บทความวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการหดตัวระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อด้วยวิธีการวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น

สารัมภ์ บุญมี รัตน บริสุทธิกุล และ เลิศฤทธิ์ ชื่นเจริญ*
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08-9888-9905 อีเมล: B5327348@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.019
รับเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2560 ตอบรับเมื่อ 19 พฤษภาคม 2560 เผยแพร่ออนไลน์ 17 มกราคม 2561
© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการหดตัวและขยายตัวระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน และเหล็กหล่อเหนียว เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์นี้จึงได้ประดิษฐ์อุปกรณ์พิเศษโดยอาศัยวิธีการวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น ซึ่งประกอบด้วยแบบหล่อทรายทรงกลมที่ผลิตด้วยกรรมวิธีแอดดิทีฟห่อหุ้มด้วยเปลือกเหล็กกล้าซึ่งมีเทอร์โมคัปเปิลและแท่งควอตซ์ (เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น) เพื่อบันทึกอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ได้ในเวลาเดียวกัน เหล็กหล่อประเภทต่างๆ ที่มีคาร์บอนสมมูล 3.7, 4.0, 4.3 และ 4.6 ถูกผลิตขึ้นเพื่อการทดลอง จากการทดลองพบว่าพฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภท ต่างกันเล็กน้อย โดยการปริมาณการขยายตัวและเวลาการขยายตัวของแกรไฟต์เพิ่มขึ้นตามคาร์บอนสมมูลที่เพิ่มขึ้น มีอยู่ในช่วง 0.2–1.8 มิลลิเมตร และ 230–450 วินาที ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบการหดตัวเนื่องจากการเกิดออสเตนไนท์ในบางเงื่อนไขการทดลองที่คาร์บอนสมมูลต่ำกว่า 4.3 พฤติกรรมการแข็งตัวของเหล็กหล่อแต่ละประเภทไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: พฤติกรรมการแข็งตัว, เหล็กหล่อ, การเคลื่อนที่เชิงเส้น, การหดตัว

การอ้างอิงบทความ: สารัมภ์ บุญมี รัตน บริสุทธิกุล และ เลิศฤทธิ์ ชื่นเจริญ, "การศึกษาพฤติกรรมการหดตัวระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อด้วยวิธีการวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,* ปีที่ 28, ฉบับที่ 1, หน้า 77–88, ม.ค.–มี.ค. 2561.

-17-0000(077-088)P5.indd 77 4/10/61 BE 2:04 PM

Research Article

Study of Solidification Shrinkage Behavior in Cast Irons by Linear Displacement Method

Sarum Boonmee, Rattana Borrisutthekul and Lertrit Chuencharoen*

School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

*Corresponding Author: Tel: 089-888-9905, E-mail: B5327348@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2018.01.019

Received 21 February 2017; Accepted 19 May 2017; Published online: 17 January 2018

© 2018 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aims to study the solidification behavior in Gray Iron (GI), Compacted Graphite Iron (CGI) and Ductile Iron (DI). In order to achieve this goal, the special equipment was devised by applying a linear displacement method. The equipment consisted of spherical additive-manufactured sand molds encased in steel jackets. The jackets were equipped with a thermocouple 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 for this experiment. It was found that the contraction and the expansion behaviors of three types of cast irons exhibited slight differences. The graphite expansion and graphite expansion time increased with increasing carbon equivalent ranged from 0.2–1.8 mm and 230–450 s respectively. In addition, the austenite shrinkage was observed for some conditions at CE lower than 4.3. No significant difference was seen between types of irons.

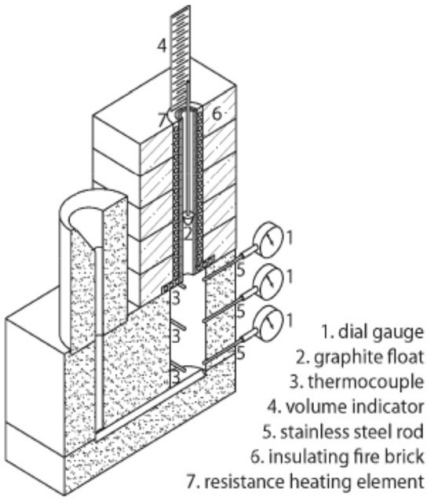
Keywords: Solidification Behavior, Cast Iron, Linear Displacement, Shrinkage

Please cite this article as: S. Boonmee, R. Borrisutthekul, and L. Chuencharoen, "Study of solidification shrinkage behavior in cast irons by linear displacement method," *The Journal of KMUTNB,* vol. 28, no. 1, pp. 77–88, Jan.–Mar. 2018 (in Thai).

-17-0000(077-088)P5.indd 78 4/10/61 BE 2:04 PM

1. บทนำ

เหล็กหล่อเป็นอีกหนึ่งวัสดุที่มีความสำคัญและมักถูกนำไปใช้งานอย่างหลากหลายเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดี และยังเป็นวัสดุที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจโดยส่วนใหญ่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ซึ่งเป็นภาคอุตสาหกรรมหลักที่สร้างรายได้ให้กับประเทศ โดยข้อมูลจากกระทรวงพาณิชย์ ในปี พ.ศ. 2559 ประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกรถยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์รวมกว่า 852,360 ล้านบาท [1] จึงทำให้มีความต้องการในการผลิตเหล็กหล่อให้มีคุณภาพและปราศจากข้อบกพร่องภายหลังการหล่อ เช่น โพรงหดตัว (Shrinkage Porosity) เป็นต้น การแก้ไขปัญหาโพรงหดตัว อาจทำได้โดยการติดตั้งไรเซอร์ เพื่อชดเชยการหดตัวระหว่างการแข็งตัวของโลหะ อย่างไรก็ดีพฤติกรรมการแข็งตัวของเหล็กหล่อนั้นแตกต่างไปจากโลหะชนิดอื่นที่มีการหดตัวของออสเตนไนท์ และเกิดการขยายตัวของแกรไฟต์จากปฏิกิริยายูเทกติก ดังนั้นความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการแข็งตัวของเหล็กหล่อ จะทำให้สามารถออกแบบไรเซอร์สำหรับเหล็กหล่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบไรเซอร์ของงานหล่อเหล็กนั้น ได้แก่ 1) ปริมาณการหดตัวเนื่องจากออสเตนไนท์ 2) ปริมาณการขยายตัวของแกรไฟต์จากปฏิกิริยายูเทกติก ช่วงเวลาเริ่มต้นและการสิ้นสุดการขยายตัว ซึ่งหากทราบข้อมูลเหล่านี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลในโปรแกรมการจำลองการหล่อโลหะเพื่อทำนายแนวโน้มการเกิดโพรงหดตัวในชิ้นงานหล่อให้มีความแม่นยำ เพื่อลดอัตราการผลิตของเสียและลดการใช้พลังงานในการผลิตให้น้อยลง และนำไปสู่การออกแบบไรเซอร์และการพัฒนาสารอินนอคคูแลนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ โดยการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพื่อศึกษาพฤติกรรมการหดตัวและขยายตัวระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อเทา (GI) เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน (CGI) และเหล็กหล่อเหนียว (DI) ด้วยวิธีการวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer; LVDT) การศึกษาพฤติกรรมการแข็งตัวของเหล็กหล่อนั้นมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี โดยวิธีการแรกคือวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยตรง ในปี ค.ศ.1954 Schmidt *et al.* [2] ได้ใช้การวัดระดับของน้ำโลหะในไรเซอร์ด้วยทุ่นลอยทำจากแกรไฟต์ โดยออกแบบให้มีการให้ความร้อนกับไรเซอร์ด้วยขดลวดความร้อนและมีเกจวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของงานหล่อ แต่การทดลองนี้มีข้อเสียคือความไม่แน่นอนของระบบทางเดินน้ำโลหะและการทำงานของทุ่นลอยแกรไฟต์ นอกจากนี้แบบหล่อทำจากทรายชื้นซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ ทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง (รูปที่ 1)

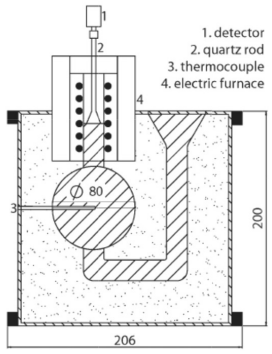


รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณการหดและขยายตัวของ Schmidt *et al.* [2]

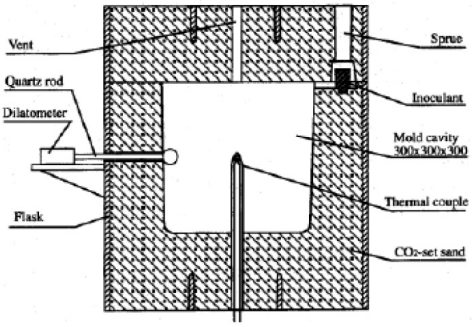
เทคนิคคล้ายกันนี้ได้รับการปรับปรุงใหม่โดยปี ค.ศ. 2012 Zou *et al.* [3] โดยออกแบบสำหรับวัดการหดและขยายตัวสำหรับเหล็กหล่อเหนียวและใช้หีบแบบเหล็กกล้าเสริมความแข็งแรงของแบบหล่อและให้งานหล่อเป็นทรงกลมแทนทรงกระบอกทำให้ได้ผลสม่ำเสมอและจากอุปสรรคในการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำโลหะด้วยทุ่นลอยแกรไฟต์ (รูปที่ 2) จึงมีผู้วิจัยหาวิธีในการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยใช้วิธีการวัดปริมาณการหดตัวของโลหะด้วยวิธีการเคลื่อนที่เชิงเส้นในปี ค.ศ.1979 Stefanescu *et al.* [4] ได้ใช้การวัดปริมาณการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อด้วยการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์แทนทุ่นลอยแกรไฟต์ พร้อมกับบันทึกกราฟเย็นตัวไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์

การวัดการเคลื่อนที่ด้วยแท่งควอทซ์เหมาะสมกับลักษณะการวัดแบบการเคลื่อนที่เชิงเส้น เนื่องจากแท่งควอทซ์

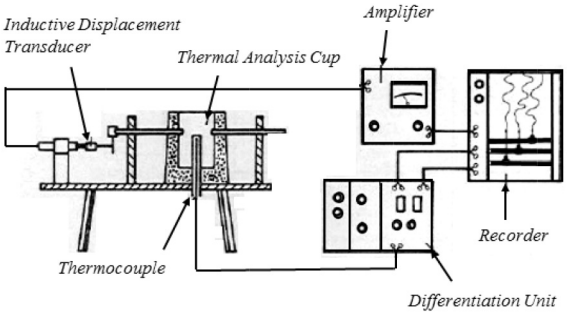
-17-0000(077-088)P5.indd 79 4/10/61 BE 2:04 PM



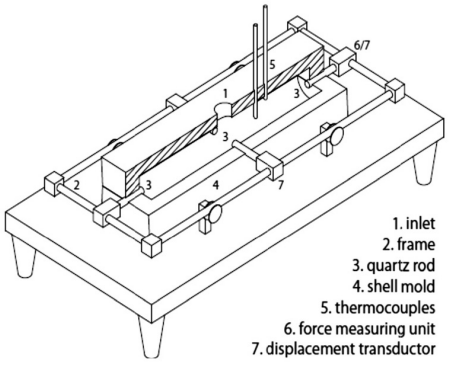
รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณการหดและขยายตัวของ Zou *et al.* [3]



รูปที่ 4 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณการหดและขยายตัวของ Gedeonova *et al.* [5]



รูปที่ 3 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณการหดและขยายตัวของ Stefanescu *et al.* [4]



รูปที่ 5 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณการหดและขยายตัวของ Svidro กับ Dioszegi [7]

มีอัตราการขยายตัวต่ำและความสามารถในการนำความร้อนต่ำ ทำให้ผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ (รูปที่ 3)

โดยปี ค.ศ.1995 Gedeonova *et al.* [5] ซึ่งได้เปลี่ยนไปใช้งานหล่อรูปทรงกระบอกและได้ทำการพัฒนาการวัดแรงที่เกิดจากการขยายตัวของแบบหล่อ ซึ่งวัตถุประสงค์ในงานวิจัยคือศึกษาผลการใช้และไม่ใช้หีบแบบเพื่อลดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อ ซึ่งพบว่าการใช้หีบแบบสามารถลดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อได้และให้ผลการทดลองที่สม่ำเสมอ (รูปที่ 4) ในปี ค.ศ. 2011 Chisamera *et al.* [6] ได้ประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ที่สามารถวัดการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์พร้อมอุณหภูมิของงานหล่อและใช้แบบหล่อทรายโซเดียมซิลิเกตเสริมด้วยหีบแบบเหล็กกล้า และในช่วงเวลาเดียวกัน Stefanescu *et al.* [8] ได้ทำการทดลองงานหล่อทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ใช้แบบหล่อทรายโซเดียมลิเกตเสริมด้วยหีบแบบเหล็กกล้า ทั้งสองงานวิจัยแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นตัวกับการหดและขยายตัว ซึ่งให้ผลการทดลองที่น่าเชื่อถือเป็นอย่างมาก พร้อมยืนยันว่าการเสริมแบบหล่อด้วยหีบแบบมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผลการทดลอง ล่าสุดในปี ค.ศ. 2013 Svidro กับ Dioszegi [7] ได้ใช้อุปกรณ์วัดการหดและขยายตัวทั้งสองทิศทางพร้อมกับวัดแรงดันของน้ำโลหะที่เกิดจากการขยายตัว (รูปที่ 5) พร้อมวัดอุณหภูมิที่ผิวและใจกลางชิ้นงาน ข้อสรุปจากงานวิจัยนี้คือการหดและการขยายตัวขึ้นอยู่กับทิศทาง (ด้านยาวหรือด้านหนา) เนื่องจากงานหล่อมีลักษณะเป็นแท่ง และแรงดันของน้ำโลหะมีความสอดคล้องกับการขยายตัว

-17-0000(077-088)P5.indd 80 4/10/61 BE 2:04 PM

จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวถึงก่อนหน้า พอที่จะสรุปได้โดยรวมดังนี้

1. การวัดการหดและขยายตัวด้วยการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์ให้ผลการทดลองที่สม่ำเสมอและมีความยุ่งยากน้อยกว่าการวัดโดยใช้ทุ่นลอยแกรไฟต์

2. แบบหล่อทรายที่ไม่มีความแข็งแรงเมื่อได้รับความร้อนจากน้ำโลหะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อซึ่งบิดเบือนผลการทดลอง ควรใช้หีบแบบเสริมความแข็งแรงให้กับแบบหล่อ

3. การบันทึกกราฟการเย็นตัวพร้อมกับการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ผลการทดลองทำให้ทราบช่วงเวลาการหดและขยายตัวระหว่างการแข็งตัว

4. การหดและขยายตัวขึ้นอยู่กับทิศทางและรูปร่างของชิ้นงานหล่อ

2. วิธีการวิจัย

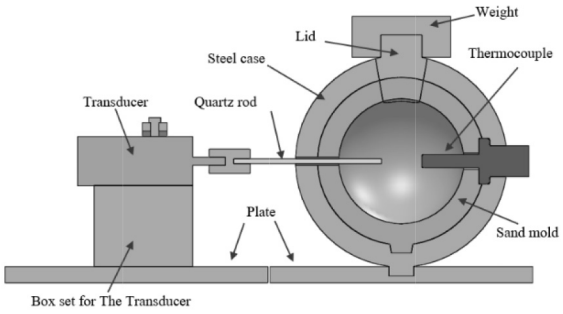
2.1 การออกแบบชุดอุปกรณ์วัดการหดและขยายตัว

การออกแบบนี้ (รูปที่ 6) ผู้วิจัยคาดว่าจะให้ผลที่เชื่อถือโดยให้สมมุติฐานดังนี้

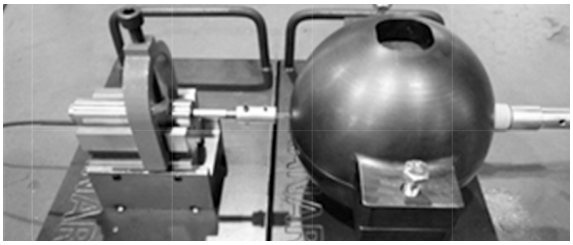
2.1.1 แบบหล่อทำจากทรายทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ผลิตด้วยเครื่องพิมพ์แบบหล่อสามมิติ (3D Mold Printer) ทำให้ปริมาณการหดและขยายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งงานหล่อ ทำให้ค่าที่วัดได้มีผลกระทบจากปัจจัยอื่นน้อย

2.1.2 การใช้เปลือกเหล็กกล้าห่อหุ้มและน้ำหนักกดทับฝาปิดช่วยลดการเคลื่อนที่ของทรายแบบหล่อ ทำให้รักษาแรงดันที่เกิดจากการขยายตัวของน้ำเหล็กได้ดีและมีความสม่ำเสมอ

2.1.3 การใช้เครื่องพิมพ์แบบหล่อสามมิติ ทำให้สามารถผลิตแบบหล่อทรงกลมได้โดยไม่มีเส้นแบ่งระหว่างหีบแบบ (Parting Line) และมีขนาดสม่ำเสมอทุกชิ้น ซึ่งลดปัญหาคลาดเคลื่อนจากการประกบแบบพร้อมกับสามารถติดตั้งแท่งควอทซ์และเทอร์โมคัปเปิลประเภท S ได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังมั่นใจได้ว่าไม่มีการรั่วของน้ำโลหะที่เส้นแบ่งระหว่างหีบแบบและรักษาความดันได้ดี



รูปที่ 6 แนวความคิดการออกแบบชุดอุปกรณ์การวัดปริมาณการหดและขยายตัวของผู้วิจัย



รูปที่ 7 ชุดอุปกรณ์วัดการหดและขยายตัวของผู้วิจัย

2.1.4 การให้เซ็นเซอร์ตำแหน่งเชิงเส้น (LVDT) อยู่ในแนวนอนทำให้การเคลื่อนที่ไม่ขึ้นอยู่กับแรงลอยตัวจากน้ำเหล็ก และการให้เทอร์โมคัปเปิลอยู่ในตำแหน่งตรงข้ามกับแท่งควอทซ์ ทำให้จุดศูนย์กลางความร้อนไม่เคลื่อนที่ไปจากใจกลางงานหล่อ

2.2 การประดิษฐ์และติดตั้ง

ประดิษฐ์และติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับงานวิจัยดังแสดงรูปที่ 7

2.3 การหลอมเหล็กดิบ

หลอมเหล็กดิบ (Pig Iron) ด้วยเตาหลอมโลหะ (Induction Furnace) โดยควบคุมปริมาณธาตุซิลิคอนให้อยู่ในช่วง 2.5–2.8% และทำการปรุงส่วนผสมทางเคมีตามที่ต้องการศึกษาวิจัย โดยคาร์บอนสมมูลหาได้จาก

$$\text{คาร์บอนสมมูล} = \%C + 0.31(\%Si+\%P) - 0.0027(\%Mn)$$

-17-0000(077-088)P5.indd 81 4/10/61 BE 2:04 PM

กรณีผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว จะมีการทำแมกนีเซียมทรีตเมนต์ ด้วยวิธี Sandwich Method โดยใช้ FeSiMg เป็นโนดูลลาไรเซอร์ และอุณหภูมิก่อนทำแมกนีเซียมทรีตเมนต์อยู่ที่ 1450°C

2.4 การเทน้ำโลหะ

2.4.1 ก่อนเทน้ำโลหะลงสู่ชิ้นงานวิจัยทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อ ด้วยเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ (Spectrometer) โดยมีคาร์บอนสมมูล (Carbon Equivalent; CE) ที่ต้องการศึกษาอยู่ระหว่าง 3.7–4.6

2.4.2 เทน้ำโลหะลงสู่เบ้ารองรับน้ำโลหะขนาดเล็กและเทลงสู่ชิ้นงานวิจัยทำการปิดฝาและใช้น้ำหนักกดทับเก็บผลข้อมูลจนชิ้นงานมีอุณหภูมิถึง 900°C แล้วนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ผล

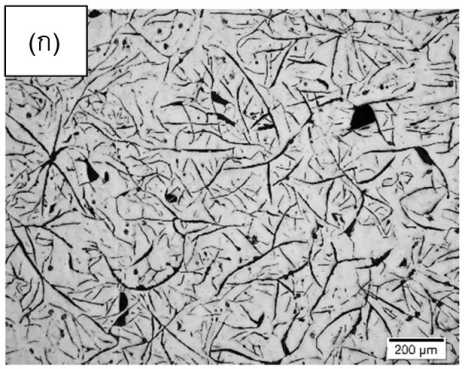
3. ผลการทดลอง

3.1 ส่วนผสมทางเคมี

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ เหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน และเหล็กหล่อเหนียว โดยมีคาร์บอนสมมูลที่ต้องการศึกษาอยู่ระหว่าง 3.7–4.6 โดยมีส่วนผสมทางเคมีภายหลังการหล่อแสดงดังตารางที่ 1

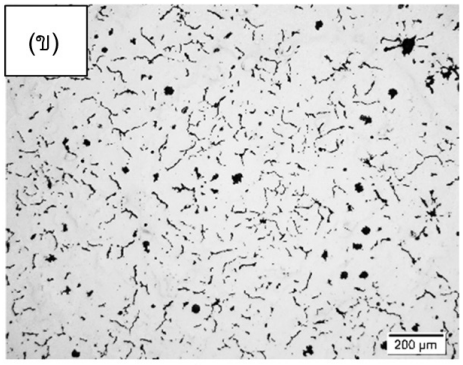
ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อที่ทำการศึกษา

	CE	C	Si	Mn	P	S	Mg
GI	3.75 4.04 4.26 4.46	2.88 3.19 3.40 3.63	2.61 2.56 2.58 2.50	0.067 0.050 0.036 0.038	0.031 0.030 0.022 0.035	0.016 0.012 0.020 0.021	<0.001 <0.001 <0.001 <0.001
CGI	3.71 4.13 4.30 4.48	2.81 3.24 3.42 3.59	2.71 2.67 2.64 2.66	0.094 0.049 0.028 0.027	0.029 0.037 0.036 0.043	0.033 0.022 0.014 0.026	0.025 0.014 0.007 0.008
DI	3.75 4.05 4.34 4.56	2.85 3.15 3.48 3.70	2.70 2.71 2.60 2.59	0.095 0.070 0.095 0.051	0.036 0.030 0.036 0.202	0.015 0.009 0.015 0.005	0.067 0.070 0.067 0.080



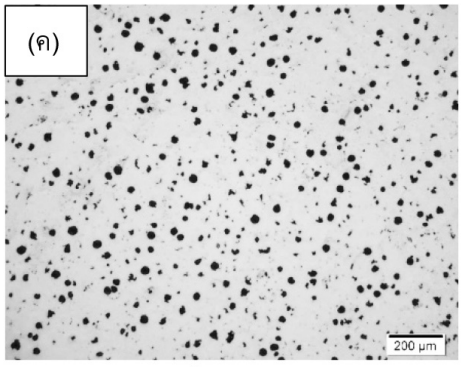
คาร์บอนสมมูล 4.26

% Visual Nodularity = 0



คาร์บอนสมมูล 4.30

% Visual Nodularity = 15

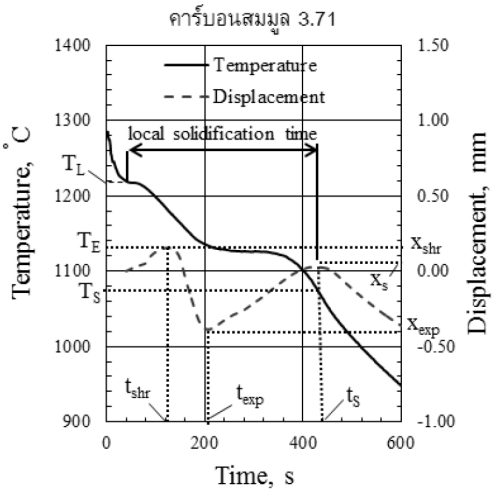


คาร์บอนสมมูล 4.34

% Visual Nodularity = 90

รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภท (ก) เหล็กหล่อเทา (ข) เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน (ค) เหล็กหล่อเหนียว

-17-0000(077-088)P5.indd 82 4/10/61 BE 2:04 PM



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นและระยะการเคลื่อนที่ของ LVDT ของเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน

3.2 โครงสร้างจุลภาค

ตรวจสอบลักษณะของแกรไฟต์ที่เกิดขึ้นภายหลังการหล่อโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วยแกรไฟต์ (สีดำ) และโครงสร้างพื้น (สีขาว) [รูปที่ 8 (ก)] เหล็กหล่อเทาที่แสดงให้เห็นลักษณะแกรไฟต์แบบแผ่น (Flake Graphite) [รูปที่ 8 (ข)] เหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนมีการเติมธาตุแมกนีเซียม (Mg) ประมาณ 0.009–0.015% ทำให้เกิดการฟอร์มแกรไฟต์จากลักษณะแบบแผ่นเป็นรูปทรงคล้ายตัวหนอน (Compacted Graphite) [รูปที่ 8 (ค)] เหล็กหล่อเหนียวการเติมธาตุแมกนีเซียมประมาณ 0.02–0.08% จะทำให้ฟอร์มแกรไฟต์เป็นเม็ดกลม และต้องมีความกลมของแกรไฟต์ (Nodularty) มากกว่า 80%

3.3 กราฟการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่

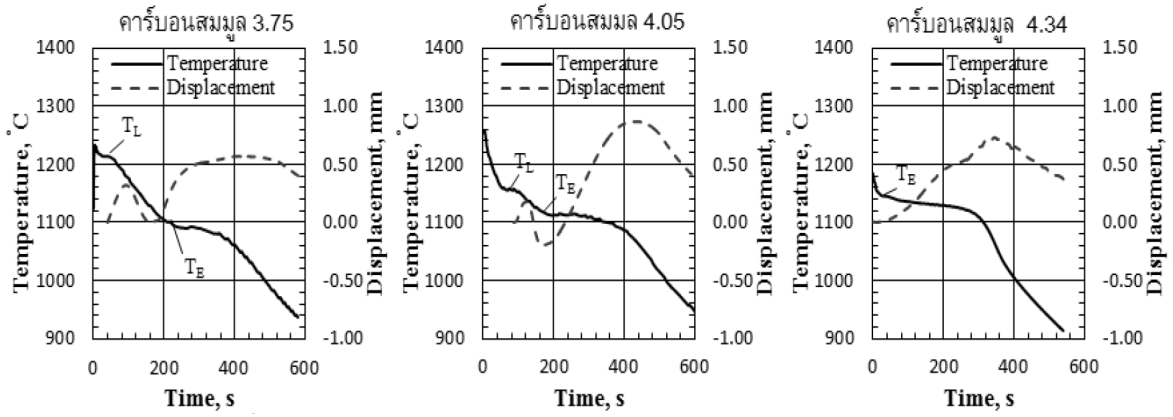
หัวข้อนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นตัวและกราฟการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน ที่วัดได้จากการเคลื่อนที่ของแท่งควอทซ์ โดยรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นและระยะการเคลื่อนที่ของ LVDT ให้เห็นพฤติกรรมการแข็งตัวของเหล็กหล่อประเภทไฮโปยูเทกติก ที่สามารถอธิบายการหดตัวเนื่องจากออสเตนไนท์และการขยายตัวของแกรไฟต์ โดยเริ่มต้นเกิดการหดตัวของออสเตนไนท์ เนื่องจากอุณหภูมิลดต่ำลงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (TL) ออสเตนไนท์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกไปจับยึดแท่งควอทซ์ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานทำให้ค่าแสดงออกมาติดลบหรือหดตัว และเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิยูเทกติก (T_E) จะพบการขยายตัวของแกรไฟต์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยายูเทกติก ทำให้แท่งควอทซ์ถูกผลักออกจากชิ้นงานเคลื่อนที่เป็นบวกหรือขยายตัว การขยายตัวของแกรไฟต์เป็นไปอย่างต่อเนื่องและสิ้นสุดการขยายตัวเมื่อสิ้นสุดการแข็งตัว

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อ

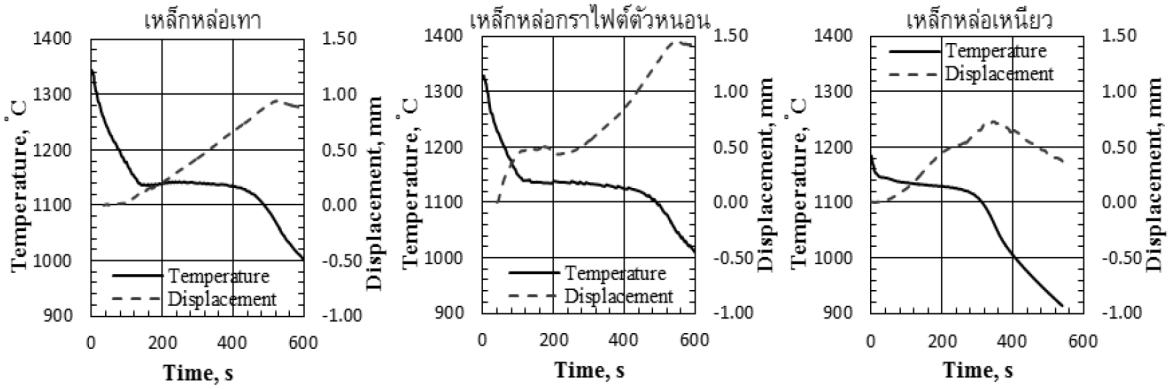
วิเคราะห์การเคลื่อนที่เชิงเส้น		**วิเคราะห์กราฟการเย็นตัว**	
x_{shr}	การเคลื่อนที่เริ่มต้นของการหดตัว	T_L	อุณหภูมิลิควิดัส
x_{exp}	การเคลื่อนที่เริ่มต้นของการขยายตัว	T_S	อุณหภูมิสุดท้ายของการแข็งตัว
$x_{S,LVDT}$	การเคลื่อนที่สุดท้ายของการขยายตัว	T_E	อุณหภูมิเริ่มต้นของการแข็งตัว
t_{shr}	เวลาเริ่มต้นของการหดตัว		
t_{exp}	เวลาเริ่มต้นของการขยายตัว		
t_S	เวลาสุดท้ายของการขยายตัว		
Δx_{shr}	ระยะการหดตัวของออสเตนไนท์ $\Delta x_{shr} = x_{exp} - x_{shr}$		
Δx_{exp}	ระยะการขยายตัวของแกรไฟต์ $\Delta x_{exp} = x_{S,LVDT} - x_{exp}$		
Δt_{shr}	เวลาทั้งหมดที่เกิดการหดตัว $\Delta t_{shr} = t_{exp} - t_{shr}$		
Δt_{exp}	เวลาทั้งหมดที่เกิดการขยายตัว $\Delta t_{exp} = t_{S,LVDT} - t_{exp}$		

ตารางที่ 2 แสดงสัญลักษณ์ที่ใช้ในการอภิปราย จากรูปที่ 10 เมื่อพิจารณากราฟการเย็นตัวจะเห็นได้ว่าเหล็กหล่อ

-17-0000(077-088)P5.indd 83 4/10/61 BE 2:04 PM



รูปที่ 10 กราฟการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ LVDT ของเหล็กหล่อเหนียว



รูปที่ 11 กราฟการเย็นตัวและระยะการเคลื่อนที่ LVDT ของเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภท ที่มีส่วนผสมยูเทกติก

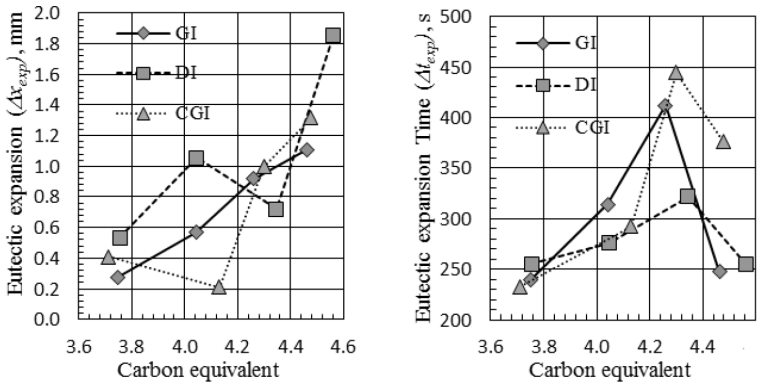
ที่มีค่าคาร์บอนสมมูลมากขึ้น และยังพบอีกว่าเมื่อคาร์บอนสมมูลที่เพิ่มขึ้น ทำให้พบปริมาณการหดตัวเนื่องจากออสเตนไนท์น้อยหรืออาจไม่พบการหดตัว เนื่องจากออสเตนไนท์เลย โดยปกติเหล็กหล่อประเภทไฮโปยูเทกติกจะพบการหดตัวเนื่องจากออสเตนไนท์ก่อนเนื่องจากออสเตนไนท์เกิดเป็นอันดับแรกและตามด้วยการขยายตัวของแกรไฟต์จากปฏิกิริยายูเทกติก ส่วนกรณีของไฮเปอร์ยูเทกติกจะพบว่ามีการขยายตัวของแกรไฟต์ก่อนเพราะ (Primary Graphite) เกิดขึ้นก่อนโครงสร้างยูเทกติกทำให้มีการขยายตัวของแกรไฟต์เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อนั้นไม่ได้ขึ้นกับประเภทเหล็กหล่อ มีแนวโน้มให้ระยะการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน

4. วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 อิทธิพลของคาร์บอนสมมูล

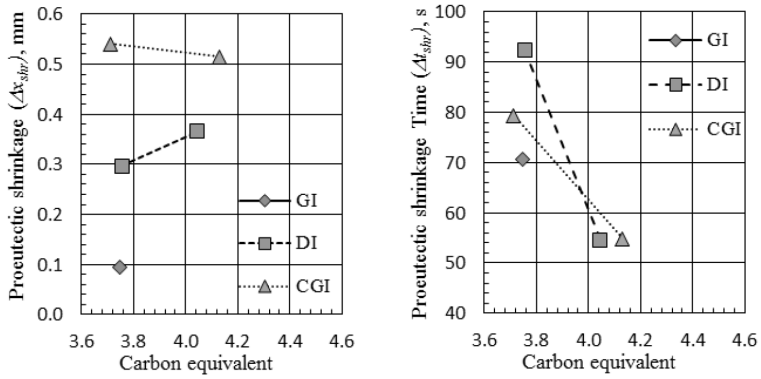
จากรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนสมมูลกับการขยายตัวเนื่องจากปฏิกิริยายูเทกติก เหล็กหล่อที่มีคาร์บอนสมมูลเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้ปริมาณการขยายตัวของแกรไฟต์ และช่วงเวลาการขยายตัวเพิ่มขึ้น สำหรับกรณีของเหล็กหล่อที่คาร์บอนสมมูลมากกว่า 4.3 (ไฮเปอร์ยูเทกติก) พบปริมาณการขยายตัวของแกรไฟต์มากและพบช่วงเวลาที่เกิดการขยายตัวสั้น สันนิษฐานว่าช่วงแรกที่อุณหภูมิของน้ำโลหะต่ำกว่าอุณหภูมิลิคิวดัส (T_L) แกรไฟต์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรก (Primary Graphite) ไม่สามารถจับยึดแท่งควอทซ์ได้ เนื่องจากเหล็กหล่อไฮเปอร์ยูเทกติกนั้นมีการแข็งตัวแบบหลายบริเวณ (Mushy) ทำให้ไม่สามารถ

-17-0000(077-088)P5.indd 84 4/10/61 BE 2:04 PM



(ก) (ข)

รูปที่ 12 (ก) อิทธิพลของคาร์บอนสมมูลที่มีต่อการขยายตัวเนื่องจากแกรไฟต์ (ข) ช่วงเวลาการขยายตัวจากแกรไฟต์



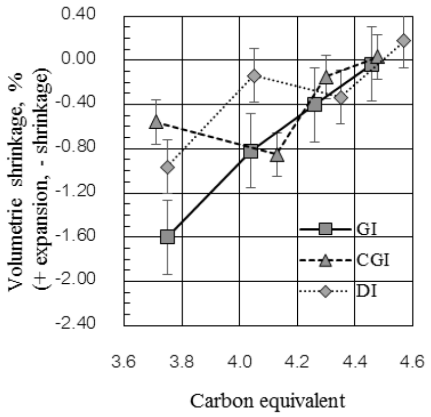
(ก) (ข)

รูปที่ 13 (ก) อิทธิพลของคาร์บอนสมมูลที่มีต่อการหดตัวเนื่องจากออสเตนไนท์ (ข) ช่วงเวลาการหดตัวออสเตนไนท์

วัดปริมาณการขยายตัวของแกรไฟต์ที่เกิดขึ้น ในช่วงแรกได้ส่งผลให้ช่วงเวลาที่เกิดการขยายตัวของแกรไฟต์ (Δt_{exp}) สั้นกว่าเหล็กหล่อส่วนผสมยูเทกติกแต่มีปริมาณการขยายตัวจากแกรไฟต์ (Δx_{exp}) ที่มาก เป็นผลมาจากแกรไฟต์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรก (Primary Graphite) ทำให้มีแรงดันของแกรไฟต์สูง โดยปริมาณการขยายตัวของแกรไฟต์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.21–1.8 มิลลิเมตร และระยะเวลาในการขยายตัวของแกรไฟต์อยู่ระหว่าง 230–440 วินาที สำหรับเหล็กหล่อที่มีค่าคาร์บอนสมมูลอยู่ระหว่าง 3.7–4.56 นอกจากนี้รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนสมมูลกับการหดตัวเนื่องจากออสเตนไนท์ จะเห็นได้ว่าไม่สามารถสรุปการหดตัวเนื่องจากออสเตนไนท์ได้เนื่องจากข้อมูลที่ได้ไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ถ้าเป็นไปตามทฤษฎีคาร์บอนสมมูลที่ต่ำ จะมีปริมาณการหดตัวเนื่องจากออสเตนไนท์มาก

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chisamera [6] และ Stefanescu [8] ทั้งสองงานวิจัยนี้ได้ให้ข้อสรุปเกี่ยวกับคาร์บอนสมมูลว่า เหล็กหล่อที่มีคาร์บอนสมมูลเพิ่มขึ้นจะมีปริมาณการขยายตัวสูงขึ้นและมีเวลาในการขยายตัวนานอย่างไรก็ดีงานวิจัยของ Stefanescu [8] ได้ตั้งข้อสังเกตว่าเหล็กหล่อเทาให้ผลการทดลองที่สม่ำเสมอกว่าทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากพฤติกรรมแข็งตัวที่เริ่มต้นจากที่ผิวซึ่งยึดจับกับแท่งควอทซ์ตั้งแต่เริ่มต้นของการแข็งตัว แต่เหล็กหล่อเหนียวและแกรไฟต์ตัวหนอนซึ่งแข็งตัวแบบ Mushy จึงไม่ยึดจับกับแท่ง

-17-0000(077-088)P5.indd 85 4/10/61 BE 2:04 PM

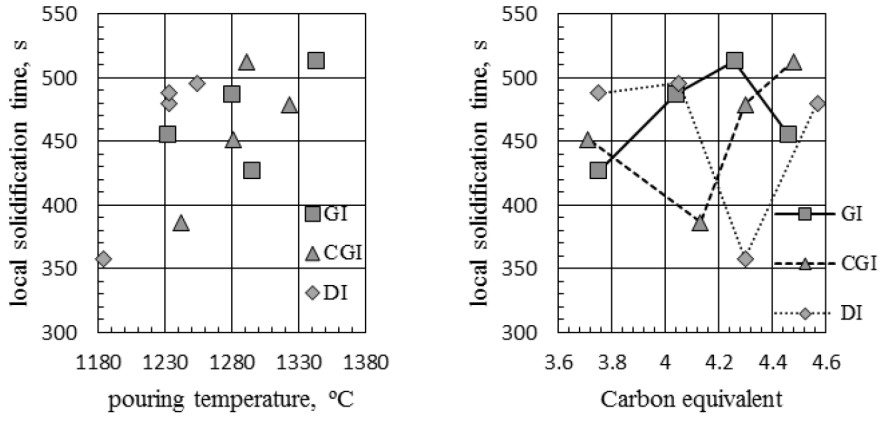


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดชิ้นงานภายหลังการแข็งตัวกับคาร์บอนสมมูล

ควอทซ์ตั้งแต่ต้นจึงได้ผลไม่ค่อยสม่ำเสมอ รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดชิ้นงานภายหลังการแข็งตัวกับคาร์บอนสมมูล แสดงให้เห็นถึงขนาดของชิ้นงานภายหลังแข็งตัวโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลงไปโดยกำหนดให้ขนาดชิ้นงานเริ่มต้นเท่ากับ 0 อย่างไรก็ดีจะเห็นได้ว่าเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนสมมูลมากกว่า 4.3 จะให้ขนาดชิ้นงานภายหลังการแข็งตัวที่ใหญ่ขึ้นกว่าชิ้นงานเริ่มต้น 0.03–0.18% อาจเกิดจากการที่มีแรงดันและการขยายตัวของแกรไฟต์จากปฏิกิริยายูเทกติกมาก ทำให้แบบหล่อทรายไม่สามารถรักษามิติของชิ้นงานและแรงดันไว้ได้ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อเกิดความเสียหาย โดยขนาดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นยังแสดงให้เห็นผลของคาร์บอนสมมูล แต่อย่างไรก็ดีงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแบบหล่อทรายยังไม่มีความแข็งแรงมากพอที่จะรับแรงดันที่เกิดจากการขยายตัวของแกรไฟต์ประเภทเหล็กหล่อไฮเปอร์ยูเทกติก ก่อนหน้านี้ได้มีงานวิจัย Gedeonova [5] ที่ศึกษาผลการใช้และไม่ใช้หีบแบบหล่อเพื่อลดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อ และสรุปได้ว่าการใช้หีบแบบหล่อนั้นสามารถลดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อได้และการใช้แบบหล่อที่มีความแข็งแรงจะมีประโยชน์มาก เนื่องจากจะช่วยรักษามิติของชิ้นงานและแรงดันแกรไฟต์ไว้ได้ งานวิจัยนี้ยังยืนยันข้อสรุปของ Gedeonova [5]

4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิเท

จากผลการทดลองแสดงในรูปที่ 15 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทกับช่วงเวลาในการแข็งตัว และรูปที่ 15 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทกับเวลาในการแข็งตัว (Local Solidification Time) พบว่าเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียวที่มีอุณหภูมิเทต่ำกว่าเหล็กหล่อในประเภทเดียวกัน ทำให้ชิ้นงานเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการเย็นตัวอย่างไม่สมดุล



(ก) (ข)

รูปที่ 15 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเทกับช่วงเวลาในการแข็งตัว (ข) คาร์บอนสมมูลของเหล็กหล่อ ทั้ง 3 ประเภทกับช่วงเวลาในการแข็งตัว

-17-0000(077-088)P5.indd 86 4/10/61 BE 2:04 PM

ส่งผลกระทบให้เลื่อนปฏิกิริยายูเทกติกไปทางขวาและกดเส้นอุณหภูมิยูเทกติกให้ต่ำลงจากแผนภูมิสมดุลเหล็กและคาร์ไบค์ ทำให้พบปริมาณออสเตนไนท์เพิ่มขึ้นและการเย็นตัวอย่างรวดเร็วยังส่งผลให้ช่วงเวลาการแข็งตัวของชิ้นงานสั้นจากรูปที่ 15 (ข) กรณีของเหล็กหล่อเหนียวที่มีคาร์บอนสมมูล 4.30 มีอุณหภูมิเท 1,180°C ซึ่งมีอุณหภูมิเทต่ำกว่าเหล็กหล่อประเภทเดียวกัน ทำให้ช่วงเวลาการแข็งตัวนั้นสั้นอยู่ที่ประมาณ 360 วินาที เมื่อเทียบกับเหล็กหล่อประเภทเดียวกันที่มีอุณหภูมิเทมากกว่า 1,230°C และเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานอยู่ที่ 470-500 วินาที ส่งผลให้ปริมาณการขยายตัวของแกรไฟต์ที่แสดงในรูปที่ 12 (ก) มีค่าน้อยกว่าปกติ

5. สรุป

การศึกษาพฤติกรรมการหดและขยายตัวระหว่างการแข็งตัวของเหล็กหล่อด้วยวิธีวัดการเคลื่อนที่เชิงเส้น จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมการหดและขยายตัวของเหล็กหล่อทั้ง 3 ประเภท จะให้พฤติกรรมการหดและขยายตัวที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากรูปทรงแกรไฟต์ เมื่อพิจารณาปริมาณการขยายตัวพบว่าเหล็กหล่อเหนียวมีแนวโน้มให้ปริมาณการขยายตัวจากแกรไฟต์มากที่สุด สันนิษฐานว่าเหล็กหล่อเหนียวมีอันเดอร์คูลลิ่งมากแต่น้อยกว่าเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอน แต่เนื่องจากเหล็กหล่อเหนียวมีนิวเคลียสในการเกิดแกรไฟต์มาก ทำให้มีปริมาณการขยายตัวของแกรไฟต์จากปฏิกิริยายูเทกติกมาก รองลงมาคือเหล็กหล่อแกรไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเทา ตามลำดับ

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

3. ระยะเวลาในการขยายตัวของแกรไฟต์มีระยะเวลานานขึ้น เมื่อมีคาร์บอนสมมูลมากขึ้น โดยมีระยะเวลาระหว่าง 230–440 วินาที สำหรับเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนสมมูลอยู่ในช่วง 3.7–4.56

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

5. ขนาดชิ้นงานภายหลังการแข็งตัวมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อคาร์บอนสมมูลมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าน่าจะเกิดการเคลื่อนที่ของผนังแบบหล่อระหว่างการแข็งตัว เป็นสาเหตุให้ระยะเวลาในการขยายตัวของแกรไฟต์สั้นลงในกรณีเหล็กหล่อไฮเปอร์ยูเทกติก โดยมีระยะเวลา 247–376 วินาที สำหรับเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนสมมูลอยู่ในช่วง 4.46–4.5

เอกสารอ้างอิง

[1] Ministry of commerce. (2016, December). Thailand Trading export [Online]. Available: http://www.ops3.moc.go.th/.

[2] W. A. Schmidt, E. Sullivan, and H. F. Taylor, “Risering of gray iron castings,” *Trans AFS,* vol. 62, pp. 70–77, 1954.

[3] Y. Zou, “Influence of mold material and CE value on shrinkage of spherical graphite cast iron,” in *Proceeding of the 70th World Foundry Congress,* Mexico, April 2012, pp. 11.

[4] D. M. Stefanescu, “Production of vermicular graphite cast irons by operative control and correction of graphite shape,” in *Proceeding of the 46th international Foundry Congress CIATF,* Spain, October 1979, pp. 37.

[5] Z. Gedeonova, “Displacement on the surface mould and metal during the solidification of nodular graphite iron casting,” *Material Science Forum,* vol. 2, pp. 391–398, 1995.

[6] M. Chisamera, I. Riposan, S. Stan, P. Toboc, T. Skaland, and D. White, “Shrinkage evaluation in ductile iron as influenced by mould media and inoculant type,” *International journal of cast metals,* vol. 24, no. 1, pp. 28–36, 2011.

-17-0000(077-088)P5.indd 87 4/10/61 BE 2:04 PM

[7] P. Svidro and A. Dioszeg, "On problems of volume change measurements in lamellar cast iron," *International Journal of Cast Metals Research,* vol. 27, no. 1, pp. 26-37, 2013.

[8] G. Alonso, D. M. Stefanescu, R. Suarez, and G. Zarrabeitia, "Understanding graphite expansion during the eutectic solidification of cast iron through combined linear displacement and thermal analysis," *International Foundry Research,* vol. 66, no. 4, pp. 1–12, January 2014.

[9] D. M . Stefanescu, M. Moran, and S. Boonmee, "The use of combined liquid displacement and cooling curve analysis in understanding the solidification of cast iron," in *AFS Proceedings,* 2012, pp. 365–374.

[10] G. L. Rivera, R.E. Boeri, and J.A. Sikora, "Solidification of gray cast iron," *Scripta Materialia,* vol. 50, pp. 331–335, 2013.

[11] A. Dioszegi and I. L. Svensson, "On the problems of thermal analysis of solidification," *Materials Science and Engineering,* vol. 413, pp. 474-479, 2016.

-17-0000(077-088)P5.indd 88 4/10/61 BE 2:04 PM