

การศึกษาพฤติกรรมการหดตัวระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อ
ด้วยวิธีวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

**STUDY OF SOLIDIFICATION SHRINKAGE BEHAVIOR
IN CAST IRONS BY LINEAR DISPLACEMENT METHOD**

Lertrit Chuencharoen



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2016

การศึกษาพฤติกรรมการหดตัวระหว่างการแข่งขันตัวของเหล็กหล่อด้วย
วิธีวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.ฐาปนีย์ พังกรวิชัย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.รัตน บิริสุทติกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.สารัมภ์ บุญมี)

กรรมการ

(อ. ดร.ปัญญา บัวสมบูร)

กรรมการ

(อ. ดร.ภูษิต มิตรสมหวัง)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เลิศฤทธิ์ ชื่นเจริญ : การศึกษาพฤติกรรมการหดตัวระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อ
ด้วยวิธีการวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น (STUDY OF SOLIDIFICATION SHRINKAGE
BEHAVIOR IN CAST IRONS BY LINEAR DISPLACEMENT METHOD)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตน บริสุทธิกุล, 86 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการหดตัวและขยายตัวระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวนอน และเหล็กหล่อเหนียว เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์นี้จึงได้ประดิษฐ์อุปกรณ์พิเศษโดยอาศัยวิธีการวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น ซึ่งประกอบด้วยแบบหล่อทรายทรงกลมที่ผลิตด้วยกรรมวิธีแอดดิทีฟ ห่อหุ้มด้วยเปลือกเหล็กกล้า ซึ่งมีเทอร์โมคัปเปิลและอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น ทำให้สามารถวัดอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ได้ในเวลาเดียวกัน จากนั้นจึงผลิตเหล็กหล่อประเภทต่าง ๆ ที่มีคาร์บอนผสม 3.7, 4.0, 4.3 และ 4.6 จากการทดลองพบว่าพฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภทไม่แตกต่างกัน โดยการขยายตัวของกราไฟต์เพิ่มขึ้นตามคาร์บอนผสมที่เพิ่มขึ้น มีค่าปริมาณและเวลาการขยายตัวอยู่ในช่วง 0.2 – 1.8 มิลลิเมตร และ 230 – 450 วินาที ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบการหดตัวเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันในทั้งในบางเงื่อนไขการทดลองที่คาร์บอนผสมต่ำกว่า 4.3 พฤติกรรมการแข็งตัวของเหล็กหล่อ แต่ละประเภทไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

LERTRIT CHUENCHAROEN : STUDY OF SOLIDIFICATION

SHRINKAGE BEHAVIOR IN CAST IRONS BY LINEAR DISPLACEMENT

METHOD. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. RATTANA

BORRISUTTHEKUL, Ph.D., 86 PP.

SOLIDIFICATION/ BEHAVIOR/ SHRINKAGE/ CAST IRON/

LINEAR DISPLACEMENT

This research aims to study the solidification behavior in gray iron (GI), compacted graphite iron (CGI) and ductile iron (DI). The special equipment was devised by applying a linear displacement method for this purpose. The spherical additive-manufactured sand molds were encased in the steel jackets. The molds were equipped with a thermocouple (type S) and quartz rod (connected to the LVDT) to record the temperature and the displacement simultaneously. Irons with various carbon equivalent (CE) 3.7, 4.0, 4.3 and 4.6 were produced. It was found that contraction and expansion behaviors of three type of cast irons exhibited no difference. The graphite expansion and graphite expansion time increased with increasing carbon equivalent ranged from 0.2 – 1.8 mm. and 230 – 450 s. respectively. The austenite shrinkage was observed for some conditions at CE lower than 4.3. No significant difference was seen between types of irons.

School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีทั้งด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

คุณโองการ จันทรสุขเกษม และคุณนัฏฐินี วัลลุชอาร์ยะ เจ้าของบริษัท สปีด ทรีดีโมลด์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แบบหล่อทรายในการทำวิจัย และให้กำลังใจในการทำงานเป็นอย่างดีเสมอมา

อาจารย์ ดร.สารัมภ์ บุญมี และ ผศ.ดร.รัตน บิริสุทติกุล อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้โอกาสทางด้านการศึกษาและสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย ตลอดจนให้ความรู้ทางวิชาการ พร้อมทั้งคำแนะนำในการแก้ไขปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงช่วยตรวจทานและแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและแนวทางแก้ไขปัญหาในการดำเนินการวิจัย

นายคมสัน ภาษยเดช นายวิชาญ วีระชัยสุนทร นายนพพร แถวเพชร นายวิเศษฐ์ เผือกแดง วิศวกรและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (อาคารเครื่องมือ 6) ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือรวมถึงคำแนะนำงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ กลุ่มวิจัยงานหล่อที่อยู่ในความดูแลของ อาจารย์ ดร.สารัมภ์ บุญมี และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกคนที่ให้ความช่วยเหลืองานวิจัยในครั้งนี้จนเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การส่งเสริมทางด้านการศึกษาและให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา

เลิศฤทธิ์ ชื่นเจริญ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 บริบทศนั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 เทคนิคการวัดปริมาณการหดตัวและขยายตัวของเส้นใยของโลหะ.....	5
2.2 พฤติกรรมการหดและขยายตัวของเส้นใยของโลหะ.....	13
2.3 แนวคิดการออกแบบชุดอุปกรณ์วัดการหดและขยายตัวของเส้นใย.....	16
2.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการยืดตัวและการขยายตัว.....	18
2.5 เซ็นเซอร์ตำแหน่งเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer, LVDT)	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3	วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลอง.....	21
3.1	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	21
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	23
3.3	ขั้นตอนการทดลอง.....	31
3.3.1	การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการวิจัย.....	31
3.3.2	การหล่อหลอมเหล็กหล่อ.....	31
3.3.3	การควบคุมส่วนผสมทางเคมี.....	31
3.3.4	การทำแมกนีเซียมทรีทเมนต์.....	32
3.3.5	การเทน้ำโลหะจากเตาหลอมสู่เบ้าเพื่อลงงานวิจัย.....	33
3.3.6	การเก็บผลการทดลอง.....	34
4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	35
4.1	ผลการทดลอง.....	35
4.1.1	ส่วนผสมทางเคมี.....	35
4.1.2	โครงสร้างจุลภาค.....	36
4.1.3	กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัว และระยะการเคลื่อนที่.....	40
4.2	อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อพฤติกรรมการหดตัวของออสเทนไนต์ และขยายตัวของกราไฟต์.....	49
4.2.1	อิทธิพลของคาร์บอนผสม.....	49
4.2.2	อิทธิพลของรูปทรงกราไฟต์.....	53
4.2.3	อิทธิพลของอุณหภูมิเท.....	55
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1	สรุปผล.....	58
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	59
	รายการอ้างอิง.....	60

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก สรุปข้อมูลของอุณหภูมิและระยะเวลาเคลื่อนที่.....	62
ภาคผนวก ข ปริมาณการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ.....	65
ภาคผนวก ค รายละเอียดการออกแบบชุดอุปกรณ์.....	67
ภาคผนวก ง อัตราการเคลื่อนที่และระยะเวลาเคลื่อนที่ของ LVDT	78
ภาคผนวก จ การหาค่าคาร์บอนผสม.....	82
ประวัติผู้เขียน	84

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แนวคิดการติดตั้งไรเซอร์	1
2.1 อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโลหะระหว่างแข็งตัวโดย Mallet's และคณะ	5
2.2 อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโลหะระหว่างแข็งตัวโดย Schmidt และคณะ	6
2.3 อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโลหะระหว่างแข็งตัวโดย Zou และคณะ	6
2.4 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ของแท่งซิลิกาเพื่อวัดการหดตัวของโลหะโดย Degois และคณะ	7
2.5 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์และอุณหภูมิเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างการหดตัวกับอุณหภูมิโดย Stefanescu และคณะ	8
2.6 อุปกรณ์ศึกษาพฤติกรรมหดและขยายตัวโดย Yang กับ Aalheinen และคณะ	8
2.7 อุปกรณ์ศึกษาพฤติกรรมหดและขยายตัวพร้อมกับอุณหภูมิและแรงดัน โดย Gedeonova และ คณะ	9
2.8 อุปกรณ์ศึกษาพฤติกรรมขยายตัวของผนังแบบหล่อ โดย Mrvar และคณะ	9
2.9 อุปกรณ์ศึกษาพฤติกรรมหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ โดย Chisamera และคณะ	10
2.10 อุปกรณ์วัดพฤติกรรมหดและขยายตัว โดย Stefanescu และคณะ	10
2.11 อุปกรณ์วัดการหดและขยายตัวกับอุณหภูมิ โดย Svidro กับ Dioszegi และคณะ	11
2.12 กราฟแสดงการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อเหนียวโดย Degois และคณะ	13
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับกราฟการเย็นตัวโดย Stefanescu และคณะ	14
2.14 พฤติกรรมขยายและหดตัวของเหล็กหล่อเทา (ซ้าย)และเหล็กหล่อเหนียว (ขวา)	15
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนสมมูลกับปริมาณขยายตัว(ซ้าย) และเวลาการขยายตัว (ขวา)	15
2.16 พฤติกรรมขยายและหดตัวของเหล็กหล่อเทาที่มีส่วนผสมเดียวกัน โดย Svidro กับ Dioezgi และคณะ	16

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 ชุดอุปกรณ์วัดการหดและขยายตัวของโลหะโดยผู้วิจัย.....	17
2.18 อัตราการเย็นตัว (dT/dt) และอัตราการหดและขยายตัว (dr/dt)	19
2.19 วงจรพื้นฐาน Line Variable Differential Transformer, LVDT	20
2.20 ลักษณะการทำงาน Line Variable Differential Transformer, LVDT	20
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	22
3.2 เตาหลอมและตัวควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้า.....	23
3.3 เบ้ารองรับน้ำโลหะ (Ladle)	24
3.4 ฐานแบบหล่อทำด้วยโลหะทองแดง	24
3.5 เบ้ารองรับน้ำโลหะสำหรับชักตัวอย่าง	25
3.6 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบหยาบ (ซ้าย) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด (ขวา).....	25
3.7 เครื่องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี.....	26
3.8 อุปกรณ์สำหรับการวัดการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ	27
3.9 แบบหล่อทรายทรงกลมสามมิติและเปลือกหุ้มหุ้มเหล็กกล้า	27
3.10 เปลือกหุ้มหุ้มเหล็กกล้าฝานและฝาล่างพร้อมด้วยน้ำหนักกดทับ	28
3.11 เซ็นเซอร์ตำแหน่งเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer, LVDT).....	28
3.12 ระบบเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล (Digital data acquisition system)	29
เครื่องวัดผิวชิ้นงาน	30
3.14 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพร้อมชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพ	30
3.15 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการวัดการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ.....	31
3.16 การหล่อหลอมเหล็กดิบ (ซ้าย) และการเทน้ำโลหะเพื่อตรวจสอบสเปกโตรมิเตอร์ (ขวา) ..	32
3.17 การทำแมกนีเซียมทริทแมนท์ โดยวิธี Sandwich method	32
3.18 การทำแมกนีเซียมทริทแมนท์ โดยวิธี Sandwich method	33
3.19 การถ่ายโอนน้ำโลหะลงสู่เบ้าขนาดเล็กก่อนเทงานวิจัย	33
3.20 การเทน้ำโลหะลงชิ้นงานวิจัย	34
3.21 ชิ้นงานภายหลังการแข็งตัว.....	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทาที่คาร์บอนสมมูลแตกต่างกัน.....	37
4.2 แสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน ที่คาร์บอนสมมูลแตกต่างกัน	38
4.3 แสดงลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่ คาร์บอนสมมูลแตกต่างกัน	39
4.4 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นตัวและอัตราการเย็นตัว	41
4.5 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นตัว และระยะการเคลื่อนที่ของ LVDT	41
4.6 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ ของเหล็กหล่อเทา (CE 3.71)	43
4.7 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ ของเหล็กหล่อเทา (CE 4.04)	43
4.8 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ ของเหล็กหล่อเทา (CE 4.26)	44
4.9 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ ของเหล็กหล่อเทา (CE 4.46)	44
4.10 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ ของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน (CE 3.71).....	45
4.11 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ ของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน (CE 4.13).....	45
4.12 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ ของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน (CE 4.30).....	46
4.13 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ ของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน (CE 4.48).....	46
4.14 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ ของเหล็กหล่อเหนียว (CE 3.75).....	47

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟการเข็นตัวอัตราการเข็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ ของเหล็กหล่อเหนียว (CE 4.05)	47
4.16 กราฟการเข็นตัวอัตราการเข็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ ของเหล็กหล่อเหนียว (CE 4.34)	48
4.17 กราฟการเข็นตัวอัตราการเข็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ ของเหล็กหล่อเหนียว (CE 4.57)	48
4.18 อิทธิพลของคาร์บอนผสมและรูปทรงของกราไฟต์ที่ มีผลต่อการขยายตัวของกราไฟต์ (ขวา) และช่วงเวลา การขยายตัวของกราไฟต์ (ซ้าย)	50
4.19 อิทธิพลของคาร์บอนผสมและรูปทรงของกราไฟต์ที่มีต่อ การหดตัวออสเทนไนต์ (ขวา) และช่วงเวลากการหดตัวออสเทนไนต์ (ซ้าย)	51
4.20 การเคลื่อนที่เชิงเส้นภายหลังการแข็งตัวของเหล็กหล่อเทา ที่คาร์บอนผสมไม่เท่ากัน	51
4.21 การเคลื่อนที่เชิงเส้นภายหลังการแข็งตัวของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน ที่คาร์บอนผสมไม่เท่ากัน	52
4.22 การเคลื่อนที่เชิงเส้นภายหลังการแข็งตัวของเหล็กหล่อเหนียว ที่คาร์บอนผสมไม่เท่ากัน	52
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดชิ้นงานกับคาร์บอนผสมของเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภท.....	53
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทียบกับช่วงเวลาในการแข็งตัว.....	55
4.25 คาร์บอนผสมของเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภทกับช่วงเวลาในการแข็งตัว.....	56
4.26 อัตราส่วนการขยายตัวต่อเวลาทั้งในการแข็งตัว.....	56
4.27 อัตราส่วนการหดตัวต่อเวลาทั้งในการแข็งตัว.....	57

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	สรุปเงื่อนไขการทดลอง..... 4
2.1	สรุปเทคนิครายละเอียดโดยสังเขปของอุปกรณ์วัดพฤติกรรมการหดและขยายตัวของ โลหะระหว่างการแข็งตัว..... 12
3.1	ปริมาณธาตุของเฟอร์โรซิลิคอนและปริมาณธาตุของสาร โนคูลลาไรเซอร์ (Fe-Si-Mg)..... 22
4.1	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อ 3 ประเภท..... 35
4.2	สัญลักษณ์ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ 40

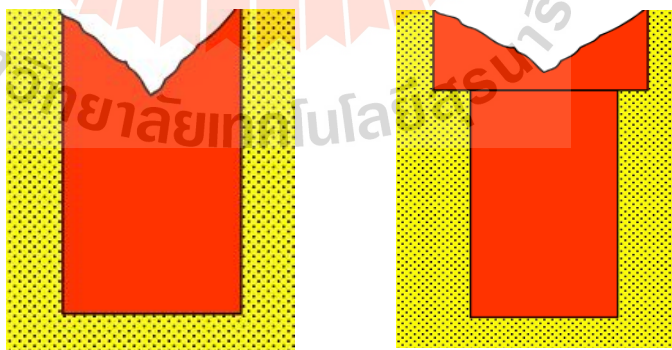


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เหล็กหล่อเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่มีความสำคัญและเหมาะสมกับการนำไปใช้งานอย่างหลากหลายเช่น เสื้อสูบรถยนต์ เพลาค้อเหวี่ยง เป็นต้น เพราะมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดี ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างต่ำและยังเป็นวัสดุที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจ โดยส่วนใหญ่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ซึ่งเป็นภาคอุตสาหกรรมหลักที่สร้างรายได้ให้กับประเทศ โดยข้อมูลจากกระทรวงพาณิชย์ ในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกรถยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์รวมกว่า 863,000 ล้านบาท [1] จึงทำให้มีความต้องการในการผลิตเหล็กหล่อให้มีคุณภาพและปราศจากข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการหล่อเพื่อลดต้นทุนในการผลิตเช่น ปัญหาโพรงหดตัว (Shrinkage porosity) ที่เกิดเมื่อโลหะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งทำให้มีปริมาตรลดลงและความหนาแน่นมากขึ้นจึงต้องให้มีการป้อนน้ำโลหะเพื่อชดเชยการหดตัว หากงานหล่อไม่มีการติดตั้งไรเซอร์จะเกิดโพรงหดตัวขึ้นได้ในชิ้นงาน การติดตั้งไรเซอร์จะช่วยป้อนน้ำโลหะให้ไหลไปชดเชยการหดตัวภายในชิ้นงานหล่อซึ่งไรเซอร์นี้สามารถติดตั้งในภายหลังได้ ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แนวคิดการติดตั้งไรเซอร์ [2]

อย่างไรก็ดีกลไกการแข็งตัวของเหล็กหล่อขึ้นก่อนข้างมีความซับซ้อนเนื่องจากเกิดการหดตัวของออสเตนไนท์และเกิดการขยายตัวของกราฟไฟต์ที่ตกผลึกออกมา โดยในทางทฤษฎีกรรมของเหล็กหล่อไฮโปยูเทคติก (Hypo-Eutectic) ในช่วงแรกเมื่อน้ำโลหะมีอุณหภูมิต่ำกว่า (Liquids Temperature, T_L) จะเริ่มเกิดของแข็งแรกที่ตกผลึกออกมาคือออสเตนไนท์ที่มีความหนาแน่นสูง เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำโลหะหลอมเหลว ผลกระทบที่เกิดขึ้นของออสเตนไนท์ในช่วงแรกนั้นจะมีปริมาตรลดลงและในช่วงสุดท้ายก่อนเกิดการแข็งตัวจะเริ่มเกิดการตกผลึกของกราฟไฟต์ โดยกราฟไฟต์ที่ตกผลึกออกมานั้นมีความหนาแน่นต่ำทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการขยายตัวของกราฟไฟต์และการขยายตัวจะสิ้นสุดเมื่อถึงจุดสิ้นสุดการแข็งตัว กล่าวอีกนัยหนึ่งกราฟไฟต์ที่เกิดขึ้นนั้นไปช่วยชดเชยการหดตัวของออสเตนไนท์ในช่วงแรก ดังนั้นการออกแบบไรเซอร์ในงานหล่อเหล็กหล่อจึงมีหลักการและวิธีการที่แตกต่างไปจากการหล่อโลหะชนิดอื่น

วิธีการดั้งเดิมที่ใช้แก้ปัญหาโพรงหดตัวได้แก่ การติดตั้งไรเซอร์ สำหรับเหล็กหล่อมีพฤติกรรมการแข็งตัวแตกต่างไปจากโลหะชนิดอื่น คือมีการขยายตัวอันเนื่องมาจากการเกิดกราฟไฟต์ซึ่งช่วยชดเชยการหดตัวของเหล็กหล่อได้ นอกจากนี้การขยายตัวจากการเกิดกราฟไฟต์จะช่วยเพิ่มแรงดันผลักดันให้น้ำโลหะไหลเข้าไปป้อนบริเวณที่ไหลผ่านได้ยากลดปัญหาการเกิดโพรงหดตัวระดับจุลภาค (Micro-shrinkage porosity) ดังนั้นจึงทำให้หลักการออกแบบไรเซอร์สำหรับเหล็กหล่อมีอยู่ 3 หลักการ ได้แก่

1. ไรเซอร์ต้องมีขนาดที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการชดเชยการหดตัวและไม่ใหญ่เกินจำเป็น
2. ไรเซอร์ต้องทำงานในช่วงเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากเหล็กหล่อ (ส่วนผสมไฮโปยูเทคติก) จะหดตัวเฉพาะในช่วงแรกจากการเกิดออสเตนไนท์ซึ่งเป็นช่วงที่ต้องการการชดเชยการหดตัวแต่เมื่อกราฟไฟต์เริ่มเกิดขึ้น การขยายตัวจากกราฟไฟต์จะชดเชยการหดตัวได้เอง อย่างไรก็ตามการขยายตัวจากกราฟไฟต์จะไม่มีประโยชน์หากเกิดขึ้นขณะที่รอยต่อระหว่างไรเซอร์และระบบทางวิ่งของน้ำโลหะยังไม่แข็งตัวดี ซึ่งจะทำให้การขยายตัวออกแรงดันน้ำโลหะให้ย้อนกลับเข้าไปในไรเซอร์และไม่ช่วยชดเชยการหดตัว
3. ไรเซอร์ต้องมีจำนวนและตำแหน่งที่เหมาะสม โดยควรมีไรเซอร์หนึ่งตัวต่อหนึ่งบริเวณการแข็งตัว (Solidification zone) หากมีมากเกินไปจะส่งผลเสียให้เกิดโพรงหดตัวที่บริเวณรอยต่อระหว่างไรเซอร์ที่ไม่หดตัวและงานหล่อ

นอกจากนี้การแก้ปัญหาโพรงหดตัวในงานหล่อด้วยการติดตั้งไรเซอร์แล้ว ยังมีอีกวิธีในการช่วยชดเชยการหดตัวของเหล็กหล่อก็คือการพัฒนาสารอินนอคูลแลนต์ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เนื่องจากทำให้การขยายตัวจากการเกิดกราฟไฟต์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอจนถึงช่วงสุดท้ายซึ่งจะชดเชยการหดตัวได้ตลอดช่วงการแข็งตัว ซึ่งหากมีเครื่องมือที่สามารถวัดการหดตัวและขยายตัว

ระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อได้จะทำให้สามารถนำมาใช้ในการพัฒนาสารอินนोकูลแลนต์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้

ดังนั้นข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบไรเซอร์สำหรับงานหล่อเหล็กหล่อนั้น ได้แก่

1. ปริมาณการหดตัวเนื่องจากออสเทนไนท์
2. ปริมาณการขยายตัวเนื่องจากกราไฟต์ ช่วงเวลาเริ่มต้นและการสิ้นสุดการขยายตัว

ซึ่งหากทราบข้อมูลเหล่านี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลในโปรแกรมการจำลองการหล่อโลหะเพื่อทำนายแนวโน้มการเกิดโพรงหดตัวในงานหล่อให้มีความแม่นยำ เพื่อลดอัตราการผลิตของเสียและลดการใช้พลังงานในการผลิตให้น้อยลง และนำไปสู่การออกแบบไรเซอร์และการพัฒนาสารอินนोकูลแลนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการหดตัวและขยายตัวระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน เหล็กหล่อเหนียว ด้วยวิธีการวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น

1.3 สมมติฐานงานวิจัย

1. ปริมาณคาร์บอนสมมูล (Carbon Equivalent) ถูกคาดการณ์ว่าจะมีผลต่อพฤติกรรมการขยายตัวของเหล็กหล่อทั้ง 3 ชนิด โดยเหล็กหล่อที่มีปริมาณคาร์บอนสมมูลที่สูงจะทำให้มีปริมาณการขยายตัวที่มากขึ้น

2. รูปทรงกราไฟต์ น่าจะมีผลต่อพฤติกรรมการขยายตัวโดยคาดการณ์ว่าเหล็กหล่อเหนียวจะให้ปริมาณการขยายตัวที่มากที่สุดและ เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน เหล็กหล่อเทา ตามลำดับเป็นผลมาจากการเติมธาตุแมกนีเซียม

1.4. ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ

1. ศึกษาและพัฒนาชุดอุปกรณ์สำหรับการวัดการหดตัวและขยายตัวระหว่างการแข็งตัวของโลหะที่มีจุดหลอมตัวไม่เกิน 1300 °C โดยอุปกรณ์สามารถวัดการหดตัวและอุณหภูมิได้พร้อมกัน

2. ศึกษาการหดและขยายตัวประเภทของเหล็กหล่อที่สนใจได้แก่ เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน เหล็กหล่อเหนียว ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีอยู่ระหว่าง

คาร์บอน 2.9 – 3.7%

ซิลิกอน 2.5 – 2.8%

แมกนีเซียม 0 – 0.08%

โดยมีคาร์บอนสมมูล ($CE = \%C + (\%Si + \%P)/3$) ตั้งแต่ $CE = 3.7, 4.0, 4.3$ และ 4.6 และแบ่งประเภทของเหล็กหล่อตามเปอร์เซ็นต์แมกนีเซียม ($\%Mg$) ตั้งแต่ ($0 \%Mg$, เหล็กหล่อเทา), ($0.009 \%Mg$, เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน), ($0.080 \%Mg$, เหล็กหล่อเหนียว)

ตารางที่ 1.1 สรุปเงื่อนไขการทดลอง

	ส่วนผสมทางเคมี (Chemical Composition) %			
เหล็กหล่อเทา	CE = 3.7 %Mg = 0	CE = 4.0 %Mg = 0	CE = 4.3 %Mg = 0	CE = 4.6 %Mg = 0
เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน	CE = 3.7 %Mg = 0.009	CE = 4.0 %Mg = 0.009	CE = 4.3 %Mg = 0.009	CE = 4.6 %Mg = 0.009
เหล็กหล่อเหนียว	CE = 3.7 %Mg = 0.08	CE = 4.0 %Mg = 0.08	CE = 4.3 %Mg = 0.08	CE = 4.6 %Mg = 0.08

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดอุปกรณ์สำหรับศึกษาพฤติกรรมการหดตัวและขยายตัวระหว่างการแข็งตัวของโลหะ

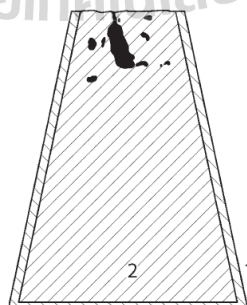
2. ได้ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมการหดและขยายตัวระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อเหนียว และเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

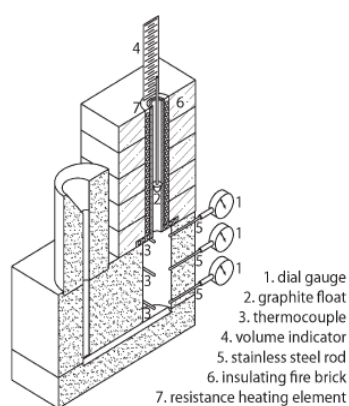
2.1 เทคนิคการวัดปริมาณการหดตัวและขยายตัวระหว่างการแข็งตัวของโลหะ

แรกเริ่มเดิมทีเทคนิคการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาณการหดตัวในโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเหล็กหล่อ นั้นมีวิธีการวัดปริมาณการหดตัวอยู่ด้วยกัน 2 วิธี โดยวิธีการแรกคือการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยตรงและวิธีที่สองคือการวัดปริมาณการหดตัวของโลหะด้วยวิธีการเคลื่อนที่เชิงเส้น วิธีการแรกนั้นในปี ค.ศ. 1874 โดย Mallet และคณะ [24] ยังไม่มีอุปกรณ์ที่เหมาะสมจึงใช้การเปรียบเทียบปริมาตรและความหนาแน่นของน้ำโลหะโดยตรง โดยนำน้ำโลหะที่หลอมเหลวลงในภาชนะรูปกรวย ดังแสดงในรูปที่ 2.1 อย่างไรก็ตามวิธีการศึกษาแบบนี้ให้ข้อมูลเฉพาะ ปริมาตรการหดตัวภายหลังการแข็งตัวสิ้นสุดแล้ว ทำให้มีประโยชน์ต่อการศึกษาพฤติกรรม การหดตัวน้อย โดยเฉพาะในเหล็กหล่อที่มีทั้งการหดและขยายตัว ความพยายามในการวัดการหดและขยายตัวในเหล็กหล่อได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องในปี ค.ศ. 1954 โดย Schmidt และคณะ [23] ได้ทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเหล็กหล่อด้วยการวัดระดับของน้ำโลหะในไรเซอร์ด้วยทุ่นลอยทำจากกราไฟต์ โดยออกแบบให้มีการให้ความร้อนกับไรเซอร์ด้วยขดลวดความร้อนและมีเกจวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของงานหล่อแต่การทดลองนี้มีข้อเสียคือความไม่แน่นอนของระบบทางเดินน้ำโลหะและการทำงานของทุ่นลอย แบบหล่อทำจากทรายขึ้นซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ ทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงดังแสดงในรูปที่ 2.2



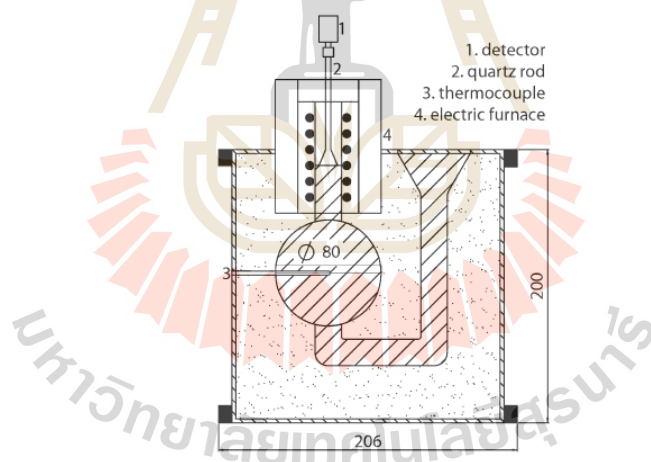
1. Vessel
2. specimen

รูปที่ 2.1 อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโลหะระหว่างแข็งตัวโดย Mallet's และคณะ[24]



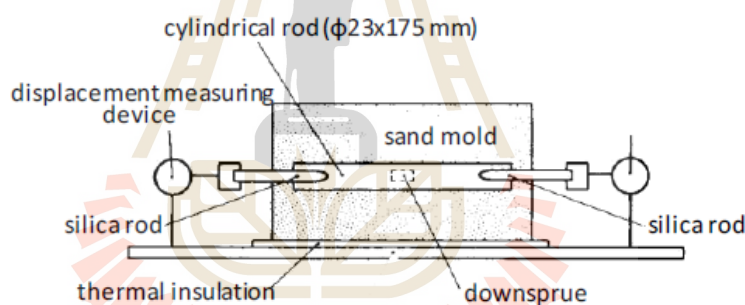
รูปที่ 2.2 อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโลหะระหว่างแข็งตัวโดย Schmidt และคณะ [23]

ในปี ค.ศ. 2012 โดย Zou และคณะ [17] ได้ใช้เทคนิคคล้ายกับ Schmidt โดยออกแบบสำหรับการวัดการหดและขยายตัวสำหรับเหล็กหล่อเหนียวและใช้หีบแบบเหล็กกล้าเสริมความแข็งแรงของแบบหล่อและให้งานหล่อเป็นทรงกลมแทนทรงกระบอกทำให้ได้ผลสม่ำเสมอขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้หุ่นลอยกราไฟต์ให้ผลที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากมีความซับซ้อนของกลไกการวัดแสดงในรูปที่ 2.3



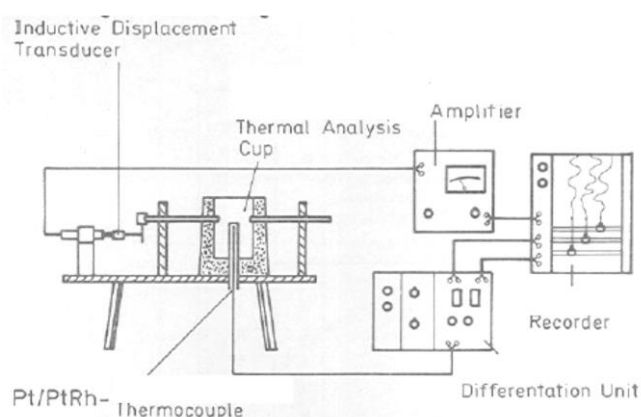
รูปที่ 2.3 อุปกรณ์วัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโลหะระหว่างแข็งตัวโดย Zou และคณะ [17]

เนื่องจากอุปสรรคในการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำโลหะด้วยหุ่นลอยกราฟไฟต์ ทำให้ผลที่ได้ไม่สม่ำเสมอ จึงมีผู้วิจัยหาวิธีวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยใช้วิธีวัดปริมาณการหดตัวของโลหะด้วยวิธีการเคลื่อนที่เชิงเส้น จึงเป็นที่มาของวิธีการที่สอง โดยผลงานวิจัยเหล่านี้มีหลักการคล้ายคลึงกันแต่เปลี่ยนจากใช้หุ่นลอยกราฟไฟต์ มาเป็นแท่งวัสดุทนไฟทำจากควอทซ์หรือซิลิกายื่นเข้าไปในโพรงแบบ ซึ่งต่อเชื่อมกับระบบวัดระยะทางการเคลื่อนที่เมื่อโลหะแข็งตัวรอบ ๆ แท่งวัสดุทนไฟจะดึงหรือผลักให้แท่งควอทซ์เคลื่อนที่ ระยะการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์บอกถึงปริมาณการหดและการขยายตัวของงานหล่อ โดยในปี ค.ศ. 1975 Degois และคณะ [25] ใช้แท่งซิลิกาสำหรับวัดงานหล่อรูปทรงกระบอกครึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าแท่งควอทซ์หรือวัสดุทนไฟเหมาะสมกับลักษณะการวัดแบบการเคลื่อนที่เชิงเส้น เนื่องจากแท่งควอทซ์มีอัตราการขยายตัวต่ำและความสามารถในการนำความร้อนต่ำ ภายหลังแท่งควอทซ์ถูกใช้ในงานวิจัยอีกหลายคณะและพัฒนาเทคนิคการวัดให้มีผลที่น่าเชื่อถือ โดยใช้ได้แบบทรายที่มีความแข็งแรงขึ้น เพื่อลดอัตราการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อ



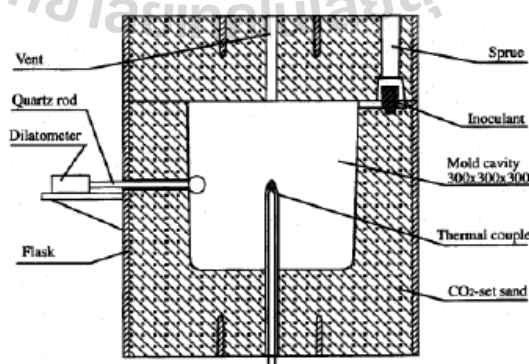
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ของแท่งซิลิกาเพื่อวัดการหดตัวของโลหะ โดย Degois และคณะ [25]

ในปี ค.ศ. 1979 Stefanescu และคณะ [16] ผลงานวิจัยเป็นก้าวสำคัญของการพัฒนาเทคนิคการวัดหาปริมาณการหดตัวและขยายตัวของเหล็กหล่อคือสามารถบันทึกกราฟการเย็นตัวไปพร้อมกับการวัดการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 กราฟการเย็นตัวที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปเชื่อมโยงกับการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์ ทำให้วิเคราะห์ช่วงเวลาการหดและขยายตัวในเหล็กหล่อได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวพบปัญหาคือใช้แบบหล่อแบบเปิดทำให้แรงดันจากการขยายตัวไม่ได้ทำต่อแท่งควอทซ์อย่างเดียวและอีกทั้งพฤติกรรมแผ่ความร้อนของแบบเปิดทำให้การแข็งตัวของงานหล่อเป็นไปอย่างไม่สมมาตร

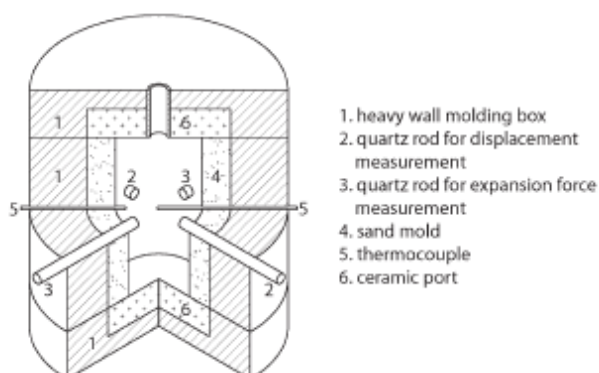


รูปที่ 2.5 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์และอุณหภูมิเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับอุณหภูมิโดย Stefanescu และคณะ [16]

ในปี ค.ศ. 1989 Yang กับ Aalheinen และคณะ [15] ได้ออกแบบการทดลองคล้ายกับ Stefanescu โดยทดลองกับแบบหล่อทรายโซเดียมซิลิเกตที่ปิดงานหล่อโดยรอบ ซึ่งกราฟการเย็นตัวที่ได้สามารถเชื่อมโยงกับการเคลื่อนที่ทำให้สามารถวิเคราะห์ช่วงเวลาการหดและขยายตัวในเหล็กหล่อได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสามารถหาความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์ซึ่งบอกอัตราการหดและขยายตัวดังแสดงในรูปที่ 2.6 และมีงานวิจัยที่ใช้เทคนิคคล้ายกันอีกโดยปี ค.ศ.1995 Gedeonova และคณะ [14] ซึ่งได้เปลี่ยนไปใช้งานหล่อรูปทรงระบอบและได้ทำการพัฒนาการวัดแรงที่เกิดจากการขยายตัวของแบบหล่อ ซึ่งวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนั้นคือศึกษาผลการใช้และไม่ใช้หีบแบบเพื่อลดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อ ซึ่งพบว่าการใช้หีบแบบสามารถลดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อได้และให้ผลการทดลองที่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

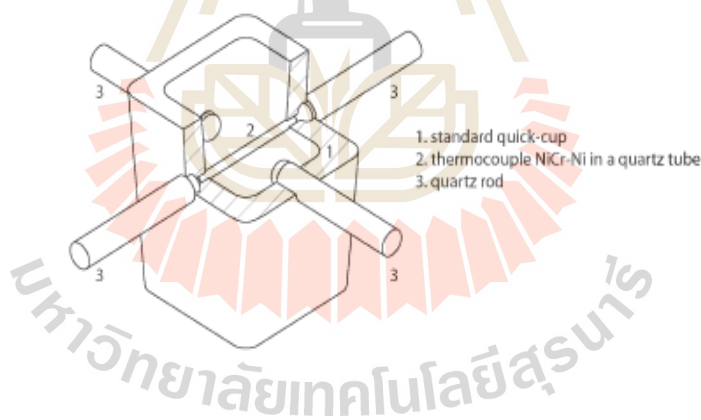


รูปที่ 2.6 อุปกรณ์ศึกษาพฤติกรรมการหดและขยายตัวโดย Yang กับ Aalheinen และคณะ [15]



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์ศึกษาพฤติกรรมการหดและขยายตัวพร้อมทั้งอุณหภูมิและแรงดัน โดย Gedeonova และ คณะ [14]

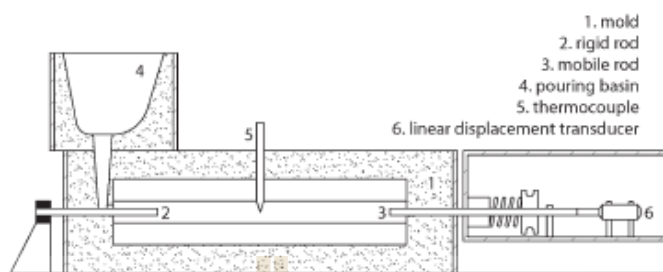
ในปี ค.ศ. 2002 Mrvar และ คณะ [21] ได้วัดอัตราการขยายตัวของแบบหล่อด้วยโพลีเอทิลีนซึ่งยื่นยื่นข้อสรุปของ Gedeonova ว่าการใช้หีบแบบสามารถลดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8



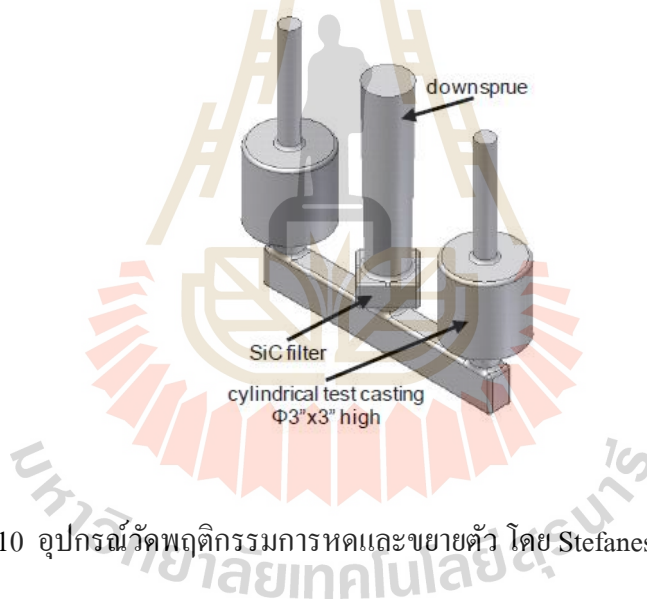
รูปที่ 2.8 อุปกรณ์ศึกษาพฤติกรรมการขยายตัวของผนังแบบหล่อ โดย Mrvar และคณะ [21]

ในปี ค.ศ. 2011 Chisamera และคณะ [10] ได้ประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ที่สามารถวัดการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์และอุณหภูมิของงานหล่อ โดยมีพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 30 x 30 มม. ยาว 200 มม. ใช้แบบหล่อทรายโซเดียมซิลิเกตเสริมด้วยหีบแบบเหล็กกล้า ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และใน ค.ศ. 2012 Stefanescu และคณะ [12] ได้ออกแบบงานหล่อสำหรับวัดการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์ ในงานหล่อทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว และใช้แบบหล่อทรายโซเดียมซิลิเกตเสริมด้วยหีบแบบเหล็กกล้า ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทั้งสองงานวิจัยแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกราฟ

การเย็นตัวและการหดและขยายตัว ซึ่งให้ผลการทดลองที่น่าเชื่อถือเป็นอย่างมาก พร้อมยืนยันว่าการเตรียมแบบหล่อด้วยหีบแบบมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผลการทดลอง

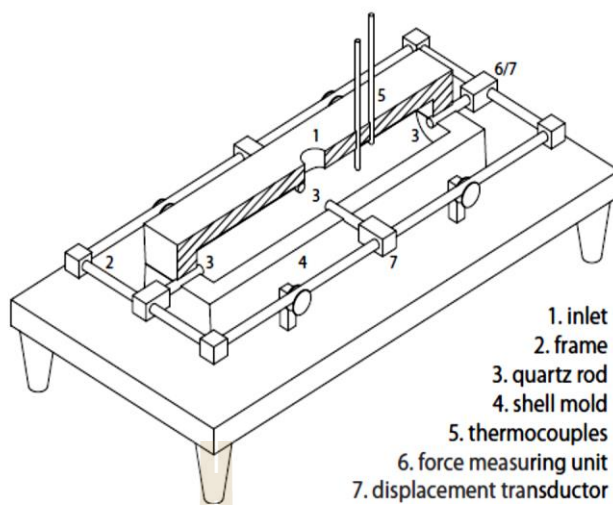


รูปที่ 2.9 อุปกรณ์ศึกษาพฤติกรรมกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อโดย Chisamera และคณะ [10]



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์วัดพฤติกรรมกรรมการหดและขยายตัว โดย Stefanescu และคณะ [12]

ล่าสุดในปี ค.ศ. 2013 Svidro กับ Dioszegi และคณะ [11] ได้ใช้อุปกรณ์คล้ายกับ Chisamera แต่วัดการหดและขยายตัวในทั้งสองทิศทางพร้อมกับวัดแรงดันของน้ำโลหะที่เกิดจากการขยายตัว วัดอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางชิ้นงาน และทำการทดลองไปจนถึงปฏิบัติการยูเทคตอยด์ ข้อสรุปจากงานวิจัยนี้คือการการหดและการขยายตัวขึ้นอยู่กับทิศทาง (ด้านยาวหรือด้านหนา) เนื่องจากงานหล่อมักมีลักษณะเป็นแท่ง และแรงดันของน้ำโลหะมีความสอดคล้องกับการขยายตัวและ ไม่มีความจำเป็นที่จะทดลองจนถึงอุณหภูมิยูเทคตอยด์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเหล็กหล่อในสถานะของแข็งสามารถวัดได้ละเอียดด้วยเทคนิค Thermal Dilatometry ดังแสดงในรูปที่ 2.11



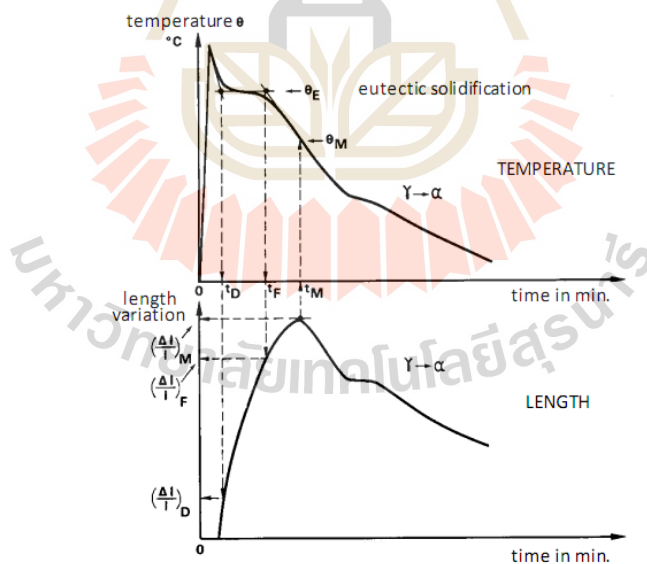
รูปที่ 2.11 อุปกรณ์วัดการหดและขยายตัวกับอุณหภูมิ โดย Svidro กับ Dioszegi และคณะ [11]

ตารางที่ 2.1 สรุปเทคนิครายละเอียดโดยสังเขปของอุปกรณ์วัดพฤติกรรมการหดและขยายตัวของโลหะระหว่างการแข็งตัว

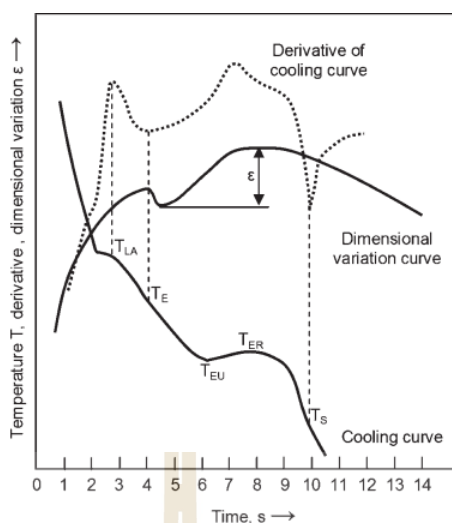
	เทคนิคการวัด	ลักษณะงานหล่อ	หมายเหตุ
Mallet et al. (1874) [24]	-Volume change	-Vessel	
Schmidt et al. (1954) [23]	- Graphite buoy - Dial gauges	-Cylindrical ,vertical	- Green sand mold
Degois et al. (1975) [25]	- Displacement on silica rod	-Cylindrical ,horizontal	
Stefanescu et al. (1979) [16]	-LVDT on quartz rod -Thermocouple	-Thermal analysis cup	- Furan mold (hot box)
Yang et al. (1989) [15]	-Dilatometer on quartz rod -Thermocouple	-Square box	-CO ₂ Sand mold
Gedeonava et al. (1995) [14]	-LVDT on quartz rod -Thermocouple -Load cell on quartz rod	-Cylindrical ,vertical	-Heavy wall molding box
Mrvar et al. (2002) [21]	-LVDT on quartz rod -Thermocouple	-Thermal analysis cup	-CO ₂ Sand mold
Chisamera et al (2011) [10]	-LVDT on quartz rod -Thermocouple	-Square bar (30x30x200 mm) ,horizontal	-Green sand mold -Furan sand mold both encase in a container
Zou et al. (2012) [17]	- Graphite buoy -Thermocouple	-Spherical (Ø80 mm)	-encase in a steel flask
Stefanescu et al. (2012) [12]	-LVDT on quartz rod -Thermocouple	-Cylindrical (Ø3”), horizontal	-Sodium silicate sand mold, encase in a steel flask
Dosizegi et al. (2013) [11]	- 2 LVDT on quartz rod - 2 Thermocouple	-Cylindrical, (Ø50x350 mm), horizontal	- Shell sand mold

2.2 พฤติกรรมการหดและขยายตัวของโลหะ

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงเทคนิคการวัดการหดและขยายตัวของโลหะจะเห็นได้ว่าได้มีผู้วิจัยได้แสดงผลการทดลองไว้หลากหลาย ในหัวข้อนี้จะขอเสนอเฉพาะผลงานที่สำคัญ โดยในปี ค.ศ. 1975 Degois และคณะ [25] ในยุคนั้นการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลยังไม่ทันสมัยจึงทำให้ข้อมูลที่เก็บได้ไม่ละเอียดเท่าที่ควร มีเพียงข้อมูลการหดและขยายตัวเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 2.12 จะเห็นเพียงกราฟการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อเหนียว อย่างไรก็ตาม Degois และคณะ ได้พยายามแสดงสมมุติฐานความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นตัวและการเคลื่อนที่ของแท่งซิลิกาจากภาพ θ_M คืออุณหภูมิยูเทคติก θ_E คืออุณหภูมิที่มีการขยายตัวสูงสุด t_D คือเวลาที่เริ่มเกิดปฏิกิริยายูเทคติก t_F คือเวลาที่ปฏิกิริยายูเทคติกสิ้นสุด t_M คือเวลาที่มีการขยายตัวสูงสุด จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าในช่วงต้นของกราฟจะไม่ปรากฏการหดตัวเนื่องจากออกสเตนไนท์ Degois ได้สันนิษฐานว่าการขยายตัวยังคงต่อเนื่องไปหลังปฏิกิริยายูเทคติกสิ้นสุดแล้วจึงค่อยๆ หดตัวในสภาวะของแข็งไปจนถึงอุณหภูมิยูเทคตอยด์จึงมีอัตราการหดตัวช้าลง งานวิจัยนี้ให้ข้อมูลที่นำไปใช้ได้น้อยเนื่องจากไม่มีการวัดอุณหภูมิเพื่อหาความสัมพันธ์อีกทั้งการเคลื่อนที่ของแท่งซิลิกาให้ผลที่ไม่สม่ำเสมอ

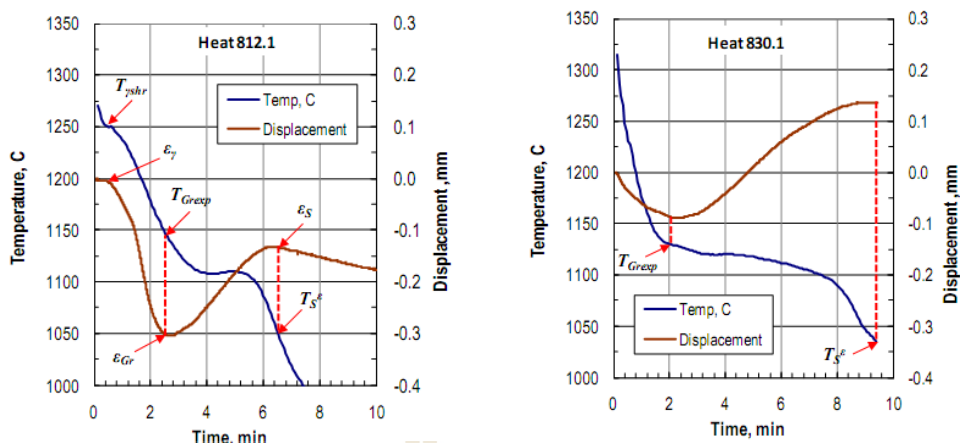


รูปที่ 2.12 กราฟแสดงการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อเหนียวโดย Degois และคณะ [25]

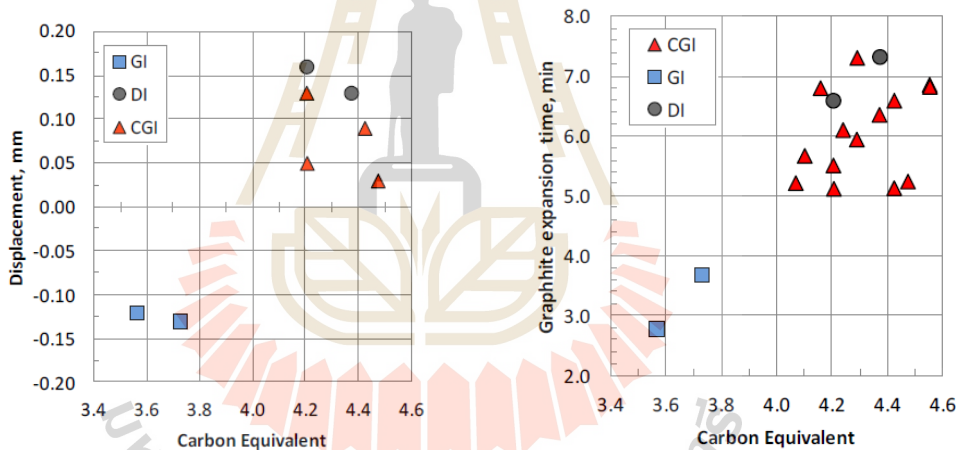


รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวกับกราฟการเย็นตัวโดย Stefanescu และคณะ [16]

ในปี ค.ศ. 1979 Stefanescu และคณะ [16] ได้แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดและขยายตัวพร้อมทั้งกราฟการเย็นตัวเป็นครั้งแรก ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ข้อสรุปที่สำคัญจากงานวิจัยนี้คือการแสดงให้เห็นถึงการหดตัวที่เกิดจากออสเตนไนท์และการขยายตัวจากปฏิกิริยายูเทคติก ซึ่งกราฟการเย็นตัวและการเคลื่อนที่มีความสัมพันธ์กันนอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นอีกว่าการขยายตัวสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงปฏิกิริยายูเทคติกและค่อย ๆ หดตัวไปจนถึงจุดสิ้นสุดการแข็งตัว ซึ่งในภายหลังปี ค.ศ. 2011 Chisamera และคณะ [10] ได้แสดงความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันและในช่วงเวลาเดียวกันนั้น Stefanescu และคณะ [12] ได้กลับมาทำการทดลองด้วยงานหล่อที่มีลักษณะปิด โดยได้ทดลองกับเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 2.14 จากการวิจัยนี้ได้ข้อสรุปว่าเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนผสมสูงกว่าจะมีปริมาณการขยายตัวสูงกว่าและมีเวลาการขยายตัวนานกว่าเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนผสมน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.15 อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มีข้อสังเกตคือผลการทดลองไม่ค่อยสม่าเสมอเนื่องจากอุปสรรคในการวัด โดยตั้งข้อสังเกตว่าเหล็กหล่อทำให้ผลสม่าเสมอกว่าทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากพฤติกรรมกรรมการแข็งตัวที่เริ่มต้นจากที่ผิวซึ่งยึดจับกับแท่งควอทซ์ตั้งแต่จุดเริ่มต้นของการแข็งตัว แต่เหล็กหล่อเหนียวและเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนซึ่งแข็งตัวแบบ Mushy จึงไม่ยึดจับกับแท่งควอทซ์ตั้งแต่ต้นจึงได้ผลไม่ค่อยสม่าเสมอ



รูปที่ 2.14 พฤติกรรมการขยายและหดตัวของเหล็กหล่อเทา (ซ้าย) และเหล็กหล่อเหนียว (ขวา) [12]

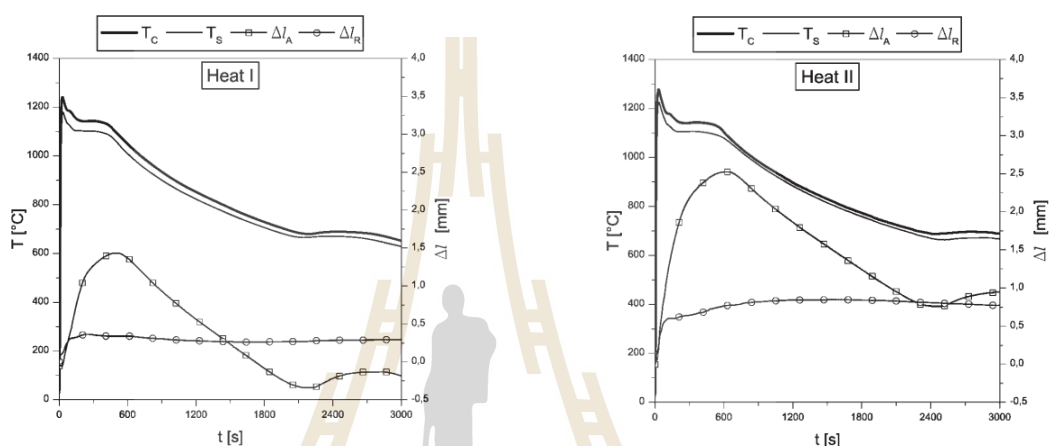


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนสมมูลกับปริมาณขยายตัว (ซ้าย) และเวลาการขยายตัว (ขวา) [12]

ล่าสุดในปี ค.ศ. 2013 Svidro กับ Diosezgi และคณะ [11] ได้ใช้อุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งจากงานวิจัยนี้มีความน่าสนใจหลายประการคือ ไม่พบการหดตัวเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันในทันทีในทุกเงื่อนไขการทดลองซึ่งมีความขัดแย้งกับงานวิจัยของ Stefanescu ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการทดลองในเหล็กหล่อที่มีค่าคาร์บอนสมมูลเท่ากับ 4.1 ซึ่งใกล้เคียงส่วนผสมยูเทคติก จึงอาจไม่ปรากฏการหดตัวของออกซิเดชันในทันที งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการหดและ

ขยายตัวนั้นขึ้นอยู่กับทิศทางการวัด โดยการขยายตัวตามแนวรัศมี (Radial expansion) มีความอ่อนไหวต่อช่วงเวลาการแข็งตัวกว่าการขยายตัวตามแนวยาว (Axial expansion)

โดยเฉพาะในช่วงปฏิบัติการยู่เทคดอยด์ซึ่งไม่สามารถสังเกตได้จากการขยายตัวตามแนวยาว นอกจากนี้งานวิจัยนี้ก็ได้แสดงให้เห็นความอ่อนไหวของการวัดซึ่งจากการทดลองซ้ำในเหล็กหล่อเทาที่มีส่วนผสมทางเคมีคงที่ แต่ปริมาณการขยายตัวสูงสุดที่วัดได้แตกต่างกันถึง 40 % ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 พฤติกรรมการขยายและหดตัวของเหล็กหล่อเทาที่มีส่วนผสมเดียวกันโดย Svidro กับ Dioezgi และคณะ [11]

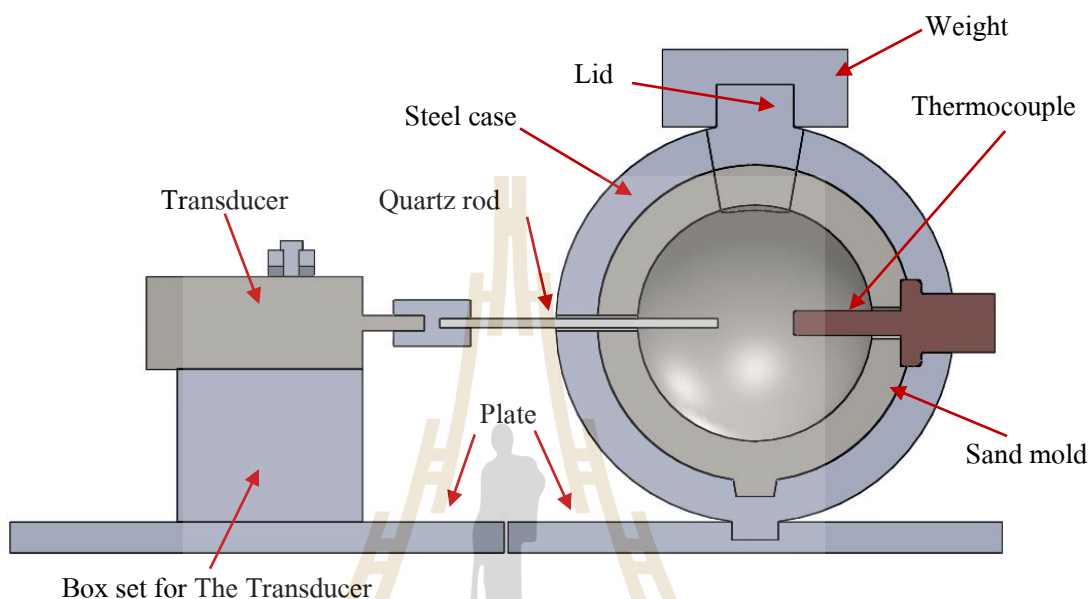
2.3 แนวคิดการออกแบบชุดอุปกรณ์วัดการหดและขยายตัวของผู้วิจัย

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในเทคนิคการวัดปริมาณการหดตัวและขยายตัวระหว่างการแข็งตัวของโลหะทำให้สามารถสรุปโดยรวมได้ดังนี้

1. การใช้แท่งวัสดุทนไฟหรือแท่งควอทซ์ในการวัดพฤติกรรมการหดและขยายตัวทำให้ได้ผลการทดลองที่สม่ำเสมอและมีความยุ่งยากน้อย เมื่อเทียบกับการใช้หุ่นลอย
2. แบบหล่อทรายที่ไม่มีความแข็งแรงเมื่อได้รับความร้อนจากน้ำโลหะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อซึ่งบิดเบือนผลการทดลอง ควรใช้หีบแบบเสริมความแข็งแรงให้กับแบบหล่อ
3. การบันทึกกราฟการเย็นตัวไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์และมีประโยชน์อย่างยิ่งในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของระยะการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์ และทำให้สามารถ

ทราบถึงช่วงเวลาการหดและขยายตัวระหว่างการแข็งตัวของโลหะและขยายตัวขึ้นอยู่กับทิศทางและรูปร่างของงานหล่อ

จากข้อสังเกตเกี่ยวกับการออกแบบชุดอุปกรณ์วัดการหดและขยายตัวที่ได้กล่าวมานั้น ผู้วิจัยได้มีแนวคิดการออกแบบชุดอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ชุดอุปกรณ์วัดการหดและขยายตัวของโลหะโดยผู้วิจัย

การออกแบบนี้ผู้วิจัยคาดว่าจะให้ผลที่เชื่อถือได้โดยให้สมมุติฐานดังนี้

1. แบบหล่อทำจากทรายทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ผลิตด้วยเครื่องพิมพ์แบบหล่อสามมิติ (3D mold printer) ทำให้ปริมาณการหดและขยายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งงานหล่อ ทำให้ค่าที่วัดได้มาผลกระทบจากปัจจัยอื่น
2. การใช้เปลือกเหล็กกล้าหล่อหุ้มและน้ำหนักกดทับฝาปิด ช่วยลดการเคลื่อนที่ของทรายแบบหล่อ ทำให้รักษาแรงดันที่เกิดจากการขยายตัวของน้ำเหล็กได้ดีและมีความสม่ำเสมอ
3. การใช้เครื่องพิมพ์แบบหล่อสามมิติ (3D mold printer) ทำให้สามารถผลิตแบบหล่อทรงกลมได้โดยไม่มีเส้นแบ่งระหว่างหีบแบบ (Parting line) และมีขนาดสม่ำเสมอทุกชิ้น ซึ่งลดปัญหาคลาดเคลื่อนจากการประกอบแบบ พร้อมกับสามารถติดตั้งแท่งควอทซ์และเทอร์โมคัปเปิลได้อย่างแม่นยำ ทั้งยังมั่นใจได้ว่าจะไม่มีการรั่วของน้ำโลหะที่เส้นที่แบ่งระหว่างหีบแบบและรักษาความดันได้ดี

4. การใช้เซ็นเซอร์ตำแหน่งเชิงเส้น (LVDT) อยู่ในแนวนอนทำให้การเคลื่อนที่ไม่ขึ้นอยู่กับแรงลอยตัวจากน้ำเหล็กและแรงโน้มถ่วง การให้เทอร์โมคัปเปิลอยู่ในตำแหน่งตรงกันข้ามกับแท่งควอทซ์ ทำให้จุดศูนย์กลางความร้อนไม่เคลื่อนไปจากใจกลางงานหล่อ

2.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นตัวและการขยายตัว

การวิเคราะห์ข้อมูลเริ่มต้นจากการวิเคราะห์กราฟการเย็นตัวและกราฟการหดและขยายตัว เพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้นจึงคำนวณหาอัตราการเย็นตัว (dT/dt) และอัตราการหดและขยายตัว (dr/dt) เพื่อจะช่วยให้สามารถระบุจุดเริ่มต้นของการเกิดออสเทนไนต์และจุดเริ่มต้น สิ้นสุดการขยายตัวจากกราฟได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 อัตราการหดและขยายตัว (dr/dt) สามารถนำไปแปลงเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (dV/dt) จากความสัมพันธ์

ปริมาตรของงานหล่อทรงกลม $V = \frac{4}{3} \pi r^3$

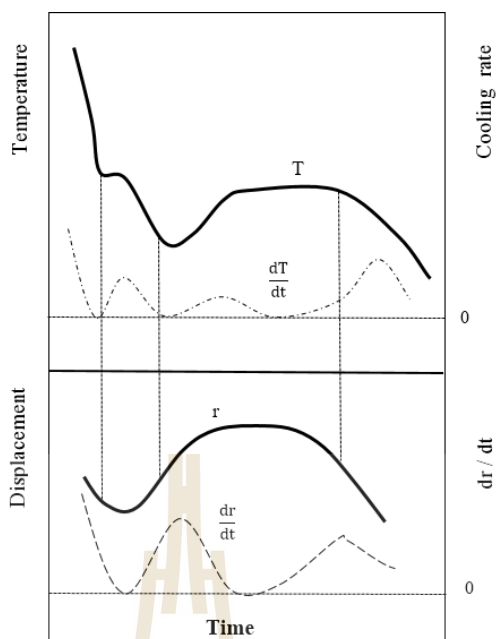
$$\text{ดังนั้น } \frac{dV}{dr} = 4\pi r^2$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dr} \frac{dr}{dt} = 4\pi r^2 \frac{dr}{dt}$$

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้จากการหดและขยายตัว การทราบอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสามารถนำไปใช้ในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงความดัน (ΔP) ระหว่างการแข็งตัวของโลหะได้จากความสัมพันธ์ของ Clausius - Clapeyron

$$(\Delta P) = \frac{\Delta H_f}{\Delta V T_m} \Delta T = \frac{\Delta H_f}{T_m} \frac{dT}{dV}$$

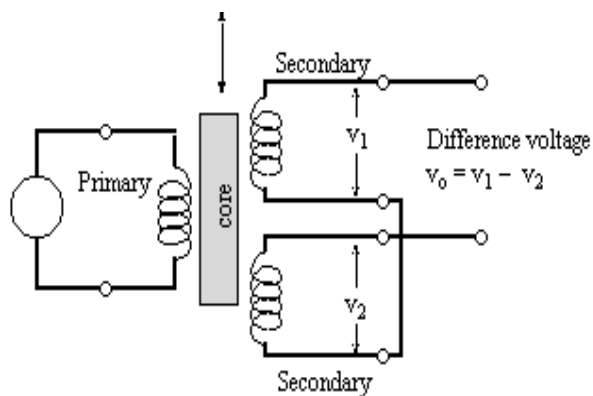
โดยที่ $\frac{dV}{dT} = \frac{dV}{dt} \frac{dt}{dT}$ และ ΔH_f คือ ค่าความร้อนแฝงจากการเปลี่ยนเฟส (Latent heat of fusion) การเปลี่ยนแปลงความดันระหว่างการแข็งตัวของโลหะสามารถนำไปทำนายโอกาสเกิดโพรงหดตัวระดับจุลภาคได้



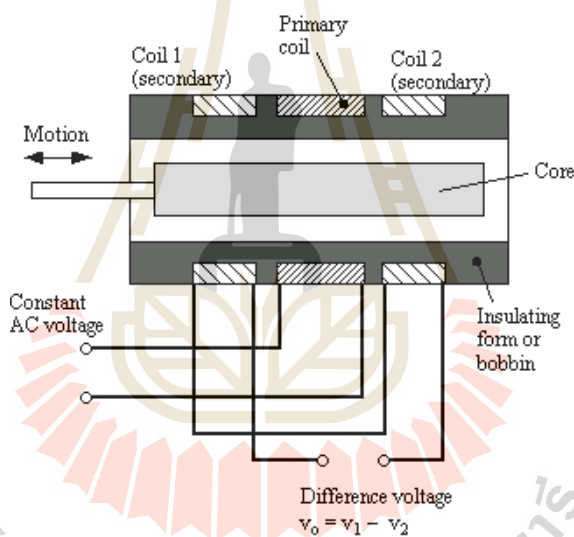
รูปที่ 2.18 อัตราการเย็นตัว (dT/dt) และอัตราการหดและขยายตัว (dr/dt)

2.5 เซ็นเซอร์ตำแหน่งเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer, LVDT)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ตำแหน่งเชิงเส้น (Line Variable Differential Transformer, LVDT) เข้ามาช่วยในการศึกษาพฤติกรรมการหดและขยายตัวระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อ โดยเซ็นเซอร์ตำแหน่งเชิงเส้น (LVDT) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่ใช้สำหรับวัดระยะทางสั้น ๆ ลักษณะวงจรของ LVDT แสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่ง LVDT ประกอบด้วยหม้อแปลง 3 ขด คือ ขดปฐมภูมิ (Primary) 1 ขด และขดทุติยภูมิ (Secondary) 2 ขด โดยทั้งสองขดจะมีทิศทางพันตรงข้ามกันทำให้มีเฟสตรงข้ามกันและมีแกน (Core) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้อีก 1 ตัว ถ้าหากแกน (Core) อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลาง แรงดันที่ขดทุติยภูมิ (Secondary) ทั้งสองจะเท่ากันและมีเฟสตรงข้าม ทำให้แรงดันรวมมีค่าเป็นศูนย์เมื่อแกน (Core) มีการเคลื่อนที่แรงดันที่ทุติยภูมิ (Secondary) ขดหนึ่งจะเพิ่มขึ้นในขณะที่อีกขดหนึ่งจะลดลง ทำให้แรงดันรวมขดทุติยภูมิ (Secondary) เกิดมีค่าขึ้นมาจะเป็นบวกหรือลบขึ้นอยู่กับทิศทางเคลื่อนที่ของแกน ส่วนขนาดของแรงดันจะขึ้นอยู่กับระยะทางที่แกนเคลื่อนที่ไปวงจรของ LVDT จะต่อเข้ากับวงจรเรกติไฟร์ทางเฟส (phase sensitive rectifier) จะได้เป็นแรงดันไฟตรงเพื่อนำไปประมวลผลต่อไปดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 วงจรพื้นฐาน Line Variable Differential Transformer, LVDT
(Automate process industry, www, 2012)



รูปที่ 2.20 ลักษณะการทำงาน Line Variable Differential Transformer, LVDT
(Automate process industry, www, 2012)

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1. เหล็กดิบ หรือที่นิยมเรียกกันว่า Pig iron เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเหล็กหล่อ โดยเหล็กดิบนั้นต้องมีขนาดที่เหมาะสมในการใส่ไปในเตาหลอม

3.1.2. เหล็กกล้า เป็นวัตถุดิบที่ช่วยในการลดปริมาณคาร์บอนของเหล็กหล่อหลอมเหลว กรณีที่เหล็กหล่อหลอมเหลวนั้นมีคาร์บอนเกินความต้องการ

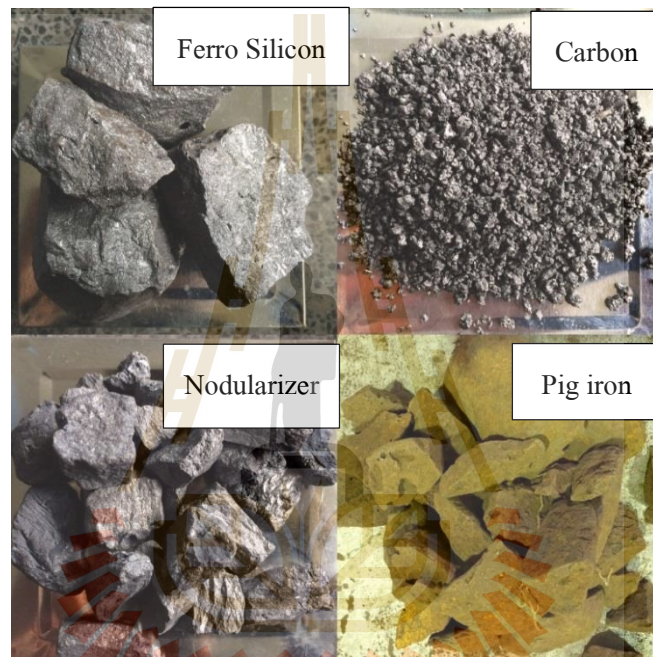
3.1.3. เฟอร์โร-ซิลิคอน เป็นวัตถุดิบที่เพิ่มปริมาณซิลิคอนในน้ำเหล็กที่มีปริมาณซิลิคอนต่ำกว่าที่ต้องการมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1

3.1.4. สาร โนดุลลาไรเซอร์ (Nodularizer) เป็นเฟอร์โรอัลลอยของ Fe-Si-Mg alloy ซึ่งเป็นวัตถุดิบในการเติมลงไปในการผลิตเหล็กหล่อหลอมเหลว เพื่อวัตถุประสงค์ในการเปลี่ยนรูปทรงของกราไฟต์จากรูปทรงแบบแผ่น (Flake graphite) เป็นรูปทรงกลม (Spheroidal graphite) หรือรูปทรงคล้ายตัวหนอน (Vermicular graphite) การเปลี่ยนรูปทรงกราฟไฟต์นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณแมกนีเซียม โดยเฟอร์โรอัลลอยมีส่วนผสมดังตารางที่ 3.1

3.1.5. ผงคาร์บอน เป็นวัตถุดิบที่เติมเพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนในเหล็กหล่อหลอมเหลวให้มีปริมาณคาร์บอนที่ต้องการ ผงคาร์บอนที่เติมมักมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไม่น้อยกว่า 99%

ตารางที่ 3.1 ปริมาณธาตุของเฟอร์โรซิลิกอนและปริมาณธาตุของสารโนดูลาไรเซอร์ (Fe-Si-Mg)

	Chemical Composition (%)								
	Fe	C	Si	P	S	Mg	Al	Ti	Sn
Ferro Silicon	Bal.	0.2 Max	75 Min	0.05	0.02 Max	-	1.5 Max	-	-
Nodularizer	Bal.	-	45	-	-	4.5	0.93	-	



รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เตาหลอมโลหะประเภทไฟฟ้ากระแสเหนี่ยวนำ (Electric Induction Furnaces) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทำให้น้ำเหล็กเกิดการหลอมเหลว ก่อนจะมีการเติมส่วนผสมอื่นลงไปให้น้ำเหล็กหลอมเหลว เพื่อให้ได้ส่วนผสมทางเคมีตามต้องการ โดยเตาหลอมมาพร้อมชุดควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ที่ 100 kVA ดังแสดงรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เตาหลอมและตัวควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้า

3.2.2 ชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ประกอบไปด้วยเทอร์โมคัปเปิลประเภท S ใช้ในการวัดอุณหภูมิในน้ำโลหะหลอมเหลวก่อนเทลงเบ้ารองรับน้ำโลหะ

3.2.3 เบ้ารองรับน้ำโลหะ (Ladle) เป็นเบ้าที่รองรับน้ำโลหะจากเตาหลอมโลหะ และเป็นที่ใช้ในการผสมสารโนดูลาไรเซอร์ (Nodularizer) ก่อนเทลงแบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

3.2.4 ชุดอุปกรณ์สำหรับชักตัวอย่างน้ำโลหะ ประกอบไปด้วยฐานแบบหล่อโลหะที่ทำด้วยโลหะทองแดงและเบ้ารองรับน้ำโลหะสำหรับชักตัวอย่าง ก่อนที่จะนำไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 เบ้ารองรับน้ำโลหะ (Ladle)



รูปที่ 3.4 ฐานแบบหล่อทำด้วยโลหะทองแดง



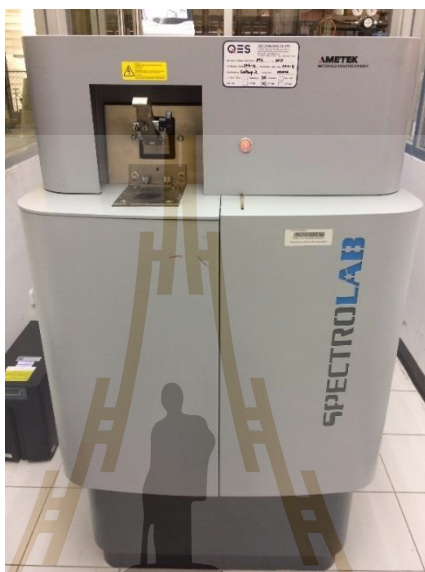
รูปที่ 3.5 เบ้ารองรับน้ำโลหะสำหรับชั่งตัวอย่าง

3.2.5 เครื่องชั่งน้ำหนัก สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องชั่งอยู่ 2 แบบด้วยกันคือเครื่องชั่งหยาบและเครื่องชั่งละเอียด สำหรับเครื่องชั่งหยาบจะใช้ชั่งเหล็กดิบ (Pig iron) ก่อนจะใส่ลงสู่เตาหลอมและเครื่องชั่งละเอียดนั้นจะชั่งวัตถุดิบสำหรับเติมลงสู่เตาหลอมเพื่อปรับส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบหยาบ (ซ้าย) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด (ขวา)

3.2.6 เครื่องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี หรือที่เรียกว่าสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) เป็นเครื่องในการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ในขณะที่ทำการหล่อหลอมและก่อนเทน้ำโลหะลงชิ้นงานหล่อ เพื่อตรวจสอบว่าส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะนั้นอยู่ในช่วงที่ต้องการการศึกษาหรือไม่ดังแสดงในรูปที่ 3.7



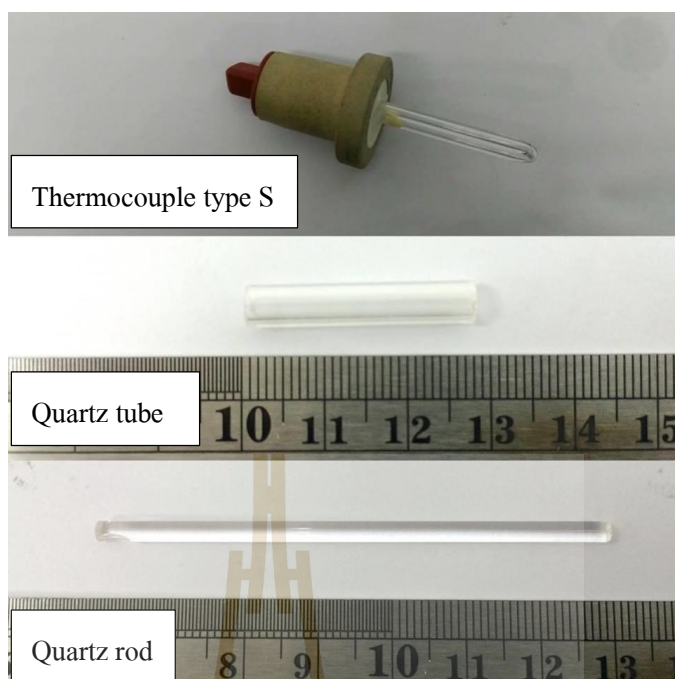
รูปที่ 3.7 เครื่องตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

3.2.7 อุปกรณ์สำหรับการวัดปริมาณการหดตัวและขยายตัวของเหล็กหล่อ ประกอบไปด้วย

3.2.7.1 เทอร์โมคัปเปิลประเภท S ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1700°C ซึ่งจะต่อเข้ากับระบบเก็บข้อมูล (Digital data acquisition system) แสดงรูปที่ 3.8

3.2.7.2 แท่งควอทซ์ (Quartz rod) และท่อควอทซ์ (Quartz tube) เป็นอุปกรณ์สำหรับใช้วัดระยะการเคลื่อนที่ของงานหล่อ โดยจะทำการเชื่อมต่อกับ Transducer แสดงรูปที่ 3.8

3.2.7.3 แบบหล่อทรายทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ผลิตด้วยเครื่องพิมพ์แบบหล่อ 3 มิติ โดยบริษัท สปีด ทรีดี โมเดล จำกัด ที่มีคลาดเคลื่อนของเครื่องพิมพ์แบบหล่ออยู่ที่ 0.002 มิลลิเมตร เป็นแบบหล่อทรายทรงกลมและเป็นแบบหล่อเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อแสดงรูปที่ 3.9

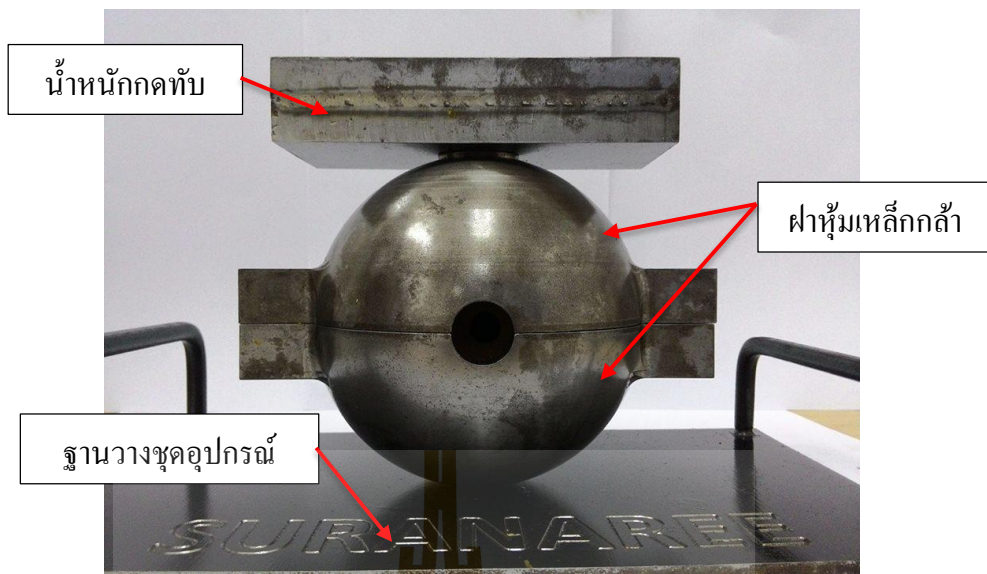


รูปที่ 3.8 อุปกรณ์สำหรับการวัดการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ

3.2.7.4 เปลือกหุ้มเหล็กกล้าฝานและฝาล่างพร้อมน้ำหนักกดทับ เป็นอุปกรณ์ในการห่อหุ้มแบบหล่อทรายทรงกลมเพื่อลดการขยายตัวของทรายแบบแสดงรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 แบบหล่อทรายทรงกลมสามมิติและเปลือกหุ้มเหล็กกล้า



รูปที่ 3.10 เปลือกหุ้มหุ้มเหล็กกล้าฝาบนและฝาล่างพร้อมด้วยน้ำหนักกดทับ

3.2.7.5 เซ็นเซอร์ตำแหน่งเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) หรือทรานสดิวเซอร์ (Transducer) คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากรูปแบบหนึ่งเป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถแปรผลออกมาเป็นค่าได้โดยต่อกับแท่งควอทซ์สำหรับวัดการหดและขยายตัว ซึ่งต่อเชื่อมกับตัวควบคุมและขยายสัญญาณ (Signal modulator) แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เซ็นเซอร์ตำแหน่งเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer, LVDT)

3.2.7.6 ระบบเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล (Digital data acquisition system) เป็นอุปกรณ์ในการเก็บระบบข้อมูลจาก Transducer และ Thermocouple ซึ่งตัวระบบเก็บข้อมูลนั้นจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กเพื่อแสดงผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 3.12

3.2.7.7 คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นจอแสดงผลการทดลองที่ได้มาจากระบบเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล



รูปที่ 3.12 ระบบเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล (Digital data acquisition system)

3.2.8 เครื่องวัดผิวชิ้นงาน สำหรับเตรียมผิวชิ้นงานในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค แสดงรูปที่ 3.13

3.2.9 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพร้อมอุปกรณ์การถ่ายภาพ ใช้ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างภายหลังการหล่อ ดังแสดงรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน



รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพร้อมชุดอุปกรณ์ถ่ายภาพ

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 ติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 3.15

3.3.2 หลอมเหล็กดิบ (Pig iron) ในเตาหลอมโลหะ เมื่อเหล็กดิบหลอมเหลวทำการปรุงส่วนผสมทางเคมีที่ต้องการ โดยควบคุมปริมาณธาตุซิลิกอนให้อยู่ในช่วง 2.5-2.8% หลังจากนั้นเติมวัตถุดิบให้ได้ส่วนผสมตามที่ต้องการศึกษาวิจัยโดยสรุปในตารางที่ 1.1

3.3.3 หลังจากทำการปรุงส่วนผสมทางเคมีเป็นที่เรียบร้อยแล้วทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี โดยใช้บารอมรับน้ำโลหะเทลงฐานแบบหล่อโลหะสำหรับตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrometer) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และคำนวณค่าคาร์บอนสมมูล (Carbon equivalent, CE) ให้ตรงกับเป้าหมายที่ต้องการ โดยหากน้ำโลหะมีปริมาณคาร์บอนที่มากเกินไปจะทำการเติมเหล็กกล้าเพื่อลดปริมาณคาร์บอนในน้ำเหล็ก หรือถ้ามีปริมาณซิลิกอนในน้ำโลหะมีมากจะต้องเติมเหล็กดิบเพื่อลดปริมาณซิลิกอน

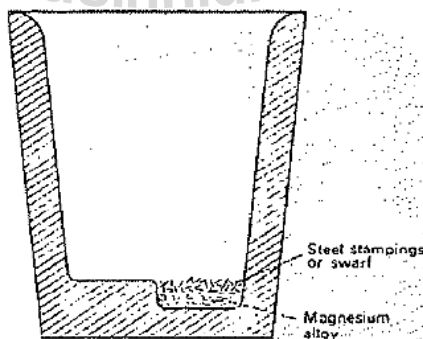


รูปที่ 3.15 การติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการวัดการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ



รูปที่ 3.16 การหล่อหลอมเหล็กดิบ (ซ้าย) และการเทน้ำโลหะเพื่อตรวจสอบสเปกโตรมิเตอร์ (ขวา)

3.3.4 กรณีสำหรับหล่อเหล็กหล่อเหนียวและเหล็กหล่อตัวหนอนจะต้องมีการทำแมกนีเซียมทริทเมนต์ โดยวิธี Sandwich method ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ประกอบด้วยเบ้ารองรับน้ำโลหะ ที่มีช่องกันสำหรับใส่ Nodularizer เมื่อถ่ายเทน้ำโลหะจากเตาหลอมสู่เบ้า น้ำเหล็กจะไหลทับโนดูลาไรเซอร์ (Nodularizer) ทำให้เกิดปฏิกิริยาส่วนใหญ่มักจะใช้เศษขี้กิ้งเหล็กกล้าคลุมทับโนดูลาไรเซอร์ (Nodularizer) เพื่อชะลอปฏิกิริยา



รูปที่ 3.17 การทำแมกนีเซียมทริทเมนต์ โดยวิธี Sandwich method [4]



รูปที่ 3.18 การทำแมกนีเซียมทรีทเมนต์ โดยวิธี Sandwich method

3.3.5 เมื่อปฏิบัติการในการทำแมกนีเซียมทรีทเมนต์ที่สิ้นสุด โดยจะทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีอีกครั้ง ก่อนที่ทำการถ่ายโอนน้ำโลหะจากเบ้าใหญ่ลงสู่เบ้ารองรับน้ำโลหะขนาดเล็กสำหรับแท่งงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 การถ่ายโอนน้ำโลหะลงสู่เบ้าขนาดเล็กก่อนแท่งงานวิจัย



รูปที่ 3.20 การเทน้ำโลหะลงชิ้นงานวิจัย

3.3.6 เมื่อเทน้ำโลหะลงสู่แบบหล่อเรียบร้อยแล้วทำการปิดฝา รอให้ชิ้นงานแข็งตัวและมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 800°C หลังจากนั้นทำการรื้อชิ้นงานและเก็บผลการทดลองแล้วนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 3.21 ชิ้นงานภายหลังการแข็งตัว

3.3.7 ทำการวัดขนาดชิ้นงานภายหลังการแข็งตัว เพื่อหาขนาดชิ้นงานภายหลังการหล่อที่เปลี่ยนแปลงไป โดยทำการวัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ โดยทำการวัดขนาดชิ้นงานทั้งหมด 10 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.22 ลักษณะชิ้นงานภายหลังการหล่อ



รูปที่ 3.23 การวัดชิ้นงานภายหลังการหล่อ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ส่วนผสมทางเคมี

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของอสเตนไนท์และขยายตัวของกราไฟต์จากปฏิกิริยาอุทกติกในเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภท ได้แก่เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหอน และเหล็กหล่อเหนียว โดยมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อ 3 ประเภท

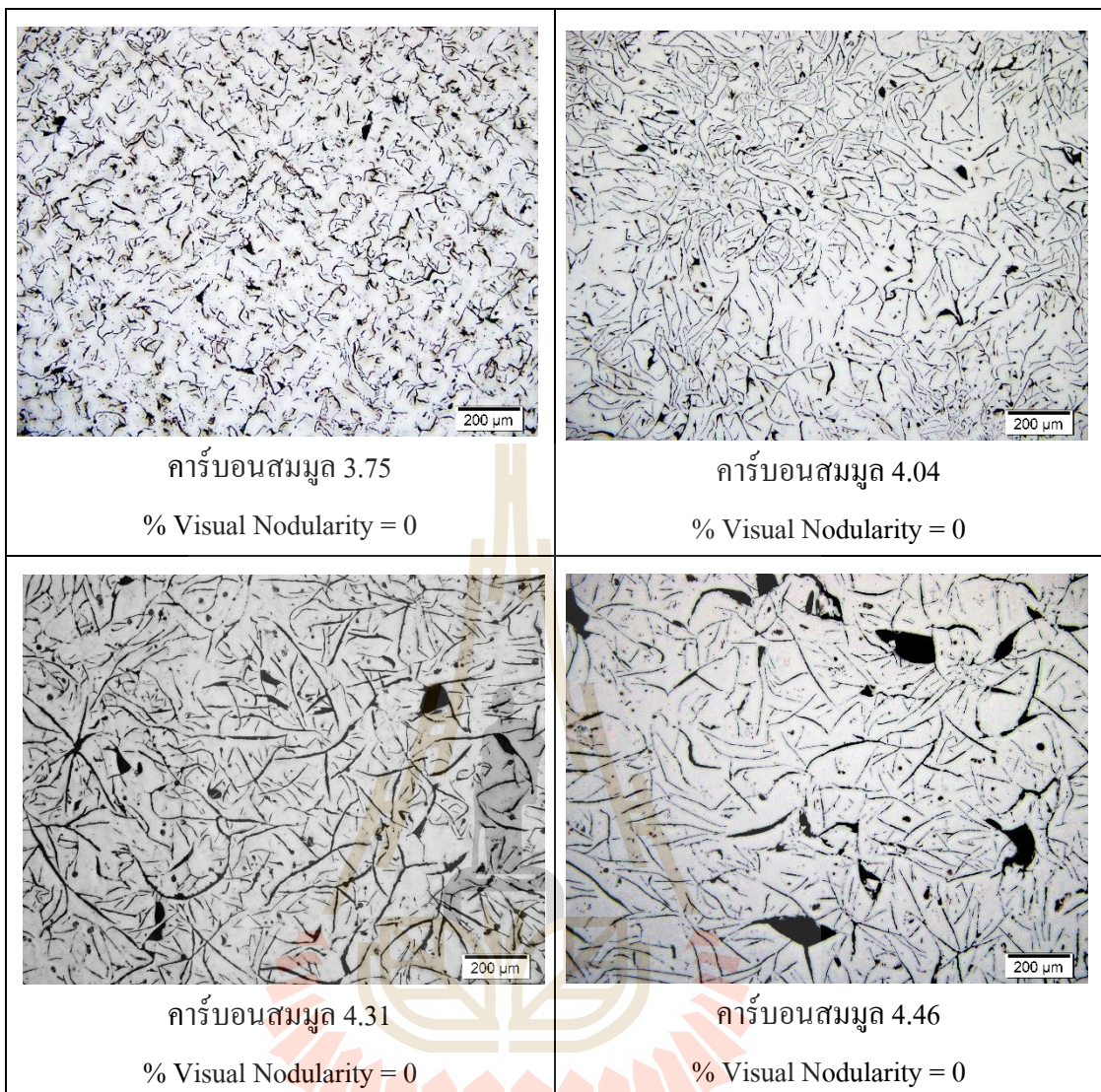
ประเภท	CE	ส่วนผสมทางเคมี (%)						
		C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu
เหล็กหล่อ เทา	3.75	2.88	2.61	0.067	0.031	0.016	<0.001	0.011
	4.04	3.19	2.56	0.050	0.000	0.102	<0.001	0.007
	4.26	3.40	2.58	0.036	<0.0002	<0.0002	<0.001	<0.0015
	4.46	3.63	2.50	0.038	0.035	0.021	<0.001	0.007
เหล็กหล่อ กราไฟต์ ตัวหอน	3.71	2.81	2.71	0.094	0.029	0.033	0.025	0.011
	4.13	3.24	2.67	0.049	0.037	0.022	0.014	0.007
	4.30	3.42	2.64	0.028	0.036	0.014	0.008	0.005
	4.48	3.59	2.66	0.027	0.043	0.026	0.009	0.004
เหล็กหล่อ เหนียว	3.75	2.75	3.02	0.095	0.036	0.015	0.067	0.013
	4.05	3.04	3.02	0.070	0.030	0.009	0.070	0.012
	4.34	3.48	2.60	0.095	0.036	0.015	0.067	0.013
	4.56	3.70	2.59	0.051	0.202	0.000	0.008	0.008

4.1.2 โครงสร้างจุลภาค

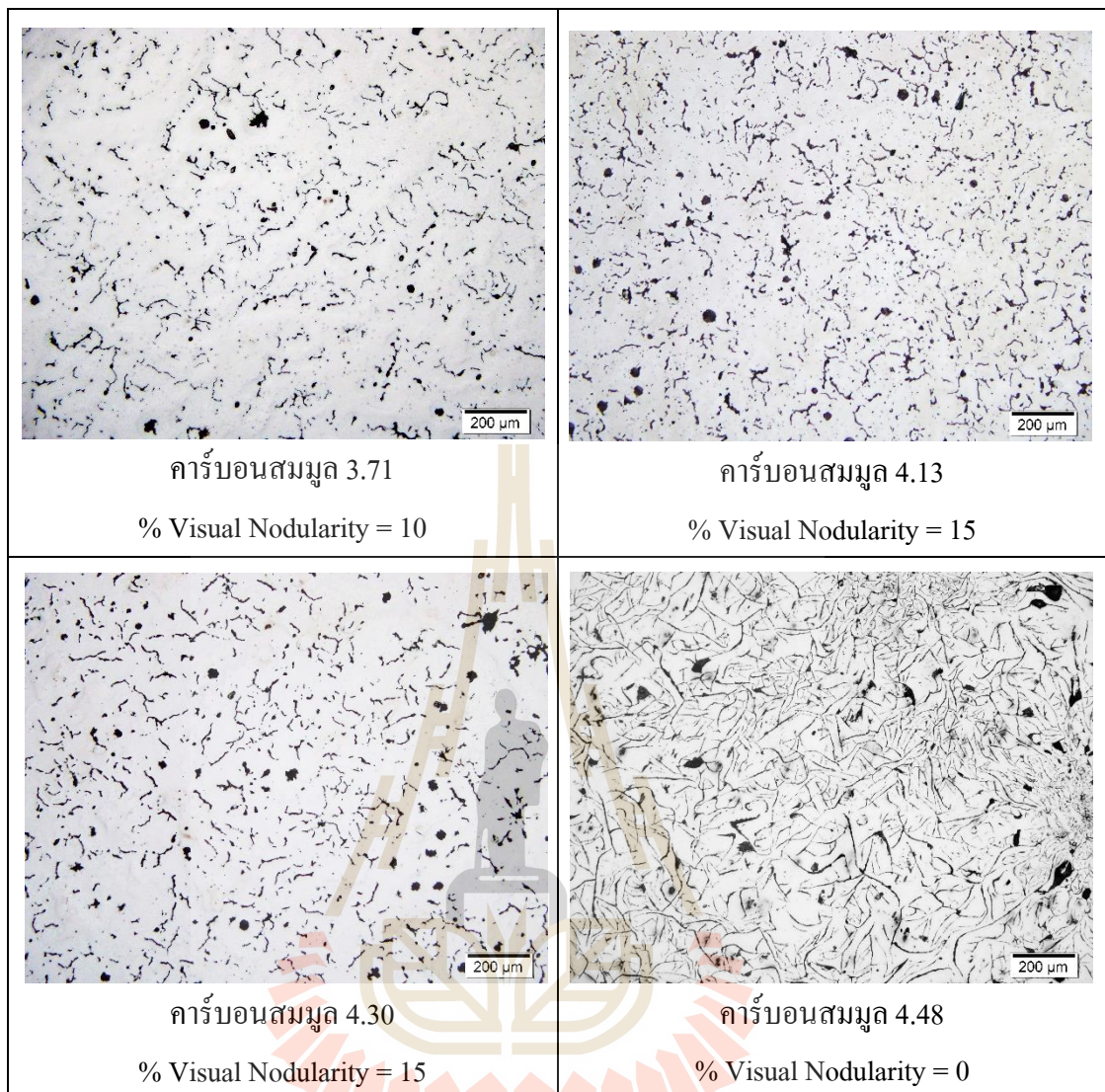
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคเป็นการตรวจสอบลักษณะของกราฟไฟต์ที่เกิดขึ้นภายหลังการหล่อโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) จากรูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทาที่แสดงให้เห็นลักษณะกราฟไฟต์แบบแผ่น (Flake graphite) ที่ไม่มีการเติมธาตุแมกนีเซียม (Mg) โดยปริมาณกราฟไฟต์เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น และพบว่าการเติมธาตุแมกนีเซียม (Mg) มีผลต่อการฟอร์มรูปทรงกราฟไฟต์

เหล็กหล่อกราฟไฟต์ตัวหนอน (Compacted graphite) แสดงรูปที่ 4.2 มีการเติมธาตุแมกนีเซียม (Mg) ประมาณ 0.009 – 0.015% ทำให้เกิดการฟอร์มกราฟไฟต์จากลักษณะแบบแผ่น (Flake graphite) เป็นรูปทรงคล้ายตัวหนอน (Compacted graphite) โดยโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อกราฟไฟต์ตัวหนอนนั้นจะมีกราฟไฟต์เม็ดกลมได้ไม่เกิน 20% ในโครงสร้างจุลภาคและ 80% เป็นกราฟไฟต์ตัวหนอน และจากรูปที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อกราฟไฟต์ตัวหนอนที่มีคาร์บอนสมมูล 4.48 จะเห็นได้ว่ากราฟไฟต์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแบบแผ่น (Flake graphite) สันนิษฐานว่าการที่ได้กราฟไฟต์แบบแผ่นนั้น อาจเกิดจากเติมสารโนดูลาไรเซอร์ (Nodularizer) ในปริมาณที่น้อยและอุณหภูมิในการเทค่อนข้างสูง อาจส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียธาตุแมกนีเซียมระหว่างขั้นตอนการทำแมกนีเซียมทรีทเมนต์ ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมที่เติมลงไปไม่เพียงพอที่จะทำให้กราฟไฟต์แบบแผ่นเกิดการฟอร์มเป็นกราฟไฟต์ตัวหนอน

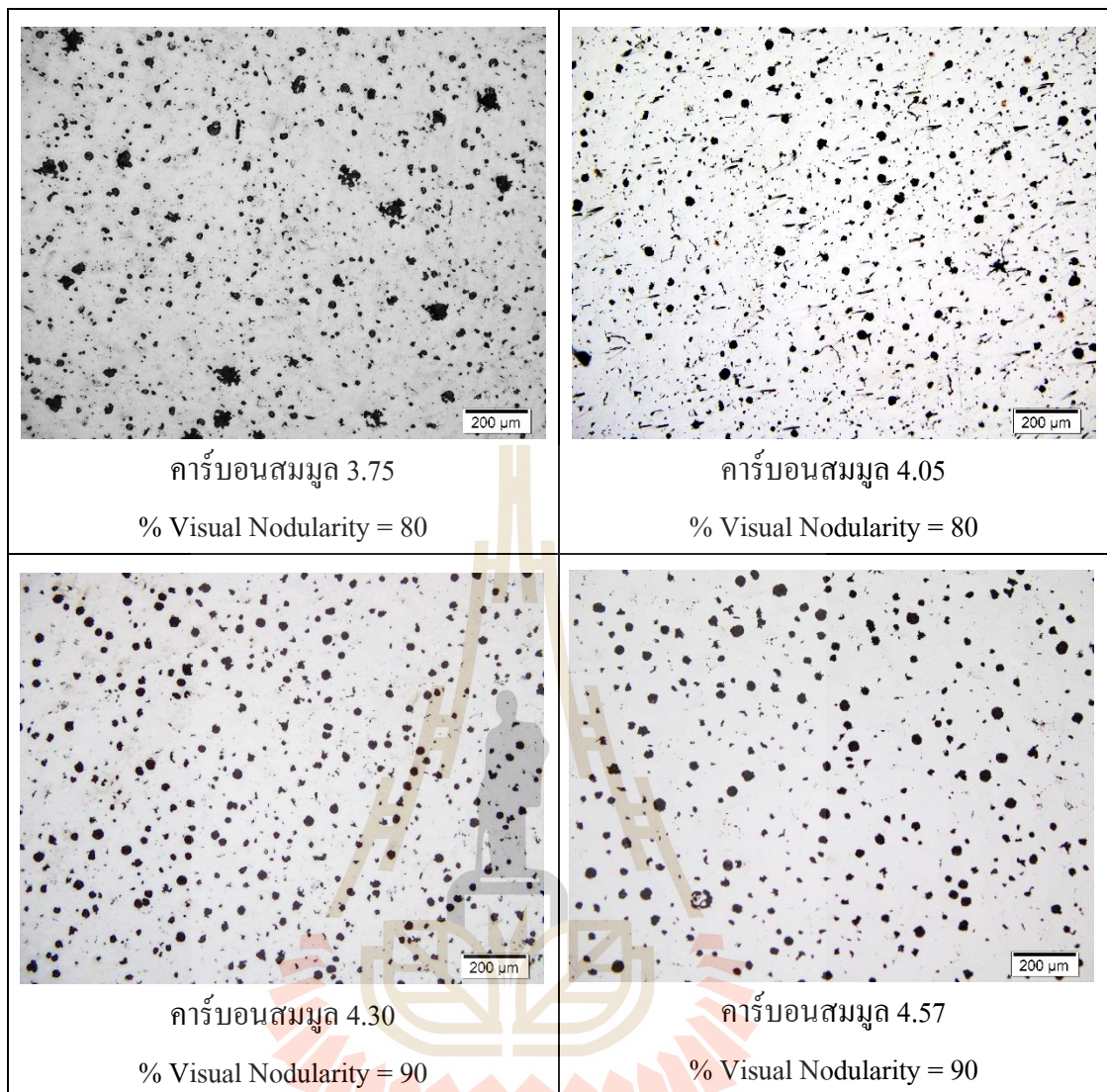
เหล็กหล่อเหนียวมีการเติมธาตุแมกนีเซียมประมาณ 0.02 – 0.08 % จะทำให้ฟอร์มกราฟไฟต์เป็นเม็ดกลม (Nodule graphite) โดยมาตรฐาน ASTM A247-10 ต้องมีความกลมของกราฟไฟต์ (Nodularity) มากกว่า 80% แสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเทาที่คาร์บอนผสมแตกต่างกัน



รูปที่ 4.2 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนที่คาร์บอนผสมแตกต่างกัน



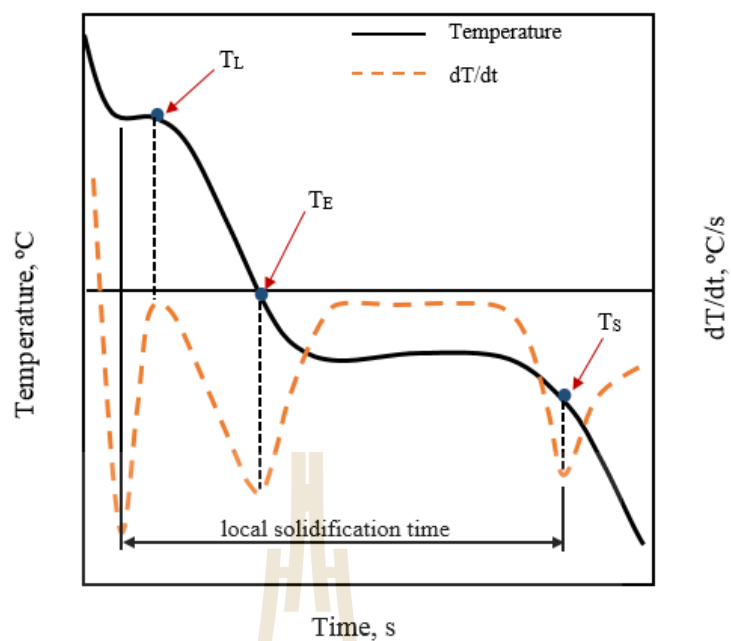
รูปที่ 4.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อเหนียวที่คาร์บอนผสมแตกต่างกัน

4.1.3 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัว และระยะการเคลื่อนที่

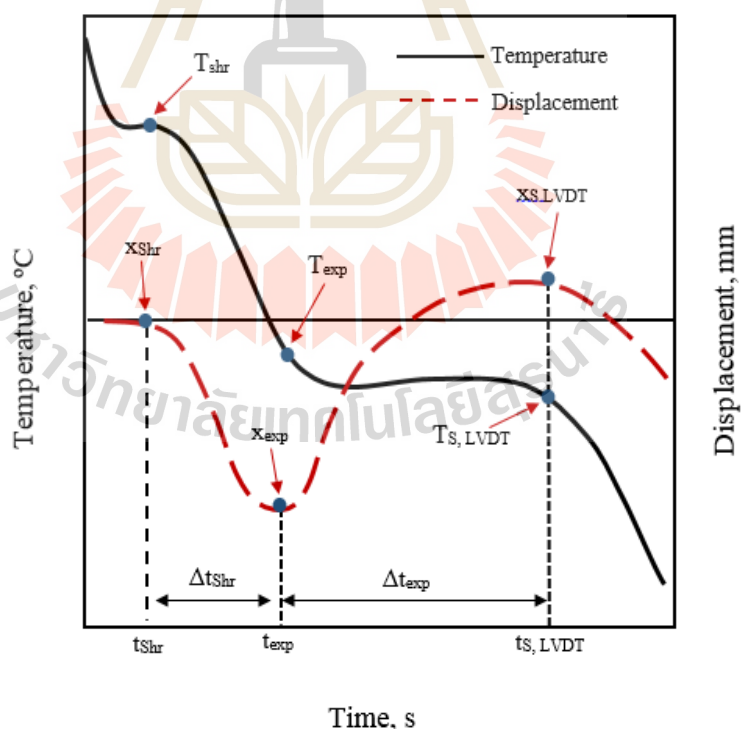
หัวข้อนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นตัวและกราฟการหดและขยายตัวเพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้นจึงกำหนดหาอัตราการเย็นตัว (dT/dt) เพื่อจะช่วยให้สามารถระบุจุดเริ่มต้นการเกิดออสเตนไนท์และจุดเริ่มต้น สิ้นสุดการขยายตัวของกราไฟต์ แสดงในรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.2 สัญลักษณ์ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ

วิเคราะห์การเคลื่อนที่เชิงเส้น		
สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T_{shr}	อุณหภูมิที่เริ่มเกิดออสเตนไนท์	°C
T_{exp}	อุณหภูมิที่เริ่มเกิดกราไฟต์	°C
$T_{S,LVDT}$	อุณหภูมิสุดท้ายของการแข็งตัว ระบุโดย LVDT	°C
x_{shr}	การเคลื่อนที่เริ่มต้นของการเกิดการหดตัวของออสเตนไนท์	mm
x_{exp}	การเคลื่อนที่เริ่มต้นของการเกิดการขยายตัวของกราไฟต์	mm
$x_{S,LVDT}$	การเคลื่อนที่ ณ จุดสุดท้ายของการแข็งตัว ระบุโดย LVDT	mm
Δx_{shr}	ระยะการหดตัวของออสเตนไนท์ ($x_{exp} - x_{shr}$)	mm
Δx_{exp}	ระยะการขยายตัวของกราไฟต์ ($x_{S,LVDT} - x_{exp}$)	mm
t_{shr}	เวลาเริ่มต้นของการเกิดการหดตัวของออสเตนไนท์	s
t_{exp}	เวลาเริ่มต้นของการเกิดการขยายตัวของกราไฟต์	s
$t_{S,LVDT}$	เวลาสุดท้ายของการแข็งตัว ระบุโดย LVDT	s
Δt_{shy}	เวลาทั้งหมดที่เกิดการหดตัวของออสเตนไนท์	s
Δt_{exp}	เวลาทั้งหมดที่เกิดการขยายตัวของกราไฟต์	s
Δt_{total}	เวลาทั้งหมดในการแข็งตัว	s
วิเคราะห์กราฟการเย็นตัว		
สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T_L	อุณหภูมิลิควิดัส	°C
T_E	อุณหภูมิเริ่มต้นการแข็งตัวที่ปฏิริยายุทธคติ	°C
T_S	อุณหภูมิสุดท้ายของการแข็งตัวที่ปฏิริยายุทธคติ	°C



รูปที่ 4.4 แนวคิดความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นตัวและอัตราการเย็นตัว



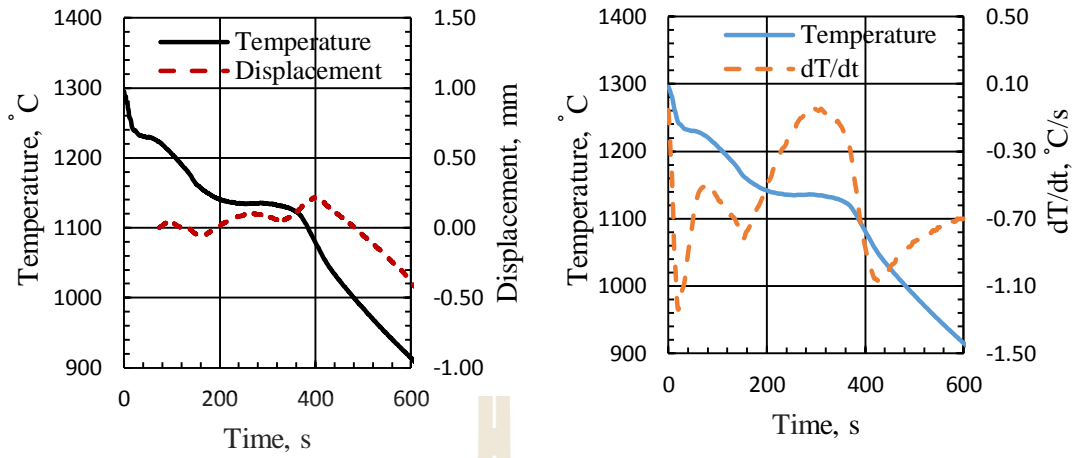
รูปที่ 4.5 แนวคิดความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของ LVDT

พฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อสามารถอธิบายได้จากรูปที่ 4.5 โดยแสดงแนวคิดความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อประเภทไฮโปยูเทคติก (Hypo-Eutectic) และระยะการเคลื่อนที่ของ LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ทำให้สามารถอธิบายพฤติกรรมการหดตัวและขยายตัวของเหล็กหล่อได้

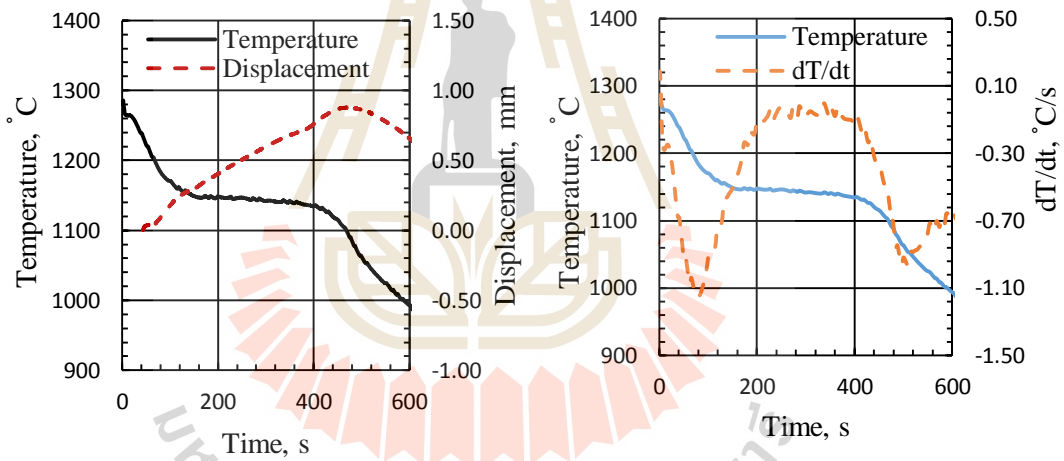
กรณีของเหล็กหล่อประเภทไฮโปยูเทคติก (Hypo-Eutectic) ช่วงแรกของการเย็นตัว น้ำโลหะหลอมเหลวมีอุณหภูมิลดต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (Liquidus Temperature, T_L) ซึ่งจะเริ่มเกิดของแข็งแรกคือออสเตนไนต์ (x_{shr}) โดยออสเตนไนต์ที่เกิดขึ้นนั้นจะไปยึดจับแท่งควอทซ์ที่ต่อเข้ากับ LVDT ทำให้แท่งควอทซ์ถูกดึงเข้าไปในตัวชิ้นงานและค่าเคลื่อนที่ที่คิดลบหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเกิดการหดตัวของออสเตนไนต์ หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิน้ำโลหะเข้าใกล้อุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature, T_E) จะเริ่มเกิดกราฟไฟต์จากปฏิกิริยายูเทคติกขึ้น (x_{exp}) และระยะการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์จะเริ่มมีค่าเป็นบวกมากขึ้นหรือเกิดการขยายตัวของกราฟไฟต์ การขยายตัวของกราฟไฟต์นั้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และจะสิ้นสุดการขยายตัวหลังสิ้นสุดปฏิกิริยายูเทคติก ($x_{s,LVDT}$) โดยสามารถหาปริมาณการหดตัวของออสเตนไนต์และการขยายตัวของกราฟไฟต์ได้จาก $(x_{shr} - x_{exp})$, $(x_{exp} - x_{s,LVDT})$ ตามลำดับ โดยปริมาณการหดตัวของออสเตนไนต์ ขึ้นอยู่กับความห่างของเส้นอุณหภูมิหลอมเหลว (T_L) กับอุณหภูมิยูเทคติก (T_E) ถ้าเหล็กหล่อมีความห่างของอุณหภูมิ ($T_L - T_E$) มากจะทำให้พบปริมาณการหดตัวจากออสเตนไนต์เพิ่มขึ้น

กรณีเหล็กหล่อส่วนผสมยูเทคติก อาจจะไม่พบการหดตัวของออสเตนไนต์ เนื่องจากมีเพียงการขยายตัวของกราฟไฟต์จากปฏิกิริยายูเทคติก

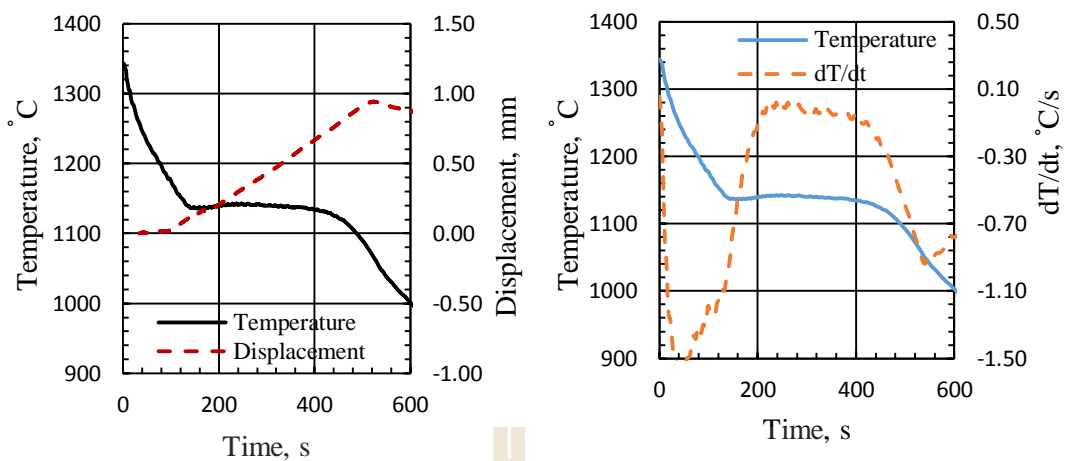
กรณีเหล็กหล่อส่วนผสมไฮเปอร์ยูเทคติกช่วงแรกอาจจะไม่พบปริมาณการหดตัวของออสเตนไนต์และการขยายตัวของกราฟไฟต์ที่เกิดในช่วงแรก เป็นผลมาจากการแข็งตัวแบบ Mushy และอาจจะพบปริมาณการขยายตัวของกราฟไฟต์ เมื่ออุณหภูมิน้ำโลหะเข้าใกล้อุณหภูมิยูเทคติก แต่การขยายตัวค่อนข้างสูงและเป็นเวลานาน ผลมาจากการเกิดกราฟไฟต์ในช่วงแรก (primary graphite)



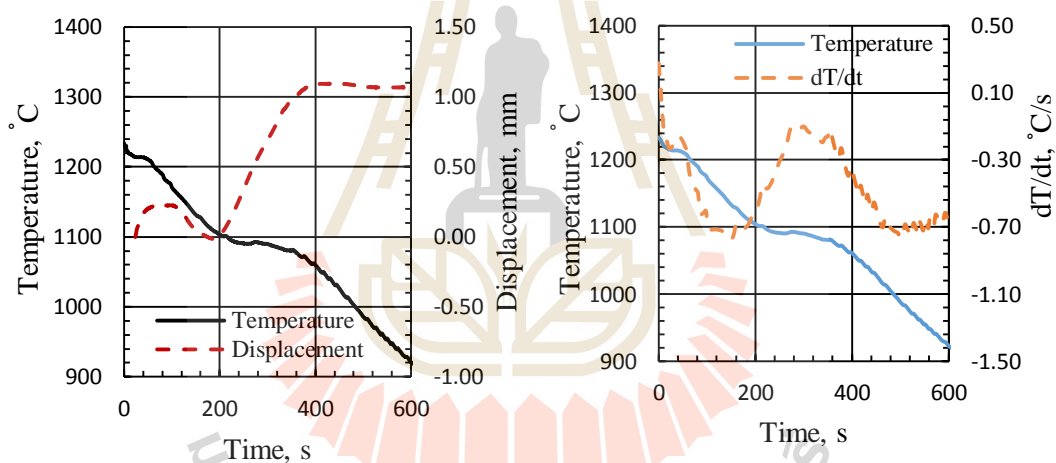
รูปที่ 4.6 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อเทา (CE 3.71)



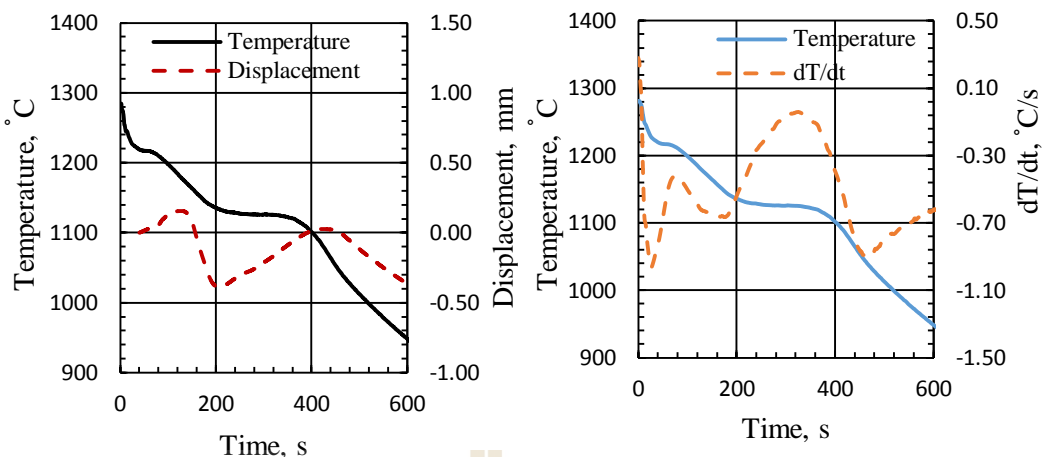
รูปที่ 4.7 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อเทา (CE 4.04)



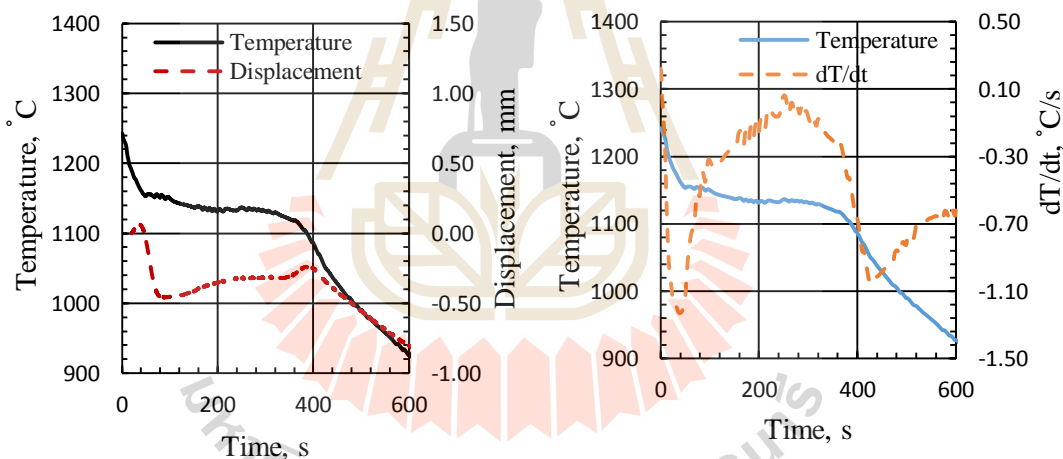
รูปที่ 4.8 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อเทา (CE 4.26)



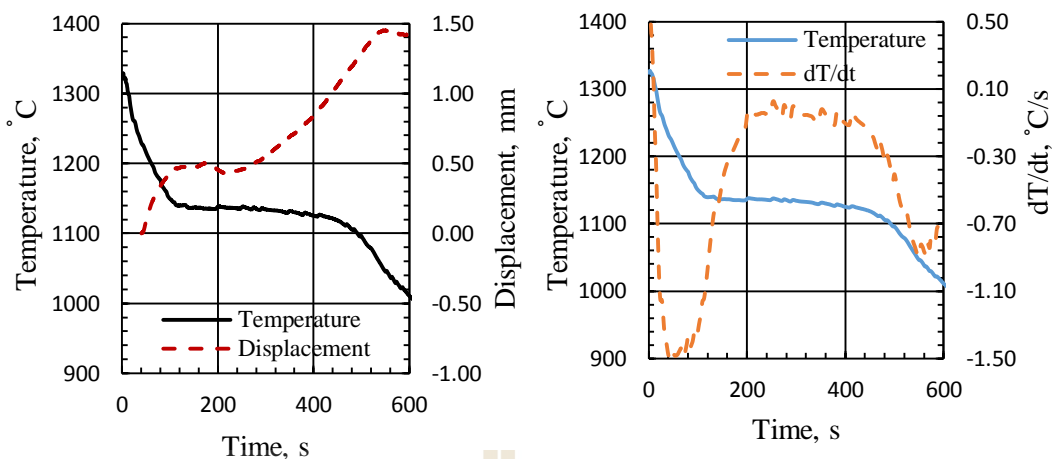
รูปที่ 4.9 กราฟการเย็นตัว อัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อเทา (CE 4.46)



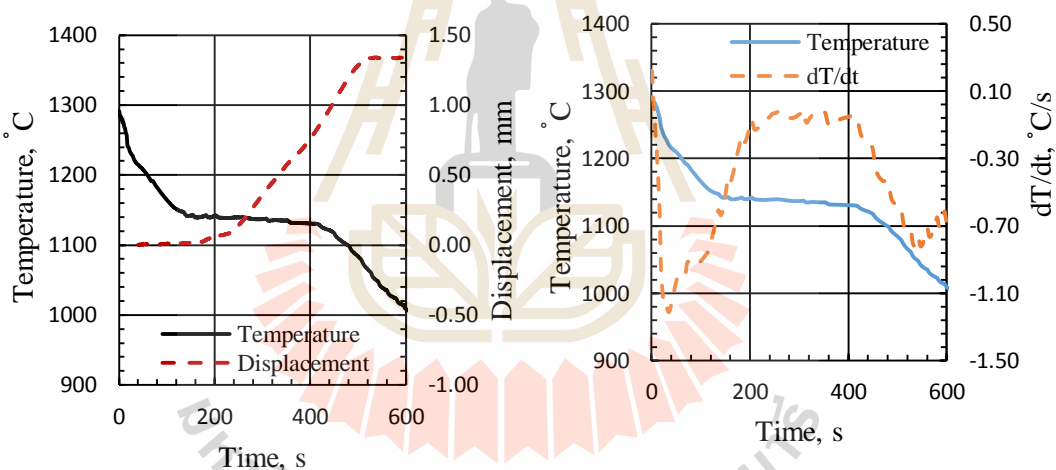
รูปที่ 4.10 กราฟการขึ้นตัวอัตราการขึ้นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อ
กราฟไฟต์ตัวหนอน (CE 3.71)



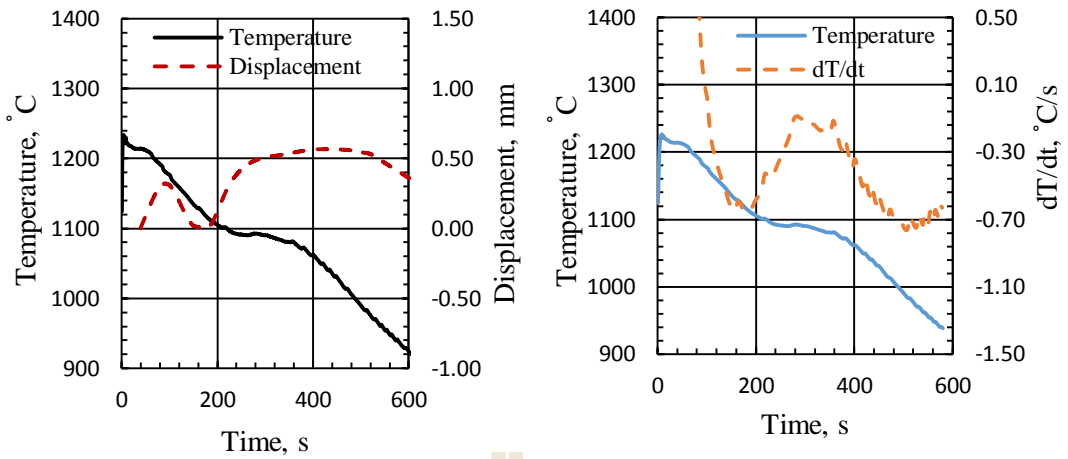
รูปที่ 4.11 กราฟการขึ้นตัวอัตราการขึ้นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อ
กราฟไฟต์ตัวหนอน (CE 4.13)



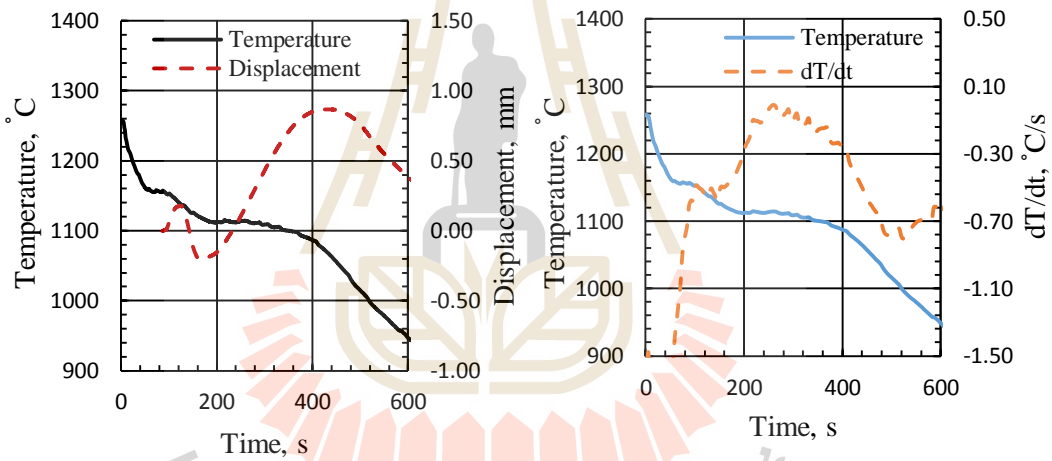
รูปที่ 4.12 กราฟการเย็นตัวอัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อ
กราฟไฟต์ตัวหนอน (CE 4.30)



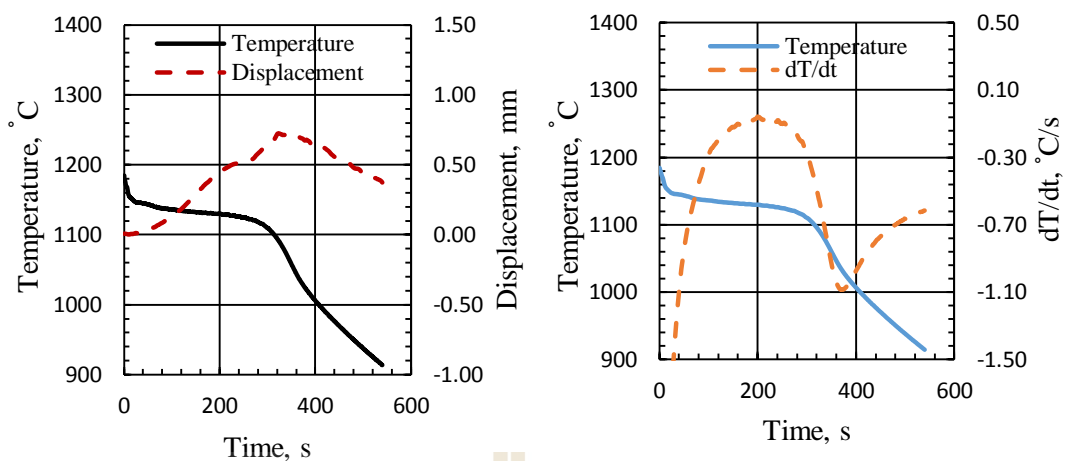
รูปที่ 4.13 กราฟการเย็นตัวอัตราการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อ
กราฟไฟต์ตัวหนอน (CE 4.48)



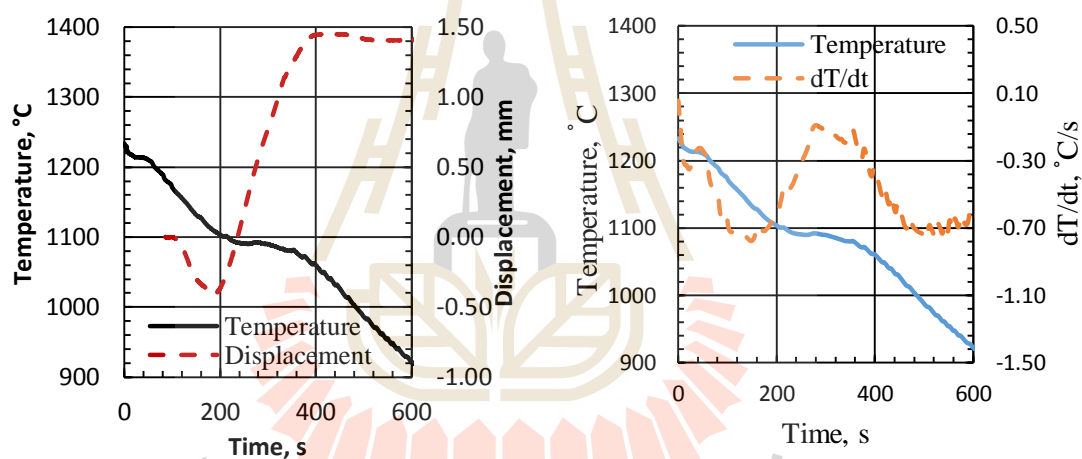
รูปที่ 4.14 กราฟการขึ้นตัวอัตราการขึ้นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อเหนียว (CE 3.75)



รูปที่ 4.15 กราฟการขึ้นตัวอัตราการขึ้นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อเหนียว (CE 4.05)



รูปที่ 4.16 กราฟการขึ้นตัวอัตราการขึ้นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อเหนียว (CE 4.34)



รูปที่ 4.17 กราฟการขึ้นตัวอัตราการขึ้นตัวและระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อเหนียว (CE 4.57)

4.2 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อพฤติกรรมกรรมการหดตัวของออสเตนไนท์และขยายตัวของกราไฟต์

4.2.1 อิทธิพลของคาร์บอนสมมูล

จากข้อมูลผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของคาร์บอนสมมูลที่มีผลต่อพฤติกรรมกรรมการหดตัวของออสเตนไนท์และขยายตัวของกราไฟต์ จะเห็นว่าเหล็กหล่อที่มีค่าคาร์บอนสมมูลน้อยกว่า 4.3 (ไฮโปยูเทคติก) จะให้ปริมาณการขยายตัวจากกราไฟต์และเวลาในการขยายตัวจากกราไฟต์น้อย เนื่องจากมีความห่างของเส้นอุณหภูมิวิกฤต (T_L) และอุณหภูมิยูเทคติก (T_E) มาก ทำให้เกิดของแข็งออสเตนไนท์มากกว่ากราไฟต์ นอกจากนี้มีช่วงเวลาที่เกิดการขยายตัวของกราไฟต์สั้น (Δt_{exp}) เนื่องจากมีปฏิกริยายูเทคติกน้อย เมื่อเทียบกับเหล็กหล่อส่วนผสมยูเทคติก พบว่ามีช่วงเวลาที่เกิดการขยายตัวของกราไฟต์นาน ส่งผลให้มีปริมาณการขยายตัวจากกราไฟต์มากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น

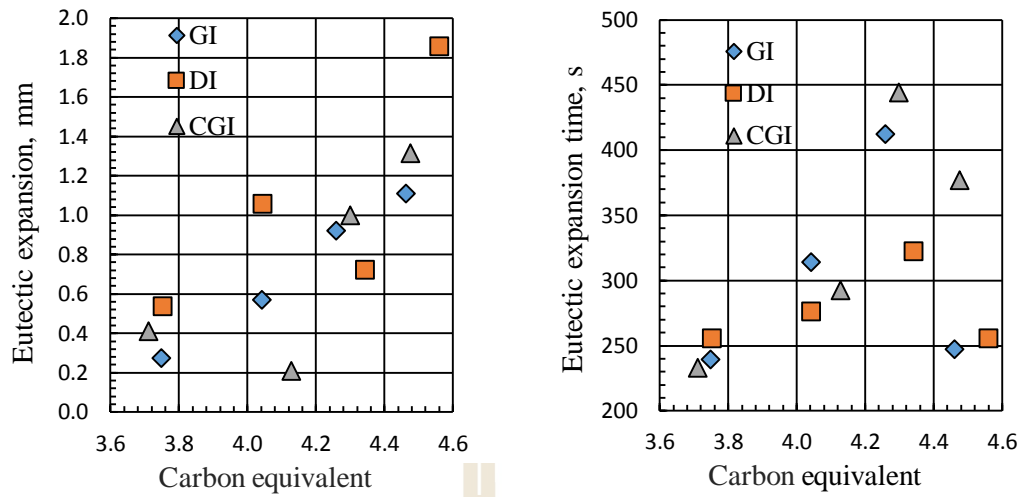
อย่างไรก็ดีในกรณีของเหล็กหล่อที่มีค่าคาร์บอนสมมูลมากกว่า 4.3 (ไฮเปอร์ยูเทคติก) พบปริมาณการขยายตัวจากกราไฟต์มาก แต่กลับพบช่วงเวลาที่เกิดการขยายตัวจากกราไฟต์ที่สั้น สันนิษฐานว่าช่วงแรกที่อุณหภูมิของน้ำโลหะต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_L) กราไฟต์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรก (primary graphite) ไม่สามารถจับยึดแก่ทองหล่อได้ เนื่องจากเหล็กหล่อไฮเปอร์ยูเทคติกมีการแข็งตัวแบบ Mushy ทำให้ไม่สามารถวัดปริมาณการขยายตัวของกราไฟต์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกได้ ทำให้ช่วงเวลาที่เกิดการขยายตัวของกราไฟต์สั้น (Δt_{exp}) กว่าเหล็กหล่อส่วนผสมยูเทคติก แต่จะมีปริมาณการขยายตัวจากกราไฟต์ที่มาก เป็นผลมาจากกราไฟต์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรก (primary graphite) ทำให้มีปริมาณการขยายตัวจากกราไฟต์สูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Stefanescu (2012) [18] ที่ได้ให้ข้อสรุปเกี่ยวกับคาร์บอนสมมูลว่าเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนสมมูลเพิ่มขึ้นจะมีปริมาณการขยายตัวสูงขึ้นและมีเวลาในการขยายตัวนาน หลังจากนั้นได้มีงานวิจัย Dioszegi (2013) [11] ที่มีความน่าสนใจคือไม่พบการหดตัวของออสเตนไนท์ในทุกเงื่อนไขการทดลองอาจเป็นผลมาจากเหล็กหล่อมีคาร์บอนสมมูล 4.1 ซึ่งใกล้เคียงกับส่วนผสมยูเทคติก จึงไม่เกิดการหดตัวของออสเตนไนท์ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังมีข้อสังเกตคือการออกแบบที่ให้ชิ้นงานเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและยาว 350 มิลลิเมตร ที่แสดงให้เห็นปริมาณการหดและขยายตัวขึ้นอยู่กับทิศทาง ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่ออกแบบให้ชิ้นงานเป็นรูปทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 มิลลิเมตร ที่ให้การเย็นตัวเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน

อย่างไรก็ดีจากรูปที่ 4.20, 4.21 และ 4.22 ที่แสดงระยะการเคลื่อนที่ภายหลังการแข็งตัวของเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภท จะเห็นได้ว่าค่าคาร์บอนสมมูลที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้ความชันของระยะการเคลื่อนที่ภายหลังการแข็งตัวน้อยลง โดยสันนิษฐานว่าเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนสมมูลมาก

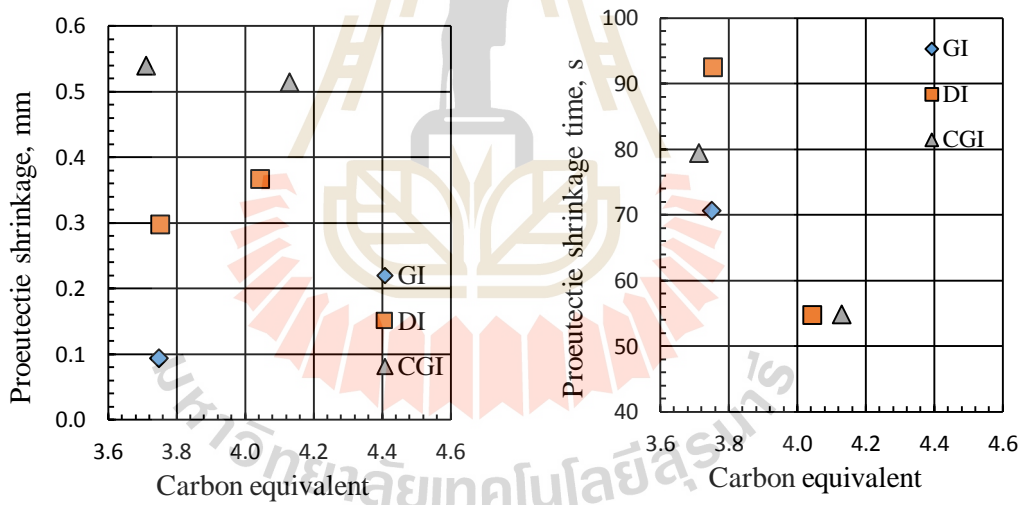
จะเกิดปฏิกิริยาอุทกติกมาก ทำให้มีปริมาณการขยายตัวของกราฟไฟต์สูง และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของกราฟไฟต์ (0.0000079 K^{-1}) มีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเหล็ก (0.000015 K^{-1}) เมื่อภายหลังการแข็งตัวขึ้นงานเกิดการหดตัวอย่างช้า ๆ จากสมการเชิงเส้น $y = mx + c$ โดย m คือความชันของระยะการเคลื่อนที่ภายหลังการแข็งตัว นอกจากนี้รูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงขนาดของขึ้นงานภายหลังแข็งตัวโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยกำหนดให้ขนาดขึ้นงานเริ่มต้นเท่ากับ 0 อย่างไรก็ตามก็สังเกตเห็นได้ว่าเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนผสมมากกว่า 4.3 จะให้ขนาดขึ้นงานภายหลังการแข็งตัวที่ใหญ่ขึ้นกว่าขึ้นงานเริ่มต้น 0.03 – 0.18% อาจเกิดจากการที่มีแรงดันและการขยายตัวของกราฟไฟต์จากปฏิกิริยาอุทกติกค่อนข้างสูง ทำให้ไม่สามารถทำให้แบบหล่อทรายรักษามิติของขึ้นงานและแรงดันไว้ได้ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อเกิดความเสียหาย โดยขนาดขึ้นงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นยังแสดงให้เห็นผลของคาร์บอนผสม แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแบบหล่อทรายยังไม่มีความแข็งแรงมากพอที่จะรับแรงดันที่เกิดจากการขยายตัวของกราฟไฟต์ประเภทเหล็กหล่อไฮเปอร์ยูทกติกได้

ก่อนหน้านี้ได้มีงานวิจัย Gedeonova (1995) ที่ศึกษาผลการใช้และไม่ใช้หีบแบบหล่อเพื่อลดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อ และสรุปได้ว่าการใช้หีบแบบหล่อนั้นสามารถลดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อได้ และการใช้แบบหล่อที่มีความแข็งแรงจะมีประโยชน์มาก เนื่องจากจะช่วยรักษามิติของขึ้นงานและแรงดันกราฟไฟต์ไว้ได้ งานวิจัยนี้ยังยืนยันข้อสรุปของ Gedeonova

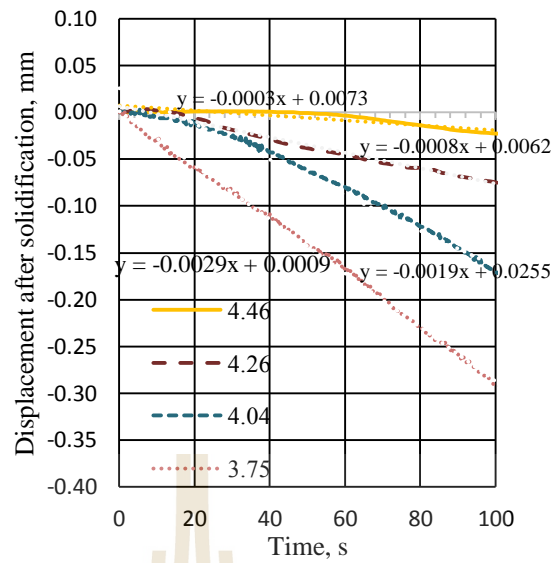




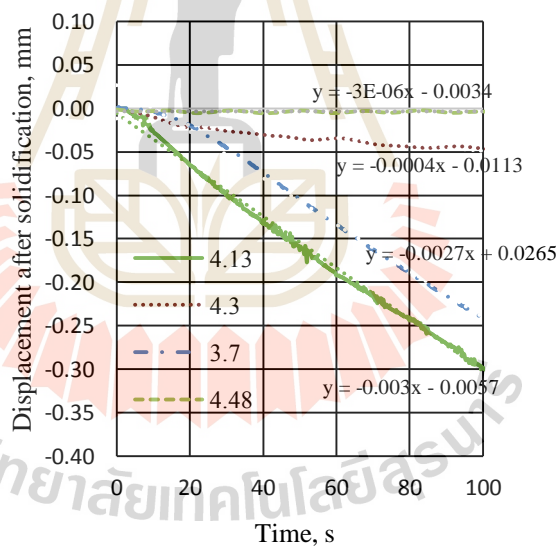
รูปที่ 4.18 อิทธิพลของคาร์บอนสมมูลที่มีผลต่อการขยายตัวของกราฟไฟต์ (ขวา) และช่วงเวลาการขยายตัวของกราฟไฟต์ (ซ้าย)



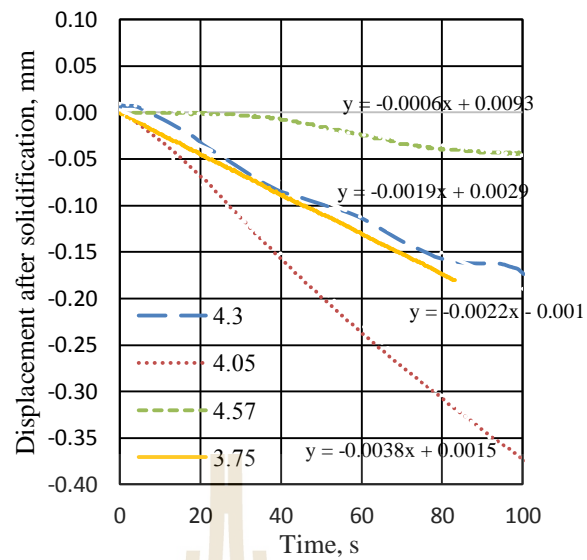
รูปที่ 4.19 อิทธิพลของคาร์บอนสมมูลที่มีต่อการหดตัวเนื่องจากออสเทนไนท์ (ขวา) และช่วงเวลาการหดตัวออสเทนไนท์ (ซ้าย)



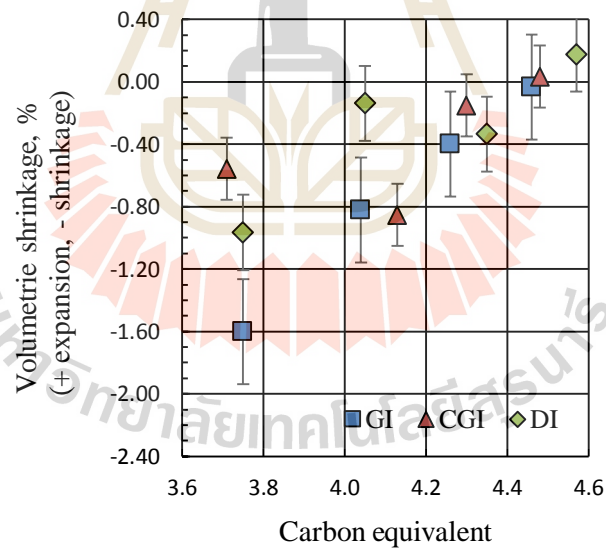
รูปที่ 4.20 การเคลื่อนที่ภายหลังการแข็งตัวของเหล็กหล่อเทาที่คาร์บอนสมมูลไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.21 การเคลื่อนที่ภายหลังการแข็งตัวของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนที่คาร์บอนสมมูลไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.22 การเคลื่อนที่ภายหลังจากแข็งตัวของเหล็กหล่อเหนียวที่คาร์บอนสมมูลไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดชิ้นงานภายหลังจากแข็งตัวกับคาร์บอนสมมูลของเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภท

4.2.2 อิทธิพลของรูปทรงกราฟไฟต์

จากผลการทดลองที่ได้แสดงในรูป 4.18 และ 4.19 ก่อนหน้านี้จะเห็นได้ว่ารูปทรงกราฟไฟต์มีผลต่อพฤติกรรมการหดตัวและขยายตัวของเหล็กหล่ออย่างมาก โดยเหล็กหล่อเหนียวมีแนวโน้มให้ปริมาณการขยายตัวของกราฟไฟต์จากปฏิกิริยาอุทกติกมากที่สุดในทุกกรณีของการบอบสมมูลและสันนิษฐานว่าอาจเป็นเพราะเหล็กหล่อเหนียวมีจำนวนนิวเคลียสในการเกิดกราฟไฟต์มาก ทำให้เหล็กหล่อเหนียวมีปริมาณการขยายตัวของกราฟไฟต์มากกว่าเหล็กหล่อกราฟไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเทา แต่เมื่อพิจารณาเวลาในการขยายตัวของกราฟไฟต์พบว่าเหล็กหล่อเหนียวให้เวลาในการขยายตัวของกราฟไฟต์น้อยที่สุด เนื่องด้วยเหล็กหล่อเหนียวมีพฤติกรรมการแข็งตัวแบบ Mushy คือมีการเกิดแข็งตัวหลายบริเวณ ทำให้ในช่วงแรกของการแข็งที่เกิดขึ้นยังไม่สามารถเกิดเป็นของแข็งที่ยึดจับทั่วทั้งมวลได้ ทำให้ผลที่ได้จากการวัดช่วงเวลาในการขยายตัวของกราฟไฟต์ได้น้อยและผลที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอ แตกต่างจากเหล็กหล่อเทาที่ให้ผลการทดลองที่สม่ำเสมอเนื่องจากมีพฤติกรรมการแข็งตัวแบบ Skin-forming ที่เริ่มการแข็งตัวจากที่ผิวงานหล่อก่อนแล้วจึงไล่เข้าไปสู่ใจกลางงานหล่อ โดยจากรูปที่ 4.6 แสดงพฤติกรรมการแข็งตัวแบบ Skin-forming เป็นเหล็กหล่อเทาที่มีคาร์บอนสมมูล 3.71 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 1230 °C เริ่มเกิดการหดตัวเนื่องจากออสเตนไนท์บริเวณที่ผิวงานหล่อ เมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อย ๆ จนถึงอุณหภูมิ 1185 °C ก่อนถึงอุณหภูมิยูเทคติกจะเริ่มเกิดกราฟไฟต์ขึ้น

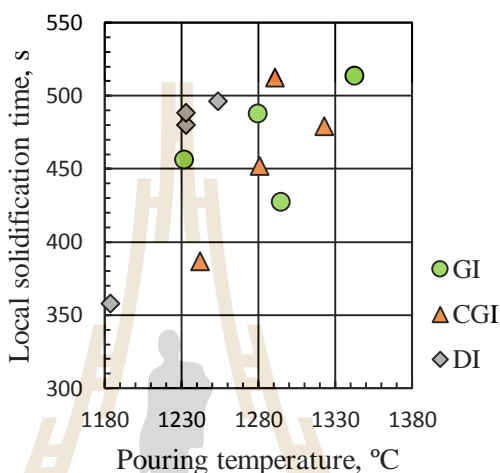
ปริมาณการขยายตัวจะเริ่มมากขึ้นเมื่อถึงอุณหภูมิยูเทคติก นอกจากนี้การขยายตัวเนื่องจากกราฟไฟต์จะดำเนินต่อไปจนถึงสิ้นสุดการแข็งตัว แต่กลับพบบริเวณหดตัวของกราฟไฟต์ระยะการเคลื่อนที่ทั้งที่อุณหภูมิกำลังจะสิ้นสุดการแข็งตัว โดยสันนิษฐานว่าในช่วงแรกบริเวณที่ผิวชิ้นงานหล่อนั้น ได้เริ่มเกิดของแข็งออสเตนไนท์ขึ้นซึ่งได้ยึดจับทั่วทั้งมวลไว้ ขณะเดียวกันบริเวณใจกลางงานหล่อยังเป็นน้ำโลหะหลอมเหลว เมื่อบริเวณใจกลางเริ่มเกิดของแข็งออสเตนไนท์ขึ้นทำให้เกิดการหดตัว แต่บริเวณที่ผิวชิ้นงานหล่อที่เคยเป็นออสเตนไนท์ก็เริ่มเกิดกราฟไฟต์จากปฏิกิริยาอุทกติกขึ้นทำให้เกิดการขยายตัว แต่เนื่องด้วยปริมาณการหดตัวเนื่องจากออสเตนไนท์มีมากกว่าบริเวณใจกลางชิ้นงาน ทำให้บริเวณผิวงานหล่อที่เกิดกราฟไฟต์จากปฏิกิริยาอุทกติกอยู่นั้นและยังเป็นบริเวณที่เกาะยึดทั่วทั้งมวลอยู่เกิดการหดตัวตาม แต่เมื่อภายในบริเวณใจกลางชิ้นงานเริ่มเกิดกราฟไฟต์ขึ้น กราฟไฟต์ระยะการเคลื่อนที่จึงเกิดการขยายตัวต่อจนถึงสิ้นสุดปฏิกิริยาอุทกติก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเกิดจากการที่บริเวณผิวชิ้นงานและใจกลางชิ้นงานเกิดปฏิกิริยาอุทกติกไม่พร้อมกัน แต่ในกรณีเหล็กหล่อกราฟไฟต์ตัวหนอนนั้นมีการแข็งตัวแบบผสมระหว่างเหล็กหล่อเทากับเหล็กหล่อเหนียว เมื่อมาพิจารณาปริมาณการหดตัวจากออสเตนไนท์พบว่าเหล็กหล่อกราฟไฟต์ตัวหนอน มีแนวโน้มให้ปริมาณการหดตัวและช่วงเวลากการหดตัวเนื่องจากออสเตนไนท์มาก อาจเป็น

ผลมาจากเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนนั้นมีอัตราส่วนคาร์บอนที่สูงกว่า เหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว ทำให้มีช่วงเวลากการเกิดออสเตนไนท์นานก่อนที่จะเริ่มเกิดปฏิกิริยายูเทคติก แต่อย่างไรก็ดี รูปทรงกราไฟต์มีอิทธิพลต่อปริมาณการขยายตัวของกราฟไฟต์อย่างมาก ที่เป็นผลมาจากการเติมธาตุแมกนีเซียม และได้ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Stefanescu (2012) [18] ที่ทำการศึกษาพฤติกรรมการหดตัวของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว ที่ให้ข้อสรุปว่าเหล็กหล่อที่มีการเติมธาตุแมกนีเซียมสูงขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณการขยายตัวมากขึ้น เป็นผลมาจากทำให้กราฟไฟต์เกิดการฟอร์มรูปร่างจากแบบแผ่นไปเป็นรูปทรงคล้ายตัวหนอนหรือเม็ดกลม ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณแมกนีเซียมที่เติม และการที่มีปริมาณการขยายตัวที่มากเป็นผลมาจากเหล็กหล่อเหนียวมีอัตราส่วนคาร์บอนสูงและจำนวนนิวเคลียสในการเกิดกราฟไฟต์ที่มาก ทำให้เกิดแรงดันจากกราฟไฟต์ที่สูงกว่าเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน แต่อย่างไรก็ดี งานวิจัยนี้ยังใช้หีบแบบเสริมเหล็กกล้าที่ช่วยลดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อทรายทำให้ได้ผลที่สม่ำเสมอ

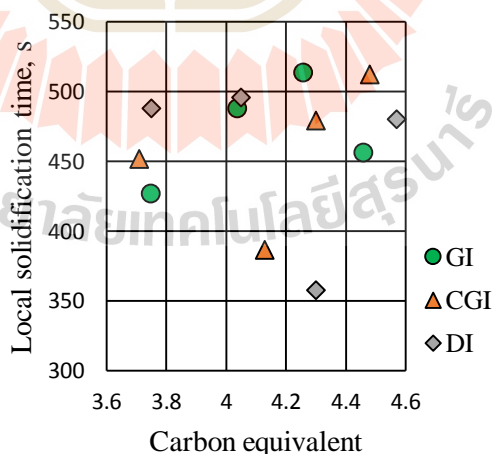
4.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิเท

จากผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณการขยายตัวของเหล็กหล่อ จากรูปที่ 4.24 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการแข็งตัว (Local solidification time) จะเห็นได้ว่าเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเหล็กหล่อในประเภทเดียวกันนั้น ทำให้ชิ้นงานเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการเย็นตัวอย่างไม่สมดุล และส่งผลกระทบให้เลื่อนปฏิกิริยายูเทคติก ไปทางขวาและกดเส้นอุณหภูมิยูเทคติกให้ต่ำลง ทำให้พบปริมาณออสเตนไนท์เพิ่มขึ้นและการเย็นตัวอย่างรวดเร็วยิ่งส่งผลให้ช่วงเวลากการแข็งตัวของชิ้นงานนั้นสั้น โดยรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่ากรณีของเหล็กหล่อเหนียวที่มีคาร์บอนสมมูลอยู่ที่ 4.30 ให้เวลากการแข็งตัวของชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ 360 วินาที ทำให้เวลาในการเกิดปริมาณการหดตัวของออสเตนไนท์และการขยายตัวของกราฟไฟต์สั้นลงตามไปด้วย เมื่อเทียบกับเหล็กหล่อประเภทเดียวกันที่มีอุณหภูมิมากกว่า 1230 °C และเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานอยู่ที่ 470-500 วินาที ส่งผลให้ค่าการขยายตัวของกราฟไฟต์ที่แสดงในรูปที่ 4.18 มีค่าน้อยกว่าปกติ และเมื่อพิจารณาช่วงเวลาที่เกิดการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ ต่อเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการแข็งตัว (Local solidification time) ทำให้สามารถทราบอัตราส่วนของการหดและขยายตัวที่เกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ดีเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนสมมูลต่างกันจะให้อัตราส่วนการหดและขยายที่ไม่เท่ากัน พบว่าเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมไฮโปยูเทคติกและมีคาร์บอนสมมูลเพิ่มขึ้น จะให้อัตราส่วนการขยายตัวมากขึ้น และจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนการขยายตัวจะเท่ากับ 1 เมื่อเหล็กหล่อมีคาร์บอนสมมูล

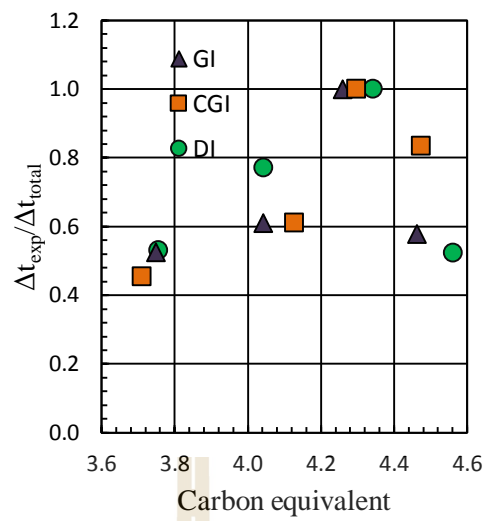
เท่ากับ 4.3 เนื่องจากอุณหภูมิวิกฤต (T_L) เท่ากับอุณหภูมิยูเทคติก (T_E) ทำให้พบแต่การขยายตัวจากกราฟไฟต์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยายูเทคติก และจากรูปที่ 4.28 ที่แสดงสัดส่วนการเคลื่อนที่จากการขยายตัวของกราฟไฟต์ต่อรัศมีทรงกลมของชิ้นงาน ทำให้สามารถทราบรัศมีทรงกลมของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปและทำให้ทราบปริมาณของทรงกลมที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวของกราฟไฟต์จากปฏิกิริยายูเทคติก



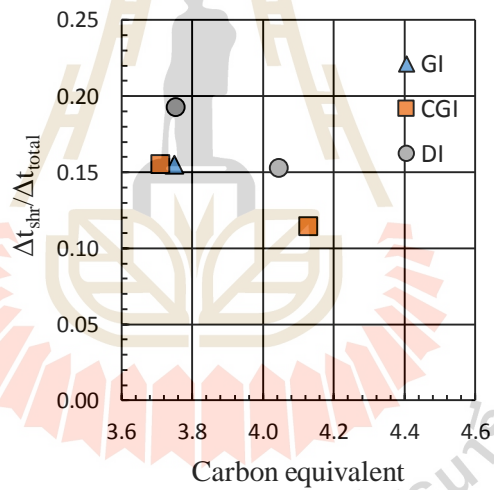
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทกับช่วงเวลาในการแข็งตัว



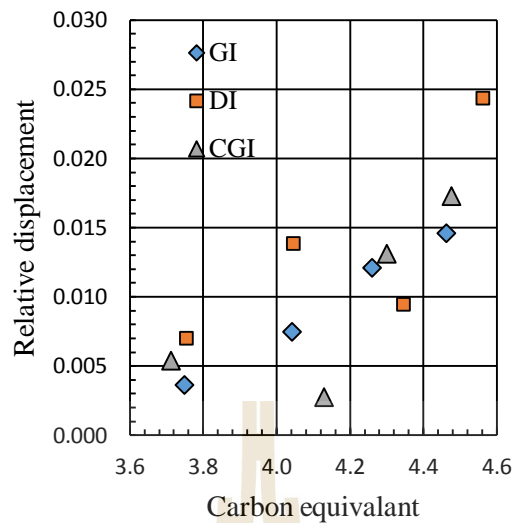
รูปที่ 4.25 คาร์บอนสมมูลของเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภทกับช่วงเวลาในการแข็งตัว



รูปที่ 4.26 อัตราส่วนการขยายตัวต่อเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน



รูปที่ 4.27 อัตราส่วนการหดตัวต่อเวลาทั้งหมดในการแข็งตัวของชิ้นงาน



รูปที่ 4.28 สัดส่วนการขยายตัวจากปฏิกิริยาอุทกคตต่อรัศมีทรงกลมของชิ้นงาน

4.3 ชุดอุปกรณ์สำหรับวัดพฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าตัวชุดอุปกรณ์นี้ยังมีข้อเสียคือไม่สามารถวัดปริมาณการหดตัวเนื่องจากออสเทนไนต์ได้ในบางการทดลอง อาจเป็นผลมาจากปริมาณของแข็งออสเทนไนต์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกมีปริมาณน้อยที่บริเวณผิวงานหล่อ และแท่งควาทซ์มีความยาวเกินไป ทำให้ของแข็งออสเทนไนต์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถจับยึดให้แท่งควาทซ์ให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ เมื่อแท่งควาทซ์เริ่มเกิดการเคลื่อนที่ในขณะที่เดียวกันอุณหภูมิอาจจะลดลงถึงอุณหภูมิยูเทคติก ทำให้วัดปริมาณการหดตัวจากออสเทนไนต์ได้น้อยหรืออาจจะไม่ได้เลย

อย่างไรก็ดีชุดอุปกรณ์นี้ยังให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อกับกราฟการเย็นตัว (Cooling Curve Analysis) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ทำให้สามารถระบุช่วงเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดการเกิดออสเทนไนต์และกราฟไฟต์จากปฏิกิริยาอุทกคตได้อย่างถูกต้อง และการใช้หีบแบบเหล็กหล่อทำให้ช่วยลดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อทราย ทำให้รักษาแรงดันที่เกิดจากการขยายตัวของน้ำเหล็กได้ดี

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

การศึกษาพฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อด้วยวิธีวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภท จะให้พฤติกรรมการหดและขยายตัวที่แตกต่างกันที่เป็นผลมาจากรูปทรงกราไฟต์ เมื่อพิจารณาปริมาณการขยายตัวพบว่าเหล็กหล่อเหนียวมีแนวโน้มให้ปริมาณการขยายตัวจากกราไฟต์มากที่สุด สันนิษฐานว่าเหล็กหล่อเหนียวมีอินเตอร์คูตลิ่งที่มากแต่น้อยกว่าเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน แต่เนื่องจากเหล็กหล่อเหนียวมีนิวเคลียสในการเกิดกราไฟต์มากทำให้มีปริมาณการขยายตัวของกราไฟต์จากปฏิกิริยาอุทกคิกมาก รองลงมาคือเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเทา และเมื่อพิจารณาปริมาณการหดตัวในทางทฤษฎีเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนมีแนวโน้มให้ปริมาณการหดตัวของออสเตนไนท์ที่มากอันเนื่องมาจากเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนนั้นมีอินเตอร์คูตลิ่งที่มากทำให้พบปริมาณการเกิดออสเตนไนท์ที่มากกว่าเหล็กหล่อเหนียวและเหล็กหล่อเทา

2. ปริมาณการขยายตัวของกราไฟต์จะมากขึ้น เมื่อคาร์บอนสมมูลมากขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.21 – 1.8 มิลลิเมตร สำหรับเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนสมมูลอยู่ในช่วง 3.7 – 4.56

3. ระยะเวลาในการขยายตัวของกราไฟต์มีระยะเวลานานขึ้นเมื่อ มีคาร์บอนสมมูลมากขึ้น โดยมีระยะเวลาระหว่าง 230 – 440 วินาที สำหรับเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนสมมูลอยู่ในช่วง 3.7 – 4.56

4. ระยะเวลาในการหดตัวของออสเตนไนท์นั้นจะสั้นลงเมื่อคาร์บอนสมมูลเพิ่มขึ้น โดยมีระยะเวลาระหว่าง 92 – 54 วินาที สำหรับเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนสมมูลอยู่ในช่วง 3.71 – 4.13

5. ขนาดชิ้นงานภายหลังการแข็งตัวมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อคาร์บอนสมมูลมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าน่าจะมีการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อระหว่างการแข็งตัว เป็นสาเหตุให้ระยะเวลาในการขยายตัวของกราไฟต์สั้นลงในกรณีเหล็กหล่อไฮเปอร์ยูเทคติก โดยมีระยะเวลา 247 – 376 วินาที สำหรับเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนสมมูลอยู่ในช่วง 4.46 – 4.56

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เหล็กหล่อที่มีคาร์บอนผสมน้อยกว่า 4.3 บางการทดลองไม่สามารถวัดปริมาณการหดตัวเนื่องจากออสเทนไนท์ได้ อาจเป็นผลมาจากปริมาณของแข็งออสเทนไนท์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกมีปริมาณน้อยที่บริเวณผิวงานหล่อ และแท่งควาทซ์มีความยาวเกินไป ทำให้ของแข็งออสเทนไนท์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถจับยึดให้แท่งควาทซ์เกิดการเคลื่อนที่ได้ เมื่อแท่งควาทซ์เริ่มเกิดการเคลื่อนที่ในขณะที่เดียวกันอุณหภูมิอาจจะลดลงถึงอุณหภูมิยูเทคติก ทำให้วัดปริมาณการหดตัวจากออสเทนไนท์ได้น้อยหรืออาจจะไม่ได้เลย

2. อุณหภูมิที่ไม่เท่ากันในเหล็กหล่อประเภทเดียวกัน จะให้ผลปริมาณการหดและขยายตัวที่คลาดเคลื่อน สันนิษฐานว่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่านั้นส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเย็นตัวแบบไม่สมดุล ทำให้ส่วนผสมยูเทคติกเลื่อนไปทางขวาและเส้นอุณหภูมियูเทคติกสูงขึ้น นอกจากนี้ทำให้เวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานสั้น (Local solidification time)

3. บางการทดลองระยะการเคลื่อนที่ LVDT กับกราฟการเย็นตัวให้ผลที่ไม่สอดคล้องกัน สันนิษฐานว่าอาจเกิดจากการวางตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลและความยาวของแท่งควาทซ์ด้วยระยะที่เท่ากัน แต่เนื่องจากอุณหภูมิที่วัดได้เป็นอุณหภูมิที่บริเวณใจกลางชิ้นงาน แต่ระยะการเคลื่อนที่เริ่มเกิดขึ้นบริเวณที่ผิวงานหล่อ

4. แบบหล่อทรายทรงกลมทำให้เกิดการหดและขยายตัวที่สม่ำเสมอ เนื่องจากชิ้นงานเย็นตัวเท่ากันทุกทิศทาง ทำให้ผลที่ได้มีผลกระทบจากปัจจัยอื่นน้อย

5. การใช้หีบแบบเหล็กกล้าทำให้ช่วยลดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อทราย ทำให้รักษาแรงดันที่เกิดจากการขยายตัวของน้ำเหล็กได้ดี



ภาคผนวก ก

สรุปข้อมูลของอุณหภูมิและระยะเวลาเคลื่อนที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สรุปข้อมูลของอุณหภูมิและระยะการเคลื่อนที่

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลของอุณหภูมิและระยะการเคลื่อนที่

ประเภท	CE	T_{shr}	T_{exp}	$T_{S,LVDT}$	x_{shr}	x_{exp}	$x_{S,LVDT}$	Δx_{shr}
เหล็กหล่อ เหนียว	3.75	1178	1125	1036	0.320	0.023	0.557	0.297
	4.05	1140	1116	1049	0.180	-0.189	0.865	0.366
	4.34	-	1145	1057	-	0.009	0.729	-
	4.56	-	1120	1030	-	-0.407	1.448	-
เหล็กหล่อ กราไฟต์ ตัวหนอน	3.71	1179	1135	1041	0.154	-0.386	0.023	0.540
	4.13	1163	1151	1048	0.056	-0.458	-0.249	0.514
	4.30	-	1146	1047	-	0.453	1.451	-
	4.48	-	1150	1038	-	0.024	1.340	-
เหล็กหล่อ เทา	3.75	1211	1157	1060	0.037	-0.058	0.217	0.095
	4.04	-	1170	1077	-	0.305	0.874	-
	4.26	-	1157	1062	-	0.022	0.941	-
	4.46	-	1112	1037	-	-0.014	1.097	-

หมายเหตุ CE คือ คาร์บอนผสม

สรุปข้อมูลของอุณหภูมิและระยะเวลาเคลื่อนที่ (ต่อ)

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลของอุณหภูมิและระยะเวลาเคลื่อนที่ (ต่อ)

ประเภท	CE	Δx_{exp}	t_{shr}	t_{exp}	$t_{S,LVDT}$	Δt_{shr}	Δt_{exp}	$\frac{\Delta t_{exp}}{\Delta t_{total}}$	$\frac{\Delta t_{shr}}{\Delta t_{total}}$
เหล็กหล่อ เหนียว	3.75	0.534	92.2	184.6	440	92	255	0.5	0.2
	4.05	1.054	124	179	454	55	276	0.8	0.2
	4.34	0.720	-	28.0	350	-	322	1.0	0.0
	4.56	1.855	-	188.8	444	-	255	0.5	0.0
เหล็กหล่อ กราไฟต์ ตัวนอน	3.71	0.409	127.2	206.6	440	79	233	0.5	0.2
	4.13	0.209	39	93.8	386	55	293	0.6	0.1
	4.30	0.998	-	104.8	549	-	444	1.0	0.0
	4.48	1.315	-	174.6	551	-	377	0.8	0.0
เหล็กหล่อ เทา	3.75	0.275	93	163.6	403	71	239	0.5	0.2
	4.04	0.569	-	155.0	469	-	314	0.6	0.0
	4.26	0.919	-	111.2	523	-	412	1.0	0.0
	4.46	1.111	-	188.0	435	-	247	0.6	0.0

หมายเหตุ CE คือ คาร์บอนผสม



ภาคผนวก ข

ปริมาณการหดและขยายตัวของชิ้นงานหล่อ

ปริมาณการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ

ตารางที่ ข.1 ปริมาณการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ

ประเภท	CE	ขนาดชิ้นงาน เริ่มต้น	ขนาดชิ้นงานสุดท้าย	การหดและขยายตัว (%)
เหล็กหล่อเทา	3.75	76.20	74.98	-1.60
	4.04	76.20	75.57	-0.82
	4.26	76.20	75.89	-0.40
	4.46	76.20	76.17	-0.03
เหล็กหล่อ กราไฟต์ ตัวนอน	3.71	76.20	75.77	-0.56
	4.13	76.20	75.55	-0.85
	4.30	76.20	76.08	-0.15
	4.48	76.20	76.22	0.03
เหล็กหล่อ เหนียว	3.75	76.20	75.46	-0.96
	4.05	76.20	76.09	-0.14
	4.35	76.20	75.94	-0.33
	4.57	76.20	76.33	0.18

หมายเหตุ CE คือ คาร์บอนรวม

- คือ ปริมาณการหดตัว
- + คือ ปริมาณการขยายตัว



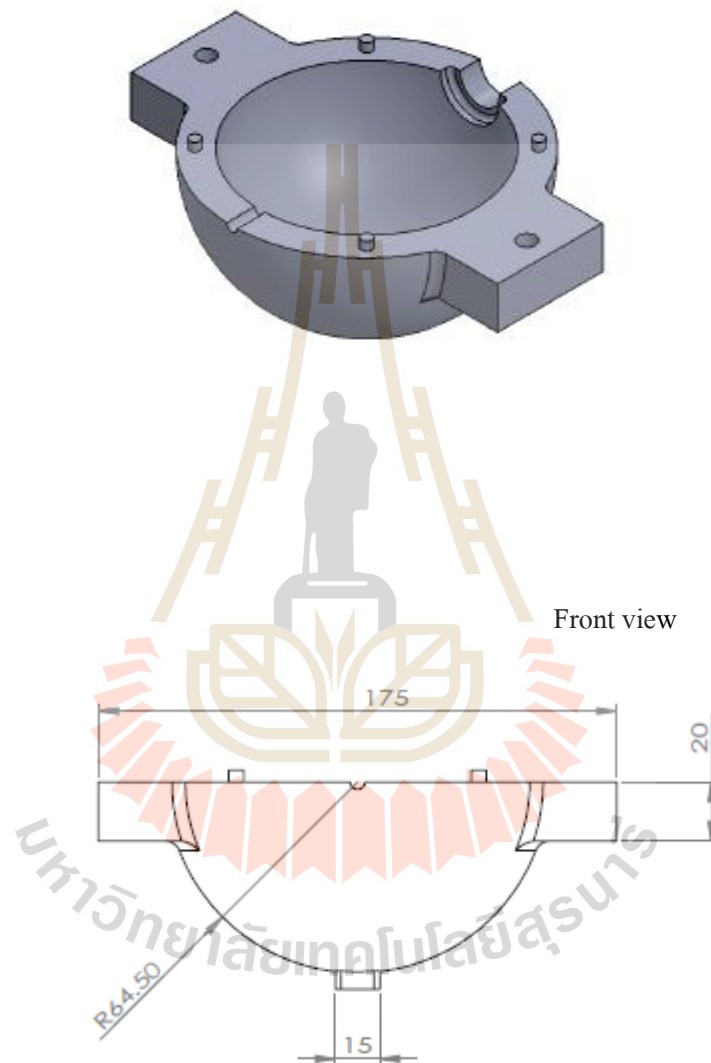
ภาคผนวก ค

รายละเอียดการออกแบบชุดอุปกรณ์

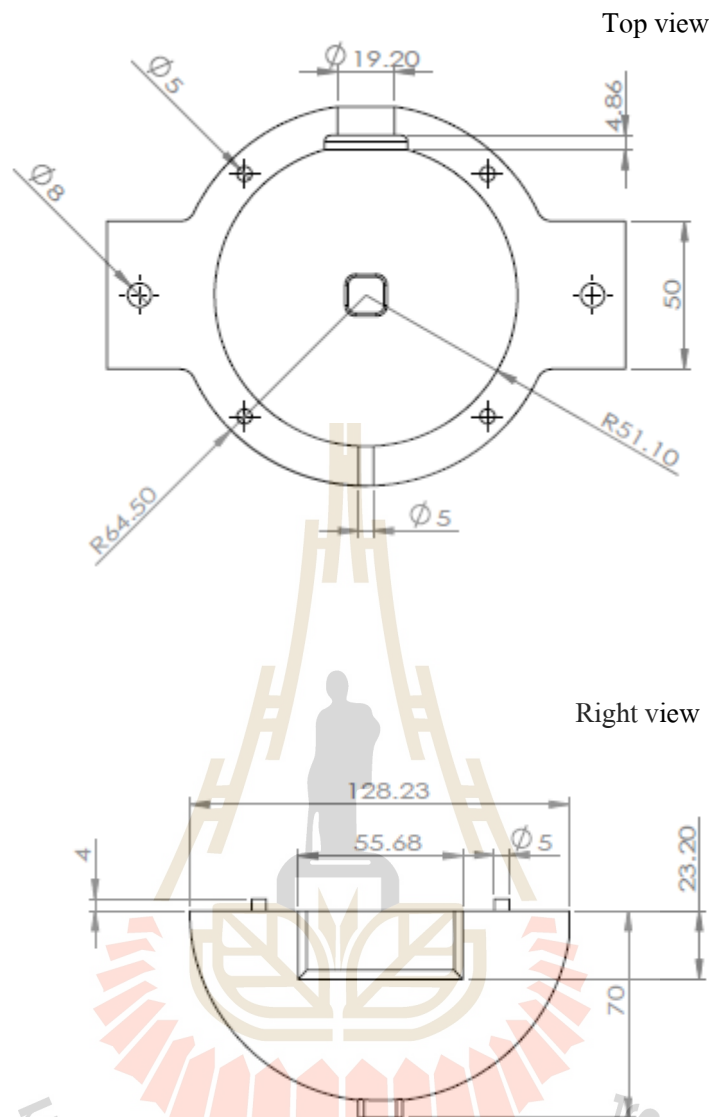
ขนาดชิ้นงานหีบแบบเหล็กกล้าล่าง

หน่วย มิลลิเมตร (mm)

Isometric



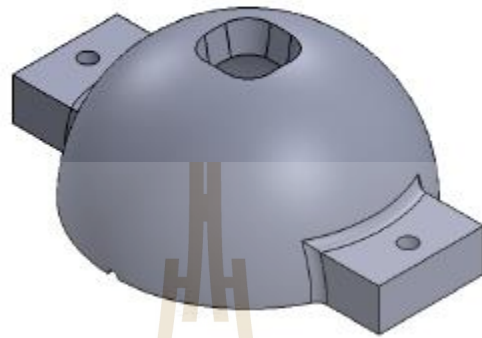
รูปที่ ค.1 ขนาดชิ้นงานหีบแบบล่าง



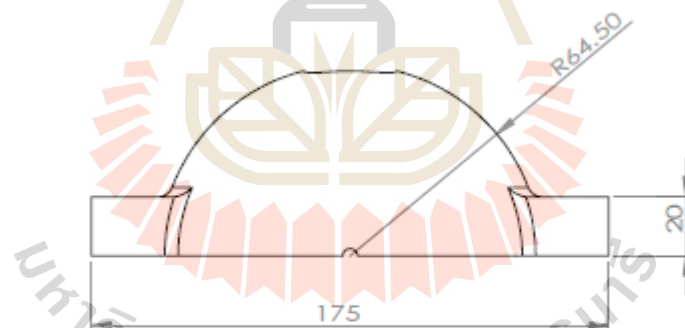
รูปที่ ค.1 ขนาดชิ้นงานหีบแบบเหล็กกล้าด่าง (ต่อ)

ขนาดชิ้นงานหีบแบบเหล็กกล้าบน

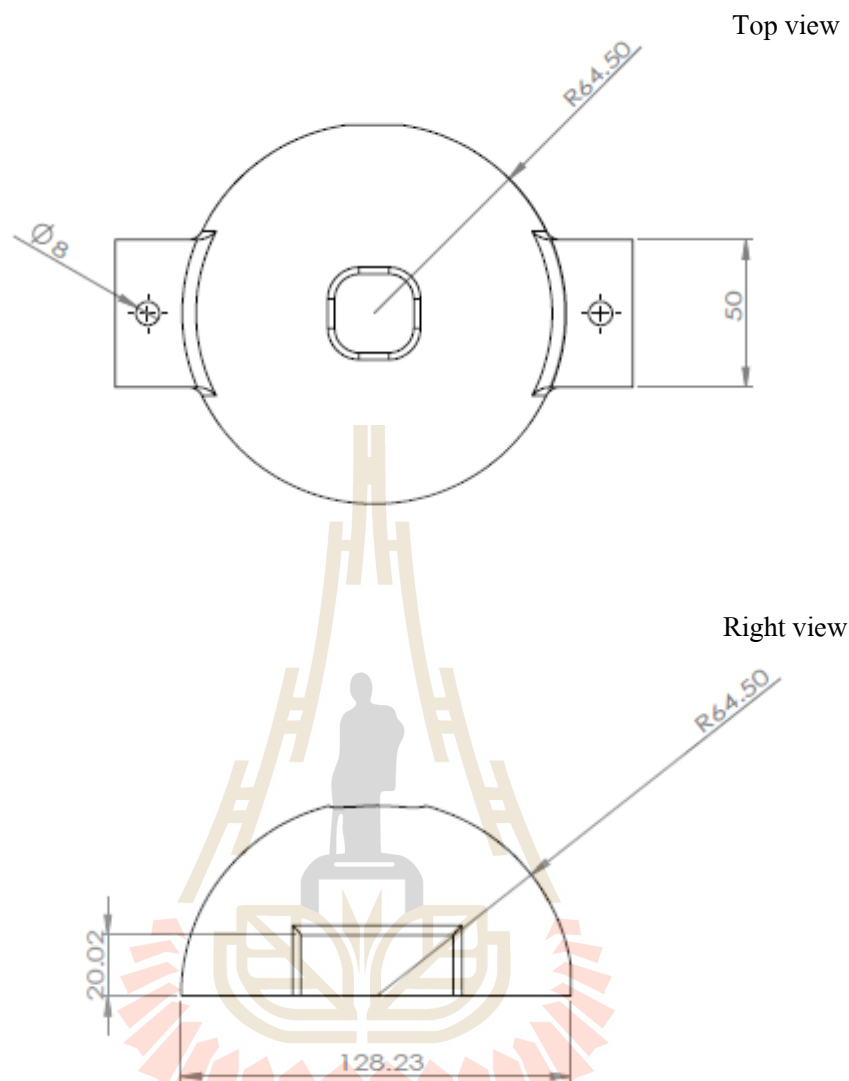
Isometric view



Front view



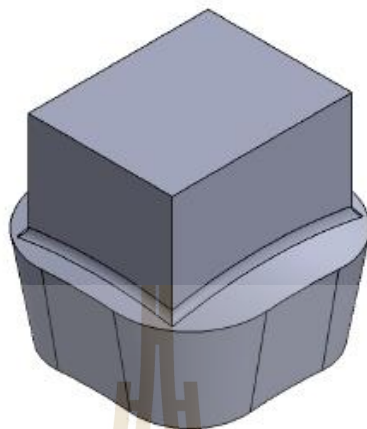
รูปที่ ค.2 ขนาดชิ้นงานหีบแบบเหล็กกล้าบน



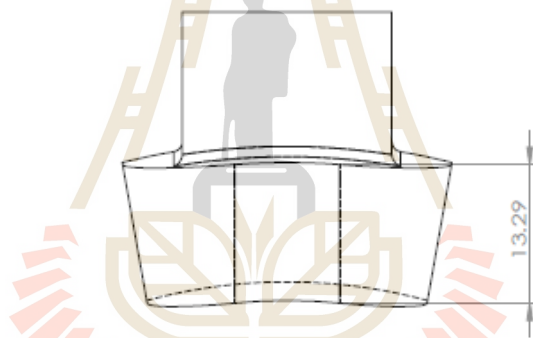
รูปที่ ค.2 ขนาดชิ้นงานหีบแบบเหล็กหัวบน (ต่อ)

ขนาดชิ้นงานฝาปิดหีบแบบเหล็กกล้าบน

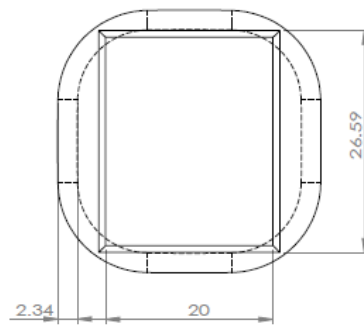
Isometric view



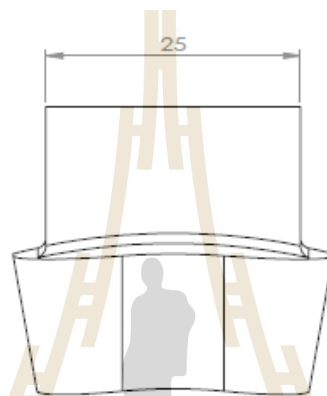
Front view



รูปที่ ค.3 ขนาดชิ้นงานฝาปิดหีบแบบเหล็กกล้าบน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Top view

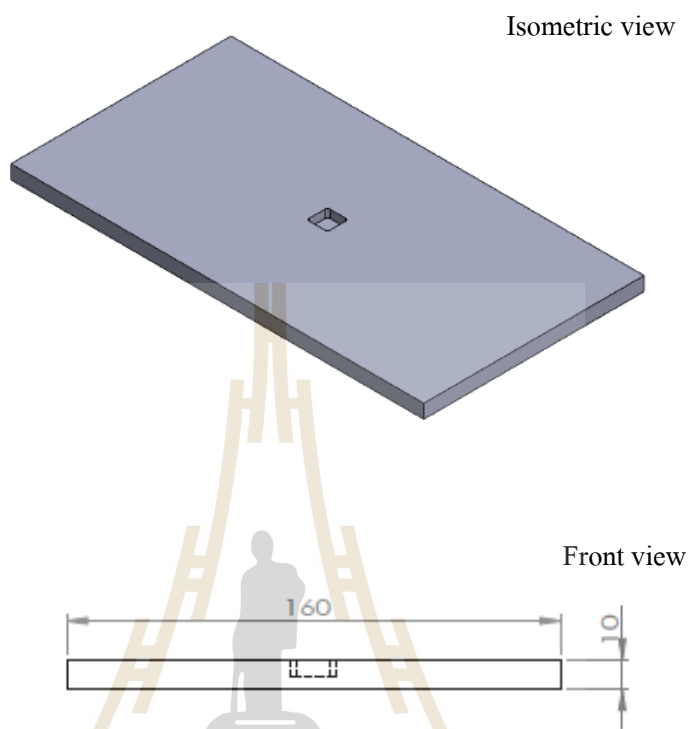


Right view

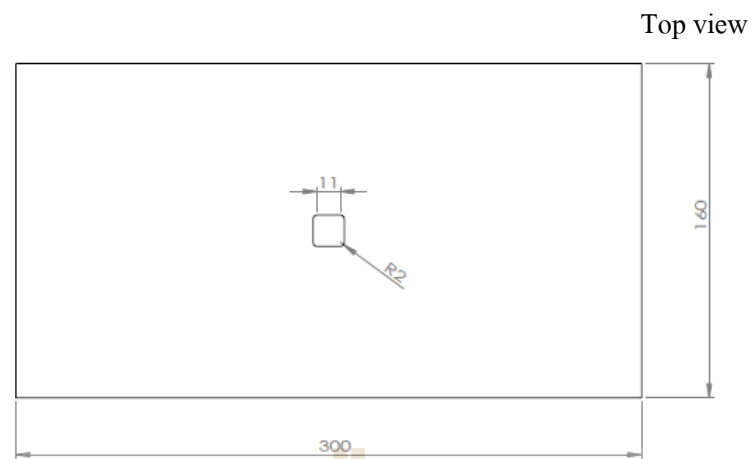
รูปที่ ค.3 ขนาดชิ้นงานฝาปิดหีบแบบเหล็กกล้าบน (ต่อ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดชิ้นงานแผ่นรองชุดอุปกรณ์



รูปที่ ค.4 ขนาดชิ้นงานแผ่นรองชุดอุปกรณ์



รูปที่ ค.4 ขนาดชิ้นงานแผ่นรองชุดอุปกรณ์ (ต่อ)

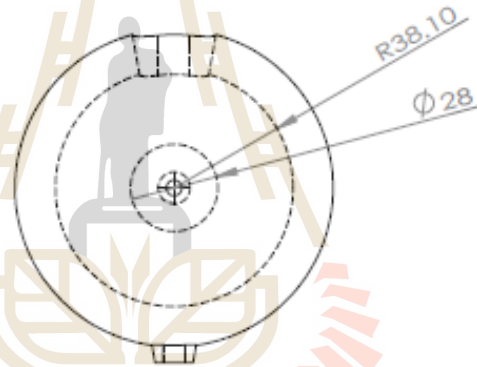


ขนาดชิ้นแบบหล่อทรายทรงกลม

Isometric view

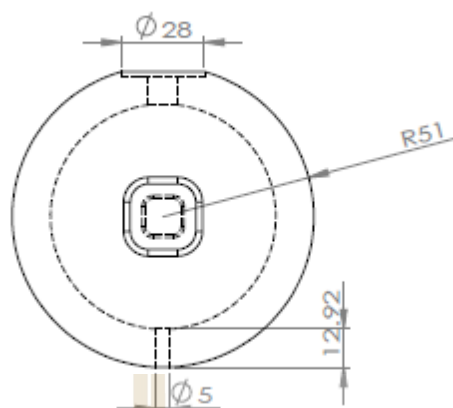


Front view

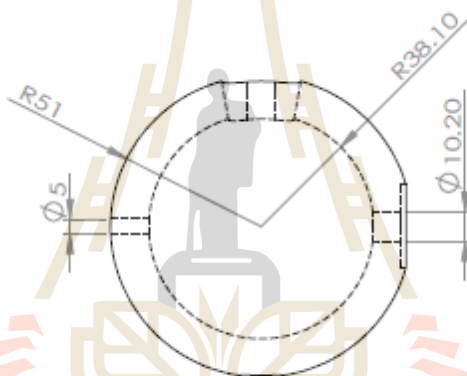


รูปที่ ค.5 ขนาดชิ้นงานแบบหล่อทรายทรงกลม

Top view



Right view



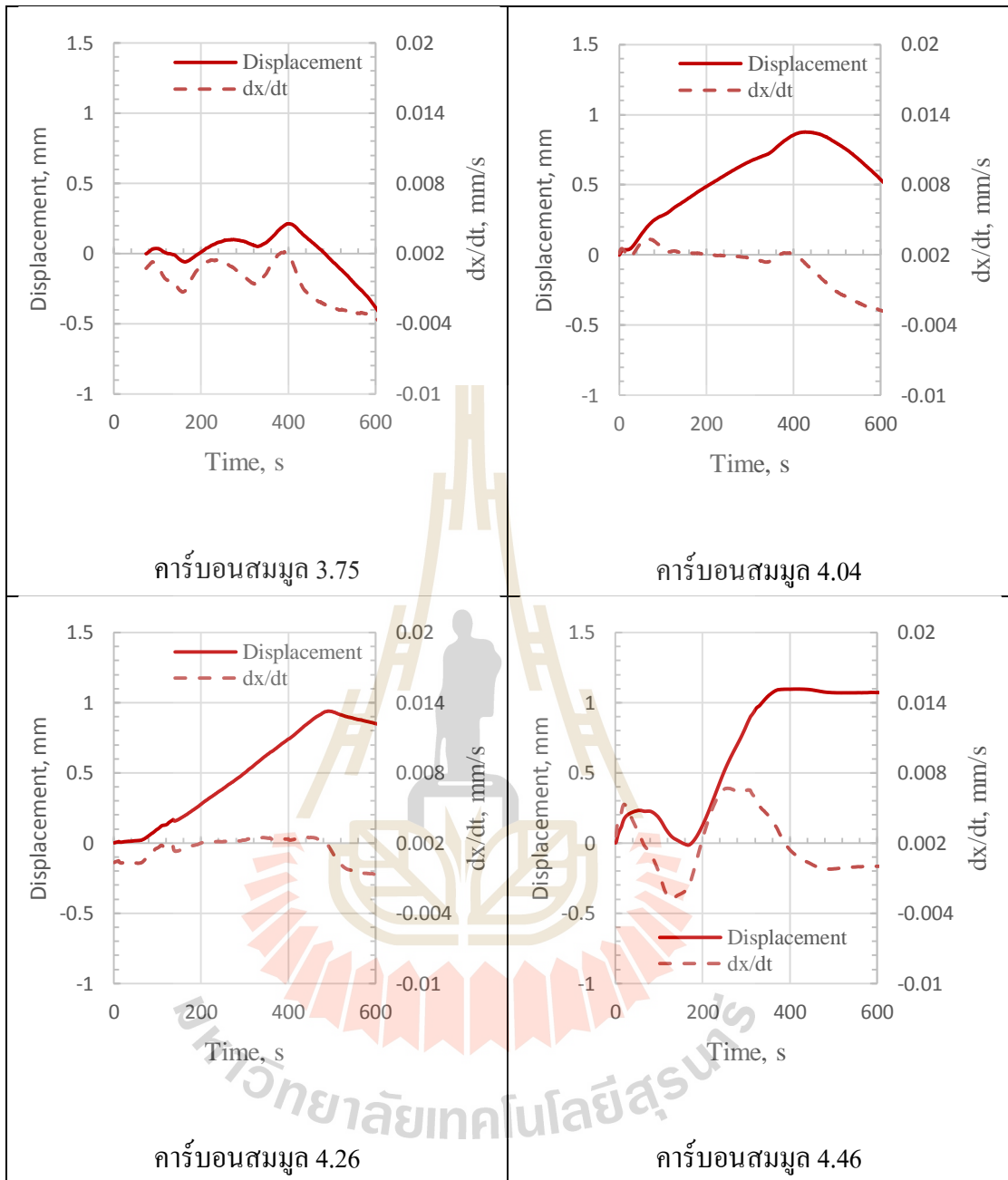
รูปที่ ค.5 ขนาดชิ้นงานแบบหล่อทรายทรงกลม (ต่อ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาคผนวก ง

อัตราเคลื่อนที่และระยะการเคลื่อนที่ของ LVDT



รูปที่ จ.1 อัตราการเคลื่อนที่และระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อเทา



ภาคผนวก จ

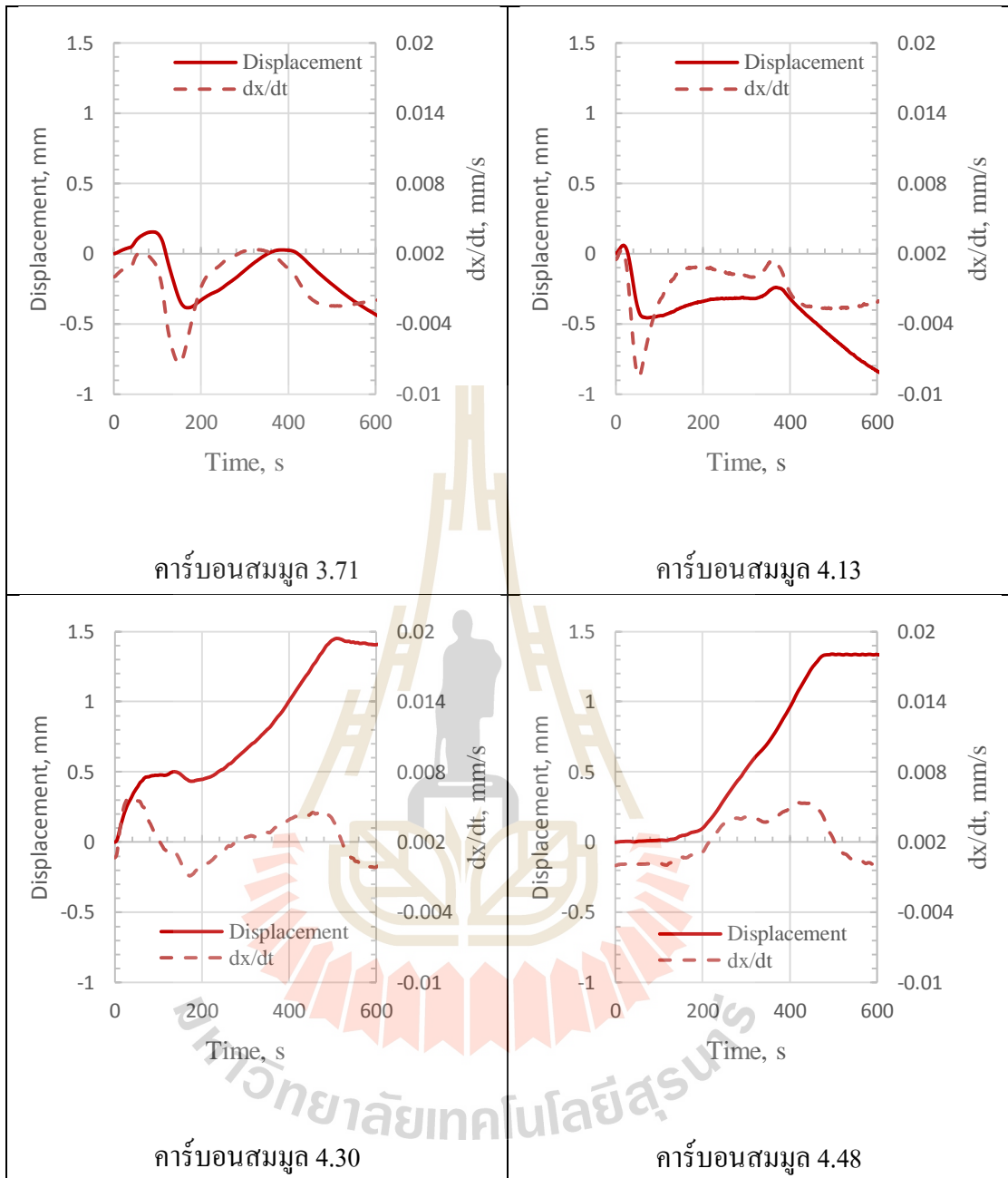
การหาค่าคาร์บอนสมมูล (Carbon Equivalent), CE

การหาค่าคาร์บอนสมมูล (Carbon Equivalent)

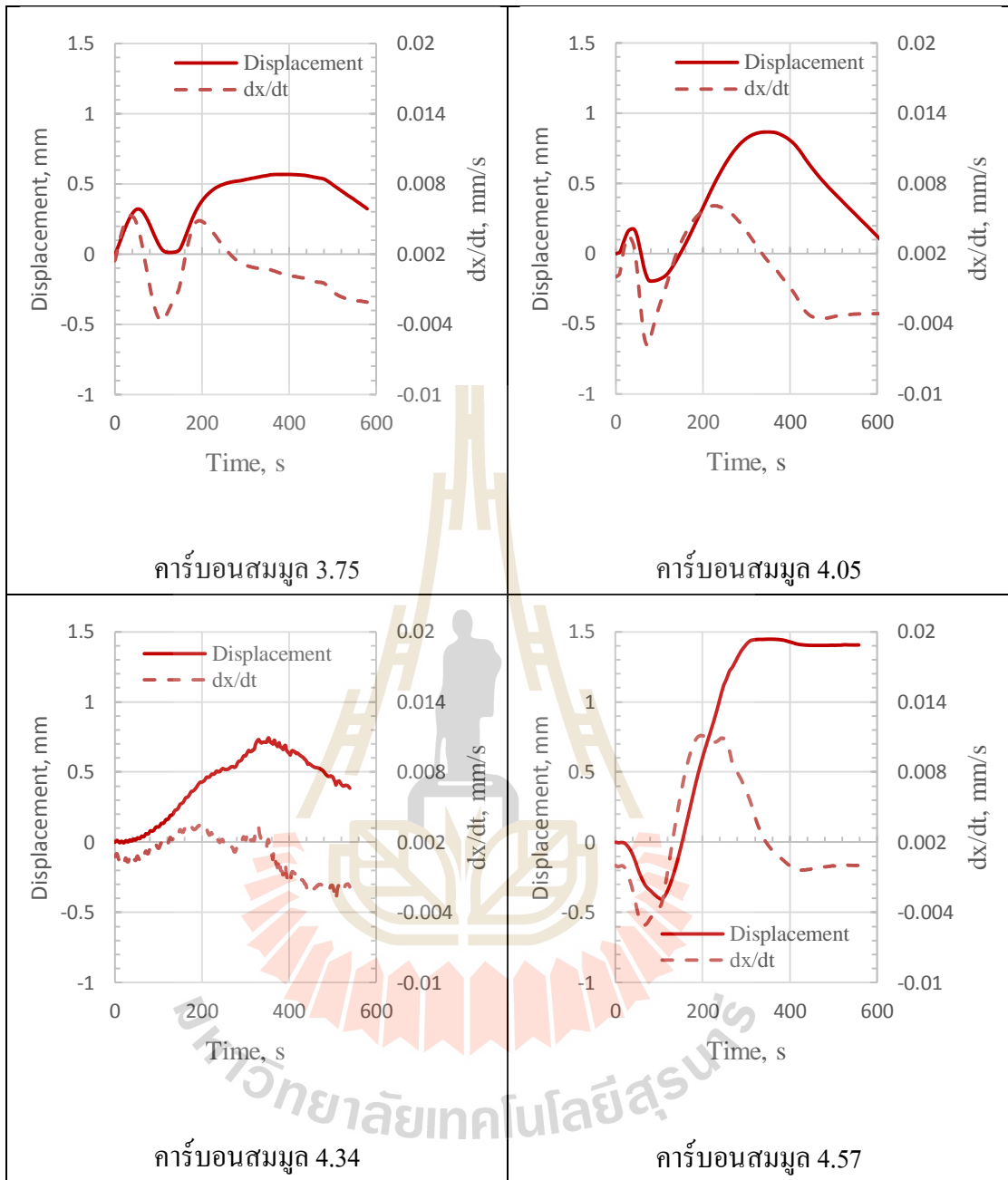
$$CE = \%C + 0.31(\%Si) - 0.0027(\%Mn)$$

โดย %C คือ เปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่เจืออยู่ในเหล็กหล่อ
%Si คือ เปอร์เซ็นต์ซิลิคอนที่เจืออยู่ในเหล็กหล่อ
%Mn คือ เปอร์เซ็นต์แมงกานีสที่เจืออยู่ในเหล็กหล่อ





รูปที่ จ.2 อัตราการเคลื่อนที่และระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน



รูปที่ จ.3 อัตราการเคลื่อนที่และระยะการเคลื่อนที่ของเหล็กหล่อเหนียว

ประวัติผู้เขียน

นายเลิศฤทธิ์ ชื่นเจริญ เกิดเมื่อวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ.2534 ได้สำเร็จการศึกษา ระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนลำพะอง (ราษฎร์จำเริญบำรุง) ในปี พ.ศ.2546 และสำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจาก โรงเรียนพรตพิทยพยัต เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานครในปี พ.ศ.2552 หลังจากนั้นในปี พ.ศ.2556 ได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา หลังจากนั้นในปี พ.ศ.2557 ได้ทำงานที่บริษัท สปีดทรีดี โมเดล จำกัด จังหวัดสมุทรสาคร ตำแหน่งวิศวกร ระยะเวลาทำงาน (7 มกราคม 2557 - 30 มิถุนายน 2557) และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้ทำการวิจัยในหัวข้อเรื่องการศึกษาพฤติกรรมการหดตัวระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อด้วยวิธีการวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น โดยมีอาจารย์ที่ปรึกษาคือ ผศ. ดร.รัตน บริสุทติกุล และ อ. ดร.สารัมภ์ บุญมี ในระหว่างการศึกษาต่อได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาปฏิบัติการโลหการกายภาพ 1 และปฏิบัติการวิศวกรรมการหล่อโลหะ

