

การขึ้นรูปและลักษณะสมบัติของเซรามิกวงฝังคอร์เดี่ยวไรต์จากของเสียในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ

นางสาววิไลรัตน์ โกสุพรรณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF CORDIERITE HONEYCOMB CERAMIC  
FROM REFRACTORY INDUSTRIAL WASTE



Miss Wilairat Gosuphan

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology  
Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University



วิไลรัตน์ โกลุพพรรณ : การขึ้นรูปและลักษณะสมบัติของเซรามิกรวงผึ้งคอร์เดียไรต์จากของเสีย  
 ในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ (FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF CORDIERITE  
 HONEYCOMB CERAMIC FROM REFRACTORY INDUSTRIAL WASTE) อ.ที่ปรึกษา  
 วิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.จรัสพร  
 มงคลขจิต, 75 หน้า

งานวิจัยนี้ให้ความสนใจที่จะนำเศษคอร์เดียไรต์ป่น ซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ  
 มีองค์ประกอบหลักคือคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ นำมาศึกษาสำหรับใช้งานเป็นวัตถุดิบหลักในการเตรียม  
 เนื้อดินปั้นเซรามิกคอร์เดียไรต์ และทำการขึ้นรูปด้วยการรีดผ่านหัวแบบ ผลิตเป็นเซรามิก  
 รวงผึ้ง โดยทำการทดลองเตรียมเซรามิกคอร์เดียไรต์จากวัตถุดิบสองกลุ่มคือ กลุ่มที่หนึ่งเตรียมจากเศษ  
 คอร์เดียไรต์ป่นจากวัสดุทนไฟผสมกับทัลค์และอะลูมินาเพื่อให้ได้เฟสคอร์เดียไรต์เพียงอย่างเดียว (โดย  
 ใช้อัตราส่วนผสมร้อยละ 70 23 และ 7 โดยมวลตามลำดับ) และกลุ่มที่สองซึ่งเตรียมจากดินขาวระนอง  
 ผสมกับทัลค์และอะลูมินา (โดยใช้อัตราส่วนผสมร้อยละ 45 40 และ 15 โดยมวลตามลำดับ) สำหรับใช้  
 เป็นตัวเปรียบเทียบ ทำการเตรียมส่วนผสมด้วยการบดเปียก นวดผสมตัวประสาน สารหล่อลื่นและน้ำ  
 แล้วทำการทดลองขึ้นรูปเซรามิกรวงผึ้ง พบว่าปริมาณการเติมคาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส โพลีไวนิล  
 แอลกอฮอล์ โพลีเอทิลีนไกลคอล น้ำมันกลีเซอริน และน้ำ ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 7 1 0.5 1.5 และ  
 25 ตามลำดับสำหรับกลุ่มที่หนึ่ง และ ร้อยละ 3 1 0.5 1 และ 27 ตามลำดับสำหรับกลุ่มที่สอง คือ  
 ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการรีดขึ้นรูปขึ้นงานเป็นเซรามิกรวงผึ้ง หลังจากนั้นทำการศึกษาลักษณะสมบัติการ  
 ไหลตัวของเนื้อดินปั้นที่เตรียมได้ด้วยแบบจำลองและสมการของเบนโบว์-บริดจ์วอเตอร์ พบว่าเนื้อดิน  
 ปั้นที่เตรียมได้มีค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกความแข็งแรงของเนื้อดินปั้น ค่าความ  
 เป็นซูโดพลาสติก บ่งบอกสภาพการไหลตัวของซูโดพลาสติก และค่าความเสียดทานต่อผนังเครื่องรีด  
 และหัวแบบหรือตาย ของเนื้อดินปั้นทั้งสองกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกันและเหมาะสมกับงานรีดขึ้นรูป  
 เซรามิกรวงผึ้ง

ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้หลังทำการเผาที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง  
 ประกอบด้วยเฟสคอร์เดียไรต์เพียงอย่างเดียว และเนื้อดินปั้นที่เตรียมได้หลังเผาแล้วมีค่าความแข็งแรง  
 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ค่าการดูดซึมน้ำ อยู่ที่ 21.7 เมกะปาสคาล  $2.94 \times 10^{-6}$  ต่อ  
 องศาเซลเซียส 17.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับในกลุ่มที่หนึ่ง และ 24.91 เมกะปาสคาล  $3.85 \times 10^{-6}$  ต่อ  
 องศาเซลเซียส 12.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับในกลุ่มที่สอง ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันนัก

ภาควิชา : วัสดุศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต ..... วิไลรัตน์ โกลุพพรรณ

สาขาวิชา : เทคโนโลยีเซรามิก

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา : 2552

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

## 4972259023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEY WORDS: CORDIERITE / HONEYCOMB / EXTRUSION / REFRACTORY WASTE

WILAIRAT GOSUPHAN: FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF CORDIERITE HONEYCOMB CERAMIC FROM REFRACTORY INDUSTRIAL WASTE. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. THANAKORN WASANAPIARNPONG, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: CHARUSPORN MONGKOLKACHIT, Ph.D., 75 pp.

In this research, cordierite waste from refractory industry was selected as a raw material for cordierite ceramic preparation. The main compositions of the waste are cordierite and mullite. The cordierite ceramic dough was prepared and extruded through a special die to form a honeycomb structure. The cordierite honeycomb ceramics were prepared from two groups of raw material mixtures. For the first group, the mixture consists of cordierite waste powder mixed with talc and alumina (70% cordierite waste powder, 23% talc, and 7% alumina by mass). The mixture of second group, the mixture consists of Ranong China clay, was mixed with talc and alumina (45% Ranong China clay, 40% talc, and 15% alumina by mass) to achieve pure cordierite phase. The mixtures were wet milled and mixed with binders, plasticizer, lubricant, and water with suitable composition as clay dough. The doughs extruded through a honeycomb die using a screw extruder. The various amount of the addition of carboxy methyl cellulose (CMC), polyvinyl alcohol (PVA), polyethylene glycol (PEG), glycerin oil, and water was 7, 1, 0.5, 1.5, and 25 mass% respectively for the first group and 3, 1, 0.5, 1, and 27 mass% for the second group, respectively. The dough could be extruded with good quality for honeycomb ceramic products. The rheology and the extrusion behavior of the doughs were also studied using a model and equation of Benbow-Bridgwater. The results show that the selected dough compositions of both groups of mixtures obtain yield strength (indicating the hardness of the dough), pseudo-plasticity (representing the pseudo-plastic behavior of the dough), and friction force to the surface of die wall were almost the same, which are suitable for honeycomb ceramic extrusion.

After firing at 1300°C for 2 h, the sintered products consist of only cordierite phase. The firing doughs have the bending strength, coefficient of thermal expansion, and water absorption of 21.70 MPa,  $2.94 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , and 17.24% for the first group and 24.91 MPa,  $3.85 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , and 12.47% for the second group, respectively which are not so significantly different.

Department : Materials Science.....

Student's Signature ..... Wilairat Gosuphan

Field of Study : Ceramic Technology.....

Advisor's Signature ..... 

Academic Year : 2009.....

Co-Advisor's Signature ..... 

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนจากหลายๆ ฝ่าย ทั้งทางด้านวิชาการ ด้านธุรการและท่านทั้งหลายที่เกี่ยวข้องดังนี้

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และแก้ไขปัญหาลดระยะเวลาในการทำวิจัย และที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.จรัสพร มงคลขจิต ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและให้ความรู้เกี่ยวกับการทดลอง

ดร.ภาวดี อังค์วัฒน์ ที่ให้คำแนะนำ และให้ความรู้เกี่ยวกับการทดลองและการเขียนวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.รจนา พรประเสริฐสุข และ คุณอดิศักดิ์ ถือพลอย ที่ให้ความช่วยเหลือในส่วนสุดท้ายที่ขัดข้องให้ดำเนินไปได้อย่างราบรื่น

คณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และดำเนินการในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะกรรมการสอบทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องของรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์และถูกต้องมากยิ่งขึ้น

หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สวทช) ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือสำหรับงานวิจัยนี้ ได้แก่ เครื่องขึ้นรูป Honeycomb ceramics (Vacuum kneader and extruder) เครื่อง High speed mixer และ เครื่องรีด Three-roll mill ตลอดระยะเวลาการทำวิจัยในครั้งนี้

ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง (ADB) ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษา การทำงานวิจัยและการนำเสนอผลงาน

คุณสมคิด ทองศิลา และบุคลากรภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ได้รับความช่วยเหลือในการทำการทดลอง

เพื่อนๆ พี่ๆ น้อง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกคนและ คุณอดิสร บุรณวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ พี่สาวทั้งสองคน และครอบครัวโกสุพรรณ ที่คอยให้กำลังใจ ทุกครั้งที่ประสบปัญหา ทำให้มีสติพร้อมที่จะเผชิญหน้ากับสิ่งที่เกิดขึ้น และก้าวเดินต่อไปอย่างเข้มแข็ง

## สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 เซรามิกรวงผึ้ง (Honeycomb ceramics) .....	3
2.2 แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ (catalytic converter).....	4
2.3 โครงสร้างโลหะของแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ .....	9
2.4 กระบวนการผลิตเซรามิกรวงผึ้ง .....	10
2.5 หัวแบบ (Die) สำหรับเซรามิกรวงผึ้ง.....	11
2.6 พฤติกรรมการไหลตัวของเนื้อดินปั้น.....	12
2.6.1 การไหลตัวแบบซูโดพลาสติก (Pseudo-plastic) .....	12
2.6.2 Benbow-Bridgwater model.....	13
2.7.3 สมบัติความเหนียวของเนื้อดินปั้น.....	14
2.7 ตัวกรองเซรามิกในเครื่องยนต์ดีเซล .....	15
2.8 อุปกรณ์แปลงแก๊สด้วยไอน้ำ (steam reformer) .....	16
2.9 การเลือกใช้วัสดุสำหรับงานเซรามิกรวงผึ้ง .....	17
2.9.1 คอร์เตียไรต์ .....	17
2.9.2 ซิลิคอนคาร์ไบด์ .....	19
2.9.3 อะลูมิเนียมไททานต.....	20
2.9.4 ซิลิคอนไนไตรต์.....	20
2.9.5 มัลไลต์.....	21
2.10 การเตรียมผลิตภัณฑ์เซรามิกคอร์เตียไรต์.....	21
2.11 อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ.....	22

<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>24</b>
3.1 สารเคมีและวัสดุดิบที่ใช้ในการทดลอง .....	24
3.2 แผนผังการทดลอง .....	26
3.3 การเตรียมเนื้อคอร์เดียไรต์ .....	27
3.3.1 การเตรียมวัสดุดิบ .....	27
3.3.2 การอัดขึ้นรูปชิ้นงาน .....	28
3.3.3 การขึ้นรูปเซรามิกวงผึ้ง .....	29
3.3.4 การวิเคราะห์การไหลตัว .....	31
3.5 การวิเคราะห์สมบัติ .....	33
3.5.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค .....	33
3.5.2 การหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน .....	33
3.5.3 การหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (Water absorption) .....	34
3.5.4 การหาค่าการหดตัวหลังเผา (Firing shrinkage) .....	34
3.5.5 การหาค่าองค์ประกอบเฟส .....	34
3.5.6 การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน .....	35
3.5.7 การทดสอบความแข็งแรง .....	35
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล .....</b>	<b>37</b>
4.1 การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงวัสดุดิบ .....	37
4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน .....	39
4.3 การวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ .....	41
4.4 การหาค่าการหดตัว .....	43
4.5 การวิเคราะห์สมบัติการขยายตัวทางความร้อน .....	45
4.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบเฟส .....	46
4.7 ค่าความแข็งแรง .....	47
4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค .....	48
4.9 ผลของปริมาณน้ำและสารตัวเติม .....	51
4.10 ผลของการเติมโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) และ น้ำมันกลีเซอริน .....	56
4.11 ลักษณะการไหลตัวของเนื้อดินปั้นคอร์เดียไรต์ .....	57
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>62</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	62



รายการอ้างอิง..... 63

ภาคผนวก ..... 66

    ภาคผนวก ก ..... 67

    ภาคผนวก ข ..... 70

    ภาคผนวก ค ..... 72

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 75



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนโดยมวลของอากาศต่อเชื้อเพลิง สำหรับเชื้อเพลิงต่างๆ.....	8
ตารางที่ 2.2 สมบัติของรวงผึ้งคอร์เดียไรต์.....	10
ตารางที่ 2.3 วัสดุที่น่าสนใจสำหรับตัวกรองในเครื่องยนต์ดีเซล.....	17
ตารางที่ 3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง .....	24
ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของผงวัตถุดิบตั้งต้น .....	27
ตารางที่ 3.3 ชนิดและปริมาณสารตัวเติม .....	28
ตารางที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคของผงคอร์เดียไรต์และวัตถุดิบตั้งต้น.....	38
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์กากค้างตะแกรงของผงคอร์เดียไรต์ที่ได้จากการผสมดินขาวระนองเศษคอร์เดียไรต์ป่น และวัตถุดิบอื่นๆ.....	39
ตารางที่ 4.3 แสดง Bulk density, porosity และ water absorption ของชิ้นงานหลังเผา .....	44
ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติทั่วไปของเซรามิกรวงผึ้งคอร์เดียไรต์ในทางอุตสาหกรรม .....	44
ตารางที่ 4.5 ลักษณะโดยทั่วไปของส่วนผสมเนื้อดินปั้นที่ได้จากดินขาวระนอง.....	52
ตารางที่ 4.6 ลักษณะโดยทั่วไปของส่วนผสมเนื้อดินปั้นที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น .....	53
ตารางที่ 4.7 สูตรที่ใช้ในการเตรียมเนื้อดินสำหรับตรวจสอบสมบัติ.....	55
ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ต่างๆ จากเนื้อดินปั้นคอร์เดียไรต์ที่ได้จากดินขาวระนองและเศษคอร์เดียไรต์ป่นเมื่อห้วแบบมีขนาดต่างๆ.....	61

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ที่ทำด้วยโลหะ.....	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างภายในแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ชนิด Pellet type.....	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างภายในแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ชนิด Monolith type.....	5
รูปที่ 2.4 กราฟประสิทธิภาพการบำบัด CO และ HC ของ แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์.....	6
รูปที่ 2.5 กราฟประสิทธิภาพการบำบัด CO, HC, NOx ของ three-way catalyst.....	8
รูปที่ 2.6 โครงสร้างแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ที่ทำจากโลหะและเซรามิก .....	9
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างโครงสร้างของหัวแบบเซรามิกวงผึ้ง.....	11
รูปที่ 2.8 ลักษณะของ Die (จากโครงการพัฒนาเซรามิกส์คะตะลิสต์เพื่อพัฒนาเชื้อเพลิงชนิด ต่างๆ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง SOFC ของ MTEC) .....	12
รูปที่ 2.9 แผนผัง Benbow-Bridgwater model .....	13
รูปที่ 2.10 เครื่อง Laboratory ram extrusion ที่ใช้ในการทดลอง.....	14
รูปที่ 2.11 Platy structure ของแร่ดินเคโอลิไนต์.....	15
รูปที่ 2.12 การประยุกต์ใช้งานหลักๆ ของเซรามิกคอร์เดียไรต์.....	19
รูปที่ 2.13 ตัวกรองเซรามิกที่ทำจาก SiC (ด้านซ้าย) และตัวกรองคอร์เดียไรต์ (ด้านขวา).....	20
รูปที่ 3.1 องค์ประกอบเฟสของเซรามิกคอร์เดียไรต์ปนจากโรงงานอุตสาหกรรม .....	25
รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการทดลองเตรียมเซรามิกวงผึ้ง.....	26
รูปที่ 3.3 เซรามิกคอร์เดียไรต์ปนจากอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ .....	27
รูปที่ 3.4 Ternary diagram ของคอร์เดียไรต์ .....	28
รูปที่ 3.5 กราฟอุณหภูมิและเวลาในการเผาผนึกคอร์เดียไรต์ .....	29
รูปที่ 3.6 เครื่อง Three roll mill ณ ห้องปฏิบัติการเซรามิกส์ประยุกต์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและ วัสดุแห่งชาติ (MTEC).....	29
รูปที่ 3.7 เครื่อง Vacuum Extrusion Forming Machine (FM-30-1) ณ ห้องปฏิบัติการเซรามิกส์ ประยุกต์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) .....	30
รูปที่ 3.8 เนื้อดินที่ออกจากเครื่องเครื่อง Vacuum Extrusion Forming Machine (FM-30-1) ณ ห้องปฏิบัติการเซรามิกส์ประยุกต์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) .....	31
รูปที่ 3.9 Instron Compressing Machine 5882 ณ ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	32
รูปที่ 3.10 หัวแบบ (Die) ขนาดต่างๆ กัน.....	32

รูปที่ 3.11 เครื่อง Particle Size Analyzer รุ่น Hydro 2000 ผลิตโดยบริษัท Malvern ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย .....	33
รูปที่ 3.12 XRD sample holder.....	35
รูปที่ 3.13 Dilatometer ผลิตโดยบริษัท Netzsch รุ่น 402C ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวัสดุ ศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย .....	35
รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคของวัสดุดิบตั้งต้นและส่วนผสม .....	37
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนอง ด้วยเทคนิค TG- DTA .....	40
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของส่วนผสมที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น ด้วยเทคนิค TG-DTA.....	40
รูปที่ 4.4 Bulk density ของชิ้นงานคอร์เดียไรต์ที่ได้จากการผสมดินขาวระนอง และจากเศษคอร์ เดียไรต์ป่น.....	42
รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานคอร์เดียไรต์ที่ได้จากการผสมดินขาวระนองและ จาก เศษคอร์เดียไรต์ป่น.....	42
รูปที่ 4.6 ค่าการหดตัวก่อนเผาและหลังเผาของชิ้นงานคอร์เดียไรต์เมื่อเผาที่ อุณหภูมิ 1250- 1350°C.....	43
รูปที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานคอร์เดียไรต์ที่ได้จากวัตถุดิบสองชนิด คือ ดินขาวระนอง และเศษคอร์เดียไรต์ป่น ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 100-500°C .....	45
รูปที่ 4.8 กราฟองค์ประกอบเฟสของคอร์เดียไรต์ที่ได้จากการผสมเศษคอร์เดียไรต์ป่น ซึ่งทำการ เผานึ่งที่อุณหภูมิ 1250-1350°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5°C/min เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	46
รูปที่ 4.9 กราฟองค์ประกอบเฟสของคอร์เดียไรต์ที่ได้จากการผสมดินขาวระนองเมื่อทำการเผา นึ่งที่อุณหภูมิ 1250-1350°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5°C/min เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ....	47
รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานคอร์เดียไรต์เมื่อเผานึ่งที่อุณหภูมิ 1250-1350°C.....	48
รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของวัตถุดิบที่ใช้ได้แก่ อะลูมินา(1) ทัลค์ (2) ดินขาวระนอง (3) และ เศษคอร์เดียไรต์ป่น (4) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ตามลำดับ .....	49
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาค (ภาคตัดขวาง) ก่อนเผาของส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนอง (a-c) และเศษคอร์เดียไรต์ป่น (d-f) ที่กำลังขยาย 50 เท่า 500 เท่า และ 10000 เท่า ตามลำดับ .....	50
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาค (ภาคตัดขวาง) หลังเผาของคอร์เดียไรต์ที่ได้จากดินขาวระนอง (g-h) และเศษคอร์เดียไรต์ป่น (i-j) ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 10000 เท่า ตามลำดับ .....	51
รูปที่ 4.14 ชิ้นงานที่ออกจากเครื่องรีด Vacuum Extrusion forming machine .....	54

- รูปที่ 4.15 ขึ้นงานก่อนเผา (a-b) และหลังเผา (c-d) ที่อุณหภูมิ 1300°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง..... 56
- รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของแรงและเวลาที่ใช้สำหรับ Ram extrusion ที่ความเร็วต่างๆ กัน ..... 57
- รูปที่ 4.17 ความดันในการรีดที่ความเร็วและความยาวของหัวแบบต่างๆ กันของส่วนผสมที่ได้จาก  
ดินขาวระนอง ..... 58
- รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของแรงและเวลาที่ใช้สำหรับ Ram extrusion ที่ความเร็วต่างๆ กัน ..... 58
- รูปที่ 4.19 ความดันในการรีดที่ความเร็วและความยาวของหัวแบบต่างๆ กันของส่วนผสมได้จาก  
เศษคอร์เดียไรต์ป่น..... 59



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วของประเทศจากภาคเกษตรกรรมมาเป็นภาคอุตสาหกรรมทำให้แหล่งชุมชนต่างๆ ที่เป็นศูนย์กลางทางเศรษฐกิจของแต่ละพื้นที่มีการขยายจำนวนของประชากรอย่างรวดเร็วไปพร้อมๆ กับขีดความสามารถของเทคโนโลยีที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการพื้นฐานของมนุษย์เพิ่มขึ้น รวมถึงเครื่องอำนวยความสะดวกต่างๆ ซึ่งรวมทั้งความต้องการในการคมนาคมขนส่งก็เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้เกิดปัญหาจราจรติดขัดมากขึ้นเรื่อยๆ การจราจรที่ติดขัดทำให้รถเคลื่อนตัวได้ด้วยความเร็วต่ำ มีการหยุดและออกตัวบ่อยครั้งขึ้น น้ำมันถูกเผาผลาญมากขึ้น เกิดการสันดาปของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์ และมีการระบายสารมลพิษทางท่อไอเสียในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้น สารมลพิษที่ระบายเข้าสู่บรรยากาศที่เกิดจากการคมนาคมขนส่ง มีหลายชนิด อาทิ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HC) รวมถึงฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน สารตะกั่วและแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และนอกจากมลพิษที่เกิดจากยานยนต์แล้ว ก็ยังเกิดจากการปล่อยแก๊สพิษจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ แต่ส่วนใหญ่ก็จะมีการบำบัดอยู่แล้ว โดยในส่วนของยานยนต์จะมีการใช้ตัวกรอง (Filter) และเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา หรือแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ (Catalytic converter) เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่กรองและลดไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ แต่ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นสินค้านำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีมูลค่าค่อนข้างสูง หากมีการผลิตในประเทศก็น่าจะลดต้นทุนในการนำเข้ามาสินค้านี้ได้มาก โดยวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตมีทั้งที่เป็นเซรามิกและโลหะ แต่ส่วนใหญ่จะใช้เป็นวัสดุเซรามิก เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำทำให้มีน้ำหนักเบา และทนอุณหภูมิสูงได้

จากปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตและปัญหาที่ตามมาหลังกระบวนการผลิต ในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ แผ่นรองเตา และผลิตภัณฑ์อื่นๆ สำหรับเตาเผาเซรามิก จำพวกเนื้อคอร์เดียไรต์ ซึ่งจะมีการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้นจากการแตกเสียหาย บิดเบี้ยว หรือผิดมาตรฐานของผลิตภัณฑ์หลังจากการเผา และไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีกในกระบวนการผลิต หากสามารถนำของเสียที่มาจากอุตสาหกรรมดังกล่าวมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้ก็น่าจะสามารถลดของเสีย และเพิ่มมูลค่าของสินค้าได้

งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะทำการขึ้นรูปเซรามิกวงผึ้งจากเนื้อคอร์เดียไรต์ โดยจะทำการเตรียมเนื้อคอร์เดียไรต์จากวัตถุดิบสองกลุ่มคือ วัตถุดิบกลุ่มผงคอร์เดียไรต์จากของเสียใน

อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ ผสมกับอะลูมินา และทัลค์ (กลุ่มที่ 1) และวัตถุดิบกลุ่มดินขาวระนอง อะลูมินาและ ทัลค์ (กลุ่มที่ 2) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยคอร์เดียไรต์เพียงเฟสเดียว โดยทำการบดผสมวัตถุดิบทั้งสองกลุ่มกับน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน 60:40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้สารช่วยกระจายตัว หลังจากนั้นนำน้ำดินที่ได้มาอบแห้ง และบดด้วยโกร่งเพื่อให้ได้ความละเอียดที่เหมาะสม ผสมกับสารตัวเติม และน้ำในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อเตรียมเนื้อดินให้ได้ความเหนียวที่เหมาะสมสำหรับการรีดขึ้นงานเป็นเซรามิกรูปวงผึ้งต่อไป ทำการขึ้นรูปขึ้นงานจากเนื้อดินที่เตรียมได้ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ด้วยการอัดแบบทิศทางเดียว เผาและทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การดูดซึมน้ำ ค่าความหนาแน่น องค์ประกอบทางเฟสและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน เพื่อให้ได้สูตรที่เหมาะสม หลังจากได้สูตรส่วนผสมที่เหมาะสมแล้วจึงมานำศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปของเนื้อดินนั้น และทำการขึ้นรูปเป็นรูปวงผึ้ง ทดสอบและหาความสัมพันธ์ของลักษณะเนื้อดินกับเซรามิกวงผึ้งที่รีดได้ ก่อนทำการเผาและตรวจสอบสมบัติอีกครั้ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1. เพื่อศึกษาการเตรียมเซรามิกคอร์เดียไรต์จากของเสียในอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ เปรียบเทียบกับส่วนผสมกลุ่มที่เริ่มต้นจากวัตถุดิบดินขาวระนอง

1.2.2. เพื่อศึกษาหาปริมาณสารตัวเติมที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเซรามิกวงผึ้งเนื้อคอร์เดียไรต์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1. เตรียมเนื้อคอร์เดียไรต์จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น (ของเสียจากอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ) ผสมกับทัลค์ และอะลูมินา เปรียบเทียบกับการใช้ดินขาวระนองเป็นวัตถุดิบตั้งต้น

1.3.2. ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้ส่วนผสมเปลี่ยนเป็นเฟสคอร์เดียไรต์สมบูรณ์

1.3.3. ศึกษาปริมาณสารตัวเติมที่เหมาะสมในการขึ้นรูปเซรามิกวงผึ้ง

1.3.4. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของเนื้อคอร์เดียไรต์ที่เตรียมได้

1.3.5. ขึ้นรูปขึ้นงานเป็นรูปวงผึ้งจากร่างวงผึ้งจากเนื้อคอร์เดียไรต์ได้และศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. สามารถนำของเสียจากอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟมาใช้ประโยชน์ได้

1.4.2. สามารถพัฒนาเทคนิคการขึ้นรูปเซรามิกวงผึ้งขึ้นเองในประเทศ โดยใช้ของเสียจากอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟจำพวกคอร์เดียไรต์ หรือจากวัตถุดิบจำพวกดินขาว

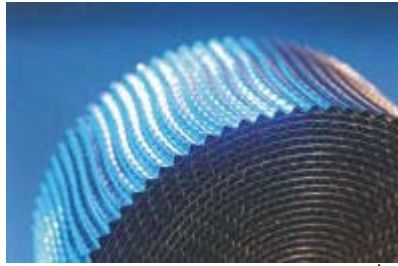
## บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เซรามิกรวงผึ้ง (Honeycomb ceramics)

ตัวรองเซรามิกรวงผึ้ง (Honeycomb ceramics substrate) เป็นส่วนสำคัญสำหรับเทคโนโลยีเกี่ยวกับการบำบัดไอเสีย (Flue gas) จากเครื่องยนต์ในรอบ 20 ปีที่ผ่านมา ตั้งแต่ชิ้นส่วนตัวรองเซรามิก สำหรับแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ไปจนถึงการออกแบบรูปร่างที่ซับซ้อนและหลากหลายสำหรับการประยุกต์ใช้งานต่างๆ ในทางอุตสาหกรรม ซึ่งต้องการความทนทานและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีถูกพัฒนาไปอย่างต่อเนื่องเพื่อแข่งขันไปตามความต้องการเพื่อลดการปล่อยไอเสียและมลพิษทางอากาศสู่สิ่งแวดล้อม ตัวอย่างของเทคโนโลยีนี้ได้แก่ แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ตัวรอง (particulate filters) ใช้ในห้องเผาไหม้และในหม้อปฏิกรณ์ (Catalytic combustor and reactor) สำหรับกระบวนการเคมี<sup>[1]</sup> 90 เปอร์เซ็นต์ของไอเสียที่ปล่อยจากยานยนต์ สามารถบำบัดให้กลายเป็นแก๊สที่ไม่มีพิษต่อร่างกายโดยอาศัยการทำงานของแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งการควบคุมการปล่อยแก๊สพิษต้องเริ่มจากการลดพวก สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon, HC) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) และสารก่อมะเร็งอื่นๆ โดย HC เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไร้รสชาติและไม่มีกลิ่นซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของคาร์บอน หากหายใจเข้าไปมากกว่า 0.3 เปอร์เซ็นต์ อาจทำให้เสียชีวิตได้ในเวลา 3 นาที ซึ่งมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนมอนอกไซด์ถูกปล่อยจากยานยนต์ในตัวเมือง<sup>[2]</sup> และแก๊สไนโตรเจน สามารถทำให้เยื่อหุ้มกระดูกเคืองได้

เซรามิกรวงผึ้งได้รับการออกแบบเพื่อใช้เป็นตัวรอง (substrate) สำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับอุตสาหกรรมบำบัดแก๊สเสีย ซึ่งช่วยลดปริมาณ CO และ NOx โดยโครงสร้างที่เป็นรวงผึ้งจะให้พื้นที่ผิวสูงในขณะที่มีปริมาตรน้อยและด้วยโครงสร้างภายในที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตทำให้สามารถผลิตรูปร่างได้มากกว่าการออกแบบดั้งเดิม ซึ่งแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ตัวแรกใช้เม็ดอะลูมินาเป็นจำนวนมาก เป็นตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยาโลหะ แต่แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ในปัจจุบัน สารเร่งปฏิกิริยาโลหะจะถูกเคลือบบนตัวรองรับที่มีลักษณะเป็นช่องกลวงคล้ายรวงผึ้ง (honeycomb) ซึ่งตัวรองรับอาจทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมดังรูปที่ 2.1 หรือคอร์เดียไรต์ (cordierite) ซึ่งมีข้อดีกว่าแบบเม็ดอะลูมินา เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่เป็นช่องกลวงช่วยลดแรงดันย้อนกลับ (back pressure) ได้ดีกว่า แต่ต้นทุนการผลิตตัวรองแบบรวงผึ้งนั้นสูงกว่า



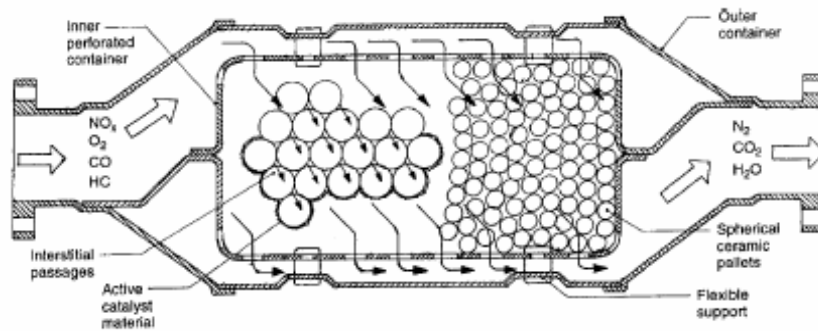


รูปที่ 2.1 ตัวอย่างแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ที่ทำด้วยโลหะ<sup>[3]</sup>

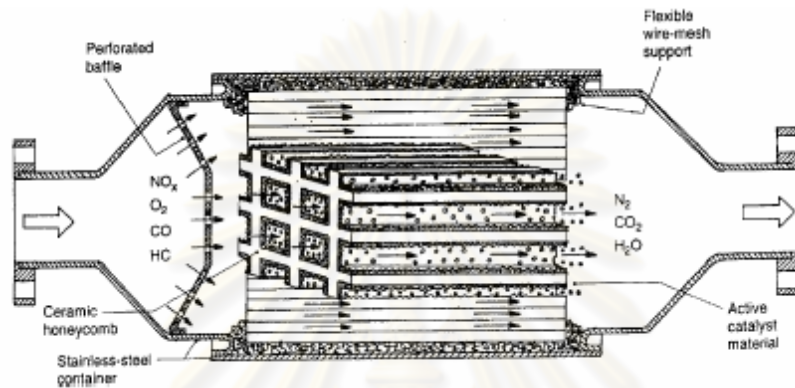
## 2.2 แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ (catalytic converter)

แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ (catalytic converter) หรือเครื่องฟอกไอเสียเชิงเร่งปฏิกิริยา ใช้ทำงานในรถยนต์แก๊สโซลีนมีลักษณะเป็นกล่องโลหะที่ติดตั้งอยู่กับระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์ (exhaust manifold) กับท่อเก็บเสียงภายในตัวแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม โครงสร้างภายในเป็นช่องสี่เหลี่ยมเล็กๆ เรียงติดกันคล้ายรวงผึ้ง ทำจากวัสดุประเภทเซรามิก หรือโลหะเคลือบผิวภายในเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสด้วยอะลูมินา ที่มีความเป็นรูพรุนสูง ภายนอกจะเคลือบด้วยสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ซึ่งเป็นโลหะแพลทินัม (Platinum (Pt)) แพลเลเดียม (Palladium (Pd)) หรือโรเดียม (Rhodium (Rh)) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือผสมกันอีกชั้นหนึ่ง เรียกรวมว่าโลหะมีค่า (precious metal) เคลือบหรือฉาบไว้บนวัสดุ รวมเรียกว่าตัวรอง (Substrate) โดยโครงสร้างที่ผิวของวัสดุที่เป็นโครงนั้น จะมีลักษณะเป็นรูพรุนซึ่งเมื่อไอเสียไหลผ่านแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ โลหะมีค่า จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และ รีดักชัน ทำให้ HC, CO, CO<sub>2</sub> และ H<sub>2</sub>O ส่วน NO<sub>x</sub> จะทำปฏิกิริยา CO กลายเป็น CO<sub>2</sub> และแก๊สไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) ในขณะเดียวกัน NO<sub>x</sub> และ HC ก็จะทำปฏิกิริยากัน ได้ CO<sub>2</sub> N<sub>2</sub> และน้ำ

โครงสร้างภายในของแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์สามารถแบ่งได้เป็นสองแบบ คือ pellet type และ monolith type <sup>[4]</sup> ดังรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 โดย pellet type ประกอบด้วยวัสดุทรงกลมเล็กๆ จำนวนมากบรรจุอยู่ในกล่องเหล็กกล้าไร้สนิม วัสดุทรงกลมนั้นเป็นพวกเซรามิกซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มิลลิเมตร ด้านบนของผิวจะเคลือบด้วยโลหะมีค่า โดยความหนาของผิวเคลือบประมาณ 0.25 มิลลิเมตร ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์แบบนี้ ผิวของเซรามิกส่วนใหญ่จะเคลือบด้วยสารที่มีความเป็นรูพรุนสูง เช่น อะลูมินา ก่อนนำมาเคลือบด้วยโลหะมีค่า อีกครั้งหนึ่ง วัสดุที่เลือกมาใช้ทำเป็นเม็ดทรงกลมเล็กๆ นี้จะต้องมีสมบัติทนต่อการขัดสีที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1000°C) ได้ดี ส่วนแบบ monolith โครงสร้างภายในกล่องเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะคล้ายรวงผึ้งทำด้วยเซรามิก (honeycomb ceramic) และรวงผึ้งที่มีช่องเป็นรูสี่เหลี่ยมเล็กๆ ให้ไอเสียไหลผ่านได้นั้นมีขนาดระหว่าง 30-60 ช่องต่อตารางเซนติเมตร โลหะมีค่าจะเคลือบอยู่บนอะลูมินาที่มีรูพรุนสูง และอะลูมินาจะเคลือบอยู่บนผิวของโครงเซรามิกที่คล้ายรวงผึ้งอีกทีหนึ่ง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างภายในแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ชนิด Pellet type<sup>[4]</sup>



รูปที่ 2.3 โครงสร้างภายในแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ชนิด Monolith type<sup>[4]</sup>

### การทำงานของแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์

แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนไอเสีย 3 ชนิดได้แก่ HC, CO, และ NO<sub>x</sub> ให้เป็น CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, และ O<sub>2</sub> ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) และรีดักชัน (reduction) ดังสมการที่ 2.1-2.4 ซึ่งแสดงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ แต่อัตราการเกิดจะช้ามาก ดังนั้นจึงต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดเร็วขึ้น

ขั้นแรก : กำจัด ไนโตรเจนออกไซด์ของ โดยปฏิกิริยารีดักชัน ให้เป็นแก๊สไนโตรเจน



หรือ



โดยใช้แพลทินัม และโรเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นที่สอง กำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์



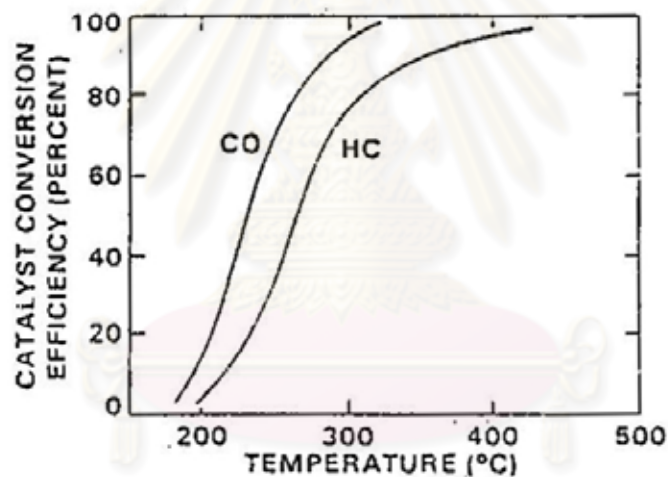
โดยใช้แพลทินัมและแพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้นสุดท้าย กำจัดไฮโดรคาร์บอนตกค้างที่หลงเหลือจากการเผาไหม้



ขณะที่อุณหภูมิของแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ไม่เกิน 230-250°C ประสิทธิภาพของการบำบัดแก๊สพิษจะมีค่าต่ำกว่า 50 % ส่วนอุณหภูมิที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดและอายุการใช้งานที่นานพอสมควรจะอยู่ในช่วง 400-800°C โดยอุณหภูมิสูงสุดไม่ควรเกิน 850°C ดังแสดงในรูปที่ 2.4

นอกจากนี้รถยนต์ยังมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณตัวหนึ่งเรียกว่า แลมดาเซ็นเซอร์ (Lamda sensor) อยู่ด้านหน้าของตัวแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ สำหรับตรวจวัดปริมาณแก๊สออกซิเจนในไอเสีย และรายงานค่าที่ได้ส่งกลับไปยังกล่องอีซียู (ECU) เพื่อให้ปรับเพิ่มหรือลดปริมาณอากาศที่เข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงให้ได้ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมกับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (stoichiometric point) ตลอดเวลา และเพื่อให้มีออกซิเจนเหลือเพียงพอสำหรับการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ด้วย



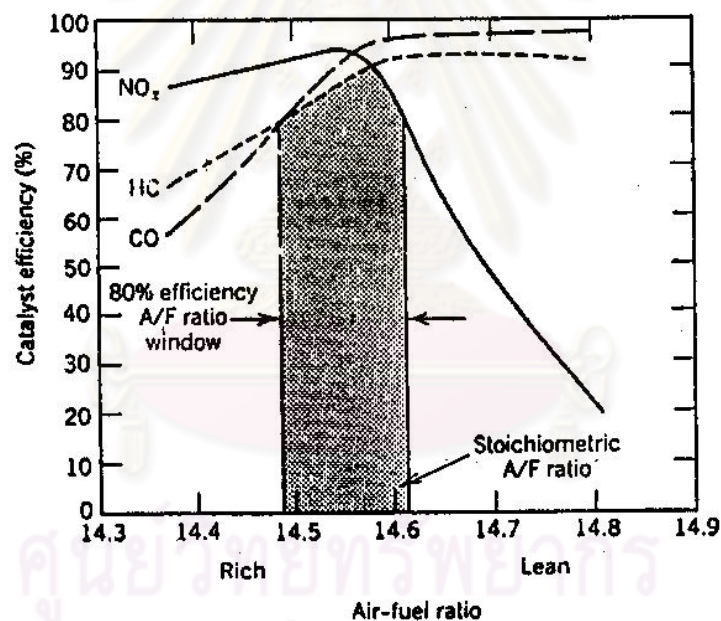
รูปที่ 2.4 กราฟประสิทธิภาพการบำบัด CO และ HC ของ แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ<sup>[5]</sup>

แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์รุ่นแรกๆ ที่ผลิตมาใช้งานในช่วงต้นทศวรรษที่ 1970 การออกแบบไม่ได้รวมถึงการบำบัด NOx รวมทั้งในเวลานั้น กฎบังคับปริมาณของ NOx ยังไม่เข้มงวดเหมือนปัจจุบันการลดปริมาณ NOx จึงใช้วิธีลดอุณหภูมิของการเผาไหม้ โดยการนำไอเสียบางส่วนกลับเข้าไปผสมกับไอดี (exhaust gas recirculation - EGR) ก่อนที่จะป้อนเข้าไปในกระบอกสูบซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ได้ผลดีและสามารถลด NOx ได้ แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับวิธีนี้เพื่อลดปริมาณ HC, CO และ NOx ให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด เป็นเรื่องยาก เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไอเสียกลับเข้าไปผสมในไอดี เพื่อต้องการลดปริมาณ NOx ให้อยู่ภายใต้เกณฑ์บังคับใหม่นั้น กลับก่อให้เกิดปัญหา

การสิ้นของเครื่องยนต์ และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีการพัฒนาแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ขึ้นมาใหม่เพื่อให้สามารถบำบัดแก๊สพิษทั้งสามชนิดได้ จึงเป็นที่มาของ dual-bed catalyst และ three-way catalyst เนื่องจาก dual-bed catalyst มีข้อเสีย คือเครื่องยนต์จะต้องทำงานที่สภาวะไอดีเข้มข้น (rich mixture) ตลอดเวลาซึ่งทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงและแก๊สแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ที่เกิดขึ้นใน bed ส่วนแรกจะถูกรีออกไซด์ เป็น NO ใน bed ส่วนที่สองทำให้การควบคุมปริมาณ  $\text{NO}_x$  ทำได้ยาก ส่วน three-way catalyst ซึ่งเป็นแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน มีลักษณะเป็นการรวม bed ทั้งสองส่วนของ dual-bed catalyst เข้าด้วยกัน ดังนั้นใน three-way catalyst แก๊สทั้งสามได้แก่ HC, CO และ ( $\text{NO}_x$ ) จะถูกบำบัดไปพร้อมกัน ซึ่งในการทำงานไม่ต้องการอากาศเพิ่มเติมจากภายนอก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีการสูบอากาศสำหรับเครื่องยนต์เบนซินและดีเซลนั้น อัตราส่วนโดยมวลของอากาศต่อเชื้อเพลิง (Stoichiometric Air/Fuel Ratio) เท่ากับ 14.7 : 1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เผาไหม้สมบูรณ์ที่สุด ซึ่งจะปล่อยมลพิษออกมาน้อยกว่าอัตราส่วนผสมอื่นๆ โดยสามารถปรับการจ่ายเชื้อเพลิงให้ได้อัตราส่วนโดยมวลของอากาศต่อเชื้อเพลิง สำหรับเชื้อเพลิงต่างๆ ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งในขณะที่เครื่องยนต์ทำงานจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงเกินกว่า 0.05 ซึ่งเป็นช่วง Air/Fuel Ratio ที่แคบมากดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ในการบำบัดไอเสียกับปริมาณ Air/Fuel Ratio ที่ค่าต่างๆ<sup>[5]</sup> อย่างไรก็ตาม การควบคุม Air/Fuel Ratio ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด ค่อนข้างจะเกินความสามารถของเครื่องยนต์ที่ใช้คาร์บิวเรเตอร์ธรรมดาทุกๆ ไปหรือแม้แต่เครื่องยนต์ที่ใช้ระบบหัวฉีด ดังนั้นการควบคุมอากาศต่อเชื้อเพลิงให้อยู่ในช่วงดังกล่าวต้องอาศัยการติดตั้งออกซิเจนเซนเซอร์ไว้ที่ท่อไอเสียก่อนที่จะถึงแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ สัญญาณจากออกซิเจนเซนเซอร์จะส่งไปยังหน่วยควบคุม (electronically controlled unit) ซึ่งหน่วยควบคุมนี้จะแปลสัญญาณแล้วจึงส่งสัญญาณไปควบคุมระบบจ่ายเชื้อเพลิงให้ปรับส่วนผสมของไอดีให้อยู่ภายในช่วงที่ควบคุมอีกครั้ง

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนโดยมวลของอากาศต่อเชื้อเพลิง สำหรับเชื้อเพลิงต่างๆ<sup>[2]</sup>

เชื้อเพลิง	อัตราส่วนโดยมวล ของอากาศต่อ เชื้อเพลิง	อัตราส่วนโดย ปริมาตร	%โดยมวลของ เชื้อเพลิง
เบนซิน	14.7:1	-	-
NGV (มีเทน)	17.2:1	97:1	6.8%
LPG (โพรเพน+บิวเทน)	15.5:1	23.9:1	5.8%
เอทานอล	9:1	-	11.1%
ไฮโดรเจน	34:1	2.39:1	2.9%
ดีเซล	14.6:1	-	6.8%



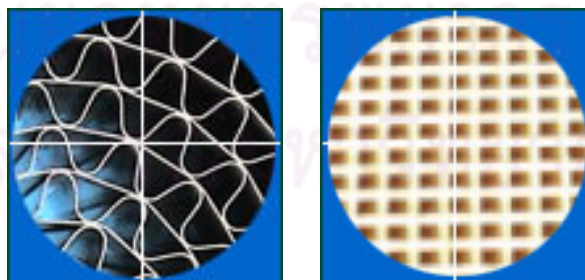
รูปที่ 2.5 กราฟประสิทธิภาพการบำบัด CO, HC, NO<sub>x</sub> ของ three-way catalyst ที่ค่า Air/Fuel Ratio ต่างๆ<sup>[5]</sup>

ประสิทธิภาพของแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ได้รับการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับมาตรฐานควบคุมไอเสียที่เข้มงวดมากขึ้น ตัวอย่างแนวทางในการปรับปรุงแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ในอนาคตได้แก่ ระบบอุ่นแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์เนื่องจากจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิประมาณ 300°C ซึ่งการติดเครื่องยนต์ขณะเย็น แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ไม่สามารถกำจัดแก๊สพิษได้ทันที ทำให้มีแก๊สพิษต่างๆ ถูกปล่อยออกมา ต้องรอจนแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์

เตอรืร้อนซึ่งใช้เวลาหลายนาที่ ดังนั้นจึงพัฒนาระบบอุ่นแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ 2 ทาง คือ การย้ายให้แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ เข้าใกล้เครื่องยนต์มากขึ้น ซึ่งทำให้แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ร้อนเร็วขึ้น แต่มีข้อเสียคือแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ต้องรับสภาพอุณหภูมิสูงตลอดเวลา ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง (โดยทั่วไปมีอายุการใช้งานเท่ากับรถยนต์) อีกทางคือการใช้ลดความร้อนอุ่นแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งวิธีนี้ไม่สามารถใช้งานได้จริง เนื่องจากแบตเตอรี่ในรถยนต์ขนาด 12 โวลต์ ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ไม่เพียงพอทำให้ลดไฟฟ้าร้อนแต่อาจเป็นไปได้สำหรับการนำไปใช้ในรถยนต์ระบบไฮบริด (hybrid) ที่ใช้ทั้งไฟฟ้าและน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง วิธีที่สองเป็นการใช้ระบบดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนโดยใช้สารบางชนิด เช่น ซีโอไลท์ (zeolite) โดยวางซีโอไลท์อยู่ด้านหน้าของแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ ซีโอไลท์จะดูดซับแก๊สไฮโดรคาร์บอนในไอเสียเอาไว้ในช่วงที่แคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์อยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำเมื่ออุณหภูมิแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์สูงพอที่จะสามารถทำงานได้ ซีโอไลท์จะคายไอของแก๊สไฮโดรคาร์บอนออกมาเพื่อไปทำปฏิกิริยาเคมี ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีแนวโน้มว่าสามารถลดแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่หลุดออกจากแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นอีก

### 2.3 โครงสร้างโลหะของแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์

ในกรณีตัวรองโลหะทำจากแผ่นโลหะบางเรียบ วางซ้อนกันเป็นชั้นๆ เป็นรูปทรงกลมหรือทรงกระบอก โดยโลหะแผ่นเรียบจะวางสลับกัน และเป็นชั้นลูกฟูกดังรูปที่ 2.6 เพื่อผลิตโครงสร้างที่เป็นช่องซึ่งสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยการเคลือบเช่นเดียวกับตัวรองเซรามิก โดยกระบวนการที่สามารถเพิ่มขีดความสามารถคือ การใช้โครงสร้างรวงผึ้งควบคู่ไปกับการใช้เทคโนโลยี vacuums brazing ที่อุณหภูมิสูง<sup>[6]</sup>



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ที่ทำจากโลหะและเซรามิก<sup>[6]</sup>

## 2.4 กระบวนการผลิตเซรามิกวงผึ้ง

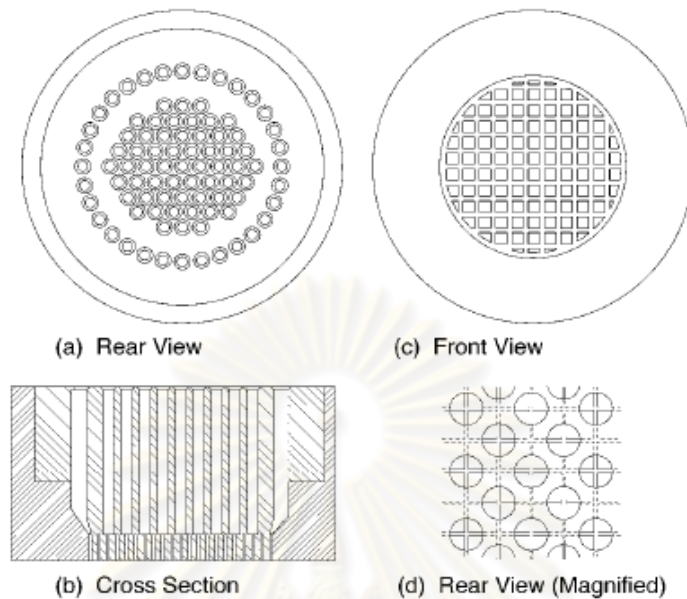
ตัวรองเซรามิกวงผึ้งถูกผลิตขึ้นในปี 1975 ซึ่งเตรียมจากคอร์เดียไรต์ ( $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$ ) ซึ่งได้จากดินเกาลิน ทัลค์ และอะลูมินา โดยส่วนประกอบดังกล่าวจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงมีปริมาณรูพรุนและสามารถต้านทานต่อการเกิดการออกซิเดชันได้ดี<sup>[2]</sup> ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติของวงผึ้งคอร์เดียไรต์<sup>[2]</sup>

Item		Properties	
Crystal structure		Cordierite $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$	
Thermal properties	Thermal expansion ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) (40 °C–800°C)	< 1.0	
	Specific heat (cal/g°C)	0.2	
	Softening temperature (°C)	1410	
	Melting point (°C)	1455	
Physical properties	Total pore volume ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	0.2	
	Porosity (%)	35	
	Mean pore diameter ( $\mu\text{m}$ )	4	
Mechanical properties	Compressive strength ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	A-axis	> 85
		B-axis	> 11
		C-axis	> 1
Thermal shock resistance	Electric furnace-room atmosphere (°C Difference)	> 650	

กระบวนการผลิตเซรามิกวงผึ้งประกอบด้วยสี่ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบตั้งต้น การขึ้นรูป การเผาผนึก การวิเคราะห์และตรวจสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์หลังเผา สำหรับวัตถุดิบตั้งต้น ความบริสุทธิ์ และขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบส่งผลโดยตรงต่อลักษณะเฉพาะของเนื้อคอร์เดียไรต์ เช่น เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน และการทนต่ออุณหภูมิของตัวรอง โดยจะผสมวัตถุดิบทั้งหมดกับสารตัวเติมและน้ำในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับเนื้อดินปั้น ในการขึ้นรูปจะใช้วิธีการรีดขึ้นรูป (extrusion) ซึ่งจะขึ้นรูปให้มีขนาดและรูปร่างต่างๆ โดยขึ้นงานที่ได้จะต้องมีสัมประสิทธิ์ทางความร้อนต่ำ ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญและจำเป็นสำหรับตัวรองแคทาไลติกคอนเวอร์เตอร์เพื่อทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน โดยรูปที่ 2.7<sup>[2]</sup> แสดงตัวอย่างโครงสร้างของหัวแบบเซรามิกวงผึ้ง กลไกในการสร้างเซลล์เริ่มขึ้นเมื่อเนื้อดินปั้นไหลเข้าไปยังรูด้านหลังของหัวแบบดังรูป a ผ่านหัวแบบดังรูป b และออกมาผ่านทางแยกด้านหน้าของหัวแบบดังรูป c เพราะว่าวัตถุดิบจะไหลอย่างต่อเนื่องออกจากหัวแบบ และเชื่อมต่อกันเป็นผนังของวงผึ้งดังรูป d โดยโครงสร้างที่สามารถขึ้นรูปได้แก่ สี่เหลี่ยมจัตุรัส หกเหลี่ยม สามเหลี่ยม รูปเหลี่ยมมุมฉาก

ซึ่งโครงสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือสี่เหลี่ยมจัตุรัสเนื่องจากมันมีความสมดุลระหว่าง ความแข็งแรงทางกลและ pressure drop ซึ่งปัจจุบันโครงสร้างที่เป็นหกเหลี่ยมก็มีการใช้งานมากขึ้น



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างโครงสร้างของหัวแบบเซรามิกรวงผึ้ง<sup>[2]</sup>

กระบวนการเผาผลาญนี้ส่งผลสำคัญต่อลักษณะสมบัติของตัวกรอง เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน การดูดซึมน้ำ เปอร์เซ็นต์การหดตัวของผลิตภัณฑ์ และความเสถียรทางความร้อน โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ  $1200-1400^{\circ}\text{C}$  ซึ่งที่อุณหภูมินี้ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์<sup>[2]</sup>

## 2.5 หัวแบบ (Die) สำหรับเซรามิกรวงผึ้ง

โดยทั่วไปหัวแบบ (die) ซึ่งใช้ในการขึ้นรูปรวงผึ้งมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 15-233 ช่องต่อตารางเซนติเมตร หรือประมาณ 100-1500 ช่องต่อตารางนิ้ว และที่ใช้ทั่วไปในทางอุตสาหกรรมคือ 93, 62, 47, และ 31 ช่องต่อตารางเซนติเมตร หรือประมาณ 600, 400, 300 และ 200 ช่องต่อตารางนิ้ว โดยมีผนังบางอยู่ในช่วง 0.1-0.6 มิลลิเมตร ขนาดและรูปร่างภายในของรวงผึ้งจะพิจารณาถึงการนำไปใช้ เช่น การนำไปใช้ในรถยนต์จะต้องพิจารณาขนาดของเครื่องยนต์และช่องว่างภายใน ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ อยู่ที่ 62 ช่องต่อตารางเซนติเมตร หรือ 400 ช่องต่อตารางนิ้ว และมีผนังหนา 0.15 มิลลิเมตร ซึ่งใช้เป็นแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ในเครื่องยนต์แก๊สโซลีน และขนาด 15-30 ช่องต่อตารางเซนติเมตร หรือ 100-200 ช่องต่อตารางนิ้ว และผนังหนา 0.30-0.64 มิลลิเมตร หรือประมาณ 12-25 มิลลิเมตร นำไปใช้สำหรับตัวกรองอนุภาคในเครื่องยนต์ดีเซล<sup>[7]</sup> โดยในงานวิจัยนี้จะใช้หัวแบบขนาด 72 ช่องต่อตารางนิ้ว และมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งใช้



ในโครงการพัฒนาเซรามิกส์คะตะลิสต์เพื่อพัฒนาเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง SOFC ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)



รูปที่ 2.8 ลักษณะของ Die (จากโครงการพัฒนาเซรามิกส์คะตะลิสต์เพื่อพัฒนาเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง SOFC ของ MTEC)

## 2.6 พฤติกรรมการไหลตัวของเนื้อดินปั้น

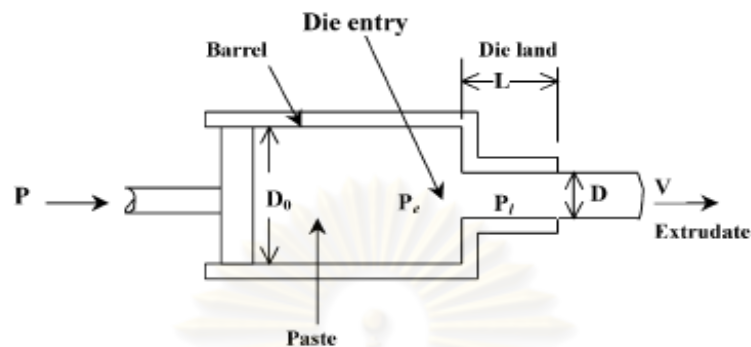
เนื้อดินปั้นที่จะนำไปรีดต้องมีความหนาแน่นสูง ซึ่งประกอบขึ้นจากอนุภาคของแข็งแขวนลอยอยู่ในของเหลวซึ่งมีความหล่อลื่น โดยในงานวิจัยนี้ อนุภาคของแข็งเป็นคอร์เดี่ยวไรต์ซึ่งเกิดจากการผสมของเศษคอร์เดี่ยวไรต์ป่น อะลูมินา และทัลค์ ขณะที่เฟสของเหลวเป็นสารตัวเติมที่ละลายในน้ำกลั่น โดยสารตัวเติมที่ใช้ได้แก่ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) และน้ำมันกลีเซอริน มีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานทำให้ชิ้นงานหลังจากขึ้นรูปสามารถคงตัวอยู่ได้ ซึ่งมีบทบาทในการเคลื่อนที่ของเฟสของเหลวไปยังเฟสของแข็ง (liquid migration) เนื่องจากมีผลต่อความดันที่ใช้ในการรีด และอาจทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพต่ำเฟสของเหลวควรจะมีค่าความหนืดสูงเมื่อมีอัตราเฉือนต่ำ (low shear rate) ในทางตรงข้ามต้องมีความหนืดต่ำเมื่อได้รับอัตราเฉือนสูง<sup>[7]</sup>

### 2.6.1 การไหลตัวแบบซูโดพลาสติก (Pseudo-plastic)

การไหลตัวแบบ pseudo-plastic เป็นหนึ่งในสี่แบบการไหลตัวของ Non Newtonian Fluid<sup>[8]</sup> ซึ่งเป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ของไหลมีค่าความหนืดเป็นค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนหรือ ความเร็วในการกวน ลักษณะการไหลแบบนี้แบ่งเป็น 4 แบบของไหลที่มีค่าความหนืดลดลง เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน หรือเมื่อมีการให้แรง การไหลตัวของเนื้อสารก็จะง่ายขึ้น ตัวอย่างเช่น น้ำผลไม้เข้มข้น กาวน้ำใส สารช่วยแขวนตะกอน สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ สารละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น

## 2.6.2 Benbow-Bridgwater model

Benbow และ Bridgwater ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ต้องการในการรีดเนื้อดินปั้น โดยกลไกการรีดของเนื้อดินปั้นและพารามิเตอร์ในการรีดโดยใช้ เครื่องรีดตั้งแผนผังดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนผัง Benbow-Bridgwater model<sup>[9]</sup>

จากโมเดลของ Benbow-Bridgwater สามารถหาค่า pressure drop ในเนื้อดินปั้นในระหว่างการรีดผ่านหัวแม่แบบกับมุม 90° ของ die-entry ซึ่งเราสามารถหาพารามิเตอร์เพื่อบอกสมบัติของเนื้อดินปั้นจาก สมการที่ 2.7<sup>[9]</sup>

$$P_d = P_e + P_l$$

$$= 2(\sigma + \alpha V^m) \ln(D_0 / D) + 4(\tau + \beta V^n)(L / D) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $P_e$  = ความดันที่ลดลง ณ die entry

$P_l$  = ความดันที่ลดลง ณ die land

$D_0$  = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ barrel

$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ die

$L$  = ความยาวของ die

$\sigma$  = yield strength of dough

$\tau$  = stress บริเวณผนังของ die-land

$\alpha$  = velocity sensitivity factor of the bulk yield stress

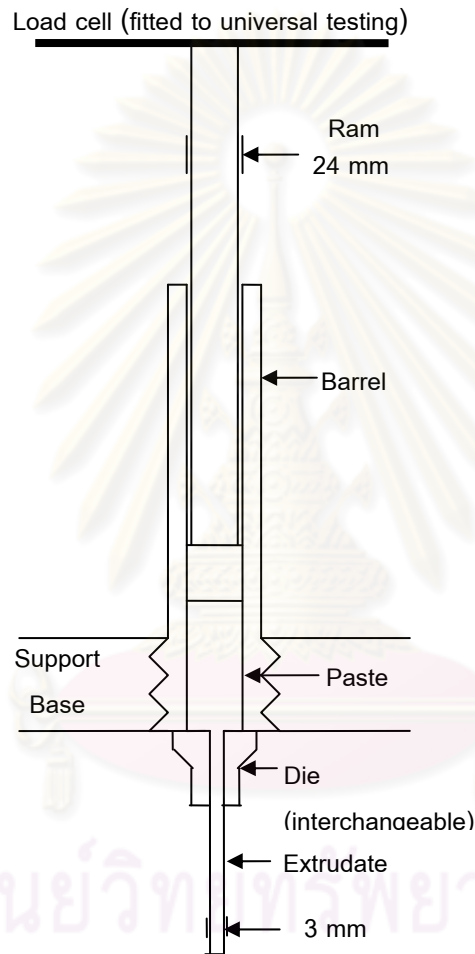
$\beta$  = wall shear stress velocity factor

$m$  = bulk velocity exponent

$n$  = wall velocity exponent

$V$  = ความเร็วของการรีด

โดยพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ได้จากการรีดซึ่งวิเคราะห์ได้จากการไหลตัวของเนื้อดินคือ  $\sigma, \tau, \alpha, \beta, m, n$  โดยได้จากการทดลองด้วยเครื่อง Laboratory ram extrusion รูปที่ 2.10 โดยความดันที่วัดได้จะมีค่าแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวแบบ (L/D) ที่ความเร็วในการรีดแตกต่างกัน โดยข้อมูลที่ได้สามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และความเร็วในการรีดของหัวแบบอื่นๆ และเนื้อดินปั้นที่มีองค์ประกอบอื่นๆ ได้

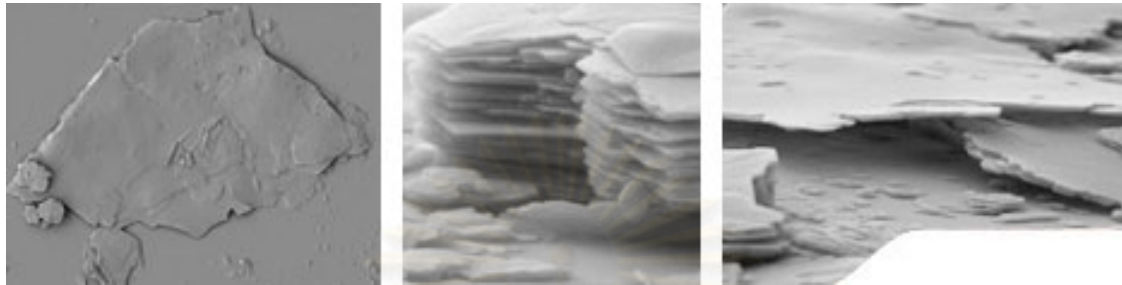


รูปที่ 2.10 เครื่อง Laboratory ram extrusion ที่ใช้ในการทดลอง

### 2.7.3 สมบัติความเหนียวของเนื้อดินปั้น

ความเหนียวของเนื้อดินปั้นมีผลมาจากลักษณะรูปร่างของดิน ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแผ่น (Platy structure) ซึ่งมีขนาดอยู่ในระดับไมครอน เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ดินเกาะกันและทลัดมี ส่วนช่วยในการไหลตัวและมีผลต่อการจัดเรียงตัวของผลึกคอร์เดียไรต์ในเนื้อรวงผึ้งที่ผ่านการเผา ผนึกแล้วเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นแผ่นซ้อนๆ กันดังรูปที่ 2.11<sup>[10]</sup> ส่วนที่เป็นชั้นของแร่เคโอลิไนต์ ( $\text{Al}_2(\text{OH})_4(\text{Si}_2\text{O}_5)_2$ ) ในดินเกาะกัน ประกอบขึ้นจากสองชั้นของ silicate tetrahedral sheet และ

octahedral sheet ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ในขณะที่โครงสร้างทาลค์มีสามชั้นคือ silicate tetrahedral sheet, brucite octahedral sheet ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) และ silicate tetrahedral sheet จัดเรียงซ้อนกันเป็นสามชั้นเหมือนแซนวิช โดยแผ่นซ้อนของทาลค์มีขนาดประมาณ 10-20 ไมครอน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าดิน (0.1-10 ไมครอน)<sup>[11]</sup>



รูปที่ 2.11 Platy structure ของแวกดินเคโอลิไนต์<sup>[10]</sup>

## 2.7 ตัวกรองเซรามิกในเครื่องยนต์ดีเซล

ตัวกรองอนุภาคในเครื่องยนต์ดีเซล (diesel particulate filter) หรือ DPF เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อกำจัดฝุ่นหรือเขม่าจากท่อไอเสียรถยนต์จากเครื่องยนต์ดีเซล โดยประสิทธิภาพของตัวกรองจะสามารถกำจัดเขม่าออกมากกว่า 85% หรือในบางครั้งอาจจะมีประสิทธิภาพถึง 100% เครื่องยนต์ดีเซลจะมาพร้อมกับตัวกรองซึ่งทำหน้าที่กำจัดเขม่าควันออกจากท่อไอเสียรถยนต์ ตัวกรองบางชนิดทำหน้าที่เป็นตัวกรองอย่างเดียว ขณะที่บางชนิดจะเผาไหม้อนุภาคที่สะสมอยู่ด้วย ไม่เพียงแต่ใช้เป็นตัวกรองสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น (passive catalyst) แต่ยังใช้ใน active technology เช่น การให้ความร้อนตัวกรองไปจนถึงอุณหภูมิซึ่งเผาไหม้เขม่า<sup>[12]</sup>

### การลดลงของความดันและความสามารถในการไหลผ่าน (Pressure drop and permeability)

การจะทำให้ประสิทธิภาพการกรองสูงขึ้น Pressure drop เป็นสมบัติที่สำคัญสำหรับตัวกรอง โดย Pressure drop ของแก๊สหรือของเหลวจะไหลผ่านวัสดุที่มีรูพรุน ซึ่งอธิบายได้โดยใช้กฎของ Darcy และ Forchheimer's Extension ดังสมการที่ 2.5<sup>[13]</sup>

$$\Delta p = \frac{\eta}{k} dv + \beta \rho d v^2 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\Delta p =$  Pressure drop (Pa)

$\eta =$  Dynamic viscosity (Pa·s)

$k =$  การไหลซึมผ่านจำเพาะ ( $\text{m}^2$ )

$$\begin{aligned}
 d &= \text{ความหนาของผนัง (m}^2\text{)} \\
 v &= \text{ความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่าน (m/s)} \\
 \beta &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉื่อย (m}^{-1}\text{)} \\
 \rho &= \text{ความหนาแน่นของแก๊ส (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}
 \end{aligned}$$

โดยการไหลผ่านจำเพาะของวัสดุที่มีรูพรุนจะขึ้นอยู่กับ ขนาด ปริมาตร รูปร่างของรูพรุน สำหรับการไหลผ่านของวัสดุเซรามิกซึ่งจะใช้เป็นตัวกรองอนุภาคในเครื่องยนต์ดีเซล ความสามารถในการไหลผ่านของวัสดุที่นำมาใช้เป็น DPF อยู่ในช่วง  $10^{-12} \text{ m}^2$  (ตัวกรองที่เป็นเซรามิก) ถึง  $10^{-9} \text{ m}^2$  (ตัวกรองที่เป็นเส้นใยหรือโฟม) ซึ่งสามารถหาคำนวณได้จากสมการของ Ergun ดังสมการที่ 2.6

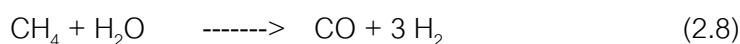
$$k = \frac{\varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} D^2 \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}
 k &= \text{ความสามารถในการไหลผ่านของวัสดุ} \\
 \varepsilon &= \text{เมื่อ ความพรุนตัว (-)} \\
 D &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (m)}
 \end{aligned}$$

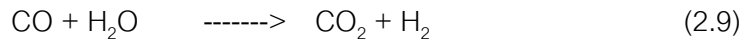
ความต้านทานการไหลตัวของระบบรวมทั้งหมดของตัวกรองได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอื่นๆ ด้วย ปริมาณของแก๊สที่สูญเสียไปจะเป็นไปตามความดันที่ลดลง ซึ่งก็คือแรงเสียดทานตามช่องในผนังของตัวกรอง

## 2.8 อุปกรณ์แปลงแก๊สด้วยไอน้ำ (steam reformer)

หลักการทำงานของอุปกรณ์แปลงแก๊สด้วยไอน้ำจะอาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชันของแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ (catalytic oxidation) เพื่อผลิตไฮโดรเจนจากไฮโดรคาร์บอน โดยในอุตสาหกรรมจะใช้วิธีนี้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cells) ในทางการค้าจะใช้วิธีเปลี่ยนไอน้ำและแก๊สธรรมชาติ (steam methane reforming (SMR)) ซึ่งจะทำให้สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ปริมาณมากและต้นทุนต่ำ โดยใช้อุณหภูมิสูงประมาณ  $700\text{-}1100^\circ\text{C}$  และมีนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ไอน้ำจะเกิดปฏิกิริยากับมีเทนกลายเป็น CO และ  $\text{H}_2$  ดังสมการที่ 2.8<sup>[14]</sup>



นอกจากนั้นเรายังสามารถพบไฮโดรเจนได้อีกที่อุณหภูมิต่ำเมื่อคาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับไอน้ำดังสมการที่ 2.9



## 2.9 การเลือกวัสดุสำหรับงานเซรามิกทรงผึ่ง

ข้อดีของโครงสร้างที่เป็นเซรามิกเช่น อะลูมินา ซิลิคอนไนไตรด์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และเซอร์โคเนียเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะ คือ น้ำหนักเบา มีความเสถียรทางความร้อนและเคมี โดยวัสดุที่นำมาใช้ผลิตเซรามิกทรงผึ่งจะต้องมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง มีความต้านทานต่อความเค้นที่เกิดจากความร้อน (thermal stress) ต้านทานการกัดกร่อนและมีความแข็งแรงเพียงพอเพื่อรองรับความต้องการสำหรับสำหรับการนำไปใช้งาน นอกจากนี้วัสดุที่นำมาใช้ควรมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ (low coefficient of thermal expansion (CTE)) และสามารถนำความร้อนได้ดีเพื่อลดผลที่เกิดจากความเครียดจากอุณหภูมิ ซึ่งในการเลือกวัสดุไม่สามารถครอบคลุมสมบัติที่ต้องการทั้งหมดของวัสดุได้ ดังนั้นในการเลือกวัสดุนำไปใช้งานต้องคำนึงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับการใช้งานสูงสุดซึ่งตารางที่ 2.3 จึงแสดงการเลือกวัสดุซึ่งเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับทำตัวกรองในเครื่องยนต์ดีเซล

ตารางที่ 2.3 วัสดุที่น่าสนใจสำหรับตัวกรองในเครื่องยนต์ดีเซล<sup>[13]</sup>

Material	Cordierite	SiC	Silicon	Mullite	Al-Titanate	FeCrNi
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.1	3.1-3.2	2.3	2.9	3.3	8.1
Thermal conductivity (RT) (W/mK)	1-3	90	120	4-5	1.5-3	14
CTE 20–1000°C (10 <sup>-6</sup> 1/K)	0.9-2.5	4.7-5.2	4.4	4.4-0.5	3	17
Young's modulus (GPa)	130	410	110	150	20	200
Thermal limit for application	1350	1500	350	1600	1500	1250
Corrosion resistance *	-	+	0	0	0	-
Price *	++	-	--	+	+	--

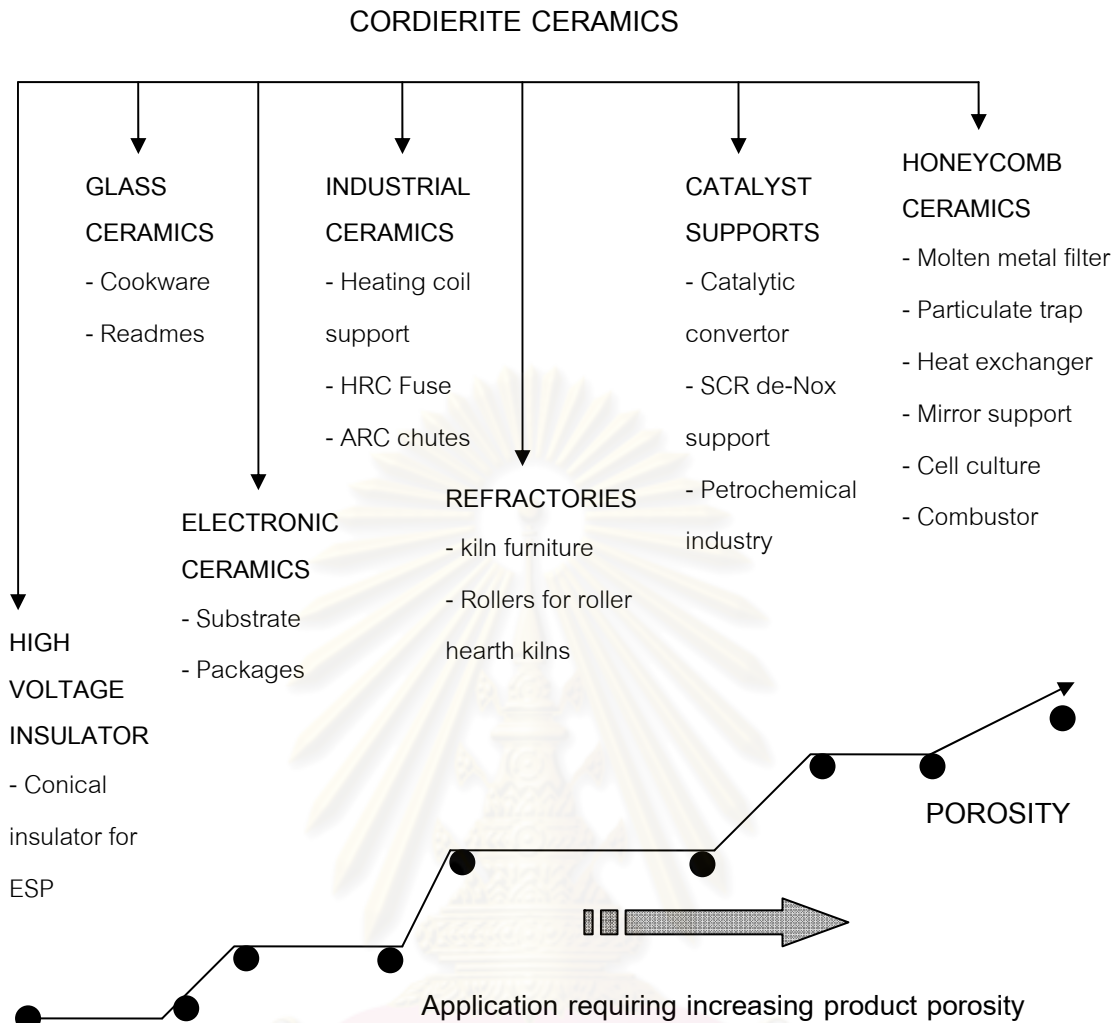
\*สมบัติที่สามารถเปรียบเทียบกันโดยตรง ++ = ดีมาก + = ดี 0 = ปานกลาง - = ไม่ดี -- = ไม่ดีมาก

### 2.9.1 คอร์ดิเอร์ไรต์

คอร์ดิเอร์ไรต์เป็นวัสดุประกอบจำพวก แมกนีเซียม อะลูมินาและซิลิกेट ดังแสดงในเฟสไดอะแกรมดังรูปที่ 3.4 โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ  $2\text{MgO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$  ซึ่งค้นพบโดยนักธรณีวิทยาชาวฝรั่งเศสชื่อ Pierre Louis Antoine Cordier (1777 -1861) คอร์ดิเอร์ไรต์ในธรรมชาตินั้น

เป็นแร่ที่หายากมาก ดังนั้น คอเรียไรต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมนั้นจะถูกสังเคราะห์ขึ้นมาจากวัตถุดิบต่างๆ เช่น ดินดำ ดินขาว ทัลค์ หรือแมกนีไซต์ (Magnecite) และอะลูมินา ในการผลิตคอเรียไรต์มาใช้งานนั้น ค่อนข้างควบคุมการเกิดเฟสคอเรียไรต์ได้ยาก เนื่องจากจะเกิด incongruent melting compound ในช่วงอุณหภูมิ 1100-1400°C ซึ่งมีผลทำให้คอเรียไรต์มีจุดสุกตัวแคบ (narrow firing range) ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาการกลายเป็นเนื้อแก้วเนื่องจากการเกิดเฟสของเหลวอย่างรวดเร็ว การเพิ่มปริมาณสารบางตัวเช่น เซอร์โคเนีย สามารถเพิ่มช่วงอุณหภูมิการเผาโดยไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการขยายตัวทางความร้อนและการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากนัก ในระหว่างการทำปฏิกิริยาของ ดินเหนียว อะลูมินา และทัลค์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 1250°C ดินเหนียวและทัลค์จะเปลี่ยนรูปเป็น mullite และ protoenstatite ในช่วงแรก โดยจะรวมกับอะลูมินาเพื่อทำให้เกิดเฟสคอเรียไรต์ ซึ่งจะเกิดในช่วง 1250-1430°C<sup>[15]</sup> โดยอัตราการเกิดของ mullite จะสูงกว่าเนื่องจากแปรผันตามอัตราส่วนของอะลูมินาที่มากกว่าในองค์ประกอบของคอเรียไรต์<sup>[15]</sup>

โครงสร้างผลึกที่พบในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีสองแบบได้แก่ แอลฟาคอเรียไรต์ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล (hexagonal) พบได้ที่อุณหภูมิสูง และบีตาคอเรียไรต์ มีโครงสร้างแบบออร์โทโครมบิก (orthochromatic) โดยพบได้ที่อุณหภูมิต่ำ คอเรียไรต์เป็นวัสดุหลักในงานหลายประเภท อาทิ ใช้ในการเตรียมเป็นตัวรองเซรามิกวงฝังในแคลคูลติกคอนเวอร์เตอร์ซึ่งใช้ในรถยนต์ (automobiles) เตาอบทำความสะอาดด้วยตัวเอง (self-cleaning ovens) และในอุตสาหกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อน คอเรียไรต์เฟสแอลฟาสามารถเตรียมได้ง่ายด้วยปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction) ที่อุณหภูมิ 1300-1400°C โดยปรกติสารตั้งต้นที่ใช้ในสังเคราะห์ได้แก่ เกล็ดิน ทัลค์ และอะลูมินา<sup>[16]</sup> สมบัติที่สำคัญของคอเรียไรต์คือมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำและทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและสมบัติทางกลค่อนข้างดี สามารถการต้านทานต่อการกัดกร่อนทางเคมี ทนต่ออุณหภูมิและสามารถทำเป็นรูปร่างที่ซับซ้อนได้ และราคาต่ำ นอกจากนี้มันยังสามารถผลิตให้ได้ปริมาณสูงๆ โดยผ่านกระบวนการอัดรีดหรือกระบวนการอัดแห้ง เซรามิกวงฝังที่ได้จากคอเรียไรต์เป็นตัวรองที่มีปริมาณรูพรุนสูง (porous substrates) การรีดขึ้นรูปเป็นเทคนิคที่ใช้ในการผลิตเซรามิกจำนวนมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมรถยนต์ซึ่งมีการใช้ชิ้นส่วนตัวรองเซรามิกคอเรียไรต์มากกว่า 30 ปี<sup>[7]</sup> การประยุกต์ใช้หลักๆ ของเซรามิกคอเรียไรต์แสดงดังรูปที่ 2.12<sup>[7]</sup>



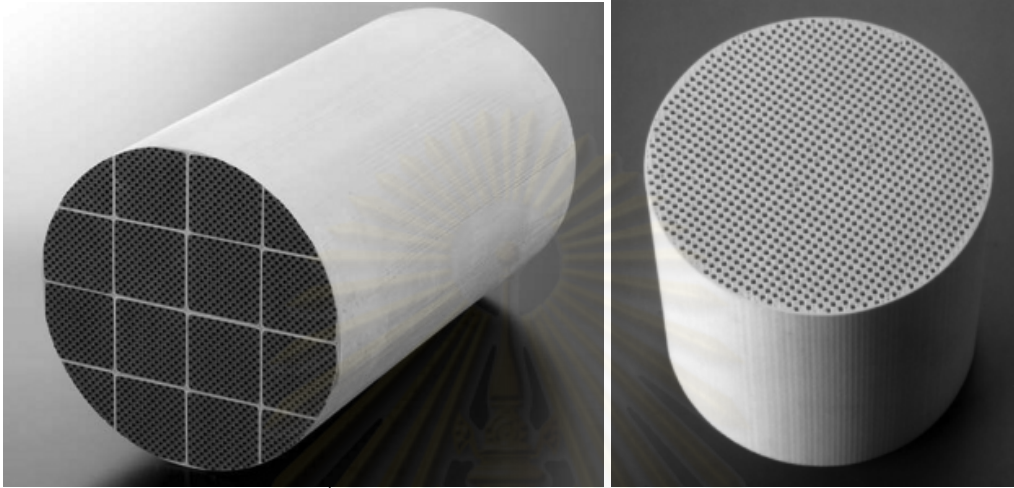
รูปที่ 2.12 การประยุกต์ใช้งานหลักๆ ของเซรามิกคอร์เดียไรต์<sup>[7]</sup>

### 2.9.2 ซิลิคอนคาร์ไบด์

ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นวัสดุเซรามิกที่มีโครงสร้างหลากหลาย ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เชื่อมพันธะด้วย ซิลิเกต (silicate-boned) หรือซิลิคอนคาร์ไบด์ที่เกิดจากการตกผลึก (Recrystallized SiC, RSiC) ซึ่งปกติจะเป็นรูพรุน หรือพวก SSiC หรือ LPS-SiC ซึ่งโดยทั่วไปถูกพัฒนาให้เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง แต่อย่างไรก็ตามวัสดุทั้งหมดนี้สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อจะควบคุมรูพรุนของวัสดุเพื่อที่จะใช้งานเป็นตัวกรอง Recrystallized sic หรือเรียกว่า (RSiC) สังเคราะห์ขึ้นจากการให้ความร้อนของผงซิลิคอนคาร์ไบด์สองขนาด (bimodal) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 2200°C ในสุญญากาศ โดยทั่วไปตัวกรองที่ทำจากซิลิคอนคาร์ไบด์จะขึ้นรูปเป็นส่วนๆ เป็นรูวงผึ้งก่อนจะนำมาประกอบกันโดยใช้ซีเมนต์ (low modulus



cement) เป็นตัวเชื่อมดังรูปที่ 2.13 ซึ่งบรรจุเส้นใยอะลูมิเนียมซิลิเกต ผงซิลิคอนคาร์ไบด์และเชื่อมกันด้วยพันธะซิลิกาเพื่อลดความเค้นของตัวกรองให้ต่ำซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่าง uneven regeneration เนื่องจากซิลิคอนคาร์ไบด์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงกว่าคอร์เดี่ยวไรต์



รูปที่ 2.13 ตัวกรองเซรามิกที่ทำจาก SiC (ด้านซ้าย) และตัวกรองคอร์เดียไรต์ (ด้านขวา)<sup>[13]</sup>

### 2.9.3 อะลูมิเนียมไททานเนต

อะลูมิเนียมไททานเนตเป็นวัสดุที่ส่วนใหญ่นำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กกล้า ส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมรถยนต์ และขึ้นส่วนใหญ่ในแคทาลิติกคอนเวอร์เตอร์ เนื่องจากสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี เช่นเดียวกับคอร์เดียไรต์ สมบัติทางกายภาพและทางกลของอะลูมิเนียมไททานเนตจะขึ้นอยู่กับทิศทาง (high anisotropy) เช่นสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ซึ่งนำไปสู่รอยแตกในเนื้อวัสดุทำให้วัสดุมีค่ายังมอดุลัสต่ำ และความแข็งแรงต่ำด้วย ในปัจจุบันมีการพัฒนาอะลูมิเนียมไททานเนตสำหรับเครื่องยนต์ที่มีน้ำหนักเบา โดยทำการผสมกับวัสดุตัวอื่นเช่น เฟลด์สปาร์ (Ca/Sr-Feldspar) และมัลไลต์ (mullite) ซึ่งสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดี และเสถียรทางเคมีและความร้อน แต่ความแข็งแรงทางกลก็ยังต่ำอยู่

### 2.9.4 ซิลิคอนไนไตรด์

ซิลิคอนไนไตรด์เป็นวัสดุอีกชนิดที่ใช้สำหรับทำตัวกรองสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิคอนคาร์ไบด์ ซิลิคอนไนไตรด์จะให้ความแข็งแรงสูงกว่า เนื่องจากซิลิคอนไนไตรด์เป็นสารประกอบที่มีพันธะระหว่างอะตอมเป็นพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง การสลายตัวให้เกิดแก๊สของซิลิคอนและไนโตรเจนต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1800 องศาเซลเซียส จึงทำให้ซิลิคอนไนไตรด์เป็นที่นิยมในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง<sup>[17]</sup> นอกจากนี้ มีค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำ แต่มีค่าการนำ

ความร้อนปานกลางและมีราคาสูง จากการรายงานของบริษัทอาซาฮีในประเทศญี่ปุ่นพบว่าตัวกรองซิลิคอนไนไตรด์ถูกผลิตขึ้นโดยใช้วิธีไนไตรเดชัน ของซิลิคอน โดยเทคนิคในการเกิดพันธะของซิลิคอนไนไตรด์เรียกว่า Reaction-bonded silicon nitride (RBSN) เพื่อจะให้ได้ว่าวัสดุตัวกรองซึ่งให้รูพรุนสูง และสามารถขึ้นรูปเป็นรูวงมุ้ง ซึ่งสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีและมีความแข็งแรงสูง มีการรายงานว่าบริเวณผิวของเกรนมีรูปร่างเป็น whisker ซึ่ง whisker ที่เกิดขึ้นจะทำให้การเกาะตัวกันแบบหลวมและจะมี pressure drop ต่ำ

### 2.9.5 มัลไลต์

มัลไลต์เป็นองค์ประกอบหลักของเซรามิกในระบบอะลูมิเนียมไนไตรด์ซึ่งพบในวัสดุทนไฟเนื่องจากมัลไลต์มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำที่อุณหภูมิสูงและทนต่อการกัดกร่อน แต่ไม่นำความร้อน โดยปรกติเทคนิคในการเผาผนึกจะผลิตเฉพาะมัลไลต์ที่มีความแข็งแรงสูงซึ่งมีโครงสร้างผลึกคล้ายรูปเข็ม ซึ่งจะเกิดในเฟสที่มีปริมาณเนื้อแก้วสูง มีผลทำให้ความเสถียรทางความร้อนลดลง ส่วนใหญ่มัลไลต์จะใช้ในการผลิตเป็นวัสดุทนไฟสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น แผ่นรองผลิตภัณฑ์เซรามิกเข้าเตาเผา เป็นต้น โดยสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าวัสดุจำพวกคอร์เดียไรต์ แต่เนื่องจากยังมีค่าการขยายตัวทางความร้อนสูงกว่าคอร์เดียไรต์ ( $5.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) จึงมักมีปัญหาการแตกหักเสียหาย หากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลันทำให้ไม่เป็นที่นิยมเท่าวัสดุจำพวกคอร์เดียไรต์

### 2.10 การเตรียมผลิตภัณฑ์เซรามิกคอร์เดียไรต์

มีงานวิจัยที่ทำการเตรียมคอร์เดียไรต์จากเงื่อนต่างๆ โดย Johnson และคณะ<sup>[18]</sup> ทำการเตรียมสารตั้งต้นคอร์เดียไรต์จากการผสมทัลค์ ดินเหนียวและอะลูมินา และศึกษาผลของการเติมแคลเซียมออกไซด์ต่อการขยายตัวทางความร้อน โดยพบว่า เฟสคอร์เดียไรต์เกิดขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิ  $1400^\circ\text{C}$  โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะเกิดเฟสของมัลไลต์ และคอร์ันดัมไปพร้อมๆ กับเฟสคอร์เดียไรต์ ซึ่งค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำสุดคือ  $0.74 \times 10^{-6} / \text{K}$  เมื่อทำการเผาขึ้นไฟเป็นเวลา 4 ชั่วโมงในชั้นงานที่ไม่มีการเติมแคลเซียมออกไซด์ แต่มีค่าการขยายตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่เติม ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมคอร์เดียไรต์เป็นอุณหภูมิค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงมีการพัฒนาขั้นตอนการเตรียมให้สามารถเตรียมคอร์เดียไรต์ได้ที่อุณหภูมิต่ำลง

Hirono และคณะ<sup>[19]</sup> สามารถเตรียมคอร์เดียไรต์ได้ที่อุณหภูมิ  $1300^\circ\text{C}$  ด้วยการเติมเซอร์โคเนียซึ่งจะทำให้คอร์เดียไรต์ที่เตรียมได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่ค่าการขยายตัวทางความร้อนเพิ่ม และเนื่องจากการเตรียมคอร์เดียไรต์ในงานวิจัยนี้ใช้สารละลายเป็นสารตั้งต้นในวิธีการเตรียมด้วยวิธีตกตะกอนร่วมกับเซอร์โคเนีย คอร์เดียไรต์ที่เตรียมได้จึงมีความบริสุทธิ์สูงแต่อาจมีเฟสของสารที่เกิด

จากเซอร์โคเนียเกิดขึ้น ซึ่งอาจมีผลต่อการขึ้นรูป และสมบัติโครงสร้างเซรามิกวงฝังที่จะทำการขึ้นรูป

Hamzawya และคณะ<sup>[20]</sup> ทำการเตรียมคอร์เดียไรต์กับแก้วโบโรซิลิเกตเพื่อเพิ่มความหนาแน่น โดยที่อุณหภูมิ 1300°C ซึ่งงานมีความหนาแน่นสูงสุดเนื่องจากปริมาณเฟสของเหลวที่เกิดจากแก้วโบโรซิลิเกต ถึงแม้ขึ้นงานจะให้ค่าความหนาแน่นสูงแต่เนื่องจากเฟสคริสโตบาลิตที่ปรากฏขึ้น มีผลทำให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าสูงขึ้น ( $4.2 - 3.8 \times 10^{-6}/K$ ) เมื่อเทียบกับคอร์เดียไรต์ที่ไม่มีการเติมแก้วโบโรซิลิเกต ( $2.2 \times 10^{-6}/K$ ) เนื่องจากคริสโตบาลิตมีค่าการขยายตัวทางความร้อนสูง ( $50 \times 10^{-6}/K$ ) และนอกจากนั้นอาจพบเฟสสปิเนลเกิดขึ้นซึ่งเกิดจากการปรากฏของเฟสของเหลวเนื่องจากการเพิ่มสารตัวเติมเพื่อลดอุณหภูมิในการเผา

Das<sup>[7]</sup> ทำการเตรียมคอร์เดียไรต์จากการผสมดินขาวเกาหลี ทัลค์ และอะลูมินา โดยทำการศึกษาผลของสารตั้งต้นและปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ผลของสิ่งเจือปน (impurities) ลักษณะของดินขาวเกาหลีที่ใช้ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ รวมทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาพบว่าที่อุณหภูมิต่ำสุดที่สามารถเตรียมคอร์เดียไรต์ได้นั้นคือ 1280°C โดยใช้เวลาในการเผานานถึง 50 ชั่วโมงแต่สามารถลดเวลาในการเผาให้สั้นลงได้โดยเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 6 องศาต่อนาที โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมคืออยู่ในช่วง 1345-1370°C ซึ่งอยู่ใกล้จุดยูเทคติกของคอร์เดียไรต์

อุบลรัตน์ หวังรัชต์สกุล<sup>[21]</sup> ทำการเตรียมเนื้อคอร์เดียไรต์จากวัตถุดิบภายในประเทศเป็นวัตถุดิบหลักได้แก่ ดินขาวระนองและดินดาลำปาง ซึ่งสามารถเตรียมเนื้อคอร์เดียไรต์ที่อุณหภูมิ 1300°C เวลา ขึ้นไฟ 2 ชั่วโมง และ 1400°C เวลา ขึ้นไฟ 1 ชั่วโมง และค่าการขยายตัวทางความร้อน  $2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}C$  แต่ยังไม่ได้เฟสคอร์เดียไรต์เพียงอย่างเดียว จึงสนใจที่จะพัฒนาให้ได้เนื้อคอร์เดียไรต์ที่สมบูรณ์และนำไปขึ้นรูปเป็นเซรามิกวงฝังต่อไปในงานวิจัยนี้

## 2.11 อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ

ในอุตสาหกรรมเซรามิกชนิดต่างๆ<sup>[22]</sup> เช่น ถ้วยชาม สุขภัณฑ์ กระเบื้อง ตุ๊กตา ของตกแต่งและอื่นๆ ซึ่งในกระบวนการเผานั้นจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ช่วยรองรับชิ้นงานไม่ว่าจะเป็นแผ่นรองเผา ขาดั่ง หรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการต้องสามารถรับอุณหภูมิสูงได้มากโดยไม่ทำความเสียหายให้ผลิตภัณฑ์สามารถรับน้ำหนักได้ดีแม้เป็นการรับน้ำหนักที่อุณหภูมิสูง (refractoriness under load) สามารถทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลันได้ดี (good thermal shock resistance) มีค่าการนำความร้อนดี ซึ่งสำหรับงานอุตสาหกรรมเซรามิกแบบดั้งเดิมนั้นวัสดุที่นำมาใช้มีสองชนิดได้แก่ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) และคอร์เดียไรต์หรือ คอร์เดียไรต์ผสมมัลไลต์ ซึ่งเนื้อซิลิคอนคาร์ไบด์นั้นจะรับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ได้มากกว่า โดยเฉพาะการรับน้ำหนักที่อุณหภูมิสูง

เพราะซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงกว่าคาร์ไบด์อื่น ดังนั้นจึงสามารถทำให้บางลงได้ส่งผลให้น้ำหนักลดลงแต่ข้อเสียของซิลิคอนคาร์ไบด์คือราคาสูงกว่าคาร์ไบด์อื่น นอกจากนี้ปัญหาอีกอย่างของเนื้อซิลิคอนคาร์ไบด์คือ หลังจากใช้งานแล้วจะเกิดซิลิกาขึ้นที่ผิวของชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มสีขาวขุ่น เนื่องจากการเผาหรือปริมาณเนื้อแก้วที่อยู่ในซิลิคอนคาร์ไบด์ซิลิกาที่เกิดขึ้นบนผิวของซิลิคอนคาร์ไบด์นี้จะทำให้ความแข็งแรงลดลง และเศษซิลิกาอาจหลุดล่อนแล้วไปติดกับชิ้นงาน ทำให้เกิดตำหนิขึ้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ได้

ดังนั้นคาร์ไบด์จึงเป็นที่นิยมสำหรับงานด้านวัสดุทนไฟ เพราะมีราคาถูกกว่าจึงมีโรงงานอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟในประเทศไทยที่ทำการผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์คาร์ไบด์เพื่อตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมเซรามิก โดยส่วนใหญ่จะทำการผลิตโดยใช้ส่วนผสมของดินขาว (ทั้งเผาแล้วและยังไม่เผา) ดินเหนียว แมกนีไซต์ หรือ ทัลค์ และอะลูมินา นำมาขึ้นรูปแล้วเผาเป็นผลิตภัณฑ์คาร์ไบด์ ไม่ได้ใช้วัตถุดิบที่เป็นเฟสคาร์ไบด์มาก่อน แต่ในกระบวนการผลิตวัสดุทนไฟคาร์ไบด์ หลังจากกระบวนการเผาเพื่อให้ได้เฟสคาร์ไบด์แล้ว หากมีของเสีย เช่น เกิดการแตกร้าว บิ่น โกง หรือผิดรูปจากมาตรฐานที่ตั้งไว้ ก็จะต้องทุบทิ้งกลายเป็นขยะ โดยนำกลับมาใช้ใหม่เป็นส่วนผสมได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นมูลเหตุจูงใจที่จะนำของเสียดังกล่าวมาทำการวิจัย เพื่อการใช้ประโยชน์และการเพิ่มมูลค่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

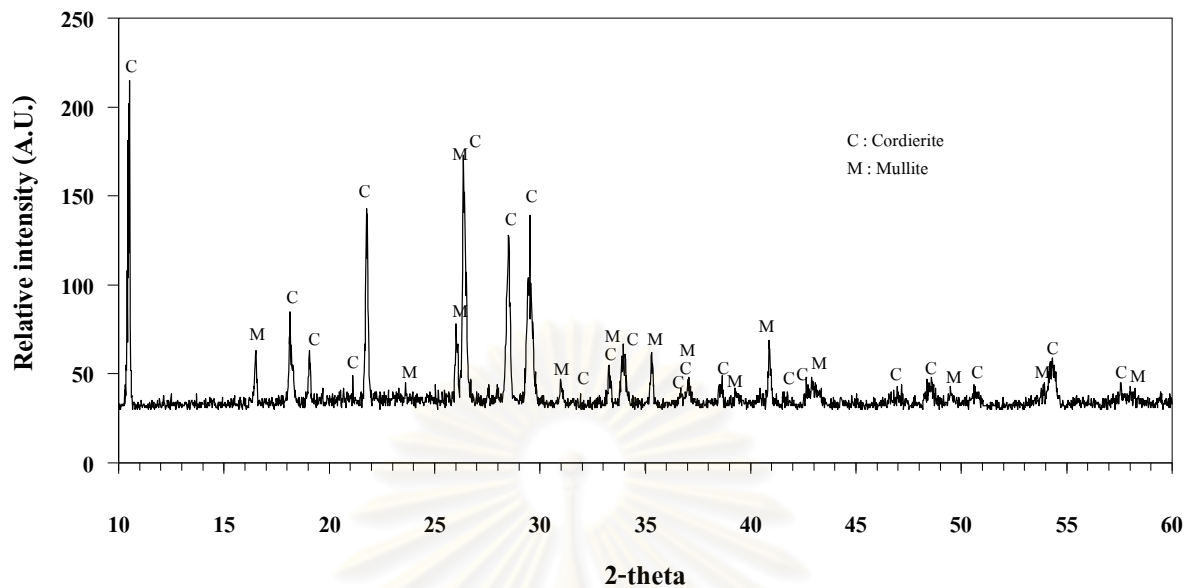
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการขึ้นรูปเซรามิกทรงผึ่งจากเนื้อคอร์เดียไรต์ โดยเตรียมเนื้อคอร์เดียไรต์จากวัตถุดิบสองกลุ่มคือ จากดินขาวระนองและเศษคอร์เดียไรต์ป่นจากอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึง วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี ตลอดจนวิธีการทดลอง ที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานในครั้งนี้

#### 3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมคอร์เดียไรต์แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยเศษคอร์เดียไรต์ป่นที่ได้มาจากโรงงาน มีองค์ประกอบหลักคือ เฟลสคอร์เดียไรต์และมัลไลต์ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรง มิได้มีเฟลสของคอร์เดียไรต์เพียงอย่างเดียวดังแสดงในรูปที่ 3.1 อีกทั้งมีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่ตรงกับค่าทางทฤษฎีของเฟลสคอร์เดียไรต์ จึงจำเป็นต้องผสมกับ ทัลค์และอะลูมินาเพื่อให้ได้องค์ประกอบใกล้เคียงกับเฟลสคอร์เดียไรต์มากที่สุด

ตารางที่ 3.1 สารเคมีและวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

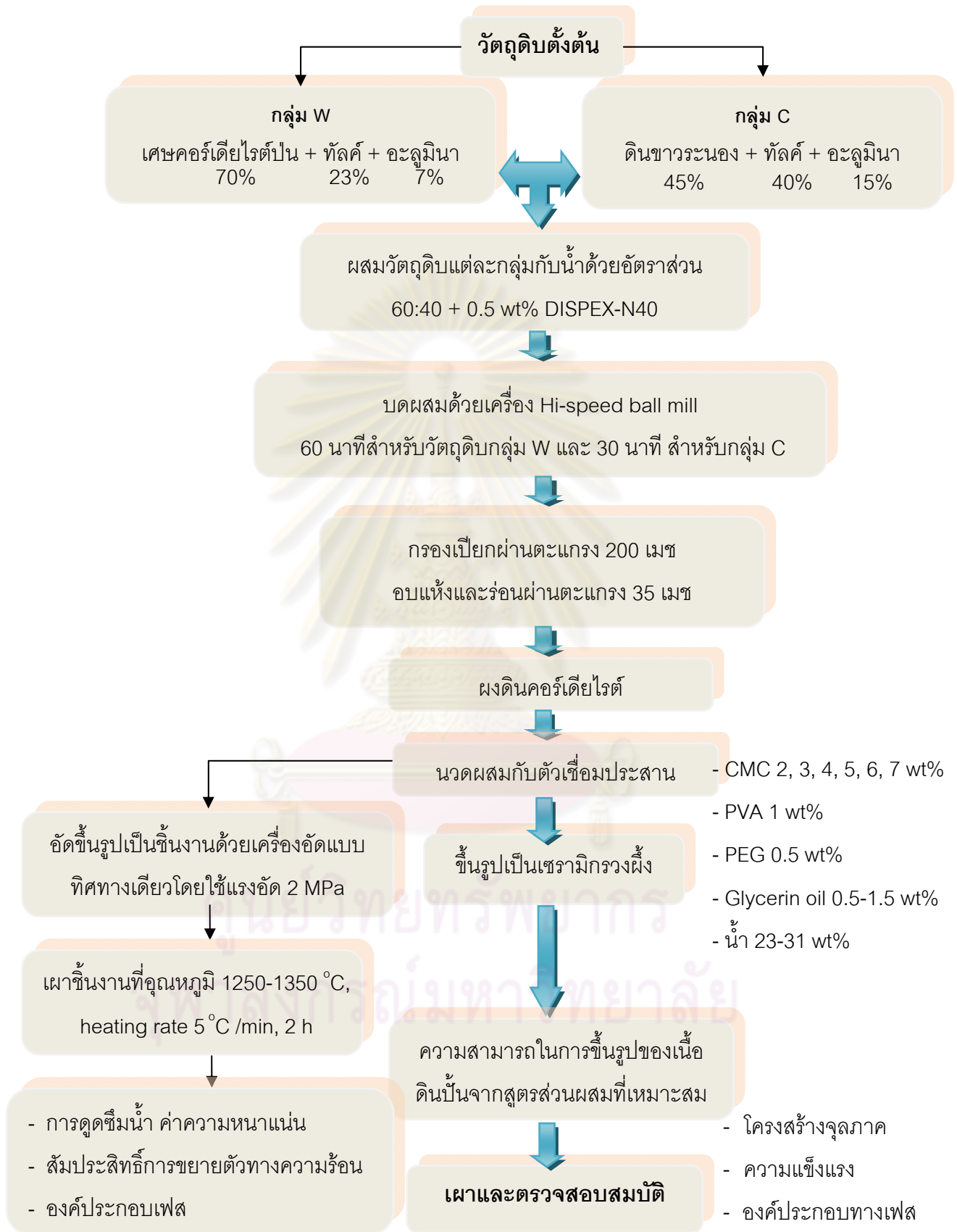
สารเคมี	คุณภาพ	บริษัทผู้ผลิต
ดินขาวระนอง	Quick Cast	บริษัทคอมพาวด์เคลย์
เศษคอร์เดียไรต์ป่น	-200 #	บริษัท อิมเมอริส คิลิน เฟอร์นิเจอร์
อะลูมินา	AM-21	Mitsui Sumitomo Chemical Co., Ltd, Japan
ทัลค์	-	GMT, Bangkok, Thailand
คาร์บอนซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)	-	Ceramics R Us Corporation Limited
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)	- น้ำหนักโมเลกุล 1100	Wako Pure Chemical Industries, Ltd
โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG)	- น้ำหนักโมเลกุล 1000	Wako Pure Chemical Industries, Ltd
น้ำมันกลีเซอริน	- น้ำหนักโมเลกุล 92.09 - ความหนาแน่น 1.257 g/ml	Asia Pacific Special Chemicals Limited ACN
DISPEX-N40	-	Loxley Pubic Company, Ltd



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบเฟสของเศษคอร์เดียไรต์ป็นจากโรงงานอุตสาหกรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 3.2 แผนผังการทดลอง



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการทดลองเตรียมเซรามิกทรงผึ่ง

### 3.3 การเตรียมเนื้อคอร์เตียไรต์

#### 3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

เนื้อคอร์เตียไรต์เตรียมจากวัตถุดิบสองกลุ่มคือ ใช้ดินขาวระนองและเศษคอร์เตียไรต์ป่น ซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟดังรูปที่ 3.4 เป็นวัตถุดิบหลัก ทำการผสมกับ ทัลค์และอะลูมินา ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยกลุ่มที่หนึ่งประกอบด้วยเศษคอร์เตียไรต์ป่นจากวัสดุทนไฟผสมกับทัลค์และอะลูมินาเพื่อให้ได้เฟสคอร์เตียไรต์เพียงอย่างเดียว (โดยใช้อัตราส่วนผสมร้อยละ 70 23 และ 7 โดยน้ำหนักตามลำดับ) และกลุ่มที่สองซึ่งเตรียมจากดินขาวระนองผสมกับทัลค์และอะลูมินา (โดยใช้อัตราส่วนผสมร้อยละ 45 40 และ 15 โดยน้ำหนักตามลำดับ) สำหรับใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ โดยเตรียมส่วนผสมให้ได้เฟสของคอร์เตียไรต์ตาม Ternary diagram ของสารในระบบ แมกนีเซียมอะลูมิเนียมซิลิเกตดังรูปที่ 3.4 โดยทำการบดผสมวัตถุดิบแต่ละกลุ่มกับน้ำด้วยอัตราส่วน 60:40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักโดยใช้สารช่วยกระจายตัว (DISPEX-N40, dispersant) หลังจากนั้นนำน้ำดินที่ได้มาอบให้แห้ง บด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 เมช เพื่อให้ได้ความละเอียดที่เหมาะสม ก่อนจะนำไปผสมกับตัวเชื่อมประสานและตัวเติมต่างๆ ดังตารางที่ 3.3

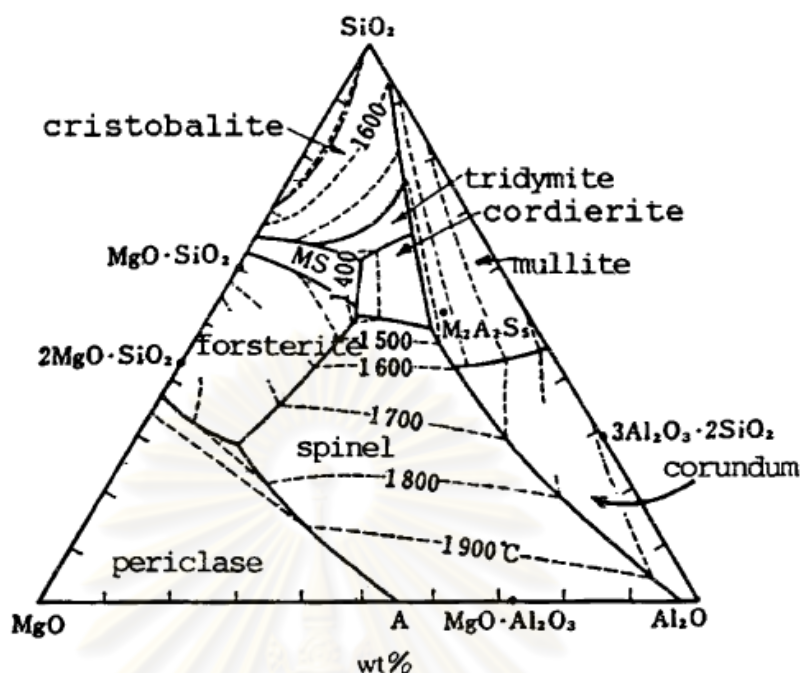


รูปที่ 3.3 เศษคอร์เตียไรต์ป่นจากอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของผงวัตถุดิบตั้งต้น

วัตถุดิบ	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	MgO (%)	อื่นๆ (L.O.I., H <sub>2</sub> O, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
ดินขาวระนอง	45.85	39.00	0.08	15.06
ทัลค์	-	63.37	31.88	4.75
อะลูมินา	99.99	-	-	0.01
เศษคอร์เตียไรต์ป่น	38.05	51.17	8.22	2.56





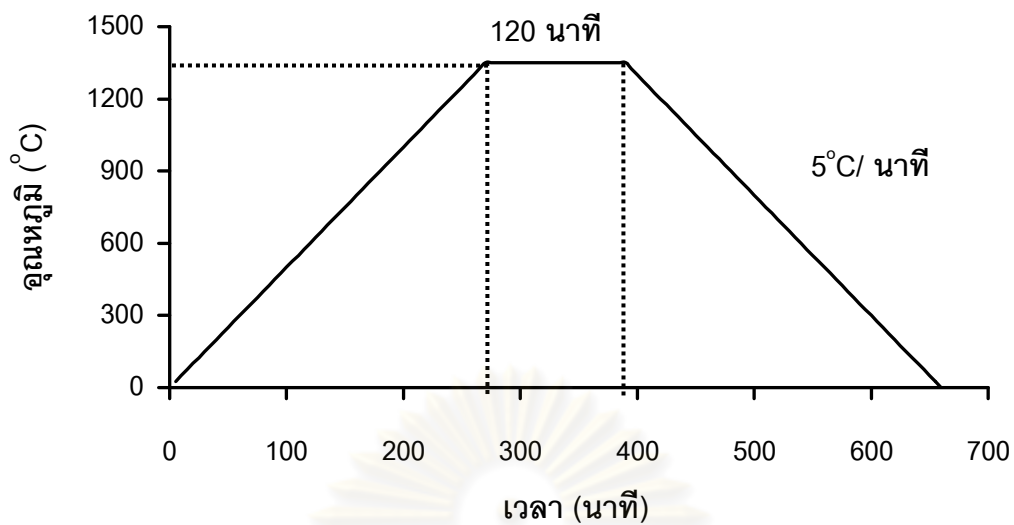
รูปที่ 3.4 Ternary diagram ของคอร์เดียไรต์<sup>[23]</sup>

ตารางที่ 3.3 ชนิดและปริมาณสารตัวเติม

สารตัวเติม	หน้าที่	ปริมาณ (wt %)
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)	binder	2-7
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)	co-binder	1
โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG)	plasticizer	0.5
น้ำมันกลีเซอริน	lubricant	0.5-1.5
น้ำกลั่น	medium	23-31

### 3.3.2 การอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

นำเนื้อคอร์เดียไรต์ที่ผสมสารตัวเติมแล้วมาขึ้นรูปเป็นรูปเหรียญ (Pellets) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร โดยมีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulics pressing) โดยใช้ความดัน 2 MPa นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปมาอบแห้ง และเผาเพื่อให้เกิดเฟสคอร์เดียไรต์ที่อุณหภูมิ 1250-1350°C ดังรูปที่ 3.5 นำชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้วทดสอบสมบัติทางกายภาพซึ่งได้แก่ หาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ ค่าความหนาแน่น ค่าการหดตัวขององค์ประกอบเฟส และสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน เป็นลำดับต่อไป



รูปที่ 3.5 กราฟอุณหภูมิและเวลาในการเผาผนึกคอร์เดียไรต์

### 3.3.3 การขึ้นรูปเซรามิกทรงผึ่ง

เนื่องจากเนื้อดินปั้น (Dough) ที่ผ่านการผสมสารตัวเติมและนวดด้วยมือยังขาดความเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องนำเนื้อดินปั้นมาเข้าเครื่อง three roll mill โดยงานส่วนนี้ได้ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยเซรามิกส์ประยุกต์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ดังรูปที่ 3.6 เพื่อผสมส่วนผสมให้เข้ากัน



รูปที่ 3.6 เครื่อง Three roll mill ณ ห้องปฏิบัติการเซรามิกส์ประยุกต์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

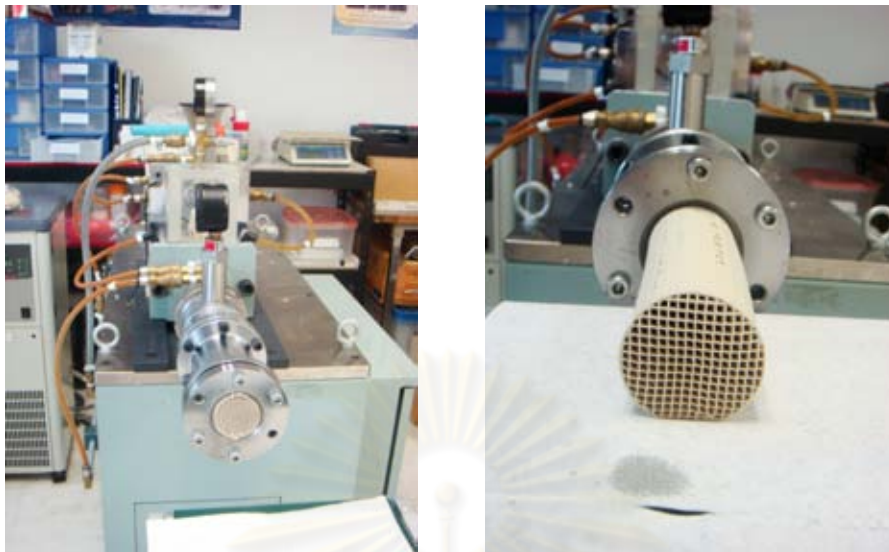
หลังจากนั้นทำการรีดขึ้นรูปเป็นเซรามิกทรงฟุ้งด้วยเครื่อง Vacuum Extrusion Forming Machine (FM-30-1) ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวได้ดำเนินการ ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยเซรามิกส์ ประยุกต์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) โดยหัวแบบที่ใช้มีขนาด 72 ช่องต่อ ตารางนิ้ว และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร



**รูปที่ 3.7** เครื่อง Vacuum Extrusion Forming Machine (FM-30-1) ณ ห้องปฏิบัติการเซรามิกส์ ประยุกต์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

โดยลักษณะของชิ้นงานที่ออกมาจากตัวเครื่องจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่ได้จะนำไปอบแห้งและเผาที่อุณหภูมิ 1250-1350°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้ได้เฟสคอร์เดียไรต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 เนื้อดินที่ออกจากเครื่องเครื่อง Vacuum Extrusion Forming Machine (FM-30-1) ณ ห้องปฏิบัติการเซรามิกส์ประยุกต์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

### 3.3.4 การวิเคราะห์การไหลตัว

เนื้อดินปั้นที่ใช้รีดต้องมีความหนาแน่นสูง ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของอนุภาคที่เป็นของแข็งในเฟสที่เป็นเฟสของเหลวหล่อลื่น ซึ่งในงานวิจัยนี้เฟสของแข็งคือคอร์เดียไรต์ซึ่งเกิดจากการผสมของดินขาวระนอง ทัลค์ และอะลูมินา ในขณะที่เฟสของเหลวจะเป็นสารละลายซึ่งจะปรับปรุงการไหลตัวของเนื้อดินปั้นที่ได้จากสารตัวเติมที่ละลายในน้ำกลั่น ได้แก่ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) โพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) น้ำมันกลีเซอริน ซึ่งแต่ละตัวจะมีหน้าที่ในการทำงานต่างกันโดยเฉพาะเป็นตัวเชื่อมประสาน ซึ่งจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์คงรูป และยับยั้งการเคลื่อนตัวของเฟสของเหลว (phase migration or liquid migration) ซึ่งส่งผลให้ความดันในการรีดสูง และผลิตภัณฑ์มีคุณภาพต่ำ ซึ่งพารามิเตอร์ที่สามารถบอกค่าการไหลตัวของเนื้อดินปั้นดังกล่าวมาแล้วในบทที่สองสามารถหาได้จากเครื่อง Ram extruder โดยใช้เครื่อง Instron Compressing Machine ณ ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยดังรูปที่ 3.9 โดยในการทดลองเครื่อง Instron จะให้แรงกดต่อเนื้อดินปั้น แล้วทำการบันทึกค่าแรงกดที่ใช้จากการทดลองต่อระยะเวลาเป็นวินาที นำค่าแรงกดที่ได้จากการทดลองมาหาค่า ความดันที่ใช้ในการรีด (extrusion pressure) จากสมการที่ 3.1

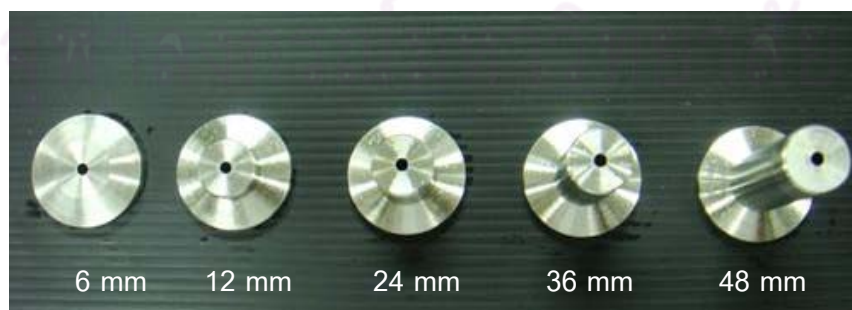


รูปที่ 3.9 Instron Compressing Machine 5882 ณ ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$P = F / A \quad (3.1)$$

เมื่อ  $P =$  ความดันที่ใช้ในการรีด (MPa)  
 $F =$  แรงที่ใช้ในการกดเนื้อดิน (N)  
 $A =$  พื้นที่หน้าตัดของแม่แบบ ( $m^2$ )

โดยอุปกรณ์ Ram extruder ที่ใช้ในการทดสอบการไหลตัวจะทำขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิม ส่วนหัวของบาร์เรลยึดกับหัวแบบซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 3 มิลลิเมตร และมีความยาว 6, 12, 24, 36, และ 48 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งทำให้ได้อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 2, 4, 6, 8, 12 และ 16 ซึ่งใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.10 หัวแบบ (Die) ขนาดต่างๆ กัน

### 3.5 การวิเคราะห์สมบัติ

#### 3.5.1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยของวัตถุดิบเริ่มต้นมีความสำคัญต่อการขึ้นรูปทรงผึ่งเนื่องจากส่งผลต่อสมบัติความยืดหยุ่นของเนื้อดินปั้น (Dough) เนื่องจากคอร์เดียไรต์มีสมบัติความไม่ยืดหยุ่นสูง (non-plastics) ทำให้ต้องใช้สารตัวเติมปริมาณมากเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่เนื้อดินปั้น ซึ่งในการวิจัยสามารถหาขนาดของอนุภาคเฉลี่ยโดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค (particle size analyzer) ผลิตโดยบริษัท Malvern รุ่น Hydro 2000 ดังรูปที่ 3.11 โดยจะทำการกระจายตัวอนุภาคด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 5 นาทีก่อนทำการวิเคราะห์เพื่อลดกันการเกาะตัวของอนุภาค



รูปที่ 3.11 เครื่อง Particle Size Analyzer รุ่น Hydro 2000 ผลิตโดยบริษัท Malvern ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.5.2 การหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

ในการวัดค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทำได้โดยใช้หลักอาร์คิมิดีส (Archimedes Principle) เนื่องจากชิ้นงานหลังการเผาออกจากจะมีเนื้อสารแล้วยังประกอบด้วยรูพรุนซึ่งหลังจากชั่งน้ำหนักด้วยวิธีอาร์คิมิดีสจะสามารถกำจัดรูพรุนที่อยู่ในชิ้นงานโดยการแทนที่น้ำและสามารถทราบน้ำหนักที่แท้จริงของชิ้นงานได้โดยเริ่มจากการวัดน้ำหนักแห้ง (dry weight) ของชิ้นงาน ( $W_1$ ) ต้มในน้ำเดือดเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ก่อนทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ให้อิมตัวด้วยน้ำ ชั่งน้ำหนักแทนที่น้ำ ( $W_2$ ) ชั่งน้ำหนักอีกครั้งเป็นน้ำหนักอิมน้ำ ( $W_3$ ) โดยเช็ดชิ้นงานกับฟองน้ำหมาดๆ ก่อนเพื่อซับน้ำที่เป็นส่วนเกินออก แล้วคำนวณหาค่าความหนาแน่นจากสมการที่ 3.2

$$\text{Bulk densities} = w_1 / (w_2 - w_3) \text{ g/cm}^3 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $w_1 =$  น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน

$$w_2 = \text{น้ำหนักอิมิตัว}$$

$$w_3 = \text{น้ำหนักในน้ำ}$$

### 3.5.3 การหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

สมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุสามารถบอกความสามารถในการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์หลังผ่านกระบวนการเผาผนึกโดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$\text{Water absorption, \%} = (w_2 - w_1) / w_1 \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $w_1 = \text{น้ำหนักแห้งของชิ้นงาน}$

$$w_2 = \text{น้ำหนักอิมิตัว}$$

### 3.5.4 การหาค่าการหดตัวหลังเผา (Firing shrinkage)

ในระหว่างการเผาผนึก น้ำและตัวเชื่อมประสานจะระเหยออก รวมทั้งการเผาผนึกจะทำให้ชิ้นงานมีขนาดเล็กลง การหาค่าการหดตัวของชิ้นงานสามารถหาได้จากการวัดขนาดของชิ้นงานก่อนเผา นั่นคือชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปและรอแห้ง และชิ้นงานหลังจากการเผา ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$\text{Firing shrinkage, \%} = (L_1 - L_2) / L_1 \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $L_1 = \text{ความยาวของชิ้นงานก่อนเผา}$

$$L_2 = \text{ความยาวของชิ้นงานหลังเผา}$$

### 3.5.5 การหาค่าองค์ประกอบเฟส

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer) ใช้ในการหาโครงสร้างผลึกของชิ้นงาน โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุ หรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีสะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ โดยตัวอย่างที่นำไปวิเคราะห์มีลักษณะเป็นผงละเอียด นำไปอัดลงบน Sample holder ดังรูปที่ 3.12<sup>[24]</sup> ก่อนนำไปวิเคราะห์



รูปที่ 3.12 XRD sample holder<sup>[24]</sup>

### 3.5.6 การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

การหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงาน ต้องเตรียมชิ้นงานให้มีขนาดประมาณ  $5 \times 5 \times 25$  มิลลิเมตร ก่อนทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Dilatometer รุ่น 402C ผลิตโดยบริษัท Netzsch ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 Dilatometer ผลิตโดยบริษัท Netzsch รุ่น 402C

ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.5.7 การทดสอบความแข็งแรง

การทดสอบความแข็งแรงของเนื้อคอร์เดียวไรต์ จะใช้การทดสอบด้วยวิธี Three point bending โดยลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบเป็นแท่งกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร โดย



ระยะห่างของลิ่มที่รองรับมีขนาด 10 เซนติเมตร โดยความแข็งแรงของชิ้นงานสามารถหาได้จากการคำนวณดังสมการที่ 3.5

$$MOR = 8LD / \pi d^3 \quad (\text{MPa}) \quad (3.5)$$

- เมื่อ  $L$  = คำน้หนักแรงกด (N)  
 $D$  = ระยะห่างของลิ่มที่รองรับแท่งทดสอบ (m)  
 $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของแท่งทดสอบ (m)



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

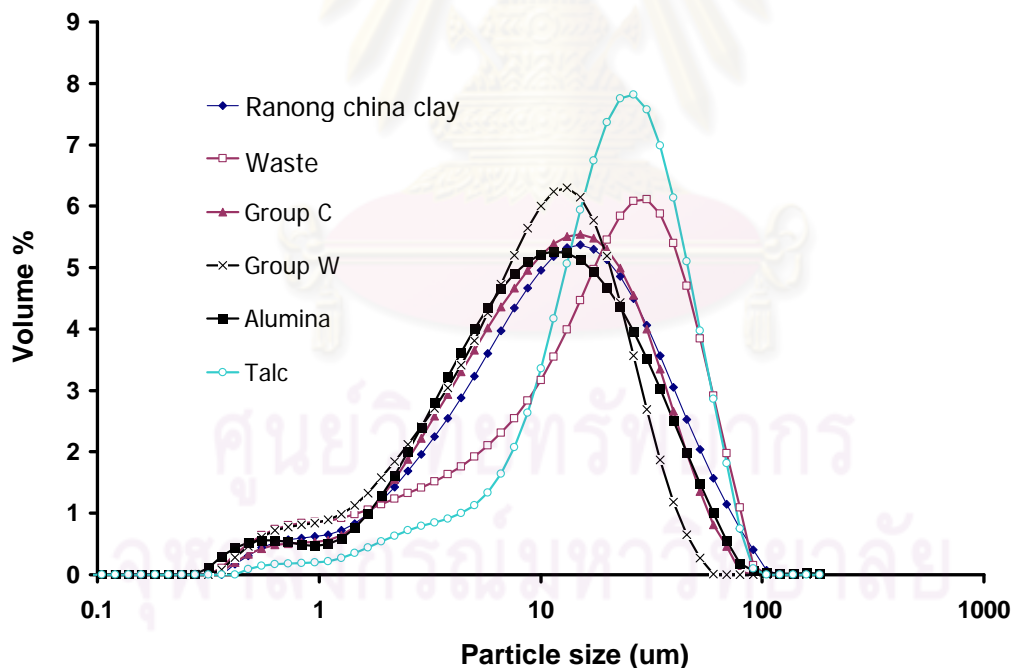
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

จากการศึกษาการเตรียมและลักษณะสมบัติของเนื้อดินปั้นคอร์เดียไรต์พบว่ามีปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของคอร์เดียไรต์ทั้งก่อนเผาและหลังเผา โดยในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้นซึ่งได้แก่

#### 4.1 การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงวัตถุดิบ

จากการทดลองเตรียมส่วนผสมจากดินขาวระนองและเศษคอร์เดียไรต์ป่นผสมกับ อะลูมินา และทัลค์ พบว่าส่วนผสมที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น มีขนาดของอนุภาคค่อนข้างใหญ่ซึ่งอาจทำให้เนื้อดินปั้นขัดสีผิวง่ายแบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบดย่อยเพื่อลดขนาดอนุภาคให้มีค่าใกล้เคียงกับอนุภาคของเนื้อดิน โดยการกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุดิบตั้งต้นแสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่อทำการหาขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องหาขนาดอนุภาค โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของวัตถุดิบตั้งต้นและส่วนผสม

โดยขนาดอนุภาคเริ่มต้นของเศษคอร์เดียไรต์ป่น มีค่าประมาณ 50.1 ไมครอน ซึ่งมีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของวัตถุดิบอื่นๆ การบดผสมในครั้งเดียวอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้ได้ส่วนผสมที่มีความละเอียดที่เหมาะสม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบดย่อยเพื่อลดขนาดให้มีอนุภาคเล็กกลง

ทำให้เศษคอร์เดียไรต์ป่นมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของดินขาวระนอง เพื่อลดปัญหาการเสียดสีกับผนังแม่แบบได้ นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคที่เล็กลงยังช่วยเพิ่มความสามารถในการเผาผนึกให้เร็วขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดแนวโน้มของการแยกเฟสในขณะการรีดขึ้นรูป<sup>[25]</sup> และเพิ่มความเหนียวให้เนื้อดินป่นได้

**ตารางที่ 4.1** การกระจายขนาดอนุภาคของผงคอร์เดียไรต์และวัตถุดิบตั้งต้น

วัตถุดิบ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
1. เศษคอร์เดียไรต์ป่น (200 เมช)	50.1
2. เศษคอร์เดียไรต์ป่น (หลังจากบดย่อย)	19.7
3. ดินขาวระนอง	13.1
4. อะลูมินา	10.9
5. ทัลค์	23.3
6. ส่วนผสมที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น	10.1
7. ส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนอง	11.9

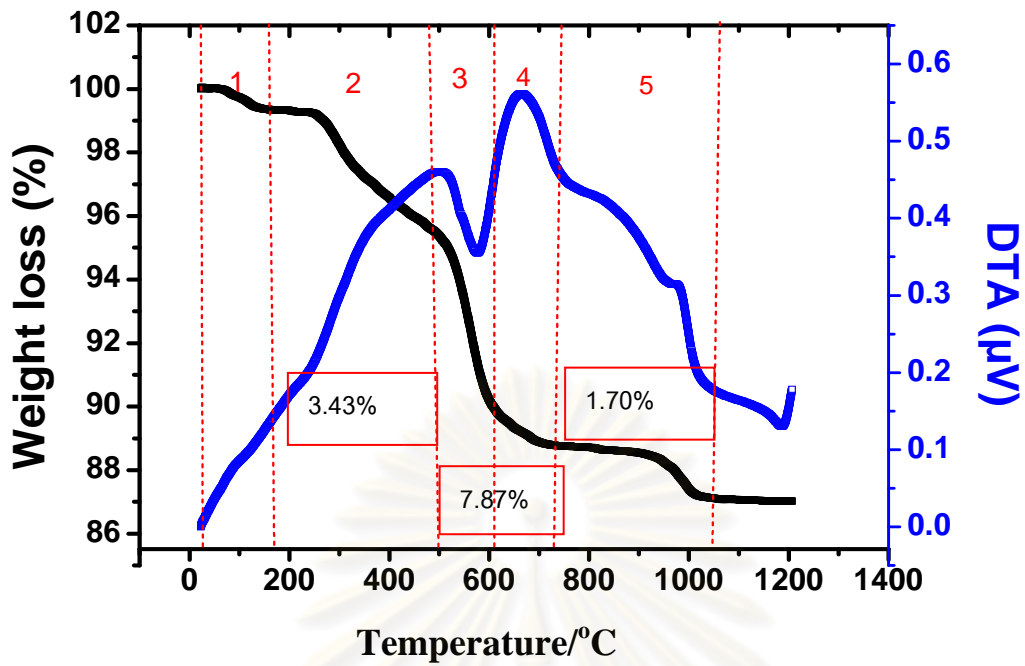
ขนาดอนุภาคของส่วนผสมที่ได้จากการผสมของดินขาวระนองและส่วนผสมอื่นๆ มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 11.9 ไมครอน ในขณะที่ส่วนผสมที่ได้จากการผสมระหว่างเศษคอร์เดียไรต์ป่นกับวัตถุดิบอื่น มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 10.1 ไมครอน แต่เมื่อทำการหาเปอร์เซ็นต์การค้ำตะแกรง โดยผ่านตะแกรงร่อน 325 เมช พบว่าที่เวลาในการบดผสมเท่ากันคือ 30 นาที การค้ำตะแกรงจากส่วนผสมที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่นมีเปอร์เซ็นต์ค้ำสูงเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จึงจำเป็นต้องเพิ่มเวลาในการบดผสมกับวัตถุดิบอื่นเป็น 60 นาทีสำหรับส่วนผสมในกลุ่มที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น หลังจากการบดผสมของวัตถุดิบทั้งสองกลุ่มที่เวลาต่างกันคือ 30 นาที สำหรับการผสมดินขาวระนองและ 60 นาที สำหรับการผสมเศษคอร์เดียไรต์ป่น พบว่าเปอร์เซ็นต์การค้ำตะแกรงของทั้งสองกลุ่มให้ค่าใกล้เคียงกันคือ 0.22 และ 0.36 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซนต์กากค้างตะแกรงของผงคอร์เดียไรต์ที่ได้จากการผสมดินขาวระนองเศษคอร์เดียไรต์ป่น และวัตถุดิบอื่นๆ

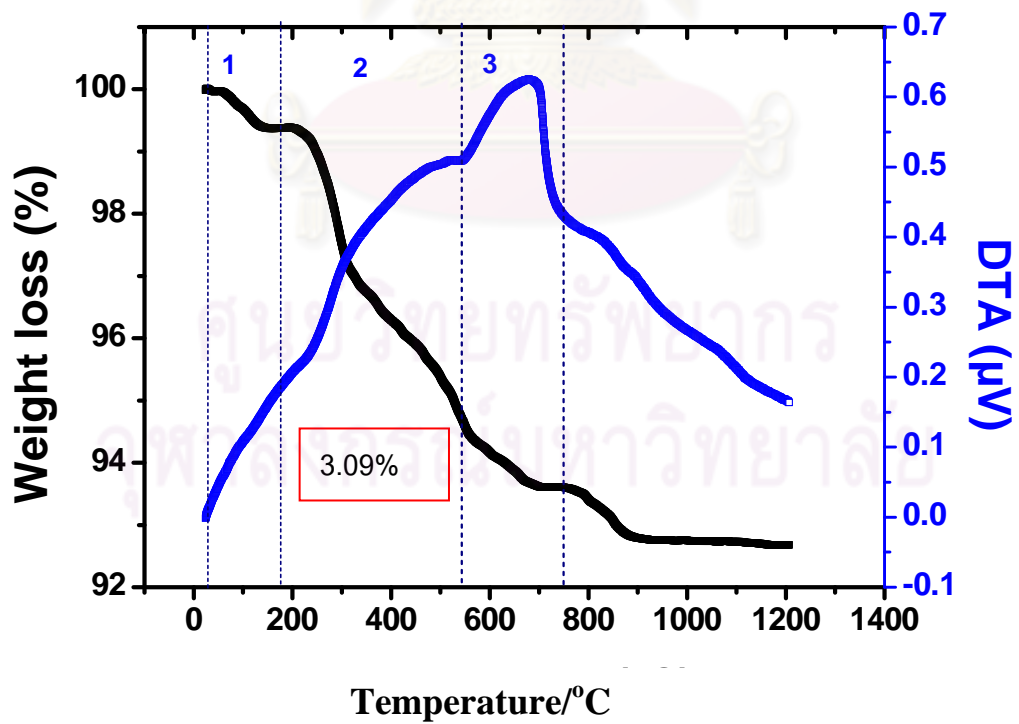
วัตถุดิบ	กากค้างตะแกรง 325 เมช (wt%)
1. ส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนอง บด 30 นาที	0.22
2. ส่วนผสมที่ได้จากผงคอร์เดียไรต์ป่น บด 30 นาที	4.63
3. ส่วนผสมที่ได้จากผงคอร์เดียไรต์ป่นบด 60 นาที	0.36
4. อะลูมินา	0.64
5. เศษคอร์เดียไรต์ป่น	38.82
6. ทัลค์	0.44
7. ดินขาวระนอง	0.23

#### 4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนองและเศษคอร์เดียไรต์ป่นด้วยเทคนิค TG-DTA ในช่วงอุณหภูมิ 25-1200°C ดังรูปที่ 4.2 พบว่าส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนองเกิดปฏิกิริยาการดูดความร้อน (Endothermic) ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 100°C ซึ่งเกิดการสลายตัวของน้ำและความชื้นในตัวอย่าง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกิดการสลายตัวของสารตัวเดิมที่อุณหภูมิประมาณ 300°C<sup>[19]</sup> ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ ส่งผลให้น้ำหนักที่หายไปของสารหายไปประมาณ 3.43 เปอร์เซนต์ และที่อุณหภูมิประมาณ 500-600°C เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของ kaolinite ไปเป็น metakaolin และมัลไลต์ ส่งผลให้น้ำหนักของสารหายไปประมาณ 7.87 เปอร์เซนต์ และที่อุณหภูมิใกล้ 1000°C เกิดการสลายตัวของมัลไลต์พร้อมๆ กับการสร้างเฟสของมัลไลต์จากโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกของแร่เคโอลิไนต์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร<sup>[26]</sup> และจะเปลี่ยนเป็นเฟสคอร์เดียไรต์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนอง  
ด้วยเทคนิค TG-DTA



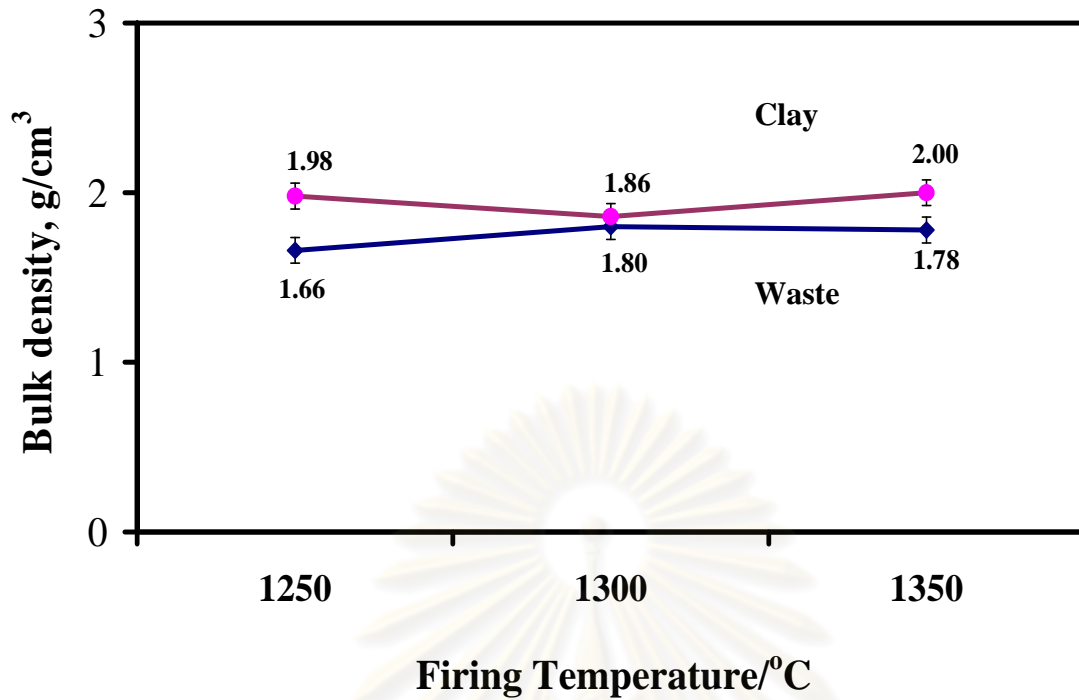
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของส่วนผสมที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น  
ด้วยเทคนิค TG-DTA

ในกรณีของส่วนผสมที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่นเกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic) เนื่องจากการสลายตัวของน้ำในช่วงอุณหภูมิ 100°C เช่นเดียวกับส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนองดังรูปที่ 4.3 และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสลายตัวของสารตัวเติมในช่วง อุณหภูมิ 300-400°C ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำหนักหายไปสูงสุดคือ 3.09 เปอร์เซ็นต์ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการสลายตัวของน้ำจากทัลคัมในช่วงอุณหภูมิประมาณ 700°C และคายความร้อน (exothermic) เพื่อเริ่มสร้างเฟสคอร์เดียไรต์จากมัลไลต์ในเศษคอร์เดียไรต์ป่นและเป็นเฟสคอร์เดียไรต์ที่สมบูรณ์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

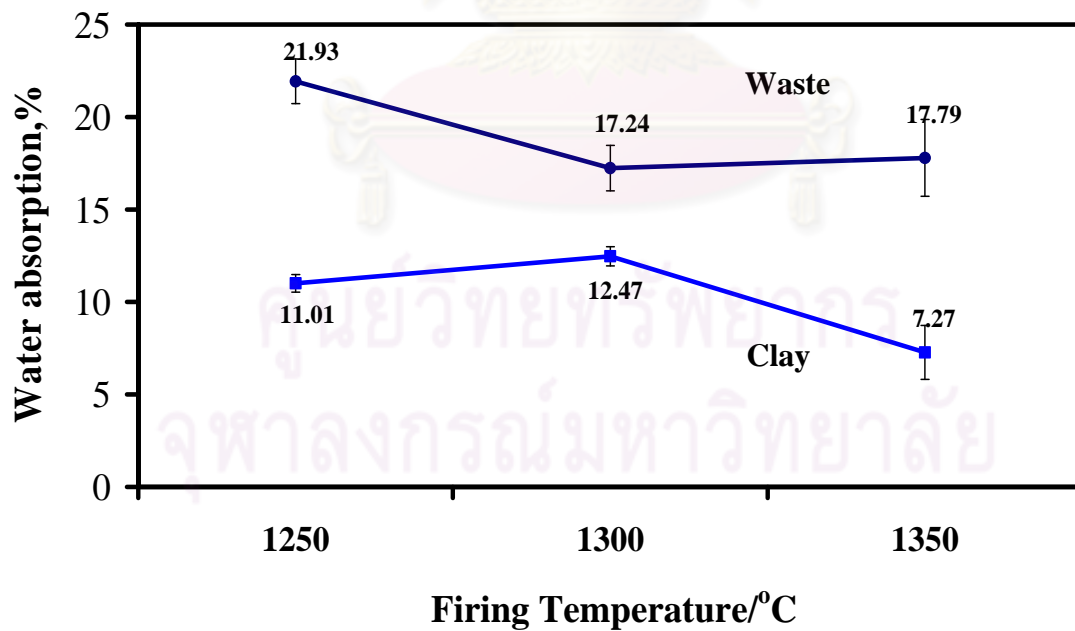
#### 4.3 การวิเคราะห์การดูดซึมน้ำ

จากการทดลองนำชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 1250-1400°C พบว่าที่อุณหภูมิสูงสุดคือ 1400°C ชิ้นงานมีลักษณะบิดและจากการสังเกตพบว่าเนื้อคอร์เดียไรต์เริ่มหลอมตัวซึ่งเป็นผลมาจากการ over firing ที่อุณหภูมิ 1400°C ดังนั้นจึงมาพิจารณาที่ 1250-1350°C พบว่าค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากดินขาวระนองมีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่นเล็กน้อยดังรูปที่ 4.4 โดยค่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากดินขาวระนองมีค่าอยู่ในช่วง 1.86-2.00 g/cm<sup>3</sup> ในขณะที่ชิ้นงานที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่นมีค่าอยู่ในช่วง 1.66-1.80 g/cm<sup>3</sup> เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 1250°C ถึง 1300°C พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากดินขาวระนองมีค่าลดลงเล็กน้อยเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนเฟสจากมัลไลต์ไปเป็นคอร์เดียไรต์และเนื่องจากมัลไลต์มีค่าความหนาแน่นสูงกว่า (3.16 g/cm<sup>3</sup>) เมื่อเปรียบเทียบกับคอร์เดียไรต์ (2.65 g/cm<sup>3</sup>) ส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง

โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นและปริมาณรูพรุนในชิ้นงานมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงด้วยซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในตัวอย่างที่ได้จากดินขาวระนองมีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น และเมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้นถึง 1350°C มีผลทำให้ชิ้นงานมีค่าความหนาแน่นสูงขึ้น และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำลดลง



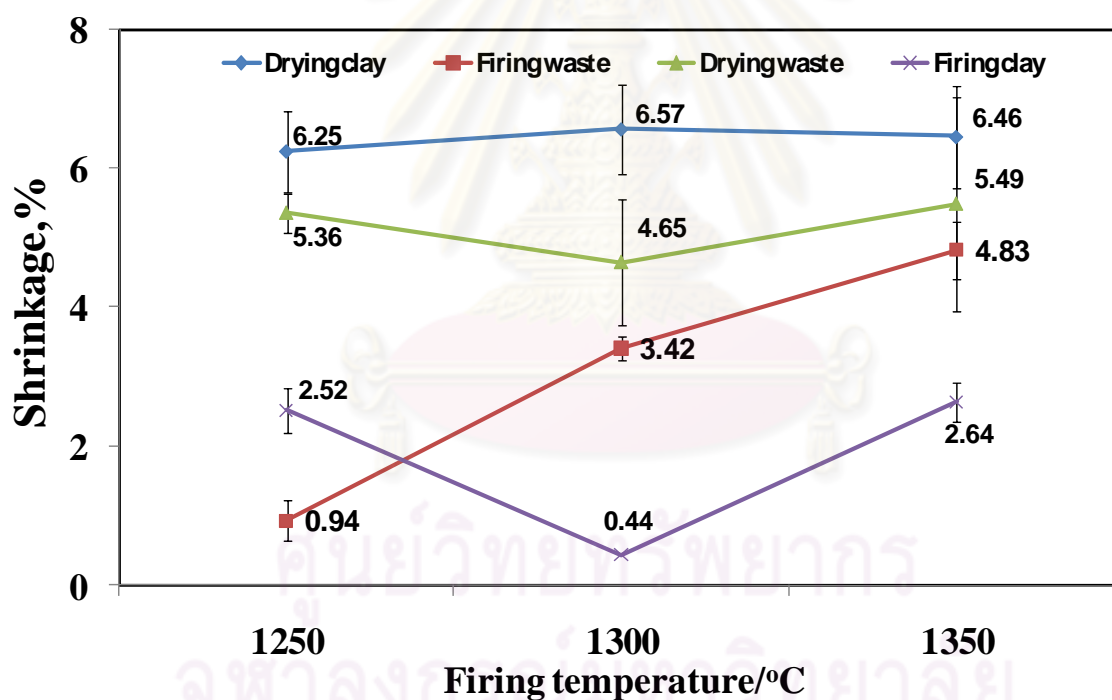
รูปที่ 4.4 Bulk density ของชิ้นงานคอร์เดียไรต์ที่ได้จากการผสมดินขาวระนอง และจากเศษคอร์เดียไรต์ป่น



รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของชิ้นงานคอร์เดียไรต์ที่ได้จากการผสมดินขาวระนองและ จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น

#### 4.4 การหาค่าการหดตัว

จากรูปที่ 4.6 แสดงกราฟการหดตัวของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1250-1350°C พบว่าก่อนเผาเนื้อชิ้นงานที่ได้จากดินขาวระนองมีค่าการหดตัวอยู่ในช่วง 6 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับชิ้นงานที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณความชื้นที่ใช้ในการผสมส่วนผสมของดินขาวระนองสูงกว่าเศษคอร์เดียไรต์ป่น ทำให้การหดตัวของชิ้นงานสูงกว่า หลังจากผ่านกระบวนการเผาเนื้อ พบว่าชิ้นงานที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่นมีการหดตัวสูงกว่าชิ้นงานที่ได้จากดินขาวระนอง เนื่องจากเนื้อคอร์เดียไรต์ที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่นซึ่งประกอบด้วยปริมาณสารตัวเติมสูง ซึ่งค่าการหดตัวที่เพิ่มขึ้นมีผลมาจากปริมาณช่องว่างที่เกิดจากการสลายตัวของสารตัวเติมดังแสดงในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ของรูพรุนที่เกิดในชิ้นงานที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่นสูงกว่าชิ้นงานที่ได้จากดินขาวระนองค่อนข้างมากส่งผลให้ชิ้นงานมีการหดตัวสูงกว่า แต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ชิ้นงานมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าชิ้นงานที่ได้จากดินขาวระนอง



รูปที่ 4.6 ค่าการหดตัวก่อนเผาและหลังเผาของชิ้นงานคอร์เดียไรต์เมื่อเผาที่

อุณหภูมิ 1250-1350°C



ตารางที่ 4.3 แสดง Bulk density, porosity และ water absorption ของชิ้นงานหลังเผา

Temperature (°C)	Material	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Water absorption (%)
1250	Clay	1.98	21.75	11.01
	Waste	1.66	36.44	21.93
1300	Clay	1.86	23.13	12.47
	Waste	1.80	30.99	17.24
1350	Clay	2.00	14.46	7.27
	Waste	1.78	31.69	17.79

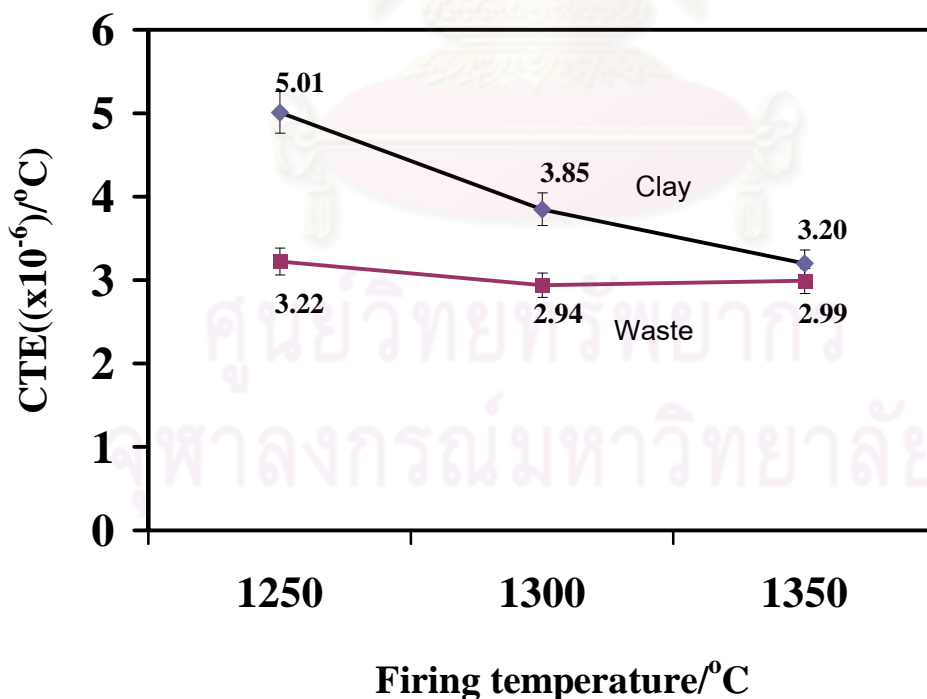
โดยจากการศึกษาพบว่าสมบัติทั่วไปของเซรามิกวงฝังคอร์เดียไรต์ในทางอุตสาหกรรมแสดงดังตารางที่ 4.4 โดยองค์ประกอบเฟสหลักๆ เป็นคอร์เดียไรต์ซึ่งผลิตภัณฑ์หลังจากเผาประกอบด้วยปริมาณรูพรุนค่อนข้างสูงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ และจะให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำประมาณ  $0.55-0.65 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  ซึ่งมีค่าต่ำมากทำให้สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีกว่าวัสดุอื่นๆ

ตารางที่ 4.4 แสดงสมบัติทั่วไปของเซรามิกวงฝังคอร์เดียไรต์ในทางอุตสาหกรรม<sup>[27]</sup>

No.	Property	Typical	Measurement Technique
1	Physical Appearance	White	
2	Coefficient of Thermal Expansion ( 30 - 800 °C ), ( $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )	0.55-0.65	Dilatometer ( Netzsch - 402 C ) Germany.
3	Strength N/m <sup>2</sup> ( $\times 10^7$ ) a - axis b - axis	1.70 0.25	Tensometer ( T20 ), Monsanto, USA
4	Bulk Density ( g/cm <sup>3</sup> )	1.494	
5	Apparent Porosity (%)	40.41	
6	Water Absorption (%)	27.05	
7	Softening Temperature (°C)	1430	
8	Phases Comp. (%) Cordierite (Major) Mullite (Minor) Spinel (Minor) Corundum (Minor)	> 95 % } < 5 %	X - ray Diffractometer ( D8 advanced system, Bruker, Germany )

#### 4.5 การวิเคราะห์สมบัติการขยายตัวทางความร้อน

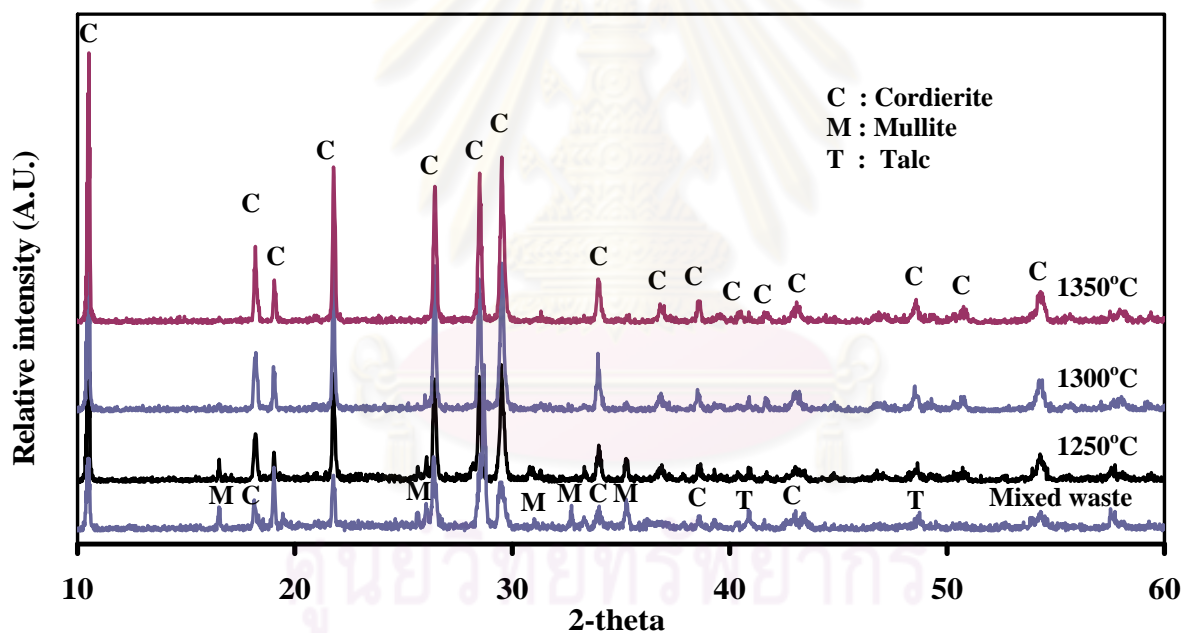
จากการหาค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานคอร์เดียไรต์พบว่า คอร์เดียไรต์ที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่นมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำกว่าคอร์เดียไรต์ที่ได้จากการผสมดินขาวระนองถึงแม้จะประกอบด้วยเฟสของคอร์เดียไรต์เพียงเฟสเดียวเหมือนกัน เนื่องจากชิ้นงานที่ได้จากดินขาวระนองจะมีสารเจือปน เช่นพวกแอลคาไลนัมมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานที่ได้จากดินขาวระนองสูงกว่าชิ้นงานที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก  $1250^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1300^{\circ}\text{C}$  ดังรูปที่ 4.7 พบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากดินขาวระนองมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงคือ 5.01, 3.85 และ  $3.20 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่ชิ้นงานที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่นมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนลดลงคือ 3.22, 2.94 และ  $2.99 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีค่าต่ำสุดคือ  $2.94 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$  ที่อุณหภูมิ  $1300^{\circ}\text{C}$  และถึงแม้อุณหภูมิในการเผาสูงจะสูงขึ้น สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ได้ก็มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักสำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากเศษคอร์เดียไรต์ป่น และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ  $1250^{\circ}\text{C}$  พบว่าชิ้นงานทั้งสองกลุ่มจะให้การขยายตัวทางความร้อนสูงกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ เนื่องจากที่อุณหภูมินี้ยังปรากฏเฟสของมัลไลต์ซึ่งเป็นเฟสที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงกว่าคอร์เดียไรต์ ( $5.41 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ ) ส่งผลให้ที่อุณหภูมินี้ มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูงกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ



รูปที่ 4.7 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของชิ้นงานคอร์เดียไรต์ที่ได้จากวัตถุดิบสองชนิด คือ ดินขาวระนอง และเศษคอร์เดียไรต์ป่น ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ  $100-500^{\circ}\text{C}$

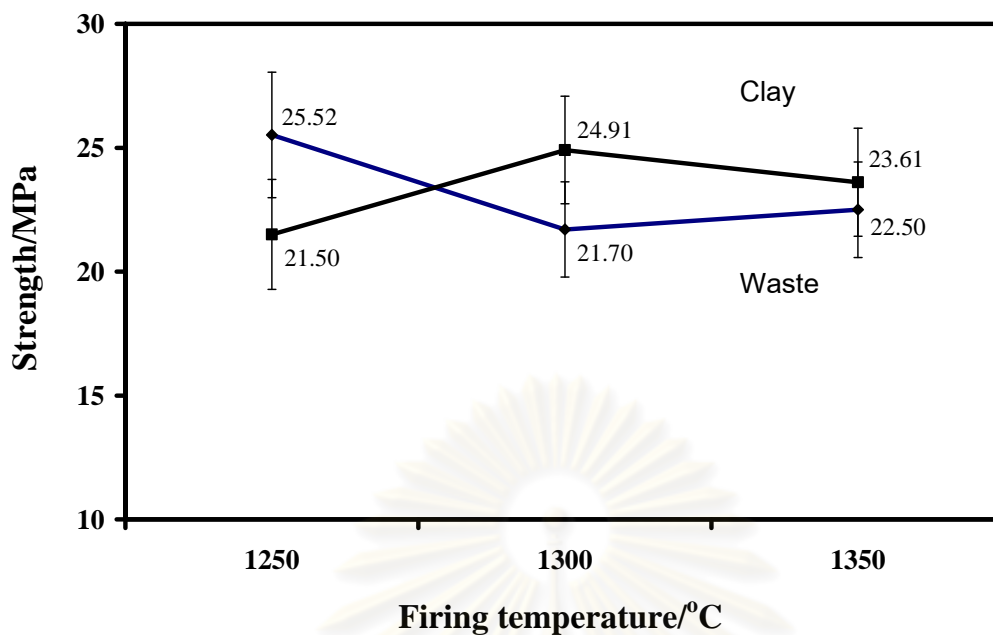
#### 4.6 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเฟส

จากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเฟสของส่วนผสมที่มีการใช้เศษคอร์เดียไรต์ป่นพบว่า ปรากฏเฟสของวัตถุดิบตั้งต้นคือ คอร์เดียไรต์ มัลไลต์ ทัลค์ โดยหลังจากเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1250, 1300, 1350°C พบว่าชิ้นงานประกอบด้วยเฟสของคอร์เดียไรต์เป็นเฟสหลักที่อุณหภูมิ 1300°C เมื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน (JCPDS 12-0303) โดยที่อุณหภูมินี้จะไม่ปรากฏเฟสของมัลไลต์ แต่จะปรากฏชัดเจนที่อุณหภูมิ 1250°C โดยมีการเกิดร่วมกับเฟสอื่นๆ ของวัตถุดิบตั้งต้น แต่จะค่อยๆ เปลี่ยนเฟสเป็นคอร์เดียไรต์ เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.8 ในกรณีของส่วนผสมที่มีการใช้ดินขาวระนองพบว่า ปรากฏเฟสของวัตถุดิบตั้งต้นเช่นกันคือ เคโอลิไนต์ ทัลค์ ควอตซ์ และอะลูมินา ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งปริมาณของเฟสที่ปรากฏขึ้นอยู่กับปริมาณเปอร์เซ็นต์ของส่วนผสมที่ใช้ และหลังจากเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าให้คอร์เดียไรต์เฟสเดียวที่อุณหภูมิ 1300°C เช่นกัน



รูปที่ 4.8 กราฟองค์ประกอบเฟสของคอร์เดียไรต์ที่ได้จากการผสมเศษคอร์เดียไรต์ป่น ซึ่งทำการเผาผืนที่อุณหภูมิ 1250-1350°C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5°C/min เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



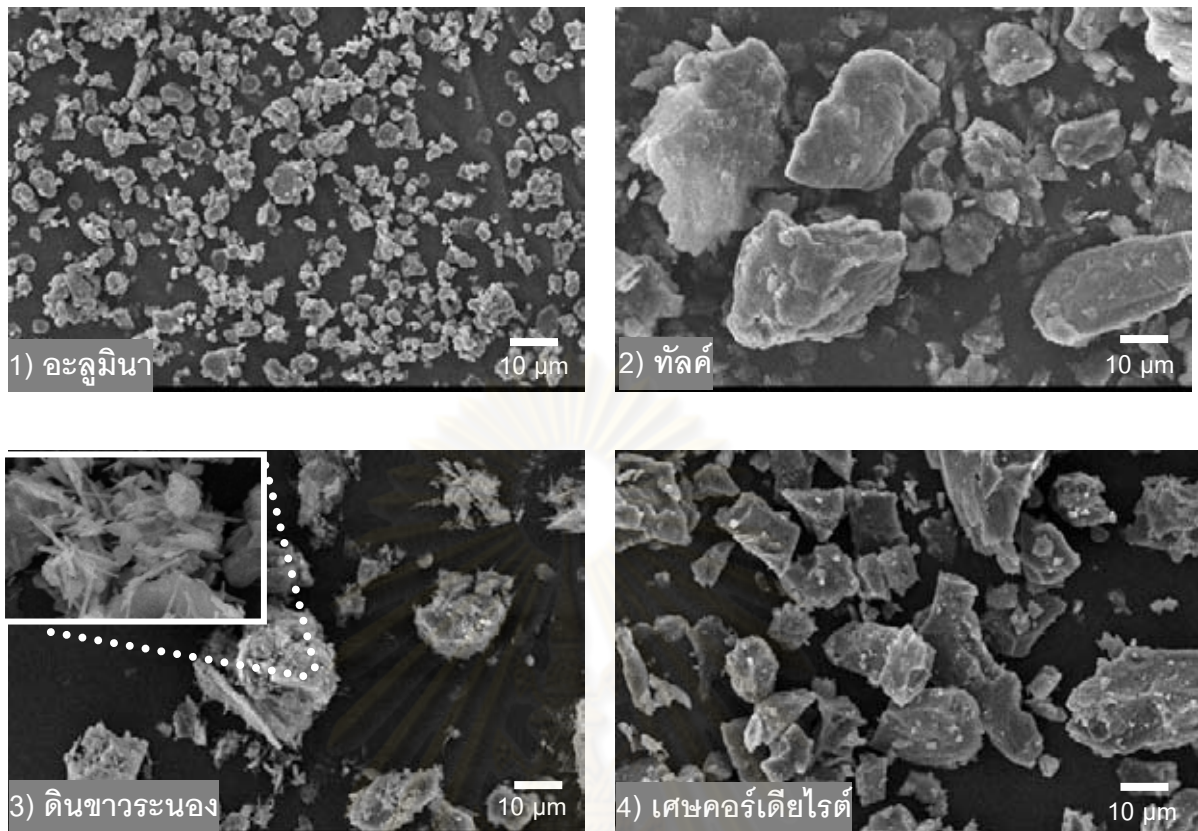


รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานคอร์เดียไรต์เมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1250-1350°C

#### 4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัตถุบิทั้งสี่ชนิดแสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าขนาดของอะลูมินามีขนาดเล็กที่สุดคือต่ำกว่า 10 ไมครอน กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเกาะติดเป็นก้อน ซึ่งแตกต่างจาก ทัลค์ ดินขาวระนอง และเศษคอร์เดียไรต์ป่นซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน โดยโครงสร้างของดินและทัลค์ มีลักษณะเป็นแผ่นๆ ซ้อนกันและภายในเนื้อดินขาวระนองยังปรากฏอนุภาคเป็นแท่งเล็กๆ ซึ่งเป็นอนุภาคของฮาลลอยไซต์ซึ่งเป็นเฟสหนึ่งของเคโอลิไนต์ซึ่งถูก hydrated กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อดิน

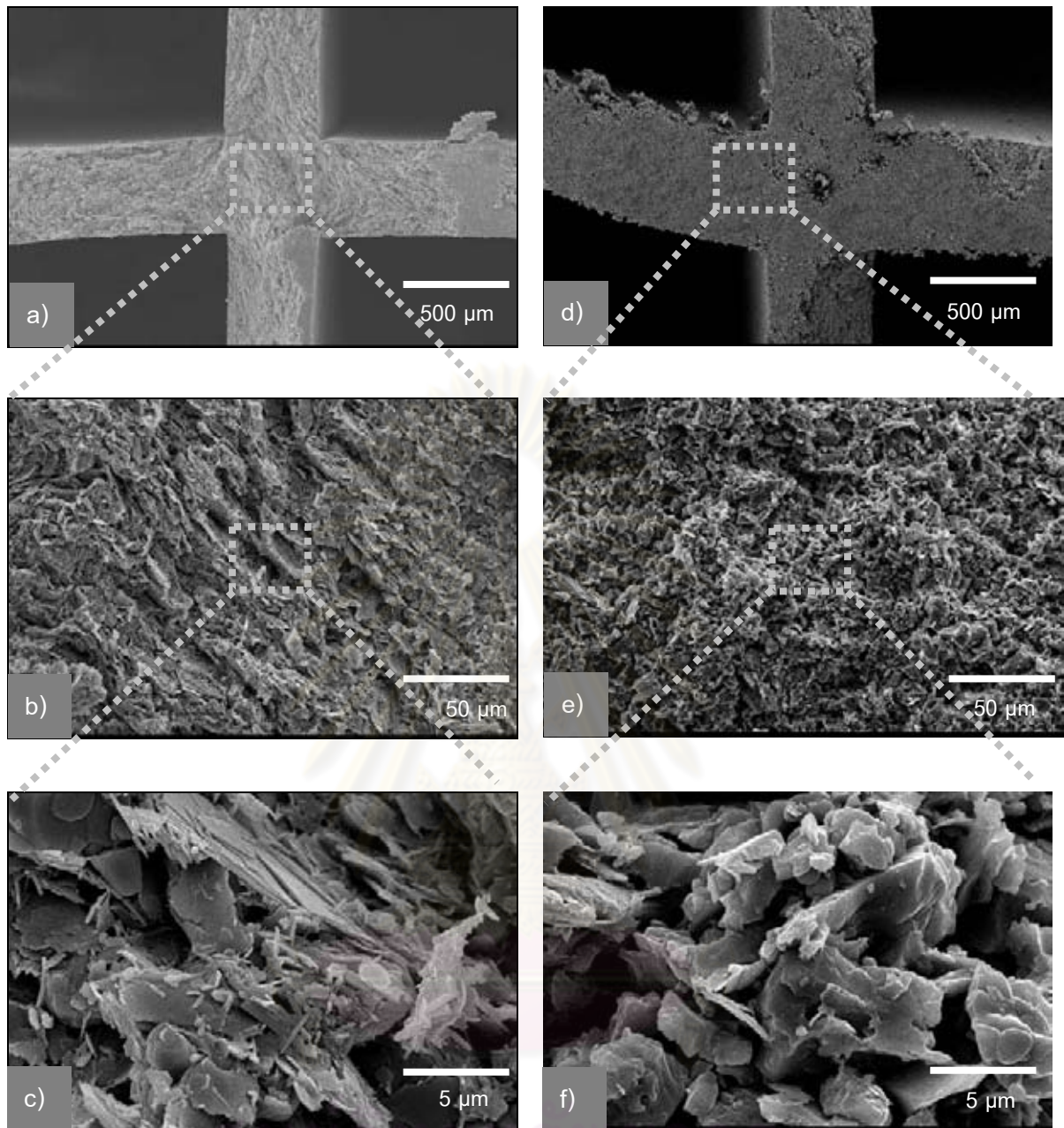
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



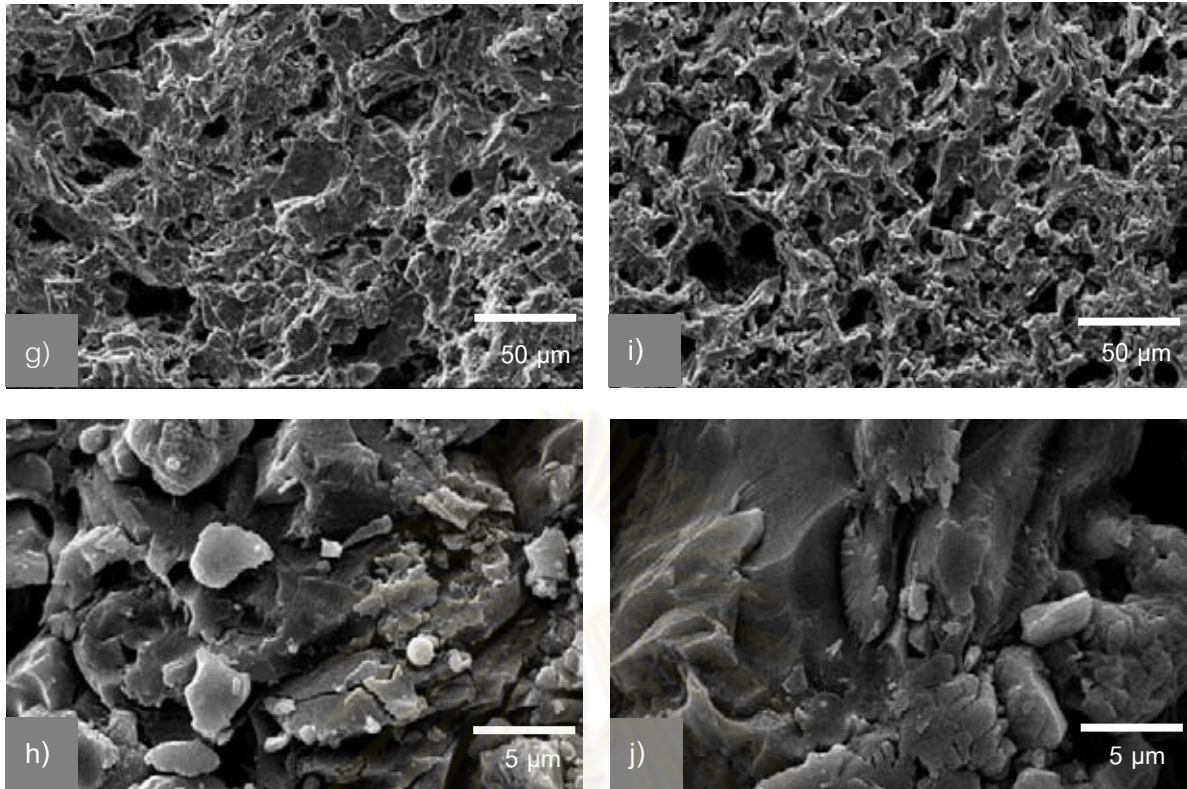
**รูปที่ 4.11** โครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่ใช้ได้แก่ อะลูมินา (1) ทัลค์ (2) ดินขาวระนอง (3) และ เศษคอร์เดียไรต์ปน (4) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ตามลำดับ

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จากส่วนผสมของดินขาวระนองพบว่า ประกอบด้วยอนุภาคของดินและทัลค์ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบาง (platelet-like)<sup>[28]</sup> รูปที่ 4.12 a-b และปรากฏอนุภาคเล็กๆ เกาะอยู่บนอนุภาคของดิน ซึ่งเป็นอนุภาคของฮาลลอยไซต์กระจายทั่วชิ้นงานเมื่อผ่านการเผาผนึกอนุภาคเหล่านี้จะหายไป และเนื้อดินมีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีปริมาณรูพรุนอย่างสม่ำเสมอ

เมื่อพิจารณาโครงสร้างภายในของคอร์เดียไรต์ที่ได้จากวัสดุดิบทั้งสองชนิดมีโครงสร้างไม่แตกต่างกัน แต่ปริมาณรูพรุนในตัวอย่งที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ปนสูงกว่าที่ได้จากดินขาวระนองซึ่งสอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและน้ำหนักของตัวอย่าง



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาค (ภาคตัดขวาง) ก่อนเผาของส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนอง (a-c) และเศษคอร์เดียไรต์ป่น (d-f) ที่กำลังขยาย 50 เท่า 500 เท่า และ 10000 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาค (ภาคตัดขวาง) หลังเผาของคอร์เดียไรต์ที่ได้จากดินขาวระนอง (g-h) และเศษคอร์เดียไรต์ป่น (i-j) ที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 10000 เท่า ตามลำดับ

#### 4.9 ผลของปริมาณน้ำและสารตัวเติม

จากการทดลองเตรียมเนื้อคอร์เดียไรต์จากส่วนผสมที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น และดินขาวระนอง พบว่าเนื้อคอร์เดียไรต์ทั้งสองสูตรต้องการปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดที่จะทำให้โครงสร้างที่เป็นรวงผึ้งคงรูปอยู่ได้โดยไม่เสียหายหลังจากการขึ้นรูป จากตารางที่ 4.5 จะแสดงให้เห็นว่า การทดลองเตรียมเนื้อดินนั้นมีการลดปริมาณน้ำลงเรื่อยๆ เนื่องจากปริมาณน้ำที่มากเกินไปมีผลทำให้ชิ้นงานที่รีดขึ้นรูปมานั้นไม่สามารถคงรูปได้และในปริมาณน้ำที่เท่ากัน การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมในดินจะทำให้ค่าความดันของการรีดเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความเหนียวของเนื้อดินนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่า ค่าความดันที่ใช้ในการรีดเนื้อคอร์เดียไรต์ที่ได้จากการผสมดินมีค่าเท่ากับ 2.5 เมกะปาสคาล โดยค่าความดันที่ได้จะเป็นตัวบอกว่าชิ้นงานที่รีดออกมา นั้นสามารถคงรูปได้มากน้อยเพียงใด เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ความดันของการรีดจะลดลงมี ผลทำให้ชิ้นงานอ่อนตัวไม่สามารถคงรูปได้ ต้องเพิ่มปริมาณสารตัวเติม โดยส่วนใหญ่สารตัวเติมที่นิยมนำมาใช้คู่กับ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) คือ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เนื่องจากสามารถลดความดันที่ได้จากการรีดเพราะจะเพิ่มสมบัติความเป็นพลาสติกให้กับเนื้อดินเมื่อทำงานร่วมกับ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส<sup>[1]</sup>



จากการลองผสมส่วนผสมทั้งสองกลุ่มคือ ส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนอง และส่วนผสมที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ปนกับ CMC ปริมาณต่างๆ กันเพื่อทดสอบลักษณะทั่วไปของเนื้อดินปั้นที่ได้ เช่น ความแข็ง ความเหนียวและความยืดหยุ่น พบว่าส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนองปริมาณใช้ปริมาณ CMC ค่อนข้างน้อย คือ 2-3 เปอร์เซ็นต์แต่ใช้ปริมาณน้ำในการทดลองค่อนข้างสูงเนื่องจากดินขาวระนองมีสมบัติในการดูดซึมน้ำ โดยผลจากการทดสอบพบว่าที่ปริมาณน้ำและปริมาณ CMC ต่างกัน ลักษณะของเนื้อดินที่ได้มีค่าแตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งเนื้อดินที่ได้มีความแข็ง ความยืดหยุ่นและความเหนียวดี และหลังจากการนำสูตรส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ 4.7 มาทดลองขึ้นรูปพบว่าสูตรส่วนผสม F2 ซึ่งเป็นสูตรส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนองสามารถขึ้นรูปสำเร็จ โดยขึ้นงานที่ได้สามารถคงตัวอยู่ได้ ไม่ยุบตัว และผนังขึ้นงานเรียบ โดยใช้ปริมาณน้ำ 27 เปอร์เซ็นต์ CMC 3 เปอร์เซ็นต์ และน้ำมันกลีเซอรินที่ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ปริมาณ PVA และ PEG คงที่ที่ 1 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ลักษณะโดยทั่วไปของส่วนผสมเนื้อดินปั้นที่ได้จากดินขาวระนอง

ปริมาณน้ำ(wt %)	ลักษณะโดยทั่วไป	
	ปริมาณ CMC (wt %)	
	2	3
26.5	-	H, E, P, L
27	-	h, E, P, L
28	-	S, E*
29	S, C, e*	S, c, e*
29.5	S, C, e	S, c, e
30	S, C, e, T	S, c, e, T
31	S, C, e, T*	S, c, e, T*

หมายเหตุ เมื่อปริมาณ PVA, PEG และ glycerin คงที่ ที่ 1, 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

\* = glycerin 0.5 เปอร์เซ็นต์

F = ไม่ยืดหยุ่น E = ยืดหยุ่นดี e = ยืดหยุ่นน้อย H = ความแข็งมาก h = ความแข็งน้อย

C = แฉก c = แฉกเล็กน้อย S = นิ่ม P = เหนียว T = ติดมือ L = ลื่น

S, C, e = เนื้อดินนิ่ม ปีบแล้วแตก มีความยืดหยุ่นน้อย

S, c, e = เนื้อดินนิ่ม ปีบแล้วแตกเล็กน้อย มีความยืดหยุ่นน้อย

S, C, e, T = เนื้อดินนิ่ม ปีบแล้วแตก มีความยืดหยุ่นเล็กน้อย ติดมือ

S, c, e, T = เนื้อดินนิ่ม ปีบแล้วแตกเล็กน้อย มีความยืดหยุ่นเล็กน้อย ติดมือ

H, E, P, L	=	เนื้อดินแข็งมาก มีความยืดหยุ่นดี เหนียว และลื่น
h, E, P, L	=	เนื้อดินแข็งดี มีความยืดหยุ่นดี มีความเหนียวและลื่น ไม่ติดมือ
S, E	=	เนื้อดินนิ่ม มีความยืดหยุ่นดี

แต่ในกรณีของเนื้อดินปั้นที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป็นพบว่าต้องใช้ปริมาณ CMC ในการเตรียมค่อนข้างสูง เพื่อให้เนื้อดินปั้นมีลักษณะใกล้เคียงกับเนื้อดินเนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นประกอบด้วยเศษคอร์เดียไรต์ป็นซึ่งมีความเป็น non-plastic สูงโดยปริมาณน้ำที่ใช้อยู่ที่ 23-27 เปอร์เซ็นต์ดังตารางที่ 4.6 แสดงลักษณะทั่วไปของเนื้อดินปั้นที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป็น พบว่าลักษณะของเนื้อดินปั้นที่ได้จากการเติมปริมาณน้ำและ CMC ต่างกันมีลักษณะต่างกัน โดยหลังจากการนำสูตรต่างๆ มาทำการขึ้นรูปดังตารางที่ 4.7 พบว่าสูตรที่สามารถขึ้นรูปได้ต้องใช้ CMC ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณ PVA และ PEG ที่ใช้คือ 1 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาณน้ำมันกลีเซอรินที่ใช้เพียง 1 ไม่เพียงพอสำหรับการรีด เนื่องจากผนังของชิ้นงานยังเกิดรอยแตกซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างเนื้อดินปั้นและผนังแม่แบบยังสูงอยู่รูปที่ 4.14 ดังนั้นจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณปริมาณน้ำมันกลีเซอรินเป็น 1.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ไม่เกิดรอยแตกบริเวณผิวของชิ้นงานดังรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงตัวอย่างของชิ้นงานที่สามารถขึ้นรูปสำเร็จจากการผสมของวัตถุดิบทั้งสองกลุ่ม

ตารางที่ 4.6 ลักษณะโดยทั่วไปของส่วนผสมเนื้อดินปั้นที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป็น

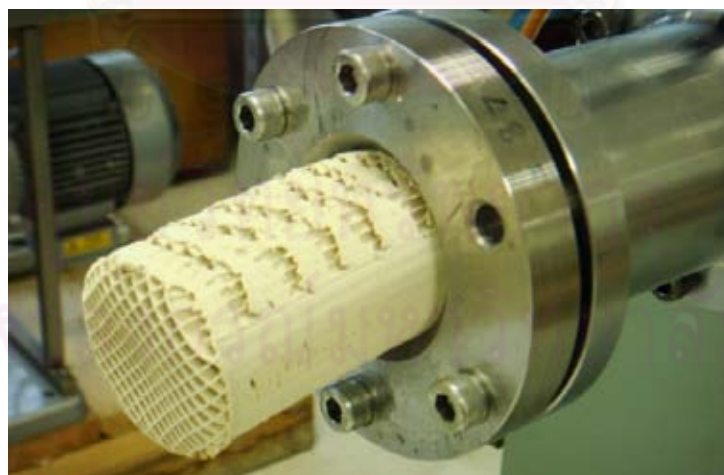
ปริมาณน้ำ (wt %)	ลักษณะโดยทั่วไป					
	ปริมาณ CMC (wt %)					
	2	3	4	5	6	7
23	H, F, C*	H, F, C*	H, F, C*	-	-	-
24	H, F, C	H, F, C	H, F, C	-	-	H
25	S, F, C	S, F, C	S, e	h, E	-	h, E, P, L**
26	S, F, C	S, F, C	S, e	h, E, C	S, e	S, P
27	S, F, C	-	-	S, e**	-	h, e, P**
27.5	S, F, c**	-	-	-	-	-
28	S, F, c*	S, F, c*	S, F, C*	-	-	h, e, P, T*
29	S, F, c, T*	S, F, c*	S, F, C*	-	-	S, e, P, T*

หมายเหตุ เมื่อปริมาณ PVA, PEG และ glycerin คงที่ ที่ 1, 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

\* = glycerin 0.5 เปอร์เซ็นต์

\*\* = glycerin 1 เปอร์เซ็นต์

F = ไม่ยืดหยุ่น	E = ยืดหยุ่นดี	e = ยืดหยุ่นน้อย	H = ความแข็งมาก	h = ความแข็งดี
C = แตก	c = แตกเล็กน้อย	S = นิ่ม	P = เหนียว	T = ติดมือ
L = ลื่น				
H, F, C	=	เนื้อดินแข็งมาก ไม่ยืดหยุ่น บีบแล้วแตก		
S, F, C	=	เนื้อดินนิ่ม ไม่ยืดหยุ่น บีบแล้วแตก		
S, F, c	=	เนื้อดินนิ่ม ไม่ยืดหยุ่น บีบแล้วแตกเล็กน้อย		
S, F, c, T	=	เนื้อดินนิ่ม ไม่ยืดหยุ่น บีบแล้วแตกเล็กน้อย ติดมือ		
S, e	=	เนื้อดินนิ่ม มีความยืดหยุ่นเล็กน้อย		
h, E	=	เนื้อดินแข็งดี มีความยืดหยุ่น		
h, E, C	=	เนื้อดินแข็งดี มีความยืดหยุ่นดี แต่ยังไม่เหนียว		
S, e	=	เนื้อดินนิ่ม มีความยืดหยุ่นน้อย		
h, E, P, L	=	เนื้อดินแข็งดี มีความยืดหยุ่นดี มีความเหนียวและลื่น ไม่ติดมือ		
H	=	เนื้อดินแข็ง		
S, P	=	เนื้อดินนิ่มแต่เหนียว		
h, e, P	=	เนื้อดินแข็งพอดี มีความยืดหยุ่นน้อย แต่มีความเหนียว		
h, e, P, T	=	เนื้อดินแข็งพอดี มีความยืดหยุ่นน้อย มีความเหนียว ติดมือ		
S, e, P, T	=	เนื้อดินนิ่ม มีความยืดหยุ่นน้อย มีความเหนียว ติดมือ		
-	=	ไม่มีการทดลอง		



รูปที่ 4.14 ชิ้นงานที่ออกจากเครื่องรีด Vacuum Extrusion forming machine

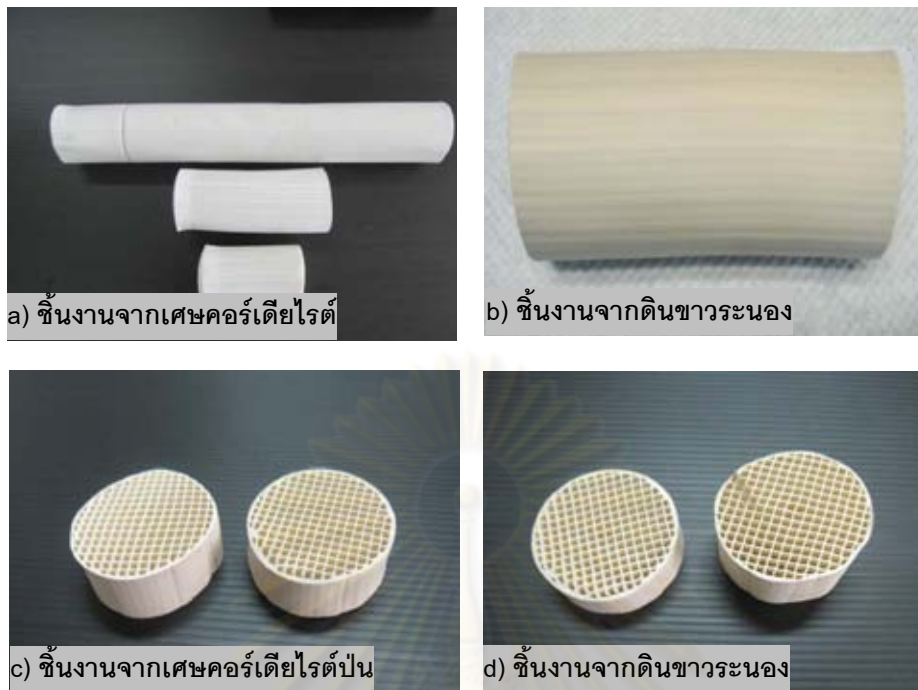
ตารางที่ 4.7 สูตรเนื้อดินปั้นที่นำไปทำการทดลองรีดขึ้นรูปวงผึ้ง

สูตร	ส่วนผสม	ปริมาณน้ำ (wt %)	ปริมาณ CMC (wt %)	ปริมาณน้ำมัน กลีเซอริน (wt %)
A1	W	29	2	0.5
A2	C	31	2	0.5
B1	W	28	2	0.5
C1	W	28	3	0.5
D1	W	27	2	1
D2	C	30	2	1
E1	W	27.5	2	1
E2	C	29.5	2	1
F1	W	23	3	1
F2*	C	27	3	1
G1	C	26.5	3	1
H1	W	26	5	1.5
I1	W	26	6	1.5
J1*	W	25	7	1.5
K1	W	24.5	7	1.5
L1	W	24	7	1.5

\* สูตรที่สามารถขึ้นรูปได้สำเร็จ

หมายเหตุ: สูตรในตารางที่ 4.7 นี้ ตั้งชื่อสูตรตั้งแต่ A-L โดยเลือกสูตรส่วนผสมจากตารางที่ 4.5 และ 4.5 มาทำการทดลองขึ้นรูปเซรามิกวงผึ้ง

ศูนย์วิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 ชิ้นงานก่อนเผา (a-b) และหลังเผา (c-d) ที่อุณหภูมิ 1300°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

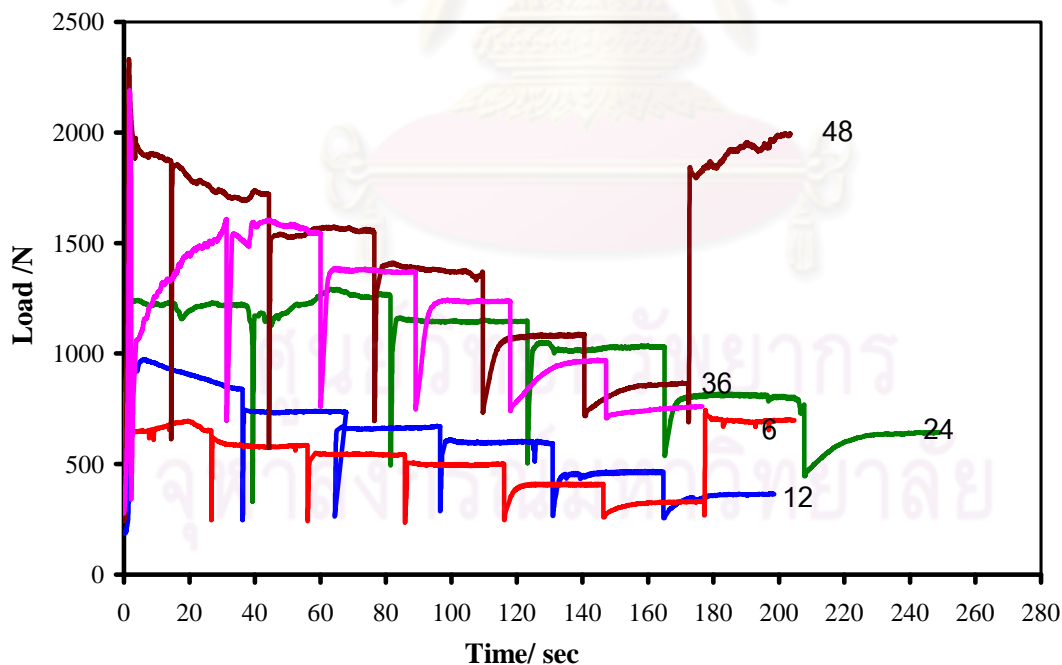
#### 4.10 ผลของการเติมโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) และ น้ำมันกลีเซอริน

การเติมโพลีเอทิลีนไกลคอล (PEG) ในเนื้อดินปั้น (dough) จะทำให้ความดันในระหว่างการรีดลดลงเนื่องจาก PEG จะลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคในเนื้อดินปั้นโดยไปลดความเหนียวระหว่างอนุภาคแต่จะเพิ่มความเสียดทานระหว่างเนื้อดินปั้นกับผนังแม่แบบ (die) ดังนั้น PEG จึงเป็นสารตัวเติมที่เพิ่มสมบัติความเป็นพลาสติกแต่ไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นสารหล่อลื่น (lubricant) สำหรับการรีด ดังนั้นในการทดลองจึงมีการใช้น้ำมันกลีเซอรินเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างเนื้อดินปั้นและผนังแม่แบบเนื่องจากขณะทำการทดลองทำการผสมที่เปอร์เซ็นต์น้ำมันกลีเซอรินต่ำๆ ผนังของชิ้นงานที่ออกจากเครื่องเกิดรอยแตก ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มปริมาณกลีเซอรินเพื่อเพิ่มความหล่อลื่นให้กับเนื้อดินปั้นและผนังแม่แบบ

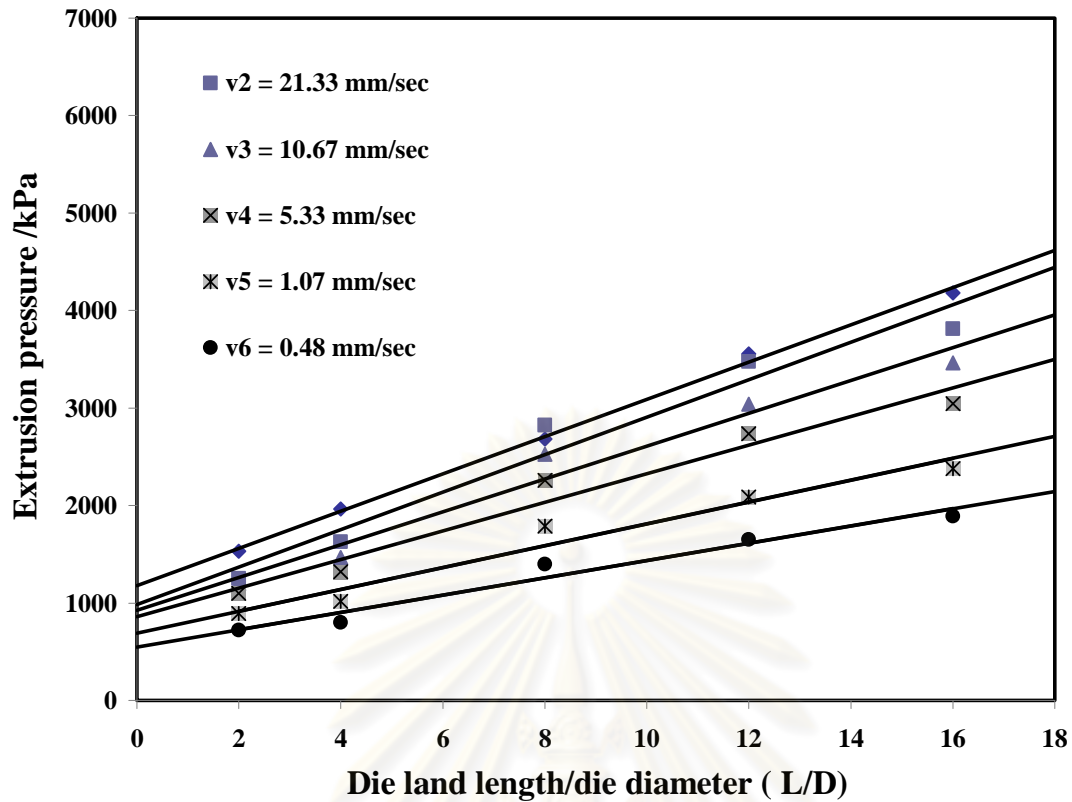
#### 4.11 ลักษณะการไหลตัวของเนื้อดินปั้นคอร์เดียไรต์

ผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ให้กับเครื่อง Ram extruder และความยาวของหัวแบบค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.16 สำหรับคอร์เดียไรต์ที่ได้จากดินขาวระนองและรูปที่ 4.18 สำหรับคอร์เดียไรต์ที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น จากกราฟจะสังเกตว่าแรงที่ให้จะลดลงเมื่อลดความเร็วของ Ram speed และความยาวของหัวแบบ เนื่องจากสามารถลดสาเหตุของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงของ Ram speed และความยาวของหัวแบบ ซึ่งบางครั้งแรงที่ให้อาจมีการเปลี่ยนแปลงบ่อยครั้งเนื่องมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อดินปั้น ซึ่งความดันที่ใช้ในการรีดสามารถหาได้จากแรงเฉลี่ยของแต่ละความเร็วและแม่แบบแต่ละตัว โดยรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการรีดและอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของแม่แบบ (L/D)

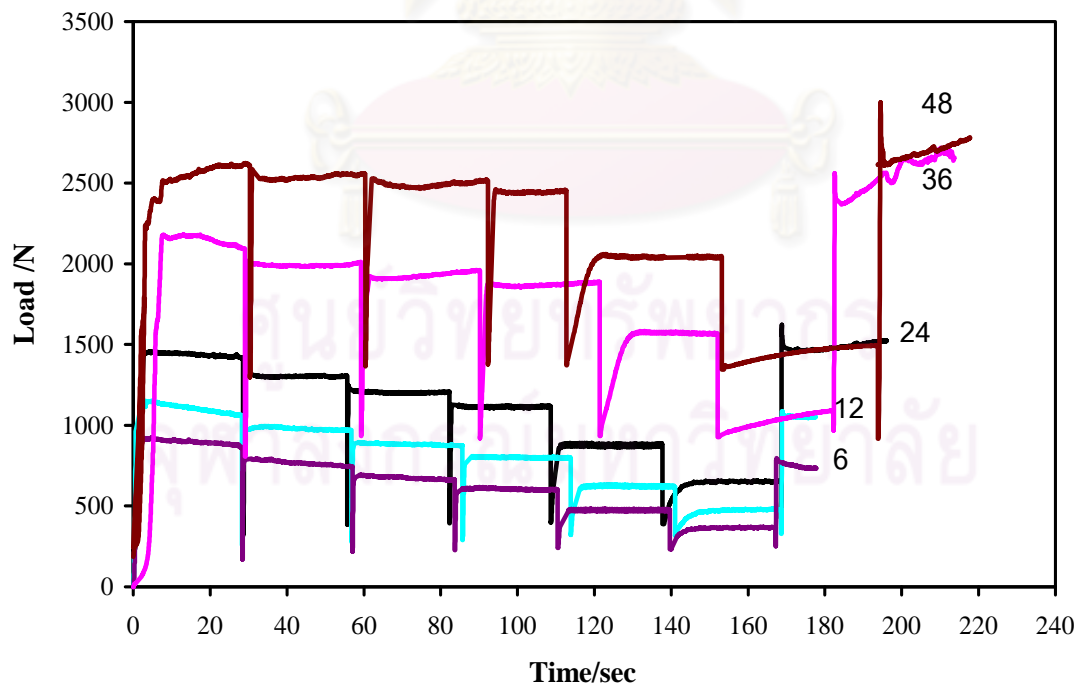
โดยที่อัตราส่วนของ L/D มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ความดันที่ใช้ในระบบ ( $P$ ) มีค่าเท่ากับ  $\Delta P_2$  ซึ่งก็คือ  $= 2(\sigma + \alpha V^m) \ln(D_0 / D)$  ซึ่งเป็นความดันที่เปลี่ยนแปลงระหว่าง barrel และ die entry โดยจุดตัดแกน y จะมีค่าเท่ากับ  $\Delta P_2$  แต่ในกรณีที่ ค่า L/D มีค่ามาก ความดันที่เปลี่ยนแปลงไปบริเวณหัวแบบที่เกิดจากความยาว ส่งผลต่อค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงในระบบ<sup>[29]</sup>



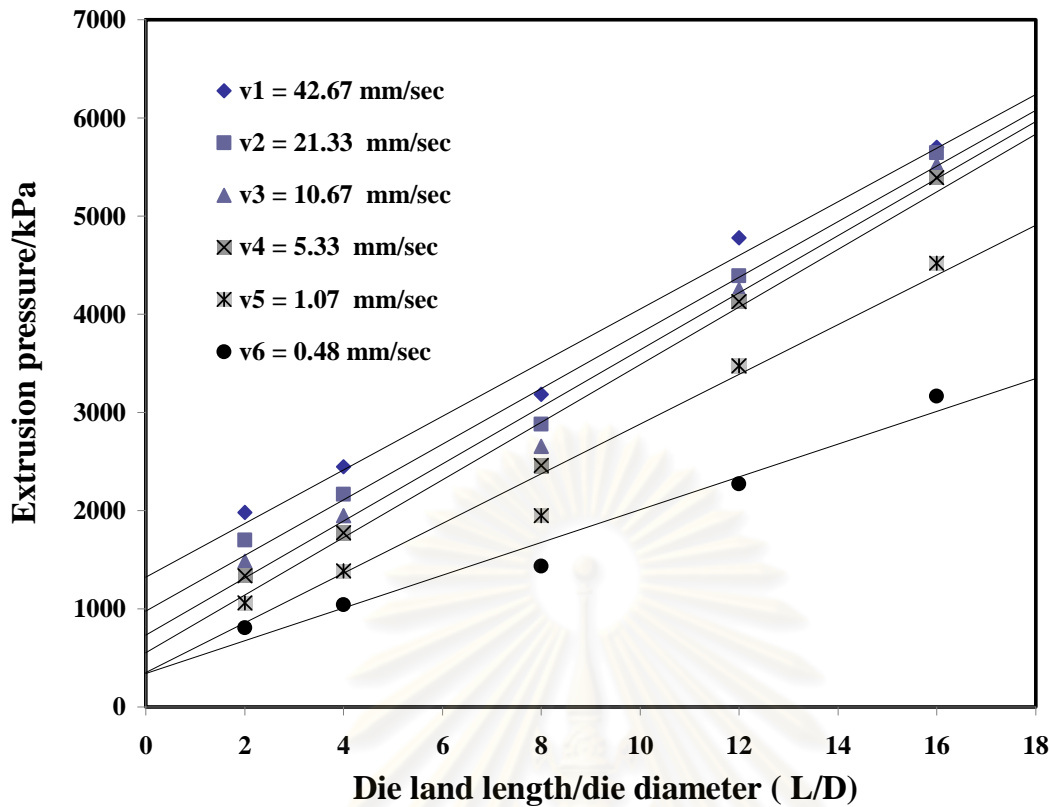
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของแรงและเวลาที่ใช้สำหรับ Ram extrusion ที่ความเร็วต่างๆ กัน คือ 0.0007, 0.00036, 0.00018, 0.000089, 0.000018 และ 0.000008 เมตรต่อวินาที ของส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนอง



รูปที่ 4.17 ความดันในการรีดที่ความเร็วและความยาวของหัวแบบต่างๆ กันของส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนอง



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของแรงและเวลาที่ใช้สำหรับ Ram extrusion ที่ความเร็วต่างๆ กัน คือ 0.0007, 0.00036, 0.00018, 0.000089, 0.000018 และ 0.000008 เมตรต่อวินาที ของส่วนผสมที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ป่น



รูปที่ 4.19 ความดันในการรีดที่ความเร็วและความยาวของหัวแบบต่างๆ กันของส่วนผสมได้จาก เศษคอร์เดียไรต์ป็น

พารามิเตอร์ที่สามารถอธิบายการไหลตัวของเนื้อดินปั้นสามารถหาได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ใช้ในการรีด (extrusion pressures) และ ความเร็วที่ได้จากการรีด (extrudate velocity) โดยใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ (curve fitting method) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.8 จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าค่า yield strength ( $\sigma$ ) แสดงถึงค่าความแข็งของเนื้อดินปั้น ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น และจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทำให้ความดันที่เกิดจาก die-entry เปลี่ยนแปลง โดยการต้านทานแรงเฉือนของอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กัค่า yield strength ( $\sigma$ ) โดยค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 0.15-0.3 สามารถรีดขึ้นรูปวงผึ้งได้ดี เนื่องจากมีค่า yield สูง หากมีค่า yield strength ต่ำๆ ขึ้นงาน หลังการขึ้นรูปไม่สามารถรักษารูปทรงได้ ในขณะที่ถ้าค่า yield strength มีค่าเกิน 0.30 จะต้องใช้ความดันในการรีดสูงขึ้นซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องรีดที่มีกำลังสูง และหัวแบบที่แข็งแรงกว่า<sup>[9]</sup> ซึ่งจากการทดลองพบว่า yield strength ( $\sigma$ ) ของส่วนผสมทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 0.24-0.28



ค่าแอลฟา ( $\alpha$ ) หรือ Velocity sensitivity factor เป็นค่าที่บอกถึงแรงที่ใช้ในการรีดในเวลาหนึ่งๆ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ซึ่งเป็นการวัดความสัมพันธ์ระหว่างการต้านทานการไหลตัวและความเร็วที่ได้จากการรีด

ค่า  $m$  เป็นค่าที่บอกสภาพความเป็นพลาสติกหรือซูโดพลาสติกของเนื้อดินปั้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าควรอยู่ในช่วง 0.18-0.59 ซึ่งจะทำให้ได้เนื้อดินปั้นที่มีความยืดหยุ่นดีเหมาะสำหรับการนำมารีด ถ้ามีค่าต่ำกว่า 0.4 แสดงว่าเนื้อดินปั้นมีความยืดหยุ่นไม่ดีพอ เนื่องจากสมบัติการไหลตัวต่ำ เมื่อเนื้อดินปั้นผ่านหัวแบบจะทำให้เกิดแรงเสียดทานสูงและไม่สามารถรักษารูปทรงได้ ซึ่งจากการทดลองพบว่าส่วนผสมที่ได้จากวัตถุดิบทั้งสองกลุ่มอยู่ในช่วง 0.41-0.51 หากมีค่าสูงแสดงว่าเนื้อดินปั้นมีความเป็นซูโดพลาสติกสูง เมื่อออกจากแม่แบบสามารถรักษารูปปร่างให้คงรูปได้

ค่า  $\beta$  เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับเซรามิกผงเนื่องจากเป็นค่าที่ส่งผลอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ Wall shear stress หรือค่า  $\tau$  ซึ่งเป็นตัวที่บอกถึงแรงเสียดทานระหว่างผนังแม่แบบและเนื้อดินซึ่งมีค่า 1/100 ของ yield strength โดยทั่วไปค่า  $\tau$  จะมีค่าอยู่ในช่วง น้อยกว่า 0.02 จะทำให้สามารถขึ้นรูปได้ดี ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าแรงเสียดทานของส่วนผสมที่ได้จากวัตถุดิบทั้งสองที่มีต่อผนังแม่แบบมีค่าค่อนข้างสูงคือ 0.04-0.05 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณสารตัวเติมที่ทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นไม่เพียงพอทำให้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นยังมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งจากการสังเกตพบว่าได้ว่าพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้พิจารณาการไหลตัวของเนื้อดินปั้นหลักๆ ได้แก่ พารามิเตอร์ที่สามารถบอกค่าความแข็งแรงของเนื้อดินปั้นได้คือ yield strength ( $\sigma$ ) พารามิเตอร์ที่สามารถบอกค่าแรงเสียดทานของเนื้อดินปั้นและผนังได้คือ ค่า  $\tau$  และพารามิเตอร์ที่สามารถบอกสมบัติความเป็นซูโดพลาสติกของเนื้อดินได้คือค่า  $m$  นอกจากนั้นค่า  $\alpha V^m$  และ  $\beta V^n$  เป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนตัวของของเหลว ซึ่งหาก shear lubrication ดีจะทำให้ค่า  $\sigma/\tau$  สูงขึ้น<sup>[9]</sup>

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์ต่างๆ จากเนื้อดินปั้นคอร์เดียไรต์ที่ได้จากดินขาวระนองและเศษคอร์เดียไรต์ปั้นเมื่อหัวแบบมีขนาดต่างๆ

Extrusion parameter	Dough batch	
	Group C	Group W
$\sigma$ [MPa]	0.281	0.235
$\alpha$ [MPa(s m <sup>-1</sup> ) <sup>m</sup> ]	0.027	0.573
$\tau$ [MPa]	0.044	0.048
$\beta$ [MPa(s m <sup>-1</sup> ) <sup>n</sup> ]	0.777	0.151
$m$ (exponent)	0.506	0.412
$n$ (exponent)	0.715	0.625
$\alpha V^m$ [MPa]*	0.001	0.029
$\beta V^n$ [MPa]*	0.004	0.002
$\sigma/\tau$ ratio	6.460	4.904

\* V=0.0007 m/sec, Group C= ส่วนผสมที่ได้จากดินขาวระนอง

Group W= ส่วนผสมที่ได้จากเศษคอร์เดียไรต์ปั้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการเตรียมคอร์เดียวไรต์จากเศษคอร์เดียวไรต์ป่นและดินขาวระนองเพื่อใช้ในการเตรียมเซรามิกวงผึ้งพบว่า

1. เศษคอร์เดียวไรต์ป่นจากอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมเซรามิกวงผึ้งได้ โดยสมบัติที่ได้มีค่าไม่แตกต่างจากเซรามิกวงผึ้งที่ได้จากดินขาวระนอง

2. สูตรในการเตรียมคอร์เดียวไรต์ที่เหมาะสมสำหรับเศษคอร์เดียวไรต์ป่นคือ น้ำ 25 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 7 และน้ำมันกลีเซอริน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และน้ำ 27 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 3 และน้ำมันกลีเซอริน 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับดินขาวระนองโดย โพลีไวนิลแอลกอฮอล์และ โพลีเอทิลีนไกลคอล ปริมาณคงที่คือ 1, และ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3. ค่าความแข็งแรง (yield strength,  $\sigma$ ) แรงเสียดทานระหว่างเนื้อดินปั้นกับผนังแม่แบบ และสภาพความเป็นซูโดพลาสติกของส่วนผสมที่ได้จากวัตถุดิบทั้งสองคือ 0.24-0.28 เมกะปาสคาล 0.41-0.51 และ 0.04-0.05 ตามลำดับ ซึ่งวัตถุดิบทั้งสองกลุ่มมีค่าไม่ต่างกันมากนัก

4. อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเตรียมคอร์เดียวไรต์จากวัตถุดิบทั้งสองกลุ่มคือ  $1300^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะให้องค์ประกอบของคอร์เดียวไรต์เป็นเฟสเดียว

5. ที่อุณหภูมิการเผาหนึ่งดังกล่าวจะให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนต่ำคือ  $2.94 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  และ  $3.85 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  สำหรับเศษคอร์เดียวไรต์ป่นและดินขาวระนองตามลำดับ

6. ชิ้นงานคอร์เดียวไรต์ที่ได้จากดินขาวระนองและเศษคอร์เดียวไรต์ป่นมีค่าความแข็งแรง (Bending strength) ไม่แตกต่างกันมากนักคืออยู่ในช่วง 21-25 เมกะปาสคาล

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำวิจัยในครั้งนี้ การทดลองเตรียมเนื้อดินปั้นได้ออกแบบมาเพื่อใช้กับเครื่องรีดขึ้นรูปซึ่งใช้งานในระดับงานวิจัย ทำให้มีข้อจำกัดเรื่องกำลังในการรีดของเครื่องมือ ดังนั้นในการใช้งานในระดับอุตสาหกรรมการลดปริมาณของน้ำ ลง 0.5-1 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ชิ้นงานวงผึ้งมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและการหดตัวน้อยลง

## รายการอ้างอิง

- [1] **Catalytic converter** [Online]. Available from: [http://www.mtec.or.th/index.php?option=com\\_content&task=view&id=90&Itemid=36](http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=90&Itemid=36) [2008, 8 September].
- [2] Bode, H. **Material Aspects in Automotive Catalytic Converters**. Munich: Federal Republic of Germany, 2002.
- [3] **แคลทาลิติกคอนเวอร์เตอร์** [Online]. Available from: [http://amethyst.mtec.or.th/th/news/cool\\_stuff/cool38.html](http://amethyst.mtec.or.th/th/news/cool_stuff/cool38.html) [2008, 18 June].
- [4] Yamunaa, A., Johnsonb, R., Mahajanb, Y. R. and Lalithambikac, M. **Kaolin-based cordierite for pollution control**. *Journal of the European Ceramic Society* 24 (2004).
- [5] สมชาย จันทร์ชานา. **CATALYTIC CONVERTER** อุปกรณ์บำบัดก๊าซมลพิษในไอเสียเครื่องยนต์ 2001. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2001.(เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- [6] **Substrates for metal catalyst** [Online]. Available from: <http://www.anydertechs.com/english/products/products-03.htm> [2008, 18 June].
- [7] Das, R. N. **Study on cordierite honeycomb substrates and gamma alumina support for catalytic converter application**. Doctoral Dissertation, Tokyo Institute of Technology. 2002.
- [8] **ความหนืดคุณลักษณะเฉพาะของของไหล** [Online]. Available from: [www.dss.go.th/dssweb/st-articles/.../pep\\_9\\_2549\\_viscosity.pdf](http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/.../pep_9_2549_viscosity.pdf) [2009, 5 MAY].
- [9] Das, R. N., Madhusoodana, C. D. and Okada, K. **Rheological studies on cordierite honeycomb extrusion**. *Journal of the European Ceramic Society* 22[16] (2002): 2893-2900.
- [10] **Nano kaolin** [Online]. Available from: <http://www.imerys-perfmans.com/kaolin/eu/barrisurf.htm> [2009, 27 July].
- [11] Wongpratad, U. **Intercalation of silver nanoparticle in kaolin for antibacterial application**. Master Degree Thesis, Chulalongkorn University. 2008.
- [12] **Diesel particulate filter** [Online]. Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel\\_particulate\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_particulate_filter) [2008, 8 June].
- [13] Adler, J. **Ceramic Diesel Particulate Filters**. *International Journal of Applied Ceramic Technology* 2[6] (2005): 429-439.

- [14] **Fossil fuel reforming** [Online]. Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Steam\\_reforming](http://en.wikipedia.org/wiki/Steam_reforming) [2008, 18 June].
- [15] Saha, S. P., et al. Thermal anisotropy in sintered cordierite monoliths. *Materials Chemistry and Physics* 67[1] (2001): 140-145.
- [16] Malachevsky, M. T., Fiscina, J. E. and Esparza, D. A. Preparation of Synthetic Cordierite by Solid-State Reaction via Bismuth Oxide Flux. *Journal of the Americans Ceramic Society* 84[7] (2001): 1575-1577.
- [17] Kaewtabut, Y. **Effect of alkaline earth oxide additives co-doped with yttria and silica on sintering of silicon nitride ceramics**. Master Degree Thesis, Chulalongkorn University. 2007.
- [18] Johnson, R., Ganesh, I., Saha, B. P., Narasimharao, G. V. and Mahajan, Y. R. Solid state reactions of cordierite precursor oxides and effect of CaO doping on the thermal expansion behaviour of cordierite honeycomb structures. *Journal of Materials Science* 38[13] (2003): 2953-2961.
- [19] H. INADA M. HIRANO, H. I. Preparation and characterization of cordierite-zirconia composites from co-precipitated powder. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* 28 (1993): 74-78.
- [20] Hamzawy, E. M. A., Kheshen, A. A. E. and Zawrah, M. Densification and properties of glass/cordierite composites. *Ceramics International* 31[3] (2004): 383-389.
- [21] อุบลรัตน์ หวังรักษาศีสกุล. Development of Cordierite Ceramics for Catalytic Converter Using Local Raw Materials. *Journal of KMITNB* 17[3] (2007): 39-46.
- [22] การผลิตแผ่นรองเผาชนิดคอร์เดียไรท์ (Cordierite)- มัลไลท์ (Mullite) [Online]. Available from: [www.ThaiCeramicSociety.com](http://www.ThaiCeramicSociety.com) [2009, 5 February].
- [23] Shiw, Z. M. Sintering Additives to Eliminate Interphases in Cordierite Ceramics. *Journal of the Americans Ceramic Society* 88[5] (2005): 1297-1301.
- [24] **X-ray Diffractometer (XRD)** [Online]. Available from: [http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf\\_XRD1.htm](http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm) [2009, 26 June].
- [25] Gonza'lez-Velasco, J. R., Ferret, R., Lo'pez-Fonseca, R. and Gutie'rrez-Ortiz, M. A. Influence of particle size distribution of precursor oxides on the synthesis of cordierite by solid-state reaction. *Powder Technology* 153[1] (2005): 34-42.

- [26] Neto, J. B. R. and Moreno, R. Rheological behaviour of kaolin/talc/alumina suspensions for manufacturing cordierite foams. *Applied Clay Science* 37[1-2] (2006): 157-166.
- [27] **Honeycomb Ceramics** [Online]. Available from: <http://www.marketech-ceramics.com/pages/honeycomb.html> [2008, 23 June].
- [28] Bardhan, P. Ceramic honeycomb filters and catalyts. *Current Opinion in Solid State & Materials Science* 2[5] (1997): 577-583.
- [29] Li, Y. Y., Perera, S., Crittenden, B. D. and Bridgwater, J. The effect of the binder on the manufacture of a 5A zeolite monolith. *Powder Technology* 116[1] (2001): 85-96.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

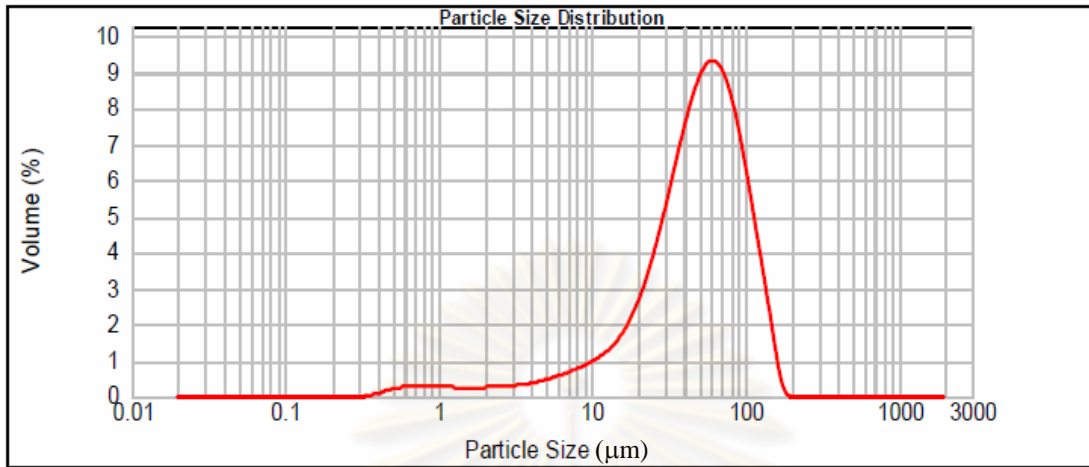


ภาคผนวก

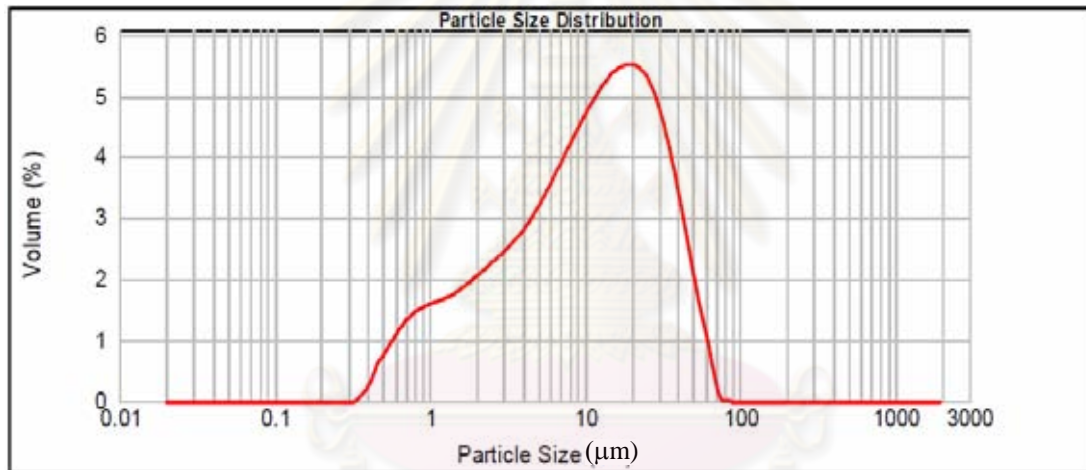
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

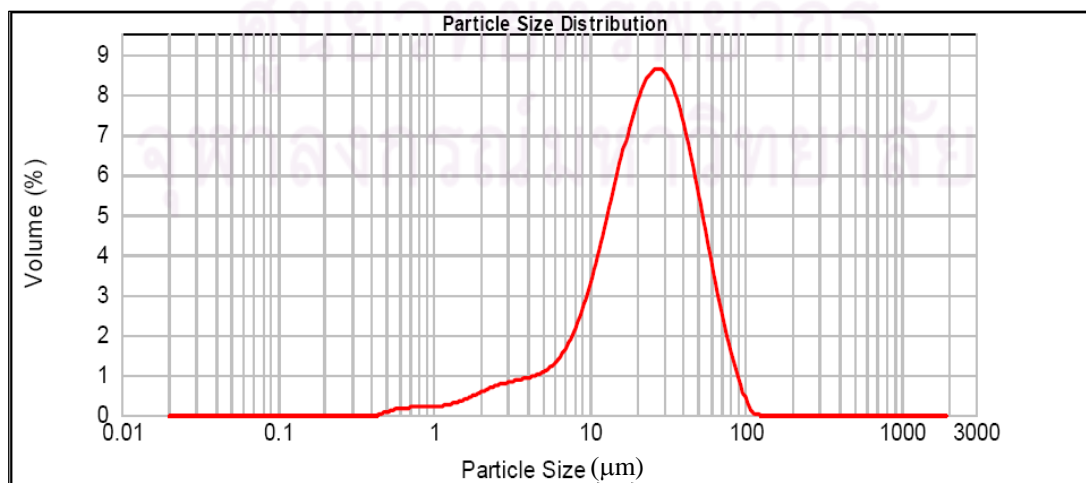
กราฟแสดงการกระจายตัวของอนุภาค



การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของโพลีเอทิลีนไกลคอล

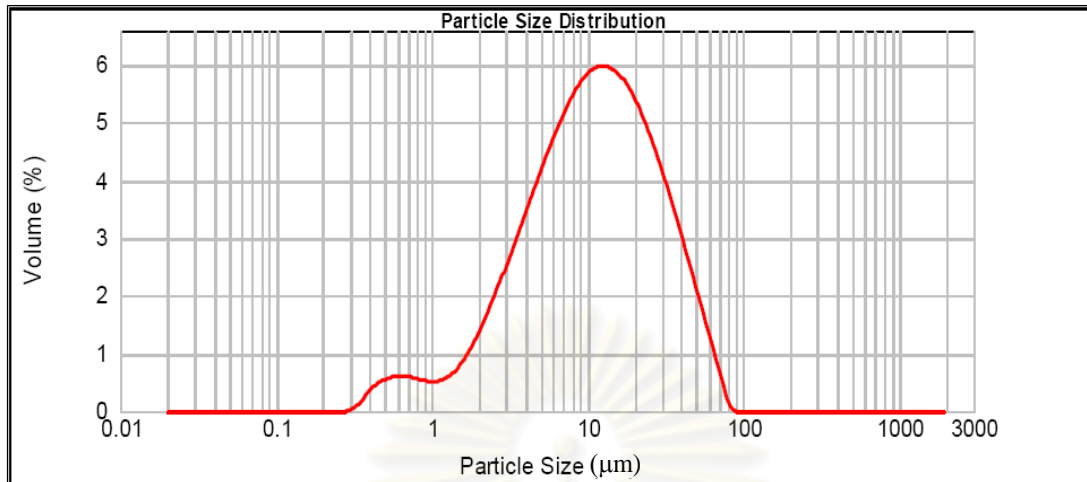


การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของโพลีเอทิลีนไกลคอลหลังจากการบด 30 นาที

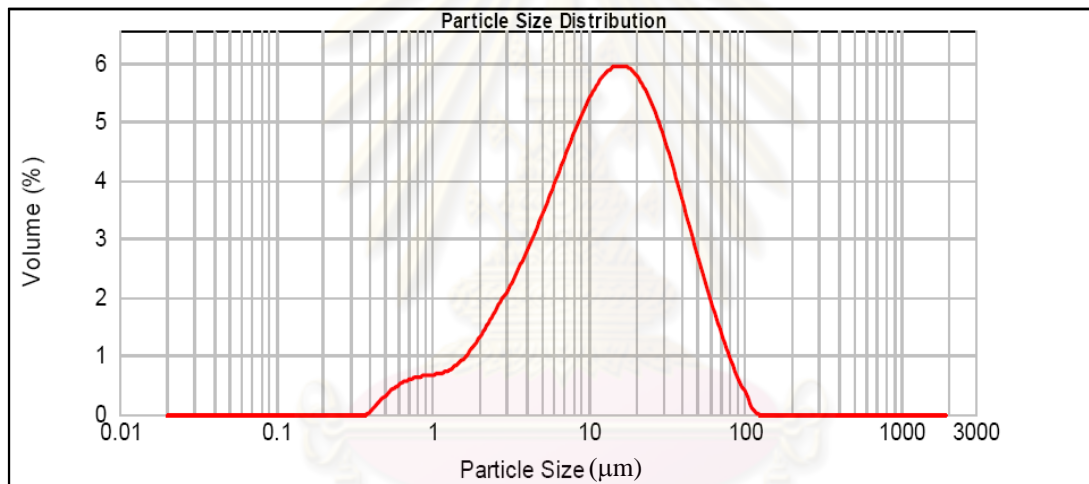


การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

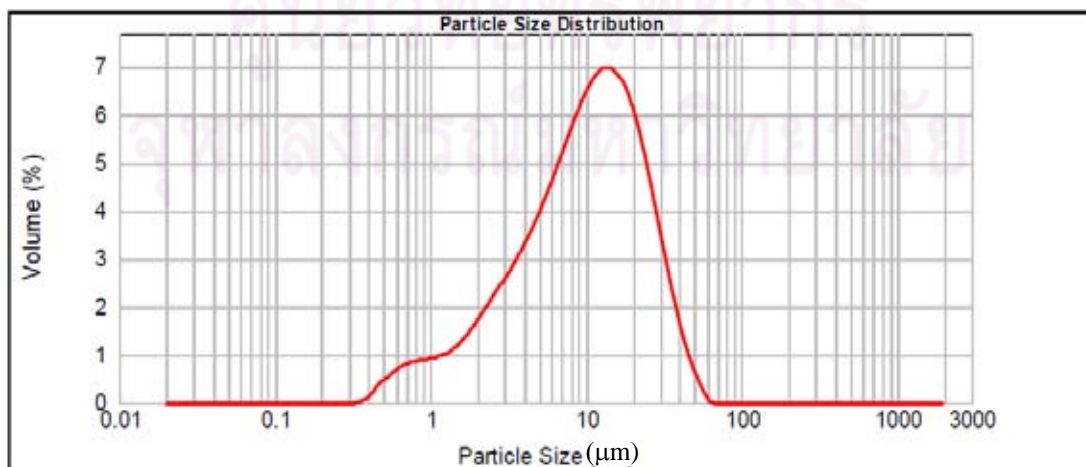




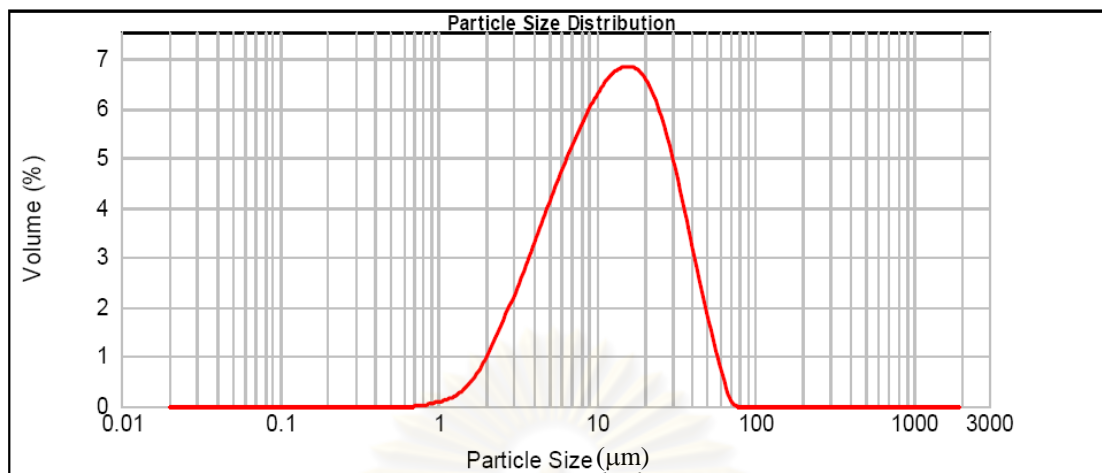
การกระจายตัวขนาดอนุภาคของผงอะลูมินา



การกระจายตัวขนาดอนุภาคของดินขาวระนอง



การกระจายตัวขนาดอนุภาคของส่วนผสมที่เตรียมจากเศษคอร์ดีเยไรต์ป่น



การกระจายตัวขนาดอนุภาคของส่วนผสมที่เตรียมจากดินขาวระนอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

แสดง JCPDS มาตรฐาน ที่ใช้เปรียบเทียบ

## 1. Cordierite No. 12-0303

12-0303		Wavelength= 1.54056						i		
Mg <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>18</sub>	2 $\theta$	Int	h	k	l	2 $\theta$	Int	h	k	l
Magnesium Aluminum Silicate	10.350	80	0	2	0	39.258	4	1	7	1
	10.460	80	1	1	0	39.491	4	3	5	1
	14.113	2	1	1	1	39.690	2	4	2	1
Cordierite	18.052	30	1	3	0	39.984	4	0	2	4
	18.239	12	2	0	0	40.226	4	1	5	3
Rad.: CuK $\alpha$ 1 $\lambda$ : 1.54056 Filter: d-sp: Guinier 114.6	18.988	12	0	0	2	40.301	4	2	4	3
Cut off: Int.: I/Intor.:	20.399	4	1	3	1	40.452	4	3	1	3
Ref: de Wolff, P., Technisch Physische Dienst, Delft, The Netherlands, ICDD Grant-in-Aid	20.785	6	0	4	0	41.503	14	2	6	2
	20.984	2	2	2	0	41.825	4	4	0	2
	21.711	75	1	1	2	42.780	12	1	7	2
	26.267	70	1	3	2	43.015	10	3	5	2
Sys.: Orthorhombic S.G.: Ccmm (66)	26.426	60	2	0	2	43.210	16	4	2	2
a: 9.739 b: 17.08 c: 9.345 A: 0.5702 C: 0.5471	27.857	4	2	4	0	43.893	2	4	4	1
$\alpha$ : $\beta$ : $\gamma$ : Z: 4 mp:	28.309	45	0	4	2	44.209	2b	2	2	4
Ref: Ibid.	28.493	100	2	2	2	46.408	4	2	8	0
	29.296	65	1	5	1	46.559	6	3	7	0
	29.425	55	2	4	1	46.762	4	0	8	2
	29.614	60	3	1	1	46.968	2	5	1	0
Dx: 2.499 Dm: 2.675 SS/FOM: F <sub>30</sub> = 37(.0199, 41)	31.406	2	0	6	0	47.149	6	4	4	2
	31.738	2	3	3	0	47.489	4	2	8	1
sr: 1.555(3) $\mu$ : 1.549(2) $\sigma$ : 1.5525(2) Sign: +/-: 65-10 $\mu$	33.203	2	3	3	1	48.049	2	1	5	4
Ref: Deer, W., Howie, R., Zussman, J., Rock Forming Minerals, 1, 268	33.757	25	1	5	2	48.266	10	1	7	3
	33.862	18	2	4	2	48.457	12	3	5	3
	34.035	14	1	3	3	48.623	12	4	2	3
Color: Grayish blue, light violet-blue, dark blue	36.557	8	2	6	0	48.873	4	1	9	0
Specimen from Kragero, Norway. Beryl SuperGroup, 20 Group.	36.946	12	0	6	2	49.239	4	4	6	0
PSC: oC116. See ICSD 100250 (PDF 83-1385); ICSD 15487 (PDF 72-172); ICSD 36248 (PDF 76-1794); ICSD 100487 (PDF 83-1596); ICSD 100489 (PDF 83-1598). Mwt: 584.95. Volume[CD]: 1554.47.	37.232	2	3	3	2	49.468	6	5	3	0
	37.833	2	2	6	1	49.902	2	1	9	1
	38.489	25	0	0	4	50.255	6	4	6	1

2 $\theta$	Int	h	k	l
50.493	10	0	6	4
50.703	10	3	3	4
52.879	2	1	9	2
53.243	2	4	6	2
53.445	2	5	3	2
53.614	8	0	10	0
54.127	40	2	6	4
54.405	20	4	0	4
55.186	4	1	7	4
55.439	4	2	8	3
55.916	2	5	1	3
56.102	4	3	9	0
56.705	2	6	0	0
56.935	2	2	4	5
57.089	6	2	10	0
57.400	2	0	10	2
57.596	4	1	9	3
57.953	12	4	6	3
58.154	6	5	3	3

## 2. Mullite No. 15-0776

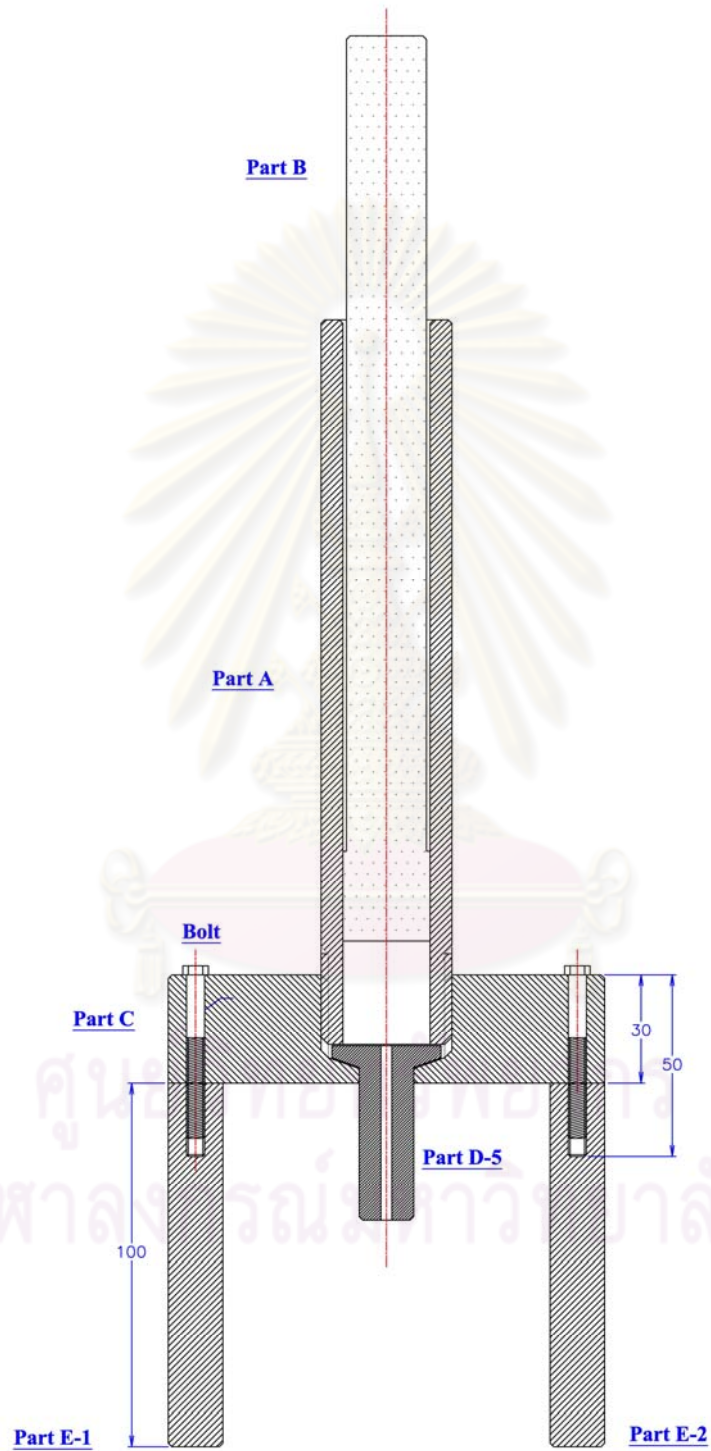
15-0776		Wavelength= 1.54056									
Al6Si2O13		2 $\theta$	Int	h	k	l	2 $\theta$	Int	h	k	l
Aluminum Silicate											
		16.432	50	1	1	0	70.991	u	2	1	2
		23.554	8	2	0	0	71.576	4	5	1	1
		25.971	95	1	2	0	71.904	3	3	5	0
		26.267	100	2	1	0	72.647	4	5	3	0
		30.960	20	0	0	1	73.901	7	0	6	0
		33.228	40	2	2	0	74.191	13	2	5	1
		35.278	50	1	1	1	74.580	6	2	2	2
		36.993	14	1	3	0	75.162	12	5	2	1
		37.554	<2	3	1	0	75.555	<2	6	0	0
		38.992	4	0	2	1	76.836	6	1	3	2
		39.276	20	2	0	1	77.182	2	3	1	2
		40.874	60	1	2	1	78.311	2	4	4	1
		42.590	25	2	3	0	78.835	<2	2	6	0
		42.908	8	3	2	0	80.480	4	2	3	2
		46.059	2	2	2	1	81.046	3	5	3	1
		47.227	2	0	4	0	84.493	<2	4	0	2
		48.184	8	4	0	0	87.002	1	2	6	1
		48.845	<2	1	4	0	88.569	4	2	4	2
		49.468	10	3	1	1	89.090	5	4	2	2
		50.812	<2	3	3	0	93.817	<2	2	7	0
		53.462	6	2	4	0	98.446	4	1	7	1
		53.883	14	3	2	1	98.958	4	2	5	2
		54.093	10	4	2	0	99.868	8	3	7	0
		57.561	20	0	4	1					
		58.412	12	4	0	1					
		58.994	2	1	4	1					
		59.763	2	4	1	1					
		60.711	35	3	3	1					
		61.492	<2	1	5	0					
		62.874	<2	5	1	0					
		63.054	<2	2	4	1					
		63.661	8	4	2	1					
		64.571	18	0	0	2					
		65.494	4	2	5	0					
		66.514	8	5	2	0					
		67.130	<2	1	1	2					
		69.616	6u	2	0	2					
		69.806	u	4	4	0					
		70.442	12	1	5	1					
		70.844	5u	1	2	2					
Sys.: Orthorhombic S.G.: Pbam (55) a: 7.5456 b: 7.6090 c: 2.8042 A: 0.9812 C: 0.3751 $\alpha$ : $\beta$ : $\gamma$ : Z: .75 mp: Ref: Ibid. Dx: 3.171 Dm: 3.000 SS/FOM: F <sub>30</sub> = 60(.0135 , 37) $\omega$ : 1.637 $\eta$ $\omega$ $\beta$ : 1.641 $\sigma$ $\gamma$ : 1.652 Sign: + 2V: 45-50° Ref: Winchell, Elements of Optical Mineralogy, 2, 401 Color: Colorless Pattern taken at 25 C. Sample was prepared from stoichiometric mixture of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and SiO <sub>2</sub> x H <sub>2</sub> O. Sample was repeatedly ground and heated up to temperature of 1725 C. Spectrographic analysis: 0.01 to 0.1% Fe, and 0.001 to 0.01% each of Ca, Cr, Mg, Mn, Ni, Ti and Zr. Chemical analysis showed Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 61.6, SiO <sub>2</sub> 38 (mole%). Tungsten used as an internal stand. FSC: oP15.75. See ICSD 23726 (PDF 73-1253); See ICSD 23867 (PDF 73-1389); See ICSD 28544 (PDF 74-2419); See ICSD 202159 (PDF 84-1205); See ICSD 66263 (PDF 79-1275); See ICSD 66264 (PDF 79-1276); See ICSD 66444 (PDF 79-1450); See ICSD 66445 (PDF 79-1451); See ICSD 66446 (PDF 79-1452); See ICSD 66447 (PDF 79-1453); See ICSD 66448 (PDF 79-1454); See ICSD 66449 (PDF 79-1455); See ICSD 66450 (PDF 79-1456); See ICSD 66451 (PDF 79-1457); See ICSD 66452 (PDF 79-1458); See ICSD 74008 (PDF 82-37); See ICSD 75305 (PDF 82-1237). Mwt: 426.05. Volume[CD]: 167.35.											



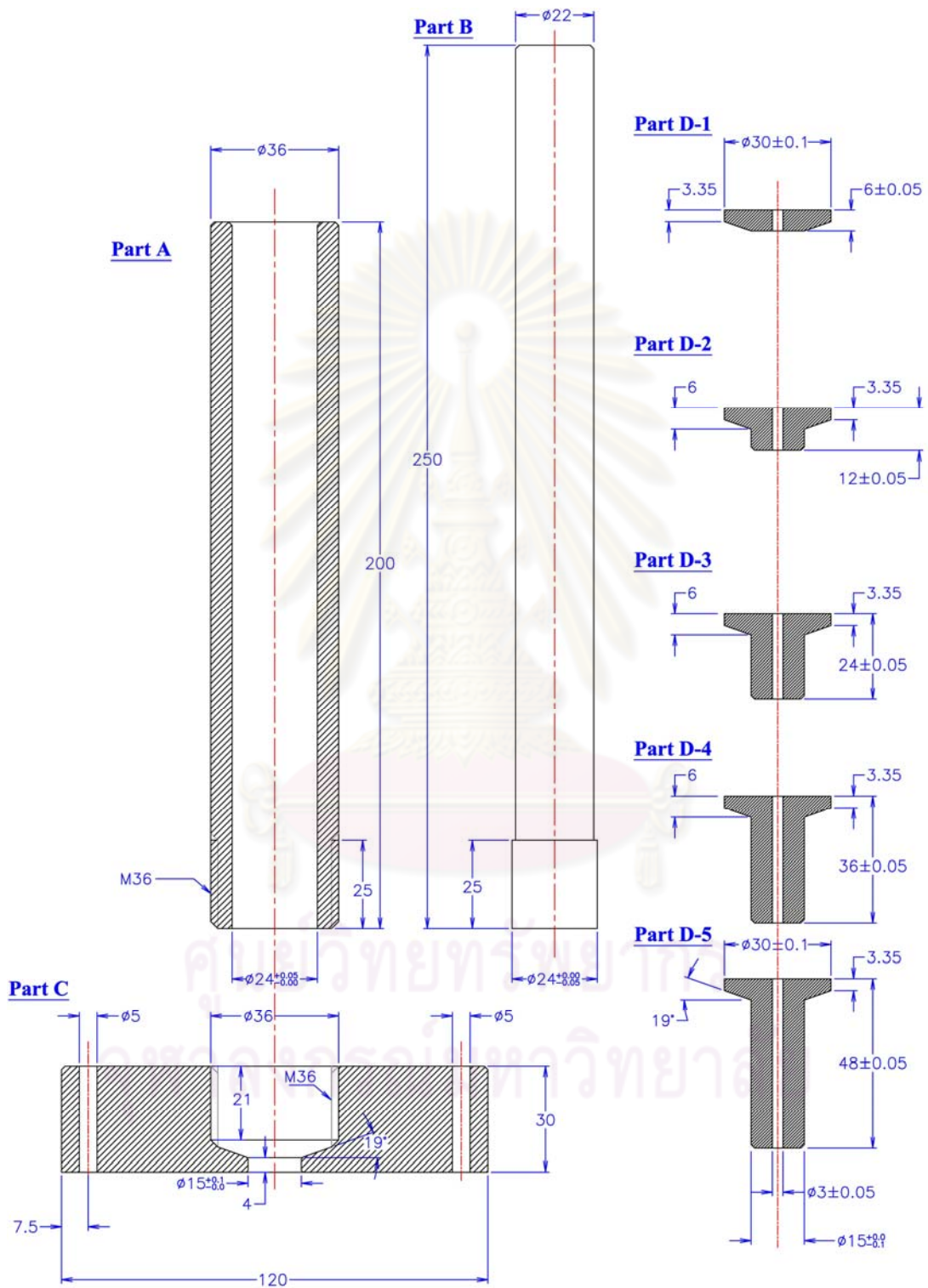
2003 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

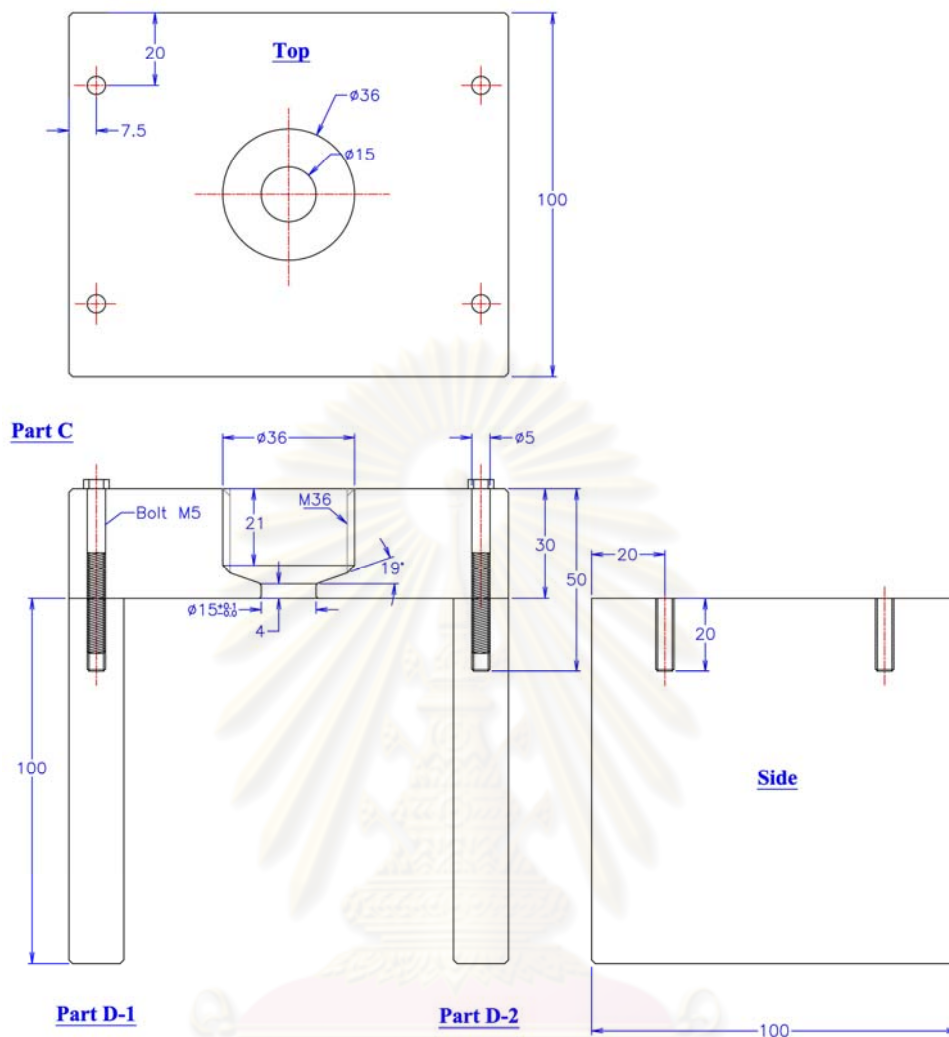
## ภาคผนวก ค



แบบโครงสร้างและส่วนประกอบส่วนต่างๆ ของเครื่อง Ram extruder



แบบโครงสร้างของ Push rod และหัวแบบขนาดต่างๆ



แบบโครงสร้าง Top view และ Side view ของเครื่อง Ram extruder

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว วิไลรัตน์ โกสุพรรณ เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ 2527 ปัจจุบันอายุ 24 ปี เกิดที่โรงพยาบาลสงขลา จังหวัดสงขลา เป็นบุตรสาวคนที่สามของครอบครัวโกสุพรรณ สำเร็จ การศึกษา ระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตจากสาขาวิชาวัสดุศาสตร์ คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ เมื่อ พ.ศ. 2550 และเข้าศึกษาต่อใน ระดับ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2550 และสำเร็จการศึกษาในปี 2552

### การนำเสนอผลงานในระดับนานาชาติ

“FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF CORDIERITE HONEYCOMB CERAMIC FOR CATALYST SUBSTRATE” Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2009). January 14 - 16, 2009, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย