

บทที่ 2

แนวความคิดและทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

เนื่องจากเหล็กกล้าผสมที่ใช้ในอุตสาหกรรม ต้องการความแข็ง ความแข็งแรง ความเหนียว ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการแตกในการใช้งาน เป็นต้น ดังนั้นก่อนนำไปใช้งาน ต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับสภาพที่จะนำไปใช้งาน การอบชุบเหล็กกล้าผสมด้วยความร้อนจึงเป็นกรรมวิธีที่มีความสำคัญกรรมวิธีหนึ่งและใช้กันอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมโลหะ เนื่องจากเหล็กกล้าผสมเป็นโลหะประเภทหนึ่งที่ใช้ค่อนข้างมากในงานอุตสาหกรรม เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องจักร เครื่องมือกล และอุปกรณ์ต่าง ๆ

โดยการอบชุบเหล็กกล้าผสมด้วยความร้อนที่จะได้กล่าวในงานวิจัยนี้คือ การอบคืนตัว (Tempering) หลังจากผ่านกรรมวิธีการชุบแข็ง (Hardening) เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่เหมาะสมนั้น จะต้องใช้การวิเคราะห์และการออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment) ในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบชุบเหล็กกล้าผสมด้วยความร้อน

2.1 เหล็กกล้าผสม (Alloy steels)

เหล็กกล้าผสมคือ เหล็กที่ผสมธาตุต่าง ๆ นอกเหนือไปจากธาตุคาร์บอนและธาตุบางตัวที่ติดมาเนื่องจากกรรมวิธีการถลุง (แมงกานีส ซิลิกอน ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส) การผสมธาตุต่าง ๆ ลงไปในเหล็กก็เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติหลาย ๆ ประการที่เหล็กคาร์บอนให้ คุณสมบัติเหล่านั้นอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ ไม่สามารถใช้งานได้ดี ถึงแม้ว่าการผสมธาตุต่าง ๆ ลงไปในเหล็กจะทำให้เหล็กมีราคาสูงขึ้นก็ตาม ความมุ่งหมายของการผสมธาตุดังกล่าวมีหลายประการคือ เพิ่มคุณสมบัติด้านชุบแข็ง ปรับปรุงความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติ เพิ่มคุณสมบัติต้านทานการสึกหรออันเนื่องมาจากการเสียดสีขณะใช้งาน เพิ่มความเหนียวทนต่อแรงกระแทก เพิ่มคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน และปรับปรุงคุณสมบัติด้านแม่เหล็ก

2.1.1 ชนิดของเหล็กกล้าผสม (Classification of alloy steels)

ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าผสมโดยทั่วไปจะไม่ผสมธาตุผสมเพียงธาตุใดธาตุหนึ่งโดยเฉพาะ มักจะผสมร่วมกันตั้งแต่สองธาตุขึ้นไป ทั้งนี้เพื่อให้บทบาทของธาตุที่ผสมร่วมกันได้มีส่วนทำให้คุณภาพของเหล็กกล้าผสมอยู่ในเกณฑ์สูงและราคาไม่แพงจนเกินไป ดังตัวอย่างเช่น เหล็กนิเกิล-โครเมียม เหล็กโครเมียม-โมลิบดีนัม หรือเหล็กโครเมียม-โมลิบดีนัม

วานเนเดียม เป็นต้น ทำให้การจำแนกชนิดของเหล็กกล้าผสมเป็นไปอย่างกว้างขวาง และมาตรฐานจะแตกต่างกันไปแต่ละแหล่งที่ผลิต มีทั้งการจำแนกโดยอาศัยลักษณะโครงสร้าง เช่น

2.1.1.1 เหล็กเฟอร์ริติก เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำ และผสมธาตุส่วนใหญ่ที่มีบทบาททำให้เฟอร์ไรต์มีเสถียรภาพ เช่น โครเมียม โมลิบดีนัม และวานเนเดียม

2.1.1.2 เหล็กเพิร์ลิติก เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนปานกลาง ถึงคาร์บอนสูง และมีธาตุต่าง ๆ ผสมอยู่ไม่เกิน 5-6%

2.1.1.3 เหล็กมาร์เทนซิติค เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนปานกลางถึงคาร์บอนสูง มีธาตุโดยเฉพาะ แมงกานีส นิกเกิล และอื่น ๆ อยู่ในปริมาณที่จะทำให้เหล็กมีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ เพียงปล่อยให้เย็นในอากาศ

2.1.1.4 เหล็กออสเทนนิติก เป็นเหล็กที่ผสมธาตุนิกเกิล และแมงกานีสในปริมาณสูง ตั้งแต่ 10% ขึ้นไปจนถึง 30% ซึ่งธาตุทั้งสองสามารถคงสภาพโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ได้ที่อุณหภูมิปกติ

นอกจากการแบ่งประเภทโดยอาศัยโครงสร้างแล้ว ยังมีการจำแนกประเภทโดยอาศัยลักษณะการใช้งาน ดังเช่น เหล็กสร้างเครื่องมือกล (Constructional alloy steels) ได้แก่ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนปานกลาง และมีธาตุผสมอยู่ในปริมาณต่ำ มีความแข็งแรงไม่สูงมาก สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติได้ด้วยการอบชุบ เหล็กที่กล่าวถึงนี้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับมาตรฐานการผลิตและปริมาณธาตุที่ผสม ที่ควรรู้จักเพราะใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่ เหล็กตามมาตรฐาน AISI 4140 หรือ 4150 (JIS ScM 440-445 หรือ DIN 42 CrMo 4) และ AISI 4340 (JIS SncM 439 ; DIN 26 Cr Ni Mo 4)

1) เหล็กเครื่องมือ (Tools Steels) หมายถึงเหล็กที่ใช้ทำอุปกรณ์การตัดโลหะหรือการขึ้นรูปโลหะและอื่น ๆ ซึ่งสามารถจำแนกออกไปได้กว้างขวางตามลักษณะการใช้งาน เช่น เหล็กทำเครื่องมือร้อน (Hot Working Tool) หรือเหล็กทำเครื่องมือเย็น (Cold Working Tool) เหล็กทำเครื่องมือทนแรงกระแทก (Shock-Resisting) และเหล็กทำเครื่องมือตัดความเร็วสูง (High Speed Steel)

2) อาศัยปริมาณของธาตุผสมเป็นหลักในการจำแนก ได้แก่ เหล็กเครื่องมือคาร์บอน (Carbon Tool Steels) เหล็กเครื่องมือผสมต่ำ (Low-Alloy Tool Steels) และเหล็กเครื่องมือผสมปานกลาง (Medium-Alloy Tool Steels)

3) อาศัยลักษณะการชุบแข็งเป็นหลักในการแบ่งชนิดของเหล็ก ได้แก่ เหล็กชุบแข็งด้วยน้ำใช้สัญลักษณ์ W เหล็กชุบแข็งด้วยน้ำมันใช้สัญลักษณ์ด้วย O และ A แทนเหล็กชุบแข็งโดยการปล่อยให้เย็นในอากาศ

2.1.2 เหล็กกล้า AISI 4140 หรือเหล็กมาตรฐาน JIS SCM 440

ส่วนผสมของเหล็ก AISI 4140 ประกอบด้วยคาร์บอน 0.38% - 0.43% ซิลิกอน 0.15% - 0.30% แมงกานีส 0.075% - 1% ฟอสฟอรัส 0.035max ซัลเฟอร์ 0.040 max โครเมียม 0.80% - 1.10% และ โมลิบดีนัม 0.15% - 0.25%

คุณลักษณะเป็นเหล็กกล้าผสมคาร์บอนปานกลาง ใช้ทำเฟืองขนาดเล็ก สลักเกลียว ชิ้นส่วนเครื่องจักร และน็อตต่าง ๆ ที่ต้องการความแข็งแรงสูง

ความแข็งแรงและความสามารถในการชุบแข็งดีกว่าเหล็กมาตรฐาน AISI 4130 เนื่องจากเหล็ก AISI 4130 ประกอบด้วยคาร์บอน 0.28%-0.33%C ซึ่งน้อยกว่าเหล็ก AISI 4140 และเหล็กชนิดนี้จะมีความสามารถในการเชื่อมได้ดีและความสามารถในการขึ้นรูปของเหล็กชนิดนี้ก็เช่นเดียวกัน โดยค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุสูงสุดของเหล็กชนิดนี้คือ 1,650 Mpa สำหรับเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งและทำการอบคืนตัวมาแล้วอุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนตัวควรใช้อุณหภูมิไม่เกิน 480°C เพราะถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 480°C ค่าความแข็งแรงของเหล็กจะลดลงอย่างรวดเร็ว และเหล็กชนิดนี้สามารถชุบแข็งด้วยวิธีไนไตรดิง (Nitriding) ในส่วนของการตีขึ้นรูปจะใช้อุณหภูมิช่วง 1,100°C – 1,200°C ถ้าเป็นงานในกระบวนการสุดท้าย (Finishing Process) ไม่ควรเลือกใช้ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 980°C โดยเฉพาะงานที่เป็นชิ้นส่วน (Parts) ต่าง ๆ ภายหลังจากการตีขึ้นรูปร้อนแล้วควรปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้า ๆ

2.1.3 บทบาทของธาตุผสมที่สำคัญ

2.1.3.1 แมงกานีส จัดเป็นธาตุผสมที่ทำหน้าที่หลายประการรวมกัน โดยเริ่มตั้งแต่ทำหน้าที่เป็นตัวกำจัดแก๊สในเหล็กกล้า ดึงกำมะถันที่มีอยู่ในเหล็กมารวมตัวเป็นแมงกานีสซัลไฟด์ เพื่อไม่ให้กำมะถันไปรวมตัวกับเหล็ก จะทำให้เหล็กเสียคุณสมบัติด้านความเหนียว แมงกานีสส่วนที่เหลือจากทำหน้าที่ดังกล่าวแล้วจะไปละลายในเฟอร์ไรต์ มีผลทางด้านเสริมความแข็งแรง รวมตัวกับคาร์บอนให้แมงกานีสคาร์ไบด์ Mn_3C ซึ่งอาจจะมีเหล็กเข้ามา มีบทบาทร่วมด้วยในรูปของ $(FeMn)_3C$ แมงกานีสมีบทบาทเพิ่มคุณสมบัติทางด้านความสามารถในการชุบแข็ง เมื่อผสมร่วมกับโครเมียมและ โมลิบดีนัม จะช่วยให้เหล็กมีความสามารถในการชุบแข็งได้มากยิ่งขึ้น ใช้ในกรณีเมื่อชิ้นงานมีความหนาแน่นมาก ๆ เหล็กที่ผสมแมงกานีส-โครเมียมและ โมลิบดีนัมสามารถทำการชุบลง (Air quench) ได้ผลดีในเหล็กกล้าคาร์บอน ถ้าผสมแมงกานีส ถ้าฟังก์จะมีข้อเสียอยู่ประการหนึ่ง คือ จะเปราะภายหลังจากการอบคืนตัวในช่วง 400°C - 600°C ซึ่งเรียกว่า Temper Brittleness ซึ่งจะลดน้อยเมื่อผสมโมลิบดีนัมในเหล็ก ในทางปฏิบัติจะยึดถือที่ 0.6% Mn เป็นเกณฑ์ที่แมงกานีสยังไม่เป็นธาตุผสมก็ยังมีบทบาทเพียงเป็นตัวกำจัดแก๊ส และลดปริมาณกำมะถันในเหล็กกล้าปริมาณสูงกว่า 0.6% ขึ้นไป จึงจะถือว่าเป็นธาตุผสม

2.1.3.2 ซิลิกอน เป็นธาตุที่พบในเหล็กกล้าเครื่องมือทุกประเภทประมาณ 0.2-0.3% ด้วยซิลิกอนทำหน้าที่เป็น Deoxidizer จัดเป็นธาตุที่มีบทบาทเสริมคุณสมบัติความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) แต่ถ้าผสมซิลิกอนปริมาณสูงจะมีแนวโน้มลดความเหนียว (Ductility) ซิลิกอนเป็นธาตุที่ไม่รวมตัวกับคาร์บอน เมื่อผสมอยู่ในเหล็กกล้าแต่จะมีบทบาทช่วยให้คาร์บอนรวมตัวกันเป็นกราไฟต์ (Graphitiser) มีเหล็กกล้าเครื่องมือบางประเภทที่มีคาร์บอนสูงและผสมซิลิกอนสูงประมาณ 1% โครงสร้างภายหลังการชุบแข็งแล้วจะปรากฏมีกราไฟต์กระจายอยู่ในโครงสร้างพื้นฐาน เป็นการช่วยให้ความลื่นเมื่อใช้ทำแม่พิมพ์ ลดปัญหาการจับติดของโลหะในขณะทำการขึ้นรูป ซิลิกอนจะไม่ใช้เป็นธาตุผสมล้าพั้งในเหล็กกล้าคาร์บอน แต่จะผสมร่วมกับโมลิบดีนัม หรือวานาเดียม ซึ่งอาจจะผสมซิลิกอนได้สูงถึง 1% และจะให้ผลในด้านดีหลายประการคือ ลดปัญหาด้านการเกิดออกซิเดชันให้กับเหล็กในช่วงอุณหภูมิ 1000°C - 1100°C ลดปัญหาการแยกตัวตามบริเวณขอบเกรนของคาร์ไบด์ ประเภท M_2C เพิ่มคุณสมบัติด้านความสามารถในการชุบแข็งเสริมกับโมลิบดีนัม คงความแข็งแรงไว้ได้ดีในขณะทำการอบคืนตัวในช่วงอุณหภูมิ 150°C - 300°C

2.1.3.3 โครเมียม เป็นธาตุที่พบในเหล็กกล้าเครื่องมือที่ผสมในปริมาณตั้งแต่ 0.5-17% เป็นธาตุที่มีบทบาทเพิ่มเสถียรภาพให้กับโครงสร้างเฟอร์ไรต์ที่มีผลต่อการเพิ่มคุณสมบัติความสามารถในการชุบแข็ง โครเมียมสามารถรวมกับคาร์บอน และให้คาร์ไบด์ได้หลายรูปแบบ เช่น คาร์ไบด์ M_7C_3 , $M_{23}C_6$ และ M_3C ขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนและโครเมียม โครเมียมมีส่วนในการต้านทานการเป็นอ็อกไซด์ขณะอยู่ที่อุณหภูมิสูง และคงความแข็งแรงไว้ได้ดี และให้ผลทางด้าน Secondary hardening ในระดับปานกลาง นอกจากนี้โครเมียมยังมีบทบาทต้านทานการกัดกร่อนได้ดี เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน ทำงานเย็น และเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูง จะผสมโครเมียมในปริมาณสูง ตั้งแต่ 0.5 - 12% ร่วมกับธาตุโมลิบดีนัม และทังสเตน และวานาเดียม

2.1.3.4 โมลิบดีนัม เป็นธาตุที่สามารถละลายได้ในเฟอร์ไรต์ อยู่ในกลุ่มเพิ่มเสถียรภาพให้กับเฟอร์ไรต์และโมลิบดีนัมอีกส่วนหนึ่งสามารถรวมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์เชิงซ้อนหลายรูปแบบ โมลิบดีนัมมีบทบาทค่อนข้างรุนแรงในการลดปริมาณคาร์บอนที่จุดยูเทคตอยด์ และเพิ่มอุณหภูมิเตี้ยคตอยด์ให้สูงขึ้น จึงมีผลทำให้ความสามารถในการชุบแข็งมีแนวโน้มลดลง ถ้าผสมปริมาณสูงเกินกว่า 1% และจะมีคาร์ไบด์หลงเหลืออยู่ภายหลังการชุบแข็ง ส่วนใหญ่เหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนและเหล็กกล้าเครื่องมือความเร็วสูงจึงผสมโมลิบดีนัมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านความสามารถในการชุบแข็ง โมลิบดีนัมมีบทบาทด้าน Secondary hardening ที่นับว่ารุนแรงกว่าโครเมียมและไม่มีผลทางด้าน Temper Brittleness โมลิบดีนัมไม่มีผลทางด้านทำให้มีออสเตนไนท์เหลือค้างภายหลังการชุบ และสามารถคงความแข็งของมาร์เทนไซต์ได้จนถึง

อุณหภูมิ 500 °C สิ่งที่ไม่สู้จะดีของโมลิบดีนัม คือเหล็กจะเป็นอ็อกไซด์ได้มาก เมื่ออยู่ในช่วงอุณหภูมิ 1000 °C - 1100 °C และมีแนวโน้มก่อให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนตามบริเวณผิวได้ง่าย

2.1.3.5 ฟอสฟอรัส ส่วนผสมของฟอสฟอรัสในเหล็กกล้าคาร์บอน จะยอมให้มีฟอสฟอรัสได้ไม่เกิน 0.04% P ถ้ามีฟอสฟอรัสผสมลงไปมาก จะทำให้ลดค่าความเหนียวของเหล็กกล้าคาร์บอนนั้น และเพิ่มอัตราการแตกร้าว ในขณะที่ผ่านงานรีดเย็น ซึ่งจะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Cold-Short

2.1.3.6 ซัลเฟอร์หรือกำมะถัน ส่วนผสมของกำมะถันในเหล็กกล้าคาร์บอนจะยอมให้มีกำมะถันได้ไม่เกิน 0.05% S เพราะกำมะถันจะรวมตัวกับเหล็กเกิดเป็นเหล็กซัลไฟด์ (FeS) เมื่อเหล็กผ่านงานขึ้นรูปร้อนจะทำให้เกิดความเปราะ และแตกร้าว ซึ่งจะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Hot-Short แต่กำมะถันยังมีข้อดีคือมีบทบาทในการเพิ่มคุณสมบัติทางด้านความง่ายต่อการตกแต่งด้วยเครื่องจักร (Machinability)

2.2 กรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment)

กรรมวิธีทางความร้อนเป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการปรับปรุง พัฒนา และควบคุมโครงสร้างของโลหะ จุดประสงค์ของกรรมวิธีทางความร้อนมี 2 ประการกล่าวคือต้องการทำให้โลหะมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น และต้องการทำให้โลหะอ่อนตัวลง จุดประสงค์ทั้งสองประการจะบรรลุผลได้จะต้องศึกษาเกี่ยวกับแผนภูมิสมดุลของเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ ตลอดจนแผนภูมิการเย็นตัวของโลหะ

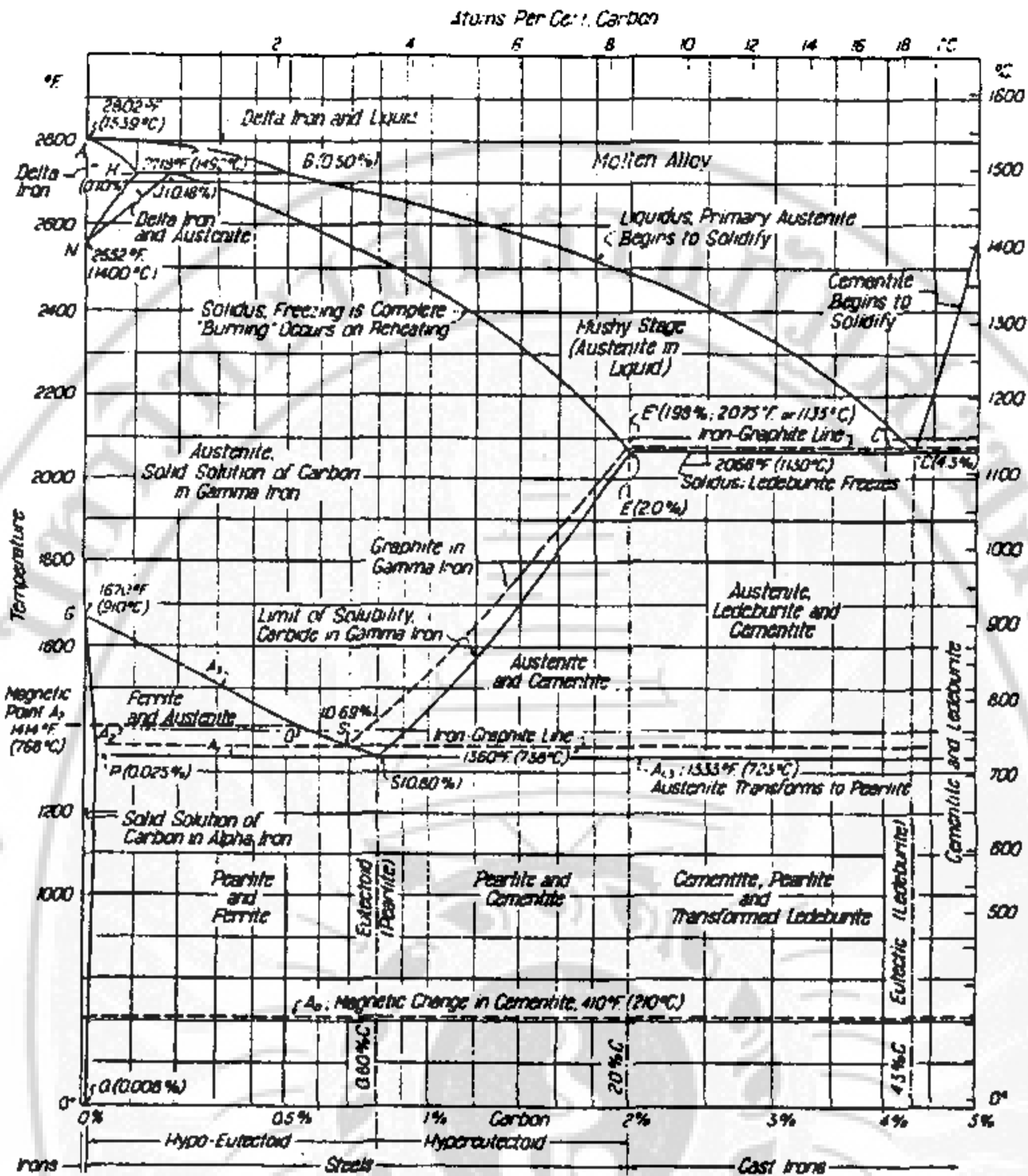
2.2.1 แผนภูมิสมดุลเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ (Iron-Iron Carbide Diagram)

ในการทำกรรมวิธีทางความร้อน จำเป็นต้องศึกษาแผนภูมิสมดุลของเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยจะต้องศึกษาโครงสร้างจุลภาคต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1.1 เหล็กเดลตา (Delta Iron) จากรูปที่ 2.1 พบโครงสร้างของเหล็กเดลตา (δ) เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 1,400°-1,539°C โดยจะมีปริมาณคาร์บอนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 0.50 โดยจะอยู่ร่วมกับเหล็กหลอมเหลว ส่วนเหล็กเดลตาที่มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ร้อยละ 0.10 จะมีเหล็กเดลตาอยู่เพียงโครงสร้างเดียวเท่านั้น

เหล็กเดลตามีระบบผลึกเป็นแบบ BCC และมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก เมื่อปล่อยให้อุณหภูมิต่ำลงเหล็กเดลตาก็จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างออสเทนไนท์ที่มีระบบผลึกเป็นแบบ FCC

2.2.1.2 ออสเทนไนท์ (Austenite) หรือเหล็กแกมมา (γ) เกิดขึ้นจากการละลายของคาร์บอนในเหล็กแกมมา โดยที่ปริมาณคาร์บอนจะเพิ่มสูงสุดประมาณร้อยละ 2 ที่อุณหภูมิ $1,130^{\circ}\text{C}$ มีระบบผลึกเป็น FCC



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลของเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์

2.2.1.3 เฟอไรท์ (Ferrite) หรือเหล็กแอลฟา (α) มีระบบผลึกเป็นแบบ BCC โครงสร้างนี้จะประกอบด้วยเหล็กที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ คือจะมีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 0.025 ที่อุณหภูมิ 723°C

2.2.1.4 ซิเมนต์ไต์ (Cementite) หรือเหล็กคาร์ไบด์ (Fe_3C) เป็นโครงสร้างที่แข็งและเปราะ โครงสร้างซิเมนต์ไต์นี้ไม่ปรากฏเป็นโครงสร้างเดี่ยว แต่จะแทรกอยู่กับโครงสร้างอื่น ๆ มีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 6.67 และมีระบบผลึกเป็นแบบ Orthorhombic

2.2.1.5 เพิร์ไลต์ (Pearite) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยเฟอไรท์กับซิเมนต์ไต์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยายูเทคตอยด์ ในขณะที่ทำให้เย็นช้า ๆ การเกิดจะสลับกันเป็นแถบขาว ๆ (Lamellar Structure) ของเฟอไรท์กับซิเมนต์ไต์

แผนภาพสมดุลเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ ในช่วงอุณหภูมิยูเทคตอยด์ มีสิ่งที่จะต้องพิจารณาทำความเข้าใจ คือเส้นอุณหภูมิวิกฤติ (Critical Temperature) ซึ่งเป็นเส้นแสดงอาณาเขตของเฟสต่าง ๆ ในช่วงอุณหภูมิยูเทคตอยด์ ในที่นี้กำหนดให้เส้น

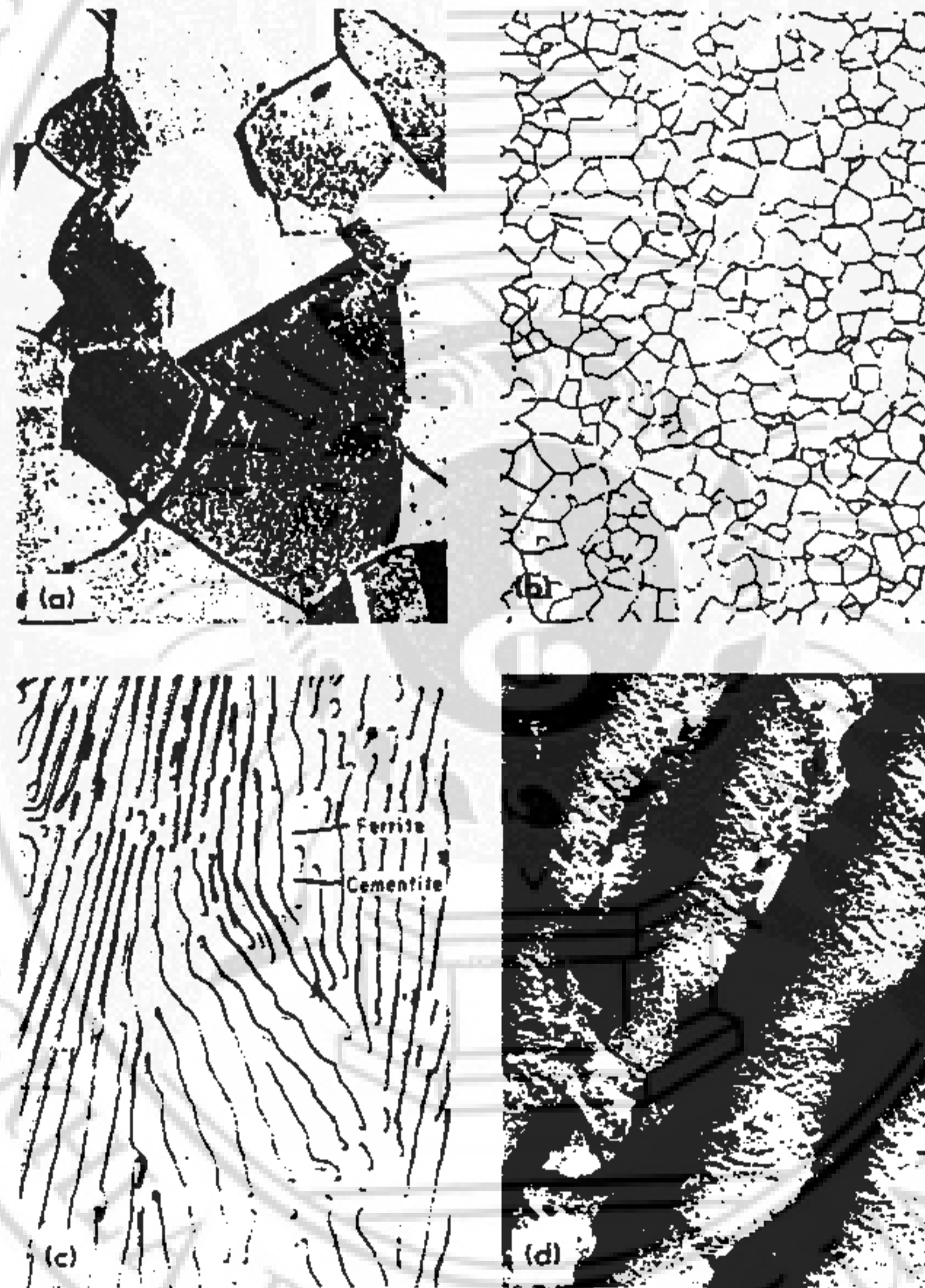
A_1 คืออุณหภูมิยูเทคตอยด์ (723°C)

A_2 คือเส้นที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (768°C)

A_3 คือเส้นที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงออสเทนไนต์ไปเป็นเฟอร์ไรต์ ในขณะที่ปล่อยให้เย็น และจากเฟอร์ไรต์สลายตัวเป็นออสเทนไนต์หมดในขณะที่ทำการเผาให้ร้อน

A_{cm} คือเส้นที่เริ่มมีซิเมนต์ไคต์แยกตัวจากออสเทนไนต์ในขณะที่เย็นตัว และซิเมนต์ไคต์สลายตัวหมดในขณะที่ทำการเผาให้ร้อนถึงอุณหภูมินี้

A_4 คือเส้นที่มีการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนต์ไปเป็นเฟอร์ไรต์เคลต้า (δ)



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของเหล็กแต่ละชนิด

(a) โครงสร้างออสเทนไนต์ ขยาย 500 เท่า

(b) โครงสร้างเฟอร์ไรต์ ขยาย 100 เท่า

(c) โครงสร้างเพิร์ไลต์ ขยาย 2,500 เท่า

(d) โครงสร้างเพิร์ไลต์ ขยาย 1,700 เท่า

โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

2.2.1.6 มาร์เทนไซต์ (Martensite) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากโครงสร้างแบบออสเทนไนต์เปลี่ยนมาเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์ เนื่องจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของโครงสร้างแบบออสเทนไนต์ ซึ่งไม่มีเวลาพอที่จะเปลี่ยนโครงสร้างแบบเฟอไรต์และเพอร์ไรต์ได้อันจะเกิดทำให้โครงสร้างเกิดการบิดตัวเกิดโครงสร้างใหม่ขึ้นเรียกว่า โครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์ มีระบบผลึกเป็น BCT



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ขยาย 25,000 เท่า

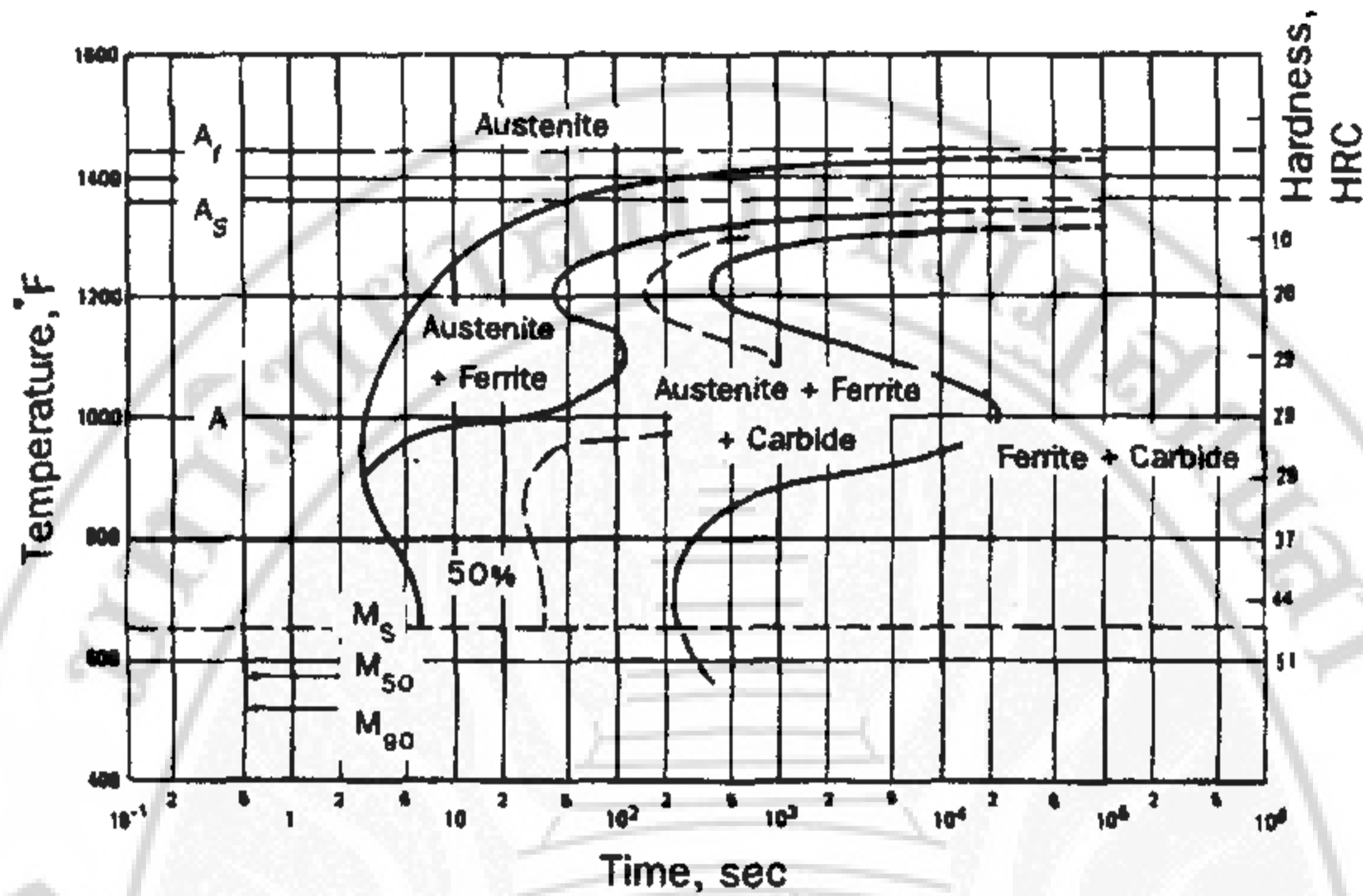
2.2.2 แผนภูมิเวลา อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลง (Time Temperature Transformation Diagram ; แผนภูมิ TTT)

เป็นแผนภูมิที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหล็กในขณะที่เหล็กนั้นถูกทำให้เย็นตัวภายในเวลาที่กำหนดไว้ จากแผนภูมิสมดุลเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์จะพบว่าเส้น A_1 นั้นเป็นเส้นเริ่มการเปลี่ยนแปลง โครงสร้าง เช่นเหล็กไฮโปยูเทคตอยด์ เมื่อถูกอบที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_1 เล็กน้อยเฟอไรต์จะเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนต์ สำหรับเพอร์ไรต์นั้นจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นออสเทนไนต์ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหนือเส้น A_2

แต่สำหรับเหล็กไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ เมื่อถูกอบที่อุณหภูมิเหนือเส้น A_1 เล็กน้อยเฟอไรต์จะเปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนต์ และถ้าอบให้อุณหภูมิสูงขึ้นไปอีกจนอุณหภูมิเกินกว่า A_{cm} ซีเมนไตต์ที่เหลืออยู่จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นออสเทนไนต์เช่นเดียวกัน ดังนั้นถ้าจะปรับปรุงโครงสร้างของเหล็กก็จะต้องอบเหล็กนั้น ๆ ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปเป็นออสเทนไนต์เสียก่อน และหลังจากนั้นจึงทำให้ออสเทนไนต์เปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างอื่น ๆ ตามที่เราต้องการ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวนี้จะพบอยู่ในแผนภูมิ TTT และแผนภูมิ CCT

2.2.3 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงขณะเกิดการเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (Continuous Cooling Transformation Diagram)

แผนภูมินี้จะมีลักษณะคล้ายกันกับแผนภูมิ TTT แต่มีส่วนที่แตกต่างกันคือ โครงสร้างต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในแผนภูมิ CCT จะถูกแบ่งขอบเขตของโครงสร้างอย่างชัดเจน



รูปที่ 2.4 แผนภูมิ TTT ของเหล็กกล้าผสม AISI 4140

2.3 กรรมวิธีการอบชุบโลหะด้วยความร้อน

เป็นขบวนการให้ความร้อนและความเย็นโดยอาศัยเวลาเข้ากระทำกับโลหะผสมในภาวะของแข็ง เพื่อให้ได้โลหะที่มีคุณภาพตามต้องการ การอบชุบเหล็กกล้า ซึ่งเป็นโลหะที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมซึ่งจะเริ่มต้นจากการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน จนมีอุณหภูมิสูงเหนือระดับอุณหภูมิวิกฤตเล็กน้อย ที่นี้เหล็กกล้าจะเปลี่ยนโครงสร้างกลับไปเป็นออสเทนไนต์โดยปกติ อัตราการให้ความร้อนไม่ค่อยมีผลต่ออุณหภูมิการอบชุบมากนักแต่ชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็นมา และมีความเค้นสูงต้องให้ความร้อนในอัตราที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ปราศจากความเค้น เพื่อป้องกันชิ้นงานบิดเบี้ยว ชิ้นงานบางควรได้รับความร้อนในอัตราต่ำกว่าชิ้นงานหนาเพื่อป้องกันความเค้นจากความร้อนและการบิดตัวของชิ้นงาน หลังปฏิบัติทั่วไปในการอบชุบนั้นมักถือว่าย่างให้ความร้อนด้วยอัตราต่ำเท่าใด ก็จะมีผลเสียจากความเสียหายจากการอบชุบได้มากเท่านั้น

2.3.1 การชุบแข็ง (Hardening)

2.3.1.1 จุดประสงค์ของการชุบแข็ง เพื่อต้องการให้เหล็กภายหลังการชุบมีความแข็งเพิ่มขึ้น เพื่อทนต่อการเสียดสีในขณะใช้งาน การชุบแข็งเป็นวิธีที่จะให้ได้โครงสร้างของเหล็ก สุดท้ายเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนต์ ขึ้นอยู่กับความแข็งสุดท้ายที่ต้องการ

2.3.1.2 กรรมวิธีการชุบแข็ง กระทำโดยการเผาเหล็กจากอุณหภูมิบรรยากาศให้ร้อนประมาณ $800^{\circ} - 900^{\circ} \text{C}$ (ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็ก) ภายในเตาไฟฟ้าหรือเตาอบชุบอื่น ๆ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้เมื่อเหล็กร้อนจนถึงอุณหภูมินี้ โครงสร้างของเหล็กจะเปลี่ยนเป็น ออสเทนไนท์ทั่ว ๆ ไป มักจะเผาให้อุณหภูมิของเหล็กร้อนเลขเส้น A_1 ประมาณ $50^{\circ} - 75^{\circ} \text{C}$ แต่จะไม่เผาเหล็กให้อุณหภูมิสูงเกินพิคตินี้ เพราะจะทำให้เกรนของเหล็กขยายตัวโตขึ้น ซึ่งจะทำให้คุณภาพของเหล็กหลังจากการชุบเสียไป ในทางปฏิบัติถ้าเป็นเหล็กที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.8% จะเผาให้อุณหภูมิสูงกว่าเส้น A_1 ประมาณ $50^{\circ} - 75^{\circ} \text{C}$ ถ้าเหล็กมีคาร์บอนสูงกว่า 0.8% จะเผาเพียงแค่อุณหภูมิเหนือเส้น A_1 ประมาณ $50^{\circ} - 75^{\circ} \text{C}$ เท่านั้น เหตุผลก็คือเพื่อต้องการรักษาซิเมนต์ไคต์ไว้ไม่ให้เปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ เพราะซิเมนต์ไคต์มีความแข็งสูงอยู่แล้ว เมื่อเผาเหล็กจนกลายเป็นออสเทนไนท์แล้วจะต้องทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ระยะหนึ่ง เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงต่อความหนา 25 มิลลิเมตร เพื่อให้เหล็กร้อนทั่วถึงกันตลอดทั้งท่ง จากนั้นจึงจะนำเอาเหล็กออกจากเตาทำให้เย็นโดยรวดเร็วด้วยการจุ่มลงในน้ำ (Water Quench) หรือในน้ำมัน (Oil Quench) ในขณะที่ทำให้เหล็กเย็นโดยรวดเร็วนี้ ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนกลับไปเป็นเฟอร์ไรท์ และเพิร์ไลต์ ไม่ทัน แต่จะให้โครงสร้างใหม่ที่มีความแข็งสูง เรียกว่ามาร์เทนไซต์ ถ้าจะพิจารณาโดยละเอียดแล้วมาร์เทนไซต์ก็คือเหล็กเฟอร์ไรท์นั่นเอง แต่เป็นเหล็กเฟอร์ไรท์ที่มีปริมาณคาร์บอนสูงกว่าสภาวะสมดุลตาม Equilibrium Diagram ที่เป็นเช่นนี้เพราะอะตอมของคาร์บอนไม่มีเวลาเพียงพอที่จะเคลื่อนไหวมารวมกันให้ซิเมนต์ไคต์ ดังนั้นความแข็งของเหล็กที่ผ่านการชุบจึงขึ้นอยู่กับสองสิ่งคือ

- 1) ปริมาณธาตุคาร์บอนในเหล็ก กล่าวคือถ้าในเหล็กมีธาตุคาร์บอนมาก โอกาสที่เหล็กจะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ก็ยิ่งง่าย และให้ปริมาณของมาร์เทนไซต์มาก
- 2) อัตราความเร็วในการชุบ กล่าวคือ ถ้าทำให้เหล็กเย็นเร็ว ๆ โอกาสที่ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ก็มีมาก ในทางตรงกันข้ามถ้าปล่อยให้เหล็กเย็นช้า ๆ ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ไรท์กับซิเมนต์ไคต์หมดไม่เกิดมาร์เทนไซต์ เหล็กก็ไม่แข็ง

2.3.2 องค์ประกอบในการชุบแข็ง เหล็กที่มีความแข็งสูงจะต้องมีองค์ประกอบที่สำคัญอย่างน้อย 3 ประการ

2.3.2.1 ปริมาณคาร์บอน เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เพราะการที่ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนไปเป็น มาร์เทนไซต์ ในลักษณะการชุบแข็งธรรมดาด้วยน้ำ เหล็กควรมีคาร์บอนมากกว่า 0.3% ส่วนธาตุที่ผสมในเหล็กอื่น ๆ เช่น นิกเกิล โครเมียมและโมลิบดีนัม จะเพียงทำหน้าที่ช่วยให้การชุบแข็งได้ผลดีขึ้นเท่านั้น ความแข็งของมาร์เทนไซต์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนดังตัวอย่าง เช่น เหล็กคาร์บอน 0.35% สามารถชุบแข็งได้ความแข็งประมาณ 50 HRC ตรงกันข้ามเหล็ก 0.02%C , 12%Cr ได้ความแข็งภายหลังการชุบเพียง 35 HRC

2.3.2.2 อุณหภูมิก่อนการชุบ คืออุณหภูมิที่เหล็กจะต้องเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ ก่อนการชุบน้ำหรือน้ำมัน อุณหภูมิของเหล็กไม่สูงพอจนโครงสร้างเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์หมด เขาจะชุบในน้ำหรือน้ำเกลือ น้ำค้าง ความแข็งที่ได้จะไม่สูงเท่าที่ควร เพราะมาร์เทนไซต์ที่ได้ จะต้องมาจากออสเทนไนท์เท่านั้นและเป็นการเปลี่ยนโครงสร้าง โดยปราศจากการกำเนิด นิวเคลียสไม่เหมือนอย่างเช่น เฟอร์ไรต์ หรือซิเมนต์ไคต์

2.3.2.3 อัตราการเย็นตัว เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ หรือเบนไนท์จะต้องเป็นอัตราการเย็นตัวที่สูงพอ ซึ่งจะปรากฏ คำว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) หมายถึงอัตราการเย็นตัวที่ออสเทนไนท์ เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ ถ้าอัตราการเย็นตัวช้ากว่านี้ ออสเทนไนท์จะไม่มี โอกาสเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ แต่จะได้เฟอไรต์แทน

2.3.3 ของเหลวสำหรับการชุบแข็ง ของเหลวที่ใช้สำหรับการชุบแข็งที่ดีโดย หลักเกณฑ์ทั่วไปจะต้องให้อัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต (Critical Cooling Rate) ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้ออสเทนไนท์แตกตัวไปเป็นเฟอไรต์หรือโครงสร้างที่ไม่ใช่มาร์ เทนไซต์ (Intermediate Structure) และที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือควรให้อัตราการเย็นตัวที่ช้า ลงในช่วงอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนท์ที่ไม่ใช่มาร์เทนไซต์ ซึ่งจะเป็นช่วง อุณหภูมิระหว่าง 200-400 °C ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเครียดภายในกับชิ้นเหล็กมากกั น มิฉะนั้นจะทำให้เกิดการบิดงอ หรือแตกร้าวขึ้นได้

2.3.3.1 การถ่ายเทความร้อน ที่ของเหลวชนิดมีจุดเดือดกลายเป็นไอสามารถแยก ออกเป็น 3 ลักษณะที่ต่างกันเมื่อสัมผัสกับแท่งเหล็กร้อน

1) ชั้นแรก เมื่อจุ่มแท่งเหล็กลงไปของเหลวสัมผัสกับแท่งเหล็กที่ร้อน ของเหลวรอบ ๆ จะรับความร้อนสูงจนกลายเป็นไอหุ้มแท่งเหล็กไว้ในลักษณะเป็นฟิล์มบาง ๆ การถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้จะช้า เพราะความร้อนต้องผ่านฟิล์มบาง ๆ ซึ่งมีสภาพเป็นตัวนำ ความร้อนต่ำ แต่จะเป็นอยู่ในระยะสั้น ๆ เมื่อไอของของเหลวรวมตัวกันมากก็จะลอยขึ้นหรือ อาจจะถูกพัดออก

2) ชั้นสอง เมื่อฟิล์มบาง ๆ ของไอที่หุ้มแท่งเหล็กแตกออกขอเหลวที่อยู่ รอบนอกจะเข้าสัมผัสกับแท่งเหล็กในช่วงนี้ของเหลวรอบ ๆ ซึ่งได้รับความร้อนอยู่แล้วในชั้นแรก เมื่อเข้าสัมผัสก็จะรับความร้อนจำนวนมาก จะเกิดการเดือดและกลายเป็นไอ แต่ไม่มีโอกาสหุ้ม แท่งเหล็กเหมือนกับการกวนของเหลว มีโอกาสสัมผัสกับแท่งเหล็กยิ่งถูกถ่ายเทออกมาได้มาก เพราะของเหลวทั่ว ๆ ไป มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง ในชั้นนี้้อัตราการเย็นตัวจะ สูงมาก

3) ขั้นที่สาม เป็นขั้นที่มีอัตราการเย็นตัวช้าลง เมื่อความร้อนจากแท่งเหล็กน้อยลงอุณหภูมิของของเหลวเริ่มต่ำลง กว่าจุดเดือดความร้อนจะถูกถ่ายเทออกไปโดยการพาตัวของเหลวเพียงอย่างเดียว จึงทำให้อัตราการเย็นตัวลดต่ำลง จนถึงจุดที่อุณหภูมิเท่ากันทั้งแท่งเหล็กและของเหลว

2.3.3.2 ของเหลวสำหรับการชุบแข็งที่ใช้กันทั่ว ๆ ไป ได้แก่ น้ำ น้ำเกลือ น้ำค้าง น้ำมัน เกลือละลาย และอากาศ สำหรับงานวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะน้ำ และน้ำมัน

1) น้ำ เมื่อพิจารณาคคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนของน้ำ ทำให้อัตราการเย็นตัวค่อนข้างต่ำในตอนต้น แต่จะให้ค่าอัตราการเย็นตัวสูงมากในช่วงอุณหภูมิ 400-200 °C นี้จะเป็นลักษณะที่ไม่ดีเพราะเป็นช่วงอุณหภูมิที่ออสเตนไนท์เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ และจะมีการขยายตัวเล็กน้อยจะทำให้เกิดความเครียดได้มาก อันจะเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอและแตกร้าวได้ง่าย ยิ่งที่เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนสูง

2) น้ำมัน จัดว่าเป็นของเหลวที่ให้คุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนต่ำ ทำให้อัตราการเย็นตัวสูงสุดประมาณ 200 °C ต่อวินาที ซึ่งไม่สูงพอสำหรับการชุบเพื่อให้ได้มาร์เทนไซต์สำหรับเหล็กคาร์บอนหรือ เหล็กผสมต่ำยังเป็นงานขึ้นโตโอกาสได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์จะเป็นไปได้ยาก น้ำมันจึงเหมาะสมสำหรับการชุบแข็งเหล็กที่มีส่วนผสมสูงออสเตนไนท์ที่มีเสถียรภาพสูง และมีอัตราการเย็นตัววิกฤตช้ากว่าเกณฑ์ปกติ น้ำมันมีข้อดีอยู่ตรงที่ให้อัตราการเย็นตัวสม่ำเสมอ ไม่ทำให้เกิดความเครียดมากนัก การที่จะเพิ่มคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำมันสามารถทำได้โดยการเผาให้ร้อนประมาณ 50 - 80 °C น้ำมันจะใสทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น น้ำมันที่ใช้สำหรับการชุบแข็งจะต้องเป็นน้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียม (Mineral Oil) และมีจุดติดไฟสูงประมาณ 160- 170 °C

2.3.4 เตาอบชุบโลหะ

เป็นเตาอบชุบชิ้นงานทางโลหะวิทยา สามารถอบชุบแบบอบอ่อน และชุบแข็ง โดยให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า เปลือกนอกของเตาทำด้วยเหล็ก ภายในจะเรียงอิฐทนไฟ และอิฐฉนวนกันความร้อน เพื่อให้เตาทนทานในการใช้งานและสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด ความร้อนของในเตาอบชุบได้จาก ไฟฟ้า โดยให้ความร้อนด้วยขดลวดความต้านทาน ตั้งอุณหภูมิการอบชุบด้วยระบบดิจิตอล พร้อมชุดควบคุมแสดงอุณหภูมิและเวลา มีชุดอุณหภูมิแยกออกจากตัวเตาอบชุบสามารถตั้งเวลาในการอบชิ้นงานได้

2.3.5 ความร้อนสำหรับการชุบแข็ง (Heating for Hardening)

การกำหนดอัตราการให้ความร้อนและช่วงเวลาที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่นส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก ความเครียดตกค้างจากการขึ้นรูป หรือรูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่ทำการชุบแข็ง

ปกติเมื่อเหล็กบรรจุเข้าเตาเผา ความร้อนที่เหล็กได้รับที่ผิวกับใจกลางชิ้นงานจะต่างกัน เพราะความเร็วมักจะถ่ายเทผ่านเนื้อเหล็กเข้ามายังใจกลางย่อมต้องใช้เวลา ถ้าให้ความร้อนเร็วไปหรือการเพิ่มความร้อนที่สูงแล้วทำการชุบแข็งจะทำให้เหล็กมีการบิดงอ เกิดการแตกร้าวได้ง่าย หรือถ้าให้ความร้อนช้าไปก็จะทำให้เกิดการบิดตัวและการแตกร้าวได้เหมือนกัน โดยทั่วไปจะแบ่งอัตราการเผาเหล็กไว้ 3 อัตราซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเตา

2.3.5.1 อัตราการเผาช้า เป็นวิธีที่เริ่มต้นโดยการบรรจุเหล็กเข้าเตาพร้อม ๆ กับการให้ความร้อนแก่เตาเผาพร้อม ๆ กัน อุณหภูมิของทั้งเตาและชิ้นงานจะร้อนขึ้นในอัตราใกล้เคียงกัน อุณหภูมิของเหล็กที่ผิวกับที่บริเวณแกนกลางมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย การเผาในลักษณะนี้เหมาะสำหรับเหล็กที่มีคาร์บอนสูงมีความเครียดตกค้างมาจากการขึ้นรูป รูปร่างซับซ้อน และมีส่วนที่หนาและบางต่างกันมาก

2.3.5.2 อัตราการเผาสูง วิธีนี้จะเผาเตาให้มีอุณหภูมิเท่าที่ต้องการ จากนั้นจึงจะบรรจุเหล็กเข้าเตาภายหลังหรือเป็นในกรณีที่เตากำลังใช้งานอยู่ เมื่อนำเอาเหล็กออกไปชุบหมดแล้วก็เริ่มบรรจุเหล็กชุดต่อไปใหม่ ลักษณะนี้ อุณหภูมิที่ผิวกับแกนกลางจะมีความแตกต่างกันมากในตอนเริ่มต้น แต่อุณหภูมิจะไปเท่ากันในระยะเวลาที่สั้นกว่าวิธีแรก การเผาในลักษณะนี้เหมาะสำหรับงานชิ้นเล็ก ๆ รูปร่างไม่ซับซ้อนและเป็นเหล็กคาร์บอนปานกลาง โดยจะใช้วิธีเอาเหล็กบรรจุไว้ในหีบปิดคลุมมิดชิด บรรจุเข้าเตาจะช่วยลดอัตราการเผาลงอีก เพราะระยะเวลาที่ความร้อนจะผ่านหีบเข้าไปถึงแกนกลางแห่งเหล็กจะช้าลง

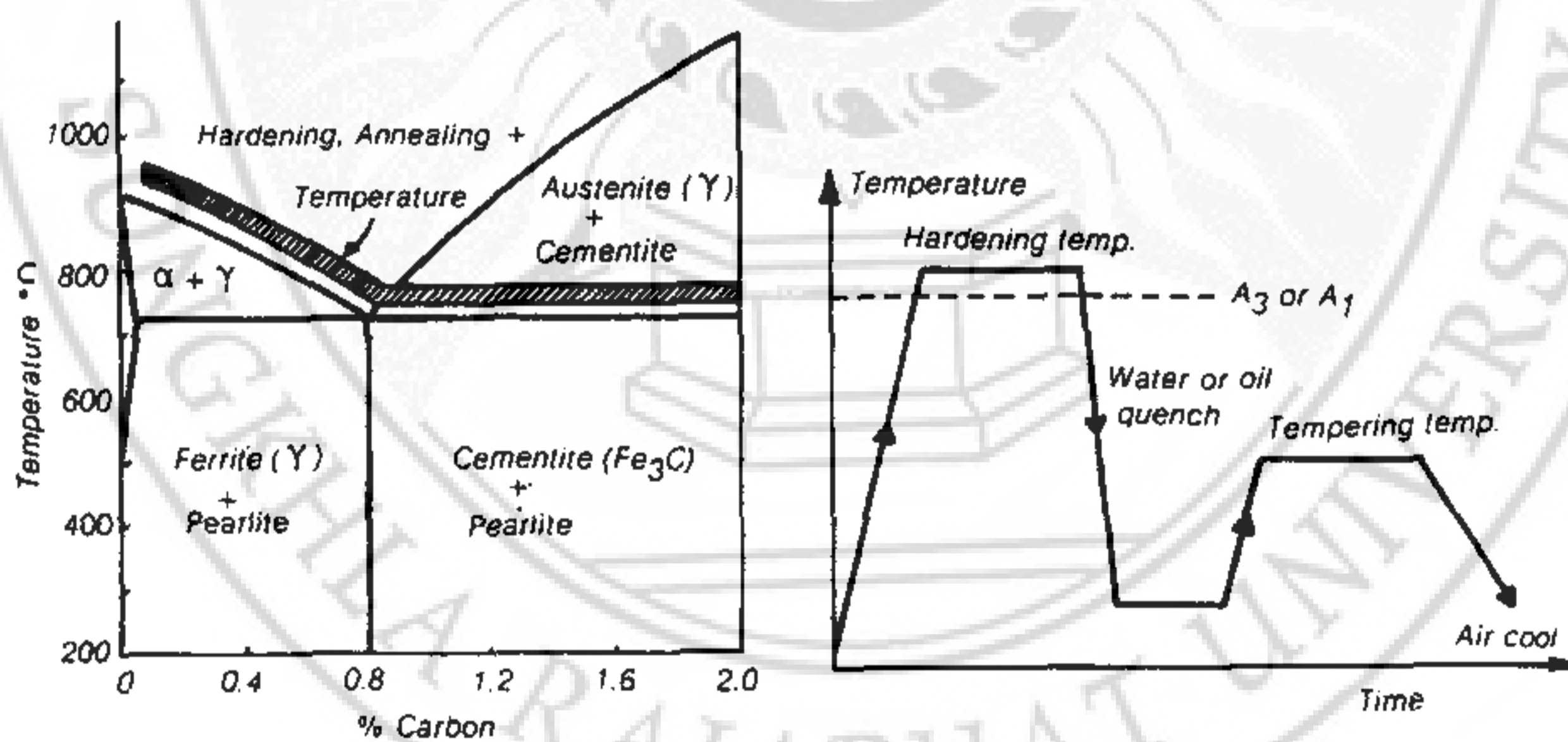
2.3.5.3 อัตราการเผาที่สูงมาก วิธีนี้จะไม่นิยมนักเพราะอัตราการเผาสูง อุณหภูมิที่ผิวกับแกนกลางจะมีความแตกต่างกันมากในตอนเริ่มต้น โดยการเผาให้มีอุณหภูมิในเตาสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการ เวลาที่ใช้จะสั้นกว่า 2 วิธีแรก แต่อุณหภูมิระหว่างที่ผิวกับใจกลางจะมีความแตกต่างกันมาก อาจจะทำให้เกิดการบิดงอหรือชิ้นงานเกิดการแตกร้าวได้ง่าย การเผาในลักษณะนี้เหมาะสำหรับงานขนาดเล็ก และรูปร่างง่าย ๆ จำเป็นต้องบรรจุในหีบเหมือนวิธีที่ 2 เพื่อช่วยลดอัตราการเผาให้ช้าลง

ในทางปฏิบัติวิธีที่นิยมกันในการชุบแข็งทั่ว ๆ ไปคือการเผาเหล็กในอ่างเกลือ เพื่อให้การเผาเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งจะให้ผลดีกว่าการเผาในเตาทั่ว ๆ ไป โดยเฉพาะในเรื่องของความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและอัตราการเผา เกลือที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หรืออาจจะผสมกับเกลือชนิดอื่น ๆ เพื่อให้มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำลง และง่ายต่อการควบคุม

2.3.6 การอบคืนตัว (Tempering)

2.3.6.1 จุดประสงค์การอบคืนตัว เนื่องจากเหล็กภายหลังการชุบแข็งแล้วจะมีความแข็งมาก และมีความเปราะ โครงสร้างที่ได้จะเป็นมาร์เทนไซต์ ออสเตนไนท์ตกค้างและคาร์ไบด์ซึ่งอยู่กันไม่เป็นระเบียบ เพื่อให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

2.3.6.2 กรรมวิธีการอบคืนตัว เหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้วย่อมจะเกิดความเครียด (Strain) ขึ้นภายในและมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่เหล็กจะขาดคุณสมบัติทางด้านความเหนียว (Ductility) ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งาน เพราะถ้าเกิดมีการกระแทกขึ้นเหล็กอาจจะแตกร้าวได้ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติใหม่โดยการอบคืนตัว โดยการนำเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาแล้วเผาภายในเตาที่อุณหภูมิค่าประมาณ $200^{\circ} - 400^{\circ} \text{C}$ ทิ้งไว้ประมาณ 1-3 ชั่วโมง แล้วเอาออกปล่อยให้เย็นในอากาศธรรมดา เหล็กจะมีคุณสมบัติด้านความเหนียว (Ductility) ดีขึ้น แต่ความแข็งจะลดลงเล็กน้อย ในขณะที่เผาที่อุณหภูมิค่า มาร์เทนไซต์จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยอะตอมคาร์บอนจะเคลื่อนไหวออกจากมาร์เทนไซต์มารวมกันเป็นเฟอร์ไรท์และซิเมนไตท์บางส่วน ที่เป็นเช่นนี้เพราะมาร์เทนไซต์ไม่ใช่โครงสร้างของเหล็กที่สมดุลที่อุณหภูมิบรรยากาศ เมื่อเหล็กได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อกลับไปเป็นโครงสร้างที่สมดุลคือเหล็กเฟอร์ไรท์กับซิเมนไตท์ ที่เราต้องเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 400°C ก็เพื่อไม่ต้องการให้มาร์เทนไซต์คืนหมดตัว เพราะเรายังต้องการความแข็งของเหล็กอยู่ ถ้าเราเผาให้อุณหภูมิสูงเกิน 400°C ความแข็งจะถูกทำลายหมด โดยทั่วไปการชุบแข็ง และการอบคืนตัวจะต้องกระทำติดต่อกันเพื่อให้ได้เหล็กแข็งและทนแรงกระแทกได้ดีด้วย ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงช่วงของอุณหภูมิในการชุบแข็งและการอบคืนตัว

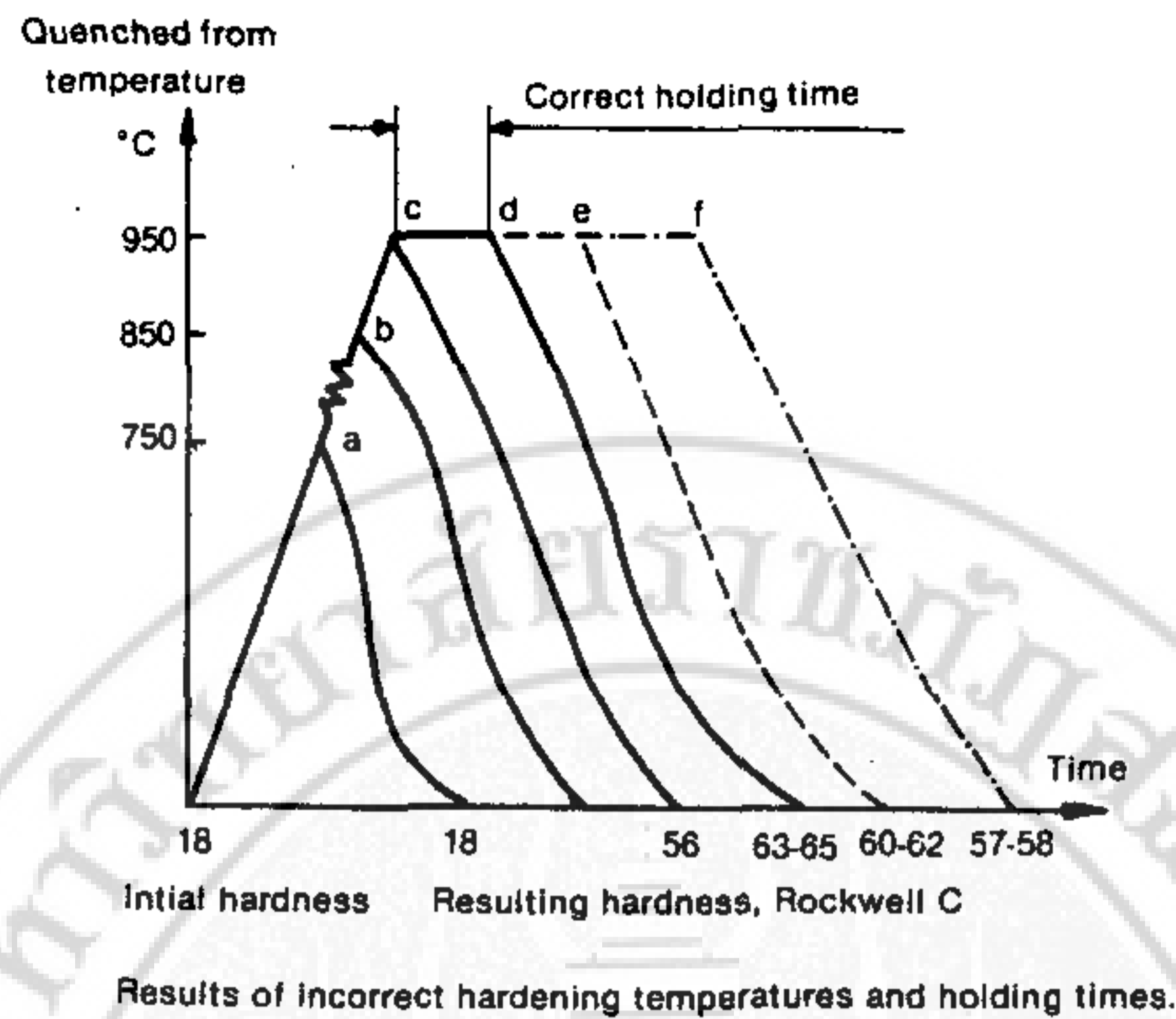
2.4 การชุบแข็งและการอบคืนตัวเหล็กกล้าผสม

เหล็กกล้าชุบแข็งและการอบคืนตัวเหล็กกล้าผสมโดยทั่วไปแล้วจะไม่แตกต่างกันไปจากการชุบแข็งและการอบคืนตัวที่กระทำกับเหล็กกล้าคาร์บอน สิ่งที่แตกต่างกันออกไปก็คืออุณหภูมิที่เผา ก่อนการชุบ ของเหลวที่ใช้ในการชุบและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนตัว ทั้งนี้เพราะอิทธิพลของธาตุผสมเป็นสำคัญ

อุณหภูมิที่เผาในช่วงที่เป็นออสเตนไนท์ก่อนการชุบ จำเป็นต้องเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อต้องการให้คาร์ไบด์ของธาตุผสมมีโอกาสดลายตัวในออสเตนไนท์ได้มาก ยิ่งเป็นคาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูงอุณหภูมิที่ใช้จะต้องสูงขึ้นไปอีก หรือไม่ก็ต้องใช้เวลาในการเผานานออกไป เพราะถ้าเกิดมีคาร์ไบด์ที่ไม่สลายตัวอยู่มาก จะทำให้ความสามารถในการชุบแข็งลดลง อาจจะไม่ได้อเหล็กที่มีความแข็งสูงตามต้องการ เมื่อต้องเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติการควบคุมบรรยากาศภายในเตาจำเป็นจะต้องควบคุมให้ได้ผล เพื่อป้องกันการลดปริมาณคาร์บอน (Decarburization) นอกจากนี้อัตราการเผาต้องให้เป็นไปโดยสม่ำเสมอ และช้ากว่าปกติ เพื่อป้องกันการบิดตัวของชิ้นงาน ยิ่งในกรณีนี้ชิ้นงานมีรูปร่างซับซ้อน จำเป็นต้องระวังมากขึ้น สิ่งที่จะต้องพิจารณาอีกประการหนึ่งคือ ช่วงเวลา (Holding time) ที่เผาเหล็กก่อนการชุบ จะต้องไม่ยาวนานจนเกินไป เพราะจะทำให้ธาตุผสมบางตัวที่รวมตัวกับคาร์บอนสลายตัวมากเกินไปจะทำให้ออสเตนไนท์ (matrix) มีธาตุผสมละลายอยู่ในอัตราสูง อาจจะทำให้ออสเตนไนท์ไม่เปลี่ยนไปเป็นมาร์เทนไซต์ได้หมด ในขณะที่ทำการชุบจะได้ออสเตนไนท์เหลือค้าง (retained austenite) อยู่จำนวนมาก ทำให้ความแข็งที่ได้จะต่ำกว่าที่ควร เหตุผลที่สำคัญก็คือ ธาตุผสมเกือบทุกตัวมีส่วนช่วยให้อุณหภูมิการเปลี่ยนออสเตนไนท์ไปเป็นมาร์เทนไซต์ต่ำลง ยิ่งเหล็กกล้าผสมเป็นชนิดที่มีธาตุผสมสูง จำเป็นจะต้องพิจารณากรณีที่จะเกิดขึ้นนี้ ดังรูปที่ 2.6

ของเหลวที่ใช้ในการชุบจะใช้ได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับธาตุที่ผสม เพราะธาตุที่ผสมส่วนมากจะมีบทบาททำให้อัตราการเย็นตัววิกฤต (critical cooling rate) ช้าลง เหล็กกล้าผสมบางชนิดอาจจะทำให้เย็นในอากาศก็ได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ ดังนั้นของเหลวที่ใช้สำหรับการชุบแข็งเหล็กกล้าผสมจะมีตั้งแต่ น้ำ น้ำมัน เกลือละลายจนถึงอากาศ (เรียกเหล็กที่ให้โครงสร้างมาร์เทนไซต์โดยการปล่อยให้เย็นในอากาศว่าเหล็กชุบลม หรือ air hardening)

อุณหภูมิที่ใช้ในการอบคืนตัว (Tempering) เป็นเรื่องที่จะต้องพิจารณามาก เพราะการอบคืนตัวกระทำได้หลายช่วงของอุณหภูมิ ดังเช่น การอบที่อุณหภูมิต่ำ (Low tempering temperature) และการอบที่อุณหภูมิสูง (high tempering temperature) นอกจากนี้จะต้องศึกษาถึงลักษณะของธาตุผสมที่มีอยู่ในเหล็ก เพราะธาตุผสมที่อยู่ในกลุ่มรวมตัวกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์จะมีผลต่อการอบคืนตัวมาก เช่น จะให้คุณสมบัติ Secondary hardening Temper และ brittleness



รูปที่ 2.6 แสดงผลของการชุบแข็งที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน

- คืออุณหภูมิที่เหล็กเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อชุบเหล็กจากอุณหภูมินี้ความแข็งจะเท่ากับความแข็งก่อนการเผา
- อุณหภูมิต่ำเกินไป เหล็กยังเปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์ไม่หมด ถ้าชุบเหล็กที่อุณหภูมินี้จะได้ความแข็งต่ำ
- อุณหภูมิที่ถูกต้องแต่เวลา (Holding time) สั้นเกินไป คาร์ไบด์ยังไม่สลายตัวเพียงพอ ความแข็งที่ได้ ไม่สูง
- อุณหภูมิที่ถูกต้องและเวลาพอเหมาะ ความแข็งที่ได้ภายหลังการชุบจะสูงกว่าการชุบที่จุด C
- e, f) อุณหภูมิถูกต้อง แต่เวลายาวนานเกินไป ความแข็งที่ได้ภายหลังการชุบจะลดลง

2.5 โครงสร้างของเหล็กที่ผ่านการทำการชุบแข็ง (Microstructures of Quenched Steels)

เหล็กกล้าเมื่อผ่านกระบวนการชุบแข็งมาแล้วอาจเกิดมีโครงสร้างเฟอไรต์ หรือโครงสร้างอื่นเกิดขึ้นได้ หรืออาจจะมีโครงสร้างออสเทนไนท์ตกค้าง (Retained Austenite) โดยโครงสร้างที่อาจพบได้ในเหล็กที่ทำการชุบแข็ง (Quenched Steels) มีดังนี้

2.5.1 ออสเทนไนท์ (Austenite) ออสเทนไนท์ที่พบหลังจากการชุบแข็งเหล็กจะเป็นออสเทนไนท์แบบตกค้าง (Retained Austenite) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนเป็นโครงสร้างมาร์เทนไซต์นั้นอุณหภูมิที่ทำให้มาร์เทนไซต์สิ้นสุด (M_f = Martensite Finish Temperature) ได้ลดต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง จึงทำให้เกิดโครงสร้างออสเทนไนท์ตกค้าง ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดออสเทนไนท์

ตกค้างได้แก่ ปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้จำนวนออสเตนไนท์ตกค้างเพิ่มขึ้น หรือ อุณหภูมิในการอบชุบเหล็กที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้จำนวนออสเตนไนท์ตกค้างเพิ่มขึ้นรวมทั้งความมีเสถียรภาพ (Stabilization) ของออสเตนไนท์จะเพิ่มโอกาสในการเกิดออสเตนไนท์ตกค้าง เป็นต้น ผลของการเกิดออสเตนไนท์ตกค้างอาจทำให้เหล็กมีความแข็งลดลง วิธีการแก้ไขอาจทำได้โดยการชุบแข็งที่ต่ำกว่าศูนย์องศา (Subzero Quenching)

2.5.2 มาร์เทนไซต์ (Martensite) พบได้โดยทั่วไปของเหล็ก (โครงสร้างเริ่มต้นต้องเป็นออสเตนไนท์เท่านั้น) ที่มีช่วงการเย็นตัวอย่างรวดเร็วพอเพียงต่อการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ลักษณะการเกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ (การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ จะเกิดขึ้นในช่วงการเย็นตัวเท่านั้น) ที่ขึ้นอยู่กับอัตราการลดลงของอุณหภูมินี้เราเรียกว่า Athemal ซึ่งลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้นมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบ Plate Martensite และ Lath Martensite ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก ถ้ามีปริมาณของคาร์บอนผสมอยู่ในเหล็กมากจะทำให้เกิดโครงสร้างเป็นแบบ Plate Martensite และถ้ามีปริมาณของคาร์บอนผสมอยู่ในเหล็กน้อยจะทำให้เกิดโครงสร้างเป็นแบบ Lath Martensite แต่ถ้ามีปริมาณของคาร์บอนผสมอยู่ในเหล็กปานกลางจะทำให้เกิดผสมทั้ง 2 แบบ

2.5.3 เฟอไรต์ละเอียด (Fine Pearlite) ประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) และซิเมนไตท์ (Cementite) พบในเหล็กที่มีช่วงการเย็นตัวอย่างช้า ๆ เมื่อมองจากกล้องจุลทรรศน์ จะเห็นมีลักษณะเป็นเหมือนขนนก เรียกว่า Plate Like แต่ถ้าพบในเหล็กที่ทำการชุบแข็งแสดงว่ามีช่วงการเย็นตัวที่ยาวนานเกินไป

2.5.4 ซอร์ไบท์ (Sorbite) คือ โครงสร้างที่เกิดจากออสเตนไนท์แตกตัวให้เฟอร์ไรท์ (Ferrite) และซิเมนไตท์ (Cementite) เช่นเดียวกับเฟอไรต์ แต่มีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าทำให้เห็นแถบโครงสร้างของเฟอร์ไรท์ และซิเมนไตท์เล็กมาก ไม่สามารถเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายแบบธรรมดาที่ใช้กันต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

2.5.5 ทรูสไตท์ (Troostite) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากออสเตนไนท์แตกตัวให้เฟอร์ไรท์ (Ferrite) และซิเมนไตท์ (Cementite) เช่นเดียวกับเฟอไรต์ แต่มีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าซอร์ไบท์ (Sorbite) ลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้นโดยการแทรกตัวอยู่กับโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ไม่สามารถเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายแบบธรรมดาที่ใช้เช่นเดียวกับโครงสร้างซอร์ไบท์ต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

2.5.6 เฟอร์ไรท์ (Ferrite) และซิเมนไตท์ (Cementite) อาจพบเจอได้ในโครงสร้างของเฟอไรต์ ซอร์ไบท์ หรือทรูสไตท์

2.6 บทบาทของธาตุที่มีผลต่อการชุบแข็ง (Hardening)

ในการชุบแข็งเหล็กผสมมีสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาสองประการดังนี้คือ

2.6.1 ความแข็งภายหลังการชุบแข็ง ผลจากการทดลองวัดความแข็งภายหลังการชุบแข็งเหล็ก 0.02% C 10% Cr ได้ความแข็ง 35 H_{RC} แต่เหล็ก 0.35% C ไม่ผสมโครเมียม ภายหลังการชุบแข็งได้ความแข็ง 50 H_{RC} จะเห็นได้ชัดว่าธาตุที่ผสมในเหล็กไม่มีบทบาทมากนักในการเพิ่มความแข็งให้กับมาร์เทนไซต์ ธาตุคาร์บอนจะให้ผลต่อความแข็งของมาร์เทนไซต์เด่นชัดกว่าธาตุผสม ทั้งนี้เพราะคาร์บอนจะก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของกลุ่มอะตอม (Lattice deformation) ได้ดีกว่าธาตุผสม

ธาตุผสมที่อยู่ในประเภทรวมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ จะมีผลต่อความแข็งอยู่บ้างก็เฉพาะที่เกิดคาร์ไบด์และไม่ละลายตัวในขณะที่เผาที่อุณหภูมิสูง (Non dissolved) เมื่อกระจายอยู่ในโครงสร้างของมาร์เทนไซต์จะมีบทบาททางด้านต้านทานต่อการเสียดสีในขณะที่ใช้งาน (wear resistance) ทำให้การสึกหรอน้อยลง แต่คาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวนี้จะไปมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็ง ธาตุที่สำคัญได้แก่ ทั้งสแตน วานาเดียม และโมลิบดีนัม ซึ่งคาร์ไบด์ของธาตุเหล่านี้มีเสถียรภาพสูงในการชุบแข็งเหล็กที่มีธาตุเหล่านี้ผสมจะต้องเผาที่อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1200 °C – 1300 °C จึงจะละลายตัว

2.6.2 ความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) ความสามารถในการชุบแข็งของเหล็กขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ที่สำคัญคือ

2.6.2.1 เกรนของออสเทนไนท์ เหล็กจะมีความสามารถในการชุบแข็งสูงควรจะมีออสเทนไนท์เกรนโต เพราะบริเวณรอบเกรนของออสเทนไนท์จะเป็นบริเวณที่ช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนท์ไปเป็นซีเมนต์ไต์และออสเทนไนท์ที่มีขนาดเกรนเล็กบริเวณรอบเกรนจะมีมาก ธาตุที่ให้คาร์ไบด์ที่มีเสถียรภาพสูง เช่น วานาเดียมคาร์ไบด์หรือทั้งสแตนคาร์ไบด์จะเป็นตัวป้องกันการขยายตัวของเกรนออสเทนไนท์จึงมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็งโดยตรง

2.6.2.2 พวกคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัว (Non dissolved carbide) เป็นอีกแฟคเตอร์หนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการชุบแข็ง เพราะพวกคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวนี้จะกระจายอยู่ในออสเทนไนท์ และพร้อมจะทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสให้กับการเปลี่ยนแปลงจากออสเทนไนท์ไปเป็นซีเมนต์ไต์ และเฟอร์ไรท์ ในขณะที่ชุบเหล็กโอกาสที่จะให้มาร์เทนไซต์จะน้อยลง ทำให้ความแข็งที่จะได้ภายหลังการชุบแข็งต่ำกว่าที่ควรจะได้

นอกจากพวกคาร์ไบด์ที่ไม่ละลายตัวจะมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็งแล้ว พวกสารมลทินที่อยู่ในรูปของซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃) ซึ่งจะไม่ละลายตัว

เช่นเดียวกัน ในช่วงอุณหภูมิออสเตนไนท์จะมีผลต่อความสามารถในการชุบแข็งเช่นเดียวกับพวกคาร์ไบด์ที่ไม่สลายตัว

2.6.2.3 ความสม่ำเสมอของออสเตนไนท์มีความสำคัญต่อความสามารถในการชุบแข็งเช่นเดียวกัน ในการชุบแข็งเหล็กจะต้องถูกเผาให้ร้อนจนได้โครงสร้างออสเตนไนท์อย่างสม่ำเสมอ ถ้าออสเตนไนท์ขาดความสม่ำเสมอ เป็นต้นว่า มีคาร์ไบด์ที่ไม่สลายตัวจับตัวกันอยู่เป็นกลุ่มเป็นก้อนจะทำให้บริเวณใกล้เคียงมีปริมาณของธาตุผสมแตกต่างกันไปจากบริเวณอื่น ๆ เพราะการเคลื่อนไหวของธาตุผสมโดยทั่วไปจะช้า ยิ่งบริเวณที่มีผลึกของคาร์ไบด์ขนาดโต การเคลื่อนที่ของอะตอมของธาตุผสมจะต้องเคลื่อนที่เป็นระยะทางไกล ซึ่งจะต้องใช้เวลามากขึ้น ดังนั้น ธาตุผสมในโครงสร้างของออสเตนไนท์จะไม่สม่ำเสมอ และการขยายตัวของเกรนออสเตนไนท์จะไม่เท่ากันตลอด เพราะการขยายตัวของออสเตนไนท์จะเกิดขึ้นเมื่อคาร์ไบด์สลายตัวหมดแล้ว ดังนั้นบริเวณใดไม่มีคาร์ไบด์ เกรนของออสเตนไนท์จะขยายตัวได้เร็วกว่าบริเวณที่มีคาร์ไบด์ จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ขนาดของเกรนออสเตนไนท์ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้มาร์เทนไซต์ที่ได้ภายหลังการชุบแข็งไม่สม่ำเสมอเช่นเดียวกัน ซึ่งจัดเป็นคุณสมบัติที่ไม่ดีของเหล็กชุบแข็ง

2.7 บทบาทของธาตุผสมที่มีต่อการอบคืนตัว (Tempering)

การอบคืนตัวจะกระทำภายหลังการชุบแข็ง ความมุ่งหมายก็เพื่อลดความเครียดที่เกิดจากการทำให้เหล็กเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิออสเตนไนท์จนถึงอุณหภูมิปกติ นอกจากนี้ ยังมีส่วนช่วยให้เหล็กมีความเหนียวเพิ่มขึ้น เพราะเหล็กภายหลังการชุบจะได้โครงสร้างมาร์เทนไซต์ซึ่งมีความแข็งสูงแต่จะเปราะแตกง่ายทำให้เป็นอันตรายในขณะนำไปใช้งาน แต่การอบคืนตัวจะทำให้ความแข็งลดลงมากขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาของการอบคืนตัว ดังได้กล่าวมาแล้วในเรื่องของการอบคืนตัวเหล็กกล้าคาร์บอน บทบาทของธาตุผสมที่มีต่อการอบคืนตัวโดยทั่วไปจะมีผลในการต่อต้านการลดความแข็ง คือทำให้ความแข็งลดลงในอัตราที่ช้ากว่าเหล็กกล้าคาร์บอน ทั้งนี้ยกเว้นธาตุผสมที่มีอยู่ในกลุ่มไม่รวมตัวกับคาร์บอน เช่น นิเกิล ซิลิกอน และรวมถึงแมงกานีสในขอบเขตอันหนึ่งซึ่งจะทำให้ผลในการต่อต้านการลดความแข็งในขณะทำการอบคืนตัวน้อยมาก

สำหรับธาตุผสมที่สามารถรวมกับคาร์บอนให้คาร์ไบด์ในหลายรูปแบบ เช่น โครเมียม โมลิบดีนัม ทังสเตน และวานาเดียม จะมีผลทำให้การต้านการลดความแข็งอย่างเด่นชัด ยังมีปริมาณของธาตุผสมเหล่านี้สูงผลในด้านนี้ยิ่งชัดเจนมาก โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 400 °C - 600

$^{\circ}\text{C}$ นอกจากจะไม่ลดความแข็งแล้วยังมีส่วนทำให้ความแข็งกลับเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Secondary Hardening

2.8 Temper Martensite

Tempermartensite เป็นชื่อของโครงสร้างที่ผ่านกระบวนการการอบคืนตัว โดยเริ่มที่อุณหภูมิ 200°C ทำให้อนุภาคคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนอุณหภูมิสูงสุดของการอบคืนตัว (Lower critical temperature) ประมาณ 720°C ซึ่งช่วงอุณหภูมิของการทำการอบคืนตัวนี้ จะมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของเหล็ก เช่น ความแข็ง ความต้านทานแรงดึง ความยืดหยุ่นและความเหนียว ดังนั้นเราจึงต้องเลือกอุณหภูมิให้เหมาะสมสำหรับการทำการอบคืนตัว โดยการทำการอบคืนตัวแบ่งเป็น

2.8.1 Low Temperature Tempering คือการอบคืนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200°C - 320°C จะเกิดการก่อตัวของคาร์ไบด์ก้อนกลม (Spheroidal carbide) ที่มาจากคาร์บอน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจะทำให้เกิดการรวมตัวกันของซิเมนต์ไครต์ (Fe_3C) กับคาร์ไบด์กลม ในเนื้อของเฟอร์ไรท์ โดยโครงสร้างที่ปรากฏจะคล้ายคลึงกับเบนไนท์ และจากการที่โครงสร้างสูญเสียคาร์บอนจะทำให้ความแข็งลดลง แต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้น การอบคืนตัวที่อุณหภูมินี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเครียดภายในและปรับปรุงคุณสมบัติด้านความเหนียว โดยจะพยายามรักษาความแข็งไว้ในระดับที่ใกล้เคียงกับความแข็งที่ได้จากการชุบแข็ง

2.8.2 High Temperature Tempering คือการอบคืนตัวที่อุณหภูมิประมาณ 395°C - 540°C จะทำให้เกิดการรวมกันของอนุภาคคาร์ไบด์มากขึ้น ทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความละเอียดน้อยลง โครงสร้างที่ได้จะอยู่ในลักษณะละเอียดและกระจายตัวคล้ายซอร์ไบท์ ซึ่งจากการที่เหล็กมีโครงสร้างแบบซอร์ไบท์จะทำให้เหล็กจะมีความแข็ง และความแข็งแรงลดลงมาก แต่ความยืดหยุ่นและความเหนียวจะเพิ่มขึ้นมากเช่นกัน การอบคืนตัวที่อุณหภูมินี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เหล็กมีความเหนียวสูง แต่ไม่คำนึงถึงความแข็งมากนักเพราะการอบที่อุณหภูมินี้ความแข็งจะลดลง

2.9 ความเปราะเนื่องจากการอบคืนตัว (Temper Brittleness)

เหล็กโดยส่วนมากกระบวนการอบคืนตัว จะหลีกเลี่ยงช่วงอุณหภูมิประมาณ 200°C - 400°C เพราะการอบคืนตัว ในช่วงอุณหภูมินี้อาจจะทำให้เหล็กเกิดความเปราะ ซึ่งเรียกช่วงอุณหภูมินี้ว่า Temper Brittleness ดังนั้นการอบคืนตัวจึงนิยมทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 400°C (High

temperature Tempering) หรือต่ำกว่า 200°C (Low temperature Tempering) โดยทั้งสองช่วง อุณหภูมิแตกต่างกันดังนี้

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำจะทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200°C ลงไปจะเป็นที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็ง

การอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูงจะทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 400°C ขึ้นไปจะเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็งและความเหนียว (เมื่อต้องการเพิ่มความเหนียว และการทดสอบแรงกระแทกต้องทำการอบคืนตัวที่อุณหภูมิ 425°C) โดยมีช่วงอุณหภูมิที่อาจทำให้เกิดความเปราะ กำหนดไว้ 4 ช่วงคือ

2.9.1 270°C - 350°C โดยช่วงอุณหภูมิของความเปราะนี้จะพบในการอบคืนตัว เหล็กกล้า และเหล็กกล้าผสมต่ำรวมทั้งเหล็กกล้าเครื่องมือและเหล็กกล้าโครงสร้าง ช่วงของอุณหภูมินี้จะเป็นช่วงอุณหภูมิที่ออสเทนไนต์ตกค้างเปลี่ยนเป็นเบนไนท์มากขึ้น ซึ่งจากการที่มีโครงสร้างเบนไนท์จะทำให้เหล็กสูญเสียความเหนียว และช่วงอุณหภูมิของความเปราะนี้จะพบสารประกอบของ ฟอสฟอรัสหลังจากการทำกรชุบแข็งและการอบคืนตัวซึ่งจะมีผลกระทบต่อแรงทดสอบแรงกระแทก โดยเมื่อผ่านการทดสอบแรงกระแทกเหล็กจะเกิดการแตกหักแบบเปราะ อีกสาเหตุที่เกิดความเปราะในช่วงนี้ก็คือจะพบคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรนของออสเทนไนท์หลังจากการอบคืนตัว

2.9.2 475°C ที่อุณหภูมินี้จะเกิดความเปราะเนื่องจากความแข็งเพิ่มขึ้น โดยจะสังเกตได้ชัดเจนในเหล็กกล้าที่มีโครเมียมมากกว่า 25% โดยจะปรากฏโครงสร้าง Ferritic และ Semi-Ferritic chrome steels ความเปราะอาจจะเกิดขึ้นหลังจากให้ความร้อนที่ 475°C ไม่กี่นาที ความแข็งจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการตกตะกอนของสารประกอบโครเมียม ทำให้โครเมียมลดปริมาณลง ซึ่งจากการลดหายไปของโครเมียมในโครงสร้างพื้นฐานจะเป็นผลให้ความต้านทานการกัดกร่อนลดลง

2.9.3 500°C โดยช่วงของความเปราะนี้จะพบในการอบคืนตัวของเหล็กกล้าโครงสร้าง โดยความเปราะที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมินี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่อบคืนตัว ถ้าเหล็กถูกทำการอบคืนตัวแล้วปล่อยให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ จะเป็นผลให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกของเหล็กลดลง โดยส่วนมากเหล็กที่จะเกิดความเปราะที่อุณหภูมินี้จะมีส่วนผสมของฟอสฟอรัสมากกว่า 0.015%

2.9.4 500°C - 570°C จะพบในเหล็กกล้าผสมสูง เช่น เหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน และเหล็กกล้าความเร็วสูง โดยช่วงอุณหภูมินี้ จะเกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์ระหว่างการเย็นตัวของ มาร์เทนไซต์ ซึ่งจากเหตุผลนี้จะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นแต่ค่าพลังงานกระแทกจะลดลงและจะทำให้เหล็กเกิดความเปราะ

2.10 การทดสอบและการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

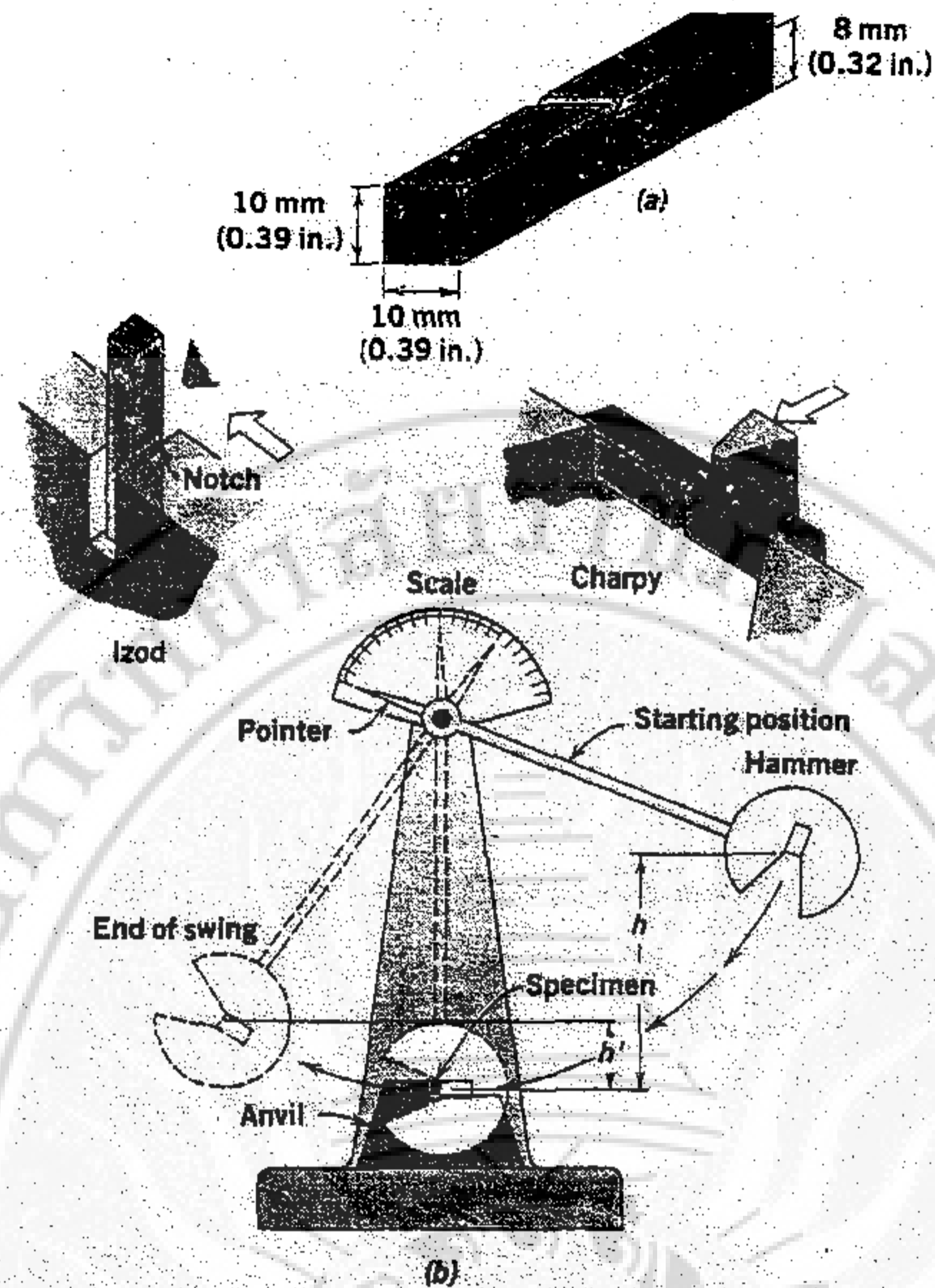
โลหะทุกชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของธาตุต่าง ๆ ที่ผสมอยู่ในโลหะแต่ละชนิด ตลอดจนกระบวนการผลิต คุณสมบัติโดยธรรมชาติของโลหะนั้น และกรรมวิธีทางความร้อนที่กระทำต่อโลหะ ดังนั้นเพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติบางอย่างของโลหะ การทดสอบและการตรวจสอบทางจุลภาคจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) และการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure)

2.10.1 การทดสอบแรงกระแทก (Impact Test) เป็นการวัดค่า Impact Energy หรือ Impact Toughness ซึ่งเป็นการวัดปริมาณของพลังงานที่วัสดุจะดูดซับไว้ได้เมื่อได้รับแรงจากการกระแทกฉับพลัน (Dynamic Impact Force) วิธีการทดสอบมีอยู่ 2 ชนิดคือ Charpy Impact Test และ Izod Impact Test เครื่องมือทดสอบทั้ง 2 ชนิดนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.7

2.10.2 การทดสอบความแข็ง (Hardness Test) ความแข็งเป็นความต้านทานการเจาะทะลุ (penetration) หรือการเสียดสี (Abrasion) ของวัสดุ ความแข็งของวัสดุเกี่ยวข้องกับค่าการจับตัวของอะตอมและโมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ เช่นเดียวกันกับความแข็งแรง ดังนั้นความแข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้น การทดสอบความแข็งมีอยู่หลายวิธีแต่ที่นิยมใช้มากที่สุดมี 3 วิธีคือ การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) การทดสอบความแข็งแบบรอกเวล (Rockwell Hardness Test) และการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vicker Hardness Test) แต่สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการทดสอบความแข็งแบบรอกเวล (Rockwell Hardness Test)

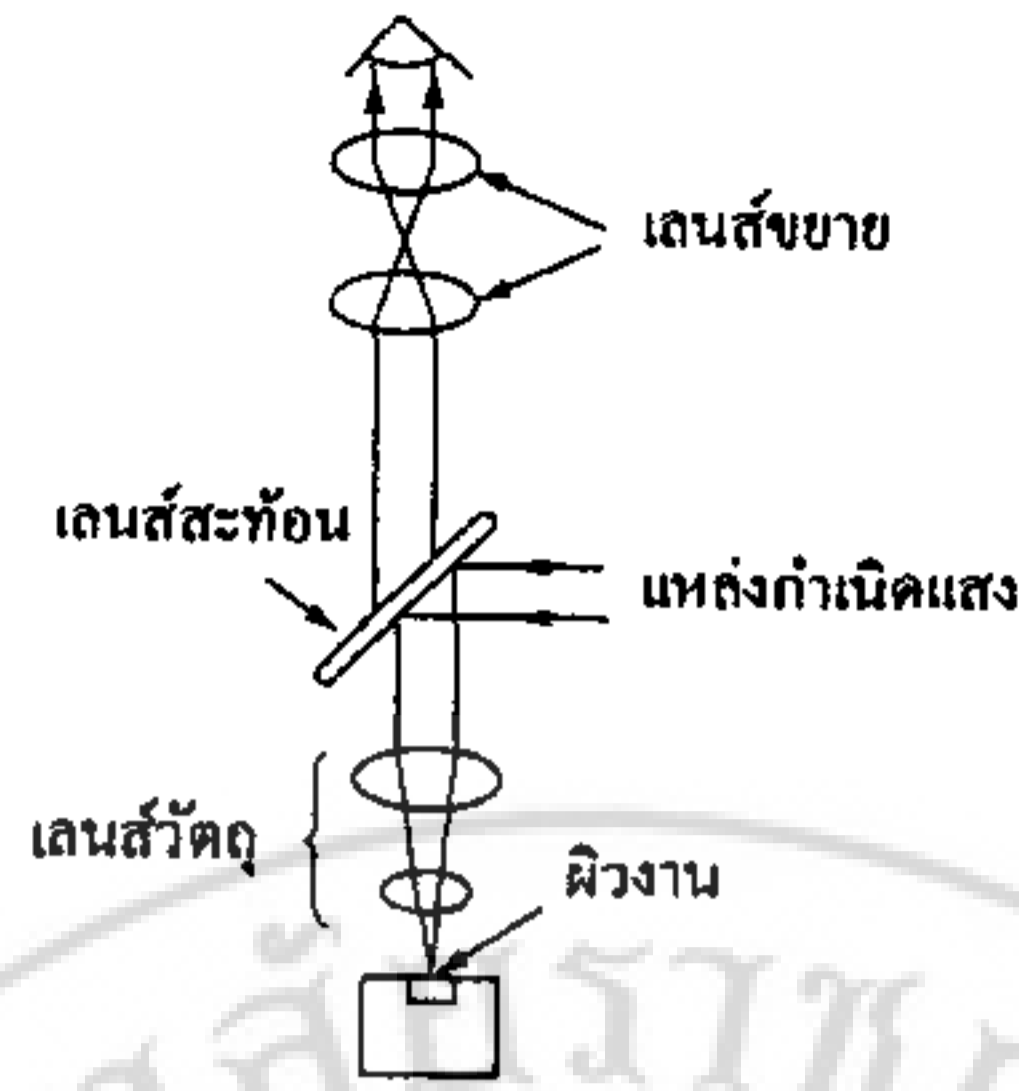
การทดสอบความแข็งแบบรอกเวลแบบนี้คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงน้อยกว่า ค่าของแรงที่ใช้และชนิด หรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นกับสเกลของความแข็งแบบรอกเวลที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรงจากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งมาก วิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อยคือ 10 กก. จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60-100 กก. ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้ อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบรอกเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลวัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกอ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง และเนื่องจากรอยบุ๋มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 2.7 การทดสอบแรงกระแทกแบบ Charpy และ Izod

2.10.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microscope) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค
 กระทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง ถ้าเป็นกล้องที่ใช้แสงจากหลอดไฟจะให้
 กำลังขยายไม่เกิน 2,000 เท่า แต่ถ้าเป็นกล้องที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนจะสามารถให้กำลังขยายได้สูง
 ถึง 100,000 เท่า หรือมากกว่า

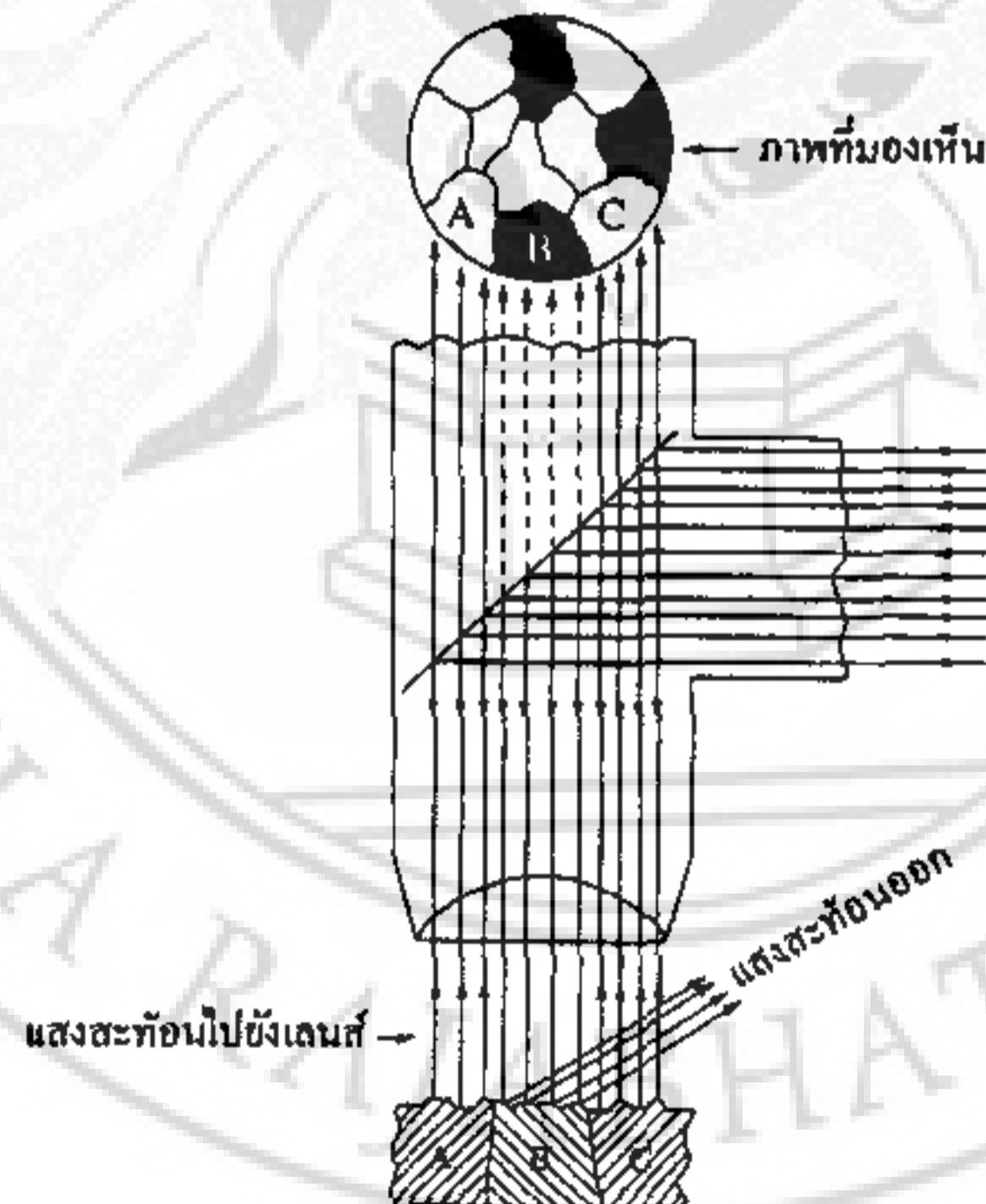
2.10.3.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์ มีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกัน
 ไม่ว่าจะเป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใดก็ตาม โดยมีหลักการทำงานด้วยการปล่อยแสงจาก
 แหล่งกำเนิดไปยังชิ้นตรวจสอบ ทำให้แสงที่ตกกระทบลงบนผิวงานที่เรียบและตั้งฉากกับลำแสง
 จะสะท้อนแสงได้ดีกว่า โดยแสงจะสะท้อนกลับเข้าไปยังเลนส์ขยาย (Eye Piece) และเข้าสู่สายตา
 ของผู้ตรวจสอบ ทำให้เห็นภาพดังกล่าวมีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แบบที่ใช้ลำแสงจากหลอดไฟ

แต่ถ้าลำแสงจากจุดกำเนิดแสงตกกระทบบนผิวงานที่ไม่เรียบและไม่ตั้งฉากกับลำแสง การสะท้อนจะไม่ดีเท่าที่ควร โดยที่将有แสงบางส่วนสะท้อนกลับไปยังเลนส์ขยายและเข้าสู่สายตาของผู้ตรวจสอบหรือในบางครั้งอาจไม่มีการสะท้อนเข้าตาผู้ตรวจสอบเลย จึงทำให้ผู้ตรวจสอบเห็นเป็นสีดำ

2.10.3.2 การเตรียมชิ้นตรวจสอบเพื่อการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคนั้นควรตัดให้เกิดพื้นที่หน้าตัด และการตัดดังกล่าวต้องหลีกเลี่ยงให้เกิดความร้อนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ทั้งนี้ก็เพราะว่าความร้อนดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าตัดนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้การตรวจสอบนั้นเกิดข้อผิดพลาด



รูปที่ 2.9 ลักษณะลำแสงสะท้อนกลับไปยังเลนส์ขยายทำให้เกิดภาพ โครงสร้างของชิ้นตรวจสอบ

หลังจากได้ชิ้นตรวจสอบที่มีขนาดตามต้องการแล้ว จะต้องดำเนินการขั้นตอนต่อไป เพื่อให้สามารถนำชิ้นตรวจสอบนั้นไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ ชิ้นตอนในลำดับต่อไปนั้นจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การขัดผิวจินตรวจสอบ ควรขัดด้วยกระดาษทรายที่ทำจากผงซิลิคอนคาร์ไบด์ ตั้งแต่เบอร์ 240 320 400 600 800 1000 และขัดจนถึงเบอร์ 1200 ตามลำดับ ในการขัดควรวางกระดาษทรายลงบนกระจกหนาเรียบ แล้วขัดผิวตรวจสอบลงบนกระดาษทรายนั้น ในขณะที่ขัดนั้นจะต้องเปิดน้ำอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้น้ำชำระสิ่งสกปรกซึ่งได้แก่ผงโลหะ และซิลิคอนคาร์ไบด์ออกให้หมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนกระดาษทรายแผ่นต่อไป ควรขัดชิ้นตรวจสอบไปอีกแนวทางหนึ่งสลับกันเป็นตารางกับแนวเดิม ทำเช่นนี้จนถึงกระดาษทรายเบอร์สุดท้าย

การขัดผิวด้านตรวจสอบควรใช้แรงพอประมาณ ไม่ควรออกแรงขัดมากจนเกินไป ทั้งนี้จะส่งผลให้โครงสร้างของชิ้นตรวจสอบเกิดความบกพร่องจนทำให้การตรวจสอบโครงสร้างเกิดข้อผิดพลาด



รูปที่ 2.10 ลักษณะแนวทางการขัดชิ้นตรวจสอบสลับเป็นตาราง

2) การขัดผิวด้วยผงขัด (Polishing) การขัดผิวด้านตรวจสอบนี้ เป็นการขัดผิวมันของชิ้นตรวจสอบด้วยผงขัดที่ทำจากผงอะลูมินา (Alumina Oxide) และแมกนีเซียม (Magnesium Oxide) หรืออาจจะใช้กากเพชรขัดผิวด้านตรวจสอบที่มีความแข็งสูงมาก โดยผงขัดเหล่านี้จะมีขนาดตั้งแต่ 0.05 – 0.3 ไมครอน

การขัดด้วยผงขัดนี้ จะต้องขัดบนจานหมุนที่ห่อหุ้มด้วยผ้าสักหลาด โดยการนำผงขัดผสมกับน้ำเทลงบนสักหลาดแล้วขัดผิวจนเป็นมัน

3) การกัดด้วยน้ำยา (Etching) ชิ้นตรวจสอบที่ถูกขัดจนเป็นมันแล้วนั้น จะต้องล้างด้วยแอลกอฮอล์ จากนั้นจะถูกนำไปกัดด้วยน้ำยา ซึ่งจะเป็นน้ำยาอะไรนั้นต้องขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการตรวจสอบ เช่น ถ้าเป็นเหล็กก็จะใช้กรดไนตริก ร้อยละ 2 – 4 ผสมกับแอลกอฮอล์ โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้น้ำยาดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของน้ำยากัดชิ้นตรวจสอบที่เป็นเหล็ก

น้ำยากัดผิวตรวจสอบ	ส่วนผสม	โลหะที่ตรวจสอบ	การใช้งาน
กรดไนตริกและไฮโดรคลอริก (Nitric Acid and Hydrochloric)	กรดไนตริก (HNO ₃) 3 มิลลิลิตร ไฮโดรคลอริก (HCl) 10 มิลลิลิตร และเมทิลแอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร	เหล็กเครื่องมือ เหล็กกล้าคาร์บอน	จุ่มชิ้นตรวจสอบ นาน 10-30 วินาที

4) การตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อชิ้นตรวจสอบถูกกัดด้วยน้ำยาเรียบร้อยแล้ว ซึ่งผู้ตรวจสอบจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของกล้องจุลทรรศน์จากคู่มือการใช้เครื่องให้เข้าใจและเกิดทักษะเสียก่อน เมื่อแน่ใจว่ามีความเข้าใจขั้นตอนการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แล้ว จึงเริ่มลงมือปฏิบัติตามขั้นตอนดังกล่าว

2.11 การทดสอบสมมติฐาน (Test of Hypothesis)

การทดสอบสมมติฐานเป็นการตัดสินใจแบบมีการทดลอง ซึ่งการทดลองนี้จะเป็นการทดลองเพื่อยืนยันความเชื่ออย่างใดอย่างหนึ่งของผู้ทดสอบ โดยที่ตัวแปรของการตัดสินใจนี้จะมีอยู่ด้วยกันสองทางเลือกคือ สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis: H_0) และสมมติฐานอื่น ๆ (Alternative Hypothesis H_1) ตัวอย่างของการทดสอบสมมติฐาน

$$H_0 : \text{ลีดของวัตถุดิบมีคุณภาพดี} \quad (2.1)$$

$$H_1 : \text{ลีดของวัตถุดิบมีคุณภาพไม่ดี}$$

การตั้งสมมติฐานตามสมการที่ 2.1 นั้น เป็นการตั้งสมมติฐานที่เป็นข้อความแสดงถึงลักษณะที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งการตั้งสมมติฐานนี้จะสามารถตั้งอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ที่เป็นตัวเลขก็ได้ เช่น

$$H_0 : \mu = 55 \text{ มม.} \quad (2.2)$$

$$H_0 : \mu \neq 55 \text{ มม.}$$

หรือ $H_0 : \mu \leq 55 \text{ มม.} \quad (2.3)$

$$H_0 : \mu > 55 \text{ มม.}$$

หรือ $H_0 : \mu \geq 55 \text{ มม.} \quad (2.4)$

$$H_0 : \mu < 55 \text{ มม.}$$

เมื่อ μ หมายถึงค่าความแข็งของเหล็ก (HRC)

การตั้งสมมติฐานดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะสามารถแบ่งสมมติฐานออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ สมมติฐานแบบ 2 ด้าน (Two Sided Alternative Hypothesis) ดังสมการที่ 2.2 และ สมมติฐานแบบด้านเดียว (One Sided Alternative Hypothesis) ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 โดยที่ สมการ 2.3 จะเป็นสมมติฐานด้านเดียวแบบบน (Upper One Side Alternative Hypothesis) และ สมการที่ 2.4 จะเป็นสมมติฐานด้านเดียวแบบล่าง (Lower One Sided Alternative Hypothesis) โดยขอให้สังเกตว่าการเรียกชื่อสมมติฐานจะเรียกตามค่าของพารามิเตอร์ที่มีความเป็นไปได้ในสมมติฐานอื่น (H_1) และแนวทางในการตั้งสมมติฐานจะกำหนดด้วยกัน 3 แนวทางคือ

2.11.1 เป็นการกำหนดจากประสบการณ์ในอดีตหรือความรู้เกี่ยวกับกระบวนการหรือจากการทดลองก่อนหน้านี้ ซึ่งการกำหนดสมมติฐานแบบนี้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างมากในการควบคุมกระบวนการ

2.11.2 เป็นการกำหนดค่าจากทฤษฎีหรือตัวแบบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ทำการศึกษา ซึ่งการกำหนดสมมติฐานแบบนี้มักจะถูกนำไปใช้กับงานวิจัยและพัฒนา (R&D)

2.11.3 เป็นการกำหนดค่าจากการพิจารณาถึงปัจจัยภายนอกต่าง ๆ อาทิแบบทางวิศวกรรม ข้อกำหนดเฉพาะทางวิศวกรรม หรือจากสัญญาที่กำหนด ซึ่งการกำหนดสมมติฐานแบบนี้มักจะถูกนำไปใช้กับการตัดสินใจในการตรวจสอบคุณภาพของฝ่ายควบคุมคุณภาพ หรือการทดสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการสอบเทียบ เป็นต้น

ภายใต้แนวทางการตั้งสมมติฐานดังกล่าวอาจจะสรุปเป็นสมมติฐานเพื่อการประยุกต์ในทางวิศวกรรมได้ 3 ประเภทคือ

2.11.3.1 การควบคุม ซึ่งเป็นการตัดสินใจเพื่อยืนยันว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากมาตรฐานหรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐานว่า

H_0 : กระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมเชิงสถิติ (หรือ $\mu = \mu_0$)

H_1 : กระบวนการมิได้อยู่ภายใต้การควบคุมเชิงสถิติ (หรือ $\mu \neq \mu_0$)

ในทางสถิติ จะถือเป็นการตัดสินใจเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของประชากรชุดเดียว

2.11.3.2 การวิเคราะห์ ซึ่งเป็นการตัดสินใจเพื่อยืนยันว่าปัจจัยที่พิจารณาเป็นสาเหตุของปัญหาที่พิจารณาหรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐานว่า

H_0 : ปัจจัยที่พิจารณามีได้เป็นสาเหตุการเปลี่ยนแปลงตัวแปร y (หรือ $\mu_1 = \mu_2$)

H_1 : ปัจจัยที่พิจารณาเป็นสาเหตุการเปลี่ยนแปลงตัวแปร y (หรือ $\mu_1 \neq \mu_2$)

ในทางสถิติจะถือเป็นการตัดสินใจเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของประชากรสองชุด หรืออาจจะมากกว่าสองชุด และระดับของปัจจัยที่พิจารณาในกรณีนี้จะต้องเป็นระดับเดียวกับมาตรฐานปัจจุบันขององค์กร หรือระดับภายใต้เทคโนโลยีที่ดีที่สุดในปัจจุบัน

2.11.3.3 การปรับปรุง ซึ่งเป็นการตัดสินใจเพื่อยืนยันว่าปัจจัยที่พิจารณามีผลต่อการปรับปรุงค่าตัวแปรตอบสนองที่พิจารณาหรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐานว่า

H_0 : ปัจจัยที่พิจารณามีผลต่อการปรับปรุงตัวแปร y (หรือ $\mu_1 = \mu_2$)

H_1 : ปัจจัยที่พิจารณามีผลต่อการปรับปรุงตัวแปร y (หรือ $\mu_1 > \mu_2$)

ในทางสถิติ จะเป็นการตัดสินใจเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของประชากรสองชุด เพียงแต่จะแตกต่างกับประเด็นการวิเคราะห์ คือในกรณีนี้ ระดับที่ 1 ของปัจจัยจะต้องเป็นระดับที่เสนอเพื่อการปรับปรุง และระดับที่ 2 ของปัจจัยจะต้องเป็นระดับมาตรฐานเดิมขององค์กร หรือภายใต้เทคโนโลยีเดิมที่ใช้

การทดสอบสมมติฐานจำเป็นต้องมีการทำการทดลองเพื่อหาเหตุผลมายืนยันความเชื่อของผู้ทดสอบ ซึ่งถ้าเหตุผลที่ได้ไม่สามารถยืนยันความเชื่อของผู้ทดสอบได้ ผู้ทดสอบก็มีความจำเป็นที่จะต้องทำการยอมรับทางเลือกอีกทางเลือกหนึ่งนั้น มิใช่เป็นเพราะทางเลือกนั้นถูกต้อง แต่ที่เลือกเพราะไม่มีเหตุผลเพียงพอที่จะทำการปฏิเสธ (Fail to Reject) ทางเลือกนั้นในทางกลับกันถ้าเหตุผลที่ได้นั้นสามารถทำการยืนยันความเชื่อของผู้ทดสอบได้ ความเชื่อของผู้ทดสอบก็จะสามารถทำการยอมรับได้

หลักการของการทดสอบสมมติฐานดังที่ได้กล่าวมานั้น ได้มีการนำไปใช้ในหลายทางด้วยกันเช่น การทดสอบความมีนัยสำคัญสำหรับพารามิเตอร์ ซึ่งเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของตัวแปรสุ่มแบบปกติและแบบไบโนเมียล (ที่มีการนำไปใช้กันค่อนข้างมาก) โดยหลักการทดสอบจะอาศัยระดับนัยสำคัญเพื่อทดสอบว่า ผลจากการทดลองมีค่าแตกต่างมากกว่าหรือน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้หลักการทดสอบสมมติฐานกับการทดสอบความมีนัยสำคัญสำหรับพารามิเตอร์คือ

- 1) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มแบบปกติ (กรณีประชากรเดียว)
- 2) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มแบบปกติ (กรณีประชากรสองชุด)
- 3) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มแบบปกติ (กรณีข้อมูลแบบคู่หรือบล็อก)
- 4) การทดสอบความมีนัยสำคัญของความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มปกติ (กรณีประชากรเดียว)
- 5) การทดสอบความมีนัยสำคัญของความแปรปรวนของตัวแปรสุ่มปกติ (กรณีประชากรสองชุด)

- 6) การทดสอบความมีนัยสำคัญของสัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่อง (กรณีประชากรเดียว)
- 7) การทดสอบความมีนัยสำคัญของสัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่อง (กรณีประชากรสองชุด)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นในเรื่องของการทดสอบความมีนัยสำคัญสำหรับพารามิเตอร์ การทดสอบแบบนี้จะมีข้อจำกัดประการหนึ่งคือ จะสามารถดำเนินการทดสอบได้กับประชากรที่ละไม่เกิน 2 กลุ่มประชากรเท่านั้น ซึ่งในการตัดสินใจทางวิศวกรรมบางครั้งอาจมีความจำเป็นต้องทำการตัดสินใจภายใต้ประชากรหลายชุด (มากกว่า 2 ชุดประชากร) ในกรณีเช่นนี้ถ้าทำการเลือกกลุ่มประชากรมาทีละ 2 กลุ่มมาทำการทดสอบ แล้วทำการสรุปผลการทดสอบทีละคู่ของประชากรไปจนครบจำนวนกลุ่มประชากรทั้งหมด ถ้าจะทำการสรุปผลการทดสอบให้ถูกต้องหมดทุกคู่ของการทดสอบจะมีผลทำให้ระดับความมีนัยสำคัญ (Significant Level) มีค่าสูงขึ้น (Inflation) ซึ่งนั่นก็หมายความว่า ความสามารถในการสรุปผลการทดลองได้ถูกต้องนั้นมีค่าลดลง ยิ่งจำนวนกลุ่มประชากรที่ต้องการทดสอบมีมาก ความสามารถในการสรุปผลการทดสอบได้ถูกต้องก็จะยิ่งมีค่าน้อยลงตามไปด้วยซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการตัดสินใจ

จากเหตุผลที่ได้กล่าวมา เมื่อมีความจำเป็นต้องมีการตัดสินใจภายใต้ประชากรมากกว่า 2 ชุด การวิเคราะห์ความแปรปรวนหรือ ANOVA (Analysis of Variance) จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้จะอาศัยหลักการคือ การหาค่าความแปรปรวนโดยรวมแล้วแยกความแปรปรวนรวมนั้นออกให้อยู่ในรูปความแปรปรวนของกลุ่มประชากรที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนสาเหตุปัจจัยที่ทำการควบคุม และความแปรปรวนที่เกิดจากสาเหตุปัจจัยที่ไม่ได้รับการควบคุมโดยตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบนี้จะเป็นตัวสถิติ F

2.12 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

ในการตัดสินใจบางกรณีทางวิศวกรรม ข้อมูลที่เก็บเป็นประจำ (Unplanned Data) เช่น ข้อมูลประจำวันหรือข้อมูลประจำสัปดาห์ ฯลฯ อาจให้สารสนเทศไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์และทำการตัดสินใจหรือในบางกรณีที่สิ่งที่คุณตัดสินใจสนใจทำการศึกษานั้นอาจไม่ใช่สภาวะปกติในการทำงาน ซึ่งทำให้การเก็บข้อมูลนั้นไม่สามารถทำได้ขณะทำการปฏิบัติงานปกติ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องการแล้วจึงนำข้อมูลที่ได้เหล่านั้นมาทำการวิเคราะห์ต่อไป แต่ก่อนที่จะทำการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่มีสารสนเทศครบถ้วนนั้น จำเป็นจะต้องมีการวางแผนการทดลองที่ดีเสียก่อนเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นและเข้ามาปะปนในข้อมูลซึ่งอาจจะส่งผลทำให้การวิเคราะห์การทดลองมีความผิดพลาดได้ ดังนั้นก่อนทำการทดลองจึงจำเป็นต้องทำการ

ออกแบบทดลองมีความผิดพลาดได้ ดังนั้นก่อนทำการทดลองจึงจำเป็นต้องทำการออกแบบการทดลองเสียก่อน

ในการออกแบบการทดลองนั้นมีหลักการที่สำคัญอยู่ 3 ประการคือ การซ้ำ (Replication) การสุ่ม (Randomization) และการสกัดกั้น (Blocking) โดยที่การซ้ำนั้นเป็นการทำการทดลองซ้ำในเงื่อนไขการทดลองเดียวกัน เหตุผลที่ต้องทำการทดลองซ้ำเพราะต้องการคุณลักษณะที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกผู้ทดลองจะสามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลองได้โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลองนี้จะถูกนำไปเป็นหน่วยพื้นฐานในการเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการปรับเปลี่ยนสาเหตุปัจจัยที่ทำการศึกษาว่า ค่าความแตกต่างที่ได้มีความแตกต่างเชิงสถิติหรือไม่ และประการที่สองคือ ผู้ทดลองใช้ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง (Sample Mean) ในการประมาณผลกระทบจากปัจจัยที่ทำการศึกษา การซ้ำจะทำให้ผู้ทดลองได้รับความแม่นยำ (Precision) ที่สูงขึ้นในการประมาณผลกระทบจากปัจจัยนั้น สิ่งที่สำคัญในการซ้ำนั้นจะต้องมีความเข้าใจว่าการซ้ำคือการทำการทดลองซ้ำภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกันมิใช่การวัดซ้ำในหนึ่งการทดลอง ซึ่งการทำการทดลองซ้ำนั้นจะสะท้อนแหล่งของความผันแปรระหว่างการทดลอง และความผันแปรในการทดลอง

การสุ่มในการออกแบบการทดลองหมายถึง ในแต่ละเงื่อนไขของการทดลองจะมีโอกาสที่ได้รับเลือกมาทำการทดลองก่อนหรือหลังเท่าเทียมกัน ซึ่งในวิธีการทางสถิติค่าสังเกตที่ได้จะต้องมีความอิสระต่อกันและมีการกระจายอย่างสุ่ม ด้วยคุณสมบัติของการทดลองสุ่มนี้เอง จะสามารถทำการเฉลี่ยออก (Average Out) ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสาเหตุปัจจัยที่นอกเหนือจากปัจจัยที่ทำการศึกษาได้

การสกัดกั้นเป็นวิธีการที่ใช้ช่วยในการออกแบบการทดลองเพื่อให้ผลจากการทดลองที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยวิธีการสกัดกั้นนี้จะเป็วิธีการที่จะช่วยลดหรือกำจัดความผันแปรจากสาเหตุปัจจัยรบกวน (Nuisance Factors) ต่าง ๆ ออกไป

ในการออกแบบการทดลองนั้นสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.12.1 การระบุปัญหา

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ปัญหาคือความเบี่ยงเบนของสมรรถนะที่เกิดขึ้นจากสมรรถนะที่ควรจะเป็น เพราะฉะนั้นในการระบุปัญหาจะต้องมีการกำหนดเป้าหมายในการกระทำต่อปัญหานั้น ๆ ด้วย และการระบุปัญหาจะต้องมีความง่ายและชัดเจนต่อความเข้าใจ ซึ่งจะทำให้มีความง่ายต่อการวิเคราะห์ปัญหา

2.12.2 การเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัย

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ผู้ทดลองต้องทำการตัดสินใจว่าปัจจัยตัวใดที่มีผลกระทบ

ต่อสมรรถนะของกระบวนการหรือระบบ โดยให้ทำการแยกปัจจัยเหล่านั้นออกเป็นปัจจัย ออกแบบที่เป็นไปได้ (Potential Design Factors) และปัจจัยรบกวน (Nuisance Factors) โดยที่ ปัจจัยออกแบบที่เป็นไปได้นั้นสามารถแบ่งออกเป็นปัจจัยที่เลือกมาทำการศึกษาหรือปัจจัย ออกแบบ (Design Factors) ปัจจัยที่ควบคุมให้คงที่ (Head-Constant Factors) และปัจจัยที่ยอมให้ แปรเปลี่ยนได้ (Allow-to-Vary Factors) ซึ่งปัจจัยสุดท้ายนี้จะต้องทำการเกลี่ยออก (Balance Out) โดยหลักของการสุ่มเพื่อให้แน่ใจว่าทุก ๆ เงื่อนไขของการทดลองจะได้รับความผันแปรจากปัจจัยนี้ อย่างทั่วถึงและเท่าเทียมกัน

ปัจจัยรบกวน ปัจจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นปัจจัยรบกวนที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Nuisance Factors) เช่น ลีตของ วัสดุหรือวันที่จะทำการทดลองซึ่งผู้ทดลอง สามารถทำการเลือกได้และปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Nuisance Factors) เช่น ความผันแปรภายในลีตของวัสดุ

ในส่วนของการเลือกระดับของปัจจัย (Level of Factors) ในการทดลองนั้นก่อนที่ผู้ ทดลองจะทำการเลือกว่าจะทำการทดลองที่ระดับใด ผู้ทำการทดลองจะต้องมีความรู้ใน กระบวนการนั้นเสียก่อนหรือทำการปรึกษากับผู้มีประสบการณ์ ผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการเพื่อให้ ได้มาซึ่งข้อมูลก่อนที่จะทำการตัดสินใจเลือกระดับของปัจจัยในการทดลอง

2.12.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง

ในการเลือกตัวแปรตอบสนองนั้น ตัวแปรที่ผู้ทดลองทำการเลือกมาจะต้องเป็น ตัวแปรที่ให้สารสนเทศที่มีประโยชน์ (Useful Information) เกี่ยวกับกระบวนการที่ทำการศึกษา ซึ่งในขั้นตอนนี้สิ่งที่มีความสำคัญและไม่สามารถละเลยได้คือ การประเมินและวิเคราะห์ระบบการ วัด (Measurement System Analysis: MSA) ที่ใช้ในการวัดตัวแปรตอบสนอง ซึ่งถ้าระบบการวัดที่ ใช้วัดตัวแปรตอบสนองมี ความสามารถไม่เพียงพอกับความผันแปรเนื่องจากการวัดอาจเป็นปัจจัย หลักที่เข้าไปรบกวนผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอาจทำให้การวิเคราะห์ผลการทดลองมีความ ถูกต้องน้อยลง

จากขั้นตอนทั้ง 3 ที่ได้กล่าวมานั้น เป็นขั้นตอนของการวางแผนก่อนการทดลอง (Pre- Experimental Planning) ซึ่งถ้าสามารถระบุสิ่งต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องและครบถ้วนแล้ว ในขั้นตอน ของการออกแบบการทดลองก็จะมีคามง่าย ซึ่งในขั้นตอนของการออกแบบการทดลองนั้นผู้ ทดลองจำเป็นจะต้องทำการเลือกรูปแบบการทดลองโดยนำสาระที่ได้จากขั้นตอนทั้ง 3 ขั้นตอน แรกมาทำการพิจารณาและเลือกรูปแบบการทดลอง (การสุ่ม) รวมไปถึงการกำหนดว่าจะใช้การ สกัดกันในการทดลองหรือไม่ด้วย

2.13 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis)

ระบบการวัดนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการประกันคุณภาพ เพราะการประกันคุณภาพเป็นการป้องกันปัญหาต่าง ๆ ด้านคุณภาพ โดยผ่านการเตือนล่วงหน้า ซึ่งการเตือนล่วงหน้านี้ได้จากการนำผลการผลิตในอดีตไปคาดการณ์ผลที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคตแต่การคาดการณ์นี้จะนำไปอย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อผลจากการผลิตอยู่ในสถานะเสถียรภาพ ซึ่งได้มาจากการควบคุมกระบวนการอย่างต่อเนื่อง

การวัดถือเป็นกระบวนการกระบวนการหนึ่ง ค่าจากการวัดจะมีความผันแปรจากสาเหตุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของระบบการวัดเสมอ ถ้าความผันแปรของระบบการวัดอยู่ภายใต้ความผันแปรจากธรรมชาติ ความผันแปรจะเสถียรตลอดเวลาและสามารถทำนายได้ แต่ถ้ากระบวนการวัดอยู่ภายใต้แหล่งความผันแปรที่ผิดพลาด ความผันแปรจะไม่เสถียรภาพและไม่สามารถทำนายได้ เพราะฉะนั้นระบบการวัดจึงมีความสำคัญมากต่อการประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เราจึงมีความจำเป็นต้องทำการประเมินความสามารถของระบบการวัดเสียก่อน ก่อนที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปทำการคาดการณ์ผลที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพ

เนื่องจากข้อมูลในทางวิศวกรรมนั้นสามารถจำแนกออกได้เป็นสองประเภทคือ ข้อมูลที่มีลักษณะเป็นช่วง (Discrete Data) และข้อมูลที่มีลักษณะแบบต่อเนื่อง (Continuous Data) ทำให้ในการวิเคราะห์ระบบการวัดนั้นจำเป็นต้องทำการแยกวิเคราะห์เป็น 2 วิธีคือ วิธีการประเมินความสามารถของระบบการวัดเมื่อข้อมูลที่ได้มาจากการวัดหรือข้อมูลจากคุณลักษณะเชิงผันแปร (Variable Characteristic) และวิธีการประเมินความสามารถของระบบการวัดเมื่อข้อมูลที่ได้มาจากการนับหรือข้อมูลจากคุณลักษณะเชิงคุณภาพ (Attribute Characteristic)

2.13.1 การประเมินความสามารถของระบบการวัดเมื่อข้อมูลที่ได้มาจากการวัด ซึ่งการประเมินความสามารถของระบบการวัดแบบนี้จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกคือการประเมินความสามารถของระบบการวัดด้านความถูกต้อง (Accuracy) ซึ่งการวิเคราะห์นี้จะมุ่งพิจารณาคุณสมบัติด้านไบอัส (Bias) ของระบบการวัด การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเสถียรภาพ (Stability) ของระบบการวัด และการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงเส้นตรง (Linearity) ของระบบการวัด และในส่วนที่สอง คือการวิเคราะห์ความแม่นยำ (Precision) ของระบบการวัด ซึ่งการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะมุ่งพิจารณาในคุณสมบัติ 2 ประการคือ ความสามารถในการวัดซ้ำภายในเงื่อนไขเดียวกันหรือรีพีทาทะบิลิตี้ (Repeatability) ซึ่งถือว่าเป็นความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random Error) ของระบบการวัดและความสามารถในการวัดซ้ำต่างเงื่อนไขหรือรีโพรดิวซิบิลิตี้ (Reproducibility) ซึ่งถือเป็นความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (System Error) ของระบบการวัด

2.13.2 การประเมินความสามารถของระบบการวัดเมื่อข้อมูลที่ได้มาจากการนับ ใน การศึกษาความสามารถของระบบการวัดนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ การประเมินผลใน ระยะสั้น (Short Method) และการประเมินผลในระยะยาว (Long Method) โดยแนวความคิดของ วิธีการประเมินผลในระยะสั้นจะอาศัยการจำแนกชั้นสิ่งตัวอย่างที่มีลักษณะทั้งดี ไม่ดี และก้ำกึ่ง (Marginal) ในจำนวนที่เหมาะสมแล้วให้พนักงานที่สุ่มมาหรือกำหนดไว้ล่วงหน้าทำการ ตรวจสอบเพื่อจำแนกผลการตรวจสอบเป็นผ่านและไม่ผ่าน แล้วทำการพิจารณาผลการตรวจสอบ ใน 2 ประเด็นคือ ด้านความถูกต้องซึ่งแบ่งเป็น ความลำเอียงของลูกค้า (Consumer's Bias) และ ความลำเอียงของผู้ผลิต (Producer's Bias) และประเด็นที่สองคือ ความมีประสิทธิภาพของการ ตรวจสอบ (Screen Effectiveness) ซึ่งการประเมินผลในทั้งสองประเด็นนี้จะทำการประเมินผล ผ่านเปอร์เซ็นต์ความไม่ไว้อิสของพนักงานตรวจสอบ

2.14 การวิเคราะห์ข้อมูล

เป็นการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองมีความเหมาะสมเพียงใดนั้น คือในการทดลอง จะเกิดความผิดพลาดทุกครั้ง การทดลองที่ดีคือ ต้องมีความผิดพลาด (e_{ij}) น้อยที่สุด วิธีการ ทดสอบว่าการทดลองมีความเหมาะสมคือการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) การตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (Error) ที่เป็นไปตามหลัก $e_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ซึ่งทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้หรือไม่

2.14.1 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล (Experimental Performing)

2.14.1.1 การตรวจสอบว่ามีการกระจายแบบปกติหรือไม่โดยใช้ NOPP (Normal Probability Paper) ทดสอบโดยดูความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือและค่าความถี่สะสมว่าเป็นแบบ เส้นตรงหรือไม่ ถ้าเป็นแบบเส้นตรง แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

2.14.1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภาพการ กระจายทดสอบโดยดูความสัมพันธ์ของค่าเศษเหลือ และค่าลำดับการสุ่มว่าสามารถคาดการณ์ได้ หรือไม่ ถ้าทุกจุดของข้อมูลไม่สามารถคาดการณ์ได้ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

2.14.1.3 การตรวจสอบความสม่ำเสมอของการแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภาพการกระจาย ทดสอบโดยดูความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ treatment และเศษเหลือ ว่ากราฟมีความสูงสม่ำเสมอหรือไม่ ถ้ากราฟของแต่ละ Treatment มีความสูงไม่แตกต่างกัน แสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวน

2.14.2 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

เป็นการวิเคราะห์ความถูกต้องของตัวแบบ และแสดงผลว่าข้อมูลได้รับการเก็บรวบรวมภายใต้สภาวะควบคุมตามแผนการทดลองแล้ว จะทำการวิเคราะห์ค่า R^2 ซึ่งเกิดจากความผันแปรทั้งหมดของข้อมูล (ในรูป SS_T) ว่าเกิดจากความผันแปรจากทรีตเมนต์เท่าใด (SS_C) หาได้จากสมการที่ 2.1

$$R^2 = \frac{\text{ความผันแปรที่สามารถอธิบายได้}}{\text{ความผันแปรทั้งหมดของข้อมูล}} \quad (2.5)$$

ซึ่งถ้าค่า R^2 ออกมาต่ำสามารถแก้ไขได้โดย

- 1) เพิ่มจำนวนการทำซ้ำโดยเพิ่มขึ้นงานในการทดสอบให้มากขึ้น
- 2) ตรวจสอบว่ามีปัจจัยอื่นเกี่ยวข้องหรือไม่ ถ้ามีการออกแบบการทดลองใหม่
- 3) ถ้าเพิ่มจำนวนทำซ้ำแล้ว ค่า R^2 ยังคงที่อยู่ ควรจะทำการบล็อกเพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

2.14.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

หลักการทำ ANOVA เป็นการใช้ความแปรปรวนมาวิเคราะห์ซึ่ง R.A.Fisher ได้ทำการวิเคราะห์ที่ความแตกต่าง โดยวัดความแตกต่างรวมออกมาในรูปของค่าความแปรปรวนแล้วแตกออกมาเป็นความแตกต่างย่อยนั้นมาเปรียบเทียบ ถ้าความแตกต่างใดมีค่ามาก แสดงว่าปัจจัยตัวนั้นมีผล ข้อดีของการใช้ ANOVA เป็นการแก้ปัญหาการเกิดการเฟ้อของ α

2.14.4 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

ในการตัดสินใจปัญหาทางวิศวกรรมนั้นมักต้องทำการตัดสินใจภายใต้ตัวแปรจำนวนอย่างน้อยสองตัวหรือมากกว่าที่มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งมีความจำเป็นต้องทำการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ เพื่อการตัดสินใจที่ดี ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรจำนวนสองตัวนี้จะดำเนินการได้ง่ายที่สุดด้วย การวิเคราะห์ในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่เรียกว่า “แผนภาพการกระจาย” และดำเนินการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการทดสอบโดยอาศัยเครื่องหมายซึ่งในการวิเคราะห์ดังกล่าวอยู่ภายใต้ข้อสมมุติว่า ตัวแปรทั้งสองที่ทำการศึกษานั้นเป็นตัวแปรทางคณิตศาสตร์ คือมิได้มีค่าผันแปร แต่สำหรับในกรณีการวิเคราะห์ที่กำหนดข้อสมมุติให้ตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถควบคุมได้และตัวแปรตามเป็นตัวแปรสุ่มแล้ว จะเรียกเทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าว “การวิเคราะห์การถดถอย” โดยการวิเคราะห์การถดถอยหมายถึง กลวิธีทางสถิติหนึ่งที่ใช้ในการวินิจฉัยและสร้างตัวแบบสำหรับความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ให้ความสนใจ ตัวแบบทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์การ

ถดถอยนี้จะได้มาจากการกำหนดตัวแปรอิสระจำนวน k ตัว ซึ่งต้องเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ ในโครงการนี้คืออุณหภูมิและเวลาในการอบคั้นตัว โดยเรียกตัวแปรนี้ว่าตัวแปรถดถอย (Regressor) หรือตัวนำ (Carrier) หรือตัวทำนาย (Predictor) และเมื่อทำการกำหนดค่าของตัวแปรถดถอยค่าหนึ่ง ๆ แล้วทำการศึกษาถึงค่าของตัวแปรตามที่มีลักษณะเป็นตัวแปรสุ่ม และเรียกตัวแปรประเภทนี้ว่าตัวแปรตอบสนอง (Response Variable)

จากข้อสมมุติที่กำหนดให้ X เป็นตัวแปรทางคณิตศาสตร์ และ Y เป็นตัวแปรสุ่ม ซึ่งมีความหมายว่า ที่แต่ละค่าควบคุมของ $X = x_1$ จะทำให้ได้ค่า Y มีหลายค่าเนื่องจากสาเหตุด้าน รัฟฟิทธิปะบิลิตี (Repeatability) จึงมีความจำเป็นต้องเฉลี่ยออกเป็น $E(Y/x_1)$ เพื่อให้ได้ค่าที่คาดหมายหรือค่าที่แสดงถึงผลจากสาเหตุที่ควบคุมได้ของ Y

ดังนั้น อาจแสดงองค์ประกอบของสารสนเทศในข้อมูลแต่ละตัวว่า

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon \quad (2.6)$$

โดยที่ β_0 เป็นค่าชดเชย (Compensation Value) ของ y เมื่อ $x = \beta_1 x_1$ คือค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของ x_1 และ y_1 และ ε หมายถึง ผลจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ใน y เมื่อ $x = x_1$ ที่มีความเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ และทำการ “เฉลี่ยออก” สาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้แบบรัฟฟิทธิปะบิลิตีใน y ของสมการ (2.8) แล้วจะได้ผลว่า

$$E(Y/x) = E(\beta_0 + \beta_1 x_1) + E(\varepsilon) \quad (2.7)$$

$$E(Y/x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 \quad (2.8)$$

โดยจะเรียกสมการที่ (2.8) นี้ว่า “สมการถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย” กล่าวคือ β_0 เป็นระยะตัวแกน Y (Y-Intercept) สำหรับเป็นค่าชดเชยของ $E(Y/x)$ และ β_1 คือค่าความชันของเส้นถดถอยที่แสดงถึงความเปลี่ยนแปลงของ $E(Y)$ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่า x ไป 1 หน่วย