การผลิตเหล็กพรุนจากสเกลโรงรีดด้วยวิธีการไดเร็กรีดักชั่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ
ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์

1. บทคัดย่อ

เหล็กออกไซด์หรือสเกลคือ วัสดุที่เป็นผลพลอยได้ที่ได้จากการอบ และรีดเหล็ก เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเหล็กกับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง งานวิจัยนี้ นำสเกลเหล็กมาเปลี่ยนสภาพให้เป็นเหล็กใหม่ โดยการทำ Reduction ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน เริ่มต้นด้วยการนำสเกลเหล็กมาผสมกับเบนโทไนท์ และน้ำ พบว่าเมื่อผสมด้วยเบนโทไนท์และน้ำด้วยปริมาณ 5% และ 10% เม็ดสเกลที่ได้จะมีการเกาะตัวที่ดี และเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1000 ° C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะให้การทดแรงกดได้ 35.59 กก. เม็ดสเกลที่ได้มีความถ่วงจำเพาะที่ 3.438 เมื่อนำเม็ดสเกลที่ได้ไปทำการ Reduction ที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 °C และที่เวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที พบว่าเปอร์เซนต์รีดักชั่นเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น

2. ทฤษฎี

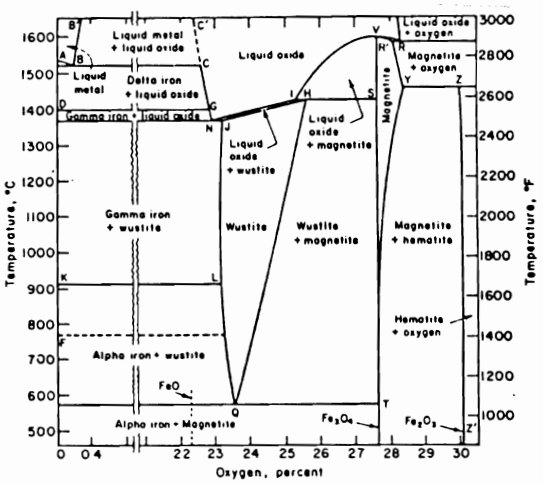
2.1 เฟสไดอะแกรมของเหล็ก

เหล็กเป็นโลหะที่มีความสำคัญมากที่มีอยู่ในโลก เป็นของแข็งและอยู่ปนกับแร่ธาตุอื่นๆ มีมากเป็นอันดับ 4 รองจากออกซิเจน (O) ซิลิคอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ส่วนประกอบของเหล็กที่มีอยู่เฉลี่ยโดยประมาณ 4.15 % จะพบมากในการตกตะกอนของแร่ ส่วนมากจะอยู่ในรูปออกไซด์ Fe_2O_3 (เฮมาไทต์) Fe_3O_4 (แมกนีไทต์) ซัลไฟด์และ FeS_2 ไพไรท์ คาร์โบเนต $FeCO_3$ (ซิเดไรท์) ซิลิเกต และอื่นๆ ที่มีความสำคัญน้อยกว่า

เหล็ก (Fe) มีเลขอะตอมเท่ากับ 26 และน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 55.85 มีจุดหลอมเหลวที่ 1539 °C ในเหล็กจะเรียงอะตอมแบบ B.C.C. ที่อุณหภูมิ 1400 °C จะเปลี่ยนการเรียงอะตอมเป็นแบบ F.C.C. ที่อุณหภูมิ 911 °C และเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 911 °C เปลี่ยนการเรียงอะตอมเป็น B.C.C. อีกครั้ง

จากเฟสไดอะแกรมของเหล็ก และออกซิเจนของ "Darken และ Gurry"[1] เฟสที่ปรากฏมี 6 เฟสคือ Alpha-Iron, Gamma-Iron, Delta-Iron, เฟอร์รัสไอออนหรือวูสไทต์(Wustite), แมกนิไทต์-ไอออนออกไซด์ (Magnetite Iron Oxide) และเฮมาไทต์ (Hematite)

วูสไทต์มีสูตรทางเคมีFe_xO ตัว x สามารถหาค่าได้จากเฟสไดอะแกรม เช่น จุด L ในรูปที่ 1 มีออกซิเจน 23.10% จะมีค่า x เท่ากับ 0.954 หรือที่จุด H จะมีค่าออกซิเจน 25.60% ซึ่งจะมีค่า x เท่ากับ 0.833 วูสไทต์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 560 °C จะไม่เสถียรภาพโดยเกิดปฏิกิริยายูเท็คตอย(Eutectoid) สลายตัวเป็นแมกนิไทต์ และอัลฟาไอออน



รูปที่ 1 เฟสไดอะแกรมของเหล็กและออกซิเจน

แมกนีไทต์(Fe_3O_4)มีโครงสร้างเป็น Inverse Spinel แมกนีไทต์จะมีความบริสุทธิ์สูงในธรรมชาติ สามารถพบร่วมกับไทเทเนียม แมกนีเซียม อะลูมิเนียม นิกเกิล โครเมียม วานาเดียม และแมงกานีส แมกนีไทต์จะอยู่ในรูปของแข็งกับอิลมาไนต์ ($FeTiO_3$) และไทเทไนเฟอร์รัสแมกนีไทต์

เฮมาไทต์ (Fe_2O_3) เป็นสารประกอบที่มีเหล็ก 70% และออกซิเจน 30% เฮมาไทต์มีรูปร่างเป็นแบบรอมโบฮีดรอลแร่ธาตุอื่นๆ เช่น เกอร์ไทต์ (Fe_2O_3 H_2O หรือ FeOOH) ได้มาจากการให้ความชื้นแก่เฮมาไทต์ในเหล็กที่บริสุทธิ์จะมีเกอร์ไทต์ 62.9% มีสีน้ำตาลแดง และเป็นผลึกแบบรอมโบฮีดรอล

2.2 เชื้อเพลิง และตัวรีดักชั่น

เหล็กออกไซด์ ตามปกติจะเป็นสารประกอบพวก Fe_2O_3, Fe_3O_4 หรือ FeO ตามความเป็นจริงแล้ว เหล็กออกไซด์จะมีเป็นสารประกอบมากมาย เพราะไม่ได้มีแต่สารประกอบพวกเหล็กออกซิเจนอย่างเดียว ในการรีดักชั่นด้วยแก๊สในตัวอย่างจะเกิดปฏิกิริยาในสารประกอบอย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาถึงคาร์บอน เหล็กออกซินเจนจะได้อนุภาคของเหล็กออกไซด์ หลังจากผ่านการรีดักชั่นด้วยไฮโดรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์ หรือคาร์บอนปฏิกิริยาในการรีดักชั่น เขียนได้ดังนี้

$$3Fe_2O_3 + H_2 = 2Fe_3O_4 + H_2O \quad (1)$$
$$Fe_3O_4 + H_2 = 3FeO_4 + H_2O \quad (2)$$
$$FeO + H_2 = Fe + H_2O \quad (3)$$
$$3Fe_2O_3 + CO = 2Fe_3O_4 + CO_2 \quad (4)$$
$$Fe_3O_4 + CO = 3FeO + CO_2 \quad (5)$$
$$FeO + CO = Fe + CO_2 \quad (6)$$
$$FeO + C = Fe + CO \quad (7)$$

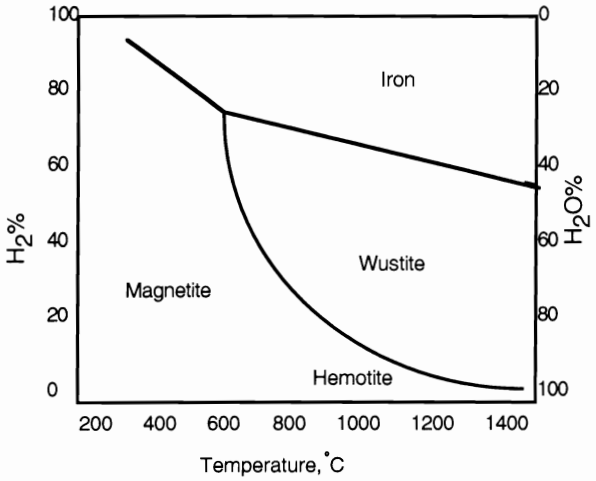
2.3 การรีดักชั่นโดยใช้แก๊สไฮโดรเจน

การรีดักชั่นเหล็กออกไซด์ โดยไฮโดรเจนพบมากกว่าการรีดักชั่นโดยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือทำการรีดักชั่นที่อุณหภูมิ 560 °C และต่ำกว่า 560 °C มีปฏิกิริยาดังนี้

$$3Fe_2O_3+H_2 = 2Fe_3O_4+H_2O \quad \Delta H^\circ O = -2800 \text{ cal} \quad (8)$$
$$Fe_3O_4+H_2 = 3FeO+H_2O \quad \Delta H^\circ O = +18500 \text{cal} \quad (9)$$
$$FeO+H_2 = 3FeO+H_2O \quad \Delta H^\circ O = +5400 \text{ cal} \quad (10)$$
$$1/2Fe_3O_4+H_2 = 3/4Fe+H_2O \quad \Delta H^\circ O = +8900 \text{ cal} \quad (11)$$

อุณหภูมิเป็น °K

ความสมดุลคงที่ในอัตราส่วน H_2O/H_2 และส่วนประกอบของแก๊สสามารถคำนวณหาได้เช่นในรูป CO ดังรูปที่ 2 แสดงให้เห็นระหว่างส่วนประกอบของแก๊สที่คงที่กับอุณหภูมิ ดังนั้นการรีดักชั่นแมกนีไทต์ และวูสไทต์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 650 °C และ 750 °C นั้นเป็นไปได้ในเชิง Thermodynamic หรืออุณหพลศาสตร์



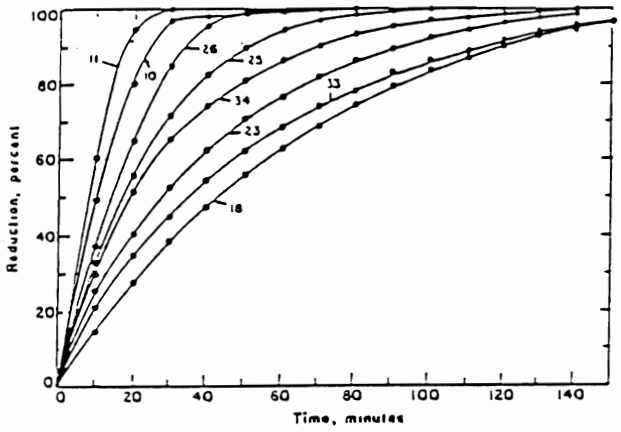
รูปที่ 2 แสดงอัตราส่วนของแก๊สกับอุณหภูมิที่เกิดไดอะแกรมเหล็กไฮโดรเจนออกซิเจน

2.4 ความสามารถในการรีดักชั่นแร่เหล็ก

การทดสอบความสามารถในการรีดักชั่นเหล็กนั้นสามารถกระทำได้หลายวิธีแต่ที่นิยมกัน คือ การแขวนตัวอย่างแร่ไว้กับตาชั่ง แล้วนำใส่ในเตา Reactor ภายนอกเป็นเตาไฟฟ้า ผ่านแก๊สเข้าไปตลอดและรักษาระดับอุณหภูมิในเตาให้คงที่ ชั่งน้ำหนักของออกซิเจนที่หายไปโดยหาจากน้ำหนักที่หายของตัวอย่างก็จะทำให้ทราบถึงน้ำหนักที่หาย โดยพล๊อตเปอร์เซนต์น้ำหนักที่หาย (เปอร์เซนต์รีดักชั่น) กับเวลา

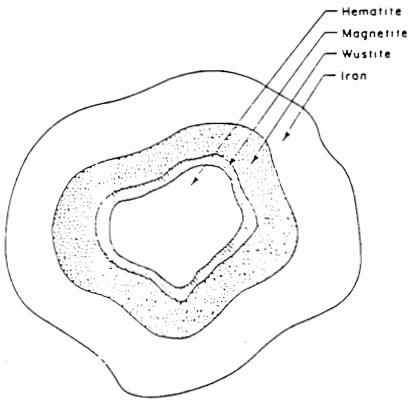
Joseph[2] ได้ทำการทดลองรีดักชั่นแร่ในธรรมชาติและผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 3 ผลแสดงให้เห็นรูพรุนในก้อนแร่หลังการรีดักชั่น การที่จะมองเห็นรูช่องว่างได้โดยดูจากกล้องจุลทรรศน์ ดูด้านข้างของก้อนแร่เหล็กที่ได้เช่นรูปที่ 4 แสดงให้เห็นภาคตัดขวางของส่วนที่หนาแน่นของแร่เหล็ก ที่ผ่านการรีดิวซ์แสดงให้เห็นตรงกลางเป็นชั้นเฮมาไทต์ ล้อมรอบด้วยชั้นซ้อนกัน 3 ชั้น ชั้นในเป็นแมกนีไทต์ ชั้นที่สองเป็นวูสไทต์ และชั้นนอกเป็นเหล็กพรุนพื้นผิวของชั้นนี้ จะมีลักษณะคล้ายกับพื้นผิวข้างนอกของก้อนเหล็กจนพบรูพรุนเป็นโพรง

ที่กำลังขยายต่ำในแร่และ Pellet ที่ได้โดยจากการปั้นก้อนในอนุภาคของแร่ จะแสดงให้เห็นการกระจายของการรีดักชั่นจากผิวนอกสุดเข้าไปสู่ชั้นเฮมาไทต์เป็นจุดศูนย์กลางดังรูปที่ 5 อย่างไรก็ตาม ถ้าดูที่กำลังขยายสูงจะเห็นโครงสร้างของแร่เรียงตัวของช่องว่างที่เกิดบนอนุภาคหรือ Pellet ด้วยแสดงให้เห็นส่วนประกอบทางเคมี ดังรูปที่ 6

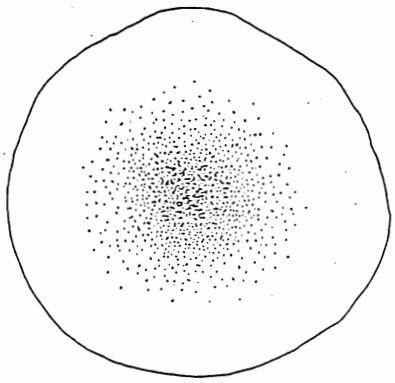


Ore No.	Porosity,%	Ore No.	Porosity,%
11	66.2	34	7.0
10	57.4	23	5.0
26	23.7	33	1.2
25	16.8	18	4.0

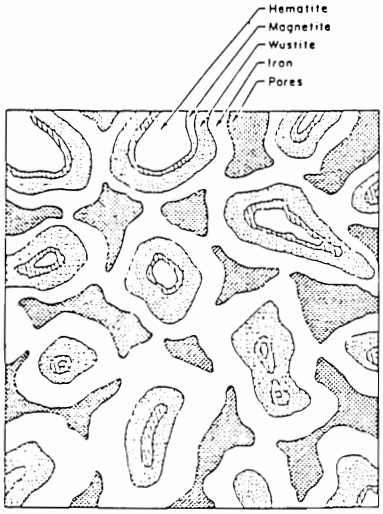
รูปที่ 3 เปอร์เซนต์รีดักชั่นกับเวลาที่ทำให้เกิดเหล็กพรุน



รูปที่ 4 ภาคตัดขวางเหล็กพรุนเพื่อดูความหนาของชั้นเนื้อเหล็ก



รูปที่ 5 ภาคตัดขวางของเหล็กแสดงการกระจายของการรีดักชั่น



รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างของแร่ที่เรียงตัวกันซึ่งเกิดบน Pellet

2.5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระหว่างการรีดักชั่น

ช่วงการรีดักชั่นเฮมาไทต์ แมกนีไทต์และวูสไทต์ไปเป็นโลหะเหล็กขั้นตอนช่วงนี้จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เฮมาไทต์จะเปลี่ยนอยู่ในรูป Closed-Packed hexagonal แต่แมกนีไทต์และวูสไทต์จะอยู่ในรูป Face-Centered Cubic (F.C.C.)

การทดลองของ Wiberg[3] ได้ทำการรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 1000 °C โดยใช้ CO และ H_2 ในช่วงแรกนั้นการรีดักชั่นด้วยแก๊สไฮโดรเจนจะเกิดรวดเร็วกว่าการใช้ CO แต่ขั้นสุดท้ายการรีดักชั่นด้วย CO จะเกิดได้เร็วหลังจากผ่าน 4 ชั่วโมงไปแล้ว การรีดักชั่นด้วยแก๊สไฮโดรเจนจะยังไม่สมบูรณ์ส่วน CO จะเกิดการทำปฏิกิริยาได้หมดสมบูรณ์

2.6 กลไกในการเกิดเหล็กพรุน

จากการทดลอง ทำการรีดักชั่นวูสไทต์ในแก๊สผสม $H_2/H_2O/CO/CO_2$ ของ S.P.Matthew และ P.C.Hayes[4] โดยนำแผ่นเหล็กบริสุทธิ์ 99.99 % มาผสมกับออกไซด์ พบว่าโครงสร้างวูสไทต์หลังทำการรีดักชั่นมีอยู่ 3 แบบดังนี้

1. โครงสร้างชนิดเอ (Type A) โครงสร้างจะเป็นเหล็กพรุน

2. โครงสร้างชนิดบี (Type B) โครงสร้างที่ได้จะเป็นวูสไทต์โปร่งและเหล็กเนื้อแน่น สำหรับเหล็กเนื้อแน่นคือเหล็กอิออนที่อิ่มตัวจะปกคลุมอยู่ที่ผิวรอบ Tunnel ของวูสไทต์โปร่ง

3. โครงสร้างชนิดซี (Type C) โครงสร้างจะเป็นวูสไทต์เนื้อแน่นเหล็กเนื้อแน่น ในปี ค.ศ. 1986 F. Nakibuglu, D.H. St.John และ P.C.Hayes[5] ได้ทำการรีดิวซ์วูสไทต์ในแก๊สผสม CO/CO_2 ข้อมูลบางส่วนของการทดลองได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ, ส่วนผสมของแก๊สโครงสร้างที่ได้ดังตารางที่ 1 กรณีของแก๊สผสม

ในระหว่างการรีดักชั่นวูสไทต์ ชั้นของเหล็กเนื้อแน่นเกิดขึ้นตรงบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเหล็กกับวูสไทต์ (Fe/Wustite Interface) ชั้นของเหล็กเนื้อแน่นนี้จะทำให้รีดิวซ์วิ่งแก๊สไม่สามารถเข้ามาทำปฏิกิริยาทางเคมีกับวูสไทต์ได้ ดังนั้นการเกิดเฟสเหล็กจะเกิดจากการแพร่ของออกซิเจนแทน

ตารางที่ 1 สรุปอิทธิพลของอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซต่อโครงสร้างหลังการรีดักชั่น

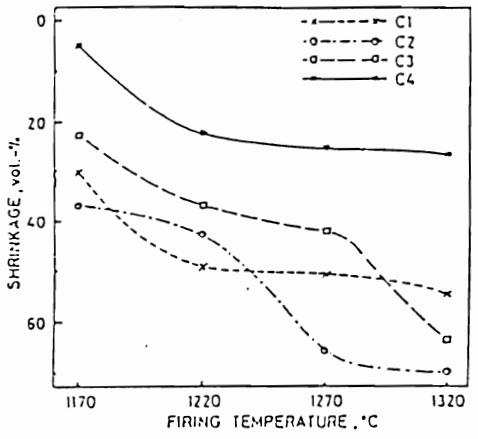
อุณหภูมิ° K	ส่วนผสมของแก๊ส			
	100 Pct CO	10 Pct CO_2 90 Pct CO	20 Pct CO_2 80 Pct CO	30Pct CO_2 70 Pct CO
1,073	A	B	C	C
1,240	A	B	C	C
1,373	A	A	C	C

2.7 ความแข็งแรงของเหล็กออกไซด์ปั้นเม็ด

E.P.Oaikhinan และ R.D.Walker[6] ได้ทำการซินเตอร์แร่ฮีมาไทต์ที่ 1220°C ถึง 1300°C พบว่าถ้าอุณหภูมิในการซินเตอร์สูงขึ้นเปอร์เซนต์การหดตัวของแร่เหล็กปั้นเม็ดและจำนวน Porosity จะเพิ่มขึ้น

E.F.Hoffmom[7] และคณะได้ทำการทดลองการรีดักชั่นแร่ฮีมาไทต์ พบว่าการเพิ่มปริมาณปูนขาวจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของแร่เหล็กปั้นเม็ด

สำหรับเบนโทไนท์นั้น จะช่วยเพิ่มความต้านทานการยุบตัวขณะทำการซินเตอร์



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเปอร์เซนต์การหดตัวของแร่เหล็ก ขณะทำการซินเตอร์

3. อุปกรณ์และสารเคมี

3.1 Tubular Furnace ซึ่งใช้ในการ Reduction
3.2 Hydrogen Gas
3.3 Nitrogen Gas
3.4 Scale
3.5 Bentonite
3.6 H_2O
3.7 Heat Treatment Furnace ใช้ในการทำ Sinter
3.8 Potassium Dichromate ($K_2Cr_2O_7$)
3.9 N-Phenylanthanilic acid
3.10 HCl acid
3.11 H_2SO_4 acid
3.12 Beaker
3.13 Burette
3.14 Boat ใส่สาร
3.15 เครื่องชั่ง

4. วิธีทำการทดลองและขั้นตอนดำเนินงาน

4.1 นำสเกลเหล็กที่บดละเอียดประมาณ 100-150 mesh ไปวิเคราะห์หาส่วนผสมของวัตถุดิบโดยเครื่อง X-ray Diffraction และ X-ray Fluorescence

4.2 ขั้นตอนการปั้น Pellet

1. นำสเกลเหล็กที่บดละเอียดแล้วผสมกับตัวประสาน คือ เบนโทไนท์และน้ำบดผสมคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วปั้นเม็ดซึ่งให้มีขนาด

ประมาณ 12.2 มิลลิเมตร (±2) ส่วนผสมของเบนโทไนท์ที่ใช้อยู่ระหว่าง 4 - 5% และความชื้น 5-10% โดยน้ำหนัก

2. Pellet ที่ปั้นได้ปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งตามระยะเวลาที่กำหนดคือ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 วัน

3. หลังจากนั้น Pellet ที่แห้งตามระยะเวลาไปซินเตอร์ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 600, 800 และ 1000 °C และปรับเปลี่ยนเวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง

4. ปล่อยให้เย็นในเตานำ pellet ที่ผ่านการซินเตอร์ไปวัด Compressive Strength ด้วยเครื่อง Tensile

5. นำค่า Strength มาพล็อตกราฟเพื่อหาช่วงอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการซินเตอร์

4.3 ขั้นตอนการทำรีดักชั่น

นำ Pellet ที่ได้มาทำการรีดักชั่นที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 °C โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. อบแห้ง Pellet ที่ 120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2. ปล่อยให้เย็นใน Dessicator

3. ชั่งน้ำหนัก Pellet ± 0.1 mg ก่อนทำรีดักชั่น

4. นำ Boat ที่ใส่ pellet ไปวางตำแหน่งที่ 1 ของเตา Tubular Furnace ประมาณ 10 นาที เพื่อปรับอุณหภูมิในก้อน pellet

5. เลื่อน Boat ไปตำแหน่งที่ 2 อยู่กึ่งกลางของ Tube

6. ทำการ Purge ด้วยแก๊สไนโตรเจนประมาณ 10 นาที อย่างแรงเพื่อไล่อากาศในเตา

7. ปิดวาล์วแก๊สไนโตรเจนเปิดแก๊สไฮโดรเจนช้าๆ

8. รักษาระดับการ Flow ของแก๊สไฮโดรเจนให้คงที่อัตราช้าๆ จนถึงเวลาที่ต้องการระยะเวลาที่ใช้คือ 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที

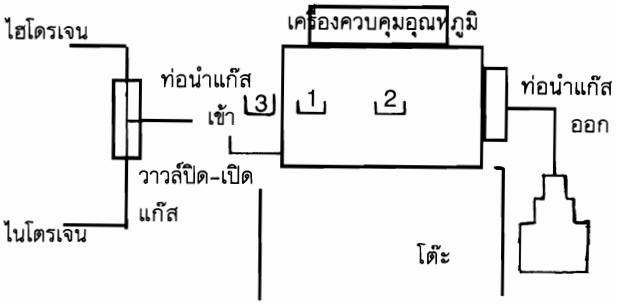
9. หยุดแก๊สไฮโดรเจนเปิดแก๊สไนโตรเจนเพื่อ Purge ท่อ 10 นาที

10. เปิด Seal แล้วดึง boat กลับมาตำแหน่งที่ 3 ของเตา

11. ปิด Seal เปิดแก๊สไนโตรเจนอีก 10 นาที ให้ pellet เย็น

12. ชั่งน้ำหนัก Pellet ± 0.1 mg คำนวณหาน้ำหนักที่หายไป

13. คำนวณหา % Reduction



รูปที่ 8 แสดงอุปกรณ์การรีดักชั่น

4.4 นำ Pellet ที่ผ่านการรีดักชั่นแล้วมาทำ Cold Mounting

4.5 นำไปขัดเพื่อดู Layer ของ Pellet

4.6 ถ่ายรูป Layer ที่ได้

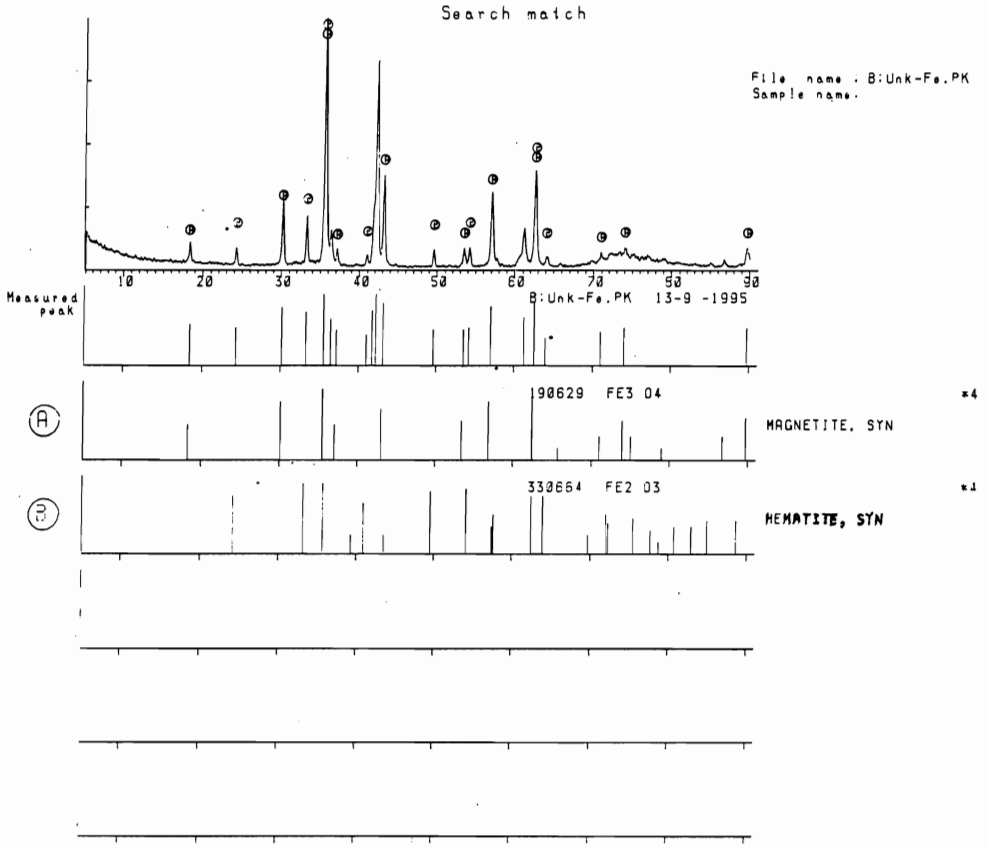
5. ผลการทดลอง

5.1 ผลการวิเคราะห์ของ X-rays

1. ผลการวิเคราะห์ของเครื่อง X- Ray fluoresence analysis ของสเกลเหล็กที่นำมาเป็นวัตถุดิบ

Fe = 67.804% (96.941% Fe_2O_3)

2. ผลการวิเคราะห์ X-Ray Diffraction ของสเกลเหล็กที่นำมาเป็นวัตถุดิบ



รูปที่ 9 แสดงผลการตรวจสอบ X-Ray Diffraction พบว่าในสเกลเหล็กนั้นจะมีลักษณะเป็น Magnetite (Fe_3O_4) และ Hematite (Fe_2O_3)

5.2 ผลการวิเคราะห์หาอัตราส่วนในการปั้น Pellet

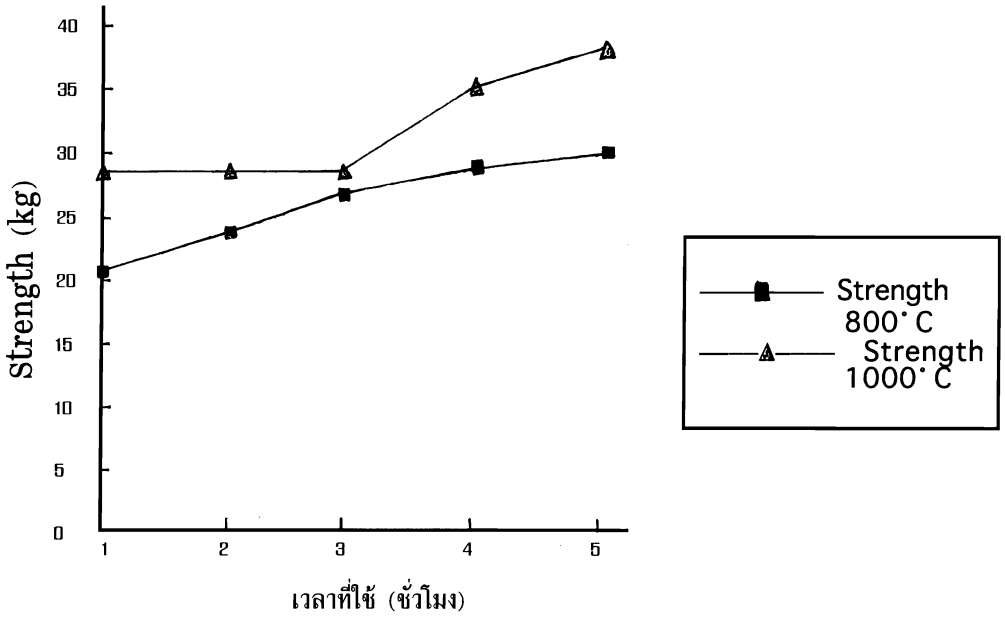
ตารางที่ 2 แสดงอัตราส่วนที่เหมาะสมในการปั้น Pellet ได้ดีคือ Scale = 85%, Bentonite = 5% และความชื้น = 10%

ครั้งที่	%Scale	%Bentonite	%Moisture	ผลการปั้น
1	89	1	10	ปั้นไม่ได้
2	92	3	5	ปั้นไม่ได้
3	87	3	10	ปั้นไม่ได้
4	91	4	5	ปั้นไม่ได้
5	86	4	10	ปั้นได้ง่ายขึ้น
6	90	5	5	ปั้นได้แต่จะแตกเมื่อแห้ง
7	85	5	10	ปั้นได้ผล

5.3 ผลของการวัดค่า Strength ที่ได้หลังจากผ่านการซินเตอร์

ตารางที่ 3 แสดงค่า Strength ที่วัดจากเครื่อง Tensile จะพบว่าจากการทดลองที่เราทำการปรับอุณหภูมิและเวลาช่วงที่อุณหภูมิ 1000°C เวลา 5 ชั่วโมง ในการซินเตอร์ค่า Strength เท่ากับ 39.17 ซึ่งดีกว่าจุดอื่นๆ

ตัวอย่างที่	%Bentonite	%Moisture	อุณหภูมิในการซินเตอร์	เวลาในการซินเตอร์	ค่า Strength
1	5	10	800	1	21.36
2	5	10	800	2	23.43
3	5	10	800	3	26.43
4	5	10	800	4	28.85
5	5	10	800	5	29.94
6	5	10	1000	1	28.35
7	5	10	1000	2	28.35
8	5	10	1000	3	28.84
9	5	10	1000	4	35.59
10	5	10	1000	5	39.17



รูปที่ 10 กราฟแสดงค่า Strength กับเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์ ณ ที่อุณหภูมิ 800 และ 1000°C

5.4 ผลการทดลอง Reduction ที่อุณหภูมิ 900°C

ตารางที่ 4 แสดง % Reduction ที่อุณหภูมิ 900°C จะพบว่าในช่วง 40 นาที จะมีการ Reduce ได้ดีและเกือบสมบูรณ์กว่า ช่วงเวลาอื่นๆ

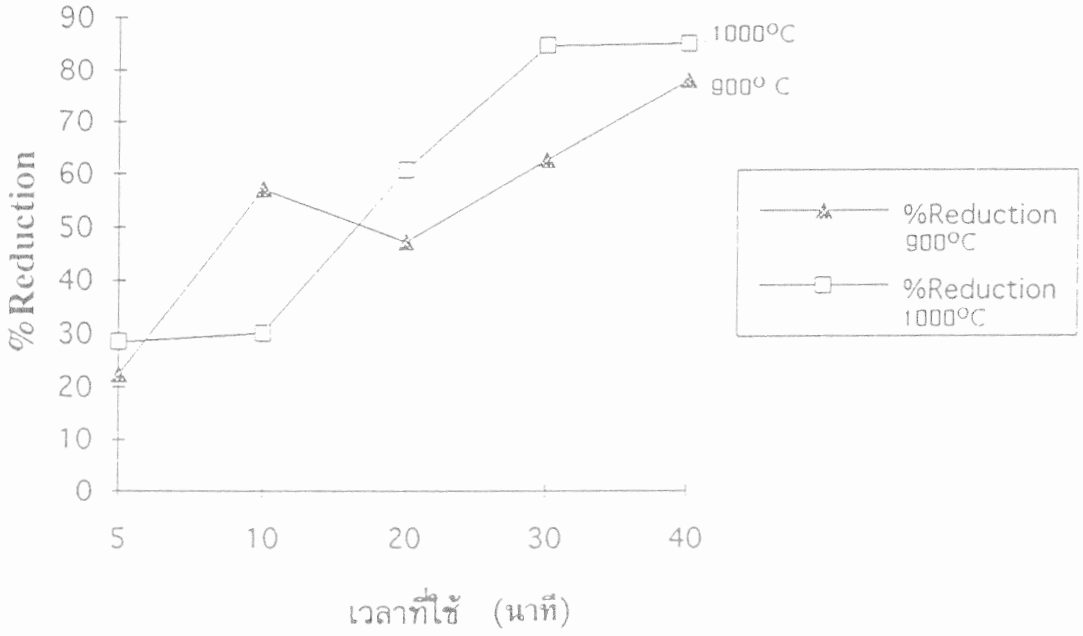
ตัวอย่างที่	เวลาที่ใช้	น้ำหนักก่อน	น้ำหนักหลัง	น้ำหนักที่หาย	น้ำหนัก O_2	%Reduction
1	5	2.6836	2.4944	0.1892	0.6091	22.21
2	10	2.9807	2.4408	0.5399	0.6987	57.07
3	20	2.6244	2.4012	0.4232	0.6516	47.21
4	30	2.9350	2.3513	0.5837	0.6649	62.66
5	40	2.6938	2.0256	0.6682	0.6122	78.16

ตารางที่ 5 แสดง % Reduction ที่อุณหภูมิ 1000°C พบว่าเวลาที่ 30 และ 40 นาที การ Reduce จะเกิดได้ดีดูจาก %Reduction เท่ากับ 84.81% และ 85.34%

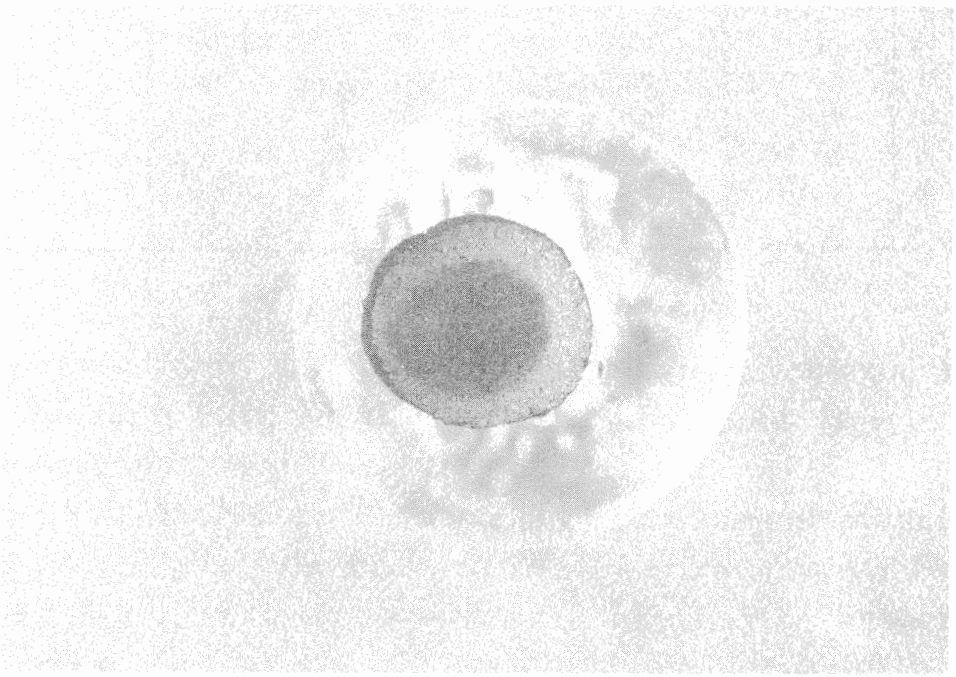
ตัวอย่างที่	เวลาที่ใช้	น้ำหนักก่อน	น้ำหนักหลัง	น้ำหนักที่หาย	น้ำหนัก O_2	%Reduction
1	5	2.9071	2.6449	0.2622	0.6785	28.42
2	10	2.6374	2.3857	0.2517	0.7952	30.07
3	20	2.9411	2.3745	0.5666	0.8887	60.70
4	30	2.7522	2.0114	0.7408	0.8298	84.81
5	40	2.9319	2.1379	0.7940	0.8839	85.34

5.5 ภาพถ่ายแสดงภาคตัดขวางบางส่วนของ Pellet ที่ผ่านการรีดักชั่นที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 °C และเวลาต่างๆ ดังนี้

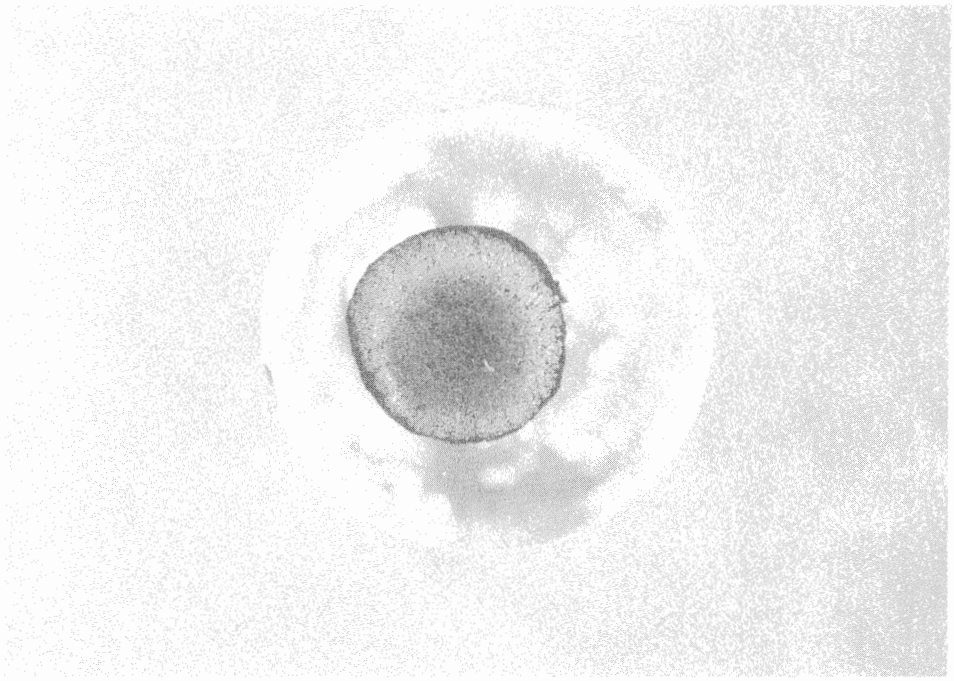
รูปที่ 12 แสดงภาคตัดขวางของ Pellet ที่รีดักชั่นอุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 10 นาที จะเห็นเส้นรอบวงแสดงบริเวณที่ถูกรีดักชั่นซึ่งยังมีบริเวณแคบกว่าที่เวลา 30 นาที ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 13 การรีดักชั่นเกิดได้บริเวณกว้างกว่า และเมื่อทำการทดลองปรับอุณหภูมิที่ 1000 °C และเวลาต่างๆ เช่น เวลา 20 และ 40 นาที การรีดักชั่นเป็นไปอย่างดีที่ 20 นาที เกิดการรีดักชั่นเหมือนกับที่อุณหภูมิ 900 °C จะเห็นบริเวณที่ถูกรีดักชั่น แสดงดังรูปที่14 และ ที่เวลา 40 นาที แสดงให้เห็นดังรูปที่ 15 ถือว่าสมบูรณ์ที่สุดในการทดลองนี้เกิดปฏิกิริยาดีที่สุด



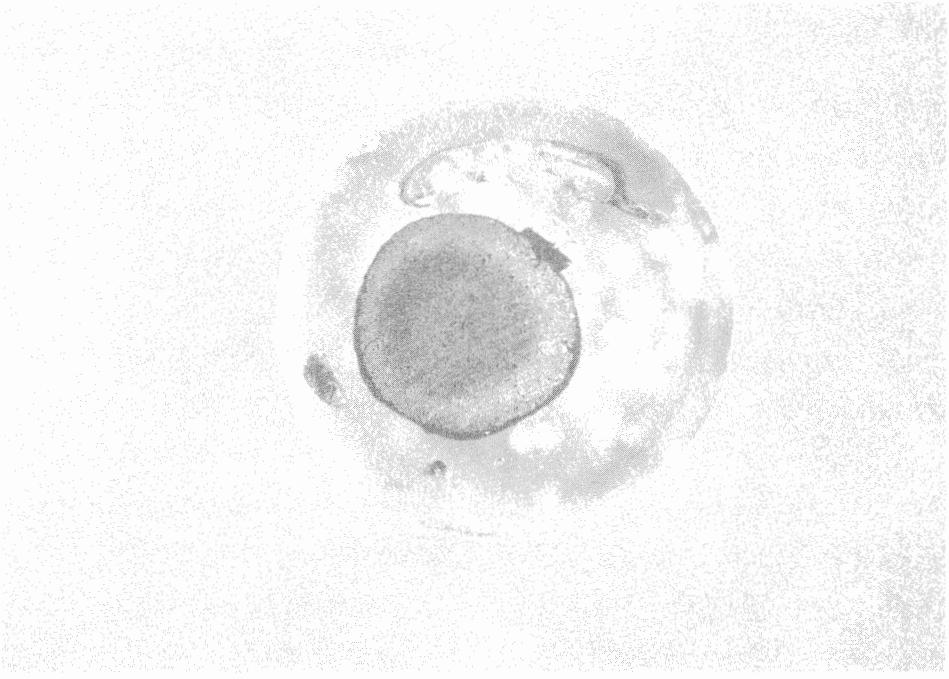
รูปที่ 11 กราฟแสดง % Reduction ของ Pellet ที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 °C หาช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม



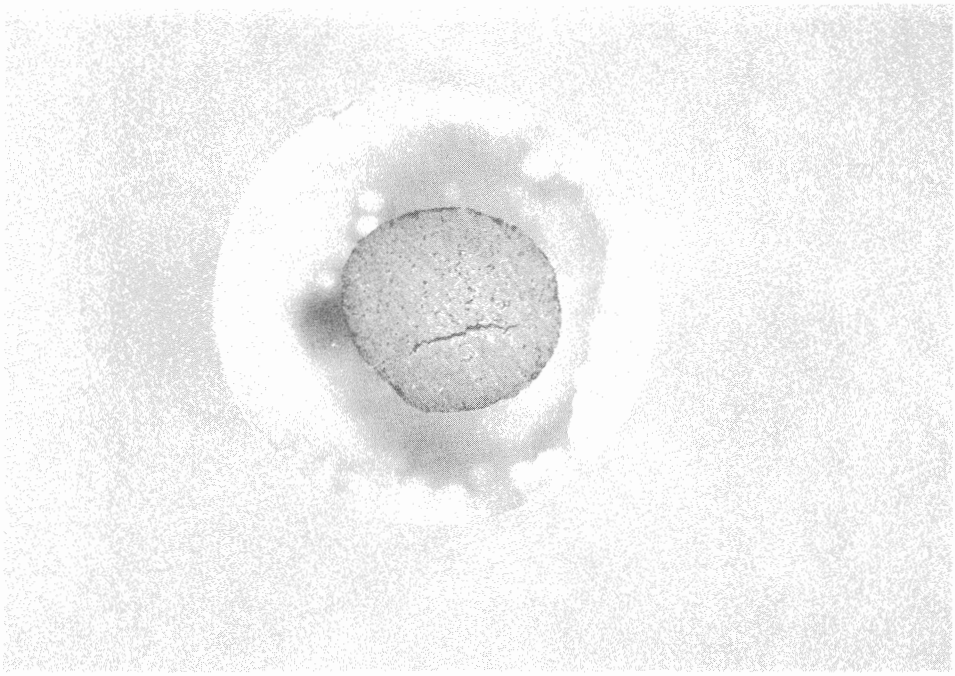
รูปที่ 12 แสดงภาคตัดขวางของ Pellet ทำการรีดักชั่นที่อุณหภูมิ 900 °C เวลา 10 นาที



รูปที่ 13 แสดงภาคตัดขวางของ Pellet ทำการรีดักชั่นที่อุณหภูมิ 900 °C เวลา 30 นาที



รูปที่ 14 แสดงภาคตัดขวางของ Pellet ทำการรีดักชั่นที่อุณหภูมิ 1000 °C เวลา 20 นาที



รูปที่ 15 แสดงภาคตัดขวางของ Pellet ทำการรีดักชั่นที่อุณหภูมิ 1000 °C เวลา 40 นาที

๘. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction สเกลเหล็กที่นำมาตรวจสอบประกอบด้วย เฮมาไทต์ และแมกนีไทต์ เมื่อนำไปทดสอบหาเปอร์เซนต์เหล็กด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ 67.80%

ในขั้นตอนการทดลองส่วนผสมที่เหมาะสมนั้นอัตรา ส่วนผสมระหว่างเบนโทไนท์กับความชื้นที่ใช้มี 7 สูตรดังนี้คือ 1% กับ 10%, 3% กับ 5%, 3% กับ 10%, 4% กับ 5%, 4% กับ 10%, 5% กับ 5% และ 5% กับ 10% พบว่าที่เบนโทไนท์ 5% กับความชื้น 10% เป็นอัตราส่วนที่สามารถทำให้ Pellet อยู่ตัวได้ดีในการทดลองจึงเลือกใช้เบนโทไนท์ 5% ความชื้น 10% เมื่อนำมาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 600, 800 และ 1000 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 600 °C Pellet จะยังไม่พัฒนาความแข็งแรงเพียงพอทำให้แตกได้ง่าย จึงไม่ได้ทำการวัด Strength ช่วงอุณหภูมิ 800 °C ที่เวลา 5 ชม. ค่า Strength 29.94 kg ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 800 °C แต่เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ 1000 °C นั้น ค่า Strength จะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น Pellet ที่ผ่านการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1000 °C เวลา 5 ชม. ค่า Strength วัดได้ 39.17 kg จะแข็งแรงกว่าที่อุณหภูมิ 800 °C

เมื่อนำ Pellet ที่ซินเตอร์ 1000 °C แล้วมา Reduction ที่อุณหภูมิ 900 °C และ 1000 °C ตัวแปรต้นที่ทำการทดลองคือเวลาที่ใช้ในการ Reduction และ เปอร์เซนต์รีดักชั่นเป็นตัวแปรตามที่เราต้องการ จะพบว่า ณ ที่อุณหภูมิ 900 °C เวลา 40 นาที %Reduction จะสูงสุดมีค่าเท่ากับ 78.16 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Pellet นั้นได้ถูกรีดักชั่นโดย H_2 ได้เกือบทั้งหมดเพราะสังเกตจากการส่องกล้องดู layer จะมีลักษณะเหมือนกันทั้งก้อนเมื่อเปรียบเทียบกับ Pellet ที่เวลาต่างกัน แต่เมื่อทำการเปลี่ยนมาทดลองที่อุณหภูมิ 1000 °C นั้นที่เวลา 40 นาที จะได้ %Reduction สูงสุดเท่ากับ 85.34%

เอกสารอ้างอิง

1. Darken,L.S., Gurry.R.W.:Jour.Amer.Chem.Soc. (1945)Vol.57, pp.1398-1412 (1948) Vol.68 PP.798-816.
2. Darken,L.S., Gurry.R.W.:Physical Chemistry of Metals, McGraw-Hill Book Co.Inc.,New York (1953)
3. Joseph.T.L.:Tran.A.I.M.E.(1936) Vol.120, PP.72-98.
4. Wiberg,M: Discussion of the Faraday Society No.4(1948) pp.231-23.
5. R.L.Stephenson, R.M.Smailer: Direct Reduction Iron, 1980, pp.9-10
6. S.P.Matthew, and P.C. Hayes:Metall Trans B, 1990,Vol 21B., pp.141-51.
7. D.H. st.John,S.P.Matthew, and P.C. Hayes : Metall Trans B, 1992, Vol 13B., pp.117-24.
8. D.H. st.John, and P.C. Hayes : Metall Trans B, 1984, Vol 15B., pp. 701-08.
9. F. Nakibuglu, D.H. st.John,and P.C. Hayes : Metall Trans B, 1986, Vol 15B., pp. 373-81.
10. G.E.F. Hoffmon "Chemical Analysis of Iron and Steel",(1931), John Wiley and Son,Inc. New York.
11. M.Farren, S.P.Matthew, and P.C. Hayes : Metall Trans B, 1990, Vol 21B., pp. 135-39.