

# การออกแบบ เครื่องจักรกล

## MACHINE DESIGN

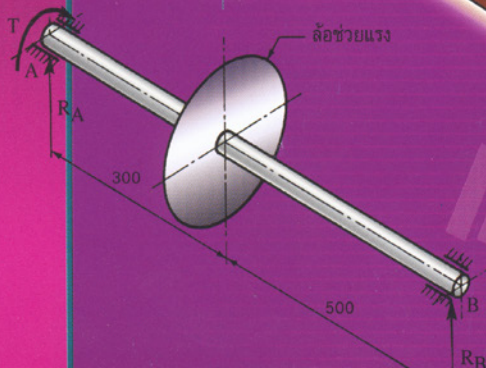
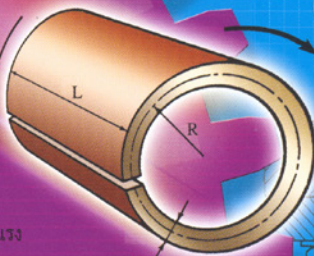
หน่วย SI

เล่ม 1



E-ED

Inspiration starts here



ศ.ดร. วรสิทธิ์ อึ้งภากรณ์

รศ.ชาญ กนิ์ตงาน

# การออกแบบ เครื่องจักรกล

---

## MACHINE DESIGN

---

เล่ม 1

**ศ.ดร.วริทธิ์ อังการณิ**  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

inspiration starts here  
**รศ.ชาญ ถิ่นตนา**

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



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

ค้นหาหนังสือที่ต้องการ ได้เร็ว ทันใจ ที่ [www.se-ed.com](http://www.se-ed.com)

# การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1

โดย ศ.ดร. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์ และ รศ. ชาญ ถนังงาน

สงวนลิขสิทธิ์ในประเทศไทยตาม พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ © พ.ศ. 2556 โดย ศ.ดร. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์ และ รศ. ชาญ ถนังงาน  
ห้ามคัดลอก ลอกเลียน ดัดแปลง ทำซ้ำ จัดพิมพ์ หรือกระทำการอื่นใด โดยวิธีการใดๆ ในรูปแบบใดๆ  
ไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของหนังสือเล่มนี้ เพื่อเผยแพร่ในสื่อทุกประเภท หรือเพื่อวัตถุประสงค์ใดๆ  
นอกจากจะได้รับอนุญาต

## ข้อมูลทางบรรณานุกรมของหอสมุดแห่งชาติ

วรวิทย์ อึ้งภากรณ์.

การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1. --กรุงเทพฯ : ซีเ็ดยูเคชั่น, 2556.

1. เครื่องจักรกล--การออกแบบ.

I. ชาญ ถนังงาน, ผู้แต่งร่วม. II. ชื่อเรื่อง.

621.815

SE-ED  
inspiration starts here

ISBN(e-book) : 978-616-08-0987-5

ผลิตและจัดจำหน่ายโดย



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

อาคารทีซีไอเอฟ ทาวเวอร์ ชั้น 19 เลขที่ 1858/87-90 ถนนบางนา-ตราด แขวงบางนา  
เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260 โทรศัพท์ 0-2739-8000

[หากมีคำแนะนำหรือติชม สามารถติดต่อได้ที่ [comment@se-ed.com](mailto:comment@se-ed.com)]

# คำนำ

หนังสือเล่มนี้เขียนขึ้นมาโดยมีจุดประสงค์ 2 ประการคือ ประการแรกผู้เขียนต้องการที่จะให้มีหนังสือการออกแบบเครื่องจักรกลเป็นภาษาไทย เพื่อที่นักศึกษาและผู้ที่ไม่มีความล้นหลามในการอ่านตำราภาษาต่างประเทศสามารถที่จะอ่านเข้าใจได้ง่าย และเข้าใจในเนื้อหาอย่างลึกซึ้ง ประการที่สองก็เพื่อที่จะให้มีหนังสือในระบบหน่วยเอสไอซึ่งในขณะนี้ไม่สามารถที่จะหาได้จากตำราภาษาต่างประเทศ

หนังสือเล่มนี้เหมาะสำหรับผู้ที่เริ่มทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่าง ๆ ผู้อ่านจะต้องมีพื้นฐานความรู้เบื้องต้นทางด้านกลศาสตร์ทั่วไป กลศาสตร์วัสดุ กลศาสตร์เครื่องจักร และคณิตศาสตร์ในระดับปีที่ 2 ของการศึกษาทางค่านวศกรรมศาสตร์ ผู้เขียนได้พยายามที่จะใช้มาตรฐานระหว่างประเทศ (ISO) และภายในประเทศ (มอก.) ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่าง ๆ มาประกอบกับการเลือกขนาดของชิ้นงานเพื่อให้เข้าใกล้กับทางปฏิบัติมากที่สุด แต่เนื่องจากขณะนี้ยังอยู่ในระยะการเปลี่ยนแปลงและแก้ไขมาตรฐานดังกล่าว ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถที่จะหามาตรฐานของชิ้นส่วนบางอย่าง เช่น แคลคูลัส ซึ่งในกรณีเช่นนี้ผู้เขียนจะยังคงใช้มาตรฐานเดิมอยู่

หนังสือเล่มนี้เป็นเล่มหนึ่งของเรื่องการออกแบบเครื่องจักรกลซึ่งเหมาะสำหรับการเรียนในระยะเวลาหนึ่งภาคการศึกษา เนื้อหาภายในมีจำนวน 11 บท เริ่มตั้งแต่บทที่ 1 ได้พูดถึงปรัชญาการออกแบบในแง่มุมต่าง ๆ เพื่อให้ผู้อ่านตระหนักถึงขั้นตอนการออกแบบเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ทำงานได้ตามความประสงค์ในราคาที่ประหยัดมากที่สุด โดยปกติผู้อ่านมักจะมีความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุและผลของกรรมวิธีทางความร้อนอยู่แล้ว โดยให้ทำการศึกษาตามต่างหากแล้วในวิชาโลหะวิทยา อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะให้หนังสือมีความสมบูรณ์ขึ้น ผู้เขียนจึงได้กล่าวถึงเรื่องนี้โดยสังเขปไว้ในบทที่ 2 ส่วนบทที่ 3 เป็นการแสดงถึงหลักการคำนวณออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอย่างง่าย บทที่ 4 และบทที่ 5 เป็นการวางรากฐานทางทฤษฎีซึ่งจะนำไปใช้ในการออกแบบชิ้นงานที่รับแรงหลาย ๆ ชนิดพร้อมกัน บทที่ 6 ถึงบทที่ 11 กล่าวถึงการคำนวณหาขนาดของชิ้นงานแต่ละชนิดโดยใช้พื้นฐานความรู้จากบทก่อน ๆ เป็นหลัก

บทที่ 1 ถึงบทที่ 5 เป็นบทที่จำเป็นจะต้องศึกษาก่อน ส่วนบทอื่น ๆ ผู้สอนสามารถที่จะเลือกเนื้อหาได้ตามความเหมาะสมสำหรับหนึ่งภาคการศึกษา โดยปกติแล้วการออกแบบชิ้นงานชิ้นหนึ่งจะได้ขนาดแตกต่างกัน ทั้งขึ้นอยู่กับข้อสมมติและการตัดสินใจของผู้ออกแบบ ฉะนั้นผู้เขียนจึงได้แสดงตัวอย่างการคำนวณและวิธีการอย่างแจ่มชัดในแต่ละหัวข้อ ด้วยจุดประสงค์ที่จะให้ผู้อ่านสามารถนำหลักการไปใช้กับปัญหาอื่น ๆ ที่มีได้แสดงอยู่ในหนังสือเล่มนี้ได้

สำหรับในการจัดพิมพ์ครั้งที่ 10 นี้ นอกจากจะมีการจัดรูปเล่มใหม่แล้ว ผู้เขียนได้เพิ่มคำตอบสำหรับแบบฝึกหัดท้ายบทด้วย เนื่องจากปัญหาทางด้านการออกแบบเครื่องจักรกลจำนวนมากสามารถที่จะให้คำตอบได้หลายคำตอบ ดังนั้นคำตอบหลายคำตอบที่ได้ให้ไว้ท้ายเล่มจึงอาจจะเป็นแต่เพียงคำตอบหนึ่งของปัญหาเท่านั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหลาย ๆ ประการ เช่น การเลือกค่าความปลอดภัย การเลือกวัสดุ การเลือกค่าของตัวประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ เป็นต้น อย่างไรก็ตามคำตอบที่ให้ไว้นี้ก็สามารถถือเป็นตัวอย่างคำตอบหนึ่งของโจทย์ได้ โดยผู้เขียนได้พยายามระบุถึงเงื่อนไขที่ได้คำตอบนั้นมาเอาไว้ด้วย

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนในการจัดพิมพ์เสมอมา และหวังว่าหนังสือเล่มนี้ยังคงมีประโยชน์ทางด้านการศึกษาและการอ้างอิงของวิศวกรได้อีกต่อไป

ศ.ดร.วิฑูรี อิงภากรณ์  
รศ.ชาญ อดันตงาน

# สารบัญ

|         |                                       |    |
|---------|---------------------------------------|----|
| บทที่ 1 | บทนำ                                  | 11 |
| 1.1     | ปรัชญาของการออกแบบ                    | 12 |
| 1.2     | พื้นฐานของผู้ออกแบบเครื่องจักรกล      | 12 |
| 1.3     | ขั้นตอนของการออกแบบ                   | 14 |
| 1.4     | ระบบของหน่วย                          | 18 |
| 1.5     | คุณสมบัติทางกลของวัสดุ                | 21 |
| 1.6     | ค่าความปลอดภัย                        | 23 |
| 1.7     | เอกสารอ้างอิงประกอบ                   | 24 |
| บทที่ 2 | คุณสมบัติทางโลหะวิทยาของวัสดุวิศวกรรม | 26 |
| 2.1     | นิยาม                                 | 26 |
| 2.2     | เหล็กเหนียว                           | 29 |
| 2.3     | เหล็กหล่อ                             | 30 |
| 2.4     | โลหะผสมสำหรับเหล็กกล้า                | 33 |
| 2.5     | เหล็กกล้า                             | 35 |
| 2.6     | การให้ชื่อเหล็กกล้าเหนียวของ AISI-SAE | 43 |
| 2.7     | อะลูมิเนียมผสมเหนียว                  | 45 |
| 2.8     | อะลูมิเนียมผสมหล่อ                    | 49 |
| 2.9     | ทองแดงและทองแดงผสม                    | 50 |
| 2.10    | แมกนีเซียมผสม                         | 51 |

|      |                      |    |
|------|----------------------|----|
| 2.11 | นิกเกิลและนิกเกิลผสม | 52 |
| 2.12 | พลาสติก              | 53 |
| 2.13 | เอกสารอ่านประกอบ     | 53 |

### บทที่ 3 การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลย่อย 55

|     |                     |    |
|-----|---------------------|----|
| 3.1 | ความเค้นอย่างง่าย   | 55 |
| 3.2 | ความเครียด          | 56 |
| 3.3 | การบิด              | 57 |
| 3.4 | คาน                 | 59 |
| 3.5 | ภาชนะความดันผนังบาง | 60 |
| 3.6 | เสา                 | 70 |
| 3.7 | คานโค้ง             | 76 |
| 3.8 | เอกสารอ่านประกอบ    | 78 |
|     | แบบฝึกหัด           | 79 |

### บทที่ 4 ความเค้นผสมและทฤษฎีความเสียหาย 84

|     |                                  |    |
|-----|----------------------------------|----|
| 4.1 | ความเค้นผสมในระบบความเค้นสองมิติ | 84 |
| 4.2 | ทฤษฎีความเค้นหลักสูงสุด          | 87 |
| 4.3 | ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด         | 88 |
| 4.4 | ทฤษฎีความเค้นเฉือนออกตะฮ์ครัล    | 89 |
| 4.5 | เอกสารอ่านประกอบ                 | 96 |
|     | แบบฝึกหัด                        | 95 |

### บทที่ 5 การออกแบบสำหรับการแตกหักเนื่องจากความล้า 101

|     |                                          |     |
|-----|------------------------------------------|-----|
| 5.1 | กลไกความล้า                              | 101 |
| 5.2 | ความต้านแรงทนทานและขีดความจำกัดความทนทาน | 102 |
| 5.3 | ตัวประกอบของผิว                          | 105 |
| 5.4 | ตัวประกอบของขนาด                         | 105 |

|      |                                           |     |
|------|-------------------------------------------|-----|
| 5.5  | ตัวประกอบของแรง                           | 105 |
| 5.6  | ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น                  | 106 |
| 5.7  | เกณฑ์ของโชเคอร์เบิร์ก                     | 107 |
| 5.8  | การแตกหักเพราะความล้าเนื่องจากความเค้นผสม | 113 |
| 5.9  | ความต้านแรงชนคิมูอิใช้งานจำกัด            | 117 |
| 5.10 | เอกสารอ่านประกอบ                          | 120 |
|      | แบบฝึกหัด                                 | 121 |

## บทที่ 6 รอยต่อด้วยหมุดย้ำและสลักเกลียว 124

|     |                                                 |     |
|-----|-------------------------------------------------|-----|
| 6.1 | การเสียหายของรอยต่อด้วยหมุดย้ำ                  | 124 |
| 6.2 | ชนิดของรอยต่อด้วยหมุดย้ำ                        | 125 |
| 6.3 | ประสิทธิภาพของรอยต่อด้วยหมุดย้ำ                 | 127 |
| 6.4 | การออกแบบรอยต่อด้วยหมุดย้ำของภาชนะความดัน       | 130 |
| 6.5 | การเชื่อมในรอยต่อสลักเกลียวและการเชื่อมของศูนย์ | 136 |
| 6.6 | ความเค้นผสมในหมุดย้ำและสลักเกลียว               | 138 |
| 6.7 | เอกสารอ่านประกอบ                                | 141 |
|     | แบบฝึกหัด                                       | 142 |

## บทที่ 7 การยึดด้วยสลักเกลียว 148

|     |                                       |     |
|-----|---------------------------------------|-----|
| 7.1 | แบบของเกลียว                          | 148 |
| 7.2 | การให้ชื่อ                            | 150 |
| 7.3 | ชนิดของอุปกรณ์ยึดด้วยเกลียว           | 154 |
| 7.4 | อุปกรณ์ล็อก                           | 157 |
| 7.5 | คุณสมบัติทางกลของสลักเกลียว           | 158 |
| 7.6 | ความเค้นที่รอยต่อด้วยเกลียว           | 160 |
| 7.7 | การหาความสูงแบนเกลียวและความยาวเกลียว | 186 |
| 7.8 | เอกสารอ่านประกอบ                      | 189 |
|     | แบบฝึกหัด                             | 190 |

|                 |                                    |            |
|-----------------|------------------------------------|------------|
| <b>บทที่ 8</b>  | <b>ลิมและสลัก</b>                  | <b>197</b> |
| 8.1             | ชนิดของลิม                         | 197        |
| 8.2             | การให้ชื่อลิม                      | 202        |
| 8.3             | ความเค้นที่รอยต่อด้วยลิม           | 206        |
| 8.4             | ความเค้นที่รอยต่อด้วยสปลายน        | 210        |
| 8.5             | สลัก                               | 215        |
| 8.6             | ความเค้นที่รอยต่อด้วยสลัก          | 219        |
| 8.7             | เอกสารอ่านประกอบ                   | 222        |
|                 | แบบฝึกหัด                          | 224        |
| <b>บทที่ 9</b>  | <b>การออกแบบเพลลา</b>              | <b>228</b> |
| 9.1             | วัสดุเพลลา                         | 229        |
| 9.2             | ขนาดของเพลลา                       | 229        |
| 9.3             | การพิจารณาในการออกแบบ              | 230        |
| 9.4             | การออกแบบเพลลาตามโค้ดของ ASME      | 232        |
| 9.5             | ความแข็งแรงทางด้านการบิด           | 235        |
| 9.6             | การออกแบบเพลลาภายใต้แรงเปลี่ยนแปลง | 238        |
| 9.7             | ความเร็ววิกฤติของเพลลา             | 245        |
| 9.8             | เอกสารอ่านประกอบ                   | 247        |
|                 | แบบฝึกหัด                          | 249        |
| <b>บทที่ 10</b> | <b>สปริง</b>                       | <b>255</b> |
| 10.1            | วัสดุสำหรับลวดสปริง                | 255        |
| 10.2            | คุณสมบัติทางกลของลวดสปริง          | 257        |
| 10.3            | ความเค้นสปริงขดรับแรงกด            | 259        |
| 10.4            | การยืดหดของสปริงขด                 | 262        |
| 10.5            | ความแข็งดิ่งของสปริง               | 263        |
| 10.6            | จำนวนขดทำการ                       | 263        |

|       |                                       |     |
|-------|---------------------------------------|-----|
| 10.7  | ระยะยวบยั้ใช้งาน                      | 264 |
| 10.8  | หลังงานที่เก็บโดยสปริง                | 265 |
| 10.9  | การออกแบบสปริงชดรับแรงกด              | 267 |
| 10.10 | การออกแบบสปริงชดโดยคคคให้แรงอยุ่หนึ่ง | 268 |
| 10.11 | เส้ร้งในสปริง                         | 271 |
| 10.12 | การโก่งงอของสปริงชด                   | 272 |
| 10.13 | การตคกระแทกของว้ตดูบสปริงชด           | 274 |
| 10.14 | การใช้สปริงชดซ้อนกัน                  | 276 |
| 10.15 | การออกแบบสปริงชดคายได้แรงเปล่ยนเปล่ง  | 277 |
| 10.16 | สปริงชดแบบค้ง                         | 280 |
| 10.17 | สปริงชดแบบบคค                         | 282 |
| 10.18 | สปริงแผ่น                             | 284 |
| 10.19 | สปริงแหวน                             | 292 |
| 10.20 | เอคสารอ่านประกอบ                      | 297 |
|       | แบบฝคคค                               | 298 |

SE-ED

inspiration starts here

## บทที่ 11 สกรูส่งกำลัง 304

|       |                                       |     |
|-------|---------------------------------------|-----|
| 11.1  | ค่วจำกัคคววม                          | 306 |
| 11.2  | ชนคคของเกลยวส่วรับสกรูส่งกำลัง        | 307 |
| 11.3  | เกลยวในระบบหน่วยอังกฤษ                | 308 |
| 11.4  | เกลยวส่วเปล่ยมคางหมุตามมาตรฐานไอเอสไอ | 310 |
| 11.5  | การให้ชื้อ                            | 317 |
| 11.6  | โมเมนต์ส่วรับหมุณสกรูส่งกำลัง         | 318 |
| 11.7  | ประลคคภาพของสกรูส่งกำลัง              | 322 |
| 11.8  | การล้คคค่วยตนเอง                      | 323 |
| 11.9  | การออกแบบสกรูส่งกำลัง                 | 327 |
| 11.10 | เอคสารอ่านประกอบ                      | 332 |

แบบฝคคค 333

ภาคผนวก ..... 337

- ก. ตารางการแปลงหน่วย 337
- ข. คุณสมบัติทางกลของโลหะและอโลหะ 341
- ค. สูตรสำเร็จของคานและหน้าตัด 364
- ง. ค่าตัวประกอบความหนาแน่น 370

คำตอบแบบฝึกหัด ..... 381

SE-ED

inspiration starts here

# 1

## บทนำ

เครื่องจักรกลเป็นส่วนประกอบของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ต่ออยู่ด้วยกัน เคลื่อนที่สัมพันธ์กัน และส่งแรงจากแหล่งต้นกำลังเพื่อเอาชนะความต้านทานต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลและใช้ทำงานได้ ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลโดยทั่วไปจะเป็นชิ้นส่วนเกร็ง (rigid) ข้อต่อที่ใช้จะต้องเลือกและจัดให้ทำงานสัมพันธ์กันโดยอาจเปลี่ยนพลังงานรูปอื่นให้อยู่ในรูปพลังงานกลหรืออาจรับพลังงานกลจากแหล่งภายนอกส่งเข้ามา และเปลี่ยนแปลงให้ทำงานได้ในลักษณะที่ต้องการ

การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกี่ยวข้องกับการออกแบบรูปร่าง พื้นฐานทางด้านการคำนวณ และหลักการเลือกใช้วัสดุสำหรับทำชิ้นส่วนตามความเหมาะสม กับการใช้เครื่องจักรกลกับงานลักษณะต่างกัน

การออกแบบเครื่องจักรกลเป็นศิลปะของการพัฒนาทางด้านความคิดใหม่ ๆ ทางด้านเครื่องจักรกล แล้วแสดงความคิดนั้นลงบนกระดาษในรูปของแบบ เครื่องจักรกลใหม่ ๆ เกิดขึ้นได้ก็เพราะความต้องการในการใช้งาน และเกิดจากมโนภาพที่ได้จากบุคคลหลายฝ่าย เช่น ผู้ใช้เครื่องจักรกล ผู้ผลิตเครื่องจักรกล ดังนั้นด้วยผลจากความคิดเห็นต่าง ๆ ทำให้เกิดการคิดแปลงปรับปรุงเครื่องจักรกลอยู่ตลอดเวลา ค้นพบวิธีการแก้ปัญหาต่าง ๆ อย่างมากจนกระทั่งพบวิธีที่ดีที่สุด

สิ่งหนึ่งที่จะขาดเสียมิได้ก็คือศิลปะในการออกแบบ ผู้ออกแบบที่ดีควรมีศิลปะในการออกแบบด้วย ศิลปะการออกแบบอาจอธิบายได้ดังนี้คือ "ผู้ออกแบบใช้ความสามารถในการประยุกต์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์สร้างแบบที่สามารถผลิตได้โดยวิธีการทางวิศวกรรมซึ่งไม่เพียงแต่จะทำงานได้เท่านั้น แต่จะต้องผลิตได้โดยวิธีที่ประหยัดที่สุด และทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพที่สุด"

## 1.1 ปรัชญาของการออกแบบ

ผู้ออกแบบจะเริ่มต้นด้วยการขีดเขียนและสร้างสรรค์แบบใหม่ ๆ ขึ้นมา แม้ว่าในการสร้างเครื่องจักรกลชนิดใหม่ที่ไม่เคยมีใช้มาก่อน จะต้องใช้ความคิดโดยอาศัยพื้นฐานความรู้ต่าง ๆ อาศัยประสบการณ์ และใช้เวลาหรือไม่ก็น้อยก็ตาม ผู้ออกแบบจะได้ผลกำไรจากความชำนาญทางด้านวิศวกรรมและด้านอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นหลายประการ

การออกแบบส่วนมากจะทำตามแบบอย่างที่มีใช้อยู่ในอุตสาหกรรม เช่น เครื่องกลึงรุ่นใหม่มักมีลักษณะคล้ายกับเครื่องกลึงรุ่นเก่า รถยนต์รุ่นใหม่มักคล้ายกับรถยนต์รุ่นเก่า เพียงแต่มีการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงให้ดีขึ้น เพราะมีความรู้มากขึ้น มีประสบการณ์มากขึ้น ในบางครั้งการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงจะทำให้เมื่อต้องการประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อเพิ่มหรือรักษาระดับราคาหรือเพิ่มผลการแข่งขันทางการตลาด

ปรัชญาของการออกแบบงานเฉพาะอย่างขึ้นอยู่กับลักษณะของอุตสาหกรรมหรือชนิดของเครื่องจักรกล การออกแบบในบางครั้งจะมีแบบต่าง ๆ หลายแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าผู้ออกแบบประสงค์จะให้งานออกมาในรูปใด งานออกแบบบางชนิดผู้ออกแบบจะต้องค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงปรัชญาให้เหมาะสมกับธรรมชาติของงานนั้น เช่น เมื่อออกแบบเครื่องบินจะต้องทำด้วยความแม่นยำสูง ระมัดระวังทางด้านความต้านแรงและน้ำหนัก ซึ่งเป็นการออกแบบที่เสียค่าใช้จ่ายสูง เมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบถึงความต้านทานขนาดใหญ่ ผู้ออกแบบไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงความแม่นยำสูงเหมือนกับเครื่องบินหรือไม่ต้องคำนึงถึงน้ำหนัก เป็นต้น

ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้มิได้ตั้งใจจะกล่าวถึงปรัชญาของการออกแบบทั้งหมดในอุตสาหกรรม แต่ประสงค์จะให้เห็นถึงความแตกต่างบางอย่างบางประการ ซึ่งในการออกแบบจริง ๆ แล้ว ควรจะต้องพิจารณาถึงปรัชญาที่เหมาะสมกับงานนั้น ๆ เป็นหลักสำคัญ

## 1.2 พื้นฐานของผู้ออกแบบเครื่องกล

ผู้ออกแบบเครื่องจักรกลที่ดีควรจะต้องมีพื้นฐานความรู้ดังต่อไปนี้เป็นอย่างดี

1. มีพื้นฐานความรู้ทางด้านความแข็งแรงของวัสดุเป็นอย่างดี เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเค้นขึ้นส่วนของเครื่องจักรกลจะต้องแข็งแรง และแข็งแรงเพียงพอที่จะรับแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้
2. มีพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุวิศวกรรมที่ใช้กับเครื่องจักรกลเป็นอย่างดี ทั้งทางด้านโลหะวิทยา กรรมวิธีทางความร้อนต่าง ๆ และติดตามการพัฒนาทางด้านวัสดุอยู่ตลอดเวลา เพื่อจะได้ค้นคว้าวัสดุที่เหมาะสมที่สุดมาใช้

3. มีความรู้ทางด้านการรวมวิธีการผลิตต่าง ๆ หลักเศรษฐศาสตร์ของวิธีการผลิต เพราะชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ผลิตขึ้นจะต้องแข่งขันกันทางด้านราคา บางครั้งการออกแบบชิ้นส่วนขึ้นหนึ่งอาจเหมาะกับโรงงานผลิตแห่งหนึ่ง แต่ไม่เหมาะกับโรงงานผลิตอีกแห่งหนึ่งก็ได้ เช่น โรงงานผลิตที่มีแผนกเชื่อมที่ดี แต่ไม่มีแผนกหล่อ จะพบว่าการผลิตโดยวิธีเชื่อมจะประหยัดที่สุด แต่ในขณะเดียวกันโรงงานอีกแห่งหนึ่งอาจตัดสินใจใช้วิธีหล่อเพราะมีแผนกหล่อที่ดีอยู่ (และอาจมีแผนกเชื่อมหรือไม่ก็ได้)

4. มีความรู้เป็นพิเศษเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ที่จะผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุ เช่น บรรยากาศที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน อุณหภูมิต่าง ๆ หรือสูงมาก ๆ เป็นต้น

5. เตรียมพร้อมสำหรับการตัดสินใจอย่างฉลาดได้ว่า

(ก) ควรเลือกใช้ชิ้นส่วนที่มีจำหน่ายอยู่แล้วหรือต้องการออกแบบใหม่

(ข) ควรใช้สูตรสำเร็จที่ได้จากประสบการณ์ในการออกแบบชิ้นส่วนหรือไม่

(ค) ควรทดสอบชิ้นงานก่อนการผลิตหรือไม่

(ง) ต้องออกแบบเป็นพิเศษเพื่อควบคุมการสั่นสะเทือน ระเบิดเสียงดัง และอื่น ๆ หรือไม่

6. มีความเข้าใจถึงความสวยงามบางประการ ซึ่งจะช่วยให้ผลผลิตดูดีและดึงดูดใจผู้ใช้

7. มีความรู้ทางด้านเศรษฐศาสตร์และการแข่งขันทางด้านราคา เพราะเหตุว่าวิศวกรมีหน้าที่ในการประหยัดเงินของคู่ค้าจ้าง การจะเพิ่มราคาสินค้าได้จะต้องมีการปรับปรุง เปลี่ยนแปลง เช่น เพิ่มสมรรถนะ เพิ่มสิ่งดึงดูดใจ หรือเพิ่มความทนทานให้มากขึ้น

8. มีสัญชาตญาณในการ เป็นนักประดิษฐ์และสร้างสรรค์ สิ่งสำคัญที่สุดก็จะต้องทำให้เกิดประสิทธิผลสูงสุด ความคิดสร้างสรรค์อาจเกิดขึ้นเพราะมีความขยันขันแข็งที่จะแก้ไขสิ่งที่ไม่ถูกใจ และมีความเต็มใจที่จะทำ

ตามปกติแล้วยังมีอีกหลายสิ่งหลายอย่างที่ควรพิจารณาโดยละเอียดอีก เช่น เครื่องจักรกลจะใช้งานได้อย่างปลอดภัยหรือไม่ มีอะไรบ่อนักการไหลเวียนของชิ้นส่วนของผู้ใช้เครื่องจักรหรือไม่ มีการสั่นสะเทือนจนอาจเกิดอันตรายหรือไม่ การประกอบชิ้นส่วนหรือการซ่อมบำรุงทำได้ยากหรือง่าย เป็นต้น

เป็นสิ่งที่แน่นอนที่สุดว่า ไม่มีวิศวกรคนใดที่จะมีความรู้เป็นพิเศษเกี่ยวกับสิ่งที่กล่าวมาแล้วทั้งหมด และตัดสินใจในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้อย่างดีที่สุด องค์กรขนาดใหญ่ขึ้นย่อมจะมีผู้ชำนาญพิเศษในด้านต่าง ๆ มากขึ้นซึ่งจะช่วยให้การเป็นที่ปรึกษาได้อย่างดี วิศวกรส่วนมากจะรู้ขั้นตอนการออกแบบแล้วเป็นอย่างดี และจะดียิ่งขึ้นถ้าได้ใช้บุคคลหลายฝ่ายที่มีความชำนาญพิเศษต่างกันมาร่วมมือกันออกแบบ การออกแบบ

เป็นงานอาชีพอย่างหนึ่งซึ่งมีเสน่ห์ดึงดูดใจผู้ออกแบบ เพราะต้องใช้พื้นฐานความรู้อย่างกว้างขวางทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติ งานวิศวกรรมก็คืองานออกแบบ

### 1.3 ขั้นตอนของการออกแบบ

การออกแบบเป็นกระบวนการที่น่าสนใจมากกว่าควรจะเริ่มต้นอย่างไร ควรจะเริ่มต้นจากกระดาษเปล่าแผ่นหนึ่ง แล้วเริ่มลงมือแสดงความคิดเห็นลงไป ต่อไปจะเกิดอะไรขึ้น มีอะไรบ้างที่เป็นตัวควบคุมหรือมีผลต่อการตัดสินใจ และสุดท้ายงานออกแบบจะสิ้นสุดลงที่ใด ดังนั้นจึงจะกล่าวถึงขั้นตอนในการออกแบบทั่วไปซึ่งงานบางประเภทอาจไม่เป็นไปตามขั้นตอนดังกล่าวนี้ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบและกรรมวิธีในการออกแบบ ดังจะเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพของการออกแบบที่มีวงป้อนกลับ

จากรูปที่ 1.1 สามารถอธิบายรายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

**1. รับรู้ความต้องการ** การออกแบบอาจเริ่มต้นขึ้นจากการที่วิศวกรได้รับรู้ความต้องการ และตัดสินใจที่จะทำอะไรบางอย่างขึ้น หรืออาจได้รับข้อมูลจากลูกค้าที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ใน ด้านการใช้งานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาจเป็นแรงผลักดันให้มีการออกแบบขึ้นได้ การแข่งขันกันทาง ด้านธุรกิจและอุตสาหกรรม ทำให้เกิดความต้องการในการออกแบบอุปกรณ์ กระบวนการ และเครื่อง จักรกลใหม่ ๆ สิ่งสำคัญก็คือ ต้องยอมรับรู้ว่าเกิดความต้องการขึ้นแล้ว ใช้ประสบการณ์พื้นฐานที่มีอยู่ ทำความเข้าใจกับความต้องการนั้นให้ถ่องแท้

**2. ลักษณะจำเพาะ** รวบรวมรายละเอียดของสิ่งที่ต้องการออกแบบให้มากที่สุดเท่าที่จะทำ ได้ ซึ่งอาจประกอบไปด้วย คุณลักษณะ ขนาด ราคา จำนวนที่ต้องการผลิต อายุการใช้งาน อุณหภูมิใช้ งาน ความเชื่อถือได้ และสิ่งที่คาดว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงได้บ้าง เช่น น้ำหนัก ขนาดต่าง ๆ พร้อมทั้ง บางสิ่งบางอย่างที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการออกแบบ เช่น กรรมวิธีการผลิต ความชำนาญของช่าง และ การแข่งขันทางด้านตลาด เป็นต้น การออกแบบบางประเภทต้องทำตามเกณฑ์ (code) เช่น หม้อไอน้ำ ภาชนะความดัน ถ้าจำเป็นจะต้องศึกษาเกณฑ์นั้นให้ทราบถึงสิ่งสำคัญต่างๆ ที่เป็นข้อควรระมัดระวังและ ปฏิบัติตาม

inspiration starts here

**3. ศึกษารายละเอียด** เมื่อได้ลักษณะจำเพาะต่างๆ แล้วขั้นต่อไปก็คือศึกษารายละเอียด ทั้งนี้ก็เพื่อแยกแยะถึงสิ่งที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายหรือความล้มเหลว ทั้งทางด้านเทคนิคและด้าน เศรษฐศาสตร์

โดยปกติแล้วผู้ที่รับผิดชอบในการศึกษารายละเอียดมักจะเป็นวิศวกรที่ผ่านงานออกแบบมาแล้ว อย่างมาก มีพื้นฐานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ต่างๆ เป็นอย่างดี รู้วิธีการเลือกใช้วัสดุ รู้วิธีการผลิต และความต้องการของแผนกขาย ผู้ที่ทำการศึกษารายละเอียดมักจะเป็นผู้รับผิดชอบโครงการทั้งหมด มีบ่อยครั้งที่ผลจากการศึกษารายละเอียดจะทำให้ลักษณะจำเพาะต้องเปลี่ยนไปเพื่อความสำเร็จของโครงการ จึงทำให้มีวงบ้อนกลับไปยังลักษณะจำเพาะดังรูปที่ 1.1

**4. สังเคราะห์ความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบ** เมื่อศึกษารายละเอียดแล้ว ต่อไป ก็จะถึงขั้นการสังเคราะห์ความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ท้าทายและน่าสนใจที่สุดใน

การออกแบบ เพราะถ้าไม่มีสิ่งชี้แจงกักกันใดแล้ว ผู้ออกแบบจะทำหน้าที่เป็นวิศวกร นักประดิษฐ์ และ จิตรกรในเวลาเดียวกัน ซึ่งในขณะนี้เขาจะเป็นนักสร้างสรรค์

การสังเคราะห์คือการวิเคราะห์และทำให้อำนวยประโยชน์ที่สุด ในขั้นนี้จะต้องสังเคราะห์ ความคิดใหม่กับความคิดเก่าเพื่อทำให้เกิดความคิดใหม่ขึ้น ความคิดสร้างสรรค์เป็นสิ่งที่สั่งสอนกันไม่ได้แม้ว่าจะใช้วิธีการกระตุ้นก็ตาม แต่ที่เชื่อได้ว่าการศึกษาที่เหมาะสมทำให้มนุษย์มีกระบวนการคิดสร้างสรรค์กว้างขวางขึ้น

**5. ออกแบบเบื้องต้นและปรับปรุง** หลังจากผ่านกระบวนการสังเคราะห์ความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบแล้ว อาจจะมีวิธีการออกแบบที่เหมาะสมกับลักษณะจำเพาะและความต้องการหลายวิธี จึงจำเป็นที่จะต้องตัดสินใจเลือกเอาวิธีใดวิธีหนึ่งเป็นแบบเบื้องต้นและปรับปรุงต่อไป

ในขั้นนี้จำเป็นต้องมีแบบแสดงเครื่องจักรกลหรือระบบที่มีความเกี่ยวข้องกัน เพื่อหาความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของระบบทั้งหมด แบบควรมีขนาดสำคัญพร้อมทั้งรูปประกอบ รูปด้านข้างอย่างสมบูรณ์ นอกจากนั้นยังต้องพิจารณาทั้งด้านคินematic (kinematic) ของระบบด้วยเพื่อความมั่นใจว่าจะทำงานได้ โดยปกติแล้วในขั้นนี้จะไม่ได้ออกแบบรูป 1.1 จึงต้องมีวงย้อนกลับไปยังลักษณะจำเพาะดังรูปที่ 1.1 เพื่อทำให้มีความสมบูรณ์ครบถ้วน พร้อมกันนั้นก็จะมีการปรับปรุง เพื่อพิสูจน์ให้เห็นถึงแนวความคิด เพื่อหาว่าสิ่งที่คิดสมมติเหมาะสม เพื่อประเมินผลของอุปกรณ์ หรือค้นหาสิ่งที่ยังไม่แน่ชัดจากข้อมูลทางเทคนิค และประสบการณ์ที่ผ่านมา ดังนั้นช่วงการออกแบบเบื้องต้นนี้อาจจะซ้ำหรือเปลี่ยนแปลงไปตามข้อมูลที่ได้ อันที่จริงแล้วการปรับปรุงจะเกิดขึ้นในขั้นตอนต่อไปของแผนภาพในรูปที่ 1.1

**6. ออกแบบรายละเอียด** การออกแบบรายละเอียดเกี่ยวข้องกับขนาดจริง และขนาดของส่วนประกอบอื่น ๆ ทั้งหมดทั้งที่จะผลิตขึ้นเอง หรือผลิตภัณฑ์สำเร็จที่จะซื้อมาใช้ ซึ่งจะประกอบเข้าด้วยกันทั้งหมดเป็นระบบ ดังนั้นจึงต้องมีแบบรายละเอียดของชิ้นส่วนทุกชิ้น แสดงรูปด้านต่าง ๆ แท้ที่จริงโดยต้องกำหนดทั้งขนาด พิกัดความเผื่อไว้ให้ครบถ้วน วัสดุที่ใช้ กรรมวิธีทางความร้อน (ถ้ามี) จำนวนชิ้นส่วน ชื่อชิ้นส่วน และบางครั้งอาจจะต้องใช้แบบประกอบของชิ้นงานสำเร็จด้วย

โดยปกติช่างเขียนแบบจะทำงานไปพร้อมกับวิศวกร เพื่อเขียนแบบที่วิศวกรกำหนดขึ้น วิศวกรจะต้องให้ข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็น เช่น รูปแบบเบื้องต้นที่วิศวกรควรร่างขึ้นมาก่อน จะต้องให้ขนาด ชนิดของวัสดุโดยใช้เทคนิคในการวิเคราะห์และประสบการณ์ที่ผ่านมา ซึ่งหมายความว่าวิศวกรต้องใช้พื้นฐาน

ทางคณิตศาสตร์ กลศาสตร์ ความแข็งแรงของวัสดุ กลศาสตร์ของไหล การสั่นสะเทือน โลหะวิทยา กระบวนการผลิต โดยที่วิศวกรอาจจะหาผู้ช่วยที่มีความชำนาญพิเศษเฉพาะสาขามาช่วยได้

7. **สร้างต้นแบบและทดสอบ** หลังจากที่มีรายละเอียดต่าง ๆ สมบูรณ์ มีแบบแยกชิ้น แบบประกอบ รวมทั้งวัสดุและรายการชิ้นส่วนต่าง ๆ แล้ว จึงส่งแบบที่สมบูรณ์ทั้งหมดไปยังโรงงานเพื่อสร้างต้นแบบ

เมื่อสร้างต้นแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วก็เตรียมประเมินผลและทดสอบ ผลจากการทดสอบอาจทำให้ต้องเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงการออกแบบเบื้องต้น หรือแบบรายละเอียดบางประการ ซึ่งแสดงไว้เป็นวงบ่อนกลับในรูปที่ 1.1 หลังการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงชิ้นส่วนบางชิ้นแล้วจะทดสอบและประเมินผลใหม่อีกครั้ง หรืออาจต้องทำอีกหลายครั้ง จนกระทั่งวิศวกรผู้ออกแบบพึงพอใจที่งานของเขามีสมรรถนะตามต้องการ เมื่อถึงขั้นนี้แล้วจะส่งแบบชิ้นส่วนและรายการวัสดุไปยังแผนกวิศวกรรมการผลิตเพื่อปรับปรุงให้เหมาะสมกับการผลิตต่อไป

8. **ออกแบบสำหรับผลิต** ในขั้นนี้จะพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงบางอย่างเพื่อความเหมาะสม (โดยมากจะพิจารณาจากหลักเศรษฐศาสตร์) ของวิธีการผลิตที่ดีที่สุด เนื่องจากการผลิตชิ้นงานน้อยชิ้นกับชิ้นงานมากขึ้นอาจต้องใช้วิธีการผลิตต่างกัน จึงต้องหาวิธีการผลิตที่ประหยัดที่สุด

บางครั้งอาจรวมชิ้นงานหลายชิ้นเข้าเป็นชิ้นเดียวกัน หรือเปลี่ยนใช้ชิ้นส่วนที่มีในท้องตลาดแทน อีกประการหนึ่งวิศวกรการผลิตอาจเลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพใกล้เคียงกันแต่ราคาถูกกว่าก็ได้ จากนั้นจึงเขียนแบบแก้ไขใหม่ให้เรียบร้อยแล้วจึงส่งฝ่ายผลิต เพื่อผลิตและส่งผลิตภัณฑ์ออกจำหน่าย

9. **ส่งผลิตภัณฑ์ออก** โดยปกติมักจะผลิตชิ้นงานต้นแบบแล้วทดสอบอีกครั้งหนึ่ง ถ้ามีข้อหาที่แก้ไขไม่ได้ก็จะส่งกลับไปยังแผนกออกแบบเบื้องต้นและปรับปรุง หรืออาจเสนอแนะข้อคิดเห็นไปได้ดังที่ได้แสดงโดยวงบ่อนกลับในรูปที่ 1.1

สิ่งที่กล่าวมาทั้งหมดอาจไม่สมบูรณ์ทางด้านรายละเอียดต่าง ๆ หรืออาจจะใช้ได้กับกระบวนการผลิตบางอย่าง บางระบบเท่านั้น เพราะการที่จะรู้รายละเอียดถึงกรรมวิธีการออกแบบในงานต่าง ๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาและเข้าไปมีส่วนร่วมในงานนั้น ๆ

## 1.4 ระบบของหน่วย

ในการวิเคราะห์ระบบของหน่วยจะทำให้สะดวกเมื่อพิจารณาถึงกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งกล่าวไว้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของวัตถุเป็นสัดส่วนกับแรงที่กระทำในแนวแรง และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$F = ma \quad (1.1)$$

สมการนี้ใช้ประโยชน์ในการศึกษามาตรฐานของระบบหน่วย ถ้าให้  $F$  แทนแรง  $M$  แทนมวล  $L$  แทนความยาว และ  $T$  แทนเวลา จะเห็นได้ว่าความเร่ง  $a$  มีหน่วยเป็น  $L/T^2$  เมื่อแทนหน่วยแรง มวล และความเร่งลงในสมการที่ (1.1) จะได้

$$F = \frac{ML}{T^2} \quad (1.2)$$

สมการที่ (1.2) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยทั้งสี่คือ แรง มวล ความยาว และเวลา หน่วยสามหน่วยอาจเลือกกันอย่างไรก็ได้ แต่หน่วยที่สี่จะขึ้นอยู่กับหน่วยสามหน่วยที่เลือกมาแล้วตามสมการที่ (1.2) หน่วยที่เลือกมาเรียกว่าหน่วยมูลฐาน หน่วยที่สี่เรียกว่าหน่วยอนุพันธ์

ถ้าเลือกแรง ความยาว และเวลา เป็นหน่วยมูลฐาน มวลก็จะเป็นหน่วยอนุพันธ์ ระบบของหน่วยที่ได้เรียกว่า ระบบหน่วยโน้มถ่วง (gravitational system of units)

ถ้าเลือกมวล ความยาว และเวลา เป็นหน่วยมูลฐาน แรงก็จะเป็นหน่วยอนุพันธ์ ระบบของหน่วยที่ได้เรียกว่า ระบบหน่วยสัมบูรณ์ (absolute system of units)

หน่วยอังกฤษที่มักใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นระบบหน่วยโน้มถ่วง หรือที่นิยมเรียกกันสั้น ๆ ว่าระบบ FPS (foot-pound-second) ในระบบหน่วยอังกฤษกำหนดให้แรงเป็นปอนด์ (lb) ความยาวเป็นฟุต (ft) และเวลาเป็นวินาที (s) จากสมการที่ (1.2) จะได้มวลมีหน่วยเป็น

$$M = \frac{FT^2}{L} = \frac{(lb)(s^2)}{ft} = \text{slug}$$

สำหรับหน่วยที่จะใช้ในการเรียนวิชานั้นส่วนมากจะเป็นระบบหน่วยระหว่างประเทศ หรือที่เรียกกันว่าระบบหน่วยเอสไอ (SI Units) ซึ่งเป็นระบบหน่วยสัมบูรณ์ ระบบหน่วยเอสไอนี้เกิดขึ้นจากการประชุมใหญ่แห่งมาตรราชั้ ดวง วัด ระหว่างประเทศครั้งที่ 11 ในปี พ.ศ. 2503 (ชื่อเต็มของระบบหน่วยคือ

Le Système International d'Unités) โดยตกลงให้ใช้มวลเป็นกิโลกรัม(kg) ความยาวเป็นเมตร(m) และเวลาเป็นวินาที(s) ส่วนหน่วยของแรงคือ

$$F = \frac{ML}{T^2} = \frac{(kg)(m)}{s^2} = N$$

ซึ่งใช้ชื่อเรียกว่านิวตัน(N)

สำหรับหน่วยอนุพันธ์อื่น ๆ ที่ใช้กันมากในวิชาการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1.1 สำหรับหน่วย  $N/m^2$  มีชื่อเรียกโดยเฉพาะว่าปาสกาล(Pascal ย่อว่า Pa) โดยปกติแล้วความเค้น(stress) ในวัสดุจะนิยมใช้หน่วยดั้งเดิมคือนิวตันต่อตารางเมตร( $N/m^2$ ) แต่ความดันที่เกิดจากของเหลวหรือก๊าซ ซึ่งมีหน่วยเดียวกันมักจะเรียกปาสกาล เช่น ความดันในหม้อไอน้ำ เป็นต้น

ตารางที่ 1.1 ระบบหน่วยเอสไอและสัญลักษณ์

| ปริมาณ                               | ชื่อหน่วย                | สัญลักษณ์ | นิยาม            |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------|------------------|
| ความยาว                              | เมตร                     | m         | -                |
| มวล                                  | กิโลกรัม                 | kg        | -                |
| เวลา                                 | วินาที                   | s         | -                |
| อุณหภูมิทางเทอร์โมไดนามิก            | เคลวิน                   | K         | -                |
| มุมเชิงระนาบ                         | เรเดียน                  | rad       | -                |
| ความเร่ง                             | เมตรต่อวินาทีกำลังสอง    | -         | $m/s^2$          |
| ความเร็วเชิงมุม                      | เรเดียนต่อวินาที         | -         | rad/s            |
| ความเร่งเชิงมุม                      | เรเดียนต่อวินาทีกำลังสอง | -         | $rad/s^2$        |
| พื้นที่                              | ตารางเมตร                | -         | $m^2$            |
| ความหนาแน่น                          | กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร  | -         | $kg/m^3$         |
| พลังงาน                              | จูล                      | J         | Nm               |
| แรง                                  | นิวตัน                   | N         | $kg \cdot m/s^2$ |
| ความถี่                              | เฮิรตซ์                  | Hz        | (cycle)/s        |
| กำลัง                                | วัตต์                    | W         | J/s              |
| ความดัน                              | ปาสกาล                   | Pa        | $N/m^2$          |
| ปริมาณความร้อน                       | จูล                      | J         | -                |
| ความร้อนจำเพาะ                       | จูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน    | -         | J/kg·K           |
| ความเค้น                             | นิวตันต่อตารางเมตร       | -         | $N/m^2$          |
| การนำความร้อน                        | วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน      | -         | W/m·K            |
| ความเร็วเชิงเส้น                     | เมตรต่อวินาที            | -         | m/s              |
| ความหนืดพลวัต<br>(dynamic viscosity) | ปาสกาล-วินาที            | Pa·s      | $Ns/m^2$         |

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) ระบบหน่วยเอสไอและสัญลักษณ์

| ปริมาณ            | ชื่อหน่วย          | สัญลักษณ์ | นิยาม                   |
|-------------------|--------------------|-----------|-------------------------|
| ความหนืดคิเนมาติก | ตารางเมตรต่อวินาที | -         | $\text{m}^2/\text{s}$   |
| ปริมาตร           | ลูกบาศก์เมตร       | -         | $\text{m}^3$            |
| งาน               | จูล                | J         | $\text{N}\cdot\text{m}$ |

การใช้หน่วยพื้นฐานดังกล่าวมาแล้วในการคำนวณ อาจเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเขียนตัวเลขที่มีค่าน้อยหรือค่ามากจนเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้จึงมีการใช้อุปสรรค(prefix) เพิ่มข้างหน้าหน่วยอุปสรรคนั้นนิยมใช้เฉพาะที่เป็นผลคูณของ  $10^3$  เท่านั้น และมีชื่อเรียกต่างกันดังในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 อุปสรรคที่ใช้เติมหน้าหน่วย

| ตัวคูณ     | อุปสรรค      | ตัวย่อ |
|------------|--------------|--------|
| $10^{12}$  | เทอร่า(tera) | T      |
| $10^9$     | กิก้า(giga)  | G      |
| $10^6$     | เมก้า(mega)  | M      |
| $10^3$     | กิโล(kilo)   | k      |
| $10^{-3}$  | มิลลิ(milli) | m      |
| $10^{-6}$  | ไมโคร(micro) | $\mu$  |
| $10^{-9}$  | นาโน(nano)   | n      |
| $10^{-12}$ | พิโก(pico)   | p      |

ตัวอย่างเช่น ความเค้น  $10^6 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ MN/m}^2$

ในระบบหน่วยเอสไอนี้ มวล 1 kg จึงมีค่าเท่ากับแรง

$$\begin{aligned} w &= mg \\ &= (1 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2) \\ &= 9.81 \text{ N} \end{aligned}$$

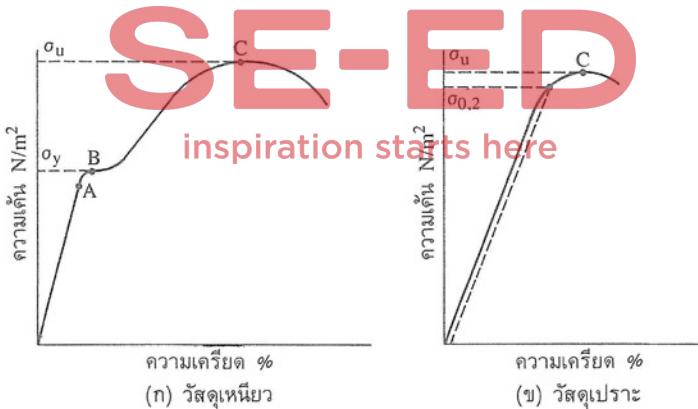
เนื่องจากข้อมูลสำหรับประกอบการแก้ปัญหาจำนวนมากยังอยู่ในระบบหน่วยอังกฤษ ทำให้เกิดความจำเป็นในการเปลี่ยนหน่วยมาเป็นระบบหน่วยเอสไอ และในบางครั้งมาตรฐานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่

ประกอบในการเลือกใช้ก็ยังมีได้จัดทำขึ้นใหม่ จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ตามมาตรฐานเดิมซึ่งเป็นระบบหน่วยอื่น ฉะนั้นเพื่อความสะดวกจึงให้ค่าเพื่อใช้สำหรับการเปลี่ยนหน่วยและหน่วยที่ใช้ไว้ในตารางที่ ก.1

## 1.5 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจะต้องคำนวณหาขนาดของชิ้นส่วนต่างๆ โดยคำนึงถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุเป็นสำคัญ ซึ่งจะพบว่าชื่อเรียกต่างๆ อยู่มาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไปจึงจะได้นิยามความหมายของชื่อต่างๆ ไว้พอสังเขปดังต่อไปนี้

ความต้านทานแรงดึงอัลติเมต (ultimate tensile strength),  $\sigma_u$  เป็นความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะรับได้ ซึ่งคำนวณได้จากภาระน้ำหนักที่ใช้ดึงวัสดุตัวอย่างหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเดิม และแทนด้วยจุด C บนกราฟความเค้น-ความเครียดในรูปที่ 1.2 ในบางครั้งอาจเรียกให้สั้นลงได้ว่าความต้านแรงดึง (tensile strength)



รูปที่ 1.2 แผนภาพความเค้น-ความเครียด

ขีดจำกัดความเป็นสัดส่วน (proportional limit) เป็นค่าความเค้นค่าสุดท้ายที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดดังจุด A ในรูปที่ 1.2(n) เมื่อพ้นจุดนี้ไปแล้วกราฟจะเป็นเส้นโค้ง ในทางปฏิบัติจะหาจุดนี้ยากมาก ฉะนั้นในการคำนวณจึงนิยมใช้ความต้านแรงดึงคราก (yield strength) แทน

ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit) อยู่ระหว่างจุด A และ B ในรูปที่ 1.2(n) เป็นจุดสุดท้ายที่เมื่อเอาแรงภายนอกออกแล้วชิ้นตัวอย่างทดสอบจะกลับมามีขนาดเท่าเดิม กราฟในช่วง AB นี้จะมีความโค้งเล็กน้อย

**ความต้านแรงดึงคราก (yield strength),  $\sigma_y$**  เป็นจุดที่ชิ้นทดสอบยืดออกได้มากโดยที่เพิ่มแรงอีกเล็กน้อยเท่านั้น (หรือไม่ได้เพิ่ม) ซึ่งแทนด้วยจุด B หรือเรียกว่าจุดคราก ความเค้นที่จุดนี้ถือเป็นหลักในการออกแบบทั่วไป สำหรับวัสดุที่ไม่มีจุดคราก เช่น เหล็กหล่อ ก็อาจใช้ความต้านแรงดึงเป็นหลักในการออกแบบหรืออาจจะหาความเค้นที่เรียกว่า ความเค้นที่จุดยืดยาว (proof stress) มาใช้แทนความต้านแรงดึงคราก โดยการลากเส้นขนานกับส่วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟตามเปอร์เซ็นต์ของความเครียดที่ต้องการดังรูปที่ 1.2(ข) โดยทั่วไปแล้วมักจะใช้ 0.2% และเพื่อแสดงความแตกต่างระหว่างความเค้นที่จุดยืดยาวกับความต้านแรงดึงคราก จึงใช้สัญลักษณ์แทนความเค้นที่จุดยืดยาว 0.2% ว่า  $\sigma_{0.2}$  หรืออาจเรียกสั้น ๆ ว่าความเค้นพิสูจน์ 0.2%

**ยังส์โมดูลัส (Young's modulus) หรือโมดูลัสความยืดหยุ่น(modulus of elasticity)** เป็นอัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดในส่วนที่กราฟเป็นเส้นตรง

**โมดูลัสเฉือน (shear modulus) หรือโมดูลัสความแข็งแกร่ง(modulus of rigidity)** ในการทดสอบชิ้นส่วนโดยใช้แรงเฉือนแล้ว เขียนกราฟระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress) กับความเครียดเฉือน (shear strain) ก็จะได้อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนต่อความเครียดเฉือนในส่วนที่กราฟเป็นเส้นตรงเรียกว่า โมดูลัสเฉือน

จากที่กล่าวมาเบื้องต้นนี้ เป็นเพียงแต่คุณสมบัติทางกลที่สำคัญต่อการออกแบบซึ่งผู้อ่านได้ทราบมาแล้วจากการศึกษาวิชาความแข็งแรงของวัสดุ หรือวิชากลศาสตร์วัสดุ ตารางที่ ข.1 ถึงตารางที่ ข. 16 ในภาคผนวก แสดงคุณสมบัติทางกลของวัสดุชนิดต่าง ๆ ซึ่งจะได้นำมาใช้ประกอบการคำนวณออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ต่อไปโดยที่หน่วยความเค้นเป็นกิปส์ต่อตารางนิ้ว (ksi : kips/in<sup>2</sup>) ในการใช้คำนวณในระบบหน่วยเอสไอให้ทำการแปลงหน่วยดังนี้

$$1 \text{ ksi} = 6.895 \text{ MN/m}^2 \text{ หรือ } \text{N/mm}^2$$

คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ความต้านแรงเฉือนคราก(yield strength in shear) ซึ่งใช้ในการออกแบบเสมอ แต่มิได้ให้ไว้ในตารางดังที่กล่าวมาแล้ว แต่อย่างไรก็ตามให้ใช้ค่าประมาณจากตารางได้ดังนี้

$$\tau_y = 0.6\sigma_y \quad (1.3)$$

## 1.6 ค่าความปลอดภัย

โดยทั่วไปแล้วค่าความปลอดภัยหมายถึง ตัวเลขที่นำไปหารค่าความต้านแรงดึงหรือความต้านแรงดึงครากของวัสดุ เพื่อให้ได้ความเค้นใช้งาน(working stress) ในชิ้นส่วนที่กำลังออกแบบ ซึ่งเรียกสั้น ๆ ว่า ความเค้นออกแบบ(design stress) หรือความเค้นใช้งาน ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าชนิดหนึ่งมีความต้านแรงดึง และความต้านแรงดึงครากเท่ากับ  $700 \text{ MN/m}^2$  และ  $420 \text{ MN/m}^2$  ตามลำดับ และในการออกแบบชิ้นงานหนึ่งโดยใช้เหล็กกล้าชนิดนี้ ผู้ออกแบบคิดว่าตามลักษณะการใช้งานแล้วความเค้นใช้งานควรจะไม่เกิน  $140 \text{ MN/m}^2$  ฉะนั้นค่าความปลอดภัยเมื่อถือความต้านแรงดึงเป็นหลักคือ

$$N_u = \frac{700}{140} = 5$$

และค่าความปลอดภัยเมื่อถือความต้านแรงดึงครากเป็นหลักคือ

$$N_y = \frac{420}{140} = 3$$

ในกรณีที่ได้มีการกำหนดขนาดของชิ้นงานมาแล้ว ค่าความปลอดภัยของชิ้นงานนั้นคือ

$$N_u = \frac{\text{ความต้านแรงดึง}}{\text{ความเค้นที่คำนวณได้}}$$

$$N_y = \frac{\text{ความต้านแรงดึงคราก}}{\text{ความเค้นที่คำนวณได้}}$$

สำหรับปัญหาที่ไม่เป็นแบบเชิงเส้น (nonlinear) เช่น ท่อโลหะ หรือเสาที่อาจจะเสียหายเนื่องมาจากการโก่งงอ จะต้องใช้ค่าความปลอดภัยกับแรงที่กระทำโดยตรงแทนที่จะใช้กับความเค้น ทั้งนี้เพราะในปัญหาแบบไม่ใช่เชิงเส้น ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานอาจจะมิได้แปรผันโดยตรงกับแรง ในกรณีเช่นนี้

$$N = \frac{\text{แรงที่ทำให้แตกหัก}}{\text{แรงที่ใช้ออกแบบ}}$$

ค่าความปลอดภัยที่จะเลือกใช้ขึ้นอยู่กับตัวประกอบจำนวนมากดังนี้

- (ก) ชนิดของแรงที่กระทำต่อชิ้นงานว่าเป็นแรงที่จัดอยู่ในประเภทอยู่หนึ่ง หรือเปลี่ยนแปลงขนาดอยู่ตลอดเวลาขณะใช้งาน
- (ข) ลักษณะการใช้งานของชิ้นงานว่าเกี่ยวข้องกับการที่อาจจะสูญเสียชีวิต หรือทรัพย์สินจำนวนมากหรือไม่

(ค) น้ำหนักของชิ้นงานว่ามีความจำเป็นที่จะต้องเบาที่สุดหรือไม่ เช่น ชิ้นส่วนสำหรับเครื่องบิน เป็นต้น ในกรณีเช่นนี้การใช้ค่าความปลอดภัยจะต้องพิจารณาอย่างละเอียดเป็นพิเศษ

(ง) จำนวนของชิ้นงานที่จะผลิตออกมา ถ้าผลิตครั้งละมาก ๆ ควรระมัดระวังในการใช้ค่าความปลอดภัยที่ไม่สูงจนเกินไป ทั้งนี้เพื่อให้ประหยัดวัสดุได้มากที่สุด

(จ) วัสดุที่ผลิตออกมาอาจไม่สม่ำเสมอ ทำให้ความสามารถในการรับแรงต่างกัน

สำหรับผู้ที่มีความชำนาญในการออกแบบน้อย ก็อาจจะใช้ค่าที่แนะนำไว้ในตารางที่ 1.3 เป็นแนวทางในการคำนวณออกแบบได้

ตารางที่ 1.3 ค่าความปลอดภัย

| ชนิดของแรง                                 | เหล็กเหนียวและโลหะเหนียว |       | เหล็กหล่อและโลหะเปราะ |
|--------------------------------------------|--------------------------|-------|-----------------------|
|                                            | $N_y$                    | $N_u$ | $N_u$                 |
| แรงอยู่นิ่ง                                | 1.5-2                    | 3-4   | 5-6                   |
| แรงซ้ำทิศทางเดียวหรือ<br>แรงกระแทกเล็กน้อย | 3                        | 6     | 7-8                   |
| แรงซ้ำสองทิศทางหรือ<br>แรงกระแทกเล็กน้อย   | 4                        | 8     | 10-12                 |
| แรงกระแทกอย่างหนัก                         | 5-7                      | 10-15 | 15-20                 |

ค่าความปลอดภัยสำหรับแรงซ้ำทิศทางเดียว (repeated, one direction) หรือแรงซ้ำสองทิศทาง (repeated and reversed) ที่ให้ไว้ในตารางที่ 1.3 หมายถึงค่าความปลอดภัยที่จะนำไปใช้เมื่อสมมติให้เป็นแรงนิ่ง (dead load) ในขณะออกแบบสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาโดยคิดละเอียดลงไปถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรง และความทนของวัสดุต่อแรงที่เปลี่ยนอยู่เสมอนี้จะใช้ค่าความปลอดภัยแตกต่างกัน วิธีการวิเคราะห์ปัญหาในลักษณะนี้จะได้กล่าวถึงในบทที่ 5 ต่อไป

## 1.7 เอกสารอ้างอิง

1. มอก. 235, มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปริมาณ และหน่วยต่างๆ ทางกายภาพ, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
2. A.D.DEUTSCHMAN, W.J.MICHELIS and C.E.WILSON, "Machine Design Theory and Practice," Macmillan Publishing Co., Inc., 1975.

3. G.NIEMANN, "Machine Elements," Vol.1, Springer-Verlag, Berlin, 1978.
4. J.E.SHIGLELY, "Mechanical Engineering Design," 3<sup>rd</sup> Ed., McGraw-Hill, Inc., 1977.
5. V.M.Faires, "Design of Machine Elements," 4<sup>th</sup> Ed., Macmillan Company, New York, 1965.

**SE-ED**  
inspiration starts here

# 2

## คุณสมบัติทางโลหะวิทยาของวัสดุวิศวกรรม

ในบทนี้จะกล่าวถึงโลหะ อโลหะ พื้นฐานของกระบวนการทางความร้อน(heat treatment) ทางด้านการออกแบบ เพื่อให้มีความคุ้นเคยกับคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ที่สำคัญ ซึ่งจะเป็นผลต่อการคำนวณความแข็งแรงและขนาดของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล

การเลือกใช้วัสดุอาจอาศัยแนวทางได้จากงานที่ผ่านมาแล้ว แต่วิศวกรก็มีโอกาสที่จะเลือกใช้วัสดุชนิดอื่น ๆ ที่เห็นว่าเหมาะสมได้เช่นกัน วัสดุที่ดีที่สุดคือวัสดุที่ควรจะใช้งานได้อย่างดีตามความประสงค์และมีราคาต้นทุนในการผลิตถูกที่สุด อย่างไรก็ตามวัสดุที่ดีที่สุดไม่จำเป็นจะต้องเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายเสมอไป บางครั้งวัสดุที่ผลิตขึ้นเป็นพิเศษอาจจะใช้งานได้ดีกว่าวัสดุที่หาง่ายก็เป็นได้ ดังนั้นวิศวกรจึงควรจะมีพื้นฐานความรู้อย่างกว้างขวาง เพื่อใช้ประกอบในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุวิศวกรรมที่เหมาะสมที่สุด

### 2.1 นิยาม

เพื่อความสะดวกในการอ้างอิงต่อไป จึงจะรวบรวมคำนิยามและชื่อเรียกบางชื่อที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุและกรรมวิธีความร้อนอย่างย่อ ๆ ดังต่อไปนี้

1. การขึ้นรูปเย็น (cold working) เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะอย่างถาวรที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิที่โลหะเป็นผลึก(recrystallization temperature) ซึ่งทำให้โลหะแข็งขึ้นเนื่องจากความเครียด(strain hardening) ในทางปฏิบัติมักนิยมใช้เหล็กรีดเย็นเนื่องจากมีความแข็งแรง ตกสิ่งได้ง่าย มีผิวสำเร็จดี แต่มีความเหนียวน้อยกว่าเหล็กที่รีดร้อน

2. การชุบ (quenching) เป็นการลดอุณหภูมิของโลหะที่มีอุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว โดยนำโลหะนั้นไปลงในตัวกลางที่ใช้ชุบ เช่น น้ำ น้ำมัน หรืออากาศ เพื่อเพิ่มความแข็งของโลหะ

3. การบ่มหรือการบ่มแข็ง (aging หรือ age hardening) เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของโลหะจากสภาวะที่ไม่เสถียร (unstable) อันเนื่องมาจากการชุบหรือการขึ้นรูปเย็นให้เป็นโครงสร้างที่เสถียร การเปลี่ยนโครงสร้างเกิดขึ้นเนื่องจากการแตกตัวของสารละลายของแข็งอิ่มตัว (saturated solid solution) ทำให้โลหะแข็งขึ้น แข็งแรงขึ้นแต่ความเหนียวลดลง การบ่มจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งอาจจะเร่งให้เกิดเร็วขึ้นได้ถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นกว่าอุณหภูมิห้องเล็กน้อย

4. การสูญเสียคาร์บอน (decarburization) เป็นการที่เหล็กกล้าสูญเสียคาร์บอนที่ผิวไปในระหว่างการรีดร้อน (hot rolled) การตีอัด (forging) และกรรมวิธีทางความร้อน (heat treatment) เนื่องจากสารที่อยู่รอบๆ ทำปฏิกิริยากับคาร์บอน

5. ความยืดหยุ่น (elasticity) เป็นความสามารถของวัสดุที่จะบิดแล้วกลับคืนสู่สภาพเดิมได้

6. ความอ่อน (malleability) เป็นคุณสมบัติของโลหะที่เปลี่ยนรูปได้มากขณะรีดหรือตีอัด ถ้าโลหะมีความอ่อนมากจะทำให้เป็นแผ่นได้บางมาก (ขณะเย็น) เช่น ทองคำ อะลูมิเนียม มีความอ่อนมาก

7. ความเหนียว (ductility) เป็นคุณสมบัติของโลหะที่เกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรก่อนการแตกหักเนื่องจากแรงดึง ความเหนียวไม่มีวิธีการวัดโดยตรง แต่วิธีการวัดเปอร์เซ็นต์ความเหนียวและเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัด ซึ่งใช้เป็นตัวชี้ในการวัดความเหนียว ถ้ามีค่ามากก็หมายความว่าเหนียวมาก ความเหนียวตรงกันข้ามกับความเปราะ (brittleness) แต่ไม่มีการแบ่งอย่างแน่นอน ดังนั้นเพื่อผลจากการนิยามจึงมักจะสมมติว่าถ้าวัสดุนั้นมาทดสอบแรงดึงโดยให้ชิ้นทดสอบยาว 50 mm เมื่อดึงแล้วยืดได้มากกว่า 5% จะจัดให้เป็นวัสดุเหนียว แต่ถ้ายืดได้น้อยกว่า 5% จะเป็นวัสดุเปราะ

8. ความเหนียวนุ่ม (toughness) เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถรับพลังงานและเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรได้ก่อนแตกหัก วัสดุที่มีความเหนียวนุ่มดีจะรับแรงกระตุกหรือแรงกระแทกได้ดี

**9. ความแข็ง (hardness)** เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ต้านทานต่อการทะลุผ่าน การขูดขีด และทนต่อการสึกหรอ ซึ่งมักจะบอกค่าเป็นตัวเลขนตามวิธีการทดสอบความแข็ง เช่น บรินเนลล์(Brinell, HB) ร็อกเวลล์(Rockwell, HR) วิกเกอร์ส(Vickers, HV) เป็นต้น ความแข็งมีหน่วยเช่นเดียวกับความเค้นคือ แรงต่อหน่วยพื้นที่ การปฏิบัติต่าง ๆ เช่น ชันรูปเย็น ชุบ และเหมเปอร์(temper) จะทำให้ความแข็งของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป

**10. ความแข็งเกร็ง (stiffness)** เป็นความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ ซึ่งวัดได้โดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นในช่วงยืดหยุ่น ถ้าวัสดุใดมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงแสดงว่าวัสดุนั้นมีความแข็งเกร็งสูง

**11. คาร์บอนอิสระ (free carbon)** เป็นคาร์บอนที่ปนอยู่ในเหล็กหรือเหล็กกล้าในรูปของแกรไฟต์หรือเหมเปอร์คาร์บอน(temper carbon)

**12. คิลล์สตีล (killed steel)** เป็นเหล็กกล้าที่ผ่านการลดยอกซิเจนในเนื้อเหล็ก โดยใช้สารลดออกซิเจน เช่น ฟอสฟอรัส หรืออะลูมิเนียม เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนอิสระระหว่างที่โลหะเหลวกำลังแข็งตัว โลหะคิลล์สตีลจะมีคุณภาพดี มีรูอากาศน้อย เนื้อเป็นเอกพันธ์ (homogeneous) ดีกว่าเหล็กที่ไม่ใช่คิลล์สตีล หรือรีมส์สตีล(rimmed steel) มีคุณสมบัติที่เหมาะสมแก่การนำไปตีขึ้นรูปหรือรีดขึ้นรูป

**13. ชุบแข็ง (hardening)** เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่เหล็กกล้า จนมีอุณหภูมิเหนือช่วงเปลี่ยนแปลง แล้วจุ่มลงในของเหลวเพื่อเพิ่มความแข็งให้กับเหล็กกล้า

**14. ช่วงเปลี่ยนแปลง (transformation range)** เป็นช่วงอุณหภูมิที่โครงสร้างของโลหะเกิดออสไตน์(austenite) ขึ้นขณะที่ให้ความร้อนกับโลหะ และยังหมายถึงช่วงอุณหภูมิที่ออสไตน์ทั้งหมดไปขณะลดความร้อน ดังนั้นโลหะใด ๆ จึงมีช่วงเปลี่ยนแปลงอยู่สองช่วง ซึ่งอาจคาบเกี่ยวกันอยู่บ้าง แต่จะไม่ทับพอกัน ช่วงในขณะให้ความร้อนจะสูงกว่าช่วงขณะลดความร้อน

**15. ความสามารถตัดคลึงได้ (machinability)** เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของโลหะที่ตัดคลึงได้ง่าย

16. เเทมเปอร์ริง (tempering) หรือเทมเปอร์ (tempered) หรือการอบคืนตัว เป็นกระบวนการเผาเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งหรือนอร์มัลไลซิง (normalizing) มาแล้วให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงเปลี่ยนแปลง แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงในอัตราต่าง ๆ กัน ทั้งนี้เพื่อลดความเค้นภายใน (stress relief) เพื่อให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น และปรับปรุงความเหนียวนุ่ม เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการทำเทมเปอร์ขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะให้เหล็กกล้ามีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน

17. นอร์มัลไลซิง (normalizing) หรือการอบปรับตัวปกติ เป็นกระบวนการทำให้โลหะอ่อนโดยให้ความร้อนกับเหล็กกล้าจนมีอุณหภูมิเหนือช่วงเปลี่ยนแปลงประมาณ  $38^{\circ}\text{C}$  แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อให้เหล็กกล้ามีโครงสร้างของโมเลกุลสม่ำเสมอ ทำให้ได้เกรน (grain) มีขนาดเล็ก และไม่มี ความเค้นภายใน นอร์มัลไลซิงมีความสำคัญต่อเหล็กกล้าที่ผ่านการตีอัดขึ้นรูป ในบางครั้งวัสดุบางชนิดเมื่อทำนอร์มัลไลซิงแล้วอาจไม่ทำให้เหล็กกล้าอ่อนเพียงพอที่จะตัดกลึงได้จึงต้องทำแอนนิลลิ่ง (annealing) อีกครั้งหนึ่งหลังจากทำนอร์มัลไลซิง กรรมวิธีเช่นนี้เรียกว่า ดับเบิลแอนนิล (double anneal) ซึ่งได้ผลดีกว่าทำแอนนิลแบบธรรมดา

18. พลาสติกซิตี้ (plasticity) เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ตรงข้ามกับความยืดหยุ่น ถ้าวัสดุเปลี่ยนรูปร่างอย่างพลาสติกจะไม่กลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้อีก

19. ริมมัสตีล (rimmed steel) เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ปล่อยออกซิเจนออกไม่หมด แท่งเหล็กชนิดนี้จะมีผิวเรียบตั้งแต่แกนกลางจะมีรูอากาศ ซึ่งจะหมดไปได้เมื่อนำไปรีดเป็นแผ่นและเป็นเส้น

20. แอนนิลลิ่ง (annealing) หรือการอบเหนียว เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่โลหะ แล้วค่อยๆ ปล่อยให้เย็นลงเพื่อทำให้โลหะอ่อนตัว วัตถุประสงค์ก็อย่างหนึ่งก็คือลดความเค้น เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลใหม่ และไล่ก๊าซภายในเนื้อโลหะ

## 2.2 เหล็กเหนียว

เหล็กเหนียว (wrought iron) ประกอบด้วยเหล็กบริสุทธิ์ที่บัสแล็ก (slag) 1% ถึง 3% นอกจากนั้นยังประกอบด้วยคาร์บอน แมงกานีส ซิลิกอน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน เหล็กเหนียวทำได้โดยเทสแล็กที่หลอมละลายจากเตาหลอมลงไปในเบ้าที่มีเนื้อเหล็กอยู่แล้วผสมกัน จากนั้นจึงนำมาอัดรีด (rolling หรือ hammering) ให้เป็นแท่งเพื่อลดสแล็กส่วนเกินออก แท่งเหล็กนี้จะนำไปขึ้นรูปร้อนให้เป็น ท่อน

ท่อ แผ่น หรือรูปพรรณต่างๆ ได้ เหล็กเหนียวมีความเหนียวและอ่อนซึ่งตีดขึ้นรูปได้ และตีดให้ติดกัน (forge welded) ได้ นอกจากนั้นยังทนต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าเหล็กกล้า เนื่องจากจะเกิดออกไซด์ (oxide) ปกคลุมผิวอย่างรวดเร็วเมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่การกัดกร่อน

เหล็กเหนียวที่ผ่านการรีดมีคุณสมบัติทางกลในแนวยาว (แนวที่ผ่านการรีด) ดีกว่าในแนวขวาง เหล็กเหนียวจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอีกได้ถ้าใส่โลหะผสมลงไปในเนื้อเหล็กเหนียว เช่น นิกเกิล 1.5% ถึง 3.5% ความต้านแรงดึงอัลติเมต(ultimate strength) ของเหล็กเหนียวเพิ่มขึ้นได้ถ้าผ่านการขึ้นรูปเย็นแล้วบ่มอย่างเหมาะสม ตัวอย่างคุณสมบัติของเหล็กเหนียวและเหล็กเหนียวผสมนิกเกิล 3.25% คุ้ได้จากตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเหนียวและเหล็กเหนียวผสมนิกเกิล

| คุณสมบัติทางกล, หน่วย             | เหล็กเหนียว<br>(คุณสมบัติในแนวยาว) | เหล็กเหนียวผสม<br>นิกเกิล 3.25% |
|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| ความต้านแรงดึง, N/mm <sup>2</sup> | 290-360                            | 380-415                         |
| จุดคราก, N/mm <sup>2</sup>        | 180-240                            | 310-345                         |
| การยืดตัว(200 mm), %              | 25-40                              | 25-30                           |
| พื้นที่หน้าตัดลดลง, %             | 40-55                              | 35-45                           |

### 2.3 เหล็กหล่อ

เหล็กหล่อ(cast iron) ที่ใช้งานทั่วไปมีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 2.5% ถึง 4.0% เป็นที่ทราบกันว่าเมื่อมีคาร์บอนผสมอยู่มากเหล็กจะเปราะและมีความเหนียน้อยลง เพราะฉะนั้นเหล็กหล่อจึงขึ้นรูปเย็นไม่ได้ แต่เมื่อนำไปหลอมเหลวแล้วจะไหลได้ง่ายจึงสามารถจะหล่อเป็นรูปทรงต่างๆ ได้ดีเมื่อเย็นตัวลงแล้วทำการบ่มจะทำให้สามารถตัดกลึงได้ เหล็กหล่อมีความต้านแรงดึงต่ำกว่าความต้านแรงกด(compressive strength) จึงเหมาะับชิ้นงานที่รับแรงกด นอกจากนั้นคุณสมบัติของเหล็กหล่อยังเปลี่ยนแปลงไปได้มากเมื่อผสมโลหะผสมชนิดต่างๆ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างกันเพื่อความเหมาะสมกับการใช้งาน

เหล็กหล่อเคิมแบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ เหล็กหล่อสีขาว(white cast iron) เหล็กหล่อเหนียว(malleable cast iron) เหล็กหล่อสีเทา(gray cast iron) และเหล็กหล่อเหนียวพิเศษ

(nodular cast iron) นอกจากนี้ยังมีอีกสองแบบคือ เหล็กหล่อเย็น (chilled cast iron) และเหล็กหล่อผสม(alloy cast iron)

**1. เหล็กหล่อสีขาว** เป็นเหล็กหล่อที่มีเนื้อละเอียดสีขาวเพราะไม่มีแกรไฟต์ คาร์บอนที่มีอยู่ในเนื้อเหล็กทั้งหมดจะรวมกับเหล็กในรูปของซีเมนไต์(cementite) ซึ่งมีความต้านแรงสูงและแข็งมาก แต่เปราะแตกง่ายจึงไม่นิยมนำมาใช้ตัดกลึง

เหล็กหล่อสีขาวมีการใช้งานอยู่ในวงจำกัด แม้ว่าจะมีข้อดีในบางงานที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอ เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในการบด แบบผลัดดันโลหะ(extrusion dies) และผิวของถังผสมซีเมนต์ เป็นต้น

**2. เหล็กหล่อเหนียว** เป็นเหล็กหล่อสีขาวที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาแล้ว เมื่อนำเอาเหล็กหล่อสีขาวไปเผาให้มอดอุณหภูมิประมาณ  $880^{\circ}\text{C}$ ทิ้งไว้ช่วงเวลาหนึ่งแล้วปล่อยให้เย็นลงอย่างช้า ๆ (คล้ายกับการเทมเปอร์) คาร์บอนในเนื้อเหล็กที่อยู่ในรูปของซีเมนไต์จะค่อย ๆ แยกตัวออกเมื่อเย็นตัวลงจนมีอุณหภูมิที่คาร์บอนที่เหลืออยู่จะจับตัวกันเป็นกลุ่มอยู่ในรูปเกือบกลม

เหล็กหล่อเหนียวมีคุณสมบัติดีกว่าเหล็กหล่อสีขาวในคุณสมบัติทางด้านการทนต่อการสึกหรอ เหล็กหล่อเหนียวตัดกลึงได้สะดวก หล่อเป็นชิ้นบางได้ (12 ถึง 50 mm) จึงนิยมใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมรถยนต์ น้ำมัน การเกษตร และรถไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้ทำห้องเฟือง(gear box) จานเบรกในรถยนต์ ชิ้นส่วนรถไฟ เป็นต้น

เหล็กหล่อเหนียวเมื่อผสมโลหะผสมลงไปจะทำให้คุณสมบัติทางกลเปลี่ยนแปลง โลหะผสมที่นิยมใช้ได้แก่ ทองแดง หรือทองแดงกับโมลิบดีนัม ทองแดงช่วยทำให้เหล็กหล่อเหนียวทนต่อการกัดกร่อนได้ดีขึ้น ความต้านแรงดึงและความต้านแรงดึงคราก(yield strength) ดีขึ้น แต่ความเหนียวจะลดลง

เหล็กหล่อเหนียวที่นิยมใช้กันมากคือ ASTM A47-52 ชั้นคุณภาพ 32 510 และ A47-52 ชั้นคุณภาพ 35 018 คุณสมบัติทางกลของวัสดุทั้งสองนี้ดูได้จากตารางที่ ข.1 ในภาคผนวก

**3. เหล็กหล่อสีเทา** เป็นเหล็กหล่อที่ใช้งานกันมากที่สุดในกระบวนการหล่อทั้งหมด ดังนั้นจึงมักเรียกเหล็กหล่อสีเทว่า เหล็กหล่อ เหล็กหล่อสีเทามีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 2.5% ถึง 4.0% และมักจะมีซิลิคอนผสมอยู่มากกว่า 2% คาร์บอนจะรวมตัวเป็นสารประกอบกับเหล็กเรียกว่า ซีเมนไต์บางส่วน

และส่วนที่เหลือจะอยู่ในรูปคาร์บอนบริสุทธิ์หรือที่เรียกว่าแกรไฟต์ เป็นแถบยาว ๆ แทรกอยู่ในเนื้อเหล็ก จึงทำให้มองเห็นเนื้อเหล็กเป็นสีเทา ถ้ามีซิลิคอนผสมอยู่มากจะทำให้ความต้านแรงของเหล็กหล่อสีเทาลดลง เหล็กหล่อสีเทาที่แข็งที่สุดและแข็งแรงที่สุดจะมีโครงสร้างแบบเพอร์ไลต์(perlite) ส่วนที่นิ่มที่สุดจะมีโครงสร้างผสมระหว่างแกรไฟต์กับเฟอร์ไรต์(ferrite) และมีคาร์บอนผสมอยู่น้อย ความแข็งและความต้านแรงของเหล็กหล่อสีเทาเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มคาร์บอน

ASTM A48-46 จัดจำพวกเหล็กหล่อสีเทาออกเป็นเจ็ดชั้นคุณภาพ โดยใช้หมายเลข 20, 25, 30, 35, 40, 50 และ 60 หมายเลขนี้จะบอกถึงความต้านแรงดึงต่ำสุดเป็น ksi (kip per in<sup>2</sup>, 1 kip = 1000 lb) ตัวอย่างเช่น เหล็กหล่อสีเทาชั้นคุณภาพ 20 มีค่าความต้านแรงดึงต่ำสุด 20 ksi หรือ 20000 psi เป็นต้น คุณสมบัติทางกลอย่างอื่นของเหล็กหล่อสีเทาหาได้จากตารางที่ ข.1

เหล็กหล่อสีเทามักนำมาใช้ทำฐานของเครื่องจักรกล และโครงสร้างที่ต้องการความต้านแรงกดสูง หรือมีการสั่นสะเทือนมาก เช่น เพลาช้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ เนื่องจากหล่อได้ง่ายและทนต่อการสึกหรอได้ดี จึงนิยมใช้ในการผลิตเสื้อสูบ จานเบรก รางแทนใส่ เฟือง ห้องเฟือง เป็นต้น

เหล็กหล่อทุกชนิดเชื่อมได้ยาก แต่ก็สามารถเชื่อมได้ถ้ามีการปฏิบัติอย่างเหมาะสม เช่น อุ่นขึ้นงานก่อนเชื่อม เตรียมผิวที่จะเชื่อม เลือกวิธีการเชื่อมและลดข้อเชื่อม ข้อควรระวังก็คือการให้ความร้อนและลดความร้อนแก่เหล็กหล่อ อาจทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นได้

**4. เหล็กหล่อเหนียวพิเศษ** เป็นเหล็กหล่อที่มีแกรไฟต์รูปทรงกลมแทรกอยู่ในเนื้อเหล็ก ซึ่งเกิดจากการผสมแมกนีเซียมหรือซีเรียม(cerium) ลงในเหล็กหล่อสีเทาขณะหลอมละลายก่อนเทลงแบบหล่อ ข้อแตกต่างจากเหล็กหล่อเหนียวก็คือ เหล็กหล่อเหนียวพิเศษจะเกิดแกรไฟต์รูปทรงกลมขณะแข็งตัว และไม่ต้องทำเหมเปอริง

เมื่อผสมโลหะผสมบางชนิดลงไปจะทำให้เหล็กหล่อเหนียวพิเศษทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และทนต่อการคืบ(creep) ที่อุณหภูมิสูง

เหล็กหล่อเหนียวพิเศษมีความต้านแรง ความเหนียว ความเหนียวนุ่มสูงกว่า เหล็กหล่อสีเทา และมีรูปพรุนน้อยกว่า จึงมักใช้ในการขึ้นรูปเป็นเพลาช้อเหวี่ยง ลูกสูบ ฝาสูบ ลูกกลิ้ง ล้อสายพาน แบบขึ้นรูป เป็นต้น คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเหนียวพิเศษหาได้จากตารางที่ ข.1

**5. เหล็กหล่อเย็น** เป็นเหล็กหล่อที่มีผิวนอกเป็นเหล็กหล่อสีขาว มีซีเมนไต์เป็นหลัก ดังนั้นจึงแข็งแรงมาก แต่ผิวในจะมีเนื้อเป็นเหล็กหล่อสีเทา ทำให้โดยใส่แผ่นโลหะเย็นในแบบหล่อใกล้ผิวแบบ เมื่อเทโลหะที่หลอมเหลวลงไป น้ำโลหะที่สัมผัสกับแผ่นโลหะเย็นจะลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจึงทำให้มีโครงสร้างเป็นซีเมนไต์ค้ำก่กล่าว เหล็กหล่อเย็นตัดกลึงได้โดยการเจียระไนอย่างเฉียวเท่านั้น และมักใช้ในการทำแบบตอก(punching die) ชิ้นส่วนสำหรับการบด ล้อรถไฟ เป็นต้น

**6. เหล็กหล่อผสม** เป็นเหล็กหล่อที่ผสมโลหะผสมต่าง ๆ ทำให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น ทนความร้อนดีขึ้น ทนต่อการกัดกร่อนและสึกกร่อนดีขึ้น หรืออาจทำให้หล่อได้ง่ายขึ้น และตัดกลึงได้ง่ายขึ้น โลหะผสมทั่วไปที่ใช้ได้แก่ นิกเกิล ทองแดง โครเมียม โมลิบดีนัม และวานาเดียม คุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อผสมบางชนิด ใกล้เคียงจากตารางที่ ข.1

## 2.4 โลหะผสมระหว่างเหล็กกล้า

โลหะผสมที่เจตนาผสมลงไปในโลหะก็เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของโลหะ เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา(plain carbon steel) ซึ่งมีปริมาณ แมงกานีส ฟอสฟอรัส และซิลิกอน อยู่ต่ำ และไม่ใช่ของที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เนื่องมาจากคาร์บอน ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องใส่โลหะผสมชนิดต่าง ๆ ลงในเหล็กกล้าคาร์บอนจำนวนมากหรือน้อยตามความต้องการ เพื่อให้เกิดผลอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างดังต่อไปนี้

- เพิ่มความต้านแรง
- ปรับปรุงคุณสมบัติในการชุบแข็ง
- ปรับปรุงคุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำหรือสูง
- เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน
- ปรับปรุงคุณสมบัติในการตัดกลึง
- ปรับปรุงคุณสมบัติต้านทานต่อการสึกหรอ
- เพิ่มความเหนียวนุ่ม

ผลของโลหะผสมที่สำคัญบางชนิดในเหล็กกล้ามีดังต่อไปนี้

1. โคบอลต์ ทำให้มีความแข็งแรงขณะที่อุณหภูมิสูง โดยทำให้เฟอร์ไรต์แข็งขึ้น

2. **โครเมียม** เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนและการเกิดออกไซด์ เพิ่มคุณสมบัติในการชุบแข็ง เพิ่มความต้านแรงที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการชุบซีกและลึกรอ (ถ้ามีคาร์บอนสูง)

3. **ซิลิกอน** โดยทั่วไปใช้ในการลดออกซิเจนในเนื้อโลหะ ทำให้แผ่นเหล็กมีคุณสมบัติแม่เหล็กเพื่อใช้งานทางด้านไฟฟ้า (ทำแกนหม้อแปลงไฟฟ้า) เพิ่มความต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ เพิ่มคุณสมบัติในการชุบแข็งของเหล็กกล้า

4. **ทังสเตน** เมื่อผสมในเหล็ก เครื่องมือจะทำให้มีคุณสมบัติที่สามารถชุบแข็งได้ดีและทนต่อการชุบซีก ทำให้มีความแข็งและความต้านแรงสูงที่อุณหภูมิสูง

5. **ไนโตรเจน** ทำให้คาร์บอนในเนื้อเหล็กเป็นอนุภาคเจือย ลดความแข็งมาร์เทนซิก (martensitic) และคุณสมบัติในการชุบแข็งของเหล็กกล้าโครเมียมปานกลาง ป้องกันการเกิดออสติไนต์ในเหล็กกล้าโครเมียมสูง และป้องกันการรวมตัวของโครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมระหว่างการให้ความร้อนเป็นเวลานาน

6. **นิกเกิล** เพิ่มความต้านแรงให้เหล็กกล้าที่ไม่ผ่านการชุบหรือแอนนัล ทำให้เหล็กกล้าเพอร์ไลต์-เฟอร์ไรต์มีความเหนียวขึ้น (ข้อแตกต่างจากเหล็กกล้า) 

7. **ฟอสฟอรัส** เพิ่มความแข็งแรงให้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน ปรับปรุงคุณสมบัติในการตัดกลึงของเหล็ก

8. **แมงกานีส** ช่วยลดค่ามอดูลัสที่จะทำให้เนื้อเหล็กเปราะ และเพิ่มคุณสมบัติในการตัดกลึง

9. **โมลิบดีนัม** ช่วยเพิ่มอุณหภูมิที่จะทำให้เกรนของออสติไนต์หยาบสูงขึ้น ชุบแข็งได้ลึก ช่วยลดความเปราะของเหล็ก เพิ่มความต้านแรง และลดการคืบ พร้อมทั้งเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดอนุภาคที่ทนต่อการชุบซีก

10. **วานาเดียม** เพิ่มอุณหภูมิที่จะทำให้เกรนของออสติไนต์หยาบสูงขึ้น (ทำให้เกรนละเอียด) เพิ่มคุณสมบัติในการชุบแข็งทำให้ความแข็งแรงของเหล็กไม่ลดลงในขณะที่ทำเหมเปอริง

11. **อะลูมิเนียม** ช่วยลดการเกิดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อต้านการขยายตัวของเกรน และใช้เป็นโลหะผสมของเหล็กกล้าไนไตรด์ (nitriding steel)

นอกจากโลหะผสมที่กล่าวข้างต้นแล้วยังมีธาตุอีก 5 ชนิด ที่เมื่อใส่ในโลหะผสมบางชนิดแล้วจะทำให้คุณสมบัติเฉพาะอย่าง ซึ่งมีดังนี้คือ

1. **กำมะถัน** เป็นโลหะ ซึ่งเป็นสารเจือปนที่ไม่พึงปรารถนาในเหล็กกล้า ทั้งนี้เพราะจะรวมตัวกับเหล็กเกิดเป็นเหล็กซัลไฟด์ ทำให้เปราะและแตกร้าวได้ แต่ถ้ามีแมงกานีสผสมอยู่อย่างพอเหมาะก็จะรวมตัวกันเป็นแมงกานีสซัลไฟด์ ช่วยทำให้คุณสมบัติในการตัดกลึงของเหล็กกล้าดีขึ้น กำมะถันที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กควรอยู่ระหว่าง 0.06% ถึง 0.30%

2. **ตะกั่ว** เมื่อใส่ในเหล็กจะไม่เกิดเป็นโลหะผสม แต่จะปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านการตัดกลึงให้ดีขึ้น และไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้า ตะกั่วมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นด้วยตัวเอง จึงช่วยลดความเสียหายระหว่างเครื่องมือตัดกับเหล็กกล้า จึงเรียกว่าปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านการตัดกลึงจำนวนตะกั่วที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กกล้า แต่จะอยู่ระหว่าง 0.15% ถึง 0.35%

3. **ทองแดง** ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าเมื่ออยู่ในบรรยากาศ อีกทั้งยังช่วยให้เหล็กกล้าไหลได้ขณะหลอมเหลวและเทลงในแบบ โดยปกติจะใส่ทองแดงในเหล็กกล้าประมาณ 0.10% ถึง 0.40%

4. **เทลลูเรียม** มีสีขาว คุณสมบัติคล้ายกำมะถัน เมื่อผสมลงไปในเหล็กกล้าที่ผสมตะกั่วจะทำให้คุณสมบัติในการตัดกลึงดีขึ้นอีก จำนวนเทลลูเรียมที่ใช้ขึ้นอยู่กับจำนวนตะกั่วที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้า และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.03% ถึง 0.05%

5. **โบรอน** เป็นโลหะซึ่งเมื่อผสมลงในเหล็กกล้ามีปริมาณไม่เกิน 0.003% แล้ว จะมีผลทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและคาร์บอนปานกลางมีคุณสมบัติในการชุบแข็งดีขึ้น โบรอนไม่มีผลต่อความต้านแรงดึงของเหล็กกล้า

## 2.5 เหล็กกล้า

เหล็กกล้าอาจแบ่งออกได้เป็น

- (1) เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา(plain carbon steel)
- (2) เหล็กกล้าผสมต่ำ ความต้านแรงสูง(high-strength, low-alloy steel)

- (3) เหล็กกล้าโครงสร้างผสมต่ำ(low alloy structural steel)
- (4) เหล็กกล้าหล่อ(cast steel)
- (5) เหล็กกล้าไร้สนิม(stainless steel)
- (6) เหล็กเครื่องมือ(tool steel) และ
- (7) เหล็กกล้าพิเศษ(special purpose steel)

**1. เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา** เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ(low carbon steel) มีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.05% ถึง 0.30% เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง(medium carbon steel) มีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.30% ถึง 0.50% และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง(high carbon steel) มีคาร์บอนผสมอยู่มากกว่า 0.50% ขึ้นไป

**(ก) เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ** มีใช้งานมากทางด้านผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมและในงานโครงสร้าง เช่น ใช้ทำท่อโครงสร้าง ดัง รถไฟ ตัวถังรถยนต์ สลักเกลียว แขนเกลียว แผ่นเหล็กชุบสังกะสี น้ำ เหล็กกล้าชนิดนี้จะมีค่ามอดูลัสสูงมาก เรียกว่า เหล็กกล้าเสรี(free cutting steel) ซึ่งนิยมใช้อย่างมากในเครื่องจักรกลอัตโนมัติ ในอุตสาหกรรมส่วนมากใช้เหล็กกล้าชนิดนี้ทั้งแบบรีดร้อนและรีดเย็น เหล็กกล้าที่ผ่านการรีดเย็นจะมีความแข็งแรงที่ ต่ำลงได้ และมีขนาดแน่นอน ถ้าต้องการให้ผิวเหล็กทนต่อการสึกหรอก็ทำได้โดยการชุบผิวแข็ง

**(ข) เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง** สามารถนำมาชุบหรือเทมเปอร์ได้โดยกรรมวิธีทางความร้อนแบบทั่วไป ดังนั้นจึงมักใช้งานที่ต้องการความแข็งแรง และทนต่อการสึกหรอ ผลิตภัณฑ์จากเหล็กกล้าผสมคาร์บอนปานกลางคือ เฟลา แกน เฟลาข้อเหวี่ยง ก้านสูบ และชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่ต้องการความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

**(ค) เหล็กกล้าคาร์บอนสูง** ใช้มากเมื่อผลิตภัณฑ์ต้องมีความแข็งแรงและความต้านแรงสูง พร้อมกันนั้นก็ทนต่อการสึกหรอได้ดีด้วย เหล็กกล้าชนิดนี้จะต้องผ่านกรรมวิธีทางความร้อนก่อนจึงจะมีคุณสมบัติตามต้องการ โดยปกติที่หาซื้อจากท้องตลาดจะอยู่ในสภาพที่ผ่านการแอนนิลมาแล้ว ดังนั้นเมื่อขึ้นรูปเรียบร้อยแล้วต้องทำกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้มีความแข็งแรงตามต้องการ เหล็กกล้าชนิดนี้ใช้ทำเครื่องมือชนิดต่างๆ เช่น คอกสว่าน อุปกรณ์ตัดเกลียวใน คอกคว้านรู แบบพิมพ์ และเครื่องมือต่างๆ และมักใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความคม เช่น มีด สกัด กรรไกร เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ทำลวดสปริงและลวดสลึงอีกด้วย

การใช้เหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีข้อควรระวังคือ ความแข็งแรงและความต้านแรงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งไม่เหมาะกับการนำไปใช้ทำเครื่องมือตัดบางชนิดที่ทำงานด้วยอุณหภูมิสูง และถ้านำไปชุบอบอาจเกิดการบิดเบี้ยวหรือแตกร้าวได้ ประการสุดท้าย เหล็กกล้าคาร์บอนสูงมีข้อเสียคือ เมื่อชุบแข็งจะให้ผิวแข็งที่ตื้น นอกเสียจากเป็นชิ้นงานบาง ดังนั้นจึงหวังผลจากการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนสูงได้ไม่มากนัก

**2. เหล็กกล้าผสมต่ำความต้านแรงสูง** เหล็กกล้าผสมต่ำความต้านแรงสูงถูกนำไปใช้งานในลักษณะที่ผลิตออกมาโดยตรงเป็นส่วนมาก หรืออาจจะใช้กรรมวิธีความร้อนในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลขึ้นอีกก็ได้ สำหรับการนำไปใช้งานโดยตรงโลหะผสมที่ใส่เข้าไปก็เพื่อทำให้พวกเฟอร์ไรต์แข็งแรงขึ้น แต่คุณสมบัติทางกลยังมิได้แสดงออกมาอย่างเต็มที่ เมื่อนำไปผ่านกรรมวิธีความร้อนเหล็กกล้าชนิดนี้จะได้รับการปรับปรุงให้มีความต้านแรงดึง ความแข็ง ความเหนียว และความเหนียวุ่มขึ้นไปอีก เป็นต้น

**3. เหล็กกล้าโครงสร้างผสมต่ำ** เหล็กกล้าโครงสร้างผสมต่ำใช้กันมากในงานทางด้านการขนส่งและการก่อสร้าง เหล็กกล้าชนิดนี้ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ฉะนั้นคุณสมบัติต่าง ๆ จึงขึ้นอยู่กับการผสมโลหะผสมลงไปอย่างเหมาะสมกับปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่ ตัวอย่างหนึ่งของเหล็กกล้าโครงสร้างผสมต่ำมีความต้านแรงดึงคร่าวประมาณ  $345 \text{ N/mm}^2$  และความต้านแรงดึงอัลลิติมประมาณ  $485 \text{ N/mm}^2$  เหล็กกล้าชนิดนี้เชื่อมได้ง่ายและชุบแข็งในอากาศไม่ได้ เพื่อให้เหล็กกล้าชนิดนี้มีความต้านแรงเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ควรสูงประมาณ 0.30% แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีความต้านแรงเพิ่มขึ้นคุณสมบัติทางด้านความเหนียว การขึ้นรูป และการเชื่อม จะลดลง

**4. เหล็กกล้าหล่อ** เหล็กกล้าหล่อมมีส่วนประกอบทางเคมีคล้ายกับเหล็กกล้าเหนียว (wrought steel) แต่ว่าได้เพิ่มให้มีซิลิคอนและแมงกานีสมากกว่า และได้ลดก๊าซออกซิเจน และก๊าซอย่างอื่นในเนื้อเหล็ก เหล็กกล้าหล่อใช้ทำชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนซึ่งต้องการให้มีคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับเหล็กกล้าเหนียว ด้วยราคาถูกกว่าการผลิตด้วยวิธีอื่น นอกจากนั้นเหล็กกล้าหล่อยังมีคุณสมบัติทางกลดีกว่าเหล็กหล่อ กรรมวิธีทางความร้อนยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกลบางประการของเหล็กกล้าหล่อได้อีกด้วย คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าหล่อดูได้จากตารางที่ ข.1

### 5. เหล็กกล้าไร้สนิม เหล็กกล้าไร้สนิมมีอยู่ 3 แบบคือ

- (ก) ออสเทนิติก(austenitic)
- (ข) เฟอร์ริติก(ferritic) และ
- (ค) มาร์เทนซิติก(martensitic)

เหล็กกล้าประเภทนี้คุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนต่างกัน ทั้งขึ้นอยู่กับปริมาณโครเมียมที่ผสมอยู่ เหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนิติกขั้มกันได้เป็นเงางาม จึงมักใช้ในงานตกแต่งเป็นส่วนมาก นอกจากนั้นยังใช้งานทางด้านที่ต้องการให้ทนความร้อน

เหล็กกล้าไร้สนิมแบ่งออกเป็นชนิดโดยระบบเลขจำนวนของ AISI (American Iron and Steel Institute) และ SAE (Society of Automotive Engineers) ระบบของ SAE ใช้ตัวเลข 5 ตัว ส่วนของ AISI ใช้ตัวเลข 3 ตัว ในระบบของ AISI เลขตัวแรกบอกอนุกรม(series) ของเหล็กกล้าไร้สนิม เลขสองตัวสุดท้ายบอกชนิดของเหล็กกล้า ตัวอักษรที่ตามหลังเลขตัวที่สามบอกถึงการดัดแปลงในอนุกรมนั้น อนุกรมการให้ชื่อเหล็กกล้าไร้สนิมได้จากตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การให้ชื่อเหล็กกล้าไร้สนิมของ AISI และ SAE

| AISI | SAE   | การแบ่งจำพวกทั่วไป                                                                                                |
|------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2xx  | 203xx | เหล็กกล้าเหนียวออสเทนิติกผสมโครเมียม-นิกเกิล-แมงกานีส ไม่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก ชุบแข็งไม่ได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน |
| 3xx  | 303xx | เหล็กกล้าเหนียวออสเทนิติกผสมโครเมียม-นิกเกิล ชุบแข็งไม่ได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน                                 |
| 4xx  | 514xx | เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติกผสมโครเมียม-เหล็กเหนียว มีคุณสมบัติแม่เหล็ก และชุบแข็งได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน      |
| 4xx  | 514xx | เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกผสมโครเมียม-เหล็กเหนียว มีคุณสมบัติแม่เหล็ก ชุบแข็งไม่ได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน        |

(ก) เหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนิติก เป็นกลุ่มของโครเมียม-นิกเกิล อยู่ในอนุกรม 300 กลุ่มของโครเมียม-นิกเกิล-แมงกานีส ประกอบด้วยชนิด 201 และ 202

อนุกรม 300 โดยทั่วไปแล้วมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าแบบมาร์เทนซิติกและเฟอร์ริติก เหล็กกล้าไร้สนิมทุกชนิดมีความคงทนต่อการดัดสะเก็ด(scaling) และมีความต้านแรงที่อุณหภูมิสูงที่ ชนิด

302 เป็นชนิดที่ใช้งานทั่วไป และมักเรียกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม 18-8 ซึ่งใช้มากในอุตสาหกรรมทางด้านอาหาร อุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ เครื่องใช้ในครัว เครื่องประดับทางด้านสาดยกรรม โรงงานนม โรงทอผ้า เป็นต้น เหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ขึ้นรูปได้ดี มีความเหนียวที่อุณหภูมิสูงและต่ำ ง่ายและราคาพอสมควร ชนิดที่ใช้กันมากในอนุกรมก็คือ 304, 316, 346 และ 347

เหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสติติกชุบแข็งไม่ได้ แต่จะแข็งในขณะขึ้นรูปเย็นแล้วตามด้วยการแอนนัลอย่างรวดเร็วจนหลังจากการขึ้นรูปเย็น เหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสติติกตัดกลึงได้ยากเพราะจะแข็งขึ้นจากการขึ้นรูปเย็น ดังนั้นจึงมีอัตราการตัดกลึง 50% ของเหล็กกล้า B112 ที่ใช้เป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบ อนุกรม 300 นี้มีความเหนียวมากแต่จะแข็งเมื่อขึ้นรูปเย็น จึงมีคุณสมบัติทางด้านการขึ้นรูปไม่คั่นัก

เหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสติติกที่อัดขึ้นรูปได้ และเชื่อมได้โดยวิธีการเชื่อมหลอมเหลว(fusion weld) ภายหลังการเชื่อมควรทำการแอนนัลด้วย

(ข) เหล็กกล้าไร้สนิมแบบเฟอร์ริติก (บางส่วนของอนุกรม 400) ชุบแข็งไม่ได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน และไม่สามารถทำให้เริ่มกลั่นตัวการขึ้นรูปเย็น มีความเหนียวจึงรีดคดงอได้ เมื่อขึ้นรูปเย็นความต้านแรงดึงครากจะเพิ่มขึ้นประมาณ 30% แต่ความต้านแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น เหล็กกล้าไร้สนิมแบบเฟอร์ริติกที่อัดขึ้นรูปและรีดได้สะดวกแต่คุณสมบัติทางด้านการตัดกลึงไม่คั่นัก ดังนั้นในการตัดกลึงจึงต้องใช้เครื่องมือตัดที่มีความคมอยู่เสมอ

เหล็กกล้าชนิดนี้เชื่อมไฟฟ้าและเชื่อมโดยใช้ความต้านทานได้(resistance welding) แต่จะต้องทำแอนนัลเพื่อลดความเปราะและเพิ่มความเหนียวนุ่ม ในการที่จะให้ได้รอยเชื่อมที่แข็งแรงที่สุดจะต้องใช้ลวดเชื่อมแบบออสติติก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหล็กกล้าเฟอร์ริติกจะมีความเหนียวนุ่มลดลง คุณสมบัติทางด้านการตีเกลลง และความต้านแรงดึงแตกหัก(breaking strength) ลดลง

(ค) เหล็กกล้าไร้สนิมแบบมาร์เทนซิกิก คล้ายกับแบบเฟอร์ริติกคือ อยู่ในกลุ่มโครเมียม-เหล็ก และเป็นส่วนหนึ่งของอนุกรม 400 เหล็กกล้าไร้สนิมแบบมาร์เทนซิกิกที่ใช้ทั่วไปคือชนิด 410 ซึ่งมีราคาแพงที่สุด เหล็กกล้าไร้สนิมแบบมาร์เทนซิกิกรับแรงกระแทกได้ดี และชุบแข็งได้โดยเผาให้ร้อนที่อุณหภูมิ 982 °C แล้วชุบน้ำมัน จากนั้นจึงทำการเทมเปอร์

การใช้งานของเหล็กกล้ามาร์เทนซิกิกอนูกรม 400 มีอยู่มากมาย เช่น ชนิด 410 ใช้ทำวาล์ว ตะแกรงกรองผง เพลาเครื่องสูบลบ มีด สลักเกลียว แบริ่งเกลียว และชิ้นส่วนต่างๆ ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ชนิด 403 ใช้ทำใบของกังหันไอน้ำ ใบเครื่องอัดลมของเครื่องยนต์เจ็ท และชิ้นส่วนที่รับความเค้นสูง ชนิด 416 ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนของคาร์บูเรเตอร์ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ วาล์ว เพลา และค้ำมกอล์ฟ ชนิด 420 เมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจะมีความแข็งแรงสูงจึงใช้ในการผลิตใบมีด อุปกรณ์การผ่าตัด เป็นต้น ชนิด 440C มีความทนทานต่อการสึกหรอ จึงใช้ในการผลิตลูกปืนในเบรค บูชชิง (bushing) ชิ้นส่วนของวาล์ว บ่าวาล์ว และมีคราตาแพง

ถ้ามีการบอบผสมอยู่มากจะต้องคัดกลึงด้วยความเร็วตัดต่ำและป้อนที่ละน้อย ชนิดที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปเย็นคือ 403 และ 410 เหล็กกล้ามาร์เทนซิกิกคือคั่นะร้อน และรีดได้ที่อุณหภูมิระหว่าง  $1035^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1232^{\circ}\text{C}$

เหล็กกล้ามาร์เทนซิกิกที่เชื่อมไฟฟ้าและเชื่อมโดยใช้ความดันทานได้คือ ชนิด 403, 410 และ 416 เพื่อให้การเชื่อมได้ผลดี (ถือไม่เปราะและแตกง่าย) ควรทำการเผาขึ้นมาก่อนที่จะเชื่อมให้มีอุณหภูมิระหว่าง  $65^{\circ}\text{C}$  ถึง  $130^{\circ}\text{C}$  เสียก่อน ภายหลังการเชื่อมจึงปล่อยให้เย็นตัวลงในอากาศจนถึงอุณหภูมิระหว่าง  $650^{\circ}\text{C}$  ถึง  $732^{\circ}\text{C}$

inspiration starts here

เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิกิกมีคุณสมบัติเลิศทางด้านการเชื่อมและการแตกหักที่อุณหภูมิสูงถึง  $540^{\circ}\text{C}$

เหล็กกล้าไร้สนิมทั้งสามแบบนี้บัดกรีอ่อน (soft soldered) และบัดกรีแข็ง (hard soldered) ได้ การบัดกรีอ่อน (ใช้ลวดบัดกรีเป็นโลหะผสมระหว่างดีบุก-ตะกั่ว) ไม่มีปัญหาแต่อย่างใด เพราะใช้อุณหภูมิต่ำจึงไม่ทำให้เกิดคาร์ไบด์ (carbide) ที่ไม่ต้องการ แต่การบัดกรีแข็ง (ใช้ลวดบัดกรีเป็นทองเหลืองหรือเงิน) ต้องใช้อุณหภูมิสูง (อย่างต่ำที่สุด  $620^{\circ}\text{C}$ ) จึงอาจทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสตินิติกเกิดคาร์ไบด์ที่ไม่ต้องการขึ้นได้ เพราะฉะนั้นถ้าต้องการบัดกรีแข็งจะต้องใช้เหล็กกล้าชนิดที่มีการบอบต่ำ หรืออาจใช้ลวดทองแดงในการบัดกรีก็น่าได้ (copper braze) แต่ต้องใช้ทองแดงที่มีความบริสุทธิ์มาก และต้องมีวิธีการปกป้องผิวขณะบัดกรีด้วย นอกจากนั้นในการบัดกรีต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง  $1095^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอาจมีผลต่อกรรมวิธีทางความร้อนที่ได้กระทำกับเหล็กกล้าไร้สนิมมาก่อนแล้ว ดังนั้นวิธีการบัดกรีเช่นนี้จึงมักใช้กับรอยเล็ก ๆ เท่านั้น

คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าไร้สนิมหล่อและเหล็กกล้าไร้สนิมเหนียว ดูได้จากตารางที่ ข.1 และตารางที่ ข.6 ในภาคผนวก

**6. เหล็กเครื่องมือ** เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของเหล็กเครื่องมือทำให้เหล็กเครื่องมือชุบแข็งได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน จึงมีคุณสมบัติพิเศษเหมาะกับการนำไปทำเป็นเครื่องมือตัด เครื่องมือเจียน แบบขึ้นรูป (forming die) คอกส่ว้น อุปกรณ์คอกอัด (punches) เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วเหล็กเครื่องมือควรมีลักษณะที่น่าพึงพอใจดังต่อไปนี้คือ

- (ก) ยังคงมีความแข็งและความต้านแรงสูงในขณะที่อุณหภูมิจากการตัดกลึงสูงขึ้น
- (ข) สามารถรับแรงกระตุก แรงกระแทกได้ โดยไม่บิ่นหรือแตกหัก (นั่นคือมีความเหนียวนุ่ม)
- (ค) สามารถทนต่อการสึกหรอและการขีดข่วนเมื่อใช้งานอย่างต่อเนื่อง เพื่อทำให้ไม่ต้องลับเครื่องมือหรือเปลี่ยนเครื่องมือบ่อยครั้ง

ปรากฏว่าไม่มีวัสดุเครื่องมือชนิดใดที่มีลักษณะน่าพึงพอใจดังกล่าวทั้งหมด ดังนั้นจึงต้องทำการคัดแปลง ปรับปรุง ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมตามต้องการของชิ้นงาน เหล็กเครื่องมือแบ่งประเภทโดยลักษณะจำเพาะตามระบบของ AISI และ SAE รวมทั้งวิธีการชุบ การใช้งาน คุณสมบัติพิเศษ และชนิดที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ๆ 6 กลุ่ม และแต่ละกลุ่มยังแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยอีก ซึ่งดูได้จากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การให้ชื่อเหล็กเครื่องมือของ AISI

| กลุ่มและสัญลักษณ์  | ชนิด                                   |
|--------------------|----------------------------------------|
| ชุบแข็งด้วยน้ำ (W) |                                        |
| ทนต่อแรงกระตุก (S) |                                        |
| ขึ้นรูปเย็น (O)    | ชุบแข็งด้วยน้ำมัน                      |
| (A)                | โลหะผสมปานกลาง ชุบแข็งด้วยอากาศ        |
| (D)                | คาร์บอนสูง โครเมียมผสมสูง              |
| ขึ้นรูปร้อน (H)    | H1-H19 มีโครเมียมเป็นพื้นฐาน           |
|                    | H20-H39 มีทังสเตนเป็นพื้นฐาน           |
|                    | H40-H59 มีโมลิบดีนัมเป็นพื้นฐาน        |
| รอบสูง (T)         | มีทังสเตนเป็นพื้นฐาน                   |
|                    | (M) มีโมลิบดีนัมเป็นพื้นฐาน            |
| ใช้งานพิเศษ (L)    | โลหะผสมต่ำ                             |
|                    | (F) คาร์บอน-ทังสเตน                    |
|                    | (P) เหล็กกล้าทำแบบ (mold)              |
|                    | (P1-P19 คาร์บอนต่ำ P20-P39 ประเภทอื่น) |

การให้ชื่อเหล็กเครื่องมือใช้ตัวเลขต่อท้ายกลุ่มตัวอักษร เช่น W3, D3 เป็นต้น รายละเอียดทางเคมีและคุณสมบัติต่าง ๆ โดยละเอียดของเหล็กเครื่องมือจะไม่กล่าวไว้ในที่นี้ ผู้สนใจจะหาดูได้จาก Tool Engineers Handbook และเอกสารอ่านประกอบเลขที่ 6

โปรดสังเกตว่ากลุ่มที่ชุบแข็งด้วยน้ำมันมีราคาถูกที่สุด และมีลักษณะเหมาะสมกับงานส่วนมาก แต่มีข้อเสียคือจะมีความแข็งแรงลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงและอาจบิดเบี้ยวเนื่องจากการชุบ ส่วนกลุ่มที่ชุบแข็งด้วยน้ำมันมีราคาแพงกว่า มีความแข็งแรงอุณหภูมิสูง และไม่บิดเบี้ยวเนื่องจากการชุบ

**7. เหล็กกล้าพิเศษ** เหล็กกล้าพิเศษใช้งานเมื่อต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นพิเศษ บางครั้งจำเป็นต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรืออุณหภูมิต่ำ โดยไม่ต้องการความต้านแรงสูงมากนัก ดังจะแบ่งได้ตามรายละเอียดต่อไปนี้

**(ก) การใช้งานที่อุณหภูมิสูง** อุปกรณ์ในโรงต้นกำลัง กังหันก๊าซ เครื่องยนต์เจ็ท โรงกลั่นน้ำมัน โรงงานเคมี และงานอื่น ๆ ต้องการใช้เหล็กกล้าที่ต้านทานการเกิดออกไซด์และมีคุณสมบัติทางเคมีที่อุณหภูมิสูง เหล็กกล้าชนิดนี้จะต้องไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกหรือเปราะเมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน เหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนนิติกบางชนิด ตัวอย่างเช่น 302, 309, 310, 316, 321 และ 327 ใช้งานอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิระหว่าง  $925^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1095^{\circ}\text{C}$  แต่ความต้านทานการคืบจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $595^{\circ}\text{C}$  เหล็กกล้าไร้สนิมแบบมาร์เทนซิติกและเฟอร์ริติกบางชนิด ตัวอย่างเช่น 405, 410, 418, 430 และ 446 ก็สามารถใช้งานอย่างต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิระหว่าง  $705^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1095^{\circ}\text{C}$  ได้ แต่ความต้านทานการคืบลดลงที่อุณหภูมิ  $540^{\circ}\text{C}$  และมีค่าลดลงเกือบเป็นศูนย์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงจะนำมาใช้งานไม่ได้ถ้าความต้านแรงที่อุณหภูมิสูงเป็นตัวประกอบสำคัญในการออกแบบ เหล็กกล้าไร้สนิมมีความต้านทานต่อการตกสะเก็ดเป็นอย่างดี ตัวอย่างเช่น ชนิด 440 ต้านทานต่อการตกสะเก็ดเมื่อใช้งานอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง  $760^{\circ}\text{C}$  ส่วนชนิดอื่น ๆ ก็ทนต่อการตกสะเก็ดที่อุณหภูมิสูงกว่า  $760^{\circ}\text{C}$

นอกจากเหล็กกล้าไร้สนิมแล้วยังมีเหล็กกล้าผสมบางชนิดที่ใช้งานกับอุณหภูมิสูงได้ โลหะผสมเหล่านี้ดูได้จากตารางที่ ข.13 ในภาคผนวก

**(ข) การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ** คุณสมบัติของเหล็กกล้าเมื่ออยู่ภายใต้อุณหภูมิต่ำ เริ่มมีความสำคัญมากขึ้นในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมน้ำมัน การทำก๊าซเหลว การผลิตยางสังเคราะห์(synthetic

rubber) การผลิตพวกไฮโดรคาร์บอน เครื่องบินที่บินระดับสูง อุปกรณ์ทางทหาร และอื่นๆ ที่ต้องการใช้เหล็กกล้าที่อุณหภูมิต่ำ แต่ทางด้านอุตสาหกรรมยังมีใช้น้อยมาก

เหล็กกล้าที่มีคุณสมบัติเหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำคือ เหล็กกล้าไร้สนิมแบบออสเทนนิติก

(ค) **เหล็กกล้าความต้านทานแรงสูงมาก (ultrahigh strength steel)** มีความต้านแรงดึงครากและความต้านแรงดึงออสติเมตสูงมาก ตารางที่ 2.4 เป็นตัวอย่างของเหล็กกล้าความต้านแรงสูงมาก 8 ชนิด

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างความต้านแรงดึงของเหล็กกล้าความต้านแรงสูงมาก

| ชนิดของเหล็กกล้า                          | ความต้านแรงดึงคราก<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ความต้านแรงดึง<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|
| เหล็กกล้าผสมที่มีคาร์บอนปานกลาง           | 1725                                       | 2070                                   |
| เหล็กเครื่องมือขึ้นรูปร้อน                | 1655                                       | 2000                                   |
| เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิก                | 1620                                       | 1690                                   |
| เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกรีดเย็น        | 1240                                       | 1380                                   |
| เหล็กกล้าไร้สนิมกึ่งออสเทนนิติก           | 1515                                       | 1620                                   |
| เหล็กกล้าผสมต่ำ ความต้านแรงสูง ชุบแข็งได้ | 1690                                       | 1965                                   |
| เหล็กกล้าผสมสูงชุบและเทมเปอร์             | 2000                                       | 2415                                   |
| ลวดเหล็กกล้าคาร์บอนสูง                    | 4000                                       | 4135                                   |

## 2.6 การให้ชื่อเหล็กกล้าเหนียวของ AISI-SAE

วิธีการให้ชื่อเหล็กกล้าที่นิยมใช้กันมากเป็นระบบของ SAE ใช้ตัวเลข 4 ตัวและ 5 ตัว ต่อมาเมื่อมีโลหะผสมชนิดใหม่ๆ มากขึ้น SAE และ AISI จึงได้กำหนดระบบการให้ชื่อใหม่รวมกันเรียกว่าระบบ AISI-SAE โดยใช้แนวความคิดเดิมของ SAE ระบบนี้ใช้ตัวเลขสี่และห้าตัว : เลขตัวแรกบอกชนิดของเหล็กกล้า (นั่นคือโลหะผสมที่เป็นหลัก) เลขตัวที่สองบอกค่าโดยประมาณของโลหะผสมที่มีอยู่มากเป็นเปอร์เซ็นต์ เลขสองตัวสุดท้ายบอกค่าเฉลี่ยของคาร์บอนเป็นจุด (คือหนึ่งในร้อย) เช่น หนึ่งจุดเท่ากับ 0.01% การให้ชื่อเหล็กกล้าเหนียวของ AISI-SAE ดูได้จากตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การให้ชื่อเหล็กกล้าเหนียวโดยใช้ระบบตัวเลขของ AISI-SAE

| การให้ชื่อ<br>ของ SAE | ชนิด                                          | การให้ชื่อ<br>ของ SAE | ชนิด                                        |
|-----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|
| 10xx                  | คาร์บอนธรรมดา                                 | 48xx                  | นิกเกิล 3.50% โมลิบดีนัม 0.25%              |
| 11xx                  | กลิ้งเสรี(resulfurized)                       | 51xx                  | โครเมียม 0.80%                              |
| 12xx                  | กลิ้งเสรี(resulfurized และ<br>rephosphorized) | 514xx                 | เหล็กกล้าทนต่อการกัดกร่อน และทน<br>ความร้อน |
| 13xx                  | แมงกานีส 1.60% ถึง 1.90%                      | 515xx                 | เหล็กกล้าทนต่อการกัดกร่อน และทน<br>ความร้อน |
| 23xx                  | นิกเกิล 3.50%                                 | 52xx                  | โครเมียม 1.50%                              |
| 25xx                  | นิกเกิล 5.00%                                 | 61xx                  | โครเมียม 0.78%                              |
|                       |                                               |                       | วานาเดียม 0.13%                             |
| 31xx                  | นิกเกิล 1.25%                                 | 86xx                  | นิกเกิล 0.55%                               |
|                       | โครเมียม 0.60%                                |                       | โครเมียม 0.50%                              |
|                       |                                               |                       | โมลิบดีนัม 0.20%                            |
| 32xx                  | นิกเกิล 1.75%                                 | 87xx                  | นิกเกิล 0.55%                               |
|                       | โครเมียม 1.00%                                |                       | โครเมียม 0.50%                              |
|                       |                                               |                       | โมลิบดีนัม 0.25%                            |
| 33xx                  | นิกเกิล 3.50%                                 | 88xx                  | นิกเกิล 0.55%                               |
|                       | โครเมียม 1.50%                                |                       | โครเมียม 0.50%                              |
|                       |                                               |                       | โมลิบดีนัม 0.35%                            |
| 34xx                  | นิกเกิล 3.00%                                 | 92xx                  | แมงกานีส 0.80%                              |
|                       | โครเมียม 0.80%                                |                       | ซิลิคอน 2.00%                               |
| 303xx                 | เหล็กกล้าทนต่อการกัดกร่อน และทน<br>ความร้อน   | 93xx                  | นิกเกิล 3.25%                               |
|                       |                                               |                       | โครเมียม 1.20%                              |
|                       |                                               |                       | โมลิบดีนัม 0.12%                            |
| 40xx                  | โมลิบดีนัม 0.25%                              | 94xx                  | แมงกานีส 0.95% ถึง 1.25%                    |
|                       |                                               |                       | นิกเกิล 0.45%                               |
| 41xx                  | โครเมียม 1.00%                                |                       | โครเมียม 0.40%                              |
|                       | โมลิบดีนัม 0.20%                              |                       | โมลิบดีนัม 0.12%                            |
|                       |                                               | 97xx                  | นิกเกิล 0.55%                               |
| 43xx                  | นิกเกิล 1.83%                                 |                       | โครเมียม 0.17%                              |
|                       | โครเมียม 0.80%                                |                       | โมลิบดีนัม 0.20%                            |
|                       | โมลิบดีนัม 0.25%                              | 98xx                  | นิกเกิล 1.00%                               |
| 46xx                  | นิกเกิล 1.75%                                 |                       | โครเมียม 0.80%                              |
|                       | โมลิบดีนัม 0.25%                              |                       | โมลิบดีนัม 0.25%                            |

- หมายเหตุ**
1. เปอร์เซ็นต์ของโลหะผสมเหล่านี้เป็นค่าโดยเฉลี่ย
  2. ในระบบของ AISI อักษรหน้าตัวเลขมีความหมายดังนี้คือ A = เหล็กกล้าผสมจากเตา basic open-hearth B = เหล็กกล้าคาร์บอนจากเตา acid bessemer C = เหล็กกล้าคาร์บอนจากเตา basic open-hearth (ไม่มีอักษรหน้าก็หมายถึงชนิดนี้ด้วยเช่นกัน) D = เหล็กกล้าคาร์บอนจากเตา acid open-hearth และ E = เหล็กกล้าจากเตาไฟฟ้า (มักจะเป็นโลหะผสม)
  3. ถ้ามีอักษร B หรือ L อยู่กลางตัวเลขหมายความว่า ได้มีการเพิ่มโบรอนหรือตะกั่ว ตัวอย่างเช่น 94B40 และ 11L41
  4. ตัวอักษรที่อยู่ข้างท้ายตัวเลขมีความหมายเพิ่มเติมดังนี้คือ A = มีการจำกัดส่วนผสมทางเคมี C = รับประกัน segregation limits H = รับประกันการชุบแข็งได้จนถึงที่กำหนดไว้ และ I = รับประกันการเข้ากันได้กับพวกโลหะ

ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้า AISI C 1040 (SAE 1040) เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา ผสมจากเตา basic open-hearth มีการบอผสมอยู่ 40 จุด หรือ 0.40% หรือเหล็กกล้า AISI 4340 (SAE 4340) เป็นเหล็กกล้าเหล็ก-โครเมียม-โมลิบดีนัม ซึ่งมีส่วนผสมโดยเฉลี่ยดังนี้คือ นิกเกิล 1.83% โครเมียม 0.80% โมลิบดีนัม 0.25% และมีการบอผสมอยู่ 40 จุด หรือ 0.40%

ตารางที่ ข.2 และตารางที่ ข.3 ในภาคผนวกแสดงคุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา และเหล็กกล้าผสมที่ผ่านการดึง การรีด และกรรมวิธีทางความร้อน ตารางที่ ข.4 และตารางที่ ข.5 แสดงผลจากอุณหภูมิที่ทำการชุบแข็ง และผลของขนาดต่างๆ ของท่อนเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา และของเหล็กกล้าผสมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนบางชนิดที่มีต่อคุณสมบัติทางกล

## 2.7 อะลูมิเนียมผสมเหนียว

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ใช้กันมากเป็นที่สองรองจากเหล็กกล้า ในรูปแบบต่างๆ เช่น เป็นเส้นแท่ง ท่อนจากการอัดออกมา (รวมทั้งรูปพรรณต่างๆ) เป็นผง แผ่น เป็นรูปจากการตีอัดและหล่อ อะลูมิเนียมมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากบรรยากาศต่างๆ ได้มาก เพราะว่ามีออกไซด์เคลือบผิวอยู่ตลอดเวลา โลหะผสมที่ผสมลงในอะลูมิเนียมจะมีผลต่อความต้านทานต่อการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามโลหะผสมต่างๆ ก็มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนอยู่

แล้วเป็นสิ่งสำคัญ กรดฮาโลเจน(halogen) และอัลคาไลอย่างแรง(strong alkalis) เป็นสารละลายสองชนิดที่กัดกร่อนอะลูมิเนียมได้เพราะสารละลายนี้จะกำจัดออกไซด์ที่ผิวของอะลูมิเนียม ทำให้เนื้อแท้ของอะลูมิเนียมสัมผัสกับสารได้

อะลูมิเนียมเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดีและสะท้อนแสงได้ดี ขึ้นรูปได้ง่ายด้วยการึง กด ตัดกลึง เชื่อม บัดกรีแข็ง หุ่นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะผสมในอะลูมิเนียม

เมื่อใช้เป็นวัสดุโครงสร้าง อะลูมิเนียมจะมีความต้านแรงพอกับเหล็กกล้า แต่เนื่องจากโมดูลัสความยืดหยุ่นของอะลูมิเนียมมีค่าประมาณหนึ่งในสามของเหล็กกล้า จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่าเหล็กกล้า (มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างน้อยกว่า) และโค้งงอได้ง่ายกว่าเมื่อรับแรงเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาทางด้านอัตราส่วนระหว่างความต้านแรงต่อน้ำหนักเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบแล้ว อะลูมิเนียมจะได้เปรียบโลหะอื่นมาก เช่น ในกรณีของเครื่องบิน จรวด รถไฟ เป็นต้น

อะลูมิเนียมไม่ทนต่อการสึกหรอจึงไม่ควรใช้กับงานที่ต้องการความคงทนต่อการสึกหรอ นอกจากนั้นความต้านแรงล้า(fatigue strength) ของอะลูมิเนียมไม่สูงนักจึงไม่ควรใช้รับแรงที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ

สัมประสิทธิ์การขยายตัวของอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 25 เท่า และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอะลูมิเนียมมากกว่าเหล็กกล้า 5 เท่า ซึ่งเป็นตัวประกอบสำคัญอันควรระมัดระวังเมื่อจะตัดกลึงและเชื่อมอะลูมิเนียม เมื่อตัดกลึงอะลูมิเนียม ความร้อนที่เกิดจากการตัดกลึงจะทำให้ชิ้นงานขยายตัวได้มาก ทำให้ขนาดของชิ้นงานที่ได้ไม่ละเอียดพอสำหรับบางงาน เพื่อลดปัญหานี้จึงควรใช้เครื่องมือตัดที่มีความคมอยู่เสมอ ใช้ความเร็วป้อนและความเร็วตัดปานกลาง และให้มีการหล่อเย็นอย่างดี

การให้ชื่ออะลูมิเนียมผสมเหนียวใช้ตัวเลขสี่ตัวดังในตารางที่ 2.6 เลขตัวแรกบอกกลุ่มของโลหะผสม เลขตัวที่สองบอกถึงการเปลี่ยนแปลงโลหะผสมเดิม หรือเปลี่ยนแปลงซึ่งจำกัดของสารเจือปนที่ไม่บริสุทธิ์ เลขสองตัวสุดท้ายบอกถึงโลหะผสมหรือความไม่บริสุทธิ์ของอะลูมิเนียมนั่นเอง

เพื่อความกระจ่างชัดจึงจะอธิบายถึงรายละเอียดของระบบต่อไปอีกในกลุ่ม 1xxx เลขสองตัวสุดท้ายจะบอกถึงความบริสุทธิ์ของอะลูมิเนียมละเอียดถึง 0.01% เลขตัวที่สอง (อยู่ถัดจากเลข 1) บอกถึงการเปลี่ยนแปลง (ถ้ามี) ปริมาณสารเจือที่ไม่บริสุทธิ์ซึ่งอาจใช้ตัวเลขจาก 0 ถึง 9 โดยที่ 0 หมายถึงว่าไม่มีการควบคุมสารเจือ ส่วนเลข 1 ถึง 9 จะบ่งแสดงว่ามีการควบคุมจำนวนของสารเจือเป็นพิเศษ ตัวอย่างเช่น อะลูมิเนียม 1060 แสดงว่าเป็นอะลูมิเนียมอย่างน้อย 99.60% ซึ่งไม่ต้อง

ควบคุมสารเจือที่ไม่บริสุทธิ์ อะลูมิเนียมผสม 1100 แสดงว่าเป็นอะลูมิเนียมอย่างน้อย 99.00% ซึ่งต้องควบคุมสารเจือที่ไม่บริสุทธิ์หนึ่งอย่างหรือมากกว่า

ตารางที่ 2.6 การให้ชื่ออะลูมิเนียมผสมเหนียว

| โลหะผสม                  | หมายเลขกลุ่ม |
|--------------------------|--------------|
| อะลูมิเนียมอย่างน้อย 99% | 1xxx         |
| ทองแดง                   | 2xxx         |
| แมงกานีส                 | 3xxx         |
| ซิลิคอน                  | 4xxx         |
| แมกนีเซียม               | 5xxx         |
| แมกนีเซียมและซิลิคอน     | 6xxx         |
| สังกะสี                  | 7xxx         |
| ธาตุอื่น                 | 8xxx         |
| อนุกรมที่ยังไม่มีใช้     | 9xxx         |

ในกลุ่ม 2xxx ถึง 8xxx เลขสองตัวสุดท้ายจะบอกถึงความแตกต่างของส่วนผสมในอะลูมิเนียมสำหรับกลุ่มนั้น ๆ ตัวอย่างเช่น อะลูมิเนียมผสม 2017 เป็นกลุ่มทองแดงผสม มีทองแดง 4.0% แมงกานีส 0.5% และแมกนีเซียม 0.5% อะลูมิเนียม 2024 เป็นกลุ่มทองแดงผสม มีทองแดง 4.5% แมงกานีส 0.6% และแมกนีเซียม 1.5% เลขตัวที่สองของกลุ่ม 2xxx ถึง 8xxx บอกถึงการดัดแปลงโลหะผสมซึ่งอาจใช้ตัวเลข 0 ถึง 9 โดยที่ 0 หมายถึงโลหะผสมเดิม และ 1 ถึง 9 หมายถึงการดัดแปลงโลหะผสม

ระบบการให้ชื่อเต็มเปอร์เซ็นต์ถึงความแข็ง ความต้านแรง และความเหนียวของอะลูมิเนียมเหนียว อะลูมิเนียมหล่อ และอะลูมิเนียมผสม ทำให้ได้โดยใช้ตัวอักษรแทนการให้ชื่อเต็มเปอร์เซ็นต์ตัวเลขที่ตามหลังแสดงถึงกลุ่มย่อย ดังในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การให้ชื่อเต็มเปอร์เซ็นต์และการแบ่งกลุ่มย่อยของอะลูมิเนียมผสม

| การให้ชื่อเต็มเปอร์เซ็นต์ | รายละเอียด                                                                                    |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| -F                        | จากการสร้างขึ้น : ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเทมเปอร์มาจากการกระบวนการขึ้นรูป (ผลิตภัณฑ์เหนียว) |
| -A                        | แอนนิลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์หนึ่ง : เป็นการเทมเปอร์ที่ปลอดภัยที่สุดของอะลูมิเนียมผสมเหนียว        |

ตารางที่ 2.7 (ต่อ) การให้ชื่อเทมเปอร์และการแบ่งกลุ่มย่อยของอะลูมิเนียมผสม

| การให้ชื่อเทมเปอร์ | รายละเอียด                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| -H                 | <p>แข็งเนื่องจากความเครียด : ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากการขึ้นรูปเย็นเท่านั้น -H มักจะมีตัวเลขตามหลังสองตัวหรือหลายตัว เลขตัวแรกจะบอกถึงวิธีการปฏิบัติกับอะลูมิเนียมดังต่อไปนี้คือ</p> <p>-H1 แข็งเนื่องจากความเครียด(strain hardened) อย่างเดียว เลขตัวที่สองซึ่งตามหลังจะบอกถึงความแข็งที่เกิดจากการขึ้นรูปเย็น เช่น เลข 8 หมายถึงแข็งเต็มที่(full hard) เลข 4 หมายถึงแข็งเพียงครึ่ง(half hard) เป็นต้น ดังนั้น -H18 หมายถึงแข็งเต็มที่ -H17 หมายถึงแข็งเจ็ดในแปด (seven eights-hard) -H16 หมายถึงแข็งสามในสี่ เป็นต้น แม้ว่าเลข 8 จะหมายถึงแข็งเต็มที่แล้ว ยังใช้เลข 9 ในกรณีที่แข็งพิเศษ(extra hard) เลขตัวที่สามหมายถึงองค์ การควบคุมการเทมเปอร์หรือคุณสมบัติทางกลที่แตกต่างกันไปจากที่ใช้ตัวเลขสองตัว</p> <p>-H2 แข็งเนื่องจากความเครียดและทำการแอนนิล : ผลิตภัณฑ์มีความแข็งเนื่องจากความเครียดมากเกินต้องการ แล้วลดความแข็งโดยการแอนนิล ตัวเลขที่ตามหลังจะบอกถึงความแข็งเนื่องจากความเครียดที่เหลืออยู่หลังจากการแอนนิลแล้ว ใช้ตัวเลขเช่นเดียวกับ -H1</p> <p>-H3 แข็งเนื่องจากความเครียดแล้วทำให้เสถียร(stabilized) : ผลิตภัณฑ์มีความแข็งเนื่องจากความเครียด แล้วทำให้เสถียรโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำเพื่อลดความแข็งแรงและเพิ่มความเหนียว การให้ชื่อนี้ใช้เฉพาะโลหะผสมที่มีแมกนีเซียมผสมอยู่ ตัวเลขที่ตามหลังจะบอกถึงความแข็งเนื่องจากความเครียดหลังการทำให้เสถียร โดยใช้ตัวเลขเช่นเดียวกับ -H1</p> |
| -W                 | <p>ใช้สารละลายในกรรมวิธีทางความร้อน(solution heat treated) : เป็นการเทมเปอร์ที่ไม่เสถียร ใช้กับโลหะผสมซึ่งบ่มโดยธรรมชาติที่อุณหภูมิห้อง หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนโดยใช้สารละลายแล้วเท่านั้น การบอกจะใช้เมื่อมีช่วงเวลาของการบ่มโดยธรรมชาติแสดงไว้ด้วย เช่น <math>-W\frac{1}{2}</math> hr หมายถึงการบ่มโดยธรรมชาติเป็นเวลา <math>\frac{1}{2}</math> ชั่วโมง</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| -T                 | <p>ใช้สารละลายในกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เกิดเทมเปอร์ที่เสถียร(stable temper) : (ยกเว้น -F, -O หรือ -H โดยมีการทำให้แข็งเนื่องจากความเครียดหรือไม่ก็ได้) ในกลุ่ม -T นี้มักจะมีตัวเลขตามหลังจากเลข 2 ถึง 10 ตัวเลขแต่ละตัวจะบอกขั้นตอนของการดำเนินการทางกรรมวิธีความร้อน ดังที่แสดงไว้ข้างล่างนี้</p> <p>-T2 แอนนิลเพื่อปรับปรุงความเหนียว และเพิ่มความเสถียรของขนาด(dimensional stability) (เฉพาะผลิตภัณฑ์หล่อเท่านั้น)</p> <p>-T3 ใช้สารละลายในกรรมวิธีทางความร้อน แล้วขึ้นรูปเย็นเพื่อปรับปรุงความแข็งแรง (ผลิตภัณฑ์เหนียว)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

ตารางที่ 2.7 (ต่อ) การให้ชื่อเต็มเปอร์และการแบ่งกลุ่มย่อยของอะลูมิเนียมผสม

| การให้ชื่อเต็มเปอร์ | รายละเอียด                                                                                                                                                         |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| -T4                 | ใช้สารละลายในกรรมวิธีทางความร้อนแล้วบ่มโดยธรรมชาติเพื่อให้เกิดภาวะเสถียร ใช้เมื่อผลิตภัณฑ์ไม่ผ่านการขึ้นรูปเย็นหลังจากกรรมวิธีทางความร้อน (ผลิตภัณฑ์หล่อและเหนียว) |
| -T5                 | เป็นการบ่มเทียม(artificial aging) หลังจากที่ยังงานเย็นตัวลงเนื่องจากการขึ้นรูปร้อน (ผลิตภัณฑ์หล่อและเหนียว)                                                        |
| -T6                 | ใช้สารละลายในกรรมวิธีทางความร้อนแล้วบ่มเทียม (ผลิตภัณฑ์หล่อและเหนียว)                                                                                              |
| -T7                 | ใช้สารละลายในกรรมวิธีทางความร้อนแล้วทำให้เสถียร (ผลิตภัณฑ์หล่อและเหนียว)                                                                                           |
| -T8                 | ใช้สารละลายในกรรมวิธีทางความร้อน แล้วนำมาขึ้นรูปเย็นและบ่มเทียม (ผลิตภัณฑ์เหนียวเท่านั้น)                                                                          |
| -T9                 | ใช้สารละลายในกรรมวิธีทางความร้อน ทำการบ่มเทียมแล้วจึงขึ้นรูปเย็น (ผลิตภัณฑ์เหนียวเท่านั้น)                                                                         |
| -T10                | ทำการบ่มเทียมแล้วจึงขึ้นรูปเย็น (ผลิตภัณฑ์เหนียวเท่านั้น)                                                                                                          |

การทำให้อะลูมิเนียมแข็งและต้านแรงขึ้นทำให้ได้โดยกรรมวิธีทางความร้อนที่แตกต่างจากเหล็กกล้า โดยขึ้นแรกผ่านกรรมวิธีทางความร้อนโดยใช้สารละลาย(solution heat treated) แล้วชุบ สูดทำย้ง บ่มแข็ง ซึ่งแตกต่างจากเหล็กกล้าเพราะเพียงแต่ชุบแข็งก็แข็งแล้ว สำหรับอะลูมิเนียมผสมถ้าชุบเพียงอย่างเดียวจะอ่อนและเหนียว แต่จะแข็งขึ้นถ้าผ่านการบ่มแข็ง กระบวนการนี้ทำให้สารเพิ่มความแข็ง (ส่วนมากคือ ทองแดงกับแมกนีเซียมและแมกนีเซียม บางครั้งก็เป็นซิลิคอนกับนิกเกิล) แยกตัวออกไปทั่ว โครงสร้างของอะลูมิเนียมผสม อะลูมิเนียมผสมบางชนิดบ่มได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่บางชนิดจะแข็งเร็วขึ้นเมื่อได้รับความร้อน กระบวนการให้ความร้อนกับอะลูมิเนียมผสมนี้เรียกว่า การบ่มเทียม อะลูมิเนียมผสมที่ผ่านกรรมวิธีนี้อยู่ในกลุ่ม "T" อีกวิธีหนึ่งที่ทำให้อะลูมิเนียมผสมแข็งขึ้นก็คือ การทำให้เกิดความเครียดจนเกินจุดคราก(strain hardening) ซึ่งอยู่ในกลุ่ม "H"

คุณสมบัติทางกลและการผลิตของอะลูมิเนียมผสมเหนียว ดูได้จากตารางที่ ๒.7 ในภาคผนวก

## 2.8 อะลูมิเนียมผสมหล่อ

อะลูมิเนียมผสมหล่อเป็นวัสดุวิศวกรรมที่ใช้งานได้หลายอย่าง และเป็นที่ยอมรับใช้กันแพร่หลายอย่างรวดเร็ว เมื่อผสมโลหะผสมบางชนิดลงไปจะทำให้อะลูมิเนียมผสมหล่อใช้สำหรับหล่อด้วยวิธีตายคาสต์(die

cast) โมลด์คาสต์(mold cast) หล่อด้วยแบบทราย หล่อด้วยแบบปูนพลาสเตอร์ หรือหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงได้ เป็นต้น และยังสามารถทำให้มีผิวสำเร็จต่างๆ ได้ด้วย อะลูมิเนียมผสมหล่อตัดกลึงได้ง่าย ถ้าหล่ออย่างเหมาะสม (มีความหนาพอเหมาะ) ก็เชื่อมได้ง่าย อะลูมิเนียมผสมหล่อบางชนิดบัดกรีแข็งไม่ได้ เช่น A712.0, C712.0 และ 443.0

ข้อเสียของอะลูมิเนียมผสมหล่อก็คือหดตัวมากจากการหล่อ ซึ่งอาจหดตัวถึง 3.5% ถึง 8.5% โดยปริมาตรและ कुछ ซึมก๊าซได้ ผลจากการหดตัวอาจทำให้น้อยลงได้ถ้าออกแบบการหล่ออย่างระมัดระวัง โดยค่อย ๆ เปลี่ยนพื้นที่หน้าตัดช้า ๆ และสังเกตมาตรฐานที่กำหนดความบางของงานหล่อตามวิธีการหล่อ เช่น ถ้าใช้หล่อด้วยแบบทรายก็ไม่ควรให้ชิ้นงานบางกว่า 6.35 mm เป็นต้น นอกจากนั้นถ้าควบคุมอัตราการเท อุณหภูมิและอื่น ๆ จะทำให้ผลจากการหดตัวและการ कुछ ซึมก๊าซลดลงหรือหมดไปได้

คุณสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสมหล่อบางชนิด ดูได้จากตารางที่ ข.8 ในภาคผนวก ซึ่งใช้วิธีการหล่อต่างกัน

## 2.9 ทองแดงและทองแดงผสม

1. ทองแดง ทองแดงบริสุทธิ์ใช้แทนทองในอุตสาหกรรมทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เพราะมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี อุตสาหกรรมน้ำมัน เคมี และโรงต้นกำลัง ก็ใช้เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน ทองแดงที่ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าเป็นประเภทเหนียวหรือไร้ออกซิเจน ทองแดงทั้งสองชนิดมีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.90%

ทองแดงและทองแดงผสมส่วนมากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนไม่ได้ คุณสมบัติทางกลของทองแดงจะเปลี่ยนแปลงและแข็งแรงขึ้นได้โดยการขึ้นรูปเย็น อย่างไรก็ตามก็มีข้อยกเว้นเพราะทองแดงเบริลเลียม (beryllium) ชุบแข็งได้

2. ทองแดงผสม ทองแดงผสมมีอยู่ประมาณ 250 ชนิด และมีการใช้ชื่ออยู่มากมายทั้ง ASTM, SAE และอื่น ๆ กับทั้งมีชื่อทางอุตสาหกรรมอีก จึงทำให้มีความสับสนอยู่มาก ขณะกำลังพัฒนาระบบการให้ชื่อทองแดงอยู่ซึ่งยังไม่สมบูรณ์นัก

ทองแดงผสมแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ทองเหลือง และบรอนซ์(bronze) ทองเหลืองเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี ทองเหลืองผสมหลักก็คือ ทองเหลืองอัลฟา(alpha brass)

(ตัวอย่างเช่น ทองเหลืองแดง(red brass) และทองเหลืองเหลือง(yellow brass)) และทองเหลืองอัลฟาเบต้า(alpha-beta brass) ทองเหลืองอาจมีส่วนผสมของคัสบุกและตะกั่วปนอยู่ได้ ถ้ามีนิกเกิลปนอยู่ในทองเหลืองมาก (มากกว่า 20%) เรียกว่า เงินนิกเกิล(nickel silver)

บรอนซ์เป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับคัสบุก แต่อย่างไรก็ตามบรอนซ์บางชนิดมีคัสบุกผสมอยู่น้อยมากหรือไม่มีเลย แต่ก็ยังเรียกว่าบรอนซ์เพราะมีสีเหมือนบรอนซ์ บรอนซ์ผสมที่ใช้กันมากคือฟอสเฟอร์-บรอนซ์(phosphor bronze) ซิลิคอนบรอนซ์(silicon bronze) อะลูมิเนียมบรอนซ์(aluminium bronze) และแมงกานีสบรอนซ์(manganese bronze) ตารางที่ ข.9 แสดงทองแดงผสมบางชนิด และตารางที่ ข.10 แสดงทองแดงผสมหล่อบางชนิด

## 2.10 แมกนีเซียมผสม

แมกนีเซียมเป็นโลหะที่เบาที่สุด (ความถ่วงจำเพาะ 1.74) ที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรม โลหะผสมในแมกนีเซียมก็เพื่อประโยชน์ในการใช้งานและความต้านแรง เช่น อะลูมิเนียม สังกะสี เซอร์โคเนียม(zirconium) แมงกานีสและทอเรียม(thorium) เป็นต้น ASTM แบ่งชนิดของแมกนีเซียมผสมตามชนิดของโลหะผสมดังต่อไปนี้ A แทนอะลูมิเนียม Z แทนสังกะสี K แทนเซอร์โคเนียม M แทนแมงกานีส H แทนทอเรียม และ E แทนโลหะ rare earth การผสมทอเรียมและ rare earth ทำให้คุณสมบัติของแมกนีเซียมผสมที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น

ASTM กำหนดวิธีการให้ชื่อแมกนีเซียมผสมอย่างง่าย ๆ ซึ่งอธิบายให้เห็นได้โดยดูจากตัวอย่าง เช่น ชนิด AZ61A-T4 มีอะลูมิเนียม 6% สังกะสี 1% อักษร A หมายถึงว่าโลหะผสมนี้มีอะลูมิเนียมเป็นหลัก และ T4 หมายถึงการให้ชื่อเต็มเปอร์เซ็นต์ใช้ระบบเดียวกับของอะลูมิเนียม ดังนั้นโลหะผสมนี้จึงใช้สารละลายในกรรมวิธีทางความร้อนตามวิธี T4

แมกนีเซียมผสมมีอัตราส่วนความต้านแรงต่อน้ำหนักสูง จึงเหมาะกับการใช้ทำเครื่องบิน จรวด ยานยนต์ อุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ เครื่องมือ อุปกรณ์ทางแสง เครื่องใช้ในสำนักงาน เป็นต้น

แมกนีเซียมผสมตัดกลึงได้ง่าย มีดัชนีในการตัดกลึง 500 เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอนกลึงเสรี B1112 ซึ่งมีดัชนีในการตัดกลึง 100 และขึ้นรูปได้หลายวิธี เช่น หล่อ ตีอัด ผลักดัน(extrusion) เชื่อมโดยก๊าซเฉื่อย เชื่อมโดยใช้ความดันทานและย้ำหุ้ม ข้อควรระวังในการตัดกลึงแมกนีเซียมผสมคือ เศษโลหะจากการตัดกลึงชิ้นเล็กมากจะลุกไหม้ได้ง่าย ถ้าเป็นชิ้นใหญ่จะลุกไหม้ยาก

เพราะถ่ายเทความร้อนได้ดีทำให้อุณหภูมิไม่สูงจนถึงจุดหลอมเหลว ในทางปฏิบัติมักจะเก็บเศษส่วนของแมกนีเซียมผสมไว้ในที่เปียกชื้นและเก็บไว้ในภาชนะบรรจุ

คุณสมบัติที่ออกอย่างหนึ่งก็คือ ทนต่อบรรยากาศได้ดี แต่น้ำก็มักจะกัดกร่อนได้บ้าง ซึ่งป้องกันได้โดยทำให้ผิวสำเร็จให้ นอกจากนั้นยังทนต่อการกัดกร่อนของกรดโครมิก(chromic) กรดไฮโดรฟลูออริก(hydrofluoric) ก๊าซ สารละลายต่างๆ และสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น ไฮโดรคาร์บอน อัลดีไฮด์(aldehydes) แอลกอฮอล์ ฟีนอล(phenols) อามาย(amines) เอสเตอร์(esters) และน้ำมัน

ตารางที่ ข. 11 ในภาคผนวก แสดงคุณสมบัติทางกลของแมกนีเซียมผสมชนิดต่าง ๆ ที่นิยมใช้ทั่วไป

## 2.11 นิกเกิลและนิกเกิลผสม

นิกเกิลมีใช้งานอยู่มากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องการคุณสมบัติที่ทนต่อการกัดกร่อนและทนต่อการเกิดออกไซด์ นิกเกิลผสมบางชนิดมีความเหนียวดีมาก ดังนั้นจึงใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 1105 °C โดยมีความต้านแรงสูงมากและเป็นโลหะผสมพิเศษสำหรับงานโครงสร้าง นิกเกิลผสมบางชนิดมีคุณสมบัติที่เลิศสำหรับงานด้านอุณหภูมิเย็นจัด(cryogenic) ซึ่งมีความต้านแรง เหนียว และเหนียวนุ่ม แม้อุณหภูมิจะต่ำถึง -240 °C ก็ตาม

นิกเกิลผสมเหนียวมีคุณสมบัติทางด้านการผลิตที่ ตัดกลึงได้ง่าย เจือนได้ ขึ้นรูปเย็น ขึ้นรูปร้อน และเชื่อมได้ โลหะผสมที่ผ่านการหล่อสามารถตัดกลึงได้ เจียรไนได้ เชื่อมและบัดกรีแข็งได้

นิกเกิลมีราคาสูงกว่าเหล็กกล้าและอะลูมิเนียม แต่ยังมีราคาค่ากว่าโลหะชนิดอื่นที่ใช้งานกับอุณหภูมิสูงมากหรือต่ำมาก แล้วยังคงมีความต้านแรงสูง นอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติแม่เหล็ก ไฟฟ้า และความร้อนที่สำคัญสำหรับงานบางประเภทอีกด้วย

ASTM, ASME, AMS กำหนดคุณลักษณะจำเพาะของนิกเกิลและนิกเกิลผสมไว้ แต่ทางปฏิบัติมักนิยมเรียกชื่อทางการค้ามากกว่า ยกเว้นบางชนิดที่มีนิกเกิลผสมสูงคือ มีนิกเกิลผสมอยู่ 94% ขึ้นไป เช่น นิกเกิล 200 นิกเกิล 201 นิกเกิล 210 ดุรานิกเกิล(duranickel) 301 และเบอร์ลิโก-นิกเกิล(berylconickel) 440 คุณสมบัติทางกลของนิกเกิลและนิกเกิลผสมที่อุณหภูมิห้องดูได้จากตารางที่ ข.13 และคุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำดูได้จากตารางที่ ข.14

## 2.12 พลาสติก

พลาสติกเป็นชื่อเรียกสารอินทรีย์สังเคราะห์นานาชนิด ซึ่งทำให้เกิดความเข้าใจผิดได้เพราะวัสดุชนิดนี้จะเป็นพลาสติกในระหว่างกระบวนการผลิตขณะหนึ่งเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามวัสดุพลาสติกแสดงให้เห็นถึงความเจริญเติบโตของวัสดุสังเคราะห์ ในสายตาของวิศวกรมีความสนใจพลาสติกในด้านการใช้เป็นโครงสร้างและการใช้งานพิเศษบางประการ

พลาสติกเกิดจากการเกาะตัวกันของโมเลกุลคาร์บอน-ไฮโดรเจน และออกซิเจนในสภาพอิ่มตัว(saturated) และไม่อิ่มตัว(unsaturated) พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เทอร์โมเซตติง(thermosetting) พลาสติก และเทอร์โมพลาสติก(thermoplastic) เทอร์โมเซตติงพลาสติกขึ้นรูปโดยใช้ความร้อนและความดัน เมื่อแข็งตัวแล้วจะทำให้ร้อนตัวอีกไม่ได้ ส่วนเทอร์โมพลาสติกจะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเมื่อลดความร้อน แม้ว่าจะทำเช่นนั้นหลายครั้งก็ไม่ทำให้คุณสมบัติของพลาสติกชนิดนี้เปลี่ยนแปลงไป

เมื่อใส่ฟิลเลอร์(filler) ในพลาสติก เช่น ฝ้าย กระดาษ เส้นใยหินหรือแก้ว จะทำให้ได้พลาสติกอีก 2 ชนิดคือ พลาสติกเสริมความแข็งแรง(reinforced plastics) และลามิเนตพลาสติก(laminated plastics) ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษ เช่น มีความเหนียวสูง ทนต่อการสึกหรอได้ดี เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารที่นำมาลามิเนต

คุณสมบัติของพลาสติกบางชนิดที่น่าสนใจสำหรับการใช้งาน ดูได้จากตารางที่ ข.15

## 2.13 เอกสารอ่านประกอบ

1. A.D.DEUTSCHMAN, W.J.MICHELS & C.E.WILSON, "Machine Design Theory and Practice," Macmillan Publishing Co., Inc., 1975.
2. "Metals Handbook," Vol.1, 8<sup>th</sup> Ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1961.
3. "Metals Handbook," Vol.2, 8<sup>th</sup> Ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1964.
4. "Tool Engineers Handbook," American Society of Tool Manufacturing Engineers, McGraw-Hill.

5. V.M.FAIRE, "Design of Machine Elements," 4<sup>th</sup> Ed., Macmillan Company,  
New York, 1965.
6. 1970 Metals Reference Issue, Machine Design. The Penton Pub. Co.

# SE-ED

inspiration starts here

# 3

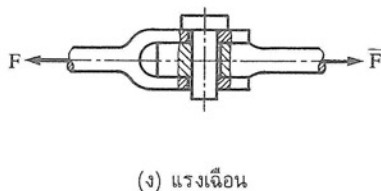
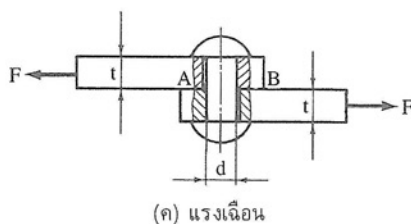
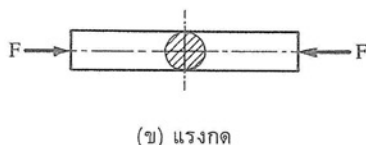
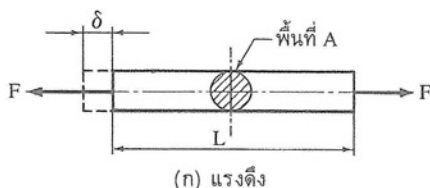
## การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลย่อย

การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอย่างง่าย จำเป็นจะต้องอาศัยความรู้ทางด้านกลศาสตร์วัสดุ พลศาสตร์ วัสดุศาสตร์ และอื่น ๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานและการนำไปใช้งาน สิ่งสำคัญก่อนที่จะออกแบบชิ้นงานได้ก็คือ ความเข้าใจทางด้านพลศาสตร์และกลศาสตร์วัสดุ อย่างต้องแท้ ในบทนี้จะเป็นการทบทวนเนื้อความและสูตรที่สำคัญทางด้านกลศาสตร์วัสดุ ซึ่งจะต้องใช้ประกอบการคำนวณออกแบบอยู่เสมอ รวมทั้งแสดงถึงวิธีการคำนวณออกแบบชิ้นงานอย่างง่ายอีกด้วย

inspiration starts here

### 3.1 ความเค้นอย่างง่าย

นิยามของความเค้นคือ แรงหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่รับแรง ความเค้นอย่างง่าย(simple stress) มีอยู่ 3 ชนิดคือ ความเค้นดึง ความเค้นกด และความเค้นเฉือน



รูปที่ 3.1 แรงชนิดต่าง ๆ

พิจารณารูปที่ 3.1(ก) และ (ข) ซึ่งเป็นท่อนโลหะกลมอยู่ภายใต้แรงดึง และแรงกด  $F$  ตามลำดับ ความเค้นดึงและความเค้นกดคือ

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad \text{และ} \quad \sigma_c = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

ในกรณีที่แผ่นโลหะยึดติดกันด้วยหมุดย้ำ ดังรูปที่ 3.1(ค) ตัวหมุดย้ำอาจจะขาดเนื่องจากแรงเฉือนกระทำที่หน้าตัด AB ถ้าพื้นที่หน้าตัดของหมุดย้ำเท่ากับ  $A$  ความเค้นเฉือนในหน้าตัดของหมุดย้ำคือ

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

ถ้าหน้าตัดของชิ้นงานที่รับแรงเฉือนมีมากกว่าหนึ่งแห่ง ดังเช่นในรูปที่ 3.1(ง) ซึ่งมีสองแห่ง พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงคือ  $2A$  ในกรณีเช่นนี้เรียกว่า หมุดย้ำรับแรงเฉือนคู่(double shear) เพราะฉะนั้นความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในหน้าตัดของหมุดย้ำนี้จะเท่ากับ

$$\tau = \frac{F}{2A}$$

พิจารณาหมุดย้ำในรูปที่ 3.1(ค) จะเกิดการอัดกันระหว่างด้านข้างของตัวหมุดย้ำกับแผ่นโลหะด้วยความเค้นที่ผิวโลหะที่สัมผัสกันนี้ไม่สม่ำเสมอ ในทางปฏิบัติจึงหาความเค้นกดโดยใช้พื้นที่ภาพฉาย (projected area) ของส่วนที่อัดกันอยู่ แทนการใช้พื้นที่จริงรอบหมุดย้ำ และมีชื่อเรียกว่าความเค้นอัด(bearing stress) ถ้าหมุดย้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d$  ความเค้นอัดคือ

$$\sigma_c = \frac{F}{dt} \quad (3.3)$$

## 3.2 ความเครียด

ความเครียด(strain)  $\epsilon$  หมายถึงอัตราส่วนระหว่างส่วนที่ยืดหรือหดของชิ้นงานกับความยาวเดิม จากรูปที่ 3.1(ก) ส่วนที่ยืดออกเนื่องจากแรงดึง  $F$  เท่ากับ  $\sigma$  เพราะฉะนั้นความเครียดนี้จะเท่ากับ

$$\epsilon = \frac{\sigma}{L} \quad (3.4)$$

จากกฎของฮุก

$$\sigma = E\epsilon \quad (3.5)$$

แต่  $\sigma = F/A$  ฉะนั้นเมื่อแทนค่า  $\epsilon$  จากสมการที่ (3.4) ลงในสมการที่ (3.5) จะได้ว่า

$$\sigma = \frac{FL}{AE} \quad (3.6)$$

จากกลศาสตร์วัสดุยังทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างยังส์โมดูลัสและโมดูลัสเฉือนอีกด้วย

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.7)$$

โดยที่  $\nu$  เป็นอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

### 3.3 การบิด

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมอยู่ภายใต้โมเมนต์บิด (torque) จะบิดไปเป็นมุมเท่ากับ

$$\theta = \frac{TL}{GJ} \quad (3.8)$$

โดยที่

$T$  คือโมเมนต์บิด

$L$  คือความยาว

$J$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของพื้นที่ (polar area moment of inertia)

$$= \frac{\pi}{32} d^4 \quad \text{สำหรับท่อนกลมตัน}$$

$$= \frac{\pi}{32} (d^4 - d_i^4) \quad \text{สำหรับท่อนกลวง}$$

$d$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก

$d_i$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน

ความเค้นเฉือนที่เกิดจากการบิดจะมีค่าสูงสุดที่ผิวนอกของท่อนกลมนั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

สมการ

$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad (3.9)$$

โดยที่  $r$  คือรัศมีนอกของท่อนกลม

ในการที่จะใช้สมการที่ (3.9) มักจะจำเป็นที่จะต้องหาค่าโมเมนต์บิดให้ได้เสียก่อน สำหรับเครื่องจักรกลที่ส่งกำลังมาตามเพล่า จะคำนวณหาค่าโมเมนต์บิดได้จาก

$$W_p = T_w = 2\pi nT \quad (3.10)$$

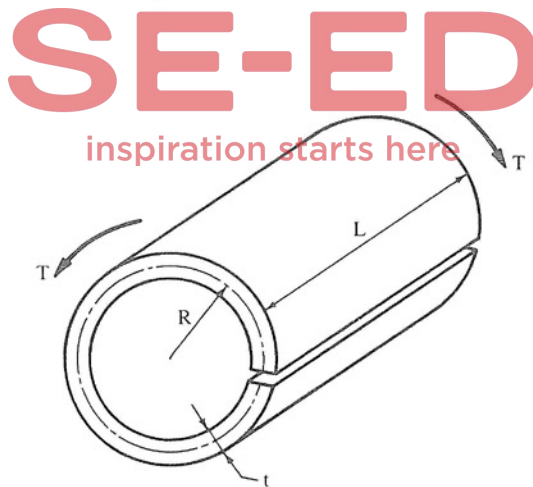
โดยที่  $P_p$  คือกำลังงานเป็น  $P$   
 $T$  คือโมเมนต์บิดเป็น  $Nm$   
 $\omega$  คือความเร็วเชิงมุมเป็น  $rad/s$   
 $n$  คือความเร็วรอบเป็น  $rev/s$

สำหรับในระบบหน่วยอังกฤษซึ่งยังมีใช้กันอยู่จะบอกกำลังงานเป็นแรงม้า และคำนวณโมเมนต์บิดได้จาก

$$hp = \frac{Tn}{63000} \quad (3.11)$$

โดยที่  $T$  คือโมเมนต์บิดเป็น  $in-lb$   
 $n$  คือความเร็วรอบเป็น  $rev/min$

ในกรณีของท่อกลมผนังบาง (thin-walled tube) ซึ่งมีรัศมีเฉลี่ย  $R$  และผ่าตลอดความยาว ดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ท่อกลมผนังบาง ผ่าตลอดความยาว

มุมบิดและค่าความเค้นเฉือนโดยประมาณคือ

$$\theta = \frac{3TL}{2\pi R t^3 G} \quad (3.12)$$

$$\tau = \frac{3T}{2\pi R t^2} \quad (3.13)$$

### 3.4 คาน

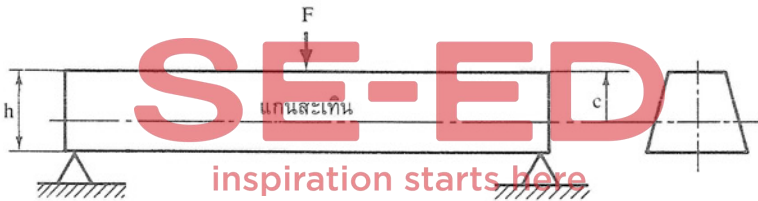
ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจำนวนมากรับแรงในแนวตั้งลักษณะเช่นเดียวกับคานทั่วไป ฉะนั้นจึงใช้ความเค้นดัด(bending stress) และการยุบตัว(deflection) เป็นข้อจำกัดในการออกแบบ ความเค้นดัดสูงสุดเกิดขึ้นที่ผิวนอกสุดของคาน ณ ตำแหน่งที่โมเมนต์ดัด(bending moment) มีค่าสูงสุด ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I} \quad (3.14)$$

โดยที่  $M$  คือโมเมนต์ดัด

$c$  คือระยะจากแกนสะเทิน(neutral axis) ไปยังผิวนอกสุด ดังรูปที่ 3.3

$I$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่



รูปที่ 3.3 คานและแกนสะเทิน

สำหรับค่า  $I$  ของหน้าตัดบางชนิด คูได้จากตารางที่ ก.1 ส่วนค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดและการยุบตัวของคาน คูได้จากตารางที่ ก.2 ถึงแม้ว่าจะมีตารางทั้งสองนี้ช่วยในการคำนวณ แต่ผู้อ่านก็ต้องเข้าใจถึงวิธีการหาค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดและการยุบตัวของคานจากกลศาสตร์วัสดุเป็นอย่างดี ทั้งนี้เพราะลักษณะของแรงและชนิดของคานอาจจะไม่ตรงกับในตารางซึ่งแสดงไว้อย่างจำกัดก็ได้

โดยทั่วไปแล้วความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในคานจะมีค่าน้อยมาก จนกระทั่งไม่ต้องนำมาคิดในการออกแบบได้ แต่ถ้าคานสั้นและมีหน้าตัดสูงมาก ความเค้นเฉือนก็อาจจะมีค่ามากได้ สำหรับคานที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความเค้นเฉือนสูงสุดจะเกิดที่แกนสะเทิน และมีค่า 1.5 เท่าของความเค้นเฉือนเฉลี่ยหรือเท่ากับ

$$\tau = \frac{3V}{2A} \quad (3.15 \text{ ก})$$

สำหรับหน้าตัดกลม

$$\tau = \frac{4V}{3A} \quad (3.15 \text{ ข})$$

โดยที่  $V$  คือแรงเฉือนสูงสุด  
 $A$  คือพื้นที่หน้าตัด

### 3.5 ภาวะความดันผนังบาง

ภาวะผนังบาง หมายถึงภาวะที่ความหนาของผนังมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับรัศมีความโค้ง ถ้าให้  $t$  เป็นความหนา และ  $R$  เป็นรัศมีความโค้ง ถ้า  $R/t$  มีค่ามากกว่า 10 ก็อาจจะจัดได้ว่าเป็นภาวะผนังบาง

สำหรับภาวะผนังบางทรงกลมซึ่งภายในบรรจุก๊าซความดัน  $p$  ความเค้นที่เกิดขึ้นภายในผนังตามทฤษฎีของภาวะผนังบางมีค่าเท่ากับ

$$\sigma = \frac{pR}{2t} \quad (3.16)$$

ส่วนภาวะผนังบางทรงกระบอก ความเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นในแนวความโค้งเรียกว่า ความเค้นรัศ (hoop stress) หรือความเค้นในแนวเส้นรอบวง (circumferential stress) ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$\sigma_h = \frac{pR}{t} \quad (3.17)$$

ส่วนความเค้นที่เกิดขึ้นตามแนวแกนของทรงกระบอก เรียกว่า ความเค้นในแนวแกน (longitudinal stress) มีค่าน้อยกว่าความเค้นในแนวเส้นรอบวงครึ่งหนึ่ง นั่นคือ

$$\sigma_l = \frac{pR}{2t} \quad (3.18)$$

โดยปกติแล้วการทำภาวะความดันส่วนมากจะมีตะเข็บหรือรอยต่อ ซึ่งบริเวณตะเข็บจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณเนื้อผนัง เพราะฉะนั้นความหนาของผนังที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.16) หรือสมการที่ (3.17) จึงไม่ได้ความปลอดภัยเท่าที่ต้องการ ดังนั้นจึงควรใช้ความหนาของผนังที่คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้คือ

สำหรับภาวะผนังบางทรงกลม

$$t = \frac{pR}{2\eta\sigma} \quad (3.19)$$

สำหรับภาชนะผนังบางทรงกระบอก

$$t = \frac{pR}{\eta\sigma} \quad (3.20)$$

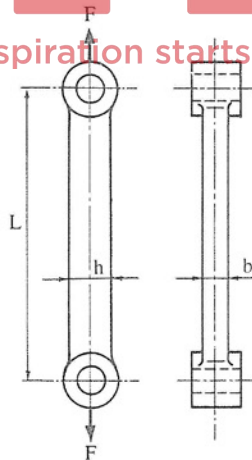
โดยที่  $\eta$  คือประสิทธิภาพของตะเข็บหรือรอยต่อ

โดยทั่วไปแล้วการออกแบบภาชนะความดันจะต้องทำตามเกณฑ์ของภาชนะความดัน เช่น ของสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งสหรัฐอเมริกา (ASME) เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อให้ได้ความปลอดภัยและภาชนะความดันที่ได้มาตรฐานเพียงพอ รายละเอียดการออกแบบตามเกณฑ์นี้จะได้กล่าวถึงภายหลัง

**ตัวอย่างที่ 3.1** ชิ้นงานดังรูปที่ 3.4 ทำด้วยเหล็กกล้า AISI C 1020 รับแรงดึง 30 kN ถ้าให้  $h = 1.5b$  จงหาขนาดของชิ้นงานเมื่อ

- (ก) ให้แรงอยู่หนึ่งและถือความต้านแรงดึงครากเป็นหลัก
- (ข) เช่นเดียวกับข้อ (ก) แต่ถือความต้านแรงดึงเป็นหลัก
- (ค) ถ้าแรงกระทำเข้าโดยเปลี่ยนค่าจาก 0 ถึง 30 kN และใช้ความต้านแรงดึงครากเป็นหลัก

inspiration starts here



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานรับแรงดึง

**วิธีทำ** จากตารางที่ ข.3 ความต้านแรงดึงและความต้านแรงดึงครากของวัสดุคือ

$$\begin{aligned} \sigma_u &= 75 \text{ ksi} \\ &= 75 \times 6.895 = 517 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 48 \text{ ksi} \\ &= 48 \times 6.895 = 331 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

(ก) จากตารางที่ 1.3 ให้  $N_y = 1.5$  ฉะนั้นความเค้นออกแบบสำหรับแรงดึง

$$\sigma_{td} = \frac{331}{1.5} = 220.70 \text{ N/mm}^2$$

จาก  $\sigma_t = \frac{F}{A} = \frac{F}{bh} = \frac{F}{b \times 1.5b}$

$$220.70 = \frac{30000}{1.5b^2}$$

เพราะฉะนั้น  $b = 9.50 \text{ mm}$

และ  $h = 1.5 \times 9.50$   
 $= 14.25 \text{ mm}$

(ข) จากตารางที่ 1.3 ให้  $N_u = 3$  ฉะนั้นความเค้นออกแบบสำหรับแรงดึง

$$\sigma_{td} = \frac{517}{3} = 172.30 \text{ N/mm}^2$$

จาก  $\sigma_t = \frac{F}{A} = \frac{F}{1.5b^2}$

$$172.30 = \frac{30000}{1.5b^2}$$

เพราะฉะนั้น  $b = 10.80 \text{ mm}$

และ  $h = 1.5 \times 10.80$   
 $= 16.20 \text{ mm}$

(ค) จากตารางที่ 1.3 ให้  $N_y = 3$  สำหรับแรงกระทำซ้ำทิศทางเดียว ฉะนั้นความเค้นออกแบบคือ  $331/3$  ดังนั้น

$$\frac{331}{3} = \frac{30000}{1.5b^2}$$

เพราะฉะนั้น  $b = 13.50 \text{ mm}$

และ  $h = 1.5 \times 13.50$   
 $= 20.25 \text{ mm}$

จากการเปรียบเทียบในข้อ (ก) และ (ข) จะพบว่า ขนาดที่ได้จากการออกแบบจะแตกต่างกันไปบ้าง ทั้งขึ้นอยู่กับวิธีการตัดสินใจเลือกใช้ค่าความปลอดภัยของผู้ออกแบบ ซึ่งอาศัยความชำนาญและประสบการณ์เป็นหลักสำคัญ หลังจากได้ขนาดจากการคำนวณแล้วก็จะต้องปรับตัวเลขเพื่อให้เหมาะสมทางด้านปฏิบัติ สำหรับชิ้นงานลักษณะดังในตัวอย่างนี้อาจจะไม่ต้องการความละเอียดถึงหนึ่งในร้อยของมิลลิเมตร ฉะนั้นถ้าจะใช้ขนาดที่ได้ในข้อ (ก) ก็อาจจะให้  $b = 10 \text{ mm}$  และ  $h = 14 \text{ mm}$  เป็นต้น

สำหรับขนาดในข้อ (ค) จะใหญ่ขึ้น ทั้งนี้เพราะแรงกระทำที่ไม่อยู่นิ่งอาจทำให้เกิดความล้า (fatigue) ขึ้นได้ ฉะนั้นจึงต้องใช้ค่าความปลอดภัยมากกว่าวิธีการออกแบบที่รับแรงอยู่นิ่ง วิธีการออกแบบโดยคิดถึงความล้าอย่างละเอียดจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 5

**ตัวอย่างที่ 3.2** เฟลากลมท่อนหนึ่งทำจากเหล็กกล้า AISI CD 1030 ใช้ส่งกำลัง 20 kW หมุนด้วยความเร็วรอบ 1450 rpm จงหาขนาดของเฟลาโดยใช้ความต้านแรงดึงคร่าว

- (ก) เมื่อเป็นเฟลาตัน
- (ข) เมื่อเป็นเฟลาคลง โดยมีอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d/d_1 = 2$
- (ค) เปรียบเทียบมุมบิดต่อความยาวเฟลา 500 mm และน้ำหนักของเฟลาที่ได้จากข้อ (ก) และ (ข)
- (ง) เมื่อไม่ต้องการให้เฟลาตันมีมุมบิดมากกว่า 2 องศาต่อความยาวเฟลา 500 mm

**วิธีทำ** จากตารางที่ ข.2

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 76 \text{ ksi} \\ &= 76 \times 6.895 = 524 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

จากตารางที่ ข.16

$$\begin{aligned}E &= 207 \text{ GN/m}^2 \\ G &= 79.30 \text{ GN/m}^2\end{aligned}$$

สมมติให้แรงที่กระทำต่อเฟลามีขนาดสม่ำเสมอ ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะของแรงที่อยู่นิ่งได้ จากตารางที่

1.3 เลือก  $N = 2$

$$\begin{aligned}\text{ความต้านแรงเฉือนคร่าว} \quad \tau_y &= 0.6\sigma_y \\ \text{ความเค้นเฉือนออกแบบ} \quad \tau_d &= \frac{\tau_y}{N} \\ &= \frac{0.6 \times 524}{2} = 157.20 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

(ก) หาขนาดของเพลาค้น

$$W_p = 2\pi nT$$

$$20000 = 2\pi \times \left(\frac{1450}{60}\right) \times T$$

$$T = 131.70 \text{ Nm}$$

ความเค้นเฉือนสูงสุด  $\tau = \frac{Tr}{J} = \frac{16T}{\pi d^3}$

แทนค่า  $157.20 = \frac{16 \times 131.70 \times 1000}{\pi d^3}$

เพราะฉะนั้น  $d = 16.22 \text{ mm}$

การเลือกขนาดเพลาควจะเลือกเฉพาะขนาดที่มีการผลิตอยู่แล้ว ซึ่งผู้ออกแบบจะต้องตรวจสอบคู่มือก่อน สำหรับขนาดที่แนะนำให้เลือกใช้จะได้กล่าวถึงต่อไปในบทการออกแบบเพลาคว

(ข) โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของพื้นที่ของเพลากลวง

$$\begin{aligned} J &= \frac{\pi}{32} (d^4 - d_i^4) \\ &= \frac{\pi}{32} \left[ (2d_i)^4 - d_i^4 \right] \\ &= \frac{15\pi d_i^4}{32} \end{aligned}$$

SEED  
inspiration starts here

ความเค้นเฉือนสูงสุด  $\tau = \frac{Tr}{J} = \frac{T(d/2)}{J} = \frac{Td_i}{J}$

$$= \frac{32T}{15\pi d_i^3}$$

$157.20 = \frac{32 \times 131.70 \times 1000}{15\pi d_i^3}$

เพราะฉะนั้น  $d_i = 8.29 \text{ mm}$

และ  $d = 2 \times 8.29$

$$= 16.58 \text{ mm}$$

(ค) มุมบิดของเพลาค้น

$$\theta = \frac{TL}{GJ}$$

เพลาค้น  $J = \frac{\pi}{32} (16.22)^4 = 6795 \text{ mm}^4$

$$\begin{aligned}\text{มุมบิด} \quad \theta &= \frac{131.70 \times 1000 \times 500}{79.3 \times 1000 \times 6795} \\ &= 0.122 \text{ rad} = 7^\circ\end{aligned}$$

$$\text{เพลากลวง} \quad J = \frac{15\pi(8.29)^4}{32} = 6955 \text{ mm}^4$$

$$\begin{aligned}\text{มุมบิด} \quad \theta &= \frac{131.70 \times 1000 \times 500}{79.3 \times 1000 \times 6955} \\ &= 0.119 \text{ rad} = 6.8^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\text{น้ำหนักเพลาดัน}}{\text{น้ำหนักเพลากลวง}} &= \frac{\frac{\pi}{4}(16.22)^2}{\frac{\pi}{4}(16.58^2 - 8.29^2)} \\ &= 1.28\end{aligned}$$

จากผลการคำนวณพบว่า เพลากลวงซึ่งรับโมเมนต์บิดได้เท่ากับเพลาดันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกใหญ่กว่าเพลาดัน แต่สามารถลดน้ำหนักลงได้ถึง 28% และมุมบิดยังลดลงอีก 0.2 องศา อย่างไรก็ตาม มุมบิดของเพลาก็ควรจะน้อยกว่านี้สัก เพราะฉะนั้นการหาขนาดของเพลาก็จะมิใช่พิจารณาจากการจำกัดความเค้น แต่จะเป็นการจำกัดมุมบิด

(ง) มุมบิดของเพลาดัน

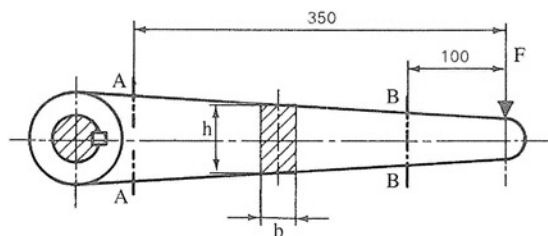
inspiration starts here

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{TL}{GJ} = \frac{32TL}{\pi Gd^4} \\ \frac{2\pi}{180} &= \frac{32 \times 131.70 \times 1000 \times 500}{\pi \times 79.3 \times 1000 \times d^4}\end{aligned}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad d = 22.20 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\text{ความเค้นเฉือนสูงสุดในเพลาดัน} \quad \tau &= \frac{16T}{\pi d^3} \\ &= \frac{16 \times 131.70 \times 1000}{\pi \times 22.2^3} \\ &= 61.30 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

**ตัวอย่างที่ 3.3** ก้านหมุนยึดติดกับเพลาด้วยลิ่มค้ำรูปที่ 3.5 มีขนาดหน้าตัด  $h = 3b$  รับแรง  $F = 9 \text{ kN}$  กระทำเข้าสองทิศทางขึ้นและลง วัสดุที่ต้องการใช้เป็นก้านหมุนคือ AISI HR 1020 ถ้าให้ก้านหมุนมีขนาดเล็กลงตามสมการของเส้นตรงจากหน้าตัด AA ถึงหน้าตัด BB จงหาขนาดของก้านหมุนนี้



รูปที่ 3.5 ก้านหมุน

วิธีทำ ให้ใช้ความต้านแรงดึงครากเป็นหลัก จากตารางที่ ข.2

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 43 \text{ ksi} \\ &= 43 \times 6.895 = 296.50 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

จากตารางที่ 1.3 เลือกใช้  $N=4$

โมเมนต์คัตที่ AA ;  $M = 9000 \times 350 = 3.15 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm}$

โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่  $I = \frac{bh^3}{12} = \frac{b(3b)^3}{12} = \frac{9b^4}{4}$

ความเค้นคัตในก้านหมุน  $\sigma_b = \frac{Mc}{I} = \frac{M(h/2)}{I}$

แทนค่า  $\frac{296.50}{4} = \frac{(3.15 \times 10^6)(3b/2)}{9b^4/4}$

เพราะฉะนั้น  $b = 30.50 \text{ mm}$

และ  $h = 3 \times 30.50 = 91.50 \text{ mm}$

โมเมนต์คัตที่ BB ;  $M = 9000 \times 100 = 9 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{mm}$

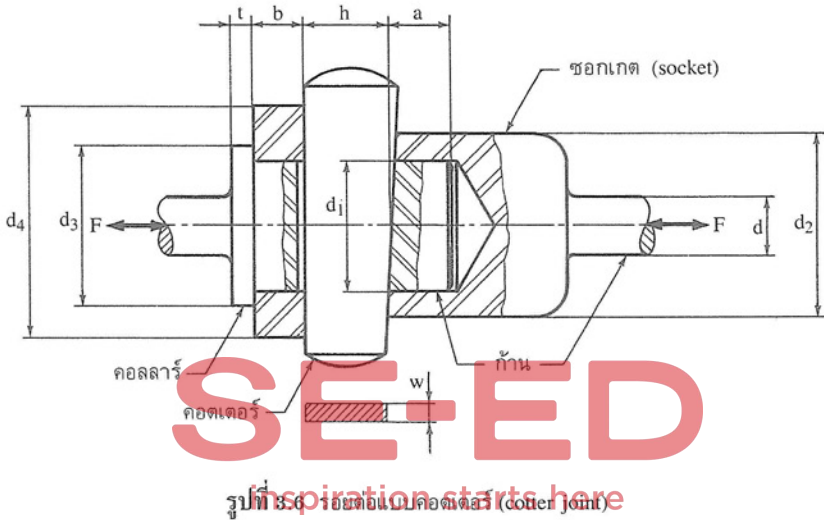
$$\frac{296.50}{4} = \frac{(9 \times 10^5)(3b/2)}{9b^4/4}$$

เพราะฉะนั้น  $b = 20 \text{ mm}$

และ  $h = 3 \times 20 = 60 \text{ mm}$

ดังนั้นหน้าตัดของก้านหมุนจะลดขนาดจาก  $91.50 \times 30.50 \text{ mm}$  ณ ตำแหน่ง AA มาเป็น  $60 \times 20 \text{ mm}$  ณ ตำแหน่ง BB

**ตัวอย่างที่ 3.4** รอยต่อแบบคอตเตอร์ดังรูปที่ 3.6 ใช้สำหรับต่อก้านของเครื่องสูบน้ำขนาดเล็กยาว แรง  $F$  เป็นทั้งแรงดึงและแรงกด มีค่าเท่ากับ 30 kN ถ้าวัสดุของรอยต่อทั้งหมดเป็นเหล็กกล้า AISI C 1020 จงหาขนาดของส่วนต่าง ๆ โดยใช้ความต้านแรงดึงครากเป็นหลัก



รูปที่ 3.6 รอยต่อแบบคอตเตอร์ (cotter joint)

**วิธีทำ** ในการแก้ปัญหาที่มีตัวไม่ทราบค่าจำนวนมาก จะต้องหาจำนวนสมการอย่างน้อยต้องเท่ากับจำนวนตัวไม่ทราบค่า ในขั้นแรกควรจะพยายามเขียนสมการที่แสดงถึงการแตกหักหรือเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในชิ้นส่วนทั้งหมดเสียก่อน สมการที่เราได้เรียกว่า สมการความต้านแรง(strength equation)

จากตารางที่ ข.3 ;  $\sigma_y = 48 \text{ ksi}$   
 $= 48 \times 6.895 = 331 \text{ N/mm}^2$   
 $\tau_y = 0.6 \times 331 = 198.60 \text{ N/mm}^2$

จากตารางที่ 1.3 ค่าความปลอดภัย  $N=4$  ฉะนั้นค่าความเค้นออกแบบต่าง ๆ คือ

ความเค้นดึง ;  $\sigma_{td} = \frac{331}{4} = 82.75 \text{ N/mm}^2$

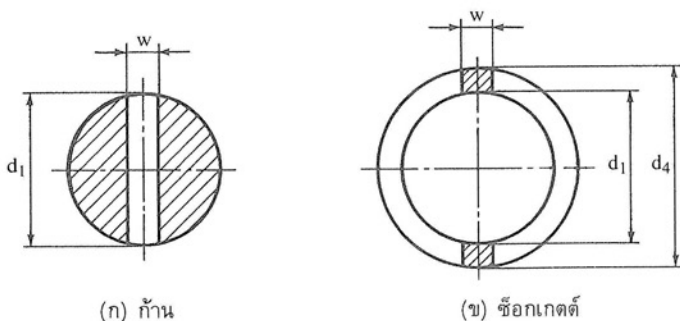
ความเค้นอัด ;  $\sigma_{cd} = 82.75 \text{ N/mm}^2$

ความเค้นเฉือน ;  $\tau_d = \frac{198.60}{4} = 49.65 \text{ N/mm}^2$

1. ก้าน(rod) อาจจะขาดโดยแรงดึง

$$F = \sigma_{td} \left[ \frac{\pi}{4} d^2 \right] \quad (ก)$$

2. ก้านอาจจะขาดที่หน้าตัดผ่านคอเตอร์ ดังรูปที่ 3.7(ก)



(ก) ก้าน

(ข) ช็อกเกตต์

รูปที่ 3.7 พื้นที่รับความเค้น

$$F = \sigma_{td} \left[ \frac{\pi}{4} d_1^2 - w d_1 \right] \quad (ข)$$

3. การอัดกันระหว่างคอเตอร์กับปลายก้าน ดังรูปที่ 3.7(ก)

$$F = \sigma_{cd} \left[ d_1 w \right] \quad (ค)$$

4. ปลายก้านอาจจะเฉือนคอเตอร์ให้ขาดแบบเฉือนคู่

$$F = \tau_d \left[ 2hw \right] \quad (ง)$$

5. ช็อกเกตต์อาจจะขาดที่หน้าตัดผ่านคอเตอร์

$$F = \sigma_{td} \left[ \frac{\pi}{4} \left( d_2^2 - d_1^2 \right) - w \left( d_2 - d_1 \right) \right] \quad (จ)$$

6. การอัดกันระหว่างคอลลาร์(collar) กับช็อกเกตต์

$$F = \sigma_{cd} \left[ \frac{\pi}{4} \left( d_3^2 - d_1^2 \right) \right] \quad (ฉ)$$

7. ถ้าขนาด d เล็กกว่า d1 คอลลาร์อาจจะถูกเฉือนขาดโดยแรงกด

$$F = \tau_d \left[ \pi d_1 t \right]$$

8. การอัดกันระหว่างคอตเตอร์กับช็อกเกตต์ ดังรูปที่ 3.7(ข)

$$F = \sigma_{cd} [d_4 - d_1] w \quad (\text{ข})$$

9. คอตเตอร์เฉือนปลายก้านชาด

$$F = \tau_d [2ad_1] \quad (\text{ญ})$$

10. คอตเตอร์เฉือนปลายด้านซ้ายของช็อกเกตต์ชาด

$$F = \tau_d (2b) [d_4 - d_1] \quad (\text{ท})$$

11. ก้านเฉือนทะลุคอลลาร์

$$F = \tau_d [\pi dt] \quad (\text{ค})$$

หลังจากที่เขียนสมการความต้านแรงทั้งหมดแล้วก็เริ่มคำนวณได้ดังนี้

จากสมการ (ก)  $30000 = 82.75 \times \frac{\pi}{4} \times d^2$

เพราะฉะนั้น  $d = 21.48 \text{ mm}$

จากสมการ (ค)  $30000 = 48.60 \times \pi \times 21.48 \times t$

เพราะฉะนั้น  $t = 9.15 \text{ mm}$

จากสมการ (ข)  $30000 = 49.65 \times \pi \times d_1 \times 9.15$

เพราะฉะนั้น  $d_1 = 21.02 \text{ mm}$

ให้สมการ (ข) เท่ากับสมการ (ค)

$$\frac{\pi}{4} d_1^2 - w d_1 = d_1 w$$

เพราะฉะนั้น  $w = \frac{\pi}{8} d_1$

$$= \frac{\pi}{8} (21.02) = 8.25 \text{ mm}$$

จากสมการ (ง)  $30000 = 49.65 \times 2h \times 8.25$

เพราะฉะนั้น  $h = 36.62 \text{ mm}$

$$\text{จากสมการ (จ)} \quad 30000 = 82.75 \left[ \frac{\pi}{4} (d_2^2 - 21.02^2) \right] - 8.25 (d_2 - 21.02)$$

$$d_2^2 - 10.51d_2 - 683 = 0$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad d_2 = 31.44 \text{ mm}$$

$$\text{จากสมการ (ฉ)} \quad 30000 = 82.75 \left[ \frac{\pi}{4} (d_3^2 - 21.02^2) \right]$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad d_3 = 30.06 \text{ mm}$$

$$\text{จากสมการ (ช)} \quad 30000 = 82.75 \times 8.25 (d_4 - 21.02)$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad d_4 = 64.96 \text{ mm}$$

$$\text{จากสมการ (ญ)} \quad 30000 = 49.65 \times 2a \times 21.02$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad a = 14.37 \text{ mm}$$

$$\text{จากสมการ (ด)} \quad 30000 = 49.65 \times 2b (64.96 - 21.02)$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad b = 6.88 \text{ mm}$$

หลังจากที่คำนวณหาขนาดต่างๆ ได้แล้ว ให้พิจารณาว่าขนาดที่คำนวณหาสามารถประกอบกันขึ้นเป็นรอยต่อแบบคอตเตอร์ได้หรือไม่ ซึ่งถ้าหากสามารถประกอบเข้ากันได้ ในที่นี้ปรากฏว่าขนาดที่ได้สามารถประกอบเข้ากันได้ แต่ลักษณะของชิ้นงานไม่จำเป็นต้องใช้ขนาดละเอียดถึงหนึ่งในร้อยของมิลลิเมตรก็ได้ ฉะนั้นจึงปรับขนาดใหม่ดังนี้

$$a = 14.40 \text{ mm}$$

$$b = 6.90 \text{ mm}$$

$$d = 21.50 \text{ mm}$$

$$d_1 = 21.00 \text{ mm}$$

$$d_2 = 31.40 \text{ mm}$$

$$d_3 = 30.00 \text{ mm}$$

$$d_4 = 65.00 \text{ mm}$$

$$h = 36.60 \text{ mm}$$

$$t = 9.20 \text{ mm}$$

$$w = 8.30 \text{ mm}$$

ให้สังเกตว่าความกว้างของคอตเตอร์  $h$  เป็นความกว้างที่วัดดังรูปที่ 3.6 ซึ่งความลาดเอียงด้านข้างควรจะมีค่าประมาณ 3% เพื่อให้สามารถอัดเข้าไปในชิ้นส่วนได้แน่น

### 3.6 เสา

เสามีลักษณะเป็นท่อนตรงและรับแรงกดในแนวแกน ถ้าแรงมีค่าไม่มากนักเสาที่เรียวยาวก็ยังคงอยู่ในสภาพที่ตรงได้ แต่ถ้าแรงเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง เสดังกล่าวก็อาจจะเกิดการโก่งงอขึ้น (buckling)

แรงที่ทำให้เกิดการโก่งงอนี้เรียกว่า แรงวิกฤต(critical load) ความเค้นที่เกิดในเสาคณะที่จะเริ่มเกิดการโก่งงอจะต่ำกว่าความเค้นใช้งานที่ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการโก่งงอขึ้นแล้ว ชิ้นงานนั้นก็จะไม่สามารถที่จะทำหน้าที่ได้ตามต้องการ ฉะนั้นการออกแบบจึงอาจจะจำกัดแรงที่ทำให้เกิดการโก่งงอแทนที่จะจำกัดความเค้น

ชิ้นส่วนของเครื่องจักรกลจำนวนมากก็ทำหน้าที่เช่นเดียวกับเสา เช่น ก้านสูบ สูตรที่ใช้กับเสาจะจำแนกออกตามอัตราส่วนความเพรียว(slenderness ratio)  $L_e/k$  โดยที่

$L_e$  คือความยาวสมมูล(equivalent length)

$$k = \left( \frac{I}{A} \right)^{1/2} \text{ รัศมีจําเริญ}$$

$I$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัด

$A$  คือพื้นที่หน้าตัด

เนื่องจากการออกแบบเสาที่อาจจะเกิดการโก่งงอจะจำกัดแรงกด แทนที่จะจำกัดความเค้น ดังนั้นจึงต้องใช้ค่าความปลอดภัยกับแรงกด ถ้าให้  $F_c$  เป็นแรงวิกฤต แรงกดใช้งานคือ  $F = F_c/N$

สำหรับเสาที่มีขนาดยาวจะนิยมใช้สูตรของออยเลอร์(Euler) คือ

$$F = \frac{\pi^2 EA}{N(L_e/k)^2} = \frac{\pi^2 EI}{NL_e^2} \quad (3.21)$$

ซึ่งถ้าเป็นเหล็กโครงสร้างแล้วจะใช้สูตรของออยเลอร์เมื่ออัตราส่วนความเพรียวมากกว่า 115 จากสูตรจะเห็นว่าเสาจะเกิดการโก่งรอบแกน ซึ่งโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดหรือรัศมีจําเริญมีค่าน้อยที่สุด ส่วนค่าความปลอดภัยสำหรับเสายาวนี้ ในทางการออกแบบเครื่องกลแนะนำให้ใช้ประมาณ 3.5

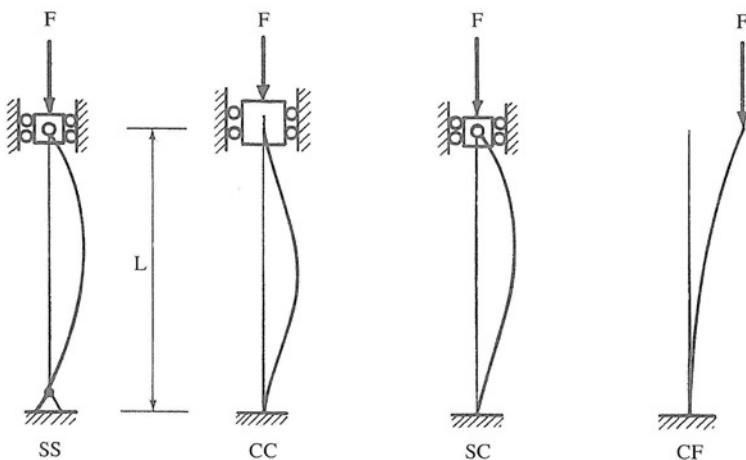
สำหรับค่าความยาวสมมูลนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของปลายชิ้นงานที่ยึดอยู่ ดังรูปที่ 3.8

ปลายยึดแบบธรรมดา (SS: simply supported)  $L_e = L$  (3.22 ก)

ปลายยึดแน่นสองข้าง (CC: clamped)  $L_e = \frac{L}{2}$  (3.22 ข)

ปลายยึดแบบธรรมดา-ยึดแน่น (SC: simply supported-clamped)  $L_e = 0.707L$  (3.22 ค)

ปลายยึดแน่น-อิสระ (CF: clamped-free)  $L_e = 2L$  (3.22 ง)



รูปที่ 3.8 แสดงการยึดปลายเสาวิธีต่าง ๆ

จะเห็นว่าปลายแบบ CC มีความแข็งแรงสูงสุดและปลายแบบ CF รับแรงกดได้น้อยที่สุด ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีลักษณะเช่นเดียวกับเสา ปลายมักจะเป็นแบบ SS, SC หรือ CF ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะที่แท้จริงของชิ้นงานนั้น

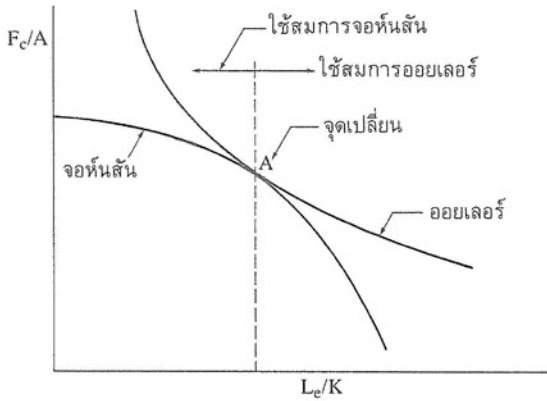
inspiration starts here

สำหรับเสาที่มีขนาดสั้นลงมาก สูตรของออยเลอร์จะใช้งานไม่ได้คืนัก ทั้งนี้เพราะความเสียหายที่แท้จริงอาจจะเนื่องมาจากการโก่งงอ และการที่ความเค้นในเสาเกินขีดจำกัดยืดหยุ่นพร้อมกัน ในกรณีเช่นนี้ผู้ออกแบบมักจะนิยมใช้สูตรของจอห์นสัน (Johnson) หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าสูตรพาราโบลา (parabolic formula) คือ

$$F = \frac{\sigma_y A}{N} \left[ 1 - \frac{\sigma_y (L_e/k)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (3.23)$$

สำหรับเหล็กโครงสร้างแล้ว จะใช้สูตรของจอห์นสันเมื่ออัตราส่วนความเพรียมีค่าประมาณ  $40 < L_e/k \leq 115$

เนื่องจากเส้นกราฟจากสูตรของออยเลอร์และจอห์นสันจะสัมผัสกันที่จุด A ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งเรียกว่าจุดเปลี่ยน (transition point) และค่า  $L_e/k = 115$  ดังกล่าวมาแล้วก็คือค่าประมาณที่จุด A นี้ เพราะฉะนั้นสำหรับวัสดุอื่น ๆ ที่มีค่า E แตกต่างกันไปอีกมาก ก็อาจจะหาจุดเปลี่ยนเพื่อเลือกใช้สูตรที่ถูกต้องได้ โดยการให้ความลาด (slope) ของกราฟที่ได้จากสมการที่ (3.21) และสมการที่ (3.23) เท่ากัน คือ



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอัตราส่วนความเพียว จากสูตรของออยเลอร์และจอห์นสัน

$$\left. \frac{d(F/A)}{d(L_e/k)} \right|_{\text{ออยเลอร์}} = \left. \frac{d(F/A)}{d(L_e/k)} \right|_{\text{จอห์นสัน}}$$

ซึ่งจะได้จุดเปลี่ยนคือ

$$\frac{L_e}{k} = \frac{\sqrt{2\pi^2 E}}{\sigma_y} \quad (3.24)$$

สำหรับสูตรของเสาอื่น ๆ ที่มีอยู่ แต่ไม่เป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบเครื่องจักรกลก็คือ สูตรเส้นตรง และสูตรซีแคนต์(secant formula) จะไม่กล่าวถึงในที่นี้ ผู้อ่านที่สนใจจะหาได้จากหนังสือกลศาสตร์วัสดุทั่วไป

สมการที่ (3.21) และสมการที่ (3.23) อาจจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\sigma_e = \alpha \frac{F}{A} \quad (3.25)$$

$$\text{โดยที่ } \alpha = \frac{\sigma_y (L_e/k)^2}{\pi^2 E} \quad \text{สำหรับสูตรของออยเลอร์}$$

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_y (L_e/k)^2}{4\pi^2 E}} \quad \text{สำหรับสูตรของจอห์นสัน}$$

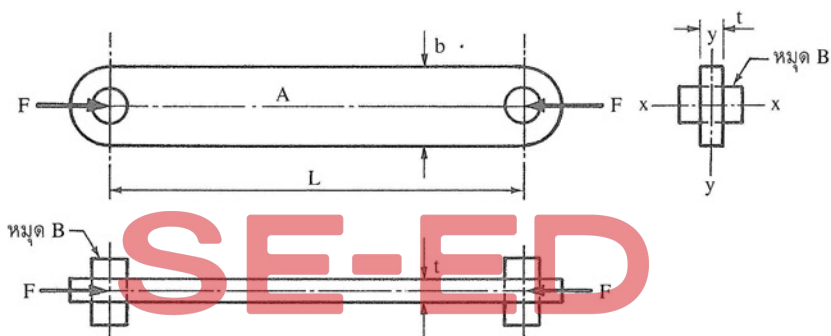
ค่า  $\sigma_e$  นี้เรียกว่า ความเค้นสมมูล(equivalent stress) ซึ่งได้มาจากการให้

$$N = \frac{F_c}{F} = \frac{\sigma_y}{\sigma_e}$$

และเป็นการบอกถึงความปลอดภัยอีกวิธีหนึ่งว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าความต้านแรงดึงครากเท่าไร

**ตัวอย่างที่ 3.5** ชิ้นส่วนดังในรูปที่ 3.10 อาจเกิดการโก่งงอรอบแกน xx หรือ yy ได้ ส่วนแผ่น A สวมลงบนหมุด B พอดี

- (ก) จงหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $b$  และ  $t$  เพื่อให้สามารถรับแรงที่จะทำให้เกิดการโก่งงอรอบแกนทั้งสองเท่ากัน
- (ข) ถ้าความหนา  $t=10$  mm และความยาว  $L=500$  mm วัสดุ AISI C 1020 จงหาแรงกดที่จะรับไว้ได้เมื่อใช้ค่าความปลอดภัยเท่ากับ 3



inspiration starts here

รูปที่ 3.10 ชิ้นส่วนรับแรงกด

**วิธีทำ** (ก) พิจารณาจากรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าการโก่งงอรอบแกน yy จะเป็นลักษณะของเสาแบบ CC ทั้งนี้เพราะปลายที่สวมอยู่ในหมุดไม่สามารถจะโก่งขึ้นได้ แต่การโก่งงอรอบแกน xx ปลายเสาหมุนรอบหมุดได้ ดังนั้นจึงควรเข้าลักษณะ SS

คิดการโก่งงอรอบแกน xx  $L_e = L$  และจากตารางที่ ค.1

$$k = \frac{b}{\sqrt{12}}$$

ในขั้นแรกนี้ยังไม่ทราบค่า  $L_e/k$  แต่การเลือกใช้สูตรของออยเลอร์หรือจอนสันก็จะให้คำตอบเท่ากัน จากสมการที่ (3.21) การโก่งงอในแนวแกน xx

$$\begin{aligned} F &= \frac{\pi^2 EA}{N(L_e/k)^2} = \frac{\pi^2 EA}{N(\sqrt{12}L/b)^2} \\ &= \frac{\pi^2 EAb^2}{12NL^2} \end{aligned} \quad (ก)$$

คิดการโก่งงอรอบแกน yy  $L_e = L/2$  และ  $k = t/\sqrt{12}$

$$\begin{aligned} F &= \frac{\pi^2 EA}{N(\sqrt{12}L/2t)^2} \\ &= \frac{\pi^2 EAt^2}{3NL^2} \end{aligned} \quad (\text{ข})$$

ให้แรงในสมการ (ก) เท่ากับในสมการ (ข)

$$\frac{\pi^2 EAb^2}{12NL^2} = \frac{\pi^2 EAt^2}{3NL^2}$$

เพราะฉะนั้น  $b = 2t$

ผู้อ่านอาจจะทดลองใช้สูตรของจอห์นสันดู จะพบว่าได้คำตอบเท่ากัน

(ข) เมื่อ  $t = 10 \text{ mm}$ ,  $b = 2 \times 10 = 20 \text{ mm}$

การโก่งงอรอบแกน xx  $\frac{L_e}{k} = \frac{\sqrt{12}L}{b}$

$$= \frac{\sqrt{12}(500)}{20} = 86.60$$

การโก่งงอรอบแกน yy  $\frac{L_e}{k} = \frac{\sqrt{12}L}{2t}$

$$= \frac{\sqrt{12}(500)}{2 \times 10} = 86.60$$

ดังนั้นในการคำนวณหาแรงกดจึงต้องใช้สูตรของจอห์นสัน

$$F = \frac{\sigma_y A}{N} \left[ 1 - \frac{\sigma_y (L_e/k)^2}{4\pi^2 E} \right]$$

จากตารางที่ ข.3  $\sigma_y = 48 \text{ ksi}$

$$= 48 \times 6.895 = 331 \text{ N/mm}^2$$

จากตารางที่ ข.16  $E = 207 \text{ GN/m}^2$

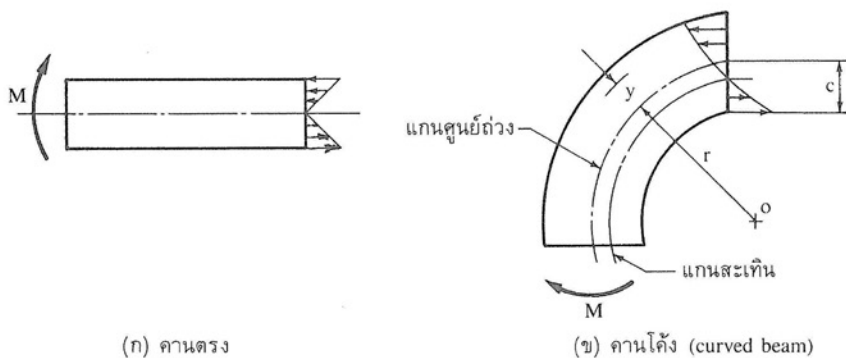
และ  $A = bt = 20 \times 10 = 200 \text{ mm}^2$

เพราะฉะนั้น  $F = \frac{331 \times 200}{3} \left[ 1 - \frac{331(86.60)^2}{4 \times \pi^2 \times 207000} \right]$

$$= 15364 \text{ N}$$

### 3.7 คานโค้ง

จากทฤษฎีของคานตรงที่อยู่ภายใต้โมเมนต์คดโค้งรูปที่ 3.11(ก) ความเค้นจะแปรผันในลักษณะของสมการเส้นตรง แกนศูนย์ถ่วง(centroidal axis) และแกนสะเทินก็จะอยู่ทับกันพอดี



(ก) คานตรง

(ข) คานโค้ง (curved beam)

รูปที่ 3.11 คาน

จากทฤษฎีของคานโค้งที่อยู่ภายใต้โมเมนต์คดโค้งรูปที่ 3.11(ข) แกนศูนย์ถ่วงและแกนสะเทินจะไม่ทับกัน โดยที่แกนสะเทินจะเลื่อนเข้าหาจุดศูนย์กลางความโค้ง O (center of curvature) ส่วนความเค้นจะกระจายออกไปในลักษณะไฮเพอร์โบลิก (hyperbolic) ถ้าคานมีหน้าตัดสมมาตร (symmetry) ความเค้นคดสูงสุดจะเกิดที่ผิวด้านในสุดเสมอ แต่ถ้าหน้าตัดไม่สมมาตร ความเค้นคดสูงสุดอาจจะเกิดที่ผิวด้านในสุดหรือนอกสุดก็ได้ สมการสำหรับคำนวณหาความเค้นคดที่จุดใด ๆ ซึ่งห่างจากแกนศูนย์ถ่วงเป็นระยะทาง  $y$  คือ

$$\sigma = \frac{M}{Ar} \left[ 1 + \frac{y}{Z(r+y)} \right] \quad (3.26)$$

โดยที่ A คือพื้นที่หน้าตัดของคาน

$r$  คือระยะจากจุดศูนย์กลางความโค้งถึงแกนศูนย์ถ่วง

$$Z = -\frac{1}{A} \int \frac{y dA}{r+y}$$

ในการคำนวณหาความเค้นคดสูงสุดในคานโค้ง จะแทนค่า  $y$  ในสมการที่ (3.26) ด้วย  $c$  ซึ่งทำให้จัดรูปใหม่ได้คล้ายกับสมการความเค้นคดของคานตรงคือ

$$\sigma = \frac{K_c M c}{I} \quad (3.27)$$

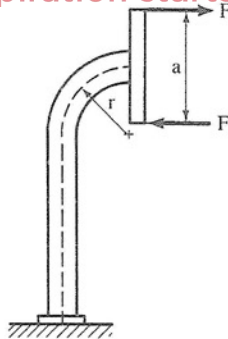
โดยที่  $K_c = \frac{\left(1 + \frac{c}{Z(r+c)}\right) I}{Arc}$  เรียกว่า ตัวประกอบความโค้ง (curvature factor)

จากสมการที่ (3.27) จะพบว่าความเค้นดัดของคานโค้งมีค่ามากกว่าคานตรง  $K_c$  เท่า และอาจจะเรียกได้ว่า  $K_c$  นี้คือตัวประกอบความเค้นหนาแน่น (stress concentration factor) ซึ่งจะได้กล่าวอย่างละเอียดในภายหลัง เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงใช้ค่า  $K_c$  จากตารางที่ ค.3 โดยที่  $K_{ci}$  เป็นค่าด้านใน และ  $K_{co}$  เป็นค่าด้านนอกของคาน

โดยปกติแล้วชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีลักษณะเป็นคานโค้ง เช่น ตะขอเกี่ยวน้ำหนักจะมีแรงดึงหรือแรงกดที่หน้าตัดด้วย ในการคำนวณจะต้องเอาความเค้นนี้มารวมกับความเค้นดัดด้วยเพื่อที่จะให้ได้ความเค้นสูงสุด ซึ่งจะกล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 4 ต่อไป สำหรับในบทนี้จะแสดงวิธีการใช้ตารางที่ ค.3 ดังตัวอย่างที่ 3.6

**ตัวอย่างที่ 3.6** ท่อนโลหะโค้งลักษณะดังรูปที่ 3.12 รับแรงคู่กลับ  $F = 1 \text{ kN}$  หน้าตัดของท่อนโลหะกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $25 \text{ mm}$  ถ้า  $r = 50 \text{ mm}$  และ  $a = 100 \text{ mm}$  จงหาความเค้นดัดสูงสุดในท่อนโลหะ

inspiration starts here



รูปที่ 3.12 ท่อนโลหะโค้ง

**วิธีทำ** โมเมนต์ดัด ;  $M = Fa$   
 $= 1 \times 100 = 100 \text{ kN} \cdot \text{mm}$

โมเมนต์ความเฉื่อย ;  $I = \frac{\pi}{64} d^4$   
 $= \frac{\pi}{64} (25)^4 = 19175 \text{ mm}^4$

$$\frac{r}{c} = \frac{50}{12.50} = 4$$

จากตารางที่ ค.3

$$K_{ci} = 1.23$$

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{K_{ci}Mc}{I} \\ &= \frac{1.23 \times 100000 \times 12.50}{19175} \\ &= 80.20 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

### 3.8 เอกสารอ่านประกอบ

1. วรวิทย์-พินัย, "กลศาสตร์วัสดุ", หน่วยเอสไอ พ.ศ. 2520.
2. V.M. FAIRES, "Design of Machine Elements", 4<sup>th</sup> Edition, The Macmillan Company, New York, 1970.

# SE-ED

inspiration starts here

หนังสือเล่มนี้เหมาะสำหรับผู้เริ่มทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ ซึ่งผู้อ่านจะต้องมีพื้นฐานความรู้เบื้องต้นทางด้านกลศาสตร์ทั่วไป กลศาสตร์วัสดุ กลศาสตร์เครื่องจักร และคณิตศาสตร์ในระดับปีที่ 2 ของการศึกษาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ เนื้อหาภายในกล่าวเริ่มตั้งแต่ปรัชญาการออกแบบในแง่มุมต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงขั้นตอนการออกแบบ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่ทำงานได้ตามความประสงค์ในราคาที่เหมาะสมมากที่สุด หลักการคำนวณออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลอย่างง่าย การวางรากฐานทางทฤษฎีการคำนวณหาขนาดของชิ้นงานแต่ละชนิด นอกจากนั้นยังได้แสดงตัวอย่างการคำนวณและวิธีอย่างชัดเจน รวมทั้งให้คำตอบสำหรับแบบฝึกหัดท้ายบทอีกด้วย

#### หนังสือเล่มนี้สำหรับ

- ☐ ปวช. ☒ ปริญญาตรี
- ☐ ปวส. ☒ บุคคลทั่วไป

หมวดเทคโนโลยี-อุตสาหกรรม  
เครื่องกล

## เกี่ยวกับผู้เขียน

### ศ.ดร. วรสิทธิ์ อังกการณ



สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล (เกียรตินิยม) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระดับปริญญาโทและปริญญาเอก จากสถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐจอร์เจีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ปัจจุบันดำรงตำแหน่งหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (พ.ศ. 2526-พ.ศ. 2534) เป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ปรึกษา และกรรมการของคณะกรรมการต่างๆ หลายแห่ง เช่น

- คณะกรรมการควบคุมการประกอบวิชาชีพวิศวกรรม กระทรวงมหาดไทย
- กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยในการทำงาน กรมแรงงาน
- ผู้ทรงคุณวุฒิร่วมพิจารณาผลงานทางวิชาการด้านวิศวกรรมเครื่องกลของสถาบันการศึกษาหลายแห่ง
- รองประธานคณะกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล ราชบัณฑิตยสถาน

นอกจากนี้ยังมีผลงานวิชาการทางด้านการเขียนและเรียบเรียงตำราจำนวน 7 เล่ม บทความวิชาการและงานวิจัยอีกประมาณ 30 เรื่อง ได้รับรางวัลชมเชยจากสภาวิจัยแห่งชาติ จากการประกวดสิ่งประดิษฐ์ **ระบบผู้เชี่ยวชาญการปรับอากาศ** และยังมีผลงานทางวิชาชีพด้านการออกแบบระบบปรับอากาศและระบบท่อในอาคารพาณิชย์ขนาดใหญ่อีกหลายอาคาร เช่น ท่าอากาศยานกรุงเทพฯ โรงแรมแชงกรีลา ฯลฯ

### รศ. ชาญ กนิชาน



สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล (เกียรตินิยม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และปริญญาโทสาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เคยได้รับการฝึกอบรมทางด้าน Production Engineering and Machine Tools ที่ Technische Hochschule Darmstadt ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี นอกจากนี้ยังมีผลงานวิชาการทางด้านงานวิจัยดังนี้

#### งานวิจัยเรื่อง

- การประเมินสภาพขึ้นรูปได้ของโลหะแผ่น (พ.ศ. 2528)
- โครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้าน pressworking
- ระยะที่ 1 : แม่พิมพ์ขึ้นรูปโลหะแผ่น (พ.ศ. 2531)
- ระยะที่ 2 : การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ราคาถูกสำหรับงาน pressworking (พ.ศ. 2532) และ
- ระยะที่ 3 : การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ขนาดใหญ่สำหรับงาน pressworking
- ที่ต้องการผลิตก้อนหินคุณภาพสูง (พ.ศ. 2532) และผลงานเขียนทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ดังนี้
- สถิติศาสตร์ กลศาสตร์ของไหล กลศาสตร์วัสดุ

ISBN 974-534-352-8



9 789745 343528

162

175 บาท