

การวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก และ โครงสร้างของสเกลตติยภูมิที่เกิดบนเหล็กแผ่นแถบรีดร้อน  
ระหว่างม้วนเก็บและเย็นตัว

นางสาว เกตน์นิภา สุขวรรณวิทย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2549  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A THERMO-GRAVIMETRIC AND STRUCTURAL ANALYSIS OF THE TERTIARY SCALE FORMED  
ON COMMERCIAL HOT-ROLLED STEEL STRIP DURING COILING AND COOLING

Miss Ketnipa Sukwannawit

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก และโครงสร้างของสเกลตติยภูมิที่เกิดบนเหล็กแผ่นแถบรีดร้อน ระหว่างม้วนเก็บและเย็นตัว
โดย	นางสาว เกตน์นิภา สุขวรรณวิทย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. กฤษดา ประภากร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร. กฤษดา ประภากร)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکร จารุพิสิฐธร)

เกตนันนิภา สุขวรรณวิทย์ : การวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก และโครงสร้างของสเกลตติยภูมิที่เกิดบนเหล็กแผ่นแถบรีดร้อน ระหว่างม้วนเก็บและเย็นตัว  
(A THERMO-GRAVIMETRIC AND STRUCTURAL ANALYSIS OF THE TERTIARY SCALE FORMED ON COMMERCIAL HOT-ROLLED STEEL STRIP DURING COILING AND COOLING) อาจารย์ที่ปรึกษา: อาจารย์ ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อรุรยา  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: ดร. กฤษดา ประภากร, 112 หน้า

ในกระบวนการรีดร้อนสเกลตติยภูมิเป็นสเกลชนิดที่จะไม่ถูกกำจัด อีกทั้งยังสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสเกลชนิดอื่นขณะเย็นตัวภายหลังการม้วนเก็บ ซึ่งส่งผลต่อการควบคุมคุณภาพของเหล็กแผ่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ (1) อัตราการเย็นตัว (2) อุณหภูมิม้วนเก็บ (3) เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และ (4) ตำแหน่งที่แตกต่างกันบนม้วนเหล็ก ต่อปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดบนผิวของเหล็กแผ่นรีดร้อนเกรด HR1 ระหว่างเย็นตัวในบรรยากาศภายหลังกระบวนการม้วนเก็บ โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อกำหนดสภาวะทางความร้อนเพื่อใช้ในการจำลองการเกิดออกไซด์สเกล ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก ภายใต้สภาวะเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ และสภาวะอุณหภูมิคงที่ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์และใช้ในการสร้างสมการทำนายปริมาณสเกลที่ตำแหน่งที่สนใจต่อไป

ผลการวิจัยพบว่า ความหนาของชั้นออกไซด์สเกลที่เกิดภายใต้สภาวะเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิม้วนเก็บสูงขึ้น แต่ความหนาจะลดลงเมื่ออัตราการเย็นตัวสูงขึ้น ในขณะที่ความหนาของออกไซด์สเกลที่เกิดภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หรือเวลาในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนานขึ้น ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้นสามารถใช้ในการคำนวณอุณหภูมิที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆภายในม้วนเหล็กได้ โดยมีค่าความถูกต้องในระดับที่น่าพอใจ

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ  
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ  
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4870226921: MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: TERTIARY SCALE / THERMO-GRAVIMETRIC ANALYSIS / ISOTHERMAL OXIDATION / COOLING RATE / MATHEMATICAL MODEL

KETNIPHA SUKWANNAWIT: A THERMO-GRAVIMETRIC AND STRUCTURAL ANALYSIS OF THE TERTIARY SCALE FORMED ON COMMERCIAL HOT-ROLLED STEEL STRIP DURING COILING AND COOLING. THESIS ADVISOR: MAWIN SUPRADIST NA AYUDHAYA, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: KRITSADA PRAPAKORN, Ph.D., 112 pp.

Tertiary scale formed on the steel surface during and after finishing rolling is usually coiled with strip and undergo structural changes during cooling. These may affect the quality of steel surface and also affect the feasibility of the pickling process. In this work, the oxidation of hot-rolled steel strip HR1 grade under isothermal condition and under various coiling and cooling condition were studied by Thermo-gravimetric analysis technique, TGA. A simple 3D heat transfer model was formulated and was used to calculate cooling profiles at various positions in the coil. The measured coil outside cooling profiles were used to validate the model. The calculated results were then used as thermal conditions for the TGA experiments.

It was found that the thickness of oxide scale formed under continuous cooling increases with coiling temperature but the thickness substantially decreases when increasing cooling rate. It was also found that the oxide scale is thicker when isothermally formed in higher oxidation temperature or longer oxidation time. The derived kinetics expressions were used to predict the weight change or thickness of the scale. The results yield good agreement with the measured scale thickness from the hot rolled strip. The cooling curve calculated by mathematical model gives a good agreement with one observed from coil cooling process, which validated the model.

Department Metallurgical Engineering	Student's signature.....
Field of study Metallurgical Engineering	Advisor's signature .....
Academic year 2006	Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความช่วยเหลือและคำแนะนำจากบุคคลหลายท่าน รวมทั้งความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือในการศึกษาวิจัยจากหลายองค์กร ตลอดจนบริษัท สหวิริยาสตีลอินดัสตรี จำกัด มหาชน และศูนย์ร่วมวิจัยโลหะและวัสดุศาสตร์ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาและการทำวิจัย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของ อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ฌ อยุธยา ดร.กฤษดา ประภากร และคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และเสียสละเวลาให้คำปรึกษาแนะนำแก่ข้าพเจ้าตลอดมา ขอขอบพระคุณบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมโลหการ และบุคลากรในศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติทุกท่าน รวมทั้งเพื่อนนิสิตในและนอกภาควิชาทุกคน ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ข้าพเจ้ามิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุกท่าน

ท้ายที่สุดนี้ข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณมารดาบิดา พี่ชาย และคุณยายผู้เป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ที่อบรมเลี้ยงดูและสั่งสอนข้าพเจ้าด้วยความรัก และคอยสนับสนุน ให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดมา คุณความดีและประโยชน์อันพึงเกิดจากงานวิจัยชิ้นนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณความดีเหล่านั้นเป็นเครื่องบูชาพระคุณด้วยความเคารพยิ่ง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น .....	5
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการเกิด ชนิด และ โครงสร้างของออกไซด์สเกล .....	5
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน .....	7
2.3 กลไกการถ่ายเทความร้อนของม้วนเหล็กระหว่างการเย็นตัวภายหลังการม้วนเก็บ .....	9
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับศึกษาการเย็นตัวของม้วนเหล็ก.....	9
2.5 การวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก.....	10
2.6 จลนพลศาสตร์ของการเกิดออกไซด์สเกล .....	10
2.7 แนวคิดเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยา ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา และขั้นกำหนดอัตรา .....	14
2.8 ปรีทอร์สน์วรรณกรรม.....	16
3 วิธีการศึกษาวิจัย.....	26
3.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการศึกษาวิจัย.....	27
3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย .....	29
3.2.1 ศึกษาผลของตำแหน่งที่แตกต่างกันบนม้วนเหล็กต่อความหนา ออกไซด์สเกล .....	29
3.2.2 เก็บข้อมูลอุณหภูมิระหว่างเย็นตัวของม้วนเหล็กจากโรงงาน .....	30
3.2.3 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	31

3.2.4 การทดลองจำลองการเกิดออกไซด์สเกลด้วยการวิเคราะห์ เทอร์โมกราวิเมตริก .....	34
3.2.5 สร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกล .....	37
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	39
4.1 การศึกษาผลของตำแหน่งที่แตกต่างกันบนม้วนเหล็กต่อความหนาออกไซด์สเกล .....	39
4.2 การเก็บข้อมูลอุณหภูมิระหว่างเย็นตัวของม้วนเหล็กจากโรงงาน .....	41
4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	45
4.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน .....	45
4.3.2 การใช้แบบจำลองเพื่อกำหนดสภาวะการทดลอง .....	49
4.4 การจำลองการเกิดออกไซด์สเกลด้วยการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก .....	53
4.4.1 ออกซิเดชันภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ .....	53
4.4.2 ออกซิเดชันภายใต้สภาวะเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ .....	62
4.5 จำนวนย้อนกลับเพื่อประเมินความถูกต้องของผลการทดลอง .....	70
4.6 สมการทำนายปริมาณสเกล .....	71
4.7 ผลการวิเคราะห์ออกไซด์สเกลที่ผิวของชิ้นงาน .....	77
4.6.1 วิเคราะห์ออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นรีดร้อน เกรด HR1 .....	77
4.6.2 วิเคราะห์ออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นรีดร้อน เกรด HR1 ที่ผ่านการจำลองการเกิดออกซิเดชันด้วยเทคนิค TGA .....	79
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	87
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	88
เอกสารอ้างอิง .....	89
ภาคผนวก .....	91
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	94
ภาคผนวก ค.....	96
ภาคผนวก ง.....	97
ภาคผนวก จ.....	98
ภาคผนวก ฉ.....	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	112



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 ภาพแสดงกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อน.....	2
ภาพที่ 2.1 แผนภูมิสมมูลระหว่างเหล็กกับออกซิเจน .....	5
ภาพที่ 2.2 กลไกการเกิดออกไซด์สเกล .....	6
ภาพที่ 2.3 การชนกันของอนุภาคเพื่อสลายพันธะเก่า และสร้างพันธะใหม่ .....	14
ภาพที่ 2.4 พลังงานกระตุ้น .....	14
ภาพที่ 2.5 การแบ่งอิลิเมนต์สำหรับคำนวณการถ่ายเทความร้อน .....	17
ภาพที่ 2.6 อัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่งกลางความหนา, รอยต่อระหว่างสเกลกับเหล็ก และผิวสเกล ของเหล็กแผ่นหนา 25.4 มิลลิเมตร ที่คำนวณจากแบบจำลอง .....	17
ภาพที่ 2.7 แผนภาพแสดงชนิดของสเกลที่เปลี่ยนไปเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิມ้วนเก็บ และอัตราการเย็นตัว .....	18
ภาพที่ 2.8 a), b), c) จำลองการเกิดสเกลที่อุณหภูมิ 1173, 1223, 1273°C ตามลำดับ เป็นเวลา 10วินาที .....	19
ภาพที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของสเกลอันเป็นผลมาจากอุณหภูมิการມ้วนแตกต่างกัน .....	20
ภาพที่ 2.10 ความหนาสเกลกับรากที่สองของเวลา ที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000°C.....	22
ภาพที่ 2.11 ความหนาสเกลกับรากที่สองของเวลา ที่อุณหภูมิ 800 ของชิ้นงานที่เตรียมผิว ด้วยการขัด ละเอียด (จุดโปรง) กับชิ้นงานรีดร้อน (จุดทึบ).....	23
ภาพที่ 2.12 รูปแบบการแบ่งอิลิเมนต์สำหรับแบบจำลองแบบ 2มิติ ที่ความลึก z.....	24
ภาพที่ 2.13 น้ำหนักต่อพื้นที่ เทียบกับเวลาในการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสม Haynes230 ที่อุณหภูมิ 800 °C .....	25
ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงาน.....	26
ภาพที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก รุ่น Mettler-Toledo รุ่น TGA SDTA851 .....	28
ภาพที่ 3.3 ถ้วยใส่ชิ้นงานผลิตจากอลูมิเนียมออกไซด์ ความจุ 70ไมโครลิตร และถึงแก๊ส ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก .....	28
ภาพที่ 3.4 กล้องอินฟราเรด รุ่น LAND Cyclop T135 .....	29
ภาพที่ 3.5 ตำแหน่งของชิ้นงานตัวอย่างบนแผ่นเหล็ก.....	30
ภาพที่ 3.6 ตำแหน่งสำหรับการวัดอุณหภูมิด้วย infrared gun(A, B, C, 4, 5, 6) และกล้องอินฟราเรดจะทำการเก็บภาพภาคตัดขวางในระนาบ A, B, C .....	31

ภาพที่ 3.7	ชิ้นงานก่อนขัดลดขนาดและกำจัดออกไซด์สเกล และชิ้นงานที่เตรียมเสร็จแล้ว	....34
ภาพที่ 3.8	แผนภาพแสดงอุณหภูมิและบรรยากาศควบคุมภายในเตาระหว่างการทดลองด้วยสภาวะออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่	.....35
ภาพที่ 3.9	แผนภาพแสดงอุณหภูมิและบรรยากาศควบคุมภายในเตาระหว่างการทดลองด้วยสภาวะอัตราการเย็นตัวคงที่	.....36
ภาพที่ 4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาออกไซด์สเกลกับตำแหน่งบนม้วนเหล็ก	.....40
ภาพที่ 4.2	ภาพถ่ายความร้อนของม้วนเหล็กพร้อมระบุอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่สนใจ ภายหลังการเย็นตัวไปเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 40 นาที (160 นาที), ถ่ายโดยกล้องอินฟราเรดรุ่น LAND cyclop T135	.....41
ภาพที่ 4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 1, 3 และ 5 กับเวลาที่ใช้ในการเย็นตัว, วัดโดยกล้องอินฟราเรดรุ่น LAND cyclop T135	.....42
ภาพที่ 4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่ง A, B และ C กับเวลาที่ใช้ในการเย็นตัว, วัดโดยinfrared gun	.....42
ภาพที่ 4.5	เปรียบเทียบอุณหภูมิของตำแหน่ง A, B และ C (ตำแหน่งบนแกน x) กับตำแหน่งที่ห่างจากจุดศูนย์กลางเท่ากันในแกน y, (สีแดง)ค่าอุณหภูมิของตำแหน่งบนแกน y (สีน้ำเงิน)ค่าอุณหภูมิของตำแหน่งบนแกน x	.....43-44
ภาพที่ 4.6	ภาพจำลองอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆบนระนาบ z=0 ที่เวลา 180 นาที	.....45
ภาพที่ 4.7	แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	.....46
ภาพที่ 4.8	ภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ	.....47
ภาพที่ 4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ณ ตำแหน่ง A, B และ C เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณ(น้ำเงิน) กับค่าจากการวัด(แดง) บนระนาบ z=0 โดยกำหนดอุณหภูมิมีวนเก็บเท่ากับ 560°C	.....48-49
ภาพที่ 4.10	กราฟอัตราการเย็นตัว (เส้นสีน้ำเงิน) และอุณหภูมิ (เส้นสีน้ำตาล) ของตำแหน่ง A, B และ C บนระนาบ z=0, คำนวณโดยใช้ อุณหภูมิมีวนเก็บเท่ากับ 560 °C	.....50-51
ภาพที่ 4.11	กราฟอัตราการเย็นตัวเฉลี่ย (คงที่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ) ในลักษณะขั้นบันได ของตำแหน่ง A, B และ C บนระนาบ z=0, คำนวณโดยใช้อุณหภูมิมีวนเก็บเท่ากับ 560 °C	.....52-53
ภาพที่ 4.12	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก สำหรับสภาวะ Isothermal oxidation ที่อุณหภูมิ 700, 650, 600, 560, 500 และ 400 °C	.....54

ภาพที่4.13a-e) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $W^n$ กับเวลา (t) ของการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเท่ากับ 400, 500, 560, 600 และ 650 ตามลำดับ.....	55-57
ภาพที่4.14 แสดงค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ.....	59
ภาพที่4.145a-e) ภาพโครงสร้างจุลภาคแสดงความหนาออกไซด์สเกลที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 2 และ 6 ชั่วโมง, 500 °C เป็นเวลา 2 และ 6 ชั่วโมง, 560 °C เป็นเวลา 2, 4 ชั่วโมง และ 600 °C เป็นเวลา 2, 6 ชั่วโมง ตามลำดับ, กำลังขยาย 1200 เท่า.....	61-62
ภาพที่4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เปลี่ยนไปเป็นฟังก์ชันของเวลาในการเกิดการออกซิเดชันภายใต้สภาวะ Non-isothermal ที่อัตราการเย็นตัว 0.6, 3.6, 9.0 และ 10.4 °C/min .....	63
ภาพที่4.17a-h) กราฟระหว่าง $(n-1)\ln W + \ln(dW/dT)$ กับ $1/T$ ของการจำลองการเกิดออกซิเดชันภายใต้สภาวะเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่เท่ากับ 0.6, 1.8, 3.6, 5.4, 6.0, 7.2, 9.0 และ 10.4 °C/นาที่ ตามลำดับ.....	64-67
ภาพที่4.18a-c) เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิม้วนเก็บต่อความหนาชั้นออกไซด์สเกลที่เกิดบนผิวชิ้นงานจำลองการเกิดออกซิเดชันภายใต้สภาวะการเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ 3.6, 7.2, 9.0 °C/นาที่ จากอุณหภูมิ 560, 630 และ 700 °C (กำลังขยาย 1200 เท่า) .....	68-69
ภาพที่4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์สเกลกับอัตราการเย็นตัวและอุณหภูมิม้วนเก็บ(CT) .....	70
ภาพที่4.20 กราฟระหว่างน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ (W) ที่เปลี่ยนไปเมื่อเวลาในการออกซิเดชันเพิ่มขึ้น .....	74
ภาพที่4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์สเกลกับอัตราการเย็นตัวและอุณหภูมิม้วนเก็บ .....	67
ภาพที่4.21 ชนิดของ oxide บริเวณขอบแผ่น. ....	77
ภาพที่4.22 ชนิดของ oxide บริเวณ 1/4 ความกว้างของแผ่น.....	78
ภาพที่4.23 ชนิดของ oxide บริเวณกึ่งกลางแผ่น.....	78
ภาพที่4.24 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 0.6 °C/นาที่, fixed angle = 1 .....	79

ภาพที่ 4.25 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 0.6 °C/นาที, fixed angle = 3 .....	80
ภาพที่ 4.26 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 0.6 °C/นาที, fixed angle = 5 .....	80
ภาพที่ 4.27 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 6 °C/นาที, fixed angle = 1 .....	81
ภาพที่ 4.28 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 6 °C/นาที, fixed angle = 3 .....	81
ภาพที่ 4.29 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 6 °C/นาที, fixed angle = 5 .....	82
ภาพที่ 4.30 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 10.4 °C/นาที, fixed angle = 1 .....	82
ภาพที่ 4.31 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 10.4 °C/นาที, fixed angle = 3 .....	83
ภาพที่ 4.32 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 10.4 °C/นาที, fixed angle = 5 .....	83
ภาพที่ 4.33 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่ออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่ 500 °C , fixed angle = 1 .....	84
ภาพที่ 4.34 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่ออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่ 500 °C , fixed angle = 3 .....	84
ภาพที่ 4.35 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่ออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่ 600 °C , fixed angle = 1 .....	85
ภาพที่ 4.36 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่ออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่ 600 °C , fixed angle = 3 .....	85
ภาพที่ 4.37 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่ออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่ 600 °C , fixed angle = 5 .....	86
ภาพที่ ๑ก ภาพแสดงรูปจำลองม้วนเหล็กในแบบ 3 มิติ (Domain), จุดต่อ และอิลิเมนต์ .....	92
ภาพที่ ๑ค กราฟแสดงค่า Thermal conductivity ที่เป็น function กับอุณหภูมิ .....	96
ภาพที่ ๑จ ภาพถ่ายความร้อนของม้วนเหล็กพร้อมระบุอุณหภูมิ .....	98
ภาพที่ ๒จ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ณ ตำแหน่ง A เปรียบเทียบระหว่าง ค่าจากการคำนวณ (น้ำเงิน) กับค่าจากการวัด (แดง) .....	105

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ธาตุผสมในเหล็กแผ่นรีดร้อนเกรด HR1.....	29
ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพและความร้อนของเหล็ก และค่าคงที่ของม้วนเหล็กที่ศึกษา ...	33
ตารางที่ 4.1 ความหนาเฉลี่ยของออกไซด์สเกลที่ตำแหน่ง H1-5, M1-5 และ T1-5 .....	39
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่ปฏิกิริยา (ความชัน, $k$ ), $\ln k$ และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) .....	58
ตารางที่ 4.3 พลังงานกระตุ้น, ค่าคงที่ และค่าคงที่ปฏิกิริยาของแต่ละอัตราการเย็นตัว ( $k$ ) .....	68
ตารางที่ 4.4 คำนวณหาน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเทียบกับผลจากการทดลองของอัตราการเย็นตัว (Non-isothermal) .....	70
ตารางที่ 4.5 คำนวณหาน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเทียบกับผลจากการทดลองของอัตราการเย็นตัว (Isothermal).....	71
ตารางที่ 4.6 รูปแบบการเย็นตัวในลักษณะขั้นบันไดของอัตราการเย็นตัวคงที่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ ของตำแหน่ง A .....	72
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงการคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยพื้นที่ ของการเย็นตัวตำแหน่ง A แบบที่ 1 .....	72
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงการคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยพื้นที่ ของการเย็นตัวตำแหน่ง A แบบที่ 2 .....	73
ตารางที่ 4.9 รูปแบบการเย็นตัวในลักษณะขั้นบันไดของอัตราการเย็นตัวคงที่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ ของตำแหน่ง C .....	75
ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงการคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยพื้นที่ ของรูปแบบการเย็นตัวในตำแหน่ง C แบบที่ 1.....	75
ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงการคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยพื้นที่ ของการเย็นตัวตำแหน่ง C แบบที่ 2.....	76
ตารางที่ ๑๖ แสดงความหนาสเกลก่อนการเฉลี่ย จากการทดลอง 4.1 .....	94-95
ตารางที่ ๑๗ Thermal conductivity ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ .....	96
ตารางที่ ๑๘ เปรียบเทียบตำแหน่ง 1 กับ 8.....	99-100
ตารางที่ ๑๙ เปรียบเทียบตำแหน่ง 3 กับ 7.....	101-102
ตารางที่ ๒๐ เปรียบเทียบตำแหน่ง 5 กับ 6.....	103-104
ตารางที่ ๒๑ ตำแหน่ง A เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณ กับค่าจากการวัด .....	105
ตารางที่ ๒๒ ตำแหน่ง B เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณ กับค่าจากการวัด .....	106

ตารางที่ ๖จ ตำแหน่งC เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณ กับค่าจากการวัด .....	106
ตารางที่ ๗จ การเขียนตัวที่ตำแหน่ง A.....	107
ตารางที่ ๘จ การเขียนตัวที่ตำแหน่ง B.....	108
ตารางที่ ๙จ การเขียนตัวที่ตำแหน่ง C.....	109

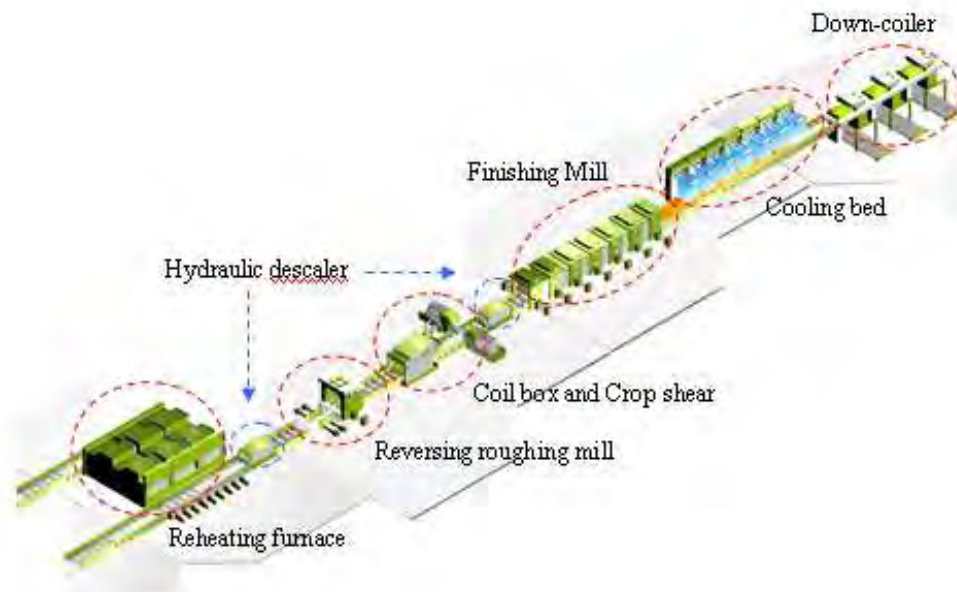
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ในกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักหลายขั้นตอน ได้แก่ อบเหล็กแท่งแบน (Slab) ในเตาเผา (Reheating furnace) ที่ให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ 1250-1300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการรีดเป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง จากนั้นเหล็กแท่งแบนที่มีอุณหภูมิตามต้องการจะถูกทำความสะอาดผิวด้วยการฉีดน้ำแรงดันสูง (Hydraulic descaler) เพื่อกำจัดออกไซด์สเกลปฐมภูมิ (Primary scale) ที่เกิดขึ้นที่ผิวเหล็กแท่งแบนที่สัมผัสกับอากาศในขณะที่มีอุณหภูมิสูง จากนั้นเหล็กแท่งแบนที่กำจัดออกไซด์สเกลปฐมภูมิออกแล้วถูกรีดเพื่อลดความหนาด้วยเครื่องรีดหยาบ (Reversing roughing mill) และลดความกว้างด้วยเครื่องรีดขอบ (Vertical edger) โดยจะถูกรีดกลับไปมา 5-7 ครั้ง เพื่อให้ได้ความหนาและความกว้างที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการต่อไป เหล็กแท่งแบนที่ถูกรีดแล้วนี้เรียกว่าเหล็กแผ่นหนา (Steel bar) เนื่องจากเหล็กแผ่นหนาที่ถูกรีดนี้จะยาวขึ้น และบางลงเมื่อเทียบกับเหล็กแท่งแบน ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศเพื่อถ่ายเทความร้อนมากขึ้น อุณหภูมิของเหล็กแผ่นหนาจึงไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น ดังนั้นเครื่องมือม้วนพัก (Coil box) จึงมีหน้าที่ในการม้วนเหล็กแผ่นหนาเพื่อลดพื้นที่ผิว และทำให้เหล็กแผ่นหนามีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั้งแผ่นจากการถ่ายเทความร้อนแก่กัน (Heat conduction) เครื่องตัด (Crop shear) ทำหน้าที่ตัดส่วนหัว และปลายของเหล็กแผ่นหนาซึ่งเป็นบริเวณที่สูญเสียความร้อนมากกว่าบริเวณอื่น จากนั้นผ่านเครื่องฉีดน้ำแรงดันสูงเพื่อกำจัดออกไซด์สเกลทุติยภูมิ (Secondary scale) ก่อนเข้าสู่กระบวนการต่อไป เครื่องรีดละเอียด (Finishing mill) ทำหน้าที่รีดลดความหนาของเหล็กแผ่นหนาเป็นเหล็กแผ่นบาง (Strip) ที่มีความหนาตามต้องการ จากนั้นเหล็กแผ่นบางจะผ่านเครื่องระบายความร้อนด้วยน้ำ (Cooling bed) เพื่อลดอุณหภูมิ และรักษาโครงสร้างทางโลหวิทยา รวมทั้งสมบัติทางกายภาพของเหล็กแผ่นบาง หลังจากนั้นเหล็กแผ่นบางจะถูกม้วนด้วยเครื่องมือม้วนเหล็กแผ่น (Down-coiler) รัดด้วยแถบเหล็ก (Strapping band) แล้วนำไปพักรอให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับบรรยากาศปกติ เป็นผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (Hot rolled coil) <sup>[1]</sup>

ออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนมีชื่อเรียกต่างกันไป ได้แก่ ออกไซด์สเกลปฐมภูมิ และออกไซด์สเกลทุติยภูมิ ซึ่งถูกกำจัดโดยการฉีดน้ำแรงดันสูงก่อนจะเข้าสู่กระบวนการถัดไป และออกไซด์สเกลตติยภูมิ (Tertiary scale) ซึ่งเกิดระหว่าง และภายหลังกระบวนการรีดละเอียดแต่ละไม่ถูกกำจัดทั้งยังถูกม้วนไปพร้อมกับผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อนอยู่ในม้วนเหล็ก และระหว่างการเย็นตัวของม้วนเหล็ก ออกไซด์สเกลชนิดนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างต่างๆกันไปอีกด้วย



ภาพที่ 1.1 ภาพแสดงกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อน<sup>[1]</sup>

เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อนอาจส่งขายเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อน หรือผ่านกระบวนการรีดเย็นเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดเย็น ออกไซด์สเกลตติขุมิจึงส่งผลเสียได้ทั้งต่อคุณภาพของผิวผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อนเอง หรือเพิ่มภาระในการกำจัดออกที่กระบวนการรีดผิวเรียบ (Skin-pass) และกระบวนการล้างผิวเหล็กด้วยสารละลายกรด (Pickling process) ดังนั้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพผิวของผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อน และลดภาระการกำจัดออกไซด์สเกลที่กระบวนการรีดเย็น การศึกษาการเกิด ชนิด และโครงสร้างของออกไซด์สเกลที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในม้วนเหล็ก รวมถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิด ชนิด และโครงสร้างของออกไซด์สเกลตติขุมิเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยในการปรับปรุงสภาวะของกระบวนการรีดร้อน และช่วยในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการล้างผิวเหล็กด้วยสารละลายกรด รวมถึงสามารถนำผลวิเคราะห์ของข้อมูลไปสร้างสมการทำนายความหนาของออกไซด์สเกลที่ตำแหน่ง และเวลาต่างๆ อีกด้วย

เพื่อศึกษาการเกิด ชนิด และโครงสร้างของออกไซด์สเกล รวมถึงผลของอุณหภูมิ เวลา และอัตราการเย็นตัว ต่อปริมาณของออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้น จึงทำการทดลองจำลองการเกิดออกไซด์สเกลด้วยการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermal gravimetric analysis) ประกอบการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทราบค่าอุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่งต่างๆ ในม้วนเหล็ก เพื่อนำไปใช้เป็นสภาวะศึกษาด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก ซึ่งข้อจำกัดของการวัดอุณหภูมิโดยตรงอย่างหนึ่งก็คือ สามารถวัดอุณหภูมิได้เฉพาะผิวด้านนอก ผิวด้านใน และขอบด้านข้างของม้วนเหล็กเท่านั้น แต่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งภายในม้วนเหล็กได้ จึงต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์



อิทธิพล เพื่อใช้ในการจำลองการเย็นตัวของมวลเหล็กในช่วงกระบวนการม้วนเก็บ และเย็นตัวในบรรยากาศ ทำให้สามารถระบุค่าอุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่งต่างๆภายในมวลเหล็กได้

ด้วยการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริกประกอบกับข้อมูลอุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัวที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทำให้สามารถศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราการเย็นตัว และเวลาต่อปริมาณของออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้น รวมทั้งสามารถนำผลวิเคราะห์ของข้อมูลไปใช้สร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง และเวลาต่างๆระหว่างการม้วนเก็บ และเย็นตัวในบรรยากาศ โดยใช้เวลา และค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการศึกษาในกระบวนการจริง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความรู้เกี่ยวกับกระบวนการเกิดออกไซด์สเกล ชนิด และโครงสร้างของออกไซด์สเกล ทั้งในเชิงทฤษฎี และในกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อน
- 1.2.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถระบุค่าอุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่งต่างๆภายในมวลเหล็ก เพื่อใช้ในการกำหนดสภาวะการทดลองเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo-gravimetric analysis)
- 1.2.3 ศึกษาผลของ อุณหภูมิ ม้วนเก็บ อัตราการเย็นตัว และเวลาต่อปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้น โดยทำการทดลองจำลองการเกิดออกไซด์สเกลด้วยการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก
- 1.2.4 สร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้น ระหว่างการเย็นตัวภายหลังการม้วนเก็บที่ตำแหน่ง และเวลาที่สนใจ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเกิด ชนิดของออกไซด์สเกล และปริมาณออกไซด์สเกลตติยภูมิที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานเหล็กแผ่นรีดร้อนเกรด HR1 ระหว่างการม้วนเก็บ และเย็นตัวในบรรยากาศภายหลังการม้วนเก็บ โดยมีขอบเขตการศึกษาวิจัย ดังนี้

- 1.3.1 ศึกษา และเก็บข้อมูลเกี่ยวกับชนิด และโครงสร้างของออกไซด์สเกลตติยภูมิ จากงานวิจัยก่อนหน้า และชิ้นงานจริงจากโรงงาน
- 1.3.2 เก็บข้อมูลจริงจากโรงงานในส่วนของอุณหภูมิของมวลเหล็ก ระหว่างการเย็นตัวในบรรยากาศภายหลังการม้วนเก็บ รวมถึงเงื่อนไขเริ่มต้น และเงื่อนไขขอบเขตที่จำเป็นสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- 1.3.3 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ที่สามารถระบุค่าอุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่งต่างๆภายในม้วนเหล็ก เพื่อใช้ในการกำหนดสภาวะการทดลองเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA)
- 1.3.4 จำลองการเกิดออกไซด์สเกลด้วยการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก โดยใช้ผลจากการคำนวณเป็นตัวกำหนดสภาวะการทดลอง (1) การเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ (Non-isothermal oxidation) และ (2) สภาวะอุณหภูมิกคงที่ (Isothermal oxidation)
- 1.3.5 สร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกล ที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวภายหลังการม้วนเก็บ ที่ตำแหน่ง และเวลาที่สนใจของม้วนเหล็กที่มีเงื่อนไขเริ่มต้น และเงื่อนไขขอบเขตเดียวกันกับข้อมูลจริงจากโรงงาน โดยใช้ผลวิเคราะห์ของข้อมูลจากการทดลอง

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้รับความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิด ชนิด โครงสร้าง และการเปลี่ยนแปลงของสเกลตติยภูมิในกระบวนการม้วนเก็บ และเย็นตัว
- 1.4.2 ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณสเกลตติยภูมิที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็กแผ่น
- 1.4.3 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่สามารถระบุค่าอุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่งต่างๆภายในม้วนเหล็ก
- 1.4.4 สามารถใช้การวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก เพื่อจำลองการเกิดออกไซด์ชั้นได้
- 1.4.5 สร้างสมการสำหรับทำนายน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น หรือความหนาของออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการรีดต่างๆกัน

## บทที่ 2

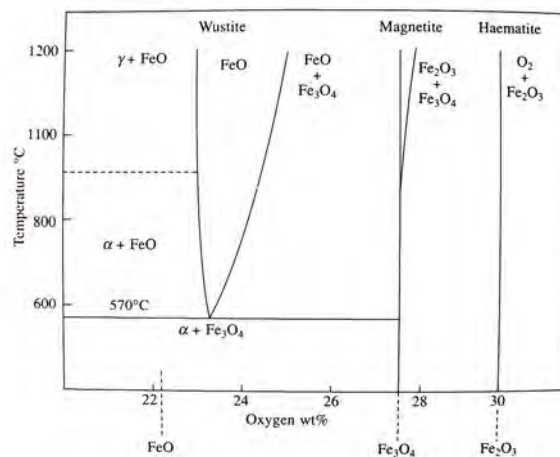
### การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

เพื่อกำหนดแนวทางในการวิจัย การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นทั้งในภาคทฤษฎี และงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ในบทนี้ได้กล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการเกิดชนิด และโครงสร้างของออกไซด์สเกล, กลไกการถ่ายเทความร้อนจากม้วนเหล็ก, โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์, เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิจัย และจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกไซด์สเกลซึ่งจะใช้ในการคำนวณค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาและสร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลต่อไป รวมทั้งได้รวบรวมงานวิจัยที่คล้ายคลึงกับงานวิจัยชิ้นนี้ไว้ในตอนท้ายของบทอีกด้วย

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการเกิด ชนิด และโครงสร้างของออกไซด์สเกล

##### 2.1.1 แผนภูมิสมดุลระหว่างเหล็กกับออกซิเจน

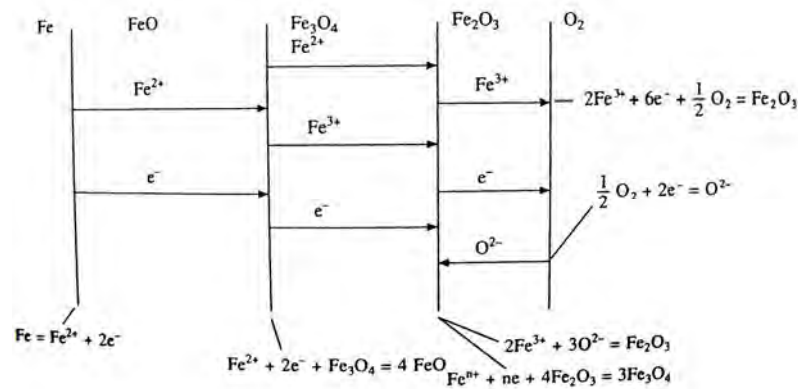
จากภาพที่ 2.1 แสดงแผนภูมิสมดุลระหว่างเหล็กกับออกซิเจน สเกลที่เกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 570 °C ประกอบไปด้วย เฮมาไทต์, แมกนีไตต์ และวูสไตต์ เมื่ออุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆ ใกล้เคียงภาวะสมดุล วูสไตต์ซึ่งไม่เสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 570 °C จะเกิดปฏิกิริยายูเทคตอยด์ (Eutectoid reaction) เปลี่ยนเฟสกลายเป็นเหล็กแอลฟา ( $\alpha$ -Fe) และแมกนีไตต์ จากนั้นระหว่างการเย็นตัวถ้าปริมาณออกซิเจนในแมกนีไตต์เพิ่มสูงขึ้น โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างแมกนีไตต์กับอะตอมออกซิเจน แมกนีไตต์อาจถูกออกซิไดซ์ (Oxidize) กลายเป็นเฮมาไทต์ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลระหว่างเหล็กกับออกซิเจน [2], [3]

### 2.1.2 กลไกการเกิดออกไซด์สเกล

กลไกการเกิดออกไซด์สเกลบนเหล็กบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $570\text{ }^{\circ}\text{C}$  สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการแพร่ของอะตอมเหล็ก, ออกซิเจน อิเล็กตรอน-โฮล (Electron hole) และช่องว่างในผลึก (Vacancy) จากภาพที่ 2.2 ที่ผิวรอยต่อของเหล็กกับวูสไตต์เหล็กแตกตัวเป็น อีออน ตามสมการ (ก)



ภาพที่ 2.2 กลไกการเกิดออกไซด์สเกลของเหล็ก ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $570\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2]

จากนั้นอีออนของเหล็ก และอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ผ่านชั้นวูสไตต์ไปโดยอาศัยช่องว่างในผลึก และอิเล็กตรอน-โฮลตามลำดับ จะรีดิวซ์ (Reduce) แมกนีไตต์ที่ผิวรอยต่อระหว่างชั้นวูสไตต์กับแมกนีไตต์ ตามสมการ (ข) เป็นกลไกการเพิ่มความหนาของชั้นวูสไตต์



อีออนของเหล็ก และอิเล็กตรอนที่มากเกินไปสำหรับปฏิกิริยา (ข) จะเคลื่อนที่ต่อไปผ่านชั้นแมกนีไตต์จนถึงผิวรอยต่อระหว่างชั้นแมกนีไตต์กับเฮมาไตต์ และเกิดปฏิกิริยารีดักชันเปลี่ยนเฮมาไตต์เป็นแมกนีไตต์ตามสมการ (ค) ซึ่งเป็นการเพิ่มความหนาของชั้นแมกนีไตต์



อีออนของเหล็กสามารถเคลื่อนที่ในชั้นเฮมาไตต์ได้โดยอาศัย iron ion vacancies ร่วมกับอิเล็กตรอน ไปเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ผิวด้านนอกซึ่งติดกับอากาศ และเกิดเป็นเฮมาไตต์ที่หนาขึ้น ตามสมการ (ง)



ในขณะเดียวกัน ออกซิเจนที่ผิวรอยต่อระหว่างชั้นเฮมาไตต์กับอากาศก็สามารถแตกตัวเป็นอีออนของออกซิเจน และเคลื่อนที่ย้อนกลับเข้าไปผ่านชั้นเฮมาไตต์และทำปฏิกิริยากับ

อิออนของเหล็ก และอิเล็กตรอนที่มากเกินไปสำหรับปฏิกิริยาในสมการ (ค) เกิดเป็นเฮมาไตต์ตามสมการ (จ)



## 2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

กลไกการถ่ายเทความร้อน มีอยู่ 3 วิธี คือ การนำความร้อน (Conduction), การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ดังนี้

### 2.2.1 การนำความร้อน

ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่งๆ (ตัวกลางที่อยู่นิ่ง) หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยอาศัยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลโดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า สมการที่อธิบายกลไกการนำความร้อนได้แก่ กฎของฟูรีเยร์ (Fourier's law) ดังนี้

$$q_x = -k \left( \frac{dT}{dx} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $q_x$  คือ ฟลักซ์ความร้อนในทิศทาง x, [J/m<sup>2</sup> s]

$k$  คือ ค่าการนำความร้อน, [W/m °C]

$\left( \frac{dT}{dx} \right)$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองบริเวณในทิศทาง x

ฟลักซ์ความร้อนจะแปรผันตามความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองบริเวณ และค่าการนำความร้อน ดังสมการที่ 2.1 หรือสามารถเขียนในรูปสมการการถ่ายเทความร้อนพิกัดคาร์ทีเซียน (Heat flow equation, Fourier's second law) ซึ่งใช้ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของมวลเหล็กในงานวิจัยนี้ ดังนี้

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\frac{\partial T}{\partial t}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลา

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุ

$C_p$  คือ ความจุความร้อน

$k$  คือ ค่าการนำความร้อน, [W/m °C]

### 2.2.2 การพาความร้อน

ปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนเกิดการถ่ายเทจากผิววัตถุไปยังของไหล หรือตัวกลางที่มีการเคลื่อนที่รอบผิววัตถุดังกล่าว การคำนวณฟลักซ์ความร้อนสามารถทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการของนิวตัน (Newton's law of cooling/heating) ซึ่งใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากมวลเหล็ก ดังนี้

$$q_s = h(T_s - T_f) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $q_s$  คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิววัตถุ  
 $h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (หมายถึงพลังงานความร้อนที่วัตถุส่งผ่านไปยังของไหลต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยอุณหภูมิ), [W/m<sup>2</sup> °C]  
 $T_s, T_f$  คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ และอุณหภูมิของของไหลตามลำดับ

### 2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน โดยการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ผ่านตัวกลางหรือบรรยากาศ สมการอธิบายกลไกการแผ่รังสีความร้อนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์ความร้อนกับความแตกต่างของอุณหภูมิยกกำลังสี่ (Stefan-Boltzmann law) ดังสมการที่ 2.4 และสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน<sup>[4]</sup> ได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.5

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (2.4)$$

$$h_r = \frac{q_{rad}}{T_s - T_{surr}} = \sigma\varepsilon \left( \frac{T_s^4 - T_{surr}^4}{T_s - T_{surr}} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $q_{rad}$  คือ ฟลักซ์ความร้อนของการแผ่รังสีความร้อน  
 $\varepsilon$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน  
 $\sigma$  คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann มีค่า  $5.6703 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup> °C<sup>4</sup>  
 $T_s$  คือ อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ  
 $T_{surr}$  คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม  
 $h_r$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน

### 2.3 กลไกการถ่ายเทความร้อนของม้วนเหล็กระหว่างการเย็นตัวภายหลังการม้วนเก็บ

การเย็นตัวของม้วนเหล็กประกอบด้วยกลไกการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 แบบ แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งของม้วนเหล็ก กล่าวคือ การถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเหล็กแผ่นเป็นแบบการนำความร้อน ในขณะที่ผิวด้านนอก, ผิวด้านใน, ช่องอากาศระหว่างชั้นเหล็ก (Air gap) และด้านข้างของม้วนเหล็กที่สัมผัสกับอากาศจะเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน และม้วนเหล็กเป็นวัตถุร้อนจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน

ในการศึกษานี้จะสนใจกลไกการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการนำความร้อนแบบ 3 มิติ, การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $h_{total}$ ,  $h_t$ ) ซึ่งเป็นการรวมสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน ( $h$ ) เข้ากับ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน<sup>[4]</sup> ( $h_r$ )

$$h_t = h + h_r \quad (2.6)$$

### 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับศึกษาการเย็นตัวของม้วนเหล็ก (Mathematical model)

ในการศึกษารูปแบบการเย็นตัวของม้วนเหล็ก โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ด้วยโปรแกรม Flex PDE สมการที่เกี่ยวข้องกับปัญหาได้แก่สมการที่ 2.1-2.4 ในการศึกษานี้จะสนใจกลไกการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการนำความร้อน, การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $h_{total}$ ) ซึ่งสมการหลักที่ใช้ในโปรแกรม Flex PDE ได้แก่

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{และ}$$

$$q_s = h_{total} (T_s - T_f) \quad \text{เงื่อนไขขอบเขต}$$

เมื่อ  $\frac{\partial T}{\partial t}$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลา

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของวัสดุ

$C_p$  คือ ความจุความร้อน

$k$  คือ ค่าการนำความร้อน, [W/m °C]

$q_s$  คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิววัตถุ

$h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (หมายถึงพลังงานความร้อนที่วัตถุส่งผ่านไปยังของไหลต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยอุณหภูมิ), [W/m<sup>2</sup> °C]

$T_s, T_f$  คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ และอุณหภูมิของของไหลตามลำดับ

ข้อมูลที่ต้องใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แก่ ขนาดของม้วนเหล็ก, ค่าคงที่ของวัสดุ (ความหนาแน่น, ความจุความร้อน, ความสามารถในการนำความร้อน), เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition), เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition; อุณหภูมิเริ่มต้นในการศึกษา ในที่นี้หมายถึงอุณหภูมิมีวนเก็บ; Coiling temperature และอุณหภูมิอากาศโดยรอบ) เพื่อใช้ในการสร้างรูปจำลองของม้วนเหล็ก ประกอบการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพื่อคำนวณในสมการที่ 2.2 โดยมีสมการที่ 2.3 เป็นเงื่อนไขขอบเขต และแสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัวกับเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ ในแบบจำลอง

## 2.5 การวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo-gravimetric analysis)

วิธีการทดลองที่นิยมใช้เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกไซด์สเกลของโลหะจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก มี 2 แบบ ได้แก่ การเก็บข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Continuous method) และการเก็บข้อมูลเฉพาะก่อนและหลังการทดลอง (Discontinuous method) ซึ่งวิธีการหลังนี้สามารถทำได้ง่าย และไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีเทคโนโลยีสูง โดยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนทำการทดลอง และชั่งน้ำหนักชิ้นงานอีกครั้งหนึ่งภายหลังการทดลอง แล้วหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีข้อเสียอยู่บ้าง คือ ได้ข้อมูลเพียง 2 ค่าต่อการทดลอง และไม่อาจทราบได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกระหว่างที่เกิดการออกซิเดชันอยู่นั้นมีรูปแบบของการเพิ่มหรือลดเป็นอย่างไร ดังนั้นวิธีการที่สะดวก และมีประสิทธิภาพมากกว่าอย่างการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo-gravimetric analysis) จึงมีบทบาทในการทดลองสาขานี้มากขึ้น<sup>[5]</sup>

วิธีการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริกที่มีหลักการพื้นฐาน คือ การวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป (เกิดปฏิกิริยาการเกิดออกไซด์สเกล) จุดเด่นของวิธีการนี้ คือ ชิ้นงานขนาดเล็กจึงเย็นตัวเร็ว ประหยัดพลังงาน และเวลาทำให้สามารถศึกษาได้หลายสถานะ สถานะที่นิยมศึกษาแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่ การศึกษาการเกิดสเกลที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal oxidation) และวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนไปเป็นฟังก์ชันกับเวลา ซึ่งนิยมสำหรับการศึกษาการเกิดสเกลของโลหะ<sup>[5]</sup> แบบที่สอง คือ ศึกษาในสถานะเย็นตัวอย่างต่อเนื่อง (Non-isothermal oxidation) จากนั้นนำข้อมูลน้ำหนักที่เปลี่ยนไปเมื่อเวลา และอุณหภูมิเปลี่ยนไปมาสร้างเป็นความสัมพันธ์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกไซด์สเกลต่อไป

## 2.6 จลนพลศาสตร์ของการเกิดสเกล (Kinetics of oxidation)

เนื่องจากการศึกษาเฉพาะพลศาสตร์ความร้อน (Thermodynamics) อย่างเดียวไม่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์อัตราการเกิดออกไซด์สเกล ดังนั้นการศึกษาด้านจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกไซด์สเกล (Kinetics of oxidation) จึงมีความสำคัญสำหรับการวิเคราะห์อัตราการเกิดปฏิกิริยา



วิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกไซด์สเกลของโลหะได้แก่ วิธีการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo-gravimetric analysis)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเวลา หรือ กฎอัตรา (Rate law) ที่พบบ่อยมี 4 ประเภท <sup>[2],[3]</sup> ได้แก่

#### 2.6.1 แบบเส้นตรง

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับเวลาเป็นสมการเส้นตรง เกิดกับปฏิกิริยาที่ผิวหรือรอยต่อระหว่างเฟส เช่น สภาวะคงที่ของการเกิดออกไซด์สเกลที่ผิวรอยต่อของโลหะกับออกไซด์สเกล, กระบวนการแพร่ผ่านชั้นป้องกัน (Protective layer)

$$W^{n-1}[dW/dt] = k_n \quad (2.7)$$

อินทิเกรต เมื่อ  $n = 1$

$$W = k_n t + C \quad (2.7.1)$$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่  
 $t$  คือ เวลา  
 $k_n$  คือ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา

#### 2.6.2 แบบพาราโบลา (Parabolic oxidation)

เป็นลักษณะที่พบมากในโลหะและโลหะผสมที่อุณหภูมิค่อนข้างสูง โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผกผันกับความหนาของออกไซด์สเกล และน้ำหนักของออกไซด์สเกลที่เพิ่มขึ้น แบบพาราโบลา อธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.7.2 (อินทิเกรตสมการที่ 2.7 เมื่อ  $n = 2$ )

$$W[dW/dt] = k_n \quad (2.7.2)$$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่  
 $t$  คือ เวลา  
 $k_n$  คือ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา

$$k_n = B \exp(-Q/RT) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $B$  คือ ค่าคงที่  
 $t$  คือ อุณหภูมิ (K)  
 $Q$  คือ พลังงานกระตุ้น (activation energy)  
 $R$  คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant) มีค่าเท่ากับ 8.314 J/mol K

สำหรับสภาวะการเกิดสเกลที่อุณหภูมิคงที่ จากสมการที่ 2.7 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับเวลา ( $W$  vs.  $t$ ) หรือน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับรากที่สองของเวลา ( $W$  vs.  $t^{1/2}$ ) ของแต่ละอุณหภูมิ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) ดังนั้นเมื่อทำกราฟลักษณะเดียวกันนี้กับอุณหภูมิอื่นๆก็จะได้ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ จากสมการที่ 2.8 นำค่าค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆมาสร้างกราฟระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา กับอินเวิร์สของอุณหภูมิ ( $\ln k$  กับ  $1/T$ ) จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $-Q/R$  ความสัมพันธ์นี้สามารถทำให้หาค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดปฏิกิริยา (Activation energy,  $Q$ ) ได้<sup>[8]</sup>

สำหรับสภาวะอัตราการเย็นตัวคงที่ (Non-isothermal oxidation) อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ( $T$ ) อธิบายได้ดังสมการ

$$T = at + b \quad \text{หรือ} \quad dT = a dt \quad (2.9)$$

เมื่อ  $a$  คือ อัตราการเย็นตัว

$b$  คือ อุณหภูมิเริ่มต้น

เมื่อแทนค่าสมการที่ 2.8 และความสัมพันธ์ของอุณหภูมิตามสมการที่ 2.9 ลงในสมการที่ 2.7 แล้วจัดรูปจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$W^{n-1} \left( \frac{dW}{dt} \right) = k_n \quad (2.7)$$

$$k_n = B \exp \left( \frac{-Q}{RT} \right) \quad (2.8)$$

$$dT = a dt \quad (2.9)$$

แทนสมการที่ 2.8 และ 2.9 ลงใน สมการที่ 2.7 แล้วจัดรูป

$$W^{n-1} \left( \frac{dW}{dT/a} \right) = B \exp \left( \frac{-Q}{RT} \right)$$

$$W^{n-1} \left( \frac{dW}{dT} \right) = \frac{B}{a} \exp \left( \frac{-Q}{RT} \right) \quad (A)$$

take ln สมการ A

$$(n-1) \ln W + \ln \left( \frac{dW}{dT} \right) = \frac{-Q}{RT} + \ln \frac{B}{a} \quad (2.10)$$

สร้างกราฟระหว่าง  $(n-1) \ln W + \ln [dW/dT]$  กับ  $1/T$  ในสมการที่ 2.10 จะได้กราฟเส้นตรง ที่มีความชันเป็น  $-Q/R$  และสามารถหาค่าคงที่  $B$  ได้จากจุดตัดแกน จากนั้นนำค่า  $B$  และ  $-Q/R$  แทนลงในสมการที่ 2.7 เพื่อหาค่า  $k_n$

### 2.6.3 แบบลอการิทึม (Logarithmic law)

พบในกรณีการเกิดออกไซด์สเกลที่อุณหภูมิค่อนข้างต่ำ<sup>[5]</sup> มีลักษณะเฉพาะ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วในช่วงแรก และลดลงอย่างต่อเนื่อง อธิบายได้ด้วยสมการ

$$W = k_n \log t + A \quad \text{หรือ} \quad W^{-1} = k_n' \log t + B \quad (2.11)$$

เมื่อ  $W$  คือ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่  
 $t$  คือ เวลา  
 $k_n, k_n'$  คือ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา

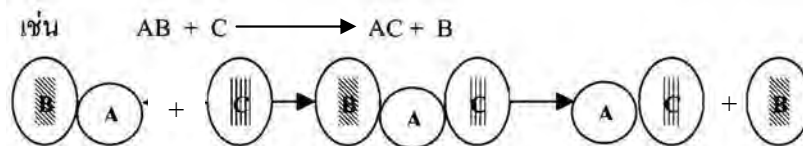
### 2.6.4 แบบผสม (Combination)

ปฏิกิริยาการเกิดสเกลในโลหะบางประเภทมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบผสม เช่น แบบผสมระหว่างแบบลอการิทึม และแบบพาราโบลิก (Cubic law อธิบายด้วยสมการที่ 2.7 โดยใช้ค่า  $n = 3$ ) เกิดที่อุณหภูมิต่ำ โดยปฏิกิริยาเป็นไปตามลอการิทึมในตอนแรก และเปลี่ยนเป็นพาราโบลิกในเวลาถัดมา และแบบผสมระหว่างแบบเส้นตรงกับ แบบพาราโบลิก โดยปฏิกิริยาเป็นไปตามแบบเส้นตรงในตอนแรก และเปลี่ยนเป็นพาราโบลิกในภายหลัง เช่น การเกิดสเกลบนโลหะ ช่วงแรกปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างรวดเร็ว โดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะตอมเหล็กกับอะตอมออกซิเจนเป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction control process) เกิดปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของออกซิเจนและอะตอมของเหล็กที่ผิวระหว่างเหล็กกับอากาศ เกิดเป็นชั้นออกไซด์กั้นระหว่างเนื้อเหล็กกับอากาศไว้ และทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงภายหลังซึ่งมีการแพร่เป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Diffusion control process)<sup>[5],[9]</sup> ในทางกลับกันปฏิกิริยาการเกิดสเกลบนผิวของชิ้นที่มีรอยแตกขนาดเล็ก (Microcracks) จะเป็นแบบพาราโบลิกแล้วเปลี่ยนเป็นแบบเส้นตรง (ปฏิกิริยาเร็วขึ้น) ในภายหลัง อันเป็นผลจากการที่ก๊าซสามารถแทรกซึมผ่านรอยแตกขนาดเล็กที่ผิวลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะเกิดสเกลขึ้นอย่างรวดเร็ว

## 2.7 แนวคิดเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยา ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยา และขั้นกำหนดอัตรา

ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไข 3 ประการ ดังนี้<sup>[20]</sup>

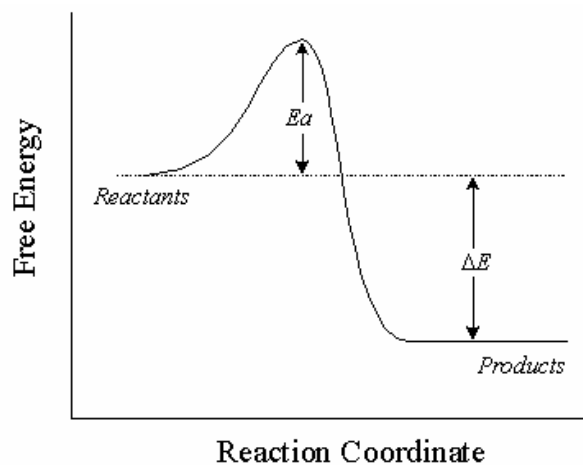
1. การชนกันของอนุภาคของสารตั้งต้น อนุภาคอาจเป็นโมเลกุล อะตอม หรือไอออน การชนกันที่เหมาะสมของอนุภาคจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี
2. ทิศทางการชน การชนกันของอนุภาคต้องอยู่ในทิศทางที่เหมาะสมเพื่อให้พันธะเก่า สลายตัว และเกิดพันธะใหม่ ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้น



ภาพที่ 2.3 การชนกันของอนุภาคที่สามารถก่อให้เกิดการสลายพันธะเก่า และสร้างพันธะใหม่

3. พลังงาน อนุภาคของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาต้องมีพลังงานเพียงพอในการทำให้พันธะเก่าที่ยึดเหนี่ยวอนุภาคไว้เข้าด้วยกันสลายตัว พลังงานนี้ต้องมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับพลังงานกระตุ้นสำหรับการเกิดปฏิกิริยา (Activation energy, พลังงานก่อกัมมันต์)

Activation Energy หรือพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) คือ พลังงานที่น้อยที่สุดที่เกิดจากการชนกันของอนุภาคแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยา มีหน่วยเป็น kcal/mol หรือ kJ/mol จากภาพที่ 2.4  $\Delta E$  คือ พลังงานที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยามีค่าเป็นลบเมื่อเป็นปฏิกิริยาคายพลังงาน และมีค่าเป็นบวกเมื่อเป็นปฏิกิริยาดูดพลังงาน



ภาพที่ 2.4 พลังงานกระตุ้น

ลักษณะสำคัญของพลังงานกระตุ้น

1. ปฏิกิริยาต่างชนิดกัน จะมีพลังงานกระตุ้นต่างกัน
2. ปฏิกิริยาที่มีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำ จะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าปฏิกิริยาที่มีพลังงานกระตุ้นสูง
3. พลังงานกระตุ้นไม่เกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ ค่าพลังงานกระตุ้นจะสูงหรือต่ำก็ได้เมื่อค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำ

ขั้นตอนหลักในการเกิดปฏิกิริยาการเกิดออกไซด์สเกลที่ผิวชิ้นงาน ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ได้แก่

1. อะตอมออกซิเจนเคลื่อนที่ในอากาศมาที่ผิวเหล็ก และอะตอมเหล็กเคลื่อนที่ในเนื้อเหล็กมายังผิวรอยต่อระหว่างเหล็กกับอากาศ
2. เกิดการ sorption อะตอมออกซิเจนที่ผิวเหล็ก
3. เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างอะตอมเหล็กกับอะตอมออกซิเจนที่ผิวรอยต่อระหว่างเหล็กกับอากาศ เกิดเป็นชั้นออกไซด์สเกลกั้นระหว่างเหล็กกับอากาศ
4. อะตอมของออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านชั้นออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นเพื่อเข้าทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอะตอมของเหล็ก

ซึ่งในทางทฤษฎี ขั้นตอนทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถเป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งสิ้น แต่โดยทั่วไปแล้วขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา จะจัดเป็น 1 ใน 2 ประเภท อันได้แก่ Surface control/ Reaction control หรือ Diffusion/ Transport control

#### 1. Surface Controlled Reactions

ปฏิกิริยา Dissolution และ Precipitation จัดเป็นปฏิกิริยาที่มีขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบ surface controlled ซึ่งลักษณะโดยทั่วไปของขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบนี้คือ มีอัตราการ dissolution ช้ากว่าอัตราการแพร่ และมักพบว่ามีพลังงานกระตุ้นสำหรับการเกิดปฏิกิริยา 12-17 kcal/mol หรืออยู่ในช่วง 50-72 kJ/mol และสูงกว่าพลังงานกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาที่เป็นลักษณะ diffusion control

#### 2. Diffusion control

เมื่ออัตราการแพร่ของอะตอมออกซิเจนผ่านชั้นออกไซด์สเกลมีค่าต่ำกว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ผิวแล้ว จะเกิดสภาวะอิมิตัวยิ่งยวดของอะตอมออกซิเจนที่ผิว และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการแพร่ของอะตอมออกซิเจนผ่านชั้นออกไซด์สเกล ลักษณะดังกล่าวนี้จัดเป็นปฏิกิริยาที่มีการแพร่เป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาประมาณ 5 kcal/mol หรือประมาณ 20 kJ/mol เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่มีขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบ surface controlled แล้วจะเห็นว่าค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำกว่ามาก

#### 3. แบบผสม

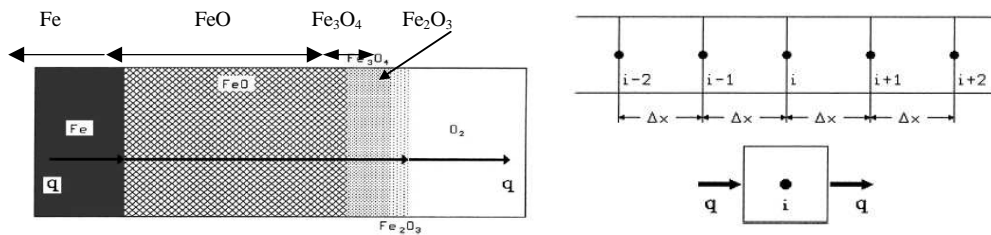
ในกรณีที่พลังงานกระตุ้นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วงระหว่าง 5-12 kcal/mol หรือ 20-50 kJ/mol จะถือว่าเป็นปฏิกิริยาที่มีทั้ง Surface Controlled Reactions และ Diffusion control เป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาการเกิดออกไซด์สเกลมี Surface Controlled Reactions เป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรก และ Diffusion control เป็นขั้นกำหนด

อัตราภายหลังการเกิดออกไซด์สเกลที่มีความหนาในระดับที่ทำให้อัตราการแพร่ช้ากว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอะตอมออกซิเจนกับอะตอมเหล็ก

## 2.8 ปรีทรศน์วรรณกรรม (Literature review)

ในกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักหลายขั้นตอน ออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนมีชื่อเรียกต่างกันไป ได้แก่ ออกไซด์สเกลปฐมภูมิ (Primary scale) เกิดขึ้นในเตาเผา (Reheating furnace) อันเป็นผลของบรรยากาศในเตาที่เอื้อต่อการเกิดออกไซด์สเกล ดังนั้นออกไซด์สเกลปฐมภูมิจึงมีความหนา 2-3 มิลลิเมตรโดยประมาณ อย่างไรก็ตาม ออกไซด์สเกลปฐมภูมิจะถูกกำจัดด้วยเครื่องฉีดน้ำแรงดันสูงที่ทางออกจากเตา ออกไซด์สเกลทุติยภูมิ (Secondary scale) เกิดขึ้นในช่วงกระบวนการรีดหยาบ (Roughing rolling) มีความหนาตั้งแต่ 10-20 ไมโครเมตร<sup>[5]</sup> และจะถูกกำจัดทั้งในระหว่างกระบวนการรีดหยาบโดยระบบฉีดน้ำแรงดันสูงที่ติดตั้งที่แท่นรีดหยาบ และภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการรีดหยาบ โดยระบบฉีดน้ำแรงดันสูงก่อนจะส่งเหล็กแท่งแบนที่ถูกรีดแล้วสู่กระบวนการรีดละเอียด ออกไซด์สเกลตติยภูมิ (Tertiary scale) เกิดระหว่าง และภายหลังกระบวนการรีดละเอียดซึ่งจะไม่ถูกกำจัดทั้งยังถูกม้วนไปพร้อมกับผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นรีดร้อน อยู่ในม้วนเหล็ก และระหว่างการเย็นตัวของม้วนเหล็ก ออกไซด์สเกลชนิดนี้ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างต่างๆกันไปโดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิม้วนเก็บ (Coiling temperature), อัตราการเย็นตัว (Cooling rate) และปริมาณออกซิเจน ดังนั้นจึงมีผู้สนใจศึกษาผลของอุณหภูมิรีดละเอียด, อุณหภูมิการม้วน, อัตราการเย็นตัว, ปริมาณออกซิเจน รวมถึงปัจจัยอื่นๆที่มีต่อโครงสร้างออกไซด์สเกล รวมถึงกระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของออกไซด์สเกลโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับออกไซด์สเกลตติยภูมิ

ในปี 1999 Martín Torres และ Rafael Colás<sup>[10]</sup> สร้างแบบจำลองสำหรับการนำความร้อนผ่านชั้นออกไซด์สเกลของเหล็กแผ่นรีดร้อนระหว่างการรีด ในช่วงอุณหภูมิ 1200 ถึง 900 °C โดยคิดการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ และสมมติให้รอยต่อของออกไซด์สเกลแต่ละชั้นไม่มีรูพรุน หรือช่องว่างระหว่างรอยต่อ แบบจำลองสร้างขึ้นโดยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference) โดยใช้จำนวน 60 อิลิเมนต์ แบ่งเป็นชั้นของเหล็กที่มีความหนาเท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาเหล็กแผ่น โดยสมมติให้การถ่ายเทความร้อนมีลักษณะสมมาตรทั้งด้านบน และด้านล่างของเหล็กแผ่น เท่ากับ 20 อิลิเมนต์, ชั้นวูสไตต์ (FeO) 36 อิลิเมนต์, ชั้นแมกนีไตต์ (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) 3 อิลิเมนต์ และเฮมาไตต์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 1 อิลิเมนต์

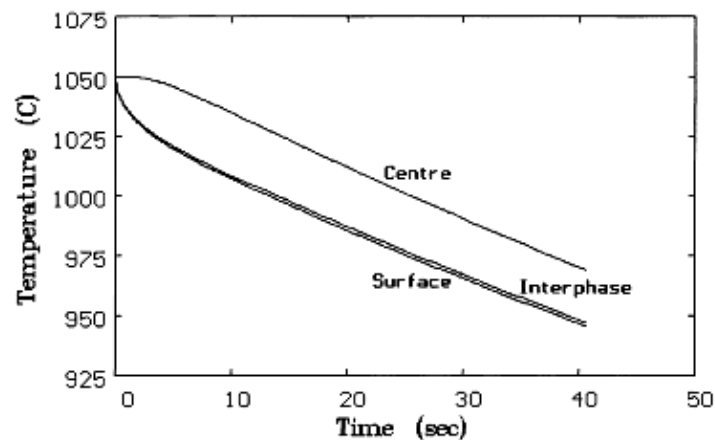


ภาพที่ 2.5 การแบ่งอิลิเมนต์สำหรับคำนวณการถ่ายเทความร้อน

สมการที่ใช้ในแบบจำลองประกอบด้วยสมการการนำความร้อนใน 1 มิติ, สมการการพาความร้อน และสมการการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2} \quad \text{และ} \quad \frac{q}{A} = h(T_s - T_\infty) \quad \text{และ} \quad \frac{q}{A} = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.12)$$

ภายหลังจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น และค่าคงที่ที่จำเป็นสำหรับแบบจำลอง (ใช้ค่าสมบัติทางกายภาพของออกไซด์สเกลที่ขึ้นกับอุณหภูมิ แต่สมบัติทางกายภาพของเหล็กเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ) จะสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ บนตำแหน่งต่างๆ ในชั้นออกไซด์สเกล และในเหล็กแผ่นได้ ดังตัวอย่าง

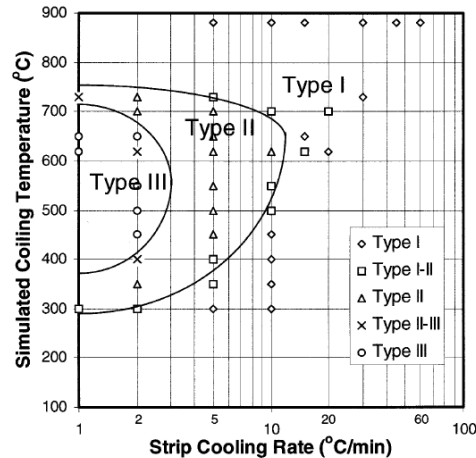


ภาพที่ 2.6 อัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่งกลางความหนา, รอยต่อระหว่างออกไซด์สเกลกับเหล็ก และผิวออกไซด์สเกล ของเหล็กแผ่นหนา 25.4 มิลลิเมตร ที่คำนวณจากแบบจำลอง

Martín Torres และ Rafael Colás สรุปว่าแบบจำลองนี้มีความแม่นยำเมื่อใช้กับออกไซด์สเกลที่มีความหนามาก เช่นออกไซด์สเกลปฐมภูมิ (Primary scale) แต่มีความซับซ้อนมากเกินไปเมื่อใช้กับออกไซด์สเกลบาง

ในปี 1999 R.Y. Chen และ W.D. Yuen<sup>[11]</sup> ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิม้วนเก็บ และอัตราการเย็นตัวต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของออกไซด์สเกลตติภูมิ ที่รอยต่อระหว่างวัสดุใต้

กับผิวเหล็ก ภายใต้สภาวะเย็นตัวแบบต่อเนื่อง (Continuous cooling) โดยใช้ชิ้นงานเหล็กแผ่นรีดเย็น 0.06% คาร์บอน, 0.25% แมงกานีส หนา 0.8 มิลลิเมตร ทำการจำลองการเกิดออกไซด์ชั้นในเตาอินฟราเรด โดยใช้อุณหภูมิการม้วนเก็บในช่วง 300-730 °C อัตราการเย็นตัว 1-60 องศาเซลเซียสต่อวินาที (°C/min) จากการศึกษาสามารถแบ่งชนิดของออกไซด์สเกลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของวูสไตต์ ได้เป็นประเภทต่างๆ



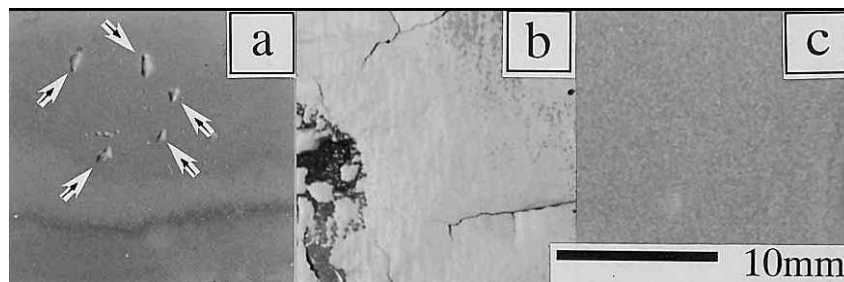
ภาพที่ 2.7 แผนภาพแสดงชนิดของออกไซด์สเกลที่เปลี่ยนไปเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิม้วนเก็บและอัตราการเย็นตัว

- ชนิด I ประกอบด้วยวูสไตต์เหลือค้าง (retained wustite) และตะกอนของแข็งของแมกนีไตต์ (magnetite precipitate) ภายในวูสไตต์ พบว่าออกไซด์สเกลชนิดนี้มักเกิดจากการม้วนเก็บที่อุณหภูมิต่ำ และอัตราการเย็นตัวสูง
- ชนิด II ประกอบด้วยวูสไตต์เหลือค้าง, ตะกอนของแข็งของแมกนีไตต์ ภายในวูสไตต์ และชั้นแมกนีไตต์แบบต่อเนื่องที่ รอยต่อของชั้นวูสไตต์กับเหล็ก
- ชนิด I-II ประกอบด้วยวูสไตต์เหลือค้าง, ตะกอนของแข็งของแมกนีไตต์ ภายในวูสไตต์, magnetite nuclei ที่รอยต่อของชั้นวูสไตต์กับเหล็ก
- ชนิด III เป็นออกไซด์สเกลชนิดที่เกิดจากม้วนเก็บที่อุณหภูมิสูงและอัตราการเย็นตัวต่ำ ประกอบด้วยโครงสร้างแบบ magnetite-iron eutectoid ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงวูสไตต์ และตะกอนของแข็งของแมกนีไตต์ ทั้งแบบที่ต่อเนื่องเป็นชั้นที่รอยต่อของชั้นวูสไตต์กับเหล็ก และที่ภายในวูสไตต์ โครงสร้างลักษณะนี้เป็นโครงสร้างที่ยากต่อกระบวนการล้างผิวเหล็กด้วยสารละลายกรด
- ชนิด II-III ประกอบด้วยโครงสร้างแบบเดียวกับ Type III แต่ยังคงมีวูสไตต์เหลือค้าง เช่นเดียวกับ Type II ออกไซด์สเกลชนิดนี้เกิดจากการม้วนเก็บที่อุณหภูมิต่ำ และอัตราการเย็นตัวต่ำ



จากผลการศึกษา R.Y. Chen และ W.D. Yuen ได้เสนอแนวคิดใหม่่ว่ากระบวนการเกิดนิเวศของแมกนีไตต์ที่รอยต่อระหว่างวูสไตต์กับผิวเหล็กเป็นลักษณะผสม กล่าวคือในสภาวะการเย็นตัวแบบต่อเนื่องขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 570 °C ส่วนของวูสไตต์ที่อยู่ติดกับเหล็กจะเกิดภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดของทั้งเหล็ก และออกซิเจน (Supersaturated of iron and oxygen) แต่การเกิดการตกตะกอนของแข็งของเหล็ก (Iron precipitation) นั้นเกิดได้ยากกว่าการตกตะกอนของแข็งของแมกนีไตต์ (Magnetite precipitation) ประกอบกับลักษณะทางกายภาพของออกไซด์สเกลกับเหล็กที่อยู่ติดกันอย่างดี ดังนั้นอะตอมเหล็กที่เกิดจากภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดจึงเลือกที่จะเติม (Deposit) ลงบนเหล็ก (แทนการเกิดการตกตะกอนของแข็งของเหล็ก) ซึ่งส่งผลให้เกิดลักษณะ oxygen enrichment ที่ตำแหน่งถัดเข้าไป และจะเหนี่ยวนำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งของแมกนีไตต์ที่รอยต่อระหว่างวูสไตต์กับผิวเหล็ก การโตของตะกอนของแข็งของแมกนีไตต์ก่อให้เกิดการผลัดอะตอมเหล็กออก ดังนั้นกระบวนการแพร่ของอะตอมเหล็ก จึงจัดเป็นตัวควบคุมการโตของตะกอนของแข็งของแมกนีไตต์ อัตราการเย็นตัวที่ช้า ส่งผลให้เกิดแมกนีไตต์แบบเป็นชั้นต่อเนื่อง ในขณะที่อัตราการเย็นตัวเร็วทำให้อะตอมเหล็กแพร่ไม่ทันจึงไม่เกิดแมกนีไตต์แบบเป็นชั้นต่อเนื่อง พบเพียงตะกอนของแข็งของแมกนีไตต์เท่านั้น

ในปี 2001 Taro KIZU, Yasunobu NAGATAKI และคณะ<sup>[12]</sup> ศึกษาผลของอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation temperature) และส่วนผสมทางเคมีของเหล็ก ต่อความติดแน่น (adhesion) ของออกไซด์สเกลบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในอากาศที่อุณหภูมิ 1173-1273 °C และเวลา 3-100 วินาที



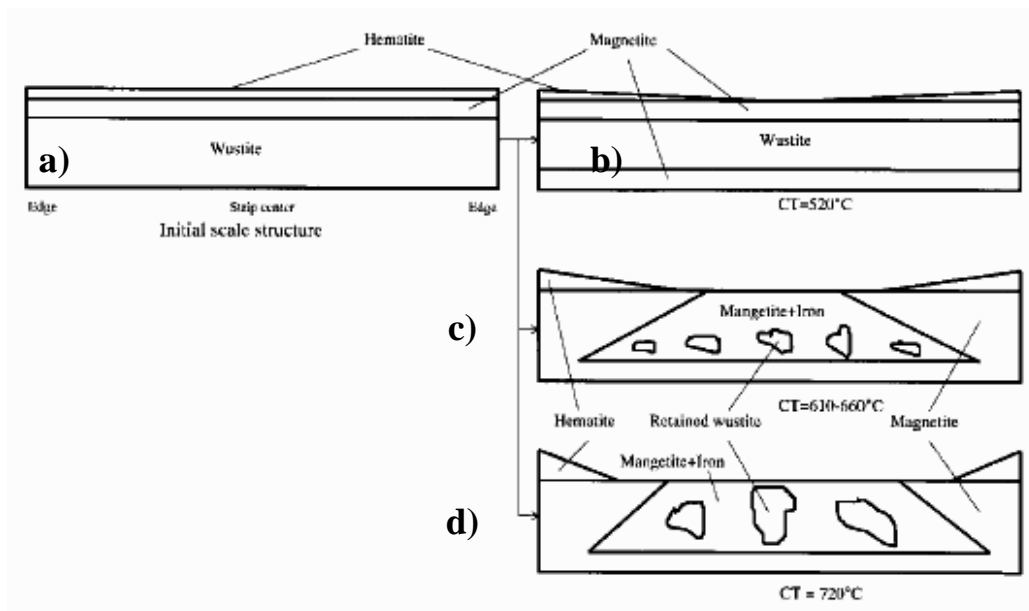
ภาพที่ 2.8 a), b), c) จำลองการเกิดสเกลที่อุณหภูมิ 1173, 1223, 1273 °C ตามลำดับ เป็นเวลา 10 วินาที

จากการศึกษาจำลองการเกิดออกไซด์สเกล โดยใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีปริมาณฟอสฟอรัส 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%by weight) ที่อุณหภูมิ 1173, 1223 และ 1273 °C เป็นเวลา 10 วินาที พบว่าที่อุณหภูมิ 1223 °C จะเกิดการโป่งพอง (blistering) ที่รอยต่อของออกไซด์สเกลกับเหล็กได้มากที่สุด และอุณหภูมินี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณฟอสฟอรัส และแมงกานีสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ซิลิคอนจะทำให้อุณหภูมินี้ต่ำลง

Taro KIZU, Yasunobu NAGATAKI และคณะ สรุปว่าการโป่งพองระหว่างรอยต่อออกไซด์สเกลกับเหล็กเกิดจากการเพิ่มขึ้นของแรงที่พยายามแยกชั้นออกไซด์สเกลออกจากเหล็ก อันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของผลึกที่จัดเรียงตัวในระนาบ {111} และ {110} บนระนาบ {100} ของวูสไตต์ และการลดลงของแรงติดแน่นระหว่างชั้นออกไซด์สเกลกับเหล็ก อันเป็นผลมาจากการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ หรือการสลายตัวของ  $Fe_3(PO_4)_2$

ในปี 2001 R.Y. Chen และ W.D. Yuen <sup>[13]</sup> ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิม้วนเก็บในช่วง 520-720 °C และปริมาณออกซิเจน ต่อโครงสร้างของออกไซด์สเกลที่เกิดบนเหล็กแผ่นรีดร้อน คาร์บอนต่ำ 0.06% คาร์บอน ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวของม้วนเหล็ก (Mid coil) เทียบกับโครงสร้างออกไซด์สเกลที่ได้จากชิ้นงานภายหลังการม้วนเก็บทันที (Initial oxide scale)

R.Y. Chen และ W.D. Yuen ศึกษาผลของปริมาณออกซิเจนโดยจำลองการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ตำแหน่งขอบโดยยื่นตัวในบรรยากาศอากาศ และจำลองการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ตำแหน่งกึ่งกลางม้วนเหล็ก ภายใต้สภาวะการยื่นตัวในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ (High Pure Nitrogen 99.99%) ชิ้นงานที่เป็น Initial oxide scale ตัดจากตำแหน่ง 3-4 เมตร ถัดจากส่วนปลายของความยาวม้วนเหล็ก (tail end) ทันทีภายหลังการม้วน และทำให้เย็นในบรรยากาศภายนอก ซึ่งมีอัตราการเย็นตัวมากกว่า 30 °C/min



ภาพที่ 2.9 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงของสเกลอันเป็นผลมาจากอุณหภูมิการม้วนแตกต่างกัน

จากการศึกษาพบว่า โครงสร้างสเกลที่ได้จากชิ้นงานภายหลังการม้วนทันที ภาพที่ 2.7a) ประกอบด้วยออกไซด์สเกล 3 ชั้น ได้แก่ เฮมาไตต์, แมกนีไตต์ และวูสไตต์

R.Y. Chen และ W.D. Yuen สรุปว่า ที่ตำแหน่งขอบความหนาของชั้นออกไซด์สเกลเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการม้วนเก็บเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิม้วนเก็บ 520 °C (ภาพที่ 2.7b) โครงสร้างประกอบด้วย เฮมาไทต์, แมกนีไทต์ และวูสไตต์ ในขณะที่ชั้นที่มีอุณหภูมิการม้วนเก็บ 610-720 °C (ภาพที่ 2.9c), 2.9d) โครงสร้างประกอบด้วย เฮมาไทต์ที่ชั้นนอก และแมกนีไทต์ที่ชั้นใน

ที่ตำแหน่งกึ่งกลางซึ่งปริมาณออกซิเจนต่ำกระบวนการออกซิเดชันเกิดขึ้น โดยการสลายตัวของออกไซด์สเกลชนิดที่มีปริมาณออกซิเจนสูง ไปเป็นออกไซด์สเกลชนิดที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำกว่า (ภาพที่ 2.9c) ที่อุณหภูมิ 570-660 °C ทั้งเฮมาไทต์ และแมกนีไทต์ สลายตัวเป็นวูสไตต์ และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 570 °C วูสไตต์เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น magnetite-iron eutectoid และวูสไตต์เหลือค้าง

สำหรับกรณีที่อุณหภูมิการม้วนสูงมาก (720 °C) ไม่เพียงเฉพาะเฮมาไทต์ และแมกนีไทต์เท่านั้นที่สลายตัว วูสไตต์จะสูญเสียออกซิเจน และเกิดสภาพ iron enrichment ซึ่ง วูสไตต์สภาพนี้มีความเสถียรสูงจึงคงเหลือเป็นวูสไตต์เหลือค้าง ภายหลังอุณหภูมิต่ำกว่า 570 °C ดังนั้นภาพที่ 2.9d) จึงมีปริมาณวูสไตต์เหลือค้าง มากกว่าภาพที่ 2.9c)

ในปี 2002 R.Y. Chen และ W.D. Yuen <sup>[14]</sup> ทำการศึกษาผลของเวลา และอุณหภูมิต่อลักษณะออกไซด์สเกลในกระบวนการออกซิเดชันภายใต้สภาวะอุณหภูมิกงที่ (Isothermal oxidation 450-900 °C) ในสภาพที่อากาศเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงานตลอดเวลา (flow air) และอากาศนิ่ง (zero flow air; limit oxygen supply) รวมทั้งศึกษาชนิด และโครงสร้างของออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันในสภาวะการเย็นตัวต่อเนื่อง (Continuous cooling oxidation ในช่วงอุณหภูมิ 520-720 °C) ใช้ชิ้นงานเหล็กแผ่นรีดร้อนคาร์บอนต่ำ (0.055% คาร์บอน, 0.012% ซิลิกอน)

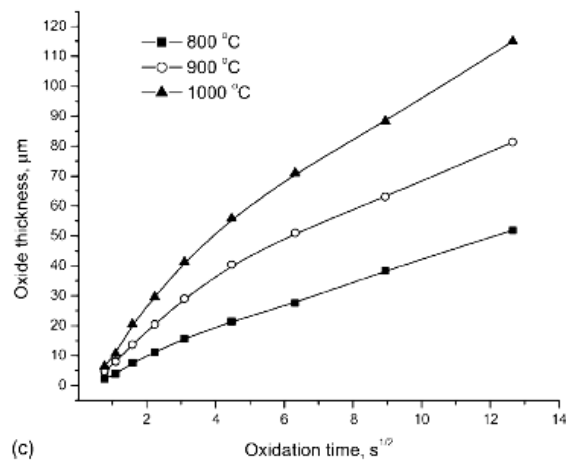
จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างที่ได้จากการออกซิเดชันในสภาวะอุณหภูมิกงที่ 880-900 °C เป็นเวลา 12 วินาที และเย็นตัวด้วยอัตรา 15-60 °C/min ในอากาศนิ่งประกอบด้วย เฮมาไทต์, แมกนีไทต์ และวูสไตต์ เหมือนกับโครงสร้างที่ได้จากกระบวนการออกซิเดชันของเหล็กบริสุทธิ์ ต่างกันเพียงเล็กน้อยที่สัดส่วนของแมกนีไทต์ต่อวูสไตต์ที่มีมากกว่าในเหล็กบริสุทธิ์ เมื่อเวลาในการออกซิเดชันในสภาวะอุณหภูมิกงที่ 880-900 °C เพิ่มขึ้นเป็น 200 วินาที พบว่าความสามารถในการเกาะติดของออกไซด์สเกลลดลง และออกไซด์สเกลมีการหลุดออกไปในบางส่วน ทำให้มีโครงสร้างออกไซด์สเกล และความหนาไม่สม่ำเสมอ

สำหรับสภาวะอุณหภูมิกงที่ การออกซิเดชันในอากาศนิ่งทำให้ได้ออกไซด์สเกลที่มีการติดแน่นดี เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่จำกัดทำให้ความเป็นไปได้ที่จะเกิดช่องว่างในผลึก และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) น้อยกว่าแบบสภาพที่อากาศเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงานตลอดเวลา (flow air)

ซึ่งเชื่อว่าเป็นผลจากการแยกตัวของรอยต่อระหว่างออกไซด์สเกลกับเหล็กจากการสะสมของช่องว่างในผลึก

จากการทดลองศึกษาชนิด และโครงสร้างของออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันในสภาวะการเย็นตัวต่อเนื่อง พบว่าชั้นเฮมาไตต์มีอัตราการโตสูงสุดในช่วงอุณหภูมิ 660-720 °C และน้อยลงในช่วง 610-660 °C และน้อยมากในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 610 °C แต่ยังไม่มีการอธิบายปรากฏการณ์นี้

ในปี 2004 Weihua Sun\*, A.K. Tieu และคณะ<sup>[9]</sup> ศึกษาการเกิดออกไซด์สเกลบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิดแผ่นในกระบวนการรีดร้อน โดยการจำลองสภาวะการรีดในระหว่างกระบวนการรีดละเอียด (Finishing mill) ด้วยเครื่อง Thermo-mechanical simulator; GLEEBLE-3500 ที่อุณหภูมิคงที่เท่ากับ 800, 900 และ 1000 °C และเวลา 0.6-160 วินาที



ภาพที่ 2.10 ความหนาออกไซด์สเกลกับรากที่สองของเวลาที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 °C

Weihua Sun\*, A.K. Tieu และคณะ ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของออกไซด์สเกล กับเวลาของแต่ละอุณหภูมิด้วยลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นตรง, พาราโบลา และลอการิทึม พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาในช่วง 20 วินาทีแรกเป็นไปอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาภายหลัง 20 วินาที มีแนวโน้มที่จะเป็นความสัมพันธ์แบบพาราโบลา<sup>[5]</sup> โดย Weihua Sun\*, A.K. Tieu และคณะ อธิบายว่าในช่วงแรก而出ออกไซด์สเกลยังบางอยู่นั้น การแพร่ของอะตอมเหล็กและออกซิเจนเป็นไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของความหนาออกไซด์สเกลจึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นเมื่อออกไซด์สเกลมีความหนามากขึ้น ความเข้มข้นของอะตอมลดลง ทำให้อัตราการถ่ายเทอะตอมเพื่อทำปฏิกิริยาเกิดเป็นออกไซด์สเกลก็ลดลงด้วย อัตราการเพิ่มความหนาของออกไซด์สเกลจึงเป็นไปตามความสัมพันธ์แบบพาราโบลา

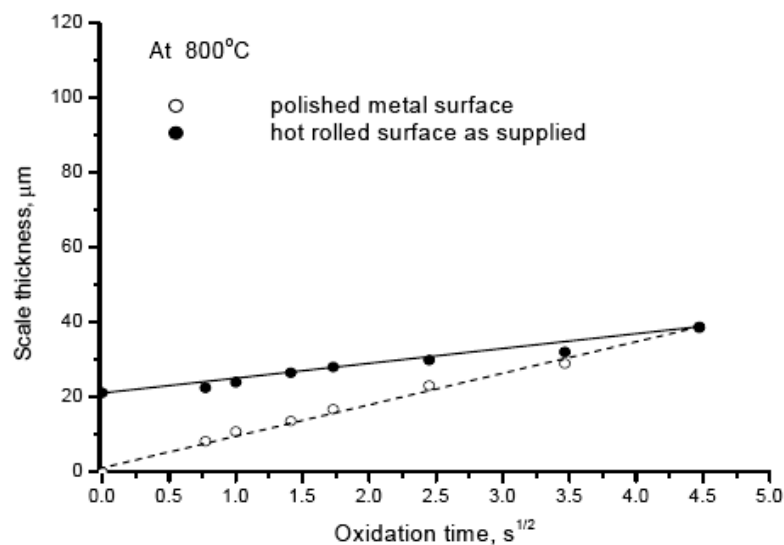
Weihua Sun <sup>[5]</sup> ศึกษาการเกิดออกซิเดชันของเหล็กกล้าละมุน (Mild steel) ที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000°C เป็นเวลา 0.6-160 วินาที พบว่าการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบพาราโบลิก คือในช่วงแรกมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็ว และช้าลงในภายหลัง และหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของสเกลกับเวลาและอุณหภูมิได้เท่ากับ

$$\text{ความหนาออกไซด์สเกล (ไมโครเมตร)} = 884.45(\sqrt{t})\exp(-5638.27/T)$$

จากนั้นได้ทำการทดลองศึกษาผลของออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นก่อนบนผิวชิ้นงาน ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้ชิ้นงานเหล็กที่รีดร้อนเป็นตัวแทนผิวที่มีออกไซด์สเกลเกิดขึ้นก่อน และชิ้นงานที่ผ่านการขัดละเอียดเป็นตัวแทนชนิดที่ไม่มีออกไซด์สเกล ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 800-1000 °C เป็นเวลา 20 วินาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานที่มีออกไซด์สเกลเกิดขึ้นก่อนแล้วจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ไม่มีออกไซด์สเกลเกิดขึ้นก่อน (20.95=ความหนาออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นก่อน)

$$\text{ความหนาสเกลมีออกไซด์ (ไมโครเมตร)} = (1.12 \times 10^5 (\sqrt{t}) \exp(-11102.71/T)) + 20.95$$

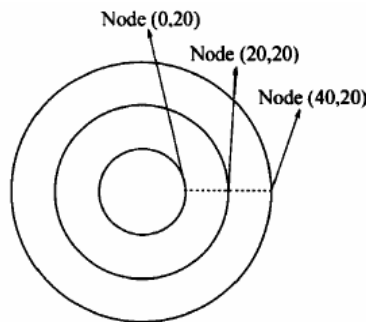
$$\text{ความหนาสเกลไม่มีออกไซด์ (ไมโครเมตร)} = 2948.46(\sqrt{t})\exp(-6290.26/T)$$



ภาพที่ 2.11 ความหนาออกไซด์สเกลกับรากที่สองของเวลาที่อุณหภูมิ 800 ของชิ้นงานเตรียมผิวด้วยการขัดละเอียด (จุดโปร่ง) กับชิ้นงานรีดร้อน (จุดทึบ)

ในปี 2006 Jiefeng Cheng, Zhengdong Liu และคณะ <sup>[15]</sup> ศึกษาผลของอุณหภูมิก่อนการม้วนเก็บ, ขนาดของม้วนเหล็ก, ชนิดของเหล็ก ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน 0.09% C และเหล็กกล้าสเตนเลส 15-22wt% Cr, 8-15wt% Ni และวิธีการเย็นตัว ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของม้วนเหล็กขณะเย็นตัวภายหลังการม้วนเก็บ โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Q-CSP รวมทั้งได้ทำการพัฒนาให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการใช้ค่าสมบัติทางกายภาพ

และความร้อนของเหล็กได้แก่ ความหนาแน่น, ความจุความร้อน และความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ แบบเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ



ภาพที่ 2.12 รูปแบบการแบ่งอิลิเมนต์สำหรับแบบจำลองแบบ 2 มิติ ที่ความลึก z

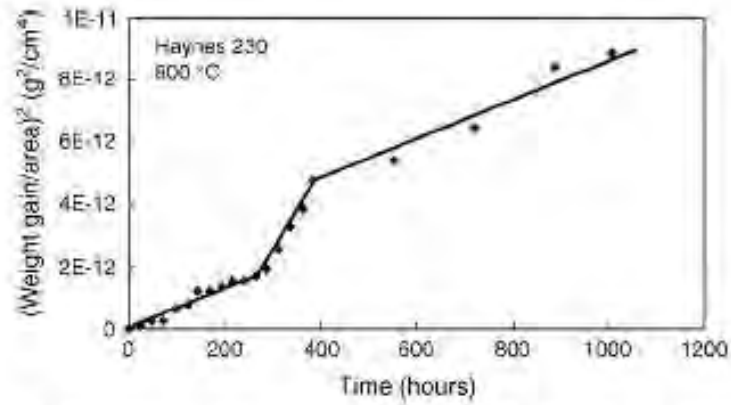
แบบจำลองนี้คือการถ่ายเทความร้อนใน 2 มิติ ได้แก่นิพจน์ของรัศมีวงเหล็ก (r) และทิศแนวแกนของรัศมีวงเหล็ก (z) โดยสมการที่เกี่ยวข้องได้แก่สมการการนำความร้อนใน 2 มิติ และสมการการพาความร้อนที่ใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขต ดังนี้

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_r \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \text{และ} \quad -k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_\infty) \quad (2.13)$$

ผลการศึกษาของ Jiefeng Cheng, Zhengdong Liu และคณะพบว่า การยื่นตัวของรัศมีวงเหล็กโดยใช้น้ำและอากาศร่วมกันมีประสิทธิภาพมากที่สุด เมื่อเทียบกับการยื่นตัวในอากาศปกติ และการอัดอากาศ (Forced air) และความแตกต่างของอุณหภูมิที่ส่วนต้น (Head) กับส่วนปลาย (Tail) ของรัศมีวงเหล็กก่อนการม้วนเก็บมีผลต่ออัตราการยื่นตัวภายหลังการม้วนเก็บ อีกทั้งขนาดของรัศมีวงเหล็กก็ส่งผลกระทบต่ออัตราการยื่นตัวเช่นกัน โดยรัศมีวงเหล็กที่มีขนาดเล็กกว่า (รัศมีน้อยกว่า) มีอัตราการยื่นตัวที่สูงกว่าในทุกตำแหน่ง และเมื่อศึกษาโดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นคงที่ พบว่าเหล็กกล้าคาร์บอนมีอัตราการยื่นตัวสูงกว่าเหล็กกล้าสเตนเลส [8], [15], [16]

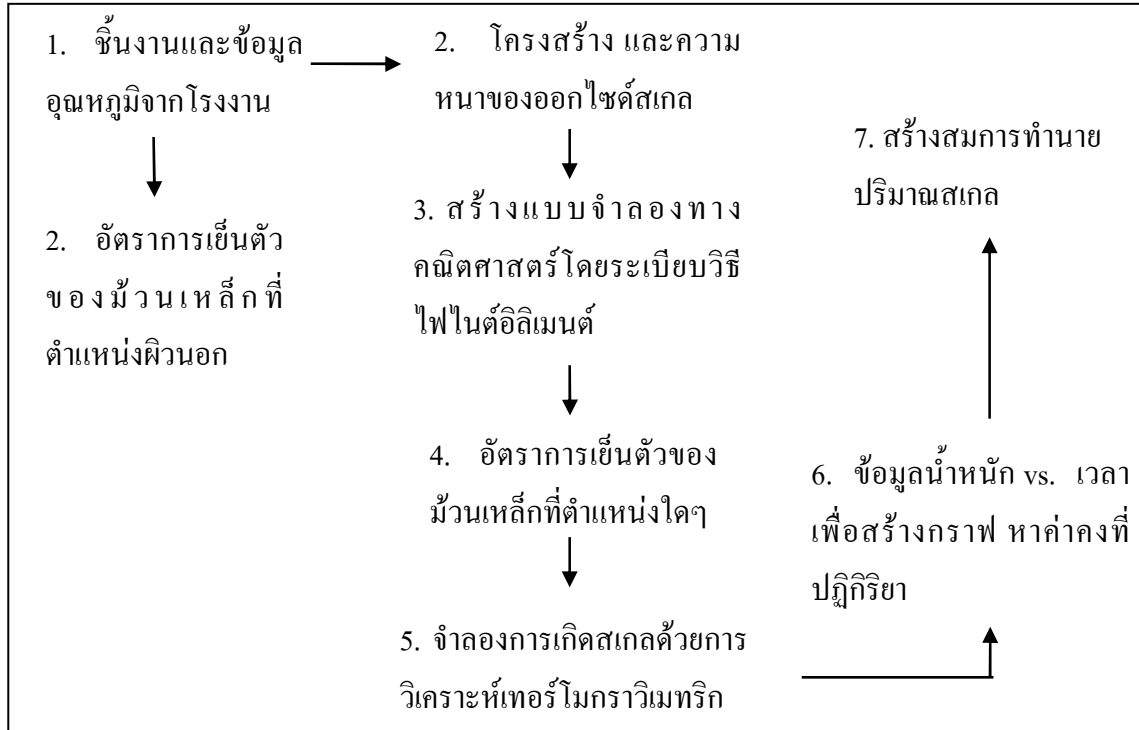
Li Jian<sup>a</sup> และคณะ<sup>[6]</sup> ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสม Haynes230 ในบรรยากาศที่อุณหภูมิ 650 และ 850 °C โดยใช้การวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักต่อพื้นที่แบ่งได้เป็น 3 ช่วง โดยที่ในแต่ละช่วงเป็นไปตามความสัมพันธ์ลักษณะพาราโบลา และมีค่าคงที่ปฏิกิริยา และพลังงานกระตุ้นแตกต่างกันในแต่ละช่วง Li Jian<sup>a</sup> และคณะอธิบายว่าค่าคงที่ปฏิกิริยา และพลังงานกระตุ้นที่แตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจากกลไกการเกิดชั้นออกไซด์ที่ต่างชนิดกัน กล่าวคือในช่วงแรกการแพร่ของอะตอมของโครเมียมผ่านชั้นโครเมียมออกไซด์เป็นตัวกำหนดอัตรา แต่ในช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นเนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาถูกกำหนดโดยการแพร่ของอะตอมของแมงกานีสผ่านชั้นโครเมียม

ออกไซด์เพื่อเกิดเป็น  $MnCr_2O_4$  และอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลงอีกครั้งหนึ่งในช่วงสุดท้ายเนื่องจากปริมาณอะตอมของแมงกานีสที่จำกัด ดังนั้นการแพร่ของอะตอมของโครเมียมจึงกลับมาเป็นขั้นกำหนดอัตราอีกครั้งหนึ่ง



ภาพที่ 2.13 น้ำหนักต่อพื้นที่ เทียบกับเวลาในการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสม Haynes230 ที่อุณหภูมิ 800 °C

### บทที่ 3 วิธีการศึกษาวิจัย



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงาน

ภายหลังการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในบทที่ 2 ในบทนี้จะเป็นการศึกษาวิจัยเพื่อศึกษาผลของ (1) อัตราการเย็นตัว (2) อุณหภูมิมี้วนเก็บ (3) เวลาที่ใช้ในการเกิดออกซิเดชัน และ (4) ตำแหน่งที่แตกต่างกันบนมี้วนเก็บ ต่อปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดบนผิวของเหล็กแผ่นรีดร้อนในกระบวนการออกซิเดชันในบรรยากาศ จากภาพที่ 3.1 วิธีการศึกษาวิจัยเริ่มจากการเก็บข้อมูลอุณหภูมิระหว่างเย็นตัวภายหลังมี้วนเก็บ ของมี้วนเหล็กแผ่นรีดร้อนที่มีอุณหภูมิมี้วนเก็บเท่ากับ 560 °C เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการประเมินความถูกต้องของค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม Flex PDE เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนของมี้วนเหล็กด้วยสมการการถ่ายเทความร้อน จากนั้นใช้ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อกำหนดสภาวะในการทดลองจำลองการเกิดออกไซด์สเกลด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาใช้ในการหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา และใช้ในการสร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลต่อไป



### 3.1 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการศึกษาวิจัย

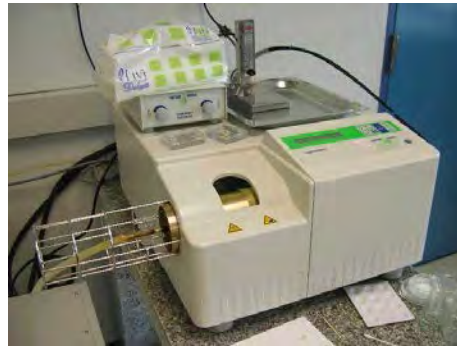
#### 3.1.1 โปรแกรม FlexPDE

ด้วยข้อจำกัดในการวัดอุณหภูมิจากม้วนเหล็กที่สามารถวัดได้เฉพาะที่ผิวด้านนอก จึงมีความจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงของการเย็นตัวของม้วนเหล็กในช่วงกระบวนการม้วนเก็บ และเย็นตัวในบรรยากาศเพื่อระบุค่าอุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่งต่างๆภายในม้วนเหล็ก เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ ได้แก่ โปรแกรม FlexPDE โปรแกรมดังกล่าวเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาที่อยู่ในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) FlexPDE เป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยภาษา C และได้มีการนำเสนอตั้งแต่ปี 1998 ด้วยการประยุกต์ใช้กับปัญหาที่เกี่ยวกับความร้อน และปัญหาเกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้า โปรแกรมดังกล่าวนี้มี 2 เวอร์ชันคือ เวอร์ชัน Professional และเวอร์ชันสำหรับบุคคลทั่วไป ซึ่งมีข้อแตกต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือเวอร์ชันสำหรับบุคคลทั่วไป จะมีการจำกัดจำนวนสมการอยู่ที่ 5 สมการ และจำนวนอิลิเมนต์สูงสุดอยู่ที่ 1500 อิลิเมนต์สำหรับปัญหา 3 มิติ ส่วนเวอร์ชัน Professional ไม่มีข้อจำกัดใดๆทั้งสิ้น

โปรแกรมนี้ให้ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดสมการที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่ต้องการศึกษา รวมทั้งเงื่อนไขเริ่มต้น เงื่อนไขขอบเขต และป้อนข้อมูลค่าคงที่ต่างๆเอง โดยหลักการในการแก้ปัญหาเริ่มที่สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ สมการการถ่ายเทความร้อน (Fourier's second law) แบบ 3 มิติ และเงื่อนไขขอบเขตซึ่งกำหนดโดยสมการการพาความร้อน (Newton's law of cooling) ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 หลังจากนี้ โปรแกรมได้คำนวณหาผลเฉลยจากการอินทิเกรตแล้ว โปรแกรมสามารถแสดงผลการคำนวณออกมาในรูปแบบกราฟ (Graphics) ได้ ซึ่งสะดวกต่อการวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น

#### 3.1.2 เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก

เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริกเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก หรือสสารที่ทำปฏิกิริยา โดยวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน ภายใต้บรรยากาศที่สามารถควบคุมได้ ข้อมูลจะแสดงในรูปแบบของกราฟระหว่างน้ำหนักของวัสดุแสดงในแกนตั้ง กับเวลา หรือ อุณหภูมิในแกนนอน เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริกโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ (1) ส่วนวัดน้ำหนัก (Balance) (2) เตาเผาให้ความร้อน (Furnace) (3) ส่วนวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) และ (4) ส่วนควบคุมบรรยากาศภายในระบบ (Gas controller)



ภาพที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก รุ่น Mettler-Toledo รุ่น TGA SDTA851



ภาพที่ 3.3 (ซ้าย) ถ้วยใส่ชิ้นงานผลิตจากอลูมิเนียมออกไซด์ ความจุ 70 ไมโครลิตร และ (ขวา) ถังแก๊สต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก สามารถเลือกใช้บรรยากาศได้หลายชนิดสำหรับการทดลอง

เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดออกไซด์สเกลจะทำให้น้ำหนักของเหล็กเปลี่ยนไป ดังนั้นจึงนำเทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermal gravimetric analysis) มาทำการทดลองจำลองการเกิดออกไซด์สเกล เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัวต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาการเกิดออกไซด์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริกของบริษัท Mettler-Toledo รุ่น TGA SDTA851 (ภาพที่ 3.2) ซึ่งสามารถจำลองการเกิดออกไซด์สเกลในสภาวะที่กำหนด (สภาวะที่ต้องการศึกษา ซึ่งได้มาจากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์) เช่น อุณหภูมิ, เวลา, อัตราการเย็นตัว, ลักษณะบรรยากาศ และบันทึกข้อมูลน้ำหนักที่เปลี่ยนไปเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ และเวลา

รายละเอียดของเครื่อง Mettler Toledo รุ่น TGA SDTA 851

- ความละเอียดการแสดงค่าอุณหภูมิชิ้นงาน 0.1 °C
- ช่วงอุณหภูมิการทำงาน: อุณหภูมิห้อง ถึง 1100 °C ด้วยความแม่นยำ  $\pm 0.3$  °C
- อัตราการให้ความร้อนและเย็นตัว: 0.1 to 200 °C/นาที
- ขนาดของชิ้นงาน: เส้นผ่านศูนย์กลาง (หรือเส้นทแยงมุม)  $\leq 3$  มิลลิเมตร และหนา  $\leq 4$  มิลลิเมตร
- น้ำหนักของชิ้นงาน: 0-500 mg. (มิลลิกรัม) ด้วยความละเอียดในการแสดงผล 0.0001 mg.
- บรรยากาศ: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, He (HP grade), Air (zero grade; 21% O<sub>2</sub>)

### 3.1.3 กล้องอินฟราเรดรุ่น LAND CYCLOPS T135



ภาพที่ 3.4 กล้องอินฟราเรดรุ่น LAND Cyclop T135

ใช้ในการเก็บข้อมูลอุณหภูมิระหว่างเย็นตัวภายหลังการม้วนเก็บของม้วนเหล็ก ใช้ถ่ายภาพวัตถุร้อนและแปลงสัญญาณเป็นค่าอุณหภูมิ

## 3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

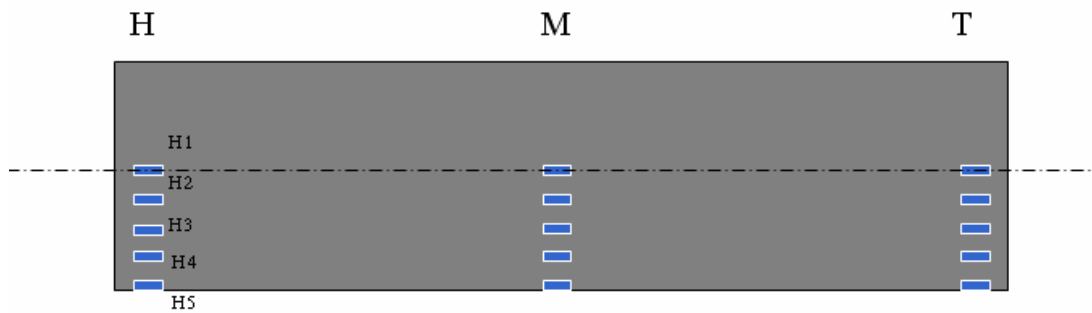
### 3.2.1 ศึกษาผลของตำแหน่งที่แตกต่างกันบนม้วนเหล็กต่อความหนาออกไซด์สเกล

#### 3.2.1.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ธาตุผสมในเหล็กแผ่นรีดร้อนเกรด HR1 (wt %)

%C	%Si	%S	%P	%Mn	%Ni	%Cr	%Mo
0.06	0.02	0.01	0.01	0.25	0.055	0.008	0.005
%V	%Cu	%Ti	%As	%Sn	%Al	%B	%Nb
0	0.026	0.003	0.000	0.000	0.032	0.0002	0

การวิจัยครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างจาก บริษัท สหวิริยาสตีลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) ชิ้นงานที่ใช้เป็นชิ้นงานเหล็กแผ่นรีดร้อน ส่วนผสมแสดงในตารางที่ 3.1 ตัดชิ้นงานขนาด 1x2 เซนติเมตร (cm.) จากส่วนต้น (Head) ส่วนกลาง (Middle) และส่วนปลาย (Tail) ของความยาวม้วนเหล็ก บริเวณละ 5 ตำแหน่ง เรียงลำดับจากขอบด้านนอก (edge) ถึงกึ่งกลางของความกว้างแผ่นเหล็ก (center) (ภาพที่ 3.4)



ภาพที่ 3.5 ตำแหน่งของชิ้นงานตัวอย่างบนแผ่นเหล็ก

จากนั้น mount ชิ้นงาน และทำการกำหนดชื่อสำหรับชิ้นงานแต่ละตำแหน่ง ดังนี้ ชิ้นงานส่วนหัวตำแหน่งกึ่งกลางความกว้างใช้ชื่อ H1 และชิ้นงานส่วนหัวตำแหน่งขอบใช้ชื่อ H5 และกำหนดชื่อในลักษณะเดียวกันสำหรับชิ้นงานส่วนกลาง และส่วนปลาย (M1, M2...M5 และ T1, T2...T5)

### 3.2.1.2 การทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

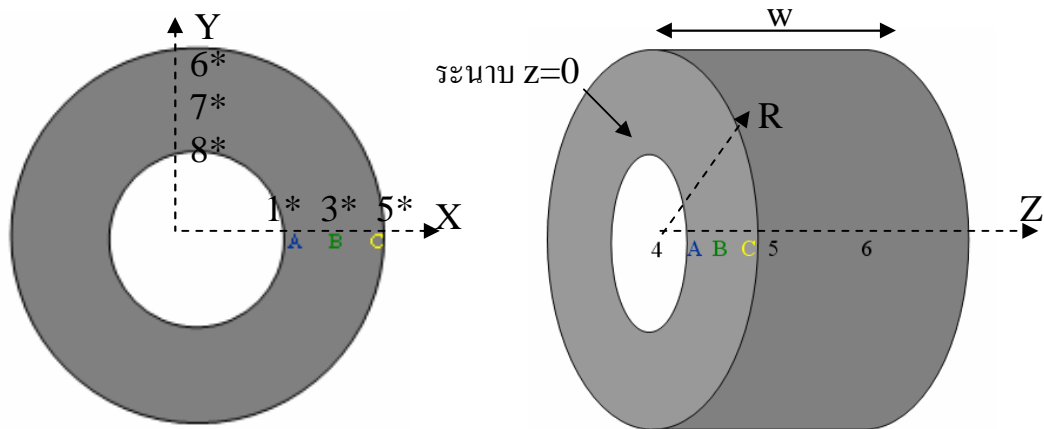
เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค และวัดความหนาของชั้นออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นบนผิวของ ชิ้นงานเหล็กแผ่นรีดร้อน ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงวิธีการเตรียมผิวชิ้นงานเพื่อศึกษาเรื่องดังกล่าว โดยเริ่มจากการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 220, 320, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ โดยหมุนชิ้นงานเป็นมุม  $45^{\circ}$  กับแนวเดิมทุกครั้งก่อนเปลี่ยนเบอร์กระดาษทราย [15] จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่ต่อกับกล้องดิจิทัล และทำการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานละ 5 ภาพ เพื่อใช้ในการวัดความหนาออกไซด์สเกลบน ชิ้นงาน

เพื่อให้ความหนาที่วัดได้สามารถใช้เป็นตัวแทนความหนาสำหรับตำแหน่งนั้นๆ ได้อย่างเหมาะสม จึงวัดความหนาของออกไซด์สเกลภาพละ 5 จุด แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยของความหนาชั้นออกไซด์สเกล และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาชั้นสเกลกับ ตำแหน่งชิ้นงาน เพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป

## 3.2.2 เก็บข้อมูลอุณหภูมิระหว่างเย็นตัวของม้วนเหล็กจากโรงงาน

### 3.2.2.1 แหล่งข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์ทางด้านข้อมูลจาก บริษัท สหวิริยาสตีลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) การเก็บข้อมูลเริ่มจากเลือกม้วนเหล็กจากสายการผลิตที่มีลักษณะตามที่ต้องการ ได้แก่ อุณหภูมิมีม้วนเก็บ  $560^{\circ}\text{C}$  จำนวน 2 ม้วน จากนั้นกำหนดตำแหน่งที่จะทำการวัดอุณหภูมิบนม้วนเหล็ก (ภาพที่ 3.5) และเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดอุณหภูมิ



ภาพที่ 3.6 ตำแหน่งสำหรับการวัดอุณหภูมิด้วย infrared gun (A, B, C, 4, 5, 6) และกล้องอินฟราเรด จะทำการเก็บภาพภาคตัดขวางในระนาบ A, B, C

เมื่อม้วนเหล็กที่ต้องการออกจาก down coiler จึงใช้กล้องอินฟราเรด และ infrared gun สำหรับการวัดอุณหภูมิแต่ละม้วนเหล็ก โดยทำการวัดตั้งแต่ม้วนเหล็กออกจาก down coiler ทันที และวัดทุกๆ ทุก 2 นาทีในครึ่งชั่วโมงแรกแล้ววัดทุก 5 นาทีต่อไปอีก 2 ชั่วโมงครึ่ง สำหรับการกล้องอินฟราเรด และวัดทุกๆ 5 นาทีระหว่างการเย็นตัวในบรรยากาศจนครบเวลา 3 ชั่วโมง สำหรับ infrared gun

### 3.2.2.2 การวิเคราะห์และจัดการข้อมูล

ภายหลังการเก็บข้อมูลอุณหภูมิระหว่างการเย็นตัวของม้วนเหล็กแล้ว จึงนำค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ มาสร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่เกิดออกซิเดชัน โดยกำหนดให้ที่เวลาเริ่มต้น ( $t = 0$ ) อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$  และเย็นลงเรื่อยๆจนครบ 3 ชั่วโมง ทำในลักษณะเดียวกันจนครบทุกตำแหน่ง จากนั้นเปรียบเทียบกราฟที่ได้จากเครื่องมือทั้งสองชนิด และเปรียบเทียบอุณหภูมิของตำแหน่งในระยะเวลาเดียวกัน ได้แก่ เปรียบเทียบตำแหน่ง 1\* กับ 8\*, 3\* กับ 7\* และ 5\* กับ 6\* โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ของข้อมูลคู่หนึ่งๆ ถ้า  $R^2$  มีค่าใกล้ 1 แปลว่าอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อยืนยันสมมติฐานว่ามีสมมาตรของอุณหภูมิในแนวรัศมี

### 3.2.3 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### 3.2.3.1 ขอบเขตของการศึกษา

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์(Mathematical Model) โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้เลือกใช้โปรแกรม Flex PDE เพื่อจำลองการเย็นตัวของม้วนเหล็กในช่วงกระบวนการม้วนเก็บ และเย็นตัวในบรรยากาศเพื่อระบุค่าอุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่งต่างๆภายในม้วนเหล็ก โดยมีสมมติฐานของการศึกษา ได้แก่

- A. ม้วนเหล็กที่พิจารณามีลักษณะเป็นเนื้อตัน สมมาตรตามแกน Z (ภาพที่ 3.5)
- B. ม้วนเหล็กมีการถ่ายเทความร้อนซึ่งอธิบายด้วยสมการการถ่ายเทความร้อนแบบ 3 มิติ
- C. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ที่ใช้ในเงื่อนไขขอบเขตแบบ Heat flux เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่รวมผลของการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

### 3.2.3.2 สมการที่เกี่ยวข้อง เงื่อนไขเริ่มต้น และเงื่อนไขขอบเขต

สำหรับการนำสมการการถ่ายเทความร้อนมาประยุกต์ใช้กับการคำนวณการเย็นตัวของม้วนเหล็ก การเขียนสมการในรูปพิกัดคาร์ทีเซียนมีความสะดวกต่อการเขียนคำสั่งเพื่อแสดงผลมากกว่าการใช้ระบบพิกัดทรงกระบอก สมการการถ่ายเทความร้อนที่ใช้สำหรับการคำนวณ โดยโปรแกรม Flex PDE อยู่ในรูปทั่วไป ดังนี้

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของโลหะ  
 $C_p$  คือ ความจุความร้อน  
 $k$  คือ ค่าการนำความร้อน, [W/m °C]

ในการแก้สมการที่ 3.1 ซึ่งอยู่ในรูปของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จะต้องมีการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น และเงื่อนไขขอบเขต สำหรับเงื่อนไขเริ่มต้นที่เวลา  $t=0$  กำหนดให้อุณหภูมิของม้วนเหล็กมีค่าเท่ากับอุณหภูมิมีวนเก็บ (560 °C)

$$t = 0, R_n < x < R, T(x) = T_c \quad (3.2)$$

เมื่อ  $R_n$  คือ รัศมีของแผ่นเหล็กชั้นในสุด  
 $R$  คือ รัศมีของแผ่นเหล็กชั้นนอกสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $R_n$  + จำนวนชั้นแผ่นเหล็ก \* ความหนาของแผ่นเหล็ก  
 $T_c$  คือ อุณหภูมิมีวนเก็บ

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่บริเวณแกนสมมาตร Z (ระนาบแบ่งครึ่งหน้ากว้างของม้วนเหล็ก) ถือว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อน

$$z = w/2, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $w$  คือ ความกว้างของแผ่นเหล็ก

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของผิวด้านนอก ด้านใน และด้านข้าง (สัมผัสอากาศ) กำหนดโดยสมการของนิวตัน (Newton's law of cooling/ heating) ดังนี้

$$x = R_n, -k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_{in}) \quad (3.4)$$

$$x = R, -k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_{out}) \quad (3.5)$$

$$z = 0, -k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_{out}) \quad (3.6)$$

ภายหลังจากการกำหนดข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นต่อการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่ง และเวลาต่างๆ อันได้แก่สมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้อง (แสดงในตารางที่ 3.2) เงื่อนไขเริ่มต้น และเงื่อนไขขอบเขตดังที่กล่าวมาแล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อไป

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางกายภาพและความร้อนของเหล็ก และค่าคงที่ของมวลเหล็กที่ศึกษา

Thermal conductivity <sup>[17]</sup>	-2.4176(Temp) + 4153.5 [W/m °C]
Density	7880 [kg/m <sup>3</sup> ]
Specific heat	452 [J/kg °C]
coil width	1.2 [m.]
steel thickness	3.2 [mm.]
inner diameter of coil	0.74 [m.]

วิธีการคำนวณค่า Thermal conductivity แสดงในภาคผนวก ก

### 3.2.3.3 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง

เนื่องจากค่าความจุความร้อน ( $C_p$ ) ความหนาแน่นของเหล็กกล้า ( $\rho$ ) และค่าการนำความร้อน ( $k$ ) ที่ใช้ในสมการการถ่ายเทความร้อน (สมการที่ 3.1) สามารถหาได้จากหนังสืออ้างอิง <sup>[17]</sup> แต่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h$ , heat transfer coefficient) ที่ใช้ในเงื่อนไขขอบเขตแบบ Heat flux ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นเป็นฟังก์ชันของ รูปร่าง และขนาดของวัตถุที่มีการถ่ายเทความร้อน, ตัวกลางในการพาความร้อน ดังนั้นเมื่อรูปร่าง และขนาดของวัตถุหรือตัวกลางในการพาความร้อนแตกต่างกันย่อมส่งผลให้ค่า  $h$  เปลี่ยนไปด้วย ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนี้จึงต้องใช้ค่า  $h$  ที่เหมาะสมกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนของมวลเหล็กในงานวิจัยนี้ด้วย

วิธีการหาค่า  $h$  ที่เหมาะสมทำโดยอาศัยหลักการ trial and error โดยสร้างฟังก์ชันค่า  $h$  ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในแบบเลขยกกำลัง <sup>[17]</sup> เพื่อใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

และสั่งให้แบบจำลองคำนวณอุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง A, B และ C เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในตำแหน่งเดียวกันที่วัดได้จริงจากหัวข้อ 3.2.2.2 โดยใช้ค่า  $R^2$  ในการพิจารณา ถ้าค่า  $R^2$  ในทุกตำแหน่งมีค่ามากกว่า 0.85 ให้ถือว่าฟังก์ชันค่า  $h$  นั้นมีความเหมาะสมสำหรับรูปแบบการถ่ายเทความร้อนของม้วนเหล็กในงานวิจัยนี้ และจะใช้ฟังก์ชันค่า  $h$  นั้นสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตลอดการวิจัย แต่ถ้าค่า  $R^2$  ในตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.85 ให้ปรับตัวคูณในฟังก์ชันค่า  $h$  แล้วทำซ้ำจนกว่าจะได้ค่า  $h$  ในทุกตำแหน่งมากกว่า 0.85

#### 3.2.3.4 การใช้แบบจำลองเพื่อกำหนดสภาวะการทดลอง

เมื่อได้ค่า  $h$  ที่เหมาะสมสำหรับลักษณะการถ่ายเทความร้อนของม้วนเหล็กในงานวิจัยนี้แล้ว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะถือว่ามีความน่าเชื่อถือ และสามารถใช้ในการคำนวณอุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่งต่างๆของม้วนเหล็ก เพื่อใช้ในการกำหนดสภาวะการทดลองจำลองการเกิดออกไซด์สเกลด้วยการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก โดยจะใช้การเขียนคำสั่งด้วยภาษา C ให้โปรแกรมทำการคำนวณอัตราการเย็นตัวที่  $R_n < x < R$  บนระนาบ  $z = 0$  และ  $z = w/2$  เทียบกับเวลา

เนื่องจากรูปแบบการเย็นตัวของม้วนเหล็กในความเป็นจริงเป็นการเย็นตัวแบบต่อเนื่อง (อัตราการเย็นตัวลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป, Continuous cooling) แต่การวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริกมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถจำลองรูปแบบการเย็นตัวแบบต่อเนื่องได้ ดังนั้นจึงต้องใช้รูปแบบการเย็นตัวที่เกิดจากการเฉลี่ยอัตราการเย็นตัวในช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยนี้จะใช้เป็นตัวแทนอัตราการเย็นตัวของทั้งช่วงเวลาที่คิดนั้น โดยประเมินความถูกต้องของอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยได้โดยหาค่า  $R^2$  ของอัตราการเย็นตัวแบบต่อเนื่องที่คำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับอัตราการเย็นตัวเฉลี่ย ณ ช่วงเวลาเดียวกัน และใช้ชุดของอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยเหล่านี้เป็นสภาวะสำหรับการจำลองการเกิดออกไซด์ชั้นภายใต้การเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่สำหรับการทดลองในขั้นถัดไป

### 3.2.4 การทดลองจำลองการเกิดออกไซด์สเกลด้วยการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก

#### 3.2.4.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก



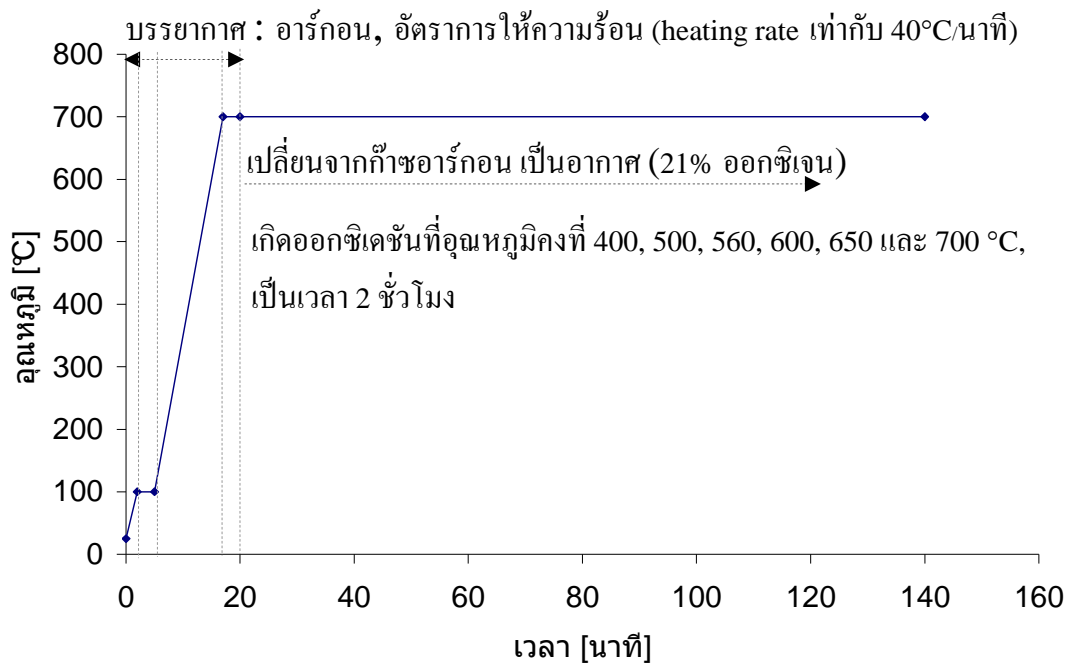
ภาพที่ 3.7 (ซ้าย) ชิ้นงานก่อนขัดลดขนาด และกำจัดออกไซด์สเกล (ขวา) ชิ้นงานที่เตรียมเสร็จแล้ว



ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองจำลองการเกิดออกไซด์สเกล ด้วยการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก เป็นชิ้นงานเหล็กแผ่นรีดร้อนซึ่งมีออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการรีดร้อนปกคลุมผิวอยู่ ประกอบกับข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก รุ่น Mettler-Toledo รุ่น TGA SDTA851 ที่สามารถใช้ชิ้นงานที่มีน้ำหนักมากที่สุดไม่เกิน 500 mg. จึงทำให้ต้องเตรียมชิ้นงานที่มีขนาดและน้ำหนักที่เหมาะสม รวมทั้งกำจัดออกไซด์สเกลที่ปกคลุมผิวอยู่ด้วย โดยขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเริ่มด้วยการตัดชิ้นงานเหล็กแผ่นรีดร้อนขนาด  $5 \times 5 \times 3.2 \text{ mm}^3$  จำนวนมาก จากนั้นขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 เพื่อกำจัดออกไซด์สเกลที่มีอยู่ก่อนหน้าออกไป และเพื่อลดขนาดให้ได้ชิ้นงานสุดท้ายที่มีขนาดประมาณ  $2 \times 2 \times 3 \text{ mm}^3$  (ภาพที่ 3.7 กลุ่มขวา) และมีน้ำหนักไม่เกิน 500 mg. เก็บชิ้นงานที่เตรียมแล้วในขวดฝาปิดที่บรรจุเอทิลแอลกอฮอล์ 99.5% หรือห่อชิ้นงานด้วยสำลี และเก็บในถุงพลาสติกที่บรรจุสารดูดความชื้น และดูดอากาศออกจนหมด

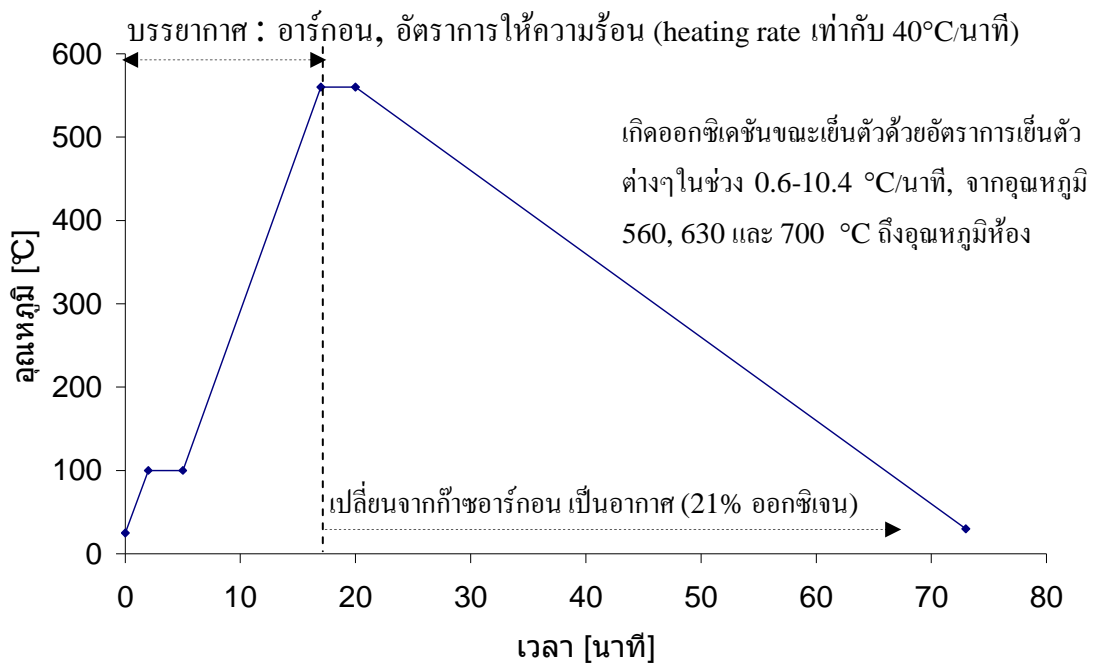
3.2.4.2 สภาพะสำหรับการทดลอง : ศึกษาผลของอัตราการเย็นตัว, อุณหภูมิผิวน้ำหนัก และเวลา ต่อการเกิดออกซิเดชัน

ทำการศึกษาโดยแบ่งเป็นสภาวะการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal oxidation) และการเกิดออกซิเดชันขณะเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ (Non-isothermal oxidation) ดังนี้



ภาพที่ 3.8 แผนภาพแสดงอุณหภูมิและบรรยากาศควบคุมภายในเตาระหว่างการทดลองด้วยสภาวะออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่

ภาพที่ 3.8 แสดงอุณหภูมิและบรรยากาศควบคุมภายในเตาระหว่างการทดลองสภาวะการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่ ในช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อน  $40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จาก  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  จากนั้นช่วงที่ 2 คงอุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อน  $40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จาก  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง อุณหภูมิที่ต้องการศึกษา ได้แก่  $700, 650, 600, 560, 500$  และ  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  และคงอุณหภูมินั้นไว้เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น ก่อนที่จะสลับจากก๊าซอาร์กอนเป็นอากาศ (Air 21% ออกซิเจน, High pure grade) และคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.9 แผนภาพแสดงอุณหภูมิและบรรยากาศควบคุมภายในเตาระหว่างการทดลองด้วยสภาวะอัตราการเย็นตัวคงที่

ภาพที่ 3.9 แสดงอุณหภูมิและบรรยากาศควบคุมภายในเตาระหว่างการทดลองด้วยสภาวะอัตราการเย็นตัวคงที่ โดยมีรูปแบบการให้ความร้อนและคงอุณหภูมิเหมือนกับการทดลองแบบ Isothermal oxidation แต่ศึกษาอุณหภูมิมีว้นเก็บต่างๆกัน 3 อุณหภูมิ ได้แก่  $560, 630$  และ  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  และภายหลังจากการคงอุณหภูมิที่อุณหภูมิศึกษานาน 3 นาที แล้วจะทำการสลับก๊าซอาร์กอนเป็นอากาศ (Air 21% ออกซิเจน, High pure grade) พร้อมกับการเริ่มเย็นตัวจากอุณหภูมิศึกษาด้วยอัตราการเย็นตัว  $0.6, 1.8, 5.4, 6.0, 7.2, 9.0$  และ  $10.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$  ซึ่งอัตราการเย็นตัวเหล่านี้ได้จากการคำนวณในหัวข้อ 3.2.3.4

### 3.2.4.3 การวิเคราะห์และจัดการข้อมูล

ภายหลังการทดลองในหัวข้อ 3.2.4.2 เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริกจะเก็บผลการทดลองในรูปของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อเวลา ดังนั้นเพื่อการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกไซด์สเกล และหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา จึงต้องแปลงข้อมูลดังกล่าวให้เป็นน้ำหนักที่เปลี่ยนไปจากการเกิดออกซิเดชันต่อพื้นที่ที่เกิดออกซิเดชัน ( $W$ , weight change per area) กับรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเกิดออกซิเดชัน (นับเวลา  $t=0$  ทันทีภายหลังการสลับวาล์วก๊าซจากอาร์กอนเป็นอากาศ) และสร้างกราฟระหว่าง  $W$  กับ  $t^{1/2}$  สำหรับการทดลองแบบ Isothermal oxidation

ในส่วนของสภาวะ Non-isothermal oxidation ให้ทำการสร้างกราฟระหว่าง  $(n-1) \ln W + \ln [dW/dT]$  กับ  $1/T$  (สมการที่ 2.7) โดยที่ใช้  $n=2$  ทำในลักษณะเดียวกันนี้จนครบทุกสภาวะที่ทำการทดลอง บันทึกผลเพื่อวิเคราะห์ต่อไป

### 3.2.4.4 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

เมื่อการทดลองเสร็จสิ้นในแต่ละสภาวะ ต้องทำการเก็บชิ้นงานโดยกำหนดด้านอ้างอิงบนชิ้นงานแล้วเขียนรายละเอียดของสภาวะนั้นกำกับไว้ จากนั้นนำไป mount โดยให้ด้านอ้างอิงอยู่ตำแหน่งเดียวกันทุกครั้ง ชัดชิ้นงานที่ mount แล้วด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ โดยหมุนชิ้นงาน 45 องศา ทุกครั้งก่อนเปลี่ยนเบอร์กระดาษทราย จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค วัดความหนาของออกไซด์สเกล และทำการหาค่าเฉลี่ยของความหนาสำหรับแต่ละสภาวะ บันทึกผล และสร้างเป็นกราฟระหว่างความหนากับอัตราการเย็นตัว หรือ ความหนากับอุณหภูมิในการทดลอง Isothermal oxidation

### 3.2.5 สร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกล

ภายหลังการวิเคราะห์และจัดการข้อมูลในหัวข้อ 3.2.4.3 แล้วจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่ กับเวลาในการเกิดออกซิเดชัน ของทั้งแบบ Isothermal oxidation และ Non-isothermal oxidation ดังมีรูปทั่วไปตามสมการที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ จากนั้นสร้างสมการเพื่อทำนายปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้น โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.8-3.12 ของการทดลองทั้งแบบ Isothermal oxidation และ Non-isothermal oxidation ร่วมกับกราฟอัตราการเย็นตัวแบบขั้นบันได จากข้อ 3.2.3.4 ดังจะกล่าวในผลการทดลองบทที่ 4 หัวข้อ 4.5 สมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกล<sup>[5]</sup>

$$W_{total} = \sum W_n \quad (3.7)$$

$$W = k_n^* t^{1/2} \quad (3.8)$$

$$W^2 = k_n t \quad (3.9)$$

$$k_n = B_n \exp\left(\frac{-Q_n}{RT}\right) \quad (3.10)$$

$$W_{total} = \sum \left[ B_n t^{1/2} \exp\left(\frac{-Q_n}{RT}\right) \right] \quad (3.11)$$

$$W_{total} = \sum \left[ B_n t \exp\left(\frac{-Q_n}{RT}\right) \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

- เมื่อ  $n$  คือ อัตราการเย็นตัว [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ] หรือ แต่ละอุณหภูมิคงที่ สำหรับการสร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลแบบ Non-isothermal oxidation และ Isothermal oxidation ตามลำดับ
- $B_n$  คือ ค่าคงที่ของแต่ละอัตราการเย็นตัว หรือ แต่ละอุณหภูมิคงที่ สำหรับการสร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลแบบ Non-isothermal oxidation และ Isothermal oxidation ตามลำดับ
- $Q_n$  คือ พลังงานกระตุ้น (activation energy) ของแต่ละอัตราการเย็นตัว หรือ แต่ละอุณหภูมิคงที่ สำหรับการสร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลแบบ Non-isothermal oxidation และ Isothermal oxidation ตามลำดับ
- $T$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของแต่ละช่วงที่กำหนดให้มีอัตราการเย็นตัวคงที่ หรือ กำหนดให้อุณหภูมิคงที่ สำหรับการสร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลแบบ Non-isothermal oxidation และ Isothermal oxidation ตามลำดับ
- $t$  คือ ช่วงเวลาที่กำหนดให้มีอัตราการเย็นตัวคงที่ หรือกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ สำหรับการสร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลแบบ Non-isothermal oxidation และ Isothermal oxidation ตามลำดับ

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ภายหลังทำการทดลองตามวิธีการศึกษาวิจัยในบทที่ 3 จะได้ผลการทดลองซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ และอธิบายเพื่อให้บรรลุจุดประสงค์ของงานวิจัย อันได้แก่ การอธิบายผลของ (1) อัตราการเย็นตัว (2) อุณหภูมิผิวบนเก็บ (3) เวลาที่ใช้ในการเกิดออกซิเดชัน และ (4) ตำแหน่งที่แตกต่างกันบนผิวเหล็ก ต่อปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดบนผิวของเหล็กแผ่นรีดร้อนในกระบวนการออกซิเดชันในบรรยากาศ รวมถึงได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถคำนวณอุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่งต่างๆบนผิวเหล็กระหว่างการเย็นตัว และได้สมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกล ซึ่งในบทนี้จะแสดงผลการทดลองในรูปแบบของตาราง รูปแสดงโครงสร้างจุลภาค และกราฟความสัมพันธ์เพื่อความสะดวกในการอ่านข้อมูล

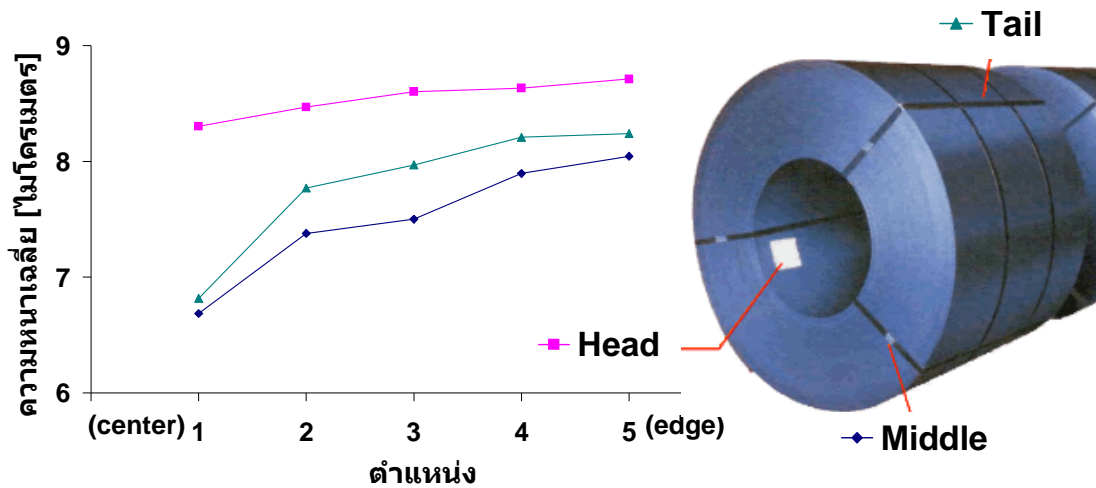
#### 4.1 ผลการศึกษาตำแหน่งที่แตกต่างกันบนผิวเหล็กต่อความหนาออกไซด์สเกล

ภายหลังการกำหนดตำแหน่งบนผิวเหล็กแผ่นที่ต้องการศึกษาความหนาของออกไซด์สเกลดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.1.1 แล้ว จึงทำการตัดชิ้นงานจากตำแหน่งเหล่านั้นทั้งหมด 15 ชิ้น ผลการตรวจวัดความหนาของออกไซด์สเกลของชิ้นงานก่อนเฉลี่ยแสดงในภาคผนวก ข และตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยของความหนาออกไซด์สเกลในแต่ละตำแหน่ง ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ความหนาเฉลี่ยของออกไซด์สเกลที่ตำแหน่ง H1-5, M1-5 และ T1-5 (ไมครอน)

	ส่วนต้น (Head, H)	ส่วนกลาง (Middle, M)	ส่วนปลาย (Tail, T)
1 (กึ่งกลางแผ่น, center)	8.31	6.69	6.82
2	8.47	7.38	7.77
3	8.60	7.50	7.97
4	8.63	7.90	8.21
5 (ขอบแผ่น, edge)	8.71	8.04	8.24

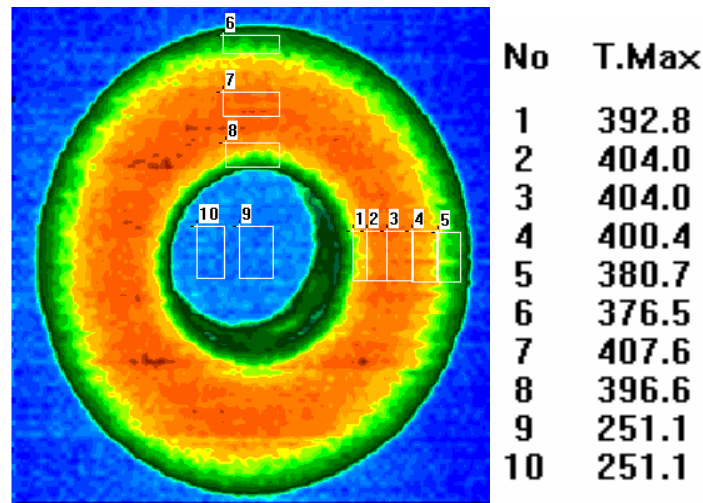
จากผลการทดลองพบว่าที่ตำแหน่งแตกต่างกันบนผิวเหล็ก จะมีความหนาของออกไซด์สเกลที่แตกต่างกัน โดยออกไซด์สเกลของชิ้นงานที่ได้จากส่วนต้น (Head) มีความหนามากกว่าออกไซด์สเกลบนชิ้นงานส่วนปลาย (Tail) และหนากว่าออกไซด์สเกลบนชิ้นงานส่วนกลาง (Middle) ตามลำดับ ในทุกๆตำแหน่ง และความหนาออกไซด์สเกลมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อชิ้นงานอยู่ใกล้ขอบ (edge) มากขึ้น เหมือนกันทั้งส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลาย ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาออกไซด์สเกลกับตำแหน่งบนม้วนเหล็ก

จากภาพที่ 4.1 วิเคราะห์ปัจจัยด้านอุณหภูมิขณะเย็นตัวของแต่ละตำแหน่ง จะพบว่า ส่วนกลางเป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ส่วนต้น และส่วนปลายมีอุณหภูมิต่ำที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาซึ่งมีการแพร่ของอะตอมเหล็ก และออกซิเจนเป็นขั้นกำหนดอัตรา และการแพร่ของอะตอมเหล็กและออกซิเจนมีค่าสูงที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่พิจารณานั้นมีปริมาณออกซิเจนไม่เท่ากัน กล่าวคือปริมาณออกซิเจนในส่วนกลางซึ่งอยู่ภายในม้วนเหล็กที่ม้วนตัวแน่น มีน้อยกว่าในส่วนต้น และส่วนปลายซึ่งสัมผัสกับอากาศมากกว่า ดังนั้นแม้ว่าส่วนกลางจะมีอุณหภูมิสูงเหมาะสมกับการเกิดออกซิเดชัน แต่ปริมาณอะตอมออกซิเจนไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยากับอะตอมเหล็ก การโต หรือ เปลี่ยนแปลง โครงสร้างของออกไซด์สเกลจึงเกิดขึ้นจากการสลายตัวของออกไซด์สเกลที่มีสัดส่วนออกซิเจนต่อเหล็กมากที่สุด เพื่อชดเชยอะตอมของออกซิเจนเพียงอย่างเดียว ซึ่งเมื่อเทียบกับส่วนต้นซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าเล็กน้อยแต่มีปริมาณออกซิเจนเพียงพอตลอดเวลา ทำให้การโตขึ้นของออกไซด์สเกลเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นออกไซด์สเกลในส่วนต้นจึงหนากว่าส่วนกลาง และส่วนปลาย ตามลำดับ และสามารถอธิบายความหนาของออกไซด์สเกลที่ตำแหน่ง 1 (ขอบ) – 5 (กึ่งกลาง) ได้ในลักษณะเดียวกันกล่าวคือ ที่ตำแหน่ง 1 หรือต่อไปจะเรียกว่าตำแหน่งขอบ จะมีลักษณะ edge drop ซึ่งทำให้ตำแหน่งขอบบางกว่าตำแหน่งถัดเข้าไปจนถึงกึ่งกลางแผ่น เป็นผลให้ที่ตำแหน่งขอบสัมผัสกับอากาศ (ออกซิเจน) มากกว่าตำแหน่งอื่น ในขณะที่ตำแหน่ง 5 หรือต่อไปจะเรียกว่าตำแหน่งกึ่งกลาง ซึ่งแม้ว่าจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าตำแหน่งขอบแต่ปริมาณออกซิเจนที่จำกัดเนื่องจากม้วนเหล็กที่ม้วนตัวแน่นจึงทำให้ความหนาของออกไซด์สเกลน้อยกว่าในตำแหน่งขอบนั่นเอง

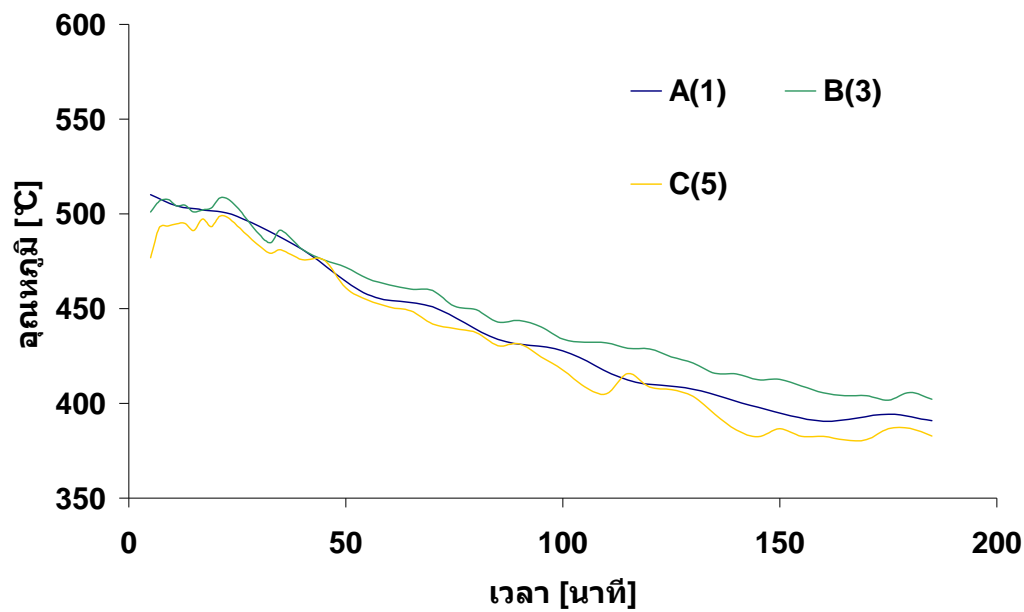
## 4.2 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิระหว่างเย็นตัวของมันเหล็กจากโรงงาน



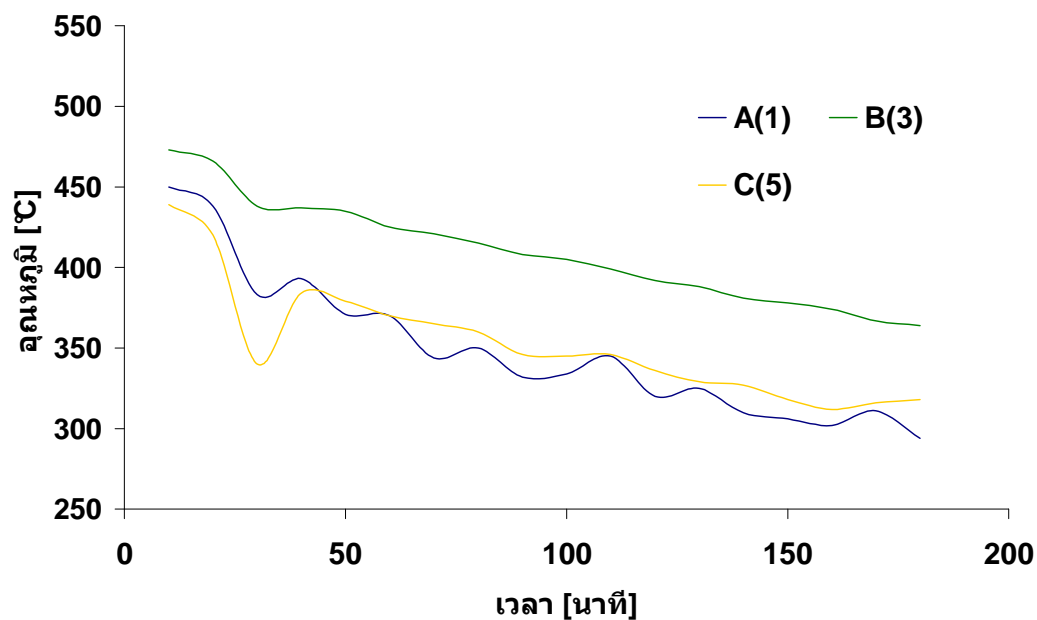
ภาพที่ 4.2 ตัวอย่างภาพถ่ายความร้อนของมันเหล็กพร้อมระบุอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่สนใจ ภายหลังการเย็นตัวไปเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 40 นาที (160 นาที), ถ่ายโดยกล้องอินฟราเรดรุ่น LAND cyclop T135

ภายหลังการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องอินฟราเรด และ infrared gun ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 ผลจากกล้องอินฟราเรดแสดงในลักษณะภาพถ่ายวัตถุร้อนดังแสดงในภาพที่ 4.2 โดยมีทั้งหมด 43 ภาพ ที่เวลาทันทีภายหลังออกจาก down coiler และทุกๆ 2 นาที ในครึ่งชั่วโมงแรก และทุกๆ 5 นาที จนครบเวลา 3 ชั่วโมง ระหว่างการเย็นตัวในบรรยากาศ ซึ่งแต่ละภาพระบุอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่สนใจ เช่นกรอบสี่เหลี่ยมที่มีหมายเลข 1, 3 และ 5 กำกับอยู่ในภาพที่ 4.2 ซึ่งต่อไปจะเรียกว่าตำแหน่ง A, B และ C ตามลำดับ เป็นต้น ส่วน infrared gun ได้ค่าเป็นตัวเลขแสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่ง A, B และ C ตำแหน่งละ 36 ค่า (วัดทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง) เมื่อนำข้อมูลอุณหภูมิในตำแหน่ง A, B และ C ของภาพถ่ายความร้อนแต่ละภาพมาสร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในการเย็นตัว จะมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.3 ขณะเดียวกันเมื่อสร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิที่ได้จาก infrared gun ในตำแหน่ง A, B และ C กับเวลาในการเย็นตัวจะมีลักษณะดังภาพที่ 4.4

จากภาพพบว่าอุณหภูมิในตำแหน่ง A, B และ C ของภาพที่ 4.4 มีค่าลดลงแล้วกลับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา 30 นาที ซึ่งน่าจะเป็นความผิดพลาดจากการวัด ในขณะที่อุณหภูมิในตำแหน่ง A, B และ C ของภาพที่ 4.3 มีความละเอียดมากกว่า (ภาพที่ 4.3 ใช้ข้อมูล 43 จุด ในขณะที่ภาพที่ 4.4 ใช้ข้อมูล 36 จุด) และมีการแกว่งของข้อมูลที่น้อยกว่า ดังนั้นจึงตัดสินใจใช้ข้อมูลในตำแหน่ง A, B และ C ของภาพที่ 4.4 ซึ่งวัดได้จากกล้องอินฟราเรดเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น



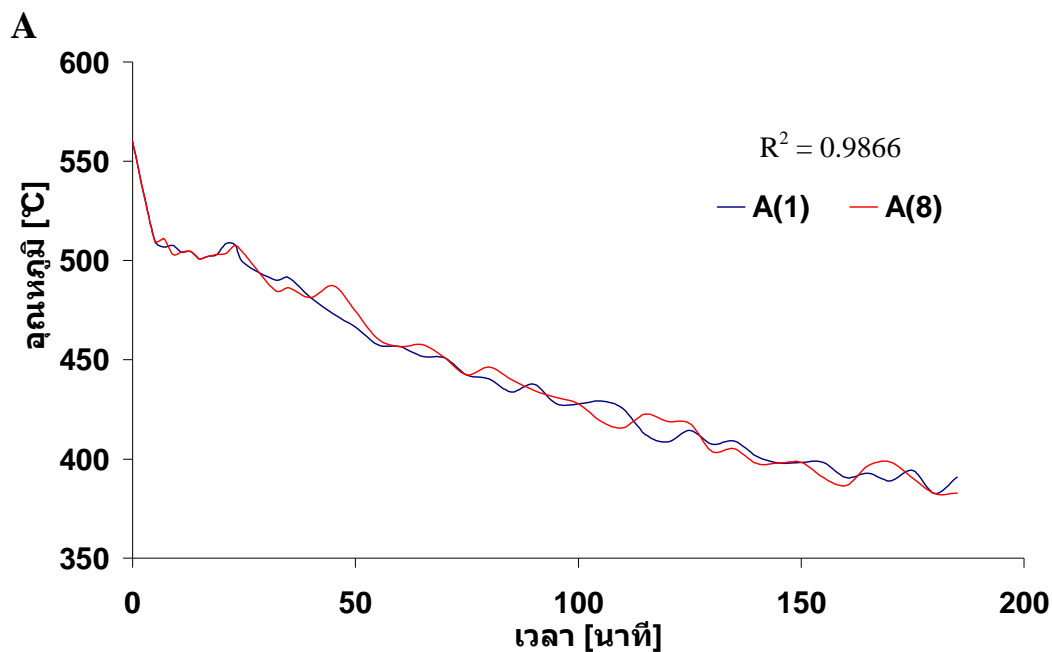
ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 1, 3 และ 5 (หรือต่อไปนี้จะเรียกว่า ตำแหน่ง A, B และ C ตามลำดับ) กับเวลาที่ใช้ในการเขียนตัว, วัดโดยกล้องอินฟราเรดรุ่น LAND cyclop T135



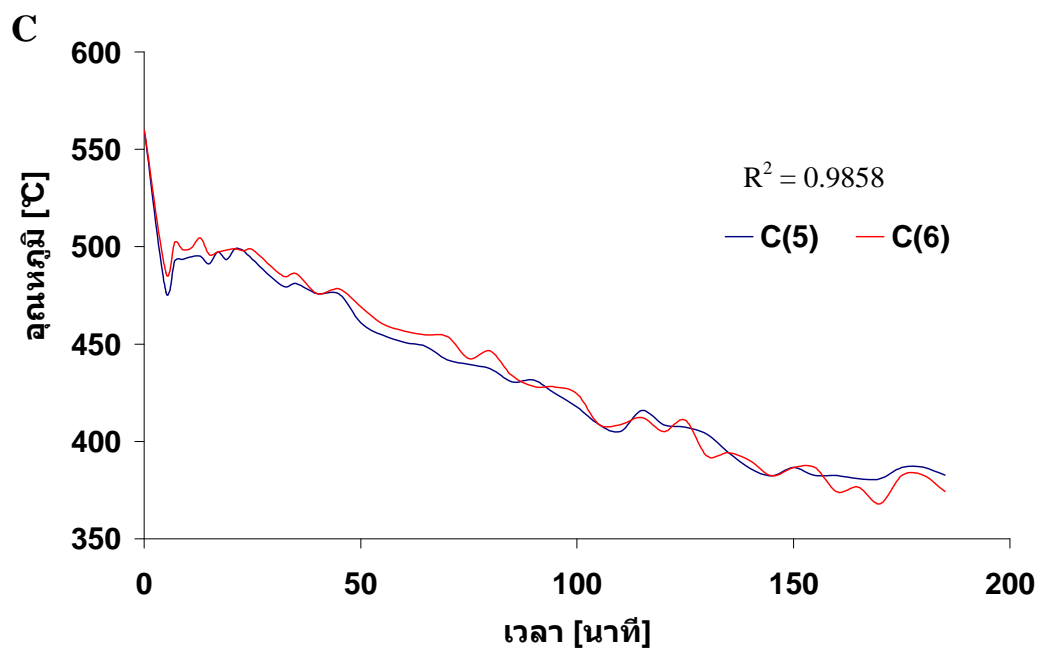
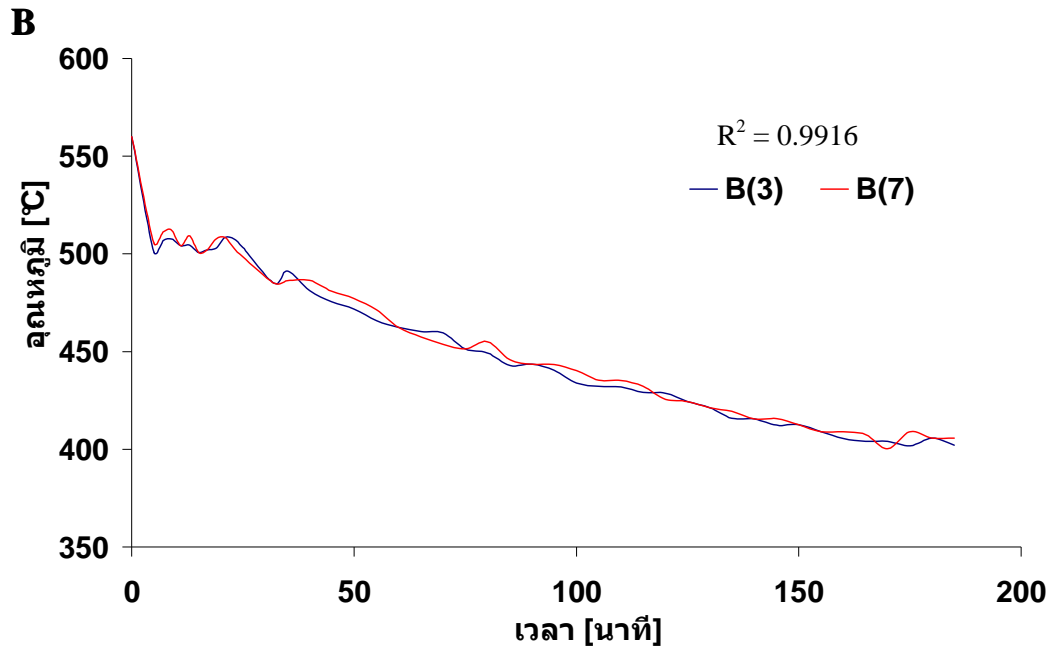
ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่ง A, B และ C กับเวลาที่ใช้ในการเขียนตัว, วัดโดยinfrared gun



ผลของการทดลองเพื่อยืนยันสมมติฐานว่า ม้วนเหล็กมีสมมาตรในการถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี โดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิของตำแหน่งในระยะรัศมีเดียวกัน ได้แก่ เปรียบเทียบตำแหน่ง 1 กับ 8, 3 กับ 7 และ 5 กับ 6 (ในภาพที่4.2) และหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) ของข้อมูลคู่หนึ่งๆ พบว่าค่า  $R^2$  สำหรับตำแหน่ง 1 กับ 8 มีค่าเท่ากับ 0.9866, ตำแหน่ง 3 กับ 7 มีค่าเท่ากับ 0.9916 และตำแหน่ง 5 กับ 6 มีค่าเท่ากับ 0.9858 ดังแสดงในภาพที่4.5 เส้นสีน้ำเงินคือค่าของตำแหน่งในแกนตั้ง (6, 7 และ 8) และเส้นสีแดงคือค่าของตำแหน่งในแกนนอน (1, 3 และ 5) จากค่า  $R^2$  ทำให้เชื่อได้ว่าม้วนเหล็กมีสมมาตรตามแกนรัศมีจริง ดังนั้นไม่ว่าตำแหน่งในม้วนเหล็กที่สนใจนั้นจะอยู่ในแนวแกนตั้งหรือแกนนอน ถ้าอยู่ในระยะรัศมีที่เท่ากันย่อมมีอุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัวเท่ากัน

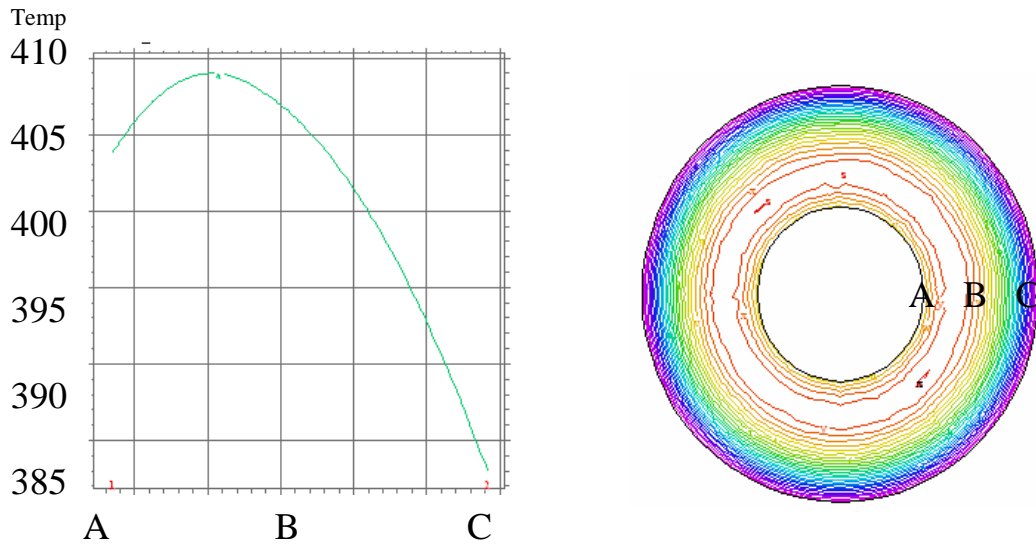


ภาพที่4.5 เปรียบเทียบอุณหภูมิของตำแหน่ง A, B และC (ตำแหน่งบนแกน x) กับตำแหน่งที่ห่างจากจุดศูนย์กลางเท่ากันในแกน y, (สีแดง) ค่าอุณหภูมิของตำแหน่งบนแกน y (สีน้ำเงิน) ค่าอุณหภูมิของตำแหน่งบนแกน x



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบอุณหภูมิของตำแหน่ง A, B และ C (ตำแหน่งบนแกน x) กับตำแหน่งที่ห่างจากจุดศูนย์กลางเท่ากันในแกน y, (สีแดง) ค่าอุณหภูมิของตำแหน่งบนแกน y (สีน้ำเงิน) ค่าอุณหภูมิของตำแหน่งบนแกน x

### 4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ภาพที่4.6 ภาพจำลองอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆบนระนาบ  $z=w/2$  ที่เวลา 180นาที่

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น สามารถคำนวณและแสดงผลทั้งในรูปแบบกราฟ ความสัมพันธ์ และข้อมูลตัวเลขดังแสดงในภาพที่4.6 ซึ่งต้องทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมกับรูปแบบการถ่ายเทความร้อนของม้วนเหล็กในงานวิจัยนี้ก่อน แบบจำลองจึงจะสามารถคำนวณแสดงแสดงผลที่มีความน่าเชื่อถือ

#### 4.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

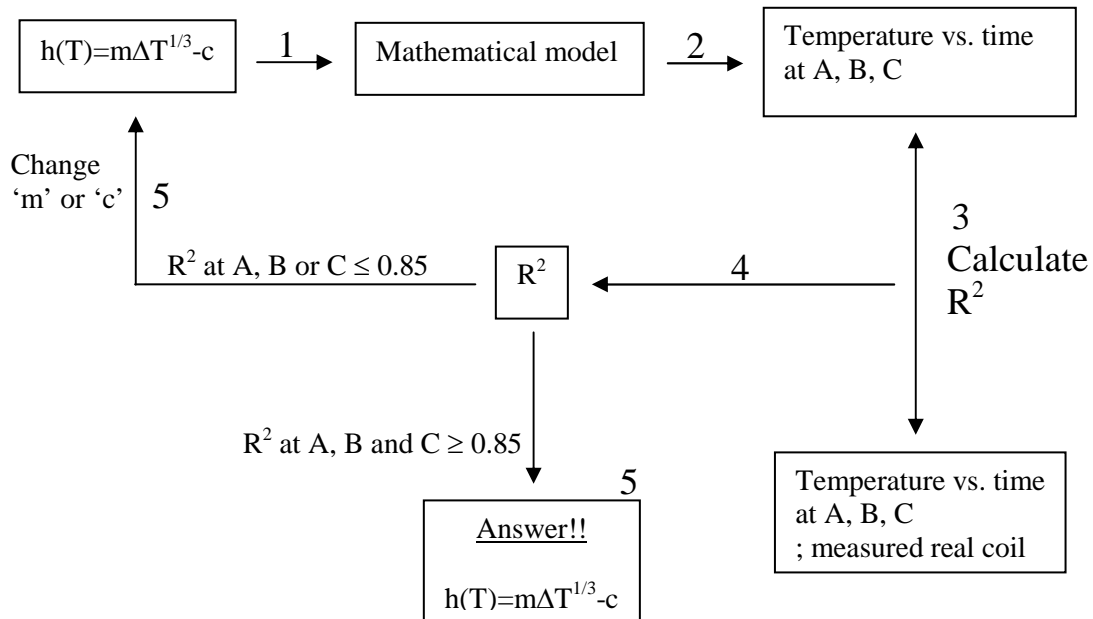
เนื่องจากมีผู้เสนอค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป<sup>[3]</sup> ดังสมการ

$$h_m = 1.31\Delta T^{1/3} \quad [W/m^2 \text{ } ^\circ C] \quad (4.1)$$

เมื่อ  $h_m$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

$\Delta T$  คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุร้อนกับอากาศ

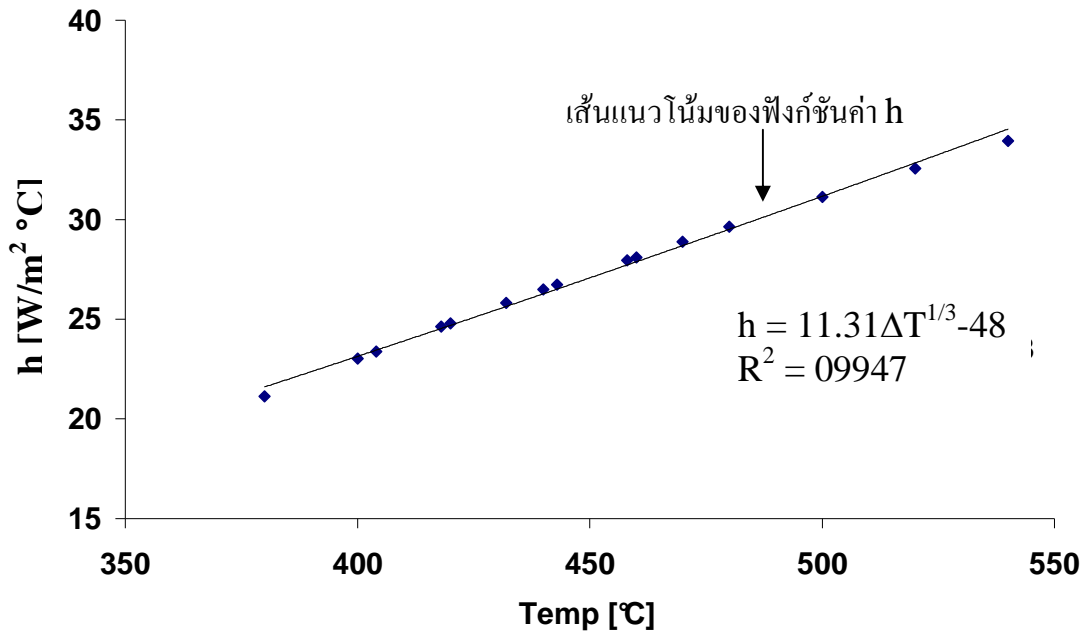
ดังนั้นจึงได้ลองใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $h$ ) ดังกล่าวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนี้ไม่เหมาะสมกับรูปแบบการถ่ายเทความร้อนของม้วนเหล็กในงานวิจัย กล่าวคือ ค่า  $R^2$  ที่ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่ง A, B และ C ของผลจากการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับอุณหภูมิจริงมีค่าไม่เหมาะสม



ภาพที่ 4.7 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ดังนั้นจึงต้องสร้างฟังก์ชันค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขึ้น โดยอาศัยรูปแบบความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกับสมการที่ 4.1 แต่เปลี่ยนค่าคงที่ซึ่งขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแสดงในภาพที่ 4.7 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดสมการ  $h(T) = m\Delta T^{1/3} - c$  ใช้ค่า  $m_n$  และ  $c_n$
2. นำฟังก์ชัน  $h$  ดังกล่าวไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พร้อมทั้งเขียนคำสั่งให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณอุณหภูมิที่ตำแหน่ง A, B และ C ในระหว่างเย็นตัว
3. หาค่า  $R^2$  ของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง A, B และ C จากการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับอุณหภูมิจริง
4. ถ้า  $R^2$  สำหรับทุกตำแหน่ง A, B และ C มีค่ามากกว่า 0.85 ให้ใช้ฟังก์ชัน  $h(T) = m_n\Delta T^{1/3} - c_n$
5. ถ้า  $R^2$  ในตำแหน่ง A, B หรือ C ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.85 ให้กลับไปขั้นตอนที่ 1 และเปลี่ยนค่า  $m_n$  หรือ  $c_n$

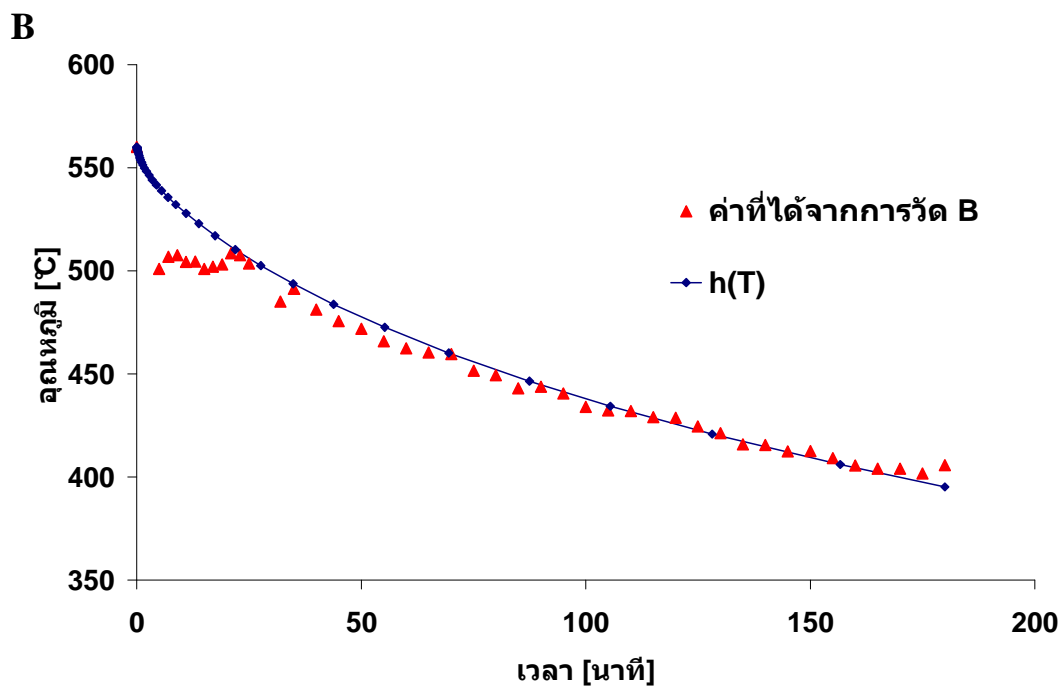
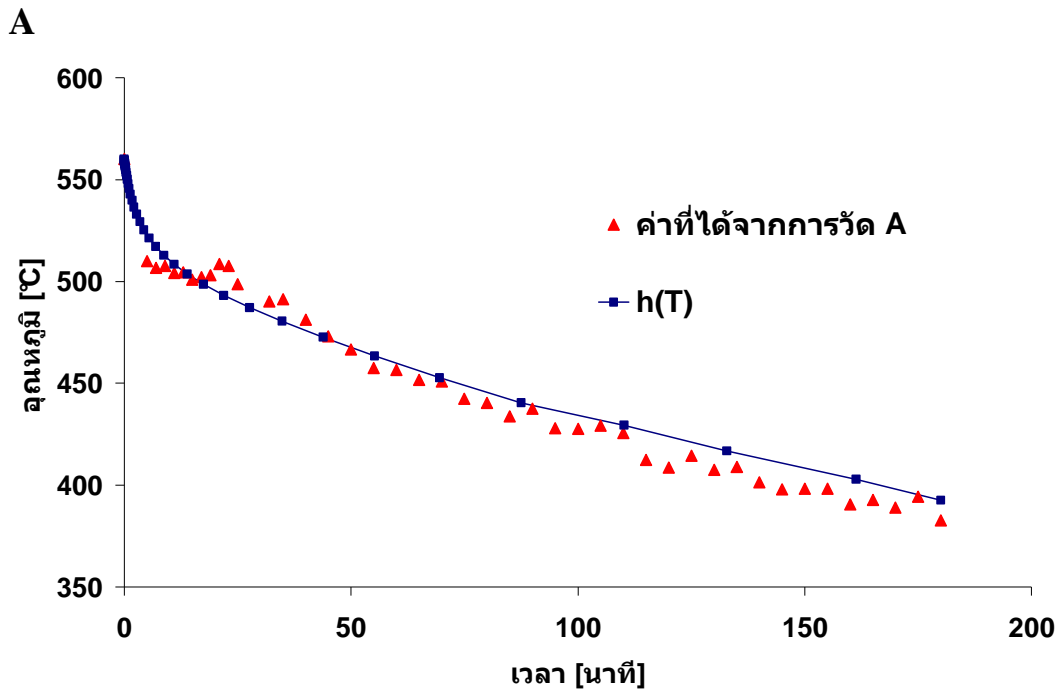


ภาพที่ 4.8 ภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

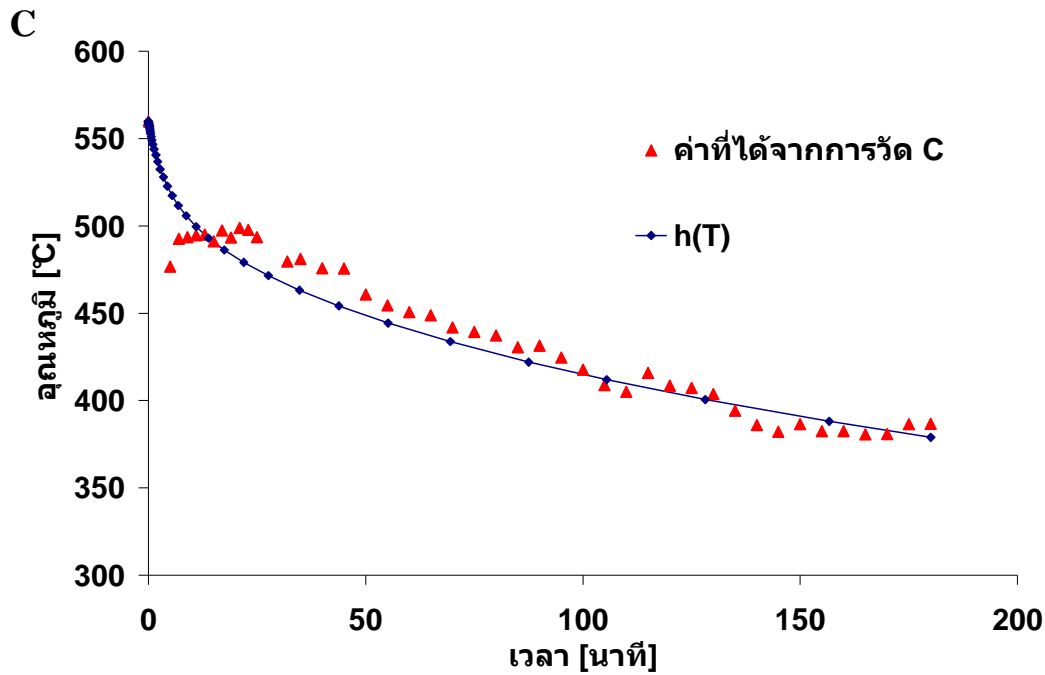
ภายหลังการ trial and error หลายครั้งจึงได้  $R^2$  ของตำแหน่ง A, B และ C เท่ากับ 0.9702, 0.8617 และ 0.8885 ตามลำดับ (ตารางแสดงค่าสำหรับการคำนวณ  $R^2$  แสดงในภาคผนวก จ) เมื่อ  $R^2$  ของทุกตำแหน่งมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.85 แล้วฟังก์ชัน  $h$  ที่ใช้ในการคำนวณรอบนั้นจึงถือว่าเหมาะสมสำหรับรูปแบบการถ่ายเทความร้อนของม้วนเหล็กในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ (ดังภาพที่ 4.8)

$$h(T) = 11.31\Delta T^{1/3} - 48 \quad [W/m^2 \text{ } ^\circ C]$$

ภาพที่ 4.9 A-C แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ณ ตำแหน่ง A, B และ C ตามลำดับ เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณ (เส้นสีน้ำเงิน) ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และมีค่าเท่ากับ  $h(T) = 11.31\Delta T^{1/3} - 48 [W/m^2 \text{ } ^\circ C]$  กับค่าที่ได้จากการวัด (จุดสีแดง) บนระนาบ  $z=0$  โดยกำหนดอุณหภูมิมีวนเก็บเท่ากับ  $560^\circ C$



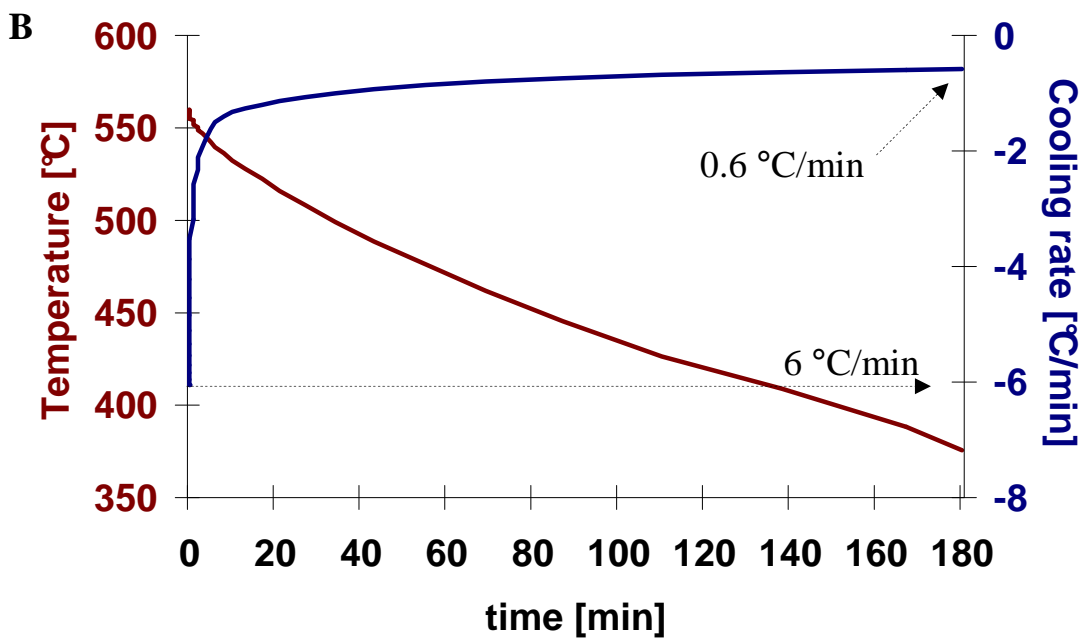
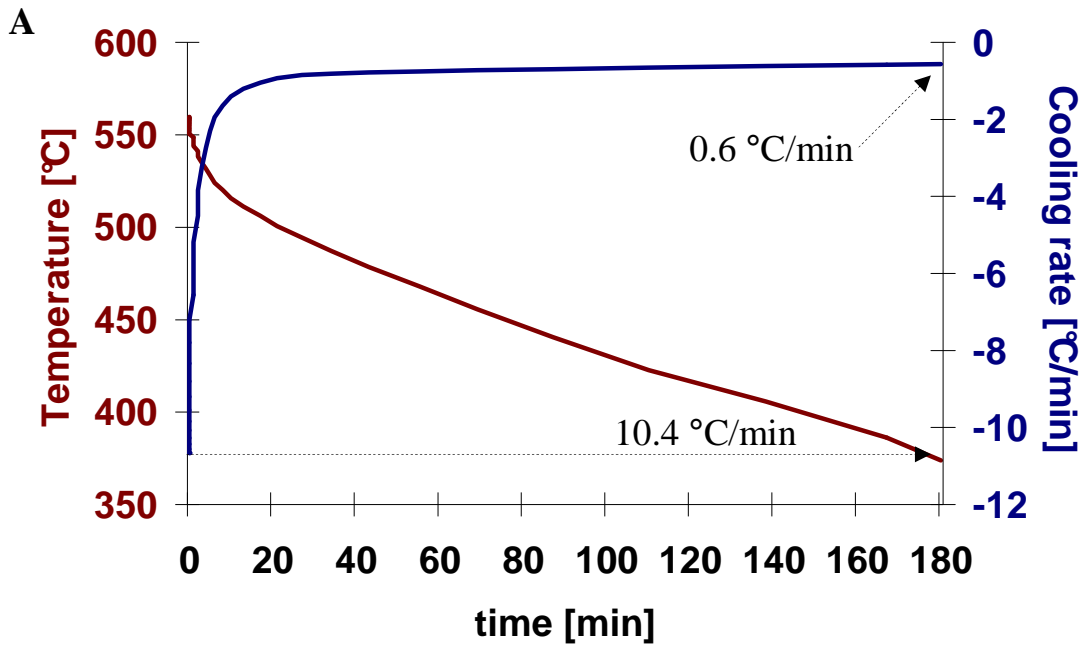
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ณ ตำแหน่ง A และ B เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณ (น้ำเงิน) กับค่าจากการวัด (แดง) บนระนาบ  $z=0$  โดยกำหนดอุณหภูมิผิวน้ำที่เท่ากับ  $560^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ณ ตำแหน่ง C เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณ (น้ำเงิน) กับค่าจากการวัด (แดง) บนระนาบ  $z=0$  โดยกำหนดอุณหภูมิมีวนเก็บเท่ากับ  $560^{\circ}\text{C}$

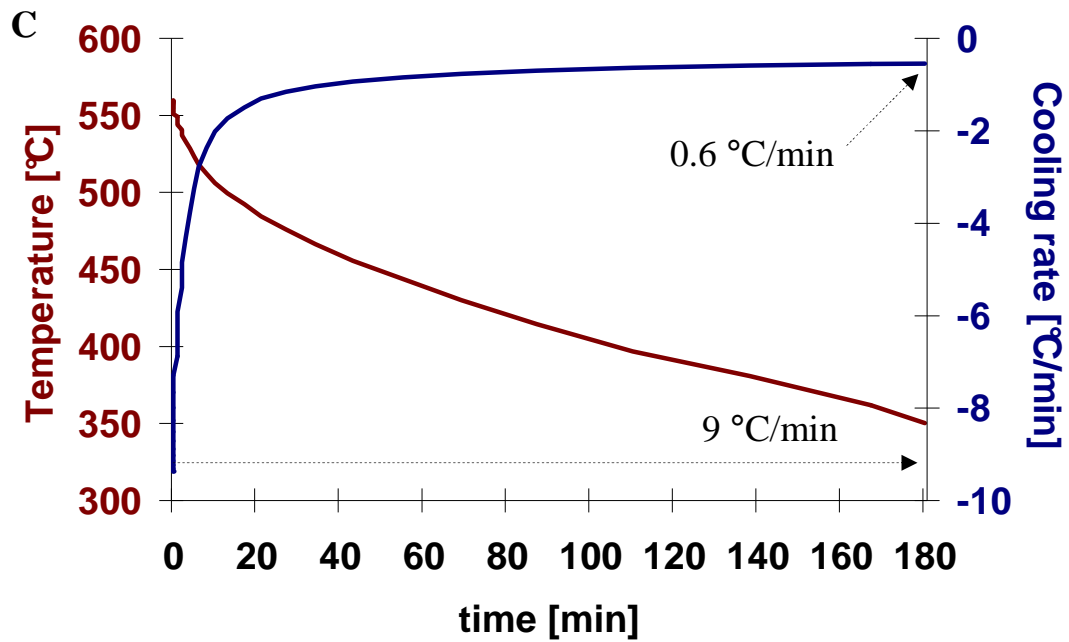
#### 4.3.2 แบบจำลองเพื่อกำหนดสภาวะการทดลอง

หลังจากที่ได้ค่า  $h$  ที่เหมาะสมกับรูปแบบการเย็นตัวของมีวนเหล็กในงานวิจัยนี้แล้ว จึงเขียนคำสั่งให้แบบจำลองคำนวณอุณหภูมิ และอัตราการเย็นตัวของตำแหน่ง A, B และ C เพื่อใช้ค่าอัตราการเย็นตัวในทั้ง 3 ตำแหน่งกำหนดช่วงอัตราการเย็นตัวคงที่สำหรับการทดลอง จำลองการเกิดออกไซด์สเกลด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแบบ Non-isothermal จากภาพที่ 4.10 A, B และ C พบว่าอัตราการเย็นตัวของตำแหน่ง A อยู่ในช่วง  $0.6-10.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ในขณะที่อัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่ง B และ C อยู่ในช่วง  $0.6-6^{\circ}\text{C}/\text{min}$  และ  $0.6-9^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ตามลำดับ



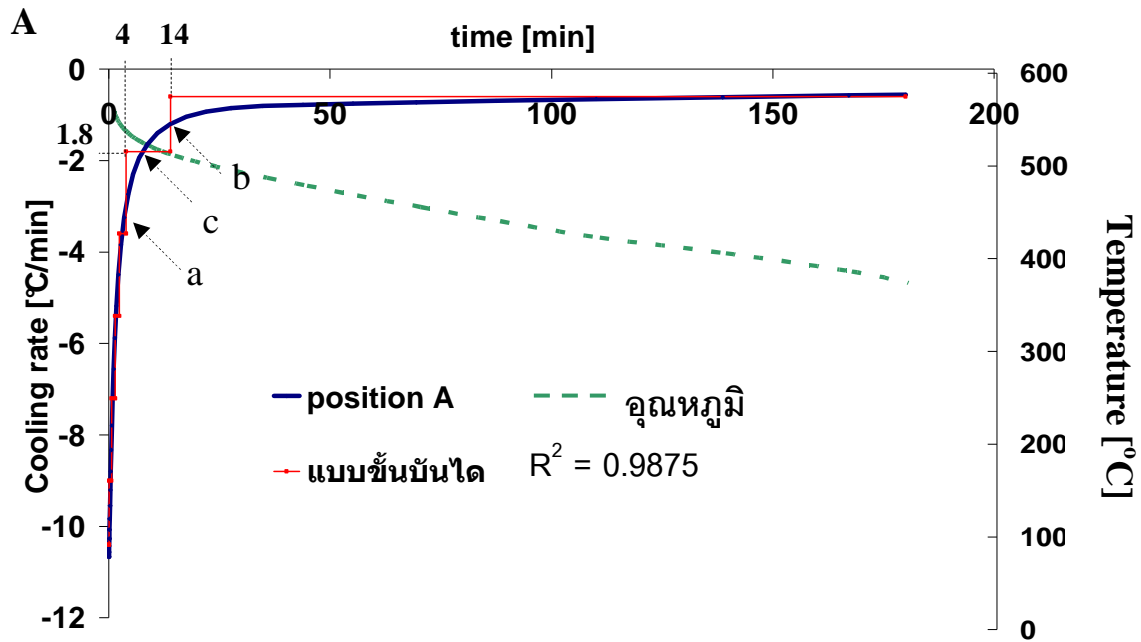
ภาพที่ 4.10 กราฟอัตราการเย็นตัว (เส้นสีน้ำเงิน) และอุณหภูมิ (เส้นสีน้ำตาล) ของตำแหน่ง A และ B บนระนาบ  $z=0$ , จำนวน โดยใช้อุณหภูมิมีวนเก็บเท่ากับ  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$





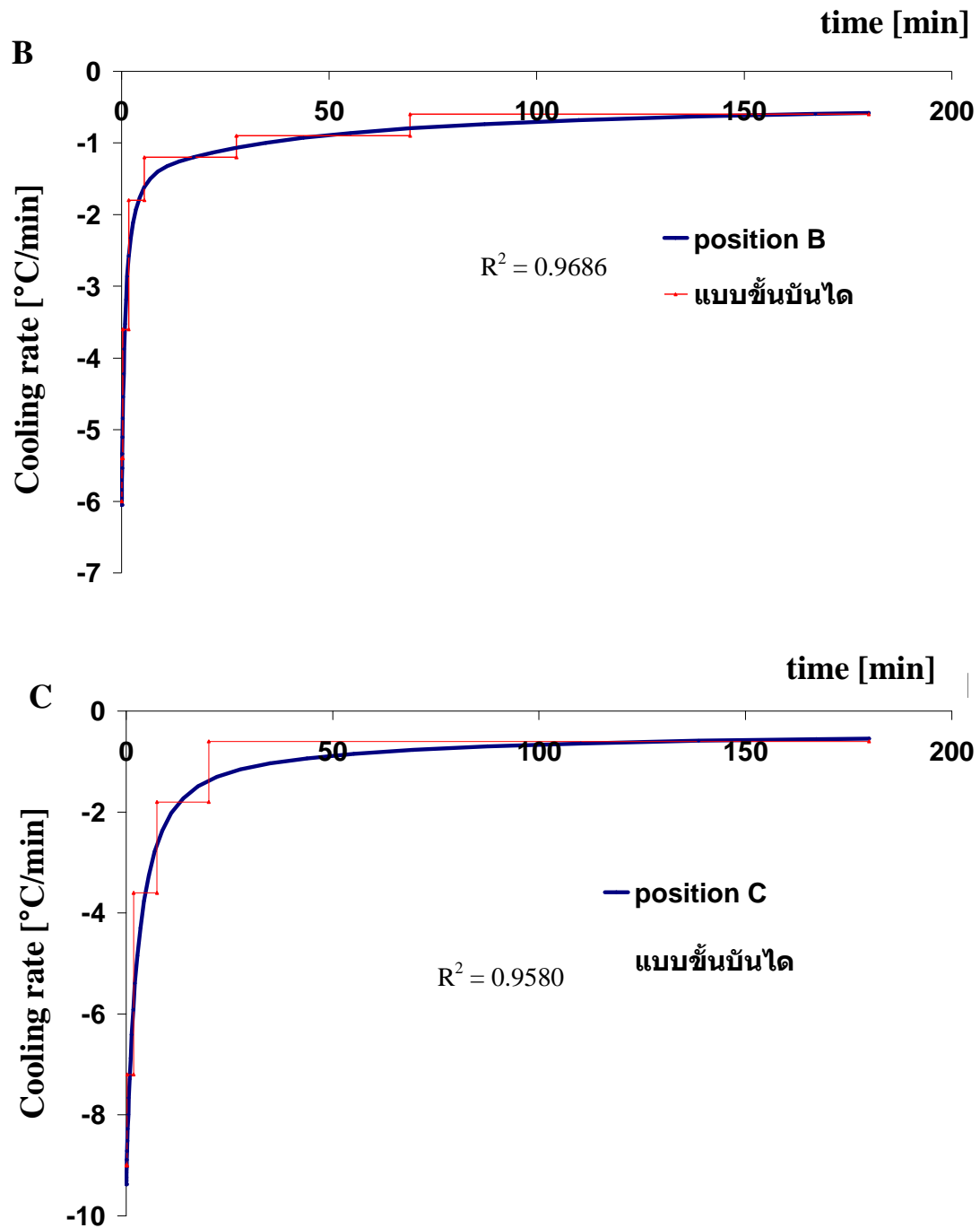
ภาพที่ 4.10 กราฟอัตราการเย็นตัว (เส้นสีน้ำเงิน) และอุณหภูมิ (เส้นสีน้ำตาล) ของตำแหน่ง C บนระนาบ  $z=0$ , คำนวณโดยใช้อุณหภูมิมีวนเก็บเท่ากับ  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$

เนื่องจากรูปแบบการเย็นตัวของมีวนเหล็กในความเป็นจริงเป็นการเย็นตัวแบบต่อเนื่อง (อัตราการเย็นตัวลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป, Continuous cooling) แต่การวิเคราะห์เทอร์โมกราฟิมетริกมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถจำลองรูปแบบการเย็นตัวแบบต่อเนื่องได้ ดังนั้นจึงต้องใช้รูปแบบการเย็นตัวที่เกิดจากการเฉลี่ยอัตราการเย็นตัวในช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยนี้จะใช้เป็นตัวแทนอัตราการเย็นตัวของทั้งช่วงเวลาที่ยกมานั้น โดยประเมินความถูกต้องของอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยได้โดยหาค่า  $R^2$  ของอัตราการเย็นตัวแบบต่อเนื่องที่คำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับอัตราการเย็นตัวเฉลี่ย ณ ช่วงเวลาเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.11 A, B และ C



ภาพที่4.11 กราฟอัตราการเย็นตัวเฉลี่ย (คงที่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ) ในลักษณะขั้นบันได ของตำแหน่ง A บนระนาบ  $z=0$ , คำนวณโดยใช้อุณหภูมิมีวนเก็บเท่ากับ  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$

ภาพที่4.11A พิจารณาส่วนของเส้นโค้ง (สีน้ำเงิน)  $ab$  ทุกๆจุดบนส่วนของเส้นโค้งนี้จะมีอัตราการเย็นตัวแบบต่อเนื่อง (อ่านค่าได้จากแกน  $y$ ) และส่วนของเส้นโค้งนี้ครอบคลุมช่วงเวลา 4-14 นาที เส้นตรงสีแดงซึ่งตัดกับส่วนของเส้นโค้ง  $ab$  คืออัตราการเย็นตัวเฉลี่ยในช่วงเวลา 4-14 นาที โดยมีค่าอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยเท่ากับ  $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  และจุด  $c$  คือ จุดกึ่งกลางของช่วงเวลาที่อัตราการเย็นตัวเฉลี่ยคงที่ และเป็นจุดตัวแทนสำหรับการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงที่มีอัตราการเย็นตัวคงที่นั้น ดังนั้นในการหาค่า  $R^2$  จะใช้การเทียบค่าอัตราการเย็นตัวแบบต่อเนื่องทุกค่าบนส่วนของเส้นโค้ง  $ab$  กับค่าอัตราการเย็นตัวเฉลี่ย  $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  และทำเช่นเดียวกันนี้กับทุกช่วงและทุกตำแหน่ง (A, B และ C) จะได้ค่า  $R^2$  สำหรับตำแหน่ง A, B และ C เท่ากับ 0.9875, 0.9686 และ 0.9580 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นชุดของอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยเหล่านี้จึงนำไปใช้เป็นสภาวะสำหรับการจำลองการเกิดออกซิเดชันภายใต้การเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ได้

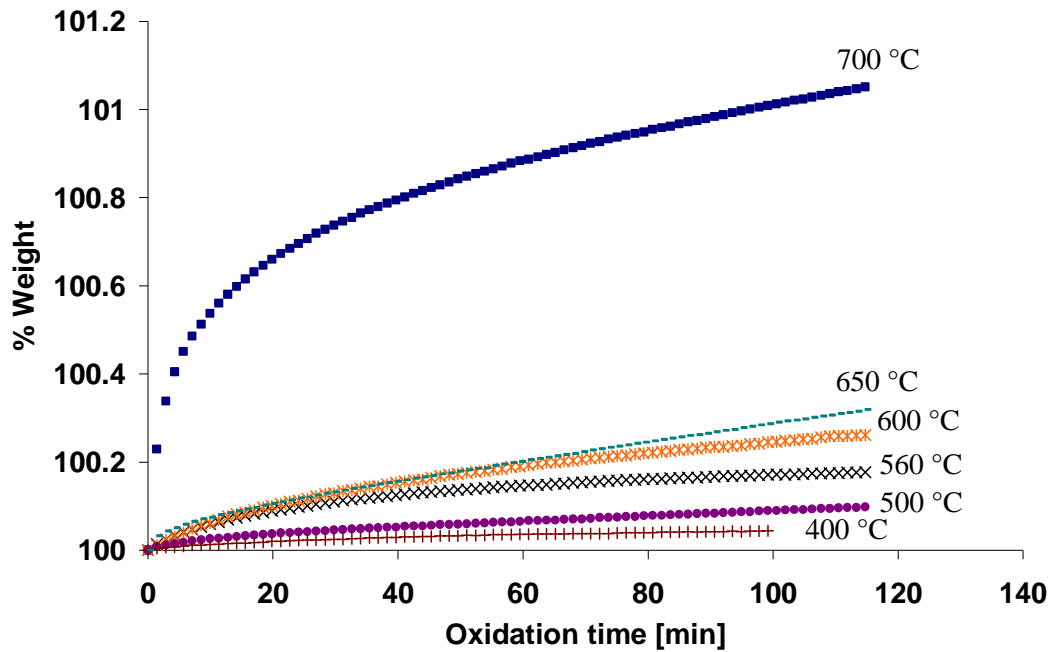


ภาพที่4.11 กราฟอัตราการเย็นตัวเฉลี่ย (คงที่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ)ในลักษณะขั้นบันได ของตำแหน่ง B และ C บนระนาบ  $z=0$ , กำหนดโดยใช้อุณหภูมิมีวนเก็บเท่ากับ  $560^{\circ}\text{C}$

#### 4.4 ผลการจำลองการเกิดออกไซด์สเกลด้วยการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก

##### 4.4.1 ออกซิเดชันภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal oxidation)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองจำลองการเกิดออกไซด์สเกล ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal oxidation) ที่อุณหภูมิ 700, 650, 600, 560, 500 และ  $400^{\circ}\text{C}$  โดยที่ผลการทดลอง แสดงในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อเวลา (%W/ oxidation time) ดังแสดงในภาพที่4.12



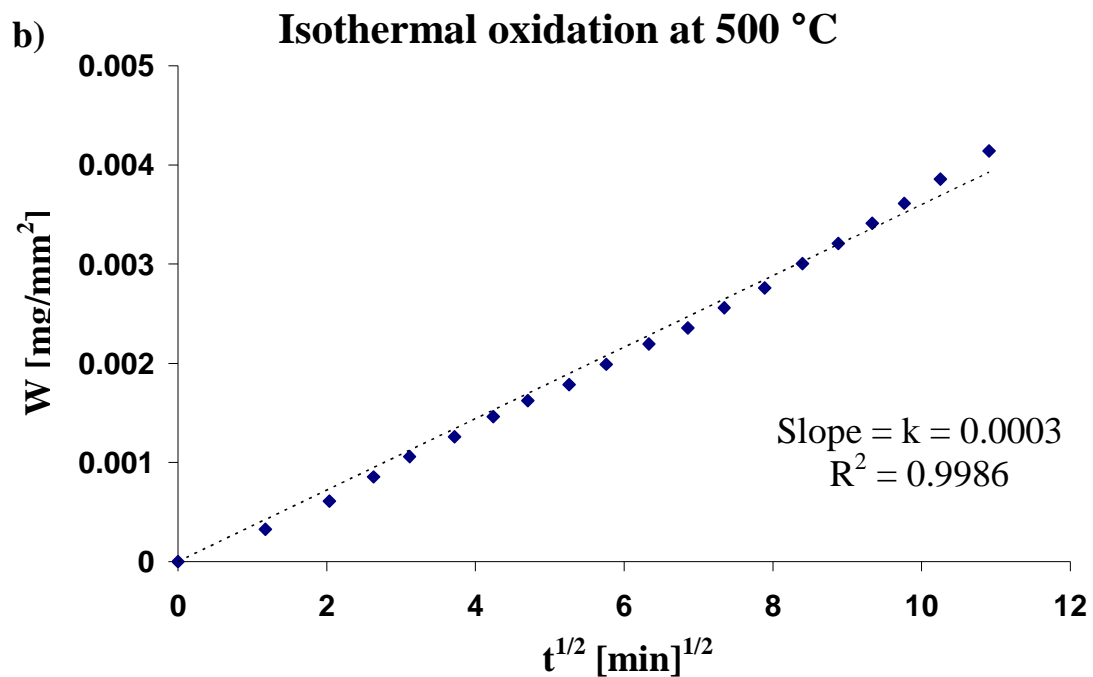
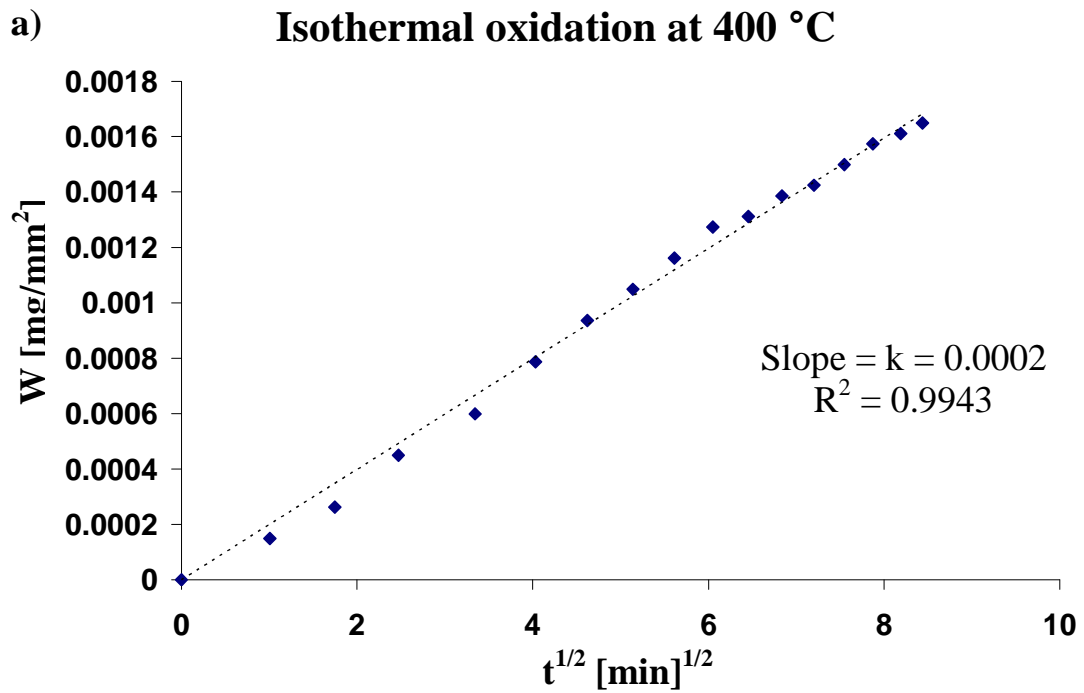
ภาพที่4.12 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก สำหรับสภาวะ Isothermal oxidation ที่อุณหภูมิ 700, 650, 600, 560, 500 และ400 °C, (%W vs. oxidation time)

จากผลการทดลองในภาพที่4.12 พบว่า เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้น หรือ อุณหภูมิในการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้น

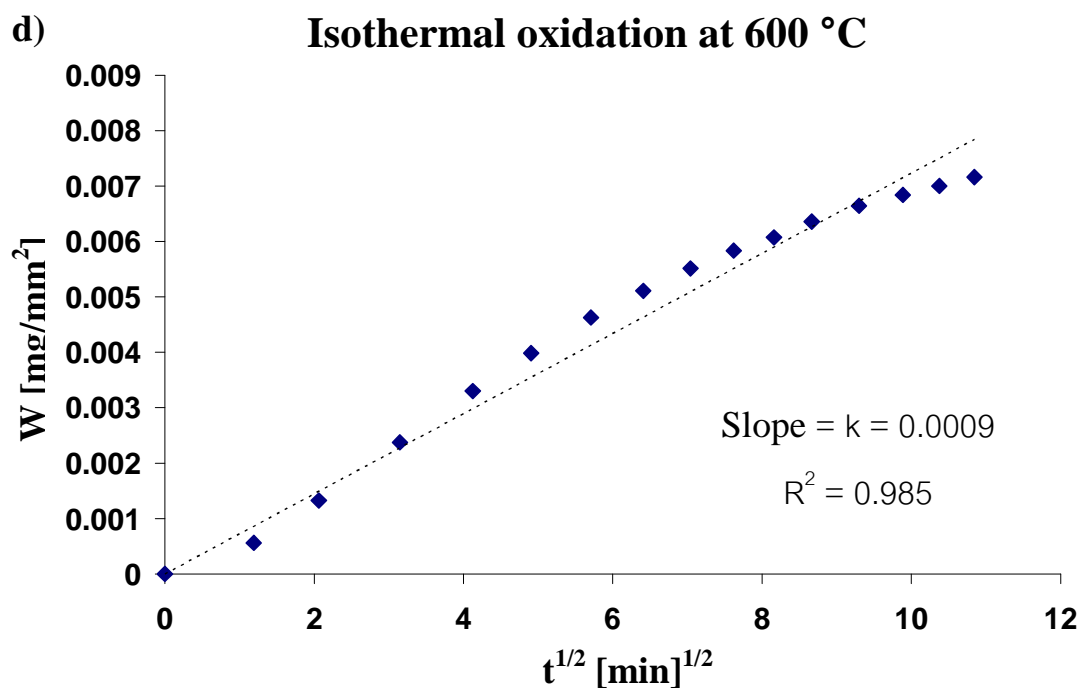
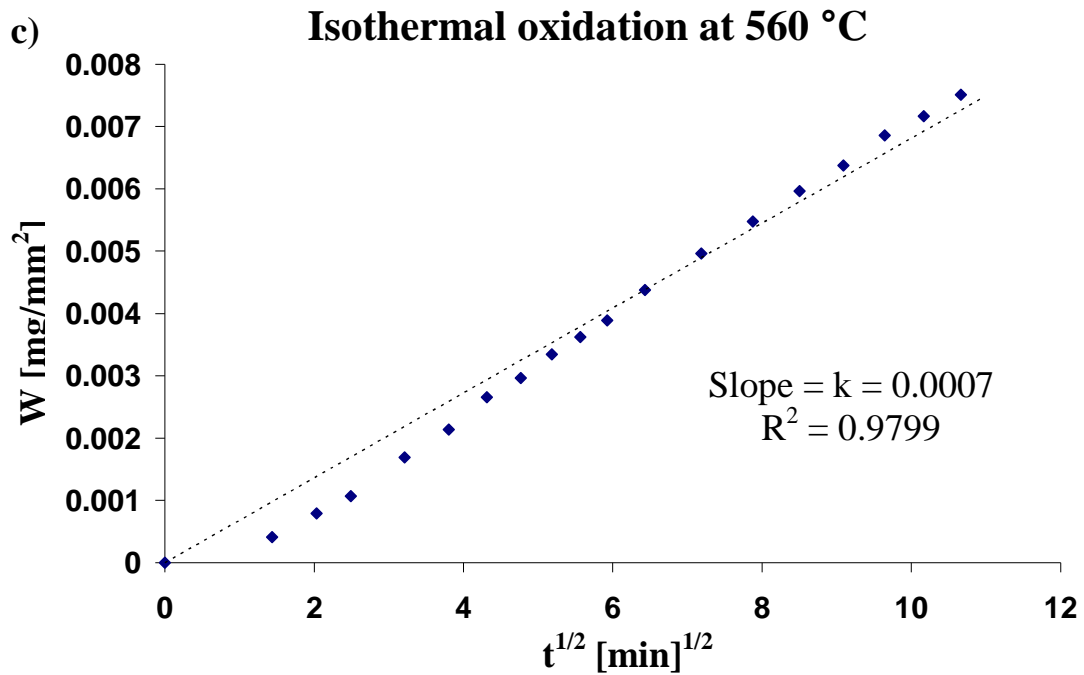
เพื่อการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกไซด์สเกล และหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา จึงต้องแปลงข้อมูลในรูปของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อเวลา (%W/ oxidation time) ให้เป็นน้ำหนักที่เปลี่ยนไปจากการเกิดออกซิเดชันต่อพื้นที่ที่เกิดออกซิเดชัน (W, weight change per area) กับรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเกิดออกซิเดชัน (นับเวลา t=0 ทันทีภายหลังการสลับวาล์วก๊าซจากอาร์กอนเป็นอากาศ) ดังนี้

$$\%W \xrightarrow[\text{การออกซิเดชัน}]{\begin{array}{l} \text{คูณด้วยน้ำหนักเริ่มต้น} \\ \text{หารด้วยพื้นที่ผิวที่เกิด} \end{array}} W$$

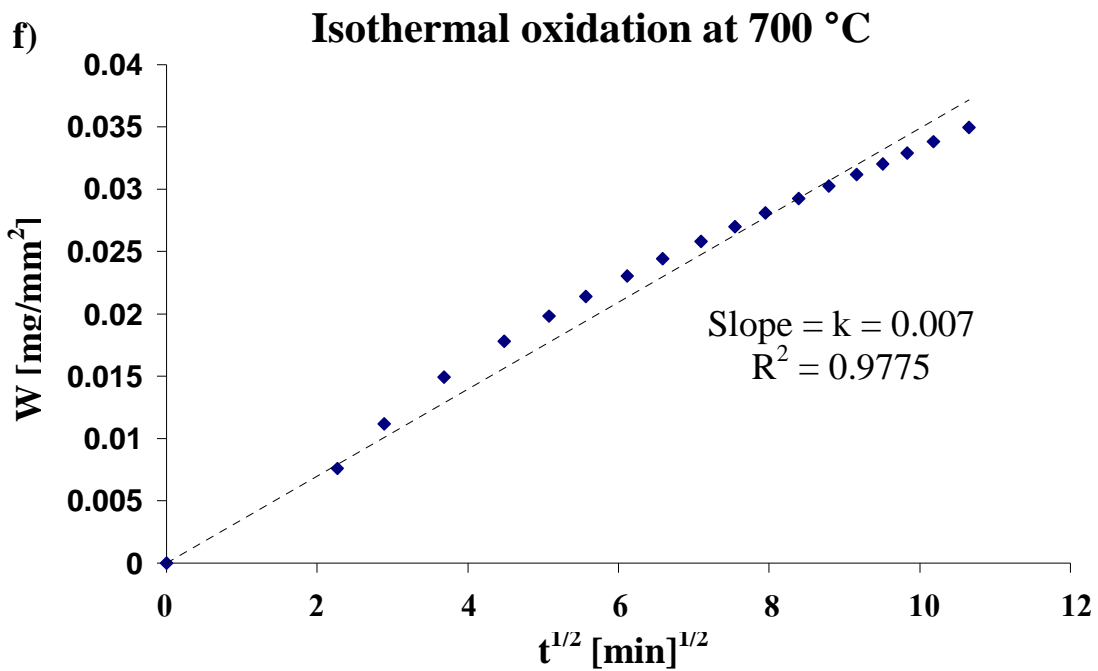
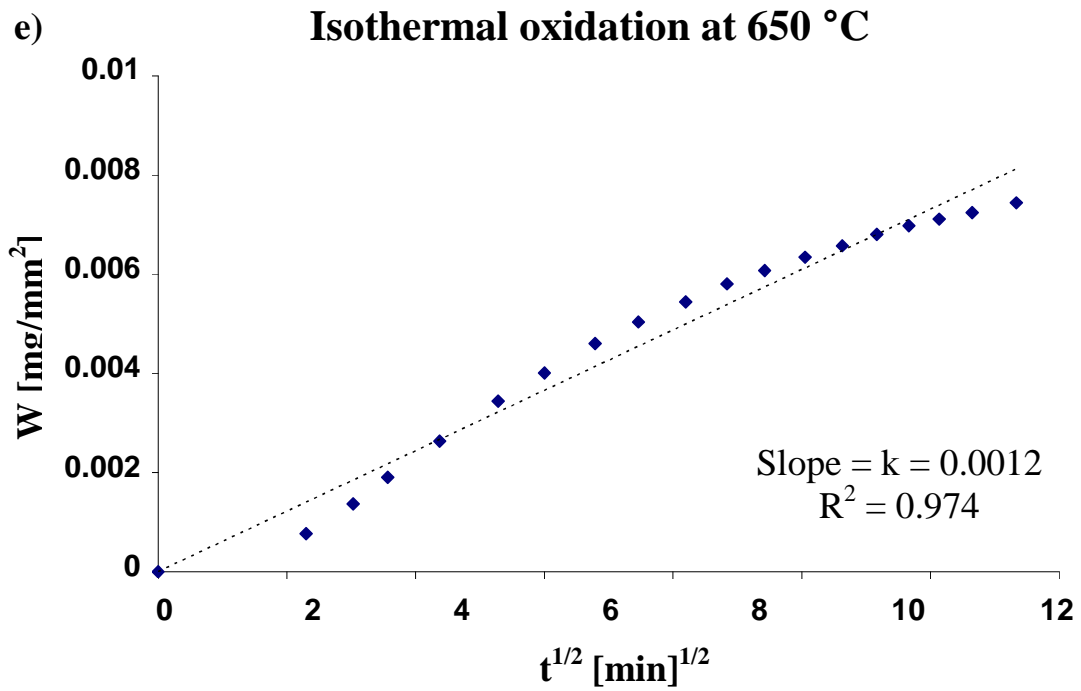
หลังการแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปร้อยละของน้ำหนักต่อเวลาให้เป็น น้ำหนักที่เปลี่ยนไปจากการเกิดออกซิเดชันต่อพื้นที่ที่เกิดออกซิเดชัน (W, weight change per area) กับรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเกิดออกซิเดชัน แล้วสร้างกราฟระหว่าง W กับ  $t^{1/2}$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่าคงที่ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมินั้น (k(T)) ดังแสดงในภาพที่4.13 a)-f)



ภาพที่ 4.13 a)-e) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $W$  กับรากที่สองของเวลา ( $t^{1/2}$ ) ของการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเท่ากับ 400, 500, 560, 600, 650 และ 700 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.13 a)-e) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $W$  กับรากที่สองของเวลา ( $t^{1/2}$ ) ของการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเท่ากับ 400, 500, 560, 600, 650 และ 700 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.13 a)-e) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $W$  กับรากที่สองของเวลา ( $t^{1/2}$ ) ของการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเท่ากับ 400, 500, 560, 600, 650 และ 700 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่ปฏิกิริยา (ความชัน, k), ln k และสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ ( $R^2$ )

Temp		1000/T [1/K]	Slope, k [mg/mm <sup>2</sup> min <sup>-0.5</sup> ]	ln k	R <sup>2</sup>
[°C]	[K]				
700	973	1.027749	0.007	-4.96185	0.9775
650	923	1.083424	0.0012	-6.72543	0.974
600	873	1.145475	0.0009	-7.01312	0.985
560	833	1.20048	0.0007	-7.26443	0.9894
500	773	1.293661	0.0006	-7.41858	0.999
500	773	1.293661	0.0003	-8.11173	0.9986
400	673	1.485884	0.0002	-8.51719	0.9943

พิจารณาตารางที่ 4.2 ซึ่งรวบรวมผลการทดลองจะพบว่าเมื่อสร้างกราฟระหว่าง W กับ รากที่สองของเวลาแล้วได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งยืนยันได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ ( $R^2$ ) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 แปลว่าการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิทดลองนี้เป็นไปตาม parabolic law คืออัตราการเกิดปฏิกิริยาในช่วงแรกสูง และลดลงในช่วงหลัง

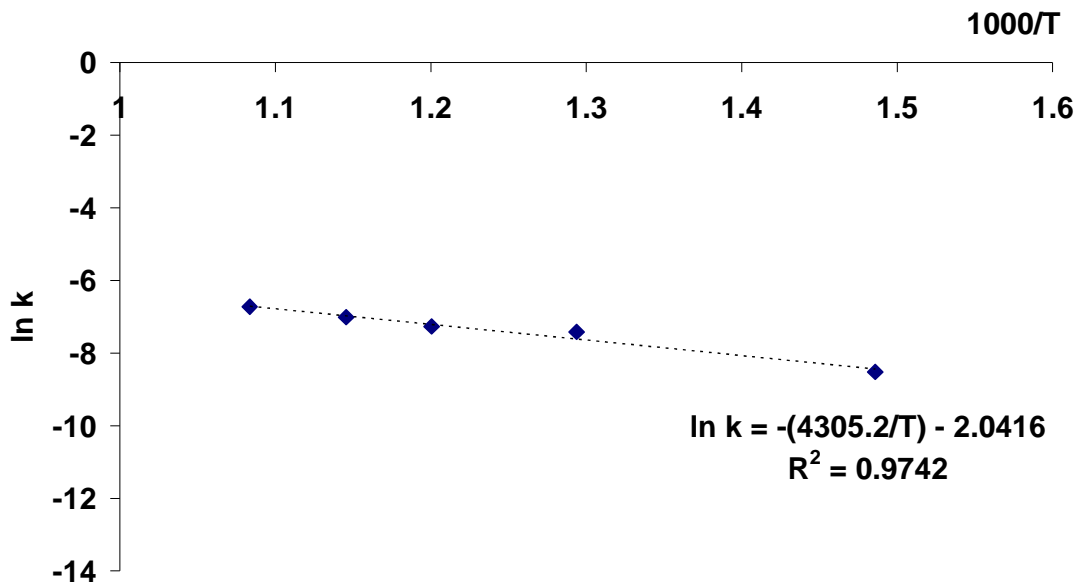
$$k(T) = k_B \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

$$\ln k = \ln k_B - \frac{Q}{RT} \quad (4.2)$$

$$\ln k = \left(\frac{-Q}{R}\right) \frac{1}{T} + Const.$$

เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 400-700 °C มีลักษณะแบบพาราโบลิก และสามารถหาค่าคงที่ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันได้จากความชันของกราฟระหว่าง W กับ  $t^{1/2}$  เช่นเดียวกัน ดังนั้นถ้าสร้างกราฟระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่ปฏิกิริยาของแต่ละอุณหภูมิ (ln k) กับ 1/T ดังสมการที่ 4.2 แล้วจะได้กราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ปฏิกิริยากับอุณหภูมิดังแสดงในภาพที่ 4.14 และมีค่าความชันเท่ากับ  $-Q/R$  และเนื่องจากกราฟเป็นเส้นตรง จึงสามารถใช้ในการทำนายค่าคงที่ของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 400-700 °C หรือ เวลาที่ต่างจากสภาวะที่ทำการทดลองได้





ภาพที่ 4.14 แสดงค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k) ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

ภายหลังการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  สำหรับการเกิดออกซิเดชันระหว่างอุณหภูมิ 400-700 °C จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ปฏิกิริยากับอุณหภูมิ เท่ากับ  $\ln k = -6270.9/T + 0.58$  เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น และมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.7924 ซึ่งเมื่อทำการคำนวณหาค่า  $k$  เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของสมการนอกเหนือจากการพิจารณาด้วยค่า  $R^2$  เช่น ที่อุณหภูมิ 600 °C คำนวณค่า  $k$  ได้เท่ากับ  $0.0014 \text{ mg/mm}^2\text{min}^{0.5}$  ซึ่งต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองที่มีค่าเท่ากับ  $0.0009 \text{ mg/mm}^2\text{min}^{0.5}$  ถึง 55% ดังนั้นความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงไม่น่าจะถูกต้อง

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่า มีผู้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับค่าพลังงานกระตุ้นที่ได้จากการทดลองในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน [5], [8] กล่าวคือค่าพลังงานกระตุ้น ( $Q$ ) ที่ช่วงอุณหภูมิ 700-1250 °C มีความแตกต่างกับค่า  $Q$  ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 700 °C ซึ่งจะทำให้สมการที่ใช้สำหรับหาค่า  $k$  ที่ช่วงอุณหภูมินั้นๆ แตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  โดยตัดข้อมูลที่ 700 °C ออก จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้น  $\ln k = -4305.2/T - 2.0416$  และมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9742 ซึ่งเมื่อคำนวณค่า  $k$  เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่อุณหภูมิ 600 °C ได้ค่า  $k$  เท่ากับ  $0.00094 \text{ mg/mm}^2\text{min}^{0.5}$  ซึ่งต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองที่มีค่าเท่ากับ  $0.0009 \text{ mg/mm}^2\text{min}^{0.5}$  เพียง 4.4% สมการนี้จึงมีความน่าเชื่อถือ และสามารถใช้ในการคำนวณค่า  $k$  ในช่วงอุณหภูมิ 400-600 °C ได้ในระดับที่น่าพอใจ และเมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$k [\text{mg/mm}^2\text{min}^{0.5}] = 0.13 \exp(-4305.2/T)$$

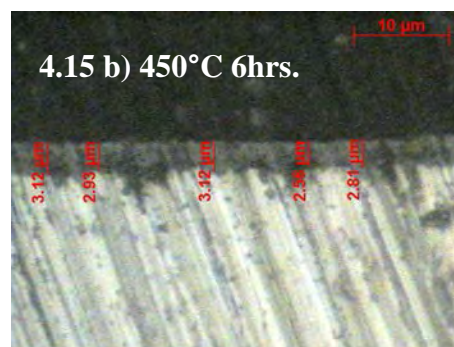
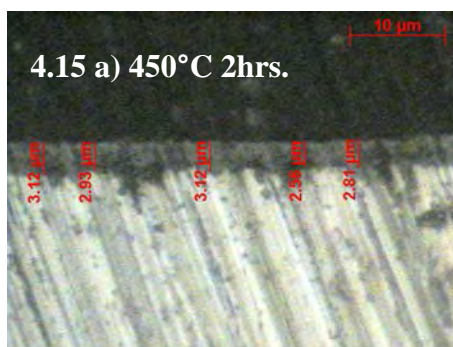
จากภาพที่ 4.14 จะเห็นว่าค่าคงที่ปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หรือค่าคงที่ปฏิกิริยาแปรผันตรงกับอุณหภูมิ และสามารถหาพลังงานกระตุ้น (Q) ได้เท่ากับ 35793.43 J/mol เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Weihua Sun<sup>[5]</sup> ซึ่งทำการศึกษาการเกิดออกซิเดชันของเหล็กกล้าละมุน (Mild steel) ที่อุณหภูมิ 800-1000 °C และหาค่าพลังงานกระตุ้นได้เท่ากับ 46876.58 J/mol หรือ ผลการทดลองอื่นๆ<sup>[8]</sup> ซึ่งศึกษาการเกิดออกซิเดชันของเหล็กกล้าละมุนที่อุณหภูมิ 700-1250 °C และได้ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 143246 J/mol หรือ ในกรณีศึกษาการเกิดออกซิเดชันของเหล็กบริสุทธิ์<sup>[8]</sup> ที่อุณหภูมิ 700-1250 °C เปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 600-1250 °C ก็ได้ค่าพลังงานกระตุ้นที่แตกต่างกันเป็น 169452 J/mol และ 170000 J/mol ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นเพราะออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลองต่างกันเป็นออกไซด์สเกลต่างชนิดกัน หรือมีกลไกการเกิดออกไซด์สเกลที่ต่างกันจึงส่งผลให้ค่าพลังงานกระตุ้นของการเกิดออกซิเดชันแตกต่างกัน

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่าปฏิกิริยาที่มีพลังงานกระตุ้นต่ำกว่า 20 kJ/mol จัดเป็นปฏิกิริยาที่มีขึ้นกำหนดอัตราแบบ diffusion control และปฏิกิริยาที่มีพลังงานกระตุ้นอยู่ระหว่าง 50-72 kJ/mol จัดเป็นปฏิกิริยาที่มีขึ้นกำหนดอัตราแบบ reaction control ในงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานให้การเกิดออกไซด์สเกลในสภาวะ isothermal oxidation มีความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับเวลาเป็นแบบพาราโบลา ซึ่งจัดเป็นลักษณะของปฏิกิริยาที่มีขึ้นกำหนดอัตราแบบ diffusion control แต่จากการทดลองจะพบว่าพลังงานกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาการเกิดออกไซด์สเกลภายใต้สภาวะ Isothermal oxidation ที่อุณหภูมิ 400-600 °C ให้ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 35.793 kJ/mol (35793.43 J/mol) มากกว่าพลังงานกระตุ้นสำหรับ diffusion control ซึ่งน่าจะเกิดจากลักษณะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการทดลองนี้ไม่ได้เป็น diffusion control ตลอดทั้งช่วงเวลาที่เกิดการออกซิเดชัน แต่อาจจะเป็นลักษณะที่เกิดเป็น reaction control ในช่วงแรกของการเกิดออกซิเดชัน กล่าวคือช่วงที่เริ่มเกิดการออกซิเดชันออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นมีความหนาไม่มากอะตอมของออกซิเจนจึงใช้เวลาในการแพร่ผ่านชั้นออกไซด์สเกลน้อย ดังนั้น diffusion rate จึงน่าจะมีค่ามากกว่า reaction rate ซึ่งส่งผลให้ปฏิกิริยาในช่วงแรกเป็นแบบ reaction control และภายหลังเมื่อออกไซด์สเกลหนาขึ้นอะตอมของออกซิเจนใช้เวลาในการแพร่ผ่านชั้นออกไซด์สเกลนานขึ้น diffusion rate จึงมีค่าต่ำกว่า reaction rate ปฏิกิริยาในช่วงหลังจึงเป็นแบบ diffusion control ดังนั้นเมื่อเรากำหนดค่าพลังงานกระตุ้นตลอดช่วงการเกิดออกซิเดชันจึงทำให้พลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าที่ควรจะเป็น

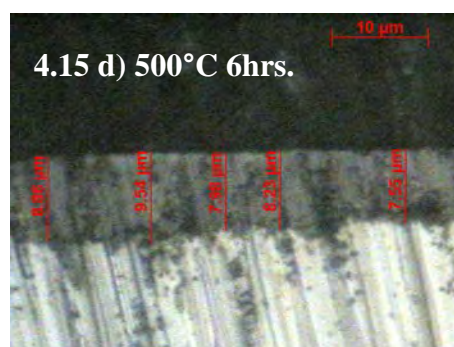
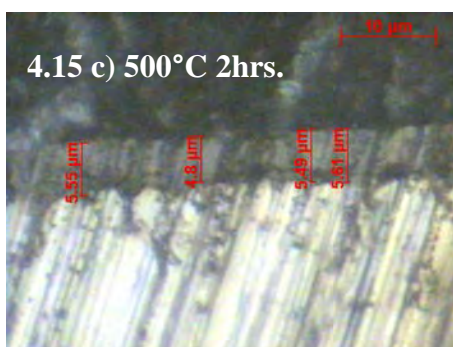
ภายหลังทำการทดลอง นำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และวัดความหนาของชั้นออกไซด์สเกลที่เกิดบนผิวของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ที่กำลังขยาย 1200 เท่า

ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาค และความหนาของออกไซด์สเกลแสดงในภาพที่ 4.15 a)-h) จากการวัดความหนาออกไซด์สเกลพบว่า ความหนาของออกไซด์สเกลมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเกิดออกซิเดชันมากขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากค่าคงที่ปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (ภาพที่ 4.14 ดังนั้นเมื่อค่าคงที่ปฏิกิริยาสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาข้อมมากขึ้นด้วย จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ความหนาของชั้นออกไซด์สเกลเพิ่มขึ้น และความหนาของออกไซด์สเกลมากขึ้นเมื่อเวลาในการเกิดออกซิเดชันมากขึ้น เพราะอัตราในการเกิดปฏิกิริยา ( $k(T)$ ) สำหรับแต่ละอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ความชันของกราฟเป็นบวก) เมื่อเวลาในการเกิดออกซิเดชันมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.15 a)-e) ซึ่งใช้อธิบายว่าเมื่อเวลาในการเกิดออกซิเดชันมากขึ้นออกไซด์สเกลจึงหนาขึ้น

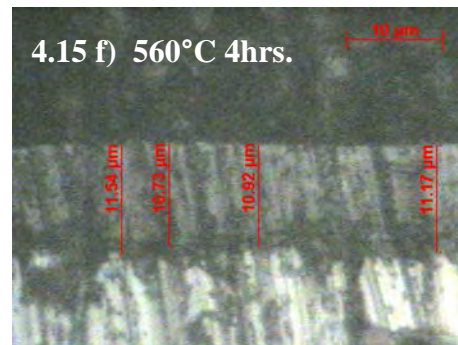
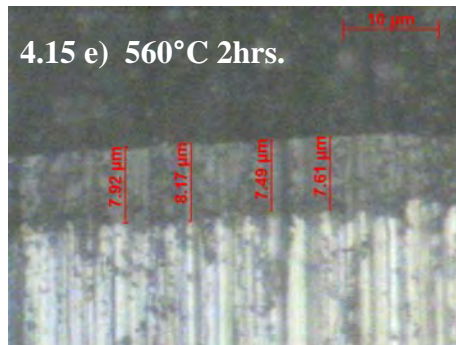
แต่เนื่องจากออกไซด์สเกลจะมีค่าความเกาะติดกับผิวเหล็ก (Adhesion) แย่ลงเมื่ออุณหภูมิ หรือ เวลาในการเกิดออกซิเดชันมากขึ้น ทำให้ออกไซด์สเกลหลุดลอกออกง่าย ดังนั้นจะเห็นว่าในภาพที่ 4.15 g) ออกไซด์สเกลมีลักษณะไม่สมบูรณ์มีส่วนที่หลุดออกเป็นช่วงๆ และสังเกตเห็นแถบร่องลึกสีดำเหนือออกไซด์สเกล ซึ่งน่าจะเป็นร่องที่เกิดจากชั้นออกไซด์สเกลหลุดออกขณะนำชิ้นงานออกจากเตา หรือ ระหว่าง mount และภาพที่ 4.15 h) ไม่ปรากฏออกไซด์สเกลเลยเนื่องจากออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นหลุดออกขณะนำชิ้นงานออกจากเตา



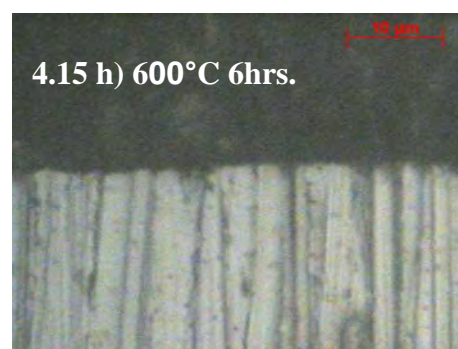
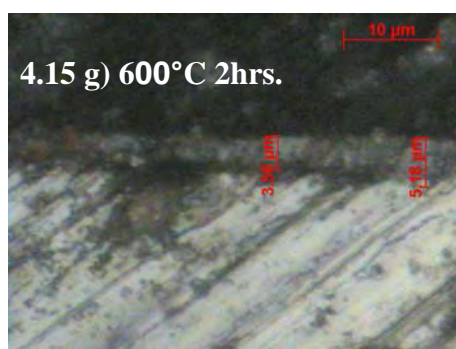
ภาพที่ 4.15 a), b) ภาพโครงสร้างจุลภาคแสดงความหนาออกไซด์สเกลที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 2 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ, กำลังขยาย 1200 เท่า



ภาพที่ 4.15 c), d) ภาพโครงสร้างจุลภาคแสดงความหนาออกไซด์สเกลที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 2 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ, กำลังขยาย 1200 เท่า



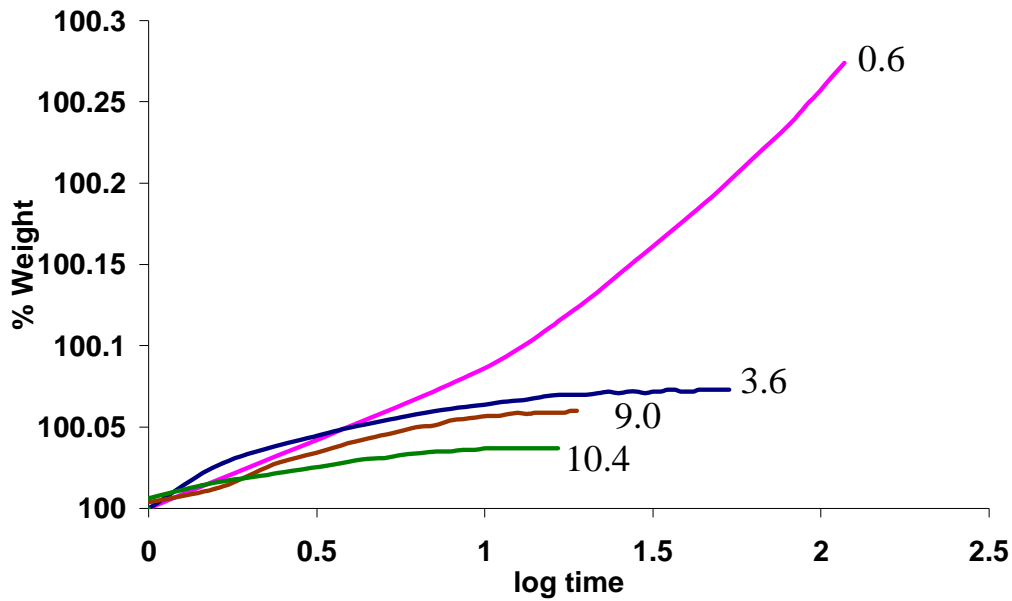
ภาพที่ 4.15 e), f) ภาพโครงสร้างจุลภาคแสดงความหนาออกไซด์สเกลที่อุณหภูมิ 560 °C เป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ, กำลังขยาย 1200 เท่า



ภาพที่ 4.15 e)-h) ภาพโครงสร้างจุลภาคแสดงความหนาออกไซด์สเกลที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 2 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ, กำลังขยาย 1200 เท่า

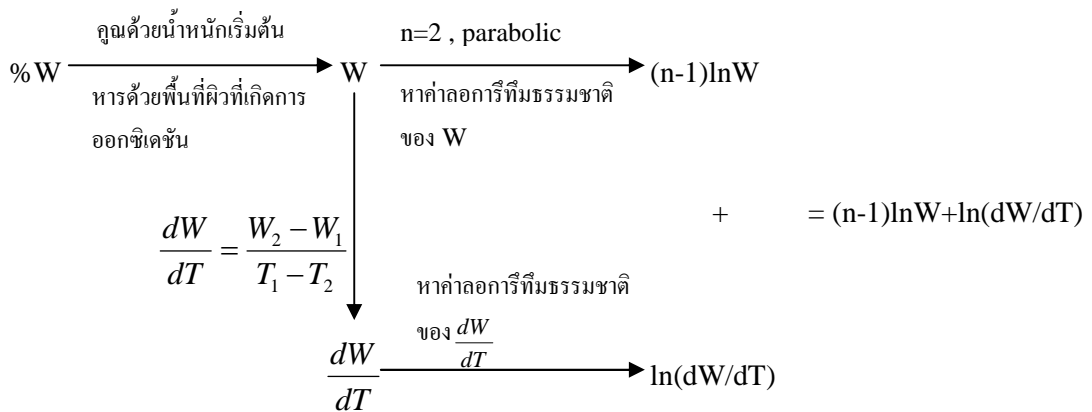
#### 4.4.2 ออกซิเดชันภายใต้สภาวะเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ (Non-isothermal oxidation)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองจำลองการเกิดออกไซด์สเกล ภายใต้สภาวะเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ที่ 0.6, 1.8, 5.4, 6.0, 7.2, 9.0 และ 10.4 °C/min จากอุณหภูมิ 560, 630 และ 700 °C ผลการทดลองแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อเวลา (%W/oxidation time) ภาพที่ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เปลี่ยนไปเป็นฟังก์ชันของเวลาในการเกิดการออกซิเดชันภายใต้สภาวะ Non-isothermal ที่อัตราการเย็นตัวต่างๆ (เพื่อความสะดวกในการแสดงผลของแต่ละอัตราการเย็นตัวในกราฟเดียวกัน จึงเปลี่ยนแกนเวลา ให้เป็น log time ซึ่งสามารถมาตราส่วนแกนเวลาลง และลดความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของแต่ละอัตราการเย็นตัวจาก 17.22 เท่า เหลือเพียง 1.72 เท่า)

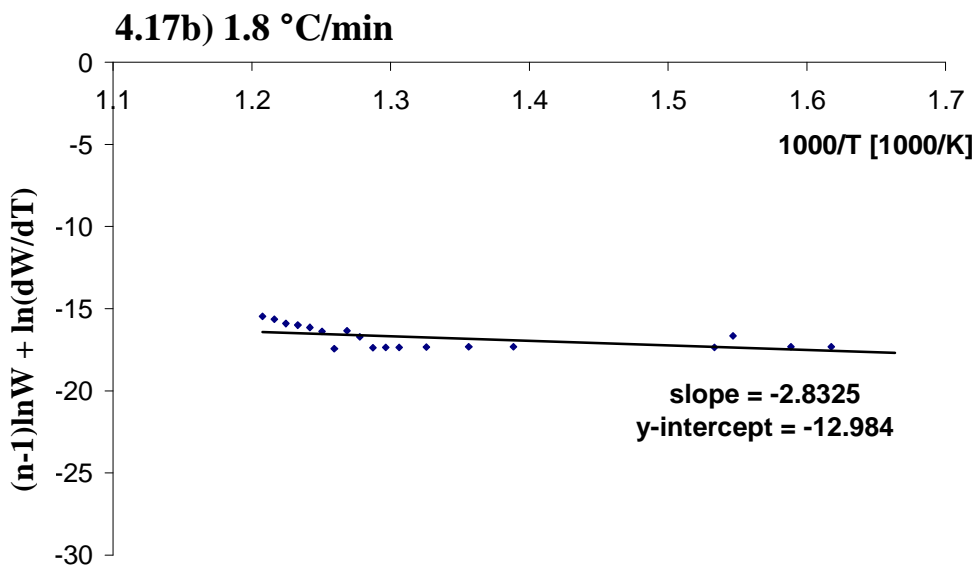
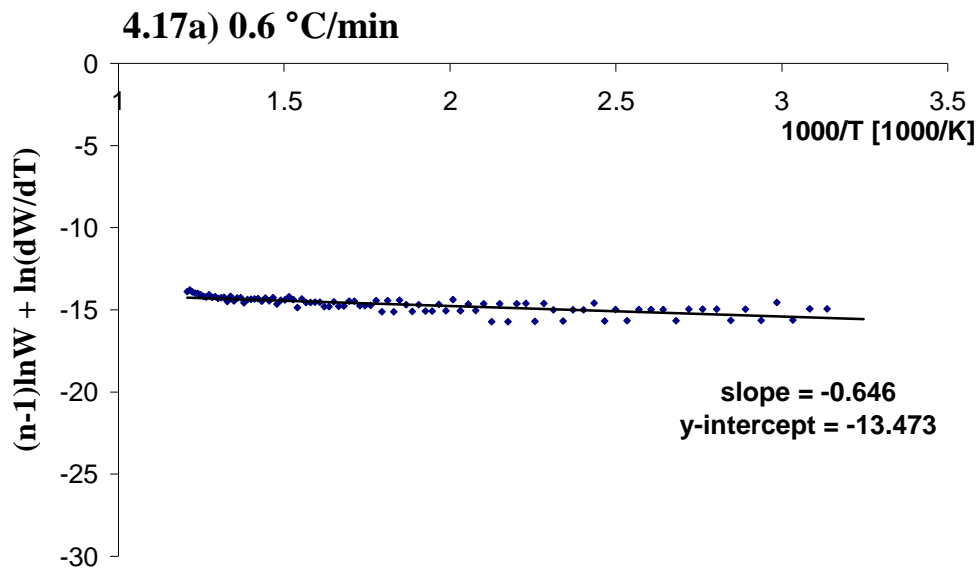


ภาพที่ 4.16 แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่เปลี่ยนไปเป็นฟังก์ชันของเวลาในการเกิดการออกซิเดชันภายใต้สภาวะ Non-isothermal ที่อัตราการเย็นตัว 0.6, 3.6, 9.0 และ 10.4 °C/min

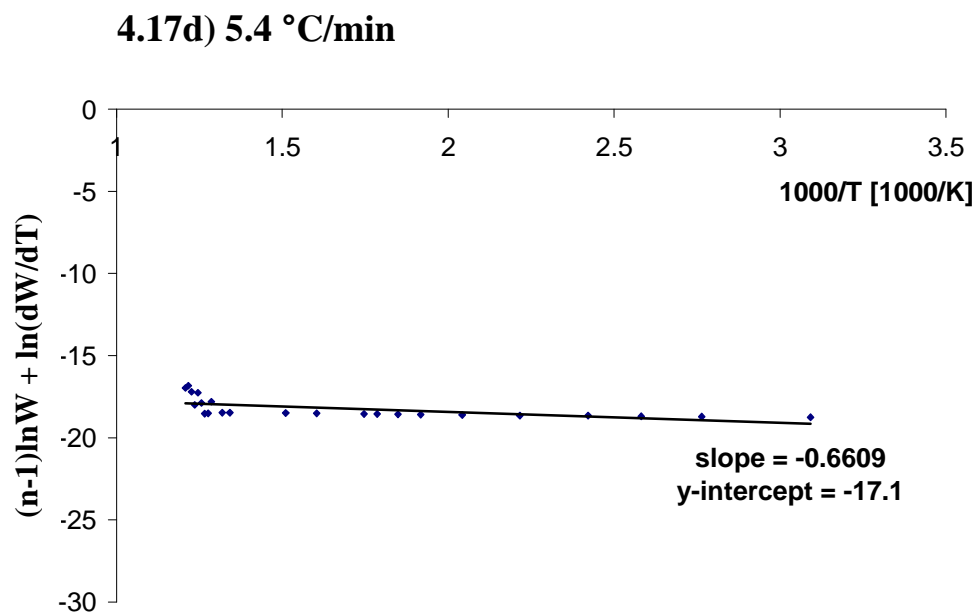
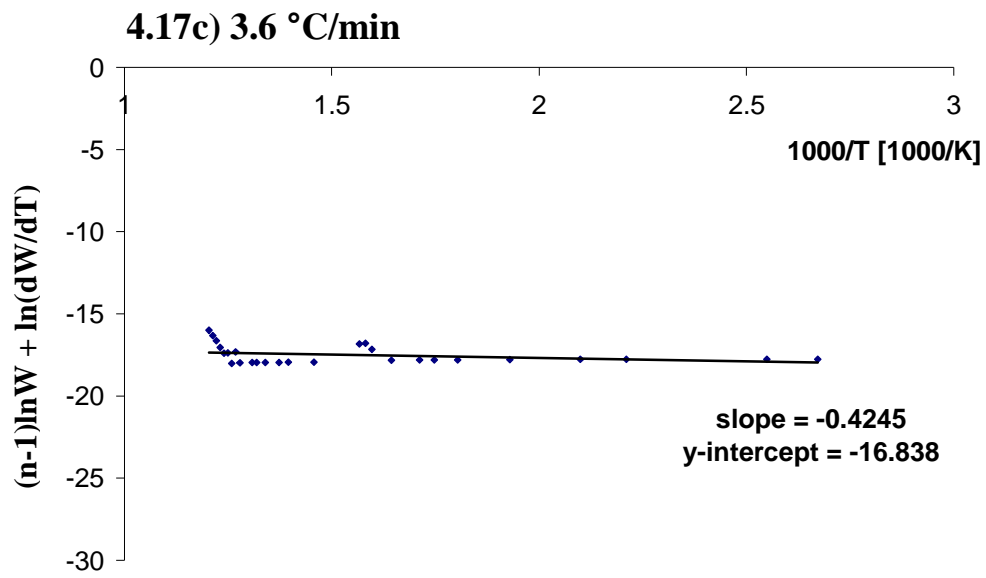
จากภาพที่ 4.16 พบว่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%Weight) ของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเกิดออกซิเดชันผ่านไปสำหรับทุกอัตราการเย็นตัว และเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%Weight) ของชิ้นงานลดลงเมื่อใช้อัตราการเย็นตัวสูงขึ้น



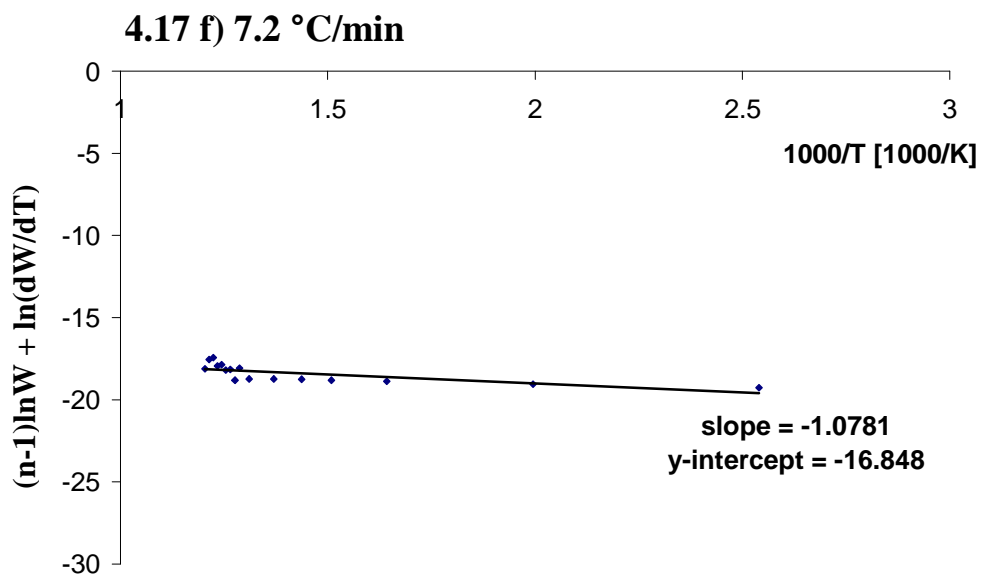
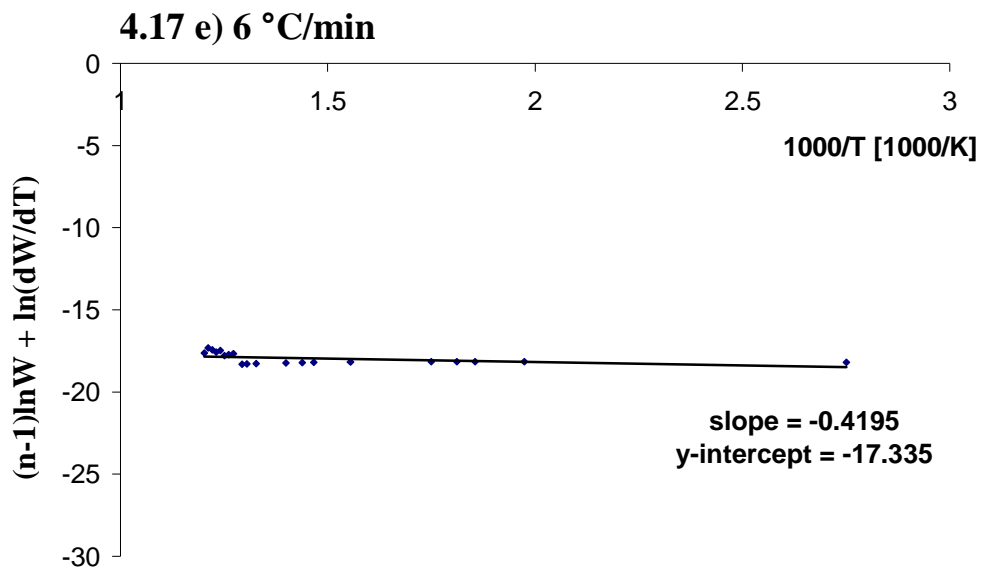
เพื่อการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกไซด์สเกล และหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา จึงต้องแปลงข้อมูลในรูปของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อเวลา (%W/ oxidation time) ให้อยู่ในรูป  $(n-1)\ln W + \ln(dW/dT)$  กับ  $1/T$  (จากสมการที่ 2.7) โดยมีขั้นตอนดังแสดงในแผนภาพด้านบน ซึ่งภายหลังการสร้างกราฟตามความสัมพันธ์นั้นแล้วจะได้กราฟที่มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 4.17a-h) โดยมีค่าความชันเท่ากับ  $-Q/R$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\ln B/a$



ภาพที่ 4.17 a), b) กราฟระหว่าง  $(n-1)\ln W + \ln(dW/dT)$  กับ  $1/T$  ของการจำลองการเกิดออกซิเดชัน ภายใต้สภาวะเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่เท่ากับ 0.6, 1.8 °C/min

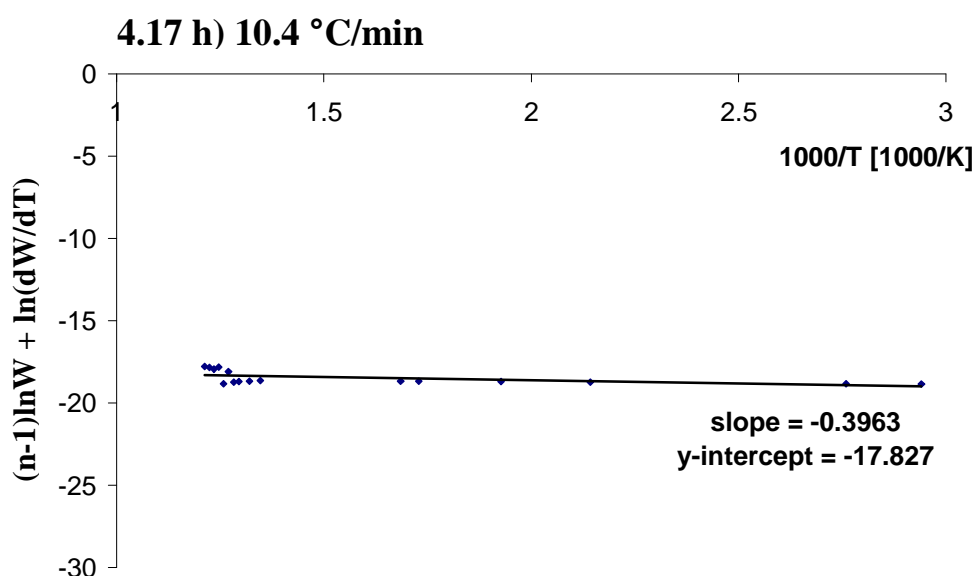
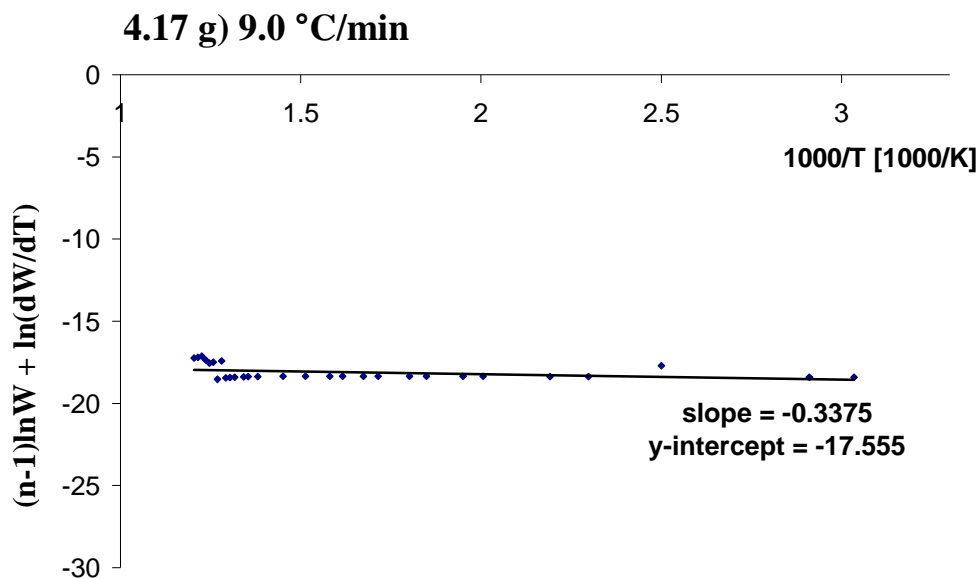


ภาพที่ 4.17 c) และ d) กราฟระหว่าง  $(n-1)\ln W + \ln(dW/dT)$  กับ  $1/T$  ของการจำลองการเกิดออกซิเดชันภายใต้สภาวะเริ่มต้นด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่เท่ากับ 3.6 และ 5.4 °C/min ตามลำดับ



ภาพที่ 4.17 e) และ f) กราฟระหว่าง  $(n-1)\ln W + \ln(dW/dT)$  กับ  $1/T$  ของการจำลองการเกิดออกซิเดชันภายใต้สภาวะเริ่มต้นด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่เท่ากับ 6 และ 7.2 °C/min ตามลำดับ





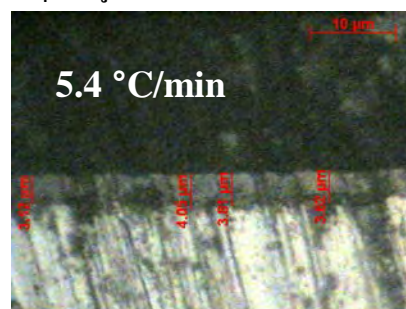
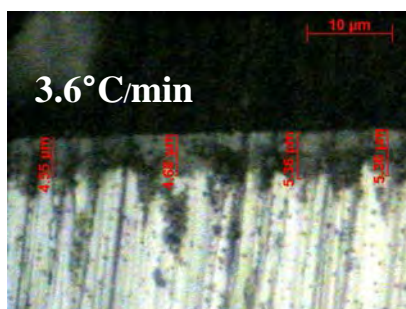
ภาพที่ 4.17 g), h) กราฟระหว่าง  $(n-1)\ln W + \ln(dW/dT)$  กับ  $1/T$  ของการจำลองการเกิดออกซิเดชันภายใต้สภาวะเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่เท่ากับ 9, 10.4 °C/min

จากภาพที่ 4.17 a)-h) พบว่าสามารถคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น ( $Q$ ) ได้จากนำค่าความชันคูณด้วยค่าคงที่ของก๊าซ ( $R = 8.314$  J/mol) และหาค่าคงที่  $B$  ได้โดยการคูณอัตราการเย็นตัวด้วย  $e^{-y\text{-intercept}}$  ( $\exp(y\text{-intercept})$ ) ซึ่งทั้งค่า  $Q$  และ  $B$  สามารถนำไปใช้ในสมการค่าคงที่ปฏิกิริยาสำหรับแต่ละอัตราการเย็นตัว  $k = B\exp(-Q/RT)$  (ค่าคงที่ปฏิกิริยานี้ใช้สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง  $W^2$  กับ  $t$ ,  $W^2=kt$ ) ดังแสดงผลการคำนวณของทุกอัตราการเย็นตัวจากอุณหภูมิเริ่มต้น 560 °C ดัง ในตารางที่ 4.3

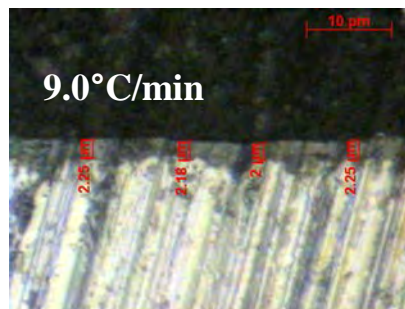
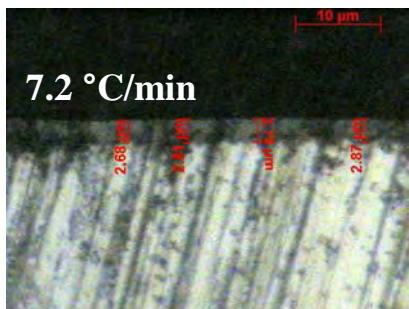
ตารางที่ 4.3 พลังงานกระตุ้น, ค่าคงที่ (B) และค่าคงที่ปฏิกิริยา (k (cooling rate)) สำหรับชิ้นงานที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560, 630 และ 700 °C

initial temperature (CT), °C	cooling rate (a), °C/min	-Q/R slope	ln(B/a) y-intercept	B
560	0.6	-646	-13.473	8.45088E-07
	1.8	-2832.5	-12.984	4.13421E-06
	3.6	-424.5	-16.838	1.75248E-07
	5.4	-660.9	-17.1	2.02282E-07
	6	-629.6	-16.491	4.13239E-07
	7.2	-1078.1	-16.848	3.47008E-07
	9	-337.5	-17.555	2.13896E-07
	10.4	-396.3	-17.827	1.88307E-07
630	3.6	-1877.3	-14.922	1.19058E-06
	7.2	-1218	-17.929	1.17724E-07
	9	-1168.5	-16.183	8.43441E-07
	12.6	-759.7	-18.503	1.16043E-07
700	3.6	-699.1	-14.798	1.34776E-06
	9	-3506.2	-12.45	3.52595E-05

ภายหลังทำการทดลอง นำชิ้นงานมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และวัดความหนาของชั้นออกไซด์สเกลที่เกิดบนผิวของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ที่กำลังขยาย 1200 เท่า ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาค และความหนาของออกไซด์สเกลแสดงในภาพที่ 4.18 และ 4.18 a)-c) จากภาพพบว่าความหนาของออกไซด์สเกลลดลงเมื่ออัตราการเย็นตัวสูงขึ้น (จุดข้อมูลมีแนวโน้มลดต่ำลงสำหรับทุกๆอุณหภูมิเริ่มต้น, CT และอุณหภูมิสุดท้าย, final ดังแสดงในภาพที่ 4.18) ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการเย็นตัวสูงทำให้เวลาในการเกิดออกซิเดชันน้อยลง อะตอมของเหล็ก และอะตอมของออกซิเจนมีเวลาในการเคลื่อนที่ผ่านแต่ละชั้นของสเกลที่เกิดขึ้นก่อนน้อย จึงทำให้มีโอกาสน้อยที่จะได้สเกลที่มีความหนา ในทางกลับกันความหนาของออกไซด์สเกลเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิม้วนเก็บเพิ่มขึ้น (ความหนาของออกไซด์สเกลที่เย็นตัวจาก CT 700 °C สูงกว่า CT 630 °C และ CT 560 °C สำหรับทุกๆอัตราการเย็นตัว, แสดงในภาพที่ 4.19) อธิบายได้จากค่าคงที่ปฏิกิริยาซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิสูงค่าคงที่ปฏิกิริยาก็มีค่าสูงนั่นหมายถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาก็มีค่าสูงด้วยเช่นกัน ที่อุณหภูมิเริ่มต้นสูงค่าคงที่ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิขณะนั้นก็มีค่าสูง ดังนั้นโอกาสที่จะได้ออกไซด์สเกลที่มีความหนามากก็มากกว่าสภาวะที่เริ่มต้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า



ภาพที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคแสดงความหนาชั้นออกไซด์สเกลที่เกิดบนผิวชิ้นงานจำลองการเกิดออกซิเดชันภายใต้สภาวะการเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ 3.6, 5.4 °C/min จากอุณหภูมิ 560 °C



ภาพที่ 04.18 โครงสร้างจุลภาคแสดงความหนาชั้นออกไซด์สเกลที่เกิดบนผิวชิ้นงานจำลองการเกิดออกซิเดชันภายใต้สภาวะการเย็นตัวด้วยอัตราการเย็นตัวคงที่ 7.2, 9.0 °C/min จากอุณหภูมิ 560 °C (กำลังขยาย 1200 เท่า)

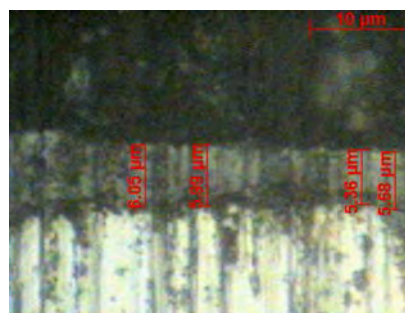
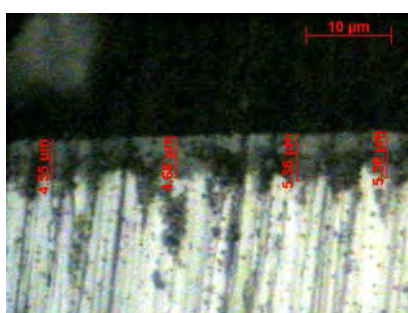


Fig4.18a) Cooling rate = 3.6°C/min, (x1200)

ซ้าย : Cooled from 560 °C to 30 °C

ขวา : Cooled from 630 °C to 30 °C

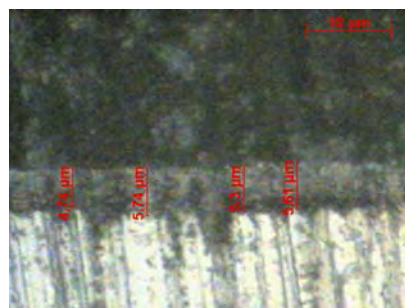
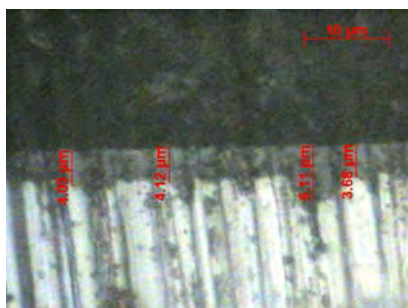


Fig4.18 b) Cooling rate = 7.2°C/min, (x1200)

ซ้าย : Cooled from 560 °C to 30 °C

ขวา : Cooled from 630 °C to 30 °C

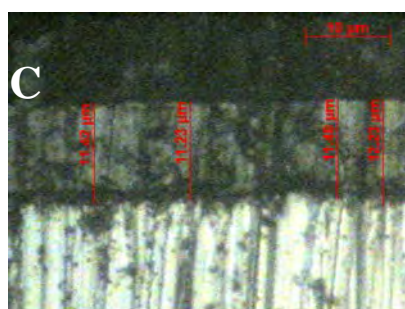
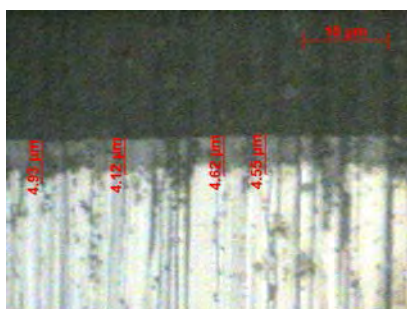
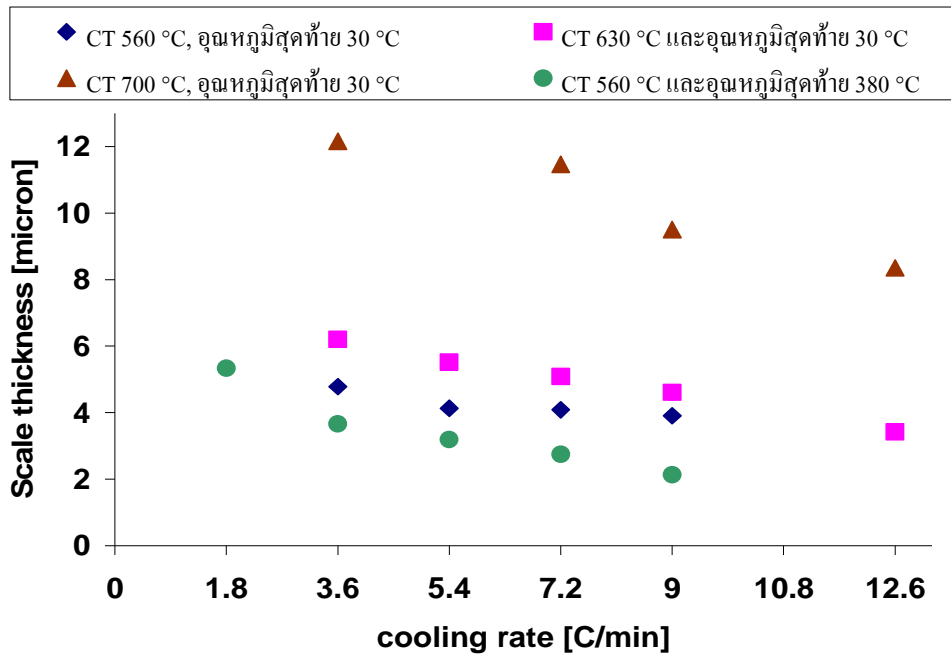


Fig4.18 c) Cooling rate = 9.0°C/min, (x1200)

B : Cooled from 560 °C to 30 °C

C : Cooled from 700 °C to 30 °C



ภาพที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์สเกลกับอัตราการเย็นตัว และ อุณหภูมิมีวนเก็บ (CT)

#### 4.5 จำนวนย้อนกลับเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง

ภายหลังการทดลองจำลองการเกิดออกไซด์สเกลด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกทั้งแบบ Isothermal และ Non-isothermal oxidation แล้ว จะได้อัตราการเย็นตัวค่าคงที่ที่ปฏิกิริยาของแต่ละการทดลอง ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการคำนวณย้อนกลับหาหน้าหนักที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดออกไซด์สเกลในการทดลองนั้นๆ ได้ จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าผลการคำนวณย้อนกลับมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง ดังนั้นจึงสามารถนำค่าคงที่ปฏิกิริยาเหล่านี้ไปใช้ในการสร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลในหัวข้อถัดไปได้

ตารางที่ 4.4 ใช้ค่า  $k = B \exp(-Q/RT)$  ของแต่ละอัตราการเย็นตัวคำนวณหาหน้าหนักที่เพิ่มขึ้น เทียบกับผลจากการทดลองของอัตราการเย็นตัวนั้นๆ (Non-isothermal)

cooling rate [°C/min]	W [mg/mm <sup>2</sup> ]	
	TGA	Calculate
0.6	0.01335	0.0156
1.8	0.00397	0.0035
3.6	0.00319	0.0036
5.4	0.00195	0.00252
7.2	0.00158	0.00197
9	0.00214	0.00259

ตารางที่ 4.5 ใช้สมการ  $k = 0.13\exp(-4305.2/T)$  คำนวณหาหน้าหนักที่เพิ่มขึ้น เทียบกับผลจากการทดลอง (Isothermal)

Temp		Oxidation time [min]	W [mg/mm <sup>2</sup> ]	
[°C]	[K]		TGA	Calculate
500	773	120	0.00231	0.005429303
	773	360	0.01458	0.009403828
560	833	120	0.01024	0.008108987
	833	180	0.009	0.009931441
600	873	120	0.00716	0.010275678
	873	360	0.01248	0.017797996

#### 4.6 สมการทำนายปริมาณสเกล

$$W = k_n^* t^{1/2} \quad (4.3.1)$$

$$W^2 = k_n t \quad (4.3.2)$$

$$W_{total} = \Sigma(W_n) \quad (4.4)$$

$$W_{total} = \Sigma \left[ B_n t^{1/2} \exp\left(\frac{-Q_n}{RT}\right) \right] \quad (4.5.1)$$

$$W_{total} = \Sigma \left[ B_n t \exp\left(\frac{-Q_n}{RT}\right) \right]^{1/2} \quad (4.5.2)$$

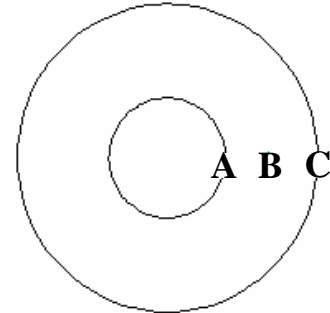
จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นกับเวลาในสมการที่ 4.3 (4.3.1 สำหรับการทดลองแบบ Isothermal oxidation และ 4.3.2 สำหรับการทดลองแบบ Non-isothermal oxidation) และสมการที่ 4.4-4.5 (4.5.1 สำหรับการทดลองแบบ Isothermal oxidation และ 4.5.2 สำหรับการทดลองแบบ Non-isothermal oxidation) ซึ่งปริมาณออกไซด์สเกลทั้งหมดที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัว มีค่าเท่ากับผลรวมของปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา (ภาพที่ 4.11A) ดังนั้นจึงสามารถสร้างสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลทั้งหมดที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวภายหลังการม้วนเก็บจนถึงถึง ณ อุณหภูมิที่สนใจใดๆได้ โดย

1. ใช้อุณหภูมิเฉลี่ย (จุด c จากภาพที่ 4.11A) ของแต่ละช่วงเวลาที่กำหนดให้มีอัตราการเย็นตัวคงที่ (การเย็นตัวแบบขั้นบันได) ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อ 4.3.2 ประกอบกับค่าคงที่ปฏิกิริยาสำหรับแต่ละอัตราการเย็นตัวที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 หรือ

2. ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยเหล่านั้น ร่วมกับค่าคงที่ปฏิกิริยาที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากการทดลองแบบ Isothermal oxidation ดังนี้

ตารางที่ 4.6 การเขียนตัวแบบขั้นบันได (อัตราการเย็นตัวคงที่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ) ณ ตำแหน่ง A

most fit cooling profile for position A				
Temp range [°C]	cooling rate [°C/min]	oxidation time [min]	average temp	
			[°C]	[K]
560-558	-10.4	0.10	559.00	832.00
558-552	-9.0	0.50	556.00	829.00
552-548	-7.2	0.90	550.00	823.00
548-541	-5.4	1.00	545.00	818.00
541-531	-3.6	1.50	537.00	810.00
531-511	-1.8	10.00	524.00	797.00
511-373	-0.6	166.00	422.00	695.00



ในกรณีที่ต้องการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ถึงอุณหภูมิ 380 °C ณ ตำแหน่ง A แบบที่ 1 เริ่มด้วยการเลือกกราฟอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยแบบขั้นบันไดซึ่งแสดงในภาพที่ 4.11A เพื่อความสะดวกในการอ่านค่าให้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.6 อันประกอบไปด้วยอัตราการเย็นตัวเฉลี่ย, ช่วงเวลาที่ใช้อัตราการเย็นตัวเฉลี่ยนั้นเป็นตัวแทนอัตราการเย็นตัวจริง และอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา จากนั้นเลือกค่าคงที่ B และ  $-Q/R$  ของอัตราการเย็นตัวที่ต้องการ (อัตราการเย็นตัวเฉลี่ยในตารางที่ 4.5) จากตารางที่ 4.2 แล้วใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.3.2 เพื่อคำนวณปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ผลการคำนวณแสดงโดยสรุปในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงการคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยพื้นที่ของการเย็นตัวตำแหน่ง A แบบที่ 1

cooling rate [°C/min]	B	Temp [K]	exp(-Q/RT)	Oxidation time [min]	$W^2$ $B*t*\exp(-Q/RT)$	W [mg/mm <sup>2</sup> ] [x10 <sup>-3</sup> ]
0.6	8.45088E-07	695	0.39475	166.00	5.53777E-05	7.441617
1.8	4.13421E-06	797	0.02861	10.00	1.18285E-06	1.087591
3.6	1.75248E-07	810	0.59210	1.50	1.55647E-07	0.394521
5.4	2.02282E-07	818	0.44577	1.00	9.0172E-08	0.300286
7.2	3.47008E-07	823	0.26983	0.90	8.42697E-08	0.290293
9	2.13896E-07	829	0.66557	0.50	7.1181E-08	0.266798
10.4	1.88307E-07	832	0.62106	0.10	1.1695E-08	0.108144

จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.5.2 เพื่อคำนวณน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่จากการเกิดออกไซด์ชั้นระหว่างการเย็นตัวจาก 560°C ถึง 380°C ณ ตำแหน่ง A ดังนี้

$$W_{total} = \sum[\sqrt{W}] = \sum \left[ B_n t \exp\left(\frac{-Q_n}{RT}\right) \right]^{1/2}$$

$$W_{total} = (7.441617 + 1.087591 + 0.394521 + 0.300286 + 0.290293 + 0.266798 + 0.108144) \times 10^{-3}$$

$$= 9.8892 \times 10^{-3} \text{ mg/mm}^2$$

น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่ระหว่างการเย็นตัวจาก 560°C ถึง 380°C ณ ตำแหน่ง A มีค่าเท่ากับ  $9.8892 \times 10^{-3} \text{ mg/mm}^2$

ในกรณีที่ต้องการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง A แบบที่ 2 เริ่มด้วยการเลือกกราฟอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยแบบขั้นบันไดซึ่งแสดงในภาพที่ 4.11A หรือ ตารางที่ 4.6 ซึ่งจะใช้เฉพาะช่วงเวลา (Oxidation time) กับอุณหภูมิคงที่ในแต่ละช่วงเวลา จากนั้นหาค่าคงที่ปฏิกิริยาของแต่ละอุณหภูมิคงที่ ด้วยความสัมพันธ์ที่คำนวณได้จากการทดลองแบบ Isothermal oxidation

$$k [\text{mg/mm}^2 \text{min}^{0.5}] = 0.13 \exp(-4305.2/T)$$

ผลการคำนวณแสดงโดยสรุปในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงการคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยพื้นที่ของการเย็นตัวตำแหน่ง A แบบที่ 2

Temp range [°C]	average temp		Oxidation time [min]	k(T)	W=kt <sup>1/2</sup>
	[°C]	[K]			
560-558	559.00	832.00	0.10	0.0007357	0.000232637
558-552	556.00	829.00	0.50	0.000722	0.000510541
552-548	550.00	823.00	0.90	0.0006952	0.000659514
548-541	545.00	818.00	1.00	0.0006733	0.000673312
541-531	537.00	810.00	1.50	0.0006392	0.000782865
531-511	524.00	797.00	10.00	0.0005861	0.00185349
511-373	422.00	695.00	166.00	0.0002653	0.003417796

จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.5.1 เพื่อคำนวณน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่จากการเกิดออกไซด์ชั้น

$$W_{total} = \sum \left[ B_n t^{1/2} \exp\left(\frac{-Q_n}{RT}\right) \right]$$

$$W_{total} = (0.232637 + 0.510541 + 0.659514 + 0.673312 + 0.782865 + 1.853492 + 3.417796) \times 10^{-3}$$

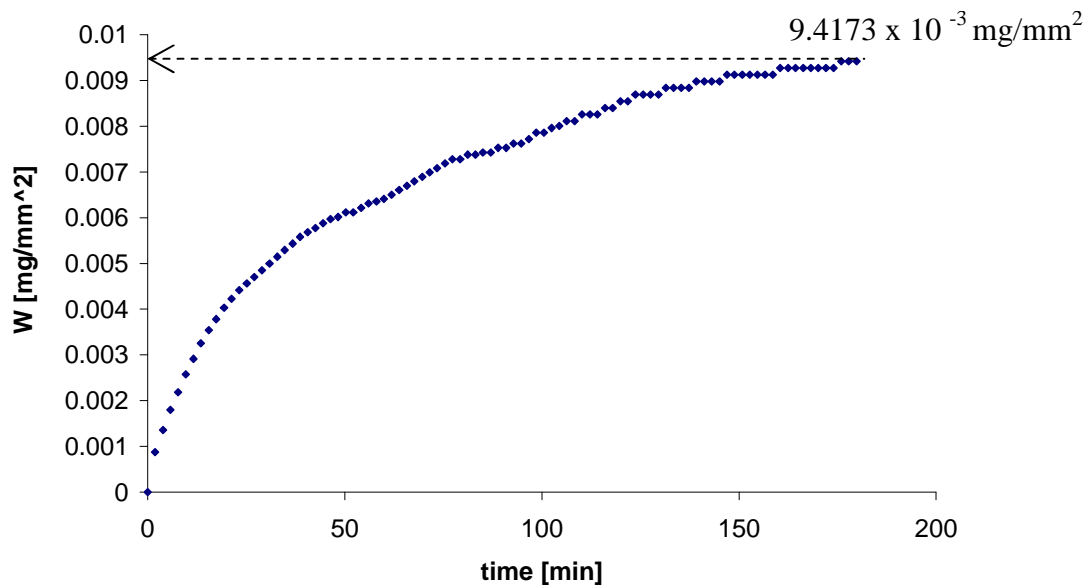
$$= 8.13 \times 10^{-3} \text{ mg/mm}^2$$

จากนั้นนำผลที่ได้จากการคำนวณโดยสมการเทียบกับผลจากการทดลองการเกิดออกไซด์ชั้นภายใต้สภาวะการเย็นตัวต่อเนื่อง ซึ่งใช้ชุดอัตราการเย็นตัวในภาพที่ 4.11A เป็นสภาวะการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.20 ซึ่งมีปริมาณน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ ( $W_{total}$ ) ที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดออกไซด์ชั้นมีค่าเท่ากับ  $9.4173 \times 10^{-3} \text{ mg/mm}^2$  พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณแบบที่ 1 (ใช้ค่าคงที่ปฏิกิริยาแบบ non-isothermal oxidation) มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง และมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองเพียง 5.01%

$$\frac{9.8892 \times 10^{-3} - 9.4173 \times 10^{-3}}{9.4173 \times 10^{-3}} \times 100 = 5.01\%$$

ในขณะที่ผลที่ได้จากการคำนวณแบบที่ 2 (ใช้ค่าคงที่ปฏิกิริยาแบบ Isothermal oxidation) มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง 13.67%

$$\frac{9.4173 \times 10^{-3} - 8.13 \times 10^{-3}}{9.4173 \times 10^{-3}} \times 100 = 13.67\%$$



ภาพที่ 4.20 กราฟระหว่างน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ (W) ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเวลาในการออกซิเดชันเพิ่มขึ้น

จากผลการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ในหัวข้อ 4.7 แสดงให้เห็นว่าออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นมีสัดส่วนของแมกนีไตต์มากกว่าเฮมาไตต์ ดังนั้นถ้าใช้สมมติฐานว่าปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นทั้งหมดคือแมกนีไตต์ จะสามารถหาค่าความหนาของออกไซด์สเกลได้ ดังนี้

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{A \cdot h} = \frac{W}{h} \quad (4.6)$$

- เมื่อ
- $\rho$  = ความหนาแน่นของออกไซด์สเกล [mg/mm<sup>3</sup>]
  - $m$  = น้ำหนักของออกไซด์สเกล [mg]
  - $V$  = ปริมาตรของออกไซด์สเกล [mm<sup>3</sup>]
  - $A$  = พื้นที่ผิวของชิ้นงาน [mm<sup>2</sup>]
  - $h$  = ความหนาของสเกล [mm]
  - $W$  = น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ของออกไซด์สเกล [mg/mm<sup>2</sup>]



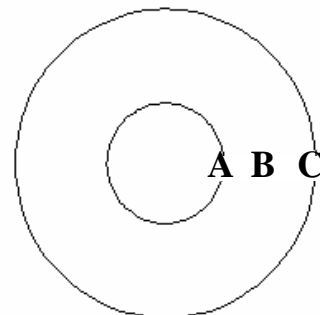
ความหนาของออกไซด์สเกลที่เกิดระหว่างการเย็นตัวจาก 560 °C ถึง 380 °C ที่ตำแหน่ง A ที่ประมาณจากสมการทำนายความหนาออกไซด์สเกลแบบที่ 1 จะมีค่าเท่ากับ (ค่าความหนาแน่นของเฮมาไต์เท่ากับ 5.18 mg/mm<sup>3</sup>)

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของออกไซด์สเกล} &= \frac{9.8892 \times 10^{-3}}{5.18} \\ &= 1.91 \text{ ไมโครเมตร} \end{aligned}$$

ในกรณีที่ต้องการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัว จากอุณหภูมิ 560 °C ถึงอุณหภูมิ 380 °C ณ ตำแหน่งอื่นๆ เช่น ตำแหน่ง C เริ่มด้วยการเลือกกราฟอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยแบบขั้นบันไดซึ่งแสดงในภาพที่ 4.11C เพื่อความสะดวกในการอ่านค่าให้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.9 อันประกอบไปด้วยอัตราการเย็นตัวเฉลี่ย, ช่วงเวลาที่ใช้อัตราการเย็นตัวเฉลี่ยนั้นเป็นตัวแทนอัตราการเย็นตัวจริง และอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา จากนั้นเลือกค่าคงที่ B และ -Q/R ของอัตราการเย็นตัวที่ต้องการ (อัตราการเย็นตัวเฉลี่ยในตารางที่ 4.9) จากตารางที่ 4.3 แล้วใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.3.2 เพื่อคำนวณปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ผลการคำนวณแสดงโดยสรุปในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 การเย็นตัวแบบขั้นบันได (อัตราการเย็นตัวคงที่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ) ณ ตำแหน่ง C

most fit cooling profile for position C		
cooling rate [C/min]	oxidation time [min]	average temperature [C]
-9.0	0.24	558.75
-7.2	1.47	550.12
-3.6	3.78	525.41
-1.8	8.35	499.30
-0.9	41.35	459.40
-0.6	124.81	380.83



ตารางที่ 4.10 แสดงการคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยพื้นที่ของการเย็นตัวตำแหน่ง C แบบที่ 1

Cooling rate [°C/min]	B	Temp [K]	exp(-Q/RT)	Oxidation time [min]	W <sup>2</sup> B*t*exp(-Q/RT)	W [mg/mm <sup>2</sup> ] [x10 <sup>-3</sup> ]
0.6	8.45088E-07	653.83	0.37231	166.16	5.22802E-05	7.230508
1.8	4.13421E-06	772.30	0.02554	8.35	8.81545E-07	0.938906
3.6	1.75248E-07	798.41	0.58761	3.78	3.89257E-07	0.623905
7.2	3.47008E-07	823.12	0.26988	1.47	1.37667E-07	0.371034
9	2.13896E-07	831.75	0.66646	0.24	3.46745E-08	0.186211

จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.4-4.5 เพื่อคำนวณน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่จากการเกิดออกซิเดชันระหว่างการเย็นตัวจาก 560°C ถึง 380°C ณ ตำแหน่ง C ดังนี้

$$W_{total} = \sum[\sqrt{W}] = \sum \left[ B_n t \exp\left(\frac{-Q_n}{RT}\right) \right]^{1/2}$$

$$W_{total} = (7.230508 + 0.938906 + 0.623905 + 0.371034 + 0.186211) \times 10^{-3} \text{ mg/mm}^2$$

$$= 9.350564 \times 10^{-3} \text{ mg/mm}^2$$

น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่ระหว่างการเย็นตัวจาก 560°C ถึง 380°C ณ ตำแหน่ง C มีค่าเท่ากับ  $9.350564 \times 10^{-3} \text{ mg/mm}^2$

สำหรับการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง C แบบที่ 2 เริ่มด้วยการเลือกกราฟอัตราการเย็นตัวเฉลี่ยแบบขั้นบันไดซึ่งแสดงในภาพที่ 4.11C หรือ ตารางที่ 4.9 ซึ่งจะใช้เฉพาะช่วงเวลา (Oxidation time) กับอุณหภูมิคงที่ในแต่ละช่วงเวลา จากนั้นหาค่าคงที่ปฏิกิริยาของแต่ละอุณหภูมิคงที่ ด้วยความสัมพันธ์ที่คำนวณได้จากการทดลองแบบ Isothermal oxidation ผลการคำนวณแสดงโดยสรุปในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การคำนวณน้ำหนักที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยพื้นที่ของการเย็นตัวตำแหน่ง C แบบที่ 2

average temp		Oxidation time [min]	k(T)	W=kt <sup>1/2</sup>
[°C]	[K]			
559	832	0.24	0.000735662	0.0003604
556	829	1.47	0.000722014	0.0008754
550	823	3.78	0.000695189	0.0013516
545	818	8.35	0.000673312	0.0019456
537	810	41.35	0.000639207	0.0041104
524	797	124.81	0.000586125	0.0065481

จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.5.1 เพื่อคำนวณน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่จากการเกิดออกซิเดชัน

$$W_{total} = \sum \left[ B_n t^{1/2} \exp\left(\frac{-Q_n}{RT}\right) \right]$$

$$W_{total} = (0.3604 + 0.8754 + 1.3516 + 1.9456 + 4.1104 + 6.5481) \times 10^{-3}$$

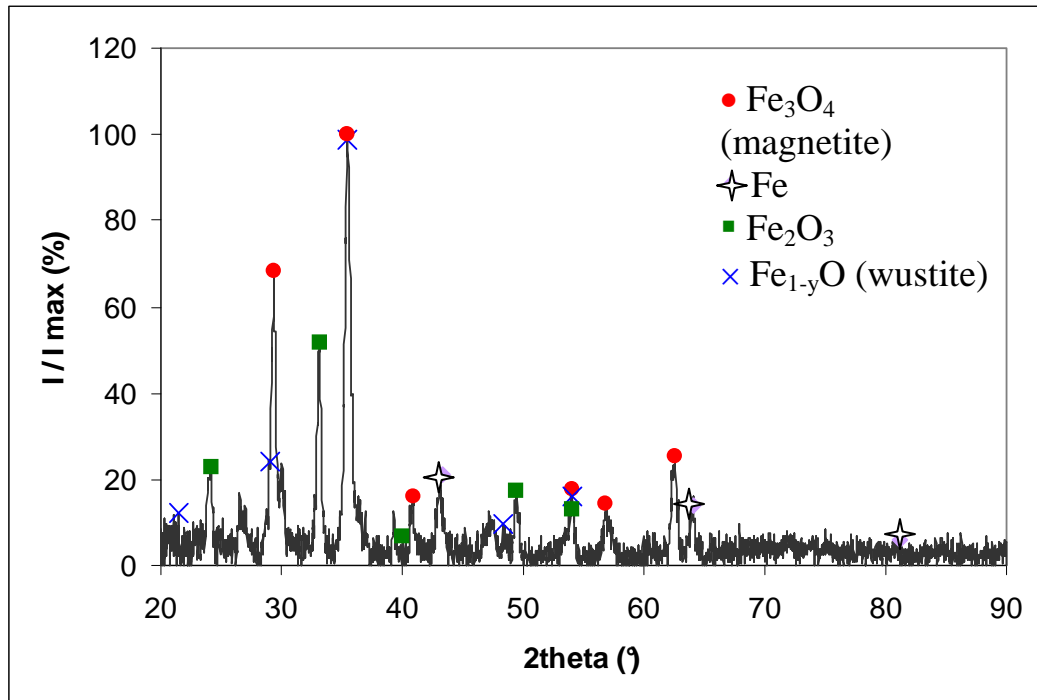
$$= 15.1915 \times 10^{-3} \text{ mg/mm}^2$$

จากผลการคำนวณปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดขึ้น โดยสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกล ที่ตำแหน่ง A และ C ในแบบที่ 1 และ แบบที่ 2 พบว่าการคำนวณโดยใช้ค่าคงที่ปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลองแบบ Non-isothermal oxidation หรือ แบบที่ 1 นั้น มีแนวโน้มของปริมาณออกไซด์สเกลที่

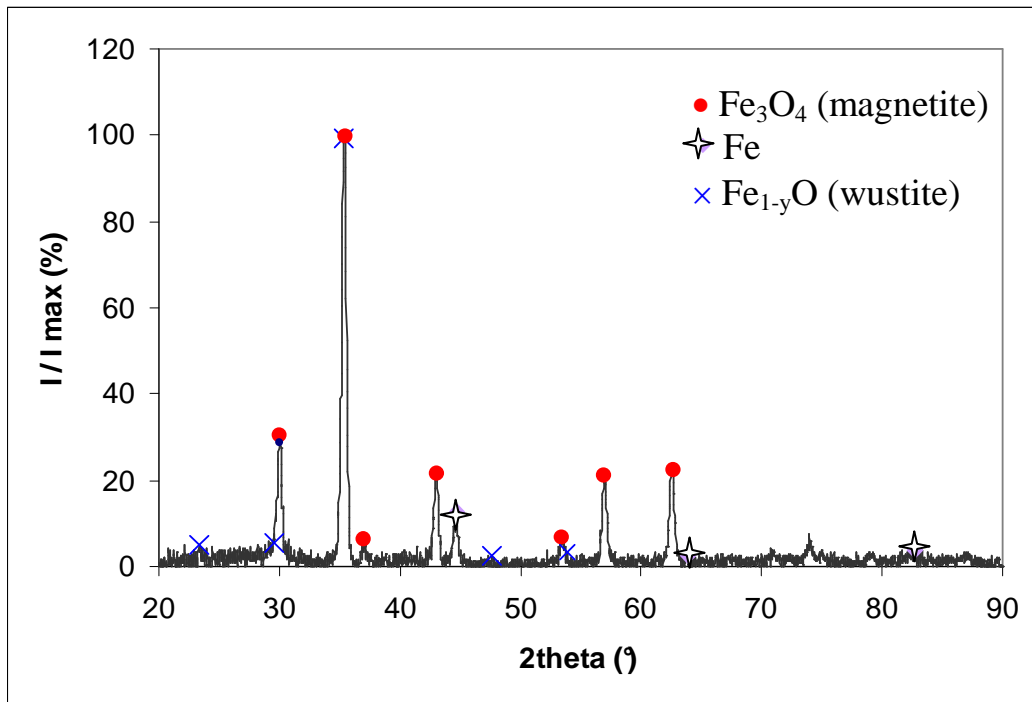
เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง A และ C ตรงกับความเป็นจริง กล่าวคือ ที่ตำแหน่ง A มีความปริมาณออกไซด์สเกลที่เพิ่มขึ้นมากกว่าในตำแหน่ง C ในขณะที่การคำนวณโดยใช้ค่าคงที่ปฏิกิริยาแบบ Isothermal oxidation ให้ผลการคำนวณที่ผิดไปจากความเป็นจริง ดังนั้นสมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลแบบที่ 1 จึงมีความน่าเชื่อถือมากกว่า

#### 4.7 ผลการวิเคราะห์ห่อออกไซด์สเกลที่ผิวของชิ้นงาน

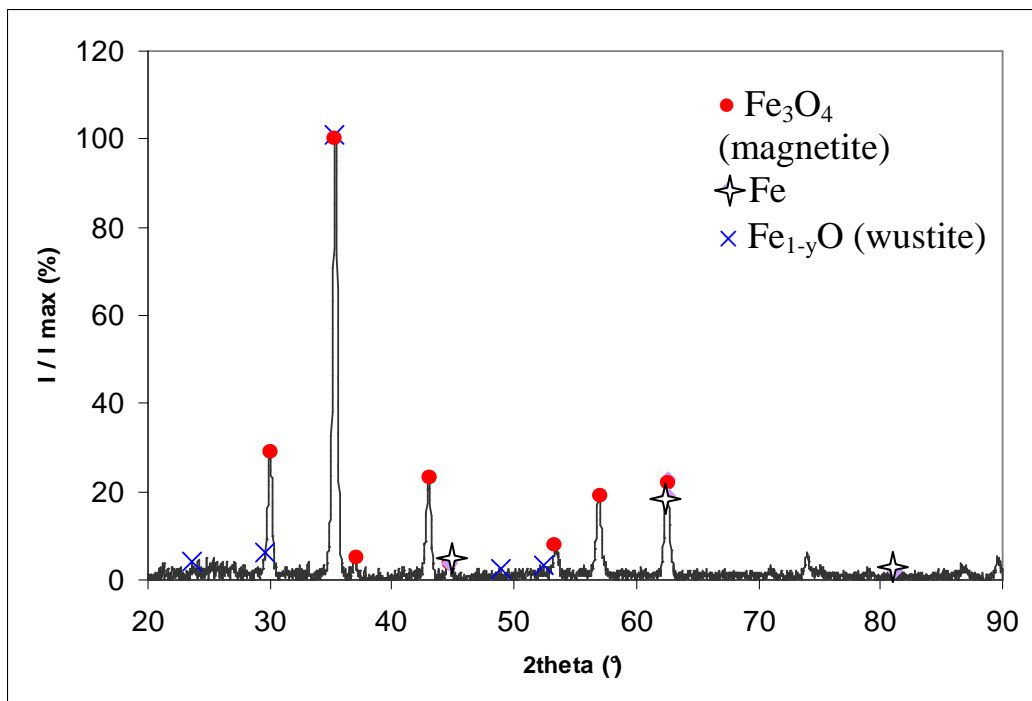
##### 4.7.1 วิเคราะห์ห่อออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นรีดร้อน เกรด HR1 (ตัวอย่างจากโรงงาน)



ภาพที่ 4.21 ชนิดของ oxide บริเวณขอบแผ่น



ภาพที่4.22 ชนิดของ oxide บริเวณ 1/4 ความกว้างของแผ่น



ภาพที่4.23 ชนิดของ oxide บริเวณกึ่งกลางแผ่น

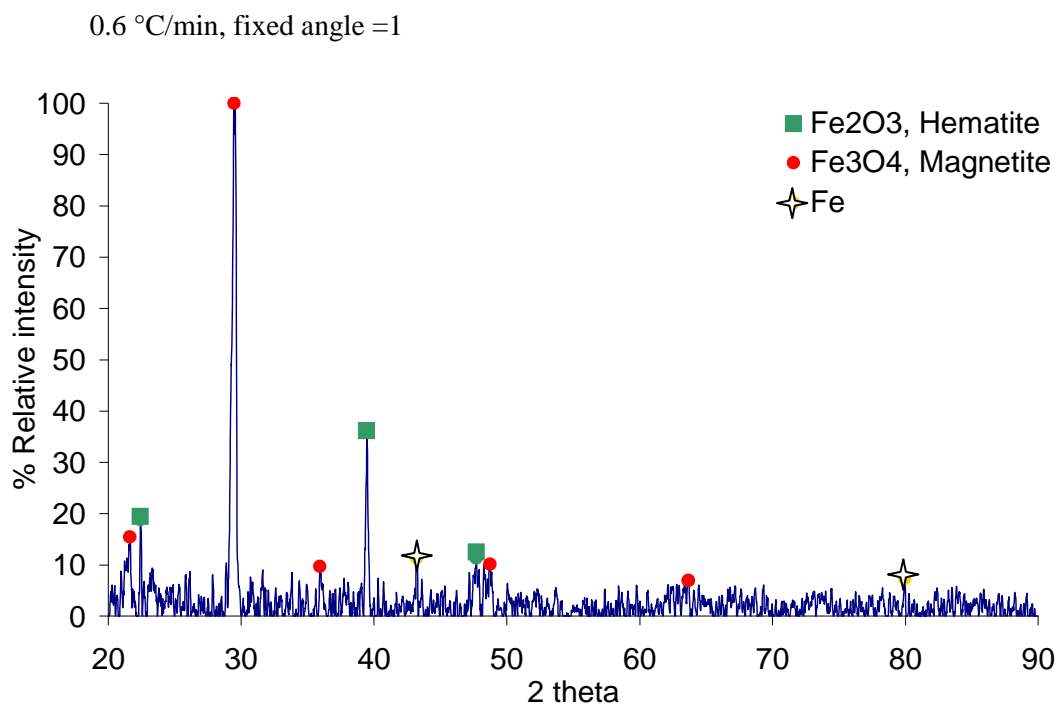
ผลการวิเคราะห์ออกไซด์สเกลที่ผิวของชิ้นงานจากเครื่อง XRD ทำให้ทราบว่าโครงสร้างสเกลบริเวณขอบแผ่นนั้นแตกต่างจากบริเวณอื่นๆ คือมีเฮมาไตต์ผสมอยู่ด้วย ในขณะที่บริเวณอื่น

จะพบแต่เหล็ก และแมกนีไตต์ ดังภาพที่ 1-3 ส่วน  $Fe_{1-y}O$  นี้คือ วูสไตต์ แต่สัดส่วนของสารประกอบไม่ตรงตามแผนภูมิสมมูล เนื่องจากปริมาณออกไซด์ในเหล็ก และการเย็นตัวที่รวดเร็ว

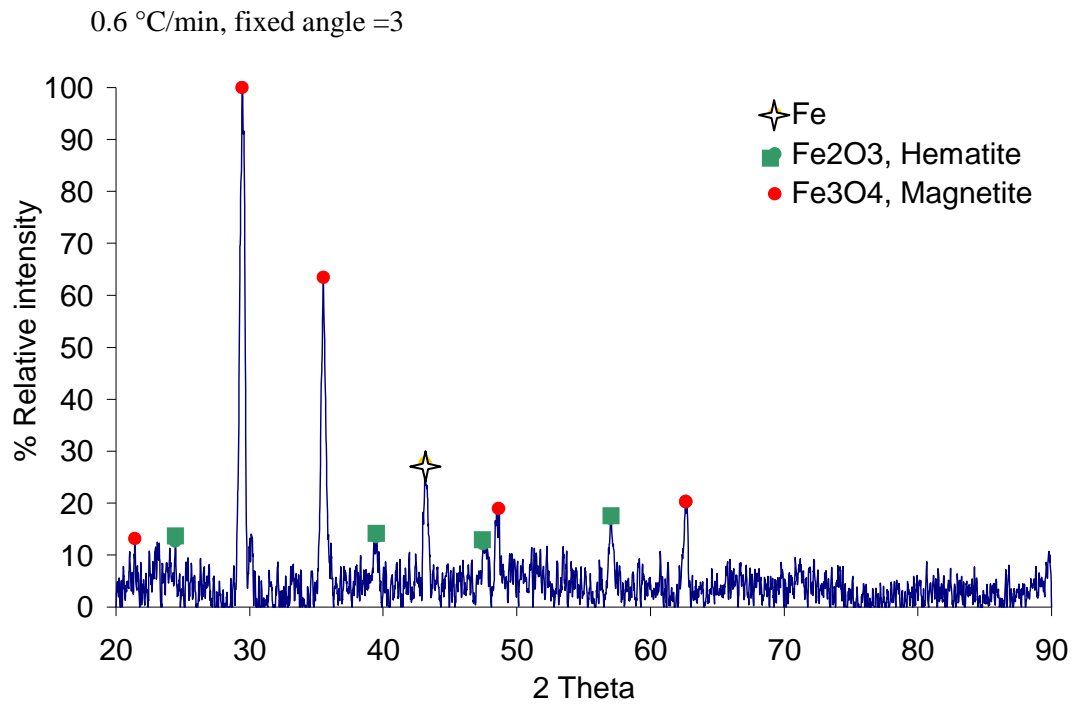
#### 4.7.2 วิเคราะห์ออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นรีดร้อน เกรด HR1 ที่ผ่านการจำลองการเกิดออกซิเดชันด้วยเทคนิค TGA

ผลการวิเคราะห์ออกไซด์สเกลที่เกิดบนผิวชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการเกิดออกซิเดชันด้วยเทคนิค TGA ในสภาวะ non-isothermal ทำให้ทราบว่าเมื่อออกไซด์สเกล 2 ชนิด ได้แก่ เฮมาไตต์ และแมกนีไตต์ โดยมีแมกนีไตต์ในสัดส่วนที่มากกว่า <sup>[4]</sup> และที่อัตราการเย็นตัวต่ำเฮมาไตต์จะมีปริมาณมากกว่าที่อัตราการเย็นตัวสูง (เทียบค่า relative intensity กับ magnetite) อีกทั้งไม่พบวูสไตต์ เนื่องจากวูสไตต์ไม่เสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $570\text{ }^{\circ}\text{C}$

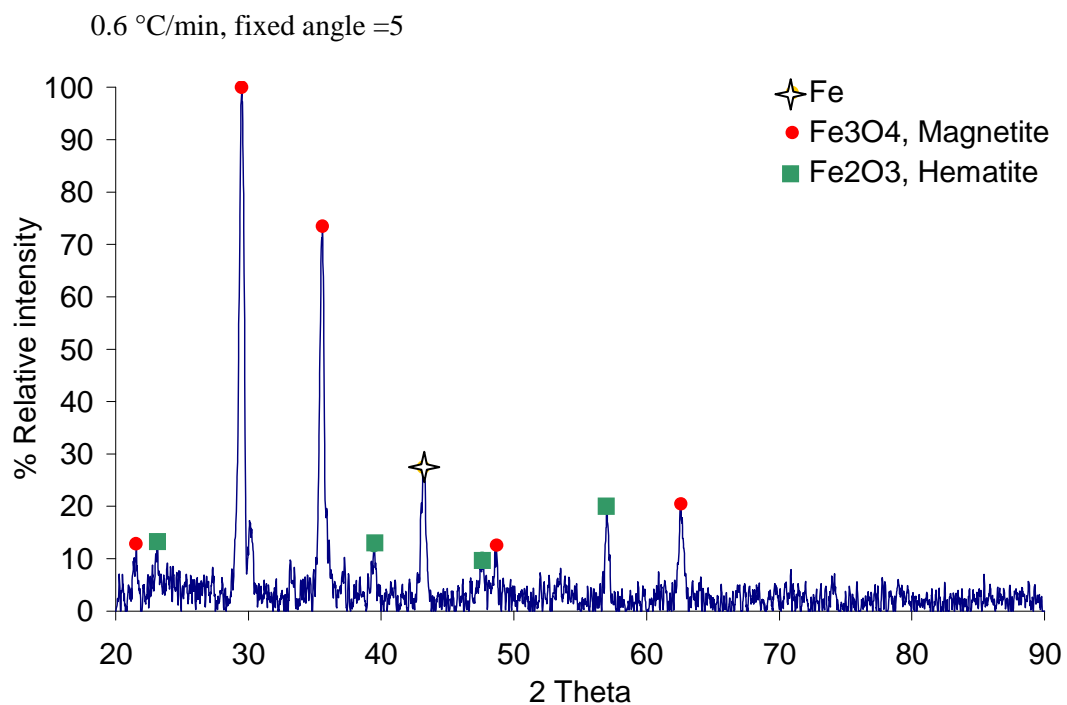
สำหรับสภาวะ isothermal oxidation จะเห็นว่าถึงแม้จะทำการทดลองที่อุณหภูมิ  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  แต่ก็ไม่มีพบวูสไตต์ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการแยกตัวของออกไซด์สเกลกับผิวเหล็กในขณะการออกซิเดชัน ทำให้ปริมาณ iron flux ลดน้อยลง ดังนั้นวูสไตต์ที่อาจจะเกิดขึ้นมาแล้วจึงถูกออกซิไดซ์กลายเป็นแมกนีไตต์ที่รอยต่อระหว่างวูสไตต์กับแมกนีไตต์ <sup>[13]</sup> ซึ่งการแยกตัวของออกไซด์สเกลกับผิวเหล็กนี้ยืนยันได้จากการทดลอง isothermal oxidation ที่  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  และออกไซด์สเกลหลุดออกอย่างง่ายดายในขณะนำชิ้นงานออกจากเตา



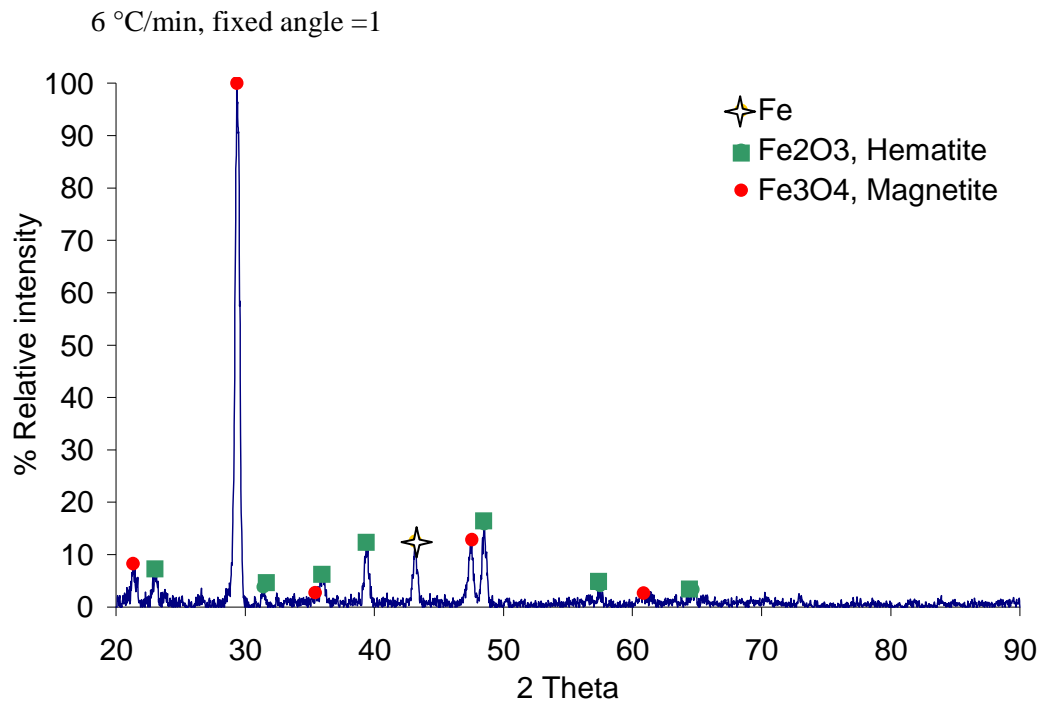
ภาพที่ 4.24 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$  ด้วยอัตราการเย็นตัว  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , fixed angle = 1



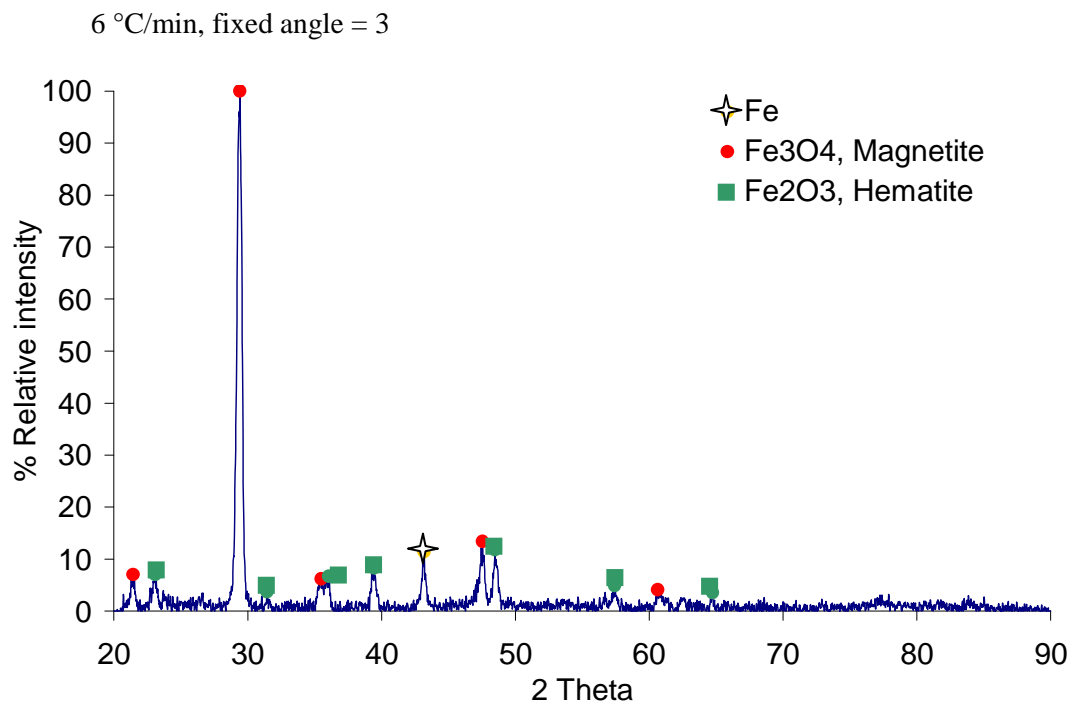
ภาพที่4.25 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 0.6 °C/min, fixed angle = 3



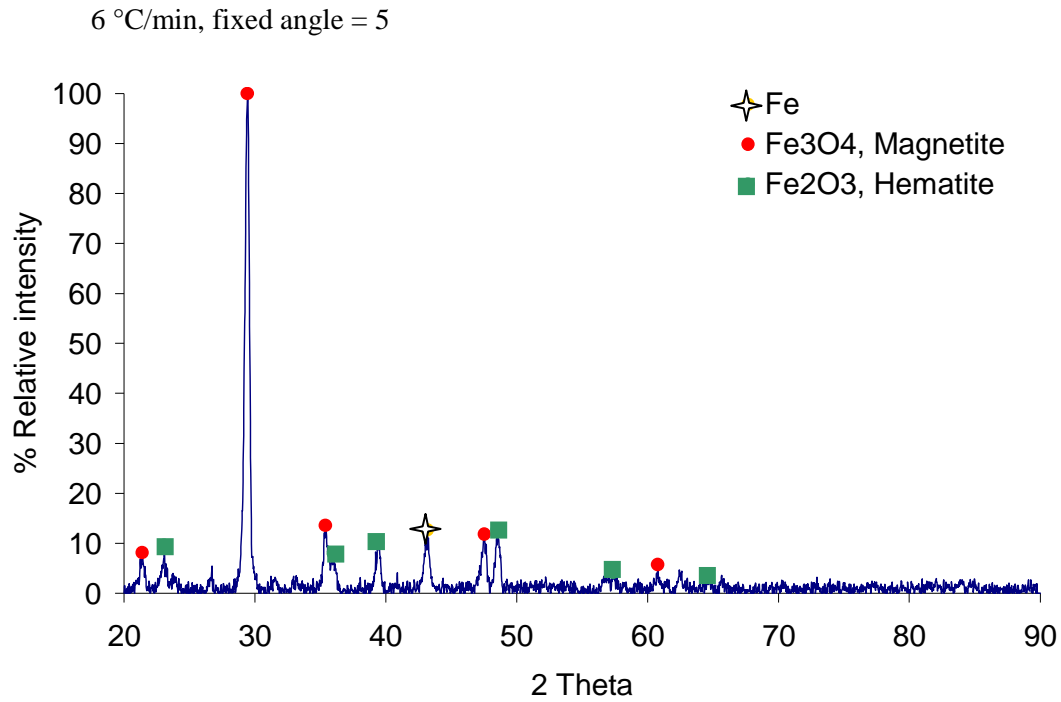
ภาพที่4.26 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 0.6 °C/min, fixed angle = 5



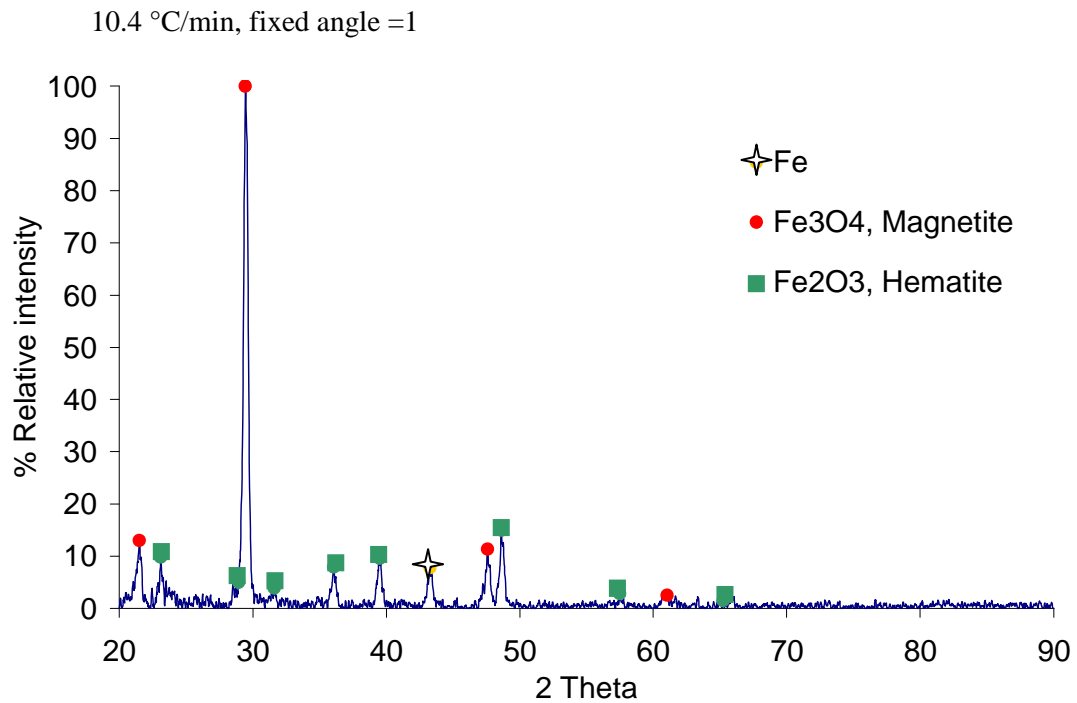
ภาพที่ 4.27 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 6 °C/min, fixed angle = 1



ภาพที่ 4.28 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 6 °C/min, fixed angle = 3

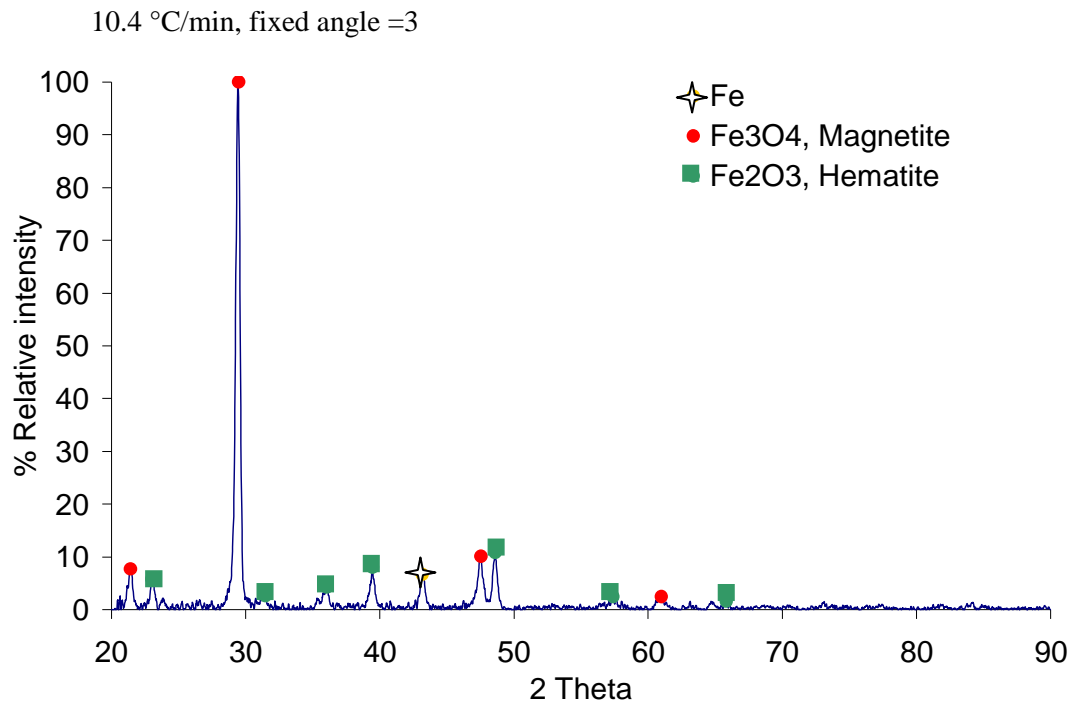


ภาพที่ 4.29 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 6 °C/min, fixed angle = 5

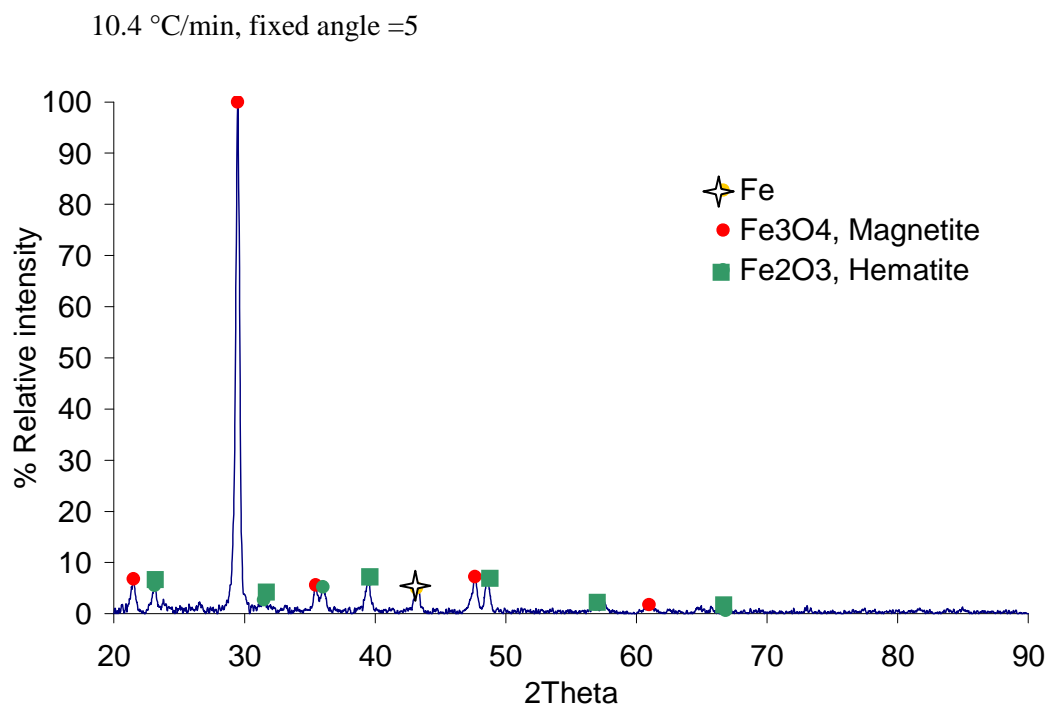


ภาพที่ 4.30 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 10.4 °C/min, fixed angle = 1

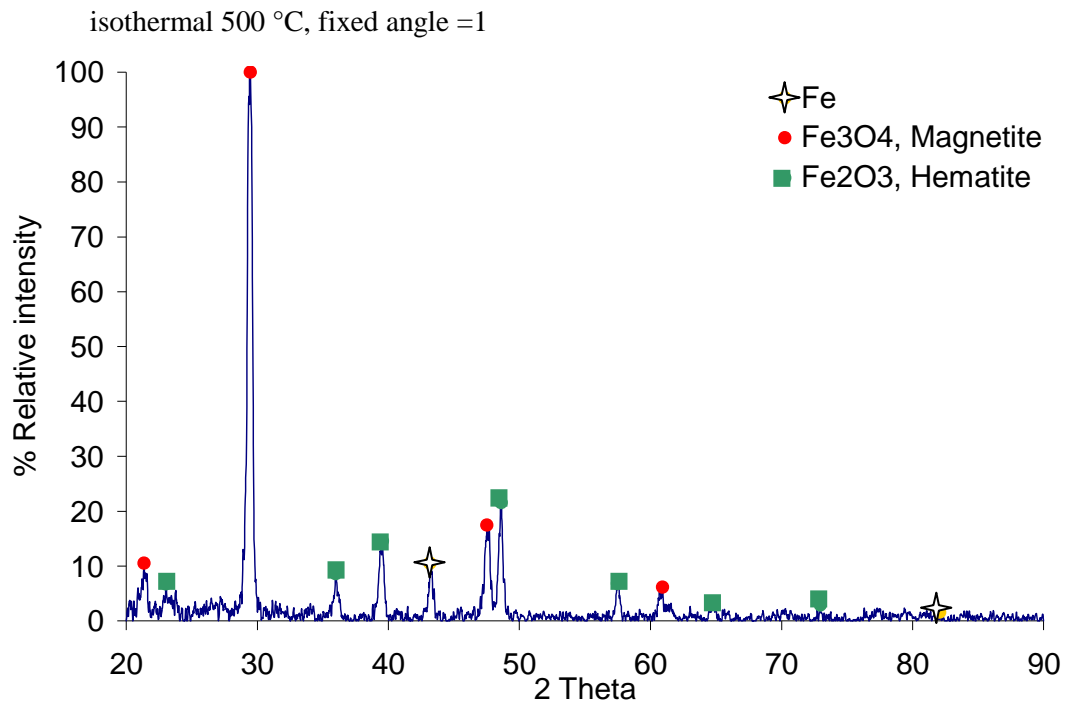




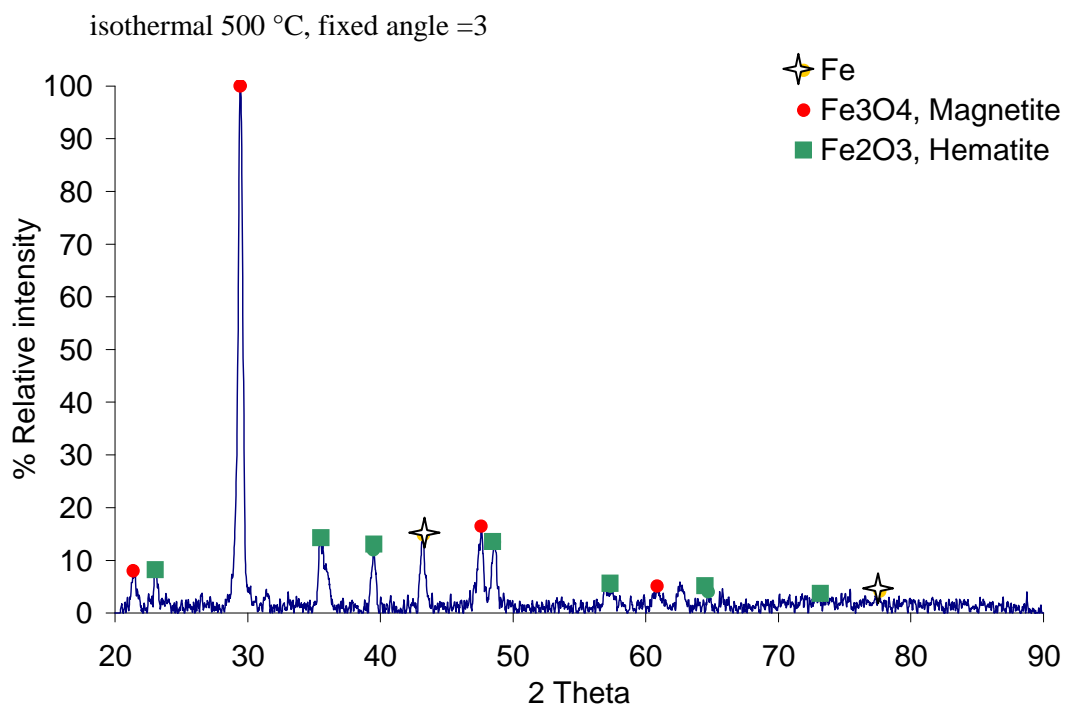
ภาพที่ 4.31 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 10.4 °C/min, fixed angle = 3



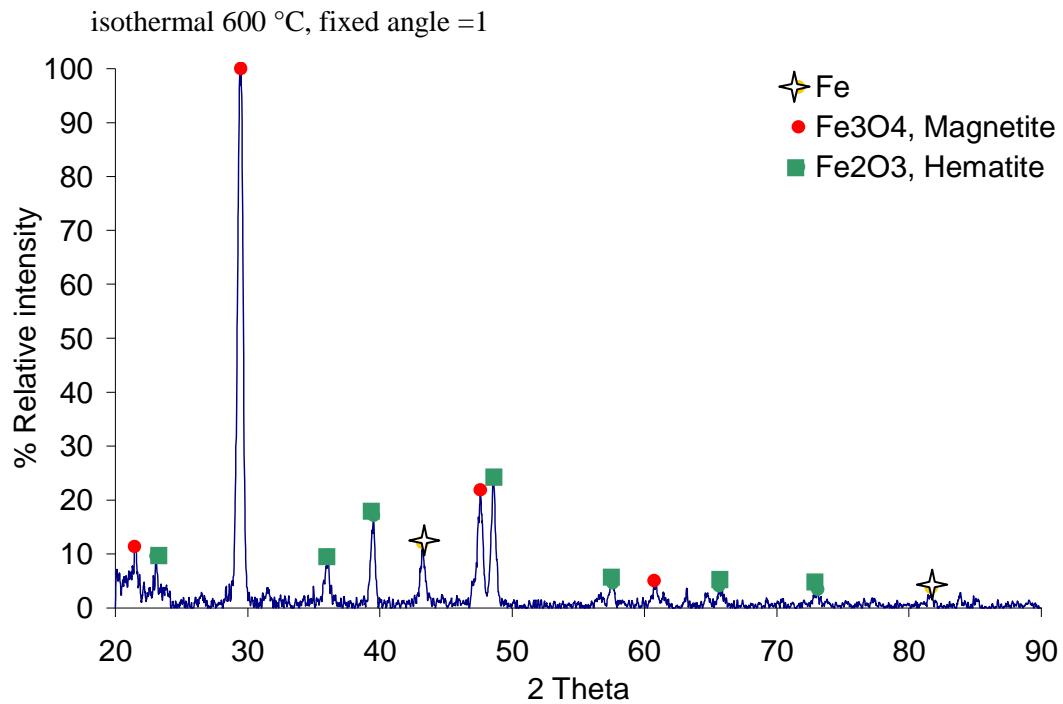
ภาพที่ 4.32 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่เย็นตัวจากอุณหภูมิ 560 °C ด้วยอัตราการเย็นตัว 10.4 °C/min, fixed angle = 5



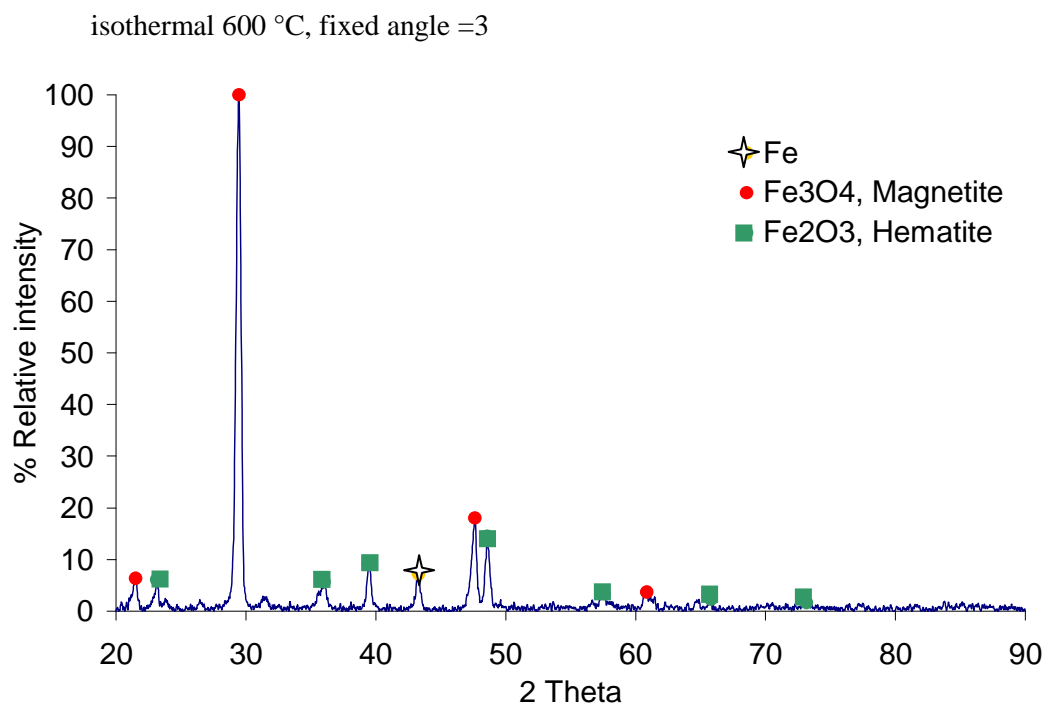
ภาพที่4.33 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่ออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 500 °C, fixed angle = 1



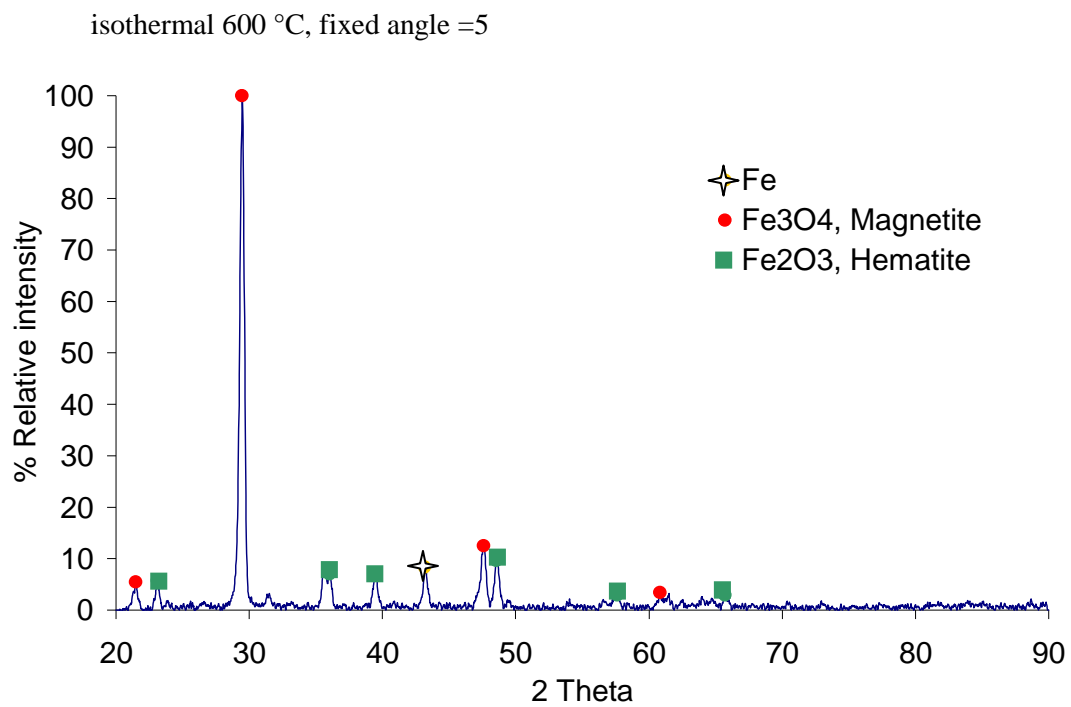
ภาพที่4.34 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่ออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 500 °C, fixed angle = 3



ภาพที่ 4.35 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่ออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 600 °C, fixed angle = 1



ภาพที่ 4.36 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่ออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 600 °C, fixed angle = 3



ภาพที่ 4.37 ชนิดของออกไซด์สเกลบนเหล็กแผ่นที่ออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 600 °C, fixed angle = 5

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของ(1) อัตราการเย็นตัว (2) อุณหภูมิมีวนเก็บ (3) เวลาที่ใช้ในการเกิดออกซิเดชัน และ (4) ตำแหน่งที่แตกต่างกันบนมีวนเหล็ก ต่อปริมาณออกไซด์สเกลที่เกิดบนผิวของเหล็กแผ่นรีดร้อนระหว่างเย็นตัวในบรรยากาศภายหลังมีวนเก็บ และได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดออกไซด์สเกลด้วย

ภายหลังกำหนดวัตถุประสงค์ในการวิจัย ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเพื่อกำหนดแนวทางในการทดลอง และทำการทดลองแล้ว จะได้ผลการทดลองซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ และอธิบายเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยมีข้อสรุปดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

- 1) จากผลการวัดความหนาออกไซด์สเกลบนชิ้นงานที่ได้จากโรงงานพบว่า ความหนาของออกไซด์สเกลที่ตำแหน่งที่ได้จากส่วนต้น (Head) มีความหนามากกว่า ออกไซด์สเกลบนชิ้นงานส่วนปลาย (Tail) และหนากว่าออกไซด์สเกลบนชิ้นงานส่วนกลาง (Middle) ตามลำดับ ในทุกๆตำแหน่ง และความหนาออกไซด์สเกลมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อชิ้นงานอยู่ใกล้ขอบ (edge) มากขึ้น เหมือนกันทั้งส่วนต้น ส่วนกลาง และส่วนปลาย ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการเย็นตัว และปริมาณออกซิเจนที่ต่างกันในแต่ละตำแหน่ง
- 2) จากการคำนวณอัตราการเย็นตัวโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า อัตราการเย็นตัวที่ตำแหน่ง A ต่ำกว่าตำแหน่ง C และตำแหน่ง B มีอัตราการเย็นตัวต่ำที่สุด เนื่องจากตำแหน่ง B มีอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำที่สุด ในขณะที่ตำแหน่ง C ความร้อนสามารถถ่ายเทได้ดีที่สุด ส่วนในตำแหน่ง A ซึ่งเป็นผิวโค้งด้านในของมีวนเหล็ก เนื่องจากมีลักษณะโค้งเว้า อัตราการถ่ายเทความร้อนจึงต่ำกว่าลักษณะ โค้งนูนแบบบริเวณ C
- 3) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมสำหรับปัญหาในงานวิจัยนี้ มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยมีค่าเท่ากับ

$$h(T) = 11.31\Delta T^{1/3} - 48 \quad [W/m^2 \text{ } ^\circ C]$$

- 4) จากการทดลองจำลองการเกิดออกไซด์สเกลด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแบบ Isothermal พบว่า ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ที่ 400-600 °C มีค่าขึ้นกับอุณหภูมิ และมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$k(T) = 0.13 \exp(-4305.29/T) \quad [mg/mm^2 \text{ min}^{-1/2}]$$

- 5) ความหนาของชั้นออกไซด์สเกลเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเกิดออกซิเดชันภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal oxidation) เพิ่มขึ้น หรือเวลาในการเกิดออกซิเดชันภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่ (Non-isothermal oxidation) เพิ่มขึ้น
- 6) สามารถใช้สมการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลแบบที่สร้างขึ้นโดยใช้ค่าคงที่ปฏิกิริยาจากการทดลองแบบ Non-isothermal oxidation สำหรับการทำนายปริมาณออกไซด์สเกลได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 5.01%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เปลี่ยนเป็นการใช้ชิ้นงานเหล็กรีดเย็นเพื่อลดภาระในการเตรียมผิวชิ้นงาน

## รายการอ้างอิง

- [1] สหวิริยาอินคัสตรี จำกัด (มหาชน), ผลิตภัณฑ์ และการผลิต[Online]. Available from: <http://www.ssi-steel.com/th/prdct/htclindex.html> [2004, May 1]
- [2] A.S. Khanna. High Temperature Oxidation and Corrosion. United State of America: ASM International, 2002.
- [3] PER KOFSTAD. High-Temperature Oxidation of Metal. United State of America: John Wiley & Sons, Inc., 1966.
- [4] D.R. Poirier และ G.H. Geiger. Transport phenomena in materials processing. United State of America: A Publication of the Minerals, Metals & Materials Society, 1994.
- [5] Weihua Sun. A study on the characteristics of oxide scale in hot rolling of steel. Doctoral dissertation, Materials and mechatronic engineering Faculty of engineering University of Wollongong, 2005.
- [6] Li Jian<sup>a</sup> และคณะ. Oxidation kinetics of Haynes 230 alloy in air at temperatures between 650 and 850 °C. Journal of Power Sources 159 [2006] : 641–645.
- [7] Bernhard Wunderlich. Thermal Analysis. United State of America: ACADEMIC PRESS, INC., 1990.
- [8] R. Y. Chen and W. Y. D. Yuen. Review of the High-Temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen. Oxidation of Metals Vol. 59 Nos. 5/6 [June, 2003]
- [9] Weihua Sun\*, A.K. Tieu และคณะ. Oxide scales growth of low-carbon steel at high temperatures. Journal of Materials Processing Technology 155–156 [2004] : 1300–1306
- [10] Martín Torres และ Rafael Colás. A model for heat conduction through the oxide layer of steel during hot rolling. Journal of Materials Processing Technology 105 (2000) : 258-263.
- [11] R. Y. Chen and W. Y. D. Yuen. A Study of the Scale Structure of Hot-Rolled Steel Strip by Simulated Coiling and Cooling. Oxidation of Metals Vol. 53 Nos. 5/6 (2000).
- [12] Taro KIZU, Yasunobu NAGATAKI และคณะ. Effects of Chemical Composition and Oxidation Temperature on the Adhesion of Scale in Plain Carbon Steels. ISIJ International Vol. 41 No.12 (2001): 1494–1501.
- [13] R. Y. Chen and W. Y. D. Yuen. Oxide-Scale Structures Formed on Commercial Hot-Rolled Steel Strip and Their Formation Mechanism. Oxidation of Metals Vol. 56 Nos. 1/2 (2001).

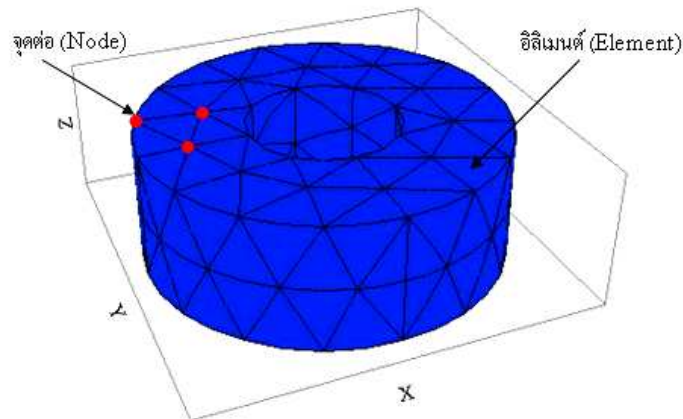
- [14] R. Y. Chen and W. Y. D. Yuen. Oxidation of low carbon, low silicon mild steel at 450-900 °C under condition relevant to hot-strip processing. Oxidation of Metals Vol. 57 Nos. 1/2 (February, 2002).
- [15] Jiefeng Cheng, Zhengdong Liu และคณะ. Analysis of the factors affecting thermal evolution of hot rolled steel during coil cooling. Journal of University of Science and Technology Beijing Vol.13 No.2 (April, 2006): 139.
- [16] W.W. Smeltzer and D.J. Young, Progr. Solid-State Chem. 10, 17 (1975).
- [17] Yildiz Bayazitoglu. Element of heat transfer. Singapore : McGraw-Hill Book Company, 1988
- [18] R. Bhattacharya และคณะ. Influence of cooling rate on the structure and formation of oxide scale in low carbon steel wire rods during hot rolling. Surface & Coatings Technology (2006).
- [19] R. Y. Chen and W. Y. D. Yuen. Examination of Oxide Scales of Hot Rolled Steel Products. ISIJ International Vol. 45 No.1 (2005): 52-59.
- [20] ชุติษาการศึกษานอกโรงเรียน, Activation energy [Online].Available from: <http://ebook.nfe.go.th/ebook/html/023/132.htm> [2007, March 10]



ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

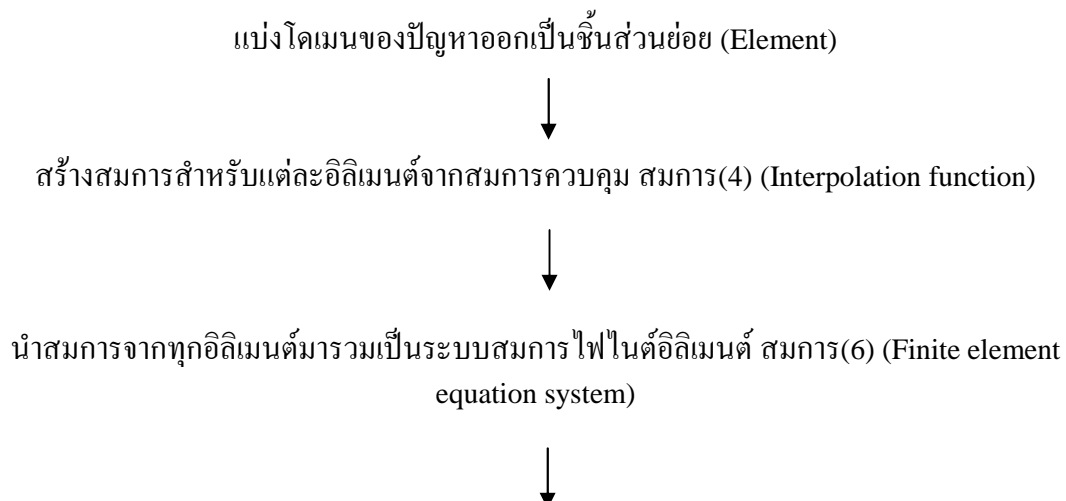
### ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)



ภาพที่ ๑๖ ภาพแสดงรูปจำลองม้วนเหล็กในแบบ 3มิติ (Domain), จุดต่อ และอิลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือ FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ ที่ต้องมีสมการควบคุมระบบ (Interpolation function) และใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) เพื่อแก้สมการ ภายหลังจากกำหนดขอบเขตของปัญหา (Domain) แล้วจะมีการแบ่งโดเมนออกเป็นชิ้นส่วนย่อยเรียกว่า อิลิเมนต์ (Element) แต่ละอิลิเมนต์จะเชื่อมกันด้วยจุดต่อ (Node) นำสมการควบคุมระบบมาสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลิเมนต์บนโดเมน นำสมการของทุกอิลิเมนต์มารวมเข้าด้วยกันจะได้ระบบสมการ (Finite element equation system) ที่ใช้ในการคำนวณค่าของตัวแปร แทนค่าต่างๆ เช่น เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition), เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) แล้วแก้ระบบสมการดังกล่าวซึ่งจะได้ผลเฉลยโดยประมาณที่จุดต่อบนโดเมน วิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณ

#### 1. ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



ให้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)



แก้ระบบสมการ ซึ่งจะได้ผลเฉลยที่จุดต่อบน โดเมน

## 2. สมการควบคุมระบบ (Interpolation function)

$$\phi(x,y) = N_1(x,y)\phi_1 + N_2(x,y)\phi_2 + N_3(x,y)\phi_3 \quad (4)$$

หรือ

$$\phi(x,y) = [N_1 \ N_2 \ N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}$$

$\phi_{1,2,3}$  = nodal unknowns

$N_i(x,y)$  = element interpolation function;  $n = 1,2,3$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

รวมสมการทุกอีลิเมนต์เป็นระบบสมการไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element equation system)

$$\sum (\text{elementEquation}) \rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ๑๖ แสดงความหนาสเกลก่อนการเฉลี่ย จากการทดลอง 4.1

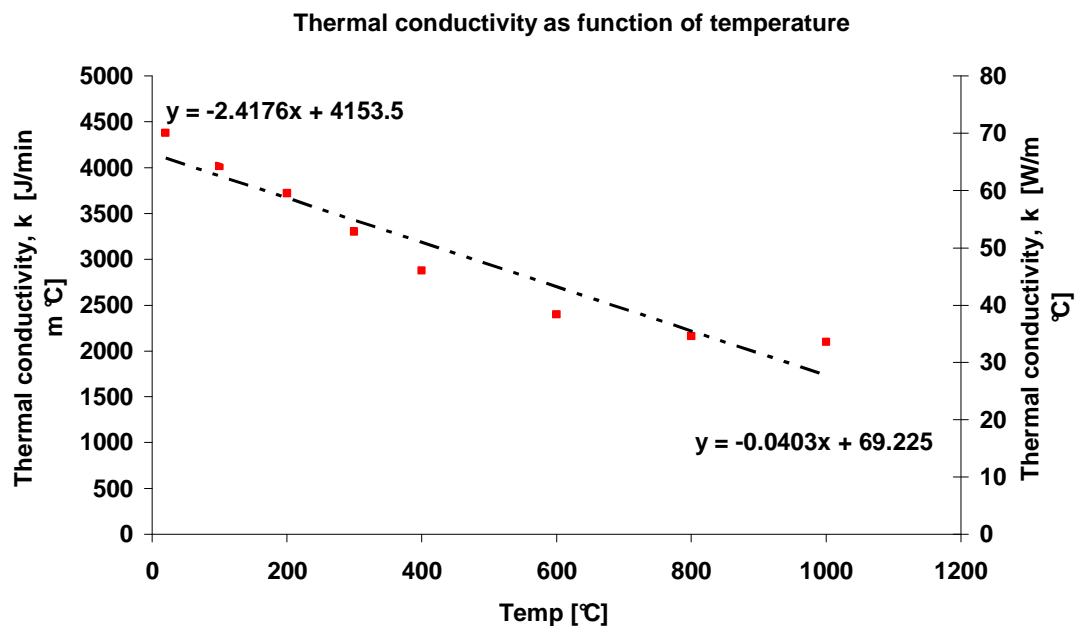
ชั้นงาน	ตำแหน่ง	thickness in micron					เฉลี่ย	average thickness
		1	2	3	4			
H1	1.1	10.35	9.86	8.98	8.61	9.15	8.31	
	1.2	10.98	11.1	9.98	10.11	10.05		
	1.3	8.92	8.17	8.3	7.67	8.05		
	1.4	9.04	9.17	7.92	8.67	8.54		
	1.5	8.61	8.73	7.98	7.98	8.33		
H2	2.1	9.07	8.02	9.02	7.64	8.23	8.47	
	2.2	8.40	7.90	7.64	9.65	7.98		
	2.3	8.40	8.65	9.15	9.15	8.84		
	2.4	9.40	8.77	8.90	9.65	8.84		
	2.5	10.03	10.04	9.40	9.90	9.40		
H3	3.1	8.77	8.40	7.39	7.39	7.99	8.60	
	3.2	9.27	9.27	7.52	8.27	8.58		
	3.3	10.40	9.90	10.4	11.15	10.23		
	3.4	10.15	8.15	8.90	9.15	8.73		
	3.5	7.27	6.52	6.77	7.02	6.90		
H4	4.1	7.90	8.15	9.90	12.41	10.15	8.63	
	4.2	10.65	8.77	8.52	7.77	9.31		
	4.3	11.40	9.90	7.14	6.64	8.52		
	4.4	9.02	7.52	8.15	7.90	8.15		
	4.5	6.27	7.27	7.77	11.65	8.90		
H5	5.1	7.67	8.42	7.42	8.17	8.30	8.71	
	5.2	7.98	7.17	6.18	7.73	7.86		
	5.3	8.86	9.36	8.05	8.55	8.71		
	5.4	9.36	8.36	9.11	7.73	8.64		
	5.5	9.17	9.73	8.73	7.98	9.21		
M1	1.1	8.15	8.40	7.90	8.65	8.28	6.69	
	1.2	6.27	6.77	7.02	9.27	6.69		
M2	2.1	7.90	7.64	7.64	6.64	7.31	7.38	
	2.2	8.40	7.77	8.90	8.90	7.77		
	2.3	8.15	8.15	7.40	8.90	7.40		
	2.4	7.39	7.90	7.90	8.90	7.39		
	2.5	7.90	7.02	8.15	9.40	7.02		
M3	3.1	7.64	7.64	6.39	6.89	7.64	7.50	
	3.2	5.89	6.39	7.14	5.64	7.14		
	3.3	5.76	7.02	6.77	6.02	7.02		
	3.4	6.27	7.52	8.02	7.52	7.69		
	3.5	6.52	7.39	7.52	8.52	8.02		

ชั้นงาน	ตำแหน่ง	thickness in micron					เฉลี่ย	average thickness
		1	2	3	4			
M4	4.1	5.89	7.14	7.14	7.64	7.31	7.90	
	4.2	8.40	7.90	8.27	7.77	7.98		
	4.3	7.9	7.90	8.65	10.90	7.90		
	4.4	8.15	9.90	9.90	11.15	8.15		
	4.5	8.02	8.90	7.52	9.4	8.15		
M5	5.1	6.02	6.27	7.27	5.64	6.52	8.04	
	5.2	8.15	9.90	9.90	7.52	8.87		
	5.3	9.40	7.90	7.64	8.40	8.31		
	5.4	6.27	7.52	7.27	7.52	7.44		
	5.5	6.89	7.64	7.90	7.14	7.56		
T1	1.1	6.77	6.52	6.77	5.76	6.46	6.82	
	1.2	5.39	5.39	5.64	5.14	5.39		
	1.3	6.77	6.89	7.64	6.39	6.92		
	1.4	7.52	8.65	8.90	7.64	8.18		
	1.5	6.89	7.64	7.64	6.39	7.14		
T2	2.1	8.90	8.65	8.15	7.64	7.90	7.77	
	2.2	8.65	8.15	8.15	8.65	8.15		
	2.3	9.40	8.90	8.40	9.15	8.40		
	2.4	8.15	7.90	7.90	8.15	7.90		
	2.5	9.15	8.65	7.14	10.9	7.14		
T3	3.2	8.40	8.65	7.14	8.65	8.21	7.97	
	3.3	8.15	8.15	7.90	7.64	7.96		
	3.4	8.90	8.40	7.90	7.64	8.21		
	3.5	8.65	9.40	8.15	7.90	8.53		
T4	4.1	8.65	8.65	7.39	9.65	8.59	8.21	
	4.2	8.90	8.40	9.40	8.65	8.84		
	4.3	7.64	8.65	6.89	7.39	7.64		
	4.4	7.77	9.78	8.02	6.77	8.09		
	4.5	9.27	8.27	7.52	6.52	7.90		
T5	5.1	7.64	8.40	6.27	7.64	7.44	8.24	
	5.2	8.40	8.90	8.64	8.40	8.59		
	5.3	9.40	9.65	9.40	9.15	9.48		
	5.4	6.02	10.53	7.27	9.40	8.31		
	5.5	7.39	7.52	7.27	7.52	7.43		

## ภาคผนวก ค

ตารางที่ ๑๓ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ <sup>[16]</sup>

Thermal conductivity, k		
Temp [°C]	k [W/m °C]	k [J/min m °C]
20	73	4380
100	67	4020
200	62	3720
300	55	3300
400	48	2880
600	40	2400
800	36	2160
1000	35	2100



ภาพที่ ๑๓ กราฟแสดงค่า Thermal conductivity ที่เป็น function กับอุณหภูมิ

## ภาคผนวก ง

### linear regression

การคำนวณหาสมการแทนชุดข้อมูล โดยวิธี linear regression

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อพื้นที่ กับเวลาในปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง มีสมการความสัมพันธ์คือ

$$y^a \equiv kt$$

$y$  = น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อหน่วยพื้นที่

$k$  = ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา

$t$  = เวลาในการเกิดออกซิเดชัน

$$a \log y \equiv \log k + \log t$$

$$\log y \equiv \frac{1}{a} \log t + \frac{1}{a} \log k$$

take log:

$$y \equiv mx + c$$

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log y$  กับ  $\log t$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีจุดตัดแกนตั้ง  $\frac{1}{a} \log k$

และความชัน  $\frac{1}{a}$

การหาสมการเส้นตรงที่เป็นตัวแทนของจุดแต่ละจุดโดยการหาสมการความถดถอยเชิงเส้น (linear regression)

$$\text{ให้ } \log y = y^*$$

$$\text{Log } t = x^*$$

$$\sum_1^n y^* = b \sum_1^n x + nc$$

$$\sum xy = b \sum x^2 + c \sum x$$

แก้สมการหาค่า  $b$  และ  $c$  แล้วแทนลงใน  $\log y = b \log t + c$

## ภาคผนวก จ

### สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination)

ผลต่างของ 1 กับอัตราส่วนของ Sum of square error (SSE) กับ Sum of square total (SST) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ ๑๖ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หรืออาจนิยามทำเป็นเปอร์เซ็นต์มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100% ถ้า  $R^2$  มีค่าใกล้ 1 หรือ 100% แปลว่า ข้อมูลที่ทำการเปรียบเทียบกันนั้นมีความใกล้เคียงกันมาก

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

สมการที่ ๑๖

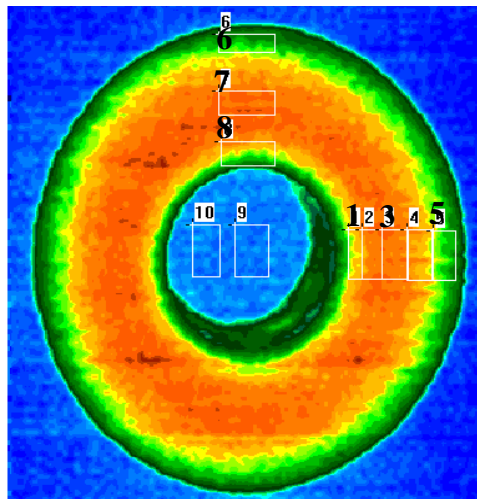
$R^2$  = สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

$y_i$  = ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

$\hat{y}_i$  = ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ

$\bar{y}$  = ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ประเมินความถูกต้องของสมมติฐานว่าวนเหล็กมีสมมาตรในการถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี



ภาพที่ ๑๖ ภาพถ่ายความร้อนของม้วนเหล็กพร้อมระบุอุณหภูมิ



ตารางที่ ๑๑ เปรียบเทียบตำแหน่ง 1 กับ 8

time [min]	Position No.1 (1)	Position No.1 (8)	$(\text{observe}-\bar{y})^2$	$(\text{observe}-\text{predict})^2$
	predict	observe		
0	560	560	12095.50042	0
5	510.1	510.1	3609.551782	0
7	506.7	511.2	3742.936782	20.25
9	507.6	503	2806.832237	21.16
11	504.2	504.2	2935.423146	0
13	504.6	504.6	2978.926782	0
15	500.9	500.9	2588.728146	0
17	502.1	502.1	2712.279055	0
19	503.1	503.1	2817.438146	0
21	508.5	503.7	2881.4936	23.04
23	507.6	507.6	3315.404055	0
25	498.6	503.5	2860.061782	24.01
32	490.2	485	1223.5686	27.04
35	491.4	486.3	1316.205418	26.01
40	481.3	481.3	978.4099638	0
45	473	487.3	1389.764509	204.49
50	466.5	474.6	604.1540548	65.61
55	457.5	460.4	107.7349638	8.41
60	456.6	456.6	43.29041839	0
65	451.7	457.5	55.94360021	33.64
70	450.9	450.9	0.773600207	0
75	442.4	442.4	58.07132748	0
80	440.4	446.4	13.10769112	36
85	433.7	439.9	102.4236002	38.44
90	437.6	434.5	240.8845093	9.61
95	427.9	431.1	357.9836002	10.24

เปรียบเทียบตำแหน่ง 1 กับ 8 (ต่อ)

time [min]	Position No.1 (1)	Position No.1 (8)	$(\text{observe}-\bar{y})^2$	$(\text{observe}-\text{predict})^2$
	predict	observe		
100	427.7	427.7	498.2026911	0
105	429.1	419.2	949.9004184	98.01
110	425.6	415.6	1184.767691	100
115	412.3	422.6	751.8813275	106.09
120	408.6	419	962.2686002	108.16
125	414.4	417.8	1038.157691	11.56
130	407.4	403.7	2145.584509	13.69
135	409	405.3	1999.919055	13.69
140	401.4	397.7	2737.429964	13.69
145	397.9	397.9	2716.541782	0
150	398.2	398.2	2685.359509	0
155	398.2	390.6	3530.790418	57.76
160	390.6	386.6	4022.154055	16
165	392.8	396.6	2853.744964	14.44
170	388.9	398.4	2664.671327	90.25
175	394.3	390.5	3542.684509	14.44
180	382.6	382.6	4545.517691	0
185	390.8	382.7	4532.0436	65.61
		Mean 450.0204545	SST 95198.51159	SSE 1271.34

$$R^2 = 1 - (\text{SSE}/\text{SST}) = 0.986645379$$

ตารางที่ ๒๖ เปรียบเทียบตำแหน่ง 3 กับ 7

time [min]	Position No.2 (3)	Position No.2 (7)	$(\text{observe}-\bar{y})^2$	$(\text{observe}-\text{predict})^2$
	predict	observe		
0	560	560	10420.2336	0
5	500.9	505.5	2263.813146	21.16
7	506.7	511.2	2838.709964	20.25
9	507.6	512.2	2946.269055	21.16
11	504.2	504.2	2141.796327	0
13	504.6	509.3	2639.857691	22.09
15	500.9	500.9	1847.241327	0
17	502.1	502.1	1951.832237	0
19	503.1	507.8	2487.969055	22.09
21	508.5	508.5	2558.290418	0
23	507.6	502.8	2014.1736	23.04
25	503.5	498.6	1654.825418	24.01
32	485	485	733.301782	0
35	491.4	486.3	805.3986002	26.01
40	481.3	486.5	816.7904184	27.04
45	475.6	480.9	528.0595093	28.09
50	471.9	477.2	371.7008729	28.09
55	465.9	471.5	184.4040548	31.36
60	462.4	462.4	20.06632748	0
65	460.4	457.5	0.176782025	8.41
70	459.6	453.8	16.97814566	33.64
75	451.4	451.4	42.51632748	0
80	449.4	455.1	7.954963843	32.49
85	442.9	445.9	144.4913275	9
90	443.7	443.7	202.2213275	0
95	440.5	443.5	207.9495093	9

เปรียบเทียบตำแหน่ง 3 กับ 7 (ต่อ)

time [min]	Position No.2 (3)	Position No.2 (7)	$(\text{observe}-\bar{y})^2$	$(\text{observe}-\text{predict})^2$
	predict	observe		
100	434	440.3	310.4804184	39.69
105	432.2	435.4	507.1708729	10.24
110	432	435.2	516.2190548	10.24
115	429.1	432.3	656.4076911	10.24
120	428.8	425.6	1044.611782	10.24
125	424.5	424.5	1116.926782	0
130	421.3	421.3	1341.057691	0
135	415.9	419.4	1483.825418	12.25
140	415.6	415.6	1791.020873	0
145	412.4	415.8	1774.132691	11.56
150	412.6	412.6	2053.9436	0
155	409.1	409.1	2383.436782	0
160	405.5	409.1	2383.436782	12.96
165	404	407.6	2532.148146	12.96
170	404	400.4	3308.602691	12.96
175	401.8	409.1	2383.436782	53.29
180	405.7	405.7	2726.975873	0
185	402.1	405.7	2726.975873	12.96
		Mean 457.9204545	SST 596.52	SSE 70887.83159

$$R^2 = 1 - (\text{SSE}/\text{SST}) = 0.991585016$$

ตารางที่ ๑๖ เปรียบเทียบตำแหน่ง 5 กับ 6

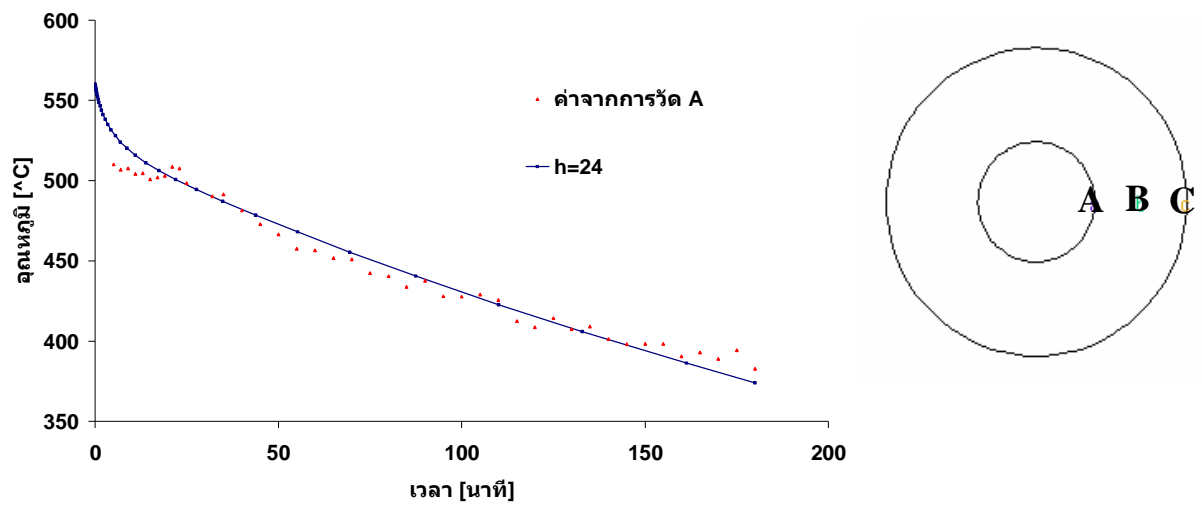
time [min]	Position No.3 (5)	Position No.3 (6)	$(\text{observe}-\bar{y})^2$	$(\text{observe}-\text{predict})^2$
	predict	observe		
0	560	560	13662.95331	0
5	476.8	486.7	1899.96922	98.01
7	492.7	502.1	3479.65922	88.36
9	493.6	498.4	3056.833311	23.04
11	494.8	499.6	3190.966038	23.04
13	495.1	504.6	3780.852402	90.25
15	491.1	496	2797.207856	24.01
17	497.3	497.3	2936.408311	0
19	493.3	498.2	3034.757856	24.01
21	498.9	498.9	3112.371947	0
23	497.9	497.9	3001.794675	0
25	493.6	498.6	3078.988765	25
32	479.7	485	1754.657856	28.09
35	481	486.3	1865.258311	28.09
40	475.9	475.9	1075.094675	0
45	475.6	478.3	1238.240129	7.29
50	460.9	469.2	680.6169473	68.89
55	454.6	460.4	298.8969473	33.64
60	450.8	456.6	181.943311	33.64
65	448.8	454.6	131.9887655	33.64
70	441.9	453.8	114.2469473	141.61
75	439.4	442.4	0.506038223	9
80	437.3	446.4	10.81512913	82.81
85	430.5	433.7	88.5737655	10.24
90	431.4	428.2	222.3487655	10.24
95	424.6	427.9	231.3855837	10.89

เปรียบเทียบตำแหน่ง 5 กับ 6 (ต่อ)

time [min]	Position No.3 (5)	Position No.3 (6)	$(\text{observe}-\bar{y})^2$	$(\text{observe}-\text{predict})^2$
	predict	observe		
100	417.7	424.4	350.1151291	44.89
105	408.8	408.8	1177.269675	0
110	405	408.6	1191.03422	12.96
115	415.8	412.3	949.3401291	12.25
120	408.6	405	1452.476038	12.96
125	407.3	410.9	1037.571947	12.96
130	403.7	392.5	2561.510129	125.44
135	394.2	394.2	2392.321493	0
140	386.1	390.1	2810.204675	16
145	382.3	382.3	3698.021947	0
150	386.5	386.5	3204.846493	0
155	382.5	386.5	3204.846493	16
160	382.5	374.1	4762.568311	70.56
165	380.7	376.5	4437.073765	17.64
170	380.8	367.9	5656.74922	166.41
175	386.5	382.4	3685.869675	16.81
180	386.7	382.6	3661.625129	16.81
185	382.7	374.3	4735.003765	70.56
		Mean 443.1113636	SST 105895.7843	SSE 1506.04

$$R^2 = 1 - (\text{SSE}/\text{SST}) = 0.985778093$$

ประเมินความถูกต้องของค่า heat transfer coefficient



ภาพที่ ๒๖ ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ณ ตำแหน่ง A เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณ (น้ำเงิน) กับค่าจากการวัด (แดง)

ตารางที่ ๔๘ ตำแหน่ง A เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณ (flex) กับค่าจากการวัด (real)

Flex [°C]	Real [°C]	SE	ST
560	560	7.94E-10	7542.923
521.3855	510.1	127.3627	1365.303
517.2228	506.7	110.7295	1125.603
512.8907	507.6	27.99108	1186.803
508.3628	504.2	17.32881	964.1025
503.6076	504.6	0.984792	989.1025
498.5699	502.1	12.46187	838.1025
493.1408	508.5	235.9053	1249.623
487.1388	498.6	131.3598	647.7025
480.3187	491.4	122.7947	333.0625
472.4132	473	0.344357	0.0225
463.1878	457.5	32.35086	244.9225
452.4849	450.9	2.51198	495.0625
440.236	433.7	42.71989	1556.302
429.1635	425.6	12.69861	2261.002
416.6079	409	57.87973	4115.222
402.5794	390.6	143.5049	6814.502
392.593	382.6	99.86004	8199.302
Mean	473.15	SSE	SST
		1178.789	39928.67

$$R^2 = 0.970478$$

ตารางที่ ๕๖ ตำแหน่ง B เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณ (flex) กับค่าจากการวัด (real)

Flex [°C]	Real [°C]	SE	ST
560	560	3.60001E-15	6828.268
538.8828	500.9	1442.691735	553.8178
535.7019	506.7	841.1104327	860.4444
532.0423	507.6	597.4237342	914.0544
527.7963	504.2	556.7839471	720.0278
522.8397	504.6	332.6884184	741.6544
517.0492	502.1	223.4795057	611.7378
510.3184	508.5	3.306614019	969.2844
502.5644	503.5	0.875259902	682.9511
493.7228	491.4	5.395423904	196.9344
483.7373	475.6	66.21585049	3.121111
472.5545	465.9	44.28205256	131.4844
460.1255	459.6	0.276111953	315.6544
446.4107	442.9	12.32527934	1187.951
434.3312	432	5.434425369	2058.134
420.8527	415.9	24.52926651	3778.151
405.9592	405.5	0.210826886	5164.818
395.1792	405.7	110.6866885	5136.111
	Mean	SSE	SST
	477.3667	4267.715573	30854.6

$$R^2 = 0.861683$$

ตารางที่ ๖๖ ตำแหน่ง C เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการคำนวณ (flex) กับค่าจากการวัด (real)

Flex [°C]	Real [°C]	SE	ST
560	560	2.54016E-11	9186.158
517.4302	476.8	1650.810229	159.882
511.7167	492.7	361.6353341	814.7853
505.7426	493.6	147.4428496	866.9753
499.5273	494.8	22.34693152	939.082
493.0589	495.1	4.166236905	957.5586
486.2893	497.3	121.2359184	1098.554
479.1352	498.9	390.6455647	1207.176
471.4872	493.6	488.9750911	866.9753
463.2248	481	315.9587127	283.7353
454.2347	475.6	456.4745887	130.9753
444.4257	454.6	103.5167622	91.30864
433.7302	441.9	66.7452095	495.3098
422.0911	430.5	70.70949746	1132.696
411.9254	405	47.96101114	3499.38
400.6117	394.2	41.11033122	4893.78
388.0877	382.5	31.22235463	6667.63
378.9885	386.7	59.46788171	5999.363
	Mean	SSE	SST
	464.1556	4380.424505	39291.32

$$R^2 = 0.888514$$



ประเมินความถูกต้องของแบบจำลองการเย็นตัวแบบขั้นบันได

ตารางที่ ๘๖ การเย็นตัวที่ตำแหน่ง A

cooling rate [°C/min]		SE	ST
Observe	Predict		
-10.66673085	-10.4	0.071145347	35.95697009
-10.66673085	-10.4	0.071145347	35.95697009
-10.56188732	-10.4	0.026207505	34.71059203
-10.43194309	-10.4	0.001020361	33.19632656
-10.27177856	-10.4	0.016440737	31.37636325
-10.07554313	-10.4	0.105272259	29.21646143
-9.836818508	-9	0.700265215	26.69273008
-9.548922914	-9	0.301316365	23.80078834
-9.2054189	-9	0.042196924	20.56714244
-8.800872032	-9	0.039651947	17.06147868
-8.331866635	-9	0.446402194	13.40694023
-7.798207661	-9	1.444304827	9.783695291
-7.20412904	-7.2	1.7049E-05	6.420199651
-6.55922217	-7.2	0.410596228	3.567959907
-5.878757347	-5.4	0.229208597	1.460326259
-5.183151086	-5.4	0.047023452	0.26299803
-4.496501961	-5.4	0.816308707	0.030211929
-3.844227735	-3.6	0.059647186	0.682424713
-3.249794827	-3.6	0.122643663	2.017885377
-2.730627919	-3.6	0.755807815	3.76239664
-2.294101614	-1.8	0.244136405	5.646403128
-1.935879905	-1.8	0.018463349	7.47715033
-1.642994463	-1.8	0.024650739	9.164686288
-1.401188437	-1.8	0.159050663	10.68720647
-1.201916131	-1.8	0.357704315	12.02980979
-1.043769762	-0.6	0.196931601	13.15185031
-0.927773183	-0.6	0.107435259	14.00663984
-0.851235545	-0.6	0.063119299	14.58538889
-0.805210528	-0.6	0.042111361	14.93905384
-0.776675576	-0.6	0.031214259	15.16044938
-0.753034361	-0.6	0.023419516	15.34510915
-0.725888127	-0.6	0.015847821	15.55852505
-0.692282684	-0.6	0.008516094	15.82476299
-0.653378715	-0.6	0.002849287	16.13579922
-0.611814137	-0.6	0.000139574	16.47145158
-0.577479449	-0.6	0.000507175	16.75132536
-0.564001599	-0.6	0.001295885	16.86183234
	Mean	SSE	SST
	-4.67031775	7.004014328	559.728305

$$R^2 = 0.987486761$$

## ตารางที่ ๘๖ การเขียนตัวที่ตำแหน่ง B

cooling rate [°C/min]		SE	ST
Observe	Predict		
-6.052447689	-6	0.00275076	11.10002581
-6.052447689	-6	0.00275076	11.10002581
-5.95871479	-6	0.001704469	10.48423746
-5.843923334	-6	0.024359926	9.754039485
-5.704694736	-6	0.087205199	8.903761673
-5.537568823	-5.4	0.018925181	7.934312983
-5.339401025	-5.4	0.003672236	6.857188818
-5.107910264	-5.4	0.085316414	5.698402514
-4.842395301	-5.4	0.310923	4.50126181
-4.544573304	-3.6	0.892218726	3.32623089
-4.219392878	-3.6	0.383647538	2.245847852
-3.875540877	-3.6	0.075922775	1.333478302
-3.525244644	-3.6	0.005588363	0.647167279
-3.182974832	-3.6	0.17390999	0.213626312
-2.862924584	-3.6	0.543280169	0.020205775
-2.575759694	-3.6	1.049068204	0.021030183
-2.325919698	-1.8	0.276591529	0.155912737
-2.11112108	-1.8	0.096796327	0.371681031
-1.924942302	-1.8	0.015610579	0.633353768
-1.761380768	-1.8	0.001491445	0.920442218
-1.618372505	-1.8	0.032988547	1.215296921
-1.497512584	-1.2	0.088513738	1.496377218
-1.400172075	-1.2	0.04006886	1.743998864
-1.323467175	-1.2	0.015244143	1.952476331
-1.259716429	-1.2	0.003566052	2.134699649
-1.199737128	-1.2	6.91016E-08	2.313564016
-1.137005309	-1.2	0.003968331	2.508334565
-1.069580383	-1.2	0.017009277	2.72645214
-0.999168965	-0.9	0.009834484	2.963936178
-0.928807774	-0.9	0.000829888	3.211155736
-0.860941611	-0.9	0.001525558	3.458989783
-0.796835493	-0.9	0.010642916	3.701553105
-0.73710626	-0.6	0.018798126	3.934951854
-0.682271998	-0.6	0.006768682	4.155504953
-0.632411341	-0.6	0.001050495	4.361273493
-0.595136981	-0.6	2.3649E-05	4.518347899
-0.581247645	-0.6	0.000351651	4.577588288
	Mean	SSE	SST
	-2.720777567	4.302918052	137.1967337

$$R^2 = 0.968636877$$

ตารางที่ ๕๖ การเขียนตัวที่ตำแหน่ง C

cooling rate [°C/min]		SE	ST
Observe	Predict		
-9.373384836	-9	0.139416236	22.0673973
-9.373384836	-9	0.139416236	22.0673973
-9.312185698	-9	0.09745991	21.49616512
-9.236310903	-9	0.055842843	20.79835096
-9.14273042	-9	0.020371973	19.95355676
-9.027941218	-9	0.000780712	18.94122027
-8.888021435	-9	0.012539199	17.74289371
-8.718738427	-9	0.079108072	16.34543203
-8.515734467	-7.2	1.731157187	14.74517355
-8.274805505	-7.2	1.155206874	12.95291265
-7.992272815	-7.2	0.627696213	10.9990583
-7.665423705	-7.2	0.216619225	8.937909721
-7.292971969	-7.2	0.008643787	6.849641487
-6.875476213	-7.2	0.105315688	4.838619461
-6.41567295	-7.2	0.615168921	3.0271927
-5.918733897	-3.6	5.376526883	1.544909544
-5.392502591	-3.6	3.213065539	0.513676946
-4.847719771	-3.6	1.556804627	0.029559848
-4.298055981	-3.6	0.487282153	0.142682985
-3.759543559	-3.6	0.025454147	0.83950753
-3.249036383	-3.6	0.12317546	2.035625867
-2.78182972	-3.6	0.669402607	3.587085521
-2.369249097	-1.8	0.324044534	5.320130912
-2.017177383	-1.8	0.047166016	7.068221018
-1.725880253	-1.8	0.005493737	8.701967485
-1.490784836	-1.8	0.095614018	10.14425786
-1.303785765	-1.8	0.246228568	11.37041253
-1.154902575	-0.6	0.307916868	12.39664822
-1.034042977	-0.6	0.188393306	13.26232134
-0.932490075	-0.6	0.11054965	14.01229429
-0.84398278	-0.6	0.059527597	14.68274653
-0.765337765	-0.6	0.027336577	15.29163664
-0.696120587	-0.6	0.009239167	15.83776859
-0.636986445	-0.6	0.001367997	16.31193411
-0.587470562	-0.6	0.000156987	16.71435578
-0.552956546	-0.6	0.002213087	16.99775564
-0.540584849	-0.6	0.00353016	17.09992159
Mean	-4.675789994	SSE	SST
		17.88523276	425.6683421

$$R^2 = 0.957983174$$

## ภาคผนวก จ

คำสั่งที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Flex PDE

**TITLE** 'Heat conduction\_Steel coil'

### COORDINATES

Cartesian3

### SELECT

regrid=off

{ use fixed grid }

ngrid=5

{ smaller grid for quicker run }

### VARIABLES

Temp (threshold=300)

### DEFINITIONS

Ts = 560

{ starting temp, all Temp is in degree celcius }

Tf = 350

{ final temp }

Rn = 0.74/2

{ 0.74 meter is inner diameter of coil }

a = 0.003

{ 0.003 meter, 'a' is steel thickness }

w = 1.2

{ 1.2meter, 'w' is width of steel coil }

m = 171

{ 171 layers, 'm' is number of layer }

R = Rn + m\*a

{ R is radius of steel coil at layer m }

rho = 7880

{ density 7897 kg/m<sup>3</sup>, for pure iron at temp = 20C }

k = -2.4176\*Temp + 4153.5

{ Thermal conductivity of pure iron, J/m min C, k is temperature dependent and its value varies from 35 at temp1000C to 73 W/m C at temp 20C, }

cp = 452 {heat capacity, J/kg C, pure iron at temp 20C}

Tout = 65

Tin = 200

h\_in = (678.6\*(Temp-Tin)<sup>(1/3)</sup>)-2880

{ h between layer and air gap, J/min m<sup>2</sup> C }

h\_out = (678.6\*(Temp-Tout)<sup>(1/3)</sup>)-2880

{ h between coil surface and air, J/min m<sup>2</sup> C }

alpha = k/(rho\*cp)

### INITIAL VALUES

Temp = Ts

### EQUATIONS

div(-k\*grad(Temp)) + dt(Temp)\*rho\*cp = 0

{ heat conduction equation, rectangular coordinate  $k \cdot d^2 \text{Temp} / dx^2 = \rho \cdot cp \cdot d \text{Temp} / dt \text{time}$  }

### EXTRUSION

z = 0, w/2

**BOUNDARIES**

surface 1 natural(Temp) = 0  
 { natural(Temp) is heat flux,  $q = -k dTemp/dz$ ,  $q = 0$  at halfwidth section }

surface 2 natural(Temp) =  $h_{in} * (Temp - Tout)$  {  $q = h * (T - T_{fluid})$ , Newton's law of cooling, heating }  
region 'outer'

layer 1  
 start (R,0)  
 layer 1 natural(Temp) =  $h_{in} * (Temp - Tout)$   
 arc (center = 0,0) angle = 360 to close

region 'inner'

layer 1 void  
 start (Rn,0)  
 layer 1 natural(Temp) =  $h_{in} * (Temp - Tin)$   
 arc (center = 0,0) angle = 360 to close

time 0 to 60\*3 { 60 min. \* 3 hrs. }

**MONITORS**

for cycle = 1  
 contour(Temp) on z = w/2  
 contour(Temp) on z = w/4  
 contour(Temp) on z = 0

**PLOTS**

{elevation(Temp)}

elevation(Temp) from (Rn,0,w/2) to (R,0,w/2) as 'axis Temperature across A, B, C at side surface section,  $z=0.6$ '

elevation(Temp) from (Rn,0,w/4) to (R,0,w/4) as 'axis Temperature across A, B, C at quarter width  $z=0.3$ '

elevation(Temp) from (Rn,0,0) to (R,0,0) as 'axis Temperature across A, B, C at halfwidth,  $z=0$ '

elevation(dt(Temp)) from (Rn,0,w/2) to (R,0,w/2) as 'axis dTemp\_dt at  $z=0.6$ '

{history(Temp)}

{ at  $z=w/2$  }

history(Temp) at (Rn,0,w/2) as 'Temperature[ $^{\circ}C$ ]' export format "#T#b#1" file="fnT9Temp at A\_w2.txt"

history(Temp) at (Rn+85\*a,0,w/2) as 'Temperature[ $^{\circ}C$ ]' export format "#T#b#1" file="fnT9Temp at B\_w2.txt"

history(Temp) at (Rn+170\*a,0,w/2) as 'Temperature[ $^{\circ}C$ ]' export format "#T#b#1" file="fnT9Temp at C\_w2.txt"

history(dt(Temp)) at (Rn,0,w/2) as 'cooling rate[ $^{\circ}C/min$ ]' export format "#T#b#1" file="dTemp\_dt at A\_w2.txt"

history(dt(Temp)) at (Rn+85\*a,0,w/2) as 'cooling rate[ $^{\circ}C/min$ ]' export format "#T#b#1" file="dTemp\_dt at B\_w2.txt"

history(dt(Temp)) at (Rn+170\*a,0,w/2) as 'cooling rate[ $^{\circ}C/min$ ]' export format "#T#b#1" file="dTemp\_dt at C\_w2.txt"

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นางสาวเกตน์นิภา สุขวรรณวิทย์ เกิดเมื่อวันที่ ๒๕ ธันวาคม พ.ศ.๒๕๒๕ ที่โรงพยาบาลกรุงเทพคริสเตียน เป็นชาวกรุงเทพมหานครโดยกำเนิด เข้าศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.๒๕๔๔ และเข้าเรียนในสาขา วิศวกรรมโลหการในปีถัดมา ในปี พ.ศ.๒๕๔๖ ได้รับทุนจากบริษัท สหวิริยาสตีล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) เพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา ๒๕๔๘