บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 โครงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันเหล็กมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่องานด้านวิศวกรรม และงานด้านอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นความสำคัญทางด้านโครงสร้างพื้นฐานที่ต้องการพื้นที่กว้างๆ และความยาวมาก ๆ ได้แก่ สะพานข้ามทาง โครงสร้างตึก โรงงานอุตสาหกรรม สนามกีฬา รถยนต์ เป็นต้น

ดังนั้นจึงควรที่จะมีการคิดค้นและการปรับปรุงวิธีการใช้เหล็กโดยเอาจุดแข็งมาใช้ และนำเอาจุดอ่อนมาปรับปรุงผสมกับวัสดุชนิดอื่นเพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการ และเหมาะสมกับสภาพที่จะเอาไปใช้งานนอกจากนี้ควรจะมีการปรับปรุงเหล็กเพื่อเพิ่มความสามารถในการทนทานต่อแรงกระแทกในขณะที่เหล็กมีน้ำหนักเท่าเดิมหรือเบากว่าเดิม และเพิ่มความสามารถในการยืดหยุ่นของเหล็กเพื่อรับการสั่นสะเทือนมากขึ้น และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงสร้างเหล็กให้เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

2.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอบชุบที่มีผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของเหล็ก AISI 4140

ดำเนินงานวิจัยโดย นาย วทัญญู อรรถาเวช , นาย สมศักดิ์ โพธิสุวรรณ และ นางสาว สุภัค จำรัสทอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา อุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบชุบ ที่มีผลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของเหล็ก AISI 4140 โดยทำการทดสอบวัสดุ และวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธีทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบชุบ และอัตราการเย็นตัวของสารชุบที่มีผลต่อความแข็ง ความทนต่อแรงกระแทก ความทนต่อแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น รวมทั้งศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กที่ผ่านกระบวนการอบชุบ

ผลลัพธ์ของการศึกษาพบว่าความแข็งจะแปรผันตรงกับอัตรกการเย็นตัว และแปรผกผันกับอุณหภูมิอบชุบ และอุณหภูมิการอบคืนไฟ ความทนต่อแรงกระแทกจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิอบชุบ อุณหภูมิการอบคืนไฟ และอัตราเย็นตัวของสารอบชุบ ความทนต่อแรงดึงจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิอบชุบ อุณหภูมิการอบคืนไฟ และอัตราเย็นตัวของสารอบชุบ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิอบชุบ อุณหภูมิการอบคืนไฟ และอัตราเย็นตัวของสารอบชุบ เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่นจะไม่มีผลต่ออุณหภูมิการอบชุบ แต่จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิการอบคืนไฟและแปรผกผันกับอัตราการเย็นตัวของสารชุบ โครงสร้างจุลภาคจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิอบชุบ อุณหภูมิการอบคืนไฟ และอัตราเย็นตัวของสารอบชุบ

2.1.2 การศึกษาตัวแปรในการอบชุบที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค

ดำเนินงานวิจัยโดย นางสาวทิพวรรณ แม้นเจริญ และนายศักดิ์ชัย เด่นนิติรัตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา อุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ได้ศึกษาตัวแปรในการชุบแข็งที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาค โดยทำการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการคำนวณทางสถิติ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และความทนต่อแรงกระแทก กับตัวกลางที่ใช้ในการชุบแข็ง และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบ รวมทั้งศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งในสภาวะต่าง ๆ

ผลลัพธ์ของการศึกษาพบว่า อุณหภูมิและการเย็นตัวมีผลกระทบต่อความแข็ง ความทนต่อแรงกระแทก และโครงสร้างจุลภาค โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบแปรผกผันกับความแข็ง แต่แปรผกผันกับความทนต่อแรงกระแทก และขนาดของเม็ดเกรน ยกเว้นการชุบแข็งในน้ำมัน อุณหภูมิไม่มีผลต่อความทนต่อแรงกระแทก โดยความทนต่อแรงกระแทกที่ได้จากการชุบแข็งในน้ำมันจะใกล้เคียงกับความทนต่อแรงกระแทกก่อนการชุบแข็ง

2.2 การอบชุบ (Heat Treatment)

2.1.1 การชุบแข็ง (Hardening)

คือ การอบชุบความร้อนเพื่อต้องการให้เหล็กภายหลังการชุบมีความแข็งเพิ่มขึ้น เพื่อทนต่อการเสียดสีในขณะทำงาน การชุบแข็งเป็นวิธีที่จะให้ได้โครงสร้างของเหล็กสุดท้ายเป็นมาร์เทนไซท์ หรือเบนไนท์ ขึ้นอยู่กับความแข็งสุดท้ายที่ต้องการ

การชุบแข็งเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับเหล็กจนมีอุณหภูมิเท่ากับ หรือสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ แล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ภายหลังการอบชุบจะทำให้คุณสมบัติของเหล็กเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้เหล็กมีคุณสมบัติตามที่ผู้ใช้งานต้องการ เช่น มีความแข็งมากขึ้น หรือทนต่อการเสียดสีขณะใช้งาน

ในการให้ความร้อนแก่เหล็กจะเพิ่มความร้อนขึ้นอย่างช้าๆ เพื่อให้โครงสร้างของเหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอ ในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนไป ถ้าหากให้ความร้อนแก่เหล็กอย่างรวดเร็วเกินไป จะทำให้เหล็กเกิดการแตกร้าว โค้งหรือบิดงอในช่วงการให้ความร้อนแก่เหล็กก่อนที่จะขึ้นไปถึงช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ ดังนั้นจึงควรจะมีการคงอุณหภูมิไว้เป็นช่วงๆ เพื่อให้เหล็กมีอุณหภูมิเท่ากันทั่วทั้งหน้าตัด และตลอดทั้งชิ้นงาน

ความแข็งของเหล็กหลังจากที่ได้จากการชุบแข็ง จะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนของสารชุบ ปริมาณของคาร์บอน และขนาดของชิ้นงาน ในเหล็กกล้าผสมนั้นจะมีธาตุต่างๆ เป็นส่วนผสมอยู่ ธาตุเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยในการเพิ่มคุณสมบัติของเหล็ก เช่น ทำให้สามารถชุบแข็งได้ลึกมาก และในการทำให้เหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็วสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือ สารชุบซึ่งมีอัตราการ

เย็นตัวที่แตกต่างกัน เช่น น้ำจะให้อัตราการเย็นตัวที่ดีกว่าน้ำมัน สารชุบมีหลายชนิด เช่น น้ำ น้ำมัน โดยปกติแล้วเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และปานกลางจะชุบแข็งในน้ำเพื่อให้มีอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็ว แต่ในเหล็กกล้าคาร์บอนสูง และเหล็กกล้าโลหะผสมจะชุบแข็งในน้ำมัน เพราะว่าการเย็นตัวไม่รวดเร็วเท่ากับน้ำ ถ้าทำให้การเย็นตัวเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยการจุ่มน้ำอาจจะทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนสูง และเหล็กกล้าโลหะผสมเกิดการแตกร้าวได้ เนื่องจากอิทธิพลของธาตุคาร์บอนและธาตุอื่นๆผสมอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และปานกลาง

เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำกว่า 0.3 % จะไม่สามารถทำการชุบแข็งได้ หรือเมื่อทำการชุบแล้วจะไม่แข็งนั่นเอง ถ้าจะทำให้แข็งได้ต้องทำการชุบ โดยการชุบผิวแข็งเท่านั้น ความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น โดยสามารถสรุปองค์ประกอบที่สำคัญที่ทำให้สามารถชุบแข็งได้คือ

1. เหล็กที่ต้องการชุบแข็งต้องมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.3%
2. เหล็กจะต้องได้รับความร้อนเหนือเส้นอุณหภูมิวิกฤติ จนโครงสร้างเปลี่ยนไปเป็นออสเตนไนท์ทั้งหมด
3. สารชุบต้องมีอัตราการเย็นตัวที่สูงพอเหมาะ

การชุบแข็งแบบมาร์เทมเปอริ่ง (Martempering) เป็นกระบวนการชุบแข็งที่เหมาะกับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน หรือมีความหนาบางแตกต่างกันมากๆ เพราะว่าชิ้นงานดังกล่าวถ้าชุบแข็งด้วยวิธีธรรมดา จะทำให้เกิดการบิดงอหรือแตกร้าวได้ง่าย วิธีการนี้จะทำโดยการเผาเหล็กจนโครงสร้างเดิมเปลี่ยนไปเป็นออสเตนไนท์ แล้วทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยการจุ่มลงในสารชุบที่มีการถ่ายเทความร้อนได้รวดเร็วก่อน จากนั้นต้องจุ่มแช่ในอ่างเกลือหลอมละลาย ที่อุณหภูมิประมาณ 400 ^{0}C ในช่วงเวลาหนึ่งก่อน แล้วจึงจุ่มลงในน้ำ หรือเป่าด้วยอากาศเย็นทันที

การชุบแข็งแบบออสเทมเปอริง (Austempering) เป็นกระบวนการชุบแข็งที่มีขั้นตอนคล้ายคลึงกับวิธีมาร์เทมเปอริง แต่แตกต่างกันตรงที่เวลาที่ใช้ในการชุบลงในอ่างเกลือ ต้องใช้เวลานานจนแน่ใจว่า โครงสร้างได้เปลี่ยนจากออสเตนไนท์ไปเป็นเบนไนท์อย่างสมบูรณ์ ซึ่งระยะเวลานั้นต้องดูว่าเป็นเหล็กที่มีส่วนผสมของธาตุอื่น และมีโครงสร้างเป็นแบบใดจาก TTT Curve จากนั้นก็นำชิ้นงานออกจากอ่างเกลือ แล้วปล่อยให้เย็นในน้ำ หรือในอากาศ อุณหภูมิของน้ำเกลือจะอยู่ประมาณ 400-600 ^{0}C โครงสร้างสุดท้ายที่ได้คือ เบนไนท์

2.1.2 การอบคืนตัว (Tempering)

เหล็กภายหลังการชุบแข็งจะมีโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยมาร์เทนไซท์ และออสเตนไนท์เหลือค้าง (Residual austenite) ถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนสูง จะมีโปรยูเต็คตอยด์ซีเมนต์ไตต์กระจัดกระจายอยู่ทั่วไป นอกจากนี้เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งจะเกิดความเครียดภายใน อันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วจากอุณหภูมิสูง คุณสมบัติของเหล็กตามลักษณะที่กล่าวจะมีความแข็งสูง แต่จะขาดคุณสมบัติด้านความเหนียวไม่ทนต่อแรงกระแทก (Poor impace strength) และความเครียดภายในที่เกิดขึ้นจะมีส่วนทำให้ชิ้นงานบิดงอ หรืออาจเกิดการแตกร้าวในขณะใช้งานได้ ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งก่อนนำไปใช้งานควรนำมาทำการอบคืนตัว เพื่อคลายความเครียดภายในให้หมดไป หรือเหลืออยู่น้อยที่สุด และในขณะเดียวกันจะทำให้มาร์เทนไซท์แตกตัวให้โครงสร้างกึ่งสมดุล (Tempered Matensite) ซึ่งจะมีผลอย่างกว้างขวางต่อคุณสมบัติของเหล็ก ดังเช่น ความแข็งจะลดลง แต่ความเหนียวจะกลับสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิของการอบคืนตัวและเวลาที่ใช้

การอบคืนตัวเป็นวิธีการเผาเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A_1 ภายหลังเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานพอสมควรแล้ว จะปล่อยให้เย็นตัวช้าๆ ภายในเตา การเปลี่ยนแปลงของมาร์เทนไซท์และออสเตนไนท์เหลือค้างไปสู่โครงสร้างกึ่งสมดุลย์จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่างๆ กัน ดังนี้

อุณหภูมิช่วงแรก (80-200 ^{0}C) โครงสร้างมาร์เทนไซท์จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ซนิดที่ใกล้จะเป็นระบบลูกบาศก์ (Pseudo cubic) ซึ่งมีคาร์บอนละลายอยู่ 0.25% กับคาร์ไบด์ซนิดเอฟซีลอน มีสูตร Fe_2C หรือ Fe_2C_4 และมีคาร์บอนประมาณ 8.2% ทั้งคาร์ไบด์ และเฟอร์ไรท์ (0.25% C) จะตกผลึกซนิดละเอียด และกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง สามารถศึกษาได้โดยกล้องขยายอิเลคตรอนเท่านั้น การอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมินี้ความแข็งจะลดลงเล็กน้อย แต่ความเครียดภายในจะถูกทำลายไปเกือบหมด

อุณหภูมิช่วงที่สอง (200-280 ^{0}C) โครงสร้างออสเตนไนท์ที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซท์ได้ทันในขณะชุบแข็ง (retained austenite) จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ (0.25% C) และซีเมนต์ไตต์ (Fe_3C) ที่มีความละเอียดและกระจัดกระจายโครงสร้างที่ปรากฏจะคล้ายคลึงกับเบนไนต์ความแข็งจะลดลงมาก แต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น

อุณหภูมิช่วงที่สาม (300-500 ^{0}C) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเฟอร์ไรท์จะแตกตัวให้เฟอร์ไรท์ที่มีคาร์บอน 0.025% และซีเมนต์ไตต์ ส่วนเอฟซีลอนคาร์ไบด์ จะเปลี่ยนเป็นซีเมนต์ไตต์ (Fe_3C) โครงสร้างที่ได้จะคงยังอยู่ในลักษณะละเอียด และกระจัดกระจายมีลักษณะคล้ายซอร์ไบท์

อุณหภูมิช่วงที่สี่ (สูงกว่า 500 ^{0}C ขึ้นไปจนถึง A_1) โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะปรับตัวเข้าสู่สภาพสมดุลย์และมีการขยายตัวของเฟอร์ไรท์และซีเมนต์ไตต์โตขึ้น ความแข็งจะลดลงมาก โดยความเหนียวจะเพิ่มขึ้นในลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กที่ผ่านการทำสเฟอร์รอยไดซ์ซิง (Incomplete annealing)

ในทางปฏิบัติแบ่งช่วงอุณหภูมิสำหรับการอบคืนตัวออกเป็น 3 ช่วง คือ

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำ (150-250 ^{0}C) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเครียดภายใน และปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเหนียว โดยพยายามรักษาความแข็งไว้ในระดับใกล้เคียงกับความแข็งที่ได้ภายหลังการชุบแข็ง เวลาที่ใช้ประมาณ 1-2 ชั่วโมง โครงสร้างของเหล็กจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิปานกลาง (350-450 ^{0}C) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เหล็กมีความเหนียวสูง และมีคุณสมบัติทางด้านความยืดหยุ่นสูง ส่วนใหญ่ใช้สำหรับเหล็กทำแหนบสปริง โครงสร้างของเหล็กจะใกล้เคียงกับเบนไนท์

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูง (500-650 ^{0}C) จะกระทำเมื่อต้องการทำลายความเครียดภายในให้หมดไป และเพื่อให้ได้เหล็กที่มีคุณสมบัติด้านความเหนียวสูง โดยมีความอยู่ในเกณฑ์สูงด้วย โครงสร้างของเหล็กจะมีลักษณะเป็นเพิร์ไลท์ละเอียดใกล้เคียงกับโครงสร้างซอร์ไบท์

2.3 สารชุบ (Quenching Medium)

สารชุบหมายถึง ตัวกลางที่ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวด้วยอัตราที่เหมาะสม เพื่อสามารถควบคุมให้ชิ้นงานมีโครงสร้างตามความต้องการตามสภาวะ และประเภทของการใช้งาน ซึ่งต้องมความสัมพันธ์กันระหว่างอัตราการเย็นตัว (Cooling Rate) เวลา (Time) และอุณหภูมิ (Temperature) สารชุบชนิดต่างๆ จะให้ความสามารถในการลดอุณหภูมิที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้นในการเลือกสารชุบจึงควรพิจารณาถึงองค์ประกอบ ดังนี้

ก. อัตราการถ่ายเทความร้อนของสารชุบ

ข. ขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน

ค. ลักษณะโครงสร้างที่ต้องการภายหลังการอบชุบ

ชนิดของสารชุบ

2.3.1 น้ำ (Water)

เป็นสารชุบที่หาได้ง่าย ราคาถูก และสามารถระบายความร้อนได้ดี มีอัตราการเย็นตัวที่สม่ำเสมอ ไม่เกิดมลพิษ และไม่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน แต่มีข้อเสียคือ ชิ้นงานมักจะเกิดการบิดงอ หรือเกิดการแตกร้าวได้ง่าย ความแข็งไม่ค่อยสม่ำเสมอ และชิ้นงานเป็นสนิมภายหลังการอบชุบ เพราะว่าน้ำให้อัตราการเย็นตัวที่ค่อนข้างต่ำในตอนแรก แต่อัตราการเย็นตัวจะสูงขึ้นมากในช่วงอุณหภูมิ 200-400 ^{0}C อันเป็นคุณสมบัติที่ไม่ดี เพราะว่าเป็นช่วงที่ออสเตนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซท์ จะทำให้เกิดความเครียดมากโดยเฉพาะเหล็กที่มีเปอร์เซ็นคาร์บอนสูง

2.3.2 น้ำเกลือ (Brine)

เป็นสารละลายที่มีเกลือละลายอยู่ในน้ำ ที่มีความเข้มข้นต่างๆ กันแต่ที่นิยมใช้กันประมาณ 10% น้ำเกลือมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนที่ดีมาก มีอัตราการเย็นตัวประมาณ 2,300 ^{0}C ต่อวินาที ช่วงที่ให้อัตราการเย็นตัวสูงสุดคือ 400-600 ^{0}C ซึ่งไม่อยู่ในช่วงที่ออสเตนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซท์ ดังนั้นความเครียดภายในจึงมีน้อยลง เกิดการบิดงอน้อยกว่าการชุบด้วยน้ำ ข้อเสียที่พบบ่อยๆ คือ น้ำเกลือจะทำปฏิกิริยากับถังชุบ และอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดการผุกร่อนอย่างรุนแรง

2.3.3 น้ำมัน (Oil)

เป็นสารชุบที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำประมาณ 200 ^{0}C ต่อวินาที ซึ่งไม่สูงพอสำหรับการชุบเพื่อให้ได้มาร์เทนไซท์ โดยเฉพาะเหล็กผสมต่ำหรืองานขนาดใหญ่ เหมาะกับงานที่เหล็กมีส่วนผสมสูงที่ไม่ต้องการความแข็งมาก น้ำมันมีข้อดีตรงที่ให้อัตราการเย็นตัวที่สม่ำเสมอ ไม่เกิดความเครียดกับชิ้นงานมาก แต่ถ้าต้องการเพิ่มอัตราการเย็นตัวให้น้ำมันดีขึ้น ก่อนการชุบควรอุ่นน้ำมันให้มีความร้อนประมาณ 50-80 ^{0}C จะทำให้น้ำมันมีความใสขึ้น

2.3.4 อากาศ (Air)

ส่วนมากใช้กับงานที่เป็นเหล็กที่มีส่วนผสมสูง หรือเหล็กที่มีส่วนผสมต่ำแต่มีขนาดเล็กและบาง มีข้อดีตรงที่ขนาดของชิ้นงานคงที่ แต่มักเกิดสนิมได้ง่าย อันเนื่องมาจากการรวมตัวกันของออกซิเจน

2.4 ความแข็ง (Hardness)

การวัดหาความแข็งเป็นการทดสอบที่ง่าย และผู้ทดสอบไม่ต้องมีความชำนาญมากนัก เพราะเครื่องที่ใช้ทดสอบความแข็งจะช่วยได้มากและจะทราบผลได้อย่างรวดเร็ว

การวัดค่าความแข็งมีหลายวิธี ได้แก่ เครื่องทดสอบแบบบริเนลล์ (Brinell tester), แบบร็อกเวลล์ (Rockwell), แบบวิกเกอร์ (Vicker) และแบบชอร์ (Shore) แต่ในที่นี้จะขอกล่าวโดยละเอียดเฉพาะเครื่องทดสอบแบบบริเนลล์

2.4.1 ชนิดของการทดสอบความแข็ง

ชนิดของการทดสอบความแข็งจะมีความหมายในทางวิศวกรรมคือ เป็นความแข็งของวัสดุต่างๆ ที่จะนำมาวัดหาความแข็งได้โดยความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือความต้านทานต่อการขีดข่วน ความต้านทานต่อการเกิดการเสียดสี

หลักในการปฏิบัติ เราสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. ชนิดที่ใช้น้ำหนักกดลงคงที่และใช้หัวกด (indenter) เป็นตัวกดเพื่อหาความแข็ง ได้แก่ แบบบริเนลล์, แบบร็อกเวลล์, และแบบวิกเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีการวัดเพื่อหารอยบุ๋ม หาความลึกบนผิวหน้าของชิ้นงาน

2. ชนิดที่ใช้น้ำหนักกดลงที่ไม่คงที่ เช่น เครื่องทดสอบความแข็งแบบมาร์เทนส์ (Martens haardness)

3. ชนิดที่ใช้แรงเคลื่อนที่โดยใช้แรงกระแทกชิ้นงานทดสอบ เช่นแบบชอร์

3.1 การทดสอบโดยการใช้ลูกตุ้มแกว่ง เมื่อไปกระทบชิ้นงานให้แตกหักแล้วสะท้อนกลับมา และวัดเป็นมุม (องศา) ได้แก่ การทดสอบแบบเจอโรสโคป (Juro scope-hardness), แบบชาร์ปี และแบบไอซอต

3.2 ชนิดที่ใช้วิธีขีดข่วนลงบนชิ้นงานคือ แบบสแครตช์ (Scratch hardness) แบบมาร์เทนส์สแครตช์ (Martens Scratch hardness)

2.4.2 การทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์

เมื่อปี พ.ศ. 2443 เจ. เอ. บริเนลล์ (J.A. Brinell) ได้กำหนดวิธีการทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ขึ้น และเป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

2.4.2.1 หลักการหาค่าความแข็ง และการวัดความแข็งแบบบริเนลล์

การหาค่าความแข็งแบบบริเนลล์โดยการคำนวณ จะใช้สูตรดังต่อไปนี้

$$HB = \frac{\text{น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ (kg)}}{\text{พื้นที่ผิวหน้ารอยบุ๋ม}}$$

$$= \frac{P}{(\pi D/2)[D - (D^2 - d^2)}$$

$$= \frac{2P}{} \qquad (2.1)$$

$$\overline{\P D\,[D-\ (D^2\ -d^2)}$$

กำหนดให้ ¶ = 22/7 (หรือ 3.1416)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm)

P = น้ำหนักกดที่กระทำต่อวัตถุ (kg)

d = ความโตของรอยบุ๋ม (mm)

ในการคำนวณค่าความแข็งแบบบริเนลล์ ถ้าค่าที่ได้ออกมามีจุดทศนิยมให้ตัดจุดทศนิยมนั้นออก เช่น ค่าความแข็งบริเนลล์ 53.5 ให้เขียนเป็น ค่าความแข็งบริเนลล์ 53 เท่านั้น

และถ้าค่าความแข็งที่ได้ออกมามีจุดทศนิยมมากกว่า 2 ตัว ให้ตัดออก 1 ตัวคงไว้เพียง 1 ตัวเท่านั้น เช่น ได้ค่าความแข็ง 35.645 ให้ตอบเป็นค่าความแข็งแบบบริเนลล์ 35.6 เท่านั้น

2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวกดกับน้ำหนัก และความโตของ เส้นผ่านศูนย์กลางตัวกด ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหัวกดกับน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ (load) และความโตของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวกด

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด (mm)	น้ำหนักที่ใช้ (kg)	โลหะที่ใช้	สัญลักษณ์
5	750	วัสดุทดสอบแข็งมาก	(5/750)
10	500	อลูมิเนียม แมกนีเซียม	(10/500)
10	1000	โลหะผสมทองแดงผสม	(10/1000)
10	3000	เหล็กกล้าที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม	(10/3000)

2.4.4 ข้อควรระวังในการทดสอบ

1. ผิวหน้าของชิ้นงานทดสอบต้องเรียบสม่ำเสมอ

2. หลังจากที่กดชิ้นงานให้เป็นรอยบุ๋มแล้ว เวลาที่จะวัดความโตของรอยบุ๋มจะต้องใช้กล้องขยายส่องดู ด้านในของกล้องจะมีสเกล เอาสเกลด้านใดด้านหนึ่งให้อยู่ที่ 0 แล้วทำการวัดหาค่าความโตทั้งทางด้านแนวนอนและแนวตั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

3. ความหนาของชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบ ต้องมีพื้นที่มากกว่าความลึกรอยกดประมาณ 10 เท่า

4. พื้นที่ความกว้างและความยาวของชิ้นงานทดสอบจะต้องโตและยาวประมาณ 2 เท่าของความโตของหัวกด

5. เมื่อทำการกดหาความแข็งเป็นรอยบุ๋มแล้วและต้องการทดสอบอีกครั้งใกล้ๆ จุดเดิม ต้องให้ห่างกว่าจุดแรงมากกว่า 4 เท่า ของความโตหัวกด และต้องห่างจากจุดแรกมากกว่า 2.5 เท่าของความโตหัวกด

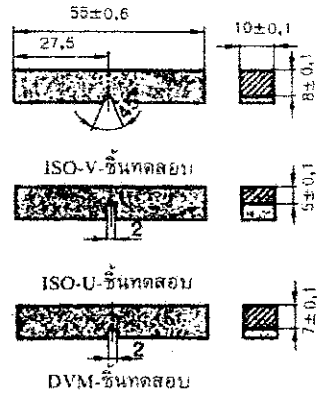
2.5 ความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

ค่าความเหนียว (toughness) ของวัสดุสามารถหาได้จากการทดสอบแรงกระแทก และการทดสอบแรงกระแทกนี้ เป็นการทดสอบแบบ Dynamic Test ซึ่งทดสอบโดยการปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักตกลงมากระทบเหล็กตัวอย่างที่ทดสอบจนเกิดการบิดงอเสียหาย การปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักตกลงมาเองจะก่อให้เกิดแรงกระทบซึ่งสามารถคำนวณเป็นพลังงานออกมาได้

ค่าพลังงานของการกระทบจะทำให้เหล็กตัวอย่างเสียหายจะมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานที่ได้จากลูกตุ้มก่อนการกระทบและหลังการกระทบ และค่าพลังงานนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วของการแกว่งของลูกตุ้ม

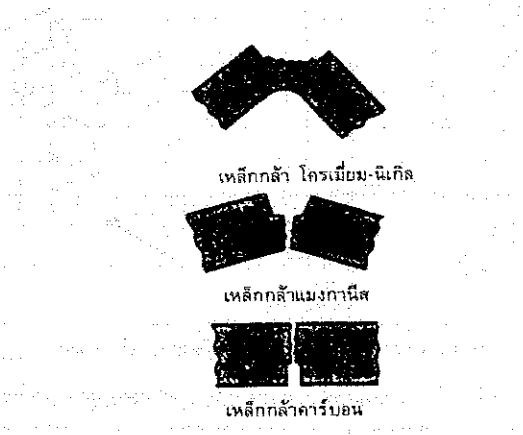
2.5.1 การทดสอบด้วยการตีหักแบบชาร์ปี้ (Charpy Impact Test) ตาม DIN 50115

เป็นการทดสอบเพื่อต้องการทราบว่าเหล็กกล้า เหล็กกล้าหล่อ มีความเหนียวและการเปลี่ยนรูป โดยใช้หัวค้อนตามรูปที่ 2.1 ปล่อยลงมาให้กระแทกกับชิ้นงานทดสอบ (specimen) ที่มีขนาดมาตรฐานต่างกันด้วยความเร็วหัวค้อนประมาณ 5-5.5 m/s เครื่องทดสอบนี้มีขนาดมาตรฐานตั้งแต่ 50-300 J สำหรับชิ้นทดสอบขนาดเล็กจะใช้กับเครื่องทดสอบขนาด 7.5-50 J โดยใช้ความเร็วหัวค้อน 3.6-4 m/s



รูปที่ 2.1 ลักษณะรูปร่างของชิ้นงานทดสอบ

(ที่มา :งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม ,มานพ, 2537)



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างประเภทของรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบเหล็กกล้าชนิดต่างๆ

(ที่มา :งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม ,มานพ, 2537)

2.5.1.1 การจะประเมินค่าหรือเปรียบเทียบค่าจากการทดสอบ จะต้องมีข้อมูลดังต่อไปนี้

ก) งานที่ใช้ในการตี

ข) ลักษณะรูปร่างของชิ้นงานทดสอบ

ค) อุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ (กรณีที่ไม่ได้บอกมาให้ทดสอบที่ 20 ^{0}C ± 2 ^{0}C)

ง) ทิศทางการตีชิ้นงานทดสอบที่ถูกรีดตามแนวขวางหรือตามแนวยาว

จ) งานทั้งหมดที่หัวค้อนใช้ทั้งหมดในการทดสอบ

ความแตกต่างระหว่างวัสดุที่เหนียว คือ เหล็กล้าโครเมียม-นิกเกิล กับวัสดุที่เปราะ คือ เหล็กกล้าคาร์บอน จะเห็นได้ตามรูปตัวอย่างของรอยแตกหักของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งการทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นการทดสอบแบบไดนามิกส์

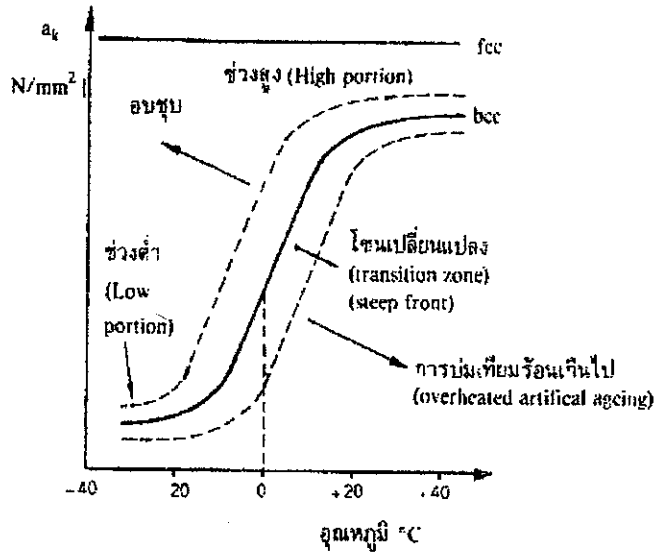
2.5.1.2 องค์ประกอบที่มีผลต่อแรงกระแทก คือ

ก) รอยบาก (notch) รูปตัว V จะแตกหักได้ง่ายกว่ารอยบากรูปตัว U

ข) ถ้าอุณหภูมิยิ่งของวัสดุยิ่งต่ำจุเกิดการแตกหักแบบเปราะได้ง่าย

ในการทดสอบแบบตีกระแทกนี้กับการหาความเหนียวของเหล็กกล้า เหล็กเหนียวหล่อ การบ่ม (ageing) ความเปราะจากความร้อน ความเปราะจากความเย็น และการตรวจสอบวัสดุที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

ดังนั้น จึงมีการทดสอบชิ้นงานทดสอบหลายชิ้นที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ตามรูปที่ 2.3 แสดงความแตกต่างกันของวัสดุเหล็ก ระหว่าง face centered cubic (fcc) และ body centered cubic (bcc)



รูปที่ 2.3 แผนภาพความต้านแรงกระแทก

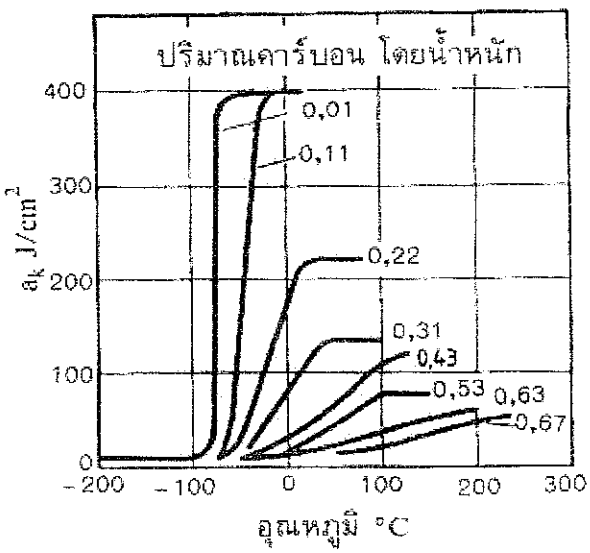
(ที่มา :โลหะวิทยา ,มนัส, 2543)

วัสดุโครงสร้าง bcc เป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (homogeneous) จะมีค่าคงที่ตลอด (ระหว่าง -40 ^{0}C - +40 ^{0}C) และคงความเหนียว ซึ่งได้แก่วัสดุเหล็กกล้าออสเตนไนต์ นิกเกิล ทองแดง อะลูมิเนียม

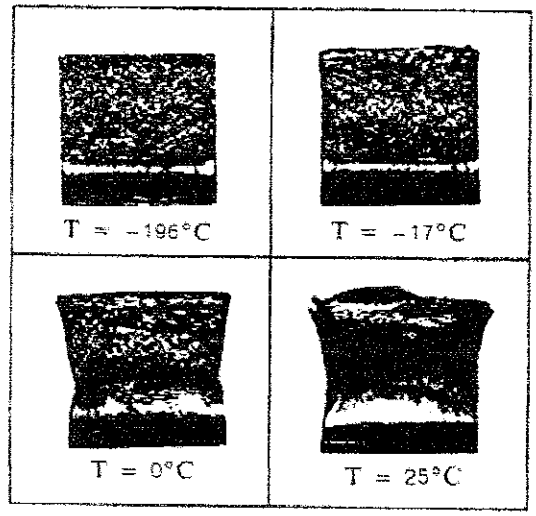
วัสดุโครงสร้าง bcc เช่น เหล็กกล้าไม่เจือหรือเจือต่ำทุกชนิด จะมีค่าความเหนียวดีที่อุณหภูมิสูง (high portion) แต่จะเปราะ (ค่าความเหนียวต่ำ) ที่อุณหภูมิต่ำ ค่าความเหนียวที่อยู่ระหว่าโซนของการเปลี่ยนแปลง (transition zone) (ประมาณ –10 ^{0}C - +10) ค่าความเหนียวจะไม่คงที่ (เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน ค่าความเหนียวเปลี่ยน) วัสดุที่มีเส้นโค้งในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุซึ่งได้แก่ เหล็กกล้าเฟอร์ไรต์

วัสดุที่มีเกร็นละเอียด จะมีความเหนียวที่ช่วงต่ำ (low portion) มากกว่าวัสดุที่มีเกร็นหยาบ

ความเหนียว ความเปราะของวัสดุสามารถดูได้จากรูปร่างรอยแตกดังต่อไปนี้ (พิจารณารูปที่ 2.5 ประกอบ)



รูปที่ 2.4 เส้นโค้ง a_k-T ของเหล็กกล้าไม่เจือ
(ที่มา: วิศวกรรมการอบชุบเหล็ก,มนัส , 2537)



รูปที่ 2.5 รอยแตกจากการตีกระแทกที่อุณหภูมิต่างกัน วัสดุ St 37

(ที่มา :งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม ,มานพ, 2537)

ในการทำให้ชิ้นงานทดสอบมีอุณหภูมิต่างๆ ในการทดสอบจึงต้องใช้วิธีการต่างๆ เข้าช่วยดังต่อไปนี้ สำหรับ

-184 ^{0}C ใช้อากาศเหลว

- 72 ^{0}C ใช้ส่วนประสมความเย็นของกรดคาร์บอนิกรูปหิมะ + แอลกอฮอล์

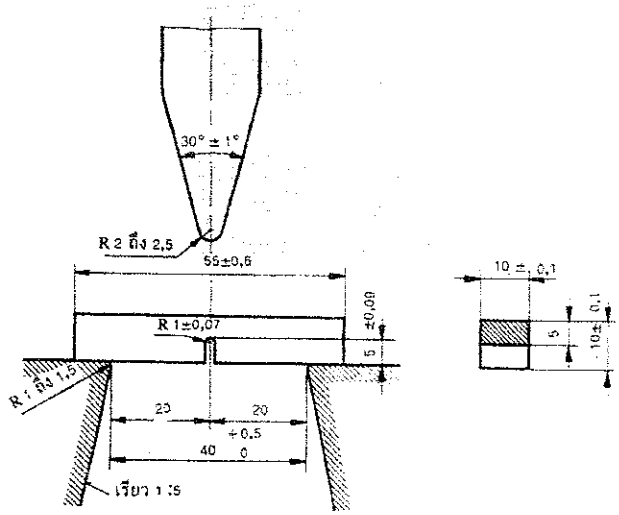
- 21 ^{0}C ใช่ส่วนประสมความเย็น เกลือแกง + น้ำแข็ง

- 0 ^{0}C น้ำแข็ง

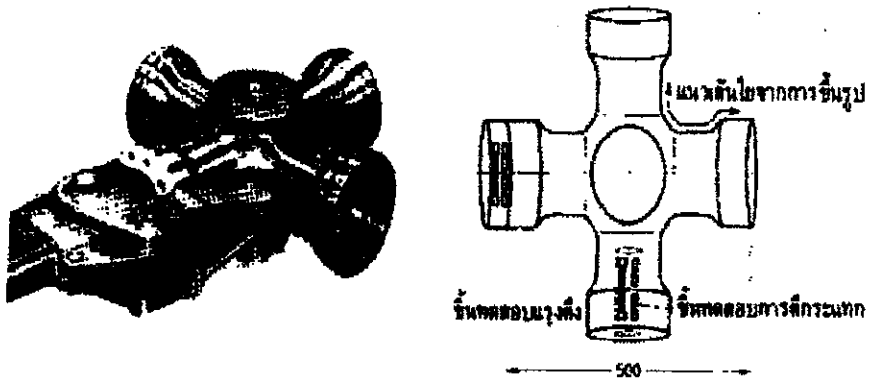
- 20 ^{0}C อุณหภูมิห้องปรับอากาศ

- 100 ^{0}C น้ำเดือด

- 200 ^{0}C อ่างเกลือ



รูปที่ 2.7 ขนาดมาตรฐานในการทดสอบชิ้นงานทดสอบแบบชาร์ปี้ ตาม iso 83-1976(E)
(ที่มา :งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม ,มานพ, 2537)



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการนำชิ้นงานทดสอบด้วยการกระแทก และแรงดึงจากหัวโรเตอร์ เฮลิคอปเตอร์
(BO 105)
(ที่มา :งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม ,มานพ, 2537)

2.5.1.3 การกำหนดสัญลักษณ์ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย

เนื่องจากพลังงานที่ใช้ตีมีขนาดต่างกัน ชิ้นงานทดสอบมีลักษณะรอยบากและขนาดต่างกัน ดังนั้น ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย จึงควรใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีลักษณะรอยบากเป็นตัว U ลึก 5mm ขนาด 10 x 10 x 55 mm แต่ถ้าความลึกของรอยบากรูปตัว U เป็นขนาดอื่น ก็เขียนสัญลักษณ์ได้ดังนี้ เช่น

KCU 15/3 แสดงถึงการใช้พลังงานในการกระแทก 15 kgm และใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีรอยบากลึก 3 mm

KCU 30/3 แสดงถึงการใช้พลังงานในการกระแทกตามปกติคือ 30 kgm และใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีรอยบากลึก 3 mm

2.5.1.4 วิธีการทดสอบ

ก) ประกอบเครื่องทดสอบเพื่อทำการทดสอบแบบชาร์ปี้

ข) ตรวจสอบขนาดของชิ้นงานทดสอบและวัดพื้นที่หน้าตัดด้วย

ค) ยกค้อนตีขึ้นเล็กน้อยเพื่อที่จะวางชิ้นงานทดสอบให้ตั้งฉากกับฐานรองรับ โดยให้รอยบากอยู่ตรงที่จุดกึ่งกลางระหว่างฐานรองรับ และอยู่ตรงกันข้ามกับค้อนที่ตี

ง) ยกค้อนขึ้นจนกระทั่งเข็ม main pointer อยู่ตรงขีดตำแหน่งตี ซึ่งค้อนจะอยู่สูงโดยทำมุม 160 $^{\circ}$C25' 22"

จ) ตั้งเข็ม idle pointer ให้อยู่ตรงขีดตำแหน่งตีด้วย

ฉ) ดึงล็อกปล่อยค้อนลงตี

ช) เบรคค้อนที่ตีซึ่งแกว่งเลยไปทางด้านหลัง

ซ) บันทึกอุณหภูมิทดสอบขณะนั้นด้วย

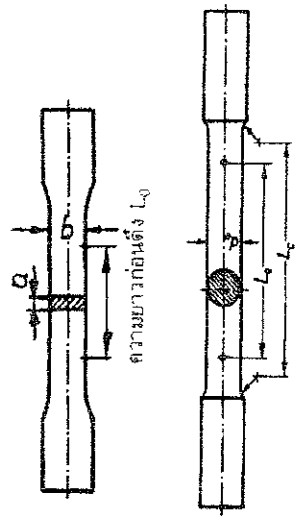
ฌ) ถ้าชิ้นทดสอบไม่หักขาดออกจากกัน ค่าของการกระแทกจะไม่ถูกต้อง ดังนั้นจึงควรบันทึกไว้ว่า ชิ้นงานทดสอบไม่หักขาดออกจากกันด้วยค่ากระแทกเท่าใด

2.6 การทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile test)

การทดสอบความต้านแรงดึง (Tensile test) ซึ่งมีความสำคัญที่สุดในการให้ข้อมูลเกี่ยวกับวัสดุเหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าชนิดเดียวกันว่าสามารถรับภาระได้สูงกว่าแท่งเหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าได้เท่าไร ในการหาความเค้นจึงจำเป็นต้องมีแท่งทดสอบ (specimen) ที่มีสัดส่วนที่มาตรฐานจะมีความยาวก่อนการดึง L_0 ที่มีขนาดมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบ (d_0) เอง 5ถึง 10 เท่า และความยาวที่ใช้ทดสอบ $L_c = L_0 + d_0$ ชิ้นทดสอบที่มีสัดส่วนที่เท่ากันจะมาเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบได้ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมก็ได้

จุดประสงค์การทดสอบด้วยแรงดึง

- เพื่อหาความต้านทานแรงดึง (Tensile test)
- เพื่อหาความเค้นคราก (yield stress)
- เพื่อหาขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elastic limit)
- เพื่อหาความยืด (elongation)



รูปที่ 2.9 ชิ้นทดสอบความต้านแรงดึง

(ที่มา :งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม ,มานพ, 2537)

2.6.1 กฎของฮุก (Hook's law)

ค่าความต้านแรงดึงจะเป็นสัดส่วนกับความเครียดจะได้

$$\frac{\text{ความต้านแรงดึง}}{\text{ความเครียด}} = \text{ค่าคงที่}$$

ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) เมื่อความต้านแรงดึงอยู่ ณ จุดใดจะใช้สูตร ความต้านแรงดึง (N/mm^2)

$$\sigma = F/S_o \qquad (2.2)$$

$$A = (L - L_o) \times 100 / L_o \qquad (2.3)$$

$$E = (\sigma \times 100)/\varepsilon \qquad (2.4)$$

เมื่อ F = แรงดึง

S_0 = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง

L_0 = ความยาวก่อนดึง

L = ความยาวหลังดึง

A = ความยืด...%

ε = ระยะยืด %

E = โมดูลัสยืดหยุ่น (N/mm^2)

2.6.2 การหาค่าอัตราการยืดตัว (ε) 0.2 %

อัตราการยืดตัว (ε) 0.2 % หมายถึง ความเค้นที่ทำให้เกิดการยืดตัวของชิ้นทดสอบมีค่า 0.2 % (เมื่อลดแรงดึงลงเหลือศูนย์) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

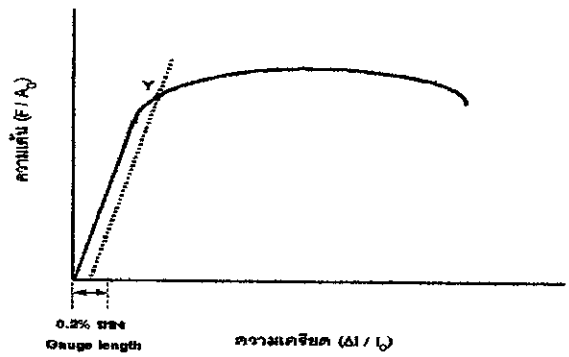
$$R_{p0.2} = F_{0.2} / S_0 \qquad (2.5)$$

เมื่อ $R_{p0.2}$ = ค่าความเค้นที่ทำให้เกิดอัตรายืดตัว 0.2 % (N/mm^2)

$F_{0.2}$ = แรงที่ใช้ดึงให้ชิ้นทดสอบยืดตัว 0.2 % (N) (เมื่อลดแรงลงหมด)

S_0 = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง (mm^2)

ในการที่จะใช้ดึงให้ได้ค่า $R_{p0.2}$ เพื่อให้เกิดอัตราการยืดตัว (ε) 0.2 % พอดีเท่านั้น จะต้องใช้เครื่องมือวัดละเอียด จะวัดค่าอัตราการยืดตัวได้ถึง 0.05% ในการดึงชิ้นทดสอบดังรูป ด้วยการแรงดึงจากจุด A ถึงค่า $F_{0.2}$ ถึงจุด B ด้วยความเร็วไม่เกิน 10 N/mm^2 ในแต่ละวินาที ในขณะนี้ชิ้นทดสอบจะมีค่าอัตราการยืดตัว = ระยะ AD)



รูปที่ 2.10 เส้นโค้งของแรงดึงอัตราการยืดตัวในช่วง 0.2

เมื่อลดแรงดึงลงเหลือศูนย์(สังเกตเส้นลดแรงดึงลูกศรลงเอียงซ้าย)ชิ้นทดสอบจะหดตัวระยะจาก ADมาเหลือระยะ ACที่มีค่าอัตรายืดตัว = 0.2% พอดี

ค่า $R_{p0.2}$ จะมีค่าเท่ากับความเค้นจุดคราก(R_e)ในการหาค่า $R_{p0.2}$ ก็เพื่อต้องการทราบค่าความเค้นจุดครากของวัสดุที่ไม่มีความเค้นจุดคราก ให้เห็นอย่างเด่นชัด(เหมือนเหล็กกล้าละมุน St 34)

ค่า R_e หรือ $R_{p0.2}$ นี้ จะนำมาใช้เป็นข้อมูลในการหาค่าความเค้นอนุญาตได้ดังนี้

$$\sigma_{all} = R_{p0.2}/v \text{ หรือ } \sigma_{all} = R_e/v \qquad (2.6)$$

เมื่อ σ_{all} = ความเค้นอนุญาต (allowance stress)

v = ค่าความปลอดภัย (safety factor)

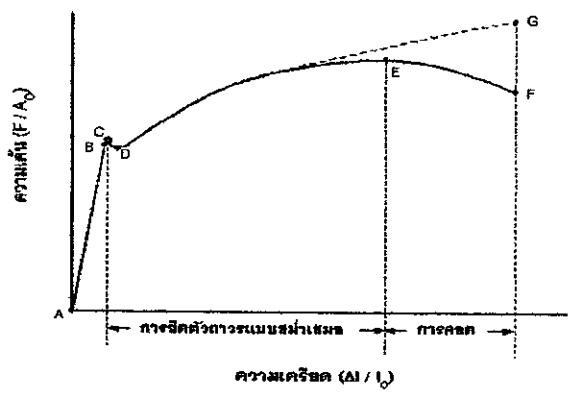
ค่าการลดทอนพื้นที่ชิ้นส่วนที่ถูกดึงจนขาด จะมีการคิดหาเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่บริเวณรอยขาด ต่อพื้นที่เดิมก่อนการดึง

$$Z = (S_0 - S_1)\,x100/S_0 \qquad (2.7)$$

เมื่อ Z = การลดทอนพื้นที่หลังการขาด (%)

S_0 = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง (mm^2)

S_1 = พื้นที่หน้าตัดหลังดึง (mm^2)



รูปที่ 2.11 แผนภาพความต้านแรงดึง – ความยืด

2.6.3 ช่วงต่างๆ ของกราฟความเค้น-ความเครียดที่น่าสนใจได้แก่

ช่วง AB เป็นช่วงที่วัสดุเริ่มยืดตัว โดยที่ระยะยืดตัวจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่มาดึงเป็นแนวเส้นตรง เราเรียกช่วงนี้ของกราฟว่า Proportional limit หรือ Limit of Proportionality โดยความชันของเส้นตรงดังกล่าวจะเรียกว่า Young's Modulus of Elasticityเมื่อวัสดุยืดตัวอีกเล็กน้อยจะถึงจุด C ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มที่จะมีการแปรรูปแบบถาวร (Plastic deformation) โดยวัสดุที่ได้รับแรงดึงในช่วง AC เมื่อทำการหยุดดึงชิ้นงานจะหดกลับไปยังความยาวเริ่มแรกของวัสดุนั้น เราเรียกการแปรรูปในช่วง AC ว่า Elastic deformation ในทางปฏิบัติ จุด B และ C จะอยู่ใกล้กันมากจนสามารถถือได้ว่าเป็นจุดเดียวกัน สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อทำการแปรรูปต่อจากจุด C ความเค้นจะลดลง และคงที่โดยวัสดุสามารถยืดตัวออกไปได้เองโดยไม่ต้องเพิ่มความเค้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เราเรียกค่าความเค้นที่จุด D ว่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) เมื่อดึงวัสดุต่อจากจุด D ไปเรื่อย ค่าความเค้นจะค่อยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะยืดเพิ่มขึ้นจนถึงจุด E ซึ่งเป็นจุดที่ความเค้นสูงสุดของกราฟที่เป็นเส้นเต็ม เราเรียกค่าความเค้นสูงสุดนี้ว่า ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ซึ่งถ้าวัสดุถูกดึงออกจากจุด D พื้นที่หน้าตัดบางส่วนของชิ้นงานจะเริ่มเกิดการคอด (Non-uniform deformation) และทำให้รับแรงได้น้อยลงอย่างมาก เมื่อดึงวัสดุต่อจนถึงจุด F วัสดุจะขาดในที่สุด ซึ่งเราสามารถหาค่าความยาวที่วัสดุยืดตัวออกโดยการนำเอาชิ้นงานที่ขาดมาต่อกัน แล้วหาความยาวของวัสดุหลังการดึง (Initial gauge length) ลบด้วยความยาวของวัสดุก่อนดึง (Initial gauge length) และทำการคำนวณหาค่าความยืดตัวร้อยละ (Percentage elongation) ได้ (ความยืดร้อยละ (%Elongation) = (Gauge length หลังดึง- Gauge length ก่อนดึง) X 100)

2.7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope)

การศึกษาโครงสร้างจุลภาค (Microscope) โดยการทำชิ้นงานทดสอบไปขัดกับกระดาษทรายและสารขัดละเอียดจนให้ผิวเป็นมัน จากนั้นจะมีการกัดด้วยสารเคมีทำให้เกิดโครงสร้างที่ขอบเม็ดเกร็นขึ้น หรือกัดให้ผิวของแต่ละผลึกให้สามารถมองเห็นด้วยกล่องโดยการส่องแสงไฟฟ้าไปกระทบผิวชิ้นงานทดสอบ และสะท้อนออกมาแตกต่างกัน การมองตรวจสอบนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับ โครงสร้างของเม็ดเกร็น เช่น เกร็นหยาบ หรือละเอียด การเกิดระนาบคู่ รูปเข็ม กาแผ่กระจาย และการเรียงตัวของเม็ดเกร็น เป็นต้น

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

1. การเลือก และตัดชิ้นทดสอบ เป็นการเลือกชิ้นงานทดสอบที่เหมาะสม และตัดเตรียมตามจำนวนที่ต้องการ แต่ถ้าชิ้นงานทดสอบมีขนาดเล็กมากก็ควรหุ้มชิ้นงานทดสอบด้วยเรซินโดยที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบอยู่ภายนอกของเรซิน และขนาดของเรซินควรมีขนาดใกล้เคียงกับชิ้นทดสอบ

2. การผิวชิ้นงานทดสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 180 240 320 400 600 1,000 ตามลำดับ ควรขัดด้วยการวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบขัดด้วยมือ หรือใช้เครื่องขัดแบบจานหมุนแล้วจับชิ้นงานทดสอบด้วยมือ หรือขัดอัตโนมัติ ในขณะขัดนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรก ซึ่งได้แก่ ผงโลหะ และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไปควรขัดชิ้นงานทดสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้ถึงกระดาษแผ่นสุดท้าย

การขัดผิวชิ้นงานทดสอบควรใช้แรงพอประมาณไม่ควรออกแรงมากจนเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของชิ้นงานทดสอบเกิดความบกพร่องจนทำให้เกิดการตรวจสอบโครงสร้างเกิดการผิดพลาดได้

3. การขัดด้วยผงขัด (Polishing)

การขัดผิวในขั้นตอนนี้เป็นการขัดผิวมันของชิ้นงานทดสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอลูมินา (Alumina Oxide) และแมกนีเซียม(Magnesium Oxide) หรืออาจจะใช้กากเพชรขัดผิวของชิ้นงานทดสอบที่มีความแข็งสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05-0.3 ไมครอน

การขัดด้วยผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาดโดยขัดผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาด แล้วขัดผิวจนเป็นมัน

4. การกัดด้วยน้ำยา (Etching)

ชิ้นงานทดสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้นจะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยา จะเป็นน้ำยาอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้าเป็นเหล็กก็จะใช้กรดไนตริกร้อยละ 2-4 ผสมกับแอลกอฮอล์

TN
752
.T4
W764ว
2548

15 มิ.ย. 2549
4840502

สำนักหอสมุด

ตารางที่ 2.2 แสดงวิธีการกัดผิวงาน (ที่มา : กระบวนการผลิต , ชลิตต์ , 2544)

วิธีการ	คำบรรยาย
Immersion etching	จุ่มผิวงานที่จะตรวจสอบลงในน้ำยา
Drop etching	หยดน้ำยาลงบนผิวงาน(หงายผิวงานขึ้น)
Wash etching	ใช้น้ำยาเทลาดลงบนผิวงาน ใช้กับงานขนาดใหญ่ หรือน้ำยาที่เกิดเป็นแก๊สได้ง่าย
Alternative immersing etching	จุ่มงานลงในน้ำยา 2 ชนิดแรกโดยชนิดที่สองใช้ละลายที่เกิดจากน้ำยาชนิดแรก
Swab etching	ใช้ผ้า สำลีหรือแปรงขนสัตว์จุ่มน้ำยาแล้วทาบนผิวงานช่วยขจัดเยื้อที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา
Etch polishing	กรรมวิธีคล้ายกับการขัดมัน แต่ใช้น้ำยาแทนผงซักฟอกป้องกันไม่ให้เกิดเยื้อบนชิ้นงาน
Tempering-etching	เผางานในอากาศ และสังเกตดูสีที่ปรากฏขึ้นบนผิวงาน เพราะโครงสร้างแต่ละชนิดจะให้สีไม่เหมือนกัน
Warm-etching	ใช้น้ำยาอุณหภูมิสูง อาจทำคล้ายกับกรณี Tempering etching (แต่ใช้น้ำยา หรือสารตัวกลางต่างกัน) หรือใช้วิธีจุ่มลงในน้ำยาร้อน
Double multi-etching	ใช้น้ำยาสองชนิดขึ้นไปแล้วแต่ว่าต้องการตรวจสอบเฟสอะไร
Indentification etching	ใช้น้ำยาเฉพาะอย่าง ละกัดเฉพาะเฟสที่ต้องการตรวจสอบ
Eletrolytic (anodic) etching	กัดในอิเลคโตรไลท์ โดยใช้ชิ้นงานเป็นขั้วบวก
Potentiostanic etching	เป็นวิธี anodic etching โดยใช้ความต่างศักย์คงที่
Quantitative etching	เป็นวิธี anodic etching โดยการละลายขั้วบวก (งาน) ตามจำนวนที่ต้องการ เมื่อใช้กระแสความหนาแน่นของกระแสและเวลาตามกำหนด

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นทดสอบที่เป็นเหล็ก

(ที่มา : กระบวนการผลิต , ชลิตต์ , 2544)

น้ำยากัดผิวทดสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริกและไฮโดรคลอริก	กรดไนตริก 3 มิลลิลิตร ไฮโดรคลอริก 10มิลลิลิตร และเมทิลแอลกอฮอล์ 100มิลลิลิตร	เหล็กเครื่องมือ เหล็กกล้าคาร์บอน	จุ่มชิ้นทดสอบ นาน 10-30 วินาที
เฟอร์ริกคลอไรด์และกรดไนตริก	ผสมเฟอร์ริกคลอไรด์ในกรดไฮโดรคลอริกและใส่กรดไนตริกเล็กน้อย	เหล็กกล้าไร้สนิม	จุ่มแช่หรือเช็ดด้วยสำลี นาน 5-120 วินาที
ผสมกรดในเอทิลแอลกอฮอล์	เฟอร์ริกคลอไรด์ 2.5 มิลลิลิตร, กรดพิคริค 5 มิลลิลิตร , กรดไฮโดรคลอริก 2 มิลลิลิตร , เอทิลแอลกอฮอล์ 90 มิลลิลิตร	เหล็กหล่อ เหล็กกล้าคาร์บอนสูง	จุ่มแช่นาน ประมาณ 5-20 วินาที
ไนตริกและอะเซติก	ไนตริกแอซิด 30 มิลลิลิตร ผสมกรดน้ำส้ม อะเซติกซิด 20 มิลลิลิตร	เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีส่วนของนิกเกิลและโคบอลต์เป็นจำนวนมาก	เช็ดด้วยสำลีชุบกรด นาน 10-30 วินาที
โซเดียมเมตาบิส-ซัลไฟต์	โซเดียมเมตาบิสซัลไฟต์ 15 มิลลิลิตร ผสมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร	เหล็กเครื่องมือรอบสูง	กัดด้วยกรดในเวลา 10-60 วินาที
ไนตัล	ไนตริกแอซิด 1 มิลลิลิตร ผสมเอทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กชุบแข็งผิวและเหล็กทั่วไป	กัดด้วยกรดนาน 10-15 วินาที
กรดไฮโดรคลอริก	กรดไฮโดรคลอริก 50 มิลลิลิตร ผสมเอทิลแอลกอฮอล์ 50 มิลลิลิตร	เหล็กกล้าที่ผสมของโครเมียมและนิกเกิล	กัดด้วยกรดนาน 10-30 วินาที

จุลโครงสร้างของโลหะ (Micro structure)

โลหะโดยทั่วไปหลังการเย็นตัวจะประกอบด้วยเกรน หรือผลึกจำนวนมากซึ่งเกิดจากเกรนของโลหะจำนวนมากจะเกิดขณะมีการเปลี่ยนแปลงจากการหลอมละลายมาเป็นโลหะแข็ง การเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิแข็งตัว โดยการให้กำเนิดนิวเคลียส อะตอมที่ถ่ายเทเพลังงานอิสระไปสู่บรรยากาศรอบ ๆ ทำให้การเคลื่อนที่น้อยลง เมื่อมารวมกันเป็นจุดของโลหะเล็ก ๆ ที่เรียกว่านิวเคลียส เมื่ออุณหภูมิลดลงนิวเคลียสมีการขยายตัวกลายเป็นผลึก ซึ่งเรียกว่า เกรน การขยายตัวจะสิ้นสุดเมื่อปริมาณของโลหะหลอมเหลวหมดไป หรือไม่ก็เกรนที่ขยายตัว ไปชนกับเกรนข้างเคียง เราเรียกว่า โครงสร้างนี้ว่า Dendrite

ขนาดของผลึก หรือเกรนที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิภาคสัมพันธ์กับการเย็นตัวของโลหะหลอมเหลวโดยเฉพาะในช่วงที่เกิดการแข็งตัว จะพบว่าอัตราเย็นตัวมีอัตราสูงจะปรากฏนิวเคลียสเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และการขยายตัวของแต่ละเกรนจะมีอัตราต่ำ เพราะแต่ละเกรนจะแย่งอะตอมของโลหะให้มาจับรวมตัวกับนิวเคลียสซึ่งมีจำนวนมากทำให้ได้โลหะที่มีเกรนขนาดเล็กละเอียด

ในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราการเย็นตัวช้า ปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นจะน้อย การขยายตัวของนิวเคลียสจะมีมากทำให้ได้โลหะที่มีเกรนใหญ่

ขนาดความโตของเม็ดเกรนมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุโลหะ เช่นความแข็ง ความเค้นจุดรากตัว และความต้านแรงดึง ด้วยเหตุนี้ความรู้เกี่ยวกับขนาด และการกระจายของเม็ดเกรนจงสามารถบ่งบอกคุณสมบัติของวัสดุในทางปฏิบัติได้เป็นอย่างมาก

การประมาณของเม็ดเกรนทำได้โดยการตรวจสอบทางกล้องไมโครสโคป (microscopic examination) หรืออาจประมาณอย่างหยาบ ๆ โดยการทดสอบการหัก เฟอร์ไรท์จะแยกตัวจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเมื่อทำให้มีการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ขอบของเกรนเหล่านี้สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนโดยการขัด และการกัดผิวงาน เพราะการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ทำให้เกิดเฟอร์ไรท์ขั้นแรก ซึ่งจะทำให้หาขนาดของเกรนได้ ดังนั้นการเย็นตัวของโลหะมีผลต่อการหาขนาดของเกรนด้วย

2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

2.8.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว (One-way and nalysis of variance)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากหน่วยที่ทดลองที่ได้จากการทดลองโดยใช้เพียงปัจจัยเดียว แต่แยกเป็นหลายระดับหรือหลายชนิด ซึ่งระดับหรือชนิดของปัจจัยดังกล่าวจะเรียกว่า สิ่งทดลอง(Treatment)

ทั้งนี้มีข้อสมมุติเกี่ยวกับตัวแปรสุ่ม ε_{ij} ในแต่ละสิ่งทดลอง ดังนี้

- ε_{ij} มีการแจกแจงปกติ
- ค่าเฉลี่ยของ $\varepsilon_{ij} = E(\varepsilon_{ij})=0$
- ความแปรปรวนของ ε_{ij} มีค่าเท่ากันทุกสิ่งทดสอบ
- ε_{ij} เป็นอิสระต่อกัน

นั่นคือ กล่าวโดยสรุปเกี่ยวกับข้อสมมุติของตัวแปรสุ่ม ε_{ij} ได้ว่า ในแต่ละสิ่งการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ เป็นอิสระต่อกันโดยมีค่าเฉลี่ย 0 และความแปรปรวนที่ไม่ทราบค่า

ตารางที่ 2.4 แสดงการทดลองประเภทวิเคราะห์ปัจจัยเดียว (experiments with single factor)

Treatment	observations				total	averge
1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1n}	$y_{1.}$	
2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2n}	$y_{2.}$	
.						
.						
k	y_{k1}	y_{k2}	...	y_{kn}	$y_{k.}$	
					$y_{..}$	$y_{..}$

จากตารางที่ 2.4 เป็นการทดลอง 1 ปัจจัย ประกอบด้วย k treatments แต่ละ treatments
ประกอบด้วย n observations

y_{ij} = ค่าสังเกต (observations) จากวิธีปฏิบัติที่ i ตัวอย่างที่ j

$y_{i.}$ = ผลรวมของค่าสังเกต (observations) ทุกค่าในวิธีปฏิบัติที่ i

$y_{i.}$ = ค่าเฉลี่ยของค่าสังเกต (observations) ในวิธีปฏิบัติที่ i

$y_{..}$ = ผลรวมของค่าสังเกต (observations) ทั้งหมดในการทดลอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับหนึ่งปัจจัย

1. ตั้งสมมุติฐาน

$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = ... = \mu_k$

$H_1 = \mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่

2. ความแปรปรวนรวมจะเกิดมาจาก 2 แหล่ง

2.1 ความแปรปรวนที่เกิดวิธีปฏิบัติ (Treatment Sum of Squares : SS_{treat})

2.2 ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในกลุ่ม (Error Sum of Squares : SS_E)

ดังนั้น $SS_T = SS_{treat} + SS_E$ (2.8)

$SS_T = \Sigma\Sigma y_{ij}^2 - y^2../N$ (2.9)

$SS_{treat} = \Sigma\Sigma y_{ij}^2/n_i - y^2../N$ (2.10)

$SS_E = SS_T - SS_{treat}$ (2.11)

เมื่อ N คือ จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด และ n_i คือ จำนวนค่าสังเกตในวิธีปฏิบัติที่ i

3. ตาราง ANOVA

ตารางที่ 2.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว

แหล่งของความแปรปรวน(SOV)	ระดับแห่งความสำเร็จ(df)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (MS)	F
สิ่งที่ทดลอง	k-1	SS_{treat}	SS_{treat}/ k-1	MS_{treat}/MS_E
ความคลาดเคลื่อน	N–k	SS_E	SS_E / N–k	
รวม	N-1	SS_T		

$F > F\alpha_{,k-1,n-k}$ (ได้จากเปิดตารางสถิติ F ที่ระดับนัยสำคัญ α องศาเสรี k-1,N-k)

4. วิเคราะห์ผล

- ถ้า $F > F\alpha_{,k-1,n-k}$ ให้ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1
- ถ้า $F < F\alpha_{,k-1,n-k}$ ให้ยอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1

5. สรุปผลการทดสอบ

การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทาง (Two-way ANOVA)

เป็นการทดสอบโดยการพิจารณาเลือกปัจจัย 2 ปัจจัยพร้อมกัน จากหลายปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองมากที่สุด แล้วนำมาทการทดสอบที่วิธีการทดสอบที่แตกต่างกัน แล้วพิจารณาว่ามีผลกระทบหรือไม่

ตารางที่ 2.6 แสดงการทดลองการวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทาง

Factor A	Factor B				total
	1	2	.....	i	
1	y_{111} y_{112} ... y_{11n}	Y_{121} y_{122} ... y_{11n}	....	y_{1i1} y_{1i2} ... y_{1in}	$y_{1..}$
2	Y_{211} y_{212} ... y_{21n}	Y_{221} y_{222} ... y_{22n}	....	Y_{2i1} y_{2i2} ... y_{2in}	$Y_{2..}$
..	..	..	..	..	..
k	Y_{k11} y_{k12}	Y_{k21} y_{k22}	.....	Y_{ki1} y_{ki2}	$Y_{k..}$
	$y_{.1.}$	$y_{.2.}$	.....	$y_{.i.}$	$y_{...}$

จากตารางเป็นการทดลอง 2 ปัจจัย คือ ปัจจัย A ซึ่งประกอบด้วย k treatments ; ปัจจัย B ซึ่งประกอบด้วย I treatments แต่ละ treatments มี observations และมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด N=kIn

y_{ijn} = ค่าสังเกตที่ n วิธีปฏิบัติที่ i ปัจจัย A จากวิธีปฏิบัติที่ j ปัจจัย B

$y_{i..}$ = ผลรวมของค่าสังเกต In ค่าในวิธีปฏิบัติที่ i ปัจจัย A

$y_{.j.}$ = ผลรวมของค่าสังเกต kn ค่าในวิธีปฏิบัติที่ j ปัจจัย B

$y_{ij.}$ = ผลรวมของค่าสังเกต n ค่าในวิธีปฏิบัติที่ i ปัจจัย A วิธีปฏิบัติที่ j ปัจจัย B

$y_{...}$ = ผลรวมของค่าสังเกตทุกค่า (N=kIn) ในการทดลอง

2.8.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน 2 ทาง

1. ตั้งสมมุติฐาน

H_0 : $(\beta)_{ij} = 0_k$

H_1 : $(\beta)_{ij} \neq 0_k$ อย่างน้อย 1 ค่า

2.ความแปรปรวนรวม (Total Sum of Squares : SS_T)

$$SS_T = SS_T + SS_B + SS_{AB} + SS_E$$

โดย $$SS_T = y^2_{ijn} - y^2../N$$

$$SS_A = \Sigma\Sigma y^2_{i..}/ln - y^2../N$$

$$SS_B = \Sigma\Sigma y^2_{.j.}/kn - y^2../N$$

$$SS_{subtotal} = \Sigma\Sigma y^2_{ij.}/n - y^2../N$$

$$SS_{AB} = SS_{subtotal} - SS_A - SS_B$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

3. นำค่า SS_A SS_B SS_{AB} SS_E SS_T จากข้อ 2. มาสร้างตาราง ANOVA

ตารางที่ 2.7 ตาราง ANOVA

Source	SS	df	MS	F_c
A	SS_A	k-1	SS_A /(k-1)	MS_A/MS_E *
B	SS_B	l-1	$SS_B/(l-1)$	MS_B/MS_E * *
Interarction AB	SS_{AB}	(k-1)/(l-1)	SS_{AB} /(k-1)(l-1)	MS_{AB}/MS_E ***
Error	SS_E	(kl)/(n-1)	$SS_E/(kl)(n-1)$	
Total	SS_T	N-1		

$F^*_{ตาราง} = F\alpha_{,k-1,(kl)(n-1)}$; $F^*_{ตาราง} = F\alpha_{,l-1,(kl)(n-1)}$; $F^*_{ตาราง} = F\alpha_{,(k-1),(l-1),(kl),(n-1)}$

4. วิเคราะห์ผลโดย

4.1 ถ้า $F^*_c > F\alpha_{,k-1,(kl)(n-1)}$ ให้ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 ปัจจัย A มีผลกระทบ

4.2 ถ้า $F^{**}_c > F\alpha_{,k-1,(kl)(n-1)}$ ให้ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 ปัจจัย B มีผลกระทบ

4.3 ถ้า $F^{***}_c > F\alpha_{,k-1,(kl)(n-1)}$ ให้ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 ปัจจัย AB มีผลกระทบ

5.สรุปผลทดสอบ

2.9 การถดถอยเชิงเส้นและสหพันธ์ (Linear Regression and Correlation)

2.9.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างง่ายมีอยู่ว่า ค่าของตัวแปรตามขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรทั้งสองชนิดนี้จะเป็นความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง

ดังนั้นสมการเส้นตรงที่เป็นตัวแทนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองจึงเป็น

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon \qquad (2.12)$$

เมื่อ α คือ ค่าคงที่เมื่อ x มีค่าเป็นศูนย์

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ของตัวแปรอิสระ x ; i =1, . . , n,

ε คือ ค่าความคาดเคลื่อน

x คือ ตัวแปรอิสระ

y คือ ตัวแปรตาม

ขั้นตอนการวิเคราะห์การทดทอยเชิงเส้นอย่างง่าย

ขั้นที่ 1 คำนวณ S_{XX} S_{YY} S_{XY}

$$S_{XX} = \Sigma_x^2 - (\Sigma X^2)/n$$

$$S_{YY} = \Sigma_y^2 - (\Sigma y^2)/n$$

$$S_{XY} = \Sigma_{xy} - (\Sigma X)(\Sigma y)/n$$

ขั้นที่ 2 คำนวณหา β_0 และ β_1

$$\beta_1 = S_{XY}/S_{XX}$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x}$$

ขั้นที่ 3 เขียนสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย

$$y = \beta_0 + \beta_1 x$$

ขั้นที่ 4 ทดสอบสมมุติฐาน

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

ค่าสถิติ t $$t = \frac{\beta_1}{\sigma / S_{xx}} \quad (2.13)$$

โดยที่ $$\sigma = \frac{S_{YY} - (\beta_1)(S_{XY})}{n-2} \quad (2.14)$$

ถ้า $t_{คำนวณ} > t_{\alpha/2,n-2}$ ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 แสดงว่า x และ y สัมพันธ์กัน

ขั้นที่ 5 ทดสอบสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (sample correlation coefficient ; r)

$$r = \frac{S_{XY}}{S_{XX} S_{YY}} \quad (2.15)$$

ถ้า r = 0 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กัน r < 0.30 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันต่ำ

0.50<r<0.80 = 0 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันปานกลาง (สามารถนำไปใช้งานได้)

r >0.8 แสดงว่ามีสัมพันธ์กันสูง (สมการนำไปใช้งานได้)

2.9.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรตาม 1 ตัว กับตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว ความสัมพันธ์ของตัวแปรตามจะอยู่ในรูปฟังก์ชันของตัวแปรอิสระ นั่นคือ

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, \ldots, X_k) \quad (2.16)$$

สมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x + \beta_3 x + \ldots + \beta_k x \quad (2.17)$$

การประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

$$Y = \begin{vmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ . \\ Y_n \end{vmatrix} \qquad X = \begin{vmatrix} X_{11} & X_{21} & X & \dots & X_{k1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \dots & X_{k2} \\ & & & & \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{kn} \end{vmatrix}_{Nx(k+1)}$$

$$\beta = \begin{vmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ . \\ \beta_k \end{vmatrix} \qquad \varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \\ \varepsilon_3 \end{vmatrix}_{nx1}$$

$$X'Y = \begin{vmatrix} \Sigma Y_i \\ \Sigma X_{1i} Y_i \\ \\ \Sigma X_{ki} Y_i \end{vmatrix} \qquad X = \begin{vmatrix} n & \Sigma X_{1i} & \Sigma X_{2i} & \Sigma X_{ki} \\ \Sigma X_{1i} & \Sigma X_{1ii} & \Sigma X_{1i} X_{2i} & \Sigma X_{ki} X_{1i} \\ \\ \Sigma X_{ki} & \Sigma X_{1i} X_{ki} & \Sigma X_{2i} X_{ki} & \Sigma X^2_{ki} \end{vmatrix}_{Nx(k+1)}$$

$$\beta = (X'X)^{-1} X'Y$$

ตารางที่ 2.8 การประมาณค่าความแปรปรวนของ β

Source	SS	df	MS	F
สมการถดถอย R	$\beta X'Y - nY^2$	k	SS_R/k	MSR/MSE
Error	$Y'Y - \beta X'Y$	n-k-1	SSE/n-k-1	
Total		n-1		

ความแปรปรวน $\sigma^2 = MSE = [Y'Y - \beta X'Y] / (n-k-1)$