

เอกสารประกอบการบรรยาย

เรื่อง

วัสดุวิศวกรรม

**Principles of Materials  
Science and Engineering**

โดย

รองศาสตราจารย์ แม่้น อมรสิทธิ์

**Engineering Materials**

ความสำคัญของการศึกษาวัสดุวิศวกรรม ซึ่งเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องอย่างเป็นด้านหลักของการใช้พื้นฐานและการประยุกต์ความรู้ทางวัสดุ เพื่อปรับปรุงสมบัติแล้วนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการและเป็นประโยชน์ต่อสังคม

### จุดมุ่งหมาย (goals) ของการเรียนรู้วิชา Engineering Materials

1. เพื่อต้องการให้ผู้เรียนมีความรู้ความคุ้นเคยกับสมบัติของวัสดุ เมื่อต้องการเลือกใช้หรือนำไปประยุกต์
2. เพื่อต้องการให้ผู้เรียนได้เข้าใจถึงองค์ประกอบ โครงสร้าง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุกับการใช้งาน
3. เพื่อต้องการให้ผู้เรียนได้ทราบถึงข้อมูลต่าง ๆ ของสมบัติของวัสดุ เพื่อนำมาใช้งานเพื่อหลีกเลี่ยงการต้องทดสอบ
4. เพื่อให้ผู้เรียนได้เข้าใจถึงกระบวนการผลิต, กระบวนการทดสอบให้วัสดุที่ผลิตออกมา มีความสมบูรณ์และมีคุณภาพ

### ตำราหรือหนังสือที่ใช้ประกอบการเรียน

1. **Foundations of Materials Science and Engineering** by William F. Smith
2. **Principles of Materials Science and Engineering** by William F. Smith
3. **Elements of Materials Science and Engineering** by Lawrence H. Van Vlack
4. **Materials for Engineering Concepts and Applications** by Lawrence H. Van Vlack
5. **The Science and Engineering of Materials** by Donald R. Askeland
6. **Engineering Materials Properties and Selection** by Kenneth G. Budinski
7. **Materials Science and Engineering 3<sup>rd</sup> ed.** By William D. Callister Jr., John Wiley & Sons
8. วัสดุวิศวกรรม แปลและเรียบเรียง โดย รศ.แมน อมรสิทธิ์ ผศ.ดร.สมชัย อัครทิวา

## 1. วัสดุวิศวกรรม

### 1.1 วัสดุคืออะไร

วัสดุ คือสิ่งต่าง ๆ หรือสสารที่ประกอบด้วยสารเคมี สิ่งต่าง ๆ ที่อยู่รอบตัวเราล้วนเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากวัสดุทั้งสิ้น

**1.2 วัสดุวิศวกรรม (Engineering materials)** คือวัสดุที่นำไปใช้ในงานทางด้านวิศวกรรม

### 1.3 ประเภทของวัสดุ

วัสดุวิศวกรรม (Engineering materials) แบ่งออกได้ออกเป็น 5 ประเภท แต่ละประเภทจะมีโครงสร้าง, สมบัติและความแข็งแรงแตกต่างกัน ดังนี้

1. ประเภทโลหะ (Metallic materials)
2. ประเภทพลาสติก หรือพอลิเมอร์ (Polymeric materials)
3. ประเภทเซรามิก (Ceramic materials)
4. ประเภทวัสดุผสม (Composite materials)
5. ประเภทอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic materials)

#### 1.3.1.1 วัสดุประเภทโลหะ

วัสดุพวกนี้ถือว่าเป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic substances) ที่ประกอบด้วยธาตุที่เป็นโลหะชนิดเดี่ยวหรือหลายชนิดก็ได้ บางครั้งอาจมีโลหะผสมอยู่ด้วยก็ได้ โดยทั่วไปพวกโลหะจะมีสมบัติเฉพาะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี มีความแข็งแรงสูง เหนียวอ่อนตัวได้ เป็นต้น ถ้าเอาโลหะบริสุทธิ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปผสมกันจะได้โลหะผสม (alloy)

โลหะและโลหะผสม ยังแบ่งออกได้เป็น 2 พวก

- ก. พวกโลหะที่เป็นเหล็ก (Ferrous metals) และโลหะผสม ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก
- ข. พวกโลหะที่ไม่มีเหล็ก (Non-ferrous metals) และโลหะผสมของมันที่ไม่มีเหล็กหรือถ้ามีเหล็กก็จะมีอยู่น้อย เช่น อะลูมิเนียม (Al) นิกเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) ดีบุก (Sn) แมกนีเซียม (Mg) เป็นต้น

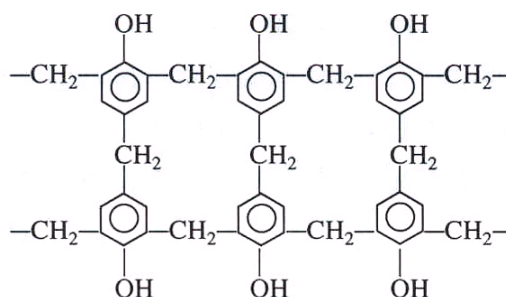
#### 1.3.1.2 วัสดุประเภทพลาสติกหรือพอลิเมอร์

วัสดุพวกนี้เป็นสารอินทรีย์ ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยธาตุ C, H, N, Cl, F, S, O เป็นต้น พอลิเมอร์เป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ มีโครงสร้างที่ต่อกันยาวหรือเป็นโครงข่าย (net work) พอลิเมอร์เป็นสารที่ไม่มีรูปร่างผลึกเป็นส่วนใหญ่ แต่บางชนิดเป็นของผสมที่มีรูปร่างผลึกและไม่มีรูปร่างผลึกปนกัน จึงมีสมบัติที่กว้างมาก มีทั้งแข็งแรง, อ่อน เป็นฉนวนไฟฟ้า มีจุดหลอมเหลวทั้งสูงและต่ำ โดยทั่วไปพอลิเมอร์มีความหนาแน่นต่ำ ตัวอย่างเช่น

พอลิเอทิลีน (polyethylene)  $-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-$

พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)  $-CH_2-\underset{\substack{| \\ Cl}}{CH}-CH_2-\underset{\substack{| \\ Cl}}{CH}-$

### เบเคไลท์ (Bakelite)



พลาสติกเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมีอยู่ 2 ชนิด คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เป็นพลาสติกชนิดที่สามารถหลอมเหลวได้ด้วยความร้อนอีกชนิดหนึ่งคือ เทอร์โมเซต (Thermosetting plastic) เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถหลอมเหลวได้ เมื่อแข็งตัวแล้วเป็นพลาสติกที่แข็งแรงแต่เปราะ

#### 1.3.1.3 วัสดุประเภทเซรามิก

วัสดุพวกนี้เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic substance) ที่ประกอบด้วยธาตุที่เป็นโลหะ และอโลหะรวมกันอยู่ได้ด้วยพันธะทางเคมี (chemical bond) ซึ่งมีลักษณะดังนี้

- ก. มีรูปร่างผลึกหรือไม่มีรูปร่างผลึกก็ได้ หรือเป็นของผสมของทั้งสองอย่างก็ได้
- ข. มีความแข็งสูง (high hardness)
- ค. มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง
- ง. มีความเปราะสูง หรือแตกง่ายเมื่อโดนแรงกระแทก
- จ. เป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนที่ดี

ในปัจจุบันเซรามิกได้พัฒนาและก้าวหน้าไปมาก สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ทำกระสวยอวกาศ (Space shuttle) ส่วนประกอบของเครื่องยนต์ใช้ทำหัววัดอุณหภูมิ เป็นต้น

#### 1.3.1.4 วัสดุประเภทผสม (composite material)

วัสดุประเภทผสมคืออะไรนั้น มีความหมายกว้างขวางมาก ตามดิกชันนารีได้ให้ความหมายไว้ว่า composite คือสิ่งประกอบด้วยองค์ประกอบ (constituents) ต่าง ๆ กัน ทั้งที่สามารถบอกความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่า หรือองค์ประกอบที่มีขนาดเล็กลงไปในระดับอะตอม (atomic level) หรือระดับไมโคร (microstructural level) ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์พิเศษในการดูองค์ประกอบของมันแล้วจึงจัดว่าเป็นวัสดุประเภทผสมทั้งสิ้น

สำหรับความหมายที่ยอมรับกันได้โดยทั่วไปคือ “วัสดุประเภทผสม หมายถึง วัสดุที่จัดว่าเป็นของผสมประกอบด้วยองค์ประกอบอย่างน้อยแตกต่างกันไปตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยที่องค์ประกอบเหล่านั้นอาจมีรูปร่างและองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน ทำให้มันไม่ละลายเข้าด้วยกัน” ในความสำคัญทางวิศวกรรมแล้ว วัสดุประเภทผสมก็คือวัสดุที่ได้จากการนำเอาวัสดุที่แตกต่างกันมาผสมกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ทำให้วัสดุนั้นมีสมบัติพิเศษขึ้นกว่าวัสดุเดิม เช่น คอนกรีต ไม้อัด ไฟเบอร์กลาส หรือพวก Reinforcement fiber เป็นต้น

#### 1.3.1.5 วัสดุประเภทอิเล็กทรอนิกส์

วัสดุประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญมากในปัจจุบันซึ่งเป็นยุคของเทคโนโลยีขั้นสูง วัสดุประเภทนี้ที่จัดว่าสำคัญที่สุด คือ ซิลิกอนบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถนำไปใช้หรือดัดแปลงให้มีลักษณะสมบัติเฉพาะได้ดีมาก เช่น ใช้ทำ silicon chip, micro-eletronic devices, semiconductors เป็นต้น

## 1.4 สมบัติและการเลือกใช้วัสดุ

การเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับงานนั้นจำเป็นจะต้องศึกษา หรือพิจารณาจากสมบัติของวัสดุนั้นให้มันตรงกับงานที่ออกแบบ หรือที่ต้องการทำจากวัสดุต่าง ๆ ซึ่งมีอยู่มากมาย และวิศวกรสามารถส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์สมบัติ องค์ประกอบได้จากศูนย์เครื่องมือหรือศูนย์ทดสอบ ซึ่งมีอยู่หลายแห่งด้วยกัน เพื่อประหยัดเวลาและการลงทุน

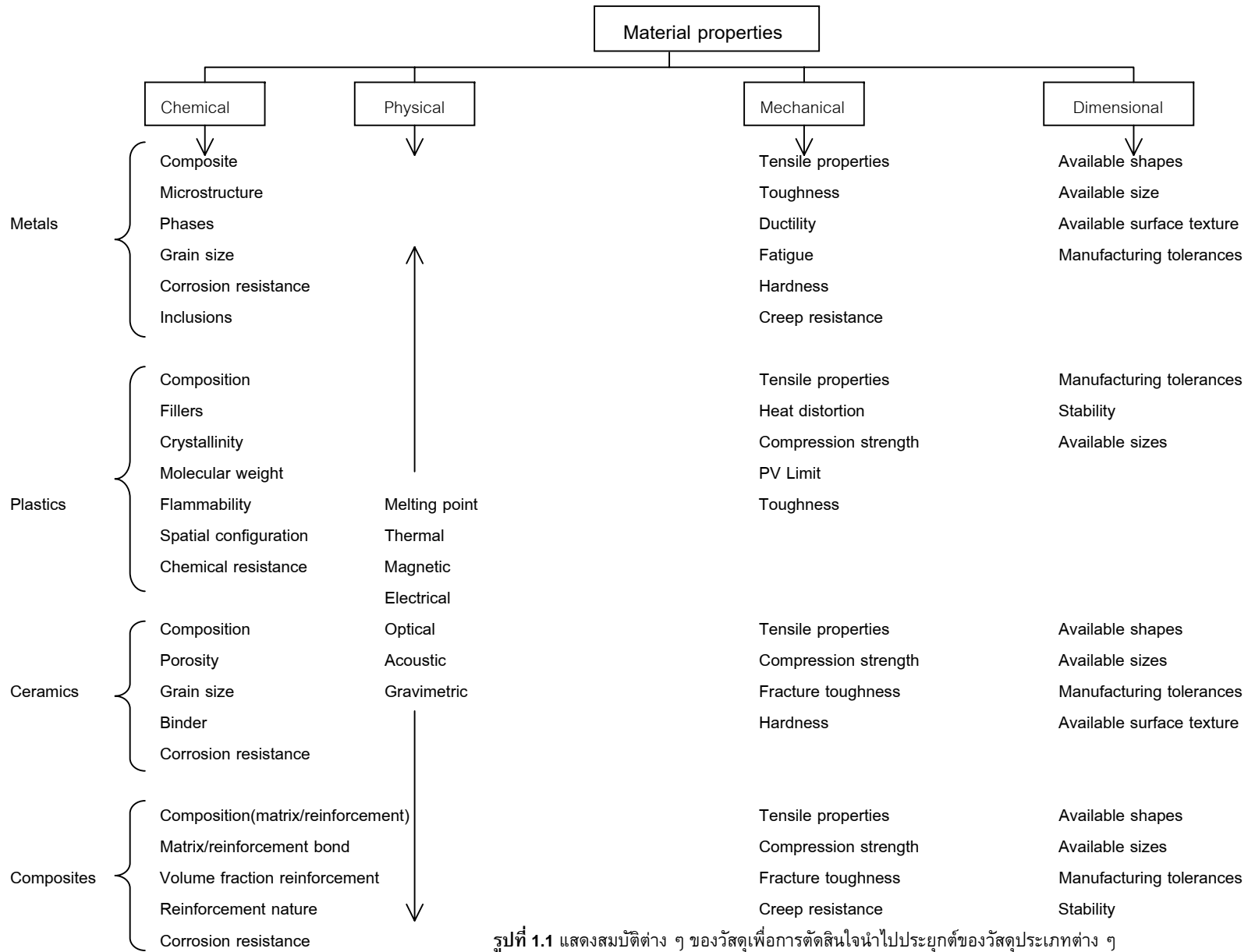
สมบัติที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาเลือกวัสดุที่จะใช้ดังแสดงในรูป 1.1

### 1.4.1 สมบัติทางเคมี (Chemical properties)

เป็นสมบัติที่สำคัญของวัสดุซึ่งจะบอกลักษณะเฉพาะตัวที่เกี่ยวกับโครงสร้างและองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่เป็นวัสดุนั้น ตามปกติสมบัตินี้จะทราบได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการเท่านั้น โดยจะให้วิธีการวิเคราะห์แบบทำลายหรือไม่ทำลายตัวอย่าง

### 1.4.2 สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)

เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุที่เกี่ยวกับการเกิดอันตรกิริยาของวัสดุนั้นกับพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ กัน เช่น ลักษณะของสี ความหนาแน่น การหลอมเหลว ปรากฏการณ์ที่เกิดกับสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า เป็นต้น การทดสอบสมบัตินี้จะไม่มีการทำให้วัสดุนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือถูกทำลาย



รูปที่ 1.1 แสดงสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเพื่อการตัดสินใจนำไปประยุกต์ของวัสดุประเภทต่าง ๆ

### 14.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุที่ถูกกระทำด้วยแรง โดยทั่วไปจะเกี่ยวกับการยืดและหดตัวของวัสดุ (elastic and inelastic properties) ความแข็ง, ความสามารถในการรับน้ำหนัก ความสึกหรอและการดูดกลืนพลังงาน เป็นต้น

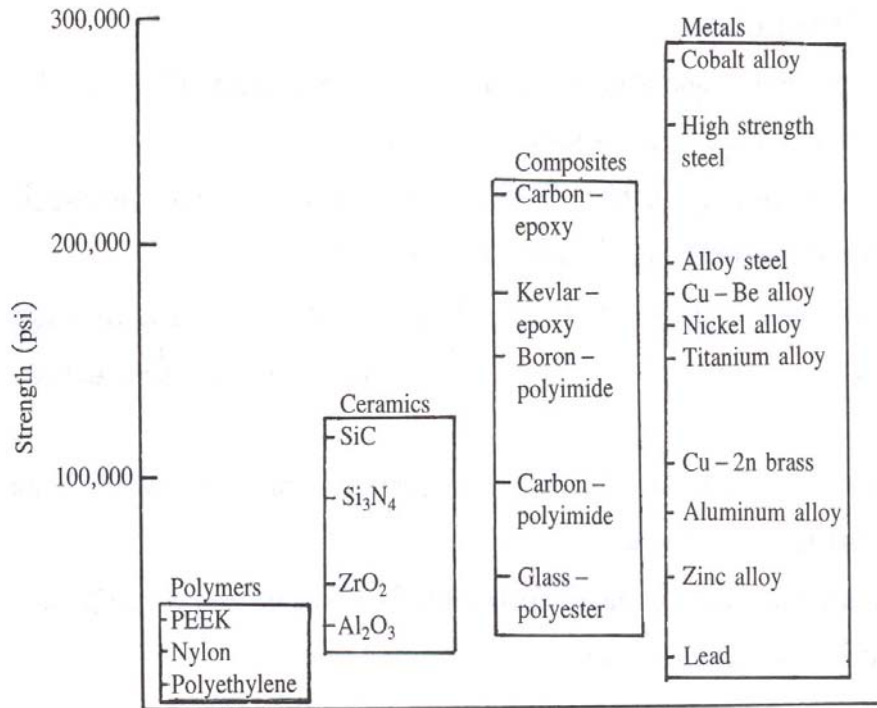
### 14.4 สมบัติเชิงมิติ (ขนาด) (Dimensional properties)

เป็นสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในการเลือกใช้วัสดุ เช่น ขนาด รูปร่าง ความคงทน ตลอดจนลักษณะของผิวว่าหยาบ ละเอียด หรือเรียบ เป็นต้น ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะไม่มีกำหนดไว้ในหนังสือคู่มือหรือในมาตรฐาน แต่ก็เป็นแฟกเตอร์หนึ่งที่จะใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจได้ด้วย

ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างของวัสดุ สมบัติและการใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 แสดงความแข็งแรงของวัสดุบางประเภท

ตารางที่ 1.1 แสดงตัวอย่างของการใช้งานและสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุ	การใช้งาน	สมบัติ
โลหะ ทองแดง (Cu)	ใช้ทำลวดไฟฟ้า	นำไฟฟ้าดี สามารถทำให้มีรูปร่างต่าง ๆ ได้ดี สามารถหล่อได้ กลึงได้ รับการสั่นได้
เหล็กหล่อ (cast iron)	ใช้ทำเสื่อสุรรถยนต์	มีความแข็งแรงสูง และสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ด้วยความร้อน
เหล็กแอลลอย (alloy steel)	ใช้ทำคีม กุญแจปากตาย ปากกาสำหรับจับ ชัน บิด	
เซรามิก SiO <sub>2</sub> -Na <sub>2</sub> O-CaO	ใช้ทำกระจกหน้าต่าง	ให้ประโยชน์ทางแสง และเป็นฉนวนความร้อน เป็นฉนวนความร้อน, หลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub>	ใช้ทำวัสดุทนไฟ	สมบัติเฉื่อยต่อโลหะที่หลอมเหลว
Barium titanate	ใช้ทำอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนสัญญาณเสียง, แสง, ความร้อน ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่น ใช้ในการทำอุปกรณ์เครื่องเสียง	เปลี่ยนเสียงให้เป็นไฟฟ้า โดยอาศัยสมบัติ Piezoelectric
พอลิเมอร์ พอลิเอทีลีน	ใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร	ทำเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ ได้ อ่อนตัวได้เป็นฉนวนไฟฟ้าและกันความชื้นได้
อีพอกซี (epoxy)	ใช้เคลือบหรือห่อหุ้มแผ่นวงจรไฟฟ้า	เป็นฉนวนไฟฟ้าและกันความชื้นได้ดี
ฟีนอลิก	ใช้ทำกาว ใช้ทำไม้อัดในอุตสาหกรรม	แข็งแรงและกันความชื้นได้ดี
ไฟฟ้า-สารกึ่งตัวนำ ซิลิคอน (Si)	ใช้ทำทรานซิสเตอร์ และแผ่นวงจรไฟฟ้า ใช้ทำระบบเส้นใยนำแสง	มีสมบัติพิเศษทางไฟฟ้า
Ga As		เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสงได้
วัสดุผสม (composite) แกรไฟต์-อีพอกซี	ใช้ทำส่วนประกอบของรถยนต์, เครื่องบิน	มีความแข็งแรงมาก
ทังสเตนคาร์ไบด์โคบอลต์	ใช้ทำเครื่องเจาะ ส่วนเครื่องกลึง	มีความแข็งแรงสูง



รูปที่ 1.2 แสดงความแข็งแรง (strength) ของวัสดุชนิดต่าง ๆ

## สรุป

วัสดุศาสตร์และวัสดุวิศวกรรมศาสตร์ เป็นการเชื่อมโยงความรู้เกี่ยวกับวัสดุทั้งหลาย ระหว่างพื้นฐานความรู้ทางวิทยาศาสตร์และทางวิศวกรรมเข้าด้วยกัน

วัสดุศาสตร์เป็นศาสตร์ที่เกี่ยวกับการวิจัยหาความรู้ใหม่ ๆ ขึ้นพื้นฐานของวัสดุทั้งหลาย แต่วัสดุวิศวกรรมศาสตร์เป็นศาสตร์ที่เกี่ยวกับการประยุกต์ความรู้ของวัสดุให้เป็นประโยชน์ต่อสังคมและมวลมนุษย

วัสดุแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ พลาสติกโลหะ, พอลิเมอร์และเซรามิก อีก 2 ประเภท ซึ่งมีความสำคัญมากสำหรับวิศวกรรมและเทคโนโลยีสมัยใหม่ ได้แก่ วัสดุผสมและอิเล็กทรอนิกส์ วัสดุแต่ละประเภทมีการแข่งขันกันอยู่ตลอดเวลาเพื่อความคงอยู่ และหาตลาดใหม่ ตลอดจนมีการใช้ทดแทนซึ่งกันและกันอยู่เสมอ วัตถุประสงค์ ต้นทุนการผลิตและการค้นคว้าพัฒนาหาวัสดุใหม่ กระบวนการใหม่ ๆ ล้วนเป็นแฟกเตอร์ที่สำคัญที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงการใช้วัสดุเกิดขึ้น



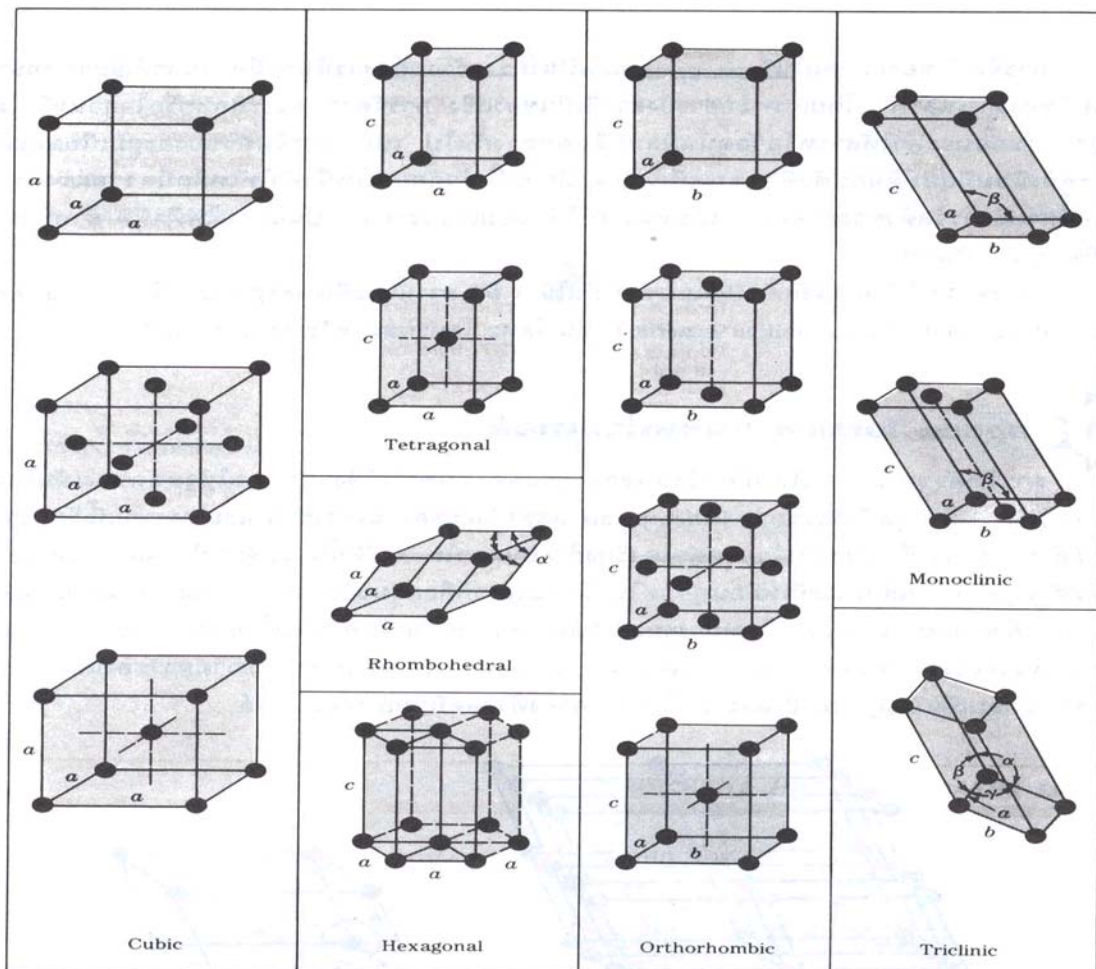
## 2. การจัดตัวของอะตอมและโครงสร้างของผลึก

การจัดตัวของอะตอมใน space ออกมาเป็นโครงสร้างของสารนับว่ามีความสำคัญมากต่อลักษณะและสมบัติของสารเหล่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารที่เป็นของแข็ง การจัดตัวของอะตอมหรือไอออนหรือโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบจะทำให้สารหรือวัสดุนั้นมีสมบัติแตกต่างกันไป เช่น การจัดตัวของอะลูมิเนียม อะตอมจะทำให้อะลูมิเนียมมีสมบัติอ่อนตัวดี ขณะที่เหล็กจะมีการจัดตัวอีกแบบหนึ่งทำให้เหล็กมีความแข็งแรงดีกว่า พอลิเอทิลีนจะมีการจัดตัวของอะตอมอีกแบบหนึ่ง ทำให้หลอมเหลวง่ายและเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี สำหรับยางจะมีสมบัติยืดหยุ่นดี เป็นต้น

ถ้าอะตอมหรือไอออนจัดตัวเป็นแบบซ้ำ ๆ กันใน 3 มิติ สารนั้นจะมีโครงสร้างเป็นผลึก (crystal structure หรือ crystalline solid หรือ crystalline material) เช่น โลหะ โลหะผสม หรือเซรามิก เป็นต้น

### 2.1 ระบบผลึกและบราวส์แลตทิซ

นักผลึกวิทยา (Crystallographers) ได้กำหนดความยาวของแต่ละด้านและมุมที่ด้านประกอบกันเป็นหน่วยเซลล์ออกมาเป็นแบบต่างๆ กัน ได้ 7 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และใน 7 แบบนี้ A.J.Bravais ได้แสดงให้เห็นว่ามีหน่วยเซลล์มาตรฐาน (Standard unit cells) ถึง 14 ชนิดด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ทั้ง 14 ชนิด ตาม Bravais กำหนดจุดสีดำแสดง lattice points ซึ่งจะอยู่ที่ด้านหรือที่มุมของหน่วยเซลล์

Bravais lattices มีหน่วยเซลล์พื้นฐานอยู่ 4 ชนิด คือ (1) simple (2) body-centered (3) face-centered และ (4) base-centered สำหรับ cubic system มี 3 ชนิด Orthorhombic system มี 4 ชนิด tetragonal system มี 2 ชนิด monoclinic system มี 2 ชนิด ส่วน Rhombohedral, hexagonal, และ triclinic systems มีอย่างละหนึ่งชนิด

ตารางที่ 2.1 การจำแนก space lattices ด้วยระบบผลึก

Crystal system	Axial lengths and interaxial angles	Space lattice
Cubic	Three equal axes at right angles $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple cubic Body-centered cubic Face-centered cubic
Tetragonal	Three axes at right angles, two equal $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple tetragonal Body-centered tetragonal
Orthorhombic	Three unequal axes at right angles $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple orthorhombic Body-centered orthorhombic Base-centered orthorhombic Face-centered orthorhombic
Rhombohedral	Three equal axes, equally inclined $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Simple rhombohedral
Hexagonal	Two equal axes at $120^\circ$ , third axis at right angles $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Simple hexagonal
Monoclinic	Three unequal axes, one pair not at right angles $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	Simple monoclinic Base-centered monoclinic
Triclinic	Three unequal axes, unequally inclined and none at right angles $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Simple triclinic

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าคงตัวแลตทิซและรัศมีอะตอมของโลหะบางชนิดที่มีโครงสร้างแบบ FCC ที่อุณหภูมิห้อง

Metal	Lattice constants a, nm	Atomic radius R, nm
Chromium	0.289	0.125
Iron	0.287	0.124
Molybdenum	0.315	0.136
Potassium	0.533	0.231
Sodium	0.429	0.186
Tantalum	0.330	0.143
Tungsten	0.316	0.137
Vanadium	0.304	0.132

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าของ lattice constants กับรัศมีอะตอมของโลหะบางชนิด  
ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ที่อุณหภูมิห้อง

Metal	Lattice constants a (nm)	Atomic radius R (nm)
Aluminium	0.405	0.143
Copper	0.3615	0.128
Gold	0.408	0.144
Lead	0.495	0.175
Nickel	0.352	0.125
Platinum	0.393	0.139
Silver	0.409	0.144

ตารางที่ 2.4 แสดงโลหะชนิดต่าง ๆ ที่มีโครงสร้างเป็น HCP มีอุณหภูมิห้อง (20°C) และ Lattice constants,  
รัศมีอะตอมและอัตราส่วน c/a

Metal	Lattice constants (nm)		Atomic radius R (nm)	c/a ratio
	a	C		
Cadmium	0.2973	0.5618	0.149	1.890
Zinc	0.2665	0.4947	0.133	1.856
Magnesium	0.3209	0.5209	0.160	1.633
Cobalt	0.2507	0.4069	0.125	1.623
Zirconium	0.3231	0.5148	0.160	1.593
Titanium	0.2950	0.4683	0.147	1.587
Beryllium	0.2286	0.3584	0.113	1.568

### 3. การแข็งตัวของโลหะ ความไม่สมบูรณ์ของผลึกและกระบวนการแพร่ภายในของแข็ง

#### 3.1 การโตขึ้นของผลึกในโลหะหลอมเหลวและการเกิดโครงสร้างของเกรน

หลังจากที่เกิดนิวคลีไอที่เสถียรขึ้นในกระบวนการการแข็งตัวของโลหะแล้ว นิวคลีไอจะโตขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้เป็นผลึก ภายในผลึกอะตอมจะจัดเรียงตัวเป็นระเบียบที่สม่ำเสมอ แต่ทิศทางของแต่ละผลึกจะแตกต่างกันไปเมื่อการแข็งตัวของโลหะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ แต่ละผลึกจะสัมผัสกันในทิศทางที่ต่างกัน โลหะที่ประกอบด้วยผลึกจำนวนมากนี้จะถูกเรียกว่า โลหะหลายผลึก (polycrystalline) ซึ่งแต่ละผลึกที่ถูกเรียกว่า เกรน และผิวสัมผัสระหว่างผลึก เรียกว่า ขอบเขตของเกรน

จำนวนของนิวคลีไอที่เกิดขึ้นในกระบวนการการแข็งตัวของโลหะจะมีผลต่อโครงสร้างของเกรน กล่าวคือ ถ้าจำนวนนิวคลีไอที่เกิดขึ้นมีจำนวนน้อย จะทำให้ได้โครงสร้างของเกรนที่มีความหยาบและขนาดใหญ่ (coarse grains) แต่ถ้ามีจำนวนนิวคลีไอเกิดขึ้นมาก จะทำให้ได้โครงสร้างของเกรนที่ละเอียด ซึ่งเป็นความต้องการของวิศวกร เพราะโลหะที่มีความแข็งแรงที่ดีต้องประกอบด้วยโครงสร้างของเกรนที่ละเอียดและสม่ำเสมอ จำนวนนิวคลีไอที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับอัตราการเร็วในการทำให้โลหะที่หลอมเหลวเย็นลงมาก กล่าวคือ ถ้าทำให้โลหะเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะมีผลทำให้เกิดนิวคลีไอจำนวนมาก และได้เกรนที่มีขนาดละเอียด ในทางตรงกันข้าม ถ้าทำให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ จะทำให้เกิดนิวคลีไอจำนวนน้อย และได้เกรนที่ใหญ่กว่า

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อจำนวนของการเกิดนิวคลีไอ เช่น การมีสิ่งแปลกปลอม อาทิเช่นอะลูมิเนียมและไทเทเนียมในโลหะหลอมเหลวหรือการคนโลหะที่หลอมเหลวในกระบวนการทำให้โลหะแข็งตัว เป็นต้น

เมื่อนำโลหะที่บริสุทธิ์พอสมควรไปหล่อในแบบที่อยู่กับที่ โดยไม่มีการเติม grain refiner จะพบว่าเกิดโครงสร้างของเกรน 2 แบบ คือ

1. Equiaxed grains เป็นเกรนที่เกิดจากผลึกที่โตในทุกทิศทาง และมักเกิดขึ้นในบริเวณที่ใกล้ผนังของแบบที่ใช้หล่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (a) เพราะบริเวณที่ใกล้ผนังของแบบที่ใช้หล่อจะมีปริมาณ undercooling สูงหรืออัตราการเย็นตัวสูง ทำให้เกิดนิวคลีไอขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งเป็นผลก่อให้เกิด equiaxed grains ที่ละเอียด

2. Columnar grains เป็นเกรนที่มีลักษณะยาวและหยาบ เกรนชนิดนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่โลหะหลอมเหลวเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ อาทิเช่น บริเวณตรงกลางของแบบหล่อ ซึ่งเป็นบริเวณที่โลหะหลอมเหลวเย็นตัวลงช้ากว่า เมื่อเทียบกับบริเวณใกล้ผนังของแบบหล่อ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เป็นบริเวณที่มีปริมาณ undercooling ที่ต่ำ ทำให้เกิดปริมาณนิวคลีไอจำนวนน้อย ซึ่งเป็นผลก่อให้เกิด columnar grains ที่มีลักษณะหยาบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (b)



รูปที่ 3.1 (a) แสดงโครงสร้างของเกรนของโลหะที่แข็งตัวในแม่แบบที่เย็น

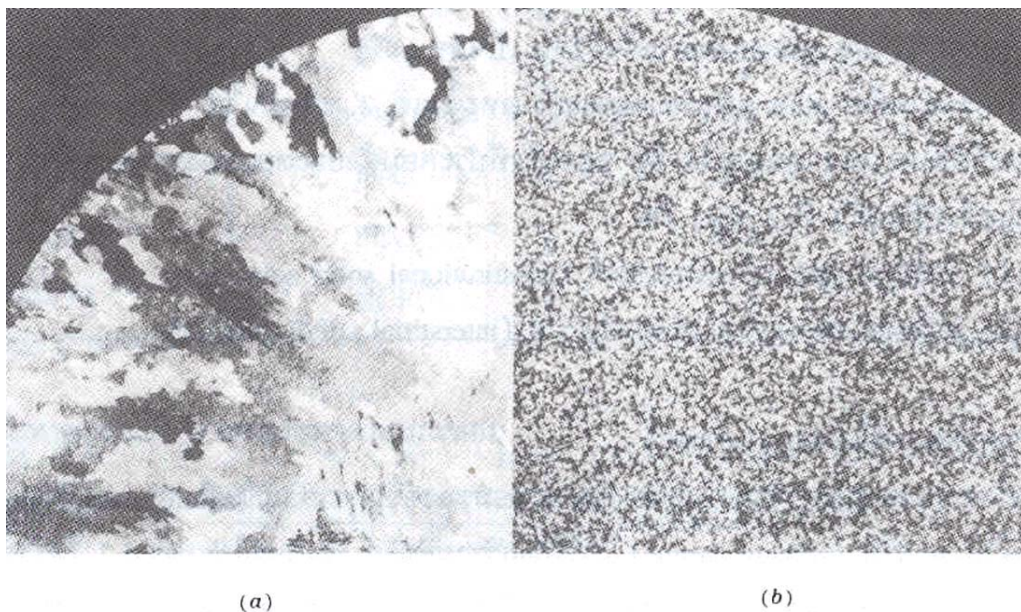
(b) แสดงภาพตัดขวางการเกิด columnar grain ในแท่ง (ingot) ของโลหะผสมอะลูมิเนียม 1100 (99.0% Al)



ในกระบวนการหล่อโลหะในอุตสาหกรรม เพื่อให้ได้เกรนที่มีขนาดเล็กและละเอียด สามารถทำได้โดยการเติม grain refiner ลงในโลหะหลอมเหลวในกระบวนการหล่อโลหะ เช่น กระบวนการหล่อโลหะผสมของอะลูมิเนียมมักจะใช้ Ti, B, และ Zr เป็น grain refiner

### 3.2 การผลิตวัสดุผลึกเดี่ยว

โดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุที่มีโครงสร้างเป็นผลึกและใช้ในงานวิศวกรรมนั้นมักจะประกอบด้วยโครงสร้างหลายผลึก (polycrystalline) แต่ก็มีวัสดุบางอย่างที่มีโครงสร้างผลึกเดี่ยว (single crystals) ตัวอย่างเช่น ชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ อาทิเช่น transistors และ diodes บางชนิด ซึ่งถูกทำขึ้นจากธาตุหรือสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกเดี่ยว โครงสร้างผลึกเดี่ยวนี้เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เพราะถ้าชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ถูกทำขึ้นจากวัสดุที่มีโครงสร้างหลายผลึก ขอบเขตของเกรนที่มีอยู่ในโครงสร้างจะขัดขวางและทำลายคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นส่วนนั้น



รูปที่ 3.2 เป็นภาพแสดงภาพตัดขวางของโลหะผสม 6063 (Al-0.7% Mg-0.4% Si) ที่ไม่มีการเติม grain refiner (a) และที่มีการเติม grain refiner (b)

โครงสร้างผลึกเดี่ยวจะเกิดขึ้นได้ถ้าในกระบวนการแข็งตัวเกิดนิวเคลียสเพียงนิวเคลียสเดียว ซึ่งกระทำได้โดยการทำผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลวมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของของแข็งเพียงเล็กน้อยและอุณหภูมิภายในของเหลวจะต่องสูงกว่าที่ผิวสัมผัส ตัวอย่างการผลิตวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกเดี่ยวนี้ อาทิเช่น วิธี Czochralski ซึ่งเป็นวิธีการผลิตซิลิคอนโครงสร้างผลึกเดี่ยวที่มีคุณภาพสูง

### 3.3 สารละลายของแข็งโลหะ

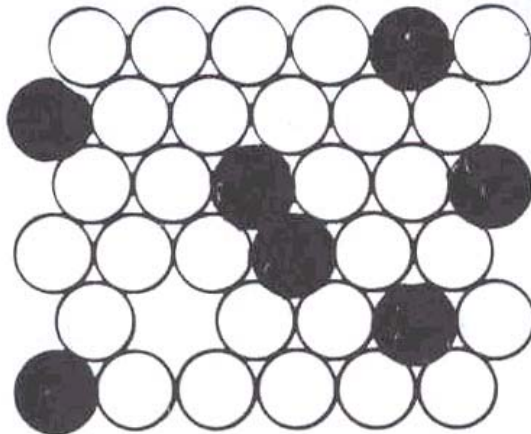
โลหะที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ ส่วนน้อยจะเป็นโลหะบริสุทธิ์หรือเกือบบริสุทธิ์ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะเป็นโลหะที่มีโลหะอื่นหรือโลหะผสมอยู่ เพื่อให้โลหะผสมนั้นมีคุณภาพพิเศษมากขึ้น เช่น ทำให้แข็งแรง ไม่เกิดสนิม ขยายตัวน้อย และทนต่อการกัดกร่อน เป็นต้น

โลหะผสมหรือ alloy เป็นของผสมของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป หรืออาจเป็นโลหะผสมกับอโลหะ โลหะผสมจัดว่าเป็นสารละลายของแข็ง คือ ของแข็งที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างเดียวกัน มี 2 แบบ คือ

- (1) สารละลายของแข็งแบบแทนที่ (substitutional solid solution)
- (2) สารละลายของแข็งแบบเซลล์แทรก (interstitial solid solution)

#### สารละลายของแข็งแบบแทนที่

เกิดจากอะตอมของธาตุ 2 ชนิด คือ อะตอมของตัวถูกละลาย (solute atoms) สามารถเข้าไปแทนที่อะตอมของตัวทำละลาย (solvent atoms) ในโครงสร้างผลึกได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โครงสร้างผลึกของโลหะผสมชนิดนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่อาจจะเกิดการเสียรูปไปบ้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อขนาดของอะตอมต่างกัน



รูปที่ 3.4 แสดง substitutional solid solution วงกลมสีเข้มกับสีขาว แสดงอะตอมของธาตุต่างชนิดกัน

สภาวะที่อะตอมหนึ่งจะเข้าไปแทนที่อีกอะตอมหนึ่งได้ดี จะต้องมึลักษณะดังนี้คือ

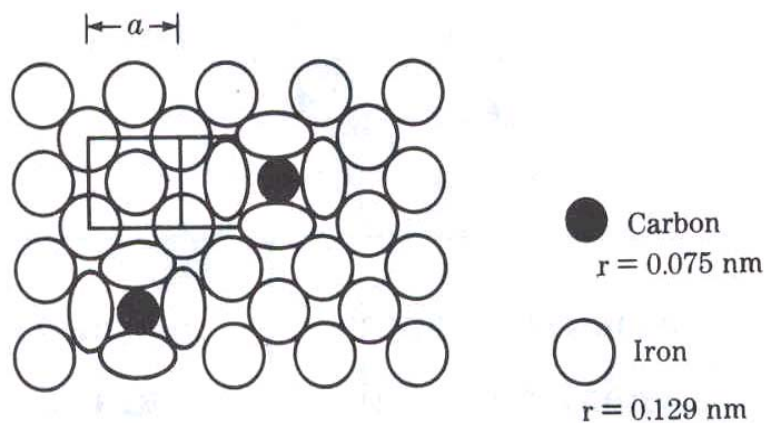
1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอะตอมทั้งสองจะต้องไม่ต่างกันเกิน 15%
2. โครงสร้างผลึกของธาตุทั้งสองจะต้องเหมือนกัน
3. ค่าอิเล็กโตรเนกาวิตี หรือสภาพไฟฟ้าลบ (electronegativity) จะต้องต่างกันไม่มากนัก มิฉะนั้นแล้วจะเกิดสารประกอบได้
4. จะต้องมึค่าเวเลนซ์เท่ากัน

### สารละลายของแข็งแบบเซลล์แทรก

เป็นสารละลายของแข็งที่เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมของตัวถูกละลายเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างอะตอมของตัวทำละลายหรือ parent atoms ช่องว่างระหว่างอะตอมของตัวทำละลายนี้ถูกเรียกว่า ซอก (interstices) สารละลายของแข็งแบบเซลล์แทรก จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อขนาดของอะตอมของตัวทำละลายมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของอะตอมของตัวถูกละลาย ตัวอย่างของอะตอมที่มีขนาดเล็กและสามารถเข้าไปแทรกอยู่ในซอก เพื่อทำให้เกิด interstitial solid solutions ได้ อาทิเช่น H, C, N และ O

ตัวอย่างของสารละลายของแข็งแบบเซลล์แทรกที่สำคัญ คือ อะตอมของคาร์บอนในเหล็ก  $\gamma$  ที่มีโครงสร้างแบบ FCC ซึ่งจะอยู่ตัวที่อุณหภูมิระหว่าง  $912-1,394^{\circ}\text{C}$  อะตอมของคาร์บอนจะเข้าไปแทรกในซอกระหว่างอะตอมของเหล็กได้สูงสุด 2.08% ที่อุณหภูมิ  $1148^{\circ}\text{C}$  รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของเหล็กขณะที่อะตอมของคาร์บอนเข้าไปแทรกในซอกระหว่างอะตอมของเหล็ก ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าอะตอมของเหล็กที่อยู่รอบอะตอมของคาร์บอนจะเกิดการเสียรูปไปเล็กน้อย

เนื่องจากขนาดของซอกระหว่างอะตอมในเหล็ก  $\gamma$  ที่มีโครงสร้างแบบ FCC เท่ากับ  $0.053\text{ nm}$  (ตัวอย่าง) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของซอกระหว่างอะตอมในเหล็ก  $\alpha$  ที่มีโครงสร้างแบบ BCC คือประมาณ  $0.036\text{ nm}$  จึงเป็นผลทำให้อะตอมของคาร์บอนที่มีขนาด  $0.075\text{ nm}$  สามารถละลายในเหล็ก  $\gamma$  ที่มีโครงสร้างแบบ FCC (2.08%) ได้ดีกว่าเหล็ก  $\alpha$  ที่มีโครงสร้างแบบ BCC (0.025%)



รูปที่ 3.5 แสดงสารละลายของแข็งแบบเซลล์แทรกของคาร์บอนในเหล็ก  $\gamma$  ที่มีโครงสร้างแบบ FCC ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $912^{\circ}\text{C}$  และเกิดการบิดเบี้ยวขึ้น (distortion)

### 3.4 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก

ในความเป็นจริง ไม่มีผลึกใดที่มีความสมบูรณ์อย่างแท้จริง แต่มักจะมีความบกพร่องเกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกเสมอ ซึ่งความบกพร่องที่เกิดขึ้นเหล่านี้มักจะมีผลทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลแตกต่างกันออกไป

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกสามารถแบ่งออกตามเรขาคณิตและรูปร่าง ได้เป็น 3 แบบ ดังนี้คือ

- (1) ความไม่สมบูรณ์แบบศูนย์มิติ หรือแบบจุด (zero-dimension or point defects)
- (2) ความไม่สมบูรณ์แบบหนึ่งมิติ หรือแบบเส้น (one-dimension or line defects)
- (3) ความไม่สมบูรณ์แบบสองมิติ (two-dimension defects) ซึ่งรวมถึงผิวภายนอกและขอบเขตภายในของเกรน

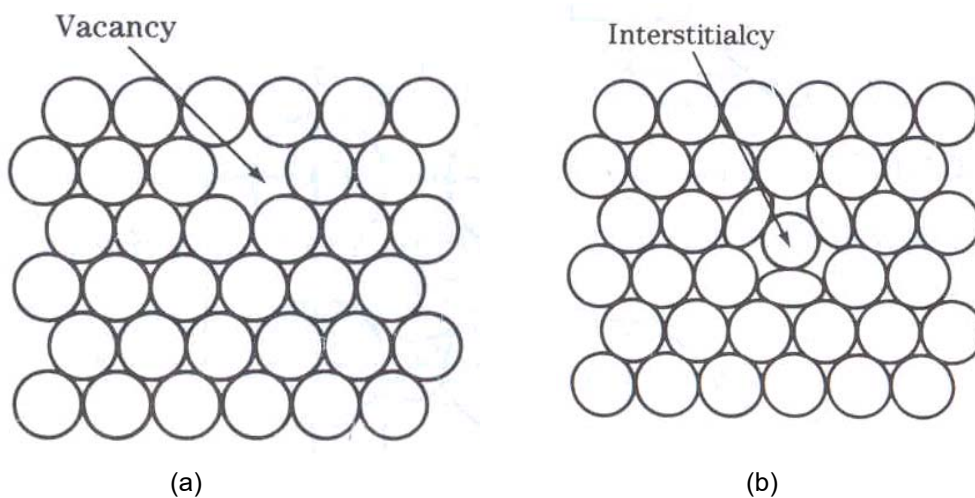
นอกจากนี้ยังอาจจะมีความไม่สมบูรณ์แบบสามมิติ (three-dimension macroscopic or bulk defects) ซึ่งความ

ไม่สมบูรณ์เหล่านี้ได้แก่ รูพรุน รอยร้าว และสิ่งแปลกปลอม เป็นต้น

### ความไม่สมบูรณ์แบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

ซึ่งเกิดขึ้นได้หลายลักษณะ ดังนี้คือ

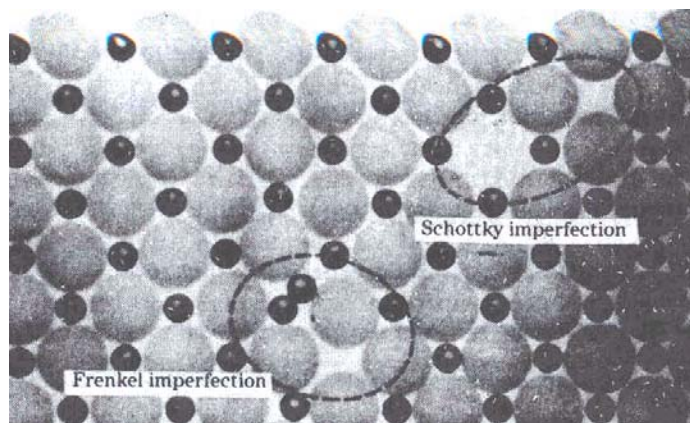
(1) การเกิดช่องว่างขึ้นเป็นความไม่สมบูรณ์แบบจุดอย่างธรรมดาที่สุด กล่าวคือ อะตอมบางอะตอมที่อยู่ในโครงสร้างได้หายไป ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (a) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นในขณะที่โลหะหลอมเหลวแข็งตัว โดยที่มีการระบายระบบในช่วงที่ผลึกเจริญเติบโต หรือมีการจัดเรียงตัวใหม่ของอะตอมในโครงผลึกที่มีอยู่เดิม เนื่องจากการเคลื่อนตัวของอะตอมเป็นต้น ภายในโครงสร้างของโลหะโดยส่วนใหญ่แล้วที่สภาวะสมดุลมักจะมีช่องว่างไม่เกินกว่า 1 ช่องต่อ 10,000 อะตอม และพลังงานกระตุ้นที่ต้องใช้ในการเกิดช่องว่างจะมีค่าประมาณ 1 eV ช่องว่างเหล่านี้สามารถเปลี่ยนตำแหน่งได้เนื่องจากระบวนการแพร่หรือการเคลื่อนย้ายของอะตอมข้างเคียง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ๆ



รูปที่ 3.6 (a) แสดงความไม่สมบูรณ์แบบจุดที่เกิดเป็นช่องว่าง (vacancy point defect)

(b) แสดงการเกิด self-interstitial หรือ interstitialcy point defect ในโครงสร้างแบบ close-packed ของโลหะ

(2) Self-interstitial หรือ interstitialcy เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากอะตอมหนึ่งเข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องระหว่างอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (b) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปรากฏการณ์เช่นนี้มักจะไม่มีเกิดขึ้น เพราะเมื่อเกิดขึ้นแล้วมักจะทำให้โครงสร้างผลึกไม่เสถียรและเกิดการบิดเบี้ยว (distortion)



รูปที่ 3.7 แสดงการเกิด Schottky defect กับ Frenkel defect



นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์แบบจุดยังอาจเกิดขึ้นในโครงสร้างผลึกไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังนี้คือ

(1) Schottky imperfection เป็นความไม่สมบูรณ์แบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากทั้งไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกจากโครงสร้างไป เพื่อรักษาประจุของโครงสร้างให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดช่องว่าง 2 ช่องของประจุบวก-ประจุลบ (cation - anion divacancy) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ส่วนบน)

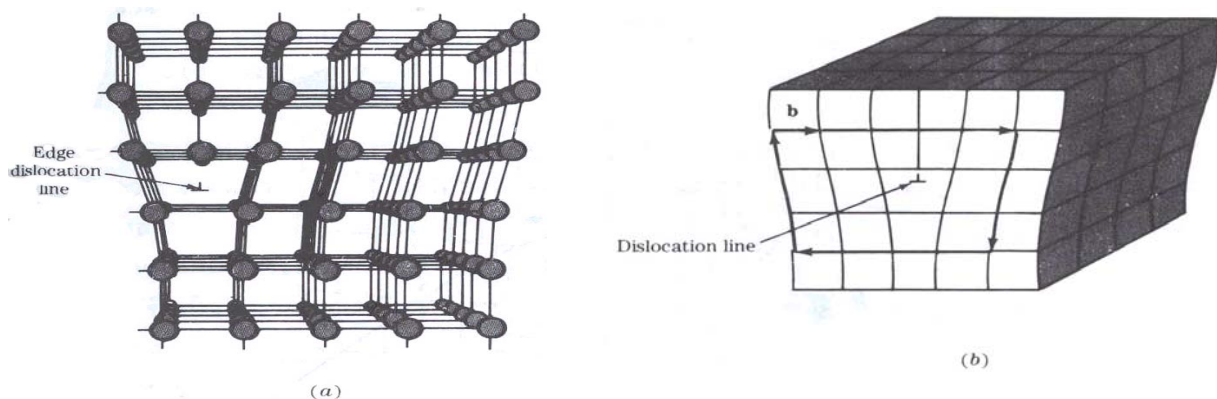
(2) Frenkel imperfection เป็นความไม่สมบูรณ์แบบจุดที่เกิดช่องว่างขึ้น เนื่องจากไอออนบวกบวกที่มีขนาดเล็กกว่า ไม่ได้หลุดหายออกจากโครงสร้าง แต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในช่องระหว่างไอออนลบ ร่วมกับไอออนบวกอีกตัวหนึ่ง ทำให้เกิดช่องว่างของประจุบวก (cation vacancy) ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ส่วนล่าง)

นอกจากนี้อะตอมแปลกปลอมหรือไอออนแปลกปลอมที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของโลหะหรือของไอออนิก ในลักษณะของการแทนที่ (substitutional) หรือการเข้าไปแทรกในช่อง ก็ถือได้ว่าเป็นความไม่สมบูรณ์แบบจุดเช่นกัน อาทิเช่น อะตอมที่แปลกปลอมเข้าไปแทนที่อะตอมของซิลิคอนในซิลิคอนบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นผลต่อคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าของซิลิคอนบริสุทธิ์ ทำให้เกิดประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก

### ความไม่สมบูรณ์แบบหนึ่งมิติหรือแบบเส้น

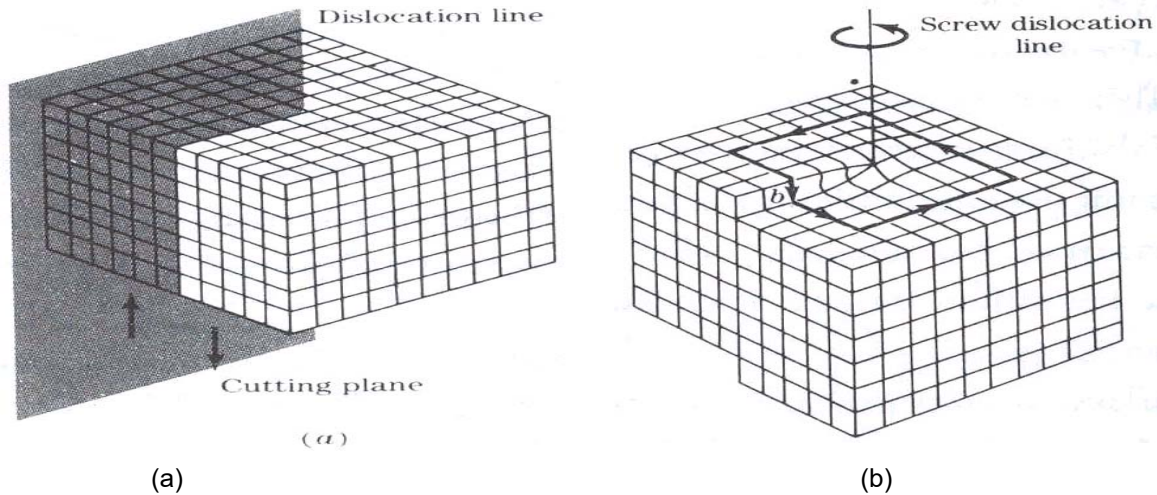
ความไม่สมบูรณ์แบบนี้ อาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งคือ dislocations เป็นความไม่สมบูรณ์ที่ก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของผลึก มักจะเกิดขึ้นในเวลาที่โลหะหลอมเหลวแข็งตัว หรือการที่วัสดุถูกทำให้เสียสภาพแบบพลาสติก (plastic deformation) เป็นต้น ซึ่งมี 2 ลักษณะ ดังนี้คือ

(1) Edge dislocation เกิดขึ้นเนื่องจากมี extra half plane ของอะตอมในโครงสร้างผลึก ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (a) ระยะที่เพิ่มขึ้นรอบ ๆ dislocation นี้ เรียกว่า slip หรือ Burgers vector  $b$  ซึ่งจะตั้งฉากกับ edge-dislocation line ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (b)



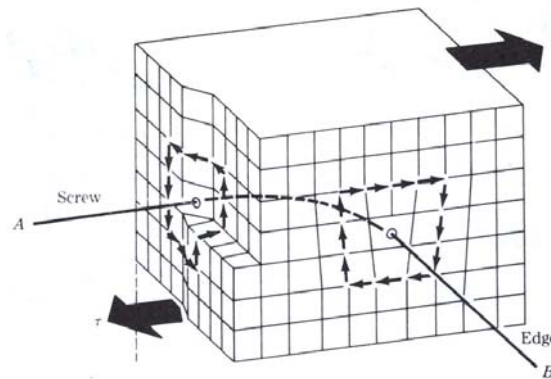
รูปที่ 3.8 (a) แสดงการเกิด edge dislocation ในผลึกซึ่งเกิดความไม่สมบูรณ์แบบเส้นที่เกิดอยู่ในแนวบนของตัวที่หัวกลับ (inverted tee  $\perp$ ) โดยมี extra half plane ของอะตอมเกิดแทรกอยู่  
(b) แสดง edge dislocation ซึ่งบ่งถึงทิศทางของ Burgers หรือ slip vector

(2) Screw dislocation เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นจากการไถแรงเฉือนเข้าไปในโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ ทำให้โครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์เกิดการบิดเบี้ยวหรือเสียรูปไป ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ในบริเวณที่โครงสร้างผลึกเกิดการบิดเบี้ยวขึ้นนี้ จะมีพลังงานสะสมอยู่มาก slip หรือ Burgers vector ที่เกิดขึ้น screw dislocation นี้จะขนานกับ dislocation line ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 3.9 (b)



รูปที่ 3.9 แสดงการเกิด screw dislocation

- (a) แสดงรูปผลึกที่สมบูรณ์ ถูกตัดด้วย plane และไม่มีแรงไถเฉือนที่ตรงกันข้าม แต่ขนานกับ plane ที่ตัด เกิด screw dislocation ที่แสดงในรูป (b)
- (b) แสดง screw dislocation กับ slip หรือ Burgers vector  $b$  ที่ขนานกับ dislocation line



รูปที่ 3.10 แสดง dislocation แบบผสมที่เกิดขึ้นในผลึกซึ่ง dislocation line AB เป็นแบบ screw type ในแนวที่พุ่งเข้าสู่ผลึกทางด้านซ้าย และเป็นแบบ edge dislocation ในแนวที่ออกจากผลึกทางด้านขวา โดยส่วนใหญ่แล้ว ความไม่สมบูรณ์แบบเส้นที่เกิดขึ้นในโครงผลึกนั้นมักจะเป็นแบบผสมระหว่าง edge dislocation และ screw dislocation ดังแสดงในรูปที่ 3.10

### ความไม่สมบูรณ์แบบ 2 มิติ หรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์แบบ 2 มิตินี้ อาทิเช่น ขอบเขตของเกรนซึ่งเป็นความบกพร่องของพื้นผิวที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีโครงสร้างหลายผลึก ขอบเขตของเกรนเกิดขึ้นได้ เนื่องจากการเรียงตัวของอะตอมในแต่ละผลึกที่มีทิศทางที่แตกต่างกัน ในขณะที่ผลึกเติบโตขึ้นเป็นเกรน เมื่อเกรนแต่ละเกรนมาสัมผัสกันจึงทำให้เกิดขอบเขตของเกรนขึ้น ซึ่งเป็นบริเวณแคบ ๆ ระหว่างเกรน บริเวณแคบ ๆ นี้จะมีความกว้างประมาณ 2 - 5 เท่าของรัศมีของอะตอม และมี atomic packing ต่ำกว่าภายในเกรน นอกจากนี้ยังเป็นบริเวณที่มีการสะสมของสิ่งเจือปนเป็นจำนวนมากเช่นกัน

### 3.5 ขนาดของเกรน

ขนาดของเกรนในโลหะที่มีโครงสร้างหลายผลึกมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแข็งแรงของวัสดุ

ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่าประมาณครึ่งหนึ่งของจุดหลอมเหลว) ขอบเขตของเกรนจะมีผลทำให้โลหะมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากขอบเขตของเกรนจะขัดขวางต่อการเคลื่อนตัวและเป็นปัจจัย ทำให้โลหะมีความแข็งแรงลดน้อยลง

วิธี ASTM เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการวัดขนาดของเกรน ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$N = 2^{n-1}$$

N = จำนวนเกรน/ตารางนิ้วของพื้นผิวที่ถูกขัดและถูก etched ด้วยสารเคมี ที่กำลังขยาย 100 เท่า

n = เป็นตัวเลขจำนวนเต็ม ซึ่งหมายถึง ASTM grain-size number

ค่า grain-size numbers พร้อมด้วยค่าจำนวนเกรน ต่อตารางนิ้วที่กำลังขยาย 100 เท่า และค่าจำนวนเกรนต่อตารางมิลลิเมตรที่กำลังขยาย 1 เท่า ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดง ASTM Grain Sizes

Grain size no.	จำนวนของเกรน	
	ต่อตารางมิลลิเมตรที่กำลังขยาย 1 เท่า	ต่อตารางนิ้วที่กำลังขยาย 100 เท่า
1	15.5	1.0
2	31.0	2.0
3	62.0	4.0
4	124	8.0
5	248	16.0
6	496	32.0
7	992	64.0
8	1980	128
9	3970	256
10	7940	512

ตัวอย่างที่ 3.1 ASTM grain-size มักจะถูกกำหนดจาก photomicrograph ของโลหะที่ส่องดูด้วยกำลังขยาย 100 เท่า จึงคำนวณหา ASTM grain-size number ของโลหะชนิดหนึ่ง ที่มีจำนวนเกรนเท่ากับ 64 เกรนต่อตารางนิ้วที่กำลังขยาย 100 เท่า

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad N &= 2^{n-1} \\
 \text{ดังนั้น} \quad 64 &= 2^{n-1} \\
 \log 64 &= (n-1)(\log 2) \\
 1.806 &= (n-1)(0.301) \\
 n &= 7
 \end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 3.2** ถ้านบน photomicrograph ของโลหะชนิดหนึ่งมีจำนวนเกรนเท่ากับ 60 เกรน ต่อตารางนิ้วที่กำลังขยาย 200 เท่า จงคำนวณหา ASTM grain-size number ของโลหะชนิดนี้  
 เนื่องจากโจทย์กำหนด 60 เกรนต่อตารางนิ้วที่กำลังขยาย 200 เท่า จึงยังแทนลงในสูตรไม่ได้ จำเป็นต้องหาค่าจำนวนเกรนที่กำลังขยาย 100 เท่าเสียก่อน ดังนี้คือ

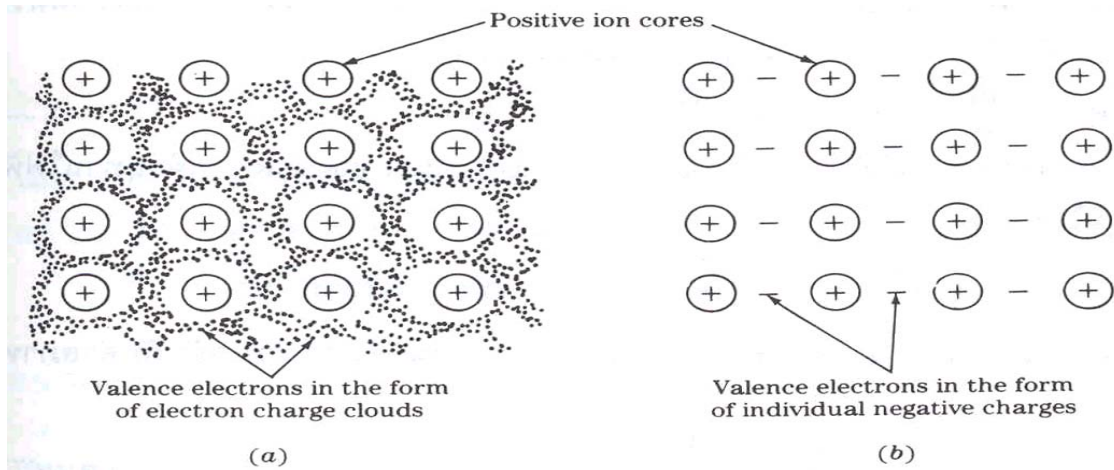
$$\begin{aligned}
 N &= \left(\frac{200}{100}\right)^2 \times (60 \text{ เกรน} / \text{ตารางนิ้ว}) = 240 \\
 \text{จาก} \quad N &= 2^{n-1} \\
 240 &= 2^{n-1} \\
 \log 240 &= (n-1)\log 2 \\
 2.380 &= (n-1)(0.301) \\
 n &= 8.91
 \end{aligned}$$

การศึกษาลักษณะพื้นผิวของโลหะนั้น อาจศึกษาได้โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า scanning electron microscope (SEM)

## 4. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ

### การนำไฟฟ้าในโลหะ

อะตอมของโลหะจะมีการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบ เกิดเป็นโครงผลึก (อาทิเช่น FCC, BCC และ HCP) โดยที่อะตอมเหล่านั้นจะเกิดพันธะระหว่างกัน โดยการเคลื่อนที่อย่างอิสระของอิเล็กตรอนวงนอกสุดของแต่ละอะตอม ซึ่งเรียกพันธะนี้ว่า “พันธะโลหะ” อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อย่างอิสระระหว่าง positive ion cores (อะตอมที่ปราศจากเวเลนซ์อิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนวงนอกสุด) ในโครงผลึกคล้ายกลุ่มหมอก ดังแสดงในรูปที่ 4.1

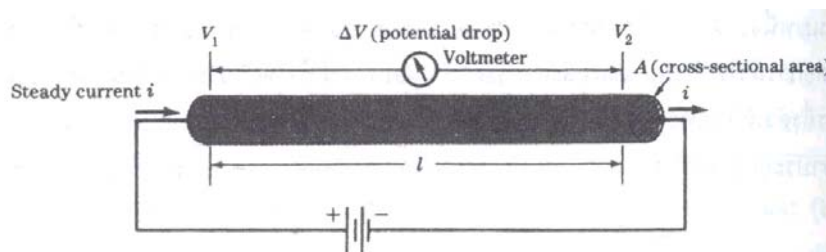


รูปที่ 4.1 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมของโลหะที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนหนึ่งตัว อาทิเช่น Cu, Ag หรือ Na

ถ้าไม่มีความต่างศักย์ทางไฟฟ้า อิเล็กตรอนวงนอกสุดนี้ก็จะเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้ไม่มีการไหลของกระแสไฟฟ้า แต่ถ้ามีการให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเข้าไป ก็จะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity) ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์โดยตรงกับความต่างศักย์ แต่ไปในทิศทางตรงกันข้าม

### กฎของโอห์ม (Ohm's law)

ลองพิจารณาเส้นลวดทองแดงเส้นหนึ่งที่ปลายทั้งสองข้างถูกต่อเข้ากับแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่มีความต่างศักย์ทางไฟฟ้า  $V$  จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า  $I$



รูปที่ 4.2 แสดงความต่างศักย์  $\Delta V$  ที่ต่อเข้ากับลวดโลหะ ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด  $A$  กระแสไหลผ่านเส้นลวด โดยเป็นปรากฏการณ์ส่วนกลับกับความต้านทาน  $R$  ของเส้นลวด

$$i = \frac{V}{R}$$

เมื่อ

$$i = \text{กระแสไฟฟ้า, A แอมแปร์}$$

$$V = \text{ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า, V (โวลต์)}$$

$$R = \text{ความต้านทานของเส้นลวด, } \Omega \text{ (โอห์ม)}$$

ความต้านทานทางไฟฟ้า R ของลวดตัวนำ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวของลวดตัวนำ l และเป็นปฏิภาคส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ A ดังสมการ

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad \text{หรือ} \quad \rho = \frac{RA}{l}$$

เมื่อ  $\rho$  = สภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) หน่วยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าคงที่ของวัสดุที่อุณหภูมิใด ๆ คือ

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{\Omega \cdot \text{m}^2}{\text{m}} = \text{โอห์ม - เมตร} = \Omega \cdot \text{m}$$

ส่วนค่าสภาพการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) จะเป็นปฏิภาคส่วนกลับกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ดังนี้

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

หน่วยของค่าสภาพการนำไฟฟ้า คือ (โอห์ม - เมตร)<sup>-1</sup> = ( $\Omega \cdot \text{m}$ )<sup>-1</sup> สำหรับหน่วยในระบบ SI ค่า  $\Omega^{-1}$  จะเรียกว่า siemens (S) แต่หน่วยนี้ไม่ค่อยได้ถูกนำมาใช้เท่าใดนัก

ตารางที่ 4.1 ได้แสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะและอโลหะบางชนิด จากตารางจะสังเกตเห็นได้ว่า โลหะบริสุทธิ์ อาทิเช่น เงิน, ทองแดง และทอง จะมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าสูงประมาณ  $10^7$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ )<sup>-1</sup>

ส่วนพอลิเอทิลีนและพอลิสไตรีน ซึ่งเป็นฉนวนทางไฟฟ้า จะมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าต่ำประมาณ  $10^{-14}$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ )<sup>-1</sup> ซึ่งน้อยกว่าโลหะตัวนำถึงประมาณ  $10^{23}$  เท่า ส่วนซิลิคอนและเจอร์เมเนียม จะมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างโลหะและฉนวน จึงถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำ (semiconductors)

ตารางที่ 4.1 แสดงสภาพการนำไฟฟ้าของโลหะและอโลหะที่อุณหภูมิห้อง

โลหะและโลหะผสม	$\sigma$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) <sup>-1</sup>	อโลหะ	$\sigma$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) <sup>-1</sup>
เงิน	$6.3 \times 10^7$	แกรไฟต์	$10^5$ (ค่าเฉลี่ย)
ทองแดง	$5.8 \times 10^7$	เจอร์มาเนียม	2.2
ทอง	$4.2 \times 10^7$	ซิลิคอน	$4.3 \times 10^{-4}$
อะลูมิเนียม	$3.4 \times 10^7$	พอลิเอทิลีน	$10^{-14}$
		พอลิสไตรีน	$10^{-14}$
		เพชร	$10^{-14}$

ตัวอย่างที่ 4.1 ลวดตัวนำเส้นหนึ่งซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 ซม. มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน 20 A และกำลังไฟฟ้าสูงสุดในลวดตัวนำเส้นนี้เท่ากับ 4 W/m จงคำนวณหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าต่ำสุดของลวดตัวนำเส้นนี้

วิธีทำ

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า} & P = iV = i^2R \\
 \text{เมื่อ} & i = \text{กระแสไฟฟ้า, A} \\
 & V = \text{ความต่างศักย์, V} \\
 & R = \text{ความต้านทานไฟฟ้า, } \Omega \\
 & P = \text{กำลังไฟฟ้า, W} \\
 & R = \frac{\rho l}{A}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } \rho &= \text{สภาพต้านทานไฟฟ้า, } \Omega \cdot \text{m} \\
 l &= \text{ความยาวของลวดตัวนำ, m} \\
 A &= \text{พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำ, m}^2
 \end{aligned}$$

$$\therefore P = i^2 \frac{\rho l}{A} = \frac{i^2 l}{\sigma A}$$

$$\sigma = \frac{i^2 l}{PA}$$

$$\text{แทนค่า } P = 4 \text{ W/m, } i = 20 \text{ A, } l = 1 \text{ m}$$

$$A = \pi r^2 = \frac{22}{7} \times \left(\frac{0.002}{2}\right)^2 = 3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\sigma = \frac{i^2 l}{PA} = \frac{(20\text{A})^2 (1\text{m})}{(4\text{W})(3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2)} = 3.18 \times 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$$

ดังนั้น จะต้องใช้ลวดตัวนำที่มีสภาพการนำไฟฟ้าอย่างน้อย  $3.18 \times 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$  หรือมากกว่า

ตัวอย่างที่ 4.2

ถ้ากระแสไฟฟ้า 10A ไหลผ่านลวดทองแดง ทำให้เกิดความต่างศักย์ 0.4 V/m จงหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุดของเส้นลวดทองแดงนี้  $[\sigma \text{ ของลวดทองแดงเท่ากับ } 5.85 \times 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}]$

วิธีทำ

$$\text{จากกฎของโอห์ม} \quad V = iR \text{ และ } R = \frac{\rho l}{A}$$

$$\therefore V = \frac{i\rho l}{A}$$

$$A = \frac{i\rho l}{V}$$

$$\text{แทน } A = (\pi/4)d^2 \text{ และ } \rho = \frac{l}{\sigma} \text{ จะได้}$$

$$\frac{\pi}{4}d^2 = \frac{il}{\sigma V}$$

$$\therefore d = \sqrt{\frac{4il}{\pi\sigma V}}$$

$$\text{แทนค่า } i = 10 \text{ A, } V = 0.4 \text{ V สำหรับความยาวของลวด } 1 \text{ m, } l = 1.0 \text{ m, และ } \sigma = 5.85 \times 10^7 (\Omega \cdot \text{m})^{-1} \text{ ดังนั้น}$$

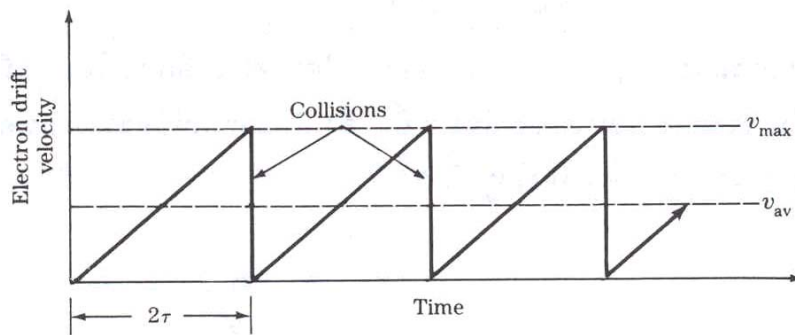
$$d = \sqrt{\frac{4il}{\pi\sigma V}} = \sqrt{\frac{4(10A)(1.0m)}{\pi[5.85 \times 10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}](0.4V)}} = 7.37 \times 10^{-4} \text{ m}$$

ดังนั้น เส้นลวดทองแดงนี้จะต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าหรือเท่ากับ  $7.37 \times 10^{-4} \text{ m}$

**ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนในโลหะตัวนำ**

ที่อุณหภูมิห้อง positive – ion cores ที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของโลหะตัวนำจะเกิดการสั่น จึงมีค่าพลังงานจลน์ในตัวจำนวนหนึ่ง ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อย่างอิสระชน positive – ion cores ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานกัน เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าภายนอกใส่เข้าไป จึงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไหล

ถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ E ถูกใส่เข้าไปในตัวนำ อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป อิเล็กตรอนจะวิ่งชน ion core ในโครงสร้าง ทำให้สูญเสียพลังงานจลน์ของตัวเอง หลังจากเกิดการชนอิเล็กตรอนจะเป็นอิสระที่จะถูกเร่งอีกครั้ง จึงเป็นผลทำให้ความเร็วของอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงตามเวลาในลักษณะคล้ายฟันเลื่อย (sawtooth manner) ดังแสดงในรูป 4.3 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่เกิดการชนเท่ากับ 2T เมื่อ T คือ relaxation time

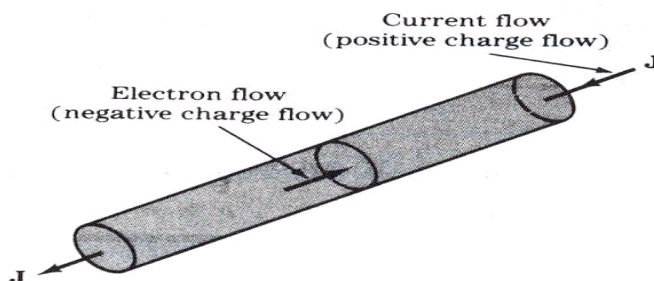


**รูปที่ 4.3** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอนกับเวลา

อิเล็กตรอนจะมีค่าเฉลี่ยของความเร็วลอยเลื่อนเท่ากับ  $v_d$  ซึ่งจะเป็นปรากฏการณ์โดยตรงกับสนามไฟฟ้า E ดังสมการ

$$v_d = \mu E$$

เมื่อ  $\mu$  คือสภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน  $m^2/(V \cdot S)$  ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนคงที่



**รูปที่ 4.4** แสดงการไหลของอิเล็กตรอนในลวดทองแดง



ลองพิจารณารูปที่ 4.4 เป็นเส้นลวดตัวนำที่มีความหนาแน่นของกระแส (current density)  $J$  ไหลในทิศทางดังที่แสดง ค่าความหนาแน่นของกระแสถูกนิยามไว้ว่า คือ อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับแนวของ  $J$  ซึ่งมีหน่วยเป็น  $A/m^2$  หรือ  $C/(s.m^2)$

อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนในหนึ่งหน่วยปริมาตร, ค่าประจุของอิเล็กตรอน,  $e(-1.60 \times 10^{-19} C)$  และความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน,  $v_d$  ซึ่งเท่ากับ  $-nev_d$  แต่อย่างไรก็ตาม การไหลของกระแสไฟฟ้าคือการไหลของประจุบวก ดังนั้นความหนาแน่นของกระแส  $J$  จึงมีเครื่องหมายเป็นบวก ดังสมการ

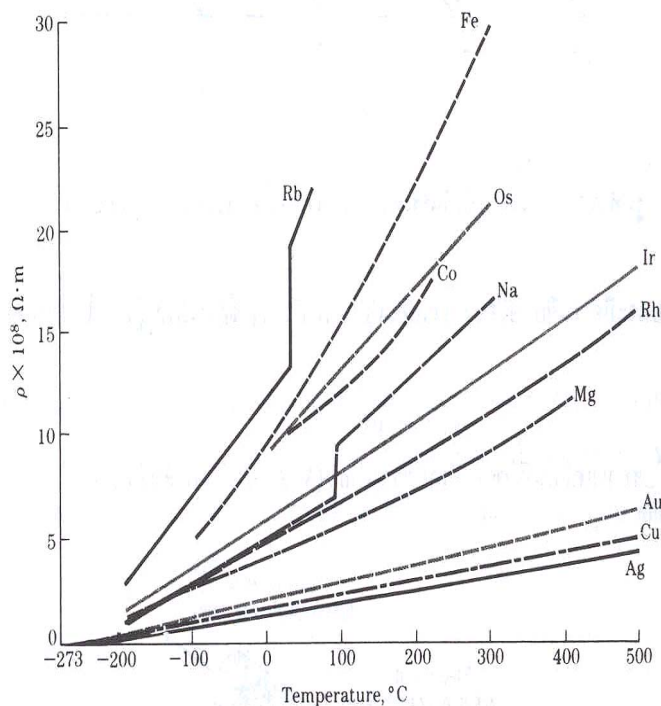
$$J = nev_d$$

**ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะ (electrical resistivity of metals)**

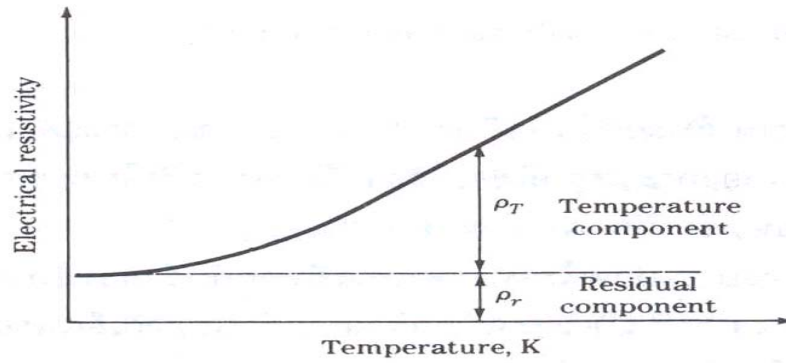
ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของโลหะนั้น สามารถประมาณค่าได้จาก

$$\rho_{total} = \rho_T + \rho_r$$

$\rho_T$  เกิดจากการสั่นของ positive ion cores ในโครงสร้างผลึกของโลหะ เนื่องจากอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ positive ion cores สั่นมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้โลหะมีสภาพต้านทานมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะบางชนิด



รูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะชนิดหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

ส่วน  $\rho_r$  เกิดจากความบกพร่องภายในโครงสร้างของโลหะ อาทิเช่น dislocations, ขอบเขตของเกรน, และสารเจือปนต่าง ๆ ซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ค่า  $\rho_r$  จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและเด่นที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น (รูปที่ 4.6)

ในโลหะส่วนใหญ่ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-200^{\circ}\text{C}$  ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งอาจหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \rho_r &= \rho_{0^{\circ}\text{C}} (1 + \alpha_T T) \\ \text{เมื่อ } \rho_{0^{\circ}\text{C}} &= \text{ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิ } 0^{\circ}\text{C} \\ \alpha_T &= \text{temperature resistivity coefficients, } ^{\circ}\text{C}^{-1} \\ T &= \text{อุณหภูมิของโลหะ, } ^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า temperature resistivity coefficients ของโลหะบางชนิด

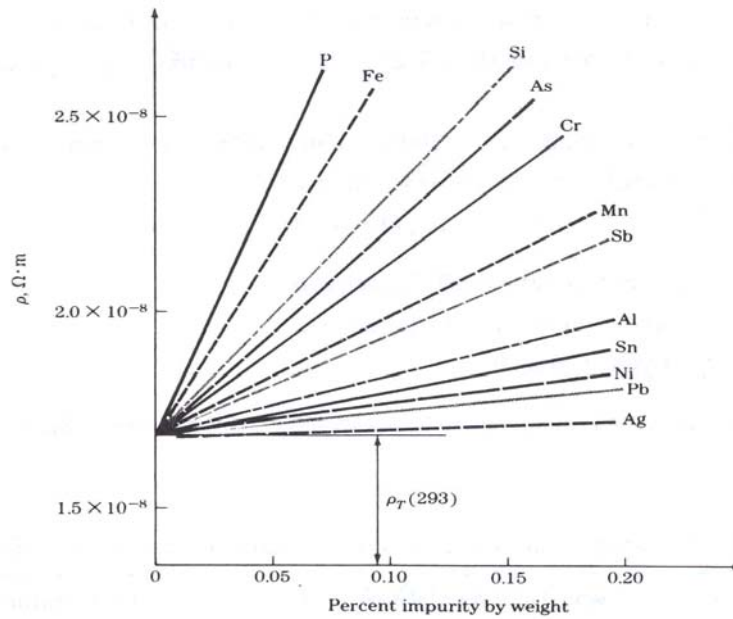
โลหะ	ความต้านทานไฟฟ้าที่ $0^{\circ}\text{C}$ , $\mu\Omega.\text{cm}$	Temperature resistivity coefficient $\alpha_T, ^{\circ}\text{C}^{-1}$
อะลูมิเนียม	2.7	0.0039
ทองแดง	1.6	0.0039
ทอง	2.3	0.0034
เหล็ก	9	0.0045
เงิน	1.47	0.0038

ตัวอย่างที่ 4.3 จงคำนวณหาค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของทองแดงบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิต่ำ  $132^{\circ}\text{C}$ , โดยใช้ค่า temperature resistivity coefficient ของทองแดงจากตารางที่ 4.2

วิธีทำ

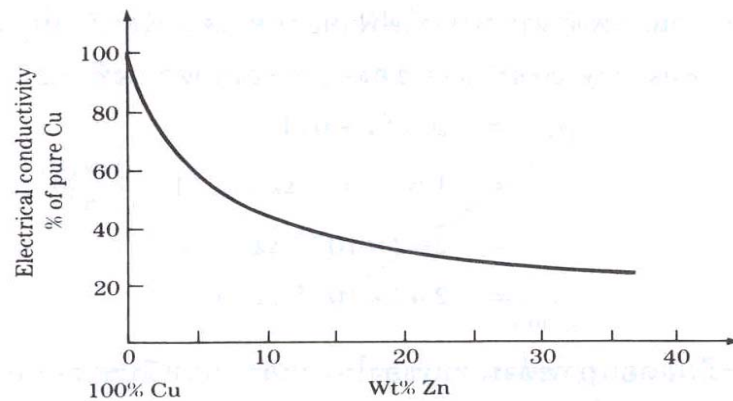
$$\begin{aligned} \rho_T &= \rho_{0^{\circ}\text{C}}(1 + \alpha_T T) \\ &= 1.6 \times 10^{-6} \Omega.\text{cm} \left(1 + \frac{0.0039}{^{\circ}\text{C}} \times 132^{\circ}\text{C}\right) \\ &= 2.42 \times 10^{-6} \Omega.\text{cm} \\ &= 2.42 \times 10^{-8} \Omega.\text{cm} \end{aligned}$$

นอกจากอุณหภูมิจะมีผลต่อสภาพต้านทานของโลหะแล้ว การเติมธาตุอื่นลงในโลหะบริสุทธิ์ก็จะมีผลต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของโลหะเช่นกัน กล่าวคือ เมื่อเติมธาตุอื่นลงในโลหะบริสุทธิ์ จะทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นตัวพาประจุได้ลำบากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของโลหะนั้นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงผลกระทบของการเติมธาตุบางชนิดต่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของทองแดงที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า ผลของธาตุแต่ละชนิดที่มีต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของทองแดงจะค่อนข้างแตกต่างกัน กล่าวคือ โลหะเงินจะให้ผลกระทบน้อยที่สุด แต่ฟอสฟอรัสจะมีผลกระทบทำให้ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของทองแดงเพิ่มขึ้นอย่างมาก



รูปที่ 4.8 แสดงผลของการเติมสังกะสีลงในทองแดงบริสุทธิ์ที่ทำให้สภาพการนำไฟฟ้าของทองแดงลดลง

รูปที่ 4.8 แสดงผลของการเติมโลหะสังกะสีลงในทองแดงต่อค่าสภาพการนำไฟฟ้าของทองแดง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า ทองแดงจะมีสภาพการนำไฟฟ้าลดลงอย่างมาก เมื่อมีการเติมสังกะสีปริมาณ 5-35% ลงในทองแดง

## 5. สมบัติเชิงกลของโลหะ

### 5.1 กระบวนการการผลิตโลหะและโลหะผสม

#### การหล่อโลหะและโลหะผสม

ในกระบวนการหล่อโลหะ หรือโลหะผสม โดยมากจะใช้วิธีหลอมโลหะในเตาหลอมเสียก่อน ๆ ที่จะนำไปเทลงในแบบ และถ้าจะทำโลหะผสมก็จะใช้วิธีเติมโลหะอีกชนิดหนึ่งหรือหลาย ๆ ชนิดลงในโลหะที่กำลังหลอมเหลวอยู่แล้ว คนให้ผสมกันดีจนได้ส่วนผสมที่ต้องการ จากนั้นก็จะนำไปหล่อให้เป็นแท่งหรือเป็นแผ่นให้เป็นรูปตามที่ต้องการหรือทำให้เป็นวัสดุสำเร็จรูปต่อไป

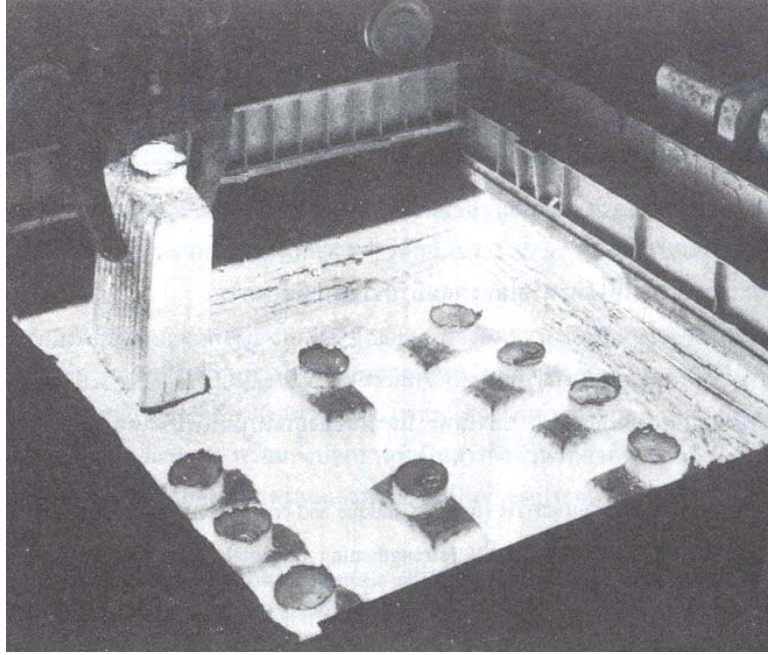
#### การรีดร้อนและการรีดเย็น

ในกรณีที่ต้องการทำเป็นแผ่นโลหะที่มันได้หรือทำให้เป็นแผ่นหนาตามที่ต้องการจากโลหะที่เป็นแท่ง โดยใช้วิธีรีดร้อนและรีดเย็น

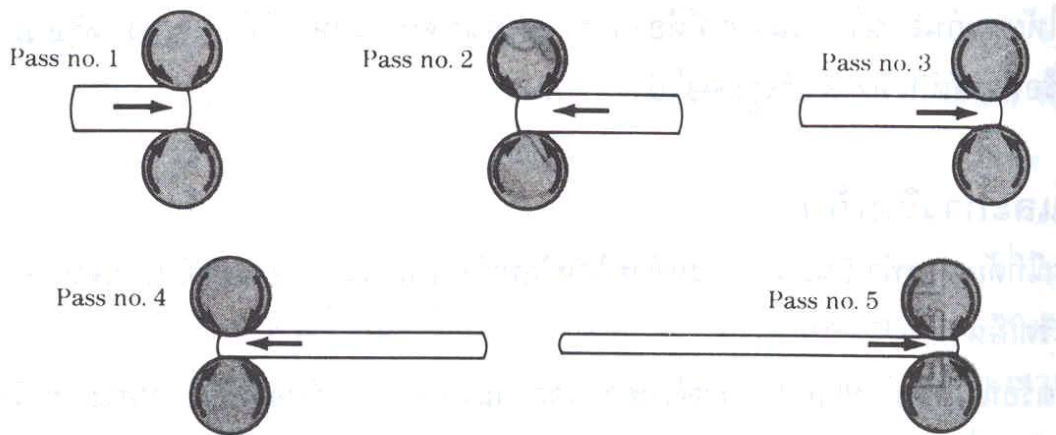
การรีดร้อน (Hot rolling) : ถ้าต้องการลดความหนาลงมา มักจะใช้วิธีรีดขณะที่ยังร้อน ๆ แต่ก่อนรีดจะทำให้โลหะนั้นร้อนที่อุณหภูมิสูงก่อนในเตาเผา (รูปที่ 5.1) ซึ่งเรียกว่า soaking pit แล้วจึงส่งเข้าไปรีดด้วยลูกกลิ้ง (รูปที่ 5.2) จนกว่าจะเย็น แล้วจึงทำให้ร้อนใหม่ติดต่อกันไป (รูปที่ 5.3)

การรีดเย็น (Cold rolling) : ตามปกติจะทำการรีดที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ลูกรีด 4 ลูก และอาจรีดเป็นลำดับติดต่อกันก็ได้ วิธีนี้เหมาะแก่การรีดเย็นพวกโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก เช่น ดีบุก (tin) หรืออะลูมิเนียม ความหนาที่ถูกรีดให้บางลงสามารถคำนวณหาได้โดย

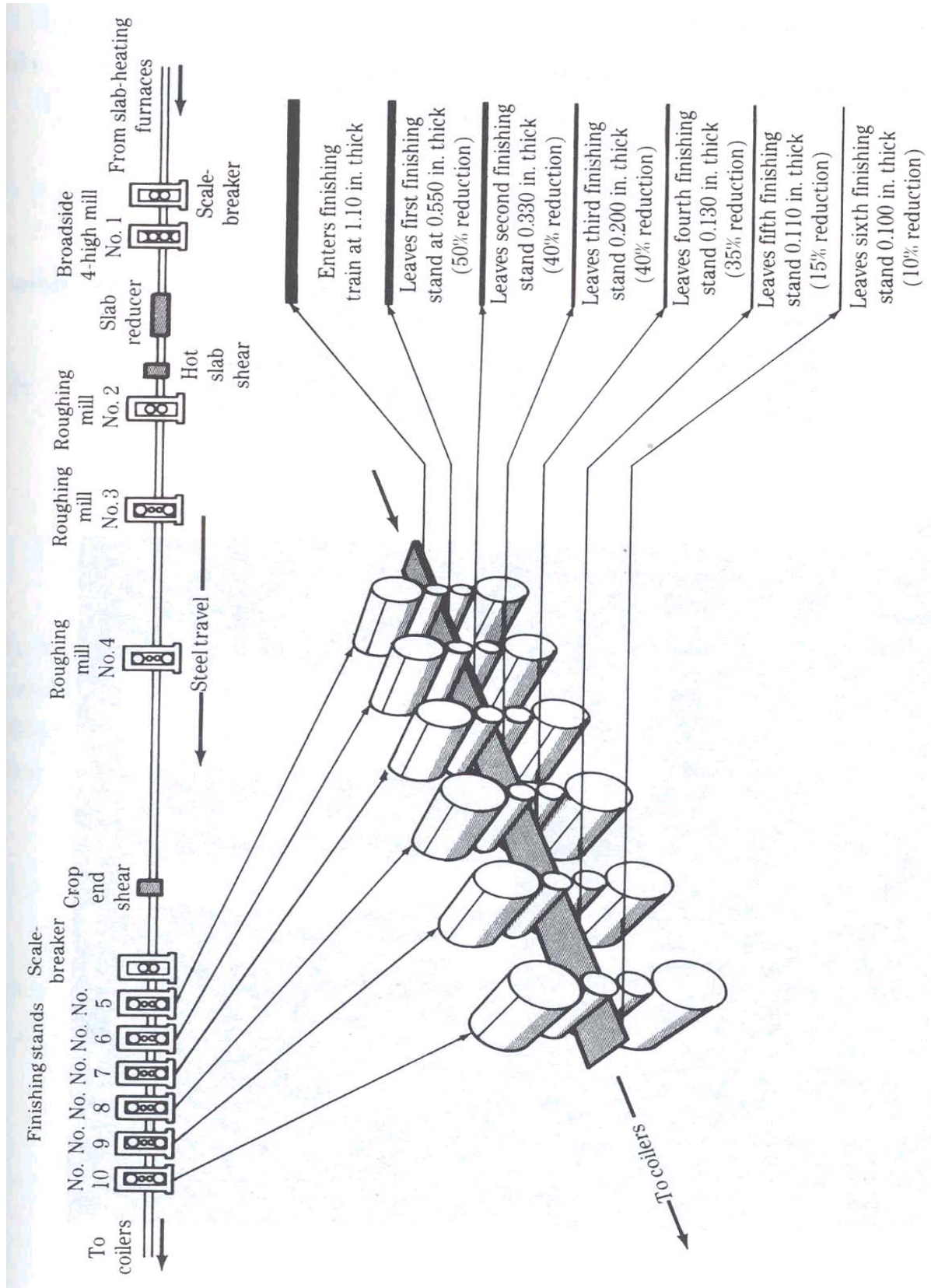
$$\% \text{ความหนาที่ลดลง} = \frac{\text{ความหนาเริ่มต้นของโลหะ} - \text{ความหนาสุดท้ายของโลหะ}}{\text{ความหนาเริ่มต้นของโลหะ}} \times 100\%$$



รูปที่ 5.1 แสดงถึงเหล็กจะถูกเผาให้ร้อนประมาณ  $1200^{\circ}\text{C}$  ( $2200^{\circ}\text{F}$ ) ในเตาแก๊ส เรียกว่า soaking pit ประมาณ 4-8 ชม. ก่อนนำไปรีด (Bethlehem Steel Co.)



รูปที่ 5.2 แสดงไต่อะแกรมของการรีดร้อน



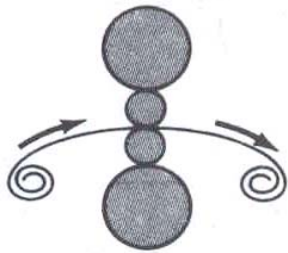
รูปที่ 5.3 แสดงกระบวนการรีดโลหะที่ร้อนเป็นอนุกรม เพื่อให้โลหะบางลง ๆ ซึ่งมีตัวรีดหยาบ 4 ตัว และตัวรีดสุดท้ายอีก 6 ตัว



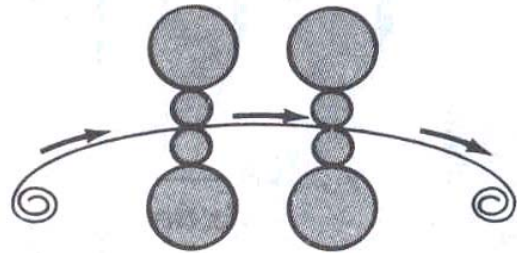
**ตัวอย่างที่ 5.1** จงคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความหนาที่ลดลงของการรีดเย็นแผ่นโลหะผสมอะลูมิเนียม จากความหนา 0.120 นิ้ว เป็น 0.040 นิ้ว

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ความหนาที่ลดลง} &= \frac{\text{ความหนาเริ่มต้น} - \text{ความหนาสุดท้าย}}{\text{ความหนาเริ่มต้น}} \times 100\% \\ &= \frac{0.120 - 0.040}{0.120} \times 100 \\ &= \frac{0.080}{0.120} \times 100 \\ &= 66.7\% \end{aligned}$$



(a)



(b)

**ตัวอย่างที่ 5.2** แผ่นโลหะผสมซึ่งมีทองแดง 10% สังกะสี 30% ถูกนำไปรีดเย็นลง 20% เหลือความหนาเป็น 3.00 มม. เมื่อนำไปรีดต่อจนเหลือความหนาเป็น 2.00 มม. จงหา % cold work ทั้งหมดว่าเป็นเท่าใด

วิธีทำ ก่อนอื่นหาความหนาเริ่มแรกเสียก่อน โดยให้ x เป็นความหนาเริ่มต้น

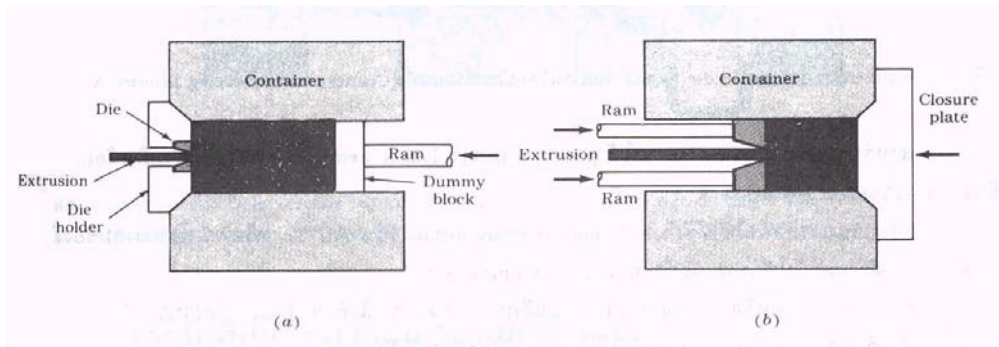
$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น} \quad \frac{x - 3.00}{x} &= 0.20 \\ x &= 3.75 \text{ มม.} \\ \% \text{ cold work ทั้งหมด} &= \frac{3.75 - 2.00}{3.75} \times 100 \\ &= 46.6\% \end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 5.3** จงหาเปอร์เซ็นต์ความหนาที่ลดลง เมื่อนำลวดทองแดงที่ทำให้อ่อนตัวแล้วนำมาดึงให้เส้นผ่านศูนย์กลางลดลงจาก 1.27 มม. เหลือ 0.813 มม.

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ความหนาที่ลดลง} &= \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยน}}{\text{พื้นที่เดิม}} \times 100\% \\ &= \frac{\left(\frac{\pi}{4}\right)(1.27)^2 - \left(\frac{\pi}{4}\right)(0.813)^2}{\left(\frac{\pi}{4}\right)(1.27)^2} \times 100\% \\ &= 59\% \end{aligned}$$

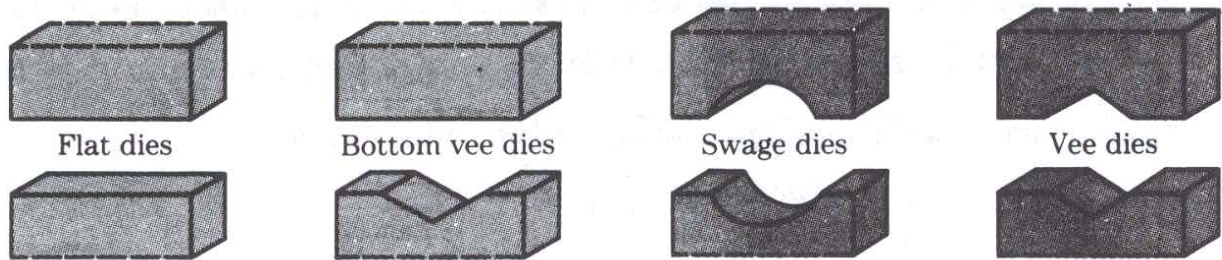
กระบวนการอัดฉีด (Extrusion) : โดยมากใช้กับกระบวนการผลิตของพวกพลาสติก โดยวัสดุนั้นจะถูกอัดด้วยความดันสูง เพื่อบังคับให้ออกไปทาง open die ดังรูปที่ 5.4 แต่ถ้าเป็นโลหะหรือโลหะผสม จะใช้วิธีนี้ได้กับโลหะที่กำลังร้อน เพราะมันจะมีความต้านทานต่ำจึงมักจะทำให้เป็นแท่งกลมหรือทำเป็นท่อกลวง โดยนำโลหะที่หลอมเหลวมาใส่ไว้ในที่พัก (billet) ของภาชนะบรรจุ (container) แล้วจึงจะถูกอัดด้วยตัวดัน (ram) ให้ออกทางตาย (die) ให้



รูปที่ 5.4 แสดงกระบวนการผลิตโลหะโดยใช้ Direct และ Indirect extrusion

กระบวนการอัดฉีด 2 แบบ คือ

1. Direct extrusion (ดังรูปที่ 5.4 (a))
2. Indirect extrusion (ดังรูปที่ 5.4 (b))



รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะรูปร่างของ Open-die forging

สำหรับ Indirect extrusion จะใช้ power น้อยกว่า Direct extrusion เพราะมีความฝืดน้อยกว่า แต่ก็มีขีดจำกัดกว่า Direct extrusion

กระบวนการอัดฉีดใช้ได้ดีกับพวก non-ferrous metals เช่น Al, Cu หรือพวกโลหะผสมของมันที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและยังใช้กับพวกแก้ว ถ่านและ Stainless steel

กระบวนการอัดหรือตี (Forging) : เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่ใช้เปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุ ด้วยการตีด้วยหม้อนหรือด้วยการอัด (press) ขณะร้อนให้ออกมาเป็นรูปร่างที่ต้องการ

กระบวนการอัดหรือตีมี 2 แบบคือ

1. Open-die forging (ดังรูปที่ 5.5)
2. Closed-die forging



ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุที่มีลักษณะเป็นพิเศษ โดยให้มี refine structure และลดความพรุน (porosity) ของวัสดุด้วย นอกจากนี้ยังมีกระบวนการอื่น ๆ อีก เช่น

- ก. กระบวนการดึงให้เป็นเส้น (wire drawing) โดยดึงผ่าน die ที่มีสารหล่อลื่น และบางครั้งต้องทำให้ร้อนก่อน ทั้งนี้แล้วแต่ชนิดของโลหะ
- ข. Deep drawing เป็นกระบวนการที่โดยมากใช้เปลี่ยนแปลงจากรูปลักษณะที่เป็นแผ่นให้ออกมาเป็นถ้วย โดยการอัดเข้าไปตามรูปแบบที่ต้องการ

## 5.2 ความเค้นและความเครียดของโลหะ

จะได้กล่าวถึงสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของโลหะเพื่อการนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรมว่ามีความแข็งแรง และมีความอ่อนความแข็งของวัสดุเป็นอย่างไร เหมาะที่จะใช้งานหรือไม่

Elastic และ plastic deformation ถ้าเอาโลหะมาดึงในทิศทางเดียว (uniaxial tensile force) จะทำให้โลหะเปลี่ยนรูปได้และถ้าเลิกดึงแล้วโลหะนั้นกลับมามีอยู่ในสภาพเดิมเรียกว่าเกิด Elastic deformation แต่ถ้ากลับสู่สภาพเดิมไม่ได้ 100% เรียกว่าเกิด Plastic deformation ในระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนรูปนี้ อะตอมจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ การเปลี่ยนแปลงแบบนี้บางครั้งก็เป็นสิ่งที่วิศวกรต้องการมาก เพราะสามารถนำไปผลิตสิ่งของต่าง ๆ ได้ถ้าไม่มีแตกหัก และเป็นไปตามที่ต้องการ เช่น การผลิตชิ้นส่วนรถยนต์จากเหล็กกล้า เป็นต้น

### ความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress)

ถ้านำแท่งโลหะมายาว  $l_0$  และมีพื้นที่หน้าตัด  $A_0$  ดึงด้วยแรง  $F$

$$\text{Engineering Stress } (\sigma) = \frac{F \text{ (Ave. uniaxial tensile force)}}{A_0 \text{ (original cross-section area)}}$$

หน่วยที่ใช้วัดค่าของความเค้น

ปอนด์ต่อตารางนิ้ว = lb/in<sup>2</sup> หรือ psi

ปาสคาล (Pascals), นิวตัน/เมตร<sup>2</sup> 1 N/m<sup>2</sup> = 1 Pa

1 psi = 6.89 x 10<sup>3</sup> Pa

10<sup>6</sup> Pa = 1 เมกะปาสคาล = Mpa

**ตัวอย่างที่ 5.4** แท่งอะลูมิเนียมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.500 นิ้ว ถูกดึงด้วยแรง 2500 lb จงหาความเค้นทางวิศวกรรมในหน่วย psi

$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ} \quad \sigma &= \frac{\text{Force}}{\text{original } A_0} \\ &= \frac{2500}{\pi r^2} \\ &= \frac{2500}{\pi \left(\frac{1}{4}\right) (0.500)^2} \\ &= 12700 \text{ lb/in}^2 \end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 5.5** โลหะแท่งหนึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 เซนติเมตร รั้งน้ำหนัก 2500 กิโลกรัม จงคำนวณหาความเค้นทางวิศวกรรมที่เกิดกับแท่งโลหะในหน่วยเมกะปาสคาล (MPa)

วิธีทำ

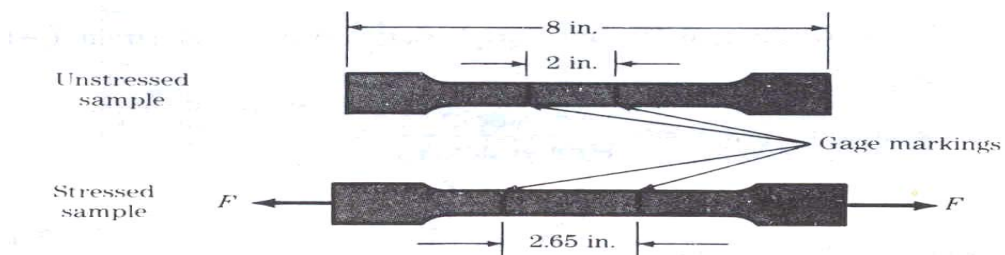
$$\begin{aligned}
 \text{มวลที่ใส่ลงไปบนแท่งโลหะ} &= 2500 \text{ kg} \\
 \therefore \text{แรง } F &= ma \\
 \text{มวล } m &= 2500 \text{ kg} \\
 \text{อัตราเร่ง } a &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\
 \therefore F &= (2500 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2) \\
 &= 24,500 \text{ N} \\
 \text{แท่งโลหะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง} &= 1.25 \text{ cm} \\
 &= 0.0125 \text{ m} \\
 \therefore \text{ความเค้นทางวิศวกรรม } \sigma &= \frac{F}{A_o} = \frac{F}{\frac{\pi}{4}d^2} \\
 &= \frac{24500 \text{ N}}{\left(\frac{\pi}{4}\right)(0.0125 \text{ m})^2} \\
 &= (2.00 \times 10^8 \text{ Pa}) \\
 &= 2.00 \times 10^8 \text{ PA} \times \frac{1 \text{ MPa}}{10^6 \text{ Pa}} \\
 &= 200 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

**ความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain)**

เมื่อแท่งโลหะถูกดึงในทิศทางเดียวกัน ทำให้แท่งโลหะยาวขึ้นในทิศทางที่แรงกระทำ ความยาวที่เพิ่มขึ้นนี้เรียกว่า ความเครียด (strain) จากคำนิยามของคำว่า Engineering strain หมายถึง ความเครียดทางวิศวกรรมที่เกิดจากแรงดึงโลหะ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม

$$\begin{aligned}
 \text{Engineering strain } (\epsilon) &= \frac{l - l_o}{l_o} \\
 &= \frac{\Delta l}{l_o} = \frac{\text{ความยาวที่เปลี่ยนไป}}{\text{ความยาวเดิม}}
 \end{aligned}$$

โดยทั่วไปทางด้านวิศวกรรมจะใช้ความยาว 2 นิ้ว ซึ่งเรียกว่า gage length ดังรูปที่ 5.5



**รูปที่ 5.5** แสดงผลของแผ่นโลหะที่ถูกทดสอบ

**ตัวอย่างที่ 5.6** แท่งอะลูมิเนียมกว้าง 0.500 นิ้ว หนา 0.04 นิ้ว และยาว 8 นิ้ว โดยใช้ gage length 2 นิ้ว เมื่อทำให้เกิดความเครียดตัว gage length ได้ 2.65 นิ้ว จงหาความเครียดทางวิศวกรรม ดังรูปที่ 5.5

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{ความเครียดทางวิศวกรรม } (\epsilon) &= \frac{l - l_0}{l_0} \\ &= \frac{2.65 - 2.00}{2.00} = 0.325 \\ \% \text{ elongation} &= 0.325 \times 100 = 32.5\% \end{aligned}$$

Poisson Ratio การเปลี่ยนรูปที่เป็น elastic ในทิศทางเดียว บางครั้งจะมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านข้างด้วย (lateral contraction) tensile stress ( $\sigma_z$ ) จะทำให้เกิด axial strain ( $+\epsilon_z$ ) และ lateral contraction เป็น  $-\epsilon_x$  และ  $-\epsilon_y$

$$\begin{aligned} \therefore \text{Poisson ratio } (V) &= \frac{\epsilon(\text{lateral})}{\epsilon(\text{longitudinal})} \\ &= -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \end{aligned}$$

สำหรับวัสดุวิศวกรรมสมมติ  $\nu = 0.5$

แต่สำหรับวัสดุวิศวกรรมจริง ๆ จะมีค่า  $\nu$  อยู่ระหว่าง 0.25 – 0.4 เฉลี่ยจะได้ 0.30

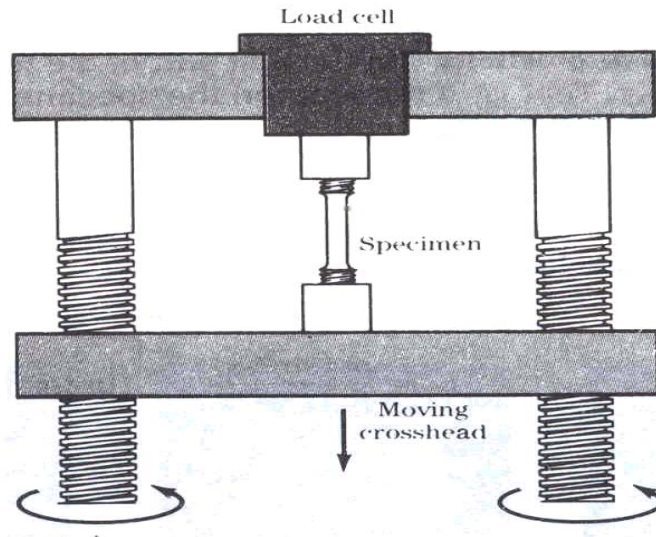
### ความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน

โลหะสามารถเปลี่ยนรูปได้ด้วยความเค้นเฉือน ซึ่งโดยมากจะเป็น shear stress ธรรมดากระทำเป็นคู่ (act in pairs)

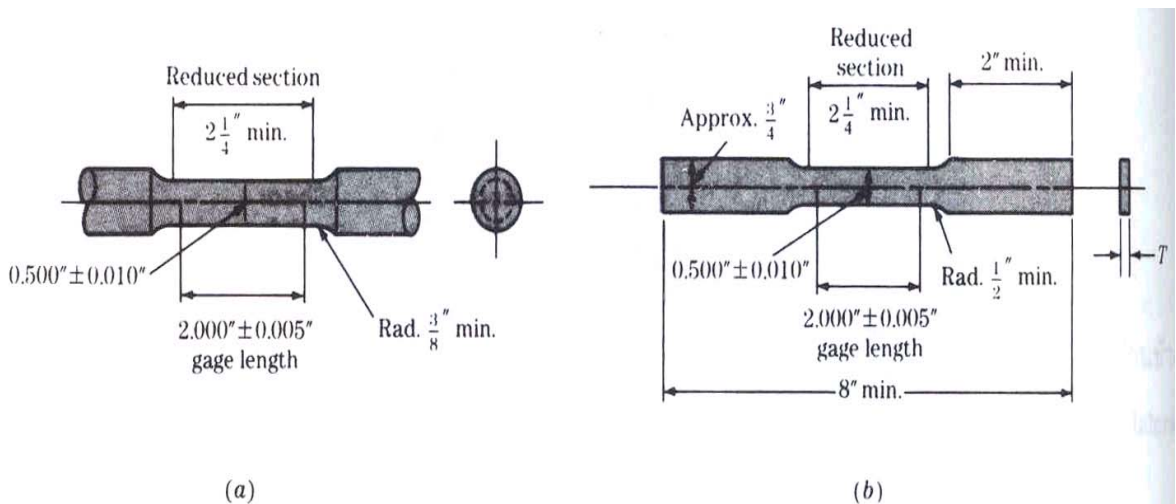
$$\begin{aligned} \text{นั่นคือ } \tau \text{ (shear stress)} &= \frac{S}{A} \\ S &= \text{แรงเฉือนที่กระทำกับ surface A} \\ \tau &= \text{shear stress, N/m}^2 \text{ หรือ Pascal (Pa)} \\ A &= \text{พื้นที่ทั้งหมดที่ shear force กระทำ} \\ \text{Shear strain } \gamma &= \frac{a}{h} = \tan \theta \\ a &= \text{shear displacement} \\ h &= \text{distance ที่แรงเฉือนกระทำ} \\ \text{ถ้าเป็น pure elastic shear} \\ \tau &= G\gamma \\ G &= \text{elastic shear modulus} \end{aligned}$$

### 5.3 การทดสอบแรงดึงและแผนภาพของความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม

การทดสอบแรงดึง (Tensile test) ใช้สำหรับการประเมินความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสมด้วยการใช้วิธีดึงจนขาดในช่วงเวลาสั้น ๆ ด้วยอัตราคงที่ สารตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะแตกต่างกันไปสำหรับโลหะอาจทำเป็นแผ่น หรืออาจทำเป็นแท่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 นิ้ว และใช้ gage length 2 นิ้ว ดังรูปที่ 5.7 ข้อมูลของแรงสามารถหาได้จากกราฟของการทดสอบแรงดึง ซึ่งเป็นกราฟระหว่างความเค้นทางวิศวกรรมกับความเครียดทางวิศวกรรม ดังรูปที่ 5.8 จะสามารถหา Tensile strength ได้



รูปที่ 5.6 แสดงภาพง่าย ๆ ของเครื่องมือที่ใช้ทดสอบแรงดึง ซึ่งเป็นการดึงลง

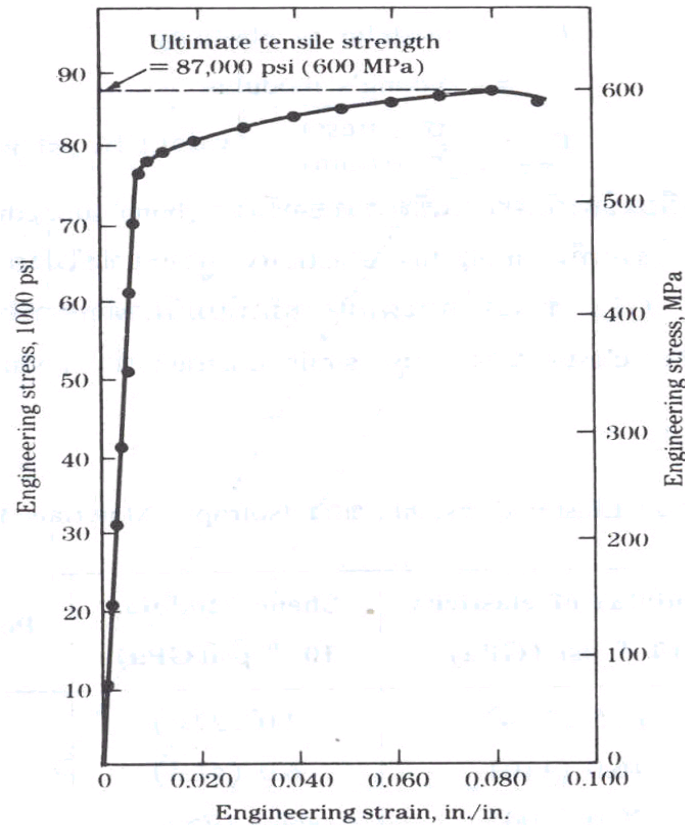


(a)

(b)

รูปที่ 5.7 แสดงตัวอย่างของขนาดที่จะใช้ทดสอบแรงดึง

- (a) ขนาดมาตรฐานที่มีลักษณะกลม gage length ยาว 2 นิ้ว
- (b) ขนาดมาตรฐานที่มีลักษณะเป็นแผ่น gage length ยาว 2 นิ้ว



รูปที่ 5.8 แสดงลักษณะของกราฟ stress-strain diagram จากการทดสอบ strength ของโลหะผสมอะลูมิเนียม (7075-T6) ขนาดเพลต 5/8 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 นิ้ว และใช้ gage length 2 นิ้ว

ข้อมูลสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบแรงดึงและแผนภาพความเค้น-ความเค้นทางวิศวกรรม สมบัติเชิงกลของโลหะและโลหะผสมเป็นเรื่องที่สำคัญสำหรับวิศวกรในการออกแบบโครงสร้าง ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงดึง มีดังนี้

1. Modulus of elasticity
2. Yield strength ที่วัดได้จาก 0.2% offset
3. Ultimate tensile strength
4. Percent elongation at fracture
5. Percent reduction in area at fracture

### Modulus of Elasticity

เป็นการทดสอบของการเปลี่ยนรูปว่าจะสามารถเปลี่ยนกลับมารูปเดิมได้หรือไม่สำหรับโลหะ maximum, elastic deformation มักจะมีน้อยกว่า 0.5% โดยทั่วไปโลหะและโลหะผสมจะแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นแบบเส้นตรงของความเค้นและความเครียดในช่วงของ elastic ของ engineering stress-strain diagram ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วย Hook's law ดังรูปที่ 5.8

Hook's law ได้อธิบายไว้ดังนี้

$$\begin{aligned} \sigma \text{ (stress)} &= E \epsilon \text{ (strain)} \\ E &= \text{modulus of elasticity} \\ &= \text{Young's modulus} \\ E &= \frac{\sigma \text{ (stress)}}{\epsilon \text{ (strain)}} \quad (\text{หน่วยเป็น psi หรือ Pa}) \end{aligned}$$

Modulus elasticity นี้จะเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของพันธะ (bond strength) ระหว่างอะตอมของโลหะหรือโลหะผสม (ดูตารางที่ 5.1) โลหะที่มี modulus elasticity สูงจะแข็ง ไม่มือง่าย เช่น เหล็กกล้า มีค่า elastic modulus  $30 \times 10^6$  psi (207 GPa) ขณะที่โลหะผสมอะลูมิเนียมมีค่าต่ำกว่าประมาณ  $10 - 11 \times 10^6$  psi. (69-76 GPa) โปรดสังเกตุว่าในช่วง elastic ของ stress strain diagram ค่า modulus จะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อ stress เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าของ Elastic Constants ของ Isotropic Materials ที่อุณหภูมิห้อง

Materials	Modulus of elasticity $10^6$ psi (GPa)	Shear Modulus $10^6$ psi (GPa)	Poisson's ratio
Aluminium alloys	10.5 (72.4)	4.0 (27.5)	0.31
Copper	16.0 (110)	6.0 (41.4)	0.33
Steel	29.0 (200)	11.0 (75.8)	0.33
Stainless steel	28.0 (193)	9.5 (65.6)	0.28
Titanium	17.0 (117)	6.5 (44.8)	0.31
Tungsten	58.0 (400)	22.8 (157)	0.27

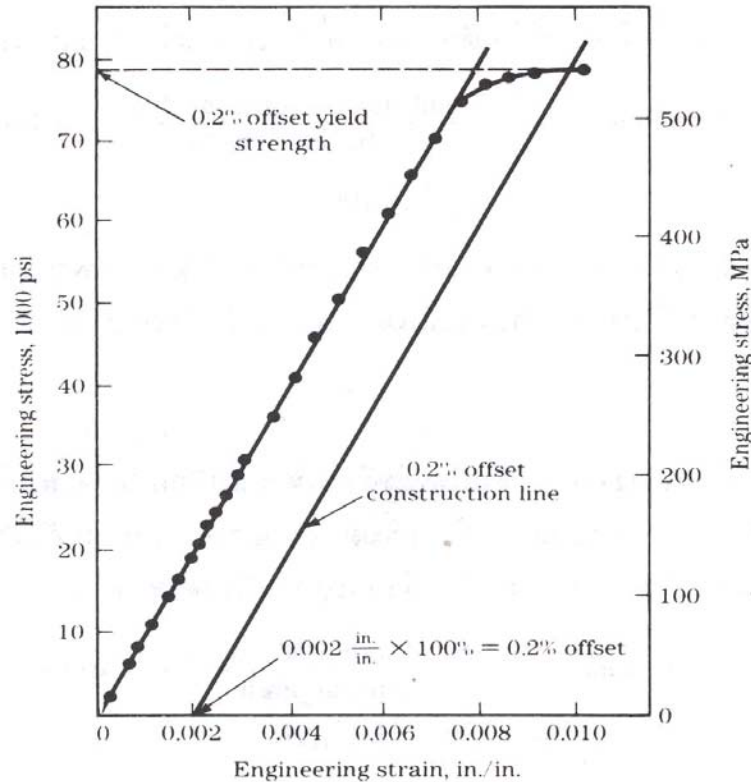
### Yield Strength

เป็นค่าที่มีความสำคัญที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างของวิศวกร เพราะมันเป็นค่าความแข็งแรงของโลหะหรือโลหะผสมที่สำคัญต่อการเปลี่ยนรูปที่จะเกิดขึ้นอย่างถาวร จาก stress-strain curve ไม่มีจุดที่แน่นอนที่แสดงให้เห็นถึงจุดที่ elastic strain สิ้นสุด และ plastic strain เริ่มต้น จึงได้เลือกเอา yield strength เป็นความแข็งแรงของโลหะ หรือโลหะเมื่อมีปริมาณ plastic strain เกิดขึ้นจำนวนหนึ่งแน่นอน สำหรับการออกแบบโครงสร้างของวิศวกรอเมริกัน ได้กำหนดให้ 0.2% ของ plastic strain ที่เกิดขึ้นใน stress-strain diagram ตามรูปที่ 5.9

0.2% yield strength นี้อาจเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า 0.2% offset yield strength แต่ในอังกฤษใช้ 0.1% offset การหา yield strength ให้ลากเส้นตรงขนานกับเส้น stress-strain diagram ดังรูปที่ 5.9 ตรงจุด 0.002 นิ้ว/นิ้ว (เมตร/เมตร) ไปตัด curve ข้างบนจะได้ yield strength 78000 psi

### Ultimate Tensile Strength

เป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ โดยพิจารณาจาก engineering stress-strain curve ดังรูปที่ 5.8 ถ้าตัวอย่างวัสดุซึ่งอาจเป็นโลหะหรือโลหะผสมไปดึง จะเห็นว่าตรงกลางจะเล็กลง เกิดเป็นคอคอด (necking) และถ้าดึงต่อไปความเค้นทางวิศวกรรมจะลดลง เมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น ในที่สุดก็จะขาด ความเค้นทางวิศวกรรมหาได้จากพื้นที่หน้าตัดเดิม ( $A_0$ ) ของตัวอย่าง



รูปที่ 5.9 แสดง Engineering stress-strain diagram ซึ่งจะได้กราฟเส้นตรงซึ่งขยายจากรูป 5.8 ทำให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้นในการหา 0.2% offset

จากรูปที่ 5.9 Ultimate tensile strength หาได้โดยการลากเส้นขนานกับแกน strain ของ stress-strain curve จากจุดสูงสุดไปตัดแกน stress จะได้ค่า ultimate tensile strength บางครั้งเรียกว่า tensile strength จากรูปที่ 5.8 แสดง ultimate tensile strength ของโลหะผสมอะลูมิเนียมซึ่งมีค่า 87000 psi

ค่านี้ไม่ค่อยได้ใช้มากนักสำหรับยานออกแบบก่อสร้างโดยเฉพาะโลหะอ่อน (ductile alloy) เนื่องจากมีการเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปอย่างถาวรขึ้นอย่างมาก ก่อนที่จะถึง ultimate tensile strength อย่างไรก็ตาม ultimate tensile strength สามารถบ่งชี้ได้ว่าโลหะนั้นมีความสมบูรณ์หรือไม่ ถ้าโลหะนั้นมีโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ เช่น มีรูพรุน จะทำให้ค่า strength ลดลง

#### Percent Elongation (% ความยืด)

ปริมาณความยืดที่เกิดจากการนำตัวอย่างไปดึง เป็นค่าที่ใช้บอกถึงความอ่อน (ductile) ของโลหะ ความอ่อนตัวของโลหะโดยทั่วไปแสดงด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความยืด (percent elongation) โดยเริ่มจาก gage length ที่ใช้กันคือ 2.0 นิ้ว (5.1 cm) ดังรูปที่ 5.7 โดยทั่วไปโลหะใดยิ่งอ่อน ยิ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดมาก แสดงว่าโลหะนั้นเปลี่ยนรูปมาก สำหรับโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่เป็นแผ่นหนา 0.062 นิ้ว (1.6 mm) จะมี % elongation สูงถึง 35% แต่ถ้าเป็น aluminum alloy (high strength) 7075 – T6 ที่หนาเท่ากัน จะมี % elongation เพียง 11% ความยาวของโลหะที่ยืดออกสามารถวัดได้ด้วย extensometer หรืออาจจะวัดด้วย calipers เปอร์เซ็นต์ความยืดสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \% \text{ elongation} &= \frac{\text{Final length} - \text{Initial length}}{\text{Initial length}} \times 100\% \\ &= \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \end{aligned}$$

% elongation ณ จุดที่ขาดมีความสำคัญทางด้านวิศวกรรมมาก เพราะนอกจากจะทำให้ทราบว่าโลหะนั้นอ่อนเพียงใด ยังเป็นดัชนีที่ชี้ให้เห็นว่า โลหะนั้นมีคุณภาพอย่างไรด้วย โดยที่ % elongation ต่ำกว่าปกติ

### Percent reduction in area

พวกโลหะหรือโลหะผสมที่อ่อนอาจแสดงได้ด้วยค่า % reduction in area ตามปกติค่านี้ได้จากการทำการทดสอบแรงดึง โดยเริ่มต้นด้วยตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 นิ้ว (12.7 มม.) เมื่อถึงจนขาด วัดเส้นผ่านศูนย์กลางอีกครั้งหนึ่งก็จะหาค่านี้ได้ตั้งสมการ

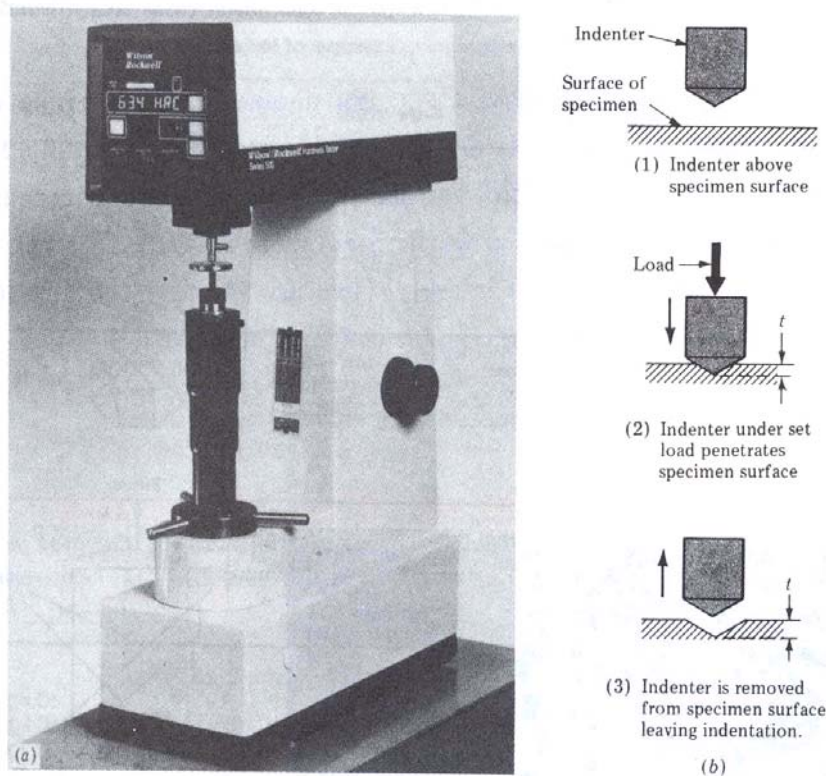
$$\begin{aligned} \% \text{ reduction in area} &= \frac{\text{initial area} - \text{final area}}{\text{initial area}} \times 100\% \\ &= \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \end{aligned}$$

% area reduction นี้จะลดลงเมื่อโลหะมี defect เช่น โลหะมีความพรุน เป็นต้น ซึ่งเหมือนกับ % elongation

**ตัวอย่างที่ 5.7** เส้นลวดเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.500 นิ้ว ถูกดึงจนขาด ปรากฏว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตรงลวดขาดเป็น 0.343 นิ้ว จงหา % reduction in area ของตัวอย่างนี้

$$\begin{aligned} \therefore \% \text{ reduction in area} &= \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \\ &= 1 - \frac{A_f}{A_0} \times 100\% \\ &= 1 - \frac{\left(\frac{\pi}{4}\right)(0.343)^2}{\left(\frac{\pi}{4}\right)(0.500)^2} \times 100\% \\ &= 53\% \end{aligned}$$





รูปที่ 5.10 (a) แสดง Rock well hardness tester

(b) แสดงวิธีการวัด hardness ด้วย diamond-cone indenter ความลึก ( $t$ ) ใช้หาความแข็งของวัสดุ ถ้า  $t$  น้อย แสดงว่าวัสดุนั้นแข็งกว่า

#### 5.4 ความแข็งและการทดสอบความแข็ง

ความแข็งแรงของโลหะเป็นการวัดความต่อต้าน (resistance) ของโลหะที่จะต้องเปลี่ยนรูปร่างไปอย่างถาวร (plastic deformation) การทดสอบความแข็งของวัสดุนั้น ใช้วิธีกดวัสดุที่มีลักษณะแข็งกว่า เช่น เหล็กแข็ง ทังสเตนคาร์ไบด์ เพชร เป็นต้น โดยทำเป็นรูปร่างต่าง ๆ กัน เช่น ทำเป็นรูปกลม พีระมิด หรือโคน เมื่อกดตัวกด (indenter) ลงไปในวัสดุที่ทดสอบเป็นมุม  $90^{\circ}$  ลงไปอย่างช้า ๆ แล้ววัดรอยเว้าที่เกิดขึ้น ก็จะสามารถหาความแข็งได้ รูปที่ 5.10 ความแข็งของโลหะจะมีค่าเท่าไร ขึ้นอยู่กับความยากง่ายของการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุนั้น การทดสอบความแข็งของวัสดุนั้นทำได้ง่ายกว่าการหาความแข็งแรงของวัสดุ

#### 5.5 การเกิดรอยแตกของโลหะ

การเกิดรอยแตกของโลหะเป็นการแยกหรือการแตกของของแข็ง ออกเป็นหลาย ๆ ส่วนเมื่อมีความเค้น โดยทั่วไปการเกิดรอยแตกของโลหะ แบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือ

1. การเกิดรอยแตกของโลหะอ่อน (Ductile fracture) เกิดขึ้นหลังจากที่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรด้วยการดึง ถ้าความเค้นเกิดขึ้นกับตัวอย่าง (specimen) เกิน ultimate tensile strength เป็นเวลานานพอควร จะทำให้โลหะเกิดรอยแตกขึ้น ซึ่งมีลักษณะที่เห็นได้ชัด 3 ลักษณะด้วยกันคือ

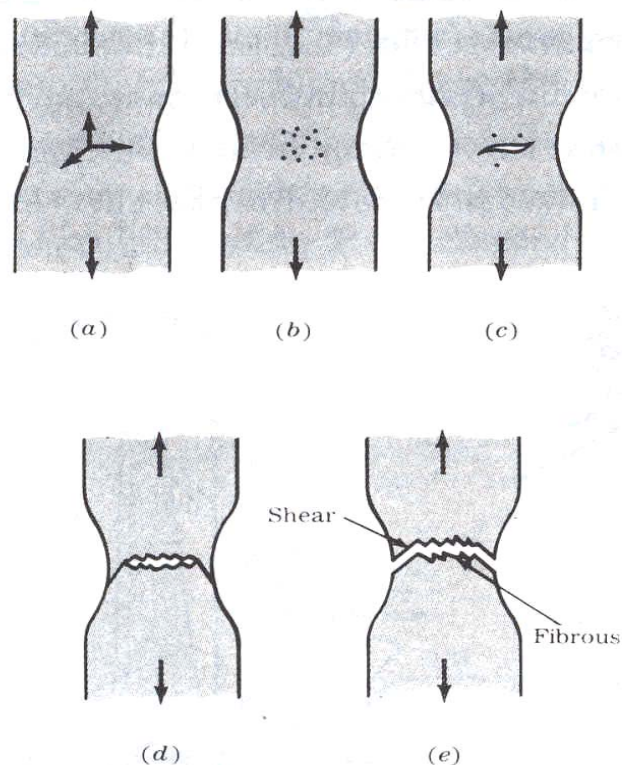
1.1 มีลักษณะเว้าเข้าไปและมีช่องว่างเกิดขึ้นที่บริเวณนั้น (ดังรูป 5.11 a และ b)

- 1.2 ช่องว่างที่เกิดขึ้นรวมตัวกันมากขึ้นเป็นรอยแตกที่ตรงกลาง แล้วมาสู่ผิวของตัวอย่าง เป็นแนวตั้งฉากกับทิศทางของแรงดึง (ดังรูป 5.11 c)
- 1.3 เมื่อรอยแตกดำเนินมาใกล้กับผิว ทิศทางจะเปลี่ยนไปเป็นมุม 45 องศา ทำให้เกิดแตกออกเป็นพื้นปลาชิ้น (cup and cone results) (ดังแสดงในรูปที่ 5.11 d และ e)

2. การเกิดรอยแตกของโลหะแข็ง (Brittle fracture) มีโลหะและโลหะผสมหลายชนิดที่มีการเกิดรอยแตกแบบนี้ คือมีลักษณะเฉพาะของการเกิดรอยแตกตามระนาบของผลึกที่เรียกว่า cleavage planes แม้จะเกิดการเปลี่ยนรูปเพียงเล็กน้อย เช่น โลหะที่มีโครงสร้างของผลึกเป็น HCP เมื่อเกิดรอยแตกจะเป็นการแตกชนิดนี้ และโลหะอีกหลายชนิดที่มีโครงสร้างเป็น BCC เช่น เหล็ก  $\alpha$ , โมลิบดีนัม และทังสเตนก็มีการแตกแบบเดียวกัน การเกิดรอยแตกของโลหะแข็ง มีขั้นตอนของการเกิดรอยแตก 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

- 2.1 การเปลี่ยนรูปอย่างถาวรจะเกิดขึ้นตาม slip plane ที่ถูกขวางกั้น
- 2.2 ความเค้นเฉือนจะถูกสะสมมากขึ้นที่ slip plane ถูกขวางกั้น ก่อให้เกิดรอยแตกเล็ก ๆ ขึ้นมาก่อน
- 2.3 เมื่อความเค้นดำเนินต่อไป การเกิดรอยแตกเล็ก ๆ จะเกิดมากขึ้นจนเป็นรอยแตกเกิดขึ้น

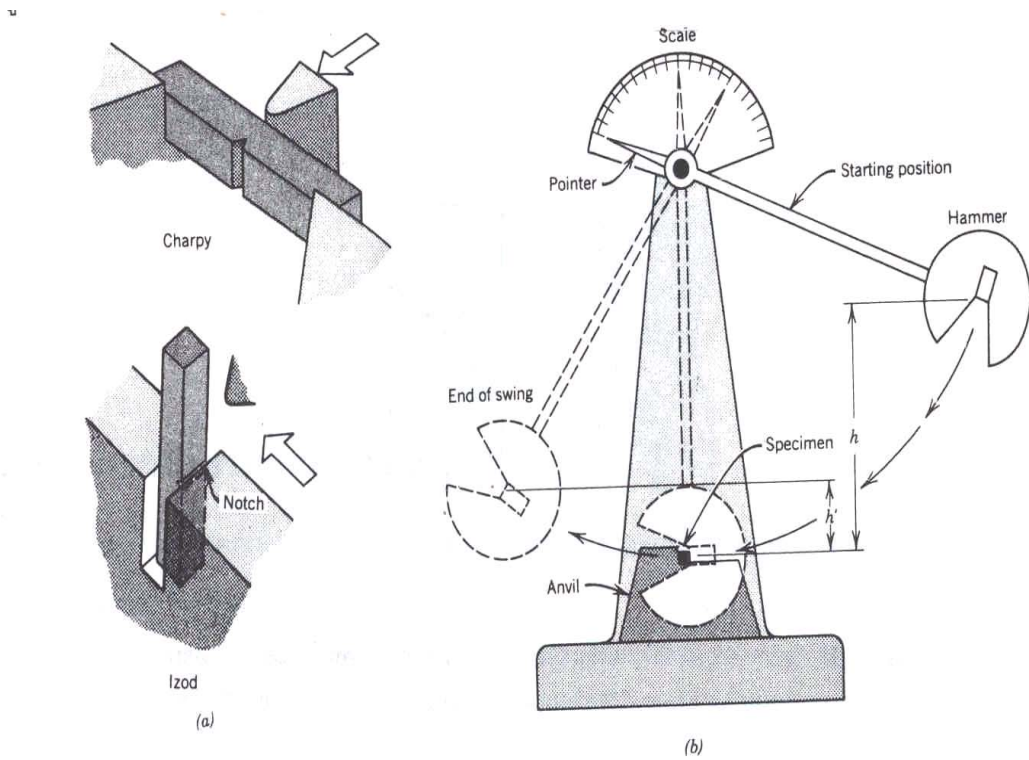
การเกิดรอยแตกนี้อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบ คือถ้าอุณหภูมิต่ำและมีความเครียดสูง ขอบที่จะเกิดรอยแตกเป็นแบบ brittle fracture รวมทั้งที่บริเวณมีรอยบาก (notch) ด้วย



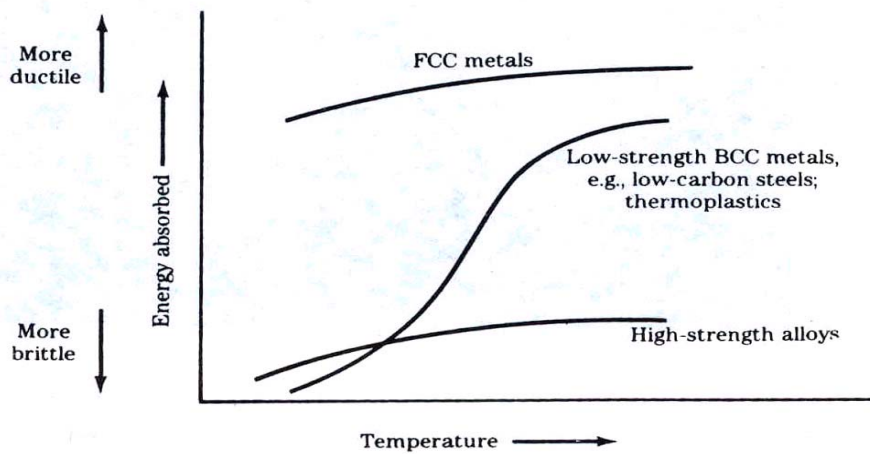
รูปที่ 5.11 แสดงลักษณะหรือขั้นตอนของการเกิดรอยแตกเป็นพื้นปลาชิ้นของโลหะอ่อน

**5.6 ความแข็งแรงหรือความเหนียวของวัสดุ และการทดสอบต่อแรงกระแทก**

ความแข็งแรงหรือความเหนียวของวัสดุ (Toughness) เป็นสมบัติของวัสดุอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนปริมาณพลังงานของวัสดุนั้นจะเป็นไปได้มากน้อยเพียงใดก่อนจะเกิดการแตกหัก ซึ่งนับว่ามีความสำคัญมากต่องานทางด้านวิศวกรรม โดยพิจารณาจากความทนทานต่อแรงกระแทก (impact) โดยไม่เกิดการแตกหัก วิธีวัดความแข็งแรงของวัสดุที่ง่ายที่สุดวิธีหนึ่ง คือใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทก (impact testing machine) ดังรูปที่ 5.12

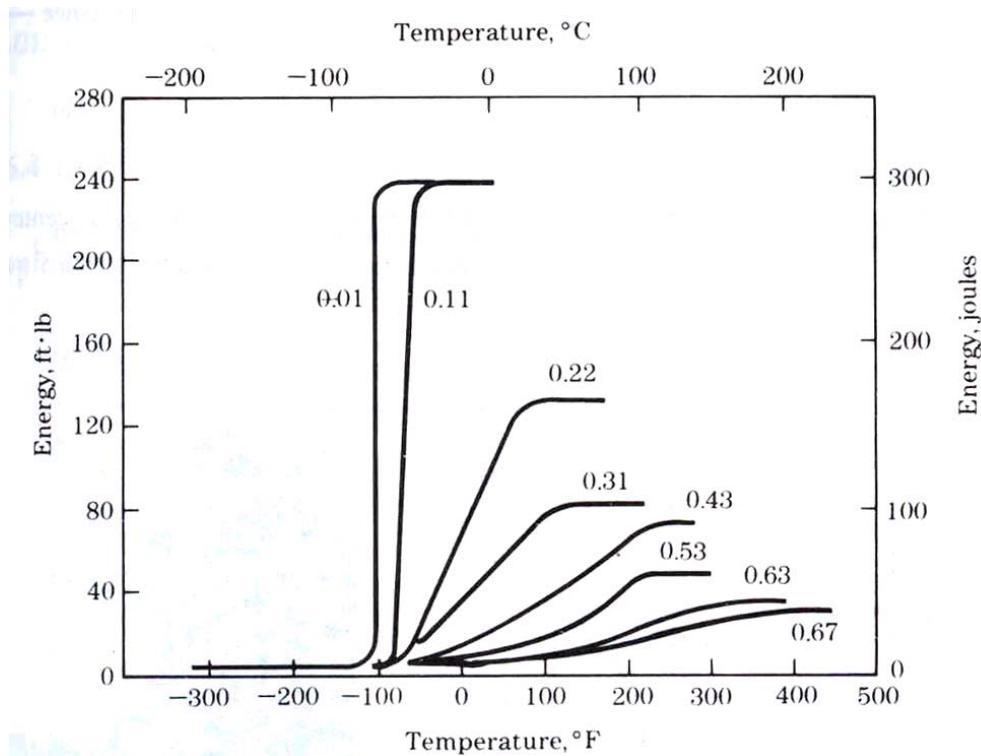


รูปที่ 5.12 แสดงการทดสอบแรงกระแทก (a) แสดงตัวอย่างที่ใช้ Charpy and Izod test (b) แสดงภาพวาดของเครื่องที่ใช้ทดสอบแรงกระแทก



รูปที่ 5.13 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการดูดกลืนพลังงานจากการทดสอบแรงกระแทกของวัสดุบางชนิด

รูปที่ 5.13 แสดงถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดกลืนพลังงานของวัสดุบางชนิด Impact test นี้สามารถนำมาใช้ทดสอบหาช่วงของอุณหภูมิของการเปลี่ยนสมบัติและพฤติกรรมของโลหะและโลหะผสมจากอ่อน (ductile) ไปเป็นแข็ง เพราะ นั่นคือ เหล็กอ่อนที่มีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นจะทำให้เหล็กแข็งมากขึ้น และดูดกลืนพลังงานน้อยลง ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง แต่ถ้ามีปริมาณคาร์บอนต่ำจะดูดกลืนพลังงานได้ดี คือเป็นเหล็กที่อ่อนหรือเหนียวขึ้น แต่เกิดในช่วงอุณหภูมิที่แคบ และเมื่อใช้อุณหภูมิต่ำ ๆ การทดสอบ Fracture toughness ของโลหะและโลหะผสมได้มีการพัฒนาวิธีทดสอบที่ซับซ้อนอื่น ๆ อีก



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงผลของปริมาณของคาร์บอนที่มีต่อ impact energy และอุณหภูมิสำหรับเหล็กที่ทำให้ร้อนขึ้น

## 6. วัสดุพอลิเมอร์

### 6.1 ความหมายและประเภทของพอลิเมอร์

คำว่า "พอลิเมอร์" (Polymer) ตามคำศัพท์แล้วแปลว่า หลายส่วน (Many parts) คำว่า Poly แปลว่ามากหรือหลายอย่าง ดังนั้นวัสดุพอลิเมอร์อาจจะพิจารณาได้ว่าเป็นสารที่ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ หรือหน่วยต่าง ๆ เข้าด้วยกันด้วยพันธะเคมีกลายเป็นของแข็ง ในที่นี้จะกล่าวถึงชนิดต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ (รูปที่ 6.1) การทำพอลิเมอร์ในทางเคมี ลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ สมบัติต่าง ๆ กระบวนการเตรียม เทคนิคต่าง ๆ ในการขึ้นรูป การประยุกต์ของพอลิเมอร์ในทางอุตสาหกรรมและวิศวกรรมตลอดจนผลกระทบต่าง ๆ ต่อความแข็งแรงและการเสริมความแข็งแรงของพอลิเมอร์ แต่พอลิเมอร์ที่มีความสำคัญต่อการประยุกต์ทางอุตสาหกรรมและผู้ใช้ อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. พลาสติก (Plastics)
2. อีลาสโตเมอร์ (Elastomers) หรือพวกยาง (Rubber)

พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์กลุ่มใหญ่และอาจมีหมู่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกัน ซึ่งอาจทำให้รวมตัวกันหรือเข้าแบบให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ พลาสติกมีหลายแบบ เช่น พอลิเอทิลีน และไนลอน เป็นต้น

พลาสติกที่แบ่งออกเป็น 2 ประเภทนั้นขึ้นอยู่กับพันธะเคมีที่กระทำกันได้ออกมาเป็นโครงสร้าง และมีลักษณะเฉพาะเมื่อทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และเทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting plastic) ส่วนอีลาสโตเมอร์หรือยางเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะยืดหยุ่น (elastical) ได้มากเมื่อออกแรงดึงและจะกลับมาอยู่ในสภาพเดิมเมื่อปล่อยแรงดึง

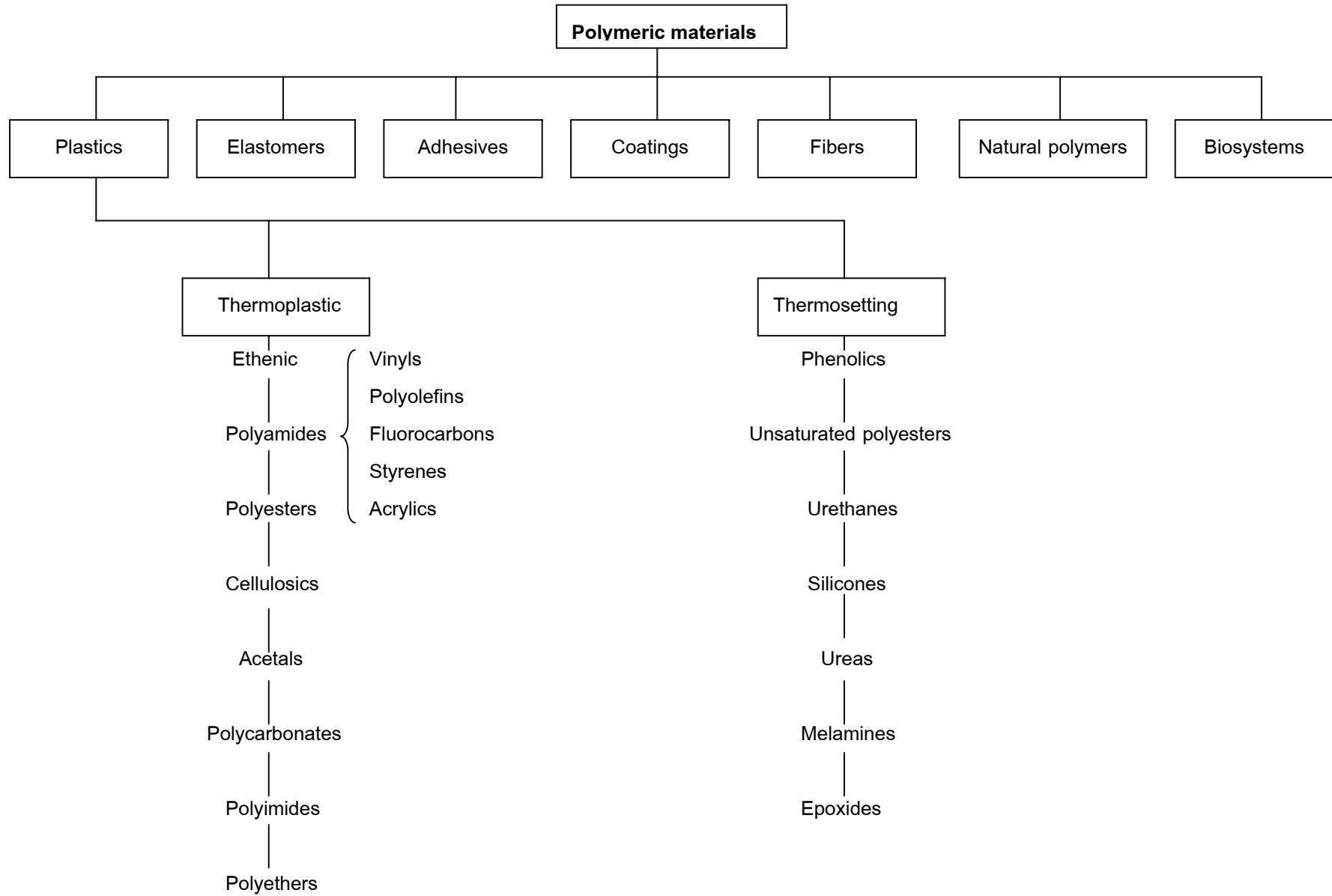
**Thermoplastics** เป็นพลาสติกที่สามารถทำให้หลอมเหลวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยความร้อน และจะแข็งตัวเมื่อทำให้เย็น พลาสติกพวกนี้จึงสามารถ recycle ได้ตลอดโดยสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง เทอร์โมพลาสติกโดยมากประกอบด้วยพวก long chain carbon atoms ที่เกิดพันธะโคเวเลนต์เข้าด้วยกัน บางครั้งอาจมีธาตุไนโตรเจน ออกซิเจน หรือกำมะถัน เข้าไปเกิดพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลต่อโมเลกุลจะเกิดพันธะทุติยภูมิ (secondary bonds) กันอีกด้วย

**Thermosetting plastic (Thermosets)** เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถทำให้หลอมเหลวได้ด้วยความร้อน พลาสติกชนิดนี้จะคงรูปร่างถาวรด้วยการบ่ม "set" หรือ "cured" ด้วยปฏิกิริยาเคมีหรือด้วยความร้อน เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการสลายตัวหรือไหม้ได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถทำ recycle กับพลาสติกชนิดนี้ได้ โดยมาก Thermosetting plastics ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมที่เกิดพันธะโคเวเลนต์เข้าด้วยกันเป็นโครงข่าย (network) ได้เป็นของแข็ง บางครั้งในโครงข่ายนั้นจะมีอะตอมของธาตุไนโตรเจน ออกซิเจน กำมะถัน หรืออะตอมอื่น ๆ เข้าไปเกิดพันธะโคเวเลนต์ร่วมด้วย

พลาสติกเป็นวัสดุวิศวกรรมที่สำคัญหลายประการด้วยกัน เพราะมันมีสมบัติกว้างขวางมาก บางชนิดอาจจะไม่มีวัสดุอื่นเสมอเหมือน และโดยทั่วไปพลาสติกจะมีราคาค่อนข้างต่ำ พลาสติกยังมีข้อได้เปรียบอีกหลายอย่างที่วิศวกรเครื่องกลนำไปใช้ออกแบบ เพื่อลดการใช้ชิ้นส่วนบางอย่าง ลดขั้นตอนการทำงานโดยทำให้ง่ายต่อการประกอบ ลดน้ำหนัก ลดเสียงดังและบางกรณีช่วยลดเรื่องของการหล่อลื่น บางชิ้นส่วนพลาสติกยังมีประโยชน์อีกมากมายต่อการออก

แบบใช้งานทางไฟฟ้า เพราะพลาสติกเป็นฉนวนที่ดีเยี่ยม ทางอิเล็กทรอนิกส์ใช้ทำตัวเชื่อมต่อ (connectors) สวิตช์ รีเลย์ ทำชิ้นส่วนของทีวี รูปแบบขดลวด ทำแผงวงจรไฟฟ้า และทำชิ้นส่วนของเครื่องคอมพิวเตอร์

ปริมาณการใช้พลาสติกในทางอุตสาหกรรมได้เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนว่าอุตสาหกรรมใช้พลาสติกมากขึ้น คืออุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ ของเล่น ของใช้ในบ้าน เป็นต้น ต่อไปนี้จะกล่าวถึง โครงสร้าง สมบัติ และการประยุกต์ของพลาสติกและอีลาสโตเมอร์



รูปที่ 6.1 แสดงชนิดต่าง ๆ ของวัสดุพอลิเมอร์ และชนิดต่าง ๆ ที่สำคัญของพลาสติก

## 6.2 ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชัน

เทอร์โมพลาสติกส่วนมากได้จากการบวนการสังเคราะห์ โดยให้โมเลกุลเล็กๆ มาเชื่อมต่อกันเป็นลูกโซ่ (chain-growth polymerization) ด้วยพันธะโคเวเลนต์กลายเป็นโมเลกุลที่ยาวมาก ๆ โมเลกุลเริ่มต้นที่เล็กหรือง่าย ๆ (simple-molecules) ที่เรียกว่าโมโนเมอร์ (monomers) ซึ่งมาจากภาษากรีกว่า mono แปลว่าหนึ่งและ meros แปลว่าส่วน (part) โมเลกุลหรือโมโนเมอร์ที่มาต่อกันเป็นลูกโซ่ยาวนี้ เรียกว่า พอลิเมอร์ (polymer) ซึ่งมาจากภาษากรีกว่า polys แปลว่ามาก และ meros แปลว่าส่วน กระบวนการทางเคมีที่ทำให้เกิด long chain molecule นี้เรียกว่า chain-growth polymerization

## 6.3 ขั้นตอนการเกิดพอลิเมอไรเซชัน (Chain Polymerization Steps)

ปฏิกริยาที่ทำให้เกิด chain polymerization ของเอทิลีนโมโนเมอร์ ไปเป็น linear polymers คือ polyethylene สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

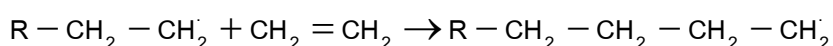
1. เกิด initiation
2. เกิด propagation
3. เกิด termination

### 1. Initiation

เป็นการเกิดปฏิกริยาเริ่มต้นเช่นเดียวกับปฏิกริยาทั้งหลายที่มีการใช้ตัวเร่ง (catalyst) ในกรณีของการเกิด polyethylene ใช้ organic peroxides (เปอร์ออกไซด์ที่เป็นสารอินทรีย์) เป็นตัวที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free-radical) ซึ่งหมายถึงกลุ่มของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนขาดคู่ หรืออิเล็กตรอนอิสระ (unpaired electron หรือ free electron) ทำให้สามารถเกิดพันธะโคเวเลนต์กับโมเลกุลอื่นที่มีอิเล็กตรอนขาดคู่เช่นเดียวกันได้

### 2. Propagation

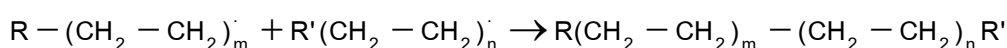
เป็นกระบวนการที่เกิด polymer chain ด้วยการที่โมโนเมอร์เข้าไปต่อกันเป็นหน่วยที่ใหญ่ขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่พันธะคู่ (double bond) หัวท้ายของโมเลกุลจะเปิดออกเพื่อให้ free radical เข้าเกิดพันธะโคเวเลนต์ต่อไป polymer chain จะเกิด polymerization ทำให้ chain ยาวขึ้น ๆ และพลังงานของระบบก็ต่ำลง ทำให้กระบวนการเกิดปฏิกริยาเป็นไปอย่างต่อเนื่อง นั่นคือผลรวมของพลังงานของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะต่ำกว่าผลรวมของพลังงานของโมโนเมอร์ที่ทำให้เกิดพอลิเมอร์ degree of polymerization (DP) ของพอลิเมอร์จะมีค่าแตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์ สำหรับพอลิเอทิลีนที่ขายกันอยู่ในปัจจุบันมีค่า DP เฉลี่ยอยู่ในช่วง 3500 – 25000



### 3. Termination

เป็นกระบวนการที่จะทำให้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันสิ้นสุดลง การเติมสาร Terminator เพื่อหยุดการเกิด free radical หรือให้ free radical chains ทั้งสองรวมกัน อีกวิธีหนึ่งนี้อาจทำให้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันสิ้นสุดได้ด้วยสารเจือปน (impurities) เพียงเล็กน้อย

ปฏิกริยาที่เกิดจาก 2 free radicals รวมตัวกันแล้วทำให้ปฏิกริยาสิ้นสุดลง เช่น





## 6.4 พอลิเมอร์เดี่ยวและพอลิเมอร์ผสม

### พอลิเมอร์เดี่ยว (Homopolymers)

เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ชนิดเดียวหรือเป็นพอลิเมอร์ที่โครงสร้างประกอบด้วยหน่วยย่อยเพียงอย่างเดียว ถ้า A เป็นโมโนเมอร์ ดังนั้นโมเลกุลของพอลิเมอร์เดี่ยวจะเป็น AAAAAA...

### พอลิเมอร์ผสม (Copolymers)

เป็นพอลิเมอร์ที่โมเลกุลของมัน หรือโครงสร้างของมันประกอบด้วยโมโนเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาต่อกันเข้าด้วยกันในรูปแบบต่างๆ กัน พอลิเมอร์ผสมมีแบบต่างกันอยู่ 4 แบบ คือ

1. Random copolymers เป็นพอลิเมอร์ผสมโมโนเมอร์แต่ละชนิดมาต่อกันเป็นแบบไม่แน่นอน เช่น ถ้า A และ B เป็นโมโนเมอร์ที่ต่างกัน 2 ชนิด การเรียงตัวของมันจะเป็นแบบ

AABABBBBAABABAAB...

2. Alternating copolymers เป็นพอลิเมอร์ผสมที่เกิดจากโมโนเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาเรียงต่อกันเป็นพอลิเมอร์แบบสลับกัน เช่น

ABABABABAB...

3. Block copolymers เป็นพอลิเมอร์ผสมที่เกิดจากโมโนเมอร์แต่ละชนิดมาต่อกันเป็นแบบช่วงยาว ๆ (long block) เช่น

AAAAA-BBBBBB...

4. Graft copolymers เป็นพอลิเมอร์ผสมที่เกิดจากโมโนเมอร์ที่มาต่อกันเป็นโซ่ยาวแล้วมีกิ่งก้าน เช่น

AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA

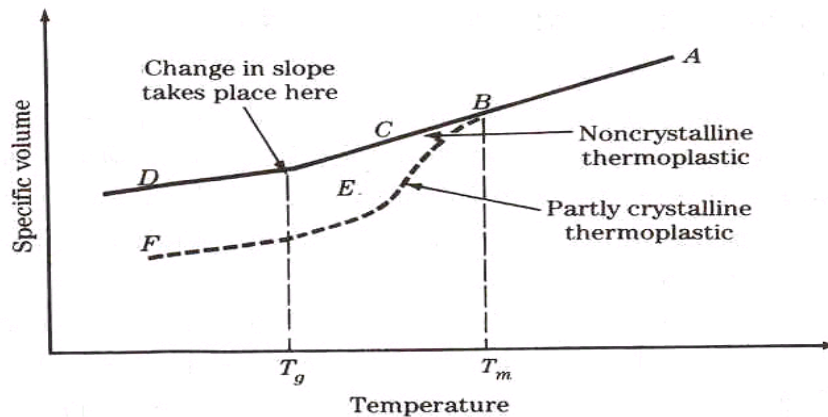
B	B
B	B
B	B

## 6.5 การเกิดผลึกและเสตอริโอไอโซเมอร์ในเทอร์โมพลาสติกบางชนิด

เทอร์โมพลาสติกเหลวเมื่อแข็งตัวจะกลายเป็นของแข็งที่มีบางส่วนเป็นพวกไม่มีรูปร่างผลึกหรืออสัณฐาน และบางส่วนเป็นผลึก ต่อไปนี้จะได้ทำการตรวจสอบดูว่าการแข็งตัวของวัสดุพวกนี้มีลักษณะโครงสร้างเฉพาะอย่างไร

ถ้านำเทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีรูปร่างผลึกและเป็นของเหลวมาทำให้เย็นลงอย่างช้า ๆ การแข็งตัวของมันจะไปทำให้ค่าปริมาตรจำเพาะ (specific volume ปริมาตร/หน่วยมวล) ลดลงอย่างทันทีทันใด แต่ (ดังรูปที่ 6.2) ของเหลวนั้นจะกลายเป็นของเหลวเย็นยิ่งยวด (supercooled liquid) ซึ่งมีค่าปริมาตรจำเพาะจะค่อย ๆ ลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงดังแสดงด้วยเส้น ABC ในรูปที่ 6.2 ในขณะที่อุณหภูมิลดลง ๆ การเปลี่ยนแปลงของความชันของค่าปริมาตรจำเพาะต่ออุณหภูมิ ดังแสดงด้วยเส้น C และ D ของ curve ABCD อุณหภูมิเฉลี่ยตรงที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันนั้น คืออุณหภูมิที่พลาสติกเปลี่ยนเป็นพลาสติกที่มีรูปร่างผลึกที่เรียกว่า glass transition temperature ( $T_g$ ) เหนือจุด  $T_g$  เทอร์โมพลาสติกที่ไม่มีรูปร่างผลึกจะมีลักษณะเป็นของเหลวข้น (viscous) และถ้าต่ำกว่าจุด  $T_g$  วัสดุพลาสติกนี้จะแสดงลักษณะเปราะเหมือนแก้ว (glass brittle) ในบางกรณี  $T_g$  อาจจะใช้พิจารณาถึงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงความเหนียว-เปราะของวัสดุได้ ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  วัสดุนั้นจะมีลักษณะเปราะคล้ายแก้ว เพราะการเคลื่อนไหวของโมเลกุลจะเป็นระเบียบแน่นอน รูปที่ 6.2 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการเขียนกราฟระหว่างค่าปริมาตรจำเพาะกับอุณหภูมิของพอลิเอทิลีนที่ไม่มีรูปร่างผลึก

ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความชันของ curve ที่  $T_g$  อยู่ที่  $-12^{\circ}\text{C}$  และตารางที่ 6.1 เป็นค่า  $T_g$  ของเทอร์โมพลาสติกบางชนิด



**รูปที่ 6.2** แสดงการแข็งตัวและการทำให้เย็นลงของเทอร์โมพลาสติกที่ไม่เป็นผลึก (non crystalline) และที่เป็นผลึกบางส่วน (crystalline) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาตรจำเพาะที่อุณหภูมิต่าง ๆ  $T_g$  เป็น glass transition temperature และ  $T_m$  เป็นอุณหภูมิที่เกิดการหลอมเหลว การเย็นตัวของเทอร์โมพลาสติกจะเป็นไปตามเส้น ABCD เมื่อ A = ของเหลว B = ของเหลวข้นมาก C = ของเหลวเย็นยิ่งยวด และ D = ของแข็งคล้ายแก้ว (แข็งและเปราะ) สำหรับเทอร์โมพลาสติกที่เป็นผลึกบางส่วนจะเย็นตัวลงตามเส้น ABEF เมื่อ E = บริเวณที่เป็นผลึกแข็งอยู่ในของเหลวเย็นยิ่งยวด และ F = บริเวณที่เป็นผลึกแข็งอยู่ในลักษณะคล้ายแก้ว

## 6.6 กระบวนการผลิตวัสดุพลาสติก

กระบวนการผลิตวัสดุสำเร็จรูปให้ออกมาเป็นแผ่น เป็นแท่ง หรือให้มีรูปร่างต่าง ๆ จากเม็ดพลาสติกนั้น ทำได้หลายวิธี เช่น ใช้กระบวนการอัดฉีดเข้าไปในแบบหรือทำออกมาเป็นท่อ การจะใช้กระบวนการใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก คือเป็นเทอร์โมพลาสติกหรือเทอร์โมเซตติงพลาสติก สำหรับเทอร์โมพลาสติกจะใช้วิธีทำให้ร้อนจนอ่อนตัวลงหรือเหลวแล้วจึงอัดฉีดเข้าไปในแบบให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ กันก่อนที่จะเย็นตัวลง แต่ถ้าเป็นเทอร์โมเซตติงพลาสติกจะใช้กระบวนการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเชื่อมโยงเป็นโครงข่ายแล้วเข้าไปในแบบเป็นรูปร่างตามที่ต้องการก่อนที่กระบวนการพอลิเมอไรเซชันจะสิ้นสุดลง และขั้นสุดท้ายของการเกิดพอลิเมอไรเซชันก็คือ การให้ความร้อนหรือความกดดันหรือใช้ตัวเร่งที่อุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิสูงขึ้น

ต่อไปนี้จะเน้นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตติงพลาสติก

### กระบวนการที่ใช้ผลิตวัสดุเทอร์โมพลาสติก

#### 1. การฉีดเข้าไปในแบบ (Injection molding)

วิธีการนี้นับว่าเป็นสิ่งสำคัญที่สุดที่ใช้ผลิตวัสดุสำเร็จรูปของวัสดุเทอร์โมพลาสติก เครื่องที่ทันสมัยใช้ reciprocating-screw เป็นตัวพาพลาสติกที่หลอมเหลวแล้วฉีดเข้าไปในแบบ

ในกระบวนการผลิตด้วยการฉีดพลาสติกเหลวเข้าไปในแบบนี้ เม็ดพลาสติกจะถูกส่งลงมาจากถังใส่ (hopper) เข้าไปยังกระบอกลูกฉีดซึ่งมีสกรูหมุนไปรอบ ๆ พร้อมกันนั้น เม็ดพลาสติกจะถูกทำให้ร้อนจนหลอมเหลว เมื่อพลาสติกเหลวที่ปลายสกรูมีมากพอ สกรูจะหยุดหมุน แต่จะทำหน้าที่เป็นตัวอัดฉีดจากช่องออกเข้าสู่แบบ ในเวลาสั้นและให้ความดันคงที่จนพลาสติกแข็งตัว สกรูจะถอยออกมา แบบที่ใช้หล่อจะมีน้ำเย็นเข้าไปหล่อ เพื่อให้พลาสติกแข็งตัวเร็ว ขึ้น

สุดท้ายแบบจะเปิดออก พลาสติกจะหลุดออกมาจากแบบด้วยการใช้อากาศหรือสปริงดันออกมา แล้วแบบก็จะประกอบเข้าไปใหม่พร้อมที่จะอัดฉีดต่อไป

ข้อดีของกระบวนการผลิตโดยวิธีนี้คือ

1. ชิ้นงานหรืออุปกรณ์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพดีและสามารถผลิตได้รวดเร็ว
2. เป็นกระบวนการผลิตที่มีค่าแรงถูก
3. ผิวของอุปกรณ์ที่ผลิตได้จะมีสภาพดี
4. กระบวนการนี้สามารถผลิตแบบอัตโนมัติได้
5. ชิ้นงานที่มีลักษณะยุ่งยากซับซ้อน สามารถผลิตได้โดยวิธีนี้

ข้อเสียของวิธีนี้คือ

1. เครื่องจักรมีราคาแพงมาก จึงต้องผลิตครั้งละมาก ๆ
2. เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีจะต้องควบคุมกระบวนการค่อนข้างใกล้ชิด

## 2. กระบวนการอัดรีด (Extrusion)

เป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญอีกวิธีหนึ่งสำหรับใช้กับเทอร์โมพลาสติก กระบวนการนี้โดยมากใช้ผลิตพวกท่อ แท่ง เป็นฟิล์มและแผ่นพลาสติกหรือผลิตเป็นรูปแบบอย่างอื่น เครื่องอัดรีดอาจใช้ทำวัตถุที่เป็นพลาสติกผสมให้ออกมา มีรูปร่างต่าง ๆ กันเช่น ทำเม็ดและใช้กับพวกพลาสติกที่ใช้แล้ว

ในกระบวนการอัดรีดพลาสติกนี้เม็ดพลาสติกจะถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนแล้วพลาสติกที่หลอมเหลวจะถูกบังคับให้ออกไปทางท่อเปิดหรือ die ตามรูปร่างที่ต้องการด้วยสกรูหมุน พลาสติกที่ออกมาแล้วจะทำให้เย็นต่ำกว่า  $T_g$  หรือ glass transition temperature เพื่อให้แน่ใจว่ารูปร่างจะคงที่ การทำให้พลาสติกเย็นลงใช้วิธีเอาลมเป่าหรือใช้ระบบน้ำเย็นหล่อก็ได้

## 3. กระบวนการอัดเข้ากับแบบ (compression molding)

เป็นกระบวนการอัดเข้ากับแบบ ซึ่งโดยทั่วไปตัวแบบเองจะมีการทำให้ร้อนก่อน แล้วใช้เม็ดพลาสติกใส่ลงไปในแบบ เมื่อแบบเข้าประกบกัน ความร้อนและความดันจะรักษาให้คงที่จนกว่าเม็ดพลาสติกจะเข้าเต็มแบบและทำให้แข็งตัว กระบวนการนี้เหมาะที่จะใช้กับ Thermosetting materials เพราะการทำให้แข็งตัวสำหรับ Thermosetting polymers นั้นขึ้นอยู่กับเวลาของการเกิดปฏิกิริยาและมักจะใช้เวลาานกว่ากระบวนการแบบฉีด

## 4. กระบวนการ Transfer molding

เป็นกระบวนการที่ใช้กับพลาสติกที่เป็น Thermosets โดยเอาวัสดุที่ขึ้นรูปใส่ในกระบอกอัด วัสดุนั้นจะถูกเผาให้ร้อนจนเหลวแล้ววัสดุนั้นจะถูกอัดเข้าไปในแบบ วิธีการนี้ได้ดัดแปลงมาจาก compression molding

## 5. กระบวนการ Blow molding

กระบวนการนี้ใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่กลวง โดยการเป่าพอลิเมอร์ที่ร้อนด้วยลมให้พอลิเมอร์เข้าไปติดกับแบบที่เป็น 2 ชั้นประกบกัน โดยให้พอลิเมอร์ที่เป็นหลอด (tube หรือ parison) ทำให้อุ่นแล้วถูกดันลงมาจากด้านบนของแบบ แล้วใช้อัดอากาศเข้าไป พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวจะกลายเป็นรูปร่างต่าง ๆ กันตามแบบที่ใช้และได้ความหนาที่ค่อนข้างสม่ำเสมอกัน วิธีการใช้ในการผลิตขวดพลาสติกหรือภาชนะบรรจุอื่น ๆ ซึ่งสามารถทำได้รวดเร็วและใช้กับเทอร์โมพลาสติก

## 6. กระบวนการ Thermoforming

เป็นกระบวนการที่ใช้พอลิเมอร์แผ่นหรือฟิล์มบาง ๆ ผลิตเป็นรูปต่าง ๆ วิธีการนี้แผ่นพอลิเมอร์จะถูกเผาจนอ่อนตัวลงและห้อยลงมาจนสัมผัสกับแบบด้วยระบบสูญญากาศ ทำให้แผ่นพอลิเมอร์ออกมา มีรูปร่างตามแบบที่ใช้ บางครั้งอาจใช้แบบที่เป็นโลหะ 2 ชั้นประกบกันก็ได้ กระบวนการนี้เหมาะที่จะนำไปใช้กับการผลิตที่มีจำนวนไม่มากนัก

### 7. กระบวนการรีดให้เป็นแผ่น (Calendaring)

เป็นกระบวนการที่ใช้ Thermoplastic ทำเป็นแผ่นหรือเป็นฟิล์ม โดยใช้พลาสติกผ่านเข้าไประหว่างลูกกลิ้งที่ให้ความร้อน (heated rolls) และต่อเนื่องกัน ระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งคู่สุดท้ายจะบอกความหนาของแผ่นพลาสติกนั้น กระบวนการนี้อาจนำมาใช้เป็นวิธีผสมวัสดุให้เข้ากันได้ โดยทั่วไปยางแผ่นก็ใช้กระบวนการนี้ทำเช่นเดียวกัน

### 8. กระบวนการหล่อ (Casting)

กระบวนการนี้ใช้ในการขึ้นรูปของที่ตันหรือกลวง โดยใช้พลาสติกที่หลอมเหลวหรือจากเรซินที่ผสมตัวเร่งแล้ว ด้วยการเทลงไปในแบบ แล้วปล่อยให้แข็งตัวหรือให้ set ตัว (curing) สำหรับแบบควรจะต้องให้ข้างบนเปิด กระบวนการนี้ใช้กันมากในการหล่อพวกยูรีเทน และ silicone elastomers ให้เป็นแผ่นหรือเหมาะที่จะใช้ทำเครื่องร้อนแร่ หรือใช้สร้างอุปกรณ์ที่อยู่กับที่ด้วยสาร epoxy หรือ polyester resins

### 9. กระบวนการ Reaction Injection Molding (RIM)

กระบวนการนี้จะใช้วิธีป้อนพอลิเมอร์ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเข้าไปใน mixing chamber ก่อน ให้ผสมกันแล้วให้ออกไปสู่แบบหล่อที่ความดันปกติ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะก่อให้เกิดการขยายตัวเต็มแบบหล่อ ถ้ามีความร้อนเกิดขึ้นจะช่วยให้พอลิเมอร์แข็งตัวเร็วขึ้น และอาจใช้ filler ผสมเข้าไปเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นก็ได้ กระบวนการนี้ใช้หล่ออุปกรณ์รถยนต์ต่าง ๆ วัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อเป็นพอลิยูรีเทนโฟม

## 6.7 สมบัติพื้นฐานและการเลือกใช้ประโยชน์ทั่วไปของเทอร์โมพลาสติก

ในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงสิ่งสำคัญเกี่ยวกับโครงสร้าง กระบวนการทางเคมี สมบัติและการประยุกต์ของเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอทิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิโพรพีลีน พอลิสไตรีน เอบีเอส พอลิเมทิลเมทาครีเลต พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน เซลลูโลสอะซิเตต และสารที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น ตารางที่ 6.1 แสดงค่าความหนาแน่น tensile strengths, impact strengths, dielectric strengths และอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถใช้งานได้ สิ่งที่สำคัญและดีที่สุดของพลาสติกสำหรับการนำไปประยุกต์ทางวิศวกรรม คือพลาสติกที่มีความหนาแน่นต่ำหรือน้ำหนักเบา (พลาสติกมีความหนาแน่นประมาณเท่ากับ 1 เมื่อเทียบกับเหล็กประมาณ 7.8)

ตารางที่ 6.1 แสดงสมบัติบางชนิดของเทอร์โมพลาสติกบางอย่างที่ใช้กันทั่วไป

ตารางที่ 7.2 แสดงสมบัติบางชนิดของเทอร์โมพลาสติกบางอย่างที่ใช้กันทั่วไป

Material	Density, g/cm <sup>3</sup>	Tensile strength, × 1000 psi*	Impact strength, Izod, ft · lb/in†	Dielectric strength, V/mil‡	Max-use temp. (no load)	
					°F	°C
Polyethylene:						
Low-density	0.92–0.93	0.9–2.5	...	480	180–212	82–100
High-density	0.95–0.96	2.9–5.4	0.4–14	480	175–250	80–120
Rigid, chlorinated PVC	1.49–1.58	7.5–9	1.0–5.6		230	110
Polypropylene, general-purpose	0.90–0.91	4.8–5.5	0.4–2.2	650	225–300	107–150
Styrene-acrylonitrile (SAN)	1.08	10–12	0.4–0.5	1775	140–220	60–104
ABS, general-purpose	1.05–1.07	5.9	6	385	160–200	71–93
Acrylic, general- purpose	1.11–1.19	11.0	2.3	450–500	130–230	54–110
Cellulosics, acetate	1.2–1.3	3–8	1.1–6.8	250–600	140–220	60–104
Polytetrafluoroethylene	2.1–2.3	1–4	2.5–4.0	400–500	550	288

\*1000 psi = 6.9 MPa.  
†Notched Izod test: 1 ft · lb/in = 53.38 J/m.  
‡1 V/mil = 39.4 V/mm.  
Source: *Materials Engineering*, May 1972.

Tensile strength ของพลาสติกค่อนข้างต่ำซึ่งเป็นจุดอ่อนหรือข้อเสียที่จะนำไปใช้ออกแบบงานทางวิศวกรรม พลาสติกส่วนมากจะมี tensile strength น้อยกว่า 10,000 psi (69 MPa)

การทดสอบแรงกระแทก (Impact test) ของพลาสติก ส่วนมากจะใช้ Izod test (ใช้ขนาดของตัวอย่าง

$\frac{1}{8} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{1}$  in) ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 0.4-14 ft lb/in ซึ่งเป็นการวัดพลังงานที่ถูกดูดกลืนต่อความยาวของรอยบาก เมื่อลูกตุ้ม

เข้าชนเรียกว่า notch impact strength ของวัสดุ

พลาสติกโดยทั่วไปจะเป็นฉนวนที่ดีและวัดค่าออกมาเป็นค่า dielectric strength ซึ่งเป็นค่า voltage ที่ต่างกันจนทำให้เกิดไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุนั้นได้ วัดออกมาเป็นค่า Volt/mil หรือ Volt/mm ค่า dielectric strength ของพวกพลาสติก จะมีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 385-1775 Volt/mil ดังแสดงในตารางที่ 6.1

สำหรับอุณหภูมิสูงสุดที่เทอร์โมพลาสติกสามารถใช้งานได้ค่อนข้างจะต่ำ คืออยู่ระหว่าง 130°-300°F (54°-149°C) อย่างไรก็ตามเทอร์โมพลาสติกบางชนิดสามารถทนความร้อนได้ถึง 550°F (288°C) เช่น พวก Teflon เป็นต้น

### พอลิเอทิลีน (Polyethylene = PE)

พอลิเอทิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะใสจนถึงสีขาวแต่แสงผ่านได้ ถ้าเป็นฟิล์มบาง ๆ จะใส แต่ถ้าหนาจะขุ่นขาวคล้ายซีฟิ่ง และสามารถทำให้เป็นสีต่าง ๆ ได้

พอลิเอทิลีนโดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 แบบ คือ

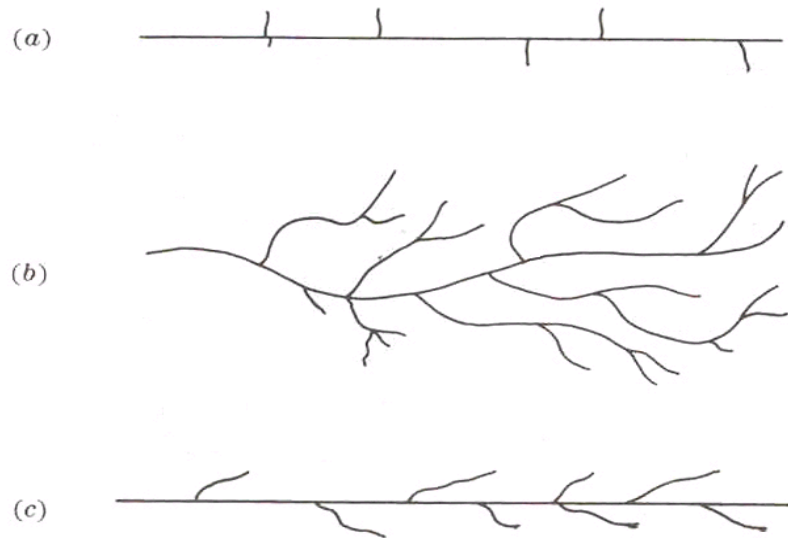
1. PE แบบความหนาแน่นต่ำ (LDPE)
2. PE แบบความหนาแน่นสูง (HDPE)

พวกความหนาแน่นต่ำจะมีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา (branch-chain) ดังแสดงในรูปที่ 6.3 (b) แต่พวกความหนาแน่นสูงจะมีโครงสร้างเป็นเส้นตรง (straight-chain) ดังแสดงในรูปที่ 6.3 (a)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผลิตโดยใช้ถังปฏิกรณ์ (autoclave reactors) ความดันมากกว่า 14500 psi (100 MPa) ที่อุณหภูมิประมาณ 300°C และชนิดความหนาแน่นสูง ผลิตด้วยกระบวนการ Phillips และ Ziegler โดยมีตัวเร่งที่ทำให้ใช้ความดันและอุณหภูมิต่ำลง คือใช้อุณหภูมิ 100-150°C และความดัน 290-580 psi (2-4 MPa)

ในปัจจุบันการผลิตพอลิเอทิลีนได้พัฒนาขึ้นโดยใช้ความดันเพียง 100-300 psi และอุณหภูมิต่ำประมาณ 100°C เท่านั้น พอลิเอทิลีนที่ผลิตได้จะเป็น linear-low density (LLDPE) ซึ่งโครงสร้างเป็นเส้นตรงโดยมีกิ่งก้านสั้น ๆ ดังรูปที่ 6.3 (c)

**โครงสร้างและสมบัติ** โครงสร้างของพอลิเอทิลีน ทั้งแบบความหนาแน่นต่ำและสูง ดังแสดงในรูปที่ 6.3 แบบความหนาแน่นต่ำ โครงสร้างจะมีกิ่งก้านสาขา ทำให้ degree ของ crystallinity และ density ต่ำลง (ดูตารางที่ 6.2) โครงสร้างแบบนี้ยังทำให้ strength ต่ำลงอีกด้วย เนื่องจากไปทำให้แรงของการเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลลดลง ในทางตรงข้าม พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงจะมีโครงสร้างที่มีกิ่งก้านสาขาน้อย ทำให้โมเลกุลสามารถเข้าไปใกล้กันได้มากขึ้น ทำให้ crystallinity และ strength เพิ่มขึ้นด้วย (ดูตารางที่ 6.2)



รูปที่ 6.3 แสดงโครงสร้างของพอลิเอทีลีนแบบต่าง ๆ

(a) แบบความหนาแน่นสูง (high-density)

(b) แบบความหนาแน่นต่ำ (low-density)

(c) แบบโครงสร้างเป็นเส้นตรงความหนาแน่นต่ำ (linear-low-density)

ตารางที่ 6.2 แสดงสมบัติของพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและความหนาแน่นสูง

Property	Low-density polyethylene	Linear-low-density polyethylene	High-density polyethylene
Density, g/cm <sup>3</sup>	0.92–0.93	0.922–0.926	0.95–0.96
Tensile strength, × 1000 psi	0.9–2.5	1.8–2.9	2.9–5.4
Elongation, %	550–600	600–800	20–120
Crystallinity, %	65	...	95

พอลิเอทีลีนเป็นพลาสติกที่ใช้กันมากทั่วโลก เนื่องจากมีราคาถูก และมีสมบัติเอื้อต่อการใช้งานหลาย ๆ ด้าน แข็งแรงพอสมควร เหนียว กันการสึกกร่อนได้ดี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส กลายเป็นไอได้น้อยมาก

การประยุกต์ ใช้ทำภาชนะบรรจุ ฉนวนไฟฟ้า สายพลาสติก ทำอุปกรณ์ที่ใช้ในบ้านเรือน ทำขวด ทำฟิล์ม พลาสติกสำหรับห่อของ และใช้สำหรับบุ (liner) สระน้ำ เป็นต้น

### พอลิไวนิลคลอไรด์ และโคพอลิเมอร์

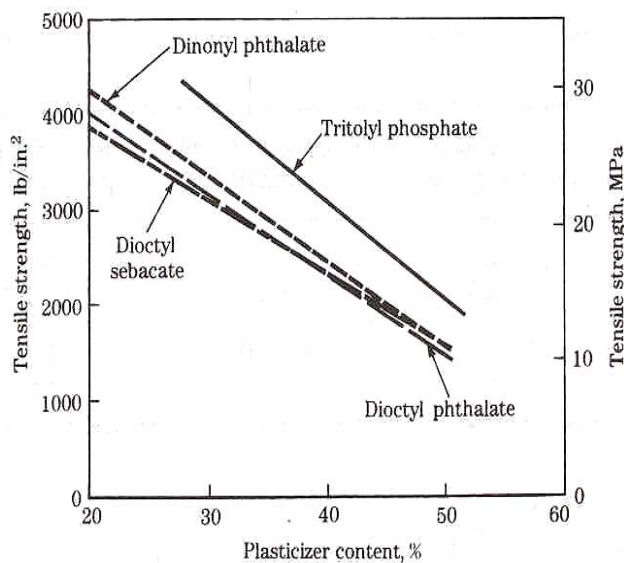
พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นพลาสติกสังเคราะห์ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมาก เพราะ PVC ไม่ถูกกัดกร่อน ด้วยสารเคมี และมีสมบัติพิเศษที่สามารถผสมได้กับสารอื่น ๆ ที่มีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีหลากหลายได้อีกมาก

**โครงสร้างและสมบัติ** จากการที่ PVC มีอะตอมใหญ่ เช่น คลอรีนเข้าไปต่อกับคาร์บอนอะตอมในโครงสร้างของ PVC ทำให้พอลิเมอร์นั้นเป็น Amorphous และไม่ตกผลึก นอกจากนี้อะตอมคลอรีนยังทำให้โมเลกุลมี strong dipole moment ซึ่งทำให้เกิดแรงเกาะกัน (cohesion) ระหว่างโมเลกุลของ PVC สูงยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้เกิด sterichindrance และเกิดแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้า (electrostatic repulsion) ด้วยความอ่อนตัว (flexibility) ของ polymer chain จะลดลงทำให้กระบวนการผลิตที่เป็น polymers อย่างเดียวยากขึ้น การประยุกต์ใช้ก็น้อยลง ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการเติมสารบางชนิดเข้าไปช่วยเพื่อให้สมบัติดีขึ้น

PVC ที่เป็น polymers ชนิดเดียวมี strength ค่อนข้างสูง (7.5-9.0 ksi) และเปราะ ทนความร้อนได้ปานกลาง (57-82°C ที่ 66 psi) มีค่า dielectric strength สูง (425-1300 V/mil) ละลายในตัวทำละลายยาก และถ้า PVC มีปริมาณคลอรีนมากจะทำให้ติดไฟยากและป้องกันสารเคมีได้ดี

การประยุกต์ใช้ของ PVC โดยทั่วไปจะใช้วิธีผสมกับสารอื่นบางชนิด เพื่อปรับปรุงคุณภาพของ PVC ให้ดียิ่งขึ้น สารที่นำมาใช้ผสมได้แก่ พลาสติไซเซอร์ (plasticizers) สารที่ทำให้เสถียรต่อความร้อน (heat stabilizers) สารหล่อลื่น (lubricants) สารเติมแต่ง (fillers) และสี (pigments) PVC ที่ผสมด้วยพลาสติไซเซอร์ใช้ทำเฟอร์นิเจอร์หุ้มเบาะ หุ้มฝาผนังภายใน เสื้อกันฝน รองเท้า กระเป๋าเดินทาง ส่วนประกอบรถยนต์ ฉนวนไฟฟ้า ทำที่ปูพื้น สายยาง ส่วนประกอบตู้เย็น และของใช้ต่าง ๆ ในบ้าน เป็นต้น

สารพลาสติไซเซอร์เป็นสารที่ทำให้ PVC มีความอ่อนตัวหรือเหนียวขึ้น สารพวกนี้เป็นสารที่มีมวลโมเลกุลสูง แต่ควรจะต้องเป็นสารที่สามารถรวมและเข้ากันได้เป็นอย่างดีกับวัสดุพอลิเมอร์นั้น สำหรับ PVC ส่วนมากใช้ผสมด้วย phthalate ester ผลของพลาสติไซเซอร์ต่อ tensile strength ของ PVC ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แสดงผลของพลาสติไซเซอร์ชนิดต่าง ๆ ต่อ tensile strength ของ PVC

**Heat stabilizers** เป็นสารที่เติมลงใน PVC แล้วจะช่วยป้องกันไม่ให้ PVC เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนในระหว่างผลิต และยังช่วยให้อายุของผลิตภัณฑ์ที่ทำได้อายุยาวขึ้น สารพวกนี้อาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ซึ่งโดยปกติจะเป็นพวกสารประกอบ organometallic ของดีบุก ตะกั่ว แบริยม แคดเมียม แคลเซียม และสังกะสี

**Lubricants** เป็นส่วนที่ช่วยทำให้ PVC ที่หลอมเหลวไม่ติดกับเครื่องที่กำลังใช้ผลิต เช่น ใช้ขี้ผึ้ง fatty ester, metallic soaps เป็นต้น



**Fillers** ได้แก่ สารที่เติมเข้าไปเพื่อให้มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นการลดราคาให้ต่ำลง เช่น ใช้ผงหินปูนผสมเข้าไป เป็นต้น

**Pigments** เป็นสีอินทรีย์และสีอนินทรีย์ที่ผสมเข้ากับ PVC ให้ออกมาเป็นสีสวยงาม แต่ทำให้ขุ่นและทนต่อสภาวะอากาศได้ดีขึ้น

### พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)

พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกอีกชนิดหนึ่งที่มีการใช้มาก และมีความสำคัญเป็นอันดับที่สาม เนื่องจากราคาถูก เพราะสามารถสังเคราะห์ได้จากปิโตรเลียม

**โครงสร้างและสมบัติ** จากพอลิเอทิลีนไปเป็นพอลิโพรพิลีนด้วยการแทนที่ไฮโดรเจนด้วยหมู่เมทิล ( $-CH_3$ ) ทุก ๆ 2 อะตอมของคาร์บอนในโครงสร้าง ทำให้พอลิโพรพิลีนมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่อ่อนตัวน้อยลง หมู่เมทิลในโครงสร้างช่วยทำให้เพิ่ม glass transition temperature ดังนั้นพอลิโพรพิลีนจึงมีจุดหลอมเหลวและจุดทำให้อ่อนตัวสูงกว่าพอลิเอทิลีน จากการใช้ stereospecific catalysts ทำให้สามารถสังเคราะห์ isotactic polypropylene ซึ่งมีจุดหลอมเหลว  $165-177^{\circ}C$  ได้ วัสดุนี้ถ้าได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ  $120^{\circ}C$  จะไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างเลย

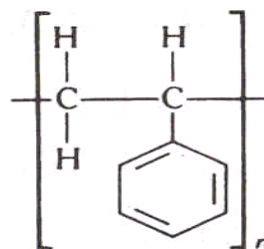
พอลิโพรพิลีนใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในอุตสาหกรรมมากมาย เพราะมันมีสมบัติที่ดีหลายอย่าง เช่น ทนต่อสารเคมี ไม่ดูดความชื้น ทนความร้อนได้ดี มีความหนาแน่นต่ำ ( $0.900-0.910 \text{ g/cm}^3$ ) ผิวหน้าแข็งและมีรูปร่างเสถียร แต่มีความอ่อนตัวที่จะโค้งงอได้ ประกอบกับราคาของโมโนเมอร์ถูกด้วย ทำให้พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ได้รับความสนใจมาก

**การประยุกต์ของพอลิโพรพิลีน** การประยุกต์ที่เป็นหลักของพอลิโพรพิลีนคือทำของใช้ในบ้านและเครื่องไฟฟ้า ภาชนะบรรจุอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ ขวดและภาชนะต่าง ๆ ใช้ทำ copolymers ที่ทนทานต่อแรงกระแทกแทนยางได้แก่ ใช้ทำหม้อเบตเตอร์ ใช้หุ้มกันชน ทำที่ห่อหุ้มกันเปราะเหมือน โปฟัด ท่อน้ำ พรม ถุง แผ่นฟิล์มสำหรับห่อของและอื่นๆ อีกมาก

### พอลิสไตรีน (Polystyrene)

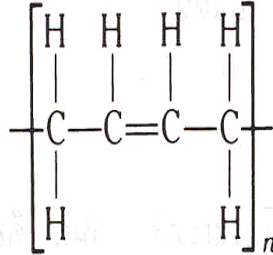
สารนี้เป็นพลาสติกตัวที่สี่ที่มีการใช้มาก พอลิสไตรีนอย่างเดียวเป็นพลาสติกที่ใส ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส แต่ค่อนข้างเปราะ นอกจากจะมีการผสมสารอื่น ดังนั้นพอลิสไตรีนจึงใช้ผลิตพวก copolymers ที่สำคัญ ๆ เป็นจำนวนมาก

โครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อย คือ





**โครงสร้างและสมบัติ** เนื่องจากในโครงสร้างมี phenylene ring เข้าไปต่อกับอะตอมของคาร์บอน ทำให้พอลิสไตรีนมีโครงสร้างที่แข็งไม่ยืดหยุ่น เทอะทะ และมี steric hindrance พอสมควร จึงทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้ไม่อ่อนตัวที่อุณหภูมิห้อง ถ้าเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวจะมีลักษณะเฉพาะคือแข็ง (rigidity) ใสเป็นประกาย ง่ายในการผลิตเป็นสิ่งของต่าง ๆ แต่อาจจะเปราะ ถ้าจะให้มีความทนทานต่อแรงกระแทกสามารถทำได้โดยผสมกับสารอื่นให้เกิด copolymeration เช่น ผสมกับยางเทียม polybutadiene elastomer ซึ่งมีสูตรเป็น



Copolymers ที่มียางผสมจะมียางอยู่ประมาณ 3-12% จะทำให้พอลิเมอร์นี้ลดความแข็งแรงและอ่อนตัวด้วยความร้อนขึ้น

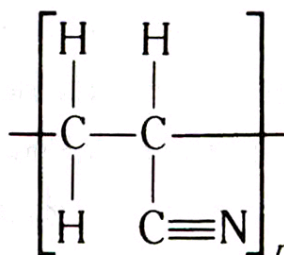
โดยทั่วไปพอลิสไตรีนจะมีรูปร่างคงที่เมื่อนำไปทำแบบหล่อ จะมีการหดตัวเล็กน้อย ทำได้ง่าย ราคาถูก แต่ไม่ทนต่อสภาพอากาศและสารเคมี ตัวทำละลายอินทรีย์และพวกน้ำมันจะละลายพอลิสไตรีนได้ พอลิสไตรีนเป็นวัสดุฉนวนไฟฟ้าที่ดีและมีสมบัติเชิงกลที่ใช้ได้ที่อุณหภูมิค่อนข้างจำกัด

**การประยุกต์** พอลิสไตรีนใช้ทำชิ้นส่วนภายในของรถยนต์ อุปกรณ์ เครื่องใช้ในบ้าน ปุ่มที่ใช้ปรับหรือหมุนตลอดจนอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป

### พอลิอะครีโลไนไตรล์ (polyacrylonitrile)

พอลิเมอร์นี้เป็นพวกอะครีลิก ซึ่งมักจะทำพวกเส้นใย เพราะพอลิเมอร์นี้มีความแข็งแรงและเสถียรต่อสารเคมี บางครั้งยังใช้ทำ copolymers เป็น engineering thermoplastics ชนิดหนึ่งได้อีกด้วย

โครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อย คือ



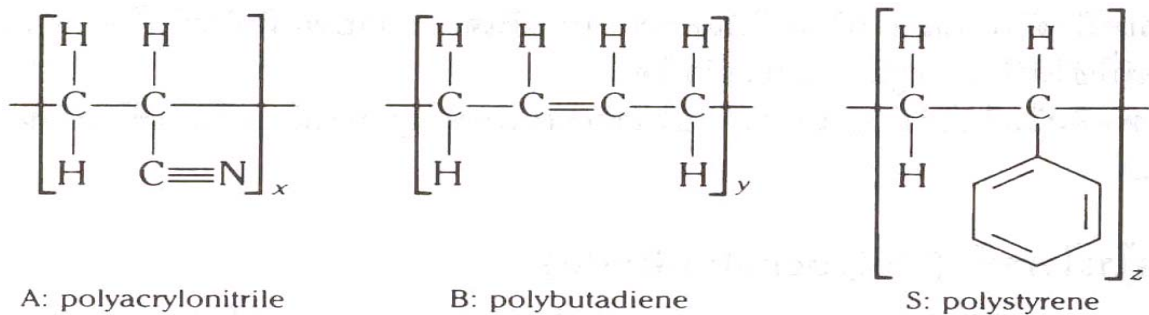
**โครงสร้างและสมบัติ** เนื่องจากหมู่นาไนไตรล์ซึ่งมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงมาก เมื่อต่อเข้ากับคาร์บอนอะตอมในโครงสร้างทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าระหว่างหมู่นาไนไตรล์กันเอง ทำให้โมเลกุลถูกบังคับให้ต่อกันเป็นโครงสร้างตามยาว (rodlike) และแข็ง โค้งงอยาก โครงสร้างแบบนี้จะมีการจัดตัวของมันอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดเป็นเส้นใยที่แข็งแรงระหว่าง polymer chains ด้วยพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นจากผลที่เกิดขึ้นนี้ ทำให้เส้นใยอะครีโลไนไตรล์มี strengths สูง และทนทานต่อความชื้นและตัวทำละลายดีมาก ๆ

การประยุกต์ อะครีโลไนไทรล์นำไปใช้ในลักษณะเป็นเส้นใยเช่นเดียวกับขนสัตว์ เช่น ใช้ทำเสื้อกันหนาว ผ้าห่ม เป็นต้น และยังใช้ทำ copolymers เช่น styrene-acrylonitrile (SAN resins) และทำ acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymers (ABS resins)

## ABS

ABS เป็นชื่อของเทอร์โมพลาสติกที่ผลิตมาจากโมโนเมอร์ 3 ชนิด คืออะครีโลไนไทรล์ บิวตะไดอีน และ สไตรีน ABS จัดว่าเป็นวัสดุวิศวกรรมที่ทนแรงกระแทกได้ดี มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดีและง่ายต่อการทำผลิตภัณฑ์

โครงสร้างทางเคมีของหน่วยย่อย ABS ประกอบด้วยโครงสร้างทางเคมี 3 หน่วยด้วยกัน คือ



โครงสร้างและสมบัติของ **ABS** ABS มีสมบัติและการใช้ประโยชน์ที่กว้างขวาง โดยที่มันสามารถแสดงสมบัติต่าง ๆ ที่เป็นขององค์ประกอบของมัน อะครีโลไนไทรล์แสดงสมบัติทางความทนทานต่อความร้อนและสารเคมีและเหนียว บิวตะไดอีนให้สมบัติทางความทนทานต่อแรงกระแทกแต่เก็บไว้ได้ไม่นานมีความเสถียรต่ำ ส่วนสไตรีนมีความแข็งดี ผิวเป็นมัน ง่ายต่อกระบวนการผลิต ความทนทานต่อแรงกระแทกของ ABS จะเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของยางที่ใช้ผสมเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ tensile strength และทนต่อความร้อนลดลง ตารางที่ 6.3 แสดงสมบัติของ ABS พลาสติกที่ทนต่อแรงกระแทกต่ำ ปานกลางและสูง

ตารางที่ 6.3 แสดงสมบัติทั่วไปของ ABS พลาสติกที่ 23°C

	High-impact	Medium-impact	Low-impact
Impact strength (Izod):			
ft·lb/in	7–12	4–7	2–4
J/m	375–640	215–375	105–320
Tensile strength:			
× 1000 psi	4.8–6.0	6.0–7.0	6.0–7.5
MPa	33–41	41–48	41–52
Elongation, %	15–70	10–50	5–30

การประยุกต์ ABS มีการนำไปใช้มากในการทำพวกท่อ และอุปกรณ์ขนาดต่างๆ โดยเฉพาะทำท่อน้ำทิ้งในอาคาร ทำส่วนประกอบรถยนต์ เครื่องไฟฟ้า เช่น ทำที่บุประตูตู้เย็น เครื่องคำนวณ ตัวเครื่องคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ ท่อสายไฟฟ้า ทำอุปกรณ์กันการรบกวนของแม่เหล็กไฟฟ้าและความถี่วิทยุ

### พอลิเมทิลเมทาครีเลต (Polymethyl methacrylate = PMMA)

พอลิเมออร์นี้เป็นเทอร์โมพลาสติกที่แข็งไม่ยืดหยุ่น ใสและทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี ทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่ากระจก วัสดุนี้อาจจะรู้จักกันดีในชื่อทางการค้าว่า เพล็กซ์กลาส (Plexiglas) หรือลูซิท์ (Lucite) ซึ่งเป็นวัสดุที่สำคัญที่สุดในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่เป็นพวกอะครีลิก (acrylics)

**โครงสร้างและสมบัติ** จากการที่หมู่เมทิล (methyl) และเมทาครีเลต (methacrylate) ที่เข้าไปต่อกับคาร์บอนอะตอมของโครงสร้างหลักนั้นทำให้เกิด steric hindrance อันเป็นผลให้พอลิเมออร์ชนิดนี้มีลักษณะแข็ง ใส ยืดหยุ่น จากการจัดตัวของพอลิเมออร์เป็นแบบ Random ทำให้กลายเป็นสารที่ไม่มีรูปร่างผลึก แสงผ่านได้อย่างดี ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีและสภาวะแวดล้อม

**การประยุกต์ PMMA** ใช้สำหรับทำกระจกหน้าต่างของเครื่องบิน เรือเร็ว หน้าต่างสูง ๆ โคมไฟที่ติดตั้งภายนอกบ้าน ป้ายโฆษณาสีนํ้าไฟ ทำयरถยนต์ กระจกนิรภัย แว่นตานิรภัย ลูกบิด มือถือ และอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ เป็นต้น

### ฟลูออโรพลาสติก (Fluoroplastics)

พอลิเมออร์หรือพลาสติกชนิดนี้ทำได้จากโมโนเมอร์ที่มีอะตอมของธาตุฟลูออรีนประกอบอยู่หนึ่งอะตอมหรือหลายอะตอม ฟลูออโรพลาสติกมีสมบัติพิเศษหลาย ๆ อย่างที่นำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรม เช่น มีความต้านทานสูง ทนทานต่อสารเคมีในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ และมีสมบัติที่ดีมาก ๆ อีกอย่างหนึ่งคือ มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ถ้าฟลูออโรพลาสติกที่มีเปอร์เซ็นต์ฟลูออรีนสูง ๆ จะมีสมบัติที่ความฝืดต่ำ ซึ่งมีผลทำให้พลาสติกนี้มีสมบัติหล่อลื่นได้ในตัวและไม่ติดภาชนะ

ฟลูออโรพลาสติกที่ผลิตได้มีหลายชนิด แต่มีเพียง 2 ชนิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ พอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน (PTFE) และพอลิคัลโรไตรฟลูออโรเอทีลีน (PCTFE)

### พอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน (PTFE)

กระบวนการผลิตทางเคมี PTFE เป็นพอลิเมออร์ที่อะตอมของฟลูออรีนเข้าแทนที่อะตอมของไฮโดรเจนในเอทีลีนหมดและเกิดจากพอลิเมอไรเซชันของ free radical chain ของแก๊สเตตระฟลูออโรเอทีลีน เป็นพอลิเมออร์โซ่ตรงพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน (teflon) ผู้ผลิตคือ R.J. Plunkett ในปี 1938 จากห้องปฏิบัติการของบริษัทดูปอง (Du Pont)

**โครงสร้างและสมบัติ PTFE** เป็นพอลิเมออร์ที่มีรูปร่างผลึก มีจุดหลอมเหลวที่  $327^{\circ}\text{C}$  ( $620^{\circ}\text{F}$ ) เนื่องจากอะตอมของฟลูออรีนมีขนาดเล็กและการเข้าเกาะใน carbon chain ของพอลิเมออร์มีความเป็นระเบียบ ทำให้พอลิเมออร์ที่ได้เป็นผลึกที่มีความหนาแน่นสูง คือมีค่า  $2.13\text{-}2.19\text{ g/cm}^3$

PTFE เป็นพอลิเมออร์ที่ทนต่อสารเคมีเป็นพิเศษ และยังไม่ละลายในตัวทำละลายสารอินทรีย์ ยกเว้นตัวทำละลายที่มีฟลูออรีนบางชนิด PTFE มีสมบัติเชิงกลที่ดีทั้งในช่วงอุณหภูมิต่ำ  $-200^{\circ}\text{C}$  ( $-300^{\circ}\text{F}$ ) ถึง  $260^{\circ}\text{C}$  ( $500^{\circ}\text{F}$ ) impact strength สูง แต่มีค่า tensile strength การสึกหรอ และ creep resistance ต่ำ เมื่อเทียบกับ engineering plastics อื่น ๆ PTFE ถ้าผสมกับ fillers เช่น glass fibers จะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น PTFE ยังเป็นพอลิเมออร์เมื่อใช้งานจะลื่นและมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ

**กระบวนการผลิต** เนื่องจาก PTFE เมื่อหลอมเหลวจะมีความหนืดสูง การใช้กระบวนการผลิตแบบ extrusion หรือ injection molding ธรรมดาจะทำได้ จึงต้องใช้วิธีอัดเม็ดเข้าไปในแบบที่มีความดันสูง 2,000-10,000 psi (14-69 MPa) หลังจากนั้นนำไปให้ความร้อนที่  $360\text{-}380^{\circ}\text{C}$  ( $680\text{-}716^{\circ}\text{F}$ )

การประยุกต์ ใช้ทำท่อและส่วนประกอบของปั๊มที่ใช้กับสารเคมี ใช้หุ้มสายไฟฟ้าที่ใช้กับอุณหภูมิสูง ๆ ทำอุปกรณ์ไฟฟ้า เทป ใช้เคลือบ ปลอก แหวน ตลับ ประเก็น ซีล (seals) โอริง และตลับลูกปืน เป็นต้น

### พอลิคลอโรไตรฟลูออโรเอทีลีน (PCTFE)

โครงสร้างและสมบัติ จากการแทนที่ฟลูออรีนอะตอมที่สี่ด้วยคลอรีน ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอใน polymer chains พอลิเมอร์ชนิดนี้จึงมีผลึกน้อยกว่าและหลอมเหลวได้ง่ายกว่า ดังนั้น PCTFE จึงมีจุดหลอมเหลว  $218^{\circ}\text{C}$  ( $420^{\circ}\text{F}$ ) ต่ำกว่า PTFE ทำให้สามารถผลิตวัสดุสำเร็จรูปได้ด้วยกระบวนการอัดรีดเข้าไปในแบบโดยทั่วไป

การประยุกต์ พอลิเมอร์ PCTFE สามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับ PTFE แต่สามารถใช้กระบวนการผลิตแบบธรรมดาได้ เช่น ใช้ทำอุปกรณ์ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมเคมี อุปกรณ์ไฟฟ้า ประเก็น โอริง และซีล เป็นต้น

### พอลิเมอร์อัลลอยด์ (Polymer Alloys)

พอลิเมอร์อัลลอยด์เป็น copolymer ชนิดหนึ่ง ซึ่งได้จากการผสม homopolymers ที่มีโครงสร้างต่างกันในเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์อัลลอยด์นั้น พอลิเมอร์ที่แตกต่างกันจะเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลด้วยแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (dipole forces) แต่ถ้าเป็น copolymer พันธะระหว่างโมเลกุลของโมโนเมอร์เป็นพันธะโคเวเลนต์ ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง องค์ประกอบของพอลิเมอร์อัลลอยด์จะต้องเข้ากันได้ หรือมี adhesion ในปริมาณหนึ่ง เพื่อป้องกันการแยกออกจากกัน (phase separation) ในระหว่างกระบวนการผลิต ในปัจจุบันพอลิเมอร์อัลลอยด์มีความสำคัญมากขึ้นเป็นลำดับ เพราะทำให้พลาสติกมีคุณภาพดีขึ้น และราคาก็เหมาะสม

ตารางที่ 6.4 แสดงพอลิเมอร์อัลลอยด์บางชนิดที่ผลิตออกมาเชิงพาณิชย์

Some Properties of Selected Engineering Thermoplastics

Polymer alloy	Trade name of material	Supplier
ABS/polycarbonate	Bayblend MC2500	Mobay
ABS/polyvinyl chloride	Cycovin K-29	Borg-Warner Chemicals
Acetal/elastomer	Celcon C-400	Celanese
Polycarbonate/polyethylene	Lexan EM	General Electric
Polycarbonate/PBT/elastomer	Xenoy 1000	General Electric
PBT/PET	Valox 815	General Electric

Source: "Modern Plastics Encyclopedia, 1984-85," McGraw-Hill.

พอลิเมอร์อัลลอยด์สมัยเก่าบางชนิดทำได้จากการเติมพอลิเมอร์ที่เป็นยาง เช่น ABS เข้าไปเพื่อทำให้พอลิเมอร์แข็งแรงและเหนียวขึ้น เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์แข็งขึ้น และวัสดุพวกยางนี้ยังช่วยทำให้พอลิเมอร์ที่แข็งมีความเหนียวขึ้น ในปัจจุบันนี้เทอร์โมพลาสติกใหม่ ๆ จึงใช้วิธีการผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกัน เช่น ใช้ PBT (polybutylene terephthalate) ผสมกับ PET (polyethylene terephthalate) ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีผิวมันและราคาก็ถูกลง ดังแสดงในตารางที่ 6.4 ของพอลิเมอร์อัลลอยด์บางชนิด

## 6.8 เทอร์โมเซททิงพลาสติก (เทอร์โมเซท)

เทอร์โมเซททิงพลาสติกหรือเทอร์โมเซท เป็นพลาสติกที่เกิดพันธะโคเวเลนต์เป็นโครงข่ายของโครงสร้างของโมเลกุล เทอร์โมเซทบางชนิดเกิด cross-linked ด้วยความร้อนหรือด้วยความร้อนและความกดดัน นอกจากนี้อาจเกิด cross-linked ได้โดยปฏิกิริยาเคมีที่อุณหภูมิห้อง (เทอร์โมเซทที่แข็งตัวเมื่อเย็น) แม้ว่าส่วนที่จะถูกบ่ม (cured parts) ที่มาจากเทอร์โมเซท สามารถทำให้อ่อนตัวลงได้ด้วยความร้อนก็ตาม พันธะโคเวเลนต์ที่เกิด cross-link จะเป็นตัวป้องกันมิให้เกิดภาวะที่ทำให้เกิดการไหลขึ้นก่อนที่พลาสติกจะถูกบ่ม ดังนั้นเทอร์โมเซทจึงไม่สามารถหลอมเหลวด้วยความร้อนใหม่ได้เหมือนกับเทอร์โมพลาสติก นี่เป็นข้อเสียเปรียบของเทอร์โมเซทที่ไม่สามารถนำเศษพลาสติกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตไปทำรีไซเคิลและนำไปใช้ใหม่ได้

โดยทั่วไปข้อได้เปรียบของเทอร์โมเซททิงพลาสติกสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรม การประยุกต์อาจพิจารณาจากสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างดังต่อไปนี้

1. มีความเสถียรต่อความร้อนสูง
2. มีความแข็งแรงสูง ไม่มือง่าย
3. มีความเสถียรเชิงมิติสูง
4. มีความทนทานต่อการเกิดครีฟและเปลี่ยนรูปร่างใต้การใช้งาน
5. มีน้ำหนักเบา
6. มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนที่ดี

เทอร์โมเซททิงพลาสติก ตามปกติจะใช้กระบวนการผลิตแบบอัดหรือแบบ transfer molding อย่างไรก็ตามในบางกรณี เทอร์โมเซทสามารถใช้กระบวนการผลิตแบบ injection molding ที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อให้เป็นกระบวนการผลิตที่ถูกลง

เทอร์โมเซทอีกหลายชนิดที่ทำเป็นสารประกอบซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด คือ 1) เรซินที่มี curing agents ตัวที่ทำให้แข็งและพลาสติกไซเซออร์และ 2) ฟิลเลอร์ และ/หรือสารเสริมแรงซึ่งอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ซีลี้อย ไมก้า แก้ว และเซลลูโลส ตามธรรมดาจะใช้เป็นวัสดุฟิลเลอร์

### สมบัติพื้นฐานของเทอร์โมเซททิงพลาสติกบางชนิด

ตารางที่ 6.5 แสดงความหนาแน่น tensile strength impact strength, dielectric strength และอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถทนได้ สำหรับเทอร์โมเซททิงพลาสติกบางชนิด ความหนาแน่นของเทอร์โมเซททิงพลาสติกมักจะสูงกว่าวัสดุพลาสติกโดยทั่วไปเล็กน้อย ดังในตารางที่ 6.5 จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง  $1.34\text{-}2.3\text{ g/cm}^3$  tensile strength ของเทอร์โมเซทส่วนมากจะมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งจะอยู่ในช่วงจาก 4,000-15,000 psi (28-103 MPa) แต่ถ้ามีปริมาณของแก้วเข้าไปผสมมาก ๆ tensile strength ของเทอร์โมเซทสามารถเพิ่มขึ้นได้สูงถึง 30,000 psi (201 MPa) เทอร์โมเซทที่มีแก้วผสมยังให้ impact strength สูงอีกด้วย เทอร์โมเซทยังมีค่า dielectric strength สูงดีด้วย โดยอยู่ในช่วง 140-650 V/mil พลาสติกพวกนี้มีขีดจำกัดในการใช้อุณหภูมิสูงเหมือนพลาสติกทั่วไป ซึ่งอยู่ในช่วง  $170\text{-}550^\circ\text{F}$  ( $77\text{-}228^\circ\text{C}$ )

ตารางที่ 6.5 แสดงสมบัติของเทอร์โมเซทพลาสติกบางชนิด

Material	Density, g/cm <sup>3</sup>	Tensile strength, × 1000 psi*	Impact strength, Izod, ft-lb/in†	Dielectric strength, V/mil‡	Max-use temp. (no load)	
					°F	°C
Phenolic:						
Wood-flour-filled	1.34–1.45	5–9	0.2–0.6	260–400	300–350	150–177
Mica-filled	1.65–1.92	5.5–7	0.3–0.4	350–400	250–300	120–150
Glass-filled	1.69–1.95	5–18	0.3–18	140–400	350–550	177–288
Polyester:						
Glass-filled SMC	1.7–2.1	8–20	8–22	320–400	300–350	150–177
Glass-filled BMC	1.7–2.3	4–10	15–16	300–420	300–350	150–177
Melamine:						
Cellulose-filled	1.45–1.52	5–9	0.2–0.4	350–400	250	120
Flock-filled	1.50–1.55	7–9	0.4–0.5	300–330	250	120
Glass-filled	1.8–2.0	5–10	0.6–18	170–300	300–400	150–200
Urea, cellulose-filled	1.47–1.52	5.5–13	0.2–0.4	300–400	170	77
Alkyd:						
Glass-filled	2.12–2.15	4–9.5	0.6–10	350–450	450	230
Mineral-filled	1.60–2.30	3–9	0.3–0.5	350–450	300–450	150–230
Epoxy (bis A):						
No filler	1.06–1.40	4–13	0.2–10	400–650	250–500	120–260
Mineral-filled	1.6–2.0	5–15	0.3–0.4	300–400	300–500	150–260
Glass-filled	1.7–2.0	10–30	...	300–400	300–500	150–260

\*1000 psi = 6.9 MPa. †1 V/mil = 39.4 V/mm.  
 † Notched Izod test: 1 ft · lb/in = 53.38 J/m. Source: *Materials Engineering*, May 1972.

### ฟีนอลิก (Phenolics)

เทอร์โมเซทพลาสติกชนิดฟีนอลิกเป็นพลาสติกที่สำคัญพวกแรกที่น่ามาใช้ในอุตสาหกรรม ลิขสิทธิ์เดิมเป็นปฏิกริยาของฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ได้ ฟีนอลิกพลาสติก เบเคิลท์ ในนามของ L.H. Baekeland ในปี 1909 ฟีนอลิกพลาสติกยังคงใช้อยู่ในปัจจุบันนี้ เพราะมันมีราคาถูกและเป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนที่ดี ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีด้วยหล่อแบบได้ง่ายแต่มีสีจำกัด (ปกติจะมีสีดำหรือน้ำตาล)

**เคมีของฟีนอลิกเรซิน** ฟีนอลิกเรซินตามธรรมชาติจะผลิตได้จากปฏิกริยาของฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ โดยกระบวนการ condensation polymerization และมีน้ำออกมาเป็นผลพลอยได้ ฟีนอลิกเรซินสภาวะสอง (novolac) จะเกิดขึ้นเป็นธรรมชาติในภาวะแรกจะเกิดเทอร์โมพลาสติกเรซินที่มีลักษณะเปราะขึ้นก่อน ซึ่งเรซินนี้จะหลอมเหลวได้แต่จะไม่เกิด cross-link เป็นโครงข่ายของแข็ง วัสดุนี้เตรียมได้โดยใช้ฟอร์มัลดีไฮด์น้อยกว่า 1 โมล ทำปฏิกริยากับ 1 โมลของฟีนอล โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันจะเกิดขึ้น

**การประยุกต์** สารประกอบพวกฟีนอลิกใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับทำอุปกรณ์พวกสายไฟฟ้า สวิตช์ตัวเชื่อม ต่อ ระบบรีเลย์ โทรศัพท์ วิศวกรที่สร้างรถยนต์ใช้สารประกอบฟีนอลิกทำเพาเวอร์เบรก ส่วนประกอบทรานสมิชั่น พวกฟีนอลิกยังใช้ทำพวกมือจับ ปุ่มต่าง ๆ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ฟีนอลิกทนความร้อนสูง ไม่ดูดความชื้น จึงนำมาใช้ทำไม้อัด และปาร์ติเคิลบอร์ด ฟีนอลิกเป็นจำนวนมากใช้ทำไบเดอร์ (binder) กับทรายในโรงหล่อ



## อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resins)

อีพอกซีเรซิน เป็นเทอร์โมเซตทิงพวกหนึ่งของบรรดาวัสดุพอลิเมอร์ ที่การบ่มหรือการทำให้เกิด cross-link จะไม่มีผลจากปฏิกิริยาออกมาและยังมีการหดตัวน้อยด้วย วัสดุพวกนี้ติดยึดกับวัสดุอื่นได้ดี ทนทานต่อสารเคมีและสิ่งแวดล้อม มีสมบัติเชิงกลที่ดี และเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีอีกด้วย

**การประยุกต์** อีพอกซีเรซินนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยใช้เคลือบเพื่อป้องกันการขูดขีดและป้องกันการกัดต่าง สารเคมี รวมทั้งเคลือบเครื่องตกแต่งต่าง ๆ เพราะอีพอกซีเรซินมีสมบัติที่ดีในความเหนียวแน่น สมบัติเชิงกลดีและทนทานต่อสารเคมีที่ใช้ประโยชน์กันโดยทั่วไป ได้แก่ การใช้เคลือบตัวถังรถยนต์ เครื่องมือ ของใช้ที่สำคัญ ๆ และใช้หุ้มเส้นลวดสายไฟฟ้า เป็นต้น ในทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ใช้อีพอกซีในงานที่เกี่ยวกับ dielectric strength เมื่อแข็งตัวมีการหดตัวน้อย มีแรงยึดที่ดี ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ป้องกันน้ำและความชื้นได้ดี ใช้เป็นฉนวนในพวกไฟฟ้าแรงสูง ทำสวิตช์ เกียร์ และหุ้มพวกทรานซิสเตอร์ นอกจากนี้อีพอกซีเรซินยังใช้เสริมแรงด้วยพวกเส้นใยและแลมมีเนต

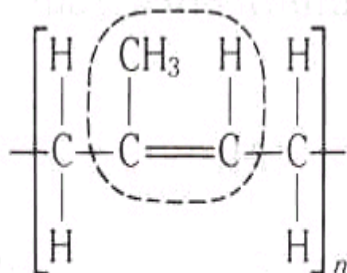
## 6.9 อีลาสโตเมอร์หรือยาง

อีลาสโตเมอร์หรือยางเป็นวัสดุประเภทพอลิเมอร์อย่างหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนขนาดได้อย่างมากเมื่อดึงและเมื่อปล่อยแรงดึงจะกลับมายุ่งสภาพเดิม อีลาสโตเมอร์มีด้วยกันหลายแบบ แต่พวกที่จะได้กล่าวต่อไปได้แก่ ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ (synthetic polyisoprene) ยางสไตรีน-บิวตะไดอิน ยางไนไทรล์ พอลิคลอโรพรีน และซิลิโคน (silicones) เป็นต้น

### ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)

ยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากลาเทก (Latex) หรือน้ำยางจากต้นยางพารา ซึ่งปลูกมากในแถบร้อน แถวเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ ประเทศไทย มาเลเซียและอินโดนีเซีย แหล่งของยางธรรมชาติคือ ลาเทก ซึ่งเป็นของเหลวสีขาวคล้ายนมสด โดยมีอนุภาคเล็ก ๆ ของยางแขวนลอยอยู่ในน้ำ น้ำยางลาเทกที่เก็บมาจากต้นยางพาราจะถูกทำให้เจือจางลงเหลือ 15% และทำให้ตกตะกอนด้วยกรดฟอร์มิก (กรดอินทรีย์) นำยางที่ตกตะกอนมาอัดด้วยลูกกลิ้งเพื่อไล่น้ำออก จะได้เป็นยางแผ่น ยางแผ่นนี้จะนำไปทำให้แห้งด้วยการอบด้วยอากาศร้อนหรืออบด้วยควันไฟ ยางแผ่นหรือยางที่อยู่ในรูปแบบอื่นจะนำไปบดด้วยลูกกลิ้งที่หนัก แรงเฉือนจะทำให้ห่วงโซ่ยาวของพอลิเมอร์แตกออกทำให้มวลโมเลกุลโดยเฉลี่ยลดลง

**โครงสร้าง** ยางธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็น cis-1,4 polyisoprene (ดังสูตรข้างล่างนี้) ผสมกับจำนวนเล็กน้อยของโปรตีน ไขมัน เกลือแร่และสารอื่น ๆ cis-1,4 polyisoprene เป็นพวก long-chain พอลิเมอร์ (มวลโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ  $5 \times 10^5$  กรัม/โมล) มีสูตรโครงสร้างเป็น



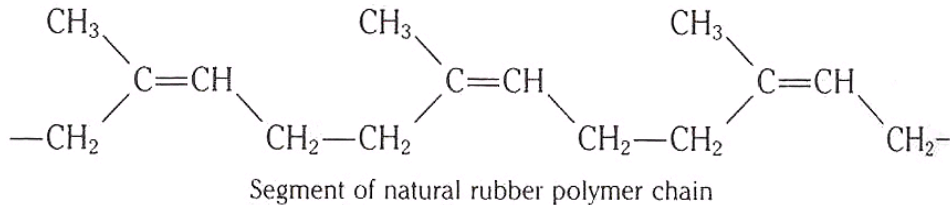
cis-1,4 Polyisoprene

Repeating structural unit for natural rubber

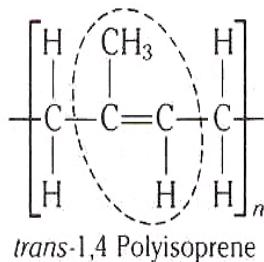
Cis-1,4 polyisoprene

หน่วยโครงสร้างย่อยของยางธรรมชาติ

คำว่า cis- ที่อยู่ข้างหน้า แสดงว่าหมู่เมทิล (-CH<sub>3</sub>) และไฮโดรเจนอะตอมอยู่ข้างเดียวกันของพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนซึ่งแสดงอยู่ในวงของโครงสร้าง 1,4 บอกถึงตำแหน่งของคาร์บอนว่าอยู่ตำแหน่งที่ 1 และที่ 4 ที่เป็นหน่วยย่อยของพอลิเมอร์ที่เกิดพันธะโคเวเลนต์ต่อเป็นโซ่ยาว โซ่พอลิเมอร์ของยางธรรมชาติจะยาวสลับซับซ้อนและเป็นม้วนขด ที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ที่สภาวะสั้นอยู่เสมอ ทำให้โมเลกุลเกิดโค้งงอ เนื่องจาก steric hindrance ของหมู่เมทิลกับไฮโดรเจนอะตอมที่อยู่ข้างเดียวกันของพันธะคู่ การจัดตัวของยางธรรมชาติในโซ่พอลิเมอร์จึงเป็นดังรูปข้างล่างนี้



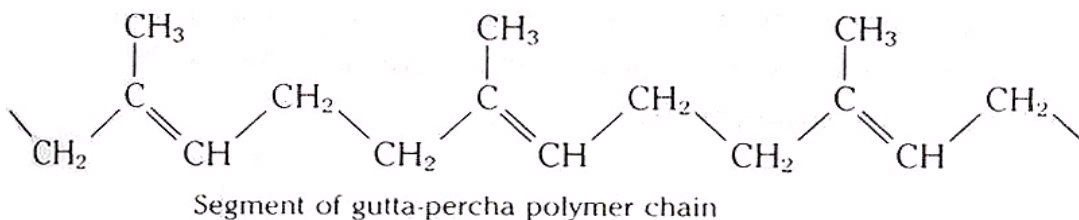
พอลิไอโซพรีน ยังมีไอโซเมอร์อย่างอื่นอีก คือ ทรานส์-1,4 พอลิไอโซพรีน (trans-1,4 polyisoprene) เรียกว่า กุตตาเปอร์ชา (gutta percha) ซึ่งไม่เป็นอีลาสโตเมอร์ และมีโครงสร้างที่มีหมู่เมทิลและไฮโดรเจนอะตอมอยู่คนละด้านของพันธะคู่ ดังแสดงอยู่ในโครงสร้างที่เป็นวงข้างล่างนี้



Repeating structural unit for gutta-percha

Trans-1,4 Polyisoprene  
Repeating structural unit for gutta-percha

ในสูตรโครงสร้างนี้หมู่เมทิลและไฮโดรเจนอะตอมที่เกิดพันธะที่พันธะคู่จะไม่รบกวนซึ่งกันและกัน ด้วยเหตุนี้ ทรานส์-1,4 พอลิไอโซพรีนจึงมีโมเลกุลที่สมมาตรมากกว่า ซึ่งสามารถตกผลึกเป็นสารแข็งได้ดีกว่า

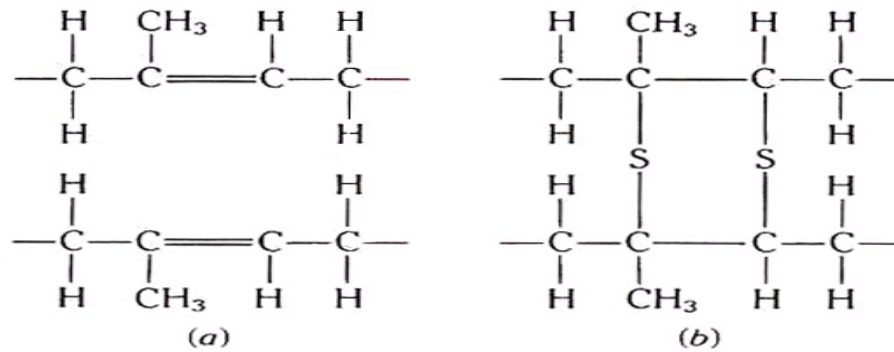


**การทำให้ยางแข็ง (Vulcanization)** การทำให้ยางแข็งเป็นกระบวนการทางเคมีซึ่งเป็นการทำให้เกิด cross-link ระหว่างโมเลกุลกลายเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นและเคลื่อนไหวยาก ในปี 1893 ชาลส์ กูดเยียร์ (Charles Goodyear) ได้ค้นพบกระบวนการทำให้ยางแข็งโดยใช้กำมะถันและตะกั่วคาร์บอเนต กูดเยียร์พบว่าเมื่อนำยางธรรมชาติผสมกับกำมะถันและตะกั่วคาร์บอเนตแล้วให้ความร้อน ยางจะเปลี่ยนจากเทอร์โมพลาสติกไปเป็นอีลาสโตเมอร์ แม้ในปัจจุบันนี้ปฏิกิริยา



ระหว่างกำมะถันกับยางจะซับซ้อนและยังไม่เข้าใจที่แจ่มชัดนักแต่ผลสุดท้ายที่เกิดขึ้น คือ พันธะคู่ในพอลิไอโซพรีน โมเลกุลจะเปิดออกแล้วเกิด cross-link กับอะตอมของกำมะถันดังแสดงในรูปที่ 6.5

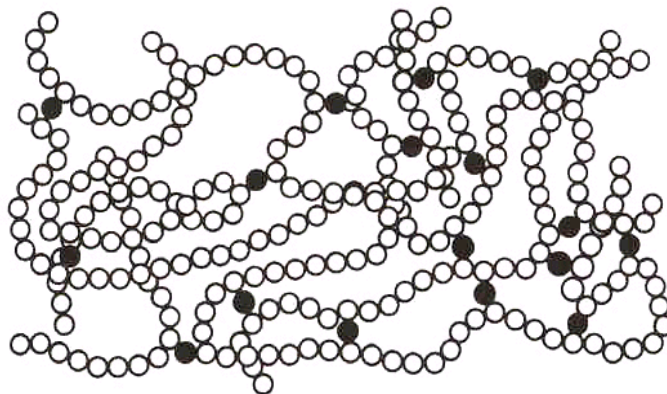
**รูปที่ 6.5** แสดงกระบวนการเกิด Vulcanization ของยางกับอะตอมของกำมะถัน โดยเกิด cross-link ของซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน



(a) แสดงซิส-1,4 พอลิไอโซพรีนก่อนเกิด cross-link กับอะตอมของกำมะถัน

(b) แสดงซิส-1,4 พอลิไอโซพรีนหลังเกิด cross-link กับอะตอมของกำมะถันที่ตำแหน่งพันธะคู่

รูปที่ 6.6 แสดงถึงการเกิด cross-link ของอะตอมกำมะถันต่อโมเลกุลของยาง กำมะถันและยางทำปฏิกิริยากัน ซ้ำมากแม้จะเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ดังนั้นเพื่อต้องการให้เวลาบ่มสั้นลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงต้องเติมสารเคมีและสารอื่น ๆ อีกด้วย เช่น เติมฟิลเลอร์ พลาสติไซเซอร์ และแอนติออกซิเดนท์



**รูปที่ 6.6** แสดงแบบของการเกิด cross-link ของซิส-1,4 พอลิไอโซพรีนด้วยอะตอมของกำมะถัน (เม็ดสีดำ)

โดยทั่วไปถ้ายางที่ผสมกับกำมะถันประมาณ 3% โดยน้ำหนักและให้ความร้อน  $100-200^{\circ}\text{C}$  จะได้ vulcanized rubber ที่อ่อน แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของกำมะถันขึ้น การเกิด cross-link ก็เพิ่มขึ้นจะทำให้ได้ยางแข็งขึ้น และโค้งงอได้น้อยลง แต่ถ้าจะให้ยางแข็งเต็มที่จะต้องผสมกำมะถันประมาณ 45% โดยน้ำหนัก

### ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubbers)

เมื่อปี 1980 ได้มีรายงานว่ายางสังเคราะห์ถูกนำมาใช้ถึง 70% ของการใช้ยางทั้งโลก ยางสังเคราะห์บางชนิดที่นับว่าสำคัญได้แก่ สไตรีน-บิวตะไดอีน ยางไนไตรล์ และพอลิคลอโรพรีน

ตารางที่ 6.6 แสดงสมบัติบางอย่างของอีลาสโตเมอร์บางชนิด

Elastomer	Tensile strength, ksi†	Elongation, %	Density, g/cm <sup>3</sup>	Recommended operating temp.	
				°F	°C
Natural rubber* ( <i>cis</i> -polyisoprene)	2.5–3.5	750–850	0.93	–60 to 180	–50 to 82
SBR or Buna S* (butadiene-styrene)	0.2–3.5	400–600	0.94	–60 to 180	–50 to 82
Nitrile or Buna N* (butadiene-acrylonitrile)	0.5–0.9	450–700	1.0	–60 to 250	–50 to 120
Neoprene* (polychloroprene)	3.0–4.0	800–900	1.25	–40 to 240	–40 to 115
Silicone (polysiloxane)	0.6–1.3	100–500	1.1–1.6	–178 to 600	–115 to 315

\* Pure gum vulcanizate properties.

† 1000 psi = 6.89 MPa.

### การทำให้เทอร์โมพลาสติกแข็งแรงขึ้น (Strengthening of Thermoplastics)

ขอให้พิจารณาจากปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้ โดยที่แต่ละปัจจัยอาจจะเป็นการบอกความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกได้

- 1) มวลโมเลกุลโดยเฉลี่ยของพอลิเมอร์
- 2) ระดับของการเกิดผลึก
- 3) ผลของกรุปใหญ่ ๆ ที่เข้าไปต่อกับโมเลกุล
- 4) ผลของอะตอมที่มีขั้วสูง ๆ เข้าไปต่อกับโมเลกุล
- 5) ผลของอะตอมของออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน ที่เข้าไปต่อกับคาร์บอนในโซ่โมเลกุล
- 6) ผลของเฟนิลริงในโซ่โมเลกุล
- 7) การเติมใยแก้วเข้าไปเสริมแรง

### 6.10 การเลือกใช้วัสดุพอลิเมอร์สำหรับการออกแบบทางวิศวกรรม

ในปัจจุบันวัสดุพอลิเมอร์ได้นำมาใช้ในงานในรูปแบบต่าง ๆ กันเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เพราะวัสดุประเภทนี้มีราคาถูก มีสมบัติที่ดีเหมาะแก่การใช้งานและง่ายต่อการผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป สำหรับงานออกแบบทางวิศวกรรมก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในการเลือกใช้วัสดุประเภทนี้ซึ่งจะต้องเลือกให้สมบัติตรงกับที่ต้องการ ตารางที่ 6.7 ได้แสดงรายการชนิดต่างๆ ของพอลิเมอร์ ชื่อทางการค้า สมบัติ การประยุกต์และเกรด สมบัติที่สำคัญที่ปรากฏอยู่เสมอ คือ

1. ความสามารถที่ทำให้ลดจำนวนส่วนประกอบในการออกแบบ
2. ทนทานต่อสารเคมีในสภาวะสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ กัน
3. มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า
4. มีน้ำหนักเบา
5. ง่ายต่อการใช้กระบวนการผลิต

6. มีความแข็งแรง เหนียว และทนทานที่ดีพอ
7. มีลักษณะโปร่งใส แสงผ่านได้
8. มีสัมประสิทธิ์ของความผิดต่ำ
9. สามารถทำเป็นสีต่าง ๆ และทำเป็นแผ่นได้
10. สามารถกันความชื้น เมื่อทำเป็นบรรจุภัณฑ์
11. มีรูปร่างที่เสถียร

วัสดุพลาสติกได้รับความนิยมนำไปใช้ในการออกแบบงานทางวิศวกรรมเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีราคาถูก บางครั้งก็คำนึงถึงทั้งราคาของวัสดุและราคาในการผลิตออกมาเป็นวัสดุสำเร็จรูป ทำให้พลาสติกมีข้อได้เปรียบ เช่น ในการสร้างเครื่องตัดหญ้าจะใช้พลาสติกดีหรือโลหะดีเพื่อใช้ในการออกแบบ จะเห็นว่ามีหลายส่วนที่สามารถใช้พลาสติกแทนเหล็กได้เพราะไม่เกิดการผุกร่อน น้ำหนักเบา ทนทาน ตลอดจนราคาในการผลิตก็ถูกกว่าด้วย

**ตัวอย่างที่ 6.1** เครื่องยนต์ใหม่ของรถยนต์ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยที่อยู่ภายในฝากระโปรงจะมีอุณหภูมิถึง 340°F (171°C) มีไอน้ำมันอยู่ด้วย ถ้ามองว่าพลาสติกชนิดไหนที่ท่านจะเลือกใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าสำหรับ sensors หรือตัวต่อ (connectors) ที่สามารถทนต่อสภาวะดังกล่าวได้ โดยเลือกใช้วัสดุจากตารางที่ 6.7 คำตอบ จากการใช้ตารางที่ 6.7 วัสดุที่จะเลือกใช้ได้ควรเป็นพอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ที่เสริมแรงด้วยใยแก้ว 40% เพราะวัสดุนี้ทนได้ดีมากต่อความร้อน สารเคมี และเป็นฉนวนไฟฟ้า และให้รูปทรงที่เสถียรดี วัสดุพลาสติกอื่น ๆ ก็อาจเลือกใช้ได้

การจะประยุกต์พลาสติกสำหรับออกแบบโครงสร้างนั้นค่อนข้างจะจำกัดและไม่ดีเท่าเหล็กกล้า เช่น การสร้างรถยนต์สมัยใหม่ จะมีพลาสติกเป็นองค์ประกอบประมาณ 200 ถึง 350 ปอนด์ (90.7-159 kg) อีกหลายปีโดยไม่ใช้ทำโครงสร้าง อย่างไรก็ตามพลาสติกยังใช้ทำส่วนประกอบที่เหมาะสมสำหรับรถยนต์มากขึ้น เช่น นำไปทำหลังคาประตูและส่วนประกอบอื่น ๆ

## สรุป

พลาสติกและอีลาสโตเมอร์เป็นวัสดุวิศวกรรมขั้นพื้นฐานที่สำคัญ เพราะมันมีสมบัติกว้างขวาง ง่ายต่อการทำให้มีรูปร่างต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้ และมีราคาถูกพอสมควร วัสดุพลาสติกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ เทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตติงพลาสติก (เทอร์โมเซต) เทอร์โมพลาสติกสามารถหลอมเหลวได้ด้วยความร้อน เมื่อเย็นจะแข็งและรักษารูปร่างไว้ได้ วัสดุประเภทนี้สามารถรีไซเคิลได้เทอร์โมเซตติงพลาสติกตามปกติจะทำให้มีรูปร่างต่าง ๆ ที่ถาวรได้ด้วยความร้อนและความดัน ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นด้วยการเกิดพันธะของอะตอมต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ทำให้เป็นของแข็งได้ เทอร์โมเซตติงอาจเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องได้ และไม่ต้องใช้ความร้อนและความกดดัน เทอร์โมเซตติงพลาสติกไม่สามารถหลอมเหลวใหม่ได้ หลังจากที่ทำให้แข็งหรืออบ (curing) แล้ว แต่ถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงจะสลายตัวได้

สารเคมีที่ใช้ผลิตพลาสติกส่วนใหญ่จะมาจากปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน วัสดุพลาสติกผลิตขึ้นมาได้จากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของโมเลกุลเล็ก ๆ เป็นจำนวนมาก ซึ่งเรียกว่า โมโนเมอร์ (monomers) กลายเป็นโมเลกุลใหญ่ เรียกว่าพอลิเมอร์ (polymers) เทอร์โมพลาสติกประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นโซ่ยาวและเกิดพันธะกันระหว่างโซ่โมเลกุลด้วยแรงที่เรียกว่า secondary permanent dipole เทอร์โมเซตติงพลาสติกเกิดพันธะโคเวเลนต์ที่แข็งแรงระหว่างอะตอมต่าง ๆ

## 7. เฟสไดอะแกรม

วิภาคหรือเฟสที่มีอยู่ในวัสดุ หมายถึงบริเวณที่มีโครงสร้างและ/หรือองค์ประกอบที่แตกต่างจากเฟสอื่น กราฟที่แสดงถึงเฟสต่างๆ ที่มีอยู่ในวัสดุ ณ สภาวะหนึ่ง (อุณหภูมิ ความดัน และองค์ประกอบ) จะถูกเรียกว่า **เฟสไดอะแกรม (phase diagrams)** หรืออาจถูกเรียกว่า **equilibrium diagrams** หรือ **constitutional diagrams** โดยทั่วไป เฟสไดอะแกรมมักจะถูกสร้างขึ้นที่สภาวะสมดุล กล่าวคือ เฟสไดอะแกรมนั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ซึ่งมักจะกระทำได้ด้วยค่อย ๆ ทำให้ระบบนั้นเย็นตัวลงหรือร้อนขึ้นอย่างช้า ๆ เนื่องจากชนิด จำนวน และปริมาณของเฟสที่มีอยู่ในวัสดุมักจะให้ผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุ ดังนั้นเฟสไดอะแกรมจึงเป็นประโยชน์ต่อนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรเป็นอย่างมากที่สามารถนำไปใช้ในการทำนายลักษณะและสมบัติของวัสดุได้ และสามารถทราบข้อมูลต่าง ๆ ได้จากเฟสไดอะแกรม ซึ่งพอจะสรุปได้ดังนี้คือ

1. แสดงเฟสต่าง ๆ ที่มีอยู่ในวัสดุในสภาวะ (อุณหภูมิ องค์ประกอบ) ที่แตกต่างกัน
2. แสดงถึงสภาพละลายได้ของธาตุหนึ่ง (หรือสารประกอบหนึ่ง) ในอีกธาตุหนึ่ง ณ สภาวะสมดุล
3. สามารถบอกให้ทราบถึงอุณหภูมิที่โลหะผสมเริ่มแข็งตัวเป็นของแข็งและช่วงอุณหภูมิที่โลหะผสมเกิดการแข็งตัว เมื่อโลหะผสมนั้นถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ
4. สามารถบอกให้ทราบถึงอุณหภูมิที่โลหะผสมเริ่มหลอมละลาย

### 7.1 กฎเฟสของ Gibbs

จากวิชาเทอร์โมไดนามิกส์ J.W. Gibbs ได้สร้างสมการที่สามารถใช้ในการหาจำนวนเฟสที่มีอยู่ในระบบหนึ่ง ๆ ที่สภาวะสมดุล ได้ดังนี้คือ

$$\begin{aligned}
 P + F &= C + 2 \\
 \text{เมื่อ } P &= \text{จำนวนของเฟสที่มีอยู่ในระบบ} \\
 C &= \text{จำนวนชนิดของส่วนประกอบในระบบ} \\
 F &= \text{ระดับขั้นความเสรี (degrees of freedom)}
 \end{aligned}$$

โดยปกติ ส่วนประกอบ C คือ ธาตุ สารประกอบ หรือสารละลายที่มีอยู่ในระบบ ระดับขั้นความเสรี F คือจำนวนของตัวแปร (ความดัน อุณหภูมิ และองค์ประกอบ) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระ โดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนเฟสในสภาวะสมดุลของระบบที่กำลังพิจารณาอยู่

เราลองพิจารณาเฟสไดอะแกรมของน้ำบริสุทธิ์ที่จุดร่วมสาม ซึ่งประกอบด้วย 3 เฟสที่สภาวะสมดุลและมีเพียงส่วนประกอบเดียวคือน้ำ ดังนั้นจำนวนระดับขั้นความเสรี จะมีค่าดังนี้คือ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ } P + F &= C + 2 \\
 3 + F &= 1 + 2 \\
 F &= 0 \text{ (ระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 0)}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากไม่มีตัวแปร (อุณหภูมิ หรือความดัน) ใด สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นที่จุดร่วมสามจึงถูกเรียกว่า invariant point

ถ้าพิจารณาถึงจุดบนเส้นโค้งเยือกแข็งระหว่างของเหลว - ของแข็ง ซึ่งมี 2 เฟส จะได้

$$2 + F = 1 + 2$$

$$F = 1 \text{ (ระดับชั้นความเสรีเท่ากับ 1)}$$

ระบบเช่นนี้ จะมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ 1 ซึ่งหมายถึงมีตัวแปร (อุณหภูมิหรือความดัน) 1 ตัวที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระ โดยที่ระบบก็ยังคงมีเฟสอยู่ 1 เฟส

ในการศึกษาทางวัสดุศาสตร์โดยทั่วไป ระบบที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิดนั้น ความดันมักจะถูกกำหนดให้คงที่ ที่ 1 บรรยากาศ ดังนั้น เฟสไดอะแกรมของระบบเช่นนี้จึงมักจะเป็นเฟสไดอะแกรมแบบอุณหภูมิ-องค์ประกอบ (temperature-composition phase diagram) ซึ่ง Gibbs phase rule จะถูกเปลี่ยนไปเป็น

$$P + F = C + 1 \text{ (P คงที่ที่ 1 บรรยากาศ)}$$

## 7.2 ระบบ Binary Isomorphous Alloy

ระบบที่ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด เช่น โลหะผสม เราจะเรียกว่า binary system หรือระบบที่ประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ชนิด (two component system) เนื่องจากธาตุโลหะแต่ละชนิดในโลหะผสมนั้นจะพิจารณาได้ว่าเป็นส่วนประกอบที่แยกกันคนละชนิด เช่น ทองแดงบริสุทธิ์พิจารณาได้ว่าเป็นระบบที่มีส่วนประกอบชนิดเดียว ในขณะที่โลหะผสมระหว่างทองแดงและนิกเกิลนั้น พิจารณาได้ว่าเป็นระบบที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิด ในบางครั้งสารประกอบในโลหะผสมจะพิจารณาได้ว่าเป็นส่วนประกอบชนิดหนึ่งได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้า plain-carbon ที่ประกอบด้วยเหล็กและเหล็กคาร์ไบด์ เป็นส่วนประกอบหลัก จะพิจารณาได้ว่าเป็นระบบที่มีส่วนประกอบ 2 ชนิดได้

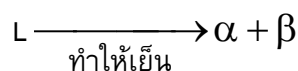
ในบางระบบที่ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด ถ้าโลหะผสมนั้นสามารถละลายรวมกันได้อย่างสมบูรณ์ทั้งในสถานะของแข็งและของเหลวแล้ว ระบบเหล่านั้นจะมีโครงสร้างผลึกเพียงชนิดเดียวที่ทุก ๆ สัดส่วนองค์ประกอบ ซึ่งเราเรียกระบบเช่นนี้ว่า isomorphous system ระบบที่ธาตุ 2 ชนิดละลายเข้าด้วยกันได้อย่างสมบูรณ์นั้น จะต้องมีเงื่อนไขสอดคล้องตามกฎของ Hume-Rothery

Hume-Rothery ได้ตั้งกฎการละลายของธาตุ 2 ชนิดที่สามารถละลายเข้าด้วยกันได้อย่างสมบูรณ์ไว้ดังนี้คือ

1. โครงสร้างผลึกของธาตุแต่ละชนิดจะต้องเหมือนกัน
2. ขนาดของอะตอมของธาตุทั้งสองจะต้องไม่ต่างกันเกินกว่า 15%
3. ธาตุทั้งสองนั้นจะต้องไม่ทำให้เกิดสารประกอบ นั่นคือธาตุทั้งสองนั้นจะต้องมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีไม่ต่างกันมากนัก
4. ธาตุทั้งสองนั้นควรมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนที่เท่ากัน

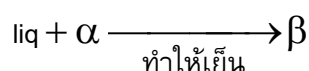
ระบบโลหะผสม 2 ชนิดแบบ

1. Eutectic system



เช่น Pb-Sn

2. Peritectic system

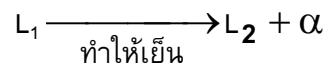


เช่น Fe-Ni



หรือ Pt-Ag

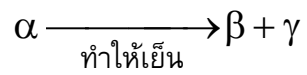
## 3. Monotectic system



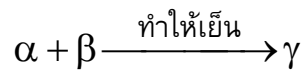
เช่น Cu-Pb

นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาที่เป็น invariant system อีก 2 ชนิดคือ

## 4. Eutectoid system



## 5. Peritectoid system



## 8. วัสดุเซรามิก

เซรามิกเป็นวัสดุอนินทรีย์ (inorganic) ที่ประกอบด้วยธาตุที่เป็นโลหะและอโลหะ โดยเกิดพันธะไอออนิกและ/หรือโคเวเลนต์ร่วมกัน องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเซรามิกจะแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิด บางชนิดจะมีองค์ประกอบเป็นสารประกอบอย่างง่าย ๆ แต่บางชนิดจะประกอบด้วยเฟสต่าง ๆ ที่ซับซ้อนโดยเกิดพันธะระหว่างกัน

สมบัติของเซรามิกจะแตกต่างกันอย่างมาก เนื่องจากความแตกต่างของพันธะในโครงสร้าง โดยทั่วไปเซรามิกจะมักจะมีสมบัติที่แข็งและเปราะ มีความแข็งแรงน้อยมาก เป็นฉนวนไฟฟ้าและความร้อนที่ดีเพราะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนได้ นอกจากนี้วัสดุเซรามิกยังมีจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีและสภาวะแวดล้อมได้ดีเนื่องจากมีพันธะทางเคมีที่แข็งแรง จากสมบัติเหล่านี้ทำให้วัสดุเซรามิกเป็นวัสดุที่ขาดไม่ได้สำหรับงานออกแบบทางวิศวกรรมต่าง ๆ

โดยทั่วไป วัสดุเซรามิกที่ถูกใช้ในงานวิศวกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้คือ

1. วัสดุเซรามิกธรรมดา
2. วัสดุเซรามิกวิศวกรรม

วัสดุจำพวกเซรามิกธรรมดา (traditional ceramic) คือ วัสดุเซรามิกที่มีมาแต่เดิม ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด คือ ดินเหนียว (clay) ซิลิกา (silica) และเฟลสปาร์ (feldspar) ตัวอย่างของเซรามิกพวกนี้ได้แก่ พวกอิฐ (brick) กระเบื้องมุงหลังคา (tile) และลูกถ้วยไฟฟ้า เป็นต้น

วัสดุจำพวกเซรามิกวิศวกรรม (engineering ceramics) คือวัสดุเซรามิกที่ประกอบด้วยสารบริสุทธิ์หรือเกือบบริสุทธิ์ของพวกอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) , ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) และซิลิคอนไนไตรด์ ( $Si_3N_4$ ) วัสดุชนิดนี้มักจะใช้ในงานเทคโนโลยีขั้นสูง เช่น SiC ใช้ทำเครื่องยนต์ของกังหันแก๊ส (gas turbine engine) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งในเครื่องยนต์ AGT-100 และอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ใช้เป็นฐานรองรับตัว integrated circuit chips ในอุปกรณ์ thermal conduction module

### 8.1 โครงสร้างอย่างธรรมดาของเซรามิก

ก่อนอื่นเราลองพิจารณาถึงโครงสร้างอย่างธรรมดาของเซรามิก ตารางที่ 8.1 ได้ยกตัวอย่างสารประกอบเซรามิกบางชนิดที่มีโครงสร้างอย่างธรรมดา และจุดหลอมเหลวของสารประกอบเหล่านี้

ตารางที่ 8.1 สารประกอบเซรามิกบางชนิดและจุดหลอมเหลว

สารประกอบเซรามิก	จุดหลอมเหลว ( $^{\circ}C$ )	สารประกอบเซรามิก	จุดหลอมเหลว ( $^{\circ}C$ )
Hafnium carbide, HfC	4150	Boron carbide, $B_4C$	2450
Titanium carbide, TiC	3210	Alumium oxide $Al_2O_3$	2050
Tungsten carbide, WC	2850	Silicon dioxide* $SiO_2$	1715
Magnesium oxide, MgO	2789	Silicon nitride, $Si_3N_4$	1900
Silicon carbide, SiC	2500	Titanium dioxide, $TiO_2$	1605

\* Cristobalite

## 8.2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก

ผลิตภัณฑ์จำพวกเซรามิก สามารถถูกผลิตขึ้นได้โดยการนำผงหรืออนุภาคมาอัดขึ้นเป็นรูปร่างแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง ๆ เพียงพอเพื่อที่จะทำให้อนุภาคเหล่านั้นเกาะกันหรือเกิดพันธะระหว่างกันขึ้น ขั้นตอนพื้นฐานที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกมีดังนี้คือ

1. การเตรียมวัสดุ
2. การขึ้นรูปหรือการหล่อ
3. การทำให้แห้งและเผาที่อุณหภูมิสูงเพียงพอเพื่อที่จะทำให้อนุภาคของเซรามิกเกิดพันธะระหว่างกัน

**การเตรียมวัสดุ** ผลิตภัณฑ์เซรามิกส่วนใหญ่ถูกผลิตขึ้นโดยการรวมกลุ่ม (agglomeration) ของอนุภาควัตถุดิบของผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับสมบัติของผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ต้องการ อนุภาคและส่วนประกอบอื่น เช่น สารยึดเหนี่ยว (binder) และสารหล่อลื่น (Lubricants) อาจถูกเติมลงไปและผสมเข้าด้วยกันด้วยวิธีแบบเปียกหรือแบบแห้งได้ ในกรณีของผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ไม่ต้องการสมบัติพิเศษ เช่น อิฐธรรมดา ภาชนะ หรือผลิตภัณฑ์ดินเหนียวอื่น ๆ ในทางปฏิบัติเราสามารถผสมส่วนประกอบทั้งหมดด้วยน้ำ แต่ในกรณีของผลิตภัณฑ์เซรามิกอื่นบางชนิด วัสดุดิบอาจจะถูกบดแบบแห้งร่วมกับสารยึดเหนี่ยวและสารเติมแต่งอื่น ๆ และในบางครั้งอาจมีการใช้ทั้งกระบวนการแบบแห้งและแบบเปียกรวมกัน ตัวอย่างเช่น ในการผลิตฉนวนอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ที่มีคุณภาพสูงชนิดหนึ่ง อนุภาคของวัตถุดิบจะถูกบดรวมเข้ากับน้ำพร้อมกับสารยึดเหนี่ยวจำพวกไข (wax) เกิดเป็นสารละลายขุ่น (slurry) หลังจากนั้นจะทำให้แห้งด้วยวิธีการฉีดพ่น (spray) เกิดเป็นเม็ดทรงกลมขนาดเล็ก ๆ

**การขึ้นรูป** ผลิตภัณฑ์เซรามิกซึ่งถูกผลิตขึ้นโดยการรวมกลุ่มของอนุภาคนั้น อาจถูกขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการที่แตกต่างกันหลายวิธีทั้งในสภาวะที่แห้ง, เหนียวหรือของเหลว กระบวนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำ (cold-forming processes) จะเป็นวิธีที่มักถูกใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก แต่กระบวนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง (hot-forming processes) ก็มักถูกใช้เช่นกัน กระบวนการอัด (pressing) กระบวนการ slip casting และกระบวนการ extrusion จะเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปในการขึ้นรูปเซรามิก

**กระบวนการอัด (pressing)** วัตถุดิบของเซรามิกที่อยู่ในรูปของอนุภาคสามารถถูกกดอัดได้ในสภาวะแห้ง เหนียว หรือเปียกในแม่แบบเพื่อได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างลักษณะตามที่ต้องการ

**กระบวนการอัดแห้ง (dry pressing)** กระบวนการนี้มักถูกใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ เช่น วัตถุทนไฟที่ใช้ในงานโครงสร้าง (วัสดุที่ต้านทานต่อความร้อนได้สูง) และส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการอัดแห้ง (dry pressing) อาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ กระบวนการอัดขึ้นรูปผงเซรามิกที่ผสมน้ำและ/หรือสารยึดเหนี่ยวประเภทสารอินทรีย์จำนวนเล็กน้อยในแม่แบบให้แน่นในแนวแกนเดียว (uniaxial compaction) หลังจากที่เซรามิกผ่านกระบวนการอัดเย็น (cold pressing) แล้วผลิตภัณฑ์นั้นก็จะถูกเผา (sintered) เพื่อให้ได้ความแข็งแรงและโครงสร้างตามที่ต้องการ กระบวนการอัดแห้งถูกใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลายรูปแบบอย่างรวดเร็ว มีความสม่ำเสมอและมีความผิดพลาดน้อย ตัวอย่างเช่น อะลูมินา ไททาเนต และเพอร์ไรต์ สามารถถูกอัดแห้งให้ได้ขนาดตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตรจนถึงหลายนิ้วได้ด้วยอัตราการผลิต 5000 ชิ้นต่อนาที



**กระบวนการอัดแบบ isostatic** ในกระบวนการนี้ ผงเซรามิกจะถูกบดในใส่ลงในภาชนะบรรจุที่มิดชิดและยึดหยุ่นได้ (มักจะเป็นยาง) (ถูกเรียกว่าถุง bag) ถุงนี้จะบรรจุอยู่ในห้องของของเหลวไฮดรอลิกซึ่งจะถูกบดด้วยความดันผลิตภัณฑ์ที่ถูกผลิตขึ้นโดยวิธีการอัดแบบ isostatic นี้มีดังนี้คือ วัสดุทนไฟ อิฐ ฉนวนของหัวเทียน เครื่องมือจำพวกคาร์ไบด์ crucibles และ bearing

**กระบวนการอัดร้อน (hot pressing)** สำหรับในกระบวนการอัดและเผาควบคู่กันนี้ผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ถูกผลิตขึ้นจะมีความหนาแน่นสูง และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น วิธีการอัดแบบแกนเดียว (uniaxial) และ isostatic สามารถถูกนำมาใช้ได้ในการบวนการนี้

**กระบวนการ slip casting** รูปร่างของเซรามิกสามารถถูกหล่อขึ้นได้โดยกระบวนการที่มีลักษณะเฉพาะตัวที่เรียกว่า **slip casting** ขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการ slip casting มีดังนี้คือ

1. การเตรียมวัตถุดิบซึ่งประกอบด้วยเซรามิกที่มีลักษณะเป็นผงและของเหลว (ส่วนใหญ่มักจะเป็นดินเหนียวและน้ำ) ให้อยู่ในสภาพแขวนลอยที่มีความเสถียร ที่เรียกว่า **slip**
2. เท slip ลงในแม่แบบที่มีรูปทรง ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะถูกทำจาก plaster of paris ส่วนที่เป็นน้ำใน slip จะถูกดูดซับด้วยแม่แบบบางส่วน ขณะที่ของเหลวถูกกำจัดออกจาก slip ชั้นของวัสดุที่มีลักษณะกึ่งของแข็งจะแข็งตัวอยู่รอบ ๆ ผิวของแม่แบบ
3. เมื่อวัสดุมีความหนาแน่นเพียงพอแล้ว กระบวนการหล่อจะถูกยับยั้งและ slip ที่มากเกินไปจะถูกเทออกจากช่องว่าง ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า drain casting ส่วนอีกวิธีหนึ่งคือ รูปร่างของแข็งจะถูกทำขึ้นโดยให้มีการหล่ออย่างต่อเนื่องจนกระทั่งช่องว่างภายในแม่แบบทั้งหมดถูกเติมจนเต็ม วิธีการหล่อในลักษณะนี้จะถูกเรียกว่า solid casting
4. วัสดุภายในแม่แบบจะถูกทำให้แห้งจนกระทั่งมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะเคลื่อนย้าย และเอาวัสดุนั้นออกจากแม่แบบ
5. สุดท้าย วัสดุที่หล่อแล้วนี้จะถูกเผาเพื่อให้ได้สมบัติและโครงสร้างตามที่ต้องการ

กระบวนการ slip casting เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีผนังบาง และมีรูปร่างที่สลับซับซ้อน แต่ต้องการความหนาที่สม่ำเสมอ นอกจากนี้กระบวนการ slip casting นี้ยังเหมาะกับงานพัฒนาชิ้นส่วนและการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีจำนวนน้อยในเชิงเศรษฐศาสตร์ มีผลิตภัณฑ์หลายชนิดของกระบวนการ slip casting ที่ถูกหล่อภายใต้สภาวะความดันหรือสุญญากาศ

**กระบวนการ extrusion** วัสดุที่มีรูปร่างทรงกระบอกกลวงสามารถถูกผลิตขึ้นโดยกระบวนการ extrusion ผ่านแม่แบบ ซึ่งวิธีการนี้มักจะถูกใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น อิฐทนไฟ ท่อระบายน้ำ กระเบื้อง และฉนวนไฟฟ้า เป็นต้น เครื่องจักรที่มักถูกนำมาใช้คือเครื่อง vacuum-auger-type extrusion ซึ่งวัตถุดิบเซรามิกที่ประกอบด้วยดินเหนียวและน้ำจะถูกอัดผ่านแม่แบบที่เป็นเหล็กกล้าหรือโลหะผสมด้วย auger ที่ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์

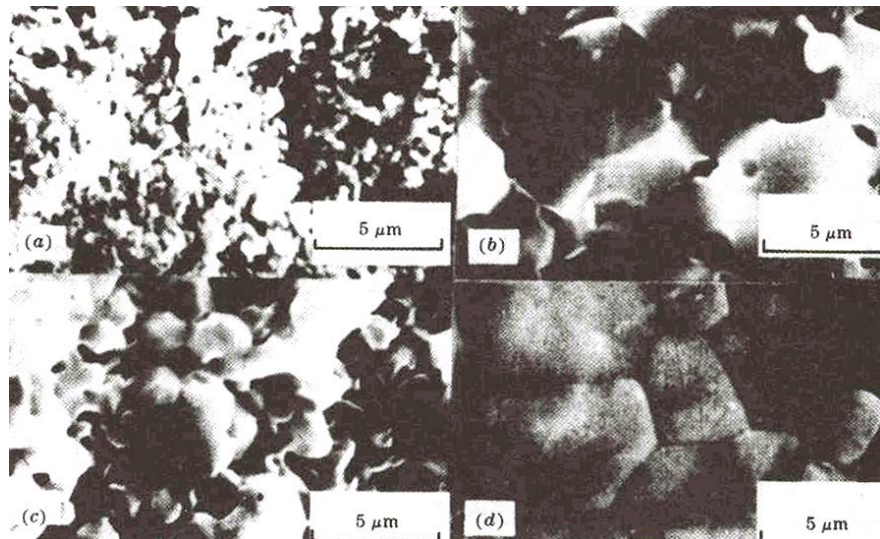
**กรรมวิธีทางความร้อน** เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิก ซึ่งมีหลายวิธีด้วยกัน คือ

1. การอบแห้งและการกำจัดสารยึดเหนี่ยว วัตถุประสงค์ของวิธีนี้คือ เพื่อกำจัดน้ำออกจากตัวเซรามิก ก่อนที่จะนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปการอบแห้งจะกระทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และอาจใช้เวลาถึง 24 ชั่วโมง ถ้าผลิต

ภัณฑ์เซรามิกนั้นต้องมีขนาดใหญ่และสารยึดเหนี่ยวเป็นสารจำพวกอินทรีย์ จะต้องเผาที่อุณหภูมิ 200-300°C เพื่อให้สารเหล่านี้หมดไป

2. Sintering คือกระบวนการที่ทำให้อนุภาคของวัสดุเซรามิกเกิดพันธะซึ่งกันและกัน โดยการแพร่ของของแข็งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้ส่วนที่เป็นรูพรุนของเนื้อวัสดุลดลงและมีความหนาแน่นมากขึ้น โดยมากวิธีนี้จะใช้กับเซรามิกจำพวก alumina, beryllia, ferrites และ titanates

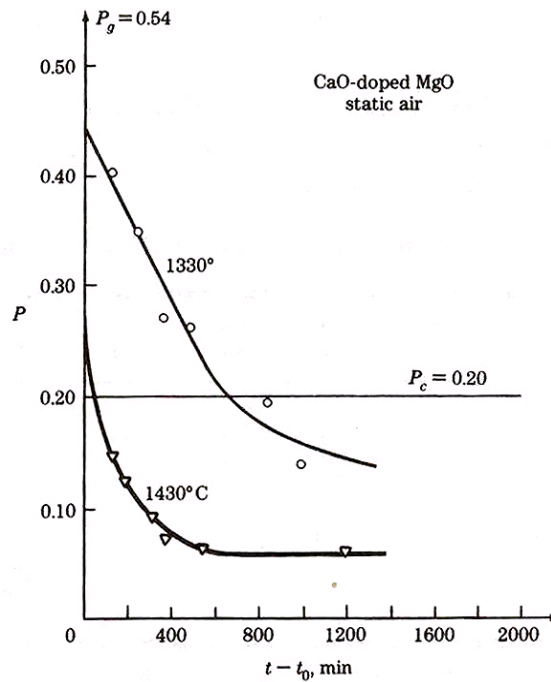
ในกระบวนการ sintering อนุภาคจะเกาะเข้ากันโดยการแพร่ภายใต้สถานะที่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิสูงมากแต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารประกอบที่ถูกเผานั้น ตัวอย่างเช่น ฉนวนของหัวเทียนที่ทำจากอะลูมินาจะถูกเผาที่อุณหภูมิ 1600°C (จุดหลอมเหลวของอะลูมินาเท่ากับ 2050°C) ในกระบวนการ sintering การแพร่ของอะตอม จะเกิดขึ้นระหว่างหน้าผิวสัมผัสของอนุภาค ทำให้เกิดพันธะทางเคมีซึ่งกันและกันขึ้น ถ้ากระบวนการดำเนินต่อไป จะเกิดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากเกิดการรวมตัวของอนุภาคเล็ก ๆ เข้าด้วยกันมากขึ้น ดังเช่น การ sintering ของ MgO (ที่แสดงในรูปที่ 8.1 (a), (b) และ (c))



**รูปที่ 8.1** ภาพ Scanning electron micrographs ของพื้นผิวของ MgO (ผงที่ถูกอัดแน่น) ที่ถูกเผาที่ 1430°C ในสภาวะอากาศหนึ่งเป็นเวลา (a) 30 นาที (สัดส่วนรูพรุน = 0.39), (b) 303 นาที (f.p. = 0.14); (c) 1110 นาที (f.p. = 0.09); พื้นผิวของ (c) ที่ถูก annealed ได้แสดงดังรูป (d)

ขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการ sintering เพิ่มขึ้นอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ความพรุน (porosity) ของวัสดุจะลดลง (รูปที่ 8.2) สุดท้ายที่จุดสิ้นสุดของกระบวนการ ขนาดของเกรนจะเข้าสู่สภาวะสมดุล (รูปที่ 8.1 (d)) แรงที่ขับเคลื่อนให้กระบวนการดำเนินไป คือ การลดพลังงานของระบบให้ต่ำลง

3. Vitrification มีผลิตภัณฑ์เซรามิกบางชนิด เช่น porcelain และส่วนประกอบของวัสดุอิเล็กทรอนิกส์บางชนิดจะประกอบด้วยวัฏภาคของแก้ว วัฏภาคของแก้วนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเชื่อมประสานอนุภาคของเซรามิก กล่าวคือ เมื่อให้ความร้อนวัสดุเซรามิกเหล่านี้ แก้วจะหลอมเหลวและแพร่เข้าไปในช่องว่างของวัสดุ และบางครั้งอาจเกิดปฏิกิริยากับวัสดุที่อยู่ภายใน และเมื่ออุณหภูมิลดลง แก้วจะแข็งตัว และช่วยยึดอนุภาคที่ไม่หลอมเหลวให้ติดกัน



รูปที่ 8.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความพรุน และเวลาที่ใช้ในการ sintering ของ MgO ที่ถูกเติมด้วย CaO 0.2% โดยน้ำหนัก และถูกเผาภายใต้สภาวะอากาศนิ่งที่ 1330 และ 1430°C ข้อสังเกตคือ การเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความพรุนลดลงอย่างรวดเร็ว

### 8.3 วัสดุเซรามิกธรรมดาและเซรามิกวิศวกรรม

เซรามิกแบ่งได้ออกเป็น 2 พวก คือ

1. วัสดุเซรามิกธรรมดา (tradition ceramic) เซรามิกพวกนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ดินเหนียว ซิลิกา (flint) และเฟลสปาร์ (Feldspar) ส่วนใหญ่ดินเหนียวประกอบด้วย hydrated aluminum, silicates ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_2\text{H}_2\text{O}$ ) และออกไซด์อื่น ๆ เช่น  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{K}_2\text{O}$

ตารางที่ 8.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินเหนียวบางชนิด

Weight percentages of major oxides										Ignition loss
Type of clay	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}$	
Kaolin	37.4	45.5	1.68	1.30	0.004	0.03	0.011	0.005	13.9	
Tenn. ball clay	30.9	54.0	0.74	1.50	0.14	0.20	0.45	0.72	...	11.4
Kv. ball clay	32.0	51.7	0.90	1.52	0.21	0.19	0.38	0.89	...	12.3

ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในดินเหนียว อาจถูกเรียกว่า flint หรือ quartz จะมีจุดหลอมเหลวที่สูงและทนไฟได้ดี ส่วน potash (potassium) feldspar ซึ่งมีสูตรเคมี  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$  จะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าและเกิดเป็นแก้วได้เมื่อถูกเผา แก้วนี้จะทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานส่วนประกอบที่ทนไฟ (silica) เข้าด้วยกัน

ผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ทำจากดินเหนียว ได้แก่ อิฐที่ใช้ในการก่อสร้าง ท่อระบายน้ำ กระเบื้องมุงหลังคา และ กระเบื้องปูพื้น เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์ whiteware เช่น ถ้วยไฟฟ้า ถ้วยชาม และเครื่องสุขภัณฑ์จะถูกทำจากส่วนประกอบของดินเหนียว ซิลิกา และเฟลสปาร์ โดยมีการควบคุมองค์ประกอบ ตารางที่ 8.3 ได้รวบรวมองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ whiteware ที่ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ชนิด (triaxial)

ตารางที่ 8.3 องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ whiteware บางชนิด

Type body	China clay	Ball clay	Feldspar	Flint	Other
Hard porcelain	40	10	25	25	
Electrical insulation ware	27	14	26	33	
Vitreous sanitary ware	30	20	34	18	
Electrical insulation	23	25	34	18	
Vitreous tile	26	30	32	12	
Semivitreous whiteware	23	30	25	21	
Bone china	25	...	15	22	38 bone ash
Hotel china	31	10	22	35	2 CaCO <sub>3</sub>
Dental porcelain	5	...	95		

Source: W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics," 2d ed., Wiley, 1976, p. 532.

2. วัสดุเซรามิกวิศวกรรม (engineering ceramics) หรือเซรามิกทางเทคนิค (technical ceramics) เซรามิกชนิดนี้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารบริสุทธิ์ หรือเกือบบริสุทธิ์ ของสารประกอบออกไซด์ คาร์ไบด์ หรือไนไตรด์ วัสดุเซรามิกวิศวกรรมที่สำคัญ เช่น อะลูมินา ซิลิคอนไนไตรด์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และเซอร์โคเนียม

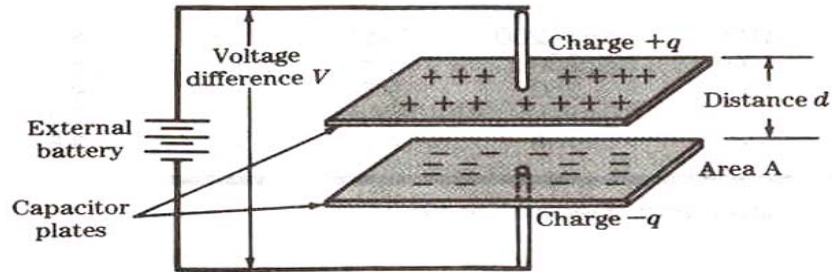
#### 8.4 สมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิก

วัสดุเซรามิกได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมาก กล่าวคือ มีวัสดุเซรามิกหลายชนิดที่ถูกใช้เป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าทั้งต่ำและสูง และยังได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitors) ชนิดต่าง ๆ ที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้เซรามิกบางชนิดยังมีสมบัติพิเศษที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแรงดันทางกลไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า หรือในทางกลับกัน ก็สามารถเปลี่ยนสัญญาณทางไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแรงดันทางกลได้เช่นกัน ซึ่งวัสดุเซรามิกที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะถูกเรียกว่า piezoelectrics

ก่อนที่จะกล่าวถึงสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวัสดุเซรามิกชนิดต่าง ๆ จะขอกล่าวถึงสมบัติพื้นฐานบางชนิดของฉนวน หรือวัสดุไดอิเล็กตริก ดังนี้คือ

1. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant)
2. dielectric breakdown strength
3. loss factor

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) เราลองพิจารณาตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนาน (parallel-plate capacitor) ที่ประกอบด้วยแผ่นโลหะที่มีพื้นที่  $A$  และแยกห่างกันเป็นระยะ  $d$  ดังแสดงในรูปที่ 8.3



รูปที่ 8.3 แสดงตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนาน (parallel-plate capacitor) แบบธรรมดา

ในกรณีที่ช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะเป็นสุญญากาศ เมื่อใส่ความต่างศักย์  $V$  ให้กับแผ่นโลหะ ที่แผ่นโลหะหนึ่งจะมีประจุสุทธิเป็น  $+q$  และอีกแผ่นโลหะแผ่นหนึ่งจะมีประจุสุทธิเป็น  $-q$  ค่าประจุ  $q$  จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์  $V$  ดังนี้คือ

$$q = CV \quad \text{หรือ} \quad C = \frac{q}{V}$$

เมื่อ  $C$  เป็นค่าคงที่ซึ่งถูกเรียกว่าความจุ (capacitance) ของตัวเก็บประจุ หน่วยในระบบ SI ของความจุ คือ coulomb/volt (C/V) หรือ farad (F) ดังนั้น 1 farad = 1 coulomb/volt

เนื่องจากหน่วยของความจุจะมีค่าน้อยมาก เพราะฉะนั้นจึงมักจะใช้เป็น picofarad ( $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$ ) หรือ microfarad ( $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$ )

ค่าความจุของตัวเก็บประจุเป็นค่าวัดความสามารถในการเก็บประจุทางไฟฟ้า กล่าวคือ ถ้าค่าความจุมีค่าสูง ประจุที่ถูกเก็บไว้ในแผ่นโลหะก็จะมากด้วย ค่าความจุ  $C$  จะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของแผ่นโลหะและระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะ ดังนี้

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  = permittivity ของ free space =  $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ถ้าช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะถูกใส่ด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก (หรือฉนวน) ค่าความจุของตัวเก็บประจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยตัวคูณ  $k$  ซึ่งเรียกว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric) ของวัสดุไดอิเล็กตริก ดังนี้

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{d}$$

ตารางที่ 8.4 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฉนวนเซรามิกบางชนิด

Material	Volume resistivity, $\Omega \cdot m$	Dielectric strength		Dielectric constant $\kappa$		Loss factor	
		V/mil	kV/mm	60 Hz	$10^6$ Hz	60 Hz	$10^6$ Hz
Electrical porcelain insulators	$10^{11}$ – $10^{13}$	55–300	2–12	6	...	0.06	
Steatite insulators	$>10^{12}$	145–280	6–11	6	6	0.008–0.090	0.007–0.024
Fosterite insulators	$>10^{12}$	250	9.8	...	6	...	0.001–0.002
Alumina insulators	$>10^{12}$	250	9.8	...	9	...	0.0008–0.001
Soda-lime glass	...	...	...	...	7.2	...	0.009
Fused silica	...	8	...	...	3.8	...	0.00004

Source: Materials Selector, Mater. Eng., December 1982.

พลังงานที่ถูกเก็บสะสมในตัวเก็บประจุในปริมาตรที่กำหนดที่ค่าความต่างศักย์ค่าหนึ่ง จะเพิ่มขึ้นโดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเมื่อมีวัสดุไดอิเล็กตริกอยู่  
ถ้าใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงจะสามารถผลิตตัวเก็บประจุที่มีขนาดเล็กลงได้

**Dielectric strength** เป็นปริมาณที่บอกถึงความสามารถของวัสดุในการที่จะเก็บพลังงานไว้ได้ที่ความต่างศักย์สูง ๆ ซึ่งถูกนิยามไว้เป็น volt ต่อหน่วยความยาว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า คือค่าที่บอกถึงปริมาณสนามไฟฟ้าสูงสุดที่วัสดุยังคงรักษาความเป็นฉนวนไว้ได้

โดยทั่วไป ค่า dielectric strength จะมีหน่วยเป็น V/mil (1 mil = 0.001 นิ้ว) kV/mm ถ้าวัสดุไดอิเล็กตริกถูกป้อนด้วยความต่างศักย์ที่สูงมาก ๆ อาจทำให้ความเค้นของอิเล็กตรอนหรือไอออนในการที่จะพยายามไหลผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกมีค่าเกินกว่าค่า dielectric strength และถ้ามีค่าเกินกว่าค่า dielectric strength วัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกทำลายและทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น ค่า dielectric strength ของวัสดุฉนวนเซรามิกบางชนิดถูกแสดงไว้ในตารางที่ 8.4

**Dielectric loss factor** โดยปกติ ถ้าความต่างศักย์ที่ใช้ในการรักษาประจุบนตัวเก็บประจุมีรูปร่างสัญญาณเป็นลักษณะ sinusoidal เช่น ความต่างศักย์จากกระแสไฟฟ้าสลับ กระแสไฟฟ้าจะอยู่นำหน้าความต่างศักย์  $90^\circ$  เสมอ เมื่อไม่มีการสูญเสียพลังงานระหว่างแผ่นโลหะ แต่โดยความเป็นจริงแล้ว กระแสไฟฟ้าจําหน้าความต่างศักย์  $90^\circ - \delta$  ซึ่ง  $\delta$  คือ dielectric loss angle และผลคูณของ  $\kappa \tan \delta$  คือ loss factor ซึ่งเป็นค่าปริมาณที่บอกถึงพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อนของตัวเก็บประจุในวงจรกระแสไฟฟ้าสลับ ตารางที่ 8.4 ได้แสดงค่า loss factor ของวัสดุฉนวนของเซรามิกบางชนิดไว้

## 8.5 วัสดุเซรามิกที่ใช้เป็นฉนวน

วัสดุเซรามิกเป็นวัสดุที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมที่สามารถนำมาใช้เป็นฉนวนในงานอุตสาหกรรม



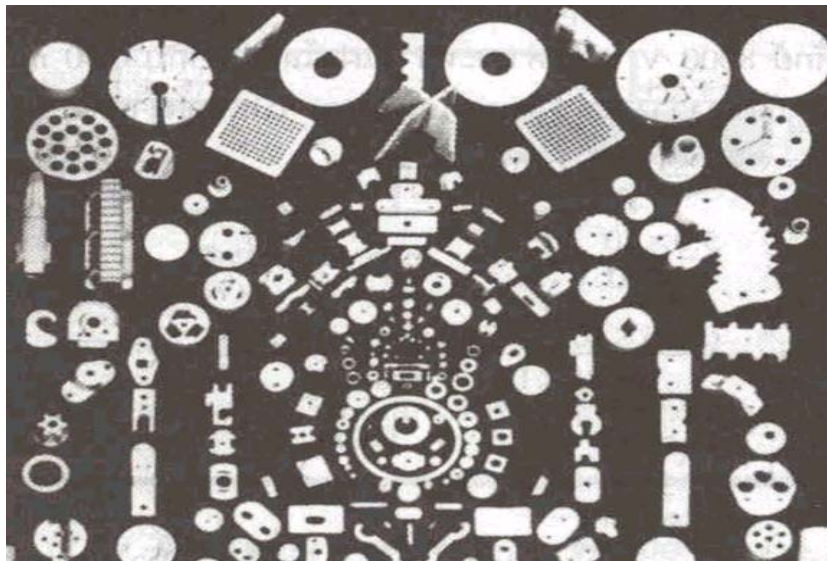
สาหรณทางดานไฟฟาและอเล็กทรอนิกสอยางมาก เนื่องจากพันธะระหวางอะตอมที่เกิดขึ้นในเซรามิกเป็นพันธะแบบไอออนิกและโคเวเลนต์ที่แข็งแรง ดังนั้น จึงทำให้อเล็กตรอนและไอออนถูกจำกัดในการเคลื่อนที่ เป็นผลทำให้วัสดุเซรามิกมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟาที่ดี และสมบัติเชิงกลที่แข็งแรงแต่นองขางเปราะ ตัวอย่างของเซรามิกที่ใช้เป็นฉนวนมีดังนี้

**Electrical porcelain** ประกอบด้วยดินเหนียว 50%, ซิลิกา 25% และ feldspar องค์ประกอบเช่นนี้จะทำให้วัสดุมีสภาพพลาสติกที่ดีและช่วงของอุณหภูมิในการเผาองขางกวาง โดยมีราคาต้นทุนต่ำ ข้อเสียของวัสดุเซรามิกที่ใช้เป็นฉนวนชนิดนี้คือ มีค่า loss factor สูงกว่าวัสดุชนิดอื่น (ตารางที่ 8.4) เพราะแอลคาไลออนมีการเคลื่อนที่ได้ดี

**Steatite** steatite porcelains เป็นฉนวนทางไฟฟาที่ดี เพราะมี power-loss factor ต่ำ, ไม่ดูดความชื้น และมีค่า impact strength สูง วัสดุเซรามิกชนิดนี้ถูกใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟา และอเล็กทรอนิกสอยางกวางขวง steatite ที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะประกอบด้วย 90% talc และ 10% clay โครงสร้างของ steatite จะประกอบด้วยผลึก enstatite ที่เกิดพันธะร่วมนกันด้วยแก้ว (glassy matrix)

**Fosterite** มีสูตรทางเคมีดังนี้คือ  $Mg_2SiO_4$  และเนื่องจากไม่มีแอลคาไลออน จึงทำให้มีความต้านทานสูง และมีการสูญเสียพลังงานต่ำกว่า steatite เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ fosterite ยังมี loss factor ต่ำที่ความถี่สูง (ตารางที่ 8.4)

**Alumina** เซรามิกอะลูมินาจะประกอบด้วยผลึก  $Al_2O_3$  ที่เกิดพันธะร่วมนกันด้วยแก้ว วัฏภาคของแก้วนี้เกิดจากการผสมระหวางดินเหนียว talc และ alkaline earth fluxes ซึ่งปราศจากแอลคาไล เซรามิกอะลูมินาจะมีค่า dielectric strengths ที่สูงและ dielectric losses ที่ต่ำและมีความแข็งแรงสูง อะลูมินาที่ผ่านกระบวนการ sintering จะใช้ในอุปกรณ์ทางด้านอเล็กทรอนิกสมากมาย เนื่องจากมี dielectric losses ต่ำและมีพื้นผิวที่เรียบ



รูปที่ 8.4 ชิ้นส่วนของฉนวนอเล็กทรอนิกสและฉนวนไฟฟาบางชนิดที่ผลิตจาก steatite  
ประโยชน์ของเซรามิก เชิงไฟฟา

1. ทำเป็นฉนวนไฟฟา
2. ทำตัวเก็บประจุ capacitor
3. ทำสารกึ่งตัวนำ

## ประโยชน์ของเซรามิก เซิงกลและความร้อน

1. ทำผงขัด
2. ทำวัตถุทนไฟ
3. ทนกรดและด่าง

## แก้ว

แก้วเป็นวัสดุที่มีลักษณะพิเศษซึ่งไม่มีวัสดุวิศวกรรมใดเหมือน เพราะเป็นวัสดุที่โปร่งใส แข็งที่อุณหภูมิห้อง พร้อมกันนั้นมีความแข็งแรงเพียงพอและทนทานต่อการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ดังนั้น จึงทำให้แก้วเป็นวัสดุที่ขาดเสียไม่ได้ในงานวิศวกรรมต่าง ๆ เช่น งานก่อสร้างและกระจกของยานพาหนะต่าง ๆ หลอดสุญญากาศและหลอดไฟ ในงานทางด้านอุตสาหกรรมไฟฟ้า และเครื่องมือเครื่องแก้วต่าง ๆ ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น

แก้วคือ วัสดุเซรามิกที่ถูกทำขึ้นจากสารอนินทรีย์ที่อุณหภูมิสูง แก้วแตกต่างจากวัสดุเซรามิกอื่น ๆ คือ เมื่อบดประกอบถูกหลอมเหลวโดยให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวลงแล้ว แก้วจะแข็งตัวโดยไม่เกิดโครงสร้างผลึก ดังนั้นแก้วจึงเป็นวัสดุที่ไม่มีผลึก หรืออสัณฐาน โมเลกุลของแก้วจะไม่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ



ตารางที่ 8.5 องค์ประกอบของแก้วบางชนิด

Glass	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Other	Remarks
1. (Fused) silica	99.5+							Difficult to melt and fabricate but usable to 1000°C. Very low expansion and high thermal shock resistance
2. 96% silica	96.3	<0.2	<0.2		2.9	0.4		Fabricate from relatively soft borosilicate glass; heat to separate SiO <sub>2</sub> and B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> phases; acid leach B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> phase; heat to consolidate pores.
3. Soda-lime: plate glass	71–73	12–14		10–12		0.5–1.5	MgO, 1–4	Easily fabricated. Widely used in slightly varying grades, for windows, containers, and electric bulbs.
4. Lead silicate: Electrical	63	7.6	6	0.3	0.2	0.6	PbO, 21 MgO, 0.2	Readily melted and fabricated with good electrical properties. High lead absorbs x-rays; high refractive used in achromatic lenses. Decorative crystal glass.
5. High-Lead	35		7.2				PbO, 58	
6. Borosilicate: Low expansion	80.5	3.8	0.4		12.9	2.2		Low expansion, good thermal shock resistance, and chemical stability. Widely used in chemical industry.
7. Low electrical loss	70.0		0.5		28.0	1.1	PbO, 1.2	Low dielectric loss.
8. Aluminoborosilicate: Standard apparatus	74.7	6.4	0.5	0.9	9.6	5.6	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 2.2	Increased alumina, lower boric oxide improves chemical durability.
9. Low alkali (E-glass)	54.5	0.5		22	8.5	14.5		Widely used for fibers in glass resin composites.
10. Aluminosilicate	57	1.0		5.5	4	20.5	MgO, 12	High-temperature strength, low expansion.
11. Glass-ceramic	40–70					10–35	MgO, 10–30 TiO <sub>2</sub> , 7–15	Crystalline ceramic made by devitrifying glass. Easy fabrication (as glass), good properties. Various glasses and catalysts.

## 9. วัสดุผสม

### 9.1 วัสดุผสมคืออะไร

ในปัจจุบันคำนิยามของคำว่าวัสดุผสม (Composite Materials) ที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางนั้นยังไม่มี แต่ถ้าหากดูจากพจนานุกรมซึ่งได้คำนิยามไว้ว่า วัสดุผสมเป็นสิ่งใดก็ได้ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ในระดับของอะตอมของวัสดุ เช่น โลหะผสมบางชนิด และวัสดุพอลิเมอร์ สามารถเรียกได้ว่าเป็นวัสดุผสม เพราะมันประกอบด้วยกลุ่มอะตอมที่แตกต่างกัน ถ้าพิจารณาจากโครงสร้างในระดับไมโคร (ประมาณ  $10^{-4}$ - $10^{-2}$  ซม.) ของโลหะผสม เช่น เหล็กกล้าธรรมดาจะประกอบด้วยเฟอร์ไรต์ (ferrite) และเพิร์ลไลท์ (pearlite) สามารถเรียกได้ว่าเป็นวัสดุผสมเพราะเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลท์มีองค์ประกอบที่ต่างกัน (เป็นโครงสร้างที่เป็นยูเทคตอยด์ของเหล็กกล้า) ซึ่งสามารถดูได้จากกล้องไมโครสโคปที่ระดับแมโคร (ประมาณ 10<sup>-2</sup> ซม. หรือมากกว่า) พลาสติกที่เสริมแรงด้วยใยแก้วสามารถ

มองเห็นด้วยตาเปล่าว่ามีใยแก้วผสมกับพอลิเมอร์ จึงถือว่าวัสดุผสมในขณะนี้เราพอจะเห็นได้แล้วว่าความยากในการให้คำนิยามของวัสดุผสมอยู่ที่ความจำกัดของขนาดขององค์ประกอบในวัสดุนั้น ๆ ในงานออกแบบทางวิศวกรรม โดยทั่วไปวัสดุผสมจะหมายถึงวัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีขนาดอยู่ในช่วงของไมโครถึงแมโคร แต่ชอบที่จะให้อยู่ในช่วงแมโครมากกว่า

วัสดุผสม (composite material) เป็นระบบของวัสดุที่ประกอบด้วยของผสมหรือเป็นการรวมกันของสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปทั้งในขนาดไมโครหรือแมโครก็ได้ ที่องค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันและจะต้องไม่ละลายเข้าด้วยกัน

ความสำคัญทางวิศวกรรมของวัสดุผสมอยู่ที่ว่าวัสดุ 2 ชนิดมากกว่า 2 ชนิดที่นำมาผสมกันให้ได้วัสดุผสมที่มีสมบัติพิเศษดีเป็นพิเศษหรือให้มีลักษณะที่สำคัญบางอย่างแตกต่างไปจากสารเดิม

วัสดุต่างๆ ที่จัดอยู่ในพวกวัสดุผสมนั้นมีมากมาย แต่จะขอกล่าวเฉพาะที่มีความสำคัญที่สุดต่องานวิศวกรรมเท่านั้น ซึ่งได้แก่ พลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย คอนกรีต ยางมะตอย ไม้และอื่น ๆ เช่นการใช้วัสดุผสมในการออกแบบเชิงวิศวกรรม

### 9.2 วัสดุผสมที่เป็นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย

เส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้เสริมแรงพลาสติกในสหรัฐอเมริกา มีด้วยกัน 3 ประเภทหลัก คือ เส้นใยแก้ว อะรามิด เส้นใยอะรามิดเป็นพลาสติกพวก อะโรมาติก พอลิอะไมด์ที่มีโครงสร้างของโมเลกุลแข็งมาก ๆ (very rigid) และเส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว คือพวกที่ใช้กันมากที่สุดและมีราคาต่ำสุด เส้นใยอะรามิด และเส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงสูง และมีความหนาแน่นต่ำ และนำไปประยุกต์ได้มากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างยานอวกาศ เนื่องจากมีราคาแพง

#### ใยแก้วสำหรับเสริมแรงพลาสติกเรซิน

ใยแก้วที่นำมาใช้เสริมแรงพลาสติก เพื่อให้มีโครงสร้างแบบวัสดุผสมและใช้สำหรับทำแบบหรือแม่พิมพ์ (molding compounds) วัสดุพวกนี้จะมีลักษณะเฉพาะที่ดีคือ มีความแข็งแรงสูง มีรูปทรงที่เสถียร เป็นฉนวนความร้อนที่ดี ไม่ดูดความชื้น ทนทานต่อการผุกร่อน เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ขึ้นรูปง่าย และมีราคาค่อนข้างถูก

แก้วที่ใช้สำหรับทำใยแก้ว ที่นับว่าสำคัญที่สุดมีอยู่ 2 ประเภท คือ E (electrical) glasses และ S (high-strength) glasses

E glass เป็นเส้นใยแก้วที่ใช้กันมากที่สุด และใช้กับกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง E glass เป็นแก้วที่ได้จากสารประกอบของ lime-aluminum-borosilicate ซึ่งไม่มีโซเดียมหรือโพแทสเซียมหรือมีปริมาณน้อย องค์ประกอบหลักของ E glass คือมีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) 52-56% อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 12-16% แคลเซียมออกไซด์ 16-15% และโบรอนออกไซด์ ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) 8-13% E glass ที่บริสุทธิ์มี tensile strength ประมาณ 500 ksi (3.44 GPa) และมี modulus of elasticity 10.5 Msi (72.3 GPa)

S glass มีค่าอัตราส่วนของ Strength ต่อน้ำหนักสูงกว่าและราคาแพงกว่า E glass และในระยะเริ่มแรก S glass จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ทางการทหารและอวกาศ tensile strength ของ S glass มีค่ามากกว่า 650 Ksi (4.48  $\text{SiO}_2$ ) ประมาณ 65% อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 25% และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) 10%

**การผลิตใยแก้ว (glass fibers) และแบบต่าง ๆ ของวัสดุที่เสริมแรงด้วยใยแก้ว (fiber glass reinforcing)**

ใยแก้วหรือไฟเบอร์กลาสผลิตได้จากการดึงแก้วที่กำลังหลอมเหลวอยู่ในเตาให้ออกมาเป็นเส้นเล็ก ๆ (filaments) แล้วนำมาม้วนเข้าด้วยกันทำเป็นเกรียว เส้นใยเล็ก ๆ เหล่านี้นำไปทำใยแก้วหรือให้อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (roving) หรืออาจจะทอเป็นแผ่นไฟเบอร์ แผ่นใยแก้วที่ทอเป็นผืนใช้ในการเสริมแรง แผ่นใยแก้วสามารถตัดทำเป็นรูปร่างต่าง ๆ เส้นใยเล็ก ๆ อาจทำให้มันอยู่รวมกันได้โดยใช้เรซิน ส่วนแผ่นใยแก้วจะทำให้ติดกันได้ด้วยพันธะเคมี

#### สมบัติของใยแก้ว

การเปรียบเทียบสมบัติเกี่ยวกับแรงดึง (Tensile properties) และความหนาแน่นของเส้นใยแก้วอี เทียบกับเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยอะรามิด ได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 9.1 จะเห็นว่าเส้นใยแก้วมี Tensile strength และมอดูลัสยืดหยุ่นที่ดีต่ำกว่าใยคาร์บอนและใยอะรามิด แต่มีค่าความยืดมากกว่า ความหนาแน่นของใยแก้วก็สูงกว่าของใยคาร์บอนและใยอะรามิด อย่างไรก็ตามใยแก้วก็ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางที่ใช้สำหรับเสริมแรงพลาสติกเพราะมีราคาถูก

ตารางที่ 9.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของเส้นใยที่ใช้เสริมแรงพลาสติก

Property	E glass (HTS)	Carbon (type HT)	Aramid (Kevlar 49)
Tensile strength, ksi (MPa)	350 (2410)	450 (3100)	525 (3617)
Tensile modulus, Msi (GPa)	10 (69)	32 (220)	18 (124)
Elongation to break, %	3.5	1.40	2.5
Density, g/cm <sup>3</sup>	2.54	1.75	1.48

#### เส้นใยคาร์บอนสำหรับเสริมแรงพลาสติก (Carbon Fibers for Reinforced Plastics)

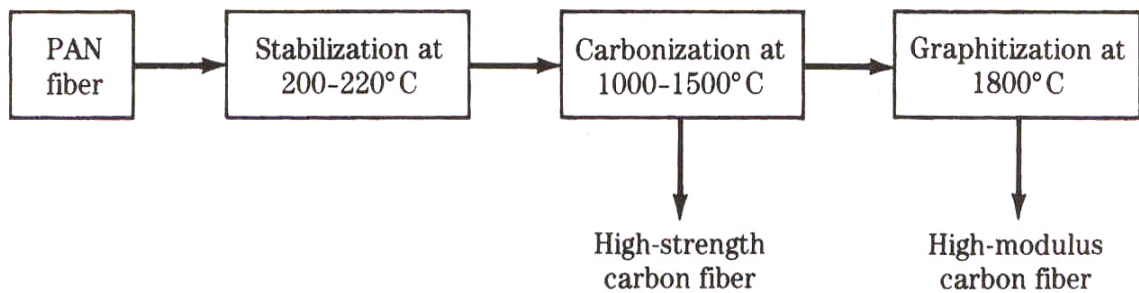
วัสดุผสมที่ผลิตจากการใช้ใยคาร์บอนไปเสริมแรงให้กับพลาสติกเรซิน (plastic resin) เช่น อีพอกซี (epoxy) เพื่อให้วัสดุผสมนั้นมีคุณลักษณะเฉพาะในหลาย ๆ ส่วนร่วมกัน คือทำให้มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง มีความแข็งตัวไม่โค้งงอง่าย สมบัติเหล่านี้ก่อให้เกิดความสนใจที่จะนำไปประยุกต์ทางด้านยานอวกาศ (aerospace) เช่น สร้างเครื่อง

บิน โดยใช้วัสดุผสมที่ทำด้วยใยคาร์บอนเสริมแรงพลาสติก แต่เนื่องจากราคาของเส้นใยคาร์บอนค่อนข้างสูง จึงทำให้การนำไปใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ต้องจำกัดตัวลง

เส้นใยคาร์บอนที่ใช้วัสดุผสมนี้ ทำมาจากแหล่งที่สำคัญ 2 แหล่งคือ พอลิอะครีโลไนไทรล์ (Polyacrylonitrile, PAN) กับยางมะตอย (pitch) ซึ่งเป็นตัวที่เกิดขึ้นมาก่อนที่จะเป็นเส้นใยคาร์บอนเรียกว่า พรีเคอร์เซอร์ (Precursor)

โดยทั่วไปเส้นใยคาร์บอนผลิตมาจาก PAN-precursor ด้วยกระบวนการ 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ

1. กระบวนการทำให้เสถียร (stabilization)
2. กระบวนการทำให้เกิดคาร์บอน (Carbonization)
3. กระบวนการทำให้เป็นแกรไฟต์ (graphitization)



**รูปที่ 9.1** แสดงขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตใยคาร์บอนที่มีความแข็งแรงและโมดูลัสสูงจากพอลิอะครีโลไนไทรล์ (PAN) พรีเคอร์เซอร์

ขั้นตอนแรกเป็นกระบวนการทำให้เสถียร (Stabilization stage) ขั้นตอนนี้เส้นใย PAN จะถูกดึงให้ยืดยาวเป็นเส้นตรง โดยให้เส้นใยแต่ละเส้นขนานกับแกนเส้นใย แล้วทำให้เกิดออกซิเดชันด้วยอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 200-220°C (392-428°F) ทั้ง ๆ ที่ยังดึงอยู่

ขั้นตอนที่สอง เป็นกระบวนการทำให้เกิดคาร์บอน (Carbonization) ซึ่งเป็นการผลิตเส้นใยคาร์บอนด้วยการกำจัดออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนจากเส้นใย PAN การเผาให้กลายเป็นคาร์บอนนี้ตามปกติจะเผาที่อุณหภูมิ 1000-1500°C ในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ในระหว่างการเกิดกระบวนการที่เปลี่ยนเป็นคาร์บอนนี้ เส้นใยนั้นจะเปลี่ยนเป็นเส้นใยเล็ก ๆ หรือเป็นแถบ (ribbon) คล้ายแกรไฟต์ ขึ้นในแต่ละเส้นใย ซึ่งทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมาก

ขั้นที่สามหรือการทำให้เส้นใยเป็นแกรไฟต์ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับเพิ่มอึดลัสติกมอดูลัสจากการที่มีความแข็งแรงสูง ในระหว่างที่มีการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1800°C เส้นใยแต่ละเส้นจะมีการเปลี่ยนโครงสร้างกลายเป็นผลึกคล้ายแกรไฟต์เพิ่มขึ้น

### วัสดุผสมพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย

เรซินพอลิเอสเทอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว (Fiberglass-reinforced polyester resins) ความแข็งแรงของพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วนั้น ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับปริมาณของแก้วและการจัดตัวของใยแก้ว โดยทั่วไปถ้าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแก้วในวัสดุผสมมีค่าสูงกว่า ความแข็งแรงของพลาสติกเสริมแรงก็จะแข็งแรงกว่าด้วย เมื่อมีเส้นใยแก้วที่พันกันเป็นเกลียวขนานกัน อาจทำให้ปริมาณของใยแก้วมีในวัสดุผสมได้ถึง 80% โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้วัสดุนี้มีความแข็งแรงสูง

## คอนกรีต

คอนกรีต (concrete) เป็นวัสดุวิศวกรรมหลักที่ใช้ในการก่อสร้าง วิศวกรโยธาใช้คอนกรีตในการออกแบบก่อสร้าง เช่น สร้างสะพาน อาคาร เขื่อน กำแพงสำหรับกักเก็บและกั้นน้ำ และใช้สร้างถนน ในปี 1993 สหรัฐอเมริกาผลิตคอนกรีตใช้ประมาณ  $60 \times 10^7$  เมตริกตัน ซึ่งมากกว่าเหล็กกล้าถึง  $8.7 \times 10^7$  เมตริกตันในปีเดียวกัน เมื่อก้าวถึงวัสดุก่อสร้างแล้วคอนกรีตมีข้อได้เปรียบกว่าวัสดุอื่นๆ มากมาย เช่น ง่ายต่อการออกแบบและเปลี่ยนแปลงได้ง่าย สามารถหล่อได้ ประหยัดราคาถูก มีความทนทาน ป้องกันไฟได้ สามารถนำไปประกอบหรือสร้างที่บริเวณงานได้ และยังสามารถออกแบบหรือสร้างให้สวยงามได้ สิ่งที่เป็นข้อเสียของคอนกรีต โดยพิจารณาจากทัศนะของวิศวกร คือ คอนกรีตมี tensile strength ต่ำ ความอ่อนตัวหรือความเหนียวต่ำ และมีการหดตัวบวม

คอนกรีตเป็นวัสดุผสมประเภทเซรามิกชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่หยาบของวัสดุฝังตัวอยู่ในเมทริกซ์แข็งของเนื้อซีเมนต์ (ตัวเชื่อม) ซึ่งตามปกติจะเป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์กับน้ำ คอนกรีตอาจมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันบ้าง แต่ตามปกติแล้วจะประกอบด้วยปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ 7-15% น้ำ 14-21% อากาศ  $\frac{1}{2}$ -8% ส่วนผสมที่ละเอียดเป็นผง 24-30% และส่วนผสมที่เป็นอนุภาคหยาบ 31-51% โดยปริมาตร รูปที่ 13.27 แสดงภาพตัดขวางของตัวอย่างคอนกรีตที่ขัดมันแล้ว เนื้อซีเมนต์ในคอนกรีตจะทำหน้าที่เป็นกาวเพื่อยึดอนุภาคต่างๆ เข้าด้วยกันเป็นวัสดุผสม ต่อไปนี้เรามาดูลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบของคอนกรีตและสมบัติบางอย่างของมัน

### ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

การผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ วัตถุดิบที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ได้แก่ ปูนขาว หรือไลม์ (CaO) ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) องค์ประกอบเหล่านี้จะมีอัตราส่วนที่พอเหมาะในการผลิตปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดต่างๆ วัตถุดิบที่ได้รับการคัดเลือกมาแล้วนำมาย่อย บดให้ละเอียด แล้วนำมาผสมกันให้เข้ากันตามอัตราส่วนที่ต้องการ ของผสมที่ได้นี้จะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1400 ถึง 1650°C (2600-3000°F) ในเตาหมุน (rotary kiln) ในกระบวนการนี้ของผสมเมื่อถูกเผาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้น ผลที่ได้จะเป็นก้อนซีเมนต์ (cement clinker) หลังจากทำให้เย็นแล้วนำไปบดให้ละเอียด และผสมผงยิปซัม (Gypsum CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) ลงไปอีกเล็กน้อย เพื่อควบคุมเวลาแข็งตัว (setting time) ของคอนกรีต

**องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์**

จากความคิดและข้อสรุปเชิงปฏิบัติการ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์สามารถประกอบด้วยสารประกอบหลัก 4 อย่างคือ

สารประกอบ	สูตรเคมี	ตัวย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	3CaO·SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	2CaO·SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต	3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์	4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

### ชนิดต่าง ๆ ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ชนิดต่าง ๆ ของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ผลิตออกมาจากการแปรเปลี่ยนปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีข้างบนนี้ โดยทั่วไปมีองค์ประกอบหลักทางเคมีอยู่ 5 อย่างดังแสดงในตารางที่ 9.2

ตารางที่ 9.2 แสดงองค์ประกอบที่สำคัญทางเคมีของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

Cement type	ASTM C150 designation	Compositions, wt %*			
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Ordinary	I†	55	20	12	9
Moderate heat of hydration, moderate sulfate resistance	II	45	30	7	12
Rapid hardening	III	65	10	12	8
Low heat of hydration	IV	25	50	5	13
Sulfate-resistant	V	40	35	3	14

\*Missing percentages consist of gypsum, and minor components such as MgO, alkali sulfate, etc.

†This is the most common of all cement types.

Source: J. F. Young, *J. Educ. Module Mater. Sci.*, 3:410 (1981). Used by permission, the *Journal of Materials Education*, University Park, Pa.

**ชนิดที่ 1 (Type I)** เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ใช้ทั่วไป ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ใช้ทำคอนกรีตที่จะต้องไม่ใช้หรือถูกกับดินหรือน้ำที่มีปริมาณซัลเฟตสูง หรือต้องไม่มีความร้อนเกิดขึ้นจากการที่ซีเมนต์รวมกับน้ำ เพราะเกิดไฮเดรชัน ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนรับไม่ได้ ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 นี้ใช้ประยุกต์ในการทำคอนกรีตสร้างทางเท้า อาคารคอนกรีตเสริมแรง สร้างสะพาน ท่อระบายน้ำ แท็งก์น้ำและอ่างเก็บน้ำ

**ชนิดที่ 2 (Type II)** ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดนี้ใช้กับงานที่มีปริมาณซัลเฟตเป็นตัวทำลายขนาดปานกลาง เช่น ทำโครงสร้างทางระบายน้ำโดยที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำบาดาลสูงกว่าปกติ ซีเมนต์ชนิดนี้ปกติจะใช้ในสภาพบรรยากาศที่ร้อนสำหรับทำโครงสร้างใหญ่ เช่น สร้างตอม่อใหญ่ๆ และสร้างกำแพงใหญ่ๆ สำหรับกักเก็บน้ำ ซีเมนต์ชนิดนี้ให้ความร้อนเมื่อรวมกับน้ำเพราะเกิดไฮเดรชันขนาดปานกลาง

**ชนิดที่ 3 (Type III)** เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ที่ได้พัฒนาให้มีความแข็งแรงสูงจากดั้งเดิม เป็นซีเมนต์ที่ใช้ทำคอนกรีตที่ต้องเอาโครงสร้างออกเร็ว เพื่อว่าจะได้ใช้งานให้เร็วขึ้น

**ชนิดที่ 4 (Type IV)** เป็นซีเมนต์ที่ให้ความร้อนจากไฮเดรชันต่ำ จึงนำไปใช้งานเมื่อต้องการให้ความร้อนที่เกิดขึ้นต่ำที่สุด ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 4 นี้ใช้งานทำคอนกรีตที่เป็นโครงสร้าง โดยใช้ซีเมนต์จำนวนมากๆ เช่น สร้างเขื่อนใหญ่ ๆ โดยที่ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการแข็งตัวของซีเมนต์เป็นแพกเตอร์ที่วิกฤต

**ชนิดที่ 5 (Type V)** เป็นซีเมนต์ที่ต้านทานการทำลายจากซัลเฟต จึงใช้สำหรับทำคอนกรีตที่ต้องถูกกับดินและน้ำบาดาลที่มีปริมาณซัลเฟตสูง

การแข็งตัวของซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แข็งตัวได้ด้วยการเกิดปฏิกิริยากับน้ำ ที่เรียกว่า **ปฏิกิริยาไฮเดรชัน** ปฏิกิริยาเหล่านี้ซับซ้อนและยังเข้าใจได้ไม่สมบูรณ์นัก ไตรแคลเซียมซัลไฟเกต (C<sub>3</sub>S) และไดแคลเซียมซัลไฟเกต (C<sub>2</sub>S) เป็นองค์ประกอบของซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประมาณ 75% โดยน้ำหนัก และเมื่อสารประกอบ



เหล่านี้เกิดปฏิกิริยากับน้ำในระหว่างแข็งตัวของซีเมนต์ ผลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสารตัวนี้จะเกิดเป็นอนุภาคเล็กมากๆ (น้อยกว่า  $1\mu\text{m}$ ) และมีลักษณะเป็นคอลลอยด์เจล (colloidal gel) ในขณะที่เดียวกันแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ก็เกิดขึ้นด้วยจากการเกิดไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{S}$  และ  $\text{C}_2\text{S}$  และเป็นสารที่มีรูปร่างผลึก ปฏิกิริยาเคมีเหล่านี้เกิดขึ้นดังสมการ



สารไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_3\text{S}$ ) จะแข็งตัวเร็วและเป็นสารที่มีบทบาทเกี่ยวกับความแข็งแรงของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตอนเริ่มแรก การเกิดไฮเดรชันของ  $\text{C}_3\text{S}$  ส่วนมากจะใช้เวลาประมาณ 2 วัน ดังนั้นความแข็งแรงของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ในตอนเริ่มแรกจะมีปริมาณของ  $\text{C}_3\text{S}$  สูงกว่าสารอื่น

ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $\text{C}_2\text{S}$ ) เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำช้า และจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นต้องใช้เวลา 1 อาทิตย์แล้ว ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ ) เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วพร้อมกับมีความร้อนเกิดขึ้นด้วย อัตราที่สูง  $\text{C}_3\text{A}$  จะค่อยๆ ให้ความแข็งแรงในตอนแรก และจะต้องรักษาให้ซีเมนต์ที่ต่อต้านซัลเฟต (ชนิดที่ 5) อยู่ในระดับต่ำ

**น้ำผสมคอนกรีต (Mixing Water for Concrete)** น้ำธรรมชาติส่วนมากสามารถดื่มได้ และสามารถนำมาใช้คอนกรีตได้ แต่น้ำบางชนิดไม่สามารถดื่มได้ แต่สามารถใช้ทำซีเมนต์ได้ ถ้าน้ำมีสารเจือปน (impurity) ถึงระดับที่กำหนดไว้ น้ำนั้นจะต้องนำไปตรวจเสียก่อนว่าจะมีผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตหรือไม่

**วัสดุเฉื่อย (inert materials) สำหรับผสมคอนกรีต (Aggregates for Concrete)** วัสดุเฉื่อยหรือวัสดุที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี ตามปกติจะมีผสมอยู่ในคอนกรีตประมาณ 60-80% โดยปริมาตรของคอนกรีต และวัสดุเหล่านี้จะมีผลต่อสมบัติของคอนกรีตอย่างมาก วัสดุที่ใช้ผสมนี้อาจจะจำแนกออกเป็นพวกที่เป็นผงละเอียด และพวกเป็นก้อนหรือหยาบ พวกที่ละเอียดประกอบด้วยทรายซึ่งอาจมีขนาดถึง  $\frac{1}{4}$  นิ้ว (6 mm) ส่วนอนุภาคที่หยาบได้แก่อนุภาคที่ไม่สามารถผ่านเครื่องร่อนนัมเบอร์ 16 (ช่องกว้าง 1.18 mm) ช่วงของขนาดระหว่างพวกละเอียดกับพวกหยาบยังมีการเหลื่อมล้ำกันอยู่บ้าง หินที่ใช้ทำซีเมนต์ส่วนใหญ่จะหยาบ ส่วนแร่ธาตุ (minerals) เช่น ทรายโดยมากจะเป็นส่วนละเอียด

### การให้อากาศกระจายอยู่ในคอนกรีต (Air Entrainment)

คอนกรีตที่มีฟองอากาศเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไปอย่างสม่ำเสมอเป็นการปรับปรุงให้คอนกรีตป้องกันความเย็นและร้อนได้และยังช่วยทำให้คอนกรีตบางชนิดใช้งานได้ดีขึ้น สารที่จะทำให้เกิดฟองอากาศเมื่อเติมลงไปนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ บางชนิดแล้วจะจัดเป็นซีเมนต์อีกประเภทหนึ่ง โดยการเติมอักษร A เข้าไปหลังชนิดของซีเมนต์ เช่น ชนิด 1A (Type IA) และชนิด 2A (Type IIA) สารที่ทำให้เกิดฟองอากาศประกอบด้วยสารที่เรียกว่า surface-active agents หรือเป็นพวก surfactants ซึ่งก็คือผงซักฟอก สารพวกนี้จะทำหน้าที่ลดแรงตึงผิว (surface tension) ระหว่างอากาศกับผิวน้ำจึงทำให้ฟองอากาศเล็กๆ เกิดขึ้น (90% ของฟองอากาศจะมีขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร) เมื่อทำให้คอนกรีตเย็บจัดพอดีจะช่วยป้องกันให้ฟองอากาศยังคงอยู่ในคอนกรีตประมาณ 4-8% โดยปริมาตร

**ความแข็งแรงต่อการอัดของคอนกรีต** คอนกรีตโดยพื้นฐานแล้วเป็นวัสดุผสมเซรามิก ซึ่งมีความแข็งแรงมากต่อแรงอัดมากกว่าแรงดึง ดังนั้นการออกแบบทางวิศวกรรมจึงใช้คอนกรีตเป็นหลักสำหรับรับแรงกดหรือแรงอัด ความ

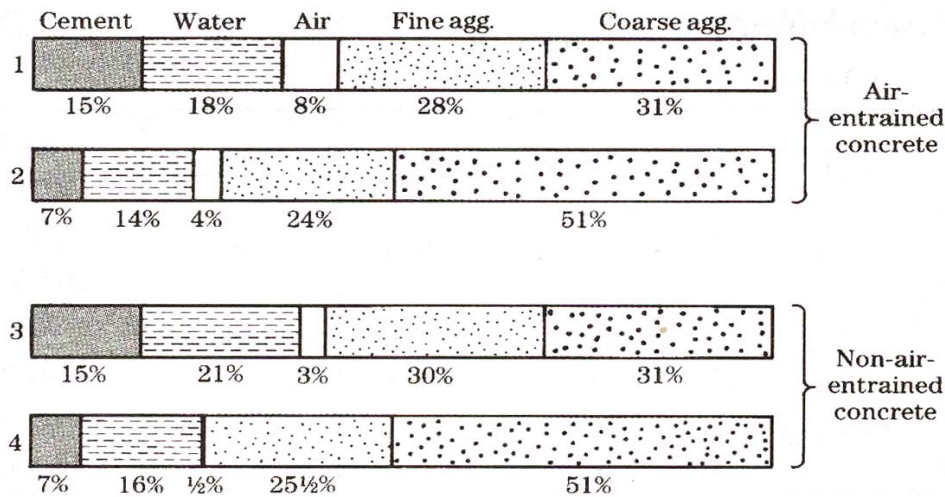
สามารถในการรับแรงดึงของคอนกรีตสามารถทำให้เพิ่มมากขึ้นได้ โดยเสริมแรงด้วยเหล็กเส้น ซึ่งจะได้กล่าวในเรื่องนี้ต่อไป

**สัดส่วนต่าง ๆ ที่ใช้ผสมคอนกรีต**

การออกแบบของผสมที่จะใช้ทำคอนกรีตนั้นควรจะต้องพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ความสามารถในการใช้งานของคอนกรีต คอนกรีตต้องสามารถที่จะไหลหรือทำให้มีรูปร่างตามแบบที่นำไปเทหรือหล่อ
2. ความแข็งแรงและช่วงเวลาของการใช้งาน สำหรับการนำคอนกรีตไปใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่จะต้องมีความแข็งแรง และช่วงการถึงเกณฑ์ที่กำหนด
3. การผลิตจะต้องประหยัด ส่วนใหญ่ที่นำมาใช้พิจารณาคือ ราคาซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด

วิธีต่างๆ ที่ใช้ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตสมัยใหม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับวิธีดั้งเดิมเมื่อปี 1900 ที่ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของส่วนผสมเป็น 1 : 2 : 4 ซึ่งเป็นอัตราส่วนของซีเมนต์ต่อวัสดุละเอียดต่อวัสดุหยาบ วันนีวิธีที่ใช้เตรียมส่วนผสมของคอนกรีตโดยใช้น้ำหนักและปริมาตรสัมบูรณ์ (absolute-volume) นั้นได้เตรียมไว้สำหรับข้างหน้า โดยสถาบันคอนกรีตของอเมริกา (the american concrete institute) เป็นเค้าโครงของวิธีการหาปริมาณขององค์ประกอบที่ต้องการคือ ซีเมนต์ส่วนผสมที่เฉื่อย (aggregate) ทั้งส่วนที่ละเอียดและหยาบ และปริมาณของน้ำสำหรับปริมาตรของคอนกรีตจำนวนหนึ่ง โดยกำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักขององค์ประกอบ ความถ่วงจำเพาะของแต่ละองค์ประกอบ และปริมาตรของน้ำที่ต้องใช้ต่อน้ำหนักของซีเมนต์ให้



**รูปที่ 9.3** แสดงช่วงของสัดส่วนของวัสดุที่ใช้ในการทำคอนกรีตด้วยวิธีการโดยปริมาตรสัมบูรณ์

รูปที่ 9.3 แสดงช่วงของสัดส่วนของวัสดุที่ใช้ในการทำคอนกรีตด้วยวิธีการโดยปริมาตรสัมบูรณ์ สำหรับคอนกรีตชนิดธรรมดาและชนิดมีฟองอากาศ คอนกรีตธรรมดามีซีเมนต์ 7-15% ส่วนผสมเฉื่อยชนิดละเอียด (fine agg.) มี 25-30% ส่วนผสมเฉื่อยชนิดหยาบ (course agg.) 31-51% และน้ำ 16-21% โดยปริมาตร



ปริมาณของอากาศที่มีในคอนกรีตธรรมดาอยู่ในช่วง  $\frac{1}{2}$ -3% แต่ถ้าเป็นคอนกรีตชนิดมีฟองอากาศ (A-E) จะมีอากาศอยู่ 4-8% จากที่ได้กล่าวมาแล้ว อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่ใช้หาความแข็งแรงต่อแรงอัดของคอนกรีต อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ ถ้าสูงกว่า 0.40 จะทำให้ความแข็งแรงต่อแรงอัดของคอนกรีตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

### คอนกรีตเสริมแรงและพรีสเตรสคอนกรีต (Reinforced and Prestressed Concrete)

โดยที่ความทนแรงดึงของคอนกรีตจะต่ำกว่าคอนกรีตแรงอัดประมาณ 10-15 เท่า ดังนั้นคอนกรีตที่วิศวกรใช้ในการออกแบบเป็นหลักคือ คอนกรีตแรงอัด อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่ของคอนกรีตที่ได้รับแรงดึง เช่น สิ่งที่เกิดกับคานคอนกรีต ตามธรรมชาติจะมีเหล็กเสริมแรงเป็นคาน ในคอนกรีตเสริมแรงนี้ แรงดึงจะเกิดการถ่ายเทจากคอนกรีตไปยังเหล็กที่เสริมแรงผ่านทางพันธะ (bonding) คอนกรีตที่มีการเสริมด้วยเหล็กอาจอยู่ในรูปของแท่งเหล็ก เหล็กเส้น และตะแกรงเหล็ก หรือตาข่ายเหล็ก เป็นต้น คอนกรีตประเภทนี้จัดว่าเป็น คอนกรีตเสริมแรง (reinforced concrete) คอนกรีตชนิดนี้จะทนแรงดึงและต้านการโค้ง (bending) ได้อย่างดี

พรีสเตรสคอนกรีต (prestressed concrete) เป็นคอนกรีตที่ทำให้เกิดความเค้นในเหล็กที่เสริมแรงก่อนความทนทานต่อแรงดึงของคอนกรีตเสริมแรงนั้นสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้อย่างการใช้แรงอัด (compressive stresses) ซึ่งความเค้นที่เกิดในคอนกรีตเนื่องมาจากเกิด pretensioning หรือ posttensioning กับเหล็กที่ใช้เสริมแรง เหล็กที่ใช้เสริมแรงนี้เรียกว่า เทนตันส์ (tendons) เช่น เทนตันส์อาจเป็นแท่งเหล็กหรือสายเคเบิล ข้อดีการทำให้เกิดพรีสเตรสคอนกรีตคือ ความเค้นที่เกิดขึ้นกับเหล็กเทนตันส์จากแรงอัดจะช่วยต่อต้านให้คอนกรีตทนต่อแรงดึงยิ่งขึ้น

### พรีเทนชัน (พรีสเตรส) คอนกรีต [Pretension (prestressed) concrete]

ในสหรัฐอเมริกา prestressed concrete ส่วนมากจะเป็น pretension ในวิธีการนี้ตามปกติเทนตันส์จะอยู่ในรูปของสายเคเบิลที่ได้จากลวดหลายเส้นพันเป็นเกลียวสายเคเบิลนี้จะถูกดึงให้ยึดโดยที่ปลายหนึ่งจะถูกยึดไว้กับที่ยึด (anchorage) อีกปลายหนึ่งยึดติดไว้กับแม่แรงที่ปรับได้ (adjustable jack) ขณะที่เทนตันส์นี้ถูกดึงอยู่แล้วเทคอนกรีตหุ้มสายเคเบิล เมื่อคอนกรีตถึงจุดที่มีความแข็งแรงตามต้องการแล้ว แรงดึงจะลดลงที่ปลายแม่แรงสายเคเบิลควรจะสั้นลงแบบอีลาสติก แต่เป็นไปได้เพราะสายเคเบิลยึดติดกับคอนกรีตเสียแล้ว ในกรณีเช่นนี้ความเค้นจากแรงอัดก็จะเกิดขึ้นในคอนกรีต

โพสเทนชัน (พรีสเตรส) คอนกรีต ในกระบวนการนี้ตามปกติจะมีท่อเล็ก ๆ (hollow conduits) ที่ใส่เทนตันส์เหล็กไว้ในคอนกรีต (เช่น ใ่วัที่คาน) ก่อนเทคอนกรีตลงไป เทนตันส์นี้อาจเป็นลวดเหล็กพันกันเป็นเกลียว หรือเป็นลวดเหล็กที่วางขนานกัน หรืออาจเป็นแท่งเหล็กแข็งก็ได้ แล้วเทคอนกรีตลงไป เมื่อคอนกรีตแข็งพอสมควร เทนตันส์เหล่านี้ปลายหนึ่งจะถูกยึดไว้กับที่ยึด (anchorage) ของปลายคอนกรีต อีกปลายหนึ่งของเทนตันส์จะถูกดึงด้วยแม่แรงที่สูงมากพอแล้วใส่ตัวประกอบยึดไว้แทนแม่แรง ที่ว่างระหว่างเทนนิส

### แอสฟัลท์

ยางมะตอยหรือแอสฟัลท์ (Asphalt) หรือที่เรียกกันทั่วไปในบ้านเราว่า “ยางมะตอย” นั้น เป็นวัสดุประสานชนิดหนึ่ง มีลักษณะยืดหยุ่น ทนทานและป้องกันน้ำซึม ซึ่งมนุษย์รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์ในหลายๆ ด้าน รวมทั้งนำมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนหรือถังเก็บน้ำตั้งแต่สมัยโบราณ แอสฟัลท์เกิดขึ้นตามธรรมชาติในหลายๆ

แห่งของโลก และที่นำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันเกือบทั้งหมดทั้งในวงการวิศวกรรมและอุตสาหกรรมจะเป็นแอสฟัลท์ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ คุณสมบัติที่สำคัญของแอสฟัลท์ในเชิงการนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างสามารถสรุปได้ดังนี้

- คุณสมบัติในการยึดและประสาน (Cementing)
  - คุณสมบัติในการป้องกันน้ำซึม (Water Proofing)
  - คุณสมบัติที่เปลี่ยนเป็นของเหลว หรืออ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นลง (Thermoplastic)
- คุณสมบัติทั้ง 3 ดังกล่าว ทำให้แอสฟัลท์ได้ถูกนำมาใช้ในงานต่างๆ ทั้งงานทางด้านวิศวกรรม และในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น
- ใช้เป็นตัวประสานเพื่อเกาะยึดวัสดุต่างๆ เช่น หินย่อย และกรวด เป็นต้น เข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ส่วนผสมสำหรับใช้ในการทำผิวทางจราจร
  - ใช้สำหรับปิดคลองชลประทาน อ่างเก็บน้ำ สระน้ำ ผิวหน้าของเขื่อนดิน เพื่อป้องกันน้ำซึม และป้องกันการกัดกร่อนของผิวดิน
  - ใช้เป็นวัสดุในวงการอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ทำสีกันสนิม ทำกระดาษป้องกันความชื้น ผสมกับทรายทำอิฐ สำหรับงานก่อสร้าง ทำกระเบื้องลูกฟูกสำหรับมุงหลังคา ตลอดจนใช้เป็นวัสดุส่วนผสมในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

ยางมะตอยมีองค์ประกอบทางเคมีคือ มีคาร์บอน 80-86% ไฮโดรเจน 9-10% ออกซิเจน 2-8% กำมะถัน 0.5-7%

และมีไนโตรเจนเล็กน้อย และอื่น ๆ ได้แก่โลหะมีอยู่น้อยมาก (trace metals) สารที่เป็นองค์ประกอบของยางมะตอยแต่ก่อนข้างจะแตกต่างกันอย่างมากและซับซ้อน ซึ่งจะมีพอลิเมอร์ตั้งแต่โมเลกุลต่ำถึงโมเลกุลสูง และผลิตภัณฑ์จากการควบแน่น (condensation products) จะประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโซ่ยาว ที่เป็นวงแหวนและที่มีวงแหวนต่อกัน

ยางมะตอยที่นับว่าสำคัญคือ ใช้เป็นตัวยึดติดกับหินย่อย (aggregate) เป็นยางมะตอยผสม (asphalt mix) ใช้สำหรับลาดถนน สถาบันยางมะตอยในสหรัฐอเมริกาได้ออกแบบของผสมที่จะใช้สำหรับลาดถนนและให้ชื่อว่าของผสม 8 โดยใช้ชื่อที่จะผสมกับยางมะตอย (หินย่อย) มีขนาดเล็กโดยจะต้องผ่านแรง (sieve) เบอร์ 8 เช่น ยางมะตอยผสมชนิดที่ 4 (type IV asphalt mix) สำหรับลาดถนน มีองค์ประกอบของยางมะตอย 3.0-7.0% ผสมกับหินย่อยที่ผ่านแรงเบอร์ 8 จำนวน 35-50%

## แหล่งกำเนิดของแอสฟัลท์

### แอสฟัลท์ตามธรรมชาติ (Native Asphalt)

ซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในลักษณะเป็นบึง เนื่องจากน้ำมันดิบตามธรรมชาติใต้ผิวโลกขึ้นมาถึงผิวโลก และถูกกระทำภายใต้สภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ เช่น ความร้อนจากแสงอาทิตย์และลม ยังผลให้ส่วนประกอบที่เป็นก๊าซหรือน้ำมันที่ระเหยง่าย แยกตัวออกไปยังผลให้เหลือเป็นแอสฟัลท์ซึ่งเป็นวัสดุที่หนักกว่าไว้บนพื้นผิวดิน ตัวอย่างของแอสฟัลท์ที่เกิดตามธรรมชาติ เช่น

ทะเลสาบแอสฟัลท์ (Lake Asphalts) เป็นแอสฟัลท์ที่พบตามธรรมชาติอยู่ในลักษณะเป็นบึงคล้ายทะเลสาบ ซึ่งอาจมีเฉพาะแอสฟัลท์เท่านั้น หรืออาจมีน้ำผสมอยู่ก็ได้

หินแอสฟัลท์ (Rock Asphalts) ได้แก่พวกหินปูนที่มีแอสฟัลท์ซีมอยู่อิมตัว กล่าวคือ แอสฟัลท์จะแทรกอยู่เต็มไปหมดตามช่องว่าง ซึ่งอาจมีปริมาณมากถึงร้อยละ 20 หินแอสฟัลท์นี้พบอยู่ทั่วไปในต่างประเทศ สำหรับในประเทศไทยเรายังไม่มีเอกสารที่รายงานทางด้านนี้

แอสฟัลท์ธรรมชาติอื่นๆ นอกจากทะเลสาบแอสฟัลท์และหินแอสฟัลท์แล้ว ยังมีแอสฟัลท์ธรรมชาติที่พบอยู่ทั่วไปตั้งแต่เป็นบึงเล็กๆ หรือแทรกอยู่เป็นชั้นๆ ระหว่างชั้นของหิน ซึ่งในบางแห่งจะมีปริมาณแอสฟัลท์ที่ค่อนข้างสูง เรียกว่า กิลโซไนท์ (Gilsonite) มีคุณสมบัติที่แข็งและเปราะ หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า แอสฟัลท์ไคท์ (Asphaltites) ซึ่งหมายถึงแอสฟัลท์ที่มีจุดหลอมเหลวที่สูง

### แอสฟัลท์ที่ได้จากการผลิต

เป็นแอสฟัลท์ที่ได้จากส่วนที่เหลือจากการกลั่นน้ำมันดิบ (Crude Oil) หลังจากการกลั่นเอาน้ำมันเชื้อเพลิงและน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันดิบตามธรรมชาติที่ได้มาจากแหล่งต่างๆ ทั่วโลก จะมีลักษณะและส่วนประกอบแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแยกตามส่วนประกอบหลักของน้ำมันดิบออกไปเป็น 3 ประเภทคือ

- น้ำมันดิบประเภทส่วนประกอบหลักเป็นพาราฟิน (Parafin Base Crude) น้ำมันดิบประเภทนี้ภายหลังจากการแยกเอาน้ำมันประเภทต่างๆ เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันหล่อลื่น หรือน้ำมันเตาออกแล้ว ส่วนที่เหลือจากการกลั่นจะเป็นพาราฟิน
- น้ำมันดิบประเภทส่วนประกอบหลักเป็นแอสฟัลท์ (Asphalt Base Crude) คือน้ำมันดิบ ซึ่งส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จากการกลั่นเอาน้ำมันประเภทต่างๆ ออกแล้วจะเป็นแอสฟัลท์
- น้ำมันดิบประเภทส่วนประกอบหลักเป็นแอสฟัลท์ (Asphalt Base Crude) คือน้ำมันดิบ ซึ่งส่วนที่เหลือส่วนใหญ่จากการกลั่นเอาน้ำมันประเภทต่างๆ ออกแล้วจะเป็นแอสฟัลท์
- น้ำมันดิบแบบผสม (Mixed Base Crude) ได้แก่น้ำมันดิบซึ่งภายหลังจากการแยกเอาพวกน้ำมันต่างๆ ออกแล้ว ส่วนที่เหลือจะมีทั้งพาราฟินและแอสฟัลท์

ในอุตสาหกรรมการผลิตแอสฟัลท์ทั่วไป จะใช้น้ำมันดิบประเภท Asphalt Base Crude ทั้งนี้เพราะส่วนที่เหลือจากการกลั่นส่วนใหญ่จะได้เป็นแอสฟัลท์

### ไม้

ในปัจจุบันนี้ถึงแม้ว่าจะมีผู้ประดิษฐ์วัสดุอื่นขึ้นมาหลายชนิด เพื่อใช้แทนไม้ แต่ไม้ก็ยังอยู่ในความนิยมของมหาชนโดยทั่วไป ทั้งในเขตนครหลวงและในท้องที่ชนบท ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าไม้เป็นวัสดุธรรมชาติ ซื่อหาได้ง่าย การก่อสร้างก็ทำได้ง่ายโดยไม่ต้องเครื่องมือพิเศษมากมาย เพียงแต่ใช้เลื่อย กบไสไม้ ข้อนและตะปู ช่างก็สามารถก่อสร้างอาคารไม้ได้แล้ว ในสมัยก่อนไม้ถูกใช้อย่างฟุ่มเฟือย เมื่อการบุฟุ้งเสียหายจากปลวก มอด ก็รื้อทิ้งแล้วเปลี่ยนใหม่ แต่ในปัจจุบันนี้วิทยาการก้าวหน้าประกอบกับป่าส่วนมากถูกโค่นทำลาย เราจึงจำเป็นต้องศึกษาการใช้ไม้อย่างประหยัด เพราะไม้ไม่เพียงแต่จะใช้ในการก่อสร้างอาคารไม้เท่านั้น ยังสามารถนำมาทำเครื่องตกแต่ง เครื่องเรือน เครื่องประดับ และเครื่องใช้ต่าง ๆ ประจำบ้านได้อีกด้วย นอกจากนี้ในการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ก็ยังต้องใช้ไม้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เช่น ไม้แบบ ค้ำยัน และนั่งร้าน เป็นต้น

ความจริงแล้วถ้าเรานำไม้มาใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของงานและสิ่งแวดล้อม เช่น ใช้ไม้แก่นที่ไม่มีมอดกินมาก่อนมาเป็นส่วนโครงสร้างภายในของอาคาร เช่น คาน ตง หรือพื้น ส่วนโครงสร้างภายนอกอาคารก็ใช้ไม้อบน้ำยา หรือสีทา เป็นต้น อาคารไม้ก็จะมีอายุยืนยาว ไม่น้อยกว่า 20 ปีขึ้นไปทีเดียว เป็นที่ทราบกันดีในวงการช่างแล้วว่า ไม้เนื้ออ่อน

อยู่ในสภาวะแห้ง หรือเปียกตลอดเวลา เช่น จมอยู่ในดินต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ก็จะไม่มีการผุพัง ถ้าเปียกบ้าง แห้งบ้าง ก็ จะเกิดการผุขึ้นตรงนั้น ทั้งนี้เนื่องจากการกัดกินของแบคทีเรียบางพวกนั่นเอง นอกจากนี้ข้อดีของไม้ก็อยู่ที่ว่า เมื่อปลูก สร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ถ้ารื้อลงมาก็ยังมีแต่เศษปรักหักพังของพวก อิฐ หิน ปูนทรายเท่านั้น

### ลักษณะโครงสร้างของไม้ (The Structure of Wood)

เนื่องจากไม้เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีลักษณะโครงสร้าง และคุณสมบัติเกี่ยวข้องกับ Cell ที่ทำหน้าที่ในการเจริญเติบโตของต้นไม้ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. Conducting Tissue เป็น cell ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงน้ำแร่ธาตุเพื่อปรุงอาหาร โดยมากเป็น Pore หรือ Vessel ถ้า Fore หรือ Vessel ถ้า Pore โตก็มีเนื้อหยาบ ถ้า Pore เล็ก เนื้อก็ละเอียด
2. Storage Tissue เป็น cell ซึ่งทำหน้าที่สะสมอาหารเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ได้แก่ cell ที่มีผนังบางเรียกว่า Parenchyma Cell
3. Strengthening Tissue เป็น cell ซึ่งสร้างความแข็งแรงให้แก่ต้นไม้ ได้แก่ พวก Fibers มีลักษณะยาว แคน อาจมี ผนัง cell หนาหรือบางก็ได้

### ลำต้นของต้นไม้ประกอบด้วย

1. ใส้ไม้ (Pitch) มักจะอยู่บริเวณกลางลำต้น สำหรับไม้ปกติธรรมดาให้กำลังของเนื้อไม้ต่ำเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับความเจริญเติบโตของต้นไม้
2. ไม้แก่น (Heart wood) เป็นที่อยู่ต่อจากใส้ไม้ออกมา ส่วนนี้เป็นส่วนของ cell ที่ไม่ทำงานในการลำเลียงอาหารแล้ว มี สีเข้ม ทำหน้าที่เป็นโครงของลำต้น มีกำลังของเนื้อไม้สูงกว่า
3. กะพี้ไม้ (Sapwood) อยู่ต่อจากไม้แก่นออกมา มีสีอ่อนกว่า เป็นส่วนที่ต้นไม้ใช้ลำเลียงอาหารที่รากดูดขึ้นมาจากดิน ส่งต่อไปยังใบเพื่อปรุงอาหาร
4. เยื่อเจริญ (Cambium Layer) เป็นชั้นบาง ๆ ถัดจากกะพี้ไม้ออกมา เป็นส่วนที่สร้าง cell ในเนื้อไม้และเปลือกไม้ขึ้นมา
5. เปลือกชั้นใน (Inner bark) อยู่ติดกับเยื่อเจริญมาจากด้านนอก มีลักษณะอ่อน เปียกชื้น เป็นส่วนที่ส่งอาหารที่ปรุงแล้วจากใบไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของลำต้นให้เจริญเติบโต
6. เปลือกชั้นนอก (Outer bark) ประกอบด้วยเยื่อไม้ที่แห้งแล้ว ทำหน้าที่หุ้มห่อลำต้น ป้องกันการระเหยของน้ำในลำต้น
7. วงรอบปีหรือวงประจำปี (Annual rings) เป็นวงแสดงการเจริญเติบโตของไม้ในรอบ 1 ปี มีลักษณะเป็นวงรอบ ๆ ใส้ ไม้วงรอบนี้อาจมีลักษณะถี่หรือห่างก็ได้ตามชนิด และความอุดมสมบูรณ์ของพื้นที่นั้น ๆ ในทางป่าไม้ใช้นับวงรอบปี นี้ในการบอกอายุของไม้ได้

### ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากไม้

#### 1.1 ไม้อัดและไม้ประสาน

**1.1.1 ไม้อัด (plywood)** หมายถึงแผ่นไม้ที่ประกอบด้วยไม้บางมีจำนวนชั้นเป็นเลขคี่ คือ 3, 5, 7, ฯลฯ ทากาวแล้วอัดติดเข้าด้วยกัน โดยให้ทิศทางของเส้นใยไม้ของชั้นข้างเคียงสลับเป็นมุมฉากต่อกัน การอัดอาจอัดให้หนา

บางเท่าใดก็ได้ โดยการเพิ่มจำนวนชั้น หรือความหนาของไม้บางซึ่งอาจปอกให้หนาแตกต่างกันได้ตั้งแต่ 1 มม. ถึง 4-5 มม. ทั้งนี้แล้วแต่ว่าจะนำไปใช้ในงานอะไร ไม้อัดตามปกติมีขนาดมาตรฐาน 4 x 8 ฟุต หรือ (1.20 x 2.40 ม.) ไม้ที่ใช้ในการอัดอาจต่างชนิดกันก็ได้ ความทนทานขึ้นอยู่กับกาที่ใช้และลักษณะงาน เช่น

ไม้อัดภายใน ใช้กาทหน้าฟอควร ได้แก่พวกยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์

ไม้อัดภายนอก ใช้กาทหน้าได้เต็มที่ได้แก่พวกฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ และรีซอลซินวอล ฟอर्मัลดีไฮด์

**1.1.2 ไม้ประสาน (Laminated wood)** ต่างกับไม้อัดที่จำนวนชั้น คือจะเป็นเท่าใดก็ได้และวางให้เสี้ยนของแต่ละแผ่นขนานกัน การอัดต้องใช้แรงอัดสูงเป็นพิเศษ ดังนั้นไม้ที่ได้ก็จะมีความแน่นสูง ใช้ในงานเฉพาะอย่าง เช่น ทำเป็นส่วนประกอบของเครื่องจักรกล คานตงขนาดใหญ่ ไม้พื้น โดยสามารถทำให้โค้งเป็นรูปอย่างใดก็ได้ กาที่ใช้โดยมากเป็นกาที่แข็งตัวในอุณหภูมิต่ำได้แก่ รีซอลซินวอลฟอर्मัลดีไฮด์

**1.1.3 ไม้อัดพิเศษ (Special Plywood)** ทำเหมือนไม้อัดธรรมดาทุกอย่างต่างกันแต่ทิศทางของเสี้ยนในแต่ละชั้นไม่เป็นมุมฉากหรือขนานกัน ใช้ในงานพิเศษบางอย่างเท่านั้น เช่นในการทำถังกลม เป็นต้น ไม้ชนิดนี้ตามปกติไม่มีการผลิต เพราะนอกจากจะยุ่งยากและเสียหายในการผลิตแล้วคุณภาพของไม้ที่ได้จากกลับมีคุณภาพเลวกว่าด้วย

**1.2 ไม้ประกอบ (Composite wood)** แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

**1.2.1 Fibre Board** พวกนี้ทำจากชิ้นไม้ซึ่งต้มและบดจน cell ไม้แยกออกมาเป็นอิสระเสียก่อน กรรมวิธีแยกออกเป็น 2 อย่าง คือ วิธีเปียกและวิธีแห้ง วิธีแห้งต้องมีกาเป็นส่วนผสม แต่ในวิธีเปียก ใยไม้จะจับยึดกันเองเหมือนการทำกระดาษ แผ่นใยไม้อัดนี้อาจทำให้มีความแข็งอ่อน แตกต่างกันได้ คือ

- Hard Board แข็งที่สุด อัดแห้ง อัดเปียกก็ได้  
ถ้าอัดแห้ง ใช้ปริมาณความชื้น 12%  
ถ้าอัดเปียก ใช้ปริมาณความชื้น 50%  
หรืออัดปานกลาง ใช้ปริมาณความชื้น 17-50%
- Soft Board อ่อนที่สุด ใช้เป็นเครื่องเก็บเสียงหรือฉนวนกันความร้อน บางที่เรียกว่า Insulation Board

**1.2.2 Particle Board** ชนิดนี้แผ่นชิ้นไม้อัดนั้น ไม้ยังมีสภาพเป็นชิ้น ๆ อยู่ ถ้าชิ้นไม้ที่ใช้มีความยาวมาก เรียกว่า เชฟวิงบอร์ด ถ้าชิ้นไม้ที่ใช้มีขนาดเล็กกลง และยาวสม่ำเสมอกว่าพวกแรก เรียกว่า ชิพบอร์ด ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ต้องใช้กาเป็นวัสดุประสานทั้งสิ้น

**1.2.3 Wool-Wool-Board** ทำจากไม้ที่ใส่เส้นใยยาวๆ คลุกปูนซีเมนต์เหมือนงานคอนกรีตแล้วอัดเป็นแผ่น ๆ เมื่อปูนซีเมนต์แข็งตัวก็เป็นแผ่นแข็ง ในประเทศไทยเรามีผู้ผลิตจำหน่ายเรียกว่า “เซลโลกริต” มีคุณสมบัติในการเป็นสื่อความร้อน เก็บเสียงได้ดี สามารถตกแต่ง โดยใช้กับงานปูนได้ดี

