



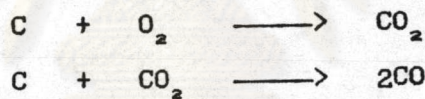
บทที่ 4

การรีดักชัน

4.1 การรีดักชันแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันมาแล้ว

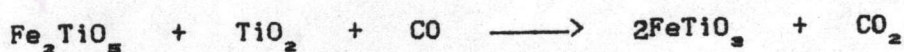
ขั้นตอนรีดักชันเป็นการเผาแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน โดยมีตัวรีดิวซ์เช่น ถ่าน ไม้ก่อก หรือแก๊สไฮโดรเจน เพื่อรีดิวซ์เหล็กออกไซด์ที่มีอยู่ในแร่เป็นโลหะเหล็ก ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญคือ มลทินที่มีอยู่ในแร่ ตัวรีดิวซ์ อุณหภูมิ และเวลาในการรีดักชัน

ในเชิงพาณิชย์ (12) การเพิ่มคุณภาพแร่โอลิเมไนต์โดยการรีดักชันมักใช้ถ่านหิน (Coal) หรือถ่าน (Char) ปฏิกิริยาหลักของการรีดักชันมักเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 1020 °C. ซึ่งจะเกิดแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ ดังปฏิกิริยา



ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นกลไกที่สำคัญของการรีดักชันโอลิเมไนต์ด้วยคาร์บอนคือการรีดักชันด้วยแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์

Jones (12) พบว่าการรีดักชันแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันซึ่งประกอบด้วย เฟลสปโตบรูคไทต์และรูไทล์เป็นส่วนใหญ่ มีปฏิกิริยา 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) จะถูกรีดิวซ์เป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ที่ช่วงอุณหภูมิ 1000-1200 °C. เป็นการก่อรูปแบบของโอลิเมไนต์ใหม่ ดังปฏิกิริยา



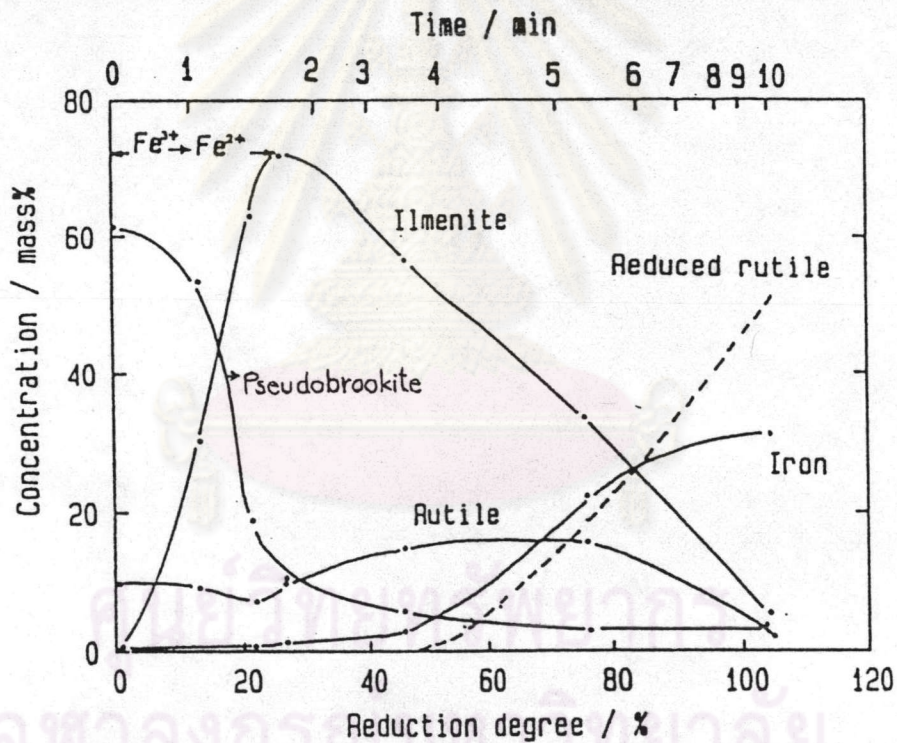
และอาจพบอัลไวสปีเนลที่มีปริมาณน้อยในขั้นตอนนี้

ขั้นตอนที่สอง เฟอร์รัสไอออนจะถูกรีดิวซ์เป็นโลหะเหล็ก (Fe) ปฏิกิริยาจะมี 2 ทาง ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณของมลทินที่มีอยู่ในแร่ ทางแรกที่อุณหภูมิ 1000 °C. ผลผลิตจะมีเฟสโลหะเหล็ก รูไทล์ และรีดิวซ์รูไทล์ซึ่งเป็นอนุกรมไทเทเนียมที่มีออกไซด์น้อย ($\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1, n+4}$) ดังปฏิกิริยา



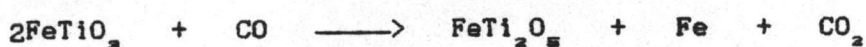
ขณะที่ทำปฏิกิริยา โลหะเหล็กและรูไทล์จะเกิดขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งสมนัยกับการลดลงของ อิลเมไนต์ หลังจากที้อิลเมไนต์ถูกรีดิวซ์อย่างสมบูรณ์ หากปฏิกิริยายังดำเนินต่อไปรูไทล์จะเริ่ม ถูกรีดิวซ์เป็นอนุกรมไทเทเนียมที่มีออกไซด์น้อย ดังปฏิกิริยา 4.2

จากรูปที่ 4.1 (12) แสดงการเปลี่ยนแปลงเฟสในการรีดักชันที่อุณหภูมิ 1000 °ซ. จะเห็นว่าในขั้นตอนแรกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการรีดิวซ์ Fe^{3+} เป็น Fe^{2+} ใช้เวลาน้อยมาก รูโดบรคไทต์จะมีปริมาณลดลงในขณะที่อิลเมไนต์ที่ก่อรูปแบบใหม่จะเพิ่มขึ้น ในขั้นตอนที่สองอิลเมไนต์ ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรกจะค่อย ๆ ลดลง มีการเพิ่มขึ้นของรูไทล์และโลหะเหล็ก

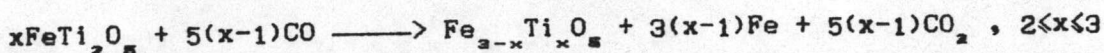


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่อิลเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน ระหว่างการรีดักชัน ด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิ 1000 °ซ. ที่เวลาต่าง ๆ (12)

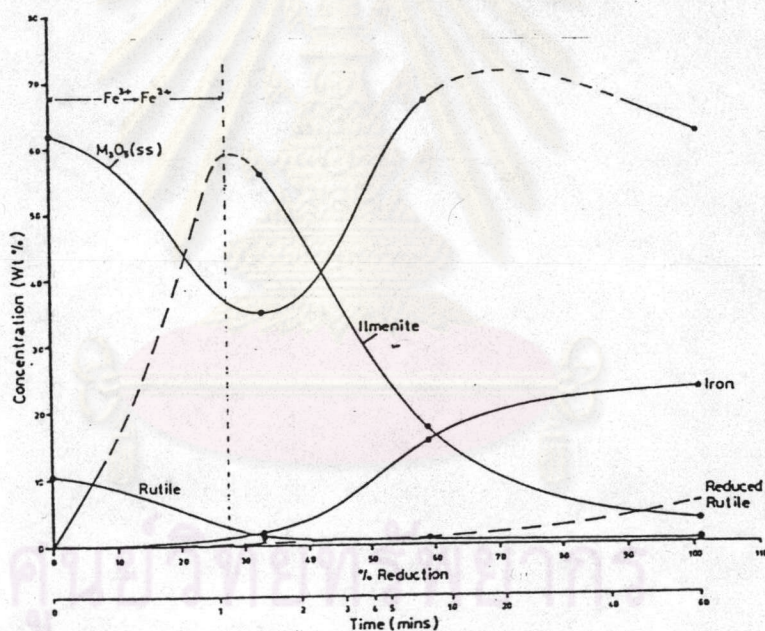
ทางที่สองที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. อิลเมไนต์จากขั้นตอนแรกจะถูกรีดิวซ์เป็นโลหะเหล็ก และเฟอร์รัสรูโดบรคไทต์ (FeTi_2O_7) ดังปฏิกิริยา



ถ้ามีการรีดักชันต่อไป โลหะเหล็กจะตกตะกอน (Precipitation) จากเฟอรัสซัลไฟด์ โดยรูปโคกต์ มีการเกิดเป็นเฟสสารละลายของแข็ง $M_2O_3 : Fe_{3-x}Ti_xO_5, 2 < x < 3$ หรือเรียกว่าอะโนโซไวต์ (Anosovite) (17) ดังปฏิกิริยา



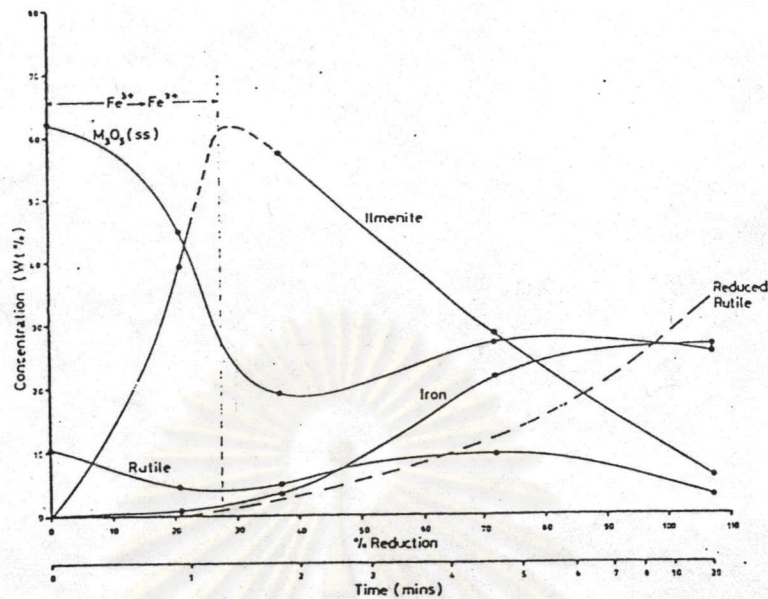
การเสถียรของ M_2O_3 อาจขึ้นกับชนิดและปริมาณของมลทินที่มีในแร่โอลิเมไนต์ เช่น แมงกานีสหรือแมกนีเซียม อะโนโซไวต์จะเป็น Ti_3O_5 ($x=3$) มากขึ้นเมื่อการรีดักชันดำเนินต่อไปและมีโลหะเหล็กตกตะกอนเพิ่มขึ้น ผลผลิตของการรีดักชันที่อุณหภูมินี้จะประกอบด้วยส่วนผสมของ 3 เฟสคือ โลหะเหล็ก M_2O_3 และริทิลรูไทล์ ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน ระหว่างการรีดักชันที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. ที่เวลาต่าง ๆ (17)

มีการศึกษาการรีดักชันที่อุณหภูมิ 1100 °ซ. เวลาต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า การกระจายของเฟสจะคล้ายกับที่อุณหภูมิ 1000 °ซ. หลังจากการรีดักชันประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ เฟอรัสซัลไฟด์จะเริ่มเพิ่มขึ้น ได้ผลผลิตเป็นเฟสริทิลรูไทล์ โลหะเหล็ก และ M_2O_3

Kataoka และ Yamada (20) ศึกษาการรีดักชันโอลิเมไนต์ในกระบวนการอิชิวาร่า โดยเผาด้วยเตาไฟฟ้า (Tabular Electric Furnace) พบว่ามีเงื่อนไขที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนของดีกต่อแร่เป็น 1 : 20 อัตราการเพิ่มความร้อนน้อยกว่า 4 °ซ. ต่อ นาที และ



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงเฟสของแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน ระหว่างการรีดักชันที่อุณหภูมิ 1100 °ซ. เวลาต่าง ๆ (17)

เผาที่อุณหภูมิ 900 °ซ. เป็นเวลา 20 นาที

Akimoto และคณะ (19) ศึกษาการรีดักชันแร่โอลิเมนไนต์ที่อุณหภูมิมากกว่า 1000 °ซ. จะได้ผลผลิตที่มีเฟสโลหะเหล็ก และเฟสไทเทเนียมเพอร์สซึ่งเป็นอนุกรมสารละลายของแข็ง $Fe_2TiO_5-FeTi_2O_7$ ศึกษาการรีดักชันด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 800 °ซ. เกิดเฟสโลหะเหล็ก รูไทล์ และสารละลายของแข็งซูโดบรูคไทต์ แต่ถ้ารีดิวซ์ด้วยคาร์บอนที่อุณหภูมิเดียวกันนี้จะไม่เกิดการรีดักชัน

มีรายงานการวิจัยพบเสมอว่าการออกซิเดชันแร่โอลิเมนไนต์ก่อนนำมารีดักชันมีผลทำให้เกิดโลหะเหล็กเพิ่มขึ้น แต่ Donnelly (19) รายงานว่ามีอัตราการรีดักชันแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยระหว่างแร่โอลิเมนไนต์ธรรมชาติและแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน

Grey และ Reid (21) ได้ศึกษาแร่โอลิเมนไนต์จากทางตะวันตกของออสเตรเลียที่มีส่วนผสมระหว่างโอลิเมนไนต์ รูไทล์ และซูโดรูไทล์ หลังจากออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 °ซ. ผลผลิตจะมีเฟสของรูไทล์ และสารละลายของแข็ง $Fe_2TiO_5-FeTi_2O_7-Mn_2TiO_5$ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเพอร์ริทซูโดบรูคไทต์ แล้วนำมารีดักชันที่อุณหภูมิ 1100 °ซ. จะได้ผลผลิตเป็นสารผสมระหว่างโลหะเหล็ก รีดิวซ์รูไทล์ และสารละลายของแข็งระหว่าง $FeTi_2O_7-MnTi_2O_7-Ti_2O_5$ ซึ่งปริมาณส่วนผสมเฟสเหล่านี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของแมงกานีสและแมกนีเซียมที่อยู่ในตัวอย่างแร่เริ่มต้น ตัวแปรที่มีผลต่อเฟสของผลผลิตสำหรับรีดักชันในเตาหมันคือ อัตราการป้อนแร่ บรรยากาศในการรีดักชัน และอุณหภูมิ

Jones (22) พบว่าการรีดักชันแร่โอลิเมนไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ.

ด้วยคาร์บอนจะให้ผลดีกว่าแก๊สผสม CO-CO₂ ในผลผลิตการรีดักชันด้วยคาร์บอนส่วนหนึ่งของสารละลายของแอมโมเนียไนโตรไซด์จะเป็นเฟสโลหะเหล็ก และรีดิคชันที่รวดเร็วที่สุดที่มีรูพรุนมาก

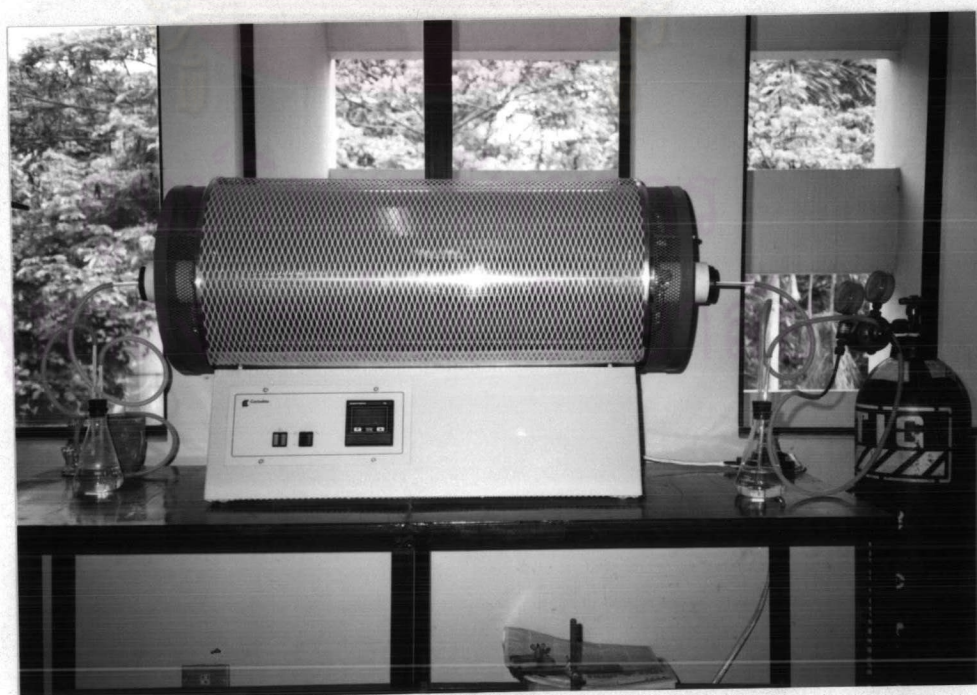
4.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการรีดักชัน

4.2.1 อุปกรณ์

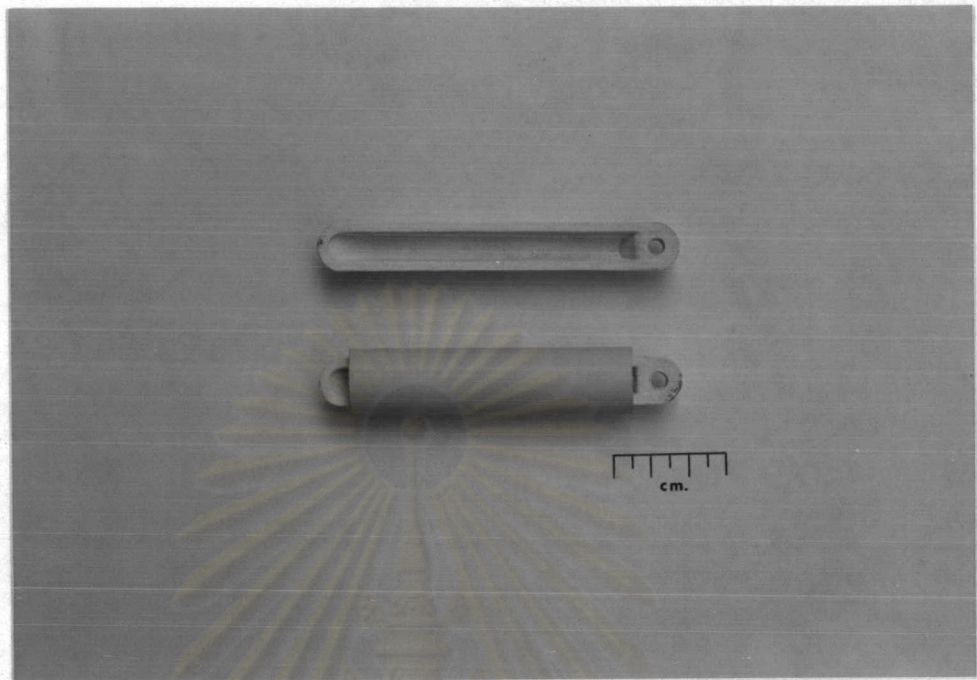
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย มีดังนี้

1. เตาเผาแบบท่อ (Tube Furnace) ยี่ห้อ Carbolite รุ่น CTF 1600
2. รางเซรามิก (Ceramic Boat) สำหรับใส่ตัวอย่างแร่ ดังรูปที่ 4.5
3. เส้นใยเซรามิก (Ceramic Fibre)
4. จุกยาง (Rubber Stoppers)
5. ท่อแก้ว (Glass Tube)
6. ท่อยาง (Rubber Tube)
7. ขวดรูปกรวย (Erlenmeyer Flasks)
8. แท่งแม่เหล็ก (Magnetic Bar)

ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เตาเผาแบบท่อ



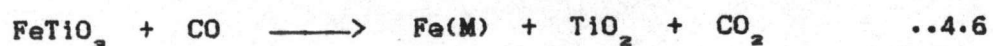
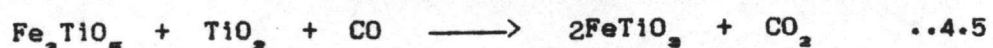
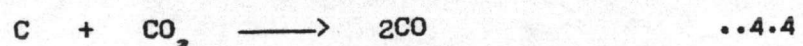
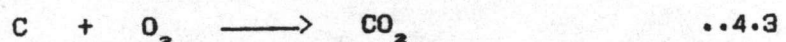
รูปที่ 4.5 รางเซรามิก

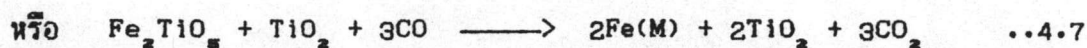
4.2.2 สารที่ใช้ในการวิจัย

1. ตัวอย่างแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเตาหมุ่ที่อุณหภูมิ 1000 °C. เวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วยเฟสชูโดบรูคไคต์และรูไทล์ (ได้จากการเตรียมตัวอย่างตามหัวข้อที่ 3.3 ในบทที่ 3)
2. โด๊ก (Coke) ขนาดเล็กกว่า 18 เมช
3. แก๊สผสมไนโตรเจนกับไฮโดรเจน (97 % N₂ + 3 % H₂)

4.2.3 การคำนวณปริมาณโด๊กที่ใช้ในการรีดักชัน

จากปฏิกิริยารีดักชันของแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันซึ่งประกอบด้วยเฟสชูโดบรูคไคต์และรูไทล์ ด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)





$$\text{มวลโมเลกุลของ } \text{Fe}_2\text{TiO}_5 = 239.6$$

$$\text{มวลโมเลกุลของ } \text{TiO}_2 = 79.9$$

$$\text{มวลโมเลกุลของ } \text{CO} = 28$$

$$\text{มวลโมเลกุลของ } \text{C} = 12$$

ในการวิจัยแต่ละการทดลองจะใช้ตัวอย่างแร่ประมาณ 2.5 กรัม จาก
ปฏิกิริยา 4.7 แร่ 1 โมล จะทำปฏิกิริยากับ CO 3 โมล

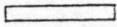
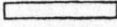
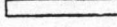
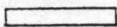
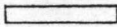
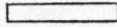
$$\begin{aligned} \text{นั่นคือ ตัวอย่างแร่ที่ใช้} &= \frac{2.5}{239.6 + 79.9} && \text{โมล} \\ &= 7.82 \times 10^{-3} && \text{โมล} \\ \text{CO ที่ต้องใช้ทำปฏิกิริยา} &= 3(7.82 \times 10^{-3}) && \text{โมล} \\ &= 23.46 \times 10^{-3} && \text{โมล} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากปฏิกิริยา 4.3 และ 4.4 นั่นคือ} &&& \\ \text{ต้องใช้ C} &= 23.46 \times 10^{-3} && \text{โมล} \\ &= 12 \times 23.46 \times 10^{-3} && \text{กรัม} \\ &= 0.2817 && \text{กรัม} \end{aligned}$$

แต่ในการทดลองจะใช้โค๊กในปริมาณที่มากเกินไป

4.2.4 วิธีการวิจัย

- นำรางเซรามิกมาใส่สารที่ใช้ในการวิจัย 6 รางดังนี้
รางที่ 1 ใส่ตัวอย่างแร่น้ำหนัก 1.5 กรัม
รางที่ 2 ใส่ตัวอย่างแร่น้ำหนัก 0.7 กรัม ปนโค๊ก 0.8 กรัม
รางที่ 3-6 ใส่โค๊ก 1.5 กรัม
- นำรางเซรามิกทั้ง 6 เข้าไปในท่อเตาเผา วางตำแหน่งดังรูปที่ 4.6
กรุปากท่อทั้งสองด้านด้วยฉนวนกันความร้อนเส้นใยเซรามิก และปิดจุกยางที่มีท่อแก้วเสียบอยู่ที่
สองด้าน ด้านหน้าจะต่อกับถังแก๊ส $\text{N}_2 + \text{H}_2$ ด้านหลังสำหรับระบายแก๊ส ดังรูปที่ 4.4
- เปิดสวิตช์เตา ตั้งอุณหภูมิและเวลาที่ต้องการเผา เปิดแก๊ส $\text{N}_2 + \text{H}_2$
เพื่อไล่อากาศที่อยู่ในเตาเป็นเวลา 10 นาที

ร่างอันที่ 3	ร่างอันที่ 1	ร่างอันที่ 6	ท่อเตา
			
ร่างอันที่ 4	ร่างอันที่ 2	ร่างอันที่ 5	
			

รูปที่ 4.6 ตำแหน่งรางเซรามิกในท่อเตาเผาสำหรับการรีดักชัน

- เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปิดสวิตซ์เตา เปิดแก๊ส $N_2 + H_2$ จนอุณหภูมิลดลงถึง 500 °ซ. ปิดแก๊ส ปล่อยให้เตาเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
- นำรางเซรามิกทั้งหมดออกมาจากเตา ตัวอย่างในร่างที่ 2 นำไปแยกแรมออกจากโค้กด้วยแท่งแม่เหล็ก นำตัวอย่างที่ได้จากร่างที่ 1 และ 2 ไปวิเคราะห์ทางเคมีหาเปอร์เซ็นต์โลหะเหล็กที่เกิดขึ้น (Metallic Iron) (ดูภาคผนวก ฉ)
- ทำการทดลองเผาที่อุณหภูมิ 1100 , 1150 , 1175 และ 1200 °ซ. เวลา 30 , 60 , 120 และ 240 นาที

4.2.5 ผลการวิจัย

ผลการรีดักชันแร่โอลิเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 , 4.8 โดยที่

$$\% \text{ การเกิดเป็นโลหะ (Metallization) } = \frac{\% \text{ โลหะเหล็ก}}{\% \text{ เหล็กทั้งหมด}} \times 100$$

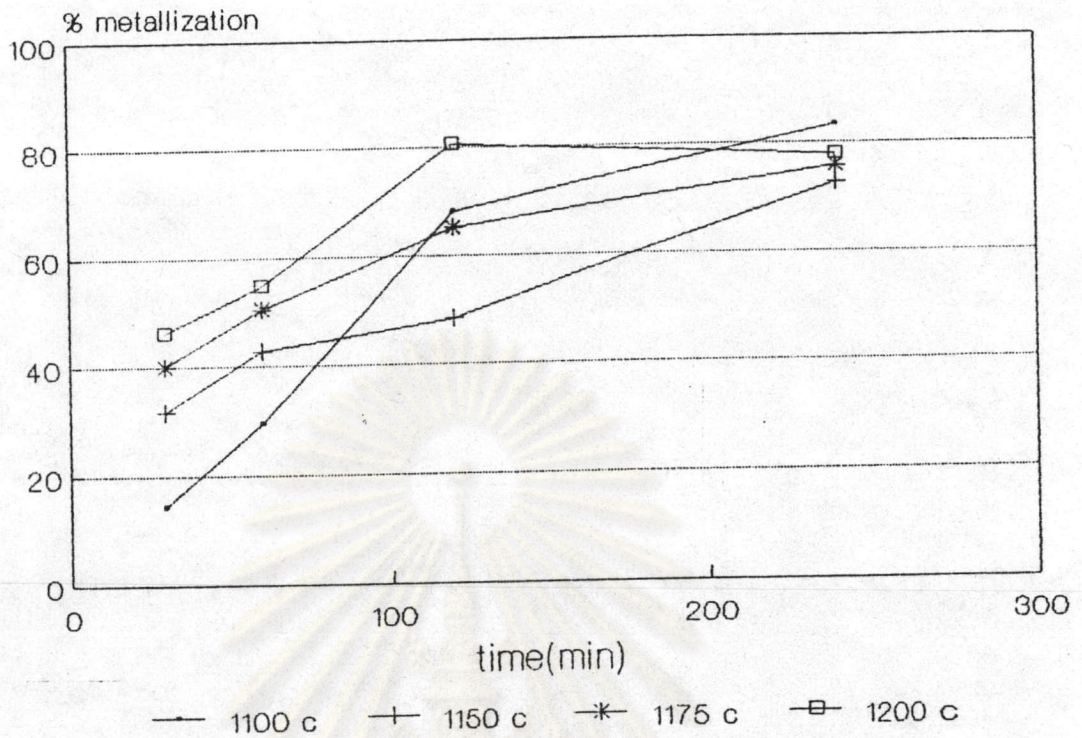
$$\% \text{ เหล็กทั้งหมด} = 31.98$$

4.2.6 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

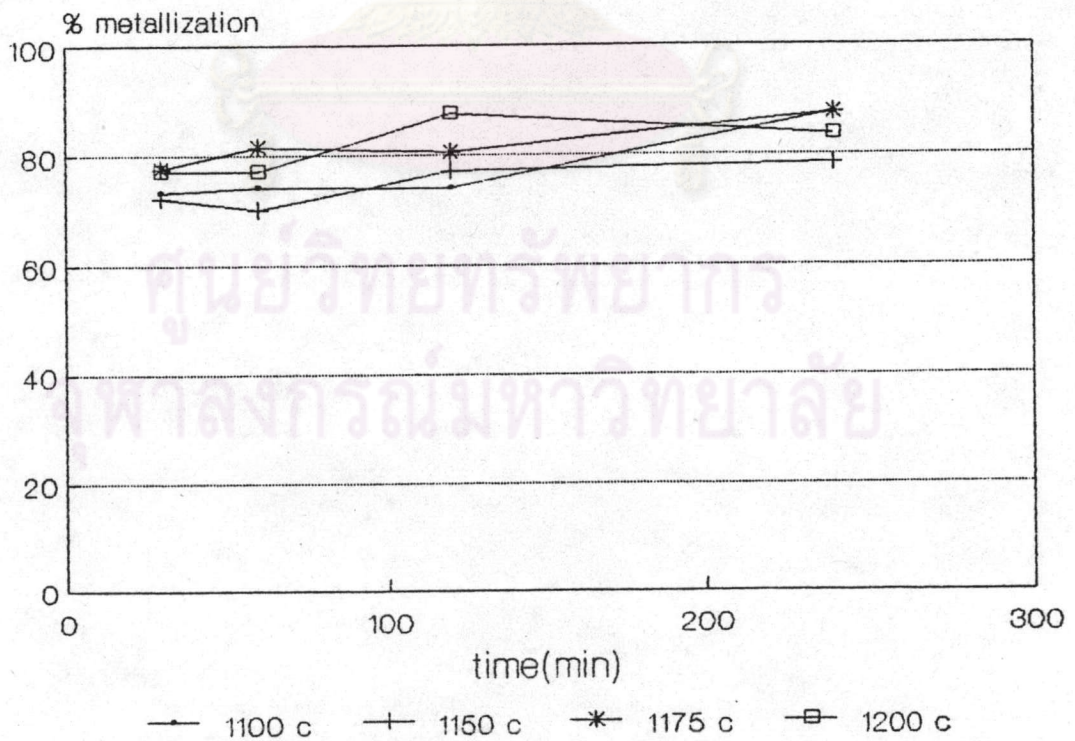
- จากผลการรีดักชันตัวอย่างแร่ในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 จะเห็นว่ารีดักชันที่อุณหภูมิสูงและเวลายาวนานจะเกิดโลหะเหล็กมาก แต่ผลที่อุณหภูมิ 1100 °ซ. เวลา 120-240 นาที จะรีดิวซ์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 1150 , 1175 และ 1200 °ซ. อาจเพราะที่อุณหภูมิ 1100 °ซ. เมื่อรีดิวซ์เป็นเวลานานปฏิกิริยาการเกิดโลหะเหล็กจะเกิดขึ้นได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง สำหรับตัวอย่างแร่ปนโค้กในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การเกิดเป็นโลหะจะมีค่าใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ แต่มีแนวโน้มเมื่อรีดิวซ์

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดกัมมันต์ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	% โลหะเหล็ก		% การเกิดเป็นโลหะ	
		แร่ ไม่ปนโตก	แร่ปนโตก	แร่ ไม่ปนโตก	แร่ปนโตก
1100	30	4.59	23.40	14.35	73.17
	60	9.41	23.74	29.42	74.23
	120	21.72	23.67	67.92	74.02
	240	26.65	28.00	83.33	87.55
1150	30	10.08	23.07	31.52	72.14
	60	13.66	22.40	42.71	70.04
	120	15.45	24.64	48.31	77.05
	240	23.18	25.08	72.48	78.42
1175	30	12.77	24.81	39.93	77.58
	60	16.13	26.09	50.44	81.58
	120	20.80	25.75	65.04	80.52
	240	24.19	28.00	75.64	87.55
1200	30	14.78	24.64	46.22	77.05
	60	17.47	24.64	54.63	77.05
	120	25.76	28.00	80.55	87.55
	240	24.86	26.76	77.74	83.68



รูปที่ 4.7 ผลการวัดที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ของแร้อิลเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน (แร่ไม่ปนโคลก)

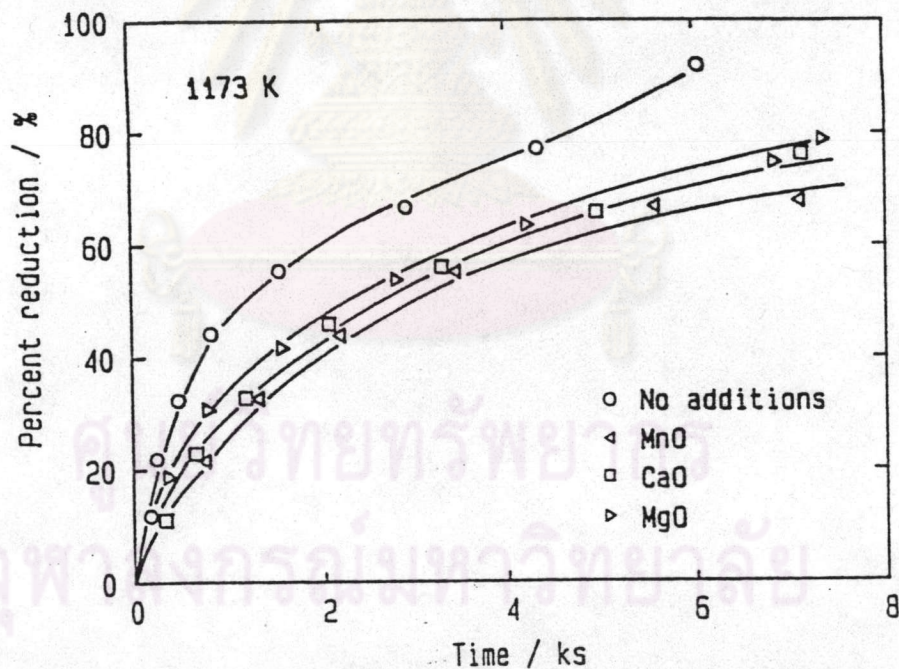


รูปที่ 4.8 ผลการวัดที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ ของแร้อิลเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชัน (แร่ปนโคลก)

ที่อุณหภูมิสูง เวลามามาก จะเกิดโลหะเหล็กได้ดี

จะเห็นว่าการรีดักชันที่เงื่อนไขเดียวกัน ตัวอย่างแร่ปนโคลิกจะถูกรีดิวซ์ได้ดีกว่าตัวอย่างแร่เพียงอย่างเดียว อาจเพราะการที่ปนโคลิกเข้าไปทำให้แร่ได้ทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ดีกว่า เนื่องจากเกิดการสัมผัสกันโดยตรง ดังนั้นในเชิงพาณิชย์ (Commercial Scale) ควรบ้อนแร่ผสมโคลิกเข้าไปในเตาหมุ่

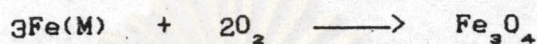
2. จากผลการวิจัยจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การเกิดเป็นโลหะสูงสุดต่ำกว่า 90 % อาจเพราะแร่โอลิเมไนต์ที่นำมาวิจัยครั้งนี้มีปริมาณแมงกานีสออกไซด์ค่อนข้างสูงเท่ากับ 4.10 % ซึ่งเป็นมลทินที่มีผลต่อการลดอัตราการรีดักชัน เช่นเดียวกับ แมกนีเซียม แคลเซียม และซิลิกอน อาจจะไปลดกัมมันตภาพ (Activity) ของเฟอร์ริก-เฟอร์รัสไอออนที่จะถูกรีดิวซ์เป็นโลหะเหล็ก ดังปฏิกิริยาที่ 4.5 และ 4.6 ดังผลการทดลองของ Merk และ Pickles (12) รูปที่ 4.9 จะเห็นว่ามลทินแมงกานีส แคลเซียม และแมกนีเซียม มีผลต่อการลดอัตราการรีดักชัน เพราะว่พวกไอออน Mn^{2+} Ca^{2+} และ Mg^{2+} จะไปแทนที่ Fe^{2+} ในแร่ ทำให้การรีดักชันมีผลน้อยลง



รูปที่ 4.9 ผลของมลทิน (1% น้ำหนัก) ต่อการรีดักชันแร่โอลิเมไนต์ด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (12)

4.3 การเตรียมตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดักชันสำหรับขั้นตอนการกวนที่มีการพ่นอากาศ

ตัวอย่างแร่ที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการกวนที่มีการพ่นอากาศ ควรมีเปอร์เซ็นต์โลหะเหล็กสูง เพราะในขั้นตอนนี้จะให้ออกซิเจนจากอากาศออกซิไดส์โลหะเหล็กเป็นเหล็กออกไซด์แยกตัวออกจากไทเทเนียมออกไซด์ในลักษณะเป็นผงละเอียด ดังปฏิกิริยา

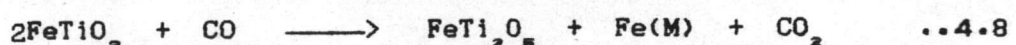
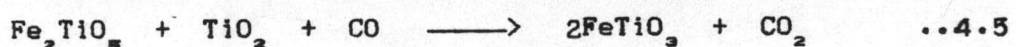


จากการวิจัยในขั้นตอนนี้พบว่าแนวโน้มนำแร่ที่ผ่านการรีดักชันคือ เป็นตัวอย่างแร่ปนด่างที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับการกวนที่มีการพ่นอากาศ นำแร่ฮีมาไทต์ที่ผ่านการออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง น้ำหนัก 2 กิโลกรัม และด่างที่มีขนาดเล็กกว่า 18 เมช 3.5 กิโลกรัม เเผาในเตาหมุนที่ปิดฝา ดังรูปที่ 3.22 ความเร็วรอบ 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง หลังจากการเผานำผลผลิตไปแยกแร่ออกจากด่างด้วยแท่งแม่เหล็ก

จากการวิเคราะห์ทางเคมีของตัวอย่างแร่จะได้เปอร์เซ็นต์โลหะเหล็กเท่ากับ 23.73 ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การเกิดเป็นโลหะเท่ากับ 74.20 จะเห็นว่าได้เปอร์เซ็นต์โลหะเหล็กน้อยกว่าที่ทดลองในเตาเผาแบบท่อ อาจเพราะในการเผาด้วยเตาหมุนเป็นการเผาตัวอย่างแร่ในปริมาณมากขึ้น และชนิดของเตาที่ใช้เผาก็ต่างกัน เตาเผาแบบท่อนั้นเป็นเตาที่เหมาะสมสำหรับสเกลห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale)

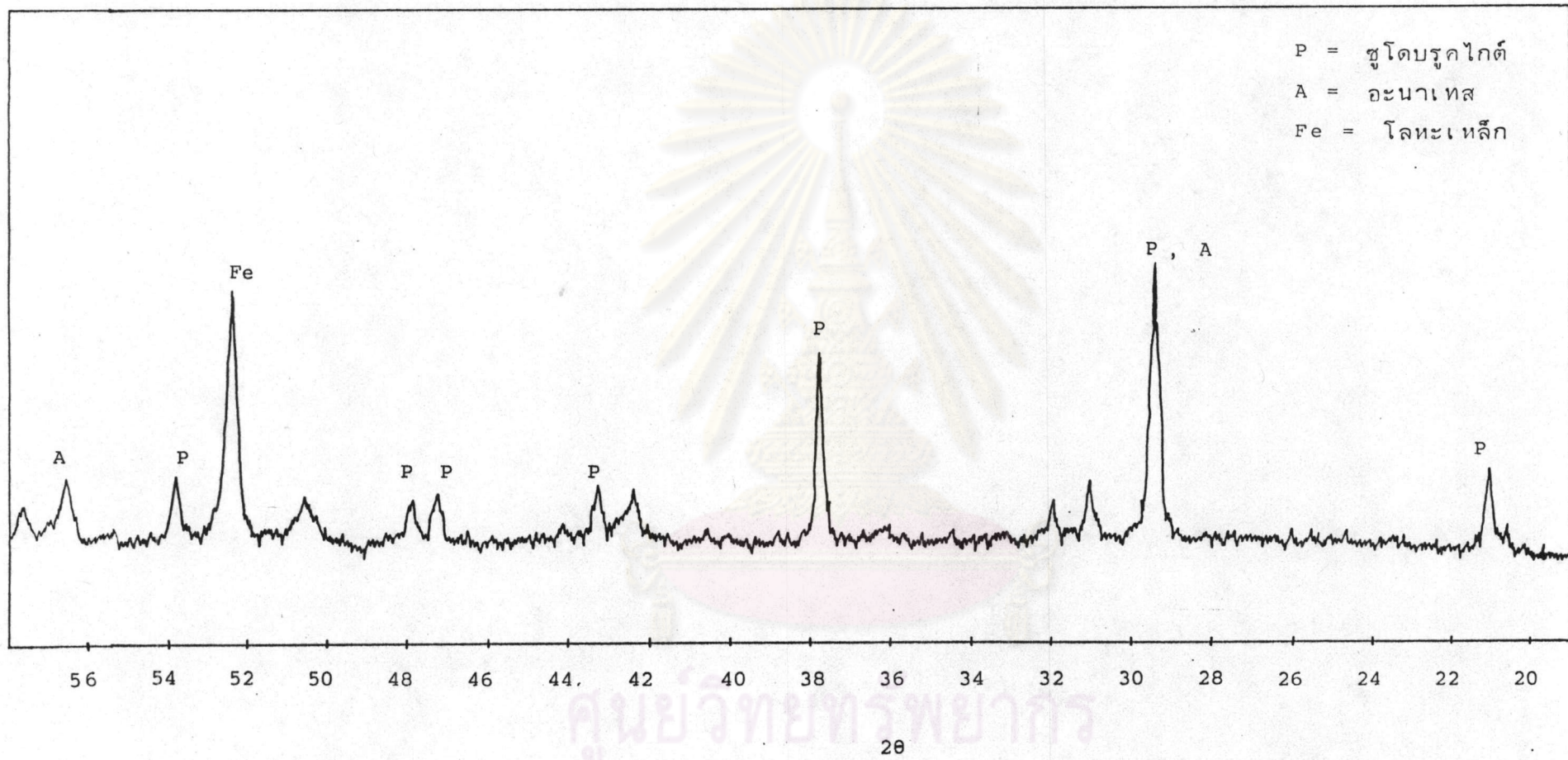
จากการวัดค่าสภาพรับแม่เหล็กไว้ได้ของแร่ที่ผ่านการรีดักชันด้วยเตาหมุนเท่ากับ $15,320 \times 10^{-6}$ ซีจีเอส ซึ่งมีค่ามากกว่าแร่ที่ผ่านการออกซิเดชันที่มีค่าเท่ากับ 111×10^{-6} ซีจีเอส แสดงว่าโลหะเหล็กมีผลต่อค่าสภาพรับแม่เหล็กไว้ได้ของแร่มาก

จากการตรวจสอบเฟสของแร่ที่ผ่านการรีดักชันด้วยเตาหมุนที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง โดยเครื่องรังสีเอกซ์เลี้ยวเบน ดังรูปที่ 4.10 เป็นเฟสซูโดบรูคไคต์ อะนาเทส และโลหะเหล็ก ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันที่ 4.7 สำหรับซูโดบรูคไคต์อาจเกิดจากปฏิกิริยา

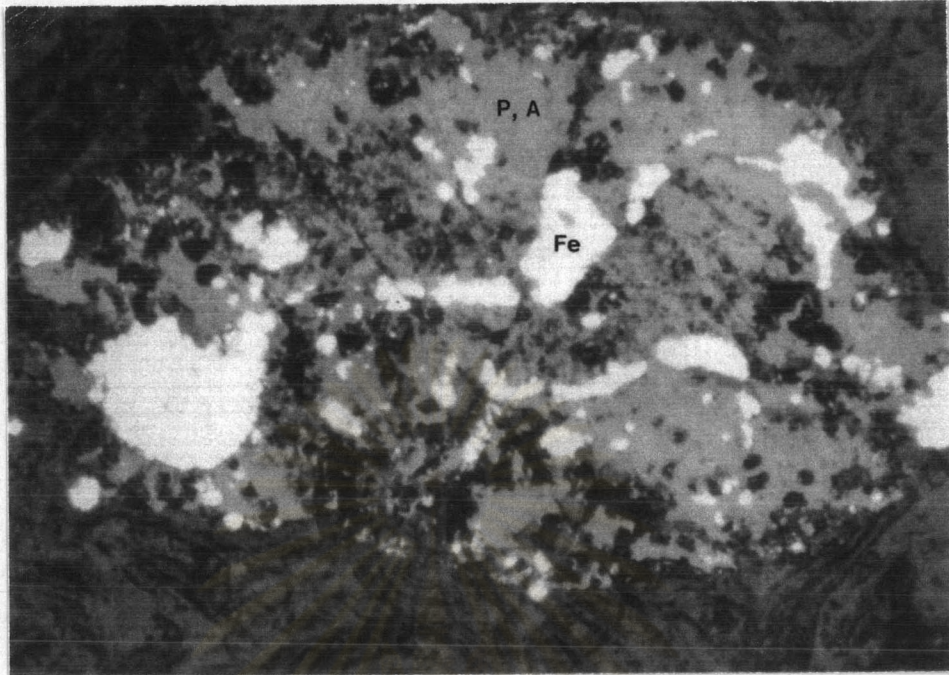


รูปที่ 4.11 แสดงภาพแร่ชัดเจนของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดักชันด้วยเตาหมุนที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะเห็นเฟสโลหะเหล็กที่มีสีขาวเป็นจุด ๆ อยู่ในเมทริกซ์ของซูโดบรูคไคต์และอะนาเทสที่มีสีเทา

การตรวจสอบเฟสโลหะเหล็กอาจทำได้โดยวิธีง่าย ๆ ด้วยการกัด (Etching) ด้วย



รูปที่ 4.10 แบบอย่างรังสีเอกซ์เดี่ยวเบนของแร่ฮิลเมไนต์ที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเตาหมุ่ที่ อุณหภูมิ 1000 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง และรีดักชันที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง การแผ่รังสี CoK_{α} ตัวกรอง Fe

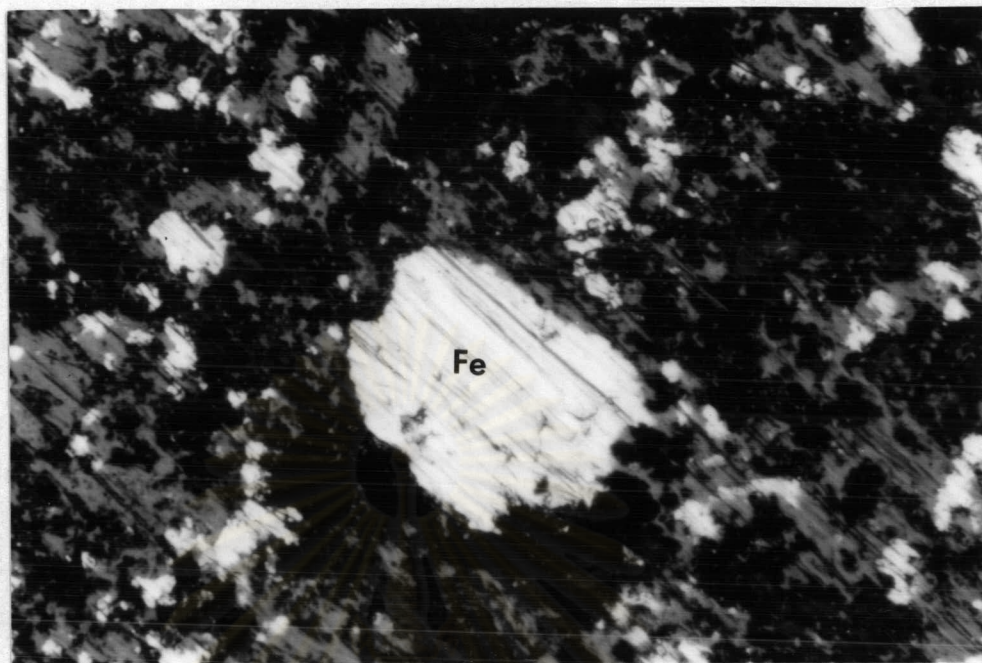


รูปที่ 4.11 ภาพแร่ชัดเจนของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดักชันด้วยเตาหมุ่ที่อุณหภูมิ 1200 °C. เวลา 4 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ $\times 100$
 Fe = โลหะเหล็ก P = ฟอสฟอรัส A = อะลูมิเนียม

สารละลายโบรมีน-เมทานอล 5 % (ปริมาตรต่อปริมาตร) เป็นเวลา 5 นาที นำไปเปรียบเทียบกับกล้องจุลทรรศน์ระหว่างก่อนและหลังการกัด ดังรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าภายหลังการกัด ตำแหน่งที่เป็นเฟสโลหะเหล็กจะสึกกร่อนไปเป็นสีดำ

รูปที่ 4.13 แสดงภาพเม็ดแร่และผิวแร่ของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดักชันด้วยเตาหมุ่ที่อุณหภูมิ 1200 °C. เวลา 4 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะเห็นผิวของเม็ดแร่ขรุขระ มีบางส่วนที่เฟสโลหะเหล็กแทรกตัวขึ้นมา จากรูปขยาย 2000 เท่า จะเห็นลักษณะของผิวแร่ต่างกัน อาจเป็นผิวของโลหะเหล็กที่มีลักษณะแตกต่างจากผิวของแมทริกซ์ที่อยู่บริเวณใกล้เคียง

รูปที่ 4.14 แสดงภาพแร่ชัดเจนของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดักชันด้วยเตาหมุ่ที่อุณหภูมิ 1200 °C. เวลา 4 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และการกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม เหล็ก แมงกานีส จากการวิเคราะห์เป็นจุด (Point Analysis) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ตำแหน่ง A และ B ของรูปที่ 4.14 (ก) พบว่าที่ตำแหน่ง A จะมีปริมาณธาตุไทเทเนียมสูง ธาตุเหล็กมีปริมาณต่ำ ซึ่งเป็นส่วนของแมทริกซ์ที่เป็นเฟสฟอสฟอรัสและอะลูมิเนียมที่ตำแหน่ง B มีปริมาณธาตุไทเทเนียมต่ำ ธาตุเหล็กมีปริมาณสูง ซึ่งเป็นบริเวณของเฟสโลหะเหล็ก

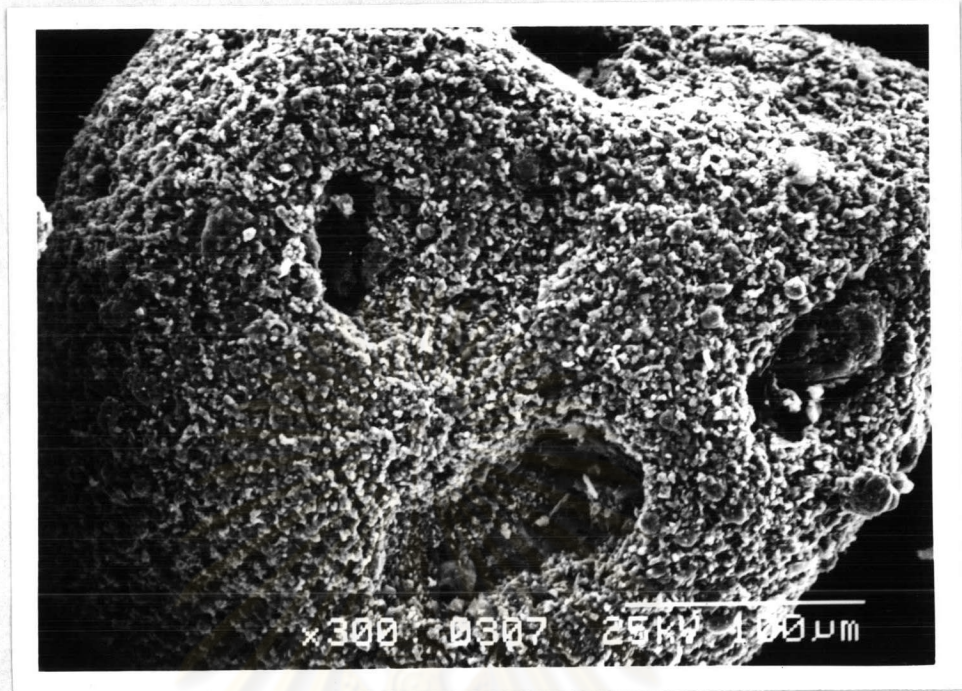


(ก) ก่อนการกัด

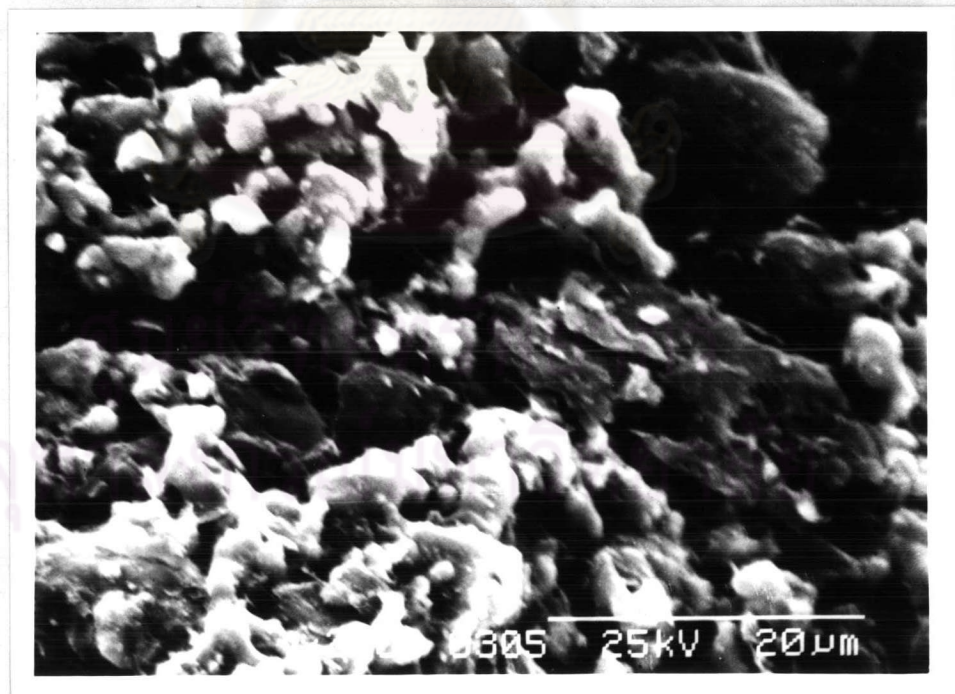


(ข) หลังการกัด

รูปที่ 4.12 แสดงการกัดเฟสโลหะเหล็กของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดขึ้นด้วยเตาหมุนที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ $\times 200$
 Fe = โลหะเหล็ก



(ก) × 300

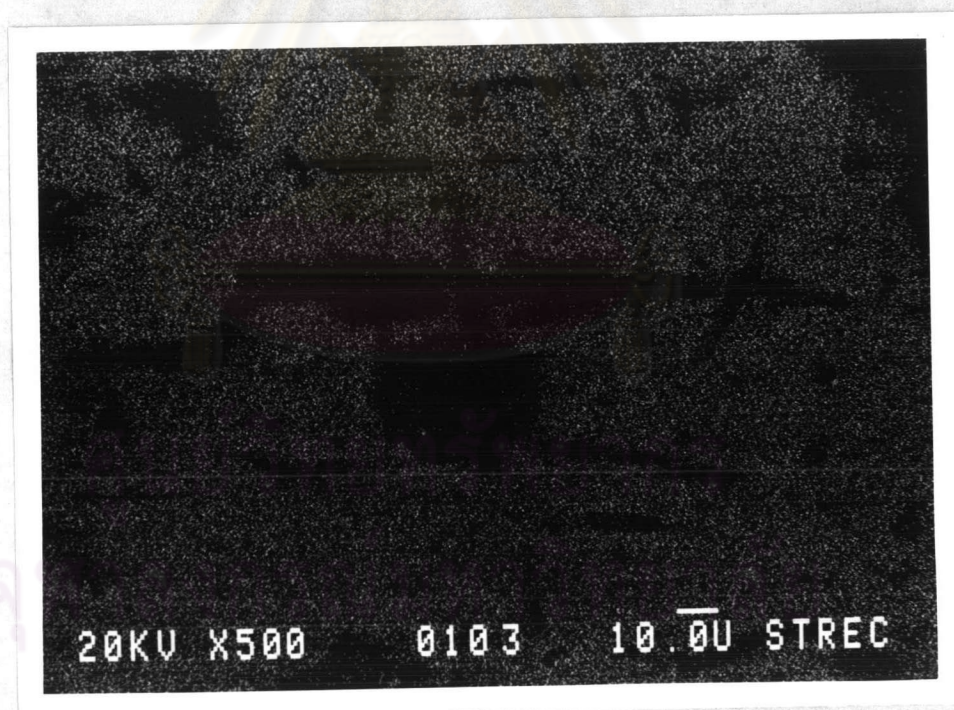


(ข) × 2000

รูปที่ 4.13 ภาพเม็ดแร่และผิวแร่ของตัวอย่างแร่ที่ผ่านการรีดกั้นด้วยเตาหมุ่ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ.
เวลา 4 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 (ก) ภาพแว็กซ์คั้นของตัวอย่างแรกที่ผ่านการวัดกัมมันต์ด้วยเตาหมุ่ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ. เวลา 4 ชั่วโมง ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน x 500 (ข) การกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม (ค) การกระจายตัวของธาตุเหล็ก (ง) การกระจายตัวของธาตุแมงกานีส



(ค)



(ง)