

การพัฒนาต้นแบบระบบวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมการผลิต
เหล็กหล่อ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**PROTOTYPING OF THE THERMAL ANALYSIS
SYSTEM FOR CAST IRON INDUSTRY**



Kittirat Worakhut

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

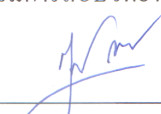
Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การพัฒนาต้นแบบระบบวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. จูฬปณีย์ พิชรวิชัย)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. สารัมภ์ บุญมี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร. ปิยญา บัวสมบุรา)

กรรมการ



(อ. ดร. กุญิต มิตรสมหวัง)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กิตติรัช วรรณ : การพัฒนาต้นแบบระบบวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อ (PROTOTYPING OF THE THERMAL ANALYSIS SYSTEM FOR CAST IRON INDUSTRY) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรรพ์ บุญมี, 70 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อ ซึ่งในภาคอุตสาหกรรม การควบคุมส่วนผสมทางเคมีในน้ำเหล็กอาศัยเครื่องออฟติคอลอิมิตซ์สเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งมีการลงทุนค่อนข้างสูงสำหรับเครื่องมือวัด การวิเคราะห์ทางความร้อนนั้นสามารถที่จะประยุกต์เพื่อใช้ควบคุมคุณภาพน้ำเหล็กได้ด้วยการทำนายส่วนผสมทางเคมีและรูปร่างของกราฟไฟต์ โดยมีการลงทุนที่ต่ำ

ระบบวิเคราะห์ทางความร้อนที่ถูกสร้างขึ้นนี้ประกอบไปด้วย ฐานติดตั้งถ้วยรองรับน้ำเหล็ก (พร้อมเทอร์โมคัปเปิล) ระบบเก็บข้อมูล หน่วยประมวลผล และหน่วยแสดงผล จากการทดลองได้เก็บข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ของลักษณะกราฟการเย็นตัว (อุณหภูมิวิกฤต T_{LA}) อุณหภูมิยูเทคติก (T_E) มุมของกราฟอัตราการเย็นตัวที่จุดสิ้นสุดการแข็งตัว (θ) และส่วนผสมทางเคมี (คาร์บอน (%C) ซิลิกอน (%Si) แมกนีเซียม (%Mg)) จากข้อมูลพบว่า T_{LA} และ %C มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ -0.97 นอกจากนี้แล้ว T_E และ %Si ก็มี R^2 ในระดับสูงมากคือ -0.99 เพราะฉะนั้นสมการสำหรับ T_{LA} และ T_E จึงได้ถูกสร้างขึ้นสำหรับการทำนาย คาร์บอนและซิลิกอน ตามลำดับ สำหรับเหล็กหล่อเหนียวนั้นพบว่า θ และแมกนีเซียม แสดงให้เห็นถึง R^2 ที่ระดับสูงมากเช่นกันคือ -0.96 สมการสำหรับทำนายแมกนีเซียมจึงได้ถูกเสนอ สมการทั้งหมดที่ได้กล่าวมาถูกเข้ารหัสโปรแกรมวิเคราะห์ทางความร้อนที่ถูกสร้างขึ้น จากนั้นอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน ได้ถูกทดสอบการใช้งานในอุตสาหกรรมโดย เปรอร์เซ็นต์ความแม่นยำของ คาร์บอน ซิลิกอน และแมกนีเซียม คือ 98.31 99.47 และ 99.93 เปรอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้แล้ว เปรอร์เซ็นต์ความเที่ยงตรงของ คาร์บอน ซิลิกอน และแมกนีเซียม คือ 0.19 0.13 และ 2.74 เปรอร์เซ็นต์ ตามลำดับได้แสดงให้เห็นว่า ระบบวิเคราะห์ทางความร้อนสามารถใช้งานได้ ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อ

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา กิตติรัช วรรณ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร. สรรพ์ บุญมี

KITTIRAT WORAKHUT : PROTOTYPING OF THE THERMAL
ANALYSIS SYSTEM FOR CAST IRON INDUSTRY. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. SARUM BOONMEE, Ph.D., 70 PP.

THERMAL ANALYSIS/COOLING CURVE/ LIQUIDUS ARREST/EUTECTIC

The objective this resech is to prototype a thermal analysis system for cast iron industry. In the industry, the control of chemical composition in iron melt is done by the Optical Emission Spectrometry (OES). However, the technique is unable to predict the nodularity directly and requires experiences in interpreting the chemical composition. Moreover, the equipment requires the capital investment. The thermal analysis can be applied to melt quality control by aiding the prediction of the chemical composition and nodularity with minimal investment.

In this study, a new thermal analysis system was created. The system consists with a sampling stand (equiped with a thermocouple), a data acquisition system, a processing unit and a display unit. The data were collected in order to correlate the characteristics of the cooling curves (*e.g.* the temperature of liquidus arrest (T_{LA}), the eutectic temperature (T_E), the angle of cooling rate curve (θ) at the end of solidification) and the chemical compositions (*e.g.* C , Si , Mg). It was found that the T_{LA} and carbon showed a significant correlation with the coefficient of determination (R^2) of -0.97. In addition, the T_E and silicon were remarkbly correlated with R^2 of -0.99. Therefore, the empirical equations for the T_{LA} and T_E were established for the prediction of carbon and silicon respectively. For ductile iron, it was found that θ and magnesium demonstrated a notable correlation with the R^2 of -0.96. An empirical equation for the prediction of magnesium was proposed. All equations mentioned above were used for encoding in

the newly created thermal analysis software. The thermal analysis system was tested in the industrial trials. The percent accuracy of carbon, silicon and magnesium were 98.31, 99.47 and 99.93 % respectively. Furthermore, the percent precision of carbon, silicon and magnesium were 0.19, 0.13 and 2.74% respectively indicating that the system was capable to be used in the foundry floor.



School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2017

Student Signature Kittirat

Advisor's Signature Sarun

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีอันเนื่องมาจากได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายส่วนด้วยกัน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ เหล่านี้ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือข้าพเจ้าในระหว่างการดำเนินงานวิจัยนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สารัมภ์ บุญมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ให้โอกาสทางศึกษาให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยนี้ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนกระทั่งงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณวิชาญ วีรัชสุนทร คุณสังเวียน แยมเกษม คุณสุนิติ ชื่นเกษม คุณกฤษดา ศรีลักษณ์ คุณวิเชษฐ์ เผือกแดง เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (อาคารเครื่องมือ 6) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตทุกท่านที่คอยช่วยเหลือในงานวิจัย

และสุดท้าย คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กิตติรัช วรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ.....	4
2.2 เหล็กหล่อเทา.....	5
2.3 เหล็กหล่อเหนียว.....	7
2.4 การวิเคราะห์ทางความร้อน.....	8
2.5 การทำนายส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเทา.....	10
2.6 การทำนายส่วนผสมทางเคมีและรูปร่างกราฟไฟต์.....	11
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 บทนำ.....	18
3.2 ออกแบบชุดอุปกรณ์และสร้างอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน.....	19
3.2.1 หลักการออกแบบ.....	19
3.2.2 ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน.....	20

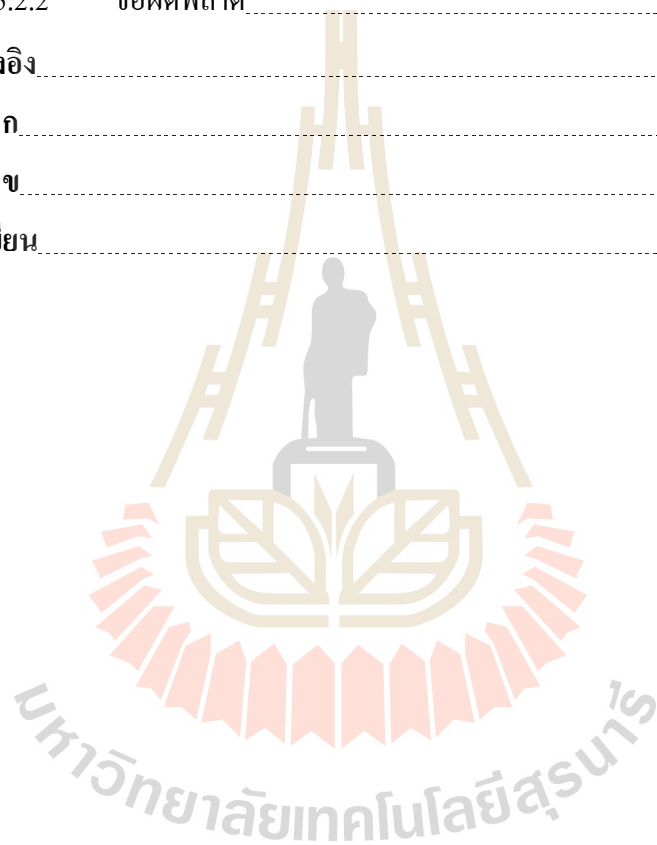
สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ.....	22
3.3.1	การผลิตเหล็กหล่อ.....	22
3.3.2	การสร้างความสัมพันธ์.....	27
3.4	การสร้างโปรแกรมสำหรับการทำนาย %C %Si CE % Mg และ %Nodularity.....	29
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	
4.1	บทนำ.....	31
4.2	การทำนายส่วนผสมทางเคมี.....	32
4.2.1	การทำนายปริมาณคาร์บอน.....	34
4.2.2	การทำนายคาร์บอนรวม.....	37
4.2.3	การทำนายปริมาณซิลิกอน.....	38
4.2.4	การทำนายปริมาณแมกนีเซียม.....	39
4.2.5	การทำนายรูปร่างกราฟไฟต์.....	42
4.3	การสร้างระบบต้นซอฟต์แวร์.....	43
4.3.1	แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อ.....	43
4.3.2	แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อโหมดเหล็กหล่อเทา.....	45
4.3.3	แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อโหมดเหล็กหล่อเหนียว.....	47
4.3.4	ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับเหล็กหล่อ.....	49
4.4	ผลการใช้งานของอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน.....	53
4.4.1	การเปรียบเทียบระหว่าง Thermal Analysis กับ Optical Emission Spectrometer.....	53
4.4.2	ความแม่นยำ (Accuracy) ของอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน.....	55
4.4.3	ความเที่ยงตรง (Precision) ของอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน.....	57
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	59
5.1.1	เหล็กหล่อเทา.....	59
5.1.2	เหล็กหล่อเหนียว.....	59
5.1.3	การพัฒนาซอฟต์แวร์.....	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1.4 ผลการใช้งาน.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
5.2.1 อุปสรรค.....	60
5.2.2 ข้อผิดพลาด.....	61
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก ก.....	63
ภาคผนวก ข.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	70



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	SMART LAB -Carbon Silicon Analyzer CE meter System	2
2.1	สมดุลของระบบ $Fe-C$ กับการเพิ่ม Si และกราฟการแข็งตัวของโลหะผสม C_0	8
2.2	เปรียบเทียบกราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน และเหล็กหล่อเหนียว	9
2.3	คำนิยามที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับเหล็กหล่อ	11
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง TER และ AT	12
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบบรินเนลและ AT	12
2.6	กราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเหนียวที่มี Nodule Count ต่างกัน	13
2.7	คำอธิบายของกราฟการเย็นตัวเพื่อการทำนายการแข็งตัวในเหล็กหล่อที่สมดุล หรือกึ่งสมดุล	14
2.8	ผลกระทบของ Bi อินทรีย์เคลือบในเหล็กหล่อ SG	15
2.9	กราฟการเย็นตัวสำหรับโลหะผสมตามทฤษฎีและการทดลอง	16
2.10	กราฟการเย็นตัวกราฟอัตราการเย็นตัวและ Fourier Zero Curve สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม	17
3.1	ลำดับการทดลอง	18
3.2	รูปแบบชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน	19
3.3	ถ้วยรองรับน้ำโลหะ	20
3.4	ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน	21
3.5	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	22
3.6	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	23
3.7	เหล็กหล่อหลอมเหลว	24
3.8	การกำจัดสแลกบนผิวหน้าเหล็ก	24
3.9	ชิ้นงานสำหรับตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี	25
3.10	การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11	การทดลองชิ้นงานสำหรับเก็บข้อมูล..... 26
3.12	การทำ Magnesium Treatment ในการผลิตเหล็กหล่อเหนียว 27
3.13	แนวคิดกราฟความสัมพันธ์สำหรับเหล็กหล่อเทา 28
3.14	แนวคิดกราฟความสัมพันธ์สำหรับเหล็กหล่อเหนียว 28
3.15	หน้าจอแสดงผลสำหรับโหมมคการทำงานของเหล็กหล่อเทา 29
3.16	หน้าจอแสดงผลสำหรับโหมมคการทำงานของเหล็กหล่อเหนียว 30
3.17	แนวคิดลำดับการทำงานของซอฟต์แวร์ 30
4.1	ตัวอย่างกราฟการเย็นตัวและนิยามค่าศัพท์ 32
4.2	อุณหภูมิควิตต์เทียบกับคาร์บอน 34
4.3	กราฟการเย็นตัวที่มีคาร์บอนต่างกัน 35
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตต์และคาร์บอน 36
4.5	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิควิตต์และคาร์บอน 36
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตต์และคาร์บอนสมมูล 37
4.7	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิควิตต์กับ คาร์บอนสมมูล 38
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิยูเทคติกและซิลิกอน 39
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการเย็นตัว และแมกนีเซียม 40
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวสูงสุดและแมกนีเซียม 41
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่าง มุม และแมกนีเซียม 41
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความกลม และแมกนีเซียม 42
4.13	แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์สำหรับเหล็กหล่อ 44
4.14	แผนผังโปรแกรมสำหรับเหล็กหล่อเทา 46
4.15	แผนผังโปรแกรมสำหรับเหล็กหล่อเหนียว 48
4.16	ตัวอย่างภาพหน้าจอของซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับโหมมคเหล็กหล่อเทา 49
4.17	ตัวอย่างภาพหน้าจอของซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับโหมมคเหล็กหล่อเหนียว 49
4.18	จอแสดงกราฟการเย็นตัวและอัตราการเย็นตัว 50
4.19	แถบการเลือกโหมมคการทำงาน 51
4.20	ส่วนแสดงผลการทำนาย 52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21	แถบการตั้งค่าตัวแปรต่างๆ 52
4.22	กราฟเปรียบเทียบระหว่าง %C โดย TA และ %C โดย OES 53
4.23	กราฟเปรียบเทียบระหว่าง %Si โดย TA และ %Si โดย OES 54
4.24	กราฟเปรียบเทียบระหว่าง CE โดย TA และ CE โดย OES 54
4.25	กราฟเปรียบเทียบระหว่าง %Mg โดย TA และ %Mg โดย OES 55



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ตัวแปรและช่วงการทดลอง 3
3.1	ช่วงของส่วนผสมทางเคมีที่ใช้ในการศึกษา 19
3.2	รายละเอียดของชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน 21
4.1	วิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆในเหล็กหล่อเทา 33
4.2	วิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆในเหล็กหล่อเหนียว 34
4.3	สมการทำนาย %C %Si CE %Mg และ %Nod 43
4.4	ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของคาร์บอน 56
4.5	ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของซิลิกอน 56
4.6	ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของคาร์บอนผสม 56
4.7	ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของแมกนีเซียม 56
4.8	ความเที่ยงตรงของคาร์บอน 57
4.9	ความเที่ยงตรงของซิลิกอน 58
4.10	ความเที่ยงตรงของคาร์บอนผสม 58
4.11	ความเที่ยงตรงของแมกนีเซียม 58
5.1	ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์และสมการทำนาย %C %Si CE %Mg และ %Nod 60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เหล็กหล่อเป็นวัสดุที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักร ยานยนต์และอุตสาหกรรมอื่นๆ เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ กลึงไสตัดเจาะได้ง่าย มีจุดหลอมตัวต่ำ มีความสามารถในการไหลดี มีอัตราการหดตัวต่ำ มีความต้านทานแรงอัด รับแรงสั่นสะเทือนได้ดี และสามารถปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานแรงดึงโดยการเติมธาตุผสม เพื่อให้ได้สมบัติของงานหล่อที่ตรงต่อความต้องการของผู้ผลิต ดังนั้นการควบคุมคุณภาพการผลิตเหล็กหล่อจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะกรรมวิธีการหลอมและการปรุงส่วนผสมทางเคมีของโลหะในการผลิตเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว ซึ่งมีการผลิตจำนวนมากในอุตสาหกรรมหล่อ ส่วนสำคัญในการผลิตเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียวให้มีสมบัติเชิงกลตามต้องการนั้นคือ น้ำเหล็กที่ได้หลังกระบวนการหลอมจะต้องมีคุณภาพเหมาะสมก่อนการนำไปหล่อขึ้นรูป ซึ่งในขั้นตอนการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของน้ำเหล็กนั้นโดยปกติอาศัยการใช้เครื่อง ออฟดิคัลอิมีสชันสเปกโตรมิเตอร์ (Optical Emission Spectrometer : OES) ในการตรวจสอบให้ข้อมูลแสดงผลเป็นส่วนผสมทางเคมีซึ่งมีความแม่นยำสูงแต่ยังมีข้อด้อยคือ ใช้เวลานานต่อการตรวจสอบหนึ่งครั้งและยังไม่สามารถทำนาย ปรากฏการณ์อื่นนอกเหนือจากส่วนผสมทางเคมีได้ ภายหลังจากต่อมาได้มีการพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis :TA) ขึ้นดังรูปที่ 1.1 เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบคุณภาพของน้ำเหล็กประกอบกับเทคโนโลยีที่ทันสมัยมากขึ้นช่วยทำให้การควบคุมคุณภาพน้ำเหล็กง่ายและรวดเร็วขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์เหล็กหล่อแต่ละครั้งมีส่วนผสมใกล้เคียงกันขึ้น ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนนี้จะวัดค่าคาร์บอนสมมูล (CE) คาร์บอน (%C) ซิลิกอน (%Si) แมกนีเซียม (%Mg) และร้อยละความกลม (%Nodularity) ซึ่งเป็นตัวแปรพื้นฐานสำหรับการควบคุมคุณภาพน้ำเหล็กหล่อ ปัจจุบันได้มีการใช้ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนกันอย่างแพร่หลายในกลุ่มประเทศที่พัฒนาแล้ว สำหรับประเทศไทยก็มีการใช้เช่นกันแต่เป็นการนำเข้าจากต่างประเทศ



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

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ตรวจสอบคุณภาพของน้ำเหล็กด้วยเทคนิควิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว

1.3 สมมติฐานการวิจัย

เหล็กหล่อที่มีความแตกต่างกันจะมีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน เช่น อัตราการเย็นตัวและรูปร่างของกราฟไฟต์เป็นต้น

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 เป็นการพัฒนาต้นแบบระบบวิเคราะห์ทางความร้อนประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้ทำนายปริมาณ คาร์บอน ซิลิกอน แมกนีเซียม และรูปร่างกราฟไฟต์ได้เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของน้ำเหล็ก

1.4.2 ฮาร์ดแวร์ ประกอบด้วย ถ้วยรองน้ำเหล็ก เทอร์โมคัปเปิล ฐานติดตั้ง ระบบเก็บ ข้อมูล ดิจิตอล และคอมพิวเตอร์

1.4.3 ซอฟต์แวร์ทำหน้าที่ เก็บข้อมูล ประมวลผล แสดงผล และเป็นส่วนติดต่อประสานงานกับผู้ใช้

1.4.4 ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ตรวจสอบคุณภาพน้ำเหล็กในการผลิตเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว

1.4.5 ควบคุมปริมาณแมงกานีส กำมะถันและฟอสฟอรัสให้อยู่ในเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการผลิตเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียวในภาคอุตสาหกรรมซึ่งได้แก่ 0.00 - 1.200%Mn 0.005 - 0.010%S และ 0.01 - 0.03%P ตามลำดับ

1.4.6 ตัวแปรที่สนใจได้แก่

ตารางที่ 1.1 ตัวแปรและช่วงการทดลอง

ตัวแปร	ช่วงการทดลอง
อุณหภูมิเท	1350-1500 °C
คาร์บอน	3.0-4.0%
ซิลิกอน	0.9-3.5%
แมกนีเซียม	0-0.06%

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับตรวจสอบคุณภาพน้ำเหล็กหล่อ

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เหล็กหล่อเป็นวัสดุที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายทั้งในทางวิชาการและภาคอุตสาหกรรม เหล็กหล้อมีปริมาณคาร์บอนมากกว่าเหล็กกล้าคือตั้งแต่ 2% ขึ้นไปจนถึง 6.67% และสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้ทางแผนภูมิสมดุลระหว่างเหล็กกับคาร์บอน เหล็กหล่อนั้นขาดความเหนียวเมื่อเทียบกับเหล็กกล้าทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปได้โดยใช้แรงทางกล แต่ทำการขึ้นรูปโดยการหลอมเหลวแล้วเทลงแบบหล่อที่ทำจากทรายหรือวัสดุทนความร้อน หลังจากการเทลงแบบหล่อแล้วจะได้ชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานจริงจึงจำเป็นต้องกลึงไสตัดเจาะเพื่อให้ได้รูปร่างชิ้นสุดท้ายตรงตามต้องการ ส่วนใหญ่แล้วเหล็กหล่อให้สมบัติด้านความแข็งแรงดึงสูงสุดต่ำ หล่อหลอมได้ง่ายกว่าเหล็กกล้าและยังสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยการเติมธาตุผสม การอบชุบทางความร้อน การจำแนกประเภทเหล็กหล่อนั้นสามารถจำแนกได้หลายลักษณะ เช่น จำแนกตามส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างพื้นฐาน รูปร่างของกราไฟต์ เป็นต้น แต่ที่จำแนกโดยทั่วไปจะจำแนกโดยอาศัยลักษณะรูปร่างของกราไฟต์หรือการรวมตัวของคาร์บอน เพราะฉะนั้นการแบ่งเหล็กหล่อตามลักษณะรูปร่างของกราไฟต์หรือการรวมตัวของคาร์บอน นั้นแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ คือ

1. เหล็กหล่อสีขาว (White cast iron)
2. เหล็กหล่อสีเทา (Gray cast iron)
3. เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน (Compacted graphite cast iron)
4. เหล็กหล่อเหนียว (Ductile cast iron)

อย่างไรก็ดีเหล็กหล่อที่ใช้กันอย่างแพร่หลายนั้นคือ เหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียวซึ่งเหล็กหลอสองชนิดนี้มีลักษณะรูปร่างของกราไฟต์ที่แตกต่างกันคือ เหล็กหล่อเทาจะมีลักษณะกราไฟต์เป็นแบบแผ่นและเหล็กหล่อเหนียวจะมีลักษณะกราไฟต์เป็นแบบทรงกลมซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.2 เหล็กหล่อเทา (Gray Iron)

เหล็กหล่อเทาหรือเหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กหล่อที่มีโครงสร้างประกอบด้วยกราไฟต์แบบแผ่นและมีโครงสร้างพื้นเป็นเฟอร์ไรท์หรือเฟอไรต์ ซึ่งใกล้เคียงกับเหล็กคิบที่ได้จากการถลุงด้วยเตาสูง Blast Furnace เหล็กหล่อเทานั้นสามารถผลิตได้จากเหล็กคิบโดยตรงได้โดยไม่ต้องปรับปรุง

ส่วนผสมทางเคมีสำหรับชิ้นงานที่ไม่ต้องการสมบัติทางกลสูง สำหรับงานที่ต้องการสมบัติทางกลสูงขึ้นทำได้โดยนำเหล็กดิบที่หลอมเหลวมาปรับปรุงส่วนผสมทางเคมีเพื่อให้มีคุณภาพดีขึ้น เหล็กหล่อเทานั้นมีสมบัติหลายประการ เช่น

1. มีความสามารถในการกลึงไสตัดเจาะสูง
2. มีความสามารถในการไหล
3. จุดหลอมตัวต่ำ
4. รับแรงสั่น ต้านแรงอัด ได้ดี
5. นำความร้อนดี
6. ปรับปรุงสมบัติทางกลได้โดยการปรับปรุงส่วนผสมทางเคมี

สาเหตุที่เรียกเหล็กหล่อเทานั้นเพราะเหล็กหล่อเทานั้นเมื่อนำมาทำให้หักและพิจารณาครุยแตกของเหล็กหล่อเทานั้นพบว่า มีสีเทา เหล็กหล่อเทาเป็นเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมหลักโดยทั่วไปจะมีคาร์บอนระหว่าง 2.5 – 4.0% ซึ่งคาร์บอนที่เกินความสามารถในการละลายในเนื้อเหล็กจะรวมตัวกันตกผลึกเป็นกราไฟต์แทรกอยู่ในเนื้อเหล็กขณะที่เหล็กเย็นตัวลงจากสภาพหลอมเหลว นอกจากคาร์บอนแล้วยังมีธาตุอื่นๆ เช่น ซิลิกอน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส และอื่น ซึ่งธาตุต่าง ๆ นี้มีบทบาทสำคัญเกี่ยวกับสมบัติเหล็กหล่อ ความแข็งแรงและความแข็งของเหล็กหล่อจะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญ 3 ประการคือ

1. ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อ
2. อัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อ
3. การฟอร์มรูปร่างของกราไฟต์

อิทธิพลของธาตุต่าง ๆ ในเหล็กหล่อเทานั้นทำให้จุดต่าง ๆ ของแผนภาพสมดุล (Equilibrium Diagram) ของเหล็กกับคาร์บอนเปลี่ยนแปลงไป เพราะฉะนั้นการพิจารณาจากคาร์บอนของแผนภูมิสมดุล อย่างเดียวไม่ได้ จะต้องผนวกกับอิทธิพลของธาตุผสมอื่นเข้าไปด้วย ซึ่งเรียกว่า คาร์บอนสมมูล (CE) ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$CE = \%C + 0.31(\%Si) + 0.27(\%P) + 0.078(1.85 - \%Mn) + 0.156(\%Al) + 0.125(\%Ti) + 0.109(\%Ni) + 0.0935(\%Cu) - 0.935(\%Mo) - 0.312(\%Cr) - 0.624(\%V) \quad (2.1)$$

ในทางปฏิบัติค่าคาร์บอนสมมูลของเหล็กหล่อจะคิดเพียงอิทธิพลของซิลิกอนกับฟอสฟอรัสเพราะอิทธิพลของธาตุอื่นนั้นมีผลน้อยเป็นไปสมการดังนี้

$$CE = \%C + 0.31(\%Si) + 0.27(\%P) \quad (2.2)$$

จากแผนภูมิสมมูลของเหล็กกับคาร์บอนสมมูลที่ CE เท่ากับ 4.3 ที่อุณหภูมิยูเทคติก เกิดปฏิกิริยาจากของเหลวเป็นออสเตนไนท์กับกราไฟต์ เพื่อให้อะตอมของคาร์บอนมีเวลาพอที่จะรวมกลุ่มกันเกิดเป็นกราไฟต์ที่มีการขยายตัวแบบอิสระปฏิกิริยาจะต้องใช้เวลานานมาก ฉะนั้นการเย็นตัวที่ทำให้เป็นไปตามเงื่อนไขได้นั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิของเหล็กหล่อตอนเทลงแบบหล่อ
2. ความร้อนแฝงของเหล็กหล่อ
3. การนำความร้อนหรือพาความร้อนของตัวแบบหล่อ
4. ขนาดหรือปริมาณของน้ำเหล็กหล่อที่จะเทลงแบบ

โดยที่ การนำความร้อนหรือพาความร้อนของตัวแบบหล่อและขนาดหรือปริมาณของน้ำเหล็กหล่อที่จะเทลงแบบเป็นตัวแปรที่กว้างมาก

จากตัวแปรส่วนผสมทางเคมีและอัตราการเย็นตัวของเหล็กหล่อ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ทำให้เหล็กหล้อมีสมบัติแตกต่างกันแล้วยังมีตัวแปรอีกอย่างหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติของเหล็กหล่อคือ การฟอร์มรูปร่างของกราไฟต์ ได้ทำการทดลองใน โดยนำเหล็กหล่อสองเบ้าที่มีส่วนผสมเดียวกันมาเทลงแบบหล่อแบบเดียวกัน โดยที่เบ้าแรกทำการเทโดยไม่ผ่านวิธีการใด ๆ ส่วนเบ้าที่สองทำการโปรยผงเฟอร์โรซิลิกอนลงในน้ำเหล็กจนละลายหมดแล้วทำการเทลงแบบผลปรากฏว่าเบ้าที่สองมีสมบัติเชิงกลดีกว่าเบ้าแรกเนื่องจากการใส่เฟอร์โรซิลิกอนลงไป ในน้ำเหล็กนั้นทำให้เกิดซิลิกอนไดออกไซด์เป็นผงเล็กๆ ซึ่งซิลิกอนไดออกไซด์นั้นมีจุดหลอมตัวสูงลอยอยู่ในน้ำเหล็กเสมือนเป็นนิวเคลียส ทำให้เกิดการตกผลึกและการรวมตัวของคาร์บอนการที่มีนิวเคลียสนั้นก็อาจทำให้เกิดการตกผลึกของออสเตนไนท์จำนวนมากได้เมื่อเกิดออสเตนไนท์จำนวนมากการขยายตัวของกราไฟต์ก็มีข้อจำกัดส่งผลให้กราไฟต์นั้นมีความละเอียดมากขึ้นและการใช้ผงเฟอร์โรซิลิกอนโปรยลงในเหล็กหล่อหลอมเหล็กก่อนเทลงแบบหล่อ เรียกว่าการทำอินออกคูเลชัน (Inoculation) นอกจากการผสมเฟอร์โรซิลิกอนแล้วก็ยังมีการใช้โลหะผสมอื่นๆ อีก เช่น แคลเซียมซิลิไซด์ ซิลิโกแมงกานีส ซิลิโกเซอร์โคเนียม เป็นต้น

2.3 เหล็กหล่อเหนียว (Ductile Iron)

เหล็กหล่อเหนียวหรือเหล็กหล่อกราไฟต์กลมมีโครงสร้างประกอบไปด้วยกราไฟต์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมและมีโครงสร้างพื้นเป็นเฟอร์ไรท์อยู่รอบกราไฟต์กับเฟอไรต์ซึ่งกระจายอยู่ทั่วไปซึ่งแตกต่างจากเหล็กหล่อเทาด้วยลักษณะของกราไฟต์ที่เป็นทรงกลมทำให้เหล็กหล่อเหนียวนี้มีสมบัติรับแรงกระแทกได้ดีเหล็กหล่อเหนียวเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมและนิยมใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ เช่น เพลาข้อเหวี่ยง เครื่องมือการเกษตร ชิ้นส่วนเรือเดินทะเล

โครงสร้างเครื่องจักรขนาดใหญ่ ท่อส่งน้ำ ท่อส่งแก๊ส เป็นต้น เนื่องจากเหล็กหล่อเหนียวมีสมบัติดังต่อไปนี้

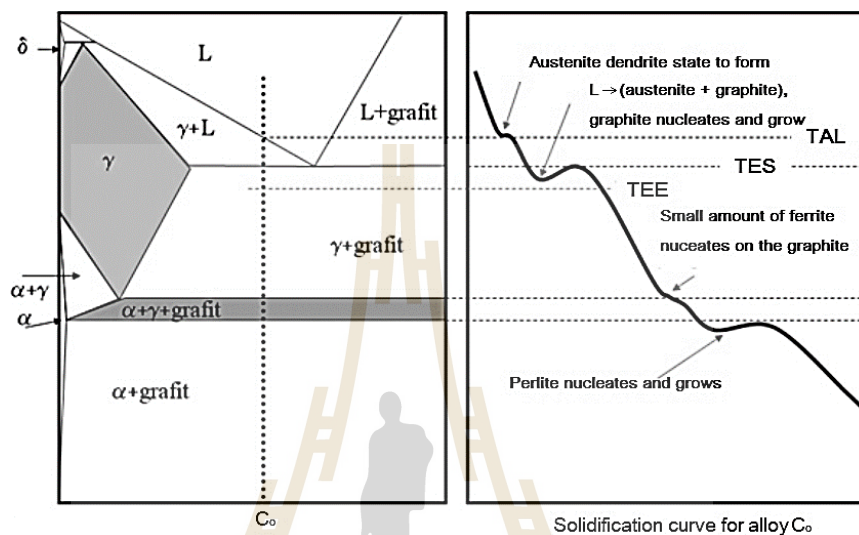
1. ทนแรงดึงได้สูง
2. มีอัตราการยืดตัวประมาณ 1 – 5 %
3. ทนความร้อนได้ดี
4. สามารถนำไปตีขึ้นรูปได้
5. สามารถรับแรงกระแทกได้ดี
6. ทนต่อการสึกหรอได้ดี
7. ความแข็งและความต้านทานแรงกระแทกต่ำ
8. สามารถนำไปชุบแข็ง คลายความเค้นหรือชุบผิวแข็งได้

สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเหนียวที่ได้กล่าวมานั้น โดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญสองประการคือ โครงสร้างพื้น และ ลักษณะของกราฟไฟต์รวมถึงการกระจายการทำให้กราฟไฟต์มีรูปร่างทรงกลมนั้นสามารถทำได้โดยการผสมโลหะแมกนีเซียม (Magnesium Treatment) การเติมแมกนีเซียมโดยตรงนั้นมีความอันตรายจากการระเบิดของแมกนีเซียมได้เนื่องจากแมกนีเซียมมีจุดเดือดที่ 1100°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเหล็กหล่อหลอมเหลวจึงไม่นิยมเติมในรูปแบบบริสุทธิ์แต่จะเติมในรูปแบบโลหะผสม ซึ่งมีหลายชนิด การเติมโลหะผสมแมกนีเซียมลงในเหล็กหล่อนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ แบบที่ 1 Open-Ladle แบบที่ 2 Plunging และแบบที่ 3 Converter แต่ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่คือแบบ Open-Ladle เป็นแบบวิธีที่ง่ายที่สุดโดยการเอาเฟอร์โรซิลิกอนแมกนีเซียมไว้ที่ก้น Ladle แล้วใช้เศษเหล็กทับไว้อีกทีเนื่องจากแมกนีเซียมเป็นโลหะที่เบา กว่าเหล็กแล้วทำการเทน้ำเหล็กที่ได้ลง Ladle

2.4 การวิเคราะห์ทางความร้อน

การวิเคราะห์ทางความร้อนเป็นเทคนิคที่ช่วยในการประเมินคุณภาพของงานหล่อ โดยจะอาศัยหลักการการแข็งตัวของเหล็กหล่อเพราะ เหล็กหล่อแต่ละชนิดที่ลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันก็จะให้กราฟการเย็นตัว (Cooling Curve) ที่แตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิเท ส่วนผสมทางเคมี การทำอินทรีย์ออกซิเดชัน เป็นต้น การวิเคราะห์ทางความร้อนในงานหล่อโลหะอาศัยหลักการทางความร้อน ในขณะที่โลหะแข็งตัว ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราการเย็นตัว ทำให้กราฟการเย็นตัวเปลี่ยนแปลงไป รูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิสมดุลของระบบเหล็กกับกราฟไฟต์ (Fe-C) กับการเพิ่ม Si และกราฟการแข็งตัวของโลหะผสม C_0 ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการเย็นตัวนั้นมีมากมาย

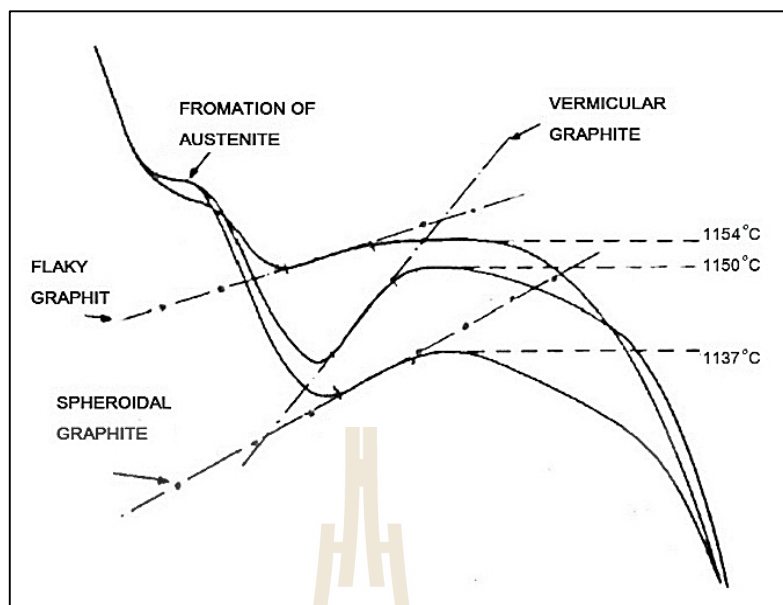
หลายส่วน เช่น อัตราการเย็นตัว (dT/dt) อุณหภูมิวิกฤต (T_L) อุณหภูมิยูเทคติก (T_E) อันเดอร์คูลิ่งสูงสุด (ΔT_{max}) อันเดอร์คูลิ่งต่ำสุด (ΔT_{min}) รีแคลเลเซนส์ (ΔT) เวลาในการแข็งตัว และ เวลาในการแข็งตัวรวม



รูปที่ 2.1 สมดุลของระบบ Fe-C กับการเพิ่ม Si และกราฟการแข็งตัวของโลหะผสม C_0 [2]

ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันและขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี อัตราการเย็นตัว อุณหภูมิเท ขนาดของงานหล่อ ระดับการอินอกคูเลชั่น เป็นต้น จึงสามารถใช้กราฟการเย็นตัวในการควบคุมคุณภาพของน้ำโลหะให้อยู่ในหน้าต่างของในกระบวนการผลิต (Process Window) ได้

ตัวอย่างของแนวความคิดนี้ อาจอธิบายได้ผ่านการเปรียบเทียบกราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบกราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียว [3]

จะเห็นได้ว่า กราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อแต่ละชนิดมีข้อแตกต่างกันหลายประการ เช่น เหล็กหล่อเทามีอินเตอร์คูลลิ่งต่ำ เนื่องจากการเกิดและการโตของกราไฟต์ของเหล็กหล่อเทาต้องการแรงขับ (Driving Force) น้อย ในขณะที่เหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนต้องการแรงขับสำหรับการเกิดและการโตของกราไฟต์มากกว่าสำหรับกรณีเหล็กหล่อเหนียวถึงแม้จะต้องการแรงขับมาก เช่นเดียวกับเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนแต่ช่วงการแข็งตัวของเหล็กหล่อเหนียวจะมีจำนวนของนิวเคลียสและยูเทคติกเซลล์มากกว่า จึงทำให้ปรากฏอินเตอร์คูลลิ่งสูงกว่าเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน

2.5 การทำนายส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเทา

การประยุกต์ใช้งานวิเคราะห์ทางความร้อนของเหล็กหล่อนั้นใช้หลักการคำนวณพื้นฐานโดยใช้ค่า CE ซึ่งค่า CE นั้นขึ้นอยู่กับคาร์บอนและธาตุที่สำคัญอื่นๆ เช่น ซิลิกอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ เป็นต้น กราฟการเย็นตัวสามารถที่จะคำนวณได้จากสมดุลอุณหพลศาสตร์ แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนของกราฟการเย็นตัวระหว่างตามทฤษฎีกับที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้ยังมีค่า คาร์บอนสมมูลลิควิดัส (CEL) ซึ่งแตกต่างจาก ค่าคาร์บอนสมมูล โดยค่าคาร์บอนสมมูลนั้นจะหาได้จาก

$$CE = \%C + 0.31(\%Si) + 0.33(\%P) - 0.027(\%S) \quad (2.3)$$

ส่วน CEL ได้จากการทดลองจำนวนมากจนสร้างความสัมพันธ์ [8] ได้คือ

$$T_{LA} = 1669 - 124(CEL) \quad (2.4)$$

$$CEL = \%C + 0.25(\%Si) + 0.5(\%P) \quad (2.5)$$

ต่อมา Heine [9][10] ได้แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างส่วนผสมกับอุณหภูมิวิกฤตสำหรับเหล็กหล่อเทาไฮโปยูเทคติก คือ

$$T_{LA} = 1569 - 97.3(\%C + 0.25Si) \quad (2.6)$$

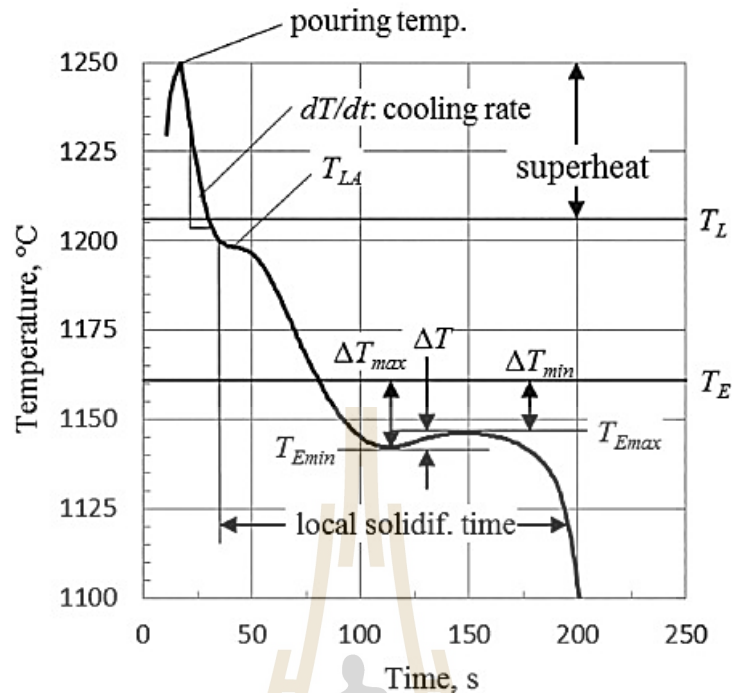
จากการทดลองซึ่งใช้สองถ้วยคือ ถ้วยมาตรฐานและถ้วยที่เติม เทลลูเรียม (Te) เข้าไป เพื่อความสามารถในการคำนวณทั้งคาร์บอนและซิลิกอน จากการวิเคราะห์กราฟการเย็นตัวนอกจากนี้แล้ว CEL คาร์บอนและซิลิกอนยังหาได้จากสมการ

$$CEL = 14.45 + 0.0089(TL) \quad (2.7)$$

$$\%C = -6.65 - 0.0084(TL) + 0.0178(TE_{while}) \quad (2.8)$$

$$\%Si = 78.411 - 4.28087(Si_{adj}) - 0.06831(TE_{while}) \quad (2.9)$$

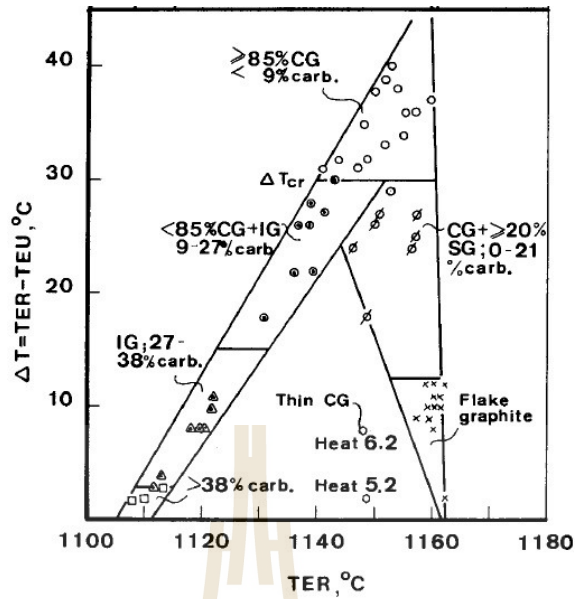
ซึ่งสมการดังกล่าวถูกเสนอโดย Heraeus Electronite [1] เป็นสมการที่ใช้คำนวณผลการทดลองที่ได้จากถ้วยที่เติม เทลลูเรียม (Te) รูปที่ 2.3 รูปแบบคำศัพท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับเหล็กหล่อ



รูปที่ 2.3 คำนิยามที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับเหล็กหล่อ [6]

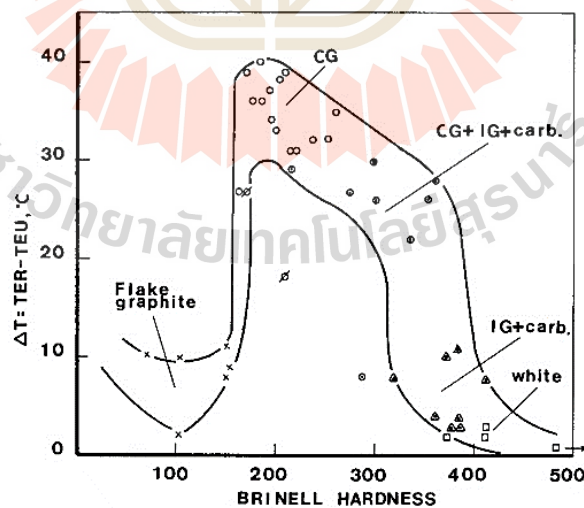
2.6 การทำนายส่วนผสมทางเคมีและรูปร่างกราฟไฟต์

จากลักษณะของกราฟการเย็นตัวที่แตกต่างกันของเหล็กหล่อแต่ละชนิดนี้ จึงสามารถนำไปใช้ทำนายรูปร่างของกราฟไฟต์ที่เกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามลักษณะกราฟการเย็นตัวยังขึ้นอยู่กับอีกหลายปัจจัย จึงจำเป็นต้องสร้างฐานข้อมูลกราฟการเย็นตัวเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ต่อลักษณะของกราฟการเย็นตัว ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการทำนาย Stefanescu และคณะ [4] ได้แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ทางความร้อนใช้ทำนายรูปร่างของกราฟไฟต์ในเหล็กหล่อเหนียวและเหล็กหล่อ กราไฟต์ตัวหนอนได้ ดังรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าที่ TER สูงเหล็กหล่อกราฟไฟต์ตัวหนอนมีอินเตอร์คูลลิ่ง (ΔT) สูงกว่าเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว



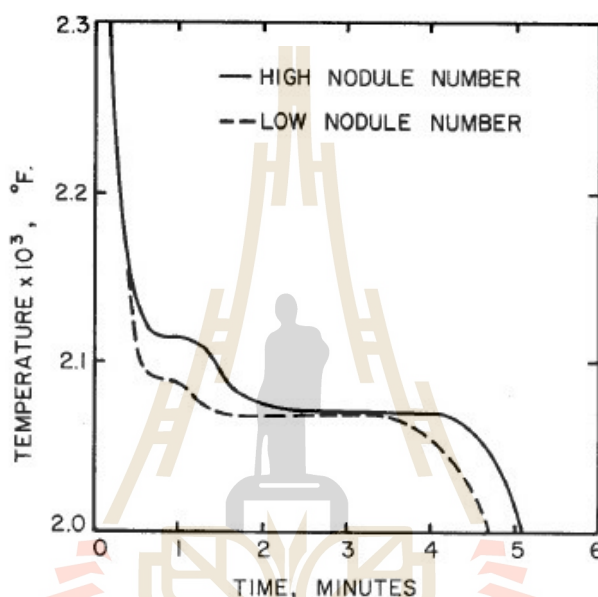
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง TER และ ΔT [4]

นอกจากนี้แล้วยังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกราฟการเย็นตัวกับสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่ออีกด้วยเนื่องจากรูปร่างของกราฟไฟต์ที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าที่ความแข็งสูงเหล็กหล่อขาวมีอันเดอร์คูลลิ่ง (ΔT) ต่ำกว่าเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อเหนียวและเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอน



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแบบบริเนลและ ΔT [4]

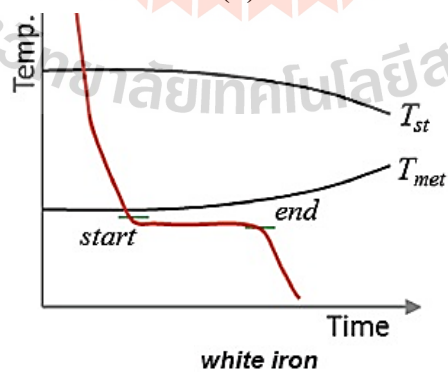
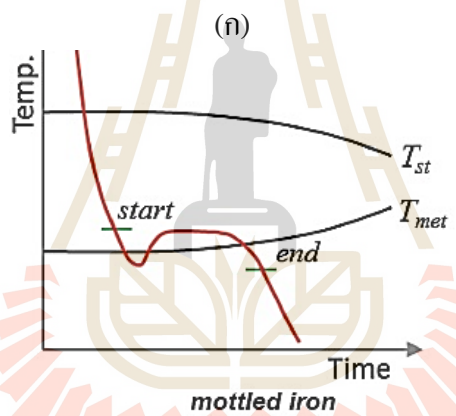
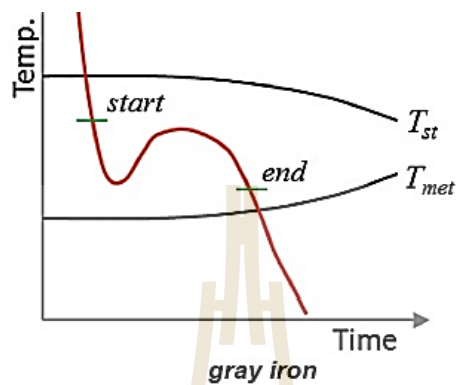
C. R. Loper และคณะ [5] ได้ชี้ให้เห็นว่ากราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อขึ้นอยู่กับปริมาณกราฟไฟต์ต่อหน่วยพื้นที่กล่าวคือ การที่เหล็กหล่อมี Nodule Number ที่ไม่เท่ากันย่อมมีอัตราการเย็นตัวที่ไม่เหมือนกัน เนื่องจากเหล็กหล่อที่มี Nodule Number มากจะมีอัตราการคายความร้อนมากกว่าเหล็กหล่อที่มี Nodule Number น้อย ดังรูปที่ 2.6 ที่การเปรียบเทียบกราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเหนียวที่มีจำนวน Nodule สูง และจำนวน Nodule ต่ำ



รูปที่ 2.6 กราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเหนียวที่มี Nodule Number ต่างกัน [5]

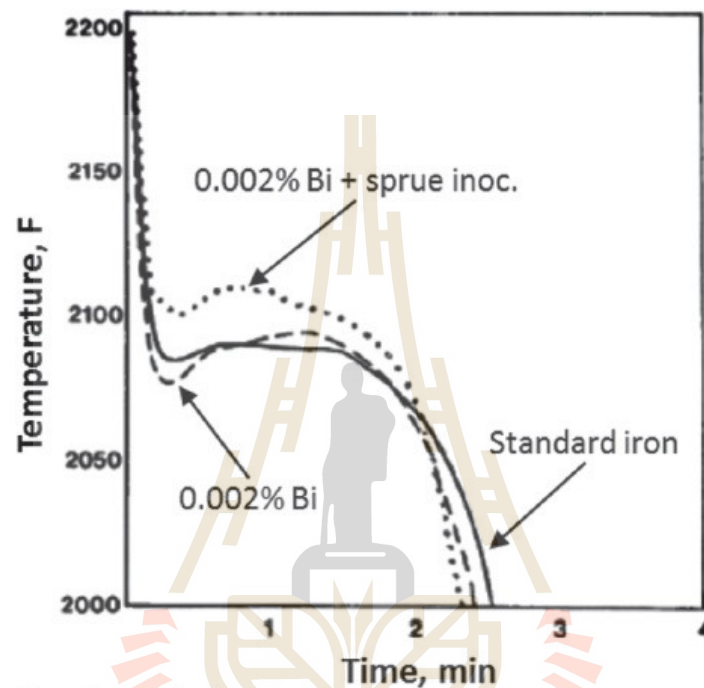
ต่อมามีการพัฒนาเทคนิควิเคราะห์ทางความร้อนอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องมาจากพัฒนาการของคอมพิวเตอร์และระบบเก็บข้อมูลดิจิทัล โดย Stefanescu [6] แสดงให้เห็นว่า กราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อสามารถที่จะใช้ทำนายรูปแบบของยูเทคติก และระดับของอินนอคูลุเลชั่นในเหล็กหล่อ โดยทั่วไปการทำนายโครงสร้างยูเทคติกจะพิจารณาจากการเริ่มและการสิ้นสุดของการแข็งตัวที่ยูเทคติกคือการเริ่มและสิ้นสุดการแข็งตัวอยู่เหนือเส้นกึ่งสมดุล (Metastable) จะเป็นแบบสมดุล (Stable) ซึ่งจะได้เหล็กหล่อเทาภายหลังการเย็นตัวปราศจากคาร์ไบด์ ดังรูปที่ 2.7 (ก) ถ้าการเริ่มการแข็งตัวอยู่เหนือเส้นกึ่งสมดุล (Metastable) แต่ที่สิ้นสุดการแข็งตัวอยู่ต่ำกว่าเส้นกึ่งสมดุล (Metastable) จะได้โครงสร้างเหล็กหล่อเทาผสมกับเหล็กหล่อขาวหรือที่เรียกกันว่า Mottled ดังรูปที่ 2.7 (ข) และถ้าการแข็งตัวเริ่มต้นและสิ้นสุดการแข็งตัวอยู่ต่ำกว่าเส้นกึ่งสมดุล (Metastable) จะได้โครงสร้างเหล็กหล่อขาวภายหลังการเย็นตัว ดังรูปที่ 2.7 (ค) ซึ่งเส้นสมดุล (Stable) และกึ่งสมดุล

(Metastable) ไม่ใช่เส้นตรงเพราะขึ้นอยู่กับธาตุผสมที่ส่งเสริมการเกิดคาร์ไบด์ในเหล็กหล่อต่างๆ ทำให้ Graphitization Potential ลดลงในทางตรงกันข้ามถ้ามีธาตุผสมที่ส่งเสริมการเกิดกราฟไฟต์อยู่ในเหล็กหล่อต่างๆ จะช่วยทำให้ Graphitization Potential เพิ่มขึ้น



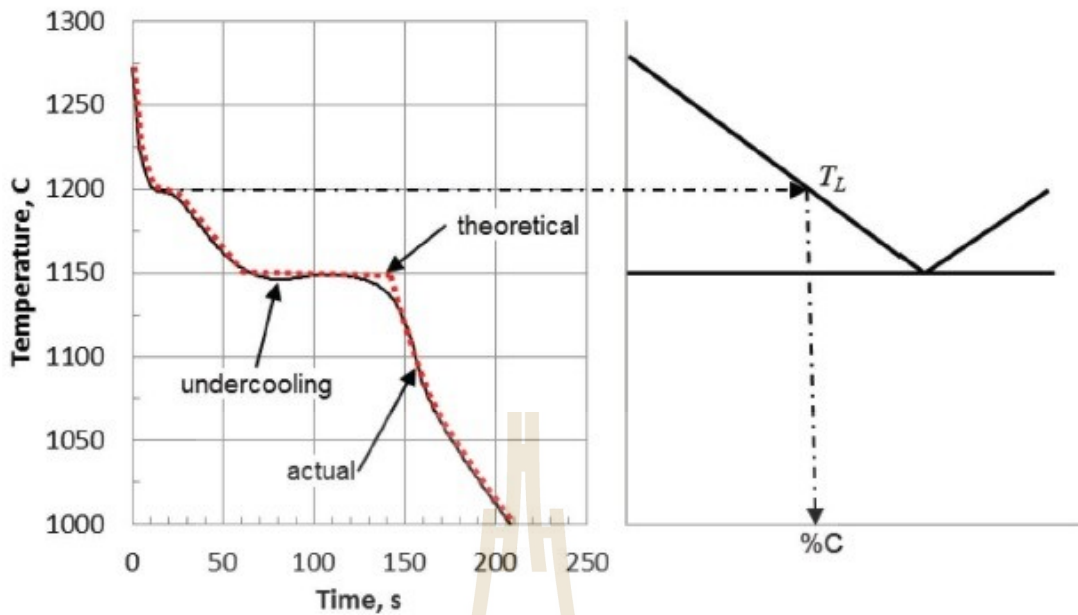
รูปที่ 2.7 กราฟการเย็นตัวสำหรับการทำนายการแข็งตัวในเหล็กหล่อที่สมดุลหรือกึ่งสมดุล [6]

นอกจากนี้แล้วสารอินทรีย์คูลเลอร์ทั้งหลายที่เติมเข้าไปในเหล็กหล่อยังส่งผลต่ออันเดอร์คูลิ่ง และอุณหภูมิเทคติกด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 2.8 ที่แสดงถึงอันเดอร์คูลิ่งและอุณหภูมิเทคติกที่เท่ากันของเหล็กหล่อมาตรฐาน เหล็กหล่อ ผสม Bi 0.002% ที่ผ่านและไม่ผ่านทำการอินทรีย์คูลเลอร์



รูปที่ 2.8 ผลกระทบของ Bi อินทรีย์คูลเลอร์ในเหล็กหล่อ SG [12]

การวิเคราะห์ทางความร้อน ยังสามารถช่วยประเมินส่วนผสมทางเคมีได้อีกด้วยโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและส่วนผสม โดยอาศัยพื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลิกวิคัส (T_L) และส่วนผสม (%C) แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยที่เส้นประคือกราฟการเย็นตัวตามทฤษฎีซึ่งใช้การคำนวณโดย เทอร์โมไดนามิกส์ และเส้นทึบคือกราฟการเย็นตัวที่ได้จากการทดลอง เมื่อพิจารณากราฟการเย็นตัวจะเห็นได้ว่ากราฟการเย็นตัวตามทฤษฎีมีความแตกต่างจากกราฟการเย็นตัวที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.9 กราฟการเย็นตัวสำหรับโลหะผสมตามทฤษฎีและการทดลอง [7]

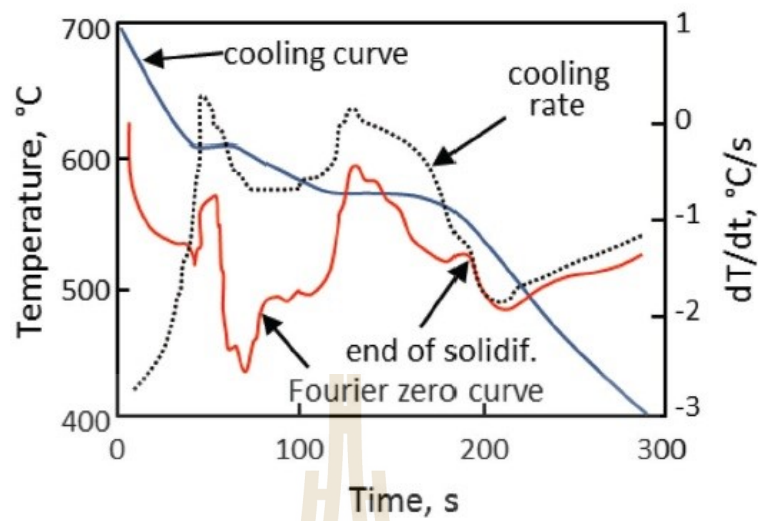
การวิเคราะห์เป็นเรื่องที่สำคัญอย่างการวิเคราะห์ของฟูเรียร์ ซึ่งการวิเคราะห์ของฟูเรียร์นั้นได้ตั้งสมมติฐานให้การถ่ายเทความร้อนมีเพียงการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว สมการฟูเรียร์กับเทอมของแหล่งความร้อน คือ

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{\partial Q_f}{C_p \partial t} \quad \text{หรือ} \quad \frac{\partial Q_f}{\partial t} = C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} - Z_F \right) \quad (3.0)$$

ที่ Zero curve จะให้ $Z_F = \alpha \nabla^2 T$ สำหรับ โมดแบบทรงกระบอก สามารถที่จะคำนวณได้โดย

$$\nabla^2 T = \frac{4(T_2 - T_1)}{(r_2^2 - r_1^2)} \quad (3.1)$$

เมื่อ T_2 คืออุณหภูมิที่ r_2 และ T_1 คืออุณหภูมิที่ r_1 รูปแบบผลที่ได้จากการวิเคราะห์สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 2.10 ที่แสดงกราฟการเย็นตัว และ Fourier Zero Curve



รูปที่ 2.10 กราฟการเย็นตัวกราฟอัตราการเย็นตัวและ Fourier Zero Curve สำหรับโลหะผสม อะลูมิเนียม [13]

จากข้อมูลทางวิชาการที่มีเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการสร้างชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนที่สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติและรายงานผลทันทีที่การแข็งตัวสิ้นสุด การใช้ด้วยรองรับน้ำเหล็กสองถ้วยเพื่อทำนายแนวโน้มการเกิดคาร์ไบด์เป็นแนวความคิดใหม่ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในเหล็กหล่อกราไฟต์ตัวหนอนและเหล็กหล่อเหนียวจะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการอย่างมาก

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

การศึกษานี้หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวตัวกับคาร์บอน ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวตัวกับคาร์บอนผสมและความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวตัวกับซิลิกอนสำหรับการทดลองโดยใช้เหล็กหล่อเทา ส่วนการทดลองโดยใช้เหล็กหล่อเหนียวนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่เกิดขึ้นจากบริเวณที่เกิดอัตราการเย็นตัวสูงสุดของกราฟอัตราการเย็นตัวเรียกว่า θ กับแมกนีเซียมและความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวสูงสุดกับแมกนีเซียมมีลำดับ โดยดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1 และการทดลองจะใช้น้ำโลหะที่มีขอบเขตส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลำดับการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ช่วงของส่วนผสมทางเคมีที่ใช้ในการศึกษา

Element	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mg	CE
Range	3.0-3.8	0.9 -3.5	0.02- 0.03	0.02-0.03	0.01- 0.02	0-0.06	3.9-4.3

3.2 ออกแบบชุดอุปกรณ์และสร้างอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน

3.2.1 หลักการออกแบบ

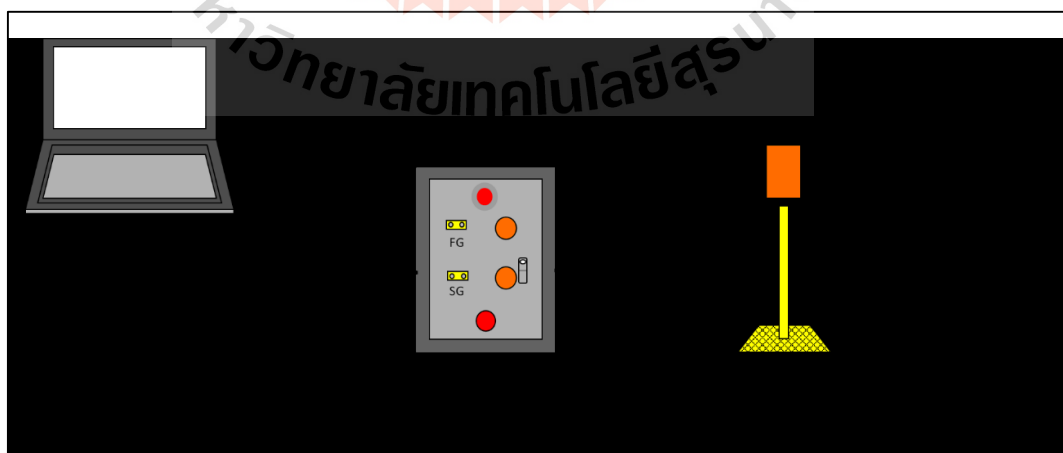
ทำการออกแบบฮาร์ดแวร์ประกอบด้วย ถ้วยร่อนน้ำเหล็ก ฐานติดตั้ง ระบบเก็บข้อมูลดิจิทัล คอมพิวเตอร์ และซอฟต์แวร์ดังรูปที่ 3.2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ถ้วยร่อนรับน้ำโลหะ เป็นถ้วยทรายผสมเรซิน มีขนาดและรายละเอียดดังรูปที่ 3.3 โดยถ้วยร่อนรับน้ำโลหะที่เติมเทลลูเรียม (*Te*) จะใช้ในการวิเคราะห์เหล็กหล่อเทาและถ้วยร่อนรับน้ำโลหะที่ไม่เติมเทลลูเรียมจะใช้ในการวิเคราะห์เหล็กหล่อเหนียว

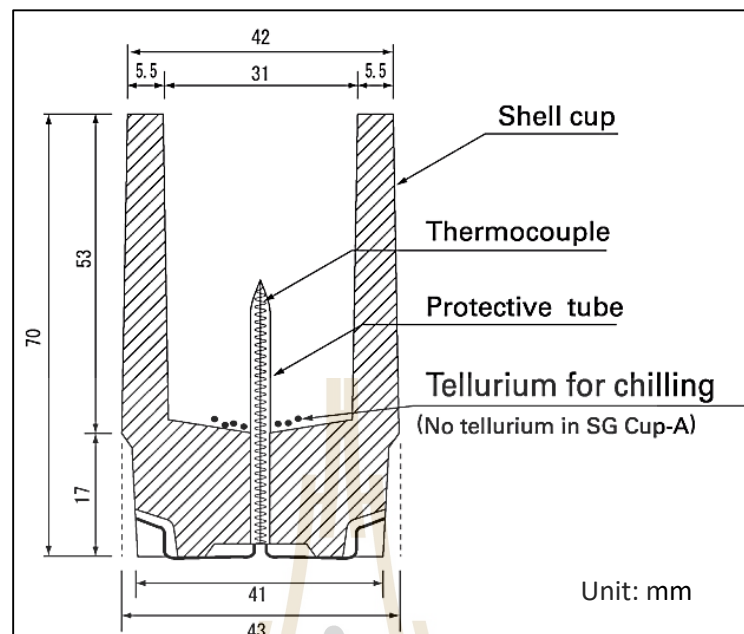
2) ฐานติดตั้งเป็นวัสดุทำจากเหล็กกล้าทนความร้อนสูงและป้องกันการกระเด็นจากน้ำเหล็ก

3) ระบบเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล เป็นระบบเก็บข้อมูลที่สามารถรับค่าและอ่านค่าของข้อมูลแบบต่อเนื่องเป็นเวลานานได้ สามารถทำงานงานร่วมกับซอฟต์แวร์ LabVIEW ได้

4) คอมพิวเตอร์มีข้อมูลจำเพาะคือ ระบบประมวลผล Intel(R) Core(TM) i7-7500 CPU@2.7GHz 2.90 GHz หน่วยความจำหลัก 1TB หน่วยความจำสำรอง 8.00 GB ระบบปฏิบัติการ Windows 10 (64 bit Operating System)



รูปที่ 3.2 รูปแบบชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน



รูปที่ 3.3 ถ้วยรองรับน้ำโลหะ[12]

3.2.2 ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน

ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับการวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับการวิเคราะห์น้ำเหล็กหล่อหลอมเหลวภายหลังจากการออกแบบในส่วน of อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ ประกอบไปด้วย คอมพิวเตอร์ระบบประมวลผล Intel(R) Core(TM) i7-7500 CPU@2.7GHz 2.90 GHz หน่วยความจำหลัก 1 TB หน่วยความจำสำรอง 8.00 GB ระบบปฏิบัติการ Windows 10 (64 bit Operating System) ระบบเก็บข้อมูลดิจิทัล มีอินพุตแบบอนาล็อก 8 ช่อง อินพุตแบบดิจิทัล 4 ช่อง เอาท์พุตแบบดิจิทัล 4 ช่อง ซอฟต์แวร์ที่สนับสนุน LabVIEW เทอร์โมคัพเปิดรูปแบบ K การบันทึกข้อมูล 1 วินาที - 18 ชั่วโมง ปลั๊กเทอร์โมคัพเปิด รูปแบบ K ใช้ในช่วงอุณหภูมิ -40 °C ถึง 1200 °C สายเทอร์โมคัพเปิดประเภท K วัดอุณหภูมิ -40 °C ถึง 1200 °C ฐานติดตั้งถ้วยรองรับน้ำเหล็กทนความร้อนได้สูงถึง 1500 °C ถ้วยรองรับน้ำโลหะมีอยู่สองแบบคือ ถ้วย SG-C และถ้วย SG-A โดย SG-A เป็นถ้วยทรายผสมเรซินภายในถ้วยเติม Te ใช้สำหรับการวิเคราะห์เหล็กหล่อเทาและ SG เป็นถ้วยทรายผสมเรซินภายในถ้วยไม่เติม Te ใช้สำหรับการวิเคราะห์เหล็กหล่อเหนียวเป็นไปดังตาราง 3.2 และการคำนวณวิเคราะห์ผ่านซอฟต์แวร์ LabVIEW ในการประมวลผลและติดต่อกับผู้ใช้งาน

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน

รายการ	ข้อมูลจำเพาะ
คอมพิวเตอร์	ระบบประมวลผล Intel(R) Core(TM) i7-7500 CPU@2.7GHz 2.90 GHz หน่วยความจำหลัก 1 TB หน่วยความจำสำรอง 8.00 GB ระบบปฏิบัติการ Windows 10 (64 bit Operating System)
ระบบเก็บข้อมูลดิจิทัล	มีอินพุตแบบอนาล็อก 8 ช่อง อินพุตแบบดิจิทัล 4 ช่อง เอาท์พุตแบบดิจิทัล 4 ช่อง ซอฟต์แวร์ที่สนับสนุน LabVIEW เทอร์โมคัพเบิลรูปแบบ K การบันทึกข้อมูล 1 วินาที - 18 ชั่วโมง
ปลั๊ก เทอร์โมคัพเบิล	ประเภท K ใช้ในช่วงอุณหภูมิ -40 °C ถึง 1200 °C
สายเทอร์โมคัพเบิล	รูปแบบ K วัดอุณหภูมิ -40 °C ถึง 1200 °C
ฐานติดตั้ง	ทนความร้อนได้สูงถึง 1500 °C
ถ้วยรองรับน้ำโลหะ	เป็นถ้วยทรายผสมเรซินภายในถ้วยเดิม <i>Te</i> ใช้สำหรับการวิเคราะห์เหล็กหล่อเทาและถ้วยทรายผสมเรซินภายในถ้วยไม้เดิม <i>Te</i> ใช้สำหรับการวิเคราะห์สำหรับเหล็กหล่อเหนียว



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน

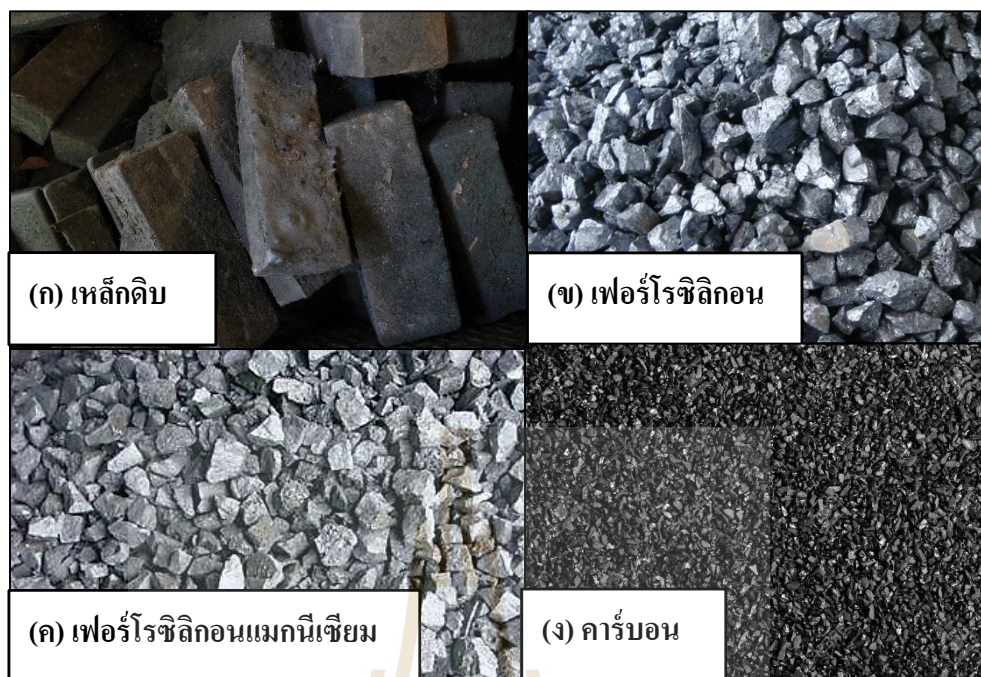
3.3 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ

3.3.1 การผลิตเหล็กหล่อ

การผลิตเหล็กหล่อเป็นขั้นตอนการทำงานตัวอย่างเพื่อเก็บข้อมูลกราฟการเย็นตัว จากข้อมูลที่ได้จะใช้สำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปรสำคัญคือ อุณหภูมิลิควิดัส (T_{LA}) อุณหภูมิยูเทคติก (T_E) ปริมาณคาร์บอน (%C) ปริมาณซิลิกอน (%Si) สำหรับใช้วิเคราะห์เหล็กหล่อเทาและการเก็บข้อมูลอัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) ค่าที่ต่ำ (θ) ปริมาณแมกนีเซียม (%Mg) สำหรับใช้วิเคราะห์เหล็กหล่อเหนียวเพื่อนำไปสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีนัยสำคัญกัน โดยมีวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

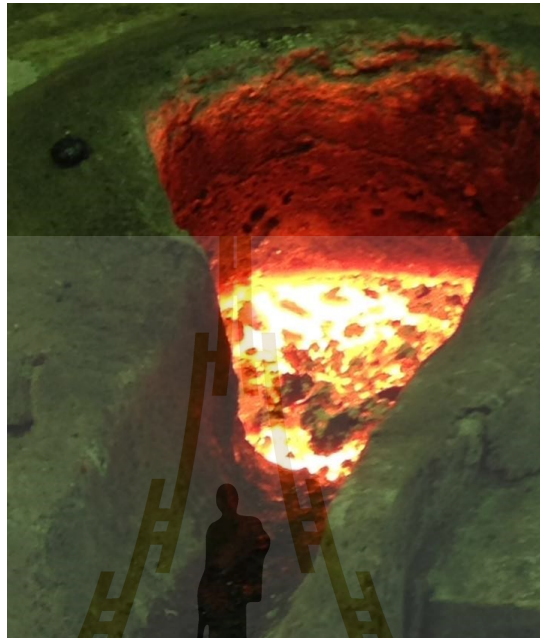


รูปที่ 3.6 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ในขั้นตอนการผลิตเหล็กหล่อนั้นเริ่มจากการผลิตเหล็กหล่อเทา เริ่มจากการนำเหล็กดิบใส่เตาอินดักชันปริมาณ 30 กิโลกรัม จากนั้นทำการเร่งกำลังไฟฟ้าของเตาอินดักชันด้วยอัตราเพิ่มขึ้น 0.5 กิโลวัตต์ต่อนาทีจนกระทั่งไปถึงที่ 25 กิโลวัตต์ ร่อนเหล็กหล่อหลอมเหลว ดังรูปที่ 3.7 ทั้งหมดแล้วทำความสะอาดน้ำเหล็กหลอมเหลวโดยใช้ฟลักซ์ทำความสะอาด 2 ครั้งดังรูปที่ 3.8

ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเริ่มต้นโดยการเทน้ำเหล็กใส่โมลของชิ้นงานตัวอย่างดังรูปที่ 3.9 สำหรับการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเมื่อได้ชิ้นงานตัวอย่างแล้วนำไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องอิมิตชันสเปกโตรมิเตอร์ดังรูปที่ 3.10 เพื่อพิจารณาว่าตรงตามขอบเขตที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้ายังไม่ตรงตามขอบเขตที่กำหนดไว้ทำการปรุงน้ำโลหะโดยการเติมเฟอร์โรซิลิกอนในกรณีที่กำลังซิลิกอนยังต่ำกว่าที่ขอบเขตกำหนดและทำการเติมคาร์บอนในกรณีที่คาร์บอนต่ำกว่าขอบเขตที่กำหนด เมื่อได้ส่วนผสมทางเคมีเป็นไปตามขอบเขตที่กำหนดแล้วทำการเก็บข้อมูลโดยการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาเพื่อตรวจสอบว่าอยู่ในช่วง 1450 – 1500 °C หรือไม่ ถ้ายังไม่อยู่ในช่วงที่กำหนดทำการเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเตาอินดักชันเพื่อให้อุณหภูมิอยู่ในช่วงดังกล่าวเมื่อได้ตรงตามที่กำหนดแล้วทำการกำจัดสแลกอีกครั้งแล้วเทน้ำเหล็กใส่แบบหล่อสำหรับตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและด้วยรองรับ

เหล็กที่มีเทลลูเรียมที่เชื่อมต่อกับระบบเก็บข้อมูลดิจิทัลและส่งไปยังคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.7 เหล็กหล่อหลอมเหลว



รูปที่ 3.8 การกำจัดสแลกบนผิวหน้าเหล็ก



รูปที่ 3.9 ชิ้นงานสำหรับตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี



รูปที่ 3.10 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี



รูปที่ 3.11 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

ข้อมูลที่ได้นั้นเป็นข้อมูลกราฟการเย็นตัวแบบกึ่งสมมูลในระหว่างการเก็บตัวอย่าง ข้อมูลนั้นคาร์บอนก็จะค่อยๆ สูญเสียไป การเก็บข้อมูลส่วนนี้จะใช้สำหรับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนซึ่งได้จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีจากชิ้นงานตัวอย่าง กับอุณหภูมิวิกฤตตัวแปรที่ได้จากกราฟการเย็นตัวและความสัมพันธ์คาร์บอนสมมูลกับอุณหภูมิวิกฤตเช่นเดียวกัน สำหรับการเก็บข้อมูลที่ใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างซิลิกอนกับอุณหภูมิยูเทคติกก่อนเทใส่ด้วยรองรับเหล็กที่มีเทลลูเรียมนั้น จะทำการเติมเฟอร์ซิลิกอนเพื่อให้ค่าซิลิกอนมีการเปลี่ยนแปลงและทำทุกครั้งก่อนเทเก็บตัวอย่างชิ้นงาน

ขั้นตอนการผลิตเหล็กหล่อเหนียวนั้นเริ่มจากการใส่วัตถุดิบและทำการหลอม เช่นเดียวกับการผลิตเหล็กหล่อเทาแต่แตกต่างกันตรงที่ขั้นตอนก่อนเก็บตัวอย่างข้อมูลในการผลิตเหล็กหล่อเหนียวนั้น จะทำการเติมแมกนีเซียมก่อน โดยการวางเฟอร์โรซิลิกอนแมกนีเซียมไว้ก้นเบ้ารองรับน้ำเหล็กแล้ว เทน้ำเหล็กลงเบ้ารองรับน้ำเหล็กโรจนเฟอร์โรซิลิกอนแมกนีเซียมทำปฏิกิริยาจนเสร็จสิ้นดังรูปที่ 3.12 แล้วเทกลับลงเตาในขั้นตอนนี้อุณหภูมิน้ำเหล็กจะลดลงต้องทำการปรับกำลังไฟของเตาอินดักชันเพิ่มขึ้นเพื่อให้อุณหภูมิน้ำเหล็กอยู่ในช่วง 1450 – 1500 °C ตรวจสอบได้โดยเทอร์โมคัปเปิล จากนั้นเทน้ำเหล็กใส่โมลสำหรับตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและด้วยรองรับน้ำเหล็กที่ไม่มีเทลลูเรียมเชื่อมต่อกับระบบเก็บข้อมูลดิจิทัลและส่งไปยังคอมพิวเตอร์ข้อมูลที่ได้นั้นเป็น

ข้อมูลกราฟการเย็นแบบสมมูลระหว่างการเก็บตัวอย่างข้อมูลนั้นแมกนีเซียมก็จะค่อย ๆ สูญเสียไป การเก็บข้อมูลส่วนนี้จะใช้สำหรับการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแมกนีเซียมซึ่งได้จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีจากชิ้นงานตัวอย่างกับอัตราการเย็นตัวสูงสุดตัวแปรที่ได้จากกราฟการเย็นตัวและความสัมพันธ์แมกนีเซียมกับมุมที่จุดสิ้นสุดการแข็งตัวเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.12 การทำ Magnesium treatment ในการผลิตเหล็กหล่อเหนียว

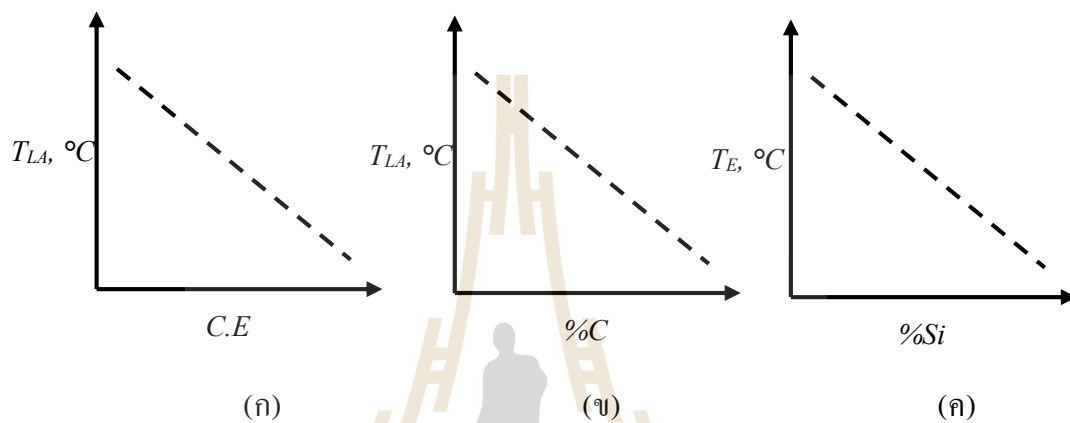
3.3.2 การสร้างความสัมพันธ์

จากการทดลองในส่วนของการผลิตเหล็กหล่อเทาได้ข้อมูลตัวแปรที่สำคัญคือ คาร์บอนซิลิกอน อลูมิเนียมลิทิวต์ อลูมิเนียมเทคติกและข้อมูลตัวแปรที่สำคัญ ในส่วนของการผลิตเหล็กหล่อเหนียวคือ แมกนีเซียม อัตราการเย็นตัวสูงสุด มุม จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาหาระดับความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.1

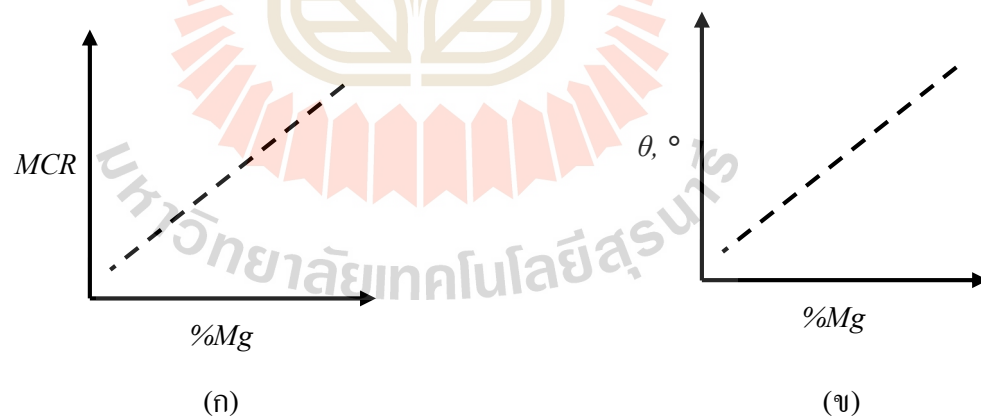
$$r = \frac{N\Sigma XY - (\Sigma X)(\Sigma Y)}{\sqrt{[N\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2][N\Sigma Y^2 - (\Sigma Y)^2]}} \quad (3.1)$$

โดยที่ r คือ สหสัมพันธ์ X คือ ข้อมูลชุดที่หนึ่ง Y คือ ข้อมูลชุดที่สองแล้วพิจารณาถึงความสัมพันธ์โดย ถ้าค่า r อยู่ในช่วง 0.7-1.0 แสดงว่าข้อมูลนั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ การเลือกชุดข้อมูลมาทำการเปรียบเทียบกันนั้นได้อาศัยเหตุและผลไปตามทฤษฎีของทางสถิติอย่างเช่น

การเลือกข้อมูลอุณหภูมิวิกฤตเปรียบเทียบกับคาร์บอน โดยอาศัยแนวโน้มจากแผนภาพกิ่งสมดุล คือเมื่อคาร์บอนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิวิกฤตจะลดลงรวมไปถึงคาร์บอนสมดุลด้วยเช่นกันแนวคิดในการสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างนำไปสู่การสร้างสมการเพื่อใช้ในการทำนาย คาร์บอนสมดุล คาร์บอน ซิลิกอน และแมกนีเซียม เป็นไปดังรูปที่ 3.13 และ 3.14



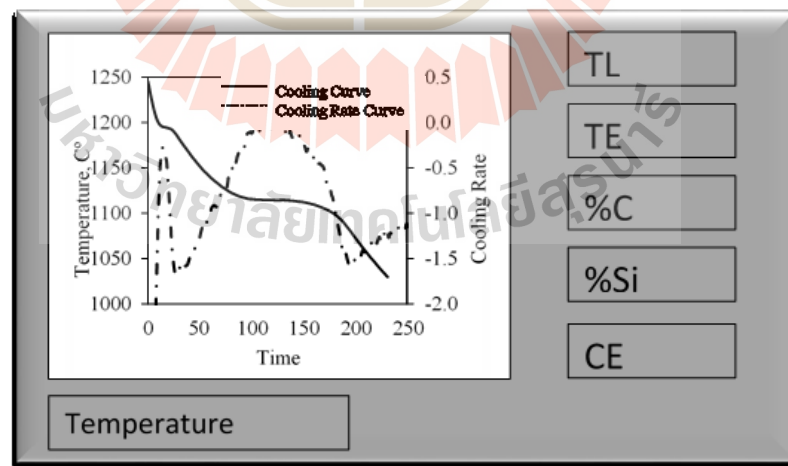
รูปที่ 3.13 แนวคิดกราฟความสัมพันธ์สำหรับเหล็กหล่อเทา



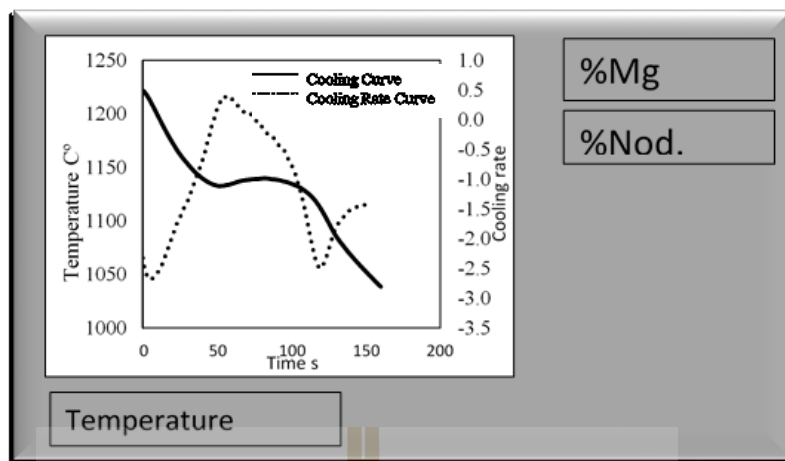
รูปที่ 3.14 แนวคิดกราฟความสัมพันธ์สำหรับเหล็กหล่อเหนียว

3.4 การสร้างโปรแกรมสำหรับการทำนาย %C %Si CE %Mg และ %Nodularity

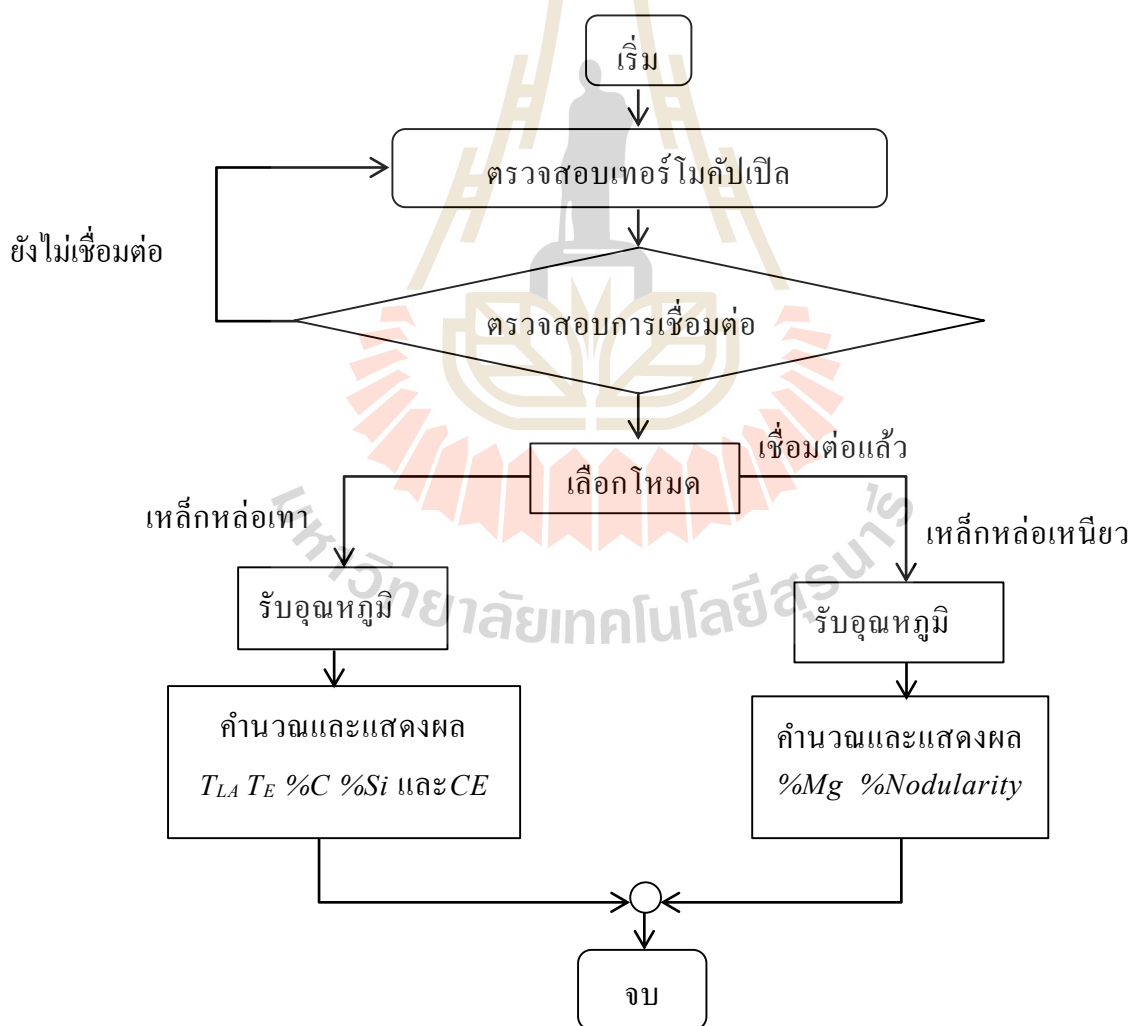
การสร้างโปรแกรมในการทำนาย %C %Si %Mg เริ่มจากการรับข้อมูลเข้าซึ่งเป็นค่าของอุณหภูมิ ผ่านมาซึ่งการกรอกรข้อมูลเพื่อทำการปรับกราฟการเย็นตัวให้มีความราบเรียบ เนื่องจากข้อมูลมีสัญญาณรบกวน ผ่านเข้าไปในส่วนการคำนวณเพื่อการตรวจจับหาค่าตัวแปร T_{LA} ทำโดยหาจากจุดเปลี่ยนเครื่องหมายจากกราฟ d^2T/dt^2 และ T_E หาจากจุดที่มีความชันเท่ากับศูนย์โดยใช้ dT/dt จากกราฟการเย็นตัวแบบกึ่งสมดุลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ถ้วยที่มีเทลลูเรียมและได้ MCR θ จากกราฟ dT/dt ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ถ้วยที่ไม่มีเทลลูเรียมเมื่อได้ตัวแปรที่ต้องการก็จะส่งไปยังในส่วนของสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อทำนาย %C หาจากการใช้ ตัวแปร T_{LA} มาคำนวณ %Si หาจากการใช้ ตัวแปร T_E มาคำนวณ CE หาจากการใช้ ตัวแปร T_{LA} มาคำนวณ %Mg หาจากการใช้ตัวแปร MCR หรือ θ %Nodularity หาจากการใช้ตัวแปร %Mg มาคำนวณแล้วสุดท้ายส่งไปยังส่วนของการแสดงผลซึ่งแบ่งเป็นสองโหมดสำหรับการทำงาน โดยโหมดการใช้งานสำหรับวิเคราะห์เหล็กหล่อเทาจะประกอบไปด้วย ส่วนที่แสดงกราฟการเย็นตัว ค่าตัวแปร T_{LA} T_E %C %Si และ CE ดังรูปที่ 3.15 โหมดการใช้งานสำหรับวิเคราะห์เหล็กหล่อเหนียวจะประกอบไปด้วย ส่วนที่แสดงกราฟการเย็นตัว ค่าตัวแปร %Mg และ %Nodularity ดังรูปที่ 3.16 โดยลำดับการทำงานทั้งหมดเป็นไปตามแผนผังดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.15 หน้าจอแสดงผลสำหรับโหมดการทำงานของเหล็กหล่อเทา



รูปที่ 3.16 หน้าจอแสดงผลสำหรับโหมดการทำงานของเหล็กหล่อเหนียว



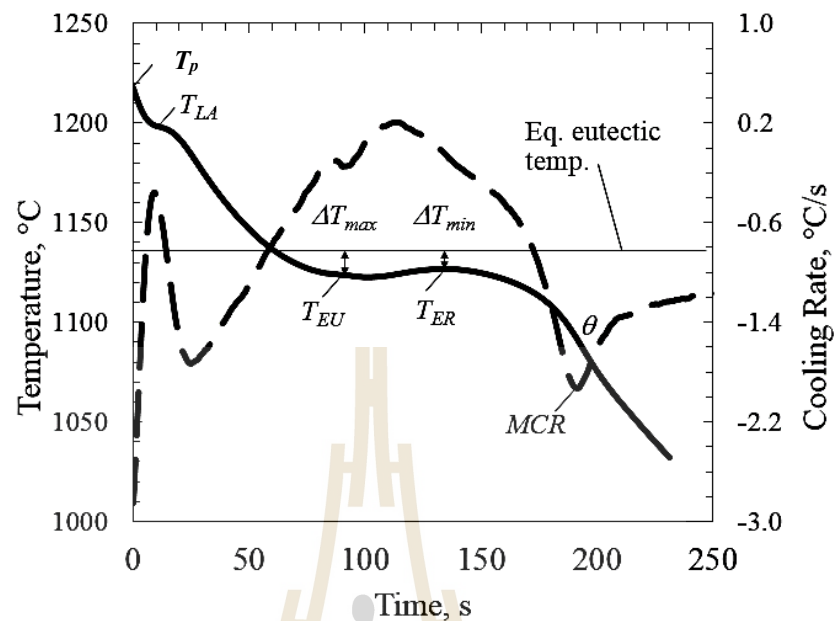
รูปที่ 3.17 แนวคิดลำดับการทำงานของซอฟต์แวร์

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

4.1 บทนำ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่ากราฟการเย็นตัวมีลักษณะแตกต่างกัน กราฟการเย็นตัวสำหรับเหล็กหล่อคือเส้นทึบ กราฟอัตราการเย็นตัวสำหรับเหล็กหล่อคือเส้นประ พิจารณากราฟการเย็นตัว โดยเริ่มจาก อุณหภูมิสูงสุดของกราฟการเย็นตัวคือ อุณหภูมิเท (T_P) ซึ่งอุณหภูมิจะต่ำกว่า อุณหภูมิในเตาเนื่องจากสูญเสียความร้อนในระหว่างการเทลงเบ้ารองรับน้ำโลหะ อุณหภูมิของเหล็กหล่อหลอมเหลวลดลงจนถึงการแข็งตัวเริ่มขึ้นที่อุณหภูมิวิกฤต (T_{LA}) สามารถสังเกตเห็น เนื่องจากการคายความร้อน อุณหภูมิของเหล็กหล่อลดลงจากก่อนหน้ามาจนถึงจุดเริ่มต้นของ ปฏิริยายุทธคติเรียกอุณหภูมินี้ว่าอุณหภูมิยุทธคติอันเดอร์คูลิ่ง (T_{EU}) ความแตกต่างระหว่าง T_{EU} กับอุณหภูมิยุทธคติที่สมดุล (T_E) คืออันเดอร์คูลิ่งสูงสุด (ΔT_{max}) ในระหว่างปฏิริยายุทธคติ อุณหภูมิจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเกิดจากการคายความร้อนของการเกิดกราฟไฟต์ ถึงอุณหภูมิสูงสุดของปฏิริยายุทธคติ ถูกกำหนดให้เป็นอุณหภูมิยุทธคติกรีแคลเซชัน (T_{ER}) ความแตกต่างระหว่าง (T_{ER}) และ อุณหภูมิยุทธคติที่สมดุลคืออันเดอร์คูลิ่งต่ำสุด (ΔT_{min}) เมื่อใช้ถ้วยที่มีเทลูเรียม T_{EU} และ T_{ER} จะมีอุณหภูมิเท่ากันเพราะเทลูเรียมทำให้การเย็นตัวของเหล็กหล่อเป็นแบบกึ่งสมดุลส่งผลให้เกิด โครงสร้างคาร์ไบด์ซึ่งไม่มีการคายความร้อนที่ปฏิริยายุทธคติอุณหภูมิยุทธคติจึงมีความสม่ำเสมอ ทำให้ง่ายต่อการเลือกอุณหภูมิไปใช้วิเคราะห์เนื่องจากมีอุณหภูมิยุทธคติเพียงอุณหภูมิเดียว จากนั้นอุณหภูมิของกราฟการเย็นตัวก็จะลดลงจนถึงสิ้นสุดการแข็งตัว ส่วนกราฟแสดงอัตราการเย็นตัวสังเกตเวลา ณ 200 วินาทีได้แสดงอัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) เป็นผลมาจากการคายความร้อน ในตอนท้ายของการแข็งตัว อัตราการเย็นตัวสูงสุดจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปร่างของ กราไฟต์ กราไฟต์แบบแผ่นมีอัตราการเย็นตัวสูงกว่ากราฟไฟต์แบบทรงกลม ณ จุด อัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) เมื่อถอยไปที่ 185 วินาที และไปข้างหน้าที 215 วินาที ของกราฟอัตราการเย็นตัว พบว่า บริเวณดังกล่าวมีลักษณะเป็นมุมเรียกว่า ทีต้า (θ) โดย θ จะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับรูปร่างของกราฟไฟต์เช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการเย็นตัวและนิยามค่าศัพท์

4.2 การทำนายส่วนผสมทางเคมี

การทำนายส่วนผสมทางเคมีเริ่มจากการหาสหสัมพันธ์ (Correlation) ซึ่ง สหสัมพันธ์ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปหรือข้อมูล 2 ชุดขึ้นไป ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่า มีมากน้อยเพียงใดนั้นจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เป็นค่าวัดความสัมพันธ์ โดยจะใช้สัญลักษณ์ r แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ใช้วัด ขนาดของความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปร มี ลักษณะ คือ $-1 \leq r \leq 1$ (Hinkle D. E. 1998, p.118) [16]

การบอกระดับหรือขนาดของความสัมพันธ์ จะใช้ตัวเลขของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ -1 หรือ 1 แสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับสูง แต่หากมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับน้อย หรือไม่มีเลย สำหรับการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยทั่วไปอาจใช้เกณฑ์ดังนี้

ค่า r	ระดับของความสัมพันธ์
0.90 - 1.00	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
0.70 - 0.90	มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง
0.50 - 0.70	มีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลาง
0.30 - 0.50	มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ
0.00 - 0.30	มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมาก

เครื่องหมาย + และ - หน้าตัวเลขสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บอถึงทิศทางของความสัมพันธ์ โดยที่หาก

r มีเครื่องหมาย + หมายถึง การมีความสัมพันธ์กันแบบแปรตรง

r มีเครื่องหมาย - หมายถึง การมีความสัมพันธ์กันแบบแปรผกผัน

ตารางที่ 4.1 ได้แสดงผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของ %C %Si CE T_{LA} และ T_E จากผลการทดลองสำหรับเหล็กหล่อเตาดังข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ 1 2 และ 3 พบว่าสหสัมพันธ์ระหว่าง %C และ T_{LA} มีค่าเท่ากับ -0.97 สหสัมพันธ์ระหว่าง CE และ T_{LA} มีค่าเท่ากับ -0.95 และสหสัมพันธ์ระหว่าง %Si และ T_E มีค่าเท่ากับ -0.99 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญของ %C T_{LA} CE T_{LA} และ %Si T_E แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง %C และ T_{LA} แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง CE และ T_{LA} และแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง %Si และ T_E ทั้งหมดมีความสัมพันธ์เป็นแบบแปรผกผันกัน

ตารางที่ 4.1 วิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆในเหล็กหล่อเตา

	%C	%Si	CE	T_{LA}	T_E
%C	1.00				
%Si	-0.48	1.00			
CE	-0.95	0.09	1.00		
T_{LA}	-0.97	0.64	-0.95	1.00	
T_E	-0.57	-0.99	-0.85	0.52	1.00

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปร %Mg MCR และ θ จากผลการทดลองสำหรับเหล็กหล่อเหนียวดังข้อมูลในภาคผนวก ก ตารางที่ 4 และ 5 พบว่าสหสัมพันธ์ระหว่าง %Mg และ MCR มีค่าเท่ากับ 0.84 สหสัมพันธ์ระหว่าง %Mg และ θ มีค่าเท่ากับ 0.96

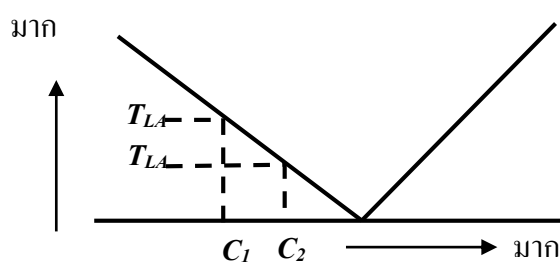
แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญของ %Mg MCR และ %Mg θ แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง %Mg และ MCR และแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง %Mg และ θ ทั้งสองคู่ความสัมพันธ์เป็นแบบแปรตรง

ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆในเหล็กหล่อเหนียว

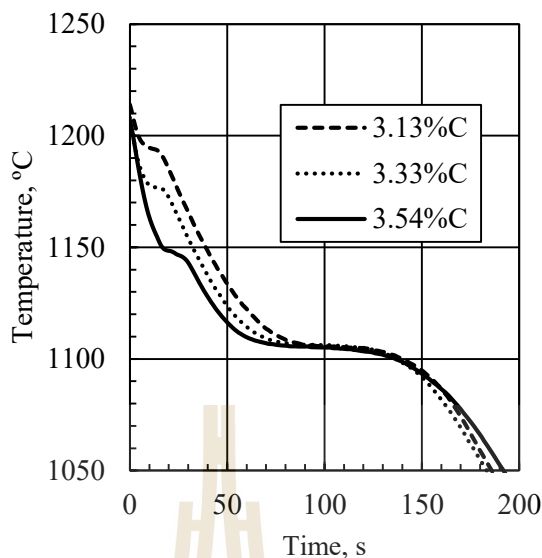
	%C	%Si	%Mg	CE	ΔT_{max}	ΔT_{min}	ΔT	MCR	θ
%C	1.00								
%Si	-0.79	1.00							
%Mg	0.04	0.29	1.00						
CE	0.63	-0.02	0.42	1.00					
ΔT_{max}	0.12	0.20	0.34	0.46	1.00				
ΔT_{min}	0.24	0.14	0.43	0.57	0.99	1.00			
ΔT	-0.55	0.08	-0.62	-0.79	-0.77	-0.87	1.00		
MCR	0.34	0.09	0.84	0.66	0.70	0.80	-0.94	1.00	
θ	0.06	0.26	0.96	0.42	0.45	0.53	-0.70	0.89	1.00

4.2.1 การทำนายปริมาณคาร์บอน

คาร์บอนในเหล็กหลอมเหลวมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิหลอม (T_{LA}) สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.2 คือ อุณหภูมิหลอมในแผนภูมิสมมูลของเหล็กกับกราฟไฟต์ลดลงจาก T_{LA1} ไปยัง T_{LA2} เมื่อคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก C₁ ไปยัง C₂ โดย T_{LA1} มากกว่า T_{LA2} และ C₂ มากกว่า C₁ รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างกราฟการเย็นตัวของเหล็กหล่อเทาที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนต่างกัน โดยที่แกนตั้งคืออุณหภูมิ แกนนอนคือเวลา ดังเห็นได้ว่าที่ 3.13%C มีอุณหภูมิหลอม (T_{LA}) สูงกว่า 3.33%C และ 3.54%C ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 อุณหภูมิหลอมเทียบกับคาร์บอน



รูปที่ 4.3 การเย็นตัวที่มีคาร์บอนต่างกัน

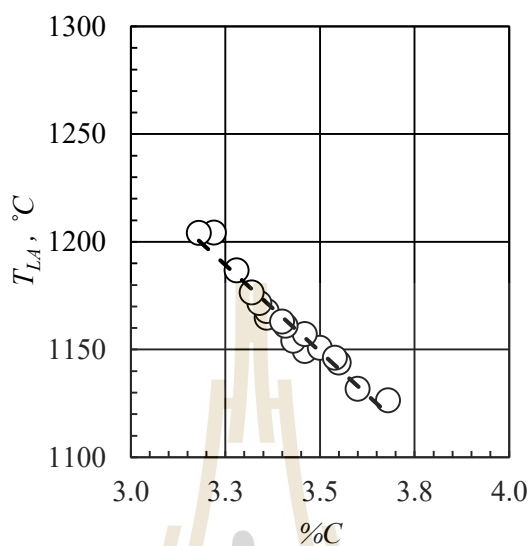
จากผลการทดลองของเหล็กหล่อเทาได้นำค่าตัวแปร อุณหภูมิลิควิดัส (T_{LA}) และคาร์บอน มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิลิควิดัส (T_{LA}) เทียบกับคาร์บอน โดยที่ แกนตั้งเป็น อุณหภูมิลิควิดัส (T_{LA}) แกนนอนเป็นคาร์บอน ดังรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อคาร์บอนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิ ลิควิดัส (T_{LA}) จะลดลงเป็นไปตามแผนภูมิสมดุลของเหล็กกับกราไฟต์ดังที่ได้กล่าวมา ข้อมูลสองชุด นี้มีค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์เท่ากับ -0.97 แนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลสองชุดนี้เป็นแบบผกผัน จากข้อมูลที่ได้นำเสนอไปดังกล่าวสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$T_{LA} = -160.82(\%C) + 1711.9 \quad (4.1)$$

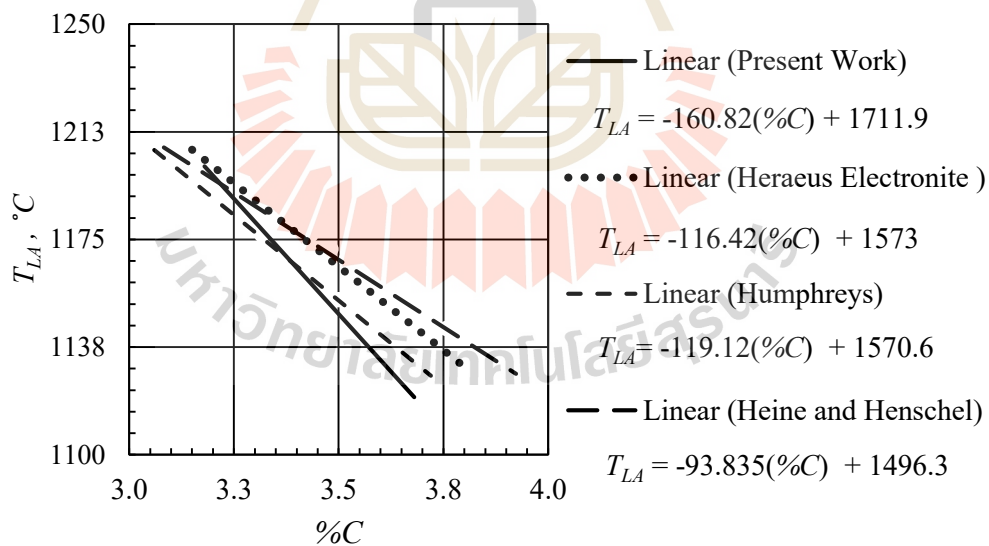
หรือ

$$\%C = -0.006218(T_{LA}) + 10.64 \quad (4.2)$$

นอกจากสมการที่ได้นำเสนอแล้วสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลิควิดัส (T_{LA}) และคาร์บอน ยังมีสมการอื่นจากผลงานของ Heraeus Electronite [1] Humphreys [7] และ Heine and Henschel [14] ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลิควิดัส (T_{LA}) และคาร์บอนเช่นเดียวกัน ซึ่งมี แนวโน้มความสัมพันธ์เป็นแบบแปรผกผันโดยที่อุณหภูมิลิควิดัส (T_{LA}) ลดลงเมื่อคาร์บอนเพิ่มขึ้น ตามแผนภาพสมดุลของเหล็กกับกราไฟต์ ได้แสดงการเปรียบเทียบไว้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตต์และคาร์บอน



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตต์และคาร์บอน

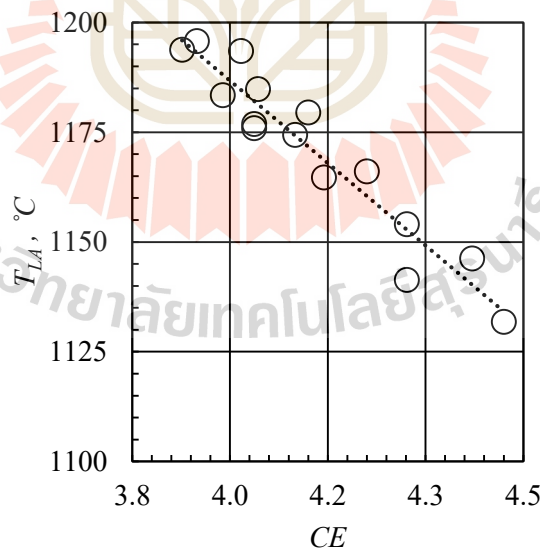
4.2.2 การทำนายคาร์บอนสมมูล

เป็นที่ทราบกันว่าการพิจารณาอุณหภูมิควิตซ์นั้นยังใช้คาร์บอนสมมูลได้ด้วยเช่นกันเนื่องจากคาร์บอนสมมูลนั้นได้รวมอิทธิพลของซิลิกอนที่มีผลต่ออุณหภูมิควิตซ์คือเลื่อนอุณหภูมิควิตซ์ไปทางขวา จากผลการทดลองของเหล็กหล่อเทาได้นำอุณหภูมิควิตซ์ (T_{LA}) และคาร์บอนสมมูลมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิควิตซ์ (T_{LA}) เทียบกับคาร์บอนสมมูล โดยที่ แกนตั้งเป็นอุณหภูมิควิตซ์ (T_{LA}) แกนนอนเป็นคาร์บอนสมมูล ดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อคาร์บอนสมมูลเพิ่มขึ้นอุณหภูมิควิตซ์จะลดลงเป็นไปตามแผนภูมิสมมูลเหล็กกับกราไฟต์ดังที่ได้กล่าวมา ข้อมูลสองชุดนี้มีสหพันธ์เท่ากับ -0.95 แนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลสองชุดนี้เป็นแบบผกผันกันจากข้อมูลที่ได้นำเสนอไปดังกล่าวสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4

$$T_{LA} = -107.29 (CE) + 1613.2 \quad (4.3)$$

หรือ

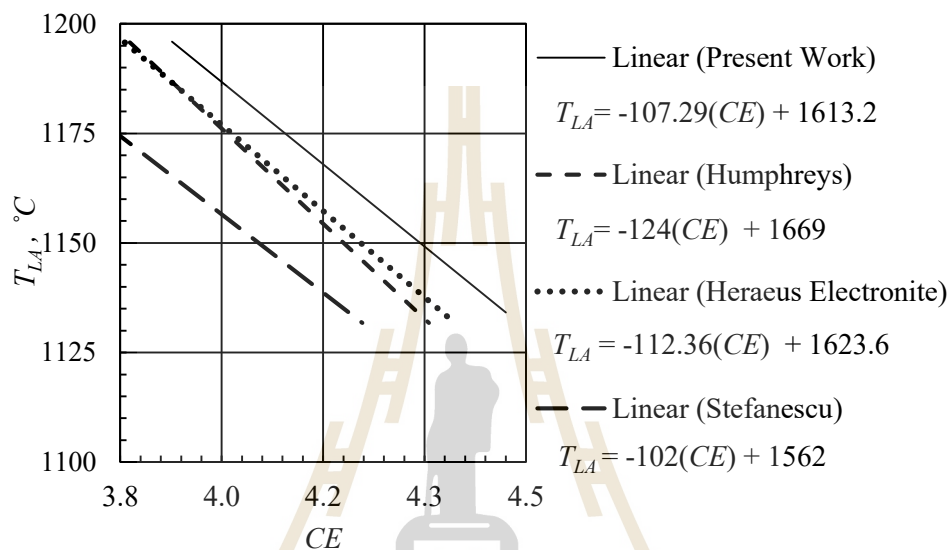
$$CE = -0.00932(T_{LA}) + 15.035 \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตซ์และคาร์บอนสมมูล

นอกจากสมการที่ได้นำเสนอแล้วสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตซ์กับคาร์บอนสมมูลยังมีสมการอื่นจากผลงานของ Heraeus Electronite [1] Stefanescu [6] และ

Humphreys [7] ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตซ์ (T_{LA}) และคาร์บอนสมมูล เช่นเดียวกัน ซึ่งมีแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นแบบแปรผกผัน โดยที่อุณหภูมิควิตซ์ (T_{LA}) ลดลงตามคาร์บอนสมมูลที่เพิ่มขึ้นไปทิศทางเดียวกันตามแผนภูมิสมมูลของเหล็กกับกราไฟต์ ได้แสดงการเปรียบเทียบไว้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิควิตซ์และคาร์บอนสมมูล

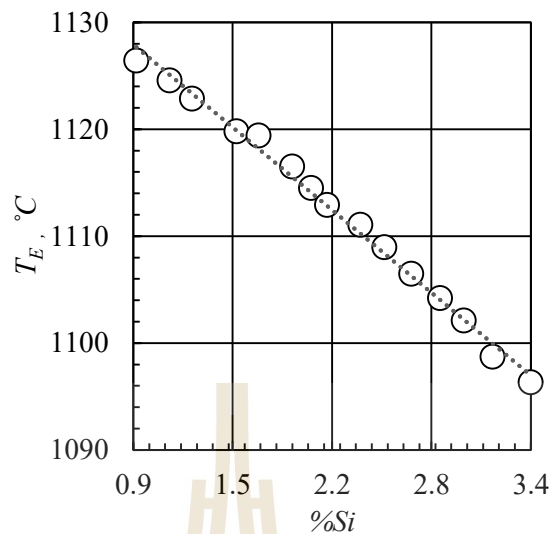
4.2.3 การทำนายปริมาณซิลิกอน

จากผลการทดลองการเก็บตัวอย่างเหล็กหล่อเทาได้นำค่าตัวแปร อุณหภูมิยูเทคติก และซิลิกอนซึ่งมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงมากเท่ากับ -0.99 มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิยูเทคติกและซิลิกอน โดยที่ แกนตั้งเป็นอุณหภูมิยูเทคติกแกนนอนเป็นซิลิกอนดังรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อซิลิกอนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิยูเทคติกจะลดลง แนวโน้มความสัมพันธ์ของข้อมูลสองชุดนี้เป็นแบบผกผันกันจากข้อมูลที่ได้นำเสนอไปดังกล่าวสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 4.5 และ 4.6

$$T_E = -12.367(\% Si) + 1139 \quad (4.5)$$

หรือ

$$\% Si = -0.080(T_E) + 92.09 \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเตาดัดและซิลิกอน

4.2.4 การทำนายปริมาณแมกนีเซียม

จากผลการทดลองการเก็บตัวอย่างเหล็กหล่อเหนียวได้ วิเคราะห์ตัวแปร อัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) และที่ต่ำ (θ) เทียบกับแมกนีเซียม จากการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ พบว่าแมกนีเซียมกับค่า อัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) และ ที่ต่ำ (θ) มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ สูงมาก โดยมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ คือ 0.84 และ 0.96 ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ดังนี้ การนำความร้อนของเหล็กหล่อมีปัจจัยสำคัญอยู่ที่รูปร่างกราฟไฟต์ซึ่งเหล็กหล่อเทามีความสามารถในการนำความร้อนสูงกว่าเหล็กหล่อเหนียวเนื่องจากมีลักษณะกราฟไฟต์เป็นแบบแผ่นในเหล็กหล่อเทเป็นโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุสูงขึ้น ในทางกลับกันอนุภาคกราฟไฟต์แบบทรงกลมในเหล็กหล่อเหนียวไม่เชื่อมต่อกัน ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนต้องผ่านตัวนำคือ โครงสร้างพื้นของเหล็กหล่อเหนียวซึ่งมีความสามารถในการนำความร้อนได้ต่ำกว่า กราฟไฟต์ ดังนั้นอัตราการเย็นตัวในช่วงสุดท้ายของการแข็งตัวของเหล็กเทามีมากกว่าเหล็กหล่อเหนียวโดยที่เหล็กหล่อเหนียวจะค่อย ๆ เย็นตัวไปอย่างช้าๆ จากปรากฏการณ์นี้ยังมีลักษณะเฉพาะอีกด้วยจากการพิจารณาที่ต่ำ (θ) โดยที่ต่ำคือ มุมของกราฟอัตราการเย็นตัวใกล้ อัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัว (dT/dt) และเวลาโดยที่แมกนีเซียมต่างกัน สังเกตเห็นได้ว่าแมกนีเซียมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ อัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) มีค่ามากขึ้น หรือ การถ่ายเทความร้อนช้าลงและเมื่อพิจารณาที่ต่ำ (θ) พบว่า ขนาดของมุมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์แมกนีเซียมเพิ่มขึ้นจากข้อมูลที่ได้ทำการทดลองสำหรับเหล็กหล่อเหนียว นำตัวแปร

อัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) และเปอร์เซ็นต์แมกนีเซียมมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) เทียบกับแมกนีเซียมโดยที่ แกนตั้งเป็นอัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) แกนนอนเป็นแมกนีเซียมดัง รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) และแมกนีเซียม บอกถึงการที่แมกนีเซียมเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) เพิ่มขึ้นเพราะแมกนีเซียมช่วยเพิ่มความกลมของกราฟไฟต์ทำให้การถ่ายเทความร้อนเข้าไปด้วย

แนวโน้มความสัมพันธ์ของอัตราการเย็นตัวสูงสุด (MCR) กับแมกนีเซียมเป็นแบบแปรตรง และข้อมูลที่ได้ทำการทดลองสำหรับเหล็กหล่อเหนียวได้นำตัวแปร ที่ด้า (θ) และแมกนีเซียมมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่ด้า (θ) เทียบกับแมกนีเซียมโดยที่ แกนตั้งเป็นที่ด้า (θ) แกนนอนเป็นแมกนีเซียมดัง รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ที่ด้า (θ) และแมกนีเซียมสังเกตได้ว่าที่ด้า (θ) มีขนาดลดลงเมื่อแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนลดลงทำให้อัตราการเย็นตัวในช่วงสุดท้ายของการแข็งตัวช้าลง แนวโน้มความสัมพันธ์ของที่ด้า (θ) และแมกนีเซียมเป็นแบบแปรตรง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้

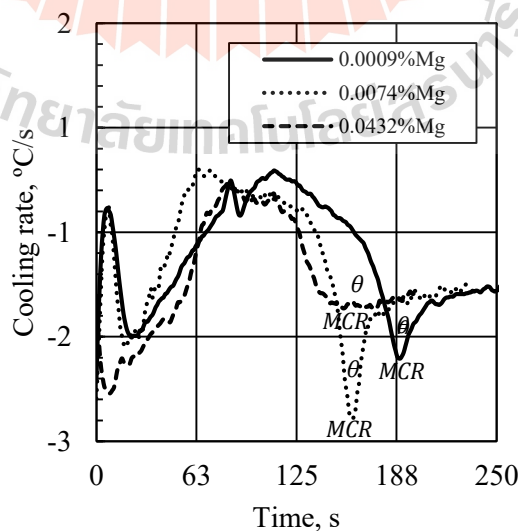
$$MCR = 27.885(\%Mg) - 2.7091 \quad (4.7)$$

$$\theta = 2218.5(\%Mg) - 17.275 \quad (4.8)$$

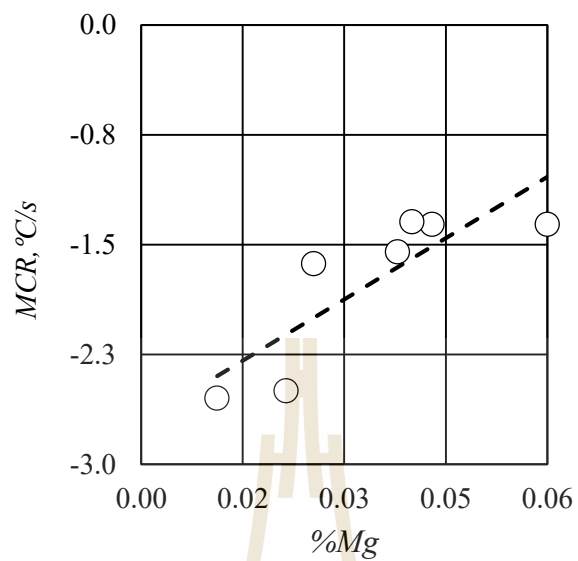
หรือ

$$\%Mg = 0.0358(MCR) + 0.0971 \quad (4.9)$$

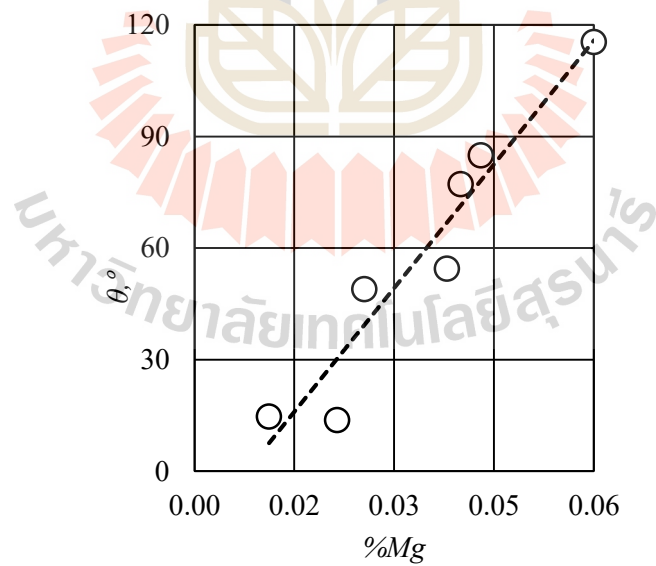
$$\%Mg = 0.00045(\theta) - 0.00778 \quad (4.10)$$



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวและแมกนีเซียม



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวสูงสุดและแมกนีเซียม

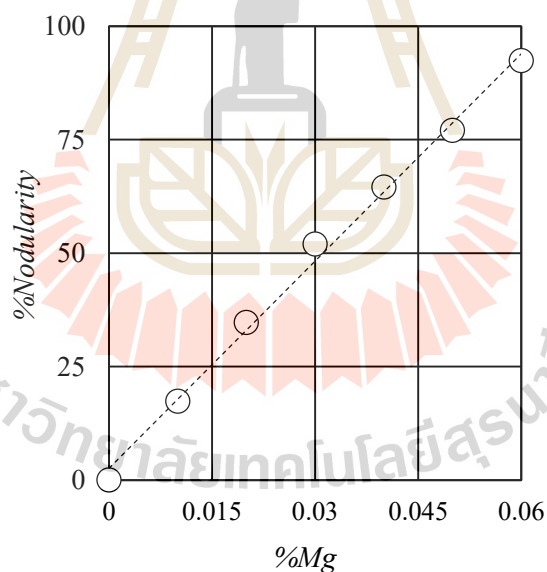


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมและแมกนีเซียม

4.2.5 การทำนายรูปร่างกราฟไฟต์

รูปร่างของกราฟไฟต์นั้นมียู่ด้วยกัน 2 ประเภท คือ กราไฟต์แบบแผ่นในเหล็กหล่อเทา และกราฟไฟต์แบบกลมในเหล็กหล่อเหนียวซึ่งมีรูปร่างต่างกัน จากผลการทดลองของ Gaurav S. Biraje และ Digvijay M. Jadhav [15] การเพิ่มขึ้นของปริมาณแมกนีเซียมนั้นจะทำให้รูปร่างกราฟไฟต์ค่อย ๆ กลมขึ้นจากที่เป็นกราฟไฟต์แบบแผ่นในช่วงการทดลองที่ปริมาณแมกนีเซียม 0 – 0.06% จากผลการทดลองสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความกลม (%Nodularity) และแมกนีเซียม โดยที่ ร้อยละความกลมบอกถึงความกลมของกราฟไฟต์ ดังรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ร้อยละความกลมและแมกนีเซียมต่างๆ อธิบายได้ดังสมการดังนี้

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



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความกลมและแมกนีเซียม

4.3 การสร้างระบบต้นแบบซอฟต์แวร์

สมการที่เสนอได้แก่ สมการที่ 4.2 4.4 4.6 4.10 และ 4.11 ตารางที่ 4.3 สำหรับทำนาย คาร์บอน (%C) คาร์บอนสมมูล (CE) ซิลิกอน (%Si) แมกนีเซียม (%Mg) และ ร้อยละความกลม (%Nodularity) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 สมการทำนาย %C %Si CE %Mg และ %Nod

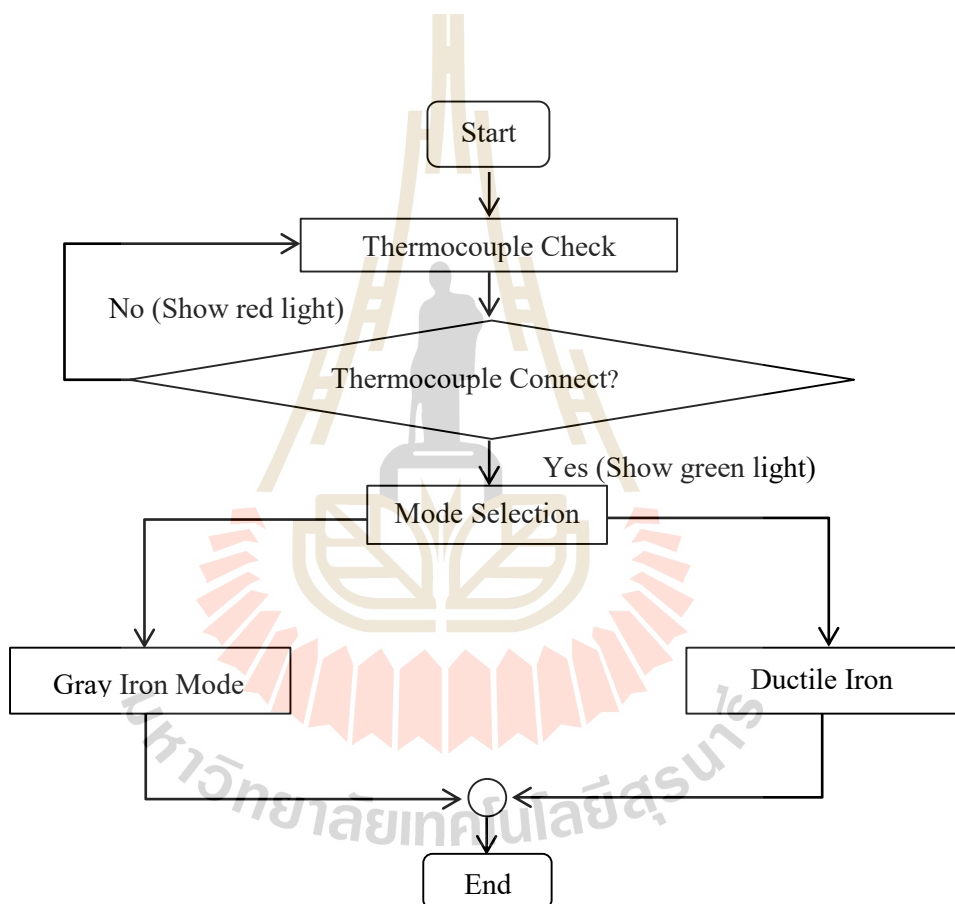
ตัวแปรทำนาย	ตัวแปรคำนวณ	สมการ
%C	T_{LA}	$\% C = -0.006218(T_{LA}) + 10.64$ (4.2)
%Si	T_E	$\% Si = -0.080(T_E) + 92.09$ (4.4)
CE	T_{LA}	$CE = -0.00932(T_{LA}) + 15.035$ (4.6)
%Mg	θ	$\% Mg = 0.00045(\theta) - 0.00778$ (4.10)
%Nod	%Mg	$\% Nodularity = 1522.7(\% Mg) + 2.5893$ (4.11)

สมการที่กล่าวมาได้ถูกเปลี่ยนเป็นรหัสในซอฟต์แวร์ต้นแบบโดยใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW เป็นซอฟต์แวร์ที่มีความสามารถในการคำนวณและเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์เพื่อตรวจจับค่าอุณหภูมิที่ต้องการพร้อมกับการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลแสดงข้อมูลบนหน้าจอแสดงผลการทำนายและแสดงค่าเตือนของระบบการทำงานที่กำหนดโดยผู้ใช้ การทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อจะมีแผนผังการทำงานโดยรวมเป็นไปดังหัวข้อที่ 4.3.1 ซึ่งจะประกอบไปด้วยสองโหมดการทำงานคือ โหมดการทำงานเหล็กหล่อเทาจะใช้สำหรับการวิเคราะห์เหล็กหล่อเทาซึ่งแผนผังการทำงานของโปรแกรมและรายละเอียดเป็นไปดังหัวข้อที่ 4.3.2 และอีกโหมดการทำงานคือ โหมดเหล็กหล่อเหนียวจะใช้สำหรับการวิเคราะห์เหล็กหล่อเหนียวมีแผนผังการทำงานของโปรแกรมและรายละเอียดเป็นไปดังหัวข้อที่ 4.3.3

4.3.1 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อ

แผนผังการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อมียุทธศาสตร์การทำงานดังนี้ เริ่มจากการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Check) เพื่อตรวจสอบว่าเทอร์โมคัปเปิลนั้นได้ถูกเชื่อมต่อในระบบแล้วหรือยังไม่ถูกเชื่อมต่อในระบบ จากนั้นไปตรวจสอบเงื่อนไขของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Connect?) ถ้าเทอร์โมคัปเปิลนั้นยังไม่ถูกเชื่อมต่อให้กลับไปตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่ออีกครั้งตรวจสอบสถานะไปเรื่อยๆจนตรวจสอบ

พบว่าเทอร์โมคัปเปิลได้เชื่อมต่อแล้วก็ไปทำงานขั้นตอนต่อไปคือ การเลือกโหมด (Mode Selection) ซึ่งจะเลือกโดยผู้ใช้งานสำหรับการเลือกโหมดเหล็กหล่อเทา (Gray Iron Mode) จะใช้สำหรับการทำนาย $\%C$ $\%Si$ และ CE ที่ได้กำหนดโดยสมการสำหรับวิเคราะห์เหล็กหล่อเทาส่วนสำหรับโหมดเหล็กหล่อเหนียว (Ductile Iron Mode) จะใช้สำหรับการทำนายตัวแปร $\%Mg$ และ $\%Nod.$ ได้กำหนดโดยสมการสำหรับวิเคราะห์เหล็กหล่อเหนียว โดยแผนผังการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อโดยรวมนั้นจะเป็นไปดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อ

4.3.2 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อโหมดเหล็กหล่อเทา

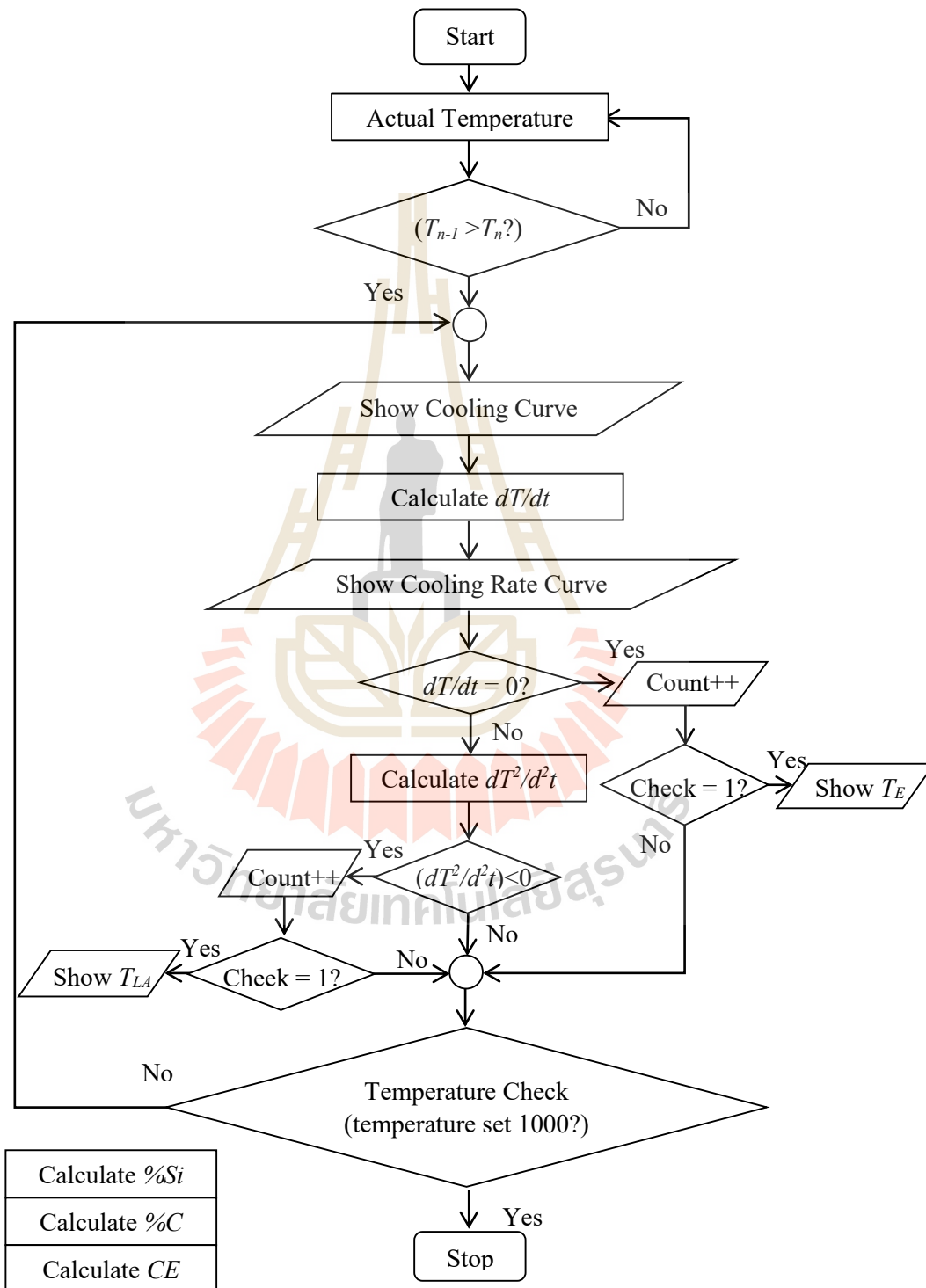
การทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อในโหมดเหล็กหล่อเทามีลำดับการทำงานคือ เริ่มต้นจากการรับข้อมูลเป็นอุณหภูมิ (Actual Temperature) จากเทอร์โมคัปเปิล แล้วเข้าสู่การตรวจสอบเงื่อนไข ($T_{n-1} > T_n$) ว่าอุณหภูมิก่อนหน้ามากกว่าอุณหภูมิปัจจุบันหรือไม่เพื่อหาค่าอุณหภูมิสูงสุดของกราฟการเย็นตัว โดยที่ T_{n-1} คือ อุณหภูมิก่อนหน้าและ T_n คือ อุณหภูมิปัจจุบันถ้า $T_{n-1} < T_n$ ให้ค่าเป็นเท็จแล้ววนกลับไปรับข้อมูลใหม่ แต่ถ้า $T_{n-1} > T_n$ ให้ค่าเป็นจริงให้ทำขั้นตอนต่อไป คือ การแสดงผลกราฟการเย็นตัว (Show Cooling Curve) ทางหน้าจอแสดงผลแล้วทำขั้นตอนคำนวณหาอัตราการเย็นตัว (Calculation dT/dt) เมื่อได้ผลการคำนวณอัตราการเย็นตัว ก็เข้าสู่ขั้นตอนแสดงผลเป็นกราฟอัตราการเย็นตัว (Show Cooling Rate Curve) ทางหน้าจอแสดงผลขั้นตอนต่อไปตรวจสอบเงื่อนไขว่าอัตราการเย็นตัวเท่ากับศูนย์ ($dT/dt = 0$?) หรือไม่ เพื่อสำหรับใช้หาค่าอุณหภูมิยูเทคติก (T_E) ถ้าใช่จะได้ค่าเป็นจริงและเข้าสู่ขั้นตอนการนับจำนวนข้อมูล (Count++)

ทำการตรวจสอบเงื่อนไขว่าเท่ากับ 1 (Check = 1) หรือไม่ ถ้าไม่จะข้ามไปขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าอุณหภูมิเท่ากับ 1000 องศาเซลเซียสหรือไม่ ถ้าไม่จะให้ค่าเป็นเท็จและไปเริ่มทำงานที่ขั้นตอนการแสดงผลกราฟการเย็นตัวอีกครั้ง ถ้าใช่จะให้ค่าเป็นจริงและไปที่จบการทำงาน (Stop) ถ้าขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าเท่ากับ 1 (Check = 1) นั้นเท่ากับ 1 จะให้ค่าเป็นจริงจะไปทำงานการในขั้นตอนแสดงผลเป็นอุณหภูมิยูเทคติก (Show T_E) ทางหน้าจอแสดงผล

ค่าอุณหภูมิยูเทคติกนั้นสามารถคำนวณปริมาณซิลิกอนได้ ต่อจากขั้นตอนตรวจสอบเงื่อนไขว่าอัตราการเย็นตัวคือ การคำนวณอนุพันธ์อันดับที่ 2 ของกราฟการเย็นตัว (dT^2/d^2t) พร้อมกับตรวจสอบเงื่อนไขว่า น้อยกว่าศูนย์ ($dT^2/d^2t < 0$) หรือไม่ เพื่อสำหรับใช้หาค่าอุณหภูมิลิวติสต์ (T_{LA}) ถ้าใช่จะได้ค่าเป็นจริงและเข้าสู่ขั้นตอนการนับจำนวนข้อมูล (Count++) ทำการตรวจสอบเงื่อนไขว่าเท่ากับ 1 (Check = 1) หรือไม่ ถ้าไม่จะข้ามไปขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าอุณหภูมิเท่ากับ 1000 องศาเซลเซียสหรือไม่ถ้าไม่จะให้ค่าเป็นเท็จและไปเริ่มทำงานที่ขั้นตอนการแสดงผลกราฟการเย็นตัวอีกครั้ง ถ้าใช่จะให้ค่าเป็นจริงและไปที่จบการทำงาน (Stop) ถ้าขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าเท่ากับ 1 (Check = 1) นั้นเท่ากับ 1 จะให้ค่าเป็นจริงจะไปทำงานการในขั้นตอนแสดงผลเป็นอุณหภูมิลิวติสต์ (Show T_{LA}) ทางหน้าจอแสดงผล

ค่าอุณหภูมิลิวติสต์นั้นใช้สำหรับคำนวณปริมาณคาร์บอนและค่าคาร์บอนสมมูลได้ จากขั้นตอนการคำนวณอนุพันธ์อันดับที่ 2 (dT^2/d^2t) ของกราฟการเย็นตัว พร้อมกับตรวจสอบเงื่อนไขว่า น้อยกว่าศูนย์ ($dT^2/d^2t < 0$) หรือไม่ ในกรณีที่ไม่น้อยกว่าศูนย์ จะให้ค่าเป็นเท็จแล้วไปที่ขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าอุณหภูมิเท่ากับ 1000 องศาเซลเซียสหรือไม่ถ้าไม่จะให้ค่าเป็นเท็จและไป

ทำงานที่ขั้นตอนการแสดงผลกราฟการเย็นตัวถ้าจะให้ค่าเป็นจริงและไปที่ขั้นตอนจบการทำงาน (Stop) ซึ่งแผนผังการทำงานโปรแกรมในโหมดหลักหล่อเทาจะเป็นไปดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แผนผัง โปรแกรมสำหรับหลักหล่อเทา

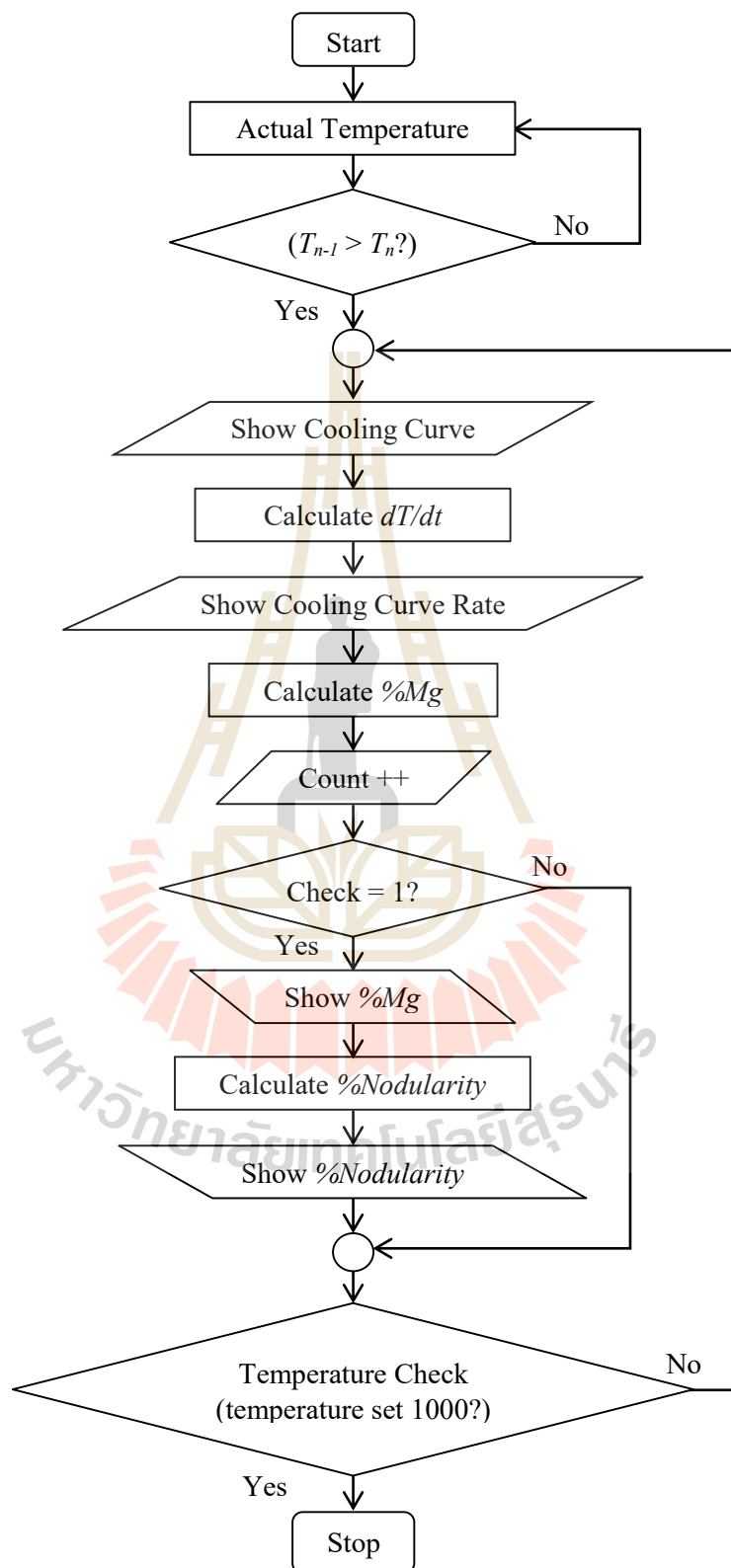
4.3.3 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อโหมดเหล็กหล่อเหนียว

การทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์เหล็กหล่อในโหมดเหล็กหล่อเหนียวมีลำดับการทำงานคือ เริ่มต้นจากการรับข้อมูลเป็นอุณหภูมิ (Actual Temperature) จากเทอร์โมคัปเปิล แล้วเข้าสู่การตรวจสอบเงื่อนไข ($T_{n-1} > T_n$) ว่าอุณหภูมิก่อนหน้ามากกว่าอุณหภูมิปัจจุบันหรือไม่โดยที่ T_{n-1} คือ อุณหภูมิก่อนหน้าและ T_n คือ อุณหภูมิปัจจุบันถ้า $T_{n-1} < T_n$ ให้ค่าเป็นเท็จแล้ววนรับข้อมูลใหม่แต่ถ้า $T_{n-1} > T_n$ ให้ค่าเป็นจริงให้ทำขั้นตอนต่อไปคือ

การแสดงผลกราฟการเย็นตัว (Show Cooling Curve) ทางหน้าจอแสดงผลแล้วทำขั้นตอนต่อไปคือ การคำนวณหาอัตราการเย็นตัว (Calculation dT/dt) เมื่อได้ผลการคำนวณอัตราการเย็นตัวก็เข้าสู่ขั้นตอนแสดงผลเป็นกราฟอัตราการเย็นตัว (Show Cooling Rate Curve) ทางหน้าจอแสดงผลขั้นตอนต่อไป

การคำนวณปริมาณแมกนีเซียม (%Mg) หลังจากได้ค่าของปริมาณแมกนีเซียมจากขั้นตอนการคำนวณปริมาณแมกนีเซียมแล้วต่อไปจะนับจำนวนข้อมูล (Count++) ทำการตรวจสอบเงื่อนไขว่าเท่ากับ 1 (Check = 1) หรือไม่ ถ้าไม่จะเข้าไปขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าอุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียสหรือไม่ถ้าไม่จะให้ค่าเป็นเท็จและไปเริ่มทำงานที่ขั้นตอนการแสดงผลกราฟการเย็นตัวอีกครั้ง ถ้าใช่จะให้ค่าเป็นจริงและไปที่จบการทำงาน (Stop) ถ้าขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าเท่ากับ 1 (Check = 1) นั้นเท่ากับ 1 จะให้ค่าเป็นจริงจะไปทำงานการในขั้นตอนแสดงผลเป็นปริมาณของแมกนีเซียม (Show %Mg)

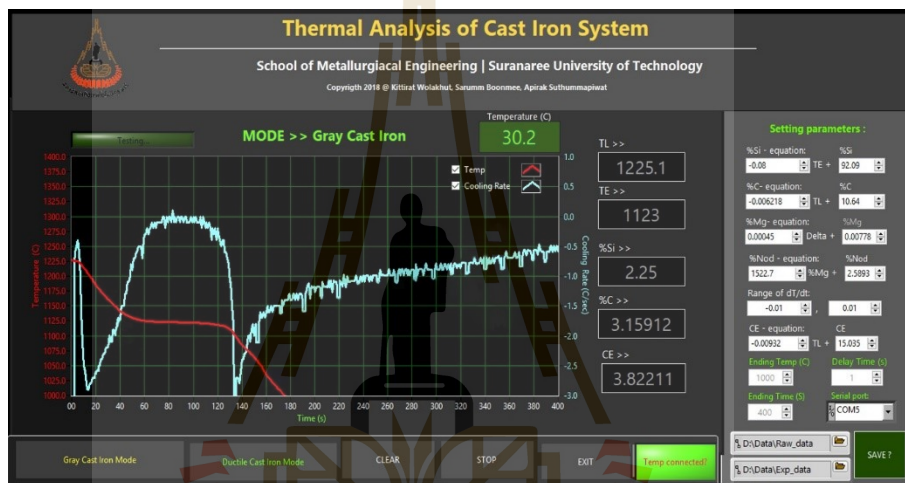
ค่าแมกนีเซียมที่ได้จะถูกนำมาเข้าสู่ขั้นตอนคำนวณค่าความกลมของของกราฟไฟต์ (%Nodularity) จากนั้นแสดงผลของค่า %Nodularity ในขั้นตอนต่อไปเป็นขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขว่าอุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียสหรือไม่ถ้าไม่จะให้ค่าเป็นเท็จและไปเริ่มทำงานที่ขั้นตอนการแสดงผลกราฟการเย็นตัวอีกครั้ง ถ้าใช่จะให้ค่าเป็นจริงและไปที่จบการทำงาน (Stop) ซึ่งแผนผังการทำงานโปรแกรมในโหมดเหล็กหล่อเทาจะเป็นไปดังรูปที่ 4.15



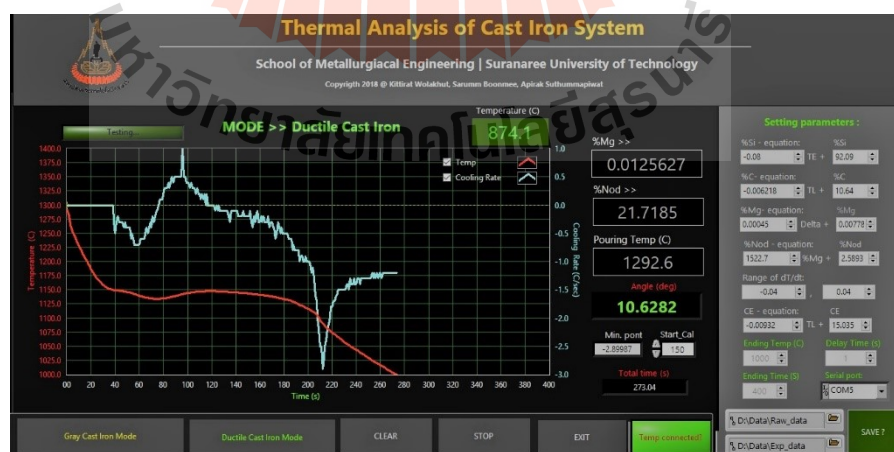
รูปที่ 4.15 แผนผังโปรแกรมสำหรับเหล็กหล่อเหนียว

4.3.4 ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับเหล็กหล่อ

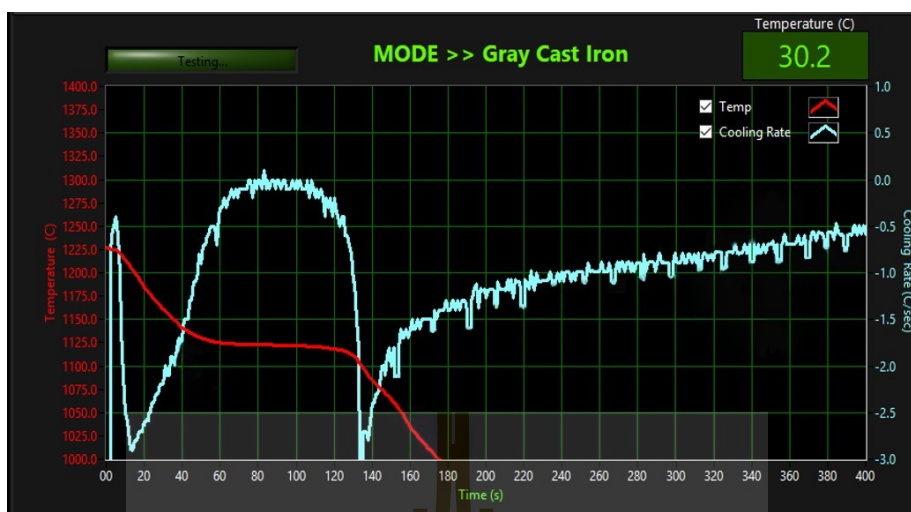
ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับเหล็กหล่อประกอบโหมมคการทำงานหลักสองโหมมคคือ โหมมคเหล็กหล่อเทา (Gray Cast Iron Mode) และ โหมมคเหล็กหล่อเหนียว (Ductile Cast Iron Mode) ดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 ในทั้งสองโหมมคนั้นมีจอแสดงกราฟการเย็นตัวเส้นสีแดงและอัตราการเย็นตัวเส้นสีน้ำเงิน แกนแนวตั้งทางซ้ายคือ อุณหภูมิ แกนแนวตั้งทางขวาคือ อัตราการเย็นตัว และแกนแนวตั้งทางขวาคืออัตราการเย็นตัว แกนแนวนอนคือเวลาสำหรับกราฟการเย็นตัว และแกนแนวตั้งทางขวาคืออัตราการเย็นตัว แกนแนวนอนคือเวลาสำหรับกราฟอัตราการเย็นตัวดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างภาพหน้าจอของซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับโหมมคเหล็กหล่อเทา



รูปที่ 4.17 ตัวอย่างภาพหน้าจอของซอฟต์แวร์ต้นแบบสำหรับโหมมคเหล็กหล่อเหนียว



รูปที่ 4.18 จอแสดงกราฟการขึ้นตัวและอัตราการขึ้นตัว

แถบการเลือกโหมดการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ทางความร้อนดังรูปที่ 4.19 มีองค์ประกอบของหน้าต่างการทำงานดังต่อไปนี้

- หมายเลข 1 โหมดเหล็กหล่อเทา (Gray Cast Iron Mode)
- หมายเลข 2 โหมดเหล็กหล่อเหนียว (Ductile Cast Iron Mode)
- หมายเลข 3 ปุ่มล้างข้อมูล (CLEAR)
- หมายเลข 4 ปุ่มหยุดการทำงาน (STOP)
- หมายเลข 5 ปุ่มออกการทำงาน (EXIT)
- หมายเลข 6 ไฟแสดงสถานะเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Connect?)

โดยองค์ประกอบของหน้าต่างการทำงานมีลักษณะการทำงานดังนี้

หมายเลข 1 โหมดเหล็กหล่อเทา ใช้สำหรับการวิเคราะห์เหล็กหล่อเทา โดยโหมดเหล็กหล่อเทานี้จะแสดงผลค่าอุณหภูมิลิควิดัส (T_{Ld}) ซึ่งคือ TL และอุณหภูมิยูเทคติก (T_E) ซึ่งคือ TE ที่แสดงบนหน้าต่างการทำงานของโปรแกรม ในส่วนของส่วนผสมทางเคมีจะแสดงค่า %Si %C และ CE ดังรูปที่ 20 (ก)

หมายเลข 2 โหมดเหล็กหล่อเหนียว ใช้สำหรับการวิเคราะห์เหล็กหล่อเหนียว โดยโหมดเหล็กหล่อเหนียวนี้จะแสดงผลค่า %Mg และ %Nodularity ดังรูปที่ 20 (ข)

หมายเลข 3 ปุ่มล้างข้อมูล (CLEAR) ใช้สำหรับล้างข้อมูลก่อนใช้งานครั้งต่อไปเพื่อป้องกันการทำงานซ้ำซ้อนจนซอฟต์แวร์เกิดความผิดพลาด

หมายเลข 4 ปุ่มหยุดการทำงาน (STOP) ใช้สำหรับหยุดการทำงานงานเมื่อได้รับข้อมูลเพียงพอต่อความต้องการแล้วโดยไม่ต้องรอให้ซอฟต์แวร์หยุดการทำงานเอง

หมายเลข 5 ปุ่มออกการทำงาน (EXIT) ใช้สำหรับออกจากซอฟต์แวร์เมื่อใช้งานทั้งหมดเสร็จสิ้น

หมายเลข 6 ไฟแสดงสถานะเทอร์โมคัปเปิลใช้สำหรับบอกสถานะการเชื่อมต่อของเทอร์โมคัปเปิลว่าเชื่อมต่อแล้วหรือไม่ในกรณีที่เชื่อมต่อแล้วไฟจะแสดงเป็นสีเขียวในกรณีที่ไม่เชื่อมต่อไฟจะแสดงเป็นสีแดง

การทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ทางความร้อนในส่วนหน้าต่างการตั้งค่า ดังรูปที่ 4.21 มีองค์ประกอบของการตั้งค่าต่างๆดังต่อไปนี้

หมายเลข 9 การตั้งค่าตัวแปรต่างๆ

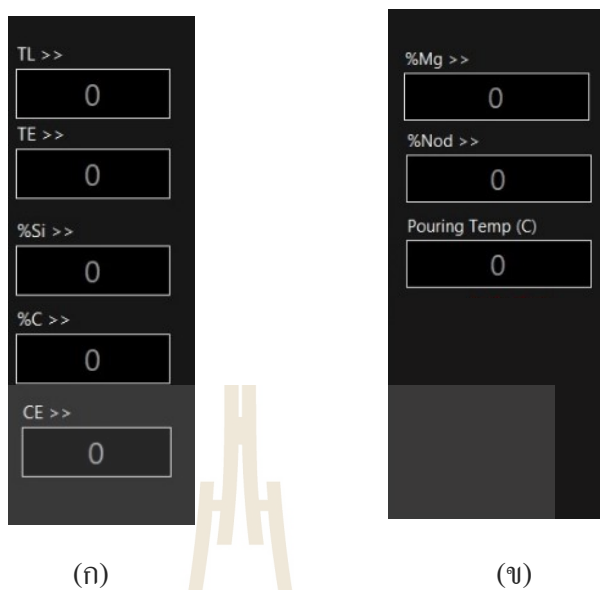
หมายเลข 10 ปุ่มบันทึกข้อมูล

หมายเลข 11 ปุ่ม เลือกตำแหน่งบันทึกข้อมูล

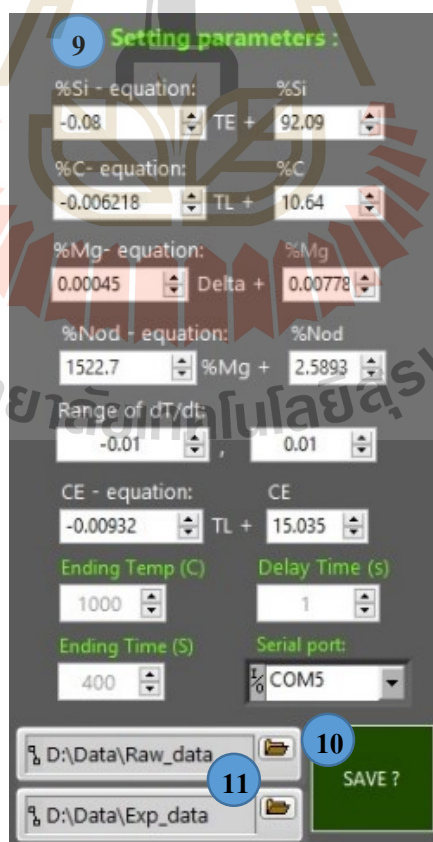
เริ่มจากหมายเลข 9 การตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ จะประกอบไปด้วย การตั้งค่า สัมประสิทธิ์ ของสมการสำหรับการทำนาย คาร์บอน (%C) ซิลิกอน (%Si) คาร์บอนผสม (CE) แมกนีเซียม(%Mg) และ %Nodrality (%Nod.) ในแถบเครื่องมือนี้ยังสามารถตั้งค่าการสิ้นสุดการทำงานของซอฟต์แวร์ได้โดยตั้งค่าที่ Ending Temp. จะกำหนดอุณหภูมิสิ้นสุดการทำงาน และ Ending time จะกำหนดเวลาสิ้นสุด ในหน้าต่างการตั้งค่ามีปุ่ม SAVE หมายเลข 10 ใช้สำหรับ การบันทึกข้อมูลที่ได้ใช้งานในการวิเคราะห์เหล็กหล่อหมายเลข 11 การตำแหน่งในการเก็บข้อมูลใช้สำหรับการเลือกพื้นที่ในการเก็บข้อมูลที่ได้จากการใช้งานซอฟต์แวร์วิเคราะห์เหล็กหล่อสามารถตั้งชื่อข้อมูลที่ทำการบันทึกได้



รูปที่ 4.19 แถบการเลือกโหมดการทำงาน



รูปที่ 4.20 ส่วนแสดงผลการทำนาย (ก) สำหรับเหล็กหล่อเทา (ข) สำหรับเหล็กหล่อเหนียว



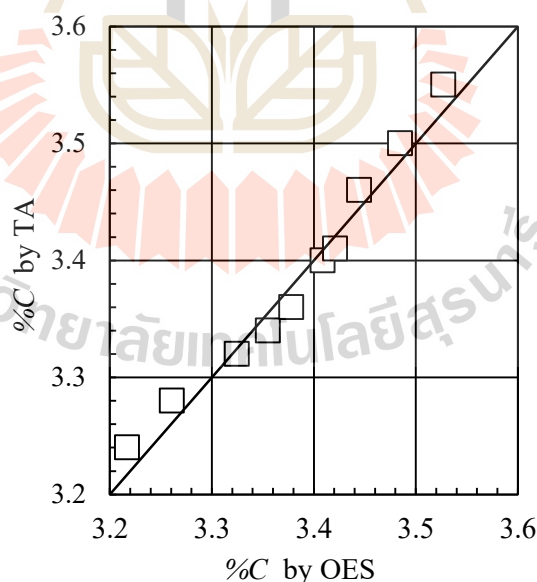
รูปที่ 4.21 แถบการตั้งค่าตัวแปรต่างๆ

4.4 ผลการใช้งานของอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน

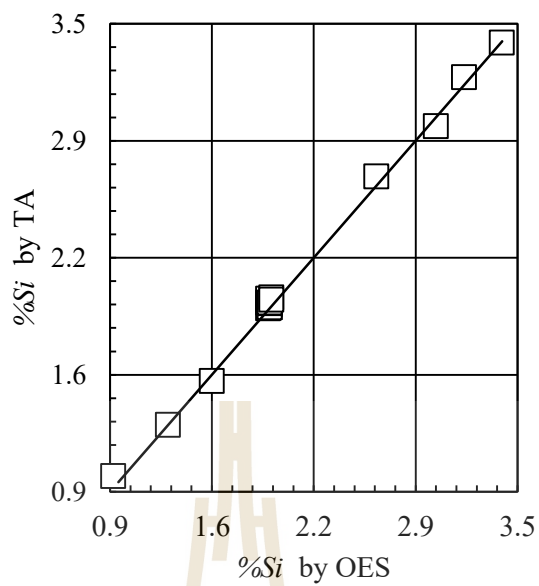
จากการทดลองใช้งานอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนได้เก็บข้อมูล %C %Si %CE และ %Mg จากการทำนายและข้อมูลเดียวกันจาก OES (Optical Emission Spectrometer) มาทำการเปรียบเทียบกันระหว่าง Thermal Analysis กับ Optical Emission Spectrometer ด้วยข้อมูล %C %Si %CE และ %Mg การทดลองใช้งานอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนนั้นได้คำนวณถึงความแม่นยำและความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนด้วย

4.4.1 การเปรียบเทียบระหว่าง Thermal Analysis กับ Optical Emission Spectrometer

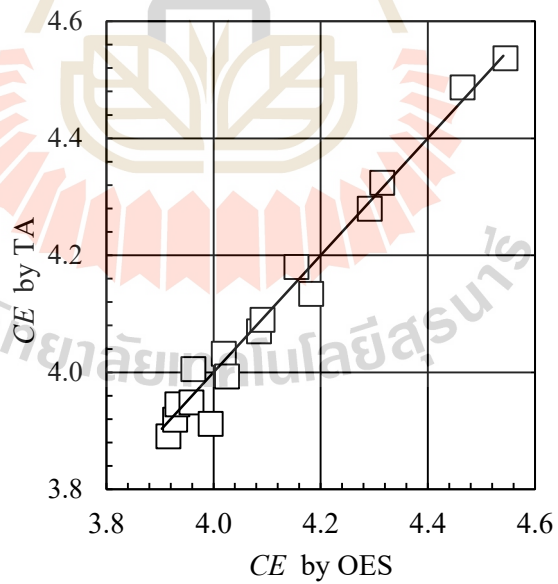
จากผลการทดลองได้เปรียบเทียบผลการทำนาย %C %Si %CE และ %Mg ระหว่าง TA (Thermal Analysis) และ OES (Optical Emission Spectrometer) พบว่าผลการทำนาย %C %Si และ CE มีแนวโน้มเข้าใกล้เส้นตรงบอกถึงผลการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OES (Optical Emission Spectrometer) ดังรูปที่ 4.22 4.23 และ 4.24 ในส่วนผลการทำนาย %Mg ก็เช่นเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ตรวจสอบด้วยเครื่อง OES (Optical Emission Spectrometer) ดังรูปที่ 4.25



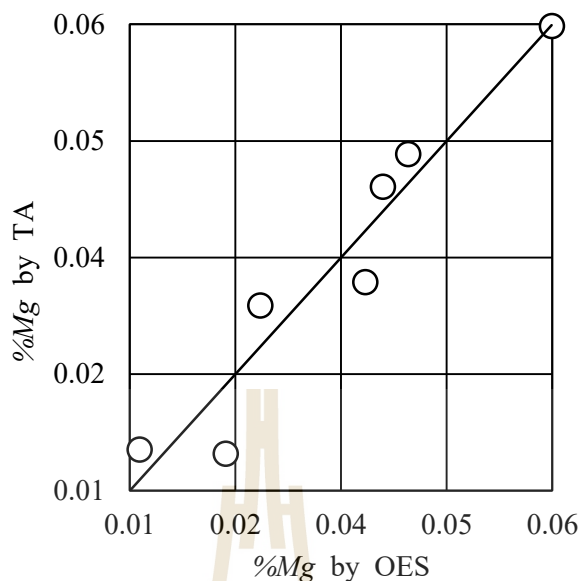
รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง %C by TA กับ %C by OES



รูปที่ 4.23 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง %Si by TA กับ %Si by OES



รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง CE by TA กับ CE by OES



รูปที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบระหว่าง %Mg by TA กับ %Mg by OES

4.4.2 ความแม่นยำ (Accuracy) ของอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน

ความแม่นยำเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของเครื่องมือวัด ในการอ่านค่าหรือแสดงค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริง โดยการคำนวณค่าความถูกต้อง/ความแม่นยำใช้สมการ

$$\%Accuracy = 100 - \%Error \quad (4.12)$$

$$Relative\ error = \frac{|X_{mea} - X_t|}{|X_t|} \quad (4.13)$$

$$\%Error = Relative\ error \times 100 \quad (4.14)$$

เมื่อ X_{mea} คือ ค่าที่ได้จากการวัด (measure value)

X_t คือ ค่าจริง (true value)

การตรวจสอบค่าความแม่นยำของอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนทำโดยนำค่า $\%C$ $\%Si$ CE และ $\%Mg$ ที่วัดได้จากอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนมาคำนวณในสมการที่ 4.12 สำหรับความแม่นยำ และ 4.14 สำหรับความคลาดเคลื่อน จากการคำนวณพบว่า $\%C$ มีความแม่นยำ คือ

98.319% ความคลาดเคลื่อน คือ 1.681% %Si มีความแม่นยำคือ 99.4764% ความคลาดเคลื่อนคือ 0.5236% CE มีความแม่นยำ คือ 99.8735% ความคลาดเคลื่อน คือ 0.1265% และ %Mg มีความแม่นยำคือ 99.9329% ความคลาดเคลื่อน 0.0671% ดังแสดงในตารางที่ 4.4 4.5 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.4 ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของคาร์บอน

%C (OES)	%C (TA)	ร้อยละความแม่นยำ	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
3.330	3.386	98.319	1.681
	3.380	98.499	1.501
	3.373	98.709	1.291

ตารางที่ 4.5 ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของซิลิกอน

%Si (OES)	%Si (TA)	ร้อยละความแม่นยำ	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
1.920	1.9240	99.7917	0.2083
	1.9240	99.7917	0.2083
	1.9200	99.4764	0.5236

ตารางที่ 4.6 ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของคาร์บอนผสม

CE (OES)	CE (TA)	ร้อยละความแม่นยำ	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
3.950	3.953	99.9241	0.0759
	3.948	99.9494	0.0506
	3.945	99.8735	0.1265

ตารางที่ 4.7 ความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของแมกนีเซียม

%Mg (OES)	%Mg (TA)	ร้อยละความแม่นยำ	ร้อยละความคลาดเคลื่อน
0.0432	0.0461	99.9329	0.0671
	0.0447	99.9653	0.0347
	0.0438	99.9862	0.0138

4.4.3 ความเที่ยงตรง (Precision) ของอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน

ความเที่ยงตรงเป็นค่าที่นิยมใช้และแสดงความหมายใกล้เคียงกับความถูกต้องแม่นยำ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วความเที่ยงตรงมีความหมายที่แตกต่างจากความแม่นยำ โดยความเที่ยงตรงเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของเครื่องมือวัดในการแสดงค่าเดิมเมื่อทำการวัดหลาย ๆ ครั้ง หรือความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ (Repeatability) ของเครื่องมือวัดภายใต้เงื่อนไขการวัดแบบเดิม โดยการคำนวณค่าความเที่ยงตรงสามารถใช้สมการ

$$\text{Precision} = \frac{|X_i - X_m|}{|X_m|} \quad (4.15)$$

$$X_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

โดยที่ X_m คือ ค่าเฉลี่ยของการวัด
 X_i คือ ค่าการวัดแต่ละครั้ง
 n คือ จำนวนครั้งของการวัด
 $\sum_{i=1}^n x_i$ คือ ผลรวมค่าของการวัดทั้งหมด

การตรวจสอบค่าความเที่ยงตรง (Precision) ของอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนทำโดยนำค่า %C %Si CE และ %Mg ที่วัดได้จากอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อนมาคำนวณในสมการที่ 4.15 จากการคำนวณพบว่า %C มีความเที่ยงตรง คือ 0.1972581% %Si มีความเที่ยงตรง คือ 0.1386963% CE มีความเที่ยงตรง คือ 0.1097417% และ %Mg มีความเที่ยงตรง คือ 2.7488856% ดังแสดงในตารางที่ 4.8 4.9 4.10 และ 4.11

ตารางที่ 4.8 ความเที่ยงตรงของคาร์บอน

%C (TA)	ร้อยละความเที่ยงตรง
3.386	0.1873952
3.380	0.0098629
3.373	0.1972581

ตารางที่ 4.9 ความเที่ยงตรงของซิลิกอน

$%Si$ (TA)	ร้อยละความเที่ยงตรง
1.9240	0.0693481
1.9240	0.0693481
1.9200	0.1386963

ตารางที่ 4.10 ความเที่ยงตรงของคาร์บอนรวม

CE (TA)	ร้อยละความเที่ยงตรง
3.953	0.1097417
3.948	0.0168833
3.945	0.0928583

ตารางที่ 4.11 ความเที่ยงตรงของแมกนีเซียม

$%Mg$ (TA)	ร้อยละความเที่ยงตรง
0.0461	2.7488856
0.0447	0.3714710
0.0438	2.3774146

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของกราฟการเย็นตัวและองค์ประกอบทางเคมีในเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียวได้ข้อสรุปจากงานวิจัยดังต่อไปนี้

5.1.1 เหล็กหล่อเทา

คาร์บอนและคาร์บอนเทียบเท่ามีความสัมพันธ์กับ T_{LA} อย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของสหสัมพันธ์เท่ากับ -0.97 และ -0.95 ตามลำดับสามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\% C = -0.006218(T_{LA}) + 10.64 \quad (5.1)$$

$$CE = -0.00932(T_{LA}) + 15.035 \quad (5.2)$$

แสดงให้เห็นว่า T_{LA} สามารถใช้ทำนายคาร์บอนและคาร์บอนเทียบเท่าในเหล็กหล่อเทาได้ นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างซิลิกอนกับ T_E ในงานวิจัยนี้ ($R^2 = -0.99$) สามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\% Si = -0.080(T_E) + 92.09 \quad (5.3)$$

สมการสำหรับความสัมพันธ์เหล่านี้ใช้สำหรับการเข้ารหัสซอฟต์แวร์ต้นแบบ

5.1.2 เหล็กหล่อเหนียว

พบว่าแมกนีเซียมสามารถทำนายได้ด้วย MCR และ θ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.84 และ 0.96 ตามลำดับ สามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\% Mg = 0.0358(MCR) + 0.0971 \quad (5.4)$$

$$\% Mg = 0.00045(\theta) - 0.00778 \quad (5.5)$$

สมการ 5.4 และ 5.5 ถูกใช้ในการทำนายแมกนีเซียมและ *Nodularity* ด้วยในซอฟต์แวร์ต้นแบบ

5.1.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์

จากความสัมพันธ์ของตัวแปรคาร์บอน (%C) และ T_{LA} คาร์บอนรวม (CE) และ T_{LA} ซิลิกอน (%Si) และ T_E แมกนีเซียม (%Mg) และที่ต่ำ(θ) ความกลม (%Nodularity) และแมกนีเซียม (%Mg) ได้สมการดังตารางที่ 5.1 ใช้สำหรับการเขียนโปรแกรมในการทำนาย %C %Si CE %Mg และ %Nod

ตารางที่ 5.1 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์และสมการทำนาย %C %Si CE %Mg และ %Nod

ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์		สมการทำนาย
%C	T_{LA}	$\% C = -0.006218(T_{LA}) + 10.64$
%Si	T_E	$\% Si = -0.080(T_E) + 92.09$
CE	T_{LA}	$CE = -0.00932(T_{LA}) + 15.035$
%Mg	θ	$\% Mg = 0.00045(\theta) - 0.00778$
%Nod	%Mg	$\% Nodularity = 1522.7(\% Mg) + 2.5893$

5.1.4 ผลการใช้งาน

จากการทดสอบการใช้งานได้ผลลัพธ์คือ ค่าความแม่นยำของอุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน ที่วัดได้พบว่า %C มีความแม่นยำเท่ากับ 97.392 ค่าความคลาดเคลื่อนคือ 2.608 %Si มีความแม่นยำเท่ากับ 99.4764 ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.5236 CE มีความแม่นยำเท่ากับ 99.344 ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.3195 และ %Mg มีความแม่นยำเท่ากับ 90.3820 ค่าความคลาดเคลื่อน 9.6180 สำหรับความเที่ยงตรงพบว่า %C มีค่าความเที่ยงเท่ากับ 0.193 %Si มีค่าความเที่ยงเท่ากับ 0.1387 CE มีค่าความเที่ยงเท่ากับ 0.0983 และ %Mg มีค่าความเที่ยงเท่ากับ 2.6243

5.2 ข้อเสนอแนะ

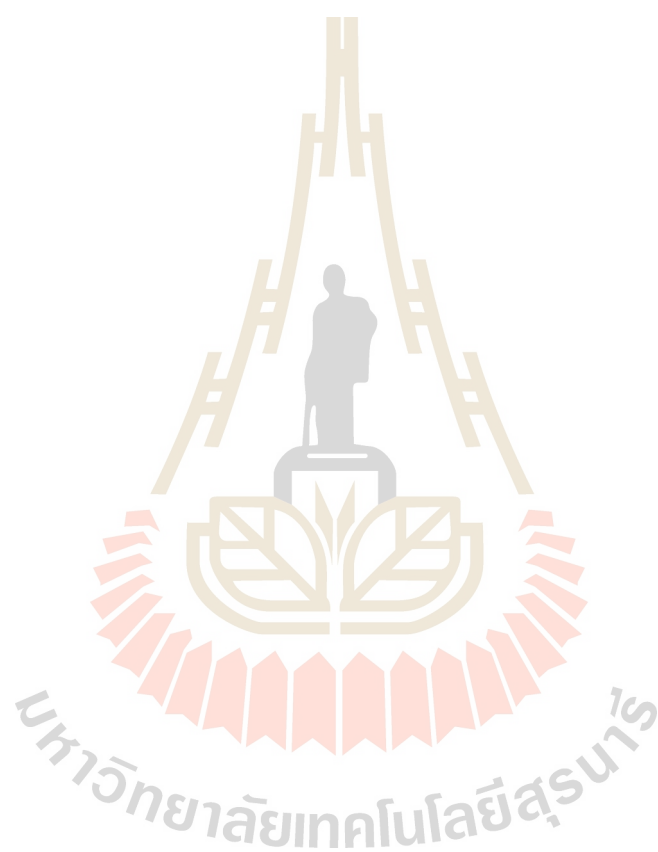
5.2.1 อุปสรรค

ระหว่างการทดลองในขั้นตอนการผลิตเหล็กหล่อเหนียวเมื่อทำการเก็บข้อมูลจะทำได้เพียงการหลอมหนึ่งครั้งต่อหนึ่งข้อมูลซึ่งทำให้สูญเสียเวลาและขนาดความสม่ำเสมอของส่วนผสมทางเคมีสำหรับธาตุบางตัวที่ไม่ต้องการเปลี่ยนแปลง

5.2.2 ข้อผิดพลาด

จากการทดลองพบว่าในกรณีถ้วยเทลูเรียมมีอายุเก็บรักษานานเกินไปนั้นจะทำให้

เกิดออกซิเดชันและไม่มีประสิทธิภาพในการทำงาน ส่งผลให้กราฟการเขียนตัวที่ได้คลาดเคลื่อนไป
และไม่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์



รายการอ้างอิง

- [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 Diploma work No. 60/2011 at Department of Materials and Manufacturing Technology chalmers university of technology Gothenburg, Sweden.
- [3] L. Bäckerud, K. Nilsson and H. Steen, in *The Metallurgy of Cast Iron*, B. Lux, I. Minkoff and F. Mollard, Eds., Georgi Publishing, Switzerland (1975) 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 ,Transactions of American Foundry Society, vol 75(1967), pp.333-348.
- [5] C. R. Loper, Jr., R. W. Heine, R. W. Reesman, R. Sch. and H. Shah, “thermal analysis of ductile iron” Transactions of American Foundry Society, vol 75(1967),pp.541-547.
- [6] D.M. Stefanescu, “Thermal analysis theory and applications in metal casting”, American Foundry Society, Vol 9, Issue 1, 2015.
- [7] J.G. Humphreys, *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, *AFS Cast Metals Res. J.* (June 1971) 49-54.
- [10] R.W. Heine, *AFS Trans.* 82 (1974) 462-470.
- [11] W. Donald and A. Moore, BCIRA Report no. 1128(1973).
- [12] Nakayama. SG-CUP. Retrieved April 26, 2016 from <http://nakayama-meps.co.jp/english/Consumable/sg.html>
- [13] J.O. Barlow and D.M. Stefanescu, *Trans. AFS* 105(1997) 349.
- [14] C. Henschel, R.W. Heine, *AFS Cast Metals Res. J.* (Sept 1971) 745-757.
- [15] Gaurav S. Biraje , Digvijay M. Jadhav, “Study and Observation of Process Parameters for Spheroidal Graphite (SG) Iron Casting,” Vol 3, Issue 1, July 2016
- [16] Hinkle DE, Wiersma W, Jurs SG. (1998).



ภาคผนวก ก

ส่วนผสมทางเคมีและตัวแปรของชุดข้อมูล

ตารางที่ 1 ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ %C และ T_{LA}

No	%C	T_{LA}
4	3.66	1181.90
9	3.46	1149.25
4	3.55	1143.95
11	3.43	1154.05
2	3.68	1126.45
3	3.60	1131.80
10	3.50	1150.75
12	3.46	1157.20
13	3.41	1161.00
15	3.36	1164.80
16	3.36	1167.95
17	3.34	1171.60
18	3.32	1176.50
8	3.54	1146.25
14	3.40	1163.00
20	3.28	1186.75
12	3.22	1204.25
13	3.18	1204.20

ตารางที่ 2 ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ CE และ T_{LA}

No	CE	T_{LA}
3	4.47	1131.80
7	4.29	1141.35
8	4.41	1146.25
11	4.29	1154.05
19	4.12	1179.50
22	4.00	1193.50
2	4.22	1166.10
6	4.09	1174.40
7	4.02	1175.95
8	4.02	1176.90
9	4.03	1184.80
12	3.96	1183.45
15	3.89	1193.80
16	3.92	1195.75
8	4.14	1164.70

ตารางที่ 3 ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ %Si และ T_E

No.	%Si	T_E
1	0.92	1126.40
2	1.13	1124.55
3	1.27	1122.85
5	1.55	1119.80
6	1.69	1119.40
7	1.90	1116.50
8	2.02	1114.50
9	2.12	1112.90
10	2.33	1111.05
11	2.48	1108.95
12	2.65	1106.45
13	2.83	1104.20
14	2.98	1102.10
15	3.16	1098.70
16	3.40	1096.30

ตารางที่ 4 ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ %Mg และ MCR

No	%Mg	MCR
2	0.060	-1.36
3	0.043	-1.36
4	0.040	-1.34
3	0.026	-1.63
2	0.038	-1.55
3	0.021	-2.50
4	0.011	-2.55

ตารางที่ 5 ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ %Mg กับ θ

No	%Mg	θ
2	0.060	115.39
3	0.043	84.92
4	0.040	77.18
3	0.026	48.96
2	0.038	54.46
3	0.021	13.71
4	0.011	14.66



ภาควิชา

การหาค่าคาร์บอนสมมูล (Carbon Equivalent), CE

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การหาค่าคาร์บอนสมมูล (Carbon Equivalent)

$$CE = \%C + (\%Si + \%P)/3$$

$\%C$ คือเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่เจอในเหล็กหล่อ

$\%Si$ คือเปอร์เซ็นต์ซิลิกอนที่เจอในเหล็กหล่อ

$\%P$ คือเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่เจอในเหล็กหล่อ



ประวัติผู้เขียน

นายกิตติรัช วรรณกุล เกิดเมื่อวันที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2534 ภูมิลำเนาเดิมอยู่ที่อำเภอทรายทองวัฒนา จังหวัดกำแพงเพชร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาในปี พ.ศ. 2552 จากโรงเรียนทุ่งทรายวิทยา อำเภอทรายทองวัฒนา จังหวัดกำแพงเพชร จากนั้นสอบเข้าได้เรียนที่สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้เข้าศึกษาในสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในปี พ.ศ. 2556

ผลงานวิจัย : ได้เสนอผลงานทางวิชาการนานาชาติในการประชุมงาน SEATUC ครั้งที่ 11 ในหัวข้อเรื่อง Prototyping Of The Thermal Analysis System For Cast Iron Production นอกจากนี้ได้เสนอผลงานทางวิชาการระดับชาติในการประชุมงาน TMETC ครั้งที่ 10 ในหัวข้อเรื่อง The Microstructural Observation And The Thermal Analysis Of Ti-Alloyed Gray Irons และ Thermal Analysis System for Iron Melt Quality Control



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี