

# บทที่ 1

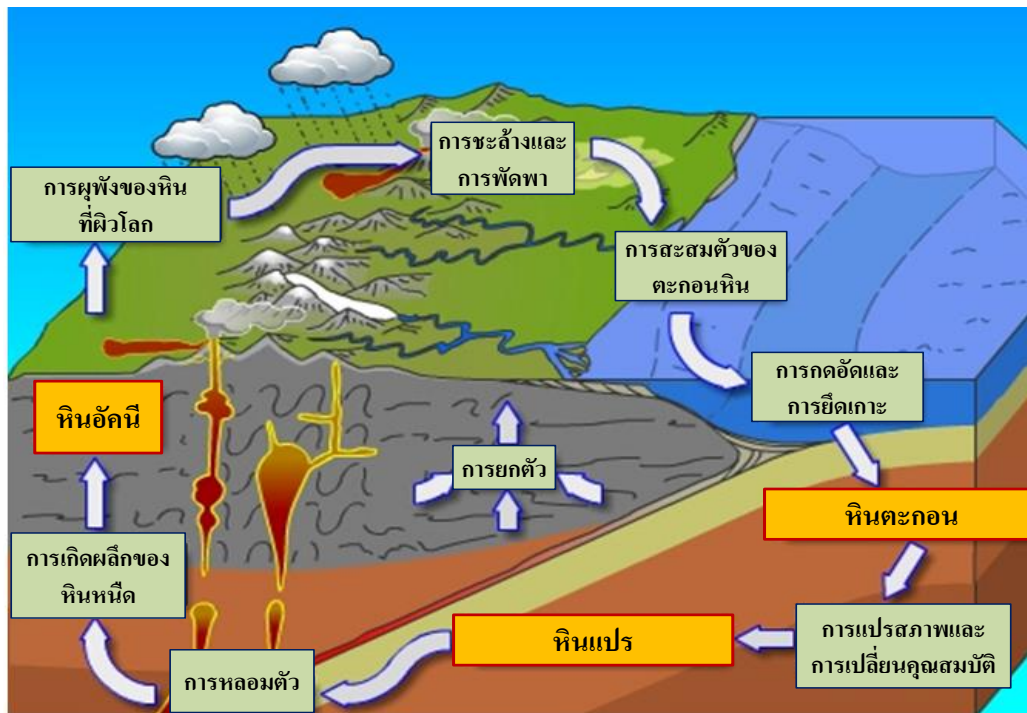
## หิน

หินเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติส่วนใหญ่เกิดจากการเย็นตัวของหินหลอมเหลวที่อยู่ใต้พื้นโลก แต่หินบางชนิดอาจเกิดจากการแปรสภาพของอินทรีย์วัตถุที่ถูกทับถมเป็นเวลานาน หินสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้หลากหลายวัตถุประสงค์ เช่น ใช้เป็นวัสดุผสมในคอนกรีต ใช้เป็นวัสดุผสมร่วมกับแอสฟัลท์ ใช้ตกแต่งเพื่อความสวยงาม ใช้ป้องกันตลิ่งจากการกัดเซาะของคลื่นทะเล และใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น เป็นต้น โดยบทนี้จะนำเสนอเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับหินซึ่งประกอบด้วย วัฏจักรของหินซึ่งเป็นขบวนการกำเนิดหินและการแปรสภาพ การจำแนกหิน ธรณีวิทยาของประเทศไทย อุตสาหกรรมหินเพื่อการก่อสร้าง และการทดสอบคุณสมบัติหิน ตามลำดับ

### วัฏจักรของหิน

หากพิจารณาเปลือกโลกเฉพาะส่วนที่เป็นของแข็งจะพบว่าส่วนใหญ่เป็นหิน (Rocks) ที่มีแร่ชนิดต่าง ๆ เป็นส่วนประกอบ มหิปพงศ์ วรรณกุล (ม.ป.ป. : 14-17) และ วัฒนา ธรรมมงคล และ วินิต ช่อวิเชียร (2532 : 2-3) กล่าวว่าในทางธรณีวิทยาแบ่งประเภทหินเปลือกโลกออกเป็น 3 กลุ่มคือ หินอัคนี (Igneous Rocks) หินตะกอน (Sedimentary Rocks) และหินแปร (Metamorphic Rocks) หินทั้งสามกลุ่มมีความสัมพันธ์กันตั้งแต่กระบวนการถือกำเนิดจนถึงกระบวนการแปรสภาพ ความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า วัฏจักรของหิน (Rock Cycle) ดังแสดงในภาพที่ 1.1 วัฏจักรของหินเริ่มจากการแทรกตัวของหินหลอมละลายภายในเปลือกโลกชั้นในออกมายังเปลือกโลกชั้นนอก เมื่อหินหลอมละลายเย็นตัวลงก็จะกลายเป็นผลึกของแข็งซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นหินอัคนีขนาดใหญ่ หินอัคนีจะใช้ระยะเวลายาวนานในการผุพังเนื่องจากมีความแข็งแรงมาก แต่บางครั้งหินอัคนีอาจเกิดการผุพังในขณะที่เคลื่อนที่มายังผิวโลกก็ได้ หินที่มีขนาดเล็กจากการผุพังจะถูกพัดพาโดยกระแสลมหรือกระแสน้ำจนเกิดการสะสมและทับถมเป็นชั้นหนา เมื่อการสะสมตัวของเศษหิน กรวด ทราย และอินทรีย์วัตถุขนาดเล็กเกาะกันแน่นจนกลายเป็นของแข็งก็จะเรียกหินชนิดใหม่นี้ว่า หินตะกอน ทั้งนี้กระบวนการกำเนิดที่เกิดจากการสะสมตัวของหินขนาดเล็กภายใต้แรงกดอัดเป็นเวลานานนี้เรียกว่า กระบวนการกำเนิดหินทางกลศาสตร์ (Mechanically Formed Sedimentary Rock) สำหรับหินตะกอนที่กำเนิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวทำละลายที่เป็นของเหลวกับตะกอนที่ทับถมกันจนยึดเกาะกันจนกลายเป็นของแข็งจะเรียกว่า กระบวนการกำเนิดหินทางเคมี (Chemically formed Sedimentary Rock) เมื่อชั้นหินตะกอนที่เกิดขึ้นมาแล้ว

อยู่ภายใต้อิทธิพลของความร้อนและความดันเป็นเวลานานก็จะแปรสภาพกลายเป็นหินชนิดใหม่ เรียกว่า หินแปร นอกจากนี้หินแปรยังสามารถกำเนิดจากการเคลื่อนที่ของชั้นหินไปตามการขยับตัวของเปลือกโลกและสัมผัสกับหินหลอมเหลวจากแหล่งอื่นจนเกิดการแลกเปลี่ยนแร่ธาตุกลายเป็นหินชนิดใหม่ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามถ้าหินตะกอนและหินแปรได้รับความร้อนจนหลอมตัวก็จะกลายเป็นหินอัคนีได้ดั้งเดิม (Braja M. Das. 2010 : 15-24 และ The Geological Society. 2012)



ภาพที่ 1.1 วัฏจักรของหิน

ที่มา : The Geological Society. 2012

Geoscience News and Information (2005) ยกตัวอย่างหินที่พบเห็นในประเทศไทยไว้ ดังนี้ หินอัคนี เช่น หินแกรนิต หินบะซอลต์ หินแกบโบร หินคูไนต์ หินพัมมิช หินเพอร์โคไทต์ หินแอนดิไซต์ หินไรโอไลต์ และหินไดโอไรท์ เป็นต้น หินตะกอนกำเนิดจากกระบวนการทางกลศาสตร์ เช่น หินทราย หินกรวดมน หินทรายแป้ง หินดินดาน หินชอล์ก หินคาร์บอน และหินปูน เป็นต้น หินตะกอนกำเนิดจากกระบวนการทางเคมี เช่น เปลือกหิน ยิปซัม โปแตชและไนเตรต เป็นต้น สำหรับหินแปรที่พบเห็นในประเทศไทย เช่น หินชนวน หินฟิลไลต์ หินไนส์ หินอ่อน หินควอร์ตไซต์ และหินแกรไฟต์ เป็นต้น ภาพที่ 1.2 ถึง 1.4 แสดงตัวอย่างหินอัคนี หินตะกอน และหินแปร ตามลำดับ



หินแกรนิต (Granite)



หินไดออไรต์ (Diorite)



หินแกบโบร (Gabbro)



หินเพอร์โดไทต์ (Peridotite)



หินออบซิเดียน (Obsidian)



หินบะซอลต์ (Basalt)



หินไรโอไลต์ (Rhyolite)



หินแอนดิไซต์ (Andesite)



หินสกอเรีย (Scoria)



หินพัมมิช (Pumice)

ภาพที่ 1.2 หินอัคนี

ที่มา : Geoscience News and Information, 2005



หินกรวดเหลี่ยม (Breccia)



หินกรวดมน (Conglomerate)



หินโดโลไมต์ (Dolomite)



หินปูน (Limestone)



หินเกลือ (Salt Rock)



หินทราย (Sandstone)



หินดินดาน (Shale)



หินทรายแป้ง (Siltstone)



หินลิกไนต์ (Lignite)



หินเชิร์ต (Chert)

ภาพที่ 1.3 หินตะกอน

ที่มา : Geoscience News and Information. 2005





หินแอมฟิโบลิต (Amphibolite)



หินไนส์ (Gneiss)



หินเนื้อหยาบ (Hornfels)



หินอ่อน (Marble)



หินโนแควลูไลท์ (Novaculite)



หินฟิลไลต์ (Phyllite)



หินควอร์ตไซต์ (Quartzite)



หินชีสต์ (Schist)



หินชนวน (Slate)



หินสบู่ (Soapstone)

ภาพที่ 1.4 หินแปร

ที่มา : Geoscience News and Information. 2005

## การจำแนกหินตามอายุกำเนิด

การจำแนกหินตามอายุกำเนิดตามข้อมูลของกรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม ได้แบ่งหินออกเป็น 2 บรมยุค (EON) ได้แก่ หินบรมยุคพรีแคมเบรียน (Precambrian) เป็นหินที่มีอายุกำเนิดยาวนานมากที่สุด และหินบรมยุคโพรเทอโรโซอิก (Phanerozoic) เป็นหินที่มีอายุกำเนิดยาวนานรองลงมา ตามลำดับ หินทั้งสองบรมยุคดังกล่าวยังสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มย่อยตามอายุกำเนิดได้อีกหลายกลุ่มดังแสดงในตารางที่ 1.1 รายละเอียดการจำแนกหินมีดังต่อไปนี้ (กรมทรัพยากรธรณี. ม.ป.ป.)

### 1. หินบรมยุคพรีแคมเบรียน

หินบรมยุคพรีแคมเบรียนมีอายุกำเนิดระหว่าง 544-4,500 ล้านปี สามารถแบ่งหินดังกล่าวออกเป็น 3 มหายุค (ERA) ประกอบด้วย หินมหายุคฮาร์เดียน (Hadean) มีอายุกำเนิดระหว่าง 3,800-4,500 ล้านปี หินมหายุคอาร์เคียน (Archean) มีอายุกำเนิดระหว่าง 2,500-3,800 ล้านปี และหินมหายุคโพรเทอโรโซอิก (Proterozoic) มีอายุกำเนิดระหว่าง 544-2,500 ล้านปี ตามลำดับ หินบรมยุคพรีแคมเบรียนในประเทศไทยมักเป็นหินแปรสภาพ เช่น หินออร์โทไนส์ หินพาราไนส์ หินชีสต์ หินแคลกซิลิเกตและหินอ่อน เป็นต้น หินบรมยุคนี้พบกระจายตัวอยู่ในพื้นที่ต่าง ๆ เช่น จังหวัดชลบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดแม่ฮ่องสอน และจังหวัดเชียงใหม่ เป็นต้น

### 2. หินบรมยุคโพรเทอโรโซอิก

หินบรมยุคโพรเทอโรโซอิกมีอายุระหว่าง 544 ล้านปีจนถึงปัจจุบัน หินบรมยุคนี้แบ่งออกเป็น 3 มหายุค ประกอบด้วย หินมหายุคพาลีโอโซอิก (Paleozoic) มีอายุกำเนิดระหว่าง 325-540 ล้านปี หินมหายุคมีโซโซอิก (Mesozoic) มีอายุกำเนิดระหว่าง 65-245 ล้านปี และหินมหายุคซีโนโซอิก (Cenozoic) มีอายุกำเนิดจากปัจจุบันถึง 65 ล้านปี ตามลำดับ รายละเอียดหินมหายุคทั้งสามมีดังนี้

2.1 หินมหายุคพาลีโอโซอิกแบ่งเป็น 6 ยุค (Period) ประกอบด้วย หินยุคแคมเบรียน (Cambrian) มีอายุระหว่าง 505-544 ล้านปี ถึงหินยุคดีโวเนียน (Devonian) มีอายุระหว่าง 360-410 ล้านปี เป็นหินจำพวกหินทราย หินดินดาน หินคาร์บอนเนตหรือหินแปรเกรดต่ำ หินมหายุคนี้พบเห็นเป็นแนวยาวจากภาคเหนือและภาคตะวันตกตอนบนผ่านลงมาทางภาคตะวันตกตอนล่าง จนถึงภาคใต้และบริเวณภาคตะวันออก สำหรับกลุ่มหินในพื้นที่ภาคใต้ที่สำคัญได้แก่ กลุ่มหินตระกูลยุคแคมเบรียน หินคาร์บอนเนตกลุ่มหินทุ่งสงยุคออร์โดวิเชียน (Ordovician) มีอายุระหว่าง 440-505 ล้านปี และกลุ่มหินตะนาวศรียุคไซลูเรียน (Silurian) มีอายุระหว่าง 410-440 ล้านปี

สำหรับหินยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous) มีอายุระหว่าง 286-360 ล้านปี ประกอบด้วยหินสมัยมิสซิสซิปปี (Mississippian) มีอายุระหว่าง 325-360 ล้านปี และหินสมัยเพนซิลวาเนียน (Pennsylvanian) มีอายุระหว่าง 286-325 ล้านปี และหินยุคเพอร์เมียน (Permian) มีอายุระหว่าง 245-286 ล้านปี พบกระจายตัวอยู่เกือบทั่วทุกภูมิภาคของประเทศยกเว้นบริเวณที่ราบสูงโคราช หินยุคคาร์บอนิเฟอรัสส่วนใหญ่เป็นพวกหินทราย หินดินดาน และหินโคลนปนกรวด แต่ในบางครั้งอาจพบหินเชิร์ตและหินปูนปะปนบ้าง ในขณะที่หินยุคเพอร์เมียนส่วนใหญ่เป็นหินปูนที่มีหินดินดาน หินทรายและหินเชิร์ต สำหรับพื้นที่ที่พบหินปูนยุคเพอร์เมียนแบ่งออกเป็น 2 แนว คือ ด้านตะวันตกและบริเวณภาคใต้ของประเทศเป็นกลุ่มหินปูนราชบุรี และด้านตะวันออกของประเทศครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของจังหวัดสระบุรี จังหวัดลพบุรี จังหวัดนครสวรรค์และพื้นที่ตามแนวขอบที่ราบสูงโคราชด้านตะวันตกซึ่งได้รับการกำหนดให้เป็นกลุ่มหินปูนสระบุรี กลุ่มหินปูนทั้งสองเป็นแหล่งหินที่สำคัญของประเทศสำหรับอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และก่อสร้าง ส่วนหินยุคเพอร์เมียนในบริเวณภาคเหนือใช้ชื่อเรียกว่ากลุ่มหินงาว

2.2 หินมหายุคมีโซโซอิกประกอบด้วย หินยุคไทรแอสซิก (Triassic) มีอายุระหว่าง 208-245 ล้านปี หินยุคจูแรสซิก (Jurassic) มีอายุระหว่าง 146-208 ล้านปี และหินยุคครีเทเชียส (Cretaceous) มีอายุระหว่าง 65-146 ล้านปี หินยุคไทรแอสซิกเป็นหินที่เกิดจากการสะสมตัวในสภาพแวดล้อมภาคพื้นสมุทรของชั้นหินดินดาน หินปูน และหินทราย หินยุคไทรแอสซิกที่พบส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตก ได้แก่ กลุ่มหินลำปาง เป็นต้น แต่ก็มีปรากฏแถบชายฝั่งทะเลตะวันออกและภาคใต้เช่นกัน สำหรับหินยุคจูแรสซิกและหินยุคครีเทเชียสเป็นหินจำพวก หินทราย หินทรายแข็ง หินดินดาน และหินกรวดมน โดยเนื้อหินที่มีสีแดงจะบ่งบอกถึงหินที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมภาคพื้นทวีป พื้นที่ของหินยุคจูแรสซิกและหินยุคครีเทเชียสปกคลุมบริเวณที่ราบสูงโคราชเรียกว่า หินโคราช ส่วนพื้นที่ด้านตะวันตกของภาคเหนือและบางส่วนของภาคตะวันตกและภาคใต้เป็นหินดินดานและหินปูนยุคจูแรสซิกที่เกิดจากการสะสมตัวในสภาวะภาคพื้นสมุทร

2.3 หินมหายุคซีโนโซอิกประกอบด้วย หินยุคเทอร์เทียรี (Tertiary) มีอายุระหว่าง 1.8-65 ล้านปี และหินยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) มีอายุ 1.8 ล้านปีถึงปัจจุบัน หินยุคเทอร์เทียรียังแบ่งออกเป็น 5 สมัย ได้แก่ หินสมัยพาลีโอซีน (Paleocene) มีอายุระหว่าง 54-65 ล้านปี หินสมัยอีโอซีน (Eocene) มีอายุระหว่าง 38-54 ล้านปี หินสมัยโอลิโกซีน (Oligocene) มีอายุระหว่าง 23-38 ล้านปี หินสมัยไมโอซีน (Miocene) มีอายุระหว่าง 5-23 ล้านปี และหินสมัยไพลโอซีน (Pliocene) มีอายุระหว่าง 1.8-5 ล้านปี ตามลำดับ

ตารางที่ 1.1 อายุหินทางธรณีวิทยา

| อายุหินทางธรณีวิทยา            |                                |                                   |                                      |                             |         |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------|
| บรมยุค<br>(EON)                | มหายุค<br>(ERA)                | ยุค<br>(Period)                   | สมัย<br>(Epoch)                      | อายุ (ล้านปี)<br>(Duration) |         |
| พรีแคมเบรียน<br>(Precambrian)  | ฮาร์เดียน<br>(Hadean)          | -                                 | -                                    | 4,500-3,800                 |         |
|                                | อาร์เคียน<br>(Archean)         | -                                 | -                                    | 3,800-2,500                 |         |
|                                | โพรเทอโรโซอิก<br>(Proterozoic) | -                                 | -                                    | 2,500-544                   |         |
| โพรเทอโรโซอิก<br>(Phanerozoic) | พาลีโอโซอิก<br>(Paleozoic)     | แคมเบรียน (Cambrian)              | -                                    | 544-505                     |         |
|                                |                                | ออโดวิเชียน<br>(Ordovician)       | -                                    | 505-440                     |         |
|                                |                                | ไซลูเรียเนียน (Silurian)          | -                                    | 440-410                     |         |
|                                |                                | ดีโวเนียน (Devonian)              | -                                    | 410-360                     |         |
|                                |                                | คาร์บอนิเฟอรัส<br>(Carboniferous) | มิสซิสซิปเปียน<br>(Mississippian)    | -                           | 360-325 |
|                                |                                |                                   | เพนซิลวาเนียเนียน<br>(Pennsylvanian) | -                           | 325-286 |
|                                |                                | เพอร์เมียน (Permian)              | -                                    | 286-245                     |         |
|                                | มีโซโซอิก<br>(Mesozoic)        | ไทรแอสซิก (Triassic)              | -                                    | 245-208                     |         |
|                                |                                | จูแรสซิก (Jurassic)               | -                                    | 208-146                     |         |
|                                |                                | ครีเตเชียส (Cretaceous)           | -                                    | 146-65                      |         |
|                                | ซีโนโซอิก<br>(Cenozoic)        | เทอร์เทียรี<br>(Tertiary)         | พาลีโอซีน (Paleocene)                | -                           | 65-54   |
|                                |                                |                                   | อีโอซีน (Eocene)                     | -                           | 54-38   |
|                                |                                |                                   | โอลิโกซีน (Oligocene)                | -                           | 38-23   |
|                                |                                |                                   | ไมโอซีน (Miocene)                    | -                           | 23-5    |
|                                |                                |                                   | ไพลโอซีน (Pliocene)                  | -                           | 5-1.8   |
| ควอเทอร์นารี<br>(Quaternary)   |                                | ไพลสโตซีน (Pleistocene)           | -                                    | 1.8-0.011                   |         |
|                                | โฮโลซีน (Holocene)             | -                                 | 0.011-ปัจจุบัน                       |                             |         |

ที่มา : กรมทรัพยากรธรณี. ม.ป.ป.



หินมหายุคซีโนโซอิกในประเทศไทยเป็นหินที่สะสมตัวทั้งบนบกและในทะเลซึ่งวางตัวอยู่ในแนวเหนือใต้ การวางตัวในลักษณะนี้เกิดจากแผ่นเปลือกโลกอินเดียเคลื่อนตัวขึ้นมาชนกับแผ่นเปลือกโลกยูเรเชียเมื่อประมาณ 40-50 ล้านปี จนทำให้ชั้นหินยุคเทอร์เชียรีกระจุกกระจายอยู่ทั้งบนบกและในทะเล หินยุคเทอร์เชียรีนี้ปรากฏในพื้นที่ประมาณ 1 ใน 3 ส่วนของประเทศไทย ประกอบด้วย หินทราย หินดินดานและหินโคลน หินยุคเทอร์เชียรีมักถูกปกคลุมด้วยชั้นตะกอนยุคควอเทอร์นารีซึ่งเป็นตะกอนสะสมตัวที่ยังไม่แข็งตัวกลายเป็นหิน ชั้นตะกอนยุคควอเทอร์นารีส่วนใหญ่จะประกอบด้วย เศษหินขนาดเล็ก กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว

### ธรณีวิทยาประเทศไทย

กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม (กรมทรัพยากรธรณี. ม.ป.ป.) ได้ทำการสำรวจและนำเสนอธรณีวิทยาประเทศไทยซึ่งประกอบด้วยแหล่งหินและดิน โดยแบ่งออกเป็น 10 ประเภท ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ประเภทที่ 1 ตะกอนแม่น้ำเป็นชั้นดินที่เกิดจากการสะสมตัวของกรวด ทราย และดินเหนียวบริเวณที่ลุ่มต่ำใกล้แม่น้ำหรือที่ราบเชิงเขา ตะกอนแม่น้ำสามารถพบเห็นได้ทั่วทุกภาคของประเทศแต่มีมากบริเวณที่ราบลุ่มภาคกลางตอนบนตั้งแต่จังหวัดสุโขทัยจนถึงจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ประเภทที่ 2 ตะกอนชายฝั่งทะเลเป็นชั้นดินที่เกิดจากการสะสมตัวของกรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวตามบริเวณที่ราบชายฝั่งทะเล ตะกอนชายฝั่งทะเลพบมากบริเวณที่ราบภาคกลางตอนล่างและตามแนวชายฝั่งทะเล

ประเภทที่ 3 หินตะกอนชนิดหินโคลนเป็นหินตะกอนที่มีหินโคลนเป็นส่วนใหญ่และมีหินดินดานกับชั้นถ่านหินลิกไนต์แทรกปนอยู่ หินตะกอนชนิดนี้เป็นหินกึ่งแข็งตัวมีปริมาณไม่มากจึงพบเห็นเพียงบางพื้นที่ของภาคเหนือ ภาคตะวันออกและภาคใต้

ประเภทที่ 4 หินตะกอนชนิดหินทรายเป็นหินตะกอนที่ประกอบด้วยหินทรายเป็นส่วนใหญ่และมีหินกรวดมนหรือหินโคลนแทรกสลับกัน หินตะกอนชนิดนี้กระจายอยู่แทบทุกพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้ฝั่งทะเลอันดามัน สำหรับภาคเหนือพบมากในพื้นที่ของจังหวัดน่านและจังหวัดอุดรธานี

ประเภทที่ 5 หินตะกอนชนิดหินดินดานเป็นหินตะกอนที่มีหินดินดานเป็นส่วนใหญ่และมีหินตะกอนชนิดอื่นปะปนอยู่บ้าง พบเห็นหินตะกอนชนิดนี้กระจายตัวบริเวณภาคเหนือ ภาคตะวันออก และทางตอนล่างของภาคใต้ สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือพบเห็นได้บางพื้นที่ของจังหวัดอุดรธานีและจังหวัดหนองบัวลำภู

ประเภทที่ 6 หินตะกอนชนิดหินปูนเป็นหินตะกอนที่มีหินปูนเป็นส่วนใหญ่และมีหินโคลไลต์กับหินตะกอนชนิดอื่นแทรก หินตะกอนชนิดนี้พบเห็นกระจายตัวในแถบเทือกเขา เช่น เทือกเขาถนนธงชัย เทือกเขาตะนาวศรี เทือกเขาเพชรบูรณ์ เทือกเขาดงพญาเย็น เทือกเขานครศรีธรรมราช และเทือกเขาสันกาลาคีรี เป็นต้น

ประเภทที่ 7 หินแปรเป็นหินที่ประกอบด้วยหินอ่อน หินฟิลไลต์ หินไนส์ และหินชีสต์ หินประเภทนี้จะพบเห็นกระจายอยู่ทั่วไปในบริเวณเทือกเขาภาคเหนือและยาวต่อเนื่องลงมาถึงเทือกเขาภาคตะวันตก นอกจากนี้ยังพบบางส่วนของเทือกเขาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบนตลอดจนเทือกเขาภาคตะวันออกและเทือกเขาภาคใต้ตอนล่าง

ประเภทที่ 8 หินอัคนีชนิดหินบะซอลต์เป็นหินที่มีแร่พลอยที่มีค่าปะปนอยู่บ้าง พบเห็นเพียงบางพื้นที่ของประเทศไทย เช่น จังหวัดเพชรบูรณ์ จังหวัดลพบุรี จังหวัดสระบุรี จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดบุรีรัมย์ จังหวัดปราจีนบุรี และจังหวัดสระแก้ว เป็นต้น

ประเภทที่ 9 หินอัคนีแทรกซ้อนเป็นหินอัคนีที่ประกอบด้วยชนิดหินแกรนิต หินแปร และหินไดออไรต์ หินอัคนีชนิดนี้พบมากในพื้นที่ภาคเหนือ และพบเห็นกระจายตัวเป็นบางส่วนในพื้นที่ภาคตะวันตกและภาคใต้

ประเภทที่ 10 หินภูเขาไฟเป็นหินที่ประกอบด้วย หินไรโอไลต์ หินแอนดีไซต์ และหินเถ้าภูเขาไฟ หินชนิดนี้พบในบางพื้นที่ของประเทศไทย เช่น จังหวัดเชียงราย จังหวัดลำปาง จังหวัดแพร่ จังหวัดเพชรบูรณ์ จังหวัดลพบุรี จังหวัดสระบุรี จังหวัดนครนายก จังหวัดฉะเชิงเทรา และจังหวัดจันทบุรี เป็นต้น

### อุตสาหกรรมหินเพื่อการก่อสร้างในประเทศไทย

อุตสาหกรรมหินที่ดำเนินการอยู่ในประเทศไทยส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้าง สุกิจ เสริมชีพ (2548:18-46) อธิบายไว้ว่า อุตสาหกรรมหินสมัยก่อนอยู่ภายใต้การกำกับดูแลของกรมที่ดิน โดยใช้ประมวลกฎหมายที่ดิน มาตรา 9 เนื้อความในประมวลกฎหมายดังกล่าวอนุญาตให้อุตสาหกรรมหินทั่วไปที่มีการระเบิดและย่อยหินมีขนาดพื้นที่ประทานบัตรไม่เกิน 10 ไร่ ในขณะที่อุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์มีขนาดพื้นที่ประทานบัตรเหมืองหินใหญ่กว่าโดยมีขนาดพื้นที่แปลงละไม่เกิน 300 ไร่ ต่อมาการพัฒนาประเทศมีการขยายตัวระหว่างปี พ.ศ. 2535-2538 จึงมีการเปลี่ยนแปลงการระเบิดและย่อยหินเป็นเทคโนโลยีการทำเหมืองหินภายใต้การกำกับดูแลของกรมทรัพยากรธรณี โดยกรมทรัพยากรธรณีมีหน้าที่พิจารณาพื้นที่หินแหล่งใหม่ที่จะขออนุญาตทำเหมือง ถ้าหากเป็นการขออนุญาตในพื้นที่เดิมก็จะตรวจสอบความถูกต้องของเทคโนโลยีการผลิต นอกจากนี้กรมทรัพยากรธรณียังมีหน้าที่กำหนดปริมาณหินสำรองเพื่อป้องกันการขาดแคลนหินในการพัฒนาประเทศ (กรมทรัพยากรธรณี, 2538 : 1-4) แหล่งผลิตหิน

ขนาดใหญ่ของประเทศไทยตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดสระบุรี จังหวัดราชบุรีและจังหวัดชลบุรี ส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับหินปูน หินโคลมิติกไลม์ และหินโคลไมต์ เนื่องจากหินดังกล่าวสามารถย่อยให้มีขนาดตามต้องการได้ง่ายและมีความแข็งแรงเหมาะกับการก่อสร้าง อย่างไรก็ตามในบางพื้นที่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการทำเหมืองหินบะซอลต์เพื่อนำมาใช้ในงานก่อสร้าง เช่น พื้นที่จังหวัดบุรีรัมย์ และจังหวัดศรีสะเกษ เป็นต้น นอกจากนั้นภาคใต้ยังมีการนำหินแกรนิตมาย่อยเพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้าง เช่น พื้นที่จังหวัดนราธิวาส จังหวัดปัตตานี และจังหวัดสงขลา เป็นต้น อุตสาหกรรมหินเพื่อการก่อสร้างที่สำคัญประกอบด้วย

### 1. อุตสาหกรรมเหมืองหิน

อุตสาหกรรมเหมืองหินหรือการทำเหมืองหินเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำหินจากแหล่งธรรมชาติมาแปรรูปเพื่อใช้ในงานประเภทต่าง ๆ กรรมวิธีการทำเหมืองหินจะต้องมีความปลอดภัยตามหลักวิศวกรรมเช่นเดียวกับการทำเหมืองแร่ชนิดอื่น ๆ สุกิจ เสริมชีพ (2548 : 21-25) กล่าวว่าผู้ขออนุญาตต้องแสดงแบบแปลนการทำเหมือง (Mine Layout) โดยใช้มาตราส่วนไม่น้อยกว่า 1:5000 และในแบบแปลนควรมีรายละเอียด เช่น ตำแหน่งที่ตั้งเหมือง พื้นที่ทำเหมือง สถานที่กองเก็บเศษหิน โรงแต่งแร่ อาคารสำนักงาน และแนวถนนภายในเหมือง เป็นต้น ผู้ที่ขออนุญาตจะต้องแสดงแบบแปลนและลำดับขั้นตอนการทำเหมือง รวมถึงแบบแปลนหน้าเหมืองสุดท้าย (Final Pit) วิธีการเจาะ วิธีการระเบิด และการลำเลียงหิน ตามลำดับ กรณีมีการตั้งโรงโม่หินในเขตประทานบัตรต้องแสดงรายละเอียดขั้นตอนการโม่หินและระบบป้องกันฝุ่นร่วมด้วย บัณฑิต จุลาสัย (2542 : 2) อธิบายว่าเครื่องจักรกลที่มักพบเห็นในการทำเหมืองหินเช่น เครื่องเจาะ ใช้สำหรับการพัฒนาหน้าเหมืองและใช้เจาะหินเพื่อฝังระเบิด รถตักใช้สำหรับตักหินที่ได้จากการระเบิดและตักเศษหินภายในบริเวณเหมือง และรถบรรทุกใช้ในการขนหินจากเหมืองไปยังแหล่งที่ตั้งของโรงโม่ เป็นต้น การทำเหมืองหินแบ่งออกเป็น 3 วิธีดังรายละเอียดต่อไปนี้ (กรมทรัพยากรธรณี. 2538 : 25-27)

1.1 การทำเหมืองหินแบบห้อยโหนเจาะและระเบิดเป็นหน้าผา การทำเหมืองหินในลักษณะนี้เป็นวิธีการทำเหมืองแบบเก่าที่มักทำในพื้นที่ที่เป็นภูเขา โดยการใช้คนงานห้อยโหนตัวจากที่สูงลงมาเพื่อเจาะและระเบิดหิน ปัจจุบันการทำเหมืองวิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากจะทำให้หน้าเหมืองสูงชันไม่ปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนั้นหินยังมีขนาดไม่แน่นอนและคุณภาพไม่ดีเนื่องจากหินที่ถูกระเบิดจะตกลงจากที่สูง อีกทั้งการทำเหมืองวิธีนี้มีความยุ่งยากในด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม

1.2 การทำเหมืองหินแบบชันบันไดในพื้นที่ราบ หรือเรียกว่า เหมืองทาบ เป็นการทำเหมืองหินที่ใช้วิธีการลำเลียงจากแหล่งหินด้านล่างขึ้นมาด้านบนลักษณะคล้ายชันบันไดโดยใช้

แรงงานมนุษย์หรือเครื่องจักรกล การทำเหมืองแบบนี้ควรมีความสูงหน้าเหมือง (Bench Height) ไม่เกิน 15 m และความลาดชันสุดท้ายหน้าเหมือง (Final Pit Slope) ไม่ควรเกิน 55 องศา ยกเว้น จะพิสูจน์ทางวิศวกรรมได้ว่ามีความปลอดภัยเพียงพอจึงจะสามารถกำหนดความสูงหน้าเหมือง หรือความลาดชันได้มากขึ้น นอกจากนี้ความกว้างของชั้นบันได (Bench) ควรมีระยะเหมาะสม กับขนาดและลักษณะการทำงานของเครื่องจักรกล การทำเหมืองแบบชั้นบันไดสามารถวางแผน จัดการทางด้านสิ่งแวดล้อมได้ดีและไม่เสียทัศนียภาพ การขุดเจาะสามารถทำได้ทั้งกลางวันและ กลางคืนจึงทำให้สามารถผลิตหินได้มากกว่าวิธีอื่น อย่างไรก็ตามต้องมีการวางระบบป้องกันน้ำท่วมเหมืองและการขนส่งเป็นอย่างดี



ภาพที่ 1.5 ลักษณะเหมืองหินแบบชั้นบันไดในพื้นที่ภูเขา

ที่มา : Jelsoft Enterprises Ltd. 2000

1.3 การทำเหมืองหินแบบชั้นบันไดในพื้นที่ภูเขา การทำเหมืองลักษณะนี้ถูกพัฒนา จากการทำเหมืองหินแบบชั้นบันไดในพื้นที่ราบด้วยการประยุกต์ใช้กับพื้นที่ภูเขา การลำเลียง หินออกมาภายนอกมีลักษณะคล้ายชั้นบันไดดังแสดงในภาพที่ 1.5 โดยความสูงเฉลี่ยชั้นบันได ควรอยู่ระหว่าง 6-8 m และต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยของเสถียรภาพหน้าเหมืองด้วย การทำเหมืองหินวิธีนี้จะตัดหน้าเหมืองโดยใช้เครื่องเจาะเพื่อบรรจุวัตถุระเบิดโดยพยายามให้มุมเอียง ของชั้นหิน (Dip) เอียงไปทางพื้นที่แหล่งหิน ไม่ควรให้แนวเอียงของชั้นหินออกมาด้านหน้างาน เนื่องจากเมื่อมีการสั่นสะเทือนจากการระเบิดหรือการลำเลียงอาจทำให้ชั้นหินเคลื่อนตัวและเกิด การวิบัติได้ นอกจากนี้การเคลื่อนตัวยังอาจเกิดจากน้ำฝนที่ซึมผ่านจนแรงเสียดทานระหว่าง ชั้นหินลดลงได้เช่นกัน การวิบัติลักษณะนี้เรียกว่า การวิบัติแบบเลื่อนไถล (Slope Failure) การ ตั้งเขตมุมเอียงของชั้นหินสามารถคาดคะเนแนวแตกของแหล่งหินนั้นได้ซึ่งจะเป็นประโยชน์ใน



การทำนายทางธรณีวิทยา การทำเหมืองหินวิธีนี้มีความปลอดภัยมากกว่าการทำเหมืองหินแบบ  
 ห้อยโหนเจาะและระเบิดเป็นหน้าผา ภาพที่ 1.6 เป็นตัวอย่างการทำเหมืองหินแบบขั้นบันไดใน  
 พื้นที่ภูเขาและภาพที่ 1.7 แสดงการลำเลียงหินออกจากเหมือง นอกจากนั้นภาพที่ 1.7 ยังแสดงให้เห็น  
 ว่าคุณสมบัติของชั้นหินด้านล่างของแนวลำเลียงเอียงเข้าหาพื้นที่แหล่งหินจึงทำให้เหมืองนี้มี  
 ความปลอดภัย (Jelsoft Enterprises Ltd. 2000)



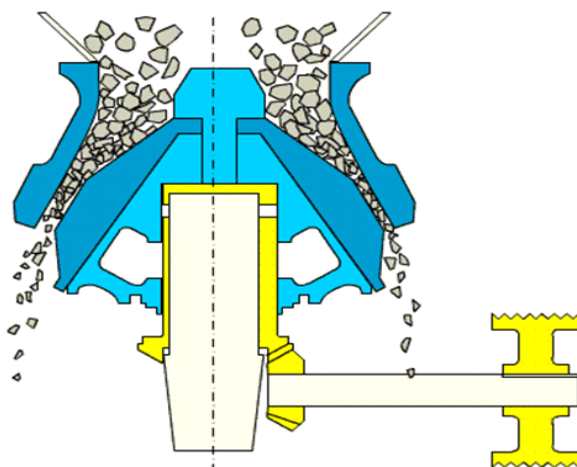
ภาพที่ 1.6 การระเบิดหินในการทำเหมืองหินแบบขั้นบันไดในพื้นที่ภูเขา  
 ที่มา : Jelsoft Enterprises Ltd. 2000



ภาพที่ 1.7 การลำเลียงหินในการทำเหมืองหินแบบขั้นบันไดในพื้นที่ภูเขา  
 ที่มา : Jelsoft Enterprises Ltd. 2000

## 2. อุตสาหกรรมผลิตหินย่อย

อุตสาหกรรมผลิตหินย่อยหรือหิน โม่ (Crushed Rock) เป็นการนำหินที่มีขนาดใหญ่จากเหมืองหินมาบดหรือย่อยให้มีขนาดเล็กลงเพื่ออำนวยความสะดวกในการลำเลียงหรือเพื่อนำหินที่ย่อยแล้วไปใช้ในการก่อสร้าง ขั้นตอนการย่อยหินเริ่มจากการลำเลียงหิน โดยรถบรรทุกจากหน้าเหมืองไปกองเก็บที่ขุ้ง หินจากขุ้งในโรงโม่จะถูกลำเลียงเข้าเครื่องย่อยหินโดยใช้เครื่องป้อนด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ การย่อยหินจะใช้เครื่องจักรกลในการให้แรงกดและแรงกระแทกจนหินแตกออกและมีขนาดเล็กลง การย่อยหินลักษณะนี้เรียกว่า ขบวนการย่อยแบบแห้ง (Dry Process) อย่างไรก็ตามควรมีการพรมน้ำเพื่อลดฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นในขบวนการย่อยและลำเลียง การย่อยหินแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การย่อยหินขั้นต้น (Primary Crushing) เป็นการให้เครื่องจักรกลหนักย่อยหิน จากหินเหมืองที่มีขนาดใหญ่ไม่เกิน 1.5 m ให้มีขนาดเล็กลงประมาณ 20-10 cm การย่อยหินขั้นที่สอง (Secondary Crushing) เป็นการย่อยหินในขั้นตอนถัดมาเพื่อการย่อยหินที่มีขนาดใหญ่ไม่เกิน 20 cm ให้มีขนาดเล็กลงเหลือประมาณ 2.0-0.5 cm เครื่องย่อยขั้นที่สองที่นิยมใช้คือเครื่องย่อยแบบกรวย (Cone Crusher) ดังแสดงในภาพที่ 1.8 สำหรับการย่อยหินขั้นที่สาม (Tertiary Crushing) เป็นการย่อยหินให้มีขนาดเล็กลงโดยใช้เครื่องย่อยแบบกรวยสั้นมีลักษณะการทำงานคล้ายกับขั้นตอนที่สองแต่ระยะห่างระหว่างกรวยแคบกว่าจึงทำให้หินย่อยที่ได้มีขนาดเล็กลง หินเหมืองที่ผ่านการย่อยทั้งสามขั้นตอนจะถูกลำเลียงไปยังตะแกรง篩สะเทือนเพื่อแยกขนาด การแยกขนาดหินโดยทั่วไปจะมีขนาดระหว่าง 2-25 mm จากนั้นจึงนำไปกองเก็บเพื่อรอการจำหน่ายต่อไปดังแสดงในภาพที่ 1.9 (Aggregate Designs Corporation, 2014 and Jelsoft Enterprises Ltd. 2000)



ภาพที่ 1.8 เครื่องย่อยหินแบบกรวย

ที่มา : Aggregate Designs Corporation, 2014



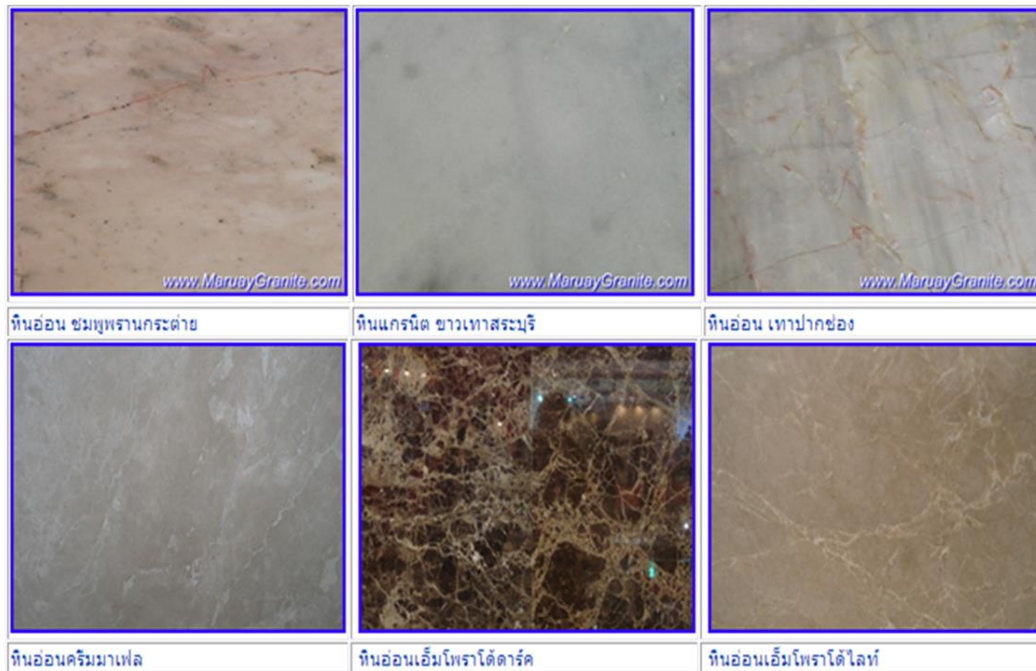
ภาพที่ 1.9 การกองเก็บหินย่อยเพื่อรอการจำหน่าย

ที่มา : Jelsoft Enterprises Ltd, 2000

### 3. อุตสาหกรรมหินเพื่อการตกแต่ง

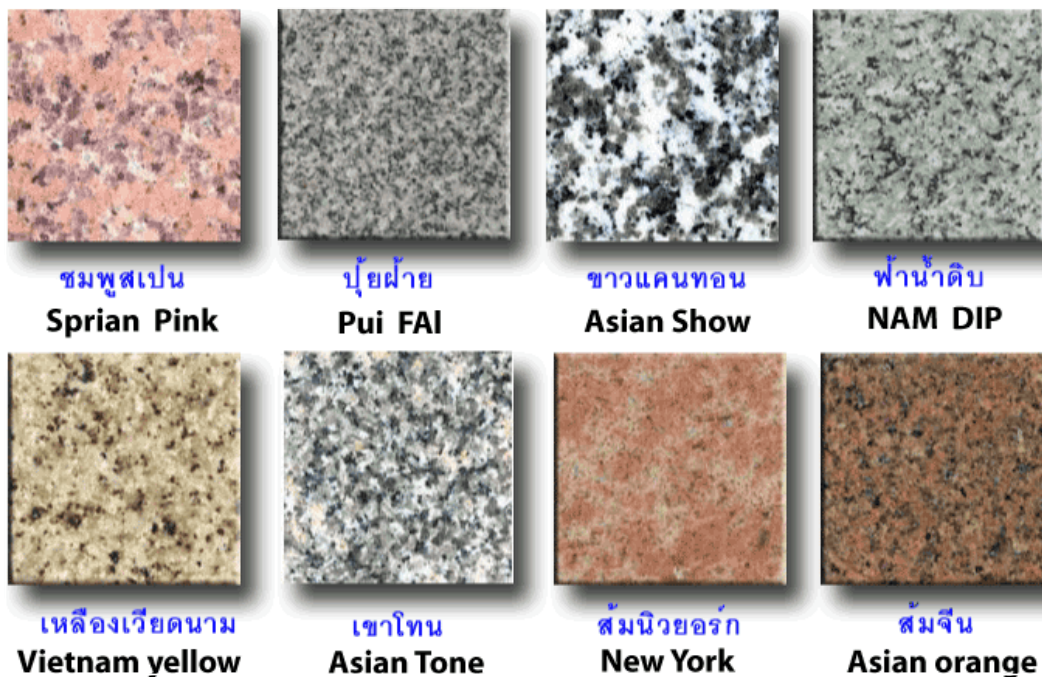
หินที่ใช้ในเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมหินเพื่อการตกแต่งจะได้จากการทำเหมืองหินขนาดเล็กซึ่งมักตั้งอยู่ในพื้นที่แหล่งหินที่มีลวดลายสวยงาม เช่น หินอ่อน หินแกรนิต หินกาบ หรือหินทราย เป็นต้น หินตกแต่งที่นิยมนำมาใช้ในการก่อสร้างได้แก่หินอ่อนซึ่งจัดเป็นหินแปรที่มีเนื้อมันวาวสวยงามซึ่งประกอบด้วยแร่แคลไซต์ แร่แคลไซต์ และแร่โดโลไมต์ แหล่งหินอ่อนที่พบในประเทศไทยได้แก่ จังหวัดสุโขทัย จังหวัดกำแพงเพชร จังหวัดลำปาง จังหวัดชัยนาท จังหวัดสระบุรี จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดอุดรดิตถ์ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดลพบุรี และจังหวัดยะลา เป็นต้น บริษัทสระบุรีมารวยแกรนิต จำกัด (ม.ป.ป.) นำเสนอตัวอย่างลวดลายและสีสันทของหินอ่อนแบบต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 1.10 หินตกแต่งที่ได้รับความนิยมอีกชนิดหนึ่งคือหินแกรนิตซึ่งเป็นหินอัคนีแทรกซอนมีเนื้อหยาบสามารถมองเห็นผลึกเกาะกันแน่น หินแกรนิตเมื่อแต่งผิวให้เรียบและขัดแล้วมีผิวมันวาวสวยงาม แหล่งหินแกรนิตที่พบในประเทศไทยได้แก่ จังหวัดเชียงราย จังหวัดตาก จังหวัดระยอง จังหวัดจันทบุรี จังหวัดชลบุรี จังหวัดสงขลา จังหวัดยะลา และจังหวัดนราธิวาส เป็นต้น ตัวอย่างลวดลายของหินแกรนิตแบบต่าง ๆ ที่นำเสนอโดย Center of Design Technology Excellence (n.d.) แสดงในภาพที่ 1.11





ภาพที่ 1.10 หินอ่อนเพื่อการตกแต่ง

ที่มา : บริษัทสระบุรีมารวยแกรนิต จำกัด. ม.ป.ป.



ภาพที่ 1.11 หินแกรนิตเพื่อการตกแต่ง

ที่มา : Center of Design Technology Excellence. n.d.



สำหรับหินตกแต่งที่ได้รับความนิยมลำดับต่อไปได้แก่หินกาบหรือหินชนวน เป็นหินที่เกิดจากการแปรสภาพของดินดานที่ทับถมกันเป็นเวลานานจนเกาะกันแน่นและมีเนื้อละเอียด นอกจากนั้นหินกาบยังมีเนื้อเกาะกันเป็นชั้น ๆ จึงทำให้สามารถแยกออกเป็นแผ่นได้ง่าย โดยผิวของหินที่ถูกแยกออกมานั้นจะมีผิวเรียบ แหล่งหินกาบที่พบในประเทศไทยได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดระยอง จังหวัดนครราชสีมา และจังหวัดนครราชสีมา เป็นต้น หินตกแต่งลำดับสุดท้ายที่จะขอล่าถึงได้แก่หินทราย หินชนิดนี้ถือว่าเป็นหินตะกอนมีเนื้อหยาบของเม็ดทราย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแร่ควอร์ต หินทรายเมื่อแต่งผิวให้เรียบและขัดแล้วมีผิวมันวาว แหล่งหินทรายที่พบในประเทศไทยได้แก่ จังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดราชบุรี และจังหวัดกาญจนบุรี เป็นต้น (Sinkaonline. 2556)

หินตกแต่งที่ได้จากหินเหมืองมักถูกแปรรูปให้เป็นแผ่นตามขนาดและความหนาที่ต้องการใช้งาน การตัดหินเหมืองให้เป็นแผ่นสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องจักรขนาดใหญ่ เช่น เลื่อยวงเดือน เลื่อยโซ่ หรือเครื่องตัดแบบลวดเพชร เป็นต้น ภาพที่ 1.12 เป็นตัวอย่างการตัดหินอ่อนให้เป็นแผ่นโดยใช้เครื่องตัดแบบลวดเพชร หินที่ถูกตัดให้เป็นแผ่นแล้วจะถูกจัดเก็บอย่างเป็นระเบียบ หากต้องการกองเก็บในลักษณะวางซ้อนทับกันจะต้องรองด้วยไม้เพื่อป้องกันการแตกร้าว แต่ถ้าหินแปรรูปมีขนาดเล็กนิยมกองเก็บในแนวตั้งเพื่อความสะดวกในการจำหน่ายและป้องกันการกดทับ นอกจากการแปรรูปหินให้เป็นแผ่นแล้วหินเหมืองบางส่วนอาจถูกนำไปแกะสลักตามจินตนาการของช่างแกะสลักได้เช่นกัน (Fujian Hailong Machinery Co.,Ltd. 1999)



ภาพที่ 1.12 การตัดหินด้วยเครื่องตัดหินแบบลวดเพชร

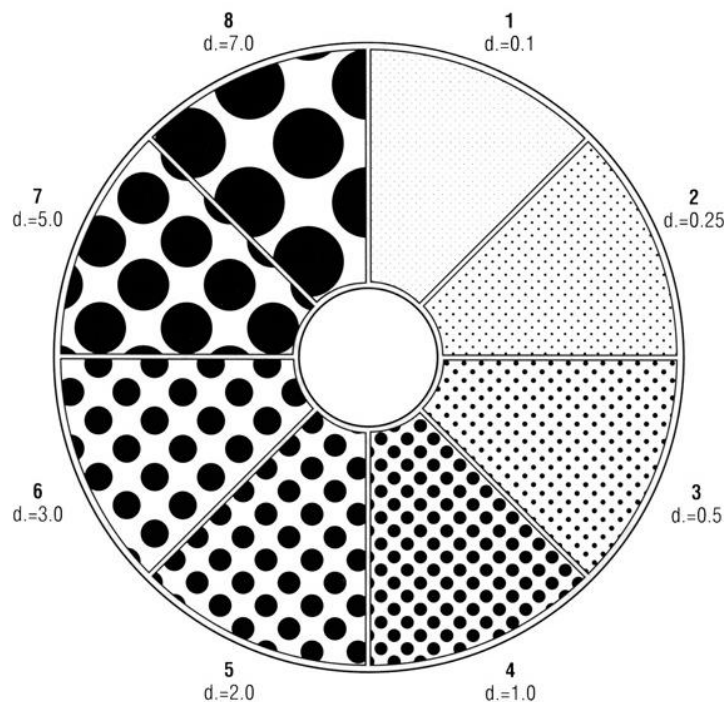
ที่มา : Fujian Hailong Machinery Co.,Ltd. 1999

## การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของหิน

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของหินเป็นการทดสอบหาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมรับแรงของหิน การทดสอบหินในลักษณะนี้เป็นการทดสอบโดยใช้อุปกรณ์อย่างง่ายในการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามหากเป็นหินย่อยที่ใช้ในงานก่อสร้างอาจต้องใช้เครื่องมือและเครื่องจักรในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากหินย่อยมักถูกทดสอบเพื่อหาขนาดและความถ่วงจำเพาะ การดูดซึมน้ำ และหน่วยน้ำหนัก ตามลำดับ การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของหินมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (กรมชลประทาน. 2552, กรมทางหลวง. 2544, มหิปปงศ์ วรกุล. ม.ป.ป. : 6-13, สุรพล สงวนแก้ว และคณะ. 2547 : 2-8 และ Duggal S.K. 2008 : 68-69)

### 1. การจำแนกแร่ประกอบหินด้วยตาเปล่า

การจำแนกชนิดของแร่ประกอบหินด้วยตาเปล่าเป็นการสังเกตและจำแนกชนิดของหินทางธรณีวิทยาโดยพิจารณาจากแร่ประกอบหิน ลักษณะเนื้อหิน ขนาดผลึก หรือขนาดตะกอนในเนื้อหิน การสังเกตโดยใช้ตาเปล่าเป็นวิธีทดสอบเบื้องต้นและใช้อุปกรณ์เสริม เช่น แวนขยายเพื่อดูเนื้อหินได้อย่างเห็นชัดเจน แผ่นเทียบขนาดตะกอนเพื่อใช้เปรียบเทียบขนาดตะกอนของหินกับขนาดมาตรฐานดังแสดงในภาพที่ 1.13 แผ่นเทียบรูปร่างของตะกอนเพื่อใช้เปรียบเทียบรูปร่างของหิน และการจำแนกสีของหินโดยการเทียบกับแผ่นเทียบสีดังแสดงในภาพที่ 1.14 เป็นต้น



ภาพที่ 1.13 แผ่นเทียบขนาดตะกอนของหิน

ที่มา : United States Department of Agriculture. 2014



ภาพที่ 1.14 การเทียบสี

ที่มา : Geoscience News and Information. 2005

## 2. การจำแนกความแข็งแรงประกอบหินเบื้องต้น

การจำแนกความแข็งแรงประกอบหินเบื้องต้นเป็นการทดสอบโดยใช้อุปกรณ์ที่มีความแข็งแรงต่างกันจุดขีดไปบนหินเพื่อใช้เป็นมาตรวัดความแข็งแรงของแร่ประกอบหิน เช่น ไขมีดของมิดพิบดังแสดงในภาพที่ 1.15(ก) มีความแข็งแรงประมาณ 5 ตามมาตรฐานรอกเวลล์ เล็บมือมีความแข็งแรงประมาณ 2.5 เหรียญกษาปณ์มีความแข็งแรงประมาณ 3.5 ปลายตะปูเหล็กมีความแข็งแรงประมาณ 4.5 กระจกมีความแข็งแรงประมาณ 5.5 และตะไบเหล็กมีความแข็งแรงประมาณ 6.5 เป็นต้น นอกจากนั้นแผ่นกระเบื้องที่ยังไม่ได้เคลือบดังแสดงในภาพที่ 1.15(ข) ก็เป็นอุปกรณ์ช่วยในการระบุชนิดของแร่ประกอบหินได้เช่นกัน ผงที่เกิดจากการนำหินมาขูดลงบนกระเบื้องที่ยังไม่ได้เคลือบจะช่วยระบุชื่อแร่ธาตุได้ เช่น แร่ฮีมาไทต์มีผงสีแดง แร่กาสินามีผงสีดำ หรือแร่ฟลูออไรต์ส่วนใหญ่มีผงสีขาว เป็นต้น



(ก) มีดพับ



(ข) แผ่นกระเบื้องที่ยังไม่ได้เคลือบ

ภาพที่ 1.15 อุปกรณ์ทดสอบความแข็งของแร่ประกอบหิน

ที่มา : มหิปปงศ์ วรกุล. ม.ป.ป. : 9-10

### 3. การทำปฏิกิริยาของแร่ประกอบหินกับกรดเจือจาง

การทดสอบการทำปฏิกิริยาของแร่ประกอบหินกับกรดเจือจางเป็นอีกวิธีการหนึ่งในการจำแนกชนิดของแร่ประกอบหินโดยการทำปฏิกิริยากับสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย กรดเจือจาง (Diluted Acid) แผ่นกระจกนาฬิกา (Watch Glass) และอุปกรณ์ดูดของเหลว (Dropper) ดังแสดงในภาพที่ 1.16 แผ่นกระจกนาฬิกามีไว้เพื่อรองรับตัวอย่างหินที่ต้องการทดสอบ โดยกรดเจือจางจะทำหน้าที่เป็นตัวทดสอบปฏิกิริยาของแร่ประกอบหิน กรดเจือจางที่ใช้อาจเป็นกรดเกลือหรือกรดซัลฟูริกก็ได้ สำหรับอุปกรณ์ดูดของเหลวมีไว้สำหรับดูดกรดและหยดลงบนหิน สำหรับปิพายและถาดแยกเป็นอุปกรณ์อำนวยความสะดวกในการแยกหินตัวอย่างออกจากกันเพื่อง่ายต่อการตรวจสอบ



(ก) กรดเจือจาง



(ข) แผ่นกระจกนาฬิกา



(ค) อุปกรณ์ดูดของเหลว

ภาพที่ 1.16 ชุดทดสอบการทำปฏิกิริยากับกรด

ที่มา : มหิปปงศ์ วรกุล. ม.ป.ป. : 10

#### 4. การทดสอบขนาดคละหินย่อย

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของหินย่อยที่ใช้ในงานก่อสร้างมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การทดสอบการกระจายขนาดคละของหิน การหารูปร่างของหิน การหาผิวสัมผัส (Surface Texture) การหาความหนาแน่นรวม (Bulk Density) การหาความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และการหาการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) เป็นต้น หินย่อยดังกล่าวมักถูกใช้เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีตหรือวัสดุชั้นทาง (Pavement Materials) หินย่อยที่ใช้เป็นวัสดุผสมควรมีขนาดคละที่ดี มีความคงทนและสามารถต้านทานต่อการสึกกร่อนได้ดี สурพล สงวนแก้ว และคณะ (2547 : 2-8) กล่าวว่า การทดสอบเพื่อหาขนาดคละมักใช้ทดสอบหินคลุกหรือหินย่อยคละขนาดสำหรับใช้ในงานก่อสร้างชั้นทาง โดยใช้ตะแกรงร่อนมาตรฐานและเครื่องเขย่าดังแสดงในภาพที่ 1.17 ตะแกรงที่มีความละเอียดจะอยู่ด้านล่างและตะแกรงขนาดใหญ่กว่าจะเรียงอยู่ด้านบนตามลำดับมาตรฐานขนาดคละของหินตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง (กรมทางหลวง, 2544) ดังแสดงในตารางที่ 1.2 เป็นมาตรฐานที่กำหนดขึ้นเพื่อจำแนกประเภทของหินคลุก หากหินที่ทดสอบมีการค้ำบนตะแกรงแต่ละอันปริมาณใกล้เคียงกันก็จะถือว่าหินนั้นมีขนาดคละที่ดี



(ก) เครื่องเขย่าตะแกรงร่อนหิน



(ข) การชั่งน้ำหนักหินที่ค้ำบนตะแกรง

ภาพที่ 1.17 ชุดทดสอบขนาดคละของหิน  
ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา, 2558

ตารางที่ 1.2 มาตรฐานขนาดคละของวัสดุพื้นทางหินคลุก

| เบอร์ตะแกรง | ขนาดตะแกรง | ร้อยละที่ผ่านตะแกรงโดยมวล |       |
|-------------|------------|---------------------------|-------|
|             |            | A                         | B     |
| 2 in        | 50 mm      | 100                       | 100   |
| 1 in        | 25 mm      | -                         | 75-95 |
| 3/8 in      | 9.5 mm     | 30-65                     | 40-75 |
| เบอร์ 4     | 4.75 mm    | 25-55                     | 30-60 |
| เบอร์ 10    | 2 mm       | 15-40                     | 20-45 |
| เบอร์ 40    | 0.425 mm   | 8-20                      | 15-30 |
| เบอร์ 200   | 0.075 mm   | 2-8                       | 5-20  |

ที่มา : กรมทางหลวง. 2544

### 5. การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินย่อย

การทดสอบความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหินย่อยมักใช้ข้อกำหนดที่ระบุตามมาตรฐานสมาคมเพื่อทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา (American Society Testing and Materials : ASTM C-127) การทดสอบนี้ใช้อุปกรณ์คือ ตาชั่งที่มีความละเอียด 0.5 g ภาชนะตะกร้าลวด และถังน้ำดังแสดงในภาพที่ 1.18 อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์ (2543 : 56-60) อธิบายขั้นตอนการทดสอบไว้ว่า การทดสอบเริ่มจากการนำหินที่ล้างตะแกรงเบอร์ 4 ไปล้างทำความสะอาดเพื่อขจัดฝุ่น อบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้หินดูดซึมน้ำเข้าไป แล้วจึงนำหินมาเช็ดด้วยผ้าไม่ให้น้ำเหลือเกาะที่ผิวรอบก้อนหินในขณะที่ผิวยังคงชื้นอยู่ หินลักษณะนี้เรียกว่า สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface Dry : SSD) จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักหินในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งแล้วนำไปใส่ลงในตะกร้าลวดเพื่อหาน้ำหนักในน้ำ นำหินขึ้นจากน้ำแล้วอบให้แห้งจากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ค่าความถ่วงจำเพาะหาได้จากการนำน้ำหนักหินที่อบแห้งหารด้วยผลต่างระหว่างน้ำหนักหินในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งและน้ำหนักของหินในน้ำ ส่วนค่าร้อยละการดูดซึมน้ำหาได้จากการนำผลต่างระหว่างน้ำหนักหินในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งและหินอบแห้งหารด้วยน้ำหนักหินอบแห้งตามลำดับ





(ก) ชุดทดสอบความถ่วงจำเพาะของหิน



(ข) หินในตะกร้าลวด

ภาพที่ 1.18 ชุดทดสอบความถ่วงจำเพาะของหิน

ที่มา : จิรวัดน์ วิมตติสุขวิริยา. 2558

#### 6. การทดสอบหน่วยน้ำหนักของหินย่อย

การทดสอบหน่วยน้ำหนักของหินย่อยตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ASTM C-29 เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักของหินย่อยที่มีช่องว่างของอากาศแทรกระหว่างหินแต่ละก้อน การทดสอบนี้ใช้หินประมาณ 15 kg พร้อมอุปกรณ์ตาชั่งที่มีความละเอียดถึง 0.05 kg แท่งกระทุ้งที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 mm ยาวประมาณ 600 mm และภาชนะโลหะทรงกระบอกดังแสดงในภาพที่ 1.19 อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์ (2543 : 65-71) อธิบายขั้นตอนการทดสอบไว้ว่า การทดสอบเริ่มจากการนำหินตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  แล้วปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำหินตัวอย่างใส่ในภาชนะโลหะทรงกระบอกเป็นชั้น ๆ จำนวน 3 ชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยแท่งเหล็กจำนวน 25 ครั้งให้ทั่วและส่วนที่เกินสันทรงกระบอกให้ปาดออกด้วยแท่งเหล็กให้เรียบเสมอขอบภาชนะ นำภาชนะทรงกระบอกที่บรรจุหินไปชั่งน้ำหนัก แล้วจึงลบด้วยน้ำหนักภาชนะเปล่าก็จะเป็นน้ำหนักหินในภาชนะ นำน้ำหนักหินหารด้วยปริมาตรภาชนะทรงกระบอกก็จะเป็นค่าหน่วยน้ำหนักหินที่ต้องการ ทำการทดสอบในลักษณะเดียวกันอีก 2 ครั้งผลที่ได้ควรมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 1



(ก) เครื่องชั่งน้ำหนัก



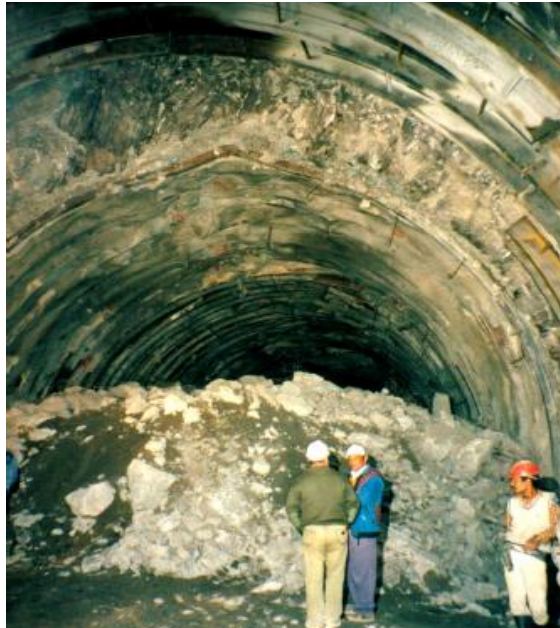
(ข) หินในภาชนะโลหะทรงกระบอก

**ภาพที่ 1.19** ชุดทดสอบหน่วยน้ำหนักของหิน

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

### การทดสอบคุณสมบัติทางกลของหิน

การทดสอบคุณสมบัติทางกลมีความสำคัญต่อหินที่ถูกนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างรวมถึงเป็นการยืนยันความปลอดภัยของสิ่งก่อสร้างที่ตั้งอยู่บนชั้นหินหรือภายในชั้นหิน เช่น อาคาร ถนน สะพาน หรืออุโมงค์ เป็นต้น หากหินมีคุณสมบัติในการต้านทานแรงได้ดีย่อมทำให้สิ่งก่อสร้างมีความมั่นคงตามไปด้วย ภาพที่ 1.20 เป็นตัวอย่างอุโมงค์ใต้ดินขนาดใหญ่ที่ขุดผ่านชั้นหินและมีหินบางส่วนที่พังทลาย สาเหตุการพังเกิดจากชั้นหินบริเวณดังกล่าวมีขนาดเล็กและเกาะตัวกันอย่างหลวม ๆ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินจึงควรนำหินมาทดสอบในห้องปฏิบัติการก่อนลงมือก่อสร้าง หินตัวอย่างที่ถูกเจาะสำรวจจากแหล่งหินธรรมชาติจะมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกตามลักษณะหัวเจาะ หินตัวอย่างที่ได้จะถูกตัดแต่งเพื่อให้มีขนาดเหมาะสมกับวิธีการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 1.21 คุณสมบัติทางกลของหินที่นิยมทดสอบประกอบด้วย การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว การทดสอบกำลังอัดแบบสามแกน การทดสอบกำลังเฉือนแบบวงแหวน การทดสอบแรงดึงแบบผ่าซีก และการทดสอบการตัด เป็นต้น นอกจากนี้หินย่อยที่นำไปใช้ในการก่อสร้างก็ควรได้รับการทดสอบคุณสมบัติด้านความคงทนด้วยเช่นกัน รายละเอียดการทดสอบคุณสมบัติทางกลของหินมีดังต่อไปนี้ (Duggal S.K. 2008 : 68-75, Evert Hoek. 2006 : 39-40 and Richard E. Goodman. 1989 : 58-62)



ภาพที่ 1.20 อุโมงค์ใต้ดินที่เจาะผ่านชั้นหินและบางส่วนพังทลาย

ที่มา : Evert Hoek, 2006 : 39



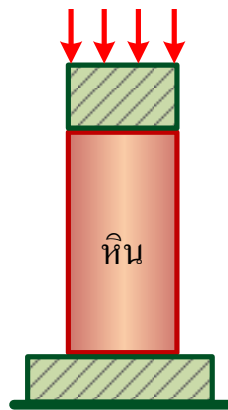
ภาพที่ 1.21 หินตัวอย่างที่ถูกเจาะสำรวจจากแหล่งหินตามธรรมชาติ

ที่มา : Evert Hoek, 2006 : 35

### 1. การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว

การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของหิน (Unconfined Compression Test of Rock) ตามมาตรฐาน ASTM D-2938 เป็นการทดสอบคุณสมบัติกำลังอัดของหินที่นิยมทดสอบ หินตัวอย่างทรงกระบอกที่ได้จากการเจาะสำรวจจะต้องนำไปตัดแต่งปลายด้านบนและด้านล่างให้เรียบ โดยมีอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างประมาณ 2-2.5 ก่อนการทดสอบควรนำหินตัวอย่างที่

ตัดแต่งเรียบร้อยแล้วไปผนึกปลายทั้งสองด้านด้วยกัมมันต์หรือปูนปลาสเตอร์เพื่อทำให้ผิวเรียบสนิท นำหินตัวอย่างไปติดตั้งในเครื่องทดสอบแล้วให้แรงกระทำที่ปลายทั้งสองด้านจนกระทั่งวิบัติดังแสดงในภาพที่ 1.22 ค่ากำลังอัดแกนเดียวของหินสามารถหาได้จากการนำแรงกดสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของหินตัวอย่าง อย่างไรก็ตามคุณสมบัติกำลังอัดแกนเดียวของหินยังมีความคลาดเคลื่อนจากสภาพที่เกิดขึ้นจริงตามธรรมชาติเนื่องจากหินตามธรรมชาติมีแรงดันด้านข้างกระทำร่วมด้วย

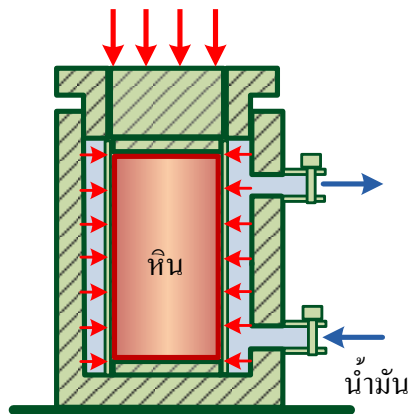


ภาพที่ 1.22 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียวของหิน

ที่มา : Richard E. Goodman. 1989 : 60

## 2. การทดสอบกำลังอัดแบบสามแกน

การทดสอบกำลังอัดแบบสามแกนของหิน (Triaxial Compression Test of Rock) ตามมาตรฐาน ASTM D-2664-67 เป็นการทดสอบกำลังอัดของหินในแนวแกนขณะที่มีการจำกัดการเสียรูปด้านข้าง หินตัวอย่างที่ได้จากการเจาะสำรวจจะถูกนำมาตัดแต่งปลายด้านบนและด้านล่างให้เรียบ แล้วจึงนำหินตัวอย่างหุ้มด้วยแผ่นยางทนน้ำมัน (Oil Resistant Rubber) ก่อนที่จะติดตั้งในเครื่องทดสอบ การจำกัดการเสียรูปด้านข้างขณะทดสอบสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มแรงดันน้ำมันรอบหินตัวอย่าง จากนั้นเพิ่มแรงกดไปบนหินตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 1.23 จนกระทั่งหินวิบัติ ค่าแรงดันน้ำมันที่เพิ่มขึ้นนี้เสมือนเป็นแรงดันด้านข้างที่หินตามธรรมชาติได้รับและค่ากำลังอัดแบบสามแกนของหินสามารถหาได้จากการนำแรงกดสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของหินตัวอย่าง ผลการทดสอบที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับหินตามธรรมชาติมากกว่าการทดสอบกำลังอัดแบบแกนเดียว อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีขั้นตอนที่ซับซ้อนจึงต้องอาศัยผู้มีประสบการณ์ในการทดสอบ

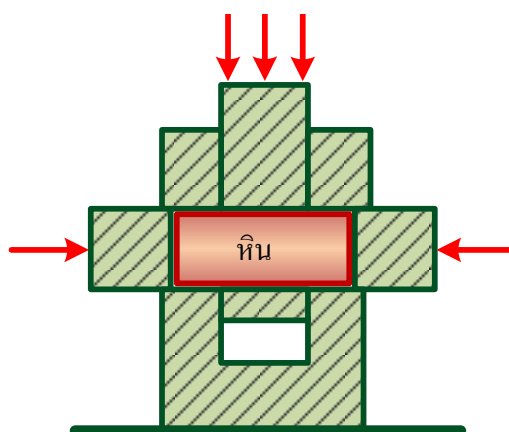


ภาพที่ 1.23 การทดสอบกำลังอัดแบบสามแกนของหิน

ที่มา : Richard E. Goodman. 1989 : 60

### 3. การทดสอบกำลังเฉือนแบบวงแหวน

การทดสอบกำลังเฉือนแบบวงแหวนของหิน (Ring Shear Test of Rock) เป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติการต้านทานแรงเฉือนของหินในขณะที่มีการควบคุมการเสีรูปร่าง หินตัวอย่างที่ได้จากการเจาะสำรวจจะถูกตัดให้มีขนาดเหมาะสมกับเครื่องทดสอบ โดยหินตัวอย่างดังกล่าวจะถูกจำกัดการเสีรูปร่างด้านข้างด้วยแรงกดคงที่ จากนั้นจึงเพิ่มแรงเฉือนให้กระทำกับหินตัวอย่างจนกระทั่งขาดออกจากกัน ค่ากำลังเฉือนแบบวงแหวนของหินสามารถหาได้จากการนำแรงเฉือนสูงสุดหารด้วยพื้นที่ที่ต้านทานแรงเฉือน ภาพที่ 1.24 แสดงการทดสอบกำลังเฉือนแบบวงแหวนของหิน



ภาพที่ 1.24 การทดสอบกำลังเฉือนแบบวงแหวนของหิน

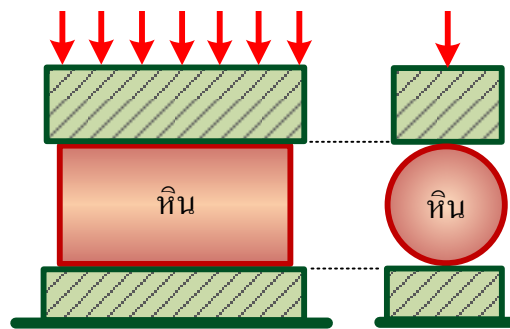
ที่มา : Richard E. Goodman. 1989 : 60

#### 4. การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีก

การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของหิน (Splitting Tension Test of Rock) เป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติด้านทานแรงดึงของหินด้วยการนำหินตัวอย่างมากในทิศทางตั้งฉากกับแนวแกน หินตัวอย่างทรงกระบอกจากการเจาะสำรวจจะถูกตัดให้มีอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างประมาณ 2-2.5 จากนั้นนำหินตัวอย่างไปกดโดยให้แรงกระทำตลอดความยาวแท่งหินในทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนจนวิบัติ การวิบัติของหินตัวอย่างจะแตกออกจากกันในลักษณะผ่าซีก ค่ากำลังดึงแบบผ่าซีก  $\sigma_t$  ของหินสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dt} \quad (1.1)$$

เมื่อ P คือแรงกดสูงสุด d คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหินตัวอย่างและ t คือความสูงของแท่งตัวอย่าง ภาพที่ 1.25 แสดงการทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของหิน



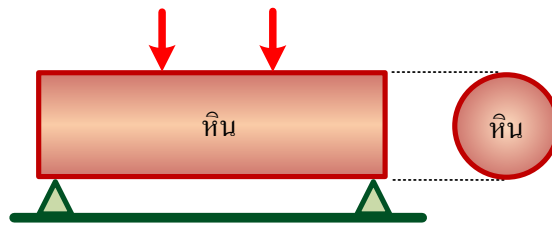
ภาพที่ 1.25 การทดสอบกำลังดึงแบบผ่าซีกของหิน

ที่มา : Richard E. Goodman, 1989 : 60

#### 5. การทดสอบกำลังดัดของหิน

การทดสอบกำลังดัดของหิน (Flexure Test of Rock) เป็นการทดสอบเพื่อหาลักษณะการดัดของแท่งหินตัวอย่างซึ่งถูกวางในแนวระนาบบนฐานรองรับ เมื่อมีแรงกระทำในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของแท่งหินตัวอย่างก็จะทำให้แท่งหินนั้นมีพฤติกรรมคล้ายคานนั้นคือเกิดหน่วยแรงอัดที่ด้านบนและหน่วยแรงดึงที่ด้านล่าง ค่ากำลังดัดของหินคือค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เกิดกับแท่งหินตัวอย่างภายใต้โมเมนต์ดัดก่อนที่จะเกิดการวิบัติ การทดสอบนี้นิยมให้แรงกระทำบนแท่งหินแบบ 4 จุด (Four Point Flexural Loading) ดังแสดงในภาพที่ 1.26 เนื่องจากโมเมนต์ดัดกระจายสม่ำเสมอบริเวณกึ่งกลางแท่งหินตัวอย่างระหว่างจุดที่แรงกระทำ





ภาพที่ 1.26 การทดสอบกำลังค้ำของหิน

ที่มา : Richard E. Goodman. 1989 : 60

### 6. การทดสอบความคงทนหินย่อย

การทดสอบความคงทนของหินย่อย (Abrasion Resistance of Coarse Aggregate) เป็นการทดสอบคุณสมบัติการต้านทานการแตกสลายหรือแปรสภาพของหินตามอายุการใช้งาน การทดสอบที่นิยมคือวิธีลอสแอนเจลิส (Los Angeles Abrasion Value : LAA) เป็นการหาค่าความคงทนต่อการสึกหรอของหินย่อยโดยการขัดสีโดยลูกเหล็ก ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการนำหินตัวอย่างและลูกเหล็กใส่ลงในเครื่องลอสแอนเจลิสดังแสดงในภาพที่ 1.27 ซึ่งมีลักษณะเป็นโลหะรูปทรงกระบอกสามารถหมุนรอบแกนราบด้วยความเร็ว 30-35 รอบต่อนาที ลูกเหล็กทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 46.8 mm และแต่ละลูกมีน้ำหนักระหว่าง 390-445 g โดยการทดสอบแต่ละครั้งจะใช้จำนวนรอบของการหมุนประมาณ 500-1,000 รอบ จำนวนรอบของการหมุนจะมากขึ้นเมื่อหินตัวอย่างมีขนาดใหญ่



(ก) เครื่องทดสอบลอสแอนเจลิส



(ข) การชั่งน้ำหนักลูกเหล็ก

ภาพที่ 1.27 การทดสอบความคงทนต่อการสึกหรอของหินวิธีลอสแอนเจลิส

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

หินตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบแล้วจะมีส่วนที่แตกหักและสึกหรองจนกลายเป็นผงอยู่รวมกัน นำหินที่ผ่านการทดสอบมาล้างบนตะแกรงเบอร์ 12 เพื่อหาปริมาณร้อยละของส่วนละเอียดที่เล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 12 เพื่อเทียบกับน้ำหนักหินตัวอย่างเริ่มต้น โดยทั่วไปวัสดุมวลรวมที่นำไปใช้ทำวัสดุผิวทางแอสฟัลต์ควรมีค่าความคงทนต่อการสึกหรอน้อยกว่าร้อยละ 30 นอกจากนั้นข้อกำหนดของประเทศออสเตรเลีย (NAASRA-Part 4 Aggregates. 1982) ยังได้นำค่าทดสอบเองเจลลิสมาใช้ในการประเมินคุณภาพหินที่เป็นวัสดุผิวทางอีกด้วย โดยมีรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 1.3 (สุรพล สงวนแก้ว และคณะ. 2547 : 3-8)

**ตารางที่ 1.3** ขอบเขตค่าทดสอบเองเจลลิสสำหรับวัสดุหินผิวทาง

| ชนิดของหิน     | ทดสอบเองเจลลิส (LAA)   |            |                |
|----------------|--|------------|----------------|
|                | ปริมาณการจราจร<br>(จำนวนการสัญจรของรถต่อช่องจราจรในหนึ่งวัน) |            |                |
|                | น้อยกว่า 200   | 300-10,000 | มากกว่า 10,000 |
| หินบะซอลต์     | 30   | 25         | 20             |
| หินแอนดิไซค์   | 30   | 25         | 20             |
| หินไรโอไลท์    | 30   | 25         | 20             |
| หินกรวดเหลี่ยม | 30   | 25         | 20             |
| หินชนวน        | 35   | 30         | 25             |
| หินควอร์ตไซค์  | 35   | 30         | 25             |
| หินปูน         | 35   | 30         | 25             |
| หินกรวดแม่น้ำ  | 35   | 30         | 25             |
| หินแกรนิต      | 45   | 40         | 35             |
| หินควอร์ต      | 45   | 40         | 35             |

ที่มา : สุรพล สงวนแก้ว และคณะ. 2547 : 4

การทดสอบความคงทนต่อการแตกหักของหินย่อย (Aggregate Crushing Value : ACV) เป็นการทดสอบหินตามมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศอังกฤษ (British Standard) BS 812-Part 110 เพื่อหาปริมาณการแตกหักของหินย่อยภายใต้แรงกด โดยหินที่นำมาทดสอบจะผ่านตะแกรงขนาด 1/2 นิ้ว และล้างบนตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว วิธีการทดสอบเริ่มต้นจากการนำหินประมาณ 2 kg มาบรรจุในกระบอกโลหะและนำไปกดด้วยแรงอย่างต่อเนื่องจนถึง 40,640 kg ภายในเวลา

10 นาที นำหินตัวอย่างที่แตกหักจากการทดสอบไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ที่มีขนาด 2.40 mm จากนั้นคำนวณค่าแตกหักโดยการหาปริมาณร้อยละของหินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 10 เทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น

นอกจากนั้นยังมีการทดสอบหาความคงทนต่อการแตกหักของหินย่อยจากแรงกระแทก (Aggregate Impact Value : AIV) ตามมาตรฐาน BS 812-Part 112 เพื่อหาปริมาณการแตกหักของหินย่อยเมื่อถูกกระทำด้วยแรงกระแทก โดยหินที่นำมาทดสอบจะต้องผ่านตะแกรงขนาด 1/2 นิ้ว และค้ำบนตะแกรงขนาด 3/8 นิ้ว วิธีการทดสอบเริ่มต้นจากการบรรจุหินใส่ในถ้วยโลหะแล้วจึงปล่อยตุ้มโลหะมาตรฐานน้ำหนักระหว่าง 13.5-14.1 kg ให้ตกกระแทกในแนวตั้งจำนวน 15 ครั้ง เมื่อระยะตกกระทบมีค่าประมาณ  $380 \pm 6.5$  mm จากนั้นจึงคำนวณค่าแตกหักของหินจากแรงกระแทกโดยการหาปริมาณร้อยละของหินที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 10 เทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น ทั้งค่า ACV และ AIV ยังสามารถนำไปใช้ในการประเมินชนิดของหินในประเทศไทยได้อีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.4 คุณสมบัติหินในประเทศไทย

| ชนิดของหิน | กำลังอัดแกนเดียว<br>(ksc) | AIV<br>(ร้อยละ) | ACV<br>(ร้อยละ) | การสึกกร่อน<br>(ร้อยละ) | ความ<br>ถ่วงจำเพาะ | การดูดซึมน้ำ<br>(ร้อยละ) |
|------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|
| หินบะซอลต์ | 2,400-3,700               | 12.1-14.8       | 11.4-14.6       | 15-20                   | 2.638-2.924        | 0.50-1.90                |
| หินแกรนิต  | 1,800-3,650               | 13.5-18.2       | 19.2-23.8       | 21-29                   | 2.598-2.750        | 0.30-1.06                |
| หินปูน     | 1,400-2,200               | 9.7-14.8        | 17.5-26.0       | 22-33                   | 2.684-2.762        | 0.15-0.55                |
| หินทราย    | 185-1,600                 | 15.3-40.0       | 19.2-37.5       | 31-75                   | 2.237-2.642        | 1.21-3.80                |

ที่มา : สุรพล สงวนแก้ว และคณะ. 2547 : 8

## สรุป

หินโดยส่วนใหญ่เกิดจากการเย็นตัวของหินหลอมเหลวที่อยู่ใต้พื้นโลก แต่หินบางชนิดอาจเกิดจากการแปรสภาพของอินทรีย์วัตถุที่ถูกทับถมเป็นเวลานาน ในทางธรณีวิทยาแบ่งประเภทหินตามลักษณะกำเนิดเป็น 3 กลุ่ม คือ หินอัคนี หินตะกอน และหินแปร โดยหินทั้งสามกลุ่มมีความสัมพันธ์กันทั้งการกำเนิดและการแปรสภาพ อย่างไรก็ตามถ้าจำแนกหินตามอายุกำเนิดจะแบ่งหินเป็น 2 บรมยุคได้แก่ บรมยุคพรีแคมเบรียนและบรมยุคโพรเทอโรโซอิก โดยหินบรมยุคทั้งสองยังสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มย่อยได้อีกหลายกลุ่มซึ่งสามารถพบเห็นกระจายอยู่ในประเทศไทย นอกจากนี้การจำแนกหินทางธรณีของประเทศไทยยังสามารถแบ่ง

ได้อีก 10 ประเภทคือ ดินดานตะกอนแม่น้ำ ดินดานตะกอนชายฝั่งทะเล หินตะกอนชนิดหินโคลน หินตะกอนชนิดหินทราย หินตะกอนชนิดหินดินดาน หินตะกอนชนิดหินปูน หินแปร หินอัคนีชนิดหินบะซอลต์ หินอัคนีแทรกซ้อน และหินภูเขาไฟ ตามลำดับ

หากกล่าวถึงอุตสาหกรรมหินที่มีอยู่ในประเทศไทยส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้ในการก่อสร้าง อุตสาหกรรมแรกที่สำคัญคืออุตสาหกรรมเหมืองหินซึ่งเกี่ยวข้องกับการนำหินจากแหล่งธรรมชาติมาแปรรูป กรรมวิธีการทำเหมืองหินจะต้องมีความปลอดภัยตามหลักวิศวกรรม ทั้งนี้หากมีการตั้งโรงโม่หินในเขตประธานบัตรต้องแสดงรายละเอียดขั้นตอนการโม่หินและระบบป้องกันฝุ่นด้วย การทำเหมืองหินแบ่งเป็น 3 วิธีคือ การทำเหมืองหินแบบห้อยโหนเจาะและระเบิด การทำเหมืองหินแบบชั้นบันไดในพื้นที่ราบ และการทำเหมืองหินแบบชั้นบันไดในพื้นที่ภูเขา อุตสาหกรรมต่อมาเป็นอุตสาหกรรมผลิตหินย่อยหรือหินโม่เป็นการต่อยอดจากอุตสาหกรรมเหมืองหิน โดยการนำหินขนาดใหญ่มาย่อยให้มีขนาดเล็กลงเพื่อความสะดวกในการใช้งาน สำหรับอุตสาหกรรมหินเพื่อการตกแต่งจะมุ่งเน้นการแปรสภาพหินที่มีลวดลายสวยงามมาใช้สำหรับการตกแต่งทางสถาปัตยกรรม ทั้งนี้หินที่ใช้ในการก่อสร้างควรผ่านการตรวจสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลเพื่อสร้างความเชื่อมั่นในการใช้งาน

### คำถามทบทวน

1. จงอธิบายกระบวนการกำเนิดและแปรสภาพของหินอัคนี หินตะกอน และหินแปร
2. ขั้นตอนการทำเหมืองหินในพื้นที่ราบและพื้นที่ภูเขาแตกต่างกันอย่างไร
3. จงอธิบายกระบวนการผลิตหินย่อยเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง
4. ขนาดหินย่อยและขนาดคละของหินคลุกมีผลอย่างไรต่อการนำไปใช้งาน
5. ถ้าต้องการเลือกหินเพื่อใช้ในการแคะสลักควรเลือกหินชนิดใดพร้อมทั้งบอกเหตุผลประกอบ
6. ความหนาแน่นแห้งของหินคืออะไรและมีผลอย่างไรต่อการนำหินไปใช้งาน
7. จงบอกวัตถุประสงค์ของการทดสอบหินวิธีลอสแอนเจลิสและจงยกตัวอย่างการนำผลการทดสอบไปใช้ประโยชน์
8. ควรเลือกการทดสอบหินวิธีใดบ้างถ้าหากมีการสร้างอุโมงค์ใต้ดินที่ต้องเจาะผ่านชั้นหิน
9. ถ้าต้องการสร้างถนนหินคลุกควรเลือกใช้หินที่มีคุณสมบัติอย่างไรพร้อมทั้งยกตัวอย่างประกอบ
10. การทดสอบกำลังอัดแบบสามแกนแตกต่างจากการทดสอบกำลังอัดแกนเดียวอย่างไร
11. ผลการทดสอบกำลังอัดแท่งหินทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm ยาว 20 cm โดยวิธีทดสอบกำลังอัดแกนเดียวพบว่าต้องใช้น้ำหนักกด 54,500 kg จึงทำให้แท่งตัวอย่างวิบัติ จงหาลำลังอัดของแท่งหินนี้ (ตอบ : กำลังอัด = 694 ksc)





## บทที่ 2

### ดิน

ดินเป็นวัสดุตามธรรมชาติที่ปกคลุมผิวโลกเกิดจากการผุร่อนของหินและรวมตัวกับอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ชั้นดินที่ปกคลุมผิวโลกจะมีความหนาน้อยกว่าชั้นหินซึ่งเป็นวัสดุต้นกำเนิดที่อยู่ด้านล่าง ดินที่มีความชื้นและช่องว่างเหมาะสมจะช่วยให้การเจริญเติบโตของพืชและเป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เมื่อก้าวถึงดินในด้านการก่อสร้างถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากชั้นดินจะทำหน้าที่แบกรับน้ำหนักสิ่งก่อสร้างที่อยู่ด้านบนชั้นดิน ในขณะที่ดินคุณภาพดีบางชนิดอาจถูกขนย้ายจากแหล่งดินตามธรรมชาติเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ภายในพื้นที่ก่อสร้างที่อยู่ห่างออกไป นอกจากนั้นดินที่มีแร่ธาตุต่าง ๆ ยังสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุก่อสร้างได้อีกด้วย จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่าดินมีส่วนเกี่ยวข้องกับการก่อสร้างอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นบทนี้จึงนำเสนอเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับดินซึ่งประกอบด้วย การกำเนิดของดิน การเรียงตัวของชั้นดิน ขนาดและรูปร่างของเม็ดดิน โครงสร้างของดิน และการทดสอบดินในทางวิศวกรรม ตามลำดับ

#### การกำเนิดของดิน

หากกล่าวถึงดิน (Soil) ในด้านวิศวกรรมเพื่อการก่อสร้างมักเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล มีนักวิชาการด้านปฐพีกลศาสตร์หลายท่านได้ให้คำจำกัดความของดินไว้ดังนี้ วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร (2532 : 1) กล่าวว่าดินเกิดจากเม็ดของแร่ธาตุที่แตกตะกอนทับถมรวมตัวกัน ไม่นานสามารถแยกออกจากกันได้โดยวิธีง่าย ๆ มีส่วนประกอบของ กรวด ทราย และดินเหนียว ดิเรก ลาวัณย์ศิริ และบุญสม เลิศหิรัญวงศ์ (2538 : 1) กล่าวว่าดินเป็นการรวมตัวของอนุภาคขนาดต่าง ๆ ที่เกิดจากการแตกตัวหรือผุพังของหินทางด้านกลหรือด้านเคมีซึ่งประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุและน้ำ มานะ อภิพัฒนะมนตรี (2543 : 1) กล่าวว่าดินเป็นวัสดุธรรมชาติที่เกิดจากการรวมตัวของอนุภาคขนาดต่าง ๆ ของหินที่ได้สลายตัวผุพังตามกระบวนการธรรมชาติและทับถมเป็นชั้น ดินแต่ละชั้นจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันเนื่องจากผลของกระบวนการผุพังที่ต่างกัน สถาพร คุวิจิตรจารุ (2545 : 1-1) กล่าวว่าดินเป็นวัสดุบนพื้นโลกที่มีส่วนผสมของ เม็ดดิน หินย่อยขนาดต่าง ๆ อินทรีย์วัตถุ น้ำ และอากาศ จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นอาจสรุปได้ว่าดินคือวัสดุธรรมชาติบนผิวโลกที่เกิดจากขบวนการผุพังทางธรณีวิทยาของหินหรือแร่ อนุภาคของหินหรือแร่ขนาดเล็กละเอียดจะจับตัวกันไม่แน่นและสามารถแยกออกจากกันได้โดยง่าย ดินมีส่วนประกอบของเม็ดดิน น้ำ อากาศ และอินทรีย์วัตถุ

เมื่อหินบนเปลือกโลกซึ่งประกอบด้วยแร่ต่าง ๆ ผ่านกระบวนการผุพัง (Weathering) จนมีขนาดอนุภาคเล็กลงและรวมตัวกับอินทรีย์วัตถุก็จะกลายเป็นดิน ซึ่งดินแต่ละพื้นที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุต้นกำเนิดและกระบวนการผุพัง ดินที่มีวัสดุต้นกำเนิดจากหินอัคนีจะมีเม็ดดินค่อนข้างใหญ่และมีความแข็งแรงมาก ดินที่มีวัสดุต้นกำเนิดจากหินตะกอนจะมีรูปร่างของเม็ดดินกลมมนจากการถูกพัดพาโดยกระแสลมหรือกระแสน้ำและมีอินทรีย์วัตถุปะปน สำหรับดินที่มีวัสดุต้นกำเนิดจากหินแปรจะมีเม็ดดินที่มีความแข็งแรงน้อยและมีอินทรีย์วัตถุปะปนอยู่มาก จึงเหมาะกับการเจริญเติบโตของพืช ขบวนการผุพังของหินจนกลายเป็นดินแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ ขบวนการผุพังทางกลเป็นการแตกหักของหินจนกลายเป็นเศษหินและหินขนาดเล็ก โดยดินที่เกิดจากขบวนการผุพังทางกลจะมีคุณสมบัติเหมือนกับหินต้นกำเนิดทุกประการ การผุพังทางกลเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะคือ การผุพังจากการแข็งตัวของน้ำ การผุพังจากน้ำหนักกดทับลดลง และการผุพังจากกิจกรรมของสิ่งมีชีวิต ตามลำดับ ขบวนการผุพังอีกแบบคือการผุพังทางเคมีเป็นการผุพังของหินจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแร่เมื่อทำปฏิกิริยากับสารเคมีตามธรรมชาติ เช่น สารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดหรือด่าง เป็นต้น โครงสร้างของแร่ที่เปลี่ยนไปจะทำให้หินต้นกำเนิดเกิดการแตกหักหรือเกิดการผุกร่อนจนกลายเป็นดิน

### การเรียงตัวของชั้นดิน

ดินที่ปรากฏบนพื้นผิวโลกในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกัน ในขณะที่เดียวกันการเรียงตัวของชั้นดินแต่ละชั้นจะสัมพันธ์กับขบวนการผุพังและสามารถบ่งบอกประวัติศาสตร์ของพื้นที่นั้นได้ การศึกษาการเรียงตัวของชั้นดินสามารถทำได้โดยการสังเกตลักษณะเนื้อดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามความลึก เรียกว่า หน้าตัดดิน (Soil Horizon) ในทางธรณีวิทยาแบ่งการเรียงตัวของชั้นดินออกเป็น 2 ลักษณะคือ การเรียงตัวของชั้นดินกำเนิดในที่และการเรียงตัวของชั้นดินกำเนิดจากการพัดพา รายละเอียดการเรียงตัวของชั้นดินมีดังต่อไปนี้ (วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. ม.ป.ป. : 2-2-2-4, สถาพร ภูวิจิตรจารุ. 2545 : 2-2-2-12 และ Soil Nutrient Management for Maui County. 2007)

#### 1. การเรียงตัวของชั้นดินกำเนิดในที่

ดินกำเนิดในที่ (Residual Soil) เป็นดินที่เกิดจากการผุพังของหินต้นกำเนิดโดยมีน้ำเป็นสารละลายหลัก การผุพังจะเกิดขึ้นมากบริเวณชั้นดินที่อยู่ใกล้กับผิวโลกและจะผุพังลดลงตามความลึกของชั้นดิน ดินกำเนิดในที่ที่มีลักษณะการเรียงตัวเป็นชั้น ๆ และสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ขนาดเม็ดดินและปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ปะปนอยู่ในแต่ละชั้นจะสัมพันธ์กับขบวนการผุพังดังรายละเอียดต่อไปนี้

O horizon

Loose and partly decayed organic matter

A horizon

Mineral matter mixed with some humus

E horizon

Light colored mineral particles. Zone of eluviation and leaching

B horizon

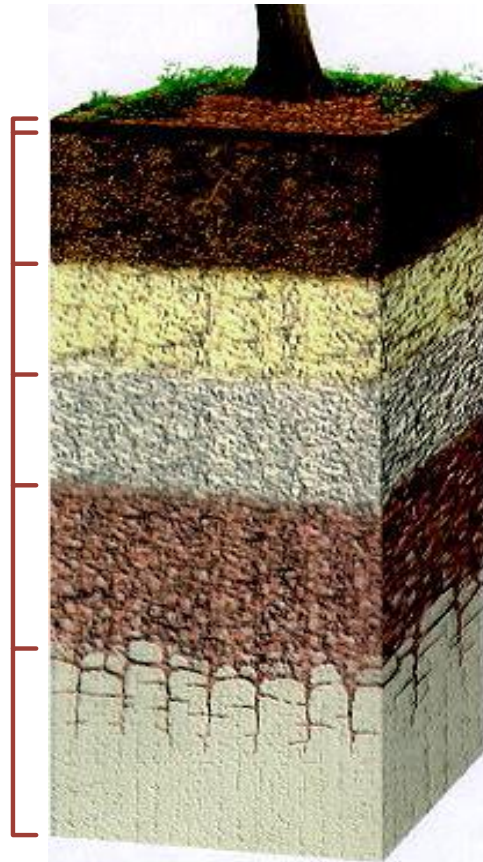
Accumulation of clay transported from above

C horizon

Partially altered parent material

R horizon

Unweathered parent material



ภาพที่ 2.1 การเรียงตัวของชั้นดินเกิดในที่

ที่มา : Soil Nutrient Management for Maui County. 2007

ดินชั้นโอ (O Horizon) หรือเรียกว่า ชั้นดินอินทรีย์ (Organic Soil) เป็นดินชั้นบนสุดมีความหนาไม่มาก มักมีสีคล้ำเนื่องจากมีอินทรีย์วัตถุที่อยู่ระหว่างการสลายตัวปนอยู่มากจนไม่สามารถสังเกตเห็นลักษณะของวัสดุต้นกำเนิดได้ ชั้นดินอินทรีย์เหมาะสำหรับงานเกษตรกรรมเนื่องจากมีความพูนมากและมีแร่ธาตุจากซากพืชซากสัตว์ที่พืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ดี แต่ในทางวิศวกรรมถือว่าชั้นดินนี้มีคุณสมบัติแย่นเนื่องจากการยุบตัวสูงเมื่อมีแรงมากระทำ

ดินชั้นเอ (A Horizon) หรือเรียกว่า ดินชั้นบน (Top Soil) เป็นดินที่ประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุที่สลายตัวสมบูรณ์แล้วผสมอยู่กับแร่และหินขนาดเล็ก ดินชั้นบนมักมีสีเข้มและน้ำสามารถซึมผ่านได้ดีจึงเหมาะให้รากพืชยึดแน่นและดูดซับแร่ธาตุในดิน ดินชั้นนี้มักถูกไถพรวนเพื่อเพิ่มแร่ธาตุต่อการเจริญเติบโตของพืชในพื้นที่เกษตรกรรม แต่ในทางวิศวกรรมดินชั้นนี้ยังมีคุณสมบัติดี้อยู่ในการรับแรง

ดินชั้นอี (E Horizon) หรือเรียกว่า ดินชั้นซึมชะ (Leaching Soil) เป็นชั้นดินที่เกิดจากการซึมผ่านของน้ำจากด้านบนลงสู่ด้านล่างแล้วนำแร่ธาตุต่าง ๆ ลงมาด้วย ในบางครั้งน้ำและแร่ธาตุจะทำปฏิกิริยากันจนเกิดการสลายตัวของแร่ ดินชั้นนี้มักมีสีซีดจางและมีปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อย เนื้อดินมีความแน่นจึงสามารถรับแรงได้ดี ในบางพื้นที่ที่มีชั้นดินซึมชะบางจนสังเกตเห็นได้ยากก็อาจรวมดินชั้นนี้ไว้กับดินชั้นบน

ดินชั้นบี (B Horizon) หรือเรียกว่า ดินชั้นล่าง (Subsoil) เป็นชั้นดินที่เกิดจากการซึมผ่านของสารละลายและแร่ลงมาสะสมในชั้นล่าง ดินชั้นนี้ในบางพื้นที่มีสีน้ำตาลปนแดงจากการมีออกไซด์ของเหล็กผสมอยู่ ดินชั้นล่างมีโครงสร้างเม็ดดินเป็นก้อนเหลี่ยมหรือแท่งผลึกยึดเกาะกัน เนื้อดินมีความแน่นจึงสามารถรับแรงได้ดี

ดินชั้นซี (C Horizon) หรือเรียกว่า ดินชั้นวัสดุต้นกำเนิด (Parent Rock) เป็นชั้นดินที่มีวัสดุต้นกำเนิดแตกหักในลักษณะเป็นก้อนแข็งและเกาะรวมกันอย่างหลวม ๆ วัสดุก้อนแข็งนี้มีส่วนประกอบของหินและแร่ที่อยู่ระหว่างขบวนการผุพังโดยมีการสะสมตัวของตะกอนจากการซึมผ่านน้อยมาก เนื้อดินชั้นนี้มีเป็นก้อนแข็งจึงสามารถรับแรงได้ดี

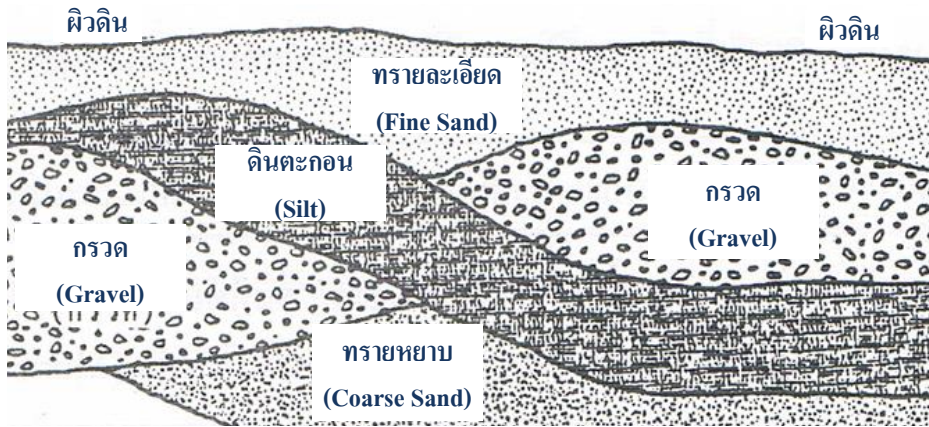
ดินชั้นอาร์ (R Horizon) หรือเรียกว่า ชั้นหินพื้น (Bedrock) เป็นชั้นของหินแข็งหรือหินดานซึ่งเป็นวัสดุต้นกำเนิดดินที่ยังไม่มีการผุพัง ชั้นหินพื้นนี้ยังไม่ถือว่าเป็นดิน

## 2. การเรียงตัวของชั้นดินกำเนิดจากการพัดพา

ดินกำเนิดจากการพัดพา (Transported Soil) เป็นดินที่เกิดจากการพัดพาเอาเม็ดดินจากแหล่งกำเนิดไปสะสมตัวแหล่งอื่นโดยอาศัยตัวกลาง เช่น กระแสน้ำ แรงลม และแรงโน้มถ่วง เป็นต้น ดินกำเนิดจากการพัดพาจะมีการเรียงตัวของชั้นดินลักษณะเป็นชั้นสลับกันดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 2.2 ดินกำเนิดจากการพัดพามีชื่อเรียกแตกต่างกันตามชนิดของตัวกลางและแหล่งทับถมดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.1 ดินโคลูเวียน (Colluvial Soil) เป็นดินที่เกิดจากการพัดพาและตกตะกอนภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วง เม็ดดินมีรูปร่างเหลี่ยมมุมและมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินมาก เช่น ดินบริเวณเชิงเขา เป็นต้น

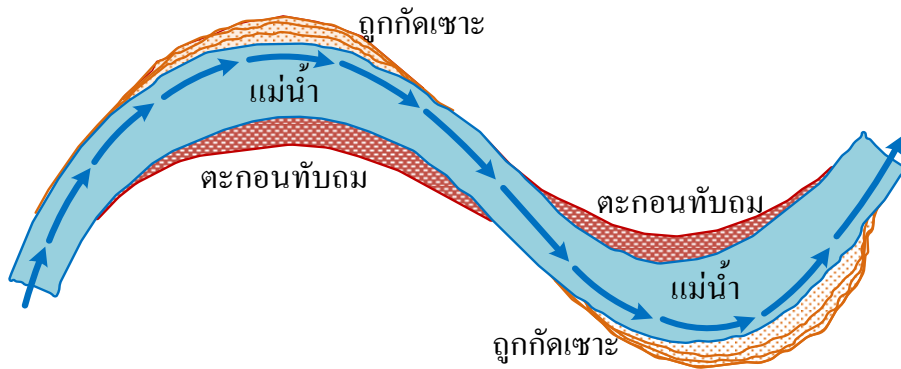
2.2 ดินเอาโอเลน (Aeolian Soil) เป็นดินที่เกิดจากการพัดพาของแรงลม เม็ดดินมีขนาดเล็กใกล้เคียงกันและมีรูปร่างกลมมน ดินชนิดนี้ทับถมกันอย่างหลวม ๆ จึงมีโอกาสเกิดการเลื่อนไถลของแผ่นดินได้ง่าย เช่น เนินทราย (Sand Dune) ในทะเลทราย เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 การเรียงตัวของชั้นดินที่เกิดจากการพัดพา

ที่มา : สถาพร ภู่วิจิตรจารุ. 2545 : 2-8

2.3 ดินอูเวียน (Alluvial Soil) เป็นดินที่เกิดจากการพัดพาของกระแสน้ำไปตามแม่น้ำ ถ้ากระแสน้ำมีความเร็วมากจะเกิดการกัดเซาะและพัดพาตะกอนดินให้ไหลไปตามกระแสน้ำดังแสดงในภาพที่ 2.3 เมื่อความเร็วของกระแสน้ำลดลงก็จะทำให้ตะกอนดินจมลงและเกิดการทับถม ชั้นดินแต่ละชั้นจะมีขนาดเม็ดดินที่สม่ำเสมอ เช่น ดินตามที่ราบปากแม่น้ำ เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 การกัดเซาะและทับถมตามชายฝั่งแม่น้ำที่มีการไหล

ที่มา : สถาพร ภู่วิจิตรจารุ. 2545 : 2-9

2.4 ดินลาคัสตริเน (Lacustrine Soil) เป็นดินที่เกิดจากการพัดพาของกระแสน้ำในทะเลสาบ ลักษณะชั้นดินจะมีการเรียงตัวของตะกอนอย่างเป็นระเบียบจากตะกอนขนาดใหญ่ที่อยู่ด้านล่างและตะกอนขนาดเล็กที่อยู่ด้านบน

2.5 ดินมารีน (Marine Soil) เป็นดินที่เกิดจากการพัดพาของกระแสน้ำในท้องทะเล ดินชนิดนี้มักเป็นดินเม็ดละเอียดที่ตกตะกอนเป็นชั้นอยู่ใต้ท้องทะเล

2.6 ดินกราเซียน (Gracial Soil) เป็นดินที่เกิดจากการพัดพาของกระแสน้ำจากการที่ธารน้ำแข็งละลาย ดินชนิดนี้มีความหนาแน่นสูงและทรุดตัวน้อยเมื่อรับแรง

### ขนาดและรูปร่างเม็ดดิน

ดินที่เกิดจากขบวนการผุพังต่างกันจะมีลักษณะเม็ดดินไม่เหมือนกัน ดังนั้นการศึกษาขนาดและรูปร่างเม็ดดินจึงมีประโยชน์ในการจำแนกประเภทของดินซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (มานะ อภิพัฒนะมนตรี. 2543 : 2-4, วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. ม.ป.ป. : 2-4 และ Braja M. Das. 2008 : 46-47)

#### 1. ขนาดเม็ดดิน

ในวิชาปฐพีกลศาสตร์ซึ่งเป็นวิชาที่ศึกษาคุณสมบัติของดินในด้านวิศวกรรมเพื่อการก่อสร้างได้จำแนกดินจากขนาดเม็ดดินออกเป็น 2 ชนิดคือ ดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด

1.1 ดินเม็ดหยาบ (Coarse Grained Soil) เป็นดินที่มีขนาดเม็ดใหญ่ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสมาคมทางหลวงรัฐและเจ้าหน้าที่ขนส่งประเทศสหรัฐอเมริกา (American Association of State Highway and Transportation Officials : AASHTO) กล่าวว่าดินเม็ดหยาบคือดินที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 0.075 mm ดินชนิดนี้มีคุณสมบัติด้านวิศวกรรมที่ดี เช่น สามารถแยกทาน้ำหนักได้ดีและไม่มีคุณสมบัติทางประจุไฟฟ้า เป็นต้น ดินเม็ดหยาบส่วนใหญ่ไม่สามารถเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพได้ (Undisturbed Sampling) เพราะเม็ดดินไม่ยึดเกาะกัน (Cohesionless) แต่ดินเม็ดหยาบบางชนิดสามารถยึดเกาะกันได้ดี (Cohesive) ถ้ามีปริมาณดินเม็ดละเอียดปะปนอยู่มาก ตัวอย่างดินเม็ดหยาบ เช่น ทรายละเอียด (Fine Sand) ทรายหยาบปานกลาง (Medium Sand) ทรายหยาบ (Coarse Sand) และกรวด (Gravel) เป็นต้น

1.2 ดินเม็ดละเอียด (Fine Grained Soil) เป็นดินที่มีขนาดเม็ดดินเล็กซึ่งมาตรฐาน AASHTO กำหนดให้มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.075 mm ดินเม็ดละเอียดเป็นดินที่มีคุณสมบัติด้านวิศวกรรมไม่ดีกว่าคือรับน้ำหนักได้น้อยและทรุดตัวสูง อย่างไรก็ตามดินชนิดนี้มีความที่บ้นน้ำ (Impervious) จึงเหมาะสำหรับใช้ทำแกนเขื่อนเพื่อป้องกันน้ำไหลซึมผ่าน ดินเม็ดละเอียดส่วนใหญ่มีการยึดเกาะกันแน่นด้วยแรงไฟฟ้าเคมีและสามารถปั้นเป็นก้อนได้โดยไม่เกิดการแตกร้าว (Plasticity) เช่น ดินเหนียว (Clay) เป็นต้น แต่อาจมีดินเม็ดละเอียดบางชนิดที่ยึดเกาะกันหลวม ๆ เช่น ดินตะกอน (Silt) หรือเรียกอีกอย่างว่า ทรายแป้ง เป็นต้น

#### 2. การจำแนกขนาดเม็ดดิน

การจำแนกดินจากการพิจารณาขนาดเม็ดดินสามารถแบ่งดินออกเป็นดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด แต่ข้อกำหนดหรือเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกขนาดเม็ดดินของหน่วยงานแต่ละแห่งมีความแตกต่างกันอยู่บ้างดังแสดงในตารางที่ 2.1 สำหรับหน่วยงานด้านการก่อสร้างของประเทศไทยมักอ้างอิงข้อกำหนดสมาคมทางหลวงรัฐและเจ้าหน้าที่ขนส่งประเทศสหรัฐอเมริกา



ในการจำแนกขนาดเม็ดดิน ข้อกำหนด AASHTO กล่าวถึงการจำแนกดินตามขนาดเม็ดดินไว้ว่า ดินเม็ดหยาบแบ่งเป็นกรวดและทราย โดยกรวดมีขนาดเม็ดดินระหว่าง 76.2-2.0 mm และทรายมีขนาดเม็ดดินระหว่าง 2.0-0.075 mm สำหรับดินเม็ดละเอียดแบ่งเป็นดินตะกอนและดินเหนียว โดยดินตะกอนมีขนาดเม็ดดินระหว่าง 0.075-0.002 mm และดินเหนียวมีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 0.002 mm ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในการเลือกใช้ข้อกำหนดใดในการจำแนกขนาดเม็ดดินนั้น ควรพิจารณาให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งานด้วย

### ตารางที่ 2.1 การจำแนกขนาดเม็ดดิน

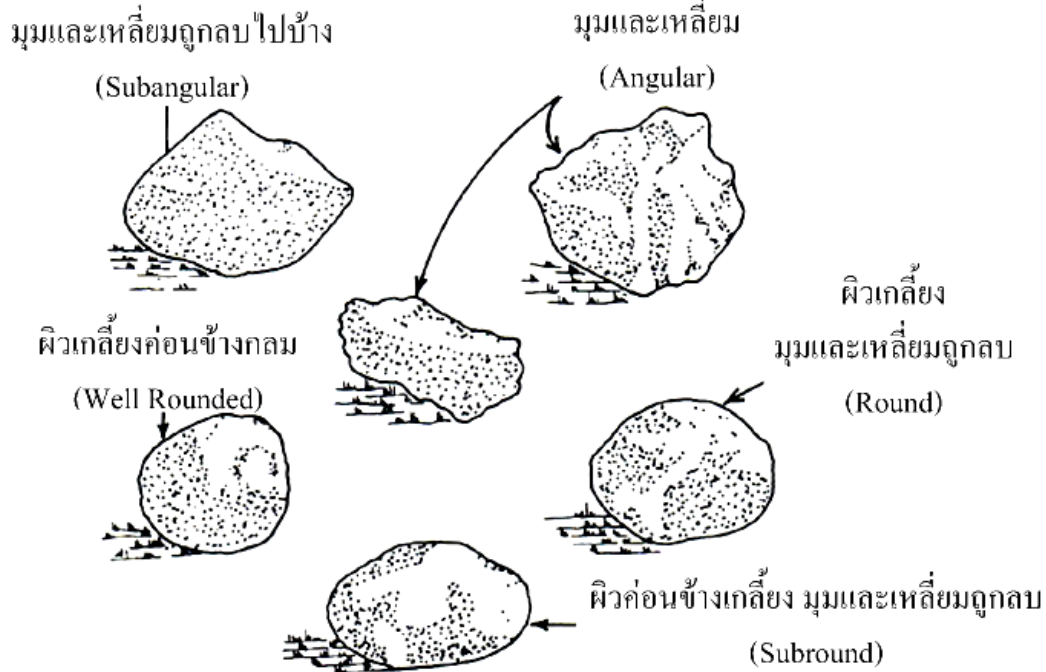
| หน่วยงาน  | ขนาดเม็ดดิน (mm) |            |                |           |
|---|------------------|------------|----------------|-----------|
|   | ดินเม็ดหยาบ      |            | ดินเม็ดละเอียด |           |
|   | กรวด             | ทราย       | ดินตะกอน       | ดินเหนียว |
| กรมเกษตรกรรมประเทศสหรัฐอเมริกา<br>(U.S. Department of Agriculture : USDA) | > 2.0            | 2.0-0.05   | 0.05-0.002     | < 0.002   |
| สมาคมทางหลวงรัฐและเจ้าหน้าที่ขนส่ง<br>ประเทศสหรัฐอเมริกา (AASHTO)         | 76.2-2.0         | 2.0-0.075  | 0.075-0.002    | < 0.002   |
| ระบบการจำแนกดินยูนิฟาย<br>(Unified Soil Classification System : USCS)     | 76.2-4.75        | 4.75-0.075 | < 0.075        |           |

ที่มา : วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. ม.ป.ป. : 2-4

### 3. รูปร่างดินเม็ดหยาบ

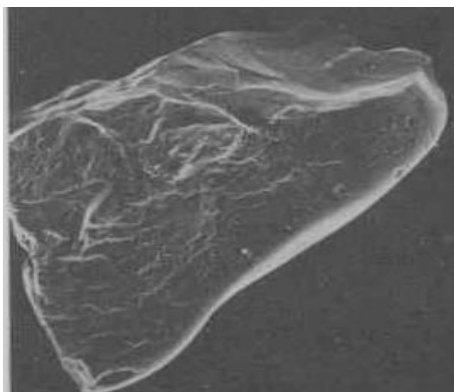
รูปร่างของเม็ดดินมีความแตกต่างกันตามขบวนการผุพังและการพัดพา การสังเกตรูปร่างและพื้นผิวของดินเม็ดหยาบสามารถทำได้จากการดูด้วยตาเปล่าหรือใช้แว่นขยาย แต่สำหรับดินเม็ดละเอียดซึ่งมีขนาดเล็กจนไม่สามารถดูด้วยตาเปล่าได้ก็จำเป็นต้องใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ช่วย เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูง เป็นต้น ดังนั้นในการศึกษารูปร่างเม็ดดินโดยทั่วไปจึงเป็นการศึกษารูปร่างของดินเม็ดหยาบ ลักษณะรูปร่างดินเม็ดหยาบจำพวกกรวดมีหลากหลายรูปแบบดังแสดงในภาพที่ 2.4 เช่น เม็ดดินมีเหลี่ยมมุมและแหลมคม ทั้งก้อน (Very Angular) เม็ดดินมีเหลี่ยมมุม (Angular) เม็ดดินมีเหลี่ยมมุมและโค้งมนเล็กน้อย (Subangular) เม็ดดินโค้งมนและมีเหลี่ยมมุมเล็กน้อย (Subrounded) เม็ดดินโค้งมนผิวเกลี้ยงเป็นส่วนใหญ่ (Rounded) และเม็ดดินผิวเกลี้ยงค่อนข้างกลม (Well Rounded) เป็นต้น สำหรับรูปร่างของดินเม็ดหยาบจำพวกทรายซึ่งมีขนาดเล็กกว่ากรวดโดยส่วนใหญ่เป็นเม็ดของแร่ควอร์ต แต่ในบางครั้งทรายอาจมีแร่ชนิดอื่นปะปน เช่น แร่เฟลด์สปาร์ เป็นต้น ทั้งนี้รูปร่างของเม็ดทรายมัก

มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมเนื่องจากแร่ควอร์ตเป็นแร่ที่แข็งจึงสึกหรอยาก ภาพที่ 2.5 แสดงรูปร่างของเม็ดทรายที่เป็นแร่ควอร์ตและเฟลด์สปาร์ที่กำลังขยาย 40 เท่า

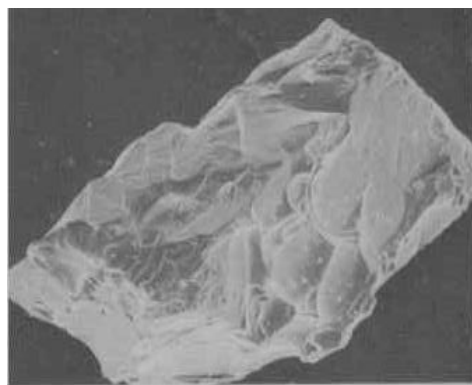


ภาพที่ 2.4 รูปร่างของดินเม็ดทราย

ที่มา : มานะ อภิปัทนะมนตรี. 2543 : 3



(ก) ทรายที่เป็นแร่ควอร์ต



(ข) ทรายที่เป็นแร่เฟลด์สปาร์

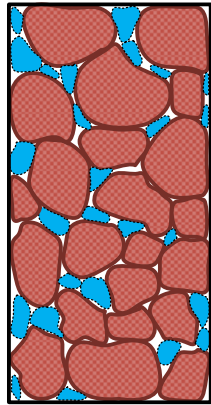
ภาพที่ 2.5 อนุภาคเม็ดทรายขยาย 40 เท่า

ที่มา : Department of Environmental Sciences. 2012

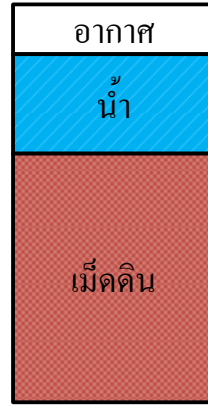
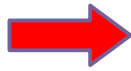
### โครงสร้างดิน

ดินตามธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างซับซ้อนยากต่อการคาดคะเน โครงสร้างของดินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ขนาดเม็ดดิน รูปร่างเม็ดดิน และแร่ธาตุในเม็ดดิน เป็นต้น หากพิจารณาดินหนึ่งหน่วยปริมาตรจะพบว่าประกอบด้วยของแข็ง น้ำ และอากาศ โดยส่วนที่เป็นของแข็งประกอบด้วยเม็ดดิน แร่ธาตุ และอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ สำหรับน้ำและอากาศจะแทรก

อยู่ภายในส่วนที่เป็นช่องว่างระหว่างของแข็ง ทั้งของแข็งและช่องว่างจะอยู่รวมกันอย่างไม่เป็นระเบียบดังแสดงในภาพที่ 2.6(ก) หากแยกส่วนประกอบของดินออกจากกันอย่างเป็นระเบียบก็จะมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.6(ข) เรียกว่า แผนภาพส่วนประกอบของดิน (Phase Diagram) โครงสร้างของดินตามธรรมชาติสามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มดังต่อไปนี้ (วัธนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร, 2532 : 5-6, Braja M. Das, 2008 : 30-35 และ Braja M. Das, 2010 : 90-93)



(ก) โครงสร้างดินตามธรรมชาติ



(ข) การแยกส่วนประกอบของดิน

ภาพที่ 2.6 ส่วนประกอบของดิน

ที่มา : สถาพร ภูวิจิตรจารย์, 2545 : 3-2

### 1. โครงสร้างเม็ดเดี่ยว

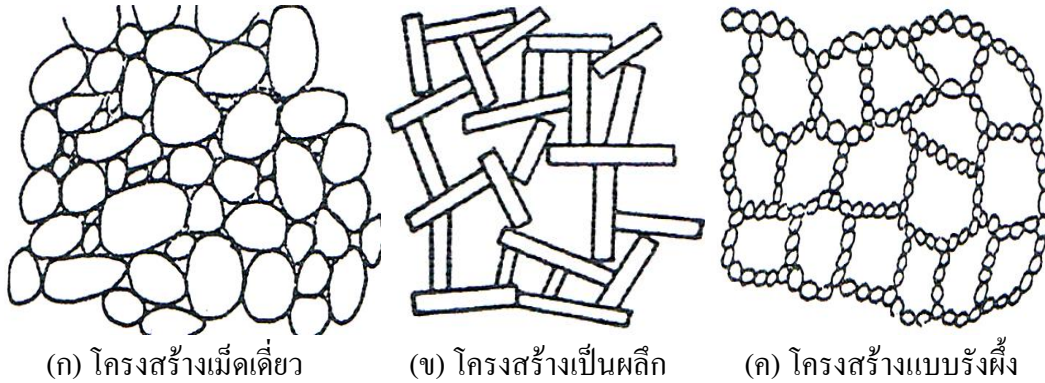
โครงสร้างเม็ดเดี่ยว (Single Grained Structure) เป็นโครงสร้างของดินเม็ดหยาบที่มีขนาดแตกต่างกันมาชิดเกาะกันอย่างหลวมๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.7(ก) โครงสร้างแบบนี้มีช่องว่างที่อยู่ภายในเนื้อดินมากแต่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ดี เมื่อมีการสั่นสะเทือนดินเม็ดเล็กจะขยับตัวเข้าไปแทรกกระหว่างดินเม็ดใหญ่ทำให้ช่องว่างลดลง แต่ถ้าเป็นโครงสร้างที่เกิดจากเม็ดดินขนาดเท่ากันการสั่นสะเทือนจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงช่องว่าง

### 2. โครงสร้างเป็นผลึก

โครงสร้างเป็นผลึก (Flocculent Structure) หรือโครงสร้างเป็นกลุ่มเป็น โครงสร้างของดินเม็ดละเอียดที่เกาะกันเป็นกลุ่มดังแสดงในภาพที่ 2.7(ข) เกิดจากการที่แต่ละอนุภาคเม็ดดินมีน้ำห่อหุ้มและมีประจุไฟฟ้าล้อมรอบ โดยอนุภาคเม็ดดินที่มีประจุไฟฟ้าต่างกันจะดึงดูดกันจนเกิดการยึดเกาะมีลักษณะคล้ายผลึก ดินเม็ดละเอียดที่มีโครงสร้างแบบนี้คือดินเหนียว

### 3. โครงสร้างแบบรังผึ้ง

โครงสร้างแบบรังผึ้ง (Honeycombed Structure) เป็นโครงสร้างดินเม็ดละเอียดคล้ายกับโครงสร้างเป็นผลึกแต่อนุภาคของเม็ดดินมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาว่า การดึงดูดกันระหว่างอนุภาคเม็ดดินที่มีขนาดเล็กจะต่อกันเป็นลูกโซ่ของเม็ดดินจนมีลักษณะคล้ายรังผึ้งดังแสดงในภาพที่ 2.7(ค) โครงสร้างแบบนี้มีช่องว่างมากเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกและมีแรงกระทำก็จะทำให้โครงสร้างพังทลายเกิดการทรุดตัวสูง



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของดิน

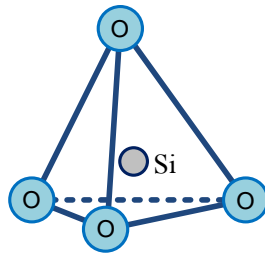
ที่มา : วัฒนา ชรรรมมงคล และ วินิต ช่อวิเชียร. 2532 : 6

## แร่ดินเหนียว

ดินเหนียวเป็นดินเม็ดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคเม็ดดินเล็กกว่า 0.002 mm ประกอบด้วยแร่ธาตุชนิดต่าง ๆ เช่น ไฮดรอกซิลลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrous Aluminum Silicates) เหล็ก (Iron) และแมกนีเซียม (Magnesium) เป็นต้น แร่ธาตุเหล่านี้ไม่ละลายในกรดและมีคุณสมบัติทางด้านประจุไฟฟ้าเคมีจึงทำให้อนุภาคเม็ดดินยึดเกาะกันแน่นและดูดซับน้ำได้ดีสามารถปั้นเป็นรูปทรงได้เมื่อเปียกชื้น นอกจากนั้นดินเหนียวยังมีความที่บเหนียวหรือน้ำซึมผ่านยาก โดยอนุภาคของดินเหนียวมีลักษณะการเรียงตัวกันเป็นชั้นของแผ่นผลึกแร่ตั้งรายละเอียดต่อไปนี้ (คชินท์ สายอินทวงศ์. 2551, มานะ อภิปัทธนะมนตรี. 2543 : 11-13, วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. ม.ป.ป. : 2-5-2-8, สถาพร ภูวิจิตรจากร. 2545 : 2-12-2-20 และ Braja M. Das. 2008 : 3-7)

### 1. แผ่นซิลิกา

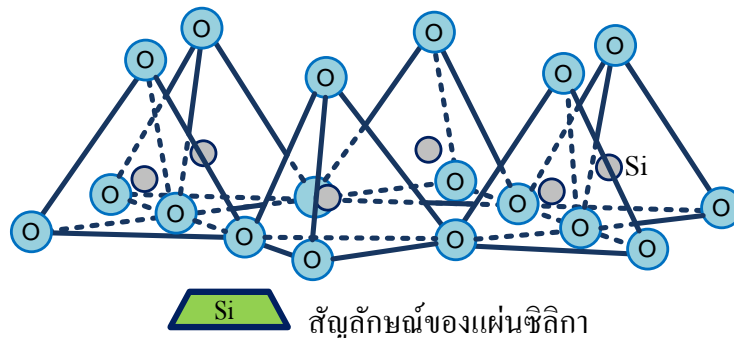
แผ่นซิลิกา (Silica Sheet) เป็นชั้นของแผ่นผลึกที่มีอะตอมของออกซิเจน (O) อยู่ที่มุมทั้งสี่ของรูปทรงเหลี่ยมและมีอะตอมของซิลิกา (Si) แทรกอยู่ภายใน การก่อตัวเป็นโมเลกุลจะยึดกันด้วยพันธะไอออนิก (Ionic Bond) รูปแบบโครงสร้างของหน่วยพื้นฐานซิลิกาเป็นรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Silica Tetrahedron) ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 หน่วยพื้นฐานแร่ดินเหนียวทรงเหลี่ยมสี่หน้าของซิลิกา

ที่มา : Braja M. Das. 2008 : 3

หน่วยพื้นฐานแร่ดินเหนียวทรงเหลี่ยมสี่หน้าของซิลิกาจะเชื่อมต่อกันโดยการใช้อะตอมร่วมกับหน่วยพื้นฐานข้างเคียงในแนวระนาบ เมื่อมองในทิศตั้งฉากกับระนาบพบว่ามีรูปร่างคล้ายหกเหลี่ยมต่อกันเป็นแผ่นดังแสดงในภาพที่ 2.9 โดยทั่วไปมักกำหนดให้แผ่นซิลิกามีสัญลักษณ์เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู

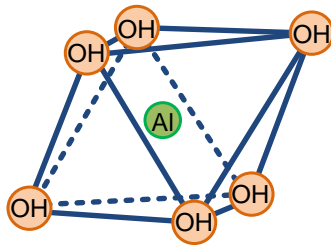


ภาพที่ 2.9 แผ่นซิลิกา

ที่มา : Braja M. Das. 2008 : 4

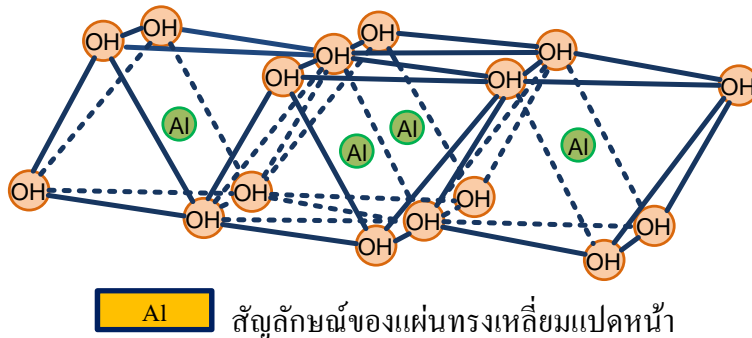
## 2. แผ่นอะลูมินา

แผ่นอะลูมินา (Alumina Sheet) เป็นชั้นของแผ่นผลึกที่มีอะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH) อยู่ที่มุมทั้งหกของทรงเหลี่ยมและมีอะตอมของอะลูมินา (Al) แทรกอยู่ภายใน การก่อตัวเป็นโมเลกุลจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไอออนิก รูปแบบโครงสร้างหน่วยพื้นฐานของอะลูมินาเป็นรูปทรงเหลี่ยมแปดหน้า (Alumina Octahedron) ดังแสดงในภาพที่ 2.10 การเชื่อมต่อของหน่วยพื้นฐานแร่ดินเหนียวทรงเหลี่ยมแปดหน้าของอะลูมินาจะใช้อะตอมร่วมกันกับหน่วยพื้นฐานข้างเคียง ทำให้เกิดโครงสร้างแผ่นที่เรียกว่าแผ่นทรงเหลี่ยมแปดหน้า (Octahedral Sheet) หรือแผ่นกิบบ์ไซต์ (Gibbsite Sheet) ดังแสดงในภาพที่ 2.11 โดยทั่วไปมักกำหนดให้แผ่นทรงเหลี่ยมแปดหน้ามีสัญลักษณ์เป็นรูปสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 2.10 หน่วยพื้นฐานแร่ดินเหนียวทรงเหลี่ยมแปดหน้าของอะลูมินา

ที่มา : Braja M. Das. 2008 : 3

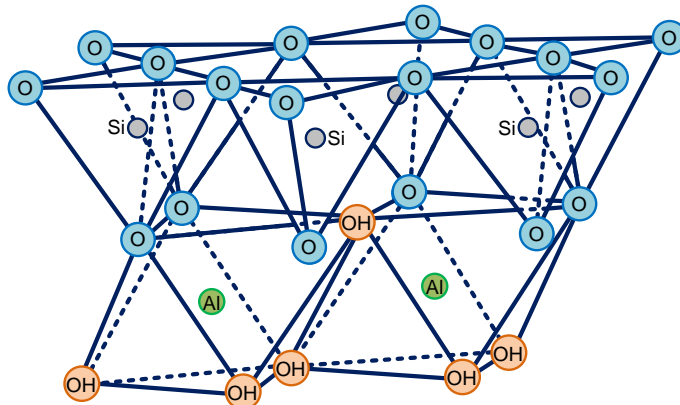


ภาพที่ 2.11 แผ่นทรงเหลี่ยมแปดหน้า

ที่มา : Braja M. Das. 2008 : 4

### 3. แผ่นซิลิกา-ทรงเหลี่ยมแปดหน้า

ในสภาพธรรมชาติของแร่ดินเหนียวจะไม่พบแผ่นซิลิกาอยู่ลำพังแต่มีกรรมตัวกับแผ่นทรงเหลี่ยมแปดหน้า โดยอะตอมของออกซิเจนตรงตำแหน่งยอดของทรงเหลี่ยมสี่หน้าจะเข้าไปแทนที่ไฮดรอกไซด์ไอออนในแผ่นทรงเหลี่ยมแปดหน้า กลายเป็นแผ่นซิลิกา-ทรงเหลี่ยมแปดหน้า (Silica-Octahedral) ดังแสดงในภาพที่ 2.12 จากลักษณะดังกล่าวแร่ดินเหนียวจะเกิดการซ้อนกันของแผ่นซิลิกากับแผ่นทรงเหลี่ยมแปดหน้าสลับกันไปมา แร่ดินเหนียวที่มีลักษณะเป็นแบบนี้ที่สำคัญมี 3 กลุ่มคือ เกาลินไนท์ มอนท์มอริลโลไนท์ และอิลไลต์ ตามลำดับ โครงสร้างของแร่ดินเหนียวแผ่นซิลิกา-ทรงเหลี่ยมแปดหน้ารูปแบบต่าง ๆ แสดงในภาพที่ 2.13



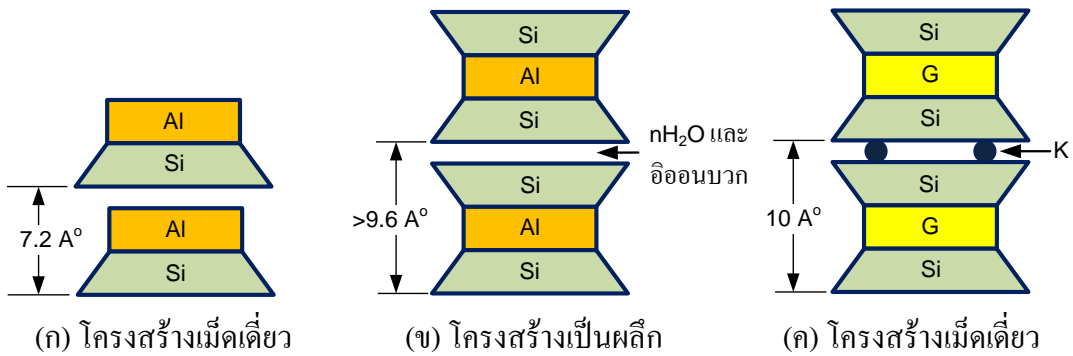




สัญลักษณ์ของแผ่นซิลิกา-ทรงเหลี่ยมแปดหน้า

ภาพที่ 2.12 แผ่นซิลิกา-ทรงเหลี่ยมแปดหน้า

ที่มา : Braja M. Das. 2008 : 4



ภาพที่ 2.13 ลักษณะโครงสร้างของแร่ดินเหนียว

ที่มา : Braja M. Das. 2010 : 29

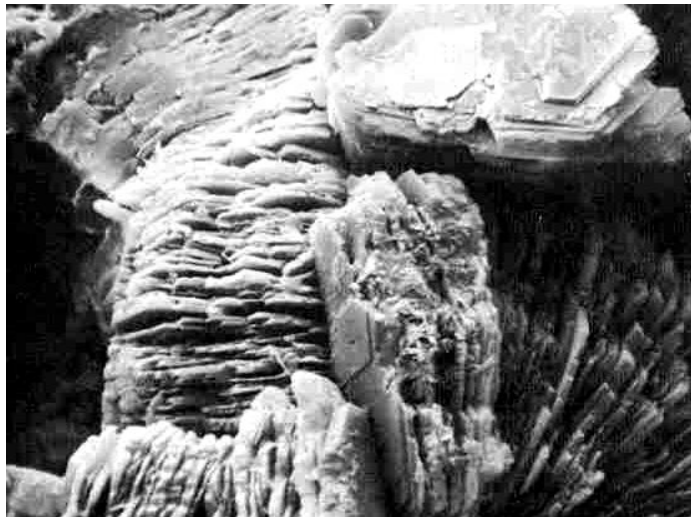
3.1 กลุ่มกาโอลินไนท์หรือเคโอลิไนต์ (Kaolinite) มีรากศัพท์จากภาษาจีนว่า เกาลิง (Kauling) เป็นชื่อของภูเขาในประเทศจีนมีสูตรเคมีคือ  $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$  โครงสร้างดินเหนียวกลุ่มกาโอลินไนท์เกิดจากการซ้อนกันของแผ่นซิลิกา-ทรงเหลี่ยมแปดหน้าโดยยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ดังแสดงในภาพที่ 2.13(ก) โดยปกติมักเกาะกันเป็นก้อนคล้ายขี้ผึ้งและสามารถป่นเป็นก้อนได้ มีทั้งชนิดเนื้อแน่นและชนิดเนื้อร่วน (Friable) ผลึกที่เป็นแผ่นจะมีสีขาวแบบมุกและมันวาวดังแสดงในภาพที่ 2.14 แต่ในบางกรณีอาจมีสีอื่นก็ได้ขึ้นอยู่กับมลทินที่ปะปน แร่นี้สังเกตเห็นได้ยากต้องทดสอบด้วยการสะท้อนแสง



### ภาพที่ 2.14 แร่เกลินไนท์

ที่มา : กรมทรัพยากรธรณี. ม.ป.ป.

คชินท์ สายอินทวงศ์ (2551) กล่าวว่าแหล่งแร่ดินเหนียวกลุ่มเกลินไนท์สามารถพบได้ในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย เช่น จังหวัดเชียงราย จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดลำพูน จังหวัดตาก จังหวัดสุโขทัย จังหวัดอุทัยธานี จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดลพบุรี จังหวัดปราจีนบุรี จังหวัดชลบุรี จังหวัดระยอง จังหวัดชุมพร จังหวัดสุราษฎร์ธานี จังหวัดภูเก็ต จังหวัดสงขลา จังหวัดยะลา และจังหวัดนราธิวาส เป็นต้น แหล่งแร่ดินเหนียวเกลินไนท์ในต่างประเทศที่พบเห็น เช่น จีน รัสเซีย เยอรมัน อังกฤษ ฝรั่งเศส และสหรัฐอเมริกา เป็นต้น ประโยชน์ของแร่ดินเหนียวเกลินไนท์คือ ใช้ทำอิฐก่อสร้าง กระเบื้องมุงหลังคา ท่อดินเหนียว อิฐทนไฟ เป็นวัตถุดิบเติมลงไปในกระดาช เพื่อเพิ่มความทึบแสง ความเหนียว และความเรียบ นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ เมื่อเปียกสามารถปั้นเป็นรูปร่างตามต้องการได้ง่าย แต่เมื่อโดนความร้อนสูงจะกลายเป็นของแข็งคล้ายแก้ว หากนำแร่ดินเหนียวเกลินไนท์มาทำให้ชื้นด้วยโอบอลต์ในเตาแล้วนำไปเผา ก็จะได้สีน้ำเงินซึ่งนิยมนำไปใช้ทำเป็นน้ำเคลือบผิวเครื่องปั้นดินเผา ภาพที่ 2.15 เป็นตัวอย่างแร่เกลินไนท์ที่กำลังขยาย 1,600 เท่า

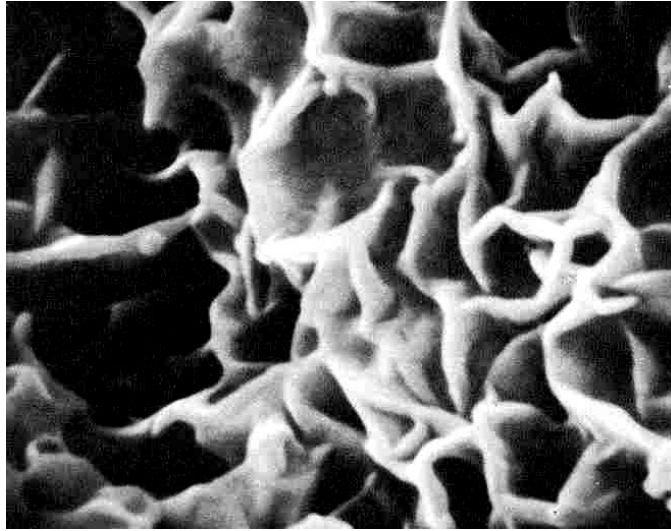


### ภาพที่ 2.15 แร่เกลินไนท์ขยาย 1,600 เท่า

ที่มา : Department of Environmental Sciences. 2012

3.2 กลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) หรือ สเมกไทต์ (Smectite) มีรากศัพท์จากชื่อสถานที่ในประเทศฝรั่งเศส โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ประกอบด้วยชั้นของแผ่นซิลิกาจำนวน 2 แผ่นและมีแผ่นทรงเหลี่ยมแปดหน้า อยู่ตรงกลางดังแสดงในภาพที่ 2.13(ข) สูตรเคมีคือ  $(OH)_4Al_4Si_8O_{20} \cdot nH_2O$  ในบางครั้งพบว่าซิลิกาอาจถูกแทนที่ด้วยอะลูมินาในรูปทรงเหลี่ยมสี่หน้าและอะลูมินาอาจถูกแทนที่ด้วยแมกนีเซียมและเหล็กในแผ่นทรงเหลี่ยมแปดหน้า แรงยึดระหว่างผลึกแร่ค่อนข้างน้อยเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vanderwaals Force) จึงทำให้น้ำแทรกเข้าไปได้ง่ายจนเกิดการบวมและปริมาตรขยายจากเดิมได้ถึง 6 เท่า แร่ดินเหนียวกลุ่มนี้โดยทั่วไปแปรสภาพมาจากหินภูเขาไฟ เช่น หินไรโอไลต์ (Rhyolites) หินแอนดีไซต์ (Andesite) และหินบะซอลต์ เป็นต้น แหล่งที่พบในยุโรปและทวีปอเมริกา เช่น อังกฤษ ฝรั่งเศส เยอรมนี อิตาลี รัสเซีย กรีซ สหรัฐอเมริกา แคนาดา และเม็กซิโก เป็นต้น ส่วนแหล่งอื่นที่พบเห็น เช่น แอฟริกาใต้ อินเดีย อาร์เจนตินา และญี่ปุ่น เป็นต้น สำหรับในประเทศไทยพบได้ที่จังหวัดจันทบุรี จังหวัดปราจีนบุรี จังหวัดลำปาง จังหวัดเลย จังหวัดอุดรธานี จังหวัดเชียงราย จังหวัดลพบุรี จังหวัดสระบุรี จังหวัดฉะเชิงเทรา และจังหวัดอุตรธานี เป็นต้น (ลชินท์ สายอินทวงศ์. 2551) ตัวอย่างดินกลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์อีกอย่างคือ เบนทอนไนต์ (Bentonite) เป็นดินที่มีการบวมตัวสูงถ้าสัมผัสกับน้ำ ชื่อของดินชนิดนี้มาจากสถานที่ ฟอर्टเบนทอน (Fort Benton) มลรัฐไวโอมิ่ง ประเทศสหรัฐอเมริกา มักใช้เบนทอนไนต์ในงานก่อสร้างเสาเข็มเจาะเพื่อป้องกันการพังทลายของหลุมเจาะ

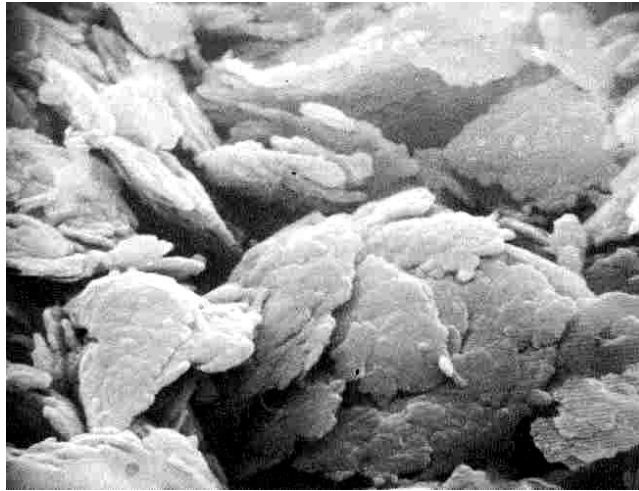
แร่ดินเหนียวกลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์นิยมนำไปใช้เป็นตัวพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ในผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ แร่ดินเหนียวกลุ่มนี้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ดิบ (Green Strength) และผลิตภัณฑ์หลังอบ (Dry Strength) ความแข็งแรงนี้มีความสำคัญกับอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่มีการเผาเพียงครั้งเดียว เนื่องจากผลิตภัณฑ์หลังจากการอบจะต้องมีผิวที่แข็งเพียงพอก่อนการตกแต่งลวดลายและการเคลือบผิว ปริมาณของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มเข้าไปในผลิตภัณฑ์เซรามิกส์นั้นไม่ควรใช้มากเนื่องจากแร่ชนิดนี้มีขนาดอนุภาคเล็กมากจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเปราะ นอกจากนั้นแร่ดินเหนียวกลุ่มนี้ยังสามารถใช้เป็นส่วนผสมของกระดาษ เครื่องสำอาง และยาได้อีกด้วย ภาพที่ 2.16 เป็นตัวอย่างแร่มอนต์มอริลโลไนต์ที่กำลังขยาย 18,000 เท่า (Department of Environmental Sciences. 2012)



ภาพที่ 2.16 แร่มอนต์มอริลโลไนต์ขยาย 18,000 เท่า

ที่มา : Department of Environmental Sciences. 2012

3.3 กลุ่มอิลไลต์ (Illite) สูตรเคมีคือ  $(OH)_4K_y(Al_4Fe_4Mg_4)(Si_{8-y}Al_y)O_{20}$  มีโครงสร้างคล้ายกลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์ วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา (ม.ป.ป. : 2-7) กล่าวว่าโครงสร้างอิลไลต์ประกอบด้วยกลุ่มชั้นของแผ่นซิลิกาจำนวน 2 แผ่นและมีแผ่นทรงเหลี่ยมแปดหน้าหรือกิบบ์ไซต์แทรกอยู่ตรงกลางดังแสดงในภาพที่ 2.13(ค) เมื่ออะตอมของซิลิกาถูกแทนที่ด้วยอะตอมของอะลูมิเนียมโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลึก (Isomorphous Substitution) จึงเกิดประจุลบบางหน่วยของซิลิกาที่เกาะกับประจุบวกของโปรแตสเซียมไอออน K จนเกิดการยึดเกาะระหว่างกลุ่ม โครงสร้างแร่ดินเหนียวกลุ่มอิลไลต์จะมีความแข็งแรงมากกว่ากลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์ โครงสร้างแร่ดินเหนียวกลุ่มอิลไลต์จะรวมกันมีขนาดใหญ่ทำให้ดูดซับน้ำได้น้อยและขยายตัวน้อย แร่ดินเหนียวกลุ่มนี้ไม่ค่อยถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมเหมือนกับสองกลุ่มแรก ภาพที่ 2.17 แสดงแร่อิลไลต์ที่กำลังขยาย 15,000 เท่า (THAI CERAMIC SOCIETY.COM. 2008)



ภาพที่ 2.17 แร่อลูไมต์ขยาย 15,000 เท่า

ที่มา : THAI CERAMIC SOCIETY.COM, 2008

### การทดสอบดินในทางวิศวกรรม

การทดสอบดินในทางวิศวกรรมเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของดินเพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ออกแบบ สิ่งก่อสร้างจะตั้งอยู่ได้อย่างมั่นคงหากก่อสร้างบนชั้นดินที่มีความแข็งแรงสามารถแบกรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย การที่จะทราบว่าดินตามธรรมชาติมีความมั่นคงแข็งแรงนั้นจำเป็นจะต้องทำการทดสอบเพื่อพิสูจน์ทราบข้อเท็จจริง นอกจากดินตามธรรมชาติแล้วดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพก็ควรทำการทดสอบด้วยเช่นกัน การที่จะได้มาซึ่งผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือจำเป็นที่จะต้องเก็บตัวอย่างดินอย่างถูกวิธี นอกจากนั้นยังต้องเลือกวิธีการทดสอบให้เหมาะสมกับประเภทของงาน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงขออธิบายการเจาะสำรวจและการทดสอบดินที่มักพบเห็นได้ทั่วไปซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. การเจาะสำรวจดิน

การเจาะสำรวจดินนิยมนำมาใช้ในการตรวจสอบลักษณะและคุณสมบัติของชั้นดินตามธรรมชาติ การเจาะสำรวจดินยังสามารถเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้อีกด้วย การกำหนดความลึกของหลุมเจาะจะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างด้านวิศวกรรม เช่น ความลึกหลุมเจาะควรมีค่าประมาณ 2-2.5 เท่าของระยะด้านแคบของสิ่งก่อสร้าง หรือมีความลึกประมาณ 0.5-2 เท่าของความสูงของเขื่อนและคันดินถม เป็นต้น การกำหนดระยะห่างและจำนวนหลุมเจาะสำรวจจะสัมพันธ์กับสภาพภูมิประเทศและพื้นที่ก่อสร้าง เช่น ความห่างระหว่างหลุมเจาะสำหรับงานอาคารควรมีระยะระหว่าง 40-60 m และความห่างระหว่างหลุมเจาะสำหรับงานถนนควรมีระยะระหว่าง 250-500 m เป็นต้น วิธีการเจาะสำรวจดิน

มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (พิชญา ทวีเลิศ. ม.ป.ป. : 1, วัฒนา ธรรมมงคล, วินิต ช่อวิเชียร. 2532 : 25-30 และ สถาพร คูวิจิตรจารุ. 2546 : 2-1-2-51)

1.1 วิธีการขุดบ่อทดสอบ (Trial Pits) เป็นการทดสอบดินโดยการใช้จอบ เสียม หรือ เครื่องจักรขุดเปิดหน้าดินเพื่อดูสภาพชั้นดินดังแสดงในภาพที่ 2.18 นอกจากนี้ยังสามารถเก็บ ตัวอย่างดิน โดยการขุดรอบก้อนดินแล้วเคลือบด้วยพาราฟิน (Parafin) เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ ความชื้น ขนาดดินตัวอย่างควรเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมประมาณ 20-30 cm ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ สามารถเก็บดินตัวอย่างได้เฉพาะที่ระดับดินไม่เกิน 6 m และไม่เหมาะกับพื้นที่ที่มีระดับน้ำใต้ดิน อยู่ใกล้ผิวดิน แต่ดินตัวอย่างที่ได้มีสภาพใกล้เคียงธรรมชาติ



ภาพที่ 2.18 วิธีการขุดบ่อทดสอบดิน

ที่มา : Maidstone Area Archaeological Group. n.d.

1.2 วิธีการเจาะสำรวจชั้นดินด้วยสว่านมือ (Hand Auger Boring) เป็นการเจาะสำรวจดินด้วยสว่านโดยใช้แรงคนหรือเครื่องจักรกล วิธีนี้สามารถเจาะสำรวจชั้นดินได้ลึกไม่เกิน 10 m และดินตัวอย่างที่ได้จะถูกรบกวนจากปลายสว่าน ข้อจำกัดของวิธีการเจาะสำรวจชั้นดินด้วยสว่านมือคือไม่เหมาะกับชั้นทรายร่วนและชั้นกรวดที่มีความแข็งมาก ภาพที่ 2.19 แสดงถึง เครื่องมือการเจาะสำรวจดินด้วยสว่านมือ

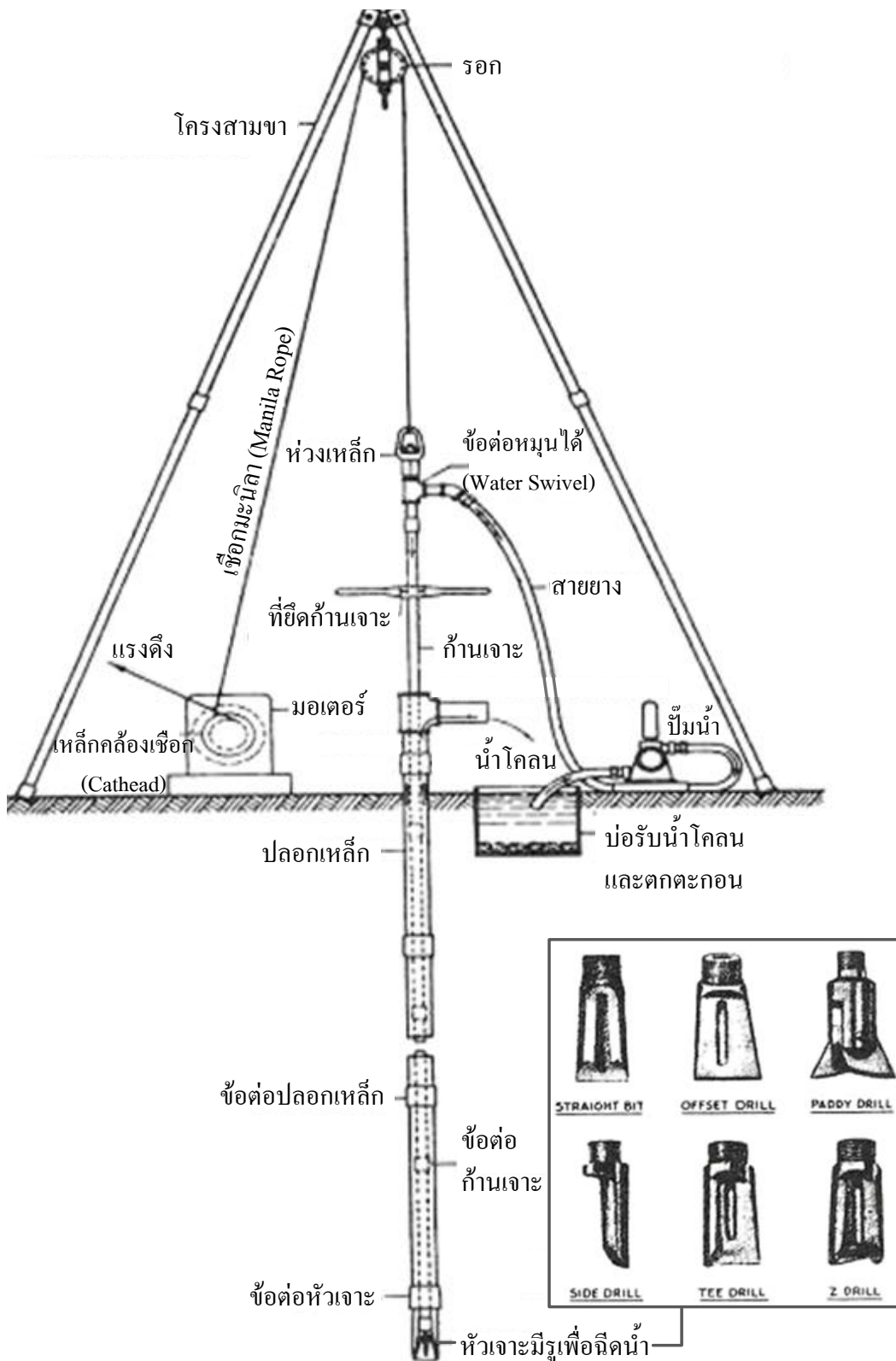




ภาพที่ 2.19 เครื่องมือการเจาะสำรวจดินด้วยสว่านมือ

ที่มา : Van Walt. 2013

1.3 วิธีการเจาะสำรวจชั้นดินแบบฉีดล้าง (Wash Boring) เป็นการเจาะสำรวจดินโดยการอัดน้ำแรงดันสูงผ่านไปตามก้านเจาะและพ่นออกที่ปลายหัวเจาะ (Chopping Bit) น้ำแรงดันสูงจะกัดเซาะชั้นดินและพัดพาเอาน้ำโคลนที่มีดินผสมอยู่ขึ้นมาด้านบนผ่านผนังหลุมเจาะ น้ำโคลนที่ไหลขึ้นมาจากหลุมจะไหลต่อไปยังบ่อตกตะกอน โดยตัวอย่างดินเม็ดหยาบจะถูกเก็บจากส่วนที่ข้างบนตะแกรงและตัวอย่างดินเม็ดละเอียดจะถูกเก็บจากการนำน้ำโคลนไปทิ้งแดดให้แห้ง การเจาะสำรวจชั้นดินวิธีนี้สามารถเจาะได้ลึกถึงระดับ 80-100 m ข้อดีของการเจาะสำรวจชั้นดินแบบฉีดล้างคือใช้แรงงานน้อยและเจาะสำรวจได้ลึก แต่มีข้อด้อยคือไม่สามารถเจาะผ่านชั้นหินดานและดินตัวอย่างมีปริมาณความชื้นสูงจากแรงดันน้ำ นอกจากนั้นยังมีข้อควรระวังคือการพังทลายของผนังหลุมเจาะกรณีเจาะผ่านชั้นดินอ่อน วิธีการป้องกันหลุมเจาะพังสามารถทำได้โดยการตอกปลอกเหล็กหรือการใช้สารละลายเบนทอไนต์ ภาพที่ 2.20 แสดงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเจาะสำรวจชั้นดินแบบฉีดล้าง



ภาพที่ 2.20 เครื่องมือการเจาะสำรวจดินแบบฉีดล้าง

ที่มา : Denich Soil Engineering Co.,Ltd. 2010

1.4 วิธีการเจาะสำรวจชั้นดินแบบเจาะปั่น (Rotary Drilling) เป็นการเจาะสำรวจโดยใช้เครื่องจักรกลในการหมุนและกดให้หัวเจาะจมลงไปในชั้นดิน ชนิดของหัวเจาะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ หัวเจาะตัด (Cutting Bit) และหัวเจาะเก็บตัวอย่าง (Coring Bit) โดยที่ปลายหัวเจาะมีรูสำหรับฉีดน้ำโคลนเพื่อหล่อลื่นและลดความร้อนที่หัวเจาะ การเจาะสำรวจวิธีนี้แตกต่างจากการเจาะแบบฉีดล้างตรงที่หัวเจาะมีความแข็งแรงมากและสามารถเจาะสำรวจชั้นดินแข็งได้ เช่น ชั้นดินดาน ดินลูกรัง ทรายปนกรวด หินผุ และชั้นหินแข็ง เป็นต้น กรณีที่ต้องเจาะผ่านชั้นหินแข็งอาจต้องใช้หัวเจาะที่ทำจากเพชร ความแตกต่างของชั้นดินสามารถสังเกตได้จากอัตราการจมตัวของก้านเจาะ (นันทพล รัตนมณี, 2554 : 18) ภาพที่ 2.21 เป็นตัวอย่างเครื่องจักรกลที่ใช้ในการเจาะสำรวจชั้นดินแบบเจาะปั่น



ภาพที่ 2.21 เครื่องจักรกลที่ใช้ในการเจาะสำรวจดินแบบเจาะปั่น

ที่มา : KLR Universal, 2009

## 2. การทดสอบดินให้ห้องปฏิบัติการ

ดินตัวอย่างที่ถูกเก็บจากแหล่งดินตามธรรมชาติส่วนหนึ่งจะถูกนำมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบคุณสมบัติดินในห้องปฏิบัติการมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การทดสอบ ตัวอย่างการทดสอบดินที่มักถูกอ้างอิงในงานก่อสร้างมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (วัฒนาธรรมมงคล และ วินิต ช่อวิเชียร, 2532 : 38-55, สถาพร คุวิจิตรจารุ, 2546 : 2-12-2-20 และ Braja M. Das, 2010 : 35-124)

2.1 การทดสอบสิ่งปนเปื้อนในทราย เป็นการทดสอบเพื่อหาสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในทรายซึ่งถือได้ว่าเป็นดินเม็ดหยาบที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในการก่อสร้าง ทรายจากแหล่งต่าง ๆ จะมีสิ่งปนเปื้อนมากน้อยแตกต่างกัน สิ่งปนเปื้อนไม่ว่าจะเป็นอินทรีย์วัตถุ โคลนหรือดินเหนียวจะทำให้คุณภาพของทรายลดลง วิธีการทดสอบสิ่งปนเปื้อนในทรายเริ่มต้นจากการนำทรายใส่ในขวดแก้วรูปทรงกระบอกสูงประมาณ 10-15 cm มีความจุประมาณ 200 ml ปริมาณทรายที่ใช้ประมาณครึ่งหนึ่งของความจุขวด นำน้ำที่ผสมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) ด้วยอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ซ่อนชาต่อน้ำหนึ่งลิตรเทใส่ลงในขวดแก้ว ให้ปริมาณสารละลายอยู่สูงกว่าทรายประมาณ 2.5 cm เขย่าแล้วทิ้งไว้ประมาณ 3 ชั่วโมง จากนั้นสังเกตความหนาของชั้นตะกอนและสีของสารละลาย ถ้าทรายมีสิ่งปนเปื้อนอยู่มากก็จะมองเห็นเป็นชั้นตะกอนอยู่เหนือชั้นทราย วัดความหนาของชั้นตะกอนเพื่อหาร้อยละการปนเปื้อน หรือถ้าหากมีอินทรีย์วัตถุปนอยู่มากสารละลายก็จะมีสีเข้มขึ้น เมื่อเทียบสีของสารละลายกับแถบสีมาตรฐานก็จะสามารถจำแนกระดับความปนเปื้อนได้ดังแสดงในภาพที่ 2.22 อย่างไรก็ตามทรายที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างควรมีความหนาของชั้นตะกอนเพียงเล็กน้อยและมีสีของสารละลายอยู่ในช่วง 1-2 ของแถบสีมาตรฐาน

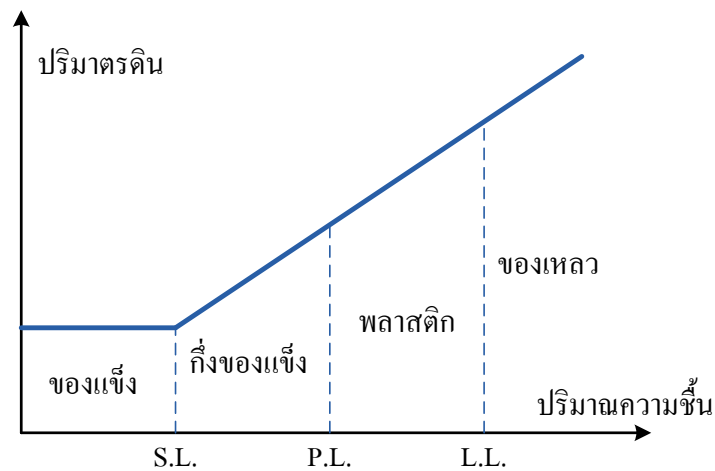


ภาพที่ 2.22 อุปกรณ์หาสิ่งปนเปื้อนในทราย

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

2.2 การทดสอบขีดจำกัดความชื้นเหลว (Consistency Limits) เป็นการหาสถานะของดินที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นในดิน การทดสอบนี้ถูกศึกษาโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนชื่อ อัลเบิร์ต มอริตซ์ อัตเตเบอร์ก (Albert Mauritz Atterberg) ในปี ค.ศ. 1911 เขาได้ศึกษาดินเม็ดละเอียดและพบว่าดินเหนียวจะมีคุณสมบัติด้านการยึดเกาะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณ

ความชื้นที่อยู่ในดิน เช่น ดินมีสถานะเป็นของเหลว (Liquid State) คือดินที่มีความชื้นมากจนทำให้อนุภาคเม็ดดินอยู่ห่างกันคล้ายของเหลวชั้น เมื่อปริมาณความชื้นลดลงดินจะมีสถานะพลาสติก (Plastic State) คือสามารถปั้นเป็นรูปต่าง ๆ ได้โดยไม่มีรอยแตกร้าว เมื่อปริมาณความชื้นลดลงอีกดินก็จะมีสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid State) คือดินที่แห้งหรือปั้นได้ยากมักจะมีรอยแตกร้าวขณะที่ปั้นและเปราะ ส่วนดินจะมีสถานะเป็นของแข็ง (Solid State) เมื่อมีปริมาณความชื้นเพียงเล็กน้อย ต่อมาในปี ค.ศ. 1932 วิศวกรชาวออสเตรียชื่อ อาเธอร์ คาสซาแกรนด์ (Arthur Casagrande) ได้พัฒนาเครื่องมือเพื่อทดสอบหาจุดแบ่งสถานะของดินเพื่อใช้ในงานด้านวิศวกรรม โดยเรียกจุดแบ่งสถานะของดินนี้ว่าขีดจำกัดความชื้นเหลวมีอยู่ 3 จุด คือ ขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit : L.L.) เป็นปริมาณความชื้นในดินที่จุดซึ่งดินเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวเป็นพลาสติก ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit : P.L.) เป็นปริมาณความชื้นในดินที่จุดซึ่งดินเปลี่ยนแปลงสถานะจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง หรือปริมาณความชื้นที่สามารถคลึงดินให้เป็นเส้นกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 mm โดยไม่เกิดรอยแตกที่ผิว ขีดจำกัดหดตัว (Shrinkage Limit : S.L.) เป็นปริมาณความชื้นในดินที่จุดซึ่งดินเปลี่ยนแปลงสถานะจากกึ่งของแข็งเป็นของแข็ง แผนภูมิสถานะของดินตามปริมาณความชื้นแสดงในภาพที่ 2.23 รายละเอียดวิธีการหาขีดจำกัดความชื้นเหลวของดินมีดังต่อไปนี้ (นันทพล รัตนมณี. 2554: 3, วัฒนา ธรรมมงคล และ วินิต ช่อวิเชียร. 2532 : 38-55 และ Braja M. Das. 2008 : 73-84)



ภาพที่ 2.23 แผนภูมิแสดงสถานะของดินตามปริมาณความชื้น

ที่มา : Braja M. Das. 2010 : 81

2.2.1 การทดสอบหาพิคต์เหลวของดินแบบคาสซาแกรนด์มาตรฐาน ASTM D4318-84 เป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องเคาะดิน (Liquid Limit Device) โดยฐานทำจากวัสดุไมกาต้า (Micarta) ซึ่งเป็นวัสดุเชิงประกอบจำพวกโพลีเมอร์มีขนาดกว้าง 125 mm ยาว 150 mm หนา 50 mm และมีกระโถนเหล็กยึดติดกับแกนหมุน ดังแสดงในภาพที่ 2.24 ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการนำดินขึ้นมาปาดใส่ในกระโถนเหล็ก จากนั้นปาดดินออกเป็นสองส่วน



โดยใช้มีดปาดร่อง (Grooving Tool) แล้วหมุนแกนเพื่อให้กระแทกขึ้นประมาณ 10 mm และตบกระทบฐานด้วยอัตราเร็ว 120 ครั้งต่อนาที ชิดจำกัดเหลวคือปริมาณความชื้นที่ดินไหลมาชนกัน เป็นระยะ 13 mm ที่จำนวนการตบกระทบ 25 ครั้ง



ภาพที่ 2.24 ชุดทดสอบชิดจำกัดเหลวของดิน

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

2.2.2 การทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกเป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณความชื้นในดินที่สามารถปั้นเป็นเส้นขนาดเล็กได้ตามมาตรฐาน ASTM D424-59 การทดสอบวิธีนี้เริ่มจากการนำดินที่มีความชื้นแตกต่างกันมาปั้นเป็นเส้นยาวทรงกระบอกด้วยนิ้วมือหรือฝ่ามือบนแผ่นกระจก พยายามปั้นดินตัวอย่างให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3.2 mm และมีขนาดสม่ำเสมอ เมื่อดินเริ่มมีรอยแตกหรือเริ่มหักเป็นท่อนจึงนำดินที่ได้ใส่กระป๋องแล้วปิดฝาให้สนิทเพื่อป้องกันความชื้นระเหย จากนั้นนำดินในกระป๋องไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักดินแห้งและนำผลต่างของน้ำหนักน้ำที่หายไปมาคำนวณหาปริมาณความชื้นซึ่งก็คือค่าพิกัดพลาสติก ภาพที่ 2.25 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติกของดิน





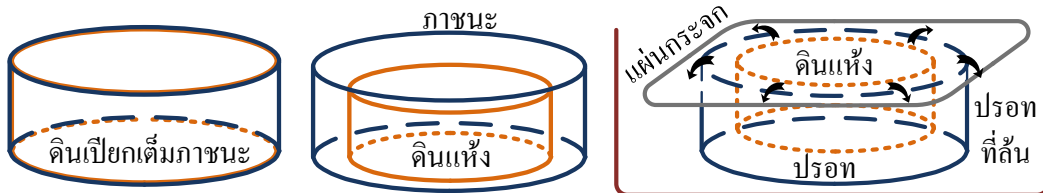
(ก) ชุดทดสอบขีดจำกัดพลาสติกของดิน

(ข) เตาอบปรับอุณหภูมิ

ภาพที่ 2.25 เครื่องมือทดสอบขีดจำกัดพลาสติกของดิน

ที่มา : จีรวัดน์ วิมุติสุขวิริยา. 2558

2.2.3 การทดสอบหาขีดจำกัดหดตัวเป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณความชื้นที่ดินเปลี่ยนจากสถานะกึ่งของแข็งเป็นของแข็งตามมาตรฐาน ASTM D4943-08 มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้คือ นำดินตัวอย่างมาผสมน้ำให้เข้ากันจนมีความชื้นมากกว่าค่าพิคต์เหลว จากนั้นนำดินตัวอย่างใส่ในภาชนะที่ชโลมน้ำมันไว้แล้วโดยพยายามไล่ฟองอากาศภายในออกให้หมด ดังแสดงในภาพที่ 2.26(ก) ชั่งน้ำหนักภาชนะที่บรรจุดินตัวอย่างจนเต็มจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดินที่ถูกอบจะหดตัวดังแสดงในภาพที่ 2.26(ข) จากนั้นนำก้อนดินแห้งและภาชนะมาชั่งน้ำหนัก ทำการทดสอบเพื่อหาปริมาตรก้อนดินแห้งโดยการแทนที่ด้วยปรอทดังแสดงในภาพที่ 2.26(ค) หาค่าขีดจำกัดหดตัวจากผลต่างระหว่างปริมาณความชื้นของดินก่อนอบและหลังอบ



(ก) ดินเปียกในภาชนะ

(ข) ดินในภาชนะหลังอบ

(ค) การหาปริมาตรดินแห้ง

ภาพที่ 2.26 การทดสอบหาขีดจำกัดการหดตัวของดิน

ที่มา : สถาพร คูวิจิตรจารุ. 2546 : 5-21

2.3 การจำแนกดินตามขนาดอนุภาคเม็ดดิน (Grain Size Analysis) มาตรฐาน ASTM D422 เป็นวิธีการจำแนกดินในทางวิศวกรรมโดยแบ่งวิธีการทดสอบไปตามขนาดอนุภาคเม็ดดิน

ดังรายละเอียดต่อไปนี้ (วัฒนา ชรรวมงคล และ วินิต ช่อวิเชียร. 2532 : 38-43, สถาพร ภูวิจิตรจารุ. 2545 : 3-22-3-31 และ Braja M. Das. 2008 : 35-44)

2.3.1 การจำแนกขนาดอนุภาคดินเม็ดหยาบโดยใช้ตระแกรงร้อน ขั้นตอนการทดสอบการจำแนกอนุภาคดินเม็ดหยาบมีดังนี้คือ นำดินตัวอย่างที่แห้งมาทุบโดยใช้ค้อนยาง เพื่อให้อนุภาคเม็ดดินแยกออกจากกัน เตรียมตะแกรงร้อนมาตรฐาน ASTM E11 ดังแสดงในภาพที่ 2.27(ก) โดยเรียงลำดับจากตะแกรงที่มีช่องขนาดใหญ่ไปหาช่องขนาดเล็กและตามด้วยถาดรองเป็นชั้นสุดท้าย จำนวนตะแกรงและขนาดตะแกรงที่ใช้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในมาตรฐานการทดสอบ เช่น มาตรฐาน ASTM กำหนดให้ใช้ตะแกรงร้อนเบอร์ 3/4 นิ้ว ขนาดช่อง 19 mm เบอร์ 4 ขนาดช่อง 4.75 mm เบอร์ 10 ขนาดช่อง 2.00 mm เบอร์ 40 ขนาดช่อง 0.425 mm เบอร์ 100 ขนาดช่อง 0.150 mm และเบอร์ 200 ขนาดช่อง 0.075 mm ตามลำดับ นำดินตัวอย่างที่ซังน้ำหนักแล้วใส่ในตะแกรงร้อนและปิดฝา นำดินไปร่อนผ่านตะแกรงร้อนด้วยเครื่องเขย่าใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที จากนั้นนำดินที่ค้างบนตะแกรงแต่ละเบอร์ไปซังน้ำหนักเพื่อหาค่าร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรง ภาพที่ 2.27(ข) แสดงเครื่องเขย่าตะแกรงร้อน



(ก) ตะแกรงร้อนมาตรฐาน



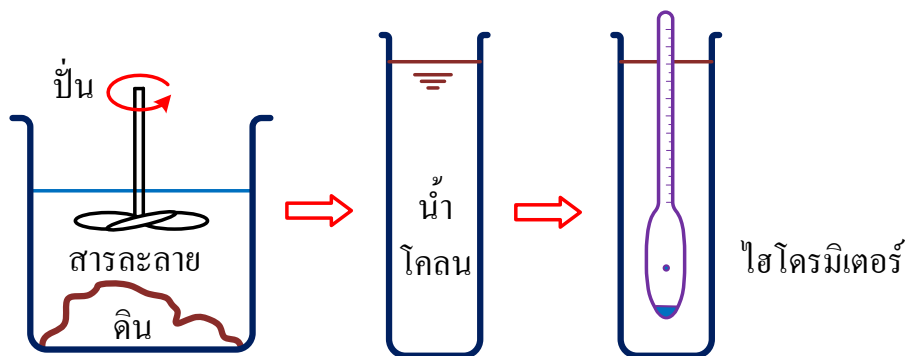
(ข) เครื่องเขย่าตะแกรงร้อน

ภาพที่ 2.27 อุปกรณ์การจำแนกขนาดอนุภาคดินเม็ดหยาบโดยใช้ตระแกรงร้อน

ที่มา : จีรวัดน์ วิมุติสุขวิริยา. 2558

2.3.2 การจำแนกขนาดอนุภาคดินเม็ดละเอียดเป็นการทดสอบดินเม็ดละเอียดโดยใช้เครื่องมือวัดความหนาแน่นของเหลวที่เรียกว่า ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer) โดยดินที่ใช้

เป็นดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 หรือดินที่มีขนาดเล็กกว่า 0.075 mm ขั้นตอนการจำแนกขนาดอนุภาคดินเม็ดละเอียดด้วยไฮโดรมิเตอร์มีดังนี้คือ ทำการเตรียมสารละลายซึ่งเป็นส่วนผสมของโซเดียมเฮกซะเมตราฟอสเฟต (Sodium Hexa Metaphosphate) ความเข้มข้นร้อยละ 4 กับน้ำกลั่น นำดินตัวอย่างประมาณ 50 g มาผสมกับสารละลายที่เตรียมไว้แล้วประมาณ 125 cm<sup>3</sup> จากนั้นปั่นส่วนผสมจนเป็นน้ำโคลนดังแสดงในภาพที่ 2.28 เมื่อส่วนผสมกลายเป็นน้ำโคลนแล้วจึงนำไปใส่กระบอกแก้วเติมน้ำและคนให้เป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้งจนมีปริมาตรสุทธิ 1,000 cm<sup>3</sup> ทำการจุ่มไฮโดรมิเตอร์ชนิดอ่านค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 0.995-1.030 ลงในน้ำโคลนเพื่ออ่านค่าระยะจมตัว จดบันทึกการจมตัวของไฮโดรมิเตอร์ตามระยะเวลาที่กำหนดซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการตกตะกอนของน้ำโคลน นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาขนาดอนุภาคดินเม็ดละเอียดต่อไป

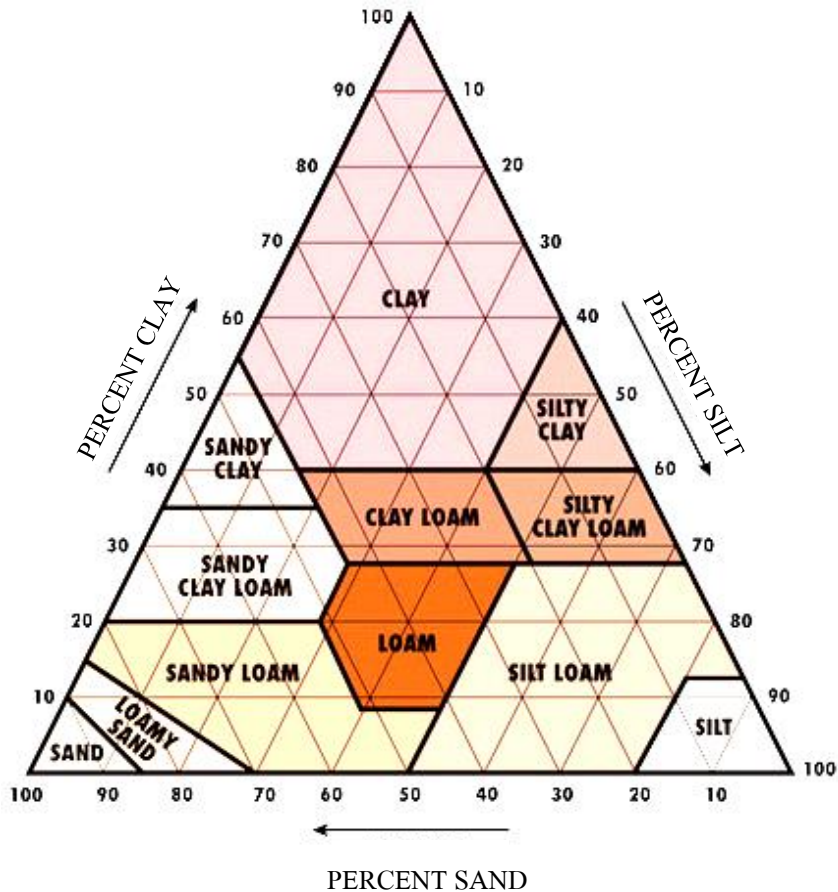


ภาพที่ 2.28 การหาขนาดดินเม็ดละเอียดโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์

ที่มา : สถาพร ภูวิจิตรจารุ. 2545 : 3-30

เมื่อได้ผลการจำแนกขนาดอนุภาคดินทั้งเม็ดหยาบและเม็ดละเอียดแล้วก็จะสามารถจำแนกประเภทของดินตัวอย่างทดสอบจากการเปรียบเทียบกับข้อกำหนดในมาตรฐานต่าง ๆ เช่น มาตรฐานกระทรวงเกษตรแห่งสหรัฐอเมริกา (USDA) ได้กำหนดการจำแนกประเภทของดินโดยใช้แผนภาพรูปสามเหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 2.29 ภายในแผนภาพจะจำแนกดินออกเป็น 12 กลุ่ม ได้แก่ ดินเหนียว (Clay) ดินตะกอน (Silt) ดินทราย (Sand) ดินเหนียวปนดินทราย (Sandy Clay) ดินเหนียวปนดินตะกอน (Silty Clay) ดินทรายเป็นอินทรีย์วัตถุ (Loamy Sand) ดินอินทรีย์วัตถุปนดินเหนียว (Clay Loam) ดินอินทรีย์วัตถุปนดินทรายและดินเหนียว (Sandy Clay Loam) ดินอินทรีย์วัตถุปนดินตะกอนและดินเหนียว (Silty Clay Loam) ดินอินทรีย์วัตถุปนทราย (Sandy Loam) ดินอินทรีย์วัตถุปนดินตะกอน (Silt Loam) และดินอินทรีย์วัตถุ (Loam) ตามลำดับ ตัวอย่างการจำแนกดินตามมาตรฐาน USDA เช่น ดินตัวอย่าง A มีปริมาณดินเหนียวร้อยละ 70 ปริมาณดินตะกอนร้อยละ 10 และปริมาณดินทรายเป็นร้อยละ 20 เมื่อ

นำไประบุตำแหน่งลงในแผนภาพจะสรุปได้ว่าดินตัวอย่าง A เป็นดินเหนียว หรือดินตัวอย่าง B มีปริมาณดินเหนียวร้อยละ 40 ปริมาณดินตะกอนร้อยละ 10 และปริมาณดินทรายร้อยละ 50 เมื่อนำไประบุตำแหน่งลงในแผนภาพจะสรุปได้ว่าดินตัวอย่าง B เป็นดินเหนียวปนดินทราย เป็นต้น



ภาพที่ 2.29 การจำแนกดินมาตรฐาน USDA

ที่มา : Guardair Corporation. 2013

2.4 การทดสอบการบดอัดดิน (Compaction Test of Soil) เป็นการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่นดินจากการบดอัดด้วยก้อนเหล็กตามมาตรฐาน ASTM D698 (วัฒนา ชรรวมงคล และ วินิต ช่อวิเชียร. 2532 : 308-316 และ Braja M. Das. 2008 : 114-124) วิธีนี้นิยมใช้ทดสอบดินเม็ดหยาบที่ใช้ในงานก่อสร้างชั้นรองพื้นถนนมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้คือ นำดินตัวอย่างที่แห้งมาทุบโดยใช้ก้อนยางเพื่อให้อนุภาคเม็ดดินแยกออกจากกัน ควรใช้ดินตัวอย่างที่มีขนาดเม็ดดินเล็กกว่า 19 mm นำดินใส่ในแบบหล่อดินเพื่อทำการบดอัดด้วยก้อนเหล็ก ภาพที่ 2.30 แสดงเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการบดอัดดิน การบดอัดแบ่งเป็น 2 วิธีคือการบดอัดแบบมาตรฐานและการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน โดยที่การบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Compaction) จะใช้ก้อนหนัก 5.5 lb ระยะตกกระทบ 12 นิ้ว หากเลือกใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว จะ

บดอัด 3 ชั้น ๆ ละ 25 ครั้ง หรือถ้าใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว จะบดอัด 3 ชั้น ๆ ละ 56 ครั้ง สำหรับการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Compaction) จะใช้ค้อนหนัก 10 lb ระยะตกกระทบ 18 นิ้ว หากเลือกใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว จะบดอัด 5 ชั้น ๆ ละ 25 ครั้ง หรือถ้าเลือกใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว จะบดอัด 5 ชั้น ๆ ละ 56 ครั้ง ภาพที่ 2.31(ก) แสดงการใช้ค้อนบดอัดดินในแบบหล่อตามจำนวนครั้งที่กำหนด เมื่อบดอัดดินเสร็จให้ถอดปลอกแบบหล่อออกแล้ว ปาดดินให้เรียบเสมอปากแบบหล่อเพื่อนำไปชั่งน้ำหนักดังแสดงในภาพที่ 2.31(ข) และ 2.31(ค) ตามลำดับ นำดินในแบบหล่อไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อหาปริมาณความชื้น เพิ่มความชื้นให้ดินตัวอย่างและทดสอบในลักษณะเดียวกัน จนกว่าน้ำหนักดินในแบบหล่อจะลดลง คำนวณหาความหนาแน่นดินแห้งที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้น นำผลการคำนวณความหนาแน่นดินแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมต่อไป



ภาพที่ 2.30 เครื่องมือทดสอบการบดอัดดิน

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558





(ก) การใช้ค้อนบดอัดดินในแบบหล่อตามจำนวนครั้งที่กำหนด




(ข) การปาดดินให้เรียบเสมอแบบหล่อ



(ค) การชั่งน้ำหนักดินในแบบหล่อเพื่อนำไปหาความหนาแน่น

ภาพที่ 2.31 วิธีทดสอบการบดอัดดิน

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิทยา. 2558



**ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ สาขาวิชาเทคโนโลยีการก่อสร้าง มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์**

การทดสอบ : การทดสอบการบดอัด (Compaction Test) วันที่ทดสอบ : 30 เมษายน 2556

โครงการ : ก่อสร้างอาคารเรียนคณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

สถานที่ก่อสร้าง : มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.บุรีรัมย์

วิธีการบดอัด : แบบมาตรฐาน (Standard Compaction)

ผู้ว่าจ้าง : มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

แหล่งดิน : ชั้นดินในสถานที่ก่อสร้างอาคาร

ผู้รับจ้าง : ห้างหุ้นส่วนจำกัด แสงฟ้าก่อสร้าง

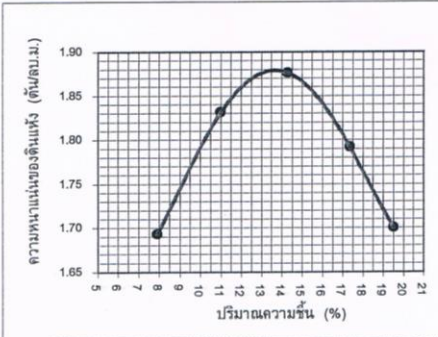
ลักษณะดิน : ดินเม็ดละเอียดปนทรายสีน้ำตาล

ผู้ทดสอบ : นายอานนท์ สุรพล

(นร-1)

| Compaction                   |                                   |          |          |          |          |
|------------------------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| ลำดับการทดสอบ                |                                   | 1        | 2        | 3        | 4        |
| น้ำหนักดินเปียก + แบบหล่อดิน | (กรัม, g)                         | 5278.00  | 5473.00  | 5577.00  | 5538.00  |
| น้ำหนักแบบหล่อดิน            | (กรัม, g)                         | 3557.000 | 3557.000 | 3557.000 | 3557.000 |
| น้ำหนักดินเปียก              | (กรัม, g)                         | 1721.00  | 1916.00  | 2020.00  | 1981.00  |
| ปริมาตรแบบหล่อดิน            | (ลบ.ซม., cm <sup>3</sup> )        | 942.21   | 942.21   | 942.21   | 942.21   |
| ความหนาแน่นของดินเปียก       | (กรัม/ลบ.ซม., g/cm <sup>3</sup> ) | 1.83     | 2.03     | 2.14     | 2.10     |

| Water Content          |                                   |        |        |       |        |
|------------------------|-----------------------------------|--------|--------|-------|--------|
| หมายเลขภาชนะ           |                                   | BH1-1  | BH1-2  | BH1-3 | BH1-4  |
| ดิน + ภาชนะ            | (กรัม, g)                         | 124.33 | 136.90 | 81.23 | 114.07 |
| น้ำหนักดินแห้ง + ภาชนะ | (กรัม, g)                         | 117.07 | 125.80 | 74.20 | 100.90 |
| น้ำหนักน้ำ             | (กรัม, g)                         | 7.26   | 11.10  | 7.03  | 13.17  |
| น้ำหนักภาชนะ           | (กรัม, g)                         | 25.07  | 25.03  | 24.90 | 25.03  |
| น้ำหนักดินแห้ง         | (กรัม, g)                         | 92.00  | 100.77 | 49.30 | 75.87  |
| ปริมาณความชื้นในดิน    | (เปอร์เซ็นต์, %)                  | 7.89   | 11.02  | 14.27 | 17.36  |
| ความหนาแน่นของดินแห้ง  | (กรัม/ลบ.ซม., g/cm <sup>3</sup> ) | 1.69   | 1.83   | 1.88  | 1.79   |
| ความหนาแน่นของดินแห้ง  | (ตัน/ลบ.ม., t/m <sup>3</sup> )    | 1.69   | 1.83   | 1.88  | 1.79   |



**รับรองเฉพาะตัวอย่างทดสอบที่เตรียมเท่านั้น**

**ข้อมูลเพิ่มเติม**

| หมายเลขแบบหล่อดิน        | C-1 | เส้นผ่านศูนย์กลางแบบหล่อดิน(ซม.,cm) |       |       |        |
|--------------------------|-----|-------------------------------------|-------|-------|--------|
| หมายเลขค้อนบดอัด         | H-2 | 1                                   | 2     | 3     | เฉลี่ย |
| ระยะตก (นิ้ว)            | 18  | 10.04                               | 10.04 | 10.05 | 10.04  |
| จำนวนชั้นที่บดอัด        | 5   | ความสูงแบบหล่อดิน (ซม., cm)         |       |       |        |
| จำนวนครั้งบดอัดต่อชั้น   | 25  | 1                                   | 2     | 3     | เฉลี่ย |
| น้ำหนักค้อนบดอัด (ปอนด์) | 10  | 11.84                               | 11.91 | 11.93 | 11.89  |

พลังงานที่บดอัด = 56250 ฟุต-ปอนด์/ลบ.ฟุต

สรุปผลการทดสอบ :

ความหนาแน่นของดินแห้งสูงสุด = 1.87 ตัน/ลบ.ม.

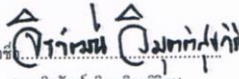
ความชื้นที่ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด = 13.59%

นายอานนท์ สุรพล

(นายอานนท์ สุรพล)

ผู้ทดสอบ


30 เม.ย. 56



(นายจิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา)

วิศวกรโยธา เลขทะเบียน กย. 25423

30 เม.ย. 56



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รักษานันท์ รักษาณชัย)

คณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

30 เม.ย. 2556

หมายเหตุ : ผลการทดสอบนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างดินที่สาขาวิชาเทคโนโลยีการก่อสร้าง มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ได้ทำการทดสอบเท่านั้น

ภาพที่ 2.32 การคำนวณความหนาแน่นดินจากการบดอัด

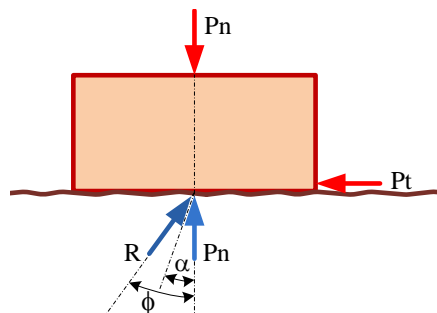
ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2556 : 1

ภาพที่ 2.32 เป็นตัวอย่างผลการทดสอบความหนาแน่นดินด้วยวิธีการบดอัดแบบมาตรฐาน โครงการก่อสร้างอาคารเรียนคณะครุศาสตร์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ (จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2556 : 1-20) ผลที่ได้ประกอบด้วยความหนาแน่นดินแห้งสูงสุดของดินที่นำมา



ทดสอบซึ่งมีค่า  $1.87 \text{ t/m}^3$  และมีปริมาณความชื้นเหมาะสมที่ร้อยละ 13.5 ค่าทั้งสองหาได้จากการประมาณค่าสูงสุดที่ได้จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและปริมาณความชื้นซึ่งมีรูปร่างคล้ายระฆังคว่ำ

2.5 การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังของดิน (Soil Strength Test) เป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติการต้านทานแรงของดิน วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร (2532 : 140-154) กล่าวว่าดินส่วนใหญ่ที่อยู่ภายใต้แรงกระทำมักเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน กำลังเฉือนของดินแปรเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบมากมายทั้งชนิดและสภาพของดิน แต่องค์ประกอบที่สำคัญต่อกำลังเฉือนของดินคือ แรงเสียดทานภายในระหว่างผิวสัมผัสเม็ดดิน (Internal Friction) และแรงเหนียวระหว่างอนุภาคเม็ดดิน (Cohesion) มานะ อภิพัฒนมนตรี (2543 : 65-88) ได้กล่าวเสริมว่าดินเป็นวัสดุที่คุณสมบัติด้านกำลังแรงเฉือนที่ดี ปริมาณสัดส่วนกำลังเฉือนของดินแปรผันตรงกับปริมาณดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด และได้อธิบายเพิ่มเติมอีกว่าการหาค่ากำลังเฉือนที่เกิดจากแรงเสียดทานอาศัยหลักการพื้นฐานของความเสียดทานระหว่างวัตถุที่สัมผัสกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.33



ภาพที่ 2.33 แผนภูมิแสดงสถานะของดินตามปริมาณความชื้น

ที่มา : มานะ อภิพัฒนมนตรี. 2543 : 65

จากภาพอธิบายได้ว่าเมื่อมีแรง  $P_n$  กระทำกับวัตถุในแนวตั้งฉากกับระนาบสัมผัสและถ้าพยายามออกแรงผลัก  $P_t$  เพื่อให้วัตถุเคลื่อนที่ไปบนระนาบสัมผัสพบว่า เมื่อแรงผลัก  $P_t$  มีค่าเป็นศูนย์แรงปฏิกิริยาตั้งฉากกับพื้นระนาบยังคงมีค่าเท่ากับ  $P_n$  และมุมเอียง (Angle of Obliquity :  $\alpha$ ) มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อเพิ่มแรงผลัก  $P_t$  จะทำให้เกิดแรงลัพธ์  $R$  ที่พยายามต้านทานแรงผลักจนส่งผลทำให้มุมเอียง  $\alpha$  เปลี่ยนไปจากเดิมที่ตั้งฉากกับพื้นระนาบ เมื่อเพิ่มแรงผลัก  $P_t$  ขึ้นอีกจนกระทั่งวัตถุเริ่มเคลื่อนที่ก็จะทำให้มุมเอียง  $\alpha$  มีค่ามากที่สุดเรียกว่า มุมเสียดทาน (Angle of Friction :  $\phi$ ) และค่า  $\tan \phi$  เรียกว่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of Friction) ถ้านำพื้นที่  $A$  ซึ่งเป็น

พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัตถุกับระนาบสัมผัสมาพิจารณาพร้อมกับสมการสมดุลแรงก็จะสามารถหาค่าหน่วยแรงเฉือน  $\tau$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าหน่วยแรงตั้งฉากผิวสัมผัส  $\sigma$  ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P_t = P_n \tan \phi \quad (2.1)$$

$$\frac{P_t}{A} = \frac{P_n}{A} \tan \phi \quad (2.2)$$

หรือ 
$$\tau = \sigma \tan \phi \quad (2.3)$$

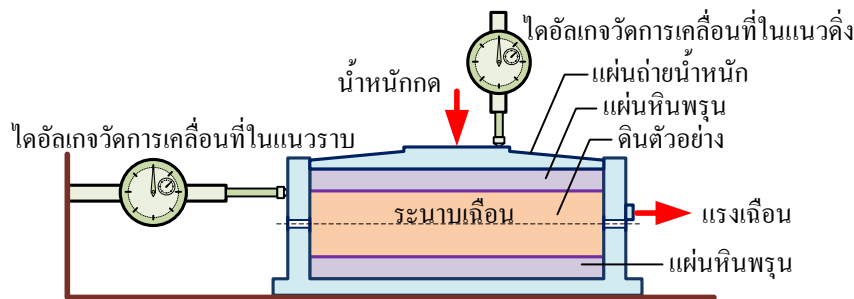
ต่อมานักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ ชาร์ล ออกุสแต็ง เดอ คูลอม (Charles Augustin de Coulomb) ได้นำเสนอการหาหน่วยแรงเฉือนในมวลดิน  $\tau$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับหน่วยแรงตั้งฉากผิวสัมผัส  $\sigma$  และหน่วยแรงเหนี่ยวนำปรากฏ (Apparent Cohesion :  $c$ ) ไว้ดังสมการต่อไปนี้

$$\tau = \sigma \tan \phi + c \quad (2.4)$$

สมการข้างต้นเรียกว่า สมการคูลอมบ์ สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าเป็นดินเม็ดหยาบจำพวกกรวดหรือทรายเพียงอย่างเดียวซึ่งมีค่าหน่วยแรงเหนี่ยวนำปรากฏเท่ากับศูนย์ หน่วยแรงเฉือนในดินเม็ดหยาบนั้นจะแปรผันไปตามหน่วยแรงตั้งฉากผิวสัมผัสและมุมเสียดทานเท่านั้น แต่ถ้าหากเป็นดินเม็ดละเอียดจำพวกดินเหนียวที่มีน้ำเคลือบเม็ดดินเพียงอย่างเดียวซึ่งมีเฉพาะค่าหน่วยแรงเหนี่ยวนำปรากฏ หน่วยแรงเฉือนในดินเม็ดละเอียดนั้นจะแปรผันไปตามหน่วยแรงเหนี่ยวนำปรากฏเท่านั้น โดยไม่มีผลของหน่วยแรงตั้งฉากผิวสัมผัสและมุมเสียดทานมาเกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามดินตามธรรมชาติมักมีปริมาณดินเม็ดหยาบและเม็ดละเอียดปะปนกันไม่แน่นอน ดังนั้นการหาหน่วยแรงเฉือนในดินจึงต้องอาศัยสมการคูลอมบ์รวมกับการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการหรือในสนาม จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าคุณสมบัติด้านกำลังของดินที่สำคัญคือคุณสมบัติด้านกำลังเฉือน ดังนั้นหัวข้อนี้จึงนำเสนอรายละเอียดการทดสอบกำลังเฉือนของดินโดยมุ่งเน้นการทดสอบในห้องปฏิบัติการดังรายละเอียดต่อไปนี้ (มานะ อภิพัฒนะมนตรี, 2543 : 65-88 และ วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร, 2532 : 140-154)

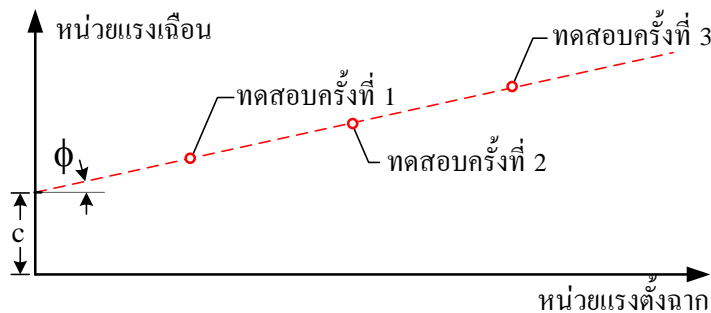
2.5.1 การทดสอบกำลังเฉือนโดยตรงของดิน (Direct Shear Test of Soil) ตามมาตรฐาน ASTM D-3080 เป็นการทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ได้ผลทดสอบรวดเร็วโดยการใช้กล่องใส่ตัวอย่าง (Shear Box) ดังแสดงในภาพที่ 2.34 ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการวางแผ่นหินพรุน (Porous Plate) ไว้ที่ด้านล่างของกล่องใส่ตัวอย่าง จากนั้นจึงนำดินตัวอย่างมาใส่ลงในกล่องใส่ตัวอย่างแล้ววางแผ่นหินพรุนและแผ่นถ่านน้ำหนักไว้ด้านบนตามลำดับ ให้น้ำหนักกดกระทำกับดินตัวอย่างในแนวตั้งฉากกับระนาบเฉือน โดยน้ำหนักกดดังกล่าวจะมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ เพิ่มแรงเฉือนจนกระทั่งดินตัวอย่างถูกเฉือนขาดออกจากกัน ผลการทดสอบที่ได้คือ หน่วยแรงเฉือน  $\tau$  ที่ได้จากการนำแรงเฉือนมาหารด้วยพื้นที่รับแรงเฉือน และหน่วยแรงตั้ง

ฉาก  $\sigma$  ที่ได้จากการนำน้ำหนักกดหารด้วยพื้นที่รับแรงกด ให้ทำการทดสอบซ้ำตามขั้นตอนเดิม โดยเพิ่มน้ำหนักกดบนดินตัวอย่าง นำผลของหน่วยแรงเฉือน  $\tau$  และหน่วยแรงตั้งฉาก  $\sigma$  ไปเขียนแผนภาพดังแสดงในภาพที่ 2.35 ก็จะสามารหามุมเสียดทาน  $\phi$  และหน่วยแรงเหนี่ยวนำปรากฏ  $c$  ของดินตัวอย่างได้ ในกรณีที่มีการติดตั้งไดอัลเกจเพื่อวัดการเคลื่อนที่ในแนวราบและในแนวตั้ง ก็จะสามารณำข้อมูลที่ได้ไปหาค่าความเครียด ผลของความเครียดที่สัมพันธ์กับหน่วยแรงเฉือน ยังสามารณำไปเขียนเป็นแผนภาพหน่วยแรงเฉือนและความเครียดได้อีกด้วย นอกจากนี้การทดสอบวิธีนี้ยังนำไปประยุกต์ใช้ได้กับกรณีที่ยอมให้น้ำในดินระบายออกไปได้ (Drained) หรือกรณีที่ไม่ยอมให้น้ำในดินระบายออกไปได้ (Undrained)



ภาพที่ 2.34 การทดสอบกำลังเฉือนโดยตรง

ที่มา : มานะ อภิปัทธนะมนตรี. 2543 : 69



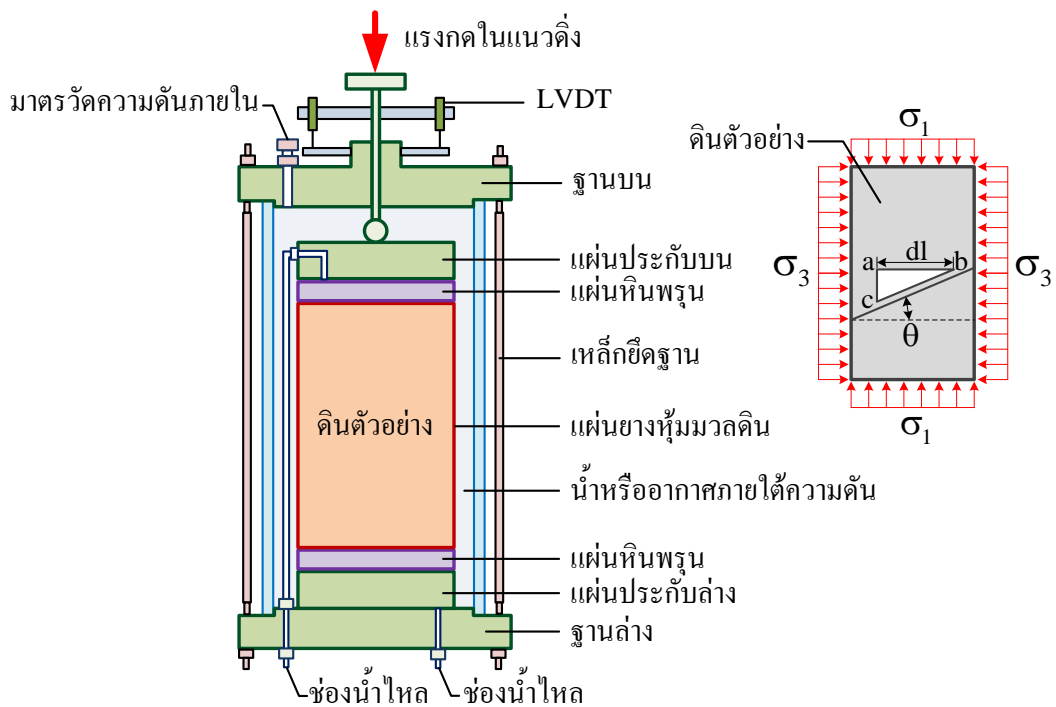
ภาพที่ 2.35 แผนภาพผลการทดสอบกำลังเฉือนโดยตรง

ที่มา : วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร. 2532 : 140

### 2.5.2 การทดสอบแรงอัดสามแกนของดิน (Triaxial Compression Test of Soil)

ตามมาตรฐาน ASTM D-2850 และ D-4767 เป็นวิธีการทดสอบกำลังเฉือนของดินที่ได้รับความนิยมเนื่องจากดินตัวอย่างจะถูกทดสอบภายใต้การควบคุมความดันด้านข้างให้มีสภาพใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติ การทดสอบนี้เหมาะกับดินที่มีหน่วยแรงเหนี่ยวนำปรากฏ เช่น ดินเหนียว เป็นต้น ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการนำดินตัวอย่างมากลึงให้เป็นรูปทรงกระบอกที่มีความสูง

ประมาณสองเท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง หุ้มดินที่กึ่งติแล้วด้วยแผ่นยางเพื่อป้องกันน้ำไหลเข้าหรือออกทางด้านข้างของดินตัวอย่าง วางแผ่นหินพรุนไว้ด้านล่างและด้านบนเพื่อให้ น้ำในดินสามารถไหลผ่านได้ทั้งด้านบนและล่างของดินตัวอย่าง จากนั้นใส่ในอุปกรณ์ทดสอบที่ปิดผนึกและภายในมีพื้นที่บรรจุน้ำหรืออากาศภายใต้ความดันควบคุมดังแสดงในภาพที่ 2.36 ดินตัวอย่างในอุปกรณ์ทดสอบจะได้รับความดันด้านข้าง (Confining Pressure :  $\sigma_3$ ) จากนั้นเพิ่มแรงกดในแนวตั้งด้วยอัตราสม่ำเสมอจนกระทั่งดินตัวอย่างวิบัติ ค่าหน่วยแรงที่เกิดจากแรงกดในแนวตั้งนี้เรียกว่า หน่วยแรงเบี่ยงเบน (Deviator Stress :  $\sigma_d$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $\sigma_1$  ลบด้วย  $\sigma_3$  เมื่อ  $\sigma_1$  เป็นหน่วยแรงอัดในแนวตั้ง โดยพื้นที่ที่ใช้ในการหาหน่วยแรงเบี่ยงเบนจะแปรเปลี่ยนไปตามปริมาตรตัวอย่างทดสอบซึ่งสัมพันธ์กับแรงกด การทดสอบวิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับกรณียอมให้น้ำในดินระบายออกไปได้ เช่น ดินปนทรายที่ยอมให้น้ำซึมผ่าน เป็นต้น หรือกรณีไม่ยอมให้น้ำในดินระบายออกไปได้ เช่น ดินเหนียวที่การไหลซึมของน้ำเป็นไปอย่างเชื่องช้า เป็นต้น



ภาพที่ 2.36 การทดสอบแรงอัดสามแกน

ที่มา : มานะ อภิพัฒนะมนตรี. 2543 : 77, วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร. 2532 : 147

และ Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 179

ในการหาหน่วยแรงเฉือน  $\tau$  และหน่วยแรงตั้งฉาก  $\sigma$  ของดินตัวอย่างที่ทดสอบโดยใช้วิธีแรงอัดสามแกนจะพิจารณาจากชิ้นส่วนขนาดเล็ก  $abc$  ดังแสดงในภาพที่ 2.36 แนว  $bc$  เป็นระนาบ

ที่คิดตัวอย่างเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน หน่วยแรง  $\sigma$  ที่เกิดในแนวตั้งฉากกับแนว bc จะมีความสัมพันธ์กับหน่วยแรงอัดในแนวตั้ง  $\sigma_1$  ความดันด้านข้าง  $\sigma_3$  และมุมเอียง  $\theta$  ดังสมการต่อไปนี้

$$\sigma = \sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3) \cos^2 \theta \quad (2.5)$$

และหน่วยแรงเฉือน  $\tau$  บนระนาบ bc หาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta \quad (2.6)$$

จากสมการคู่นี้เมื่อแทนค่าหน่วยแรงตั้งฉาก  $\sigma$  และหน่วยแรงเฉือน  $\tau$  จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{c + \sigma_3 \tan \phi}{\frac{1}{2} \sin 2\theta - \cos^2 \theta \tan \phi} \quad (2.7)$$

เมื่อพิจารณามุมของระนาบที่คิดวิบัติ  $\theta$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $45^\circ + \frac{\phi}{2}$  และนำไปแทนในสมการที่ 4.7 ก็จะทำให้ได้สมการดังต่อไปนี้

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.8)$$

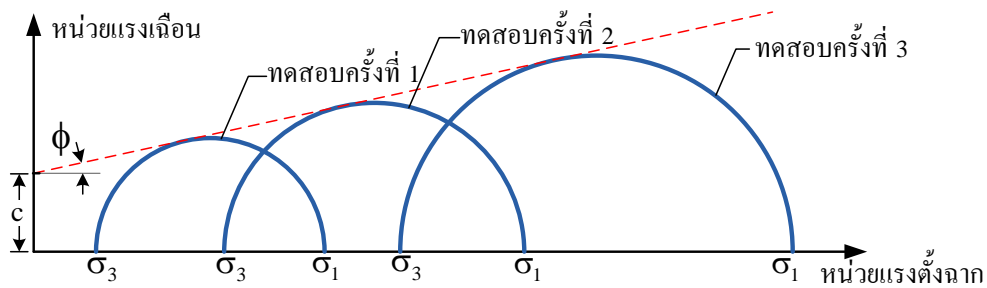
กรณีดินเม็ดหยาบที่ไม่มีหน่วยแรงเหนียวปรากฏ หรือ  $c$  เท่ากับศูนย์

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.9)$$

กรณีดินเม็ดละเอียดที่ไม่มีมุมเสียดทาน หรือ  $\phi$  เท่ากับศูนย์

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2c \quad (2.10)$$

นอกจากสมการที่กล่าวมาแล้วข้างต้นการหาค่าหน่วยแรงตั้งฉาก  $\sigma$  และหน่วยแรงเฉือน  $\tau$  ยังสามารถหาได้จากวงกลมมอร์ (Mohr's Circle) ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาด้วยการเขียนแผนภาพดังแสดงในภาพที่ 2.37 เมื่อทำการทดสอบดินตัวอย่างหลายครั้งโดยการแปรเปลี่ยนความดันด้านข้าง  $\sigma_3$  ก็จะทำให้ได้ค่าหน่วยแรงอัดในแนวตั้ง  $\sigma_1$  เปลี่ยนไป ถ้านำค่าทั้งสองไปเขียนเป็นวงกลมมอร์ก็จะได้หลายวง เนื่องจากมุมเสียดทาน  $\phi$  เป็นค่าคงที่เนื่องจากเป็นดินตัวอย่างชนิดเดียวกันจึงทำให้วงกลมมอร์แต่ละวงมีเส้นสัมผัสร่วมกัน เมื่อต่อเส้นสัมผัสจนไปตัดกับแกนตั้งของหน่วยแรงเฉือน  $\tau$  ก็จะทำให้ได้ค่าหน่วยแรงเหนียวปรากฏ  $c$  และมุมที่เส้นสัมผัสทำกับแนวราบก็จะเป็นมุมเสียดทาน  $\phi$  อนึ่ง วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร (2532 : 150) ได้แนะนำว่าเส้นสัมผัสที่ได้จากการทดสอบวิธีนี้ควรมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากการทดสอบกำลังเฉือนโดยตรง

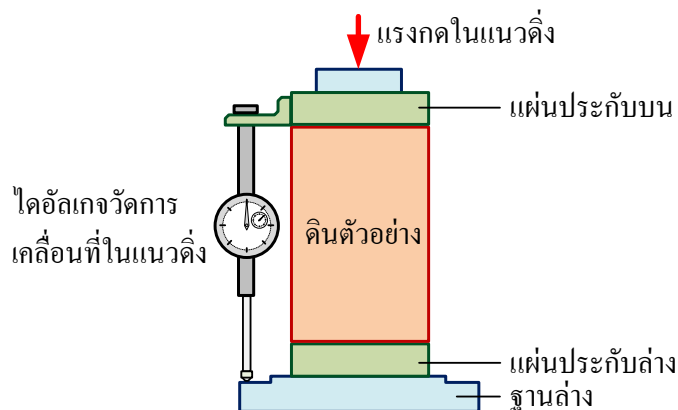


ภาพที่ 2.37 แผนภาพวงกลมมอร์

ที่มา : วัฒนา ชรรรมมงคล และวินิต ซ่อวิเชียร. 2532 : 151

2.5.3 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดของดิน (Unconfined Compression Test of Soil) ตามมาตรฐาน ASTM D-2166 เป็นการทดสอบกำลังเฉือนของดินที่มีลักษณะการทดสอบคล้ายกับการทดสอบแรงอัดสามแกน แต่ต่างกันที่การทดสอบวิธีนี้ไม่มีความดันด้านข้าง  $\sigma_3$  จึงทำให้การทดสอบมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการนำดินตัวอย่างมากลึงให้เป็นรูปทรงกระบอกที่มีความสูงประมาณสองเท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง วางแผ่นประกบไว้ด้านล่างและด้านบนของดินตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 2.38 เพิ่มแรงกดในแนวตั้งด้วยอัตราสม่ำเสมอจนกระทั่งดินตัวอย่างวิบัติ ค่าหน่วยแรงอัดในแนวตั้ง  $\sigma_1$  หาได้จากการนำแรงกดในแนวตั้งหารด้วยพื้นที่รับแรงของดินตัวอย่าง เมื่อนำผลการทดสอบนี้ไปอ้างอิงกับสมการที่ 4.8 โดยความดันด้านข้าง  $\sigma_3$  มีค่าเท่ากับศูนย์จะทำให้ได้สมการดังต่อไปนี้

$$\sigma_1 = 2c \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.11)$$



ภาพที่ 2.38 การทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด

ที่มา : มานะ อภิพัฒนะมนตรี. 2543 : 87

สมการข้างต้นไม่อาจหาค่าได้เนื่องจากมีตัวไม่ทราบค่าสองตัวคือ หน่วยแรงเหนียว  $c$  และมุมเสียดทาน  $\phi$  ดังนั้นการทดสอบนี้จึงเหมาะกับดินที่มีหน่วยแรงเหนียวปรากฏ

ที่อิมตัวซึ่งมีค่ามุมเสียดทาน  $\phi$  เท่ากับศูนย์ เช่น ดินเหนียวอิมตัว เป็นต้น ทำให้สามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$\sigma_1 = 2c \quad (2.12)$$

หรือ 
$$c = \frac{\sigma_1}{2} \quad (2.13)$$

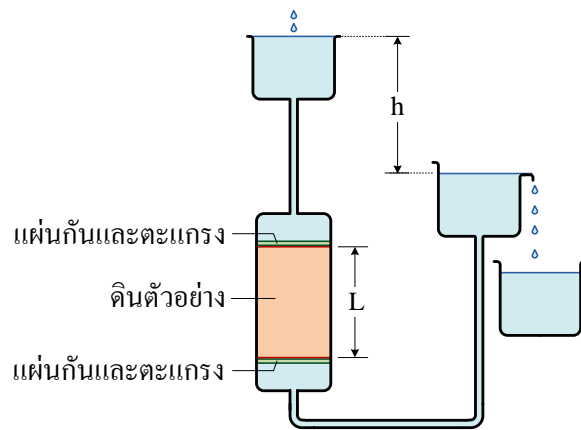
2.6 การทดสอบการไหลซึมของดิน (Soil Permeability Test) เป็นการทดสอบเพื่อหาการไหลซึมของน้ำผ่านชั้นดินซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อความดันน้ำมีความแตกต่างกัน การไหลซึมจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน เช่น ขนาดเม็ดดิน รูปร่างเม็ดดิน สภาพเกาะกันของเม็ดดิน และความแตกต่างความดันน้ำ เป็นต้น คุณสมบัติการไหลซึมของน้ำผ่านชั้นดินมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนัก การทรุดตัว และการระบายน้ำของดิน มานะ อภิพัฒนมนตรี (2543 : 117) กล่าวว่าโดยปกติการไหลของน้ำผ่านดินที่มีช่องทางการไหลที่เล็กมักเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) และสามารถนำหลักการไหลที่นำเสนอโดยวิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ เฮนรีฟิลิปแบร์ต์กัสปาร์ดาร์ซี (Henry Philibert Gaspard Darcy) หรือเรียกว่า หลักการไหลของดาร์ซี (Darcy's Law) มาประยุกต์ใช้ในการหาปริมาณน้ำไหลผ่านดิน ปริมาณการไหลต่อหน่วยเวลา  $Q$  ตามหลักการของดาร์ซีจะแปรเปลี่ยนไปตามค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้  $k$  ค่าลาดระดับน้ำ  $i$  และพื้นที่หน้าตัดการไหล  $A$  ดังสมการดังต่อไปนี้

$$Q = kiA \quad (2.14)$$

สำหรับการไหลผ่านดินนั้นค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน เช่น ดินเม็ดหยาบจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้มากกว่าดินเม็ดละเอียด เป็นต้น ดังนั้นหัวข้อนี้จึงขอแนะนำการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินโดยมุ่งเน้นการทดสอบในห้องปฏิบัติการดังรายละเอียดต่อไปนี้ (มานะ อภิพัฒนมนตรี. 2543 : 117-129, วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร. 2532 : 70-74 และสถาพร ภู่วิจิตรจารุ. 2546 : 10-1-10-17)

2.6.1 การทดสอบแบบระดับคงที่ (Constant-Head Permeameter Test) มาตรฐาน ASTM D-2434 เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำผ่านดินโดยรักษาระดับน้ำให้คงที่ตลอดเวลา การทดสอบวิธีนี้เหมาะกับดินเม็ดหยาบที่น้ำสามารถไหลผ่านได้สะดวก ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการนำดินตัวอย่างใส่ในอุปกรณ์ทดสอบที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดดิน  $A$  และระยะที่น้ำไหลซึมผ่านดิน  $L$  วางแผ่นกันและตะแกรงที่ด้านบนและด้านล่างเพื่อป้องกันดินไหลไปกับน้ำ จากนั้นปล่อยน้ำให้ไหลผ่านดินตัวอย่างโดยพยายามรักษาระดับน้ำให้มีผลต่าง  $h$  คงที่ตลอดเวลา ดังแสดงในภาพที่ 2.39 บันทึกปริมาณน้ำไหลซึมผ่านดิน  $Q$  และระยะเวลาที่น้ำไหลผ่านดิน  $t$  แล้วนำผลที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดิน  $k$  ดังสมการต่อไปนี้



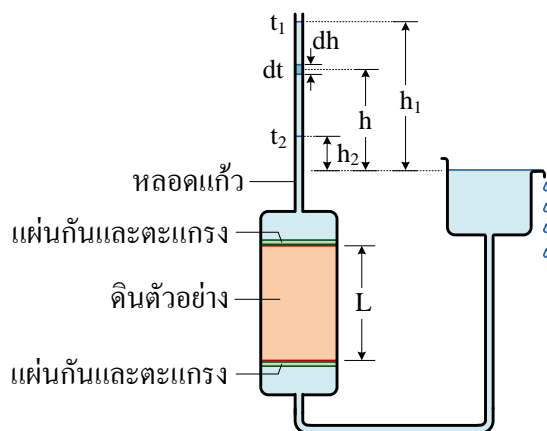


ภาพที่ 2.39 การทดสอบแบบระดับคงที่  
ที่มา : มานะ อภิพัฒนมนตรี. 2543 : 126

$$k = \frac{QL}{hAt} \quad (2.15)$$

### 2.6.2 การทดสอบแบบระดับเปลี่ยนแปลง (Variable-Head Permeameter Test)

ตามมาตรฐาน ASTM D-4511 เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำผ่านดินโดยที่ระดับน้ำเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การทดสอบวิธีนี้เหมาะกับดินเม็ดละเอียดที่น้ำไม่สามารถไหลผ่านได้สะดวก ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นจากการนำดินตัวอย่างใส่ในอุปกรณ์ทดสอบที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดดิน  $A$  และระยะที่น้ำไหลซึมผ่านดิน  $L$  วางแผ่นกั้นและตะแกรงที่ด้านบนและด้านล่างเพื่อป้องกันดินไหลไปกับน้ำ จากนั้นปล่อยน้ำให้ไหลไปตามหลอดแก้วที่มีพื้นที่หน้าตัด  $a$  ผ่านดินตัวอย่างอิสระดังแสดงในภาพที่ 2.40 บันทึกเวลาที่น้ำไหลเริ่มต้น  $t_1$  กับผลต่างระดับน้ำเวลาเริ่มต้น  $h_1$  และเวลาที่น้ำไหลสุดท้าย  $t_2$  กับผลต่างระดับน้ำเวลาสุดท้าย  $h_2$  นำผลที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดิน  $k$  ดังสมการต่อไปนี้



ภาพที่ 2.40 การทดสอบแบบระดับเปลี่ยนแปลง  
ที่มา : มานะ อภิพัฒนมนตรี. 2543 : 127

$$k = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (2.16)$$

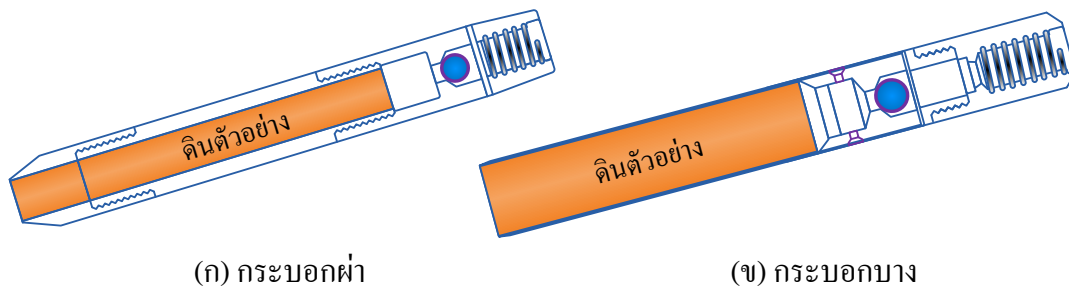
อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดิน  $k_T$  ที่อุณหภูมิการไหลของน้ำ  $T^\circ\text{C}$  ซึ่งมีความหนืดน้ำ  $\mu_T$  ควรถูกปรับให้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมมาตรฐาน  $k_{20}$  ที่อุณหภูมิการไหลของน้ำ  $20^\circ\text{C}$  และความหนืดน้ำ  $\mu_{20}$  ดังสมการต่อไปนี้

$$k_{20} = k_T \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \quad (2.17)$$

### 3. การทดสอบดินในสนาม

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบดินในสนามมีความสำคัญต่อวิศวกรเป็นอย่างมาก การทดสอบดินในสนามเพื่อการก่อสร้างเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินเดิมตามธรรมชาติหรืออาจเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติดินที่ผ่านการปรับปรุงแล้ว การทดสอบดินในสนามมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีแต่ในหัวข้อนี้เลือกนำเสนอ 2 วิธีคือ การทดสอบชั้นดินวิธีตอกทะลวงแบบมาตรฐานและการทดสอบความหนาแน่นดินโดยใช้ทรายแทนที่ การทดสอบทั้งสองวิธีสามารถพบเห็นได้ทั่วไปและมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

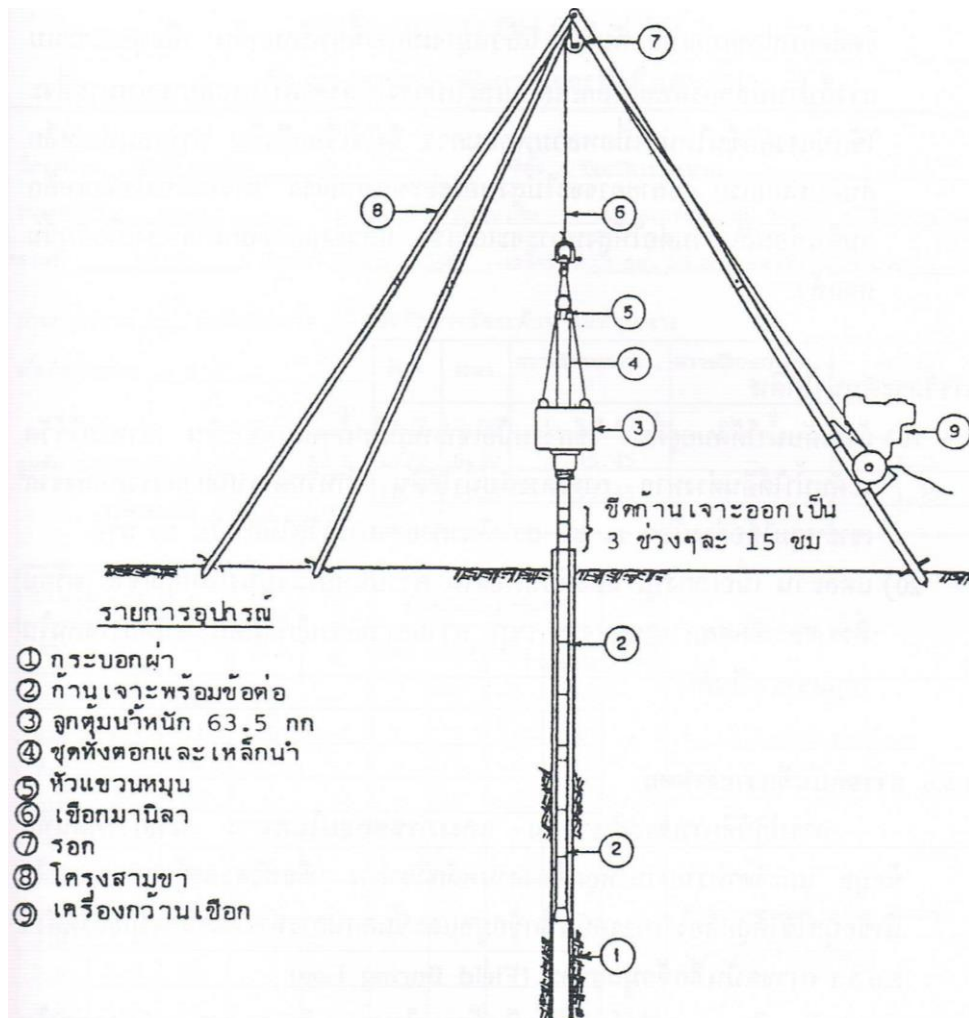
3.1 การทดสอบวิธีตอกทะลวงแบบมาตรฐาน (Standard Penetration Test : SPT) ตาม มาตรฐาน ASTM D1586 เป็นวิธีการทดสอบความแน่นดินตามธรรมชาติซึ่งสัมพันธ์กับความความสามารถในการแบกทานน้ำหนักของชั้นดิน สถาพร ภูวิจิตรจารุ (2546 : 2-31-2-50) กล่าวว่า การทดสอบนี้มักทำควบคู่กับการเจาะสำรวจดินเพื่อนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นจากการเจาะสำรวจด้วยสว่านมือจนถึงความลึกที่ต้องการ จากนั้นประกอบโครงเหล็กสามขาที่มีรอกแขวนที่ปลายด้านบน โดยใช้เชือกมะนิลาคล้องผ่านรอกและยึดกับลูกตุ้มเหล็กมาตรฐานซึ่งหนัก 140 lb หรือ 63.5 kg ในลักษณะที่ลูกตุ้มเคลื่อนที่ไปตามชุดทั้งตอกและเหล็กนำในแนวตั้งได้อย่างอิสระ โดยมีระยะตกกระทบ 30 นิ้ว หรือ 76 cm ชุดทั้งตอกจะยึดกับก้านเจาะและปลายก้านเจาะยึดด้วยกระบอกผ่า (Split Barrel) ดังแสดงในภาพที่ 2.41(ก)



ภาพที่ 2.41 กระบอกเก็บตัวอย่างดิน

ที่มา : Braja M. Das. 2010 : 635

การแปรผลการทดสอบจะอาศัยการนับจำนวนครั้งที่ตอกแล้วทำให้กระบอกฝ่าจมไปในดิน 30 cm เรียกจำนวนครั้งที่ตอกนี้ว่าค่าทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Number : N) นั้นทพล รัตนมณี (2554 : 6) ได้นำเสนอการแปรผลการทดสอบดินเม็ดหยาบไว้ว่า ถ้าค่า N อยู่ระหว่าง 0-5 เป็นดินหลวมมาก ค่า N อยู่ระหว่าง 6-10 เป็นดินหลวม ค่า N อยู่ระหว่าง 11-30 เป็นดินแน่นปานกลาง ค่า N อยู่ระหว่าง 31-50 เป็นดินแน่น และค่า N มากกว่า 50 เป็นดินแน่นมากตามลำดับ ค่า N ยังมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นสัมพัทธ์และกำลังเฉือนของดินอีกด้วย อย่างไรก็ตามหากทำการทดสอบกับชั้นดินที่เป็นดินเม็ดละเอียดที่มีความเชื่อมแน่นก็สามารถใช้กระบอกบาง (Thin Wall Tube) ดังแสดงในภาพที่ 2.41(ข) ในการเก็บตัวอย่างดินเพื่อนำมาทำการทดสอบ สำหรับภาพที่ 2.42 แสดงชุดทดสอบชั้นดินเดิมตามธรรมชาติวิธีตอกทะลวงแบบมาตรฐาน



ภาพที่ 2.42 ชุดทดสอบชั้นดินธรรมชาติวิธีตอกทะลวงแบบมาตรฐาน

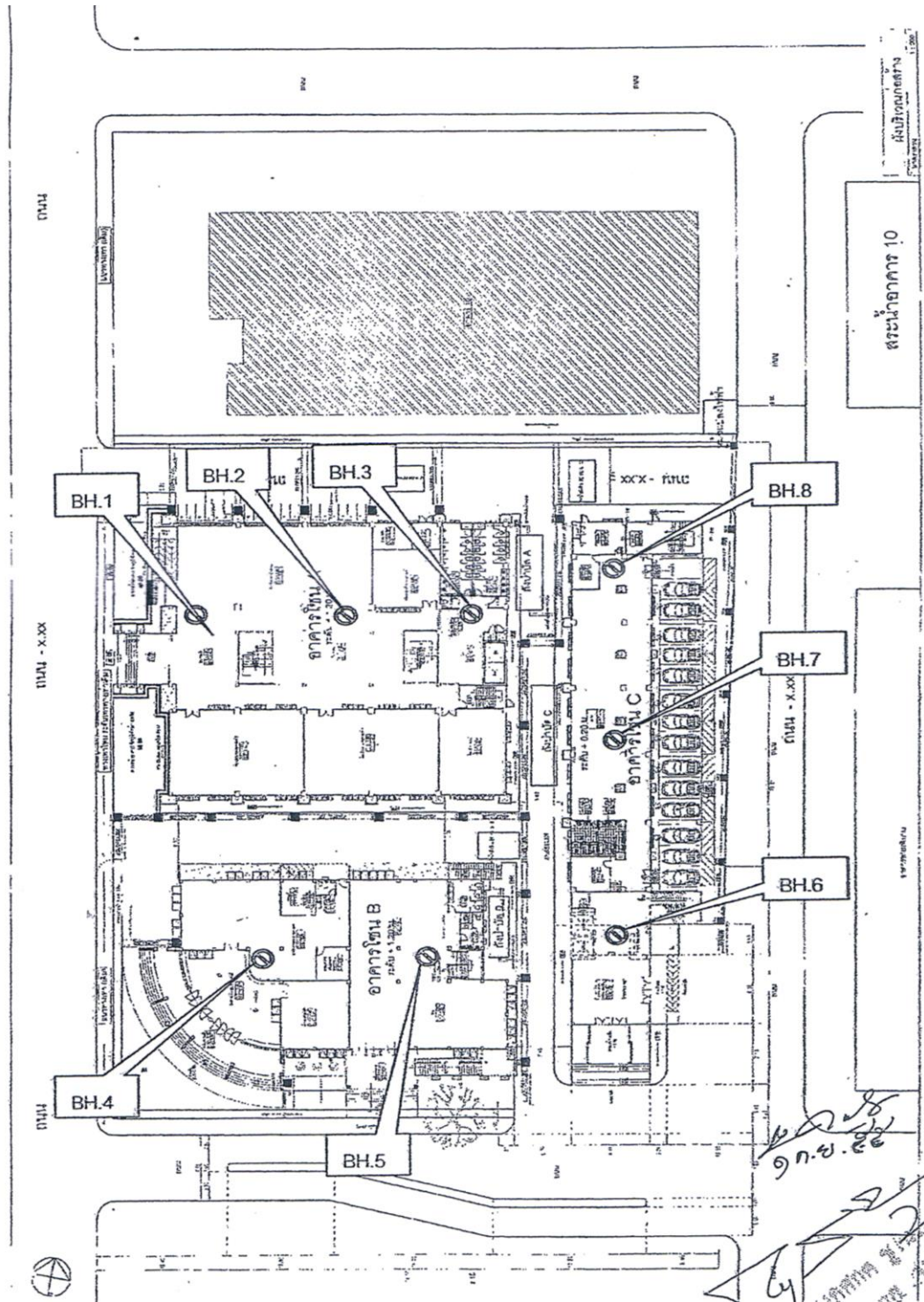
ที่มา : สถาพร ภูวิจิตรจารุ. 2546 : 2-39

ตัวอย่างการเจาะสำรวจชั้นดินวิธีตอกทะลวงแบบมาตรฐานเพื่อนำไปใช้ประกอบการวิเคราะห์และออกแบบฐานรากอาคารแสดงในภาพที่ 2.43 และ 4.44 ตัวอย่างดังกล่าวเป็นการเจาะสำรวจชั้นดิน โครงการก่อสร้างอาคารเรียนคณะครุศาสตร์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ การทดสอบนี้ใช้เครื่องมือเจาะเป็นเครื่องเจาะแบบก้าน (Motorized Cathead) ขนาดหลุมเจาะ 100 mm และมีการตอกปลอกเหล็กป้องกันหลุมเจาะพัง ตำแหน่งและจำนวนหลุมเจาะกระจายครอบคลุมพื้นที่ก่อสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.35 ในขณะที่เจาะสำรวจชั้นดินก็ได้มีการเก็บดินตัวอย่างทุกระยะ 0.5-1.0 m หรือเมื่อชั้นดินมีการเปลี่ยนสภาพ ดินที่ได้จากการเจาะสำรวจจะถูกเก็บใส่ถุงพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและจะถูกนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับผลการทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบฐานรากจะใช้วิธีตอกทะลวงแบบมาตรฐาน SPT โดยใช้ลูกตุ้มตอกก้านเจาะที่ยึดปลายด้วยกระบอกผ่า ค่าทะลวงมาตรฐาน N จะถูกบันทึกทุกระยะ 1 m หรือเมื่อชั้นดินเปลี่ยนสภาพ ดินตัวอย่างที่เก็บได้จากกระบอกผ่าจะถูกเก็บใส่ถุงพลาสติกและนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยเช่นกัน

ภาพที่ 2.44 เป็นตัวอย่างรายงานผลการทดสอบการเจาะสำรวจชั้นดิน โครงการก่อสร้างอาคารเรียนคณะครุศาสตร์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ (ไกรยุทธ เน้นอุดร. 2555 : 1-45) ซึ่งมีรายละเอียดประกอบด้วย ชื่อหลุมเจาะ BH1 ความลึกหลุมเจาะ (Depth : D) สัญลักษณ์ชั้นดิน (Graphic Log : GL) ลักษณะชั้นดิน (Soil Description) วิธีการเก็บดินตัวอย่าง (Sampling Method : SM) หมายเลขดินตัวอย่าง (Sample Number : SN) ปริมาณความชื้น หน่วยน้ำหนัก ค่าทะลวงมาตรฐาน N และกำลังแบกทานไม่ระบายน้ำ (Undrain Strength) ตามลำดับ จากผลการทดสอบดังกล่าวพบว่าชั้นดินที่ความลึกระหว่าง 0-2 m เป็นดินเหนียวปนทรายและตะกอนสภาพอ่อนสามารถรับแรงแบกทานที่ความลึก 2 m ได้ไม่เกิน  $10 \text{ t/m}^2$  ชั้นดินที่ความลึกระหว่าง 2-6 m เป็นดินเหนียวปนทรายละเอียดและตะกอนสภาพแน่นปานกลางสามารถรับแรงแบกทานที่ความลึก 4 m ได้ไม่เกิน  $30 \text{ t/m}^2$  และที่ความลึก 6 m ได้ไม่เกิน  $52 \text{ t/m}^2$  ชั้นดินที่ความลึกระหว่าง 6-8 m เป็นดินเหนียวปนทรายละเอียดและกรวดขนาดเล็กสภาพแน่นมากสามารถรับแรงแบกทานที่ความลึก 7 m ได้มากกว่า  $55 \text{ t/m}^2$  ชั้นดินที่ความลึกระหว่าง 8-10.5 m เป็นดินดานของทรายและตะกอนสภาพแข็งมาก ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึกประมาณ 8 m ในขณะที่ปริมาณความชื้นและหน่วยน้ำหนักของดินเพิ่มขึ้นตามความลึกจนถึงความลึกประมาณ 7 m จึงปรับตัวลดลงเพียงเล็กน้อย จากข้อมูลที่รายงานในรายงานสรุปได้ว่าชั้นดินดานอยู่ที่ความลึกประมาณ 10.5 m ดังนั้นในการประมาณการความลึกของเสาเข็มที่ใช้รองรับน้ำหนักของอาคารก็ควรจะมีความสัมพันธ์กับความลึกดังกล่าว อย่างไรก็ตามความน่าเชื่อถือของผลการเจาะสำรวจชั้นดินจะต้องพิจารณาจากหลุมเจาะข้างเคียงประกอบด้วย

โครงการก่อสร้าง : อาคารคณะครุศาสตร์

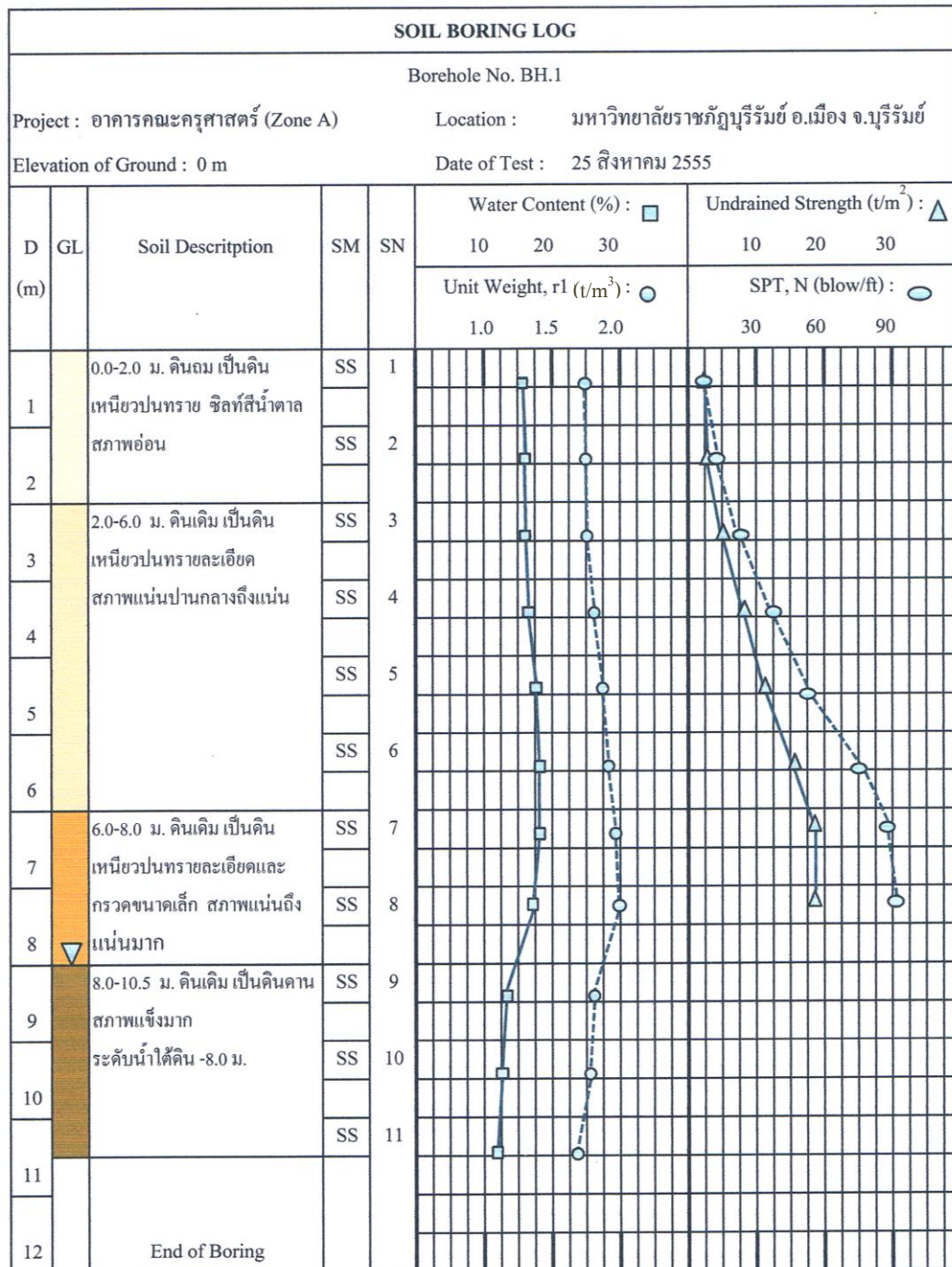
สถานที่ : มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์



ภาพที่ 2.43 แผนผังตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน

ที่มา : ไกรยุทธ เน้นอุดร. 2555 : 12





Remark : PA = Power Auper

ST = Shelby Type

DB = Diamond Bit

WO = Wash Out

SS = Split Spoon

D = Depth

GL = Graphic Log

SN = Sample No.

SM = Sampling Method

ภาพที่ 2.44 รายงานผลการทดสอบการเจาะสำรวจชั้นดิน

ที่มา : ไกรยุทธ แน่นอุดร. 2555 : 22



3.2 การทดสอบความหนาแน่นดินในสนามวิธีกรวยทราย (Sand Cone Method) ตามมาตรฐาน ASTM D1556 เป็นวิธีการตรวจสอบความหนาแน่นดินซึ่งส่วนใหญ่เป็นดินที่ผ่านการบดอัดแล้ว (วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. ม.ป.ป. : 11-9-11-12 และ Braja M. Das. 2008 : 140-142) วิธีนี้ใช้หลักการแทนที่ของทรายในการหาปริมาณของหลุมที่ถูกขุดเอาดินออก โดยทรายที่ใช้ในการทดสอบควรมีลักษณะเม็ดกลมและมีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอเรียกว่า ทรายอ็อตตาวา (Ottawa Sand) หรืออาจใช้ทรายที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และค้างตะแกรงเบอร์ 30 แทนก็ได้เช่นกัน วิธีการทดสอบเริ่มจากการปรับพื้นผิวบริเวณที่จะทดสอบให้เรียบจากนั้นวางแผ่นฐานและตอกยึดด้วยตะปูให้แน่น แผ่นฐานดังกล่าวจะมีช่องว่างรูปวงกลมอยู่ตรงกลางซึ่งมีขนาดพอดีกับปากกรวยขุดดินภายในช่องว่างของแผ่นฐานดังแสดงในภาพที่ 2.45 ใส่ในภาชนะโดยให้ความลึกของหลุมประมาณ 10-15 cm และแต่งกันหลุมให้เรียบ



ภาพที่ 2.45 การเก็บตัวอย่างดินหรือหินคลุกบดอัดแน่นในภาชนะ  
ที่มา : จิรวัดณ์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558


การเก็บเศษดินที่ติดอยู่กับหลุมอาจใช้แปรงขนอ่อนช่วยในการเก็บเศษดินกันหลุมออกให้หมด นำดินที่ขุดออกจากหลุมพร้อมภาชนะไปชั่งและนำดินส่วนหนึ่งไปอบเพื่อหาปริมาณความชื้น จากนั้นนำขวดทรายที่ทราบน้ำหนักแล้วมาคว่ำลงบนตำแหน่งช่องว่างของแผ่นฐานโดยให้ปากกรวยวางบนแผ่นฐานอย่างมั่นคงแล้วจึงเปิดวาล์วเพื่อให้ทรายไหลลงไปหลุมดังแสดงในภาพที่ 2.46 เมื่อทรายไหลจนเต็มหลุมจึงปิดวาล์วแล้วนำขวดทรายส่วนที่เหลือไปชั่งน้ำหนัก ผลต่างของน้ำหนักทรายในขวดก่อนและหลังทดสอบคือน้ำหนักทรายในหลุมบวกด้วยทรายในกรวย เมื่อเอาน้ำหนักทรายในกรวยไปลบออกก็จะได้น้ำหนักทรายในหลุม ภาพที่ 2.47 แสดงการทดสอบหาปริมาณทรายในกรวยในห้องปฏิบัติการ ปริมาตรของหลุมหาได้จากการนำน้ำหนักทรายในหลุมหารด้วยความหนาแน่นทราย จากนั้นจึงคำนวณหาค่าความหนาแน่นดินโดยการนำน้ำหนักดินในหลุมหารด้วยปริมาตรหลุม ตามลำดับ



ภาพที่ 2.46 การหาปริมาณหลุมเจาะโดยการใช้ทรายแทนที่  
ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558



ภาพที่ 2.47 การหาปริมาณทรายในกรวย  
ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558



**ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ สาขาวิชาเทคโนโลยีการก่อสร้าง มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์** (กส-3)

การทดสอบ : การทดสอบหาความหนาแน่นของดินในสนามโดยวิธีทรายแทนที่ (Sand Cone Method) วันที่ทดสอบ : 30 เมษายน 2556

โครงการ : ก่อสร้างอาคารเรียนคณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

สถานที่ก่อสร้าง : มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ต.ในเมือง

อ.เมือง จ.บุรีรัมย์

ผู้ว่าจ้าง : มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

ผู้รับจ้าง : ห้างหุ้นส่วนจำกัด แสงฟ้าก่อสร้าง

ผู้ทดสอบ : นายอานนท์ สรูปผล

| Field Data   |                                   | Sand Calibration                             |  |           |         |         |          |         |
|--|-----------------------------------|--|--|-----------|---------|---------|----------|---------|
| หมายเลขหลุมทดสอบ   | H-2                               | หมายเลขอุปกรณ์ทรายทดสอบ : S-6                |  |           |         |         |          |         |
| ความลึก (เมตร, m)  | ผิวดิน                            | 1. น้ำหนักทรายในกรวยกรณีพื้นราบ              |  |           |         |         |          |         |
| น้ำหนักขวด + กรวย + ทราย ก่อนทดสอบ                       | (กรัม, g)                         | 6584.00                                      | ลำดับการทดสอบ  | 1         | 2       | 3       |          |         |
| น้ำหนักขวด + กรวย + ทราย หลังทดสอบ                       | (กรัม, g)                         | 2988.00                                      | น้ำหนักขวด + กรวย + ทราย ก่อนทดสอบ (กรัม, g)         | 6407.00   | 5796.00 | 5650.00 |          |         |
| น้ำหนักทรายในหลุมทดสอบ + กรวย                            | (กรัม, g)                         | 3596.00                                      | น้ำหนักขวด + กรวย + ทราย หลังทดสอบ (กรัม, g)         | 5103.00   | 4512.00 | 4380.00 |          |         |
| น้ำหนักดินเปียกในหลุมทดสอบ + ภาชนะ                       | (กรัม, g)                         | 3793.00                                      | น้ำหนักทรายในกรวย                                    | (กรัม, g) | 1304.00 | 1284.00 | 1270.00  |         |
| น้ำหนักภาชนะ   | (กรัม, g)                         | 200.00                                       | น้ำหนักทรายในกรวยเฉลี่ย                              | (กรัม, g) | 1286.00 |         |          |         |
| น้ำหนักเปียกในหลุมทดสอบ                                  | (กรัม, g)                         | 3593.00                                      | 2. น้ำหนักทรายในแบบหล่อที่ใช้สอบเทียบ                |           |         |         |          |         |
| Water Content  |                                   | ลำดับการทดสอบ                                |  |           |         |         |          |         |
| หมายเลขภาชนะ   | S-A2-1                            | น้ำหนักแบบหล่อ + ทราย (กรัม, g)              |  |           |         | 8970.00 | 8960.00  | 8975.00 |
| น้ำหนักดินเปียก + ภาชนะ                                  | (กรัม, g)                         | 113.23                                       | น้ำหนักแบบหล่อ                                       | (กรัม, g) | 6400.00 | 6400.00 | 6400.00  |         |
| น้ำหนักดินแห้ง + ภาชนะ                                   | (กรัม, g)                         | 104.50                                       | น้ำหนักทราย  | (กรัม, g) | 2570.00 | 2560.00 | 2575.00  |         |
| น้ำหนักน้ำ   | (กรัม, g)                         | 8.73   | น้ำหนักทรายเฉลี่ย                                    | (กรัม, g) | 2568.33 |         |          |         |
| น้ำหนักภาชนะ   | (กรัม, g)                         | 24.93  | 3. ปริมาตรแบบหล่อที่ใช้สอบเทียบ                      |           |         |         |          |         |
| น้ำหนักดินแห้ง   | (กรัม, g)                         | 79.57  | ลำดับการทดสอบ  |           |         |         |          |         |
| ปริมาณความชื้นในดิน (เปอร์เซ็นต์, %)                     | (เปอร์เซ็นต์, %)                  | 10.98  | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบหล่อ (ซม., cm)            | 15.00     | 15.02   | 15.00   |          |         |
| Density  |                                   | ความสูงของแบบหล่อ (ซม., cm)                  |  |           |         | 11.60   | 11.60    | 11.59   |
| หมายเลขหลุมทดสอบ   | H-2                               | ปริมาตรของแบบหล่อ (ลบ.ซม., cm <sup>3</sup> ) |  |           |         | 2049.89 | 2055.364 | 2048.13 |
| น้ำหนักทรายในกรวย  | (กรัม, g)                         | 1286.00                                      | ปริมาตรของแบบหล่อเฉลี่ย (ลบ.ซม., cm <sup>3</sup> )   | 2051.13   |         |         |          |         |
| น้ำหนักทรายในหลุมทดสอบ                                   | (กรัม, g)                         | 2310.00                                      | 4. ความหนาแน่นของทรายทดสอบ                           |           |         |         |          |         |
| ความหนาแน่นของทราย (กรัม/ลบ.ซม., g/cm <sup>3</sup> )     | (กรัม/ลบ.ซม., g/cm <sup>3</sup> ) | 1.25   | ความหนาแน่นของทราย (กรัม/ลบ.ซม., g/cm <sup>3</sup> ) | 1.25      |         |         |          |         |
| ปริมาตรของหลุมทดสอบ (ลบ.ซม., cm <sup>3</sup> )           | (ลบ.ซม., cm <sup>3</sup> )        | 1848.00                                      | ความหนาแน่นของทราย (ตัน/ลบ.ม., t/m <sup>3</sup> )    | 1.25      |         |         |          |         |
| ความหนาแน่นของดินเปียก (กรัม/ลบ.ซม., g/cm <sup>3</sup> ) | (กรัม/ลบ.ซม., g/cm <sup>3</sup> ) | 1.94   |  |           |         |         |          |         |
| ความหนาแน่นของดินแห้ง (กรัม/ลบ.ซม., g/cm <sup>3</sup> )  | (กรัม/ลบ.ซม., g/cm <sup>3</sup> ) | 1.75   |  |           |         |         |          |         |
| ความหนาแน่นของดินแห้ง (ตัน/ลบ.ม., t/m <sup>3</sup> )     | (ตัน/ลบ.ม., t/m <sup>3</sup> )    | 1.75   |  |           |         |         |          |         |

**รับรองเฉพาะที่ทดสอบเท่านั้น :**

หมายเหตุ : ผลการทดสอบนี้รับรองเฉพาะหลุมเจาะที่สาขาวิชาเทคโนโลยีการก่อสร้าง มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ได้ทำการทดสอบเท่านั้น

ลงชื่อ.....  
(นายอานนท์ สรูปผล)  
ผู้ทดสอบ  
30 เม.ย. 56

ลงชื่อ.....  
(นายจิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา)  
วิศวกรโยธา เลขทะเบียน กย. 25423  
30 เม.ย. 56

ลงชื่อ.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรกฤษณ์ สักพานิชย์)  
คณบดีคณะเทคโนโลยีการก่อสร้าง  
30 เม.ย. 2556

ภาพที่ 2.48 ผลการทดสอบความหนาแน่นดินในสนามโดยวิธีกรวยทราย

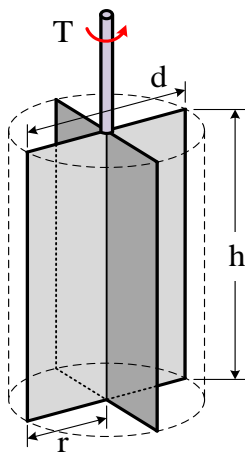
ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2556 : 3

ภาพที่ 2.48 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบความหนาแน่นดินในสนามวิธีกรวยทราย โครงการก่อสร้างอาคารเรียนคณะครุศาสตร์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ผลการทดสอบที่นำเสนอเป็นค่าความหนาแน่นดินแห้งของดินที่ถูกบดอัดแล้วซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.75 t/m<sup>3</sup> ค่าความ



หนาแน่นนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นดินสูงสุดจากการบดอัดในห้องปฏิบัติการ ถ้าค่าทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันก็ถือว่า การบดอัดดิน ณ สถานที่ทดสอบมีค่าความหนาแน่นเป็นที่ยอมรับ (จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2556 : 1-20)

3.3 การทดสอบแรงเฉือนโดยใช้ใบมีดมาตรฐาน (Vane Shear Test) ตามมาตรฐาน ASTM D2573 เป็นการทดสอบกำลังเฉือนของดินในสนามด้วยการใช้ใบมีดมาตรฐานดังแสดงในภาพที่ 2.49 ใบมีดมาตรฐานจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสี่แฉกที่ด้านบนยึดกับก้านต่อและมือหมุน ใบมีดมีอัตราส่วนความสูง  $h$  เป็นสองเท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d$  และมีความหนาประมาณ 2.5 mm การทดสอบนี้เหมาะสำหรับดินเหนียวอ่อนหรือปานกลาง ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการกดใบมีดให้จมลงในชั้นดินตามความลึกที่กำหนด จากนั้นออกแรงบิดจนดินถูกเฉือนขาดออกจากกันเป็นรูปทรงกระบอก บันทึกค่าโมเมนต์บิด  $T$  ขณะดินขาดออกจากกันแล้วนำไปคำนวณหาลังเฉือน  $\tau$  ตามสมการต่อไปนี้ (มานะ อภิปัทธนะมนตรี. 2543 : 89-90)



(ก) ลักษณะใบมีด



(ข) ใบมีดพร้อมก้านและมือหมุน

ภาพที่ 2.49 เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยใช้ใบมีดมาตรฐาน

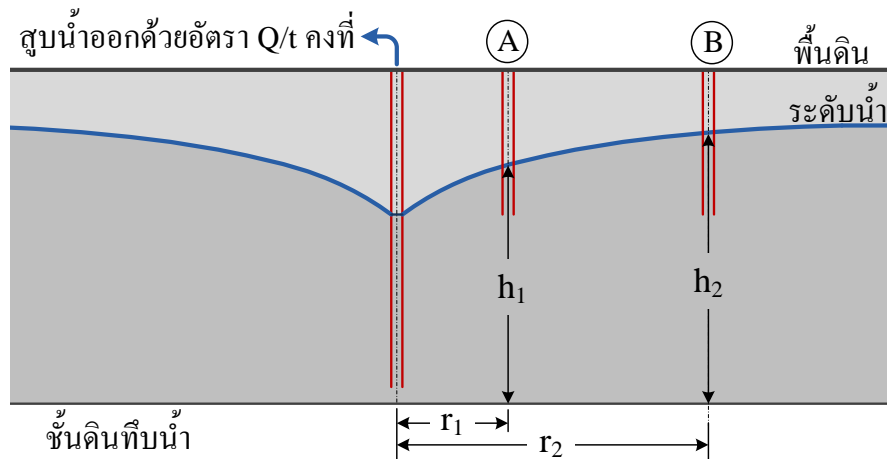
ที่มา : กรมชลประทาน. 2553 : 9, มานะ อภิปัทธนะมนตรี. 2543 : 89 และ วัฒนา ธรรมมงคล และ วินิต ช่อวิเชียร. 2532 : 156

$$\tau = \frac{3T}{28\pi r^2} \quad (2.18)$$

จากสมการข้างต้น  $r$  คือรัศมีใบมีดมาตรฐานหรือ  $d/2$  นอกจากนั้น วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร (2532 : 156) ยังได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิด  $T$  และหน่วยแรงเหนียวปรากฏ  $c$  ของดินที่ทดสอบด้วยวิธีใบมีดมาตรฐานดังสมการต่อไปนี้

$$T = \frac{c\pi d^2}{2} \left( h + \frac{d}{3} \right) \quad (2.19)$$

3.4 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินในสนาม (Well Pumping Test หรือ Well Point Method) เป็นวิธีการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดิน โดยการเจาะฝังท่อลงในชั้นดินแล้วสูบน้ำออก การทดสอบนี้เหมาะกับดินเม็ดหยาบที่เก็บตัวอย่างดินคงสภาพได้ยาก ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการเจาะชั้นดินแล้วฝังท่อให้ลึกกว่าระดับน้ำใต้ดิน จากนั้นสูบน้ำออกด้วยอัตรา  $Q$  ต่อเวลา  $t$  คงที่ และเรียกบ่อสูบน้ำออกนี้ว่า บ่อทดสอบ เมื่อสูบน้ำออกจากบ่อทดสอบจะทำให้ระดับน้ำใต้ดินลดลงเป็นรูปกรวยดังแสดงในภาพที่ 2.50 ถ้าหากเจาะบ่อสังเกต A และ B ห่างจากบ่อทดสอบเป็นระยะ  $r_1$  และ  $r_2$  ก็จะได้ระดับน้ำใต้ดินเหนือชั้นดินที่บ่อน้ำ  $h_1$  และ  $h_2$  ตามลำดับ ผลการทดสอบจะถูกนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดิน  $k$  จากสมการดังต่อไปนี้ (มานะ อภิพัฒนมนตรี, 2543:129-131 และ วัฒนา ธรรมมงคล และ วินิต ช่อวิเชียร, 2532 : 76-77)

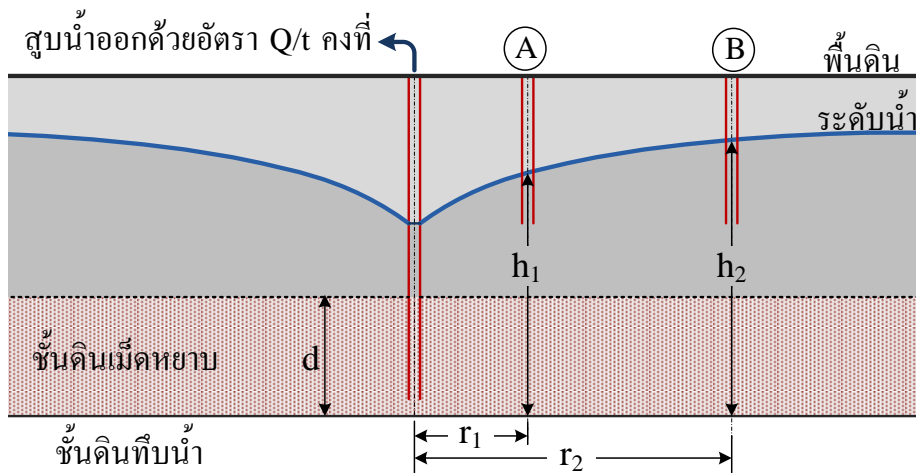


ภาพที่ 2.50 ระดับน้ำในบ่อทดสอบและบ่อสังเกต

ที่มา : มานะ อภิพัฒนมนตรี, 2543:130 และ วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร, 2532 : 76

$$k = \frac{2.3Q \log_{10} \frac{r_2}{r_1}}{\pi t (h_2^2 - h_1^2)} \quad (2.20)$$

มานะ อภิพัฒนมนตรี (2543:131) กล่าวว่ากรณีที่มีชั้นดินเม็ดหยาบหนา  $d$  อยู่ระหว่างชั้นดินที่บ่อน้ำและชั้นดินที่ต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ดังแสดงในภาพที่ 2.51 การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดินกรณีดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.51 ระดับน้ำในบ่อทดสอบและบ่อสังเกตกรณีมีชั้นดินเม็ดหยาบหนาแทรก

ที่มา : มานะ อภิปพัฒนมนตรี, 2543 : 130 และ วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร, 2532 : 76

$$k = \frac{2.3Q \log_{10} \frac{r_2}{r_1}}{2\pi dt(h_2 - h_1)} \quad (2.21)$$

วัฒนา ธรรมมงคล และวินิต ช่อวิเชียร (2532 : 77) ได้อธิบายเพิ่มเติมว่าในกรณีต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดิน  $k$  ที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินก็สามารถทำได้เช่นกัน โดยการฝังท่อที่มีรัศมีภายใน  $r$  ลงไปในชั้นดินนั้นแล้วสูบน้ำเข้าไปภายในท่อด้วยอัตรา  $Q$  ต่อเวลา  $t$  คงที่จนทำให้ระดับน้ำภายในท่อ  $H$  คงที่ด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของดิน  $k$  สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$k = \frac{Q/t}{5.5rH} \quad (2.22)$$

## สรุป

ดินเป็นวัสดุตามธรรมชาติที่ปกคลุมผิวโลกเกิดจากขบวนการผุพังทางธรณีวิทยามีส่วนประกอบของ เม็ดดิน น้ำ อากาศ และอินทรีย์วัตถุ ในทางธรณีวิทยาแบ่งการเรียงตัวของชั้นดินออกเป็น 2 ลักษณะคือ การเรียงตัวของชั้นดินกำเนิดในที่และการเรียงตัวของชั้นดินกำเนิดจากการพัดพา ทั้งนี้นักธรณีวิทยามักกำหนดให้ชั้นดินที่เกิดในที่ที่มีลักษณะเรียงตัวเป็นชั้น ๆ ประกอบด้วย ชั้นดินอินทรีย์ ดินชั้นบน ดินชั้นซิมชะ ดินชั้นล่าง ดินชั้นวัสดุต้นกำเนิด และชั้นหินพื้น ตามลำดับ สำหรับดินกำเนิดจากการพัดพาจะมีการเรียงตัวกันในลักษณะเป็นชั้นดินที่เกิดจากการพัดพาเม็ดดินจากแหล่งกำเนิดไปสะสมแหล่งอื่นโดยอาศัยตัวกลาง เช่น น้ำ แรงลม และ



แรงโน้มถ่วง เป็นต้น เนื่องจากดินตามธรรมชาติมีความซับซ้อนดังนั้นจึงมีความพยายามจำแนกดินในลักษณะต่าง ๆ ประกอบด้วย การจำแนกดินจากขนาดเม็ดดิน การจำแนกดินจากรูปร่างเม็ดดิน และการจำแนกดินจากโครงสร้างดิน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการจำแนกโครงสร้างของดินเม็ดละเอียดที่ได้รับอิทธิพลจากแรงทางไฟฟ้าเคมีจนเกิดการยึดเกาะกันแน่นอีกด้วย

การทดสอบคุณสมบัติดินในทางวิศวกรรมจะช่วยสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ออกแบบและผู้อยู่อาศัย ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือจะต้องสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การทดสอบ การทดสอบคุณสมบัติดินสามารถทำได้ทั้งที่เป็นชั้นดินตามธรรมชาติหรือชั้นดินที่ถูกปรับปรุงขึ้นมาภายหลัง การทดสอบหนึ่งที่น่าสนใจคือการเจาะสำรวจดินเพื่อตรวจสอบลักษณะและคุณสมบัติของชั้นดินตามธรรมชาติ วิธีการเจาะสำรวจมีด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีการขุดบ่อทดสอบ วิธีการเจาะสำรวจชั้นดินด้วยสว่านมือ วิธีการเจาะสำรวจชั้นดินแบบฉีดล้าง และวิธีการเจาะสำรวจชั้นดินแบบเจาะปั่น เป็นต้น นอกจากการเจาะสำรวจดินแล้วยังมีการทดสอบดินทั้งในและนอกห้องปฏิบัติการอีกด้วย การทดสอบดินดังกล่าวมีหลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และการนำผลการทดสอบไปใช้งาน

## คำถามทบทวน

1. ดินมีส่วนสำคัญกับอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างไร จงอธิบายและยกตัวอย่างประกอบ
2. อาคารที่เลือกใช้ฐานรากแผ่ควรก่อสร้างบนชั้นดินลักษณะอย่างไร
3. ดินอินทรีย์คือดินที่มีลักษณะอย่างไรและมีผลเสียอย่างไรต่อการก่อสร้าง
4. การคำนวณและออกแบบเสาเข็มควรทำการทดสอบดินวิธีใดบ้าง
5. โครงสร้างเมื่อดินแบบใดที่สามารถเก็บกักน้ำได้มาก เพราะเหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น
6. ในการถมดินปรับพื้นที่เพื่อการก่อสร้างควรใช้ดินที่มีคุณสมบัติอย่างไรและมีข้อควรระวังอะไรบ้างในขั้นตอนการทำงาน
7. เพราะเหตุใดดินเหนียวจึงมีความที่บวมมากกว่าดินทรายและดินตะกอน
8. ดินเม็ดละเอียดเหมาะกับการก่อสร้างประเภทใด
9. ควรเลือกการเจาะสำรวจดินวิธีใดหากต้องการสำรวจชั้นดินที่เป็นดินทรายปนดินเหนียว พร้อมทั้งให้เหตุผลประกอบ
10. การวัดตัวของชั้นดินตามธรรมชาติมีสาเหตุจากอะไรบ้าง
11. การทดสอบกำลังเฉือนโดยตรงของดินตัวอย่างชนิดหนึ่งครั้งที่ 1 พบว่า เมื่อให้น้ำหนักกด 40 kg กระทำกับดินตัวอย่างในแนวตั้งฉากกับระนาบเฉือน จากนั้นเพิ่มแรงเฉือนจนกระทั่งดินตัวอย่างถูกเฉือนขาดออกจากกัน อ่านค่าแรงเฉือนสูงสุดได้ 36 kg จงหาหน่วยแรงตั้งฉากและหน่วยแรงเฉือนของดินตัวอย่างจากการทดสอบครั้งนี้ กำหนดให้พื้นที่รับน้ำหนักกดและแรงเฉือน  $31.67 \text{ cm}^2$  (ตอบ : หน่วยแรงตั้งฉาก = 1.33 ksc และหน่วยแรงเฉือน = 1.14 ksc)
12. การทดสอบการไหลซึมแบบระดับคงที่ของดินตัวอย่างชนิดหนึ่งพบว่า เมื่ออุปกรณ์ใช้อุปกรณ์ทดสอบที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด  $45 \text{ cm}^2$  และมีระยะที่น้ำไหลซึมผ่านดิน 20 cm จากนั้นปล่อยน้ำให้ไหลผ่านดินตัวอย่างโดยรักษาระดับน้ำให้คงที่ที่ผลต่าง  $h$  เท่ากับ 30 cm ผลการทดสอบพบว่าภายในระยะเวลา 60 s มีน้ำไหลซึมผ่านดิน  $156 \text{ cm}^3$  จงหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ดินตัวอย่างนี้ (ตอบ : ค่าสัมประสิทธิ์การซึม =  $38.5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ )

### บทที่ 3

## ปูนขาว ซีเมนต์ และคอนกรีต

ปูนขาว ซีเมนต์ และคอนกรีตถือได้ว่าเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนาน นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยพบว่าปูนขาวถูกใช้ในงานก่อและฉาบผนังอาคารมาตั้งแต่สมัยโบราณ หลังจากนั้นปูนขาวก็ได้ถูกพัฒนาให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้นและถูกใช้งานหลากหลายประเภทมากขึ้น ต่อมาเมื่อซีเมนต์ถูกคิดค้นก็ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง ซึ่งงานที่ผลิตจากซีเมนต์จะมีความสวยงามเหมือนกับปูนขาวแต่มีความแข็งแรงมากกว่า นอกจากนี้คอนกรีตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากซีเมนต์ก็ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างอาคารและสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ โดยคอนกรีตมักใช้งานร่วมกับเหล็กเส้นหรือลวดเหล็กแรงดึงสูงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าปูนขาว ซีเมนต์ และคอนกรีตมีความสำคัญกับอุตสาหกรรมก่อสร้าง ดังนั้นบทนี้จึงนำเสนอเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับวัสดุทั้งสามชนิดโดยมุ่งเน้นที่ซีเมนต์และคอนกรีตเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

### ปูนขาว

ปูนขาว (Lime) เป็นวัสดุที่ใช้งานแพร่หลายในการก่อสร้างมีลักษณะเป็นผงหรือก้อนมีสีขาวและมีส่วนประกอบหลักคือ แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide : CaO) เมื่อนำปูนขาวมาทำปฏิกิริยากับน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง ปูนขาวสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายทั้งในอุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมกระดาษกรอง กระบวนการผลิตปูนขาวเริ่มจากการนำวัตถุดิบจำพวกหินปูนหรือวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate : CaCO<sub>3</sub>) มาเผาเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากวัตถุดิบจนหมดโดยใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000°C เมื่อเผาเสร็จแล้วจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมออกไซด์และบางส่วนเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide : MgO) หรือเรียกอีกอย่างว่า ปูนสุก (Quicklime) เมื่อนำปูนสุกมาทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide : Ca(OH)<sub>2</sub>) ที่มีส่วนประกอบของสารแขวนลอยเรียกว่า น้ำปูนใส (Milk of Lime) และส่วนที่เป็นผงแห้งเรียกว่า ปูนขาว รายละเอียดประเภทของปูนขาวและการนำไปใช้งานมีดังต่อไปนี้ (พงศ์พันธ์ วรสุนทร โรสด และวรพงศ์ วรสุนทร โรสด. 2555 : 104-112, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.202. 2548 : 1-5 และ มอก.319. 2551 : 1-4)

## 1. ประเภทของปูนขาว

หินปูนที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบผลิตปูนขาวมักมีแมกนีเซียมคาร์บอเนตปนอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกันส่งผลให้คุณสมบัติของปูนขาวที่ได้มีความแตกต่างกันด้วย ตามข้อกำหนดในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.202. 2548 : 1-5 และ มอก.319. 2551 : 1-4) แบ่งหินปูนที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบผลิตปูนขาวออกเป็น 3 กลุ่มประกอบด้วย กลุ่มแรกคือหินปูนแคลเซียมสูง (High Calcium Limestone) เป็นหินปูนที่มีปริมาณแมกนีเซียมคาร์บอเนตไม่เกินร้อยละ 5 กลุ่มที่สองคือหินปูนแมกนีเซียม (Magnesium Limestone) เป็นหินปูนที่มีปริมาณแมกนีเซียมคาร์บอเนตอยู่ระหว่างร้อยละ 5-35 และกลุ่มที่สามคือหินปูนโดโลไมต์ (Dolomitic Limestone) เป็นหินปูนที่มีปริมาณแมกนีเซียมคาร์บอเนตอยู่ระหว่างร้อยละ 35-46 ตามลำดับ นอกจากนี้หากพิจารณากรรมวิธีการผลิตก็จะสามารถแบ่งประเภทของปูนขาวออกเป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

1.1 ปูนสุกเป็นปูนที่ผลิตจากการเผาหินปูนหรือวัตถุดิบโดยไม่ผ่านการทำปฏิกิริยากับน้ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณสมบัติตามชนิดของหินปูนหรือวัตถุดิบ เช่น ปูนสุกแคลเซียมสูง (High Calcium Quick Lime) ปูนสุกแมกนีเซียม (Magnesium Quick Lime) และปูนสุกโดโลไมต์ (Dolomitic Quick Lime) เป็นต้น ปูนสุกมีขนาดเม็ดปูนไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการเผา ปูนสุกแบ่งเป็น 4 ขนาดคือ ปูนสุกผง (Pulverized) มีขนาดไม่เกิน 850  $\mu\text{m}$  ปูนสุกเม็ด (Granular) มีขนาดอยู่ระหว่าง 850  $\mu\text{m}$ -6.4 mm ปูนสุกก้อนเล็ก (Pebble) มีขนาดอยู่ระหว่าง 6.4-64 mm และปูนสุกก้อนใหญ่ (Large Lump) มีขนาดอยู่ระหว่าง 64-203 mm

1.2 ปูนขาว (Hydrated Lime) เป็นปูนชนิดผงแห้งที่มีกรรมวิธีการผลิตจากการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนสุกกับน้ำในปริมาณที่เพียงพอ ผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งเป็น 3 ชนิดคือ ปูนขาวแคลเซียมสูงเป็นปูนขาวที่มีเฉพาะแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบในเนื้อปูน ชนิดที่สองเป็นปูนขาวโดโลไมต์ที่ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ และชนิดที่สามเป็นปูนขาวโดโลไมต์ที่ประกอบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ

## 2. การใช้งานปูนขาว

อุตสาหกรรมก่อสร้างนำปูนขาวไปใช้ประโยชน์หลากหลายรูปแบบ เช่น ใช้ปูนขาวเป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ ใช้เติมในแอสฟัลต์สำหรับการก่อสร้างพื้นผิวการจราจร ใช้เป็นส่วนผสมร่วมกับซีเมนต์และทรายเพื่อใช้ในการงานก่อและฉาบผนังอาคาร เป็นต้น ปูนขาวเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจะกลายเป็นของแข็งที่หดตัวเพียงเล็กน้อยจึงนิยมนำไปผสมร่วมกับซีเมนต์เพื่อลดการแตกร้าว ปูนขาวยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถนนวนกันความร้อนได้ดีเพราะมีค่าการนำความร้อนต่ำ นอกจากนี้ปูนขาวยังสามารถใช้บำบัดความกระด้างของน้ำได้อีกด้วย

โดยปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ละลายในน้ำกระด้างและกลายเป็นตะกอน อย่างไรก็ตาม ปูนขาวยังมีจุดด้อยคือเกิดพลังงานความร้อนสูงขณะทำปฏิกิริยากับน้ำ

การใช้ประโยชน์ปูนขาวในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า เช่น ใช้ปูนขาวบริสุทธิ์ในการทำปฏิกิริยากับสารเจือปนที่มีอยู่ในเหล็กเพื่อให้ผลิตภัณฑ์เหล็กที่ได้มีคุณภาพสูงขึ้น เป็นต้น สำหรับอุตสาหกรรมการเกษตรใช้ประโยชน์จากปูนขาว เช่น ใช้ปูนขาวในการปรับสภาพความเป็นกรดหรือด่างในดินเพื่อทำให้แบคทีเรียบางชนิดสามารถเปลี่ยนไนโตรเจนได้ดียิ่งขึ้น เป็นต้น สำหรับอุตสาหกรรมอาหารและยาใช้ประโยชน์จากปูนขาว เช่น ใช้ปูนขาวเป็นวัตถุคิบบในการผลิตสารเคมีที่ใช้ผสมในยา การเติมปูนขาวในน้ำเชื่อมเพื่อลดความเป็นกรดและทำให้สิ่งเจือปนในน้ำเชื่อมตกตะกอน และใช้ปูนขาวดูดคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ผักและผลไม้สามารถเก็บไว้ได้นาน เป็นต้น

## ซีเมนต์

ซีเมนต์ (Cement) หรือปูนซีเมนต์เป็นวัสดุชนิดผงสีเทาหรือเทาเข้มเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วจะกลายเป็นวัสดุแข็งคล้ายหิน ซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำในช่วงแรกจะอยู่ในสถานะของเหลวจึงสามารถเทใส่แบบหล่อที่มีรูปร่างตามที่ต้องการได้ ซีเมนต์มักถูกใช้ร่วมกับวัสดุมวลรวมอื่นที่มีคุณสมบัติเป็นสารเจือ โดยซีเมนต์จะทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานวัสดุมวลรวมต่าง ๆ ให้ยึดติดเข้าด้วยกัน ความแข็งแรงของซีเมนต์หลังจากการทำปฏิกิริยากับน้ำจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ประเภทของซีเมนต์ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ ความแข็งแรงของวัสดุมวลรวม ปริมาณช่องว่างภายในชิ้นงาน และวิธีการบ่ม เป็นต้น ซีเมนต์สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ผลิตเครื่องเรือน ผลิตวัสดุตกแต่ง และผลิตชิ้นงานทางศิลปกรรม เป็นต้น สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างมักใช้ซีเมนต์ร่วมกับทรายและหินซึ่งเรียกว่า คอนกรีต รายละเอียดของซีเมนต์มีดังต่อไปนี้ (กวี หวังนิเวศน์กุล. 2548 : 48-63, บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. 2552, วินิต ช่อวิเชียร. 2544 และ Neville A.M. and Brooks J.J. 2010)

### 1. ประวัติการคิดค้นและพัฒนาซีเมนต์

บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (2552 : 1-3) กล่าวว่าซีเมนต์ได้ถูกคิดค้นและมีการใช้งานมาตั้งแต่อดีต เริ่มตั้งแต่เมื่อ 5,100 ปีก่อนพุทธกาลได้มีการใช้วัตถุคิบบคล้ายซีเมนต์ในงานก่อสร้างบริเวณริมฝั่งแม่น้ำดานูป การศึกษาซีเมนต์เริ่มเป็นรูปธรรมมากขึ้นในปี พ.ศ. 2299 เมื่อวิศวกรชาวอังกฤษชื่อ จอห์น สมีตัน (John Smeaton) ได้ศึกษาการนำวัตถุคิบบหินปูนผสมดินเหนียวมาเผาและศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของปูนขาวที่แข็งตัวได้ในน้ำ (Hydraulic Lime) ต่อมาในปี พ.ศ. 2339 เจมส์ ปาร์คเกอร์ (James Parker) นำหินปูนที่มีส่วนประกอบของซิลิกา (Silica)

และอะลูมินา (Alumina) มาเผาจนได้ซีเมนต์ที่แข็งตัวในน้ำ (Hydraulic Cement) และได้จดสิทธิบัตรปูนซีเมนต์ในนาม ซีเมนต์โรมัน (Roman Cement) ต่อมาในปี พ.ศ. 2356 วิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ โจเซฟ ไวแคต (Joseph Vicat) ได้ศึกษาคุณสมบัติซีเมนต์ที่เกิดจากการเผาส่วนผสมระหว่างหินชอล์ก (Chalk) และดินเหนียวบดละเอียดเพื่อใช้ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

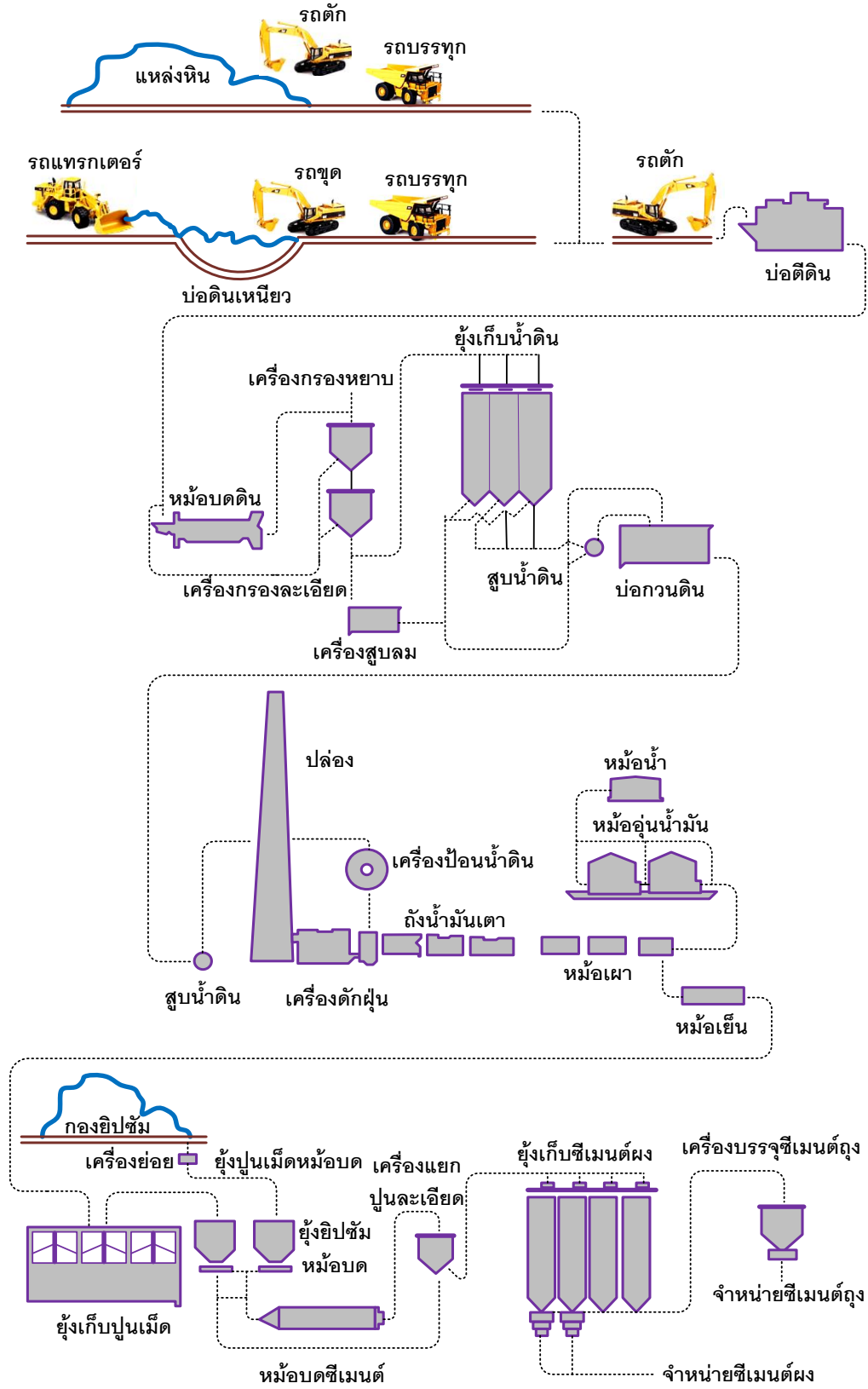
ต้นแบบของซีเมนต์ในปัจจุบันถูกคิดค้นในปี พ.ศ. 2367 โดยช่างก่อสร้างชาวอังกฤษชื่อ โจเซฟ แอสพดิน (Joseph Aspdin) เขาได้ศึกษาการนำหินปูนผสมกับปูนขาวและดินเหนียวที่บดละเอียดในน้ำจนกลายเป็นน้ำโคลนข้น จากนั้นนำวัสดุผสมดังกล่าวที่แห้งแล้วไปเผาจนคาร์บอนไดออกไซด์ระเหยออกหมดจนกลายเป็นเม็ดซีเมนต์ เมื่อนำเม็ดซีเมนต์ไปบดให้ละเอียดก็จะกลายเป็นซีเมนต์ผงสำหรับใช้งาน ซีเมนต์ชนิดนี้เมื่อแข็งตัวจะมีสีเหลืองปนเทาคล้ายกับหินก่อสร้างที่เมืองพอร์ตแลนด์ประเทศอังกฤษ ดังนั้นเขาจึงจดสิทธิบัตรซีเมนต์นี้ในนาม ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ต่อมาในปี พ.ศ. 2388 ไอแซค ชาลส์ จอห์นสัน (Isaac Charles Johnson) ได้ศึกษาคุณสมบัติซีเมนต์ผงจากการบดเม็ดซีเมนต์ที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง เขาพบว่าผงซีเมนต์ดังกล่าวเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะแข็งตัวช้าลงแต่มีคุณภาพดีขึ้นและเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) เขายังได้พัฒนากระบวนการเผาวัตถุดิบจนรวมตัวกันเป็นเม็ดเรียกว่า ปูนเม็ด (Clinker) แล้วจึงทำการบดปูนเม็ดให้เป็นผงซึ่งเป็นต้นแบบกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ในปัจจุบัน

## 2. กรรมวิธีการผลิตซีเมนต์

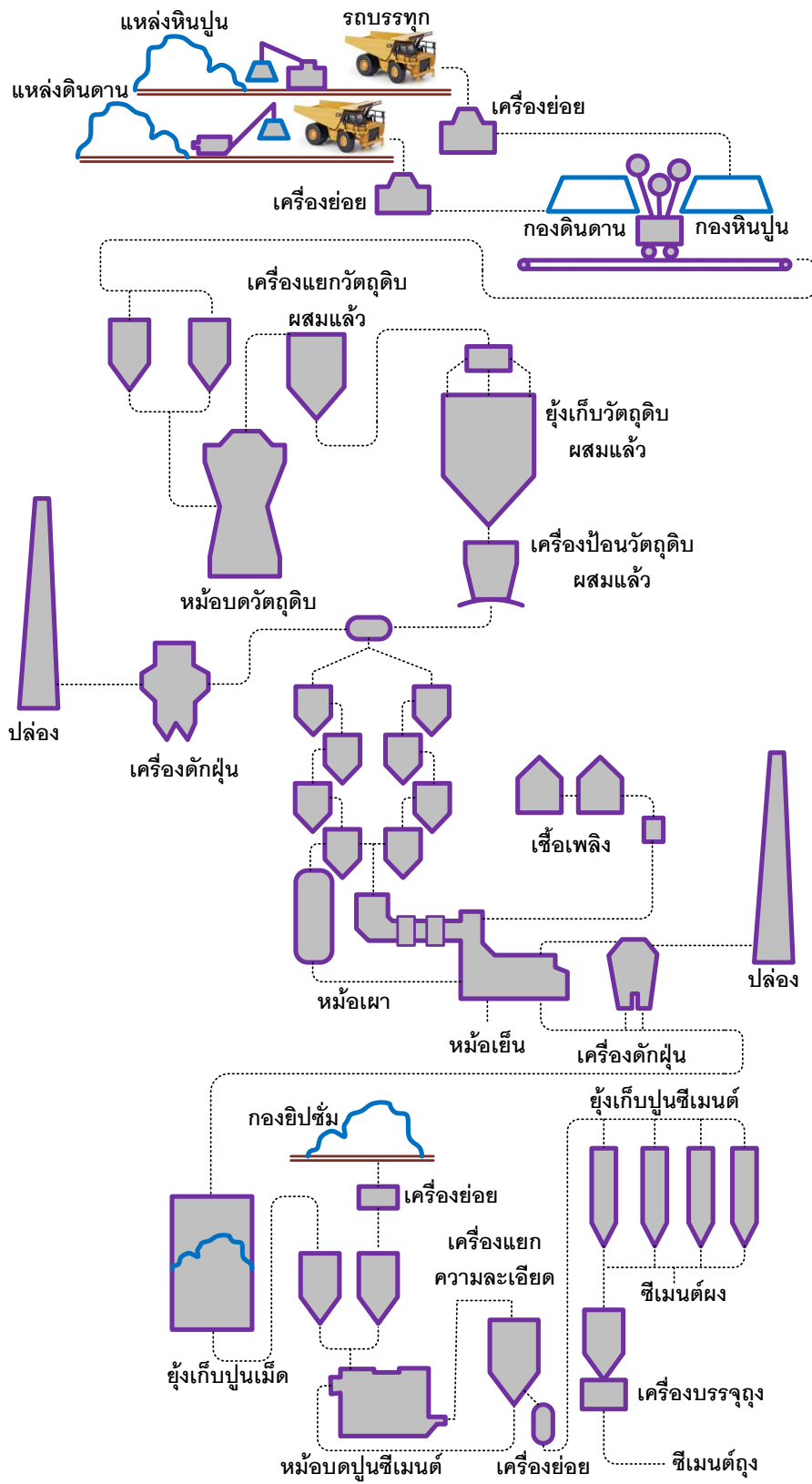
กวี หวังนิเวศน์กุล (2548: 52-54) และ บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (2552 : 9-10) นำเสนอว่ากรรมวิธีการผลิตซีเมนต์แบ่งเป็น 2 วิธีคือวิธีผลิตซีเมนต์แบบเปียกและวิธีผลิตซีเมนต์แบบแห้ง รายละเอียดกรรมวิธีการผลิตซีเมนต์มีดังต่อไปนี้

2.1 การผลิตซีเมนต์แบบเปียก (Wet Process) เป็นวิธีการผลิตซีเมนต์ที่ใช้วัตถุดิบหลักคือดินสอพองหรือดินขาว (Marl) และดินเหนียว ขั้นตอนการผลิตเริ่มต้นจากการนำวัตถุดิบทั้งสองมาผสมกับน้ำในบ่อตีดินและกวนให้วัตถุดิบเข้ากัน นำวัตถุดิบที่ผสมเข้ากันดีแล้วไปบดให้ละเอียดในหม้อบดดินจนได้น้ำดิน นำน้ำดินไปรวมกันที่บ่อกวนดินเพื่อกวนให้ส่วนผสมรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้งหนึ่ง ปล่อยให้ให้น้ำระเหยออกจนหมดแล้วจึงจะเอาส่วนที่เหลือไปเผาไล่ความชื้นในหม้อเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) เมื่อความชื้นหมดไปแล้วก็จะยังคงเผาต่อไปอีกที่อุณหภูมิประมาณ 1,400-1,500°C จนกว่าจะได้ปูนเม็ด นำปูนเม็ดที่ได้ไปผสมกับยิปซัมแล้วบดให้ละเอียดในหม้อบดซีเมนต์ สิ่งที่ได้ภายหลังจากการบดคือซีเมนต์ผง นำซีเมนต์ผงที่ได้ไปเก็บในถังเพื่อรอจำหน่ายต่อไป ภาพที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการผลิตซีเมนต์แบบเปียก





ภาพที่ 3.1 วิธีการผลิตซีเมนต์แบบเปียก  
 ที่มา : สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. ม.ป.ป.



ภาพที่ 3.2 วิธีการผลิตซีเมนต์แบบแห้ง  
ที่มา : สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. ม.ป.ป.

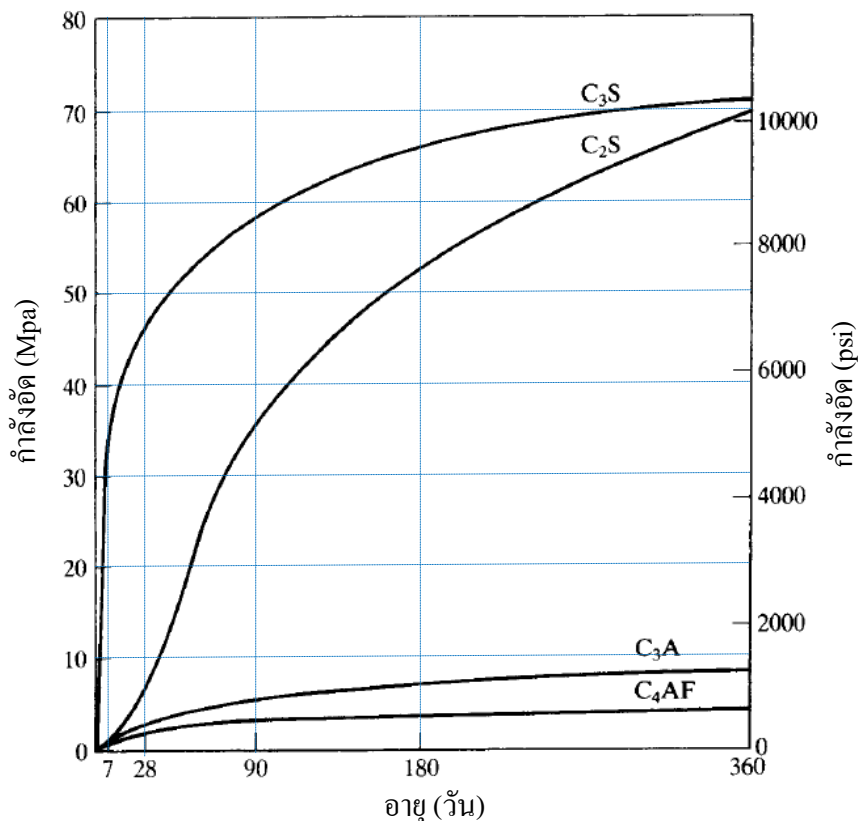
2.2 การผลิตซีเมนต์แบบแห้ง (Dry Process) เป็นกรรมวิธีการผลิตซีเมนต์ที่มีหินปูนและดินดานเป็นวัตถุดิบหลักผสมร่วมกับวัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติซีเมนต์ ขั้นตอนการผลิตเริ่มต้นจากการนำวัตถุดิบไปบดให้เป็นผงละเอียดที่หีบอบค ผสมวัตถุดิบที่เป็นผงละเอียดเข้าด้วยกันตามอัตราส่วนผสมโดยไม่ใช้น้ำ นำวัตถุดิบที่ผสมดีแล้วไปเผาในหม้อเผาแบบหมุนโดยแบ่งกระบวนการเผาเป็นสองขั้นตอนคือ ช่วงแรกเป็นการเผาโดยเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ เพื่อไล่ความชื้นในวัตถุดิบ และช่วงที่สองเป็นการเผาโดยใช้อุณหภูมิสูงประมาณ  $1,200-1,400^{\circ}\text{C}$  จนได้ปูนเม็ด นำปูนเม็ดไปบดจนกลายเป็นผงละเอียดและจัดเก็บเพื่อรอการจำหน่ายต่อไป ภาพที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการผลิตซีเมนต์แบบแห้ง

### 3. องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์

องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบที่มีในเม็ดปูนที่ได้จากกระบวนการเผา บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (2552 : 11-12) และ Neville A.M. and Brooks J.J. (2010 : 8-15) กล่าวว่าเมื่อวัตถุดิบถูกเผาที่อุณหภูมิสูงจนน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์หมดไปจะได้ผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยออกไซด์หลักคือ แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide :  $\text{CaO}$ ) และออกไซด์รอง 3 ชนิดคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide :  $\text{SiO}_2$ ) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และไอเอิร์นออกไซด์ (Iron Oxide :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ตามลำดับเมื่อออกไซด์ทั้งหมดรวมตัวกันก็จะเกิดเป็นสารประกอบหลักอีก 4 ชนิดคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate :  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate :  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium Aluminate :  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite :  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ตามลำดับ ปริมาณสารประกอบทั้งสี่ชนิดคิดเป็นร้อยละ 90 ของซีเมนต์ทั้งหมดที่ได้จากขบวนการผลิต ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 10 เป็นสารประกอบอื่น เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ ปูนขาวอิสระ ยิปซัม และอัลคาไลที่ออกไซด์ เป็นต้น รายละเอียดคุณสมบัติสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิดมีดังต่อไปนี้

3.1 ไตรแคลเซียมซิลิเกตหรือ  $\text{C}_3\text{S}$  เป็นสารประกอบที่มีสีเทาเข้มและมีผลึกรูปหกเหลี่ยม สารประกอบนี้มีประมาณร้อยละ 35-55 ของปริมาณสารประกอบทั้งหมดที่ได้จากกระบวนการผลิต เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำจะเกิดความร้อนประมาณ 500 จูลต่อกรัม (J/g) และกลายเป็นของแข็งภายในระยะเวลา 2-3 ชั่วโมง ภาพที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาในการพัฒนากำลังอัดของสารประกอบทั้ง 4 ชนิดภายในเวลา 360 วัน จากภาพพบว่าของแข็งจากสารประกอบ  $\text{C}_3\text{S}$  มีคุณสมบัติต้านทานการอัดหรือกำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับของแข็งที่ได้จากสารประกอบอื่น โดยที่ของแข็งชนิดนี้สามารถพัฒนากำลังอัดได้อย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 7 วัน แต่หลังจากนั้นจะค่อย ๆ พัฒนากำลังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

3.2 ไตรแคลเซียมซัลไฟด์หรือ  $C_2S$  เป็นสารประกอบที่มีผลึกรูปร่างกลมเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดความร้อนประมาณ 250 J/g และจะเริ่มกลายเป็นของแข็งอย่างช้า ๆ เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง หากนำของแข็งดังกล่าวไปทดสอบกำลังอัดพบว่าการพัฒนากำลังอย่างเชื่องช้าในช่วง 7 วันแรก แต่หลังจากนั้นการพัฒนากำลังจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีกำลังอัดใกล้เคียงกับของแข็งจากสารประกอบ  $C_3S$  เมื่อเวลาผ่านไป 360 วัน สารประกอบ  $C_2S$  มีปริมาณร้อยละ 15-35 ของปริมาณสารประกอบทั้งหมด



ภาพที่ 3.3 การพัฒนากำลังอัดขององค์ประกอบทางเคมีในซีเมนต์

ที่มา : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด. 2552 : 13 และ Neville A.M. and Brooks J.J.

2010 : 15

3.3 ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตหรือ  $C_3A$  เป็นสารประกอบสี่เหลี่ยมมีผลึกรูปเหลี่ยมมุม เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะกลายเป็นของแข็งอย่างรวดเร็วและเกิดความร้อนประมาณ 850 J/g เมื่อนำของแข็งดังกล่าวไปทดสอบที่อายุ 360 วันพบว่ามีความแข็งแรงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับของแข็งจาก  $C_3S$  และ  $C_2S$  การพัฒนากำลังอัดของแข็ง  $C_3A$  จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเฉพาะช่วง 1-2 วันแรก แต่หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างเชื่องช้า การหน่วงการทำปฏิกิริยาของ  $C_3A$  ทำได้โดยการเติมยิปซัมบดละเอียด ปริมาณ  $C_3A$  มีประมาณร้อยละ 7-15 ของปริมาณสารประกอบทั้งหมด

3.4 เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์หรือ  $C_4AF$  เป็นสารประกอบที่มีปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารประกอบอื่น ปริมาณ  $C_4AF$  คิดเป็นร้อยละ 5-10 ของปริมาณสารประกอบทั้งหมด เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะกลายเป็นของแข็งอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาเพียงไม่กี่นาที กำลังอัดที่อายุ 360 วันก่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับของแข็งจากสารประกอบ  $C_3S$  และ  $C_2S$  ความร้อนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับน้ำประมาณ 420 J/g

#### 4. ประเภทของซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ซีเมนต์พอร์ตแลนด์แบ่งเป็น 5 ประเภทดังต่อไปนี้ (บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. 2552 : 18-19, วินิต ช่อวิเชียร. 2544 : 13-18 และ Neville A.M. and Brooks J.J. 2010 : 21-33)

ประเภทที่ 1 ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นซีเมนต์ที่ผลิตและมีการใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับงานทั่วไป เช่น อาคาร สะพาน ถนน หรือกำแพงกันดิน เป็นต้น ซีเมนต์ประเภทนี้ควรใช้งานภายใต้สภาพแวดล้อมปกติ เช่น ไม่สัมผัสน้ำทะเล ไม่สัมผัสสารเคมี หรือไม่ควรใช้กับพื้นที่ร้อนจัดหรือหนาวจัด เป็นต้น ตัวอย่างซีเมนต์ประเภทที่ 1 ที่วางจำหน่ายตามท้องตลาด เช่น ปูนซีเมนต์ตราช้างแดง ตราเพชร ตราพญานาคเขียว และตราที่พีไอแดง เป็นต้น

ประเภทที่ 2 ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นซีเมนต์ที่ดัดแปลงขึ้นเพื่อดำเนินงานชลประทานกลางเกิดความร้อนในช่วงแรกต่ำกว่าซีเมนต์ประเภทที่ 1 ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้ในงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือพื้นที่มีชลประทานกลาง ซีเมนต์ประเภทนี้ไม่มีการผลิตในประเทศไทย

ประเภทที่ 3 ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ให้กำลังเร็ว (High Early Strength Portland Cement) เป็นซีเมนต์ที่มีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วและให้กำลังอัดสูงในระยะเวลาอันสั้น ซีเมนต์ประเภทนี้มีความละเอียดมากกว่าซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็วหรืองานซ่อมแซม ไม่ควรใช้ซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างขนาดใหญ่เพราะเกิดความร้อนสูงจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงอาจทำให้เกิดรอยแตกร้าว ตัวอย่างซีเมนต์ประเภทที่ 3 ที่วางจำหน่ายตามท้องตลาด เช่น ปูนซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราช้างม่วง และตราพญานาคแดง เป็นต้น

ประเภทที่ 4 ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เป็นซีเมนต์ที่เกิดความร้อนต่ำขณะแข็งตัว ซีเมนต์ประเภทนี้เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลายหรืองานก่อสร้างที่ต้องใช้คอนกรีตปริมาณมากเนื่องจากอุณหภูมิขณะแข็งตัวต่ำจึงช่วยลดการแตกร้าวภายในได้

ประเภทที่ 5 ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulphate Resistance Portland Cement) ซีเมนต์ประเภทนี้มีไทรแคลเซียมอะลูมิเนตต่ำเพื่อต้านทานซัลเฟตจากภายนอก เป็นซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างที่ได้รับผลกระทบจากซัลเฟตหรือมีความเป็นด่างสูง ซีเมนต์ประเภทนี้มีการพัฒนากำล้างอย่างช้า ๆ และให้ความร้อนต่ำ ตัวอย่างซีเมนต์ประเภทที่ 5 ที่วางจำหน่ายตามท้องตลาด เช่น ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม ตราช้างฟ้า ตราทีพีไอฟ้า เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีซีเมนต์พิเศษอีกหลายประเภท เช่น ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ขาว (White Portland Cement) เป็นซีเมนต์ที่ควบคุมปริมาณไอเอิร์นออกไซด์ไม่ให้เกินร้อยละ 1 จึงทำให้ซีเมนต์มีสีขาวมักใช้ในงานตกแต่ง ซีเมนต์ผสมเสร็จ (Ready Mixed Cement) เป็นซีเมนต์ที่มีวัสดุผสมคละกันในอัตราส่วนที่กำหนดเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งานเฉพาะอย่าง เช่น งานก่อ หรืองานฉาบ เป็นต้น ซีเมนต์ซิลิกา (Silica Cement) เป็นซีเมนต์ที่ผสมวัสดุละเอียด เช่น หินปูน ทราย หรือดินดาน เป็นต้น โดยวัสดุละเอียดจะถูกบดให้ละเอียดและผสมประมาณร้อยละ 25-30 ร่วมกับยิปซัมประมาณร้อยละ 4 ซีเมนต์ซิลิกามีระยะเวลาก่อตัวช้ากว่าซีเมนต์ประเภทที่ 1 จึงลดการแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตได้ดี ตัวอย่างซีเมนต์ซิลิกาที่วางจำหน่าย เช่น ตราเสือ ตรางูเห่า ตราดอกบัว และตราทีพีไอเขียว เป็นต้น

## 5. ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน

Neville A.M. and Brooks J.J. (2010 : 15-28) นำเสนอปัจจัยด้านต่าง ๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์และน้ำมีดังต่อไปนี้

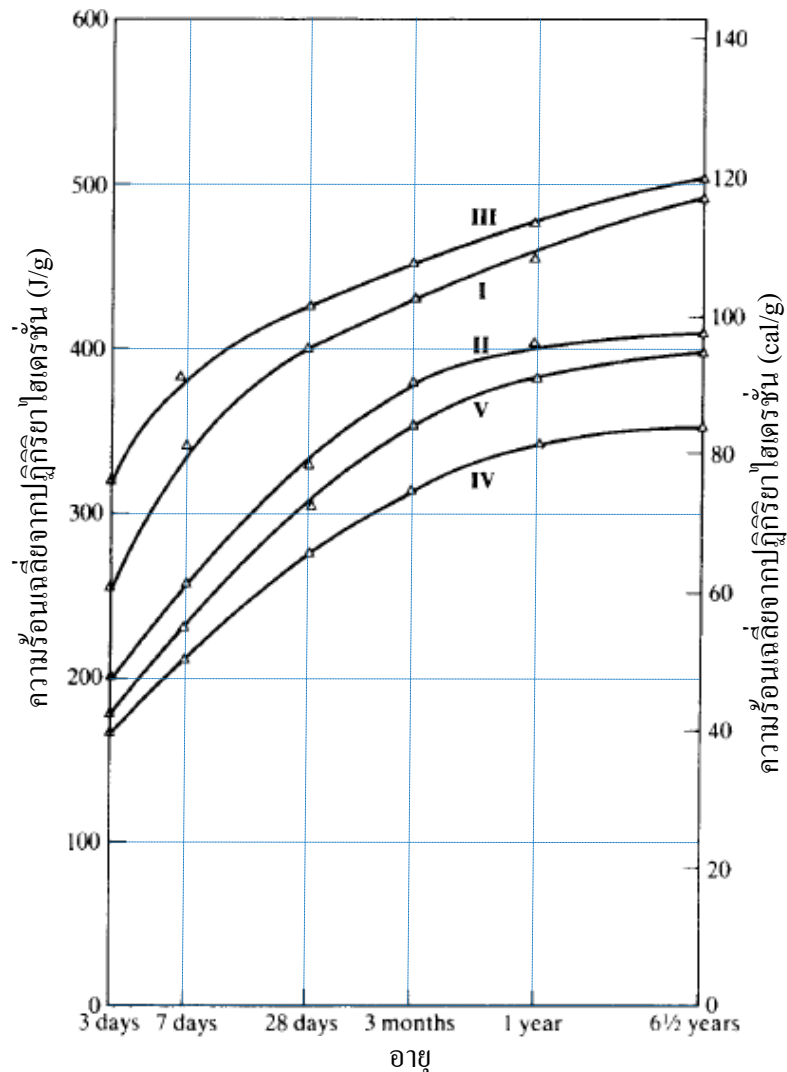
5.1 ปริมาณสารประกอบหลักที่เป็นส่วนผสมในซีเมนต์มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยไทรแคลเซียมอะลูมิเนตและเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ไทรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกตใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ยาวนานกว่าดังที่แสดงในภาพที่ 3.3

5.2 ความละเอียดของซีเมนต์มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยซีเมนต์ที่มีผงละเอียดมากจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันรวดเร็วกว่าซีเมนต์ที่มีผงหยาบเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้ำมากกว่า อย่างไรก็ตามความละเอียดของซีเมนต์มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการพัฒนากำล้างอัดในระยะยาว

5.3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน หากปริมาณน้ำมากเกินไปจะทำให้เกิดน้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยาส่งผลทำให้กำลังอัดลดลง ในขณะที่ปริมาณน้ำน้อยจนเกินไปก็จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงต้องรักษาระดับความชื้นด้วยวิธีการบ่มอย่างต่อเนื่องเพื่อทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินไปอย่างสมบูรณ์



5.4 อุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเร่งการเกิดปฏิกิริยาในขณะที่อุณหภูมิต่ำจะหน่วงการเกิดปฏิกิริยา โดยปกติแล้วเมื่อซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดความร้อนขึ้นส่งผลให้น้ำจำนวนหนึ่งระเหยจนอาจทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันไม่สมบูรณ์ หากน้ำระเหยออกไปเร็วเกินไปก็จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการแตกร้าวอีกด้วย นอกจากนั้นอุณหภูมิจากสภาพแวดล้อมก็ส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 3.4 ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ

ที่มา : Neville A.M. and Brooks J.J. 2010 : 26

ภาพที่ 3.4 แสดงปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ เป็นส่วนผสมโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.40 และบ่มขึ้นต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 21°C จากภาพดังกล่าวพบว่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงสุดเกิดกับซีเมนต์ประเภทที่ 3

ซึ่งเป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้กำลังเร็วและมีความละเอียดสูง รองลงมาเป็นซีเมนต์ประเภทที่ 1 ประเภทที่ 2 ประเภทที่ 5 และประเภทที่ 4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทั้งความละเอียดและปริมาณสารประกอบในซีเมนต์ต่างมีผลต่อปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

5.5 น้ำยาเคมีผสมเพิ่มมีผลต่อการเร่งหรือการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน งานก่อสร้างบางประเภทต้องการให้มีการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วจึงต้องผสมน้ำยาเคมีเพื่อเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น งานซ่อมแซม เป็นต้น ในขณะที่งานก่อสร้างบางประเภทต้องการยืดระยะเวลาของปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงต้องผสมน้ำยาเคมีเพื่อหน่วง เช่น คอนกรีตผสมเสร็จที่ต้องใช้เวลาในการขนส่งระยะทางไกล หรืองานเทคอนกรีตหลา เป็นต้น

## 6. การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์และซีเมนต์มอร์ตาร์

การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์และซีเมนต์มอร์ตาร์มีความสำคัญต่อการนำซีเมนต์ไปใช้งาน ถ้าซีเมนต์มีคุณภาพดีย่อมส่งผลดีต่อชิ้นงานหรือ โครงสร้างที่นำซีเมนต์นั้น ไปใช้งาน หากกล่าวถึงมาตรฐานที่ใช้ทดสอบซีเมนต์และซีเมนต์มอร์ตาร์มีอยู่ด้วยกันหลายมาตรฐาน เช่น มาตรฐานสมาคมเพื่อทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา (ASTM) มาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศอังกฤษ (BS) และมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศเยอรมัน (Deutsches Institut Fur Normung : DIN) เป็นต้น การทดสอบซีเมนต์และซีเมนต์มอร์ตาร์ของประเทศไทยมักอ้างอิงจากข้อกำหนดของหน่วยงานด้านวิศวกรรมภายในประเทศร่วมกับมาตรฐาน ASTM รายละเอียดการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์และซีเมนต์มอร์ตาร์มีดังต่อไปนี้ (กรมชลประทาน. 2552 และ อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์. 2543)

6.1 ความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์ (Specific Gravity of Cement) มาตรฐาน ASTM C188 เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราส่วนน้ำหนักของซีเมนต์ต่อน้ำหนักน้ำบริสุทธิ์ที่มีปริมาตรเท่ากัน วิธีทดสอบนี้ใช้หลักการแทนที่ซีเมนต์ด้วยน้ำมันก๊าด (Kerosene) ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นจากการเทน้ำมันก๊าดใส่ในขวดทดลองมาตรฐานเลอแซททีเลียร์ (Standard Le Chatelier Flask) แล้วอ่านค่าปริมาตรและชั่งน้ำหนัก นำซีเมนต์อบแห้งจำนวนหนึ่งใส่ในขวดทดลองที่มีน้ำมันก๊าดจากนั้นอ่านค่าปริมาตรและน้ำหนัก โดยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือน้ำหนักซีเมนต์และปริมาตรที่เพิ่มคือปริมาตรของซีเมนต์ นำค่าที่อ่านได้ไปคำนวณหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะตามลำดับ ข้อควรระวังคือควรไล่ฟองอากาศออกให้หมดและซีเมนต์ควรจมในน้ำมันก๊าดทั้งหมด ความถ่วงจำเพาะซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยทั่วไปมีค่าระหว่าง 3.00-3.20 สำหรับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าประมาณ 3.15

6.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ (Setting Time of Cement) เป็นการหาระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ผสมน้ำ หรือเรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) เปลี่ยนสถานะ

จากของเหลวกลายเป็นของแข็งและมีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน วิธีทดสอบที่นิยมใช้หาระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์คือการใช้เข็มไวแคต (Setting Time of Cement by Vicat Needle) ตามมาตรฐาน ASTM C191 โดยมาตรฐานดังกล่าวจะแบ่งระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์ออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงเริ่มก่อตัว (Stiffening Time) ช่วงก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time) และช่วงก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time) ตามลำดับ ซีเมนต์เพสต์ในภาวะเริ่มต้นจะมีลักษณะอ่อนนุ่มและปั้นได้ง่ายเมื่อนำเข็มมาตรฐานไวแคตดังแสดงในภาพที่ 3.5(ก) ไปทดสอบจะทำให้เข็มจมลงไป ในซีเมนต์เพสต์ดังแสดงในภาพที่ 3.5(ข) เมื่อปล่อยให้เวลาผ่านไปปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะเกิดขึ้นจนทำให้ความอ่อนนุ่มของซีเมนต์เพสต์ลดลงส่งผลทำให้เข็มไวแคตจมตัวลดลงด้วย



(ก) ชุดทดสอบเข็มไวแคต



(ข) การจมตัวของเข็มไวแคตในซีเมนต์เพสต์

### ภาพที่ 3.5 การหาระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

ถ้าซีเมนต์เพสต์สามารถต้านทานแรงได้ 5 ksc จะถือว่าอยู่ในช่วงเริ่มก่อตัว ถ้าเข็มไวแคตจมตัวลงน้อยกว่า 25 mm ภายในเวลา 30 วินาที หรือต้านทานแรงได้ 35 ksc จะเรียกว่า การก่อตัวระยะต้น หลังจากนั้นเมื่อปล่อยให้ไว้อีกซีเมนต์เพสต์จะก่อตัวเป็นของแข็งจนสามารถต้านทานแรงได้ 276 ksc จะเรียกว่า การก่อตัวระยะปลาย มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดไว้ว่า ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึงประเภทที่ 5 จะต้องมีเวลาก่อตัวระยะต้นไม่น้อยกว่า 45 นาที และการก่อตัวระยะปลายไม่เกิน 8 ชั่วโมงเมื่อทดสอบโดยใช้เข็มไวแคต อย่างไรก็ตามหากน้ำมี

ปริมาณมากเกินไปจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวช้าลง ปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) คือปริมาณน้ำที่ใช้ผสมกับซีเมนต์แล้วทำให้เข็มไวแคดจมในซีเมนต์เพสต์ 10 mm ภายในเวลา 30 วินาที

6.3 การทดสอบกำลังอัดซีเมนต์มอร์ตาร์ (Compressive Strength of Cement Mortar) มาตรฐาน ASTM C109-80 เป็นการทดสอบหาลำดับต้านทานแรงอัดสูงสุดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างซีเมนต์ น้ำ และวัสดุผสมละเอียด ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการนำทรายมาตรฐานที่คัดขนาดแล้วมาผสมกับซีเมนต์ด้วยอัตราส่วนซีเมนต์ 1 ส่วนต่อทราย 2.75 ส่วน นำตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ผสมน้ำแล้วไปทดสอบหาค่าการไหลแผ่เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม โดยปริมาณน้ำที่เหมาะสมคือค่าการไหลแผ่ร้อยละ 105-115 จากนั้นทำการผสมซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมแล้วใส่ในแบบหล่อทรงลูกบาศก์กว้างด้านละ 5 cm ดังแสดงในภาพที่ 3.6 แบ่งการหล่อเป็น 2 ชั้นแต่ละชั้นใช้แท่งกระทุ้งมาตรฐานกระทุ้งชั้นละ 32 ครั้งในเวลา 10 วินาที ใช้ผ้าขึ้นคลุมเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจึงนำแท่งตัวอย่างไปบ่มในน้ำ ทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักแท่งตัวอย่างจากนั้นนำไปทดสอบกำลังอัด โดยแบ่งเป็น 4 ชุด ๆ ละ 3 ตัวอย่าง โดยชุดที่ 1 ทดสอบเมื่อแท่งตัวอย่างมีอายุ 24 ชั่วโมง ชุดที่ 2 ทดสอบเมื่อแท่งตัวอย่างมีอายุ 3 วัน ชุดที่ 3 ทดสอบเมื่อแท่งตัวอย่างมีอายุ 7 วัน และชุดที่ 4 ทดสอบเมื่อแท่งตัวอย่างมีอายุ 28 วัน ตามลำดับ นำผลการทดสอบกำลังอัดของแท่งตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน เช่น ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ควรมีกำลังอัดซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อายุ 3 วันประมาณ 85 ksc ที่อายุ 7 วันประมาณ 150 ksc และที่อายุ 28 วันประมาณ 245 ksc เป็นต้น



(ก) แบบหล่อตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์



(ข) การวิบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์ภายใต้แรงอัด

ภาพที่ 3.6 การหาลำดับกำลังอัดซีเมนต์มอร์ตาร์

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิทยา. 2558

6.4 การทดสอบกำลังดึงซีเมนต์มอร์ตาร์ (Tensile Strength of Cement Mortar) เป็นการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงของแท่งมอร์ตาร์ที่เรียกว่า แท่งบริเคท (Briquet) ซึ่งมีรูปร่างโค้งมนดังแสดงในภาพที่ 3.7 ส่วนกลางของแท่งบริเคทมีพื้นที่หน้าตัดประมาณ 1 ตารางนิ้ว การทดสอบเริ่มจากการนำซีเมนต์ 1 ส่วนผสมกับทราย 3 ส่วนโดยใช้ทรายออตตาวา (Ottawa Sand) ซึ่งเป็นทรายเม็ดหยาบมีขนาดประมาณ 1 mm หรืออาจใช้ทรายทั่วไปที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และค้ำบนตะแกรงเบอร์ 30 แทนก็ได้ สำหรับปริมาณน้ำที่ใช้ผสมจะเป็นปริมาณน้ำของความชื้นเหลวปกติ จากนั้นนำซีเมนต์มอร์ตาร์มาเทใส่ในแบบหล่อแบ่งเป็น 2 ชั้นแต่ละชั้นใช้หัวแม่มือกดให้แน่นประมาณ 12 ครั้ง พยายามไล่ฟองอากาศออกให้หมดและทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์เป็นเนื้อเดียวกัน ใช้ผ้าชื้นคลุมเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจึงนำแท่งตัวอย่างไปบ่มต่อในน้ำ ทำการวัดขนาดพื้นที่หน้าตัดที่เล็กที่สุดและชั่งน้ำหนักแท่งบริเคท จากนั้นนำไปทดสอบกำลังดึง โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ชุด ๆ ละ 3 ตัวอย่าง ชุดที่ 1 ทดสอบเมื่อแท่งตัวอย่างมีอายุ 24 ชั่วโมง ชุดที่ 2 ทดสอบเมื่อแท่งตัวอย่างมีอายุ 3 วัน ชุดที่ 3 ทดสอบเมื่อแท่งตัวอย่างมีอายุ 7 วัน และชุดที่ 4 ทดสอบเมื่อแท่งตัวอย่างมีอายุ 28 วัน ตามลำดับ นำผลการทดสอบกำลังดึงของแท่งตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานต่อไป



ภาพที่ 3.7 การทดสอบกำลังดึงซีเมนต์มอร์ตาร์

ที่มา : United States Department of Transportation, 2006

## 7. วัสดุซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน

ปัจจุบันมีนักวิจัยศึกษาค้นคว้าวัสดุชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติเชื่อมประสานคล้ายกับซีเมนต์ที่เรียกว่า วัสดุซีเมนต์ (Cementitious) หรือวัสดุจำพวกสารผสมเพิ่มแร่ธาตุที่ใช้ร่วมกับซีเมนต์ที่เรียกว่า วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) โดยวัสดุทั้งสองอาจเป็นแร่ธาตุธรรมชาติหรือที่ถูกเผาจนกลายเป็นผง (Calcination) ก็ได้และควรมีแร่ธาตุที่มีองค์ประกอบของออกไซด์ชนิดเดียวกับที่มีในซีเมนต์ เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) หรือไอเอิร์นออกไซด์

(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นต้น (Michael Thomas. 2007) วัสดุซีเมนต์และวัสดุปอชโซลานสามารถใช้ร่วมกับซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ เช่น ความตึบน้ำดีขึ้น การขยายตัวลดลง เกิดความร้อนต่ำเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ กำลังอัดดีขึ้น หรือทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตดีขึ้น เป็นต้น ในกรณีวัสดุมีคุณภาพดีเพียงพอที่จะสามารถใช้ทดแทนซีเมนต์ได้เช่นกัน จากที่กล่าวข้างต้นหัวข้อนี้จึงนำเสนอวัสดุซีเมนต์และวัสดุปอชโซลาน โดยมุ่งเน้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผงเถ้าอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกว่า เถ้าลอย (Fly Ash) เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้าแร่ธาตุ หรือเถ้าชีวมวล (Biomass) เป็นต้น

ข้อกำหนดในมาตรฐาน ASTM C618-12 ได้จำแนกชั้นคุณภาพของเถ้าลอยจากวัสดุชนิดต่าง ๆ ออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพคือ ชั้นคุณภาพ N (Class N) ชั้นคุณภาพ F (Class F) และชั้นคุณภาพ C (Class C) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2 (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2555 และ Michael Thomas. 2007) นอกจากองค์ประกอบออกไซด์แล้วยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อคุณสมบัติเถ้าลอย เช่น ปริมาณความชื้น และค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (Loss on Ignition: LOI) เป็นต้น โดยมาตรฐาน ASTM C618-12 ให้ข้อเสนอแนะสำหรับปริมาณเถ้าลอยที่จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3.3 สำหรับเถ้าลอยที่เป็นวัสดุปอชโซลานคุณภาพดีที่พบในประเทศไทยคือเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า บุรฉัตร นครวิระ (2543) ได้ศึกษาคุณสมบัติด้านความต้านทานและกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และนำเสนอคุณสมบัติเถ้าถ่านหินแม่เมาะจำนวน 3 ตัวอย่างเทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 3.4 จากตารางพบว่าเถ้าลอยชนิด FL มีคุณภาพเทียบได้กับชั้นคุณภาพ F ในขณะที่เถ้าลอยชนิด FH และ FM มีคุณภาพเทียบได้กับชั้นคุณภาพ C ซึ่งยืนยันได้ว่าเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มีคุณสมบัติด้านปอชโซลานที่ดี

ตารางที่ 3.1 ชั้นคุณภาพเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-12

| ชั้นคุณภาพ   | คำจำกัดความเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-12   |
|--------------|---|
| ชั้นคุณภาพ N | วัสดุปอชโซลานตามธรรมชาติหรือที่ถูกเผาจนกลายเป็นผง เช่น แร่ธาตุประกอบหิน หรือดินเหนียว เป็นต้น   |
| ชั้นคุณภาพ F | เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาถ่านแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือถ่านหิน โดยเถ้าลอยดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอชโซลาน                                       |
| ชั้นคุณภาพ C | เถ้าลอยที่เกิดจากการเผาถ่านลิกไนต์ (Lignite) หรือถ่านหิน โดยเถ้าลอยมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอชโซลานและวัสดุซีเมนต์ ในบางกรณีอาจมีปูนขาวมากกว่าร้อยละ 10 |

ที่มา : Michael Thomas. 2007



ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-12

| องค์ประกอบทางเคมี   | ชั้นคุณภาพ N | ชั้นคุณภาพ F | ชั้นคุณภาพ C |
|---|--------------|--------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ร้อยละ) | มากกว่า 70   | มากกว่า 70   | มากกว่า 50   |
| ซัลเฟตออกไซด์ : SO <sub>3</sub> (ร้อยละ)  | น้อยกว่า 4   | น้อยกว่า 5   | น้อยกว่า 5   |
| ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)   | น้อยกว่า 3   | น้อยกว่า 3   | น้อยกว่า 3   |
| การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา : LOI (ร้อยละ)   | น้อยกว่า 10  | น้อยกว่า 6   | น้อยกว่า 6   |

ที่มา : ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2555

ตารางที่ 3.3 ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้เป็นส่วนผสมตามมาตรฐาน ASTM C618-12

| ปริมาณเถ้าลอยที่ใช้เป็นส่วนผสม | ปริมาณเถ้าลอยต่อน้ำหนักซีเมนต์ (ร้อยละ) |
|--------------------------------|---|
| ปริมาณน้อย                     | น้อยกว่า 15                             |
| ปริมาณปานกลาง                  | 15-30                                   |
| ปริมาณมาก                      | 30-50                                   |
| ปริมาณสูงมาก                   | มากกว่า 50                              |

ที่มา : Michael Thomas. 2007

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ

| องค์ประกอบทางเคมี                       | ซีเมนต์ประเภท 1 | เถ้าชนิด FH | เถ้าชนิด FM | เถ้าชนิด FL |
|---|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub> (ร้อยละ)               | 21.45           | 26.23       | 30.39       | 42.86       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ร้อยละ) | 5.35            | 13.72       | 15.90       | 23.05       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ร้อยละ) | 3.01            | 9.99        | 10.53       | 8.75        |
| CaO (ร้อยละ)                            | 67.33           | 29.97       | 23.12       | 10.13       |
| MgO (ร้อยละ)                            | 1.52            | 3.16        | 3.26        | 2.93        |
| SO <sub>3</sub> (ร้อยละ)                | 2.31            | 6.01        | 4.17        | 1.17        |
| Na <sub>2</sub> O (ร้อยละ)              | 0.11            | 0.21        | 0.19        | 0.20        |
| ความถ่วงจำเพาะ                          | 3.15            | 2.65        | 2.23        | 1.94        |
| ความหนาแน่นรวม (kg/l)                   | 1.02            | 1.13        | 1.00        | 1.00        |
| โมดูลัสความละเอียด (ร้อยละ)             | 8.60            | 30.22       | 35.68       | 42.68       |

ที่มา : บุรฉัตร นัทรวิระ. 2543

สหलग หอมวุฒิวังศ์ และคณะ (2547) ยังได้นำเสนอคุณสมบัติเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าอื่นอีก 4 แห่งร่วมกับแม่เมาะดังแสดงในตารางที่ 3.5 จากตารางพบว่าเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าทั้ง 5 แห่งมีคุณสมบัติด้านปอซโซลานที่ดี แต่เถ้าที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีค่า LOI ต่ำที่สุด นอกจากเถ้าถ่านหินแล้วยังมีการนำเถ้าชีวมวลมาศึกษาวิจัยด้วย ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2555) ได้ทำการศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตและ วัสดุผสม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554) ได้ศึกษาการใช้เถ้าชานอ้อยปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า งานวิจัยทั้งสองได้นำเสนอคุณสมบัติเถ้าชานอ้อยไว้ดังแสดงในตารางที่ 3.6 จากตารางพบว่าเถ้าชานอ้อยจาก 5 แห่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้ แต่เถ้าชานอ้อยมีค่า LOI สูงจึงอาจส่งผลกระทบต่อความทึบน้ำและการขยายตัวเมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหิน

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้า

| ชนิดเถ้าถ่านหิน          | องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) |                                |                                |       |      |                 |                  |                   |      |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|------|
|                          | SiO <sub>2</sub>           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | LOI  |
| เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ    | 41.16                      | 22.30                          | 11.51                          | 15.27 | 2.70 | 1.43            | 2.93             | 1.66              | 0.20 |
| เถ้าถ่านหินจากระยอง      | 45.24                      | 28.25                          | 2.43                           | 11.80 | 0.74 | 3.63            | 0.66             | 0.47              | 2.96 |
| เถ้าถ่านหินจากกาญจนบุรี  | 39.56                      | 20.99                          | 9.37                           | 10.62 | 1.47 | 3.34            | 3.08             | 0.30              | 7.10 |
| เถ้าถ่านหินจากราชบุรี    | 32.96                      | 13.81                          | 6.69                           | 24.42 | 1.44 | 10.56           | 2.38             | 0.61              | 7.05 |
| เถ้าถ่านหินจากปราจีนบุรี | 42.03                      | 18.97                          | 4.44                           | 4.91  | 1.01 | 19.08           | 0.28             | 0.72              | 3.65 |

ที่มา : สหलग หอมวุฒิวังศ์ และคณะ. 2547

ตารางที่ 3.6 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าชานอ้อย

| ชนิดเถ้าชานอ้อย          | องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) |                                |                                |      |     |                 |                  |      |  |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|------------------|------|--|
|                          | SiO <sub>2</sub>           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | LOI  |  |
| เถ้าชานอ้อยจากสระบุรี    | 64.3                       | 7.9                            | 4.1                            | 9.2  | 1.3 | 1.7             | 0.5              | 9.5  |  |
| เถ้าชานอ้อยจากสุพรรณบุรี | 74.7                       | -                              | 4.1                            | 7.8  | 2.8 | 1.6             | 5.4              | 15.8 |  |
| เถ้าชานอ้อยจากลพบุรี     | 59.3                       | 4.5                            | 3.4                            | 14.8 | 1.8 | 2.7             | 1.6              | 9.1  |  |
| เถ้าชานอ้อยจากราชบุรี    | 67.1                       | 4.5                            | 2.4                            | 3.6  | 2.1 | 4.3             | 1.6              | 13.7 |  |
| เถ้าชานอ้อยจากนครสวรรค์  | 54.5                       | 6.0                            | 3.2                            | 15.4 | 1.4 | 0.1             | 0.1              | 19.4 |  |

ที่มา : ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2555 และ วัสดุผสม สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2554

วัน โชค เกรือหงษ์ และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน และได้นำเสนอคุณสมบัติเถ้าปาล์มน้ำมันดังแสดงในตารางที่ 3.7 สำหรับ นิโรจน์ เงินพรหม และ สำเร้ง รักซ้อน (2555) ได้ศึกษาคินซีเมนต์ผสมเถ้าจากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมเพื่อพัฒนาเป็นอิฐประสาน และได้นำเสนอคุณสมบัติเถ้าแกลบดังแสดงในตารางที่ 3.8 จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเถ้าชีวมวลที่กล่าวข้างต้นพบว่าทั้งเถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบต่างมีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  สูงเมื่อเทียบกับซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน ส่งผลให้เมื่อใช้เถ้าชีวมวลปริมาณมากร่วมกับซีเมนต์จะทำให้คุณสมบัติด้านกำลังอัดมีการพัฒนาช้าในช่วงอายุต้น แต่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออายุมากขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 3.7 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน

| ชนิดเถ้าปาล์มน้ำมัน                   | องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) |                         |                         |      |     |               |                      |                       |     |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|------|-----|---------------|----------------------|-----------------------|-----|
|                                       | $\text{SiO}_2$             | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | CaO  | MgO | $\text{SO}_3$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | LOI |
| เถ้าปาล์มน้ำมันอนุภาคใกล้เคียงซีเมนต์ | 54.0                       | 0.9                     | 2.0                     | 12.9 | 4.9 | 4.0           | 13.5                 | 1.0                   | 3.7 |
| เถ้าปาล์มน้ำมันอนุภาคเล็กกว่าซีเมนต์  | 55.7                       | 0.9                     | 2.0                     | 12.5 | 5.1 | 2.9           | 11.9                 | 1.0                   | 4.7 |

ที่มา : วัน โชค เกรือหงษ์ และคณะ. 2555

ตารางที่ 3.8 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ

| ชนิดเถ้าถ่านหิน    | องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) |                         |                         |      |      |                |                      |      |      |
|--------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|------|------|----------------|----------------------|------|------|
|                    | $\text{SiO}_2$             | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | CaO  | MgO  | $\text{TiO}_2$ | $\text{K}_2\text{O}$ | MnO  | LOI  |
| เถ้าแกลบจากนนทบุรี | 94.00                      | -                       | 0.39                    | 2.00 | 0.42 | 0.03           | 2.80                 | 0.25 | 7.94 |

ที่มา : นิโรจน์ เงินพรหม และ สำเร้ง รักซ้อน. 2555

นอกจากนั้นยังมีการนำวัสดุเหลือทิ้งมากกว่าหนึ่งชนิดจากภาคอุตสาหกรรมมาทำเป็นวัสดุซีเมนต์ได้อีกด้วย เพ็ญพิชชา คงเพิ่ม โกศล และคณะ (2559) ได้ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้วัสดุซีเมนต์จากเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ละเอียดเพื่อใช้ทดแทนซีเมนต์ โดยนำเสนอคุณสมบัติเถ้าก้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ดังแสดงในตารางที่ 3.9 จากตารางพบว่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์มีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 59.3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงส่งผลดีต่อการพัฒนากำลังอัด ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีตที่ไม่

มีซีเมนต์ในส่วนผสมสามารถพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วันอยู่ที่ 29.7 MPa และที่อายุ 90 วันอยู่ที่ 36.8 MPa การใช้ปูนซีเมนต์ 55 kg/m<sup>3</sup> สามารถทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่อายุ 28 วันอยู่ที่ 44.3 MPa และที่อายุ 90 วันอยู่ที่ 51.4 MPa ในขณะที่คอนกรีตทั่วไปจะต้องใช้ปริมาณซีเมนต์ผสมถึง 450 kg/m<sup>3</sup> จึงจะทำให้ได้กำลังอัดที่ 28 วันอยู่ที่ประมาณ 47 MPa แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้ากั้นเตาจากโรงไฟฟ้าร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์สามารถทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงเป็นที่น่าพอใจ และยังสามารถลดการใช้ซีเมนต์ได้เป็นจำนวนมากในส่วนผสมคอนกรีต

ตารางที่ 3.9 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้ากั้นเตาและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

| ชนิดวัสดุ                       | องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) |                                |                                |      |     |                 |                  |      |
|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|------------------|------|
|                                 | SiO <sub>2</sub>           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | LOI  |
| เถ้ากั้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ   | 36.0                       | 19.9                           | 15.1                           | 19.0 | 2.4 | 1.7             | 2.3              | 3.6  |
| กากแคลเซียมคาร์ไบด์จากสมุทรสาคร | 5.2                        | 2.5                            | 2.0                            | 59.3 | 2.1 | 1.0             | 0.3              | 26.9 |

ที่มา : เพ็ญพิชชา คงเพิ่ม โภชผล และคณะ. 2559

สุภิชาติ เจนจิระปัญญา และ ปิติสานต์ กร้ามาตร (2559) ได้ศึกษาคุณสมบัติวัสดุซีเมนต์ที่ได้จากการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ร่วมกับตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยนำเสนอคุณสมบัติตะกรันเตาถลุงเหล็กดังแสดงในตารางที่ 3.10 จากตารางพบว่าตะกรันเตาถลุงเหล็กมีปริมาณ CaO ที่สูงกว่าเถ้าถ่านหินจึงส่งผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดแต่ยังไม่ดีเท่ากากแคลเซียมคาร์ไบด์

ตารางที่ 3.10 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเตาถลุงเหล็กบด

| ชนิดวัสดุ            | องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) |                                |                                |      |     |                 |                  |                   |     |
|----------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|------------------|-------------------|-----|
|                      | SiO <sub>2</sub>           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | LOI |
| ตะกรันเตาถลุงเหล็กบด | 34.0                       | 16.2                           | 1.7                            | 36.0 | 7.3 | 2.1             | 1.0              | 0.2               | 1.4 |

ที่มา : สุภิชาติ เจนจิระปัญญา และ ปิติสานต์ กร้ามาตร. 2559

## คอนกรีต

คอนกรีต (Concrete) เป็นผลิตภัณฑ์จากซีเมนต์ชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน สมศักดิ์ คำปลิว (2544 : 8) กล่าวว่าคอนกรีตเป็นการผสมระหว่าง ซีเมนต์ น้ำ ทราย หินย่อยหรือกรวด และสารเคมีผสมเพิ่ม วินิต ช่อวิเชียร (2545 : 1) กล่าวว่าคอนกรีตเป็นวัสดุเสมือนหินที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นประกอบด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทราย

หิน หรือกรวด และน้ำ แต่ในบางครั้งอาจมีสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงให้คอนกรีตมีคุณสมบัติอื่นที่ต้องการ กวี หวังนิเวศน์กุล (2548 : 1) กล่าวว่าคอนกรีตเป็นส่วนผสมระหว่างซีเมนต์เพสต์และวัสดุผสมคละ เมื่อซีเมนต์เพสต์คือปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์ น้ำ และอากาศ ส่วนวัสดุผสมคละคือวัสดุผสมหยาบและวัสดุผสมละเอียด ปิติ สุขนธสุขกุล (2556 : 1) กล่าวว่าคอนกรีตเป็นวัสดุประกอบที่เกิดจากส่วนประกอบหลัก 3 ชนิดคือ ซีเมนต์ มวลรวม และน้ำ จากคำจำกัดความที่กล่าวแล้วจึงอาจสรุปได้ว่าคอนกรีตคือ วัสดุเสมือนหินที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์ และน้ำที่มีส่วนผสมของวัสดุผสมละเอียดและวัสดุผสมหยาบร่วมกับอากาศที่แทรกอยู่ภายใน อาจเติมสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตตามวัตถุประสงค์การใช้งาน รายละเอียดเนื้อหาเกี่ยวกับคอนกรีตมีดังต่อไปนี้

### 1. วัสดุที่เป็นส่วนผสมในคอนกรีต

คอนกรีตทั่วไปประกอบด้วยวัสดุดังต่อไปนี้คือ ซีเมนต์ น้ำ วัสดุผสม และสารเคมีผสมเพิ่ม ซีเมนต์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานวัสดุผสมอื่นให้ยึดติดเข้าด้วยกันและกลายเป็นของแข็ง วัสดุผสมแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ วัสดุผสมหยาบและวัสดุผสมละเอียด หากวัสดุผสมมีคุณภาพและขนาดคละที่ดีจะช่วยให้คุณภาพคอนกรีตดีตามไปด้วย ถ้าต้องการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตสามารถทำได้โดยการเติมสารผสมเพิ่ม รายละเอียดวัสดุผสมในคอนกรีตมีดังต่อไปนี้ (บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. 2552 : 9-61, วินิต ช่อวิเชียร. 2544 : 32-68 และ Neville A.M. and Brooks J.J. 2010 : 40-76)

1.1 ซีเมนต์ที่ใช้ในงานคอนกรีตส่วนใหญ่เป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในการเลือกใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทใดนั้นจะต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของประเภทงานก่อสร้าง เช่น ซีเมนต์ประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป ซีเมนต์ประเภทที่ 2 เป็นซีเมนต์ดัดแปลงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตขนาดใหญ่ที่มีซัลเฟตปานกลาง ซีเมนต์ประเภทที่ 3 มีความละเอียดมากเหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็วหรืองานซ่อมแซม ซีเมนต์ประเภทที่ 4 เป็นซีเมนต์ที่เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำจึงเหมาะกับงานคอนกรีตหลายหรืองานที่มีการใช้คอนกรีตปริมาณมาก และซีเมนต์ประเภทที่ 5 เหมาะสำหรับโครงสร้างที่ได้รับผลกระทบจากซัลเฟตหรือพื้นที่ที่มีความเป็นด่าง เป็นต้น นอกจากนั้นซีเมนต์ที่ใช้งานควรเป็นผงละเอียดไม่จับตัวกันเป็นก้อนและควรกองเก็บในพื้นที่แห้งปราศจากความชื้น

1.2 น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตควรเป็นน้ำจืดที่สะอาดปราศจากสารอินทรีย์ กรด ด่าง และน้ำมันที่จะก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพคอนกรีต น้ำที่ใช้ผสมควรผ่านเกณฑ์ตามข้อกำหนดในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.213. 2552 : 3) ถ้าเป็นน้ำที่บริโภคไม่ได้จะต้องนำไปทดสอบหาปริมาณสารเจือปน โดยปริมาณสารเจือปนที่มีในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตต้องอยู่ใน

เกณฑ์ดังต่อไปนี้คือ คลอไรด์ในรูปของ  $\text{Cl}^-$  ไม่เกิน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/l) ซัลเฟตในรูปของ  $\text{SO}_4$  ไม่เกิน 3,000 mg/l ค่าในรูปของ  $\text{Na}_2\text{O}$  ไม่เกิน 600 mg/l และสารแขวนลอยไม่เกิน 50,000 mg/l ตามลำดับ นอกจากนั้นยังต้องนำน้ำไปผสมจริงแล้วหล่อเป็นคอนกรีตตัวอย่าง ถ้าระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตตัวอย่างอยู่ระหว่าง 1-1.5 ชั่วโมงของคอนกรีตควบคุมก็ถือว่าผ่าน และจะต้องนำคอนกรีตตัวอย่างไปทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วัน หากกำลังอัดมากกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุมจึงถือว่าน้ำนั้นผ่านเกณฑ์ ภาพที่ 3.8 เป็นตัวอย่างผลการทดสอบสารเจือปนในน้ำจากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จแห่งหนึ่งในพื้นที่อำเภอบ้านด่าน จังหวัดบุรีรัมย์ (จิรวัดณ์ วิมุตติสุขวิริยา และคณะ. 2558 : 35)

รายงานผลการทดสอบ

ส่วนราชการ คณะวิทยาศาสตร์

ผู้ขอรับบริการ ดร. จิรวัดณ์ วิมุตติสุขวิริยา

สถานที่ตั้งบ่อ บริษัท เบสท์-แพค คอนกรีต จำกัด

วันที่เก็บตัวอย่าง 30 มกราคม 2558

วันที่รับตัวอย่าง 30 มกราคม 2558

| รายการ                                     | มาตรฐานน้ำผสมคอนกรีต | ผลการวิเคราะห์ | วิธีทดสอบ                     |
|--|----------------------|----------------|-------------------------------|
| <b>คุณลักษณะทางกายภาพ</b>                  |                      |                |                               |
| อุณหภูมิ                                   | -                    | 29.00          | Thermometer                   |
| ความเป็นกรด-ด่าง                           | -                    | 7.51           | pH meter                      |
| <b>คุณลักษณะทางเคมี (มิลลิกรัมต่อลิตร)</b> |                      |                |                               |
| ค่าในรูปของ $\text{Na}_2\text{O}$          | 600                  | 46             | BM reagent Titrimetric Method |
| คลอไรด์ในรูปของ $\text{Cl}^-$              | 500                  | 145.77         | Mohr Method                   |
| ซัลเฟตในรูปของ $\text{SO}_4$               | 3,000                | 168.00         | Turbidimetric Method          |
| สารแขวนลอย                                 | ไม่เกิน 50,000       | 5.34           | Dried at 103-105 °C           |

หมายเหตุ : น้ำผสมคอนกรีตตามมาตรฐาน มอก. 213-2552

ลักษณะตัวอย่างน้ำขณะทดสอบ น้ำมีลักษณะใสและไม่มีการก่อกอง

สรุปผลการทดสอบ จากผลการทดสอบคุณภาพน้ำผสมคอนกรีต พบว่าปริมาณค่าในรูปของ  $\text{Na}_2\text{O}$  คลอไรด์ในรูปของ  $\text{Cl}^-$  ซัลเฟตในรูปของ  $\text{SO}_4$  และสารแขวนลอยมีค่าไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน

ผู้รับรอง.....

(นางปัทมา จันทน์นวล)

หัวหน้าศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์

ผู้ทดสอบ.....

(นางสาวสุภาวรัตน์ ผลินยศ<sup>1</sup> และนายสตีเฟน รอดอารี<sup>2</sup>)

พนักงานมหาวิทยาลัย

รายงานนี้รับรองผลเฉพาะที่ทดสอบเท่านั้น

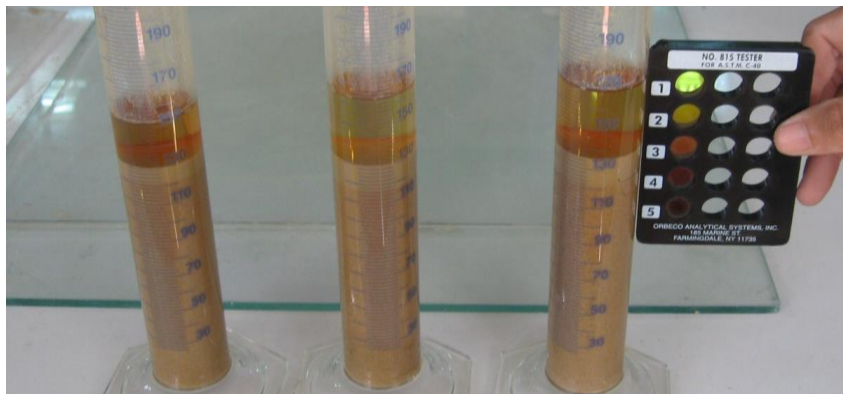
จิรวัดณ์ วิมุตติสุขวิริยา  
นายจิรวัดณ์ วิมุตติสุขวิริยา

ภาพที่ 3.8 ผลการทดสอบสารเจือปนในน้ำเพื่อนำไปผสมคอนกรีต

ที่มา : จิรวัดณ์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558 : 35




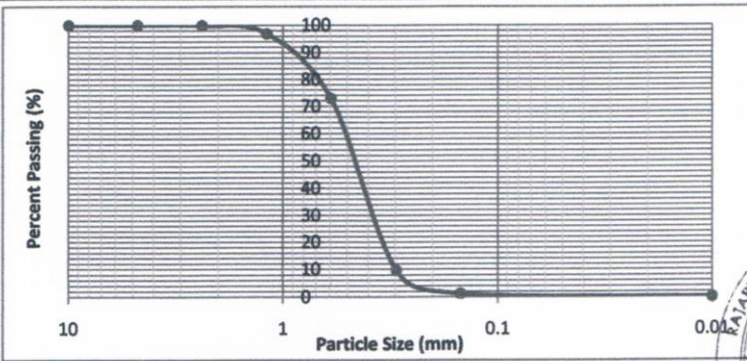

1.3 วัสดุผสมละเอียด (Fine Aggregate) เป็นวัสดุเนื้อที่ใช้นในงานคอนกรีตมีขนาดระหว่าง 0.07-4.5 mm ส่วนใหญ่เป็นทรายแม่น้ำหรือทรายบก โดยทรายที่ใช้ต้องสะอาดและไม่ทำปฏิกิริยากับซีเมนต์หรือวัสดุผสมอื่น การทดสอบความป็นเปื้อนของอินทรีย์วัตถุสามารถทำได้โดยการนำทรายมาแช่ในน้ำที่ผสม โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นสังเกตสีของเหลวที่อยู่เหนือชั้นทรายเทียบกับแถบวัดสีมาตรฐานดังแสดงในภาพที่ 3.9 ถ้าของเหลวมีสีอยู่ที่ระดับ 1-2 ของแถบวัดสีมาตรฐานก็แสดงว่าทรายนั้นมีการปนเปื้อนของอินทรีย์วัตถุน้อย



ภาพที่ 3.9 การทดสอบหาการปนเปื้อนของอินทรีย์วัตถุในทราย

ที่มา : จิรวัฒน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

ส่วนละเอียด (Gradation) และค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus : FM) ของทรายมีผลต่อความสามารถในการเทและปริมาณซีเมนต์ที่ผสมในคอนกรีต หากทรายมีส่วนละเอียดที่เหมาะสมจะช่วยให้การยึดเกาะของอนุภาคและทำให้เนื้อคอนกรีตแน่น ข้อเสนอแนะสำหรับส่วนละเอียดที่เหมาะสมของทรายคือ ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ร้อยละ 35-45 ผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ร้อยละ 26-36 ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ร้อยละ 18-27 ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 ร้อยละ 11-19 ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ร้อยละ 2-8 และผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ร้อยละ 1-2 ตามลำดับ สำหรับค่า FM เป็นดัชนีบ่งบอกความละเอียดของอนุภาคทราย ค่า FM หาได้จากการนำค่าร้อยละสะสมที่ทรายค้างบนตะแกรงเบอร์ต่าง ๆ มารวมกันแล้วหารด้วยหนึ่งร้อย ทรายหยาบจะมีค่า FM อยู่ระหว่าง 2.5-3.5 ทรายละเอียดมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5-2.5 และทรายละเอียดมากมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-1.5 ตามลำดับ ทรายที่เหมาะสมกับงานคอนกรีตควรมีค่า FM อยู่ระหว่าง 2.30-3.20 ภาพที่ 3.10 เป็นตัวอย่างผลการทดสอบค่า FM ของทรายผสมคอนกรีตของโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จแห่งหนึ่งในอำเภอบ้านด่าน จังหวัดบุรีรัมย์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.19 บ่งบอกว่าเป็นทรายละเอียด (จิรวัฒน์ วิมุตติสุขวิริยา และคณะ. 2557 : 2)

|  <p style="text-align: center;"><b>MATERIALS TESTING LABORATORY</b><br/><b>DEPARTMENT OF CONSTRUCTION TECHNOLOGY</b><br/><b>BURIRAM RAJABHAT UNIVERSITY</b><br/><b>GRAIN SIZE ANALYSIS OF FINE AGGREGATE (SIEVE ANALYSIS)</b></p> |  |                |                        |  |                      |                                 |                              |        |
|--|--|----------------|------------------------|--|----------------------|---------------------------------|------------------------------|--------|
| Project  | วัสดุมวลรวมละเอียด (ทราย) เพื่อใช้ในงานผสมคอนกรีต        |                |                        |  | Document No.         | Lab ก.ศ.001.1/2557              |                              |        |
| Owner  | บริษัท เบสท์-แพค คอนกรีต จำกัด                           |                |                        |  | Test Date            | 21 พ.ค. 2557                    |                              |        |
| Location   | 150 หมู่ 2 ถ.บุรีรัมย์-สตึก อ.บ้านค่าน จ.บุรีรัมย์ 31000 |                |                        |  | Description          | ทราย (Sand)                     |                              |        |
| Tested By  | สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์     |                |                        |  | Sheet No.            | 2/3                             |                              |        |
| Sieve No.  | Sieve Opening (mm)                                       | WT. Sieve (gm) | WT. Sieve+ Samsle (gm) | WT. Sample Retained (gm)   | Percent Retained (%) | Cumulative Percent Retained (%) | Percent Finer or Passing (%) | Remark |
| 4  | 4.76   | 522.53         | 522.7                  | 0.17   | 0.02                 | 0.02                            | 99.98                        |        |
| 8  | 2.38   | 699.02         | 700.3                  | 1.28   | 0.14                 | 0.16                            | 99.84                        |        |
| 16   | 1.19   | 660.01         | 685.43                 | 25.42  | 2.82                 | 2.99                            | 97.01                        |        |
| 30   | 0.595  | 416.81         | 634.12                 | 217.31   | 24.15                | 27.13                           | 72.87                        |        |
| 50   | 0.297  | 542.96         | 1111.73                | 568.77   | 63.20                | 90.33                           | 9.67                         |        |
| 100  | 0.149  | 520.15         | 595.59                 | 75.44  | 8.38                 | 98.71                           | 1.29                         |        |
| Pan  | -  | 469.74         | 478.81                 | 11.61  | 1.29                 | 100                             | 0                            |        |
| Summation  |  |                |                        | 900  | 100                  | 219.33                          |                              |        |
| Fineness Modulus (F.M.)  |  |                |                        |  |                      | 2.19                            |                              |        |
|    |  |                |                        |  |                      |                                 |                              |        |
| Remark : ผลการทดสอบนี้รับรองเฉพาะตัวอย่างที่ทดสอบเท่านั้น  |  |                |                        |  |                      |                                 |                              |        |
| ลงชื่อ.....<br>(นายอานนท์ สรูปพล)<br>ผู้ทดสอบ<br>21 พ.ค. 2557  |  |                |                        | <br>ลงชื่อ.....<br>(ดร.จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา)<br>วิศวกรโยธา เลขทะเบียน กย.25423<br>21 พ.ค. 2557 |                      |                                 |                              |        |

ภาพที่ 3.10 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2557 : 2

1.4 วัสดุผสมหยาบ (Coarse Aggregate) เป็นวัสดุเฉื่อยที่ใช้ในงานคอนกรีตมีขนาดใหญ่กว่า 4.5 mm ส่วนใหญ่เป็นหินย่อยจากโรงโม่ หินย่อยที่ดีควรมีรูปร่างกลมมนและมีความต้านทานการสึกหรอได้ดี การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Abrasion) ของหินสามารถทำได้โดยใช้เครื่องทดสอบตนเองเจิลลิส (Los Angeles Machine) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หินที่เหมาะสมในการผสมคอนกรีตควรมีค่าการสึกหรอ (Percent of Wear) ไม่เกินร้อยละ 35 ของน้ำหนักหินก่อนการทดสอบ ภาพที่ 3.11 เป็นตัวอย่างผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของหินย่อยเบอร์ 1 นิ้ว จากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จแห่งหนึ่งในพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ ผลการทดสอบพบว่าหินย่อยมีค่าร้อยละการสึกหรอ 9.36 ซึ่งถือว่าเป็นหินที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมหยาบในคอนกรีตได้ (จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558 : 30)

| MATERIALS TESTING LABORATORY                                  |  |                             |                             |                            |                     |  | 30 |
|---|--|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------|--|----|
| DEPARTMENT OF CONSTRUCTION TECHNOLOGY                         |  |                             |                             |                            |                     |  |    |
| BURIRAM RAJABHAT UNIVERSITY                                   |  |                             |                             |                            |                     |  |    |
| ABRATION RESISTANCE OF COARSE AGGREGATE (LOS ANGELES MACHINE) |  |                             |                             |                            |                     |  |    |
| Project   | วัสดุผสมหยาบ (หินย่อย) เพื่อใช้ในงานผสมคอนกรีต       |                             |                             | Document No.               | Lab ก.ส.001.1/2558  |  |    |
| Owner   | บริษัท กิจมงคลบุรีรัมย์ จำกัด                        |                             |                             | Test Date                  | 29 ม.ค. 2558        |  |    |
| Location  | 116/1 หมู่ 1 ต.ชุมเห็ด อ.เมือง จ.บุรีรัมย์ 31000     |                             |                             | Description                | หินเบอร์ 1 นิ้ว     |  |    |
| Tested By   | สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ |                             |                             | Sheet No.                  | 2/2                 |  |    |
| Sieve No. Passing   | Sieve No. Retain                                     | WT. Sample Before Test (gm) | WT. Sample Before Test (gm) | WT. Sample After Test (gm) | Percent of Wear (%) | Remark   |    |
| 3 นิ้ว  | 2 - 1/2 นิ้ว   | -                           | -                           | -                          | -                   | หินเบอร์ 1 นิ้ว Grading : G<br>จำนวนลูกเหล็ก 12 ลูก 5705 gm<br>จำนวนรอบ 1000 รอบ<br>น้ำหนักวัสดุผสม ค้างบนตะแกรงเบอร์ 12 |    |
| 2 - 1/2 นิ้ว  | 2 นิ้ว   | -                           | -                           | -                          | -                   |  |    |
| 2 นิ้ว  | 1 - 1/2 นิ้ว   | -                           | -                           | -                          | -                   |  |    |
| 1 - 1/2 นิ้ว  | 1 นิ้ว   | 5000.00                     | 10000.00                    | 9064.00                    | 9.36                |  |    |
| 1 นิ้ว  | 3/4 นิ้ว   | 5000.00                     |                             |                            |                     |  |    |
| 3/4 นิ้ว  | 1/2 นิ้ว   | -                           | -                           | -                          | -                   |  |    |
| 1/2 นิ้ว  | 3/8 นิ้ว   | -                           | -                           | -                          | -                   |  |    |
| 3/8 นิ้ว  | 1/4 นิ้ว   | -                           | -                           | -                          | -                   |  |    |
| 1/4 นิ้ว  | # 4  | -                           | -                           | -                          | -                   |  |    |
| # 4   | # 8  | -                           | -                           | -                          | -                   |  |    |

ภาพที่ 3.11 ผลการทดสอบความต้านทานการสึกกร่อนของหินวิธีทดสอบเองเจิลลิส

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558 : 30

นอกจากความต้านทานการสึกหรอแล้ววัสดุผสมหยาบที่ใช้ควรมีขนาดละเอียดที่ดีด้วย เพราะจะทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อยส่งผลให้ประหยัคซีเมนต์เพสต์ ภาพที่ 3.12 เป็น



ตัวอย่างการศึกษาปริมาณช่องว่างภายในวัสดุผสมที่มีขนาดคละต่างกัน โดยการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่เหลือจากการเติมลงในภาชนะบรรจุวัสดุผสม จากภาพที่ 3.12 (ก) แสดงให้เห็นว่าภาชนะที่บรรจุหินขนาดเดียวจะเหลือน้ำปริมาณน้อยที่สุดแสดงว่ามีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากสำหรับภาชนะที่บรรจุหินคละขนาดร่วมกับทรายดังแสดงในภาพที่ 3.12 (ง) จะเหลือน้ำปริมาณมากที่สุดแสดงว่ามีช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อยนั่นเอง สำหรับประเทศไทยมักพบเห็นการใช้วัสดุผสมหยาบเพียงขนาดเดียวในการผสมคอนกรีตจึงทำให้เกิดช่องว่างระหว่างวัสดุผสมมากตามไปด้วย บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (2550 : 33) มีข้อเสนอแนะสำหรับการใช้วัสดุผสมหยาบที่มีขนาดคละที่ไม่ดีว่า ถ้าใช้หินย่อยขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 4 ถึงเบอร์ 1 นิ้ว เพียงขนาดเดียวควรใช้ปริมาณซีเมนต์และทรายร้อยละ 38 ของปริมาตรคอนกรีต ถ้าใช้หินย่อยขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 4 ถึงเบอร์ 3/4 นิ้ว เพียงขนาดเดียวควรใช้ปริมาณซีเมนต์และทรายร้อยละ 40 ของปริมาตรคอนกรีต และถ้าต้องการใช้คอนกรีตที่มีความชื้นเหลวมากก็อาจใช้ปริมาณซีเมนต์และทรายระหว่างร้อยละ 42-45 ของปริมาตรคอนกรีต ปริมาณซีเมนต์และทรายที่แนะนำนี้เพื่อป้องกันการแยกตัวของวัสดุผสมขณะเทคอนกรีตและเพื่อป้องกันการเกิดช่องว่างภายในคอนกรีต



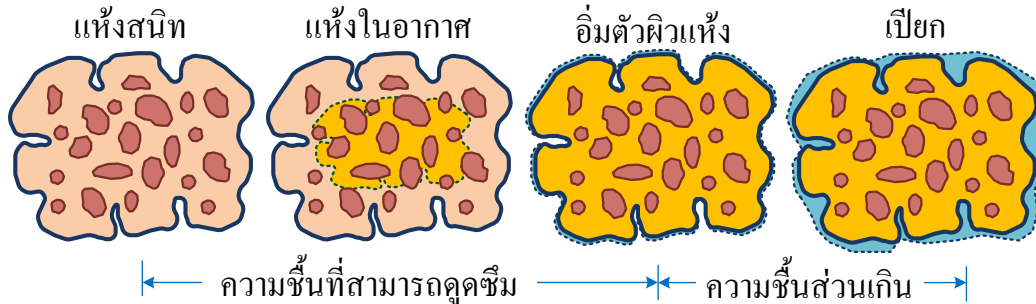
(ก) หินขนาดเดียว (ข) หินคละขนาด (ค) ทราย (ง) หินคละขนาดและทราย

ภาพที่ 3.12 ปริมาณน้ำที่เหลือจากการเติมในภาชนะที่ใส่วัสดุผสมต่างชนิดกัน

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมโดยวัสดุผสมหยาบและวัสดุผสมละเอียดก็มีผลต่อความชื้นเหลวของซีเมนต์เพสต์และกำลังอัดคอนกรีตด้วยเช่นกัน วัสดุผสมที่แห้งจะดูดซึมน้ำจากสภาพแวดล้อมจนกว่าวัสดุผสมนั้นจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้งดังแสดงในภาพที่ 3.13 ดังนั้นถ้านำวัสดุผสมที่แห้งมากไปเป็นผสมในคอนกรีตก็จะทำให้น้ำในซีเมนต์เพสต์ถูกดูด

ออกไปจนอาจทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดไม่สมบูรณ์ ในทางตรงกันข้ามหากวัสดุผสมมีความเปียกชื้นมากก็จะมีปริมาณน้ำส่วนเกินเพิ่มในซีเมนต์เพสต์ส่งผลทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลง



ภาพที่ 3.13 ปริมาณความชื้นในวัสดุผสม

ที่มา : Neville, A.M. and J.J. Brooks. 2010 : 53

1.5 สารผสมเพิ่ม (Admixture) เป็นสารเคมีที่เพิ่มเข้าไปในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตทั้งในสถานะเหลวหรือสถานะแข็งตัว สารผสมเพิ่มแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มหลักดังรายละเอียดต่อไปนี้

กลุ่มที่ 1 สารกักกระจายฟองอากาศ (Air Entraining Agent) มาตรฐาน ASTM C260 เป็นสารผสมเพิ่มจำพวกสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดระหว่าง 0.25-1.0 mm และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วคอนกรีต ฟองอากาศดังกล่าวจะถูกกักไว้ภายในอย่างคงตัวจนกระทั่งคอนกรีตแข็งตัว ตัวอย่างสารกักกระจายฟองอากาศ เช่น ยางไม้ ไขมันจากสัตว์ และไขมันจากพืช เป็นต้น ฟองอากาศขนาดเล็กนี้จะส่งผลทำให้คอนกรีตในสถานะเหลวมีความสามารถเทได้เพิ่มขึ้นและทำให้คอนกรีตในสถานะแข็งตัวมีคุณสมบัติทนทานกันความร้อนเพิ่มขึ้น

กลุ่มที่ 2 สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical Admixture) มาตรฐาน ASTM C494 เป็นสารเคมีที่ผสมในคอนกรีตเพื่อปรับระยะเวลาการก่อตัวและลดปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต การปรับระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตจะช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงาน ในขณะที่ปริมาณน้ำที่ลดลงจะช่วยให้กำลังอัดคอนกรีตดีขึ้น สารเคมีผสมเพิ่มแบ่งเป็น 7 ประเภทคือ ประเภท A เป็นสารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing) ประเภท B เป็นสารยึดการก่อตัว (Retarding) ประเภท C เป็นสารเร่งการก่อตัว (Accelerating) ประเภท D เป็นสารลดปริมาณน้ำและยึดการก่อตัว (Water Reducing and Retarding) ประเภท E เป็นสารลดปริมาณน้ำและเร่งการก่อตัว (Water Reducing and Accelerating) ประเภท F เป็นสารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก (Water Reducing High Range)

หรือ Superplasticizer) และประเภท G เป็นสารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและยึดการก่อตัว (Water Reducing High Range and Reducing) ตามลำดับ

กลุ่มที่ 3 สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture) มาตรฐาน ASTM C618 เป็นสารผสมเพิ่มที่เป็นแร่ธาตุชนิดผงละเอียดเพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีต เช่น เพิ่มคุณสมบัติการยึดเกาะระหว่างอนุภาควัสดุผสม เพิ่มความคงทนของคอนกรีต และใช้เพื่อทดแทนปริมาณซีเมนต์ เป็นต้น สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่มแบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ วัสดุเฉื่อย วัสดุประเภทซิลิกา และวัสดุที่เป็นตัวเชื่อมประสาน ตามลำดับ

กลุ่มที่ 4 สารผสมเพิ่มชนิดอื่น (Miscellaneous Admixture) เป็นสารผสมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเฉพาะของคอนกรีต ตัวอย่างสารผสมเพิ่มชนิดนี้ เช่น สารป้องกันการซึมผ่านของน้ำ สารป้องกันความชื้นที่ผิวคอนกรีต สารลดการกัดกร่อนเหล็กเสริม สารเพิ่มหรือลดการขยายตัวของคอนกรีต และสารเชื่อมประสาน เป็นต้น

## 2. คุณสมบัติคอนกรีตสด

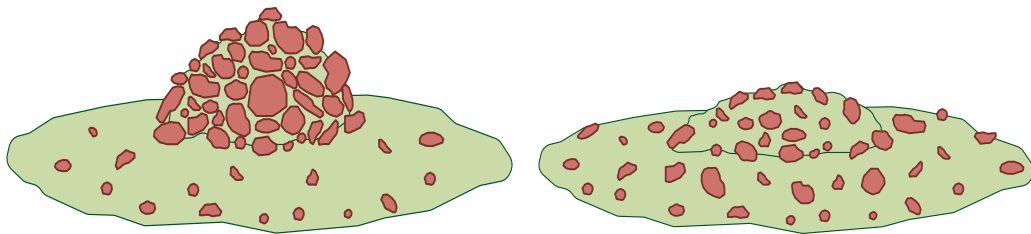
คอนกรีตสด (Fresh Concrete) เป็นคอนกรีตที่ผสมเสร็จใหม่อยู่ในสถานะเหลวซึ่งเป็นสถานะที่คอนกรีตสามารถเทและไหลไปตามแบบหล่อได้ คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตสดมีดังต่อไปนี้ (บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. 2552 : 63-96, วินิต ช่อวิเชียร. 2544 : 134-147 และ Neville A.M. and Brooks J.J. 2010 : 77-92)

2.1 ความสามารถเทได้ (Workability) เป็นพลังงานภายในคอนกรีตสดที่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานที่เกิดกับอนุภาคในขณะเทลงในแบบหล่อ โดยคอนกรีตในแบบหล่อควรปราศจากโพรงอากาศและไม่เกิดการแยกตัวระหว่างอนุภาควัสดุผสม บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (2552 : 64) กล่าวว่าปริมาณช่องว่างเพียงร้อยละ 5 ของปริมาตรคอนกรีตจะทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงไปถึงร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ปราศจากช่องว่าง ดังนั้นความสามารถเทได้จึงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการทำให้คอนกรีตมีคุณภาพดีและเกิดตำหนิน้อย การทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีตสดจะพิจารณาจากความข้นเหลว (Consistency) ซึ่งเป็นสภาพความเหลวและการยึดเกาะ (Cohesion) ระหว่างอนุภาควัสดุผสมในคอนกรีตสด การทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีตทำได้หลายวิธีตามสภาพความข้นเหลว เช่น คอนกรีตที่มีความข้นเหลวน้อยมักทดสอบวิธีสกัดส่วนการอัดแน่น (Compacting Factor Test) ตามมาตรฐาน BS 1882 หรือวิธีทดสอบวีบี (Vebe Test) ตามมาตรฐาน BS 1881 หากคอนกรีตที่มีความข้นเหลวทั่วไปมักทดสอบด้วยวิธีหาค่ายุบตัว (Slump Test) ตามมาตรฐาน ASTM C143 สำหรับคอนกรีตที่มีความข้นเหลวปานกลางมักทดสอบด้วยวิธีวัดการจมตัวของลูกบอลเคลลี่ (Kelly Ball



Penetration Test) ตามมาตรฐาน ASTM C360 และคอนกรีตที่มีความชื้นเหลวามากมักทดสอบด้วยวิธีการไหลตัว (Flow Test) ตามมาตรฐาน DIN 1048 เป็นต้น

2.2 การแยกตัว (Segregation) เป็นสภาวะที่อนุภาควัสดุผสมแยกตัวออกจากกันมักเกิดขึ้นในขณะที่คอนกรีตเคลื่อนที่ไปตามแบบหล่อหรือขณะขนย้าย ถ้าคอนกรีตสดมีการยึดเกาะระหว่างอนุภาควัสดุผสมที่ดีก็จะทำให้เกิดการแยกตัวน้อย การลดการแยกตัวของคอนกรีตสดสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้วัสดุผสมหยาบและวัสดุผสมละเอียดที่มีความถ่วงจำเพาะแตกต่างกันไม่มาก การปรับสัดส่วนของวัสดุผสมให้เหมาะสมกับประเภทของงาน หรือการใช้สารผสมเพิ่ม เป็นต้น นอกจากนี้การเลือกวิธีลำเลียงคอนกรีตสดที่ถูกต้องและการใช้เครื่องเขย่าคอนกรีตจะช่วยลดการแยกตัวได้เช่นกัน ลักษณะการแยกตัวของวัสดุผสมในคอนกรีตสดเมื่อทดสอบด้วยวิธีหาค่ายุบตัวแสดงในภาพที่ 3.14



(ก) คอนกรีตสดแยกตัว

(ข) คอนกรีตสดไม่แยกตัว

ภาพที่ 3.14 ลักษณะการแยกตัวของวัสดุผสมในคอนกรีตสด

ที่มา : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด. 2552 : 66-67

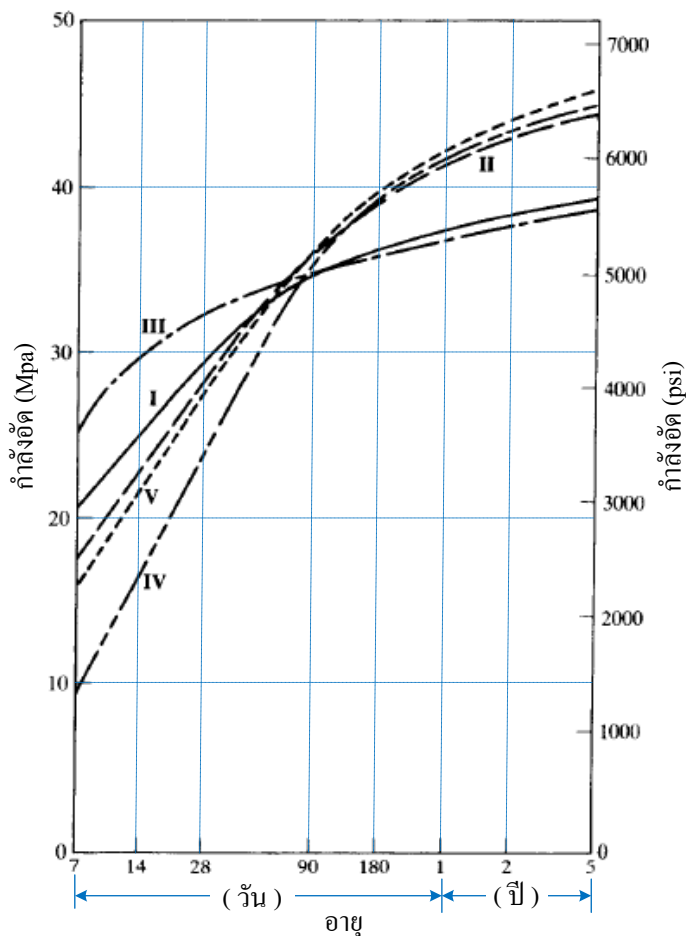
2.3 การเยิ้ม (Bleeding) เป็นการคายน้ำออกจากส่วนผสมคอนกรีตมักเกิดขึ้นหลังจากเทคอนกรีตสดใส่ในแบบหล่อแล้ว การเยิ้มมีสาเหตุจากการที่วัสดุผสมมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำจึงจมตัวลงด้านล่างส่งผลให้น้ำถูกดันให้ลอยขึ้นมาที่ผิวหน้าของคอนกรีต น้ำบริเวณผิวหน้านี้จะทำให้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากขึ้นและทำให้ปริมาณคอนกรีตลดลงเนื่องจากน้ำระเหยออกไป หากนำปริมาตรที่หายไปหารด้วยปริมาณคอนกรีตสดที่เทจนเต็มแบบหลอก็จะได้ค่าการเยิ้ม

### 3. ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดคอนกรีต

ภายหลังจากที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์และน้ำเกิดขึ้นสมบูรณ์แล้วคอนกรีตจะอยู่ในสภาวะของแข็ง เมื่อนำคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วไปทดสอบคุณสมบัติด้านทานแรงต่าง ๆ พบว่า คุณสมบัติด้านทานแรงอัดหรือกำลังอัดมีค่าสูงกว่ากำลังเฉือนและกำลังดึงตามลำดับ

ดังนั้นจึงถือได้ว่าการอัดเป็นคุณสมบัติเด่นของคอนกรีต ปัจจัยที่มีผลต่อการอัดคอนกรีตมีด้วยกันหลายประการดังต่อไปนี้ (บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. 2552 : 97-109, วินิต ช่อวิเชียร. 2544 : 148-170 และ Neville A.M. and Brooks J.J. 2010 : 94-119)

3.1 ประเภทของซีเมนต์มีผลต่อการอัดคอนกรีต เนื่องจากซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีอยู่หลายประเภทเมื่อนำไปผสมคอนกรีตย่อมส่งผลต่อการอัดแตกต่างกัน การพัฒนาการอัดของคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนผสมเดียวกันแต่ใช้ซีเมนต์ต่างประเภทกันได้ผลดังแสดงในภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเมื่อใช้ซีเมนต์แต่ละประเภท

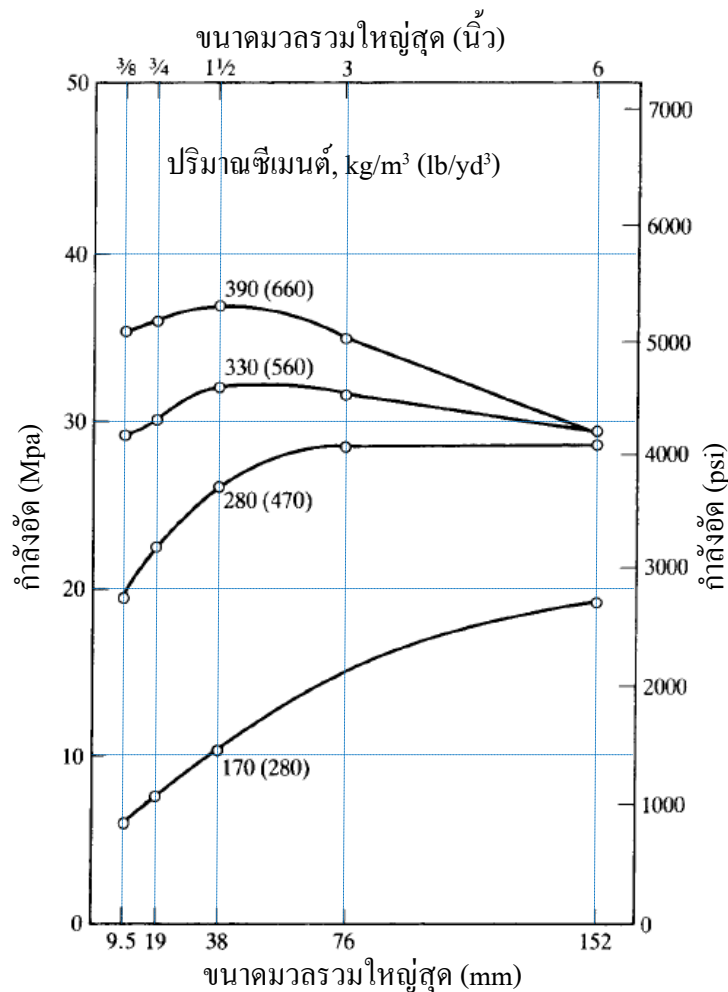
ที่มา : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด. 2552 : 19 และ Neville A.M. and Brooks J.J.

2010 : 24

จากภาพที่ 3.15 พบว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นซีเมนต์ที่นิยมใช้กับงานก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปจะมีการพัฒนากำลังอัดอย่างต่อเนื่องจนมีอายุ 28 วัน หลังจากนั้นการพัฒนากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ สำหรับคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 3 มีการพัฒนากำลังอัดอย่างรวดเร็วในช่วง 14 วันแรก หลังจากนั้นการพัฒนากำลังอัดจะลดลงจนมีค่า

ใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 เมื่อมีอายุ 5 ปี หากพิจารณาคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 2 และประเภทที่ 5 ซึ่งเป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตัดแปลงและซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตพบว่าการพัฒนากำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยกำลังอัดคอนกรีตเมื่อมีอายุ 5 ปีมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 3 ส่วนคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 4 ซึ่งเป็นซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำมีการพัฒนากำลังในช่วง 90 วันแรกต่ำกว่าซีเมนต์ประเภทอื่น แต่เมื่อเวลาผ่านไป 5 ปีจะกำลังเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับซีเมนต์ประเภทที่ 2 และประเภทที่ 5

3.2 ขนาดวัสดุผสมหยาบมีผลต่อกำลังอัดคอนกรีต วัสดุผสมที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นผิวสัมผัสของเหลวโดยรวมน้อยกว่าวัสดุผสมที่มีขนาดเล็กส่งผลให้การดูดซับน้ำน้อยลงด้วย ดังนั้นการใช้วัสดุผสมหยาบที่มีขนาดใหญ่จะช่วยลดปริมาณน้ำในขั้นตอนการผสมคอนกรีตลงได้ ปริมาณน้ำที่ลดลงนี้จะส่งผลดีต่อกำลังอัดคอนกรีตภายหลังจากแข็งตัวแล้ว ภาพที่ 3.16 แสดงอิทธิพลของขนาดวัสดุผสมหยาบต่อกำลังอัดคอนกรีต

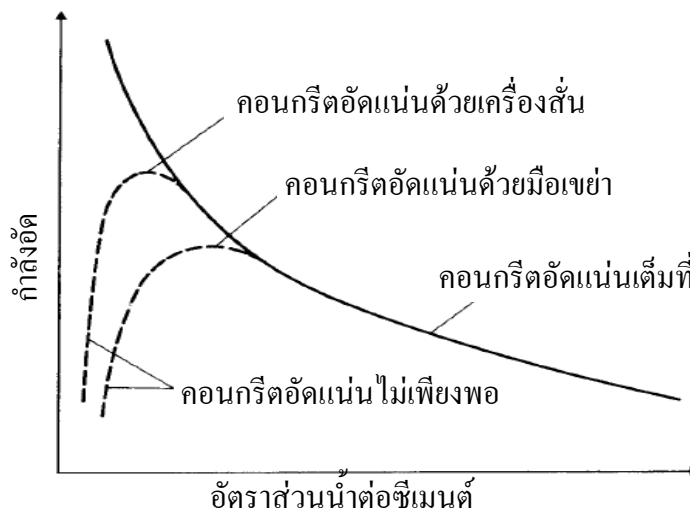


ภาพที่ 3.16 อิทธิพลของขนาดใหญ่สุดของวัสดุผสมหยาบต่อกำลังอัดคอนกรีต

ที่มา : Neville A.M. and Brooks J.J. 2010 : 64

จากภาพที่ 3.16 พบว่าคอนกรีต  $1 \text{ m}^3$  ที่ใช้ปริมาณซีเมนต์น้อยกว่า  $280 \text{ kg}$  ขนาดวัสดุผสมหยาบที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มช่วยเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตให้ดีขึ้นด้วย แต่ถ้าใช้ปริมาณซีเมนต์มากกว่า  $330 \text{ kg}$  ในการผสมคอนกรีต  $1 \text{ m}^3$  ควรใช้วัสดุผสมหยาบขนาดใหญ่สุดไม่เกิน  $1 \frac{1}{2}$  นิ้ว เพราะทำให้กำลังอัดคอนกรีตสูงที่สุด อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ขนาดวัสดุผสมหยาบยังต้องคำนึงถึงระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ระยะห่างของเหล็กเสริม และความหนาของชั้นส่วนโครงสร้างด้วย

3.3 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water Cement Ratio : W/C) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำต่อปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมคอนกรีต เช่น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.55 หมายถึงการใช้น้ำ  $0.55 \text{ kg}$  ผสมกับซีเมนต์  $1 \text{ kg}$  เป็นต้น ทั้งนี้ปริมาณน้ำที่ใช้ต้องเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยจะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากดังแสดงในภาพที่ 3.17 อย่างไรก็ตามการใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยจะส่งผลสืบเนื่องทำให้คอนกรีตสดมีความชื้นเหลือตกลงจึงมีโอกาสเกิดช่องว่างหรือโพรงอากาศได้มาก ดังนั้นการสั่นหรือเขย่าให้คอนกรีตสดมีเนื้อแน่นจะช่วยลดโพรงอากาศในคอนกรีตและทำให้กำลังอัดดีขึ้น การเขย่าหรือการกระทุ้งคอนกรีตสดด้วยมือสามารถทำได้แต่มีประสิทธิภาพด้อยกว่าการใช้เครื่องเขย่า



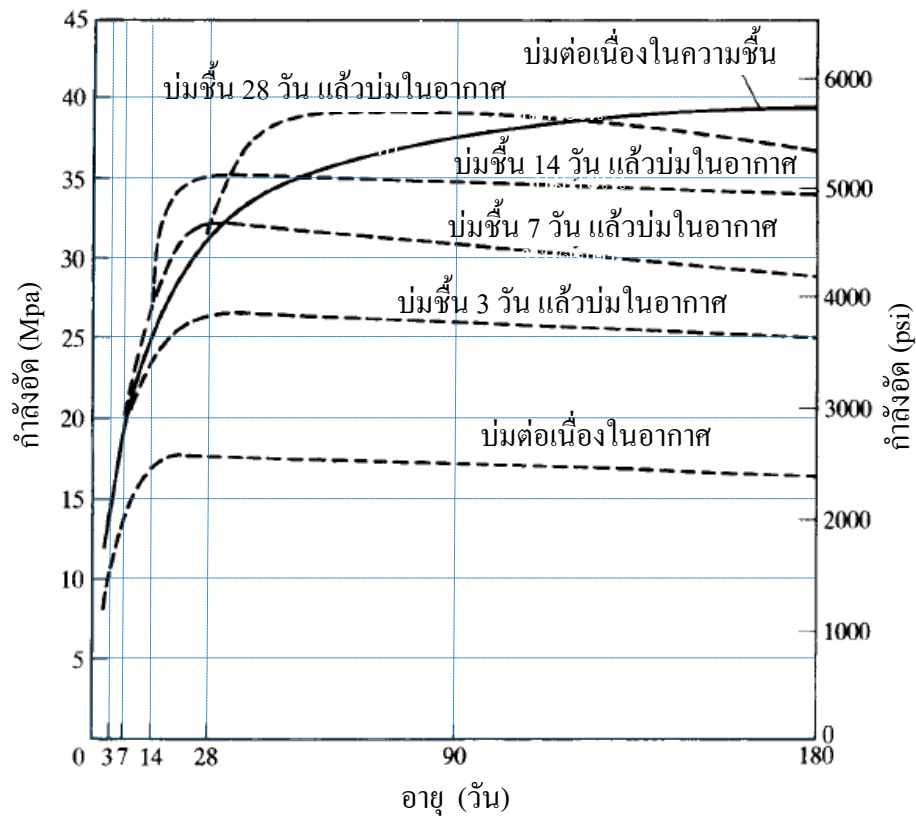
ภาพที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

ที่มา : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด. 2552 : 117 และ Neville A.M. and Brooks J.J.

2010 : 117

3.4 การบ่ม (Curing) เป็นการรักษาความชื้นภายในคอนกรีตเอาไว้เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์ หากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดไม่สมบูรณ์ย่อมส่งผลเสีย

ต่อกำลังอัดคอนกรีต การบ่มคอนกรีตมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การขังน้ำ การฉีดหรือพรมน้ำ การปกคลุมด้วยวัสดุเปียก การปกคลุมด้วยวัสดุที่บดน้ำ และการใช้สารเคมีเคลือบ เป็นต้น ภาพที่ 3.18 แสดงการพัฒนากำลังอัดคอนกรีตจากการบ่มขึ้นที่อุณหภูมิห้อง จากภาพพบว่าคอนกรีตที่ถูกบ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจะมีการพัฒนากำลังอัดได้ดีกว่าคอนกรีตที่ถูกปล่อยทิ้งไว้ให้แข็งตัวในอากาศ โดยคอนกรีตที่บ่มขึ้นต่อเนื่องเป็นเวลา 3 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วันจะมีการพัฒนา กำลังอัดดีขึ้นตามลำดับ แต่การพัฒนากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงภายหลังจากปล่อยทิ้งไว้ในอากาศ โดยคอนกรีตที่มีการบ่มขึ้นต่อเนื่องเป็นเวลา 180 วันมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีค่ากำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการบ่มขึ้นที่ใช้เวลาน้อยกว่า



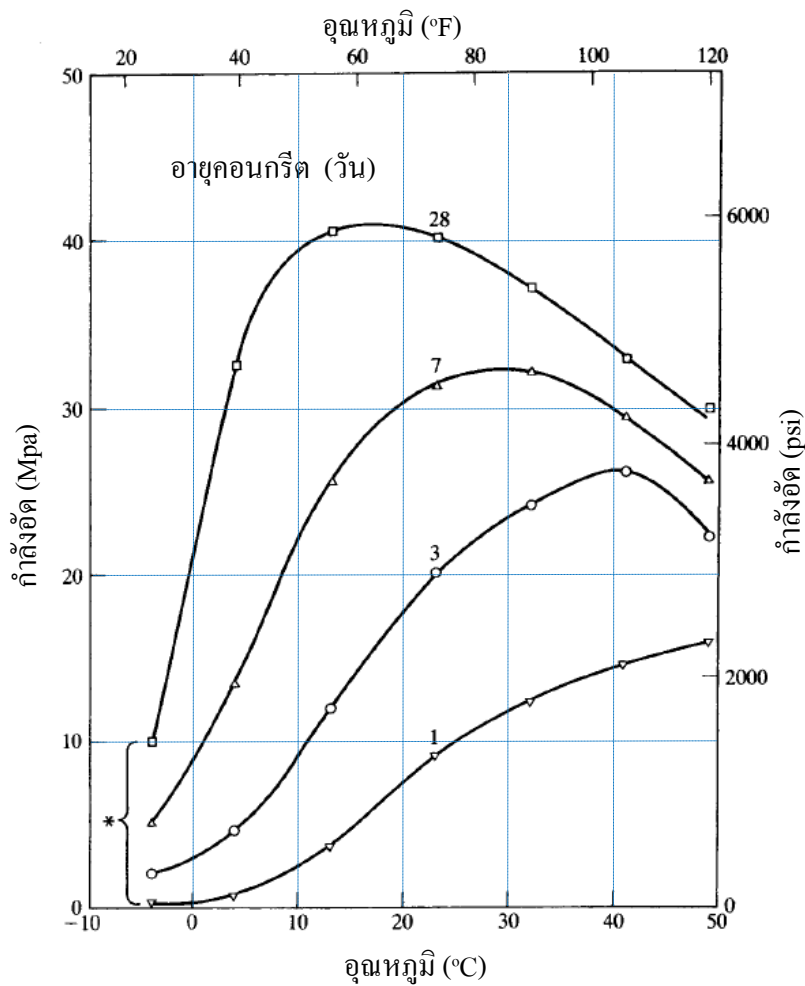
ภาพที่ 3.18 อิทธิพลของการบ่มขึ้นต่อการพัฒนา กำลังอัดคอนกรีต

ที่มา : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด, 2552 : 92 และ Neville A.M. and Brooks J.J.

2010 : 176

การบ่มคอนกรีตที่ใช้อุณหภูมิต่างกันจะมีผลต่อการพัฒนา กำลังอัดคอนกรีตต่างกันด้วย ภาพที่ 3.19 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มกับการพัฒนา กำลังอัดคอนกรีต จากภาพพบว่าคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมจะมีอุณหภูมิ

ที่เหมาะสมสำหรับการบ่มอยู่ในช่วง 10-20°C ถ้าการบ่มใช้อุณหภูมิสูงขึ้นระหว่าง 25-35°C จะเป็นผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดในช่วง 7 วันแรก ถ้าการบ่มใช้อุณหภูมิประมาณ 40°C จะเป็นผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดในช่วง 3 วันแรก และถ้าการบ่มคอนกรีตใช้อุณหภูมิสูงกว่า 40°C จะเป็นผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดในช่วง 24 ชั่วโมง หรืออาจกล่าวได้ว่าการบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงจะมีแนวโน้มทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเท่านั้น และการบ่มคอนกรีตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10°C จะมีแนวโน้มทำให้กำลังอัดคอนกรีตลดต่ำลง



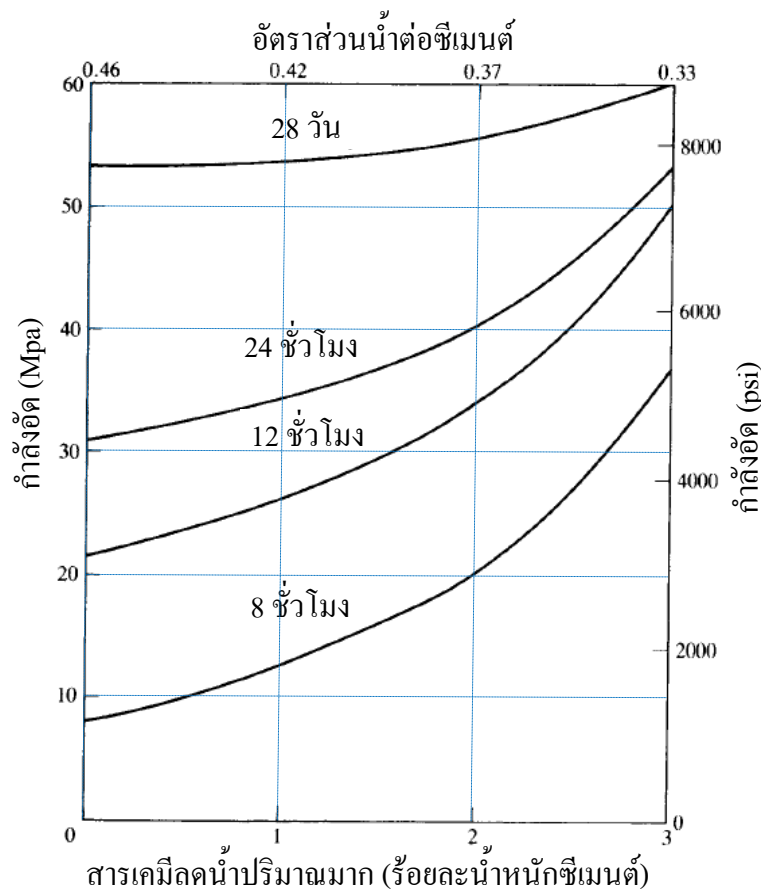
ภาพที่ 3.19 อิทธิพลของการบ่มที่อุณหภูมิแตกต่างกันต่อกำลังอัดคอนกรีต

ที่มา : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด. 2552 : 95 และ Neville A.M. and Brooks J.J.

2010 : 183

3.5 สารผสมเพิ่มมีผลต่อกำลังอัดคอนกรีตแตกต่างกัน สารผสมเพิ่มที่เติมลงในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงกำลังอัดเป็นกลุ่มสารเคมีที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C494 ยกตัวอย่างเช่น

สารเคมีผสมคอนกรีตประเภท F ซึ่งเป็นสารเคมีลดน้ำปริมาณมากเมื่อเติมลงในคอนกรีตแล้วจะมีผลต่อกำลังอัดอย่างเห็นได้ชัด สารเคมีประเภท F สามารถลดน้ำได้มากถึงร้อยละ 25-35 เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่ใช้กับคอนกรีตทั่วไป ดังนั้นสารเคมีประเภทนี้จึงมักถูกใช้เมื่อต้องการให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นแต่คุณสมบัติของคอนกรีตยังคงรักษาความสามารถเท่าเดิมเหมือนเดิม เป็นต้น ภาพที่ 3.20 เป็นผลของสารเคมีลดน้ำปริมาณมากต่อกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 เป็นส่วนผสมและปริมาณสารเคมีที่แสดงในภาพเป็นค่าร้อยละของน้ำหนักซีเมนต์



ภาพที่ 3.20 อิทธิพลของสารเคมีลดน้ำปริมาณมากต่อกำลังอัดคอนกรีต

ที่มา : Neville A.M. and Brooks J.J. 2010 : 156

จากภาพที่ 3.20 พบว่าสารเคมีลดน้ำปริมาณมากที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังอัดคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่อายุ 28 วันพบว่าคอนกรีตไม่ผสมสารเคมีมีกำลังอัดประมาณ 53 Mpa และคอนกรีตผสมสารเคมีร้อยละ 3 มีกำลังอัดประมาณ 60 Mpa หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.7 โดยปริมาณสารเคมีจะส่งผลอย่างมากต่อกำลังอัดเมื่อคอนกรีตมีอายุน้อยกว่า 24



ชั่วโมง อย่างไรก็ตามคอนกรีตสดที่ผสมสารเคมีลดน้ำปริมาณมากจะมีความสามารถเทได้ที่ดีในช่วงเวลาไม่เกิน 30 นาที แต่เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่านั้นคุณสมบัติของคอนกรีตสดจะกลับสู่สภาวะปกติ

#### 4. การทดสอบคอนกรีต

คอนกรีตไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตสดหรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วควรมีการทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมคุณภาพ ผลจากการทดสอบคอนกรีตสดจะบ่งบอกความสามารถเทได้และยังช่วยในการทำนายกำลังอัดคอนกรีตที่แข็งตัวได้อีกด้วย สำหรับการทดสอบคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเป็นการสร้างความเชื่อมั่นเมื่อนำคอนกรีตนั้นไปใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (กรมชลประทาน, 2552, บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, 2552 : 63-113 และ อุดมวิทย์กาญจนวงศ์, 2543)

4.1 การทดสอบความสามารถเทได้ของคอนกรีตสด เป็นการทดสอบหาความชื้นเหลวของคอนกรีตในสถานะของเหลวซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสามารถเทได้ หากความชื้นเหลวมากก็จะทำให้คอนกรีตสดไหลเข้าไปในแบบหล่อได้สะดวก การทดสอบความชื้นเหลวมีด้วยกันหลายวิธีแต่บางวิธีสามารถทำได้เฉพาะในห้องปฏิบัติการเนื่องจากเครื่องมือมีขนาดใหญ่ขนย้ายลำบาก เช่น วิธีการทดสอบสัดส่วนการอัดแน่น หรือวิธีทดสอบวีบี เป็นต้น สำหรับวิธีทดสอบความชื้นเหลวที่พบเห็นทั่วไปในสถานที่ก่อสร้างคือวิธีการทดสอบค่ายุบตัว แต่ในบางครั้งก็ใช้วิธีการทดสอบการจมของลูกบอลเคลลี่ ดังนั้นหัวข้อนี้จึงขอแนะนำเสนอขั้นตอนการทดสอบทั้งสองวิธีที่พบเห็นบ่อยดังรายละเอียดต่อไปนี้

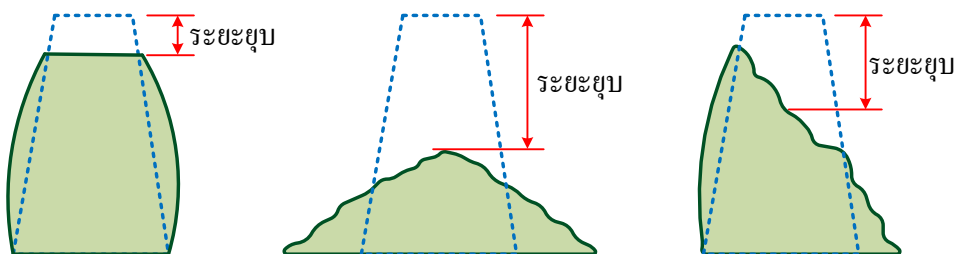
4.1.1 วิธีทดสอบค่ายุบตัวมาตรฐาน ASTM C143 เป็นวิธีวัดความชื้นเหลวของคอนกรีตสดที่พบเห็นได้บ่อยในสถานที่ก่อสร้างเนื่องจากใช้อุปกรณ์ไม่มากและใช้เวลาในการทดสอบน้อย อย่างไรก็ตามสำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน (สวพ.ทล.209, 2552: 63-67) เสนอแนะว่าการทดสอบนี้เหมาะกับคอนกรีตสดที่มีค่ายุบตัวระหว่าง 1.25-22.5 cm วิธีทดสอบค่ายุบตัวใช้อุปกรณ์หลัก 2 ชิ้นประกอบด้วย กรวยทดสอบ (Slump Cone) เป็นอุปกรณ์ทรงกรวยปลายตัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฐานกรวย 8 นิ้ว หรือ 20 cm และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางปากกรวย 4 นิ้ว หรือ 10 cm ความสูงของกรวย 12 นิ้ว หรือ 30 cm และเหล็กกระทุ้งปลายมน (Tamping Rod) เป็นแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 cm ยาว 60 cm ตามลำดับ ส่วนอุปกรณ์เสริมที่ใช้ในการทดสอบ เช่น ที่ตักคอนกรีต เกรียงเหล็ก และถาดรอง เป็นต้น ภาพที่ 3.21 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีตสด



ภาพที่ 3.21 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีตสด

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

ขั้นตอนการทดสอบค่ายุบตัวเริ่มจากการนำกรวยทดสอบไปวางบนถาดรองที่วางบนพื้นเรียบแข็ง ทั้งกรวยทดสอบและถาดรองควรขึ้นเพื่อป้องกันคอนกรีตสูญเสียน้ำ จากนั้นเหยียบฐานกรวยด้วยเท้าทั้งสองข้างให้แนบสนิทกับถาดรองแล้วตักคอนกรีตใส่ลงไปกรวย จำนวน 3 ชั้น แต่ละชั้นควรมีปริมาณใกล้เคียงกันและใช้เหล็กกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง ควรกระทุ้งคอนกรีตชั้นล่างสุดให้ถึงพื้นถาดรอง ส่วนชั้นที่สองและชั้นที่สามควรให้ปลายเหล็กกระทุ้งทะลุผ่านชั้นล่างเล็กน้อย ปาดคอนกรีตส่วนเกินออกให้เรียบเสมอปากกรวยและยกกรวยขึ้นในแนวตั้งอย่างช้าๆ เมื่อยกกรวยออกแล้วคอนกรีตจะยุบตัวลงในรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 3.22 จากนั้นหาค่าการยุบตัวของคอนกรีตโดยวัดความแตกต่างระหว่างความสูงกรวยเทียบกับผิวบนของคอนกรีตที่ยุบตัวลง ถ้าคอนกรีตยุบตัวลงมากก็แสดงว่ามีความชื้นเหลวมาก การทดสอบวิธีนี้ควรใช้ระยะเวลาทดสอบแต่ละครั้งประมาณ 2-3 นาที



(ก) การยุบแบบลูกค้อน

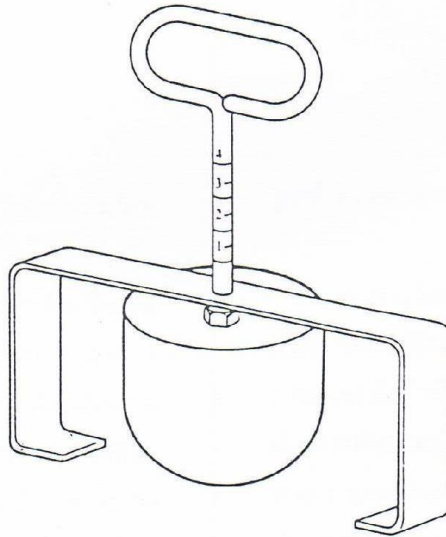
(ข) การยุบแบบลิ่ม

(ค) การยุบแบบเฉือน

ภาพที่ 3.22 รูปแบบการยุบตัว

ที่มา : Neville, A.M. and J.J. Brooks. 2010 : 83

4.1.2 วิธีทดสอบการจมของลูกบอลเคลลี่มาตรฐาน ASTM C 360 เป็นวิธีวัดความชื้นเหลวของคอนกรีตสดโดยการวัดระยะจมตัวของลูกบอลมาตรฐาน วิธีการนี้เหมาะกับคอนกรีตสดที่มีความชื้นเหลวปานกลางหรือใกล้เคียงกับวิธีการทดสอบค่ายุบตัว อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบคือลูกบอลเคลลี่ (Kelly Ball) และภาชนะสำหรับใส่คอนกรีต ลูกบอลเคลลี่มีลักษณะคล้ายทรงกลมผ่าซีกทำจากโลหะดังแสดงในภาพที่ 3.23 โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.2 cm หนัก 14 kg ส่วนภาชนะสำหรับใส่คอนกรีตควรมีความลึกไม่น้อยกว่า 20 cm และกว้างไม่น้อยกว่า 45 cm อุปกรณ์เสริมที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ที่ตักคอนกรีตและถาดรอง



ภาพที่ 3.23 ลูกบอลเคลลี่

ที่มา : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. 2552 : 77

ขั้นตอนการทดสอบการจมของลูกบอลเคลลี่เริ่มจากการนำภาชนะมาวางบนพื้นราบเรียบ ภาชนะควรตั้งอย่างมั่นคงไม่เกิดการสั่นไหว จากนั้นนำคอนกรีตสดใส่ในภาชนะแล้วปาดผิวให้เรียบ ยกลูกบอลให้ลอยอยู่บนผิวภาชนะโดยให้ขาคีลูกบอลทั้งสองข้างวางอยู่บนขอบภาชนะ ค่อย ๆ หย่อนให้ปลายมนของลูกบอลสัมผัสผิวหน้าคอนกรีตแล้วบันทึกค่าที่ก้านยัดลูกบอล ปล่อยให้ลูกบอลให้จมลงไปใ้คอนกรีตอย่างอิสระแล้วบันทึกที่ระยะจมตัวของลูกบอล ผลต่างระหว่างความลึกก่อนและหลังการจมตัวคือความชื้นเหลวของคอนกรีตสด ควรทำการทดสอบซ้ำอีก 2 ครั้งเพื่อยืนยันผลการทดสอบ

4.2 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Compressive Strength of Concrete) เป็นการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติด้านทานแรงอัดในแนวแกนของคอนกรีตในสภาวะของแข็งโดยใช้

เครื่องทดสอบแรงอัด รูปร่างของแท่งคอนกรีตที่นิยมทดสอบมี 2 ลักษณะคือ รูปทรงกระบอก ตามมาตรฐาน ASTM C192 ซึ่งมีขนาดมาตรฐานคือ เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว หรือ 15 cm สูง 12 นิ้ว หรือ 30 cm และรูปทรงลูกบาศก์ตามมาตรฐาน BS 1881 ซึ่งมีขนาดมาตรฐานคือ กว้าง ยาว และสูงด้านละ 15 cm ขนาดของแท่งคอนกรีตทดสอบที่แตกต่างไปจากนี้จะต้องถูกปรับเพื่อ เทียบเคียงกับขนาดมาตรฐาน



(ก) แบบหล่อคอนกรีตทรงกระบอก



(ข) แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์

ภาพที่ 3.24 แบบหล่อแท่งคอนกรีตและอุปกรณ์การหล่อแท่งคอนกรีต

ที่มา : จิรวัดณ์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

การหล่อแท่งคอนกรีตเริ่มจากการทาน้ำมันภายในแบบหล่อเพื่อป้องกันคอนกรีตติดกับแบบหล่อ ตักคอนกรีตใส่ในแบบหล่อทรงกระบอกดังแสดงในภาพที่ 3.24 (ก) โดยแบ่งเป็น 3 ชั้นแต่ละชั้นมีปริมาณใกล้เคียงกัน ใช้เหล็กปลายมนกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้งเพื่อให้คอนกรีตแน่น ส่วนการหล่อแท่งคอนกรีตในแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ดังแสดงในภาพที่ 3.24(ข) ก็ทำในลักษณะเดียวกันแต่ใช้เหล็กกระทุ้งชั้นละ 36 ครั้ง โดยกระทุ้งให้กระจายทั่วพื้นที่อย่างสม่ำเสมอ และให้ปลายเหล็กกระทุ้งผ่านลงไปถึงชั้นล่างเล็กน้อย หากคอนกรีตสดมีความชื้นเหลวน้อยควรใช้เครื่องเขย่าคอนกรีตเพื่อไล่ฟองอากาศหลังจากการกระทุ้ง ปาดผิวหน้าให้เรียบแล้วปล่อยให้คอนกรีตแข็งตัวประมาณ 24 ชั่วโมง ถอดแท่งคอนกรีตออกจากแบบหล่อแล้วนำไปบ่มชื้นอย่างต่อเนื่องจนมีอายุ 28 วันหรือจนถึงเวลาที่กำหนด การบ่มที่นิยมทำคือการแช่แท่งคอนกรีตในน้ำที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 21-25°C ดังแสดงในภาพที่ 3.25 เมื่อคอนกรีตมีอายุครบตามกำหนดแล้วจึงนำไปทดสอบกำลังอัดต่อไป

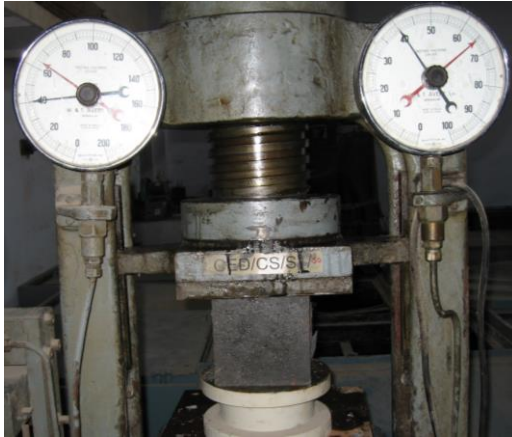


ภาพที่ 3.25 บ่อต้มแท่งคอนกรีตที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้  
ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

ขั้นตอนการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตเริ่มจากการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นของแท่งคอนกรีต ผิวหน้าแท่งคอนกรีตต้องเรียบไม่ขรุขระเพื่อให้แรงกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งหน้าตัด หากผิวหน้าไม่เรียบจะต้องขัดให้เรียบหรือเคลือบด้วยกัมมะถัน โดยกัมมะถันที่ใช้เคลือบจะอยู่ในสถานะของเหลวที่อุณหภูมิประมาณ  $180-210^{\circ}\text{C}$  กัมมะถันดังกล่าวควรผสมผงฟูหินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ด้วยอัตราส่วนผสม 3 ต่อ 1 เพื่อป้องกันการรุกรานใหม่ขณะให้ความร้อน นำแท่งคอนกรีตวางที่กึ่งกลางแท่นทดสอบแล้วเปิดเครื่องทดสอบให้แรงกดกระทำดังแสดงในภาพที่ 3.26 สำหรับแท่งคอนกรีตทรงกระบอกควรมีอัตราการกดอยู่ในช่วง 1.43-3.47 ksc ในเวลา 1 วินาที และแท่งคอนกรีตทรงลูกบาศก์ควรมีอัตราการกดอยู่ในช่วง 1.12-2.72 ksc ในเวลา 1 วินาที บันทึกแรงกดและระยะหดตัวพร้อมทั้งวาดภาพการวิบัติของแท่งคอนกรีต นำค่าแรงกดไปหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของแท่งคอนกรีตก็จะได้นหน่วยแรงอัดหรือกำลังอัด โดยทั่วไปแล้วกำลังอัดสูงสุดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกจะมีค่าน้อยกว่าทรงลูกบาศก์เนื่องจากทรงกระบอกมีอัตราส่วนความชะลูดมากกว่า ดังนั้นหากต้องการเปรียบเทียบกำลังอัดระหว่างแท่งคอนกรีตทั้งสองรูปทรงก็สามารถทำได้โดยใช้ข้อแนะนำที่ระบุในมาตรฐานต่าง ๆ เช่น วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.1014-40. 2540) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย (มอก.213. 2552) และกรมชลประทาน (สวพ.ทล.211. 2552) เป็นต้น ภาพที่ 3.27 เป็นการเปรียบเทียบกำลังอัดระหว่างแท่งคอนกรีตทั้งสองรูปทรงตามข้อแนะนำต่าง ๆ จากภาพพบว่าความสัมพันธ์กำลังอัดแท่งคอนกรีตทรงลูกบาศก์กับแท่งคอนกรีตทรงกระบอกที่นำเสนอโดย ว.ส.ท.1014-40 มีค่าต่ำกว่าข้อแนะนำที่ระบุจากสถาบันอื่นแต่ข้อแนะนำนี้มักถูกใช้



อ้างอิงในงานก่อสร้างทั่วไป ส่วนความสัมพันธ์กำลังอัดที่นำเสนอโดย สวพ.ทล.21 มีค่าใกล้เคียงกับ มอก.213 โดยที่ สวพ.ทล.211นำเสนอความสัมพันธ์ของกำลังอัดแยกย่อยตามขนาดหินย่อยที่ผสมในคอนกรีต



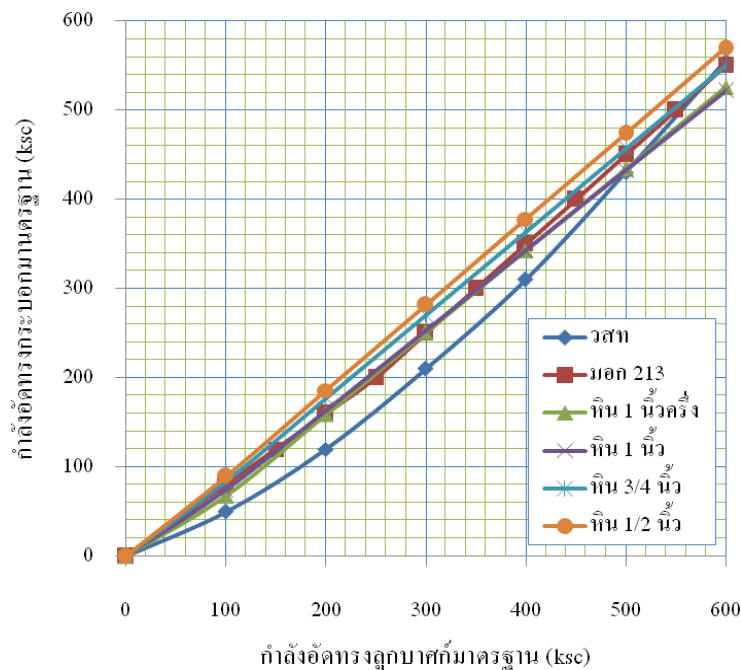
(ก) การทดสอบคอนกรีตทรงลูกบาศก์



(ข) การทดสอบคอนกรีตทรงกระบอก

ภาพที่ 3.26 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558



ภาพที่ 3.27 ความสัมพันธ์กำลังอัดคอนกรีตทรงลูกบาศก์กับทรงกระบอก

ที่มา : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด. 2552 : 102, มอก.213. 2552, ว.ส.ท.1014-40.

2540 และ สวพ.ทล.211. 2552

กรณีต้องการตรวจสอบกำลังอัดคอนกรีตจากชิ้นส่วนโครงสร้างจริงก็สามารถทำได้โดยใช้วิธีเจาะเก็บแท่งคอนกรีต (Core Drilling) มาตรฐาน ASTM C42 การทดสอบวิธีนี้เป็นการเจาะเก็บแท่งคอนกรีตตัวอย่างจากสภาพจริงในสถานที่ก่อสร้างด้วยการใช้สว่านที่ยึดปลายด้วยหัวเจาะทรงกระบอกกลวง โดยหัวเจาะที่ใช้ควรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่เป็นสามเท่าของขนาดมวลรวมหยาบแต่ไม่ควรน้อยกว่า 5 cm ในขณะที่เจาะควรให้หัวเจาะอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันตลอดเวลาเพื่อให้ชิ้นงานมีผิวเรียบสม่ำเสมอและไม่ควรให้เกิดการเหวี่ยงหรือกระแทกจนแท่งคอนกรีตแตกหัก ในขณะที่เจาะควรระบายความร้อนจากหัวเจาะด้วยน้ำ เมื่อได้แท่งคอนกรีตตัวอย่างแล้วจึงนำมาตัดปลายทั้งสองด้านให้เรียบแล้วนำไปทดสอบกำลังอัดต่อไป โดยทั่วไปนิยมให้ความสูงของแท่งคอนกรีตเป็นสองเท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ค่ากำลังอัดของแท่งคอนกรีตที่ได้จากการเจาะเก็บควรนำมาปรับแก้ให้เป็นค่ากำลังอัดแท่งคอนกรีตขนาดมาตรฐาน ASTM C192 ภาพที่ 3.28 แสดงตัวอย่างแท่งคอนกรีตที่เจาะได้จากชิ้นส่วนจริงเพื่อนำมาทดสอบกำลังอัด



ภาพที่ 3.28 การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

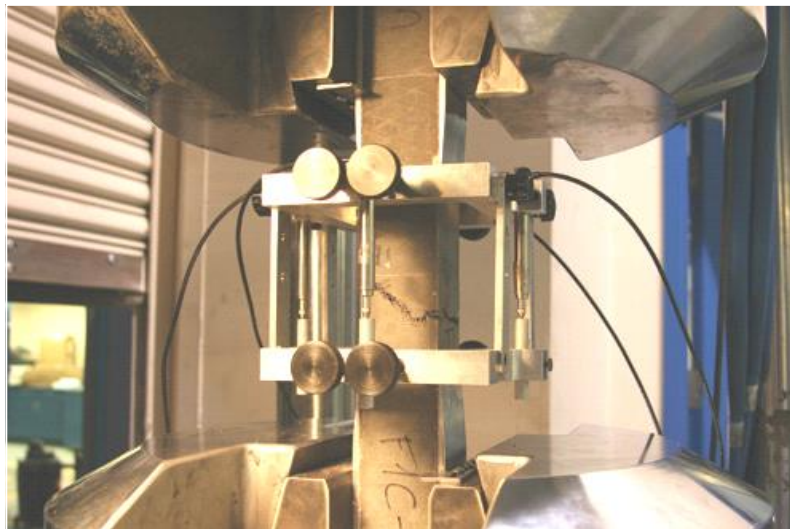
ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

4.3 การทดสอบกำลังดึงคอนกรีต (Tensile Strength of Concrete) เป็นวิธีการทดสอบหาคุณสมบัติด้านทานแรงดึงหรือกำลังดึงของคอนกรีต ขั้นตอนการเตรียมคอนกรีตตัวอย่างต้องทำอย่างระมัดระวังเนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่รับแรงอัดได้ดีแต่รับแรงดึงได้ต่ำ โดยทั่วไป



กำลังดึงคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของกำลังอัดสูงสุด (Ultimate Compressive Strength :  $f_c'$ ) การทดสอบกำลังดึงคอนกรีตมีด้วยกันหลายวิธีดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.3.1 วิธีทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตโดยตรง (Direct Tensile Strength) เป็นวิธีการหาลำดับดึงของแท่งคอนกรีตโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการหล่อแท่งคอนกรีตตัวอย่างและบ่มขึ้นตามระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นนำแท่งคอนกรีตไปติดตั้งบนเครื่องทดสอบแล้วดึงแท่งคอนกรีตด้วยอัตราคงที่จนกระทั่งชิ้นงานวิบัติดังแสดงในภาพที่ 3.29 นำค่าแรงดึงมาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดก็จะได้ค่ากำลังดึงของคอนกรีต อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่นิยมทดสอบเนื่องจากการเตรียมชิ้นงานและการติดตั้งชิ้นงานบนเครื่องทดสอบมีความยุ่งยาก



ภาพที่ 3.29 การทดสอบกำลังดึงโดยตรงของคอนกรีต

ที่มา : United States Department of Transportation, 2011

4.3.2 วิธีทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตแบบผ่าซีก (Split Tensile Strength) มาตรฐาน ASTM C496 เป็นการหาลำดับดึงของคอนกรีตวิธีอ้อมโดยการนำแท่งคอนกรีตมากดจนเกิดการวิบัติแบบผ่าซีก ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นจากการเตรียมแท่งคอนกรีตทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C192 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d$  เท่ากับ 15 cm ความสูง  $l$  เท่ากับ 30 cm เมื่อแท่งคอนกรีตมีอายุครบกำหนดจึงนำมาทดสอบกำลังดึง การติดตั้งแท่งคอนกรีตในเครื่องทดสอบจะวางนอนโดยมีแผ่นเหล็กหนาประกบทั้งด้านบนและด้านล่างตลอดความยาวแท่งคอนกรีต จากนั้นให้แรงกด  $P$  กระทำกับแท่งคอนกรีตในอัตราคงที่จนกระทั่งวิบัติดังแสดงในภาพที่ 3.30 คำนวณหาลำดับดึงแบบผ่าซีก  $f_{ct}$  จากสมการ



ภาพที่ 3.30 การทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตทรงกระบอกแบบผ่าซีก

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (3.1)$$

แก้วตา ดียิ่ง และคณะ (2552:1667) ได้นำเสนอว่าค่าแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตทั่วไปควรมีค่าระหว่าง  $1.59\sqrt{f_{c'}}$  ถึง  $1.86\sqrt{f_{c'}}$  และคอนกรีตมวลเบาควรมีค่าระหว่าง  $1.33\sqrt{f_{c'}}$  ถึง  $1.59\sqrt{f_{c'}}$  ตามลำดับ

4.3.3 วิธีทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตโดยใช้โมดูลัสแตกร้าว (Modulus of Rupture) ตามมาตรฐาน ASTM C78 เป็นการทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตวิธีอ้อมโดยการนำคานคอนกรีตมาตัดเพื่อหาค่าโมดูลัสแตกร้าว ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการหล่อคานคอนกรีตตัวอย่างขนาด 15x15x50 cm ในแบบหล่อดังแสดงในภาพที่ 3.31(ก) จากนั้นนำคานคอนกรีตที่ได้มาทดสอบโมเมนต์ค้ดบนเครื่องทดสอบดังแสดงในภาพที่ 3.31(ข) ค่าแรงกดที่กระทำบนคานจนกระทั่งคานวิบัติจะถูกนำไปคำนวณหาค่าโมดูลัสการแตกร้าวหรือค่าหน่วยแรงค้ด ค่าโมดูลัสการแตกร้าวคือค่ากำลังดึงสูงสุดของคอนกรีตซึ่งเกิดบริเวณด้านล่างของคาน อย่างไรก็ตามค่าโมดูลัสแตกร้าวสำหรับคอนกรีตทั่วไปควรมีค่าประมาณ  $1.9\sqrt{f_{c'}}$

4.4 การทดสอบคอนกรีตแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Test of Concrete) เป็นการทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของคอนกรีตโดยไม่ทำลายชิ้นส่วนโครงสร้างหรือแท่งคอนกรีตตัวอย่าง การทดสอบนี้มีด้วยกันหลายวิธีโดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือทดสอบชนิดต่าง ๆ เช่น ข้อมูลอุณหภูมิ คลื่น รั้งสี พลังงานสะท้อนกลับ การสั่นไหว และลักษณะอนุภาคขนาดเล็ก เป็นต้น ตัวอย่างวิธีการทดสอบคอนกรีตแบบไม่ทำลายมีดังนี้



(ก) แบบหล่อคอนกรีตคานคอนกรีต



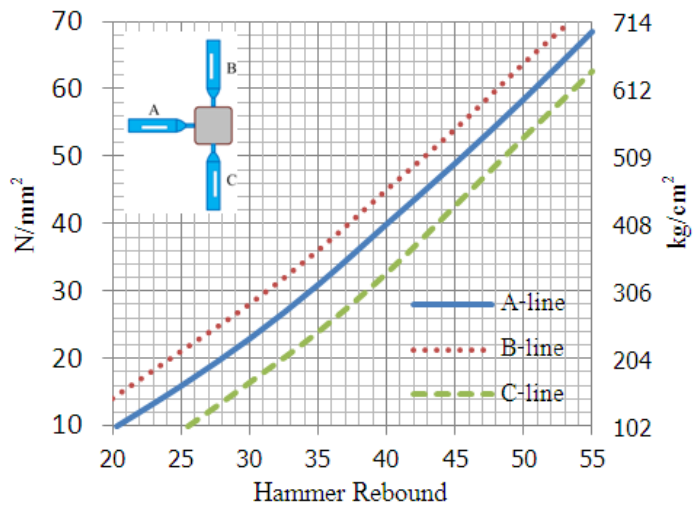
(ข) เครื่องทดสอบโมเมนต์ดัด

### ภาพที่ 3.31 การทดสอบโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีต

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

4.4.1 วิธีทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยค้อนกระแทกแบบสมิดท์ (Schmidt's Hammer) มาตรฐาน ASTM C805-02 เป็นการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตแบบไม่ทำลายโดยอาศัยการสะท้อนกลับของลูกเหล็กที่อยู่ภายในค้อน โดยลูกเหล็กจะได้รับการถ่ายเทพลังงานสักระยะจากสปริงและเกิดการสะท้อนกลับเมื่อสัมผัสผิววัตถุ การสะท้อนกลับของลูกเหล็กจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการดูดซับพลังงานของคอนกรีต ยกตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูงและผิวแข็งจะดูดซับพลังงานกระแทกต่ำจึงทำให้ลูกเหล็กสะท้อนกลับได้มาก ในขณะที่คอนกรีตที่มีความหนาแน่นน้อยและเนื้อพรุนจะให้ผลตรงข้าม เป็นต้น ขั้นตอนการทดสอบวิธีนี้เริ่มจากการขีดผิวคอนกรีตในตำแหน่งทดสอบให้เรียบด้วยหินขัด เตรียมความพร้อมของค้อนโดยสังเกตว่ามาตรวัดการสะท้อนอยู่ที่ศูนย์ จากนั้นจับค้อนให้มั่นคงและกดปลายค้อนบนผิวคอนกรีต ณ ตำแหน่งที่ต้องการทดสอบ พยายามให้แกนค้อนตั้งฉากกับผิวคอนกรีตตลอดเวลาทดสอบ ค่อย ๆ เพิ่มแรงกดจนกระทั่งเกิดการสะท้อนกลับแล้วจึงอ่านผลพร้อมจดบันทึกค่าการสะท้อนกลับ ทำการทดสอบซ้ำโดยแต่ละจุดมีระยะห่างกันไม่น้อยกว่า 2.5 cm ภาพที่ 3.32(ก) แสดงตัวอย่างค้อนกระแทกแบบสมิดท์สำหรับทดสอบกำลังอัดคอนกรีต สำนักวิจัยและพัฒนาของกรมชลประทาน (2552 : 85) แนะนำว่าหากผลที่อ่านได้แตกต่างกันเกิน 6 หน่วยให้ตัดค่านั้นทิ้งและใช้ค่าที่น่าเชื่อถือจำนวน 10 จุดมาหาค่าเฉลี่ย นำค่าเฉลี่ยการสะท้อนของลูกเหล็กมาแปลงเป็นกำลังอัดคอนกรีตจากแผนภาพที่ติดอยู่ข้างค้อนซึ่งมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 3.32(ข) วิธีทดสอบกำลังอัดคอนกรีตด้วยค้อนกระแทกแบบสมิดท์ที่มีการพัฒนาให้มีความ

สะดวกมากขึ้นด้วยการประมวลผลการสะท้อนและแปลงเป็นกำลังอัดคอนกรีต โดยอัตโนมัติดัง  
แสดงในภาพที่ 3.33



(ก) ค้อนกระแทกแบบสมิทธ์ (ข) การแปลงผลที่อ่านได้จากค้อนเป็นกำลังอัดคอนกรีต

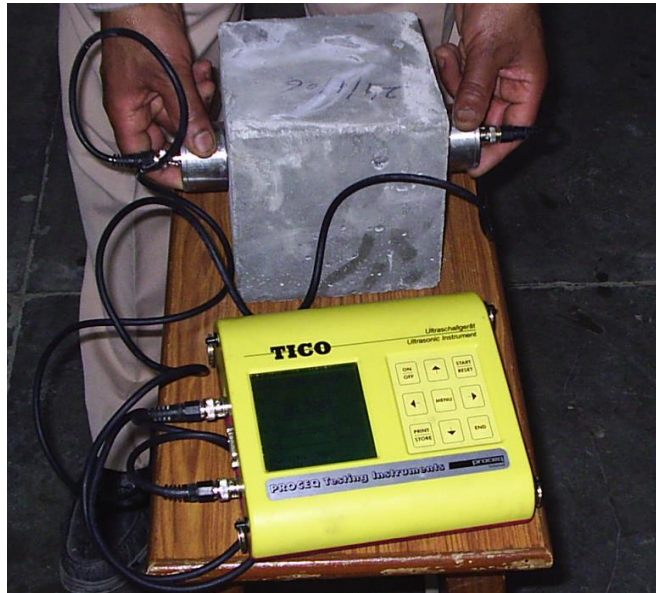
ภาพที่ 3.32 ชุดทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลายโดยใช้ค้อนกระแทก  
ที่มา : จิรวัดณ์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558 และ Sclerometro Per Calcestruzzi. n.d. : 9



ภาพที่ 3.33 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตแบบใช้ค้อนกระแทกและประมวลผลอัตโนมัติ  
ที่มา : จิรวัดณ์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558



4.4.2 วิธีทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกส์ (Ultrasonics Test of Concrete) เป็นการทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตแบบไม่ทำลายโดยใช้หลักการวัดการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกส์ทะลุผ่านเนื้อวัสดุดังแสดงในภาพที่ 3.34 คลื่นอัลตราโซนิกส์มีคุณสมบัติเป็นคลื่นเสียงในย่านความถี่สูงกว่า 20 kHz และสามารถควบคุมทิศทางคลื่นไปยังเป้าหมายได้เนื่องจากไม่มีการเลี้ยวเบนที่ขอบ คลื่นอัลตราโซนิกส์สามารถประยุกต์ใช้ในการวัดความสมบูรณ์ของวัตถุได้เป็นอย่างดี ในการแปรผลการทดสอบจำเป็นต้องอาศัยการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างข้อมูลทดสอบกับข้อมูลอ้างอิงเพื่อความน่าเชื่อถือ การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกส์ในการทดสอบคอนกรีตสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น วัดการกระจายตัวของวัสดุผสมในคอนกรีต วัดการแตกร้าวหรือโพรงอากาศภายในเนื้อคอนกรีต และใช้ทำนายกำลังอัดของคอนกรีต เป็นต้น (Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski, 2011 : 296)



ภาพที่ 3.34 การทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกส์  
ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

## สรุป

ปูนขาวเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีการใช้งานมาตั้งแต่สมัยอดีต ปูนขาวเกิดจากการนำหินปูนหรือวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตไปเผาเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์แล้วนำไปทำปฏิกิริยากับน้ำ ส่วนที่เป็นสารแขวนลอยคือน้ำปูนใสและส่วนที่เป็นผงแห้งก็คือปูนขาว อุตสาหกรรมก่อสร้างนำปูนขาวไปใช้ประโยชน์ในหลายรูปแบบ เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ ใช้เติมในยางแอสฟัลต์ ใช้ผสมร่วมกับซีเมนต์และทรายเพื่อใช้ในงานก่อและฉาบ

เป็นต้น ปูนขาวยังสามารถใช้บำบัดความกระด้างของน้ำได้โดยการทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ละลายในน้ำกระด้างให้กลายเป็นตะกอน สำหรับอุตสาหกรรมอาหารและยาใช้ประโยชน์จากปูนขาว เช่น ใช้ผลิตสารที่ใช้เติมในผลิตภัณฑ์ยา ใช้ปูนขาวดูดคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้ผักและผลไม้สามารถเก็บไว้ได้นาน การเติมปูนขาวในน้ำเชื่อมเพื่อลดความเป็นกรดและทำให้สิ่งเจือปนในน้ำเชื่อมตกตะกอน เป็นต้น

ซีเมนต์เป็นวัสดุชนิดผงสีเทาเมื่อผสมน้ำจะสามารถใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานและเมื่อแข็งตัวมีลักษณะคล้ายหิน ซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไปเรียกว่า ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กรรมวิธีการผลิตซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ วิธีผลิตซีเมนต์แบบเปียกและวิธีผลิตซีเมนต์แบบแห้ง การผลิตซีเมนต์ทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันที่ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบก่อนการนำไปเผา เมื่อนำเม็ดปูนที่ได้จากการเผามาบดให้ละเอียดก็จะได้ซีเมนต์ผง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบ่งเป็น 5 ประเภทแต่ละประเภทมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง 5 ประเภทประกอบด้วย ประเภทที่ 1 ซีเมนต์ธรรมดาเหมาะสำหรับคอนกรีตทั่วไป ประเภทที่ 2 ซีเมนต์ดัดแปลงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตขนาดใหญ่หรือพื้นที่ที่มีซัลเฟตปานกลาง ประเภทที่ 3 ซีเมนต์ให้กำลังอัดเร็วเหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็วหรืองานซ่อมแซม ประเภทที่ 4 ซีเมนต์ความร้อนต่ำเหมาะสำหรับงานคอนกรีตหลายหรืองานโครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีการใช้คอนกรีตปริมาณมาก และประเภทที่ 5 ซีเมนต์ทนซัลเฟตเหมาะสำหรับโครงสร้างที่ได้รับผลกระทบจากซัลเฟตหรือพื้นที่ที่มีความเป็นด่าง

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซีเมนต์และน้ำโดยมีวัสดุผสมละเอียดและวัสดุผสมหยาบรวมอยู่ด้วย คอนกรีตเมื่อผสมเสร็จใหม่จะอยู่ในสภาวะเหลวหรือเรียกว่าคอนกรีตสดเป็นสภาวะที่คอนกรีตสามารถไหลได้ สำหรับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีคุณสมบัติการต้านทานแรงอัดได้ดี คอนกรีตไม่ว่าจะเป็นคอนกรีตสดหรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วควรมีการทดสอบคุณภาพ ผลจากการทดสอบคอนกรีตสดเป็นการบ่งบอกความสามารถเท่าได้ และยังช่วยในการทำนายกำลังอัดคอนกรีตได้อีกด้วย สำหรับการทดสอบคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะช่วยสร้างความเชื่อมั่นเมื่อนำคอนกรีตนั้นไปใช้งาน

### คำถามทบทวน

1. ปูนขาวสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างประเภทใดได้บ้าง
2. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างปูนขาวและปูนสุก
3. วิธีการผลิตซีเมนต์แบบเปียกต่างจากวิธีการผลิตซีเมนต์แบบแห้งอย่างไร
4. จงอธิบายการพัฒนากำลังอัดของสารประกอบหลักในซีเมนต์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน
5. ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แบ่งเป็นกี่ประเภท แต่ละประเภทมีคุณสมบัติอย่างไร
6. หากจำเป็นต้องใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในพื้นที่ที่มีปริมาณซัลเฟตปานกลางจะมีวิธีการแก้ไขปัญหอย่างไร
7. วัสดุผสมในคอนกรีตแต่ละอย่างควรมีคุณสมบัติอย่างไร
8. เพราะเหตุใดจึงนิยมใช้ทรายแม่น้ำและหินย่อยเป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีต
9. จงบอกวิธีการบ่มคอนกรีตและจงอธิบายจุดเด่นและจุดด้อยของแต่ละวิธี
10. ถ้าวัสดุผสมหยาบมีสัดส่วนไม่ดีจะส่งผลเสียอย่างไรต่อคอนกรีต
11. ผลการทดสอบกำลังดึงของคอนกรีตแบบผ่าซีกของแท่งคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm พบว่าต้องใช้น้ำหนักกด 15,900 kg จึงทำให้แท่งตัวอย่างวิบัติ จงหากำลังดึงของแท่งคอนกรีตนี้ (ตอบ : กำลังดึง = 22.5 ksc)
12. ผลการทดสอบกำลังอัดแท่งคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 15 cm × 15 cm × 15 cm พบว่าต้องใช้น้ำหนักกด 95,000 kg จึงทำให้แท่งตัวอย่างวิบัติ จงหากำลังอัดของแท่งคอนกรีตนี้ (ตอบ : กำลังอัด = 422 ksc)





## บทที่ 4

### โลหะและเหล็ก

โลหะเป็นวัสดุที่มีความสำคัญในวงการอุตสาหกรรมเนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นหลายด้าน โลหะบริสุทธิ์ไม่นิยมนำมาผลิตเป็นเครื่องมือหรือเครื่องจักร แต่โลหะผสมกลับมีความนิยมมากกว่าเนื่องจากการนำโลหะตั้งแต่สองชนิดมาผสมกันเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ โลหะผสมโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือโลหะผสมที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบและโลหะผสมที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างส่วนใหญ่นิยมนำโลหะผสมที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบไปใช้งานเนื่องจากโลหะกลุ่มนี้มีความแข็งแรง ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างที่สร้างจากโลหะผสมที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ เช่น อาคาร สะพาน โรงงาน และไซโล เป็นต้น ดังนั้นบทนี้จึงมุ่งเน้นนำเสนอคุณสมบัติพื้นฐานของโลหะผสมที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ โดยมีเนื้อหาประกอบด้วย องค์ประกอบของโลหะ โครงสร้างผลึก จุดบกพร่องในโลหะ คุณสมบัติของโลหะ การทดสอบโลหะ และมาตรฐานเหล็กอุตสาหกรรม ตามลำดับ

#### องค์ประกอบของโลหะ

กวี หวังนิเวศน์กุล (2552 : 65-66) แม้น อมรสิทธิ์ (ม.ป.ป. : 3) และ Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski (2011: 85-86) กล่าวว่าโลหะ (Metal) เป็นวัสดุกลุ่มอนินทรีย์ที่เกิดจากธาตุที่เป็นโลหะชนิดเดียวหรือหลายชนิดมารวมกันหรืออาจมีโลหะเป็นส่วนผสมด้วย โลหะมีสมบัติเด่นหลายด้าน เช่น เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เป็นตัวนำความร้อนที่ดี มีความแข็งแรงสูง และสามารถรีดเป็นแผ่นหรือเป็นท่อได้ เป็นต้น โลหะที่มีบทบาทสำคัญในวงการอุตสาหกรรมคือโลหะกลุ่มที่เป็นเหล็ก (Ferrous Metal) นอกจากนั้นยังมีโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-ferrous Metal) ที่ถูกนำมาใช้งานอีกด้วย เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง สังกะสี และดีบุก เป็นต้น ถ้าหากนำโลหะบริสุทธิ์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกันจะเรียกว่า โลหะผสม (Alloy) โดยที่โลหะผสมยังแยกย่อยออกเป็น 2 กลุ่มคือ โลหะผสมที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ และโลหะผสมที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปแร่เหล็กตามธรรมชาติมักไม่บริสุทธิ์เพราะมีธาตุอื่นเจือปนอยู่ด้วย เช่น แมงกานีส ซิลิกอน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน เป็นต้น ดังนั้นหากต้องการได้แร่เหล็กบริสุทธิ์จึงต้องนำแร่เหล็กตามธรรมชาติมาถลุงเสียก่อนจึงจะสามารถนำไปใช้งานได้ อย่างไรก็ตามการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กบริสุทธิ์มีข้อจำกัดจึงมักเติมธาตุอื่นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น เติมโครเมียมและนิกเกิลเพื่อทำให้เหล็กบริสุทธิ์กลายเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น โลหะผสมที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 1. เหล็กกล้า

เหล็กกล้า (Steel) คือเหล็กที่มีส่วนผสมของคาร์บอนไม่เกินร้อยละ 2 และเป็นเหล็กที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้าง คุณสมบัติเด่นของเหล็กกล้าคือสามารถต้านทานแรงดึงและแรงเฉือนได้ดีตลอดจนสามารถเชื่อมและรีดขึ้นรูปได้ดีอีกด้วย เหล็กกล้าแบ่งเป็นกลุ่มต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้ (กรี วิทยานิพนธ์ศก. 2552 : 68-69, พงศ์พันธ์ วรสุนทรโรสด และวรพงศ์ วรสุนทรโรสด. 2555 : 181-185, สุภาสิณี ลิ้มปานานภาพ. ม.ป.ป. : 121-125 และ Mikell P. Groover. 2013 : 95-101)

1.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel) เป็นโลหะผสมที่มีธาตุเหล็กเป็นวัสดุหลักและมีธาตุคาร์บอนผสมในปริมาณต่างกันแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ

เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนไม่เกินร้อยละ 0.25 เหล็กกล้ากลุ่มนี้มีราคาไม่แพงสามารถเชื่อมและขึ้นรูปได้ง่ายจึงนิยมนำไปใช้งานทั่วไป เช่น ใช้ทำตัวถังรถยนต์ หลังคาเหล็ก หรือเครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนร้อยละ 0.2-0.5 เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถนำไปชุบแข็งได้ดีจึงเหมาะกับการนำไปใช้ทำเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น เพือง ก้านสูบ หรือไขควง เป็นต้น

เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีส่วนผสมของคาร์บอนร้อยละ 0.5-1.5 ทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้นแต่มีความเหนียวลดลง เหล็กกล้ากลุ่มนี้เหมาะกับการนำไปใช้ทำชิ้นงานที่ทนต่อการขัดสีหรือทนต่อการสึกหรอ เช่น สปริง แหนบรถยนต์ หรือลูกปืน (Ball Bearing) เป็นต้น

1.2 เหล็กกล้าผสม (Alloy Steel) เป็นโลหะผสมที่มีธาตุเหล็กเป็นวัสดุหลักและมีธาตุคาร์บอนรวมถึงธาตุอื่นผสมร่วมด้วย เหล็กกล้าผสมแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ

เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีธาตุอื่นผสมไม่เกินร้อยละ 8 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการชุบแข็งและคุณสมบัติต้านทานแรง เหล็กกล้ากลุ่มนี้นิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า เหล็กกล้าเครื่องจักรกล (Machine Steel) ตัวอย่างธาตุที่ผสมในเหล็กกล้าผสมต่ำคือ โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัม และแมงกานีส เป็นต้น

เหล็กกล้าผสมสูง (High Alloy Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีธาตุอื่นผสมมากกว่าร้อยละ 8 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเฉพาะด้าน เช่น ทนความร้อน ทนการกัดกร่อน และการกัดกร่อน เป็นต้น ถ้าเหล็กกล้าผสมสูงมีโครเมียมผสมมากกว่าร้อยละ 10.5 จะสามารถทนต่อการเกิดสนิมได้ดีจึงถูกเรียกว่า เหล็กกล้าไร้สนิม หากมีส่วนผสมของโครเมียม นิกเกิล

โมลิบดีนัม วาเนเดียม โคบอลต์ เทลเลียม มากกว่าร้อยละ 5 และคาร์บอนร้อยละ 0.8-2.2 จะทำให้เหล็กคงความแข็งที่อุณหภูมิสูงได้ดีจึงนิยมนำมาผลิตชิ้นส่วนงานเจาะและตัด

## 2. เหล็กหล่อ

เหล็กหล่อ (Cast Iron) คือ โลหะผสมที่มีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักมีคาร์บอนผสมประมาณร้อยละ 2.4 ซิลิกอนผสมประมาณร้อยละ 1-3 และมีธาตุอื่นผสมร่วมด้วย ลักษณะเด่นของเหล็กหล่อคือมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำสามารถไหลเข้าไปในแบบหล่อได้ดี เมื่อเย็นตัวแล้วมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยแต่แตกหักง่าย รายละเอียดของเหล็กหล่อแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้ (กวี หวังนิเวศน์กุล. 2552 : 70-72, พงศ์พันธ์ วรสุนทรโรสถ และวรพงศ์ วรสุนทรโรสถ. 2555 : 176-178, สุภาสิณี ลิ้มปานานภาพ. ม.ป.ป. : 125-128 และ Mikell P. Groover. 2013 : 101-102)

เหล็กหล่อขาว (White Cast Iron) เป็นเหล็กหล่อที่มีปริมาณคาร์บอนและซิลิกอนผสมต่ำ รวมถึงมีการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว เนื้อเหล็กเป็นสีขาวหรือใส ผลึกมีคุณสมบัติด้านทานการขัดสีที่ดีแต่แตกหักง่าย

เหล็กหล่อเทา (Gray Cast Iron) เป็นเหล็กหล่อที่มีการแข็งตัวช้าหรือปานกลางทำให้เหล็กหล่อชนิดนี้มีคุณสมบัติด้านทานการขัดสีและคุณสมบัติด้านทานการสึกกร่อนได้ดี ผลึกค่อนข้างแตกหักง่าย

เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable Cast Iron) เป็นเหล็กหล่อที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับเหล็กหล่อขาวแต่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางความร้อน ส่งผลให้เหล็กหล่ออบเหนียวมีความแข็งเช่นเดียวกับเหล็กหล่อขาวแต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น

### ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของเหล็กหล่อมาตรฐาน ASTM

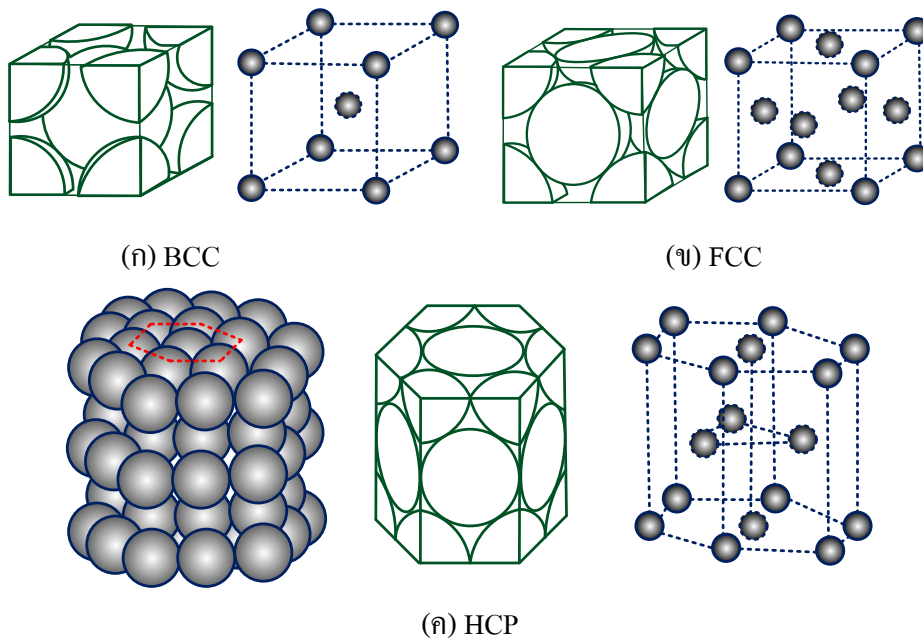
| ชนิด                         | เหล็ก (ร้อยละ) | คาร์บอน (ร้อยละ) | ซิลิกอน (ร้อยละ) | แมงกานีส (ร้อยละ) | แร่ธาตุอื่น ๆ                                 |
|------------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|---|
| เหล็กหล่อเทา (ASTM Class 20) | 93.0           | 3.5              | 2.5              | 0.65              | -   |
| เหล็กหล่อเทา (ASTM Class 30) | 93.6           | 3.2              | 2.1              | 0.75              | -   |
| เหล็กหล่อเหนียว (ASTM A395)  | 94.4           | 3.0              | 2.5              | -                 | -   |
| เหล็กหล่อขาวคาร์บอนต่ำ       | 92.5           | 2.5              | 1.3              | 0.4               | นิกเกิล 1.5<br>โครเมียม 1.0<br>โมลิบดีนัม 0.5 |

ที่มา : Mikell P. Groover. 2013 : 101

เหล็กหล่อเหนียว (Ductile Cast Iron) เป็นเหล็กหล่อที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับเหล็กหล่อเทาแต่มีปริมาณ ซิลิคอน ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัสน้อยกว่า เหล็กหล่อเหนียวมีการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางความร้อนส่งผลให้เกิดผลึกเกรไฟต์รูปทรงกลมซึ่งมีความแข็งแรงคล้ายกับเหล็กกล้า ปริมาณแร่ธาตุที่เป็นส่วนผสมของเหล็กหล่อกลุ่มต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1

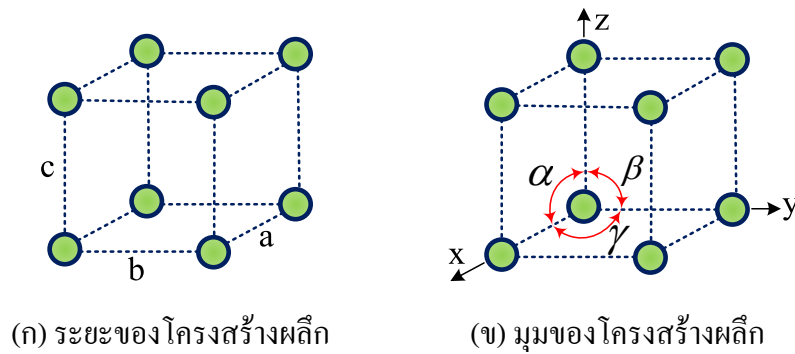
### โครงสร้างผลึกของโลหะ

โลหะมีโครงสร้างแบบผลึก (Crystalline Structure) ที่ประกอบขึ้นจากหน่วยเซลล์ (Unit Cell) ซึ่งเป็นกลุ่มของอะตอมที่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ โครงสร้างผลึกของโลหะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวไฟฟ้าที่เกิดระหว่างประจุไฟฟ้าของไอออนบวก (Cation) และไอออนลบ (Anion) เรียกแรงยึดเหนี่ยวนี้ว่า พันธะไอออนิก (Ionic Bond) ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงสามารถนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีเนื่องจากมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ใน โลหะส่วนใหญ่มีโครงสร้างผลึกแบบสมมาตร เช่น รูปทรงลูกบาศก์มีอะตอมตรงกลาง (Body-Centred Cubic : BCC) รูปทรงลูกบาศก์มีอะตอมตรงกลางแต่ละด้าน (Face-Centred Cubic : FCC) หรือรูปทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal Close-Packed : HCP) เป็นต้น โครงสร้างผลึกสามมิติของหน่วยเซลล์โลหะเรียกว่า แลตทิซ (Lattice) แสดงในภาพที่ 4.1 โครงสร้างผลึกดังกล่าวมีการกำหนดระยะระหว่างอะตอมเรียกว่า แลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice Parameter) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 (สุภาสินี ลิ้มปานานภาพ. ม.ป.ป. : 119-120, Ash Ahmed and John Sturges. 2015 : 17-28 and William D. Callister. 2007 : 38-94)



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างผลึกหน่วยเซลล์ของโลหะ

ที่มา : Ash Ahmed and John Sturges. 2015 : 25



ภาพที่ 4.2 แลตทิซพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึก

ที่มา : William D. Callister. 2007 : 46

เมื่อพิจารณาแลตทิซพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึกแบบ BCC และ FCC ซึ่งมีรูปทรงลูกบาศก์พบว่าด้าน  $a$  เท่ากับด้าน  $b$  และด้าน  $c$  มุม  $\beta$  มุม  $\alpha$  และมุม  $\gamma$  เท่ากับ 90 องศา สำหรับโครงสร้างผลึกแบบ HCP พบว่าโดยทั่วไปมีด้าน  $a$  เท่ากับด้าน  $b$  ส่วนด้าน  $c$  จะต่างออกไป มุม  $\beta$  และมุม  $\alpha$  เท่ากับ 90 องศา ส่วนมุม  $\gamma$  มีค่าเท่ากับ 120 องศา นอกจากนั้นโครงสร้างผลึกโลหะแต่ละแบบจะมีระนาบแผ่นผลึกแตกต่างกัน ระนาบดังกล่าวมีคุณสมบัติทำให้โลหะสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้โดยไม่เกิดการแตกร้าวเมื่อมีแรงกระทำ แลตทิซพารามิเตอร์และรัศมีอะตอม (Atomic Radius :  $R$ ) ของธาตุโลหะชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้องนำเสนอในตารางที่ 4.2 ถึง 4.4

ตารางที่ 4.2 แลตทิซพารามิเตอร์ของโลหะที่มีโครงสร้างแบบ BCC

| โลหะ                         | แลตทิซพารามิเตอร์ : $a = b = c$ (nm) | รัศมีอะตอม : $R$ (nm) |
|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| โครเมียม (Chromium : Cr)     | 0.289                                | 0.125                 |
| เหล็ก (Ferrous : Fe)         | 0.287                                | 0.124                 |
| โปแตสเซียม (Potassium : K)   | 0.533                                | 0.231                 |
| โซเดียม (Sodium : Na)        | 0.429                                | 0.186                 |
| แทนทาลัม (Tantalum : Ta)     | 0.330                                | 0.143                 |
| ทังสเตน (Tungsten : W)       | 0.316                                | 0.137                 |
| โมลิบดีนัม (Molybdenum : Mo) | 0.315                                | 0.136                 |
| วานาเดียม (Vanadium : V)     | 0.304                                | 0.132                 |

ที่มา : William F. Smith. 2011 : 72



ตารางที่ 4.3 แลตทิซพารามิเตอร์ของโลหะที่มีโครงสร้างแบบ FCC

| โลหะ                         | แลตทิซพารามิเตอร์: $a = b = c$ (nm) | รัศมีอะตอม : R (nm) |
|------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| อะลูมิเนียม (Aluminium : Al) | 0.405                               | 0.143               |
| ทองแดง (Copper : Cu)         | 0.3615                              | 0.128               |
| ทองคำ (Gold : Au)            | 0.408                               | 0.144               |
| ตะกั่ว (Lead : Pb)           | 0.495                               | 0.175               |
| นิกเกิล (Nickel : Ni)        | 0.352                               | 0.125               |
| เงิน (Silver : Ag)           | 0.409                               | 0.144               |
| แพลทินัม (Platinum : Pt)     | 0.393                               | 0.139               |

ที่มา : William F. Smith. 2011 : 72

ตารางที่ 4.4 แลตทิซพารามิเตอร์ของโลหะที่มีโครงสร้างแบบ HCP

| โลหะ                          | แลตทิซพารามิเตอร์ |        | รัศมีอะตอม<br>R (nm) |
|-------------------------------|-------------------|--------|----------------------|
|                               | a = b (nm)        | c (nm) |                      |
| แคดเมียม (Cadmium : Cd)       | 0.2973            | 0.5618 | 0.149                |
| สังกะสี (Zinc : Zn)           | 0.2665            | 0.4947 | 0.133                |
| แมกนีเซียม (Magnesium : Mg)   | 0.3209            | 0.5209 | 0.160                |
| โคบอลต์ (Cobalt : Co)         | 0.2507            | 0.4069 | 0.125                |
| เซอร์โคเนียม (Zirconium : Zr) | 0.3231            | 0.5148 | 0.160                |
| ไทเทเนียม (Titanium : Ti)     | 0.2950            | 0.4683 | 0.147                |
| เบริลเลียม (Beryllium : Be)   | 0.2286            | 0.3584 | 0.113                |

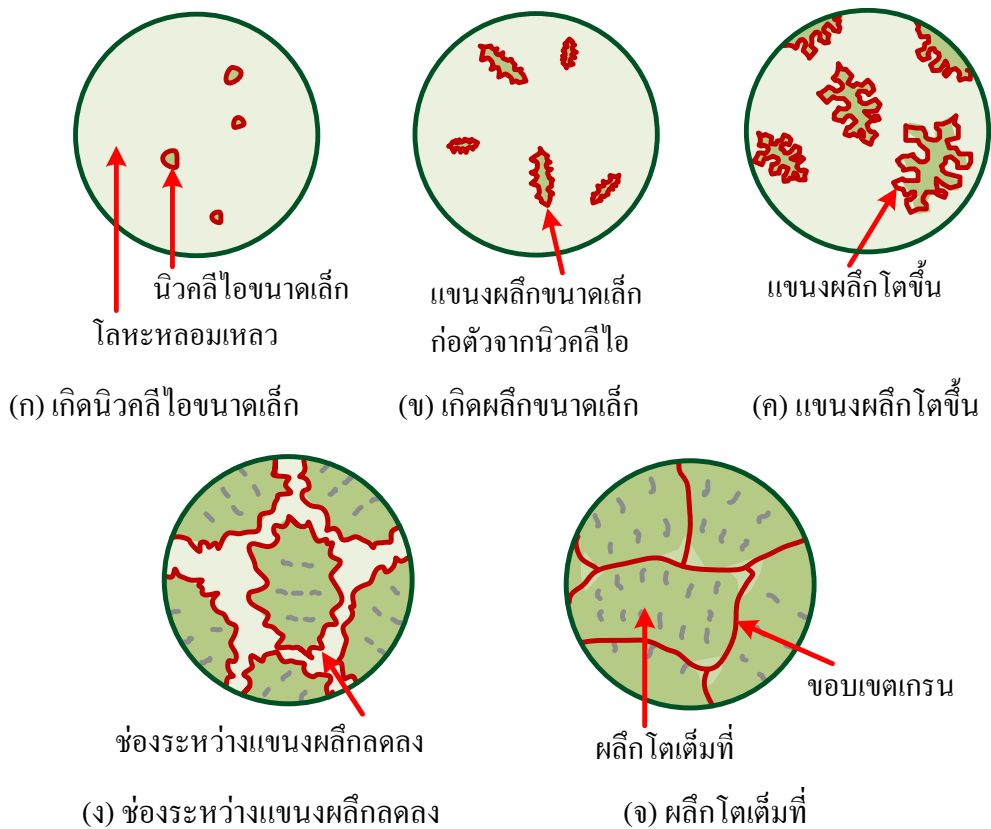
ที่มา : William F. Smith. 2011 : 73

### กระบวนการเย็นตัวของโลหะและสารละลายของแข็ง

โลหะส่วนใหญ่จะถูกใช้งานในสภาวะของแข็ง อย่างไรก็ตามในขณะที่โลหะจากสภาวะหลอมเหลวแปรสภาพมาเป็นของแข็งจะอยู่ภายใต้กระบวนการเย็นตัว โดยโลหะที่ผ่านกระบวนการเย็นตัวแล้วโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารละลายของแข็งเนื่องจากมีธาตุอื่นร่วมด้วย รายละเอียดของกระบวนการเย็นตัวและสารละลายของแข็งมีดังต่อไปนี้ (แม้น อมรสิทธิ์. ม.ป.ป. : 12-19 และ William F. Smith. 2011 : 82-84, 252-271)

**1. การเกิดผลึกของโลหะภายใต้กระบวนการเย็นตัว**

การเกิดผลึกของโลหะซึ่งเป็นของแข็งภายใต้กระบวนการเย็นตัวหรือการคลายความร้อนของโลหะหลอมเหลว (Solidification) มี 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเรียกว่า นิวคลีเอชัน (Nucleation) เป็นขั้นตอนการเกิดนิวคลีโอ (Nuclei) ซึ่งเป็นอะตอมของโลหะหลอมเหลวที่เกาะกันเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ขั้นตอนที่สองเป็นการเติบโตของแขนงผลึกจากนิวคลีโอจนกระทั่งเกิดผลึกของโลหะโตเต็มที่ ลำดับการเกิดผลึกของโลหะบริสุทธิ์แสดงในภาพที่ 4.3



**ภาพที่ 4.3** การเกิดผลึกภายใต้กระบวนการเย็นตัวของโลหะบริสุทธิ์หลอมเหลว

ที่มา : William D. Callister. 2007 : 65

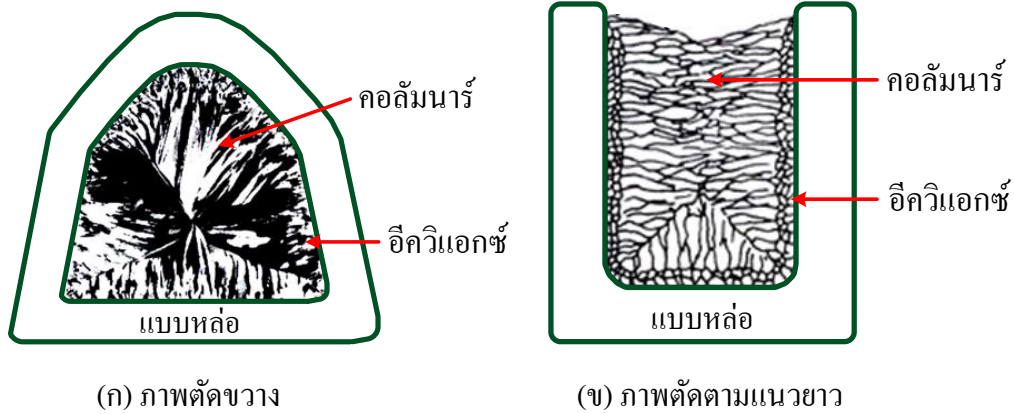
จากภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของโลหะบริสุทธิ์หลอมเหลวลดลงจะทำให้ อะตอมโลหะเริ่มเกาะกันเป็นอนุภาคขนาดเล็กเรียกว่า นิวคลีโอ กระบวนการเกิดนิวคลีโอนี้ เรียกว่า โฮโมจีเนียสนิวคลีโอชัน (Homogeneous Nucleation) จากนั้นนิวคลีโอจะโตขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งอนุภาคมีขนาดเท่ากับขนาดวิกฤตซึ่งมีความเสถียรและกลายเป็นนิวเคลียส (Nucleus) จากนั้นจะเกิดแขนงผลึกขนาดเล็กก่อตัวขึ้นจากนิวเคลียส ในขณะที่อุณหภูมิลดลงอย่างต่อเนื่อง แขนงผลึกก็จะโตขึ้นเรื่อยๆ จนกลายเป็นผลึกขนาดใหญ่ที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ

ภายในผลึกที่เกิดจากนิวคลีโอไออนแต่ละอันจะมีทิศทางการก่อตัวต่างกันและมีรูปร่างต่างกันเรียกว่า เกรน (Grain) เช่น เกรนขนาดเล็ก เกรนขนาดใหญ่ เกรนรูปร่างกลม หรือเกรนรูปร่างเรียวยาว เป็นต้น โลหะที่ประกอบด้วยผลึกจำนวนมากถูกเรียกว่าโลหะหลายผลึก เมื่อผลึกโตเต็มที่ก็จะเกิดการสัมผัสระหว่างเกรนเรียกบริเวณนี้ว่า ขอบเกรนหรือขอบเขตเกรน (Grain Boundary)

จำนวนของนิวคลีโอไออนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเย็นตัวของโลหะจะมีผลต่อโครงสร้างผลึกและรูปร่างเกรน ถ้าจำนวนนิวคลีโอไออนที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อยจะทำให้โครงสร้างเกรนหยาบและขนาดใหญ่ แต่ถ้ามีจำนวนนิวคลีโอไออนเกิดขึ้นมากจะทำให้โครงสร้างเกรนมีขนาดเล็กละเอียด โดยโครงสร้างเกรนของโลหะมีผลต่อคุณสมบัติด้านความแข็งแรง นอกจากนั้นจำนวนของนิวคลีโอไออนยังมีความสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวด้วย ถ้าหากโลหะหลอมเหลวเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะมีผลทำให้เกิดนิวคลีโอไออนจำนวนมากและได้เกรนที่มีขนาดเล็ก แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าโลหะหลอมเหลวเย็นตัวลงอย่างช้าๆ จะทำให้เกิดนิวคลีโอไออนจำนวนน้อยและได้เกรนขนาดใหญ่ ยกตัวอย่างเช่นเมื่อนำโลหะบริสุทธิ์หลอมเหลวไปใส่ในแบบหล่อที่หยุดนิ่งอยู่กับที่จะเกิดโครงสร้างเกรน 2 แบบ คือ เกรนแบบอิกวิแอกซ์ (Equiaxed Grains) และเกรนแบบคอลัมน์นาร์ (Columnar Grains) ซึ่งเกรนแบบอิกวิแอกซ์เป็นเกรนที่เกิดจากผลึกที่โตทุกทิศทางและมักเกิดขึ้นบริเวณใกล้ผนังของแบบหล่อ เนื่องจากบริเวณใกล้ผนังแบบหล่อมืออัตราการเย็นตัวเร็วจึงทำให้เกิดนิวคลีโอไออนขนาดเล็กจำนวนมากเกรนจึงมีขนาดเล็ก สำหรับเกรนแบบคอลัมน์นาร์เป็นเกรนที่มีลักษณะเรียวยาวและขนาดใหญ่ เกรนชนิดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโลหะหลอมเหลวเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ บริเวณตรงกลางแบบหล่อ การเย็นตัวอย่างช้า ๆ จะทำให้เกิดนิวคลีโอไออนจำนวนน้อยส่งผลให้เกิดเกรนที่มีลักษณะหยาบและยาว ภาพที่ 4.4 เป็นตัวอย่างที่แสดงรูปร่างของเกรนแบบอิกวิแอกซ์และแบบคอลัมน์นาร์ในแท่งโลหะผสมอะลูมิเนียม (Ingot)

การเกิดนิวคลีโอไออนในโลหะหลอมเหลวยังมีปัจจัยอื่นอีก เช่น การเติมธาตุอื่นหรือสิ่งแปลกปลอมในโลหะหลอมเหลว การคนหรือกวนโลหะหลอมเหลวในขณะที่อยู่ระหว่างกระบวนการเย็นตัว หรือการเพิ่มพื้นที่ผิวของแบบหล่อเพื่อให้เกิดนิวคลีโอไออนมากขึ้น เป็นต้น กระบวนการเกิดนิวคลีโอไออนนี้เรียกว่า เฮเทอโรจีเนียสนิวคลีโอเชัน (Heterogeneous Nucleation) ในงานอุตสาหกรรมมักใช้กระบวนการเฮเทอโรจีเนียสนิวคลีโอเชันในการกำหนดจำนวนหรือรูปร่างเกรนของโลหะ กระบวนการทำให้เกรนละเอียด (Grain Refinement) มักทำโดยการเติมสารที่เรียกว่า เกรนรีไฟเนอร์ (Grain Refiner) ลงในโลหะหลอมเหลวเพื่อให้เกิดนิวคลีโอไออนจำนวนมาก ตัวอย่างธาตุที่เป็นเกรนรีไฟเนอร์สำหรับโลหะที่มีอะลูมิเนียมเป็นส่วนผสม เช่น เซอร์โคเนียม ไทเทเนียม และ โบรอน เป็นต้น กระบวนการเฮเทอโรจีเนียสนิวคลีโอเชันยังมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เกิดผลึกแบบเดียวหรือป้องกันการเกิดหลายผลึกในชิ้นงาน เช่น ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ จำพวกทรานซิสเตอร์ที่ทำจากสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกเดียว ถ้าหากชิ้นส่วนมี

โครงสร้างหลายผลึกก็จะทำให้มีขอบเขตเกรนจำนวนมากส่งผลให้เกิดการขัดขวางและทำลายคุณสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น



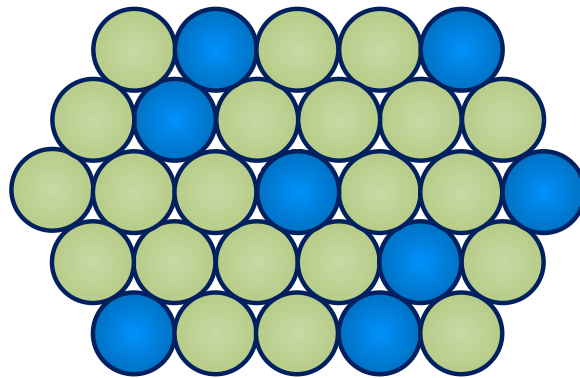
ภาพที่ 4.4 รูปร่างของเกรนแบบอีคิวแอกซ์และแบบคอลัมน์นาร์

ที่มา : แม้น อมรสิทธิ์. ม.ป.ป. : 12

## 2. โลหะในรูปสารละลายของแข็ง

โลหะในรูปสารละลายของแข็ง (Solid Solution) คือธาตุโลหะในสถานะของแข็งที่มีอะตอมหรือไอออนในโครงสร้างผลึกที่ถูกแทนที่ด้วยอะตอมของธาตุอื่น โลหะผสมจัดว่าเป็นสารละลายของแข็งที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุ 2 ชนิดขึ้นไปกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างเดียวกัน สารละลายของแข็งมี 2 แบบดังต่อไปนี้

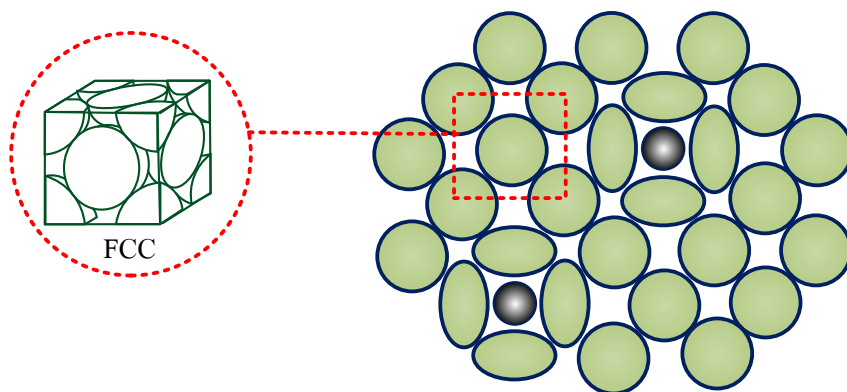
2.1 สารละลายของแข็งแบบแทนที่ (Substitutional Solid Solution) เกิดจากการแทนที่ของอะตอมของธาตุสองชนิดในโครงสร้างผลึก โดยอะตอมของธาตุที่เป็นตัวถูกละลาย (Solute Atoms) จะเข้าไปแทนที่อะตอมของธาตุที่เป็นตัวทำละลาย (Solvent Atoms) ปัจจัยที่มีผลต่อการเข้าไปแทนที่ของอะตอมต่างชนิดกัน เช่น ขนาดอะตอมของธาตุทั้งสองใกล้เคียงกัน โครงสร้างผลึกของธาตุทั้งสองเหมือนกัน ค่าอิเล็กโตรเนกาวิตี (Electronegativity) และเวเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence Electron) ของธาตุทั้งสองใกล้เคียงกัน เป็นต้น ตัวอย่างการเกิดสารละลายของแข็งแบบแทนที่กรณีขนาดอะตอมใกล้เคียงกัน เช่น ขนาดอะตอมของธาตุแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 15 มักเกิดการแทนที่ได้ง่าย ถ้าขนาดอะตอมต่างกันร้อยละ 15-30 อาจแทนที่ได้บางส่วน แต่ถ้าขนาดอะตอมต่างกันเกินกว่าร้อยละ 30 มักไม่เกิดการแทนที่ เป็นต้น โลหะที่เป็นสารละลายของแข็งแบบนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกเนื่องจากอะตอมของตัวถูกละลายและตัวทำละลายมีโครงสร้างผลึกเหมือนกัน แต่อาจเกิดการเสียรูปไปบ้างโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อขนาดอะตอมต่างกันมาก ภาพที่ 4.5 แสดงสารละลายของแข็งแบบแทนที่ระหว่างอะตอมธาตุสองชนิด



ภาพที่ 4.5 สารละลายของแข็งแบบแทนที่ระหว่างอะตอมของธาตุสองชนิด

ที่มา : แม้น อมรสิทธิ์. ม.ป.ป. : 14 และ William D. Callister. 2007 : 84

2.2 สารละลายของแข็งแบบแทรก (Interstitial Solid Solution) เป็นสารละลายที่เกิดจากอะตอมของธาตุที่เป็นตัวถูกละลายเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างอะตอมของธาตุที่เป็นตัวทำละลาย สารละลายของแข็งแบบแทรกจะเกิดขึ้นเมื่อขนาดของอะตอมของตัวถูกละลายมีขนาดเล็กกว่าอะตอมของตัวทำละลาย ตัวอย่างของธาตุที่มีขนาดเล็กและสามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างอะตอมอื่น เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน เป็นต้น ภาพที่ 4.6 แสดงสารละลายของแข็งแบบแทรกของคาร์บอนในเหล็ก จากภาพพบว่าอะตอมของคาร์บอนมีขนาดเล็กกว่าจะเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างอะตอมของเหล็ก ส่งผลทำให้อะตอมของเหล็กที่อยู่รอบอะตอมของคาร์บอนเสียรูปหรือบิดเบี้ยว (Distortion) โดยทั่วไปคาร์บอนสามารถแทรกในเหล็กที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ได้ไม่เกินร้อยละ 2.08 ที่อุณหภูมิประมาณ  $1,148^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 4.6 สารละลายของแข็งแบบแทรกของคาร์บอนในเหล็กที่มีโครงสร้างแบบ FCC

ที่มา : แม้น อมรสิทธิ์. ม.ป.ป. : 15 และ William D. Callister. 2007 : 84

## ความไม่สมบูรณ์ของผลึก

วัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ผลิตออกมาใช้งานมักมีจุดบกพร่องหรือความไม่สมบูรณ์ ความบกพร่องที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลเปลี่ยนไป สำหรับโลหะถึงแม้ว่าจะมีการควบคุมคุณภาพอย่างดีแล้วก็ตามแต่ความบกพร่องก็เกิดขึ้นได้เช่นกัน ความไม่สมบูรณ์ของผลึกโลหะแบ่งเป็น 4 แบบคือ ความไม่สมบูรณ์แบบจุด ความไม่สมบูรณ์แบบเส้น ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบ และความไม่สมบูรณ์แบบสามมิติ ตามลำดับ รายละเอียดความไม่สมบูรณ์ของผลึกโลหะมีดังต่อไปนี้ (แม้น อมรสิทธิ์. ม.ป.ป. : 15-19, Michael F. Ashby and David R.H. Jones. 2005 : 119-130 และ William D. Callister. 2007 : 79-86)

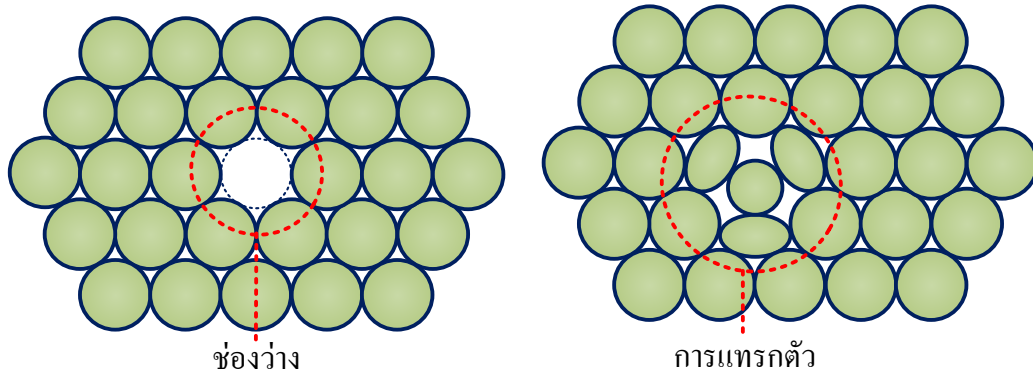
### 1. ความไม่สมบูรณ์แบบจุด

ความไม่สมบูรณ์แบบจุด (Point Defects) หรือเรียกว่า ความไม่สมบูรณ์แบบศูนย์มิติ (Zero-Dimensional Defects) เป็นข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดปกติของอะตอมใดอะตอมหนึ่งหรืออะตอมคู่ใดคู่หนึ่งในโครงสร้างผลึก ความบกพร่องแบบจุดยังแบ่งออกเป็นรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

1.1 ความไม่สมบูรณ์ที่เกิดเป็นช่องว่าง (Vacancy Point Defect) เป็นจุดบกพร่องที่เกิดจากอะตอมบางอะตอมในโครงสร้างผลึกสูญหายไปดังแสดงในภาพที่ 4.7(ก) ความไม่สมบูรณ์แบบนี้มักเกิดกับโลหะหลอมเหลวที่กำลังเย็นตัวหรืออาจเกิดในขณะที่อะตอมได้รับความร้อนจนเกิดการสั่นไหวก็ได้ ความไม่สมบูรณ์ที่เกิดเป็นช่องว่างสามารถเปลี่ยนตำแหน่งไปได้จากกระบวนการแพร่หรือการเคลื่อนตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยทั่วไปความไม่สมบูรณ์ที่เกิดเป็นช่องว่างภายในโลหะมักเกิดขึ้นน้อยกว่า 1 จุดต่อ 10,000 อะตอม

1.2 ความไม่สมบูรณ์ที่เกิดจากการแทรกตัว (Interstitial) เป็นความไม่สมบูรณ์แบบจุดที่เกิดจากอะตอมที่มีอยู่เดิมเข้าไปแทรกกระหว่างช่องว่างอะตอม (Self-interstitial) ดังแสดงในภาพที่ 4.7(ข) เมื่อเกิดการแทรกตัวก็จะทำให้อะตอมข้างเคียงเกิดการเสียรูปหรือเกิดการบิดเบี้ยว โดยทั่วไปความไม่สมบูรณ์จากการแทรกตัวมักเกิดขึ้นได้ยากกว่าการเกิดช่องว่างเนื่องจากอะตอมที่แทรกมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างและทำให้โครงสร้างผลึกขาดเสถียรภาพ

1.3 ความบกพร่องแบบช็อตคีย์ (Schottky Imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์แบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากไอออนบวกและไอออนลบสูญหายไปพร้อมกันทำให้เกิดช่องว่างคู่ของไอออนทั้งสอง (Ion Pair Vacancy) ดังแสดงในภาพที่ 4.8 สาเหตุที่เกิดการสูญหายพร้อมกันนี้เพื่อรักษาสสมดุลประจุไฟฟ้าให้เป็นกลาง

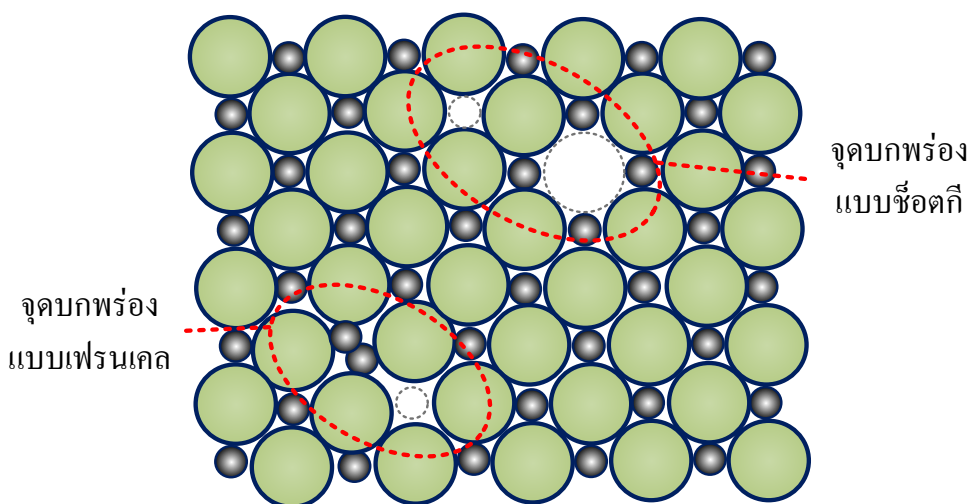


(ก) ความไม่สมบูรณ์ที่เกิดเป็นช่องว่าง (ข) ความไม่สมบูรณ์ที่เกิดจากการแทรก

ภาพที่ 4.7 ความไม่สมบูรณ์แบบจุดที่เกิดในโลหะ

ที่มา : แม้น อมรสิทธิ์. ม.ป.ป. : 16 และ William D. Callister. 2007 : 82

1.4 ความบกพร่องแบบเฟรนเคิล (Frenkel Imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์แบบจุดที่เกิดจากการย้ายตำแหน่งของไอออนบวก (Displaced Ion) เข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างของไอออนลบ สาเหตุเนื่องจากไอออนบวกมีขนาดเล็กกว่าจึงมีโอกาสที่จะเข้าไปแทรกระหว่างช่องว่างได้ ในขณะที่ไอออนบวกเข้าไปแทรกก็จะเกิดช่องว่างของตำแหน่งเดิมของไอออนบวก (Cation Vacancy) เพื่อรักษาสมดุลของประจุไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 4.8 นอกจากนี้หากมีอะตอมแปลกปลอมเข้าไปแทนที่ (Substitutional) หรือเข้าไปแทรกในช่องว่างก็ถือว่าเป็นความไม่สมบูรณ์แบบจุดด้วยเช่นกัน



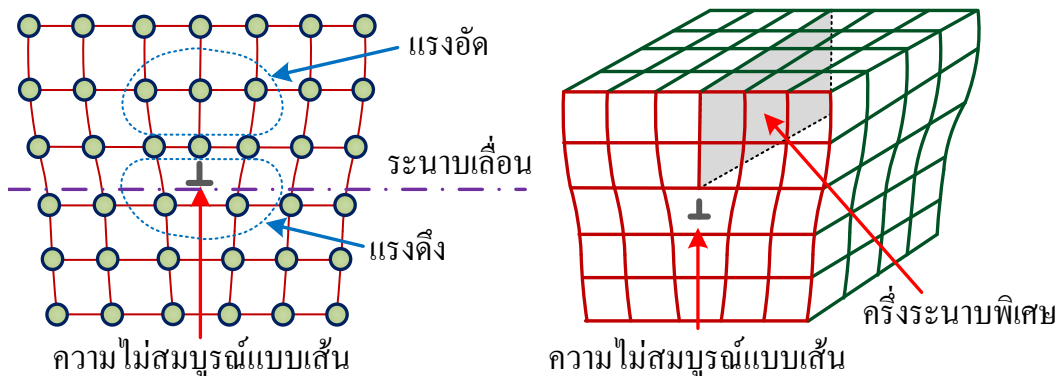
ภาพที่ 4.8 ความบกพร่องแบบช็อคกีและความบกพร่องแบบเฟรนเคิล

ที่มา : William D. Callister. 2007 : 435



## 2. ความไม่สมบูรณ์แบบเส้น

ความไม่สมบูรณ์แบบเส้น (Line Defects หรือ Dislocations) หรือความไม่สมบูรณ์แบบหนึ่งมิติ (One Dimensional Defects) เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดจากการบิดเบี้ยวหรือผิดรูปของโครงสร้างผลึก มักจะเกิดขึ้นในกระบวนการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวหรือเกิดจากแรงที่มากระทำจนทำให้โลหะเสียรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ความไม่สมบูรณ์แบบเส้นแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ ความไม่สมบูรณ์แบบเส้นขอบ (Edge Dislocation) มีสาเหตุมาจากการมีครึ่งระนาบพิเศษ (Extra Half Plane) แทรกในโครงสร้างผลึก การแทรกตัวนี้ทำให้เกิดแรงอัดบริเวณครึ่งระนาบพิเศษและแรงดึงในฝั่งตรงข้าม แนวที่แบ่งระหว่างแรงอัดและแรงดึงนี้เรียกว่าระนาบเลื่อน (Slip Plane) ภาพที่ 4.9 แสดงความไม่สมบูรณ์แบบเส้นขอบจนทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์เป็นแนวยาวคล้ายตัวที่หัวกลับ (Inverted Tee) เมื่อเกิดความไม่สมบูรณ์แบบเส้นขึ้นก็จะทำให้เกิดแรงบริเวณครึ่งระนาบพิเศษและทำให้เกิดเวกเตอร์เบอร์เกอร์ส (Burgers Vector :  $\vec{b}$ ) หรือเวกเตอร์รอยเลื่อน (Slip Vector) เวกเตอร์ดังกล่าวจะอยู่ในทิศตั้งฉากกับครึ่งระนาบพิเศษ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำก็จะทำให้ครึ่งระนาบพิเศษเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของเวกเตอร์รอยเลื่อน การเคลื่อนที่ของครึ่งระนาบพิเศษนี้จะเคลื่อนที่ไปเรื่อย ๆ และจะหยุดเมื่อเคลื่อนที่ไปจนถึงขอบของโครงสร้างผลึก ะนาบส่วนเกินที่ขอบโครงสร้างผลึกนี้เรียกว่า หน่วยแนวเลื่อน (Unit Step of Slip) ดังแสดงในภาพที่ 4.10 ทั้งนี้การเคลื่อนที่ของครึ่งระนาบพิเศษจะมีระยะเท่ากับขนาดเวกเตอร์รอยเลื่อนซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างผลึกของโลหะ

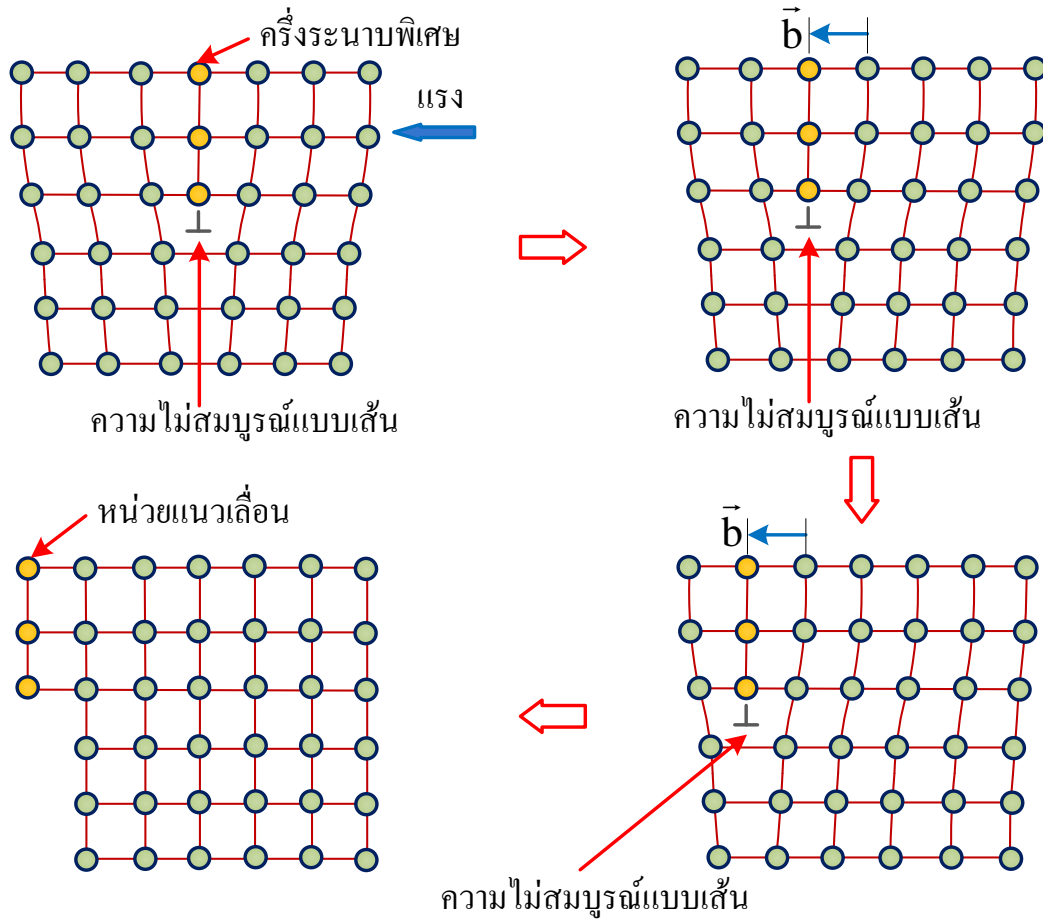


(ก) ะนาบที่เกิดความไม่สมบูรณ์

(ข) ความไม่สมบูรณ์ในลักษณะ 3 มิติ

ภาพที่ 6.9 ความไม่สมบูรณ์แบบเส้นขอบ

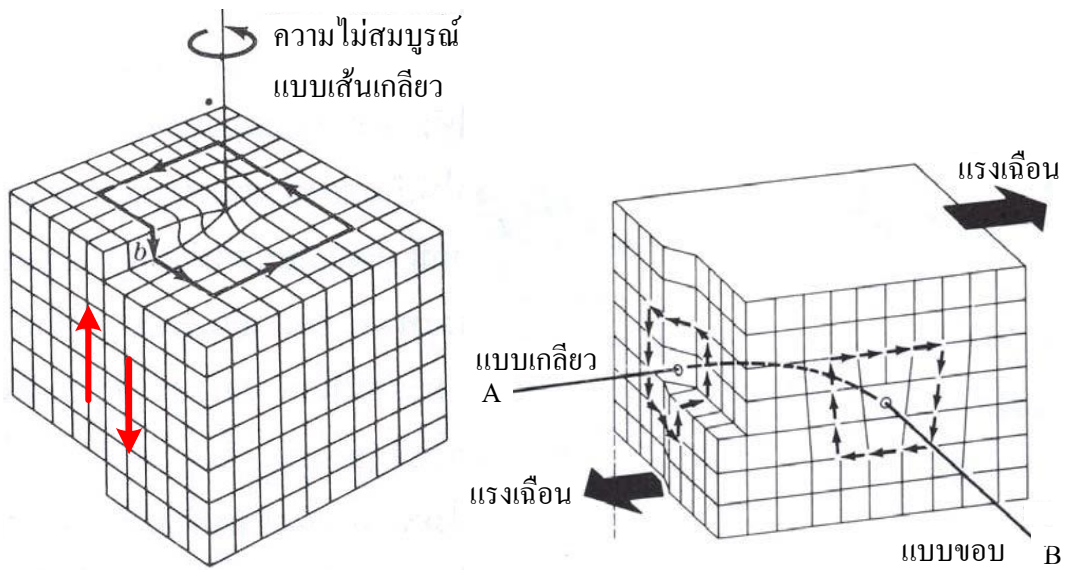
ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zanzewski. 2011 : 64



ภาพที่ 4.10 การเคลื่อนที่ของความไม่สมบูรณ์แบบเส้นขอบ

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 65

ความไม่สมบูรณ์แบบเส้นลักษณะที่สองคือความไม่สมบูรณ์แบบเส้นเกลียว (Screw Dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดจากแรงในทิศทางตรงข้ามกันกระทำกับโครงสร้างผลึก จะเกิดเป็นระนาบเฉือน (Cutting Plane) และทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการเสีรูปลดคล้ายกับเกลียวหรือบันไดเวียน บริเวณที่โครงสร้างผลึกเกิดการเสีรูปลดนี้จะมีพลังงานสะสมมาก โดยเวกเตอร์รอยเฉือนจะมีทิศทางกับแนวความไม่สมบูรณ์แบบเส้นเกลียวดังแสดงในภาพที่ 4.11(ก) อย่างไรก็ตามการเกิดความไม่สมบูรณ์แบบเส้นในโครงสร้างผลึกส่วนใหญ่มักเกิดผสมระหว่างความไม่สมบูรณ์แบบเส้นขอบและความไม่สมบูรณ์แบบเส้นเกลียวดังแสดงในภาพที่ 4.11(ข) จากภาพจะพบว่าเมื่อมีแรงเฉือนกระทำกับโครงสร้างผลึกจนเกิดความไม่สมบูรณ์แบบเส้นเกลียวในแนว A ก่อน ต่อจากนั้นจึงเกิดความไม่สมบูรณ์แบบเส้นขอบในแนว B ตามมาทีหลัง สำหรับเส้น AB เป็นแนวที่แสดงให้เห็นการเกิดความไม่สมบูรณ์แบบเส้นที่เบี่ยงเบนเป็นเส้นโค้ง



(ก) โครงสร้างผลึกบิดเบี้ยวจากแรงเฉือน (ข) ความไม่สมบูรณ์ผสมเส้นเกลียวและแบบขอบ

ภาพที่ 4.11 ความไม่สมบูรณ์แบบเส้นเกลียว

ที่มา : William D. Callister. 2007 : 90-91

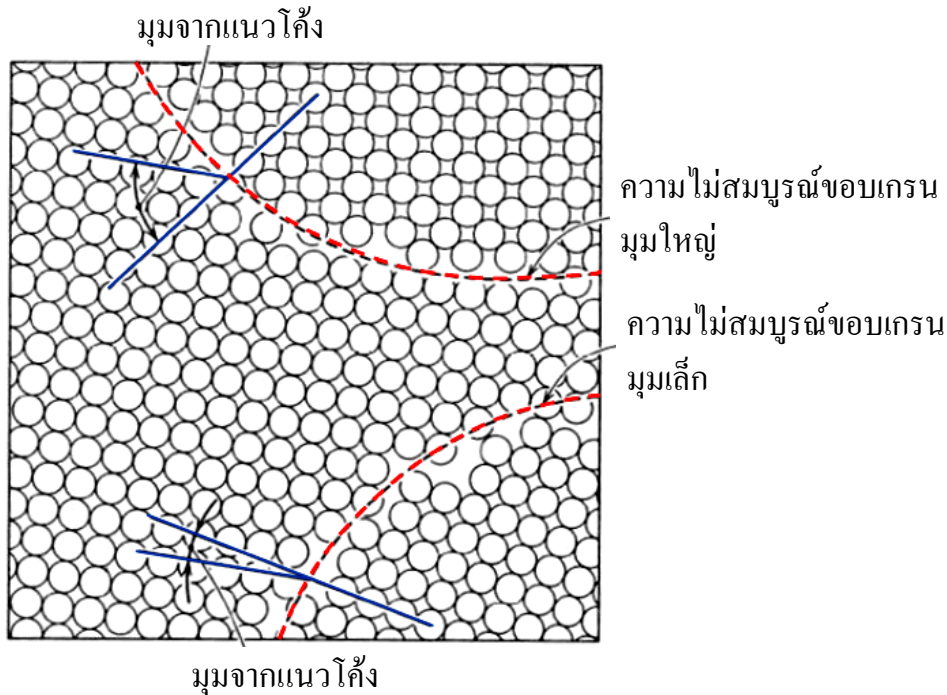
### 3. ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบ (Planar Defects) หรือเรียกว่า ความไม่สมบูรณ์แบบสองมิติ (Two-Dimensional Defects) เป็นความบกพร่องที่เกิดขึ้นบริเวณ โครงสร้างผลึกที่มีการเรียงตัวแตกต่างกัน ความไม่สมบูรณ์แบบนี้มักเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนซึ่งเป็นบริเวณที่เกรนติดโตมาสัมผัสกัน บริเวณดังกล่าวมีปริมาณอะตอมน้อยกว่าภายในเกรนและยังมีสิ่งเจือปนสะสมอยู่มากอีกด้วย ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ความไม่สมบูรณ์พื้นผิวภายนอก (External Surface) เป็นความไม่สมบูรณ์แบบระนาบที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวภายนอกของโลหะ สาเหตุเนื่องจากพื้นผิวภายนอกมีระนาบของอะตอมแถวนอกสุดไม่ได้สัมผัสกับอะตอมข้างเคียงอย่างน้อยหนึ่งด้านส่งผลทำให้พันธะระหว่างอะตอมมีความแข็งแรงน้อยกว่าอะตอมที่อยู่ด้านใน ดังนั้นพื้นผิวภายนอกจึงมีโอกาสเกิดความบกพร่องหรือความไม่สมบูรณ์ขึ้นได้ง่าย

3.2 ความไม่สมบูรณ์ขอบเกรน (Grain Boundary) เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดจากการเรียงตัวของผลึกต่างกันจากสาเหตุการเกิดผลึกอย่างอิสระของแต่ละเกรน เมื่อทิศทางการเรียงตัวของผลึกต่างกันก็จะทำให้เกิดมุมจากแนวโค้ง (Angle of Misalignment) ดังแสดงในภาพที่ 4.12 จากภาพพบว่าความแตกต่างของมุมที่เกิดอาจมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับทิศทางการก่อตัวของ

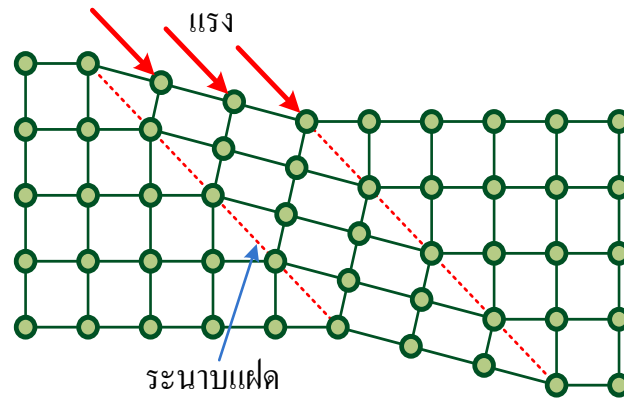
ผลึกในแต่ละเกรน ถ้ามุมต่างกันไม่มากเรียกว่า ความไม่สมบูรณ์ขอบเกรนมุมเล็ก (Small Angle Grain Boundary) หรือความไม่สมบูรณ์ขอบเอียง (Tilt Boundary) ถ้ามุมต่างกันมากก็จะเรียกว่า ความไม่สมบูรณ์ขอบเกรนมุมใหญ่ (High Angle Grain Boundary)



ภาพที่ 4.12 ความไม่สมบูรณ์ของขอบเกรน

ที่มา : William D. Callister. 2007 : 93

3.3 ความไม่สมบูรณ์ขอบแฝด (Twin Boundary) เป็นความบกพร่องแบบระนาบที่เกิดจากความแตกต่างของโครงสร้างอะตอมที่อยู่คนละด้านของระนาบซึ่งเรียกว่า ระนาบแฝด (Twin Plane) สาเหตุเกิดจากอะตอมด้านหนึ่งของระนาบแฝดมีตำแหน่งผิดไปจากเดิมคล้ายภาพสะท้อน (Mirror Image Position) ดังแสดงในภาพที่ 4.13 ความไม่สมบูรณ์ประเภทนี้มักเกิดจากความผิดพลาดของกระบวนการอบหรือกระบวนการขึ้นรูปโลหะ เช่น เมื่อโลหะถูกขึ้นรูปด้วยแรงที่มากกระทำก็จะทำให้ตำแหน่งอะตอมเปลี่ยนไปตามทิศทางแรงในขณะที่ส่วนอื่นยังคงมีโครงสร้างผลึกเหมือนเดิม เป็นต้น ความไม่สมบูรณ์ขอบแฝดมีชื่อเรียกแตกต่างกันตามลักษณะเฉพาะของการเกิดระนาบผลึก เช่น ขอบแฝดการอบ (Annealing Twin) มักจะเกิดกับโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC หรือขอบแฝดกลศาสตร์ (Mechanical Twin) มักจะเกิดกับโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ BCC และ HCP เป็นต้น ความไม่สมบูรณ์ประเภทนี้สามารถแก้ไขได้โดยการให้ความร้อนจนเกรนกลับคืนสู่สภาพเดิม



ภาพที่ 4.13 ความไม่สมบูรณ์ขอบแฝด

ที่มา : William D. Callister. 2007 : 187

#### 4. ความไม่สมบูรณ์แบบสามมิติ

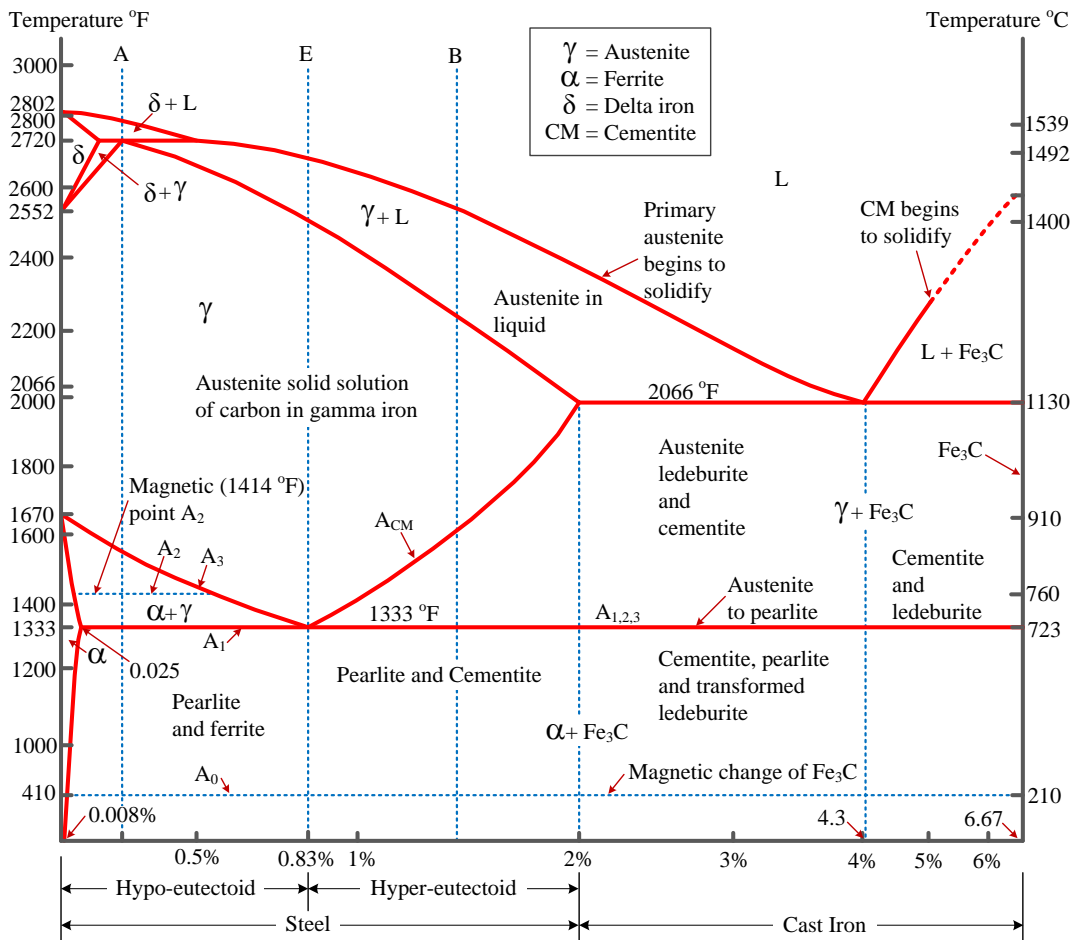
ความไม่สมบูรณ์แบบสามมิติ (Three Dimensional Defects หรือ Bulk Defects) หรือเรียกว่า ความไม่สมบูรณ์แบบปริมาตร (Volume Defects) เป็นความบกพร่องที่มักเกิดระหว่างกระบวนการขึ้นรูปโลหะ รูปแบบความไม่สมบูรณ์ลักษณะนี้ เช่น รูพรุน รอยแตกร้าว การมีสิ่งปลอมปน หรือการเกิดเฟสออสเทนไนต์ เป็นต้น

#### อิทธิพลกระบวนการทางความร้อนต่อคุณสมบัติเหล็ก

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของเหล็กกับปริมาณธาตุคาร์บอนและอุณหภูมิเกิดขึ้นอย่างกว้างขวางในหลายประเทศ ปัจจุบันได้มีการนำผลการศึกษาดังกล่าวมาเขียนเป็นแผนภูมิเรียกว่า แผนภูมิสมดุลของเหล็กกล้าและเหล็กหล่อ (Steel and Cast Iron Phase Diagram) ดังแสดงในภาพที่ 4.14 โดยแกนตั้งของแผนภูมิเป็นอุณหภูมิและแกนนอนเป็นร้อยละปริมาณธาตุคาร์บอนโดยน้ำหนักที่ผสมในเหล็ก รายละเอียดกระบวนการทางความร้อนต่อเหล็กตามแผนภูมิมีดังต่อไปนี้ (สุขอัคณา ลี. 2553 : 28-34, Ash Ahmed and John Sturges. 2015 : 75-76, 122-126 และ Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011: 89-91)

เหล็กโดยทั่วไปจะอยู่ในสถานะของแข็งเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า  $723^{\circ}\text{C}$  และจะมีชื่อเรียกต่างกันตามปริมาณคาร์บอนที่เป็นส่วนผสม ถ้าปริมาณคาร์บอนผสมในเหล็กไม่เกินร้อยละ 2.0 จะเรียกว่าเหล็กกล้าซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ไฮโปยูเทกตอยด์ (Hypo Eutectoid) เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนผสมน้อยกว่าร้อยละ 0.83 และไฮเปอร์ยูเทกตอยด์ (Hyper Eutectoid) เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนผสมร้อยละ 0.83-2.0 ตามลำดับ สำหรับเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่าร้อยละ 2.0 แต่ไม่เกินร้อยละ 6.67 จะเรียกว่าเหล็กหล่อ ปริมาณคาร์บอนมีผลต่อความ

แข็งแรงและการเสีรูปร่างของเหล็กภายใต้แรงที่มากระทำ ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของคาร์บอนในเหล็กคืออุณหภูมิและโครงสร้างผลึก เหล็กที่อุณหภูมิห้องโดยทั่วไปจะมีโครงสร้างผลึกแบบ BCC และอะตอมเรียงตัวกันแน่นมีช่องว่างน้อย เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 723°C โครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนเป็นแบบ FCC ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอะตอมมากกว่าแบบ BCC จึงทำให้อะตอมของธาตุอื่นผ่านเข้ามาภายในโครงสร้างผลึกได้ง่ายขึ้น เหล็กเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนตามแผนภูมิจะมีโครงสร้างผลึกแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.14 แผนภูมิสมดุลของเหล็กกล้าและเหล็กหล่อ

ที่มา : Invision Power Services, Inc. 2001

เฟอร์ไรต์ (Ferrite) หรืออัลฟาเฟอร์ไรต์ ( $\alpha$ -Ferrite) เป็นโครงสร้างหรือเฟส (Phase) ของเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนผสมในสารละลายของแข็งที่เป็นโครงสร้างผลึกแบบ BCC โดยมีปริมาณคาร์บอนที่ละลายไม่เกินร้อยละ 0.025 ที่อุณหภูมิประมาณ 723°C เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์

จะเห็นเกรนเป็นพื้นสีขาว เฟอร์ไรต์เป็น โครงสร้างผลึกที่มีความยืดหยุ่นสูงแต่มีความแข็งแรง และความแข็งต่ำ

ออสทีไนต์ (Austenite) หรือ แกรมม่าออสทีไนต์ ( $\gamma$ -Austenite) เป็น โครงสร้างของ เหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนผสมในสารละลายของแข็งที่เป็น โครงสร้างผลึกแบบ FCC โดยมี ปริมาณคาร์บอนละลายไม่เกินร้อยละ 2.0 ที่อุณหภูมิประมาณ  $1,130^{\circ}\text{C}$  ลักษณะของเกรนเมื่อมอง ผ่านกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเป็นพื้นสีขาวมีขนาดใหญ่กว่าเฟอร์ไรต์ ออสทีไนต์เป็น โครงสร้าง ผลึกที่มีความยืดหยุ่นสูงแต่ความแข็งแรงยังคงต่ำอยู่

ซีเมนต์ไต์ (Cementite : CM) หรือ เหล็กคาร์ไบด์ (Iron Carbide) สูตรเคมีคือ  $\text{Fe}_3\text{C}$  เป็น เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนผสมไม่เกินร้อยละ 6.67 และมีโครงสร้างผลึกไม่เสถียร (Metastable) เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่มาก โครงสร้างผลึกที่ไม่เสถียรจะทำให้เหล็กและคาร์บอน แยกออกจากกันได้ง่ายถ้าอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ซีเมนต์ไต์เป็นสารประกอบโลหะ (Intermetallic Compound) ที่มีความแข็งมากแต่เปราะ

เหล็กเดลตา (Delta Iron:  $\delta$ ) เป็น โครงสร้างเหล็กที่มีคาร์บอนผสมในสารละลายของแข็ง ที่เป็น โครงสร้างผลึกแบบ BCC โครงสร้างผลึกมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิระหว่าง  $1,400-1,539^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างผลึกของเหล็กเดลตามีความแข็งแรงแต่เปราะมากจึงเกิดการแตกร้าวได้ง่ายเมื่อมีแรงมา กระทำ

เพอร์ไลต์ (Pearlite) เป็นผลึกที่เกิดจากการรวมกันของเฟอร์ไรต์กับซีเมนต์ไต์ที่เกิดจาก ปฏิกิริยายูเทกตอยด์ (Eutectoid) เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเกรนเป็นแถบขาวสลับกัน ระหว่างอัลฟาเฟอร์ไรต์และเหล็กคาร์ไบด์ เพอร์ไลต์มีคุณสมบัติเด่นด้านความแข็งแรงแต่มีความ ยืดหยุ่นน้อยกว่าเฟอร์ไรต์

จากภาพที่ 4.14 ยังพบอีกว่าในขณะที่อุณหภูมิของเหล็กเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ มีผลทำให้ โครงสร้างผลึกเปลี่ยนไปและบางส่วนเริ่มเกิดการละลายกลายเป็นของเหลว (Liquid : L) เมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดหลอมเหลวก็จะทำให้เหล็กกลายเป็นของเหลวทั้งหมด คาร์บอนที่ เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้จุดหลอมเหลวของเหล็กลดต่ำลง โดยเหล็กบริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลว ประมาณ  $1,534^{\circ}\text{C}$  แต่เหล็กที่ผสมคาร์บอนร้อยละ 4.3 มีจุดหลอมเหลวลดลงเหลือประมาณ  $1,130^{\circ}\text{C}$  อย่างไรก็ตามถ้ามีปริมาณคาร์บอนผสมมากกว่าร้อยละ 4.3 กลับทำให้จุดหลอมเหลว เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงสถานะของเหล็กจากสถานะของเหลวกลับไปเป็นของแข็งเรียกว่า ปฏิกิริยายูเทกติก (Eutectic)



## การทดสอบคุณสมบัติของโลหะ

โลหะต่างชนิดกันย่อมมีคุณสมบัติแตกต่างกันจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำโลหะไปใช้งาน รายละเอียดการทดสอบโลหะมีดังต่อไปนี้ (สุขอัคณา ลี. 2553, K&C MOULDINGS. n.d., Mahyar Naraghi. n.d., Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011: 116-126 และ Mikell P. Groover. 2013 : 52-71)

### 1. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscopy) เป็นการศึกษารูปร่างเกรนของโลหะและสิ่งผิดปกติต่าง ๆ ที่อยู่ภายใน เกรนโลหะจะก่อตัวขึ้นจากอนุภาคของนิวคลีโอและมีรูปร่างแตกต่างกัน เมื่อเกรนเติบโตขึ้นจนสัมผัสกันจะเกิดขอบเกรนซึ่งมีลักษณะเฉพาะและสามารถตรวจสอบได้ด้วยกล้องกำลังขยายสูง โครงสร้างจุลภาคยังสามารถใช้ทำนายคุณสมบัติด้านอื่นของโลหะได้อีกด้วย ขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างจุลภาคเริ่มต้นจากการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบ โดยชิ้นงานตัวอย่างที่ถูกตัดจากชิ้นส่วนจริงจะต้องมีโครงสร้างผลึกไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม การตัดแต่งชิ้นงานควรมีการหล่อเย็นเพื่อระบายความร้อนและควรตัดชิ้นงานให้เป็นระนาบเรียบไม่ขรุขระ ถ้าชิ้นงานเป็นโลหะกลุ่มเหล็กกล้าหรือเหล็กผสมอาจใช้ใบตัดที่ทำจากผงอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) หรือถ้าชิ้นงานเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กอาจใช้ใบตัดที่ทำจากซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ก็ได้ เมื่อได้ชิ้นงานตัวอย่างตามขนาดและรูปร่างที่กำหนดแล้วก็นำชิ้นงานนั้นไปขัดแต่งผิว การขัด (Grinding) เป็นขั้นตอนการทำผิวชิ้นงานให้เรียบเพื่อขจัดรอยต่าง ๆ ที่เกิดจากขั้นตอนการตัด ชิ้นงานที่จะนำไปขัดผิวจะต้องทำเรือนหุ้มเพื่อป้องกันการจับยึดมีความมั่นคง การขัดเพื่อลบรอยตำหนิต่าง ๆ มักใช้กระดาษขัดตั้งแต่เบอร์หยาบไปจนถึงเบอร์ละเอียด กระบวนการขัดผิวชิ้นงานประกอบด้วย การขัดหยาบเป็นการขัดเพื่อขจัดรอยลึกจากการตัด การขัดละเอียดเป็นการขัดเพื่อขจัดรอยขนาดเล็กที่ผิวชิ้นงานหลังจากขั้นตอนการขัดหยาบ การขัดละเอียดยังเป็นการขัดโครงสร้างผลึกที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอุณหภูมิขณะตัดหรือขัดหยาบอีกด้วย ขณะขัดควรหมุนชิ้นงานไปเป็นมุมฉากจากทิศทางเดิมเพื่อขจัดรอยเดิมให้หายไปจนหมด การป้องกันผิวชิ้นงานไม่ให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกสามารถทำได้ด้วยการใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็น และสุดท้ายเป็นการขัดเงา (Polishing) ซึ่งเป็นการขัดเพื่อทำให้ผิวชิ้นงานเรียบสนิทจนปรากฏเห็นโครงสร้างผลึกที่แท้จริง ชนิดของผงขัดต้องมีความละเอียดมาก เช่น ผงขัดเพชรเป็นผงขัดที่มีประสิทธิภาพสูงเพราะมีความแข็งมาก หรืออาจใช้ผงขัดออกไซด์ซึ่งเป็นผงขัดสำหรับโลหะที่มีความเหนียว เป็นต้น การขัดเงาครั้งสุดท้ายอาจใช้ผงขัดที่มีขนาดละเอียดมากถึง  $0.04 \mu m$  โดยใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็น

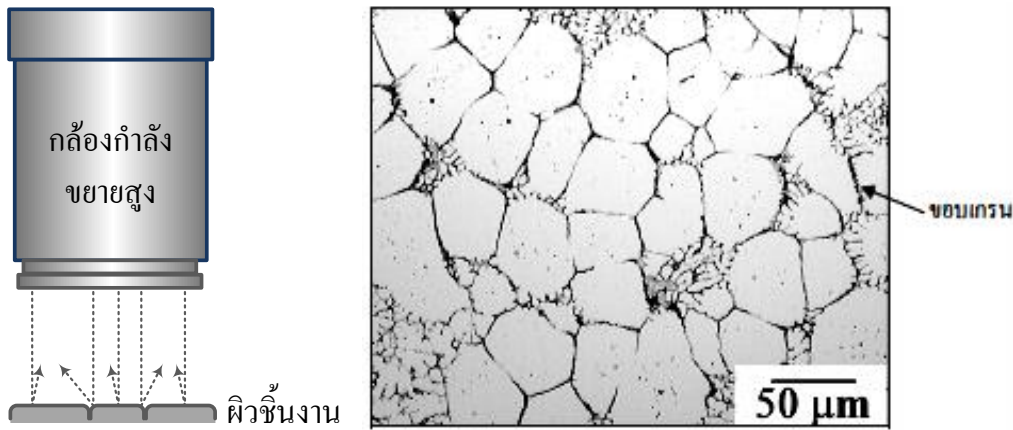
ผิวชิ้นงานภายหลังจากกระบวนการขัดเงาจะยังไม่สามารถมองเห็น โครงสร้างจุลภาคได้ อย่างชัดเจนจึงจำเป็นต้องมีการกัดผิวชิ้นงานด้วยกรด (Etching) กระบวนการกัดกรดเป็นการใช้ สารเคมีในการทำปฏิกิริยากับ โลหะเพื่อให้มองเห็นรูปร่างเกรนได้ชัดเจนยิ่งขึ้น สารเคมีที่ใช้ อาจจะเป็นกรดหรือด่างก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะดังแสดงในตารางที่ 4.5 การกัดกรดจะใช้ วิธีการจุ่ม แกว่ง หรือเช็ดผิวหน้าชิ้นงานด้วยสารเคมีตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วจึงล้างออกด้วย น้ำหรือแอลกอฮอล์ การกัดกรดสามารถทำได้ 2 ลักษณะคือการกัดกรดบริเวณขอบเกรนและการ กัดกรดบริเวณผิวหน้าเกรน

ตารางที่ 4.5 ประเภทสารเคมีสำหรับกัดผิวโลหะ

| โลหะ  | สารเคมีกัดผิวโลหะ                               | หมายเหตุ  |
|---|---|---|
| เหล็กกล้า (Carbon Steel)                                | กรดไนตริก (Nitric Acid)<br>ไนตล (Nital)         | จุ่มหรือแช่ในช่วงเวลาที่<br>กำหนดตามประเภทเหล็ก |
|   | กรดพิคริก (Picric Acid)                         |   |
| ทองแดง (Copper)<br>ทองเหลือง (Brass)<br>บรอนซ์ (Bronze) | แอมโมเนียม เปอร์ซัลเฟต<br>(Ammonium Pesulphate) | จุ่มหรือแช่ในช่วงเวลาที่<br>กำหนดตามประเภทโลหะ  |
| อะลูมิเนียม (Aluminium)                                 | กรดไฮโดรฟลูออริก<br>(Hydrofluoric Acid)         | จุ่มหรือแกว่งในช่วงเวลา<br>ประมาณ 15 วินาที     |

ที่มา : สุขอัคณา ลี. 2553 : 11

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่นิยมทดสอบคือการถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ ลำแสง (Light Microscope) เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุทึบแสงไม่สามารถใช้แสงส่องผ่านชิ้นงาน จากด้านล่างได้จึงต้องใช้การสะท้อนแสงตกกระทบที่ผิวชิ้นงานเพื่อสังเกตรูปร่างเกรน เลนส์ ของกล้องจุลทรรศน์ลำแสงมีกำลังขยายแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของกล้องซึ่งอาจมี กำลังขยายถึง 100 เท่าหรือมากกว่าก็ได้ ตัวอย่างภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการกัด กรดและถูกส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ลำแสงแสดงในภาพที่ 4.15 จากภาพจะสามารถสังเกตเห็น รูปร่างของเกรนได้จากแนวขอบเกรนและยังสามารถตรวจสอบตำหนิต่าง ๆ ที่มีภายในเกรนได้ อีกด้วย นอกจากนี้ภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ลำแสงยัง สามารถบันทึกเป็นภาพสีได้อีกด้วย

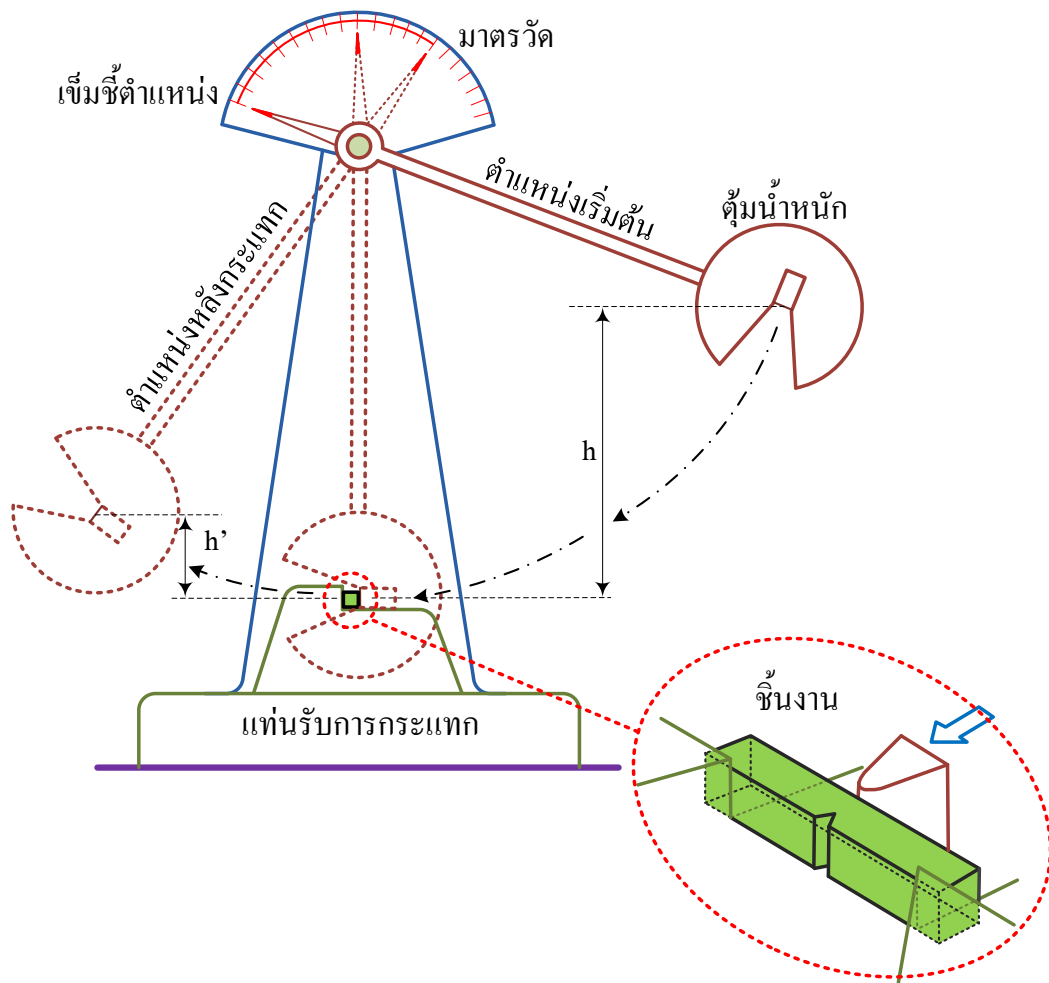


ภาพที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการอัดกรด

ที่มา : สุขอัคณา ลี, 2553 : 12 และ William D. Callister, 2007 : 100

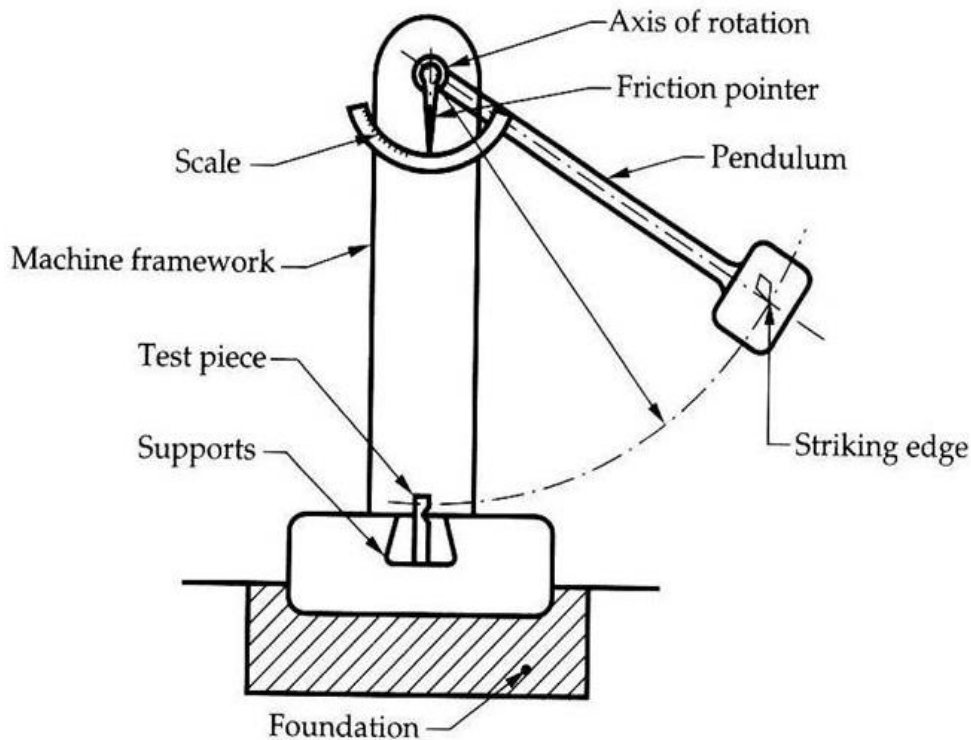
## 2. การทดสอบความแกร่งของโลหะ

ความแกร่ง (Toughness) เป็นสมบัติของวัสดุในการดูดซับพลังงานโดยไม่ทำให้เกิดการแตกหัก ความแกร่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความเหนียว วัสดุที่มีความแกร่งมากคือวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานได้มากและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากโดยไม่เกิดการแตกหัก แต่ในทางกลับกันถ้าวัสดุมีความสามารถในการดูดซับพลังงานน้อยก็จะถือว่ามีความแกร่งน้อย หรืออาจกล่าวได้ว่าวัสดุเหนียวมีแนวโน้มมีค่าความแกร่งมากกว่าวัสดุเปราะ คุณสมบัติความแกร่งมีความสำคัญกับโลหะบางชนิดที่ใช้งานเฉพาะอย่าง เช่น โครงสร้างเรือ โครงสร้างเครื่องบิน หรือลวดเหล็กกำลังสูง เป็นต้น การวัดค่าความแกร่งของโลหะมักใช้วิธีการทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) ซึ่งเป็นวิธีการวัดปริมาณพลังงานกระแทกที่กระทำกับวัตถุจนเกิดการแตกหัก การทดสอบแรงกระแทกแบ่งเป็น 2 วิธีหลักคือ การทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปปี (Charpy Impact Test) และการทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod Impact Test) ชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงกระแทกมีลักษณะเป็นแท่งยาวหน้าตัดขวางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีรอยบากอยู่ตรงกลาง รอยบากมีรูปร่างเป็นตัววี (V-Notch) หรือตัวยู (U-Notch) ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดในการทดสอบวัสดุแต่ละชนิด เครื่องมือและชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบชาร์ปปีแสดงในภาพที่ 4.16 สำหรับเครื่องมือและชิ้นงานทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอดแสดงในภาพที่ 4.17 ความแตกต่างระหว่างการทดสอบแบบชาร์ปปีและแบบไอซอดคือลักษณะการวางชิ้นงาน ชิ้นงานของการทดสอบแบบชาร์ปปีจะวางในแนวนอนและค้อนน้ำหนักจะกระแทกบริเวณตรงข้ามกับรอยบาก ส่วนการทดสอบแบบไอซอดจะวางชิ้นงานในแนวตั้งและค้อนน้ำหนักกระแทกบริเวณด้านที่มีรอยบาก



ภาพที่ 4.16 เครื่องมือการทดสอบแรงกระแทกแบบชารปีและชิ้นงาน  
ที่มา : William D. Callister. 2007 : 224

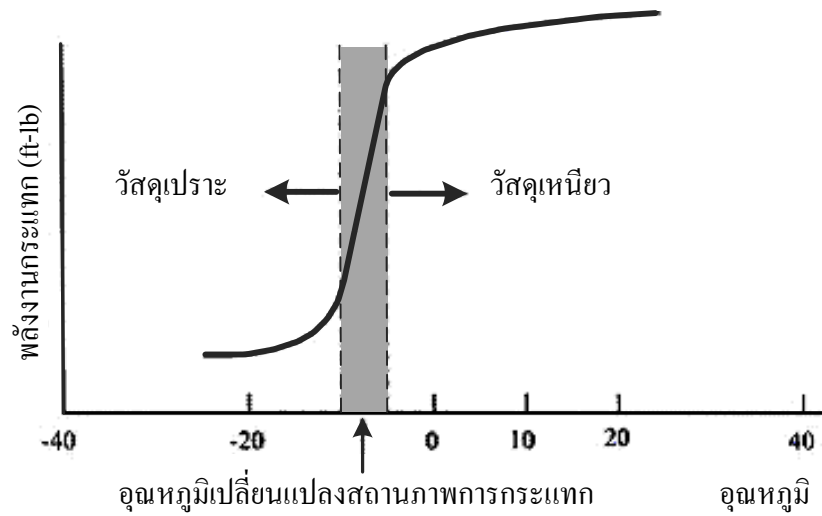
การทดสอบแรงกระแทกแบบชารปีและแบบไอซอดมีวิธีการทดสอบคล้ายกันคือ นำชิ้นงานทดสอบไปวางไว้ในตำแหน่งที่มีแรงมากระแทกจากการเหวี่ยงของค้อนน้ำหนัก มวลและความสูงของการยกค้อนน้ำหนักมีผลต่อค่าพลังงานกระแทก โดยความสูงของค้อนน้ำหนักที่ยกขึ้นก่อนการกระแทก ( $h$ ) สามารถแปลงเป็นความเร็วการเหวี่ยงขณะกระแทกชิ้นงาน ณ จุดต่ำสุดได้ เมื่อค้อนน้ำหนักกระแทกชิ้นงานจะสูญเสียพลังงานไปจำนวนหนึ่งแต่ยังคงเคลื่อนที่ต่อไปได้อีกจนถึงตำแหน่งความสูงหลังกระแทก ( $h'$ ) ผลต่างระหว่างความสูง  $h$  และ  $h'$  คือพลังงานกระแทก ซึ่งมีหน่วยเป็น จูล (Joule : J หรือ ft-lb)



ภาพที่ 4.17 เครื่องมือทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอดและชิ้นงาน

ที่มา : Mahyar Naraghi. n.d.

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแกร่งของโลหะคืออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมที่ส่งผลมายังอุณหภูมิของชิ้นงาน ภาพที่ 4.18 เป็นตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความแกร่งในรูปแบบของพลังงานกระแทก จากภาพพบว่าหากนำชิ้นงานมาทดสอบในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่างกันจะมีอุณหภูมิช่วงหนึ่งที่ทำให้พลังงานกระแทกเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนสภาพของชิ้นงานจากวัสดุเหนียวไปเป็นวัสดุเปราะ อุณหภูมิในช่วงนี้เรียกว่า อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพการกระแทก (Impact Transition Temperature : ITT) ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดจะมีช่วง ITT ต่างกัน จากภาพยังพบอีกว่าค่าพลังงานกระแทกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อชิ้นงานถูกทดสอบในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ITT และชิ้นงานยังคงมีความเหนียวคงเดิม แต่ถ้าชิ้นงานถูกทดสอบในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ITT จะทำให้ค่าพลังงานกระแทกลดลงและชิ้นงานมีความเหนียวลดลงด้วย ดังนั้นในการใช้งานวัสดุจำพวกโลหะจึงควรนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ITT เพื่อป้องกันความเสี่ยงที่โลหะจะแปรสภาพไปเป็นวัสดุเปราะนั่นเอง



ภาพที่ 4.18 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อพลังงานกระแทกของโลหะ

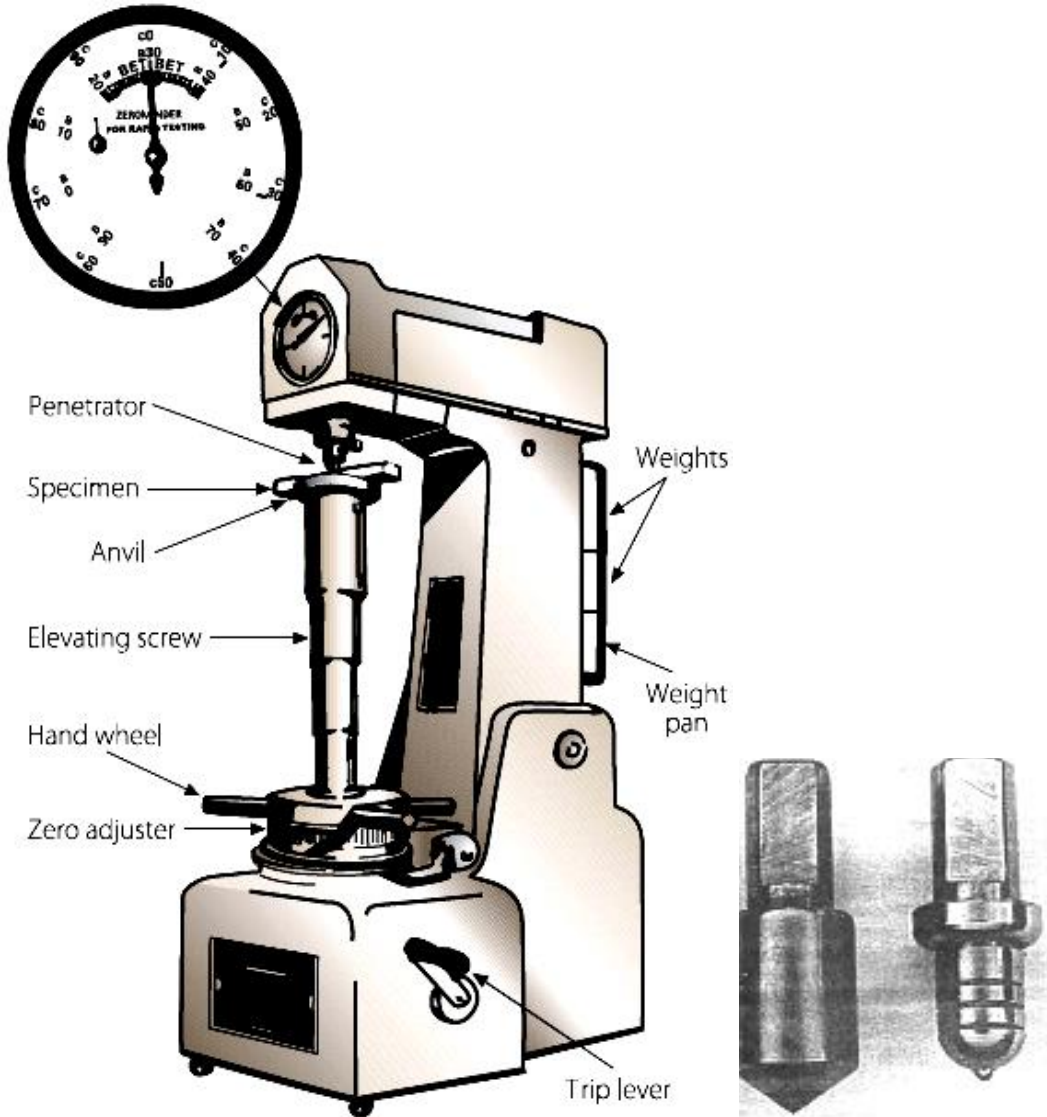
ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. ม.ป.ป.

### 3. การทดสอบความแข็งของโลหะ

ความแข็ง (Hardness) เป็นคุณสมบัติวัสดุในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร การทดสอบความแข็งเป็นวิธีที่นิยมใช้ทดสอบโลหะเนื่องจากทดสอบง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อย อีกทั้งค่าความแข็งยังมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านอื่นของวัสดุอีกด้วย เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว ความยืดหยุ่น และความหยุ่นหนืด เป็นต้น หลักการที่ใช้ประเมินค่าความแข็งของวัสดุคือการนำวัสดุที่แข็งกว่าคบนวัสดุที่อ่อนกว่าเพื่อวัดขนาดรอยกด (Indentation) การทดสอบความแข็งของวัสดุมีหลายวิธี เช่น การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส การทดสอบความแข็งแบบคนูบ และการทดสอบความแข็งแบบบาโคล เป็นต้น รายละเอียดการทดสอบความแข็งแต่ละวิธีมีดังต่อไปนี้

3.1 การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ (Rockwell Hardness Test) เป็นการวัดค่าความแข็งของวัสดุด้วยการนำหัวกดมาคดลงบนชิ้นงานด้วยแรงค่าหนึ่งแล้วจึงวัดความลึกของหัวกดที่จมลงไปชิ้นงาน ส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบแบบรอกเวลล์ประกอบด้วย มาตรวัด (Gauge) หัวกด (Penetrator) ทั้งรองรับชิ้นงาน (Anvil) ควางเลื่อนตำแหน่ง (Elevating Screw) พวงมาลัยควบคุม (Hand Wheel) ตัวปรับศูนย์ (Zero Adjuster) น้ำหนักถ่วง (Weights) และชิ้นงานทดสอบ (Specimen) ดังแสดงในภาพที่ 4.19(ก) ชนิดหัวกดที่ใช้ทดสอบมีทั้งแบบหัวกดเพชรทรงกรวย (Diamond Cone Penetrator) และหัวกดเหล็กกล้าผสมทรงโค้งมน (Alloy Steel Ball

Penetrator) โดยหัวกดแต่ละแบบจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 1.6-12.7 mm ภาพที่ 4.19(ข) แสดงตัวอย่างหัวกดแบบรอกเวลล์



(ก) เครื่องทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์

(ข) หัวกดแบบรอกเวลล์

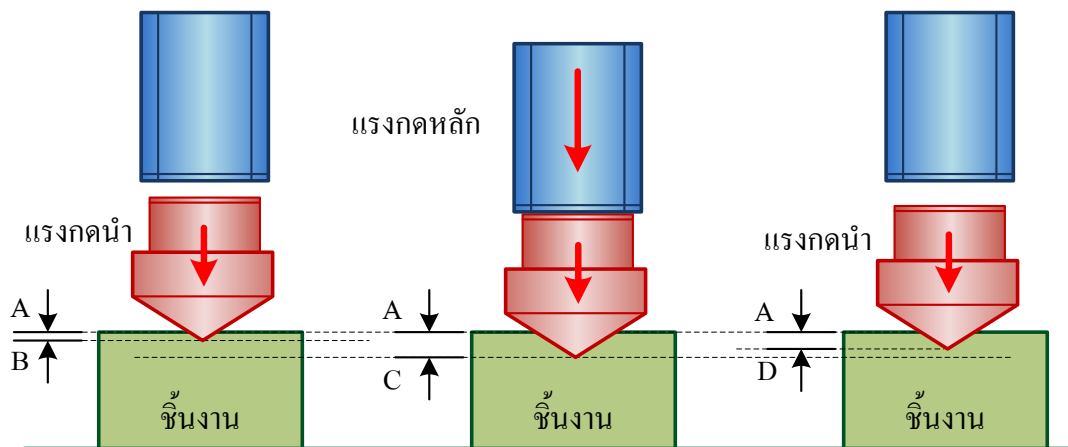
ภาพที่ 4.19 เครื่องทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์

ที่มา : AvStop.com, 2014 และ สุขอัธนา ลี, 2553 : 12

การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ยังแยกย่อยอีกหลายวิธี แต่ที่นิยมทดสอบมี 3 วิธีคือ รอกเวลล์ซี (Rockwell-C) รอกเวลล์บี (Rockwell-B) และรอกเวลล์เอ (Rockwell-A) ตามลำดับ ถ้าหากชิ้นงานมีความแข็งมากจะใช้วิธีทดสอบแบบรอกเวลล์ซีซึ่งใช้หัวกดเพชรทรงกรวยปลาย



แหลมมีมุม 120 องศา แต่ถ้าชิ้นงานมีความแข็งปานกลางจะใช้วิธีทดสอบแบบรอกเวลล์เอซึ่งใช้หัวกดเพชรทรงกรวยเช่นกันแต่ใช้แรงกดหลักน้อยกว่ารอกเวลล์ซีเพื่อให้เหมาะสมกับวัสดุที่อ่อนกว่า ในขณะที่การทดสอบแบบรอกเวลล์บีเหมาะกับชิ้นงานที่มีความแข็งน้อยซึ่งใช้หัวกดเหล็กกล้าทรงโค้งมนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.59mm ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์เริ่มต้นจากการนำชิ้นงานมาวางบนตั้งรองชิ้นงานแล้วหมุนพวงมาลัยควบคุมเพื่อยกชิ้นงานให้ไปชิดหัวกด ออกแรงกดนำเพื่อให้หัวกดจมลงบนผิวชิ้นงานเพื่อกำหนดตำแหน่งทดสอบ จากนั้นจึงเพิ่มแรงกดหลักซึ่งเป็นแรงที่ใช้ทดสอบความแข็งของวัสดุ เมื่อแรงกดลดลงก็จะทำให้หัวกดที่จมลงไปชิ้นงานเกิดการคืนตัว ดังนั้นเมื่อเอาแรงกดหลักออกให้คงค้างแรงกดนำเอาไว้เพื่อให้ปลายหัวกดยังคงอยู่ตำแหน่งที่เกิดการยุบตัวอย่างถาวรดังแสดงในภาพที่ 4.20 จากนั้นทำการบันทึกค่าความแข็งจากมาตรวัดและวัดรอยกดที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรอยกดของการทดสอบแบบรอกเวลล์จะมีค่าระหว่าง 0.2-1.0 mm



ภาพที่ 4.20 การให้แรงกดและลักษณะการจมตัวของหัวกด

ที่มา : Mechanics of Solids MIE222. n.d.

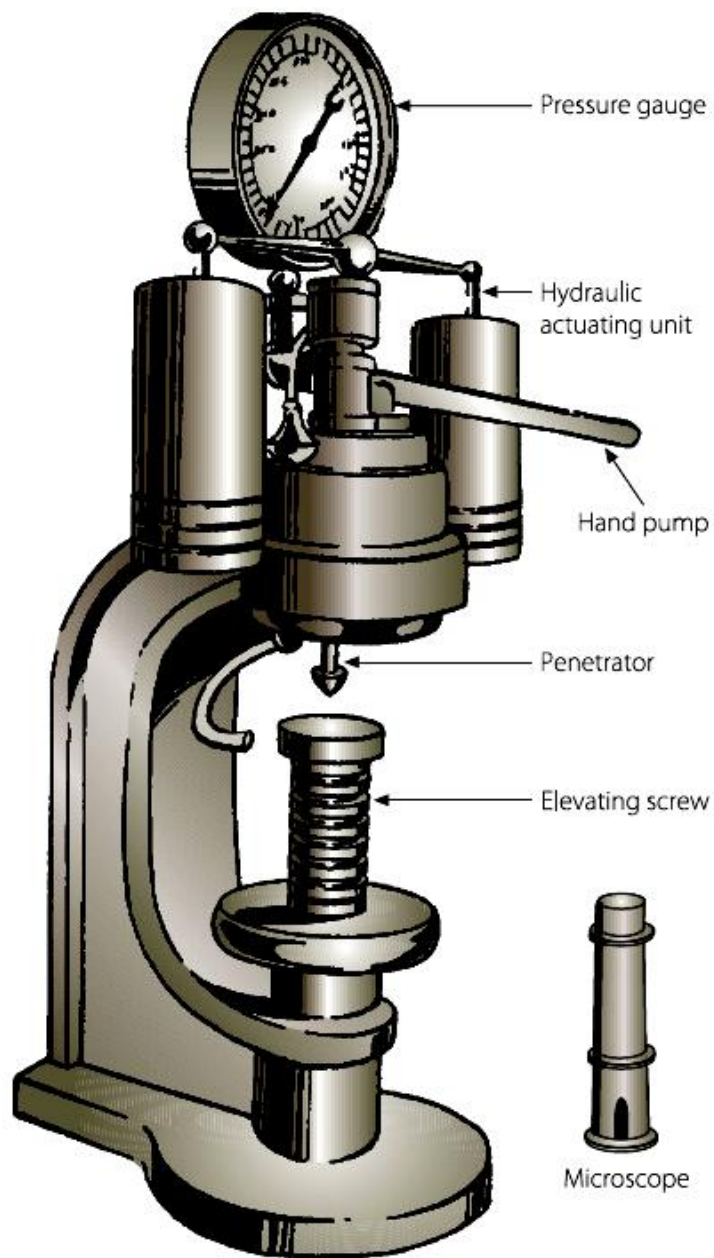
ข้อควรระวังในการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์คือ ชิ้นงานที่ทดสอบจะต้องมีผิวเรียบสม่ำเสมอ ความหนาของชิ้นงานควรมากกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกดหรือมากเพียงพอที่ไม่ทำให้ผิวด้านหลังของชิ้นงานเกิดการเสียรูปขณะรับแรงกดหลัก ระยะห่างระหว่างรอยกดหรือจากขอบชิ้นงานถึงรอยกดต้องมีระยะเพียงพอหรือไม่น้อยกว่า 3 mm แรงกดบนชิ้นงานควรมีอัตราสม่ำเสมอและเมื่อนำแรงกดออกแล้วควรสังเกตลักษณะรอยกดอย่างละเอียด การเลือกใช้แรงกดหลักสำหรับโลหะชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.6

**ตารางที่ 4.6** แรงกดหลักสำหรับโลหะชนิดต่าง ๆ ในการทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์

| วิธี | แรงกดหลัก (kg) | ชนิดหัวกด                      | ระดับ         | ชนิดของชิ้นงาน            |
|------|----------------|--------------------------------|---------------|---------------------------|
| C    | 60+100+150     | หัวกดเพชร<br>ทรงกรวย           | ดำ<br>(Black) | เหล็กกล้า เหล็กหล่อแข็ง   |
| D    | 60+100         |                                |               | เหล็กกล้าบาง              |
| A    | 60             |                                |               | โลหะผสมแข็งมาก            |
| G    | 60+100+150     | หัวกดเหล็กกล้า<br>ผสมทรงโค้งมน | แดง<br>(Red)  | ทองแดง หรือ แข็งมากกว่า B |
| B    | 60+100         |                                |               | โลหะไม่มีเหล็กเป็นส่วนผสม |
| F    | 60             |                                |               | แข็งน้อยกว่า B            |

ที่มา : สุขอัคณา ลี. 2553 : 12

3.2 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Test) เป็นการทดสอบความแข็งของวัสดุที่ใช้หัวกดลักษณะทรงกลม (Ball Indicator) กดไปบนผิวของชิ้นงานภายใต้แรงกดมาตรฐาน เครื่องทดสอบแบบบริเนลล์ประกอบด้วย มาตรการความดัน (Pressure Gauge) ไฮดรอลิกสั่งกำลัง (Hydraulic Actuating Unit) ปุ่มมือ (Hand Pump) หัวกด ควางเลื่อนตำแหน่ง และกล้องจุลทรรศน์ดังแสดงในภาพที่ 4.21 หัวกดที่ใช้ทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ทำจากโลหะแข็ง เช่น เหล็กกล้าชุบแข็ง หรือทังสเตนคาร์ไบด์ เป็นต้น หัวกดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-10 mm ซึ่งมีความสัมพันธ์กับชนิดของวัสดุทดสอบและแรงกด ในขณะที่แรงกด  $P$  ที่ใช้ทดสอบมีค่าอยู่ระหว่าง 30-3,000 kg การกำหนดแรงกดจะมีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวกด (Diameter of Ball Indicator :  $D$ ) ดังสมการ  $P/D^2$  เช่น การทดสอบความแข็งของเหล็กกล้าจะใช้อัตราส่วนแรงต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 ต่อ 1 หมายความว่าถ้าเลือกใช้หัวกดขนาด 10 mm จะต้องออกแรงกด 3,000 kg หรือถ้าต้องการทดสอบอะลูมิเนียมก็ควรใช้อัตราส่วนแรงต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ต่อ 1 เป็นต้น โดยทั่วไประยะเวลาที่ใช้ในการกดประมาณ 30 วินาที อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่ใช้ในการกดยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุทดสอบ เช่น เหล็กหรือเหล็กกล้าควรคงแรงกดเป็นระยะเวลา 10-15 วินาที เป็นต้น ขณะออกแรงกดหัวกดจะจมลงไปบนชิ้นงานและเกิดรอยยุบที่ผิวชิ้นงาน เมื่อนำแรงกดออกจึงใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องและวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรอยกดบนชิ้นงาน (Impression Diameter :  $d_1$  และ  $d_2$ ) ดังแสดงในภาพที่ 4.22 ขนาดรอยกดที่ได้จากการทดสอบคือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย ค่าความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell Hardness Number : BHN หรือ HB) สามารถหาได้จากการนำแรงกดหารด้วยพื้นที่รอยกดที่ปรากฏอยู่บนผิวชิ้นงาน

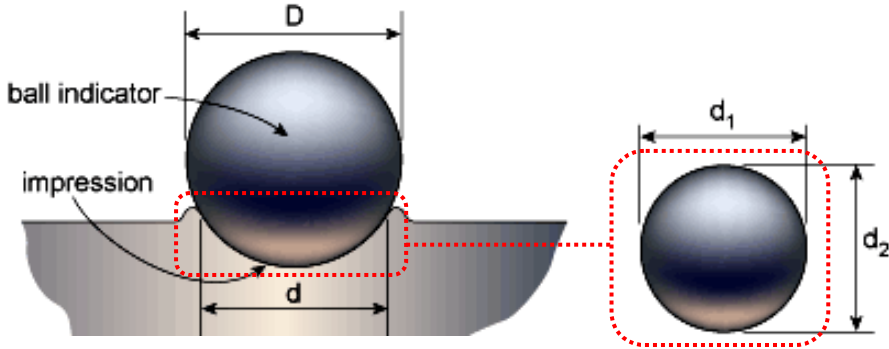


ภาพที่ 4.21 เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

ที่มา : AvStop.com. 2014

การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์จะให้รอยกดที่กว้างและลึกกว่าการทดสอบแบบรอกเวลล์จึงสามารถเห็นรอยกดได้อย่างชัดเจน แต่เนื่องจากรอยกดมีขนาดใหญ่และลึกจึงเป็นอุปสรรคในการทดสอบชิ้นงานขนาดเล็กหรือชิ้นงานที่บาง ความหนาของชิ้นงานควรมากกว่า 10 เท่าของความลึกรอยกดหรือมากเพียงพอที่ไม่ทำให้ผิวด้านหลังของชิ้นงานเกิดการเสียรูปขณะรับแรงกด ข้อควรระวังในการทดสอบแบบบริเนลล์คือ ถ้าหัวกดเป็นชนิดเหล็กกล้าชุบแข็งไม่

ควรใช้ทดสอบวัสดุที่มีความแข็งเกินกว่า 450 HB เพราะอาจทำให้เกิดการเสียรูปของหัวกด หรือ ถ้าใช้หัวกดชนิดทั้งสแตนคาร์ไบด์ไม่ควรใช้ทดสอบวัสดุที่มีความแข็งเกินกว่า 600 HB เพราะจะเกิดผลในลักษณะเดียวกัน รวมถึงระยะระหว่างรอยกดหรือระยะจากรอยกดถึงขอบชิ้นงานไม่ควรน้อยกว่าสองเท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรอยกดเฉลี่ย



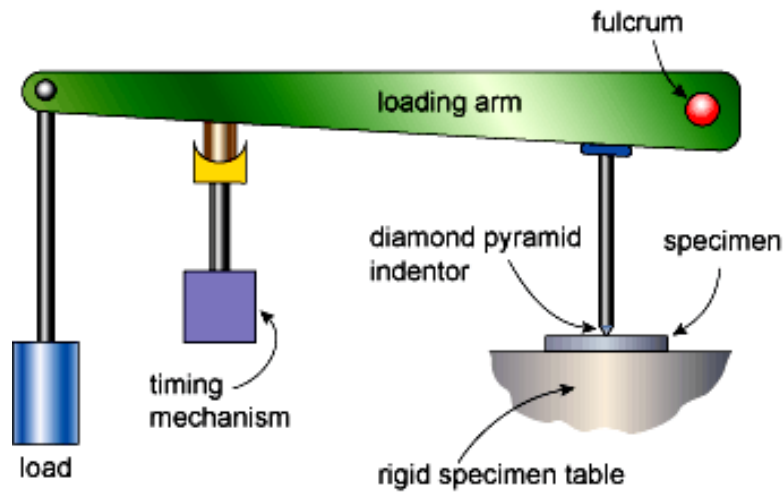
(ก) การยุบตัวของชิ้นงานภายใต้แรงกด

(ข) ขนาดรอยกดเมื่อมองจากด้านบน

ภาพที่ 4.22 การยุบของชิ้นงานการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

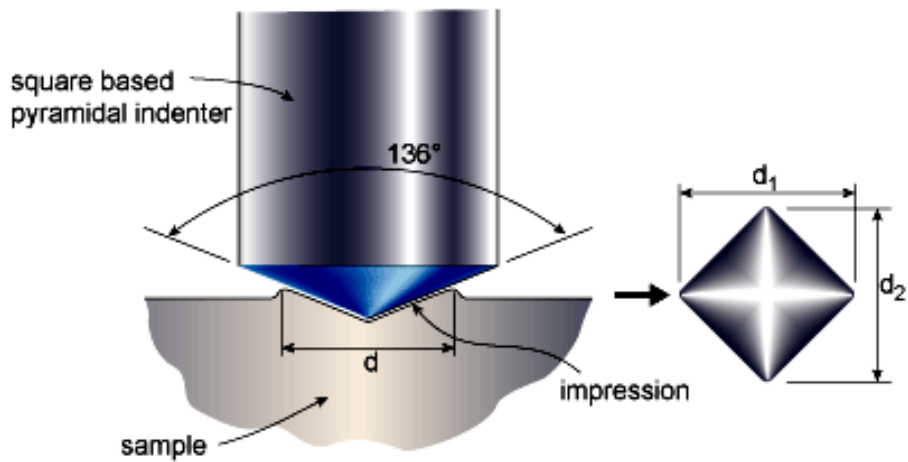
ที่มา : TWI. 2014

3.3 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Test) เป็นการทดสอบความแข็งของวัสดุที่มีหลักการคล้ายกับการทดสอบแบบบริเนลล์แต่ต่างกันที่การทดสอบแบบวิกเกอร์สใช้หัวกดเพชรรูปทรงพีรามิด (Pyramidal Diamond Indentor) โดยลักษณะหัวกดมีฐานรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ปลายมีมุมแหลม 136 องศา การทำงานของเครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์สอาศัยหลักการคานงัด (Loading Arm) โดยมีน้ำหนัก (Load) ถ่วงที่ปลายคานและส่งแรงกด  $P$  ผ่านหัวกดไปยังชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 4.23 ทิศทางของแรงกดกระทำตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน และขนาดแรงกดขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุทดสอบซึ่งมีค่าระหว่าง 1-120 kg การทดสอบชิ้นงานแต่ละครั้งจะใช้เครื่องควบคุมเวลา (Timing Mechanism) เพื่อกำหนดระยะเวลากดซึ่งอยู่ในช่วง 10-15 วินาที เช่น เหล็กกล้าจะคงแรงกดไว้ประมาณ 10 วินาที เป็นต้น เมื่อนำแรงกดออกจะพบรอยกดรูปสี่เหลี่ยมบนชิ้นงานจากนั้นจึงวัดระยะทแยงมุม (Impression Diagonal :  $d_1$  และ  $d_2$ ) ดังแสดงในภาพที่ 4.24 การหาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers Hardness Number : VHN หรือ HV) สามารถทำได้จากการนำแรงกดมาหารด้วยพื้นที่รอยกด โดยพื้นที่รอยกดจะสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยของระยะทแยงมุม



ภาพที่ 4.23 เครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

ที่มา : TWI. 2014



(ก) การยุบตัวของชิ้นงานภายใต้แรงกด (ข) ขนาดรอยกดเมื่อมองจากด้านบน

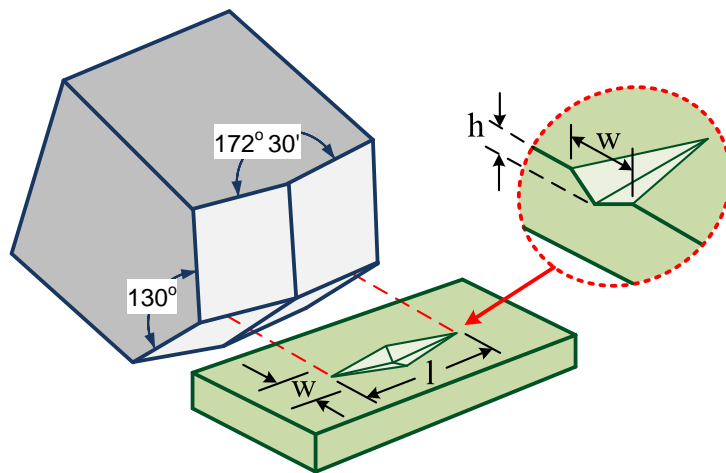
ภาพที่ 4.24 การยุบของชิ้นงานการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส

ที่มา : TWI. 2014

จุดเด่นของการทดสอบแบบวิกเกอร์สคือการใช้หัวกดที่ทำจากเพชรจึงทำให้สามารถทดสอบวัสดุได้หลายชนิดทั้งอ่อนและแข็ง อีกทั้งหัวกดเพชรไม่มีผลกระทบของการเสีรูปของหัวกดเมื่ออยู่ภายใต้แรงกด อย่างไรก็ตามหัวกดแบบวิกเกอร์สมีขนาดเล็กกว่าแบบบริเนลล์จึงทำให้รอยกดมีขนาดเล็กตามไปด้วย ดังนั้นการเตรียมพื้นผิวชิ้นงานต้องทำให้เรียบสนิทและการวัดขนาดรอยกดต้องทำอย่างระมัดระวังโดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์ ความหนาของชิ้นงานไม่ควร

น้อยกว่า 1.2 เท่าของระยะทแยงมุมของรอยกด ระยะห่างระหว่างตำแหน่งกดแต่ละครั้งควรมากกว่า 3 เท่าของระยะทแยงมุมเฉลี่ยของรอยกด

3.4 การทดสอบความแข็งแบบคนูบ (Knoop Hardness Test) เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่มีหลักการคล้ายกับแบบวิกเกอร์ส การทดสอบนี้เหมาะสำหรับทดสอบชิ้นงานที่มีความหนาหรือเป็นวัสดุแตกหักง่าย การทดสอบความแข็งแบบคนูบใช้หัวกดทำจากเพชรรูปทรงปริสมิดเรียวยาวมีมุมเอียงที่ปลายด้านหนึ่ง  $130^{\circ}$  และปลายอีกด้าน  $172^{\circ} 30'$  ดังแสดงในภาพที่ 4.25 รอยกดที่เกิดจากการทดสอบแบบคนูบจะมีระยะทแยงมากกว่าวิธีอื่นจึงสามารถวัดรอยกดได้ง่าย อีกทั้งรอยกดยังเห็นได้ชัดเจนแม้จะใช้แรงกดไม่มากส่งผลให้ค่าความแข็งที่ได้มีความน่าเชื่อถือ



ภาพที่ 4.25 การขูดภายใต้แรงกดและขนาดรอยกดบนชิ้นงานของการทดสอบแบบคนูบ  
ที่มา : TWI. 2014

3.5 การทดสอบความแข็งแบบบาโคล (Barcol Hardness Test) ตามมาตรฐาน ASTM D2583 เป็นวิธีการทดสอบความแข็งของวัสดุที่มีความสะดวกรวดเร็วเนื่องจากเครื่องมือมีขนาดเล็กดังแสดงในภาพที่ 4.26 การทดสอบนี้อาศัยการถ่ายเทแรงกดผ่านสปริงไปยังหัวกดเหล็กที่สัมผัสบนผิวชิ้นงานและอ่านค่าความแข็งจากมาตรวัดที่อยู่ด้านบน แรงกดที่ใช้ทดสอบมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับวิธีทดสอบแบบรอกเวลล์ บริเนลล์ และวิกเกอร์ส ดังนั้นวิธีนี้จึงเหมาะสำหรับการทดสอบวัสดุที่มีความแข็งไม่มากเมื่อเทียบเป็นความแข็งแบบบริเนลล์จะอยู่ในช่วง 25-100 HB เช่น ทองแดง ทองเหลือง หรืออะลูมิเนียมผสม เป็นต้น ขั้นตอนการทดสอบความแข็งแบบบาโคลสามารถทำได้โดยการนำเครื่องมือไปทดสอบชิ้นงานจริงได้เลย แต่ควรทดสอบอย่างระมัดระวังเนื่องจากอาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายได้



ภาพที่ 4.26 เครื่องมือทดสอบความแข็งแบบบาโคล

ที่มา : K&C MOULDINGS. n.d.

หน่วยความแข็งแบบบาโคล (Barcol Number) มีค่าระหว่าง 1-100 หน่วย ค่าความแข็งแต่ละหน่วยจะสัมพันธ์กับการจมตัวของหัวกดลงบนชิ้นงานที่ระยะ 0.0076mm ขณะทำการทดสอบควรวางเครื่องมือบนผิวชิ้นงานอย่างมั่นคงเพื่อป้องกันการขยับตัวของเครื่องมือขณะออกแรงกดชิ้นงาน หากเครื่องมือขยับจนทำให้เกิดข้อผิดพลาดควรเปลี่ยนตำแหน่งทดสอบใหม่เพื่อป้องกันชิ้นงานเสียหาย ปัจจัยที่เป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบแบบบาโคล เช่น ความเรียบของผิวชิ้นงาน ความเอียงระหว่างเครื่องมือกับผิวชิ้นงาน แรงเสียดทานระหว่างหัวกดกับวัสดุทดสอบ เป็นต้น โดยมุมเอียงที่ยอมให้คลาดเคลื่อนระหว่างเครื่องมือกับชิ้นงานไม่ควรเกิน 1 องศา

#### 4. การทดสอบกำลังดึง

การทดสอบกำลังดึง (Tensile Strength Test) เป็นวิธีการทดสอบหาคุณสมบัติด้านทานแรงดึงหรือกำลังดึงของโลหะ การทดสอบนี้ถือว่าเป็นวิธีที่นิยมในการประเมินความแข็งแรงของโลหะ ขั้นตอนการทดสอบกำลังดึงของโลหะเริ่มต้นจากการเตรียมชิ้นงานให้เหมาะสมกับหัวจับของเครื่องมือทดสอบ ในบางครั้งอาจต้องตัดแต่งชิ้นงานให้มีขนาดหน้าตัดสม่ำเสมอหรืออาจมีป้าสำหรับให้เครื่องมือทดสอบยึดจับอย่างมั่นคง ชิ้นงานจะถูกทำเครื่องหมายซึ่งเป็นการกำหนดระยะวัด (Gage Length) เพื่อใช้สังเกตการเปลี่ยนรูปร่างภายใต้แรงดึง จากนั้นนำชิ้นงานไปติดตั้งในเครื่องมือทดสอบกำลังดึงดังแสดงในภาพที่ 4.28(ก) แรงดึงที่กระทำกับชิ้นงานควรมีอัตราเร็วคงที่จนกว่าชิ้นงานจะขาดออกจากกัน จดบันทึกข้อมูลการทดสอบทั้งแรงดึง ระยะยืดหรือพื้นที่หน้าตัดที่ลดลงเพื่อนำไปสร้างแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและ



ความเครียด นำชิ้นงานที่วิบัติแล้วมาสังเกตลักษณะการแตกหักเพื่อระบุประเภทของวัสดุ หากโลหะใดสามารถต้านทานแรงดึงได้มากก็จะถือว่ามีความแข็งแรงมาก และถ้าโลหะใดเกิดการยืดเพียงเล็กน้อยก่อนการวิบัติก็จะถือว่ามีความเปราะ ตัวอย่างชิ้นงานเหล็กข้ออ้อยที่วิบัติจากการทดสอบกำลังดึงแสดงในภาพที่ 4.27(ข)



(ก) การติดตั้งชิ้นงานในเครื่องทดสอบ



(ข) การวิบัติของเหล็กข้ออ้อยภายใต้แรงดึง

**ภาพที่ 4.27** การทดสอบกำลังดึงของเหล็กข้ออ้อย

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

### มาตรฐานเหล็กอุตสาหกรรม

มาตรฐานเหล็กอุตสาหกรรมมีขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงคุณสมบัติของเหล็กชนิดต่าง ๆ ที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม มาตรฐานเหล็กอุตสาหกรรมถูกกำหนดขึ้นจากสถาบันชั้นนำของประเทศต่าง ๆ มาตรฐานที่นิยมใช้อ้างอิงได้แก่ มาตรฐานสมาคมเพื่อทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา มาตรฐานสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ประเทศสหรัฐอเมริกา มาตรฐานสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา มาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศเยอรมัน และมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น สำหรับประเทศไทยมีมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยเป็นตัวกำหนดมาตรฐานเหล็กที่ผลิตและจำหน่ายภายในประเทศ รายละเอียดมาตรฐานเหล็กอุตสาหกรรมของสถาบันต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้ (ประสิทธิ์ เวียงแก้ว และฉัตรชัย ลาภรังสิรัตน์. 2554 : 69-82, Mikell P. Groover. 2013 : 94-107 และ RMC. 2005)

### 1. มาตรฐานสมาคมการทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา

มาตรฐานสมาคมเพื่อทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา (ASTM) เป็นมาตรฐานหลักที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมซึ่งหลายประเทศนำไปใช้อ้างอิงเนื่องจากเนื้อหาครอบคลุมรายละเอียดหลายด้าน เช่น แหล่งกำเนิด อัตราส่วนผสม คุณสมบัติและสมบัติของวัสดุ การตรวจสอบ คุณสมบัติและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ และการกำหนดคำนิยามศัพท์และคำอธิบาย เป็นต้น เนื้อหาที่สมาคมเพื่อทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกาคำหนดขึ้นมีหลายระดับ เช่น ข้อกำหนดที่ได้รับการรับรองแล้วซึ่งเรียกว่ามาตรฐาน (Standards) ข้อกำหนดกรณีเร่งด่วนที่ยังไม่ผ่านการรับรองของสมาคมแต่ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการบริหารซึ่งเรียกว่า มาตรฐานกรณีฉุกเฉิน (Emergency Standard: ES) เอกสารที่เผยแพร่ข้อเสนอแนะก่อนการพิจารณาของสมาคมซึ่งเรียกว่า ข้อเสนอแนะ (Proposal : P) และมาตรฐานชั่วคราว (Provisional Standards : PS) เป็นต้น มาตรฐาน ASTM กำหนดสัญลักษณ์แทนกลุ่มของวัสดุจำพวกโลหะออกเป็น 2 กลุ่มคือ A แทนวัสดุโลหะกลุ่มเหล็ก B แทนวัสดุโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ ตามลำดับตัวอย่างเหล็กตามมาตรฐานนี้ เช่น ASTM-A36 เป็นมาตรฐานเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน ASTM-A53 เป็นมาตรฐานท่อเหล็กกล้าและเหล็กผสม ASTM-A269 เป็นมาตรฐานท่อเหล็กกล้าไร้สนิม หรือ ASTM-B633 เป็นมาตรฐานเหล็กเคลือบสังกะสี เป็นต้น

### 2. มาตรฐานสมาคมวิศวกรยานยนต์ประเทศสหรัฐอเมริกา

มาตรฐานสมาคมวิศวกรยานยนต์ (Society of Automotive Engineer : SAE) เป็นมาตรฐานโลหะที่ใช้อ้างอิงในกระบวนการผลิตรถยนต์ของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยสัญลักษณ์ของมาตรฐานนี้จะนำหน้าด้วยอักษร SAE และตามด้วยตัวเลขดัชนีจำนวน 4 ถึง 5 หลัก ตัวอย่างการแปลความหมายของเหล็กมาตรฐานสมาคมวิศวกรยานยนต์ประเทศสหรัฐอเมริกาเช่น เหล็ก SAE4320 เป็นเหล็กกล้าผสมโมลิบดีนัม เมื่อเลข 4 เป็นสัญลักษณ์เหล็กกล้าที่ผสมโมลิบดีนัม เลข 3 เป็นสัญลักษณ์ปริมาณโมลิบดีนัมที่ผสมอยู่ร้อยละ 3 และเลข 20 เป็นสัญลักษณ์ของปริมาณคาร์บอนที่ผสมร้อยละ 0.2 ซึ่งได้มาจากการนำเลข 20 หารด้วย 100 เป็นต้น

### 3. มาตรฐานสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา

มาตรฐานสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา (American Iron and Steel Institute : AISI) เป็นมาตรฐานเหล็กและเหล็กกล้าสำหรับงานอุตสาหกรรมที่ใช้อ้างอิงในประเทศสหรัฐอเมริกา มาตรฐานนี้มีการกำหนดสัญลักษณ์และตัวเลขดัชนีคล้ายกับมาตรฐาน SAE แต่แตกต่างกันตรงที่ตัวอักษรนำหน้าตัวเลขจะบอกถึงกรรมวิธีการผลิตด้วย เช่น AISI E 3310 เป็น

เหล็กกล้าผสมนิเกิลและโครเมียม เมื่อตัวอักษร E เป็นสัญลักษณ์การผลิตจากเตาไฟฟ้าเลข 3 เป็นสัญลักษณ์เหล็กกล้าที่มีนิเกิลและโครเมียมเป็นส่วนผสม เลข 3 เป็นสัญลักษณ์ปริมาณโมลิบดีนัมที่ผสมอยู่ร้อยละ 3 และเลข 10 เป็นสัญลักษณ์ปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ร้อยละ 0.1 ได้จากการนำเลข 10 หารด้วย 100 เป็นต้น

#### 4. มาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศเยอรมัน

มาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศเยอรมัน (German Institute for Standardization หรือ Deutsches Institut für Normung : DIN) แบ่งเหล็กเป็น 4 กลุ่มคือ เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสมต่ำ เหล็กกล้าผสมสูง และเหล็กหล่อ ตามลำดับ รายละเอียดของเหล็กแต่ละกลุ่มมีดังนี้

4.1 เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อยคือ เหล็กกล้าที่สามารถนำไปใช้งานได้เลยและเหล็กกล้าที่ต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก่อนการนำไปใช้งาน ตามลำดับกลุ่มเหล็กกล้าที่สามารถนำไปใช้งานได้เลยมีอักษรย่อคือ ST ตามด้วยตัวเลขดัชนีซึ่งเป็นตัวเลขที่แสดงคุณสมบัติในการต้านทานแรงดึงสูงสุดมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ( $\text{kg/mm}^2$ ) เช่น เหล็ก ST 37 หมายถึงเหล็กกล้าคาร์บอนที่สามารถต้านทานแรงดึงสูงสุด  $37 \text{ kg/mm}^2$  เป็นต้น สำหรับกลุ่มเหล็กกล้าที่ต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก่อนการนำไปใช้งานเป็นเหล็กที่ผลิตขึ้นโดยมีปริมาณคาร์บอนผสมต่างกันจึงต้องผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) เพื่อปรับปรุงให้มีคุณสมบัติตามต้องการ เหล็กกลุ่มนี้จะมีอักษรย่อ C นำหน้าตามด้วยตัวเลขดัชนี ซึ่งเป็นตัวเลขที่แสดงปริมาณคาร์บอนที่เป็นส่วนผสมและสามารถแปลงให้เป็นร้อยละได้โดยการนำ 100 หาร เช่น เหล็ก C 25 หมายถึงเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนผสมร้อยละ 0.25 ซึ่งได้จากการนำเลข 25 หารด้วย 100 เป็นต้น

4.2 เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีธาตุอื่นผสมไม่มากและมีการกำหนดสัญลักษณ์ประกอบด้วย ตัวเลขดัชนีหน้าสุดเป็นตัวเลขที่แสดงปริมาณส่วนผสมของคาร์บอนสามารถแปลงเป็นร้อยละได้โดยการนำ 100 หาร ต่อมาเป็นสัญลักษณ์ของธาตุต่าง ๆ ที่เป็นส่วนผสม และตามด้วยตัวเลขดัชนีแสดงปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่ผสม ตัวเลขดัชนีที่เป็นส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ จะยังไม่ใช่ค่าร้อยละที่แท้จริงแต่จะต้องนำตัวเลขดังกล่าวไปหารด้วยค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าแฟคเตอร์เฉพาะกลุ่มธาตุผสม แฟคเตอร์ดังกล่าวแบ่งเป็น 4 ค่าตามกลุ่มธาตุที่ใช้ผสมดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การกำหนดสัญลักษณ์และความหมายตามมาตรฐาน DIN

| เหล็กกล้าคาร์บอน                   |   |  |  |
|------------------------------------|---|--|--|
| ST                                 | เหล็กกล้าคาร์บอนที่สามารถนำไปใช้งานได้เลย           |  | ตัวเลขต่อท้ายคือ กำลังต้านทานแรงดึงสูงสุด มีหน่วยเป็น kg/mm <sup>2</sup>       |
| C                                  | เหล็กกล้าที่ต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้งาน |  | ตัวเลขต่อท้ายคือ ปริมาณคาร์บอนที่ผสมเปลี่ยนแปลงเป็นร้อยละได้โดยการนำ 100 ไปหาร |
| เหล็กกล้าผสมต่ำ (Low Alloy Steel)  |   |  |  |
| ตัวเลขหน้าคือ                      | Co, Cr, Mn, Ni, St, W                               | ตัวเลขปริมาณที่ผสม (หารด้วยค่าแฟกเตอร์คือ 4)   |  |
| ปริมาณร้อยละ                       | Al, Cu, Mo, Pb, Ti, V                               | ตัวเลขปริมาณที่ผสม (หารด้วยค่าแฟกเตอร์คือ 10)  |  |
| คาร์บอนที่ผสม                      | C, N, P, S  | ตัวเลขปริมาณที่ผสม (หารด้วยค่าแฟกเตอร์คือ 100) |  |
|                                    | Zn, Sn, Mg, Fe                                      | ตัวเลขปริมาณที่ผสม (หารด้วยค่าแฟกเตอร์คือ 1)   |  |
| เหล็กกล้าผสมสูง (high Alloy Steel) |   |  |  |
| X                                  | ตัวเลขปริมาณร้อยละคาร์บอนที่ผสม                     | สัญลักษณ์ธาตุที่ผสม                            | ตัวเลขแสดงปริมาณร้อยละธาตุที่ผสม   |
| เหล็กหล่อ                          |   |  |  |
| GS                                 | เหล็กเหนียวหล่อ                                     | ไม่มีอักษร                                     | ตัวเลขต่อท้ายคือ กำลังต้านทานแรงดึงสูงสุด มีหน่วยเป็น kg/mm <sup>2</sup>       |
| GG                                 | เหล็กหล่อสีเทา                                      |  |  |
| GGG                                | เหล็กหล่อกราฟไฟต์ก้อนกลม                            |  |  |
| GT                                 | เหล็กหล่อเหนียว                                     | C  | ตัวเลขต่อท้ายคือ ปริมาณร้อยละคาร์บอนที่ผสม                                     |
| GTS                                | เหล็กหล่อเหนียวสีดำ                                 |  |  |
| GH                                 | เหล็กหล่อแข็ง                                       |  |  |
| GTW                                | เหล็กหล่อเหนียวสีขาว                                |  |  |
| สัญลักษณ์เพิ่มเติมและความหมาย      |   |  |  |
| B                                  | ผลิตจากเตาเบสซิมเมอร์                               | E  | ผลิตจากเตาไฟฟ้าทั่วไป  |
| F                                  | ผลิตจากเตาน้ำมัน                                    | I  | ผลิตจากเตาไฟฟ้าชนิดเตาเหนียวนำ   |
| LE                                 | ผลิตจากเตาไฟฟ้าชนิดอาร์ค                            | M  | ผลิตจากเตาซีเมนต์มาร์ดินหรือเตาพุดเดิล   |
| T                                  | ผลิตจากเตาโทมัส                                     | TI   | ผลิตโดยกรรมวิธี (Crucible Cast Steel)  |
| W                                  | เผาด้วยอากาศบริสุทธิ์                               | U  | เหล็กที่ไม่ได้ผ่านการกำจัดออกซิเจน   |
| R                                  | เหล็กที่ผ่านการกำจัดออกซิเจน                        | RR   | เหล็กที่ผ่านการกำจัดออกซิเจน 2 ครั้ง   |
| A                                  | ทนต่อการกัดกร่อน                                    | Q  | ตีขึ้นรูปง่าย  |
| X                                  | ผสมสูง  | Z  | รีดได้ง่าย   |

ที่มา : RMC. 2005

ตัวอย่างเหล็กกล้าผสมต่ำ เช่น เหล็ก 20 MnCr 54 หมายถึงเหล็กกล้าผสมต่ำที่มีปริมาณคาร์บอนผสมร้อยละ 0.2 ซึ่งได้จากการนำเลข 20 หารด้วย 100 มีแมงกานีสผสมร้อยละ 1.2 ซึ่งได้จากการนำเลข 5 หารด้วย 4 และโครเมียมผสมร้อยละ 1.0 ซึ่งได้จากการนำเลข 4 หารด้วย 4 หรือเหล็ก 25 CrMo 4 หมายถึงเหล็กกล้าผสมต่ำที่มีปริมาณคาร์บอนผสมร้อยละ 0.25 ซึ่งได้จากการนำเลข 25 หารด้วย 100 มีโครเมียมผสมร้อยละ 1.0 ซึ่งได้จากการนำเลข 4 หารด้วย 4 และไม่มีโมลิบดีนัมผสมจึงไม่มีตัวเลขปรากฏ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีตัวอักษรนำหน้าตัวเลขดัชนีปริมาณคาร์บอนก็ได้ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ที่บ่งบอกกรรมวิธีการผลิต เช่น B คือเหล็กที่ผลิตจากเตาเบสธรรมดา E คือเหล็กที่ผลิตจากเตาไฟฟ้า F คือเหล็กที่ผลิตจากเตาน้ำมัน และ T คือเหล็กที่ผลิตจากเตาโทมัส เป็นต้น

4.3 เหล็กกล้าผสมสูง (High Alloy Steel) เป็นเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุต่าง ๆ ผสมรวมกันมากกว่าร้อยละ 8 มีสัญลักษณ์ประจำกลุ่มคืออักษร X สำหรับวิธีการเขียนสัญลักษณ์ของเหล็กกล้าผสมสูงประกอบด้วย ตัวอักษร X แล้วตามด้วยตัวเลขดัชนีแสดงปริมาณส่วนผสมของคาร์บอนสามารถแปลงเป็นร้อยละได้โดยการนำ 100 ไปหาร ต่อมาเป็นสัญลักษณ์ของธาตุอื่นที่ผสมและตามด้วยตัวเลขดัชนีแสดงปริมาณธาตุแต่ละชนิดที่ผสม ตัวเลขดัชนีที่เป็นส่วนผสมของธาตุอื่นซึ่งเป็นค่าร้อยละที่แท้จริงไม่ต้องหารด้วยแฟกเตอร์อื่นใดเลย เช่น เหล็ก X 35 NiCr 188 หมายถึงเหล็กกล้าผสมสูงมีปริมาณคาร์บอนผสมร้อยละ 0.35 ซึ่งได้จากการนำเลข 35 หารด้วย 100 ส่วนเลข 18 เป็นปริมาณนิกเกิลผสมร้อยละ 18 และเลข 8 เป็นปริมาณโครเมียมที่ผสมร้อยละ 8 เป็นต้น

4.4 เหล็กหล่อเป็นเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนผสมไม่เกินร้อยละ 2.4 และปริมาณซิลิคอนร้อยละ 1-3 นอกจากนั้นเป็นธาตุอื่นผสม การเขียนสัญลักษณ์ของเหล็กหล่อแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่ 1 เป็นการเขียนสัญลักษณ์เพื่อบอกประเภทของเหล็กหล่อไว้ด้านหน้าแล้วตามด้วยตัวเลขดัชนีความต้านทานแรงดึง เช่น เหล็ก GT-52 หมายถึงเหล็กหล่อเหนียวที่สามารถต้านทานแรงดึงได้สูงสุด 52 kg/mm<sup>2</sup> เป็นต้น สำหรับแบบที่ 2 เป็นการเขียนสัญลักษณ์เพื่อบอกประเภทของเหล็กหล่อไว้ด้านหน้าแล้วตามด้วยอักษร C และตัวเลขดัชนีซึ่งเป็นตัวเลขที่แสดงปริมาณคาร์บอนสามารถแปลงเป็นร้อยละได้โดยการนำ 100 ไปหาร เช่น เหล็ก GS-C90 หมายถึงเหล็กหล่อเหนียวมีปริมาณคาร์บอนผสมร้อยละ 0.90 ซึ่งได้จากการนำเลข 90 หารด้วย 100 เป็นต้น

## 5. มาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น

มาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น (Japaness Industrial Standards: JIS) เป็นการจำแนกประเภทเหล็กตามลักษณะการใช้งานภายในประเทศญี่ปุ่น โดยใช้สัญลักษณ์และมีความหมาย

ประกอบด้วย ตัวอักษร JIS ตามด้วยตัวอักษรแสดงกลุ่มผลิตภัณฑ์และถัดมาเป็นตัวเลขดัชนีซึ่งมี 4 ตัว เช่น JIS G 3101 เป็นต้น รายละเอียดสัญลักษณ์และความหมายแสดงในตารางที่ 4.8

**ตารางที่ 4.8** การกำหนดสัญลักษณ์และความหมายตามมาตรฐาน JIS

| สัญลักษณ์และความหมายกลุ่มผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม |                                      |                                     |                       |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| A  | งานวิศวกรรมก่อสร้างและงานสถาปัตยกรรม | K                                   | งานวิศวกรรมเคมี       |
| B  | งานวิศวกรรมเครื่องกล                 | L                                   | งานวิศวกรรมสิ่งทอ     |
| C  | งานวิศวกรรมไฟฟ้า                     | M                                   | แร่                   |
| D  | งานวิศวกรรมรถยนต์                    | P                                   | กระดาษและเยื่อกระดาษ  |
| E  | งานวิศวกรรมรถไฟ                      | R                                   | เซรามิก               |
| F  | งานก่อสร้างเรือ                      | S                                   | สินค้าที่ใช้ภายในบ้าน |
| G  | โลหะประเภทเหล็กและโลหะวิทยา          | T                                   | ยา                    |
| H  | โลหะที่มีไขเหล็ก                     | W                                   | การบิน                |
| ตัวเลขดัชนี 4 หลัก                           |                                      |                                     |                       |
| ตัวเลขหลักที่ 1                              | 0                                    | เรื่องทั่วไป การทดสอบ กฎและข้อกำหนด |                       |
|  | 1                                    | วิธีวิเคราะห์                       |                       |
|  | 2                                    | เหล็กดิบ วัสดุดิบ ธาตุผสม           |                       |
|  | 3                                    | เหล็กคาร์บอน                        |                       |
|  | 4                                    | เหล็กกล้าผสม                        |                       |
| ตัวเลขหลักที่ 2                              | 1                                    | เหล็กกล้าประสมนิเกิลและโครเมียม     |                       |
|  | 2                                    | เหล็กกล้าประสมอลูมิเนียมและโครเมียม |                       |
|  | 3                                    | เหล็กไร้สนิม                        |                       |
|  | 4                                    | เหล็กเครื่องมือ                     |                       |
|  | 8                                    | เหล็กสปริง                          |                       |
|  | 9                                    | เหล็กกล้าทนการกัดกร่อนและความร้อน   |                       |
| ตัวเลขหลักที่ 3 และ 4                        | 01                                   | เหล็กเครื่องมือ คาร์บอน             |                       |
|  | 03                                   | เหล็กไฮสปีด                         |                       |
|  | 04                                   | เหล็กเครื่องมือประสม                |                       |

ที่มา : RMC. 2005

## 6. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยเป็นข้อกำหนดด้านวิชาการที่กำหนดขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการผลิตสินค้าให้มีคุณภาพเหมาะสมกับการใช้งานครอบคลุมประเภท

สินค้าหลายประเภท เช่น อาหาร เครื่องใช้ไฟฟ้า ยานพาหนะ สิ่งทอ และวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น ตัวอย่างข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกี่ยวกับเหล็กตามประเภทและการใช้งาน เช่น มอก.20-2543 เป็นมาตรฐานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตชนิดเหล็กเส้นกลม มอก.24-2548 เป็นมาตรฐานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตชนิดเหล็กข้ออ้อย มอก.528-2548 เป็นมาตรฐานเหล็กกล้าคาร์บอนทรงแบนรีดร้อนสำหรับงานทั่วไปและงานขึ้นรูป และ มอก.1228-2549 เป็นมาตรฐานเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น เป็นต้น

## สรุป

โลหะจัดเป็นวัสดุที่มีความสำคัญในวงการอุตสาหกรรมและการก่อสร้าง โดยโลหะมีโครงสร้างแบบผลึกประกอบด้วยหน่วยเซลล์ซึ่งเป็นกลุ่มของอะตอมที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไอออนิกจึงมีความแข็งแรง โลหะผสมนิยมนำมาผลิตเป็นเครื่องมือและเครื่องจักรมากกว่าโลหะบริสุทธิ์ โลหะผสมแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือโลหะที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบและโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ โลหะผสมที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบยังแยกย่อยเป็น 2 กลุ่มคือเหล็กกล้าและเหล็กหล่ออีกด้วย โดยโลหะที่นิยมนำมาใช้ในการก่อสร้างมักเป็นโลหะผสมที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ คุณสมบัติของโลหะผสมที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบมีความสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนและอุณหภูมิ ถ้าหากมีคาร์บอนผสมในเหล็กไม่เกินร้อยละ 2.0 จะเรียกว่าเหล็กกล้า แต่ถ้ามีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 2.0-6.67 ก็จะเรียกว่าเหล็กหล่อ นอกจากนั้นอุณหภูมิและโครงสร้างผลึกยังเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของคาร์บอนโดยมักอ้างอิงจากแผนภูมิสมดุลของเหล็กกล้าและเหล็กหล่อ

เนื่องจากโลหะแต่ละกลุ่มมีส่วนผสมของธาตุต่างชนิดกันจึงทำให้มีคุณสมบัติต่างกันด้วย นอกจากนั้นเมื่อนำโลหะไปผลิตเป็นชิ้นงานย่อมมีโอกาสเกิดข้อบกพร่องขึ้นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบโลหะ เช่น การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะเป็นวิธีการตรวจสอบรูปร่างผลึกและความบกพร่องภายในเนื้อโลหะ การทดสอบความแกร่งของโลหะเป็นวิธีการทดสอบคุณสมบัติในการดูดซับพลังงาน โดยส่วนใหญ่มักใช้วิธีทดสอบแรงกระแทก การทดสอบความแข็งของโลหะเป็นวิธีการทดสอบความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร และการทดสอบแรงดึงเป็นวิธีการทดสอบที่นิยมใช้ประเมินความแข็งแรงของชิ้นงานโลหะ เป็นต้น ผลจากการทดสอบจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อกำหนดในมาตรฐานต่างๆ เพื่อใช้ในการประเมินคุณภาพโลหะที่ได้จากกระบวนการผลิต ตัวอย่างมาตรฐานเหล็กอุตสาหกรรมของสถาบันชั้นนำที่นิยมใช้อ้างอิง เช่น มาตรฐานสมาคมเพื่อทดสอบและวัสดุแห่งอเมริกา มาตรฐานสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ประเทศสหรัฐอเมริกา มาตรฐานสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งอเมริกา มาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศเยอรมัน และมาตรฐานอุตสาหกรรม



ประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น สำหรับประเทศไทยจะใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทยเป็นตัวกำหนดมาตรฐานหลักที่ผลิตและจำหน่ายภายในประเทศ

### คำถามทบทวน

1. เหล็กกล้าคาร์บอนมีคุณสมบัติอย่างไรและเหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นชิ้นงานอะไรบ้าง
2. เหล็กหล่อแตกต่างจากเหล็กกล้าอย่างไร
3. จงอธิบายโครงสร้างผลึกของโลหะแบบ BCC และ FCC พร้อมทั้งยกตัวอย่างโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้
4. จงอธิบายความไม่สมบูรณ์ของผลึกโลหะในลักษณะความบกพร่องแบบจุด
5. จงอธิบายลำดับขั้นการเกิดผลึกในโลหะภายใต้กระบวนการเย็นตัว
6. ความแกร่งของโลหะคืออะไรและมีวิธีทดสอบอย่างไร
7. อุณหภูมิมีผลต่อความแกร่งของโลหะอย่างไร
8. จงอธิบายขั้นตอนการทดสอบความแข็งของโลหะวิธีบาโคล
9. การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์แตกต่างจากการทดสอบแบบบริเนลล์อย่างไร
10. เหล็กเส้นในงานคอนกรีตเสริมเหล็กควรเป็นเหล็กชนิดใดและควรมีคุณสมบัติอย่างไร

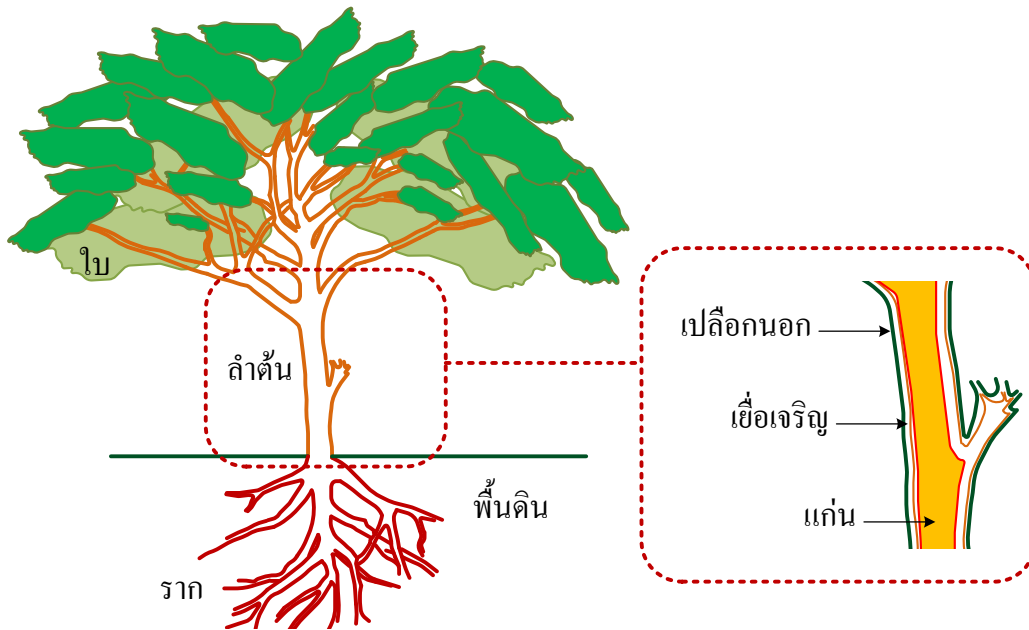
## บทที่ 5

### ไม้

ไม้เป็นวัสดุธรรมชาติที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายนับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ถึงแม้ว่าไม้แปรรูปจะมีราคาสูงขึ้นเนื่องจากทรัพยากรป่าไม้ลดลงจนมีการคิดค้นวัสดุชนิดใหม่ขึ้นมาทดแทนแต่ความต้องการใช้ไม้ก็ยังคงมีอยู่อย่างต่อเนื่อง ไม้สามารถใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างได้หลากหลายรูปแบบทั้งใช้เป็นโครงสร้างหลักหรือเพื่อการตกแต่ง นอกจากนี้ไม้แปรรูปแล้วอุตสาหกรรมไม้ยังนำเศษไม้มาคิดค้นเป็นวัสดุชนิดใหม่เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน เช่น วัสดุแผ่นบางจากไม้ ไม้เชิงประกอบ และไม้เสริมเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในการนำไม้หรือผลิตภัณฑ์จากไม้ไปใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุดจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติพื้นฐานและข้อจำกัดต่าง ๆ ตลอดจนการเรียนรู้วิธีการรักษาเนื้อไม้เพื่อยืดอายุการใช้งาน ดังนั้นบทนี้จึงขอแนะนำเสนอความรู้ที่เกี่ยวข้องกับไม้โดยมีเนื้อหาประกอบด้วย โครงสร้างต้นไม้ เซลล์ไม้ การเลื่อยไม้ คำหยาของไม้ ปริมาณความชื้นในไม้ คุณสมบัติและการทดสอบไม้ การรักษาเนื้อไม้ และผลิตภัณฑ์จากไม้ ตามลำดับ

#### โครงสร้างต้นไม้

กวี หวังนิเวศน์กุล (2552 : 29) และ พงศ์พันธ์ วรสุนทรโรตถ และวรวงศ์ วรสุนทรโรตถ (2555:11)กล่าวว่าไม้ (Wood) เป็นวัสดุธรรมชาติที่เกิดจากการแปรรูปต้นไม้มิมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ราก ลำต้น และใบ ตามลำดับ รากเป็นส่วนที่อยู่ใต้พื้นดินมีหน้าที่ดูดน้ำและสารอาหารซึ่งเป็นของเหลวจากพื้นดินผ่านไปยังลำต้น นอกจากนี้รากที่ฝังลึกลงไปในพื้นที่ดินยังทำหน้าที่ยึดลำต้นให้ทรงตัวอยู่ได้ รากจะมีขนาดใหญ่บริเวณใกล้ลำต้นและจะมีขนาดเล็กลงเมื่ออยู่ห่างออกไป ลำต้นเป็นโครงสร้างหลักของต้นไม้ที่อยู่เหนือพื้นดินมีความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่น ลำต้นทำหน้าที่ยึดกิ่งก้านเพื่อรับแสงอาทิตย์และลำเลียงสารอาหารจากรากไปที่กิ่งก้าน สำหรับใบมีสารสีเขียวเรียกว่า คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ทำหน้าที่สังเคราะห์แสงเพื่อปรุงสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตและสารอินทรีย์ สารอาหารจะถูกส่งต่อไปยังเนื้อเยื่อเจริญที่อยู่ภายในส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้มิ โครงสร้างของต้นไม้มิหากพิจารณาจากภาพตัดตามยาวของลำต้นดังแสดงในภาพที่ 5.1 พบว่าด้านนอกสุดเป็นเปลือกนอกทำหน้าที่ป้องกันลำต้น ถัดมาเป็นเนื้อเยื่อเจริญที่อยู่ล้อมรอบแก่นและมีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของต้นไม้มิ ด้านในสุดเป็นแก่นซึ่งมีความแข็งแรงทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักในการต้านทานแรงลม



ภาพที่ 5.1 โครงสร้างต้นไม้

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. 2558

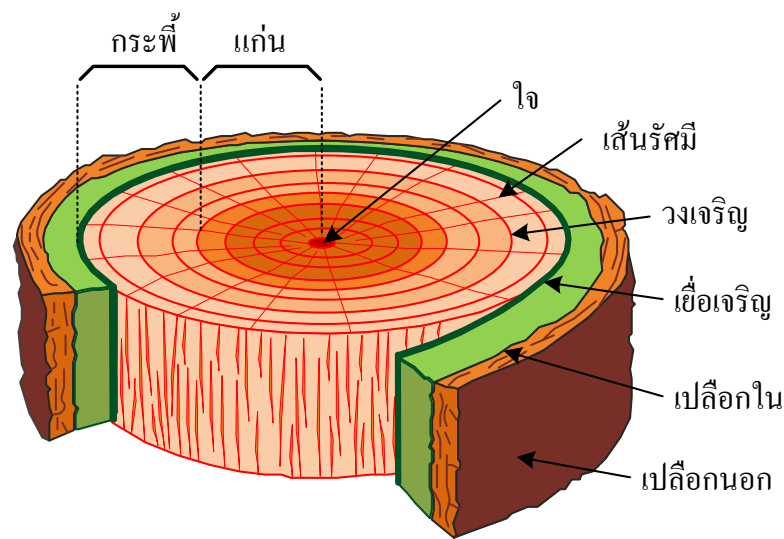
ต้นไม้หากพิจารณาจากภาพตัดขวางของลำต้นพบว่ามีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 5.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (กวี หวังนิเวศน์กุล. 2552 : 29-30, พงศ์พันธ์ วรรณทโรสถ และวรพงศ์ วรรณทโรสถ. 2555 : 11-13, 19-21, Ash Ahmed and John Sturges. 2015 : 242-244 และ Duggal S.K. 2008 : 95-96)

### 1. เปลือก

เปลือก (Bark หรือ Cortex) เป็นส่วนที่ห่อหุ้มลำต้นด้านนอกสุดแบ่งเป็นเปลือกนอก (Outer Bark หรือ Periderm) และเปลือกใน (Inner Bark หรือ Living Phloem) เปลือกนอกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ เปลือกนอกสุดเรียกว่า คอร์ก (Cork) เป็นชั้นเซลล์ที่เคยเจริญเติบโตมาก่อนแล้วตายลง และถัดมาเป็นชั้นคอร์กแคมเบียม (Cork Cambium) ซึ่งจัดเป็นเปลือกชั้นนอกที่มีการสร้างเนื้อเยื่อเจริญทางด้านข้างและแบ่งเซลล์ออกสู่ด้านนอก เปลือกนอกทำหน้าที่ป้องกันลำต้นจากผลกระทบภายนอกทั้งการขัดสีจากสัตว์หรือธรรมชาติ ตลอดจนเป็นฉนวนป้องกันลำต้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เช่น ไฟป่า หรือหิมะ เป็นต้น ส่วนเปลือกในเป็นส่วนที่มีการเจริญเติบโตและอยู่ถัดจากเปลือกนอกเข้ามาด้านในลำต้น เปลือกในทำหน้าที่ช่วยป้องกันลำต้นจากผลกระทบภายนอกและลำเลียงสารอาหารไปยังส่วนต่าง ๆ

## 2. เยื่อเจริญ

เยื่อเจริญหรือแคมเบียม (Cambium) เป็นชั้นบางของเซลล์ที่ต่อต้านภัยอาหารจำนวนมากที่ยังมีชีวิตอยู่และมีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เนื่องจากสารอาหารเป็นของเหลวจึงทำให้ชั้นเยื่อเจริญมีความชื้นมากกว่าส่วนอื่นของลำต้น การเติบโตของเซลล์คือการขยายขนาดเซลล์รวมถึงการเพิ่มจำนวนด้วยการแบ่งเซลล์ทั้งในแนวตั้งและในแนวราบ โดยส่วนใหญ่ชั้นของเยื่อเจริญจะกลายเป็นเนื้อไม้ที่ซ้อนกันเป็นวงรอบลำต้นและบางส่วนจะกลายเป็นเปลือกไม้ชั้นใน การเจริญเติบโตจะเกิดขึ้นมากในฤดูฝนแต่จะลดลงในฤดูร้อน



ภาพที่ 5.2 ภาพตัดขวางลำต้นของต้นไม้และส่วนประกอบต่าง ๆ

ที่มา : One Stop Construct. n.d.

## 3. กระจัง

กระจัง (Sapwood) เป็นเนื้อไม้ส่วนที่อยู่ถัดจากเยื่อเจริญเข้ามาด้านในลำต้น กระจังเกิดจากการเปลี่ยนสภาพของเยื่อเจริญที่มีอายุมากขึ้น เมื่อเยื่อเจริญบางส่วนมีอายุมากจะทำให้ต่อต้านภัยอาหารเสื่อมสภาพจนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแต่มีคุณสมบัติทางกลดีขึ้น เนื้อไม้ในส่วนนี้ยังคงมีต่อต้านภัยอาหารที่ยังมีชีวิตอยู่โดยจะมีมากบริเวณใกล้ชั้นเยื่อเจริญและจะลดลงตามความหนาของกระจัง นอกจากนั้นกระจังยังทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของลำต้นและเป็นที่ยึดเกาะสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตและสารอินทรีย์ที่ได้จากการสังเคราะห์แสง ความหนาของเนื้อไม้ส่วนกระจังนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญเติบโตของต้นไม้

#### 4. แก่น

แก่น (Heartwood) เป็นเนื้อไม้ส่วนที่อยู่ถัดจากกระพี้ทำหน้าที่เป็น โครงสร้างหลักของ ลำต้น แก่นประกอบด้วยชั้นเซลล์ที่ตายแล้วเป็นเวลานานจนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทำให้ คุณสมบัติทางกลดีกว่ากระพี้ สีของแก่นจะมีสีเข้มกว่ากระพี้เนื่องจากเซลล์ที่ตายเป็นเวลานานจะมี สารเคมีตกค้างอยู่ภายในและเซลล์อยู่ชิดกันเนื่องจากมีแรงกดดันของเซลล์ที่กำลังเจริญเติบโต ด้านนอก แก่นเป็นเนื้อไม้ส่วนที่แข็งที่สุดของลำต้นนิยมนำไปใช้ทำโครงสร้างอาคาร เช่น คาน ตง เสา และพื้น เป็นต้น

#### 5. วงเจริญ

วงเจริญ (Growth Ring) หรือเรียกว่า วงปี (Annual Growth Ring) เป็นแนวเส้นที่อยู่ ล้อมรอบลำต้นมีลักษณะเป็นวงซ้อนกัน แต่ละวงเกิดจากการเจริญเติบโตของชั้นเนื้อไม้ที่ แตกต่างกันตามฤดูกาลในแต่ละปี ถ้าปีใดต้นไม้เจริญเติบโตได้ดีก็จะทำให้ความหนาของวงเจริญ มากกว่าช่วงที่โตช้า นอกจากนั้นอายุของต้นไม้ยังสามารถประมาณได้จากจำนวนของวงเจริญที่ ปรากฏบนหน้าตัดของลำต้น

#### 6. เส้นรัศมี

เส้นรัศมี (Wood Ray) เป็นเซลล์ที่เจริญเติบโตทางขวางของลำต้นโดยมีทิศทางการ ขยายตัวจากกลางลำต้นไปยังด้านนอกมองเห็นในลักษณะเป็นแนวรัศมี เส้นรัศมีทำหน้าที่ช่วย ขีดโครงสร้างของลำต้นและลำเลียงสารอาหาร นอกจากนั้นเส้นรัศมียังสามารถใช้บ่งบอกชนิด ของไม้ได้อีกด้วย เช่น ไม้เนื้อแข็งส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเส้นรัศมีที่มีการเรียงตัวของเซลล์สอง แถวหรือมากกว่า แต่ในไม้กฤษณาและไม้ตะแบกใหญ่กลับมีการเรียงตัวของเซลล์แถวเดียว คล้ายไม้เนื้ออ่อน เป็นต้น

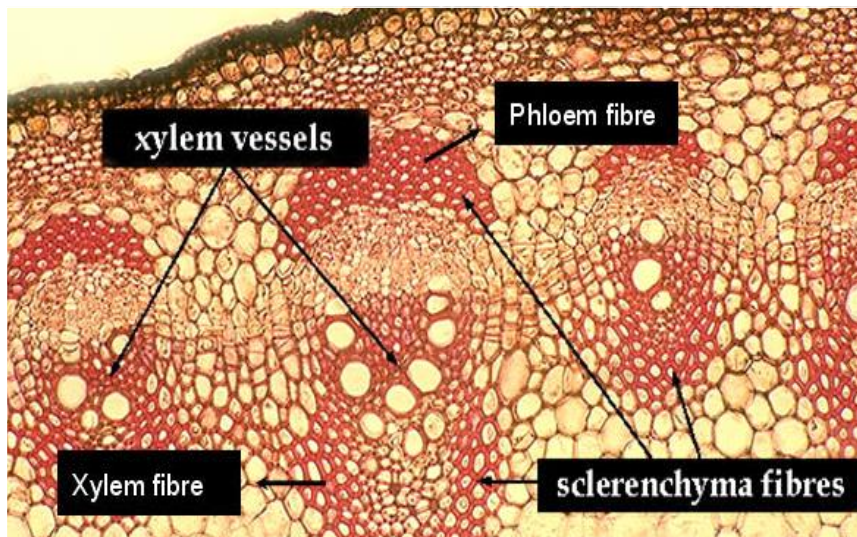
#### 7. ใจ

ใจ (Pith) หรือไส้ไม้เป็นเซลล์ที่ตายเป็นเวลานานบริเวณกลางลำต้นหรือเป็นไส้ที่อยู่ด้าน ในสุดของแก่นไม้ ในกรณีที่ไม่มียูมาใจอาจกลายเป็นโพรงเนื่องจากเซลล์เสื่อมสลาย

### โครงสร้างเนื้อไม้

สุภาวดี นาห้วนนิล(2547)กล่าวว่าเนื้อไม้ประกอบด้วยเซลล์ของสิ่งมีชีวิต (Cellular Material) ที่ไม่ได้เกิดจากเซลล์เพียงชนิดเดียวแต่ประกอบด้วยเซลล์หลายชนิดที่มีคุณสมบัติการ ดูดซับน้ำและคุณสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน ถ้าพิจารณาเซลล์เหล่านั้นตามทิศทางการทอดตัว สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เซลล์ไม้เป็นเซลล์ที่ทอดตัวไปตามแนวยาวของลำต้น และเซลล์ รัศมีเป็นเซลล์ที่ทอดตัวไปตามแนวขวางลำต้น เซลล์จำนวนหลายเซลล์เมื่อมารวมตัวกันก็จะ

กลายเป็นเนื้อเยื่อ ชนิดของเนื้อเยื่อตามลักษณะการเจริญเติบโตแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ เนื้อเยื่อเจริญ เป็นกลุ่มเซลล์ที่มีการเจริญเติบโตและมีการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส (Mitosis) และเนื้อเยื่อถาวร เป็นกลุ่มเซลล์ที่ยังมีชีวิตอยู่แต่ไม่สามารถแบ่งตัวเพื่อเพิ่มจำนวนได้ เมื่อเนื้อเยื่อกลุ่มต่าง ๆ มารวมตัวกันก็จะกลายเป็นระบบเนื้อเยื่อและอวัยวะ หากพิจารณาเนื้อเยื่อที่มารวมตัวกันตาม ลักษณะการทำงานจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 ระบบเนื้อเยื่อท่อหุ้มหรือเส้นใย (Fibre) เป็นกลุ่มเนื้อเยื่อที่รวมตัวกันอยู่บริเวณนอกสุดมีความแข็งแรงทำหน้าที่ปกคลุมเนื้อเยื่อที่อยู่ ด้านใน ส่วนกลุ่มที่ 2 คือระบบเนื้อเยื่อท่อลำเลียง (Vessel) เป็นกลุ่มเนื้อเยื่อที่รวมตัวกันเพื่อทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและสารอาหาร เมื่อระบบเนื้อเยื่อที่ทำหน้าที่เฉพาะต่างกันมารวมเข้าด้วยกันก็จะกลายเป็นเนื้อไม้ ภาพที่ 5.3 เป็นตัวอย่างโครงสร้างเนื้อเยื่อของไม้



ภาพที่ 5.3 โครงสร้างเนื้อเยื่อของไม้

ที่มา : Wood. 2551

เนื้อเยื่อของไม้ยังสามารถแยกย่อยออกได้อีกหลายชนิด เช่น เนื้อเยื่อเจริญที่ทำหน้าที่ขยายขนาดลำต้นเรียกว่า เนื้อเยื่อเจริญด้านข้างซึ่งมีได้ทั้งในระบบเนื้อเยื่อท่อหุ้มและระบบเนื้อเยื่อท่อลำเลียง ถ้าเนื้อเยื่อเจริญด้านข้างเกิดขึ้นในชั้นท่อหุ้มจะเรียกว่าคอร์กแคมเบียมและถ้าเกิดภายในท่อลำเลียงจะเรียกว่า แวสคิวลาแคมเบียม (Vascular Cambium) สำหรับเนื้อเยื่อถาวร ซึ่งเป็นกลุ่มเซลล์ที่ไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้แต่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อยคือเนื้อเยื่อถาวรเชิงเดี่ยวและเนื้อเยื่อถาวรเชิงซ้อน รายละเอียดของเนื้อเยื่อแต่ละชนิดมีดังนี้ (พงศัพันธ์ วรสุนทโรสถ และวรพงษ์ วรสุนทโรสถ .2555:14-18,พิภพสุนทรสมัย. 2540 : 6-9 และ Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 416)



### 1. เอพิเดอร์มิส

เอพิเดอร์มิส (Epidermis) เป็นเนื้อเยื่อถาวรเชิงเดี่ยวที่อยู่ชั้นนอกสุดประกอบด้วยเซลล์รูปร่างกลมหรือเหลี่ยมยาว ส่วนใหญ่ผนังเซลล์ด้านนอกจะหนากว่าด้านในและมักไม่พบช่องว่างระหว่างเซลล์ เอพิเดอร์มิสส่วนใหญ่มีการเรียงตัวของเซลล์เพียงชั้นเดียวและมีสารคิวทินซึ่งเป็นสารจำพวกไขมันเคลือบอยู่ด้านนอก ต้นไม้ที่เกิดในพื้นที่แห้งแล้งมักมีชั้นคิวทินเคลือบหนาเพื่อรักษาน้ำที่อยู่ภายใน โดยทั่วไปเอพิเดอร์มิสไม่มีคลอโรพลาสต์จึงสังเคราะห์แสงไม่ได้

### 2. พARENไคมา

พARENไคมา (Parenchyma) เป็นเนื้อเยื่อถาวรเชิงเดี่ยวที่ประกอบด้วยเซลล์ขนาดค่อนข้างใหญ่ที่ยังมีชีวิตอยู่ทำหน้าที่สะสมน้ำและสารอาหาร ผนังเซลล์ชั้นแรกมีลักษณะบางและเซลล์มีลักษณะเป็นทรงกระบอกโดยมีหน้าตัดหลายรูปแบบ เช่น กลม รี หรือหลายเหลี่ยม เป็นต้น พARENไคมามีเซลล์หลายรูปแบบมาเรียงตัวกันจึงมักเกิดช่องว่างระหว่างเซลล์และบางชนิดอาจมีคลอโรพลาสต์ พARENไคมามักพบตามลำต้นและรากของต้นไม้ เช่น บริเวณเปลือกไม้ด้านในหรือใจไม้ เป็นต้น

### 3. คอลเลนไคมา

คอลเลนไคมา (Collenchyma) เป็นเนื้อเยื่อถาวรเชิงเดี่ยวที่ประกอบด้วยเซลล์รูปร่างรียาวมีผนังเซลล์หนาทำหน้าที่สร้างความแข็งแรงให้กับต้นไม้ คอลเลนไคมาเป็นเนื้อเยื่อกลุ่มเดียวกับพARENไคมาที่มีคลอโรพลาสต์เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่ที่ยังคงมีชีวิตอยู่ เนื้อเยื่อนี้พบได้ทั่วไปในลำต้นและก้านใบ ทั้งนี้ผนังเซลล์ที่มีความแข็งแรงของคอลเลนไคมาเกิดจากการสะสมของเซลลูโลสและเพกติน

### 4. สเคลเรนไคมา

สเคลเรนไคมา (Sclerenchyma) เป็นเนื้อเยื่อถาวรเชิงเดี่ยวที่ประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนินเมื่อเจริญเต็มที่แล้วจะไม่มีชีวิต ผนังเซลล์หนามากโดยเฉพาะผนังเซลล์ชั้นที่สองเมื่อเจริญเต็มที่ที่จะเกิดเป็นช่องว่างภายในเซลล์ มักพบเนื้อเยื่อกลุ่มนี้ปะปนกับเซลล์ชนิดอื่นในลำต้นทำหน้าที่ให้ความแข็งแรง สเคลเรนไคมาแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เซลล์เส้นใยซึ่งมีลักษณะเรียวยาว ผนังเซลล์หนามักอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม และเซลล์หินซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเซลล์เส้นใยโดยมีรูปร่างไม่ยาวมากนักแต่มีความแข็งแรงมาก

### 5. ไซเลม

ไซเลม (Xylem) เป็นเนื้อเยื่อถาวรเชิงซ้อนทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและแร่ธาตุที่อยู่ในรูปของเหลวจากรากผ่านลำต้นไปยังส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ ไซเลมบางกลุ่มทำหน้าที่ลำเลียงแร่ธาตุ

ไปทางด้านข้างของลำต้น โดยมีเซลล์เรียงตัวเป็นแถวในแนวรัศมีเรียกว่า พาเรนไคมารัศมีหรือ ไชเลมรัศมี เนื้อเยื่อที่พบมากในไชเลมเป็นเซลล์ลำเลียงน้ำซึ่งประกอบด้วยเซลล์ท่อลำเลียงและ เทรคีด (Tracheid) อยู่รวมกันเป็นมัด เซลล์ท่อลำเลียงเป็นเซลล์ที่มีรูปร่างคล้ายท่อสั้นส่วนปลายของเซลล์จะถูกกั้นด้วยแผ่นรูพรุน ผนังเซลล์ชั้นที่สองหนาเนื่องจากมีเซลลูโลสและลิกนิน เคลือบแต่การเคลือบไม่สม่ำเสมอจึงทำให้ผนังมีหลายรูปแบบ เช่น แบบแนววงแหวน แบบขดเกลียว แบบตาข่าย แบบขั้นบันได และแบบรู เป็นต้น สำหรับเทรคีดเป็นเซลล์ที่มีรูปร่างคล้ายท่อ มีปลายเซลล์แหลมปิดทั้งสองด้านไม่มีแผ่นรูพรุน ผนังเซลล์หนาคลายกับเวสเซลเมมเบอร์และมีหลายรูปแบบ แต่ที่พบมากเป็นผนังแบบขอบรูใช้ในการลำเลียงน้ำไปยังเซลล์ที่อยู่ข้างเคียง ทั้งนี้ ไชเลมยังประกอบไปด้วยไชเลมพาเรนไคมาและไชเลมไฟเบอร์ โดยที่ไชเลมพาเรนไคมาเป็นเซลล์ที่มีชีวิตของพาเรนไคมาที่มารวมตัวกันอยู่ในไชเลม ผนังเซลล์ของไชเลมพาเรนไคมาจะหนาเพื่อทำหน้าที่สะสมสารอาหารและลำเลียงแร่ธาตุ สำหรับไชเลมไฟเบอร์เป็นเซลล์เส้นใยที่มีรูปร่างเรียวยาวปลายแหลมมีผนังเซลล์หนาทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ต้นไม้เมื่อเจริญเต็มที่แล้วจะไม่มีชีวิต

## 6. โพลेम

โพลेम (Phloem) เป็นเนื้อเยื่อถาวรเชิงซ้อนที่อยู่บริเวณเปลือกชั้นในลำต้นทำหน้าที่ลำเลียงสารอินทรีย์ไปยังส่วนต่าง ๆ ของต้นไม้ โพลेमประกอบด้วย ซีฟเอลิเมนต์ คอมพานีเยนเซลล์ โพลेमไฟเบอร์ และโพลेमพาเรนไคมา ตามลำดับ ซีฟเอลิเมนต์ (Sieve Element) เป็นเซลล์ผนังบางที่มีชีวิตภายในบรรจุโปรตีนเป็นจำนวนมาก ปลายผนังเซลล์ทั้งสองด้านมีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายแผ่นตะแกรงมีไซโตพลาสซึมเชื่อมระหว่างเซลล์ข้างเคียง การเชื่อมต่อทำให้สามารถลำเลียงสารอาหารระหว่างซีฟเอลิเมนต์ข้างเคียงได้ คอมพานีเยนเซลล์ (Companion Cell) จัดเป็นพาเรนไคมาพิเศษที่เซลล์มีลักษณะคล้ายกับซีฟเอลิเมนต์แต่มีขนาดเล็กกว่า คอมพานีเยนเซลล์มักอยู่ติดกับซีฟเอลิเมนต์โดยผนังเซลล์ที่อยู่ติดกันจะมีรูขนาดเล็กเชื่อมต่อกันทำหน้าที่ช่วยเหลือซีฟเอลิเมนต์ในการลำเลียงสารอาหาร ส่วนโพลेमไฟเบอร์ (Phloem Fibre) เป็นเซลล์เส้นใยมีรูปร่างเรียวยาวมีผนังเซลล์หนาทำหน้าที่สร้างความแข็งแรงให้กับต้นไม้และโพลेमพาเรนไคมา (Phloem Parenchyma) เป็นเซลล์ผนังบางที่มีชีวิตทำหน้าที่เก็บสะสมสารอาหาร

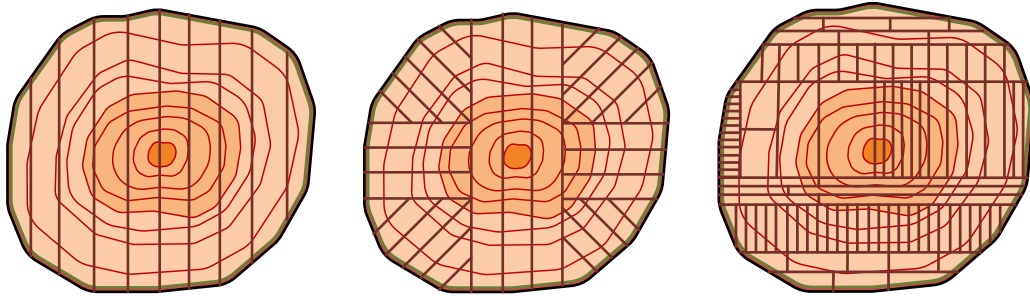
## การเลื่อยไม้และตำหนิของไม้แปรรูป

ต้นไม้ขนาดใหญ่เมื่อถูกโค่นและตัดให้เป็นท่อนเพื่อการขนย้ายจะเรียกว่า ชุง (Log) ท่อนชุงเมื่อถูกตัดใหม่จะมีความชื้นจำนวนมากแทรกอยู่ในเปลือกไม้และเนื้อไม้ เมื่อปล่อยให้ ความชื้นระเหยออกจากท่อนชุงก็จะทำให้เนื้อไม้แห้งและหดตัว ในขณะที่เดียวกันเปลือกไม้ก็

จะแห้งและหดตัวด้วยจึงทำให้แยกเปลือกออกจากท่อนซุงได้ง่าย การนำท่อนซุงมาเลื่อยหรือผ่า เพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการเรียกว่า ไม้แปรรูป (Lumber) การแปรรูปอาจทำในขณะที่ท่อนซุงยังชื้นอยู่หรือแห้งแล้วก็ได้ แต่การเลื่อยไม้ขณะที่เนื้อไม้ยังชื้นอยู่จะส่งผลทำให้ไม้แปรรูปเกิดการเสียวหรือเกิดตำหนิได้ วิธีการเลื่อยไม้และตำหนิที่เกิดกับไม้แปรรูปมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (กวี หวังนิเวศน์กุล, 2552 : 30-32, พงศ์พันธ์ วรรณทโรสถ และวรพงษ์ วรรณทโรสถ, 2555 : 17, 33-37, พิภพ สุนทรสมัย, 2540 : 10, 12-14, Ash Ahmed and John Sturges, 2015 : 251-255 และ Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski, 2011 : 421-429)

### 1. การเลื่อยไม้

การเลื่อยไม้ (Cutting Techniques) เป็นการผ่าท่อนซุงออกเป็นไม้แปรรูปตามขนาดที่ต้องการ ไม้แปรรูปโดยทั่วไปจะเป็นไม้ท่อนยาวหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม ดังนั้นการผ่าท่อนซุงจึงมักเลื่อยไปตามแนวยาวของลำต้นหรือแนวขนานเส้น เพื่อให้ได้ไม้แปรรูปท่อนยาว แต่ถ้านำท่อนซุงมาตัดตามแนวขวางลำต้นก็จะได้ไม้แปรรูปในแนวตั้งฉากเส้น แนวเส้นไม้มีผลอย่างมากต่อการรับแรงและการหดตัวของไม้แปรรูป โดยไม้จะรับแรงได้ดีในแนวขนานเส้น แต่ในแนวตั้งฉากเส้นจะรับแรงได้ลดลง การหดตัวของเนื้อไม้เนื่องจากการสูญเสียความชื้นในแนวตั้งฉากเส้นจะมีค่ามากกว่าแนวขนานเส้น ดังนั้นในการเลื่อยไม้จึงต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย การเลื่อยไม้มี 3 รูปแบบหลักคือ การผ่าแบน การผ่าสี่ส่วน และการผ่าผสม



(ก) การผ่าแบน

(ข) การผ่าสี่ส่วน

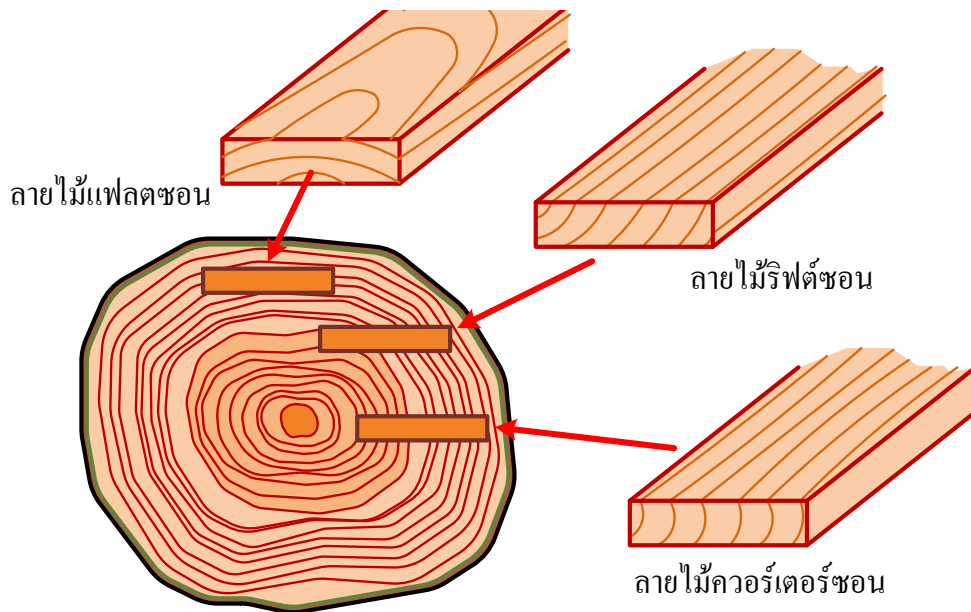
(ค) การผ่าผสม

ภาพที่ 5.4 การผ่าซุงแบบต่าง ๆ

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski, 2011 : 422

การผ่าแบน (Flat Sawing) ดังแสดงในภาพที่ 5.4(ก) เป็นรูปแบบการผ่าซุงที่ง่ายและประหยัดต้นทุนที่สุด วิธีการผ่าจะนำท่อนซุงมาเลื่อยในแนวขนานกันตลอดหน้าตัด ไม้แปรรูปที่ได้จะมีลักษณะคล้ายแผ่นกระดาษที่มีความหนาเท่ากันตลอดความยาว การผ่าสี่ส่วน (Quarter

Sawing) ดังแสดงในภาพที่ 5.4(ข) เป็นการนำท่อนซุงมาเลื่อยตามแนวยาวเพื่อแบ่งซุงออกเป็น 4 ส่วนก่อน จากนั้นนำซุงแต่ละส่วนมาเลื่อยในแนวขนานไปตามรัศมีลำต้น ขั้นตอนการผ่าสี่ส่วน มีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองแต่ไม้แปรรูปที่ได้จะมีคุณภาพดีและหดตัวน้อย สำหรับการผ่าผสม (Combination Sawing) ดังแสดงในภาพที่ 5.4(ค) เป็นการนำวิธีการผ่าไม้ทั้งสองวิธีมาใช้ร่วมกัน เพื่อให้ได้ไม้แปรรูปปริมาณมากที่สุด ไม้แปรรูปที่ได้จากการผ่าผสมจะมีคุณภาพและขนาดที่แตกต่างกันตามลักษณะของท่อนซุง



ภาพที่ 5.5 ลายไม้ในลักษณะต่าง ๆ

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 422

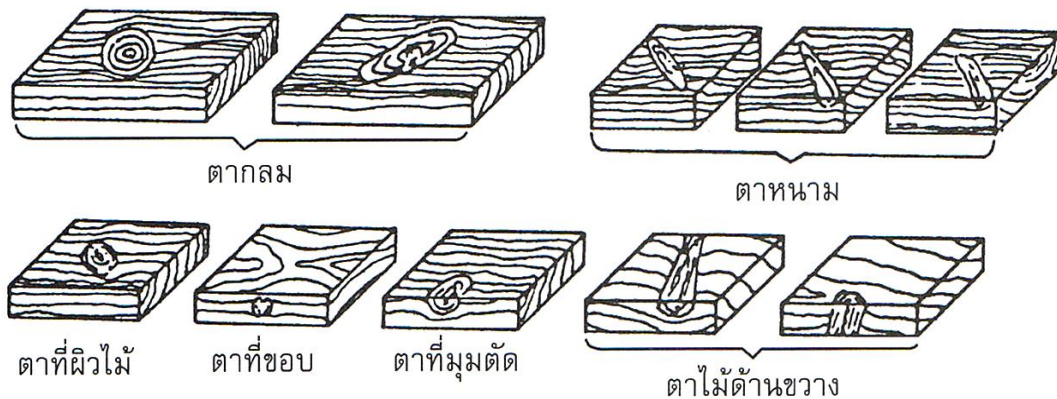
ไม้แปรรูปที่ได้จากการเลื่อยท่อนซุงแต่ละตำแหน่งจะทำให้เกิดแนวเส้นที่ขอบแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 5.5 แนวเส้นหรือลายไม้ที่อยู่บนผิวไม้แปรรูปสามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ ลายไม้แบบแฟลตซอน (Flat Sawn) เป็นลายไม้ที่มีแนวเส้นวงปีโค้งไปตามความกว้างของท่อนไม้แปรรูป เมื่อมองหน้าตัดขวางบริเวณปลายไม้แปรรูปจะเห็นลายไม้ทำมุมไม่เกิน 30 องศา ลายไม้แบบริฟต์ซอน (Rift Sawn) เป็นลายไม้ที่มีแนวเส้นวงปีขนานไปตามความยาวของท่อนไม้แปรรูป เมื่อมองหน้าตัดขวางบริเวณปลายไม้จะเห็นลายไม้เอียงทำมุมระหว่าง 30-60 องศา และลายไม้แบบควอเตอร์ซอน (Quarter Sawn) เป็นลายไม้ที่มีแนวเส้นวงปีขนานไปตามความยาวของท่อนไม้แปรรูป เมื่อมองหน้าตัดขวางจะเห็นลายไม้เอียงทำมุมระหว่าง 60-90 องศา

## 2. คำหนิของไม้แปรรูป

คำหนิของไม้แปรรูป (Defects in Lumber) เป็นจุดบกพร่องที่เกิดกับไม้แปรรูปซึ่งมีผลต่อความสมบูรณ์ของชิ้นงานและคุณสมบัติทางกล คำหนิของไม้แปรรูปแบ่งออกเป็น 4 สาเหตุคือ คำหนิที่เกิดจากผลด้านกายภาพ คำหนิที่เกิดจากผลด้านชีววิทยา คำหนิที่เกิดจากผลทางกล และคำหนิที่เกิดจากผลด้านเคมี ตามลำดับ รายละเอียดคำหนิของไม้แปรรูปมีดังต่อไปนี้

2.1 คำหนิที่เกิดจากผลด้านกายภาพเป็นจุดบกพร่องที่เกิดกับเนื้อไม้จากการสูญเสียความชื้นหรืออาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของต้นไม้ เช่น ตาไม้ การแตกร้าว การบิด หรือการโค้งงอ เป็นต้น รายละเอียดคำหนิที่เกิดจากผลด้านกายภาพมีดังนี้

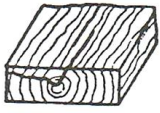
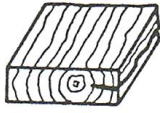
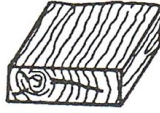




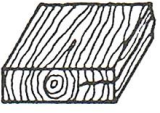

ตาไม้ (Knots) เป็นคำหนิที่เกิดจากแขนงของกิ่งไม้ที่ยื่นออกจากลำต้นส่งผลต่อการรับแรงดึงและการตัดโค้งของไม้แปรรูป เมื่อนำท่อนไม้ไปใช้ทำเป็นชิ้นส่วนรับแรงดึงหรือรับโมเมนต์คดจะส่งผลให้ส่วนที่เป็นตาคาหลุดออกจนทำให้ท่อนไม้นั้นสูญเสียพื้นที่หน้าตัดและสูญเสียความแข็งแรง ลักษณะคำหนิจากตาไม้มีหลายแบบ เช่น ตาที่ผิวไม้ ตาที่ขอบไม้ ตากลม ตาหนาม และตากลม เป็นต้น ภาพที่ 5.6 แสดงลักษณะตาไม้ชนิดต่าง ๆ ที่เกิดกับไม้แปรรูป



ภาพที่ 5.6 คำหนิจากตาไม้

ที่มา : พงศ์พันธ์ วรสุนทรโรสถ และวรวงศ์ วรสุนทรโรสถ, 2544 : 36

รอยร้าว (Shakes) เป็นคำหนิที่เกิดจากรอยแยกตามแนวเส้นไม้และแนววงปี รอยแยกนี้เกิดขึ้นกับต้นไม้มาก่อนการแปรรูปแล้วมีการโยกหรือสั่นไหวเนื่องจากแรงลม เมื่อต้นไม้มันโยกจะทำให้วงปีเก่าและวงปีใหม่เกาะกันไม่สนิทจนเกิดเป็นรอยแยกภายในเนื้อไม้ ลักษณะคำหนิจากรอยร้าวมีหลายรูปแบบ เช่น รอยร้าวกลม รอยไส้ร้าว รอยไส้ร้าวหลายแนวหรือรอยร้าวรูปดาว เป็นต้น ภาพที่ 5.7 แสดงลักษณะรอยร้าวชนิดต่าง ๆ ที่เกิดกับไม้แปรรูป

|            | รอยร้าวและรอยปริ<br>ที่หน้าไม้  | รอยร้าวและรอยปริ<br>ขอบ   | รอยร้าวและรอย<br>ปริที่ปลายตัดของไม้  |
|------------|---|---|---|
| รอยไส้ร้าว |  |  |  |
| รอยร้าวกลม |  |  |  |
| รอยปริ     |  |  |  |

ภาพที่ 5.7 รอยร้าวและรอยปริ

ที่มา : พงศ์พันธ์ วรสุนทรโรสถ และวรพงษ์ วรสุนทรโรสถ. 2544 : 35

รอยแห้ว (Wane) เป็นตำหนิที่เกิดจากส่วนที่อ่อนแอของเนื้อไม้หลุดออกจากขอบของไม้แปรรูป

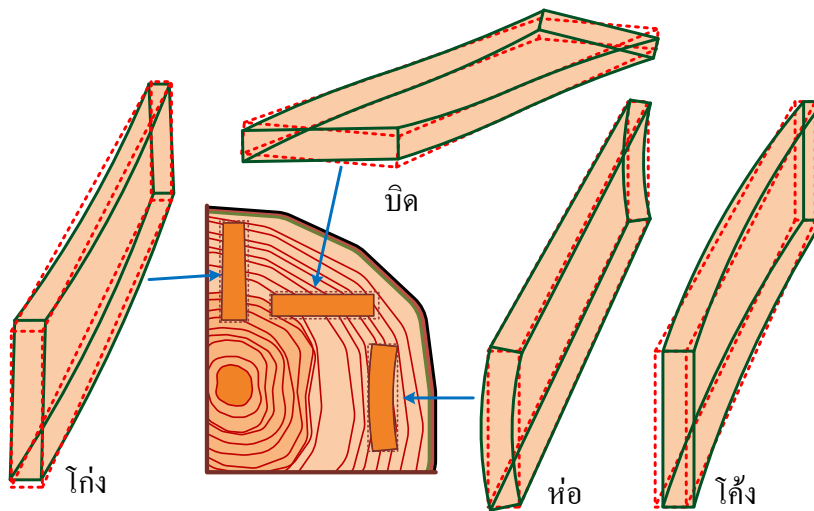
โพรงยางไม้ (Pitch Pockets) เป็นตำหนิที่เกิดจากโพรงที่อยู่ภายในวงปีอันเกิดจากการสะสมตัวของยางไม้ ลักษณะโพรงจะมีขอบเขตชัดเจนและมักเกิดตำหนิในลักษณะนี้กับต้นไม้กลุ่มไม้สนและต้นไม้ที่มียางไม้

โพรงเปลือกไม้ (Bark Pockets) เป็นตำหนิที่มักเกิดกับเนื้อไม้บริเวณที่อยู่ใกล้กับเปลือกไม้ ตำหนิลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อต้นไม้มีรอยแผลจนทำให้เปลือกไม้ฝังเข้าไปในเนื้อไม้

รอยปริ (Checks) เป็นตำหนิที่เกิดจากรอยแยกขนาดเล็กตามแนวเสี้ยนมักเกิดบริเวณผิวไม้แปรรูป สาเหตุของรอยปริเกิดจากอัตราการเจริญเติบโตของต้นไม้ที่แตกต่างกันในแต่ละฤดูกาล ลักษณะตำหนิจากรอยปริมีหลายรูปแบบ เช่น รอยปริที่ผิวเกิดจากการหดตัวที่แตกต่างกันระหว่างแนวรัศมีและแนววงปี รอยปริที่ปลายไม้เป็นรอยแยกตามแนวเสี้ยนที่ปลายไม้ รอยปริใจไม้เป็นรอยแยกที่เกิดกับใจไม้และลามไปยังเนื้อไม้ที่อยู่ใกล้ รอยปริทะลุเป็นรอยแยกตามแนวเสี้ยนจากผิวด้านหนึ่งทะลุผ่านไปอีกด้านหนึ่งของท่อนไม้ เป็นต้น ภาพที่ 5.7 แสดงลักษณะรอยปริชนิดต่าง ๆ ที่เกิดกับไม้แปรรูป

การเสีรูป (Warp) เป็นตำหนิที่เกิดจากความผิดปกติของไม้แปรรูปเนื่องจากการสูญเสียความชื้นในเนื้อไม้ ลักษณะตำหนิจากการเสีรูปแบ่งเป็น 4 แบบคือ การโก่ง (Bow) เป็นการเสีรูปตามแนวยาวของไม้แปรรูปจากปลายด้านหนึ่งไปยังปลายอีกด้านในแนวตั้งมักเกิดกับการเลี้ยวแบบควอร์เตอร์ซอน การบิด (Twist) เป็นการเสีรูปของไม้แปรรูปจากการเสีความชื้นเมื่อ

แนวเส้นไม้สม่ำเสมอมักเกิดกับการเลื้อยแบบรีฟต์ซอน การโค้ง (Crook) เป็นการเสีรูปร่างตามแนวยาวของไม้แปรรูปทางด้านข้าง การห่อ (Cup) เป็นการเสีรูปร่างในลักษณะโค้งตามความกว้างของไม้แปรรูปตลอดความยาว การห่อและการโค้งมักเกิดกับการเลื้อยแบบเฟลตซอน อย่างไรก็ตามไม้แปรรูปหนึ่งท่อนอาจเกิดการเสีรูปร่างหลายแบบร่วมกันก็ได้ เช่น การเสีรูปร่างจากการบิดอาจเกิดร่วมกับการห่อหรือการโค้ง เป็นต้น ภาพที่ 5.8 แสดงลักษณะการเสีรูปร่างของไม้แปรรูปแบบต่าง ๆ



ภาพที่ 5.8 การเสีรูปร่างของไม้แปรรูป

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 424

2.2 คำหืนที่เกิดจากผลด้านชีวภาพเป็นคำหืนที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตที่ทำลายเนื้อไม้ สิ่งมีชีวิตดังกล่าวอาจอาศัยเนื้อไม้หรือความชื้นในเนื้อไม้เป็นอาหาร เช่น ปลวก เชื้อรา แบคทีเรีย เพรียง และแมลง เป็นต้น รายละเอียดคำหืนไม้ที่เกิดจากผลด้านชีวภาพมีดังต่อไปนี้

สัตว์ต่าง ๆ (Animals) อาจทำลายเนื้อไม้เพื่อเป็นที่อยู่อาศัยหรือเพื่อเป็นอาหาร เช่น สัตว์กินพืช นก หรือกระรอก เป็นต้น

เชื้อรา (Fungi) เป็นสาเหตุทำให้เกิดคำหืนในเนื้อไม้เนื่องจากเชื้อราอาศัยความชื้นและเนื้อไม้เป็นอาหาร โดยมีอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตระหว่าง 5-40°C เชื้อราทำให้เกิดคำหืนในเนื้อไม้หลายรูปแบบ เช่น สีของเนื้อไม้ไม่สม่ำเสมอ หรือทำให้เนื้อไม้ผุกร่อนอย่างรวดเร็วเนื่องจากเชื้อราไปทำลายโครงสร้างเซลล์ของเนื้อไม้ เป็นต้น วิธีป้องกันไม้แปรรูปไม่ให้เกิดความเสียหายจากเชื้อราทำได้โดยการทำลายปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต เช่น การเก็บรักษาไม้ในสถานที่แห้งมีการระบายลมที่ดี การทาสี การทาสารเคลือบผิว หรือการใช้สารเคมีป้องกันเชื้อรา เป็นต้น



แบคทีเรีย (Bacteria) เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่อาศัยในเนื้อไม้และเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคพืช เมื่อต้นไม้เกิดโรคก็จะทำให้เนื้อไม้มีคุณภาพด้อยลงหรือผุกร่อนได้ง่าย ลักษณะตำหนิที่เกิดจากแบคทีเรียมีหลายรูปแบบ เช่น ทำให้ใจไม้เปลี่ยนเป็นสีดำหรือน้ำตาลเข้ม ทำลายเนื้อไม้ให้เป็นผงละเอียดคล้ายผงดิน กินเนื้อไม้จนทำให้ไม้ผุกร่อนและใช้การไม่ได้โดยเฉพาะไม้ที่อยู่ในที่ชื้นและตลอดเวลา เป็นต้น

ปลวก (Termites) จัดเป็นกลุ่มแมลงขนาดเล็กที่กัดกินเนื้อไม้เป็นอาหารและขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว ปลวกถือว่าเป็นปัญหาหลักของสัตว์ที่ทำลายเนื้อไม้เนื่องจากปลวกแต่ละรังจะสามารถทำลายเนื้อไม้ได้อย่างรวดเร็ว วิธีการป้องกันและกำจัดปลวกทำได้โดยรดน้ำยาเคมีบนพื้นดินโดยรอบและภายในตัวอาคารเพื่อสร้างสภาวะที่เป็นพิษต่อปลวก การเคลือบสารเคมีบนพื้นผิวไม้ หรือการอัดสารเคมีเข้าไปในเนื้อไม้ เป็นต้น

แมลงปีกแข็ง (Beetles) เป็นสิ่งมีชีวิตที่เจาะรูเข้าไปในเนื้อไม้เพื่อกินสารอาหารจำพวกแป้งหรือเพื่อเป็นที่อยู่อาศัย โดยเฉพาะแมลงปีกแข็งจำพวกมอดซึ่งเป็นแมลงขนาดเล็กที่มักเจาะเข้าไปในเนื้อไม้ส่งผลทำให้ความแข็งแรงของไม้ลดลงและทำให้เนื้อไม้ไม่สวยงาม มอดมีหลายชนิด เช่น มอดขี้ขุย มอดป่า และมอดเจาะเรือน เป็นต้น วิธีการป้องกันมอดทำเช่นเดียวกับการป้องกันปลวก

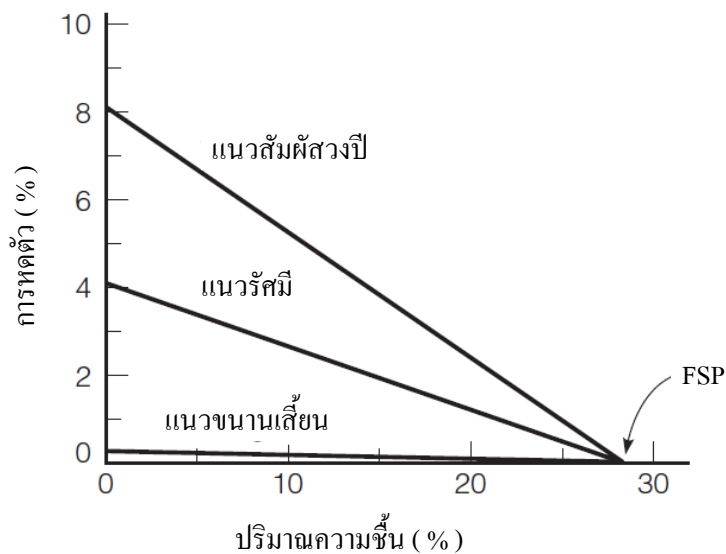
สิ่งมีชีวิตในทะเล (Marine Organisms) เป็นสิ่งมีชีวิตที่ส่งผลเสียต่อไม้ที่สัมผัสน้ำทะเลหรือน้ำกร่อย เช่น เพรียงเป็นสิ่งมีชีวิตที่อาศัยแถบชายฝั่งทะเลจะกัดเจาะไม้ให้เป็นรูขนาดใหญ่เพื่อฝังตัวอยู่ในช่องทำให้ไม้สูญเสียความแข็งแรง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสิ่งมีชีวิตอื่นที่ทำความเสียหายให้กับไม้ เช่น กุ้ง หอย และหนอนทะเล เป็นต้น

2.3 ตำหนิที่เกิดจากผลทางกลเป็นตำหนิที่มักเกิดกับไม้แปรรูปเนื่องจากมีแรงมากระทำต่อเนื้อไม้ แรงที่มีผลต่อเนื้อไม้เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ความผิดปกติจากการเจริญเติบโตตามธรรมชาติ การใช้งานไม้แปรรูปผิดประเภท หรือกระบวนการแปรรูปไม้ไม่ดี เป็นต้น ตัวอย่างตำหนิที่เกิดจากผลทางกลต่อต้นไม้ตามธรรมชาติ เช่น ต้นไม้ที่เกิดแออัดกันจนเสีกรูป หรือการขัดสีกันเนื่องจากแรงลม เป็นต้น ตัวอย่างตำหนิที่เกิดจากผลทางกลจากการใช้งานไม้แปรรูป เช่น การโค้งเนื่องจากรับน้ำหนักมาก การสึกหรอเนื่องจากถูกขัดสีหรือถูกระแทก เป็นต้น บ่อยครั้งที่เกิดตำหนิในเนื้อไม้จากกระบวนการแปรรูป เช่น เสี้ยนไม้เป็นฝอยหรือรอยฉีกมักเกิดขณะเลื่อยหรือไสไม้ด้วยเครื่องมือที่ไม่คม และรอยไหม้จากเครื่องจักรเป็นรอยดำที่เกิดจากความร้อนขณะเลื่อยไม้ เป็นต้น

2.4 ตำหนิที่เกิดจากผลด้านเคมีเป็นตำหนิที่มีสาเหตุมาจากกรด ต่าง หรือสารละลายที่ทำปฏิกิริยาเคมีกับเนื้อไม้ ปฏิกิริยาดังกล่าวมักเกิดบริเวณผิวหน้าของไม้และเกิดการเสื่อมสภาพเข้าสู่ด้านในเนื้อไม้ วิธีการป้องกันสามารถทำได้โดยการทาผิวไม้ด้วยสารเคลือบ

## ความชื้นในเนื้อไม้

ความชื้นในเนื้อไม้ (Water Content of Wood) คือปริมาณของเหลวที่มีอยู่ในเนื้อไม้ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของไม้ กรมโยธาและผังเมือง (2551 : 24-26) กล่าวว่าค่าความชื้นของไม้คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักน้ำในเนื้อไม้ต่อน้ำหนักไม้อบแห้ง การหาน้ำหนักไม้อบแห้งสามารถทำได้โดยการนำไม้ตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ  $100\pm 5^{\circ}\text{C}$  จนมีน้ำหนักคงที่ ส่วนน้ำหนักน้ำสามารถหาได้จากผลต่างระหว่างน้ำหนักไม้ชื้นและไม้อบแห้ง ปริมาณน้ำในเนื้อไม้มี 2 ลักษณะคือ น้ำที่อยู่ภายในผนังเซลล์เนื่องจากแรงยึดเกาะของของเหลว และน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างเซลล์ เมื่อต้นไม้ยังมีชีวิตอยู่ผนังเซลล์จะอึดด้วยน้ำในขณะที่ช่องว่างระหว่างเซลล์อาจมีหรือไม่มีน้ำก็ได้ ถ้าผนังเซลล์อยู่ในสภาวะอึดด้วยน้ำและภายในช่องว่างระหว่างเซลล์ไม่มีน้ำจะเรียกสภาวะนี้ว่า จุดเส้นใยอึดด้วยน้ำ (Fiber Saturation Point : FSP) ต้นไม้โดยทั่วไปมีปริมาณความชื้นที่จุด FSP อยู่ระหว่างร้อยละ 21-32 ความชื้นในเนื้อไม้ยังมีส่วนต่อการขยายตัวและหดตัวของไม้อีกด้วย โดยไม้จะขยายตัวเมื่อมีความชื้นมากขึ้นและจะหดตัวเมื่อความชื้นลดลง (Ash Ahmed and John Sturges. 2015 : 246-251 and Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 417-418)



ภาพที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวและปริมาณความชื้น

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 418

จากภาพที่ 5.9 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของไม้เมื่อปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลงไปแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของไม้ในแนวขนานเส้นใยเกิดขึ้นเพียง

เล็กน้อยเมื่อปริมาณความชื้นเปลี่ยนไปถึงจุด FSP การเปลี่ยนแปลงปริมาตรในแนวขนานเส้นมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.1-0.2 ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของไม้ในแนวสัมผัสวงปีจะมากกว่าแนวรัศมีประมาณหนึ่งเท่า การเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่แตกต่างกันตามทิศทางเส้นไม้ส่งผลทำให้เกิดการบิดงอของไม้แปรรูป ในการคำนวณและออกแบบไม้แปรรูปที่ใช้ในงานก่อสร้างมักสมมติปริมาณความชื้นที่จุด FSP อยู่ที่ร้อยละ 30 และสมมติการเปลี่ยนแปลงปริมาตรตามแนวเส้นสัมผัสวงปีที่ประมาณร้อยละ 8 ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงปริมาตรตามแนวรัศมีมีค่าประมาณร้อยละ 4 ตามลำดับ กรณีที่ไม้แปรรูปไม่สามารถระบุแนวเส้นได้อย่างชัดเจน สถาบันการก่อสร้างด้วยไม้แห่งอเมริกา (American Institute of Timber Construction : AITC) ได้แนะนำว่าปริมาตรไม้จะเปลี่ยนแปลงประมาณร้อยละ 1 เมื่อความชื้นเปลี่ยนแปลงไปร้อยละ 5 โดยเรียกสัดส่วน 1 ต่อ 5 นี้ว่า กฎนิ้วหัวแม่มือ (The Rule of Thumb) กฎนี้มักใช้ในการคำนวณและออกแบบคานประกอบที่ทำจากไม้แผ่นที่มีกาวเป็นตัวเชื่อมประสาน

### คุณสมบัติทางกายภาพของไม้

ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) แตกต่างกันตามชนิดของพันธุ์ไม้ ปริมาณความชื้น และทิศทางของแนวเส้นไม้ คุณสมบัติทางกายภาพของไม้ที่สำคัญมีดังต่อไปนี้ (กวี หวังนิเวศน์กุล. 2552 : 33-35, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท. 1002-16. 2539 : 8, Duggal S.K. 2008 : 108, 123-124 และ Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011 : 429-431)

#### 1. ความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่น

ความถ่วงจำเพาะของไม้ (Specific Gravity of Wood) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักไม้ต่อน้ำหนักน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน ส่วนความหนาแน่นไม้ (Density of Wood) เป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักไม้ต่อปริมาตรไม้ ค่าความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นของไม้จะแตกต่างกันตามชนิดของพันธุ์ไม้ซึ่งสัมพันธ์กับชนิดของเซลล์ไม้ กรมโยธาธิการและผังเมือง (2551: 50-52) ได้กำหนดมาตรฐานการทดสอบความถ่วงจำเพาะของไม้โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้คือ เตรียมไม้ตัวอย่างที่ไสเรียบจำนวน 3 ตัวอย่าง นำไม้ตัวอย่างมาวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ  $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$  เพื่อหาปริมาณความชื้น นำผลการชั่งน้ำหนักและปริมาตรไม้มาคำนวณหาความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่น สำหรับไม้เนื้อแข็งในประเทศไทยมีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 0.8-1.15 และมีความหนาแน่นระหว่าง  $720-1,110 \text{ kg/m}^3$  ทั้งความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นจะสามารถใช้ในการทำนายความสมบูรณ์ของเนื้อไม้และยังสามารถใช้ทำนายคุณสมบัติทางกลได้อีกด้วย

## 2. คุณสมบัติด้านอุณหภูมิจของไม้

คุณสมบัติด้านอุณหภูมิจของไม้ (Thermal Properties of Wood) เป็นคุณสมบัติของไม้ที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะ การแพร่ความร้อน และสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน ตามลำดับ รายละเอียดคุณสมบัติด้านอุณหภูมิจของไม้มีดังต่อไปนี้

2.1 การนำความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นการวัดอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุ ถ้าวัสดุใดมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีจะมีค่าการนำความร้อนสูงหรือเรียกว่า วัสดุนำความร้อน แต่ถ้าวัดวัสดุที่มีความสามารถในการนำความร้อนน้อยจะเรียกว่า วัสดุฉนวนความร้อน ไม้ถือว่าเป็นวัสดุฉนวนที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ แต่คุณสมบัติการนำความร้อนของไม้จะเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น การนำความร้อนในแนวขนานเส้นจะดีกว่าแนวตั้งฉากเส้นและแนวสัมผัสวงปี ในขณะที่การนำความร้อนของไม้ที่มีความชื้นมากจะดีกว่าไม้ที่มีความชื้นน้อย และไม้ที่มีความถ่วงจำเพาะมากจะมีค่าการนำความร้อนดีกว่าไม้ที่มีความถ่วงจำเพาะน้อย เป็นต้น

2.2 ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 หน่วยองศาเทียบกับปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำที่มีมวลเท่ากัน มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 หน่วยองศา ความจุความร้อนจำเพาะของไม้จะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและสภาพแวดล้อมของการเจริญเติบโตของต้นไม้ กล่าวคือ ไม้ที่มีปริมาณความชื้นมากจะมีค่าความจุความร้อนจำเพาะมากกว่าไม้แห้ง และต้นไม้ที่เติบโตในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าความจุความร้อนจำเพาะมากกว่าต้นไม้ที่เติบโตในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำ ในขณะที่ความหนาแน่นมีผลต่อความจุความร้อนไม่มาก

2.3 การแพร่ความร้อนหรือการกระจายความร้อน (Thermal Diffusivity) คืออัตราการดูดซับความร้อนของวัสดุจากสภาพแวดล้อม ไม้มีคุณสมบัติการแพร่ความร้อนน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างชนิดอื่น ยกตัวอย่างเช่น การแพร่ความร้อนของไม้โดยทั่วไปมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.006 มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) ในขณะที่เหล็กกล้ามีค่าการแพร่ความร้อนประมาณ 0.5 mm/s เป็นต้น

2.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) คือค่าอัตราส่วนระหว่างความแตกต่างของความยาวหรือปริมาตรของวัสดุที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วยองศาเทียบกับความยาวหรือปริมาตรเดิม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นวัสดุจะมีการขยายตัวส่งผลให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวมีค่าเป็นบวกแต่ถ้าอุณหภูมิลดลงก็จะได้ผลตรงกันข้าม ปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การขยายตัวของไม้คือความหนาแน่นและแนวเส้นไม้ สำหรับไม้ในแนวขนานเส้นมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระหว่าง 0.0014-0.009 มิลลิเมตรต่อ

องศาเซลเซียส ( $\text{mm}/^{\circ}\text{C}$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของไม้ในแนวขวางเล็กลงและแนวสัมผัสวงปีมีค่ามากกว่าแนวขนานเล็กลงประมาณ 5-10 เท่า การวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนของไม้ชื้นทำได้ยากเนื่องจากไม้ชื้นจะขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็จะหดตัวจากการสูญเสียความชื้นร่วมด้วย

### 3. คุณสมบัติด้านไฟฟ้าของไม้

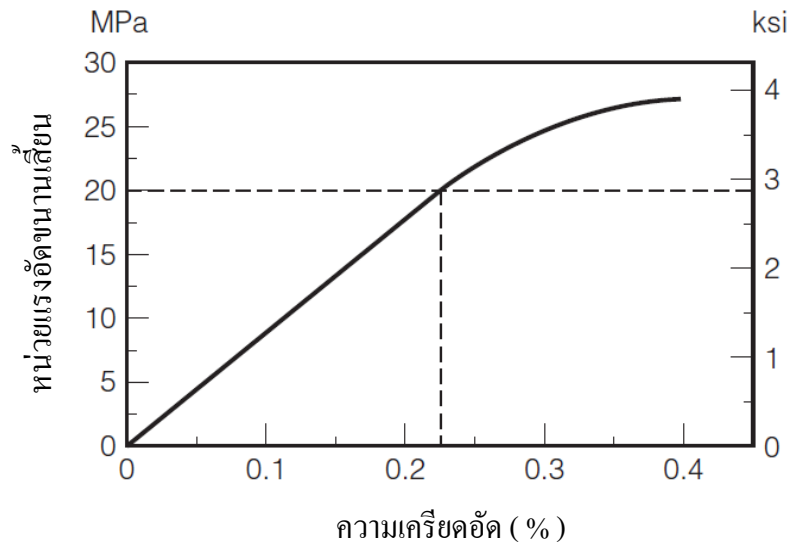
คุณสมบัติด้านไฟฟ้าของไม้ (Electrical Properties of Wood) เป็นคุณสมบัติในการนำกระแสไฟฟ้าของไม้ ซึ่งคุณสมบัตินี้จะแตกต่างกันตามปริมาณความชื้นในเนื้อไม้ เช่น ไม้แห้งจะมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ต่ำซึ่งถือว่าเป็นวัสดุฉนวนกันไฟฟ้าที่ดี เมื่อปริมาณความชื้นในเนื้อไม้เพิ่มขึ้นจะทำให้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย หากปริมาณความชื้นในเนื้อไม้มากกว่าจุดเส้นใยอิ่มตัวด้วยน้ำก็จะถือว่าไม้ท่อนนั้นมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับน้ำ เป็นต้น

### คุณสมบัติทางกลของไม้

คุณสมบัติทางกลของไม้ (Mechanical Properties of Wood) เป็นคุณสมบัติของไม้ในการต้านทานแรงซึ่งมีความสำคัญต่อการคำนวณและออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากไม้ รายละเอียดคุณสมบัติทางกลของไม้ที่สำคัญมีดังต่อไปนี้ (กวี หวังนิเวศน์กุล. 2552 : 33-35, พิภพ สุทรสมัย. 2540 : 15-16, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท.1002-16. 2539 : 5-8, Duggal S.K. 2008 : 125-128 และ Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011 : 431-433)

#### 1. โมดูลัสยืดหยุ่นของไม้

โมดูลัสยืดหยุ่นของไม้ (Modulus of Elasticity of Wood) คืออัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของไม้ในสภาวะยืดหยุ่นซึ่งหาได้จากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดดังแสดงในภาพที่ 5.10 จากภาพเป็นตัวอย่างผลการทดสอบกำลังอัดในแนวขนานเล็กลงของไม้ตัวอย่าง ลักษณะเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในช่วงแรกจะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งจึงกลายเป็นเส้นโค้งที่ความชันจะเปลี่ยนแปลงทีละน้อยจนกระทั่งไม้วิบัติ ความชันของเส้นตรงในช่วงแรกนี้คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของไม้ในแนวขนานเล็กลง ปัจจัยที่มีผลต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของไม้คือปริมาณความชื้นและค่าความถ่วงจำเพาะของเนื้อไม้ นอกจากนั้นหากนำไม้ตัวอย่างมาทดสอบกำลังอัดแต่เปลี่ยนทิศทางแนวเล็กลงที่รับแรงก็จะได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ต่างออกไป



ภาพที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดค้ำขนานเสี้ยนของไม้

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011 : 431

## 2. ความแข็งแรงของไม้

ความแข็งแรงของไม้ (Strength of Wood) เป็นคุณสมบัติของไม้ในการต้านทานแรงประเภทต่าง ๆ เช่น แรงอัด แรงดึง แรงเฉือน โมเมนต์บิด และ โมเมนต์ค้ำ เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของไม้มีด้วยกันหลายอย่าง เช่น ปริมาณความชื้น แนวเสี้ยนที่รับแรง ชนิดของพันธุ์ไม้ และค่าหนีในเนื้อไม้ เป็นต้น ถ้าพิจารณาแต่ละปัจจัยพบว่า ไม้แห้งมักมีความแข็งแรงโดยรวมดีกว่าไม้ชื้น ในขณะที่ไม้เนื้อแข็งมีความแข็งแรงมากกว่าไม้เนื้ออ่อน ไม้ที่มีค่าหนีมากจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าไม้ที่มีค่าหนีน้อย กำลังค้ำในแนวขนานเสี้ยนจะมีค่ามากกว่าแนวตั้งฉากเสี้ยน และกำลังอัดในแนวขนานเสี้ยนจะมีค่าน้อยกว่ากำลังค้ำในแนวขนานเสี้ยน อย่างไรก็ตามการนำไม้แปรรูปแต่ละท่อนไปใช้งานเพื่อรับแรงค้ำจะต้องพิจารณาอย่างรอบคอบเนื่องจากกำลังค้ำของไม้จะลดลงเมื่อมีแนวเสี้ยนเปลี่ยนไปหรือมีตาไม้แทรกอยู่ภายใน

## 3. ประสิทธิภาพการหน่วงของไม้

ประสิทธิภาพการหน่วง (Damping Capacity) คือการปลดปล่อยพลังงานจากการแกว่งตัวหรือการสั่นไหวอย่างอิสระของวัตถุ เมื่อเวลาผ่านไปการสั่นไหวของวัตถุจะลดลงเนื่องจากเกิดแรงเสียดทานขึ้นภายในเนื้อวัสดุเพื่อด้านทานการเคลื่อนที่ โดยทั่วไปประสิทธิภาพการหน่วงของไม้จะมีค่าสูงกว่าเหล็กประมาณ 10 เท่า ส่งผลให้โครงสร้างไม้สามารถลดการสั่นไหวได้เร็วกว่าโครงสร้างเหล็ก ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการหน่วงของไม้คือปริมาณความชื้นและอุณหภูมิ เช่น ถ้าไม้มีปริมาณความชื้นมากก็จะทำให้แรงเสียดทานภายในเนื้อไม้มากด้วยจึง

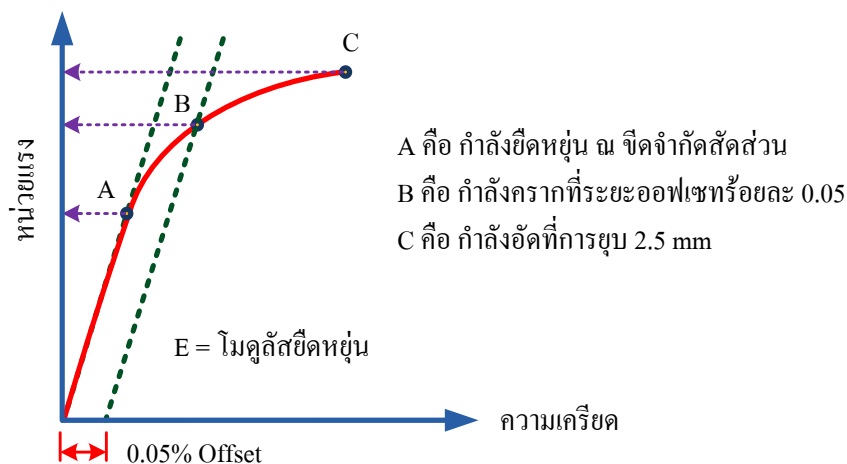
ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการหน่วงเพิ่มขึ้น หรือถ้าอุณหภูมิสภาพแวดล้อมต่ำลงก็จะทำให้ของเหลวในเนื้อไม้มีความหนืดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการหน่วงเพิ่มขึ้น เป็นต้น

### การทดสอบคุณสมบัติทางกลของไม้

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของไม้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำข้อมูลผลการทดสอบไปคำนวณและออกแบบชิ้นงานที่ทำจากไม้ วิธีการทดสอบและอ้างอิงคุณสมบัติทางกลของไม้สำหรับประเทศไทยมีด้วยกันหลายมาตรฐาน เช่น มาตรฐานการทดสอบวัสดุกรรมโยธาธิการและผังเมือง มาตรฐานสำหรับอาคารไม้สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อกำหนดในมาตรฐานการทดสอบวัสดุหรือมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมประเทศชั้นนำต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ได้เช่นกัน การทดสอบคุณสมบัติทางกลของไม้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. การทดสอบกำลังอัดในแนวตั้งฉากเสี้ยน

การทดสอบกำลังอัดในแนวตั้งฉากเสี้ยน (Compression Perpendicular to the Grain) ตามข้อกำหนดกรรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1221-51 (2551: 10-13) และมาตรฐาน ASTM D143 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของไม้ภายใต้แรงอัดในแนวตั้งฉากเสี้ยน หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น หาค่ากำลังยึดหยุ่น  $\sigma_c$  จิตจำกัดสัดส่วน ซึ่งเป็นค่าหน่วยแรงสูงสุดภายใต้สภาวะยืดหยุ่น และหาค่ากำลังครากที่ระยะออฟเซทร้อยละ 0.05 ซึ่งเป็นค่าหน่วยแรงที่สัมพันธ์กับความเครียดที่ระยะออฟเซทร้อยละ 0.05 ดังแสดงในภาพที่ 5.11 ตามลำดับ

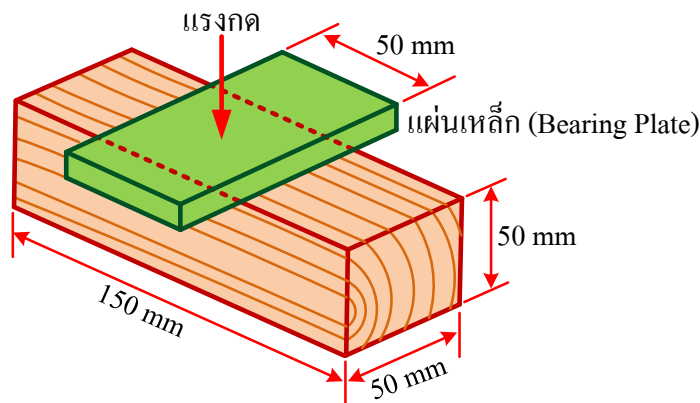


ภาพที่ 5.11 การหาค่ากำลังครากที่ระยะออฟเซทร้อยละ 0.05

ที่มา : กรรมโยธาและผังเมือง. 2551 : 12



ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการนำไม้ตัวอย่างซึ่งเป็น ไม้ไสเรียบ (Dressed Timber) ขนาด  $50 \times 50 \times 150$  mm ไปวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก จากนั้นวางไม้ตัวอย่างบนแผ่นเหล็กรองรับ (Bearing Block) โดยหันท่อนไม้ให้ด้านแนวเส้นตั้งฉากกับวงปียู่ด้านบน แล้วจึงวางแผ่นเหล็ก (Bearing Plate) กว้าง 50 mm ในแนวขวางที่กึ่งกลางไม้ตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 5.12 แผ่นเหล็กนี้ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักที่ตกลงไปบนไม้ตัวอย่าง ติดตั้งเครื่องมือวัดระยะละเอียดแบบหน้าปิด หรือไดอัลเกจเพื่ออ่านค่าการยุบตัว เพิ่มแรงกดอย่างต่อเนื่องประมาณ 0.305 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) บันทึกค่าแรงกดและค่าการยุบตัวจนกว่าตัวอย่างทดสอบจะยุบถึง 2.5 mm จึงหยุดทำการทดสอบ นำผลที่ได้ไปเขียนในแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดดังแสดงในภาพที่ 5.11 หาค่าต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์โดยการสังเกตจากแผนภาพดังกล่าว



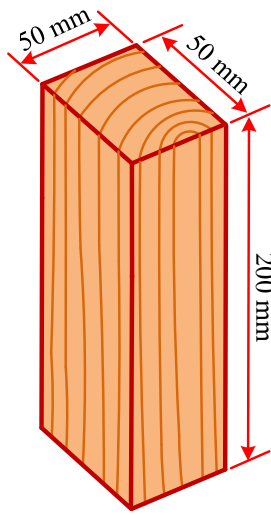
ภาพที่ 5.12 การทดสอบการอัดในแนวตั้งฉากเส้น

ที่มา : กรมโยธาและผังเมือง, 2551 : 11

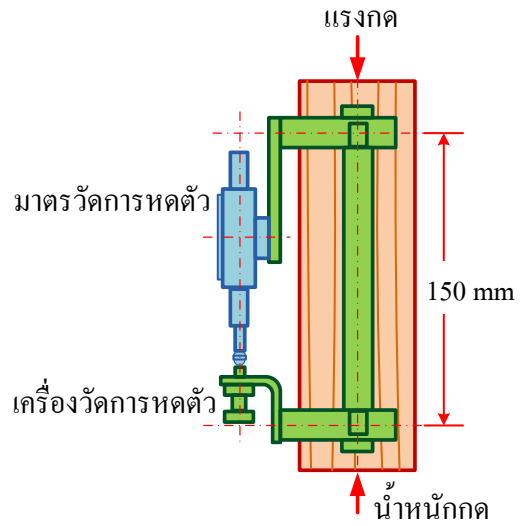
## 2. การทดสอบกำลังอัดในแนวขนานเส้น

การทดสอบกำลังอัดในแนวขนานเส้น (Compression Parallel to the Grain) ตามข้อกำหนดกรมโยธาธิการและผังเมือง มยศ. 1222-51 (2551: 16-21) และมาตรฐาน ASTM D143 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของไม้ภายใต้แรงอัดในแนวขนานเส้น หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น หาค่ากำลังยืดหยุ่น ณ จุดจำกัดสัดส่วน หาค่ากำลังครากที่ระยะออฟเซทร้อยละ 0.05 หาค่ากำลังอัดประลัย และสังเกตลักษณะการวิบัติของไม้ภายใต้แรงอัดในแนวขนานเส้น ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการนำไม้ตัวอย่างไสเรียบขนาด  $50 \times 50 \times 200$  mm ไปวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก จากนั้นติดตั้งไดอัลเกจเพื่อวัดการยุบตัวของไม้ตัวอย่างในแนวขนานเส้น นำไม้ตัวอย่างวางบนเครื่องทดสอบโดยให้แรงกระทำในแนวขนานเส้นดังแสดงในภาพที่ 5.13 เพิ่มแรงกดอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วประมาณ 0.6 mm/min บันทึกค่าแรงกดและค่าการยุบตัวจนกว่าตัวอย่าง

ทดสอบสมบัติจึงหยุดทำการทดสอบ สังเกตลักษณะการวิบัติของไม้ซึ่งมีรูปแบบแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 5.14 นำผลการทดสอบไปเขียนแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดและหาค่าต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์โดยการสังเกตจากแผนภาพดังกล่าว



(ก) ขนาดไม้ทดสอบ



(ข) การติดตั้งเครื่องมือวัดระยะหดตัว

ภาพที่ 5.13 การทดสอบการอัดในแนวนอนเสี้ยน

ที่มา : กรมโยธาและผังเมือง. 2551 : 18



(ก) รอยแตกแบบบดขยี้



(ข) รอยแตกรูปลิ้ม



(ค) รอยแตกแบบแรงเฉือน



(ง) รอยแตกแบบฉีกปลาย



(จ) รอยแตกแบบแรงอัดและเฉือนขนานเสี้ยน



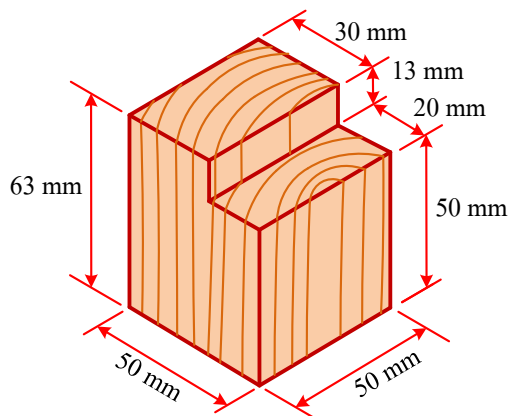
(ฉ) รอยแตกแบบแยกปลาย

ภาพที่ 5.14 รูปแบบการวิบัติของไม้ในแนวนอนเสี้ยนภายใต้แรงอัด

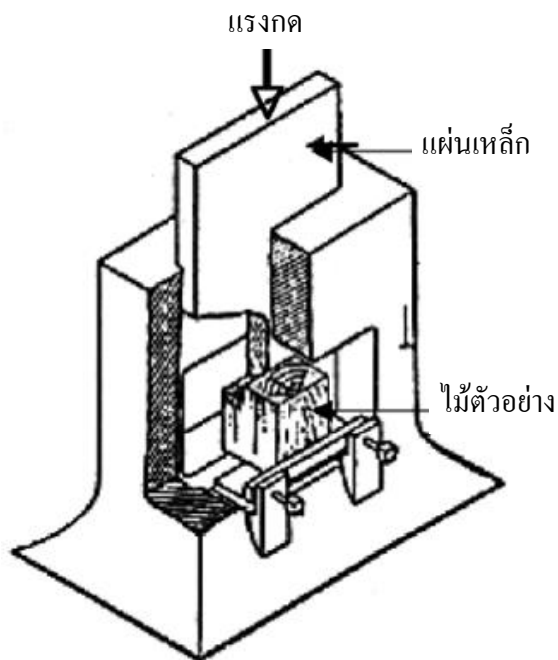
ที่มา : กรมโยธาและผังเมือง. 2551 : 19

### 3. การทดสอบกำลังเฉือนในแนวขนานเส้นไม้

การทดสอบกำลังเฉือนในแนวขนานเส้นไม้ (Shear Test of Wood Parallel to Grain) ตามข้อกำหนดกรมโยธาธิการและผังเมือง มยพ. 1226-51 (2551: 45-47) และมาตรฐาน ASTM D143-94 มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดของไม้ในแนวขนานเส้นซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเฉือนสูงสุดต่อพื้นที่หน้าตัดในระนาบเดียวกับแนวแรง ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นจากการเตรียมไม้ตัวอย่างซึ่งเป็นไม้ไผ่เรียบขนาด  $50 \times 50 \times 63$  mm ทำการบากไม้ตัวอย่างให้เป็นบ่าโดยมีพื้นที่หน้าตัดในการรับแรงเฉือนขนาด  $50 \times 50$  mm ดังแสดงในภาพที่ 5.15(ก) นำไม้ตัวอย่างที่ได้ไปวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก สังเกตและบันทึกลักษณะแนวเส้นไม้บริเวณหน้าตัดที่รับแรงเฉือน จากนั้นนำไม้ตัวอย่างไปติดตั้งบนเครื่องทดสอบโดยให้หน้าตัดที่ต้องการทดสอบแรงเฉือนอยู่ในระนาบเดียวกับแรงกระทำดังแสดงในภาพที่ 5.15(ข) เพิ่มแรงกดไปบนแผ่นเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งไม้ตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าแรงกดสูงสุดและลักษณะการวิบัติของไม้ นำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่ากำลังเฉือนสูงสุดของไม้ในแนวขนานเส้น



(ก) ขนาดไม้ตัวอย่างทดสอบ



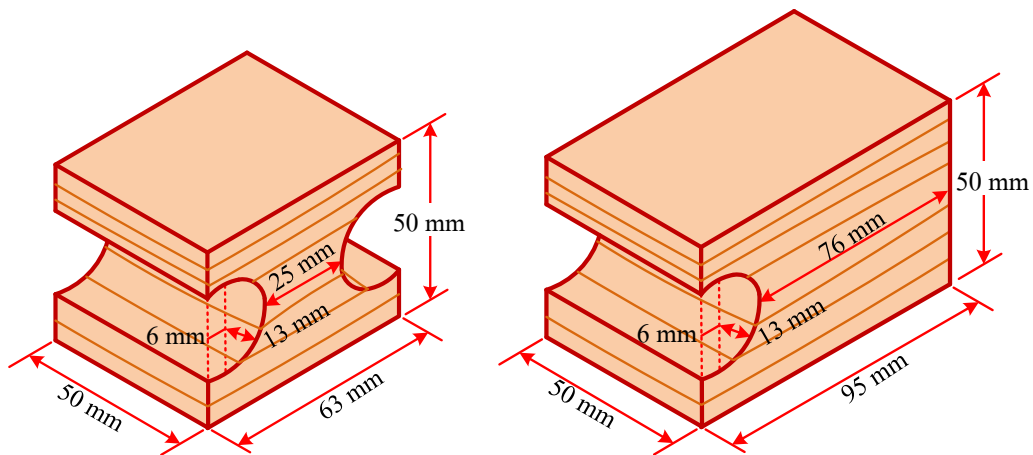
(ข) เครื่องทดสอบกำลังเฉือนในแนวขนานเส้น

ภาพที่ 5.15 การทดสอบกำลังเฉือนในแนวขนานเส้น

ที่มา : กรมโยธาและผังเมือง, 2551 : 45

#### 4. การทดสอบกำลังดึงในแนวตั้งฉากเสี้ยน

การทดสอบกำลังดึงในแนวตั้งฉากเสี้ยน (Tension Perpendicular to the Grain) และกำลังแตกร้าวของไม้ (Cleavage of Timber) ตามข้อกำหนดกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1225-51 (2551: 37-44) และมาตรฐาน ASTM D143-94 มีวัตถุประสงค์เพื่อหาลำดับสูงสุดของไม้ในแนวตั้งฉากเสี้ยนและกำลังแตกร้าวในแนวตั้งฉากเสี้ยนของไม้ โดยกำลังแตกร้าวเป็นความต้านทานการฉีกของไม้เมื่อมีแรงมากระทำ ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นจากการเตรียมไม้ตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบ ไม้ตัวอย่างมี 2 ลักษณะคือ แบบที่ 1 มีรอยเซาะร่องโค้งทั้งสองด้านเพื่อใช้ทดสอบกำลังดึงในแนวตั้งฉากเสี้ยนดังภาพที่ 5.16 (ก) และแบบที่ 2 มีการเซาะร่องโค้งเพียงด้านเดียวเพื่อใช้ทดสอบกำลังแตกร้าวในแนวตั้งฉากเสี้ยนดังภาพที่ 5.16 (ข) เมื่อได้ไม้ตัวอย่างแล้วจึงทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก ติดตั้งไม้ตัวอย่างแบบที่ 1 ในเครื่องทดสอบการดึงในแนวตั้งฉากเสี้ยนดังแสดงในภาพที่ 5.17(ก) และให้แรงดึงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วประมาณ 2.5 mm/min จนกระทั่งไม้ตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าแรงดึงสูงสุดและลักษณะการวิบัติ คำนวณหาค่ากำลังดึงในแนวตั้งฉากเสี้ยนจากการนำแรงดึงสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงของไม้ตัวอย่างแบบที่ 1 จากนั้นนำไม้ตัวอย่างแบบที่ 2 ไปติดตั้งในเครื่องทดสอบกำลังแตกร้าวดังแสดงในภาพที่ 5.17(ข) ให้แรงดึงกระทำอย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วเดียวกับการทดสอบแบบที่ 1 จนกระทั่งไม้ตัวอย่างแตก บันทึกค่าแรงดึงสูงสุดและลักษณะการวิบัติ คำนวณหาค่ากำลังแตกร้าวโดยนำค่าแรงดึงสูงสุดหารด้วยความกว้างของไม้ตัวอย่าง การทดสอบนี้ควรทำการทดสอบหาปริมาณความชื้นของไม้ตัวอย่างด้วยเนื่องจากความชื้นมีผลต่อกำลังดึงของไม้



(ก) กำลังดึงในแนวตั้งฉากเสี้ยน

(ข) กำลังแตกร้าวในแนวตั้งฉากเสี้ยน

ภาพที่ 5.16 ไม้ตัวอย่างทดสอบกำลังดึงและกำลังแตกร้าวในแนวตั้งฉากเสี้ยน

ที่มา : กรมโยธาและผังเมือง. 2551 : 39



(ก) เครื่องทดสอบกำลังดึง



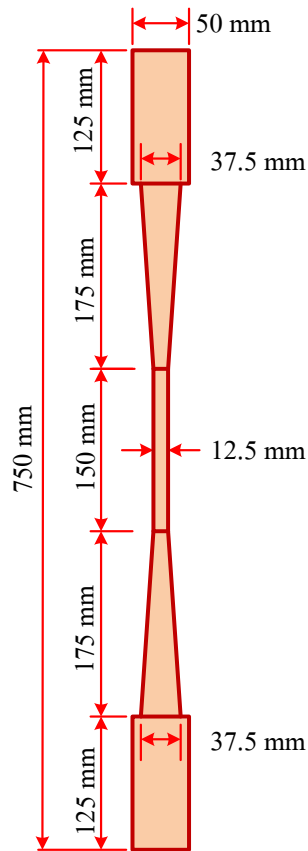
(ข) เครื่องทดสอบกำลังแตกริ้ว

ภาพที่ 5.17 เครื่องทดสอบกำลังดึงและกำลังแตกริ้วในแนวตั้งฉากเส้น

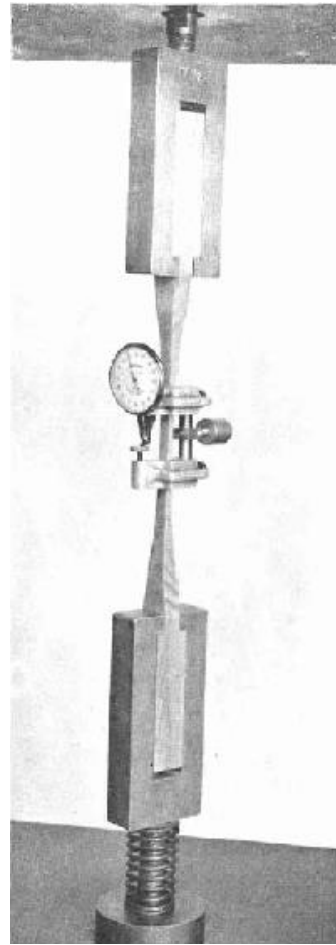
ที่มา : กรมโยธาและผังเมือง, 2551 : 38

### 5. การทดสอบกำลังดึงในแนวขนานเส้น

การทดสอบกำลังดึงในแนวขนานเส้น (Tension Parallel to the Grain) ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ASTM D143 มีวัตถุประสงค์เพื่อหาลำดับสูงสุดและหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของไม้ ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นจากการเตรียมไม้ตัวอย่างเพื่อใช้ในการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 5.18(ก) ไม้ตัวอย่างมีความยาวรวม 750 mm ที่ฐานยึดทั้งสองด้านมีขนาดพื้นที่หน้าตัด  $50 \times 50$  mm และที่กึ่งกลางมีขนาดพื้นที่หน้าตัด  $12.5 \times 12.5$  mm เมื่อได้ไม้ตัวอย่างแล้วจึงทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนัก ทำการติดตั้งไดอัลเกจเพื่อวัดการยืดตัวที่กึ่งกลางไม้ตัวอย่างโดยกำหนดระยะวัดอยู่ที่ 50 mm ดังแสดงในภาพที่ 5.18(ข) จากนั้นทำการดึงไม้ตัวอย่างด้วยความเร็วคงที่จนกระทั่งไม้ตัวอย่างวิบัติ บันทึกค่าแรงดึงสูงสุดและระยะยืดตัวก่อนการวิบัติ สังเกตลักษณะการวิบัติและคำนวณหาค่ากำลังดึงในแนวขนานเส้นจากการนำค่าแรงดึงสูงสุดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของไม้ตัวอย่าง หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด การทดสอบนี้ควรทำการทดสอบหาปริมาณความชื้นของไม้ตัวอย่างด้วยเนื่องจากความชื้นมีผลต่อกำลังดึงของไม้



(ก) ขนาดไม้ตัวอย่าง



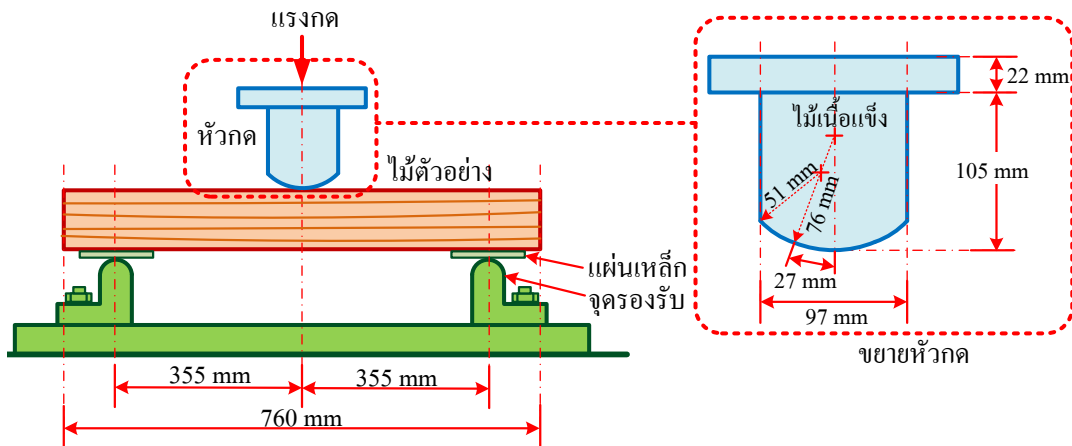
(ข) การติดตั้งไม้ตัวอย่างในเครื่องทดสอบ

ภาพที่ 5.18 การทดสอบกำลังดึงในแนวขนานเส้น

ที่มา : United State Department of Agriculture. 1956

## 6. การทดสอบกำลังดัดแบบสถิต

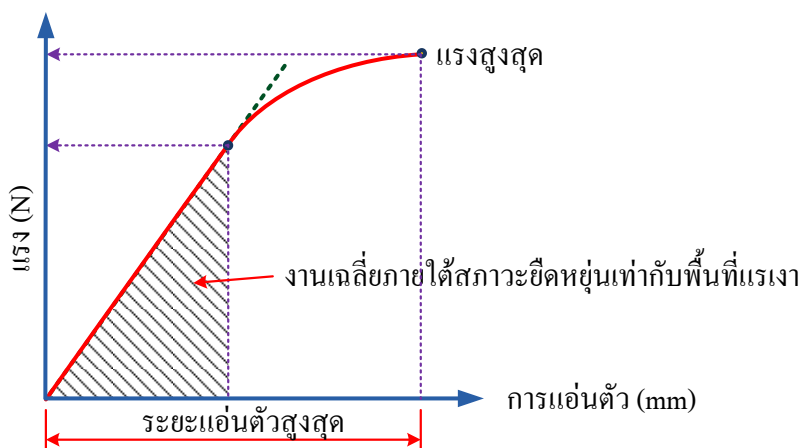
การทดสอบกำลังดัดแบบสถิต (Static Bending Test of Timber) ตามข้อกำหนดกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1224-51 (2551: 28-33) และมาตรฐาน ASTM D143 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของไม้ภายใต้โมเมนต์ดัดแบบสถิต หาค่ากำลังดัด ณ ขีดจำกัดสัดส่วนหรือหน่วยแรงที่ผิวหน้าของไม้ หาค่ากำลังเฉือนสูงสุด หาค่าโมดูลัสแตกร้าวหรือกำลังดัดสูงสุด หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น หาค่าโมดูลัสคืนตัว (Modulus of Resilience) และลักษณะของการวิบัติของไม้ภายใต้โมเมนต์ดัด ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นจากการนำไม้ตัวอย่างขนาด  $50 \times 50 \times 760$  mm ไปชั่งน้ำหนักและวัดขนาด บันทึกลักษณะแนวเส้นไม้และตำแหน่งต่าง ๆ ก่อนนำไปติดตั้งบนเครื่องมือทดสอบดังแสดงในภาพที่ 5.19



ภาพที่ 5.19 การทดสอบกำลังคัตแบบสถิตของไม้

ที่มา : กรมโยธาและผังเมือง, 2551 : 30

ฐานรองรับไม้ตัวอย่างมีระยะห่าง 710 mm และแต่ละด้านของฐานรองรับควรมีลักษณะเป็นสันมน ไม้ตัวอย่างจะถูกแรงกระทำที่กึ่งกลางท่อนไม้โดยแรงจะถูกส่งผ่านมาจากหัวกดซึ่งมีลักษณะโค้งมน จากนั้นทำการติดตั้งไดอัลเกจเพื่อวัดการแอ่นตัวที่กึ่งกลางไม้ตัวอย่าง ให้แรงกดต่อเนื่องด้วยความเร็ว 2.5 mm/min และทำการบันทึกค่าแรงและการแอ่นตัว ในการบันทึกผลจะกระทำเมื่อการแอ่นตัวเปลี่ยนแปลงทุกระยะ 0.02 mm ในช่วงขีดจำกัดสัดส่วนหรือเมื่อแอ่นตัวไม่เกิน 25 mm จากนั้นบันทึกเมื่อการแอ่นตัวเปลี่ยนแปลงทุกระยะ 0.2 mm จนกว่าจะวิบัติหรือแอ่นตัวมากกว่า 150 mm บันทึกลักษณะการวิบัติและหาปริมาณความชื้นของไม้ตัวอย่าง นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวดังแสดงในภาพที่ 5.20

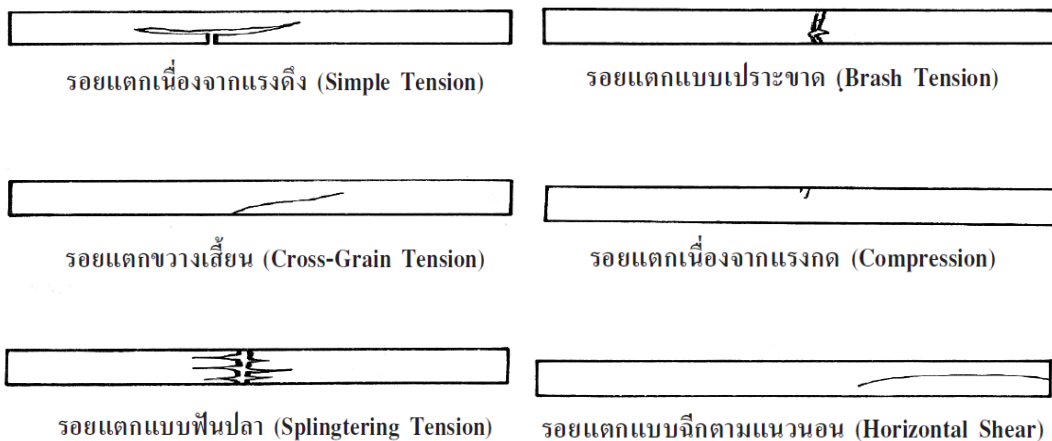


ภาพที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการแอ่นตัวภายใต้การคัต

ที่มา : กรมโยธาและผังเมือง, 2551 : 31



คำนวณค่าต่าง ๆ ประกอบด้วย ค่ากำลังคัด ณ จุดจำกัดสัดส่วนหาได้จากการคำนวณค่าหน่วยแรงสูงสุดที่กระทำบนผิวของไม้ตัวอย่างภายใต้การคัด โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ค่ากำลังเฉือนสูงสุดหาได้จากการคำนวณหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในไม้ตัวอย่างภายใต้แรงคัดสูงสุดที่ทำให้ไม้ตัวอย่างวิบัติ โมดูลัสแตกร้าหรือกำลังคัดสูงสุดหาได้จากการคำนวณหน่วยแรงสูงสุดภายใต้การคัดแล้วทำให้ไม้ตัวอย่างวิบัติ โมดูลัสยืดหยุ่นหาได้จากอัตราส่วนของหน่วยแรงต่อความเครียดภายใต้สภาวะยืดหยุ่น และค่าโมดูลัสคั้นตัวหาได้จากพื้นที่ใต้โค้งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในสภาวะยืดหยุ่น ค่าโมดูลัสคั้นตัวยังสามารถใช้ระบุพิกัดความเหนียว (Toughness) หรือพิกัดด้านแรงกระแทก (Shock-Resistance) ได้อีกด้วย ในขณะที่การวิบัติของไม้ภายใต้การคัดมีหลายรูปแบบดังแสดงในภาพที่ 5.21 เช่น รอยแตกเนื่องจากแรงดึง รอยแตกแบบเปราะขาด รอยแตกขวางเส้น รอยแตกเนื่องจากแรงกด รอยแตกแบบฟันปลา และรอยแตกแบบฉีกตามแนวนอน เป็นต้น



ภาพที่ 5.21 ลักษณะการวิบัติของไม้จากการทดสอบการคัดแบบสถิต

ที่มา : กรมโยธาและผังเมือง. 2551 : 32

นอกจากนั้นในการทดสอบการคัดของไม้แปรรูปขนาดเท่ากับ โครงสร้างจริง (Flexure Test of Structural Members) ก็สามารทำได้เช่นกัน โดยข้อกำหนดในมาตรฐาน ASTM D198 กล่าวถึงวัตถุประสงค์ไว้ว่า เพื่อศึกษาพฤติกรรมของไม้ตัวอย่างทั้งไม้จริงและไม้เชิงประกอบที่มีขนาดเท่ากับ โครงสร้างจริงภายใต้โมเมนต์คัด ไม้ที่นำมาทำการทดสอบโดยทั่วไปมักมีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่อาจประยุกต์การทดสอบนี้กับหน้าตัดรูปแบบอื่นก็ได้เช่นกัน ไม้ตัวอย่างจะถูกวางไว้บนจุดรองรับที่มีระยะห่างแปรเปลี่ยนไปตามขนาดของไม้ตัวอย่าง แรงที่กระทำกับไม้ตัวอย่างมี 3 รูปแบบคือ แรงกระทำกึ่งกลาง (Center-Point Loading) แรงกระทำสองจุด (Two-Point Loading) และแรงกระทำแบบสามส่วน (Third-Point Loading) ตามลำดับ การเลือกแรง

กระทำรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของไม้ตัวอย่างและประสิทธิภาพของเครื่องทดสอบ เช่น ไม้ตัวอย่างขนาดใหญ่และเป็นไม้เนื้อแข็งควรเลือกรูปแบบแรงกระทำกึ่งกลางเนื่องจากโมเมนต์ดัดสูงสุดจะเกิดเพียงจุดเดียวที่กึ่งกลางคาน กรณีไม้ตัวอย่างทั่วไปมักเลือกรูปแบบแรงกระทำสองจุดหรือแรงกระทำแบบสามส่วนเนื่องจากโมเมนต์ดัดสูงสุดจะกระจายอยู่ระหว่างหัวคดทั้งสองเป็นต้น แรงที่กระทำควรมีอัตราส่วนที่สอดคล้องกับไม้ตัวอย่างวิบัติ ถ้าไม้ตัวอย่างมีอัตราส่วนความลึกต่อความกว้างมากกว่า 3 จะต้องทำการค้ำยันด้านข้างเพื่อป้องกันการบิดตัว บันทึกแรงและการแอ่นตัวตลอดจนลักษณะการวิบัติของไม้ตัวอย่าง คำนวณหาค่าต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์การทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบการค้ำแบบสถิติมาตรฐาน ASTM D143

### การจำแนกประเภทของไม้

การจำแนกประเภทของไม้มีหลักเกณฑ์ที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน รายละเอียดการจำแนกประเภทของไม้มีดังต่อไปนี้ (กวี หวังนิเวศน์กุล, 2552 : 25-27, พงศ์พันธ์ วรสุนทรโรสด และวรพงศ์ วรสุนทรโรสด, 2555 : 22-29, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท.1002-16, 2539 : 8)

#### 1. การจำแนกไม้ตามหลักด้านพฤกษศาสตร์

การจำแนกประเภทของไม้โดยอาศัยหลักการด้านพฤกษศาสตร์สามารถแบ่งไม้ออกเป็น 2 ชนิดคือ ไม้เนื้ออ่อน (Softwoods) เป็นไม้ที่ได้จากต้นไม้จำพวกสนหรือต้นไม้ที่มีใบเรียวยาว ไม้เนื้ออ่อนมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าไม้เนื้อแข็งแต่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป ข้อดีของไม้เนื้ออ่อนคือไสตบแต่งผิวไม้ง่าย สำหรับไม้เนื้อแข็ง (Hardwoods) เป็นไม้ที่ได้มาจากต้นไม้ขนาดใหญ่ที่มีลักษณะใบกว้างสามารถพบเห็นได้ทั่วไปในพื้นที่ป่าไม้ของประเทศไทย ไม้เนื้อแข็งมีโครงสร้างเนื้อไม้ที่ซับซ้อนกว่าไม้เนื้ออ่อนจึงมีความแข็งแรงมากกว่า และสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกได้ดัดนำมาไปใช้งานโครงสร้าง

#### 2. การจำแนกไม้ตามคุณสมบัติทางกล

กรมป่าไม้ (2010) ได้จำแนกประเภทของไม้ตามคุณสมบัติทางกลโดยพิจารณาจากคุณสมบัติ 4 ด้านคือ หน่วยแรงอัด หน่วยแรงดึง หน่วยแรงเฉือน และหน่วยแรงดัด ตามลำดับ หน่วยแรงดังกล่าวได้จากการนำไม้ตัวอย่างที่มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 12 มาทดสอบกำลังดัด นอกจากนั้นยังนำไม้ตัวอย่างมาทดสอบความทนทานตามธรรมชาติอีกด้วย ผลการทดสอบจะถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภทของไม้ซึ่งกรมป่าไม้ได้จำแนกไม้เป็น 3 ประเภทคือ ไม้เนื้อแข็งมีความแข็งแรงมากกว่า 1,000 ksc มีความทนทานมากกว่า 6 ปี ไม้เนื้อแข็งปานกลางมีความ

แข็งแรงระหว่าง 600-1,000 ksc มีความทนทานระหว่าง 2-6 ปี และไม้เนื้ออ่อนมีความแข็งแรงน้อยกว่า 600 ksc มีความทนทานน้อยกว่า 2 ปี ตามลำดับ

ตัวอย่างไม้ที่จัดอยู่ในประเภทไม้เนื้อแข็งตามมาตรฐานกรมป่าไม้มีดังต่อไปนี้

ไม้เต็ง (*Shorea Obtusa* Wall) ลักษณะเนื้อไม้หยาบสีน้ำตาลปนแดง แนวเส้นไม้เป็นระเบียบ เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียว ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $1,040 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 1,784 ksc และความทนทานมากกว่า 10 ปี ไม้เต็งเมื่อแห้งแล้วเลื่อยและไสตกแต่งยาก มักใช้ทำเป็นชิ้นส่วนของโครงสร้าง

ไม้ประดู่ (*Pterocarpus Macrocarpus*) ลักษณะเนื้อไม้ละเอียดปานกลางสีแดงปนเหลือง และมีแนวเส้นสีเข้ม แนวเส้นไม้เป็นระเบียบแต่มีลวดลายสวยงาม เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียวปานกลาง เลื่อยและไสตกแต่งได้ง่าย ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $800 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 1,417 ksc และความทนทานมากกว่า 10 ปี มักใช้ทำเป็นชิ้นส่วนของโครงสร้างหรือเครื่องเรือน

ไม้แดง (*Xylia Kerrii* Craib and Hutch) ลักษณะเนื้อไม้ละเอียดปานกลางสีแดงหรือน้ำตาลปนเหลือง ปลูกหรือเพรียงไม่ค่อยทำลาย แนวเส้นไม้เป็นระเบียบ เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียว ไสตกแต่งและขัดเงาได้ดี ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $960 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 1,356 ksc และความทนทานมากกว่า 10 ปี มักใช้ทำเป็นชิ้นส่วนอาคารที่รับน้ำหนักไม่มากนัก เช่น ผนัง วงกบประตู หรือวงกบหน้าต่าง เป็นต้น

ไม้มะค่าแต้ (*Sindora Siamensis*) ลักษณะเนื้อไม้หยาบสีน้ำตาลผิวมัน แนวเส้นไม้เป็นระเบียบ เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียวมาก ปลูกไม่ทำลาย เลื่อยและไสตกแต่งได้ยาก ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $1,090 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 1,274 ksc และความทนทานมากกว่า 10 ปี มักใช้ทำเป็นชิ้นส่วนของโครงสร้าง

ไม้ตะแบกใหญ่ (*Lagerstroemia Calyculata* Kurz) ลักษณะเนื้อไม้ละเอียดปานกลางสีเทาหรือน้ำตาลปนเทา แนวเส้นตรง เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียว เลื่อยและไสตกแต่งได้ง่าย ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $850 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 1,244 ksc และความทนทานเมื่อใช้ในที่ร่มระหว่าง 6-10 ปี มักใช้ทำเป็นเสาอาคารหรือเครื่องเรือน

ไม้ตะเคียนทอง (*Hopea Odorata* Roxb) ลักษณะเนื้อไม้ละเอียดปานกลางสีน้ำตาลปนเหลืองและมีแนวเทาขาวของท่อน้ำยาง ปลูกไม่ค่อยทำลาย แนวเส้นไม้เป็นระเบียบ เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียว ไสตกแต่งและขัดเงาได้ดี ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $750 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 1,182 ksc และความทนทานระหว่าง 6-10 ปี มักใช้ทำเป็นชิ้นส่วนของโครงสร้างทั่วไปที่รับน้ำหนักบรรทุกไม่มากนัก

ไม้สัก (*Tectona Grandis* Linn.f) ลักษณะเนื้อไม้ละเอียดปานกลางสีเหลืองหรือน้ำตาลปนเหลืองและมีแนวเส้นสีเข้มของท่อน้ำยาง ปลูกไม่ทำลาย แนวเส้นตรง เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียวปานกลาง เลื่อยและไสตกแต่งได้ง่าย ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $640 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 1,040 ksc และความทนทานมากกว่า 10 ปี มักใช้ทำเป็นบานประตู บานหน้าต่าง และเครื่องเรือนแกะสลัก

ตัวอย่างไม้ที่จัดอยู่ในประเภทไม้เนื้อแข็งปานกลางตามมาตรฐานกรมป่าไม้มีดังต่อไปนี้

ไม้นันทรี (*Peltophorum Dasyrachis* Kurr) ลักษณะเนื้อไม้หยาบปานกลางสีน้ำตาลปนชมพูผิวมันวาว แนวเส้นตรง เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียวปานกลาง เลื่อยและไสตกแต่งได้ง่าย ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $575 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 948 ksc และความทนทานอยู่ระหว่าง 2-6 ปี มักใช้ทำชิ้นส่วนก่อสร้างทั่วไปที่ไม่โดนฝน เช่น ไม้ฝา ไม้พื้น หรือฝ้าเพดาน เป็นต้น

ไม้อย่าง (*Dipterocarpus* sp.) ลักษณะเนื้อไม้หยาบสีแดงหรือน้ำตาลเข้ม แนวเส้นตรง เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียวปานกลาง ขณะที่ต้นไม้อยังมีชีวิตอยู่สามารถเผาเพื่อเอาน้ำมันยางได้ เลื่อยและไสตกแต่งได้ง่าย ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $720 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 907 ksc และความทนทานอยู่ระหว่าง 2-6 ปี มักใช้ทำชิ้นส่วนก่อสร้างที่ไม่โดนฝน เช่น ไม้ฝา ไม้โครงคร่า หรือฝ้าเพดาน เป็นต้น

ไม้กะบาก (*Anisoptera Oblonga* Dyer) ลักษณะเนื้อไม้หยาบสีน้ำตาลอ่อนปนแดง แนวเส้นตรง เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียวปานกลาง เลื่อยและไสตกแต่งได้ง่าย ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $600 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 770 ksc และความทนทานอยู่ระหว่าง 2-6 ปี มักใช้ทำเป็นไม้แบบหล่อคอนกรีตหรือกล่องเครื่องมือเนื่องจากไม้บิดหรือโค้งงอเมื่อมีความชื้น

ไม้กระท้อน (*Sandoricum Indicum* Care) ลักษณะเนื้อไม้หยาบสีแดงปนเทา แนวเส้นตรง เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียวปานกลาง เลื่อยและไสตกแต่งได้ง่าย กำลังคัดสูงสุดประมาณ 795 ksc และความทนทานอยู่ระหว่าง 2-6 ปี มักใช้ทำเป็นเครื่องเรือน ไม้พื้น หรือฝ้าเพดาน

ไม้มะม่วงป่า (*Mangifera Caloneura*) ลักษณะเนื้อไม้หยาบปานกลางสีน้ำตาลไหม้ ผิวมันวาวเล็กน้อย แนวเส้นตรง เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียวปานกลาง เลื่อยและไสตกแต่งได้ง่าย ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $600 \text{ kg/m}^3$  ความทนทานอยู่ระหว่าง 2-6 ปี มักใช้ทำเป็นเครื่องเรือนและเป็นวัตถุค้ำไม้อัด

ตัวอย่างไม้ที่จัดอยู่ในประเภทไม้เนื้ออ่อนตามมาตรฐานกรมป่าไม้มีดังต่อไปนี้

ไม้สยาขาว (*Shorea Leprosula* Miq.) ลักษณะเนื้อไม้หยาบสีชมพูปนขาวหรือน้ำตาลอ่อนปนแดง แนวเส้นไม้มันเรียบ เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียวน้อย เลื่อยและไสตกแต่ง

ได้ง่าย ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $480 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 866 ksc และความทนทานน้อยกว่า 2 ปี มักใช้ทำเครื่องเรือนหรือไม้โครงคร่าว

ไม้มะยมป่า (*Ailanthus Fauvetiana*) ลักษณะเนื้อไม้หยาบสีขาวปนเหลืองอ่อน แนวเส้นตรง เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียวน้อย เลื่อยและไสตดแต่งได้ง่าย ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $400 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 561 ksc และความทนทานน้อยกว่า 2 ปี มักใช้ทำก้านไม้ขีด หรือเครื่องเรือน

ไม้ก้านเหลือง (*Nauclea Orientalis* Linn) ลักษณะเนื้อไม้ละเอียดปานกลางสีเหลืองเข้มหรือเหลืองปนแสด แนวเส้นไม้เป็นระเบียบ เนื้อไม้มีความแข็งและเหนียวน้อย เลื่อยและไสตดแต่งได้ง่าย ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $540 \text{ kg/m}^3$  กำลังคัดสูงสุดประมาณ 449 ksc และความทนทานน้อยกว่า 2 ปี มักใช้ทำเครื่องเรือน ไม้ฝา หรือไม้พื้น

### 3. การจำแนกไม้ตามหน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับมาตรฐานชั้นไม้ก่อสร้าง

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท.1002-16 (2539 : 8) ได้จำแนกประเภทของไม้แปรรูปเพื่อใช้ในการคำนวณและออกแบบอาคารที่สร้างจากไม้ การจำแนกไม้จะพิจารณาจากค่าหน่วยแรงหรือค่าหน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับมาตรฐานชั้นไม้ก่อสร้าง โดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยแบ่งไม้เป็น 5 ประเภทคือ ไม้เนื้ออ่อนมาก ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อปานกลาง ไม้เนื้อแข็ง และไม้เนื้อแข็งมาก ตามลำดับ ค่าหน่วยแรงกับสภาวะใช้งานไม้จะแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณความชื้นและระยะเวลาที่ไม่รับน้ำหนักบรรทุก ถ้าหากไม้ถูกใช้งานในสภาวะแห้งตลอดเวลาจะทำให้คุณสมบัติทางกลของไม้เป็นไปตามข้อกำหนดที่แสดงในตารางที่ 5.1 แต่ถ้าไม้ถูกใช้งานในน้ำหรือสัมผัสความชื้นตลอดเวลาที่จะถูกลดค่าหน่วยแรงอัดขนานเสียนลงร้อยละ 10 และลดค่าหน่วยแรงอัดตั้งฉากเสียนลงร้อยละ 33 นอกจากนั้นวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยก็ยังได้กำหนดค่าหน่วยแรงที่ยอมให้เฉลี่ยสำหรับไม้ทั้ง 5 ประเภทเอาไว้ด้วยดังแสดงในตารางที่ 5.2

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท. 1002-16 (2539) กล่าวถึงค่าหน่วยแรงที่ยอมให้สำหรับการรับน้ำหนักบรรทุกในสภาวะปกติของไม้สามารถใช้ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 5.1 และ 7.2 ตามลำดับโดยไม่ต้องคำนึงถึงผลจากแรงกระแทก แต่ในกรณีที่ไม้รับน้ำหนักบรรทุกในช่วงระยะเวลาที่สั้นวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยก็ได้กำหนดให้ไม้นั้นสามารถเพิ่มค่าหน่วยแรงที่ยอมให้มากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.1 ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ตามข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับอาคารไม้

| ชื่อไม้                  | ความถ่วงจำเพาะ | ความหนาแน่น<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | หน่วยแรงคดหรือหน่วยแรงดึงขนานเสี้ยน<br>(ksc) | โมดูลัสยืดหยุ่น<br>(ksc) | หน่วยแรงอัด<br>(ksc) |            | หน่วยแรงเฉือนประลัษ<br>ขนานเสี้ยน<br>(ksc) |
|--------------------------|----------------|-------------------------------------|--|--------------------------|----------------------|------------|--|
|                          |                |                                     |  |                          | ขนานเสี้ยน           | ขวางเสี้ยน |  |
| 1. ประเภทไม้เนื้ออ่อนมาก |                |                                     |  |                          |                      |            |  |
| กระท้อน                  | 0.57           | 580                                 | 485  | 74,927                   | 194                  | 77         | 66   |
| จำปาป่า                  | 0.51           | 500                                 | 553  | 76,102                   | 279                  | 71         | 157  |
| จิกนม                    | 0.65           | 630                                 | 463  | 64,644                   | 210                  | 87         | 163  |
| ฝิง                      | 0.53           | 530                                 | 581  | 89,542                   | 332                  | 55         | 126  |
| ยมหอม                    | 0.53           | 530                                 | 605  | 83,864                   | 230                  | 58         | 95   |
| ยางขาว                   | 0.70           | 690                                 | 612  | 89,929                   | 312                  | 65         | 161  |
| สองสลึง                  | 0.44           | 450                                 | 467  | 73,481                   | 105                  | 60         | 70   |
| 2. ประเภทไม้เนื้ออ่อน    |                |                                     |  |                          |                      |            |  |
| กราด                     | 0.87           | 870                                 | 656  | 92,563                   | 296                  | 105        | 149  |
| กระเจา                   | 0.71           | 700                                 | 648  | 88,956                   | 246                  | 104        | 142  |
| กะบาก                    | 0.74           | 740                                 | 770  | 105,017                  | 217                  | 62         | 80   |
| ตะปุ่นขาว                | -              | 590                                 | 649  | 89,438                   | 365                  | 99         | 148  |
| พญาไม้                   | 0.67           | 570                                 | 645  | 87,152                   | 310                  | 63         | 101  |
| พะยอม                    | 0.82           | 730                                 | 717  | 94,099                   | 340                  | 97         | 135  |
| ยางแดง                   | -              | 760                                 | 739  | 113,651                  | 367                  | 65         | 166  |
| สัก                      | 0.62           | 630                                 | 641  | 81,573                   | 327                  | 80         | 134  |
| อินทนิล                  | 0.65           | 640                                 | 697  | 92,720                   | 340                  | 77         | 157  |
| 3. ประเภทไม้เนื้อปานกลาง |                |                                     |  |                          |                      |            |  |
| กิ้วัว                   | 0.69           | 690                                 | 806  | 97,770                   | 378                  | 120        | 136  |
| ตะเคียนทอง               | 0.77           | 760                                 | 816  | 104,940                  | 354                  | 116        | 123  |
| ตะเคียนหนู               | 0.86           | 860                                 | 841  | 94,503                   | 288                  | 170        | 76   |
| ตะแบก                    | 0.72           | 720                                 | 808  | 112,556                  | 374                  | 105        | 175  |
| ตาเสือ                   | 0.74           | 750                                 | 867  | 124,100                  | 500                  | 102        | 82   |

ที่มา : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท. 1002-16. 2539

ตารางที่ 5.1 (ต่อ) ค่าหน่วยแรงที่ยอมรับได้ของไม้ตามข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับอาคารไม้

| ชื่อไม้                  | ความถ่วงจำเพาะ | ความหนาแน่น<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | หน่วยแรงคัต<br>หรือหน่วยแรง<br>ดึงขนานเสี้ยน<br>(ksc) | โมดูลัส<br>ยืดหยุ่น<br>(ksc) | หน่วยแรงอัด<br>(ksc) |                | หน่วยแรง<br>เฉือนประลัษ<br>ขนานเสี้ยน<br>(ksc) |
|--------------------------|----------------|-------------------------------------|---|------------------------------|----------------------|----------------|--|
|                          |                |                                     |   |                              | ขนาน<br>เสี้ยน       | ขวาง<br>เสี้ยน |  |
| 3. ประเภทไม้เนื้อปานกลาง |                |                                     |   |                              |                      |                |  |
| นนทรี                    | 0.82           | 810                                 | 813   | 107,931                      | 346                  | 113            | 68   |
| พลวง                     | 0.94           | 940                                 | 939   | 129,683                      | 351                  | 99             | 134  |
| มะค่าแต้                 | 0.99           | 990                                 | 954   | 125,800                      | 357                  | 231            | 208  |
| ยูง                      | 0.75           | 720                                 | 806   | 120,586                      | 364                  | 68             | 174  |
| รกฟ้า                    | 1.14           | 1,130                               | 854   | 111,315                      | 334                  | 155            | 192  |
| เหียง                    | 0.90           | 900                                 | 816   | 102,754                      | 358                  | 119            | 211  |
| 4. ประเภทไม้เนื้อแข็ง    |                |                                     |   |                              |                      |                |  |
| ก้านกรา                  | 0.93           | 920                                 | 999   | 154,865                      | 388                  | 125            | 80   |
| แดง                      | 1.05           | 1,050                               | 1,193   | 153,129                      | 538                  | 219            | 120  |
| ตะคร้อไข่                | 1.11           | 1,080                               | 1,189   | 148,141                      | 442                  | 232            | 135  |
| ตะคร้อหนาม               | 1.11           | 1,110                               | 960   | 138,533                      | 350                  | 230            | 163  |
| เต็ง                     | 1.07           | 1,070                               | 924   | 115,464                      | 443                  | 184            | 146  |
| ประคู้                   | 0.82           | 840                                 | 1,163   | 128,448                      | 495                  | 201            | 164  |
| มะเกลือเลือด             | 1.02           | 1,020                               | 1,131   | 137,613                      | 425                  | 235            | 144  |
| มะค่าโมง                 | 0.85           | 850                                 | 996   | 101,721                      | 463                  | 121            | 167  |
| ยมหิน                    | 0.86           | 870                                 | 1,088   | 131,629                      | 350                  | 174            | 139  |
| รัง                      | 1.15           | 1,060                               | 1,108   | 153,607                      | 496                  | 182            | 176  |
| เลียงมัน                 | 0.98           | 990                                 | 1,155   | 161,506                      | 463                  | 172            | 202  |
| สักขี้ควาย               | 0.88           | 880                                 | 1,063   | 131,968                      | 467                  | 184            | 146  |
| เสลา                     | 0.72           | 720                                 | 966   | 113,791                      | 450                  | 118            | 131  |
| หลุมพอ                   | -              | 850                                 | 1,070   | 137,543                      | 569                  | 103            | 140  |
| แอ๊ก                     | 0.78           | 870                                 | 1,060   | 136,953                      | 388                  | 136            | 151  |
| เคี่ยม                   | -              | 960                                 | -   | -                            | -                    | -              | -  |

ที่มา : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท. 1002-16. 2539



ตารางที่ 5.1 (ต่อ) ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ตามข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับอาคารไม้

| ชื่อไม้                  | ความถ่วงจำเพาะ | ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> ) | หน่วยแรงคัตหรือหน่วยแรงคิงขนานเสี้ยน (ksc) | โมดูลัสยืดหยุ่น (ksc) | หน่วยแรงอัด (ksc) |            | หน่วยแรงเฉือนประลัษย์ขนานเสี้ยน (ksc) |
|--------------------------|----------------|----------------------------------|--|-----------------------|-------------------|------------|---------------------------------------|
|                          |                |                                  |  |                       | ขนานเสี้ยน        | ขวางเสี้ยน |                                       |
| 5. ประเภทไม้เนื้อแข็งมาก |                |                                  |  |                       |                   |            |                                       |
| กระพี้เขาคาย             | 1.09           | 1,090                            | 1,357                                      | 145,380               | 500               | 217        | 174                                   |
| เขลียง                   | 1.10           | 1,100                            | 1,206                                      | 197,795               | 725               | 267        | 235                                   |
| ซาก                      | 1.09           | 1,120                            | 1,463                                      | 189,947               | 551               | 306        | 125                                   |
| ตีนนก                    | 0.99           | 990                              | 1,283                                      | 181,021               | 482               | 225        | 208                                   |
| บุนนาค                   | 1.12           | 1,120                            | 1,519                                      | 230,689               | 519               | 211        | 129                                   |

ที่มา : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท. 1002-16. 2539

ตารางที่ 5.2 ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ตามประเภทของไม้ตามมาตรฐานสำหรับอาคารไม้

| ประเภทของไม้        | หน่วยแรงคัตหรือหน่วยแรงคิงขนานเสี้ยน (ksc) | โมดูลัสยืดหยุ่น (ksc) | หน่วยแรงอัด (ksc) |               | หน่วยแรงเฉือนประลัษย์ขนานเสี้ยน (ksc) |
|---------------------|--|-----------------------|-------------------|---------------|---------------------------------------|
|                     |  |                       | ขนานเสี้ยน        | ตั้งฉากเสี้ยน |                                       |
| ไม้เนื้ออ่อนมาก     | 60   | 78,900                | 45                | 12            | 6                                     |
| ไม้เนื้ออ่อน        | 80   | 94,100                | 60                | 16            | 8                                     |
| ไม้เนื้อแข็งปานกลาง | 100  | 112,300               | 75                | 22            | 10                                    |
| ไม้เนื้อแข็ง        | 120  | 136,300               | 90                | 30            | 12                                    |
| ไม้เนื้อแข็งมาก     | 150  | 189,000               | 110               | 40            | 15                                    |

ที่มา : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท. 1002-16. 2539

### ตารางที่ 5.3 การเพิ่มค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้สำหรับระยะเวลาบรรจุช่วงสั้น

| ระยะเวลาการบรรจุน้ำหนัก            | การเพิ่มค่าหน่วยแรง (ร้อยละ) |
|------------------------------------|------------------------------|
| ระยะเวลาบรรจุน้ำหนักสูงสุด 2 เดือน | 15                           |
| ระยะเวลาบรรจุน้ำหนักสูงสุด 7 วัน   | 25                           |
| แรงลมหรือแผ่นดินไหว                | 33.33                        |
| แรงกระแทก                          | 100                          |

ที่มา : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท. 1002-16. 2539

### การรักษาเนื้อไม้

ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีอายุการใช้งานจำกัดเนื่องจากเสื่อมสภาพตามธรรมชาติหรือถูกทำลายจากแมลง นอกจากนั้นการเสื่อมสภาพอาจเกิดจากความชื้นหรือถูกเผาไหม้ก็ได้ การรักษาเนื้อไม้ให้มีความคงทนยอมทำให้อายุการใช้งานยืนยาวขึ้น การรักษาเนื้อไม้มีด้วยกันหลายวิธีแต่ที่นิยมมักใช้สารเคมีเคลือบที่ผิวไม้ การทาหรือพ่น (Surface Treatment) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดและมีค่าใช้จ่ายน้อย อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้คือมีเพียงสารเคมีเคลือบเฉพาะที่ผิวและส่วนน้อยซึมเข้าไปในเนื้อไม้ ในบางกรณีอาจใช้วิธีการอัดสารเคมีเข้าไปในเนื้อไม้ก็ได้ การอัดสารเคมีหรือการอัดน้ำยา (Pressure Treatment) เป็นวิธีรักษาเนื้อไม้ที่ดีกว่าการทาหรือพ่น การอัดน้ำยาแบ่งเป็น 2 วิธีคือ การอัดน้ำยาแบบเต็มเซลล์ (Full Cell Process) และการอัดน้ำยาแบบไม่เต็มเซลล์ (Empty Cell Process) อย่างไรก็ตามก่อนการอัดน้ำยาจะต้องเตรียมไม้ให้พร้อมเสียก่อน โดยไม้ที่ต้องการอัดน้ำยาแบบเต็มเซลล์จะต้องถูกไล่อากาศและน้ำออกจากเซลล์ก่อน จากนั้นจึงทำการอัดสารเคมีที่อุณหภูมิประมาณ 80-100°C เข้าไปในเนื้อไม้ด้วยแรงดันประมาณ 7-13 ksc จนสารเคมีเต็มเซลล์ไม้ สำหรับไม้ที่ต้องการอัดน้ำยาแบบไม่เต็มเซลล์จะต้องถูกอัดอากาศเข้าไปในเซลล์ไม้ก่อนเพื่อทำให้เซลล์ขยายตัวและขับสารเคมีออกจากเซลล์ด้วยแรงดัน 7-14 ksc จากนั้นจึงอัดสารเคมีเข้าไปในเนื้อไม้ ตามลำดับ การเลือกใช้สารเคมีจะต้องคำนึงถึงชนิดของไม้และวัตถุประสงค์การใช้งานดังรายละเอียดต่อไปนี้ (กวี หวังนิเวศน์กุล, 2552 : 45-46, พงศ์พันธุ์พร สุนทรโรสถ และวรพงศ์ สุนทรโรสถ, 2555 : 37-43, พิภพ สุนทรสมัย, 2540 : 25-34)

#### 1. สารเคมีรักษาเนื้อไม้

ซิงค์คลอไรด์ (Zinc Chloride) เป็นสารเคมีชนิดผงมีสีขาว ไม่มีกลิ่น ทนทานต่อการถูกเผาไหม้ คุณสมบัติป้องกันราและแมลงแต่ไม่สามารถป้องกันปลวกได้ ก่อนการใช้งานจะต้อง

ผสมซิงค์คลอไรด์กับน้ำร้อนเพื่อให้ละลายเป็นของเหลว เมื่อทาหรืออัดสารเคมีเข้าไปในเนื้อไม้แล้วไม่ควรให้โดนฝนหรือความชื้นเพราะจะทำให้สารเคมีเจือจางลง

โซเดียมฟลูออไรด์ (Sodium Fluoride) เป็นผลึกสีขาวละลายน้ำได้ดีมีคุณสมบัติรักษาเนื้อไม้คล้ายกับซิงค์คลอไรด์ การใช้งานจะต้องผสมกับน้ำเพื่อให้ละลายก่อนทาบนเนื้อไม้

ครีโอสต์ (Coal-Tar Creosote) เป็นสารเคมีป้องกันเชื้อราและแมลง โดยทั่วไปมีสีดำหรือสีน้ำตาลเข้มเนื่องจากเป็นสารเคมีที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบสามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อไม้ได้ดีและไม่ละลายน้ำ ดังนั้นสารเคมีชนิดนี้จึงสามารถใช้ทาไม้ที่อยู่ภายนอกอาคารได้

ปิโตรเลียม (Petroleum) หรือน้ำมันเครื่องสามารถนำมาใช้ทาไม้เพื่อป้องกันสัตว์และป้องกันการฟูได้ อาจใช้ร่วมกับครีโอสต์ในอัตราส่วนเท่ากันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพก็ได้

สีน้ำมัน (Oil Paint) รวมถึงน้ำมันรักษาเนื้อไม้จำพวกเซลแล็ก (Shellac) และแล็กเกอร์ (Lacquer) มีคุณสมบัติเป็นฟิล์มบาง ๆ ป้องกันความชื้นไม่ให้ทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อไม้และเพิ่มความสวยงาม

## 2. สารเคมีเพื่อทำให้ไม้ทนไฟ

การทำให้ไม้ทนไฟเป็นการเพิ่มความต้านทานการถูกเผาไหม้โดยยึดระยะเวลาการติดไฟของไม้ให้นานยิ่งขึ้น สารเคมีที่ใช้ในการทำให้ไม้ทนไฟ เช่น แอมโมเนียโบรไมด์ (Ammonium Bromide) ไดอะเบสิกและโมโนเบสิกฟอสเฟตของแอมโมเนีย (Diabasic and Monobasic Phosphate of Ammonia) อะลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminum Sulphate) กรดบอริก (Boric Acid) แมกนีเซียมคลอไรด์ (Magnesium Chloride) และโซเดียมฟอสเฟต (Sodium Phosphate) เป็นต้น การทำให้สารเคมีแทรกซึมเข้าไปในเนื้อไม้เพื่อทำให้ไม้ทนไฟมักจะใช้วิธีการอัดน้ำยาแบบเต็มเซลล์

## สรุป

ไม้เป็นวัสดุธรรมชาติที่เกิดจากการแปรรูปต้นไม้ซึ่งมีโครงสร้างเซลล์ที่เกิดจากเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตประกอบด้วยเซลล์ที่ทอดตัวตามแนวยาวและแนวขวางของลำต้น ต้นไม้มีส่วนประกอบสำคัญคือ ราก ลำต้น และใบ โดยส่วนของลำต้นมักถูกนำมาแปรรูปเพื่อใช้งานก่อสร้างและมีแก่นไม้เป็นส่วนที่แข็งแรงที่สุดของลำต้น การแปรรูปลำต้นหรือท่อนซุงด้วยการผ่าหรือเลื่อยด้วยวิธีต่าง ๆ จะทำให้ได้ไม้แปรรูปที่มีความแข็งแรงแตกต่างกัน ข้อควรระวังภายหลังจากการเลื่อยไม้คือการหดตัวของเนื้อไม้จนเกิดการบิดงอหรือเสียรูป ไม้แปรรูปที่ดีควรมีขนาดหน้าตัดเท่ากันทุกท่อน มีผิวเรียบ ไม่บิดงอ และมีตำหนิน้อย ทั้งนี้ปริมาณความชื้นใน

เนื้อไม้จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกล นอกจากนั้นปริมาณความชื้นยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอีกด้วย

คุณสมบัติทางกายภาพของไม้มีความแตกต่างกันตามทิศทางแนวเส้นไม้ คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ เช่น ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น การนำความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะ การแพร่ความร้อน การขยายตัวทางความร้อน และการต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับคุณสมบัติทางกลของไม้มีความสำคัญต่อการคำนวณและออกแบบโครงสร้างไม้ คุณสมบัติทางกลของไม้ที่สำคัญ เช่น โมดูลัสยืดหยุ่นและความแข็งแรง เป็นต้น ในการจำแนกประเภทของไม้มีหลายแนวความคิดตามวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น การจำแนกประเภทไม้ตามหลักพฤกษศาสตร์ แบ่งไม้ออกเป็นไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง การจำแนกประเภทไม้ตามคุณสมบัติทางกลของกรมป่าไม้แบ่งไม้ออกเป็น 3 ชนิดคือ ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้อแข็งปานกลาง และไม้เนื้ออ่อน ส่วนการจำแนกไม้ตามหลักหน่วยแรงที่ยอมรับให้สำหรับมาตรฐานชั้นไม้ก่อสร้างตามข้อกำหนดของสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยแบ่งไม้ออกเป็น 5 ชนิดคือ ไม้เนื้ออ่อนมาก ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อปานกลาง ไม้เนื้อแข็ง และไม้เนื้อแข็งมาก เป็นต้น

ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีอายุการใช้งานจำกัดเนื่องจากการเสื่อมสภาพตลอดเวลาจากการทำลายของสิ่งมีชีวิตและสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงควรรักษาเนื้อไม้ให้มีความคงทนโดยใช้สารเคมีทาที่ผิวไม้หรืออัดเข้าไปในเนื้อไม้ การทาหรือพ่นเป็นวิธีที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายน้อยแต่สารเคมีจะเคลือบเฉพาะที่ผิวไม้ สำหรับการอัดสารเคมีเข้าไปในเนื้อไม้เป็นวิธีรักษาไม้ที่ดีว่าการทาหรือพ่นแต่มีค่าใช้จ่ายสูงกว่า อย่างไรก็ตามการเลือกใช้สารเคมีรักษาเนื้อไม้ชนิดใดนั้นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์การใช้งานร่วมด้วย

### คำถามทบทวน

1. จงบอกคุณสมบัติเด่นของไม้เมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างประเภทอื่น
2. ไม้แปรรูปที่จะนำมาใช้ทำเป็นเสาอาคารควรมีคุณสมบัติอย่างไร
3. คำหืนในเนื้อไม้เกิดจากสาเหตุอะไรบ้าง
4. การเลื่อยไม้ทำให้เกิดคำหืนในไม้แปรรูปอย่างไร
5. จงอธิบายวิธีการรักษาเนื้อไม้จากสาเหตุที่แมลงกัดกินเนื้อไม้
6. ไม้เนื้ออ่อนสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างประเภทใดบ้าง
7. สาเหตุการเสื่อมสภาพของไม้เกิดจากปัจจัยอะไรบ้าง
8. แนวเสี้ยนไม้ของไม้แปรรูปมีผลอย่างไรต่อการรับแรง
9. ผลิตภัณฑ์ไม้ประสานแตกต่างจากไม้อัดอย่างไร
10. ปริมาณความชื้นในเนื้อไม้มีผลต่อคุณสมบัติทางกลอย่างไร
11. ผลการทดสอบกำลังเฉือนในแนวนานเสี้ยนไม้พบว่าต้องใช้น้ำหนักกด 315 kg จึงทำให้แท่งไม้ตัวอย่างวิบัติ จงหาลำดับเฉือนของแท่งไม้นี้และจงระบุว่าเป็นไม้ประเภทใดตามข้อกำหนดวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท. 1002-16 (ตอบ : กำลังเฉือน = 12.6 ksc, ไม้เนื้อแข็ง)
12. ผลการทดสอบกำลังดึงในแนวนานเสี้ยนไม้พบว่าต้องใช้น้ำหนักดึง 240 kg จึงทำให้แท่งไม้ตัวอย่างวิบัติ จงหาลำดับดึงของแท่งไม้นี้และจงระบุว่าเป็นไม้ประเภทใดตามข้อกำหนดวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท. 1002-16 (ตอบ : กำลังดึง = 154 ksc, ไม้เนื้อแข็งมาก)

## บทที่ 6

### คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ

ในขณะที่วัสดุชนิดใหม่มีการคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่องแต่วัสดุพื้นฐานจำพวก หิน ดิน ไม้ ซีเมนต์ และเหล็ก ยังคงมีการใช้งานแพร่หลายอยู่ในปัจจุบัน นอกจากความรู้ด้านกลศาสตร์วัสดุแล้วความรู้ด้านอื่นที่เกี่ยวข้องก็มีส่วนสำคัญต่อการศึกษาวัสดุก่อสร้าง ดังนั้นบทนี้จึงนำเสนอความรู้ทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับวัสดุก่อสร้างซึ่งมีเนื้อหาประกอบด้วย การศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุที่ตอบสนองต่อแรง คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ เครื่องมือวัดที่นิยมใช้ในการทดสอบวัสดุ การศึกษาความผันแปรของวัสดุจากกระบวนการผลิตหรือจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ วัสดุกับความคุ้มค่า วัสดุกับความสวยงาม และวัสดุกับความยั่งยืนตามลำดับ

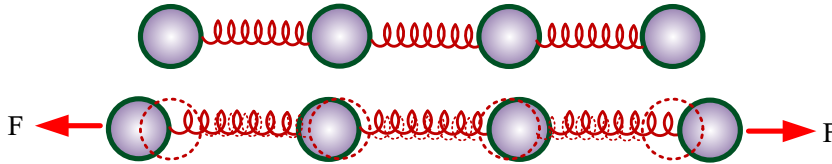
#### การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ตอบสนองต่อแรง

วัตถุโดยทั่วไปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีแรงมากระทำ การตอบสนองต่อแรงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลของวัสดุซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทก่อนหน้า ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) มักอาศัยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด กล่าวคือเมื่อวัตถุเกิดแรงด้านภายในจนส่งผลให้เกิดหน่วยแรงแล้วก็จะทำให้รูปร่างเปลี่ยนไปด้วยจนเกิดความเครียดไปพร้อมกัน หากพิจารณารูปแบบของแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดก็จะสามารถจำแนกการเปลี่ยนแปลงรูปร่างออกเป็นรูปแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (Michael F. Ashby and David R.H. Jones. 2005 : 32-46, Michael S. Mamlouk and John P. Zanievski. 2011: 5-17 and Mikell P. Groover. 2013 : 52-61)

#### 1. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอีลาสติก

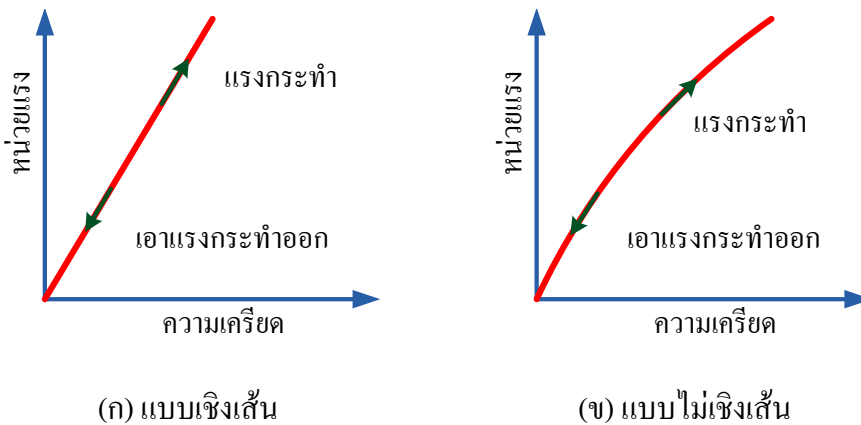
การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอีลาสติก (Elastic Deformation) หรือแบบยืดหยุ่นเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุที่ตอบสนองต่อแรงที่มากระทำแล้วสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อแรงกระทำหายไป ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากอะตอมของวัสดุในสภาวะยืดหยุ่นจะเกิดการยืดหรือหดระหว่างพันธะโดยไม่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอะตอม พันธะระหว่างอะตอมจะมีลักษณะเสมือนเป็นสปริงขนาดเล็กยึดระหว่างอะตอมข้างเคียงดังแสดงในภาพที่ 6.1 เมื่อแรงกระทำหายไประยะห่างของพันธะจะกลับคืนสู่ตำแหน่งเดิม ยกตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอีลาสติกเมื่ออยู่ในช่วงขีดจำกัดสัดส่วน เป็นต้น ความสัมพันธ์ระหว่าง

หน่วยแรงและความเครียดในสภาวะอีลาสติกอาจมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นหรือแบบไม่เชิงเส้นก็ได้ดังแสดงในภาพที่ 6.2



ภาพที่ 6.1 พันธะระหว่างอะตอมของวัสดุเสมือนเป็นสปริงขนาดเล็ก

ที่มา : Michael F. Ashby and David R.H. Jones. 2005 : 36



ภาพที่ 6.2 แผนภาพหน่วยแรงและความเครียดแบบอีลาสติก

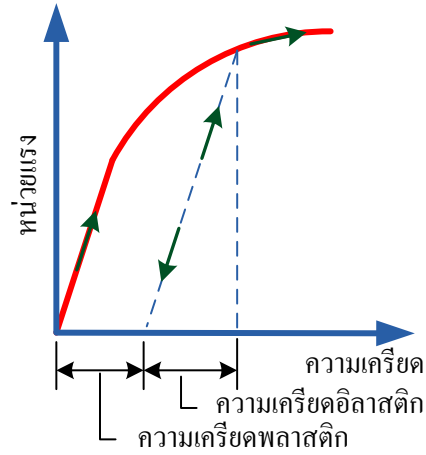
ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011 : 7

## 2. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก (Plastic Deformation) เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุที่ตอบสนองต่อแรงที่มากระทำแล้วไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เมื่อแรงที่กระทำหายไป สาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรเนื่องจากการยืดหรือหดระหว่างพันธะเกิดขึ้นจนกระทั่งอะตอมได้เลื่อนไปอยู่ตำแหน่งใหม่และโครงสร้างอะตอมเปลี่ยนไป จากภาพที่ 6.3 เป็นตัวอย่างผลการทดสอบวัสดุบางชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอีลาสติกในช่วงแรกจนกระทั่งถึงขีดจำกัดสัดส่วน ถ้าหากหน่วยแรงและความเครียดเกินขีดจำกัดสัดส่วนไปแล้ววัตถุจะยังสามารถคืนตัวกลับได้แต่ไม่ใช่สภาพเดิม ความแตกต่างระหว่างความเครียดใหม่และความเครียดเดิมภายหลังจากแรงหายไปเรียกว่า ความเครียดพลาสติก (Plastic Strain) เมื่อมีแรงมากระทำซ้ำอีกวัตถุนั้นจะยังคงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอีลาสติกโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเป็นแบบเชิงเส้นที่ขนานกับแนวเดิมที่เกิดจากแรงกระทำรอบ



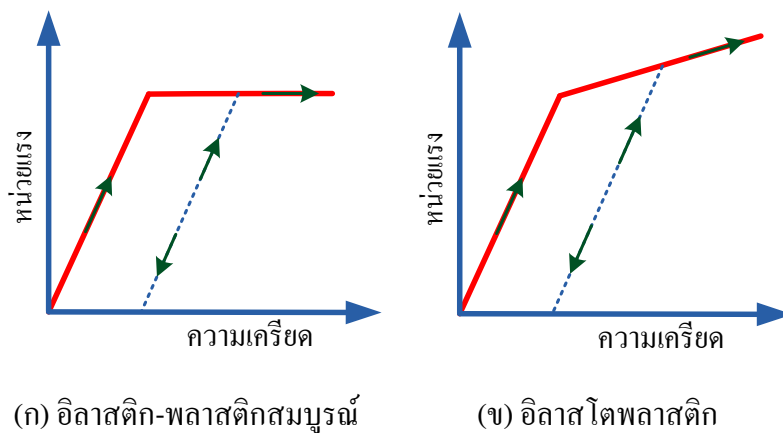
แรก กระทั่งแรงที่กระทำซ้ำทำให้ถึงขีดจำกัดสัดส่วนใหม่ความชันของเส้นจึงเปลี่ยนไปส่งผลทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกอีกครั้ง



ภาพที่ 6.3 แผนภาพหน่วยแรงและความเครียดแบบพลาสติก

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011 : 9

เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในสภาวะพลาสติกของวัสดุชนิดต่าง ๆ มักเป็นเส้นโค้งจึงมีความซับซ้อนในการนำมาประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นจึงมีการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบอิลาสติกในช่วงแรกและแบบพลาสติกในช่วงหลัง ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในสภาวะพลาสติกสมมติแบ่งเป็น 2 แบบคือ แบบอิลาสติก-พลาสติกสมบูรณ์ (Elastic-Perfectly Plastic) และแบบอิลาสโตพลาสติก (Elastoplastic) ดังแสดงในภาพที่ 6.4



(ก) อิลาสติก-พลาสติกสมบูรณ์

(ข) อิลาสโตพลาสติก

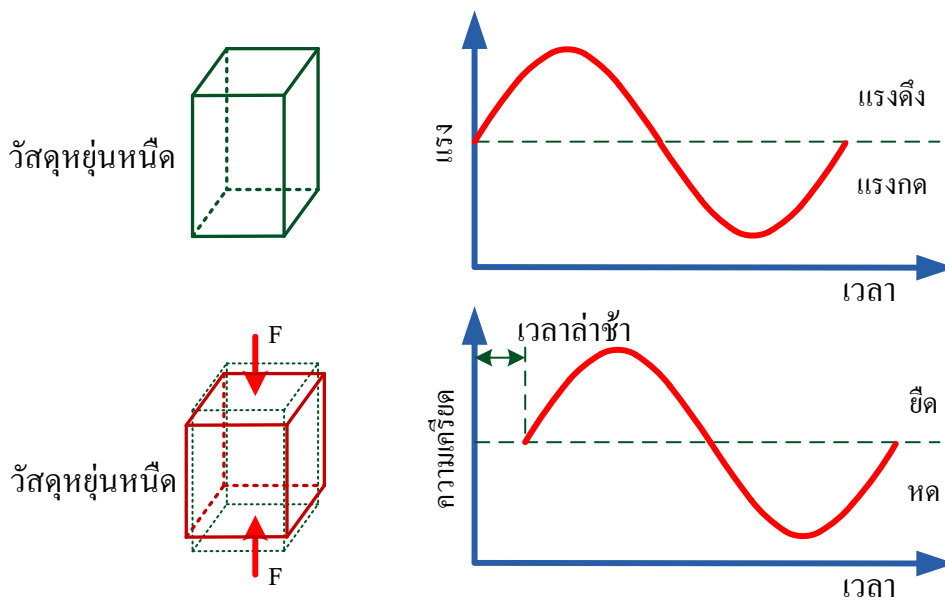
ภาพที่ 6.4 แผนภาพหน่วยแรงและความเครียดแบบพลาสติกสมมติ

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011 : 9

ภาพที่ 6.4(ก)เป็นแผนภาพหน่วยแรงและความเครียดแบบอิลาสติก-พลาสติกสมบูรณ์ที่วัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอิลาสติกในช่วงแรกและแบบพลาสติกสมบูรณ์ในช่วงหลัง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกสมบูรณ์คือการเปลี่ยนแปลงความเครียดในขณะที่หน่วยแรงคงที่ แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะนี้มักใช้กับวัสดุบางประเภท เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เป็นต้น สำหรับภาพที่ 6.4(ข)เป็นแผนภาพหน่วยแรงและความเครียดที่มีลักษณะแบบ อิลาสโตพลาสติก การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอิลาสโตพลาสติกแบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอิลาสติกและช่วงหลังเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ผสมระหว่างอิลาสติกและพลาสติก กล่าวคือเมื่อหน่วยแรงภายในวัสดุเกิดขึ้นจนถึงขีดจำกัดความ เป็นสัดส่วนแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติกในลักษณะที่เกิดความเครียดแข็ง (Strain Hardening) หรือความเครียดอ่อน (Strain Softening) การเกิดความเครียดแข็งสามารถเกิดขึ้นได้ในกระบวนการผลิต เช่น การเกิดความเครียดแข็งในเหล็กรีดเย็น โดยการทำให้เกิดการ เสียรูปอย่างถาวรก่อนการนำไปใช้งานเพื่อเพิ่มหน่วยแรงครากให้กับชิ้นงาน เป็นต้น ส่วนการ เกิดความเครียดอ่อนสามารถเกิดขึ้นได้กับวัสดุบางชนิด เช่น การเกิดความเครียดอ่อนใน คอนกรีตเมื่อคอนกรีตรับแรงกดแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรจากรอยแตกร้าวขนาด เล็กระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ เป็นต้น

### 3. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบหยุ่นหนืด

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบหยุ่นหนืด (Viscoelastic Deformation) คือการเปลี่ยนแปลง รูปร่างของวัตถุที่ตอบสนองต่อแรงโดยมีพฤติกรรมร่วมกันระหว่างคุณสมบัติแบบอิลาสติกของ ของแข็งและคุณสมบัติแบบหนืดของของเหลว ตัวอย่างวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบหยุ่นหนืด เช่น แอสฟัลท์ พลาสติก และยาง เป็นต้น โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบนี้เกิดขึ้นจากปัจจัยหลาย อย่าง เช่น อัตราเร็วที่แรงกระทำกับวัตถุและอุณหภูมิ เป็นต้น หากพิจารณาการเปลี่ยนแปลง รูปร่างเทียบกับเวลาที่ตอบสนองพบว่าวัสดุหยุ่นหนืดจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในทันทีเมื่อ มีแรงกระทำแต่จะทิ้งช่วงเวลานึงเสียก่อนจึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับลักษณะ ที่แรงกระทำ จากภาพที่ 6.5 เป็นตัวอย่างการตอบสนองของวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบหยุ่นหนืดเมื่อ มีแรงกระทำในแนวแกนรูปไซน์ (Sinusoidal Axial Load) จากภาพแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป ช่วงหนึ่งที่เรียกว่า เวลาล่าช้า (Time Lag) จึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในลักษณะรูปไซน์ ที่สอดคล้องกับแรงที่มากกระทำ เวลาล่าช้านี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและอุณหภูมิ ของสภาพแวดล้อม



ภาพที่ 6.5 แรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบหุ่่นหนืด

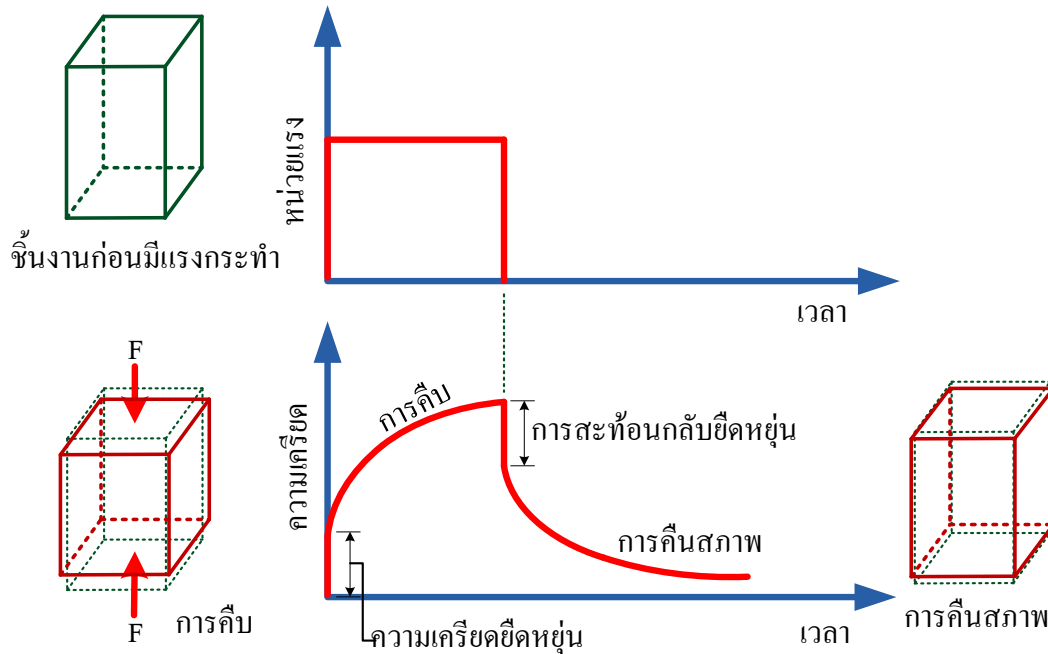
ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 12

#### 4. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบคืบ

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบคืบ (Creep) เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุที่เกิดขึ้นอย่างเชื่องช้าเมื่อมีแรงกระทำคงข้างเป็นเวลานาน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบคืบมีความแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบหุ่่นหนืดตรงที่แบบคืบจะใช้ระยะเวลาานกว่าจึงจะปรากฏผลเด่นชัด วัสดุที่มีพันธะไอออนิก พันธะโควาเลนต์หรือมีโครงสร้างแบบอสัณฐานสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบคืบได้ ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบหุ่่นหนืดจะเกิดกับวัสดุที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานเท่านั้น ยกตัวอย่างเช่น โลหะมีพันธะไอออนิกจะเกิดการคืบเด่นชัดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าร้อยละ 30 ของจุดหลอมเหลว คอนกรีตที่มีโครงสร้างผลึกของพันธะโควาเลนต์จะเกิดการคืบเด่นชัดเมื่อเวลาผ่านไปนับสิบปี หรือฝิวดนที่ทำจากแอสฟัลท์ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐานจะเกิดการยุบตัวเป็นร่องเพียงเล็กน้อยเมื่อน้ำหนักจากล้อรถมากระทำและสามารถคืนสภาพภายใต้พฤติกรรมแบบหุ่่นหนืดได้ แต่ถ้าปริมาณการจราจรมากก็เกิดการยุบตัวเป็นร่องลึกเด่นชัดขึ้นเนื่องจากการไหลตัวของแอสฟัลท์ภายใต้พฤติกรรมการไหลหุ่่นหนืด เป็นต้น

ภาพที่ 6.6 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบการคืบของชิ้นงานที่ทำจากแอสฟัลท์ภายใต้แรงกดคงที่ จากภาพแสดงให้เห็นว่าความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีแรงมากระทำและเรียกความเครียดนี้ว่า ความเครียดยืดหุ่่น (Elastic Strain) จากนั้นวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบคืบในลักษณะเส้นโค้งที่ไปตามระยะเวลาที่แรงกระทำ เมื่อนำแรงที่กระทำออกก็จะเกิด

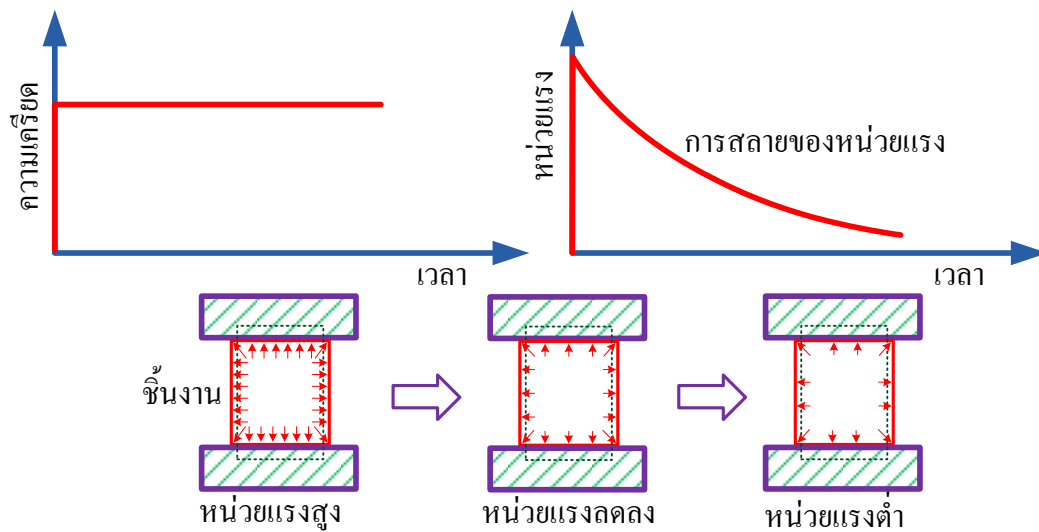
การคืนตัวอย่างทันทีทันใดค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า การสะท้อนกลับยืดหยุ่น (Elastic Rebound) จากนั้น การเปลี่ยนรูปร่างจะกลับคืนสภาพอย่างช้า ๆ แต่จะยังคงค้างความเครียดบางส่วนไว้จึงมีผลทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรขึ้น



ภาพที่ 6.6 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบคืบ

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 14

อีกกรณีเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุจากการที่หน่วยแรงสลายตัว (Dissipation of Stresses หรือ Relaxation) เป็นการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่มีการรักษาสภาพการเปลี่ยนแปลงรูปร่างให้คงที่ด้วยการสลายหน่วยแรงภายในลงอย่างช้า ๆ ยกตัวอย่างเช่น ชิ้นส่วนกันกระแทกระหว่างเครื่องจักรที่ทำจากแอสฟัลท์ถูกนำไปใส่ไว้ระหว่างช่องว่างของเครื่องจักรกลในลักษณะเกิดความเครียดคงที่ หน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายหลังจากการติดตั้งชิ้นงานในช่วงแรกจะมีค่ามากแต่เมื่อเวลาผ่านไปหน่วยแรงจะลดลงอย่างช้า ๆ ในลักษณะโค้งหงายดังแสดงในภาพที่ 6.7 ส่งผลทำให้ชิ้นงานมีรูปร่างคงเดิมแต่หน่วยแรงภายในลดลง เป็นต้น พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบหน่วยแรงสลายตัวนี้ยังมีส่วนสำคัญในการเลือกใช้เหล็กแรงดึงสูงในงานคอนกรีตอัดแรงอีกด้วย โดยเหล็กแรงดึงสูงที่มีคุณสมบัติการสลายตัวของหน่วยแรงมากย่อมส่งผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง



ภาพที่ 6.7 การสลายของหน่วยแรงภายใต้ความเครียดคงที่ของวัสดุแอสฟัลท์คอนกรีต

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 14

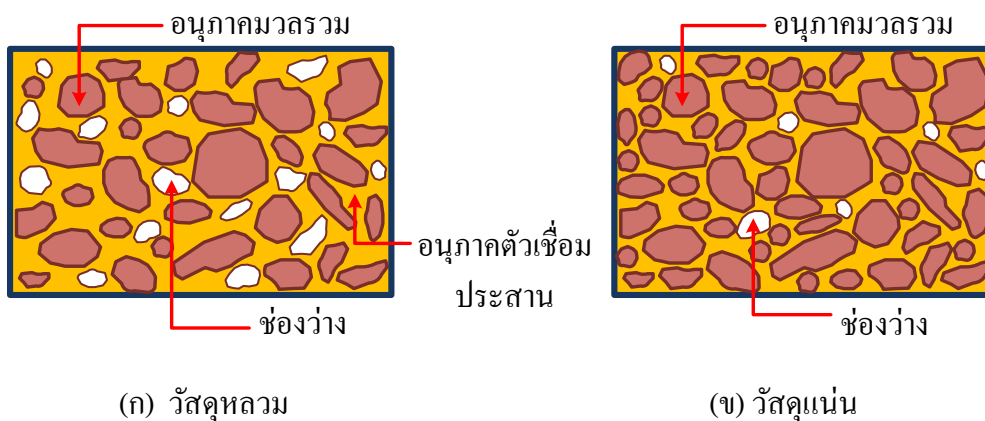
### คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) คือคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถใช้ตาเปล่าหรือเครื่องมือทดสอบบ่งบอกคุณลักษณะเฉพาะที่ไม่ใช่คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่สำคัญสำหรับงานก่อสร้าง เช่น น้ำหนัก ลักษณะพื้นผิว ขนาด รูปร่าง ความหนาแน่น หน่วยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะ และคุณสมบัติด้านอุณหภูมิ เป็นต้น รายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพมีดังต่อไปนี้ (Duggal S.K. 2008 : 2-6, Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011: 21-24 and Mikell P. Groover. 2013 : 82-84)

#### 1. ความหนาแน่น หน่วยน้ำหนัก และความถ่วงจำเพาะ

ในการออกแบบสิ่งก่อสร้างใด ๆ ก็ตามผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างและน้ำหนักบรรทุกที่สิ่งก่อสร้างนั้นจะสามารถรับได้อย่างปลอดภัย น้ำหนักของสิ่งก่อสร้างจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของวัสดุ ถ้าวัสดุมีความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบาจะช่วยทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างมีขนาดเล็กตามไปด้วย แต่ถ้าวัสดุมีความแข็งแรงแต่มีน้ำหนักมากก็จะทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างมีขนาดใหญ่ขึ้น คุณสมบัติด้านน้ำหนักของวัสดุที่สำคัญประกอบด้วย ความหนาแน่น (Density) คืออัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตร หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) คือผลคูณระหว่างความหนาแน่นกับอัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงและความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) คืออัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นวัสดุต่อความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิจำเพาะตามลำดับ

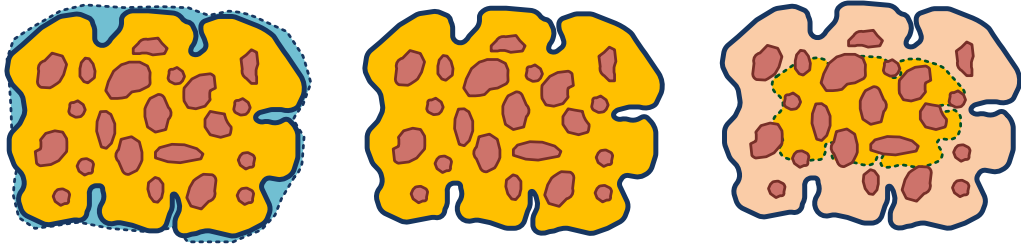
วัสดุก่อสร้างที่ผ่านกระบวนการผลิตที่ดียอมทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพดีและมีตำหนิน้อย ส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีความหนาแน่น หน่วยน้ำหนัก และความถ่วงจำเพาะคงที่ไม่ว่าจะพิจารณาจากส่วนใดของชิ้นงานก็ตาม สำหรับวัสดุที่มีช่องว่างกระจายอยู่ภายในจะทำให้คุณสมบัติด้านน้ำหนักแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณช่องว่างที่แทรกในวัสดุ เช่น ไม้ ดิน หิน และคอนกรีต เป็นต้น อย่างไรก็ตามปริมาณที่ใช้ในการหาคุณสมบัติด้านน้ำหนักสำหรับวัสดุที่มีช่องว่างแทรกก็คือปริมาตรรวม (Bulk Volume) ยกตัวอย่างเช่น ปริมาตรรวมของคอนกรีตจะประกอบด้วยอนุภาคมวลรวม อนุภาคตัวเชื่อมประสานและช่องว่างดังแสดงในภาพที่ 6.8 ถ้าคอนกรีตถูกทำให้แน่นด้วยการกระทุ้งยอมมีช่องว่างแทรกอยู่มากและอนุภาคอยู่ห่างกันดังแสดงในภาพที่ 6.8(ก) แต่ถ้าคอนกรีตถูกทำให้แน่นด้วยเครื่องเขย่ายอมมีช่องว่างลดลงและอนุภาคอยู่ชิดกันดังแสดงในภาพที่ 6.8(ข) เมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตทั้งสองพบว่าวัสดุอัดแน่นยอมมีความหนาแน่น หน่วยน้ำหนัก และความถ่วงจำเพาะมากกว่าวัสดุที่มีอนุภาคห่างกัน เป็นต้น



ภาพที่ 6.8 ปริมาตรรวมของวัสดุ

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 22

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาคุณสมบัติในการดูดซึมของเหลวของอนุภาคของวัสดุดังแสดงในภาพที่ 6.9 พบว่าคุณสมบัติด้านน้ำหนักของวัสดุจะได้รับอิทธิพลจากปริมาณของเหลวที่ถูกดูดซึมด้วยเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น การเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านน้ำหนักระหว่างอนุภาคเม็ดดินที่มีของเหลวแทรกอยู่ภายในและเกาะอยู่ด้านนอกดังแสดงในภาพที่ 6.9(ก) กับอนุภาคเม็ดดินที่มีของเหลวปริมาณน้อยแทรกอยู่ภายในดังแสดงในภาพที่ 6.9(ค) พบว่า คุณสมบัติด้านน้ำหนักของดินจะมีความแตกต่างกันตามปริมาณความชื้นที่แทรกอยู่ภายใน แต่ในกรณีที่อนุภาคเม็ดดินที่มีของเหลวแทรกอยู่ภายในแต่ไม่ปรากฏที่ผิวดังแสดงในภาพที่ 6.9(ข) หรืออนุภาคที่แห้งสนิท จะทำให้คุณสมบัติด้านน้ำหนักคงที่ เป็นต้น



(ก) มีของเหลวภายในและที่ผิว (ข) มีของเหลวเฉพาะภายใน (ค) มีของเหลวภายในบางส่วน

### ภาพที่ 6.9 ปริมาณของเหลวภายในอนุภาควรรวม

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 22

## 2. การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ

การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Expansion) เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป วัสดุโดยทั่วไปจะขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจะหดตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง วัสดุแต่ละชนิดจะมีการตอบสนองต่ออุณหภูมิแตกต่างกันซึ่งค่าการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิสามารถหาได้จากการนำปริมาตรเดิมคูณด้วยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปและคูณด้วยค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) ของวัสดุนั้น การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวอาจสร้างความเสียหายให้กับสิ่งก่อสร้างได้ ยกตัวอย่างเช่น สิ่งก่อสร้างที่มีส่วนประกอบของชิ้นส่วนที่ทำจากวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิต่างกันมาก เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปก็จะทำให้เกิดหน่วยแรงและความเครียดกับชิ้นส่วนที่แตกต่างกัน หน่วยแรงและความเครียดที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้สิ่งก่อสร้างนั้นเกิดการวิบัติได้ หรือในกรณีที่เกิดรอยแตกร้าวบนพื้นผิวถนนคอนกรีตจากการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ โดยผิวถนนจะเกิดการหดตัวในตอนกลางคืนและจะขยายตัวในตอนกลางวันส่งผลให้เกิดรอยร้าวและหลุมร่อน เป็นต้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างภายในและภายนอกอาคารก็เป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้อาคารเกิดความเสียหายจากการขยายตัวที่แตกต่างกัน เช่น การหลุมร่อนของวัสดุตกแต่งผิวภายนอกอาคาร หรือการแตกร้าวของผนังกระจก เป็นต้น

## 3. คุณสมบัติพื้นผิว

คุณสมบัติพื้นผิว (Surface Properties) เป็นคุณสมบัติเฉพาะที่พิจารณาจากลักษณะพื้นผิวภายนอกของวัสดุ คุณสมบัติพื้นผิวที่สำคัญประกอบด้วย การต้านทานการผุกร่อนและการเสื่อมสภาพของพื้นผิว การทนต่อการขีดข่วน และลักษณะพื้นผิว เป็นต้น การต้านทานการผุกร่อน

และการเสื่อมสภาพของพื้นผิวมีผลต่ออายุการใช้งานของชิ้นงานเนื่องจากกลไกการถูร่อนและการเสื่อมสภาพมักเกิดขึ้นจากผิวด้านนอกแล้วจึงขยายเข้าไปด้านใน เช่น เหล็กทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนจนเกิดสนิมบริเวณผิวด้านนอกก่อน หรือพอลิเมอร์จะเกิดการเสื่อมสภาพจากการทำปฏิกิริยากับรังสีอัลตราไวโอเลตที่บริเวณผิวด้านนอกจนทำให้เสื่อมสภาพและแตกหัก เป็นต้น การป้องกันการถูร่อนและการเสื่อมสภาพของพื้นผิวสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทาสีด้วยวัสดุเคลือบผิว การทาสี การใช้งานในที่แห้งไม่เปียกชื้น หรือการใช้งานในที่ร่มเพื่อยืดอายุการใช้งาน เป็นต้น

การขัดสีจะเกิดขึ้นเมื่อมีวัสดุสองชนิดมาสัมผัสกันและจะส่งผลทำให้เกิดการสึกหรอตามมา วัสดุที่มีความแข็งแรงแรงจะสามารถทนต่อการขัดสีได้ดีกว่าวัสดุที่อ่อนนุ่ม ตัวอย่างความเสียหายอันเนื่องมาจากการขัดสี เช่น การสึกหรอของผิวการจราจรที่เกิดจากการขัดสีระหว่างล้อรถกับวัสดุที่ใช้ทำผิวการจราจร เป็นต้น วิธีการป้องกันชิ้นงานจากผลกระทบของการขัดสีสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเลือกใช้วัสดุที่มีความแข็งเคลือบที่ผิวภายนอก หรือการทำให้ผิวด้านนอกเกิดผลึกที่แข็งแรงแรงกว่าผิวด้านใน เป็นต้น นอกจากนี้ลักษณะพื้นผิวยังมีผลต่อการใช้งานวัสดุอีกด้วย เช่น วัสดุที่มีผิวเรียบจะสามารถลดการขัดสีได้ดีกว่าวัสดุที่มีผิวขรุขระ ในทางตรงกันข้ามถ้าต้องการให้วัสดุสองชนิดยึดเกาะกันดีก็ควรทำให้ผิววัสดุทั้งสองขรุขระเสียก่อน หรือกรณีการเทคอนกรีตใส่ลงในแบบหล่อถ้าวัสดุมวลรวมมีรูปร่างกลมและผิวเรียบก็จะช่วยให้คอนกรีตไหลเข้าไปในแบบหล่อง่ายขึ้น เป็นต้น

### เครื่องมือวัด

การตรวจสอบคุณภาพวัสดุชนิดต่าง ๆ รวมถึงการคัดค้นวัสดุชนิดใหม่มักจะดำเนินการในห้องปฏิบัติการ ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากภายในห้องปฏิบัติการมีเครื่องมือทดสอบที่ทันสมัยและสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้ดีจึงสังเกตผลการทดลองที่เกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งประสิทธิภาพของเครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการทดสอบวัสดุ เครื่องมือที่มีความละเอียดหรือมีความไว (Sensitivity) ที่เหมาะสมย่อมช่วยให้นักวิจัยสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแม้เพียงเล็กน้อยได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเครื่องมือวัดบางชนิดสามารถวัดได้จากการสัมผัสในขณะที่เครื่องมือวัดบางชนิดใช้ข้อมูลอื่นประกอบการวัด สำหรับหัวข้อนี้จะขอแนะนำเสนอเครื่องมือวัดที่มักใช้บ่อยในการทดสอบวัสดุในห้องปฏิบัติการ โดยมุ่งเน้นเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและเครื่องมือวัดค่าแรง รายละเอียดเครื่องมือวัดมีดังต่อไปนี้ (Bangkok Cryptography. 2014, Biomed.in.th. 2010, Compomax. n.d., Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011: 32-40 and Quality Manufacturing Today. 2008)



### 1. เครื่องมือวัดระยะละเอียดแบบหน้าปัด

เครื่องมือวัดระยะละเอียดแบบหน้าปัดหรือไดอัลเกจ (Dial Gauge) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงระยะที่มีความละเอียดสูง ไดอัลเกจจะถูกยึดไว้กับชิ้นงานหรือตัวอย่างทดสอบในตำแหน่งที่สามารถเปรียบเทียบกับระยะอ้างอิงได้ การแสดงผลของไดอัลเกจทั่วไปจะมีสองมาตรวัดอยู่บนหน้าปัดเดียวกันคือมาตรวัดละเอียดซึ่งจะอยู่นอกและมาตรวัดหยาบที่อยู่ด้านใน ดังแสดงในภาพที่ 6.10 มาตรวัดหยาบจะขยับ 1 หน่วยเมื่อมาตรวัดละเอียดหมุนครบหนึ่งรอบหรือ 100 หน่วย เมื่อติดตั้งไดอัลเกจเสร็จเรียบร้อยแล้วต้องทำการตั้งค่ามาตรวัดละเอียดให้เป็นศูนย์ก่อนการวัดระยะทุกครั้ง



(ก) ไดอัลเกจ



(ข) หน้าปัดไดอัลเกจ

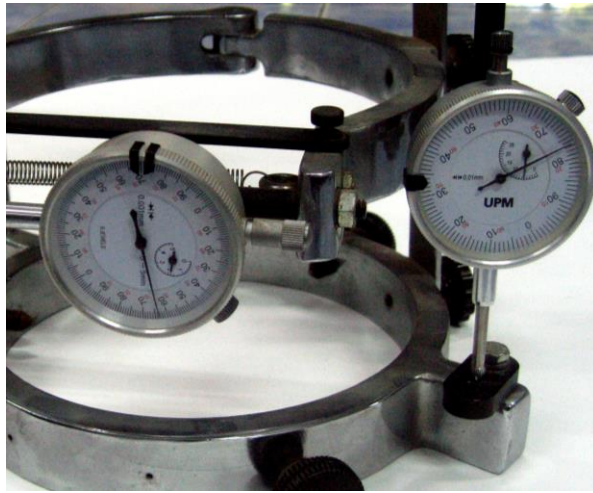
ภาพที่ 6.10 เครื่องมือวัดระยะละเอียดแบบไดอัลเกจ

ที่มา : จิรวัดณ์ วิมุติสุขวิริยา. 2558

หน่วยของมาตรวัดละเอียดจะถือว่าเป็นความไวหรือความแม่นยำของเครื่องมือวัดชนิดนี้ เช่น ในการทดสอบหนึ่งใช้ไดอัลเกจที่มีระยะวัดอยู่ในช่วง 1 นิ้วและมีความไวอยู่ที่ 0.001 นิ้ว ถ้าเข็มของมาตรวัดละเอียดหมุนไป 2 รอบหรือ 200 หน่วยละเอียดจะสามารถคิดเป็นระยะได้เท่ากับ 0.2 นิ้ว หรือ 5.08 มิลลิเมตร (mm) เป็นต้น สำหรับความไวของไดอัลเกจที่ใช้ทดสอบโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1-0.002 mm นอกจากนั้นระยะที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะใช้งานไดอัลเกจไม่ควรมากกว่าครึ่งหนึ่งของระยะวัดสูงสุดที่ไดอัลเกจสามารถวัดได้ ถ้าหากระยะขยับหรือหดของตัวอย่างทดสอบใกล้เคียงกับช่วงระยะวัดของไดอัลเกจอาจทำให้เครื่องมือเสียหายได้ ไดอัลเกจยังสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น ติดตั้งบนกรอบหรือขายึดเพื่อใช้วัดระยะในทิศทางที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 6.11 เป็นต้น



(ก) ชุดอุปกรณ์เสริมสำหรับวัดการเสียรูป



(ข) หน้าปัดไดอัลเกจ

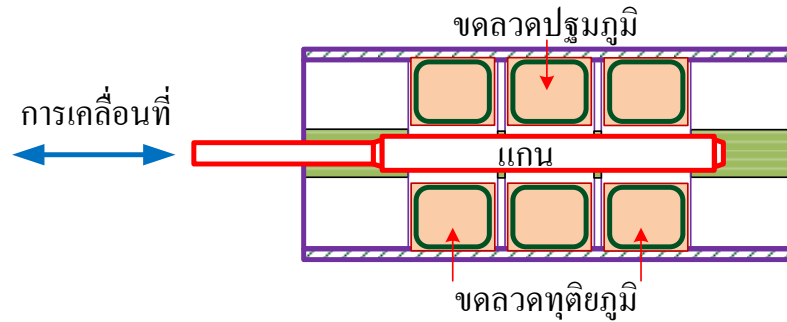
ภาพที่ 6.11 ชุดอุปกรณ์เสริมสำหรับวัดการเสียรูป

ที่มา : จีรวัดน์ วิมุติสุขวิริยา. 2557 : 180

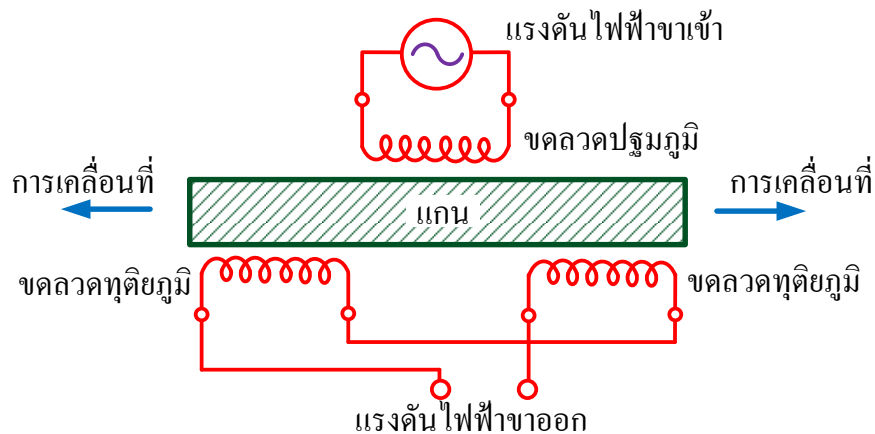
## 2. ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำเชิงเส้น

ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer : LVDT) เป็นเครื่องมือวัดระยะแบบละเอียดและมีความไวสูง โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้า เครื่องมือวัด LVDT มีส่วนประกอบคือขดลวดจำนวน 3 ชุด พันรอบแกนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ดังแสดงในภาพที่ 6.12 ขดลวดชุดแรกคือขดลวดปฐมภูมิอยู่ตรงกลาง ส่วนขดลวดชุดที่สองและชุดที่สามคือขดลวดทุติยภูมิอยู่ทางด้านซ้ายและด้านขวาของขดลวดปฐมภูมิ ขดลวดทุติยภูมิทั้งสองชุดต่อกันแบบอนุกรมและมีจำนวนขดลวดเท่ากันแต่มีทิศทางพันตรงข้ามกัน เมื่อแกนที่อยู่ระหว่างขดลวดทั้งสามชุดขยับตัวก็จะทำให้ขดลวดปฐมภูมิถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จากนั้นแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดตามมาที่ขดลวดทุติยภูมิ โดยค่าแรงดันไฟฟ้าจะแปรผันไปตามตำแหน่งของแกนที่เปลี่ยนไป เนื่องจากขดลวดทั้งสามไม่ได้สัมผัสกับแกนจึงไม่เกิดแรงเสียดทาน เมื่อตำแหน่งศูนย์ (Null Position) คือตำแหน่งที่แกนอยู่กึ่งกลางระหว่างขดลวดทั้งสามชุดพอดีซึ่งทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์ (Volt : V) ถ้าแกนเคลื่อนที่ไปทางซ้ายก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิด้านซ้ายมากกว่าด้านขวา และเมื่อแกนเคลื่อนที่ไปทางด้านขวาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิด้านขวามากกว่าด้านซ้าย ความแตกต่างของค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปแปลงเป็นระยะที่เปลี่ยนไปของตัวอย่างทดสอบ หลักการนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องมือวัดอย่างอื่นได้อีกด้วย เช่น เครื่องมือวัดค่าความดัน และเครื่องชั่งน้ำหนัก เป็นต้น

ข้อจำกัดของเครื่องมือวัด LVDT คือการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับการขยับตัวของแกน ซึ่งมีระยะอยู่ในช่วงที่จำกัดและอาจถูกรบกวนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงควรใช้เครื่องมือชนิดนี้ในระยะวัดไม่มากและไม่ควรมีคลื่นแม่เหล็กจากภายนอกมารบกวน



(ก) ส่วนประกอบภายใน LVDT

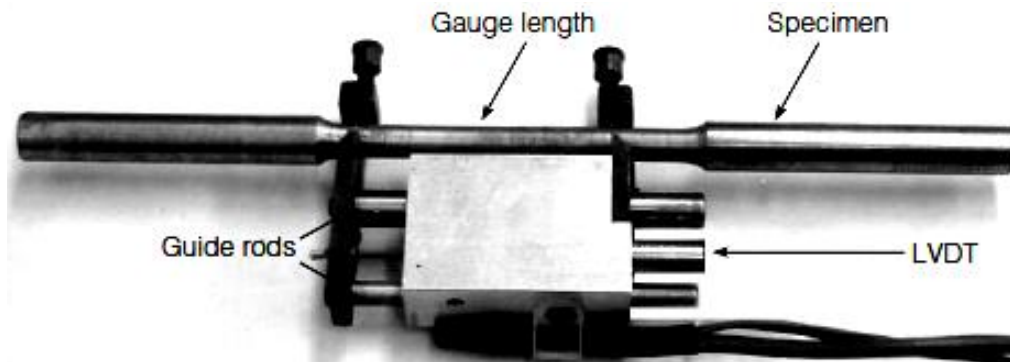


(ข) วงจรภายใน LVDT

ภาพที่ 6.12 เครื่องมือวัด LVDT

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 35

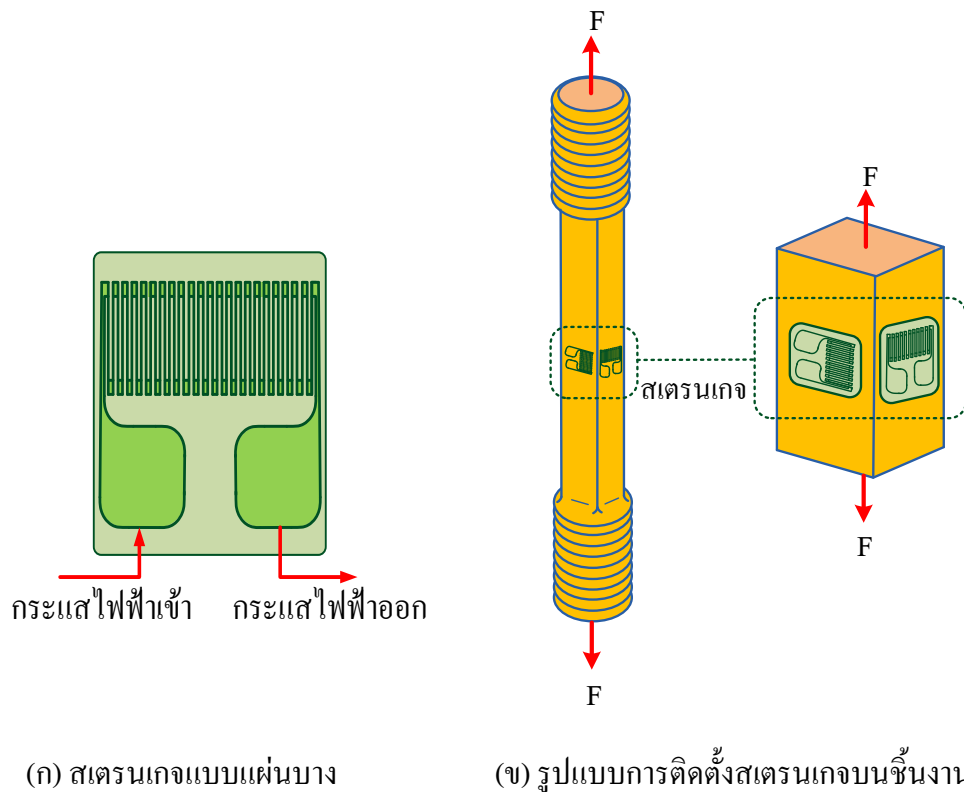
เครื่องมือวัด LVDT มีค่าความไวแตกต่างกัน ค่าความไวของเครื่องมือชนิดนี้กรณีใช้วัดระยะมักอยู่ในช่วง 0.003-0.25 โวลต์ต่อมิลลิเมตร (V/mm) ถ้าเลือกใช้ค่าความไวมากขึ้นก็จะทำให้เครื่องมือสามารถวัดระยะได้ลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าความไวลดน้อยลงระยะวัดก็จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เครื่องมือวัด LVDT ยังสามารถติดตั้งบนชุดอุปกรณ์เสริมเพื่อใช้วัดระยะในตำแหน่งที่แตกต่างกันได้ดังแสดงในภาพที่ 6.13



ภาพที่ 6.13 ชุดอุปกรณ์เสริมสำหรับวัดการเสียรูปที่มีเครื่องมือวัด LVDT ร่วมด้วย  
ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011: 36

### 3. เครื่องมือวัดความเครียด

เครื่องมือวัดความเครียดหรือสเตรนเกจ (Strain Gauge) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบละเอียด สเตรนเกจถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี ค.ศ. 1938 โดยเอ็ดเวิร์ดซิมมอนส์ (Edward Simmons) เขาทดลองนำลวดทองแดงผสมนิกเกิลเรียกว่า คอนสแตนแตน (Constantan) ขนาดเบอร์ 40 มาเชื่อมต่อเป็นวงจรไฟฟ้ามีลักษณะเป็นแผ่นบางเพื่อใช้วัดความเครียดเหล็กเส้น จากนั้นสเตรนเกจก็ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนมีหลากหลายชนิดให้เลือกใช้ แต่ที่นิยมนำไปใช้งานเป็นสเตรนเกจอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นบางที่ทำจากลวดโลหะขนาดเล็กขดเป็นวงจรวงกลมแสดงในภาพที่ 6.14(ก) อย่างไรก็ตามรูปร่างของสเตรนเกจอาจมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมหรือแผ่นวงกลมก็ได้ การใช้งานสเตรนเกจแบบแผ่นบางทำได้โดยการยึดแน่นกับผิวของตัวอย่างทดสอบโดยใช้วัสดุเชื่อมประสาน ลักษณะการติดตั้งสเตรนเกจต้องสอดคล้องกับทิศทางที่ต้องการวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ภาพที่ 6.14(ข) เป็นตัวอย่างการติดสเตรนเกจบนผิวชิ้นงานเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้งในแนวแกนและในแนวตั้งฉาก เมื่อชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างก็จะทำให้สเตรนเกจเกิดการยืดหรือหดตามไปด้วย เมื่อแรงขดลวดเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างก็จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานแรงดันไฟฟ้า ความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าจะถูกนำไปแปลงเป็นระยะที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน ทั้งนี้ช่วงการวัดที่นิยมใช้งานสำหรับสเตรนเกจมักมีระยะอยู่ระหว่าง 5-10 mm จะสังเกตว่าช่วงการวัดดังกล่าวเป็นช่วงที่แคบจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้งานสเตรนเกจกับวัสดุที่สามารถยืดหรือหดตัวมากก่อนการวิบัติ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการใช้งานสเตรนเกจมักมีสาเหตุจากการยึดไม่แนบสนิทกับผิวชิ้นงาน หรือเกิดจากตำแหน่งที่ติดตั้งสเตรนเกจคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่กำหนด

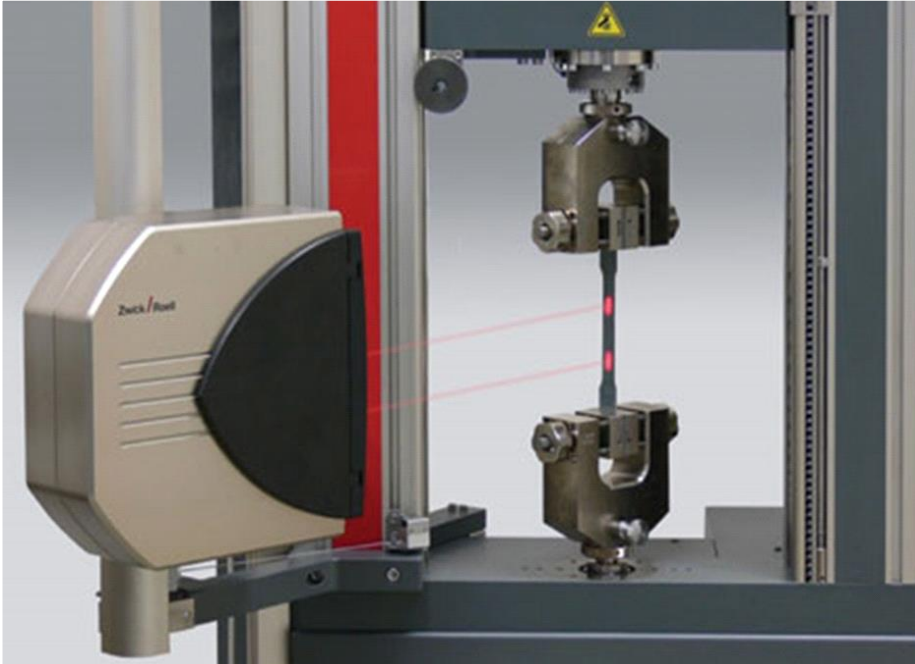


ภาพที่ 6.14 เครื่องมือวัดความเครียดแบบสเตรนเกจแบบแผ่นบาง

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011 : 37

#### 4. เครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบไม่สัมผัสชิ้นงาน

เครื่องมือวัดระยะ โดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็น ไดอัลเกจ สเตรนเกจ หรือเครื่อง LVDT ต่างก็ต้องสัมผัสชิ้นงานหรือตัวอย่างทดสอบ ข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดในลักษณะนี้บ่อยครั้งขาดความน่าเชื่อถือเพราะเครื่องมือวัดไม่สามารถจับยึดชิ้นงานได้อย่างมั่นคง หรือในบางกรณีที่มีข้อจำกัดจนไม่สามารถติดตั้งเครื่องมือวัดให้สัมผัสกับตัวอย่างทดสอบได้โดยตรง ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบไม่สัมผัสชิ้นงาน (Non-Contact Deformation Measurement) โดยการนำเทคนิคหลากหลายรูปแบบมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องมือ เช่น การนำแสงเลเซอร์มาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัด การใช้ภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง หรือการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างภาพ เป็นต้น ภาพที่ 6.15 เป็นตัวอย่างเครื่องมือวัดการเลี้ยวรูปของตัวอย่างทดสอบที่ใช้แสงเลเซอร์เป็นส่วนประกอบ การทำงานของเครื่องมือนี้คือการปล่อยแสงเลเซอร์ไปสะท้อนกับชิ้นงานแล้วนำผลที่ได้ไปคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

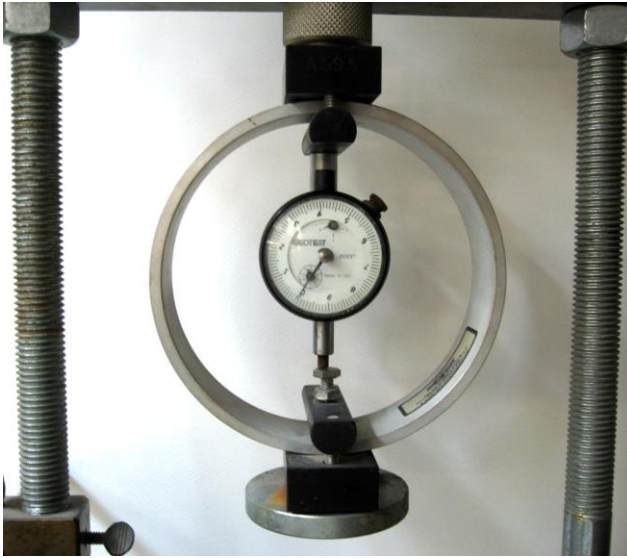


ภาพที่ 6.15 ชุดเครื่องมือวัดการเสียรูปที่มีเลเซอร์เป็นส่วนประกอบ  
ที่มา : Quality Manufacturing Today. 2008

### 5. วงแหวนวัดแรง

วงแหวนวัดแรง (Proving Ring) เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดค่าแรง วงแหวนวัดแรงมีส่วนประกอบหลัก 2 อย่างคือ วงแหวนที่ทำจากเหล็กกล้าและเครื่องมือวัดระยะละเอียดแบบหน้าปัดหรือไดอัลเกจที่ยึดติดอยู่ภายในวงแหวนดังแสดงในภาพที่ 6.16 หลักการที่ใช้วัดค่าแรงของเครื่องมือชนิดนี้คือเมื่อมีแรงมากระทำกับตัวอย่างทดสอบแรงดังกล่าวจะถูกส่งผ่านมายังวงแหวน แรงที่ส่งผ่านมานี้จะทำให้วงแหวนเปลี่ยนรูปร่างตามทิศทางที่แรงกระทำ ระยะที่เปลี่ยนแปลงไปจะถูกแสดงผลบนหน้าปัดไดอัลเกจ การแปลงผลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นค่าแรงสามารถทำได้โดยการเทียบเคียงกับแผนภาพหรือตารางผลการสอบเทียบเครื่องมือจากห้องปฏิบัติการ แผนภาพหรือตารางสอบเทียบดังกล่าวเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวงแหวนวัดแรงแต่ละอันซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะที่เปลี่ยนไป เช่น ถ้าวงแหวนวัดแรงเสียรูปเพียงเล็กน้อยก็แสดงว่ามีแรงกระทำกับตัวอย่างทดสอบไม่มาก เป็นต้น อย่างไรก็ตามควรทำการตรวจสอบความเที่ยงตรงอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ทำวงแหวนจะเปลี่ยนไปเมื่อใช้งานซ้ำกันเป็นเวลานาน นอกจากนั้นไม่ควรใช้วงแหวนวัดแรงวัดค่าแรงเกินกว่าที่ระบุในผลการสอบเทียบเพื่อป้องกันการวิบัติของวงแหวน





(ก) วงแหวนวัดแรง



(ข) หน้าปัดไดอัลเกจ

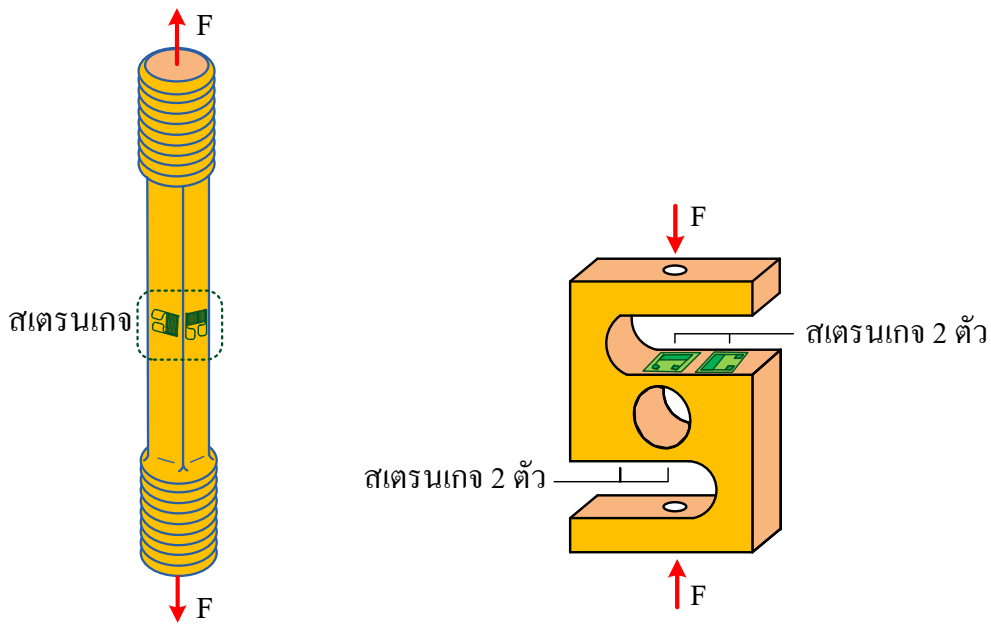
ภาพที่ 6.16 วงแหวนวัดแรง

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุติสุขวิทยา. 2558

## 6. เครื่องมือวัดค่าแรง

เครื่องมือวัดค่าแรงหรือเรียกว่า โหลดเซลล์ (Load Cell) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้วัดค่าแรงหรือน้ำหนัก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะถูกประเมินโดยใช้เครื่องมือวัดความเครียดหรือสเตรนเกจเพื่อแปลงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นจึงแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้อยู่ในรูปของแรงที่มากกระทำตามลำดับ โหลดเซลล์ที่ใช้ในการทดสอบวัสดุมีหลายชนิดดังรายละเอียดต่อไปนี้

6.1 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain Gauge Load Cell) เป็นเครื่องมือวัดค่าแรงแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสเตรนเกจเป็นส่วนประกอบ โหลดเซลล์ประเภทนี้นิยมใช้สเตรนเกจจำนวน 4 ตัวจัดเรียงกันในรูปแบบวงจรวีจิสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) ในบางครั้งอาจใช้สเตรนเกจเพียงหนึ่งหรือสองตัวก็ได้แต่ความแม่นยำจะน้อยกว่าใช้สเตรนเกจ 4 ตัว ข้อมูลการวัดจะอยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้าซึ่งมีค่าน้อยจึงจำเป็นต้องขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ความแตกต่างของค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปแปลงเป็นค่าแรงที่กระทำกับชิ้นงานหรือตัวอย่างทดสอบ ภาพที่ 6.17 และ 2.18 แสดงตัวอย่างโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิดต่าง ๆ

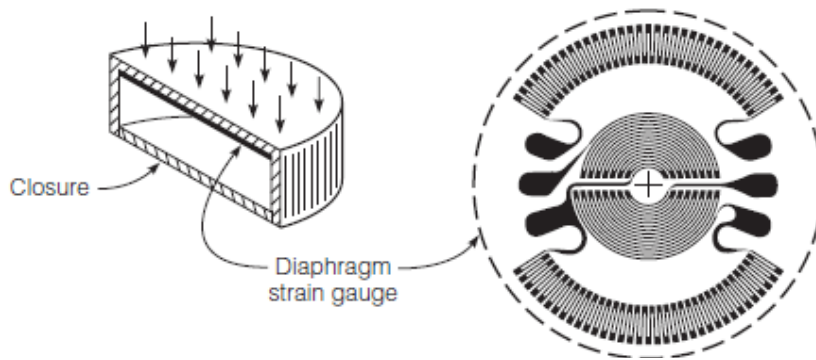


(ก) โหลดเซลล์แบบแท่งรับแรงดึง

(ข) โหลดเซลล์แบบอุปกรณ์รูปตัวเอส

ภาพที่ 6.17 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011 : 40



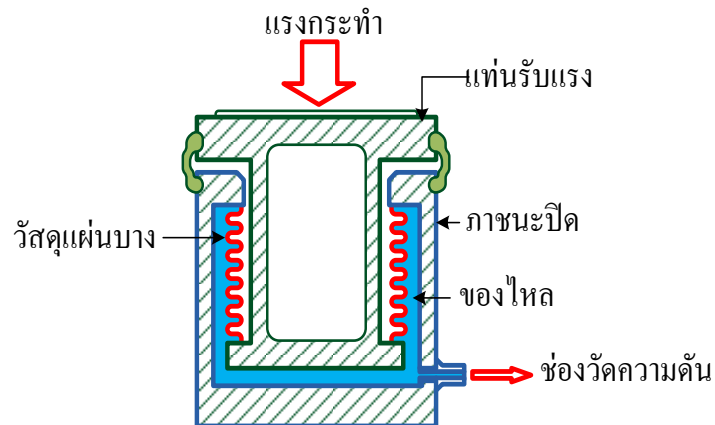
ภาพที่ 6.18 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิดแผ่นกลมติดตั้งภายในภาชนะปิด

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011: 40

6.2 โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก (Hydraulic Load Cell) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่าแรงแบบอิเล็กทรอนิกส์โดยอาศัยการวัดการเปลี่ยนแปลงความดันของของเหลว โหลดเซลล์แบบนี้มีส่วนประกอบคือ แท่นรับแรง น้ำมันไฮดรอลิกที่บรรจุภายในภาชนะปิด และช่องสำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงความดันของเหลวดังแสดงในภาพที่ 6.19 หลักการวัดแรงของเครื่องมือชนิดนี้คือ เมื่อมีแรงกระทำที่แท่นรับแรงจะทำให้แท่นขยับตัว การขยับตัวของแท่นจะทำให้แรงดันของ



ของเหลวที่บรรจุภายในเปลี่ยนแปลงไป ของเหลวที่บรรจุอยู่ในเครื่องมือจะถูกกักไว้ด้วยแผ่นบาง (Diaphragm) ที่สามารถขยับตัวได้ แผ่นบางนี้จะถูกยึดระหว่างภาชนะปิดและแท่นรับแรง แรงดันของเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปจะถูกแปลงเป็นค่าแรงโดยใช้อุปกรณ์ประมวลผลแบบอิเล็กทรอนิกส์และแสดงผลอัตโนมัติบนหน้าปัด ถ้าเลือกใช้แผ่นบางที่ทำจากโลหะก็จะทำให้สามารถวัดค่าแรงได้มากกว่าที่ทำจากพลาสติก โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิกมีความแม่นยำน้อยกว่าโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจแต่สามารถวัดค่าแรงได้มากกว่า ภาพที่ 6.20 เป็นตัวอย่างโหลดเซลล์ที่ใช้สำหรับวัดค่าแรงพร้อมจอแสดงผล



ภาพที่ 6.19 ส่วนประกอบของโหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก

ที่มา : Blogger. 2010



ภาพที่ 6.20 โหลดเซลล์วัดค่าแรง

ที่มา : จิรวัดน์ วิมุตตีสุขวิริยา. 2558

6.3 โหลดเซลล์แบบนิวแมติก (Pneumatic Load Cell) เป็นเครื่องมือสำหรับวัดแรงที่ใช้ในระบบนิวแมติกซึ่งเป็นระบบที่คล้ายกับระบบไฮดรอลิกแต่ใช้อากาศหรือแก๊สแทนของเหลว โหลดเซลล์แบบนิวแมติกมีจุดเด่นคือสามารถทนแรงกระแทกได้ดีและมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามถ้าแผ่นบางที่ใช้กักอากาศหรือแก๊สเกิดการแตกร้าวหรือรั่วก็จะทำให้ค่าความดันคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงควรใช้งานเครื่องมือวัดชนิดนี้ในสถานที่สะอาดปราศจากฝุ่นผง โหลดเซลล์แบบนิวแมติกมีความแม่นยำมากกว่าแบบไฮดรอลิกแต่สามารถวัดค่าแรงได้น้อยกว่า ภาพที่ 6.21 แสดงตัวอย่างโหลดเซลล์แบบนิวแมติกรูปตัวเอส



ภาพที่ 6.21 โหลดเซลล์แบบนิวแมติกรูปตัวเอส

ที่มา : Bangkok Cryptography. 2014

6.4 โหลดเซลล์แบบแมกเนโตสเตริกทีฟ (Magnetostrictive) เป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าแรงที่อาศัยหลักการแผ่สัญญาณแม่เหล็ก แรงที่มากระทำจะทำให้แม่เหล็กถาวรที่อยู่ภายในโหลดเซลล์เกิดการเสียรูปจึงส่งผลทำให้สัญญาณแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปด้วย หากการเสียรูปของแม่เหล็กถาวรอยู่ในสถานะยืดหยุ่นก็จะทำให้สัญญาณมีความสอดคล้องกับคุณสมบัติความ เป็นสัดส่วนกับแรงที่กระทำ จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้สามารถวัดค่าแรงได้จากการแปรผลของสัญญาณแม่เหล็ก โหลดเซลล์แบบแมกเนโตสเตริกทีฟมีความทนทานมากจึงนิยมใช้งานในอุตสาหกรรมการรีดโลหะแผ่น

### ความผันแปรของการวัด

ความผันแปร (Variability) เป็นความคลาดเคลื่อนหรือความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดจากสาเหตุต่าง ๆ ความผันแปรที่เกิดจากข้อมูลการวัดสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักคือ ความผันแปรจากกระบวนการผลิต ความผันแปรจากระบบการวัด และความผันแปรจาก

ตัวอย่างทดสอบ ตามลำดับ รายละเอียดของความผันแปรที่เกิดจากข้อมูลการวัดมีดังต่อไปนี้ (กรรณิกา ทิตารามและคณะ. 2520 : 45-61, Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011: 27-32 และ Mikell P. Groover. 2013 : 960-967)

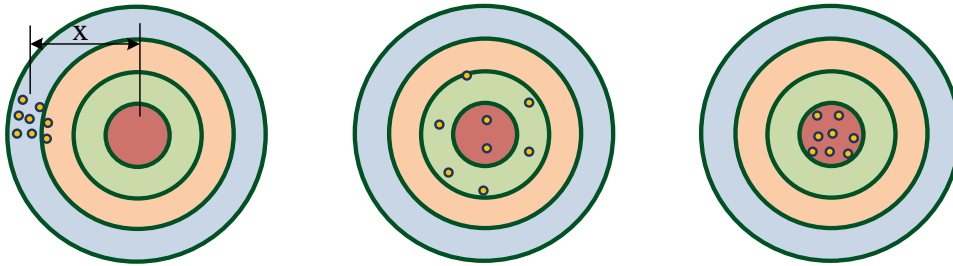
ความผันแปรจากกระบวนการผลิต (Process Variation) เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดกับตัวอย่างทดสอบที่ได้จากกระบวนการผลิตซึ่งมีสาเหตุจากปัจจัยหลายอย่าง ความผันแปรประเภทนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้แม้จะมีวิธีการตรวจสอบที่ดีแล้วก็ตาม นอกจากนี้วัสดุต่างชนิดกันย่อมมีปัจจัยที่ทำให้เกิดความผันแปรจากกระบวนการผลิตแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ความผันแปรในผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าอาจเกิดจากชนิดสารเคมีที่ผสม ปริมาณสารเคมีที่ผสม และวิธีการผลิต ส่วนความผันแปรในผลิตภัณฑ์คอนกรีตอาจเกิดจากชนิดของปูนซีเมนต์ วัสดุมวลรวม ปริมาณอากาศ และวิธีการบ่ม สำหรับความผันแปรของผลิตภัณฑ์จากไม้ อาจเกิดจากพันธุ์ไม้ อายุของต้นไม้ อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณความชื้น วัสดุเนื้อไม้ และตำหนิไม้ เป็นต้น หากเปรียบเทียบความผันแปรจากกระบวนการผลิตระหว่างวัสดุธรรมชาติและวัสดุสังเคราะห์พบว่าวัสดุตามธรรมชาติจะมีความผันแปรมากกว่าวัสดุสังเคราะห์

ความผันแปรจากระบบการวัด (Measurement System Variation) เป็นความคลาดเคลื่อนของข้อมูลการวัดที่เกิดจากเครื่องมือวัดหรือกรรมวิธีทดสอบ การเกิดความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดมีสาเหตุหลายอย่าง เช่น เครื่องมือมีความละเอียดไม่เพียงพอ เครื่องมือเก่าหรือเสื่อมสภาพ การออกแบบเครื่องมือวัดไม่เหมาะสมกับการวัด หรือการใช้งานเครื่องมือวัดไม่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม เป็นต้น ความผันแปรจากระบบการวัดสามารถควบคุมได้ง่ายเมื่อเทียบกับความผันแปรประเภทอื่น กล่าวคือหากต้องการลดความผันแปรนี้ก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนหรือเลือกเครื่องมือวัดให้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ต้องการ

ความผันแปรจากตัวอย่างทดสอบ (Sampling Variation) เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากข้อมูลการวัดของการสุ่มตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ได้จากการสุ่มจะถือว่าเป็นตัวแทนของประชากรหรือกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการวัด การที่จะควบคุมความผันแปรของตัวอย่างทดสอบจำเป็นต้องใช้หลักการทางสถิติเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งความรู้ด้านการแจกแจงทางสถิติซึ่งเป็นวิธีการแจกแจงข้อมูลในทางทฤษฎีที่อาศัยการอนุมานจากขีดจำกัดกลาง เช่น ความคลาดเคลื่อนข้อมูลการวัดโดยทั่วไปรอบค่าจริงมีลักษณะเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ เป็นต้น

ลักษณะความผันแปรของการวัดสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ ความผันแปรทางความกว้าง (Width Variation) เป็นความผันแปรที่มีความสัมพันธ์กับความเที่ยงตรง (Precision) ซึ่งอ้างอิงความไม่แน่นอนจากการกระทำซ้ำหลาย ๆ ครั้งอย่างระมัดระวัง และความผันแปรทางตำแหน่ง (Location Variation) เป็นความผันแปรที่มีความสัมพันธ์กับความแม่นยำ (Accuracy) ซึ่งอ้างอิงความไม่แน่นอนจากความไม่เสถียรภาพ (Stability) และความ โน้มเอียง (Bias) เมื่อความ

มีเสถียรภาพคือความน่าเชื่อถือของกระทำซ้ำและความโน้มเอียงเป็นความเบี่ยงเบนของข้อมูลเทียบกับค่าจริง ยกตัวอย่างเช่น ความผันแปรจากการยิงปืนไปยังเป้าหมายซึ่งมีผลการยิงดังแสดงในภาพที่ 6.22 ถ้าผลการยิงเกาะกลุ่มกันในตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งจากจุดศูนย์กลางก็จะเรียกว่ามีความเที่ยงตรงดีแต่ความแม่นยำต่ำดังแสดงในภาพที่ 6.22(ก) โดยระยะ  $x$  ที่ปรากฏในภาพคือค่าความโน้มเอียง ถ้าหากผลการยิงกระจุกกระจายรอบจุดศูนย์กลางจะเรียกว่าความเที่ยงตรงต่ำแต่ความแม่นยำสูงดังแสดงในภาพที่ 6.22(ข) และถ้าผลการยิงเกาะกลุ่มกันที่จุดศูนย์กลางจะเรียกว่ามีความเที่ยงตรงสูงและความแม่นยำสูงดังแสดงในภาพที่ 6.22(ค) เป็นต้น ดังนั้นความเที่ยงตรงและความแม่นยำจึงเป็นพื้นฐานในการศึกษาความผันแปรข้อมูลการวัด อย่างไรก็ตามเพื่อสร้างความเข้าใจในเรื่องความผันแปรของการวัดหัวข้อนี้จึงนำเสนอเนื้อหาที่เกี่ยวข้องดังรายละเอียดต่อไปนี้



(ก) มีความเที่ยงตรงแต่ไม่แม่นยำ (ข) แม่นยำแต่ไม่เที่ยงตรง (ค) เที่ยงตรงและแม่นยำ

## ภาพที่ 6.22 ความแม่นยำของการวัด

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 28

### 1. การสุ่มตัวอย่าง

กรรณิกา ทิตารามและคณะ (2520 : 143-145) กล่าวถึงการสุ่มตัวอย่างไว้ดังต่อไปนี้ การสุ่มตัวอย่าง (Random Sampling) คือการสุ่มเลือกประชากรบางส่วนในทางสถิติเพื่อเป็นตัวแทนในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อนำมาคำนวณอัตราส่วนที่แท้จริงของประชากรทั้งหมด เช่น การสุ่มเลือกผลิตภัณฑ์จากกระบวนการผลิตที่กองเก็บไว้เป็นจำนวนมากเพื่อนำมาทดสอบคุณภาพ การสุ่มตัวอย่างที่น่าเชื่อถือคือการเลือกผลิตภัณฑ์ให้ครอบคลุมพื้นที่ต่าง ๆ ของกอง เป็นต้น หากกล่าวถึงคำว่า ประชากร (Population) ในทางสถิติหมายถึงกลุ่มของค่าสังเกตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการสำรวจทางสถิติ ประชากรแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ ประชากรที่มีจำนวนแน่นอนหรือมีจำนวนจำกัด (Finite Population) และประชากรที่มีจำนวนอนันต์หรือมีจำนวนไม่จำกัด (Infinite Population) ถ้าประชากรมีจำนวนมากจนไม่สามารถสำรวจทางสถิติ

ได้ทั้งหมดจำเป็นจะต้องเลือกเพียงบางส่วนเพื่อเป็นตัวแทน ตัวแทนประชากรนี้เรียกว่า ตัวอย่าง (Sample)

วิธีสุ่มตัวอย่างแบ่งออกเป็น 4 แบบคือ การสุ่มตัวอย่างแบบธรรมดา (Simple Random Sampling) หมายถึงการเลือกตัวอย่างแบบไม่เจาะจงหรือแบบอิสระจากประชากรทั้งหมดโดยอาจใช้ตารางเลขสุ่มช่วยในการเลือกตัวอย่าง การสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งพวก (Stratified Random Sampling) หมายถึงการสุ่มตัวอย่างจากประชากรที่ถูกแบ่งเป็นพวกตามคุณลักษณะเฉพาะที่กำหนด การสุ่มตัวอย่างแบบมีระบบ (Systematic Random Sampling) หมายถึงการสุ่มตัวอย่างจากประชากรทั้งหมดโดยกำหนดเงื่อนไขการเลือกอย่างมีแบบแผน และการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งเป็นกลุ่ม (Cluster Random Sampling) หมายถึงการสุ่มตัวอย่างจากประชากรที่ถูกแบ่งเป็นกลุ่ม ตามลำดับ ค่าที่คำนวณได้จากตัวอย่างเรียกว่า ค่าสถิติ (Statistic) ซึ่งเป็นค่าตัวแปรสุ่มที่คำนวณได้จากค่าสังเกตตัวอย่างชนิดสุ่ม ค่าสถิตินี้จะถูกใช้ในการประเมินความผันแปรของประชากร สำหรับค่าสถิติที่มักพบเห็นบ่อยคือค่าแวนโวนุ่มศูนย์กลางของตัวอย่าง เช่น ค่าเฉลี่ย (Mean:  $\bar{X}$ ) ค่ามัธยฐาน (Median:  $\tilde{X}$ ) และค่าฐานนิยม (Mode:  $M$ ) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบเห็นการใช้ค่าสถิติที่แสดงการกระจายตัวของตัวอย่างด้วย เช่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation:  $S.D.$ ) และพิสัย (Range:  $R$ ) เป็นต้น ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าสถิติที่มักถูกใช้อ้างอิงมากที่สุด ถ้ากำหนดให้  $n$  คือจำนวนตัวอย่างทั้งหมดแล้วจะสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้จากสมการ

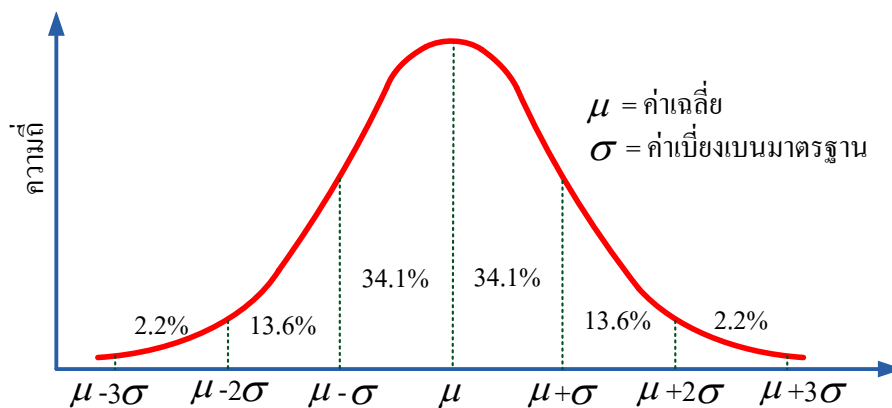
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} \quad (6.1)$$

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (6.2)$$

## 2. การแจกแจงแบบปกติ

กรณีกา ทิตารามและคณะ (2520 : 126-129) กล่าวถึงการแจกแจงความน่าจะเป็นไว้ดังต่อไปนี้ การแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) เป็นแจกแจงในทางทฤษฎีทางสถิติวิธีหนึ่งซึ่งอาศัยการอนุมานจากขีดจำกัดกลาง กล่าวคือเป็นการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มชนิดต่อเนื่องซึ่งมีลักษณะสมมาตรรอบค่าเฉลี่ย การแจกแจงนี้นิยมใช้กับความคลาดเคลื่อนของข้อมูลการวัดทั่วไป การแจกแจงแบบปกติถูกคิดค้นโดยนักคณิตศาสตร์ชาวอังกฤษเชื้อสายฝรั่งเศสชื่อ อับราฮัมเดอมัวร์ (Abraham de Moivre) ใน ค.ศ. 1733 รูปร่างเส้นโค้งการแจกแจงความน่าจะเป็นนี้มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ (The Bell-Shaped Curve) ตัวแปรสุ่มของการแจกแจง

แบบปกติจะเรียกว่า ตัวแปรสุ่มแบบปกติ (Normal Random Variable) ในขณะเดียวกันก็มีนักคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ คาร์ลเกาส์ (Karl Gauss) ได้ศึกษาความคลาดเคลื่อนของข้อมูลการวัด เขาพบว่าการแจกแจงความน่าจะเป็นที่ค้นพบมีลักษณะคล้ายคลึงกับของเดอมัวร์ ดังนั้นการแจกแจงแบบปกติจึงมีชื่ออีกอย่างว่า การแจกแจงแบบเกาส์ (Gaussian Distribution) ภาพที่ 6.23 แสดงเส้นโค้งการแจกแจงแบบปกติเมื่อแกนตั้งคือความถี่ของเหตุการณ์และแกนนอนคือค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มแบบปกติ ( $\mu$ ) ร่วมกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มแบบปกติ ( $\sigma$ )



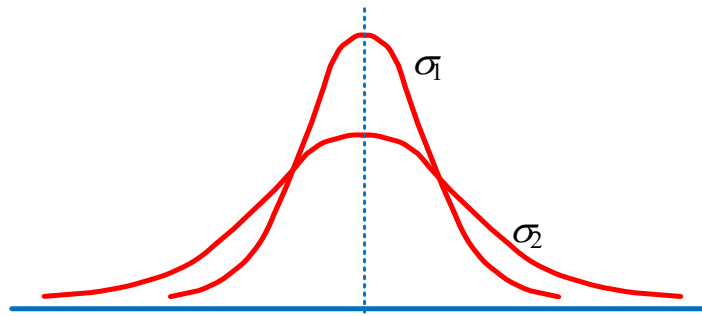
ภาพที่ 6.23 การแจกแจงปกติ

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011 : 29

การแจกแจงแบบปกตินิยมใช้บรรยายความน่าจะเป็นของประชากรที่ปรากฏตามธรรมชาติหรือข้อมูลการวัดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม พื้นที่ใต้โค้งระหว่างสองค่าของแกนนอนคือความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่สนใจ ยกตัวอย่างเช่นการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตจำนวน 30 ตัวอย่างได้ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงอัดเท่ากับ  $30 \times 10^6$  นิวตันต่อตารางเมตร (N/m<sup>2</sup>) หรือ 30 เมกะปาสกาล (MPa) และได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4 MPa จากผลการทดสอบนี้สามารถแปลความหมายทางสถิติได้ว่าโอกาสที่ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงอัดจริงจะอยู่ในช่วง 26-34 MPa มีค่าร้อยละ 68.2 หรือโอกาสที่ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงอัดจริงจะอยู่ในช่วง 22-38 MPa มีค่าร้อยละ 95.4 เป็นต้น จะสังเกตว่าพื้นที่รวมใต้เส้นโค้งการแจกแจงแบบปกติมีค่ารวมกันเท่ากับร้อยละ 100

การแจกแจงแบบปกติของตัวแปรสุ่ม  $x$  หรือ  $n(x; \mu, \sigma^2)$  สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$n(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{เมื่อ } -\infty < x < +\infty \quad (6.3)$$



ภาพที่ 6.24 การเปรียบเทียบการแจกแจงปกติ

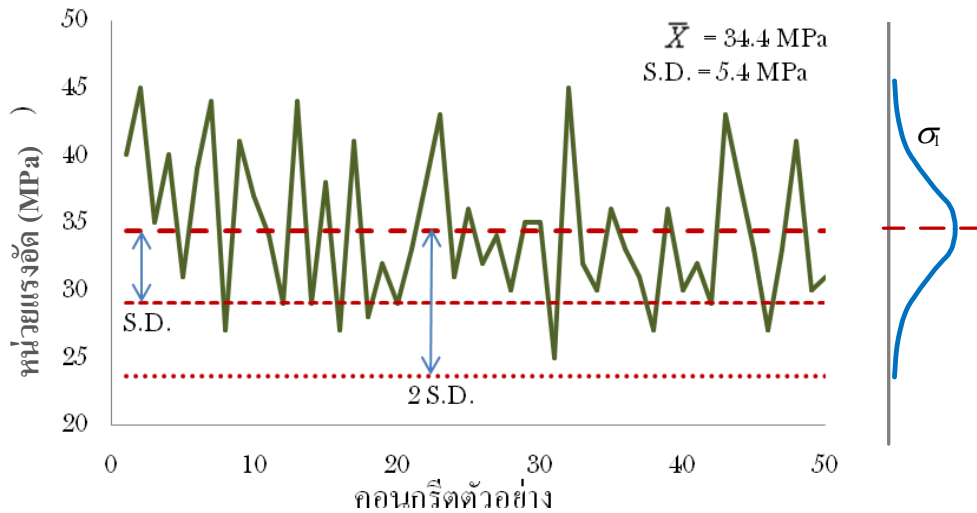
ที่มา : reliawiki.org. n.d.

ภาพที่ 6.24 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการแจกแจงปกติที่มีค่าเฉลี่ยตัวแปรสุ่มมาก  $\sigma_1$  และการแจกแจงปกติที่มีค่าเฉลี่ยตัวแปรสุ่มน้อย  $\sigma_2$  เมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตัวแปรสุ่มเท่ากัน จากภาพแสดงให้เห็นว่าจุดสูงสุดของเส้นโค้งที่มีค่าเฉลี่ยตัวแปรสุ่มมากจะอยู่สูงแต่ความกว้างจะแคบกว่าเมื่อเทียบกับเส้นโค้งของค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มน้อย โดยพื้นที่ใต้เส้นโค้งทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน

### 3. แผนภูมิควบคุม

การควบคุมความผันแปรหรือความผิดพลาดของข้อมูลการวัดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรมนิยมใช้แผนภูมิควบคุม (Control Charts) โดยแผนภูมิควบคุมนี้สามารถใช้ในการประเมินแนวโน้มข้อผิดพลาดของข้อมูลการวัดได้แต่ไม่สามารถบอกได้อย่างชัดเจนว่าเกิดข้อผิดพลาดขึ้น ณ ตำแหน่งหรือช่วงเวลาใด เช่น การประเมินความผันแปรหรือประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตหลักรูปพรรณในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น แผนภูมิควบคุมยังสามารถใช้ประโยชน์ทางอ้อมได้อีกด้วย เช่น เป็นข้อมูลการวัดที่สามารถตรวจสอบย้อนหลังได้ ใช้วิเคราะห์ต้นทุนการผลิต และใช้วิเคราะห์การยอมรับของกระบวนการทำงาน เป็นต้น แผนภูมิควบคุมมีหลากหลายรูปแบบอาศัยหลักการแสดงผลข้อมูลตามลำดับเหตุการณ์ จากภาพที่ 6.25 เป็นตัวอย่างแผนภูมิควบคุมของข้อมูลกำลังอัดคอนกรีตที่รวบรวมจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จแห่งหนึ่ง ตัวอย่างคอนกรีตที่นำมาทดสอบจะเป็นคอนกรีตที่ผ่านการบ่มขึ้นเป็นเวลา 28 วัน จำนวน 50 ตัวอย่าง จากแผนภูมิควบคุมดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดคอนกรีตตัวอย่างมีการแกว่งตัวทั้งสูงและต่ำ โดยมีค่าสูงสุด 45 MPa ค่าต่ำสุด 25 MPa ค่าเฉลี่ย 34.4 MPa และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 5.4 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้อาจใช้ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นตัวแทนในการประเมินข้อมูลกำลังอัดคอนกรีตเทียบกับกำลังอัดออกแบบที่กำหนดไว้ก็ได้ นอกจากนี้ประโยชน์ของแผนภูมิควบคุมยังสามารถเลือกให้เหมาะสมกับ

ประเภทข้อมูลได้อีกด้วย เช่น แผนภูมิควบคุมสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละชิ้น หรือแผนภูมิควบคุมสำหรับกลุ่มผลิตภัณฑ์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามความน่าเชื่อถือของแผนภูมิแต่ละอันจะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้รวบรวมข้อมูลและความเสมอต้นเสมอปลายของการเก็บรวบรวมข้อมูล

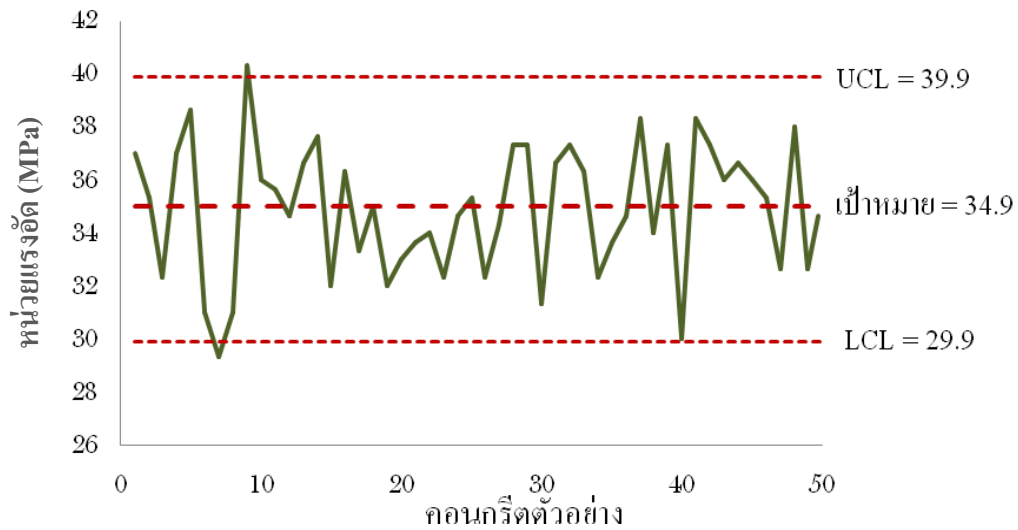


ภาพที่ 6.25 แผนภูมิควบคุมของการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 30

แผนภูมิควบคุมยังสามารถแสดงควบคู่กับขีดจำกัดควบคุม (Control Limit) ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดขึ้นจากผลการแจกแจงความน่าจะเป็นของข้อมูลเพื่อใช้บ่งบอกความน่าเชื่อถือของค่าที่วัดได้ ขีดจำกัดควบคุมประกอบด้วยขีดจำกัดบน (Upper Control Limit : UCL) และขีดจำกัดล่าง (Lower Control Limit : LCL) ยกตัวอย่างเช่น แผนภูมิควบคุมกำลังอัดเฉลี่ยของแท่งคอนกรีตจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จแห่งหนึ่ง โดยการใช้การแจกแจงแบบปกติดังแสดงในภาพที่ 6.26 ค่ากำลังอัดเฉลี่ยหนึ่งค่าจะมาจากการทดสอบคอนกรีตหนึ่งชุดซึ่งมีจำนวน 3 ตัวอย่าง ถ้ากำหนดให้เป้าหมายกำลังอัดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 34.9 MPa และถ้าต้องการให้โอกาสเกิดเหตุการณ์หน่วยแรงอัดเฉลี่ยจริงอยู่ที่ร้อยละ 95.4 ของการแจกแจงแบบปกติแล้วจะได้ว่า ขีดจำกัดบนหาได้จากการนำค่าเป้าหมายกำลังอัดเฉลี่ยบวกด้วยสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกำลังอัดเฉลี่ยทุกชุดทดสอบ และขีดจำกัดล่างหาได้จากการนำค่าเป้าหมายกำลังอัดเฉลี่ยลบด้วยสองเท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัดเฉลี่ยทุกชุดทดสอบ ตามลำดับ ดังนั้นถ้าสมมติให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังอัดเฉลี่ยทุกชุดทดสอบมีค่า 2.5 MPa แล้วจะได้ขีดจำกัดบนอยู่ที่ 39.9 MPa และขีดจำกัดล่างอยู่ที่ 29.9 MPa เป็นต้น จากตัวอย่างดังกล่าวถ้าผลการทดสอบกำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตชุดใดมีค่าสูงกว่าขีดจำกัดบนหรือต่ำกว่าขีดจำกัดล่างก็แสดงว่าคอนกรีตชุดนั้นขาดความน่าเชื่อถือ (Mikell P. Groover. 2013 : 963-967)



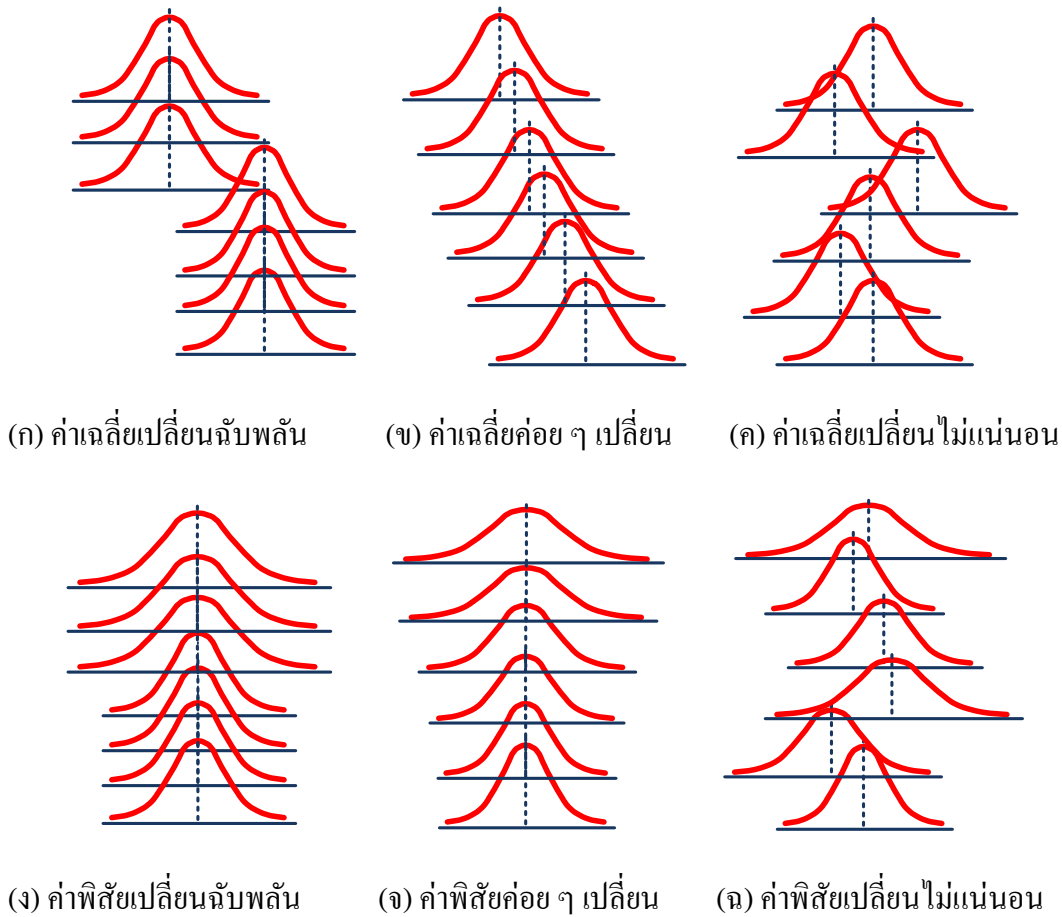


ภาพที่ 6.26 แผนภูมิควบคุมทางสถิติที่มีขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่าง

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. 2011 : 31

ความผันแปรของค่าสถิติทั้งค่าเฉลี่ยและพิสัยยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมความผันแปรของข้อมูลการวัดได้อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น ข้อมูลการวัดทางสถิติของแต่ละชุดการทดสอบสามารถแสดงเป็นแผนภูมิควบคุมได้หนึ่งภาพ ในขณะที่ผลการรวบรวมข้อมูลการวัดทั้งโครงการอาจประกอบไปด้วยข้อมูลการวัดทางสถิติจำนวนหลายชุด การแสดงผลโดยการจัดระเบียบข้อมูลจะช่วยให้การสังเกตความผันแปรของค่าเฉลี่ยและพิสัยของแต่ละชุดทำได้ง่ายขึ้น เป็นต้น ความผันแปรของชุดข้อมูลการวัดทางสถิติมีด้วยกัน 6 แบบประกอบด้วย แบบที่ 1 ความผันแปรของค่าเฉลี่ยแบบฉับพลันดังแสดงในภาพที่ 6.27(ก) แบบที่ 2 ความผันแปรของค่าพิสัยแบบฉับพลันดังแสดงในภาพที่ 6.27(ง) ทั้งความผันแปรค่าเฉลี่ยหรือพิสัยแบบฉับพลันต่างแสดงให้เห็นความผันแปรอย่างมีระบบ ดังนั้นการวิเคราะห์หาสาเหตุของความผันแปรจึงสามารถทำได้ไม่ยากเย็นนัก เช่น สาเหตุเกิดจากวัตถุดิบมีคุณภาพด้อยลง หรือเกิดจากการชำรุดเสียหายของเครื่องจักร เป็นต้น แบบที่ 3 เป็นความผันแปรของค่าเฉลี่ยแบบเกิดขึ้นทีละน้อยดังแสดงในภาพที่ 6.27(ข) แบบที่ 4 เป็นความผันแปรของค่าพิสัยแบบเกิดขึ้นทีละน้อยดังแสดงในภาพที่ 6.27(จ) ทั้งความผันแปรค่าเฉลี่ยหรือพิสัยแบบเกิดขึ้นทีละน้อยนี้ต่างเกิดจากความผันแปรอย่างมีระบบ เช่นเดียวกับสองแบบแรกแต่การเปลี่ยนแปลงเกิดบ่อยกว่า ดังนั้นการวิเคราะห์หาสาเหตุความผันแปรจึงต้องใช้ความละเอียดมากยิ่งขึ้น เช่น สาเหตุเกิดจากการเสื่อมสภาพของเครื่องจักรลดการใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน เป็นต้น แบบที่ 5 เป็นความผันแปรของค่าเฉลี่ยแบบไม่แน่นอนดังแสดงในภาพที่ 6.27(ค) และแบบที่ 6 เป็นความผันแปรของค่าพิสัยแบบไม่แน่นอนดังแสดงในภาพที่ 6.27(ฉ) ความผันแปรของสองแบบสุดท้ายเกิดขึ้นอย่างไม่เป็นระบบจึงยากต่อ

การคาดคะเนเพื่อหาสาเหตุ หรืออาจกล่าวได้ว่าเกิดความผันแปรอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีสาเหตุหลายอย่างรวมกัน เช่น สาเหตุเกิดจากการปฏิบัติงานด้วยประสิทธิภาพ หรือเกิดจากระบบการตรวจสอบด้วยประสิทธิภาพ เป็นต้น (Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011: 29-31)



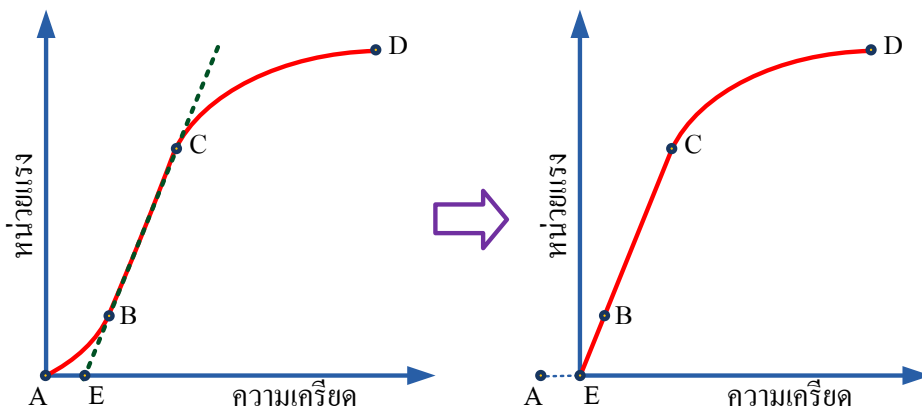
ภาพที่ 6.27 แผนภูมิควบคุมทางสถิติที่มีความผันแปรของค่าเฉลี่ยและพิสัย

ที่มา : Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski. 2011 : 31

#### 4. ความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบ

ความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบ (Experimental Error) เป็นความผันแปรของข้อมูลการวัดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการทดสอบชิ้นงานในห้องปฏิบัติการ ความคลาดเคลื่อนนี้มีสาเหตุหลัก 2 ประการคือ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องมือหรือเครื่องจักร และความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากผู้ทดสอบ ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบกำลังดึงของชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนสูงได้ผลการทดสอบระหว่างหน่วยแรงและความเครียดดังแสดงในภาพที่ 6.28 จากภาพที่ 6.28(ก) พบว่า

ลักษณะเส้นโค้งที่ปรากฏแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วง AB มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย ช่วง BC มีลักษณะเป็นเส้นตรงและช่วง CD มีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำ ตามลำดับ แนวเส้นโค้ง BC เป็นสถานะที่วัสดุอยู่ในช่วงยืดหยุ่นหรือพลาสติกภายใต้แรงดึงและเส้นโค้ง CD เป็นสถานะที่วัสดุอยู่ในช่วงพลาสติกซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการทดสอบกำลังดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนสูง แต่แนวเส้นโค้ง AB ไม่สอดคล้องกับทฤษฎีการทดสอบกำลังดึงจึงทำให้สันนิษฐานได้ว่าอาจมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนของการทดสอบ บ่อยครั้งที่นักวิจัยพบว่าความคลาดเคลื่อนมักเกิดขึ้นในช่วงแรกของการทดสอบวัสดุซึ่งมีสาเหตุหลักอยู่ 3 ประการคือ ประการแรกเกิดจากอุปกรณ์จับชิ้นงาน ไม่สามารถจับยึดชิ้นงานได้อย่างมั่นคงในช่วงแรกของการทดสอบ ประการที่สองเกิดจากการขยับตัวของโมเลกุลของวัสดุจากแรงคงข้างก่อนการทดสอบไปเป็นสถานะที่รับแรงขณะทำการทดสอบ และประการที่สามเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตัวอย่างทดสอบจากการบิดหรือโค้งงอไปอยู่ในแนวที่แรงกระทำ ตามลำดับ ดังนั้นในการปรับแก้เส้นโค้งช่วงแรกให้สอดคล้องกับคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุสามารถทำได้โดยการลากเส้นตรงระหว่างจุด B และ C ให้มาติดกับแกนนอนที่จุด E จากนั้นลากเส้นตรง EC ซึ่งผ่านจุด B แล้วกำหนดแนวแกนตั้งของหน่วยแรงขึ้นใหม่ที่จุด E ก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุในช่วงพลาสติกดังแสดงในภาพที่ 6.28(ข) ในขณะที่เส้นโค้ง CD เป็นสถานะที่วัสดุยังอยู่ในช่วงพลาสติกเช่นเดิม นอกจากนั้นในกรณีที่วัสดุแสดงพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นก็สามารถปรับแก้ความคลาดเคลื่อนได้ในทำนองเดียวกันแต่การลากเส้นตรงไปตัดแกนนอนจะต้องลากให้สัมผัสจุดที่มีความชันมากที่สุดของเส้นโค้งเดิม (Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski, 2011: 32)



(ก) ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดสอบ

(ข) การแก้ไขความคลาดเคลื่อน

**ภาพที่ 6.28** ความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบ

**ที่มา :** Michael S. Mamlouk and John P. Zaniwski, 2011 : 32

## สรุป

คุณสมบัติทางกลถือได้ว่ามีความสำคัญต่อการเลือกใช้วัสดุในการก่อสร้างเพราะเป็นคุณสมบัติที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงมากระทำ นอกจากคุณสมบัติทางกลแล้ว คุณสมบัติทางกายภาพก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน คุณสมบัติทางกายภาพที่มักถูกอ้างอิงบ่อยครั้งคือ ความหนาแน่น หน่วยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะ คุณสมบัติด้านอุณหภูมิ และลักษณะพื้นผิว เป็นต้น เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่น่าเชื่อถือเพื่อใช้ในการหาคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุจำเป็นต้องมีอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่เหมาะสม เครื่องมือที่มีความละเอียดสูงย่อมช่วยให้นักวิจัยสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแม้เพียงเล็กน้อยได้อย่างแม่นยำ ปริมาณที่มักถูกใช้อ้างอิงในการทดสอบวัสดุคือค่าระยะและค่าแรง ดังนั้นในการศึกษาวัสดุก่อสร้างจึงควรมีความรู้เกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้เพื่อวัดค่าทั้งสอง นอกจากนั้นยังต้องมีความรู้เรื่องความผันแปรหรือความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ที่เกิดกับวัสดุ เพราะความบกพร่องของชิ้นงานย่อมมีโอกาสเกิดขึ้นได้แม้จะมีกระบวนการตรวจสอบอย่างดีแล้วก็ตาม

เมื่อก้าวถึงพัฒนาการของวัสดุก่อสร้างจากอดีตจนถึงปัจจุบันพบว่า วัสดุก่อสร้างในอดีตมักเป็นวัสดุตามธรรมชาติ เช่น หิน ดิน ไม้ เหล็ก และผลิตภัณฑ์จากวัสดุธรรมชาติ เป็นต้น วัสดุก่อสร้างที่ได้จากธรรมชาติหลายชนิดมีข้อจำกัดในด้านการควบคุมคุณภาพ อย่างไรก็ตาม วัสดุก่อสร้างที่ได้จากธรรมชาติก็ยังคงถูกนำมาใช้งานในปัจจุบัน ต่อมาเมื่อวิทยาการก้าวหน้ามากขึ้นจึงได้มีการคิดค้นวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่เพิ่มมากขึ้น เช่น โลหะ คอนกรีต และพอลิเมอร์ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไปตามยุคสมัยดังนั้นการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างจึงต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ความสวยงามทางสถาปัตยกรรมและความยั่งยืนของสิ่งก่อสร้างโดยมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อยที่สุด

## คำถามทบทวน

1. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบอิลาสติกแตกต่างจากแบบพลาสติกอย่างไร
2. การคืบเกิดจากสาเหตุใดและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างไร
3. ปริมาณของเหลวภายในวัสดุมีผลต่อคุณสมบัติด้านน้ำหนักอย่างไร
4. ค่าความไวมีความสำคัญอย่างไรต่อเครื่องมือวัด
5. จงอธิบายวิธีประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดความเครียดเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องมือวัดค่าแรง
6. จงอธิบายหลักการทำงานของวงแหวนวัดแรง
7. ความผันแปรหรือความไม่แน่นอนของวัสดุเกิดจากสาเหตุใดบ้าง
8. จงยกตัวอย่างแผนภูมิควบคุมด้านวัสดุก่อสร้างพร้อมทั้งอธิบายประโยชน์ที่จะได้รับจากแผนภูมิควบคุมที่ยกตัวอย่าง
9. จงบอกสาเหตุของความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบวัสดุพร้อมทั้งอธิบายวิธีแก้ไข
10. ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างอย่างไร
11. จงหาการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรสุ่ม  $x$  จากการทดสอบกำลังอัดชิ้นงาน เมื่อผลการทดสอบทำให้ได้ค่าเฉลี่ยตัวแปรสุ่มแบบปกติ 215 ksc และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตัวแปรสุ่มแบบปกติ 12 ksc (ตอบ :  $n(x; \mu, \sigma^2) = 0.115 e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-215}{12}\right)^2}$  เมื่อ  $-\infty < x < +\infty$ )
12. จงเขียนแผนภูมิควบคุมทางสถิติที่มีขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของการทดสอบกำลังอัดแท่งคอนกรีตที่ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6.1 (ตอบ : ค่าเป้าหมาย = 204 ksc, UCL = 212 ksc และ LCL = 195 ksc)

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบกำลังอัดแท่งคอนกรีต

| ลำดับที่ | กำลังอัด (ksc) | ลำดับที่ | กำลังอัด (ksc) | ลำดับที่ | กำลังอัด (ksc) |
|----------|----------------|----------|----------------|----------|----------------|
| 1        | 205            | 6        | 195            | 11       | 220            |
| 2        | 210            | 7        | 198            | 12       | 206            |
| 3        | 204            | 8        | 201            | 13       | 210            |
| 4        | 215            | 9        | 205            | 14       | 204            |
| 5        | 190            | 10       | 204            | 15       | 190            |



## บรรณานุกรม

- กรมชลประทาน. (2553). **กระบวนการสำรวจทางธรณีวิทยาและปฐพีกลศาสตร์**. กรุงเทพฯ : สำนักชลประทานที่ 11.
- กรมชลประทาน สวพ.ทล.101-308. (2552). **มาตรฐานการทดสอบวัสดุด้านวิศวกรรมสำหรับหน่วยงานทดสอบประจำภูมิภาคของกรมชลประทาน**. กรุงเทพฯ ฯ : กลุ่มงานคอนกรีตและวัสดุ สำนักวิจัยและพัฒนา กรมชลประทาน.
- กรมทรัพยากรธรณี. (ม.ป.ป.). **เคโอลิไนต์**. ค้นเมื่อ 28 มีนาคม 2556, จาก <http://www.dmr.go.th/main.php?filename=kaolinite>.
- \_\_\_\_\_. (ม.ป.ป.). **แผนที่ประเทศไทย**. ค้นเมื่อ 4 มีนาคม 2556, จาก <http://www.dmr.go.th>.
- \_\_\_\_\_. (2538). **ระเบียบปฏิบัติเกี่ยวกับการทำเหมืองหิน**. เอกสารประกอบการสัมมนา, วันที่ 9 มิถุนายน 2538. กรุงเทพฯ ฯ : กรมทรัพยากรธรณี.
- กรมทางหลวง ทล.ม. 201/2544. (2544). **มาตรฐานหินคลุก**. ค้นเมื่อ 4 มีนาคม 2556, จาก <http://mai.doh.go.th/BL1/DocLib1/มาตรฐานพื้นทางหินคลุก.pdf>.
- กรมป่าไม้. (2010). **ประเภทของไม้**. ค้นเมื่อ 11 มิถุนายน 2556, [http://www.forest.go.th/index.php?option=com\\_content&id=311](http://www.forest.go.th/index.php?option=com_content&id=311).
- กรมโยธาและผังเมือง มยผ.1221-51 ถึง 1227-51. (2551). **มาตรฐานการทดสอบไม้**. กรุงเทพฯ ฯ : สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร.
- กรรณิกา ทิตาราม พิมพาเพิ่มพูล ภณณี เจริญภักตร์ สุมนา สุรนาคะพันธ์ สุพัตตา สีนเจิมสิริ แสงนวล นวลตรีณี และ อารมภ์ แสงเพชรส่อง. (2520). **ความน่าจะเป็นและสถิติ**. กรุงเทพฯ ฯ : พิมพ์เรื่องการพิมพ์.
- กวี หวังนิเวศน์กุล. (2548). **การออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเบื้องต้น**. กรุงเทพฯ ฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- \_\_\_\_\_. (2552). **วัสดุวิศวกรรมก่อสร้าง**. กรุงเทพฯ ฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- แก้วตา ดิยัง. (2552). **การศึกษากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14. วันที่ 13-15 พฤษภาคม 2552. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา.
- ไกรยุทธ แน่นอุดร. (2555). **รายงานผลการทดสอบดินวิธี Standard Penetration Test : โครงการก่อสร้างอาคารคณะครุศาสตร์**. สุรินทร์ : ภาควิชาก่อสร้าง วิทยาเขตสุรินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.

- คชินท์ สายอินทวงศ์. (2551). **Montmorillonite (Smectite)**. Thai Ceramic Society. ค้นเมื่อ 28 มีนาคม 2556, จาก [http://www.thaiceramicsociety.com/rm\\_soil\\_montmorillonite](http://www.thaiceramicsociety.com/rm_soil_montmorillonite).
- จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา. (2558). **การศึกษาคุณสมบัติเต้าห่านอ้อยผสมซีเมนต์**. รายงานวิจัย. บุรีรัมย์ : มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์.
- \_\_\_\_\_. (2556). **การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก**. บุรีรัมย์ : สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์.
- \_\_\_\_\_. (2556). **กำลังวัสดุ**. บุรีรัมย์ : สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์.
- \_\_\_\_\_. (2557). **เทคโนโลยีคอนกรีต**. บุรีรัมย์ : สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์.
- \_\_\_\_\_. (2556). **รายงานผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต : โครงการก่อสร้างอาคารเรียนคณะครุศาสตร์**. บุรีรัมย์ : สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์.
- \_\_\_\_\_. (2558). **รายงานผลการทดสอบความหนาแน่นดินในสนาม : โครงการก่อสร้างหลุมเจาะสำรวจปิโตรเลียมบนบก**. บุรีรัมย์ : สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์.
- \_\_\_\_\_. (2556). **รายงานผลการทดสอบความหนาแน่นดินในสนาม : โครงการก่อสร้างอาคารเรียนคณะครุศาสตร์**. บุรีรัมย์ : สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์.
- \_\_\_\_\_. (2558). **รายงานผลการทดสอบวัสดุผสมคอนกรีต : บริษัท กิจมงคลบุรีรัมย์ จำกัด**. บุรีรัมย์ : สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์.
- จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา สุปรีชา นามประเสริฐ และณรงค์เดช ยังสุขเกษม. (2557). **รายงานผลการทดสอบวัสดุผสมคอนกรีต : บริษัท เบสท์ แพค คอนกรีต จำกัด**. บุรีรัมย์ : สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์.
- \_\_\_\_\_. (2558). **รายงานผลการทดสอบวัสดุผสมคอนกรีต : บริษัท เบสท์ แพค คอนกรีต จำกัด**. บุรีรัมย์ : สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์.
- จิรศักดิ์ ภูริพันธ์วิชัย และคณะ. (2544). **การศึกษาคอนกรีตบดลอกจากเต้าห่านอ้อย**. ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชาญ ถนัดงาน. (2523). **กลศาสตร์วัสดุ**. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตพระนครเหนือ.



- ชัย จาคูพิทักษ์กุล. (2555). การใช้เต้าชานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุป้อนโซลันในงานคอนกรีต. วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. ฉบับที่ 16 : หน้า 1-11.
- คุณพล ตันนโยภาส. (ม.ป.ป.). **บทที่ 4 แร่และหิน**. สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ค้นเมื่อ 21 เมษายน 2556, จาก <http://www.mwit.ac.th/~weerawut/doc/MIn69-86.pdf>.
- ดิเรก ลาวัณย์ศิริ และ บุญสม เลิศหิรัญวงศ์. (2538). **ปฏิวัติวิศวกรรมในงานก่อสร้าง**. กรุงเทพฯ : LIBRARY NINE PUBLISHING.
- นิโรจน์ เงินพรหม และ สำเริง รักซ้อน. (2555). **พัฒนาตินซีเมนต์ลูกครึ่งผสมวัสดุเถ้าทิ้งจากผลผลิตอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมเป็นวัสดุประสาน**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ : เทคโนโลยีราชชมงคลพระนคร.
- นันทพล รัตน์มณี. (2554). **แผนที่ชั้นดินภายในเขตเทศบาลนคร นครราชสีมา**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- บจก. เซ็นเตอร์เวฟ. (2014). **ราคาบล็อกแก้วทั้งหมด**. ค้นเมื่อ 3 สิงหาคม 2556, จาก <http://homeone.tarad.com>.
- บจก. แมททีเรียล โฟกัส. (ม.ป.ป.). **ข้อมูลกลุ่มปูนซีเมนต์**. ค้นเมื่อ 3 พฤษภาคม 2556, จาก <http://www.materialfocus.com/Default.aspx?pageid=331>.
- บรรจบ อรชร. (2542). **กลศาสตร์ของแข็ง**. กรุงเทพฯ : บริษัทพิมพ์ดีจำกัด.
- บ้านสวนพอเพียง. (2016). **บล็อกประสาน**. สืบค้นเมื่อ 12 กุมภาพันธ์ 2557 จาก <http://www.bansuanporpeang.com/node/16463>.
- บริษัทกาฬสินธุ์คอนกรีตจำกัด. (2013). **พื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบกลวง**. ค้นเมื่อ 16 กรกฎาคม 2556, จาก <http://www.kc.co.th/index.php?mo=28&id=1154543>.
- บริษัทบางกอกเซรามิคจำกัด. (2014). **บล็อกแก้ว ลายธรรมชาติ**. ค้นเมื่อ 4 สิงหาคม 2556, จาก <http://bangkokceramic.co.th/laithai>.
- บริษัทบางกอกเฮาส์บิวเดอร์ จำกัด. (2554). **พื้นหินขัด**. ค้นเมื่อ 9 กรกฎาคม 2556, จาก [http://baansanruk.blogspot.com/2011/06/blog-post\\_6442.html](http://baansanruk.blogspot.com/2011/06/blog-post_6442.html).
- บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน). (2548). **ปูนซีเมนต์ตราอินทรี**. ค้นเมื่อ 5 มีนาคม 2556, จาก [http://www.siamcitycement.com/default\\_index.aspx](http://www.siamcitycement.com/default_index.aspx).
- บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด. (2552). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ : บริษัท. \_\_\_\_\_ . (2550). **คู่มือการทดสอบหิน ทราบ และคอนกรีต**. กรุงเทพฯ : บริษัท.

- บริษัทวงศ์ศรีวัฒนคำวัสดุ จำกัด. (2010). **ปูนอินทรี**. ค้นเมื่อ 4 มีนาคม 2556, จาก <http://concrete.siam2web.com>.
- บริษัทสระบุรีมารวยแกรนิต จำกัด. (ม.ป.ป.). **หินแกรนิตเกรด A**. ค้นเมื่อ 12 มีนาคม 2556, จาก <http://www.maruygranite.com>.
- \_\_\_\_\_. (2010). **หินอ่อน**. ค้นเมื่อ 29 เมษายน 2556, จาก <http://www.maruygranite.com/หินอ่อน-หินทราย-เกรดเอ-ราคาถูก.html>.
- บริษัทเอสซีจีเอ็กซ์พีเรียนซ์ จำกัด. (2555). **แผ่นผนังสำเร็จรูป**. ค้นเมื่อ 6 สิงหาคม 2556, จาก <http://www.scgexperience.co.th/th/product>.
- \_\_\_\_\_. (2555). **เรื่องพื้นพื้นของคนรักไม้**. ค้นเมื่อ 11 มิถุนายน 2556, จาก <http://www.scgexperience.co.th/th/blog/detail.aspx?id=22&post=284>.
- บัณฑิต จุลาสัย. (2542). **แนวทางการแก้ปัญหาคุณภาพของโครงการเหมืองหินและโรงโม่หิน**. เอกสารประกอบการสัมมนา อุตสาหกรรมเหมืองแร่ไทยร่วมใจรักสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ ฯ : กรมทรัพยากรธรณี.
- บ้านสวนพอเพียง. (2016). **บล็อกประสาน**. สืบค้นเมื่อ 12 กุมภาพันธ์ 2557 จาก <http://www.bansuanporpeang.com/node/16463>.
- บ้านคูดี. (ม.ป.ป.). **พื้นคอนกรีตพิมพ์ลาย**. ค้นเมื่อ 7 กรกฎาคม 2556, จาก <http://thedoohome.blogspot.com/2011/03/cement-color.html>.
- บ้านแสนรัก. (2014). **หินขัด**. ค้นเมื่อ 9 กรกฎาคม 2556, จาก [http://baansanruk.blogspot.com/2011/06/blog-post\\_6442.html](http://baansanruk.blogspot.com/2011/06/blog-post_6442.html).
- บ้านในฝัน. (2014). **ไฟเบอร์ซีเมนต์**. ค้นเมื่อ 4 สิงหาคม 2556, จาก <http://baannaifun.blogspot.com>.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ. (2543). **คุณสมบัติด้านความต้านทานและกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ**. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ฉบับที่ 2 : หน้า 17-29.
- ประจักษ์ ทูลกลสิกร, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2557). **Strength and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete Containing Ground Rice Husk Ash**. วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. ฉบับที่ 2 : หน้า 8-16.
- ประสิทธิ์ เวียงแก้ว และฉัตรชัย ลาภรังสิรัตน์. (2554). **คู่มืองานเหล็ก**. กรุงเทพฯ ฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- ปิติ สุขนครสุขกุล. (2556). **คอนกรีต**. กรุงเทพฯ ฯ : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

- ปิติศานต์ กร้ามาตร. (2553). **คุณสมบัติเบื้องต้นของคอนกรีตผสมถ้ำลอยและผงหินปูน**.  
 รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- พงศ์พันธ์ วรสุนทรโรสด และ วรพงศ์ วรสุนทรโรสด. (2555). **วัสดุก่อสร้าง**. กรุงเทพฯ :  
 ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- พิภพ สุนทรสมัย. (2540). **วัสดุวิศวกรรมการก่อสร้าง**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี  
 (ไทย-ญี่ปุ่น).
- พิชญา ทวีเลิศ. (ม.ป.ป.). **การออกแบบเขื่อนป้องกันตลิ่ง ชุมชนแห่งการเรียนรู้ การออกแบบ  
 การก่อสร้างและการบำรุงรักษาเขื่อนป้องกันตลิ่ง**. กรุงเทพฯ : กรมโยธาและผังเมือง  
 กระทรวงมหาดไทย. ค้นเมื่อ 30 มีนาคม 2556, จาก  
[http://services.dpt.go.th/dpt\\_subkm01/dptpages/book02/unit01.pdf](http://services.dpt.go.th/dpt_subkm01/dptpages/book02/unit01.pdf).
- เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล, อรรคเดช อับดุลมาดิน, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล.  
 (2559). **การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้วัสดุประสานจากถ้ำกันเตาและกาก  
 แคลเซียมคาร์ไบด์**. วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย. ฉบับที่ 4 : หน้า  
 11-19.
- ไพโรจน์ ตีรณธนากุล. (2543). **ฟิสิกส์พื้นฐานกลศาสตร์**. กรุงเทพฯ : ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ.  
 มนตรี พิรุณเกษร. (2544). **กลศาสตร์ของวัสดุ**. กรุงเทพฯ : วิทยพัฒน์.
- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2009). **ปูนก่อ ปูนฉาบ**. ค้นเมื่อ 31 กรกฎาคม 2556, จาก  
<http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet7/pkpk.htm>.
- มหิปพงศ์ วรกุล. (ม.ป.ป.). **คู่มือการวิเคราะห์และบรรยายลักษณะดิน-หินจากหลุมเจาะ**.  
 รายงานเพื่อการประเมินแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักธรณีวิทยาชำนาญการพิเศษ.  
 กรุงเทพฯ : กรมทรัพยากรธรณี.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.602/2547. (2547). **อิฐบล็อกประสาน**. กรุงเทพฯ : สำนักงาน  
 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1123-2555. (2555). **สีรองพื้นสำหรับงานปูน**. กรุงเทพฯ :  
 กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.1228-2549. (2549). **เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น**. กรุงเทพฯ : กระทรวง  
 อุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.1307-2552. (2552). **สีสังกะสีรองพื้น : สีนำสีอนินทรีย์**. กรุงเทพฯ : กระทรวง  
 อุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.1395-2554. (2554). **บล็อกแก้วกลวง**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.

- \_\_\_\_\_. มอก.1415-2552. (2552). **สีสังกะสีรองพื้น : สีนําสีอินทรี**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.1505-2541. (2541). **ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.20-2543. (2555). **เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตชนิดเหล็กเส้นกลม**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.202. (2548). **ปูนไลม**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.213. (2552). **คอนกรีตผสมเสร็จ**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.219-2524. (2524). **แผ่นยิปซัม**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.2215-2548. (2548). **สีพอกซีชนิดฟิล์มหนา**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.2321-2549. (2549). **สีมัลชันทนสภาวะอากาศ**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.2386-2525. (2555). **สีรองพื้นกันสนิมซิงก์ฟอสเฟต**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.2387-2555. (2555). **สีรองพื้นกันสนิม**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.24-2548. (2548). **เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตชนิดเหล็กข้ออ้อย**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.2442-2552. (2552). **สีมัลชันพองตัวกันไฟ**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.2514-2553. (2553). **สีมัลชันลดความร้อนจากแสงอาทิตย์**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.272-2549. (2549). **สีมัลชันใช้งานทั่วไป**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.319. (2551). **ปูนไลมอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.357-2551. (2551). **สีรองพื้นสำหรับงานไม้**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.420-2540. (2540). **ลวดเหล็กกล้าตีเกลียวสำหรับคอนกรีตอัดแรง**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.528-2548. (2548). **เหล็กกล้าคาร์บอนทรงแบนรีร้อนสำหรับงานทั่วไป**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.57-2530. (2530). **คอนกรีตบดลือกรับน้ำหนัก**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.

- \_\_\_\_\_. มอก.576-2531. (2531). **แผ่นคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงหล่อสำเร็จสำหรับระบบพื้นคอนกรีต**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.58-2530. (2530). **คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.607-2550. (2550). **สีกันเปรียงไวนิล**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.691-2547. (2547). **สีอีพอกซีสำหรับงานทั่วไป**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.77-2545. (2545). **อิฐก่อสร้างสามัญ**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.828-2546. (2546). **ชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรงหล่อสำเร็จสำหรับระบบพื้นประกอบ**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- \_\_\_\_\_. มอก.95-2540. (2540). **ลวดเหล็กกล้าสำหรับคอนกรีตอัดแรง**. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม.
- มานะ อภิพัฒน์มนตรี. (2543). **วิศวกรรมปฐพีและฐานราก**. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- แม่น อมรสิทธิ์. (ม.ป.ป.). **วัสดุวิศวกรรม**. เอกสารประกอบการบรรยาย. ค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2556, จาก [www.coe.or.th/\\_coe/\\_download/training/p\\_materials.pdf](http://www.coe.or.th/_coe/_download/training/p_materials.pdf).
- รัฐพล สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2554). **การใช้เส้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำ และความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า**. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ฉบับที่ 4 : หน้า 369-381.
- วรรณศรี บุญขจรพันธุ์. (2524). **วัสดุการก่อสร้าง**. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
- วิกิพีเดียสารานุกรมเสรี. (2556). **การไทเทรต**. ค้นเมื่อ 12 มีนาคม 2556, จาก <http://th.wikipedia.org>.
- วินิต ช่อวิเชียร. (2545). **การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก**. กรุงเทพฯ : วินิต ช่อวิเชียร.
- \_\_\_\_\_. (2545). **การออกแบบโครงสร้างไม้**. กรุงเทพฯ : ป.สัมพันธ์พาณิชย์.
- \_\_\_\_\_. (2544). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ : วินิต ช่อวิเชียร.
- วินิต ช่อวิเชียร วรรณิต ช่อวิเชียร และ วรเศรษฐ์ ช่อวิเชียร. (2548). **กำลังวัสดุ/กลศาสตร์วัสดุ**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2534). **งานฐานรากและงานก่อสร้างใต้ดิน**. การสัมมนาทางวิชาการ. กรุงเทพฯ ฯ : คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. โรงแรมเอเชีย.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ว.ส.ท.1002-16. (2539). **มาตรฐานสำหรับอาคารไม้**. กรุงเทพฯ ฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
- \_\_\_\_\_. ว.ส.ท. 1014-40. (2540). **ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต**. กรุงเทพฯ ฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.
- วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. (ม.ป.ป.). **ปฐพีกลศาสตร์**. กรุงเทพฯ ฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต.
- วีระพันธ์ สิทธิพงศ์. (2522). **กลศาสตร์วิศวกรรม**. กรุงเทพฯ ฯ : นิยมวิทยา.
- วีระศักดิ์ ทรัพย์วิเชียร, ชีระยุทธ สุวรรณประทีป และ สมาน เจริญกิจพุดผล. (2546). **กลศาสตร์วิศวกรรม**. กรุงเทพฯ ฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- วัฒนา ธรรมมงคล และ วินิต ช่อวิเชียร. (2532). **ปฐพีกลศาสตร์**. กรุงเทพฯ ฯ : ป.สัมพันธ์พาณิชย์.
- วันโชค เกรือหงส์, ชีรวัฒน์ สิ้นศิริ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ. (2555). **การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน**. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ฉบับที่ 2 : หน้า 187-200.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (ม.ป.ป.). การวัดคุณสมบัติความเหนียว (Toughness) ของวัสดุด้วยการทดสอบแรงกระแทก (Impact test). ค้นเมื่อ 31 พฤษภาคม 2556, จาก <https://www.mtec.or.th>**
- ศูนย์ผลิตภัณฑ์อิฐ บ.ป.ก. (2011). **อิฐกลวง อิฐโปร่ง อิฐช่องลม**. ค้นเมื่อ 2 สิงหาคม 2556, จาก <http://bpbbrick.nalueng.com/products?action=view&id=1994>.
- ษณัฐกร เทียมวีรสกุล และ นที อतिकุณาการ. (2543). **การศึกษากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าขาน้อย**. ปรินูญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ ฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สถาพร คูวิจิตรจากร. (2546). **ทดลองปฐพีกลศาสตร์**. กรุงเทพฯ ฯ : LIBRARY NINE PUBLISHING.
- \_\_\_\_\_. (2545). **ปฐพีกลศาสตร์**. กรุงเทพฯ ฯ : LIBRARY NINE PUBLISHING.
- สมศักดิ์ คำปลิว. (2544). **การออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก**. กรุงเทพฯ ฯ . ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- สมโพธิ วิวิธเกตุรวงศ์. (2542). **กลศาสตร์ของวัสดุ**. กรุงเทพฯ ฯ : ฟิสิกส์เซ็นเตอร์การพิมพ์.

- สหภาพ หอมวุฒิวังศ์, ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). **ผลกระทบของการใช้เต้าถ่านหิน 5 แหล่งในปริมาณสูงต่อกำลัังอัดและการต้านทานกรดของคอนกรีต**. วารสารสงขลานครินทร์ วทท. ฉบับที่ 2 : หน้า 269-283.
- สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนโดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. (ม.ป.ป.). **กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์**. ค้นเมื่อ 14 มีนาคม 2556, จาก <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book>.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2549). **กลศาสตร์ของวัสดุ**. นครราชสีมา : สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สิริศักดิ์ ปโยธรศิริ. (2543). **กลศาสตร์วิศวกรรม**. กรุงเทพฯ ฯ : ว. เพ็ชรสกุล.
- \_\_\_\_\_. (2549). **กลศาสตร์วัสดุ**. กรุงเทพฯ ฯ : ว.เพ็ชรสกุล.
- สุกิจ นามพิชญ์. (2541). **ความแข็งแรงของวัสดุ**. กรุงเทพฯ ฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- สุกิจ เสริมชีพ. (2548). **ปัญหาและอุปสรรคในการประกอบการผลิตหินอุตสาหกรรมเพื่อการก่อสร้าง**. ปัญหาพิเศษหลักสูตรรัฐประศาสนศาสตรมหาบัณฑิต. ชลบุรี : วิทยาลัยการบริหารรัฐกิจ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- สุขอัคณา ลี. (2553). **Engineering Metallurgy Laboratory Book**. อุบลราชธานี : ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- สุชีรา กุลชนะประสิทธิ์ และ ชูชัย สุจิรวกุล. (2548). **ผลกระทบของเถ้าขานอ้อยต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์**. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. ชลบุรี. การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10 : หน้า 67-72.
- สุภาวดี นาห้วนิล. (2547). **จุลินทรีย์และพีช**. ค้นเมื่อ 15 มิถุนายน 2556, จาก <http://student.nu.ac.th/cherrycoke/lesson6.htm>.
- สุภาสิณี ลิ้มปานภาพ. (ม.ป.ป.). **การศึกษาการยึดเกาะของเซลล์บนโครงสร้างวัสดุชีวภาพสำหรับการใช้งานทางการแพทย์**. ขอนแก่น : ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- \_\_\_\_\_. (2547). **Website เพื่อการเรียนการสอนรายวิชา จุลินทรีย์และพีช**. พิษณุโลก : คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. ค้นเมื่อ 10 มิถุนายน 2556, จาก <http://student.nu.ac.th/cherrycoke>.
- สุภิชาติ เจนจิระปัญญา และ ปิตินันต์ กร้ามาตร. (2559). **การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุประสานที่ใช้วัสดุจากอุตสาหกรรม**. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 2 : หน้า 77-86.

- สุรพล สงวนแก้ว ปรีชา จีรวรรณวาสนา และลลิต สวัสดิมงคล. (2547). การทดสอบและค่ากล  
สมบัติของหินที่เหมาะสม. กรุงเทพฯ ฯ : สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง.  
แสงสว่างของค่านมเม็ด. (2557). งานพื้ **Post tension**. ค้นเมื่อ 16 กรกฎาคม 2556, จาก  
<http://ozone7th.blogspot.com/2014/08/post-tension.html>.
- โสภณ วงศ์มีทรัพย์ และ เกษม จารุปาน. (ม.ป.ป.). **กลศาสตร์วิศวกรรม**. กรุงเทพฯ ฯ :  
ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ.
- สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน. (ม.ป.ป.). **ชั้นดินหรือชั้นกำเนิดดิน**. กรุงเทพฯ ฯ : กรม  
พัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. ค้นเมื่อ 18 มีนาคม 2556, จาก  
[http://osl101.idd.go.th/easysoils/s\\_profile.htm](http://osl101.idd.go.th/easysoils/s_profile.htm).
- สำเร็จ สารมาคม. (2556). การประยุกต์ใช้เถ้าลอยในการผลิตบล็อกประสาน. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.  
อดิษฐ์ อิศรางกูร ณ อยุธยา. (ม.ป.ป.). การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์. สถาบัน  
บัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์. ค้นเมื่อ 20 มกราคม 2557, จาก  
[www.rdpb.go.th/rdpb/upload/document/Economics.ppt](http://www.rdpb.go.th/rdpb/upload/document/Economics.ppt).
- อาทิมา ดวงจันทร์. (2549). การพัฒนาคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าขาน้อยสำหรับงานก่อสร้าง.  
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. กรุงเทพฯ ฯ :  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อาทิมา ดวงจันทร์ และ สุวิมล สัจจวาณิชย์. (2548). **คอนกรีตบล็อกผสมเถ้าขาน้อย**. สมาคม  
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. ชลบุรี. การประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติครั้งที่ 2 :  
หน้า 6-10.
- อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์. (2542). **กลศาสตร์วิศวกรรม**. กรุงเทพฯ ฯ : สกายบุ๊กส์.
- อุดมวิทย์ กาญจนวงศ์. (2543). **ปฏิบัติการทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ ฯ : สกายบุ๊กส์.
- อุษณีย์ กิตกำจร. (ม.ป.ป.). การอบชุบทางความร้อนของโลหะ. นครราชสีมา : สาขาวิชา  
วิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.  
ค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2556, จาก <http://personal.sut.ac.th/heatreatment/context>.
- เอสซีเทอร์ราโซ. (2001). **โรงรถเป็นพื้นทรายล้างกรวดทองส้ม**. ค้นเมื่อ 10 กรกฎาคม 2556,  
จาก [http://scterrazzo.tarad.com/product.detail\\_845958\\_th\\_3834825](http://scterrazzo.tarad.com/product.detail_845958_th_3834825).



- AAC Block making machine. (2012). **light weight block making machine manufacturer**. Retrieved August 5, 2014, from <https://www.youtube.com/watch?v=9VRrh7idCKQ>
- ACTIO. (2010). **Supply-chain Materials Data Management**. Retrieved January 2, 2013, from <http://supply-chain-data-mgmt.blogspot.com>.
- AGC Glass Europe. (2012). **Conventional production design**. Retrieved August 6, 2013, from <http://www.agc-glass.eu/English/Homepage/Our-Values>.
- Aggregate Designs Corporation. (2014). **ADC Cone Crusher Information**. Retrieved February 28, 2013, from <http://www.aggdesigns.com/Cone-Crusher-info.htm>.
- Alexander Newman. (2004). **Metal Building Systems**. New York : McGraw-Hill.
- Andrew Pytel and Jaan Kiusalaas. (2012). **Mechanics of Materials**. Stamford : Cengage Learning.
- Ash Ahmed and John Sturges. (2015). **Materials Science in Construction**. New York : Routledge.
- Askeland, Donald R. (2010). **The Science and Engineering of Materials**. Stamford : Cengage Learning.
- Attras Co.,Ltd. (2014). **Wood Cement Board**. Retrieved August 4, 2013, from [http://attras.en.ec21.com/Wood\\_Cement\\_Board--4092934\\_4820449.html](http://attras.en.ec21.com/Wood_Cement_Board--4092934_4820449.html).
- Australian Hardwood Network. (2014). **Timber Flooring**. Retrieved July 4, 2013, from <http://www.hardwood.timber.net.au/applications>.
- AvStop.com. (2014). **Hardness Testing**. Retrieved May 31, 2013, from [http://avstop.com/ac/Aviation\\_Maintenance\\_Technician\\_Handbook\\_General/5-28.html](http://avstop.com/ac/Aviation_Maintenance_Technician_Handbook_General/5-28.html).
- AZAM-Enterprises. (2014). **Gypsum Board**. Retrieved August 4, 2013, from [http://www.azamenterprises.com/gypsum\\_board.html](http://www.azamenterprises.com/gypsum_board.html).
- BALLUT BLOCKS LTD. (n.d.). **T-Beam and Block Flooring**. Retrieved July 20, 2013, from [http://www.ballutblocks.com/t-beam\\_and\\_block\\_flooring.html](http://www.ballutblocks.com/t-beam_and_block_flooring.html).
- Bangkok Cryptography. (2014). **Load Cell**. Retrieved January 2, 2013, from <http://www.bkkcrypto.com/j/index.php/transducers/load-cell>.
- Basic Engineering. (2007). **มาตรฐานเหล็กในงานอุตสาหกรรม**. ค้นเมื่อ 17 พฤษภาคม 2556, จาก <http://www.supradit.com/contents/engineer>.

- Benham P.P. and Crawford R.J. (1989). **Mechanics of Engineering Materials**. New York : Longman Scientific.
- BIG ONE TRAVEL CO., Ltd. (n.d.). **จังหวัดบุรีรัมย์**. ค้นเมื่อ 2 มกราคม 2556, จาก <http://www.bigonetravel.com/bureelum.html>.
- Bigger. (2010). **โหลดเซลล์ (Load Cell)**. Retrieved March 17, 2013, from [vrbme.blogspot.com](http://vrbme.blogspot.com).
- Biomed.in.th. (2010). **ทำความรู้จักกับ strain gauge, piezoelectric และ accelerometer**. ค้นเมื่อ 2 มกราคม 2556, จาก <http://www.biomed.in.th>.
- Braja M. Das. (2008). **Advanced Soil Mechanics**. New York : Taylor&Francis.
- \_\_\_\_\_. (2010). **Principles of Geotechnical Engineering**. Stamford : Cengage Learning.
- Budinski, Kenneth G. and Michael K. Budinski. (2010). **Engineering Materials Properties and Selection**. New York : Prentice Hall.
- BuyHome-DD. (2013). **กระเบื้องยางดูราฟลอร์**. ค้นเมื่อ 13 กรกฎาคม 2556, จาก [www.buyhome-dd.com](http://www.buyhome-dd.com).
- CAF Defects in Solids. (2010). **Tilt and Twist Grain Boundaries**. Retrieved May 28, 2013, from <http://moisespinedacaf.blogspot.com>.
- Center of Design Technology Excellence. (n.d.). **ข้อมูลการออกแบบ**. ค้นเมื่อ 17 มีนาคม 2556, จาก <http://www.creativelanna.com>.
- \_\_\_\_\_. (n.d.). **หิน**. ค้นเมื่อ 17 มีนาคม 2556, จาก <http://www.creativelanna.com/center>.
- Chegg Study. (2003). **Fundamentals of Structural Analysis**. Retrieved April 20, 2013, from <http://mgh-images.s3.amazonaws.com/9780073401096/4689-9-3IP1.png>
- Civil Engineering Portal. (2007). **Engineering Works**. Retrieved March 17, 2013, from <http://www.engineeringcivil.com>.
- Compomax. (n.d.). **Load Cell**. Retrieved January 8, 2013, from <http://www.compomax.co.th/product/load-cell>.
- Concrete Network.com. (1999). **Concrete Floor Overview**. Retrieved July 7, 2013, from [http://www.concretenetwork.com/photo-gallery/concrete-floors\\_1](http://www.concretenetwork.com/photo-gallery/concrete-floors_1).
- Concrete Slab Cost. (2014). **Concrete Slab Design**. Retrieved July 16, 2013, from <http://www.concreteslabcost.org/concrete-slab-design>.

- Construction Materail Testing Equipment. (2015). **Unit Weight Measures for Concrete**. Retrieved March 17, 2013, from <http://www.humboldtmg.com/measures.html>.
- C-Post Co.,Ltd. (n.d.). **Post-tensioning system**. Retrieved July 19, 2013, from <http://www.c-post.co.th/c-post/eng/producta.php>.
- Crawford, R.J. (1989). **Mechanics of Engineering Materials**. New York : Longman Scientific.
- Denich Soil Engineering Co.,Ltd. (2010). **Boring Test Service**. Retrieved April 2, 2013, from <http://www.denichsoiltest.com/field>.
- Department of Environmental Sciences. (2012). **EVSC 4270: SOIL SCIENCE**. The University of Virginia. Retrieved March 27, 2013, from <http://www.evsc.virginia.edu>.
- Dieter Schmid-Fine Tools. (2014). **Frame Saws, Bow Saws and Turning Saws**. Retrieved June 25, 2013, from <http://www.fine-tools.com/gestell.htm>.
- Dorling Kindersley Limited. (2009). **All About Joist and Concrete Floor Structures**. Retrieved July 4, 2013, from <http://www.diynetwork.com/floors>.
- Duggal S.K. (2008). **Building Materials**. New Delhi : New Age International (P) Limited.
- eBuild. (2010). **PC คืออะไร**. ค้นเมื่อ 19 กรกฎาคม 2556, จาก <http://ebuildthailand.blogspot.com/2012/04>.
- efunda. (2014). **Columns : Introduction**, Retrieved April 3, 2013, from [www.efunda.com](http://www.efunda.com)
- Encyclopædia Britannica, Inc. (2014). **parenchyma: basic types of plant tissue**. Retrieved June 10, 2013, from <http://kids.britannica.com/comptons/art-53828/Parenchyma-tissue-makes-up>.
- Engineering materials. (n.d.). **Types of fracture**. Retrieved March 20, 2013, from [http://www.hsc.csu.edu.au/engineering\\_studies/application/lift/3210/index.html](http://www.hsc.csu.edu.au/engineering_studies/application/lift/3210/index.html).
- ENGTRAPHOPHER. (2011)**. Green Building-School of ADM, NTU. Retrieved **January 8, 2013, from <http://steven-gerrard-88.blogspot.com>**.
- Evert Hoek. (2006). **Practical Rock Engineering**. North Vancouver. Evert Hoek Consulting Engineer Inc.
- Exact Plastic Co., Ltd. (2008). **Interlocking Rubber Gym Tiles**. Retrieved July 16, 2013, from <http://www.exact-plastic.com/product.asp?sid=152>.

- Ferdinand P. Beer, Russell Johnston, Joht T. DeWolf and David F. Mazurek. (2012).  
**Mechanics of Materials**. New York : McGraw-Hill.
- Fujian Hailong Machinery Co.,Ltd. (1999). **ลวดเพชรเครื่องตัดหินแกรนิตบล็อก**. ค้นเมื่อ 15 เมษายน 2556, จาก <http://thai.alibaba.com/product-gs/diamond-wire-saw-granite-block-cutting-machine-545820207.html>.
- Geoscience News and Information. (2005). **Rocks**. Retrieved March 20, 2013, from <http://geology.com/rocks>.
- Glass Colour Kote. (2010). **กระจกใสพิเศษ**. ค้นเมื่อ 7 สิงหาคม 2556, จาก <http://www.idealokote.com>.
- GLOBAL INNOVATIVE CAMPUS. (2014). **Distance-Slab on Ground Design Workshop**. Retrieved July 17, 2013, from <http://www.gic-edu.com>.
- Going Slowly. (2012). **North House Timber Framing Workshop**. Retrieved June 4, 2013, from <http://journal.goingslowly.com/2012/07>.
- Green House. (2012). **เรื่องควรรู้ก่อนสร้างบ้าน รู้จักกับ วีว้าบอร์ด วัสดุยอดนิยมในการสร้างบ้านสวยราคาประหยัด**. ค้นเมื่อ 29 มิถุนายน 2556, จาก <http://greenhouse.9nha.com>.
- Guangzhou geli sports equipment Co.,Ltd. (2009). **Rubber Tiles**. Retrieved July 13, 2013, from <http://www.gelisports.com/tiles/Tiles-3.asp>.
- Guardair Corporation. (2013). **Soil Classifications**. Retrieved March 25, 2013, from <http://www.guardaircorp.com/air-spade/technology/soil-characteristics.html>.
- Hearn E. J. (2000). **Mechanics of Materials 1: An Introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials**. Oxford : Butterworth-Heinemann.
- HI-RUBBER.COM. (2011). **Stable Connecting Rubber Tiles**. Retrieved July 14, 2013, from <http://www.hikingrubber.com/43-stable-connecting-rubber-tiles.html>.
- Hobart and William Smith Colleges. (2014). **PAC Update**. Retrieved July 21, 2013, from <http://www.hwsperformingarts.org/construction>.
- Home Desgn Directory Invest in Living (2014). **Build your own deck in 6 easy steps**. Retrieved June 8, 2013, from <http://www.homedesigndirectory.com>.
- Indiamart. (1996). **Reflective Glass**. Retrieved August 7, 2013, from <http://www.indiamart.com/shrikaamatchi-glass-agency/products.html>.

- Invision Power Services, Inc. (2001). โลหะวิทยาเบื้องต้นสำหรับช่างทำมิด. ค้นเมื่อ 28 พฤษภาคม 2556, จาก <http://www.konrakmeed.com/webboard/upload/lofiversion>.
- James M. Gere and Barry J. Goodno. (2012). **Mechanics of Materials**. Stamford : Cengage Learning.
- James M. Gere and Stephen P. Timoshenko. (1991). **Mechanics of Materials**. New York : Springer Science Business Media. B.V.
- Jelsoft Enterprises Ltd. (2000). การเดินทางของหินปูน. ค้นเมื่อ 26 เมษายน 2556, จาก <http://www.pixpros.net/forums/showthread.php?t=54970>.
- \_\_\_\_\_. (2000). เหมือนหิน. ค้นเมื่อ 25 มีนาคม 2556, จาก <http://www.pixpros.net>.
- John Case, Lord Chilver and CarL T. F. Ross. (1999). **Strength of Materials and Structures**. London : Arnold.
- Joseph E. Shigley. (2004). **Mechanical Engineering Design**. New York : McGraw-Hill.
- K&C MOULDINGS. (n.d.). **Barcol Hardness Tester**. Retrieved June 6, 2013, from <http://www.kcmouldings.co.uk/html/hardnesstester.html>.
- Kenneth G. Budinski. (2010). **Engineering Materials Properties and Selection**. New York : Prentice Hall.
- KLR Universal. (2009). **KLR 400 Meters DTH/Rotary Drill Rigs**. Retrieved April 3, 2013, from <http://waterwelldrillsklr.dthrotarydrilling.com/products>.
- Kreg and Woodsmith. (2013). **Build It Better: Tips for Picking the Right Plywood**. Retrieved June 29, 2013, from <http://www.kregtool.com/files/newsletters/kregplus/july13.html>.
- Laboratory for Scientific Visual Analysis. (1996). **Iron Carbon phase diagram to reinforce**. Retrieved May 30, 2013, from <http://www.sv.vt.edu/classes>.
- Lawrence H. Van Vlack. (2007). **Elements of Materials Science and Engineering**. New York : Addison-Wesley Pub. Co.Ltd.
- Lutuo Industrial Company Limited. (2009). **Dog-bone Rubber Tile RT-09**. Retrieved July 14, 2013, from [http://www.eurasiarubber.com/products\\_detail](http://www.eurasiarubber.com/products_detail).
- Madan Mehta, Walter Scarbprpugh and Diane Armprist. (2013). **Building Construction**. New York : Pearson Education, Inc.

- Mahyar Naraghi. (n.d.) **Impact Test**. Retrieved May 30, 2013, from <http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Impact%20Test.htm>
- Maidstone Area Archaeological Group. (n.d.). **Brenchley Gardens : Royal Engineers' Statue Foundations**. Retrieved March 30, 2013, from <http://btckstorage.blob.core>.
- Maschinenbau Gesellschaft mbH. (n.d.). **Wurster & Dietz Frame Saw**. Retrieved June 26, 2013, from <http://www.wdt.at/home2>.
- Material Property Data. (1996). **Izod Impact Strength Testing of Plastics**. Retrieved May 30, 2013, from <http://www.matweb.com/reference/izod-impact.aspx>.
- Mechanics of Solids MIE222. (n.d.). **Hardness Test. University of Toronto**. Retrieved June 5, 2013, from <http://www.mie.utoronto.ca/labs/emdl/people/stranart>.
- Meplus Hobby. (2013). **การเลือกใช้ไม้**. ค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 2556, จาก <http://meplushobby.wordpress.com/2013/10/11/about-wood>.
- Metal Pass. (2002). **Structure Steel ASTM Grades and Chemistry–Plate and Shape**. Retrieved January 18, 2013, from <http://www.metapass.com>.
- Michael F. Ashby and David R.H. Jones. (2005). **Engineering Materials 1**. Oxford : Butterworth Heinemann.
- Michael S. Mamlouk and John P. Zaniewski. (2011). **Materials for Civil and Construction Engineers**. New York : Prentice Hall.
- Michael Thomas. (2007). **Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete**. PCA Portland Cement Association. Canada : University of New Brunswick, pp. 1-24.
- Mikell P. Groover. (2013). **Principles of Modern Manufacturing**. Hoboken : John Wiley & Sons Singapore Pte.Ltd.
- Mixed Sources. (1996). **Corrosion Protection of Rolled Steel Sections Using Hot-Dip Galvanization**. ArcelorMittal.
- ML Testting Equipment. (2015). **Unit Weight Measures for Concrete**. Retrieved April 21, 2013, from <http://www.mltest.com/index.php/concrete/unit-weight>.
- NAASRA. (1982). **Pavement Materials: Part 4 Aggregates**. Sydney : National Association of Australian State Road Authorities.
- Natural Resources Conservation Service Soils. (n.d.). **Bama soil profile**. Retrieved March 24, 2013, from <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey>.

- Neville, A.M. and J.J. Brooks. (2010). **Concrete Technology**. London : British Library Cataloguing-in-Publication Data.
- One Stop Construct. (n.d.). **Classification of Timber**. Retrieved June 29, 2013, from <http://www.onestopconstruct.in/classification-of-timber/>
- Owner Building. (2012). **Floors and Flooring**. Retrieved July 5, 2013, from <http://www.ownerbuilding.co.za/floors-and-flooring>.
- Paroc Solugion & Products. (2014). **Ventilated Facades: Industrial Walls**. Retrieved August 6, 2013, from <http://www.paroc.ru/Solutions-and-Products/Solutions/walls>.
- PCWI Precition Instrumentation. (2009). **Barcol 935 Hardness Tester**. Retrieved June 6, 2013, from <http://www.pcwi.com.au/hardness-testers/barcol-935-hardness-tester.htm>.
- Photos Public Domain. (2014). **Red Brick Wall Texture**. Retrieved August 2, 2013, from <http://www.photos-public-domain.com/2011/01/04/red-brick-wall-texture>.
- Physic LAB. (1997). **Practice Problems Thermal Expansion**. Retrieved January 20, 2013, from <http://dev.physicslab.org>.
- PIBOON CONCRETE Co.,Ltd. (n.d.). **PCC HOLLOW CORE SLAB**. Retrieved July 17, 2013, from <http://www.webyota.com/catdir/book/71.pdf>.
- Postjung. (2014). **ประเภทของกระจก**. ค้นเมื่อ 6 สิงหาคม 2556, จาก <http://board.postjung.com>.
- Qingdao Yurong Glass Co.,Ltd. (2014). **Tinted Float Glass (YRG-G8006)**. Retrieved August 7, 2013, from <http://www.ecvv.com/product/1934316.html>.
- Quality Manufacturing Today. (2008). **Which extensometer**. Retrieved January 12, 2013, from [http://www.qmtmag.com/display\\_eds.cfm?edno=25438](http://www.qmtmag.com/display_eds.cfm?edno=25438).
- reliawiki.org. (n.d.). **The Normal Distubution**. Retrieved January 20, 2013, from [reliawiki.org/index.php/The\\_Normal\\_Distubution](http://reliawiki.org/index.php/The_Normal_Distubution).
- Richard E. Goodman. (1989). **Rock Mechanics**. New York : John Wiley & Sons.
- RMC. (2005). **ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมาตรฐานเหล็ก**. ค้นเมื่อ 17 พฤษภาคม 2556, จาก <http://www.richmattcons.com/index.php?mo=59&id=335721>.
- Russell C. Hibbeller. (2010). **Engineering Mechanics : Statics**. New York : Prentice Hall International Inc.

- \_\_\_\_\_. (2013). **Mechanics of Materials**. New York : Prentice Hall International Inc.
- SCG Cement-Building Materials Co.,Ltd. (2009). **กระเบื้องซีเมนต์ตกแต่งพื้น**. ค้นเมื่อ 7 กรกฎาคม 2556, จาก <http://www.homemart.co.th/product-category>.
- \_\_\_\_\_. (2009). **ปูนซีเมนต์งานโครงสร้าง**. ค้นเมื่อ 14 มีนาคม 2556, จาก <http://www.homemart.co.th>.
- \_\_\_\_\_. (2012). **บล็อกปูพื้น**. ค้นเมื่อ 22 กรกฎาคม 2556, จาก [http://www.homemart.co.th/product-detail.asp?product\\_id=3356](http://www.homemart.co.th/product-detail.asp?product_id=3356).
- Sclerometro Per Calcestruzzi. (n.d). **Concrete Test Hammer Model 1D0704**. Operating Manual.
- Sealand Harvesters & Developers Ltd. (2009). **Sealand Harvesters Product Implementation**. Retrieved July 20, 2013, from <http://www.sealandharvesters.com/Tbeam.html>.
- Siambig. (ม.ป.ป.). **เทคโนโลยีการก่อสร้างด้วยอิฐบล็อกประสาน**. สืบค้นเมื่อ 12 กุมภาพันธ์ 2557 จาก <http://www.siambig.com>.
- Shaymaa Mahmood. (n.d.). **Engineering materials**. Retrieved January 20, 2013, from <http://www.uotechnology.edu.iq>.
- Showers n Baths. (2014). **Volta Back-Lit Mirror**. Retrieved August 7, 2013, from <http://www.showersnbaths.co.uk/bathroom-mirrors>.
- Simpson Strong-Tie. (2014). **Engineered Timber**. Retrieved June 30, 2013, from [http://www.strongtie.co.uk/products/family\\_etd.php?etd1=1](http://www.strongtie.co.uk/products/family_etd.php?etd1=1).
- Sinkaonline. (2556). **หินกาบ**. ค้นเมื่อ 27 มีนาคม 2556, จาก <http://www.sinkaonline.com>.
- Soil Nutrient Management for Maui County. (2007). **Soil Profile**. Retrieved March 18, 2013, from [http://www.ctahr.hawaii.edu/mauisoil/a\\_profile.aspx](http://www.ctahr.hawaii.edu/mauisoil/a_profile.aspx).
- Structural Metal Decks Ltd. (n.d.). **TR 'End Cap' Closure**. Retrieved July 22, 2013, from [www.smdittd.co.uk](http://www.smdittd.co.uk).
- Technology Promotion Association (Thailand-Japan). (2012). **การฟังและการเสีयरูปของโลหะ**. ค้นเมื่อ 7 มิถุนายน 2556, จาก <http://www.tpa.or.th/writer>.
- \_\_\_\_\_. (2012). **ความทนทานต่อการล้าตัวและการกระแทก**. ค้นเมื่อ 30 พฤษภาคม 2556, จาก <http://www.tpa.or.th>.



- THAI CERAMIC SOCIETY.COM. (2008). **ดินสำหรับผลิตภัณฑ์ต่างๆ**. ค้นเมื่อ 12 มีนาคม 2556, จาก [http://www.thaiceramicsociety.com/rm\\_soil\\_product.php](http://www.thaiceramicsociety.com/rm_soil_product.php).
- THAI CON. (ม.ป.ป.). **Method of Lay Brick**. บริษัทไทยไล้ท์บล็อกแอนด์เพเนลจำกัด. ค้นเมื่อ 15 มกราคม 2556, จาก [www.thaiconproduct.com](http://www.thaiconproduct.com)
- Thaigoodview. (2000). **ดิน**. ค้นเมื่อ 18 มีนาคม 2556, จาก <http://www.thaigoodview.com>.
- The Engineered Wood Association. (2014). **Structural Composite Lumber (SCL) : A Practical Alternative**. Retrieved June 30, 2013, from <http://www.apawood.org>.
- The Geological Society. (2012). **Engineering and Future**. Retrieved March 27, 2013, from <http://www.geolsoc.org.uk/ks3/gsl/education>.
- The Geological Society of London. (2012). **The Rock Cycle**. Retrieved March 27, 2013, from <http://www.geolsoc.org.uk/ks3/gsl/education/resources/rockcycle.html>.
- The Three Touch Asia Pacific Co.,Ltd. (2010). **กระเบื้องปูห้องน้ำแบบไม่ลื่น**. ค้นเมื่อ 9 กรกฎาคม 2556, จาก [www.treetouch.com](http://www.treetouch.com).
- Timoshenko S. (1940). **Strength of Materials : Part I Elementary Theory and Problems**. New York : D. Van Nostrand Company, Inc.
- Tom Woolley and Sam Kimmins. (2002). **Green Building Handbook**. London : Spon Press.
- TWI. (2014). **Hardness Testing Part 1**. Retrieved June 5, 2013, from <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge>.
- United States Department of Agriculture. (1956). **Tension Test Methods for Wood, Wood-Base Materials and Sandwich Constructions Forest Products Laboratory**. Wisconsin : United State.
- \_\_\_\_\_. (2014). **Soil Survey Manual**. Retrieved April 3, 2013, from <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail>.
- United States Department of Transportation - Federal Highway Administration. (2006). **Geosynthetic Reinforced Soil Integrated Bridge System Interim Implementation Guide**. Retrieved May 3, 2013, from <http://www.fhwa.dot.gov>.
- \_\_\_\_\_. (2006). **Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete**. Retrieved April 15, 2013, from <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures>.

- \_\_\_\_\_. (2011). **Ultra-High Performance Concrete**. Retrieved February 20, 2013, from <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11038>.
- University of The West of England. (2009).** Evolution of Building Elements. Retrieved July 5, 2013, from [http://fet.uwe.ac.uk/conweb/house\\_ages/elements/section3](http://fet.uwe.ac.uk/conweb/house_ages/elements/section3).
- Van Walt. (2013). **Hand Augers**. Retrieved March 31, 2013, from <http://www.vanwalt.com/images/equipment/soil-sampling/hand-augers>.
- VILKONDA. (2014). **Floor installation methods**. Retrieved July 5, 2013, from <http://www.parquet.lt/en/article/New-page-68.html>.
- Wikipedia. (2015). **United States Department of Agriculture**. Retrieved June 29, 2013, from [http://en.wikipedia.org/wiki/United\\_States\\_Department\\_of\\_Agriculture](http://en.wikipedia.org/wiki/United_States_Department_of_Agriculture).
- William D. Callister. (2007). **Materials Science and Engineering : An Introduction**. New York : John Wiley & Sons Inc.
- William F. Smith. (2011). **Foundations of Materials Science and Engineering**. New York : McGraw-Hill.
- WiseGeek. (2014). **Concrete Batch Plant**. Retrieved August 2, 2013, from <http://www.wisegeek.com/what-is-a-concrete-block.htm>.
- Wood. (2551). เนื้อไม้. ค้นเมื่อ 19 มิถุนายน 2556, จาก <http://woodlala.blogspot.com>.
- Yellow Pages. (2555). วีอาร์คอนกรีตบล็อก. ค้นเมื่อ 3 สิงหาคม 2556, จาก <http://profile.yellowpages.co.th/521678400401001>.
- YouTube. (2014). การก่อบล็อกแก้ว ข้างแก้ว. ค้นเมื่อ 4 สิงหาคม 2556, จาก [https://www.youtube.com/watch?v=xxPXOVpo\\_a0](https://www.youtube.com/watch?v=xxPXOVpo_a0).