

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 โครงการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อน ของเหล็กกล้าทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล AISI 4340

อุณหภูมิในการชุบแข็งและอบคืนตัว มีความสัมพันธ์ต่อ โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของเหล็กกล้าที่จะนำไปใช้งานอย่างไร

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกล จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหล็กกล้าที่ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในกลุ่มของเหล็กกล้าทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจะเป็นเหล็กที่ประกอบไปด้วยโลหะผสมชนิดอื่นๆ ที่นอกเหนือจากคาร์บอน ได้แก่ โครเมียม , นิกเกิล , แมงกานีส, โมลิบดีนัม , ซิลิกอน , วาเนเดียม ฯลฯ ซึ่งการรวมกันของโลหะผสมจะมีผลต่อเหล็กกล้าในด้านความเหนียว การทนต่อการเสียดสี สามารถชุบแข็งได้ง่าย มีความแข็งแรงสูง และมีความต้านทานต่อแรงกระแทก เป็นต้น

บทบาทของธาตุผสมที่มีผลกระทบต่อกระบวนการชุบแข็ง

1. ความแข็งแรงภายหลังการชุบแข็งจะเห็นว่าธาตุที่ผสมในเหล็กไม่มีบทบาทมากนักในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับมาร์เทนไซต์ ธาตุคาร์บอนจะให้ผลต่อความแข็งแรงของมาร์เทนไซต์เด่นชัดกว่าธาตุผสมอื่นๆ ทั้งนี้เพราะคาร์บอนจะก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของกลุ่มอะตอม (lattice deformation) ได้ดีกว่า ธาตุผสมที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้าเมื่อรวมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ ซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรง เฉพาะที่เกิดคาร์ไบด์ และไม่สลายตัวในขณะเผาที่อุณหภูมิสูง เมื่อกระจัดกระจายอยู่ในโครงสร้างของมาร์เทนไซต์จะมีบทบาททางด้านต้านทานต่อการเสียดสีในขณะใช้งาน (wear resistance) ทำให้การสึกหรอน้อยลง แต่คาร์ไบด์ที่ไม่สลายตัวนี้ จะไปมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็ง

2. ความสามารถในการชุบแข็ง (hardenability) ในการชุบแข็งของเหล็กขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญ คือ

2.1 เกรนของออสเทนไนต์ เหล็กจะมีความสามารถในการชุบแข็งสูงควรจะมีออสเทนไนต์เกรนโค เพราะบริเวณรอบเกรนของออสเทนไนต์ จะเป็นบริเวณที่ช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนต์ไปเป็นซีเมนต์ไทต์ และเฟอร์ไรต์ได้

2.2 คาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัว (non dissolved carbide) คาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวนี้จะกระจุกกระจายอยู่ในออสเทนไนต์ และพร้อมจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสให้กับการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนต์ไปเป็นซีเมนต์ไทต์และเฟอไรต์ในขณะชุบแข็ง โอกาสที่จะให้มาร์เทนไซต์น้อยลง ทำให้ความแข็งที่จะได้ภายหลังการชุบแข็งต่ำกว่าที่ควรจะได้

ความสม่ำเสมอของออสเทนไนต์มีความสำคัญต่อความสามารถในการชุบแข็งเหล็ก ซึ่งจะต้องถูกเผาให้ความร้อนจนได้โครงสร้างออสเทนไนต์อย่างสม่ำเสมอและ ถ้าออสเทนไนต์ขาดความสม่ำเสมอ ถ้าออสเทนไนต์ขาดความสม่ำเสมอ เป็นต้นว่า มีคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวจับตัวกันอยู่เป็นกลุ่มเป็นก้อน จะทำให้บริเวณใกล้เคียงมีปริมาณของธาตุผสมแตกต่างกันไปจากบริเวณอื่นๆ ยิ่งบริเวณที่มีผลึกของคาร์ไบด์ขนาดโตแล้ว จะทำให้การเคลื่อนที่ของอะตอมของธาตุผสมในเหล็กจะต้องเคลื่อนที่เป็นระยะทางไกล ซึ่งจะต้องใช้เวลามากขึ้น ดังนั้น ธาตุผสมในโครงสร้างออสเทนไนต์ไม่สม่ำเสมอจะเกิดขึ้นเมื่อคาร์ไบด์ละลายตัวไม่หมด ส่วนบริเวณใดไม่มีคาร์ไบด์ เกรนออสเทนไนต์จะขยายตัวได้เร็วกว่าบริเวณที่มีคาร์ไบด์ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกรนออสเทนไนต์ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้มาร์เทนไซต์ที่ได้ภายหลังการอบชุบไม่สม่ำเสมอด้วย

2.1.2 การออกแบบการทดลอง

2.1.2.1 ชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานทดสอบการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความร้อนของเหล็กกล้าทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล AISI 4340 ได้เลือกมาตรฐานในการทดสอบตามมาตรฐาน JIS ซึ่งจะประกอบไปด้วยจำนวนชิ้นงานทดสอบ ดังนี้

- 1.1 โครงสร้างจุลภาคก่อนการอบชุบ จำนวน 1 ชิ้น
- 1.2 โครงสร้างจุลภาคภายหลังการอบชุบ จำนวน 10 ชิ้น
- 1.3 ชิ้นงานทดสอบความแข็ง จำนวน 15 ชิ้น
- 1.4 ชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก จำนวน 25 ชิ้น

2.1.2.2 วิธีการอบชุบ

2.1 การอุ่นชิ้นงาน (pre-heating) เป็นการให้ความร้อนกับชิ้นงาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเครียดภายในแท่งเหล็กที่ผ่านกรรมวิธีการขึ้นรูปเย็นมา โดยในที่นี้อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 650 °C และใช้เวลาคงอุณหภูมิอยู่ในอุณหภูมินี้ประมาณ 30 วินาทีต่อความหนาชิ้นงาน 1 มม.

2.2 การชุบแข็ง ในการชุบแข็งได้กำหนดจำนวนชิ้นงานตัวอย่าง และอุณหภูมิในการอบชุบเอาไว้ โดยจะกำหนดอุณหภูมิ austenitizing ที่อุณหภูมิ 750 °C , 800 °C , 850 °C , 900 °C , 950 °C และอุณหภูมิ Tempering ที่อุณหภูมิ 560 °C เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคความแข็งและการรับแรงกระแทก จึงให้ความสำคัญกับอุณหภูมิการชุบแข็ง ซึ่งจะใช้น้ำมันเป็นสารชุบ การอบชุบจะทำการชุบที่อุณหภูมิ Austenitizing ในแต่ละอุณหภูมิเพื่อทำการทดสอบ ดังนี้

1. โครงสร้างจุลภาค 2 ชั้น
2. ทดสอบความแข็ง 3 ชั้น
3. ทดสอบแรงกระแทก 5 ชั้น

2.1.2.3 การจุ่มชุบ เป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องจากการชุบแข็ง โดยจะทำการจุ่มชิ้นงานลงในสารชุบ คือ น้ำมันที่อุณหภูมิ 100 °C

2.1.2.4 การอบคืนตัว (Tempering) ช่วงอุณหภูมิการอบคืนตัว คือ 560 °C ใช้เวลาในการคงอุณหภูมิในการอบ 2 ชั่วโมง รวมชิ้นงานที่ทำการอบชุบทั้ง 5 อุณหภูมิที่กล่าวไว้ข้างต้น จำนวนทั้งหมด 50 ชิ้น

2.2 เหล็ก AISI4140

2.2.1 คุณลักษณะของเหล็ก AISI4140

คุณลักษณะของเหล็ก AISI4140 เป็นเหล็กกล้าผสมที่มีถ่านคาร์บอนเป็นส่วนผสมในช่วงปานกลางเป็นเหล็กที่นิยมใช้ทั่วไปราคาถูกถ้าเปรียบเทียบกับคุณสมบัติที่มีความแข็งแรง

ความแข็งแรงในช่วง 54-59 HRC ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณส่วนประกอบของ%คาร์บอนความสามารถในการกลึง, ใส่ชิ้นรูปอยู่ในเกณฑ์ใช้ได้ ความสามารถในการตีขึ้นรูปดีมากที่อุณหภูมิประมาณ 880 - 1230 องศาเซลเซียส (°C) ข้อเสีย คือเมื่อทำการเชื่อมจะเกิดรอยแตกร้าว

2.2.2 ส่วนประกอบของเหล็ก AISI4140

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของเหล็ก AISI4140 [2]

ธาตุ	คาร์บอน	แมกนีเซียม	ฟอสฟอรัส	กำมะถัน	ซิลิกอน	โครเมียม	โมลิบดีนัม
%	3.8-0.43	0.75-1.00	0-0.035	0.04	0.30	0.8-1.1	0.15-0.25

2.2.3 การเพิ่มความแข็งแรงเหล็ก AISI4140

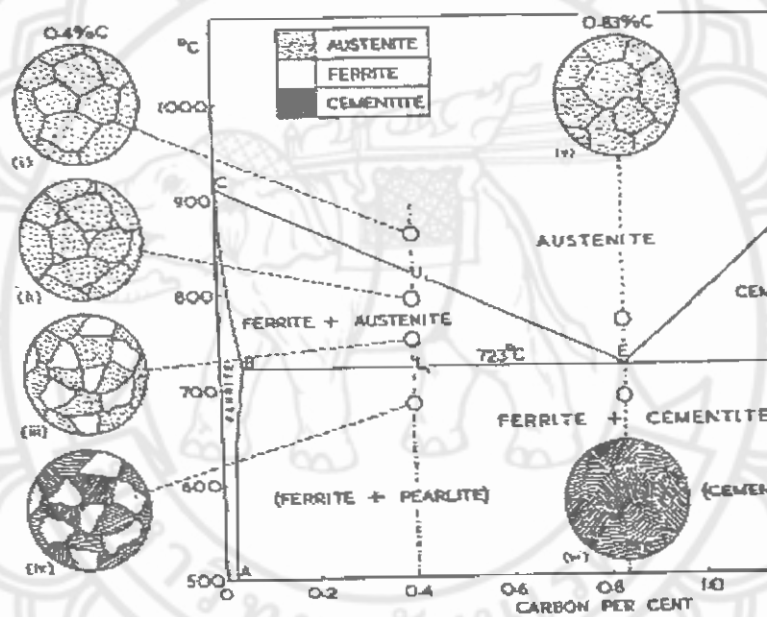
ควรให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงกว่า 850 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. Flame Hardening
2. Induction Hardening
3. Liquid Nitriding
4. Carbon Nitriding
5. Electron Beam Hardening

6. การชุบแข็ง ซึ่งสามารถใช้ น้ำ , น้ำเกลือและน้ำมันในการชุบ แต่ถ้าวัสดุมีขนาดเล็กกว่า 6.5 มิลลิเมตร ควรชุบน้ำมันเท่านั้นถ้าชุบน้ำเกลือหรือน้ำจะทำให้ชิ้นงานแตกร้าวได้

2.3 กระบวนการออสเทนไนท์ซิง (Austenitizing)

กระบวนการออสเทนไนท์ซิง คือ กระบวนการที่โลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน ถูกทำให้ร้อนขึ้นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิประมาณ 830°C หรือสูงกว่า และให้คงอยู่ ณ อุณหภูมินั้นเป็นระยะเวลาที่พอเหมาะ โครงสร้างของเหล็กกล้าจะเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟ % คาร์บอน [1]

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบ Austenitizing มีความสำคัญ คือ การใช้อุณหภูมิในการอบเผาสำหรับเหล็กแต่ละชนิดนั้นมีอุณหภูมิจำกัด เช่น จาก $810^{\circ}\text{C} - 840^{\circ}\text{C}$ ถ้าใช้อุณหภูมิและเวลานาน ผลเสียหายจะเกิดขึ้นกับเหล็กที่เผา นั่นคือ การเกิดเกรนขยาย (Grain Growth) หรือเกิดการไหม้คือ คาร์บอนถูกดูดซึม (Decarization) เมื่อเกิดสิ่งนี้ขึ้น จากนั้นจะเสียผลกล่าวคือ งานไม่แข็งแรงสม่ำเสมอมีบางจุดอ่อนและผิวเป็นสะเก็ดซึ่งสิ่งเหล่านี้มักจะเกิดขึ้นเสมอๆและเป็นปัญหาว่าเพราะเหตุใดงานอบชุบจึงไม่ได้ผลการป้องกัน สิ่งเหล่านี้จะทำได้โดยควบคุมอุณหภูมิอย่างถูกต้องเวลาในการเผาแ่งที่อุณหภูมิสูงๆอย่างถูกต้องตรวจตราและซ่อมแซมเครื่องวัดต่างๆ อยู่เสมอการป้องกันการไหม้และการสูญเสียคาร์บอน

หรือทำได้อีกวิธีก็คือ การใช้เตาเกลือ (Salt Bath) ในการอบเผาในเวลาที่สั้นลง โดยใช้เกลือเป็นตัวกลางในการทำความร้อนและเป็นตัวช่วยมิให้ผิวหน้างานถูกออกซิเจนในขณะที่เผาผิวของงานจะไม่มีสะเก็ดและไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชิ้นงานที่บางๆ เช่น สปริง เครื่องไฟฟ้าต่างๆ หรืองานที่ต้องทำมากๆ ติดต่อกันไป หรืองานที่ต้อง อบเผาในอุณหภูมิสูงๆ เช่น เหล็ก High Speed Steel ชนิดของเกลือที่ใช้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ต้องการอบชุบซึ่งมีเกลือชนิดต่างๆที่ใช้สำหรับอุณหภูมิระหว่าง $160^{\circ}\text{C} - 1300^{\circ}\text{C}$

2.4 การชุบแข็ง (Hardening)

การชุบแข็ง คือ การอบชุบความร้อนเพื่อต้องการให้เหล็กภายหลังการชุบมีความแข็งเพิ่มขึ้น เพื่อทนต่อการเสียดสีในขณะใช้งาน การชุบแข็งเป็นวิธีที่จะให้ได้โครงสร้างของเหล็กสุดท้ายเป็นมาร์เทนไซต์ หรือเบนไนท์ ขึ้นอยู่กับความแข็งสุดท้ายที่ต้องการ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากออสเตนไนท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ หรือเบนไนท์ ซึ่งจะได้เหล็กที่มีความแข็งสูง

2.4.1 องค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการในการชุบแข็ง คือ

1. ปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เพราะการที่ออสเตนไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ ในลักษณะการชุบแข็งธรรมดาด้วยน้ำ เหล็กควรมีคาร์บอนมากกว่า 0.3% ส่วนธาตุที่ผสมในเหล็กอื่นๆ เช่น นิกเกิล โครเมียม และ โมลิบดีนัมจะเพียงทำหน้าที่ช่วยให้การชุบแข็งได้ผลดีขึ้นเท่านั้น ความแข็งของมาร์เทนไซต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนดังตัวอย่างเช่นเหล็กคาร์บอน 0.35% สามารถชุบแข็ง ได้ความแข็งประมาณ 50 H_{RC} ตรงกันข้ามเหล็ก 0.02% C , 10% Cr ได้ความแข็งภายหลังการชุบแข็งเพียง 35 H_{RC}

2. อุณหภูมิก่อนการชุบ คือ อุณหภูมิที่เหล็กจะต้องเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์ ก่อนการชุบน้ำหรือน้ำมัน อุณหภูมิของเหล็กไม่สูงพอจนโครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์หมด จะชุบในน้ำหรือน้ำเกลือ น้ำต่าง ความแข็งที่ได้จะไม่สูงเท่าที่ควร เพราะมาร์เทนไซต์ที่ได้จะต้องมาจากออสเตนไนท์เท่านั้น และเป็นการเปลี่ยน โครงสร้างโดยปราศจากการกำเนิดนิวเคลียสไม่เหมือนอย่างเช่นเฟอร์ไรท์หรือซีเมนต์ไคท์

3. อัตราการเย็นตัวเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ออสเตนไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์จะต้องเป็นอัตราการเย็นตัวที่สูงพอ ซึ่งจะปรากฏคำว่า อัตราการเย็นตัววิกฤติ (Critical cooling rate) หมายถึง อัตราการเย็นตัวที่ออสเตนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ ถ้าอัตราการเย็นตัวช้ากว่านี้ ออสเตนไนท์จะไม่มีโอกาสเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ แต่จะได้เฟอไรต์หรือซอร์ไบท์แทน

2.4.2 อุณหภูมิสำหรับการชุบแข็ง (Hardening Temperature)

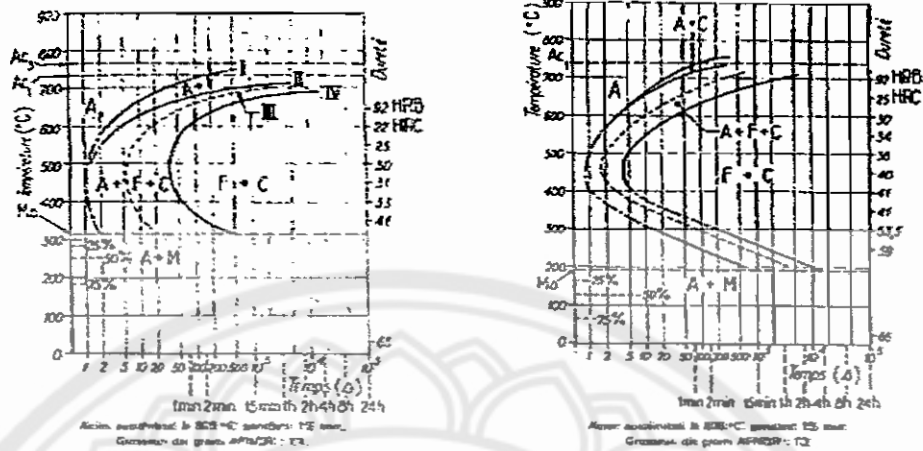
อุณหภูมิสำหรับการชุบแข็งเหล็กแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. เหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ จะใช้อุณหภูมิสูงเหนือเส้น AC_3 $30^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอุณหภูมินี้จะได้โครงสร้างเป็นออสเตนไนท์ทั้งหมด ถ้าพิจารณาในกรณีที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้และอยู่ในช่วง $AC_1 - AC_3$ จะปรากฏมีเฟอไรต์ที่เหลืออยู่บางส่วน ถ้าทำการชุบที่อุณหภูมินี้ออสเตนไนท์จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ แต่เฟอไรต์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงคงสภาพอยู่อย่างเดิม เหล็กภายหลังการชุบจะไม่ได้ความแข็งสูงเท่าที่ควร และบริเวณโครงสร้างที่เป็นเฟอไรต์จะเป็นบริเวณที่อ่อน (Soft spots) ขาดคุณสมบัติด้านทานต่อการเสียดสี

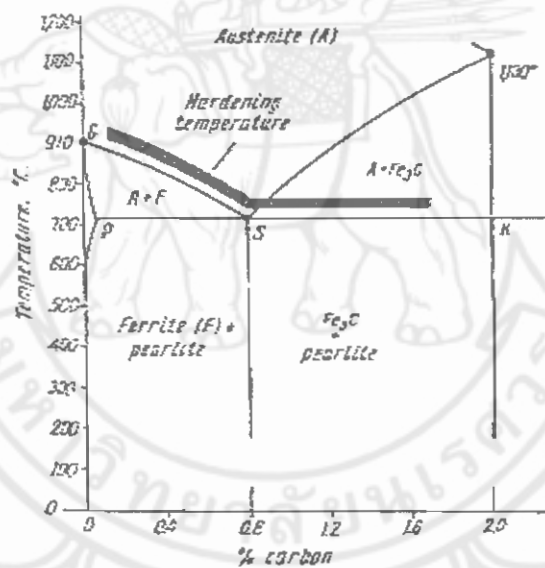
ในกรณีถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงเหนือเส้น AC_3 ไปมาก (Overheating) จะได้โครงสร้างออสเตนไนท์ที่มีเกรนโต ภายหลังจากชุบน้ำจะได้อมาร์เทนไซต์ที่หยาบ (Coarse martensite) ซึ่งจะทนแรงกระแทกได้น้อยลง อีกประการหนึ่งชิ้นงานในขณะที่ชุบน้ำจะเกิดการบิดงอหรือแตกร้าวได้ง่าย

2. เหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ จะใช้อุณหภูมิสูงเหนือเส้น AC_1 ประมาณ $30^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น จะเห็นว่าในช่วงของอุณหภูมินี้จะปรากฏโครงสร้างของโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์ที่เหลืออยู่เพียงบางส่วนเท่านั้น ที่กลายหรือสลายตัวไปเป็นออสเตนไนท์ และซีเมนต์ไคต์ที่เหลืออยู่นี้จะกระจุกกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้างของออสเตนไนท์ เมื่อทำการชุบน้ำจะได้อมาร์เทนไซต์ โดยมีโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์แทรกอยู่ ซึ่งจะปรากฏเป็นผลึกในส่วนที่เหล็กจะมีความแข็งสูง และทนการเสียดสีในขณะที่ใช้งานได้ดี ทั้งนี้เพราะโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์มีความแข็ง ประมาณ $700 - 800 \text{ H}_b$ ซึ่งแข็งกว่ามาร์เทนไซต์ ($650-700 \text{ H}_b$) ประเด็นที่สำคัญคือ จะต้องเลือกอุณหภูมิที่จะไม่เกิดโปรยูเทคตอยด์ซีเมนต์ไคต์ในลักษณะต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ตามขอบเกรน

ในกรณีที่เผาอุณหภูมิเหนือเส้น AC_{cm} จะไม่เกิดผลดีนอกจากต้องใช้เวลาพลังงานมากขึ้นแล้ว โครงสร้างออสเตนไนท์จะขยายตัวให้เกรนโตเร็วมากจะให้ผลที่ได้ภายหลังการชุบไม่ดีเพราะจะได้อมาร์เทนไซต์เกรนหยาบทนแรงกระแทกได้ไม่ดีและยังอาจเกิดการบิดงอและแตกร้าวได้โดยง่าย



รูปที่ 2.2 แผนภูมิ T.T.T.เหล็กกล้าไฮโปยูเทคทรอยด์ และ เหล็กกล้าไฮเปอร์ยูเทคทรอยด์ [1]



รูปที่ 2.3 แสดงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน [1]

2.4.3 ของเหลวสำหรับการชุบแข็ง

ของเหลวที่ใช้สำหรับการชุบแข็งที่ดีโดยหลักเกณฑ์ทั่วไปจะต้องให้อัตราการเย็นตัวสูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical cooling rate) ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ออสเทนไนต์แตกตัวไปเป็น เฟอร์ไรต์ หรือ โครงสร้างอื่นที่ไม่ใช่มาร์เทนไซต์ (Intermediate structure) และ ที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ควรจะให้อัตราการเย็นตัวที่ช้าลงในช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนต์ไปเป็น

มาร์เทนไซต์ ซึ่งจะเป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง $200^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเครียดภายในกับชิ้นเหล็กมากนัก มิฉะนั้นจะทำให้เกิดการบิดงอ หรือแตกร้าวขึ้นได้ ของเหลวสำหรับการชุบแข็งที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ น้ำ, น้ำเกลือ, น้ำด่าง, น้ำมัน, เกลือละลาย และอากาศ

การถ่ายเทความร้อนที่ของเหลวชนิดมีจุดเดือดกลายเป็นไอสามารถแยกออกเป็น 3 ลักษณะ ที่ต่างกันเมื่อสัมผัสกับแท่งเหล็กร้อน

1. เมื่อจุ่มแท่งเหล็กลงไป ของเหลวจะสัมผัสกับแท่งเหล็กที่ร้อนจัด ของเหลวรอบๆ จะรับความร้อนสูงจนกลายเป็นไอหุ้มแท่งเหล็กไว้ในลักษณะเป็นฟิล์มบางๆ ทำให้การถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้จะช้าเพราะความร้อนต้องผ่านฟิล์มบางๆ ซึ่งมีสภาพเป็นตัวนำความร้อนต่ำ แต่จะเป็นอยู่ในระยะสั้นๆ เมื่อไอของของเหลวรวมตัวกันมากก็จะลอยขึ้นหรืออาจจะแตกออก

2. เมื่อฟิล์มบางๆ ของไอที่หุ้มแท่งเหล็กแตกออก ของเหลวที่อยู่รอบนอกจะเข้าสัมผัสกับแท่งเหล็กในช่วงนี้ของเหลวรอบๆ ซึ่งได้รับความร้อนอยู่แล้วในชั้นแรก เมื่อเข้าสัมผัสก็จะรับความร้อนจำนวนมาก จะเกิดการเดือด และกลายเป็นไอ แต่ไม่มีโอกาสหุ้มแท่งเหล็กเหมือนในครั้งแรก ทั้งนี้เพราะของเหลวอยู่ในสภาพเกิดการเดือด และกลายเป็นไอทำให้มีลักษณะเหมือนกับการกวน ของเหลวมีโอกาสสัมผัสกับแท่งเหล็กอยู่ตลอดเวลาและการถ่ายเทความร้อนจะได้ปริมาณมากยิ่งขึ้นและจะเกิดขึ้นได้มากเนื่องจาก ความร้อนจากแท่งเหล็กยังถูกถ่ายเทออกมาได้มาก เพราะของเหลวทั่วไปมีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง ในชั้นนี้อัตราการเย็นตัวจะสูงมาก

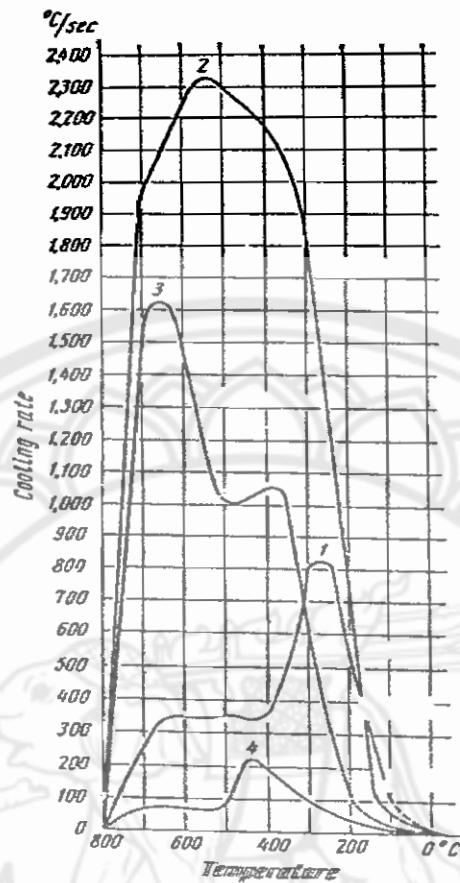
3. เป็น ชั้นที่มีอัตราการเย็นตัวช้าลง เมื่อความร้อนจากแท่งเหล็กน้อยลง อุณหภูมิของของเหลวเริ่มต่ำลงกว่าจุดเดือดความร้อนจะถูกถ่ายเทออกไปโดยการพาด้วยของเหลวเพียงอย่างเดียวทำให้อัตราการเย็นตัวลดต่ำลง จนถึงจุดที่อุณหภูมิต่ำกว่าทั้งแท่งเหล็ก และของเหลว

ของเหลวที่ใช้ในการชุบเหล็ก มีดังนี้

1. น้ำ เมื่อพิจารณาคูณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนของน้ำ โดยการทดลองวัดอัตราการเย็นตัวของลูกบอลทำด้วยโลหะเงินเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm. เเผาที่อุณหภูมิ 800°C ชุบในของเหลวหลายชนิดทำการวัดอัตราการเย็นตัวผลที่ได้ปรากฏว่า น้ำทำให้อัตราการเย็นตัวค่อนข้างต่ำในตอนต้น แต่จะให้ค่าอัตราการเย็นตัวสูงมาก ในช่วงอุณหภูมิ $400^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ นี้จะเป็นลักษณะที่ไม่ดีเพราะเป็นช่วงอุณหภูมิที่ออสเทนไนต์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ และจะมีขยายตัวเล็กน้อย จะทำให้เกิดความเครียด ได้มาก อันจะเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอ และแตกร้าวได้ง่าย ยิ่งเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนสูง การชุบแข็งโดยการชุบน้ำจะทำได้ น้ำเป็นสารชุบที่หาง่ายและสะดวกสบายที่สุดในบรรดาสารชุบต่างๆ อัตราการเย็นตัวของน้ำจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นเกือบถึงจุดเดือดของน้ำถึง 10% เนื่องจากไอน้ำไปปกคลุมผิวหน้าของน้ำ ทำให้ยากแก่การระบายความร้อน

2. ในกรณีของน้ำผสมเกลือ 10% จะให้คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนที่ดีมาก จะเห็นว่าอัตราการเย็นตัวสูงถึงประมาณ 2300°C ต่อวินาที ซึ่งสูงมากเพราะมีจุดเดือดสูงกว่าน้ำธรรมดา ช่วงอุณหภูมิที่ให้อัตราการเย็นตัวสูงสุดจะอยู่ประมาณ $600^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ ซึ่งไม่อยู่ในช่วงการเปลี่ยนสถานะไนท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ อันตรายที่จะเกิดจากความเครียดภายในจะน้อยลง แต่ก็ยังไม่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็งเหล็กคาร์บอนสูง เพราะในช่วงอุณหภูมิ $400^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ อัตราการเย็นตัวยังอยู่ในเกณฑ์สูง สารละลายน้ำเกลือนี้ เป็นตัวช่วยลดไอ้ที่ปกคลุมบนผิวหน้าของสารชุบและ ยังมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าน้ำอีกด้วย อัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 10% ไม่ควรมากกว่านี้ หลังจากชุบในสารนี้แล้วควรล้างด้วยน้ำเพื่อป้องกันการกัดกร่อนอีกทีหนึ่ง

3. น้ำมันจั่ว เป็นของเหลวที่ให้คุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนต่ำ ให้อัตราการเย็นตัวสูงสุดประมาณ 200°C ต่อวินาที ซึ่งไม่สูงพอสำหรับการชุบ เพื่อให้ได้มาร์เทนไซต์ สำหรับเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กผสมต่ำยังเป็นงานชิ้นโตมีโอกาสดำได้ โครงสร้างมาร์เทนไซต์จะเป็นไปได้ยากน้ำมันจึงเหมาะสำหรับการชุบแข็งเหล็กที่มีส่วนผสมสูงออกสแตนไนท์มีเสถียรภาพสูงและมีอัตราการเย็นตัววิกฤติต่ำกว่าเกณฑ์ปกติ น้ำมันมีข้อดีอยู่ตรงที่ให้อัตราการเย็นตัวสม่ำเสมอ ไม่ทำให้เกิดความเครียดมากนัก การที่จะเพิ่มคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำมันสามารถทำได้โดยการเผาให้ร้อนประมาณ $50^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$ น้ำมันจะใสทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นน้ำมันที่ใช้สำหรับการชุบแข็งจะต้องเป็นน้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียม (Mineral oil) และมีจุดติดไฟที่สูงประมาณ $160^{\circ}\text{C} - 170^{\circ}\text{C}$ น้ำมันเป็นสารชุบที่มีคุณสมบัติป้องกันการบิดตัวของชิ้นงานในขณะที่ชุบดีกว่าสารชุบอื่นๆ ทั้งยังลดแรงเครียดต่างๆ ภายในชิ้นงานได้ดีอีกด้วย และยังป้องกันการแตกหักของชิ้นงานขณะชุบได้ดีกว่าสารอื่นอีก น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ ก็สามารถใช้เป็นสารชุบได้ดีกว่าสารอื่นหากแต่ว่ามันมีกลิ่นเหม็นและยังจับตัวกันเป็นยางเหนียวๆ เมื่อได้รับความร้อนดังนั้น ทั่วไปใช้น้ำมันจากธรรมชาติเป็นดีที่สุด นอกจากนั้นราคายังถูกและหาง่ายอีกด้วย



รูปที่ 2.4 อัตราการเย็นตัวที่ต่างกันของสารชุบชนิดต่างๆ [1]

2.4.4 หลักสำคัญในการชุบ (Quenching)

ในการชุบให้เย็น อัตราการเย็นตัวจะต้องเร็วพอที่จะเพิ่มความแข็งให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ในการเปลี่ยนโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเหล็ก ถึงอย่างไรก็ตาม จำเป็นที่จะต้องระมัดระวังถึงความสำคัญของอัตราการเย็นตัววิกฤตจะแสดงในแผนภูมิ ที.ที.ที. (T.T.T. Diagrams) สำหรับเหล็กในเกรดต่างๆ กัน โดยดูได้จากจุ่มของส่วนโค้งตัวเอส (S. Curve) ซึ่งเรียงไปทางด้านขวา มากหรือน้อย ทำให้อัตราการเย็นตัวมากหรือน้อยตามไปด้วย

เมื่อคำนึงถึงข้อหลักเบื้องต้นในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (การหลอขยายตัว) ซึ่งมีความสำคัญ การชุบจึงจำเป็นที่จะต้องช้าที่สุดและสม่ำเสมอที่สุดเท่าที่กระทำได้ เพราะฉะนั้นจะต้องหลีกเลี่ยงการใช้สารชุบที่มีอัตราการเย็นตัวเร็วเกินไป เพื่อให้เหล็กกลายเป็นเกรนมาร์เทนไซต์ตามความต้องการ

โครงสร้างของมาร์เทนไซต์อาจทำได้ดังนี้

1. การชุบชุบชิ้นงานโดยตรง หมายถึง การชุบเหล็กจากร้อนลงมาถึงอุณหภูมิห้อง โดยการชุบในน้ำ ในน้ำมัน หรือใช้ลมเป่า ทั้งนี้การเลือกใช้สารชุบจะต้องให้เหมาะสมกับส่วนผสมของเหล็ก

2. การจุ่มชุบในน้ำเกลือ ซึ่งผสมเกลือแกง 10% หรือเกลือโซดา 5% ซึ่งจะทำให้การถ่ายเทความร้อนได้ผลรวดเร็วขึ้น ปกติน้ำจะให้ผลในการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 68°F (20°C)

3. เหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งต้องการอัตราการเย็นตัวมาก ปกติจะจุ่มในน้ำเย็น ข้อเสียของการจุ่มชุบในน้ำคือ อัตราการเย็นตัวสูง ทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอและอาจจะแตกได้ง่าย

4. การจุ่มชุบในน้ำมัน การจุ่มชุบในน้ำมันมีอัตราการเย็นตัวช้ากว่าการจุ่มชุบในน้ำ และช้าเกินไปที่จะทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ได้ ฉะนั้นเหล็กกล้าที่ใช้จุ่มชุบในน้ำมันจึงเป็นเหล็กกล้าที่คาร์บอนที่มีธาตุอื่นผสมสำหรับน้ำมันอัตราการเย็นตัวที่ดีจะต้องมีอุณหภูมิประมาณ $140^{\circ}\text{F} - 170^{\circ}\text{F}$ ($60^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$) ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันมีความหนืด และเมื่อถึงอุณหภูมินี้ความหนืดจะลดลง และสามารถรับถ่ายความร้อนได้ดีขึ้น ถ้าหากอุณหภูมิสูงกว่า 175°F (80°C) อัตราการเย็นตัวจะลดลงในขณะที่อุณหภูมิของน้ำมันเพิ่มขึ้น

2.4.5 การเตรียมและการผูกชิ้นงานสำหรับชุบ

การเตรียมและการผูกชิ้นงานสำหรับชุบเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ที่จะทำการชุบจะต้องคำนึงถึงและจะต้องใช้ความระมัดระวังในการเตรียมชิ้นงาน และการผูกชิ้นงานก่อนที่จะทำการอบชุบ เพราะถ้าหากมีการเตรียมและผูกชิ้นงานที่ถูกต้องจะช่วยให้ชิ้นงานชุบที่ออกมามีลักษณะดี คือไม่บิดงอ ทั้งยังจะช่วยลดการแตกร้าวของชิ้นงาน ซึ่งสามารถปฏิบัติได้ดังนี้

1. ถ้าหากชิ้นงานนั้นมีรูปร่างลักษณะสลับซับซ้อน เช่น มีรูขีดขอบของงานหรือมีอยู่จำนวนหลายรู เป็นต้น ควรจะใช้คันทนไฟผสมด้วยน้ำ แล้วทำการอุดรูหรือส่วนที่สลับซับซ้อนนั้นเสีย เพื่อให้ อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานจะได้ไม่ต่างกันมากนักอันเป็นเหตุให้ชิ้นงานนั้นเกิดการแตกร้าวขึ้นได้ เมื่อทำการจุ่มชุบในของเหลว

2. ผิวของชิ้นงานจะต้องสะอาดปราศจากสนิมหรือสิ่งอื่น ซึ่งจะเป็นตัวกั้นความร้อนที่จะระบายออกจากชิ้นงานไปยังสารที่ใช้จุ่มชุบ เพราะไม่เช่นนั้นแล้วเมื่อทำการจุ่มชุบชิ้นงานจะแข็งเป็นจุดๆ หรืออาจจะแข็งไม่เท่าที่ควร

3. ควรจะบันทึกชนิดของเหล็ก รูปร่าง , ประเภท และ ขนาดของชิ้นงานไว้ก่อนที่จะทำการชุบ เพื่อป้องกันการสับสนเปลี่ยนของชิ้นงาน

4. การผูกชิ้นงานจะต้องผูกให้แน่นและแข็งแรงพอที่จะไม่หลุดขณะทำการชุบ เพราะจะทำให้เกิดการเสียหายแก่ชิ้นงาน

5. ลวดที่จะทำการผูกจะต้องแข็งแรงพอ หมายถึงสามารถรับน้ำหนักของชิ้นงานได้ที่อุณหภูมิซึ่งเป็นอุณหภูมิสูง

6. การผูกหรือการจับชิ้นงานควรจะให้ถูกทิศทาง เพื่อความสะดวกในการนำชิ้นงานได้ที่อุณหภูมิชุบซึ่งเป็นอุณหภูมิสูง

7. การผูกชิ้นงานหลายชิ้นรวมเป็นพวกใหญ่ๆ อาจจะทำให้ความแข็งของชิ้นงานแต่ละชิ้นไม่เท่ากัน อันเกิดจากการเย็นตัวระหว่างชิ้นงานที่อยู่รอบนอกกับชิ้นงานที่อยู่ภายในไม่เท่ากัน

8. ในกรณีเตาที่ใช้ในการเผาชิ้นงานเป็นเตาที่ควบคุมบรรยากาศภายในเตาไม่ได้ ควรจะนำชิ้นงานที่ต้องการอบชุบบรรจุลงในกล่องเพื่อป้องกันผิวของชิ้นงานเสียอันเกิดจากออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวของชิ้นงาน การบรรจุชิ้นงานลงในกล่องควรจะทำนึ่งถึงสิ่งเหล่านี้ไม่ควรบรรจุชิ้นงานที่มีอุณหภูมิชุบต่างกันลงในกล่องเดียวกัน เพราะจะทำให้เกิดความลำบากในการชุบ และจะทำให้ผิวของชิ้นงานเสีย เนื่องจากการเปิด-ปิดกล่องหลายครั้งไม่ควรบรรจุชิ้นงานที่มีขนาดต่างกันมากลงในกล่องเดียวกัน เพราะจะทำให้การเผาแห้งลำบาก และจะทำให้ชิ้นงานแต่ละชิ้นความแข็งต่างกันกรณีชิ้นงานที่มีลักษณะที่จะบดงอได้ง่าย เช่น ชิ้นงานมีความยาวมากหรือชิ้นงานบางควรระวังชิ้นงานให้เรียบร้อยหรือให้เป็นระเบียบ ไม่ควรวางระเกะระกะเพราะจะทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอขณะเผาได้

2.5 อัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะ (Heating rate & Holding time)

การกำหนดอัตราการเผาและช่วงเวลาที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ส่วนผสมของเหล็ก โครงสร้างเดิม ความเครียดเหลือค้าง รูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่จะทำการชุบแข็ง

ปกติเหล็กเมื่อบรรจุเข้าเตาเผาความร้อนที่เหล็กได้รับที่ผิวกับใจกลางจะไม่เท่ากันในตอนแรก เพราะกว่าความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านเนื้อเหล็กเข้ามาถึงใจกลางย่อมต้องใช้เวลา การเผาในอัตราสูง ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกับใจกลางจะมีค่ามากการบิดงอมากซึ่งจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้ง่าย โดยทั่วไปเราแบ่งอัตราการเผาไว้ 3 อัตรา ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเตา

2.5.1 อัตราการเผาช้า เป็นวิธีที่เริ่มต้น โดยบรรจุเหล็กเข้าเตาพร้อมๆ กับการให้ความร้อนแก่เตาเผาพร้อมๆ กัน อุณหภูมิทั้งของเตาและชิ้นงานจะร้อนขึ้นในอัตราใกล้เคียงกันในลักษณะเช่นนี้ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวกับใจกลางของแท่งเหล็กมีน้อยการเผาในลักษณะเช่นนี้เหมาะสำหรับเหล็กที่มีคาร์บอนสูง มีความเครียดเหลือค้างมาจากการขึ้นรูป รุปร่างซับซ้อนและมีส่วนที่หนาและบางต่างกันมาก

2.5.2 อัตราการเผาสูง วิธีนี้จะเผาเตาให้มีอุณหภูมิเท่าที่ต้องการ จากนั้นจึงจะบรรจุเหล็กเข้าเตาภายหลัง หรือเป็นในกรณีที่เตากำลังใช้งานอยู่ เมื่อนำเอาเหล็กออกไปชุบหมดแล้ว ก็เริ่มบรรจุเหล็กชุดต่อไปใหม่ ลักษณะเช่นนี้ อัตราการเผาจะสูง อุณหภูมิระหว่างผิวกับใจกลางจะแตกต่างกันมากในตอนเริ่มต้น แต่จะไปเท่ากันในระยะเวลาที่สั้นกว่าวิธีที่ 1 การเผาในอัตราสูงเหมาะสำหรับงานชิ้นเล็กๆ รูปร่างที่ไม่ซับซ้อน และเป็นเหล็กคาร์บอนปานกลาง จะใช้วิธีเอาเหล็กบรรจุไว้ในหีบปิดคลุมมิดชิด บรรจุเข้าเตาจะช่วยลดอัตราการเผาลงได้อีก เพราะกว่าความร้อนจะผ่านหีบเข้าไปถึงใจกลางแท่งเหล็กจะช้าลง

2.5.3 สำหรับช่วงเวลาที่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่ต้องการ (Holding time) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ออสเทนไนท์ที่สม่ำเสมอและให้อุณหภูมิทั้งบริเวณผิวและใจกลางเท่ากัน ไม่มีเกณฑ์ที่ตายตัวขึ้นอยู่กับ

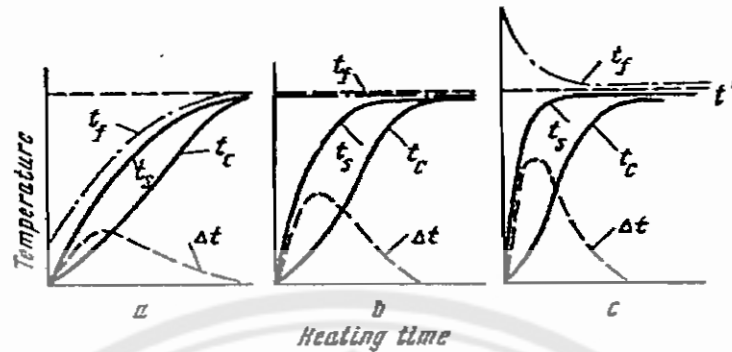
กับหลักในการปฏิบัติ ถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนหรือเหล็กผสมต่ำ (Low-alloys) ซึ่งคาร์ไบด์ละลายตัวได้ง่าย จะใช้เวลาประมาณ 5 – 15 นาที ก็พอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานด้วย แต่ถ้าเป็นเหล็กผสมปานกลาง หรือสูง ซึ่งคาร์ไบด์มีเสถียรภาพจะต้องใช้เวลาให้นานพอที่คาร์ไบด์จะละลายตัวหมด ซึ่งเวลาที่ใช้ควรเพิ่มขึ้นประมาณ 25 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ของเวลาที่ใช้เกณฑ์ปกติ

อัตราการเผาที่สูงมาก เป็นวิธีที่ไม่ผู้จะนิยมใช้เพราะอัตราการเผาจะสูง อุณหภูมิระหว่างผิวกับใจกลางแท่งเหล็กจะแตกต่างกันมากในตอนเริ่มต้น โดยวิธีการเผาให้อุณหภูมิในเตาสูงเกินกว่าอุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อบรรจุเหล็กเข้าเตาอุณหภูมิของเตาจะลดลงมาจนเท่ากับที่ต้องการ พร้อมกับ อุณหภูมิของชิ้นงานร้อนขึ้น เวลาที่ใช้จะสั้นกว่าทั้งสองวิธีแต่อุณหภูมิระหว่างใจกลางกับผิวเหล็กจะแตกต่างกันมาก อาจจะทำให้เกิดการบิดงอหรือชิ้นงานแตกร้าวได้ง่ายวิธีนี้เหมาะสำหรับงานขนาดเล็ก และรูปร่างง่าย ๆ จำเป็นจะต้องบรรจุในหีบเหมือนวิธีที่สองเพื่อช่วยลดอัตราการเผาให้ช้าลง

ในทางปฏิบัติที่นิยมกันสำหรับการชุบแข็งทั่วๆ ไป เพื่อให้การเผาเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และเป็น การป้องกันไม่ให้เหล็กเกิดออกซิเดชัน นิยมใช้การเผาเหล็กในอ่างเกลือที่เป็นกลาง (Neutral salt bath) ซึ่งให้ผลดีกว่าการเผาในเตาทั่วๆ ไป โดยเฉพาะความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและอัตราการเผา เกลือที่ใช้ ส่วนใหญ่จะเป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์ หรืออาจจะผสมกับเกลือชนิดอื่น เพื่อให้มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำลง และง่ายต่อการควบคุม

ตารางที่ 2.2 แสดงระยะเวลาในการเผาที่ความหนาต่างๆกัน [2]

Thickness or diameter of part (mm)	Box furnaces(gas or oil-fired)		Salt baths	
	Heating(min)	Holding(min)	Heating(min)	Holding(min)
25	20	5	7	3
50	40	10	17	8
75	60	15	24	12
100	80	20	33	17
125	100	25	40	20
150	120	30	50	25
200	160	40	65	35



Three possible procedures for heating parts in a furnace
(after A. A. Shmykov):

t' —specified heating temperature, t_s —surface temperature of heated parts, t_c —temperature in the core of heated part, Δt —temperature difference between surface and core, t_f —furnace temperature

รูปที่ 2.5 แสดงผลของอุณหภูมิที่ต่างกันบริเวณผิวและภายในใจกลางเมื่อเผาด้วยอัตราต่างๆ กัน (a อัตราต่ำ, b อัตราปานกลาง, c อัตราสูง) [2]

2.6 การอบคืนตัว (Tempering)

เหล็กภายหลังการชุบแข็งจะมีโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยมาร์เทนไซต์ และออสเทนไนท์ เหลือค้าง (Residual austemite) ถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนสูงจะมีโปรยูเทคตอยด์ ซีเมนต์ไคท์ กระจุกกระจายอยู่ทั่วไป นอกจากนี้เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งจะเกิดความเครียดภายใน อันเนื่องมาจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วจากอุณหภูมิสูง คุณสมบัติของเหล็กตามลักษณะที่กล่าวจะมีความแข็งสูง แต่จะขาดคุณสมบัติด้านความเหนียวไม่ทนต่อแรงกระแทก (Poor impact strength) และความเครียดภายในที่เกิดขึ้นจะมีส่วนทำให้ชิ้นงานบิดงอ หรืออาจเกิดการแตกร้าวในขณะที่ใช้งานได้ ดังนั้นเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งก่อนนำไปใช้งานควรจะต้องนำมาทำการอบคืนตัวเพื่อคลายความเครียดภายในให้หมดไปหรือเหลืออยู่น้อยที่สุด และในขณะเดียวกันจะทำให้มาร์เทนไซต์แตกตัวให้โครงสร้างกึ่งสมดุลย์ (Tempered Martensite) ซึ่งจะมีผลอย่างกว้างขวางต่อคุณสมบัติของเหล็ก เช่น ความแข็งจะลดลง แต่ความเหนียวจะกลับสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิของการอบคืนตัวและเวลาที่ใช้

การอบคืนตัวเป็นวิธีการเผาเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้น A1 ภายหลังเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลานานพอสมควรแล้ว จะปล่อยให้เย็นช้าๆ ภายในเตา การเปลี่ยนแปลงของมาร์เทนไซต์และออสเทนไนท์เหลือค้างไปสู่โครงสร้างกึ่งสมดุลย์จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่างๆ กันดังนี้

1. อุณหภูมิช่วงแรก ($80^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$) โครงสร้างมาร์เทนไซต์จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ชนิดที่ใกล้จะเป็นระบบลูกบาศก์ (Pseudo cubic) ซึ่งมีคาร์บอนละลายอยู่ 0.25 % กับคาร์ไบด์ชนิดเอพซิลอน (E carbide) มีสูตร Fe_2C หรือ Fe_2C_4 และมีคาร์บอนประมาณ 8.2% ทั้งคาร์ไบด์ และเฟอร์ไรท์ (0.25% C) จะตกผลึกชนิดละเอียด และกระจุกกระจายอยู่ทั่วไปในโครงสร้าง สามารถศึกษาได้โดยกล้อง

ขยายอิลเลคตรอนเท่านั้น การอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมินี้ความแข็งแรงจะลดลงเล็กน้อย แต่ความเครียดภายในจะถูกทำลายไปเกือบหมด

2. อุณหภูมิช่วงที่สอง ($80^{\circ}\text{C} - 280^{\circ}\text{C}$) โครงสร้างออสเตนไนท์ที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ที่ได้นั้นในขณะชุบแข็ง (retained austenite) จะแตกตัวให้โครงสร้างเฟอร์ไรท์ (0.025%) และซีเมนต์ไคต์ (Fe_3C) ที่มีความละเอียดและกระจายตัว โครงสร้างที่ปรากฏจะคล้ายคลึงกับเบนไนท์ ความแข็งแรงจะลดลงมาก แต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น

3. อุณหภูมิช่วงที่สาม ($300^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยเฟอร์ไรท์ (Pseudo cubic) จะแตกตัวให้เฟอร์ไรท์ (Cubic) ที่มีคาร์บอน 0.025% และซีเมนต์ไคต์ ส่วนเฟสโลนคาร์ไบด์ จะเปลี่ยนเป็นซีเมนต์ไคต์ (Fe_3C) โครงสร้างที่ได้จะยังอยู่ในลักษณะละเอียดและกระจายตัว มีลักษณะคล้ายซอร์ไบท์

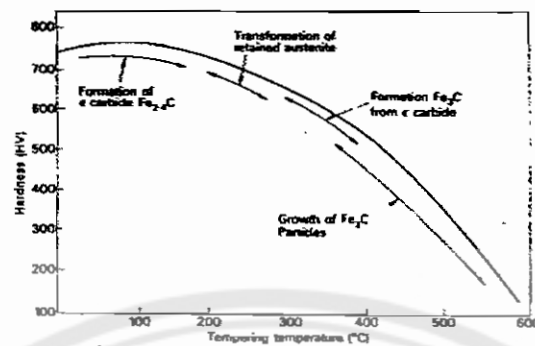
4. อุณหภูมิช่วงที่สี่ (สูงกว่า 500°C ขึ้นไปจนถึง A1) โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะปรับตัวเข้าสู่สภาพสมดุล และมีการขยายตัวของเฟอร์ไรท์และซีเมนต์ไคต์ไค้ขึ้น ความแข็งแรงจะลดลงมาก โดยความเหนียวจะเพิ่มขึ้นในลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็กที่ผ่านการทำสเฟอไรไรซ์ไค้ (Incomplete annealing)

หรือในทางปฏิบัติเราสามารถแบ่งช่วงอุณหภูมิออกเป็น 3 ช่วงคือ

1. ช่วงอุณหภูมิต่ำ ($150^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$) มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะลดความเครียดภายใน และปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความเหนียว โดยพยายามรักษาระดับความแข็งแรงไว้ในระดับใกล้เคียงกับความแข็งแรงที่ได้ภายหลังจากชุบแข็ง เวลาที่ใช้ประมาณ 1-2 ชั่วโมง โครงสร้างของเหล็กจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

2. การอบคืนตัวที่อุณหภูมิปานกลาง ($350^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$) เพื่อให้เหล็กมีความเหนียวสูงขึ้นและมีคุณสมบัติทางด้านการยืดหยุ่นสูงส่วนใหญ่ใช้กับเหล็กทำหมอบสปริง โครงสร้างของเหล็กจะใกล้เคียงกับเบนไนท์หรือทรูสไตต์

3. การอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูง ($500^{\circ}\text{C} - 650^{\circ}\text{C}$) จะกระทำเมื่อต้องการทำลายความเครียดภายในให้หมดไปและเพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติทางด้านความเหนียวสูงโดยมีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์สูงด้วยและโครงสร้างของเหล็กจะมีลักษณะเป็นเฟอไรท์ละเอียดใกล้เคียงกับ โครงสร้างซอร์ไบท์



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงค่าความแข็งที่เปลี่ยนแปลงภายหลังจากการอบคืนตัวของเหล็กยูเทคทรอยด์ [2]

2.6.1 คุณสมบัติเปราะที่เกิดจากการคืนตัว (Tempered brittleness)

การอบคืนตัวจะทำให้เกิดเหล็กที่มีคุณสมบัติด้านความเหนียวดีขึ้น ยิ่งอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวจะเพิ่มขึ้น แต่ในการทดสอบคุณสมบัติในการทนแรงกระแทก (Impact strength) ของเหล็กภายหลังการอบคืนตัวที่อุณหภูมิช่วงต่างๆ และปรากฏว่าการอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมิที่สาม ประมาณ $300^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$ หรือช่วงอุณหภูมิระหว่าง $250^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ จะได้ค่าความต้านทานแรงกระแทกลดลง ถ้าเป็นเหล็กคาร์บอนอากาศเปราะที่เกิดจากการอบคืนตัวจะปรากฏเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าเป็นเหล็กกล้าผสมโดยเฉพาะแมงกานีส, โครเมียม และ โมลิบดีนัมซึ่งจะปรากฏอาการเปราะที่เกิดจากการอบคืนตัว (Tempered brittleness) แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับถึงสาเหตุที่เกิดมาจากการตกผลึกของคาร์ไบด์ที่มาจากมาร์เทนไซต์ หรือจากการแตกตัวของมาร์เทนไซต์เหลือค้างในการอบคืนตัวควรหลีกเลี่ยงการอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวหรือถ้าจำเป็นก็ควรจะใช้เวลาให้สั้นที่สุดเพื่อป้องกันการเกิดอาการเปราะที่เกิดจากการอบคืนตัว

2.7 ปฏิบัติการให้ความร้อน (Preheating)

การให้ความร้อนในการอบเผาจำเป็นสำหรับการอบชุบแข็งมากในทางปฏิบัติซึ่งเมื่อทราบถึงอุณหภูมิ การอบชุบ เวลาให้ความร้อน สารชุบ และอุณหภูมิการอบคืน สิ่งสำคัญขั้นต่อไปก็คือในทางปฏิบัติจริงเมื่อเหล็กถูกอบเผาอยู่ในเตาจะต้องได้รับความร้อนขึ้น

โดยทั่วไปแล้วงานต่างๆ ก่อนจะเข้าเตาเผาร้อนจะต้องผ่านการ “อุ่น” (Preheating) คือ เพิ่มความร้อนขึ้นทีละน้อยในเตาอบซึ่งในทางปฏิบัติมักใช้เตาเดียวกันโดยไม่ต้องคิดเตาใหม่ทำให้เสียเชื้อเพลิงมากหรือในกรณีพิเศษ เช่น มีงานน้อยชิ้นหรือทำเพียงครั้งเดียวคือ เผาเหล็กพร้อมๆ กัน เร่งเตาให้ร้อนขึ้นครั้งเดียว โดยการใส่เหล็กหรือชิ้นส่วนเข้าในเตา และเพิ่มความร้อนเตาขึ้นเป็นขั้นๆ

เวลาในการ “อุ่น” ชิ้นส่วนเครื่องมือให้ร้อน ไม่เจาะจงลงไปว่าจะต้องใช้เวลาในการอุ่นมากหรืออุ่นน้อยเท่าไร แต่ถ้าเลือกเหล็กหรือเครื่องมือที่มีรูปร่างซับซ้อนหนาบางต่างมากในชิ้นเดียวกัน ถ้าใช้เวลาน้อยเกินไปงานนั้นจะเสีย ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นส่วนได้รับความร้อนไม่เท่ากันในชิ้นเดียวกัน และเมื่อชุบมีก็จะแตกคอง

ข้อสำคัญในการอุ่นเหล็กอีกประการหนึ่ง คือ การอุ่นให้ร้อนขึ้นทีละน้อย ทั้งนี้เพราะเหล็ก มีธาตุต่างๆ ผสมอยู่หลายอย่าง อาทิเช่น โครเมียม , โมลิบดีนัม , ทังสเตน และ ธาตุต่างๆ ที่ผสมอยู่นี้มีความสามารถในการรับความร้อนและการขยายตัวได้ไม่เท่ากันการอุ่นให้ร้อนขึ้นทีละน้อยก็จะช่วยให้เม็ดเกรนต่างๆ ภายในถ่ายเทความร้อนซึ่งกันและกัน ทำให้มีความร้อนอย่างสม่ำเสมอ การคดเนื่องจากการขยายตัวไม่เท่ากันจะไม่เกิดขึ้น

การอุ่นหรือการเผาให้ร้อนขึ้นอย่างช้าๆ นับจากอุณหภูมิธรรมดาจนถึงประมาณ 721°C เมื่อถึงอุณหภูมินี้เหล็กต่างๆ เกือบทุกชนิดจะเริ่มเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง จากอุณหภูมินี้จะเพิ่มความเร็วในการเผาให้ร้อนขึ้นไปจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ และแช่อยู่ที่อุณหภูมินี้ระยะหนึ่ง สำหรับเหล็กที่มีส่วนผสมอัลลอยด์อย่างต่ำ (Low alloy steels) หรือเหล็ก Low alloy tool steel ใช้เวลาในการอบเผาแช่ประมาณ 5 นาที ต่อความหนา 10 มม. และสำหรับเหล็ก High alloy tool steel ใช้เวลาในการเผาแช่ 10 นาที ต่อความหนา 10 มม. แต่ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับเหล็กชนิดนั้นๆ

งานที่มีรูปร่างทรงกระบอกทรงกลมหรือทรงสี่เหลี่ยมย่อมใช้เวลาในการเผามากกว่างานที่มีรูปร่างทรงบางยาว คอด มีรู และมีร่องซิกแซก สำหรับร่องและรูต่างๆ ของชิ้นงานนั้น และจะต้องอุดหรือเสริมด้วยดินทนไฟ (Mortar) หรือวัสดุทนความร้อนต่างๆ ก่อนที่จะนำไปอบชุบ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนในบริเวณนั้นมากเกินไปกว่าที่บริเวณอื่นๆ

รูปทรงของเครื่องมือเป็นสิ่งจำเป็นมากสำหรับการอบชุบการออกแบบที่ดีหมายถึงความสำเร็จในการอบชุบที่ดีด้วย แต่ในแบบที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เมื่อถึงขั้นตอนนี้ ต้องหาทางป้องกันเองตามวิธีการที่กล่าวมาแล้ว อีกวิธีหนึ่งการป้องกันการเสียหายในการชุบก็คือ การวางงานไว้ในเตา โดยทั่วๆ ไปเตาน้ำมันหรือเตาแก๊สจะให้ความร้อนไม่สม่ำเสมอกันกล่าวคือส่วนที่ติดอยู่กับขดความร้อนหรืออยู่ในบริเวณช่องไฟเผาจะร้อนกว่าบริเวณอื่นๆ ซึ่งจะสังเกตหรือดูได้จากสีของผนังเตาในบริเวณที่ได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอที่สุด คือบริเวณ ใจกลางเตา ซึ่งห่างจากขดให้ความร้อนเท่าๆ กัน ข้อระวังอีกอย่างหนึ่งคือ การวางงานภายในเตาจะต้องมีฐานรองรับเพียงพอ สำหรับงานยาวๆ หรืองานที่มีรูปร่างซับซ้อน และจะต้องคำนึงถึงเมื่อเหล็กร้อน น้ำหนักของเหล็กจะเป็นแรงถ่วงส่วนที่ยื่นออกไม่มีฐานรับ

2.8 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของโลหะเป็นเรื่องที่สำคัญสำหรับวิศวกรในการออกแบบโครงสร้างต่างๆเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานทั้งทางด้านเงินทุน , ความเหมาะสม และที่สำคัญคือความปลอดภัยซึ่งคุณสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาดังนี้

2.8.1 การทดสอบแรงดึง

ซึ่งจากกราฟการทดสอบแรงดึงสามารถนำมาหาค่าได้ดังนี้

1. ค่ายังโมดูลัส (Modulus of Elasticity :E) เป็นการทดสอบของการเปลี่ยนรูปว่าสามารถเปลี่ยนกลับมารูปเดิมได้หรือไม่
2. เปอร์เซ็นต์อีลองเกชัน (%Elongation) คือปริมาณความยืดที่เกิดจากการนำชิ้นงานไปดึงเป็นค่าที่ใช้บอกถึงความอ่อนตัว

2.8.2 การทดสอบความแข็ง

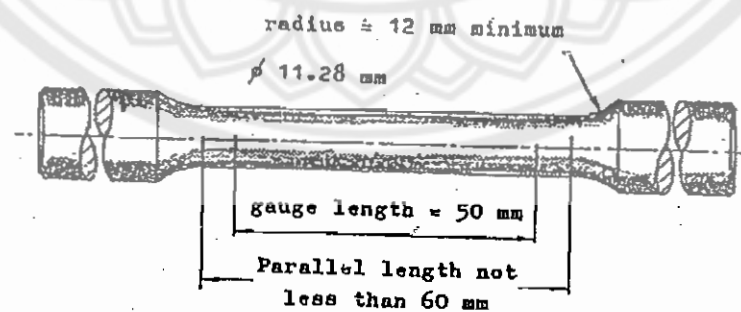
เป็นการวัดความต้านทานรอยกดของโลหะที่จะต้องเปลี่ยนรูปร่างไปอย่างถาวรจะได้ค่าความแข็งของโลหะ

2.8.3 การทดสอบแรงกระแทก

เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการดูดกลืนพลังงานก่อนเกิดการแตกหักจะได้ค่าความเหนียวของโลหะ

2.8.1 การทดสอบแรงดึง

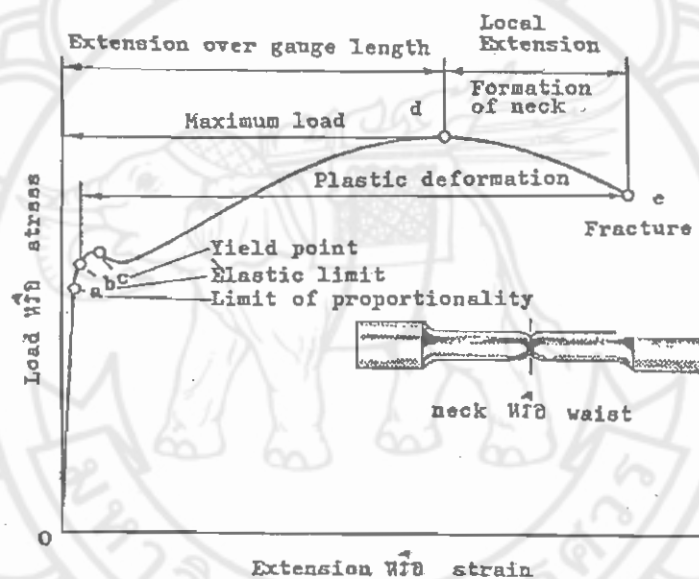
ในการหาความแข็งแรงและคุณสมบัติต่างๆของวัตถุจะต้องทดสอบด้วยตัวของวัสดุชิ้นงานกระแทกหักหรือขาดการทดสอบที่สำคัญและใช้มากที่สุดคือการทดสอบแรงดึงชิ้นวัสดุทดลองมีหลายขนาดแต่ขนาดที่ใช้มากที่สุดคือ



รูปที่ 2.7 ขนาดชิ้นงานทดสอบด้วยแรงดึง [2]

ชิ้นทดลองนี้จะเป็นรูปทรงกระบอกปลายสองข้างโตกว่าตรงกลางเพื่อจะใส่ในเครื่องทดสอบได้
 แน่น ความยาวเดิมที่ใช้การคำนวณเรียกว่า gauge length เริ่มคั้นออกแรงคึงแล้ววัดขนาดที่ยืดออกโดย
 ใช้เครื่องมือวัดพิเศษเรียกว่า Extensometer วัดแรงและขนาดที่ยืดออกจนกระทั่งวัสดุเป็น plastic ส่วนที่
 ยืดออกจะยืดออกมากต้องรีบถอด Extensometer ออกแล้ววัดส่วนที่ยืดด้วยวงเวียนเหล็กเพิ่มแรงคึงจน
 กระทั่งชิ้นทดลองนั้นขาดแล้วเขียนกราฟของแรงกับขนาดที่ยืดออก

อาจจะเขียนกราฟของ Stress (ให้คิดจากแรงหารด้วยพื้นที่หน้าตัดเดิม) กับ Strain (คิดจากส่วนที่
 ยืดหารด้วยความยาวเดิมคือ gauge length) จะได้รูปออกมาคล้ายคลึงกันสำหรับชิ้นวัสดุทดลอง mild
 steel จะได้กราฟ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟของแรงกับขนาดที่ยืดออก [2]

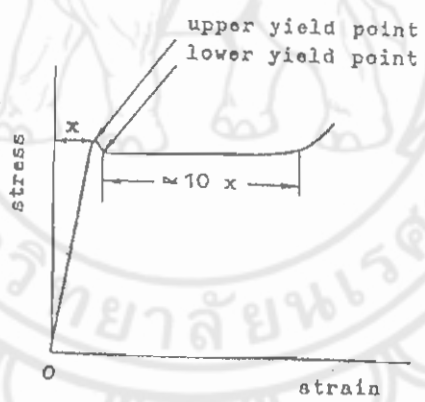
จากกราฟมีจุดสำคัญต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. จุด o-a กราฟเป็นเส้นตรงแสดงว่าแรงเป็นปฏิกภาค โดยตรงกับส่วนที่ยืดออกหรือ stress & strain
2. จุด a เรียกว่า proportional limit หรือ limit of proportionality เป็นจุดสุดท้ายที่กราฟเป็นเส้นตรงหลังจากจุดนี้แล้ว stress ไม่เป็นปฏิกภาค โดยตรงกับ strain
3. จุด b เรียกว่า elastic limit เป็นจุดสุดท้ายที่ความยาวของวัสดุจะกลับมายาวเท่าเดิมได้ เมื่อปล่อยแรงจาก o-b วัสดุเป็นแบบ elastic

- 4. จุด c เรียกว่า yield point เป็นจุดที่วัสดุยืดตัวออกโดยไม่ต้องเพิ่มแรงจุดนี้จะสังเกตเห็นได้ชัดสำหรับ mild steel ส่วนวัสดุอื่นจะไม่มีจุดนี้
- 5. จาก c-e เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบ plastic นั่นคือวัสดุยืดออกถาวรถ้าปล่อยแรงให้หดกลับมา
- 6. จาก o-d การยืดเกิดขึ้นทุกส่วนตลอด gauge length
- 7. จาก d-e การยืดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเฉพาะบริเวณที่จะหักหรือขาดเท่านั้นมีคอคอด (waist หรือ neck)
- 8. จุด d เป็นจุดที่มี stress สูงสุดเรียกว่า tensile strength ของวัสดุหรือเรียกว่า Ultimate tensile strength คำนวณได้จาก

$$\text{Ultimate tensile strength} = \frac{\text{แรงที่จุด d}}{\text{พื้นที่หน้าตัดเดิม}} \tag{2.1}$$

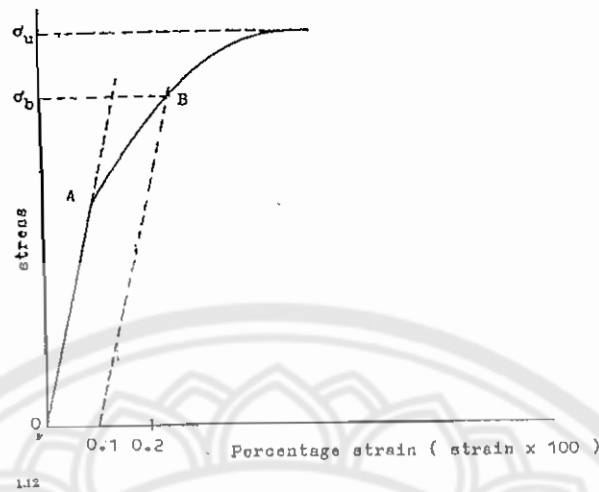
- 9. จุด e เรียกว่า rupture point หรือ breaking poin เป็นจุดที่วัสดุขาดออกจากกัน ถ้าเราขยายกราฟออกจะเป็นดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟ stress และ strain [2]

จุดบนเรียกว่า upper yield point จุดล่างเรียกว่า lower yield point และช่วงที่ยืดออกโดยไม่ต้องเพิ่มแรงจะยาวประมาณ 10 เท่าของช่วงก่อนที่จะเริ่ม yield stress ที่จุด yield point นี้เรียกว่า yield stress σ_y (หรือ σ_{yp})

สำหรับวัสดุ mild steel เหล็กหล่อ กราฟ stress และ percentage strain จะได้ กราฟดังรูปที่ 2.10 จุด A เป็น limit of proportionality แต่ yield point ไม่มี มีแต่ค่า tensile strength (σ_u) ดังนั้นจึงหาค่าอื่นไว้เปรียบเทียบกับ ลากเส้นจาก 0.1 เปอร์เซ็นต์ strain ให้ขนานกับ OA ตัดกราฟที่ B stress ที่จุด B (σ_B) เรียกว่า 0.1 percent proof stress บางครั้งก็อาจจะหาค่า 0.2 percent proof stress อีกค่าก็ได้



รูปที่ 2.10 กราฟของแรงกับขนาดที่ยืดออก [2]

2.8.1.1 ค่ายังโมดูลัส (modulus of elasticity : E)

จาก กราฟ รูป 2.10 ช่วง o-a เป็นเส้นตรง Robert Hooke ประมาณปี ค.ศ.1678 ได้ทำการทดลองดึงสปริงและตั้งกฎจากผลการทดลองไว้ว่า “ ภายในเขตของ elastic limit (ซึ่งต้องเป็น proportional limit) แรงจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับส่วนที่ยืดออกหรือ stress จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับstrain ” เรียกว่า Hooke's Law

$$\text{ตั้งนั้น} \quad \frac{\text{แรง}}{\text{ส่วนที่ยืดออก}} = \text{ค่าคงที่} \quad (2.2)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \text{ค่าคงที่} \quad (2.3)$$

2.8.1.1.1 Tension และ Compression

ค่าคงที่ของวัสดุเรียกว่า Young's modulus หรือ modulus of elasticity : E

$$\frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = E \quad (2.4)$$

$$\frac{\sigma}{\epsilon} = E \quad (2.5)$$

ป 7N
752
จน
21610
25256



(2.6) สำนักหอสมุด
22 ก.ค. 2547

4740416
(2.7)

$$\frac{P/A}{\delta/l} = E$$

$$\therefore \delta = \frac{PL}{AE}$$

ตารางที่ 2.3 ค่าโดยประมาณของ Tensile strength , E และ G ของวัสดุต่าง [2]

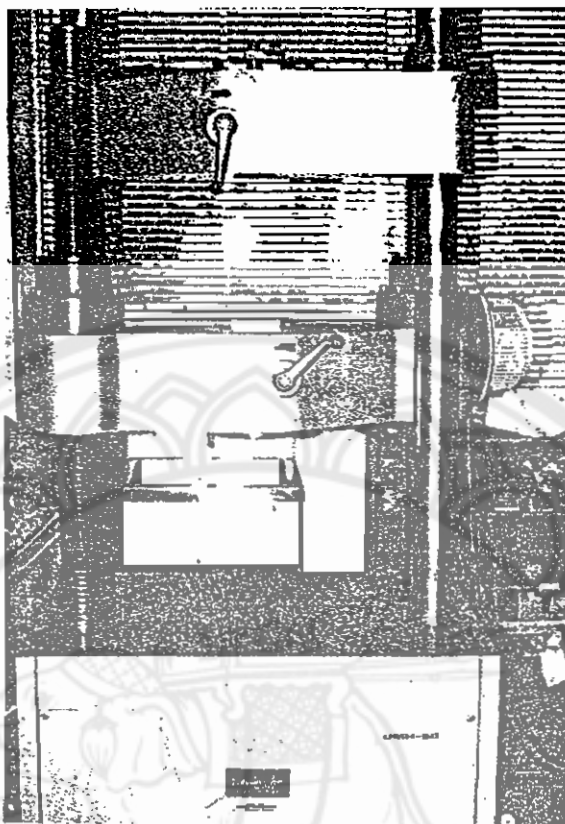
Material	Tensile Strength σ_u MN/m ²	Modulus of elasticity E (GN/m ²)	Modulus of Rigidity G (GN/m ²)
Wrought iron	300 – 400	190	83
Steel	450 – 600	205	90
Cast iron	120 – 160	110	48
Copper	300 – 350	96	39
(hard drawn)			
Brass	300 – 400	83	37
Wood		9.6	0.55

2.8.1.2 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (Percentage elongation)

$$\text{เปอร์เซ็นต์การยืดตัว} = \frac{L_1 - L_0}{\Delta L} \times 100 \quad (2.8)$$

ความยาวสุดท้ายหมายถึงความยาว gauge length ของวัสดุทดลองตอนขาดส่วนความยาวเดิมคือความยาว sauge length ตอนเริ่มต้น

ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวนี้เป็นค่าบอกความสามารถในการยืดตัวของโลหะวัสดุประเภท ductile เช่น mild seel , ทองแดง , ทองเหลือง , อลูมิเนียม , เงินและทอง จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงอาจมีค่าตั้งแต่ 15 ถึง 75% ส่วน brittle material (พวกเปราะ) เช่นเหล็กหล่อคอนกรีตจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวค่าประมาณ 2%



รูปที่ 2.11 ลักษณะเครื่องทดสอบแรงดึง [2]

2.8.2 การทดสอบความแข็ง

เครื่องวัดความแข็งของโลหะเกิดขึ้นจากในครั้งแรกมนุษย์เราทดลองเอาวัตถุ 2 ชนิดมาเสียดสีกัน ระหว่างการเสียดสีอยู่นั้นวัตถุที่มีความแข็งแรงมากกว่าก็จะเสียดสีผิวของวัตถุที่อ่อนกว่าให้เป็นรอย หรือหลุดออกมาจึงทำให้การทดลองกันเรื่อยมาจนกระทั่งได้หาวัตถุที่แข็งที่สุดได้ คือเพชรนั่นเองเมื่อได้ เพชรเป็นวัตถุที่แข็งที่สุดแล้วก็ใช้เพชรนั้นเป็นมาตรฐานของความแข็งและใช้เพชรเป็นหัวกด (Indenter) สำหรับเครื่องวัดต่างๆและระบบการวัดความแข็งแรงเสียดสีนั้นเรียกว่าระบบ Mohr และเป็นจุดเริ่มการ สร้างเครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบต่างๆ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบค่าความแข็งของโลหะและ เซรามิกและแร่ต่างๆ [2]

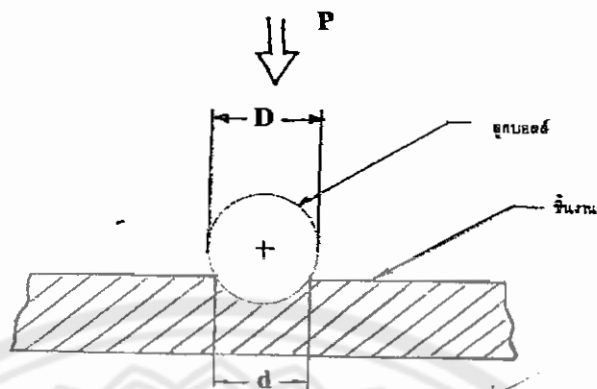
	Hardness		
	Vickers or Brinell	Mohs	
	3000	10	Diamond
Tantalum carbide	2000		
Alumina ceramics		9	Corundum
Zircon ceramics	1000	8	Topaz
Polycrystalline glass			
Manganese steels	500	7	Quartz
Titanium	300	6	Feldspar
	200		
Carbon steels		5	Apatite
	100	4	Fluorite
Aluminum			
	50	3	Calcite
Magnesium		2	Gypsum
	30		
	20	1	Talc
Hard lead alloys	10		
Soft lead	5		
	3		
	2		

2.8.2.1 หลักการและทฤษฎีการทดสอบความแข็ง

ในการทำการอบชุบโลหะด้วยความร้อน (Heat Treatment) นั้น การรู้ค่าความแข็งแรงของโลหะ นั้นเป็นสิ่งจำเป็นมากเพราะการทำการอบชุบโลหะด้วยความร้อน โลหะจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูปร่างหรือขนาดความแข็งแรงของโลหะนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปฉะนั้นการทำการอบชุบเสียก่อนและหลัง ทุกครั้งควรทำการทดสอบความแข็งเสียก่อนการทดสอบความแข็งยังเป็นตัวใช้ตรวจสอบความผิดพลาด ในวิธีการที่ใช้หรือความสามารถในทางปฏิบัติในการอบชุบของแต่ละครั้งด้วย

2.8.2.1.1 การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Tester HB)

เป็นเครื่องทดสอบแบบหนึ่งซึ่งใช้แรงมากกระทำที่หัวกดซึ่งสร้างแบบเป็นรูปทรงกลมและนำมาทดสอบความแข็งบนชิ้นงานก็จะเกิดรอยกดเป็นรูปทรงกลมบนพื้นผิวของชิ้นงานเสร็จแล้ววัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด นำค่าที่ได้ไปคำนวณค่าความแข็งแรงจากสูตรดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.12 ภาพแสดงการกดบนพื้นผิวชิ้นงาน [2]

$$\text{สูตรคำนวณ} \quad HB = \frac{2P}{3.14 D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.9)$$

HB = สัญลักษณ์ค่าความแข็งแบบ Brinell

P = น้ำหนักของแรงที่มากระทำต่อหัวกดจะเป็นระบบเครื่องกลหรือระบบไฮดรอลิกแล้วแต่บริษัทที่ผลิต (Load หน่วยเป็น Kg.)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกดมีหน่วยเป็น mm

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกดมีหน่วยเป็น mm

หัวกด ของ Brinell มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. Steels Ball หรือ Standard Ball ทำด้วยเหล็กกล้าผสมพิเศษ
2. Tungsten Carbide Ball เป็น โลหะผสมพิเศษ

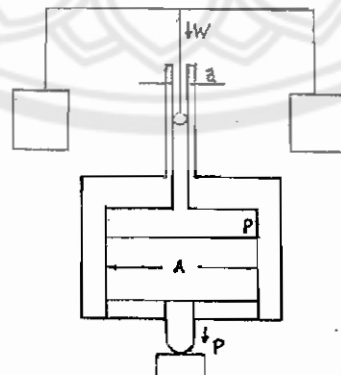
แรงกด (Load) และขนาดของหัวกด (Indenter) ขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาของชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบหาความแข็งขนาดของแรงกด Load หัวกด Indenter และชนิดของโลหะที่ใช้วัดด้วยเครื่องแบบ Brinell ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ชนิดของโลหะที่ใช้วัดด้วยเครื่องแบบ Brinell [2]

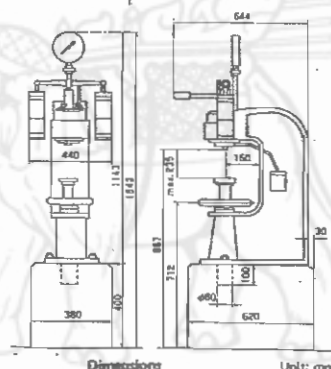
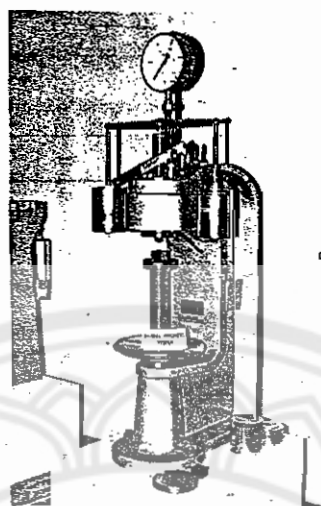
Diameter of Ball (m.m.)	Load (kg)			
	Steels and Cast Iron	Copper and its Aluminium Alloys	Aluminium	Lead Tin and Their Alloys
	$F/D^2 = 30$	$F/D^2 = 10$	$F/D^2 = 5$	$F/D^2 = 1$
1	30	10	5	1
2	120	40	20	4
5	750	250	125	25
10	3,000	1,000	500	100

การทดสอบด้วยเครื่องแบบ Brinell

1. ชิ้นงานที่นำทดสอบจะต้องมีความหนาน้อย 8 เท่าของความลึกของรอยกดส่วนมากจะใช้ครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวกด
2. ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของรอยกดแต่ละรอย หรือระยะห่างจากขอบชิ้นงานควรห่างอย่างน้อย 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยกด
3. ผิวของชิ้นงานจะต้องเรียบสะอาดและขนาน เพื่อจะได้ค่าความแข็งที่ถูกต้อง
4. ไม่เหมาะกับการวัดชิ้นงานหรือโลหะที่มีความแข็งเกิน 500 HB
5. Standard ball ไม่ควรใช้ชิ้นงานที่มีความแข็งเกิน 450 HB ถ้าหากชิ้นงานแข็งเกินควรใช้หัวกดแบบ tungsten carbide ball



รูปที่ 2.13 แสดงหลักการทำงานของเครื่องทดสอบความแข็ง [2]



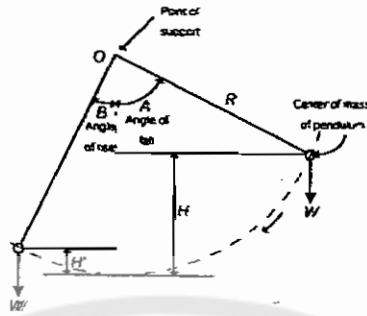
รูปที่ 2.14 เครื่องทดสอบความแข็ง [2]

2.8.3 การทดสอบแรงกระแทก

2.8.3.1 หลักการและทฤษฎีการทดสอบแรงกระแทก

การทดสอบแรงกระแทกแบบ Dynamic Test โดยการปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักตกลงมากระทบเหล็กชิ้นงานจนบิดงอเสียหายการปล่อยให้ตุ้มน้ำหนักตกลงมาจะก่อให้เกิดแรงกระแทกซึ่งสามารถคำนวณเป็นพลังงานออกมาได้

พลังงานของการกระทบเพื่อทำให้ชิ้นงานเสียหายจะเท่ากับผลต่างของพลังงานที่ได้จากลูกตุ้มก่อนกระทบและหลังกระทบ พลังงานนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของการแกว่งของลูกตุ้ม และสามารถคำนวณได้จากน้ำหนัก และมุมที่แขนของลูกตุ้มกระทำกับแนวดิ่ง มุมที่ลูกตุ้มทำกับแนวดิ่งในตอนแรกก่อนที่จะปล่อยให้ตก เรียกว่า มุมตก (Angle of Fall) ส่วนมุมที่ลูกตุ้มทำกับแนวดิ่งสูงสุดหลังจากกระทบชิ้นงานแล้วเรียกว่า มุมงย (Angle of Rise)



รูปที่ 2.15 หลักการทดสอบแรงกระแทก [3]

$$\text{พลังงานเริ่มต้น (Initial Energy)} \quad WH = WR(1-\cos A) \quad (2.10)$$

$$\text{พลังงานหลังกระทบ} \quad WH' = WR(1-\cos B) \quad (2.11)$$

$$\text{พลังงานที่ถูกใช้ไปในการกระทบเหล็กชิ้นงานโดยตรง} = W(H-H') \quad (2.12)$$

$$= WR(\cos B - \cos A) \quad (2.13)$$

เมื่อ $W =$ น้ำหนักของลูกตุ้ม

$H =$ ความสูงของจุดศูนย์กลางลูกตุ้มในตำแหน่งสูงสุดเมื่อตั้งมุมตก

$H' =$ ความสูงของจุดศูนย์กลางลูกตุ้มในตำแหน่งสูงสุดเมื่อเกิดมุมเงย

$A =$ มุมตกเป็นองศา

$B =$ มุมเงยเป็นองศา

$R =$ รัศมีของลูกตุ้มวัดจากระยะจุดศูนย์กลางจุดหมุนถึงคมมีดช่วงตัดเหล็ก

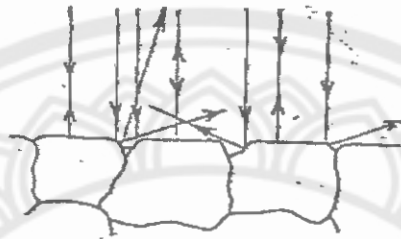
ถ้ามุมตก (มุม A) มีค่าเป็น 90° ก็จะทำให้การคำนวณง่ายขึ้นเพราะ $\cos 90^\circ = 0$

2.9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาค (microstructure) คือโครงสร้างของโลหะที่มีกำลังขยาย 100 เท่า การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของโลหะเป็นการศึกษาถึงรูปร่าง, ขนาด, การจัดเรียงตัวของผลึก และ ลักษณะของเกรน ในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะนั้นเพื่อนำไปใช้ในการเลือกวัสดุมาใช้งานให้เหมาะสมกับความต้องการเพราะวัสดุแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน การที่จะทำให้อายุการใช้งานได้ตรงตามความต้องการได้นั้นเราต้องมาดูที่กระบวนการผลิตวัสดุนั้นและทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเนื่องจากโครงสร้างที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้คือโครงสร้างจุลภาคเท่านั้น

เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุทึบ การศึกษารูปร่างขนาดและการจัดเรียงตัวของผลึก นั้นจึงต้องตัดชิ้นงานตามแนวที่ต้องการแล้วนำไปขัดมัน, ถัดกรด โดยกรดจะกัดตามขอบเกรนรุนแรงกว่าส่วนอื่น

ของผลึกเพราะขอบเกรนเป็นส่วนที่มีข้อบกพร่องมากมีที่สุด หลังจากกักครดแล้วขอบเกรนจะถูกกัดเป็นร่อง เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ การสะท้อนของลำแสงที่ตกกระทบเกรนและขอบเกรนหันเหออกนอกทิศทางเดิม ดังรูปที่ 2.16 จึงเป็นขอบเกรนเป็นสีดำ (มืด) ขณะที่เนื้อเกรนเป็นสีเหลือง(สว่าง) ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 การสะท้อนของลำแสงที่ตกกระทบเกรนและขอบเกรน [3]



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของโลหะ [3]

2.9.1 วิธีศึกษาโครงสร้างของโลหะ

การศึกษาโครงสร้างของโลหะนั้นต้องคำนึงเสมอว่าชิ้นงานที่ตัดมาตรวจสอบนั้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของโลหะผลึกใดที่เห็นเป็นวงกลมที่จริงแล้วอาจเป็นทรงกลมหรือทรงกระบอกก็ได้ตาข่ายที่อยู่รอบๆ ผลึกที่ปรากฏเป็นระนาบนั้นคือ รอยตัดผ่านเปลือกที่ห่อหุ้มผลึกต่าง ๆ

การวิเคราะห์โครงสร้างของโลหะด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคัลหรืออิเล็กตรอนจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโลหะผสม แต่ไม่สามารถบอกได้ว่าอะตอมของส่วนผสมใน โลหะนั้นกระจายตัวเป็นอย่างไร

2.9.1.1 ขั้นตอนการเตรียมงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ขั้นตอนการเตรียมงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน คือ

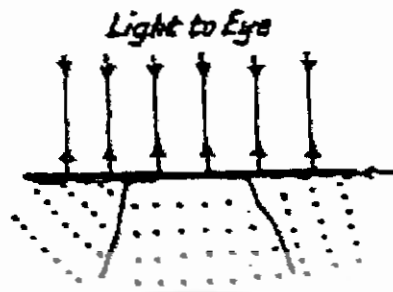
1. เลือกและตัดตัวอย่างชิ้นงาน(Sampling และ Sectioning) เป็นการคัดเลือกงานที่เหมาะสมและตัดเตรียมจำนวนที่ต้องการ

2. ครึ่งชิ้นงานและหมายงานเพื่อให้จับถือหรือยึดได้สะดวกขณะเครียมและตรวจสอบ เพื่อให้มีขนาดเหมาะสมกับเครื่องหรือต้องตรวจสอบเพื่อให้ทำเครื่องหมายได้ง่าย เช่น หมายเลขชิ้นงาน เป็นต้น

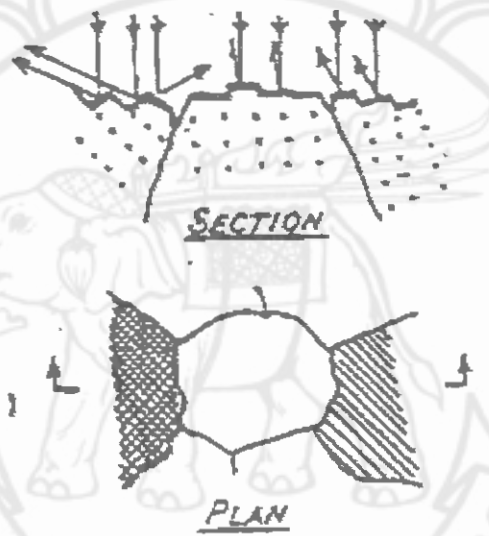
3. ขัดด้วยกระดาษทราย (Grinding) เริ่มด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบ 180 และเปลี่ยนเบอร์ที่ละเอียดเช่น 220 , 240 , 320 , 400 , 600 , 1000 และ 1200 การขัดควรขัดให้ไปทิศทางเดียวกันถ้าต้องการเปลี่ยนเบอร์ใหม่จึงเปลี่ยนทิศทางให้ตั้งฉากกับทิศทางรอยขัดเดิมและควรมีน้ำหล่อเย็นเสมอเพื่อระบายความร้อนและน้ำจะช่วยพัดพาเอาเศษจากการขัดออกไปการขัดมีหลายวิธีเช่นวางกระดาษทรายน้ำบนแผ่นกระจกแล้วขัดด้วยมือใช้เครื่องขัดขัดแบบงานหมุนแล้วจับงานด้วยมือหรือขัดอัตโนมัติ

4. ขัดมัน (Polishing) เพื่อกำจัดรอยจากกระดาษทรายและทำให้ผิวงานเรียบเป็นเงาตั้งกระจก ซึ่งอาจขัดด้วยวิธีกลโดยงานขัด (ใช้มือจับหรืออัตโนมัติ) ผงขัดที่ใช้เพื่อขัดมันมีหลายชนิด เช่น อลูมินา (Al_2O_3) แมกนีเซียมออกไซด์ (Mgo) , โครมิกออกไซด์ (Cr_2O_3) , เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และกากเพชร (Diamond compound) โดยผงขัดเหล่านี้ต้องละลายในน้ำก่อนใช้งาน และถ้าใช้น้ำไม่ได้อาจละลายในสารละลายอื่น เช่น ethylene glycol, alcohol, Kerosine หรือ glycerine นอกจากนี้ยังมีวิธีขัดมันด้วยวิธี อิเล็กโตรไลต์ เรียกว่า Electrolytic polishing ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าการขัดมันด้วยวิธีกล เครื่องขัดมันอิเล็กโตรไลต์มีทั้งชนิดตั้งกับที่และชนิดที่เคลื่อนย้ายได้ง่ายเหมาะกับการปฏิบัติงานภาคสนาม ส่วนประกอบที่สำคัญของตัวเครื่องคือ Electrolytic cell โดยมีชิ้นงานเป็นขั้วบวก เมื่อจับสวิทซ์ไฟฟ้า จะไหลครบวงจรผ่านอิเล็กโตรไลต์ น้ำยาอิเล็กโตรไลต์จะทำปฏิกิริยากับผิวงานเกิดเป็นสารหนืดเคลือบตามผิวงานเรียกว่า Anolyte Layer ซึ่งจะเป็นตัวทำให้ผิวงานเกิดความราบเรียบผิวงานก่อนขัดมันนั้น มีลักษณะเป็นรอยขรุขระ ส่วนนูนของรอยขัดจะมีชั้น Anolyte บางกว่าจึงมีความต้านทานต่อกระแสต่ำกว่าส่วนเป็นรอยลึก จึงทำให้รอยนูนละลายอย่างรวดเร็ว ผิวงานจึงราบเรียบตามต้องการ

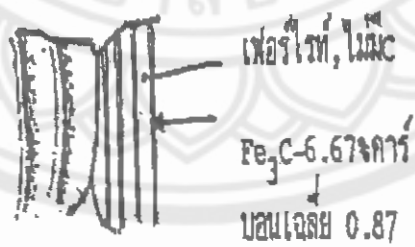
5. การกัดผิวงาน (Etching) ผิวงานที่ผ่านการขัดมันมาแล้วจะสามารถสะท้อนแสงได้ใกล้เคียงกัน จึงมองเห็นเป็นพื้นเรียบสว่างตลอดผิวขัดและอาจมองเห็นรอยแตกร้าว หลุมหรือรูพรุนแต่ยังไม่สามารถมองเห็นโครงสร้างมหภาคหรือจุลภาคจึงต้องนำไปกัดครูดแต่ละเฟสจะถูกกัดครูดไม่เท่ากัน พอตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ แสงที่ตกกระทบบนแต่ละเฟสจะสะท้อนกลับคนละทิศทาง ส่วนที่กัดครูดน้อยแสงจะสะท้อนกลับมากจึงเห็นเป็นบริเวณสว่างส่วนที่กัดครูดเป็นร่องลึกแสงจะสะท้อนออกนอกเลนส์จึงเห็นเป็นสีเทา หรือดำ



รูปที่ 2.18 ชั้นบางเหนียวจากการขัดมันปกคลุมผิวงานแสงจึงสะท้อนตามปกติ[3]



รูปที่ 2.19 หลังจากกัดกรดมัวงานขรุขระแสงสะท้อนหักเห [3]



รูปที่ 2.20 ลักษณะโครงสร้างเพอไรต์ (เฟอร์ไรต์+Fe₃C) [3]

2.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ

2.10.1 วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดสอบสมมติฐานของผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยประชากร 2 ประชากร หรือ 2 กลุ่ม เช่น เปรียบเทียบยอดขายสินค้า 2 ยี่ห้อ จะใช้สถิติทดสอบ t หรือ Z ดังกล่าวแล้วในบทที่ 15 แต่ถ้าต้องการเปรียบเทียบยอดขายสินค้า 3 ยี่ห้อ การใช้สถิติทดสอบ Z หรือ t จะต้องทำการทดสอบครั้งละ 1 คู่ เช่น ถ้ามี 3 ประชากรจะต้องทดสอบ 3 ครั้ง หรือ 3 คู่ ดังนี้

$$1. H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

$$2. H_0: \mu_1 = \mu_3$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_3$$

$$3. H_0: \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1: \mu_2 \neq \mu_3$$

จึงมีการนำการวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งเป็นวิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยประชากรตั้งแต่ 3 ประชากรขึ้นไป โดยทำการทดสอบเพียงครั้งเดียว สมมติฐานในการทดสอบเป็นดังนี้

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1: \text{มี } \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย 1 คู่ ; } i, j = 1, 2, 3$$

ถ้าผลของการทดสอบ คือ ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 จะไม่สามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของประชากรใดบ้างที่ต่างกัน อาจจะเป็นประชากรที่ 1 ต่างจาก 2 หรือต่างจาก 3 หรือ 2 ต่างจาก 3 หรือแตกต่างกันทั้ง 3 ประชากรก็ได้ ดังนั้นถ้าผลการทดสอบ คือ ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 จะต้องทำการทดสอบเพิ่มเติมต่อไปว่าประชากรใดบ้างที่มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน โดยการทดสอบครั้งละคู่ผลการทดสอบ คือ ยอมรับสมมติฐาน H_0 นั้นจะสรุปได้ว่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ประชากร ไม่แตกต่างกันจะไม่ต้องทำการทดสอบเพิ่มเติม

2.10.2 หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

หลักเกณฑ์สำคัญที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานซึ่งเกี่ยวกับความแตกต่างของค่าเฉลี่ยตั้งแต่ค่าของ 3 ประชากร หรือ 3 กลุ่มขึ้นไป คือ การแยกความแปรปรวน หรือ ความผันแปรทั้งหมดของข้อมูล ออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ความแปรปรวนหรือความผันแปรระหว่างกลุ่มหรือระหว่างประชากร (Between-Group Variability)

2. ความแปรปรวนหรือความผันแปรภายในกลุ่มหรือภายในประชากร (Within-Group

Variability) หรือ $\text{Total Variability} = \text{Between - Group Variability} + \text{Within - Group Variability}$

คนละข้อมูลของแต่ละกลุ่มหรือแต่ละประชากรแตกต่างกันทั่วไปปัจจัยหรือตัวแปรที่ทำให้ข้อมูลแตกต่างกันอาจจะมีหลายปัจจัยหรืออาจจะมีเพียงปัจจัยเดียวหรือการที่ข้อมูลแตกต่างกันเนื่องจากหน่วยตัวอย่างที่ศึกษาได้รับปัจจัยระดับ

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบความแตกต่างของข้อมูลที่ได้รับปัจจัยที่ต่างระดับกัน จะทำโดยการสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance Table) หรือเรียกย่อๆ ว่า ANOVA เพื่อทดสอบความแตกต่างระดับปัจจัย โดยตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ และปัจจัยจะต้องเป็นตัวแปรเชิงกลุ่ม

2.10.3 ประเภทของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในขั้นตอนนี้จะแบ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1. การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว หรือแบบมีปัจจัยเดียว (One - Way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวเป็นการจำแนกข้อมูลด้วยตัวแปรหรือปัจจัยเพียงปัจจัยเดียวหรือเป็นการวิเคราะห์ความแตกต่างกันของระดับต่างๆ ของปัจจัยที่สนใจนั่นเอง เช่น การคาดว่าปัจจัยที่ทำให้รายได้เฉลี่ย (ตัวแปรเชิงปริมาณ) ต่างกันมีเพียงปัจจัยเดียว คือ อาชีพ (ตัวแปรเชิงกลุ่ม)

2. การวิเคราะห์แปรปรวนแบบหลายทางหรือแบบมีหลายปัจจัย (Multiple - Factors ANOVA)

เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล โดยการจำแนกหรือแบ่งข้อมูลด้วยปัจจัยตั้งแต่ปัจจัย

2 ปัจจัยขึ้นไป และแต่ละปัจจัยก็มีหลายระดับ เช่น ความแตกต่างของเงินเดือนเฉลี่ยจะมีอิทธิพลจากสาขาที่จบ เพศ ตำแหน่งงาน เป็นต้น ในที่นี้เงินเดือนเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ แต่สาขาที่จบ เพศ และตำแหน่งงานเป็นตัวแปรเชิงกลุ่ม

2.10.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกทางเดียวหรือแบบมีปัจจัยเดียว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวเป็นการวิเคราะห์ที่คาดว่า มีเพียงปัจจัยเดียวที่ทำให้ข้อมูลแตกต่างกัน หรือเป็นการวิเคราะห์ความแตกต่างกันของระดับที่ต่างกันของปัจจัยที่คาดว่า มีอิทธิพลต่อข้อมูล ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวคือ การทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของประชากรที่รับปัจจัยที่ต่างระดับกันตั้งแต่ 3 ระดับขึ้นไป นั่นคือ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 3 ประชากร / กลุ่มขึ้นไป โดยถือว่าหน่วยที่ได้รับปัจจัยระดับเดียวกันเป็นประชากรเดียวกันหรือกลุ่มประชากรเดียวกัน และหน่วยที่ได้รับปัจจัยต่างๆ กันเป็นคนละประชากร หรือ คนละกลุ่ม เช่น คาดว่าปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้รายได้เฉลี่ยแตกต่างกัน คือ อาชีพ จึงแบ่งคนแยกตามอาชีพ ถ้าแบ่งเป็น 5 อาชีพ แสดงว่ามี 5 กลุ่ม หรือ 5 ประชากร แล้วนำรายได้เฉลี่ยของแต่ละกลุ่มมาเปรียบเทียบกัน เป็นต้น

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 3 ประชากร / กลุ่มนั้น จะต้องเก็บข้อมูลตัวอย่างจากแต่ละกลุ่ม แล้วนำข้อมูลตัวอย่างมาทดสอบเพื่ออ้างอิงถึงประชากร

2.10.4.1 เงื่อนไขของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนมีเงื่อนไข 3 ประการ ดังนี้

1. การสุ่มตัวอย่างแต่ละชุดจะต้องสุ่มอย่างเป็นอิสระกัน
2. สุ่มตัวอย่างจากประชากรที่มีการแจกแจงแบบปกติ
3. ค่าแปรปรวนของแต่ละประชากรต้องเท่ากัน

เช่น ถ้าคิดว่าปัจจัยที่ทำให้บัณฑิตใหม่มีเงินเดือนต่างกันเพียงปัจจัยเดียว คือ สาขาที่จบซึ่งแบ่งเป็น 7 สาขา หรือ 7 ระดับ เท่ากับมี 7 ประชากร เมื่อต้องการทดสอบ

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_7$$

$$H_1 : \text{มี } \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อย } 1 \text{ คู่; } i \neq j$$

โดยที่ μ_i = รายได้เฉลี่ยของผู้จบสาขาที่ i ; $i = 1, 2, \dots, 7$ จะต้องมีเงื่อนไขดังนี้

1. สุ่มตัวอย่างจากประชากรที่ i มาขนาด n_i (n จะเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้) อย่างเป็นอิสระ
2. รายได้ของแต่ละประชากร (แต่ละสาขาที่จบ) ต้องมีการแจกแจงแบบปกติ
3. $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_7^2$ โดยที่ σ_1^2 = รายได้ของความแปรปรวนของประชากรที่ 1

2.10.4.2 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว

ในรูปทั่วไปถ้าปัจจัยที่สนใจมี k ระดับ เช่น เปรียบเทียบวิธีการสอน 4 วิธี ในที่นี้ $k = 4$ จะต้องมีตัวอย่าง k ชุดที่เป็นอิสระกันจาก k ประชากร

โดยที่ X_{ij} = ข้อมูลตัวอย่างหน่วยที่ j ที่ได้รับปัจจัยระดับที่ i ; $i = 1, 2, 3, \dots, k$; $j = 1, 2, 3, \dots, n_i$

$$\text{ค่าเฉลี่ยตัวอย่างชุดที่ } i = \bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}}{n_i} \text{ ขนาดของตัวอย่างทั้งหมด } n = \sum_{i=1}^k n_i$$

ความผันแปรทั้งหมด = ความผันแปรระหว่างกลุ่ม + ความผันแปรภายในกลุ่ม

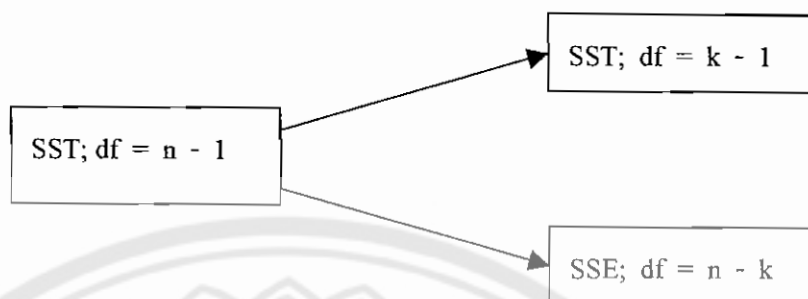
$$SST = SSTr + SSE \quad (2.14)$$

SST = ความผันแปรทั้งหมด (Total Sum Square)

SSTr = ความผันแปรระหว่างกลุ่ม (Between – Groups Sum Square)

SSE = ความผันแปรภายในกลุ่ม (Within – Group Sum Square หรือ Residual Sum Square)

หรือเขียนเป็นแผนภาพได้ดังนี้



สรุปการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมีปัจจัยเดียว

สมมติฐาน $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$

H_1 : มี $\mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

สถิติทดสอบ $F = MSTrt$

ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (1-WAY ANOVA) [4]

แหล่งความแปรผัน	Df	Sum Square	Mean Square	F
Between – Groups	$k - 1$	SSTrt	MSTrt	MSTrt
Within – Groups	$n - k$	SSE	MSE	MSE
Total	$n - 1$	SST		

2.10.4.3 การเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparisons)

การทดสอบค่าเฉลี่ย k ประชากร ซึ่งมีสมมติฐานของการทดสอบเป็น

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$

H_1 : มี $\mu_i \neq \mu_j$ อย่างน้อย 1 คู่; $i \neq j$

ผลการทดสอบอาจจะเป็น

1. ยอมรับ H_0 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของทั้ง k ประชากรเท่ากัน หรือ
2. ปฏิเสธ H_0 แสดงว่ามีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 2 ประชากรแตกต่างกัน

เมื่อปฏิเสธ H_0 จะไม่ทราบว่าค่าเฉลี่ยประชากรใดบ้างที่ไม่เท่ากัน ผู้วิเคราะห์จะต้องทำการทดสอบต่อไปว่าค่าเฉลี่ยใดบ้างไม่เท่ากัน โดยอาจจะใช้วิธีการต่อไปนี้

1. ทดสอบค่าเฉลี่ยประชากรครั้งละคู่ ($H_1 : \mu_i \neq \mu_j$) โดยใช้สถิติทดสอบ t หรือ Z
2. ใช้การประมาณค่าแบบช่วงของผลต่างค่าเฉลี่ย 2 ประชากร $L < \mu_i - \mu_j < U$

2.1 ถ้า L มีค่าติดลบ แต่ U เป็นค่าบวก แสดงว่า μ_i ไม่แตกต่างจาก μ_j
 2.2 ถ้า L และ U เป็นบวกทั้งคู่ หรือเป็นลบทั้งคู่ แสดงว่า μ_i ไม่เท่ากับกับ μ_j
 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยครั้งละคู่ใน ข้อ 1. และ 2. จะเสียเวลามาก ถ้ามีจำนวนกลุ่ม (k) มาก
 เนื่องจากจำนวนทั้งคู่ที่ต้องเปรียบเทียบ = kC_2 คู่และระดับนัยสำคัญของการทดสอบทีละคู่จะเป็น $\alpha / {}^kC_2$ นักสถิติจึงคิดวิธีการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยได้ครั้งละหลายๆ คู่ และมีระดับนัยสำคัญไม่เกิน α ที่กำหนด ซึ่งเรียกว่า การเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Multiple Comparison)

วิธีการเปรียบเทียบซึ่งโปรแกรม SPSS มีอยู่ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. วิธีการเปรียบเทียบเชิงซ้อนที่มีเงื่อนไขว่า ค่าแปรปรวนของข้อมูลทุกชุดต้องเท่ากัน ประกอบด้วย

- | | | |
|---------------|----------------|---------------------|
| | 6. R-E-G-WQ | 11. Hochberg's GT2 |
| 2. Bonferroni | 7. S-N-K | 12. Gabriel |
| 3. Sidak | 8. Tukey | 13. Waller – Suncan |
| 4. Scheffe | 9. Tukey's – b | 14. Dunnett |
| 5. RE-G-WF | | |

2. วิธีการเปรียบเทียบเชิงซ้อนที่ไม่มีเงื่อนไขเกี่ยวกับการเท่ากันของค่าแปรปรวน

- | | |
|-----------------|-------------------|
| 1. Tamhane's T2 | 3. Games – Howell |
| 2. Dunnett's T3 | 4. Dunnett's C |

2.10.4.3.1 Least – Significant Different (LS)

LSD หรือ Fisher's Least – Significant Difference ใช้ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประชากรได้ครั้งละหลายคู่ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณค่า LSD โดยที่

$$LSD = t_{\alpha/2}; n-k \sqrt{MSE} \sqrt{\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}} \text{ (ค่า MSE ได้จาก 1-WAY ANOVA)} \tag{2.15}$$

$$\text{ถ้า } n_i = n_j \text{ จะทำให้ } LSD = t_{\alpha/2}; n-k \sqrt{\frac{2MSE}{n_i}} \tag{2.16}$$

2. คำนวณความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย $\bar{x}_i - \bar{x}_j$

3. นำค่า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j|$ เปรียบเทียบค่า LSD

3.1 ถ้า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| > \text{LSD}$ แสดงค่า $\mu_i \neq \mu_j$

3.2 ถ้า $|\bar{x}_i - \bar{x}_j| \leq \text{LSD}$ แสดงค่า μ_i ไม่แตกต่างจาก μ_j

2.10.5 การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis)

ถ้าตัวแปรอิสระ k ตัว (X_1, X_2, \dots, X_k) ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม Y โดยที่ความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้น จะใช้สมการความถดถอยเชิงพหุ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X_1, X_2, \dots, X_k ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + e \quad (2.17)$$

โดยที่ β_0 = ส่วนตัดแกน Y เมื่อกำหนดให้ $X_1 = X_2 = \dots = X_k = 0$

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ เป็นสัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน (Partial Regression Coefficient) โดยที่ β_j เป็นค่าแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม Y เมื่อตัวแปรอิสระ X_j เปลี่ยนไป 1 หน่วย โดยที่ตัวแปรอิสระ X ตัวอื่นๆ มีค่าคงที่ เช่น ถ้า X_1 เปลี่ยนไป 1 หน่วย ค่า Y จะเปลี่ยนไป β_1 หน่วย โดยที่ X_2, X_3, \dots, X_k มีค่าคงที่

2.10.6 เงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ

เงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุจะเหมือนกับเงื่อนไขของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย โดยที่สมการความถดถอยเชิงพหุเป็น

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + e \quad (2.18)$$

เงื่อนไขมีดังนี้

1. ความคลาดเคลื่อน e เป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงแบบปกติ
2. ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ นั่นคือ $E(e) = 0$
3. ค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า $V(e) = \sigma_e^2$
4. e_i และ e_j เป็นอิสระต่อกัน ; $i \neq j$ นั่นคือ covariance (e_i, e_j) = 0 โดยมีเงื่อนไขที่เพิ่มจากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายอีก 1 เงื่อนไข คือ
5. ตัวแปรอิสระ X_i และ X_j ต้องเป็นอิสระกัน

2.10.7 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของสมการความถดถอยเชิงพหุ

จากสมการความถดถอยเชิงพหุ ซึ่งมีพารามิเตอร์ $k + 1$ ตัว คือ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ การประมาณค่า $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ จะต้องใช้ข้อมูลตัวอย่างของ Y, X_1, X_2, \dots, X_k โดยใช้ตัวอย่างขนาด n จากสมการความถดถอยเชิงพหุ ในสมการที่ (2.18) และจะประมาณค่า Y หรือประมาณสมการที่ (2.18) ด้วย สมการที่ (2.19)

$$\text{หรือ } \hat{Y}_i = a + b_1X_{1i} + b_2X_{2i} + \dots + b_kX_{ki}$$

$$\text{โดยที่ } \hat{\beta}_0 = a, \hat{\beta}_1 = b_1, \hat{\beta}_2 = b_2, \dots, \hat{\beta}_k = b_k \quad (2.19)$$

ดังนั้น ค่าคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า Y_i ด้วย \hat{Y}_i คือ $Y_i - \hat{Y}_i = e_i$ หรือเรียกว่า Residual หรือ Error

2.10.8 ความหมายของสัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน

ถ้ามีตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม (Y) 3 ตัว คือ X_1, X_2 และ X_3 ของสมการถดถอยเชิงพหุ คือ $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + e$

$$\text{ค่าประมาณของ } Y \text{ คือ } \hat{Y} = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.20) ค่าประมาณของ $\beta_0, \beta_1, \beta_2$, และ β_3 คือ a, b_1, b_2 และ b_3 ตามลำดับโดยที่

a คือ ส่วนหรือระยะตัดแกน Y ซึ่งเมื่อกำหนดให้ $X_1 = X_2 = X_3 = 0$

b_1, b_2 และ b_3 เป็นค่าประมาณของสัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน ซึ่งมีหน่วยเหมือน Y และมีความหมายดังนี้

b_1 เป็นค่าซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X_1 หมายถึง ถ้า X_1 เพิ่มขึ้น 1 หน่วย จะทำให้ Y เปลี่ยนไป b_1 หน่วย (ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ b_1) โดยที่กำหนัดให้ตัวแปรอิสระอื่นๆ คือ X_2 และ X_3 มีค่าคงที่

b_2 เป็นค่าซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X_2 หมายถึง ถ้า X_2 เพิ่มขึ้น 1 หน่วย จะทำให้ Y เปลี่ยนไป b_2 หน่วย โดยที่ควบคุมให้ X_1 และ X_3 มีค่าคงที่

ในทำนองเดียวกับ b_3 จะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ X_3 โยคที่ถ้า X_3 เพิ่มขึ้น 1 หน่วยจะทำให้ Y เปลี่ยนไป b_3 หน่วย โดยควบคุมให้ X_1 และ X_2 มีค่าคงที่

2.10.9 การทดสอบสมการความถดถอยเชิงพหุโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว

จากสมการความถดถอยเชิงพหุ $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k + e$

ค่าแปรปรวนของ $Y =$ ค่าแปรปรวนที่เกิดจากอิทธิพลของ $X_1, X_2, \dots, X_k +$ ค่าแปรปรวนอย่างสุ่ม หรือ

$$SST = SSR + SSE \quad (2.21)$$

โดยที่ SST(Sum Square of Total) คือ ค่าแปรปรวนรวมทั้งหมดของ $Y = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$

SSR(Sum Square of Regression) คือ ค่าแปรปรวนของ Y เนื่องจากอิทธิพลของ X_1, \dots, X_k

SSE(Sum Square of Error or Sum Square of Residual) คือ ค่าแปรปรวนของ Y เนื่องจากอิทธิพลอื่นๆ หรือเรียกว่าค่าแปรปรวนอย่างสุ่ม $= \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$

ตารางที่ 2.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุ [4]

แหล่งแปรปรวน (SV)	องศาอิสระ (DF)	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ผลบวกกำลังสองเฉลี่ย (MS)	F
ความถดถอย (Regression)	K	SSR	MSR = SSR/k	$\frac{MSR}{MSE}$
ความคลาดเคลื่อน (Error) หรือ Residual	n-k-1	SSE	MSE = SSE / (n-k-1)	
ผลรวม(Total)	n-1	SST		

จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจะใช้ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ X_1, X_2, \dots, X_k โดยตั้งสมมติฐานไว้ดังนี้

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 \dots \beta_k = 0$$

$$H_1: \text{มี } \beta_i \text{ อย่างน้อย 1 ค่าที่ } \neq 0; i = 1, 2, \dots, k$$

สถิติทดสอบ $F = \frac{MSR}{MSE}$

$$MSE$$

เขตปฏิเสธ จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ถ้า $F > F_{k, n-k-1; 1-\alpha}$ หรือ significance ของสถิติทดสอบ $F < \alpha$

ผลของการทดสอบสมมติฐานอาจจะเป็น

1. ยอมรับสมมติฐาน $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_k = 0$ ซึ่งสรุปได้ว่า Y ไม่มีความสัมพันธ์กับ X ทั้ง k ตัว (X_1, X_2, \dots, X_k) ในรูปเชิงเส้น

2. ปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ซึ่งสรุปได้ว่ามี X_i อย่างน้อย 1 ตัว ที่มีความสัมพันธ์กับ Y ในรูปเชิงเส้น จึงต้องทดสอบต่อไปว่า X_i ตัวใดที่มีความสัมพันธ์กับ Y โดยใช้สถิติทดสอบ t

2.10.10 การประมาณค่าคลาดเคลื่อนของสมการความถดถอย

การประมาณค่าคลาดเคลื่อนของความถดถอย หรือการประมาณค่าแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน (σ_e^2) $S_e^2 = S_{y.12\dots k}^2 = S^2$ โดยที่ $S^2 = \frac{SSE}{n-k-1}$

ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าประมาณ คือ

$$S = \sqrt{s^2} = \sqrt{SSE / (n - k - 1)} = \sqrt{MSE} \quad (2.22)$$

2.10.11 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยแบบช่วง

ในการประมาณค่า β_i แบบช่วง จะต้องทราบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ b_i โดยที่แบ่งเป็น

1. ตัวอย่างมีขนาดเล็ก ค่าประมาณแบบช่วงของ β_i ที่ระดับความเชื่อมั่น $(1-\alpha)$ 100% คือ $b_i \pm t_{1-\alpha/2; n-k-1} S_{b_i}$

2. ตัวอย่างขนาดใหญ่ ค่าประมาณแบบช่วงของ β_i ที่ระดับความเชื่อมั่น $(1-\alpha)$ 100% คือ $b_i \pm Z_{1-\alpha/2} S_{b_i}$

หมายเหตุ; ใน SPSS จะใช้สถิติ t ไม่ว่าขนาดตัวอย่างจะเป็นเท่าใดก็ตาม เนื่องจากเมื่อขนาดตัวอย่างใหญ่ ค่า Z และ t จะเท่ากัน

2.10.12 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์ความถดถอย

ในการทดสอบเกี่ยวกับค่า β_i เมื่อมีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว จะมี 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots \beta_k = 0$

$H_1 : \text{มี } \beta_i \text{ อย่างน้อย 1 ค่าที่ } \neq 0; i = 1, 2, \dots, k$

การทดสอบจะใช้ F-Test จากตาราง ANOVA

ถ้ายอมรับ H_0 จะสรุปได้ว่า X_1, X_2, \dots, X_k ไม่มีความสัมพันธ์กับ y

ถ้าปฏิเสธ H_0 จะสรุปได้ว่ามี X_i อย่างน้อย 1 ตัวที่มีความสัมพันธ์กับ y จึงต้องทดสอบต่อใน
ขั้นที่ 2 ว่ามี x ตัวใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับ y

ขั้นที่ 2 สมมติฐาน $H_0 : \beta_i = 0$

$H_1 : \beta_i \neq 0; i = 1, 2, \dots, k$

สมมติทดสอบ $t = \frac{b_i}{S_b}$

S_b .

หรือใช้สถิติทดสอบ Z ถ้า n มีค่ามาก

เขตปฏิเสธสมมติฐาน H_0

จะปฏิเสธสมมติฐาน H_0 เมื่อ $t > t_{1-\alpha/2; n-k-1}$ หรือ $t < -t_{1-\alpha/2; n-k-1}$ หรือกล่าวว่าจะปฏิเสธ H_0 ถ้า $|t| > t_{1-\alpha/2; n-k-1}$ หรือ Significance ของสถิติ $t <$ ระดับนัยสำคัญที่กำหนด (α)

ตารางที่ 2.8 รูปแบบการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์ความถดถอย β_i ในขั้นที่ 2 [4]

การทดสอบแบบด้านเดียว		การทดสอบแบบสองด้าน
$H_0 : \beta_i \leq 0$	$H_0 : \beta_i \geq 0$	$H_0 : \beta_i = 0$
$H_1 : \beta_i > 0$	$H_1 : \beta_i < 0$	$H_1 : \beta_i \neq 0$
สถิติทดสอบ $t = b_i / S_{b_i}$		สถิติทดสอบ $t = b_i / S_{b_i}$
$t > t_{1-\alpha; n-k-1}$	$t < -t_{1-\alpha/2; n-k-1}$	$ t > t_{1-\alpha/2; n-k-1}$
หรือ 1. Sig. < α	หรือ 1. Sig. < α	หรือ Sig. ของ $t < \alpha$
และ 2. $t > 0$	และ 2. $t < 0$	

2.10.13 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุ (multiple Coefficient of Determination : R^2 หรือ r^2)

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุจะมีความหมายเหมือนกับความหมายของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในบทที่ 19 คือ เป็นสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรอิสระ (X_1, X_2, \dots, X_k) สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y ได้ หรือกล่าวได้ว่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุเป็นสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความผันแปร Y ที่มีสาเหตุเนื่องจากความผันแปรของ $X_1, X_2, \dots,$ และ X_k โดยมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุจะใช้สัญลักษณ์ $R^2_{y,123\dots k}$ แต่โดยทั่วไปจะใช้สัญลักษณ์ R^2

$$r^2 = R^2 = \frac{\text{ความผันแปรของ } Y \text{ เนื่องจากอิทธิพลของ } X_1, X_2, \dots, X_k}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}} = \frac{SSR}{SST} \quad (2.23)$$

ถ้า ค่า R^2 ที่ใกล้ 1 จะหมายถึง X_1, X_2, \dots, X_k มีความสัมพันธ์กับ Y มาก แต่ถ้า R^2 เข้าใกล้ศูนย์ หมายถึง ค่า X_1, X_2, \dots, X_k มีความสัมพันธ์กับ Y น้อย

เนื่องจาก SSR จะเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มตัวแปรอิสระ เช่น เดิมมี X_1 และ X_2 ที่มีความสัมพันธ์กับ Y แต่เพิ่มตัวแปรอิสระ X_3 เข้าในสมการความถดถอย จะได้ว่า $SSR(X_1, X_2, X_3) > SSR(X_1, X_2)$

โดยที่ $SSR(X_1, X_2, X_3)$ หมายถึง SSR ของสมการความถดถอยที่มีตัวแปรอิสระ X_1, X_2 , และ X_3 และ $SSR(X_1, X_2)$ หมายถึง SSR ของสมการความถดถอยที่มีตัวแปรอิสระ X_1 และ X_2

ดังนั้น เมื่อเพิ่มตัวแปรอิสระเข้าสมการความถดถอยจะทำให้ค่า R^2 มากขึ้นทั้งที่ตัวแปรอิสระ X ที่เพิ่มอาจจะไม่มีความสัมพันธ์กับ Y เลยก็ได้ จึงมีการปรับค่า R^2 ให้ถูกต้องขึ้น เรียกว่า Adjusted R^2 โดยที่

$$R_a^2 = \text{Adjusted } R^2 = 1 - \frac{(n-1)(R^2-1)}{(n-k-1)} \quad (2.24)$$

กรณีที่มีตัวแปรอิสระหลายตัว จะพิจารณาจากค่า R_a^2 มากกว่าค่า R^2

2.10.13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงพหุ (Multiple Coefficient of Correlation)

ค่าของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงพหุ ได้จากการถอดรากที่สองของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุ ดังนั้น สัมประสิทธิ์เชิงพหุ $= R_{y \cdot 12 \dots k} = R = \sqrt{R^2_{y \cdot 12 \dots k}}$ โดยที่ $0 \leq R \leq 1$ โดยที่ สัมประสิทธิ์เชิงพหุ หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ y ถ้า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงพหุมีค่ามากกว่าแสดงว่าค่า y ใกล้เคียงกับค่า Y มาก

R มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แสดงว่า Y มีความสัมพันธ์กับ X_1, X_2, \dots, X_k น้อยมาก และถ้า $R = 0$ แสดงว่า Y ไม่มีความสัมพันธ์กับ X_1, X_2, \dots, X_k เลย

R มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่า Y มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระทั้ง k ตัวมีมาก

2.10.14 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วน (Coefficients of Partial Correlation)

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ X ตัวใดตัวหนึ่ง โดยให้ X ตัวอื่นๆ มีค่าคงที่ เช่น ถ้า X ความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระ 3 ตัว (X_1, X_2, X_3) สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนระหว่าง Y กับ X_i โดยกำหนดให้ X_j และ X_k คงที่ ($i \neq j \neq k$) จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ X_i จริงๆ โดยกำจัดอิทธิพลของ X_j และ X_k ที่มีต่อ Y

สัญลักษณ์ของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนที่ใช้ คือ

$r_{y1.23}$ = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนระหว่าง Y กับ X_1 โดยกำหนดให้ X_2 และ X_3 มีค่าคงที่ เป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ X_1 โดยให้ X_2 และ X_3 มีค่าคงที่ จึงเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ X_1 เท่านั้น มิใช่ความสัมพันธ์ของ X_2 และ X_3 กับ Y

$r_{y2.13}$ = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนของ Y กับ X_2 โดยกำหนดให้ X_1 และ X_3 มีค่าคงที่
 $r_{y3.12}$ = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงส่วนของ Y กับ X_3 โดยกำหนดให้ X_1 และ X_2 มีค่าคงที่ โดยที่
 $-1 \leq r_{yij} \leq 1$

