การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะผลิตภัณฑ์อะลูมินาเซรามิกที่มีความหนาแน่นสูง สำหรับงานด้านทนทานต่อการสึกกร่อน

นางสาว อาวีวรรณ บุญเพ็ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวัสดุศาสตร์
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2535

ISBN 974 - 582 - 065 - 2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

019191

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF HIGH-DENSITY ALUMINA CERAMIC FOR ABRASION-RESISTANT APPLICATION

Miss Aweewan Boonpeng

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
Department of Materials Science
Graduate School
Chulalongkorn University
1992

ISBN 974 - 582 - 065 - 2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะผลิตภัณฑ์อะลูมินาเซรามิก
ที่มีความหนาแน่นสูง สำหรับงานด้านทนทานต่อการสึกกร่อน

โดย นางสาว อาวีวรรณ บุญเพ็ง
ภาควิชา วัสดุศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เล็ก อุตตมะศิล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ปรีดา พิมพ์ขาวขำ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เล็ก อุตตมะศิล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จรัสศรี ลอประยูร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา จินาวัฒน์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

อาวีวรรณ บุญเพ็ง : การเตรียมและศึกษาลักษณะเฉพาะผลิตภัณฑ์อะลูมินาเซรามิก ที่มีความหนาแน่นสูง สำหรับงานด้านทนทานต่อการสึกกร่อน (PRERARATION AND CHARACTERIZATION OF HIGH-DENSITY ALUMINA CERAMIC FOR ABRASION-RESISTANT APPLICATION) อ.ที่ปรึกษา ผศ.ดร. เล็ก อุดมะศิล, 130 หน้า.
ISBN 974-582-065-2

การวิจัยนี้ ได้ศึกษาการเตรียมอะลูมินาเซรามิก ประเภทที่มีอะลูมินาเป็นส่วนประกอบร้อยละ 99 ด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบไอโซสแตติก โดยใช้ความดันในการขึ้นรูปในช่วง 100 - 250 เมกะปาสคาล นำไปเผาซินเทอริง ที่อุณหภูมิ 1500 - 1650 องศาเซลเซียส ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการเตรียม และผลิตภัณฑ์สุดท้าย อาทิ ความหนาแน่น ความทนทานต่อการกดอัด ความแข็ง ความต้านทานต่อการสึกกร่อน เป็นต้น จากการทดลองพบว่า ความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป จะมีอิทธิพลต่อความหนาแน่น และการจัดเรียงตัวของอนุภาคในชิ้นตัวอย่างก่อนเผา เมื่อใช้ความดันสูง อนุภาคจะอัดตัวกันแน่นขึ้น อุณหภูมิซินเทอริงจะมีผลต่อขนาดเกรน และสมบัติเชิงกลของตัวอย่างที่ผ่านการเผา อุณหภูมิซินเทอริงที่เหมาะสมกับกระบวนการเตรียม คือ 1550 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นหลังการเผาที่ได้ สูงกว่าร้อยละ 99 ของค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี ความหนาแน่น และขนาดเกรน เป็นตัวแปรอิสระต่อกัน ซึ่งลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ ที่ทำให้ได้สมบัติเชิงกลสูง คือ ความหนาแน่นสูง และขนาดเกรนเล็ก

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา เทคโนโลยีการผลิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2545 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C225756 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY
KEY WORD: ALUMINA CERAMIC/ ABRASION RESISTANT/ SINTERING
AWEEWAN BOONPENG : PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF HIGH-DENSITY ALUMINA CERAMIC FOR ABRASION-RESISTANT APPLICATION. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. LEK UTTAMASIL, Ph.D. 130 pp. ISBN 974-582-065-2

In this research, high-density alumina ceramic (99 % alumina) was prepared by isostatic pressing process. The characteristics of in-process materials and final products were investigated. The forming pressure and sintering temperature term used in the experiment were 100-250 MPa and 1500-1650 ^{o}C, respectively. Density, grain size, compressive strength, hardness and abration loss of specimens were measured. The experimental results showed that the forming pressure influenced on density and particle arrangement of green compact : the higher the pressure used had been, the higher the particles were compact. The sintering temperature significantly affected on grain size and mechanical properties of sintered specimen. The optimum sintering temperature for the preparation process was 1550 ^{o}C. A sintered density > 99% of the theoretical density was attained. Grain size was found to be independent of density. Especially, the characteristics of high-mechanical property product are high-density and fine-grain size.

ภาควิชา ..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2535 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เล็ก อุตตมะศิล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ปรีดา พิมพ์ขาวขำ รองศาสตราจารย์ ดร.จรัสศรี ลอประยูร รองศาสตราจารย์ ดร. สุพัตรา จินาวัฒน์ และคณาจารย์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ ทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศูนย์โลหะ และวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ จนก่อให้เกิดงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาโยธา ภาควิชาโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์ทดสอบ และ มาตรวิทยา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบ อุปกรณ์ทดลอง การวิเคราะห์ และทดสอบในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัย สถาบันวิจัยโลหะ และวัสดุ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวัสดุศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการปฏิบัติการ และเพื่อน ๆ ที่เป็นกำลังใจ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจ และ สนับสนุนเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

อาวีวรรณ บุญเพ็ง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญตาราง..... ฎ
สารบัญรูป..... ฐ
บทที่
1 บทนำ
1.1 วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย..... 3
1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 4
2 วารสารปริทัศน์
2.1 ผงอะลูมินา..... 5
2.2 กระบวนการอัดขึ้นรูป 11
2.2.1 สารช่วยกระจายลอยตัว (Deflocculant)..... 11
2.2.2 สารเพิ่มการยึดเกาะ (Binder)..... 12
2.2.3 การแกรนูเลท..... 12
2.2.4 การอัดขึ้นรูปแบบไอโซสแตติก..... 15
2.3 การซินเทอร์..... 17
2.3.1 การซินเทอร์และการโตของเกรน..... 17
2.3.2 อิทธิพลของแมกนีเซียมออกไซด์ต่อการซินเทอร์สารอะลูมินา..... 25
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 27
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 วัตถุดิบและสารเคมี..... 30

3.2.1 ผงอะลูมินา (Alumina Powders)..... 31

3.2.2 สารปรับปรุงสมบัติ (Additive)..... 32

3.2.3 สารช่วยการกระจายลอยตัว (Deflocculant)... 33

3.2.4 สารเพิ่มการยึดเกาะ (Binder)..... 34

3.2.5 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)..... 34

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง..... 35

3.3.1 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารช่วยการกระจายลอยตัวต่อสมบัติการไหลตัวของอะลูมินาสเลอร์รี่ในน้ำ..... 36

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างทดลองและตรวจสอบสมบัติของตัวอย่างระหว่างกระบวนการเตรียม..... 36

3.3.2.1 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น..... 36

3.3.2.2 การเตรียมแกรนูลสำหรับอัดขึ้นรูปและศึกษาสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเตรียมแกรนูล..... 38

3.3.2.3 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของแกรนูล..... 39

3.3.2.4 การอัดขึ้นรูป..... 42

3.3.2.5 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวอย่างทดลองก่อนเผา..... 44

3.3.2.6 การซินเทอร์..... 44

3.3.3 การตรวจสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์จากการทดลอง... 45

3.3.3.1 การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์ 45

3.3.3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล..... 47

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 การเตรียมอะลูมินาสเลอร์รี่และอิทธิพลของสารช่วยการกระจายลอยตัวต่อสมบัติการไหลตัวของอะลูมินาสเลอร์รี..... 49

4.2 การศึกษาลักษณะเฉพาะของสารตั้งต้น..... 54

4.3 การศึกษาลักษณะเฉพาะของอะลูมินาสเลอร์รี..... 59

4.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของแกรนูล..... 61

4.4.1 ลักษณะเฉพาะของแกรนูล..... 61

4.4.2 การวิเคราะห์สิ่งเจือปนในแกรนูล..... 65

4.4.3 การศึกษาสมบัติทางด้านความร้อนของแกรนูล..... 66

4.5 การเตรียมการอัดขึ้นรูปและอิทธิพลของความดันที่ใช้การอัดขึ้นรูปกับสมบัติของตัวอย่างทดลองก่อนเผา..... 71

4.6 การเตรียมผลิตภัณฑ์และอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการเตรียมกับสมบัติของผลิตภัณฑ์จากการทดลอง..... 76

4.6.1 อิทธิพลของอุณหภูมิซินเทอริงและความดันที่ใช้ในกระบวนการเตรียมต่อสมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์จากการทดลอง..... 76

4.6.2 สีและเฟสของตัวอย่างทดลองหลังเผา..... 82

4.6.3 อิทธิพลของอุณหภูมิซินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อขนาดเกรน..... 84

4.6.4 อิทธิพลของอุณหภูมิซินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อความต้านทานต่อแรงกดอัด..... 86

4.6.5 อิทธิพลของอุณหภูมิซินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อค่าความแข็ง..... 88

4.6.6 อิทธิพลของอุณหภูมิซินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่ออัตราการสึกกร่อน..... 90

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.7 อิทธิพลของขนาดเกรนต่อสมบัติเชิงกลของตัวอย่างทดลอง..... 92

4.8 ลักษณะจุลโครงสร้างของตัวอย่างทดลอง..... 95

4.9 การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทดลองและผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ..... 99

4.9.1 การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทดลองและข้อมูลผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ..... 99

4.9.2 การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทดลองและตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ..... 100

5 สรุปผลการทดลอง 101

เอกสารอ้างอิง..... 104

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ข้อมูลจากการทดลอง..... 109

ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์ทดสอบโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย..... 123

ประวัติผู้เขียน..... 130

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	การส่งออกอุตสาหกรรมเซรามิก	1
1.2	แสดงสมบัติของเนื้อผลิตภัณฑ์ลูกบดชนิดต่าง ๆ	2
2.1	แสดงค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีที่อุณหภูมิห้องของอัลฟาอะลูมินา	6
3.1	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2	แสดงวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	30
3.3	แสดงสมบัติทั่วไปของอะลูมินาแคลไซด์เกรด A 16 SG	31
3.4	แสดงสมบัติทั่วไปของอะลูมินาแทบูลาร์	32
3.5	แสดงสมบัติทั่วไปของ Dispex N40	33
3.6	แสดงอัตราส่วนผสมของสารปรับปรุงสมบัติในการขึ้นรูป	40
3.7	แสดงสภาวะการทดสอบความทนทานต่อการสึกกร่อน	48
4.1	แสดงลักษณะเฉพาะของผงอะลูมินา	54
4.2	แสดงลักษณะเฉพาะของอะลูมินาสเลอร์รี	59
4.3	แสดงลักษณะเฉพาะของแกรนูล	61
4.4	เปรียบเทียบปริมาณสิ่งเจือปนในแกรนูลกับสิ่งเจือปนในสารตั้งต้นจากข้อมูลของผู้ผลิต	65
4.5	แสดงสีของตัวอย่างทดสอบหลังเผา	82
4.6	แสดงข้อมูลเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทดลองและข้อมูลผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ	99
4.7	แสดงข้อมูลเปรียบเทียบสมบัติของตัวอย่างทดลองและตัวอย่างจากต่างประเทศ	100
ก.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยการกระจายลอยตัวและค่าความหนืดปรากฏของอะลูมินาสเลอร์รี	111
ก.2	แสดงค่าลักษณะเฉพาะของรูปแบบพีคเอกซเรย์ของสารตั้งต้น	112
ก.3	แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของสารตั้งต้น	113

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ก.4 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของแกรนูล..... 114
ก.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปกับความหนาแน่นของตัวอย่างทดลองก่อนเผา..... 115
ก.6 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิซินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อความหนาแน่น..... 116
ก.7 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิซินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อการหดตัวหลังเผา..... 117
ก.8 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิซินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อปริมาณรูพรุนและการดูดซึมน้ำ..... 118
ก.9 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิซินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปขนาดเกรนของตัวอย่างทดลอง..... 119
ก.10 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิซินเทอริงและความดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปต่อความทนทานต่อแรงกดอัดของตัวอย่างทดลอง..... 120
ก.11 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิซินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อความแข็ง (HR 45N) ของตัวอย่างทดลอง..... 121
ก.12 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิซินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่ออัตราการสึกกร่อนของตัวอย่างทดลอง..... 122

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมในระนาบผลึกของอะลูมินา.....	8
2.2	แสดงกระบวนการสกัดแร่บอกไซด์โดยกระบวนการเบเออร์.....	9
2.3	แสดงลำดับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของอะลูมินาที่ช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ	8
2.4	แสดงพฤติกรรมการดูดซับของอะลูมินา.....	13
2.5	แสดงปฏิกริยาระหว่างอะลูมินากับน้ำระหว่างบดด้วยน้ำ.....	13
2.6	ปฏิกริยาระหว่างผิวอะลูมินา ที่อิ่มตัวด้วยน้ำกับ H_3O^+ หรือ OH^-....	14
2.7	แสดงโครงสร้างโมเลกุลของโพลิไวนิลแอลกอฮอลประเภทที่ถูกไฮโดรไลซ์บางส่วน.....	16
2.8	แสดงแผนภาพการอัดขึ้นรูปแบบไอโซสแตติก.....	16
2.9	แสดงกลไกการเคลื่อนที่มวลในการซินเทอร์.....	20
2.10	รูปแบบการซินเทอร์ขั้นต้นของอนุภาคทรงกลม 2 อนุภาค.....	20
2.11	ภาพตัดขวางของวัสดุที่ประกอบด้วยเกรนที่มีจำนวนด้านต่างกัน.....	24
3.1	แผนภูมิแสดงวิธีดำเนินการทดลอง.....	35
3.2	แผนภาพแม่แบบยางโพลิยูรีเทรน.....	42
3.3	ส่วนประกอบของเครื่อง CIP 300/40.....	43
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารช่วยการกระจายลอยตัวและค่าความหนืดปรากฏของอะลูมินาสเลอร์รี.....	51
4.2	โครงสร้างของสารช่วยการกระจายลอยตัว โซเดียมโพลิอะคริเลต.	52
4.3	การจับตัวของสารพอลิเมอร์ที่แตกตัวได้ บนผิวอนุภาคออกไซด์.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	รูปแบบ Electrical double-layer สำหรับการทำให้อนุภาคเกิดประจุในของเหลวมีขั้ว.....	53
4.5	รูปแบบพีคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของผงอะลูมินา A 16 SG.....	56
4.6	การกระจายขนาดอนุภาคของผงอะลูมินา A 16 SG.....	57
4.7	ภาพถ่ายผงอะลูมินา A 16 SG จากกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องกราด.....	58
4.8	ภาพถ่ายผงอะลูมินา A 16 SG จากกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องผ่าน.....	58
4.9	ภาพถ่ายอะลูมินาสเลอร์รี หลังการผสมตัวเพิ่มการยึดเกาะจากกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องกราด.....	60
4.10	การกระจายขนาดอนุภาคของแกรนูล.....	63
4.11	ภาพถ่ายแกรนูลจากกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 350, 1000 และ 5000 เท่า.....	64
4.12	เทอร์โมแกรมของแกรนูล ตัวอย่างก่อนการเผาและโพลิไวนิลแอลกอฮอล.....	67
4.13	แสดงลักษณะการจับตัวของสารเพิ่มการยึดเกาะบนผิวออกไซด์.....	69
4.14	แสดงตารางการเผาที่ใช้ในการทดลอง.....	70
4.15	ความสัมพันธ์ของแรงดันที่ใช้อัดขึ้นรูปกับความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างก่อนเผา.....	72
4.16	ภาพถ่ายลักษณะรอยแตกของตัวอย่างทดลองที่ความดันต่าง ๆ.....	73
4.17	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแกรนูลเมื่อได้รับแรงอัด.....	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.18	อิทธิพลของอุณหภูมิชินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อความหนาแน่นของตัวอย่าง	77
4.19	อิทธิพลของอุณหภูมิชินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อร้อยละการหดตัวของตัวอย่าง	78
4.20	อิทธิพลของอุณหภูมิชินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง	79
4.21	อิทธิพลของอุณหภูมิเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อปริมาณรูพรุนของตัวอย่าง	80
4.22	รูปแบบพีคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของตัวอย่างทดลองหลังเผาชินเทอริงที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส	83
4.23	อิทธิพลของอุณหภูมิชินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อขนาดเกรน	85
4.24	อิทธิพลของอุณหภูมิชินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อค่าความทนทานต่อแรงกดอัดของตัวอย่าง	87
4.25	อิทธิพลของอุณหภูมิชินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อความแข็งของตัวอย่าง	89
4.26	อิทธิพลของอุณหภูมิชินเทอริงและความดันที่ใช้อัดขึ้นรูปต่อการสึกกร่อนของตัวอย่าง	91
4.27	อิทธิพลของขนาดเกรนต่อสมบัติเชิงกล	93
4.28	ภาพถ่ายจุลโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างทดลองที่ผ่านการอัดรูปที่ความดัน 250 เมกะปาสคาล และเผาชินเทอริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ	97
4.29	ภาพถ่ายจุลโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่างทดลองที่ผ่านการอัดขึ้นรูปที่ความดัน 100 เมกะปาสคาล และเผาชินเทอริงที่อุณหภูมิ 1650 องศาเซลเซียส	98

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.30	ภาพถ่ายลักษณะผิวแตกจากกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนแบบส่องกราด ของตัวอย่างทดลองที่ผ่านการอัดขึ้นรูปที่ความดัน 200 เมกะปาสคาล และเผาซินเทอริงที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส.....	98
ก.1	ภาพถ่ายผงอะลูมินา A16SG จากกล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอน แบบส่องผ่าน.....	110