วังอักษร
ความแข็งแรงของวัสดุ
STRENGTH
OF MATERIALS
วิเชียร อารมย์สุข
120.-

ความแข็งแรงของวัสดุ
(Strength of Materials)

รหัสวิชา 30100-0105

หมวดวิชาสมรรถนะวิชาชีพ กลุ่มสมรรถนะวิชาชีพพื้นฐาน

ประเภทวิชาอุตสาหกรรม

หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2563

สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา (สอศ.) กระทรวงศึกษาธิการ

เรียบเรียงโดย

วิเชียร อารมย์สุข

ความแข็งแรงของวัสดุ
(Strength of Materials)

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

วิเชียร อารมย์สุข.

ความแข็งแรงของวัสดุ. -- กรุงเทพฯ : วังอักษร, 2563.

476 หน้า.

1. ความแข็งแรงของวัสดุ. I ชื่อเรื่อง

051.2

ISBN 978-616-211-272-0

จัดพิมพ์และจัดจำหน่าย โดย...

บริษัท วังอักษร จำกัด

69/3 ถนนอรุณอมรินทร์ แขวงวัดอรุณ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600

โทร. 0-2472-3293-5 โทรสาร 0-2891-0742 Mobile : 08-8585-1521

Facebook : สำนักพิมพ์ วังอักษร e-Mail : wangaksorn9@gmail.com

http://www.wangaksorn.com ID Line : @wangaksorn

พิมพ์ครั้งที่ 2 พ.ศ. 2564

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2561

โดยบริษัท วังอักษร จำกัด ห้ามนำส่วนหนึ่งของหนังสือเล่มนี้ไปทำซ้ำ ดัดแปลง หรือเผยแพร่ต่อสาธารณชน ไม่ว่ารูปแบบใด ๆ นอกจากได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรล่วงหน้าจากทางบริษัทฯ เท่านั้น ชื่อและเครื่องหมายการค้าอื่น ๆ ที่อ้างอิงในหนังสือฉบับนี้เป็นสิทธิโดยชอบด้วยกฎหมายของเจ้าของแต่ละราย โดยบริษัท วังอักษร จำกัด มิได้อ้างความเป็นเจ้าของแต่อย่างใด

ความแข็งแรงของวัสดุ
(Strength of Materials)
รหัสวิชา 30100-0105

จุดประสงค์รายวิชา เพื่อให้

1. เข้าใจหลักการของความเค้นและความเครียด และสมบัติทางกลของวัสดุ
2. สามารถประยุกต์ใช้หลักความแข็งแรงของวัสดุในการออกแบบ ตรวจสอบ และตรวจพินิจชิ้นส่วนโครงสร้างและเครื่องจักรกล
3. มีเจตคติที่ดีในการสืบค้นความรู้และใช้หลักเหตุผลของกลศาสตร์ของแข็งในการแก้ปัญหา มีความตระหนักถึงความปลอดภัยและความคุ้มค่าของวัสดุ

สมรรถนะรายวิชา

1. แสดงความรู้เกี่ยวกับหลักการของความเค้น ความเครียดและสมบัติทางกลของวัสดุ
2. แสดงความรู้เกี่ยวกับหลักการคำนวณหาความเค้น ความเครียด การบิดของชิ้นส่วน
3. แสดงความรู้เกี่ยวกับหลักการคำนวณหาโมเมนต์ ความเค้นดัด ความเค้นเฉือน การรวมความเค้นในคาน

คำอธิบายรายวิชา

ศึกษาเกี่ยวกับแนวคิดและองค์ประกอบของความเค้นและความเครียด สมบัติทางกลของวัสดุ ความเค้นในภาชนะความดัน การต่อกันโดยการเชื่อมและโดยการใช้หมุดย้ำ การบิดเพลา โมเมนต์ดัดแรงเฉือน ความเค้นดัด ความเค้นเฉือนในคาน การรวมความเค้นและการประยุกต์ความรู้ในงานอาชีพ

คำนำ

วิชาความแข็งแรงของวัสดุ รหัสวิชา **30100-0105** จัดอยู่ในหมวดวิชาสมรรถนะวิชาชีพ กลุ่มสมรรถนะวิชาชีพพื้นฐาน ประเภทวิชาอุตสาหกรรม **ตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2563** สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา (สอศ.) กระทรวงศึกษาธิการ ผู้เขียนได้บริหารสาระการเรียนรู้แบ่งเป็น 7 บทเรียน ได้จัดแผนการจัดการเรียนรู้/แผนการสอนที่มุ่งเน้นฐานสมรรถนะ (Competency Based) และการบูรณาการ (Integrated) ตรงตามจุดประสงค์รายวิชา สมรรถนะรายวิชา คำอธิบายรายวิชา ในแต่ละบทเรียนมุ่งให้ความสำคัญส่วนที่เป็นความรู้ ทฤษฎี หลักการ กระบวนการ ตัวอย่าง แบบฝึกปฏิบัติ และคำถามเพื่อการทบทวน เพื่อฝึกทักษะประสบการณ์ เร่งพัฒนาบทบาทของผู้เรียนเป็นผู้จัดการแสวงหาความรู้ (Explorer) เป็นผู้สอนตนเองได้ สร้างองค์ความรู้ใหม่ และบทบาทของผู้สอนเปลี่ยนจากผู้ให้ความรู้มาเป็นผู้จัดการชี้แนะ (Teacher Roles) จัดสิ่งแวดล้อมเอื้ออำนวยต่อความสนใจเรียนรู้ และเป็นผู้ร่วมเรียนรู้ (Co–investigator) จัดห้องเรียนเป็นสถานที่ทำงานร่วมกัน (Learning Context) จัดกลุ่มเรียนรู้ให้รู้จักทำงานร่วมกัน (Grouping) ฝึกความใจกว้าง มุ่งสร้างสรรค์คนรุ่นใหม่ สอนความสามารถที่นำไปทำงานได้ (Competency) สอนความรัก ความเมตตา (Compassion) ความเชื่อมั่น ความซื่อสัตย์ (Trust) เป้าหมายอาชีพอันยังประโยชน์ (Productive Career) และชีวิตที่มีศักดิ์ศรี (Noble Life) เหนือสิ่งอื่นใด เป็นคนดีทั้งกาย วาจา ใจ มีคุณธรรม จรรยาบรรณทางธุรกิจและวิชาชีพ

ส่งเสริมสนับสนุนยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบคุณวุฒิวิชาชีพ (Vocational Qualification System) สอดคล้องตามมาตรฐานอาชีพ (Occupational Standard) สร้างภูมิคุ้มกัน เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ กำลังแรงงาน การพัฒนามาตรฐานการปฏิบัติงานระดับชาติ (National Benchmarking) และการวิเคราะห์หน้าที่การงาน (Functional Analysis) เพื่อให้เกิดผลสำเร็จในภาคธุรกิจ อุตสาหกรรม ทุกสาขาอาชีพ เป็นการเตรียมความพร้อมของผู้เรียนเข้าสู่สนามการแข่งขันในประชาคมอาเซียน

วิเชียร อารมย์สุข

สารบัญ

บทที่ 1 **ความเค้นและความเครียด** 1

บทนำ 2
ภาระและแรงปฏิกิริยา 3
ความเค้น 4
ความเครียด 13
ไดอะแกรมความเค้นและความเครียด 18
การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและกฎของฮุค 22
การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก 26
พลังงานความเครียด 27
อัตราส่วนปัวซอง 29
ค่าความปลอดภัย 32
ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิ 33
ความเค้นบนระนาบเอียง 35
ชิ้นส่วนที่รับแรงในแนวแกนหาค่าไม่ได้ทางสถิตยศาสตร์ 38
แบบทดสอบท้ายบท 61

บทที่ 2 **ภาชนะอัดความดันและการเชื่อมต่อ** 73

บทนำ 74
ภาชนะอัดความดันทรงกระบอกผนังบาง 75
ภาชนะอัดความดันรูปทรงกลมผนังบาง 78
ภาชนะอัดความดันรูปทรงทั่วไปผนังบาง 79
ภาชนะรูปทรงกรวยภายใต้ความดัน 80

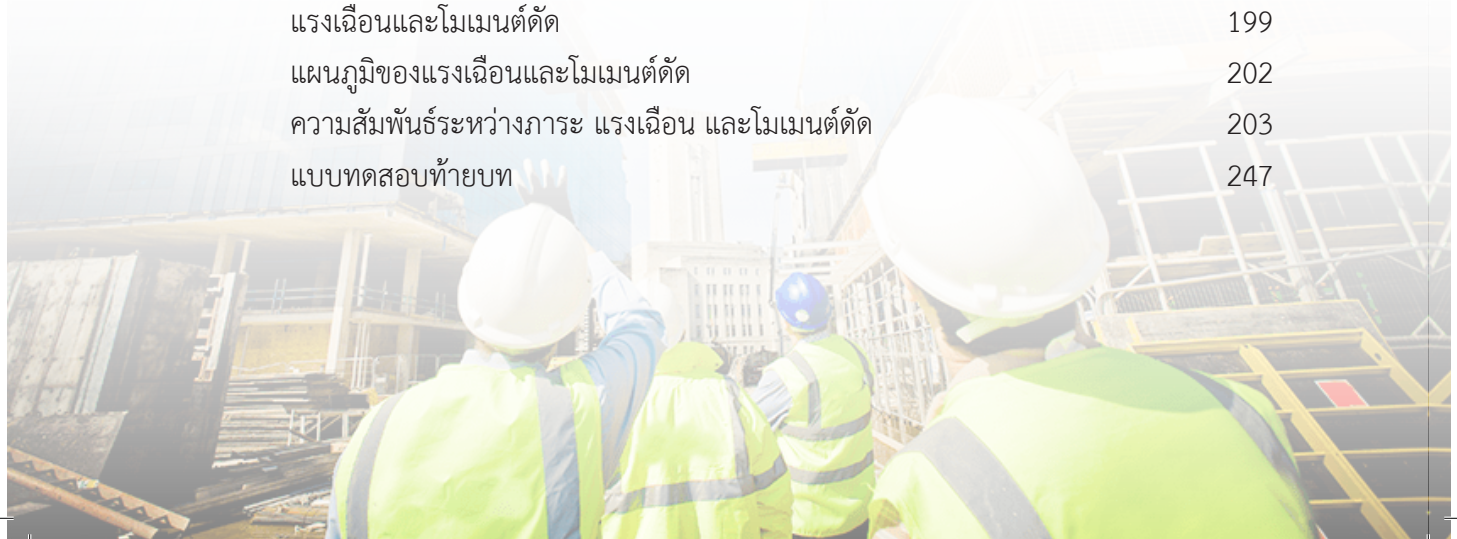
ประสิทธิภาพของรอยต่อ 81
การต่อด้วยหมุดย้ำและการเชื่อม 82
แบบทดสอบท้ายบท 112

บทที่ 3 **การบิด** 120

บทนำ 121
การบิดของเพลากลม 122
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกำลัง 128
พลังงานความเครียดเนื่องจากการบิด 129
การบิดสำหรับเพลาที่หาค่าไม่ได้ทางสถิตยศาสตร์ 130
สปริงขด 134
การบิดของท่อผนังบาง 140
การบิดของเพลาหน้าตัดรูปต่าง ๆ 144
แบบทดสอบท้ายบท 184

บทที่ 4 **แรงเฉือนและโมเมนต์ดัดในคาน** 194

บทนำ 195
การยึดและการรองรับของคาน 196
ชนิดและประเภทของคาน 196
ชนิดของแรงที่กระทำ 198
แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด 199
แผนภูมิของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด 202
ความสัมพันธ์ระหว่างภาระ แรงเฉือน และโมเมนต์ดัด 203
แบบทดสอบท้ายบท 247



บทที่ 5 **ความเค้นดัดในคาน** 254

บทนำ 255
ความเค้นดัดในคานตรง 256
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าโมเมนต์ความยืดหยุ่นของหน้าตัด 261
ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเชิงประกอบ 263
พลังงานความเครียดเนื่องจากการดัด 264
การดัดในคานเชิงประกอบ 266
การดัดในคานโค้ง 270
แบบทดสอบท้ายบท 303

บทที่ 6 **ความเค้นเฉือนในคาน** 312

บทนำ 313
ความเค้นเนื่องจากการเฉือน 313
ความเค้นเฉือนในคาน 318
ความเค้นเฉือนในคานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 320
ความเค้นเฉือนในคานหน้าตัดรูปวงกลม 322
ความเค้นเฉือนในคานหน้าตัดแบบมีปีก 324
จุดศูนย์กลางการเฉือน 325
แบบทดสอบท้ายบท 361

บทที่ 7 **การโก่งของคาน** 368

บทนำ 369
สมการดิฟเฟอเรนเชียลของเส้นโค้งอีลาสติค 370
วิธีอินทิเกรตสองชั้น 375
วิธีโมเมนต์ของพื้นที่ 379
วิธีการเสริมเข้าด้วยกัน 384
คานประเภทหาค่าไม่ได้ทางสถิตยศาสตร์ 389
แบบทดสอบท้ายบท 449

คำถามเพื่อการทบทวน 460

คำศัพท์ 464

บรรณานุกรม 469

บทที่ 1

ความเค้นและความเครียด

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม (BEHAVIORAL OBJECTIVES)

หลังจากศึกษาจบบทเรียนนี้แล้ว นักศึกษาจะมีความสามารถดังนี้

(After studying this chapter, you will be able to)

1. อธิบาย (Explain) ความหมายและประเภทของภาระและแรงปฏิกิริยา
2. ศึกษา (Study) ความหมายและแบ่งชนิดของความเค้น
3. ศึกษาความหมายและแบ่งชนิดของความเครียด
4. เขียน (Write) ไดอะแกรมความเค้นและความเครียด
5. คำนวณ (Calculate) การเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและกฎของฮุค
6. ศึกษาการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก
7. หาค่า (Determine) พลังงานความเครียด
8. อธิบายอัตราส่วนปัวซอง
9. ทดสอบ (Test) ค่าความปลอดภัย
10. คำนวณความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง
11. คำนวณความเค้นบนระนาบเอียง
12. คำนวณความแข็งแรงของชิ้นส่วนที่รับแรงในแนวแกนหาค่าไม่ได้ทางสถิตยศาสตร์
13. ยกตัวอย่างการคำนวณความเค้นและความเครียด

บทที่ 1
ความเค้นและความเครียด

บทนำ (Introduction)

ในการศึกษาวิชากลศาสตร์ของแข็ง หรือความแข็งแรงของวัสดุ มีจุดประสงค์เพื่อให้วิศวกรสามารถทำการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องจักรกล หรือโครงสร้างต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญในการออกแบบ นอกจากนั้นยังจะต้องมีความแข็งแรงทนทาน วิศวกรผู้ออกแบบต้องเลือกขนาดและประเภทของวัสดุที่จะใช้ให้เพียงพอต่อการรับแรงที่กระทำ และมีความแข็งเกร็ง (Rigid) เพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการเสียรูปจนมากเกินไป แต่ในบางครั้งการประหยัดมากเกินไปก็ไม่ปลอดภัย

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของวัสดุจะต้องกระทำอย่างมีระบบ และมีความสัมพันธ์กันระหว่างภาระภายนอกที่กระทำและผลกระทบภายใน ภาระและการเปลี่ยนรูปร่างที่เกิดขึ้นในวัสดุเนื่องจากภาระเหล่านี้ สิ่งเหล่านี้เป็นพื้นฐานสำหรับความเข้าใจปัญหาและการแก้ปัญหาในการออกแบบ ปัญหาต่าง ๆ อาจแยกออกได้เป็นทางด้านการออกแบบ (Design) และการวิเคราะห์ (Analysis) ถ้าเป็นปัญหาที่ให้เลือกขนาดและวัสดุที่ใช้สำหรับสร้างเครื่องจักรกลหรือโครงสร้างต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความถูกต้องในสภาวะที่กำหนดให้ก็เรียกว่าเป็นปัญหาทางด้านการออกแบบ ถ้าเป็นการหาขนาดของภาระที่แน่นอนที่กระทำกับส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลหรือโครงสร้างก็เรียกว่าเป็นปัญหาทางด้านการวิเคราะห์

ภาระและแรงปฏิกิริยา (Loads and Reactions)

ภาระ หมายถึง แรงใด ๆ ที่กระทำกับวัตถุ หรืออาจเรียกภาระว่า **แรงกระทำ** หรือ **แรงกิริยา** ก็ได้ ส่วนแรงที่กระทำต้านกับภาระต่อวัตถุเรียกว่า **แรงปฏิกิริยา** ภาระและแรงปฏิกิริยาอาจเป็นแรงภายนอก หรือแรงภายใน และแรงที่อยู่นิ่งหรือแรงที่เคลื่อนที่ ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไปถึงพื้นที่ที่รับแรงนั้น

ประเภทของภาระ (Types of Loads)

1. ภาระสถิต (Static Load) คือ ภาระที่กระทำต่อวัตถุซึ่งค่อย ๆ เพิ่มทีละน้อยอย่างช้า ๆ และจะไม่กระทำซ้ำ ๆ กัน

2. ภาระที่รับไว้ (Sustain Load) คือ ภาระที่กระทำต่อวัตถุเป็นเวลายาวนาน เช่น ภาระที่โครงสร้างรับน้ำหนักของตัวมันเอง หรือสำหรับวัสดุบางชนิดภายใต้สภาวะของอุณหภูมิและภาระที่แน่นอน ซึ่งภาระเหล่านี้จะทำให้เกิดผลกระทบกระเทือนต่อโครงสร้าง เช่น เกิดการโก่งงออย่างถาวรของคาน หรือเสาหดสั้นลงอย่างถาวร เป็นต้น

3. ภาระกระทำซ้ำ (Repeated Load) คือ ภาระที่กระทำต่อวัตถุซ้ำ ๆ กันหลาย ๆ ครั้ง เช่น ภาระที่กระทำต่อชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ขณะที่เครื่องยนต์ทำงาน

4. ภาระกระแทก (Impact Load) คือ ภาระที่กระทำต่อวัตถุในช่วงเวลาอันสั้นมากจนไม่สามารถหาช่วงเวลาที่ภาระดังกล่าวกระทำได้ เช่น การใช้ฆ้อนตอกตะปู หรือก้อนน้ำหนักหล่นลงกระแทกบนพื้น ในบางครั้งภาระแบบนี้อาจเรียกว่าเป็นภาระแบบ Energy Load

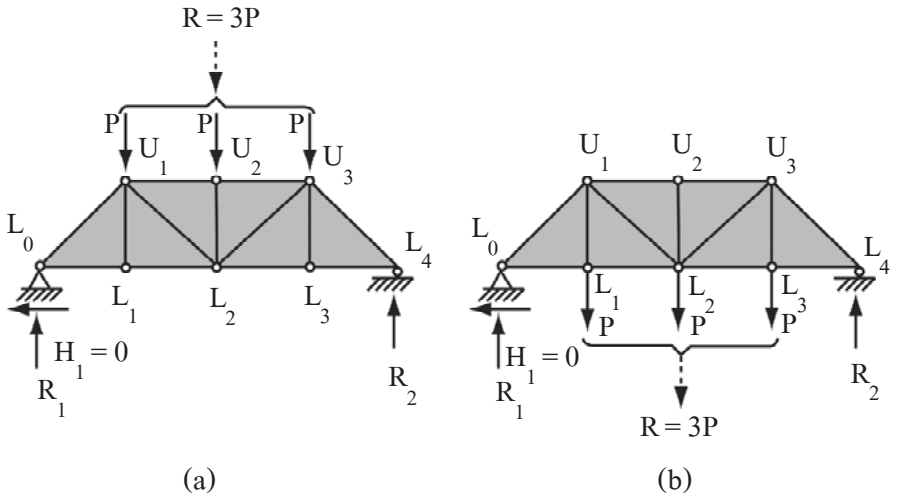
5. ภาระในแนวแกน (Axial Load) คือ ภาระหรือระบบแรงที่กระทำผ่านจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัดที่ภาระเหล่านั้นกระทำ หรือเรียกว่า Centric Load

6. ภาระกระทำเป็นจุด (Concentrated Load) คือ ภาระที่กระทำ ที่จุด ๆ หนึ่งเป็นพื้นที่เล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของชิ้นส่วนที่ถูกภาระนั้นกระทำ

7. ภาระกระจาย (Distributed Load) คือ ภาระหรือระบบแรงที่กระทำต่อวัตถุกระจายไปบนพื้นที่ของวัตถุที่ถูกกระทำ ซึ่งอาจเป็นทั้งภาระที่กระจายสม่ำเสมอ และภาระที่กระจายไม่สม่ำเสมอ

8. ภาระนอก (External Load) คือ ภาระหรือแรงที่กระทำภายนอกของโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะสมดุล เช่น แรงกระทำ P และแรงปฏิกิริยา R และ H ดังแสดงในรูปที่ 1.1

9. ภาระภายใน (Internal Load) คือ ภาระหรือแรงที่มีผลกระทบภายในต่อชิ้นส่วนของโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะสมดุล เช่น แรงในชิ้นส่วน U_1L_1, U_2L_2 และ U_3L_3 ดังแสดงในรูปที่ 1.1

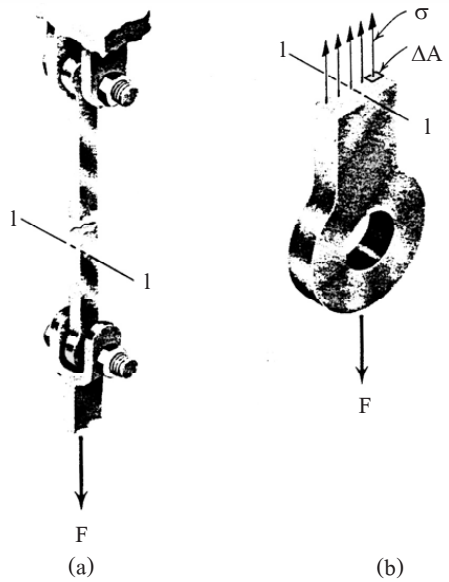


รูปที่ 1.1 *โครงสร้างรับแรงสมมาตรที่มีขนาดเท่ากัน 3 แรง*

ความเค้น (Stresses)

เมื่อระนาบภายในท่อนวัตถุใด ๆ ถูกกระทำด้วยแรงภายใน ความเข้มของแรง (Intensity of the Force) บนพื้นที่หน้าตัดนี้เรียกว่า “ความเค้น” บนระนาบ หรือกล่าวได้ว่า ความเค้น คือ แรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัด เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ σ (Sigma) ความเค้นนี้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ความต้านทานภายในของชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับแรง และใช้สำหรับการเลือกใช้วัสดุและขนาดของวัสดุสำหรับการออกแบบ

พิจารณาก้านต่อ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (a) ที่หน้าตัด 1-1 ตั้งฉากกับแกนในแนวยาวของก้านต่อ ดังแสดงในรูปที่ 1.2 (b) สำหรับสภาวะสมดุล แรงในแนวแกน F (ไม่คิดน้ำหนักของก้านต่อ) จะต้องถูกต้านด้วยผลรวมของแรงภายใน ซึ่งก็คือความเค้น σ และพื้นที่ Δ A ซึ่งเกิดความเค้น ถ้าความเค้นกระจายตลอดพื้นที่หน้าตัดของก้านต่อสามารถหาค่าความเค้นได้โดยหารขนาดของแรง F ด้วยพื้นที่หน้าตัด A



รูปที่ 1.2 *ความเค้นในก้านต่อ*

$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad \text{_____(1.1)}$$

เมื่อ σ = ความเค้น, N/m^2

F = แรงกระทำ, N

A = พื้นที่หน้าตัดที่แรงกระทำ, m^2

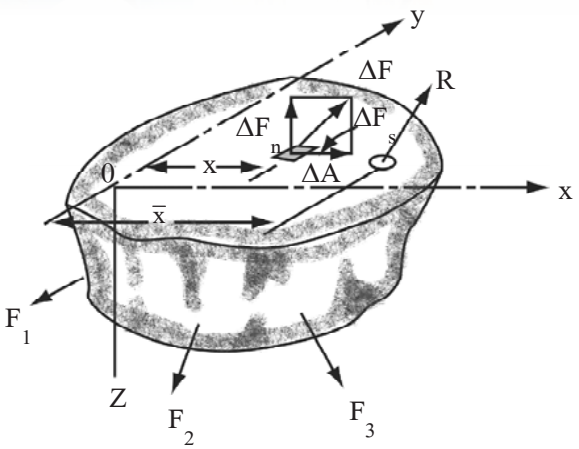
ความเค้นมีหน่วยเป็น N/m^2 หรือเรียกว่า Pascal (Pa) แต่ Pascal เป็นหน่วยเล็กในทางปฏิบัติจำเป็นต้องมีตัวคูณ เช่น

$1\ k\ Pa = 10^3\ Pa = 10^3\ N/m^2$

$1\ M\ Pa = 10^6\ Pa = 10^6\ N/m^2$

$1\ G\ Pa = 10^9\ Pa = 10^9\ N/m^2$

สมการที่ (1.1) เป็นความเค้นอย่างง่าย (Simple Stress) ซึ่งใช้ในการหาความเค้นฉาก (Normal Stress) หรือความเค้นเฉือน (Shear Stress) ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป นอกจากนั้นยังมีความเค้นอย่างอื่นอีก เช่น ความเค้นดัด (Bending Stress) ความเค้นบิด (Torsion Stress) และความเค้นผสม (Combined Stresses)



รูปที่ 1.3 *แสดงแรง ΔF บนพื้นที่ ΔA*

พิจารณา รูปที่ 1.3 วัตถุถูกกระทำด้วยระบบแรง F_1, F_2 และ F_3 และอยู่ในสภาวะสมดุลโดยแรงลัพธ์ R ซึ่งประกอบไปด้วยผลรวมของการเพิ่มของแรง ΔF กระทำบนส่วนเล็ก ๆ ของพื้นที่ ΔA ขนานกับระนาบ x - y จากนั้นแตก ΔF ออกเป็น 2 แรง โดยที่แรงหนึ่งตั้งฉากกับระนาบ คือ แรง ΔF_n และอีกแรงหนึ่งขนานกับระนาบ คือ แรง ΔF_s ดังแสดงในรูป จะได้ค่าของ “ความเค้นฉาก” (Normal Stress) คือ

$$\sigma = \lim_{\Delta A \to o} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \qquad \text{_____(1.2)}$$

สมการที่ (1.2) จะแทนด้วยสมการที่ (1.1) เมื่อความเค้นกระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด สำหรับความเค้นสม่ำเสมอ แรงลัพธ์ภายนอกของแรงที่กระทำ F_1, F_2 และ F_3 จะต้องมีแนวแรงผ่านจุดศูนย์ถ่วงของวัตถุ ซึ่งแน่นอนแรงลัพธ์ภายใน R ก็จะมีแนวแรงผ่านจุดศูนย์ถ่วงด้วย มิฉะนั้นแล้วจะเกิดผลกระทบจากการหมุนขึ้นกับวัตถุได้

จากข้อความดังกล่าวข้างต้นสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้ กำหนดให้ $\bar{x}$ เป็นระยะทางในแนวแกน x ของแรงลัพธ์ R และให้ x_C เป็นระยะทางในแนวแกน x ของจุดศูนย์ถ่วงของหน้าตัด ดังนั้น

$$R = \int_A \sigma \, dA$$

โมเมนต์รอบแกน y

$$R\bar{x} = \int_A x(\sigma \, dA)$$

เนื่องจาก σ คือ ค่าคงที่ (ความเค้นสม่ำเสมอ) บนพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด

ดังนั้น $R = \sigma \int_A dA$

$$\text{และ } R\bar{x} = \sigma \int_A x dA$$

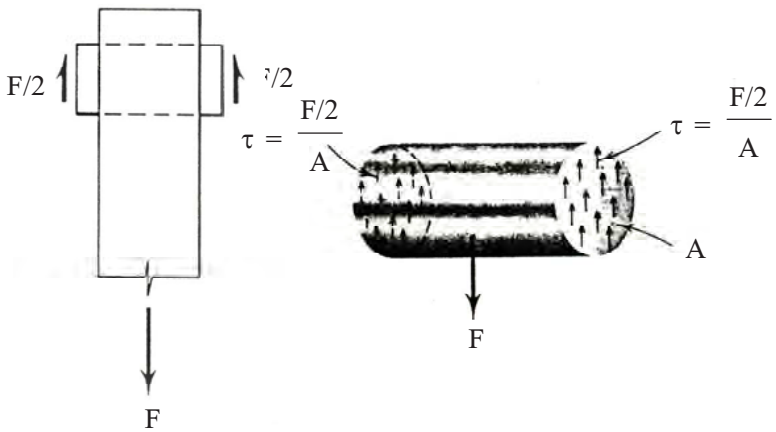
$$\text{แทนค่า R จะได้ } (\sigma \int_A dA)\bar{x} = \sigma \int_A x dA$$

$$A\bar{x} = \int_A x dA = A.x_C$$

$$\text{หรือ } \bar{x} = x_C$$

ในทำนองเดียวกันทางด้านแกน y ก็สามารถหาได้เช่นกัน

ความเค้นที่เกิดจากแรงย่อยของแรง ΔF ที่ขนานกับระนาบตัดเรียกว่า “ความเค้นเฉือน” (Shear Stress) ซึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ τ สลักในรูปที่ 1.2 (a) จะเกิดความเค้นเฉือน ในรูปที่ 1.4 (a) แสดง F.B.D. ของการต่อ และในรูปที่ 1.4 (b) แสดงสลักรับแรง F และถูกต้านโดยแรงบนผิวหน้าทั้งสองซึ่งอาจเกิดการเสียหายเนื่องจากการเฉือนได้



รูปที่ 1.4 *การเฉือนในสลักของก้านต่อ*

จากได้กล่าวแล้วข้างต้น ยังมีความเค้นที่เกิดจากกดของวัตถุหนึ่งลงบนอีกวัตถุหนึ่ง เราจึงพิจารณาแบ่งความเค้นออกเป็น 3 ชนิด คือ ความเค้นฉาก ความเค้นเฉือน และความเค้นบีบอัด

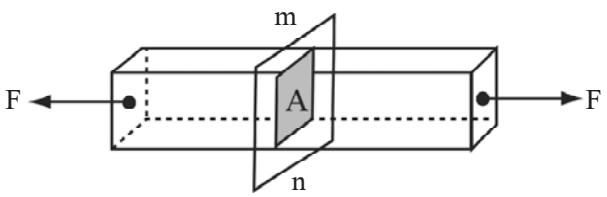
1. ความเค้นฉากหรือความเค้นตรง (Normal Stress or Direct Stress)

เป็นความเค้นที่เกิดจากแท่งวัตถุ หรือชิ้นส่วนได้รับแรง F ที่มีขนาดเท่ากัน 2 แรง กระทำผ่านแนวแกนของแท่งวัตถุ หรือชิ้นส่วนนั้นแบ่งออกเป็น

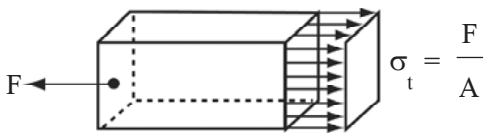
1.1 ความเค้นดึง (Tensile Stress) พิจารณาแท่งวัตถุตรงดังแสดงในรูปที่ 1.5 (a) รับแรง F ในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งแรงนี้พยายามดึงให้แท่งวัตถุนี้มีความยาวเพิ่มขึ้น แรงดังกล่าวนี้เรียกว่า

แรงดึง (Tensile Forces) ถ้าตัดแท่งวัตถุที่ระนาบ m - n ตั้งฉากกับแนวแกนของแท่งวัตถุ เราสามารถพิจารณาการสมดุลแยกออกต่างหากได้ ส่วนของแท่งวัตถุที่แยกออกมานี้เรียกว่า รูปอิสระ ดังในรูปที่ 1.5 (b) แสดง F.B.D ของแท่งวัตถุทางด้านซ้ายมือ ถ้า F.B.D นี้ไม่มีความเร่ง แรง F ที่กระทำที่ปลายจะสมดุลกับความเค้นที่ต้านที่หน้าตัด m - n นี่ก็คือความเค้นฉาก และเนื่องจากความเค้นนี้กระทำออกจาก F.B.D. จึงเรียกความเค้นนี้ว่า **ความเค้นดึง** ใช้แทนด้วยสัญลักษณ์ σ_t หาได้จาก

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \qquad \text{_____(1.3)}$$



(a)

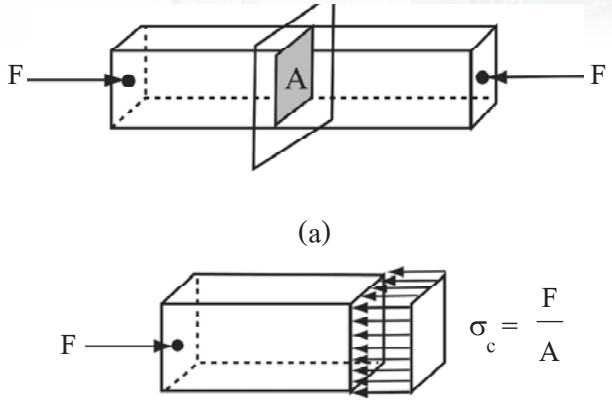


(b)

รูปที่ 1.5 *แท่งโลหะภายใต้ความเค้นดึง*

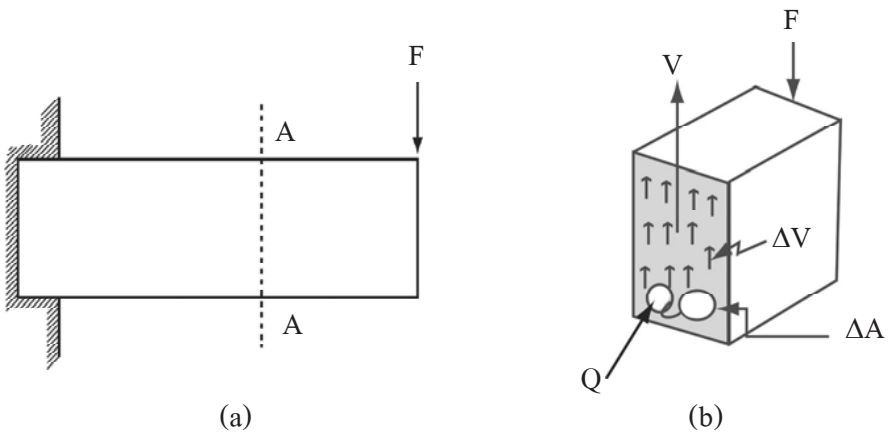
1.2 ความเค้นอัด (Compressive Stress) พิจารณาแท่งวัตถุชิ้นเดียวกันกับในรูปที่ 1.5 (a) แต่ในครั้งนี้ให้แรง F พยายามอัดแท่งวัตถุนี้ให้มีความยาวสั้นลง ดังแสดงในรูปที่ 1.6 แรงดังกล่าวนี้เรียกว่า **แรงอัด (Compressive Forces)** ซึ่งจะทำให้เกิดความเค้นอัด ใช้แทนด้วยสัญลักษณ์ σ_c หาได้จาก

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \qquad \text{_____(1.4)}$$



รูปที่ 1.6 *แท่งโลหะภายใต้ความเค้นอัด*

2. ความเค้นเฉือน (Shear Stress or Tangential Stress) พิจารณา รูปที่ 1.7 (a) คานยื่นปลายด้านหนึ่งยึดติดกับผนังส่วนปลายอีกด้านรับแรง F ตัดคานที่หน้าตัด A - A และพิจารณา F.B.D. ของคานส่วนหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 1.7 (b) ส่วนของคานอยู่ในสภาวะสมดุล แรง F ถูกสมดุลโดยแรงลัพธ์ V ซึ่งเรียกว่า **แรงเฉือน (Shearing Force)** บนหน้าตัด A - A



รูปที่ 1.7 *คานยื่นภายใต้ความเค้นเฉือน*

เหมือนกับในกรณีของความเค้นฉาก ความเค้นเฉือนก็หมายถึง ความเข้มของแรงที่จุด ๆ หนึ่งเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ τ (Tau) ถ้าแรงเฉือนจำนวนน้อย ΔV กระทำบนส่วนเล็ก ๆ ของพื้นที่ ΔA ที่จุด Q จะได้ความเค้นเฉือนที่จุด Q ดังนี้

$$\tau = \lim_{\Delta A \to o} \frac{\Delta V}{\Delta A} = \frac{dV}{dA}$$

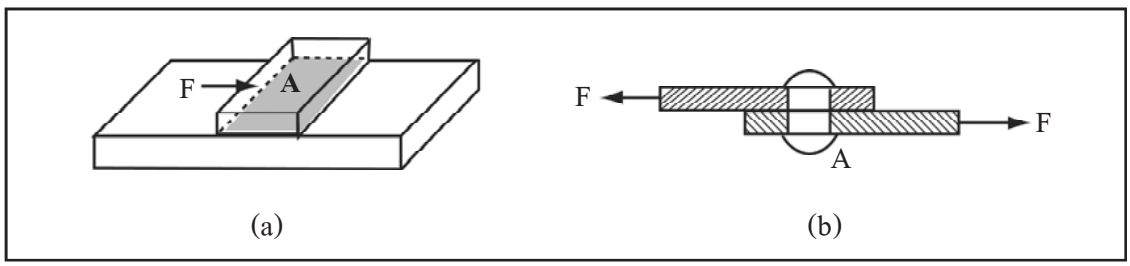
$$\text{หรือ } \tau = \lim_{\Delta A \to o} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \qquad \text{_____(1.5)}$$

ถ้าเราหารแรงเฉือนทั้งหมดด้วยพื้นที่ทั้งหมด เราจะได้ค่า F/A ซึ่งเป็นค่าความเค้นเฉือนเฉลี่ย τ_{ave} เนื่องจากในสภาพปกติความเค้นเฉือนจะไม่กระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด ความสัมพันธ์ของแรง และความเค้นเฉือนสามารถเขียนอยู่ในรูป

$$dV = dF = \tau_{ave}\, dA \qquad \text{_____(1.6)}$$

$$\text{หรือ } \boxed{\tau_{ave} = \frac{F}{A} = \frac{V}{A}} \qquad \text{_____(1.7)}$$

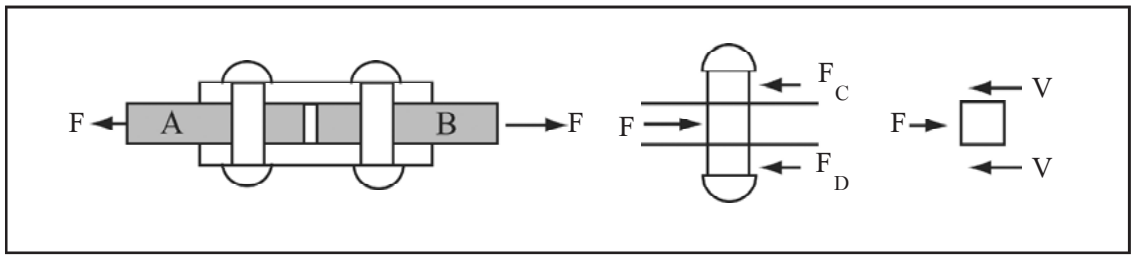
การเฉือนในสมการที่ (1.7) นี้เป็นลักษณะการเฉือนเดี่ยว (Single Shear) กล่าวคือ พื้นที่ที่ถูกเฉือนมีเพียงพื้นที่เดียว และให้สังเกตว่าพื้นที่ที่ถูกเฉือนนี้จะขนานกับแรงเฉือน ไม่เหมือนกับพื้นที่ของความเค้นฉากซึ่งพื้นที่จะตั้งฉากกับแรงที่กระทำ อีกตัวอย่างหนึ่งของลักษณะการเฉือนเดี่ยวแสดงในรูปที่ 1.8 (a) และ 1.8 (b)



รูปที่ 1.8 *ลักษณะการเฉือนเดี่ยว*

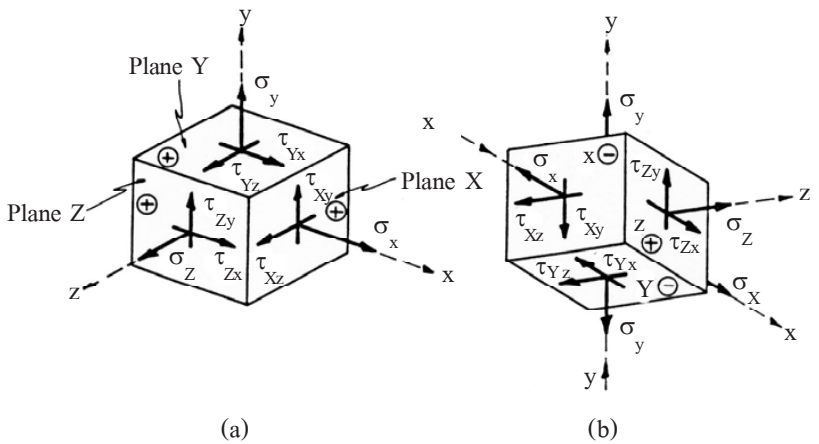
แผ่นต่อในรูปที่ 1.8 (a) และหมุดย้ำในรูปที่ 1.8 (b) ถูกเฉือนแบบการเฉือนเดี่ยว แต่ถ้าทำการต่อแผ่นต่อ ดังแสดงในรูปที่ 1.9 โดยใช้หมุดย้ำเช่นเดิมจะเห็นได้ว่า พื้นที่ที่หมุดย้ำถูกเฉือนจะมี 2 ที่ ลักษณะการเฉือนเช่นนี้จะเรียกว่า เป็นการเฉือนแบบการเฉือนคู่ (Double Shear)

$$\tau_{ave} = \frac{F}{2A} = \frac{V}{2A} \qquad \text{_____(1.8)}$$



รูปที่ 1.9 *ลักษณะการเฉือนคู่*

จากสมการที่ (1.6) $dV = dF = \tau_{ave}\, dA$ แรงเฉือนย่อยที่กระทำที่จุดต่าง ๆ จะอยู่บนระนาบที่มันกระทำซึ่งไม่จำเป็นต้องกระทำในทิศทางเดียวกัน พิจารณารูปวัตถุสี่เหลี่ยม 3 มิติ อยู่ในแกน x, y และ z ระนาบที่ตั้งฉากกับแกน x, y และ z กำหนดให้เป็นระนาบ X, Y และ Z ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1.10 แต่ละระนาบจะมีความเค้นกระทำ 3 ตัว คือ ความเค้นฉาก 1 ตัว และความเฉือนอีก 2 ตัว ความหมายของความเค้นแต่ละตัวกำหนดโดยตัวอักษร 2 ตัวที่ห้อยอยู่ ตัวแรกเป็นตัวบอกถึงระนาบ และตัวที่สองเป็นตัวบอกทิศทางของความเค้น เช่น σ_{Yy} คือ ความเค้นบนระนาบ Y มีทิศทางตามแกน y และ τ_{Zx} คือ ความเค้นบนระนาบ Z มีทิศทางตามแกน x เป็นต้น ในกรณีของความเค้นฉาก σ ไม่จำเป็นต้องเขียนตัวอักษรที่ห้อยอยู่ถึง 2 ตัว เนื่องด้วยจากอักษรเหมือนกัน ดังนั้น σ_{Xx} จึงเขียนเพียง σ_x



รูปที่ 1.10 *ความเค้นบนวัตถุสี่เหลี่ยม 3 มิติ*