เอกสารปฏิบัติการประกอบรายวิชา
02206381 ปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ I

กรรมวิธีทางความร้อน
(Heat Treatment of Steel)

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รายวิชา 02206381 ปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ I

ปฏิบัติการทดลองที่ 1-3 **กรรมวิธีทางความร้อน**

(Heat Treatment of Steel)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงกรรมวิธีการอบอ่อน
2. เพื่อศึกษาถึงกรรมวิธีการชุบแข็ง (Hardening) ในน้ำ และในน้ำมัน
3. เพื่อศึกษาวิธีการทดสอบความสามารถในการชุบแข็งของโลหะ โดยวิธี Jominy End-Quench Hardenability
4. เพื่อศึกษาเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ Jominy End-Quench Hardenability Test
5. เพื่อศึกษาความสามารถในการชุบแข็งได้ของเหล็กเพลาดำ และเหล็กเพลาขาว
6. เพื่อสามารถบอกได้ว่า ความสามรถในการชุบแข็ง ขึ้นอยู่กับอะไรบ้าง

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.1 การอบอ่อน (Annealing)

การอบอ่อน หมายถึง การอบเพื่อให้เหล็กอ่อนลง (Softening) หรือเพื่อทำให้เหล็กเหนียวขึ้น (Toughening) การอบอ่อนมีวัตถุประสงค์ คือ การอบเพื่อให้คืนตัว เนื่องจากเหล็กที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) หรือการหล่อมา มักจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น และไม่สม่ำเสมอ ทำให้การกลึงหรือไสได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำลายความแข็งของเหล็ก เพื่อกลึงไสได้สะดวก มีสอง 2 วิธี คือ

1.1.1 กรรมวิธีการทำ Full Annealing (การอบอ่อนอย่างสมบูรณ์)

นำเหล็ก Hypo-eutectoid เผาให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น Ac3 ประมาณ 30- 50 $^{\circ}$C เหล็ก Hyper-eutectoid เผาให้มีอุณหภูมิเหนือเส้น Ac1 ประมาณ 30-50 $^{\circ}$C (ไม่เลย Acm) แช่เหล็กทิ้งไว้ในเตาให้ไม่เกิน 2 ชั่วโมง ถ้าเป็นเตาไฟฟ้า ก็เพียงแต่ถอดปลั๊กแล้วปล่อยให้เย็นในเตาที่ปิดฝาสนิท เมื่อเหล็กถูกปล่อยให้เย็นช้าๆ การเปลี่ยนโครงสร้างภายใน จะกลับสู่สภาพใกล้เคียงสมดุลย์ของโครงสร้างที่เป็นอยู่เดิม เช่น มาร์เทนไซต์หรือเบนไนท์ จะกลับมาเป็นเฟอร์ไรท์ และซีเมนไทต์ ทำให้ความแข็งลดลง กลายเป็นเหล็กอ่อนนิ่ม

1.1.2 กรรมวิธีการทำ Incomplete Annealing หรือ Process Annealing (การอบอ่อนไม่สมบูรณ์) โดยแบ่งการเผาให้ความร้อนออกเป็น

1) Stress-relief Anneals เพื่อการขจัดความเค้นตกค้าง (Stress-relief) ในชิ้นงาน ซึ่งจะเผาเหล็กให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าเส้น Ac1 เล็กน้อย แช่เหล็กทิ้งไว้ในเตาไว้นานพอสมควรเพื่อให้เหล็กร้อนทั่วถึงกัน จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ วิธีนี้ความแข็งของเหล็กจะลดลงเล็กน้อย เพราะโครงสร้างของเหล็กแต่เดิม ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ความเครียดที่มีอยู่จะถูกทำลายหมดไป มีความมุ่งหมาย เพื่อทำลายความเครียดภายในให้หมดไป เช่น เหล็กที่ถูกรีดหรือตีขึ้นรูปมา ต้องผ่านการ Annealing เพื่อให้ความต้านทานแรงกระทำน้อยลง
2) Spheroidising Anneals_เพื่อต้องการเปลี่ยนให้โครงสร้างของ Cementite เปลี่ยนจากเป็นแผ่น (lamella) ให้กลายเป็นลักษณะเม็ดกลมๆ (Spheroid) เพื่อเพิ่มความเหนียวและลดความเปราะของชิ้นงาน เนื่องจากเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนสูงจะมีปัญหาเรื่องความเปราะที่เกิดจากโครงสร้าง Pro-eutectoid cementite ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงตาข่ายอยู่ตามขอบเกรน ส่งผลให้ชิ้นเหล็กมีความเปราะสูง โดยจะทำการเผาเหล็ก 0.7-.08%C เผาให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า Ac1 และเผาสลับกับสูงกว่า Ac1 เพื่อให้อ่อนตัวสูง และสำหรับเหล็กที่มีคาร์บอนมากกว่า 0.8% จะเผาให้มีอุณหภูมิสูงกว่าเส้น Ac1 เล็กน้อย เพื่อให้อ่อนตัวสูง จากนั้นแช่เหล็กทิ้งไว้ในเตาประมาณ 10-15 ชั่วโมง เพื่อให้ cementite ปรับตัวเป็นโครงสร้างแบบเม็ดกลม แล้วถึงปล่อยให้เย็นในอากาศ

1.2 การชุบแข็ง (Hardening)

การชุบแข็ง หมายถึง การชุบเพื่อให้เหล็กมีความแข็งขึ้น โดยความแข็งของเหล็กที่ผ่านการชุบ ขึ้นอยู่กับสองสิ่ง คือ ปริมาณ Carbon ในเหล็ก กล่าวคือ ถ้ามีมาก โอกาสที่จะเปลี่ยนเป็น มาร์เทนไซต์ก็ยิ่งง่าย และทำให้เกิดปริมาณของ มาร์เทนไซต์ง่าย และอัตราความเร็วในการชุบ กล่าวคือ ยิ่งเย็นเร็วๆ โอกาสที่ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์หรือ เบนไนท์ก็มีมาก ในทางตรงข้ามถ้าเย็นช้าๆ ออสเทนไนท์จะเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรท์ กับซีเมนไตต์หมด

กรรมวิธีการทำ Hardening เผาเหล็กให้ร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ 800-900 $^{\circ}$C (ขึ้นกับชนิดของเหล็ก) ถ้า C< 0.8%ให้ใช้อุณหภูมิเลยเส้น A3 ประมาณ 50-75 $^{\circ}$ C และถ้า C>0.8% ให้ใช้อุณหภูมิเลยเส้น A1 ประมาณ 50-75 $^{\circ}$ C เท่านั้น แช่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมินั้นจนเหล็กมีความร้อนเท่ากันทุกจุด (ประมาณ 1 ชม./ความหนา 1") เอาออกจากเตาทำให้เย็นโดยเร็ว ด้วยการจุ่มในน้ำ (Water Quench) หรือในน้ำมัน (Oil Quench) ออสเทนไนท์เปลี่ยนกลับเป็นเฟอร์ไรท์และเพิรไลท์ไม่ทัน แต่ให้โครงสร้างที่มีความแข็งสูง เรียก Martensite หรือ Bainite

ของเหลวสำหรับการชุบแข็งต้องมีคุณสมบัติ

1) ต้องมีอัตราการเย็นตัวที่สูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤติ
2) มีอัตราการเย็นตัวที่ช้าลงในช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงจาก Austenite ไปเป็น Martensite (ประมาณ 200-400 $^{\circ}$C) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเครียดภายในจนเกิดการบิดงอ หรือแตกร้าวเสียหายได้
3) ของเหลวสำหรับการชุบแข็งที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ น้ำ, น้ำเกลือ, น้ำด่าง, เกลือละลาย และอากาศ
4) การถ่ายเทความร้อนที่ของเหลวกลายเป็นไอเมื่อสัมผัสแท่งเหล็กร้อน แบ่งเป็น 3 ลักษณะ

   <u>ขั้นแรก</u> ของเหลวที่สัมผัสกับแท่งเหล็กร้อนจะกลายเป็นไอหุ้มแท่งเหล็กไว้ในลักษณะฟิล์มบางๆ การถ่ายเทความร้อนช่วงนี้จะช้า แต่จะเป็นอยู่ในระยะสั้นๆ

   <u>ขั้นที่สอง</u> ฟิล์มบางๆ ที่หุ้มอยู่แตกออก ของเหลวสัมผัสกับแท่งเหล็ก จะเดือดและกลายเป็นไอ มีลักษณะเหมือนการกวน ขั้นนี้อัตราการเย็นจะสูงมาก

   <u>ขั้นที่สาม</u> อัตราการเย็นตัวช้าลง เพราะแท่งเหล็กเย็นน้อยลง ของเหลวมีอุณภูมิลดลงต่ำกว่าจุดเดือด ความร้อนจึงถ่ายเทออกไปโดยการพาด้วยของเพียงอย่างเดียว อัตราการเย็นตัวจะลดลงจนถึงจุดที่ของเหลวกับแท่งเหล็กมีอุณหภูมิเท่ากัน

1.3 การทดสอบความสามารถในการชุบแข็งได้ลึก (The Jominy End-Quench Hardenability Test)

ปัจจัยที่มีผลต่อความสารถในการชุบแข็งได้

1.3.1 อัตราการเย็นตัว

เนื่องจากโครงสร้างที่ได้จะแปรผันไปตามอัตราการเย็นตัว กล่าวคือ หากอัตราการเย็นตัวเร็ว โครงสร้างก็จะเปลี่ยนจาก Austenite ไปเป็น Martensite ได้ทันที โดยไม่ต้องเปลี่ยนเป็น Ferrite หรือ Bennite และหากอัตราการเย็นตัวช้า โครงสร้างก็จะไม่เป็น Martensite ทั้งหมด แต่จะมี Ferrite หรือ Bennite ผสมอยู่ ซึ่งทำให้การอุบชุบแข็งไม่ได้โครงสร้าง Martensite 100% (ซึ่งโครงสร้าง Martensite เป็นโครงสร้างที่มีความแข็งสูงที่สุดของโครงสร้างเหล็กคาร์บอน)

1.3.2 ระยะพักตัวของ Austenite (γ)

ความสามารถในการชุบแข็งได้ จะแปรผันไปตามระยะพักตัวของ Austenite (γ) กล่าวคือ ถ้าหากระยะพักตัวของ Austenite (γ) น้อย ความสารถในการชุบแข็งได้ก็ย่อมน้อยด้วย เพราะโครงสร้างก็จะสามารถเปลี่ยนจาก γ เป็นโครงสร้างสมบูรณ์ได้ทัน แต่ ถ้าหากระยะพักตัวของ γ มาก ความสารถในการชุบแข็งได้ก็มากด้วย เพราะโครงสร้างก็จะไม่สามารถเปลี่ยนจาก γ เป็นโครงสร้างสมบูรณ์ได้ทัน ซึ่งจะกลายเป็น Martensite แทน ดังนั้นหากระยะพักตัวของ γ สูง ความสามารถในการชุบแข็งได้ก็จะสูงด้วย เพราะยิ่งมากก็จะเกิด Martensite ได้มากขึ้นด้วย

1.3.3 เปอร์เซ็นต์ Carbon ที่มีอยู่ในเนื้อเหล็ก

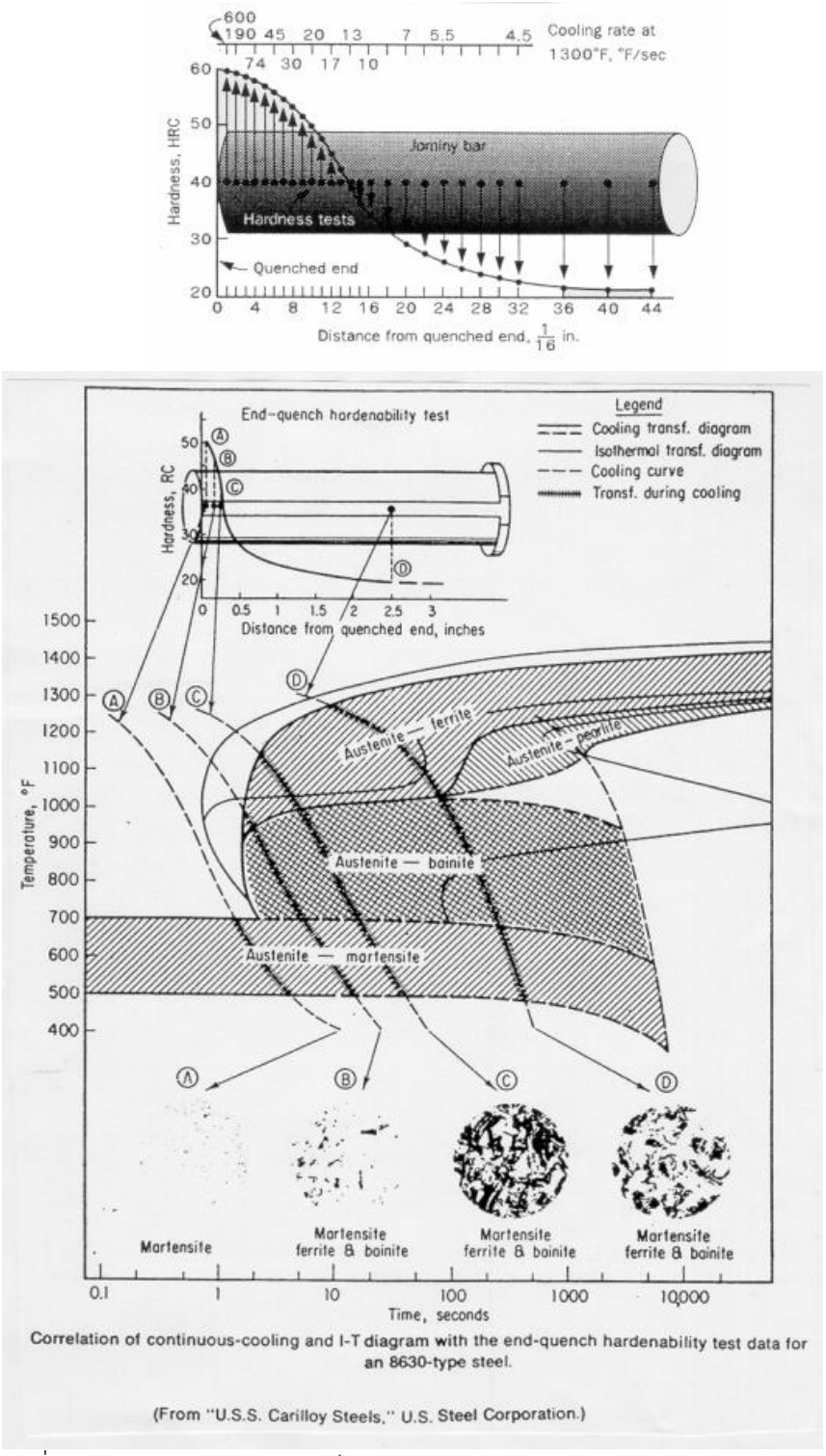
1) เมื่อ C<0.8% ความสารถในการชุบแข็งได้ลึก จะแปรผันตรงกับ % Carbon ที่มีอยู่ในเนื้อเหล็ก กล่าวคือ เมื่อเหล็กที่มี %C สูงแต่ไม่เกิน 0.8% ความสารถในการชุบแข็งได้เพิ่มขึ้น
2) เมื่อ C = 0.8% ความสารถในการชุบแข็งได้ลึกจะมีค่าสูงสุด
3) เมื่อ C>0.8% ความสารถในการชุบแข็งได้ลึก จะแปรผกผันกับ % Carbon ที่มีอยู่ในเนื้อเหล็ก กล่าวคือ เมื่อเหล็กที่มี %C สูงเกิน 0.8% ความสารถในการชุบแข็งได้ต่ำลง เนื่องจากภายในเนื้อเหล็กมี Carbon จำนวนมากอยู่แล้วการแทรกของ Carbon (หรือการฟอร์มตัว) เพื่อให้เกิดโครงสร้าง Martensite เป็นไปได้ยากกว่าเหล็กที่มี %C น้อยกว่า ซึ่งจะมีช่องว่างอยู่มากกว่าที่ Carbon จะสามารถแทรกตัว (หรือการฟอร์มตัว) เพื่อให้เกิดโครงสร้าง Martensite ได้ดีและง่ายขึ้น

2.1ส่วนผสมของธาตุอื่นๆ

ส่วนผสมของธาตุอื่นๆ ที่ปนอยู่ในเนื้อเหล็ก จะมีผลทำให้โครงสร้างเหล็กไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแน่นอนว่าโครงสร้างแบบนี้จะเกิดช่องว่างมากกว่าที่มีส่วนผสมน้อยกว่าหรือไม่มีเลย ซึ่งเป็นเหตุผลการเกิดโครงสร้าง Martensite แบบเดียวกับข้างต้น คือ มี ช่องว่างมาก Carbon ก็จะสามารถแทรกตัว (หรือการฟอร์มตัว) เพื่อให้เกิดโครงสร้าง Martensite ได้ดีและง่ายขึ้น

2.2 สารตัวกลาง

เนื่องจากสารตัวกลางจะเป็นตัวถ่ายเทความร้อนออกจากเนื้อวัสดุ หากสามารถถ่ายเทความร้อนได้เร็วเท่าใด ความสารถในการชุบแข็งได้ ก็จะสูงมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งจะสัมพันธ์กับอัตราการเย็นตัวดังข้อข้างต้น



<u>รูปที่ 1</u> แผนภูมิแสดงค่าความแข็งจากการทดสอบ Jominy กับ TTT diagram

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ขั้นตอนการทดลองการอบอ่อน

2.1.1 นำชิ้นงานเหล็กเพลาขาว หรือเหล็กเพลาดำ ไปขัดเตรียมผิวให้ปราศจากรอยขีดข่วน และปรับให้ชิ้นงานได้ระนาบ เพื่อเตรียมสำหรับอบ และวัดความแข็งต่อไป โดยขัดที่กระดาษทรายเบอร์ 120, 240, 400, 600, 800 และ 1000 ตามลำดับ

2.1.2 นำชิ้นงานที่ 2 เข้าเตาอบ ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 950 $^{\circ}$C จากนั้นแช่ไว้จนชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากันทั้งชิ้นงาน (1 ชั่วโมง/ความหนา 1 นิ้ว)

2.1.3 ปิดเตา และทิ้งชิ้นงานให้เย็นในเตา

2.1.4 นำชิ้นงานที่เย็นแล้วไปขัดผิวที่อาจมีรอยไหม้ หรือมีสนิมออก โดยขัดที่กระดาษทรายเบอร์ 1000

2.1.5 จากนั้น นำชิ้นงานที่เตรียมผิวแล้วไปวัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell Hardness Testing: Scale C (หัวเพชร) บันทึกค่าที่ได้ในใบบันทึกผลการทดลอง

2.1.6 นำค่าที่ได้ไป Plot กราฟความแข็งเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบ

2.1.7 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลองที่ได้ ทำรายงานส่ง

2.2 ขั้นตอนการทดลองการชุบแข็ง

2.3.1. นำชิ้นงานเหล็กเพลาขาว หรือเหล็กเพลาดำ ไปขัดเตรียมผิวให้ปราศจากรอยขีดข่วน และปรับให้ชิ้นงานได้ระนาบ เพื่อเตรียมสำหรับอบ และวัดความแข็งต่อไป โดยขัดที่กระดาษทรายเบอร์ 120, 240, 400, 600, 800 และ 1000 ตามลำดับ

2.3.2. นำชิ้นงานเข้าเตาอบ ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 950 $^{\circ}$C จากนั้นแช่ไว้จนชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากันทั้งชิ้นงาน (1 ชั่วโมง/ความหนา 1 นิ้ว)

2.3.3. นำชิ้นงานออกจากเตา ชิ้นงานที่ 3 ทิ้งลงถังน้ำ และชิ้นงานที่ 4 ทิ้งลงในถังน้ำมัน ทันที

2.3.4. นำชิ้นงานที่เย็นแล้วไปขัดผิวที่อาจมีรอยไหม้ หรือมีสนิมออก โดยขัดที่กระดาษทรายเบอร์ 1000

2.3.5. จากนั้น นำชิ้นงานที่เตรียมผิวแล้วไปวัดความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ Rockwell Hardness Testing: Scale C (หัวเพชร) บันทึกค่าที่ได้ในใบบันทึกผลการทดลอง

2.3.6. นำค่าที่ได้ไป Plot กราฟความแข็งเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบ

2.3.7. วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลองที่ได้ ทำรายงานส่ง

2.3 ขั้นตอนการทดลองการทดสอบความสามารถในการชุบแข็งได้

2.3.1. วัดขนาดของชิ้นงานจริง บันทึกค่าที่ได้ลงไปในใบบันทึกผล

2.3.2. นำชิ้นงานเข้าเตาอบ อบที่อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้โครงสร้าง เป็นออสเทนไนท์ และแช่ไว้ที่อุณหภูมิดังกล่าวประมาณ 20-30 นาที เป็นอย่างน้อย

2.3.3. เตรียมชุดทดสอบให้พร้อม ซักซ้อมวิธีการให้แม่นยำ

2.3.4. เปิดเตารีบนำชิ้นงานมาวางบนเครื่อง ดังรูปที่ 3 โดยเร็วที่สุด

2.3.5. เปิดน้ำให้พุ่งกระทบที่ปลายล่างดังรูปที่ 3 นานประมาณ 10 นาที ยกออกจากชุดทดสอบ

2.3.6. นำชิ้นงานไปเจียรไนผิวตลอดชิ้นงาน ลึกประมาณ 0.4-0.5 มม.

2.3.7. นำชิ้นงานไปวัดความแข็งแบบ Rockwell Scale C (Diamond) ที่ผิวตลอดความยาว โดยทำการวัดความแข็งทุกๆ ช่วง 1/16 นิ้ว โดยเริ่มจากปลายที่โดนน้ำ (จุดที่กดเรียงกันดังภาพที่ 2) จากนั้นบันทึกค่าลงในตารางบันทึกผล

2.3.8. นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความแข็งที่ได้ กับระยะวัดจากปลายชิ้นงานที่โดนน้ำขึ้นไป

2.3.9. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3. ใบบันทึกผลการทดลอง

การอบอ่อน (Annealing) และการชุบแข็ง (Hardening)

3.1 ขนาดชิ้นงานจริงที่ได้รับ

	ชิ้นงานที่ 1 ชิ้นงานปกติ	ชิ้นงานที่ 2 ชิ้นงานอบอ่อน	ชิ้นงานที่ 3 ชิ้นงานชุบแข็งในน้ำมัน	ชิ้นงานที่ 4 ชิ้นงานชุบแข็งในน้ำ
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (mm.)				
ความสูงของชิ้นงาน (mm.)				

3.2 ตารางความแข็งจากการวัดด้วย Rockwell Hardness Testing: Scale C

ชื่อชิ้นงานที่ได้รับ ❑ เหล็กเพลาขาว ❑ เหล็กเพลาดำ

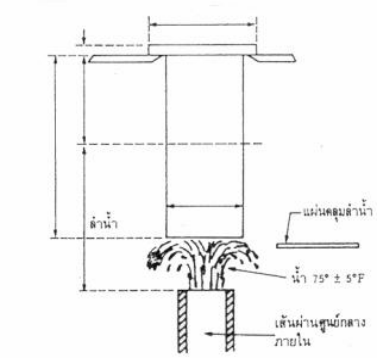
ครั้งที่	**ค่าความแข็ง HRC**			
	ชิ้นงานที่ 1 ชิ้นงานปกติ	**ชิ้นงานที่ 2 ชิ้นงานอบอ่อน**	**ชิ้นงานที่ 3 ชิ้นงานชุบแข็งในน้ำมัน**	**ชิ้นงานที่ 4 ชิ้นงานชุบแข็งในน้ำ**
1				
2				
3				
4				
5				
6				
เฉลี่ย				

4. ใบบันทึกผลการทดลอง

The Jominy End-Quench Hardenability Test

4.1 ชื่อชิ้นงานที่ได้รับ.....

4.2 ขนาดชิ้นงานจริงที่ได้รับ, ขนาดท่อฉีด และระยะทางขณะน้ำฉีดใส่ชิ้นงาน



4.3 ตารางความแข็งจากการวัดด้วย Rockwell Hardness Testing: Scale C

ระยะทางวัดจากปลายที่ฉีดน้ำ (นิ้ว)	ค่าความแข็ง HRC		ระยะทางวัดจากปลายที่ฉีดน้ำ (นิ้ว)	ค่าความแข็ง HRC	
	ชิ้นงานเหล็กเพลาขาว	ชิ้นงานเหล็กเพลาดำ		ชิ้นงานเหล็กเพลาขาว	ชิ้นงานเหล็กเพลาดำ
1/16			1+1/8		
2/16			1+2/8		
3/16			1+3/8		
4/16			1+4/8		
5/16			1+5/8		
6/16			1+6/8		
7/16			1+7/8		
8/16			2”		
9/16			2+1/8		
10/16			2+2/8		
11/16			2+3/8		
12/16			2+4/8		
13/16			2+5/8		
14/16			2+6/8		
15/16			2+7/8		
1”			3”		

4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งที่ได้กับระยะวัดจากปลายชิ้นงานที่โดนน้ำ ของชิ้นงานเหล็กเพลาขาวและเหล็กเพลาดำ

เอกสารอ้างอิง :

กิตติมา ศิลปษา**. เอกสารประกอบปฏิบัติการกรรมวิธีทางความร้อนของเหล็กกล้า**. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

วรพจน์ ศิริลักษณ์. **เอกสารประกอบการสอนวิชาการทดสอบวัสดุ.** สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่เชียงราย