

ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

เอกสารผลงานที่เสนอประเมิน

เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 6ว

วศ

กว

อว 2

เรื่องที่ 2

การศึกษาทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมสีจากเฟอร์ริกคลอไรด์

ของ

นายชัยวัฒน์ ธานีรัตน์

ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 5

กลุ่มวิจัยและพัฒนา 1

กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม

๓๗

เลขหม	กข
	๐๖๒
เลขทะเบียน	๙๙๘๓
วันที่	14 / พค. / ๕๕

บทคัดย่อ

ด้วยอธิบดีพนักงาน
จาก
.....

การทดลองนี้เป็นการทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยเฉพาะเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบาง (micaceous iron oxide) จากเฟอร์ริกคลอไรด์โดยการออกซิเดชันสารประกอบเชิงซ้อนของเฟอร์ริกคลอไรด์กับโซเดียมคลอไรด์ด้วยออกซิเจนในอากาศที่อุณหภูมิในช่วงประมาณ 360 ถึง 830 องศาเซลเซียส ในสภาวะต่าง ๆ กัน ได้แก่ การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ การทดลองเตรียมโดยมีการผ่านแก๊สในโตรเจนก่อนถึงอุณหภูมิคงที่ การเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์และเวลาเผา การเติมอากาศเข้าไปในเตาเผาหลังจากอุณหภูมิคงที่และเพิ่มเวลาเผา การทดลองในเบื้องต้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน พบว่าที่อุณหภูมิสูงประมาณ 500 ถึง 830 องศาเซลเซียสจะให้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคชั้นบางได้บ้างเล็กน้อยโดยมีอนุภาคที่เป็นเม็ดและส่วนละเอียดในปริมาณมาก ส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะไม่ให้อนุภาคชั้นบางหรือเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อมีการผ่านแก๊สในโตรเจนเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันก่อนถึงอุณหภูมิคงที่พบว่าเกิดเหล็กออกไซด์ชั้นบางมากขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส การทดลองโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์ไม่มีผลต่อการเกิดเหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคชั้นบางมากนัก แต่อาจมีผลต่อขนาดของอนุภาคชั้นบางที่เกิดขึ้นได้ ถ้าใช้ปริมาณโซเดียมคลอไรด์มากขึ้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงเวลาเผาก็ไม่มีผลต่อลักษณะของเหล็กออกไซด์ที่ได้เช่นกัน การทดลองที่ให้ผลดีที่สุดคือได้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคชั้นบางในปริมาณสูง และมีอนุภาคที่เป็นเม็ดและส่วนละเอียดในปริมาณน้อย ได้จากการทดลองเผาเฟอร์ริกคลอไรด์กับโซเดียมคลอไรด์ในอัตราส่วน 1 : 1 โดยมีการเพิ่มอากาศเข้าไปในเตาเผาระหว่างเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และมีการผ่านแก๊สในโตรเจนก่อนถึงอุณหภูมิคงที่ ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส ส่วนการเพิ่มเวลาเผาจะช่วยให้เกิดผลดีขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 830 องศาเซลเซียส เหล็กออกไซด์ที่ได้มีลักษณะรูปร่างของอนุภาคที่เป็นชั้นบางคล้ายกับเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางในธรรมชาติ จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พบว่าอนุภาคชั้นบางมีความกว้างส่วนใหญ่ไม่เกิน 28 ไมครอน และหนา 2 ถึง 4 ไมครอน

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ก
สารบัญรูป	ข
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 เป้าหมายของการศึกษาทดลอง	4
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาทดลอง	4
1.4 ขอบเขตของการศึกษาทดลอง	4
1.5 ระยะเวลาของการศึกษาทดลอง	5
1.6 ผู้ดำเนินการศึกษาทดลอง	5
1.7 ประโยชน์ที่จะได้รับ	5
บทที่ 2	
การทดลองและผลการทดลอง	6
2.1 วัสดุอุปกรณ์	6
2.2 วิธีการทดลอง	7
2.3 ผลการทดลอง	10
บทที่ 3	
วิจารณ์ผลและสรุปผลการทดลอง	31
3.1 วิจารณ์ผล	31
3.2 สรุปผลการทดลอง	34
กิตติกรรมประกาศ	36
เอกสารอ้างอิง	36

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองในเบื้องต้น	11
2	ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน	12
3	ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่าน N_2 ก่อนอุณหภูมิคงที่	15
4	ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์	17
5	ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงเวลาเผา	20
6	ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านอากาศเข้าเตาเผา	22
7	ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านอากาศและเพิ่มเวลาเผา	24

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	โครงสร้างผลึกของเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางในธรรมชาติโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 500 และ 200 เท่า	2
2	เตาเผาบ้านและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	6
3	ภาพจาก SEM ของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน	13
4	ภาพจาก SEM ของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่าน N_2 ก่อนถึงอุณหภูมิคงที่	16
5	ภาพจาก SEM ของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์	18
6	ภาพจาก SEM ของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงเวลาเผา	21
7	ภาพจาก SEM ของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านอากาศเข้าเตาเผา	23
8	ภาพจาก SEM ของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านอากาศเข้าเตาเผาและเพิ่มเวลาเผา	25
9	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ	26
10	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนอุณหภูมิคงที่	27
11	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านอากาศเข้าไปในเตาเผา	28
12	แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านอากาศเข้าเตาเผาและเพิ่มเวลาเผา	29

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

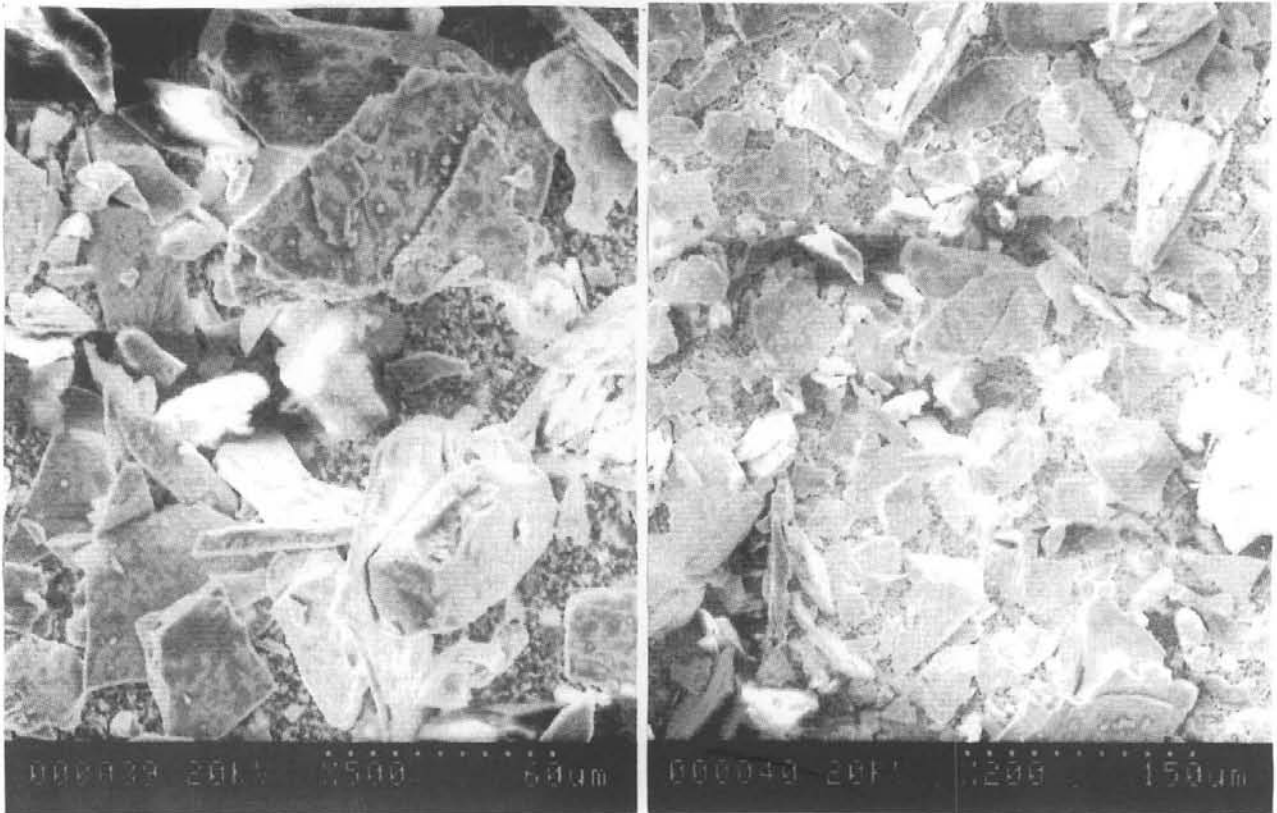
ผงสีกันสนิม (anticorrosive pigments) สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท ตามหน้าที่โดยเฉพาะภายในชั้นของสี (paint film) คือ ผงสีที่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี (active pigments) และผงสีเฉื่อย (inert pigments)

ผงสีที่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี ใช้ในสีรองพื้นเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งช่วยป้องกันการเกิดสนิมหรือการผุกร่อนที่ผิวของโลหะได้ โดยอาศัยกระบวนการทางเคมีหรือเคมีไฟฟ้า ผงสีในกลุ่มนี้ที่รู้จักกันดีได้แก่ ตะกั่วแดง สังกะสีโครเมต สังกะสีฟอสเฟต และผงสังกะสี เป็นต้น

ผงสีเฉื่อย มีลักษณะทางกายภาพที่ช่วยเพิ่มสมบัติในการขวางกั้น (barrier properties) ของสีเคลือบ โดยลดการซึมผ่านของน้ำและแก๊สออกซิเจน และเพิ่มความต้านทานการถ่ายเทประจุไฟฟ้าผ่านชั้นของสีที่เคลือบ ผงสีที่สำคัญที่สุดในพวกนี้ คือ เหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบาง (micaceous iron oxide) ซึ่งมีสีเทาและเป็นเงาวาว (metallic sheen) เหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางเป็นสารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นชั้นบาง (lamellar form) ดังรูปที่ 1 การที่มีโครงสร้างอนุภาคคล้ายเกล็ดหรือแผ่นบางนี้ จึงทำให้มีผลในการขวางกั้นอนุภาคของสารที่ทำให้เกิดสนิมได้

เหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบาง โดยคำนิยามแล้วต้องมีโครงสร้างผลึกคล้ายไมกา (mica) ไมกาเป็นชื่อเรียกแร่กลุ่มหนึ่งซึ่งมักจะแตกออกเป็นแผ่นหรือชั้นบาง (lamellae) ได้ง่าย⁽¹⁾ สมบัติทางกายภาพของเหล็กออกไซด์จึงตรวจสอบได้ โดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (optical microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (scanning electron microscope, SEM) เหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางในธรรมชาติได้มาจากแฮมาไทต์ (haematite) ซึ่งพบในแหล่งต่าง ๆ ทั่วไป เช่น ประเทศออสเตรเลีย (แหล่งใหญ่) สเปน ญี่ปุ่น แอฟริกาใต้ ออสเตรเลีย และอินเดีย เป็นต้น ผงสีที่ได้เหล่านี้มีความแตกต่างกันอย่างมากทั้งในรูปร่าง ลักษณะทางกายภาพและความบริสุทธิ์ทางเคมี การตรวจสอบผงสีเหล็กออกไซด์ที่มีการซื้อขายกัน โดยกล้องจุลทรรศน์⁽²⁾ พบว่ารูปร่างของอนุภาคมีได้ตั้งแต่เป็นแผ่นหรือเกล็ดทั้งบางและหนาจนถึงเป็นเม็ด (granular) ผงสีบางชนิดประกอบด้วยผสมของอนุภาคที่มีรูปร่างแตกต่างกันมากมาย

ผงสีเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางที่มีคุณภาพดีมากซึ่งมีปริมาณอนุภาคที่เป็นชั้นบางในสัดส่วนที่สูง ได้จากเหมืองแร่ในเมืองเซาท์เดฟวอน (South Devon) ประเทศอังกฤษ แต่ถูกนำมาใช้จนหมดแล้ว เมื่อ 25 ปีที่ผ่านมา ผงสีนี้มีความกว้างของแผ่น (platelets) ประมาณ 10 - 75 ไมครอน และความหนาต่ำกว่า 5 ไมครอน เป็นส่วนใหญ่ และมีสมบัติในการป้องกันสนิมได้ดีมาก



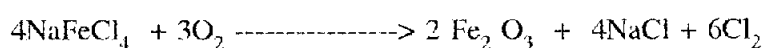
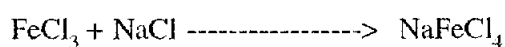
รูปที่ 1 โครงสร้างผลึกของเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางในธรรมชาติโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 500 และ 200 เท่า

การกำหนดลักษณะรูปร่างที่ต้องการของผงสีเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางยังไม่มีหลักเกณฑ์ที่ชัดเจน ตามมาตรฐานอังกฤษ (British Standard) สำหรับผงสีเหล็กออกไซด์ชนิดบับล่าสุด BS3981 - 1976 ซึ่งเทียบได้กับ ISO 1248 - 1974 ได้รวมส่วนของเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางไว้ด้วย โดยอธิบายเพียงว่า เหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางจะต้องมีลักษณะเป็นชั้นบาง แต่ไม่มีการทดสอบหรือบรรทัดฐานให้ไว้สำหรับรูปร่างของอนุภาคผงสี อย่างไรก็ตามได้มีการตรวจสอบลักษณะที่เป็นเกล็ดบางของเหล็กออกไซด์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 150 - 200 เท่า เป็นเวลานานมาแล้ว โดยเทคนิคนี้เกล็ดที่มีความหนาประมาณไม่เกิน 5 ไมครอนจะเห็นเป็นผลึกสีแดง ที่มีมุมและขอบเหลี่ยมชัดเจน ในขณะที่เกล็ดหนาหรือเม็ด จะเห็นเป็นหยด

หรือรอยเปื้อนสีดำ (black blobs) การทดสอบโดยวิธีนี้ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานออสเตรเลีย (Australian Standard), AS 2855 - 1986

เหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางในธรรมชาติได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์กันเป็นเวลานาน จนในปัจจุบันได้เกิดการขาดแคลนขึ้น โดยเฉพาะเหล็กออกไซด์ซึ่งมีคุณภาพดีจากประเทศอังกฤษได้นำมาใช้จนหมดมานานแล้ว เหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางซึ่งมีคุณภาพรองลงมาที่หาได้ในขณะนี้ ส่วนใหญ่มาจากประเทศออสเตรเลีย แต่ปริมาณแร่ที่มีอยู่ก็ลดน้อยลงเรื่อย ๆ ส่วนเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางที่ได้จากแหล่งอื่น ๆ ก็มีคุณภาพด้อยกว่าและมีปริมาณไม่มากนัก การใช้ผงสีเหล็กออกไซด์ชนิดนี้ในอุตสาหกรรมสีโดยเฉพาะสีกันสนิม จึงต้องพบกับปัญหาคุณภาพของผงสีที่ลดลง แต่ราคาเพิ่มสูงขึ้นและอาจขาดแคลนในที่สุด ดังนั้นวงการอุตสาหกรรมสีจึงพยายามศึกษาหาวิธีสังเคราะห์ชั้นบางใช้โดยวิธีการพื้นฐานที่สำคัญมีอยู่ 2 วิธีคือ การเปลี่ยนแปลงสารประกอบ FeO.OH โดยอาศัยความร้อนและน้ำในหม้อนึ่งอัดไอ (autoclave) และการออกซิเดชันของสารประกอบเชิงซ้อนของเกลือ (salt complexes) ที่หลอมเหลว เช่น KFeCl_4 ที่อุณหภูมิสูง ปัจจุบันการสังเคราะห์เหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางเพื่อผลิตขายเชิงพาณิชย์ยังไม่ประสบความสำเร็จ ยังคงดำเนินการกันอยู่เพื่อให้ได้เทคนิคและสภาวะการสังเคราะห์ที่เหมาะสมในราคาที่ไม่แพง การศึกษาวิจัยดังกล่าวมีความสำคัญเพราะจะทำให้มีเทคโนโลยีการผลิตวัสดุสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมสี โดยเฉพาะสีกันสนิมแทนตะกั่วแดงซึ่งเป็นสารอันตราย

ในการศึกษาทดลองนี้ เป็นการศึกษาค้นคว้าทดลองในเบื้องต้นเพื่อหาความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์เหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตในปริมาณมากขึ้นในขั้นต่อไป การศึกษาทดลองนี้จะใช้วิธีการออกซิเดชันของสารประกอบเชิงซ้อนเพื่อให้ได้ผลึกชั้นบางของเหล็กออกไซด์ โดยให้เฟอร์ริกคลอไรด์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับเกลือโซเดียมคลอไรด์ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่หลอมเหลว แล้วจึงออกซิไดส์ด้วยอากาศที่อุณหภูมิสูง โดยทำการศึกษาค้นคว้าทดลองที่สภาวะต่าง ๆ กัน ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบาง แสดงไว้ในสมการต่อไปนี้



1.2 เป้าหมายของการศึกษาทดลอง

เป็นการศึกษาทดลองหาวิธีเตรียมเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางจากเฟอร์ริกคลอไรด์ เพื่อเป็นแนวทางในการเตรียมเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางจากเศษเหล็ก

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาทดลอง

เพื่อหาวิธีเตรียมเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางจากเฟอร์ริกคลอไรด์ในระดับห้องปฏิบัติการ

1.4 ขอบเขตของการศึกษาทดลอง

1.4.1 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ในเบื่องค์น เพื่อศึกษาการเกิดเหล็กออกไซด์ ที่อุณหภูมิระหว่าง 360 ถึง 700 องศาเซลเซียส

1.4.2 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน เพื่อศึกษาการเกิดเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

1.4.3 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนอุณหภูมิคงที่ เพื่อควบคุมการเกิดออกซิเดชันของเฟอร์ริกคลอไรด์ให้เกิดขึ้นเฉพาะระดับอุณหภูมิที่ต้องการ

1.4.4 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์ เพื่อศึกษาผลของโซเดียมคลอไรด์ที่มีต่อการเกิดเหล็กออกไซด์

1.4.5 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงเวลาในการเผา เพื่อศึกษาการเตรียมเหล็กออกไซด์โดยใช้เวลาเผาของผสมเฟอร์ริกคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์นาน 1 ถึง 2 ชั่วโมง

1.4.6 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ โดยผ่านอากาศเข้าไปในเตาเผา เพื่อให้เฟอร์ริกคลอไรด์เกิดการออกซิเดชันได้ดีขึ้น

1.4.7 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านอากาศเข้าเตาเผาและเพิ่มเวลาเผา เพื่อศึกษาการเกิดเหล็กออกไซด์ เมื่อมีการพ่นอากาศเข้าไปในเตาเผาและเพิ่มเวลาเผาให้มากขึ้น

1.4.8 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้ โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

1.5 ระยะเวลาของการศึกษาทดลอง

ปี พ.ศ.2535 - 2537

1.6 ผู้ดำเนินการศึกษาทดลอง

นายทรงศักดิ์ พงศ์พันธุ์โรจน์

นายชัยวัฒน์ ธานีรัตน์

1.7 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.7.1 ได้วิธีเตรียมเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางเพื่อทดแทนเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางในธรรมชาติ ซึ่งกำลังจะขาดแคลนในอนาคต

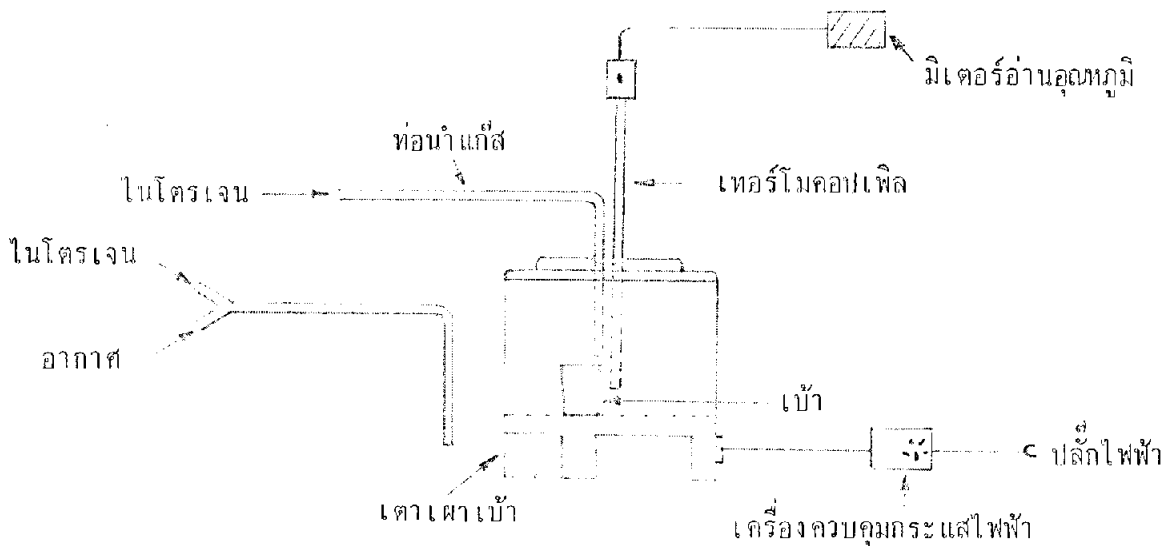
1.7.2 เป็นแนวทางในการเตรียมเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางจากเศษเหล็กซึ่งสามารถพัฒนาให้เป็นอุตสาหกรรมขนาดย่อมต่อไปได้

บทที่ 2

การทดลองและผลการทดลอง

2.1 วัสดุอุปกรณ์

เตาเผาและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 2 การให้ความร้อนแก่เฟอร์ริกคลอไรด์ และโซเดียมคลอไรด์เพื่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่หลอมเหลวและออกซิไดส์โดยอากาศ เกิดขึ้นในเตาเผาเบ้า (crucible furnace) ของ Simon Muller ซึ่งควบคุมอุณหภูมิโดยเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า (electrothermal power regulator) และวัดอุณหภูมิของเตาเผาด้วยเทอร์โมคอปเปิล (thermocouple) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องอ่านอุณหภูมิ การเติมแก๊สไนโตรเจนหรืออากาศเข้าไปในเตาเผาทำได้โดยใช้ท่อนำแก๊สซึ่งทำด้วยหลอดแก้วเชื่อมต่อกับท่อบรรจุแก๊สไนโตรเจนหรืออากาศ การเติมแก๊สไนโตรเจนอย่างเดียวใช้ท่อนำแก๊สที่มีปลายเดียว แต่ถ้าเติมอากาศด้วยจึงใช้ท่อนำแก๊สที่มีปลายข้างหนึ่ง แยกเป็น 2 ทาง (รูปตัว Y)



รูปที่ 2 เตาเผาเบ้า และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้จากการทดลอง นำไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบโดยเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) รุ่น PW 1710 ของ PHILIPS และตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 150 เท่า และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดรุ่น S - 2500 ของ HITACHI ที่กำลังขยาย 500 เท่าหรือมากกว่า

สารเคมีที่ใช้ได้แก่ เฟอร์ริกคลอไรด์ซึ่งอยู่ในรูป $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ใช้เกรดทางการค้า (commercial grade) โซเดียมคลอไรด์ใช้เกรดทางยา (BP grade) แก๊สไนโตรเจนและอากาศ ใช้เกรดสำหรับห้องปฏิบัติการ (laboratory grade) ของบริษัทไทยอินดัสเตรียลแก๊สจำกัด ส่วนลูกบอลเซรามิก (ceramic ball) เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ซึ่งทำจากส่วนผสมที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์เครื่องดินเผา โดยนำมาเผาที่อุณหภูมิสูง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 - 5 มิลลิเมตร

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ในเบื้องต้น

ชั่งเฟอร์ริกคลอไรด์ 1 กรัม และโซเดียมคลอไรด์ 1 กรัม ผสมในเบ้าพอร์ซเลน (porcelain crucible) โดยเหลือโซเดียมคลอไรด์ไว้เล็กน้อยสำหรับเปิดตอนบนของส่วนผสม นำเข้าเตาเผา และให้ความร้อนจนอุณหภูมิถึง 360 องศาเซลเซียส เผาต่อที่อุณหภูมินี้ 30 นาที จึงปิดสวิตซ์เตาเผา ปล่อยให้เย็นลง จึงนำเบ้าออกจากเตาเผา แล้วแยกเอาเหล็กออกไซด์ที่ได้ออกจากเกลือโดยเติมน้ำกลั่นละลายเกลือ กรองผ่านกระดาษกรอง ล้างด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้ง จนหมดคลอไรด์ (ทดสอบ Cl^-) นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง สังเกตลักษณะเหล็กออกไซด์ที่ได้

ทำการทดลองโดยวิธีการเดียวกัน แต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 430, 540, 605 และ 720 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้ทั้งหมด นำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 150 เท่า และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 500 เท่า สำหรับตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 360 และ 430 องศาเซลเซียส นำไปตรวจหาฟอสที่เป็นส่วนประกอบโดยเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

2.2.2 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

ชั่งเฟอร์ริกคลอไรด์ 3 กรัม ผสมกับโซเดียมคลอไรด์ 6 กรัม ในเบ้า นำเข้าเตาเผา และให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เผาต่อที่อุณหภูมินี้ 1 ชั่วโมงจึงปิดเตาเผา ปล่อยให้เย็นลง นำเบ้าออกจากเตาเผา เติมน้ำกลั่นละลายเกลือออกกรองหลาย ๆ หน จนหมดคลอไรด์ อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง สังเกตผล

ทำการทดลองเช่นเดียวกันโดยเปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 510, 605, 720 และ 830 องศาเซลเซียสตามลำดับ ผงเหล็กออกไซด์ที่ได้นำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยกล้อง-

จุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยาย 150 และ 500 เท่าตามลำดับ

2.2.3 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านแก๊สในโตรเจนก่อนอุณหภูมิคงที่

ซังเฟอร์ริกคลอไรด์ 3 กรัม และโซเดียมคลอไรด์ 6 กรัม ผสมใส่ในบ้ำ นำเข้าเตาเผาแล้วผ่านแก๊สในโตรเจน เข้าเตาเผาที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นาน 20 นาที จึงให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ปิดถังแก๊สในโตรเจน เผาต่อที่อุณหภูมินี้ นาน 1 ชั่วโมง จึงปิดเตาเผาปล่อยให้เย็นลง นำบ้ำพร้อมเหล็กออกไซด์ออกจากเตาเผา เติมน้ำละลายแก๊สออก กรองหลายครั้ง ๆ จนหมดคลอไรด์ อบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จึงสังเกตผลที่ได้

ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนใช้อุณหภูมิตี่ 510, 605, 720 และ 830 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และศึกษาลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่เตรียมขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

2.2.4 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์

ในการทดลองนี้ ทดลองใส่ลูกบอชเซรามิกเข้าไปด้วยเพื่อช่วยให้เกิดการกระจายของอากาศในของผสม ซังเฟอร์ริกคลอไรด์ 3 กรัม โซเดียมคลอไรด์ 3 กรัม และลูกบอชเซรามิก 5 กรัม ผสมในบ้ำ นำเข้าเตาเผา และผ่านแก๊สในโตรเจนเข้าเตาเผาที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นาน 20 นาที จึงให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส ปิดถังแก๊สในโตรเจน เผาต่อที่อุณหภูมินี้ นาน 1 ชั่วโมง ปิดเตาเผา ปล่อยให้เย็นลง จึงนำบ้ำพร้อมตัวอย่างออกจากเตาเผา ล้างด้วยน้ำกลั่นและกรองจนหมดแก๊สคลอไรด์ อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสและสังเกตผล

ทำการทดลองแบบเดียวกันนี้ แต่เปลี่ยนใช้โซเดียมคลอไรด์เป็น 4.5 และ 7.5 กรัม โดยลำดับ ตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้นำไปตรวจสอบลักษณะผลึกโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

2.2.5 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงเวลาในการเผา

ซังเฟอร์ริกคลอไรด์ 6 กรัม โซเดียมคลอไรด์ 6 กรัม และลูกบอชเซรามิก 10 กรัม ผสมกันบ้ำ นำเข้าเตาเผาและผ่านแก๊สในโตรเจนที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นาน 20 นาที จึงให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส ปิดถังแก๊สในโตรเจน เผาต่อที่

อุณหภูมิที่นาน 1 ชั่วโมง จึงปิดเตาเผาปล่อยให้เย็นลง นำเข้าออกจากเตาเผา เติมน้ำกลั่นละลายเกลือออกและกรองหลาย ๆ ครั้งจนหมดคลอรีน อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง และสังเกตผล

ทำการทดลองเช่นเดียวกันโดยเปลี่ยนเวลาเผาที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส เป็น 1.5 และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ หลังจากนั้นนำเหล็กออกไซด์ที่ได้ไปตรวจสอบลักษณะของอนุภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด

2.2.6 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านอากาศเข้าไปในเตาเผา

ชั่งเฟอร์ริกคลอไรด์ 6 กรัม โซเดียมคลอไรด์ 6 กรัม และลูกบอลเซรามิก 10 กรัม ผสมกันในบิวาใส่ในเตาเผา เปิดถังแก๊สไนโตรเจนให้ผ่านเข้าไปในเตาเผาที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นาน 20 นาที ให้ความร้อนจนได้อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส จึงเปิดถังอากาศเพื่อให้อากาศผ่านเข้าสู่เตาเผาที่ความดัน 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แล้วปิดถังแก๊สไนโตรเจน เมาของผสมในเบ้านานอีก 1 ชั่วโมง จึงปิดเตาเผาและถังอากาศ ปล่อยให้เตาเผาเย็นลง จึงนำบิวาออกจากเตาเผา เติมน้ำกลั่นลงไปละลายเกลือออก และกรองหลาย ๆ ครั้งจนหมดคลอรีน แล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมงและสังเกตผล

ทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้โดยเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้เป็น 720 องศาเซลเซียส และศึกษาลักษณะทางกายภาพของผงเหล็กออกไซด์ที่ได้โดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด

2.2.7 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านอากาศเข้าเตาเผาและเพิ่มเวลาเผา

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 2.2.6 โดยเปลี่ยนเวลาเผาที่อุณหภูมิ 830 และ 720 องศาเซลเซียส จาก 1 ชั่วโมงเป็น 1 ชั่วโมง 30 นาที และศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด

2.2.8 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์

นำตัวอย่างผงเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้ตามวิธีต่าง ๆ ข้างต้น มาวิเคราะห์หาเฟสที่เป็นส่วนประกอบโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ โดยใช้หลอดโคบอลต์ (Co tube) ตัวกรองเหล็ก (Fe filter) และกระทำการที่ 35 กิโลโวลต์ 25 มิลลิแอมป์ มุม 20 เริ่มจาก 10 ถึง 60

องศา ตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์มีจำนวนรวม 4 ตัวอย่าง เป็นเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (2.2.2) การทดลองโดยผ่านแก๊สในโตรเจนก่อนอุณหภูมิคงที่ (2.2.3) การทดลองโดยผ่านอากาศเข้าไปในเตาเผา (2.2.6) และการทดลองโดยผ่านอากาศเข้าเตาเผาและเพิ่มเวลาเผา (2.2.7) อย่างละ 1 ตัวอย่าง ซึ่งได้จากการทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียสทุกตัวอย่าง

2.8 ผลการทดลอง

2.8.1 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์เบื้องต้น

ตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการเผาเฟอร์ริกคลอไรด์กับโซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 360 และ 430 องศาเซลเซียส เมื่อนำไปวิเคราะห์หาเฟสที่เป็นส่วนประกอบโดยเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ พบว่ามีพีค (peak) ของฮีมาไทต์หรือสารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ที่ตำแหน่งค่า d เท่ากับ 2.70, 2.52 และ 1.69 โดยมีพีคแรกเป็นพีคที่สูงที่สุด ซึ่งแสดงว่าเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้มีสารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก และไม่มีพีคของวัตถุดิบตั้งต้นหลงเหลืออยู่

ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่มองเห็นด้วยตาเปล่าและจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงรวมทั้งจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 จากการทดลองพบว่า เหล็กออกไซด์ที่ได้จากการเผาเฟอร์ริกคลอไรด์ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 360 ถึง 430 องศาเซลเซียส เมื่อมองด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะเห็นเป็นจุดเล็กมีสีดำของอนุภาคที่เป็นเม็ดและอนุภาคที่มีขนาดเล็กละเอียด แต่ไม่เห็นผลึกสีแดงของเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบาง ส่วนที่อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 500 - 700 องศาเซลเซียสจะเห็นมีผลึกสีแดงเกิดขึ้นในปริมาณน้อยมาก โดยที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีปริมาณมากกว่าเล็กน้อย แต่ส่วนใหญ่จะเป็นจุดหรือเกล็ดสีดำของเม็ดและอนุภาคที่มีขนาดเล็กละเอียด จากการศึกษาภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดก็ให้ผลเช่นเดียวกัน ในที่นี้ไม่ได้แสดงภาพขยายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด แต่จะมีภาพแสดงไว้ในบททดลองต่อไป ซึ่งเป็นการทดลองในลักษณะเดียวกัน

นอกจากนี้จากการสังเกตสีของผงเหล็กออกไซด์ พบว่าผงสีที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่ำ มีสีน้ำตาลออกแดงและไม่มีเงาวาว ซึ่งแตกต่างจากเหล็กออกไซด์ซึ่งได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าที่มีสีเทาออกม่วงเล็กน้อยและมีเงาวาวบ้างเล็กน้อย

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองในเบื้องต้น

การทดลองที่	อุณหภูมิ °ซ	ลักษณะเหล็กออกไซด์	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง, X 150	ภาพจาก SEM X 500
1.1	360	ผงสีน้ำตาลออกแดง	จุดเล็กและใหญ่สีดำ ไม่มีผลึกสีแดง	อนุภาคเป็นเม็ดและละเอียดไม่มีแผ่นชั้นบาง
1.2	430	ผงสีม่วงออกเทา	จุดเล็กและใหญ่สีดำ ไม่มีผลึกสีแดง	อนุภาคเป็นเม็ดและละเอียดมีเกล็ดบาง 1 แผ่น
1.3	540	ผงสีเทาม่วง	จุดเล็กและใหญ่สีดำ มีผลึกสีแดงจำนวนเล็กน้อย	อนุภาคเป็นเม็ดและละเอียดมีเกล็ดบางจำนวนเล็กน้อย
1.4	605	ผงสีเทาม่วง มีเงาวาวเล็กน้อย	จุดเล็กและใหญ่สีดำ มีผลึกสีแดงจำนวนเล็กน้อย	อนุภาคเป็นเม็ดและละเอียดมีเกล็ดบางจำนวนเล็กน้อย
1.5	720	ผงสีเทาม่วง มีเงาวาวเล็กน้อย	จุดเล็กและใหญ่สีดำ มีผลึกสีแดงจำนวนมากขึ้น	อนุภาคเป็นเม็ดและละเอียดมีเกล็ดบางจำนวนมากขึ้น

สภาวะการทดลอง : อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์ริกคลอไรด์ : โซเดียมคลอไรด์, 1 : 1

อุณหภูมิสูงสุด, องศาเซลเซียส 360 430 540 605 และ 720

เวลาเผาที่อุณหภูมิสูงสุด, นาที 30

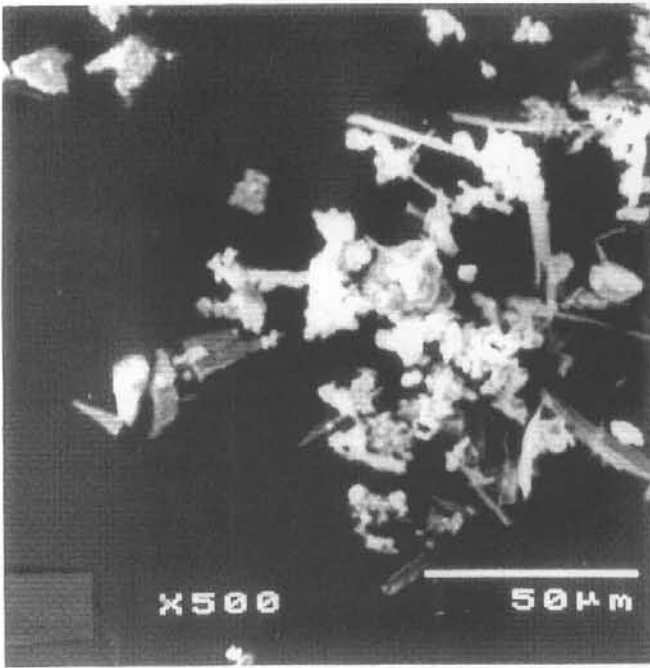
ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

การทดลองที่	อุณหภูมิ °ซ	ลักษณะเหล็กออกไซด์	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง, X 150	ภาพจาก SEM X 500
2.1	410	ผงสีม่วงเทา	จุดหรือเกล็ดสีดำ มีผลึกสีแดงจำนวนเล็กน้อยมาก	ส่วนใหญ่อนุภาคเป็นเม็ดและละเอียดมีเกล็ดบางจำนวนเล็กน้อย
2.2	510	ผงสีเทาม่วง	จุดหรือเกล็ดสีดำ มีผลึกสีแดงจำนวนเล็กน้อยมาก	ส่วนใหญ่อนุภาคเป็นเม็ดและละเอียดมีเกล็ดบางจำนวนเล็กน้อย
2.3	605	ผงสีเทาม่วง มีเงาวาวเล็กน้อย	จุดหรือเกล็ดสีดำ มีผลึกสีแดงจำนวนเล็กน้อย	-
2.4	720	ผงสีเทาม่วง มีเงาวาวเล็กน้อย	จุดหรือเกล็ดสีดำ มีผลึกสีแดงจำนวนเล็กน้อย	ส่วนใหญ่อนุภาคเป็นเม็ดและละเอียด มีเกล็ดบางจำนวนเล็กน้อย
2.5	830	ผงสีเทา มีเงาวาว	จุดหรือเกล็ดสีดำ มีผลึกสีแดงจำนวนมากขึ้น	ส่วนใหญ่อนุภาคเป็นเม็ดและละเอียด มีเกล็ดบางจำนวนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

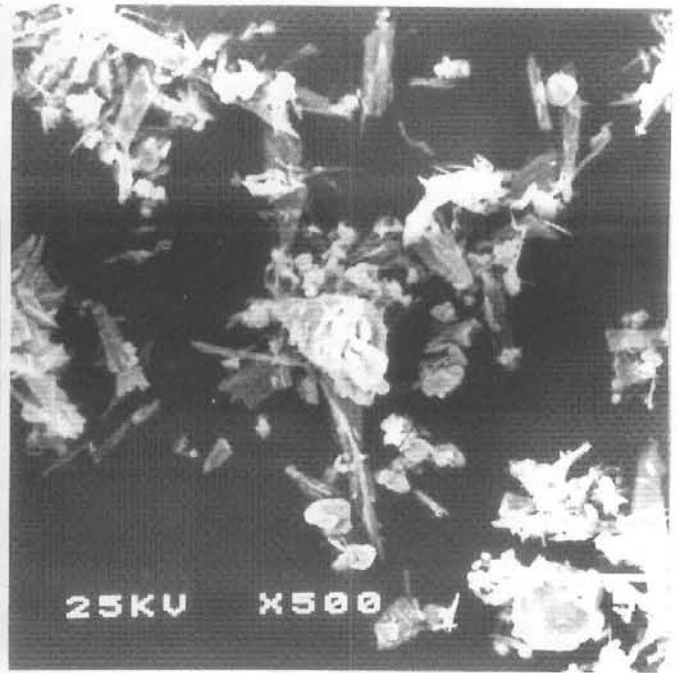
สภาวะการทดลอง : อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์ริกคลอไรด์ : โซเดียมคลอไรด์, 1 : 2

อุณหภูมิสูงสุด, องศาเซลเซียส 410 510 605 720 และ 830

เวลาเผาที่อุณหภูมิสูงสุด, ชั่วโมง 1



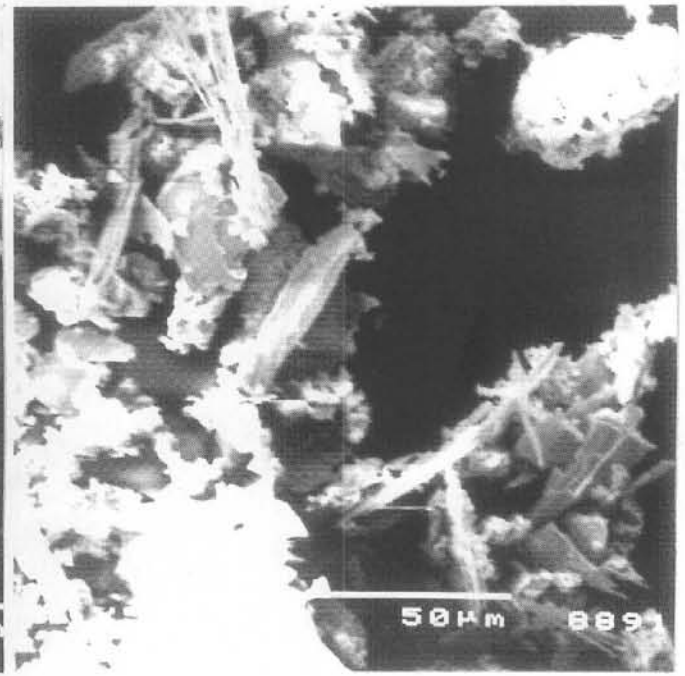
410° ซ.



510° ซ.



720° ซ.



830° ซ.

รูปที่ 8 ภาพจาก SEM ของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

2.3.2 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

การทดลองนี้ เป็นการทดลองในทำนองเดียวกับการทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ในเบื้องต้น โดยเพิ่มปริมาณเฟอร์ริกคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์และใช้เวลาผานานขึ้นด้วย นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้จะเริ่มจาก 410 องศาเซลเซียส และขยายไปจนถึงอุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 และ รูปที่ 3

จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เหล็กออกไซด์ที่ได้มีอนุภาคส่วนใหญ่เป็นเม็ดแดงและส่วนที่มีขนาดเล็กละเอียดและมีอนุภาคเป็นเกล็ดชั้นบางขนาดเล็กปนอยู่ด้วยในปริมาณน้อยมาก ส่วนที่อุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 500 - 830 องศาเซลเซียส จะพบอนุภาคที่เป็นเกล็ดชั้นบางเกิดขึ้นได้มากกว่าเล็กน้อย แต่ส่วนใหญ่ยังคงเป็นอนุภาคของเม็ดและส่วนละเอียดซึ่งอาจจะกระจายแยกกันหรือเกาะกันเป็นกลุ่ม ทั้งนี้ที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีอนุภาคชั้นบางเกิดขึ้นได้มากกว่าซึ่งสังเกตได้จากการที่มีผลึกสีแดงมากขึ้น เมื่อมองด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงหรือเห็นเกล็ดหรือแผ่นชั้นบางในปริมาณมากขึ้นในภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด นอกจากนี้จากการสังเกตสีของผงเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งมีอนุภาคชั้นบางเพิ่มขึ้นจะมีสีเทาและเป็นเงาวาวเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

2.3.3 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนอุณหภูมิคงที่

ตารางที่ 3 และรูปที่ 4 แสดงผลการทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีการผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในเตาเผาก่อนที่จะถึงอุณหภูมิคงที่ เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้ว จึงหยุดผ่านแก๊สไนโตรเจนเพื่อให้เกิดการออกซิเดชันของเฟอร์ริกคลอไรด์โดยอากาศภายในเตาเผาต่อไป จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 400 - 500 องศาเซลเซียส เหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง จะมีผลึกสีแดงซึ่งเป็นอนุภาคที่เป็นชั้นบางในปริมาณเล็กน้อยอยู่ปนกับส่วนใหญ่ที่เป็นอนุภาคของเม็ดและอนุภาคที่มีขนาดเล็กละเอียด ส่วนที่อุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 600 - 800 องศาเซลเซียส จะเห็นผลึกสีแดงในปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด นอกจากนี้เหล็กออกไซด์ที่ได้โดยวิธีนี้ยังมีอนุภาคชั้นบางที่มีขนาดใหญ่และมีปริมาณมากกว่าที่ได้จากการทดลองโดยไม่ผ่านแก๊สไนโตรเจนที่ผ่านมา เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันทุกอุณหภูมิ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนโดยสังเกตภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดเปรียบเทียบกัน

ตารางที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่าน N_2 ก่อนอุณหภูมิ
คงที่

การทดลองที่	อุณหภูมิ °ซ	ลักษณะเหล็กออกไซด์	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง, X 150	ภาพจาก SEM X 500
3.1	410	ผงสีเทาเข้ม มีเงาวาวเล็กน้อย	จุดหรือเกล็ดสีดำ มีผลึกสีแดงจำนวนมากเล็กน้อย	ส่วนใหญ่อนุภาคเป็นเม็ดและละเอียด มีเกล็ดบางจำนวนมากเล็กน้อย
3.2	510	ผงสีเทาเข้ม มีเงาวาวเล็กน้อย	จุดหรือเกล็ดสีดำ มีผลึกสีแดงจำนวนมากเล็กน้อย	ส่วนใหญ่อนุภาคเป็นเม็ดและละเอียด มีเกล็ดบาง จำนวนเล็กน้อย
3.3	605	ผงสีเทาเข้ม มีเงาวาวเล็กน้อย	จุดหรือเกล็ดสีดำ มีผลึกสีแดงจำนวนมากเล็กน้อย	-
3.4	720	ผงสีเทาเข้ม มีเงาวาว	มีผลึกสีแดงจำนวนมากขึ้น ปนกับจุดหรือเกล็ดสีดำ	เกล็ดบางมีจำนวนมากปนกับอนุภาคที่เป็นเม็ดและละเอียด
3.5	830	ผงสีเทา มีเงาวาว	ผลึกสีแดงมีจำนวนมากปน กับจุดหรือเกล็ดสีดำ	เกล็ดบางขนาดใหญ่มีจำนวนมากขึ้นปนกับอนุภาคที่เป็นเม็ดและละเอียด

สภาวะการทดลอง: อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์ริกคลอไรด์ : โซเดียมคลอไรด์, 1 : 2

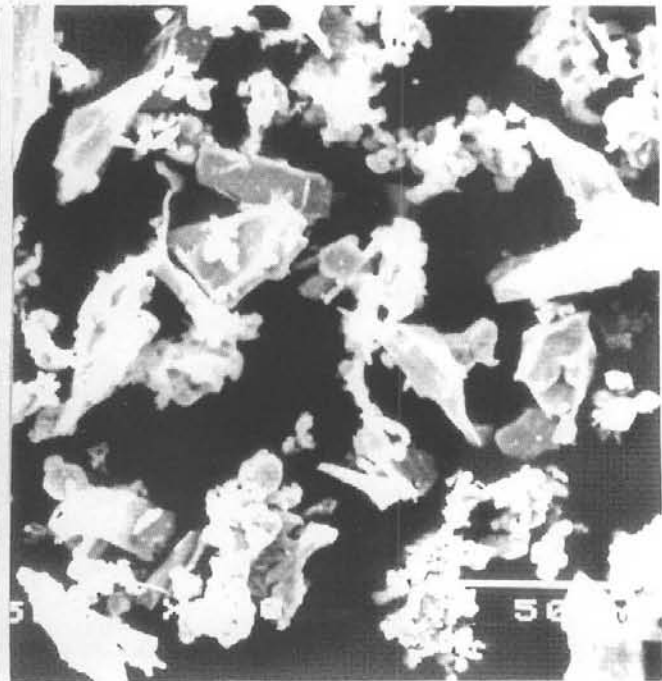
อุณหภูมิสูงสุด, องศาเซลเซียส 410 510 605 720 และ 830

เวลาเผาที่อุณหภูมิสูงสุด, ชั่วโมง 1

แก๊สในโตรเจน, ป้อนค่าต่อตารางนิ้ว 20



410° ซ.



510° ซ.



720° ซ.



830° ซ.

รูปที่ 4 ภาพจาก SEM ของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่าน N_2 ก่อนถึงอุณหภูมิคงที่

ตารางที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณ โซเดียมคลอไรด์

การทดลองที่	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} : \text{NaCl}$ g/g โดยน้ำหนัก	ลักษณะเหล็กออกไซด์	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง, X 150	ภาพจาก SEM X 500
4.1	3 : 3 (1 : 1)	ผงสีเทา มีเงาวาว	ผลึกสี่เหลี่ยมแบนกับจุดหรือเกล็ดสีดำ	อนุภาคชั้นบาง ส่วนใหญ่มีความกว้างไม่เกิน 17 ไมครอน ปนอยู่ กับอนุภาคของเม็ดและส่วนละเอียด
4.2	3 : 4.5 (1 : 1.5)	ผงสีเทา มีเงาวาว	ผลึกสี่เหลี่ยมแบนกับจุดหรือเกล็ดสีดำ	อนุภาคชั้นบาง ส่วนใหญ่มีความกว้างไม่เกิน 18 ไมครอน ปนอยู่ กับอนุภาคของเม็ดและส่วนละเอียด
4.3	3 : 7.5 (1 : 2.5)	ผงสีเทา มีเงาวาว	ผลึกสี่เหลี่ยมแบนกับจุดหรือเกล็ดสีดำ	อนุภาคชั้นบางมีความกว้างส่วนใหญ่ไม่เกิน 14 ไมครอน ปนอยู่ กับอนุภาคของเม็ดและส่วนละเอียด

สภาวะการทดลอง : อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์ริกคลอไรด์ : โซเดียมคลอไรด์, 1 : 1 1 : 1.5 และ 1 : 2.5

อุณหภูมิสูงสุด, องศาเซลเซียส 830

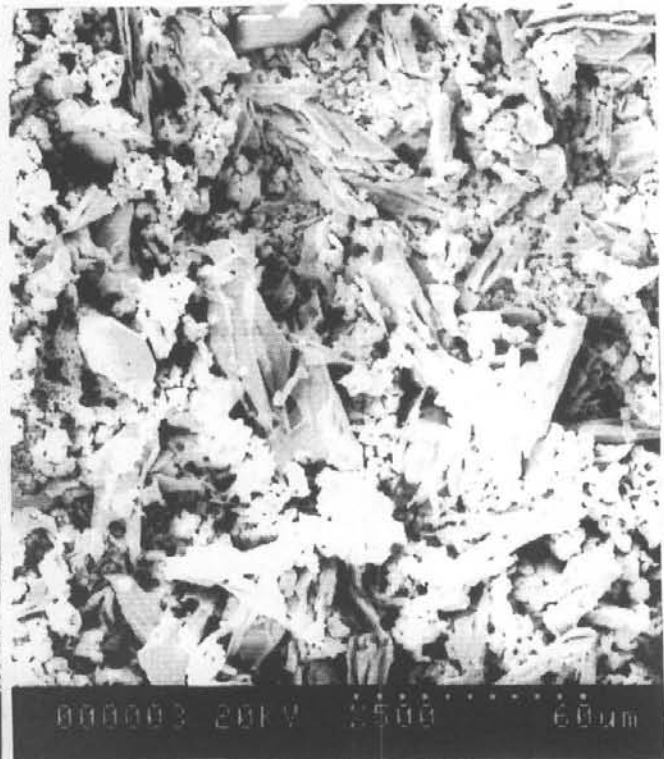
เวลาเผาที่อุณหภูมิสูงสุด, ชั่วโมง 1

แก๊สไนโตรเจน, ป้อนต่อตารางนิ้ว 20

ลูกบอลเซรามิก, กรัม 5



(4.1)



(4.2)



(4.3)

รูปที่ 5 ภาพจาก SEM ของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์

อัตราส่วน $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} : \text{NaCl}$; (4.1) 1:1, (4.2) 1:1.5, (4.3) 1:2.5 โดยน้ำหนัก

2.3.4 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์

การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์จากเฟอร์ริกคลอไรด์ด้วยการเผากับโซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส เมื่อมีการเติมแก๊สไนโตรเจนก่อนที่จะถึงอุณหภูมิคงที่ โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์ ได้แสดงผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4 และรูปที่ 5 จากการทดลองพบว่า การใช้โซเดียมคลอไรด์ในปริมาณส่วนเกินเมื่อเปรียบเทียบกับเฟอร์ริกคลอไรด์ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อโซเดียมคลอไรด์เป็น 1 : 1, 1 : 1.5 และ 1 : 2.5 ตามลำดับ จะได้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นชั้นบางที่มีลักษณะรูปร่างและปริมาณใกล้เคียงกันโดยประมาณ ซึ่งสังเกตได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยมีปริมาณอนุภาคส่วนที่เป็นเม็ดปนอยู่มากเช่นกัน แต่ขนาดอนุภาคชั้นบางที่ได้จะแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย กล่าวคือ เมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ในปริมาณมากขึ้น ในอัตราส่วนเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อโซเดียมคลอไรด์เป็น 1 : 2.5 อนุภาคชั้นบางของเหล็กออกไซด์ที่ได้ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กกว่าที่ได้จากเมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์น้อยกว่าในอัตราส่วน 1 : 1 และ 1 : 1.5 ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

2.3.5 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงเวลาในการเผา

ผลการทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียสและผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนถึงอุณหภูมิคงที่โดยเปลี่ยนแปลงเวลาเผา ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 และรูปที่ 6 จากการทดลองพบว่า การเผาของผสมของเฟอร์ริกคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ดังกล่าวในช่วงเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง จะได้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นชั้นบางเกิดขึ้นโดยมีลักษณะและปริมาณที่ใกล้เคียงกัน เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นชั้นบางเกิดขึ้นได้ในปริมาณมาก และอยู่ปนกับอนุภาคที่เป็นเม็ดและอนุภาคที่มีขนาดเล็กละเอียด

2.3.6 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านอากาศเข้าไปในเตาเผา

การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์จากเฟอร์ริกคลอไรด์ โดยมีการผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนถึงอุณหภูมิคงที่แล้วจึงพ่นอากาศเข้าไปในเตาเผา ได้แสดงผลการทดลองโดยสรุปไว้ในตารางที่ 6 และรูปที่ 7 จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิสูง 830 องศาเซลเซียส เหล็กออกไซด์ที่ได้มีอนุภาคที่เป็นชั้นบางมีขนาดใหญ่และมีปริมาณมากกว่าส่วนที่เป็นเม็ดและส่วนที่มีขนาดเล็กละเอียดอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยดูได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด เหล็กออกไซด์ที่ได้นี้มีปริมาณอนุภาคชั้นบางในสัดส่วนที่

ตารางที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงเวลาเผา

การทดลองที่	เวลาเผา (ชั่วโมง)	ลักษณะเหล็กออกไซด์	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง, X 150	ภาพจาก SEM X 500
5.1	1	ผงสีเทา มีเงาวาว	ผลึกสีแดงปนกับจุดหรือเกล็ดสีดำ	อนุภาคชั้นบางส่วนใหญ่มีความกว้างไม่เกิน 29 ไมครอนหนาประมาณ 1 - 2 ไมครอน ปนอยู่กับอนุภาคของเม็ดและส่วนละเอียด
5.2	1.5	ผงสีเทา มีเงาวาว	ผลึกสีแดงปนกับจุดหรือเกล็ดสีดำ	อนุภาคชั้นบางส่วนใหญ่มีความกว้างไม่เกิน 27 ไมครอนปนอยู่กับอนุภาคของเม็ดและส่วนละเอียด
5.3	2	ผงสีเทา มีเงาวาว	ผลึกสีแดงปนกับจุดหรือเกล็ดสีดำ	อนุภาคชั้นบางส่วนใหญ่มีความกว้างไม่เกิน 25 ไมครอนปนอยู่กับอนุภาคของเม็ดและส่วนละเอียด

สภาวะการทดลอง : อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์ริกคลอไรด์ : โซเดียมคลอไรด์, 1 : 1

อุณหภูมิสูงสุด, องศาเซลเซียส 830

เวลาเผาที่อุณหภูมิสูงสุด, ชั่วโมง 1 1.5 และ 2

แก๊สไนโตรเจน, ป้อนคําคอตารางนี้ 20

ลูกบอลเซรามิก, กรัม 10

2.3.4 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์

การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์จากเฟอร์ริกคลอไรด์ด้วยการเผากับโซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส เมื่อมีการเติมแก๊สไนโตรเจนก่อนที่จะถึงอุณหภูมิกงที่ โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์ ได้แสดงผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4 และรูปที่ 5 จากการทดลองพบว่า การใช้โซเดียมคลอไรด์ในปริมาณส่วนเกินเมื่อเปรียบเทียบกับเฟอร์ริกคลอไรด์ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อโซเดียมคลอไรด์เป็น 1 : 1, 1 : 1.5 และ 1 : 2.5 ตามลำดับ จะได้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นชั้นบางที่มีลักษณะรูปร่างและปริมาณใกล้เคียงกัน โดยประมาณ ซึ่งสังเกตได้จากภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด โดยมีปริมาณอนุภาคส่วนที่เป็นเม็ดปนอยู่มากเช่นกัน แต่ขนาดอนุภาคชั้นบางที่ได้จะแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย กล่าวคือ เมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ในปริมาณมากขึ้น ในอัตราส่วนเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อโซเดียมคลอไรด์เป็น 1 : 2.5 อนุภาคชั้นบางของเหล็กออกไซด์ที่ได้ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กกว่าที่ได้จากเมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์น้อยกว่าในอัตราส่วน 1 : 1 และ 1 : 1.5 ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตได้จากภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

2.3.5 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงเวลาในการเผา

ผลการทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียสและผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนถึงอุณหภูมิกงที่โดยเปลี่ยนแปลงเวลาเผา ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 และรูปที่ 6 จากการทดลองพบว่า การเผาของผสมของเฟอร์ริกคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์ดังกล่าวในช่วงเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง จะได้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นชั้นบางเกิดขึ้น โดยมีลักษณะและปริมาณที่ใกล้เคียงกัน เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นชั้นบางเกิดขึ้นได้ในปริมาณมาก และอยู่ปนกับอนุภาคที่เป็นเม็ดและอนุภาคที่มีขนาดเล็กละเอียด

2.3.6 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านอากาศเข้าไปในเตาเผา

การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์จากเฟอร์ริกคลอไรด์ โดยมีการผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนถึงอุณหภูมิกงที่แล้วจึงพ่นอากาศเข้าไปในเตาเผา ได้แสดงผลการทดลองโดยสรุปไว้ในตารางที่ 6 และรูปที่ 7 จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิสูง 830 องศาเซลเซียส เหล็กออกไซด์ที่ได้มีอนุภาคที่เป็นชั้นบางมีขนาดใหญ่และมีปริมาณมากกว่าส่วนที่เป็นเม็ดและส่วนที่มีขนาดเล็กละเอียดอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยดูได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด เหล็กออกไซด์ที่ได้นี้มีปริมาณอนุภาคชั้นบางในสัดส่วนที่

ตารางที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงเวลาเผา

การทดลองที่	เวลาเผา (ชั่วโมง)	ลักษณะเหล็กออกไซด์	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง, X 150	ภาพจาก SEM X 500
5.1	1	ผงสีเทา มีเงาวาว	ผลึกสี่แฉงปนกับจุดหรือเกล็ดสีดำ	อนุภาคชั้นบางส่วนใหญ่มีความกว้างไม่เกิน 29 ไมครอนหนาประมาณ 1 - 2 ไมครอน ปนอยู่กับอนุภาคของเม็ดและส่วนละเอียด
5.2	1.5	ผงสีเทา มีเงาวาว	ผลึกสี่แฉงปนกับจุดหรือเกล็ดสีดำ	อนุภาคชั้นบางส่วนใหญ่มีความกว้างไม่เกิน 27 ไมครอนปนอยู่กับอนุภาคของเม็ดและส่วนละเอียด
5.3	2	ผงสีเทา มีเงาวาว	ผลึกสี่แฉงปนกับจุดหรือเกล็ดสีดำ	อนุภาคชั้นบางส่วนใหญ่มีความกว้างไม่เกิน 25 ไมครอนปนอยู่กับอนุภาคของเม็ดและส่วนละเอียด

สภาวะการทดลอง : อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์ริกกลอไรด์ : โซเดียมคลอไรด์, 1 : 1

อุณหภูมิสูงสุด, องศาเซลเซียส 830

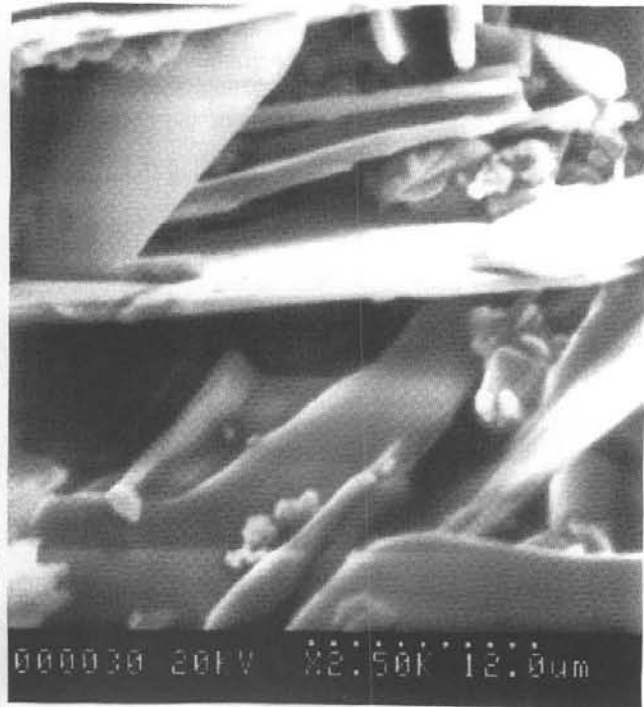
เวลาเผาที่อุณหภูมิสูงสุด, ชั่วโมง 1 1.5 และ 2

แก๊สในโครเจน, ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 20

ลูกบอลเซรามิก, กรัม 10



(5.1) a



(5.1) b



(5.2)



(5.3)

รูปที่ 6 ภาพจาก SEM ของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงเวลาเผา

เวลาเผา (5.1) 1 ชั่วโมง, (5.2) 1.5 ชั่วโมง, (5.3) 2 ชั่วโมง

ภาพ (5.1) b ที่กำลังขยาย 2500 เท่า แสดงความหนาของอนุภาคชั้นบาง

ตารางที่ 6 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลอง โดยผ่านอากาศเข้าเตาเผา

การทดลองที่	อุณหภูมิ °ซ	ลักษณะเหล็กออกไซด์	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง, X 150	ภาพจาก SEM X 500
6.1	830	ผงสีเทา มีเงาวาว ชัดเจน	ผลึกสีแดงเป็นส่วนใหญ่จุดเล็กสีดำมีจำนวนเล็กน้อย	อนุภาคเป็นเกล็ดชั้นบางมีหลายขนาดและรูปร่าง มีความกว้างได้ ถึง 48 ไมครอน แต่ส่วนใหญ่ไม่เกิน 28 ไมครอน และหนาประมาณ 2 - 4 ไมครอน นอกจากนี้เป็นเม็ดและส่วนละเอียดมีจำนวนเล็กน้อย
6.2	720	ผงสีเทา มีเงาวาว	ผลึกสีแดงปนกับจุดเล็ก ๆ สีดำ	อนุภาคชั้นบาง มีความกว้างไม่เกิน 24 ไมครอน ปนกับอนุภาคเม็ดและส่วนละเอียด

สภาวะการทดลอง : อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์ริกคลอไรด์ : โซเดียมคลอไรด์, 1 : 1

อุณหภูมิสูงสุด, องศาเซลเซียส 720 และ 830

เวลาเผาที่อุณหภูมิสูงสุด, ชั่วโมง 1

แก๊สในโครเจน, ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 20

อากาศ, ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 20

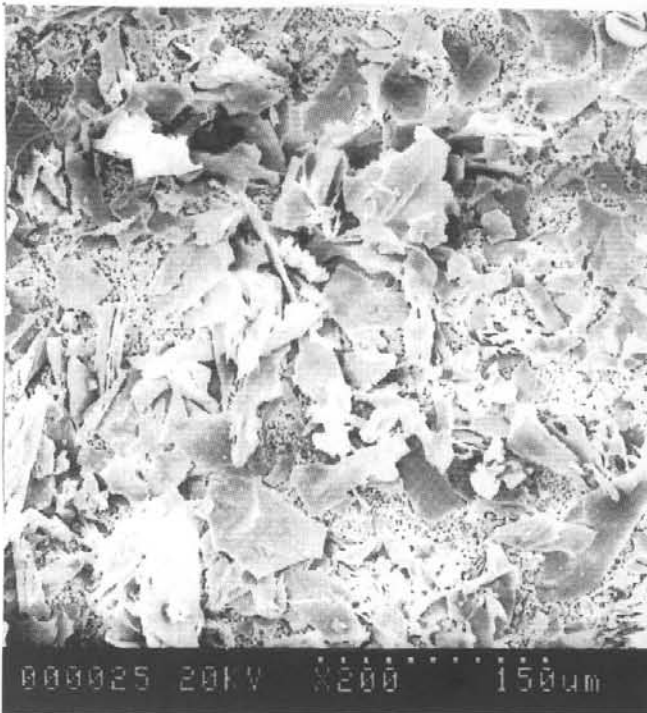
ลูกบอลเซรามิก, กรัม 10



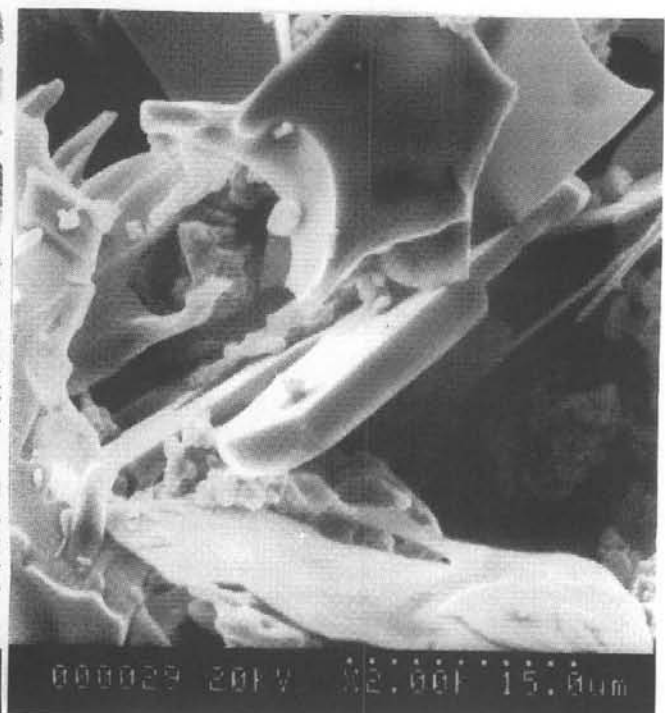
830° ซ.



720° ซ.



830° ซ.



830° ซ.

รูปที่ 7 ภาพจาก SEM ของเปลือกออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านอากาศเข้าเตาเผา

ภาพ 830° ซ., x 2.00 K (2000 เท่า) แสดงความหนาของอนุภาคชั้นบาง

สูงมากกว่าเหล็กออกไซด์ซึ่งได้จากการทดลองที่ผ่านแก๊สไนโตรเจนเพียงอย่างเดียวโดยไม่พ่นอากาศเข้าไปในเตาเผาด้วย ในกรณีเผาที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่มีการเติมอากาศเข้าไปในเตาเผาทำให้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นชั้นบางในปริมาณมากกว่า เมื่อไม่มีการเติมอากาศ ทั้งนี้สามารถสังเกตได้ชัดเจนโดยเปรียบเทียบ ภาพขยายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่ทุกระดับของอุณหภูมิการเผาเดียวกัน การเติมอากาศเข้าไปในเตาเผามีผลต่อการเพิ่มปริมาณและขนาดของเหล็กออกไซด์ชั้นบาง ภาพขยายรูปที่ 7 (830 และ 720 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับภาพขยายรูปที่ 6, 5.1 (830 องศาเซลเซียส) และรูปที่ 4 (720 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้เหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยมีการเพิ่มอากาศนี้ที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส จะให้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคชั้นบางในปริมาณมากกว่าที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 7 ลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านอากาศและเพิ่มเวลาเผา

การทดลองที่	อุณหภูมิ °ซ	ลักษณะเหล็กออกไซด์	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง, X 150	ภาพจาก SEM X 500
7.1	830	ผงสีเทา มีเงาวาวชัดเจน	ผลึกสีแดงเป็นส่วนใหญ่ จุดเล็กสีดำมีจำนวนเล็กน้อย	อนุภาคชั้นบางมีความกว้างไม่เกิน 32 ไมครอน และมีอนุภาคเม็ดและส่วนละเอียดปนอยู่เพียงเล็กน้อย
7.2	720	ผงสีเทา มีเงาวาว	ผลึกสีแดงเป็นส่วนใหญ่ จุดเล็กสีดำมีจำนวนเล็กน้อย	อนุภาคชั้นบางมีความกว้างไม่เกิน 28 ไมครอน และมีอนุภาคเม็ดและส่วนละเอียดปนเล็กน้อย

สภาวะการทดลอง : อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเฟอร์ริกคลอไรด์ : โซเดียมคลอไรด์, 1 : 1

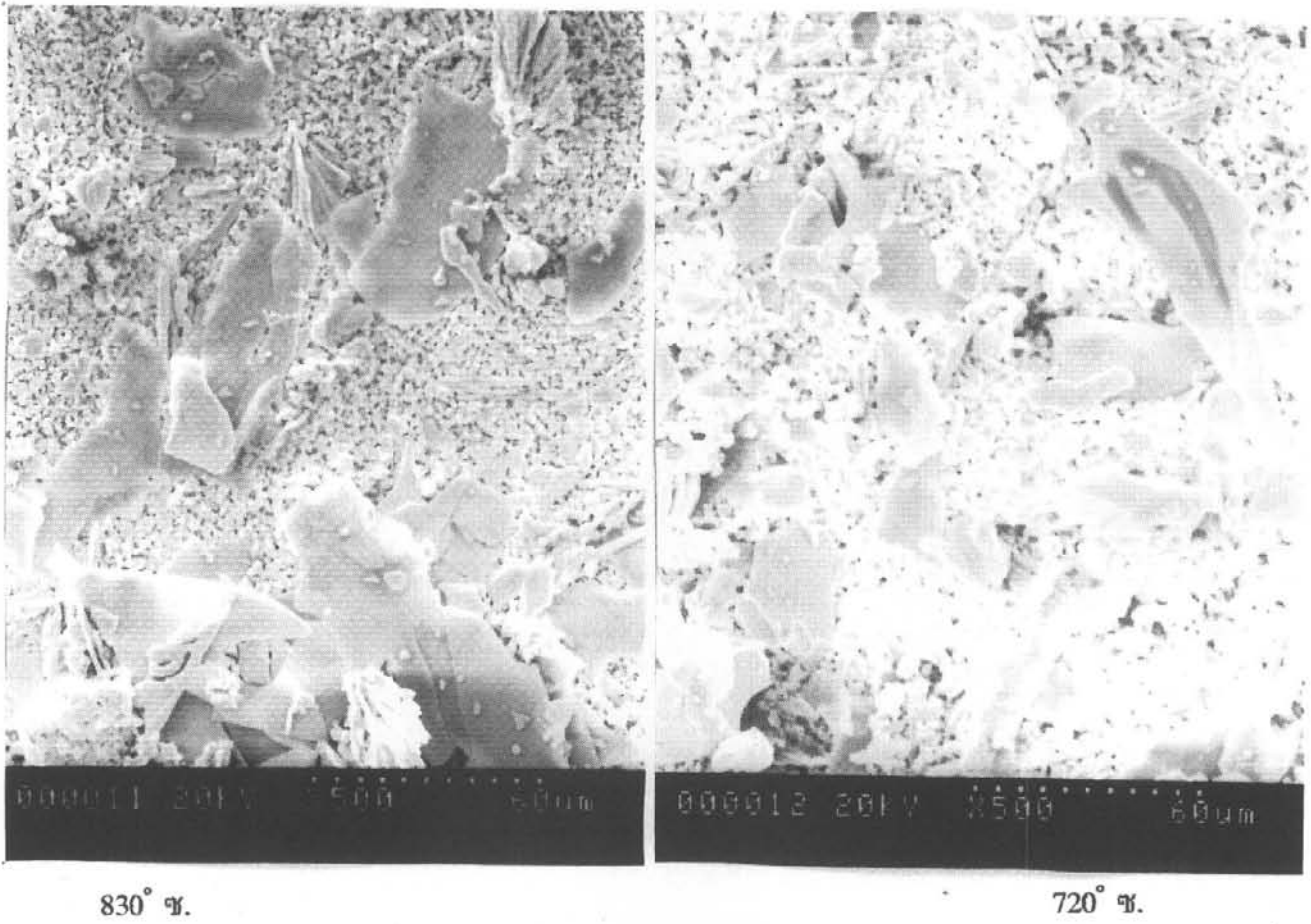
อุณหภูมิสูงสุด, องศาเซลเซียส 720 และ 830

เวลาเผาที่อุณหภูมิสูงสุด, ชั่วโมง 1.5

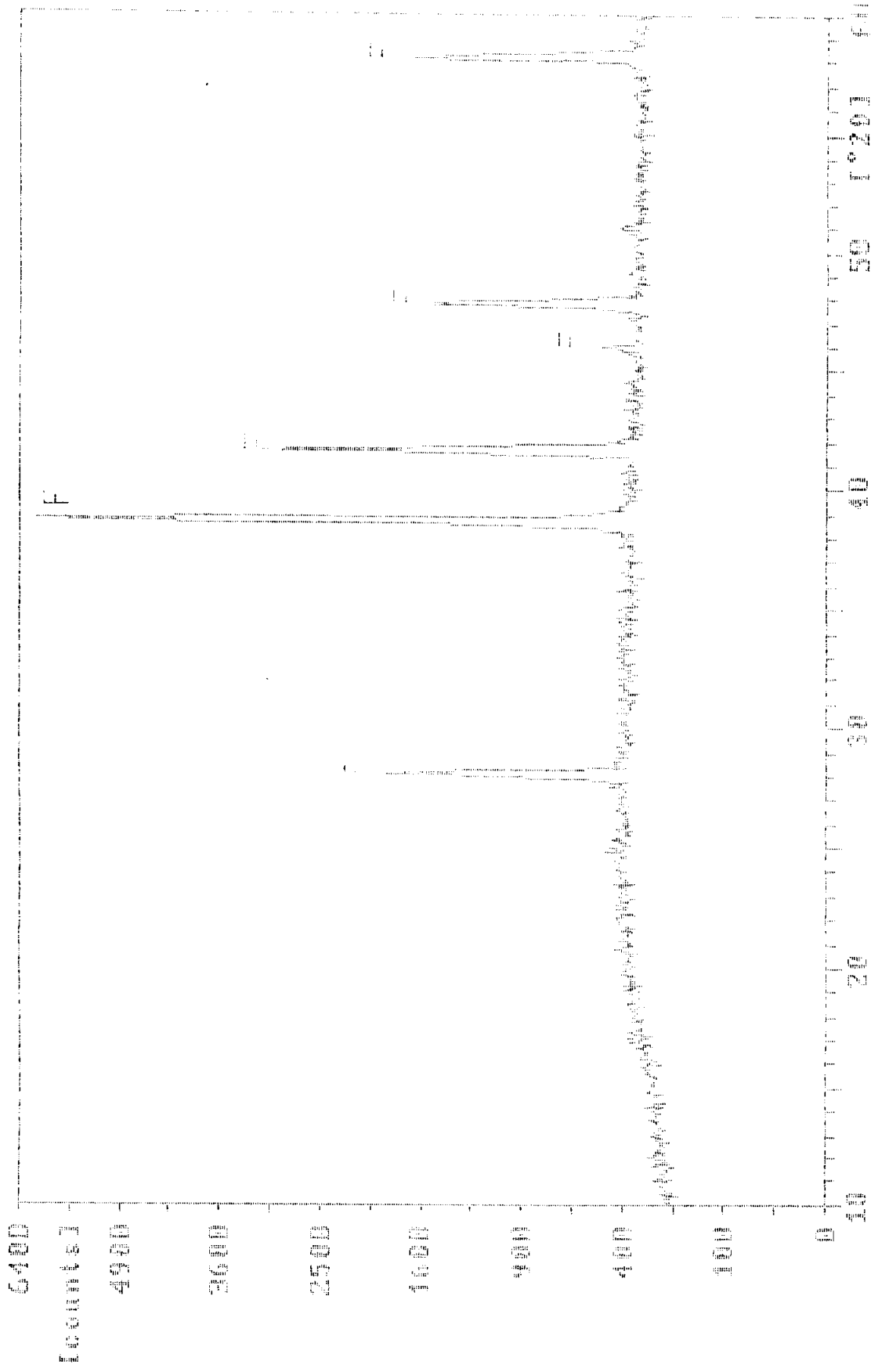
แก๊สไนโตรเจน, ป้อนต่อตารางนิ้ว 20

อากาศ, ป้อนต่อตารางนิ้ว 20

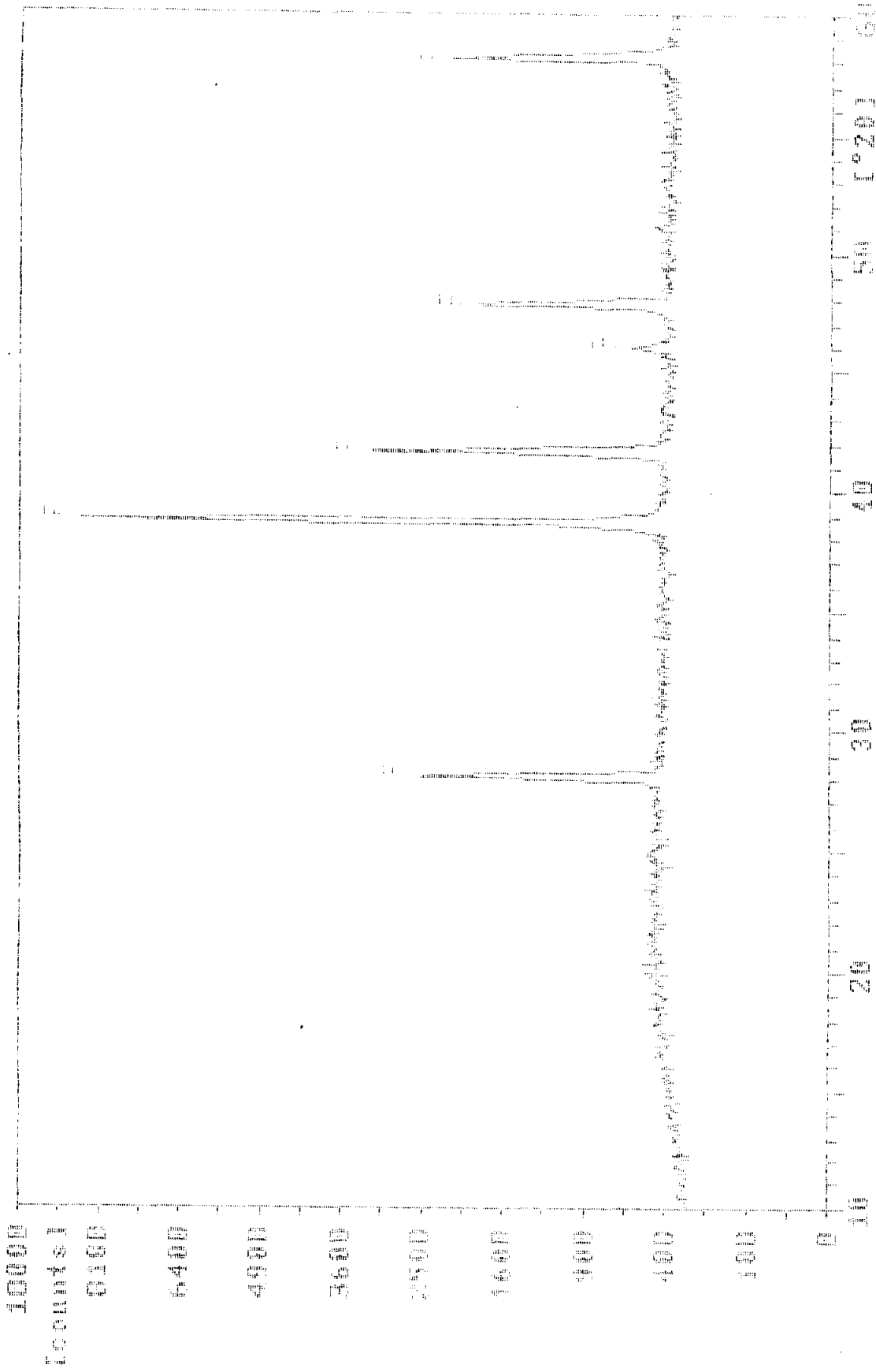
สุกานอลเซรามิก, กรัม 10



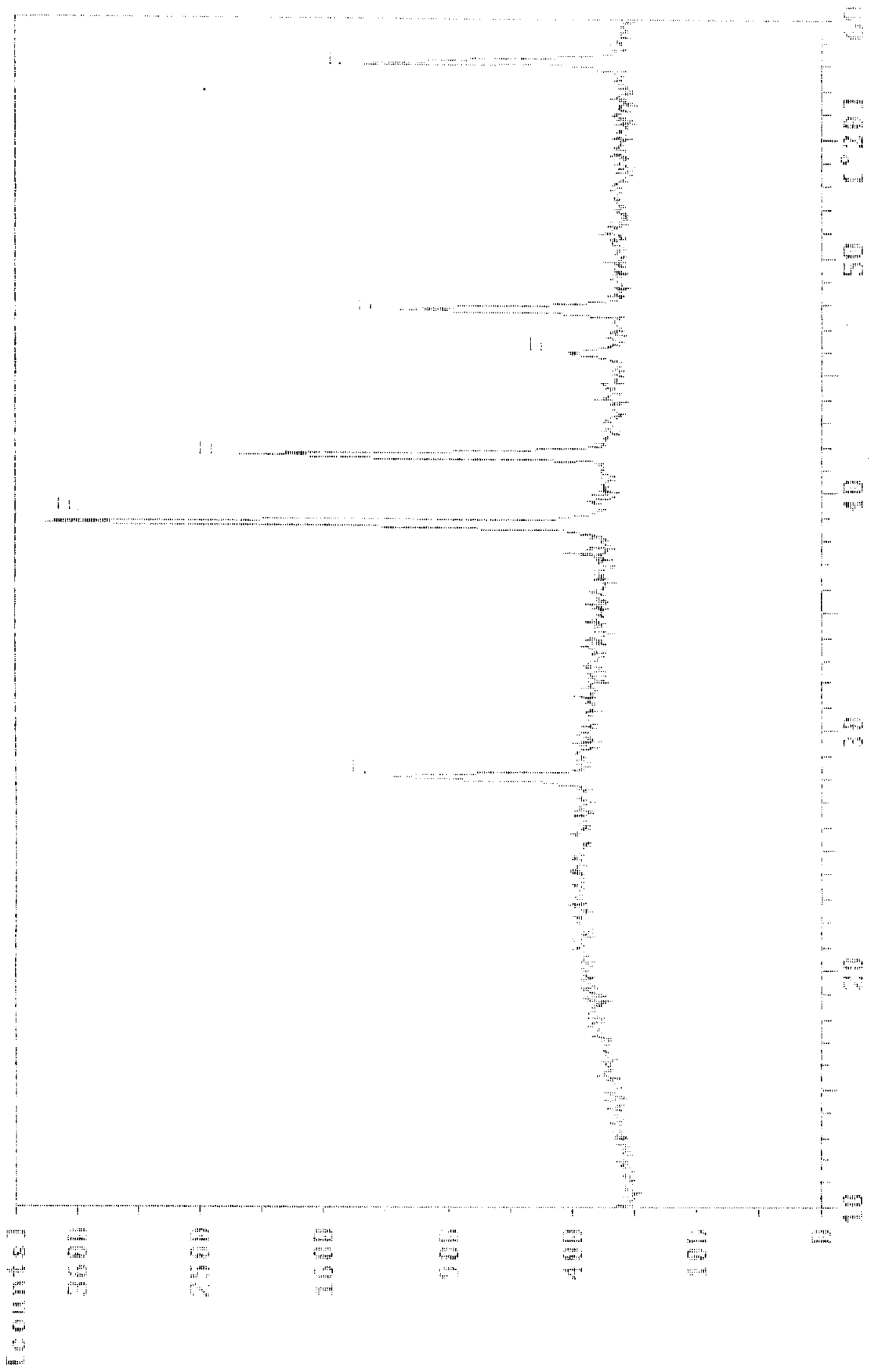
รูปที่ 8 ภาพจาก SEM ของเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านอากาศเข้าเตาเผาและเพิ่มเวลาเผา
เวลาเผา 1 ชั่วโมง 30 นาที



รูปที่ 9 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ. ในที่นี้ 830 องศาเซลเซียส
 F = สารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)

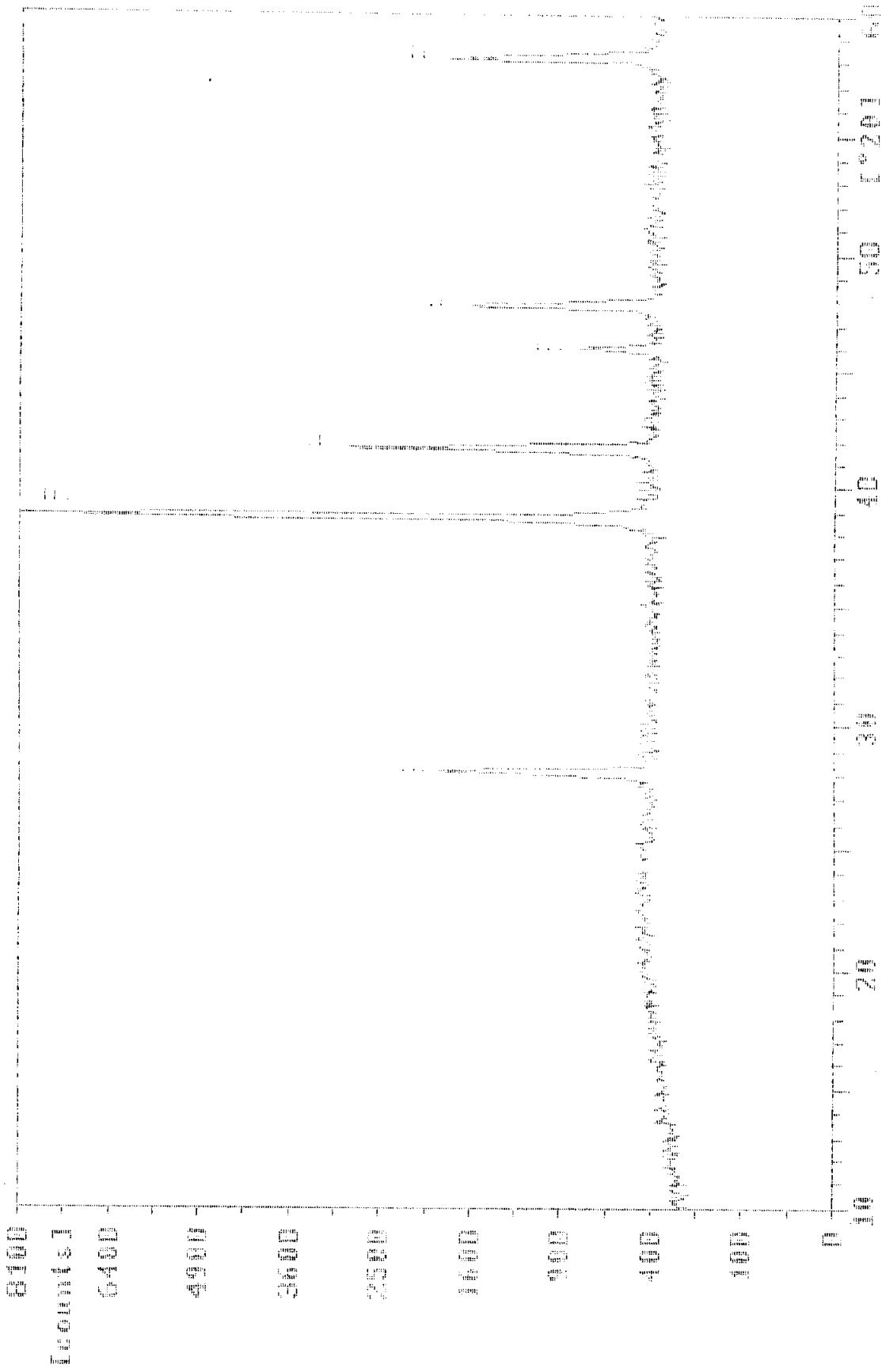


รูปที่ 10 แผนภาพการเชื่อมโยงของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนอุณหภูมิคงที่, ที่ 830 องศาเซลเซียส
 F = ตารางคอมพอย์ร็อกไซด์ (Fe₂O₃)



รูปที่ 11 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านอากาศเข้าไปในเตาเผา, ที่ 830 องศาเซลเซียส

F = สารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)



รูปที่ 12 แผนภาพการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองโดยผ่านอากาศเข้าเตาเผาและเพิ่มเวลาเผา

อุณหภูมิที่ใช้ 830 องศาเซลเซียส, เวลาเผา 1 ชั่วโมง 30 นาที

F = สารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)

2.3.7 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านอากาศเข้าเตาเผาและเพิ่มเวลาเผา

ตารางที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงผลการทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์จากเฟอร์ริกคลอไรด์ โดยผ่านอากาศเข้าเตาเผาหลังจากอุณหภูมิคงที่และหยุดผ่านแก๊สในโตรเจนแล้วและเพิ่มเวลาเผา เป็น 1 ชั่วโมง 30 นาที จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียสจะได้เหล็กออกไซด์ ที่มีลักษณะอนุภาคเป็นชั้นบางคล้ายกับที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่ใช้เวลาเผานาน 1 ชั่วโมง (รูปที่ 7) และยังพบว่าปริมาณผลึกชั้นบางเป็นจำนวนมากเช่นเดียวกัน ส่วนที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียสเมื่อเวลาเผานาน 1 ชั่วโมง 30 นาที จะให้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคชั้นบางมี ขนาดใหญ่ และปริมาณมากกว่าเมื่อใช้เวลาเผาเพียง 1 ชั่วโมง

2.3.8 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้โดยเครื่อง เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์

แผนภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเหล็กออกไซด์โดยเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ แสดงไว้ในรูปที่ 9 - 12 ซึ่งเป็นแผนภาพจากการวิเคราะห์ตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้จากการ ทดลองเตรียมที่อุณหภูมิต่าง ๆ การทดลองโดยผ่านแก๊สในโตรเจนก่อนถึงอุณหภูมิกงที่ การ ทดลองโดยผ่านอากาศเข้าไปในเตาเผาและการทดลองโดยผ่านอากาศเข้าเตาเผาและเพิ่มเวลาเผา ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่าทุกตัวอย่างให้พีค ปรากฏที่ตำแหน่ง ค่า d เท่ากับ 2.70 และ 2.52 ซึ่งเป็นพีคที่สูงสุดและรองลงมาตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีพีคอื่นที่เกิดขึ้นด้วยซึ่งล้วนเป็น พีคของสารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แสดงว่าเหล็กออกไซด์ที่ได้ทุกตัวอย่างมีสาร ประกอบเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก

บทที่ 3

วิจารณ์ผลและสรุปผลการทดลอง

3.1 วิจารณ์ผล

3.1.1 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ในเบื้องต้น

จากการพิจารณาลักษณะทางกายภาพของเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้จากการทดลองในเบื้องต้น โดยเผาเฟอร์ริกคลอไรด์กับโซเดียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 360 - 370 องศาเซลเซียส จึงเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิสูงมีแนวโน้มจะเกิดเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และเหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นเม็ดและมีส่วนละเอียดเป็นจำนวนมาก จะให้สีออกน้ำตาลแดงและไม่เป็นเงาวาว ในขณะที่เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นแผ่นหรือเกล็ดชั้นบางในปริมาณเพิ่มขึ้นจะเห็นเป็นสีเทาและมีเงาวาวมากขึ้น

3.1.2 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันนี้ ให้ผลการทดลองที่แสดงว่าเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และสีของผงเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งมีอนุภาคชั้นบางเพิ่มขึ้นก็มีสีเทาและเป็นเงาวาวเพิ่มมากขึ้น จึงสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ในเบื้องต้น อย่างไรก็ตามเหล็กออกไซด์ที่ได้นี้ยังไม่อาจจัดเป็นเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบาง เนื่องจากมีอนุภาคที่เป็นชั้นบางปนอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

3.1.3 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนอุณหภูมิคงที่

การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนถึงอุณหภูมิคงที่ได้แสดงผลการทดลองที่ยืนยันว่าเหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นชั้นบาง เกิดที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า และยังพบว่าเหล็กออกไซด์ที่ได้มีอนุภาคชั้นบางขนาดใหญ่ และมีปริมาณมากกว่าที่ได้จากการทดลองโดยไม่ผ่านแก๊สไนโตรเจนที่ผ่านมา ณ ที่ทุกระดับของอุณหภูมิการเผาเดียวกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนถึงอุณหภูมิคงที่จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการออกซิเดชันของเฟอร์ริกคลอไรด์ก่อนที่จะถึงอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อให้การออกซิเดชันเกิดขึ้นที่อุณหภูมิค่อนข้างคงที่ แต่การทดลองที่ผ่านมา ซึ่งไม่มีการเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในเตาเผา ก่อนถึงอุณหภูมิคงที่ การออกซิเดชันของเฟอร์ริกคลอไรด์สามารถเกิดขึ้นได้ก่อนอุณหภูมิที่

ต้องการ และการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำมักจะให้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นเม็ดหรืออนุภาคที่มีขนาดเล็กละเอียด ดังนั้น ถ้าไม่ผ่านแก๊สไนโตรเจน จึงทำให้ได้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคส่วนใหญ่เป็นเม็ดและส่วนละเอียดในขณะที่เกิดอนุภาคชั้นบางเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

อย่างไรก็ตามถึงแม้การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยมีการผ่านแก๊สไนโตรเจนด้วย นี้จะให้อนุภาคชั้นบางของเหล็กออกไซด์ในปริมาณมากขึ้นก็ตาม แต่ยังมีอนุภาคที่เป็นเม็ดและส่วนที่มีขนาดเล็กละเอียดปนอยู่มาก ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองต่อไปเพื่อให้เหล็กออกไซด์ที่ได้มีปริมาณเกล็ดชั้นบางสูงขึ้น และส่วนที่เป็นเม็ดหรือที่มีขนาดเล็กละเอียดให้มีปริมาณลดน้อยลง

3.1.4 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์

จากการทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้พบว่า มีผลต่อขนาดของอนุภาคชั้นบางของเหล็กออกไซด์ที่ได้ จึงอาจใช้ในการควบคุมขนาดของเหล็กออกไซด์ที่ต้องการได้ อัตราส่วนของเฟอร์ริกคลอไรด์ และโซเดียมคลอไรด์ เท่ากับ 1 : 1 และ 1 : 1.5 ตามลำดับเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม ในการเตรียมเหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคชั้นบางและมีขนาดใหญ่ โซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ร่วมในปฏิกิริยามีหน้าที่โดยตรงคือช่วยลดการกลายเป็นไอของเฟอร์ริกคลอไรด์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300°C ^(3,4) โดยโซเดียมคลอไรด์จะเกิดปฏิกิริยากับเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารประกอบเชิงซ้อน, NaFeCl_4 ⁽⁵⁾ ซึ่งจะหลอมเหลวและถูกออกซิไดส์โดยออกซิเจนในอากาศได้เหล็กออกไซด์ตามต้องการ ส่วนการเติม ลูกบอลเซรามิกลงไปในของผสมของเฟอร์ริกคลอไรด์และโซเดียมคลอไรด์พบว่าสามารถช่วยให้เกิดการกระจายอากาศในของผสมได้ดีขึ้น เนื่องจากของผสมจะมีความหนืดสูงมาก เมื่อถูกออกซิไดส์และเกิดเฟอร์ริกออกไซด์มากขึ้น ทำให้อากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ไม่ทั่วถึง เมื่อมีลูกบอลอยู่ด้วยจะทำให้ของผสมที่หลอมเหลว เกาะเคลือบอยู่ตามผิวของลูกบอล ซึ่งช่วยให้อากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาได้อย่างทั่วถึงมากกว่าเดิม

3.1.5 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยเปลี่ยนแปลงเวลาในการเผา

ในการทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส และผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนถึงอุณหภูมิคงที่โดยเปลี่ยนแปลงเวลาเผา ได้ใช้สารตั้งต้นเป็นเฟอร์ริกคลอไรด์ในปริมาณ 6 กรัม และโซเดียมคลอไรด์ 6 กรัม (อัตราส่วน เป็น 1 : 1) เมื่อใช้เวลาเผา 1 ถึง 2 ชั่วโมงแล้วให้ผลไม่แตกต่างกันนัก แสดงว่าใช้เวลาเผาเพียง 1 ชั่วโมงก็เพียงพอ การใช้เวลาเผาน้อยไปจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ซึ่งสังเกตได้ในเวลากรองจะเห็นสารละลายมีสีเหลืองของเฟอร์ริกคลอไรด์

3.1.6 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านอากาศเข้าไปในเตาเผา

การเตรียมเหล็กออกไซด์ โดยมีการเติมอากาศลงไปในช่วงการเผา มีผลต่อการเพิ่มปริมาณและขนาดอนุภาคของเหล็กชั้นบางที่ได้มีการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างตารางที่ 4 และ 6 ที่ระดับอุณหภูมิการเผา 830 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเป็นเพราะถ้าไม่เติมอากาศ การเกิดออกซิเดชันของเฟอร์ริกคลอไรด์ จะต้องใช้อากาศภายในเตาเผาเท่านั้น การเกิดปฏิกิริยา จึงไม่ดีพอเป็นผลให้ได้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นเม็ดและอื่น ๆ ปนอยู่ในปริมาณมากด้วย เมื่อมีการเพิ่มอากาศเข้าไปในเตาเผา การเกิดปฏิกิริยาเป็นไปได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น อันเป็นผลให้เกิดเหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคเป็นชั้นบางในปริมาณที่มากกว่าอนุภาคเม็ดและอื่น ๆ การทดลองนี้ ยังแสดงให้เห็นว่าการเตรียมเหล็กออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง (830 องศาเซลเซียส) จะให้อนุภาคชั้นบางของเหล็กออกไซด์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (720 องศาเซลเซียส) อันสอดคล้องกับผลที่ได้ในตอนต้น

เหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองนี้ที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส มีส่วนที่เป็นเม็ดและอนุภาคที่มีขนาดเล็กละเอียดปนอยู่ด้วยเพียงเล็กน้อย โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นผลึกชั้นบางที่มีรูปร่างลักษณะคล้ายกับเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางในธรรมชาติมาก (รูปที่ 1)

3.1.7 การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านอากาศเข้าเตาเผาและเพิ่มเวลาเผา

การทดลองนี้พบว่าที่ทุกระดับของอุณหภูมิการเผาเดียวกัน การเพิ่มระยะเวลาในการเผาให้นานขึ้นจาก 1 ชั่วโมงเป็น 1.5 ชั่วโมง มีผลต่อการเพิ่มปริมาณและขนาดอนุภาคของเหล็กออกไซด์ชั้นบางที่ได้โดยสังเกตได้จากการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างตารางที่ 6 และ 7 กล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส เวลาเผาที่เพิ่มขึ้นจะให้เหล็กออกไซด์ที่มีลักษณะและปริมาณไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก แต่ที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส การเพิ่มเวลาเผาจะทำให้ได้เหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคชั้นบาง ขนาดใหญ่ และปริมาณมากขึ้นเล็กน้อย

3.1.8 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้โดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์

จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบของตัวอย่างเหล็กออกไซด์โดยเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ พบว่าทุกตัวอย่างมีฮีมาไทต์หรือสารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก แสดงให้เห็นว่าเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้โดยวิธีการต่างๆ ข้างต้นจะให้สารประกอบเฟอร์ริก-

ออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้จะแตกต่างกันเฉพาะลักษณะของอนุภาคของเหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจเป็นอนุภาคชั้นบาง เม็ด หรือส่วนละเอียด

3.2 สรุปผลการทดลอง

การเผาส่วนผสมของเฟอร์ริกคลอไรด์และเกลือโซเดียมคลอไรด์ในอากาศที่อุณหภูมิระหว่าง 360 ถึง 830 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดเหล็กออกไซด์ที่เป็นฮีมาไทต์หรือเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) โดยที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 360 ถึง 430 องศาเซลเซียส เหล็กออกไซด์ที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดและส่วนละเอียด และมีอนุภาคที่เป็นชั้นบางในปริมาณน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 500 ถึง 830 องศาเซลเซียส สามารถให้อนุภาคชั้นบางของเหล็กออกไซด์เกิดขึ้นได้บ้างเพียงเล็กน้อย โดยมีอนุภาคส่วนใหญ่ยังคงเป็นเม็ดและที่มีขนาดเล็กละเอียด นอกจากนี้ตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่มีอนุภาคชั้นบางเพิ่มขึ้นจะเห็นเป็นสีเทาและมีเงาวาวเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ถ้ามีส่วนละเอียดมากมักจะเห็นเป็นสีออกแดง ตัวอย่างเหล็กออกไซด์ที่ได้โดยวิธีนี้ มีปริมาณอนุภาคชั้นบางเพียงเล็กน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนที่เป็นเม็ดและส่วนละเอียด จึงไม่จัดเป็นเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบาง

การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์โดยผ่านแก๊สไนโตรเจนก่อนถึงอุณหภูมิคงที่ช่วยให้ได้เหล็กออกไซด์ที่มีผลึกเป็นชั้นบางในปริมาณที่มากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิสูงประมาณ 600 ถึง 800 องศาเซลเซียส และให้ผลดีที่สุดที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงปริมาณโซเดียมคลอไรด์และเวลาที่ใช้ในการเผาไม่มีผลต่อลักษณะและปริมาณของเหล็กออกไซด์ที่เป็นชั้นบางมากนัก แต่ถ้าใช้โซเดียมคลอไรด์ในปริมาณสูงขึ้นไปอัตราส่วนเฟอร์ริกคลอไรด์ต่อโซเดียมคลอไรด์ เป็น 1 : 2.5 โดยน้ำหนัก จะได้อนุภาคชั้นบางที่มีขนาดเล็กลงเล็กน้อย

การทดลองเตรียมเหล็กออกไซด์เพื่อให้ได้อนุภาคชั้นบางในปริมาณมาก ซึ่งให้ผลดีที่สุดได้จากการเติมอากาศเข้าไปในเตาเผาด้วยหลังจากผ่านแก๊สไนโตรเจนและถึงอุณหภูมิคงที่ในช่วงอุณหภูมิสูง 700 ถึง 830 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงกว่าจะให้ผลดีกว่า กล่าวคือที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส เหล็กออกไซด์ที่ได้มีอนุภาคที่เป็นชั้นบาง เกิดขึ้นในปริมาณสูงมาก เมื่อเทียบกับอนุภาคที่เป็นเม็ดและส่วนละเอียดโดยมีลักษณะรูปร่างของผลึกคล้ายกับเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางในธรรมชาติ การเพิ่มระยะเวลาในการเผามีผลต่อการเพิ่มขนาดและปริมาณของอนุภาคชั้นบางเล็กน้อย ซึ่งอาจใช้ในการควบคุมให้ได้ขนาดของอนุภาคชั้นบางที่ต้องการได้ เหล็กออกไซด์ที่ได้จากการทดลองนี้มีอนุภาคชั้นบางที่มีความกว้างส่วนใหญ่ไม่เกิน 28 ไมครอน

และหนาประมาณ 2 ถึง 4 ไมครอน โดยมีอนุภาคที่เป็นเม็ดและส่วนละเอียดปนอยู่เพียงเล็กน้อย เหล็กออกไซด์ที่ได้นี้มีอนุภาคเป็นชั้นบางซึ่งมีรูปร่างและขนาดคล้ายกับเหล็กออกไซด์ ในธรรมชาติ (รูปที่ 1) นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะเห็นเป็นผลึกสีแดงมีขอบเหลี่ยมและมุมชัดเจนซึ่งแสดงถึงอนุภาคเป็นชั้นบาง เป็นไปตามมาตรฐานออสเตรเลียดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้นี้จึงมีคุณสมบัติในการป้องกันสนิมได้ และสามารถนำมาใช้ทำสีกันสนิมได้

การคำนวณต้นทุนของผลผลิตเหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางที่เตรียมได้จะพิจารณาจากการทดลองที่ 2.2.6 ที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ 6 กรัม โซเดียมคลอไรด์ 6 กรัมและให้เหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบาง 1.63 กรัม ทั้งนี้ เฟอร์ริกคลอไรด์ และโซเดียมคลอไรด์มีราคากิโลกรัมละ 25 และ 5 บาท ตามลำดับ เมื่อกำหนดต้นทุนของผลผลิตจากวัตถุดิบทั้งสองแล้ว เหล็กออกไซด์ชนิดชั้นบางที่ได้จะมีราคาต้นทุนกิโลกรัมละ 111 บาท ซึ่งเป็นราคาที่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามการพัฒนาการผลิตเพื่อลดต้นทุนสามารถทำได้โดยการเติมเศษเหล็กเข้าไปในของผสมในกระบวนการผลิต ซึ่งจะได้ทำการศึกษาทดลองต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี โดยได้รับการสนับสนุนจาก ดร.สุจินดา โชติพานิช ผู้อำนวยการกองการวิจัยและยังให้คำแนะนำปรึกษาในการเขียนรายงานผลการวิจัย ซึ่งทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น คณะผู้วิจัยจึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย นอกจากนี้ยังใคร่ขอขอบคุณ คุณอนุชิต กิจสวัสดิ์ หัวหน้ากลุ่มวิจัยและพัฒนา 1 ที่ให้การสนับสนุนและคำแนะนำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณคุณคุณวรรณา ต.แสงจันทร์ ที่ช่วยวิเคราะห์ส่วนประกอบของตัวอย่างเหล็กออกไซด์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์

เอกสารอ้างอิง

1. Bishop, D.M. 1981. Micaceous iron oxide pigments. **Journal of the Oil and Colour Chemists' Association.** 64(2) : 57
2. Carter, E.V. and R.D. Laundon. 1990. Synthetic micaceous iron oxide : A new anticorrosive pigment. **Journal of the Oil and Colour Chemists' Association.** 73(1) : 7
3. Bailar, J.C. and H.J. Emeleus. 1973. **Comprehensive Inorganic Chemistry.** Vol.3 Pergamon Press Ltd. New York. p.1039
4. Johnstone, H.F., H.C. Weingartner and W.E. Winsche. 1942. The System Ferric Chloride - Sodium Chloride. **Journal of the American Chemical Society.** 64 : 241
5. Charles, M.C. and E.D. Wendell. 1961. The Reaction of Ferric Chloride with Sodium and Potassium Chlorides. **Journal of Physical Chemistry.** 65 : 1505