



## รายงานการวิจัย

# การพัฒนาต้นแบบระบบวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับอุตสาหกรรม การผลิตเหล็กหล่อ (Prototyping of Thermal Analysis System for Cast Iron Industry)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สारัมภ์ บุญมี

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2561

รหัสโครงการ SUT-713-58-12-62



## รายงานการวิจัย

การพัฒนาต้นแบบระบบวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมการผลิต  
เหล็กหล่อ

Prototyping of Thermal Analysis System for Cast Iron Industry

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2558 ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ความเอื้อเฟื้อสถานที่วิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ของศูนย์ฯ ที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้สนับสนุนวัสดุสิ้นเปลืองบางส่วนในการวิจัยได้แก่ บริษัท พีเอส สตีล จำกัด ขอขอบคุณ บริษัท ESI group ที่เอื้อเฟื้ออนุญาตให้ใช้ซอฟต์แวร์จำลองการหล่อโลหะเพื่อการวิจัยโดยไม่มีค่าใช้จ่าย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการในหน่วยวิจัยการประยุกต์ใช้โลหะวิทยาเพื่อการขึ้นรูปโลหะในฐานะผู้ช่วยวิจัย เนื่องด้วยธรรมชาติของงานวิจัยที่ต้องทำเป็นหมู่คณะ ซึ่งเป็นบทพิสูจน์ของการทำงานเป็นทีม ความพยายาม และความอุตสาหะได้เป็นอย่างดี

สารัมภ์ บุญมี

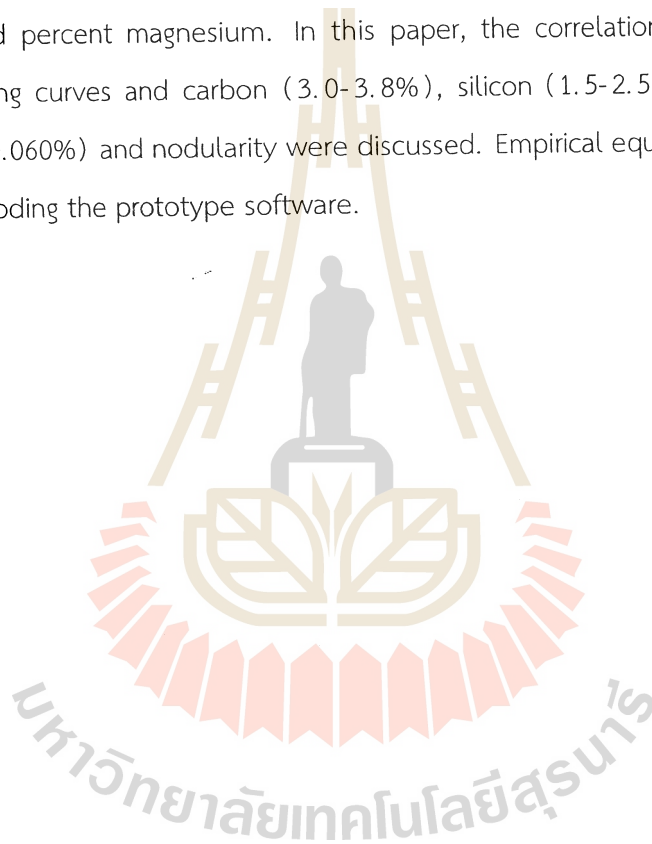


## บทคัดย่อ

โดยทั่วไปการควบคุมคุณภาพน้ำโลหะในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กหล่อทำโดยเทคนิค ออฟติคัลอีมิสชันสเปกโตรเมทรี (Optical Emission Spectrometry) เทคนิคนี้ใช้หาส่วนผสมทางเคมีของน้ำโลหะทำให้สามารถปรับส่วนผสมทางเคมีให้ไปตามต้องการก่อนการเทหล่อ ในการวิจัยครั้งนี้ระบบวิเคราะห์ทางความร้อนถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพน้ำโลหะ สามารถใช้ทำนายส่วนผสมทางเคมีโดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ลักษณะของกราฟการเย็นตัวที่วัดได้ แล้วนำไปคำนวณทำนายส่วนผสมทางเคมีจากสมการสหสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้น นอกจากนี้เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนยังสามารถให้ข้อมูลเพิ่มเติมเช่น อัตราการเย็นตัวและแอนเดอร์คูลิ่ง ซึ่งสามารถใช้ทำนายปริมาณคาร์บอน ซิลิกอน แมกนีเซียม คาร์บอนสมมูลได้ ในการวิจัยครั้งนี้ได้วิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างลักษณะกราฟการเย็นตัว ส่วนผสมทางเคมีในช่วง คาร์บอน 3.0 – 3.8% ซิลิกอน 1.5 – 2.5% แมกนีเซียม 0 – 0.06% และความกลมของกราไฟต์ สมการที่พัฒนาขึ้นจากสหสัมพันธ์ที่ได้ถูกนำไปเขียนโปรแกรมสำหรับระบบวิเคราะห์ทางความร้อนที่พัฒนาขึ้น

## Abstract

Melt quality control of cast iron is normally conducted by the Optical Emission Spectrometry (OES). This technique determines the chemical composition of iron melt allowing the chemical adjustment before pouring. In this study, the thermal analysis system has been developed to predict the chemical composition in the iron melt. The principle of the technique is the implementation of the characteristics of the cooling curves of sampled iron to correlate with the compositions. Furthermore, the technique can provide additional information such as cooling rate and undercooling in which can be correlated to percent carbon, percent silicon and percent magnesium. In this paper, the correlations between characteristics of the cooling curves and carbon (3.0-3.8%), silicon (1.5-2.5%), carbon equivalent, magnesium (0-0.060%) and nodularity were discussed. Empirical equations were proposed and used for encoding the prototype software.



## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญภาพ .....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหา .....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
ขอบเขตของการวิจัย .....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
บทนำ.....	3
การทำนายเหล็กหล่อเทา.....	4
การทำนายเหล็กหล่อเหนียว.....	6
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
บทนำ.....	12
การออกแบบชุดอุปกรณ์และสร้างอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน.....	13
การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ.....	16
การสร้างโปรแกรมสำหรับการทำนาย %C %Si และ% Mg.....	20
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
บทนำ .....	22
การทำนายส่วนผสมทางเคมี.....	23
การสร้างระบบต้นแบบซอฟต์แวร์.....	30
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
สรุปผลการวิจัย .....	38
ข้อเสนอแนะ .....	39
บรรณานุกรม .....	40
ภาคผนวก	

ภาคผนวก ก .....	41
ประวัติผู้วิจัย .....	47



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ช่วงของส่วนผสมทางเคมีที่ใช้ในการศึกษา.....	13
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน.....	15
ตารางที่ 4.1 วิเคราะห์สหสัมพันธ์สำหรับเหล็กหล่อเทา.....	23
ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์สหสัมพันธ์สำหรับเหล็กหล่อเหนียว.....	23
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดต้นทุ่นต้นแบบระบบวิเคราะห์ทางความร้อน.....	37





สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 SMART LAB –Carbon Silicon Analyzer CE meter System.....	1
รูปที่ 2.1 สมดุลของระบบ Fe-C กับการเพิ่ม Si และกราฟการแข็งตัวของโลหะผสม C <sub>0</sub> .....	3
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบกราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราฟไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว.....	4
รูปที่ 2.3 รูปแบบคำศัพท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับเหล็กหล่อ.....	6
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $T_{E_{max}}$ ( $T_{ER}$ ) และ $\Delta T_{max}$ .....	7
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบบริเนลและ $\Delta T_{max}$ .....	8
รูปที่ 2.6 กราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเหนียว.....	8
รูปที่ 2.7 การอธิบายของกราฟการเย็นตัวเพื่อการทำนายการแข็งตัวในเหล็กหล่อที่สมดุลหรือกึ่งสมดุล.....	9
รูปที่ 2.8 ผลของ Bi อินน็อคคูเลชั่น ในเหล็กหล่อ SG.....	9
รูปที่ 2.9 กราฟการเย็นตัวสำหรับ โลหะผสม ไฮโปยูเทคติก ตามทฤษฎีและการทดลอง.....	10
รูปที่ 2.10 กราฟการเย็นตัวกราฟอัตราการเย็นตัวและ Fourier Zero Curve สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม.....	11
รูปที่ 3.1 ลำดับการทดลอง.....	12
รูปที่ 3.2 ถ้วยรองรับน้ำโลหะ.....	14
รูปที่ 3.3 รูปแบบชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน.....	14
รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน.....	15
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	17
รูปที่ 3.6 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	18
รูปที่ 3.7 แนวคิดกราฟความสัมพันธ์สำหรับเหล็กหล่อเทา.....	20
รูปที่ 3.8 แนวคิดกราฟความสัมพันธ์สำหรับเหล็กหล่อเหนียว.....	21
รูปที่ 3.9 แนวคิดลำดับการทำงานของซอฟต์แวร์.....	21
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกราฟการเย็นตัวและนิยามคำศัพท์.....	22
รูปที่ 4.2 กราฟการเย็นตัวที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่างกัน.....	24
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤตกับคาร์บอน.....	25

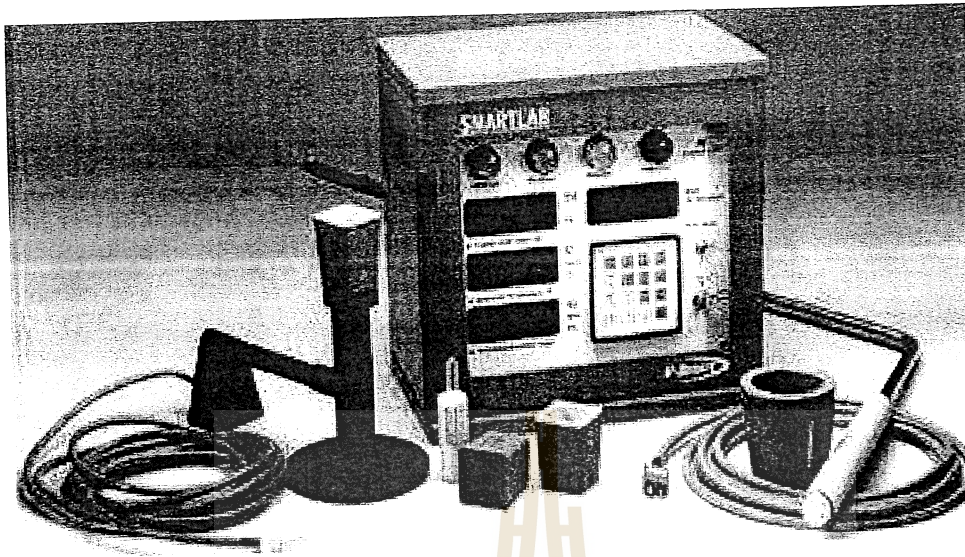
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตซ์กับคาร์บอน.....	25
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตซ์กับคาร์บอนผสม.....	26
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตซ์กับคาร์บอนผสม.....	26
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหตุเกิดกับซิลิกอน.....	27
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวกับแมกนีเซียม.....	28
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวสูงสุดกับแมกนีเซียม.....	29
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\theta$ กับแมกนีเซียม.....	29
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Nodularity และ %Mg.....	30
รูปที่ 4.11 แผนภาพการทำงานของงานระบบต้นแบบซอฟต์แวร์สำหรับโหมดเหล็กหล่อเทา.....	31
รูปที่ 4.12 แผนภาพการทำงานของงานระบบต้นแบบซอฟต์แวร์สำหรับโหมดเหล็กหล่อเหนียว.....	33
รูปที่ 4.13 แผนผังการทำงานของโปรแกรมทำนาย %C.....	33
รูปที่ 4.14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมทำนาย CE.....	34
รูปที่ 4.15 แผนผังการทำงานของโปรแกรมทำนาย %Si.....	35
รูปที่ 4.16 ตัวอย่างภาพหน้าจอของซอฟต์แวร์ต้นแบบ.....	36

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เหล็กหล่อมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์และมีบ้างเล็กน้อยสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ เนื่องจากผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ กลึงไสตัดเจาะได้ง่าย มีอุณหภูมิในการหลอมตัวต่ำ มีความสามารถในการไหลดี มีอัตราการขยายตัวน้อย มีความต้านทานแรงอัด รับแรงสั่นได้ดี และสามารถปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานแรงดึงได้ เพื่อให้ได้สมบัติของงานหล่อที่ต้องต่อความต้องการของผู้ผลิต การควบคุมคุณภาพการผลิตเหล็กหล่อจึงมีความสำคัญอย่างมากโดยเฉพาะการผลิตเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียวซึ่งมีมากในประเทศไทย ปัจจัยที่ทำให้สามารถผลิตเหล็กหล่อให้ได้ตรงตามต้องการนั้นประกอบด้วยส่วนสำคัญได้แก่ น้ำเหล็กที่ได้หลังกระบวนการหลอมจะต้องมีคุณภาพเหมาะสมก่อนการหล่อขึ้นรูป โดยปัจจุบันยังอาศัยการใช้เครื่อง Optical Emission Spectrometer ในการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีซึ่งมีความแม่นยำแม้ว่าจะยังมีข้อเสียคือ ใช้เวลานานในการตรวจสอบและไม่สามารถทำนายปรากฏการณ์อื่นนอกเหนือจากส่วนผสมทางเคมีได้ ภายหลังจากได้มีการพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนขึ้น เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบคุณภาพของน้ำเหล็กประกอบกับเทคโนโลยีที่ทันสมัยมากขึ้นช่วยทำให้การควบคุมคุณภาพน้ำเหล็กง่ายและรวดเร็วขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์เหล็กหล่อภายหลังการหล่อได้มาตรฐานการผลิต ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนนี้จะวัดค่า คาร์บอนสมมูล (CE) คาร์บอน (%C) และ ซิลิกอน (%Si) เป็นหลัก ซึ่งเป็นตัวแปรพื้นฐานสำหรับการควบคุมคุณภาพน้ำเหล็ก ปัจจุบันได้มีการใช้ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนกันอย่างแพร่หลายในกลุ่มประเทศที่พัฒนาแล้ว สำหรับประเทศไทยก็มีการใช้เช่นกันแต่เป็นการนำเข้าจากต่างประเทศไม่ได้เป็นผู้ผลิตเอง และการนำเข้าจากต่างประเทศนั้นยังใช้ต้นทุนสูง



รูปที่ 1.1 SMART LAB -Carbon Silicon Analyzer CE meter System [1]

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ตรวจสอบคุณภาพของน้ำเหล็กด้วยเทคนิควิเคราะห์ทางความร้อน ต้นทุนต่ำสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 เป็นการพัฒนาต้นแบบระบบวิเคราะห์ทางความร้อนประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ สามารถใช้ทำนายคุณภาพของน้ำเหล็ก เช่น ปริมาณคาร์บอน ซิลิกอน และรูปร่างกราไฟต์ได้

1.3.2 ฮาร์ดแวร์ ประกอบด้วย ถ้วยรองน้ำเหล็ก เทอร์โมคัปเปิล ฐานติดตั้งระบบ เก็บข้อมูล ดิจิตอล และคอมพิวเตอร์

1.3.3 ซอฟต์แวร์ ทำหน้าที่เก็บข้อมูล ประมวลผล แสดงผล และเป็นส่วนติดต่อประสานงานกับผู้ใช้

1.3.4 ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ตรวจสอบคุณภาพน้ำเหล็กในการผลิตเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน เหล็กหล่อเหนียว

1.3.5 ควบคุมปริมาณแมงกานีส กำมะถัน และฟอสฟอรัสให้อยู่ในเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการผลิตเหล็กหล่อในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งได้แก่ 0.005 - 0.010%S และ 0.01 - 0.03%P ตามลำดับ

1.3.6 ตัวแปรที่สนใจได้แก่ อุณหภูมิเต (1350 -1500 °C) คาร์บอน (3.0 - 4.0%) ซิลิกอน (1.8 - 2.4%) แมกนีเซียม (0 - 0.06%)

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับตรวจสอบคุณภาพน้ำเหล็กหล่อด้วยต้นทุนต่ำ

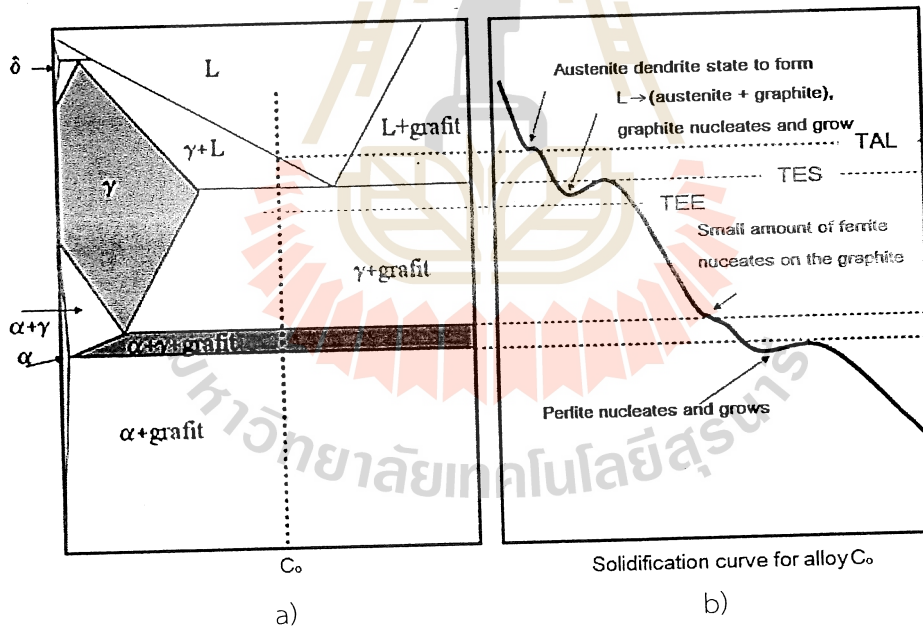


## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

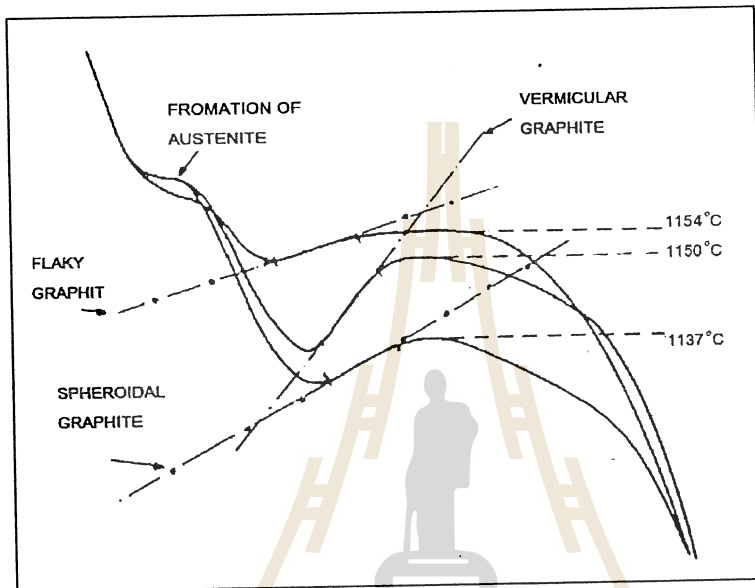
#### 2.1 บทนำ

การวิเคราะห์ทางความร้อนเป็นเทคนิคที่ช่วยในการประเมินคุณภาพของงานหล่อซึ่งจะช่วยให้งานหล่อนั้นได้คุณภาพตามมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยจะอาศัยหลักการการแข็งตัวของเหล็กหล่อ เนื่องจากเหล็กหล่อแต่ละชนิดที่ตัวแปรแตกต่างกันก็จะให้กราฟการเย็นตัว (Cooling Curve) ที่แตกต่างกัน เช่น อุนท์มิเท ส่วนผสมทางเคมี คุณสมบัติของการอินทรีย์คูลเลอร์ เป็นต้น การวิเคราะห์ทางความร้อนในงานหล่อโลหะอาศัยหลักการคายความร้อน ในขณะที่โลหะแข็งตัว ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุนท์มิและอัตราการเย็นตัว ส่งผลให้กราฟการเย็นตัวเปลี่ยนแปลงไป รูปที่ 2.1 a) แสดง สมดุลของระบบ เหล็กกับกราไฟต์ (Fe-Gr) กับการเพิ่ม Si และ รูปที่ 2.1 b) แสดงกราฟการแข็งตัวของเหล็กหล่อส่วนผสม  $C_0$  ลักษณะที่สำคัญของกราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อยกตัวอย่างเช่น อัตราการเย็นตัว ( $dT/dt$ ) อุนท์มิลิควิตัส ( $T_L$ ) อุนท์มิยูเทคติก ( $T_E$ ) อันเตอร์คูลลิ่งสูงสุด ( $\Delta T_{max}$ ) อันเตอร์คูลลิ่งต่ำสุด ( $\Delta T_{min}$ ) รีแคลเลชัน ( $\Delta T$ ) เวลาในการแข็งตัว และ เวลาในการแข็งตัวรวม



รูปที่ 2.1 สมดุลของระบบ Fe-C กับการเพิ่ม Si และกราฟการแข็งตัวของเหล็กหล่อส่วนผสม  $C_0$ . [2]

ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันและขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี อัตราการเย็นตัว อุณหภูมิเท ขนาดของงานหล่อ ระดับการอินอกซิเดชัน เป็นต้น จึงจะสามารถใช้กราฟการเย็นตัวในการควบคุมคุณภาพของน้ำโลหะให้อยู่ในหน้าต่างของในกระบวนการผลิต (Process Window) ได้ ตัวอย่างของ แนวความคิดนี้ อาจอธิบายได้ผ่านการเปรียบเทียบกราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบกราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว [3]

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ากราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อแต่ละชนิดมีข้อแตกต่างกัน โดยเหล็กหล่อเทามีอินเตอร์คูลิ่งต่ำ เนื่องจากการเกิดและการโตของกราไฟต์ของเหล็กหล่อเทาต้องการแรงขับ (Driving Force) น้อย ในขณะที่เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนต้องการแรงขับสำหรับการเกิดนิวเคลียสและการโตของกราไฟต์มากกว่าสำหรับกรณีเหล็กหล่อเหนียว ในระหว่างการแข็งตัวของเหล็กเหนียวจะมีจำนวนของนิวเคลียสและยูเทคติกเซลล์มากกว่า จึงทำให้เกิดอินเตอร์คูลิ่งสูงกว่าเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน

## 2.2 การทำนายเหล็กหล่อเทา

การประยุกต์ใช้งานวิเคราะห์ทางความร้อนของเหล็กหล่อนั้นใช้หลักการคำนวณพื้นฐานโดยใช้ค่าคาร์บอนสมมูล (CE) ซึ่งค่า CE นั้นขึ้นอยู่กับคาร์บอนและธาตุที่สำคัญอื่นๆเช่น ซิลิกอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ เป็นต้น กราฟการเย็นตัวสามารถที่จะคำนวณได้จากอุณหพลศาสตร์

แต่ก็ยังมี ความคลาดเคลื่อนของกราฟการเย็นตัวระหว่างตามทฤษฎีกับที่ได้จากการทดลอง นอกจากนั้นยังมีค่า คาร์บอนสมมูลลิควิดัส (CEL) ซึ่งแตกต่างจากค่า CE โดยค่า CE นั้นจะหาได้จาก

$$CE = \%C + 0.31(\%Si) + 0.33(\%P) - 0.027(\%S) \quad (2.1)$$

ส่วน CEL ได้จากการสร้างความสัมพันธ์กับ  $T_{LA}$  ซึ่งมาจากการทดลอง [8] คือ

$$T_{LA} = 1669 - 124(CEL) \quad (2.2)$$

$$CEL = \%C + 0.25(\%Si) + 0.5(\%P) \quad (2.3)$$

ต่อมา Heine [9][10] ได้ความสัมพันธ์ ระหว่างส่วนผสมกับ อุณหภูมิลิควิดัส สำหรับเหล็กหล่อเทา ไฮเปอร์ยูเทคติก คือ

$$T_{LA} = 1569 - 97.3(\%C + 0.25(\%S)) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $T_{LA}$  คืออุณหภูมิลิควิดัสที่ตรวจพบในกราฟการเย็นตัว มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากอุณหภูมิลิควิดัสตามแผนภูมิสมมูล ในการทดลองเพื่อสร้างความสัมพันธ์ข้างต้นมีการใช้ถ้วยสองประเภทได้แก่ ถ้วยมาตรฐานและ ถ้วยที่เติม เทลลูเรียม (Te) ลงไป โดยเทลลูเรียมมีบทบาททำให้กราฟการเย็นตัวช่วงอุณหภูมิยูเทคติกคงที่ ทำให้ง่ายต่อการอ่านค่าและแปรผลด้วยคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังทำให้สามารถใช้วัดช่วงส่วนผสมที่กว้างขึ้นได้ เนื่องจากเทลลูเรียมมีอิทธิพลทำให้ส่วนผสมที่จุดยูเทคติกสูงขึ้น นอกจากนี้แล้ว CEL คาร์บอนและซิลิกอนยังหาได้จากสมการ

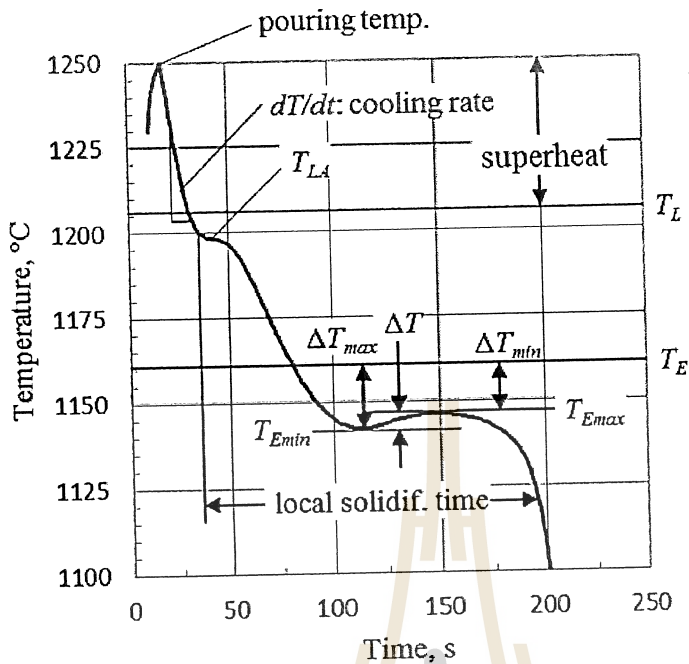
$$CEL = 14.45 - 0.0089(T_{LA}) \quad (2.5)$$

$$\%C = -6.65 - 0.0084(T_{LA}) + 0.0178(T_{E,white}) \quad (2.6)$$

$$\%Si = 78.411 - 4.28087(\%Si_{adj}) - 0.06831(T_{E,white}) \quad (2.7)$$

ซึ่งสมการดังกล่าวถูกเสนอโดย Heraeus Electro-Nite [1] เป็นสมการที่ใช้คำนวณผลการทดลองที่ได้จากถ้วยที่เติม เทลลูเรียม (Te) รูปที่ 2.3 รูปแบบคำศัพท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับเหล็กหล่อ





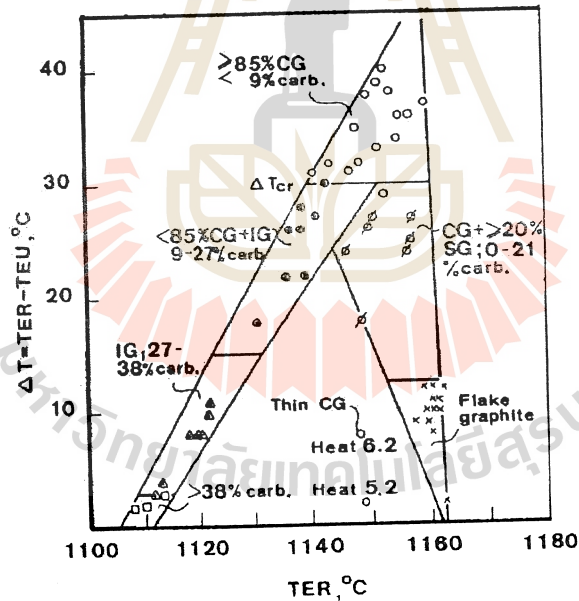
รูปที่ 2.3 รูปแบบคำศัพท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับเหล็กหล่อ[1]

จะเห็นได้ว่ากราฟการเย็นตัวมีส่วนประกอบที่สำคัญหลายส่วน เช่น

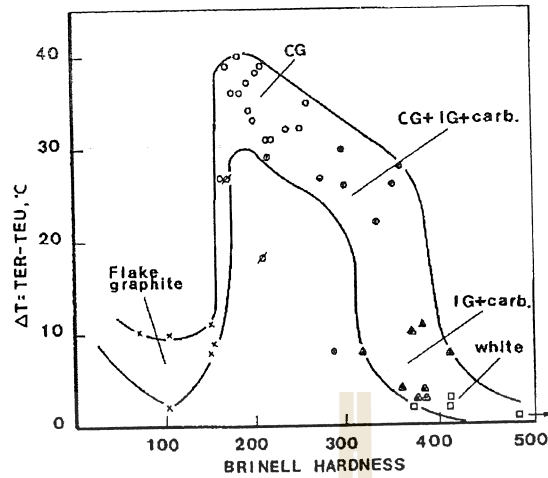
- อัตราการเย็นตัว (Cooling rate,  $\frac{dT}{dt}$ ) โดยอัตราการเย็นตัวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท มวลของน้ำเหล็กตัวอย่าง ความสามารถในการนำความร้อนของทรายแบบ
- อุณหภูมิลiquidus (Liquidus arrest temperature,  $T_{LA}$ ) คืออุณหภูมิที่เริ่มเกิดการแข็งตัวที่ตรวจพบได้ในกราฟการเย็นตัว ทั้งนี้ต่างจากอุณหภูมิลiquidus ตามสมมูล เนื่องจากน้ำเหล็กตัวอย่างจะแข็งตัวด้วยอัตราที่เร็วกว่าตามสมมูล
- อุณหภูมิยูเทคติกอันเดอร์คูลิ่ง (Eutectic temperature,  $T_{Emin}$ ) คืออุณหภูมิลiquidus ต่ำสุดที่พบ โดยในทางกายภาพคืออุณหภูมิที่เกิดอันเดอร์คูลิ่งสูงสุด
- อันเดอร์คูลิ่งสูงสุด (Maximum undercooling,  $\Delta T_{max}$ )
- อันเดอร์คูลิ่งต่ำสุด (Minimum undercooling,  $\Delta T_{min}$ )
- รีแคลเซเซนส์ (Recalcesence,  $T_{Emax}$ ) คืออุณหภูมิยูเทคติกสูงสุดที่พบ เป็นผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อน
- เวลาในการแข็งตัว (Local solidification time)
- เวลาในการแข็งตัวรวม (Total solidification time)

### 2.3 การทำนายเหล็กหล่อเหนียว

เนื่องจากกราฟการเย็นตัวที่ต่างกันของเหล็กหล่อแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน จึงสามารถนำไปใช้ทำนายรูปร่างของกราฟไฟต์ที่จะเกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามก็ตีกราฟการเย็นตัวยังขึ้นอยู่กับอีกหลายปัจจัย จึงจำเป็นที่จะต้องสร้างฐานข้อมูลกราฟการเย็นตัวเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ต่อลักษณะของกราฟการเย็นตัว ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณใช้ในการทำนาย Stefanescu และคณะ [4] ได้ชี้ให้เห็นว่า การวิเคราะห์ทางความร้อนสามารถใช้ทำนายรูปร่างของกราฟไฟต์ในเหล็กหล่อเหนียวและเหล็กหล่อกราฟไฟต์ตัวหนอนได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\Delta T_{\max}$  ( $T_{E\max} - T_{E\min}$ ) และ  $T_{E\min}$  ดังรูปที่ 2.4 จากรูปจะเห็นได้ว่าที่  $T_{E\max}$  เท่ากัน เมื่อ  $\Delta T_{\max}$  มีค่ามากจะมีแนวโน้มทำให้ได้กราฟไฟต์ตัวหนอนและกราฟไฟต์กลมมากกว่ากราฟไฟต์แบบแผ่น นอกจากนี้แล้วยังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นตัวกับสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่ออีกด้วยเนื่องจากรูปร่างของกราฟไฟต์ที่ต่างกันแสดงให้เห็นถึงสมบัติเชิงกลที่ต่างกันดังรูปที่ 2.5 โดยพบว่ากราฟไฟต์แบบแผ่นและกราฟไฟต์กลมจะมีค่า  $\Delta T_{\max}$  ค่อนข้างต่ำ แต่กราฟไฟต์ตัวหนอนจะมีค่า  $\Delta T_{\max}$  ค่อนข้างสูง

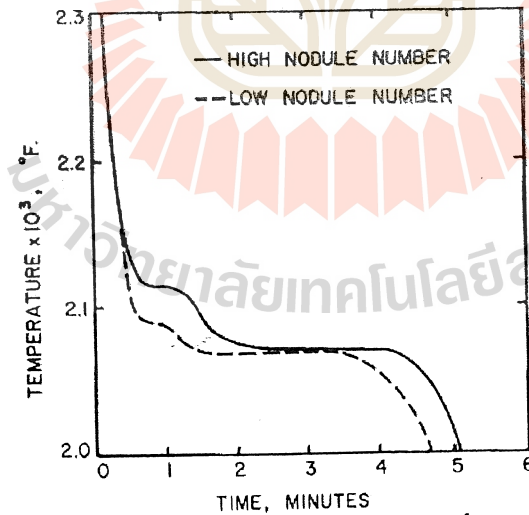


รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_{E\max}$  ( $T_{ER}$ ) และ  $\Delta T_{\max}$  [4]



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบบริเนลและ  $\Delta T_{\max}$  [4]

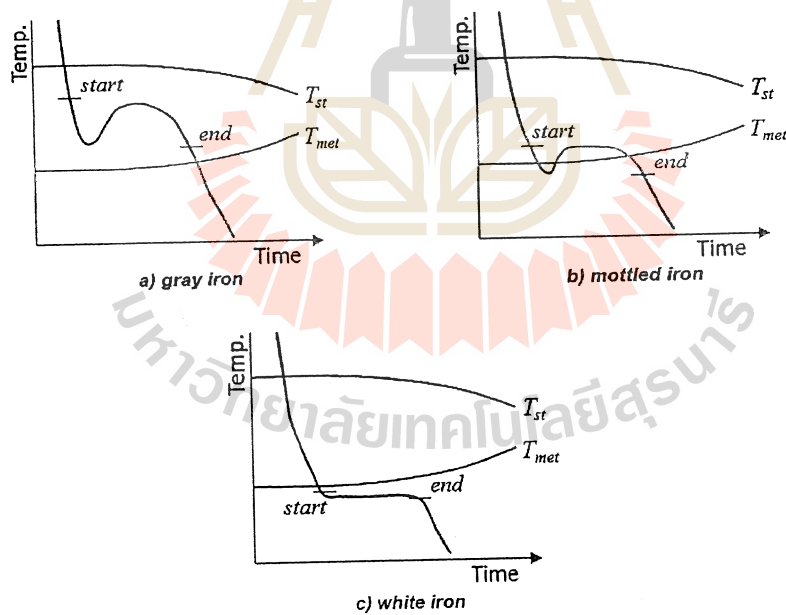
C. R. Loper และคณะ [5] ได้ชี้ให้เห็นว่ากราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อ ขึ้นอยู่ปริมาณ Nodule count เนื่องจากเหล็กหล่อที่มีจำนวน Nodule มากจะมีอัตราการคายความร้อนมากกว่าเหล็กหล่อที่มีจำนวน Nodule น้อย ระหว่างการแข็งตัว ดังรูปที่ 2.6 จากภาพจะเห็นได้ว่าเหล็กหล่อที่มี Nodule count ต่ำกว่าจะมีอินเตอร์คูลลิ่งสูงสุดมากกว่าและมีเวลาการแข็งตัวโดยรวมสั้นกว่าเหล็กหล่อที่มี Nodule count สูง



รูปที่ 2.6 กราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเหนียว [5]

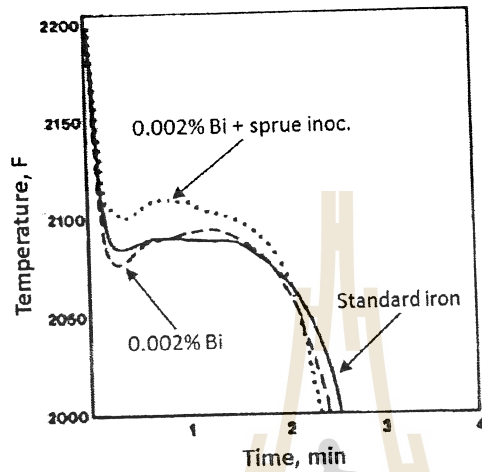
ต่อมามีการพัฒนาเทคนิควิเคราะห์ทางความร้อนอย่างต่อเนื่อง เนื่องมาจากพัฒนาการของคอมพิวเตอร์และระบบเก็บข้อมูลดิจิทัล โดย Stefanescu [6] แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้กราฟการ

เย็นตัวทำนารูปแบบการเกิดปฏิกิริยาอุทกติกและระดับของอินนอคูลุเลชั่นในเหล็กหล่อ โดยทั่วไป การทำนายโครงสร้างยูเทคติกจะพิจารณาจากการเริ่มและการสิ้นสุดของการแข็งตัวของยูเทคติกคือ ถ้าการเริ่มและสิ้นสุดการแข็งตัวอยู่เหนือเส้นอุณหภูมิยูเทคติกกึ่งสมดุล (Metastable eutectic temperature) จะเกิดปฏิกิริยาอุทกติกแบบสมดุล (Stable eutectic) ซึ่งจะได้เหล็กหล่อเทา ภายหลังการเย็นตัว ปรากฏจากคาร์ไบด์ ดังรูปที่ 2.7a ถ้าการแข็งตัวเริ่มอยู่เหนืออุณหภูมิยูเทคติกกึ่งสมดุล (Metastable eutectic temperature) แต่ที่สิ้นสุดการแข็งตัวอยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติกกึ่งสมดุลจะได้โครงสร้างเหล็กหล่อเทาผสมกับเหล็กหล่อขาวหรือที่เรียกกันว่าโครงสร้าง Mottled ดังรูปที่ 2.7b และถ้าการแข็งตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดการแข็งตัวอยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติกกึ่งสมดุลจะได้โครงสร้างเหล็กหล่อขาวภายหลังการเย็นตัว ดังรูปที่ 2.7c ซึ่งอุณหภูมิยูเทคติกสมดุล (Stable eutectic temperature) และอุณหภูมิยูเทคติกกึ่งสมดุลไม่ใช่เส้นตรงเพราะขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของธาตุผสมที่ส่งเสริมการเกิดคาร์ไบด์ในเหล็กหล่อ ทำให้ Graphitization Potential ลดลงในทางตรงกันข้ามถ้ามีธาตุผสมที่ส่งเสริมการเกิดกราฟไฟต์อยู่ในเหล็กหล่อนั้นๆ จะช่วยทำให้ Graphitization Potential เพิ่มขึ้น



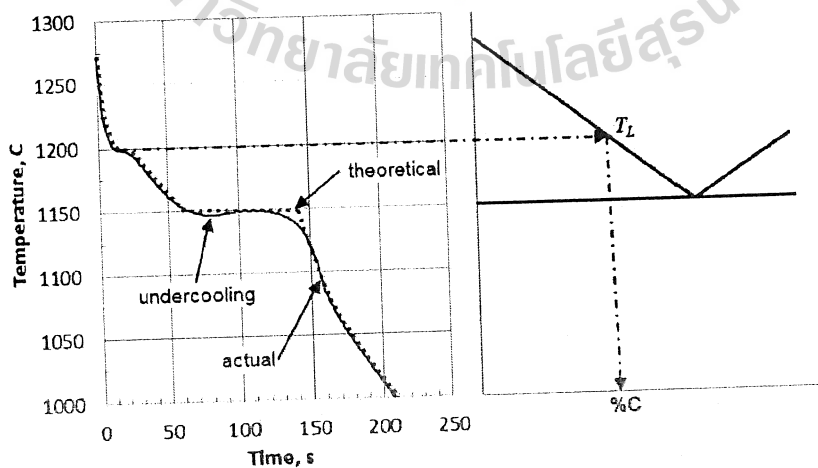
รูปที่ 2.7 การอธิบายของกราฟการเย็นตัวเพื่อการทำนายการแข็งตัวในเหล็กหล่อที่ สมดุลหรือกึ่งสมดุล [6]

นอกจากนี้แล้วการทำอินน็อคูเลชั่นที่ยังส่งผลต่ออันเตอร์คูลิ่ง และอุณหภูมิยูเทคติกด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 2.8 ที่แสดงถึงอิทธิพลของการทำอินน็อคูเลชั่นต่ออันเตอร์คูลิ่งของเหล็กหล่อผสม Bi 0.002%



รูปที่ 2.8 ผลของ Bi อินน็อคูเลชั่น ในเหล็กหล่อ SG [12]

นอกจากนี้การวิเคราะห์ทางความร้อน ยังสามารถช่วยประเมินส่วนผสมทางเคมีได้อีกด้วย โดยอาศัยพื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤต ( $T_L$ ) และส่วนผสม (%C) แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยที่เส้นสีแดงคือกราฟการเย็นตัวที่ได้จากการคำนวณและเส้นสีดำคือกราฟการเย็นตัวที่ได้จากการทดลอง เมื่อพิจารณากราฟการเย็นตัวจะเห็นได้ว่ากราฟการเย็นตัวที่ได้จากการคำนวณมีความแตกต่างจากกราฟการเย็นตัวที่ได้จากการทดลอง เนื่องจากการแข็งตัวของโลหะมีจลนศาสตร์ที่เร็วกว่าตามสมดุล



รูปที่ 2.9 กราฟการเย็นตัวสำหรับ โลหะผสม ไฮโปยูเทคติก ตามทฤษฎีและการทดลอง [7]

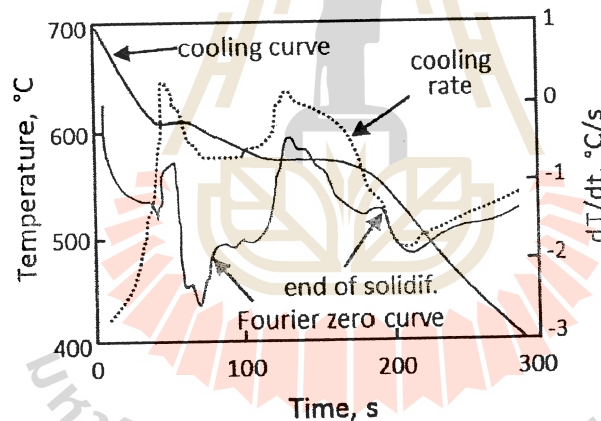
การวิเคราะห์เป็นเรื่องที่สำคัญอย่างการวิเคราะห์ของฟูเรียร์ ซึ่งการวิเคราะห์ของฟูเรียร์นั้นได้ตั้งสมมติฐานให้การถ่ายเทความร้อนมีเฉพาะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว สมการฟูเรียร์กับเทอมของแหล่งความร้อน คือ

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{1}{c_p} \frac{\partial Q_f}{\partial t} \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial Q_f}{\partial t} = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} - Z_f \right) \quad (2.8)$$

ที่ Zero curve จะให้  $Z_f = \alpha \nabla^2 T$  สำหรับ โมลแบบทรงกระบอก สามารถที่จะคำนวณได้โดย

$$\nabla^2 T = 4(T_2 - T_1)/(r_2^2 - r_1^2) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $T_2$  คืออุณหภูมิที่  $r_2$  และ  $T_1$  คืออุณหภูมิที่  $r_1$  รูปแบบผลที่ได้จากการวิเคราะห์สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 11 ที่แสดงกราฟการเย็นตัว กราฟอัตราการเย็นตัว และ Fourier Zero Curve



รูปที่ 2.10 ที่แสดงกราฟการเย็นตัวกราฟอัตราการเย็นตัวและ Fourier Zero Curve สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม [13]

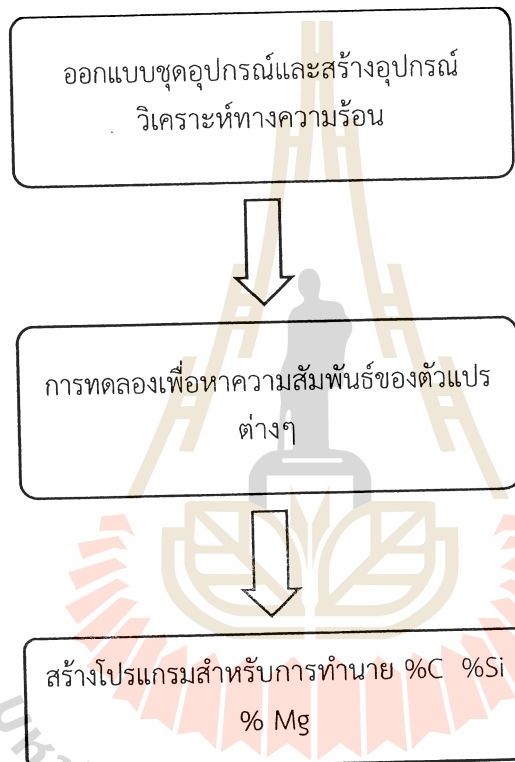
จากข้อมูลทางวิชาการที่มีเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการสร้างชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนที่สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติและรายงานผลทันทีที่การแข็งตัวสิ้นสุด การใช้ถ้วยรองรับน้ำเหล็กสองถ้วยเพื่อทำนายแนวโน้มการเกิดคาร์ไบด์เป็นแนวความคิดใหม่ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหอนและเหล็กหล่อเหนียวจะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการอย่างมาก

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

##### 3.1 บทนำ

การศึกษานี้มุ่งหาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ของกราฟการเย็นตัว เช่น อุณหภูมิวิกฤต อุณหภูมิยูเทคติก กับส่วนผสมทางเคมี เช่น คาร์บอน คาร์บอนสมมูล ซิลิกอน นอกจากนี้ในกรณีของเหล็กหล่อเหนียวจะมีการหาความสัมพันธ์เพิ่มเติมระหว่างอัตราการเย็นตัวสูงสุด ณ จุดสิ้นสุดการแข็งตัว กับแมกนีเซียมด้วย โดยมีลำดับขั้นตอนหลักดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลำดับการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ช่วงของส่วนผสมทางเคมีที่ใช้ในการศึกษา

ธาตุ	ช่วง, %
C	3.0 – 3.8
Si	1.5 – 2.5
Mn	0.029 – 0.033
P	0.02 – 0.03
S	0.01 – 0.02
Mg	0 – 0.06
Carbon Equivalent (CE)	3.9 – 4.3

### 3.2 การออกแบบชุดอุปกรณ์และสร้างอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน

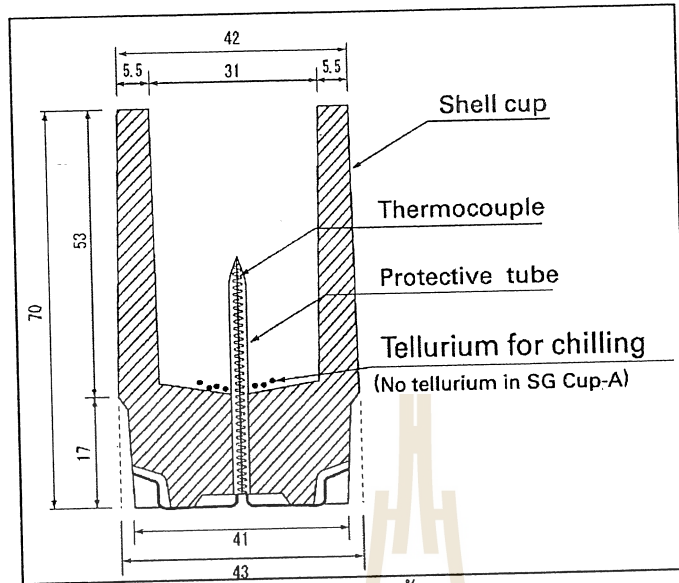
#### 3.2.1 หลักการออกแบบ

ทำการออกแบบฮาร์ดแวร์ประกอบด้วย ถ้วยร่อนน้ำเหล็ก ฐานติดตั้ง ระบบเก็บข้อมูล ดิจิตอล คอมพิวเตอร์ และซอฟต์แวร์ ซึ่งจะเขียนโค้ดผ่านโปรแกรม LabVIEW โดยมีรายละเอียดดังนี้

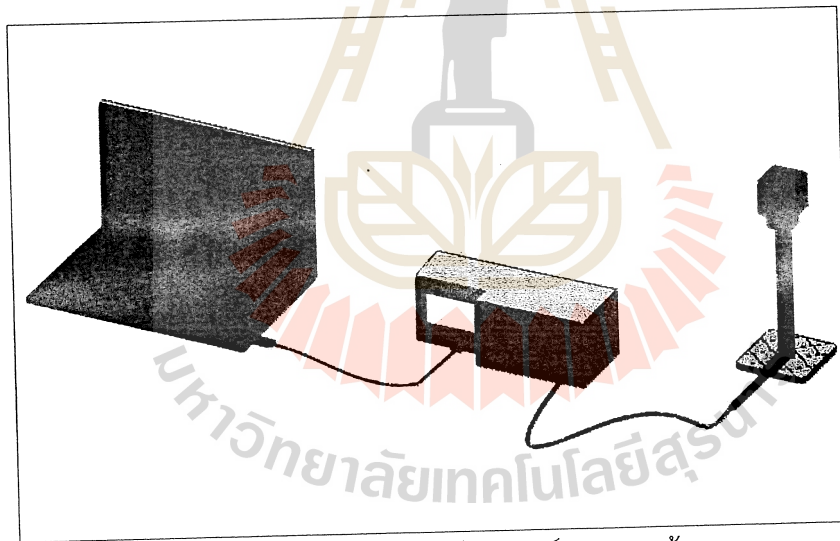
- 1) ถ้วยร่อนรับน้ำโลหะ เป็นถ้วยทรายผสมเรซิน มีขนาดและรายละเอียดดังรูปที่ 3.2
- 2) ฐานติดตั้ง เป็นวัสดุจากเหล็กกล้าทนความร้อนสูงและป้องกันการกระเด็นใส่น้ำเหล็ก
- 3) ระบบเก็บข้อมูลแบบดิจิตอล มีความถี่สูงสุดที่ 4 MHz สำหรับฟังก์ชัน Serial Peripheral Interface (SPI)
- 4) คอมพิวเตอร์มีข้อมูลจำเพาะ ระบบประมวลผล (CPU) 2.30 Hz หน่วยความจำสำรอง (RAM) 4.00 GB ระบบดำเนินงาน 64 bit

แบบร่างระบบวิเคราะห์ทางความร้อนที่ประกอบเสร็จสมบูรณ์จะมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.3 ประกอบด้วยถ้วยและฐานร่อนรับน้ำโลหะ ระบบเก็บข้อมูลดิจิตอล และคอมพิวเตอร์





รูปที่ 3.2 ถ้วยรองรับน้ำโลหะ[12]



รูปที่ 3.3 รูปแบบชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน

### 3.2.1 ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน

ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับการวิเคราะห์น้ำเหล็กหลอมเหลว ภายหลังจากการออกแบบ ในส่วนของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ประกอบไปด้วย คอมพิวเตอร์ระบบประมวลผล (CPU) 2.30Hz หน่วยความจำสำรอง (RAM) 4.00 GB ระบบดำเนินงาน 64 bit ระบบเก็บข้อมูล ดิจิตอล มีความถี่สูงสุดที่ 4 MHz สำหรับฟังก์ชัน Serial Peripheral Interface (SPI) ปลั๊กเทอร์โมคัพเปิล รูปแบบ K ใช้ในช่วงอุณหภูมิ  $-40^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1200^{\circ}\text{C}$  แอมพลิฟายเออร์ MAX31855 รับ

สัญญาณดิจิทัลที่แปลงค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+1350\text{ }^{\circ}\text{C}$  สายเทอร์โมคัปเปิลประเภท K วัดอุณหภูมิ  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ฐานติดตั้งถ้วยรองน้ำเหล็กทนความร้อนได้สูงถึง  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถ้วยรองรับน้ำโลหะมีอยู่สองแบบคือ ถ้วย CE สำหรับเหล็กหล่อเทา และถ้วย SG สำหรับเหล็กหล่อเหนียว เป็นไปตามตาราง 3.2 และซอฟต์แวร์ รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่ายของระบบวิเคราะห์ทางความร้อนที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน

รายการ	ข้อมูลจำเพาะ
คอมพิวเตอร์	คอมพิวเตอร์มีข้อมูลจำเพาะ ระบบประมวลผล (CPU) 2.30Hz หน่วยความจำสำรอง(RAM) 4.00 GB ระบบดำเนินงาน 64 bit
ระบบเก็บข้อมูลดิจิทัล	มีความถี่สูงสุดที่ 4 MHz สำหรับฟังก์ชัน Serial Peripheral Interface (SPI)
ปลั๊ก เทอร์โมคัปเปิล	ประเภท K ใช้ในช่วงอุณหภูมิ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
แอมพลิฟายเออร์ MAX31855	รับสัญญาณค่าอุณหภูมิ $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $+1350\text{ }^{\circ}\text{C}$
สายเทอร์โมคัปเปิล	รูปแบบ K วัดอุณหภูมิ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
ฐานติดตั้ง	ทนความร้อนได้สูงถึง $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$
ถ้วยรองรับน้ำโลหะ	CE (สำหรับเหล็กหล่อเทา) และ SG (สำหรับเหล็กหล่อเหนียว)



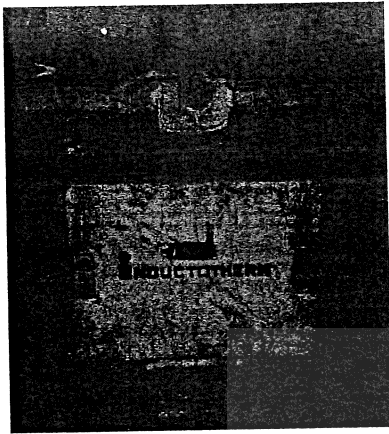
รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน

### 3.3 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ

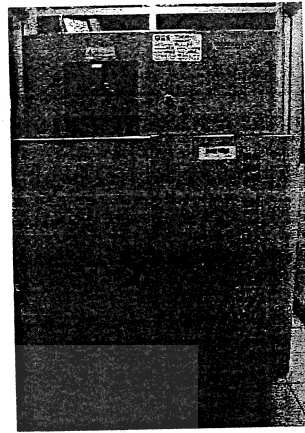
#### 3.3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำโลหะ

การเตรียมตัวอย่างน้ำโลหะคือขั้นตอนการหลอมเหล็กหล่อให้มีส่วนผสมทางเคมีเป็นไปตามต้องการเพื่อใช้สำหรับการนำไปวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปรสำคัญคือ  $T_{LA}$   $T_E$   $\%C$   $\%Si$  สำหรับเหล็กหล่อเทาและอัตราการเย็นตัวสูงสุด ณ จุดสิ้นสุดการแข็งตัว (Maximum Cooling Rate at the end of solidification: MCR) องศาของมุมในกราฟอัตราการเย็นตัว ณ จุดสิ้นสุดการแข็งตัว  $\theta$  (จะกล่าวถึงในรายละเอียดในบทที่ 4)  $\%Mg$  สำหรับเหล็กหล่อเหนียวโดยมีเครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลองดังต่อไปนี้ (แสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6)

- 1) เตาอินดักชัน
- 2) อิมิชชันสเปคโตมิเตอร์
- 3) เทอร์โมคัพเปิล
- 4) เหล็กดิบ
- 5) เฟอร์โรซิลิกอน
- 6) เฟอร์โรซิลิกอนแมกนีเซียม
- 7) คาร์บอน
- 8) เบ้ารองรับน้ำโลหะ



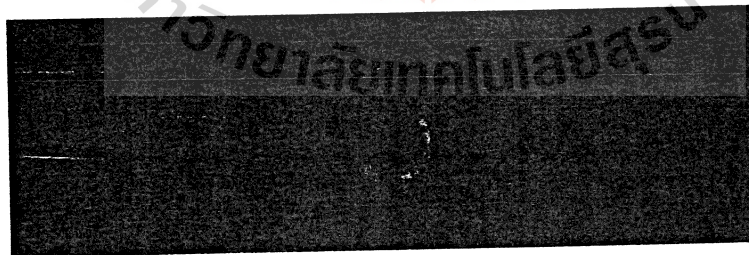
(ก) เต้าอินดักชัน



(ข) สเปคโตรมิเตอร์

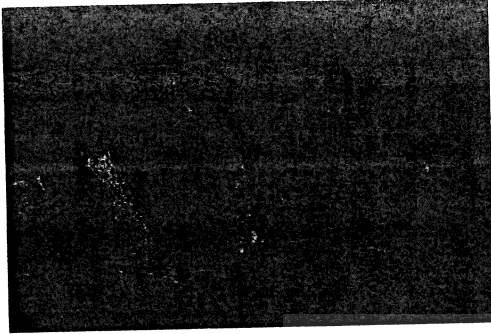


(ค) เทอร์โมคัมแพิล

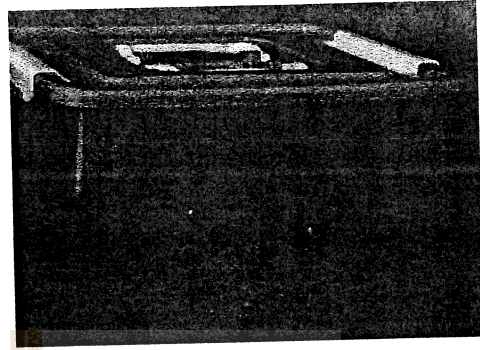


(ง) เบ้ารองรับน้ำโลหะ

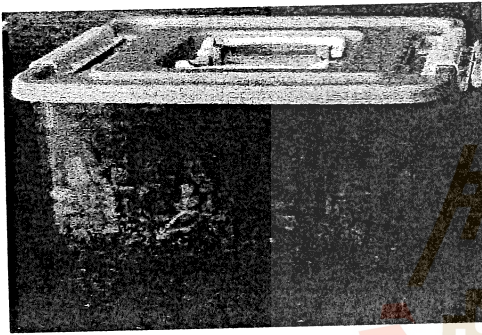
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



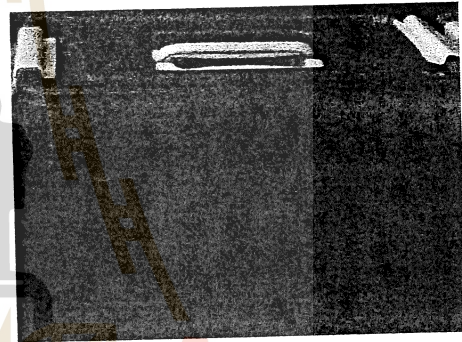
(ก) เหล็กดิบ



(ข) เฟอร์โรซิลิกอน



(ค) เฟอร์โรซิลิกอนแมกนีเซียม



(ง) คาร์บอน

รูปที่ 3.6 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างน้ำโลหะนั้นเริ่มจากการผลิตเหล็กหล่อเทา เริ่มจากการนำเหล็กดิบใส่เตาอินดักชั่นปริมาณ 30 กิโลกรัม จากนั้นทำการเร่งกำลังของเตาอินดักชั่นด้วยอัตราเพิ่มขึ้น 0.5 กิโลวัตต์ต่อนาทีจนกระทั่งเหล็กหล่อนั้นหลอมเหลว แล้วทำความสะอาดน้ำเหล็กหลอมเหลวโดยใช้ฟลักซ์ทำความสะอาด 2 ครั้ง ต่อมาทำการเหน้าเหล็กใส่โมลของชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเมื่อได้ชิ้นงานตัวอย่างแล้วนำไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องอิมสชันสเปคโตรมิเตอร์เพื่อพิจารณาว่าตรงตามขอบเขตที่กำหนดไว้หรือไม่ถ้ายังไม่ตรงตามขอบเขตที่กำหนดไว้ทำการปรับน้ำโลหะโดยการเติมเฟอร์โรซิลิกอนในกรณีที่ค่าซิลิกอนยังต่ำกว่าที่ขอบเขตกำหนดและทำการเติมคาร์บอนในกรณีที่คาร์บอนต่ำกว่าขอบเขตที่กำหนดเมื่อได้ส่วนผสมทางเคมีเป็นไปตามขอบเขตที่กำหนดแล้วทำการเก็บข้อมูลโดยการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาเพื่อตรวจสอบดูว่าอยู่ในช่วง 1450 -

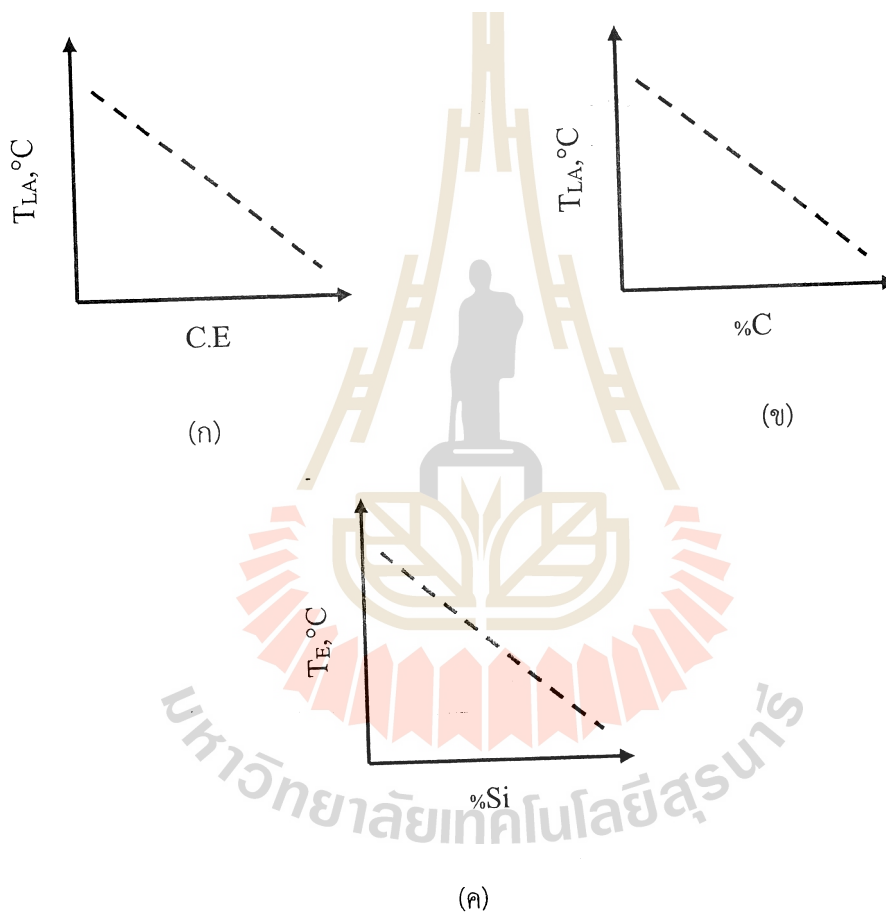
1500 °C หรือไม่ถ้ายังทำการเพิ่มกำลังไฟของเตาอินดักชันเพื่อให้อุณหภูมิอยู่ในช่วงดังกล่าวเมื่อได้ตรงตามที่กำหนดแล้วทำการกำจัดสแลกอีกครั้งแล้วเทน้ำเหล็กใสโมลสำหรับตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและถ้วยรองรับเหล็กที่มีเทลลูเรียมเชื่อมต่อกับระบบเก็บข้อมูลดิจิทัลและส่งไปยังคอมพิวเตอร์ข้อมูลที่ได้นั้นเป็นข้อมูลกราฟการเย็นแบบกึ่งสมดุลในระหว่างการเก็บตัวอย่างข้อมูลนั้นคาร์บอนก็จะค่อยๆสูญเสียไปการเก็บข้อมูลส่วนนี้จะใช้สำหรับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนซึ่งได้จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีจากชิ้นงานตัวอย่างกับอุณหภูมิวิกฤตตัวแปรที่ได้จากกราฟการเย็นตัวและความสัมพันธ์คาร์บอนสมมูลกับอุณหภูมิวิกฤตตัวแปรเช่นเดียวกันสำหรับการเก็บข้อมูลที่ใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างซิลิกอนกับอุณหภูมิยูเทคติกก่อนเทใส่ถ้วยรองรับเหล็กที่มีเทลลูเรียมนั้นจะทำการเติมเฟอร์โรซิลิกอนเพื่อให้ค่าซิลิกอนมีการเปลี่ยนแปลงและทำทุกครั้งก่อนเทเก็บตัวอย่างชิ้นงาน ขั้นตอนการผลิตเหล็กหล่อเหนียวนั้นเริ่มจากการใส่วัตถุดิบและการหลอมเช่นเดียวกับการผลิตเหล็กหล่อเทาแต่แตกต่างกันตรงที่ขั้นตอนก่อนเก็บตัวอย่างข้อมูลในการผลิตเหล็กหล่อเหนียวนั้นจะทำการเติมแมกนีเซียมก่อนโดยการวางเฟอร์โรซิลิกอนแมกนีเซียมไว้ก่อนบ่มรองรับน้ำเหล็กแล้ว เทน้ำเหล็กลงบ่มรองรับน้ำเหล็กโรจนเฟอร์โรซิลิกอนแมกนีเซียมทำปฏิกิริยาจนเสร็จสิ้น แล้วเทกลับลงเตาในขั้นตอนนี้อุณหภูมิ น้ำเหล็กจะลดลงต้องทำการปรับกำลังไฟของเตาอินดักชันเพิ่มขึ้นเพื่อให้อุณหภูมิ น้ำเหล็กอยู่ในช่วง 1450 – 1500 °C ตรวจสอบได้โดยเทอร์โมคัพเปิล จากนั้นเทน้ำใสโมลสำหรับตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและถ้วยรองรับเหล็กที่มีไม่เทลลูเรียมเชื่อมต่อกับระบบเก็บข้อมูลดิจิทัลและส่งไปยังคอมพิวเตอร์ข้อมูลที่ได้นั้นเป็นข้อมูลกราฟการเย็นแบบสมดุลระหว่างการเก็บตัวอย่างข้อมูลนั้นแมกนีเซียมก็จะค่อยๆสูญเสียไปการเก็บข้อมูลส่วนนี้จะใช้สำหรับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีเซียมซึ่งได้จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีจากชิ้นงานตัวอย่างกับอัตราการเย็นตัวสูงสุดตัวแปรที่ได้จากกราฟการเย็นตัวและความสัมพันธ์แมกนีเซียมกับมุมที่จุดสิ้นสุดการแข็งเช่นเดียวกัน

### 3.3.2 การสร้างสหสัมพันธ์

จากการทดลองในส่วนของการผลิตเหล็กหล่อเทาได้ข้อมูลตัวแปรที่สำคัญคือ คาร์บอนซิลิกอน อุณหภูมิวิกฤต อุณหภูมิยูเทคติกและข้อมูลตัวแปรที่สำคัญ ในส่วนของการผลิตเหล็กหล่อเหนียวคือ แมกนีเซียม อัตราการเย็นตัวสูงสุด มุม จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาหาความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.1

$$R^2 = \frac{N\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N\sum X^2 - (\sum X)^2][N\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (3.1)$$

โดยที่  $R^2$  คือ สหสัมพันธ์  $X$  คือ ข้อมูลชุดที่หนึ่ง  $Y$  คือ ข้อมูลชุดที่สอง แล้วพิจารณาถึงความสัมพันธ์ โดย ถ้าค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.7 - 1.0 แสดงว่าข้อมูลนั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ การเลือกชุดข้อมูลมาทำการเปรียบเทียบนั้นได้อาศัยเหตุและผลไปตามทฤษฎีอย่างเช่นการเลือกข้อมูล อุณหภูมิ ลิควิดส์เปรียบเทียบกับคาร์บอนโดยอาศัยแนวโน้มจากแผนภาพกึ่งสมดุลคือเมื่อคาร์บอนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิลิควิดส์จะลดลงรวมไปถึงคาร์บอนผสมด้วยเช่นกันแนวคิดในการสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ นำไปสู่การสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนาย คาร์บอนผสม คาร์บอน ซิลิกอน และ แมกนีเซียม เป็นไปดังรูปที่ 3.7

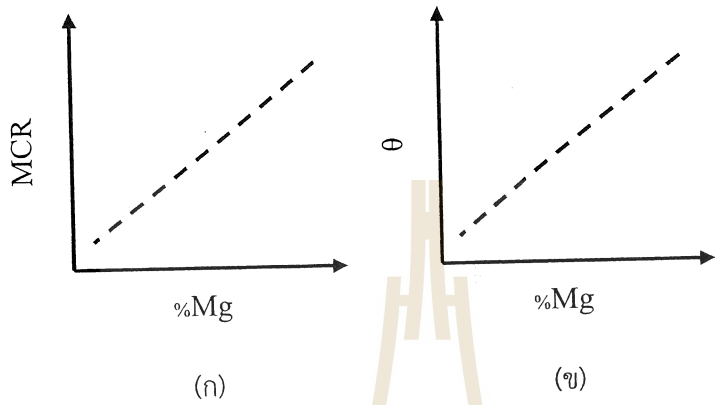


รูปที่ 3.7 แนวคิดกราฟความสัมพันธ์สำหรับเหล็กหล่อเทา

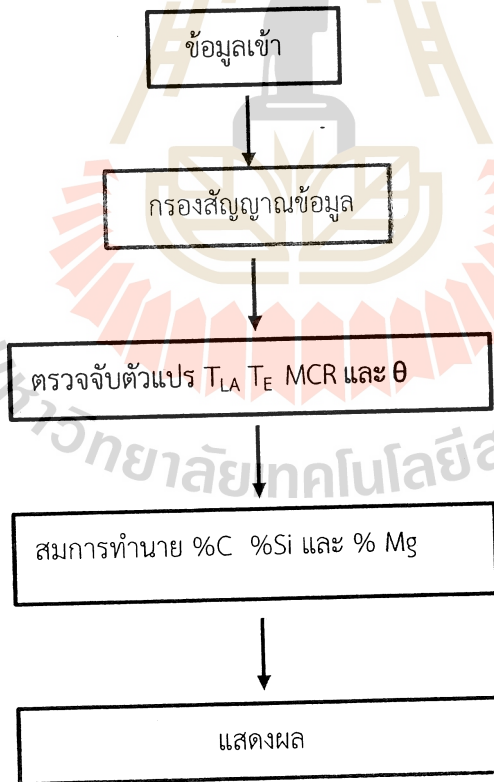
#### 3.4 การสร้างโปรแกรมสำหรับการทำนาย %C %Si และ % Mg

การสร้างโปรแกรมในการทำนาย %C %Si % Mg เริ่มจากการรับข้อมูลเข้าซึ่งเป็นค่าของอุณหภูมิ ผ่านมายังการกรองข้อมูลเพื่อทำการ Smooth curve เนื่องจากข้อมูลมีสัญญาณรบกวน ผ่านเข้าไปในส่วนการคำนวณเพื่อการตรวจจับหาค่าตัวแปร  $T_{LA}$   $T_E$  จากรูปภาพการเขียนตัวแบบกึ่งสมดุลที่ได้

จากการทดลองโดยใช้ถ้วยที่มีเทลลูเรียมและได้ MCR  $\theta$  จากราฟการเียนตัวแบบสมดุลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ถ้วยที่ไม่มีเทลลูเรียม เมื่อได้ตัวแปรที่ต้องการก็จะส่งไปยังในส่วนของสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อ ทำนาย %C %Si % Mg และสุดท้ายส่งไปยังส่วนของการแสดงผลตามแผนผังดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 แนวคิดกราฟความสัมพันธ์สำหรับเหล็กหล่อเหนียว



รูปที่ 3.9 แนวคิดลำดับการทำงานของซอฟต์แวร์

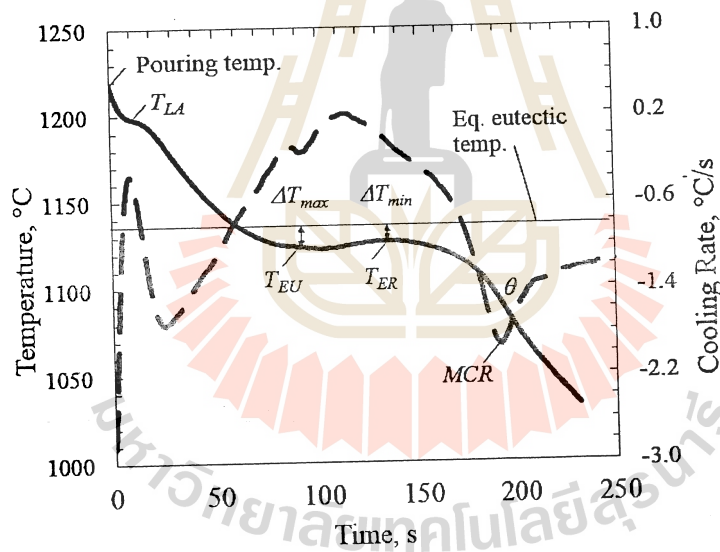


## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 บทนำ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่ากราฟการเย็นตัวได้แสดงพฤติกรรมดังรูปที่ 4.1 อุณหภูมิเริ่มต้นที่ได้รับคืออุณหภูมิเท ซึ่งอุณหภูมิเท ( $T_P$ ) จะต่ำกว่าอุณหภูมิในเตาเนื่องจากสูญเสียความร้อนในระหว่างการถ่ายเทจากเตาลงเข้ารีบนำโลหะ จากนั้นการแข็งตัวเริ่มขึ้นที่อุณหภูมิลิควิดัส ( $T_{LA}$ ) สามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟการเย็นตัวเนื่องจากการคายความร้อน ถัดมาอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงจุดเริ่มต้นของปฏิกิริยายูเทคติก อุณหภูมินี้เรียกว่าอุณหภูมิยูเทคติกอันเดอร์คูลิ่ง ( $T_{EU}$ ) ความแตกต่างระหว่าง  $T_{EU}$  กับอุณหภูมิยูเทคติกที่สมดุลคืออันเดอร์คูลิ่งสูงสุด ( $\Delta T_{max}$ ) ในระหว่างปฏิกิริยายูเทคติกอุณหภูมิจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยายูเทคติก ซึ่งเรียกว่าอุณหภูมิยูเทคติกกรีเคลสเซน ( $T_{ER}$ ) ความแตกต่างระหว่าง  $T_{ER}$  และอุณหภูมิยูเทคติกที่สมดุลคืออันเดอร์คูลิ่งต่ำสุด ( $\Delta T_{min}$ ) เมื่อใช้ถ้วยที่มีเทลลูเรียม (Te-containing)  $T_{EU}$  และ  $T_{ER}$  จะมีอุณหภูมิเท่ากันจึงบันทึกเป็น  $T_E$  ในกรณีการวิเคราะห์เหล็กหล่อเหนียวจะมีการบันทึกอัตราการเย็นตัวสูงสุด ( $MCR$ ) เมื่อสิ้นสุดการแข็งตัวด้วย



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกราฟการเย็นตัวและนิยามคำศัพท์

#### 4.2 การทำนายส่วนผสมทางเคมี

การทำนายส่วนผสมทางเคมีเริ่มจากการหาสหสัมพันธ์เพื่อหาแนวโน้มความสัมพันธ์ว่าเป็นไปในทิศทางใด ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของตัวแปร %C %Si CE  $T_{LA}$  และ  $T_E$  ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของตัวแปร %Mg  $\Delta T_{max}$   $\Delta T_{min}$  MCR และ  $\theta$  ตัวเลขในตารางเป็นค่าสัมประสิทธิ์ ( $R^2$ ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ ค่า  $R^2$  ที่สูงกว่า แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญ ตัวเลขบวกบ่งชี้ความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงและตัวเลขเชิงลบบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์แบบผกผัน ค่า  $R^2$  มากกว่า 0.80 ถือว่าเป็นความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ช่วงที่ 0.60 - 0.80 ถือเป็นช่วงที่มีความสัมพันธ์ปานกลาง

ตารางที่ 4.1 วิเคราะห์สหสัมพันธ์สำหรับเหล็กหล่อเทา

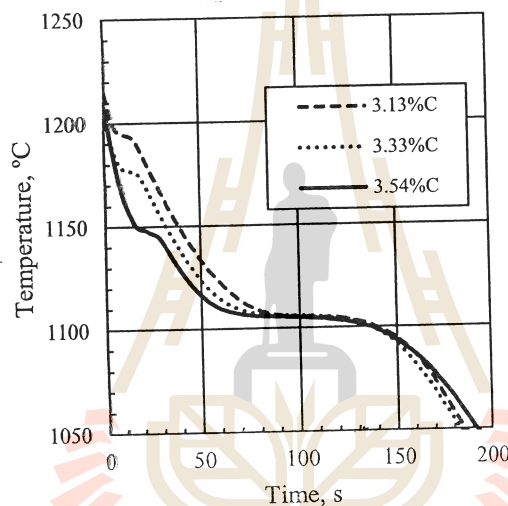
	%C	%Si	%CE	$T_{LA}$	$T_E$
%C	1.00				
%Si	-0.29	1.00			
%CE	0.59	0.66	1.00		
$T_{LA}$	-0.60	-0.38	-0.81	1.00	
$T_E$	0.32	-0.97	-0.61	0.36	1.00

ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์สหสัมพันธ์สำหรับเหล็กหล่อเหนียว

	%Mg	$\Delta T_{max}$	$\Delta T_{min}$	MCR	$\theta$
%Mg	1.00				
$\Delta T_{max}$	0.72	1.00			
$\Delta T_{min}$	0.74	0.91	1.00		
MCR	0.80	0.94	0.91	1.00	
$\theta$	0.81	0.72	0.80	0.97	1.00

#### 4.2.1 การทำนาย %C

จากข้อมูลดังตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์พบว่าคาร์บอนในเหล็กหลอมเหลวมีความสัมพันธ์กับ  $T_{LA}$  ( $R^2 = -0.60$ ) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของลิควิดัสและคาร์บอนในแผนภูมิสมดุลของเหล็กและกราไฟต์ คือเมื่อคาร์บอนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิลิควิดัสจะลดลงในช่วงไฮโปยูเทคติก กล่าวคือทำให้อุณหภูมิเริ่มการแข็งตัวต่ำลง รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างกราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเทาที่มีปริมาณคาร์บอนต่างกัน สังเกตได้ว่า 3.13%C มีอุณหภูมิลิควิดัสสูงกว่า 3.33%C และ 3.54%C ตามลำดับ



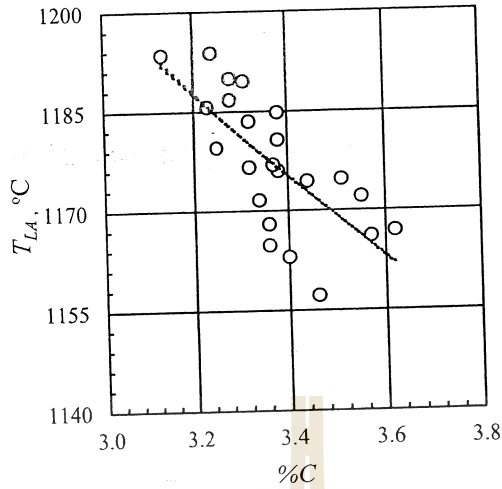
รูปที่ 4.2 กราฟการเย็นตัวที่มีคาร์บอนต่างกัน

เมื่อได้นำผลการทดลองมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิลิควิดัส เทียบกับคาร์บอนดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อคาร์บอนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิลิควิดัสจะลดลงเป็นไปตามแผนภูมิสมดุลเหล็ก-กราไฟต์ และข้อมูลสองชุดนี้มีสหสัมพันธ์เท่ากับ -0.60 มีความผกผันกันของข้อมูลสองชุดนี้ สมการที่ (4.1) และ (4.2) ถูกนำเสนอสำหรับการเข้ารหัสในซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับทำนายเปอร์เซ็นต์คาร์บอน

$$T_{LA} = -84.45(\%C) + 1459.5 \quad (4.1)$$

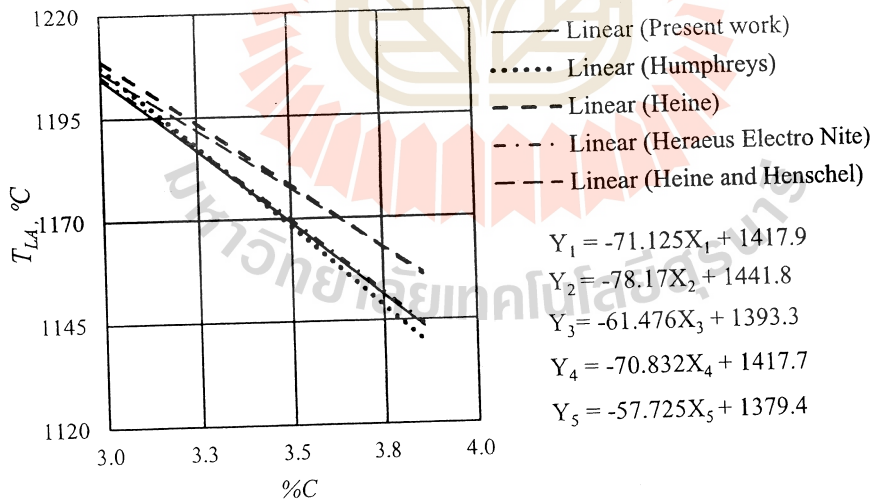
หรือ

$$\%C = -0.01632(T_{LA}) + 22.5888 \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลวกับปริมาณคาร์บอนต่างๆ

สมการที่นำเสนอข้างต้นสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยอื่น ๆ [1, 7, 9, 10] ซึ่งพบว่าแนวโน้มที่ไปในทิศทางเดียวกันตรงไปตามแผนภาพสมดุลเหล็ก-กราไฟต์ ดังแสดงดังรูปที่ 4.4 จะพบว่าสมการที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ทำนาค่า %C ใกล้เคียงกับสมการของ Heine และ Henschel [10] ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าสูงกว่าผลงานวิจัยอื่น ๆ



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหลอมเหลวกับคาร์บอน

#### 4.2.2 การทำนาย CE

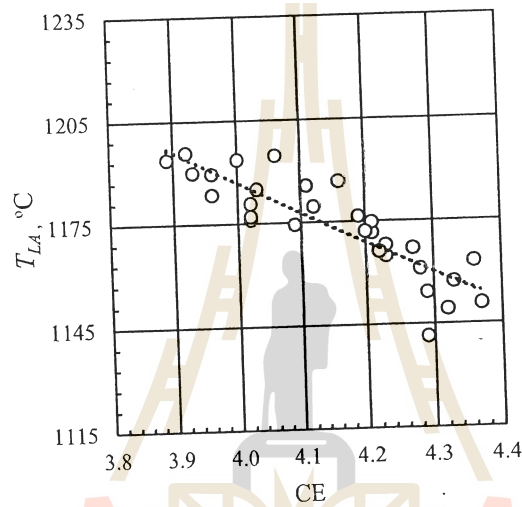
คาร์บอนสมมูลมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ( $R^2 = -0.81$ ) กับ  $T_{LA}$  คือ เมื่อคาร์บอนสมมูลเพิ่มขึ้นอุณหภูมิหลอมเหลวจะลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้

สมการต่อไปนี้ และถูกนำเสนอสำหรับการเข้ารหัสในซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับทำนายคาร์บอนเทียบเท่า

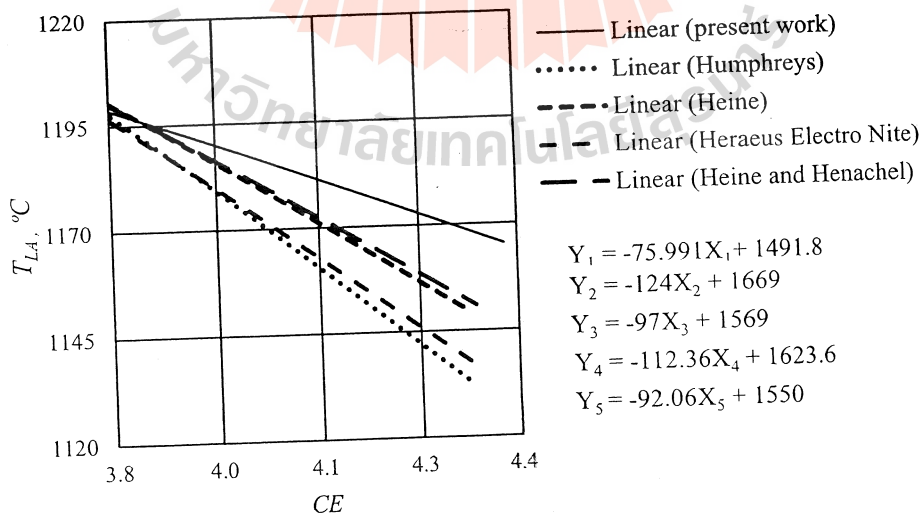
$$T_{LA} = -88.95(\% CE) + 1542.6 \quad (4.3)$$

หรือ

$$CE = -0.0124(T_{LA}) + 17.3423 \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตซ์กับคาร์บอนสมมูลต่างๆ



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตซ์กับคาร์บอนสมมูล

เมื่อเปรียบเทียบสมการทำนายคาร์บอนสมมูลจากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น ๆ [1, 7, 9, 10] (รูปที่ 4.6) จะพบว่าแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่ค่าที่ได้แตกต่างกันอยู่บ้างเนื่องจากการเงื่อนไขและขอบเขตการทดลอง รวมถึงปริมาณซิลิกอนที่มีอยู่ในน้ำโลหะ

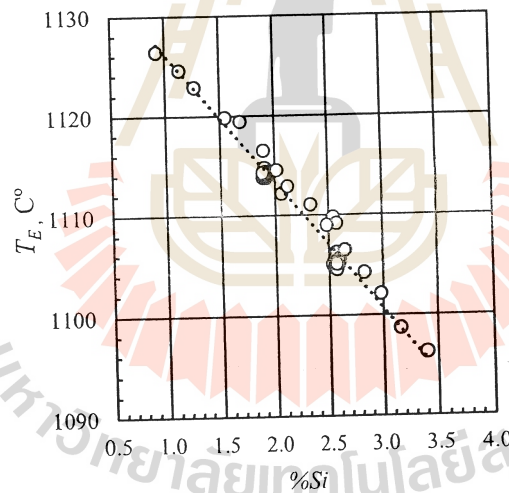
#### 4.2.3 การทำนาย%Si

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_E$  กับเปอร์เซ็นต์ซิลิกอนมีความรุนแรงอย่างมาก ( $R^2 = -0.97$ ) รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_E$  กับ  $Si$  สำหรับเหล็กหล่อเทา เห็นได้ว่า  $T_E$  ลดลงเมื่อมีซิลิกอนเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น สมการต่อไปนี้จะใช้สำหรับการทำนายซิลิกอนโดย  $T_E$

$$T_E = -12.719(\%Si) + 1138.8 \quad (4.5)$$

หรือ

$$\%Si = -0.0785(T_E) + 89.53 \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเขตติดกับเปอร์เซ็นต์ซิลิกอน

#### 4.2.4 การทำนาย%Mg

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของเหล็กหล่อเหนียว พบว่าแมกนีเซียมมีความสัมพันธ์กับแมกนีเซียมสูงที่สุดกับค่า  $MCR$  และ  $\theta$  มีค่าสัมประสิทธิ์คือ 0.80 และ 0.81 ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ด้วยการนำความร้อนของเหล็ก เป็นที่ทราบกันดีว่าเหล็กหล่อเทามีการนำความร้อนสูงกว่าเหล็กหล่อเหนียวเนื่องจากมีลักษณะกราฟไฟต์เป็นแบบแผ่น ในเหล็กหล่อเทาให้โครงสร้างที่เชื่อมต่อกันช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุสูงขึ้น ในทางกลับกันอนุภาค

แกรไฟต์แบบทรงกลมในเหล็กหล่อเหนียวแยกตัวกัน ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนต้องผ่านตัวเหนียวนำ คือโครงสร้างพื้นของเหล็กหล่อเหนียวซึ่งนำความร้อนได้น้อยกว่ากราไฟต์ ดังนั้นอัตราการเย็นตัวใน ตอนท้ายของการแข็งตัวจะมีค่าสูงขึ้นสำหรับเหล็กสีเทามากกว่าเหล็กหล่อเหนียวเพราะอัตราการ ถ่ายเทของความร้อนสูงขึ้นจากตัวอย่างไปยังบริเวณโดยรอบ ปรากฏการณ์นี้ยังสามารถมี ลักษณะเฉพาะได้ด้วย  $\theta$  ได้ รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการเย็นตัว ( $dT/dt$ ) กับ เปอร์เซนต์แมกนีเซียมต่างๆ จะเห็นได้ว่า  $\theta$  ลดลงเมื่อเพิ่มแมกนีเซียม รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง  $MCR$ ,  $\theta$  และแมกนีเซียมเปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ความสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ ด้วยสมการลอการิทึมดังนี้

$$MCR = 0.2174 \ln (Mg\%) - 0.7464 \quad (4.7)$$

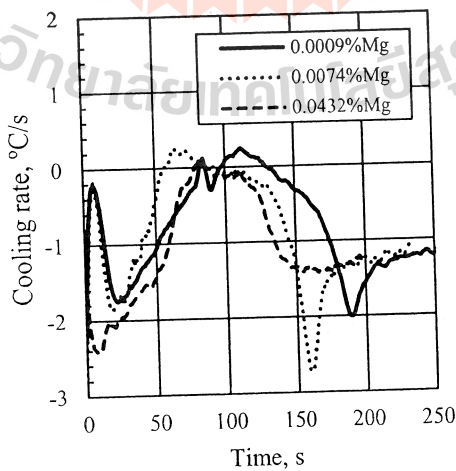
$$\theta = 14.564 \ln (\%Mg) + 128.88 \quad (4.8)$$

หรือ

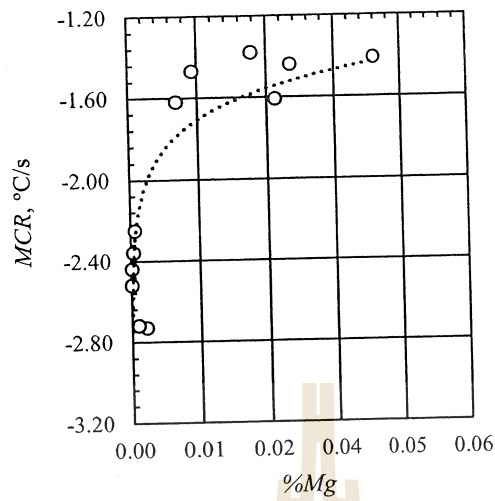
$$\%Mg = \exp (4.599 (MCR) + 3.4333) \quad (4.9)$$

$$\%Mg = \exp (0.06866 (\theta) - 8.8492) \quad (4.10)$$

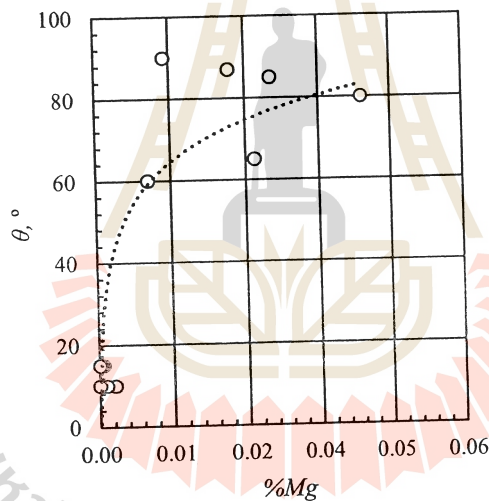
เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าการเกิดขึ้นของเหล็กหล่อเหนียวขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ แมกนีเซียม ดังนั้นสมการที่แสดงสามารถใช้ในการทำนายของเปอร์เซ็นต์ Nodularity ได้ สมการที่ เสนอทั้งหมดถูกเปลี่ยนเป็นรหัสในซอฟต์แวร์ต้นแบบโดยใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW รายละเอียดกล่าวถึง ในหัวข้อ 4.3



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวกับแมกนีเซียม



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวสูงสุดกับเปอร์เซ็นต์แมกนีเซียม



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta$  กับแมกนีเซียม

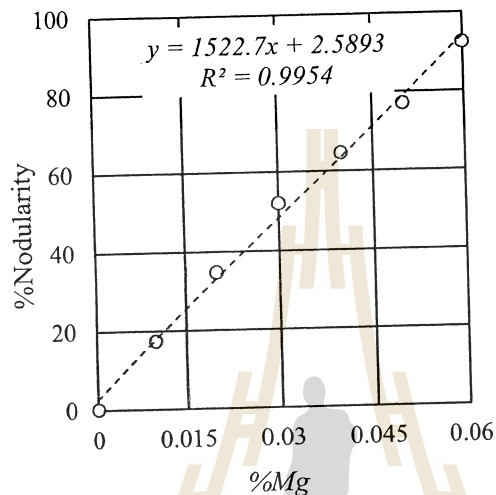
#### 4.2.5 การทำนายรูปร่างกราไฟต์

รูปร่างของกราไฟต์ในเหล็กหล่อสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ กราไฟต์แบบแผ่น กราไฟต์แบบตัวหนอน และกราไฟต์แบบกลม โดยมีวิธีการจำแนกจากสัญญาณ (หรือรูปทรง) ของกราไฟต์ ในการวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยวิธีเทคนิคทางภาพ (Image analysis) ตามมาตรฐาน ASTM E2567 โดยวิเคราะห์ออกมาเป็น Nodularity รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nodularity และแมกนีเซียม (0 – 0.06%) จะเห็นได้ว่าความกลมของกราไฟต์เพิ่มขึ้นตาม



ปริมาณแมกนีเซียมเหลือค้างที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Nodularity ซึ่งบอกถึงความกลมของกราฟไตต์กับแมกนีเซียมเป็นไปดังสมการ

$$\% \text{Nodularity} = 1522.7 (\% \text{Mg}) + 2.5893 \quad (4.11)$$



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Nodularity และ %Mg

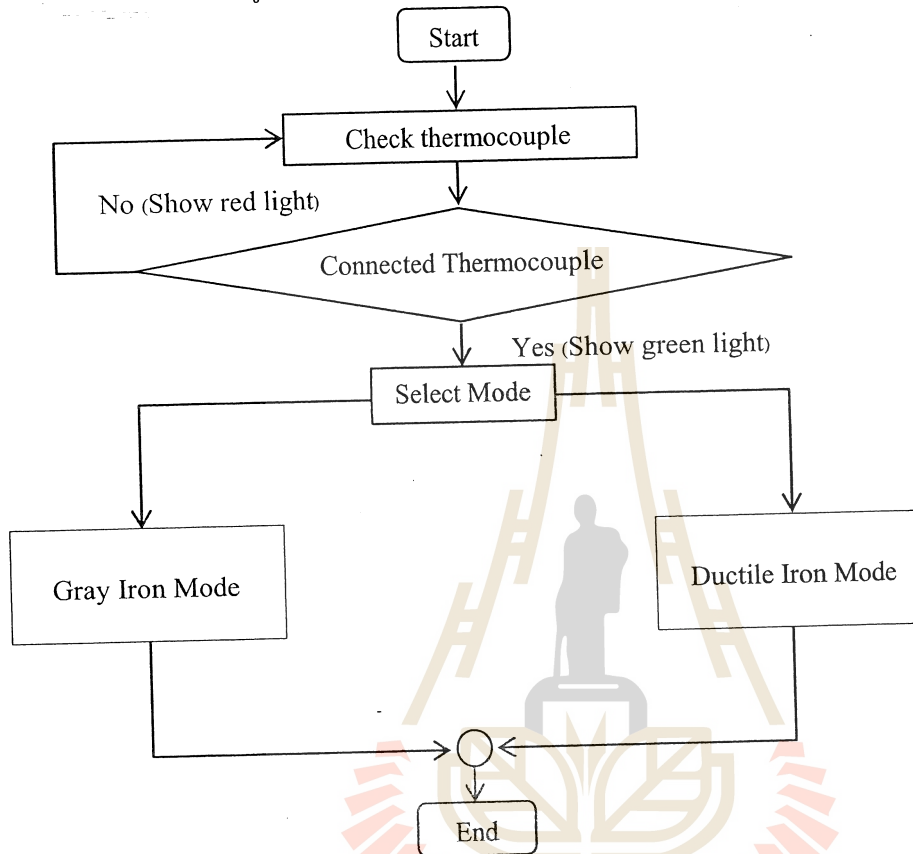
#### 4.3 การสร้างระบบต้นแบบซอฟต์แวร์

สมการที่เสนอทั้งหมดถูกเปลี่ยนเป็นรหัสในซอฟต์แวร์ต้นแบบโดยใช้ LabVIEW ซอฟต์แวร์มีความสามารถในการคำนวณและเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์เพื่อตรวจจับค่าอุณหภูมิที่ต้องการพร้อมกับการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลแสดงข้อมูลบนหน้าจอแสดงผลการทำนายและแสดงค่าเตือนเมื่อผลลัพธ์ไม่ตรงเป้าหมายที่กำหนดโดยผู้ใช้ การทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อจะมีแผนผังการทำงานเป็นไปดังหัวข้อ 4.3.1 ซึ่งจะประกอบไปด้วยสองโหมดการทำงานคือ โหมดการทำงานเหล็กหล่อเทาจะใช้สำหรับการวิเคราะห์เหล็กหล่อเทาซึ่งแผนผังการทำงานของโปรแกรมและรายละเอียดเป็นไปดังหัวข้อ 4.3.2 และอีกโหมดการทำงานคือ โหมดเหล็กหล่อเหนียวจะใช้สำหรับการวิเคราะห์เหล็กหล่อเหนียวมีแผนผังการทำงานของโปรแกรมและรายละเอียดเป็นไปดังหัวข้อ 4.3.3

##### 4.3.1 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อ

แผนผังการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อมีลำดับการทำงานดังนี้ เริ่มจากการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple checking) จากนั้นไปตอนตรวจสอบเงื่อนไขว่าเทอร์โมคัปเปิลเชื่อมต่อแล้วหรือไม่ถ้าก็กลับไปตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่ออีกครั้งถ้าเชื่อมต่อแล้วก็ไปทำงานขั้นตอนต่อไปคือ การเลือกโหมดซึ่งจะเลือกโดยผู้ใช้งานสำหรับการ

เลือกโหมดเหล็กหล่อเทาจะใช้สำหรับงานวิเคราะห์เหล็กหล่อเทาส่วนสำหรับโหมดเหล็กหล่อเหนียวก็  
จะใช้ในการวิเคราะห์เหล็กหล่อเหนียวเท่านั้น โดยแผนผังการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อ  
โดยรวมนั้นจะเป็นไปดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อ

#### 4.3.2 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อโหมดเหล็กหล่อเทา

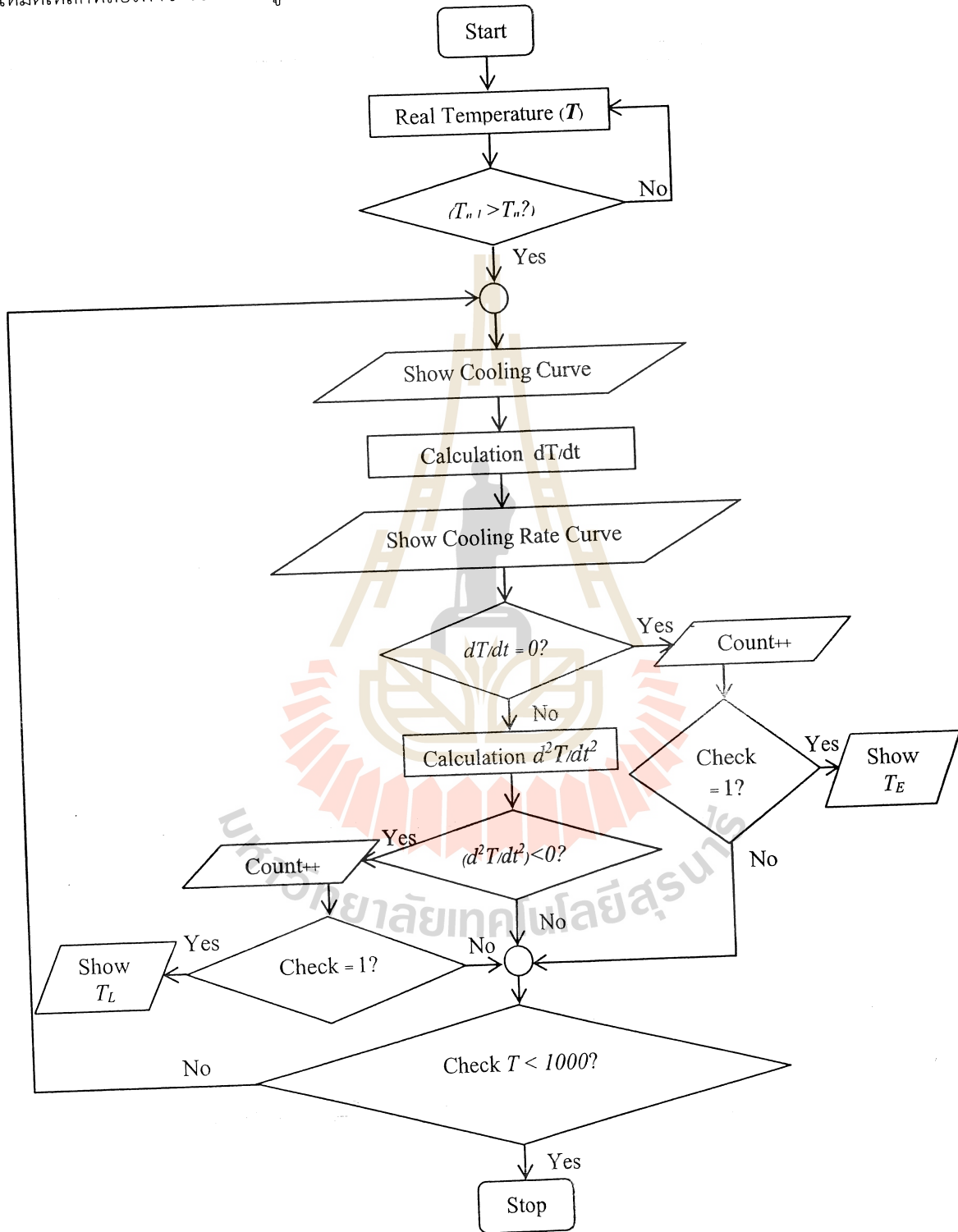
การทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อในโหมดเหล็กหล่อเทามีลำดับการทำงานคือ เริ่มต้น  
จากการรับข้อมูลเป็นอนุกรมแบบ Real Time แล้วตรวจสอบเงื่อนไขว่า  $T_{n.1} > T_n$  หรือไม่โดยที่  $T_{n.1}$   
คือ อนุกรมก่อนหน้านี้และ  $T_n$  คือ อนุกรมปัจจุบัน ถ้า  $T_{n.1} < T_n$  ให้ค่าเป็นเท็จแล้ววนรับข้อมูลใหม่แต่  
ถ้า  $T_{n.1} > T_n$  ให้ทำขั้นตอนต่อไปคือ การแสดงผลกราฟการการเย็นตัวทางหน้าจอแล้วขั้นตอนต่อไป  
เป็นการคำนวณหาอัตราการเย็นตัว ( $dT/dt$ ) ตามด้วยขั้นตอนแสดงผลเป็นกราฟอัตราการการเย็นตัว  
ทางหน้าจอขั้นตอนต่อไปตรวจสอบเงื่อนไขว่าอัตราการการเย็นตัวเท่ากับศูนย์หรือไม่ ถ้าใช่จะได้ค่า  
เป็นจริง ขั้นตอนต่อไปจะทำการนับผลจำนวนข้อมูลโดยใช้ Count++ ทำการตรวจสอบเงื่อนไขว่าเท่ากับ  
1 (Check = 1) หรือไม่ ถ้าไม่จะข้ามไปขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าอุณหภูมิเท่ากับ 1000 องศา  
เซียลเซียสหรือไม่ ถ้าไม่จะให้ค่าเป็นเท็จและไปทำงานที่ขั้นตอนการแสดงผลกราฟการเย็นตัวถ้าใช่จะ

ให้ค่าเป็นจริงและไปที่ขั้นตอนจบการทำงาน ถ้าขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขเท่ากับ 1 (Check = 1) นั้นเท่ากับ 1 จะให้ค่าเป็นจริงจะไปทำงานการในขั้นตอนแสดงผลเป็นอุณหภูมิยุคตึก ( $T_E$ ) และค่าอุณหภูมิยุคตึกนั้นทำให้คำนวณปริมาณซิลิกอนได้ ต่อจากขั้นตอนตรวจสอบเงื่อนไขว่าอัตราการเย็นตัวคือ การคำนวณอนุพันธ์อันดับที่ 2 ของกราฟการเย็นตัว  $d^2T/dt^2$  พร้อมกับตรวจสอบเงื่อนไขว่า  $d^2T/dt^2$  น้อยกว่าศูนย์หรือไม่ ถ้าใช่จะได้ค่าเป็นจริง ขั้นต่อไปจะทำการนับผลจำนวนข้อมูลโดยใช้ Count++ ทำการตรวจสอบเงื่อนไขว่าเท่ากับ 1 (Check = 1) หรือไม่ ถ้าไม่จะข้ามไปขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าอุณหภูมิเท่ากับ 1000 องศาเซลเซียสหรือไม่ ถ้าไม่จะให้ค่าเป็นเท็จและไปทำงานที่ขั้นตอนการแสดงผลกราฟการเย็นตัวถ้าใช่จะให้ค่าเป็นจริงและไปที่ขั้นตอนจบการทำงาน ถ้าขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าเท่ากับ 1 (Check = 1) นั้นเท่ากับ 1 จะให้ค่าเป็นจริงจะไปทำงานการในขั้นตอนแสดงผลเป็นอุณหภูมิควิตัส ( $T_L$ ) และค่าอุณหภูมิควิตัสนั้นทำให้คำนวณปริมาณคาร์บอนและค่าคาร์บอนสมมูลได้ จากขั้นตอนการคำนวณอนุพันธ์อันดับที่ 2 ของกราฟการเย็นตัว  $d^2T/dt^2$  พร้อมกับตรวจสอบเงื่อนไขว่า  $d^2T/dt^2$  น้อยกว่าศูนย์หรือไม่ ในกรณีที่ไม่ว่าจะให้ค่าเป็นเท็จแล้วไปที่ขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าอุณหภูมิเท่ากับ 1000 องศาเซลเซียสหรือไม่ถ้าไม่จะให้ค่าเป็นเท็จและไปทำงานที่ขั้นตอนการแสดงผลกราฟการเย็นตัวถ้าใช่จะให้ค่าเป็นจริงและไปที่ขั้นตอนจบการทำงาน ซึ่งแผนผังการทำงานโปรแกรมในโหมดเหล็กหล่อเทาจะเป็นไปดังรูปที่ 4.13

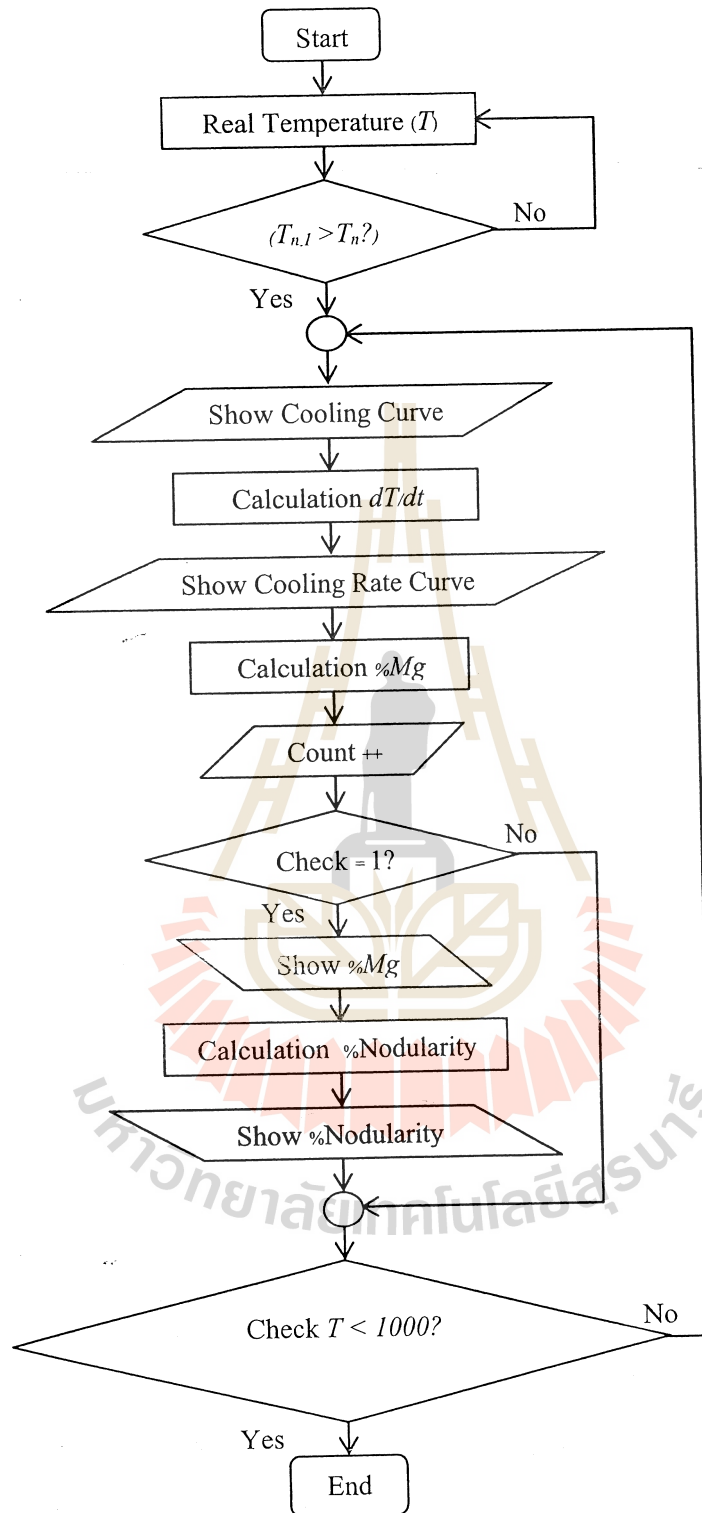
#### 4.3.3 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อโหมดเหล็กหล่อเหนียว

การทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อโหมดเหล็กหล่อเหนียวมีลำดับการทำงานคือ เริ่มต้นจากการรับข้อมูลเป็นอุณหภูมิแบบ Real Time แล้วตรวจสอบเงื่อนไขว่า  $T_{n,1} > T_n$  หรือไม่โดยที่  $T_{n,1}$  คือ อุณหภูมิก่อนหน้าและ  $T_n$  คือ อุณหภูมิปัจจุบัน ถ้า  $T_{n,1} < T_n$  ให้ค่าเป็นเท็จแล้วรับข้อมูลใหม่แต่ถ้า  $T_{n,1} > T_n$  ให้ทำขั้นตอนต่อไปคือ การแสดงผลกราฟการการเย็นตัวทางหน้าจอแล้วขั้นตอนต่อไปเป็นการคำนวณหาอัตราการเย็นตัว ( $dT/dt$ ) ตามด้วยขั้นตอนแสดงผลเป็นกราฟอัตราการการเย็นตัวทางหน้าจอขั้นตอนต่อไปเป็นการคำนวณปริมาณแมกนีเซียม (%Mg) ผ่านขั้นตอนการคำนวณปริมาณแมกนีเซียมแล้วต่อไปจะทำการนับผลจำนวนข้อมูลโดยใช้ Count++ ทำการตรวจสอบเงื่อนไขว่าเท่ากับ 1 (Check = 1) หรือไม่ ถ้าไม่จะข้ามไปขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าอุณหภูมิเท่ากับ 1000 องศาเซลเซียสหรือไม่ถ้าไม่จะให้ค่าเป็นเท็จและไปทำงานที่ขั้นตอนการแสดงผลกราฟการเย็นตัวถ้าใช่จะให้ค่าเป็นจริงและไปที่ขั้นตอนจบการทำงาน ถ้าขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าเท่ากับ 1 (Check = 1) นั้นเท่ากับ 1 จะให้ค่าเป็นจริงจะไปทำงานการในขั้นตอนแสดงผลเป็นปริมาณของแมกนีเซียมทางหน้าจอขั้นตอนต่อไปจะคำนวณค่า (%Nodularity) บอกถึงรูปร่างของกราฟไฟต์ จากนั้นแสดงผลของค่า %Nodularity ในขั้นตอนต่อไป ต่อมาทำการตรวจสอบเงื่อนไขว่าอุณหภูมิเท่ากับ 1000 องศาเซลเซียสหรือไม่ถ้าไม่จะให้ค่าเป็นเท็จและไปทำงานที่ขั้นตอนการแสดงผลกราฟ

การเขียนตัวถ้าใช้จะให้ค่าเป็นจริงและไปที่ขั้นตอนจบการทำงาน ซึ่งแผนผังการทำงานโปรแกรมในโหมดเหล็กหล่อเทาจะเป็นไปดังรูปที่ 4.14



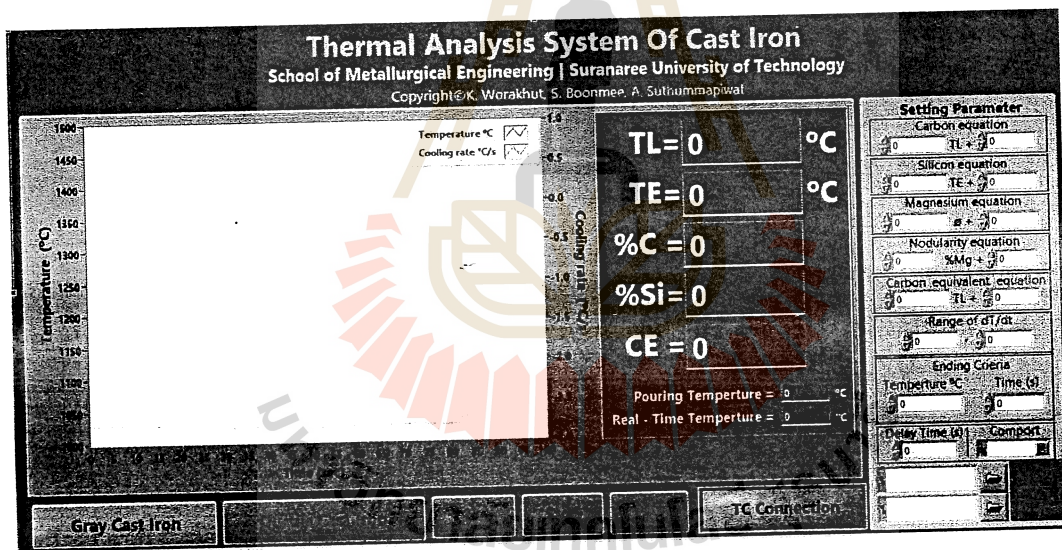
รูปที่ 4.13 แผนผังโปรแกรมสำหรับเหล็กหล่อเทา



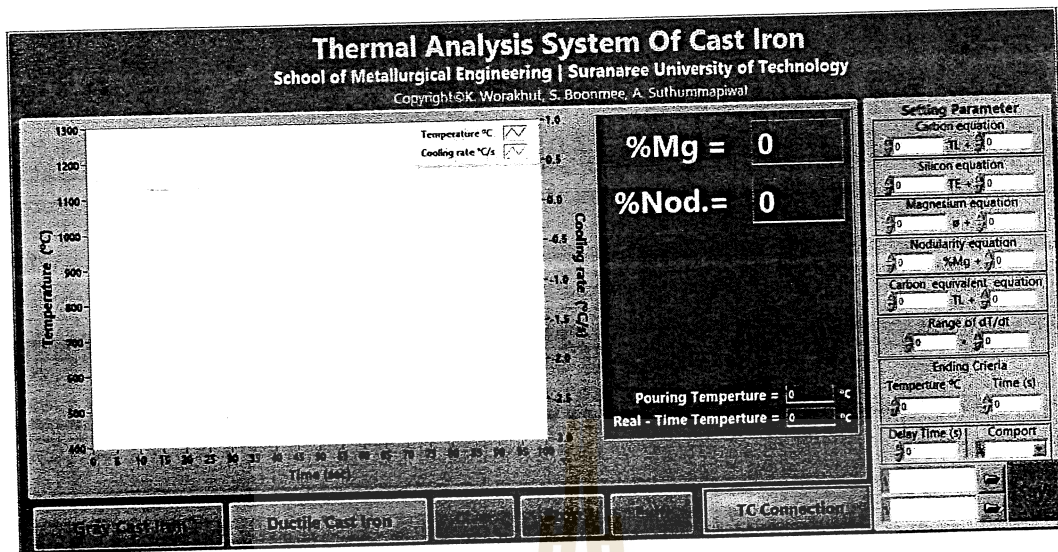
รูปที่ 4.14 แผนผังโปรแกรมสำหรับเหล็กหล่อเหนียว

#### 4.3.4 การแสดงผลโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อ

การแสดงผลการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อประกอบไปด้วยส่วนที่แสดงกราฟการเย็นเส้นสีน้ำเงินโดยพิจารณาเทียบแกนแนวตั้งทางซ้ายและแกนแนวนอนส่วนที่แสดงกราฟอัตราการเย็นตัวนั้นเส้นสีแดงโดยพิจารณาเทียบแกนแนวตั้งทางขวาและแกนแนวนอน ส่วนปุ่มการทำงานนั้นได้แก่ ปุ่มโหมดการทำงานของกรวิเคราะห์เหล็กหล่อเทา (Gray Cast Iron Mode) ปุ่มโหมดการทำงานของกรวิเคราะห์เหล็กหล่อเหนียว (Ductile Cast Iron Mode) ปุ่มเริ่มการทำงาน (Start) เป็นการเริ่มการทำงานงานของโหมดที่เลือก ปุ่มหยุดการทำงาน เป็นการเริ่มการทำงานงานของโหมดที่เลือก และส่วนสุดท้ายคือส่วนที่แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณประกอบไปด้วย อุณหภูมิลิควิดัส ( $T_L$ ) อุณหภูมิยูเทคติก ( $T_E$ ) ปริมาณคาร์บอน (%C) ปริมาณซิลิกอน (%Si) และคาร์บอนสมมูล (CE) สำหรับโหมดเหล็กหล่อเทา ดังรูปที่ 4.15 ในส่วนเหล็กหล่อเหนียวก็เช่นเดียวกันแต่แตกต่างใส่ส่วนสุดท้ายซึ่งในโหมดเหล็กหล่อเหนียวจะประกอบได้ด้วย ปริมาณแมกนีเซียม (%Mg) และค่าบอกรูปทรงกราไฟต์ (%Nodularity) ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างภาพหน้าจอของซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับโหมดเหล็กหล่อเทา



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างภาพหน้าจอของซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับโหมดเหล็กหล่อเหนียว

#### 4.3.5 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ผลสัมฤทธิ์ของงานวิจัยนี้ประการหนึ่งคือสามารถนำสิ่งประดิษฐ์ที่เกิดขึ้นไปใช้ในอุตสาหกรรม การผลิตเหล็กหล่อ โดยทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งในปัจจุบันมีผู้ผลิตระบบวิเคราะห์ทาง ความร้อนจำหน่ายจากต่างประเทศ เช่น สเปน อังกฤษ ญี่ปุ่น เป็นต้น ซึ่งมีราคาจำหน่ายต่างกันขึ้นอยู่กับสมรรถนะของระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์จากญี่ปุ่นที่มีสมรรถนะเทียบเคียงกันจะมีราคา ขายปลีกเฉลี่ย (Mean market street price) ประมาณ 310,000 บาทต่อชุด สำหรับระบบ วิเคราะห์ทางความร้อนที่พัฒนาขึ้นในการวิจัยครั้งนี้มีต้นทุนอยู่ที่ 77,000 บาทต่อชุด รายละเอียด แสดงดังตารางที่ 4.3 ดังนั้นจึงสามารถอนุมานได้ว่าระบบวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับเหล็กหล่อที่ พัฒนาขึ้นสามารถจัดจำหน่ายได้ในราคาขายปลีกเฉลี่ยต่ำกว่าการนำเข้า จึงมีส่วนต่างสำหรับการ นำไปผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้มีกลุ่มเป้าหมายคือโรงงานอุตสาหกรรมหล่อโลหะขนาดเล็กและ ขนาดกลาง ซึ่งตามทำเนียบสมาชิกสมาคมอุตสาหกรรมหล่อโลหะมีจำนวนมากกว่า 300 แห่งทั่ว ประเทศ จึงอนุมานได้ว่ามีกลุ่มเป้าหมายภายในประเทศเพียงพอต่อความคุ้มค่าเชิงพาณิชย์ และใน เวลาเดียวกันสามารถผลิตเพื่อส่งออกไปยังประเทศใกล้เคียงได้ในอนาคต

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดต้นทุนต้นแบบระบบวิเคราะห์ทางความร้อน

รายการ	ราคา (บาท)
คอมพิวเตอร์	20,000
Data Logger	20,000
สายเทอร์โมคัพเปิล	2,500
ปลั๊กเทอร์โมคัพเปิล	500
ซอฟต์แวร์	18,500
กล่องเหล็ก และฮาร์ดแวร์อื่น ๆ	4,500
ถ้วยรองรับน้ำโลหะ โหมดเหล็กหล่อเทา (100 ถ้วย)	3,000
ถ้วยรองรับน้ำโลหะ โหมดเหล็กหล่อเหนียว (100 ถ้วย)	3,000
ฐานรองและคอนเนคเตอร์	5,000
รวม	77,000



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของกราฟการเย็นตัวและองค์ประกอบทางเคมีในเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียวได้ข้อสรุปจากงานวิจัยดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 เหล็กหล่อเทา

เปอร์เซ็นต์คาร์บอนและคาร์บอนเทียบเท่ามีความสัมพันธ์กับ  $T_{LA}$  อย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ -0.60 และ -0.81 ตามลำดับสามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\%C = -0.01632T_{LA} + 22.5888 \quad (5.1)$$

$$CE = -0.0124T_{LA} + 17.3423 \quad (5.2)$$

แสดงให้เห็นว่า  $T_{LA}$  สามารถใช้ทำนายเปอร์เซ็นต์คาร์บอนและคาร์บอนเทียบเท่าในเหล็กหล่อเทาได้ นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างเปอร์เซ็นต์ซิลิกอนกับ  $T_E$  ในงานวิจัยนี้ ( $R^2 = -0.97$ ) สามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\%Si = -0.0785T_E + 89.53 \quad (5.3)$$

ซึ่งเมื่อนำความสัมพันธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [1, 7, 9, 10] พบว่าผลการทำนายจากสมการข้างต้นให้ค่าสูงกว่า ทั้งนี้เป็นผลจากช่วงปริมาณซิลิกอนที่ทดลองแตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยอื่น ๆ ที่มีช่วงปริมาณซิลิกอนใกล้เคียงกัน [6, 8] และเป็นงานวิจัยที่ใช้อุปกรณ์ทันสมัยกว่าพบว่าให้ค่าไปในช่วงเดียวกัน แต่เนื่องจากสมการเหล่านี้เป็นความลับทางการค้าจึงไม่มีการเปิดเผยในผลงานวิจัยสำหรับสมการสำหรับความสัมพันธ์จากการวิจัยนี้ได้ถูกนำไปใช้สำหรับการเข้ารหัสซอฟต์แวร์ต้นแบบต่อไป

##### 5.1.2 เหล็กหล่อเหนียว

พบว่าเปอร์เซ็นต์ของแมงกานีสสามารถทำนายได้ด้วย  $MCR$  และ  $\theta$  มีค่าสัมประสิทธิ์  $R^2$  เท่ากับ 0.80 และ 0.81 ตามลำดับ สามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\%Mg = \exp(4.599 (MCR) + 3.4333) \quad (5.4)$$

$$\%Mg = \exp(0.06866 (\theta) - 8.8492) \quad (5.5)$$

สมการ 5.4 และ 5.5 ถูกใช้ในการทำนายเปอร์เซ็นต์แมงกานีสและเปอร์เซ็นต์ Nodularity ในซอฟต์แวร์ต้นแบบ ทั้งนี้แนวโน้ม  $\%Mg$  ที่เพิ่มขึ้นตาม  $MCR$  ดังกล่าวก็ถูกรายงานโดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [8] แต่ไม่มีการเปิดเผยสมการเนื่องจากเป็นความลับทางการค้า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 อุปสรรค

ระหว่างการทดลองในขั้นตอนการผลิตเหล็กหล่อเหนียวเมื่อทำการเก็บข้อมูลจะทำได้เพียงการหลอมหนึ่งครั้งต่อหนึ่งข้อมูลซึ่งทำให้สูญเสียเวลาและขนาดความสม่ำเสมอของส่วนผสมทางเคมีสำหรับธาตุบางตัวที่ไม่ต้องการเปลี่ยนแปลง

### 5.2.2 ข้อผิดพลาด

จากการทดลองพบว่าในกรณีด้วยเพลลุ่มีอายุเก็บรักษานานเกินไปจะทำให้เกิด ออกซิเดชันและไม่มีประสิทธิภาพในการทำงาน ส่งผลให้กราฟการเย็นตัวที่ได้คลาดเคลื่อนไปและไม่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์



## บรรณานุกรม

- [1] W. Van der Perre: "Thermal analysis, principles and applications," Heraeus Electro-Nite website <http://heraeus-electro-nite.com> (last accessed 10-30-14)
- [2] Hamed Hoseini Hooshyar, "Thermal Analysis of Compacted Graphite Iron", Department of Materials and Manufacturing Technology CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Gothenburg, Sweden.
- [3] L. Backerud, K. Nilsson and H. Steen, "Thermal Analysis—Theory and Applications in Metalcasting", in *The Metallurgy of Cast Iron*, B. Lux, I. Minkoff and F. Mollard, Eds., Georgi Publishing, Switzerland (1975) p. 625.
- [4] D. M. Stefanescu, C. R. Loper, Jr., R. C. and I. G. Chen, "The Cooling Curve Structure Analysis of Compacted/Vermicular Graphite Cast Irons Produced by Different Melt Treatments", *AFS Trans.*, vol 75 (1982), pp. 333-348.
- [5] C. R. Loper, Jr., R. W. Heine, R. W. Reesman, R. Sch. and H. Shah, "Thermal Analysis of Ductile Iron", *AFS Trans.*, vol 75 (1967), pp. 541-547.
- [6] D.M. Stefanescu, "Thermal Analysis Theory and Applications in Metal Casting", *International Journal of Metalcasting*, Vol 9 (2015), Issue 1, pp. 7 – 22.
- [7] J.G. Humphreys, "Rapid Control Test for Carbon Equivalent", *BCIRA J.* 9 (1961) 609-621.
- [8] D.M. Stefanescu and S. Katz, "Thermodynamic Properties of Iron-Base Alloys," *ASM Handbook vol.15 – Casting* (2008) 41-55.
- [9] R.W. Heine, "The Carbon Equivalent Fe—C-Si Diagram and Its Application to Cast Irons", *AFS Cast Metals Res. J.* (June 1971) 49-54.
- [10] R.W. Heine, "Carbon, Silicon, Carbon Equivalent, Solidification and Thermal Analysis Relationships in Grey and Ductile Iron", *AFS Trans.* 82 (1974) 462-470.
- [11] W. Donald and A. Moore, "Significance of Carbon Equivalent Formulae and Their Applications in the Foundry", *BCIRA Report* no. 1128(1973).
- [12] G.R. Strong, "Thermal Analysis as a Ductile Iron Molten Metal Processing Evaluation Tool", *AFS Trans.* 91 (1983) 151-156.
- [13] D. M. Stefanescu and I. G. Chen, "Computer Aided Differential Thermal Analysis of Spheroidal and Compacted Graphite Cast Irons", *AFS Trans.*, 92, 947 (1984)



ตารางที่ ก.1 ตารางส่วนผสมทางเคมีสำหรับวิเคราะห์ %C กับ  $T_{LA}$ 

Date	No	%C	$T_{LA}$
20/7/2559	14	3.40	1163
20/7/2559	12	3.46	1157
19/7/2559	4	3.62	1167
20/7/2559	15	3.36	1165
20/7/2559	16	3.36	1168
19/7/2559	2	3.57	1166
20/7/2559	17	3.34	1172
19/7/2559	1	3.51	1175
19/7/2559	5	3.55	1172
20/7/2559	18	3.32	1177
20/7/2559	20	3.28	1187
20/7/2559	19	3.25	1180
20/7/2559	21	3.23	1186
19/7/2559	6	3.44	1174
19/7/2559	9	3.38	1185
19/7/2559	7	3.38	1176
19/7/2559	8	3.37	1177
19/7/2559	19	3.38	1181
20/7/2559	22	3.13	1194
19/7/2559	12	3.32	1183
19/7/2559	13	3.31	1190
19/7/2559	14	3.28	1190
19/7/2559	15	3.24	1194

ตารางที่ ก.2 ตารางส่วนผสมทางเคมีสำหรับวิเคราะห์ CE กับ  $T_{LA}$

Date	No	C						
20/7/2559	14	3.40	2.58	0.299	0.025	0.014	4.36	1163
20/7/2559	12	3.46	2.57	0.031	0.025	0.014	4.33	1157
19/7/2559	4	3.62	1.92	0.032	0.024	0.015	4.27	1167
20/7/2559	15	3.36	2.57	0.030	0.251	0.014	4.23	1165
20/7/2559	16	3.36	2.57	0.030	0.025	0.014	4.23	1168
19/7/2559	2	3.57	1.92	0.030	0.023	0.013	4.22	1166
20/7/2559	17	3.34	2.57	0.031	0.025	0.014	4.21	1172
19/7/2559	1	3.51	2.06	0.031	0.023	0.013	4.21	1175
19/7/2559	5	3.55	1.92	0.032	0.025	0.014	4.20	1172
20/7/2559	18	3.32	2.57	0.031	0.025	0.014	4.19	1177
20/7/2559	20	3.28	2.60	0.030	0.026	0.014	4.16	1187
20/7/2559	19	3.25	2.57	0.031	0.025	0.013	4.12	1180
20/7/2559	21	3.23	2.60	0.029	0.025	0.013	4.11	1186
19/7/2559	6	3.44	1.93	0.032	0.026	0.014	4.09	1174
19/7/2559	9	3.38	1.91	0.029	0.027	0.011	4.03	1185
19/7/2559	7	3.38	1.89	0.031	0.025	0.012	4.02	1176
19/7/2559	8	3.37	1.92	0.031	0.026	0.012	4.02	1177
19/7/2559	19	3.38	1.89	0.030	0.028	0.011	4.02	1181
20/7/2559	22	3.13	2.57	0.031	0.025	0.014	4.00	1194
19/7/2559	12	3.32	1.90	0.029	0.027	0.011	3.96	1183
19/7/2559	13	3.31	1.92	0.029	0.028	0.011	3.96	1190
19/7/2559	14	3.28	1.93	0.030	0.028	0.011	3.93	1190
19/7/2559	15	3.24	1.92	0.030	0.028	0.011	3.89	1194

ตารางที่ ก.3 ตารางส่วนผสมทางเคมีสำหรับวิเคราะห์ %Si กับ  $T_E$ 

Date	No	%Si	$T_E$
20/7/2559	2	2.570	1105
20/7/2559	6	2.580	1106
20/7/2559	1	2.550	1105
20/7/2559	3	2.570	1106
20/7/2559	4	2.550	1105
20/7/2559	8	2.580	1106
20/7/2559	10	2.570	1106
20/7/2559	14	2.580	1105
20/7/2559	12	2.570	1109
20/7/2559	9	2.540	1110
20/7/2559	7	2.530	1105
20/7/2559	11	2.560	1105
20/7/2559	13	2.570	1105
19/7/2559	4	1.920	1114
20/7/2559	15	2.570	1106
20/7/2559	16	2.570	1106
19/7/2559	2	1.920	1115
20/7/2559	17	2.570	1105
19/7/2559	1	2.060	1112
19/7/2559	5	1.920	1114
20/7/2559	18	2.570	1106
16/2/2560	1	0.92	1126
16/2/2560	7	1.90	1117
20/7/2559	20	2.600	1106
16/2/2560	2	1.13	1125
16/2/2560	8	2.02	1115
16/2/2560	16	3.40	1096
16/2/2560	3	1.27	1123
16/2/2560	13	2.83	1104
20/7/2559	19	2.570	1105

16/2/2560	12	2.65	1106
20/7/2559	21	2.600	1105
16/2/2560	15	3.16	1099
16/2/2560	5	1.55	1120
16/2/2560	11	2.48	1109
19/7/2559	6	1.930	1114
16/2/2560	9	2.12	1113
16/2/2560	10	2.33	1111
19/7/2559	10	1.920	1115
16/2/2560	14	2.98	1102
19/7/2559	9	1.910	1114
19/7/2559	7	1.890	1114
19/7/2559	8	1.920	1115
19/7/2559	19	1.890	1114
20/7/2559	22	2.570	1105
19/7/2559	11	1.910	1115
19/7/2559	12	1.900	1114
19/7/2559	13	1.920	1114
19/7/2559	14	1.930	1114
19/7/2559	16	1.910	1114
19/7/2559	15	1.920	1114
16/2/2560	6	1.69	1119

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ตารางที่ ก.4 ตารางส่วนผสมทางเคมีสำหรับวิเคราะห์ %Mg กับ MCR

Date	No	Mg	MCR
9/12/2559	3.00	0.0255	-1.61
9/12/2559	4.00	0.0084	-1.62
9/12/2559	8.00	0.0012	-2.72
9/12/2559	9.00	0.0009	-2.01
21/11/2559	2.00	0.0008	-2.25
21/11/2559	3.00	0.0005	-2.36
21/11/2559	4.00	0.0002	-2.44
21/11/2559	6.00	0.0001	-2.52
28/11/2559	1.00	0.0432	-1.41
28/11/2559	2.00	0.0282	-1.44
28/11/2559	3.00	0.0214	-1.38
28/11/2559	4.00	0.0112	-1.47

ตารางที่ ก.5 ตารางส่วนผสมทางเคมีสำหรับวิเคราะห์ %Mg กับ  $\theta$ 

Date	No	Mg	$\theta$
9/12/2559	3.00	0.026	65.00
9/12/2559	4.00	0.008	60.00
9/12/2559	6.00	0.003	10.00
9/12/2559	8.00	0.001	10.00
9/12/2559	9.00	0.001	20.00
21/11/2559	2.00	0.001	15.00
21/11/2559	3.00	0.000	15.00
21/11/2559	4.00	0.000	15.00
21/11/2559	6.00	0.000	10.00
28/11/2559	1.00	0.043	80.00
28/11/2559	2.00	0.028	85.00
28/11/2559	3.00	0.021	87.00

## ประวัติผู้เขียน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สารัมภ์ บุญมี เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2520 สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโลหการ) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2541 และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโลหการ) จากจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2547 หลังจากนั้นได้ศึกษาต่อยัง The Ohio State University ประเทศ สหรัฐอเมริกา สำเร็จการศึกษา Master of Science และ Doctor of Philosophy ด้าน Materials Science and Engineering ในปี พ.ศ. 2554 และ 2556 ตามลำดับ ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สามารถติดต่อได้ที่ [sarum@sut.ac.th](mailto:sarum@sut.ac.th) หรือโทรศัพท์สำนักงาน 044-224360

