



เหมาะสำหรับ

- นักศึกษาระดับอุดมศึกษา สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิศวกรรมการผลิต วิศวกรรมวัสดุ วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
- วิศวกรหรือช่างเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต

SEEED
inspiration starts here

กระบวนการผลิต

Manufacturing Processes

รศ.ดร. ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ

กระบวนการผลิต

โดย รศ.ดร. ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ

สงวนลิขสิทธิ์ตามกฎหมาย โดย รศ.ดร. ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ © พ.ศ. 2559

ห้ามคัดลอก ลอกเลียน ดัดแปลง ทำซ้ำ จัดพิมพ์ หรือกระทำการอื่นใด โดยวิธีการใดๆ ในรูปแบบใดๆ ไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้ เพื่อเผยแพร่ในสื่อทุกประเภท หรือเพื่อวัตถุประสงค์ใดๆ นอกจากจะได้รับอนุญาต

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ.

กระบวนการผลิต.--กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2559.

588 หน้า.

1. กระบวนการผลิต.

II. ชื่อเรื่อง

670

SE-ED
inspiration starts here

Barcode (e-book) : 9786160846498

ผลิตและจัดจำหน่ายโดย



บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
SE-EDUCATION PUBLIC COMPANY LIMITED

เลขที่ 1858/87-90 ถนนเทพรัตน แขวงบางนาใต้ เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260
โทรศัพท์ 0-2826-8000

หากมีคำแนะนำหรือติชม สามารถติดต่อได้ที่ comment@se-ed.com

คำนำ

กระบวนการผลิตเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับเลือกใช้กระบวนการขึ้นรูปและผลิตชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำการออกแบบโดยวิศวกรหรือช่างเทคนิค โดยหนังสือเล่มนี้ได้ทำการเรียบเรียงเนื้อหาตั้งแต่โครงสร้างของวัสดุที่มีความสัมพันธ์กับการขึ้นรูปไปจนถึงกระบวนการผลิตพื้นฐานที่มีใช้อยู่ในอุตสาหกรรมตลอดจนกระบวนการผลิตที่ทันสมัย ซึ่งเนื้อหาภายในเล่มประกอบด้วย โครงสร้างและสมบัติของวัสดุ โครงสร้างของโลหะและการอบชุบความร้อน การหล่อโลหะ การขึ้นรูปโลหะก่อน การขึ้นรูปโลหะแผ่น การผลิตโลหะผง การขึ้นรูปเซรามิก การขึ้นรูปแก้ว การผลิตวัสดุกึ่งตัวนำ การขึ้นรูปพลาสติก การขึ้นรูปวัสดุผสม การสร้างชิ้นงานต้นแบบรวดเร็ว พื้นฐานการกัดแต่งและเครื่องมือตัด การกัดแต่งแบบธรรมดา การกัดแต่งขั้นสูง กระบวนการต่อ การปรับปรุงและเคลือบผิววัสดุ การวัดและการตรวจสอบ ระบบอัตโนมัติและการผลิตที่ประสานด้วยคอมพิวเตอร์ การออกแบบผลิตภัณฑ์และการเลือกกระบวนการผลิต นอกจากนี้ ผู้เขียนยังได้สอดแทรกแบบฝึกหัดไว้ในทุกบทเพื่อให้เกิดความเข้าใจที่มากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ผู้เขียนจะได้พยายามตรวจแก้ไขและปรับปรุงเนื้อหาในแต่ละบทอยู่หลายครั้ง แต่จุดบกพร่องก็ยังคงมีอยู่ ดังนั้น หากได้รับความกรุณาจากผู้อ่านที่พบข้อผิดพลาด กรุณาเสนอแนะมายังผู้เขียนเพื่อที่จะได้ดำเนินการแก้ไขและปรับปรุงให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เพื่อการพัฒนาตำราเรียนด้านกระบวนการผลิตที่เป็นภาษาไทยให้มีคุณภาพต่อไป

ผู้เขียนต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ของผู้เขียนทุกท่านที่ได้สั่งสอนให้ความรู้ทางด้านวิศวกรรม ตั้งแต่สมัยเรียนหนังสือจนกระทั่งได้มาเป็นอาจารย์ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สุดท้ายนี้ ผู้เขียนต้องขอขอบคุณครอบครัวของผู้เขียนที่ได้เป็นกำลังใจในการทำงานตลอดมา ขอขอบพระคุณคุณอาจารย์ที่ให้ความรู้และข้อเสนอแนะในการจัดทำหนังสือเล่มนี้ ตลอดจนผู้พิมพ์ต้นฉบับซึ่งได้ทุ่มเทเวลาในการทำงานจนทำให้หนังสือเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ขึ้นมาได้

รองศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ

The background features a collage of industrial scenes, including a welding process with bright sparks, a large cylindrical metal component, and various mechanical parts. These images are overlaid with a pattern of white diamond-shaped frames on a light gray background.

SE-ED

inspiration starts here

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ _____ 11

- 1.1 ระบบการผลิต 11
- 1.2 หน้าที่ต่าง ๆ ในการผลิต 12
- 1.3 การจำแนกอุตสาหกรรมการผลิต 13
- 1.4 ชนิดของการผลิต 14
- 1.5 การผลิตพื้นฐาน 16
- แบบฝึกหัดท้ายบท 18

SE-ED

inspiration starts here

บทที่ 2 โครงสร้างและสมบัติของวัสดุ _____ 19

- 2.1 โครงสร้างของโลหะ 20
- 2.2 สมบัติทางกลและการทดสอบ 34
- 2.3 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ 43
- 2.4 สมบัติทางเคมีของวัสดุ 48
- แบบฝึกหัดท้ายบท 52

บทที่ 3 โครงสร้างของโลหะและการอบชุบความร้อน _____ 65

- 3.1 ชนิดและการใช้งานโลหะ 65
- 3.2 แผนภาพเฟส 84
- 3.3 แผนภาพเฟสของเหล็ก-คาร์บอน 78
- 3.4 การเปลี่ยนแปลงเฟสของเหล็กกล้า 91
- 3.5 กระบวนการอบชุบความร้อนโลหะ 100

6 | กระบวนการผลิต

- 3.6 การชุบแข็งที่ผิว 106
- 3.7 การชุบแข็งโดยวิธีการบ่มแข็งหรือการตกตะกอน 110
- แบบฝึกหัดท้ายบท 112

บทที่ 4 การหล่อโลหะ _____ 116

- 4.1 ส่วนประกอบของแบบหล่อ 116
- 4.2 การไหลของของไหล 118
- 4.3 ความสามารถในการไหลของโลหะหลอมเหลว 122
- 4.4 การแข็งตัวของโลหะ 123
- 4.5 จุดบกพร่องในงานหล่อ 133
- 4.6 การออกแบบงานหล่อ 135
- 4.7 การหล่อโดยแบบหล่อที่นำกลับมาหล่อซ้ำไม่ได้ 138
- 4.8 การหล่อโดยแบบหล่อที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ 154
- 4.9 การหล่อต่อเนื่อง 163
- 4.10 การหล่อโลหะผลึกเดี่ยว 164
- แบบฝึกหัดท้ายบท 168



บทที่ 5 การขึ้นรูปโลหะก่อน _____ 170

- 5.1 การรีดขึ้นรูป 171
- 5.2 การตีขึ้นรูป 182
- 5.3 การอัดรีดขึ้นรูป 194
- 5.4 การดึงขึ้นรูป 201
- แบบฝึกหัดท้ายบท 207

บทที่ 6 การขึ้นรูปโลหะแผ่น _____ 208

- 6.1 การตัดเฉือน 208
- 6.2 การพับขึ้นรูป 217
- 6.3 การลากขึ้นรูปลึก 226
- 6.4 การขึ้นรูปด้วยยาง 231
- 6.5 การปั้นขึ้นรูป 232

6.6 การดัดขึ้นรูป	235
6.7 การพับรีดและการรีดขึ้นรูป	235
6.8 การขึ้นรูปด้วยอัตราการให้พลังงานสูง	237
6.9 การตัดท่อ	238
6.10 แม่พิมพ์และเครื่องมือสำหรับการขึ้นรูปโลหะแผ่น	240
แบบฝึกหัดท้ายบท	246

บทที่ 7 การผลิตโลหะผง เซรามิก แก้ว และวัสดุกึ่งตัวนำ _____ 248

7.1 โลหะผงวิทยา	248
7.2 การผลิตเซรามิก	262
7.3 การผลิตแก้ว	272
7.4 การผลิตอุปกรณ์วัสดุกึ่งตัวนำ	279
แบบฝึกหัดท้ายบท	282

บทที่ 8 การขึ้นรูปพลาสติก วัสดุผสม และการสร้างชิ้นงานต้นแบบรวดเร็ว _____ 284

8.1 โครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์	284
8.2 การขึ้นรูปพลาสติก	288
8.3 การขึ้นรูปวัสดุผสม	308
8.4 การสร้างต้นแบบรวดเร็ว	318
แบบฝึกหัดท้ายบท	325



บทที่ 9 พื้นฐานการกัดแต่งและเครื่องมือตัด _____ 327

9.1 องค์ประกอบการกัดแต่งด้วยเครื่องจักร	327
9.2 ทฤษฎีการเกิดเศษจากการกัดแต่งโลหะ	329
9.3 แรงและพลังงานในการตัดเฉือนโลหะ	335
9.4 อุณหภูมิในการตัด	342
9.5 การสึกหรอและอายุเครื่องมือตัด	344
9.6 วัสดุเครื่องมือ	352
9.7 ของเหลวสำหรับการตัด	363
แบบฝึกหัดท้ายบท	365

บทที่ 10 การกีดแต่งแบบธรรมดา _____ **367**

- 10.1 การกลึง 367
- 10.2 การคว้าน 378
- 10.3 การเจาะ 380
- 10.4 การกัด 387
- 10.5 การไส 396
- 10.6 การแทงขึ้นรูป 398
- 10.7 การเลื่อย 399
- 10.8 แมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์และเทอร์นิงเซ็นเตอร์ 400
- 10.9 การเจียรระโนและทำผิวสำเร็จ 404
- แบบฝึกหัดท้ายบท 416

บทที่ 11 การกีดแต่งขั้นสูง _____ **418**

- 11.1 การกีดแต่งด้วยเคมี 418
- 11.2 การกีดแต่งด้วยไฟฟ้าเคมี 422
- 11.3 การเจียรระโนด้วยไฟฟ้าเคมี 423
- 11.4 การกีดแต่งด้วยพลังงานความร้อน 424
- 11.5 การกีดแต่งโดยพลังงานทางกล 431
- แบบฝึกหัดท้ายบท 438



บทที่ 12 กระบวนการต่อ _____ **439**

- 12.1 การเชื่อมอาร์ก 441
- 12.2 การเชื่อมความต้านทาน 451
- 12.3 การเชื่อมแก๊สเชื้อเพลิงออกซิเจน 457
- 12.4 การเชื่อมหลอมละลายด้วยวิธีอื่น ๆ 460
- 12.5 การเชื่อมสภาวะของแข็ง 463
- 12.6 คุณภาพการเชื่อม 466
- 12.7 การออกแบบรอยต่อและสัญลักษณ์การเชื่อม 474
- 12.8 การแล่นประสาน 477
- 12.9 การบัดกรี 480

12.10	การยึดติดด้วยกาว	483
12.11	การต่อยึดทางกล	485
	แบบฝึกหัดท้ายบท	488

บทที่ 13 การปรับปรุงและเคลือบผิววัสดุ _____ 490

13.1	การทำความสะอาดผิว	490
13.2	การปรับปรุงผิวทางกล	494
13.3	การชุบผิว	495
13.4	การเคลือบผิวด้วยการเปลี่ยนแปลง	498
13.5	การเคลือบด้วยไอ	499
13.6	การเคลือบผิวด้วยความร้อนและทางกล	504
13.7	การเคลือบผิวด้วยเพชรและคาร์บอนคล้ายเพชร	507
13.8	การเคลือบผิวด้วยดี	507
	แบบฝึกหัดท้ายบท	509

บทที่ 14 การวัดและการตรวจสอบ _____ 510

14.1	การวัดและเครื่องมือวัดแบบธรรมดา	510
14.2	การวัดผิว	522
14.3	การวัดและเครื่องมือวัดที่ทันสมัย	526
14.4	การตรวจสอบ	530
	แบบฝึกหัดท้ายบท	536

บทที่ 15 ระบบอัตโนมัติและการผลิตที่ประสานด้วยคอมพิวเตอร์ _____ 537

15.1	การควบคุมเชิงตัวเลข	537
15.2	หุ่นยนต์อุตสาหกรรม	547
15.3	ระบบขนถ่ายและจัดเก็บอัตโนมัติ	552
15.4	ระบบการประกอบอัตโนมัติ	553
15.5	การผลิตที่ประสานด้วยคอมพิวเตอร์	556
15.6	คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม	557
15.7	คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต	560

10 | กระบวนการผลิต

15.8 คอมพิวเตอร์ช่วยวางแผนกระบวนการผลิต 561

15.9 เทคโนโลยีกลุ่ม 563

15.10 ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น 570

แบบฝึกหัดท้ายบท 573

บทที่ 16 การออกแบบผลิตภัณฑ์และการเลือกกระบวนการผลิต _____ 574

16.1 การออกแบบผลิตภัณฑ์ 574

16.2 การเลือกวัสดุ 576

16.3 การเลือกกระบวนการผลิต 579

16.4 ต้นทุนกระบวนการผลิต 582

แบบฝึกหัดท้ายบท 585

บรรณานุกรม _____ 586

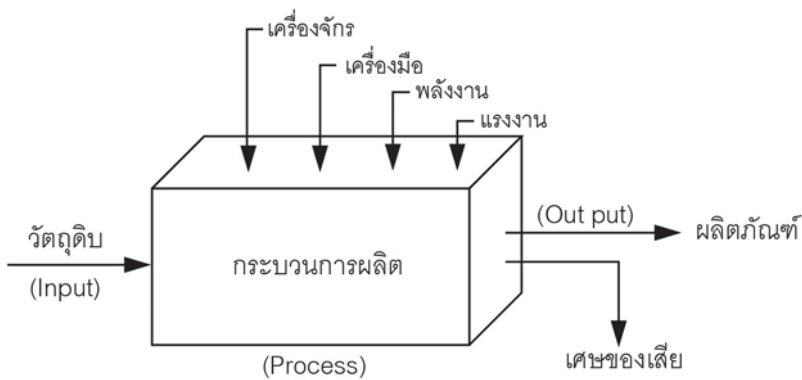
SE-ED
inspiration starts here

การผลิต (Manufacturing) หมายถึง การแปรรูปวัตถุดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์ โดยคำว่า การผลิต (Manufacturing) มาจากภาษาละติน 2 คำ คือ *manus* ที่แปลว่า มือ และ *factus* ที่แปลว่า ทำ ดังนั้นความหมายเบื้องต้นจึงหมายถึง *ทำด้วยมือ* (Made by hands) ในปัจจุบันมีเครื่องมือและเครื่องจักรที่ทันสมัย ทำให้ความหมายของการผลิตมีความหมายที่กว้างขึ้น โดยหมายถึง การทำผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบ โดยใช้กระบวนการต่างๆ เครื่องจักร และขั้นตอนการทำงานที่มีการวางแผนการดำเนินการแต่ละกิจกรรมเป็นอย่างดี ผลิตภัณฑ์ที่เราใช้อยู่ในชีวิตประจำวันเกิดขึ้นจากการผลิตทั้งสิ้น ไม่ว่าจะเป็น เสื้อผ้า อุปกรณ์เครื่องครัว โทรศัพท์ รถยนต์ เครื่องบิน ทีวี ตู้เย็น ฯลฯ ล้วนแล้วแต่เกิดจากการผลิตทั้งสิ้น ดังนั้น การผลิตเป็นสิ่งที่มีความสำคัญกับการดำเนินชีวิตของมนุษย์เราเป็นอย่างมาก

inspiration starts here

1.1 ระบบการผลิต (Manufacturing System)

ระบบการผลิตประกอบด้วย 3 ส่วนด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดย ส่วนแรก คือ *ส่วนป้อนเข้า* (Input) เป็นวัตถุดิบ ส่วนที่สอง คือ *กระบวนการผลิต* (Process) มีองค์ประกอบย่อย ได้แก่ เครื่องจักร เครื่องมือ พลังงาน และแรงงาน ทุกองค์ประกอบจะร่วมกันทำหน้าที่ในการแปรรูปวัตถุดิบให้ออกมาเป็นส่วนที่สาม คือ *ผลผลิต* (Output) ที่ออกมาในรูปของผลิตภัณฑ์และเศษหลงเหลือจากการผลิต



รูปที่ 1.1 ระบบการผลิต
(ที่มา: Groover M.P., 1987)

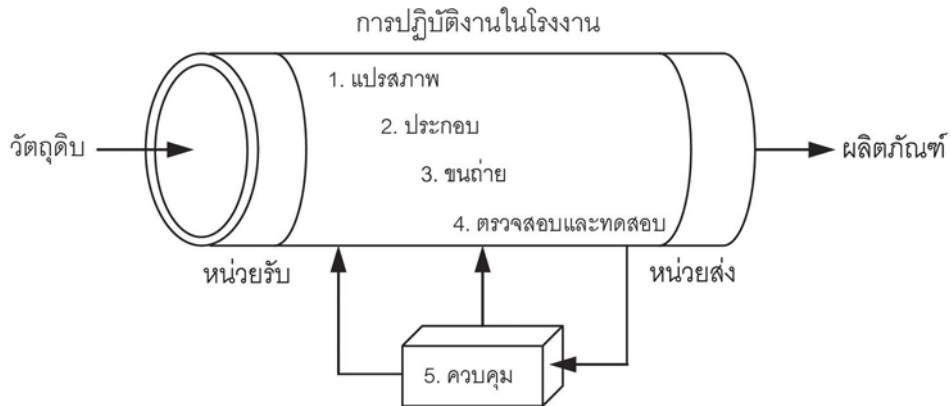
โดยทั่วไปแล้ว ในกระบวนการผลิตจะเป็นส่วนที่ทำให้วัตถุดิบมีมูลค่าเพิ่มขึ้น (Value add) โดยทำการแปรรูปวัตถุดิบในแต่ละขั้นตอนให้มีสภาวะตามที่กำหนด การแปรรูปนั้นอาศัยเครื่องมือเครื่องจักรที่มีหน้าที่หรือการทำงานจำเพาะเจาะจงแต่ละชนิด เพื่อทำการผลิตหรือแปรรูปวัตถุดิบให้ได้ตามขนาดหรือรูปร่าง ตลอดจนสมบัติที่กำหนด การทำงานของเครื่องมือเครื่องจักรนั้นต้องอาศัยพลังงานจากกระแสไฟฟ้าหรือน้ำมันเชื้อเพลิง เพื่อช่วยในการขับเคลื่อน ส่วนประกอบสุดท้ายคือ แรงงานซึ่งจะทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของเครื่องจักร อุปกรณ์ การนำวัตถุดิบป้อนเข้าหรือนำผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จแล้วออกจากเครื่องจักร รวมถึงการตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์และบำรุงรักษาเครื่องมือและเครื่องจักรด้วย

1.2 หน้าที่ต่างๆ ในการผลิต (Function of Manufacturing)

โดยทั่วไปแล้ว ในอุตสาหกรรมการผลิตจะมีหน้าที่หลักๆ ที่เป็นพื้นฐานประกอบไปด้วย การแปรรูป การประกอบ การขนถ่ายลำเลียง การตรวจสอบและทดสอบ สุดท้ายคือการควบคุม โดยแบบจำลองหน้าที่ต่างๆ ในการผลิตแสดงในรูปที่ 1.2 การแปรรูป (Processing) ทำหน้าที่ดำเนินการทำให้วัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์เริ่มต้น มีขนาดรูปร่างหรือสมบัติเปลี่ยนไปจากเริ่มแรกที่นำเข้ามาในกระบวนการผลิต ในส่วนนี้จะไม่มีกระบวนการขึ้นชิ้นส่วนใดๆ เพิ่มเข้าไปในชิ้นงาน มีเพียงการขึ้นรูปหรือการกัดแต่งและเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบเท่านั้น เช่น การรีดเหล็กแผ่น การขึ้นชิ้นงานพลาสติก หรือการกลึงชิ้นงาน เป็นต้น

หน้าที่ถัดมาในการผลิต คือ การประกอบ (Assembly) ซึ่งอาจใช้การต่อ เช่น การเชื่อม การบัดกรี การแล่นประสาน การใช้กาว การยึดติดโดยสลักเกลียว แป้นเกลียว สกรู หรือหมุดย้ำ เป็นต้น หน้าที่ต่อไป คือ การขนถ่ายและการจัดเก็บวัสดุ (Material handling and storage) ทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์จากหน่วยงานหนึ่งไปยังหน่วยงานถัดไป รวมถึงการจัดเก็บระหว่างหน่วยผลิตแต่ละหน่วยและการจัดเก็บเข้าในโกดังก่อนส่งมอบต่อให้ลูกค้าด้วย หน้าที่อีกส่วนหนึ่งของการผลิต คือ การตรวจสอบและทดสอบ

(Inspection and testing) ทั้งปริมาณและคุณภาพ ให้ได้ตามข้อกำหนดจากมาตรฐานหรือการออกแบบหรือจากลูกค้า ส่วนหน้าที่สุดท้าย คือ หน้าที่การควบคุม (Control) ซึ่งจะกระทำทั้งในส่วนของการแปรสภาพและการประกอบ โดยจะทำการควบคุมให้กิจกรรมในส่วนต่างๆ ดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด



รูปที่ 1.2 รูปแบบของหน้าที่ต่างๆ ในการผลิต

(ที่มา: Groover M.P., 1987)

1.3 การจำแนกอุตสาหกรรมการผลิต (Classification of Industries)

อุตสาหกรรมการผลิต สามารถจำแนกได้โดยอาศัยชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ทำการผลิตเป็นตัวจำแนก ซึ่งแบ่งเป็นสามกลุ่ม คือ

อุตสาหกรรมต้นน้ำ (Primary industries) เป็นอุตสาหกรรมที่ทำการแปรสภาพวัตถุดิบที่เป็นทรัพยากรธรรมชาติให้เป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ทรัพยากรทางการเกษตร สินแร่ หรือก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น

ถัดมาเป็น **อุตสาหกรรมกลางน้ำ** (Secondary industries) อุตสาหกรรมกลุ่มนี้จะดำเนินการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมต้นน้ำมาทำการแปรสภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่จะส่งต่อไปถึงผู้บริโภค เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เคมี คอมพิวเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ กระดาษและพลาสติก เป็นต้น

กลุ่มสุดท้ายเป็น **อุตสาหกรรมปลายน้ำ** (Tertiary industries) เป็นอุตสาหกรรมที่เป็นส่วนสนับสนุนทางด้านบริการและเศรษฐกิจ เช่น ธนาคาร โรงแรม การท่องเที่ยว การขนส่ง เป็นต้น

ตารางที่ 1.1 แสดงตัวอย่างชนิดของอุตสาหกรรมการผลิตทั้ง 3 กลุ่ม โดยหนังสือเล่มนี้จะเน้นการผลิตที่เป็นอุตสาหกรรมในกลุ่มกลางน้ำเสียเป็นส่วนใหญ่และจะมีกลุ่มต้นน้ำ อย่างเช่น อุตสาหกรรมทางการผลิตโลหะซึ่งใช้สินแร่ตั้งต้นในการผลิตด้วย

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างชนิดของอุตสาหกรรมในกลุ่มต่างๆ

ต้นน้ำ	กลางน้ำ		ปลายน้ำ
อุตสาหกรรมเกษตร	อุตสาหกรรมยานยนต์	อุตสาหกรรมผลิตอาหาร	ธนาคาร
อุตสาหกรรมป่าไม้	อุตสาหกรรมผลิตเครื่องปั้น	อุตสาหกรรมแก้ว, เซรามิก	สถานศึกษา
อุตสาหกรรมการประมง	อุตสาหกรรมโลหะพื้นฐาน	อุตสาหกรรมเครื่องจักรกล	โรงแรม
อุตสาหกรรมสินแร่	อุตสาหกรรมเครื่องดัด	อุตสาหกรรมกระดาษ	ประกัน
อุตสาหกรรมปิโตรเลียม	อุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง	อุตสาหกรรมผลิตยา	ร้านอาหาร
	อุตสาหกรรมเคมี	อุตสาหกรรมขึ้นรูปพลาสติก	ท่องเที่ยว
	อุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์	อุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่ม	ขนส่ง
	อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	อุตสาหกรรมยาง	ขายส่ง
	อุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนโลหะ	อุตสาหกรรมไม้และเฟอร์นิเจอร์	ยาและสุขภาพ

หากอาศัยลักษณะของการกระทำต่อวัตถุดิบเพื่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ อาจจำแนกโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ โรงงานผลิตภัณฑ์พื้นฐาน โรงงานแปรรูป และ โรงงานประกอบ โดยโรงงานทั้ง 3 กลุ่มนี้จะมีลักษณะการผลิตที่ต่อเนื่องกัน ตั้งแต่การนำทรัพยากรธรรมชาติเข้ามาแปรรูปจนกระทั่งส่งต่อให้ลูกค้าเมื่อทำการผลิตเสร็จ

โรงงานผลิตภัณฑ์พื้นฐานจะเป็นส่วนเริ่มต้นแรกสุด โดยการนำทรัพยากรธรรมชาติมาผ่านกระบวนการเพื่อให้ได้วัตถุดิบที่จะนำไปผ่านโรงงานถัดไป เช่น เหล็กกล้าจะถูกผลิตจากสินแร่เหล็กได้เป็นอินกอต (Ingot) จากนั้นจะถูกส่งต่อไปโรงงานแปรรูปในส่วนที่สอง เพื่อทำการแปรรูปได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปทำการประกอบขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป เช่น โรงงานแปรรูปจะทำกรีดแท่งอินกอตได้เป็นเหล็กแผ่น หรือเหล็กรูปพรรณรูปทรงต่างๆ เช่น เหล็กฉาก เหล็กตัวไอ เป็นต้น จากนั้นผลิตภัณฑ์จะถูกนำไปใช้ต่อโดยโรงงานประกอบ เช่น เหล็กที่ผ่านการรีดมา จะนำไปตัดและพับขึ้นรูปประกอบเป็นตัวถังรถยนต์ หรือเหล็กตัวไอถูกนำไปเชื่อมประกอบเป็นโครงสร้างอาคาร เป็นต้น

1.4 ชนิดของการผลิต (Type of Production)

การจำแนกชนิดของการผลิตโดยอาศัยปริมาณของผลิตภัณฑ์เป็นตัวจำแนก อาจแบ่งได้ 3 ประเภท คือ การผลิตแบบตามงาน (Job shop production) การผลิตแบบกลุ่ม (Batch production) และ การผลิตเป็นจำนวนมาก (Mass production) การผลิตทั้ง 3 แบบนี้จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณการผลิต ดังแสดงในรูปที่

1.3 การผลิตแต่ละประเภทมีลักษณะดังนี้

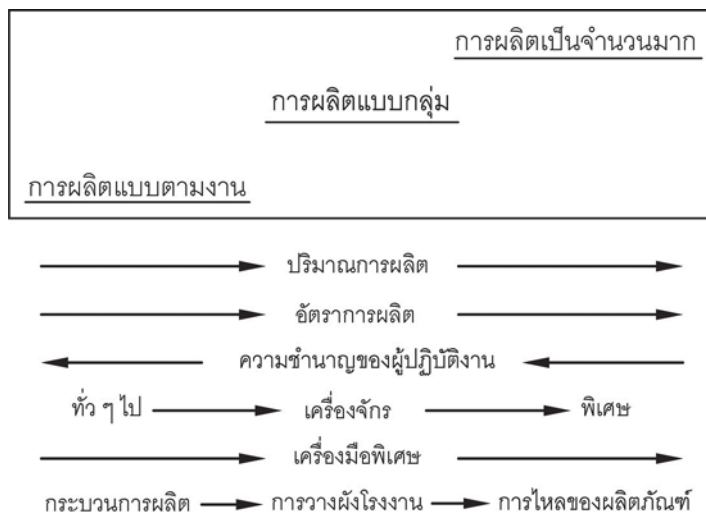
1. **การผลิตแบบตามงาน** เป็นการผลิตในปริมาณน้อยชิ้นหรือมีขนาดล็อตในการผลิตที่น้อยๆ อัตราการผลิตต่ำ ความสามารถหรือทักษะของผู้ปฏิบัติงานจะต้องมีสูง เพราะรูปแบบหรือชนิดของผลิตภัณฑ์จะมีหลากหลายชนิด เครื่องมือและอุปกรณ์จะต้องมีความสามารถใช้งานได้หลากหลายและยืดหยุ่น ในขณะที่การวางแผนโรงงานจะต้องมีการวางแผนแบ่งกลุ่มกระบวนการผลิต

2. **การผลิตแบบกลุ่ม** ปริมาณการผลิตแต่ละล็อตจะอยู่ระดับปานกลาง ซึ่งอาจมีการผลิตและสต็อกของไว้ในคลังสินค้าเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้ทันในในเวลาต่างๆ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตแบบนี้จะมีลักษณะการทำงานแบบต่างๆ ไป แต่ให้อัตราการผลิตที่สูงกว่า มีการออกแบบอุปกรณ์นำเจาะและจับยึดชิ้นงาน (Jig and fixture) เพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตให้สูงขึ้น

ตัวอย่างของโรงงานที่ผลิตแบบกลุ่ม ได้แก่ โรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ โรงงานผลิตหนังสือ โรงงานผลิตชิ้นส่วนในงานประกอบต่างๆ เป็นต้น โรงงานที่ผลิตแบบกลุ่มประกอบด้วย แผนกเครื่องจักรกล แผนกหล่อ แผนกแม่พิมพ์พลาสติก แผนกปั๊มขึ้นรูป รวมอยู่ในโรงงานเดียวกัน

3. **การผลิตเป็นจำนวนมาก** เป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง รูปแบบของผลิตภัณฑ์จะมีน้อยชนิด แต่ผลิตปริมาณมาก อัตราการผลิตสูง เครื่องมือเครื่องจักรจะถูกออกแบบและสร้างมาเฉพาะเจาะจงของแต่ละผลิตภัณฑ์ การลงทุนอุปกรณ์และเครื่องจักรจะมีราคาสูง การผลิตน้อยชิ้นจะไม่คุ้มทุน ทักษะของพนักงานไม่ต้องมีสูง อุตสาหกรรมที่ผลิตแบบเป็นจำนวนมากนั้น ได้แก่ โรงงานประกอบอุปกรณ์หรือเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ โรงงานผลิตรถยนต์ คอมพิวเตอร์ เป็นต้น

inspiration starts here



รูปที่ 1.3 ชนิดของการผลิต
(ที่มา: Groover M.P., 1987)

1.5 การผลิตพื้นฐาน (Basic Manufacturing)

การหล่อ (Casting) กรรมวิธีนี้เหมาะสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อน หรือโลหะที่มีความแข็งขึ้นรูปโดยวิธีการอื่นๆ ได้ยาก ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อนั้นโดยมากจะต้องนำไปทำการกัดแต่งในขั้นตอนต่อไป เพื่อให้ได้ขนาดหรือรูปร่างและตำแหน่งที่ต้องการประกอบกับชิ้นส่วนอื่น หลักการของการหล่อจะอาศัยการเทน้ำโลหะหลอมเหลวเข้าไปในโพรงแบบหล่อที่มีรูปร่างเป็นชิ้นงานที่เราต้องการ จากนั้นปล่อยให้แข็งตัวแล้วจึงนำออกจากแบบหล่อและทำการตัดรูล้นและรูเทออก จะได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ

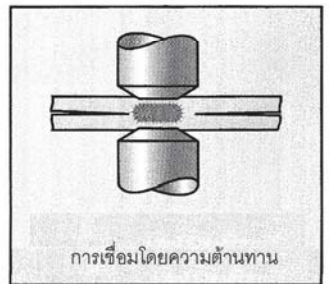
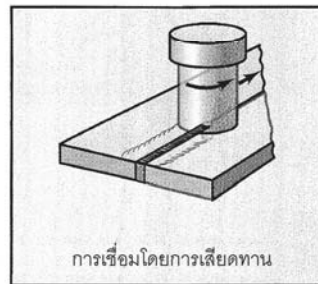
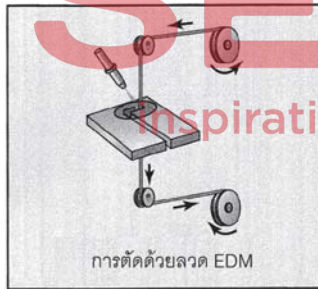
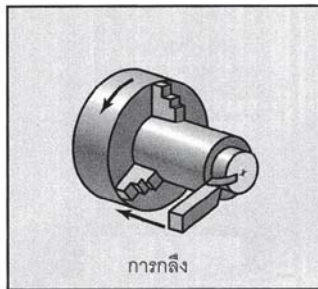
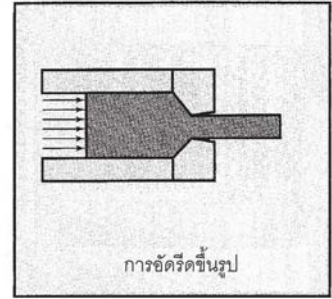
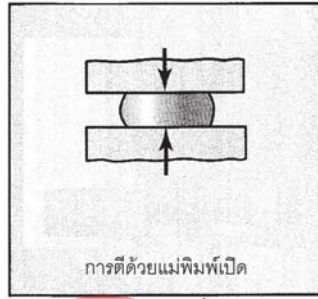
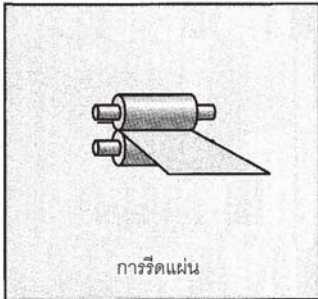
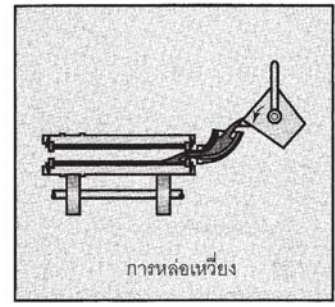
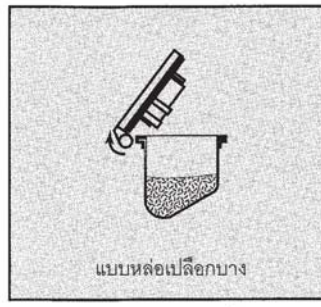
รูปที่ 1.4 แสดงตัวอย่างกระบวนการหล่อ เช่น การหล่อโดยแบบหล่อประณีต แบบหล่อเปลือกบาง และการหล่อเหวียง เป็นต้น

การขึ้นรูป (Forming) วิธีกรรมวิธีเป็นการใช้แรงในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงาน รูปทรงของผลิตภัณฑ์มักมีหน้าตัดคงที่หรือรูปร่างไม่ซับซ้อน กระบวนการนี้ประกอบด้วย การรีด การตี การอัดรีด การขึ้นรูปโลหะแผ่น เป็นต้น ในกรณีการขึ้นรูปโลหะ สามารถกระทำได้ทั้งการขึ้นรูปร้อนและการขึ้นรูปเย็น การจะเลือกใช้กระบวนการใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติภายหลังการขึ้นรูปที่เราต้องการ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการขึ้นรูปด้วย

การกัดแต่ง (Machining) เป็นการตัดเฉือนเนื้อวัสดุในบางส่วนที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้ได้รูปทรงของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ การกัดแต่งจะต้องมีเครื่องมือตัดที่มีความแข็งและคม ซึ่งอาจมีตำแหน่งในการตัดเฉือนเนื้อโลหะเป็นหนึ่งตำแหน่งหรือมากกว่าขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องจักรและชนิดของเครื่องมือคมตัด ตัวแปรที่มีผลต่อเวลาในการกัดแต่งและคุณภาพผิวชิ้นงานภายหลังการกัดแต่งประกอบไปด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อน รวมถึงชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัดด้วย ตัวอย่างการกัดแต่งประกอบด้วย การกลึง การกัดแต่งด้วยไฟฟ้า และการเจียรไน เป็นต้น

การต่อ (Joining) เป็นการนำชิ้นงานมาประกอบเป็นผลิตภัณฑ์โดยการต่อ ซึ่งอาจอาศัยการใช้ความร้อนทำให้เกิดการหลอมละลายชิ้นงานสองชิ้นเข้าด้วยกันโดยการเชื่อมหรืออาศัยการใช้หมุดย้ำ สกรู และสลักเกลียว เป็นต้น ตัวอย่างกระบวนการต่อประกอบด้วย การเชื่อม การแล่นประสาน การบัดกรี การยึดเหนี่ยวโดยการแพร์ การยึดเหนี่ยวโดยกาว และการต่อโดยวิธีทางกล เป็นต้น

การตกแต่งผิวสำเร็จ (Surface finished) เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการผลิตชิ้นงานขึ้นมา เพื่อให้ผิวของงานมีความเรียบ ขนาดเที่ยงตรงตามข้อกำหนด กระบวนการนี้ได้แก่ การขัดเงา การปรับปรุงพื้นผิว การเคลือบ และการอบผิว เป็นต้น



กระบวนการเชื่อม

รูปที่ 1.4 กระบวนการผลิตพื้นฐานแบบต่างๆ
(ที่มา: Kalpakjian S. and Schmid S.R., 2006)

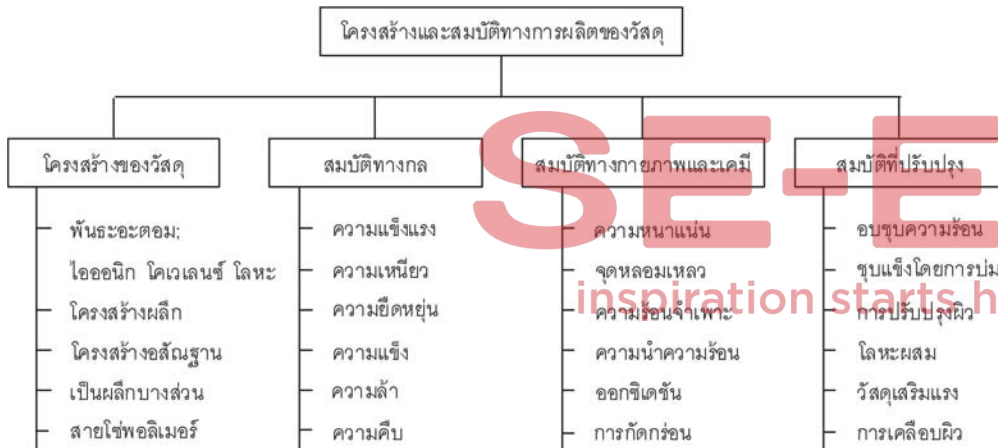
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1

1. จงให้ความหมายคำว่า “Manufacturing”
2. จงอธิบายส่วนประกอบของ “Manufacturing system”
3. จงอธิบายหน้าที่ต่างๆ ในการผลิต
4. จงบอกประเภทของอุตสาหกรรมการผลิตโดยอาศัยชนิดของผลิตภัณฑ์
5. จงบอกประเภทของการผลิตที่อาศัยปริมาณการผลิตเป็นตัวจำแนก
6. จงบอกการผลิตพื้นฐานแต่ละกรรมวิธี พร้อมยกตัวอย่างประกอบ

SE-ED
inspiration starts here

เหล็กกล้าถูกเลือกใช้ในการผลิตตัวถังรถยนต์ ทั้งนี้เพราะต้องการความแข็งแรง ขึ้นรูปง่ายและราคาไม่แพง พลาสติกถูกเลือกใช้ในการผลิตชิ้นส่วนหลายๆ ชนิด ด้วยเหตุผลของสมบัติที่เป็นฉนวน กันความร้อน ไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมี และคุณลักษณะที่สามารถเลือกใช้งานได้หลากหลาย เช่น มีหลากสีให้เลือก น้ำหนักเบา ขึ้นรูปง่ายได้ง่ายโดยมีค่าใช้จ่ายไม่สูงเกินไป แก้วถูกเลือกใช้ในการผลิตกระจกรถยนต์ไม่ใช่เพียงเหตุผลของความโปร่งใสเพียงอย่างเดียว แต่ด้วยความที่แก้วนั้นมีความแข็งแรง ขึ้นรูปได้ง่ายและสะอาด ตลอดจนมีความทนทานต่อการขีดข่วนให้เป็นรอยได้ดี เป็นต้น

จากตัวอย่างข้างต้น จะเห็นได้ว่าวิศวกรที่ทำหน้าที่ในการออกแบบผลิตภัณฑ์นั้น จะต้องมีความรู้และเข้าใจโครงสร้างและสมบัติของวัสดุเป็นอย่างดี โดยพื้นฐานความรู้ทางด้านโครงสร้างและสมบัติของวัสดุเบื้องต้นนั้น แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งประกอบไปด้วย โครงสร้างของวัสดุ สมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติที่สามารถปรับปรุงขึ้นมาใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานให้มากขึ้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างและสมบัติชนิดต่างๆ ของวัสดุ

2.1 โครงสร้างของโลหะ (Structure of Metals)

โครงสร้างของวัสดุแยกออกเป็นระดับต่างๆ ได้แก่ โครงสร้างอะตอม การจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นโครงสร้างผลึกและโครงสร้างโมเลกุล โครงสร้างจุลภาค และโครงสร้างมหภาค โครงสร้างของอะตอมมีอิทธิพลต่อการเกิดพันธะระหว่างอะตอมเป็นอย่างยิ่ง และเป็นที่มาของการจำแนกประเภทของวัสดุออกเป็น กลุ่มโลหะ อโลหะ และวัสดุกึ่งตัวนำ การจัดเรียงตัวของกลุ่มอะตอมเพื่อเกิดเป็นโครงสร้างนั้นจะมีการเรียงตัวกันเป็น 2 แบบ คือ โครงสร้างผลึก (Crystal structure) และ โครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous structure)

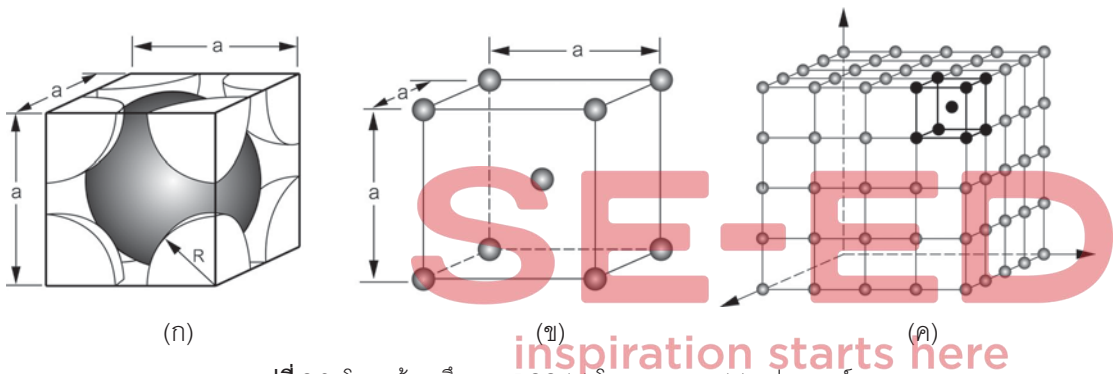
สำหรับโครงสร้างผลึกนั้น เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของอะตอมอย่างเป็นระเบียบและมีรูปแบบที่แน่นอนเป็นระบบ 3 มิติ และเกิดขึ้นกับของแข็งเท่านั้น โดยของแข็งนี้อาจจะเป็นโลหะหรืออโลหะก็ได้ ส่วน

โครงสร้างอณูฐานนั้น อะตอมจะรวมตัวกันเป็นรูปแบบที่ไม่แน่นอน อาจเป็นระเบียบเพียงช่วงสั้นๆ แต่ขาดระเบียบในช่วงยาว

2.1.1 โครงสร้างผลึกพื้นฐานของโลหะ (Crystal structure of metal)

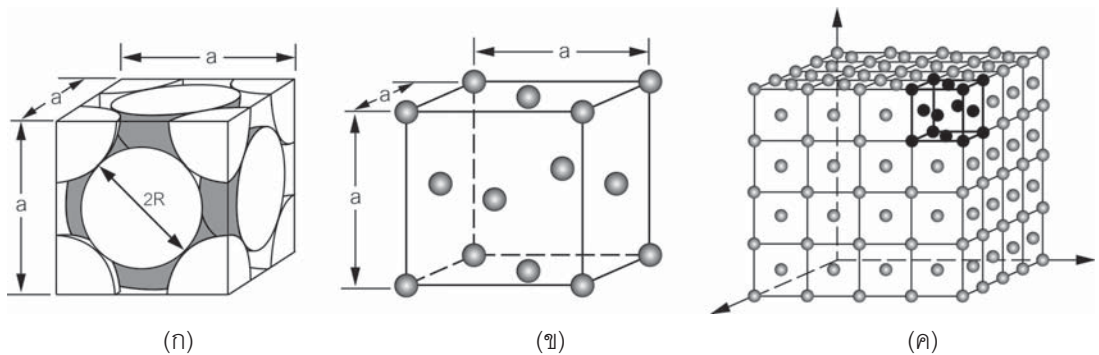
เมื่ออะตอมมารวมกันเป็นโครงสร้างผลึกจะมีรูปทรงที่เป็นลูกบาศก์ เรียกว่า หน่วยเซลล์ (Unit cell) บ่อยครั้งเรามักเรียกว่า โครงสร้างผลึก โลหะเกือบ 90 เปอร์เซ็นต์ จะมีระบบผลึกอยู่ 3 แบบ ประกอบไปด้วย

1. ระบบผลึกแบบบอดี-เซ็นเตอร์-คิวบิก (Body-center cubic หรือ BCC) ลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบ BCC แสดงในรูปที่ 2.3 ผลึกแบบ BCC จะมีอะตอมอยู่ที่มุมทั้งหมดแปดมุม และกึ่งกลางหน่วยเซลล์ อีกหนึ่งอะตอม โลหะที่มีผลึกแบบนี้ ได้แก่ โครเมียม เหล็กแอลฟา โมลิบดีนัม เป็นต้น



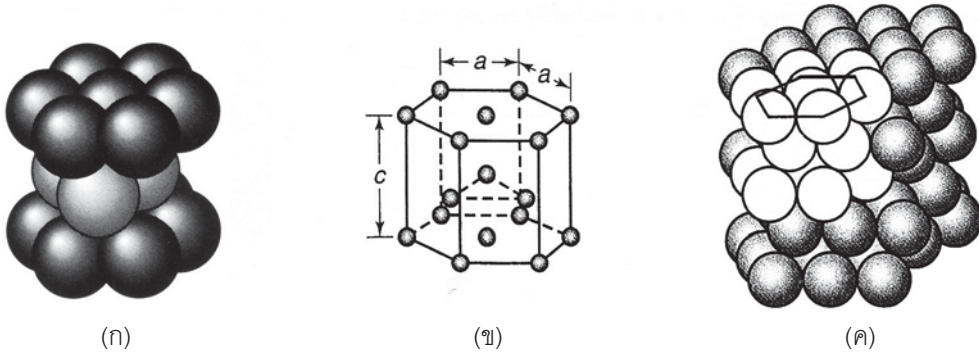
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบ BCC (ก) โมเดลลูกบอล (ข) หน่วยเซลล์ (ค) โครงสร้างผลึกที่มีหลายหน่วยเซลล์

2. ระบบผลึกแบบเฟซ-เซ็นเตอร์-คิวบิก (Face-centered cubic หรือ FCC) ระบบผลึกแบบ FCC จะมีอะตอมอยู่ทุกมุมและกึ่งกลางด้านทุกด้านบริเวณผิวหน้าของหน่วยเซลล์ โครงสร้างของระบบผลึกแบบ FCC แสดงดังรูปที่ 2.4 โลหะที่มีผลึกแบบนี้ได้แก่ อะลูมิเนียม ทองแดง ทองคำ เหล็กแกมมา เป็นต้น

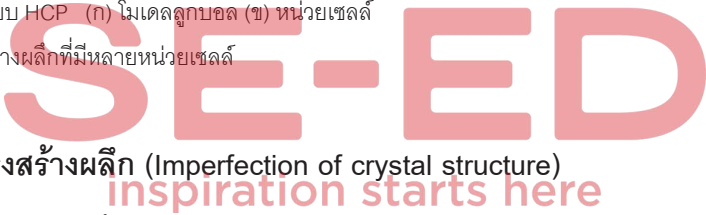


รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบ FCC (ก) โมเดลลูกบอล (ข) หน่วยเซลล์ (ค) โครงสร้างผลึกที่มีหลายหน่วยเซลล์

3. ระบบผลึกแบบเฮกซะโกนอล-คลอส-แพ็ค (Hexagonal close-packed หรือ HCP) โครงสร้างผลึกแบบ HCP นี้จะมีลักษณะเป็นรูปทรงหกเหลี่ยม โดยอะตอมจะอยู่ที่มุมทั้ง 6 มุมทั้งด้านบนและล่าง ดังรูปที่ 2.5 และอยู่กึ่งกลางบริเวณผิวหน้าของรูปทรงหกเหลี่ยมด้านบนและล่างอีกด้านละหนึ่งลูก ส่วนบริเวณด้านในผิวหน้าในแนวตั้งจะมีอะตอมอยู่กึ่งกลางโดยอยู่ด้านเว้นด้าน ทำให้มีอะตอมอยู่ 3 อะตอม โลหะที่มีผลึกแบบนี้ ได้แก่ แคดเมียม สังกะสี แมกนีเซียม โคบอลต์ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกแบบ HCP (ก) โมเดลลูกบอล (ข) หน่วยเซลล์ (ค) โครงสร้างผลึกที่มีหลายหน่วยเซลล์



2.1.2 ความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก (Imperfection of crystal structure)

ความไม่สมบูรณ์แบบจุด (Point defect) เกิดขึ้นเฉพาะที่จุดใดจุดหนึ่ง โดยสาเหตุเกิดจากอะตอมเพียงไม่กี่ตัว ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้

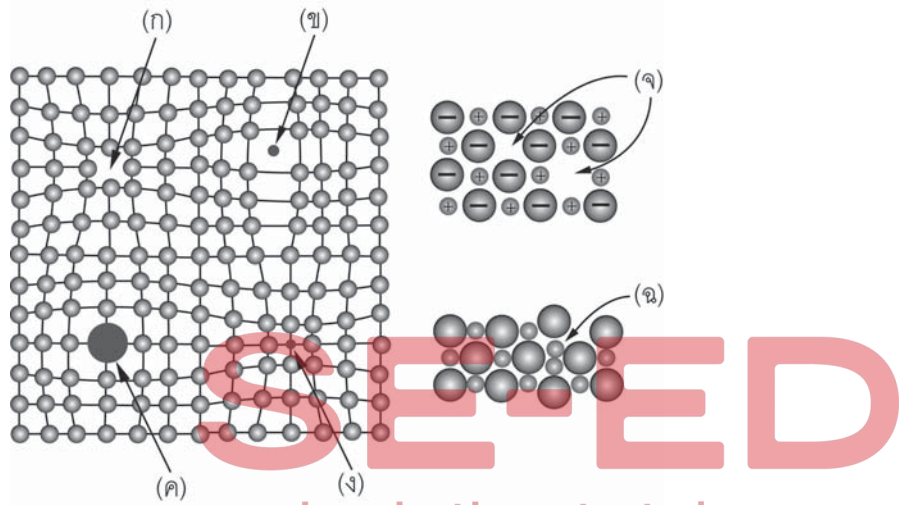
การเกิดช่องว่าง (Vacancy) เกิดจากอะตอมในโครงสร้างผลึกบางตัวหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ จึงทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) สาเหตุของการเกิดช่องว่างของอะตอม อาจเกิดจากการถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว การขึ้นรูป หรือการถูกอนุภาคบางอย่างวิ่งชน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โอกาสเกิดช่องว่างของอะตอมยิ่งมีสูงขึ้นไปด้วย

การแทรกที่ของอะตอม (Interstitial defect) เป็นจุดบกพร่องที่เกิดจากอะตอมของธาตุหนึ่งแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างแลตทิซของผลึกของอะตอมอีกธาตุหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) โดยอะตอมที่เข้าไปแทรกที่นั้นจะทำให้แลตทิซของโครงสร้างผลึกเดิมขยายขึ้นจนทำให้เกิดการบิดเบี้ยวเกิดขึ้น

การแทนที่ของอะตอม (Substitutional defect) เกิดจากอะตอมของธาตุหนึ่งเข้าไปแทนที่อะตอมของอีกธาตุหนึ่งในตำแหน่งเดิมของอะตอม โดยการแทนที่ของอะตอมตัวใหม่อาจมีขนาดที่เล็กกว่าหรือโตกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ค) และ (ง) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการบิดเบี้ยวของโครงสร้างผลึกเกิดขึ้นเช่นกัน

จุดบกพร่องแบบช็อตต์กี (Schottky) เกิดจากข้อผิดพลาดที่ทั้งประจุบวกและประจุลบได้หลุดออกจากตำแหน่งเดิมของตนเองไป เพื่อรักษาประจุของโครงสร้างให้เป็นกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (จ) ทำให้เกิดช่องว่างที่ทั้งบวกและลบเกิดขึ้น

จุดบกพร่องแบบเฟรนเคิล (Frenkel) เป็นจุดบกพร่องที่เกิดจากการย้ายที่ของไอออนบวกจากที่เดิมของตนไปแทรกอยู่ร่วมกับไอออนลบและบวกของอีกที่หนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างที่เป็นประจุบวกเกิดขึ้น



inspiration starts here

รูปที่ 2.6 ความไม่สมบูรณ์แบบจุด (ก) การเกิดช่องว่าง (ข) การแทรกที่ (ค) การแทนที่ของอะตอมขนาดใหญ่

(ง) การแทนที่ของอะตอมขนาดเล็ก (จ) ช็อตต์กี (Schottky) (ฉ) เฟรนเคิล (Frenkel)

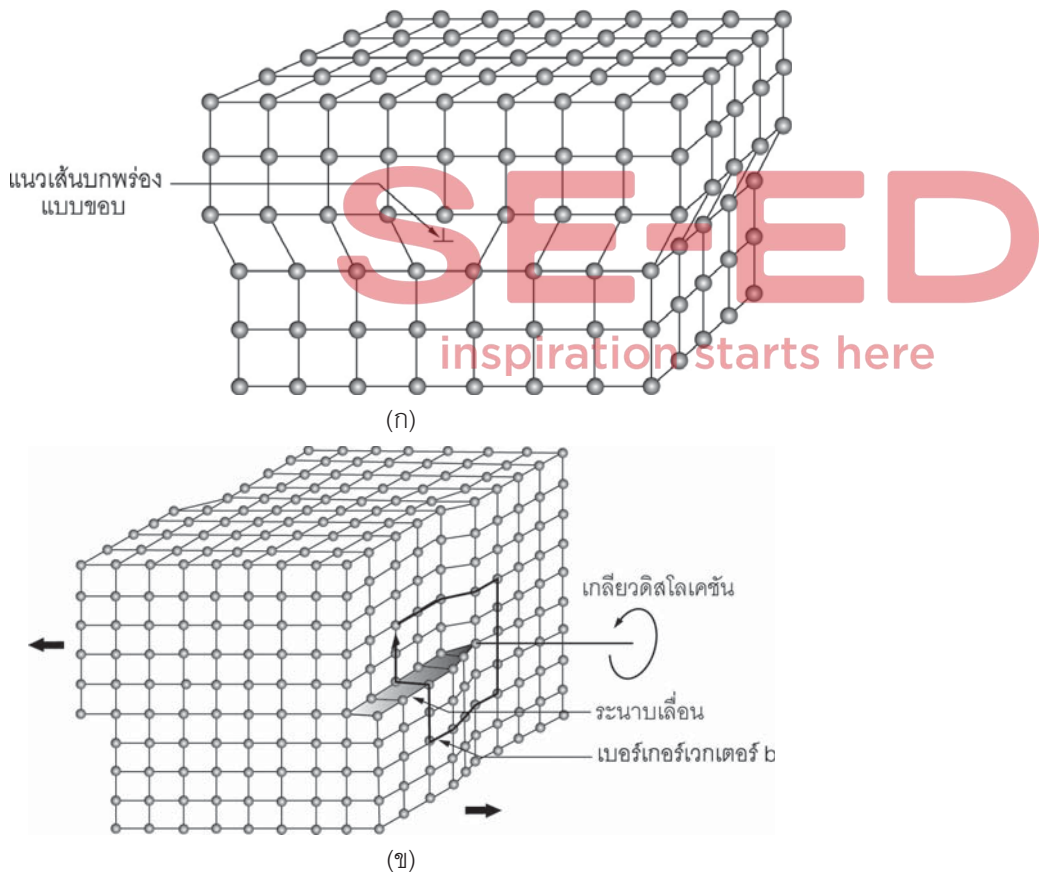
(ที่มา: ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2556)

ความไม่สมบูรณ์แบบเส้น (Line defect) มักเรียกว่า **ดิสโลเคชัน (Dislocation)** ซึ่งจะเกิดเป็นแถวหรือแนวเส้น จึงเรียกว่าความไม่สมบูรณ์แบบเส้น สาเหตุของการเกิดอาจะมาจากการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวหรือการเปลี่ยนรูปในสภาพพลาสติก การเกิดดิสโลเคชันจะมี 2 ลักษณะ คือ แนวบกพร่องแบบขอบ (Edge dislocation) และแนวบกพร่องแบบเกลียว (Screw dislocation)

1. **แนวบกพร่องแบบขอบ (Edge dislocation)** เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอมออกไปโดยการเคลื่อนตัวเป็นเส้นแนวบกพร่องแบบขอบ (Edge dislocation line) บริเวณรอบแนวบกพร่องจะเกิดสภาวะของการอัดและการดึง โดยความเครียดดึงจะเกิดได้ขอบที่เกินมาและความเครียดอัดจะเกิดรอบขอบที่เกินมา ลักษณะการเกิดมีลักษณะคล้ายตัวที่หัวคว่ำ \perp ซึ่งจะมีระนาบเพียงครึ่งระนาบของอะตอมที่แทรกอยู่

2. **แนวบกพร่องแบบเกลียว** (Screw dislocation) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข) ลักษณะการเกิดคล้ายบันไดวนหรือเป็นเกลียว โดยมีแนวกลางของบันไดวนเป็นเส้นแนวบกพร่อง สาเหตุเกิดจากระนาบของผลึกได้รับแรงเฉือนพร้อมกัน แต่ในทิศทางตรงกันข้าม โดยมีสลิปเวกเตอร์ขนานกับทิศทางของแรงหรือเส้นแนวบกพร่อง

ความไม่สมบูรณ์แบบระนาบ (Planar defect) เป็นความบกพร่องที่เกิดกับอะตอมหลายอะตอมหรือหลายแถว ในระนาบหนึ่ง ซึ่งขยายออกเป็น 2 มิติ เป็นความไม่สมบูรณ์แบบระนาบแบบหนึ่ง โดยขอบเกรนเกรนของวัสดุเกิดจากกลุ่มของผลึกที่มีการจัดเรียงตัวในแนวต่างๆ กัน โดยแต่ละกลุ่มจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกไปในทิศทางเดียวกัน แต่จะไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันทุกเกรน ดังนั้น แต่ละเกรนจะมีรอยต่อระหว่างกันเกิดขึ้น ซึ่งเรียกว่า **ขอบเกรน** (Grain boundary) ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างเกรนนี้ อะตอมจะไม่มี การจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ที่ขอบเกรนขึ้น



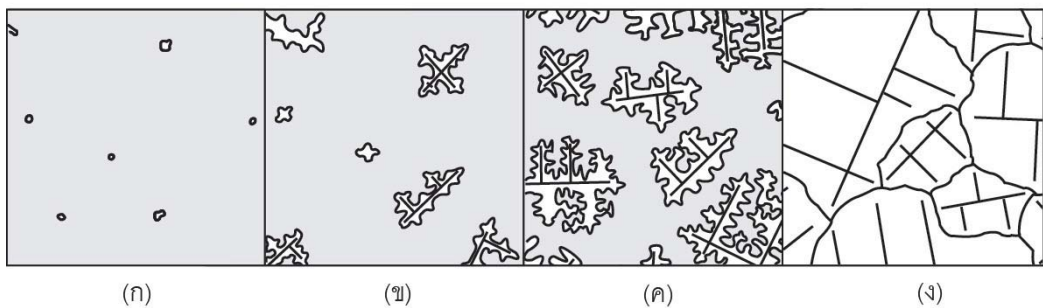
รูปที่ 2.7 (ก) ตำแหน่งอะตอมล้อมรอบแนวบกพร่องแบบขอบ (ข) การเกิดแนวบกพร่องแบบเกลียว สลิปเวกเตอร์จะขนานกับแนวบกพร่อง

2.1.3 เกรนและขอบเกรน (Grain and grain boundary)

กระบวนการเริ่มแรกของกระบวนการขึ้นรูปโลหะ คือ การหล่อ โดยการหลอมโลหะให้อยู่ในสภาวะของเหลว จากนั้นเทลงแบบหล่อแล้วทำให้เกิดการแข็งตัว ซึ่งเรียกว่า *การแข็งตัวของโลหะ* (Solidification of metal) โดยโลหะจะเกิดการแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิหลอมเหลวลดต่ำลงมาจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว โครงสร้างที่ได้จากการแข็งตัวจะมีผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล ดังนั้น การควบคุมขนาดและรูปร่างของเม็ดเกรนจึงต้องกระทำกันในช่วงที่โลหะเกิดการแข็งตัวนี้

ในขณะที่โลหะเกิดการแข็งตัว อะตอมจำนวนมากจะวิ่งเข้ามารวมกลุ่มและจัดเรียงตัวต่อกันเป็นโครงสร้างผลึกและขยายตัวออกอย่างมีทิศทาง กระบวนการแข็งตัวของโลหะจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การกำเนิดนิวเคลียสในขั้นแรก และการเติบโตหรือขยายตัวนิวเคลียสจะเป็นขั้นตอนถัดมา

รูปที่ 2.8 (ก) แสดงการกำเนิดนิวเคลียสเริ่มต้นของของแข็ง ซึ่งเกิดจากอะตอมของโลหะหลอมเหลวมารวมตัวกันเมื่ออุณหภูมิของน้ำโลหะลดลงมาถึงจุดแข็งตัว อนุภาคของแข็งขนาดเล็กนี้เรียกว่า *นิวเคลียไอ* (Nuclei) นิวเคลียไอจะขยายตัวโตขึ้นเนื่องจากอะตอมของโลหะในโลหะเหลววิ่งมาเกาะตัวเพิ่มขึ้นและขยายตัวเป็นกิ่งก้านสาขาคล้ายกิ่งไม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) และ (ค) โดยมีชื่อเรียกตามลักษณะที่มองเห็นว่า *ผลึกกิ่งไม้* (Dendrite) เมื่อมีการขยายตัวโตขึ้นเรื่อยๆ ปลายของผลึกกิ่งไม้จะชนกันทำให้ไม่สามารถขยายตัวไปในทิศทางนั้นได้อีก แต่จะเปลี่ยนไปขยายตัวไปยังบริเวณที่เป็นของเหลว จนกระทั่งของเหลวหมดไปกลายเป็นของแข็งทั้งหมด ผลึกกิ่งไม้เมื่อเติบโตเต็มที่ จะเรียกว่า *เกรน* (Grain) และขอบของเกรนที่เป็นรอยเชื่อมต่อกันจะเรียกว่า *ขอบเกรน* (Grain boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ง)



รูปที่ 2.8 (ก) การเกิดนิวเคลียไอจากผลึกขนาดเล็ก (ข) และ (ค) โครงสร้างผลึกขยายตัวเป็นผลึกกิ่งไม้
(ง) สิ้นสุดการแข็งตัวเกิดเกรนและมีขอบเกรนเป็นตัวกั้นระหว่างเกรน (ที่มา: Abner S.H., 1974)

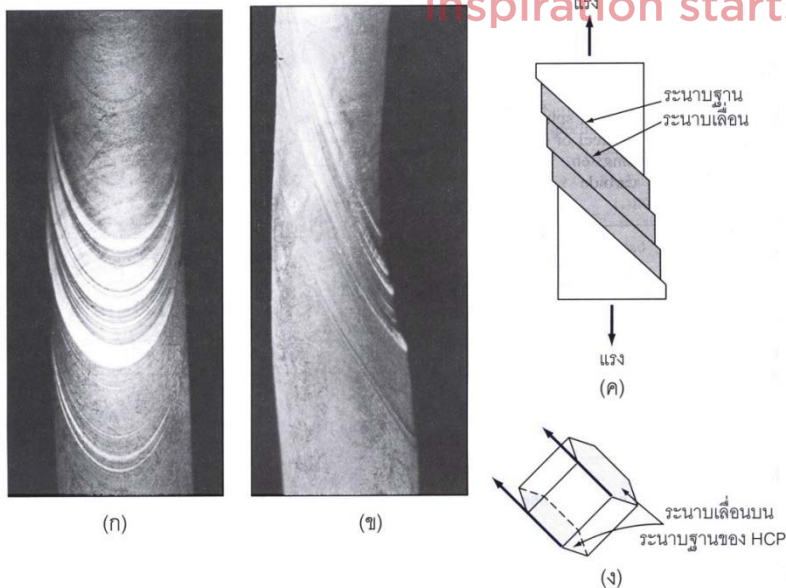
2.1.4 การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของโลหะ (Plastic deformation of metal)

เมื่อโลหะได้รับความเค้นต่ำกว่าขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) จะทำให้โลหะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างไป และเมื่อเราลดความเค้นลงจนหมดโลหะจะกลับคืนสู่สภาพเดิม การเปลี่ยนรูปร่างในลักษณะนี้ เป็นการเปลี่ยน

รูปแบบชั่วคราวเรียกว่า การเปลี่ยนรูปร่างยืดหยุ่น (Elastic deformation) แต่เมื่อใดก็ตามที่เราให้ความเค้นสูงกว่าขีดจำกัดความยืดหยุ่น การเปลี่ยนรูปร่างถาวรจะเกิดขึ้นกับโลหะ ถึงแม้จะลดความเค้นลงจนหมดไปแล้วก็ตาม โลหะก็จะไม่กลับคืนสู่สภาพเดิมอีก เรียกการเปลี่ยนรูปร่างในลักษณะนี้ว่า การเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic deformation)

ความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของโลหะเป็นคุณลักษณะเฉพาะอย่างหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ไม่ว่าจะเป็นการขึ้นรูปโดยการบีบ การรีด การตี หรือการอัดขึ้นรูป ล้วนแล้วแต่อาศัยการเปลี่ยนรูปร่างถาวรของโลหะทั้งสิ้น หรือแม้กระทั่งกระบวนการขึ้นรูปโดยการตัดเฉือน เช่น การกรึง การกัด หรือการเลื่อย ก็เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปร่างถาวรเช่นกัน พฤติกรรมของโลหะภายใต้สภาวะการเปลี่ยนรูปร่างถาวรนั้น เป็นกลไกที่มีความสำคัญในการศึกษาเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในการเลือกกระบวนการขึ้นรูปโลหะได้อย่างเหมาะสม

การเปลี่ยนรูปร่างโดยการเลื่อนของโลหะผลึกเดี่ยว หมายถึง การเปลี่ยนตำแหน่งของกลุ่มอะตอมจากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งใหม่ โดยการเลื่อนผ่านกันของกลุ่มอะตอมในโครงสร้างผลึกเมื่อถูกแรงกระทำเกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่า เมื่อโลหะได้รับแรงกระทำโดยการดึง โลหะจะยืดออกเรื่อยๆ ตามขนาดของแรงที่กระทำและเมื่อแรงเพิ่มมากขึ้นจนเกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น โลหะจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรเกิดขึ้น



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนรูปร่างโดยการเลื่อนในสังกะสีผลึกเดี่ยว (ก) ภาพด้านหน้า (ข) ภาพด้านข้าง (ค) ระนาบฐานของผลึก HCP และระนาบเลื่อน (ง) ระนาบเลื่อนที่เกิดบนระนาบฐานของผลึก HCP (ที่มา: Smith W.F., 2006)

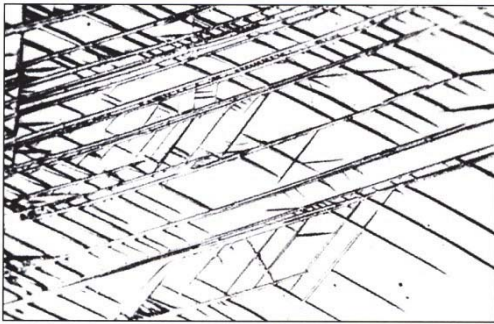
การเปลี่ยนรูปร่างนั้น จะเกิดโดยการเลื่อนผ่านกันของระนาบผลึก ซึ่งจะมองเห็นเป็นเส้น เรียกว่า *แนวการเลื่อน* (Slip line) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) และ (ค) ส่วนระนาบที่เลื่อนผ่านกัน เรียกว่า *ระนาบเลื่อน* (Slip plan) และเมื่อแรงกระทำยังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะพบว่า แรงที่ให้นั้นไม่ได้มีทิศทางตามทิศทางการเลื่อนของผลึก แต่จะกระทำในลักษณะเส้นตรงตามทิศทางของแรงที่ให้ ดังนั้น จึงส่งผลให้ผลึกแต่ละชั้นเกิดการหมุนบิดและเกิดการตัดเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) จนท้ายที่สุดแล้วจะไม่มีระนาบผลึกใดสามารถเกิดการเลื่อนได้อีก โลหะจะขาดจากกัน

การเปลี่ยนรูปโดยการเลื่อนของโลหะจะไม่เกิดเพียงระนาบใดระนาบหนึ่ง แต่จะเกิดขึ้นหลายๆ ระนาบ และสามารถตรวจสอบดูระนาบการเลื่อนได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ซึ่งเป็นการเลื่อนของสังกะสีที่มีผลึกเดี่ยวโดยระนาบที่เกิดการเลื่อนเป็นระนาบฐาน (Basal plane) ของผลึกแบบ HCP (รูปที่ 2.9 (ค) และ (ง)) และหากสังเกตดูจะเห็นว่า มีระนาบที่เกิดการเลื่อนในบริเวณที่ใกล้ชิดกันเป็นแถบคู่ ซึ่งเราเรียกว่า *แถบการเลื่อน* (Slip band)

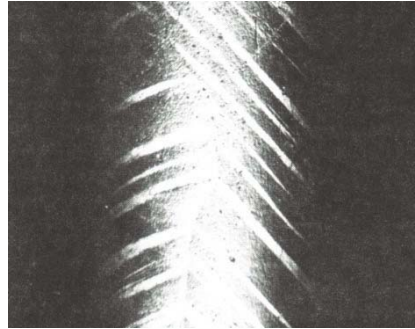
การเปลี่ยนรูปโดยการบิดของโลหะผลึกเดี่ยว เกิดขึ้นเมื่อโลหะได้รับความเค้นเฉือน ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างผลึกเกิดการบิด และอะตอมเกิดการเคลื่อนที่ในระนาบผลึกในแนวที่ขนานกับระนาบการบิด (Twining plane) ทำให้โครงสร้างผลึกถูกแบ่งออกเป็น 2 ซีก ในทิศทางที่ต่างกัน โดยทิศทางจะมีลักษณะคล้ายกระจกเงาสะท้อน

การเกิดการบิดของโครงสร้างผลึก จะทำให้ความสัมพันธ์ของตำแหน่งหรือการเรียงตัวของอะตอมเปลี่ยนไป โดยอะตอมที่เชื่อมต่อกันในแลตทิซเดียวกัน จะเกิดการเคลื่อนที่เป็นเส้นทแยงมุมไปยังตำแหน่งใหม่ การเกิดจะเกิดพร้อมๆ กันหลายหน่วยเซลล์ และการเคลื่อนที่จะเป็นเพียงระยะทางสั้นๆ โดยอะตอมจะยังคงเชื่อมต่อกับแลตทิซเดิมแต่ตำแหน่งจะเปลี่ยนไป

การเกิดการบิดอาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างที่มีขนาดเล็กที่ต้องตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) ซึ่งแสดงการเกิดการบิดของไทเทเนียม และบางครั้งการเกิดการบิดจะเกิดเป็นขอบเขตบริเวณกว้างจนสามารถตรวจสอบได้ด้วยสายตา ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) เป็นลักษณะการเกิดการบิดที่เรียกว่า *แถบบิด* (Twin band) ของสังกะสี ซึ่งสามารถมองเห็นแถบขาวๆ ที่เกิดจากการบิดด้วยสายตาได้



(ก)



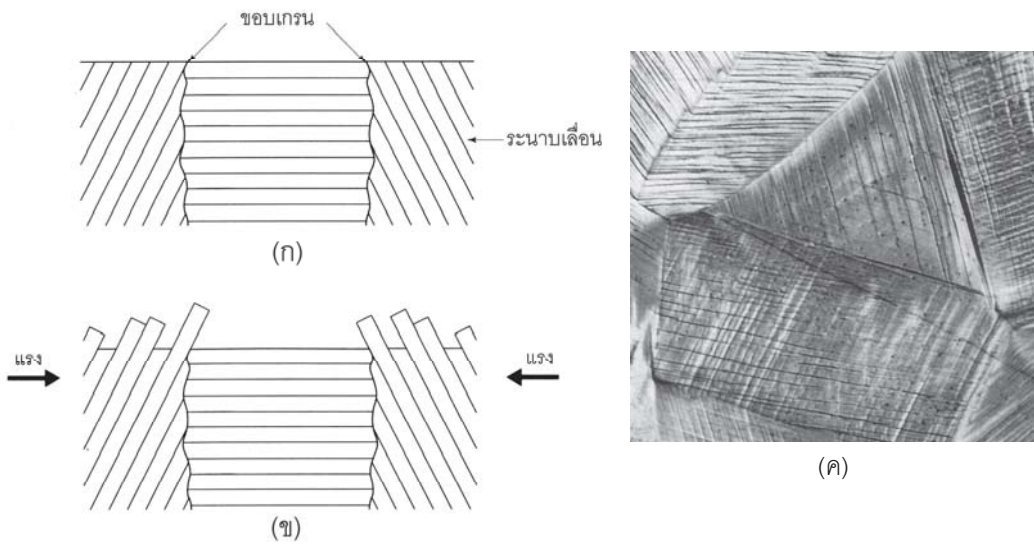
(ข)

รูปที่ 2.10 (ก) การเปลี่ยนรูปโดยการบิดที่เกิดขึ้นกับไทเทเนียม (99.77%) (ที่มา Smith W.F., 2006)

(ข) การเกิดแถบบิด (Twin band) ของสังกะสี (ที่มา: Abner S.H., 1974)

การเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของโลหะพหุผลึก โลหะผสมที่ใช้ในงานวิศวกรรมส่วนมากเป็นโลหะพหุผลึก (Polycrystalline) หรือโลหะหลายผลึกที่เรียงตัวในทิศทางต่างกัน ส่วนโลหะที่เป็นผลึกเดี่ยว (Single crystalline) นั้นมีใช้น้อย การเรียงตัวของผลึกในโลหะผสมจะไม่มีทิศทางที่แน่นอนหรือไม่เป็นทิศทางเดียวกันทั้งหมด ดังนั้น ทิศทางของการเกิดการเลื่อน จึงเปลี่ยนไปในทิศทางที่แตกต่างกันในแต่ละเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) โลหะที่มีผลึกหลายผลึกอยู่รวมกันโดยมีขอบเกรนเป็นตัวกั้น และแต่ละเกรนจะมีระนาบเลื่อนในทิศทางที่แตกต่างกัน และเมื่อมีแรงกระทำจะทำให้เกิดการเลื่อนตามระนาบเลื่อนของแต่ละเกรน ดังรูปที่ 2.11 (ข) และทิศทางการเลื่อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณขอบเกรนของแต่ละผลึก ทั้งนี้เพราะแถบเลื่อนของเกรนหนึ่งเคลื่อนที่ไปชนกับแถบเลื่อนของอีกเกรนหนึ่ง ทำให้เกิดการผลักดันกันขึ้น แถบเลื่อนของอีกเกรนจะเกิดการเลื่อนเกิดขึ้นเช่นกัน แต่ทิศทางจะแตกต่างกัน

ตัวอย่างของภาพถ่ายผลึกของทองแดงที่เกิดการเลื่อนในทิศทางต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.11 (ค) จะเห็นได้ว่า แถบเลื่อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือหักเหทั้งภายในเกรนและบริเวณขอบเกรน โลหะที่มีหลายผลึกโดยทั่วไปแล้วจะมีความแข็งแรงกว่าโลหะที่มีผลึกเดี่ยว นั่นหมายความว่าหากต้องการให้เกิดการเลื่อนเกิดขึ้นจะต้องใช้แรงกระทำที่มากกว่าสำหรับโลหะหลายผลึก สาเหตุที่ทำให้โลหะหลายผลึกมีความแข็งแรงกว่าเพราะขอบเกรนจะเป็นตัวกั้นไม่ให้เกิดการเลื่อนหรือการเคลื่อนที่ของอะตอมได้ง่ายๆ ดังนั้น ยังมีจำนวนเกรนมากก็ยังมีขอบเกรนกันมากขึ้น นั่นเป็นสาเหตุที่ว่า เมื่อต้องการเพิ่มความแข็งแรงกับโลหะ เราจึงต้องทำให้โลหะนั้นมีเกรนที่ละเอียด (Fine grain)



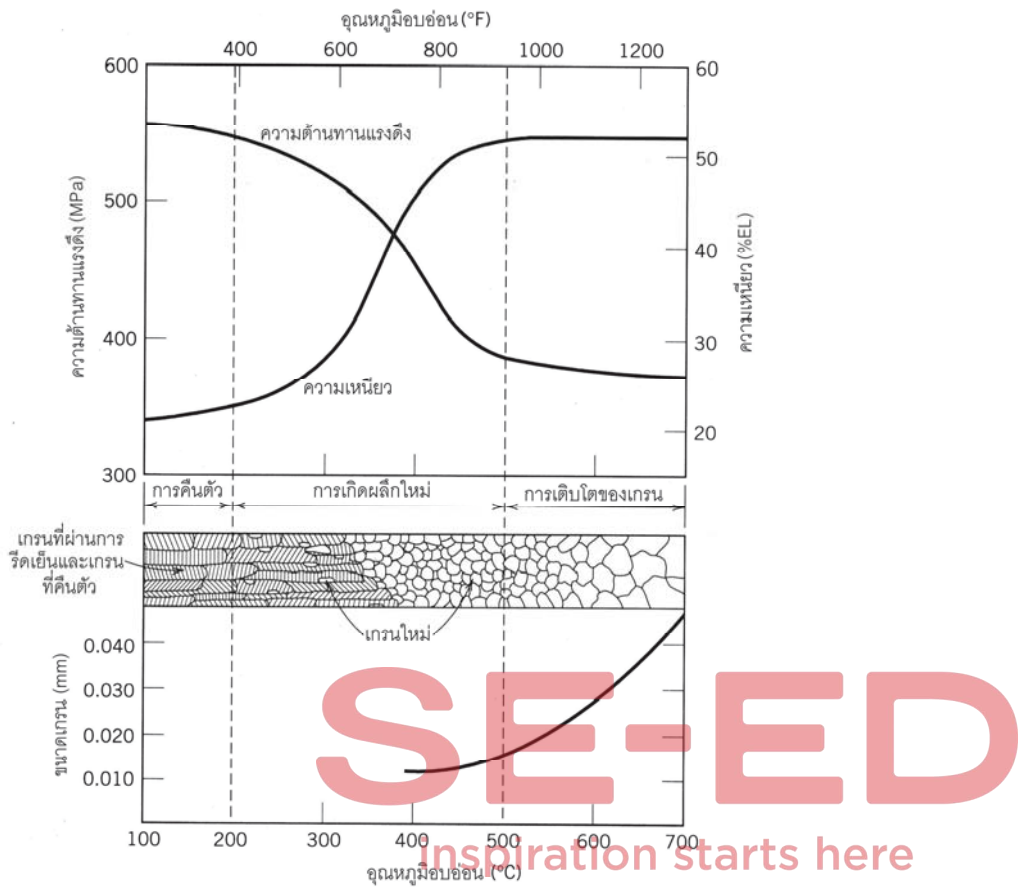
รูปที่ 2.11 การเกิดการเคลื่อนของแถบเลื่อนของผลึกหลายผลึก (ก) ผลึกก่อนรับแรง, (ข) ผลึกเมื่อมีแรงมากจะทำให้เกิดการเคลื่อนเกิดขึ้นตามระนาบเลื่อน (ที่มา: Timing R., 1998), (ค) ตัวอย่างของภาพถ่ายผลึกของทองแดงที่เกิดการเคลื่อนหลายทิศทาง (ที่มา: Callister W.D.Jr., 2003)

2.1.5 การคืนตัว การเกิดผลึกใหม่ และการเติบโตของเกรน

(Recovery, recrystallization and grain growth)

การเปลี่ยนรูปร่างถาวรของโลหะหลายผลึกที่อุณหภูมิต่ำ จะทำให้ขนาดโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลงและรวมถึงสมบัติอีกหลายอย่างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย เช่น การเปลี่ยนรูปร่างของเกรน การเกิดความแข็งเนื่องจากความเครียด และการเพิ่มขึ้นของความเข้มของดิสโลเคชัน พลังงานที่ใช้ในการทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวรนี้ จะถูกเก็บไว้ภายในเนื้อของโลหะในรูปของพลังงานความเครียด (Strain energy) อาจจะมีอยู่ในรูปของความเครียดดึง ความเครียดอัด หรือความเครียดเฉือนบริเวณดิสโลเคชันที่เกิดขึ้นใหม่ ไม่เพียงแต่สมบัติทางกลของโลหะเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนรูป สมบัติทางด้านความนำไฟฟ้าและความต้านทานการกัดกร่อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน

โครงสร้างและสมบัติต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปนี้สามารถกลับคืนมาได้โดยใช้ความร้อนในการปรับปรุง (Heat treatment) ซึ่งบ่อยครั้งจะเรียกกระบวนการนี้ว่า การอบอ่อน (Annealing) การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับโลหะในกระบวนการอบอ่อนนั้น ประกอบไปด้วย การคืนตัว (Recovery) การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) และการเติบโตของเกรน (Grain growth) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 แสดงถึงความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการณ์การอบอ่อนของทองเหลือง



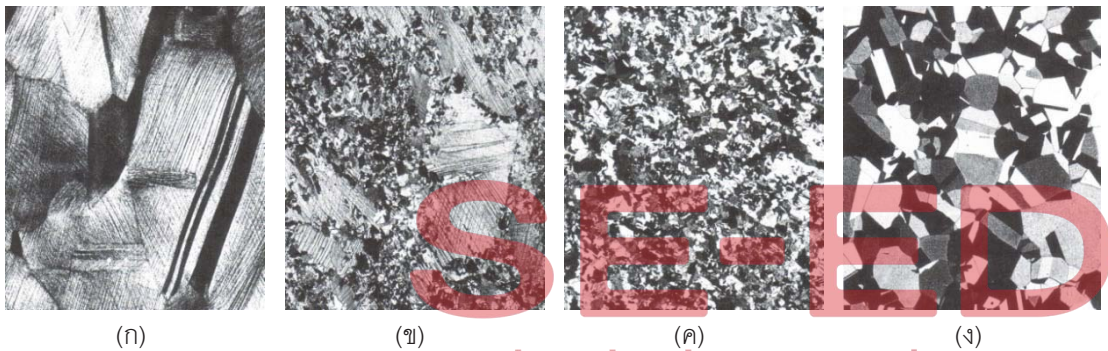
รูปที่ 2.12 อิทธิพลของอุณหภูมิการอบอ่อนที่มีต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความเหนียว และโครงสร้างเกรนในช่วงการคืนตัว การเกิดผลึกใหม่ และการเติบโตของเกรนของโลหะ (ที่มา: Callister W.D.Jr., 2003)

การคืนตัว (Recovery) เมื่อโลหะถูกนำไปให้ความร้อนในช่วงแรกจะเกิดการคืนตัวขึ้นภายในเนื้อโลหะ โดยเกิดการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันบางส่วนที่เคลื่อนที่ได้ง่ายและเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ โดยอะตอมที่แทรกอยู่บนระนาบเลื่อนจะถูกขจัดออกไป ส่วนดิสโลเคชันที่มีสภาวะตรงกันข้ามจะมาบรรจบกันพอดี กลายเป็นผลึกที่สมบูรณ์ขึ้น แต่ไม่สามารถขจัดดิสโลเคชันทั้งหมดได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะทำให้สมบัติทางกายภาพ เช่น ความนำความร้อนและนำไฟฟ้ากลับคืนสู่สภาพเดิม ส่วนสมบัติทางกลจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

การเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เมื่อกระบวนการคืนตัวเสร็จสิ้นลง และอุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้กระบวนการเกิดผลึกใหม่เริ่มเกิดขึ้น โดยกลุ่มของเกรนที่เกิดขึ้นใหม่จะไม่มีพลังงานความเครียดหลงเหลืออยู่ และรูปร่างของเกรนจะมีลักษณะสมมาตรหรือเท่ากันเกือบทุกด้าน กลไกการเกิดเกรนใหม่จะเริ่มจาก

การกำเนิดนิวคลีไอ บริเวณขอบเกรนเดิมและขยายตัวโตขึ้นเรื่อยๆ โดยกระบวนการขยายตัวจะเกิดจากการแพร่ในช่วงสั้นๆ การเกิดผลึกใหม่ในช่วงต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.12 โดยขณะที่มีการเกิดผลึกใหม่ สมบัติทางกลของโลหะจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย นั่นคือ ขณะที่อุณหภูมิการอบอ่อนเพิ่มสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ ความต้านทานแรงดึงของโลหะจะลดลง โลหะจะอ่อนและความเหนียวจะเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงสมบัติเหล่านี้จะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิ

รูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นลักษณะของการเกิดผลึกใหม่ของทองเหลืองที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมา โดยรูป (ก) แสดงเส้นของการเลื่อนเนื่องจากแรงกดจากการรีด และเมื่อทำการอบอ่อนจะทำให้เกิดผลึกขึ้นมาใหม่และขยายตัวโตขึ้นเมื่อให้เวลาเพิ่มขึ้นตามลำดับ



inspiration starts here

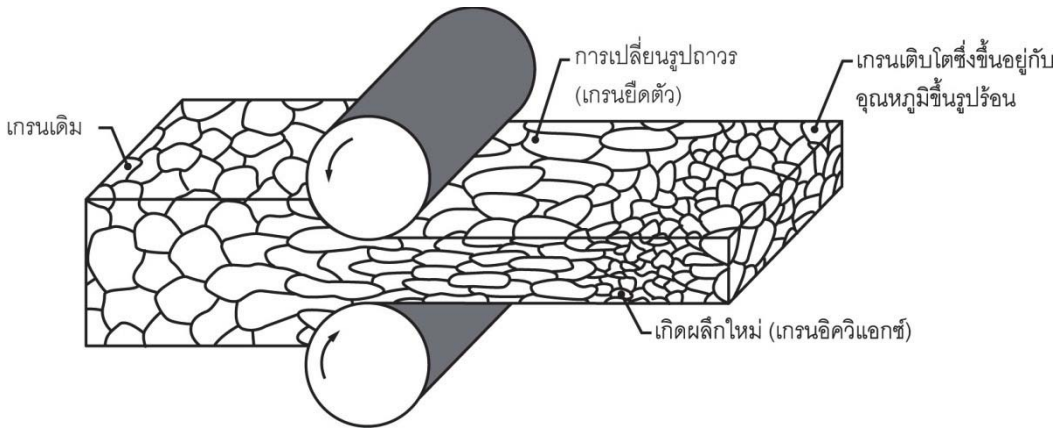
รูปที่ 2.13 โครงสร้างจุลภาคของการเกิดผลึกใหม่ของทองเหลือง (ก) โครงสร้างเกรนผ่านการขึ้นรูปเย็น (33%CW), (ข) เมื่อเวลาผ่านไป 4 วินาที (580°C), (ค) เมื่อเวลาผ่านไป 8 วินาที (580°C), (ง) เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที (580°C) (ที่มา: Callister W.D.Jr., 2003)

การเติบโตของเกรน (Grain growth) หลังจากการเกิดผลึกใหม่สมบูรณ์แล้วเกรนของโลหะจะขยายตัวอย่างต่อเนื่องเรื่อยๆ ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า **การเติบโตของเกรน (Grain growth)** การเติบโตของเกรนนั้นไม่ได้เกิดขึ้นกับทุกๆ เกรน หากมีเกรนใดเกรนหนึ่งโตขึ้น เกรนอื่นๆ จะต้องหดลง ทั้งนี้เพราะการเติบโตของเกรนจะเป็นการขยายขอบเขตของตนออกไป โดยอาศัยการแพร่ของอะตอมของเกรนที่อยู่ติดกันเข้ามาจัดเรียงตัวให้เกรนของตนเองขยายขึ้นในช่วงสั้นๆ และทิศทางการขยายตัวของขอบเขตเกรนจะตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนตัวของอะตอม

2.1.6 การขึ้นรูปร้อนและขึ้นรูปเย็น (Hot and cold working)

การขึ้นรูปร้อน (Hot working) หมายถึง การขึ้นรูปโลหะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization temperature) ที่อุณหภูมิสูงการขึ้นรูปโลหะจะทำได้ง่ายขึ้น เพราะโลหะจะมีสภาวะที่อ่อนตัวสูง และเกรนที่ถูกขึ้นรูปให้แบนจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นผลึกหรือเม็ดเกรนแบบสมมาตรด้วย

ตนเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ดังนั้น การขึ้นรูปอ่อนจึงไม่มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงที่เกิดจากความเครียดให้แก่โลหะแต่อย่างใด เปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปทำได้ค่อนข้างสูงและต่อเนื่อง ดังนั้น จึงเหมาะในการขึ้นรูปขึ้นงานขนาดใหญ่ที่ต้องใช้แรงกระทำอย่างมาก ทำให้ลดขั้นตอนการทำงานลง



รูปที่ 2.14 การขึ้นรูปอ่อนโดยการแปรรูปโลหะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่
(ที่มา: ฅงรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2556)

อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization temperature) คือ อุณหภูมิที่ทำให้ผลึกของโลหะที่แบนหรือบิดเบี้ยวจากการขึ้นรูปมาเกิดเป็นผลึกขึ้นใหม่ โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่จะมีค่าประมาณ $1/2$ ถึง $2/3$ ของอุณหภูมิลอมเหลวของโลหะนั้นๆ การเกิดผลึกใหม่โดยทั่วไปแล้วโลหะบริสุทธิ์จะเกิดขึ้นง่ายกว่าโลหะผสม โดยธาตุผสมในโลหะผสมจะมีส่วนในการเพิ่มอุณหภูมิเกิดผลึกใหม่ให้สูงขึ้น สำหรับโลหะบริสุทธิ์แล้วอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่จะมีค่าประมาณ $0.4 T_m$ (Kelvin) โดย T_m คือ อุณหภูมิลอมเหลวของโลหะ โลหะทางการค้าบางชนิดจะมีค่าประมาณ $0.7 T_m$ ตารางที่ 2.1 แสดงค่าของอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่และอุณหภูมิลอมเหลวของโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสมบางชนิด

การขึ้นรูปเย็น (Cold working) หมายถึง การขึ้นรูปหรือแปรรูปโลหะที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็นมาเม็ดเกรนจะมีลักษณะบิดเบี้ยวและแบนทำให้เกิดความเค้นตกค้างและความแข็งแรงและความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกว่า การเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากความเครียด (Strain hardening) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งให้กับโลหะที่ไม่สามารถชุบแข็งด้วยความร้อนหรือปรับปรุงธาตุผสมได้ เราสามารถหาเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น (Percent cold work, CW) ได้จากสมการ

$$\%CW = \left(\frac{A_o - A_d}{A_o} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

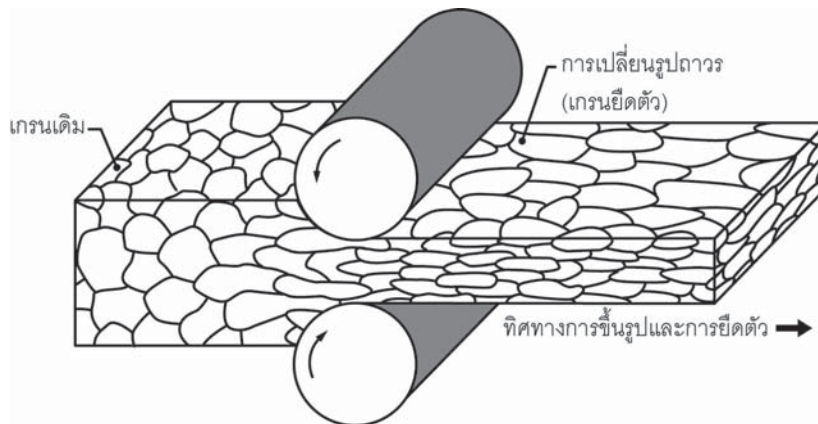
เมื่อ A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนการเปลี่ยนรูป
 A_d คือ พื้นที่หน้าตัดหลังการเปลี่ยนรูป

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่และอุณหภูมิลอมเหลวของโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม

โลหะ	อุณหภูมิเกิดผลึกใหม่		อุณหภูมิลอมเหลว	
	°C	°F	°C	°F
ตะกั่ว	-4	25	327	620
ดีบุก	-4	25	232	450
สังกะสี	10	50	420	788
อะลูมิเนียม (99.999 wt%)	80	176	660	1,220
ทองแดง (99.999 wt%)	120	250	1,085	1,985
ทองเหลือง (50Cu-40Zn)	475	887	900	1,552
นิกเกิล (99.99 wt%)	370	700	1,455	2,651
เหล็ก	450	840	1,538	2,800
ทังสเตน	1,200	2,200	3,410	6,170

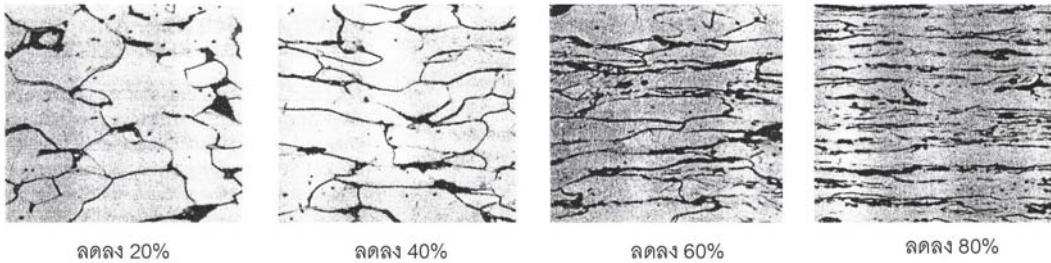
(ที่มา: Callister W.D.Jr., 2003)

การเพิ่มเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น จะทำให้เกรนของโลหะเกิดการบิดเบี้ยวและยืดออกไปตามทิศทางของการขึ้นรูปและยิ่งเพิ่มเปอร์เซ็นต์มากขึ้นเรื่อยๆ เกรนของโลหะจะยิ่งยืดออกและแบนลงเรื่อยๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 จากผลของการยืดตัวของเกรนจะทำให้ความเข้มของดิสโลเคชันเพิ่มขึ้นและตำแหน่งของดิสโลเคชันมีความใกล้เคียงกันและเกี่ยวพันกันมากขึ้น ส่งผลให้โลหะมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรมากขึ้น



รูปที่ 2.15 การขึ้นรูปเย็นทำให้เกรนของโลหะยืดตัวออกและแบนลง

(ที่มา: ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2556)



รูปที่ 2.16 การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปเย็น ทำให้เกรนของโลหะยืดออกตามทิศทางของการขึ้นรูป (ที่มา: Moniz B.J., 1994)

2.2 สมบัติทางกลและการทดสอบ (Mechanical Properties and Testing)

สมบัติทางกล (Mechanical properties) หมายถึง พฤติกรรมที่วัสดุแสดงออกมาเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง หรือความเหนียว เป็นต้น การเลือกใช้วัสดุในงานวิศวกรรมนั้น สมบัติอย่างแรกที่เรามักพิจารณา คือ สมบัติทางกล โดยวัสดุที่จะนำมาใช้งานนั้นจำเป็นต้องมีความแข็งแรง ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น หรือมีความเหนียวเพียงพอ ลักษณะเหล่านี้ล้วนเป็นสมบัติทางกลทั้งสิ้น ค่าของสมบัติทางกลของวัสดุจะถูกบันทึกเป็นข้อมูลไว้ในคู่มือหรือเอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่เราสามารถจะหามาพิจารณาเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับงานของเราได้ หรือในทางวิศวกรรมข้อมูลของสมบัติทางกลนั้น จะได้จากการทดสอบด้วยเครื่องมือและวิธีการ ตลอดจนขั้นตอนทดสอบที่เป็นมาตรฐานที่สามารถให้ความเชื่อถือได้

2.2.1 ความเค้นกับความเครียด (Stress and strain)

ความเค้น (Stress) หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่พยายามต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำเพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนรูปไปจากเดิม แรงที่มากระทำจะถูกกระจายไปอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ หากแบ่งตามลักษณะของแรงที่กระทำกับวัสดุแล้ว จะทำให้เกิดความเค้นขึ้น 3 แบบ คือ ความเค้นดึง (Tensile stress) ความเค้นอัด (Compressive stress) และ ความเค้นเฉือน (Shear stress) ดังแสดงในรูปที่ 2.17

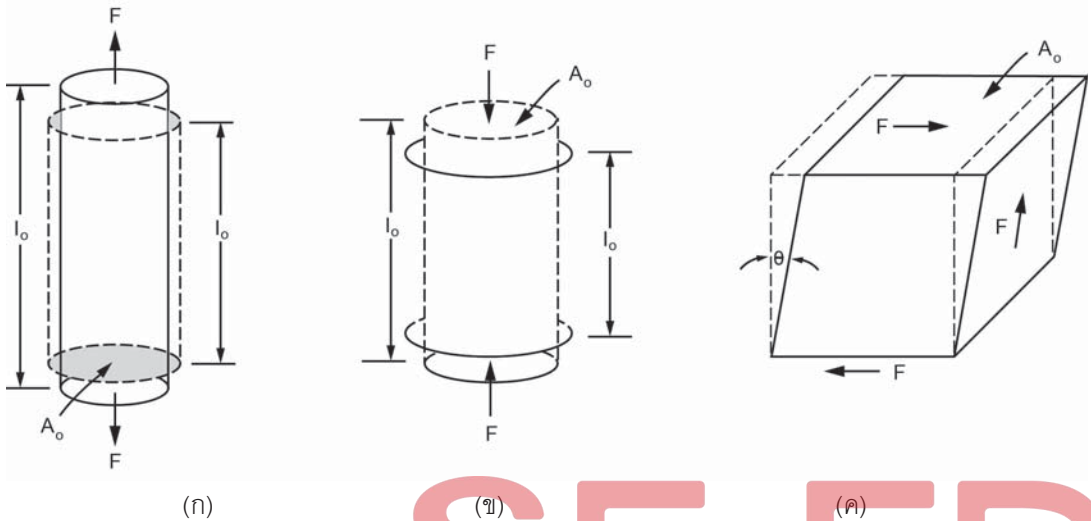
ความเค้นดึงและความเค้นอัดจะรับแรงที่มากระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ส่วนความเค้นเฉือนแรงที่กระทำจะขนานกับพื้นที่หน้าตัด ในทางวิศวกรรมเราสามารถหาความเค้นที่เกิดขึ้นได้โดยคิดเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด ดังสมการที่ (2.2) กรณีความเค้นดึงและความเค้นอัดนั้นแรงที่ใช้ในการคำนวณจะตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ส่วนความเค้นเฉือนจะใช้แรงที่ขนานกับพื้นที่หน้าตัด

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.2)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้นทางวิศวกรรม (ปอนด์/นิ้ว², นิวตัน/ม.², กก./มม.²)

F คือ แรงที่กระทำกับพื้นที่หน้าตัด (ปอนด์, นิวตัน, กก.)

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดขวางที่ถูกแรงกระทำ (นิ้ว², ม.², มม.²)



รูปที่ 2.17 (ก) วัสดุรับแรงดึงจะเกิดความเค้นดึงขึ้นและยืดตัวออกเป็นเส้นตรง (ข) วัสดุรับแรงอัดจะเกิดความเค้นอัดและหดตัวเป็นเส้นตรง (ค) วัสดุรับแรงเฉือนจะเกิดความเค้นเฉือนและเปลี่ยนรูปเป็นมุมบิด

(ที่มา: Callister W. D. Jr., 2003)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ โดยแบ่งเป็น *ความเครียดยืดหยุ่น (Elastic strain)* และ *ความเครียดถาวร (Plastic strain)* ความเครียดยืดหยุ่นเป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อลดแรงกระทำแล้ว วัสดุจะกลับสู่รูปเดิมเหมือนก่อนหน้าที่จะรับแรง ส่วนความเครียดแบบถาวรเป็นลักษณะที่เมื่อปล่อยแรงแล้ววัสดุจะไม่กลับสู่ขนาดเดิม การหาความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain) หากจากอัตราส่วนของขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปต่อขนาดเดิม โดยหาได้จาก

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (2.3)$$

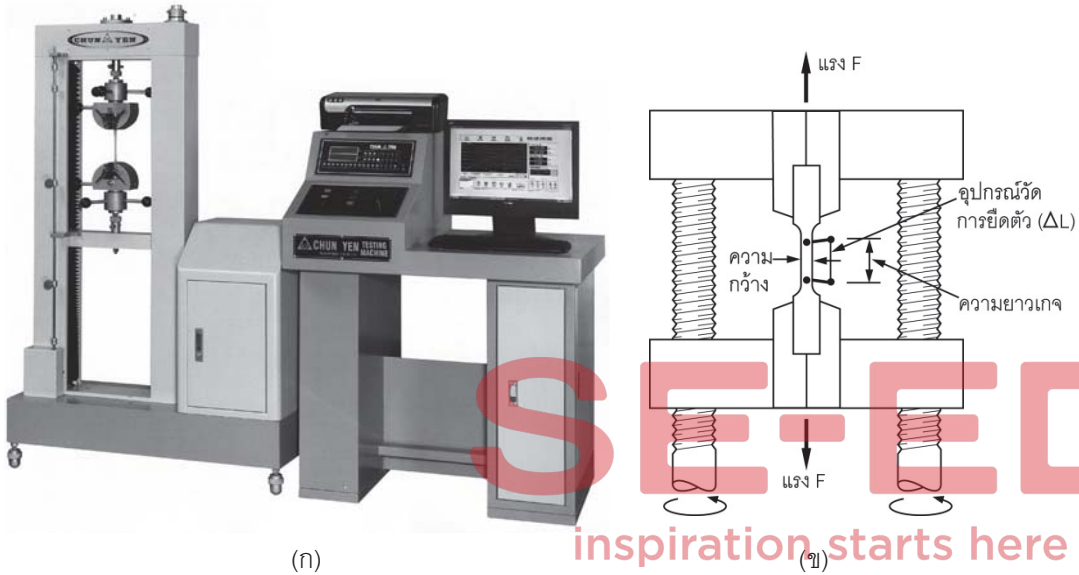
เมื่อ ϵ คือ ความเครียดทางวิศวกรรม

l คือ ความยาวเมื่อได้รับแรงกระทำ

l_0 คือ ความยาวเกจ (Gage length)

2.2.2 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

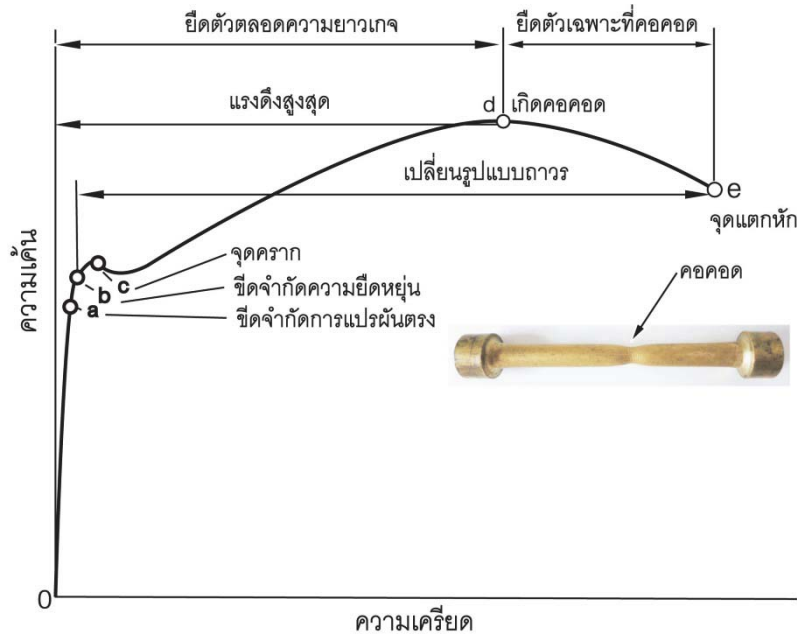
การทดสอบแรงดึง เป็นการวัดความต้านทานของวัสดุโดยการให้แรงดึงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ (Static load) จนกระทั่งวัสดุขาดจากกัน ชิ้นงานทดสอบมีได้หลายลักษณะ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องทดสอบ หัวจับขึ้นทดสอบและขนาดของแรงที่ใช้ดึง แต่โดยทั่วไปแล้วชิ้นทดสอบมักจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงกลม สำหรับเครื่องทดสอบจะมีหลายแบบและหลายขนาดแต่จะมีส่วนประกอบหลักๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 (ก) ลักษณะเครื่องทดสอบแรงดึง (ที่มา: CBN Materialtest Co., Ltd.) (ข) อุปกรณ์และการติดตั้งชิ้นทดสอบบนเครื่องทดสอบแรงดึง (ที่มา: Askeland D.R and Phulé P.P., 2003)

เมื่อติดตั้งชิ้นทดสอบบนเครื่องทดสอบแล้ว จะมีการให้แรงดึง (F) ซึ่งเรียกว่า *ภาระ* (Load) หรือแรงกระทำและมีเครื่องมือวัดการยืดตัว (Strain gage หรือ Extensometer) ติดอยู่บนชิ้นทดสอบเพื่อวัดความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงความยาวเกจขณะให้แรงดึง จากนั้นทำการบันทึกค่าของแรงที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอและความยาวของชิ้นทดสอบที่ยืดออกในช่วงของแรงต่างๆ จนกระทั่งชิ้นงานขาด

กราฟความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering stress-strain curve) ค่าของแรงและความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจะถูกนำมาเปลี่ยนเป็นค่าของความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering stress) และความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering strain) โดยหาได้จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) จากนั้นนำค่าความเค้นและความเครียดไปสร้างกราฟ โดยแกนนอนเป็นความเครียดและแกนตั้งเป็นความเค้น จะได้กราฟขึ้นมาหนึ่งเส้น เรียกว่า *กราฟความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering stress-strain curve)* ดังแสดงในรูปที่ 2.19 กราฟความเค้นและความเครียดจะมีจุดต่างๆ ที่สำคัญ ประกอบไปด้วย



รูปที่ 2.19 จุดที่สำคัญของกราฟความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม
(ที่มา: ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2556)

ขีดจำกัดการแปรผันตรง (Proportional limit) เป็นจุดปลายของส่วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียด ซึ่งถ้าพ้นจุดนี้ไปแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะไม่แปรผันตรงอีกต่อไป

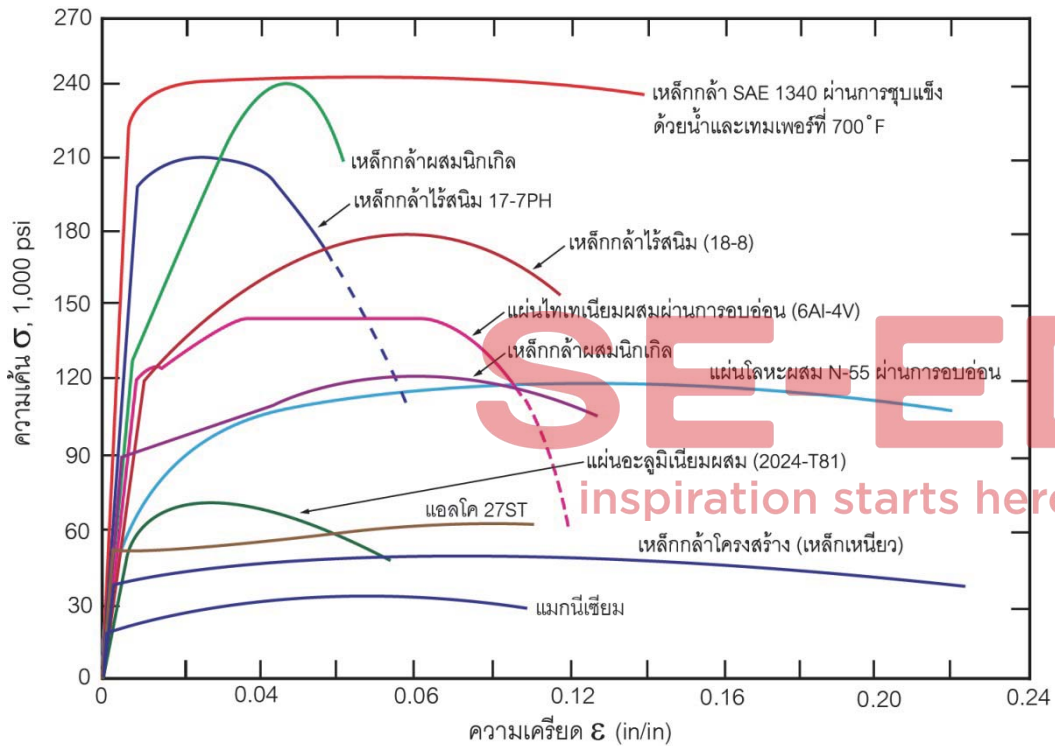
ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) เป็นจุดที่ความเค้นสูงสุดซึ่งต่ำกว่าความเค้น ณ จุดครากที่ทำให้วัสดุยังไม่เปลี่ยนรูปร่างถาวร ณ จุดนี้หากปล่อยแรงออกวัสดุจะกลับสู่สภาพเดิม

จุดคราก (Yield point) เป็นตำแหน่งที่ขึ้นทดสอบเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร ในกรณีเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและคาร์บอนปานกลาง ที่จุดครากขึ้นทดสอบจะเกิดการยืดตัวออกหรือเกิดความเครียดเพิ่มขึ้น โดยที่ความเค้นลดลง ตำแหน่งสูงสุดของจุดคราก เรียกว่า **จุดครากบน** (Upper yield) ส่วนตำแหน่งต่ำสุด เรียกว่า **จุดครากล่าง** (Lower yield) เป็นช่วงที่ความเครียดเพิ่มขึ้น โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น

จุดแตกหัก (Fracture point) เป็นจุดที่วัสดุเกิดการฉีกขาดหรือแตกหักจากกัน

ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) หรือความเค้นดึงสูงสุดที่วัสดุสามารถทนทานได้ นิยมเรียกสั้นๆ ว่า **ความต้านทานแรงดึง** (Tensile strength)

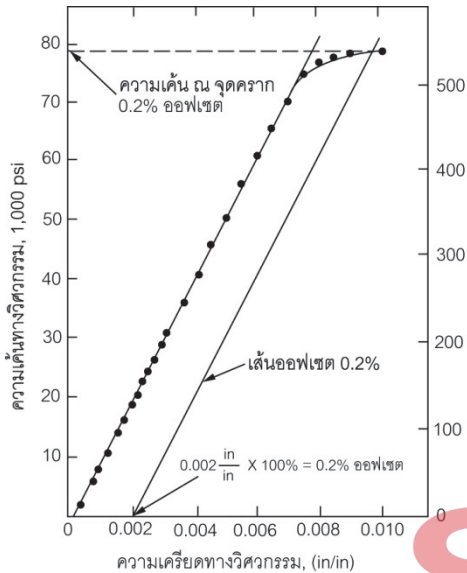
วัสดุแต่ละชนิดจะให้ลักษณะของกราฟความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมที่ไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายๆ อย่าง เช่น ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุนั้นๆ หรือกระบวนการอบชุบ เป็นต้น การเปรียบเทียบกราฟความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมของโลหะผสมชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.20 โดยจะเห็นได้ว่า ธาตุผสมและกระบวนการอบชุบ จะมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงและความเหนียวของโลหะผสมต่างๆ ดังเช่น เหล็กกล้า SAE 1340 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำและอบคืนตัวที่ 370°C (700°F) จะมีความแข็งแรงที่สูงมาก



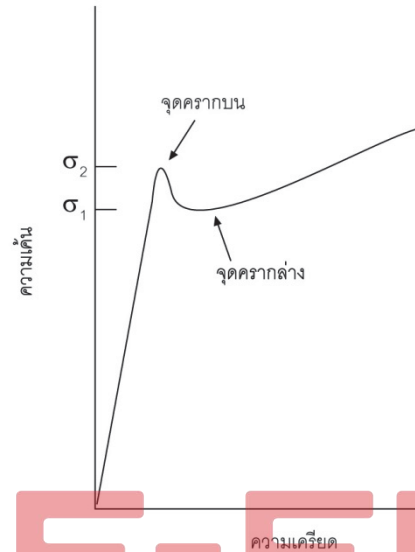
รูปที่ 2.20 กราฟความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมของโลหะผสมชนิดต่างๆ (ที่มา: Smith W.F., 2006)

ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength; YS หรือ σ_y) หมายถึง จุดที่วัสดุมีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร โดยหากให้แรงกระทำกับวัสดุเกินจุดครากนี้ไปวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างไปและไม่กลับสู่สภาพเดิม 100% หรือหากมองลึกกลงไปในระดับโครงสร้างของผลึก จุดครากคือ จุดที่โครงสร้างผลึกเกิดการเลื่อน (Slip) ของระนาบผลึก ดังนั้น จุดครากคือ ค่าความแข็งแรงที่เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างการเปลี่ยนรูปร่างยืดหยุ่น (Elastic deformation) และการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Plastic deformation)

วัสดุบางชนิดเราไม่สามารถสังเกตจุดครากที่แน่นอนได้ ดังนั้น จึงต้องมีการประมาณค่าโดยการออฟเซตที่ 0.2% (0.2% Offset) ของความเครียด นั่นคือ ค่า 0.002 นิ้ว/นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ก)



(ก)



(ข)

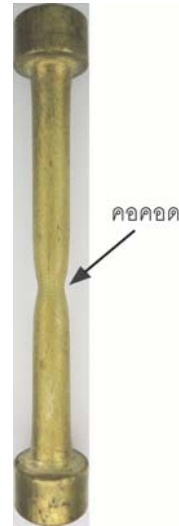
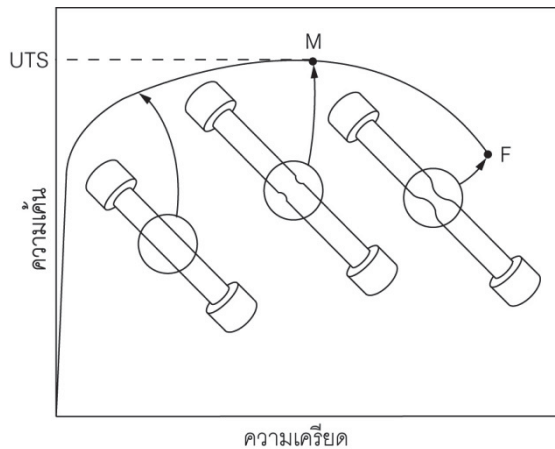
รูปที่ 2.21 (ก) การหาความเค้น ณ จุดครากโดยวิธี 0.2% ออฟเซต (0.2% Offset) (ที่มา: Smith W.F., 1993)

(ข) จุดครากบนและจุดครากล่างของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (ที่มา: Askeland D.R and Phulé P.P., 2003)

จากนั้นลากเส้นขึ้นมาโดยให้ขนานกับกราฟความเค้นกับความเครียดไปตัดกันด้านบน จุดตัดนั้นคือจุดคราก 0.2% ออฟเซต ในทางวิศวกรรมจะใช้ความเค้นที่จุดครากนี้ในการออกแบบโครงสร้างต่างๆ ความเค้น 0.2% ออฟเซตนี้ บางครั้งเรียกว่า *ความเค้นพิสูจน์* (Proof stress)

วัสดุบางชนิดสามารถมองเห็นจุดครากได้ชัดเจนอย่างเช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ข) จุดครากที่มองเห็นจะมีถึง 2 จุด ส่วนที่อยู่บนสุดเรียกว่า *จุดครากบน* (Upper yield point) ส่วนล่างลงมาเรียกว่า *จุดครากล่าง* (Lower yield point)

ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength; TS หรือ UTS หรือ σ_u) คือ ค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุรับได้ หากดูจากกราฟความเค้นกับความเครียดในจุดที่มีความเค้นสูงสุด คือ จุด M ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ณ จุดนี้ขึ้นทดสอบจะเริ่มเกิดคอคอด (Necking) ขึ้นที่บริเวณความยาวเกจ และเมื่อผ่านจุดนี้ไป วัสดุจะมีพื้นที่หน้าตัดลดลงเรื่อยๆ จนเกิดการแตกหัก บางครั้งเรียกความเค้นแรงดึงนี้ว่า **ความต้านทานแรงดึงสูงสุด** (Ultimate tensile strength; UTS)



รูปที่ 2.22 การเกิดคอคอดของชิ้นทดสอบ ณ จุดความเค้นแรงดึงสูงสุด
(ที่มา: ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2556)

มอดุลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity; E) สมบัติในสภาวะยืดหยุ่น การเปลี่ยนรูปของวัสดุในสภาวะนี้เป็นการเปลี่ยนรูปที่ไม่ถาวร โดยมีค่าที่สำคัญอยู่ค่าหนึ่งเรียกว่า **มอดุลัสของความยืดหยุ่น** หรือ **มอดุลัสของยัง** (Young's modulus) ใช้ E เป็นสัญลักษณ์ ค่าของ E นั้นเป็นค่าความชันของกราฟความเค้นกับความเครียดในช่วงสภาวะยืดหยุ่นหรือในช่วงขีดจำกัดการแปรผันตรง (Proportional limit) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's law) นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงขนาดและความเค้นของวัสดุ ในช่วงที่มีสภาวะยืดหยุ่น จะเป็นอัตราส่วนหรือสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ดังสมการต่อไปนี้

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.4)$$

เปอร์เซ็นต์การยืดตัวและการลดลงของพื้นที่หน้าตัดหรือ %EL และ %RA การวัดความเหนียว (Ductility) ของวัสดุเป็นการวัดขนาดของการเปลี่ยนรูปว่าวัสดุมีการเปลี่ยนรูปไปได้มากน้อยเพียงใดเมื่อมีแรงกระทำ วัสดุที่เปลี่ยนรูปไปได้มากโดยปราศจากการแตกหักแสดงว่าวัสดุมีความเหนียวมาก ค่าความเหนียวค่าหนึ่งของวัสดุที่นิยมใช้ คือ **เปอร์เซ็นต์การยืดตัว** (% Elongation; %EL หรือ %e) หาได้จากสมการ ดังนี้

$$\% EL = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100 \quad (2.5)$$

เมื่อ l_f คือ ความยาวของชิ้นทดสอบหลังจากขาด

l_o คือ ความยาวเกจ

% EL คือ เปอร์เซ็นต์การยืดตัว

การวัดค่าความเหนียวอีกค่าหนึ่งที่น่าสนใจ คือ เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด (% Reduction of area; %RA) โดยหาได้จากสมการ (2.6) ดังนี้

$$\% RA = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100 \quad (2.6)$$

เมื่อ RA คือ เปอร์เซ็นต์การลดลงของพื้นที่หน้าตัด

A_o คือ พื้นที่หน้าตัดก่อนทดสอบ

A_f คือ พื้นที่หน้าตัดหลังการแตกหัก

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกลของโลหะต่างๆ ที่ทดสอบโดยแรงดึงที่อุณหภูมิห้อง

ชนิดของโลหะ	ความแข็งแรง ณ จุดคราก		ความต้านทานแรงดึงสูงสุด		ความเหนียว, %EL
	เมกะปาสกาล	กิโลปอนด์/นิ้ว ²	เมกะปาสกาล	กิโลปอนด์/นิ้ว ²	
โมลิบดีนัม	565	82	655	95	35
ไทเทเนียม	450	65	520	75	25
เหล็กกล้า (1020)	180	26	380	55	25
นิกเกิล	138	20	480	70	40
เหล็กบริสุทธิ์	130	19	262	38	45
ทองเหลือง (70%Cu-30%Zn)	75	11	300	44	68
ทองแดง	69	10	200	29	45
อะลูมิเนียม	35	5	90	13	40

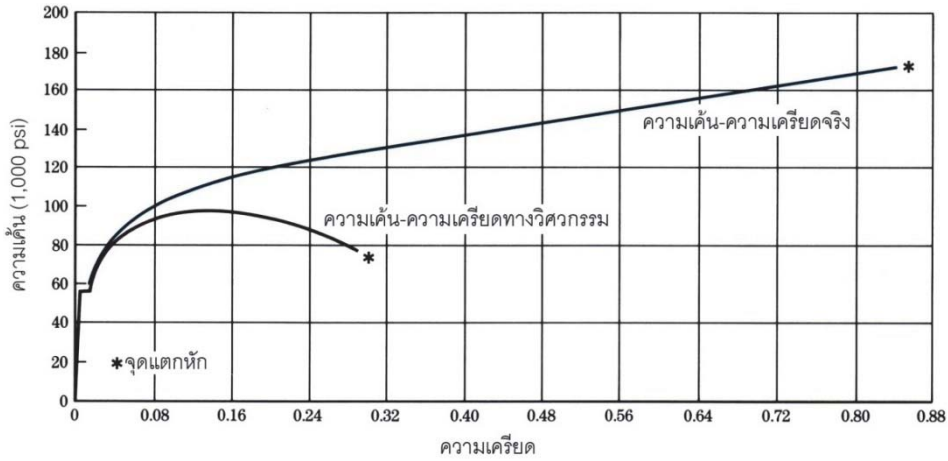
(ที่มา: Callister W.D.Jr., 2003)

ความเค้นและความเครียดจริง (True stress and true strain) ในการคำนวณค่าความเค้นของวัสดุ โดยใช้พื้นที่หน้าตัดเดิมตั้งแต่เริ่มให้แรงกระทำจนวัสดุเกิดการแตกหักนั้น เป็นค่าที่ไม่ถูกต้องนัก เพราะค่าของความเค้นภายหลังรับแรงดึงสูงสุดแล้ว ความเค้นจะลดลง ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว หากต้องการค่าที่แท้จริงเราจะต้องใช้พื้นที่หน้าตัดจริง ณ จุดรับแรงต่างๆ มาคำนวณหาค่าความเค้น ซึ่งเรียกว่า *ความเค้นจริง (True stress)* ในทำนองเดียวกัน *ความเครียดจริง (True strain)* ก็จะต้องหาจากความยาวจริงเช่นกัน โดยความเค้นและความเครียดจริงจะหาได้จากสมการข้างล่าง และรูปที่ 2.23 แสดงการเปรียบเทียบเส้นกราฟความเค้นและความเครียดจริงกับความเค้นและความเครียดปกติ

$$\text{ความเค้นจริง} = \sigma_t = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

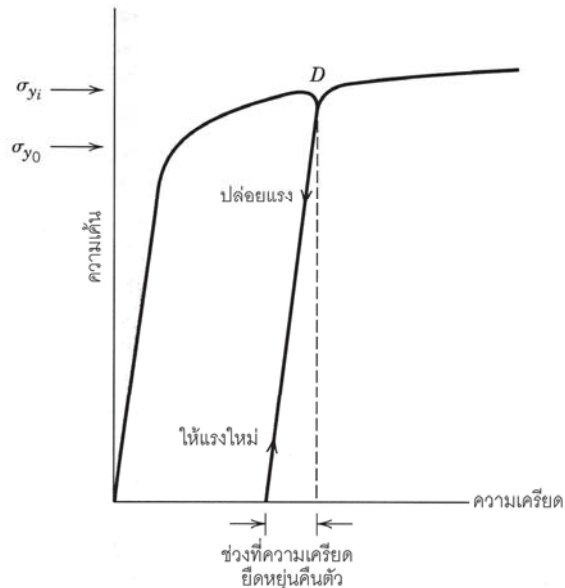
$$\text{ความเครียดจริง} = \int \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_o}\right) = \ln\left(\frac{A_o}{A}\right) \quad (2.8)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดจริง ณ จุดที่รับแรง F



รูปที่ 2.23 กราฟเปรียบเทียบความเค้นและความเครียดจริงกับความเค้นและความเครียดปกติของเหล็กกล้าคาร์บอน (ที่มา: Smith W.F., 2006)

การเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากความเครียด (Strain hardening) แสดงในรูปที่ 2.24 ซึ่งเป็นกราฟความเค้น-ความเครียด เมื่อโลหะได้รับแรงครั้งแรกและมีความแข็งแรง ณ จุดคราก คือ σ_{y0} โลหะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรจนถึงจุด D และเมื่อลดความเค้นลงจนหมดไปแล้วให้แรงกระทำขึ้นใหม่ จะทำให้เกิดจุดครากขึ้นใหม่ที่มีค่ามากกว่าเดิม นั่นคือ σ_{yi} ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้โลหะมีความแข็งแรงมากขึ้นภายหลังการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรเพราะค่าความเค้น ณ จุดครากเปลี่ยนจาก σ_{y0} ไปเป็น σ_{yi}



รูปที่ 2.24 กราฟความเค้น-ความเครียด แสดงให้เห็นการเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากความเครียด โดยการเปลี่ยนความเค้นที่จุดครากจาก σ_{y0} ไปเป็น σ_{yi} ที่จุด D (ที่มา: Callister W.D.Jr., 2003)

2.2.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

การทดสอบความแข็งเป็นการวัดความต้านทานของวัสดุต่อการกดให้เป็นรอยบุ๋ม (Indentation) การขีดหรือขีดให้เป็นรอย (Scratching) วัสดุใดที่สามารถทำให้เกิดรอยบุ๋มได้โตหรือลึก แสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งต่ำ แต่ถ้ารอยกดเล็กหรือตื้นแสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งสูง การหาค่าความแข็งของวัสดุแต่ละวิธีนั้นมักเรียกชื่อตามผู้ที่พัฒนาการวัดขึ้นมา หรือเรียกตามชื่อเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้วัด ดังนี้

การวัดความแข็งแบบบริเนลล์ (Brinell hardness test ; HB หรือ BHN) พัฒนาขึ้นโดย เจ.เอ. บริเนลล์ (J. A. Brinell) ในปี 1900 เป็นการวัดโดยใช้น้ำหนักมาตรฐานกดผ่านหัวกด (Indenter) ทำด้วยลูกบอลเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งหรือลูกบอลทังสเตนคาร์ไบด์ กดลงบนชิ้นงานเป็นเวลา 10-30 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 2.3 จากนั้นปลดน้ำหนักมาตรฐานออก หัวกดจะทำให้เกิดรอยกดที่ผิวชิ้นงาน จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปวัดขนาดความโตของรอยกดด้วยกล้องขยาย แล้วนำค่าที่วัดได้ไปหาค่าความแข็ง เรียกว่า BHN (Brinell hardness number) ได้จากสูตรในตารางที่ 2.3

การวัดความแข็งวิธีนี้นิยมใช้กับโลหะที่มีความอ่อน เช่น อะลูมิเนียม ตะกั่ว หรือดีบุก ไปจนถึงโลหะที่มีความแข็งอย่างเหล็กกล้าคาร์บอน หรือโลหะที่มีโครงสร้างหลายเฟสอย่างเหล็กหล่อสีเทา เป็นต้น การบอกค่าความแข็งนิยมระบุตัวอักษรที่บ่งบอกถึงวิธีการทดสอบ เช่น 550 BHN หรือ 450 HB เป็นต้น

การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์ (Rockwell hardness test; HR) พัฒนาขึ้นโดย เอส.พี. ร็อกเวลล์ (S.P. Rockwell) ในปี 1922 การทดสอบความแข็งแบบร็อกเวลล์เป็นที่นิยมใช้กันมากในงานอุตสาหกรรม เพราะทดสอบได้ง่าย รวดเร็วและสามารถทราบค่าความแข็งได้โดยตรงจากเครื่อง โดยการอ่านค่าที่หน้าปัดที่ติดมากับเครื่อง หัวกด (Indenter) และน้ำหนักกด (Load) จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มทดสอบแบบธรรมดา และแบบพิเศษ

ทั้ง 2 กลุ่มจะแบ่งการวัดโลหะออกแตกต่างกันตามสเกล (Scale) A-V โดยหัวเพชรจะใช้วัดโลหะแข็ง และหัวบอลเหล็กกล้าจะใช้วัดโลหะอ่อน ส่วนการทดสอบแบบพิเศษจะใช้กับโลหะที่มีความบาง การทดสอบความแข็งด้วยร็อกเวลล์ที่นิยมใช้จะมี 2 แบบด้วยกัน คือ HRC และ HRB สำหรับ HRC จะเป็นการทดสอบโลหะที่ผ่านการชุบแข็งมาหัวทดสอบเป็นหัวเพชร และ HRB จะใช้กับโลหะที่อ่อนกว่าซึ่งหัวทดสอบจะเป็นหัวบอลเหล็กกล้า การเขียนหรือระบุความแข็งจะให้อักษรบอกวิธีการทดสอบมาด้วย เช่น 60 HRC หรือ 45 HRB เป็นต้น

การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness test; HV) การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์สกระทำโดยใช้แรงกดอยู่ระหว่าง 1-200 กก. กดผ่านหัวกดที่ทำด้วยเพชรรูปพีระมิด มีฐานรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มุมรวมที่ปลายแหลมเท่ากับ 136 องศา ดังแสดงในตารางที่ 2.3 แรงที่กดบนผิวชิ้นทดสอบจะใช้เวลา

10-30 วินาที จากนั้นปลดแรงกดออก แล้วนำชิ้นงานไปวัดขนาดของรอยกดด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อนำค่าที่ได้ไปหาค่าความแข็งจากสูตร

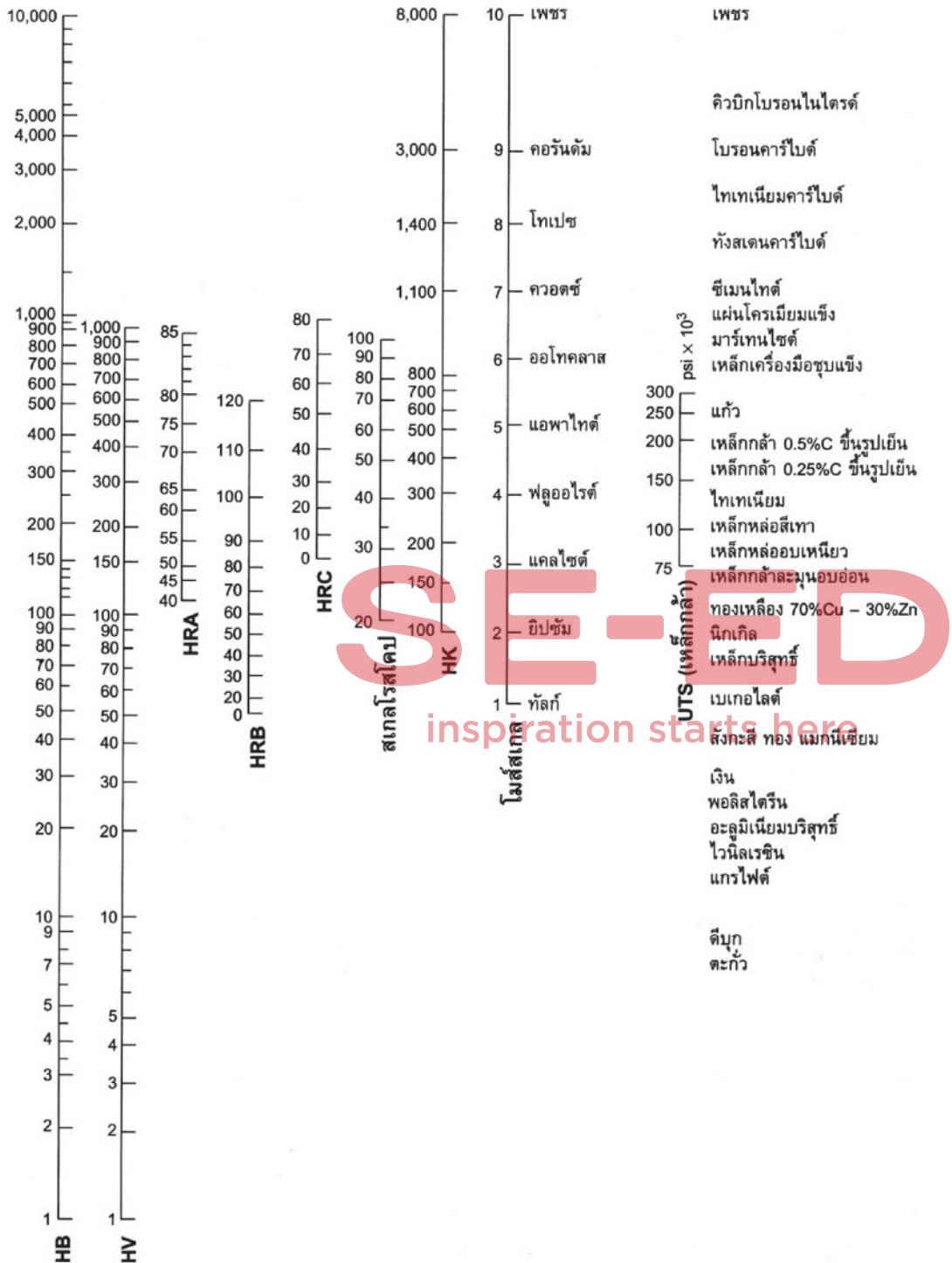
ตารางที่ 2.3 การทดสอบความแข็งแบบต่างๆ

ชนิดการทดสอบ		รูปร่างหัวกด		น้ำหนักกด, P	ค่าความแข็ง
หัวกด	ด้านข้าง	ด้านบน			
บริเนลล์	10 มม. เหล็กกล้า หรือลูกบอลทั้งสแตนคาร์ไบด์			500 กก. 1500 กก. 3000 กก.	$HB = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
วิกเกอร์ส	เพชรรูปพีระมิด			1-120 กก.	$HV = \frac{1.854P}{L^2}$
นูพ	เพชรรูปข้าวหลามตัด			25น.-5น.	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$
ร็อกเวลล์					
A } C } D }	เพชรรูปกรวย			60 กก. 150 กก. 100 กก.	HRA HRC HRD } = 100 - 500r
B } F } G }	บอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15875 ซม. บอลเหล็กกล้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3175 ซม.			100 กก. 60 กก. 150 กก.	HRB HRF HRG } = 130 - 500r
E				100 กก.	HRE

(ที่มา: Kalpakjian S. and Schmid S.R., 2008)

การทดสอบความแข็งแบบนูพ (Knoop hardness test; HK หรือ KHN) พัฒนาขึ้นโดย เอฟ. นูพ (F. Knoop) ในปี 1939 การทดสอบความแข็งแบบนูพเหมาะกับการทดสอบความแข็งชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและเป็นแผ่นบางๆ หรือชิ้นงานชุบผิวแข็ง เช่นเดียวกับแบบไมโครวิกเกอร์ส วิธีการทดสอบแตกต่างกับแบบไมโครวิกเกอร์ส คือ หัวกดเป็นเพชรรูปข้าวหลามตัด มุมที่ปลายตามแนวขวาง 130 องศา และมุมตามแนวยาว 170 องศา 30 ลิปดา ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ค่าความแข็งของการทดสอบแบบนูพหาจากการคำนวณจากสูตรที่ให้ไว้ในตาราง

การวัดความแข็งแบบชอร์สเกลโรสโคป (Shore scleroscope hardness test) เป็นการทดสอบความแข็งโดยการใช้ค้อนหัวเพชรซึ่งมีน้ำหนัก 1/12 ออนซ์ ปลอยจากที่สูงห่างจากชิ้นงานทดสอบ 10 นิ้ว ให้ตกลงมากระทบกับผิวชิ้นงาน ให้สังเกตดูการกระดอนกลับของค้อนหัวเพชรว่าสูงหรือต่ำจากสเกลที่หน้าปัดโลหะที่แข็ง ค้อนหัวเพชรจะกระดอนกลับได้สูงกว่าโลหะอ่อน



รูปที่ 2.25 กราฟเปรียบเทียบและเปลี่ยนค่าความแข็งจากการวัดแต่ละแบบ (ที่มา: Kapakjian S. and Schmid S.R., 2006)

การวัดความแข็งแบบสเกลของโมส์ (Mohs's scale) เป็นการทดสอบความแข็งอย่างง่าย ๆ ซึ่ง เอฟ. โมส์ (F. Mohs) เป็นผู้คิดขึ้นในปี 1822 โดยอาศัยการแบ่งความแข็งออกเป็น 10 ชั้นตามชนิดของหินแร่ ดังแสดงในรูปที่ 2.25

โดยที่หินแร่ชนิดใดมีความแข็งต่ำสุด กำหนดชั้นความแข็ง 1 และหินแร่ชนิดใดมีความแข็งสูงสุด กำหนดเป็นชั้นความแข็ง 10 ตามลำดับ ในการทดสอบความแข็งโดยวิธีนี้กระทำได้โดยนำเอาหินแร่มาตรฐาน ทั้งสิบไปขีดโลหะที่ต้องการทราบความแข็ง สังเกตดูว่าหินแร่ตามมาตรฐานความแข็งชั้นใดขีดโลหะเป็นรอย แสดงว่าโลหะนั้นมีความแข็งอยู่ในชั้นนั้น เช่น นำเอาหินแร่ความแข็งชั้น 7 ไปขีดโลหะอีกชนิดหนึ่ง ทำให้โลหะนั้นเป็นรอยแสดงว่าโลหะนั้นมีความแข็งเท่ากับชั้นที่ 7 เทียบเท่าหินแร่ควอตซ์ การทดสอบความแข็งแบบสเกลของโมส์ นิยมใช้ทดสอบหินแร่มากกว่าในทางโลหวิทยา เพราะช่วงของความแข็งกว้างมาก และเป็นค่าที่ยากจะไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในทางวิศวกรรม

การเปรียบเทียบค่าความแข็งแบบต่างๆ บางครั้งเราต้องการเปรียบเทียบค่าความแข็งของโลหะต่างชนิดกัน ซึ่งไม่สามารถวัดจากวิธีการวัดด้วยวิธีการเดียวกันได้ทั้งหมด เราสามารถเปรียบเทียบหรือเปลี่ยนค่าความแข็งจากการวัดแต่ละแบบที่มีสเกลแตกต่างกันได้ โดยอาศัยกราฟในรูปที่ 2.25 ค่าที่ได้จากกราฟ เปรียบเทียบความแข็งของวัสดุต่างๆ เหล่านี้เป็นค่าโดยประมาณ หากต้องการค่าที่ถูกต้องจริงๆ จะต้องวัดจากเครื่องและวิธีการวัดความแข็งแต่ละแบบโดยตรง

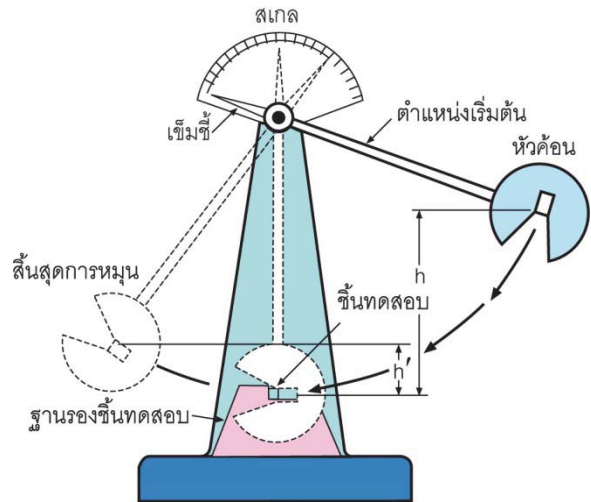
2.2.4 การทดสอบแรงกระแทก (Impact test) inspiration starts here

การทดสอบแรงกระแทกของวัสดุ เป็นการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการรับแรงที่มากกระทำกับ วัสดุด้วยความรวดเร็ว (Dynamic load) ความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุ หมายถึง การที่วัสดุ สามารถดูดกลืนหรือเก็บพลังงานกระแทกไว้ได้มากน้อยเพียงใด ถ้าวัสดุสามารถเก็บสะสมพลังงานต่อหน่วย ปริมาตรตั้งแต่เริ่มต้นได้รับแรงกระแทกจนกระทั่งแตกหักไว้ได้สูง หมายความว่าวัสดุนั้นมีทัพเนสส์ (Toughness) สูงหรือมีความทนทานต่อการแตกหักสูง

หลักการทดสอบแรงกระแทกจะใช้ค้อนเหวี่ยง (Hammer) กระแทกขึ้นทดสอบ ซึ่งทำเป็นขนาดมาตรฐาน ไว้ ลักษณะการเหวี่ยงจะคล้ายลูกตุ้มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณพลังงานที่ใช้ กระแทกขึ้นทดสอบได้จากผลต่างของระดับสูงต่ำของค้อนเหวี่ยง เมื่อเริ่มแกว่งและหลังจากที่แกว่งไปกระแทกขึ้น ทดสอบให้หัก อย่างไรก็ตาม เราสามารถอ่านค่าของพลังงานได้จากหน้าปัดของเครื่องทดสอบได้โดยตรง โดยไม่ต้องคำนวณค่าที่อ่านได้จะเป็นพลังงานที่วัสดุดูดกลืนไว้ได้จนเกิดการแตกหักก็มีหน่วยเป็นจูล (Joule)



(ก)

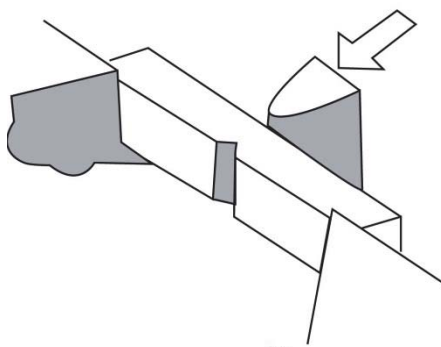


(ข)

รูปที่ 2.26 (ก) เครื่องทดสอบแรงกระแทก (ที่มา: Black J.T. and Kohser R.A., 2013)

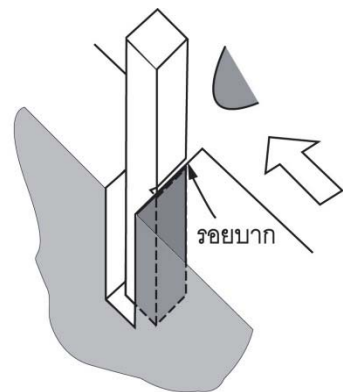
(ข) หลักการทำงานและส่วนประกอบของเครื่องทดสอบแรงกระแทก (ที่มา: Smith W.F., 2006)

การทดสอบแรงกระแทกที่นิยมใช้มี 2 แบบ คือ แบบชาร์ปี (Charpy test) และไอซอด (Izod test) การทดสอบทั้งสองแบบนี้แตกต่างกันตรงลักษณะของการจับชิ้นงาน โดยการทดสอบแบบชาร์ปีจะจับชิ้นงานที่ปลายทั้งสองข้างและให้รอยบากอยู่กึ่งกลาง โดยหันหลังรอยบากให้จุดกระทบของค้อนเหวี่ยง ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ก) ส่วนการทดสอบแบบไอซอด ชิ้นทดสอบจะถูกจับยึดที่ปลายเพียงด้านเดียวและปลายอีกด้านหนึ่งจะตั้งขึ้นและหันรอยบากเข้าจุดกระทบของลูกตุ้ม ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ข)



แบบชาร์ปี

(ก)



แบบไอซอด

(ข)

รูปที่ 2.27 การจับยึดชิ้นทดสอบแรงกระแทก (ก) แบบชาร์ปี (ข) แบบไอซอด

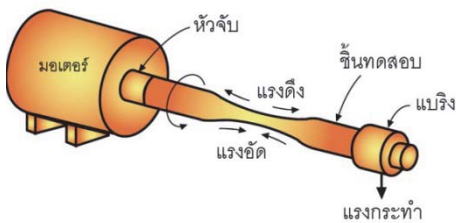
(ที่มา: Callister W.D.Jr., 2003)

2.2.5 การทดสอบความล้า (Fatigue test)

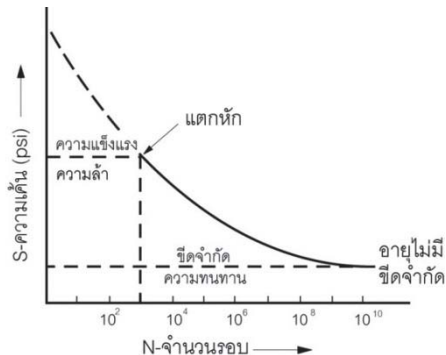
การทดสอบความล้าเป็นการทดสอบโดยการให้แรงกระทำกับวัสดุในลักษณะซ้ำๆ (Cyclic load) เป็นจำนวนมากครั้ง จนกระทั่งวัสดุเกิดความล้าและแตกหักในที่สุด การทดสอบนี้จำเป็นต้องทำสำหรับวัสดุที่จะนำไปทำชิ้นส่วนที่ต้องหมุน เกิดการดัดหรือการสั่นสะเทือน เช่น เพลาส่งกำลัง ชิ้นส่วนเหล่านี้จะได้รับความเค้นที่สลับกันไปมา เช่น อาจจะได้รับความเค้นอัดและความเค้นดึง กลับไปกลับมายุ่งตลอดเวลา และมีโอกาสจะเกิดการแตกหัก เนื่องจากความล้าเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะหากบริเวณผิวหรือเนื้อของวัสดุมีรอยแตกร้าวอยู่ก่อนจะเป็นจุดที่เร่งให้เกิดการแตกหักเร็วขึ้น การแตกหักของวัสดุเนื่องจากความล้า นั้น จะเกิดขึ้นได้ถึงแม้ว่าวัสดุนั้นจะรับแรงต่ำกว่าความเค้น ณ จุดครากหรือความเค้นสูงสุดของวัสดุก็ตาม

ในการทดสอบความล้า นั้น ชิ้นงานทดสอบจะถูกจับยึดด้วยหัวจับติดกับมอเตอร์หมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.28 (ก) และปลายอีกด้านหนึ่งจะประกบกับแบริงและอุปกรณ์รับรอบการหมุน จากนั้นจะมีการให้แรงกระทำกับชิ้นทดสอบที่คงที่ โดยชิ้นทดสอบจะมีลักษณะโค้งขึ้น ทำให้ผิวด้านบนรับแรงดึงและผิวด้านล่างรับแรงกด จากนั้นให้หมุนมอเตอร์ไปจนกว่าชิ้นทดสอบจะแตกหัก และบันทึกจำนวนรอบที่วัสดุแตกหักกับความเค้นที่ให้นำไปสร้างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับจำนวนรอบ (Number of cycles) ดังแสดงในรูปที่ 2.28 (ข) เรียกกราฟนี้ว่า กราฟ S-N (S-N curve)

ลักษณะของกราฟ S-N จะลาดเอียงลงช่วงหนึ่ง แล้วจะเปลี่ยนทิศทางเป็นเส้นตรงขนานกับเส้น N โดยเส้นที่ลาดเอียงนั้นแสดงขอบเขตของความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบ ทำให้เกิดการแตกหัก ความเค้นดังกล่าวเรียกว่า ความแข็งแรงความล้า (Fatigue strength) หรือ ความต้านทานความล้า การแตกหักเกิดขึ้นเมื่อค่าความต้านทานต่ำกว่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ จึงเรียกการแตกหักนี้ว่า การแตกหักจากความล้า (Fatigue failure) ส่วนเส้นกราฟที่เปลี่ยนทิศทางเป็นเส้นตรงขนานกับแกน N บอกให้ทราบถึงวัสดุทนทานต่อความเค้นได้ระดับหนึ่ง โดยไม่เกิดการแตกหักไม่ว่าจะหมุนไปกี่รอบก็ตาม ค่าความต้านทานดังกล่าวเรียกว่า ซีดจำกัดความทนทาน (Endurance limit)



(ก)



(ข)

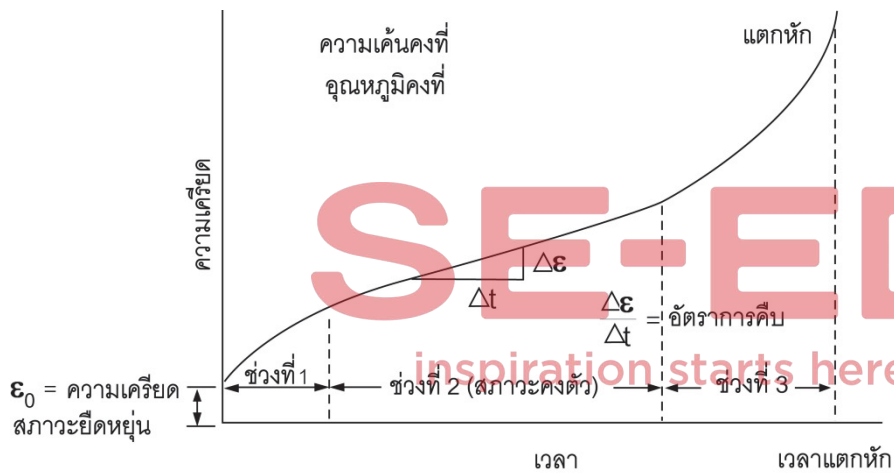
รูปที่ 2.28 (ก) เครื่องทดสอบความล้า (ที่มา: Askeland D.R., 1994)

(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-จำนวนรอบ (S-N curve) (ที่มา: Pollack H., 1988)

2.2.6 การทดสอบการคืบ (Creep test)

วัสดุหลายชนิดที่ถูกนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงและได้รับความเค้นเป็นเวลานาน ในขณะเดียวกันวัสดุ จะเกิดการยืดตัวอย่างช้าๆ และต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าแรงที่กระทำนั้นจะมีค่าต่ำกว่าความเค้น ณ จุดครากของ วัสดุก็ตาม วัสดุจะยังคงยืดตัวต่อไปเรื่อยๆ จนเกิดการแตกหักหรือขาด ปรากฏการณ์ดังกล่าว เราเรียกว่า การ คืบ (Creep)

การทดสอบการคืบเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด กับเวลาที่ให้แรงกระทำกับชิ้น ทดสอบที่อุณหภูมิสูง จากนั้นนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลา ดังแสดงในรูป ที่ 2.29 จะได้กราฟขึ้นมามีหนึ่งเส้น เรียกว่า กราฟการคืบ (Creep curve)



รูปที่ 2.29 กราฟการคืบที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับเวลาโดยอุณหภูมิและความเค้นคงที่ (ที่มา: Askeland D.R and Phulé P.P., 2003)

จากกราฟที่ได้ในรูปที่ 2.29 กราฟการคืบจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงแรก เป็นช่วงที่มีการปรับตัวในเนื้อวัสดุ มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกขึ้นใหม่ จุดใดที่มีดิสโลเคชันก็จะมีการเปลี่ยนตำแหน่ง (Dislocation climb) ไปยังที่ใหม่ การเปลี่ยนรูปในช่วงนี้จะเกิดอัตราการคืบ (Creep rate) ค่อนข้างช้า เพราะจุดบกพร่องภายในเนื้อวัสดุเกิดการจัดเรียงตัวใหม่และยังไม่เป็นระเบียบ จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ลำบาก

ช่วงที่สอง เป็นช่วงที่มีการยืดตัวออกอย่างสม่ำเสมอหรือเรียกว่า *สภาวะคงตัว* (Steady state) ช่วงนี้ จะเกิดความสมดุลระหว่างแรงที่กระทำกับการเปลี่ยนรูปภายในเนื้อวัสดุหรือเป็นช่วงที่ความเครียดกับอัตราการ คืบตัว (Recovery) ของเม็ดเกรนของวัสดุมีความใกล้เคียงกัน ความชันของเส้นกราฟในช่วงนี้สามารถนำไปหา อัตราการคืบ (Creep rate)

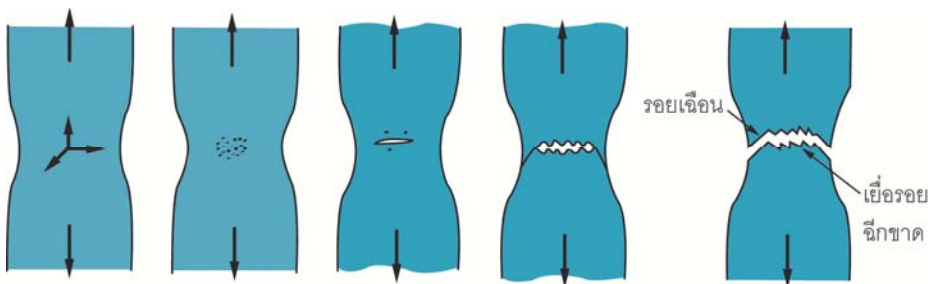
ช่วงที่สาม เป็นช่วงที่อัตราการคืบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนขึ้นทอดสอบเกิดการขาด ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบเล็กลง ทำให้เกิดความเค้นที่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อชิ้นทดสอบเกิดคอคอดขึ้น ซึ่งจะเป็นจุดที่เกิดการฉีกขาดอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปแล้ว ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการคืบของวัสดุนั้นจะขึ้นอยู่กับความเค้นและอุณหภูมิ โดยหากความเค้นและอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการคืบสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

2.2.7 ความเสียหายของวัสดุ (Failure of materials)

ความเสียหายของวัสดุเป็นสิ่งที่อาจเกิดขึ้นได้กับวัสดุทุกชนิดที่ถูกใช้งานอยู่ในชีวิตประจำวัน โครงสร้างอาคารบ้านเรือนหรือโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนรถยนต์หรือเครื่องใช้ภายในบ้าน ที่สร้างขึ้นจากชิ้นส่วนของวัสดุเป็นจำนวนมากหลายล้านชิ้น หากพิจารณาในเชิงสถิติแล้วเราจะเห็นว่าโอกาสที่ชิ้นส่วนใดชิ้นส่วนหนึ่งจะเกิดความเสียหายนั้นมีไม่น้อย สาเหตุของความเสียหายต่างๆ ที่เกิดขึ้น อาจเนื่องมาจากการออกแบบที่ไม่เหมาะสม การเลือกใช้วัสดุผิดประเภทหรือแม้แต่การใช้กระบวนการผลิตที่ไม่ถูกต้อง ดังนั้น ในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงความเสียหายของวัสดุที่อาจเกิดขึ้นเป็นอย่างมาก เพราะนั่นหมายถึงความไม่ปลอดภัยที่อาจเกิดขึ้นกับชีวิตและทรัพย์สินได้

การแตกหักแบบเหนียว (Ductile fracture) การแตกหักแบบเหนียวปกติแล้วจะเป็นการแตกหักแบบผ่าเกรน (Transgranular) ซึ่งเกิดขึ้นกับโลหะที่มีความเหนียวและมีความทนทานต่อการแตกหักสูงๆ ลักษณะการเปลี่ยนรูปก่อนการแตกหักของวัสดุเหนียว โดยปกติแล้วจะมีการเกิดคอคอด (Necking) ขึ้นก่อนการฉีกขาดของเนื้อโลหะ การแตกหักแบบเหนียวนี้ปกติจะเกิดขึ้นเมื่อโลหะรับแรงเกินขีดจำกัดที่ทนทานได้หรือโลหะได้รับความเค้นที่สูงเกินไป จึงทำให้เกิดการแตกหักขึ้น

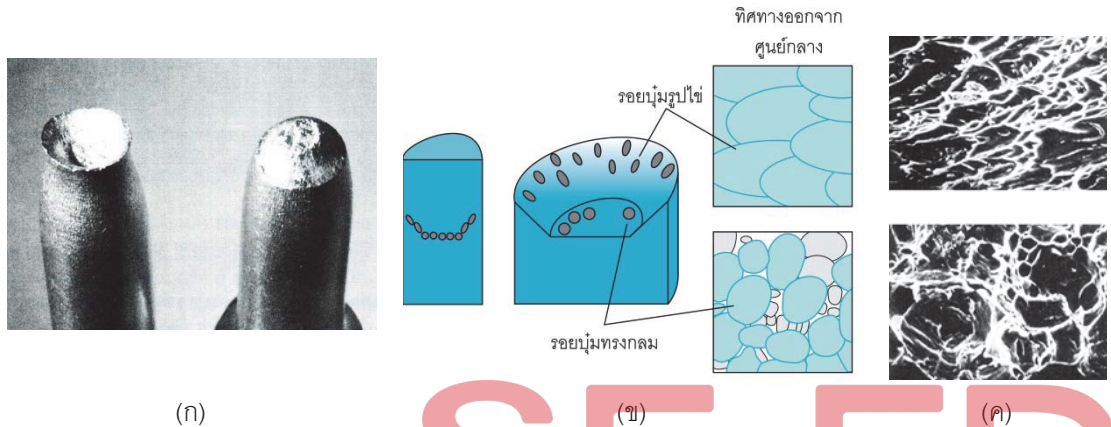
ในการทดสอบแรงดึงกับโลหะ การแตกหักแบบเหนียวจะเริ่มต้นจากการเกิดคอคอด จากนั้นจะเกิดรูหรือช่องว่างขนาดเล็ก (Microvoids) ขึ้น ดังแสดงรูปที่ 2.30 บริเวณกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้นที่กระทำกับชิ้นทดสอบที่บริเวณขอบเกรนหรือบริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารมลทินที่ฝังอยู่ภายใน และเมื่อความเค้นเพิ่มขึ้นช่องว่างขนาดเล็กจะขยายตัวโตขึ้นและรวมตัวกันเป็นช่องว่างขนาดใหญ่และลูกกลมจนฉีกขาดในที่สุด



รูปที่ 2.30 ขั้นตอนการเกิดการแตกหักแบบเหนียวของโลหะที่ได้รับแรงดึง

(ที่มา: Smith F.W., 2006)

การเปลี่ยนรูปเนื่องจากการเลื่อนจะเกิดขึ้นในโลหะที่มีการแตกหักแบบเหนียว ซึ่งเราทราบกันแล้วว่าการเลื่อนจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนมีค่าสูงถึงจุดความเค้นเฉือนวิกฤตและความเค้นดึงกล่าวจะมีค่าสูงสุดที่มุม 45° กับทิศทางของความเค้นที่กระทำกับโลหะ ลักษณะผิวของรอยแตกหักจะมีลักษณะเฉพาะที่เรียกว่าการแตกหักแบบถ้วยและกรวย (Cup-and-cone) ดังแสดงในรูปที่ 2.31 โดยผิวของรอยแตกด้านหนึ่งจะเป็นรูปถ้วยและอีกด้านจะเป็นรูปกรวย



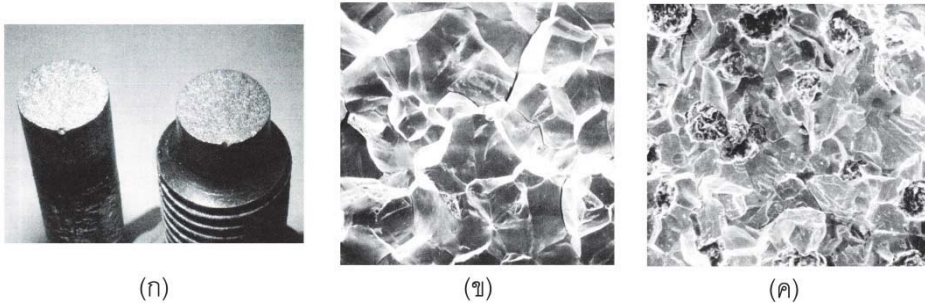
รูปที่ 2.31 (ก) รอยแตกแบบถ้วยและกรวยที่เกิดขึ้นที่ชั้นทดสอบแรงดึง (ที่มา: Callister W.D.Jr., 2003)

(ข) ลักษณะหลุมที่เกิดขึ้นที่ศูนย์กลาง รอยแตกมีลักษณะเป็นรอยนูนขนาดเล็กสม่ำเสมอ ส่วนที่ขอบมีลักษณะเป็นรอยนูนรูปไข่หรือรูปตัวซี (ค) รอยแตกบริเวณผิวของกรวยที่เกิดการเลื่อน และรอยแตกมีลักษณะเป็นหลุมที่ศูนย์กลางหลุม (ที่มา: Askeland D.R and Phulé P.P., 2003)

ลักษณะผิวของรอยแตกหักบริเวณใจกลางถ้วยจะมีลักษณะเป็นหลุมกลมขนาดเล็กสม่ำเสมอหรือจะมีลักษณะเกรนแบบอิกิวแอกซ์ (Equiaxed) ดังรูปที่ 2.31 (ค) ล่าง ส่วนบริเวณผิวของโคนจะมีลักษณะเป็นรอยนูนรูปทรงรีคล้ายรูปไข่หรือรูปตัวซี และมีลักษณะซ้อนทับกันโดยมีทิศทางวิ่งออกจากศูนย์กลางของชั้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.31 (ค) บน โดยรูปเป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งที่มีกำลังขยายสูง

การแตกหักแบบเปราะ (Brittle fracture) การแตกหักแบบเปราะจะเกิดขึ้นกับโลหะหรือโลหะผสมที่มีความแข็งแรงสูงๆ หรือกลุ่มที่มีความเหนียวและทัฟเนสส์ต่ำมากๆ สำหรับโลหะที่มีความเหนียวบางชนิดอาจเกิดการแตกแบบเปราะได้ที่อุณหภูมิต่ำๆ การแตกหักแบบเปราะจะมีการเปลี่ยนรูปในสภาวะพลาสติกที่น้อยมากหรือไม่มีเลย การแตกหักโดยมากจะมีจุดเริ่มต้นรอยแตกร้าขนาดเล็กซึ่งเป็นจุดศูนย์รวมความเค้นที่มีความเข้มข้นสูง การรุกรามหรือขยายตัวของรอยแตกร้าบางครั้งจะมีอัตราเร็วเท่ากับความเร็วของเสียงที่วิ่งผ่านเนื้อโลหะ โดยปกติแล้วลักษณะของการแตกหักจะตั้งฉากกับทิศทางของความเค้นดึงที่กระทำกับโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.32 (ก) ทำให้ผิวของรอยแตกหักมีลักษณะแบนเรียบ บางครั้งการแตกหักอาจเป็นการแตกระหว่าง

เกรน (Intergranular) ดังแสดงในรูปที่ 2.32 (ข) หรือบางครั้งลักษณะของการแตกหักอาจเป็นการแตกแบบผ่าเกรน (Transgranular or transcrystalline) ดังแสดงในรูปที่ 2.32 (ค) ซึ่งในกรณีหลังนี้มักเกิดขึ้นเมื่อโลหะมีโครงสร้างที่มีส่วนผสมไม่สม่ำเสมอหรือมีสารมลทินฝังอยู่ในเกรนของโลหะ



รูปที่ 2.32 (ก) ลักษณะการแตกหักแบบเปราะที่เกิดขึ้นทดสอบแรงดึง (ข) การแตกหักระหว่างเกรน (ค) การแตกหักผ่าเกรน (ที่มา: Callister W.D.Jr., 2003)

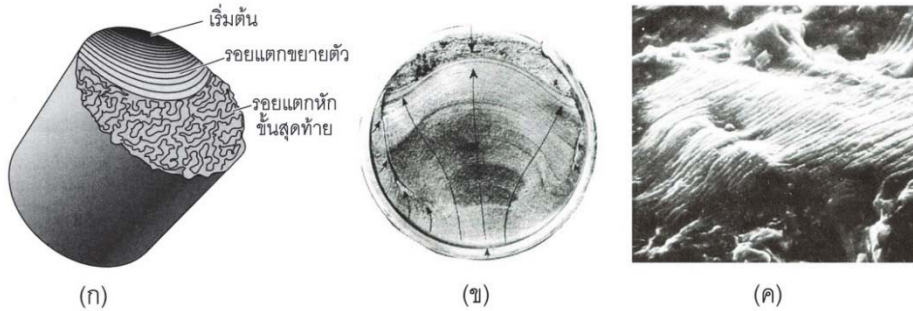
การแตกหักเนื่องจากความล้า (Fatigue fracture) การแตกหักเนื่องจากความล้าเกิดขึ้นเนื่องจากวัสดุได้รับความเค้นสลับไปมาเป็นวัฏจักรจนเกิดการล้าตัวและเกิดการแตกหักขึ้นในที่สุด แม้ความเค้นที่ได้รับนั้นต่ำกว่าความเค้น ณ จุดครากก็ตาม กระบวนการแตกหักเนื่องจากความล้าเกิดขึ้นได้ 3 ขั้นตอน คือ

1. **จุดเริ่มต้นการแตก (Crack initiation)** เป็นการกำเนิดรอยแตกขนาดเล็กขึ้นและเป็นจุดศูนย์กลางของความเค้น
2. **การขยายตัวของรอยแตก (Crack propagation)** ขณะที่วัสดุได้รับความเค้นแบบวัฏจักร แต่ลรอบที่ได้รับความเค้นจะส่งผลให้รอยแตกขยายตัวเพิ่มขึ้น และ
3. **เกิดการแตกหัก (Final failure)** เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นทันทีทันใดเมื่อรอยแตกมีขนาดเท่ากับขนาดวิกฤต

ลักษณะของรอยแตกหักเนื่องจากความล้า บ่อยครั้งที่ทำการสังเกตเห็นได้ค่อนข้างง่าย โดยลักษณะผิวของรอยแตกใกล้บริเวณจุดกำเนิดรอยแตกจะมีลักษณะค่อนข้างเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.33 (ก) จากนั้นบริเวณถัดมาจะเริ่มมีผิวหยาบและขนาดโตขึ้นเรื่อยๆ และในบริเวณสุดท้ายผิวรอยแตกจะมีลักษณะคล้ายเยื่อที่ถูกฉีกขาด ผิวของรอยแตกที่เกิดขึ้นในขั้นที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงการขยายตัวของรอยแตกนั้น จะมีลักษณะรอยแตกแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ **แบบบีชมาร์ค (Beachmarks)** และ **แบบสตริเอชัน (Striation)**

รอยแตกทั้งสองแบบนี้จะบ่งชี้ตำแหน่งของปลายรอยแตก โดยรอยแตกจะมีลักษณะเป็นแนวเส้นวงโค้งที่ขยายตัวออกจากตำแหน่งของจุดเริ่มต้นของรอยแตก โดยทั่วไปแล้วรอยแตกจะมีลักษณะเป็นวงกลมหรือ

กึ่งวงกลม รอยแตกแบบบีชมาร์คบางครั้งเรียกว่า รอยแตกแบบเปลือกหอย (Clamshell mark) ดังแสดงในรูปที่ 2.33 (ข) ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า



รูปที่ 2.33 (ก) ภาพร่างแสดงลักษณะผิวของรอยแตกเนื่องจากความล้า (ข) ผิวรอยแตกที่แสดงทิศทางการขยายตัวของรอยแตก และลักษณะรอยแตกแบบบีชมาร์ค (ค) ผิวรอยแตกแบบสไตรเอชันที่ถ่ายด้วยกล้อง SEM

(ที่มา: Askeland D.R and Phulé P.P., 2003)

รอยแตกแบบนี้มักเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีการหยุดพักการใช้งานเป็นช่วงๆ เช่น เครื่องจักรที่ทำงานเฉพาะช่วงเวลาทำงานปกติและปิดเครื่องหลังเลิกงาน ในกรณีเช่นนี้ ลักษณะของแถบบีชมาร์คแต่ละเส้นจะแสดงถึงช่วงเวลาที่เกิดการขยายตัวของรอยแตก สำหรับผิวของรอยแตกแบบสไตรเอชันนั้นจะมีขนาดที่เล็กมากในระดับจุลภาค ซึ่งจะเห็นได้ด้วยกล้องขยายกำลังสูง อย่างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ลักษณะของรอยแตกแบบสไตรเอชันแสดงในรูปที่ 2.33 (ค) แถบสไตรเอชันแต่ละแถบจะบอกระยะเวลาที่แถวหน้ารอยแตกเคลื่อนที่ไปในหนึ่งรอบวัฏจักร ขนาดความกว้างของแถบสไตรเอชันนี้จะขึ้นกับช่วงความเค้นโดยจะมีความกว้างมากขึ้น เมื่อช่วงความเค้นกว้างขึ้น

2.3 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ (Physical Properties of Materials)

สมบัติทางกายภาพ หมายถึง คุณลักษณะหรือพฤติกรรมของวัสดุที่แสดงออกมาในรูปของพลังงาน เช่น ความร้อน ไฟฟ้า และแม่เหล็ก สมบัติเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างอะตอมของวัสดุ สมบัติทางกายภาพเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่น่ามาใช้ในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุในงานอุตสาหกรรม สมบัติดังกล่าวอาจจำแนกออกเป็นประเภทได้ดังนี้คือ ความหนาแน่น สมบัติทางความร้อน ไฟฟ้า แม่เหล็ก และแสง เป็นต้น บ่อยครั้งเราจะพบว่า สมบัติทางกายภาพจะถูกนำไปพิจารณาร่วมกับสมบัติทางกล เช่น อัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนัก หรือมอดูลัสจำเพาะ เป็นต้น

2.3.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของวัสดุ หมายถึง มวลของวัสดุต่อหน่วยปริมาตร โดยทั่วไปแล้วจะแสดงเป็นหน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ชนิดต่างๆ ความสำคัญของความหนาแน่นที่มีต่อการเลือกใช้วัสดุในงานอุตสาหกรรมนั้นจะพบได้บ่อยครั้ง ดังเช่น ชิ้นส่วนของเครื่องบินหรือยานอวกาศนั้น ต้องการวัสดุที่มีน้ำหนักเบาหรือมีความหนาแน่นน้อยเพื่อช่วยให้การใช้พลังงานในการขับเคลื่อนนั้นลดลงในขณะเดียวกันก็ต้องการความแข็งแรงที่สูงด้วย เป็นต้น

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพที่อุณหภูมิห้องของวัสดุชนิดต่างๆ

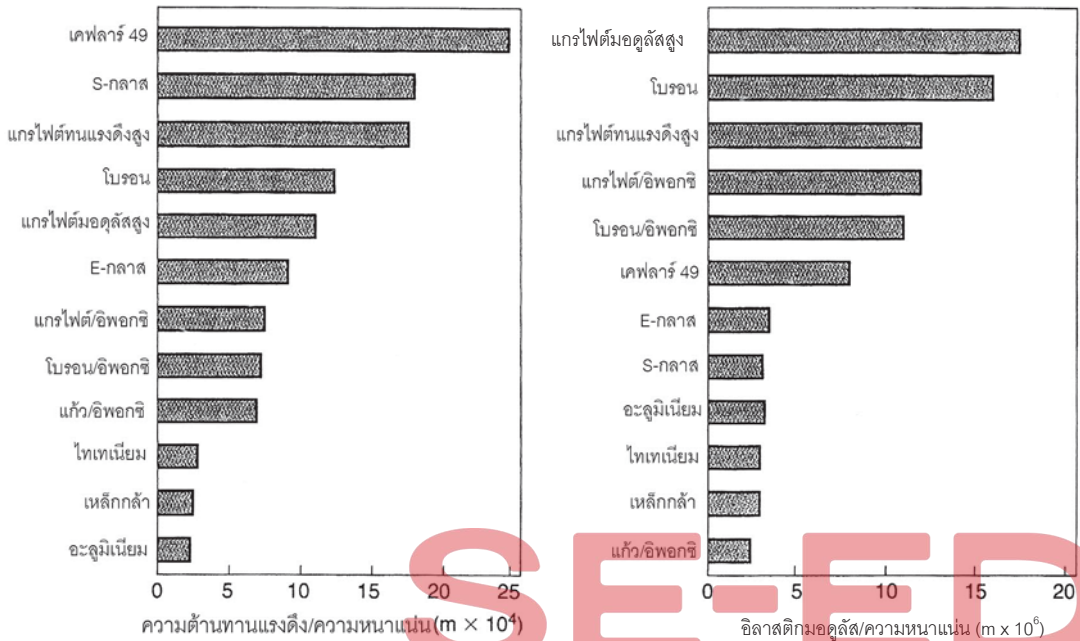
วัสดุ	ความหนาแน่น (kg./m. ³)	จุดหลอมเหลว (°C)	ความร้อน จำเพาะ (J/kgK)	ความนำ ความร้อน (W/mK)	สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน ($\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)
วัสดุกลุ่มโลหะ					
อะลูมิเนียม	2,700	660	900	222	23.6
ทองแดง	8,970	1,082	385	393	16.5
ทอง	19,300	1,063	129	317	19.3
เหล็กกล้า	6,920-9,130	1,371-1,532	448-502	15-52	11.7-17.3
ตะกั่ว	11,350	327	130	35	29.4
แมกนีเซียม	1,745	650	1,025	154	26.0
นิกเกิล	8,910	1,453	440	92	13.3
ไทเทเนียม	4,510	1,668	519	17	8.35
วัสดุกลุ่มอโลหะ					
เซรามิก	2,300-5,500	-	750-950	10-17	5.5-13.5
แก้ว	2,400-2,700	580-1,540	500-850	0.6-1.7	4.6-70
แกรไฟต์	1,900-2,200	-	840	5-10	7.86
พลาสติก	900-2,000	110-330	1,000-2,000	0.1-0.4	72-200
ไม้	400-700	-	2,400-2,800	0.1-0.4	2-60

(ที่มา: Kalpakjian S. and Schmid S.R., 2006)

ความหนาแน่นมีบทบาทอย่างมากต่ออัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนัก (Strength-to-weight) หรือมักเรียกสั้นๆ ว่า ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific strength) และอัตราส่วนของสติฟเนสส์ต่อน้ำหนัก (Stiffness-to-weight ratio) หรือ โมดูลัสจำเพาะ (Specific modulus) ของวัสดุ ตัวอย่างเช่น ไทเทเนียมและอะลูมิเนียมเป็นโลหะกลุ่มแรกๆ ที่จะถูกพิจารณาเลือกใช้ในการนำมาผลิตชิ้นส่วนเครื่องบินหรือยานยนต์ ทั้งนี้เนื่องจากโลหะทั้งสองจะมีอัตราส่วนของความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงอยู่อันดับต้นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่น

อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุขึ้นมามากหลายชนิดที่ให้สมบัติทางกลที่สูงในขณะที่มีน้ำหนักน้อยลง รูปที่ 2.34 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งแรงต่อน้ำหนักและโมดูลัสยืดหยุ่นต่อน้ำหนักของวัสดุชนิดต่างๆ ทั้งกลุ่มโลหะและอโลหะ จากภาพเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิตนั้นจะ

ให้อัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักและมอดุลัสจำเพาะที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับโลหะ ดังนั้น ปัจจุบันจึงมีการประยุกต์ใช้วัสดุผสมมาผลิตชิ้นส่วนเครื่องบินและยานยนต์มากขึ้น



รูปที่ 2.34 ความแข็งแรงจำเพาะและมอดุลัสจำเพาะที่อุณหภูมิห้องของวัสดุชนิดต่างๆ

(ที่มา: Kalpakjian S. and Schmid S.R., 2006)

2.3.2 สมบัติทางความร้อน (Thermal property)

สมบัติทางความร้อนเป็นพฤติกรรมการตอบสนองของวัสดุที่มีต่อความร้อนที่ได้รับจากภายนอก ซึ่งประกอบไปด้วย จุดหลอมเหลว ความจุความร้อน การถ่ายเทความร้อน และการขยายตัวเนื่องจากความร้อน เป็นต้น การเข้าใจสมบัติทั้งหลายเหล่านี้จะทำให้เราเลือกใช้วัสดุได้ตรงกับงานที่วิศวกรหรือช่างเทคนิคทำการออกแบบได้

จุดหลอมเหลว (Melting point) หมายถึง อุณหภูมิที่วัสดุเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว ในกรณีของโลหะ หากเป็นโลหะบริสุทธิ์จะมีจุดหลอมเหลวเพียงอุณหภูมิเดียว ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ส่วนโลหะผสมนั้นจะมีจุดหลอมเหลวเป็นช่วงอุณหภูมิ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมนั้นๆ จุดหลอมเหลวของวัสดุมีความสำคัญต่อการเลือกใช้วัสดุเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น พลาสติกจะมีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปหรือการผลิตขึ้นมาใช้งานในอุตสาหกรรม ในขณะที่แกรไฟต์จะมีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก จึงถูกนำไปใช้งานเป็นวัสดุทนไฟหรือทนความร้อน เป็นต้น

จุดหลอมเหลวของโลหะจะมีอิทธิพลทางอ้อมต่อกระบวนการขึ้นรูปโลหะ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิการเกิดผลึกใหม่ที่ใช้แบ่งแยกการขึ้นรูปร้อนและขึ้นรูปเย็นนั้นมีความสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลวของโลหะ กระบวนการอบชุบความร้อนโลหะเช่น การอบอ่อน การชุบแข็ง หรือการขึ้นรูปร้อนนั้น จะอาศัยความรู้ของจุดหลอมเหลว ประกอบการปฏิบัติงานด้วย จุดหลอมเหลวยังมีบทบาทอย่างสูงต่อการเลือกใช้วัสดุในการทำเครื่องมือคมตัดแม่พิมพ์ขึ้นรูป ตลอดจนการขึ้นรูปวัสดุโดยกระบวนการหล่อ ทั้งนี้เพราะวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูงย่อมทำการหลอมละลายยาก ดังนั้น ผลที่ตามมาคือค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานเพื่อการหลอมสูงขึ้นไปตามลำดับ

ความจุความร้อน (Heat capacity) หมายถึง อัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ให้แก่สสารต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) หมายถึง ความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลของวัสดุหรือพลังงานที่ใช้ในการทำให้สารหนึ่งหน่วยมวลมีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศา ความจุความร้อนเป็นความสามารถของวัสดุในการดูดซับความร้อนจากสภาพแวดล้อม โดยที่ศูนย์องศาสมบูรณ์ อะตอมของวัสดุจะอยู่ในระดับพลังงานที่ต่ำสุด แต่หากมีการให้ความร้อนเข้าไปในวัสดุ อะตอมจะได้รับพลังงานความร้อนและเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นและส่งผ่านไปให้กับอะตอมรอบข้างต่อไป ทำให้เกิดคลื่นยืดหยุ่น (Elastic wave) ที่เรียกว่า โฟนอน (Phonon) โดยพลังงานของโฟนอนอาจหาได้ในรูปของความยาวคลื่นหรือความถี่ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.4

การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion) หมายถึง การที่ขนาดของวัสดุ (ความยาว/พื้นที่/ปริมาตร) เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่ออะตอมได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและมีขนาดรัศมีอะตอมที่โตขึ้น ส่งผลให้ขนาดของวัสดุนั้นเพิ่มขึ้นหรือขยายตัวขึ้น การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุ จะหาได้ในรูปของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเชิงเส้น (Linear coefficient of thermal expansion) ปกติแล้วสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเซรามิกและแก้วจะมีค่าน้อยกว่าโลหะ แต่สำหรับพอลิเมอร์แล้วสัมประสิทธิ์การขยายตัวจะมีมากกว่าทั้งโลหะและเซรามิกเป็นอย่างมาก สิ่งที่ทำให้วัสดุมีการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่ต่างกันนั้น เป็นเพราะธรรมชาติของการยึดเหนี่ยวของอะตอมในการเกิดพันธะ สำหรับเซรามิกและแก้วนั้น การยึดเหนี่ยวของพันธะอะตอมจะมีพลังงานยึดเหนี่ยวที่สูงมาก ทำให้การสั่นสะเทือนและแยกห่างกันของอะตอมอันเนื่องมาจากพลังงานความร้อนนั้นมีน้อย

การนำความร้อน (Thermal conductivity) หมายถึง ปริมาณความร้อนซึ่งไหลผ่านวัตถุปริมาตรหนึ่งหน่วยในหนึ่งหน่วยเวลา เมื่อพื้นที่ผิว 2 ด้านของวัตถุอุณหภูมิต่างกัน 1 องศา การถ่ายเทพลังงานความร้อนเกิดขึ้นด้วยกลไกที่สำคัญสองกลไกคือ การถ่ายเทของอิเล็กตรอนอิสระ และการสั่นสะเทือนของแลตทิซหรือโฟนอน เมื่อเวเลนซ์อิเล็กตรอนได้รับพลังงานความร้อน จะเกิดการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่เย็นกว่าของวัสดุ

และถ่ายเทความร้อนไปสู่อะตอมตัวถัดไป ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทไปเท่าไรนั้น ขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ความบกพร่องของแลตทิซและอุณหภูมิอีกด้วย

2.3.3 สมบัติทางไฟฟ้า แม่เหล็ก และแสง

(Electrical, magnetic and optical properties)

สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical property) ของวัสดุเป็นสมบัติที่จำเป็นจะต้องรู้และความเข้าใจเพื่อเลือกใช้วัสดุได้อย่างเหมาะสม สมบัติทางไฟฟ้าประกอบไปด้วย ความนำไฟฟ้า ไดอิเล็กทริก สภาพเพียโซอิเล็กทริก และสภาพเฟอร์โรอิเล็กทริก สมบัติต่างๆ เหล่านี้ จะนำไปใช้อธิบายสมบัติของตัวนำยิ่งยวด วัสดุกึ่งตัวนำ ตลอดจนจนความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าของวัสดุ และการประยุกต์ใช้งาน

การนำไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมจะมีสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) หรือสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ที่แตกต่างกัน จากความแตกต่างดังกล่าว ทำให้จำแนกวัสดุออกเป็น วัสดุตัวนำ วัสดุกึ่งตัวนำ และวัสดุที่เป็นฉนวน ตัวอย่างเช่น โลหะถูกจัดอยู่ในกลุ่มที่เป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้า ส่วน วัสดุกลุ่มพอลิเมอร์และเซรามิก จัดเป็นวัสดุฉนวน เป็นต้น

สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ หมายถึง การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยมีตัวพาประจุ (Charge carries) ซึ่งประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนและไอออน ตัวพาประจุจำแนกออกเป็น ตัวพาประจุบวก (Positive charge carries) และตัวพาประจุลบ (Negative charge carries)

ตัวพาประจุบวกประกอบไปด้วยแคตไอออน และช่องว่างหรือหลุมอิเล็กตรอน (Electron holes) ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานหลุดออกไป ทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้น ส่วนตัวพาประจุลบประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนและไอออน การนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยการพาประจุของอิเล็กตรอนหรือหลุมอิเล็กตรอน จะเรียกว่า **การนำไฟฟ้าโดยอิเล็กตรอน** (Electron conduction) ส่วนการนำไฟฟ้าโดยไอออน จะถูกเรียกว่า **การนำไฟฟ้าโดยไอออน** (Ionic conduction)

วัสดุแต่ละชนิดจะนำไฟฟ้าได้มากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับสภาพต้านทานไฟฟ้าและสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุนั้นๆ โดยสภาพต้านทานและสภาพการนำไฟฟ้านั้น จะไม่ขึ้นกับขนาดของวัสดุ แต่จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาคเป็นอย่างมาก เช่น สภาพต้านทานไฟฟ้าของทองแดงบริสุทธิ์ จะมีค่าน้อยกว่าทองแดงบริสุทธิ์ทางการค้า ทั้งนี้เพราะสารมลทินที่ปนอยู่ในเนื้อของทองแดงทางการค้า จะเป็นตัวขัดขวางการพาประจุของอิเล็กตรอน

ไดอิเล็กทริก (Dielectric) หมายถึง สารที่ปราศจากอิเล็กตรอนอิสระหรือมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนน้อยมากจึงต้านการไหลของกระแสไฟฟ้า วัสดุไดอิเล็กทริกมีสมบัติที่ไม่นำกระแสไฟฟ้าหรือมีความเป็น

ฉนวนไฟฟ้า ดังนั้น วัสดุที่นำไฟฟ้า เช่น โลหะจึงไม่จัดเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก ต่างจากวัสดุเซรามิกและพอลิเมอร์ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นวัสดุไดอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใช้วัสดุไดอิเล็กทริกมาคั่นระหว่างแผ่นโลหะและค่าความจุของตัวเก็บประจุขณะที่ระหว่างแผ่นโลหะเป็นสุญญากาศ ค่าความจุไฟฟ้าจะมีมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำ ขนาด และรูปทรงของตัวนำ เมื่อนำวัสดุไดอิเล็กทริกใส่แทนที่ในสุญญากาศระหว่างวัสดุตัวนำ จะเกิดโพลาริเซชัน (Polarization) ขึ้นในวัสดุไดอิเล็กทริก และเกิดประจุไฟฟ้าสะสมขึ้น ดังนั้น ค่าความจุของตัวเก็บประจุจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งที่เราเรียกว่า **ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)** พลังงานที่สะสมไว้ในตัวเก็บประจุจะมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงขึ้น และวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงๆ เหมาะสำหรับใช้ผลิตอุปกรณ์ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ที่มีขนาดเล็กๆ ได้ดี

สภาพเพียโซอิเล็กทริก เมื่อเราทำให้ขนาดของวัสดุไดอิเล็กทริกเกิดความเค้น จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นมา เราเรียกพฤติกรรมนี้ว่า **เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric; คำว่า Piezo หมายถึง ความดัน (Pressure))** วัสดุที่มีพฤติกรรมนี้ ได้แก่ เลดเซอร์โคเนียมไทเทเนต (Lead zirconium titanate; PZT) เป็นต้น ในทางตรงกันข้าม หากเราให้แรงเคลื่อนกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุขึ้นหรือเกิดความเครียดขึ้น พฤติกรรมนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ทำอุปกรณ์แอคชูเอเตอร์ (Actuator) และตัวรับรู้ (Sensor) ได้ ดังเช่น เครื่องทำความสะอาดโดยคลื่นอัลตราโซนิก เครื่องสร้างภาพด้วยอัลตราซาวด์ที่ใช้ในงานแพทย์ อุปกรณ์ไมโครแอคชูเอเตอร์ และระบบตรวจจับสนต่างๆ ที่ใช้ในเรือดำน้ำ เป็นต้น

สมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetic property) หลายชนิดในงานอุตสาหกรรมอาศัยประโยชน์จากวัสดุแม่เหล็กอย่างเช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและทรานส์ฟอร์มเมอร์ งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสารที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์เก็บข้อมูลอย่างแผ่นดิสก์ ตลับวีดีโอ ตลอดจนแผ่นซีดีต่างๆ เหล่านี้ล้วนอาศัยสมบัติทางแม่เหล็กในการประยุกต์ใช้งานทั้งนั้น พฤติกรรมทางแม่เหล็กของวัสดุ สามารถอธิบายได้ด้วยโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานของวัสดุ และเราสามารถควบคุมพฤติกรรมดังกล่าวนี้ได้ด้วยการควบคุมส่วนผสมของวัสดุ โครงสร้างจุลภาคและกระบวนการผลิต

สภาพแม่เหล็กแบบพารา (Paramagnetism) วัสดุที่มีสภาพแม่เหล็กแบบพาราจะแสดงความไวต่อสภาพแม่เหล็กในเชิงบวกเล็กน้อย เมื่อนำไปอยู่ในสนามแม่เหล็กจากภายนอก และสภาพแม่เหล็กแบบพาราจะหายไปหากนำวัสดุออกจากสนามแม่เหล็ก วัสดุเฟอร์โรและเฟอร์ริจะแสดงพฤติกรรมแม่เหล็กแบบพาราออกมาหากอยู่ที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิคูรี และโลหะที่มีสนามแม่เหล็กแบบพารา ได้แก่ อะลูมิเนียม ไทเทเนียม และทองแดงผสมบางชนิด

สภาพแม่เหล็กแบบเฟอร์โร (Ferromagnetism) วัสดุที่มีโมเมนต์แม่เหล็กแบบถาวรอยู่ในตัวเอง แม้จะไม่ได้อยู่ในสนามแม่เหล็กภายนอกก็ตาม ส่งผลให้วัสดุชนิดนี้สามารถแสดงสนามแม่เหล็กถาวรได้ พฤติกรรมดังกล่าวนี้เรียกว่า **สภาพแม่เหล็กแบบเฟอร์โร** สภาพแม่เหล็กแบบนี้สำหรับธาตุทรานซิชัน เช่น เหล็ก (BCC) โคบอลต์ และนิกเกิล เกิดขึ้นเนื่องจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานชั้นในไม่มีคู่ ทำให้การหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอนมีการหักล้างกันของโมเมนต์แม่เหล็กไม่หมด ส่งผลให้โมเมนต์แม่เหล็กที่เหลือเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบตลอดปริมาตรที่มีขนาดใหญ่ภายในผลึกของแข็ง เราเรียก พฤติกรรมนี้ว่า **โดเมนแม่เหล็ก** ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุด (Valence electron) ของอะตอมจะไม่แสดงผลของโมเมนต์แม่เหล็ก ทั้งนี้เพราะ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเกิดพันธะเคมีกับอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมอื่น

สมบัติทางแสง (Optical property) วัสดุที่ใช้งานโดยอาศัยสมบัติทางแสงหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีบทบาทที่สำคัญเป็นอย่างสูง ในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของระบบการสื่อสาร ระบบข่าวสารข้อมูล เทคโนโลยีทางการแพทย์ กระบวนการผลิตและทางด้านดาราศาสตร์ สมบัติทางแสงของวัสดุพื้นฐานที่สำคัญ ได้แก่ การหักเห (Refraction) การสะท้อน (Reflection) การดูดซับ (Absorption) และการส่งผ่าน (Transmission) ของแสง ตลอดจนปฏิกิริยาของวัสดุที่มีต่อแสงซึ่งทำให้เกิดความสามารถในการเรืองแสง (Luminescence) หรือความสามารถในการนำแสงของวัสดุ เป็นต้น

2.4 สมบัติทางเคมีของวัสดุ (Chemical Properties of Materials)

สมบัติทางเคมีของวัสดุนั้น หมายถึง คุณลักษณะหรือพฤติกรรมของวัสดุที่แสดงออกมาในสภาพแวดล้อมทางเคมี เช่น ความต้านทานการกัดกร่อน ความต้านทานกรดหรือด่าง เป็นต้น สมบัติทางเคมีของวัสดุนั้นหากจะกล่าวในรายละเอียดแล้วจะมีเนื้อหาค่อนข้างมาก ดังนั้น ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเนื้อหาที่เป็นประโยชน์ต่อการเลือกใช้งานของวัสดุเท่านั้น ซึ่งประกอบไปด้วย การกัดกร่อน และการเกิดออกซิเดชัน

2.4.1 การกัดกร่อน (Corrosion)

ส่วนผสมทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของผิวภายนอกของวัสดุจะเกิดการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ในกรณีของการกัดกร่อนทางเคมีวัสดุจะถูกทำให้ละลายโดยการกัดกร่อนของสารที่เป็นของเหลวแต่ในกรณีการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical corrosion) นั้น อะตอมของโลหะจะถูกเคลื่อนย้ายออกจากเนื้อของวัสดุซึ่งเป็นผลมาจากวงจรไฟฟ้าที่เกิดขึ้น สำหรับรายละเอียดของการกัดกร่อนแบบไฟฟ้าเคมีมีหลักการดังต่อไปนี้

การกัดกร่อนแบบไฟฟ้าเคมี เป็นกระบวนการกัดกร่อนที่พบมากที่สุดกับวัสดุกลุ่มโลหะ เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของโลหะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนไปกลายเป็นไอออน การเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีปกติแล้วจะต้องมีสารตัวกลางที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา เช่น น้ำ ดิน หรืออากาศ ในกระบวนการกัดกร่อนแบบนี้วงจรไฟฟ้าจะถูก

กระบวนการผลิตเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับเลือกใช้กระบวนการขึ้นรูป และผลิตชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับที่ได้ทำการออกแบบโดยวิศวกรรมหรือช่างเทคนิค หนังสือเล่มนี้ได้ทำการเรียบเรียงเนื้อหาตั้งแต่โครงสร้างของวัสดุที่มีความสัมพันธ์กับการขึ้นรูป ไปจนถึงกระบวนการผลิตพื้นฐานที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมตลอดจนกระบวนการผลิตที่ทันสมัย เนื้อหาในเล่มประกอบด้วย โครงสร้างและสมบัติของวัสดุ พื้นฐานการกัดแต่งและเครื่องมือตัด โครงสร้างของโลหะและการอบชุบความร้อน การขึ้นรูปโลหะก้อน การขึ้นรูปโลหะแผ่น การผลิตโลหะผง การขึ้นรูปเซรามิก การขึ้นรูปแก้ว การผลิตวัสดุที่ก้าวหน้า การขึ้นรูปพลาสติก ระบบอัตโนมัติและการผลิตที่ประสานด้วยคอมพิวเตอร์ การออกแบบผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ศึกษาสามารถทำความเข้าใจในเนื้อหาได้มากยิ่งขึ้น ผู้เขียนได้อธิบายรายละเอียดพร้อมตัวอย่างในการวิเคราะห์ในส่วนที่จำเป็น อีกทั้งอธิบายศัพท์เฉพาะทางกระบวนการผลิตไว้มากที่สุด ตลอดจนได้สอดแทรกแบบฝึกหัดไว้ในทุกๆ บท เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่มากยิ่งขึ้น



ประวัติผู้เขียน

รศ.ดร. นรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ

การศึกษา

- Doctor of Engineering (D.Eng.) สาขาวิชา Design and Manufacturing Engineering จาก Asian Institute of Technology (AIT)
- Master of Engineering (M.Eng.) สาขาวิชา Manufacturing System Engineering จาก Asian Institute of Technology (AIT)
- วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา

การทำงาน

- พ.ศ. 2564-ปัจจุบัน ดำรงตำแหน่งรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิเทศสัมพันธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
- พ.ศ. 2558-2563 ดำรงตำแหน่งคณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
- พ.ศ. 2554-2558 ดำรงตำแหน่งรองคณบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
- พ.ศ. 2543-2545 ดำรงตำแหน่งหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา

ประสบการณ์ฝึกอบรมและศึกษาดูงาน

- Heat Treatment and Metal Finishing for Improving of Metal, JICA, Japan

ประสบการณ์การทำงาน

- อาจารย์พิเศษรายวิชาปฏิบัติการกรรมวิธีการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา
- วิทยากรบรรยายในการฝึกอบรมสัมมนาในหัวข้อ “การอบชุบและการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้า”

งานวิจัยและสิ่งประดิษฐ์

- ชุดจำลองการแข็งตัวของโลหะ
- เตาอบชุบความร้อนฟลูอิดไดซ์เบด
- ผลของกระบวนการอบชุบความร้อนที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและความแข็งแรงของดาบซามูไร
- การปรับปรุงสมบัติทางกลของเงินสเตอร์ลิง 925 ด้วยการอบชุบความร้อนโดยการบ่มแข็ง
- การออกแบบระบบป้อนเติมหน้าโลหะในการหล่อ Investment Casting ในการผลิตเครื่องประดับเงินสเตอร์ลิง
- การประยุกต์ใช้กรรมวิธีแพ็คเกจเบอร์โรซิงในการชุบแข็งมิติทางการเกษตร
- การศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาของเศษวัสดุธรรมชาติในการชุบแข็งมิติทางการเกษตรในกระบวนการแพ็คเกจเบอร์โรซิง

หนังสือที่เรียบเรียง

- วัสดุวิศวกรรม (Engineering Materials)
- โลหวิทยา (Metallurgy)
- วิศวกรรมหล่อโลหะ (Metal Casting Engineering)



SE-ED Publisher



www.se-ed.com



sbc fans

พร้อมจำหน่ายในรูปแบบ

- e-book (PDF)
- e-book (EPUB)
- audiobooks

- ปกอ่อน
- LARGE PRINT (ตัวอักษรขนาดใหญ่)



9 786160 846498

389 บาท

คู่มือเรียน-สอน/อุดมศึกษา-เทคโนโลยี, อุตสาหกรรมการผลิต