



# การออกแบบโครงสร้างเหล็ก โดยวิธี LRFD/ASD

## ตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16

Structural Steel Design by LRFD/ASD Method

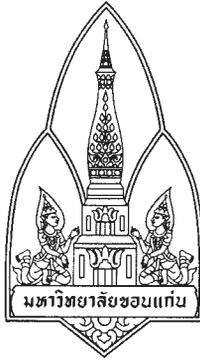
According to ANSI/AISC 360-16 Standard



ศาสตราจารย์วิระ ทอสกุลโท

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



# การออกแบบโครงสร้างเหล็ก โดยวิธี LRFD/ASD ตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16

ศาสตราจารย์วีระ หอสกุลไท  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ได้รับทุนสนับสนุนการผลิตตำรา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ลำดับที่ 195

โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2565

ISBN (e-book) 978-616-438-706-5

วีระ หอสกุลไท.

การออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธี LRFD/ASD ตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 /

วีระ หอสกุลไท -- ขอนแก่น : สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2565.

755 หน้า : ภาพประกอบ

1. โครงสร้างเหล็ก -- การออกแบบและการสร้าง. 2. การออกแบบโครงสร้าง. 3. การออกแบบ  
ตัวค้ำยันน้ำหนักบรรทุก. 4. การออกแบบกำลังที่ยอมให้. (1) มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

คณะวิศวกรรมศาสตร์. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. (2) ชื่อเรื่อง.

TA684 ว842

ISBN (e-book) 978-616-438-706-5

จัดทำโดย ศูนย์นวัตกรรมการเรียนการสอน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ราคา 650 บาท

สงวนลิขสิทธิ์ โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2565

## คำนำ

หนังสือการออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธี LRFD/ASD ตามมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16 เล่มนี้ได้รับทุนสนับสนุนการผลิตตำราใหม่ พ.ศ. 2562 จากศูนย์นวัตกรรมการเรียนการสอน มหาวิทยาลัยขอนแก่น เพื่อให้ได้ตำราที่มีเนื้อหาทันสมัยและสอดคล้องกับทฤษฎีที่เปลี่ยนไป ผู้เขียนจึงได้เขียนหนังสือการออกแบบโครงสร้างเหล็กให้สอดคล้องกับมาตรฐานการออกแบบที่เปลี่ยนไปและอ้างอิงมาตรฐานล่าสุดของ ANSI/AISC 360-16 ซึ่งในอดีตการออกแบบโครงสร้างเหล็กได้ใช้วิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress Design, ASD) ต่อมาได้เปลี่ยนเป็นวิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable Strength Design, ASD) เพื่อให้ได้พฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างเหล็กที่ต้องใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดและสอดคล้องกับวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (Load and Resistance Factor, LRFD) ที่กำหนดในมาตรฐาน ANSI/AISC 360-16

หนังสือการออกแบบโครงสร้างเหล็กเล่มนี้มีเนื้อหาส่วนแรกเป็นการแนะนำคุณสมบัติเหล็ก รูปพรรณและเหล็กโครงสร้าง วิธีการออกแบบ น้ำหนักบรรทุกกระทำต่ออาคารตามกฎกระทรวงฯ ฉบับที่ 6 ออกตาม พรบ. ความคุมอาคาร พ.ศ. 2522 แรงลมได้แนะนำวิธีการวิเคราะห์หน่วยแรงลม สถิติเทียบเท่าโดยวิธีอย่างง่ายตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 และแรงสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหว ตามกฎกระทรวง พ.ศ. 2564 ใช้วิธีการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 ส่วนที่ 2 ได้แยกเนื้อหาตามพฤติกรรมการรับแรงและประเภทส่วนของโครงสร้าง ดังนี้ องค์อาคารรับแรงดึง รอยต่อสลักเกลียว รอยต่อเชื่อม องค์อาคารรับแรงอัด คาน ส่วนของโครงสร้างรับแรงดัด และคานแผ่นเหล็กประกอบ และองค์อาคารรับแรงดัดและแรงตามแนวแกนร่วมกัน (คาน-เสา)

หนังสือเล่มนี้ใช้ประกอบการเรียนการสอนในวิชาการออกแบบโครงสร้างเหล็ก ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และยังเหมาะสำหรับนักศึกษา วิศวกรที่ใช้ศึกษาเพิ่มเติมและประกอบในการทำงาน

ศาสตราจารย์วีระ หอสกุลไท  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



## สารบัญ

|   | หน้า             |
|---|------------------|
| คำนำ  | ก                |
| สารบัญ  | ข                |
| <b>บทที่ 1 เหล็กโครงสร้าง</b>                 | <b>1 – 25</b>    |
| 1.1 บทนำ                                      | 1                |
| 1.2 เหล็กโครงสร้าง                            | 3                |
| 1.3 เหล็กรูปพรรณตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม | 18               |
| 1.4 เอกสารอ้างอิง                             | 23               |
| <b>บทที่ 2 วิธีการออกแบบและน้ำหนักบรรทุก</b>  | <b>27 – 116</b>  |
| 2.1 บทนำ                                      | 27               |
| 2.2 แนวคิดการออกแบบโครงสร้างเหล็ก             | 28               |
| 2.3 น้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อโครงสร้าง         | 41               |
| 2.4 แรงลม                                     | 45               |
| 2.5 แรงเนื่องจากแผ่นดินไหว                    | 75               |
| 2.6 น้ำหนักบรรทุกกระแทก                       | 111              |
| 2.7 แบบฝึกหัด                                 | 112              |
| 2.8 เอกสารอ้างอิง                             | 115              |
| <b>บทที่ 3 องค์กรรับแรงดึง</b>                | <b>117 – 174</b> |
| 3.1 บทนำ                                      | 117              |
| 3.2 กำลังรับแรงดึง                            | 117              |
| 3.3 การออกแบบองค์กรรับแรงดึง                  | 140              |
| 3.4 องค์กรประกอบรับแรงดึง                     | 145              |
| 3.5 แท่งเหล็กกลมรับแรงดึง                     | 150              |
| 3.6 องค์กรยึดด้วยสลัก                         | 157              |
| 3.7 ท่อนรูปมุดตาไก่                           | 164              |
| 3.8 แบบฝึกหัด                                 | 169              |
| 3.9 เอกสารอ้างอิง                             | 174              |

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า                 |
|--|----------------------|
| <b>บทที่ 4 รอยต่อสลักเกลียว</b>  | <b>175 – 243</b>     |
| 4.1 บทนำ   | 175                  |
| 4.2 ตัวยึด   | 176                  |
| 4.3 ประเภทของรอยต่อสลักเกลียว  | 183                  |
| 4.4 ประเภทของรอยต่อ  | 186                  |
| 4.5 รอยต่อสลักเกลียวแบบรับแรงแบกทาน: กรณีรับแรงดึงตรงศูนย์               | 189                  |
| 4.6 รอยต่อสลักเกลียวแบบรับแรงแบกทาน: กรณีรับแรงเฉือนเยื้องศูนย์          | 207                  |
| 4.7 รอยต่อสลักเกลียวแบบรับแรงแบกทาน: กรณีรับแรงดึง<br>และแรงเฉือนร่วมกัน | 219                  |
| 4.8 รอยต่อสลักเกลียวแบบเลื่อนวิกฤติ: กรณีรับแรงดึงตรงศูนย์               | 226                  |
| 4.9 รอยต่อสลักเกลียวแบบเลื่อนวิกฤติ: กรณีรับแรงดึงและแรงเฉือนร่วมกัน     | 232                  |
| 4.10 แบบฝึกหัด   | 237                  |
| 4.11 เอกสารอ้างอิง   | 243                  |
| <br><b>บทที่ 5 รอยต่อเชื่อม</b>  | <br><b>245 – 326</b> |
| 5.1 บทนำ   | 245                  |
| 5.2 ตำแหน่งในรอยเชื่อม   | 248                  |
| 5.3 การตรวจสอบรอยเชื่อม  | 252                  |
| 5.4 ประเภทของรอยต่อ  | 257                  |
| 5.5 ประเภทของรอยเชื่อม   | 260                  |
| 5.6 สัญลักษณ์มาตรฐานของงานเชื่อม   | 261                  |
| 5.7 ลวดเชื่อม  | 263                  |
| 5.8 กำลังรับแรงของรอยต่อเชื่อม   | 268                  |
| 5.9 รอยเชื่อมแบบพอก  | 269                  |
| 5.10 รอยเชื่อมแบบบากร่อง   | 301                  |
| 5.11 รอยต่อเชื่อมแบบอุดรูกลมและอุดร่อง                                   | 314                  |
| 5.12 แบบฝึกหัด   | 320                  |
| 5.13 เอกสารอ้างอิง   | 326                  |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า             |
|---|------------------|
| <b>บทที่ 6 องค์อาคารรับแรงอัด</b>   | <b>327 – 414</b> |
| 6.1 บทนำ  | 327              |
| 6.2 กำลังรับแรงขององค์อาคารรับแรงอัด  | 328              |
| 6.3 กำลังรับแรงอัดและการวิบัติของเสา  | 335              |
| 6.4 การออกแบบขององค์อาคารรับแรงอัด  | 347              |
| 6.5 องค์อาคารที่ไม่มีชิ้นส่วนขลุ่วิบัติแบบโก่งเดาะเนื่องจากแรงดัด   | 349              |
| 6.6 องค์อาคารและเหล็กฉากเดี่ยวที่ไม่มีชิ้นส่วนขลุ่วิบัติแบบโก่งเดาะ<br>เนื่องจากแรงบิด และเนื่องจากแรงดัด-แรงบิดร่วมกัน | 367              |
| 6.7 เหล็กฉากเดี่ยวที่ไม่มีชิ้นส่วนขลุ่วิบัติรับแรงอัดตามแนวแกน  | 378              |
| 6.8 องค์อาคารประกอบ   | 385              |
| 6.9 องค์อาคารรับแรงอัดที่มีชิ้นส่วนขลุ่วิบัติ   | 405              |
| 6.10 แบบฝึกหัด  | 411              |
| 6.11 เอกสารอ้างอิง  | 414              |
| <br>  |                  |
| <b>บทที่ 7 คาน</b>  | <b>415 – 542</b> |
| 7.1 บทนำ  | 415              |
| 7.2 พฤติกรรมการรับโมเมนต์ดัดของคานในระนาบ   | 416              |
| 7.3 การวิบัติของคานเหล็กเนื่องจากแรงดัด   | 421              |
| 7.4 กำลังรับแรงของคานเหล็ก  | 428              |
| 7.5 การโก่ง   | 433              |
| 7.6 เหล็กหน้าตัด I มีหน้าตัดแบบคอมแพคสมมาตร 2 แกน<br>และเหล็กทรง C ดัดรอบแกน x  | 435              |
| 7.7 เหล็กหน้าตัด I สมมาตร 2 แกน มีแผ่นเอวคอมแพค<br>และแผ่นปีกไม่คอมแพคหรือขลุ่วิบัติดัดรอบแกน x                         | 452              |
| 7.8 เหล็กหน้าตัด I อื่น ๆ สมมาตร 2 แกนและแกนเดียวมีแผ่นเอวคอมแพค<br>หรือไม่คอมแพคดัดรอบแกน x                            | 457              |
| 7.9 เหล็กหน้าตัด I สมมาตร 2 แกนและแกนเดียว มีแผ่นเอวขลุ่วิบัติ<br>ดัดรอบแกน x   | 470              |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า             |
|---|------------------|
| 7.10 เหล็กหน้าตัด I และเหล็กราง C ด้ตรอบแกน y                                   | 479              |
| 7.11 หน้าตัดสี่เหลี่ยมกลวง (HSS) และหน้าตัดกล่อง (Box sections)                 | 485              |
| 7.12 ท่อกลม   | 494              |
| 7.13 เหล็ก T และเหล็กฉากคู่มือแรงกระทำในระนาบของแกนสมมาตร                       | 499              |
| 7.14 เหล็กฉากเดี่ยว   | 510              |
| 7.15 เหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมตันและเหล็กกลมตัน                                    | 518              |
| 7.16 การตัด 2 แกน   | 523              |
| 7.17 แบบฝึกหัด  | 535              |
| 7.18 เอกสารอ้างอิง  | 542              |
| <b>บทที่ 8 ส่วนโครงสร้างรับแรงตัดและคานแผ่นเหล็กประกอบ</b>                      | <b>543 – 636</b> |
| 8.1 บทนำ  | 543              |
| 8.2 เหล็กหน้าตัด I รับแรงแบบจุด   | 544              |
| 8.3 พฤติกรรมการงัด (Prying action)  | 554              |
| 8.4 แผ่นเหล็กรองคาน   | 568              |
| 8.5 การเสริมคานด้วยแผ่นเหล็กประกบ   | 580              |
| 8.6 คานแผ่นเหล็กประกอบ  | 586              |
| 8.7 แผ่นเหล็กตั้งเสริมกำลัง   | 599              |
| 8.8 รอยต่อต้านทานโมเมนต์ตัด   | 619              |
| 8.9 แบบฝึกหัด   | 632              |
| 8.10 เอกสารอ้างอิง  | 636              |
| <b>บทที่ 9 องค์อาคารรับแรงตัดและแรงตามแนวแกนร่วมกัน</b>                         | <b>637 – 718</b> |
| 9.1 บทนำ  | 637              |
| 9.2 เสาในโครงข้อแข็ง  | 639              |
| 9.3 องค์อาคารที่มีแกนสมมาตร 2 แกนและแกนเดียวรับแรงตัด<br>และแรงตามแนวแกนร่วมกัน | 652              |
| 9.4 โมเมนต์ตัดลำดับที่ 1 และลำดับที่ 2 ขององค์อาคารคาน-เสา                      | 661              |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                       | หน้า |
|---------------------------------------|------|
| 9.5 วิธีวิเคราะห์ลำดับที่ 2 โดยประมาณ | 662  |
| 9.6 แผ่นเหล็กรองรับฐานเสาเหล็ก        | 686  |
| 9.7 แบบฝึกหัด                         | 715  |
| 9.8 เอกสารอ้างอิง                     | 718  |
| <br>                                  |      |
| ภาคผนวก ก                             | 719  |
| ภาคผนวก ข                             | 722  |
| ภาคผนวก ค                             | 724  |
| ภาคผนวก ง                             | 726  |
| ภาคผนวก จ                             | 731  |
| ภาคผนวก ฉ                             | 735  |
| ภาคผนวก ช                             | 738  |
| ภาคผนวก ซ                             | 740  |
| ภาคผนวก ฌ                             | 744  |
| ภาคผนวก ฎ                             | 746  |
| ดัชนี                                 | 749  |
| ประวัติผู้เขียน                       | 755  |



# บทที่ 1

## เหล็กโครงสร้าง

### 1.1 บทนำ

เหล็กเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานโครงสร้าง เนื่องจากมีกำลังรับแรงสูง หน้าตัดต่อการรับน้ำหนักต่ำ ง่ายต่อการการดัดแปลงขึ้นรูปและติดตั้ง มีคุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา ใช้ในงานโครงสร้างได้หลากหลาย เช่น อาคาร สะพาน และอาคารระฟ้า เป็นต้น ดังรูปที่ 1.1 และยังมีคุณสมบัติเฉพาะที่โดดเด่น ดังนี้

(1) กำลังรับแรงต่อหน่วยน้ำหนักมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นที่ใช้ในงานโครงสร้าง ทำให้น้ำหนักรวมของโครงสร้างมีค่าน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

(2) เหล็กมีพฤติกรรมเชิงอีลาสติกใกล้เคียงกับกฎของฮุก (Hooke's law) โดยมีค่าหน่วยแรงพิกัดเส้นตรง (Proportional limit) ใกล้เคียงกับหน่วยแรงคราก (Yield stress,  $F_y$ ) จึงมีพฤติกรรมการรับแรงใกล้เคียงกับสมมติฐานของการออกแบบ

(3) เหล็กเป็นวัสดุเหนียว (Ductile material) มีการยืดตัวได้มากที่หน่วยแรงดึงประลัยไม่เกิดการวิบัติโดยง่าย เช่น การทดสอบการรับแรงดึงของเหล็กคาร์บอนต่ำ มีช่วงการยืดตัวมากกว่าตำแหน่งหน่วยแรงคราก ซึ่งเป็นตำแหน่งที่หน้าตัดเหล็กเริ่มมีขนาดเล็กลงจนถึงหน่วยแรงดึงขาด (Fracture stress) ในขณะที่วัสดุเปราะ (Brittle material) มีการยืดตัวในช่วงหน่วยแรงครากถึงหน่วยแรงดึงขาดแคบ

(4) เหล็กเป็นวัสดุที่มีความแกร่ง (Toughness) สามารถดูดซับพลังงานไว้ได้อย่างมากไม่เกิดการแตกหักโดยง่าย มีกำลังรับแรงและความเหนียวสูง เมื่อองค์อาคารเหล็กรับแรงจนกระทั่งมีการยืดตัวสูงจะยังคงอยู่ได้โดยไม่เกิดการฉีกขาดแม้ว่าแรงกระทำจะมีค่ามากก็ตาม จึงเป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นของเหล็กโครงสร้าง ฉะนั้นในระหว่างการผลิตขึ้นรูป (Fabrication) และติดตั้ง (Erection) จึงสามารถดัดงอ ทุบ และเจาะรูได้โดยที่ไม่ปรากฏความเสียหายให้เห็น



(ก) Sydney Harbour Bridge, Australia [1]



(ข) Building [2]



(ค) Burj Khalifa, Dubai, UAE [3]

### รูปที่ 1.1 อาคารโครงสร้างเหล็ก

อย่างไรก็ตาม โครงสร้างเหล็กยังมีข้อเสียที่ต้องพิจารณา ะมัดระวัง และป้องกัน ดังนี้

(1) ไม่ทนไฟต้องมีระบบป้องกันเพลิง โดยปกติเหล็กโครงสร้างไม่ติดไฟแต่ส่วนประกอบของอาคารโดยส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่ติดไฟเป็นเชื้อเพลิง เมื่อเกิดเพลิงไหม้ในตัวอาคารจะทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสเหล็กก็จะทำให้อุณหภูมิของเหล็กสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กำลังรับแรงของเหล็กลดลง ระบบป้องกันเพลิงสำหรับโครงสร้างเหล็กอาจหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน และใช้ระบบฉีดน้ำ (Springer system) เป็นต้น

(2) ไม่ทนต่อการกัดกร่อนหรือเกิดสนิม (Corrosion) เป็นธรรมชาติของโลหะเปลือยสัมผัสกับอากาศและน้ำโดยตรงมักมีความเสี่ยงต่อการเกิดกัดกร่อน แต่อย่างไรก็ตามสามารถป้องกันได้โดยการทาสีหรือใช้เหล็กที่คงทนต่อการกัดกร่อน (Weathering steel)

(3) เกิดการวิบัติแบบเปราะ (Brittle fracture) เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกกระทำซ้ำหลายๆ รอบ และอุณหภูมิติดลบ เกิดภายใต้สภาวะหน่วยแรงสามแกน (Triaxial stress condition) และบริเวณที่เกิดหน่วยแรงเข้มข้น (Stress concentration) เป็นต้น

(4) เกิดความล้า (Fatigue) ทำให้กำลังรับแรงของเหล็กลดลง เมื่อองค์อาคารรับแรงกระทำซ้ำ สลับไปมาหลายๆ รอบ (Cyclic load) หรือรับแรงดึงผันแปรหลายๆ รอบ

## 1.2 เหล็กโครงสร้าง (Structural Steel)

โดยทั่วไป เหล็กที่ใช้ในงานโครงสร้างเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) และเหล็กกล้าผสม (Alloy Steel) ของธาตุเหล็ก (Iron) และคาร์บอน (Carbon) อาจมีการผสมธาตุอื่นเพื่อให้ได้เหล็กกล้าที่มีคุณภาพตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น คาร์บอน (Carbon, C) ให้กำลังและความแข็ง แมงกานีส (Manganese, Mn) ให้ความแข็ง ซิลิกอน (Silicon, Si) ให้กำลัง ตะกั่ว (Lead, Pb) ให้ความอ่อนกลิ้งง่าย นิกเกิล (Nickel, Ni) โครเมียม (Chromium, Cr) และทองแดง (Copper, Cu) ให้ความทนทานต่อการกัดกร่อน เป็นต้น

### 1.2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon Steel)

สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งสหรัฐอเมริกา (American Iron and Steel Institute, AISI) จำแนกเหล็กกล้าคาร์บอนตามปริมาณคาร์บอนที่ใช้ในส่วนผสมเป็น 4 ประเภท [4] ได้แก่

(1) **เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low carbon steel)** หรือเหล็กกล้าละมุน (Mild steel) มีปริมาณคาร์บอนไม่เกินร้อยละ 0.30 นิยมใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เนื่องจากมีราคาไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของวัสดุที่ได้ต่อการประยุกต์ใช้งาน เหล็กกล้าละมุนมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.05 – 0.25 เป็นเหล็กเหนียวสามารถดัดงอได้ง่ายโดยไม่แตกหัก มีกำลังดึงค่อนข้างต่ำง่ายต่อการดัดแปลงขึ้นรูป สามารถเพิ่มความแข็งที่ผิวได้โดยการชุบแข็ง ซึ่งเป็นขบวนการคาร์บูไรซิง (Carburizing) ผลิตเป็นเหล็กโครงสร้างกำลังปกติ

(2) **เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium carbon steel)** มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.30 – 0.60 มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าละมุน แต่มีกำลังดึงสูงกว่า ผลิตเป็นเหล็กกล้ากำลังสูง (High strength steel) โดยใช้ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.30 – 0.35 ผสมแมงกานีสร้อยละ

0.60 เหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.40 – 0.60 และแมงกานีสร้อยละ 0.60 – 1.65 มีกำลังสูง ต้านทานความเสียหายได้ดี ใช้ผลิตเหล็กทรงรถไฟ ล้อและเพลารถไฟ

(3) เหล็กกล้าคาร์บอนปริมาณสูง (High carbon steel) มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.60 – 1.00 เมื่อผสมแมงกานีสร้อยละ 0.30 – 0.60 มีความแกร่งมาก ใช้ผลิตสปริงและลวดกำลังสูง

(4) เหล็กกล้าคาร์บอนปริมาณสูงมาก (Ultrahigh carbon steel) มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 1.00 – 2.00 มีความแกร่งสูงมาก ใช้เพื่อลดขนาดชิ้นงานให้เล็กลง ทำให้น้ำหนักลดลง

### 1.2.2 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือเหล็กกล้าละมุน อธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง (Tensile stress) และความเครียด (Tensile strain) ดังรูปที่ 1.2 เมื่อแท่งเหล็กรับแรงดึงตามแนวแกนทำให้เหล็กเกิดการยืดตัว แบ่งพฤติกรรมการรับแรงและการเสียรูปได้เป็น 4 ช่วง ได้แก่

(1) **ช่วงอีลาสติก (Elastic region)** เป็นช่วงเริ่มต้นที่เหล็กรับแรงดึงยังไม่มาก อยู่ในช่วงจากจุด O ถึงจุด B ช่วงที่เริ่มต้นจาก O ถึง A มีความสัมพันธ์ของหน่วยแรงแปรผันโดยตรงกับความเครียดได้กราฟเป็นเส้นตรง โดยที่จุด A เป็นพิกัดเส้นตรง (Proportional limit) และความชันของเส้นตรง OA เป็นโมดูลัสอีลาสติก (Modulus of elasticity,  $E$ ) มีค่าดังสมการ (1.1) จากนั้นกราฟจะเริ่มโค้งขึ้นในช่วงสั้นๆ แต่การยืดตัวยังเป็นอีลาสติก ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดแปรผันไม่เป็นเส้นตรง เป็นช่วงจากจุด A ถึง B โดยที่จุด B เป็นจุดที่เหล็กเริ่มยืดตัวพลาสติกและหลังจากจุดนี้เหล็กจะมีการเสียรูปพลาสติกซึ่งเป็นการเสียรูปถาวร เมื่อเหล็กรับแรงเพิ่ม พื้นที่หน้าตัดเหล็กเริ่มลดลง เรียกจุด B นี้ว่า จุดครากบน (Upper yield point) เกิดหน่วยแรงครากบน (Upper yield stress,  $\sigma_u$ ) และเป็นพิกัดอีลาสติก (Elastic limit)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \dots\dots (1.1)$$

โดยที่  $E$  = โมดูลัสอีลาสติก, ksc

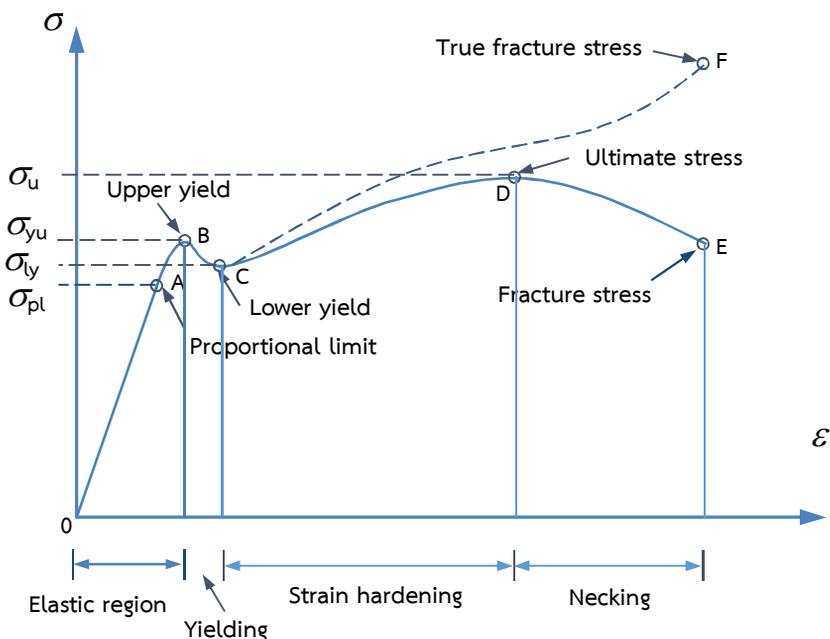
$\sigma$  = หน่วยแรงดึง, ksc

$\epsilon$  = ความเครียดดึง, mm/mm

(2) **ช่วงคราก (Yielding)** ต่อจากช่วงอีลาสติกกราฟเริ่มตกลงในช่วงสั้นๆ ก่อนที่จะโค้งขึ้นอีกครั้ง เป็นช่วงจากจุด B ถึง C และที่จุด C เรียกว่า จุดครากล่าง (Lower yield point) ให้หน่วยแรงครากล่าง (Lower yield stress,  $\sigma_{ly}$ ) การเกิดจุดครากบนและจุดครากล่างเป็นคุณสมบัติเฉพาะของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

(3) **ช่วงเกิดความเครียดอย่างมาก (Strain hardening)** ต่อจากช่วงคราก เหล็กจะเกิดการเสียรูปอย่างถาวรพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงดึงเล็กลงเรื่อยๆ อัตราการเพิ่มของหน่วยแรงเพิ่มขึ้นช้ากว่าอัตราการเพิ่มความเครียดจนกระทั่งได้ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่จุด D ซึ่งเรียกว่า หน่วยแรงประลัย (Ultimate stress,  $\sigma_u$  เป็นกราฟช่วง C ถึง D

(4) **ช่วงมีส่วนคอด (Necking)** ต่อจากช่วงเกิดความเครียดอย่างมาก หลังจากเหล็กเกิดการประลัยกราฟเริ่มโค้งลงอย่างรวดเร็ว เหล็กเริ่มมีส่วนคอด (Necking) และหน้าตัดส่วนคอดจะเล็กลงอย่างรวดเร็วขณะที่หน่วยแรงจริง (True stress) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นกัน จนกระทั่งเหล็กขาดออกจากกันในที่สุด เป็นกราฟช่วง D ถึง E ที่จุด E เป็นจุดที่เหล็กขาดมีค่าหน่วยแรงเป็นหน่วยแรงดึงขาด (Fracture stress) ขณะที่จุด F เป็นหน่วยแรงดึงขาดจริง (True fracture stress)



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ