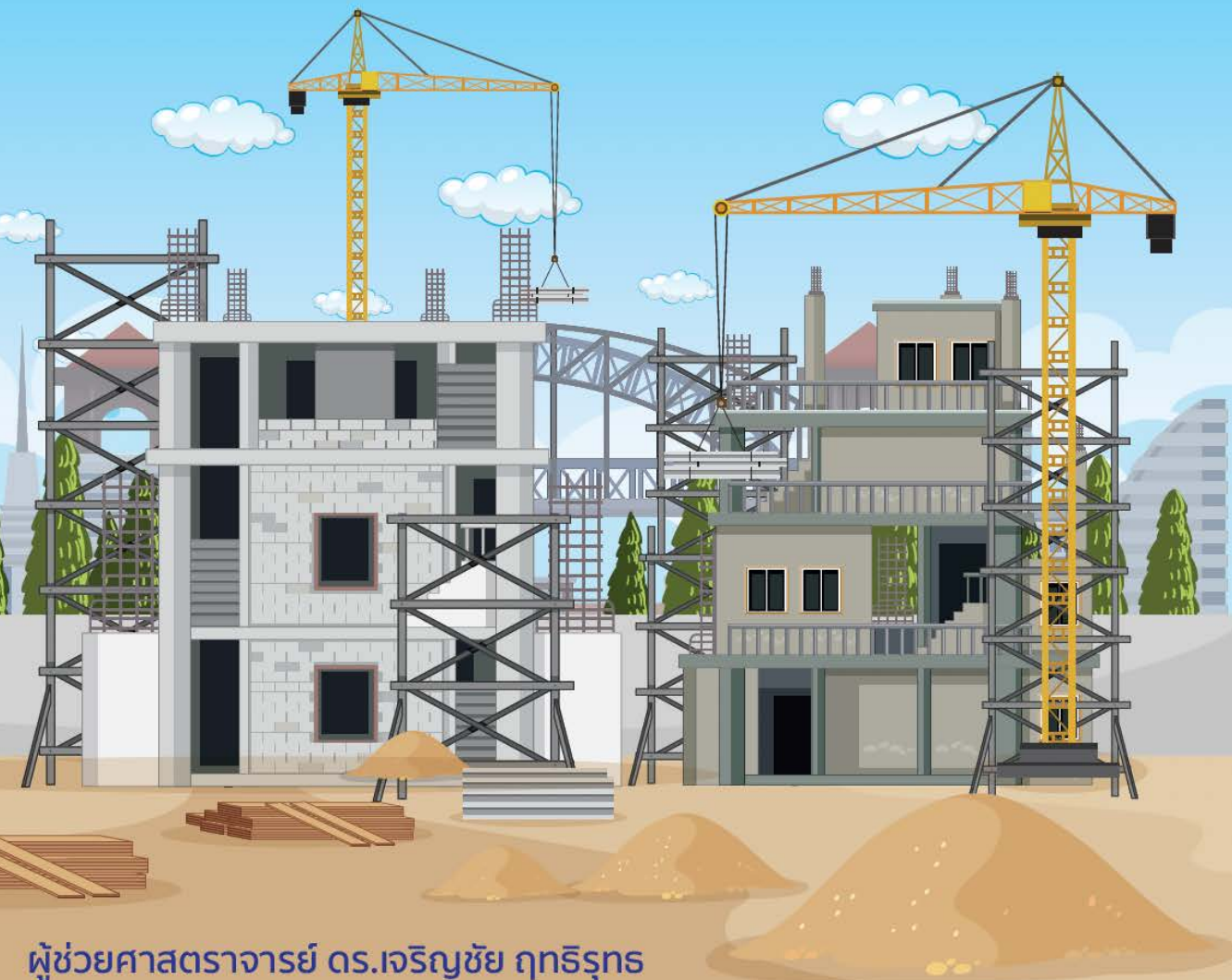


ตำรา วิชาวัสดุวิศวกรรมโยธา และการทดสอบ

Civil Engineering Materials and Testing

31-407-011-207



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย ฤทธิรุทร

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขต ขอนแก่น

31-407-011-207

ตำรา วัสดุวิศวกรรมโยธาและการทดสอบ

Civil Engineering Materials and Testing

วิชาบังคับก่อน : 31-407-010-201 ความแข็งแรงวัสดุ

Prerequisite: 31-407-010-201 Strength of Materials 3(2-3-5)

พฤติกรรมและสมบัติพื้นฐาน, การตรวจสอบและการทดสอบวัสดุวิศวกรรมโยธาชนิดต่าง ๆ เช่น เหล็กรูปพรรณ และเหล็กเส้น ไม้ ซีเมนต์ มวลรวม และวัสดุผสมเพิ่ม, การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต, คอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว, วัสดุทางหลวง และวัสดุอื่นด้านวิศวกรรมโยธา

Fundamental behaviors and properties, introduction to inspecting and testing of various civil engineering materials, steel and rebar, wood, cement, aggregates and admixtures, mix design, fresh and hardened concrete, highway materials, others civil engineering materials

พิมพ์ครั้งแรก : 2566

ผู้เขียน : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย ฤทธิรุท

รูปเล่ม : QueenBee Writersite

จัดพิมพ์โดย

เจริญชัย ฤทธิรุท 12/29 หมู่ 6 ถ.ศรีจันทร์

ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000 โทร.0895164594

จัดจำหน่ายโดย : เจริญชัย ฤทธิรุท

ราคา 350 บาท

ISBN E-book 978-616-603-303-8

ขอสงวนสิทธิ์เนื้อหา รูปภาพ และข้อมูลทั้งหมดของหนังสือเล่มนี้
ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ (ฉบับเพิ่มเติม) พ.ศ.2558

คำนำ

ตำรานี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชาวัสดุวิศวกรรมโยธาและการทดสอบ ซึ่งจัดเป็นวิชาหนึ่งในหลักสูตรการศึกษาของวิศวกรรมโยธา มีวัตถุประสงค์เพื่อพฤติกรรมและสมบัติพื้นฐานการตรวจสอบ และการทดสอบวัสดุวิศวกรรมโยธาที่มักใช้เป็นพื้นฐานในงานก่อสร้าง เช่น เหล็กรูปพรรณและเหล็กเส้น ไม้ ซีเมนต์ มวลรวม และวัสดุผสมเพิ่มในคอนกรีต นอกจากนี้ตำรายังเรียบเรียงการเรียนรู้เกี่ยวกับการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต คอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ความรู้เบื้องต้นของวัสดุทางหลวง และวัสดุอื่นด้านวิศวกรรมโยธา เมื่อผู้เรียนมีความเข้าใจแล้ว จะสามารถนำองค์ความรู้ที่มีไปใช้ในการเรียนในรายวิชาต่อไป เช่น การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตอัดแรง การออกแบบโครงสร้างไม้และเหล็ก การประมาณราคางานก่อสร้าง การออกแบบผิวทาง เป็นต้น นอกจากนี้ยังทำให้ผู้เรียนได้รับความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุวิศวกรรมโยธาที่สามารถนำไปใช้ประยุกต์ในการปฏิบัติงานตามสภาพจริงได้ และมีทักษะในการทดสอบ ตรวจสอบงานวัสดุทางวิศวกรรมโยธา

แนวทางในการเขียนตำราเล่มนี้ผู้เขียนได้พัฒนาจากเอกสารคำสอน และเรียบเรียงข้อมูลประกอบจากหลายแหล่ง ได้แก่ หนังสือและตำราทั้งไทยและต่างประเทศ วารสารวิชาการ มาตรฐานผลิตภัณฑ์ และการทดสอบของไทยและต่างประเทศ ผลงานวิจัยของผู้เขียนเอง และผลงานของนักศึกษาระดับปริญญาตรี โท ที่ผู้เขียนเป็นที่ปรึกษา รวมถึงข้อมูลจากการทำงานบริการวิชาการในสถานประกอบการของผู้เขียน อนึ่ง ผู้เขียนหวังว่าตำราเล่มนี้จะประโยชน์ต่อนักศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต หรือ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ที่จะต้องมีองค์ความรู้ด้านวัสดุวิศวกรรมโยธา ในการนำไปใช้ทำงานจริงต่อไปในอนาคต หรือใช้ในการอ่านศึกษาหาความรู้ในการเตรียมสอบ

สุดท้ายใคร่ระลึกถึงพระคุณท่านอธิการบดี ท่านรองอธิการบดีประจำวิทยาเขตขอนแก่น และผู้บริหารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้ให้การสนับสนุนการเขียนตำราวิชาการอย่างเต็มที่ รวมถึงอาจารย์เพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะและกำลังใจในการผลิตตำราจนสำเร็จ ทั้งนี้หากในตำรายังมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับและจะนำกลับมาแก้ไขให้ถูกต้องในโอกาสต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย ฤทธิรุท
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

สารบัญ

บทที่ 1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

1.1 สมบัติของวัสดุในงานวิศวกรรม	18
1.2 การทดสอบวัสดุ	19
1.3 มาตรฐานการทดสอบ	25
1.4 ระบบหน่วยระหว่างชาติ	26
1.5 อุปกรณ์ในการวัด	26
คำถามท้ายบท	30
เอกสารอ้างอิง	46
	47

บทที่ 2 เหล็กในงานก่อสร้าง

2.1 ประเภทของเหล็ก	50
2.2 วัสดุเหล็กในงานก่อสร้าง	51
2.3 เหล็กรูปพรรณ	56
2.4 คุณสมบัติและกำลังของเหล็กโครงสร้าง	56
2.5 การตรวจสอบการเชื่อม	64
2.6 เหล็กเสริมคอนกรีต	66
2.7 การทดสอบเหล็กเสริมคอนกรีต	68
2.8 รายละเอียดการเสริมเหล็กในคอนกรีต	76
2.9 เหล็กเสริมด้านการยึดหด	77
2.10 ความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม วัดจากผิวเหล็ก	82
2.11 การจัดเก็บและดูแลรักษาเหล็กในงานก่อสร้าง	83
คำถามท้ายบท	84
เอกสารอ้างอิง	86
	87

บทที่ 3 ไม้ที่ใช้ในงานก่อสร้าง

3.1 โครงสร้างและการเจริญเติบโตของต้นไม้	90
3.2 หลักเกณฑ์การแบ่งเนื้อไม้ตามมาตรฐานของกรมป่าไม้	91
3.3 ลายไม้และกรรมวิธีในการตัดไม้	97
3.4 การแปรรูปไม้	106
3.5 ความชื้นบรรจุและการหดตัว	107
3.6 ความสมดุลของความชื้นและการโค้งบิดของไม้	108
3.7 ความเสียหายของไม้	111
3.8 ตาหิในเนื้อไม้	113
3.9 คุณสมบัติของไม้	119
3.10 วิธีการป้องกันรักษาเนื้อไม้	121
3.11 การจัดเก็บรักษาไม้	129
คำถามท้ายบท	135
เอกสารอ้างอิง	138
	139

บทที่ 4 คอนกรีต

4.1 ประเภทของคอนกรีต	142
คำถามท้ายบท	143
เอกสารอ้างอิง	150
	151

บทที่ 5 ปูนซีเมนต์

5.1 ประวัติปูนซีเมนต์	154
5.2 การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในประเทศไทย	155
5.3 กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	158
5.4 การบรรจุและเก็บรักษา	159
5.5 ประเภทของปูนซีเมนต์	165
5.6 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์	165
5.7 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	176
5.8 การก่อตัวและการแข็งตัว	188
5.9 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reactions)	195
5.10 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	196
5.11 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	200
คำถามท้ายบท	202
เอกสารอ้างอิง	204
	205

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 6 น้ำผสมคอนกรีต	214	บทที่ 10 การผสมคอนกรีตและคอนกรีตผสมเสร็จ	296
6.1 น้ำสำหรับล้างวัสดุผสม (washing water)	213	10.1 การผสมคอนกรีต	297
6.2 น้ำสำหรับผสมคอนกรีต (mixing water)	213	10.2 คอนกรีตผสมเสร็จ (Ready mixed concrete)	299
6.3 น้ำสำหรับบ่มคอนกรีต (Water for curing concrete)	217	คำถามท้ายบท	306
คำถามท้ายบท	218	เอกสารอ้างอิง	307
เอกสารอ้างอิง 219			
บทที่ 7 มวลรวม	220	บทที่ 11 คอนกรีตสด Fresh Concrete	308
7.1 ประเภทของมวลรวม	221	11.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการเทของคอนกรีตสด	309
7.2 คุณสมบัติของมวลรวม	222	11.2 การเคลื่อนย้ายลำเลียงคอนกรีตสด	311
คำถามท้ายบท	245	11.3 การเทคอนกรีตและการทำให้แน่น	313
เอกสารอ้างอิง	246	11.4 คุณสมบัติของคอนกรีตสด	318
		คำถามท้ายบท	326
		เอกสารอ้างอิง	327
บทที่ 8 สารผสมเพิ่ม	250	บทที่ 12 คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	330
8.1 ประเภทของสารผสมเพิ่ม	251	12.1 กำลังของคอนกรีต (Strength of concrete)	331
8.2 สารกักกระจายฟองอากาศ	253	12.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต	349
8.3 สารเคมีผสมคอนกรีต	255	12.3 คุณสมบัติยืดหยุ่นของคอนกรีต	352
8.4 สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture)	265	12.4 คุณสมบัติอื่น ๆ ของคอนกรีต	358
8.5 สารผสมเพิ่มอื่น ๆ	266	คำถามท้ายบท	364
คำถามท้ายบท	267	เอกสารอ้างอิง	365
เอกสารอ้างอิง	268		
บทที่ 9 การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต	270	บทที่ 13 วัสดุงานทาง	372
9.1 ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาหาปริมาณส่วนผสมของคอนกรีต	271	13.1 โครงสร้างของงานสร้างถนนลาดยางแอสฟัลต์	373
9.2 ค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ต้องการผลิต (Required average strength, f'_{cr})	273	13.2 วัสดุทำผิวจราจรแบบแอสฟัลต์	375
9.3 ขั้นตอนการออกแบบปริมาณส่วนผสมคอนกรีต	281	คำถามท้ายบท	382
9.4 ตัวอย่างการออกแบบปริมาณส่วนผสมคอนกรีต	289	เอกสารอ้างอิง	383
คำถามท้ายบท	294		
เอกสารอ้างอิง	295		

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1.1 ภาพตัดภายในมวลรวมแสดงช่องว่างชนิดน้ำซึมผ่านได้ และน้ำซึมผ่านไม่ได้	23
รูปที่ 1.2 ไดอัลเกจแบบอนาล็อก	31
รูปที่ 1.3 ไดอัลเกจแบบดิจิตอล	31
รูปที่ 1.4 เวอร์เนียร์อ่านแบบดิจิตอล	31
รูปที่ 1.5 เวอร์เนียร์อ่านค่าแบบสเกล	32
รูปที่ 1.6 การอ่านเวอร์เนียร์	33
รูปที่ 1.7 ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวน้ำแบบเชิงเส้น (LVDT)	34
รูปที่ 1.8 วงจรภายใน LVDT	35
รูปที่ 1.9 ติดตั้งสเตรนเกจบนคานโลหะ	35
รูปที่ 1.10 ลักษณะการทำงานของสเตรนเกจบนคานเมื่อรับแรงดัด	36
รูปที่ 1.11 สเตรนเกจแบบอุปกรณ์กึ่งตัวนำ	37
รูปที่ 1.12 สเตรนเกจแบบโลหะ	37
รูปที่ 1.13 วงแหวนเปรียบเทียบ	38
รูปที่ 1.14 ตัวอย่างการใช้วงแหวนเปรียบเทียบกับการทดสอบดิน	38
รูปที่ 1.15 ลักษณะโหนดเซลล์แบบ Single End Shear Beam	40
รูปที่ 1.16 ถังบรรจุที่ติดตั้งโหนดเซลล์เพื่อชั่งน้ำหนัก	40
รูปที่ 1.17 ลักษณะโหนดเซลล์แบบ Double End Shear Beam	41
รูปที่ 1.18 ลักษณะการติดตั้งโหนดเซลล์แบบ Double End Shear Beam ที่ขาถังไซโล	41
รูปที่ 1.19 ลักษณะโหนดเซลล์แบบ Single Point	42
รูปที่ 1.20 ลักษณะโหนดเซลล์แบบ Bending Beam	42
รูปที่ 1.21 ตาชั่งน้ำหนักที่ใช้โหนดเซลล์แบบ Bending Beam	43
รูปที่ 1.22 ลักษณะโหนดเซลล์แบบ Pancake	43
รูปที่ 1.23 เครื่องทดสอบกำลังอัด	44
รูปที่ 1.24 ลักษณะโหนดเซลล์แบบ Canister	44
รูปที่ 1.25 ลักษณะการติดตั้งโหนดเซลล์แบบ Canister เครื่องชั่งน้ำหนักบรรทุก	45
รูปที่ 1.26 ลักษณะโหนดเซลล์แบบ S Beam	45
รูปที่ 1.27 ลักษณะการติดตั้งโหนดเซลล์ S beam ที่เครื่องชั่งวัสดุ	46

รูปที่ 2.1 ป้ายระบุการได้รับมาตรฐานนอกของเหล็กเส้น	50
รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์ระบุการได้รับมาตรฐานนอกของเหล็กรูปพรรณ	50
รูปที่ 2.3 ภาพสินค้าเหล็ก	51
รูปที่ 2.4 เหล็กดิบหรือเหล็กพิกที่ได้จากการถลุงแร่เหล็ก	52
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างเหล็กเหนียวนำไปใช้ผลิต (ก) น็อตและ (ข) ท่อน้ำ	53
รูปที่ 2.6 เหล็กหล่อนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ในงานก่อสร้าง (ก) เสาคอมไฟ (ข) วาล์วน้ำ (ค) ฝาบ่อ manhole	54
รูปที่ 2.7 เหล็กทรงรถไฟ	56
รูปที่ 2.8 เหล็กรูปพรรณรีดร้อนรูปแบบต่าง ๆ	57
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กรูปพรรณรีดร้อน H-Beam ในงานโครงสร้างเสาและคาน	59
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กรูปพรรณรีดร้อน I-Beam ในงานรางคน	59
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กรูปพรรณรีดร้อน “เหล็กรางน้ำ” ในงานบันได	60
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กรูปพรรณรีดร้อน “เหล็กฉาก” ในงานเสาส่งไฟฟ้าและวิทยุ	60
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการใช้งานของเหล็กรูปพรรณรีดร้อน “คัท-ปิม” ในงานโครงถักหลังคา	61
รูปที่ 2.14 เหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็นที่เป็นเหล็กกล่อง (ก) โครงหลังคา (ข) โครงรับพื้น	62
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างการเลือกใช้เหล็กทอกลมในงาน (ก) โครงหลังคา (ข) ราวบันได	62
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างเหล็กรูปพรรณเชื่อมประกอบในงานโครงสร้างสะพาน	63
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดภายใต้แรงดึง	65
รูปที่ 2.18 ลักษณะการทดสอบด้วย Ultrasonic	67
รูปที่ 2.19 แสดงตัวอย่างบั้งและครีบของเหล็กข้ออ้อย	73
รูปที่ 2.20 การจัดเก็บเหล็กในงานก่อสร้าง	84
รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการทาสีกันสนิมเหล็กรูปพรรณ	86
รูปที่ 3.1 โครงสร้างบ้านที่สร้างจากไม้	90
รูปที่ 3.2 องค์ประกอบของไม้	91
รูปที่ 3.3 ลักษณะท่อเยื่อ Vessel และ Tracheids	92
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายกำลังขยาย 50 เท่า	92
รูปที่ 3.5 ลักษณะภายในของไม้	93
รูปที่ 3.6 ไม้อายุ 24 ปีจากการนับวงเจริญ	94
รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบวงปีของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง	95

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3.8 กระพี้มีสีอ่อนกว่าแก่นไม้	95	รูปที่ 3.39 เครื่องอัดน้ำยาไม้ให้มีความคงทนและปราศจากศัตรูไม้	132
รูปที่ 3.9 ลักษณะด้านของไม้	96	รูปที่ 3.40 สถานที่จัดเก็บไม้	135
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างไม้เนื้อแข็ง	100	รูปที่ 3.41 การผึ่งไม้กระดาน	137
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างไม้เนื้อแข็งปานกลาง	103	รูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงส่วนผสมคอนกรีต	142
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างไม้เนื้ออ่อน	105	รูปที่ 4.2 การทดสอบการไหลยวบตัวของคอนกรีต SCC	144
รูปที่ 3.13 แสดงลายไม้ชนิดต่าง ๆ	107	รูปที่ 4.3 มวลรวมหยาบเบา (ก) เซรามิกดินเหนียว (ข) ตะกรันบอลขยายตัว	145
รูปที่ 3.14 การแปรรูปไม้แบบควอเตอร์ซอร์ว (ก) และการแปรรูปไม้แบบเพลนซอร์ว (ข)	108	รูปที่ 4.4 ลักษณะการยึดเกาะของคอนกรีตพูน	147
รูปที่ 3.15 การเรียงซ้อนทับกันของไม้แปรรูปเพื่อไล่ความชื้นให้แห้งโดยอากาศ	109	รูปที่ 4.5 สร้างถนนจากคอนกรีตบดอัด (ก) เครื่องจักรบดอัด (ข) การอัดผิวด้านข้างแทนแบบหล่อ	148
รูปที่ 3.16 การอบไม้ด้วยความร้อน	110	รูปที่ 4.6 ถนนจากจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต จากงานวิจัยของผู้เขียน	149
รูปที่ 3.17 แสดงจุด Fiber Saturation	110	รูปที่ 4.7 หมอนรองรางรถไฟจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต จากงานวิจัยของผู้เขียน	149
รูปที่ 3.18 การหดตัวและการผิดรูปร่างไปของไม้แผ่นเรียบ ไม้สีเหลี่ยม และไม้กลม	111	รูปที่ 5.1 ร่างพระราชหัตถเลขาของพระบาทสมเด็จพระมงกุฎเกล้าเจ้าอยู่หัวว่าด้วยการตั้งบริษัทปูนซีเมนต์	158
รูปที่ 3.19 การคดของไม้ชนิดต่าง Bow, Crook, Cup และ Twist ตามลำดับจากบนลงล่าง	112	รูปที่ 5.2 แผนภูมิแสดงกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบบแห้ง (Dry process)	163
รูปที่ 3.20 เชื้อราขึ้นผิวพื้นไม้ ใต้อาคารที่มีความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสม	114	รูปที่ 5.3 พื้นผนังงานเทอร์ราซโซ	173
รูปที่ 3.21 มอดหลากหลายสายพันธุ์	116	รูปที่ 5.4 Gilson MA-15 Wagner Turbidimeter	177
รูปที่ 3.22 มอดป่า(Ambrosia)	116	รูปที่ 5.5 Blaine Air Permeability Apparatus	178
รูปที่ 3.23 ฝุ่นที่หล่นออกมาจากการเจาะไม้ของมอด	117	รูปที่ 5.6 เครื่องวัดขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่าง	179
รูปที่ 3.24 ลักษณะการกินของมอดเจาะเรือน	117	รูปที่ 5.7 เครื่องทดสอบไวนด์แคต	180
รูปที่ 3.25 ลักษณะการอาศัยอยู่ของเพรียงทะเล ในเนื้อไม้	118	รูปที่ 5.8 เครื่องมือไวนด์แคต	181
รูปที่ 3.26 ลักษณะการเจาะและอาศัยอยู่ในไม้ของตัวเพรียง	118	รูปที่ 5.9 เครื่องทดสอบแบบ กิลโมร์	182
รูปที่ 3.27 เพรียงลักษณะเหมือนหอย	119	รูปที่ 5.10 เครื่องมือเลขาเตอเลียอร์สำหรับวัดการไม่คงตัว	184
รูปที่ 3.28 ลักษณะการเกิดตาไม้ ส่งผลให้ทิศทางของแนวเสี้ยนสะดุด	120	รูปที่ 5.11 อุณหภูมิจุดกึ่งกลางคอนกรีตและบริเวณผิวของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด1.2เมตร	186
รูปที่ 3.29 รอยร้าวของไม้	120	รูปที่ 5.12 ลักษณะการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	186
รูปที่ 3.30 รอยปริของไม้	120	รูปที่ 5.13 หน้าตัดของClinker รูปร่างลักษณะของ C3S มีสีน้ำเงินเข้มเป็นผลึก 6 เหลี่ยม	191
รูปที่ 3.31 ลักษณะห้วงทดสอบแรงดัดของไม้และการวางตัวอย่างทดสอบแรงดัดของไม้	123	รูปที่ 5.14 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลักและปูนซีเมนต์	192
รูปที่ 3.32 ลักษณะความเสียหายของไม้จากแรงดัด	124	รูปที่ 5.15 ลักษณะคอนกรีตที่เสียหายจากการเกิดปฏิกิริยาอัลคาไล-ซิลิกา	194
รูปที่ 3.33 (ก) ไม้ได้รับแรงตั้งฉากกับเสี้ยน (ข) ไม้ได้รับแรงขนานกับเสี้ยน	125	รูปที่ 5.16 ขั้นตอนการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต	195
รูปที่ 3.34 การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดในแนวตั้งฉากเสี้ยนของไม้	126	รูปที่ 5.17 แท่งผลึกเอททริงโกด์ ถ่ายด้วยเทคนิค ESEM	196
รูปที่ 3.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (Stress-Strain Curve)	126	รูปที่ 5.18 แท่งผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ถ่ายด้วยเทคนิค ESEM	197
รูปที่ 3.36 การทดสอบหาค่าแรงอัดในแนวขนานเสี้ยนของไม้	127	รูปที่ 5.19 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต	198
รูปที่ 3.37 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างไม้	128	รูปที่ 5.20 ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C3A	199
รูปที่ 3.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด	128	รูปที่ 5.21 ภาพของ Monosulphate และ Ettringite	199

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5.22 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	201
รูปที่ 5.23 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	202
รูปที่ 5.24 การพัฒนากำลังของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทต่าง ๆ	203
รูปที่ 7.1 แลบสีมาตรฐาน	224
รูปที่ 7.2 ลักษณะรูปร่างของมวลรวมตามมาตรฐาน	225
รูปที่ 7.3 ลักษณะแ่งน้ำได้มวลรวมที่เป็นสาเหตุให้ความทนทานของคอนกรีตลดลง	227
รูปที่ 7.4 ลักษณะการเยิ้ม (Bleeding) ของคอนกรีต	227
รูปที่ 7.5 เครื่องขัดสีสอสแอนเจลิส	229
รูปที่ 7.6 ลักษณะการวิบัติของมวลรวมกำลังสูงกว่าเพสต์	231
รูปที่ 7.7 ลักษณะการวิบัติของมวลรวมกำลังต่ำกว่าเพสต์	231
รูปที่ 7.8 ภาพจำลองลักษณะการวิบัติ (a) มวลรวมกำลังสูงกว่าเพสต์ (b) มวลรวมกำลังต่ำกว่าเพสต์	232
รูปที่ 7.9 ภาพตัดภายในมวลรวมแสดงช่องว่างชนิดน้ำซึมผ่านได้และชนิดน้ำซึมผ่านไม่ได้	232
รูปที่ 7.10 แสดงสภาวะการดูดซึมของมวลรวม	233
รูปที่ 7.11 ทราयीที่มีลักษณะความชื้นอิมตัวผิวแห้ง	234
รูปที่ 7.12 การเรียงตัวของขนาดคละแบบต่าง ๆ (ก) ขนาดเดียว (ข) ขนาดคละไม่ดี (ค) ขนาดคละดี	236
รูปที่ 7.13 ลักษณะมวลรวมอบแห้ง ความถ่วงจำเพาะรวมสภาพแห้ง	239
รูปที่ 7.14 ลักษณะมวลรวมอิมตัวผิวแห้ง ความถ่วงจำเพาะรวมสภาพอิมตัวผิวแห้ง	240
รูปที่ 7.15 ลักษณะมวลรวมอบแห้ง ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	241
รูปที่ 7.16 ปริมาตรของทราयीเปลี่ยนแปลงตามความชื้นที่อยู่ในทราयी	243
รูปที่ 7.17 ระดับของเหลวแสดงปริมาณช่องว่าง	243
รูปที่ 7.18 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและปริมาณส่วนละเอียด	244
รูปที่ 8.1 แสดงการแบ่งประเภทของสารผสมเพิ่ม	252
รูปที่ 8.2 ผลของการกักกระจายฟองอากาศต่อกำลังและความคงทน	254
รูปที่ 8.3 แสดงลักษณะการทำงานลดปริมาณของน้ำ	257
รูปที่ 8.4 (ก) อนุภาคของซีเมนต์จะจับตัวอยู่เป็นกลุ่มก่อนการใส่สารผสมเพิ่มประเภทน้ำ (ข) การกระจาย ตัวอย่างสม่ำเสมอของอนุภาคซีเมนต์หลังการใส่สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ	258
รูปที่ 9.1 เส้นโค้งของการแจกแจงความถี่ปกติเมื่อสัมพันธ์กับการแปรปรวน หรือความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าต่างกัน	277

รูปที่ 10.1 เติมน้ำลงกลางปล่องที่เตรียมไว้	297
รูปที่ 10.2 กระบวนการผลิตคอนกรีตสำเร็จรูป	301
รูปที่ 11.1 การยุบตัวของคอนกรีต	319
รูปที่ 11.2 Acme Penetrometer	321
รูปที่ 11.3 การทดสอบโดยการกระทุ้งแน่น	322
รูปที่ 11.4 การทดสอบโดยการเขย่าแน่น	323
รูปที่ 11.5 การหาความหนาแน่นของคอนกรีตสด	323
รูปที่ 11.6 ผลิตภัณฑ์ทดสอบวัสดุที่ผ่านการรับรอง	324
รูปที่ 11.7 เครื่องมือวัดความดัน	325
รูปที่ 12.1 กำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ใช้ขนาดต่าง ๆ กัน	335
รูปที่ 12.2 ภาพตัดแสดงชิ้นส่วนของค้อนกระแทกและลักษณะการทำงานของค้อนกระแทก	338
รูปที่ 12.3 การกำหนดตำแหน่งจุดทดสอบ	338
รูปที่ 12.4 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อน และกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	339
รูปที่ 12.5 ชุดทดสอบแรงดึงของคอนกรีตโดยวิธีการผ่าซีก	343
รูปที่ 12.6 แบบจำลองมิติและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนตัวอย่าง	343
รูปที่ 12.7 การคำนวณสำหรับการใช้แรงกดหนึ่งจุดกลางคาน	345
รูปที่ 12.8 การคำนวณสำหรับการใช้แรงกดหนึ่งสองกลางคาน	346
รูปที่ 12.9 (a) ขนาดของตัวอย่าง (b) การติดตั้งตัวอย่าง มาตรฐาน RILEM	347
รูปที่ 12.10 ความแตกต่างของขนาดตัวอย่าง Pullout test สำหรับ มาตรฐาน ASTM และ RILEM	348
รูปที่ 12.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตที่อายุต่างกัน	350
รูปที่ 12.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับร้อยละช่องว่างในคอนกรีต	352
รูปที่ 12.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตน้ำหนักปกติ	353
รูปที่ 12.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต	355
รูปที่ 12.15 เครื่อง Compressometer สำหรับตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก	356
รูปที่ 12.16 เครื่อง Compressometer สำหรับตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก ลักษณะการทดสอบการคืบตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C512-02	357
รูปที่ 12.17 การเสียรูปของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	357
รูปที่ 13.1 หน้าตัดผิวจราจรแบบลาดยางชนิดแอสฟัลต์คอนกรีต	372

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างของความหนาแน่นของวัสดุก่อสร้าง	21
ตารางที่ 1.2 ตัวอย่างความหนาแน่นรวมของวัสดุก่อสร้าง	22
ตารางที่ 1.3 หน่วยงานมาตรฐานที่ออกเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบวัสดุ	26
ตารางที่ 1.4 หน่วยพื้นฐาน	27
ตารางที่ 1.5 เลข 10 ยกกำลังใด ๆ	28
ตารางที่ 2.1 แสดงข้อดีข้อเสียของการใช้เหล็ก	57
ตารางที่ 2.2 ชั้นคุณภาพและส่วนประกอบทางเคมีเมื่อวิเคราะห์จากบ้ำ	58
ตารางที่ 2.3 ชั้นคุณภาพ ความต้านแรงดึงที่จุดคราก ความต้านแรงดึงและความยืด และความต้านการกระแทก	58
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลม	70
ตารางที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบของเคมีต้องไม่เกินกว่าเกณฑ์กำหนด	71
ตารางที่ 2.6 ชื่อขนาด ขนาดระบุและมวลระบุของเหล็กเส้นกลม	72
ตารางที่ 2.7 ชื่อขนาด ขนาดระบุและมวลระบุของเหล็กข้ออ้อย	74
ตารางที่ 2.8 ส่วนประกอบทางเคมีเมื่อวิเคราะห์จากบ้ำ	74
ตารางที่ 2.9 สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย	75
ตารางที่ 2.10 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กที่สุดสำหรับของเหล็กข้ออ้อย	78
ตารางที่ 2.11 อัตราส่วนเหล็กเสริมด้านการหดตัวน้อยที่สุดในแผ่นพื้น	82
ตารางที่ 3.1 ประเภทของไม้ตามความแข็งแรงในการตัดและความทนทาน	98
ตารางที่ 3.2 การกำหนดการอาบน้ำยาของไม้	98
ตารางที่ 3.3 หน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ตาม พ.ร.บ. ควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 และมาตรฐาน ว.ส.ท	99
ตารางที่ 3.4 ไม้เนื้อแข็ง	102
ตารางที่ 3.5 ไม้เนื้อแข็งปานกลาง แสดงข้อมูลสรุปชื่อไม้และคุณสมบัติ ด้านความต้านทานแรงดัดและความทนทานสำหรับไม้เนื้อแข็งปานกลาง	104
ตารางที่ 3.6 ไม้เนื้ออ่อน	106
ตารางที่ 5.1 ลำดับบริษัทผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10 ลำดับ ปี ค.ศ.2020	157
ตารางที่ 5.2 สมบัติทางเคมี	167
ตารางที่ 5.3 สมบัติทางฟิสิกส์	168
ตารางที่ 5.4 ปริมาณร้อยละของสารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทต่าง ๆ	168

ตารางที่ 5.5 ลักษณะทางฟิสิกส์	171
ตารางที่ 5.6 รายละเอียดส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก	172
ตารางที่ 5.7 ค่าออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Oxide Composition	188
ตารางที่ 5.8 สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	189
ตารางที่ 5.9 ตัวอย่างการคำนวณหาสารประกอบหลัก	190
ตารางที่ 5.10 สมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	192
ตารางที่ 5.11 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก สำเร็จ 80%	200
ตารางที่ 6.1 เกณฑ์การตัดสินคุณภาพน้ำที่เหมาะสมสำหรับผสมคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 1602	214
ตารางที่ 6.2 ปริมาณสารประกอบทางเคมีที่เจือปนในน้ำมากที่สุดที่ยอมให้สำหรับผสมคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C 1602	215
ตารางที่ 7.1 ขีดจำกัดของวัสดุอันตรายสำหรับมวลรวมละเอียด	222
ตารางที่ 7.2 ขีดจำกัดของวัสดุอันตรายสำหรับมวลรวมหยาบ	223
ตารางที่ 7.3 คุณสมบัติของมวลรวม	230
ตารางที่ 8.1 ประโยชน์การใช้สารลดปริมาณน้ำ	256
ตารางที่ 8.2 สรุปคุณลักษณะของสารเคมีผสมคอนกรีตประเภทต่าง ๆ ตามข้อกำหนดมาตรฐาน	264
ตารางที่ 9.1 ค่าคงที่มาตรฐาน k (Himsworth constants)	276
ตารางที่ 9.2 ตัวแปรปรับแก้ค่าการเปียงเบนมาตรฐานเมื่อมีการทดสอบ 15 ถึง 29 ครั้ง	278
ตารางที่ 9.3 ตัวอย่างค่ากำลังรับแรงอัดจากการทดสอบจำนวนตัวอย่าง 20 ตัวอย่าง	280
ตารางที่ 9.4 กำลังอัดเฉลี่ยที่ผลิตเมื่อไม่มีข้อมูลเพียงพอสำหรับหาค่าการเปียงเบนมาตรฐาน	281
ตารางที่ 9.5 ค่ายุบตัวที่แนะนำสำหรับโครงสร้างประเภทต่าง ๆ	282
ตารางที่ 9.6 ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตและความต้องการปริมาณฟองอากาศ สำหรับค่ายุบตัวและขนาด มวลรวมโตสุด	283
ตารางที่ 9.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์กับกำลังอัดของคอนกรีต	284
ตารางที่ 9.8 อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้ใช้ได้ สำหรับคอนกรีตในสัมผัสสภาวะรุนแรง	285
ตารางที่ 9.9 อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์สูงสุดโดยน้ำหนักที่ยอมให้ใช้ได้ สำหรับคอนกรีตสัมผัสสภาวะพิเศษ	286
ตารางที่ 9.10 ปริมาตรของมวลรวมหยาบต่อปริมาตรของคอนกรีต	287
ตารางที่ 9.11 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตสดโดยประมาณ	288

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่10.1 ข้อกำหนดความคลาดเคลื่อนของค่ายุบตัว	303
ตารางที่ 11.1 วิธีการและเครื่องมือสำหรับขนส่งและจัดการคอนกรีตประเภทต่าง ๆ	312
ตารางที่ 11.2 การทดสอบความสามารถเทของคอนกรีต	319
ตารางที่ 12.1 อัตราส่วนกำลังทรงกระบอกต่อทรงลูกบาศก์ จากสมการของ L’Hermite	333
ตารางที่ 12.2 ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของขนาดตัวอย่าง UNESCO	333
ตารางที่ 12.3 อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางกับตัวคูณที่ใช้แก้ไขค่าความต้านทานอัด	334
ตารางที่ 12.4 ประเภทของโพรงและขนาด	351
ตารางที่ 12.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	354



บทที่ 1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

ความรู้ความเข้าใจในเรื่องสมบัติพื้นฐานของวัสดุมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในการจะทำให้สามารถเลือกชนิดของวัสดุได้เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งวัสดุที่ใช้ในงานวิศวกรรมโยธาและงานวิศวกรรมอื่น ๆ มีด้วยกันหลายประเภท ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็นประเภทต่าง ๆ ตามชนิดและคุณสมบัติ ได้แก่ โลหะ โลหะผสม (Alloy), ไม้, ปูนซีเมนต์, คอนกรีต, วัสดุผสมจากแอสฟัลท์, ผลิตภัณฑ์จากดิน, อิฐ, และพลาสติก เป็นต้น การพิจารณาเลือกใช้จึงขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ความสวยงาม กระบวนการผลิต ขั้นตอนในการก่อสร้าง สมบัติทางกล สมบัติทางฟิสิกส์ สมบัติทางเคมี และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

แต่อย่างไรก็ตามในตำราเล่มนี้จะมุ่งเน้นไปที่วัสดุที่ใช้เกี่ยวกับงานโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธาเป็นหลัก เช่น คอนกรีต, ไม้, เหล็กรูปพรรณ, เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต, วัสดุงานทางและวัสดุอื่น ๆ ในด้านวิศวกรรมโยธา ซึ่งการใช้งานวัสดุเหล่านี้จะต้องพิจารณาถึงความคงทนปลอดภัยในการใช้งานด้านวัสดุวิศวกรรมโยธา โดยสมบัติหลักที่สำคัญในการพิจารณาเลือกใช้ได้แก่ กำลัง (Strength), ความแข็งแรง (Rigidity) และความทนทาน (Durability) เป็นต้น

ดังนั้นเพื่อให้เกิดการเลือกใช้งานวัสดุได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการใช้งาน การทำความเข้าใจในเรื่องของสมบัติของวัสดุในงานด้านวิศวกรรมให้ถ่องแท้ จะทำให้สามารถเลือกใช้วัสดุได้อย่างมีคุณภาพ ทั้งด้านราคาที่เหมาะสมและการใช้งานที่ตรงกับความต้องการ

1.1 สมบัติของวัสดุในงานวิศวกรรม (Property of Materials)

วัสดุแต่ละชนิดจะมีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน การจะนำวัสดุแต่ละชนิดมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในงานด้านต่าง ๆ ผู้ใช้จำเป็นต้องมีความเข้าใจถึงสมบัติของวัสดุแต่ละประเภท ซึ่งสามารถแบ่งตามหลักการทดสอบได้ 3 ประเภทคือ สมบัติทางกล สมบัติทางฟิสิกส์ และสมบัติทางเคมี

1.1.1 การทดสอบสมบัติทางกล (Mechanical Testing)

สมบัติทางกลเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของวัสดุเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อวัสดุ ได้แก่ กำลัง (Strength) เช่น กำลังรับแรงดึง (Tension), กำลังรับแรงอัด (Compression), กำลังรับแรงเฉือน (Shear), กำลังรับแรงดัด (Flexure), โมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus), กำลังรับแรงกระแทก (Impact) และความทนทาน (Endurance) เป็นต้น โดยงานด้านวิศวกรรมโยธา สมบัติที่มีความสำคัญเป็นอันดับแรกในการพิจารณาคือ สมบัติเชิงกล เนื่องจากการที่โครงสร้างอาคาร สะพาน หรือถนน จะสามารถใช้งานได้อย่างคงทนถาวรและปลอดภัยได้นั้น ขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้น ๆ เป็นสำคัญ

1. กำลัง (Strength)

กำลังเป็นความสามารถในการต้านทานแรงที่มากระทำให้วัสดุนั้นเกิดการวิบัติ เช่น กำลังรับแรงดึง (Tension), กำลังรับแรงอัด (Compression), กำลังรับแรงเฉือน (Shear), กำลังรับแรงดัด (Flexure), กำลังรับแรงกระแทก (Impact) เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจะพบได้ว่าวัสดุนั้น ๆ จะเกิดความเค้น (Stress) และความเครียด รวมถึงการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation) เกิดขึ้นเสมอ

2. ความเค้น (Stress)

ความเค้น หมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติและความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่าแรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน ซึ่งโดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ คือ

- 1) ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน
- 2) ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่อพยายามอัดให้วัสดุนั้นสั้นลง
- 3) ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) ใช้สัญลักษณ์ τ เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกัน

3. ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ

ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนรูปสามารถ แบ่งได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1) การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิมทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างเช่น ยางยืด, สปริง เมื่อมีการดึงแล้วปล่อย วัสดุชนิดนี้จะกลับคืนรูปไปมีขนาดเท่าเดิมก่อนการดึง

2) การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกไปแล้ววัสดุจะไม่สามารถกลับคืนรูปเดิมได้ แต่จะมีรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไป โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หรือขึ้นอยู่กับความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินขีดจำกัดการคืนรูป (Elastic Limit) วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behaviour) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าขีดจำกัดการคืนรูป วัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation)

นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบได้ในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งอิลาสติก จะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำ วัสดุจะมีการคืนรูปแต่จะไม่กลับไปมีลักษณะเหมือนเดิม ซึ่งการวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

2.1) แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม

2.2) แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ

4. ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งเป็นความต้านทานแรงกดที่ส่งผลต่อการขีด เจาะ หรือการพยายามทำให้ทะลุ เราสามารถทดสอบความแข็งได้ด้วยการใช้วัสดุที่มีความแข็งหลายระดับ เช่น การทดสอบมาตราความแข็งแร่ของโมส (Mohs scale of mineral hardness) การทดสอบการขีดสีของผิว (Abrasion) เพื่อตรวจสอบว่าผิวมีความแข็งมากเพียงใด

5. ความยืดหยุ่น (Elasticity)

ความยืดหยุ่น เป็นสมบัติของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้เมื่อมีแรงกระทำและจะกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้เมื่อหยุดออกแรงกระทำต่อวัตถุนั้น ซึ่งสัดส่วนของความเค้นต่อการเสียรูป คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ความยืดหยุ่นสามารถแสดงได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)

ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึงหรืออัด โดยจะพล็อตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงของวัสดุ ความเปราะ ความเหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) อีกด้วย เช่น เหล็กgrupพรรณเหล็กเสริมคอนกรีต เป็นวัสดุที่มีความเหนียว ส่วนวัสดุที่มีความเปราะเช่น หิน อิฐ และคอนกรีต เป็นต้น วัสดุเหล่านี้เมื่อทดสอบจะเกิดการวิบัติทันทีโดยไม่มีการแสดงอาการยืดตัวก่อนให้เห็น

1.1.2 การทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ (Physical Testing)

การทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ เป็นสมบัติของวัสดุที่ไม่มีแรงกระทำมาเกี่ยวข้อง แต่เป็นการพิจารณาถึงคุณภาพหรือคุณลักษณะของเนื้อของวัสดุ

1) ด้านมิติ (Dimensions), รูปร่าง (Shape) สามารถหาได้จากการใช้เครื่องมือวัดความยาว ได้แก่ ตลับเมตร, ไม้บรรทัด, เกจวัดความยาว, เวอร์เนียคาลิเปอร์ หรือเครื่องมือวัดอื่น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการวัดและความละเอียดที่ต้องการ

2) ความหนาแน่น(Density, ρ)เป็นสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิดและเป็นปริมาณที่บอกค่ามวลของสารในหนึ่งหน่วย

ความหนาแน่นเป็นปริมาณสเกลาร์สามารถคำนวณได้จาก

ρ=M/V g/cm3 (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

เมื่อ M = มวล (กรัม)

V = ปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

ตารางที่1.1

ตัวอย่างของความหนาแน่นของวัสดุก่อสร้าง

วัสดุ	ความหนาแน่น (ก./ลบ.ซม.)
ไม้	1.5-1.6
แกรนิต	2.6-2.9
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2.9-3.1
อิฐ	2.5-2.8
เหล็ก	7.8-7.9

3) ความหนาแน่นรวม (Bulk Density, ρ_b) คือสัดส่วนของมวลต่อหน่วยของปริมาตรของวัสดุในลักษณะธรรมชาติ (ประกอบด้วยโพรงหรือช่องว่าง)

$$\rho_b = \frac{M}{V} \text{ kg/m}^3$$

เมื่อ M = มวลของวัตถุ (kg)

V = ปริมาตรของวัตถุในลักษณะธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยโพรงหรือช่องว่าง (m³)

โดยปกติแล้ว ความหนาแน่นรวมจะมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่น แต่สำหรับของเหลวหรือวัสดุที่มีความพรุนหรือปริมาณช่องว่างต่ำ ค่าของความหนาแน่นรวมจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่น โดยจะมีสมบัติทางกล เช่น กำลังรับแรงและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน มักมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นรวม

ตารางที่1.2

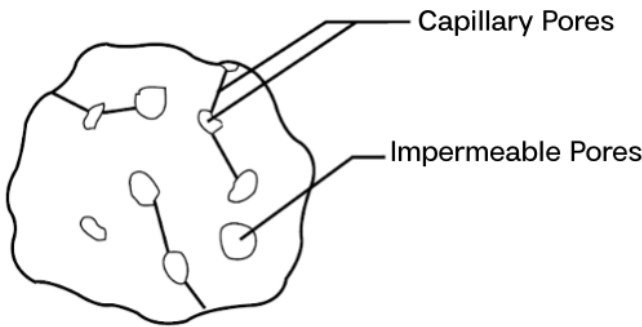
ตัวอย่างความหนาแน่นรวมของวัสดุก่อสร้าง

รายการวัสดุ	ความหนาแน่น (kg/m³)
อิฐมอญ	1500-1800
อิฐมวลเบา	500-1500
คอนกรีต	2300-2450
ไม้ (เนื้ออ่อน-เนื้อแข็ง)	400-1200
เหล็ก	7850

4) หน่วยน้ำหนัก (Unit weight) คือน้ำหนักของวัตถุต่อหน่วยปริมาตร งานทางด้านวิศวกรรมโยธาจะใช้ค่าน้ำหนักนี้ในการคำนวณน้ำหนักของวัสดุสำหรับโครงสร้าง เมื่อทราบว่าโครงสร้างนั้นมีหน่วยน้ำหนักเท่าใดก็จะนำค่าน้ำหนักไปคำนวณวิเคราะห์การรับน้ำหนักของโครงสร้างต่อไป

5) ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของสสารหนึ่ง ๆ ต่อความหนาแน่นของน้ำ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะจึงเป็นปริมาณที่ไร้มิติ (ไม่มีหน่วย)

ความถ่วงจำเพาะสามารถแยกออกเป็น 2 ประเภท คือความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์และความถ่วงจำเพาะปรากฏ โดยขึ้นอยู่กับปริมาตรของวัตถุที่นำโพรงหรือช่องว่างมารวมหรือไม่ ซึ่งโพรงในวัสดุจะมีลักษณะเป็น 2 ประการคือ โพรงคาปิลลารี (capillary pore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10 ถึง 10,000 นาโนเมตร น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปในโพรงได้ และโพรงทึบน้ำ (Impermeable pores) เป็นโพรงที่น้ำไม่สามารถเข้าหรือออกจากโพรงได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ภาพตัดภายในมวลรวมแสดงช่องว่างชนิดน้ำซึมผ่านได้ และน้ำซึมผ่านไม่ได้

5.1) ความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์ (True or Absolute Specific Gravity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งที่ชั่งในอากาศของมวลรวม เทียบกับน้ำหนักของน้ำที่ชั่งในอากาศ ที่มีปริมาตรเท่ากับมวลรวม โดยไม่รวมช่องว่างในมวลรวม ทั้งที่เป็นช่องว่างชนิดที่น้ำซึมผ่านเข้าไปได้ (Capillary pores) และชนิดที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable pores) ณ อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะสมบูรณ์นี้เป็นค่าที่ไม่นิยมใช้

5.2) ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent or mass Specific Gravity) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักแห้งที่ชั่งในอากาศของมวลรวม เทียบกับน้ำหนักของน้ำที่ชั่งในอากาศ ที่มีปริมาตรเท่ากับมวลรวม โดยรวมช่องว่างในมวลรวมทั้งที่เป็นช่องว่างชนิดที่น้ำซึมผ่านเข้าไปได้ (Capillary pores) และชนิดที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impermeable pores) ณ อุณหภูมิ เดียวกัน

6) ความพรุน (Porosity) คืออัตราส่วนร้อยละของปริมาตรช่องว่างในเนื้อวัสดุพรุน (pore space, V_v) กับปริมาตรรวม (bulk volume, V_b) ของวัสดุพรุน (porous material) ยกตัวอย่าง เช่น หินทรายก้อนหนึ่งมีปริมาตร 100 ลบ.นิ้ว มีช่องว่างคิดเป็น 20 ลบ.นิ้ว หินทรายก้อนนี้ก็จะมีความพรุนเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์

$$n = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{e}{1 + e}$$

7) อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio, e) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรช่องว่างของวัสดุ ต่อปริมาตรที่เป็นของแข็ง $e = \frac{V_v}{V_s}$

8) การดูดซึมน้ำ หมายถึงความสามารถของวัสดุในการดูดซับและกักเก็บน้ำ โดยแสดงค่าเป็นร้อยละของน้ำหนักหรือปริมาตรของวัสดุแห้ง โดยปกติแล้วค่าการดูดซึมน้ำจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 100 เสมอ

$$W_w = \frac{M_1 - M}{M} \times 100 \text{ หรือ } W_v = \frac{M_1 - M}{V} \times 100$$

เมื่อ M_1 = มวลของวัตถุที่อยู่ในสภาพอ้อมตัวผิวแห้ง (g)
 M = มวลของวัตถุที่อยู่ในลักษณะอบแห้ง (g)
 V = ปริมาตรของวัสดุที่รวมโพรงช่องว่าง (mm³)

9) คุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ
คุณสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ สามารถจำแนกได้ ดังนี้

9.1) การทดสอบทางด้านความร้อน (Thermal) ได้แก่ ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat), ความจุความร้อน (Thermal capacity), การขยายตัว (Thermal Expansion), การนำความร้อน (Conductivity) เป็นต้น

9.2) การทดสอบทางด้านทนต่อสภาพสิ่งแวดล้อม (Environment ได้แก่ ความทนทานต่อสภาพอากาศ (Weathering Resistance), ความทนทานต่อการเป็นน้ำแข็ง (Frost Resistance) และความทนทานต่อการเผาไหม้ (Fire Resistance) เป็นต้น

9.3) การทดสอบทางด้านไฟฟ้าและแม่เหล็ก (Electrical and Magnetic) ได้แก่ การนำแม่เหล็ก (Conductivity), การซึมผ่านแม่เหล็ก (Magnetic Permeability), และการเกิดไฟฟ้า (Galvanic Action) เป็นต้น

9.4) การทดสอบทางด้านเสียง (Acoustical) ได้แก่ การส่งผ่านเสียง (Sound Trans-mission) และการสะท้อนของเสียง (Sound Deflection) เป็นต้น

9.5) การทดสอบการมองเห็น (Optical) ได้แก่ สี (Color), การส่งผ่านแสง (Light Transmission) และการสะท้อนของแสง (Light Deflection) เป็นต้น

1.1.3 การทดสอบทางด้านเคมี (Chemical Testing)

การทำสอบทางเคมี เป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุ การนำวัสดุไปใช้ทางด้านวิศวกรรมโยธาต้องพิจารณาถึงสมบัติทางเคมีของวัสดุ ได้แก่ สารประกอบด้วยออกซิเจนบนธาตุอื่น (Oxide), ความเป็นกรด (Acidity), ความเป็นด่าง (Alkalinity) และความต้านทานการสึกกร่อน (Resistance to Corrosion) เป็นต้น

1.2 การทดสอบวัสดุ

วัตถุประสงค์ของการทดสอบวัสดุ (Material Testing) มีด้วยกัน 3 ข้อ คือ

1. เพื่อตรวจสอบคุณภาพของวัสดุ ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติทางเคมี หรือคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ว่ามีคุณภาพเหมาะสมกับการใช้งานหรือไม่
2. เพื่อต้องการพัฒนาคุณภาพของวัสดุให้มีคุณภาพดีขึ้น เพื่อประสิทธิภาพของการใช้งานวัสดุนั้น ๆ ได้เหมาะสมกับความต้องการใช้งาน
3. เพื่อให้ได้ค่าคงที่ของสมบัติวัสดุบนพื้นฐานทางด้านวิทยาศาสตร์

ความแตกต่างระหว่างการทดลองหรือการประลอง (Experiments) กับการทดสอบ (Test)

ในการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุมักจะมีวิธีการที่คล้ายคลึงกันอยู่สองวิธี คือ การทดลองหรือการประลอง และการทดสอบ โดยทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงทั้งในด้านของวิธีการและผลลัพธ์ ซึ่งสามารถอธิบายความแตกต่างได้ ดังนี้

การทดลองหรือการประลอง หมายถึง การทดสอบโครงสร้างจริง เป็นการค้นหาสิ่งใหม่ ๆ และมีการวิบัติที่ไม่แน่นอน วิธีการนี้จึงเป็นการทดลองดูว่าจะสามารถเกิดอะไรขึ้นได้บ้าง ซึ่งอาจเป็นสิ่งที่ใหม่ ๆ ที่ไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อน

การทดสอบ หมายถึง การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Test) และการทดสอบในสนาม (Field Test) เป็นการทดสอบตามขั้นตอนที่เคยปฏิบัติมาแล้วและมีผลเป็นที่ยอมรับ แต่การทดสอบในห้องปฏิบัติการสามารถควบคุมได้ดีกว่าในสนาม ค่าความถูกต้องและค่าคลาดเคลื่อนจึงแตกต่างกัน เพื่อป้องกันและแปรผลที่คลาดเคลื่อน ซึ่งผลทดสอบที่ได้ควรคำนึงถึง

- 1) การทดสอบนั้นกระทำต่อแบบจำลองโครงสร้างนั้นทั้งหมด หรือเฉพาะชิ้นส่วนโครงสร้างบางส่วน
- 2) การทดสอบนั้นกระทำต่อโครงสร้างจริงทั้งหมด หรือเฉพาะชิ้นส่วนโครงสร้างบางส่วน
- 3) การทดสอบนั้นกระทำต่อแบบจำลองโครงสร้างจริงทั้งหมด หรือเฉพาะชิ้นส่วนโครงสร้างจำลองบางส่วน
- 4) การทดสอบกระทำต่อชิ้นตัวอย่างที่ตัดมาจากโครงสร้างจริง

1.3 มาตรฐานการทดสอบ

หน่วยงานมาตรฐานการทดสอบที่รับผิดชอบในการออกเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบวัสดุ แต่ละองค์กรในแต่ละประเทศมีการกำหนดมาตรฐานการทดสอบไว้เพื่อใช้ในการดำเนินการทดสอบซึ่งแต่ละหน่วยงานจัดทำวิธีการทดสอบที่สอดคล้องกับวัสดุ ผลิตภัณฑ์ เครื่องมือ และการใช้งานวัสดุในแต่ละประเทศ ซึ่งได้แสดงตัวอย่างบางหน่วยงานไว้ในตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3

หน่วยงานมาตรฐานที่ออกเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบวัสดุ

ชื่อย่อ	ชื่อเต็ม	มาตรฐานประเทศ
ASTM	American Society for Testing Materials	สหรัฐอเมริกา
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Official	
AISC	American Institute of Steel Construction	
AISI	American Iron and Steel Institute	
ACI	American Concrete Institute	
AREA	American Railway Engineering Association	
BS	British Standard	อังกฤษ
DIN	German Industry Standard (Deutsche Industrial Norms)	เยอรมนี
CSA	Canadian Standards Association	แคนาดา
JIS	Japanese Industrial Standards	ญี่ปุ่น
มอก.	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	ไทย
มยผ.	กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย	
ว.ส.ท.	วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์	

1.4 ระบบหน่วยระหว่างชาติ

ระบบหน่วยระหว่างชาติเป็นระบบหน่วยที่ใช้สำหรับวัดปริมาณต่าง ๆ ให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน โดยสามารถแบ่งออกได้ ดังนี้

1.4.1 หน่วย (Unit)

ระบบหน่วยระหว่างชาติที่ใช้โดยทั่วไปมี 3 ระบบคือ

- 1) ระบบอังกฤษ (British System)
- 2) ระบบเมตริก (Metric System)
- 3) ระบบ SI (International System of Unit)

1.4.2 หน่วยพื้นฐาน (Basic Unit)

หน่วยพื้นฐานที่ใช้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.4

หน่วยพื้นฐาน

ปริมาณ (Quantity)	มิติ (Dimension)	อังกฤษ (British)		เมตริก (Metric)		SI	
		หน่วย	สัญลักษณ์	หน่วย	สัญลักษณ์	หน่วย	สัญลักษณ์
1. ความยาว (Length)	L	foot	ft	meter	m	meter	m
2. เวลา (Time)	T	second	sec	second	sec	second	sec
3. มวล (Mass)	M	slug	lb•sec ² /ft	kg•sec ² /m	kg•sec ² /m	kilogram	N•sec ² /m
4. แรง (Force)	F	pound	lb	kilogram force	kgf	newton	N

สำหรับหน่วยความยาว เวลา และมวล เป็นหน่วยเอกพันธ์ ส่วนแรงเป็นหน่วยอนุพันธ์ ได้จากกฎที่ 2 ของนิวตัน

F = ma

โดยที่ F = แรง

M = มวล

A = อัตราเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก

ดังนั้น

แรง 1 lb คือแรงที่ทำให้มวล 1 slug $\left(\frac{\text{lb} \cdot \text{sec}^2}{\text{ft}}\right)$ เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง $1 \frac{\text{ft}}{\text{sec}^2}$

แรง 1 N คือแรงที่ทำให้มวล 1 kg $\left(\frac{\text{N} \cdot \text{sec}^2}{\text{m}}\right)$ เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง $1 \frac{\text{m}}{\text{N} \cdot \text{sec}^2}$

แรง 1 kgf คือแรงที่ทำให้มวล 1 kg $\left(\frac{\text{kgf} \cdot \text{sec}^2}{\text{m}}\right)$ เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง $9.81 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$

พิสูจน์

F = ma

Kgf = kg • $\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$

1 kgf = 1 kg x 9.81 $\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$

1 kgf = 9.81 kg • $\frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$ หรือ N

1.4.3 อุปสรรค (Prefixes)

การกำหนดสัญลักษณ์และชื่อของ 10 ยกกำลังใด ๆ ค่าของตัวเลขไม่ว่าจะหลักกี่ตาม นิยมเขียนอยู่ในช่วง 0.10 - 1,000 ถ้าสูงกว้านี้มักใช้เลข 10 ยกกำลังใด ๆ คุณเพื่อให้กะทัดรัด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1.5

ตารางที่ 1.5

เลข 10 ยกกำลังใด ๆ

จำนวน (amount)	ตัวคูณ (multiples)	อุปสรรค (prefixes)	สัญลักษณ์ (symbol)
1,000,000,000	10^9	กิกะ (Giga)	G
1,000,000	10^6	เมกกะ (mega)	M
1,000	10^3	กิโล (kilo)	k
0.001	10^{-3}	มิลลิ (milli)	m
0.000,001	10^{-6}	ไมโคร (micro)	μ
0.000,000,001	10^{-9}	นาโน (nano)	n

จากตารางที่ 1.5 สามารถแสดงตัวอย่างของเลขยกกำลัง 10 ได้ เช่น

$$1,000 \text{ N} = 1 \text{ kN}$$

$$1,000 \text{ kN} = 1 \text{ MN}$$

1.4.4 การเปลี่ยนหน่วย (Unit Conversion)

การเปลี่ยนหน่วยจะสามารถกระทำได้อีกต่อเมื่อทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยในแต่ละระบบ สำหรับการเปลี่ยนหน่วยจากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่ง จะต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของหน่วยพื้นฐานระหว่างหน่วยต่างระบบนั้น ๆ หน่วยพื้นฐานต่างระบบที่ควรทราบแสดงไว้ในตารางที่ 1.4

หลักการเปลี่ยนหน่วยใช้วิธีการทางพีชคณิตเข้าช่วย โดยถือหลักว่าหน่วยแรงต่างสามารถคูณหารกันได้ เช่นเดียวกับการคูณหารปริมาณทางพีชคณิต โดยมีหลักการดังนี้

1) เขียนหน่วยที่จะเปลี่ยนลงไปให้เท่ากับตัวหน่วยนั้น

2) พิจารณาว่าหน่วยที่ต้องการจะเปลี่ยนนั้น เปลี่ยนในระบบเดียวกันหรือต่างระบบกัน ถึงแม้ว่าหน่วยปริมาณจะต่างระบบกัน แต่มิติของหน่วยจะเหมือนกัน

3) เมื่อทราบว่าต้องการเปลี่ยนจากระบบใดไปยังระบบใดแล้ว ให้หาทางกำจัดหน่วยที่ไม่ต้องการให้ได้หน่วยที่ต้องการ โดยการคูณวงเล็บซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยเดียวกันของต่างระบบ หรือระบบเดียวกันแล้วแต่กรณี ทั้งนี้เพื่อให้การตัดทอนหน่วยที่ไม่ต้องการออกไป โดยอาศัย

หลักการของพีชคณิต

4) ถ้าหน่วยที่เปลี่ยนใหม่ยังไม่ได้ตามที่ต้องการอีก ให้หาวงเล็บซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของหน่วยประเภทเดียวกันมาคูณอีกและกระทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าการตัดทอนจะได้หน่วยที่ต้องการ

5) ระวังกว้างตัวเลขเศษและส่วน หากหน่วยมีการยกกำลังทั้งเศษและส่วน ต้องยกกำลังเศษและส่วนของตัวเลขด้วย

ตัวอย่างที่ 1.1 จงเปลี่ยนหน่วยแรงอัด $1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ให้อยู่ในหน่วยระบบอังกฤษ

วิธีทำ

$$\begin{aligned} 1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} &= 1 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) \left(\frac{2.205 \text{ lb}}{1 \text{ kgf}} \right) \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ in}} \right)^2 \\ &= 1 \times \left(\frac{2.205}{1} \right) \times \left(\frac{2.54}{1} \right)^2 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) \left(\frac{\text{lb}}{\text{kgf}} \right) \left(\frac{\text{cm}}{\text{in}} \right)^2 \\ &= 14.22 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \end{aligned}$$

ดังนั้น $1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 14.22 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 1.2 จงเปลี่ยนหน่วยแรงอัด $14.22 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$ ให้อยู่ในระบบหน่วย SI

วิธีทำ

$$\begin{aligned} 14.22 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} &= 14.22 \left(\frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \right) \left(\frac{1 \text{ kgf}}{2.205 \text{ lb}} \right) \left(\frac{9.81 \text{ N}}{1 \text{ kgf}} \right) \left(\frac{1 \text{ in}}{2.54 \text{ cm}} \right)^2 \left(\frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} \right)^2 \\ &= 14.22 \times \left(\frac{1}{2.205} \right) \times \left(\frac{9.81}{1} \right) \times \left(\frac{1}{2.54} \right)^2 \times \left(\frac{1}{10} \right)^2 \left(\frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \right) \left(\frac{\text{kgf}}{\text{lb}} \right) \\ &\quad \left(\frac{\text{N}}{\text{kgf}} \right) \left(\frac{\text{in}}{\text{cm}} \right)^2 \left(\frac{\text{cm}}{\text{mm}} \right)^2 \\ &= 0.0981 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{aligned}$$

ดังนั้น $14.22 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} = 0.0981 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

ตอบ

ตัวอย่างที่ 1.3 จงเปลี่ยนหน่วยแรงดึง $2,400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ให้อยู่ในหน่วยระบบ SI

วิธีทำ

$$\begin{aligned} 2,400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} &= 2,400 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) \left(\frac{9.81 \text{ N}}{1 \text{ kgf}} \right) \left(\frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} \right)^2 \\ &= 2,400 \times \left(\frac{9.81}{1} \right) \times \left(\frac{1}{10} \right)^2 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) \left(\frac{\text{N}}{\text{kgf}} \right) \left(\frac{\text{cm}}{\text{mm}} \right)^2 \\ &= 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\ \text{ดังนั้น } 2,400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} &= 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{aligned}$$

ตอบ

1.5 อุปกรณ์ในการวัด

ในการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุวิศวกรรมโยธานั้นโดยปกติจะวัดที่ 3 ส่วนหลักคือ ระยะเวลา การเสียรูปและแรงที่กระทำ โดยบางครั้งใช้การวัดโดยตรงและบางครั้งใช้การวัดทางอ้อม ความยาวและการเสียรูปสามารถวัดโดยตรงได้ โดยใช้เครื่องมือพื้นฐาน ได้แก่ ไม้บรรทัด ตลับเมตร เวอร์เนีย คาร์ลิเปอร์ เกจวัด ส่วนในการวัดทางอ้อมนั้น วัดได้จากการวัดความต่างศักย์ที่สัมพันธ์กับระยะเวลาการเสียรูป แรง ความเค้น หรือความเครียด

ยกตัวอย่างกลุ่มอุปกรณ์วัดที่ต้องสัมผัสกับตัววัสดุ เช่น Linear Variable Differential Transformers (LVDTs), สเตรนเกจ (Strain gauges) และโหลดเซลล์ (Load cells) กลุ่มอุปกรณ์ที่ไม่สัมผัสกับวัสดุ เช่น เลเซอร์ เป็นต้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นง่ายต่อการบันทึกข้อมูลเพื่อบันทึกค่า นอกจากนี้ การแสดงผลเป็นไปอย่างปัจจุบันทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ทันทีระหว่างการทดสอบ

อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ในการวัดค่าทุกประเภทจะมีค่าความละเอียดที่สามารถทำได้ ดังนั้นระหว่างการใช้งานควรพิจารณาค่าความละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิดให้เหมาะกับการทดลอง หรือให้สอดคล้องกับมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งอุปกรณ์ที่มักใช้ในการทดสอบวัสดุ ได้แก่

นาฬิกาวัดหรือไดอัลเกจ (Dial gauges) โดยในตำรานี้จะขอเรียกอุปกรณ์นี้ว่า ไดอัลเกจ ,ทรานสดิวเซอร์ชนิดแปลงความเหนียวนาแบบเชิงเส้น Linear Variable Differential Transformers (LVDT) ในตำรานี้จะขอเรียกอุปกรณ์นี้ว่า LVDT, สเตรนเกจ (Strain gauges), วงแหวนปรับเทียบ (Proving rings), โหลดเซลล์ (Load cells) โดยสามารถอธิบายการใช้งานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ ดังนี้

1.5.1 นาฬิกาวัดหรือไดอัลเกจ (Dial gauges)

นาฬิกาวัดหรือไดอัลเกจ คืออุปกรณ์การวัดที่มีหน้าปัดและมาตราส่วน (Scale) คล้ายกับนาฬิกา หรือแบบแสดงผลเป็นตัวเลขดิจิทัล ใช้ในหลายการทดสอบไดอัลเกจ เป็นเครื่องมือที่อ่านค่าระยะการเคลื่อนที่ของแกนวัด โดยระยะการเคลื่อนที่ที่สามารถวัดได้ขึ้นอยู่กับความยาวของแกนซึ่งมีหลายขนาด ความยาวแกน เมื่อกล่าวถึงไดอัลเกจชนิดเข็มแบบอนาล็อก (Analog) ซึ่งติดอยู่กับหน้าปัด ค่าความละเอียดของไดอัลเกจชนิดนี้ จะอยู่ระหว่าง 0.1 มม.ถึง 0.002 มม. ดังแสดงในรูปที่ 1.2 แสดงไดอัลเกจที่มีความละเอียด 0.01 มม.และมีระยะวัดสูงสุด 10 มม. สามารถตั้งค่าศูนย์ได้โดยหมุนวงแหวนภายนอก เมื่อหัวสัมผัสถูกดันขึ้นเพิ่มยาวของหน้าปัดจะหมุนตามเข็มนาฬิกา ส่วนเข็มสั้นเข็มวัดรอบ จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา ยกตัวอย่างแบบ 0.01 มม.เมื่อเข็มยาวหมุนครบ 1 รอบ หน้าปัดจะมีค่าเป็น 1 มิลลิเมตร ส่วนแบบดิจิทัลค่าระยะการเคลื่อนที่ตัวจะสามารถอ่านได้ทันที ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.2 ไดอัลเกจแบบเข็ม [1]



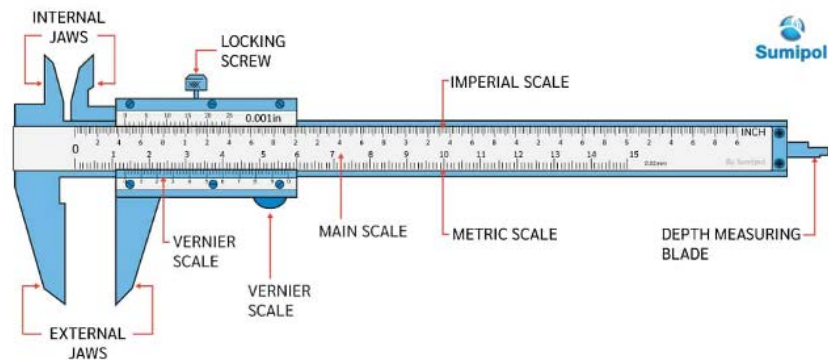
รูปที่ 1.3 ไดอัลเกจแบบดิจิทัล [2]

1.5.2 เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper)

เวอร์เนียคาลิเปอร์เป็นอุปกรณ์วัดพื้นฐานใช้ในการวัดระยะห่างของด้านที่อยู่ตรงข้ามกัน วัดได้ทั้งวัตถุที่เป็นทรงกระบอกและทรงตรง โดยหาค่าได้ทั้งความหนาบาง ความลึก ความกว้างภายนอก และยังสามารถใช้วัดขนาดความกว้างภายในของวัตถุเพื่อหาความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางได้ เวอร์เนียเป็นเครื่องมือวัดละเอียดได้ถึง 0.05 mm, 0.02 mm และ 0.01 mm มีทั้งแบบดิจิทัลซึ่งแสดงผลทันทีเมื่อวัดค่า ดังแสดงในรูปที่ 1.4 และแบบสเกล แสดงในรูปที่ 1.5 ซึ่งผู้ใช้งานต้องเข้าใจวิธีการอ่านค่า โดยอธิบายไว้ในรูปที่ 1.6 (ก), (ข), (ค) และ (ง)



รูปที่ 1.4 เวอร์เนียอ่านแบบดิจิทัล [3]



รูปที่ 1.5 เวอร์เนียอ่านค่าแบบสเกล [4]

จากรูปที่ 1.5 ตำแหน่งต่าง ๆ มีความหมายดังต่อไปนี้

Internal Jaws (ปากวัดภายใน)

ใช้ในการวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในของวัตถุ โดยด้านแบนจะหันออกด้านนอก ให้ประกบกับวัตถุให้สามารถใช้วัดภายในได้ง่าย

External Jaws (ปากวัดภายนอก)

ใช้ในการวัดขนาดของวัตถุจากภายนอก เหมาะกับการใช้วัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ความยาวหรือความหนาของวัตถุ โดยเลื่อนด้านที่แบนให้ประกบพอดีกับวัตถุที่ต้องการ

Locking Screw (สกรูล็อก)

ในขณะทำการวัดจะมีการเลื่อนปากวัดให้มีขนาดพอดีกับวัตถุที่ต้องการ เมื่อได้ระยะที่ต้องการแล้วก็ใช้สกรูล็อก เพื่อทำการล็อกปากวัดเอาไว้ไม่ให้ไหลไปจากสเกลที่วัดไว้

Main Scale (สเกลหลัก)

สเกลหลักจะแสดงค่าที่เป็นหน่วยระบบอิมพีเรียล (นิ้ว) ที่อยู่ด้านบน และแบบเมตริก (มิลลิเมตร) ที่อยู่ด้านล่าง ซึ่งแต่ละขีดบนระบบเมตริกจะมีค่าเป็นมิลลิเมตร

Vernier Scale (สเกลเวอร์เนีย)

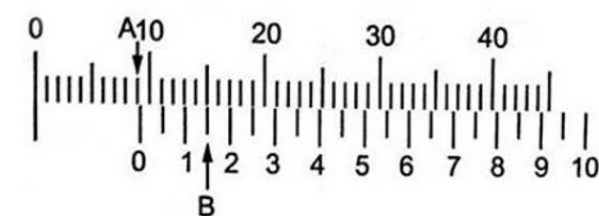
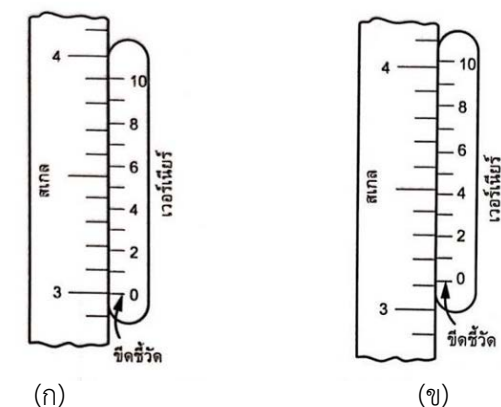
สเกลเวอร์เนียเป็นค่าที่บอกเป็นหลักทศนิยม โดยแต่ละขีดมีค่า 0.01 มิลลิเมตร โดยจะทำการอ่านค่าหลังจากอ่านค่าบนสเกลหลักแล้วนำมาคำนวณ

Thumb Screw (ปุ่มเลื่อนสเกล)

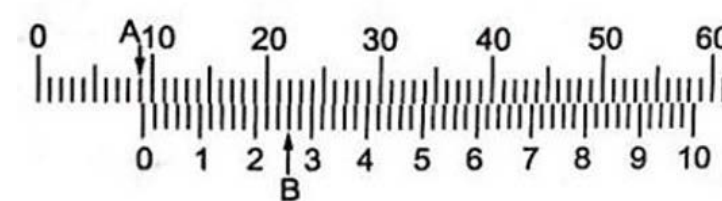
ปุ่มเลื่อนสเกลช่วยให้การเลื่อนวัดขนาดง่ายขึ้น โดยปรับให้ปากวัดมีขนาดที่พอดีกับขนาดวัตถุที่ต้องการ

Depth Measuring Blade (ปากวัดความลึก)

ใช้ในการวัดความลึกของรูในวัตถุ เพื่อหาค่าความลึกของวัตถุหรือส่วนที่อยู่ลึกบนวัตถุได้ โดยวิธีการอ่านค่าใช้วิธีเดียวกับปากวัดภายนอกและปากวัดภายใน



(ค) เวอร์เนียชนิดอ่านละเอียด 0.05 mm



(ง) เวอร์เนียชนิดอ่านละเอียด 0.02 mm

รูปที่ 1.6 การอ่านเวอร์เนีย

จากรูปที่ 1.6 (ก) ค่าที่อ่านได้จากเวอร์เนียคือ 3.00

จากรูปที่ 1.6 (ข) ค่าที่อ่านได้จากเวอร์เนียคือ 3.12

จากรูปที่ 1.6 (ค) ค่าที่อ่านได้จากเวอร์เนียคือ A = 9 mm

$$B = 0.05 \times 3 = 0.15 \text{ mm}$$

$$C = 9.15 \text{ mm}$$

จากรูปที่ 1.6 (ง) ค่าที่อ่านได้จากเวอร์เนียคือ A = 9 mm

$$B = 0.02 \times 13 = 0.26 \text{ mm}$$

$$C = 9.26 \text{ mm}$$

1.5.3 ทรานสดิวเซอร์ชนิดแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น Linear Variable Differential Transformers (LVDT)

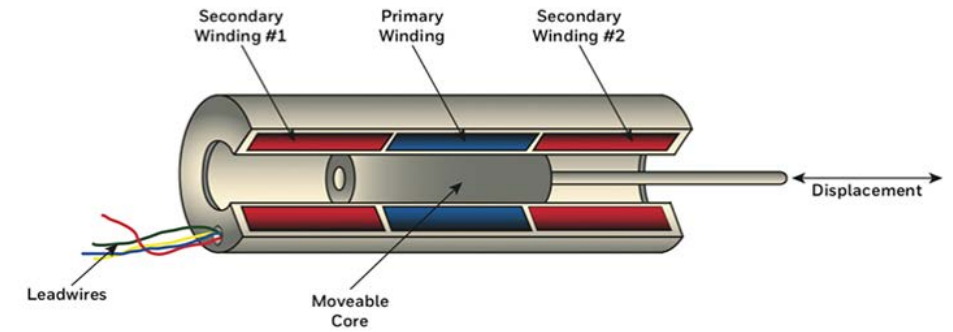
เครื่องวัด LVDT เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้วัดการเคลื่อนตัวขนาดเล็ก หรือการยืดหดตัวของชิ้นงาน ทำงานโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ ซึ่งมีโครงสร้างที่ประกอบด้วย ขดลวดปฐมภูมิ (primary winding) หนึ่งชุดอยู่ตรงกลาง และขดลวดทุติยภูมิ (secondary winding) จำนวนสองชุดต่ออนุกรมกัน โดยมีตำแหน่งอยู่ทางด้านซ้ายและด้านขวาของขดลวดปฐมภูมิ ขดลวดทุติยภูมิทั้งสองชุดนี้มีจำนวนรอบที่เท่ากันแต่มีทิศทางการพันขดลวดตรงข้ามกัน (พันในทิศทางตามเข็มนาฬิกาหนึ่งชุด และทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหนึ่งชุด) เมื่อขดลวดปฐมภูมิได้รับการกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากภายนอก จะมีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดทุติยภูมิทั้งสองชุด โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับขดลวดทุติยภูมิแต่ละชุดขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแกนเคลื่อนที่ (movable core)

โดยถ้าแกนอยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างขดลวดทั้งสองชุดพอดี แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับขดลวดทุติยภูมิทั้งสองชุดจะมีค่าเท่ากันแต่มีทิศทางตรงข้ามกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ LVDT จึงมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ หรือเรียกว่าตำแหน่งศูนย์ (Null Position) ถ้าแกนเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้าย แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิด้านซ้ายมากกว่าด้านขวา และเมื่อแกนเคลื่อนที่ไปทางด้านขวาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิด้านขวามากกว่าด้านซ้าย ดังนั้นค่าที่ได้จะเป็นค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้า

LVDT สามารถวัดค่าระยะการเคลื่อนที่แบบสถิตยศาสตร์ (Statics) หรือแบบพลศาสตร์ (Dynamics) ได้ LVDT มีความละเอียดและระยะในการวัดได้หลายช่วง โดยปกติแล้วความละเอียดมีค่าระหว่าง 0.003 ถึง 0.25 โวลต์/มิลลิเมตร (V/mm.) ก่อนการใช้งานต้องทำการปรับแก้ (Calibrated) เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ที่จ่ายออกมา (Output voltage) กับ ระยะการเคลื่อนตัว



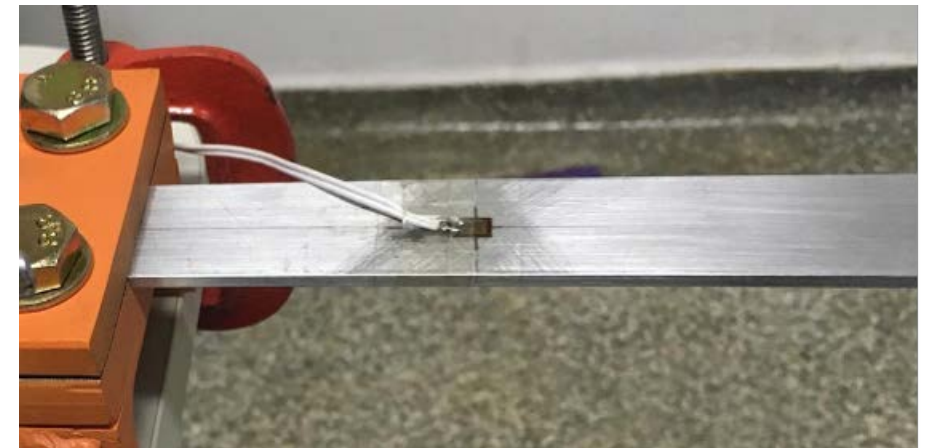
รูปที่ 1.7 ทรานสดิวเซอร์ชนิดแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น Linear Variable Differential Transformers (LVDT) [5]



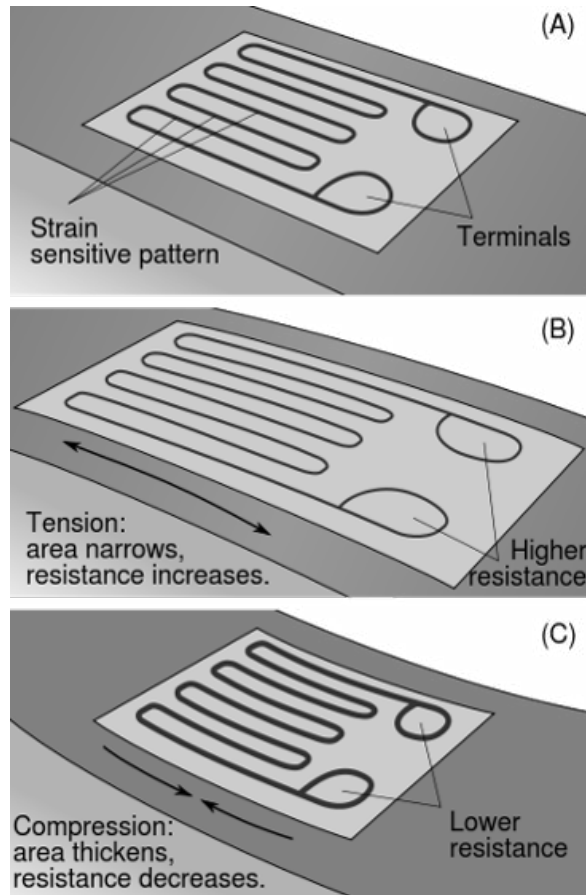
รูปที่ 1.8 วงจรภายใน LVDT [6]

1.5.4 สเตรนเกจ (Strain gauges)

สเตรนเกจเป็นเซ็นเซอร์ที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดมิติ หรือความเครียดในเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงภายนอกที่มากระทำด้วยการให้กำเนิดสัญญาณทางไฟฟ้า เมื่อสเตรนเกจถูกกระทำด้วยแรงใด ๆ จนทำให้เส้นโลหะภายในเกิดการเปลี่ยนรูป เช่น ยืด หด บิด หรือ งอ จะส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของตัวสเตรนเกจเปลี่ยนไป กล่าวคือสเตรนเกจเปรียบเสมือนตัวต้านทานที่ปรับค่าได้จากแรงทางกล นำไปใช้งานในการตรวจวัดได้อย่างกว้างขวาง เช่น การวัดน้ำหนัก ความดัน แรงเชิงกล หรือการเคลื่อนที่ สเตรนเกจมีลักษณะเป็นเส้นลวดโลหะขนาดเล็กขดรวมกันเป็นกลุ่มเรียกว่า กริด (Grid) ส่วนหัวและส่วนท้ายของขดลวดนี้ถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่เพื่อให้ง่ายต่อการเชื่อมต่อวงจร (Solder Tab) โดยสเตรนเกจสามารถตรวจวัดการยืดหรือหดตัวของเนื้อวัสดุของโครงสร้าง ซึ่งการยืดหรือหดตัวที่ตรวจวัดได้นี้ทำให้ทราบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างได้ ซึ่งความเค้นเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการประเมินความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้าง



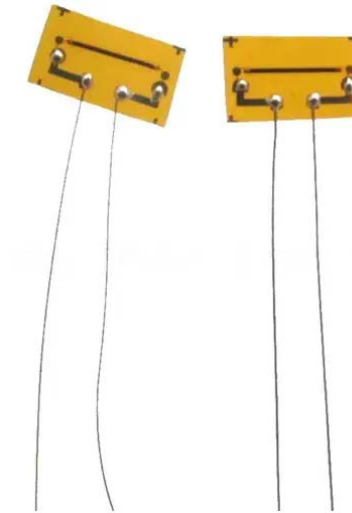
รูปที่ 1.9 ติดตั้งสเตรนเกจบนคานโลหะ [7]



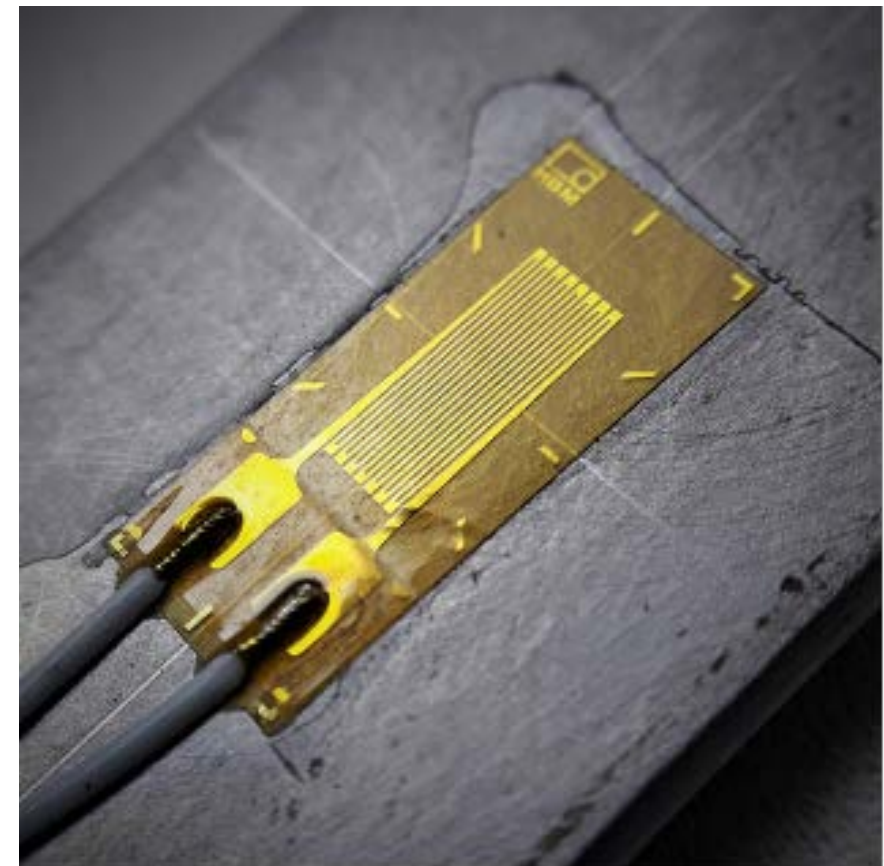
รูปที่ 1.10 ลักษณะการทำงานของสเตรนเกจบนคานเมื่อรับแรงดัด (A) ไม่มีแรงกระทำ (B) เกิดแรงดัดบนหน้าตัดคาน ทำให้พื้นที่ของสเตรนเกจที่แคบลงจะเกิดค่าต้านทานสูงขึ้น (C) เมื่อเกิดแรงอัดพื้นของสเตรนเกจที่พื่นขึ้นทำให้ความต้านทานลดลง [8]

สเตรนเกจแบ่งตามรูปแบบได้ 2 แบบ คือ แบบยึดติด (Bonded Strain Gage) และแบบไม่ยึดติด (Un bonded Strain Gage) และหากแบ่งตามประเภทของวัสดุสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ แบบอุปกรณ์กึ่งตัวนำ (Semiconductor Strain Gages) และแบบโลหะ (Metallic Strain Gage) โดยที่สเตรนเกจแบบอุปกรณ์กึ่งตัวนำจะมีขนาดเล็กกว่าและความไวสูงกว่าแบบเส้นลวดโลหะ ประมาณ 10 เท่าของสเตรนเกจแบบเส้นลวดโลหะ แต่มีความเป็นเชิงเส้นต่ำมาก และจะใช้เฉพาะงานพิเศษ

สเตรนเกจเหมาะสมกับวัตถุประสงค์การใช้งานในช่วงการทำงานที่หลากหลาย ตั้งแต่การวัดความเครียดแบบสถิต ไปจนถึงการวัดความเครียดแบบพลวัต และความเครียดที่เกิดขึ้นจากการกระแทกที่มีความถี่หลายร้อยกิโลเฮิร์ต เนื่องด้วยสเตรนเกจมีช่วงการทำงานที่กว้างดังที่กล่าวมานี้ จึงสามารถนำไปใช้งานกับโครงสร้างที่สร้างจากวัสดุต่างชนิด และมีรูปร่างที่หลากหลายได้ ตัวอย่างการใช้สเตรนเกจ เช่น การวัดความเครียดในคาน เสา ของอาคาร สามารถนำสเตรนเกจไปติดกับคานหรือเสา ที่ต้องการวัดและต่อเข้าร่วมกับวงจรบริดจ์ เพื่อวัดหาค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปได้



รูปที่ 1.11 สเตรนเกจแบบอุปกรณ์กึ่งตัวนำ [9]



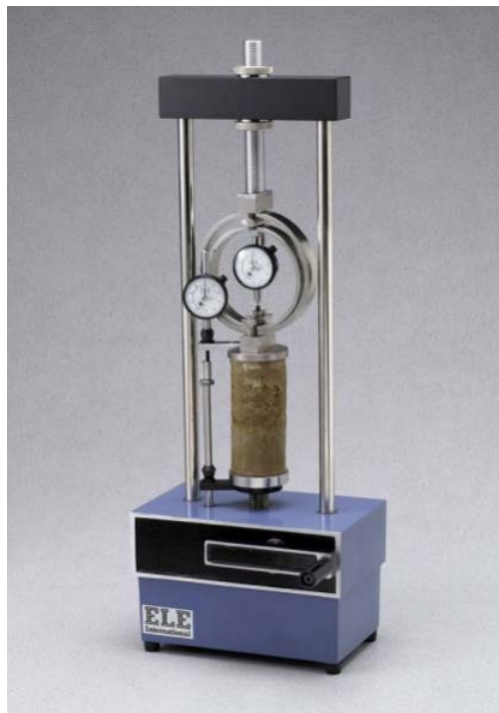
รูปที่ 1.12 สเตรนเกจแบบโลหะ [10]

1.5.5 วงแหวนปรับเทียบ (Proving ring)

Proving ring ใช้สำหรับวัดแรงในห้องทดสอบ โดยประกอบด้วยแหวนโลหะที่มีไดอัลเกจติดอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 1.13 เมื่อมีแรงกระทำกับ Proving ring แล้วแหวนจะเกิดการเสียรูป จะทำการวัดการเสียรูปด้วยไดอัลเกจ โดยที่ค่าของการเสียรูปที่วัดได้จากไดอัลเกจจะสัมพันธ์กับค่าแรงที่กระทำ ตัวอย่างของการใช้งานเช่นการนำเอาวงแหวนปรับเทียบมาใช้ทดสอบ Unconfined compressive strength ดังแสดงในรูปที่ 1.14 ข้อระวังที่สำคัญคือ อย่าทำให้แหวนโลหะเสียรูปเกินกว่าพิกัดของแหวน โดยค่าพิกัดนี้จะถูกระบุมากับแหวนโลหะตั้งแต่การผลิต



รูปที่ 1.13 วงแหวนปรับเทียบ [11]



รูปที่ 1.14 ตัวอย่างการใช้วงแหวนปรับเทียบกับการทดสอบดิน [12]

1.5.6 โหลดเซลล์ (Load cell)

โหลดเซลล์ คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนจากแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัวโหลดเซลล์ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เราสามารถนำสัญญาณทางไฟฟ้านี้ไปจ่ายเข้าจอแสดงผล เพื่อให้แสดงค่าเป็นน้ำหนักหรือแรงที่กระทำให้เห็นได้ โหลดเซลล์ถูกสร้างมาจาก Strain Gauge ที่จัดเรียงวงจรในรูปแบบวงจรวิสต์อน บริดจ์ (Wheatstone Bridge) ซึ่งสามารถแปลงค่าแรงกด หรือแรงดึงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า Load cell สามารถเอาไปประยุกต์ทำเครื่องชั่ง ตวงในอุตสาหกรรมได้ (วัดแรงกด Compression) หรือใช้ทดสอบวัสดุ (วัดแรงดึง Tensile) ได้อีกด้วย การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงาน (Press fit) ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุ โลหะ ทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ วิศวกรรมโยธา ทดสอบคอนกรีต ทดสอบไม้ ฯลฯ ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากต่องานภาคอุตสาหกรรม

โหลดเซลล์ถูกผลิตออกมาหลายรูปแบบ หลายพิกัด และสามารถแบ่งตามลักษณะของตัววัดค่าได้ 5 ประเภท ได้แก่ โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain Gauge Load cell), โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก (Hydraulic Load Cell), โหลดเซลล์แบบนิวแมติก (Pneumatic Load cell), ไพโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive) และ แมกเนโตสเตริกทีฟ (Magnetostrictive) เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตามโหลดเซลล์โดยส่วนมากเป็นชนิดสเตรนเกจ โดยโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจสามารถแบ่งได้เป็นอีก 2 ประเภทใหญ่ คือ โหลดเซลล์แบบใช้แรงกด ออกแบบมาเพื่อใช้แรงกดลงบนตัวโหลดเซลล์ และโหลดเซลล์แบบใช้แรงดึง ออกแบบมาเพื่อใช้แรงดึงตัวโหลดเซลล์ออกจากกัน

หลักการของโหลดเซลล์ประเภทนี้คือ เมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียด (Strain) จะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ ปกติแล้วมักจะใช้เกจวัดความเครียด 4 ตัว (วงจร Wheatstone Bridge Circuit) ในการวัด โดยเกจตัวต้านทานทั้งสี่จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อใช้แปลงแรงที่กระทำกับตัวของเกจ ไม่ว่าจะเป็นแรงกดหรือแรงดึง จะส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีหน่วยเป็น mV/V หมายความว่า ถ้าจ่ายแรงดัน 10 V ให้กับ Load cell ที่มี Spec. 2 mV/V ที่ Full load สมมุติว่าน้ำหนักเป็น 2,000 กิโลกรัม ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำต่อ Load cell ที่น้ำหนัก Full load สัญญาณที่จะได้ก็จะได้เท่ากับ 20 mV ซึ่งสามารถประเมินเบื้องต้นได้ดังนี้

$$0 \text{ Kg} = 0 \text{ mV}$$

$$1000 \text{ Kg} = 10 \text{ mV}$$

$$2000 \text{ Kg} = 20 \text{ mV}$$

1) โหลดเซลล์แบบใช้แรงกด

โหลดเซลล์ชนิดนี้เป็นโหลดเซลล์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้แรงกดลงบนตัวโหลดเซลล์ ซึ่งมีชื่อเรียกตามรูปร่างและการใช้งาน ได้แก่

Single End Shear Beam

ปกติจะเรียก Shear Beam เป็นโหลดเซลล์ที่ใช้งานโดยยึดปลายด้านหนึ่งเข้ากับฐานและนำถ่วงลงบนปลายอีกด้านหนึ่งเพื่อวัดแรงกด ซึ่งจะใช้ 4 ตัวต่อ 1 ถึง นิยมใช้มากในการชั่งน้ำหนักในถัง เช่น การชั่งน้ำหนักหิน ทราयीในถังก่อนปล่อยลงไปผสมกับซีเมนต์และน้ำในแพลนคอนกรีตผสมเสร็จ หรือในถังบรรจุวัสดุดังแสดงในรูปที่ 1.16 มีขนาดตั้งแต่ 250 กิโลกรัม ถึง 10 ตัน



รูปที่ 1.15 ลักษณะโหลดเซลล์แบบ Single End Shear Beam [13]



รูปที่ 1.16 ถังบรรจุที่ติดตั้งโหลดเซลล์เพื่อชั่งน้ำหนัก[14]

Double End Shear Beam

เป็นโหลดเซลล์ที่เหมือนกับนำ Single End Shear Beam จำนวน 2 ตัวมารวมกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.17 ซึ่งจะทำให้มีจำนวนสเตรนเกจมากขึ้น ทำให้ได้ความละเอียดมากขึ้น การติดตั้งโดยยึดปลายทั้งสองข้างด้วยสกรูติดกับฐาน และนำถ่วงมาวางตรงกลางโดยมีลูกบอลและเบ้ายึดกับถังและโหลดเซลล์ เพื่อให้ถังสามารถขยับได้แต่ไม่หลุดหล่นไป นิยมใช้ในงานชั่งที่มีน้ำหนักมาก ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้ถังถังหรือไซโลที่มีขนาดใหญ่ จะติดตั้งไว้ที่ขาของถังหรือไซโล ดังแสดงในรูปที่ 1.18 มีขนาดตั้งแต่ 10 ตัน ถึง 50 ตัน



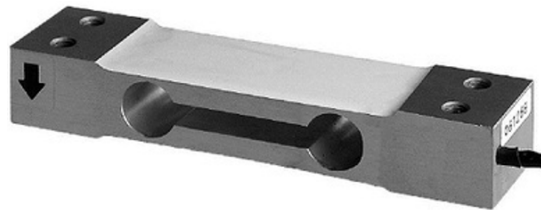
รูปที่ 1.17 ลักษณะโหลดเซลล์แบบ Double End Shear Beam[15]



รูปที่ 1.18 ลักษณะการติดตั้งโหลดเซลล์แบบ Double End Shear Beam ที่ขาถังไซโล [16]

Single Point

คือโหลดเซลล์ที่ออกแบบมาเพื่อให้ใช้กับ รูปแบบขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 1.19 สำหรับงานชั่งที่น้ำหนักน้อยกว่า 1 ตัน โดยใช้โหลดเซลล์เพียงตัวเดียว โดยยึดโหลดเซลล์เข้าที่ จุดศูนย์กลางของเครื่อง มีขนาดพิกัดน้ำหนักตั้งแต่ 2 กิโลกรัมถึง 800 กิโลกรัม



รูปที่ 1.19 ลักษณะโหลดเซลล์แบบ Single Point [17]

Bending Beam

Bending Beam เป็นโหลดเซลล์ที่ออกแบบมา โดยการแปลงแรงบิดที่กดที่ปลายด้านหนึ่งและอีกด้านยึดติดกับฐานและมีโครงสร้างคล้ายสปริง ดังแสดงในรูปที่ 1.20 มีข้อดีคือ ค่าใช้จ่ายต่ำและติดตั้งง่าย ซึ่งจะให้สัญญาณได้ดีที่ขนาดแรงกดไม่มากตั้งแต่ 25 กิโลกรัม ถึง 500 กิโลกรัม อย่างไรก็ตามการใช้โหลดเซลล์ลักษณะนี้ต้องติดตั้งการ์ดป้องกันโหลดเซลล์เสียหาย ประยุกต์ใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 1.21



รูปที่ 1.20 ลักษณะโหลดเซลล์แบบ Bending Beam [18]



รูปที่ 1.21 ตาชั่งน้ำหนักที่ใช้โหลดเซลล์แบบ Bending Beam [19]

Pancake

เป็นโหลดเซลล์ ที่มีรูปร่างคล้ายขนมแพนเค้ก ดังแสดงในรูปที่ 1.22 สามารถใช้ได้ทั้งแรงกดและแรงดึงที่มีแม่นยำสูง ค่า Linearity และ Hysteresis ในระดับ 0.05% เนื่องจากมีจำนวนสเตรนเกจมากกว่าโหลดเซลล์ชนิดอื่น นิยมใช้สำหรับงานเครื่องทดสอบแรงกดหรือแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 1.23 มีขนาดตั้งแต่ 500 กิโลกรัม ถึง 500 ตัน



รูปที่ 1.22 ลักษณะโหลดเซลล์แบบ Pancake [20]



รูปที่ 1.23 เครื่องทดสอบกำลังอัด [21]

Canister

Canister เป็นโหลดเซลล์ที่รูปร่างเหมือนกระป๋อง ดังแสดงในรูปที่ 1.24 ใช้รับแรงกด มีความแม่นยำสูง ค่า Linearity และ Hysteresis ในระดับ 0.05% โดยนิยมใช้ทำเครื่องชั่งทั่วไปที่ต้องการความแม่นยำสูง รวมถึงเครื่องชั่งรถบรรทุก ดังแสดงในรูปที่ 1.25 มีขนาดตั้งแต่ 200 กิโลกรัม ถึง 20 ตันแรงดึง มีขนาดตั้งแต่ 500 กิโลกรัม ถึง 500 ตัน



รูปที่ 1.24 ลักษณะโหลดเซลล์แบบ Canister [22]



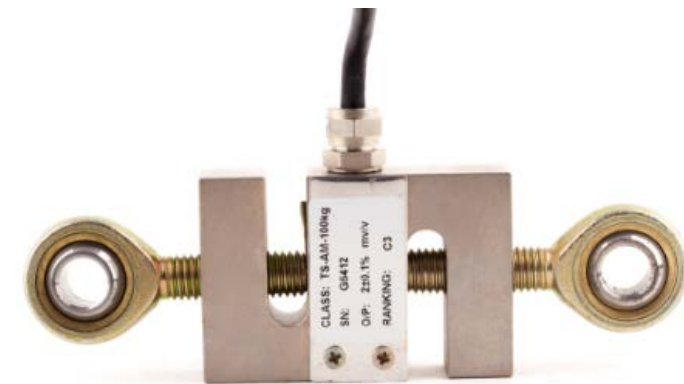
รูปที่ 1.25 ลักษณะการติดตั้งโหลดเซลล์แบบ Canister เครื่องชั่งน้ำหนักรถบรรทุก [23]

2) Load cell แบบใช้แรงดึง

เป็นโหลดเซลล์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้แรงดึงตัวโหลดเซลล์ออกจากกัน ซึ่งมีชื่อเรียกตามรูปร่างและการใช้ ได้แก่

S Beam

S Beam เป็นโหลดเซลล์ ที่ใช้งานโดยยึดด้านบนกับโครงสร้างโดยใช้ลูกปืนตาเหล็ก (Rod end) ดังรูปที่ 1.26 ส่วนด้านล่างใช้แขวนถัง หรือน้ำหนักที่ต้องการชั่งซึ่งจะทำให้ถังสามารถแกว่งตัวเล็กน้อยได้โดยที่ไม่มีผลกับการชั่ง ดังแสดงในรูปที่ 1.27 มีขนาดตั้งแต่ 2 กิโลกรัม ถึง 5 ตัน



รูปที่ 1.26 ลักษณะโหลดเซลล์แบบ S Beam [24]



รูปที่ 1.27 ลักษณะการติดตั้งโหลดเซลล์ S beam ที่เครื่องชั่งวัสดุ [25]

คำถามท้ายบท

1. การสร้างอาคาร สะพาน หรือถนน จะสามารถใช้งานได้อย่างคงทนถาวรและปลอดภัยได้ขึ้นอยู่กับสิ่งใดเป็นสำคัญ
2. เมื่อมีแรงกระทำทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันเป็นลักษณะของความเค้นชนิดใด
3. จงอธิบายความแตกต่างของการเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกและการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก
4. จงอธิบายลักษณะของโพรงคาปิลลารี
5. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใดใช้สำหรับวัดการยืดหดตัวของชิ้นงาน
6. หากต้องการการวัดความเครียดแบบสถิตควรเลือกใช้เครื่องมือชนิดใดในการวัด
7. จงอธิบายวิธีการติดตั้งโหลดเซลล์ Double End Shear Beam
8. วัสดุที่ใช้เกี่ยวกับงานโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธาเป็นหลัก ได้แก่
9. การทดสอบชนิดใดที่ไม่มีแรงกระทำมาเกี่ยวข้องและสามารถทดสอบได้อย่างไรบ้าง
10. 500-1500 เป็นความหนาแน่นรวมของวัสดุชนิดใด

เอกสารอ้างอิง

- [1] iToolmart. ไดอัลเกจ MITUTOYO 2046A 0-10 mm. (ดิ่งหลัง). เข้าถึงได้จาก. <https://itoolmart.com>
- [2] Alibaba. 0.001มิลลิเมตรห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ดิจิทัล Dial ตัวบ่งชี้ตัวบ่งชี้ที่วัดการหมุน - Buy Dial Indicator,Dial Gauge,0.001mm Dial Indicator Product. Alibaba.com. เข้าถึงได้จาก. <https://thai.alibaba.com/product-detail/0-001mm-laboratory-electronic-digital-dial-indicator-dial-gauge-indicator-60758835536.html?fromMSite=true>
- [3] product detail. Stainless Steel Vernier Digital Caliper-EAGLE ONE. Srithai Hardware. เข้าถึงได้จาก. http://www.srithaihardware.com/product_detail.php?sub_category=92&category=21&id=1404&lang=en
- [4] Sumipol. เวอร์เนีย หรือเวอร์เนียรคาลิปเปอร์คืออะไร และใช้งานอย่างไร. เข้าถึงได้จาก. <https://www.sumipol.com/knowledge/what-is-vernier/>
- [5] RDP Electronics ACT3000A. RDP Electronics ACT3000A LVDT Displacement Sensor. Elkome. Available from. <https://shop.elkome.com/en/act3000a-lvdt-displacement-sensor>
- [6] Passive Components Blog. Linear Variable Differential Transformers LVDTs Explained. Available from. <https://passive-components.eu/linear-variable-differential-transformers-lvdt-explained/>
- [7] SciELO Brazil. A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices. Available from. <https://www.scielo.br/j/rbep/a/NVcLk4zwNZDCr64zNXPLHS/?lang=en>
- [8] Wikipedia. Strain gauge. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Strain_gauge&oldid=1043171085
- [9] Top Sensor Technology. Semiconductor Strain Gauges SPY. Available from. <http://www.tst-scale.com/strain-gauges/semiconductor-strain-gauges/semiconductor-strain-gauges-spy.html>
- [10] A. T. Nachazel. What is a Strain Gauge and How Does it Work?. Michigan Scientific Corporation. Available from. <https://www.michsci.com/what-is-a-strain-gauge/>
- [11] Humboldt. Load Ring with Dial Gauge, Proving Ring. Available from. <https://www.humboldtmfg.com/load-ring-with-dial-gauge.html>

- [12] ELE International. Unconfined Compression Tester, Hand-Operated. Available from. <https://www.ele.com/product/2-unconfined-compression-tester-hand-operated>
- [13] Factomart. KBQS-500 KGS. - ZEGA - SHEAR BEAM Load Cell รุ่น KBQS,500kg, 2mV/V, 10 - 12VDC. Available from. <https://my.factomart.com/KBQS-500-KGS>.
- [14] Factomart. การใช้งานเครื่องผสมวัสดุดิบ Mixing. เข้าถึงได้จาก. <https://mall.factomart.com/mixing-application/>
- [15] BOSCHE. Double Ended Shear Beam load cell D10N. Available from. <https://www.bosche.eu/en/scale-components/load-cells/double-shear-beam-load-cell/double-ended-shear-beam-load-cell-d10n>
- [16] agrinnovate. JRL เครื่องชั่งน้ำหนักไซโล 10 ตัน. เข้าถึงได้จาก. <http://www.agrinnovate-th.com>
- [17] indiamart. Single Point Load Cell. Available from. <https://www.indiamart.com/prod-detail/single-point-load-cell-7525910933.html>
- [18] SCMA. DINI ARGE0 Assembly Kit for Bending Beam Load Cells รุ่น KFXDN. Available from. <http://www.scmashopping.com/product/1220/dini-argeo-assembly-kit-for-bending-beam-load-cells-%E0%B8%A3%E0%B8%B8%E0%B9%88%E0%B8%99-kfxdn>
- [19] QUR. 823B Platform Scale 100k Dual Size Display. Available from. <https://th.zhujiang-dustbin.com/823b-platform-scale-100kg/>
- [20] ATO. Tension/Compression Load Cell, Low Profile, 500kg/30 ton to 100 ton. Available from. <https://www.ato.com/compression-load-cell-low-profile-200kg-to-100-ton>
- [21] Amazon. EIE Instruments Fully Automatic Concrete Cube Compression Testing Machine(240V, 50-60Hz). Available from. <https://www.amazon.in/EIE-Automatic-Concrete-Compression-Testing/dp/B01N9HVWQ>
- [22] Load Cell Central. Model PSCG: Canister Load Cell - Stainless Steel. 800loadcel. Available from. <https://www.800loadcel.com/load-cells/canister-load-cells/stainlesssteel-canister-loadcell.html>
- [23] Column Type Load Cell. GCS703 Hopper Scale Canister Column Type Load Cell. Galoce. Available from. https://www.galoce.com/products/canister-type-load-cell/GCS703_Hopper_Scale_Canister_Column_Type_Load_Cell.html
- [24] admin. Load cell แบบสเตรนเกจ ประเภทไหนใช้กับอะไร. tom.ji42. เข้าถึงได้จาก. <https://tom.ji42.com/?p=22004>

- [25] Alibaba. Gsl311 Miniature Size Tension Compression S-beam Load Cell – Available from. https://galoce.en.alibaba.com/product/62269795645-802745979/GSL311_Miniature_Size_Tension_Compression_S_Beam_Load_Cell.html

บทที่ 2. เหล็กในงานก่อสร้าง

การก่อสร้างอาคาร สะพานหรือถนน วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างมักจะมีเหล็กเป็นส่วนประกอบสำคัญของงานโครงสร้าง เพื่อทำหน้าที่ให้สิ่งก่อสร้างเป็นรูปร่าง มีความคงทนแข็งแรง และเสริมคุณสมบัติให้แก่วัสดุอื่น เช่นเหล็กเสริมคอนกรีต ซึ่งการแบ่งประเภทของเหล็กตามรูปแบบการใช้งานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ เหล็กรูปพรรณสำหรับงานโครงสร้าง และ เหล็กเสริมคอนกรีต การเลือกใช้เหล็กในงานก่อสร้าง จึงควรเลือกให้เหมาะสมกับประเภทของการใช้งาน เพื่อความคงทนของโครงสร้าง ความรวดเร็วในการทำงาน และควรเลือกซื้อเหล็กที่ผ่านมาตรฐาน มอก. โดยสามารถมองหาสัญลักษณ์ มอก. และชื่อผู้ผลิตอย่างชัดเจนได้บนเหล็กแต่ละชนิดที่เราเลือกใช้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.1 ป้ายระบุการได้รับมาตรฐานมอก.ของเหล็กเส้น [1]



รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์ระบุการได้รับมาตรฐานมอก.ของเหล็กรูปพรรณ [2]

นอกจากนี้การใช้โครงสร้างเหล็กยังสามารถช่วยในการประหยัดงบประมาณ หากมีการแก้ไขโครงสร้างในอนาคต เป็นการลดการใช้ทรัพยากรสิ่งแวดล้อมเนื่องจาก เหล็กเป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ อีกทั้งยังสามารถจำหน่ายต่อเป็นเหล็กสำหรับใช้งานหรือเป็นเศษเหล็กหากไม่ต้องการใช้ โครงสร้างนั้นอีกต่อไปแล้ว ซึ่งถือเป็นการลงทุนที่มีความคุ้มค่าในระยะยาว



2.1 ประเภทของเหล็ก

เหล็ก เป็นธาตุสามัญอย่างหนึ่งในธรรมชาติที่มีอยู่บนโลกมากเป็นอันดับที่ 3 รองลงมาจากออกซิเจนและซิลิกอน โดยปกติเหล็กจะเกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของแร่เฮมาไทต์และแมกนีไทต์ โดยมีแหล่งแร่สำคัญอยู่ที่ประเทศออสเตรเลีย, อินเดีย, และบราซิล จนมนุษย์ได้นำแร่เหล็กไปผ่านกระบวนการผลิตเพื่อนำมาใช้ในการอุตสาหกรรมก่อสร้างทุกประเภท

สินแร่เหล็กที่ขุดขึ้นมาโดยกรรมวิธีการทำเหมืองแร่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 อยู่ในลักษณะเป็นสารประกอบและมีวัสดุอื่นผสมปะปนอยู่ เช่น ดิน หิน ทราย เป็นต้น จากลักษณะนี้ทำให้สินแร่เหล็กที่ขุดขึ้นมาได้เป็นเหล็กที่ไม่บริสุทธิ์จึงไม่อาจนำมาใช้งานได้ทันที โดยเฉพาะมีออกซิเจนซึ่งอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งออกซิเจนเหล่านี้จะอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์ ดังนั้น ก่อนที่จะนำสินแร่เหล็กไปใช้ประโยชน์ จะต้องทำการขจัดออกซิเจนด้วยกรรมวิธีการถลุงสินแร่เหล็กภายในเตาสูง (Blast Furnace)



รูปที่ 2.3 ภาพสินแร่เหล็ก [3]

เมื่อนำแร่เหล็กมาถลุง จะได้โลหะเหล็กที่ยังคงมีส่วนประกอบอื่น ๆ ปะปนอยู่ ทำให้นำมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมได้น้อย เนื่องจากมีคุณสมบัติในการใช้งานค่อนข้างจำกัด ดังนั้น เหล็กที่จะนำไปใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจึงเป็นเหล็กผสม โดยการผสมสารลงไปในเนื้อเหล็ก มีทั้งสารที่เป็นโลหะและอโลหะ ทั้งนี้ เพื่อต้องการปรับปรุงคุณภาพเหล็กให้สามารถนำไปใช้งานได้ดียิ่งขึ้น ทำให้เหล็กมีความแข็งแรงมากขึ้น สามารถทนต่อแรงดึงได้มากขึ้น

2.1.1 ความหมายของเหล็กดิบ

เหล็กดิบหรือเหล็กพิก เป็นต้นกำเนิดของวัสดุผลิตภัณฑ์เหล็กที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น เหล็กเหนียว เหล็กหล่อและเหล็กกล้า การได้มาซึ่งเหล็กดิบหรือเหล็กพิก (Pig Iron) ได้มาจากการถลุงสินแร่เหล็ก หินปูนและถ่านโค้ก ซึ่งจะถูกป้อนเข้าไปทางด้านบนของเตาเรียงแยกกันเป็นชั้น ๆ ความร้อนในการถลุงได้จากการเผาไหม้ของถ่านโค้ก โดยมีลมร้อนเป่าจากด้านล่างของเตาเพื่อช่วยในการเผาไหม้ และหินปูนจะรวมตัวกับสารมลทินและสิ่งสกปรก เกิดเป็นฟองชี้ตระกรันลอยอยู่ด้านบน ส่วนเนื้อเหล็กจะรวมตัวกับคาร์บอนในถ่านโค้กแล้วจมลงด้านล่าง ปฏิกริยานี้จะให้น้ำเหล็กไหลลงพิมพ์ที่เตรียมไว้จนได้เหล็กเป็นแท่งที่เรียกว่า ‘เหล็กดิบ’ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งมีส่วนประกอบของเหล็กประมาณ 95%, คาร์บอน 3-4%, ซิลิกอน 1% และธาตุอื่น ๆ ซึ่งจะต้องนำมาทำให้บริสุทธิ์ขึ้นและเติมสารอัลลอยเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ



รูปที่ 2.4 เหล็กดิบหรือเหล็กพิกที่ได้จากการถลุงแร่เหล็ก [4]

2.1.2 ความหมายของเหล็กเหนียว (Mild Steel)

เหล็กเหนียวเป็นเหล็กที่มีค่าของความแข็งต่ำ มีกำลังวัสดุต่ำกว่าเหล็กชนิดอื่น ๆ มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนต่ำ เหล็กเหนียวที่ดีจะต้องมีธาตุคาร์บอนประมาณ 0.15% และมีตะกรันอย่างละเอียดอยู่ประมาณ 1.3% กระจายอยู่ทั่วชิ้นโลหะ เหล็กเหนียวจะมีเนื้อหยาบและถ่านไปทดลองเกี่ยวกับแรงดึงจะแตกเป็นรอย สีดำหรือสีคล้ำ

คุณสมบัติของเหล็กเหนียวหรือเหล็กอ่อน คือสามารถรับแรงดึงได้ดี จุดหลอมเหลวสูง ผิวละเอียด ดัดสปริงหรือโค้งงอได้ เมื่อเผาให้ร้อนจะอ่อนตัวผงเหล็กจะแหลมตะไบยาก การรวมตัวของคาร์บอนจะแทรกอยู่ในเนื้อเหล็ก ทนทานต่อการเป็นสนิม เชื่อมได้ง่าย ดัดงอได้ง่าย และมีความสามารถในการยึดเกาะกับวัสดุที่เคลือบได้ดี ตัวอย่างการใช้งานเหล็กเหนียวดังแสดงในรูปที่ 2.5



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างเหล็กเหนียวนำไปใช้ผลิต (ก) น็อตและ (ข) ท่อน้ำ [5], [6]

2.1.3 ความหมายของเหล็กหล่อ (Cast Irons)

เหล็กหล่อ เป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่มาก การขึ้นรูปเหล็กหล่อจะใช้วิธีหลอมละลายจนเหลวลงไปในแบบหล่อที่ทำด้วยทรายหรือวัสดุทนความร้อน จากกรรมวิธีนี้จึงเรียกเหล็กชนิดนี้ว่า ‘เหล็กหล่อ’ หลังจากหล่อรูปร่างได้ใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการแล้ว จึงจะนำมาทำการกลึง ไส ตัด และเจาะ ซึ่งสามารถจำแนกประเภทของเหล็กหล่อได้หลายประเภท ดังนี้

เหล็กหล่อสีเทา มีความสามารถในการรับแรงสั่นสะเทือน รับแรงกระแทก ทนต่อความล้า และสามารถตกแต่งด้วยเครื่องจักรกลได้ดี เหมาะสำหรับผลิตโครงสร้างของเครื่องจักรกลต่าง ๆ เช่น เครื่องกลึง เครื่องกัด เครื่องไส เครื่องเจาะ แท่นระดับ ปากกาจับงานตะไบ ทั้งดีเหล็ก เสือสูบ เครื่องยนต์และเฟืองต่าง ๆ

เหล็กหล่อสีขาว มีความแข็งสูงมาก เหมาะสำหรับนำไปใช้งานที่ต้องทนต่อการเสียดสี เช่น อุปกรณ์โรงโม่หิน ลูกรีดโลหะ อุปกรณ์ในงานรถไฟ เป็นต้น

เหล็กหล่อเหนียว (Malleable Cast Iron) ผลิตได้โดยการนำชิ้นงานที่ทำจากเหล็กหล่อสีขาว มาทำการอบอ่อน ทำให้ความแข็งของเหล็กหล่อขาวลดลง แต่ชิ้นงานจะเพิ่มความเหนียวมากขึ้น การนำไปใช้ประโยชน์เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องจักรในงานเกษตร หัวเผาแก๊ส อุปกรณ์ข้อต่อ งานประปา เป็นต้น

เหล็กหล่อกราไฟต์ก้อนกลม (Nodular Cast Iron) ในเหล็กหล่อที่หลอมเหลวอยู่ จะทำการเติมซีเรียม (cerium) ลงไปเพื่อดึงกำมะถันออก และจะเหลือซีเรียมอยู่ในเหล็กประมาณ 0.02% ทำให้กราไฟต์จับตัวเป็นก้อนกลม หรือใช้แมกนีเซียมใส่ลงในเหล็กหล่อที่หลอมเหลวอยู่ เพื่อให้กราไฟต์จับตัวกันเป็นก้อนกลม เหล็กหล่อกราไฟต์ก้อนกลมมีคุณสมบัติที่ดีของเหล็กหล่อสีเทาและเหล็กกล้า เหมาะสำหรับนำไปใช้ในงานโครงสร้างเครื่องจักรกลขนาดใหญ่ เครื่องจักรกลการเกษตร เพลาค้อเหวี่ยง ท่อส่งน้ำ ท่อส่งแก๊ส และเฟือง เป็นต้น

พศ.ดร.เจริญชัย ฤทธิรุทร



การศึกษา

ปริญญาตรี มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2545
ปริญญาโทวิศวกรรมโยธา ด้านวัสดุวิศวกรรม จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2549
และปริญญาเอกวิศวกรรมโยธา ด้านคอนกรีตและซีเมนต์ จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผลงานวิจัย

ทำงานวิจัยร่วมกับ The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) ประเทศออสเตรเลีย พ.ศ. 2554
มีผลงานวิจัยด้านจีโอโพลิเมอร์ซีเมนต์และคอนกรีต จากดินขาวเผา, เถ้าลอย, เถ้าชีวะมวล
ศึกษาคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์, คอนกรีตอัดแรง, จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมวลเบา
การนำยางพารามาใช้ในงานคอนกรีต
ปรับปรุงแอสฟัลต์ซีเมนต์ด้วยเกล็ดยางพารา

งานบริการวิชาการ

ให้คำแนะนำการก่อสร้าง, ซ่อมแซม, ปรับปรุงบ้านและอาคาร
ให้คำแนะนำสำหรับโรงงานผู้ผลิตผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป และชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จ

ปัจจุบัน

ดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์
ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขต ขอนแก่น