



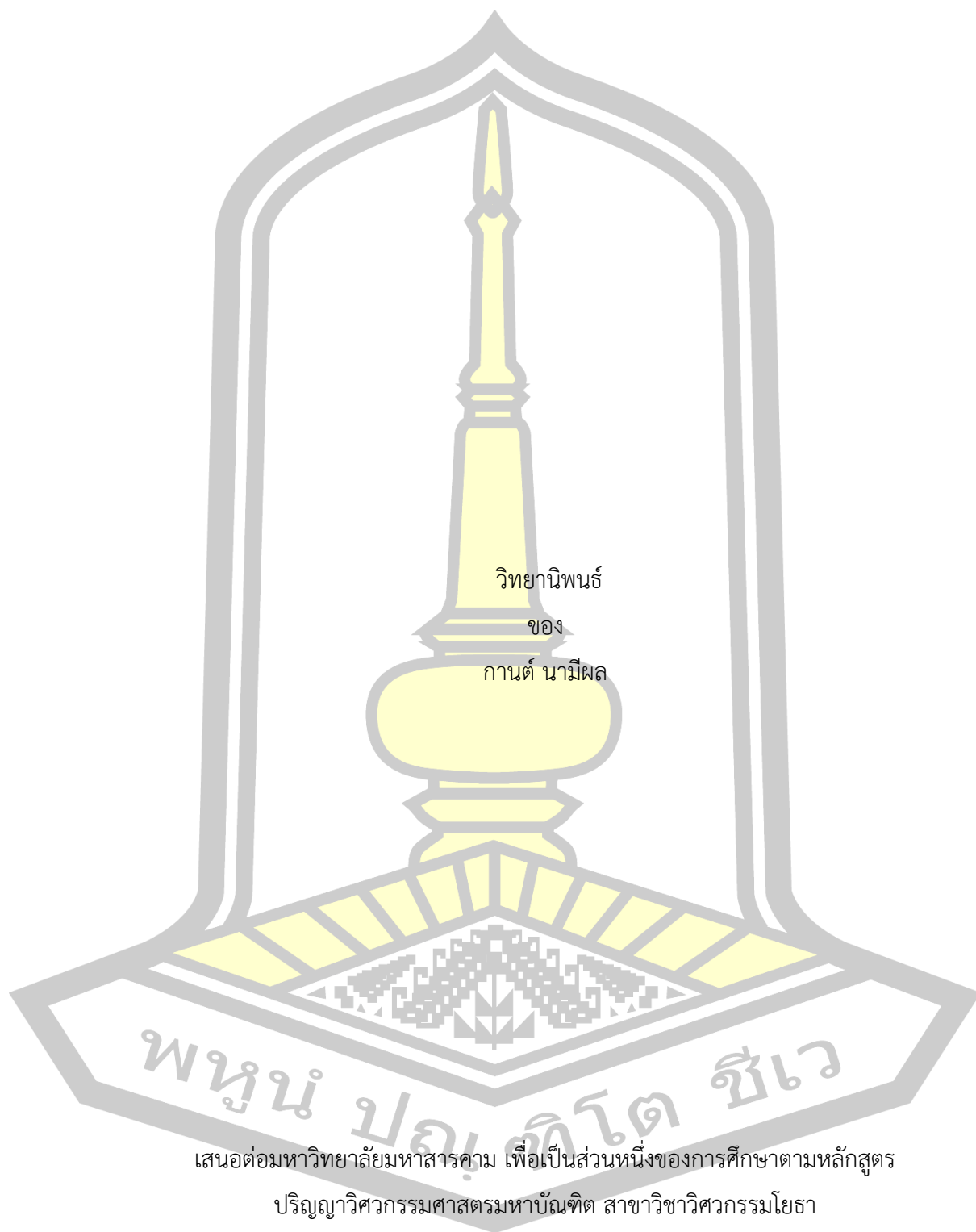
การใช้ประโยชน์จากถ้ำกั้นเตา - ของเสียจากเตาเผาในกระบวนการผลิตแหวน

วิทยานิพนธ์
ของ
กานต์ นามีผล

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มิถุนายน 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การใช้ประโยชน์จากถ้ำก้นเตา - ของเสียจากเตาเผาในกระบวนการผลิตแหอวน



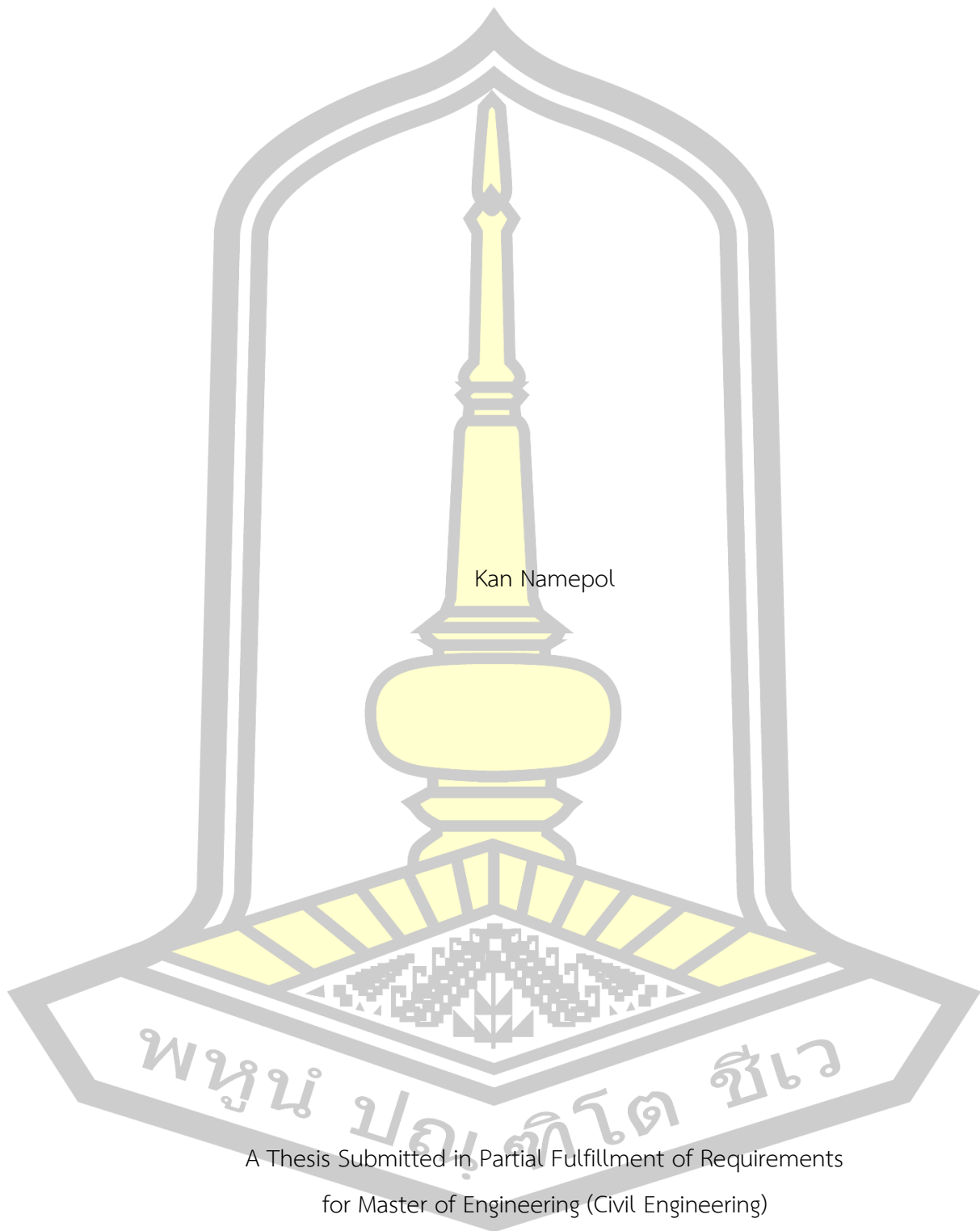
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Bottom ash utilization – Furnace waste from production of fishing net



Kan Namepol

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Civil Engineering)

June 2019

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายกานต์ นามิผล แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. มณีรัตน์ องค์กรวรรณี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. สหलग หอมวุฒิมังค์)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิดา ชัยมูล)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

พหุบัน บุณฺ ทัต ชีเว

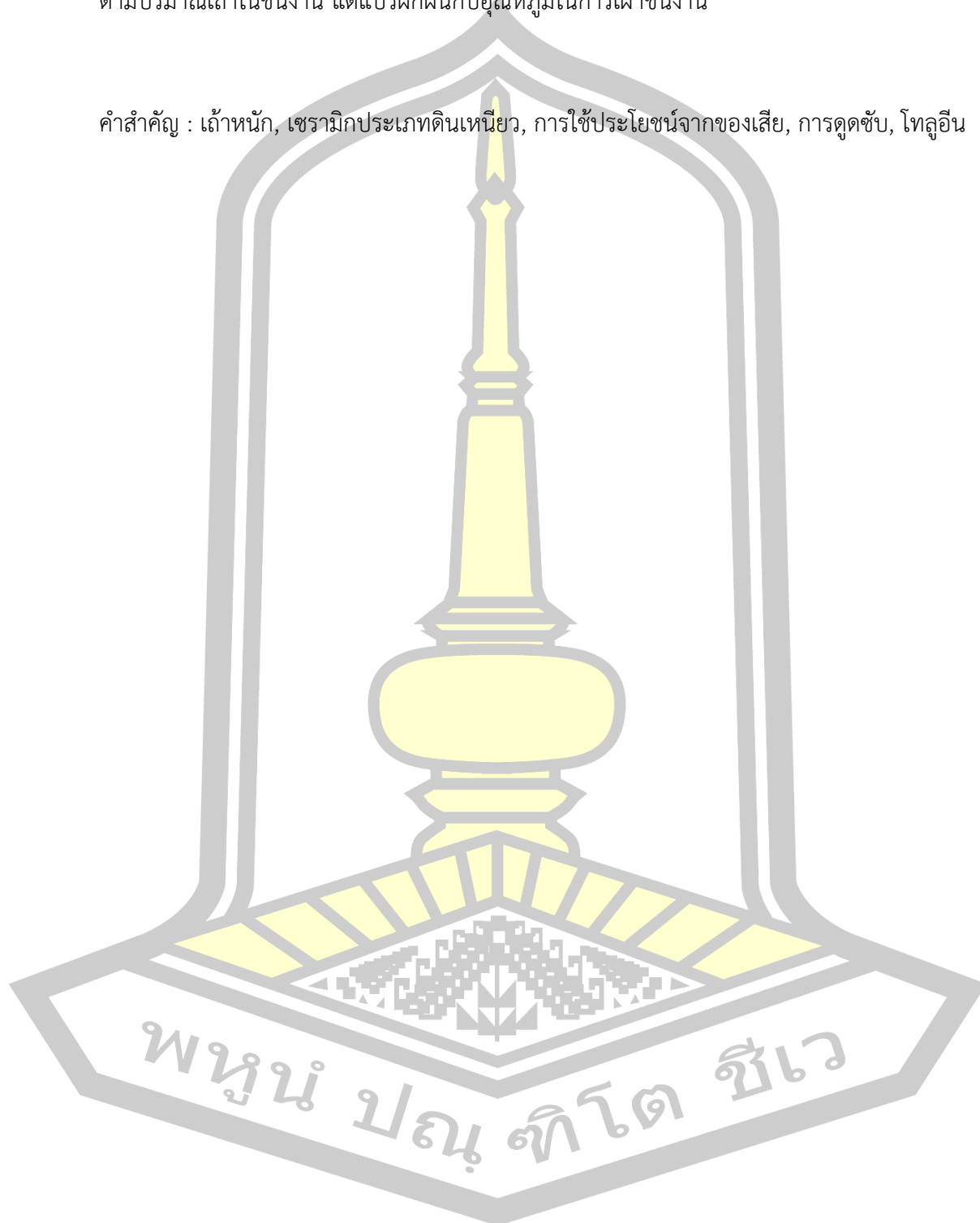
ชื่อเรื่อง	การใช้ประโยชน์จากเถ้าก้นเตา – ของเสียจากเตาเผาในกระบวนการผลิตแหวน		
ผู้วิจัย	กานต์ นามิผล		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. มณีรัตน์ องค์กรธรณี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สหลาก หอมวุฒิมังค์		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์ของเถ้าหนักซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแหวนในจังหวัดขอนแก่น โดยใช้ทดแทนดินเหนียวในการผลิตเซรามิกประเภทดินเหนียว ดินเหนียวที่ใช้ในการทดลองได้จากจังหวัดมหาสารคาม ทำการอบวัตถุดิบที่ 103-105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วบดและร่อนผ่านตะแกรงให้ได้อนุภาคเล็กกว่า 300 และ 150 ไมครอน ทดสอบอัตราส่วนเถ้าหนักแทนที่ดินเหนียว ได้แก่ร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก เติมน้ำในส่วนผสมให้ได้ความชื้นร้อยละ 15-20 จากนั้นหล่อตัวอย่างในแบบอะคริลิกสี่เหลี่ยมขนาด 30x60x10 ลูกบาศก์มิลลิเมตร บ่มที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ทดสอบอุณหภูมิเผาสูงสุดที่ 400-1,300 องศาเซลเซียส และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5, 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดแล้วเผาต่ออีก 0 และ 4 ชั่วโมง การทดสอบสมบัติเซรามิกประกอบด้วย การแตกร้าว การหดตัวเชิงเส้น การดูดซึมน้ำ กำลังรับแรงอัด ความต้านแรงกดแตก สันฐานวิทยาของอนุภาค การชะของโลหะหนัก และความสามารถในการดูดซับมลพิษอากาศ คือ ก๊าซโทลูอิน ผลการทดสอบพบว่า อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเผาที่ไม่ทำให้เซรามิกเกิดการแตกร้าว คือ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาสูงสุดทำให้กำลังรับแรงอัด และความต้านทานแรงกดแตกเพิ่มขึ้น แต่การยืดเวลาเผาต่อไม่ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราส่วนเถ้าหนักสามารถช่วยลดการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิก แต่ตัวอย่างที่ผสมเถ้าหนักและเผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียสกลับทำให้ชิ้นงานพองตัว ชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนัก 20 เปอร์เซ็นต์เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสให้ค่าความต้านแรงกดแตกสูงที่สุด และค่าดูดซึมน้ำน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของดิฟแฟร็กโตแกรมที่ปรากฏคริสโตบาไลต์ซึ่งเป็นเฟสของแก้วเกิดที่อุณหภูมิสูงช่วยสร้างความแข็งแรงให้โครงสร้าง ผลของการชะของโลหะหนักจากเซรามิกผสมเถ้าหนักพบปริมาณ สารหนู ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม แบเรียม โครเมียม ทองแดง สังกะสี และซิลิเนียม ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานขององค์กรสิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา และมาตรฐานน้ำชะออกจากหลุมฝังกลบขยะอันตรายของสำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรมประเทศไทย ส่วนพฤติกรรมการดูดซับก๊าซโทลูอินของเซรามิกสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมฟลูนด

ลิซ โดยที่ความเข้มข้นโทลูอิน 200 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความสามารถในการดูดซับแปรผันตามปริมาณเก้าอี้ในงาน แต่แปรผกผันกับอุณหภูมิในการเผาชิ้นงาน

คำสำคัญ : เก้าอี้, เซรามิกประเภทดินเหนียว, การใช้ประโยชน์จากของเสีย, การดูดซับ, โทลูอิน



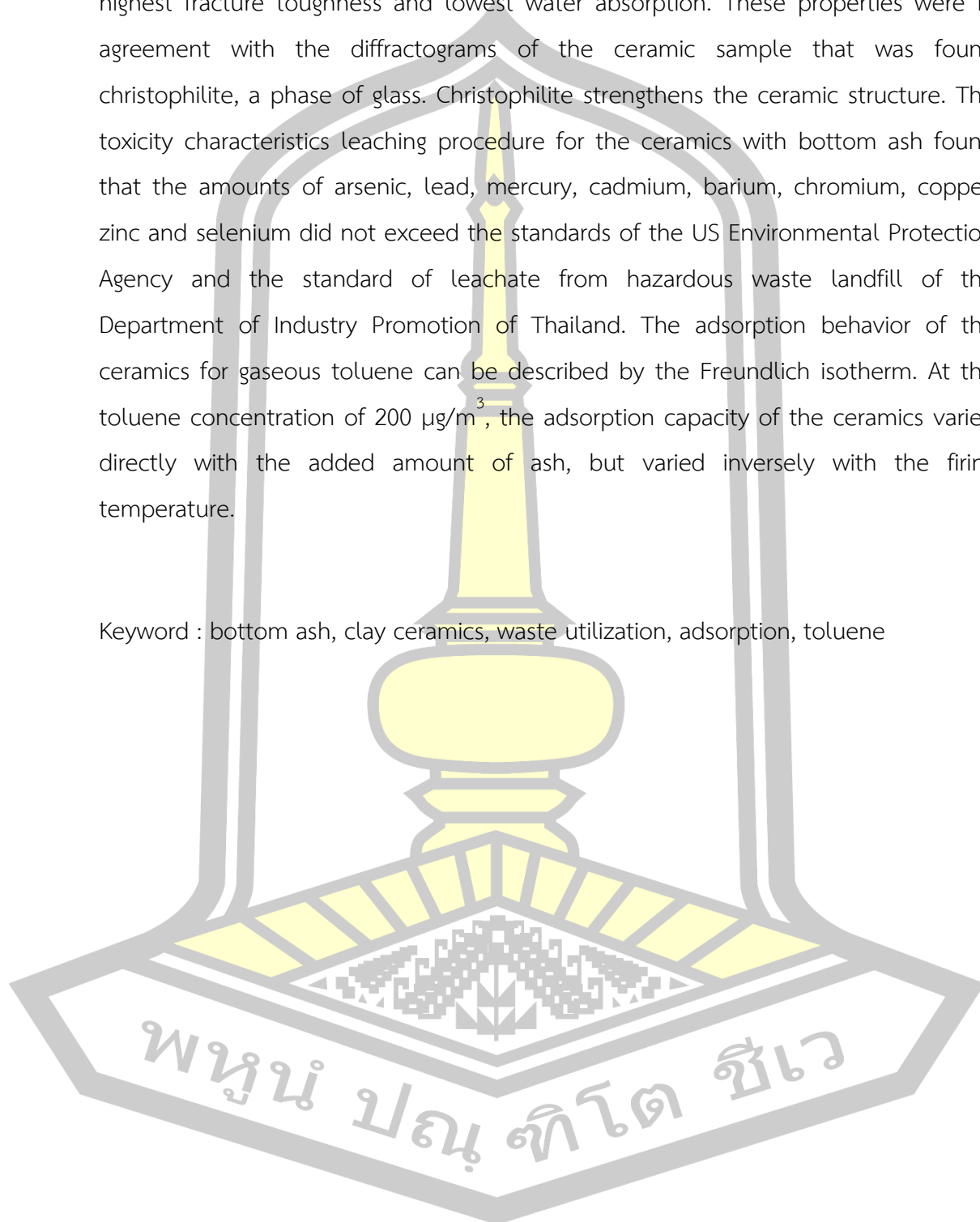
TITLE	Bottom ash utilization – Furnace waste from production of fishing net		
AUTHOR	Kan Namepol		
ADVISORS	Associate Professor Maneerat Ongwandee , Ph.D. Assistant Professor Sahalaph Homwouttiwong , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Civil Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2019

ABSTRACT

This research studied utilization of bottom ash, waste from coal combustion of the fishing-net processing factory in Khan Kaen, as a clay replacement material for ceramic production. Clay used in this study was collected in Maha Sarakham. The raw materials were dried at 103-105°C for 24 hours, then crushed and sifted through sieves to get particles smaller than 300 and 150 micron. The replacement percentage of clay with bottom ash was tested at 0, 20 and 40 by weight. Water was added to obtain a moisture content of 15-20%. Then, the mixtures were casted in 30x60x10 mm³ acrylic molds and dried for 24 hours. Consequently, they were fired at the maximum temperature of 400-1,300°C using a temperature ramp rate of 1.5, 3 and 9°C per minute. When reaching the specified temperature, the samples were fired for another 0 and 4 hours. The ceramic properties were examined for visible cracks, linear shrinkage, water absorption, compressive strength and fracture toughness. Moreover, the ceramic examination was extended to particle morphological analysis, toxicity characteristic leaching for heavy metals and adsorption capacity for gaseous toluene as a representative of air pollutants. Results showed the temperature ramp rate of 1.5°C per minute resulted in no visible cracks. Increasing the firing temperature enhanced the compressive strength and fracture toughness of the ceramics, but extending the firing period did not affect the compressive strength. Increasing the ash ratio can assist in reducing the linear shrinkage of ceramics. However, the samples containing ash that were fired at

1,300°C became swollen. The 20%-bottom ash sample, fired at 1000°C exhibited the highest fracture toughness and lowest water absorption. These properties were in agreement with the diffractograms of the ceramic sample that was found christophilite, a phase of glass. Christophilite strengthens the ceramic structure. The toxicity characteristics leaching procedure for the ceramics with bottom ash found that the amounts of arsenic, lead, mercury, cadmium, barium, chromium, copper, zinc and selenium did not exceed the standards of the US Environmental Protection Agency and the standard of leachate from hazardous waste landfill of the Department of Industry Promotion of Thailand. The adsorption behavior of the ceramics for gaseous toluene can be described by the Freundlich isotherm. At the toluene concentration of $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, the adsorption capacity of the ceramics varied directly with the added amount of ash, but varied inversely with the firing temperature.

Keyword : bottom ash, clay ceramics, waste utilization, adsorption, toluene



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาเป็นอย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร.มณีรัตน์ องค์กรธณี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหลาภ หอมวุฒิวังศ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำช่วยเหลือ สนับสนุน และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการจัดทำวิจัยและวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิตา ชัยมูล ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษา และวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว.) สำหรับทุนอุดหนุนโปรแกรมวิจัย HSM-PJ-CT-18-21 เรื่องการจัดการกากของเสียอุตสาหกรรมและของเสียจากภาคเกษตรกรรมอย่างยั่งยืนเพื่อเตรียมความพร้อมสู่เศรษฐกิจหมุนเวียน พร้อมทั้งขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) ที่ได้จัดสรรงบประมาณสนับสนุนอำนวยความสะดวกและสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์อันเป็นประโยชน์ต่อความสำเร็จของการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาเอก โท และตรี สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และสาขาวิศวกรรมโยธา ทุกท่าน ที่คอยสนับสนุน ช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณครอบครัวนามีผล ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจ ทำให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตา แต่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

พูน ปณ ทิโต ชีเว

กานต์ นามีผล

สารบัญ

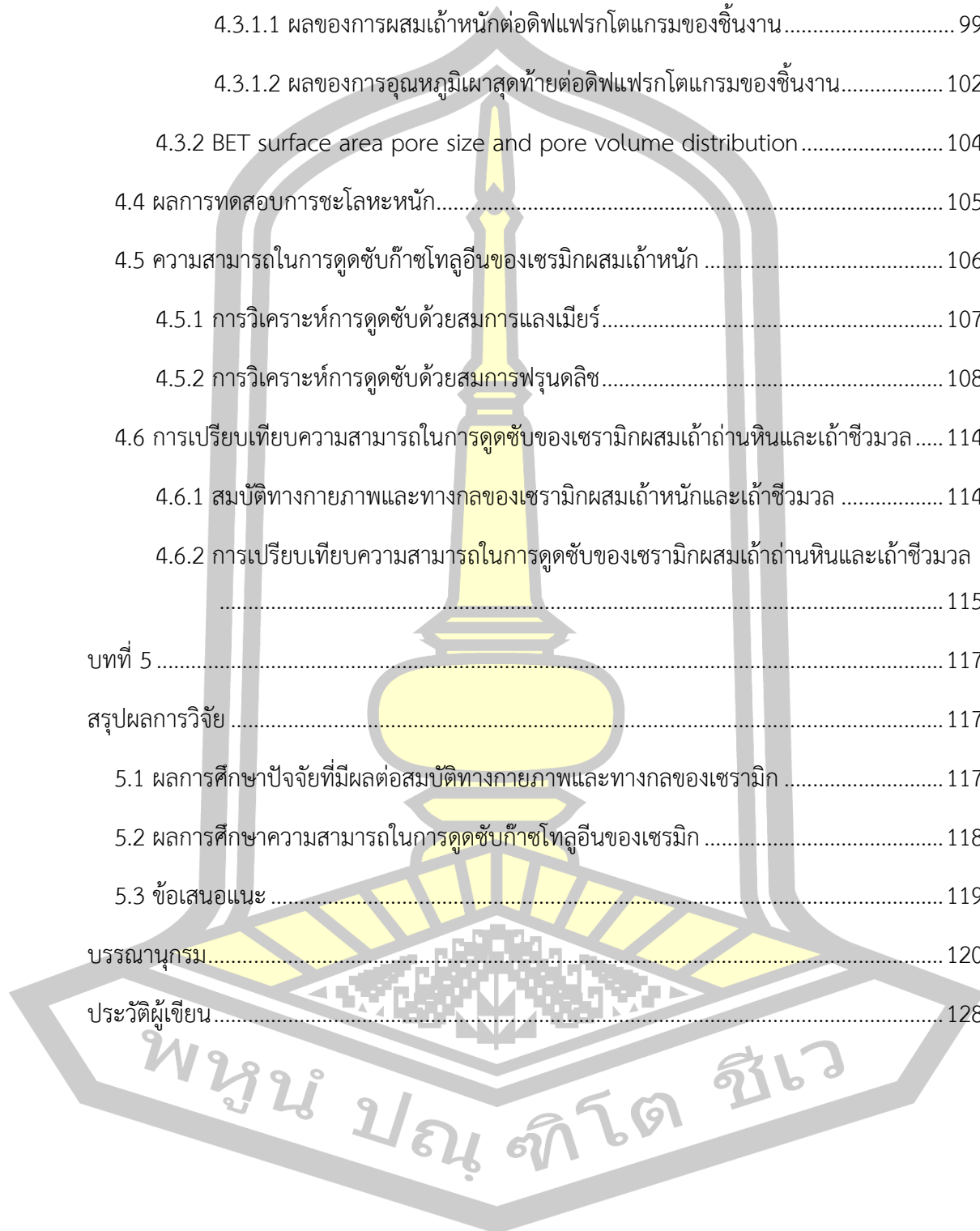
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
ตาราง.....	๗
ภาพประกอบ.....	ฌ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ของการวิจัย.....	3
บทที่ 2.....	4
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แก้วถ่านหิน.....	4
2.1.1 ประเภทของแก้วถ่านหิน.....	4
2.1.2 การจัดการแก้วถ่านหิน.....	6
2.2 วัสดุเซรามิก.....	7
2.2.1 ประเภทวัสดุเซรามิก.....	8
2.2.2 วัตถุดิบที่ใช้ทำเซรามิกประเภทดิน.....	10
2.2.2.1 วัตถุดิบประเภทดิน (Clays).....	10

2.2.2.2	วัตถุดิบประเภทฟลักซ์ (fluxes).....	12
2.2.2.3	วัตถุดิบประเภทตัวเติม (fillers).....	14
2.2.3	การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน.....	16
2.2.4	การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากดิน.....	18
2.3	การดูดซับ.....	19
2.3.1	กลไกการดูดซับ.....	20
2.3.1.1	แรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ (physical adsorption).....	20
2.3.1.2	แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี (chemisorption, chemical adsorption).....	23
2.3.2	สมดุลการดูดซับ.....	23
2.3.3	ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	25
2.3.4	ปัจจัยที่มีผลกับการดูดซับมลพิษอากาศ.....	27
2.3.5	วัสดุดูดซับ.....	29
2.3.5.1	ประเภทของตัวดูดซับ.....	29
2.3.5.2	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	31
2.3.5.3	โครงสร้างถ่านกัมมันต์.....	33
2.3.5.4	ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์กับการดูดซับก๊าซหรือไอ.....	36
2.4	สารอินทรีย์ระเหย (volatile organic chemicals, VOCs).....	36
2.4.1	ประเภทของสารอินทรีย์.....	37
2.4.2	แหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยในอาคาร.....	38
2.4.3	มาตรฐานและผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหย.....	39
2.4.4	การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยในอาคาร.....	40
2.5	อุตสาหกรรมแหวน.....	42
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42
2.6.1	การใช้ประโยชน์จากเถ้าหนัก.....	42

2.6.2 การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยในอากาศ.....	44
บทที่ 3	46
วิธีดำเนินการวิจัย	46
3.1 วัตถุประสงค์และการเตรียมวัตถุประสงค์.....	46
3.1.1 วัตถุประสงค์	46
3.1.2 การเตรียมวัตถุประสงค์.....	50
3.2 การทดสอบสมบัติเซรามิก	52
3.2.1 การแตกร้าว (Cracks).....	52
3.2.2 การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage).....	52
3.2.3 การดูดซึมน้ำ (Water absorption).....	53
3.2.4 กำลังรับแรงกดอัด (Compressive strength).....	53
3.2.5 ความต้านแรงกดแตก (Fracture toughness).....	54
3.2.6 การทดสอบชะของโลหะหนัก.....	54
3.3 การตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานวิทยาพื้นผิวของเซรามิก	55
3.3.1 X-ray diffractometer (XRD).....	55
3.3.2 BET surface area pore size and pore volume distribution analyzer	55
3.4 การผลิตเซรามิกผสมแก้วหนัก.....	56
3.4.1 การทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเซรามิก.....	56
3.4.1.1 ระยะเวลาการตาก (Drying time).....	56
3.4.1.2 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ.....	57
3.4.1.3 อุณหภูมิสุดท้ายของการเผาและระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย.....	59
3.4.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิก	61
3.4.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเซรามิกผสมแก้วหนัก.....	63

3.5 การทดสอบความสามารถของเซรามิกในการดูดซับโพลูอิน.....	66
3.5.1 หลักการทดลองการดูดซับ	66
3.5.2 ขั้นตอนการทดลอง	67
3.5.3 สารเคมีและอุปกรณ์	68
3.5.4 การวัดขนาดตัวอย่างเซรามิก	72
3.5.4 การชั่งตัวอย่างก๊าซและการวิเคราะห์โพลูอิน	74
3.5.5 การวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับ	75
3.6 สรุปรายละเอียดการดำเนินการทดลอง.....	76
3.7 การประกันคุณภาพงานวิจัย.....	77
3.7.1 การสร้างกราฟความเข้มข้นมาตรฐานและการปรับเทียบ	77
3.7.2 การหาระยะเวลาที่การดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุล	78
3.7.3 ค่าปริมาณสารอินทรีย์ต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (MDL).....	79
บทที่ 4	81
ผลการวิจัย	81
4.1 ผลการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเซรามิก.....	81
4.1.1 ระยะเวลาการตาก (Drying time).....	81
4.1.2 ผลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเผา.....	83
4.1.3 ผลของอุณหภูมิสุดท้ายและระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย	85
4.1.3.1 ผลอุณหภูมิสุดท้ายในการเผา	85
4.1.3.2 ผลระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย	89
4.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของเซรามิก.....	92
4.2.1 ผลอัตราส่วนผสมเถ้าหนัก.....	94
4.2.2 ผลของอุณหภูมิสุดท้ายในเผา.....	96
4.3 ผลการทดสอบอณูฐาน.....	99

4.3.1 X-ray diffractogram	99
4.3.1.1 ผลของการผสมแก้วหนักต่อดิฟแฟร็กโตแกรมของชิ้นงาน.....	99
4.3.1.2 ผลของการอุณหภูมิเผาสุดท้ายต่อดิฟแฟร็กโตแกรมของชิ้นงาน.....	102
4.3.2 BET surface area pore size and pore volume distribution	104
4.4 ผลการทดสอบการชะโลหะหนัก.....	105
4.5 ความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอีนของเซรามิกผสมแก้วหนัก	106
4.5.1 การวิเคราะห์การดูดซับด้วยสมการแลงเมียร์.....	107
4.5.2 การวิเคราะห์การดูดซับด้วยสมการฟรุนดลิช.....	108
4.6 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของเซรามิกผสมแก้วถ่านหินและแก้วชีวมวล	114
4.6.1 สมบัติทางกายภาพและทางกลของเซรามิกผสมแก้วหนักและแก้วชีวมวล	114
4.6.2 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของเซรามิกผสมแก้วถ่านหินและแก้วชีวมวล	115
บทที่ 5	117
สรุปผลการวิจัย	117
5.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของเซรามิก	117
5.2 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอีนของเซรามิก	118
5.3 ข้อเสนอแนะ	119
บรรณานุกรม.....	120
ประวัติผู้เขียน.....	128



ตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สถิติการใช้ถ่านหินของประเทศไทย.....	4
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านหินและถ่านล้อยจากประเทศอียิปต์.....	7
ตารางที่ 3 การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบของสารประกอบเฟลด์สปาร์.....	13
ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของแร่ดิน.....	16
ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเนื้อดินปั้น.....	18
ตารางที่ 6 สารอินทรีย์ระเหยชนิด non chlorinated VOCs.....	37
ตารางที่ 7 สารระเหยอินทรีย์ที่พบบ่อยในอาคารและแหล่งที่พบ.....	39
ตารางที่ 8 ค่ามาตรฐานสารอินทรีย์ระเหยในอาคารและผลกระทบต่อสุขภาพ.....	40
ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของถ่านหิน.....	47
ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ธาตุของถ่านหิน.....	48
ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ธาตุของดินเหนียวชุดที่ 1 และดินเหนียวชุดที่ 2.....	49
ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของดินเหนียวชุดที่ 1 และดินเหนียวชุดที่ 2.....	50
ตารางที่ 13 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่กำหนดในการศึกษาปัจจัยหาสภาวะที่เหมาะสม.....	60
ตารางที่ 14 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่กำหนดในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเซรามิกผสมถ่านหิน.....	63
ตารางที่ 15 สภาวะการทำงานของเครื่อง GC-FID สำหรับวิเคราะห์หาไทลูอิน.....	74
ตารางที่ 16 ตารางสรุปรายละเอียดการดำเนินการทดลอง.....	76
ตารางที่ 17 ผลของอัตราการผลิตอุณหภูมิขณะเผาที่ส่งผลและต่อรอยแตกกร้าว.....	85
ตารางที่ 18 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเซรามิก.....	86
ตารางที่ 19 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเซรามิกที่มีการขยายระยะเวลาการเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย.....	89
ตารางที่ 20 ผลของอัตราส่วนผสมและอุณหภูมิในการเผาต่อสมบัติเซรามิก.....	95

ตารางที่ 21	สมการของการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ.....	98
ตารางที่ 22	พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของชิ้นงานเซรามิกผสม แก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 ที่อุณหภูมิเผา 1,000 องศาเซลเซียส.....	104
ตารางที่ 23	ผลของการวิเคราะห์การชะโลหะหนักและมาตรฐานเปรียบเทียบ.....	106
ตารางที่ 24	จำนวนชิ้นงาน พื้นที่และปริมาตรของเซรามิกที่ใช้ในการดูดซับ.....	107
ตารางที่ 25	พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและค่าความสามารถดูดซับก๊าซโทลูอิน	112
ตารางที่ 26	การดูดซึมน้ำและความต้านแรงกดแตกของเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผสมแก้วชนิดต่างๆ ร้อยละ 0 และ 20.....	114
ตารางที่ 27	ความสามารถดูดซับก๊าซโทลูอินและค่า R^2 ของเซรามิกผสมแก้วชนิดต่างๆและผงแก้วชนิด ต่างๆ.....	116



ภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบที่ 1 โครงสร้างแบบไม่มีผลึก.....	8
ภาพประกอบที่ 2 การเปลี่ยนแปลงเฟส.....	17
ภาพประกอบที่ 3 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ....	21
ภาพประกอบที่ 4 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ.....	22
ภาพประกอบที่ 5 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่มีขั้ว.....	22
ภาพประกอบที่ 6 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC.....	24
ภาพประกอบที่ 7 โครงสร้างซีไอไลต์.....	30
ภาพประกอบที่ 8 โครงสร้างอะลูมิเนียมออกไซด์.....	30
ภาพประกอบที่ 9 โครงสร้างซิลิกาเจล.....	31
ภาพประกอบที่ 10 ลักษณะทางกายภาพของถ่านหิน.....	46
ภาพประกอบที่ 11 ภาพถ่ายถ่านหินจาก SEM (ก) กำลังขยาย 150 เท่า (ข) กำลังขยาย 500 เท่า	47
ภาพประกอบที่ 12 ลักษณะของดินเหนียวที่ใช้ทดลอง.....	48
ภาพประกอบที่ 13 ภาพถ่ายดินเหนียวจาก SEM กำลังขยาย 800 เท่า.....	49
ภาพประกอบที่ 14 ขนาดการกระจายตัวของดินเหนียวและถ่านหินเมื่อผ่านตะแกรงเบอร์ 50.....	51
ภาพประกอบที่ 15 ลักษณะของวัตถุดิบหลังผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (ก) ดินเหนียว และ (ข) ถ่านหิน.....	51
ภาพประกอบที่ 16 ขนาดการกระจายตัวของดินเหนียวและถ่านหินเมื่อผ่านตะแกรงเบอร์ 100.....	52
ภาพประกอบที่ 17 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงกดอัดและความต้านแรงกดแตก.....	53
ภาพประกอบที่ 18 ลักษณะการทดสอบความต้านแรงกดแตก.....	54
ภาพประกอบที่ 19 เครื่องวิเคราะห์ X-ray diffractometer.....	55
ภาพประกอบที่ 20 ผังการทดลองหาระยะเวลาการตาก.....	56

ภาพประกอบที่ 21	ผังการทดลองหาอัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเผา.....	58
ภาพประกอบที่ 22	ผังการทดลองหาอุณหภูมิสุดท้ายและระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย.....	59
ภาพประกอบที่ 23	ผังการทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเซรามิก	62
ภาพประกอบที่ 24	ตู้อบไฟฟ้า.....	64
ภาพประกอบที่ 25	เครื่องปั่นหิน	64
ภาพประกอบที่ 26	แบบอะคริลิกขนาด 30x60x10 มิลลิเมตร	65
ภาพประกอบที่ 27	เครื่องชั่งน้ำหนัก	65
ภาพประกอบที่ 28	เวอร์เนียคาลิเปอร์.....	65
ภาพประกอบที่ 29	เตาเผาอุณหภูมิสูง.....	66
ภาพประกอบที่ 30	ผังการทดลองความสามารถของเซรามิกในการดูดซับ	67
ภาพประกอบที่ 31	สารเคมีโทลูอินเกรดมาตรฐานการวิเคราะห์.....	68
ภาพประกอบที่ 32	เข็มฉีดยา ขนาด 1 มิลลิลิตร.....	69
ภาพประกอบที่ 33	เข็มฉีดยาของเหลว ขนาด 10 ไมโครลิตร.....	69
ภาพประกอบที่ 34	ลูกแก้ว.....	69
ภาพประกอบที่ 35	เครื่องเขย่า	70
ภาพประกอบที่ 36	ขวดเก็บตัวอย่างและฝา Septa.....	70
ภาพประกอบที่ 37	SPME Holder และ SPME Fiber.....	71
ภาพประกอบที่ 38	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	71
ภาพประกอบที่ 39	ถุงก๊าซมาตรฐาน.....	72
ภาพประกอบที่ 40	การจัดวางชิ้นงานเซรามิกที่ตัดแล้วก่อนถ่ายรูป เพื่อคำนวณพื้นที่ในการดูดซับ .	72
ภาพประกอบที่ 41	วิธีการวัดพื้นที่ชิ้นงานที่ตัดแล้ว ด้วยโปรแกรม Photoshop CS6.....	73
ภาพประกอบที่ 42	กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน	78
ภาพประกอบที่ 43	กราฟความเข้มข้นโทลูอินที่เหลือจากเซรามิกดูดซับในระยะเวลาต่างๆ	79

ภาพประกอบที่ 44 แสดงลักษณะของตัวอย่างผสมแก้วหนัก 3 อัตราส่วน ที่ถอดแบบหลังจากการตากเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ก) อัตราส่วนร้อยละ 0 (ข) อัตราส่วนร้อยละ 20 และ (ค) อัตราส่วนร้อยละ 40 82

ภาพประกอบที่ 45 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างส่วนผสม 3 อัตราส่วนขณะตากในท้อง.. 82

ภาพประกอบที่ 46 ชิ้นงานเซรามิกอัตราส่วนผสมแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 เผาด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5, 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที 84

ภาพประกอบที่ 47 การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานผสมแก้วหนัก 3 อัตราส่วน เผาด้วยอุณหภูมิต่ำสุด 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส 87

ภาพประกอบที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับกำลังรับแรงอัดของเซรามิก 88

ภาพประกอบที่ 49 ผลอุณหภูมิเผา 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส ต่อการหดตัวเชิงเส้น ของเซรามิกอัตราส่วนแก้วร้อยละ 20 ที่ไม่มีการขยายเวลาและมีการขยายเวลาเผาจากอุณหภูมิต่ำสุดท้าย 4 ชั่วโมง..... 91

ภาพประกอบที่ 50 ผลอุณหภูมิเผา 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส ต่อการดูดซึมน้ำ ของเซรามิกอัตราส่วนแก้วร้อยละ 20 ที่ไม่มีการขยายเวลาและมีการขยายเวลาเผาจากอุณหภูมิต่ำสุดท้าย 4 ชั่วโมง..... 92

ภาพประกอบที่ 51 ชิ้นงานเซรามิก 3 อัตราส่วนผสมแก้ว เผาด้วยอุณหภูมิ 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส 93

ภาพประกอบที่ 52 ชิ้นงานเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 40 เผาด้วยอุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส..... 94

ภาพประกอบที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับความต้านแรงกดแตกของเซรามิก..... 96

ภาพประกอบที่ 54 การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานผสมแก้วหนัก 3 อัตราส่วน เผาด้วยอุณหภูมิต่ำสุด 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส 97

ภาพประกอบที่ 55 ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 700 ผสมแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 โดย C คือ Cristobalite และ L คือ Labradorite 100

ภาพประกอบที่ 56 ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 1,000 ผสมแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 โดย C คือ Cristobalite และ L คือ Labradorite 101

ภาพประกอบที่ 57 ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 1,300 ผสมแก้วร้อยละ 0 และ 20 102

ภาพประกอบที่ 58 ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 20 เผาที่อุณหภูมิ 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส โดย H คือ Histidyltryptophan, Q คือ Quartz และ C คือ Cristobalite 103

ภาพประกอบที่ 59 การทำนายการดูดซับด้วยสมการแลงเมียร์ของ ชิ้นงานเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 40 เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส..... 108

ภาพประกอบที่ 60 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอินด้วยสมการฟรุนดลิชของ ชิ้นงานเซรามิกผสมแก้ว ร้อยละ 0, 20 และ 40 เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 109

ภาพประกอบที่ 61 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอินด้วยสมการฟรุนดลิชของ ชิ้นงานเซรามิกผสมแก้ว ร้อยละ 0, 20 และ 40 เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส 110

ภาพประกอบที่ 62 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอินด้วยสมการฟรุนดลิชของ ชิ้นงานเซรามิกผสมแก้ว ร้อยละ 0 และ 20 เผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส 111



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและปัญหา

ประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงจากถ่านหินประมาณ 5 ถึง 10 ล้านตันต่อปี ซึ่งการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงจะทำให้เกิดผลพลอยได้คือ เถ้าลอย (fly ash) และเถ้าถ่านหินก้นเตา (bottom ash) เถ้าลอยจะเกิดร้อยละ 30-60 ของปริมาณถ่านหินทั้งหมด ส่วนเถ้าถ่านหินก้นเตาจะเกิดร้อยละ 15-25 ของปริมาณถ่านหินทั้งหมด ในการจัดการเถ้าเหล่านี้ในอดีตต้องใช้การฝังกลบแบบขยะอันตรายเพราะส่วนใหญ่เถ้าทั้ง 2 ประเภทจะมีโลหะหนักผสมอยู่ ทำให้เมื่อโดนน้ำชะผ่าน โลหะหนักจะปนเปื้อนออกมาด้วย ซึ่งการจัดการเถ้าถ่านหินในอดีตต้องสิ้นเปลืองทั้งพื้นที่และค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียเหล่านี้เป็นจำนวนมาก แต่เนื่องจากการศึกษาค้นคว้าในปัจจุบันทำให้ทราบว่าเถ้าลอยมีคุณสมบัติที่จะไปแทนที่ซีเมนต์เพราะเป็นวัสดุปอซโซลาน (pozzolan) แต่เถ้าหนักจากก้นเตามีความพรุนสูง ทำให้ไม่เหมาะกับการไปแทนที่ในส่วนของซีเมนต์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้เพื่องานการทาง (ดวงเดือน, 2554) และการก่อสร้าง (จินดาประเสริฐ และรักซ้อน, 2557) แต่เนื่องจากเถ้าหนักก้นเตาที่ผู้วิจัยศึกษานั้นมีปริมาณคาร์บอนกว่าร้อยละ 40 จึงน่าจะเหมาะกับการนำมาผสมในวัสดุเซรามิก เพื่อเพิ่มรูพรุนและลดความหนาแน่น ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุเซรามิกมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งยังไม่เคยมีงานวิจัยที่นำเถ้าหนักก้นเตาไปผลิตวัสดุเซรามิกเพื่อการดูดซับ

ปัจจุบันผู้คนให้ความสำคัญกับมลพิษอากาศภายในอาคารเป็นอย่างมาก เพราะคนส่วนใหญ่ใช้เวลาอยู่ภายในอาคารมากกว่าภายนอกอาคารและความเข้มข้นของมลพิษภายในอาคารมีปริมาณที่สูงกว่าภายนอกอาคารถึง 4 เท่า มลพิษอากาศภายในอาคารที่สำคัญมากชนิดหนึ่งคือ สารอินทรีย์ระเหย จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานและผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น ระบบทางเดินหายใจ และอาจรวมไปถึงความพิษปกติที่เกิดขึ้นกับเซลล์ของร่างกายจนกลายเป็นเซลล์มะเร็ง การกำจัดสารมลพิษประเภทสารอินทรีย์ระเหยด้วยการดูดซับ (adsorption) จัดเป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้ในอาคารทั่วไป เช่น เครื่องฟอกอากาศ (air purifier) ที่ติดตั้งถ่านกัมมันต์ไว้กำจัดกลิ่นในอาคาร เป็นต้น

การดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน เกิดขึ้นระหว่างตัวถูกดูดซับกับวัสดุดูดซับ โดยในวัสดุดูดซับที่เป็นวัสดุดูดซับคือ เซรามิกที่ผลิตจากดินเหนียว แต่คุณสมบัติของวัสดุดูดซับนี้ มีความหนาแน่นมากและมีปริมาณรูพรุนที่น้อย เนื่องจากผลิตจากดินเหนียวอย่างเดียว ทำให้ความสามารถ

ในการดูดซับต่ำ ดังนั้นถ้าหากกันเตาที่มีปริมาณคาร์บอนที่สูง จึงเหมาะที่จะนำมาผสม เพื่อลดความหนาแน่นและเพิ่มปริมาณรูพรุน ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการดูดซับของวัสดุเซรามิกประเภทดินเหนียวเพิ่มสูงขึ้นด้วย

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการใช้ประโยชน์เถ้าหนักซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมมาเป็นส่วนผสมทดแทนดินเหนียวในการผลิตวัสดุเซรามิกประเภทดินเหนียว เพื่อเพิ่มทางเลือกในการจัดการและเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าหนัก ในการศึกษาผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ผลิตขึ้นจะทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลตามวิธีการทดสอบของมาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) เพื่อหาอัตราส่วนในการผสม อุณหภูมิในการเผาและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสม รวมทั้งศึกษาความสามารถของเซรามิกที่ผลิตขึ้นในการใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับสารมลพิษอากาศ เช่น สารอินทรีย์ระเหย ภายในอาคาร เพื่อเพิ่มมูลค่าการใช้ประโยชน์เถ้าหนักอีกทางหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อหาอัตราส่วนในการผสม อุณหภูมิในการเผา และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสมสำหรับผลิตเซรามิกดินเหนียวผสมเถ้าหนัก โดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพและทางกลของเซรามิก
- 2) เพื่ออธิบายพฤติกรรมและความสามารถของเซรามิกดินเหนียวผสมเถ้าหนักในการดูดซับมลพิษอากาศในอาคารประเภทสารอินทรีย์ระเหย และเปรียบเทียบกับเซรามิกดินเหนียวผสมเถ้าชีวมวลต่างๆ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตเซรามิกคือ ดินเหนียว และเถ้าหนัก
- 2) วัสดุเซรามิกที่ผลิตเป็นวัสดุเซรามิกประเภทดินเหนียว โดยขึ้นรูปเป็นทรงสี่เหลี่ยมขนาด 30x60x10 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆ
- 3) ตัวแปรที่ศึกษาในการผลิตวัสดุเซรามิก (1) อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5, 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที (2) อัตราส่วนของเถ้าหนักร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก (3) อุณหภูมิในการเผา 400, 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส และ (4) ระยะเวลาในการเผาจากอุณหภูมิสุดท้าย 0 และ 4 ชั่วโมง
- 4) สมบัติเซรามิกที่ทำการทดสอบคือ สมบัติทางกลได้แก่ (1) การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength) (2) ความต้านแรงกดแตก (Fracture toughness) และ (3) การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage) อ้างอิง มอก.2398 ส่วนสมบัติทางกายภาพและทางเคมีได้แก่ (1) รอย

แตกร้าว (Cracks) (2) การดูดซึมน้ำ (Water absorption) (3) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (XRF) (4) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (XRD) และ (5) การชะของโลหะหนัก TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) อ้างอิง มอก.2398, USEPA และกรมส่งเสริมอุตสาหกรรม

5) การทดสอบการดูดซับมลพิษอากาศของวัสดุเซรามิก เลือกใช้โทลูอีน (Toluene) เป็นมลพิษสารอินทรีย์ระเหยในการทดสอบนี้ ใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของโทลูอีนในช่วง 200-2,000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อหาความสามารถในการดูดซับโดยใช้ ไอโซมเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) และใช้ไอโซมเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

1.4 ประโยชน์ของการวิจัย

- 1) เพิ่มทางเลือกในการใช้ประโยชน์เก้าอี้ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรม ด้วยการทดแทนดินเหนียวเพื่อผลิตเซรามิก
- 2) ได้ทราบถึงอัตราส่วน อุณหภูมิสุดท้ายในการเผา อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ และระยะเวลาเผาต่อ ที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเซรามิกที่มีการแทนที่ดินเหนียวด้วยเก้าอี้
- 3) ได้ทราบถึงความสามารถในการดูดซับโทลูอีนของวัสดุเซรามิกที่ผลิตขึ้นจากอัตราส่วนผสม อุณหภูมิในการเผา และระยะเวลาในการเผาที่ต่างกัน



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหิน (coal ash) เป็นผลพลอยได้ (by product) ที่เกิดจากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อให้ได้พลังงานความร้อนแล้วนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้ถ่านหินเป็นจำนวนมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังตารางที่ 1 ทำให้ปริมาณเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยเมื่อเผาถ่านหินจะมีวัสดุปะทะละเอียดลอยออกมาตามลมร้อนเพื่อจะออกไปสู่ปล่องควัน และจะถูกดักจับไว้โดยเครื่องกำจัดมลพิษอากาศก่อนออกสู่บรรยากาศภายนอก โดยวัสดุปะทะที่ถูกดักจับไว้เรียกว่า เถ้าลอย (fly ash) และจะมีบางส่วนที่ถูกหลอมเหลวแล้วจับตัวกันเป็นก้อนมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้มีน้ำหนักมากขึ้นและตกลงมาสู่ก้นเตาโดยวัสดุที่อยู่ก้นเตาเรียกว่า เถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา (bottom ash)

ตารางที่ 1 สถิติการใช้ถ่านหินของประเทศไทย

ปี	ปริมาณการใช้ถ่านหิน (ล้านตัน)
2010	4.63
2011	4.47
2012	5.04
2013	4.75
2014	5.72

ที่มา: ดัดแปลงจากสำนักงานสถิติแห่งชาติ

2.1.1 ประเภทของเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการเกิดหลังการเผาไหม้ได้เป็น 2 ประเภทคือ เถ้าลอย และ เถ้าหนัก

1) เถ้าลอย (fly ash)

เถ้าลอยเป็นเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร จะลอยไปกับอากาศร้อนแล้วถูกดักจับโดยเครื่องดักจับไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic precipitator) หรือระบบดักจับฝุ่นต่างๆ เถ้าลอยที่เคลื่อนที่ผ่านสนามไฟฟ้าจะเกิดประจุไฟฟ้า เมื่อเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปยังถังเก็บซึ่งมีประจุไฟฟ้าขั้วตรง ข้ามกับเถ้าลอย ทำให้เถ้าลอยถูกดูดติดไว้กับแผ่นรวบรวม (collector plates) ที่อยู่ภายในถังเก็บเถ้าลอย จากนั้นเถ้าลอยที่ถูกแยกออกมาจะถูกส่งไปเก็บไว้ในไซโล โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยมีลักษณะเป็นผงฝุ่นสีเทา สีเทา ดำ หรือสีเทาปนน้ำตาล จัดว่าเป็นวัสดุปอซโซลานตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM, 2014) โดยเป็นวัสดุ ที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก วัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือมีความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้ เถ้าลอยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือเถ้าลอยประเภทเอฟ (Class F) และ ประเภทซี (Class C) โดยใช้องค์ประกอบทางเคมีเป็นเกณฑ์ในการจำแนกดังนี้

(1) เถ้าลอยประเภทเอฟ คือเถ้าลอยที่ได้จากการเผาหินประเภทแอนทราไซต์และบิทูมินัส มีผลรวมของซิลิกา, อลูมินาและเฟอร์ริกออกไซด์ มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

(2) เถ้าลอยประเภทซี เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาหินประเภทลิกไนต์และซับบิทูมินัสมีผลรวมของซิลิกา, อลูมินาและเฟอร์ริกออกไซด์ร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณ แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 15-23 โดยน้ำหนัก

เถ้าลอยประเภทเอฟจะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ต่ำ ส่วนเถ้าลอยประเภทซี จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง ทำให้เถ้าลอยประเภทซี มีออกไซด์ของธาตุอื่นๆ ผสมอยู่ทำให้โครงสร้างของเถ้าลอยประเภทซี เมื่อได้รับความร้อนแล้วจะเกิดความไม่เป็นระเบียบและมีเสถียรภาพลดลง ทำให้เถ้าลอยประเภทซี มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากกว่าเถ้าลอยประเภทเอฟ

2) เถ้าหนัก (bottom ash)

เถ้าหนักหรือเถ้าก้นเตา คือ เถ้าที่ได้หลังจากการเผาถ่านหิน ซึ่งเกิดมาจากการที่อุณหภูมิของเถ้า ที่เหลือจากการเผาไหม้ปะทะรวมกันเป็นเม็ด หรือเป็นก้อนโต หรือมีบางส่วนของเถ้าซึ่งปะทะกับผนังเตาและหลอม ติดกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เมื่อมีน้ำหนักรวมกันมากขึ้นจะหล่นลงสู่ก้นเตา ซึ่งเถ้าหนักมีปริมาณร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนักของเถ้าถ่านหินทั้งหมด เถ้าหนักมีสีดำ โดยเม็ดอนุภาคของเถ้าหนักมีลักษณะที่เป็นพื้นที่ผิวที่มีรูพรุน คุณสมบัติทางกายภาพและเฟสของเถ้าหนัก แตกต่างจาก

ถั่วลยมากถึงแม้จะมาจากแหล่งเดียวกัน เช่น ถั่วหนักจะมีขนาดใหญ่ รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน มีอนุภาคทรงกลมน้อยมากและมีความเป็นอสัณฐานที่ต่ำ (Aamodt, 2006) องค์ประกอบทางเคมีของถั่วหนักส่วนใหญ่จะเป็นซิลิกา (Silica) อลูมินา (Alumina) และเหล็กออกไซด์ (Iron oxide) นอกจากนี้ยังมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) อีกเล็กน้อย

2.1.2 การจัดการถั่วถ่านหิน

ในอดีตถั่วถ่านหินจัดเป็นขยะอันตราย โดยส่วนใหญ่การกำจัดถั่วถ่านหินจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายจำนวนมาก เพราะต้องใช้การฝังกลบในหลุมฝังกลบแบบพิเศษจัดเป็นขยะอันตรายเพราะน้ำชะขยะเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมีโลหะหนักปนเปื้อนออกมาด้วย แต่ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากถั่วลยอย่างมาก เนื่องจากสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ดี เพราะถั่วลยมีความละเอียดสูงเป็นวัสดุปอซโซลาน ทำให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตที่นำไปผสมได้ (Cho et al., 2019) ถั่วลยยังสามารถใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำได้อีกด้วย (Dhanke et al., 2018) และยังมีการนำถั่วลยไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นในด้านนการก่อสร้าง ด้านการทาง (Haleem et al., 2016) ด้านการเกษตรที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน (Pandey et al., 2019) ด้านสิ่งแวดล้อมที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย (Mushtaq et al., 2019) ด้านวัสดุเซรามิกที่มีการนำมาเป็นส่วนผสมในวัสดุเซรามิก (Abbas et al., 2017) จนทำให้ถั่วลยในปัจจุบันไม่ใช่วัสดุทิ้งที่เหลือทิ้ง แต่เป็นวัสดุทิ้งที่เป็นราคาต้องซื้อขายกัน

ส่วนถั่วถ่านหินยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์มากนัก ดังนั้นถั่วถ่านหินส่วนใหญ่จึงถูกจัดการโดยนำไปฝังกลบแบบพิเศษจัดเป็นขยะอันตรายเพราะเมื่อน้ำชะผ่านก็จะมีโลหะหนักปนออกมาด้วย และเนื่องจากขนาดใหญ่ ไม่ได้มีลักษณะกลม เป็นเหลี่ยมไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุนมากจึงไม่เหมาะที่จะนำไปผสมคอนกรีตเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์หรือทราย เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณถั่วหนักจะทำให้ได้กำลังคอนกรีตที่ลดลง (จินดาประเสริฐ และรักซ้อน, 2557) และมีงานวิจัยบางส่วนที่นำถั่วถ่านหินไปใช้ประโยชน์ในงานการทาง คือนำไปผสมกับยางมะตอยหรือนำไปถมที่ดิน (ดวงเดือน, 2554) แต่ก็ยังถือว่าถั่วถ่านหินเป็นวัสดุเหลือทิ้ง เพราะยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายและส่วนมากในประเทศไทยยังคงนำถั่วถ่านหินไปฝังกลบอยู่

คุณภาพและปริมาณของถั่วลยและถั่วหนักแสดงดังในตารางที่ 2 ซึ่งสามารถแปรผันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ ปัจจัยหลายอย่างได้แก่ ประเภทของระบบการเผา ชนิดของถ่านหิน ความละเอียดของถ่านหินที่บด และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ยกตัวอย่างเช่นถั่วลยที่ได้จากระบบการเผาแบบใช้ถ่านหินบดซึ่งใช้อุณหภูมิการเผาสูงกว่าระบบการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed drier) จะทำให้ถั่วถ่านหินที่ได้มีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลม มีความเป็นอสัณฐานสูงและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา จัดว่าเป็นวัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดี ในขณะที่อนุภาคของถั่วลยและถั่วหนักที่ได้จากระบบการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะมีรูปร่างไม่แน่นอน มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม และมีอนุภาคทรงกลมปะปนอยู่

เล็กน้อย มีส่วนประกอบที่เป็นผลึกค่อนข้างสูง ทำให้มีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุพอลิโกลานที่ไม่ดี (Makarata et al., 2011) นอกจากนี้หากมีการนำวัสดุชีวมวลเช่น แกลบ ข้าวโพด เศษไม้มาเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับถ่านหินในระบบการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด จะทำให้เถ้าลอยผสมเถ้าชีวมวลที่ได้เป็นสารวัสดุโกลานที่มีคุณภาพไม่ดึนั้ก (บุญเสริม และจินดาประเสริฐ, 2556)

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักและเถ้าลอยจากประเทศอียิปต์ (Ragheb, 2013)

องค์ประกอบ	เถ้าลอย	เถ้าหนัก
SiO ₂	68.0	17.6
Al ₂ O ₃	1.34	2.31
Fe ₂ O ₃	0.25	7.22
FeO	0.00	12.1
CaO	5.77	48.4
MgO	2.39	7.84
Na ₂ O	0.76	0.13
K ₂ O	2.09	0.04
SO ₅	1.44	0.00
TiO ₂	0.07	1.15
P ₂ O ₅	0.39	1.87
MnO	0.00	0.87
LOI	17.2	N.A.
Total	99.8	99.7

หมายเหตุ: LOI (loss on ignition) คือ การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา

N.A. (not analyzed) คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

เนื่องจากเถ้าหนักมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกับ วัสดุเดิม และ วัสดุฟลักซ์ ที่ใช้ในการผลิตวัสดุเซรามิก จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเถ้าหนักไปเป็นส่วนผสมในการผลิตวัสดุเซรามิก

2.2 วัสดุเซรามิก

เซรามิกมีรากศัพท์มาจากภาษากรีก คำว่า “keramos” มีความหมายว่า สิ่งที่ถูกเผา ในอดีตวัสดุเซรามิกที่มีการใช้งานมากที่สุดคือ เซรามิกดั้งเดิม ซึ่งทำมาจากวัสดุหลัก คือ ดินเหนียว ความหมายของวัสดุเซรามิกตาม ASTM คือ วัสดุที่เริ่มต้นจากสารอนินทรีย์มาประกอบกัน แล้ว

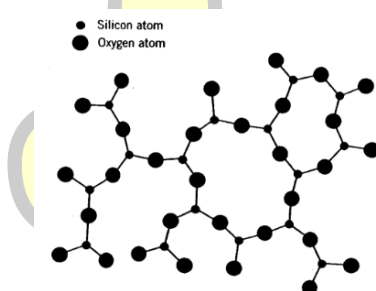
เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง เมื่อเกิดการเผาแบบ “Sintering” และทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนไปจากเดิม วัสดุเซรามิกเป็นสารประกอบระหว่างธาตุโลหะกับอโลหะ อะตอมในวัสดุเซรามิกถูกยึดเหนี่ยวกันโดยพันธะเคมี พันธะส่วนใหญ่เป็นพันธะไอออนิก ในบางกรณีเป็นโควาเลนต์หรือ พันธะโลหะ ขึ้นอยู่กับผลต่างของอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) (ศิริหล้า, 2557)

2.2.1 ประเภทวัสดุเซรามิก

วัสดุเซรามิกสามารถแบ่งชนิด ได้เป็น 6 ประเภทใหญ่ๆ คือ 1) แก้ว 2) วัสดุทนไฟ 3) วัสดุขัดถู 4) ซีเมนต์ 5) เซรามิกขั้นสูง 6) ผลิตภัณฑ์จากดิน

1) แก้ว (glasses)

แก้ววัสดุในกลุ่มนี้ถูกนำไปใช้ทั่วไปในการทำบรรจุภัณฑ์, กระจกหน้าต่าง, เลนส์ และไฟเบอร์กลาส เป็นต้น แก้วมีโครงสร้างแบบไม่มีผลึก (noncrystalline) ดังภาพประกอบที่ 1 หรือเรียกว่าเป็นวัสดุอสัณฐาน (amorphous materials) ของซิลิเกตและออกไซด์อื่นๆ เช่น CaO , Na_2O , K_2O และ Al_2O_3 เป็นต้น แก้วที่ใช้กันทั่วไปเป็นแก้วโซดาไลม์ (soda-lime glass) ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือ SiO_2 ประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ที่เหลือเป็น Na_2O (soda) และ CaO (lime)



ภาพประกอบที่ 1 โครงสร้างแบบไม่มีผลึก

2) วัสดุทนไฟ (refractories)

วัสดุทนไฟแบ่งได้หลายประเภทตามส่วนประกอบหลัก โดยจะแบ่งเป็น 4 กลุ่มได้แก่ (1) วัสดุทนไฟชนิดไฟร์เคลย์ (fireclay refractories) (2) วัสดุทนไฟชนิดซิลิกา (silica refractories) (3) วัสดุทนไฟพื้นฐาน (basic refractories) และ (4) วัสดุทนไฟชนิดพิเศษ (special refractories) ในการผลิตวัสดุทนไฟ ความพรุน (porosity) เป็นคุณสมบัติสำคัญที่ต้องควบคุมในการผลิตอิฐทนไฟ เนื่องจากความแข็งแรง การทนต่อแรงกระทำ การทนต่อสภาวะกัดกร่อนของ อิฐจะเพิ่มสูงขึ้นถ้าวัสดุมีความพรุนต่ำลง แต่ในขณะเดียวกัน การเป็นฉนวนความร้อนการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะลดต่ำลง

3) วัสดุขัดถู (abrasives)

วัสดุขัดถูเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับขัด เจียรระโน หรือตัดวัสดุที่อ่อนกว่าตัวมันเองออกไป คุณสมบัติที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับวัสดุในกลุ่มนี้คือ ความแข็ง การทนต่อการสึกหรอ ความทนทาน และทนความร้อน สารขัดถูแบ่งได้ 2 ประเภทคือ (1) วัสดุขัดถูที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น หินทราย, เพชรและคาร์เนต เป็นต้น และ (2) วัสดุขัดถูที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น โบรอนคาร์ไบด์ (B_4C), เซอร์โคเนีย (ZrO_2) และซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นต้น

4) ซีเมนต์ (cements)

คุณสมบัติของวัสดุในกลุ่มนี้คือ เมื่อผสมกับน้ำจะสามารถทำให้อยู่ในรูปทรง ที่ต้องการ และจะคงรูปร่างเมื่อแข็งตัว คุณสมบัติข้อนี้ของซีเมนต์มีประโยชน์มาก เนื่องจากทำให้สามารถขึ้นรูปได้เกือบทุกรูปแบบในระยะเวลาค่อนข้างรวดเร็ว ปูนซีเมนต์ที่มีการใช้มากที่สุด ได้แก่ ปูนซีเมนต์ชนิดพอร์ตแลนด์ ความแข็งของปูนพอร์ตแลนด์ได้มาจากการทำปฏิกิริยากับน้ำ

5) เซรามิกขั้นสูง (advanced ceramic)

ในปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุเซรามิกให้แก่การใช้งานในด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น ด้านโครงสร้าง เช่น ไบโอเซรามิก (bioceramics), เครื่องมือตัดและชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เป็นต้น ด้านไฟฟ้า เช่น ตัวเก็บประจุ, ฉนวน, ซับสเตรต (substrates), ไอซี, ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectrics), แม่เหล็ก และตัวนำยวดยิ่ง (superconductors) เป็นต้น ด้านเคมีและสิ่งแวดล้อม เช่น แผ่นกรอง (filter), เยื่อ (membrane) และตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysts) เป็นต้น

6) ผลิตภัณฑ์จากดิน (Clay products)

ดินเหนียวเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเซรามิกที่มีการใช้อย่างแพร่หลายมากที่สุด โดยการนำไปผสมกับน้ำในอัตราส่วน ที่เหมาะสม ปั้นให้เป็นรูปร่าง ทิ้งไว้ให้แห้ง และนำไปให้ความร้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง วัตถุดิบสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์จากดิน เช่น ดินขาว (kaolin, china clay), ดินเหนียว หรือดินดำ (ball clay), ดินแดง, ทราย, หินปูน และหินฟันม้าหรือเฟลสปาร์ (feldspar) เป็นต้น วัสดุเซรามิกที่มาจากผลิตภัณฑ์จากดินหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เซรามิกแบบดั้งเดิม (traditional ceramics) ได้แก่ ถ้วย จานชาม สุขภัณฑ์ ลูกถ้วยไฟฟ้า กระจกเบื้องปูพื้นและบุผนัง กระจกเบื้องหลังคา วัสดุทนไฟ แผ่นรองเผาในเตา อิฐก่อสร้าง กระดาษดินไม้ โอ่ง กระจกและแก้ว ปูนซีเมนต์ ยิปซัม ปูนพลาสติก เป็นต้น (มาตยภุธร, 2550) สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม คือ

(1) โบนไชนา (Bone china) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของเถ้ากระดูก ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความโปร่งแสง ความแข็งแรงปานกลาง การดูดซึมน้ำต่ำ

(2) เอิร์ทเทนแวร์ (Earthen ware) เป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกที่มีประวัติการผลิตกันมายาวนาน เรียกกันทั่วไปว่า เครื่องปั้นดินเผา ทำจากวัตถุดิบคือดินเหนียวที่หาได้ในท้องถิ่น ส่วนใหญ่จะมีปริมาณธาตุเหล็กสูง นำมาขึ้นรูปโดยการปั้น แล้วเผาที่อุณหภูมิต่ำเพียง 900-1,100 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสีน้ำตาลแดง เนื้อหยาบ รูพรุนมาก ไม่สามารถป้องกันการดูดซึมของน้ำได้ มีความแข็งแรงต่ำเนื่องจากยังเผาไม่ถึงจุดสุกตัว จึงแตกหักง่าย ทำให้ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มีราคาถูก

(3) สโตนแวร์ (Stone ware) เป็นผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ทำจากเนื้อดินขาวผสมกับหินฟันม้า และทราย ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะมีสีขาว ออกเทา นำมาขึ้นรูปโดยการปั้นหรือหล่อจากน้ำสลิปแล้วเผาที่อุณหภูมิสูงกว่าเนื้อเอิร์ทเทนแวร์ โดยเผาที่ประมาณ 1,100-1,300 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้เนื้อหยาบ ผิวขรุขระ มีรูพรุนน้อย ดูดซึมน้ำได้ประมาณร้อยละ 3 มีความแข็งแรงกว่าผลิตภัณฑ์เอิร์ทเทนแวร์ จากการที่ต้องเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มีราคาแพงขึ้น

(4) พอร์ซเลน (Porcelain) ผลิตภัณฑ์นี้มีส่วนผสมของเนื้อผลิตภัณฑ์เหมือนกับสโตนแวร์ แต่มีขั้นตอนการผลิตที่ยุ้งยากซับซ้อนกว่า ในขั้นตอนการเผาจะเผาที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 1,250 องศาเซลเซียสขึ้นไป เพื่อให้ถึงจุดสุกตัว จึงมีความแข็งแรงสูงมาก เนื้อผลิตภัณฑ์แน่นและละเอียด ผิวเนียนเป็นมันวาว สวยงาม มาก มีการดูดซึมน้ำต่ำมากซึ่งใกล้เคียงศูนย์ เหมาะแก่การใช้ตกแต่งเป็นเครื่องประดับ ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มีราคาแพงมาก

2.2.2 วัตถุดิบที่ใช้ทำเซรามิกประเภทดิน

วัตถุดิบที่ใช้ในการเซรามิกได้งานแร่ดินในธรรมชาติทั่วไป หรืออาจจะทำมาผ่านกระบวนการให้แร่ดินนั้นมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ตลอดจนอาจจะสังเคราะห์ขึ้นมาก็ได้ ส่วนประกอบหลักในการทำเซรามิกมี 3 ส่วน คือ (1) วัตถุดิบประเภทดิน (clays) เป็นตัวให้ความเหนียวและช่วยให้สามารถขึ้นรูปเนื้อดินได้ง่าย และช่วยทำให้เนื้อดินมีความแข็งแรงเพียงพอหลังการเผาซึ่งทำให้สามารถหีบจับชิ้นงานในขั้นตอนการขึ้นรูปและการเผาได้ (2) วัตถุดิบประเภทฟลักซ์ (fluxes) เป็นแร่ที่ประกอบด้วยอัลคาไลน์หรืออัลคาไลน์เอิร์ทซึ่งจะหลอมตัวระหว่างเผาและทำปฏิกิริยากับสารประกอบตัวอื่นๆ เพื่อฟอร์มตัวเป็นแก้วซึ่งจะทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงกับชิ้นงานหลังเผา ดังนั้นสารประกอบฟลักซ์จะเป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาชิ้นงานลง และ (3) วัตถุดิบประเภทตัวเติม (fillers) โดยทั่วไปแล้วซิลิกาที่ใช้ในส่วนผสมของเนื้อดินจะทำหน้าที่หลักในการควบคุมค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเนื้อดินหลังการเผา (สงเคราะห์, 2551)

2.2.2.1 วัตถุดิบประเภทดิน (Clays)

โดยทั่วไปแร่ดินเกิดมาจากกระบวนการสลายตัวของหินอัคนี เช่น หินแกรนิต ซึ่งมีองค์ประกอบมาจาก Potash Mica ($K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$), หินเขียวหนุมาน (quartz: SiO_2) และ Potash Feldspar ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) ในอัตราส่วนที่เท่าๆ กัน โดยสารประกอบที่มีความ

เสถียรน้อยที่สุดในที่นี้คือ เฟลด์สปาร์ (Feldspar) จึงเกิดการสลายตัวขึ้นหลังจากมีการทำปฏิกิริยากับอากาศและน้ำมาเป็นระยะเวลาอันยาวนานดังสมการ 1 กระบวนการสลายตัวนี้เรียกว่า “Kaolinisation” ซึ่งจะทำให้ได้แร่ดินเป็นผลลัพธ์จากกระบวนการดังกล่าว (ศิริหล้า, 2557)



1) ดินขาว (china clays)

ดินขาวเป็นดินชนิดปฐมภูมิ (primary clay) ซึ่งได้มาจากกระบวนการทำเหมืองแบบเปิด (open-cast pits) โดยใช้ระบบน้ำแรงดันสูงในการล้าง น้ำจะพัดพาเอาดินและสิ่งเจือปน ไปยังด้านล่างของเหมือง จากจุดนี้สารแขวนลอยจะถูกปั๊มไปยังถังตกตะกอนขนาดใหญ่ซึ่งสิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะถูกตกตะกอนแยกออกไป ทำให้ในสารแขวนลอยดังกล่าวจะเหลือเพียงอนุภาคของดินและสิ่งเจือปนที่มีขนาดละเอียดกว่าเท่านั้น

เนื่องจากมีปริมาณสิ่งเจือปนอยู่ในปริมาณที่น้อย ทำให้ดินขาว มีคุณสมบัติหลังเผาที่ดี คือ จะให้สีหลังเผาที่ขาวมากซึ่งจะตรงกันข้ามกับดินประเภททุติยภูมิ (secondary clays) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับแล้วดินขาวจะมีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่ ทำให้ความเหนียว (plasticity) และความแข็งแรงก่อนเผา (unfired strength) ของดินขาวน้อยกว่าดินที่จัดอยู่ในประเภทดินทุติยภูมิเช่น ดินดำ (สุวรรณโณม, 2543)

2) ดินดำหรือดินเหนียว (ball clays)

เกิดจากดินที่ถูกตัดออกมาจากเหมือง จะมีสิ่งเจือปนรวมอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน ค่อนข้างมาก ถึงแม้ว่าแร่ดินที่พบจะเป็นแร่โคโลไนต์ (Kaolinite) แต่องค์ประกอบของโครงสร้างที่สำคัญก็จะคล้ายๆกับที่พบในดินขาว นั่นคือ ผลึกดินจะมีความละเอียดมาก ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เนื้อดินมีความเหนียวและความแข็งแรงก่อนเผาที่ค่อนข้างสูง และนี่ถือเป็นคุณสมบัติที่ดีของดินเหนียว นั่นเอง เช่นเดียวกับกับดินทุติยภูมิอื่นๆ ดินเหนียวจะมีสิ่งเจือปนต่างๆ เจือปนอยู่ในปริมาณที่สูงและมีขนาดที่ละเอียดมากๆ ดังนั้นจึงทำให้การกำจัดออกไปในขั้นตอนสุดท้ายทำได้ยาก โดยทั่วไปดินที่มาจากแหล่งที่แตกต่างกันอาจจะนำมาผสมเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ ประเภทต่างๆต้องการ ซึ่งปกติแล้วจะนิยมใช้ดิน 2 หรือ 3 ชนิดผสมเข้าด้วยกันเพื่อลดผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ จากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน

ดินเหนียวจะมีสิ่งแปลกปลอมหลากหลายชนิดเจือปนอยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน ค่อนข้างมาก ซิลิกาอิสระ (free silica) ที่ปนอยู่ในดินบางครั้งอาจทำให้ปริมาณของซิลิกาทั้งหมดที่เป็น

องค์ประกอบของดินทั้งหมดมีมากกว่าร้อยละ 60 ซึ่งจะทำให้มีปริมาณของแร่ดินต่ำสำหรับดินเหนียว ที่มีสารประกอบอินทรีย์เจือปนอยู่มาก การวิเคราะห์ทางเคมี จะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) ที่สูงและทำให้มีความเหนียว ความแข็งแรงก่อนเผา และการหดตัวจากการอบแห้งที่สูงตามมาด้วย นอกจากนี้สภาพของการกระจายตัว (deflocculation) ก็แตกต่างจากดินที่ไม่มีสารประกอบอินทรีย์เจือปนอยู่ กล่าวคือในสภาวะความเป็นด่าง (alkaline condition) ดินเหนียวจะรวมตัวกับอนุภาคของสารประกอบอินทรีย์ ช่วยให้ดินมีสภาวะการกระจายตัวที่ดีขึ้น (เงินเลี้ยง, 2556)

2.2.2.2 วัสดุติบประเภทฟลักซ์ (fluxes)

ฟลักซ์ คือวัสดุติบซึ่งทำให้ส่วนผสมที่ถูกเติมลงไปมีจุดหลอมเหลวต่ำลง เพราะจะไม่สามารถจำแนกวัสดุติบใดๆ ออกเป็นฟลักซ์หรือวัสดุทนไฟได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการที่วัสดุติบจะทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ได้หรือไม่ขึ้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวของวัสดุติบนั้นเองเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับตัววัสดุติบหรือส่วนผสมที่จะเติมลงไปด้วย ยังมีวัสดุติบบางตัวที่โดยทั่วไปจะถือว่าเป็นฟลักซ์และนิยมนำมาใช้ในการผลิตเนื้อดิน ซึ่งวัสดุติบเหล่านี้จะมีปริมาณอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ทค่อนข้างสูง สารประกอบฟลักซ์ที่มีอัลคาไลน์ในปริมาณสูงจะมีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า ไม่เพียงแต่ปริมาณของอัลคาไลน์เท่านั้นที่จะต้องนำมาพิจารณา แต่ฟลักซ์จะต้องมีเหล็ก (Fe_2O_3) เจือปนอยู่ในปริมาณที่ต่ำด้วย เนื่องจากจะมีผลต่อสีของเนื้อดินที่ได้หลังเผา นอกจากนี้ขนาดอนุภาคของฟลักซ์ก็เป็นสิ่งที่สำคัญมากเช่นกัน เพราะอนุภาคขนาดเล็กกว่าจะทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าและมีประสิทธิภาพมากกว่า ฟลักซ์จะถูกบดให้มีค่าความละเอียดที่แน่นอนซึ่งโดยทั่วไปมักจะมีประมาณร้อยละ 55 ที่มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 10 ไมครอน (กังวานตระกูล, 2556)

ในการบดวัสดุติบที่ละเอียดมากขึ้นจะมีผลทำให้วัสดุติบนั้นมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นซึ่งก็จะทำให้ความสามารถในการละลายของสารประกอบอัลคาไลน์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย สารละลายอัลคาไลน์ดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดสภาวะความเป็นด่างขึ้นซึ่งจะช่วยให้ดินมีการกระจายตัวมากขึ้น ดังนั้นอาจจะทำให้ความเหนียวของดินลดลงได้ (พิชทองกลาง, 2556)

เมื่อเนื้อดินถูกเผา สารประกอบฟลักซ์จะหลอมตัวกลายเป็นแก้วและไปเคลือบผิวอนุภาคของวัสดุติบตัวอื่นที่มีความทนไฟมากกว่าให้เปียก และในขั้นตอนการเผาพื้นผิวของอนุภาคที่โดนเคลือบด้วยของเหลวจะมีแรงตึงผิวเกิดขึ้นและจะดึงเอาอนุภาคของวัสดุติบอื่นๆ ที่มีความทนไฟสูงกว่าเข้าด้วยกันทำให้ขนาดของรูพรุนลดลงและเนื้อดินเกิดการหดตัวขึ้น โดยแก้วที่เกิดขึ้นจะมีส่วนประกอบที่แตกต่างจากสารประกอบฟลักซ์ดั้งเดิม เนื่องจากจะเกิดการทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบอื่นของเนื้อดิน เช่น คิวทซ์และดินขาว เป็นต้น และในขณะที่อุณหภูมิภายในเตาเผา ลดลงเรื่อยๆ เนื้อแก้วที่เป็นสารประกอบระหว่างซิลิเกต (silicate) และอลูมิเนต (aluminate) จะ

กลายเป็นของแข็งและรวมตัวเข้าด้วยกันกับอนุภาคหรือผลึกที่ไม่สามารถหลอมละลายได้ ซึ่งความพรุนตัวของเนื้อดินที่ผ่านการเผามาแล้วนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณและธรรมชาติของสารประกอบฟลักซ์ที่ใช้ในเนื้อดิน รวมทั้งขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในการเผาด้วย หากในระหว่างการเผามีการหลอมตัวเป็นแก้วมากเกินไป จะทำให้ชิ้นงานที่ถูกเผาอยู่เกิดการบิดเบี้ยวเสียรูปได้ง่าย โดยหลักการแล้วเนื้อดินควรจะมีช่วงของอุณหภูมิการเผาที่กว้างพอ ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกระบวนการเผาไม่ควรจะมีผลทำให้ปริมาณของแก้วหรือคุณสมบัติการไหลตัวของแก้ว เกิดการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงมากเกินไป วัตถุประสงค์ประเภทฟลักซ์ที่นิยมใช้กันคือ เฟลด์สปาร์, เนฟลินไซยาไนต์, แก้วกระดุก และ ทัลด์ เป็นต้น (Aras, 2018)

1) เฟลด์สปาร์ (feldspars)

เฟลด์สปาร์ ที่เกิดขึ้นมีหลายชนิด ตัวอย่างองค์ประกอบทางเคมีของเฟลด์สปาร์แสดงในตารางที่ 3 เช่น โปแตสเฟลด์สปาร์หรือออร์โทเคลส (Orthoclase) และไมโครไคลน์ (Microcline) มีสูตรเคมีที่เหมือนกันคือ $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ แต่มีโครงสร้างผลึกต่างกัน โดยโปแตสเฟลด์สปาร์จะมีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ส่วนไมโครไคลน์จะมีโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก โซดาเฟลด์สปาร์หรือแอลไบต์ (Albite) มีสูตรเคมีคือ $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$, โลมเฟลด์สปาร์หรืออะนอร์ไรต์ มีสูตรเคมีคือ $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, ลิเทียมเฟลด์สปาร์ (Petalite) มีสูตรเคมีคือ $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 8SiO_2$ และแบเรียมเฟลด์สปาร์หรือเซลเซียน มีสูตรเคมีคือ $BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ซึ่งเฟลด์สปาร์เหล่านี้ไม่ได้ถูกพบในรูปของเฟลด์สปาร์บริสุทธิ์ ยกตัวอย่างเช่น ในโปแตสเฟลด์สปาร์จะมีโซดาเฟลด์สปาร์ปนอยู่ด้วยเสมอ นอกจากนี้ยังอาจจะมีปริมาณของควอทซ์ปนอยู่ด้วยมากถึงร้อยละ 15 ซึ่งจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นในสูตรดิน โดยทั่วไปแล้ว ในสูตรดินที่ใช้โซดาเฟลด์สปาร์เป็นส่วนประกอบจะมีอุณหภูมิการหลอมตัวต่ำกว่าสูตรดินที่ใช้โปแตสเฟลด์สปาร์และมีแนวโน้มที่จะทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดเบี้ยวระหว่างเผาได้ง่ายกว่า เนื่องจากแก้วที่เกิดมาจากโซดาเฟลด์สปาร์มักจะมีความหนืดต่ำกว่าแก้วที่เกิดจากโปแตสเฟลด์สปาร์ (จำปา, 2557)

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบของสารประกอบเฟลด์สปาร์ (จำปา, 2557)

องค์ประกอบ	เฟลด์สปาร์ (ร้อยละ)	เนฟลินไซยาไนต์ (ร้อยละ)
SiO ₂	67.0 – 70.0	56.1
TiO ₂	0.02 – 0.07	0.10
Al ₂ O ₃	16.5 – 18.5	24.7
Fe ₂ O ₃	0.10 – 0.30	0.08

ตารางที่ 3 (ต่อ) การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบของสารประกอบเฟลด์สปาร์

องค์ประกอบ	เฟลด์สปาร์ (ร้อยละ)	เนฟิไลน์ไฮยาไนต์ (ร้อยละ)
MgO	0.03 – 0.15	N.A.
CaO	0.30 – 0.50	0.75
K ₂ O	9.00 – 11.0	9.20
Na ₂ O	2.50 – 3.30	8.10
LOI	0.40 – 0.70	0.75

หมายเหตุ: LOI (loss on ignition)

คือ การสูญเสียน้ำหนักจากการเผา

N.A. (not analyzed)

คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

2.2.2.3 วัสดุเติมประเภทตัวเติม (fillers)

ตัวเติมเป็นคำเรียกถึงวัสดุที่ ไม่มีความเหนียวที่ใช้เป็นส่วนประกอบของสูตรดินซึ่งไม่ใช่กลุ่มของฟลักซ์ ในเชิงปฏิบัติแล้ว ตัวเติมมักจะหมายถึงซิลิกาเสมอ ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของฟลินท์ (flint) หรือทราย (sand) ก็ตาม แต่ก็จะมีเนื้อดินบางตัวที่หมายถึงอะลูมินา (ศิริหาล้า, 2557)

การเติมวัสดุที่ ไม่มีความเหนียวใดๆ ลงไปในเนื้อดิน วัสดุเติมประเภทตัวเติมจะช่วยให้การอบแห้งของเนื้อดินทำได้ง่ายขึ้น และยังทำให้การหดตัวหลังอบแห้ง (drying shrinkage) และความเหนียว (plasticity) ของเนื้อดินลดลงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ฟลินท์และทรายยังจะมีส่วนช่วยในเรื่องความขาวของเนื้อดินหลังเผาด้วย อีกทั้งยังมีความสำคัญมากในการควบคุมค่าการขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดินที่ผ่านการเผาแล้ว

1) ซิลิกา (silica)

เนื้อดิน “Whiteware” จะมีซิลิกา รวมอยู่ในรูปของซิลิเกตที่อยู่ในวัสดุเติมต่างๆ ได้แก่ ในดินขาว, เฟลด์สปาร์ และเนฟิไลน์ไฮยาไนต์ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วก็จะมีการเติมซิลิกาในรูปของฟลินท์หรือทรายเพิ่มต่างหาก ตัวอย่างเช่น เนื้อดิน “Earthenware” จะมีปริมาณซิลิกาโดยรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 72-76 โดยประมาณ ซึ่งร้อยละ 35 ของทั้งหมดจะมาจาก การเติมซิลิกาอิสระ (free silica) ที่อยู่รูปของฟลินท์หรือทราย อีกประมาณร้อยละ 35 อยู่ในรูปของซิลิเกตที่มีอยู่ในดินและฟลักซ์ และที่เหลือจะเป็นซิลิกาอิสระที่ปนอยู่ในวัสดุเติมตัวอื่นๆ (กั้ววานตระกุล, 2556) ค่าการขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion) รวมทั้งค่าความต้านทานต่อการร้าว (crazing resistance) ของเนื้อดินหลักๆ แล้วจะขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลิกาอิสระที่มีอยู่ในเนื้อดินนั้นๆ เนื่องจากซิลิกาอิสระจะมีค่าการขยายตัวทางความร้อนที่สูงกว่าซิลิกาที่อยู่เป็นองค์ประกอบของวัสดุเติมอื่นๆ

ซิลิกาอาจจะถูกนำมาใช้ในเนื้อดินและเคลือบทั้งที่อยู่ในรูปของฟลีนท์หรือทราย เช่นเดียวกันกับวัตถุที่ที่มีความเหนียวตัวอื่นๆ ที่เมื่อมีการเติมลงไปในส่วนผสมของเนื้อดินเซรามิกซึ่งมีดินอยู่ด้วยจะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงหลังการอบแห้ง (dry strength) และค่าความเหนียวของเนื้อดินดังกล่าวนี้ลดลง ทำให้แห้งตัวได้ง่ายขึ้นและมีการหดตัวหลังอบแห้งลดลง

2) ฟลีนท์ (flint)

ในองค์ประกอบของฟลีนท์ (flint) จะประกอบด้วยน้ำปริมาณเล็กน้อย ช่องว่างอากาศขนาดเล็ก และซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) ที่อยู่ระหว่างช่องว่างต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเกิดของมันมาจากโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะคล้ายกับฟองน้ำซึ่งถูกละลายอยู่ในน้ำทะเลและมีการก่อตัวเกิดเป็นแร่ซอล์กขึ้นในเวลาต่อมา ด้วยจุลโครงสร้างของฟลีนท์ที่มีขนาดเล็กมากนี้ทำให้ ฟลีนท์ทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าควอทซ์ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างกระบวนการเผา ฟลีนท์จะเกิดการเปลี่ยนเฟสกลายเป็น คริสโตแบไลต์ (อีกรูปแบบผลึกหนึ่งของซิลิกา) ได้เร็วกว่าด้วย ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากขนาดของการเปลี่ยนรูปของคริสโตแบไลต์ (cristobalite) ที่อยู่ในเนื้อดินจะมีผลอย่างมากต่อการขยายตัวทางความร้อนของเนื้อดิน

3) อะลูมินา (alumina)

มีสูตรดินจำนวนน้อยมากที่นำเอาอะลูมินามาใช้เป็นตัวเติม (filler) แทนซิลิกา ซึ่งอะลูมินาจะมีข้อได้เปรียบทางเทคนิคอยู่บางประการ หลักๆ ก็คือ อะลูมินาจะมีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่ำกว่าผลึกของซิลิกา และทำให้เนื้อดินที่ได้มีความแข็งแรงหลังเผาสูง แต่จะมีราคาแพงมาก ดังนั้นการนำอะลูมินามาใช้ในเนื้อดิน “Whiteware” จึงมักจะถูกจำกัดด้วยราคาเป็นส่วนใหญ่ และที่สำคัญการใช้อะลูมินาจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีหนักมาก เพราะ อะลูมินามีค่าความถ่วงจำเพาะสูงถึง 3.9 (ศิริหล้า, 2557)

พูน ปณ ทิโต ชีเว

2.2.3 การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน

เนื่องจากในวัสดุเซรามิกสามารถแยกองค์ประกอบได้เป็น 3 ส่วนคือ วัสดุประเภทดิน วัสดุประเภทฟลักซ์ และ วัสดุประเภทตัวเติม ซึ่งวัสดุแต่ละประเภทมีการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่างกัน และมีผลต่อการเกิดการแตกร้าวในวัสดุเซรามิก

1) การเปลี่ยนแปลงของเนื้อดิน

การเปลี่ยนแปลงของแร่ดินตามอุณหภูมิต่างๆ เมื่อได้รับความร้อนสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของแร่ดิน (ศิรห้ำ, 2557)

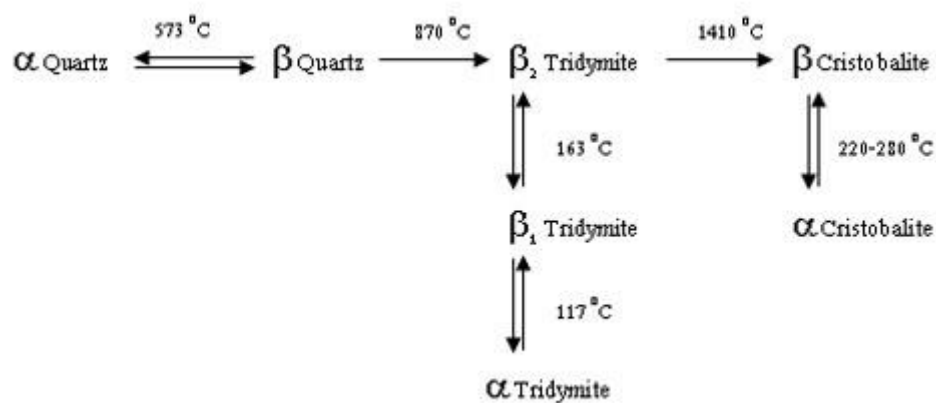
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น
100 - 200	เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน เนื่องจากน้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคดินหายไป
450	เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน เนื่องจากการหายไปของอินทรีย์สาร
450 - 600	เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อน เนื่องจากน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของดินสลายตัวไป ทำให้โครงสร้างดินเปลี่ยนเป็นเมตะเคโอลิน
980	เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน เนื่องจากโครงสร้างดินเปลี่ยนจากเมตะเคโอลิน เป็นสปิเนล พร้อมปล่อยซิลิกาอสัญฐานออกมา
1,050 - 1,100	เกิดปฏิกิริยาคายความร้อน เนื่องจากโครงสร้างดินเปลี่ยนจากสปิเนล เป็นมัลไลต์ พร้อมปล่อยซิลิกาอสัญฐานออกมา
1,200 - 1,400	เกิดผลึกมัลไลต์มากขึ้น พร้อมมีการคายพลังงาน

2) การเปลี่ยนของซิลิกา

รูปผลึกของซิลิกามีอยู่ 3 รูปหลักๆ ได้แก่ ควอทซ์ (quartz) ทริติไมต์ (tridymite) และคริสโตแบไลต์ (cristobalite) ซึ่งรูปผลึกทั้งสามแบบนี้มีสูตรทางเคมีเป็นสูตรเดียวกันคือ SiO_2 แต่จะแตกต่างกันในตำแหน่งการจัดเรียงอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจนที่อยู่ในโครงสร้าง กล่าวคือในรูปผลึกของคริสโตแบไลต์และทริติไมต์นั้นอะตอมต่างๆ จะถูกจัดวางอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันน้อยกว่าควอทซ์ จึงทำให้ทั้งคริสโตแบไลต์และทริติไมต์มีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่าควอทซ์ โดยความถ่วงจำเพาะของคริสโตแบไลต์, ทริติไมต์ และ ควอทซ์ เท่ากับ 2.28, 2.32 และ 2.65 ตามลำดับ ทริติไมต์และคริสโตแบไลต์เป็นรูปของซิลิกาซึ่งเกิดที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ควอทซ์เป็นรูปที่มีความเสถียรจนถึงอุณหภูมิ 870 องศาเซลเซียส สำหรับช่วงอุณหภูมิที่ทริติไมต์มีความเสถียรจะอยู่ในช่วง 870 องศา

เซลเซียสถึง 1,470 องศาเซลเซียส ส่วน คริสโตแบไลต์จะอยู่ในช่วง 1,470 องศาเซลเซียสจนถึงจุดหลอมตัวที่ 1,710 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงจากรูปผลึกหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งนั้น รูปผลึกแต่ละรูปอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (minor change) ภายในโครงสร้างที่เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงเฟส (inversions) ดังภาพประกอบที่ 2 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเฟสจะเกิดขึ้นจากการหมุนตัว (rotation) ของพันธะวาเลนซ์ระหว่างอะตอมของซิลิกอนและออกซิเจนเท่านั้น โดยจะมีปริมาณของพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และโครงสร้างที่สำคัญๆ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงในแต่ละกรณีดังกล่าว รูปซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะเรียกว่าอัลฟา (alpha form) ส่วนรูปซึ่งเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าจะเรียกว่าเบต้า (beta form) โดยการเปลี่ยนแปลงสำคัญๆ ที่เกิดขึ้นแสดงดังต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 2 การเปลี่ยนแปลงเฟส (ต้นนโยภาส และคณะ, 2554)

3) การเปลี่ยนของเฟลด์สปาร์

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างผลึกของเฟลด์สปาร์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงมาก โดยจะอยู่ที่เริ่มหลอมละลายตั้งแต่ 1,000 – 1,800 องศาเซลเซียส (จำปา, 2557)

4) การเปลี่ยนแปลงของเนื้อดินปั้น

มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเนื้อดินปั้นที่มีส่วนผสมของเนื้อดินร้อยละ 50, ควอทซ์ร้อยละ 25 และเฟลด์สปาร์ร้อยละ 25 ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อดินปั้นตามอุณหภูมิต่างๆ เป็นดังตารางที่ 5 เมื่อเนื้อดินปั้นได้รับความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายและทางเคมีซึ่งทำให้เนื้อดินปั้นเกิดความแข็งแรง

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเนื้อดินปั้น (สุวรรณโณม, 2543)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น
100 - 200	น้ำที่อยู่ระหว่างอนุภาคดินระเหยออกไป
450	อินทรีย์สารในดินถูกเผาไหม้
500 - 600	น้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของดินสลายตัวไป ทำให้ดินเปลี่ยนโครงสร้างเป็นเมตะเคโอลิน
573	ผลึกของควอทซ์หรือซิลิกาเปลี่ยนรูปร่าง ทำให้ดินเกิดการขยายตัว
980	มีสปิเนลเกิดขึ้น และเนื้อดินเริ่มมีการหดตัว
1,000	เริ่มมีมัลไลต์ปฐมภูมิ (primary mullite) เกิดขึ้น
1,050 - 1,100	เฟลด์สปาร์เริ่มหลอมละลาย มีมัลไลต์เพิ่มขึ้น ทำให้เนื้อดินแข็งแรง การหดตัวยังคงดำเนินต่อไป
1,200	มีแก้วและมัลไลต์มากขึ้น ควอทซ์บางส่วนหลอมละลาย รูพรุนลดลง
1,250	เนื้อดินกลายเป็นแก้วร้อยละ 60, มัลไลต์ร้อยละ 21 และควอทซ์ร้อยละ 19

2.2.4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากดิน

ในกระบวนการผลิตเซรามิก การขึ้นรูปถือว่าสำคัญเพื่อให้ได้วัสดุเซรามิกที่มีรูปร่างสวยงามตามต้องการ การขึ้นรูปของเซรามิกแบ่งออกเป็น 6 ประเภทดังนี้ (อดิศัยพัฒนกุล และระมิงค์วงศ์, 2559)

(1) การขึ้นรูปด้วยมือ (handing) เป็นการขึ้นรูปที่มีมาตั้งแต่ยุคแรกและยังนิยมใช้กันมาถึงในปัจจุบัน ใช้อุปกรณ์ในการขึ้นรูปน้อยชิ้น แต่ผู้ทำการปั้นด้วยมือต้องมีความชำนาญมากพอสมควร โดยปกติดินที่นำมาขึ้นรูปด้วยมือจะมีน้ำอยู่ร้อยละ 18 - 25 โดยน้ำหนัก

(2) การขึ้นรูปด้วยจานหมุน (whell throwing) จานหมุนได้รับการประดิษฐ์เพื่อใช้ในการขึ้นรูปแทนการขึ้นรูปด้วยมือเมื่อประมาณ 3,000 ปีก่อนประวัติศาสตร์ และยังนิยมใช้กันถึงในปัจจุบัน สามารถขึ้นรูปได้เร็วกว่าการปั้นด้วยมือ แต่ช่างปั้นต้องมีความชำนาญสูง โดยปกติดินที่นำมาขึ้นรูปด้วยมือจะมีน้ำอยู่ร้อยละ 22-25 โดยน้ำหนัก

(3) การขึ้นรูปด้วยวิธีจิกเกอร์และจอลลี่ (Jiggering and Jollying forming techniques) เป็นการขึ้นรูปด้วยจานหมุนแผ่นโลหะเป็นหน้าตัดของภาชนะประกอประกอแบบพิมพ์ปูนปลาสเตอร์ วิธีขึ้นรูปนี้ทำให้สามารถขึ้นรูปได้รวดเร็ว ทำให้วัสดุเซรามิกมีความสม่ำเสมอ ถือเป็นวิธีการขึ้นรูปวิธีแรกที่ใช้ในอุตสาหกรรม ขึ้นรูปได้เฉลี่ยประมาณ 1,000 ชิ้นต่อวัน

(4) การขึ้นรูปด้วยเครื่องโรลเลอร์เฮด (roller head) เครื่องจักรชนิดนี้ถูกนำมาใช้ที่ประเทศอังกฤษครั้งแรกเมื่อคริสต์ศักราช 1960 สามารถขึ้นรูปได้เร็วกว่าวิธีจิกเกอร์ เพราะแรงกดของเครื่องที่มากกว่าและมีการเปลี่ยนแปลงใบมีดเป็นหัวโลหะที่สามารถหมุนรอบตัวเองได้ในขณะที่กดลงไป แม่พิมพ์ปูนพลาสติกพร้อมๆกัน มีการตั้งอุณหภูมิของหัวหมุนโลหะทำให้เนื้อดินไม่หลุดติดกับจานโลหะ

(5) การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดดินเหนียว (plastic pressing) ใช้ขึ้นรูปวัสดุเซรามิกที่ไม่ใช้ทรงกลม เช่น จานทรงสี่เหลี่ยม เป็นต้น วิธีการทำงานของเครื่องคือ จะใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกที่มีแม่พิมพ์ปูนพลาสติก 2 ชั้น โดยเวลาอัดจะมีช่องว่างเพื่อให้ดินส่วนเกินล้นออกมา ตัวแม่พิมพ์ต้องมีความแข็งแรงสูงและจะมีท่อเล็กๆจำนวนมากในแม่พิมพ์เพื่อใช้ดูดน้ำในเนื้อดิน

(6) การขึ้นรูปด้วยวิธีหล่อหน้าดิน เป็นการขึ้นรูปที่มีมาประมาณ 200 กว่าปี มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ใช้ขึ้นรูปวัสดุเซรามิกที่มีรายละเอียดสูง โดยจะเป็นการเทน้ำดินใส่แบบแม่พิมพ์แล้วแม่พิมพ์จะค่อยๆดูดน้ำออกอย่างช้าๆและสม่ำเสมอ ทำให้ได้วัสดุเซรามิกที่มีรูปร่างตามแบบพิมพ์ที่ออกแบบไว้ น้ำดินที่หลงในแม่พิมพ์จะมีการเติมสารป้องกันดินตกตะกอน เพื่อให้ปริมาณของเนื้อดินไม่ลงไปนอนก้นของแม่พิมพ์

โดยทั่วไปแล้ววัสดุเซรามิกที่จัดอยู่ในกลุ่มผลิตภัณฑ์จากดินเมืองค์ประกอบที่สามารถทำหน้าที่เป็นสารดูดซับได้ แต่ความสามารถในการดูดซับจะมากหรือน้อย ส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิต และกระบวนการผลิตว่าจะต้องการให้มีคุณสมบัตินี้หรือไม่ เพราะถ้าทำให้วัสดุเซรามิกมีความพรุนมาก ความสามารถในการดูดซับก็จะมากขึ้นด้วย แต่ความแข็งแรงก็จะน้อยลง

2.3 การดูดซับ

การดูดซับ เป็นการแยกสารประเภทหนึ่งออกจากสารอีกประเภทหนึ่งโดยให้ออกมาเกาะติดอยู่กับบริเวณพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการ สารที่ต้องการแยกออกแล้วมาเกาะติดอยู่กับบริเวณพื้นผิวของวัสดุจะเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนวัสดุที่ให้พื้นผิวในการดูดซับเรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent) ตัวถูกดูดซับส่วนใหญ่จากเข้าไปอยู่ในโพรงของตัวดูดซับ มีเพียงส่วนน้อยที่จะเกาะอยู่ตามผิวภายนอก กระบวนการดูดซับจะดำเนินไปเรื่อยๆจนเข้าสู่ภาวะสมดุล โดยเริ่มต้นตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวดูดซับเรียกว่ากระบวนการดูดซับ (adsorption) ในขณะที่ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวดูดซับก็จะมีตัวถูกดูดซับบางส่วนหลุดออกไปเช่นเดียวกัน เรียกว่า การคายการดูดซับ (desorption) เมื่อเวลาผ่านไปพื้นผิวของตัวดูดซับเต็ม การดูดซับและการคายการดูดซับจะเท่ากัน เรียกกระบวนการนี้ว่า สมดุลการดูดซับ (equilibrium adsorption) เขียนได้ดังสมการ 2 เมื่อ A คือตัวดูดซับ, S คือตัวถูกดูดซับ และ AS คือ สารที่เกิดจากการดูดซับ (พงค์สันติสุข, 2541)



2.3.1 กลไกการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 1 โมเลกุลของมลพิษในอากาศที่ต้องการดูดซับ เคลื่อนที่แพร่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 โมเลกุลของมลพิษในอากาศที่ต้องการดูดซับ เคลื่อนที่แพร่เข้าไปในโพรงที่เป็นรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 โมเลกุลของมลพิษในอากาศที่ต้องการดูดซับ จะถูกยึดติดไว้ตามพื้นผิวที่เป็นรูพรุนของตัวดูดซับ

ในขั้นตอนที่ 1 เกิดการแพร่ของมลพิษอากาศไปยังบริเวณตัวดูดซับ เพราะความแตกต่างของความเข้มข้นระหว่างอากาศที่ปนเปื้อนกับความเข้มข้นที่ผิวของตัวดูดซับ ทำให้โมเลกุลของมลพิษอากาศที่ต้องการดูดซับไหลจากความเข้มข้นมากไปยังบริเวณผิวตัวดูดซับที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า และเมื่อมลพิษเคลื่อนที่มาถึงผิวของตัวดูดซับแล้วก็จะเคลื่อนที่เข้าไปสู่รูพรุนของตัวดูดซับต่อไป ตามขั้นตอนที่ 2 โดยในการแพร่เข้าไปจะเป็นแบบกลุ่มก้อน (bulk diffusion) ในรูพรุนช่วงแรกจะมีขนาดใหญ่ เมื่อลึกลงไปรูพรุนจะมีขนาดเล็กลง ทำให้โมเลกุลมลพิษเกิดการชนกันและถูกยึดติดไว้ในรูพรุนของตัวดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งสามารถแบ่งแรงยึดเหนี่ยวดังกล่าว ได้เป็น 2 ประเภท คือ แรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ และแรงยึดเหนี่ยวทางเคมี (กลมเกลี้ยง, 2558)

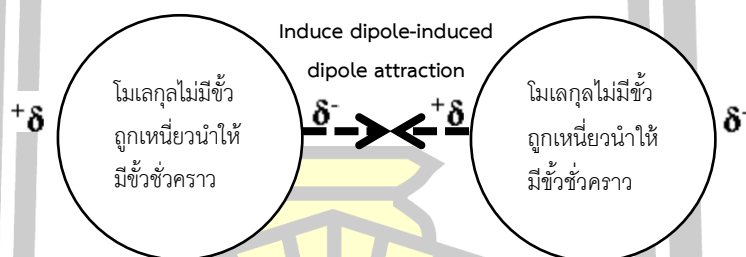
2.3.1.1 แรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ (physical adsorption)

เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ เป็นแรงที่จับกันไว้อย่างอ่อนๆ เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (vander waals force) แรงแวนเดอร์วาลส์มีการคายพลังงานที่น้อย ซึ่งน้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล จึงสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย แต่ในจุดนี้เองที่ถือเป็นข้อดี เพราะจะทำให้ง่ายต่อการฟื้นฟูสภาพ (regeneration) แล้วนำกลับมาใช้ให้ แต่ถึงแรงแวนเดอร์วาลส์จะมีค่าน้อย แต่ก็ยังมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในก๊าซหรือสารละลาย ดังนั้นตัวถูกดูดซับจะยึดติดแน่นบนผิวของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวหรือมีรูพรุนสูง ตัวถูกดูดซับสามารถซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ การดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์มีผลทำให้เกิดแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ ของโมเลกุลในสภาพมีขั้วหรือโมเลกุลในสภาพไม่มีขั้ว เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบในโมเลกุล ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวดูดซับ

และตัวถูกดูดซับหรือก็คือแรงแวนเดอร์วาลส์สามารถแบ่งย่อยออกได้อีก 3 ประเภทดังนี้ (ฉัตรศิริเวช, 2552)

1) แรงลอนดอนหรือแรงแผ่กระจาย (London force, dispersion force)

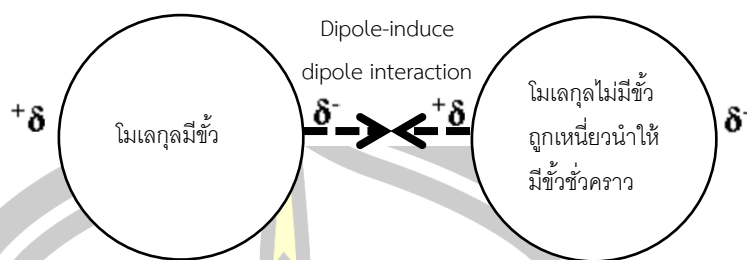
แรงลอนดอนหรือแรงแผ่กระจายเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แรงชนิดนี้เกิดขึ้นเนื่องจากในโมเลกุล อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ซึ่งอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่นี้ไม่ได้มีการกระจายตัวที่ดี กระจายตัวกันอย่างไม่สม่ำเสมอ และมีการเคลื่อนที่ไปสะสมหนาแน่นอยู่ในด้านที่ไม่มีขั้วของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลจากเดิมที่ไม่มีขั้ว มีอำนาจทางไฟฟ้าเป็นขั้วลบมากขึ้นกว่าปกติ ในขณะที่ด้านตรงกันข้ามอีกด้านหนึ่งของโมเลกุล จากที่เคยไม่มีขั้ว ก็จะแสดงอำนาจทางไฟฟ้าเป็นขั้วบวก ทำให้จากโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว กลายเป็นโมเลกุลที่มีขั้วชั่วคราว (induced dipole) โดยขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ จะไปเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลใกล้เคียงกันจากเดิมที่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดสภาพมีขั้วชั่วคราวขึ้นมาเช่นกัน โดยโมเลกุลที่มีขั้วลบหันไปทางไหน ก็จะเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลใกล้เคียงกันเกิดขั้วบวกขึ้นมา ด้วยกระบวนการการนี้จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของโมเลกุลต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆ เรียกว่า แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (induce dipole-induced dipole attraction) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3



ภาพประกอบที่ 3 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (แช่โล้, 2543)

2) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

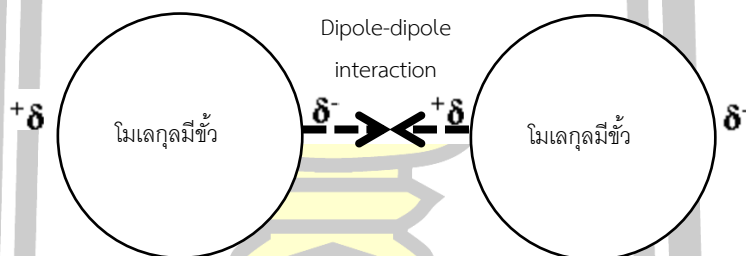
แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แรงยึดเหนี่ยวชนิดนี้เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วเคลื่อนที่เข้าใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ โดยโมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะถูกเหนี่ยวนำให้กลายเป็นโมเลกุลที่มีขั้วชั่วคราว เรียกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (dipole-induce dipole interaction) ดังแสดงภาพประกอบที่ 4



ภาพประกอบที่ 4 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (แซ่โล้, 2543)

3) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่มีขั้ว

แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดขึ้นจากโมเลกุลหนึ่งแสดงอำนาจทางไฟฟ้าเป็นบวก ในขณะที่อีกโมเลกุลหนึ่งแสดงอำนาจทางไฟฟ้าเป็นลบ ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ต่างขั้วกัน เรียกว่าแรงไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole interaction) ดังแสดงภาพประกอบที่ 5



ภาพประกอบที่ 5 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่มีขั้ว (แซ่โล้, 2543)

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทางกายภาพ นอกจากแรงแวนเดอร์วาลส์แล้วยังมีพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) ที่ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล โดยพันธะไฮโดรเจน เกิดจากโมเลกุล หนึ่งมีอะตอมของไฮโดรเจนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งทำให้โมเลกุลนั้นแสดงอำนาจทางไฟฟ้าเป็นบวก เกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone pair electron) ของอีกโมเลกุลหนึ่ง ที่มีอะตอมของธาตุฟลูออรีน คลอรีน ออกซิเจนและไนโตรเจน อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งธาตุเหล่านี้มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) สูง ทำให้โมเลกุลนั้นแสดงอำนาจทางไฟฟ้าเป็น ลบ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลในลักษณะพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้น พันธะไฮโดรเจนนี้มีบทบาทสำคัญกับขบวนการที่สำคัญของสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นการจับกันระหว่างโมเลกุลของโปรตีน การจับเข้ากับของ “Deoxyribonucleic Acid” (DNA) และ “Ribonucleic acid” (RNA) เป็นต้น (แซ่โล้, 2543)

2.3.1.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี (chemisorption, chemical adsorption)

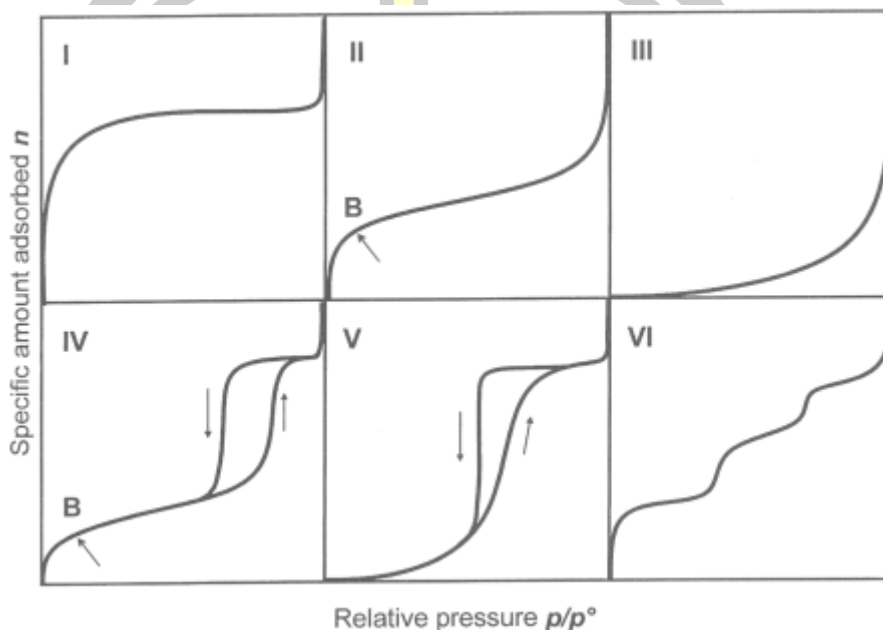
แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี เป็นแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้น จากการสร้างพันธะเคมี (chemical bonding) ระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ สร้างสารประกอบระหว่างผิวตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง และให้ความร้อนออกมามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ แต่แรงยึดเหนี่ยวทางเคมีจะดูดซับตัวถูกดูดซับได้น้อยเพราะจะเกิดได้แค่บางส่วนของพื้นผิวเท่านั้นและในสภาพแวดล้อมที่เพราะสม เช่น ในอุณหภูมิที่สูงกว่าปกติ จากหลายข้อจำกัดทำให้แรงยึดเหนี่ยวทางเคมีไม่สามารถดูดตัวถูกดูดซับได้มากเท่ากับแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพเพราะแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพสามารถเกิดได้ทุกส่วนของพื้นผิว แรงยึดเหนี่ยวทางเคมีอาจเป็นพันธะไอออนิก (ionic bond) ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ หรือพันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) ซึ่งเกิดจากการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกัน หรืออาจเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับก็ได้ แรงยึดเหนี่ยวทางเคมีจะมีความแข็งแรงมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ ไม่สามารถเกิดการคายการดูดซับได้ เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีไปแล้ว จึงไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (irreversible) (เสนาณรงค์ชวรกุล, 2548)

2.3.2 สมดุลการดูดซับ

สมดุลการดูดซับ สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร โดยสารจะถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง โดยการแสดงด้วยรูปกราฟ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับ โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้น โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเข้าไปยังทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับอ่อนลงเนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวเหลือน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้โดยการทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สาม ซึ่งอาจเกิดการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มทุกตำแหน่ง และในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อกันหลายชั้น (Wang et al., 2012)

รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะเป็นการบอกเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายแบบแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ชนิดสารที่ถูกดูดซับ และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวของสารดูดซับ ในปี ค.ศ. 1940 ได้มีการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับโดย Brunauer, Deming, Deming และ Teller เรียกว่า BDDT

ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอมการดูดซับออกเป็น 5 ประเภท ซึ่งการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ BDDT ได้เป็นหลักในการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ซึ่งมีการเพิ่มจากไอโซเทอมการดูดซับของ BDDT อีก 1 ประเภททำให้ไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC มีทั้งหมด 6 ประเภท ดังที่แสดงในภาพประกอบที่ 6



ภาพประกอบที่ 6 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC (Sing et al., 1985)

แบบ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับลักษณะเฉพาะของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร (microporous adsorbent) การดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก ลักษณะไอโซเทอมจะเป็นโค้งงอ (concave) หาแกนในแนวนอน (relative pressure) สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก สารดูดซับมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อย ดังนั้นการดูดซับจะถูกจำกัดเนื่องจากไม่สามารถเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ การบรรจุโมเลกุลลงในรูขนาดเล็กของสารดูดซับนี้สมบูรณ์ และมีการอิมมัตที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้ง เรียกว่าแลงเมียร์

แบบ II เป็นรูปแบบปกติของไอโซเทอมที่เกิดในสารดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (nonporous) หรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (microporous) โดยในแบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดเป็นหลายชั้น (multilayer) ในต่อมาจากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้ง หรือจุดปี (break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบขั้นเดียวนั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะ

เกิด การดูดซับเสรีจสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า “Sigmoid” (S-shape isotherm)

แบบ III เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการ รวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสรีจสมบูรณ์ในแบบที่ III จะ มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II ซึ่งเส้นกราฟจะโค้งออก (convex) จากแกนแนวนอน (relative pressure) จำนวนสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น อย่างไม่จำกัด ซึ่งเป็นแบบพิเศษ

แบบ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมใน รูพรุนอีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของ กราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่น ภายในรูพรุนของช่องแคบ (capillary condensation in pores) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะ เหมือนกับชนิดที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้ง จะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์

แบบ V เป็นไอโซเทอมรูปแบบพิเศษ มีความคล้ายกับแบบ III เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งจะพบในสารดูดซับที่มีขนาดรูพรุนในช่วงเดียวกับไอโซเทอมแบบ IV สำหรับไอโซเทอมแบบ III และแบบ V นี้จะ คำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสรีจสมบูรณ์

แบบ VI เป็นการดูดซับแบบ multilayer เป็นชั้นๆ ขึ้นบนผิวของ nonporous โดยความสูง ของแต่ละชั้นจะเป็นความสามารถของ monolayer ในชั้นนั้นๆ

2.3.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่จุดสมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ

1) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ. 1916 แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมการดูดซับแบบง่ายสุดโดยถือเป็นต้นแบบของการดูดซับมีสมมติฐาน คือ

(1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)

(2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน

(3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

(4) โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะเคลื่อนย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่ายๆ เป็นแบบจำลองพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ดังแสดงในสมการ 3 (เดชา, 2552)

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (3)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ(กรัม) ที่ภาวะสมดุล
 q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (มิลลิกรัมต่อกรัม) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer)

b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

สมการ 3 จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรงจะได้ ดังแสดงในสมการ 4

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (4)$$

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ค่า q_m และ b หาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน (intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรสภาวะสมดุล (equilibrium parameter, R_L) ดังแสดงในสมการ 5

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_0} \quad (5)$$

เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

โดยค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับ เป็นเส้นตรง (linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (favorable) และ $R_L = 0$ การดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible)

2) ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

สมการของฟรุนดลิช มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด พื้นผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช เป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงก์เมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น ดังแสดงในสมการ 6 และสมการ 7

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_f \quad (7)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม) ที่ภาวะสมดุล
 K_f คือค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 n คือค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e)$ กับ $\log(C_e)$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมี จุดตัดแกนเท่ากับ $\log(K_f)$ จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณา จากความชันของกราฟระหว่าง $\log(C_e)$ กับ $\log(q_e)$ โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า n น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำค่า $1/n$ อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ (Ozdes et al., 2011)

2.3.4 ปัจจัยที่มีผลกับการดูดซับมลพิษอากาศ

การดูดซับจะเกิดขึ้นได้มากหรือได้น้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยคุณสมบัติของตัวดูดซับจะเป็นตัวกำหนดว่า ควรใช้ตัวถูกดูดซับตัวนั้นหรือไม่ สำหรับการดูดซับมลพิษออกจากอากาศหรือตัวถูกดูดซับเหล่านั้น

1) พื้นผิวและโครงสร้างของรูพรุน

พื้นผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของตัวดูดซับ เนื่องจากเมื่อตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวที่เยอะ ก็จะทำให้สามารถเก็บมลพิษได้เยอะเช่นเดียวกัน หรือจะพูดว่าตัวดูดซับนั้นมีความสามารถในการดูดซับที่

สูงก็ได้ ส่วนโครงสร้างของรูพรุนมีผลในการช่วยให้พื้นที่ผิวสามารถดูดซับได้เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากถ้าโมเลกุลของมลพิษอากาศหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปอยู่ในโครงสร้างรูพรุนได้ ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับก็จะลดลง ในทางกลับกัน ถ้าโมเลกุลของมลพิษอากาศหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถเข้าไปอยู่ในโครงสร้างรูพรุนได้ ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

2) ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ

ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับหรือขนาดของตัวดูดซับจะมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการดูดซับ โดยเมื่อลดขนาดของตัวดูดซับลง จะทำให้อัตราในการดูดซับมลพิษสูงขึ้น หรือจะพูดว่าทำให้ดูดซับได้รวดเร็วขึ้นนั่นเอง

3) เคมีที่ผิวหน้าของตัวดูดซับ

เคมีที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะเกี่ยวกับหมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวโมเลกุลของตัวดูดซับ โดยกลุ่มฟังก์ชันเฉพาะดังกล่าวจะช่วยเพิ่มการดูดซับของโมเลกุลมลพิษได้และเปลี่ยนแปลงรูพรุน ทำให้เหมาะแก่การดูดซับมลพิษชนิดนั้นๆ

4) ขนาดของตัวถูกดูดซับ

ขนาดของตัวถูกดูดซับเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากเช่นกัน เพราะในกระบวนการดูดซับส่วนใหญ่แล้วเกิดขึ้นในโพรงหรือในรูพรุนของตัวดูดซับ ดังนั้นถ้าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดใหญ่จนไม่สามารถเข้าไปในโพรงของตัวดูดซับได้ ก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง และจากงานวิจัยอื่นๆพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูงเมื่อขนาดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย โดยพบว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่มีขนาดเล็กจะถูกดูดเข้าไปก่อน จากนั้นโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าก็จะถูกดูดตามเข้าไป

5) ความปั่นป่วน

ความปั่นป่วนโดยความปั่นป่วนของกระบวนการดูดซับ มีผลต่ออัตราเร็วในการแพร่ของตัวถูกดูดซับภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ถ้าความปั่นป่วนต่ำโอกาสที่มลพิษจะแพร่เข้าไปในรูพรุนก็จะน้อย ในทางกลับกันถ้าความปั่นป่วนสูงโอกาสที่มลพิษจะสัมผัสหรือแพร่เข้าไปในตัวดูดซับก็จะมาก

6) ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ

ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับมีผลแปรผันตรงกับความสามารถในการดูดซับ โดยถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับมีมาก จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีค่าสูงด้วย เพราะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในตัวกลางกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในตัวดูดซับ ทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นด้วย

7) อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลต่อการดูดซับตามประเภทของการดูดซับ กล่าวคือ ถ้าการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถให้การดูดซับเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้สมดุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเกิดเร็วขึ้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและสามารถเกาะติดผิวบริเวณที่ว่างของตัวดูดซับได้มากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมียังทำให้ตัวถูกดูดซับแทรกซึมเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับได้มากขึ้น ผลทั้งหมดเนื่องจากการที่รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น การเพิ่มพลังงานจลน์และการเพิ่มอัตราการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ ในทางกลับกันถ้าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนการเพิ่มอุณหภูมิมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ที่ลดลงเพราะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (ฉัตรศิริเวช, 2552)

2.3.5 วัสดุดูดซับ

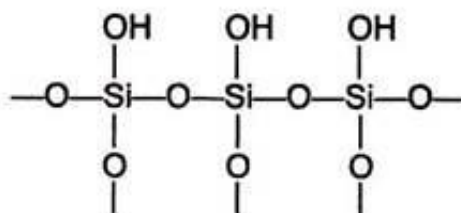
วัสดุดูดซับ หมายถึง วัสดุที่มีอำนาจดูดซับสารอื่น ๆ หรือสารมลพิษไว้บนผิวของตัววัสดุนั้นๆ ได้ ในกระบวนการดูดซับวัสดุดูดซับมีความสำคัญมาก เพราะจะต้องเลือกใช้ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับมลพิษอากาศที่ต้องการให้ได้ โดยจะต้องพิจารณาจากหลายด้าน ซึ่งเมื่อนำหลักการต่างๆ มาพิจารณาแล้ว ประสิทธิภาพในการดูดซับก็จะสูงขึ้นด้วย

2.3.5.1 ประเภทของตัวดูดซับ

วัสดุดูดซับมลพิษแต่ละตัวจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป โดยส่วนใหญ่ประสิทธิภาพในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นที่ผิวในการดูดซับ และลักษณะความมีขั้วของผิววัสดุดูดซับมลพิษ วัสดุดูดซับมลพิษชนิดมีขั้ว ได้แก่ ซีโอไลต์ อะลูมินาและซิลิกาเจล เป็นต้น ส่วนวัสดุดูดซับมลพิษชนิดที่ไม่มีขั้ว ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

1) ซีโอไลต์ (zeolites)

ซีโอไลต์ คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) หน่วยย่อยของ ซีโอไลต์ ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน หรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 และ AlO_4) โดยสร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) ดังที่แสดงในภาพประกอบที่ 7 อะตอมของซิลิคอน หรือ อะลูมิเนียมจะอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่ออกซิเจน เกิดโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น และเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์มีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียมโพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถกำจัดด้วยการอบแห้ง หรือเผาที่ความร้อนสูง (เพ็งคุณ, 2557)



ภาพประกอบที่ 9 โครงสร้างซิลิกาเจล (เพ็งคุณ, 2557)

4) ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการก่อกัมมันต์ เพื่อให้โครงสร้างภายในเกิดมีรูพรุนมากมายซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวสูง โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวประมาณ 600-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม รูพรุนหรือโพรงของถ่านกัมมันต์นี้มีขนาดระหว่าง 2-2,000 นาโนเมตร โดยถ่านกัมมันต์จะสามารถมีรูพรุนเพิ่มขึ้นได้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของลิกนินต่อเซลลูโลสในวัตถุดิบ อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น อัตราการให้ความร้อน วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้นจะต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ที่นิยมมีหลายชนิด ได้แก่ ไม้ กะลามะพร้าว ถ่านหิน ชีลื้อย กากเมล็ดกาแฟ เปลือกของผลไม้บางชนิด เศษไม้แป๊กเป็นตัวเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากหาได้ง่ายและมีปริมาณมาก (ฉัตรศิริเวช, 2552)

วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์มีการกำหนดและมีวัสดุหลายชนิดที่สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้ แต่ควรมีคุณสมบัติ ดังต่อไปนี้ (1) เป็นของเหลือทิ้ง หรือมีราคาถูก (2) มีปริมาณคาร์บอนสูง (3) มีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ (4) มีคุณสมบัติคงที่ สะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ และ (5) สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่คุณภาพสูงได้ ตามหลักแล้วอินทรีย์วัตถุทุกชนิดสามารถนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ได้ ปัจจุบันจึงได้มีการนำของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากหาได้ง่ายและมีราคาถูก แต่อย่างไรก็ตาม การนำของเสียเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์นั้นจะก่อให้เกิดปัญหา คือ วัตถุดิบมีคุณสมบัติไม่คงที่ แม้ว่าจะเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกัน ทำให้ยากในการควบคุมขั้นตอนในการผลิต

2.3.5.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

ในปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ลักษณะ และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการเผาให้เป็นถ่านหรือการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) หรือไพโรไลซิส (pyrolysis) และขั้นตอนการกระตุ้นหรือแอคติเวชัน (activation) (ลอยหา, 2556)

1) การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนเซชันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอนไนเซชัน หลังจากนั้นทำการอบหรือตากวัตถุดิบให้แห้ง (dehydration) แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความชื้นและเหนียว ทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจจะนำวัตถุดิบนั้นไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้ สำหรับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง อาจนำมาทำให้เป็นเม็ดโดยใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตาหรือทาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน แล้วนำไปอัดเป็นเม็ดก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนต่อไป

2) ขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization)

ขั้นตอนการคาร์บอนไนเซชันจัดว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากในการคาร์บอนไนเซชันจะมีการเริ่มสร้างของโครงสร้างรูพรุน โดยในระหว่างการคาร์บอนไนเซชัน ธาตุและองค์ประกอบต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนรวมถึงสารระเหยต่างๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และน้ำ จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบในรูปของก๊าซและน้ำมันทาร์ จากนั้นจะได้ถ่านคาร์บอน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งจะมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก โดยจะมีสาร อนินทรีย์ที่เป็นทาร์จากการเผาไหม้อุดช่องว่างเหล่านั้น ซึ่งใน ส่วนประกอบของถ่านคาร์บอนที่ได้จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไฮโดรเจน และคาร์บอนต่อออกซิเจน เพิ่มมากขึ้นจากวัตถุดิบในตอนแรกด้วย ขั้นตอนของกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน (เพ็งคุณ, 2557)

(1) การสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบในช่วงอุณหภูมิ 27-197 องศาเซลเซียส

(2) การไพโรไลซิสโดยเกิดก๊าซ และน้ำมันทาร์จากการเผาไหม้ในโครงสร้างในช่วงอุณหภูมิ 197-497 องศาเซลเซียส

(3) ช่วงที่มีการเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่าน โดยในช่วงนี้น้ำหนักของวัตถุดิบจะลดลงไปมากในช่วงอุณหภูมิ 497-847 องศาเซลเซียส

ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันมีหลากหลายตัวแปรมาก ที่จะเป็นตัวกำหนดว่า ถ่านถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันไปแล้ว จะมีประสิทธิภาพสูงมากน้อยเพียงใด ตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันได้แก่ อุณหภูมิ, อัตราการให้ความร้อน, ตัวกลางของตัวเร่งปฏิกิริยา และธรรมชาติของวัตถุดิบ

3) ขั้นตอนการกระตุ้น (activation)

การกระตุ้น คือ การทำให้ถ่านคาร์บอนมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น วัตถุประสงค์ของการกระตุ้น มี

ดังนี้ เพิ่มพื้นที่ผิว (active surface area), เพิ่มความว่องไวในการดูดซับ และการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออินทรีย์วัตถุ การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกการกระตุ้นที่เกิดขึ้นได้เป็น 2 ประเภท คือ การกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี

(1) การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) เช่น การกระตุ้นด้วยไอน้ำ, การกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการกระตุ้นด้วยอากาศ เป็นต้น การกระตุ้นด้วยไอน้ำ ไอน้ำนั้นถือได้ว่าเป็นสารกระตุ้นทางกายภาพที่มีการใช้กันมาก เนื่องจากโมเลกุลของน้ำนั้นมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และในการกระตุ้นด้วยไอน้ำนั้นจะมีข้อดีคือ โมเลกุลของน้ำจะแพร่เข้าไปได้อย่างรวดเร็วในโครงสร้างรูพรุนเนื่องจากโมเลกุลที่มีขนาดเล็กจึงสามารถเข้าไปในรูพรุนขนาดเล็กได้ มีการเกิดปฏิกิริยาที่รวดเร็ว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึงสามเท่าที่สภาวะความดัน 10 กิโลปาสคาลและอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส (วิทิตศานท์ และคณะ, 2550)

(2) การกระตุ้นทางเคมี (chemical activation) หลักการของการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นทางเคมี คือ เมื่อนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผสมกับเกลืออินทรีย์ด้วยอัตราส่วนต่างๆ แล้วนำไปเผาที่สภาวะอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่จะทำให้อินทรีย์วัตถุสลายตัว เกลืออินทรีย์จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ให้เกิดการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากเกลืออินทรีย์เหล่านี้มีความคงทนต่อการสลายที่ อุณหภูมิสูงๆ จึงยังคงสภาพหุ้มอยู่รอบๆ ถ่านและแทรกตัวอยู่ภายใน ทำให้การหดตัวของถ่านเกิดขึ้นได้จำกัด เมื่อนำมาสกัดเอาสารอินทรีย์ออกก็จะเกิดช่องว่างหรือรูพรุน ซึ่งแต่เดิมเป็นที่ที่มีสารอินทรีย์เคยอยู่ ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมี คือ ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีรูพรุนสูง และแทรกซึมอยู่ทั่วเนื้อถ่าน ใช้อุณหภูมิในการผลิตไม่สูง ส่วนข้อเสีย คือ ต้องล้างสารเคมีที่ใช้กระตุ้นออกให้หมดไม่ให้เหลือตกค้างเพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน จึงเป็นการสิ้นเปลืองแรงงานและเวลา สารเคมีที่ใช้มีราคาค่อนข้างสูง นอกจากนี้สารเคมีที่ใช้บางชนิดมีฤทธิ์กัดกร่อนภาชนะหรือเครื่องมือที่ใช้ในการผลิต ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง สารเคมีที่ใช้ กระตุ้นได้แก่กรดบอริก (H_3BO_3), โพตัสเซียมไรโอไซยาเนต ($K_2S_2O_3$), เกลือแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$), เกลือแมงกานีสคลอไรด์ ($MnCl_2$), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $CaOH$), แมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$), แคลเซียมฟอสเฟต ($Ca(PO_3)_2$), กรดไนตริก (HNO_3), ไซยาไนด์ (CN^-), โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$), ปูนโดโลไมต์ ($CaMg(CO_3)_2$), โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4), เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_2$), กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4), กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) เป็นต้น (ศิริหล้า, 2557)

2.3.5.3 โครงสร้างถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งมีลักษณะคล้ายแกรไฟต์ (Graphite) แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของถ่านกัมมันต์มีมากกว่าแกรไฟต์

1) โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าผลึกของแกรไฟต์ โดยโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นของคาร์บอนอะตอมในรูปของวงแหวนเบนซีน (benzene ring) หรือกลุ่มของอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม (regular-hexagon) นั่นคือแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะโควาเลนต์ อิเล็กตรอนที่เหลือนอกหนึ่งจะเคลื่อนที่ไปทั่วโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อให้โครงสร้างมีความเสถียรยิ่งขึ้นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ ถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นผลึกเล็กๆ ที่ไม่สมบูรณ์ เกิดการเบี่ยงเบนในแนวฉากและซ้อนเหลื่อมกันในแนวระนาบ เรียกว่าโครงสร้างแบบเทอร์โบสแตติก (turbostatic structure) จะมีการจัดเรียงตัวของผลึกเล็กๆ จะมีทิศทางไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการคาร์บอนไนเซชัน (Jankowska et al., 1991)

2) โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันมีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากการสูญเสียองค์ประกอบคาร์บอนระหว่างช่องระหว่างผลึกของคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสมคือการทำให้มีความพรุนไม่ใช่ขนาดของรู เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมากมีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ และมีความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะรูปร่างของรูพรุนนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางรูมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งเป็นรูปตัววี รูพรุนของถ่านกัมมันต์มีหลายประเภท สามารถจำแนกตามขนาดรัศมีของรูพรุนได้เป็น 3 ขนาด คือ แมคโครพอร์, เมโซพอร์และไมโครพอร์

(1) แมคโครพอร์จะมีรัศมีของรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 100 - 200 นาโนเมตร ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้นแมคโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับเป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูพรุนที่เล็กกว่า

(2) เมโซพอร์หรือทรานซิชันนัลพอร์ (Transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 1.5 - 100 นาโนเมตร ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูพรุนเป็นเมโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล (silica gels), อะลูมินาเจล (alumina gels) และตัวเร่งปฏิกิริยาอะมิโนซิลิเกต (aminosilicate catalyst) เป็นต้น

(3) ไมโครพอร์จะมีขนาดรัศมีรูพรุนน้อยกว่า 1.5 นาโนเมตร ปริมาตร 0.2 - 0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะเป็นจำนวนมากหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัมบางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่การดูดซับและพลังงาน

ดูดซับ (adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มมากขึ้นที่ความดันต่ำๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ซึ่งเชื่อมั่นว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือการกระจายตัวของรูพรุน (pore size distribution) จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ และวิธีการกระตุ้นตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นไมโครพอร์ คือ ซีโอไลต์

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ส่วนมากประกอบด้วยรูพรุนการจัดกระจาย โครงสร้างที่มีทั้งแมโครพอร์ เมโซพอร์ และไมโครพอร์ เรียกว่าโครงสร้างผสม (mixed structure type) พบว่าแมโครพอร์เป็นเพียงทางเปิดสู่ผิวภายนอกอนุภาค โดยมีเมโซพอร์เป็นกิ่งออกมาจากไมโครพอร์อีกทีหนึ่ง โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ในการค้าจะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200-300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีผลต่อความจุในการดูดซับ จะมีประมาณร้อยละ 90-95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าความจุในการดูดซับยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย คือถ้าบริเวณผิวของถ่านกัมมันต์เป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (basal planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ การดูดซับจะเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์หรืออาจเกิดจากไฟอิลิกตรอน แรงยึดเหนี่ยวทั้งสองเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อนแม้ว่าจะดูดซับได้แต่มีโอกาสที่จะหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันการดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรง โอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่า

3) โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์

พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีอะตอมที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับอะตอมอื่นๆได้ เช่นอะตอมของออกซิเจนและไฮโดรเจน ในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ทั้งในกระบวนการคาร์บอนเซชันและการกระตุ้นจะทำให้ธาตุเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไป การที่มีอะตอมของออกซิเจนและไฮโดรเจนนี้ส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากอะตอมเหล่านี้เมื่อรวมตัวกับอะตอมของคาร์บอนโดยเกิดพันธะเคมี จะเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันนอล (functional groups) หมู่ฟังก์ชันนอลที่พบบนผิวถ่านกัมมันต์บ่อยๆ ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันนอลที่เป็นกรด เช่นหมู่ Carboxyl, Phenolic hydroxyl, Quinonoid, Normal lactone, Fluorescein-type lactone และ Carboxylic acid anhydride และอีกกลุ่มคือ หมู่ฟังก์ชันนอลที่เป็นเบส ได้แก่ Quinine, Chromene และ Pyrone-Like นอกจากนี้ในกระบวนการขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ยังเกิดเถ้า ซึ่งเถ้าและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้ายังมีหลากหลายอีกด้วย (Jankowska et al., 1991)

นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมถ่านกัมมันต์ลงในสารละลาย จะทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเปลี่ยนแปลง คือสามารถแสดงความเป็นกรดหรือเบสได้ ถ่านกัมมันต์ที่มีอะตอมของออกซิเจนบนพื้นผิวมากก็จะแสดงความเป็นกรด ซึ่งพื้นผิวที่มีความเป็นกรดนี้จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีอะตอมของออกซิเจนน้อย ก็จะแสดงความเป็นเบส ซึ่งจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบ โครงสร้างทางเคมีโดยทั่วไปของถ่านกัมมันต์

2.3.5.4 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์กับการดูดซับก๊าซหรือไอ

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์กันอย่างแพร่หลาย และยังรวมไปถึงการใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับมลพิษอากาศภายในอาคารอีกด้วย หน้าที่ของถ่านกัมมันต์ในแต่ละโรงงานจะแตกต่างกันไป นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมยังมีการใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อบำบัดมลพิษอากาศอีกด้วย ตัวอย่างเช่น

- (1) ใช้แยกก๊าซโซลีนออกจากก๊าซธรรมชาติ
- (2) ใช้ดูดซับกัมมันต์ภาพรังสีออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์สำหรับหน่วยปฏิบัติการให้การสลายตัวเกิดขึ้นสมบูรณ์ขณะที่ยังถูกจับไว้ในเบตของถ่านกัมมันต์ (activated carbon bed)
- (3) ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่ำ
- (4) กำจัดก๊าซเจือปนออก เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม อะเซทิลีน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ เป็นต้น
- (5) กำจัดกลิ่นจากอากาศ ในเครื่องปรับอากาศ ทำให้กลิ่นเหม็นลดน้อยลง
- (6) ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซพิษ ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้

จากประโยชน์ของถ่านกัมมันต์หลากหลายข้อที่กล่าวไปจะเห็นได้ว่า มีถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการจัดการมลพิษอากาศได้หลากหลายชนิด แต่มลพิษอากาศในอาคารส่วนมากจะมาจากวัสดุตกแต่งอาคารและอุปกรณ์สำนักงาน ซึ่งส่วนใหญ่แล้ววัสดุอุปกรณ์เหล่านี้จะปล่อยสารอินทรีย์ระเหยออกสู่อากาศในอาคาร และสามารถก่ออันตรายต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัยได้

2.4 สารอินทรีย์ระเหย (volatile organic chemicals, VOCs)

สารอินทรีย์ระเหยหรือสารอินทรีย์ระเหยง่าย หรือเรียกทับศัพท์ด้วยย่อ วิโอซี (VOCs) คือกลุ่มสารประกอบอินทรีย์ (organic compounds) ที่จะระเหยเป็นไอได้ ในอุณหภูมิห้องและความดันปกติ (ที่ 293 เคลวิน และ 101 กิโลปาสคาล) แล้วกระจายตัวไปในอากาศ โมเลกุลส่วนใหญ่ของสารอินทรีย์ระเหยจะประกอบด้วย อะตอมของคาร์บอน (C) และอะตอมของไฮโดรเจน (H) เป็นองค์ประกอบหลัก และอาจประกอบด้วยอะตอมของซัลเฟอร์ ฟลูออไรด์ ออกซิเจน โบรไมด์หรือไนโตรเจน ประกอบกับเป็นสารอโรมาติก (aromatic) หรือแอลิฟาติก (aliphatic) สารอินทรีย์ระเหยยังหมายถึงสารกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มแอกซอลอีกด้วย เพราะสารในกลุ่มเหล่านี้สามารถกลายเป็นไอได้ที่ความดันปกติและอุณหภูมิห้อง

2.4.1 ประเภทของสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ระเหยมีสถานะเป็นไอที่อุณหภูมิห้อง โดยสามารถจำแนกเป็น 4 กลุ่มตามความดันไอได้ดังนี้ (1) สารอินทรีย์ระเหยง่าย (very volatile organic compounds: VOCs) คือจะมีความดันไอมากกว่า 15 กิโลปาสคาลและจุดเดือดต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส (2) สารอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds: VOCs) คือจะมีความดันไอมากกว่า 10^{-2} กิโลปาสคาลและมีจุดเดือดอยู่ระหว่าง 30 ถึง 180 องศาเซลเซียส (3) สารอินทรีย์กึ่งระเหย (semivolatile organic compounds) คือจะมีความดันไอในช่วง 10^{-8} ถึง 10^{-2} กิโลปาสคาลและมีจุดเดือดอยู่ระหว่าง 180 ถึง 350 องศาเซลเซียส (4) สารอินทรีย์ที่ไม่ระเหย (nonvolatile organic compounds) คือจะมีความดันไอน้อยกว่า 10^{-8} กิโลปาสคาลและมีจุดเดือดมากกว่า 350 องศาเซลเซียส (จันทร์เพ็ญ, 2546) และสารอินทรีย์ยังสามารถแบ่งตามลักษณะโมเลกุลเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

1) กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล (non-chlorinated VOCs)

โดยส่วนมากแล้วจะเป็นตัวทำลายละลาย ได้แก่ สารประกอบแอลิแฟติก (aliphatic hydrocarbons) เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง (fuel oils), น้ำมันเบนซิน (gasoline), เฮกเซน (hexane), แอลกอฮอล์ (alcohols), อัลดีไฮด์ (aldehydes) และคีโตน (ketone) เป็นต้น ยังรวมถึงกลุ่มสารประกอบอะโรมาติก (aromatic hydrocarbons) เช่น เบนซีน (benzene), โทลูอีน (toluene), สไตรีน (styrene) และฟีนอล (phenol) เป็นต้น และมีอีกกลุ่มดังที่แต่ไว้ในตารางที่ 6 สารอินทรีย์ระเหยกลุ่มนี้มาจากสิ่งแวดล้อม การเผาไหม้ของขยะจำพวกพลาสติก วัสดุสารตัวทำลายและสีทาวัสดุ เป็นต้น เมื่อมนุษย์ได้รับจะส่งผลเสียต่อระบบทางเดินหายใจ

ตารางที่ 6 สารอินทรีย์ระเหยชนิด non chlorinated VOCs

Aliphatic Hydrocarbons	Alcohols, Aldehyde, Ketone	Aromatic Hydrocarbons
fuel oils	ethyl alcohol	benzene
gasoline	formaldehyde	styrene
hexane	methyl alcohol	toluene
1,3-butadiene		naphthalene
industrial solvents		phenol
propane		xylene

2) กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล (chlorinated VOCs)

ได้แก่ สารเคมีที่สังเคราะห์ใช้ในอุตสาหกรรม สารกลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุลนี้จะมีความเป็นพิษมากกว่าสารกลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล และยังมีเสถียรในสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารกลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากโครงสร้างพันธะระหว่างคาร์บอนและธาตุกลุ่มฮาโลเจนมีความทนทานมาก ยากต่อการสลายตัวในธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็นสลายตัวทางชีวภาพ ทางกายภาพและทางวิธีเคมีทั่วไป มีความคงตัวสูงและสะสมอยู่ได้นาน สามารถรบกวนการทำงานของสารพันธุกรรม ส่งผลยับยั้งปฏิกิริยาชีวเคมีในระดับเซลล์และมีฤทธิ์ในการก่อมะเร็งหรือกระตุ้นการเกิดมะเร็งได้ จึงจัดเป็นสารอันตราย ตัวอย่างสารกลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุลมีดังนี้ trichloroethylene, tetrachloroethylene, dichloroethane, bromoform, bromomethane, carbon tetrachloride, chloroethane และ chloropropane เป็นต้น

2.4.2 แหล่งกำเนิดของสารอินทรีย์ระเหยในอาคาร

แหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ (1) แหล่งกำเนิดตามธรรมชาติ (2) แหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติจะเป็นการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยจากกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น ไฟไหม้ป่า ต้นไม้ผลัดใบ ภูเขาไฟระเบิด และการย่อยสลายสารอินทรีย์จากแบคทีเรียในสภาวะไร้ออกซิเจน เป็นต้น ส่วนแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การใช้น้ำมันเชื้อเพลิง การใช้ถ่านหิน การใช้สารละลายในอุตสาหกรรมต่างๆ การกำจัดของเสีย การเผาขยะ การใช้ผลิตภัณฑ์ตามอาคารบ้านเรือน และการเกษตร เป็นต้น โดยส่วนใหญ่แล้วปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นจะมาจากแหล่งกำเนิดที่เป็นกิจกรรมของมนุษย์ เพราะสารอินทรีย์ระเหยถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นสารทำละลาย สารเชื่อมประสาน สารซักแห้ง สารทำความสะอาด น้ำมันเชื้อเพลิง และสี เป็นต้น และยังมีแหล่งกำเนิดที่มาจากการใช้พาหนะในการเดินทาง แหล่งกำเนิดในอาคาร คือ วัสดุอาคาร สีทาอาคาร เฟอร์นิเจอร์ น้ำหอม และอุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้น โดยตารางที่ 7 จะเป็นสารอินทรีย์ระเหยที่พบในผลิตภัณฑ์หรืออุปกรณ์สำนักงานต่างๆ

ตารางที่ 7 สารระเหยอินทรีย์ที่พบบ่อยในอาคารและแหล่งที่พบ (Godish, 2016)

ผลิตภัณฑ์	สารอินทรีย์ระเหยแหล่งที่พบ
ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมจากผลผลิตของปิโตรเลียม เช่น ทินเนอร์ ยาฆ่าแมลง น้ำยาเคลือบสีเฟอร์นิเจอร์	benzene, cyclohexane, ethylbenzene, hexane, toluene, xylene และ 1,2,4-trimethylbenzene
ผลิตภัณฑ์ของใช้ส่วนบุคคล เช่น น้ำหอม น้ำยาล้างเล็บ สเปรย์ฉีดผม	acetone, ethyl alcohol, ethyl acetate และ methacrylates
ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น น้ำยาซักแห้ง น้ำยาขัดคราบ น้ำยาทำความสะอาดเครื่องหนังและขนสัตว์	tetrachloroethen (PERC) และ trichloroethene (TCE)
ผลิตภัณฑ์กำจัดกลิ่น เช่น น้ำมันที่ทำจากส้ม น้ำยาทำความสะอาดจากสับปะรด สารละลายหรือผลิตภัณฑ์ที่มีกลิ่น	isoprene, d-limonene และ a-pinene
ผลิตภัณฑ์ก่อสร้าง เช่น ท่อพีวีซี ซีเมนต์ สารยึดติดต่างๆ	acetone, cyclohexane, hexane, methyl ethyl ketone, tetrahydrofuran, toluene และ 1,1,1-trichloroethane
น้ำยาทำความสะอาดเบรก น้ำมันละลายไขมัน	methylene chloride, PERC, TCE, toluene และ xylene
สารทำความสะอาดของแอร์และตู้แช่	frenos
น้ำยาดับกลิ่น สเปรย์ปรับอากาศ	1,4-dichlorobenzene และ naphthalene
ผลิตภัณฑ์สีสเปรย์ เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์รถยนต์	heptane, butane และ pantane

2.4.3 มาตรฐานและผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหย

ผลกระทบของสารอินทรีย์ระเหยสามารถแบ่งได้เป็น (1) ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยจะเป็นสารตั้งต้นแล้วไปทำปฏิกิริยา NO_x ทำให้เกิดเป็นก๊าซโอโซนและมลพิษต่างๆ ซึ่งเป็นมลพิษอากาศทุติยภูมิ ซึ่งจะทำให้มีความเป็นพิษเพิ่มมากขึ้น และ (2) ผลกระทบต่อสุขภาพของสารอินทรีย์ระเหย แบ่งได้เป็น แบบเฉียบพลัน จะทำให้มีอาการปวดหัว มึนงง อ่อนเพลีย อาเจียน คลื่นไส้ ถ้ารับในปริมาณมาก อาจทำให้เกิดอาการชัก หมดสติ หรืออาจถึงเสียชีวิตได้ ส่วนแบบเรื้อรัง จะทำให้เกิดความผิดปกติต่อระบบประสาทและสมอง ระบบหายใจ ระบบเลือด ระบบสืบพันธุ์ ผิวหนัง ตา ตับ ไต ระบบภูมิคุ้มกัน และสารอินทรีย์ระเหยบางชนิดยังเป็นสารก่อมะเร็งอีก

สำหรับประเทศไทยยังไม่ได้มีการกำหนดกฎหมายของสารอินทรีย์ระเหยในอาคาร มีแต่การกำหนดมาตรฐานสารอินทรีย์ระเหยในบรรยากาศทั่วไป แต่ในต่างประเทศมีการกำหนดมาตรฐานสารอินทรีย์ระเหยแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 8 ที่แสดงค่ามาตรฐานของสารอินทรีย์ระเหยในอาคารและผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายเมื่อได้รับสารอินทรีย์ระเหยแต่ละชนิด

ตารางที่ 8 ค่ามาตรฐานสารอินทรีย์ระเหยในอาคารและผลกระทบต่อสุขภาพ

สารอินทรีย์ระเหย	ค่ามาตรฐาน TLV-TWA (ppm)	ผลกระทบต่อสุขภาพ
benzene	0.5	ทำลายไขกระดูก เม็ดเลือดแดงแตก โรคลิวติจาง โรคทางประสาทส่วนกลาง
carbon tetrachloride	10	ตับเสื่อม ตับแข็ง
chloroform	10	ตับเสื่อม ตับแข็ง ไตเสื่อม หัวใจเต้นผิดจังหวะ ระบายเคืองตาและผิวหนัง
hexane	50	สับสประคายเคือง กดประสาทส่วนกลาง ปวดหัว สับสน อาจหมดสติได้
methyl alcohol	200	ตับเสื่อม กดประสาท ทำให้ตาบอด
methylene chloride	50	สับสประคายเคือง ปอดบวม โรคตับ กดประสาทส่วนกลาง อาจหมดสติและเสียชีวิตได้
trichloroethylene	50	ตับแข็ง ตับเสื่อม ไตเสื่อม
toluene	50	อาการทางระบบประสาทส่วนกลาง
vinyl chloride	5	ทำให้มีนิ้งง หมดสติ สับสประคายเคือง อาจทำให้งอออกที่ตับ
xylene	100	ระคายเคือง โรคผิวหนัง อาการทางระบบประสาทส่วนกลาง

ที่มา: ดัดแปลงจาก ACGIH TLV-TWA (American Conference of Governmental Industrial Hygienist Threshold Limit Values Time-weighted Average) กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

2.4.4 การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยในอาคาร

สารอินทรีย์ระเหยง่ายในอาคารมีสาเหตุมาจาก การระบายอากาศไม่เพียงพอ, มีสารปนเปื้อนอยู่ภายในอาคาร, มลพิษจากภายนอกอาคารและไม่ทราบสาเหตุ โดยคิดเป็น 50, 30, 10

และร้อยละ 10 ตามลำดับ และการจัดการที่ดีที่สุดคือ ไม่ให้สารอินทรีย์ระเหยง่ายปนเปื้อนหรือรั่วซึมออกมา แต่เมื่อเกิดการปนเปื้อนหรือรั่วซึมแล้วก็ต้องมีการจัดการหรือการบำบัด โดยวิธีจัดการหรือการบำบัดมีดังนี้

(1) การระบายอากาศ จากข้อมูลข้างต้น สารอินทรีย์ระเหยง่ายในอาคารเกิดจากการระบายอากาศในอาคารไม่เพียงพอ มากถึงร้อยละ 50 ถ้าอาคารถูกออกแบบให้มีอัตราการระบายอากาศที่ดี หรือมีเครื่องมือกลในการระบายอากาศก็จะทำให้สารอินทรีย์ระเหยในอาคารลดลงได้อย่างมาก

(2) การหลีกเลี่ยงผลิตภัณฑ์หรือกิจกรรม จากข้อมูลข้างต้น สารอินทรีย์ระเหยง่ายในอาคารเกิดจากมีสารปนเปื้อนอยู่ภายในอาคารถึงร้อยละ 30 ดังนั้น ถ้าเราสามารถหลีกเลี่ยงการใช้วัสดุและอุปกรณ์ปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ก็จะทำให้สารอินทรีย์ระเหยง่ายในอาคารลดลงเช่นเดียวกัน วัสดุอุปกรณ์ดังกล่าวควรแยกพื้นที่ออกจากส่วนที่อยู่อาศัยหลัก ควรแยกไปอยู่ในห้องที่มีการระบายอากาศสูง เช่น เครื่องถ่ายเอกสารและเครื่องพิมพ์แบบหมึก ส่วนกิจกรรม ควรมีการกำหนดพื้นที่สำหรับกิจกรรมที่ก่อให้เกิดสารอินทรีย์ระเหย เช่น กำหนดพื้นที่สูบบุหรี่ให้อยู่นอกตัวอาคาร เป็นต้น

(3) การเอจจิ้ง (aging) เป็นการกำจัดหรือลดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่จะปล่อยออกมา ก่อนที่จะนำไปใช้จริง โดยการ เอจจิ้งจะเป็นการทำให้วัสดุหรืออุปกรณ์นั้นปล่อยสารอินทรีย์ระเหยออกมาให้ได้มากที่สุด โดยระยะเวลาในการเอจจิ้งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ระเหย ลักษณะของวัสดุอุปกรณ์ ความดัน อุณหภูมิ และการระบายอากาศ เป็นต้น

(4) การอบ (bake-out) วิธีการอบใช้กับอาคารที่มีการตกแต่งเสร็จแล้ว แต่ยังไม่มีการเข้าใช้งานหรืออยู่อาศัย โดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการระบายอากาศ เพื่อเร่งให้วัสดุอุปกรณ์ปล่อยสารอินทรีย์ระเหยออกมา ก่อนที่จะเข้าไปอยู่อาศัยหรือเข้าไปใช้งานจริง

(5) การใช้สารออกซิไดซ์ เพื่อไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ระเหย โดยสารออกซิไดซ์จะไปปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ระเหย ทำให้สารอินทรีย์ระเหยสลายตัวและหมดสภาพความเป็นพิษ โดยสารออกซิไดซ์ที่ใช้ได้แก่ ก๊าซโอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โพตัสเซียมเปอร์มังกาเนต และไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น

(6) การใช้จุลินทรีย์ ในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหย โดยเป็นการนำจุลินทรีย์หลายชนิดที่สามารถทำปฏิกิริยาชีวเคมีกับสารอินทรีย์ระเหยมารวมกัน โดยเอนไซม์ของแบคทีเรียที่ปล่อยออกมาจะทำให้สารอินทรีย์ระเหยบางชนิดถูกทำลายและหมดสภาพความเป็นพิษได้

(7) การใช้การดูดซับ ในการกำจัดสารอินทรีย์ระเหย โดยมีการนำวัสดุหลากหลายชนิดมาดูดซับสารอินทรีย์ระเหย โดยวัสดุที่นำมาใช้ในการดูดซับมีหลากหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ และต้นไม้ เป็นต้น

2.5 อุตสาหกรรมแหวน

อุตสาหกรรมผลิตแหวนเป็นอุตสาหกรรมแปรรูปเม็ดพลาสติกไปเป็นเส้นใยแล้วทำการถักทอขึ้นรูปแล้วนำไปอบ ย้อม เพื่อให้ได้ความเหนียวและความแข็งแรงตามที่ต้องการ เพื่อผลิตเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับปลา อุตสาหกรรมแหวนเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ประเภท อุตสาหกรรมสิ่งทอ กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมผลิตแหวนจะดำเนินไปได้ต้องอาศัยพลังงานความร้อน โดยทั่วไปแล้วจะใช้ความร้อนจากหม้อต้มน้ำ (boiler) เพื่อเอาไอน้ำร้อน (steam) ไปใช้ในกระบวนการชักใย กระบวนการทอ กระบวนการย้อมและกระบวนการอบ กระบวนการผลิตแหวนจะทำให้เกิดของ

เนื่องจากเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากหม้อต้มน้ำ ทำให้ต้องมีเชื้อเพลิงเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานและเชื้อเพลิงที่ใช้ส่วนมากคือ ถ่านหิน ซึ่งในการเผาไหม้ถ่านหินจะเหลือเถ้าหนักและเถ้าลอย ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียอันตรายเหล่านี้ ซึ่งถือว่าเป็นค่าใช้จ่ายที่มาก เนื่องจากปริมาณการใช้ถ่านหินสูงถึงเฉลี่ยต่อเดือนประมาณ 200 ตัน โดยถ้าประสิทธิภาพของหม้อต้มน้ำอยู่ในระดับสูง มีการกระจายความร้อนดี จะเกิดเถ้าถ่านหินจากการเผาไหม้ถ่านหินประมาณร้อยละ 25 ของปริมาณถ่านหินทั้งหมดที่ใช้ โดยจะเกิดเป็นเถ้าลอยประมาณร้อยละ 15 ของปริมาณถ่านหินทั้งหมด และเป็นถ่านหนักร้อยละ 10 ของปริมาณถ่านหินทั้งหมด ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเป็นปริมาณที่มากและต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการที่สูงเช่นเดียวกัน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การใช้ประโยชน์จากเถ้าหนัก

อิสระกุล และมหัจฉริยวงศ์ (2557 : บทคัดย่อ) ศึกษาเถ้าแกลบและเถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ นำผสมเป็นสารเสริมความแข็งแรง ร่วมกับดินเซรามิกในการผลิตกระเบื้องเซรามิกเพื่อศึกษา คุณลักษณะและลดการใช้พลังงานในการเผา กระเบื้องเซรามิกที่ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอยลิกไนต์ใน อัตราส่วนร้อยละ 10 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ผสมกับดินสูตร W03 แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกส์ที่ 200 bar แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 900 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส เมื่อตรวจสอบทางกายภาพและเชิงกลพบว่า กระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 21.60-59.16 และค่าโมดูลัสการแตกร้าว 2.05-48.76 กิโลกรัมฟุตต่อตารางเซนติเมตร กระเบื้องเซรามิกที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยลิกไนต์มีการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 2.18-23.70 และค่าโมดูลัสการแตกร้าว 10.00-178.74 กิโลกรัมฟุตต่อตารางเซนติเมตร ส่วนผสมของเถ้าทั้งสองชนิดเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่าโมดูลัสการแตกร้าวต่ำลง อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ เถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 50 และเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่า

การดูดซึมน้ำร้อยละ 15.93 ต่ำกว่ากระเบื้องเซรามิกทั่วไป และมีค่าโมดูลัสการแตกร้าว 96.29 กิโลกรัมฟุตต่อตารางเซนติเมตรสูงกว่ากระเบื้องเซรามิกทั่วไป

คุณยัย (2556 : บทคัดย่อ) การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองใช้วัสดุทดแทนเนื้อดินเพื่อทำเซรามิกหอม โดยใช้กากดินขาวทดแทนทราย และเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของเนื้อดินหลังเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ใช้วัตถุดิบ 3 ชนิดคือ ดินขาวลำปาง โปแตชเฟลด์สปาร์ และกากดินขาว มาคำนวณได้อัตราส่วนผสม 36 แบบ นำส่วนผสมมาบดผสมและเผาที่อุณหภูมิสูงสุด 1200 องศาเซลเซียส บรรยากาศ ออกซิเดชันด้วยเตาไฟฟ้า จากการวิจัยพบว่า เนื้อดินที่สามารถขึ้นรูปได้มี 28 อัตราส่วนผสม และทดสอบสมบัติทางกายภาพ 3 ด้าน คือ การหดตัว การดูดซึมน้ำและความแข็งแรง จากการทดสอบทางกายภาพ ได้คัดเลือกเนื้อดินที่มีอัตราการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 20 ได้ 9 อัตรา จากนั้นมาทดสอบสมบัติทางกายภาพเพิ่ม 2 ด้าน คือ ระยะเวลาดูดและอัตราการระเหย โดยใช้เวลาทดสอบต่อเนื่อง 7 ชั่วโมง พบว่าเนื้อดิน อัตราส่วนผสมที่ 6 และ 13 ซึ่งมีกากดินขาวเป็นส่วนผสมในช่วงร้อยละ 30-40 มีระยะเวลาดูดเฉลี่ยร้อยละ 75.83 มีอัตราการระเหยเฉลี่ย 0.77 กรัม โดยจากน้ำหนักเริ่มต้น 1 กรัม ในเวลา 7 ชั่วโมง โดยผลการทดสอบมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิห้อง จึงสามารถสรุปผลได้ว่าการใช้กากดินขาว ในการทดลองทำเนื้อดินเพื่อทำเซรามิกหอม ในช่วงร้อยละ 30-40 สามารถใช้ทดแทนทรายได้

หมักหมั่น และคณะ (2556 : บทคัดย่อ) ศึกษาการใช้ซีโอไลต์และผงหินชนวนเป็นวัตถุดิบในการผลิตเนื้อกระเบื้องเซรามิก หินชนวนแทนที่ซีโอไลต์ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ภายใต้ความชื้นที่เหมาะสมในแต่ละอัตราส่วน ซึ่งวัตถุดิบทั้งหมดขึ้นรูปด้วย แรงอัดไฮดรอลิก 100 บาร์ หมักไว้ 8 ชั่วโมง แล้วอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ก่อนเผา ในเตาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างกันคือ 1,100, 1,150 และ 1,200 องศาเซลเซียส ผลทดสอบพบว่าความหนาแน่นรวม ได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณหินชนวนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมหินชนวนลงไปได้ปรับปรุงให้สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของกระเบื้องเซรามิกซีโอไลต์ดีขึ้น โดยเฉพาะกระเบื้องผสมผงหินชนวนร้อยละ 30 โดยน้ำหนักและอุณหภูมิเผาที่ 1,200 องศาเซลเซียส ทำให้กระเบื้องดูดซึมน้ำสุดคือร้อยละ 9.3 และที่เติมหินชนวนร้อยละ 10 กำลังตัดมีค่าสูงสุด 88.27 เมกะพาสคัล ซึ่งกระเบื้องทุกส่วนผสม และทุกอุณหภูมิเผาผ่าน มาตรฐาน มอก. 37-2529 สำหรับกระเบื้องปูพื้น ประเภทดูดซึมน้ำสูง

Tonnayopas และคณะ (2009 : บทคัดย่อ) ศึกษาการทำกระเบื้องปูพื้นโดยใช้เศษหินแกรนิตและเถ้าปาล์ม โดยได้นำวัตถุดิบทั้งสองมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ผ่านเกรดโรงงานอุตสาหกรรมทั้งเรื่องสารตกค้างและอุณหภูมิในการเผา เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมที่สุด ทั้งความชื้นและอุณหภูมิในการเผา โดยเผาในสภาวะปิดภายใต้เงื่อนไขห้องปฏิบัติการ โดยใช้อุณหภูมิในการเผาสูงสุด 1,140 ถึง 1,180 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 20 องศาเซลเซียส กระเบื้องปูพื้นที่ได้จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและความร้อน เช่น สี, การดูดซึมน้ำ, การหดตัวและความหนาแน่น

นอกจากนี้ยังทำการตรวจวัด XRF, XRD และ TGA ทั้งก่อนและหลังการเผา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระเบื้องปูพื้นมีคุณสมบัติเป็นไปตามมอก 37-2529

Eliche-Quesada & Leite-Costa, 2016 : บทคัดย่อ) ศึกษาการทำอิฐเหนียวโดยใช้เถ้ามะกอกที่เหลือจากกระบวนการสกัดเอาน้ำมันออกแล้วนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิง เเผาที่ได้นำมาบดแล้วนำไปผสมกับดินเหนียวร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก อิฐที่ผสมเถ้ามะกอกตั้งแต่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักขึ้นไปใช้ไม่ได้ เนื่องจากการดูดซึมน้ำและกำลังอัดไม่ได้มาตรฐาน ส่วนอิฐที่ผสมเถ้ามะกอกร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ผ่านมาตรฐานของอิฐดินเหนียว โดยที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่นและกำลังอัด 1,635 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 33.5 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่นและกำลังอัด 1,527 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 14.2 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งอิฐที่ผสมเถ้ามะกอกทั้งร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก เป็นฉนวนกันความร้อนได้ดีกว่า อิฐมาตรฐานร้อยละ 14.4 และ 16.8 ตามลำดับ

2.6.2 การกำจัดสารอินทรีย์ระเหยในอากาศ

สุทธินันท์ไชย (2549 : บทคัดย่อ) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของแผ่นกรองผงถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมดในอากาศจากกันชนรถยนต์ โดยการทำการศึกษาในแบบระบบระบายอากาศเฉพาะที่ ใช้แผ่นกรองผงถ่านกัมมันต์ที่มีความหนา 0.5 1 และ 1.5 นิ้วในการดูดซับ ทำซ้ำความหนาละ 5 ซ้ำ รวมเป็น 15 ตัวอย่าง ใช้เครื่องในการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมด และใช้เวลาในการตรวจวัดตัวอย่างละ 15 นาที ผลที่ได้มีดังนี้ ประสิทธิภาพของแผ่นกรองผงถ่านกัมมันต์ที่มีความหนา 0.5, 1 และ 1.5 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยเท่ากับร้อยละ 56.84, 70.23 และ 73.68 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความหนาของแผ่นกรองผงถ่านกัมมันต์มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย

สมดี (2555 : บทคัดย่อ) ศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมด โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากมูลโคและแผ่นใยแก้วที่เคลือบไทเทเนียมไดออกไซด์ ทดลองในห้องจำลองขนาด 3.0 x 6.0 x 2.8 เมตร โดยชุดการทดลองที่ 1 ใช้ถ่านกัมมันต์มูลโคปริมาณ 200, 250 และ 300 กรัม โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมดเท่ากับ 580, 660 และ 850 พีพีเอ็ม จากผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์จากมูลโคปริมาณ 300 กรัมมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุดคือร้อยละ 87.69, 84.22 และ 80.27 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมดเท่ากับ 580, 660 และ 850 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ภายในเวลาสัมผัส 240 นาที ส่วนชุดการทดลองที่ 2 ใช้แผ่นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 15, 20 และ 25 กรัม โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมดเท่ากับ 580, 660 และ 850 พีพีเอ็ม จากผลการทดลองพบว่า แผ่นใยแก้วที่เคลือบด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 20 กรัมมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงที่สุดคือร้อยละ 86.58, 79.54

และ 68.20 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ระเหยทั้งหมดเท่ากับ 580, 660 และ 850 พีพีเอ็ม ตามลำดับ

ธนบูรณ์กาญจน์ (2556 : บทคัดย่อ) ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอระเหยของเฮกเซน ไชโคลเฮกเซน เอทิล อะซิเตท และบิวทิลอะซิเตท ภายในคอลัมน์ โดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมจากของเสียอุตสาหกรรมการผลิตเส้นใยเรยอนได้แก่ เส้นใยเรยอนและเกลือโซเดียมซัลเฟต กับเส้นใยุ่นโดยการใส่กรดฟอสฟอริกแทนกรดซัลฟิวริกและหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุดูดซับ นำวัสดุดูดซับที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมี โดยปัจจัยทางกายภาพได้แก่ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่พาไอระเหยเข้าสู่ระบบที่ 2, 6 และ 10 ลิตรต่อชั่วโมง ปริมาณวัสดุดูดซับ 1, 3 และ 5 กรัม และรูปแบบการจัดเรียงคอลัมน์ของ วัสดุดูดซับเรยอน วัสดุดูดซับุ่น วัสดุดูดซับผสมเรยอนกับวัสดุดูดซับุ่น และวัสดุดูดซับเรยอนสลับชั้นกับวัสดุดูดซับุ่น ในอัตราส่วนเส้นใยเรยอนต่อเส้นใยุ่นเท่ากับ 1:0, 0:1, 1:1 และ 1:1 ตามลำดับ และศึกษาปัจจัยทางเคมีที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ มวลโมเลกุล ความมีขี้/ไม่มีขี้ ลักษณะโครงสร้างและค่าความดันไอ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างวัสดุดูดซับที่เตรียมกับวัสดุดูดซับทางการค้าโพลีโพรไพลีน ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก คือความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุดูดซับ อัตราการไหลที่เหมาะสมกับระบบดูดซับคือ 2 ลิตรต่ออนาที และวัสดุดูดซับปริมาณ 3 กรัม ผลการศึกษาพบว่าวัสดุดูดซับ เส้นใยุ่น, วัสดุดูดซับแบบสลับ, เส้นใยผสม และเส้นใยเรยอน มีประสิทธิภาพการดูดซับไอระเหยเฮกเซน ไชโคลเฮกเซน เอทิล อะซิเตท และบิวทิลอะซิเตท ได้สูงสุดตามลำดับ และพบว่าโพลีโพรไพลีนมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารไม่มีขี้สูงกว่าวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้นแต่ประสิทธิภาพในการดูดซับสารมีขี้มีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับที่เตรียมขึ้น

Yuso et al. (2013 : บทคัดย่อ) ศึกษาความสามารถในการดูดซับและการคายการดูดซับของสารอินทรีย์ระเหย โดยสารอินทรีย์ระเหยที่ใช้คือโทลูอินกับเฮกเซน ตัวดูดซับที่นำมาใช้คือถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกอัลมอน โดยจะเปลี่ยนกระบวนการผลิตให้ต่างกันคือ มีการปรับอุณหภูมิในช่วง 400–800 องศาเซลเซียส เวลาในการเผา 30–130 นาที และปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นอยู่ในสัดส่วน 0.5–1.5 ผลจากการศึกษาพบว่า ความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยที่ความเข้มข้น 500 พีพีเอ็ม ได้ความสามารถในการดูดซับโทลูอินเท่ากับ 253 มิลลิกรัมโทลูอินต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ และได้ความสามารถในการดูดซับเฮกเซนเท่ากับ 122 มิลลิกรัมเฮกเซนต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ และยังพบอีกว่าเวลาในการเข้าสู่จุดสมดุลของปฏิกิริยาการดูดซับจะลดลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารอินทรีย์ระเหย อัตราการไหลของก๊าซก็มีผลต่อเวลาในการเข้าสู่สมดุลคือ เมื่ออัตราการไหลมากขึ้น เวลาในการเข้าสู่สมดุลจะน้อยลง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น การผลิตเซรามิกผสมเถ้าหนักโดยการศึกษาประกอบด้วยการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเซรามิก และการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิก วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ ดินเหนียวและเถ้าถ่านหินก้นเตา จากนั้นนำเซรามิกที่ผลิตได้มาทดสอบความสามารถของเซรามิกในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย รายละเอียดวัตถุประสงค์และวิธีการทดลองมีดังต่อไปนี้

3.1 วัตถุประสงค์และการเตรียมวัตถุดิบ

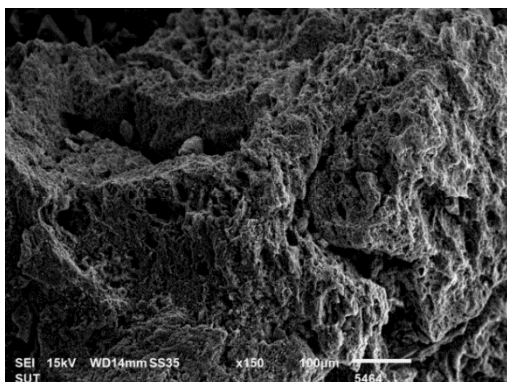
3.1.1 วัตถุดิบ

1) เถ้าถ่านหินก้นเตาหรือเถ้าหนัก

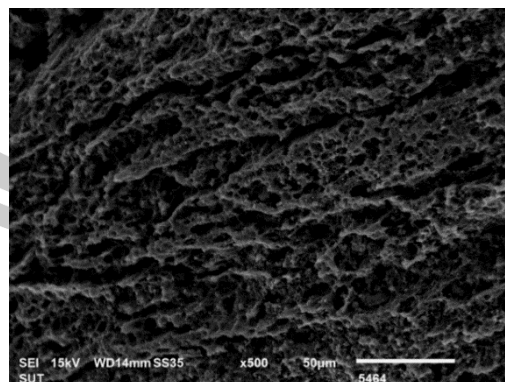
เถ้าหนักที่นำมาใช้ผลิตวัสดุเซรามิกเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัส จากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตแหวน ซึ่งใช้ถ่านหินบิทูมินัสเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ของหม้อต้มไอน้ำ เถ้าหนักที่นำมาใช้มีลักษณะทางกายภาพดังภาพประกอบที่ 10 คือเป็นสีดำ มีสีน้ำตาลเงินปนเล็กน้อย มีลักษณะแข็งแต่เปราะ น้ำหนักเบาและมีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ เมื่อทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายกำลังขยายสูง Scanning electron microscope (SEM) (JSM-6010, JEOL, USA) เพื่อดูภาพถ่ายพื้นผิวของเถ้าหนักก่อนอบได้ผลตามภาพประกอบที่ 10



ภาพประกอบที่ 10 ลักษณะทางกายภาพของเถ้าหนัก



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 11 ภาพถ่ายเอ้าท์ไลน์จาก SEM (ก) กำลังขยาย 150 เท่า (ข) กำลังขยาย 500 เท่า

จากภาพประกอบที่ 11 แสดงให้เห็นว่าเอ้าท์ไลน์ที่นำมาใช้ มีความพรุนตลอดทั่วทั้งพื้นที่ผิว ซึ่งจะทำให้วัสดุเซรามิก จากดินเหนียวที่ผสมเอ้าท์ไลน์มีความพรุนสูง น้ำหนักเบา และเหมาะกับการดูดซับมลพิษ และเมื่อนำเอ้าท์ไลน์ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ X-ray fluorescence (XRF) (AXIOS MAX, Netherlands) มีองค์ประกอบเคมีตามตารางที่ 9 สังเกตได้ว่ามีองค์ประกอบของซิลิกาอยู่มากถึงประมาณร้อยละ 58 ซึ่งเหมาะกับการเติมลงไปเพื่อผลิตวัสดุเซรามิกจากดิน เพราะโดยส่วนใหญ่ในการผลิตวัสดุเซรามิกจากดินจะมีการเติมซิลิกาอิสระเพิ่มลงไป และจากตารางที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุของเอ้าท์ไลน์ด้วยวิธี EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) จะเห็นว่ามีการคาร์บอนมากถึงร้อยละ 40 ซึ่งวัสดุที่มีการคาร์บอนสูงอาจสามารถเพิ่มคุณสมบัติเซรามิกดินในการดูดซับสารมลพิษอากาศ เหมาะกับการผลิตเซรามิกเพื่อใช้ประโยชน์เป็นวัสดุดูดซับร่วมด้วย

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของเอ้าท์ไลน์

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
SiO ₂	58.91
Al ₂ O ₃	16.44
CaO	10.20
Fe ₂ O ₃	8.11
K ₂ O	1.18
SO ₃	0.21
Others	4.95

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ธาตุของเถ้าหนัก

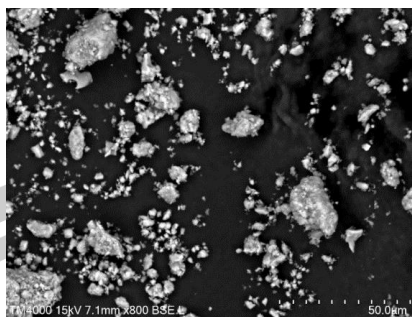
องค์ประกอบธาตุ	ปริมาณ (ร้อยละ)
	เถ้าหนัก
O	45.45
C	33.94
Si	13.79
Al	5.49
Fe	1.01
K	0.32
Others	0.00

2) ดินเหนียว

ดินเหนียวที่นำมาใช้ในการทดลองจะเป็นดินเหนียวจากบ้านหม้อ อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม มีลักษณะเป็นก้อน สีน้ำตาลปนดำ เมื่อนำไปอบไล่ความชื้นแล้วมีสีน้ำตาล ดังแสดงในภาพประกอบที่ 12 โดยดินเหนียวที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ชุด คือ ดินเหนียวที่ได้มาในช่วงปี 2559 (ดินเหนียวชุดที่ 1) และดินเหนียวที่ได้มาในช่วงปี 2561 (ดินเหนียวชุดที่ 2) ภาพประกอบที่ 13 ทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายกำลังขยายสูงเพื่อดูภาพถ่ายพื้นที่ผิวของดินเหนียวหลังบดได้ผลตามภาพประกอบที่ 13



ภาพประกอบที่ 12 ลักษณะของดินเหนียวที่ใช้ทดลอง



ภาพประกอบที่ 13 ภาพถ่ายดินเหนียวจาก SEM กำลังขยาย 800 เท่า

ดินเหนียวชุดที่ 1

ใช้ในการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเซรามิก โดยใช้ขนาดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 50 (เล็กกว่า 300 ไมครอน) จากตารางที่ 11 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุของดินเหนียวชุดที่ 1 จะเห็นว่ามีองค์ประกอบของธาตุคล้ายคลึงกับของถ่านหิน แต่มีธาตุออกซิเจนน้อยกว่าของถ่านหินอย่างชัดเจน เมื่อนำดินเหนียวชุดที่ 1 ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุมีองค์ประกอบเคมีตามตารางที่ 12

ดินเหนียวชุดที่ 2

จะใช้ในการทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิกและการทดสอบความสามารถของเซรามิกในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย โดยจะใช้ขนาดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (เล็กกว่า 150 ไมครอน) เมื่อนำดินเหนียวชุดที่ 2 ไปวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุและองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุมีองค์ประกอบเคมีตามตารางที่ 11 และ 12

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ธาตุของดินเหนียวชุดที่ 1 และดินเหนียวชุดที่ 2

องค์ประกอบธาตุ	ปริมาณ (ร้อยละ)	
	ดินเหนียวชุดที่ 1	ดินเหนียวชุดที่ 2
C	36.47	39.81
O	36.91	27.65
Si	15.59	12.93
Al	2.47	6.64
Fe	1.26	2.63
K	0.30	0.43
Others	7.00	9.91

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของดินเหนียวชุดที่ 1 และดินเหนียวชุดที่ 2

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)	
	ดินเหนียวชุดที่ 1	ดินเหนียวชุดที่ 2
SiO ₂	69.28	52.82
Al ₂ O ₃	14.88	9.57
Fe ₂ O ₃	9.07	26.44
K ₂ O	1.65	2.15
CaO	0.87	1.29
Others	4.25	7.73

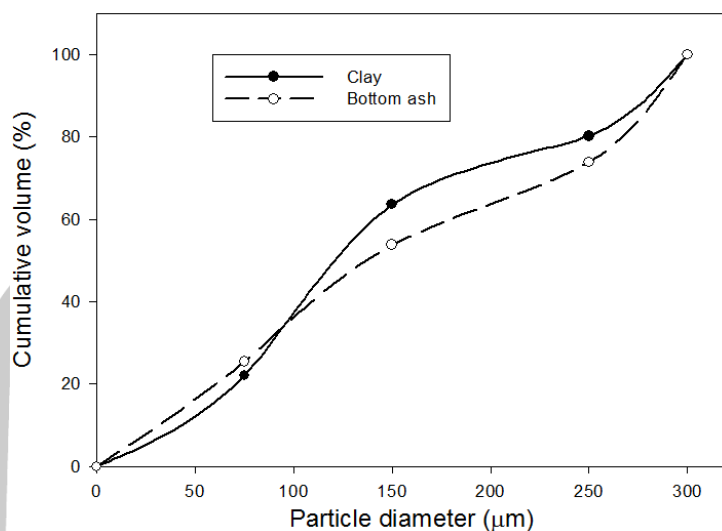
3.1.2 การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีตามชุดการทดลอง คือ 1. ใช้สำหรับการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเซรามิก 2. ใช้สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิก ซึ่งเงื่อนไขสำหรับทั้ง 2 กรณีเป็นเงื่อนไขจากสถานที่และเวลาเดียวกัน แต่ดินเหนียวเป็นดินเหนียวจากสถานที่เดียวกันแต่เวลาต่างกันเนื่องจากดินเหนียวชุดที่ 1 ถูกใช้จนหมด จึงต้องมีการไปเอาเพิ่มจากแหล่งเดียวกัน

1) การเตรียมวัตถุดิบใช้สำหรับการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเซรามิก

นำดินเหนียวและเถ้าหมักมาอบไล่ความชื้นก่อนโดยใช้อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ง่ายต่อการบดและควบคุมความชื้นของวัสดุเซรามิกก่อนการผสม จากนั้นนำไปบดป่นโดยเครื่องปั่นดิน แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ให้ได้ขนาดเล็กกว่า 300 ไมครอน ได้กราฟขนาดการกระจายตัวของดินเหนียวและเถ้าหมักตามภาพประกอบที่ 14

พูน ปณ ทิโต ชีเว



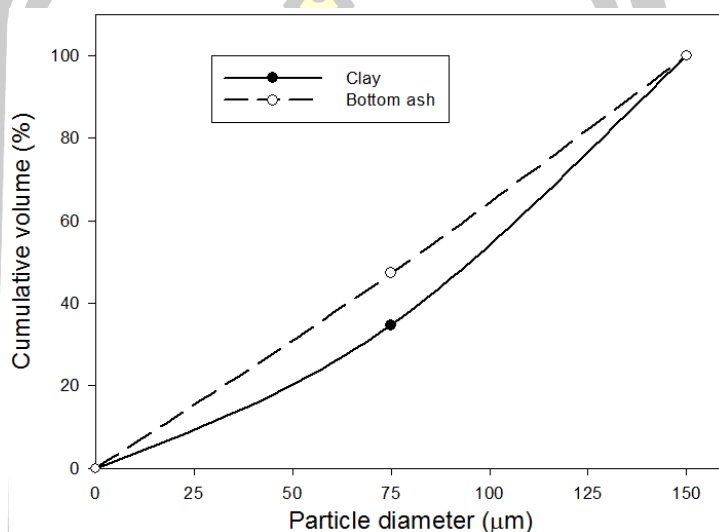
ภาพประกอบที่ 14 ขนาดการกระจายตัวของดินเหนียวและเถ้าหนักเมื่อผ่านตะแกรงเบอร์ 50

2) การเตรียมวัตถุดิบใช้สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิก นำดินเหนียวและเถ้าหนักมาอบไล่ความชื้นก่อนโดยใช้อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ง่ายต่อการบดและควบคุมความชื้นของวัสดุเซรามิกก่อนการผสม จากนั้นนำไปบดป่นโดยเครื่องบดดิน แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ให้ได้ขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอน ภาพประกอบที่ 15 แสดงลักษณะของดินเหนียวและเถ้าหนักที่ร่อนผ่านตะแกรง โดยผงดินเหนียวมีลักษณะสีน้ำตาลเทา ส่วนเถ้าหนักมีลักษณะสีดำ



ภาพประกอบที่ 15 ลักษณะของวัตถุดิบหลังผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (ก) ดินเหนียว และ (ข) เถ้าหนัก

จากภาพประกอบที่ 14 และ 16 สังเกตได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นแสดงถึงความแตกต่างกันระหว่างขนาดของดินเหนียวและเถ้าหนัก โดยในภาพประกอบที่ 14 มีความแตกต่างกัน 2 ช่วงช่วงที่มีความแตกต่างกันมากคือ 150 ไมครอน ดังนั้นในการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิกจึงเลือกใช้วัสดุดิบที่มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอนเพื่อเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกันให้กับเซรามิกที่ผลิต



ภาพประกอบที่ 16 ขนาดการกระจายตัวของดินเหนียวและเถ้าหนักเมื่อผ่านตะแกรงเบอร์ 100

3.2 การทดสอบสมบัติเซรามิก

งานวิจัยนี้ใช้การทดสอบเซรามิกเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลตามมาตรฐานการทดสอบดังนี้

3.2.1 การแตกร้าว (Cracks)

ตามมาตรฐานวิธีการทดสอบกระเบื้องเซรามิก มอก.2398 เล่ม 2 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2553) รอยแตกร้าว หัวข้อวิธีตรวจสอบมิติและคุณภาพผิวหน้า ระบุการทดสอบรอยร้าวซึ่งมีการทดสอบหลายปัจจัย แต่ผู้วิจัยสนใจเพียงให้ขึ้นรูปและนำไปใช้ประโยชน์จริงได้ ดังนั้นจึงเลือกการทดสอบด้วยการสังเกตด้วยตาเปล่า โดยทำการทดสอบซ้ำ 3 ตัวอย่าง

3.2.2 การหดตัวเชิงเส้น (Linear shrinkage)

การหดตัวเชิงเส้นเป็นการวัดความยาวของชิ้นงานก่อนเข้าเตาเผา (L_1) และหลังจากเผาเสร็จแล้ว (L_2) ตามมาตรฐานวิธีทดสอบกระเบื้องเซรามิก มอก.2398 เล่ม 2 (สำนักงานมาตรฐาน

ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2553) ทำการทดสอบซ้ำ 3 ตัวอย่าง ทำการวัดความยาวด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ สามารถคำนวณร้อยละการหดตัวเชิงเส้นได้ตามสมการ 8

$$\text{การหดตัวเชิงเส้น(ร้อยละ)} = \left(\frac{L_1 - L_2}{L_1} \right) \times 100 \quad (8)$$

3.2.3 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

การดูดซึมน้ำใช้การชั่งน้ำหนักแห้งและน้ำหนักอิมมัตว ตามมาตรฐานวิธีทดสอบของ มอก. 2398 เล่ม 3 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2553) ทำการทดสอบซ้ำ 2 ตัวอย่าง ทำการทดสอบโดยนำตัวอย่างชิ้นงานไปอบไล่ความชื้น 103 ถึง 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำตัวอย่างชิ้นงานที่เย็นแล้วไปชั่งน้ำหนัก (m_1) จากนั้นนำตัวอย่างชิ้นงานที่เย็นแล้วไปแช่น้ำ 24 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นมาเช็ดผิวด้วยผ้าซามัวร์ แล้วชั่งน้ำหนักทันที (m_2) สามารถการคำนวณร้อยละการดูดซึมน้ำได้ตามสมการ 9

$$\text{การดูดซึมน้ำ(ร้อยละ)} = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \times 100 \quad (9)$$

3.2.4 กำลังรับแรงกดอัด (Compressive strength)

กำลังรับแรงกดอัดใช้เครื่องกด (TS501-100, Narin instrument, Thailand) ตามภาพประกอบที่ 17 ในการทดสอบ ตามวิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C67-17 (American Society for Testing and Materials, 2017) ทำการทดสอบโดยวัดความยาวของชิ้นงาน (L หน่วย มิลลิเมตร) และความกว้าง (B หน่วย มิลลิเมตร) นำวัสดุเซรามิกวางไว้บนแผ่นรองรับของเครื่องกด ใช้หัวกดลักษณะกลมกดลงมาที่วัสดุเซรามิกจนแตกหัก บันทึกค่ากำลังกดที่วัดได้ (F หน่วย นิวตัน) สามารถคำนวณกำลังรับแรงอัดได้ตามสมการ 10

$$\text{กำลังรับแรงกดอัด (MPa)} = \left(\frac{F}{B \times L} \right) \quad (10)$$

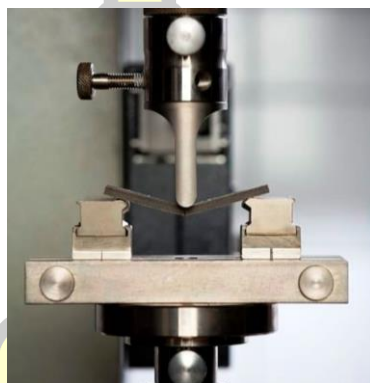


ภาพประกอบที่ 17 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงกดอัดและความต้านแรงกดแตก

3.2.5 ความต้านแรงกดแตก (Fracture toughness)

ความต้านแรงกดแตก ใช้เครื่องกด (TS501-100, Narin instrument, Thailand) ในการทดสอบ ตามวิธีทดสอบตามมาตรฐาน มอก.2398 เล่ม 4 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2553) ทำการทดสอบโดยวัดความยาวของชิ้นงาน (L หน่วย มิลลิเมตร) และความกว้าง (B หน่วย มิลลิเมตร) นำชิ้นงานวางไว้บนแผ่นรองรับทรงกระบอก วางในลักษณะให้ปลายชิ้นงานอยู่บริเวณปลายแผ่นรองรับทรงกระบอกทั้งสองข้าง ใช้หัวกดลักษณะทรงกระบอกตามภาพประกอบที่ 18 กดลงมาที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานจนแตก บันทึกค่ากำลังกดที่วัดได้ (F หน่วย นิวตัน) สามารถคำนวณความต้านทานแรงกดแตกได้ตามสมการ 11

$$\text{ความต้านแรงกดแตก (N)} = \left(\frac{FxL}{B} \right) \quad (11)$$



ภาพประกอบที่ 18 ลักษณะการทดสอบความต้านแรงกดแตก

3.2.6 การทดสอบชะของโลหะหนัก

เนื่องจากเจ้าหน้าที่เป็นของเสียอันตรายเพราะมีโลหะหนักปนเปื้อน ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการนำไปใช้ประโยชน์ จึงทำการทดสอบการชะของโลหะสำหรับชิ้นงานเซรามิกที่ผลิตขึ้น ผู้วิจัยได้เลือกชิ้นงานที่ผสมแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 เฟอร์ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส มาทดสอบการชะโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู ตะกั่ว พรอท แคดเมียม ซีลีเนียม แบเรียม โครเมียม ทองแดง และสังกะสี โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการชะโลหะหนักสำหรับของเสียอันตรายที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกากำหนด (United States Environmental Protection Agency, 1992) และตามเกณฑ์ของการตรวจสอบน้ำที่ชะออกจากหลุมฝังกลบขยะอันตราย ของสำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2548)

3.3 การตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานวิทยาพื้นผิวของเซรามิก

การตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานวิทยาพื้นผิวของเซรามิกมีจุดประสงค์เพื่อประกอบการวิเคราะห์ร่วมกับผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและการกลของเซรามิก และความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหย วิธีการตรวจวัดประกอบด้วย

3.3.1 X-ray diffractometer (XRD)

เป็นการทดสอบโดยอาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อไปกระทบที่ชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆกันโดยมีห้วงสัญญาณเป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะม้องศาในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่างและลักษณะผลึก ข้อมูลที่ได้มีลักษณะเป็นกราฟเรียกว่าดิฟแฟรกโตแกรม โดยดิฟแฟรกโตแกรมที่ได้สามารถนำมาเปรียบเทียบองค์ประกอบและผลึกได้

- เครื่องมือและอุปกรณ์ เครื่องวิเคราะห์ X-ray diffractometer รุ่น D8 ADVANCE, BRUKER (Thailand) ตามภาพประกอบที่ 19



ภาพประกอบที่ 19 เครื่องวิเคราะห์ X-ray diffractometer

3.3.2 BET surface area pore size and pore volume distribution analyzer

เป็นหลักการวิเคราะห์เพื่อหาพื้นที่ผิวจำเพาะ ใช้หลักการดูดซับก๊าซบนพื้นที่ผิวของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยคิดว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิว ข้อมูลที่ได้มีลักษณะกราฟขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนและปริมาตรของรูพรุน

- เครื่องมือและอุปกรณ์ เครื่องวิเคราะห์ BET (Belsorp mini II, MicrotracBel Corp., Japan)

3.4 การผลิตเซรามิกผสมเถ้าหนัก

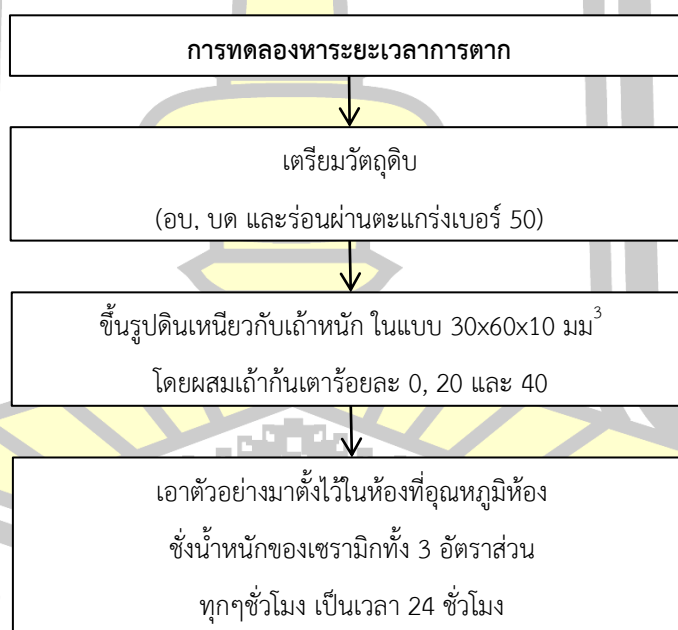
การผลิตเซรามิกผสมเถ้าหนักแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ชุดการทดลอง คือ การทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเซรามิก และการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิก

3.4.1 การทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเซรามิก

การทดลองนี้ประกอบด้วยการศึกษาหาค่าหรือช่วงที่เหมาะสมของ ระยะเวลาตากตัวอย่าง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในการเผา และอุณหภูมิสุดท้าย (อุณหภูมิสูงสุด) และระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย

3.4.1.1 ระยะเวลาการตาก (Drying time)

เนื่องจากความชื้นในตัวอย่างของส่วนผสมก่อนเผามีผลต่อการหดตัวและการแตกร้าวของผลิตภัณฑ์วัสดุเซรามิกที่ได้ จึงจำเป็นต้องทราบระยะเวลาการตากเพื่อให้ส่วนผสมมีการคายน้ำก่อนนำเข้าเตาเผา โดยขั้นตอนกระบวนการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 20



ภาพประกอบที่ 20 ผังการทดลองหาระยะเวลาการตาก

ขั้นตอนการทดลอง

(1) เตรียมดินเหนียวและเถ้าหนัก โดยการนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำวัตถุดิบทั้งสองที่อบไล่ความชื้นเสร็จแล้วมาเข้าเครื่องปั่นดิน เพื่อให้เป็นผง แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50

(2) นำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาผสมในอัตราผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใส่เถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมน้ำให้ได้ความชื้นร้อยละ 15-20 แล้วผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำตัวอย่างอัดใส่แบบอะคริลิกขนาด 30x60x10 มิลลิเมตร ที่มีการติดไว้นิลเพื่อป้องกันการเกาะติดกันของแบบกับส่วนผสม

(3) นำตัวอย่างที่ขึ้นรูปเสร็จแล้วมาตากไว้ในห้อง แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุกๆ ชั่วโมงเป็นเวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง

(4) คำนวณผลต่างของน้ำหนักเซรามิกในแต่ละชั่วโมงจากสมการ 12 โดย m_1 คือน้ำหนักตัวอย่างเวลาที่ t_1 และ m_2 คือน้ำหนักตัวอย่างเวลาที่ $t_1 + 1$ ชั่วโมง

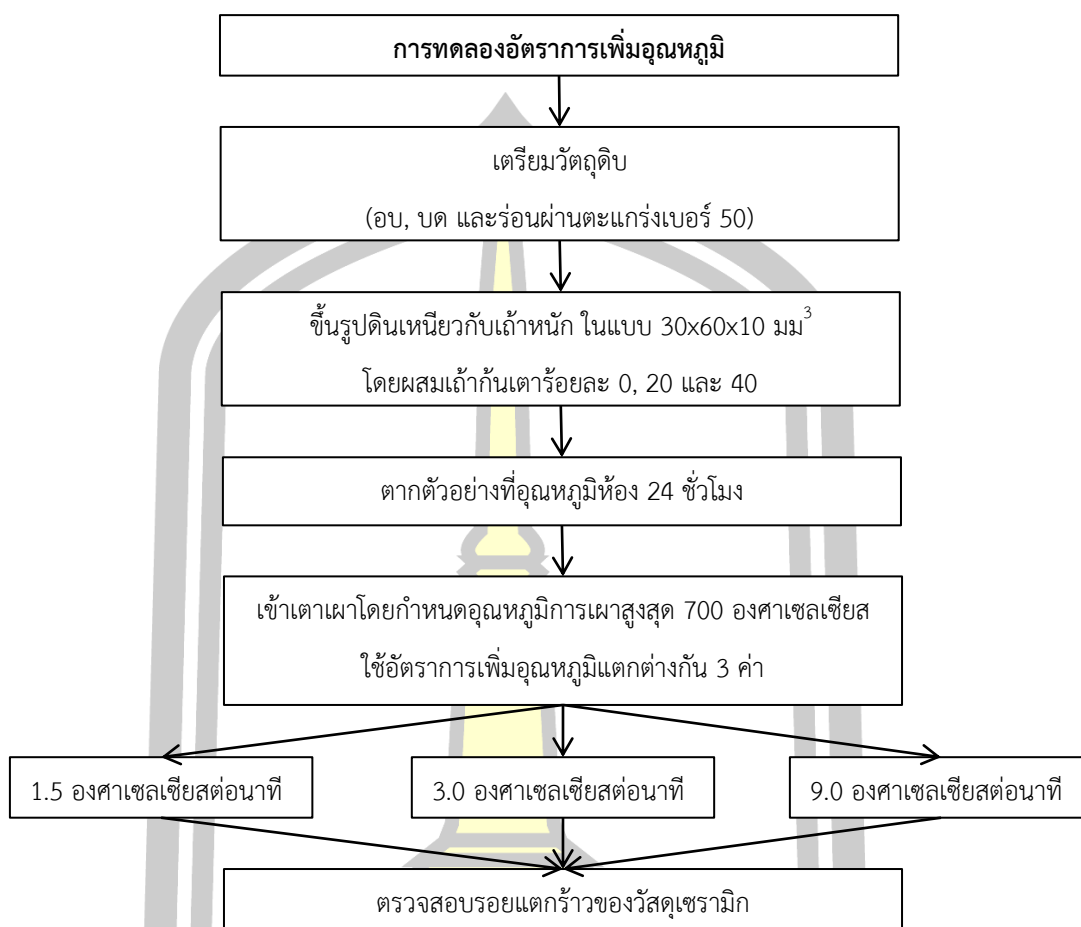
$$\text{ผลต่างน้ำหนักเซรามิก(\%)} = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) \times 100 \quad (12)$$

(5) สร้างกราฟจากร้อยละผลต่างของน้ำหนักเซรามิกในแต่ละชั่วโมง

3.4.1.2 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ

เนื่องจากการเผาตัวอย่างเพื่อผลิตเซรามิก จำเป็นต้องทราบอัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเผาที่เหมาะสมเพราะถ้าเพิ่มอุณหภูมิเร็วเกินไปจะทำให้เซรามิกที่เกิดรอยแตกร้าวได้ ส่วนถ้าเพิ่มอุณหภูมิช้าเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองทั้งเวลาและพลังงาน โดยขั้นตอนกระบวนการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 21

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบที่ 21 ผังการทดลองหาอัตราการเพิ่มอุณหภูมิตัวดิน

ขั้นตอนการทดลอง

(1) เตรียมดินเหนียวและเถ้าหนัก โดยการนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำวัสดุดิบทั้งสองที่อบไล่ความชื้นเสร็จแล้วมาเข้าเครื่องปั่นดินเพื่อให้เป็นผง แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50

(2) นำวัสดุดิบทั้งสองชนิดมาผสมในภาชนะผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใส่เถ้าหนักในร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมน้ำให้ได้ความชื้นร้อยละ 15-20 แล้วผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำตัวอย่างอัดใส่แบบอะคริลิกขนาด 30x60x10 มิลลิเมตร ที่มีการติดไวไนลเพื่อป้องกันการเกาะติดกันของแบบกับส่วนผสม แล้วตั้งทิ้งไว้ในห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(3) เมื่อครบ 24 ชั่วโมงแล้ว ทำการถอดแบบออกจากตัวอย่าง แล้วนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูง โดยเลือกใช้อุณหภูมิในการเผา 700 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที

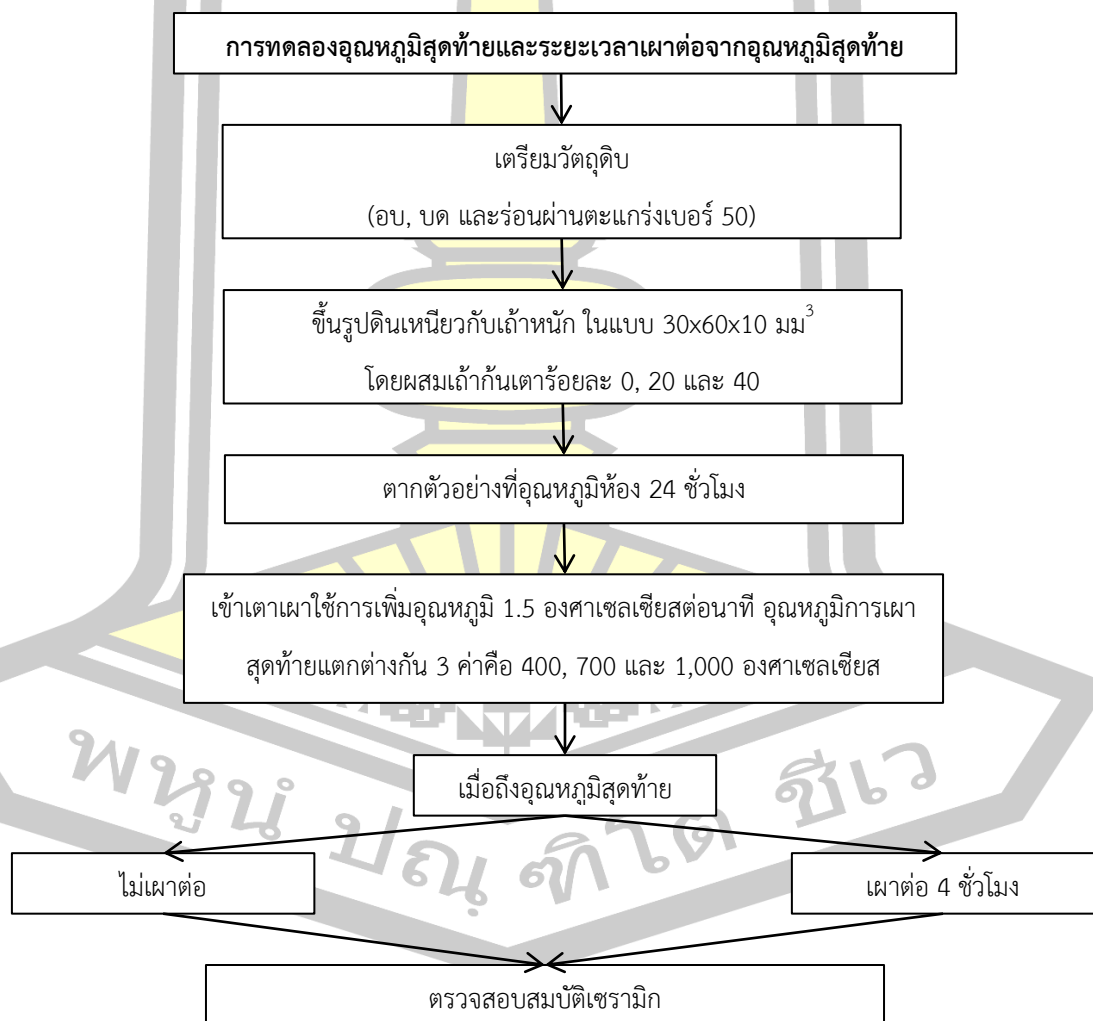
(4) เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ทั้งชิ้นงานไว้ในเตาให้ชิ้นงานอุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆ จนถึง 40 องศาเซลเซียสแล้วจึงเปิดฝาเตา

(5) ทำตามขั้นตอนใหม่ทั้งหมดโดยเปลี่ยนอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที

(6) ตรวจสอบการเกิดรอยแตกร้าวของเซรามิกหลังเผา

3.4.1.3 อุณหภูมิสุดท้ายของการเผาและระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย

เนื่องจากการเผาวัสดุเซรามิก อุณหภูมิสุดท้ายหรืออุณหภูมิสูงสุดของการเผาและระยะเวลาการเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย มีผลต่อเนื้อเซรามิกที่ได้ การหดตัวเชิงเส้น การดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัด จึงจำเป็นต้องทราบอุณหภูมิสุดท้ายและระยะเวลาการเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย เพื่อให้ได้เซรามิกที่มีคุณสมบัติต่างๆตามความต้องการ โดยขั้นตอนกระบวนการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 22



ภาพประกอบที่ 22 ผังการทดลองหาอุณหภูมิสุดท้ายและระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย

ขั้นตอนการทดลอง

- (1) เตรียมดินเหนียวและเถ้าหนัก โดยการนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำวัตถุดิบทั้งสองที่อบไล่ความชื้นเสร็จแล้วมาเข้าเครื่องปั่นดินเพื่อให้เป็นผง แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50
- (2) นำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาผสมในภาตผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใส่เถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมน้ำให้ได้ความชื้นร้อยละ 15-20 แล้วผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำตัวอย่างอัดใส่แบบอะคริลิคขนาด 30x60x10 มิลลิเมตร ที่มีการติดไว้นิลเพื่อป้องกันการเกาะติดกันของแบบกับส่วนผสม แล้วตั้งทิ้งไว้ในห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- (3) เมื่อครบ 24 ชั่วโมงแล้ว ทำการถอดแบบออกจากตัวอย่าง แล้วนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูง โดยเลือกใช้อุณหภูมิในการเผา 400 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที
- (4) เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ทิ้งชิ้นงานไว้ในเตาให้ชิ้นงานอุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆจนถึง 40 องศาเซลเซียสแล้วจึงเปิดฝาเตา
- (5) ทำตามขั้นตอนใหม่ทั้งหมดโดยเปลี่ยนอุณหภูมิสุดท้ายเป็น 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส
- (6) ทำตามขั้นตอนใหม่ทั้งหมดโดยเมื่อเผาถึงอุณหภูมิสุดท้ายแล้วให้เผาต่อไปอีกเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- (7) ทดสอบสมบัติเซรามิกที่ได้ ประกอบด้วย การหดตัวเชิงเส้น การดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 13 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่กำหนดในการศึกษาปัจจัยหาสภาวะที่เหมาะสม

ปัจจัยที่ศึกษา	ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม
ผลของเวลาการตาก	น้ำหนักของเซรามิก ตากที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง	(1) ผลต่างของน้ำหนักเซรามิกในแต่ละชั่วโมง
ผลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	เซรามิกที่เผาอุณหภูมิสุดท้าย 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5, 3.0 และ 9.0 องศาเซลเซียสต่อนาที	(1) รอยแตกร้าว
ผลของอุณหภูมิสุดท้ายของการเผา	เซรามิกที่เผาด้วยอุณหภูมิสุดท้าย 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส	(1) การหดตัวเชิงเส้น (2) การดูดซึมน้ำ (3) กำลังรับแรงอัด

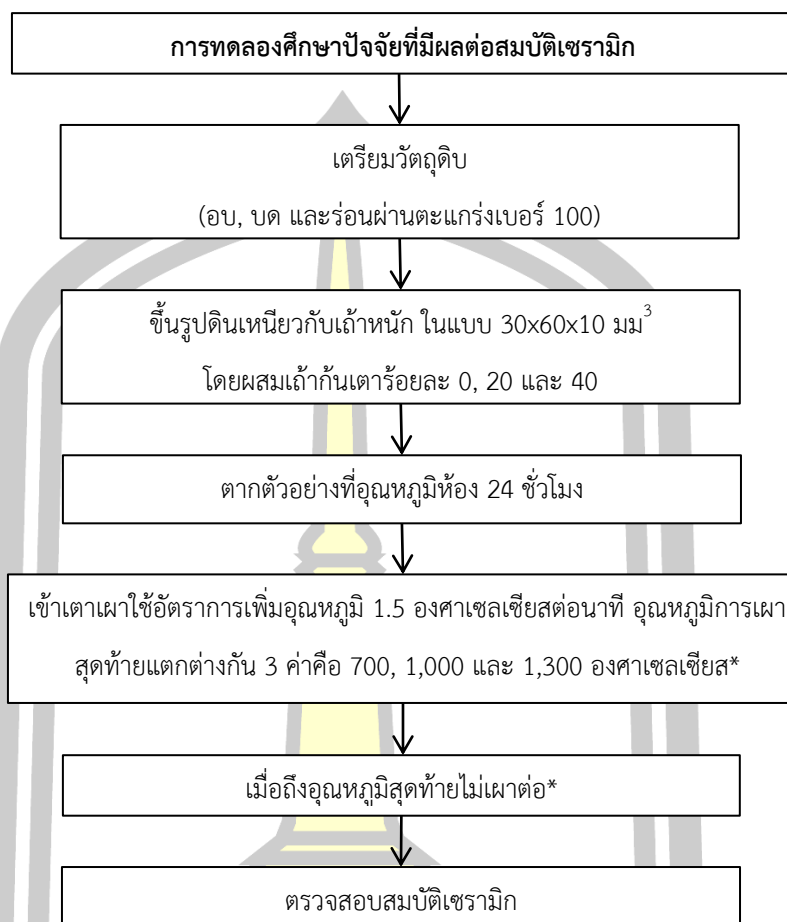
ตารางที่ 13 (ต่อ) ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่กำหนดในการศึกษาปัจจัยหาสภาวะที่เหมาะสม

ปัจจัยที่ศึกษา	ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม
ผลของระยะเวลาเผาต่อจาก อุณหภูมิสุดท้าย	เซรามิกที่เผาด้วยอุณหภูมิ สุดท้าย 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส โดยมีการเพิ่ม ระยะเวลาการเผาต่อจาก อุณหภูมิสุดท้าย 0 และ 4 ชั่วโมง	(1) การหดตัวเชิงเส้น (2) การดูดซึมน้ำ (3) กำลังรับแรงอัด

3.4.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิก

จากการทดลองเบื้องต้นในหัวข้อ 3.4.1 นำผลการศึกษาที่ได้มาเป็นแนวทางในการกำหนดการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเซรามิกผสมแก้วหนัก ประกอบด้วย การศึกษาปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ และอุณหภูมิการเผา มีผลต่อสมบัติเซรามิก ได้แก่ การหดตัวเชิงเส้น การดูดซึมน้ำ ความต้านแรงกดแตก มาตรฐานวิทยาพื้นผิว (BET, XRD) การชะของโลหะหนักของเซรามิกผสมแก้วหนัก หมายเหตุในการทดลองนี้ใช้ดินเหนียวชุดที่ 2 ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ได้ขนาดอนุภาคดินเหนียวเล็กกว่า 150 ไมครอน โดยขั้นตอนกระบวนการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 23





ภาพประกอบที่ 23 ผังการทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเซรามิก

(*หมายเหตุ การเลือกใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเผาและอุณหภูมิสุดท้ายของการเผา
แสดงในหัวข้อ 4.1.2 และ 4.1.3.)

ขั้นตอนการทดลอง

- (1) เตรียมดินเหนียวและเถ้าหนัก โดยการนำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำวัตถุดิบทั้งสองที่อบไล่ความชื้นเสร็จแล้วมาเข้าเครื่องปั่นดินเพื่อให้เป็นผง แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100
- (2) นำวัตถุดิบทั้งสองชนิดมาผสมในอัตราผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใส่เถ้าถ่านหินร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก จากนั้นเติมน้ำให้ได้ความชื้นร้อยละ 15-20 แล้วผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำตัวอย่างอัดใส่แบบอะคริลิกขนาด 30x60x10 มิลลิเมตร ที่มีการตีไวไนลเพื่อป้องกันการเกาะติดกันของแบบกับส่วนผสม แล้วตั้งทิ้งไว้ในห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- (3) เมื่อครบ 24 ชั่วโมงแล้ว ทำการถอดแบบออกจากตัวอย่าง แล้วนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูง โดยเลือกใช้อุณหภูมิในการเผา 700 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที

(4) เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ทิ้งชิ้นงานไว้ในเตาให้ชิ้นงานอุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆจนถึง 40 องศาเซลเซียสแล้วจึงเปิดฝาเตา

(5) ทำตามขั้นตอนใหม่ทั้งหมดโดยเปลี่ยนอุณหภูมิสุดท้ายเป็น 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส

(6) ปัจจัย ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ศึกษาในการทดลองนี้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 14 ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่กำหนดในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเซรามิกผสมแก้วหนัก

ปัจจัยที่ศึกษา	ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม
ผลของอัตราส่วน	เซรามิกที่มีส่วนผสมของแก้วหนักร้อยละ 0, 20 และ 40	(1) การหดตัวเชิงเส้น (2) การดูดซึมน้ำ (3) ความต้านแรงกดแตก (4) อัสัณฐานวิทยาพื้นผิว (5) การชะของโลหะหนัก (6) การดูดซับสารอินทรีย์ระเหย
ผลของอุณหภูมิสุดท้าย	เซรามิกที่เผาด้วยอุณหภูมิสุดท้าย 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส	(1) การหดตัวเชิงเส้น (2) การดูดซึมน้ำ (3) ความต้านแรงกดแตก (4) อัสัณฐานวิทยาพื้นผิว (5) การชะของโลหะหนัก (6) การดูดซับสารอินทรีย์ระเหย

3.4.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมและการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเซรามิกผสมแก้วหนัก

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองผลิตเซรามิกผสมแก้วหนักมีดังนี้

(1) ตู้อบไฟฟ้า ภาพประกอบที่ 24 (E28#00-00797, WTB binder, Germany) ใช้ในการอบไล่ความชื้นของวัตถุดิบโดยใช้อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 24 ตู้ไฟฟ้า

(2) เครื่องปั่นหิน ภาพประกอบที่ 25 ใช้ในการปั่นดินเหนียวและเถ้าหนัก ให้ละเอียดและมีขนาดเล็กจนสามารถผ่านตะแกรงได้



ภาพประกอบที่ 25 เครื่องปั่นหิน

(3) ตะแกรงเบอร์ 50 ใช้ในการร่อนดินเหนียวและเถ้าหนัก ให้ได้วัสดุที่ละเอียดกว่า 300 ไมครอน เพื่อให้วัสดุผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

(4) ตะแกรงเบอร์ 100 ใช้ในการร่อนดินเหนียวและเถ้าหนัก ให้ได้วัสดุที่ละเอียดกว่า 150 ไมครอน เพื่อให้วัสดุผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

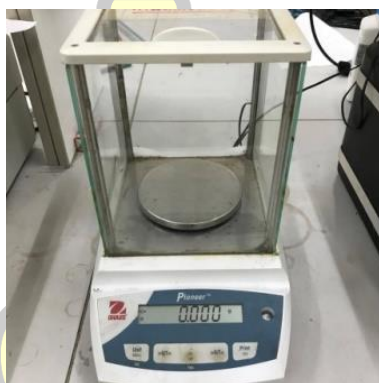
(5) แบบอะคริลิกขนาด 30x60x10 มิลลิเมตร ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุเซรามิก มีการติดไวนิลเพื่อต้องการเกาะตัวระหว่างแบบและชิ้นงานตอนถอดแบบ ตามภาพประกอบที่ 26



ภาพประกอบที่ 26 แบบอะคริลิกขนาด 30x60x10 มิลลิเมตร

(6) ถาดผสม ใช้ในการผสมวัสดุให้เข้ากันดีเป็นเนื้อเดียวกัน

(7) เครื่องชั่งน้ำหนัก ภาพประกอบที่ 27 ใช้ชั่งน้ำหนักวัสดุและตัวอย่างขณะตาก



ภาพประกอบที่ 27 เครื่องชั่งน้ำหนัก

(8) เวอร์เนียคาลิปเปอร์ ภาพประกอบที่ 28 ใช้วัดขนาดเซรามิกก่อนและหลังเผา โดยมีความคลาดเคลื่อน 0.05 มิลลิเมตร



ภาพประกอบที่ 28 เวอร์เนียคาลิปเปอร์

(9) เตาเผาอุณหภูมิสูง ภาพประกอบที่ 29 (LT 5/13. Nabertherm GmbH, Germany)
ใช้ในการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 400, 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส



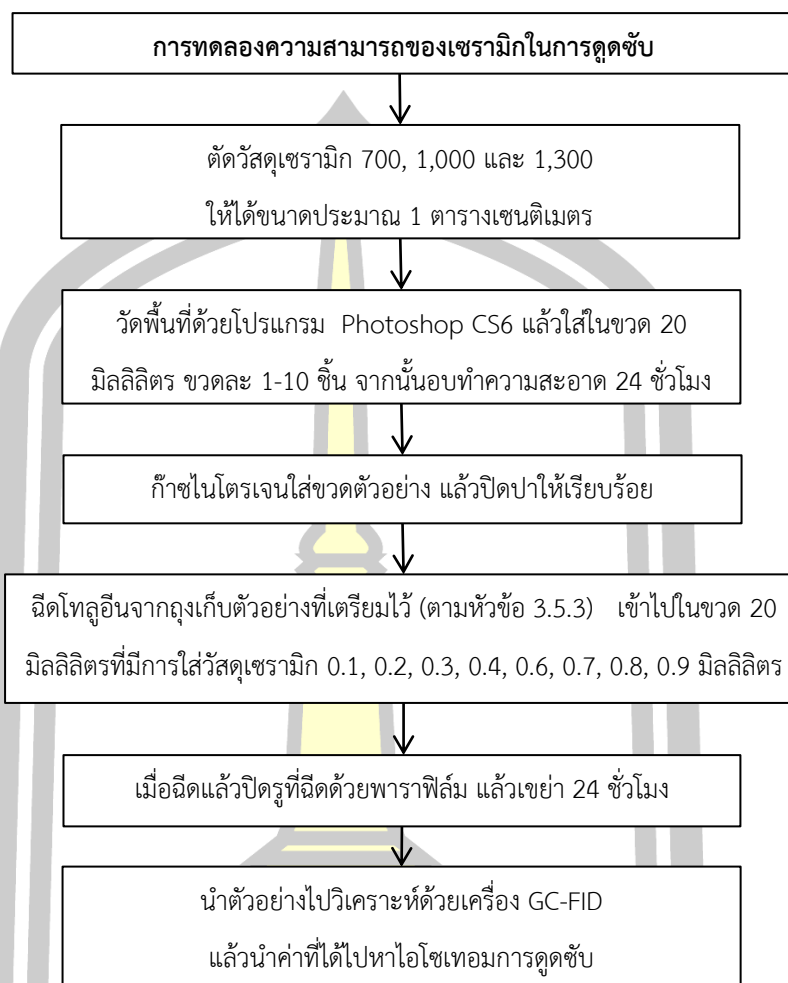
ภาพประกอบที่ 29 เตาเผาอุณหภูมิสูง

3.5 การทดสอบความสามารถของเซรามิกในการดูดซับโทลูอิน

งานวิจัยนี้นอกจากเหนือจากการศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มมูลค่าแก่หนักซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมแหวนด้วยการผลิตเซรามิกดินผสมแก่หนักแล้ว ยังพิจารณาการใช้เซรามิกผสมแก่หนักมาเป็นวัสดุดูดซับสารมลพิษอากาศในอาคารโดยเฉพาะในกลุ่มสารอินทรีย์ระเหยซึ่งมีหลากหลายชนิดที่ตรวจพบในอาคารทั่วไป (Ongwandee et al., 2011) เนื่องจากโทลูอินมักมีการตรวจพบในปริมาณสูงกว่าสารอินทรีย์ระเหยชนิดอื่น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โทลูอินเป็นตัวแทนสารมลพิษอินทรีย์ระเหยในการศึกษาความสามารถในการดูดซับของเซรามิกผสมแก่หนัก และเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์เซรามิกที่ชาวบ้านในพื้นที่บ้านหม้อ จังหวัดมหาสารคามเป็นผู้ผลิต

3.5.1 หลักการทดลองการดูดซับ

ใช้ชิ้นงานเซรามิกหลังเผาที่ 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียสอัตราส่วนผสมแก่หนักร้อยละ 0, 20 และ 40 มาทดลองดูดซับก๊าซโทลูอิน โดยตัดชิ้นงานเซรามิกให้มีขนาดประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร ใส่ในขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร ทดสอบความสามารถในการดูดซับโทลูอินโดยใช้ความเข้มข้น 4.38-39.04 นาโนกรัมต่อ 20 มิลลิลิตรหรือประมาณ 200-2,000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากพบว่าโทลูอินภายในอาคารมีค่าประมาณ 35.5-230 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Ongwandee et al., 2011) โดยขั้นตอนกระบวนการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 30



ภาพประกอบที่ 30 ผังการทดสอบความสามารถของเซรามิกในการดูดซับ

3.5.2 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองการดูดซับของวัสดุเซรามิก มีดังต่อไปนี้

- (1) นำวัสดุเซรามิกหลังเผาที่ 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส 3 อัตราส่วน ไปตัดให้มีขนาดประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร ใส่เข้าไปในขวด 20 มิลลิลิตร จำนวน 1-10 ชิ้น ชิ้นงานที่ตัดแล้ว นำไปทำความสะอาดด้วยการอบ 103-105 องศาเซลเซียส
- (2) หาพื้นที่ผิวหน้า 2 ด้านของชิ้นงานเซรามิกที่ตัดด้วยโปรแกรม Photoshop CS6 เพื่อใช้คำนวณความสามารถในการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ผิวเซรามิก (รายละเอียดการหาพื้นที่ผิวแสดงในหัวข้อ 3.5.4)
- (3) จากนั้นเติมก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์ความเข้มข้นร้อยละ 99.999 เข้าไปในขวดที่มีชิ้นงานเซรามิกแล้วปิดฝาให้สนิท

(4) ใช้เข็มฉีดยาดูดโกลูอินจากถุงเก็บก๊าซที่เตรียมความเข้มข้นก๊าซโกลูอินมาตรฐานไว้แล้วคือ 43.4 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตรฉีดเข้าไปในขวดที่มีชิ้นงานเซรามิก ขนาด 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 มิลลิลิตร ซึ่งจะได้โกลูอินในขวดเท่ากับ 4.3, 8.7, 13.0, 17.4, 26.0, 30.4, 34.7, 39.0 นาโนกรัม ตามลำดับ ปิดรูเข็มด้วยพาราฟิล์ม จากนั้นนำขวดดูดซับไปเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยเครื่องเขย่าแนวระนาบ (OS-10, BIOSAN, Republic of Latvia)

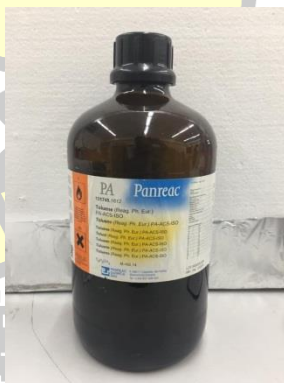
(5) หลังจากเขย่าครบ 24 ชั่วโมง ใช้อุปกรณ์ solid phase micro extraction ซักตัวอย่างก๊าซโกลูอินที่หลงเหลืออยู่ในขวด แล้ววิเคราะห์ด้วยเครื่อง gas chromatography flame ionization detector (GC/FID) โดยการเปรียบเทียบหาปริมาณโกลูอินด้วยกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน

(6) นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาไอโซโทมการดูดซับเพื่อหาความสามารถในการดูดซับโกลูอินของวัสดุเซรามิกต่อไป

3.5.3 สารเคมีและอุปกรณ์

สารเคมีและอุปกรณ์ในการทดลองการดูดซับโกลูอินของวัสดุเซรามิกมีดังนี้

(1) โกลูอิน ภาพประกอบที่ 31 (C_7H_8) CAS Number 108-88-3 (Sigma Aldrich, Singapore) มีองค์ประกอบของโกลูอินร้อยละ 99.5 ใช้โกลูอินเกรดมาตรฐานการวิเคราะห์ (analytical standard)



ภาพประกอบที่ 31 สารเคมีโกลูอินเกรดมาตรฐานการวิเคราะห์

(2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ใช้ก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์ความเข้มข้นร้อยละ 99.999 เป็นก๊าซเจือจางให้ได้ก๊าซโกลูอินที่มีความเข้มข้นตามที่กำหนด

(3) เข็มฉีดยา ขนาด 1 มิลลิลิตร ภาพประกอบที่ 32 (1MDF-GT 1ML, SGE, Japan) ใช้ฉีดก๊าซจากถุงเก็บก๊าซไปยังขวด 20 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้ความเข้มข้นในขวดที่ต้องการ



ภาพประกอบที่ 32 เข็มฉีดยาขนาด 1 มิลลิลิตร

(4) เข็มฉีดยาของเหลว ขนาด 10 ไมโครลิตร ภาพประกอบที่ 33 (10F10UL, SGE, Japan) ใช้ฉีดสารละลายโพลีอีนบรีสุทรี เอาไปในถุงเก็บก๊าซในได้ความเข้มข้นตามต้องการ



ภาพประกอบที่ 33 เข็มฉีดยาของเหลว ขนาด 10 ไมโครลิตร

(5) ลูกแก้ว ภาพประกอบที่ 34 (Glass bead) ใช้ใส่เข้าไปในขวดดูดซับที่เป็นขวดควบคุมที่ไม่ใส่ชั้นงานเซรามิก โดยใส่ลูกแก้วให้ได้ปริมาตรเท่ากับปริมาตรของชั้นงานเซรามิก โดยทำความสะอาดลูกแก้วด้วยการอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จากนั้นรอให้เย็นตัวในโถดูดความชื้น ก่อนใช้ในการทดลอง



ภาพประกอบที่ 34 ลูกแก้ว

(6) เครื่องเขย่า ภาพประกอบที่ 35 ใช้เขย่าถุงเตรียมก๊าซมาตรฐานและขวดตัวอย่างเพื่อให้เกิดความปั่นป่วนโพลีอินกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ



ภาพประกอบที่ 35 เครื่องเขย่า

(7) ขวดเก็บตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร ภาพประกอบที่ 36 (SUN-SRI, USA) ใช้ใส่เซรามิกเพื่อทดสอบความสามารถในดูดซับ

(8) ฝา Septa 18 มิลลิเมตร ภาพประกอบที่ 36 (Thermo scientific, Thailand) สำหรับ SPME ใช้ปิดขวด 20 มิลลิลิตร เพื่อไม่ให้เกิดการรั่วไหล



ภาพประกอบที่ 36 ขวดเก็บตัวอย่างและฝา Septa

(9) SPME Holder และ SPME Fiber ภาพประกอบที่ 37 (Supelco, USA) แบบ Manual ชนิด DVB/CAR/PDMS หนา 50/30 ไมโครเมตร ใช้ชักตัวอย่างก๊าซโพลีอินในขวดดูดซับเพื่อไปวิเคราะห์หาปริมาณด้วยเครื่อง GC/FID



ภาพประกอบที่ 37 SPME Holder และ SPME Fiber

(10) GC/FID เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ภาพประกอบที่ 38 (Gas chromatography, GC) (Shimadzu, Japan) ใช้วิเคราะห์หาโทลูอินที่ติดอยู่บน SPME Fiber



ภาพประกอบที่ 38 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

(11) ถุงก๊าซมาตรฐาน ภาพประกอบที่ 39 ใช้ถุงเก็บตัวอย่างก๊าซชนิด Tedlar bag ขนาด 40 ลิตร (232-20, SKC, USA) เพื่อใช้ผสมโทลูอินกับก๊าซไนโตรเจน ให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ โดยมีวิธีการเตรียมก๊าซมาตรฐานดังนี้

-เติมก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์เข้าถุงเก็บตัวอย่างด้วยอัตราการไหลประมาณ 0.5 ลิตรต่อ นาที

-เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที ฉีดโทลูอินความเข้มข้นร้อยละ 99.5 ปริมาณ 1 ไมโครลิตร เข้าในถุงเก็บตัวอย่าง

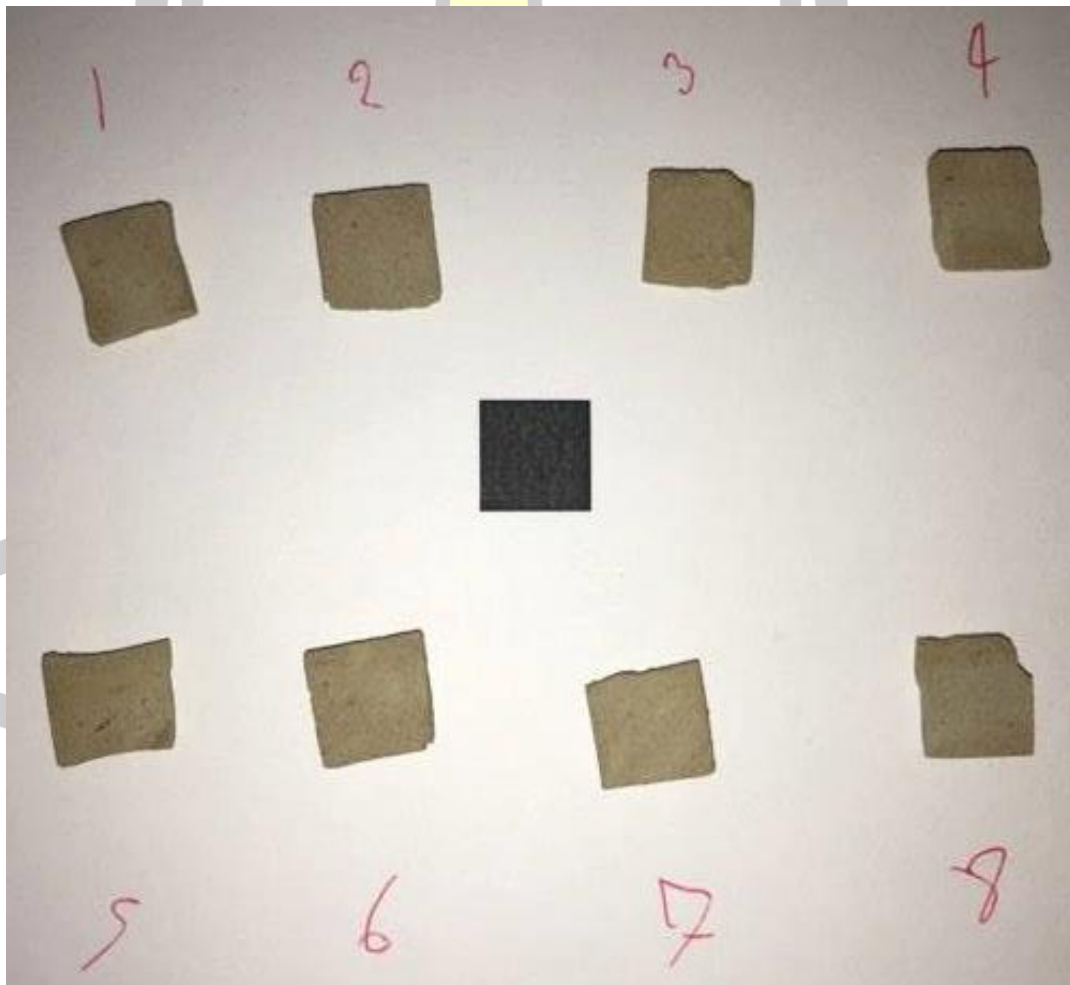
-เมื่อครบ 40 นาทีให้หยุดการเติมก๊าซไนโตรเจน แล้วนำถุงเก็บตัวอย่างไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า 2 ชั่วโมง แล้วนำถุงตัวอย่างไปใช้งานได้ โดยมีความเข้มข้นโทลูอิน 11.51 ppm หรือ 43 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร



ภาพประกอบที่ 39 ถุงก๊อชมมาตรฐาน

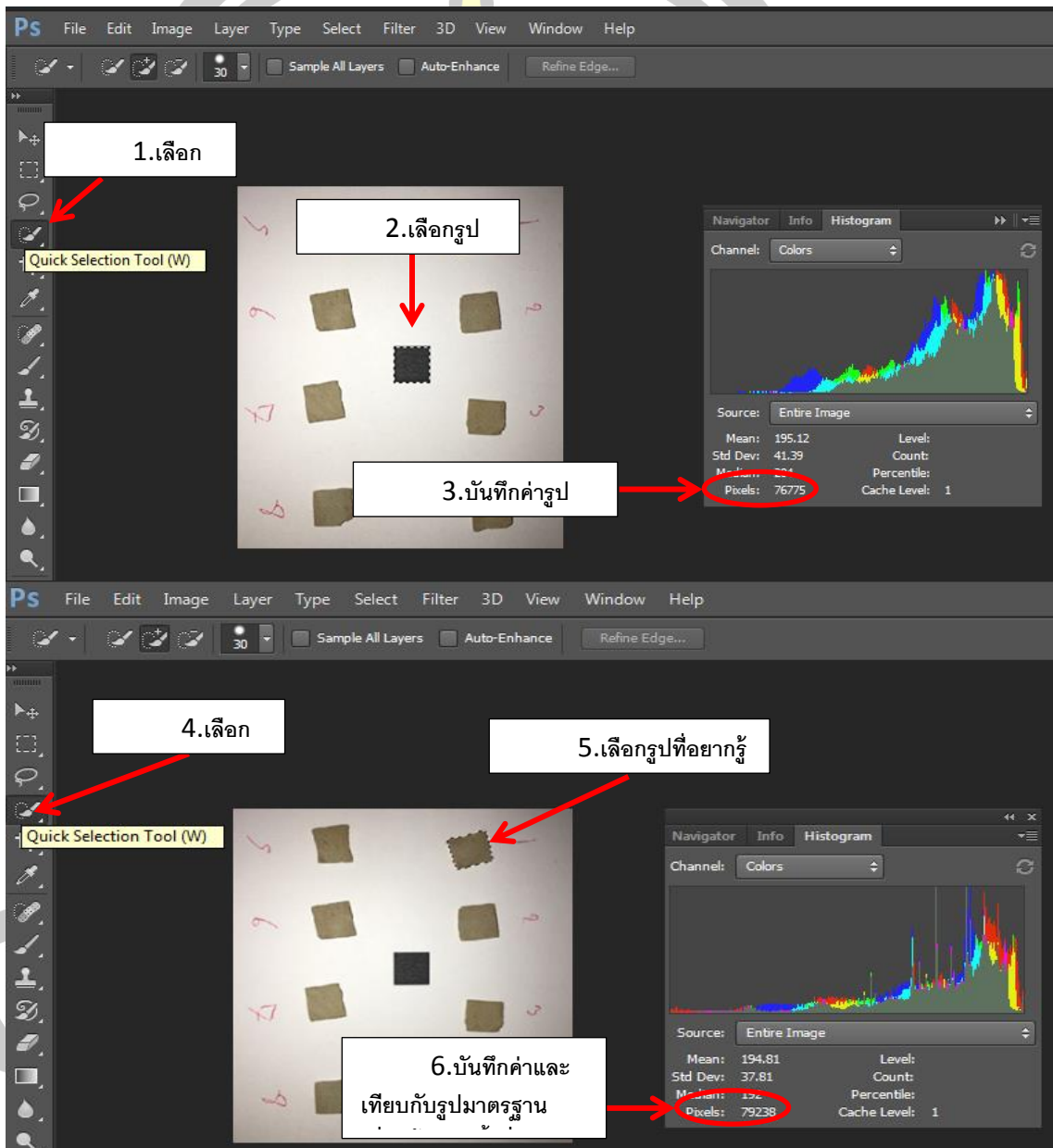
3.5.4 การวัดขนาดตัวอย่างเซรามิก

การวัดขนาดตัวอย่างเซรามิก ใช้โปรแกรม Photoshop CS6 โดยทำการพิมพ์ขนาดพื้นที่มาตรฐาน 1 ตารางเซนติเมตรลงในกระดาษ แล้ววางชิ้นงานเซรามิกที่ต้องการวัดพื้นที่ไว้บริเวณใกล้เคียงตามภาพประกอบที่ 40



ภาพประกอบที่ 40 การจัดวางชิ้นงานเซรามิกที่ตัดแล้วก่อนถ่ายรูป เพื่อกำหนดพื้นที่ในการดูซ้ำ

จากนั้นถ่ายภาพแล้วนำไปเปิดในโปรแกรม Photoshop CS6 ใช้คำสั่ง Quick selection tool เพื่อคุมภาพขนาดพื้นที่มาตรฐาน 1 ตารางเซนติเมตร บันทึกค่า pixel จากหน้าต่าง Histogram ตามภาพประกอบที่ 41 จากนั้นใช้คำสั่ง Quick selection อีกครั้งคุมภาพที่ต้องการทราบพื้นที่ บันทึกค่า pixel จากหน้าต่าง Histogram จากนั้นคำนวณเปรียบเทียบพื้นที่จาก pixel ของพื้นที่มาตรฐาน 1 ตารางเซนติเมตร



ภาพประกอบที่ 41 วิธีการวัดพื้นที่ชิ้นงานที่ตัดแล้ว ด้วยโปรแกรม Photoshop CS6

3.5.4 การชักตัวอย่างก๊าซและการวิเคราะห์โกลูอิน

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิค SPME GC/FID มีรายละเอียดการชักตัวอย่างและการวิเคราะห์ตัวอย่าง ดังนี้

1) การชักตัวอย่างก๊าซโกลูอินด้วย SPME

การชักตัวอย่างก๊าซโกลูอิน จะประกอบด้วยเวลาสกัดและเวลาคาย โดยเวลาสกัดคือเวลาที่ SPME Fiber สัมผัสกับมลพิษอากาศในขวดตัวอย่างที่เตรียมไว้ และเวลาคายเป็น เวลาที่ SPME Fiber สัมผัสกับความร้อนในคอลัมน์ของเครื่อง GC-FID ในการทดลองนี้กำหนดทั้งเวลาสกัดและเวลาคายไว้ 3 นาที โดยใช้ SPME Fiber ชนิด DVB/CAR/PDMS ที่มีความสามารถในการดูดซับทั้งสารมีขั้วและไม่มีขั้ว โดยขั้นแรกของการตรวจวัดคือ เสียบ SPME Holder เข้าไปในขวดตัวอย่างที่มีมลพิษอากาศ จากนั้นหมุน SPME Fiber ออกมาแล้วจับเวลา 3 นาที (เวลาสกัด) เมื่อครบ 3 นาที หมุน SPME Fiber กลับแล้วนำ SPME Holder ออกจากขวดแล้วไปเสียบที่เครื่อง GC-FID หมุน SPME Fiber ออกมาให้เครื่อง GC-FID วิเคราะห์ จับเวลา 3 นาที (เวลาคาย) เมื่อครบ 3 นาที หมุน SPME Fiber กลับแล้วนำ SPME Holder ออกจากเครื่อง GC-FID

2) การวิเคราะห์หาปริมาณโกลูอินด้วยเครื่อง GC/FID

ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง GC-FID จะมีลักษณะเป็นกราฟ โดยเครื่อง GC-FID จะวิเคราะห์โกลูอินออกมาเป็นพื้นที่ใต้กราฟในช่วงเวลาประมาณนาที่ที่ 6 ของแต่ละตัวอย่าง การจะทำให้ข้อมูลที่ได้มีหน่วยเป็นความเข้มข้นต้องนำไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานที่อยู่สร้างขึ้นมาก่อน โดยสถานะของเครื่อง GC-FID ที่ใช้วิเคราะห์โกลูอินเป็นดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 สถานะการทำงานของเครื่อง GC-FID สำหรับวิเคราะห์หาโกลูอิน

Column Type	Rtx [®] -5MS Column length 30 m , Film thickness 0.25 μ m
Column Oven Temp	40 °C
Injection Temp	250 °C
Injection Mode	Split
Flow Control Mode	Linear Velocity
Pressure	80.5 kPa
Total Flow	6.0 (mL / min)
Column Flow	1 (mL / min)

ตารางที่ 15 (ต่อ) สภาวะการทำงานของเครื่อง GC-FID สำหรับวิเคราะห์หาโทลูอิน

Spit Ratio	2
Oven Temp. Program Rate	20 (°C/min)
Temperature	40-60 °C

3.5.5 การวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับจะอธิบายถึงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลกับปริมาณวัสดุเซรามิกที่อุณหภูมิคงที่ ในการทดลองนี้ทางผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Nonlinear regression (NLREG) ซึ่งเป็นโปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression method) มาช่วยในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ไอโซเทอมการดูดซับ โดยทำการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับ 2 แบบจำลอง คือ สมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) และสมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

สมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) จะสมมติว่าพื้นที่ของตัวดูดซับมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด กล่าวคือ ผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ ทำให้พื้นที่ผิวและพลังงานของตัวดูดซับมีการกระจายตัวแบบเลขชี้กำลัง โดยสมการที่ใช้คือ

$$q_e = K_f C_e^n \quad (13)$$

สมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) จะสมมติว่าเป็นการดูดซับมีเพียงชั้นเดียว โมเลกุลมีจำนวนและตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน และในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะสามารถดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงโมเลกุลเดียวเท่านั้น โดยสมการที่ใช้คือ

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (14)$$

โดย q_e คือ ความสามารถในการดูดซับมลพิษของเซรามิก (ไมโครกรัมต่อตารางเมตร)

q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับมลพิษของเซรามิก (ไมโครกรัมต่อตารางเมตร)

K_f คือ ค่าคงที่แสดงถึงความจุจำเพาะของการดูดซับที่สภาวะความเข้มข้นค่าใดๆ (specific capacity)

C_e คือ ความเข้มข้นของมลพิษ ณ สภาวะสมดุล (ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

- n คือ ค่ายกกำลังแสดงถึงระดับการสะสมและความหลากหลายของพลังงานใน
ปฏิกิริยาการดูดซับ
- b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์

3.6 สรุปรายละเอียดการดำเนินการทดลอง

ตารางที่ 16 แสดงรายละเอียดภาพรวมของการทดสอบทั้งหมด โดยระบุ เครื่องมือ วิธีการ และการนำการทดสอบที่ได้ไปใช้วิเคราะห์ตัวแปรใดบ้าง

ตารางที่ 16 ตารางสรุปรายละเอียดการดำเนินการทดลอง

การทดสอบ	เครื่องมือ	วิธีการ	ใช้วิเคราะห์
ผลต่างของน้ำหนักเซรามิกในแต่ละชั่วโมง	เครื่องชั่งน้ำหนัก	วัดน้ำหนักเซรามิกขณะตากเป็นเวลา 24 ชั่วโมง	การคายน้ำหนักของเซรามิกขณะตาก
รอยแตกร้าว	สังเกตด้วยตา	สังเกตรอยแตกที่เกิดขึ้นกับเซรามิกหลังเผา	อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ
การหดตัวเชิงเส้น	เวอร์เนียคาลิเปอร์	วัดความกว้าง ยาวของเซรามิกก่อนเผา และหลังเผา	อัตราส่วนผสม, อุณหภูมิในการเผา, ระยะเวลาการเผาต่อ
การดูดซึมน้ำ	เครื่องชั่งน้ำหนัก	วัดน้ำหนักเซรามิกแห้งและหลังแช่น้ำ	อัตราส่วนผสม, อุณหภูมิในการเผา, ระยะเวลาการเผาต่อ
กำลังรับแรงอัด	เครื่องกด	กดชิ้นงานด้วยหัวกดกลม ชิ้นงานสัมผัสแผ่นรองแบบเต็มชิ้นงาน	อัตราส่วนผสม, อุณหภูมิในการเผา, ระยะเวลาการเผาต่อ
ความต้านแรงกดแตก	เครื่องกด	กดชิ้นงานด้วยหัวกดแหลม ชิ้นงานสัมผัสแผ่นรองแค่หัวกับท้ายชิ้นงาน	อัตราส่วนผสม, อุณหภูมิในการเผา

ตารางที่ 16 (ต่อ) ตารางสรุปรายละเอียดการดำเนินการทดลอง

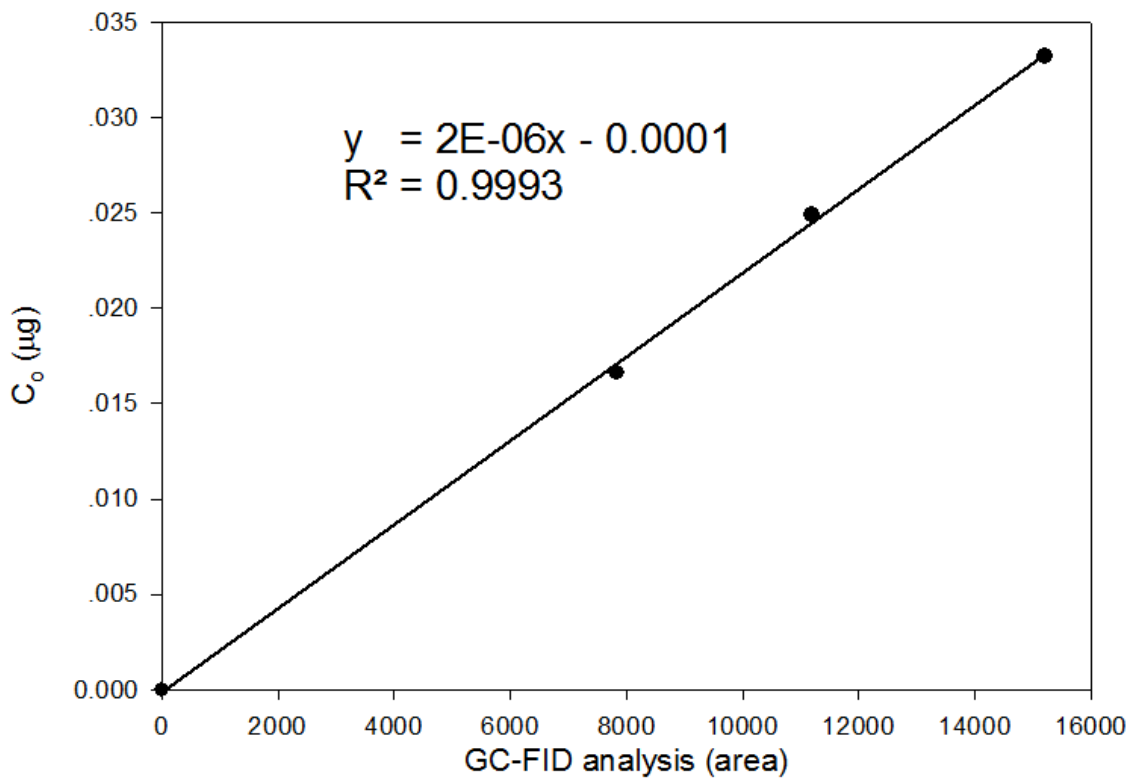
การทดสอบ	เครื่องมือ	วิธีการ	ใช้วิเคราะห์
BET	เครื่องวัดรูพรุนและ ปริมาตรของรูพรุน	วัดรูพรุนและ ปริมาตรของรูพรุน ของเซรามิก	อัตราส่วนผสม, อุณหภูมิในการเผา
XRD	เครื่อง X-ray diffractometer	การเลี้ยวเบนและ สะท้อนของรังสี	อัตราส่วนผสม, อุณหภูมิในการเผา
การชะของโลหะหนัก	เครื่อง Inductively coupled plasma	TCLP	อัตราส่วนผสม, อุณหภูมิในการเผา
การดูดซับโพลูอิน	SPME และ GC-FID	ทำไอโซเทอมการดูด ซับโพลูอิน	อัตราส่วนผสม, อุณหภูมิในการเผา

3.7 การประกันคุณภาพงานวิจัย

3.7.1 การสร้างกราฟความเข้มข้นมาตรฐานและการเปรียบเทียบ

กราฟความเข้มข้นมาตรฐานถูกสร้างขึ้นก่อนวิเคราะห์การดูดซับในทุกวันที่มีการทดลอง เพื่อใช้เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากเครื่อง GC-FID (ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง GC-FID มีหน่วยเป็น area) เป็นข้อมูลในหน่วยความเข้มข้น กราฟความเข้มข้นมาตรฐานต้องทำใหม่ทุกวันเพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการเปรียบเทียบ โดยการทำการกราฟความเข้มข้นมาตรฐานจะทดลองเหมือนกับการทดลองการดูดซับ แต่จะใส่ลูกแก้ว (Glass bead) ที่ไม่ดูดซับโพลูอินแทนชิ้นงานเซรามิกหลังเผา เพื่อให้ทราบความเข้มข้นที่ใส่เข้าไปก่อนมีการดูดซับ เมื่อได้ข้อมูล area จากเครื่อง GC-FID และข้อมูลความเข้มข้นจากการคำนวณแล้วนำมาสร้าง กราฟความเข้มข้นมาตรฐานตามภาพประกอบที่ 42



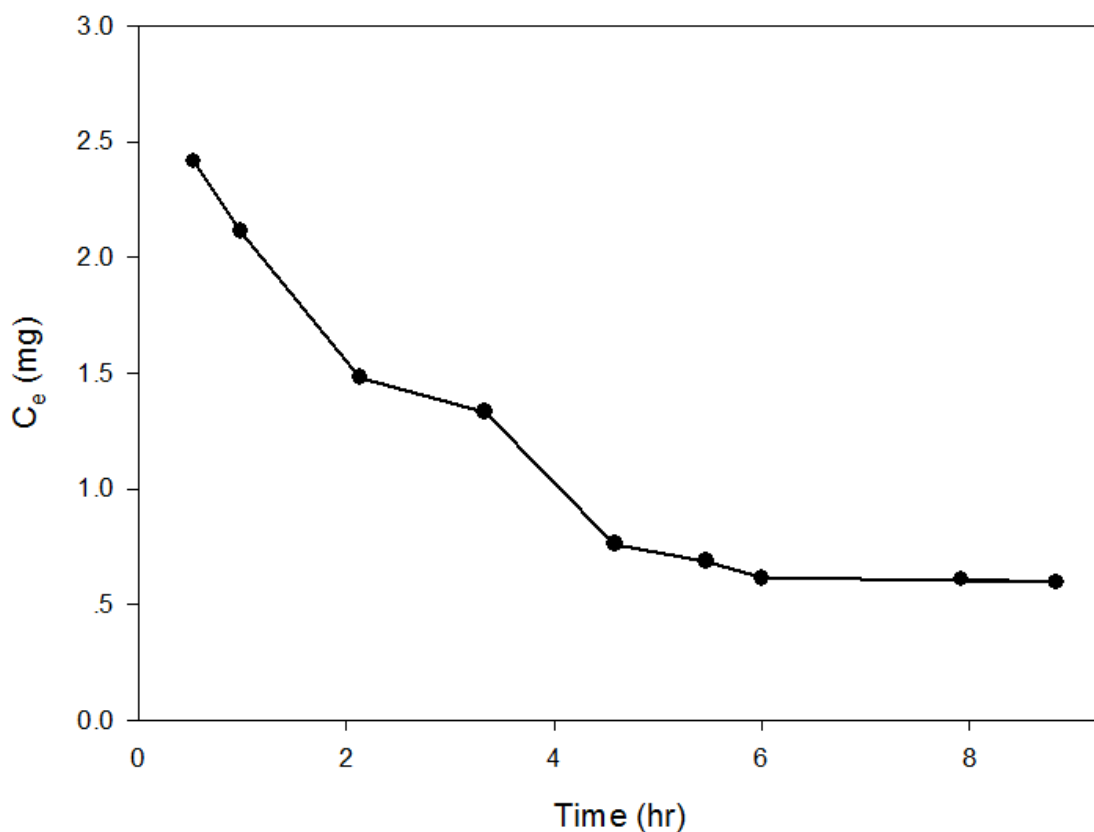


ภาพประกอบที่ 42 กราฟความเข้มข้นมาตรฐาน

จากภาพประกอบที่ 42 กราฟความเข้มข้นมาตรฐานควรมีความถูกต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 ($R^2 > 0.90$) เพื่อความแม่นยำในการเปรียบเทียบ การเปรียบเทียบใช้สมการเส้นตรงตามภาพประกอบที่ 41 ปรับเทียบค่า area ให้เป็นค่าความเข้มข้นเพื่อใช้วิเคราะห์ไอโซโทมต่อไป

3.7.2 การหาระยะเวลาการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุล

การหาระยะเวลาการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลทำโดยการใช้ชิ้นงานหลังเผาที่มีขนาดเท่ากันประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร ฉีดความเข้มข้นโทลูอินเท่ากัน แล้วทิ้งระยะเวลาให้ชิ้นงานดูดซับโทลูอินในระยะเวลาที่ต่างกันตั้งแต่ 0-10 ชั่วโมงแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย SPME และเครื่อง GC-FID จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟความเข้มข้นมาตรฐาน จะได้ปริมาณโทลูอินที่เหลืออยู่ในช่วงเวลาการดูดซับที่ต่างกัน นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟระหว่างเวลากับโทลูอินที่เหลืออยู่ ได้ตามภาพประกอบที่ 43



ภาพประกอบที่ 43 กราฟความเข้มข้นโทลูอินที่เหลือจากเซรามิกดูดซับในระยะเวลาต่างๆ

จากภาพประกอบที่ 43 เห็นได้ว่าตั้งแต่ชั่วโมงที่ 6 เป็นต้นไป ความเข้มข้นโทลูอินที่เหลือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ผู้วิจัยเลือกใช้เวลาในการดูดซับ 8 ชั่วโมงขึ้นไป เพื่อให้สะดวกต่อการทำการทดลอง

3.7.3 ค่าปริมาณสารอินทรีย์ต่ำสุดที่สามารถวัดได้ (MDL)

Method Detection Limits คือปริมาณสารอินทรีย์ต่ำสุดที่สามารถวัดได้ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 ว่าสารที่ทำการวิเคราะห์มีค่ามากกว่าศูนย์ ตามการให้คำจำกัดความขององค์กร United State Environmental Protection Agency โดย MDL สามารถหาได้จากสมการ 15

$$MLD = t_{n-1, \alpha=0.01} \sigma \quad (15)$$

โดย	n	คือ จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ
	σ	คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองซ้ำ
	$t_{n-1, \alpha=0.01}$	คือ ค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 99% และการประมาณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยที่ค่า degree of freedom เท่ากับ $n-1$

ค่า MLD ของโพลูอินที่ใช้ในการทดลอง มีค่าเท่ากับ 4.9 ppb ซึ่งคิดจากจำนวนการทดลองซ้ำทั้งหมด 7 ครั้ง ความเข้มข้นที่ใช้ในทดสอบ 54 ppb



บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยถูกแบ่งเป็น 6 หัวข้อ คือ 1. ผลการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเซรามิก 2. ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของเซรามิก 3. ผลการทดสอบบดสัณฐาน 4. ผลการทดสอบการชะโลหะหนัก 5. ความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอีนของเซรามิกผสมเถ้าหนัก และ 6. การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของเซรามิกผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล

4.1 ผลการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุเซรามิก

4.1.1 ระยะเวลาการตาก (Drying time)

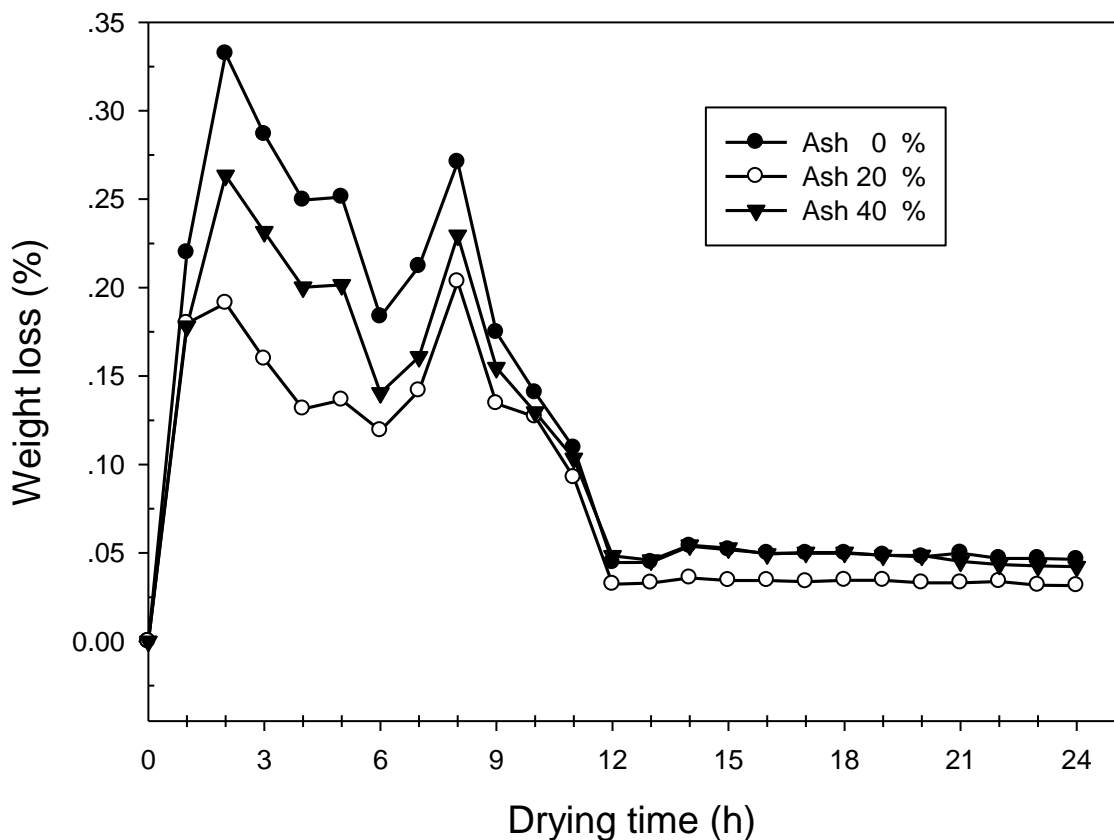
ภาพประกอบที่ 44 แสดงลักษณะของตัวอย่างดินผสมเถ้าหนัก 3 อัตราส่วนคือร้อยละ 0, 20 และ 40 ตากที่อุณหภูมิห้อง 27 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถอดออกจากแบบหล่ออะคริลิกขนาด $30 \times 60 \times 10$ มิลลิเมตร พบว่ามีลักษณะของตัวอย่างมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยตัวอย่างผสมเถ้าร้อยละ 40 มีสีเทาเข้มที่สุด รองลงมาคือตัวอย่างผสมเถ้าร้อยละ 20 และตัวอย่างผสมเถ้าไม่มีสีน้ำตาลเทา เพราะดินเหนียวที่ใช้น้ำตาล ส่วนเถ้าหนักที่ใช้มีสีดำ ตัวอย่างทั้ง 3 อัตราส่วน มีความเรียบเนียนของผิวหน้าต่างกัน โดยตัวอย่างผสมเถ้าไม่มีสีผิวหน้ามีความเรียบมากที่สุด เมื่อสัมผัสแล้วผิวไม่สาก รองลงมาคือตัวอย่างผสมเถ้าร้อยละ 20 และตัวอย่างผสมเถ้าร้อยละ 40 ผิวหน้าของตัวอย่างมีความสากมากที่สุด ตัวอย่างที่ผสมเถ้าทั้งอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 เมื่อลูบแล้วจะมีผิวหน้าของตัวอย่างติดมากับมือด้วย

พหุ ประ โท ชี เว



ภาพประกอบที่ 44 แสดงลักษณะของตัวอย่างผสมเถ้าหนัก 3 อัตราส่วน ที่ถอดแบบหลังจากการตากเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ก) อัตราส่วนร้อยละ 0 (ข) อัตราส่วนร้อยละ 20 และ (ค) อัตราส่วนร้อยละ 40

ภาพประกอบที่ 45 แสดงร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมเถ้าหนัก ร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุกชั่วโมงเพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง คำนวณร้อยละการสูญเสียน้ำหนักตามสมการ 12



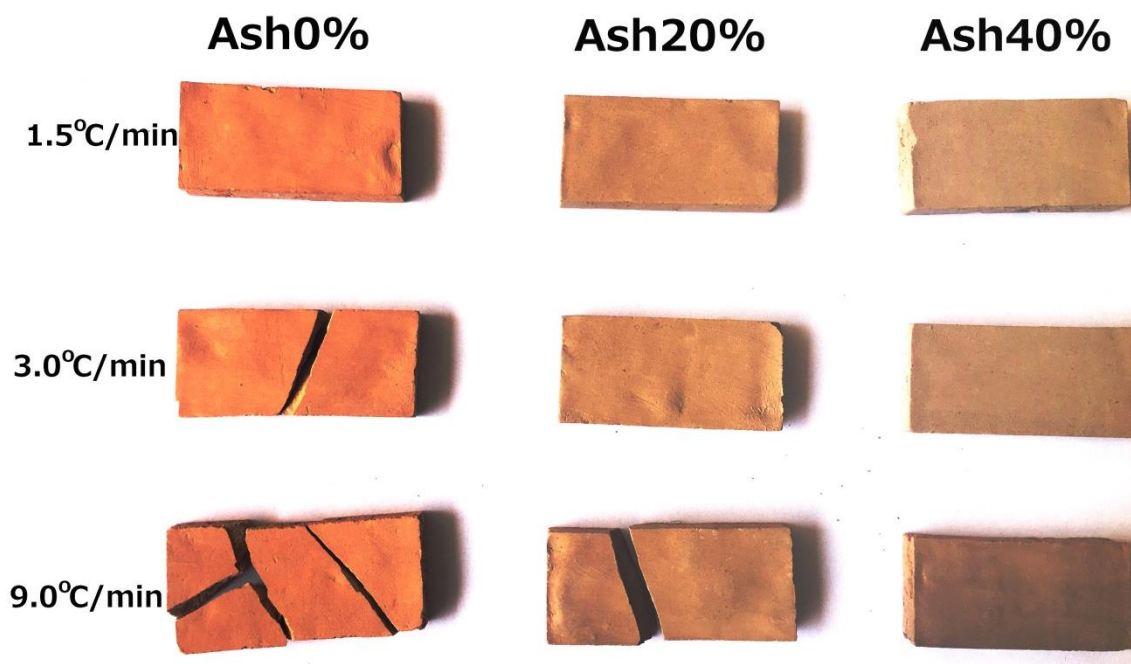
ภาพประกอบที่ 45 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างส่วนผสม 3 อัตราส่วนขณะตากในห้อง

จากภาพประกอบที่ 45 สังเกตได้ว่าตัวอย่างทั้ง 3 อัตราส่วนผสมมีการสูญเสียน้ำหนักมาก ในช่วงแรกในช่วง 0 ถึง 11 ชั่วโมงแรกของการตาก โดยสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 0.1-0.3 หลังจากผ่านไป 12 ชั่วโมงการสูญเสียน้ำหนักเริ่มคงที่ มีค่าประมาณร้อยละ 0.03-0.05 ลักษณะการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างในงานวิจัยนี้มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Ankush et al. (2016) ที่ทดสอบการสูญเสียความชื้นของอิฐ ที่อุณหภูมิการตากต่างกัน 3 ช่วงคือ 30-35, 40-45 และ 50-55 องศาเซลเซียส โดยในช่วงเวลาแรก 0-6 ชั่วโมง มีอัตราการสูญเสียความชื้นที่สูง ประมาณร้อยละ 0.08-0.5 และในเวลาต่อมาการสูญเสียความชื้นในตัวอย่างอิฐเริ่มคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากช่วงแรกของการตากตัวอย่างยังมีความชื้นอยู่มาก ทำให้น้ำระเหยออกอย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปความชื้นในตัวอย่งลดลงทำให้น้ำระเหยออกช้า การสูญเสียน้ำหนักจึงเริ่มคงที่ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเบื้องต้นพบว่าตัวอย่างที่มีความชื้นมากก่อนนำเข้าเตาเผา จะส่งผลให้เซรามิกหลังเผามีการหดตัวสูง เนื่องจากน้ำในตัวอย่งระเหยออกมา ทำให้เซรามิกเสียรูปร่างได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การตากตัวอย่าง 24 ชั่วโมงในทุกการทดลองเพื่อลดปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น

4.1.2 ผลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิการเผา

ภาพประกอบที่ 46 แสดงชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเผา 1.5, 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่ออนาที ถึงอุณหภูมิสุดท้าย 700 องศาเซลเซียส จากนั้นปล่อยให้ตัวอย่างที่เผาแล้วเย็นลงในเตาจนถึงอุณหภูมิห้อง จากการสังเกตทางกายภาพพบว่า เซรามิกหลังเผามีสีแตกต่างกัน โดยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเผา 1.5, 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่ออนาที ไม่ทำให้สีของเซรามิกแตกต่างกัน แต่อัตราการผสมเถ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 ทำให้สีแตกต่างกัน ชิ้นงานเซรามิกที่ไม่ผสมเถ้าหลังเผาจะเป็นสีน้ำตาลส้ม ส่วนชิ้นงานเซรามิกที่ผสมเถ้าหลังเผาจะเป็นสีน้ำตาลเทา ชิ้นงานจะมีสีเทามากขึ้นเมื่ออัตราส่วนเถ้าเพิ่มขึ้น

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบที่ 46 ชิ้นงานเซรามิกอัตราส่วนผสมเถ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 เผาด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5, 3 และ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที

จากภาพประกอบที่ 46 พบว่าชิ้นงานเซรามิกที่มีการแตกหักมี 3 ชิ้นงานคือ 1. ชิ้นงานที่ไม่มีอัตราผสมเถ้าหนัก เผาด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที 2. ชิ้นงานที่ไม่มีอัตราผสมเถ้าหนัก เผาด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที 3. ชิ้นงานที่ไม่มีอัตราผสมเถ้าหนัก เผาด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 9 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 17

ชิ้นงานเซรามิกดังกล่าวเกิดการแตกร้าว เนื่องจากน้ำในตัวอย่างระเหยอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการแตกร้าวได้ ซึ่งผลของการแตกร้าวของชิ้นงานมีลักษณะสอดคล้องการทดสอบเบื้องต้น ถ้าน้ำให้ตัวอย่างระเหยออกมารวดเร็ว ตัวอย่างจะเสียรูปร่าง (รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 4.1.1) ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Kadir and Mohajerani (2015) ที่ผลิตอิฐดินเผาเพื่อศึกษาการระเหยของก๊าซจากอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 0.7, 2.0, 5.0 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้อุณหภูมิสูงสุดในการเผา 1,050 องศาเซลเซียส พบว่าอิฐที่ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 0.7 และ 2.0 องศาเซลเซียสต่อนาทีไม่มีรอยแตกร้าว ส่วนอิฐที่ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5.0 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีเกิดรอยแตกร้าวเล็กน้อยจาก นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการผสมเถ้าในเซรามิกดินเหนียวช่วยทำให้เซรามิกสามารถทนต่อการเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Arivudai and Jayakumar (2018) ที่ใช้เถ้าหนักจากหม้อไอน้ำถ่านหินในการผลิตอิฐดินเหนียว ซึ่งการหดตัวเชิงเส้นลดลงตามปริมาณเถ้าหนักที่แทนที่ดินเหนียวในการผลิตอิฐ และการเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็วก็ทำให้น้ำในตัวอย่างระเหยอย่างรวดเร็วทำให้ชิ้นงานแตกร้าวได้

ดังนั้นในการทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิกจึงเลือกใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที

ตารางที่ 17 ผลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะเผาที่ส่งผลและต่อรอยแตกร้าว

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (องศาเซลเซียสต่อนาที)	การแตกร้าว		
	อัตราส่วนแก้ว (ร้อยละ)		
	0	20	40
1.5	ไม่พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
3	พบ	ไม่พบ	ไม่พบ
9	พบ	พบ	ไม่พบ

4.1.3 ผลของอุณหภูมิสุดท้ายและระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิสุดท้าย (สูงสุด) ของการเผาเซรามิก ได้แก่ 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส ต่อสมบัติของเซรามิกที่ได้ นอกจากนี้ยังศึกษาผลของระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้ายคือ ไม่ขยายเวลาเผาต่อ (0 ชั่วโมง) และขยายเวลาเผาต่ออีก 4 ชั่วโมง

4.1.3.1 ผลอุณหภูมิสุดท้ายในการเผา

ตารางที่ 18 แสดงผลอุณหภูมิเผาสุดท้าย 3 ค่าคือ 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส ต่อค่าการหดตัวเชิงเส้น การดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัดของเซรามิก โดยค่าการหดตัวเชิงเส้นคำนวณตามสมการที่ 8 การหดตัวเชิงเส้นแสดงถึงการเสียรูปร่างของชิ้นงาน ในการทดลองนี้ชิ้นงานที่มีการเสียรูปร่างมากที่สุดคือชิ้นงานที่ไม่ผสมแก้ว เผาด้วยอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสมีค่าการหดตัวเชิงเส้นร้อยละ 3.93 ส่วนชิ้นงานที่มีการเสียรูปร่างน้อยที่สุดคือชิ้นงานที่ผสมแก้วร้อยละ 40 เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสซึ่งไม่มีการหดตัวเชิงเส้นเลย อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เมื่อนำออกมาจากเตาพบว่า มีลักษณะดินที่ยังไม่สุกคือ ยังแข็งตัวไม่ทั้งก้อนเมื่อจับชิ้นงานมีเสียงของชิ้นงานติดมือเหมือนตัวอย่างก่อนนำเข้าเตาเผา

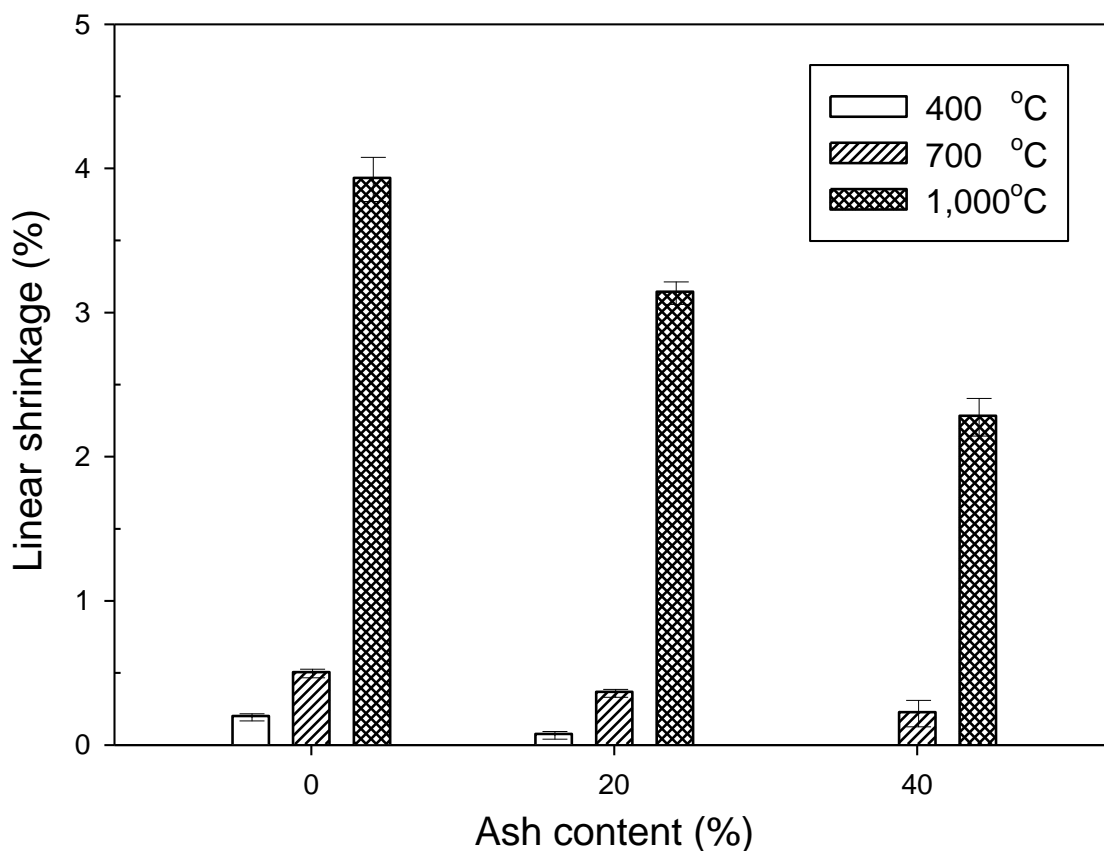
ตารางที่ 18 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเซรามิก *

อุณหภูมิ (°C) / อัตราเถ้า (ร้อยละ)	การหดตัวเชิงเส้น (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	กำลังรับแรงอัด (MPa)
400 / 00	0.20±0.03	19.0±0.00	4.82
400 / 20	0.08±0.03	18.1±0.09	5.17
400 / 40	0.00±0.00	19.3±0.43	3.88
700 / 00	0.51±0.03	17.8±0.61	9.22
700 / 20	0.37±0.03	17.6±0.19	16.7
700 / 40	0.23±0.09	18.2±0.54	8.29
1,000 / 00	3.93±0.15	13.2±0.02	33.5
1,000 / 20	3.15±0.08	11.6±0.28	47.5
1,000 / 40	2.28±0.13	15.4±0.00	33.5

* การทดลองนี้ไม่มีการยืดระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย

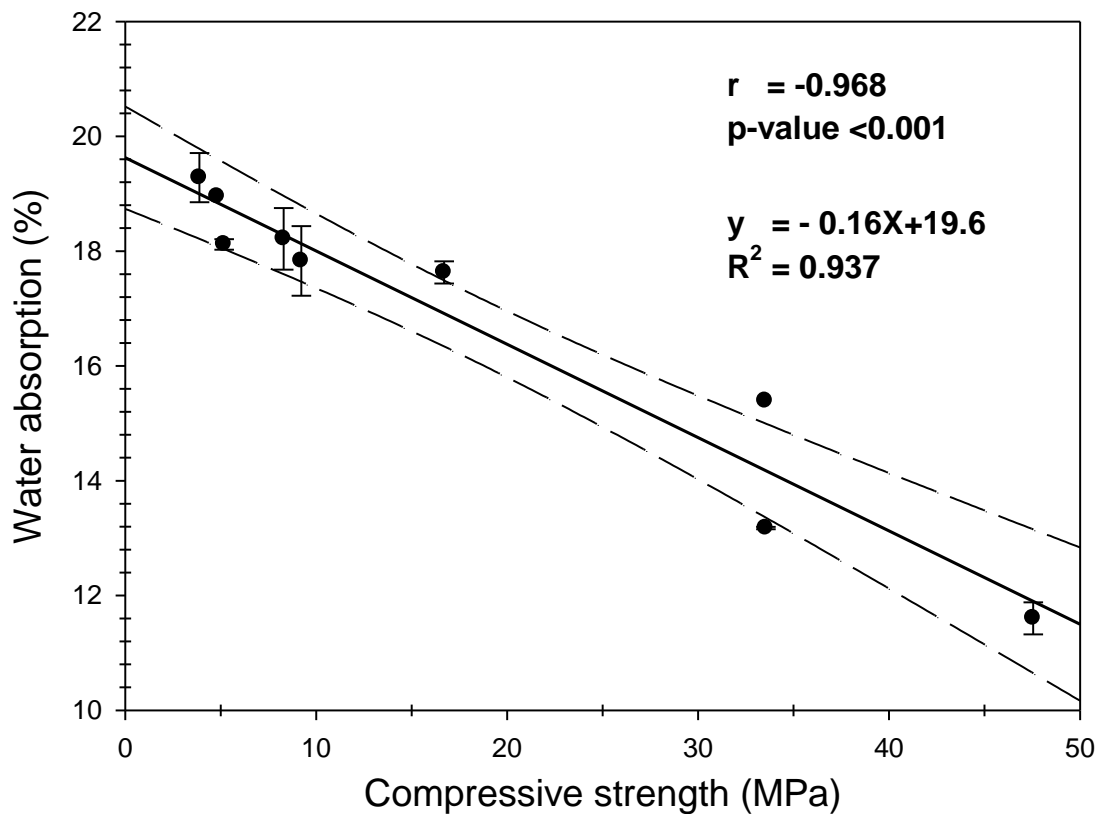
ภาพประกอบที่ 47 แสดงการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานผสมเถ้าหนักร้อยละ 0, 20 และ 40 เผาด้วยอุณหภูมิสุดท้าย 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส ไม่มีการขยายระยะเวลาเผาต่อ สังเกตได้ว่าการหดตัวเชิงเส้นมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา ชิ้นงานไม่ผสมเถ้าหนัก อุณหภูมิเผาที่ 1,000 องศาเซลเซียส มีการหดตัวเชิงเส้นมากกว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิเผา 400 และ 700 องศาเซลเซียส เท่ากับ 19 และ 7.8 เท่า ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิเผาที่สูงขึ้นทำให้เกิดเฟสของเหลว (liquid phase) และการระเหยที่มากขึ้น จึงเกิดการหดตัวมากขึ้นตามไปด้วย (จันบัวลา และวาสนาเพียรพงศ์, 2560) ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Mahmoudi et al. (2016) ที่ผลิตเซรามิกจากดินเหนียว ใช้อัตรา การเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิในการเผาสูงสุด 850, 900, 950, 1,000, 1,050 และ 1,100 องศาเซลเซียส ได้ค่าการหดตัวหลังการเผาเท่ากับ 0.57, 0.89, 1.57, 2.56, 2.76 และ 3.86 ตามลำดับ

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบที่ 47 การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานผสมเถ้าหนัก 3 อัตราส่วน เผาด้วยอุณหภูมิสุด 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาสมบัติของเซรามิกด้านการดูดซึมน้ำและกำลังรับแรงอัดแสดงดังตารางที่ 18 พบว่าชิ้นงานที่ผสมเถ้าร้อยละ 40 เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีกำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด 3.88 เมกะปาสคาลและมีการดูดซึมน้ำมากที่สุดร้อยละ 19.3 ส่วนชิ้นงานที่ผสมเถ้าร้อยละ 20 เผาด้วยอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส มีกำลังรับแรงอัดมากที่สุด 47.5 เมกะปาสคาล และมีการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดร้อยละ 11.6 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดเฟสของเหลว และเฟสของแก้ว (silica phase) เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรูพรุนปิดภายใน ส่งผลให้การดูดซึมน้ำของชิ้นงานลดลง และอุณหภูมิเผาที่สูงขึ้นยังทำให้องค์ประกอบ SiO_2 ในส่วนผสมเกิดเป็นผลึกควออตซ์ (quartz) ช่วยเสริมความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานจึงเพิ่มขึ้น (Hutchinson and Yvonne, 1996) ภาพประกอบที่ 48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ และผสมเถ้าอัตราส่วนต่างๆ โดยเส้นทึบแสดงสมการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ในขณะที่เส้นประแสดงช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของสมการถดถอยที่ได้



ภาพประกอบที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับกำลังรับแรงอัดของเซรามิก

จากภาพประกอบที่ 48 เมื่อนำค่าการดูดซึมน้ำและกำลังรับแรงอัดมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้น พบว่ามีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกัน โดยมีค่า r (Pearson correlation coefficient) เท่ากับ -0.968 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 เมื่อนำมาสร้างเป็นสมการถดถอยเชิงเส้น มีค่า R^2 (proportion of variance explained) = 0.937 ความชันจากสมการได้เท่ากับ -5.76 ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Eliche-Quesada and Leite-Costa (2016) ที่ใช้เถ้ามะกอกและดินเหนียวในการทำอิฐดินเหนียว โดยใช้อัตราผสมเถ้าร้อยละ 0-50 เเผด้วยอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส พบว่าการดูดซึมน้ำและกำลังรับแรงอัดมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกัน

จากหัวข้อที่ 4.1.3.1 เซรามิกที่เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีเนื้อดินไม่สุก ดังนั้นในการทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิกจึงไม่ใช้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แต่ทางผู้วิจัยยังคงต้องการอุณหภูมิการเผาสูงสุด 3 ค่า จึงได้เพิ่มอุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เพื่อให้ครบตามต้องการ

4.1.3.2 ผลระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย

ตารางที่ 19 แสดงผลอุณหภูมิเผาสุดท้าย 3 ค่าคือ 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส ต่อค่าการหดตัวเชิงเส้น การดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัดของเซรามิกอัตราส่วนแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 ที่มีการขยายเวลาเผาจากอุณหภูมิสุดท้าย 4 ชั่วโมง การทดลองนี้ชิ้นงานที่มีการเสียรูปร่างมากที่สุดคือชิ้นงานที่ไม่ผสมแก้ว เผาด้วยอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสมีค่าการหดตัวเชิงเส้นร้อยละ 6.57 ส่วนชิ้นงานที่มีการเสียรูปร่างน้อยที่สุดคือชิ้นงานที่ผสมแก้วร้อยละ 40 เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีค่าการหดตัวเชิงเส้นร้อยละ 0.12

เมื่อพิจารณาสมบัติของเซรามิกด้านการดูดซึมน้ำแสดงดังตารางที่ 19 พบว่าชิ้นงานที่ผสมแก้วร้อยละ 40 เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุดร้อยละ 17.8 ส่วนชิ้นงานที่ผสมแก้วร้อยละ 20 เผาด้วยอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดร้อยละ 8.94

ตารางที่ 19 เมื่อพิจารณาสมบัติของเซรามิกด้านกำลังรับแรงอัด พบว่าชิ้นงานไม่ผสมแก้วหนัก เผาด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยที่สุด 3.93 เมกะปาสคาล ส่วนชิ้นงานที่ผสมแก้วร้อยละ 20 เผาด้วยอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส มีกำลังรับแรงอัดมากที่สุด 40.9 เมกะปาสคาล

ตารางที่ 19 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติเซรามิกที่มีการขยายระยะเวลาการเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย

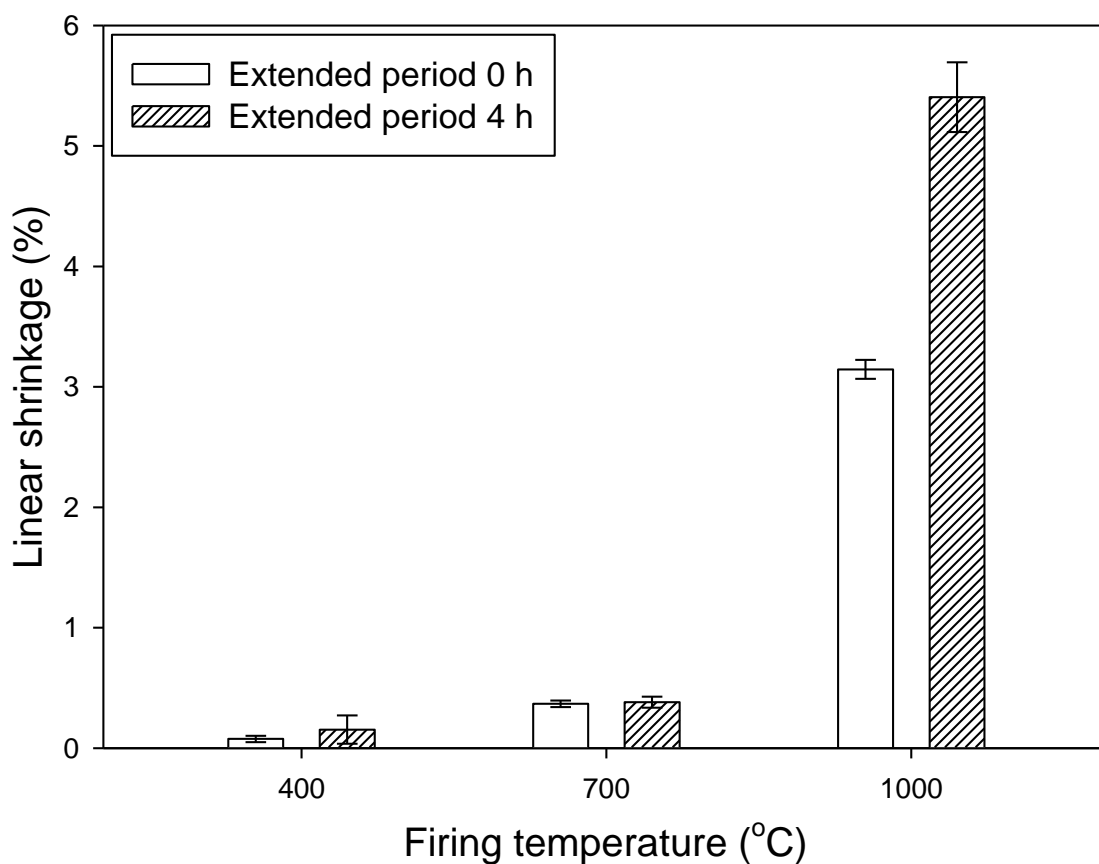
อุณหภูมิ (°C) / อัตราแก้ว (ร้อยละ)	การหดตัวเชิงเส้น (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	กำลังรับแรงอัด (MPa)
400 / 00	0.48±0.15	17.4±0.57	3.93
400 / 20	0.15±0.12	16.6±0.16	5.94
400 / 40	0.12±0.10	17.8±1.13	4.90
700 / 00	0.54±0.07	14.5±3.44	11.7
700 / 20	0.38±0.04	14.4±0.40	12.7
700 / 40	0.24±0.02	14.9±0.35	6.64
1,000 / 00	6.57±0.44	11.0±0.93	29.4
1,000 / 20	5.40±0.29	8.94±0.47	40.9
1,000 / 40	2.71±0.29	12.9±0.40	29.8

เมื่อพิจารณาสมบัติของเซรามิกด้านกำลังรับแรงอัด เปรียบเทียบกันระหว่างชิ้นงานที่ไม่มีการขยายเวลาเผากับชิ้นงานที่มีการขยายเวลาเผา 4 ชั่วโมง ดังตารางที่ 18 และ 19 พบว่าการขยายเวลาเผาส่งผลให้ชิ้นงานส่วนใหญ่ ที่เผาอุณหภูมิ 400 และ 700 องศาเซลเซียสมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น แต่กลับไม่ส่งผลให้ชิ้นงานส่วน ที่เผาอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำข้อมูล ค่าการขยายระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้ายและค่ากำลังรับแรงอัดไปหาความสัมพันธ์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (SPSS 22) โดยทำการทดสอบค่าเฉลี่ยสำหรับ 2 กลุ่มตัวอย่าง กรณีที่ 2 กลุ่มตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน

กำหนดให้วิเคราะห์ความเชื่อมั่นที่ระดับร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) โดยตั้งสมมติฐานว่า H_0 : ค่ากำลังรับแรงอัดของการขยายเวลาเผาต่อการไม่ขยายเวลาเผา ไม่มีความแตกต่างกัน H_1 : ค่ากำลังรับแรงอัดของการขยายเวลาเผาต่อการไม่ขยายเวลาเผา มีความแตกต่างกัน เมื่อวิเคราะห์เสร็จแล้วพบว่าค่าความน่าจะเป็น Sig. (2-tailed) มีค่าเท่ากับ 0.794 ซึ่งมากกว่าระดับความเชื่อมั่นที่กำหนดไว้ ($\alpha=0.05$) ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐาน H_0 คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของการขยายเวลาเผาต่อการไม่ขยายเวลาเผา ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หรือพูดนัยว่าการเผาต่อไม่ได้ทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของเซรามิกจึงเลือก ไม่เพิ่มระยะเวลาการเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานในการเผา

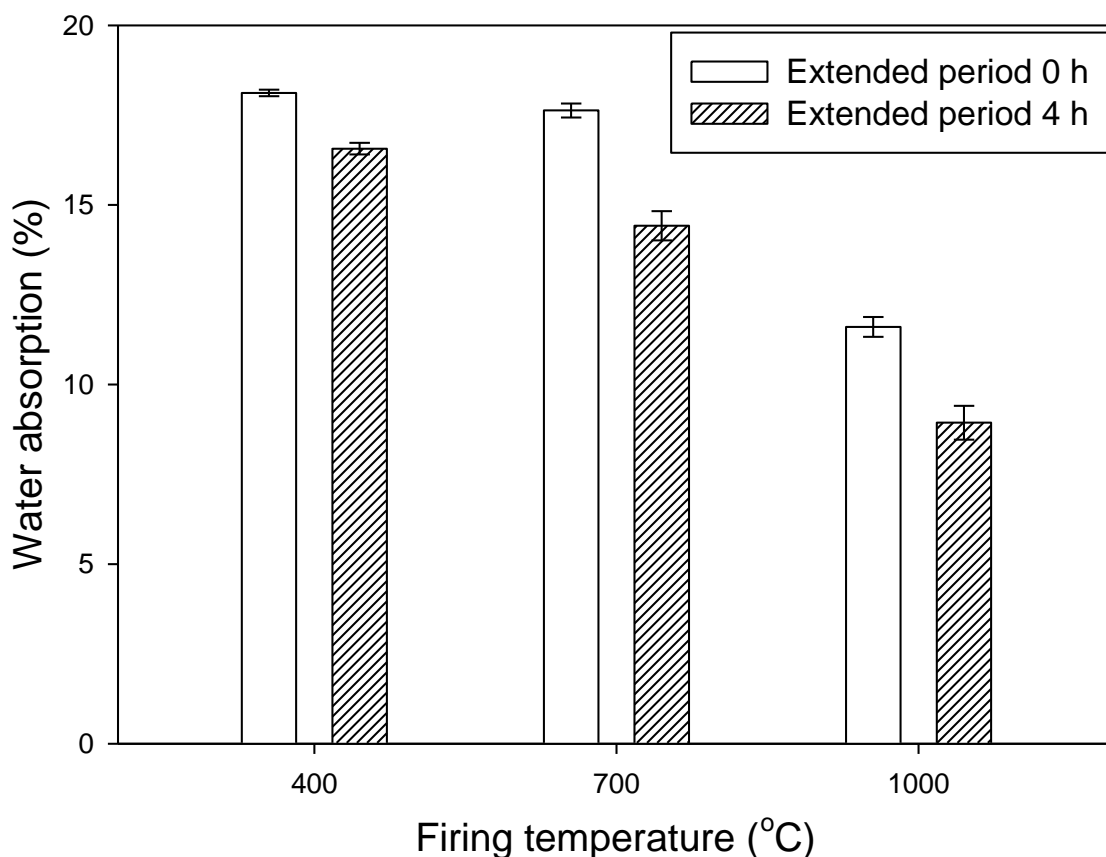
ภาพประกอบที่ 49 แสดงผลอุณหภูมิเผาสุดท้าย 3 ค่าคือ 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส ต่อค่าการหดตัวเชิงเส้น ของเซรามิกอัตราส่วนแก้วร้อยละ 20 ที่ไม่มีการขยายเวลาและมีการขยายเวลาเผาจากอุณหภูมิสุดท้าย 4 ชั่วโมง พบว่าการขยายเวลาเผา 4 ชั่วโมง ทำให้การหดตัวเชิงเส้นมีค่ามากขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจากการไม่ขยายเวลาเผาเท่ากับ 2.01, 1.03 และ 1.72 เท่าสำหรับอุณหภูมิเผา 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการขยายระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย ทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนนานขึ้น คล้ายกับการเพิ่มอุณหภูมิ จึงเกิดเฟสของเหลวและการระเหยที่มากขึ้น จึงเกิดการหดตัวมากขึ้นตามไปด้วย (จันบัวลา & วาสนาเพียรพงศ์, 2560)

พูนุ ปณุกิตโต ชีวะ



ภาพประกอบที่ 49 ผลอุณหภูมิเผา 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส ต่อการหดตัวเชิงเส้น ของเซรามิกอัตราส่วนแก้วร้อยละ 20 ที่ไม่มีการขยายเวลาและมีการขยายเวลาเผาจากอุณหภูมิสุดท้าย 4 ชั่วโมง

ภาพประกอบที่ 50 แสดงผลอุณหภูมิเผาสุดท้าย 3 ค่าคือ 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส ต่อค่าการดูดซึมน้ำ ของเซรามิกอัตราส่วนแก้วร้อยละ 20 ที่ไม่มีการขยายเวลาและมีการขยายเวลาเผาจากอุณหภูมิสุดท้าย 4 ชั่วโมง พบว่าการขยายเวลาเผา 4 ชั่วโมง ทำให้การดูดซึมน้ำมีค่าน้อยลง โดยน้อยลงจากการไม่ขยายเวลาเผาเท่ากับ 0.91, 0.82 และ 0.77 เท่าสำหรับอุณหภูมิเผา 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการขยายระยะเวลาการเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้ายอีก 4 ชั่วโมง ทำให้ชิ้นงานได้รับความร้อนนานขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดเฟสของเหลวและเฟสของแก้วเพิ่มขึ้น เฟสของเหลวและเฟสของแก้วเมื่อเย็นตัวลง จะแข็งและปิดส่วนของรูพรุนที่เชื่อมติดกับผิวหน้าชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดรูพรุนเปิดกลายเป็นรูพรุนปิด ดังนั้นค่าการดูดซึมน้ำจึงลดลง (Yariv, 2004)



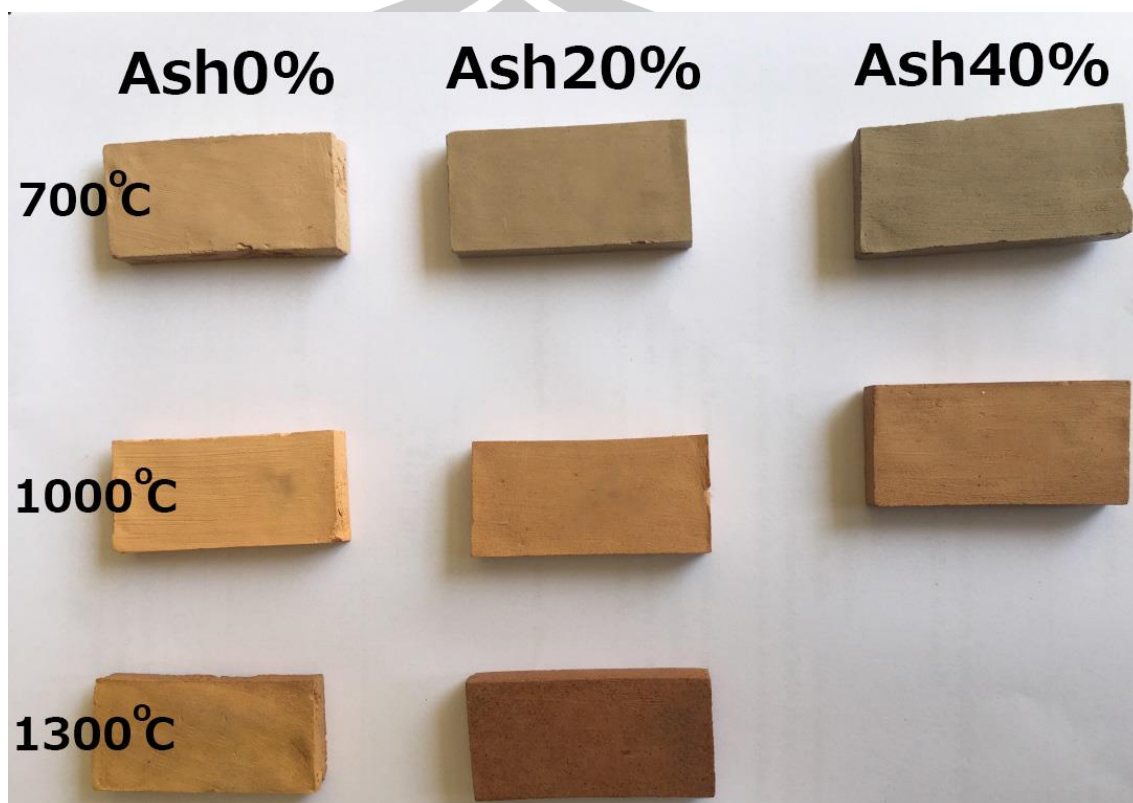
ภาพประกอบที่ 50 ผลอุณหภูมิมเผา 400, 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส ต่อการดูดซึมน้ำ ของเซรามิกอัตราส่วนแก้วร้อยละ 20 ที่ไม่มีการขยายเวลาและมีการขยายเวลาเผาจากอุณหภูมิต่ำสุดท้าย 4 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาค่ามาตรฐานอิฐก่อสร้างประเภท ข มอก. 77-2545 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2545) ซึ่งกำหนดค่ากำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 15 เมกะปาสคาล และค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 25 พบว่าชิ้นงานเซรามิกอุณหภูมิมเผา 1,000 องศาเซลเซียสผ่านมาตรฐานทุกอัตราส่วน แต่ชิ้นงานเซรามิกอุณหภูมิมเผา 400 และ 700 องศาเซลเซียสผ่านมาตรฐานเพียงชิ้นงานเดียว คือ เซรามิกผสมแก้วร้อยละ 20 เผาที่ 700 องศาเซลเซียส ไม่มีการยืดระยะเวลาการเผาต่อ

4.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของเซรามิก

ภาพประกอบที่ 51 แสดงชิ้นงานเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 เผาที่อุณหภูมิต่ำสุดท้าย 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิมเผา 1.5 องศาเซลเซียสต่อ นาที ไม่ขยายระยะเวลาเผาต่อ พบว่าสีของชิ้นงานเซรามิกเข้มขึ้น เมื่อแทนที่แก้วหนักในอัตราส่วนที่มากขึ้นในอุณหภูมิมการเผาเท่ากัน ส่วนในแง่ของอุณหภูมิมการเผา ชิ้นงานเซรามิกเผาที่อุณหภูมิม 700

องศาเซลเซียสมีสีเทามากกว่าการเผาที่อุณหภูมิอื่น อาจเป็นเพราะอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสยังไม่เพียงพอให้ชิ้นงานเปลี่ยนสีได้ทั้งหมด เนื่องจากสีเทาดำเป็นสีของชิ้นงานก่อนนำไปเผา



ภาพประกอบที่ 51 ชิ้นงานเซรามิก 3 อัตราส่วนผสมเถ้า เผาด้วยอุณหภูมิ 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส

ภาพประกอบที่ 52 แสดงชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าร้อยละ 40 เผาที่อุณหภูมิสุดท้าย 1,300 องศาเซลเซียส พบว่าชิ้นงานเซรามิกมีรูปร่างที่ผิดแปลกไปจากชิ้นงานตัวอื่น มีลักษณะพองตัว พื้นที่บางส่วนมีความพรุนคล้ายรังผึ้ง อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิเผา 1,300 องศาเซลเซียส ทำให้เถ้าที่ผสมเข้าไปร้อยละ 40 หลอมละลายเกิดเป็นก๊าซภายในชิ้นงาน เมื่อก๊าซภายในพยายามเคลื่อนที่ออกจากชิ้นงานทำให้เกิดรูพรุนและชิ้นงานเกิดการขยายตัว เนื่องจากภายในเตาเผาชิ้นงานถูกวางใกล้กัน ชิ้นงานจึงหลอมรวมกับชิ้นงานที่วางอยู่ใกล้เคียงทั้งหมด 8 ชิ้นงาน ตามภาพประกอบที่ 52 ทำให้ชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าร้อยละ 40 เผาที่อุณหภูมิสุดท้าย 1,300 องศาเซลเซียสไม่สามารถทดสอบสมบัติของเซรามิกได้



ภาพประกอบที่ 52 ชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าร้อยละ 40 เผาด้วยอุณหภูมิตั้งที่ 1,300 องศาเซลเซียส

4.2.1 ผลอัตราส่วนผสมเถ้าหนัก

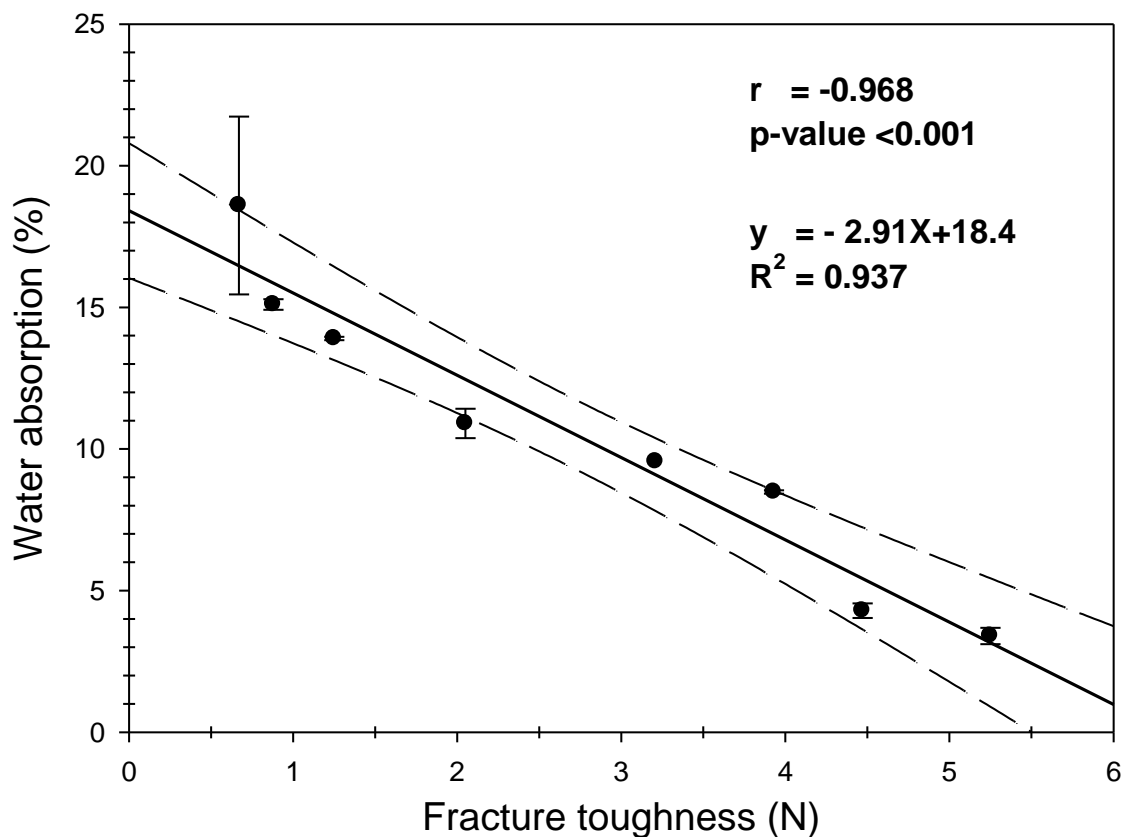
ตารางที่ 20 แสดงผลอุณหภูมิตั้งที่เผาสุดท้าย 3 ค่าคือ 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส ต่อค่าการหดตัวเชิงเส้น การดูดซึมน้ำ และความต้านแรงกดแตกของเซรามิกอัตราส่วนเถ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 หมายถึง การทดลองในหัวข้อ 4.2 เป็นการใช้อินเหนียวชุดที่ 2 ซึ่งดินเหนียวและเถ้าหนักมีขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอน

เมื่อพิจารณาสมบัติด้านการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิกหลังเผาพบว่า ชิ้นงานที่มีการเสียรูปร่างมากที่สุดคือชิ้นงานที่ไม่ผสมเถ้า เผาด้วยอุณหภูมิตั้งที่ 1,300 องศาเซลเซียสมีค่าการหดตัวเชิงเส้นร้อยละ 4.67 ส่วนชิ้นงานที่มีการเสียรูปร่างน้อยที่สุดคือชิ้นงานที่ผสมเถ้าร้อยละ 40 เผาด้วยอุณหภูมิตั้งที่ 700 องศาเซลเซียสมีค่าการหดตัวเชิงเส้นร้อยละ 0.11 เมื่อพิจารณาจากผลของการทดลองในดินเหนียวชุดที่ 1 ทำให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการหดตัวเชิงเส้นแปรผกผันกับปริมาณเถ้าที่ผสม ซึ่งผลของอัตราส่วนผสมของเถ้าหนักต่อการหดตัวเชิงเส้นในการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ จันบัวลา และวาสนาเพียรพงศ์ (2560) ที่ผลิตอิฐมอญจากดินและเถ้าขานอ้อย อัตราผสมร้อยละ 10-40 เผาด้วยอุณหภูมิตั้งที่ 700-1,000 องศาเซลเซียส โดยอธิบายว่าเถ้าที่ผสมช่วยให้การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานลดลงเพราะเถ้าช่วยลดความเป็นพลาสติกของดิน แต่อย่างไรก็ดีพบว่า ชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าหนัก ร้อยละ 20 เผาด้วยอุณหภูมิตั้งที่ 1,300 องศาเซลเซียส กลับมีค่าการหดตัวเชิงเส้นติดลบนั้นหมายถึง ชิ้นงานหลังเผามีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานก่อนเผา เกิดการขยายตัว โดยผลของการขยายตัวแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดมากขึ้นเมื่อมีการเติมเถ้าแทนที่ดินเหนียวร้อยละ 40 เผาด้วยอุณหภูมิตั้งที่ 1,300 องศาเซลเซียส ชิ้นงานเกิดการพองตัวและหลอมรวมกับชิ้นงานที่วางใกล้เคียงกันดังภาพประกอบที่ 52

ตารางที่ 20 ผลของอัตราส่วนผสมและอุณหภูมิในการเผาต่อสมบัติเซรามิก

อุณหภูมิ (°C) / อัตราเถ้า (ร้อยละ)	การหดตัวเชิงเส้น (ร้อยละ)	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความต้านแรงกดแตก (N)
700 / 00	0.23±0.05	18.6±3.14	0.67±0.11
700 / 20	0.18±0.05	13.9±0.06	1.25±0.18
700 / 40	0.11±0.04	15.1±0.19	0.88±0.11
1,000 / 00	3.67±0.06	10.9±0.52	2.05±0.11
1,000 / 20	3.12±0.17	8.48±0.06	3.93±0.49
1,000 / 40	2.69±0.09	9.55±0.00	3.21±0.50
1,300 / 00	4.76±0.25	3.40±0.29	5.25±0.22
1,300 / 20	-0.33±0.17	4.29±0.26	4.47±0.44

เมื่อพิจารณาสมบัติของเซรามิกด้านการดูดซึมน้ำและความต้านแรงกดแตกแสดงดังตารางที่ 20 พบว่าชิ้นงานที่ไม่ผสมเถ้า เผาด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีการดูดซึมน้ำมากที่สุดร้อยละ 18.6 และมีความต้านแรงกดแตกน้อยที่สุด 0.67 นิวตัน ส่วนชิ้นงานที่ผสมเถ้าร้อยละ 20 เผาด้วยอุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส มีการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดร้อยละ 3.40 และมีความต้านแรงกดแตกมากที่สุด 5.25 นิวตัน จากผลการทดลองสามารถบอกได้ว่าการผสมเถ้าหนักในอัตราส่วนที่เหมาะสมช่วยลดการดูดซึมน้ำและเพิ่มความต้านทานแรงกดได้ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากองค์ประกอบเคมีของเถ้าหนักที่นำมาใช้ (ตารางที่ 9 และ 12) มีปริมาณ Al_2O_3 มากกว่าดินเหนียว ซึ่ง Al_2O_3 จัดเป็นส่วนโครงสร้างกระดูก เมื่อถูกเผาไหม้จะทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้นเพิ่มความต้านทานแรงกดให้ชิ้นงานได้ แต่อย่างไรก็ดี Eliche-Quesada and Leite-Costa (2016) ใช้เถ้ามะกอกแทนที่ดินร้อยละ 0-50 ผลคืออุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มสัดส่วนเถ้าส่งผลให้จำนวนรูพรุนของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เมื่อผู้วิจัยผสมเถ้าหนักร้อยละ 40 การดูดซึมน้ำจึงกลับมาสูงขึ้นและความต้านทานแรงกดกลับมามีค่าลดลง ภาพประกอบที่ 53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับความต้านแรงกดแตกของชิ้นงานเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ และผสมเถ้าอัตราส่วนต่างๆ โดยเส้นทึบแสดงสมการถดถอยเชิงเส้น ในขณะที่เส้นประแสดงช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของสมการถดถอยที่ได้

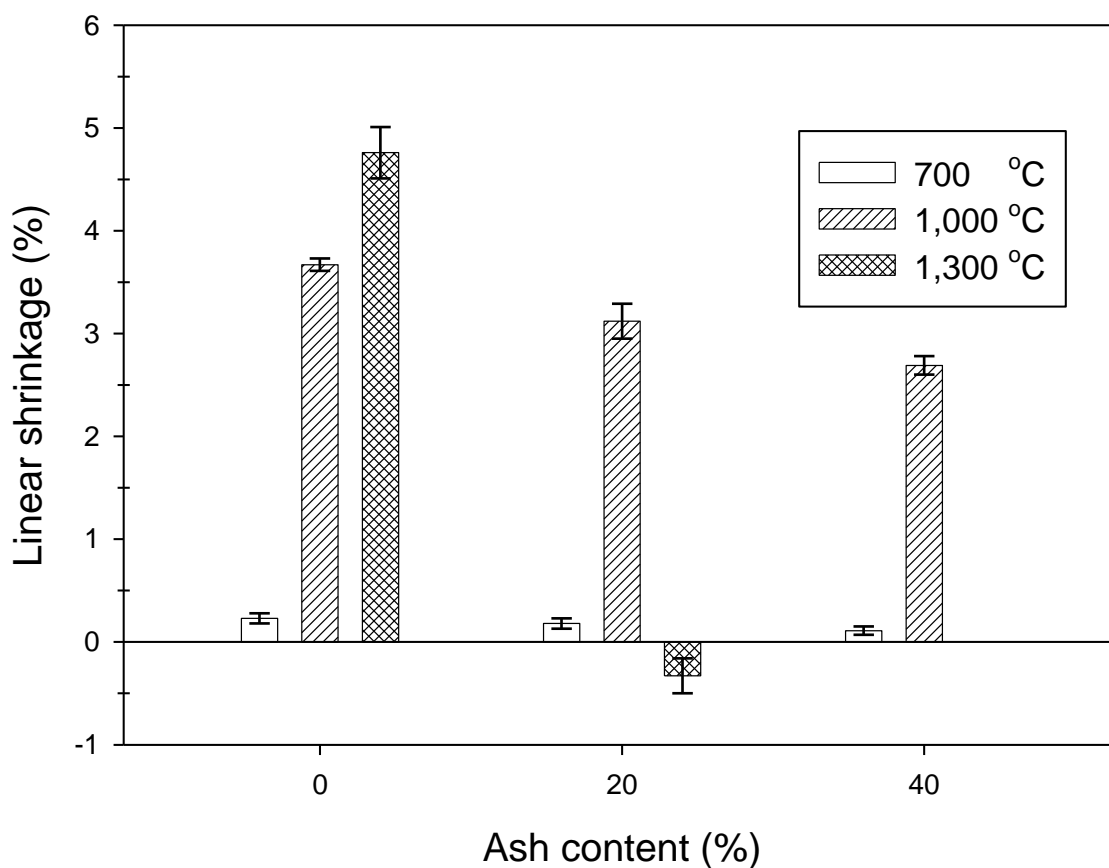


ภาพประกอบที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับความต้านแรงกดแตกของเซรามิก

ภาพประกอบที่ 53 เมื่อนำค่าการดูดซึมน้ำและความต้านแรงกดแตกมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้น พบว่ามีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกัน โดยมีค่า r เท่ากับ -0.968 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 เมื่อนำมาสร้างเป็นสมการถดถอยเชิงเส้น มีค่า R^2 เท่ากับ 0.937 ความชันจากสมการได้เท่ากับ -2.91 ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับกำลังรับแรงอัด (หัวข้อ 4.1.3.1) ซึ่งความชันจากสมการได้เท่ากับ -5.76

4.2.2 ผลของอุณหภูมิสุดท้ายในเผา

ภาพประกอบที่ 54 แสดงผลอุณหภูมิเผาสุดท้าย 3 ค่าคือ 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส ต่อค่าการหดตัวเชิงเส้นของเซรามิกอัตราส่วนแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 พบว่าอุณหภูมิเผาสุดท้ายที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าการหดตัวเชิงเส้นเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจากเซรามิกอัตราส่วนแก้วร้อยละ 0 เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเท่ากับ 16 และ 21 เท่าสำหรับอุณหภูมิเผา 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียสตามลำดับ



ภาพประกอบที่ 54 การหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานผสมเถ้าหนัก 3 อัตราส่วน เผาด้วยอุณหภูมิสุด 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาจากผลของการทดลองในดินเหนียวชุดที่ 1 และภาพประกอบที่ 54 ทำให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการหดตัวเชิงเส้นแปรผันตามอุณหภูมิสุดท้ายในการเผา โดยในกรณีเซรามิกที่ไม่ผสมเถ้าพบว่า การเผาที่อุณหภูมิเผา 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าการหดตัวเชิงเส้นเพิ่มขึ้น 16 และ 21 เท่าของการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งผลของอุณหภูมิสุดท้ายในการเผาต่อค่าการหดตัวเชิงเส้นในการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bennour et al. (2015) ที่ผลิตรูจากดินเหนียวอย่างเดียวยุโดยการเผาที่อุณหภูมิ 950, 1050 และ 1100 องศาเซลเซียส พบว่าการหดตัวหลังเผาร้อยละ 1.7, 2.8 และ 5.5 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ดี ในงานวิจัยนี้เมื่อผสมเถ้าร้อยละ 20 และ 40 เผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ชิ้นงานเกิดการขยายตัวมากตามปริมาณเถ้าที่ใส่ จึงสามารถบอกได้ว่าอุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส เนื้อเถ้าหนักในวัสดุเซรามิกมีการขยายตัวมากกว่าการหดตัวของเนื้อดินเหนียวในวัสดุเซรามิก

ตารางที่ 20 เมื่อพิจารณาจากผลของอุณหภูมิเผาสุดท้ายต่อการดูดซึมน้ำและความต้านทานแรงกดแตก พบว่ากรณีชิ้นงานที่ไม่เข้าผสม เผาด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีการดูดซึมน้ำมากที่สุดร้อยละ 18.6 และมีความต้านทานแรงกดแตกน้อยที่สุด 0.67 นิวตัน ส่วนชิ้นงานเผาด้วยอุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส มีการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดร้อยละ 3.40 และมีความต้านทานแรงกดแตกมากที่สุด 5.25 นิวตัน ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการเผาที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดรูพรุนปิด (รายละเอียดตามหัวข้อ 4.1.3.1) ซึ่งการดูดซึมน้ำสอดคล้องกับงานของ Mahmoudi et al. (2016) ที่ผลิตเซรามิกจากดินเหนียว ใช้อุณหภูมิสุดท้ายในการเผา 850-1,100 องศาเซลเซียส ได้ค่าการดูดซึมน้ำของชิ้นงานเท่ากับร้อยละ 9.77-21.2 โดยการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแปรผกผันกับอุณหภูมิสุดท้ายในการเผา

ตารางที่ 21 แสดงสมการของการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ (Multiple Linear Regression) ของตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ในการศึกษาครั้งนี้คือ อัตราส่วนผสมแก้วหนัก และอุณหภูมิสุดท้ายในการเผา ต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามคือ การหดตัวเชิงเส้น, การดูดซึมน้ำ และความต้านทานแรงกด ว่าตัวแปรอิสระมีผลมากน้อยเพียงใด โดยดูจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยในรูปแบบมาตรฐาน (ไม่คิดเครื่องหมาย) ส่วน Adjusted R² แสดงค่าอิทธิพลของตัวแปรอิสระทั้งหมดที่มีผลต่อตัวแปรตาม

ตารางที่ 21 สมการของการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ

ตัวแปรตาม	สมการ *	Adjusted R ²
การหดตัวเชิงเส้น (X ₁)	$X_1 = -0.25Y + 0.44Z$	0.03
การดูดซึมน้ำ (X ₂)	$X_2 = -0.16Y - 0.99Z$	0.92
ความต้านทานแรงกดแตก (X ₃)	$X_3 = 0.11Y + 0.97Z$	0.86

* หมายเหตุ กำหนดให้ค่า Y คือสัมประสิทธิ์การถดถอยในรูปแบบมาตรฐานของอัตราส่วนผสมแก้วหนัก

ค่า Z คือสัมประสิทธิ์การถดถอยในรูปแบบมาตรฐานของอุณหภูมิสุดท้ายในการเผา

เมื่อพิจารณาสมการการถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณของการหดตัวเชิงเส้น, การดูดซึมน้ำ และความต้านทานแรงกดแตก แสดงดังตารางที่ 21 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิสุดท้ายในการเผาเซรามิก (Z) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนผสมแก้วหนัก (Y) ในทุกการพิจารณาตัวแปรตาม ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิสุดท้ายในการเผามีอิทธิพลต่อการหดตัวเชิงเส้น, การดูดซึมน้ำ และความต้านทานแรงกดแตก มากกว่าอัตราส่วนผสมแก้วหนัก และจาก Adjusted R² พบว่าการกำหนดตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปรคือ อัตราส่วนผสมแก้วหนักและอุณหภูมิสุดท้ายในการเผามีอิทธิพลต่อ การหดตัวเชิงเส้น, การดูดซึมน้ำ และความต้านทานแรงกดแตก เท่ากับร้อยละ 3, 92 และ 86 ตามลำดับ จะเห็นว่า

Adjusted R² ของการหัดตัวเชิงเส้นมีค่าต่ำสุด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากชุดข้อมูลการหัดตัวเชิงเส้นของจำนวนตัวอย่างทั้งหมดมีเพียง 1 ตัวอย่างที่มีค่าการหัดตัวติดลบ (ชิ้นงานผสมแก้วร้อยละ 20 เเผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส) จึงไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปจึงควรศึกษาอัตราส่วนผสมแก้วมากกว่า 3 อัตราส่วน เช่น พิจารณาร้อยละ 5, 10, 15, 25 และ 30 เป็นต้น

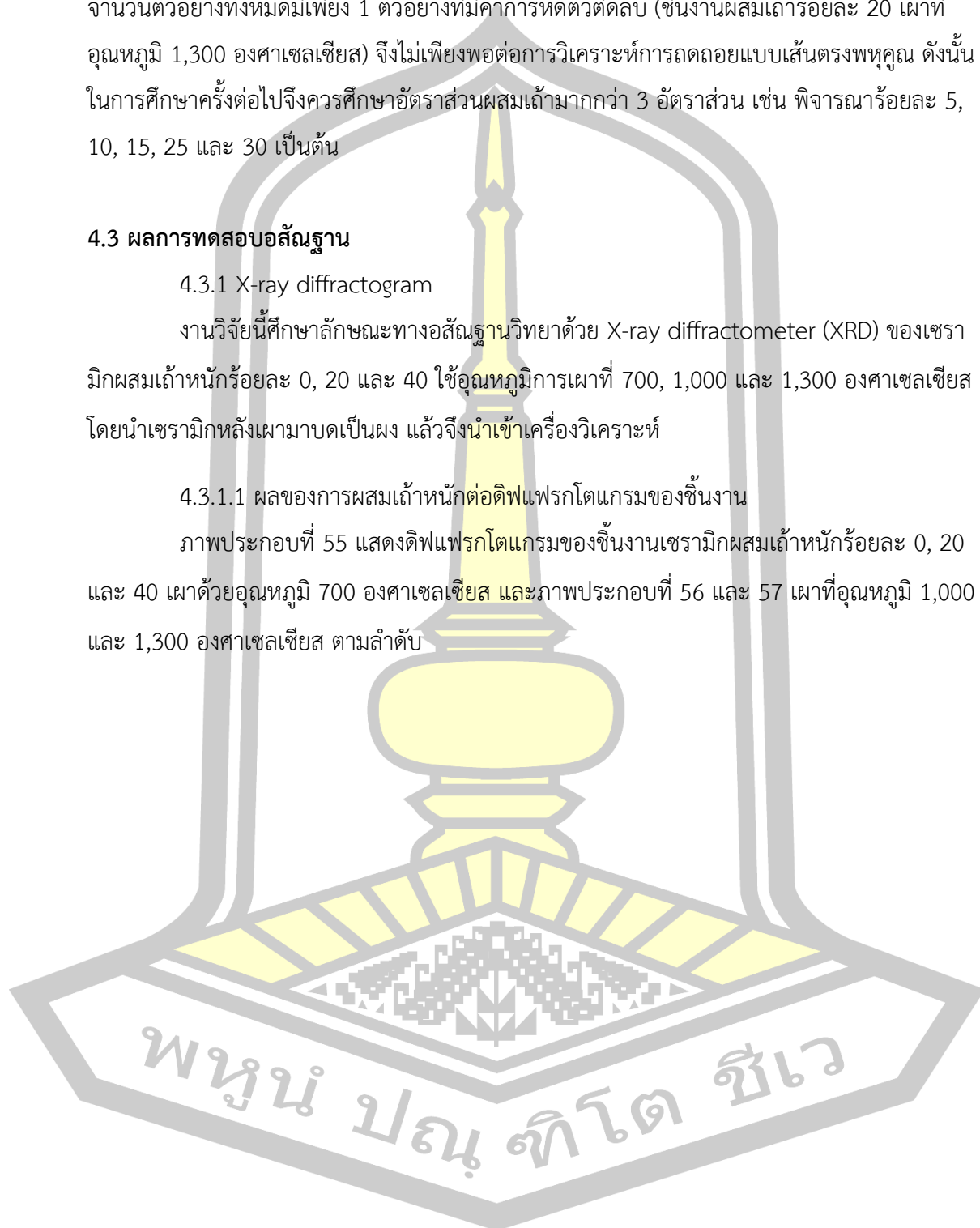
4.3 ผลการทดสอบอสังฐาน

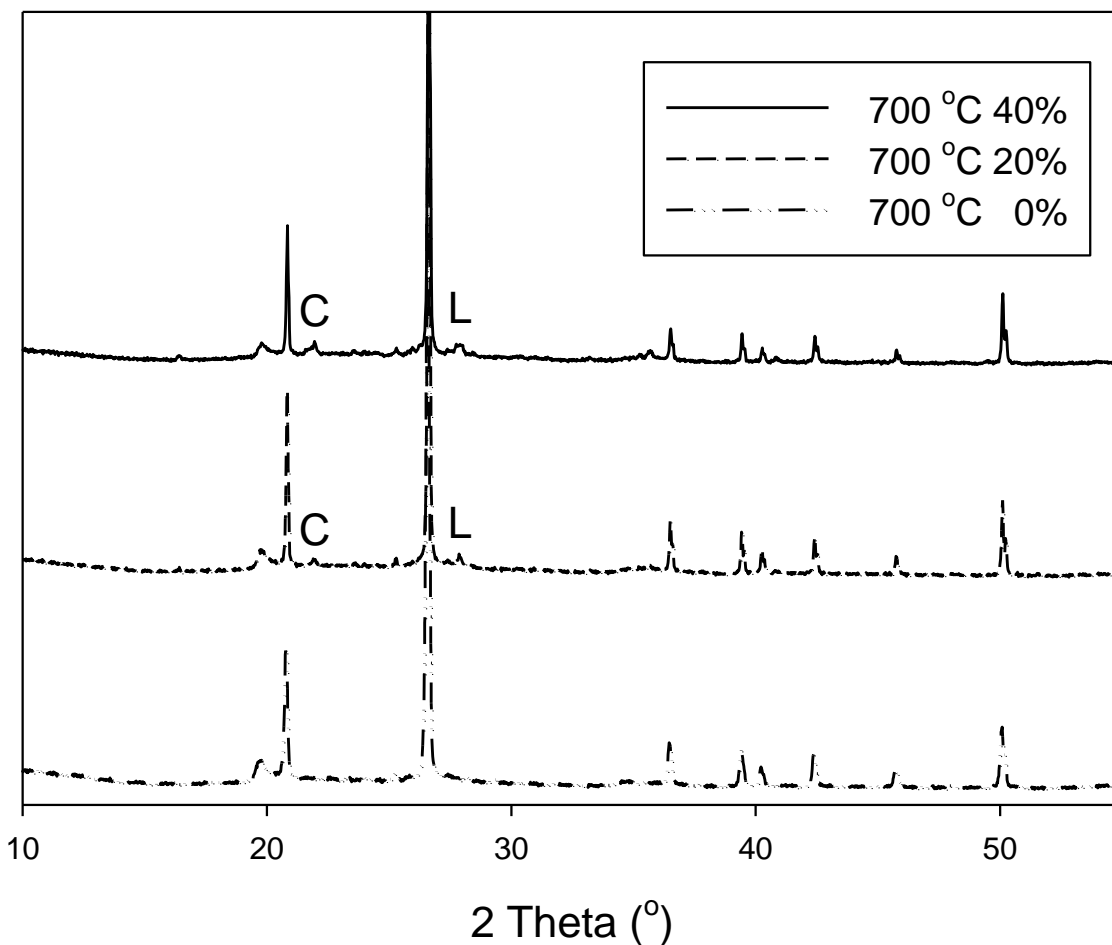
4.3.1 X-ray diffractogram

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะทางอสังฐานวิทยาด้วย X-ray diffractometer (XRD) ของเซรามิกผสมแก้วหนักร้อยละ 0, 20 และ 40 ใช้อุณหภูมิการเผาที่ 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส โดยนำเซรามิกหลังเผามาบดเป็นผง แล้วจึงนำเข้าเครื่องวิเคราะห์

4.3.1.1 ผลของการผสมแก้วหนักร้อยละต่อดิฟแฟรคโตแกรมของชิ้นงาน

ภาพประกอบที่ 55 แสดงดิฟแฟรคโตแกรมของชิ้นงานเซรามิกผสมแก้วหนักร้อยละ 0, 20 และ 40 เเผาด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และภาพประกอบที่ 56 และ 57 เเผาที่อุณหภูมิ 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

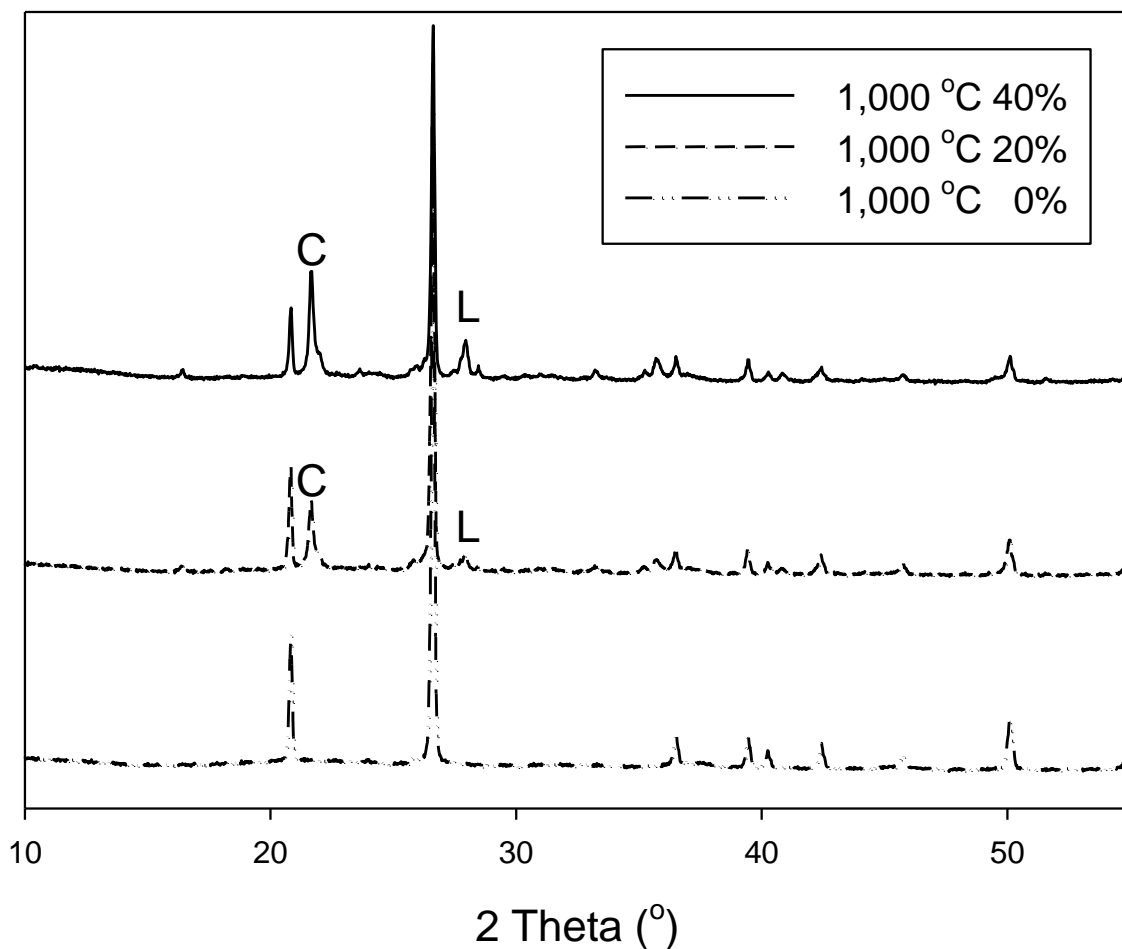




ภาพประกอบที่ 55 ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 700 ผสมเอ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 โดย C คือ Cristobalite และ L คือ Labradorite

จากภาพประกอบที่ 55 พบว่ามีลักษณะดิฟแฟรกโตแกรมที่แตกต่างกันเล็กน้อย 2 จุดคือ จุด C และ L โดยมีแค่ชิ้นงานเซรามิกที่ผสมเอ้าหนักปรากฏโครงสร้างดิฟแฟรกโตแกรม Cristobalite (C) ที่ 21.6 องศา และ Labradorite (L) ที่ 27.9 องศา นอกจากความแตกต่าง 2 ตำแหน่งข้างต้นแล้ว ดิฟแฟรกโตแกรมตำแหน่งองศาอื่นของชิ้นงานเซรามิกผสมเอ้าหนักร้อยละ 0, 20 และ 40 เผาด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีความคล้ายกัน

ภาพประกอบที่ 56 ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเซรามิกผสมเอ้าหนักร้อยละ 0, 20 และ 40 เผาด้วยอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส พบว่ามีความแตกต่างคล้ายเซรามิกเผาด้วยอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ดังภาพประกอบที่ 55 แต่เห็นความแตกต่างได้ชัดเจนกว่า โดยมีแค่ชิ้นงานที่ผสมเอ้าปรากฏจุด C และ L นอกจากนั้นดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเซรามิกทั้ง 3 อัตราผสมเอ้า เผาด้วยอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส มีความคล้ายกัน



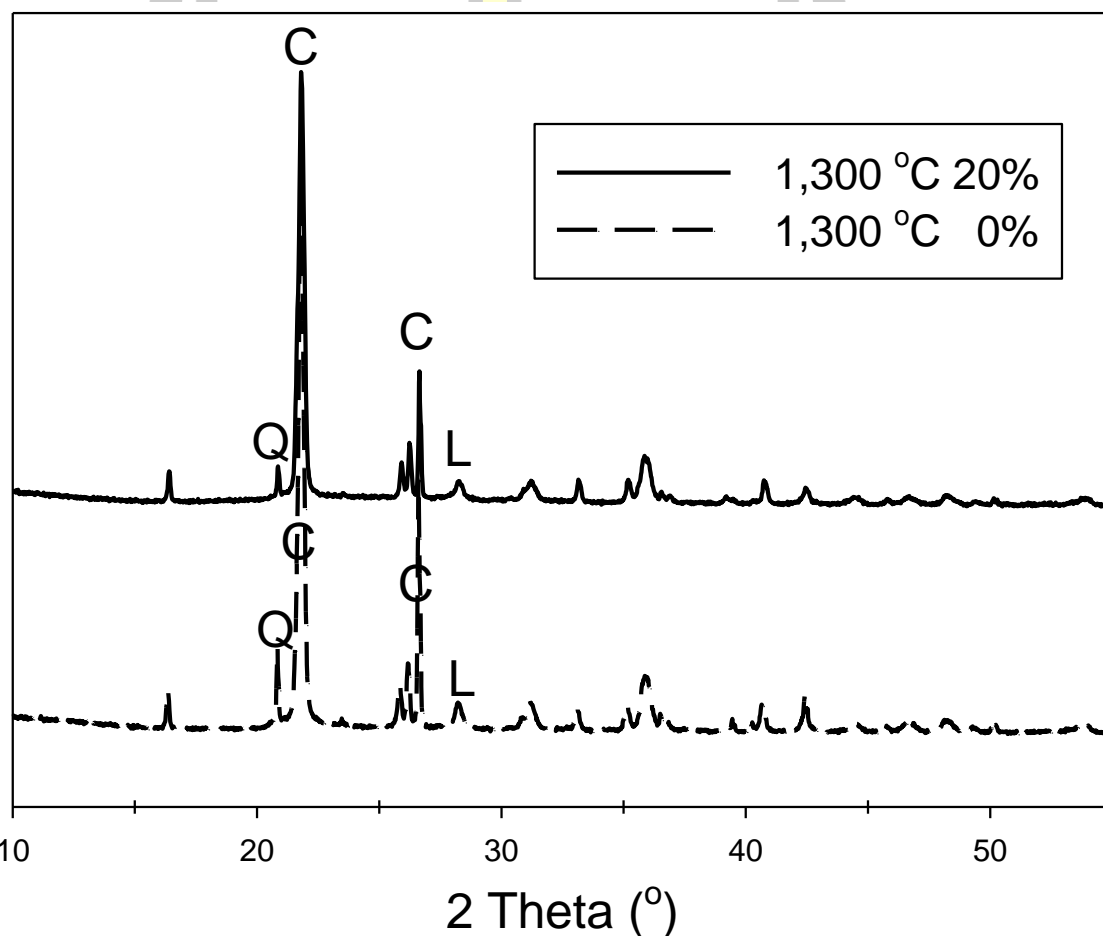
ภาพประกอบที่ 56 ดิฟแฟร็กโตแกรมของชิ้นงานเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 1,000 ผสมเถ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 โดย C คือ Cristobalite และ L คือ Labradorite

เมื่อพิจารณาดิฟแฟร็กโตแกรมของชิ้นงานเซรามิกทั้ง 3 อัตราส่วน เผาที่อุณหภูมิ 700 และ 1,000 ดังภาพประกอบที่ 55 และ 56 พบว่าการผสมเถ้าหนักทำให้เกิดโครงสร้าง Cristobalite ซึ่งเป็นโครงสร้างที่อุณหภูมิสูง เริ่มเสถียรที่ 1,470 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเถ้าหนักมีความเป็นวัสดุฟลักซ์ เมื่อโดนความร้อนจะหลอมเหลวง่าย สสารหลอมเหลวที่เกิดขึ้นทำให้จุดหลอมเหลวของซิลิกาตกลงมาจากปกติ (Eliche-Quesada and Leite-Costa, 2016) จึงสามารถพบโครงสร้าง Cristobalite ได้ แม้เผาด้วยอุณหภูมิ 700 และ 1,000 องศาเซลเซียส แต่ในชิ้นงานที่ไม่ผสมเถ้า ไม่พบดิฟแฟร็กโตแกรมของโครงสร้าง Cristobalite อาจเนื่องมาจากชิ้นงานที่ไม่ผสมเถ้า มีวัสดุฟลักซ์ไม่เพียงพอที่จะลดจุดหลอมเหลวของซิลิกาจนทำให้เกิดโครงสร้าง Cristobalite

ส่วนดิฟแฟร็กโตแกรมของโครงสร้าง Labradorite ที่พบแค่ในชิ้นงานที่ผสมเถ้าเนื่องจากโครงสร้าง Labradorite ประกอบด้วย Ca, Na, Al, Si และ O และเริ่มเสถียรที่ 1,260 องศาเซลเซียส (Biró et al., 2019) โดยในดินเหนียวชุดที่ 2 ที่ใช้ในงานวิจัยมี CaO เพียงร้อยละ 1.29 แต่ในเถ้ามี

CaO มากถึงร้อยละ 10.20 (ตารางที่ 9) ทำให้ชิ้นงานที่ไม่ผสมเถ้าไม่ปรากฏดิฟแฟรกโตแกรมของโครงสร้าง Labradorite เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่อาจไม่เพียงพอและไม่มีวัสดุฟลักซ์ช่วยลดจุดหลอมเหลว

ภาพประกอบที่ 57 ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าร้อยละ 0 และ 20 เผาด้วยอุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะของดิฟแฟรกโตแกรมไม่มีความแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงถึง 1,300 องศาเซลเซียส ทำให้ชิ้นงานทั้งที่ผสมเถ้าและไม่ผสมเถ้าเกิดโครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิสูงได้เหมือนกัน

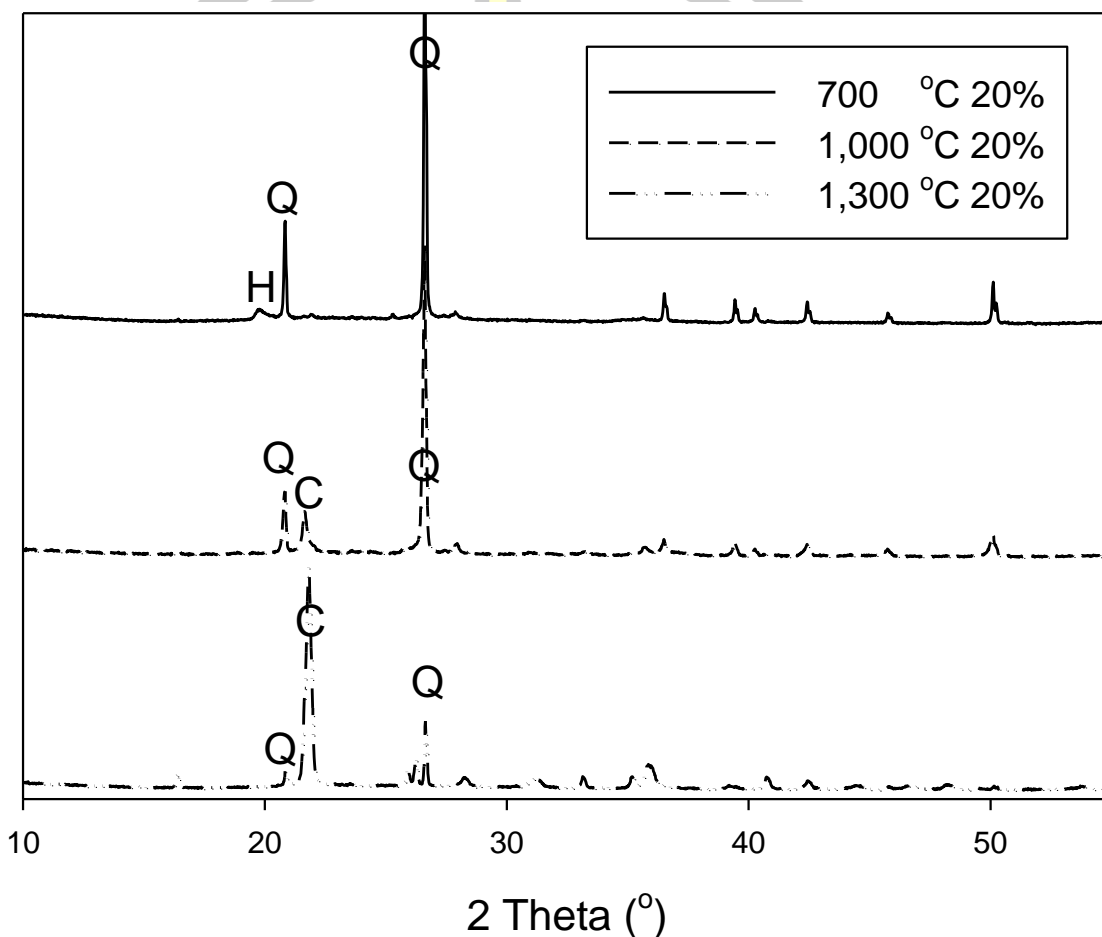


ภาพประกอบที่ 57 ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเซรามิก เผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ผสมเถ้าร้อยละ 0 และ 20

4.3.1.2 ผลของการอุณหภูมิเผาสุดท้ายต่อดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงาน

ภาพประกอบที่ 58 แสดงดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานที่อุณหภูมิการเผา 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส ผสมเถ้าร้อยละ 20 เมื่อพิจารณาความแตกต่างของดิฟแฟรกโตแกรม พบว่าดิฟแฟรกโตแกรมมีความแตกต่างกัน 3 ตำแหน่งคือ Histidyltryptophan (H) ที่ 19.7 องศา, Quartz

(Q) ที่ 20.8 องศา และ Cristobalite (C) ที่ 21.6 องศา โดยชิ้นงานที่เผา 700 องศาเซลเซียส ปรากฏดิฟแฟรกโตแกรมโครงสร้าง Histidyltryptophan แต่ไม่พบในชิ้นงานที่เผา 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส ส่วนชิ้นงานที่เผา 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส ปรากฏดิฟแฟรกโตแกรมโครงสร้าง Cristobalite แต่ไม่พบในชิ้นงานที่เผา 700 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 58 ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 20 เผาที่อุณหภูมิ 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส โดย H คือ Histidyltryptophan, Q คือ Quartz และ C คือ Cristobalite

ภาพประกอบที่ 58 แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ปรากฏดิฟแฟรกโตแกรมของโครงสร้าง Histidyltryptophan เพียงตัวเดียวไม่พบที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากโครงสร้าง Histidyltryptophan เป็นโครงสร้างที่มีสารอินทรีย์คาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ($C_{17}H_{19}N_5O_3$) (National Center for Biotechnology Information, 2006) การเผาที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 1,000 องศาเซลเซียสขึ้นไปทำให้สารอินทรีย์คาร์บอนในชิ้นงานสลายตัวไป ส่วนดิฟแฟรกโต

กรรมของโครงสร้าง Cristobalite และ Quartz โครงสร้างทั้งสองชนิดนี้เกิดจากองค์ประกอบเคมีเดียวกันคือ SiO_2 โดย Quartz เป็นโครงสร้างที่เริ่มเสถียรที่ 573 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่า Cristobalite ซึ่งเป็นโครงสร้างเริ่มเสถียรที่ 1,260 องศาเซลเซียส ดังนั้นภาพประกอบที่ 58 เห็นได้ว่าที่อุณหภูมิเผา 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียสพบดิฟแฟรกโตแกรมของโครงสร้าง Quartz น้อยกว่าที่อุณหภูมิเผา 700 องศาเซลเซียส เนื่องจากโครงสร้าง Quartz ในชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียสถูกเปลี่ยนให้เป็นโครงสร้าง Cristobalite ด้วยเหตุที่โครงสร้าง Cristobalite มีความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้าง Quartz เนื่องจากมีองค์ประกอบเคมีเดียวกันแต่เกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า จึงทำให้กำลังรับแรงอัดและความต้านทานแรงกดแตกของชิ้นงานในงานวิจัยนี้ที่มีค่ามากขึ้นเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น (หัวข้อ 4.1.3 และ 4.2.1)

4.3.2 BET surface area pore size and pore volume distribution

งานวิจัยนี้ศึกษา พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนทั้งหมด ด้วยการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของทฤษฎี BET ผู้วิจัยเลือกวิเคราะห์ชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าหนักร้อยละ 0, 20 และ 40 ที่อุณหภูมิเผา 1,000 องศาเซลเซียส ได้ผลดังตารางที่ 22 เมื่อพิจารณาปัจจัยการผสมเถ้าพบว่าการผสมเถ้าหนักทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลง ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กลง และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดน้อยลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเป็นวัสดุพลัซม์ของเถ้าหนัก (ออกไซด์ของหมู่ 1 และ 2) เมื่อโดนความร้อนแล้วสามารถหลอมเหลวและอาจปิดรูพรุนเปิดของชิ้นงานได้ ทำให้พื้นที่ผิวภายในรูพรุนและปริมาตรรูพรุนทั้งหมดน้อยลง

ตารางที่ 22 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าร้อยละ 0, 20 และ 40 ที่อุณหภูมิเผา 1,000 องศาเซลเซียส

ชิ้นงานเซรามิก ส่วนเถ้า (ร้อยละ)	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	ปริมาตรรูพรุน ทั้งหมด(cm^3/g)
0	3.20	46.3	3.70×10^{-2}
20	1.81	21.8	9.88×10^{-3}
40	1.63	22.8	9.31×10^{-3}

4.4 ผลการทดสอบการชะโลหะหนัก

เจ้าหน้าที่จัดเป็นของเสียอันตรายเพราะมีโลหะหนักปนเปื้อนหลายชนิดไม่ว่าจะเป็น สารหนู โครเมียม แคดเมียม ปรอท แมงกานีส โมลิบดีนัม นิกเกิล ไทเทเนียม วาเนเดียม ตะกั่ว แบริียม โครเมียม ทองแดง สังกะสี (Bella et al., 2018) ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยและความมั่นใจในการนำไปใช้ประโยชน์ จึงทำการทดสอบการชะโลหะสำหรับชิ้นงานเซรามิกที่ผลิตขึ้นจากเจ้าหน้าที่ผู้วิจัยได้เลือกชิ้นงานผสมแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 เหนืออุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส มาทดสอบการชะโลหะหนัก โดยทดสอบชนิดของโลหะหนักที่ทดสอบได้แก่ สารหนู ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม ซีลีเนียม แบริียม โครเมียม ทองแดง และสังกะสี ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 23 โดยทางผู้วิจัยใช้มาตรฐานในการเปรียบเทียบ 2 มาตรฐานคือ 1. มาตรฐานการชะโลหะหนักสำหรับของเสียอันตรายตามที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกากำหนด (United States Environmental Protection Agency, 1992) 2. มาตรฐานการตรวจสอบน้ำที่ชะออกจากหลุมฝังกลบขยะอันตรายของสำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม (กสอ.) (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม , 2548)

จากตารางที่ 23 พบว่าโลหะหนักที่ตรวจสอบการชะออกจากชิ้นงานผสมแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 เหนืออุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ไม่เกินค่าที่กำหนดตามมาตรฐานการชะโลหะหนักสำหรับของเสียอันตรายและมาตรฐานการตรวจสอบน้ำที่ชะออกจากหลุมฝังกลบขยะอันตราย เมื่อพิจารณาตัวอย่างเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 0 ชี้ให้เห็นว่าโลหะหนักที่มาจากดินได้แก่ ตะกั่ว และ ทองแดง ในขณะที่ตัวอย่างเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 20 และ 40 แสดงให้เห็นว่าโลหะหนักที่มาจากเจ้าหน้าที่ได้แก่ สารหนู แบริียม และโครเมียม โดยในงานวิจัยนี้สารหนูและแบริียม เป็นโลหะหนักที่ถูกชะออกมาในปริมาณที่สูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่น ซึ่งโลหะหนักทั้ง 2 ชนิดคาดว่ามาจากเจ้าหน้าที่ใช้เป็นหลัก ดังนั้นผู้ที่ต้องการศึกษาต่อจึงควรระมัดระวังอัตราส่วนผสมแก้วไม่ให้มากเกินไป เพราะอาจทำให้ชิ้นงานที่ได้มีค่าการชะโลหะที่เกินมาตรฐาน

พูน ปรุ ทิโต ชีเว

ตารางที่ 23 ผลของการวิเคราะห์การชะโลหะหนักและมาตรฐานเปรียบเทียบ

รายการทดสอบ *	ความเข้มข้นโลหะหนัก(มิลลิกรัมต่อลิตร)				
	เซรามิกผสมแก้ว (ร้อยละ)			มาตรฐาน	
	0	20	40	US-EPA (mg/l)	กสอ. (mg/l)
สารหนู	0.004	0.010	0.019	5.00	0.050
ตะกั่ว	0.005	0.001	nd	5.00	0.050
ปรอท	nd	nd	nd	0.20	0.002
แคดเมียม	nd	nd	nd	1.00	0.010
ซีลีเนียม	nd	nd	nd	1.00	0.010
แบเรียม	0.336	0.603	0.681	100	1.000
โครเมียม	nd	0.001	0.002	5.00	0.050
ทองแดง	0.021	0.013	0.013	5.00	1.000
สังกะสี	0.024	0.032	0.027	300	5.000

* nd หมายถึง ตรวจวัดไม่พบ โดยค่าต่ำสุดที่สามารถวัดได้คือ 0.001 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.5 ความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอินของเซรามิกผสมแก้วหนัก

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอินของเซรามิกที่ผลิตขึ้น โดยก๊าซโทลูอินถูกใช้เป็นสารตัวแทนมลพิษอากาศอินทรีย์ระเหยในอาคาร เซรามิกที่ใช้ทดสอบไอโซเทอมมีอัตราส่วนผสมแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 เผาที่อุณหภูมิ 700, 1000 และ 1,300 องศาเซลเซียส โทลูอินที่ใช้มีความเข้มข้นประมาณ 200-2000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

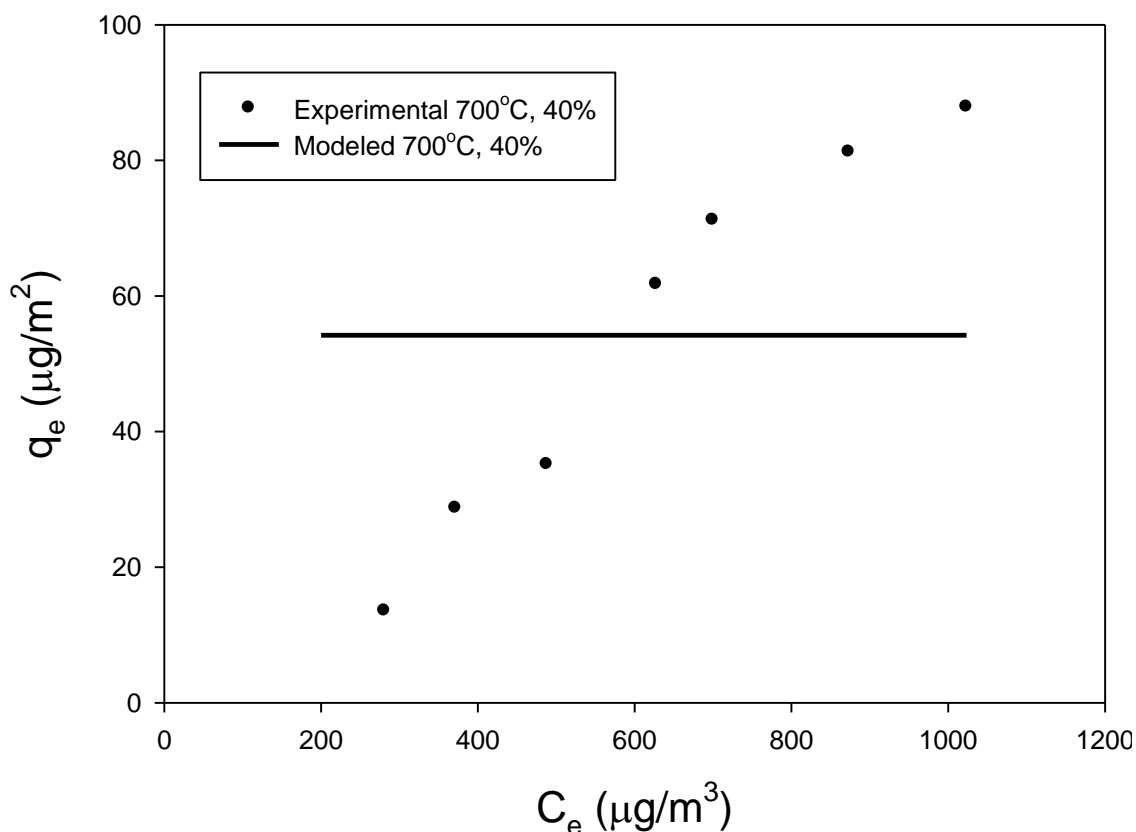
ตารางที่ 24 แสดงจำนวนชั้น พื้นที่ และปริมาตรของตัวอย่างเซรามิกที่ใช้ในการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอิน ซึ่งผู้วิจัยใส่จำนวนชั้นงานเท่ากันสำหรับเซรามิกที่เผาอุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากต้องการให้มีพื้นที่ในการดูดซับใกล้เคียงกัน ส่วนเซรามิกที่เผาอุณหภูมิต่างกัน ผู้วิจัยใส่ชั้นงานไม่เท่ากัน เพราะเซรามิกที่เผาอุณหภูมิสูงพบว่าดูดซับก๊าซโทลูอินได้น้อย ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ไอโซเทอมจึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน จึงจำเป็นต้องใส่ชั้นงานเพิ่ม เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ

ตารางที่ 24 จำนวนชิ้นงาน พื้นที่และปริมาตรของเซรามิกที่ใช้ในการดูดซับ

อุณหภูมิ (°C) / อัตราเก่า (ร้อยละ)	จำนวนชิ้น	พื้นที่เฉลี่ย (cm ²)	ปริมาตรเฉลี่ย (cm ³)
700 / 00	1	1.06	0.23
700 / 20	1	0.94	0.21
700 / 40	1	1.10	0.24
1,000 / 00	7	4.92	0.81
1,000 / 20	7	5.03	0.83
1,000 / 40	7	5.72	0.94
1,300 / 00	10	7.32	1.28
1,300 / 20	10	8.62	1.51

4.5.1 การวิเคราะห์การดูดซับด้วยสมการแลงเมียร์

จากการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับพบว่า โมเดลการดูดซับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ไม่สามารถอธิบายการดูดซับของวัสดุเซรามิกที่ผลิตขึ้นได้ ดังภาพประกอบที่ 59 แสดงตัวอย่างการใช้สมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์เพื่ออธิบายการดูดซับโทลูอีนของชิ้นงานเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 40 เหนือที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จากภาพแสดงให้เห็นว่าชุดข้อมูลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการแลงเมียร์ไม่สามารถแนบสนิทกับชุดข้อมูลจากการทดลอง เมื่อวิเคราะห์ด้วยการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยโปรแกรมทางสถิติ NLREG โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.34 ส่วนผลการทดสอบการดูดซับด้วยสมการแบบแลงเมียร์สำหรับเซรามิกที่เหลือมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.15-0.32 ดังนั้นสมการแบบแลงเมียร์ไม่สามารถอธิบายการดูดซับโทลูอีนของชิ้นงานที่ผลิตขึ้นได้ ซึ่งโมเดลการดูดซับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์สามารถอธิบายได้เพียงการดูดซับที่พื้นผิวโดยตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ไม่มีการทับซ้อนกันของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ เมื่อถูกดูดซับแล้วตัวถูกดูดซับไม่สามารถเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งได้ พื้นผิวบนตัวดูดซับมีจำกัด พื้นผิวไม่ขรุขระและมีพลังงานเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว แต่ในชิ้นงานที่ผลิตขึ้นไม่เป็นไปตามทฤษฎีของแลงเมียร์ ผู้วิจัยจึงรายงานผลในรูปแบบโมเดลการดูดซับไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช เพียงชนิดเดียว

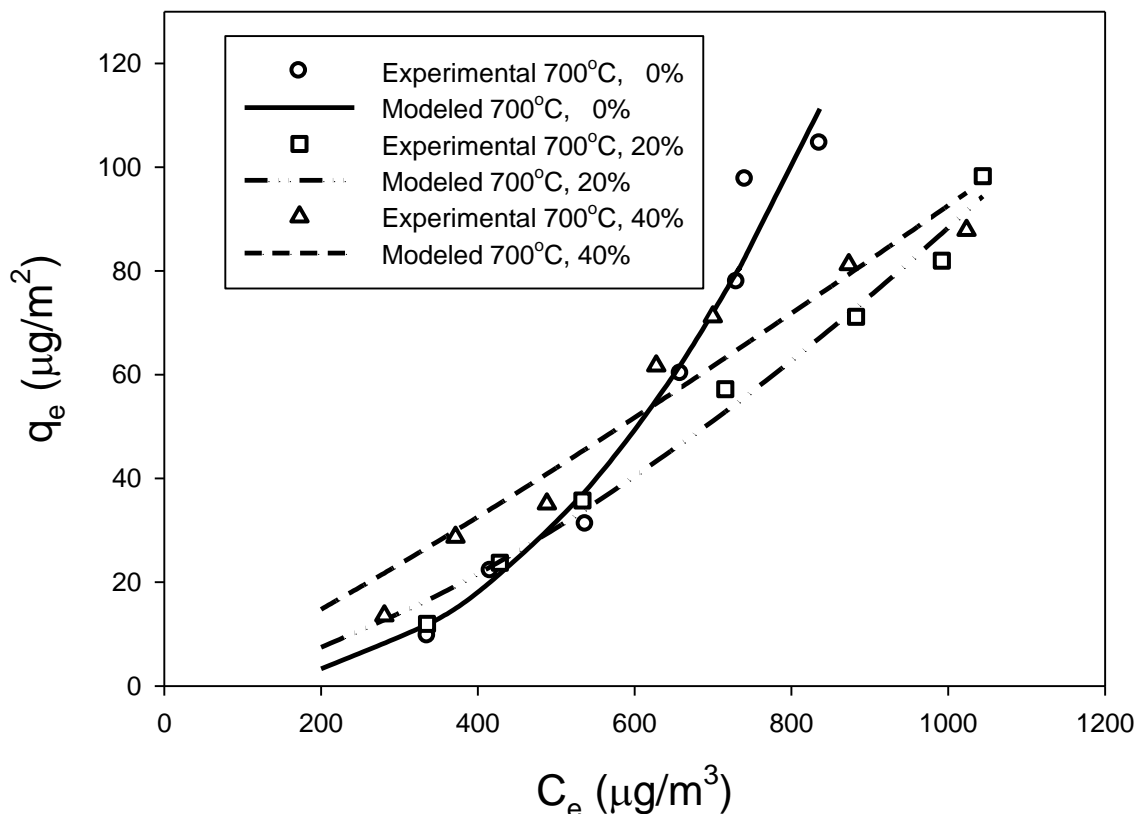


ภาพประกอบที่ 59 การทำนายการดูดซับด้วยสมการแลงเมียร์ของ ชิ้นงานเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 40 เเผที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

4.5.2 การวิเคราะห์การดูดซับด้วยสมการฟรุนดลิช

ภาพประกอบที่ 60 แสดงชุดข้อมูลจากการทดลองและการทำนายด้วยสมการฟรุนดลิช สำหรับการดูดซับก๊าซโทลูอินของชิ้นงานเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 เเผที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ด้วยการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยโปรแกรมทางสถิติ NLREG

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์

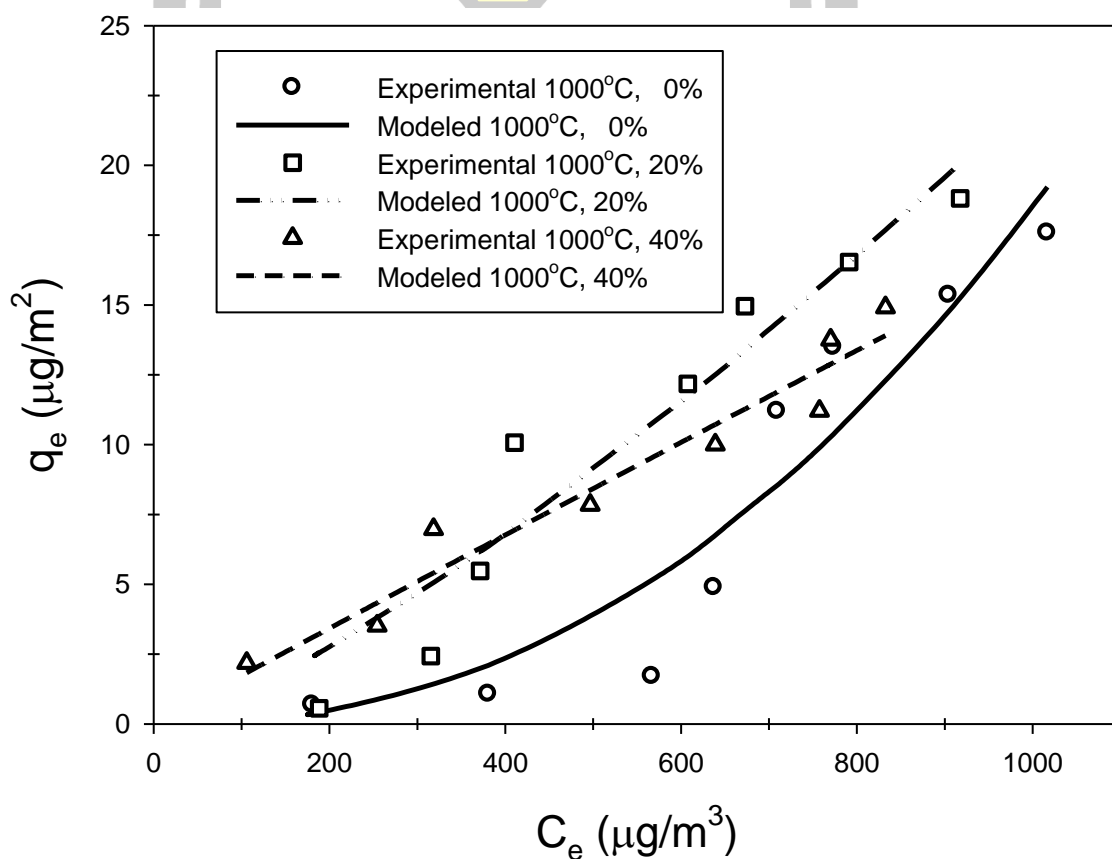


ภาพประกอบที่ 60 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอินด้วยสมการฟรุนดลิชของ ชิ้นงานเซรามิกผสมแก้ว ร้อยละ 0, 20 และ 40 เพาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ภาพประกอบที่ 60 แสดงให้เห็นว่าชุดข้อมูลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการฟรุนดลิชแบบ สนิทกับชุดข้อมูลจากการทดลองดี โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.94-0.98 ชิ้นงานที่ผสมแก้วมีลักษณะ โค้งงาย ซึ่งคล้ายกับลักษณะไอโซเทอมการดูดซับประเภทที่ 3 (Sing et al., 1985) ตามที่ Sing et al. ได้จำแนกลักษณะไอโซเทอมไว้ ซึ่งอธิบายไอโซเทอมประเภทนี้ว่า เป็นการดูดซับที่มีแรงระหว่างตัว ดูดซับและตัวถูกดูดซับอ่อน แต่มีแรงดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเองมาก ทำให้ตัวถูกดูดซับ รวมตัวกันก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ส่วนไอโซเทอมของเซรามิกที่ผสมแก้วร้อยละ 20 และ 40 มีลักษณะคล้ายเส้นตรง (พิจารณาได้จากค่า n ในตารางที่ 25) ซึ่งเป็นลักษณะของไอโซเทอม การดูดซับแบบเส้นตรง (linear adsorption) หมายความว่า พื้นผิวของเซรามิกที่ใช้ดูดซับยังเหลือ พื้นที่ในการดูดซับและพื้นผิวมีพลังงานใกล้เคียงกัน โมเลกุลของโทลูอินจึงถูกดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อ พิจารณาความสามารถในการดูดซับโทลูอินของเซรามิกที่เพาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ณ ความ เข้มข้น 200-600 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 40 มีค่าความสามารถ

สูงสุด แต่เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 600 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เซรามิกที่ไม่ผสมแก้วกลับมีความสามารถในการดูดซับโทลูอินสูงกว่า

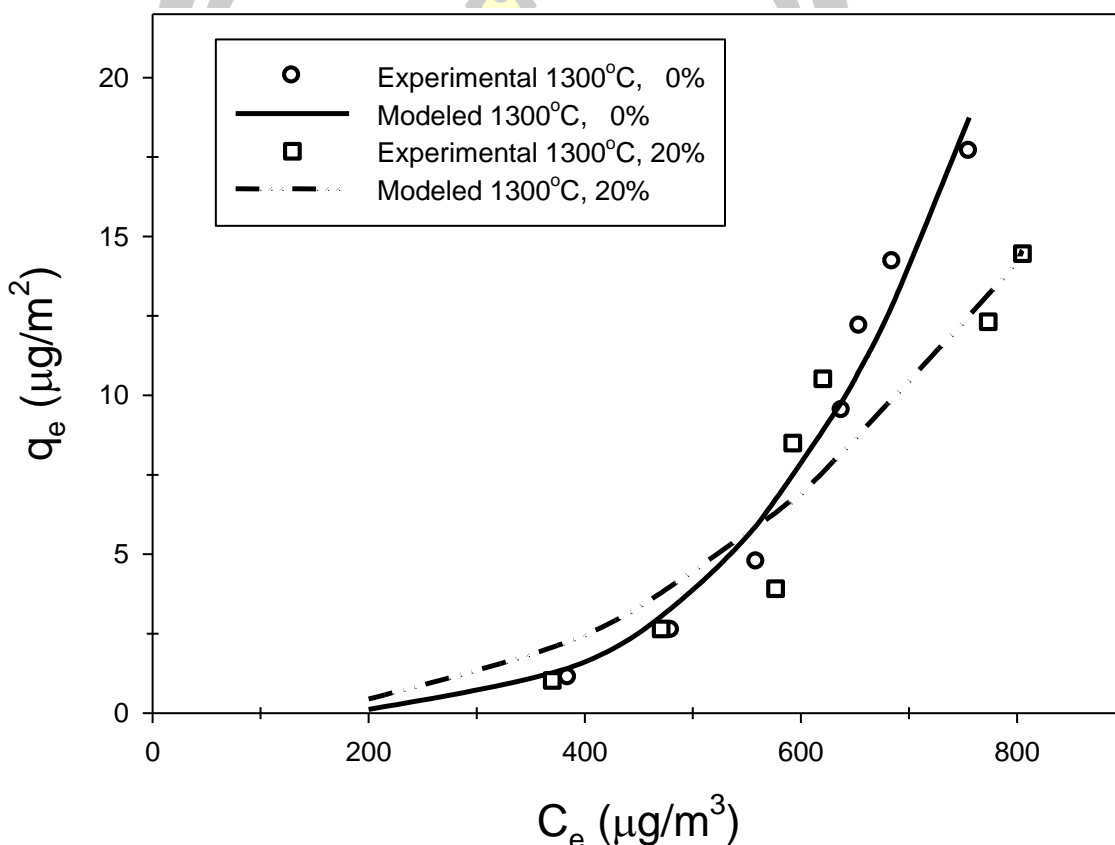
ภาพประกอบที่ 61 แสดงไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอินของชิ้นงานเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส พบว่าชุดข้อมูลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการฟรอนดลิชแบบสันทกับชุดข้อมูลจากการทดลองดี โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.89-0.94 ไอโซเทอมของเซรามิกไม่ผสมแก้วมีลักษณะโค้งหงาย ส่วนไอโซเทอมของเซรามิกที่ผสมแก้วมีลักษณะคล้ายเส้นตรง เซรามิกที่ผสมแก้วร้อยละ 40 เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดซับโทลูอินสูงสุดในอุณหภูมิการเผาเดียวกัน ที่ความเข้มข้น 200-400 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่เมื่อความเข้มข้นเกิน 400 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เซรามิกที่ผสมแก้วร้อยละ 20 กลับมีความสามารถในการดูดซับโทลูอินมากกว่า



ภาพประกอบที่ 61 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอินด้วยสมการฟรอนดลิชของ ชิ้นงานเซรามิกผสมแก้ว ร้อยละ 0, 20 และ 40 เผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส

ภาพประกอบที่ 62 แสดงไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอินของชิ้นงานเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส พบว่าชุดข้อมูลที่ได้จากการทำนายด้วยสมการฟรอนดลิชแบบสันทกับชุดข้อมูล

จากการทดลองดี โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.87-0.97 ไอโซเทอมของเซรามิกทั้งสองชนิดมีลักษณะโค้ง
 หายเหมือนกัน เซรามิกที่ผสมแก้วร้อยละ 20 มีความสามารถในการดูดซับโทลูอินสูงที่สุดในอุณหภูมิ
 การเผาเดียวกัน ที่ความเข้มข้น 200-500 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่เมื่อความเข้มข้นเกิน 500
 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เซรามิกที่ไม่ผสมแก้วกลับมีความสามารถในการดูดซับโทลูอินมากกว่า
 หมายเหตุ ที่อุณหภูมิการเผา 1,300 องศาเซลเซียส ไม่มีชิ้นงานผสมแก้วร้อยละ 40 เนื่องจาก ชิ้นงาน
 เกิดการขยายตัวและผิรูปร่างไม่สามารถตัดชิ้นงานไปทดสอบความสามารถในการดูดซับโทลูอินได้



ภาพประกอบที่ 62 ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอินด้วยสมการฟรอนดลิชของ ชิ้นงานเซรามิกผสมแก้ว
 ร้อยละ 0 และ 20 เผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 25 แสดงค่า K_f , n , R^2 และ q_e จากไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิชของเซรามิก
 ผสมแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 เผาที่อุณหภูมิ 700, 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส ค่าที่ได้มาจาก
 การทำนายพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น หมายเหตุ q_e
 คำนวณได้จากการแทนค่า C_e ในสมการที่ 13 โดยใช้ความเข้มข้นเท่ากับ 200 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์
 เมตร เหตุผลที่ใช้ความเข้มข้นนี้เนื่องจากงานวิจัยของ Ongwandee et al. (2011) ทดสอบวัดความ

เข้มข้นของโพลีอินภายในอาคาร พบว่าโพลีอินภายในอาคารมีค่าเฉลี่ย 35.5-230 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

เมื่อพิจารณาค่า K_f ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ดังตารางที่ 25 พบว่า ชั้นงานเซรามิกผสมแก้วร้อยละ 40 เหนือที่ 700 องศาเซลเซียสมีค่า K_f มากที่สุด (หน่วยคือ $\mu\text{g}^{1-n} \text{m}^{3n-2}$) มีค่า 3.51×10^{-2} ส่วนชั้นงานเซรามิกที่ไม่ผสมแก้ว เหนือที่ 1,300 องศาเซลเซียสมีค่า K_f น้อยที่สุด มีค่า 1.81×10^{-10} การเพิ่มอัตราส่วนผสมแก้วที่มากขึ้นส่งผลให้ค่า K_f เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ค่า K_f ยังเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิการเผา โดยพบว่าที่อัตราส่วนผสมแก้วเดียวกัน การเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่า K_f ลดลง

เมื่อพิจารณาค่า n ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช พบว่าการเผาที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมแก้วที่มากขึ้น ทำให้ค่า n จากไอโซเทอมมีค่าลดลงใกล้เคียงกับ 1 โดยค่า n ในไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช บ่งบอกถึงลักษณะของไอโซเทอม กล่าวคือ เมื่อค่า n มีค่าเท่ากับ 1 หรือเข้าใกล้ 1 มากๆ ไอโซเทอมที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นลักษณะของไอโซเทอมการดูดซับแบบเส้นตรง (linear adsorption) หมายความว่า พื้นผิวของเซรามิกที่ใช้ดูดซับยังเหลือพื้นที่ในการดูดซับ และพื้นผิวมีพลังงานใกล้เคียงกัน โมเลกุลของสารถูกดูดซับจึงถูกดูดซับแบบชั้นเดียว ถ้าค่า n มากกว่า 1 ไอโซเทอมที่ได้จะมีลักษณะโค้งงอ ซึ่งเป็นลักษณะของการดูดซับที่ Unfavorable adsorption กล่าวคือตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับน้อยเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับต่ำ สูดท้ายถ้าค่า n น้อยกว่า 1 ไอโซเทอมที่ได้จะมีลักษณะโค้งคว่ำ ซึ่งเป็นลักษณะของการดูดซับที่ Favorable adsorption กล่าวคือตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับมากเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับต่ำ โดยทั่วไปการกำจัดมลพิษด้วยการดูดซับต้องการตัวดูดซับที่มีค่า n น้อยกว่า 1 เพราะ ตัวดูดซับนั้นๆ สามารถดูดซับตัวถูกดูดซับได้ดีในความเข้มข้นต่ำๆ

ตารางที่ 25 พารามิเตอร์ของสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและค่าความสามารถดูดซับก๊าซโพลีอิน

อุณหภูมิ (°C) / อัตราแก้ว (ร้อยละ)	K_f^*	n	R^2	q_e^{**} ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)
700 / 00	7.48×10^{-6}	2.45	0.96	3.32
700 / 20	2.18×10^{-3}	1.54	0.98	7.46
700 / 40	3.51×10^{-2}	1.14	0.94	14.8
1,000 / 00	3.21×10^{-6}	2.25	0.89	0.49

ตารางที่ 25 (ต่อ) พารามิเตอร์ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและค่าความสามารถดูดซับก๊าซโทลูอิน

อุณหภูมิ (°C) / อัตราเร็ว (ร้อยละ)	K_f^*	n	R^2	q_e^{**} ($\mu\text{g}/\text{m}^2$)
1,000 / 20	2.80×10^{-3}	1.30	0.92	2.76
1,000 / 40	1.88×10^{-2}	0.98	0.94	3.43
1,300 / 00	1.81×10^{-10}	3.83	0.97	0.12
1,300 / 20	7.44×10^{-7}	2.51	0.87	0.44

* หน่วยของ K_f คือ $\mu\text{g}^{1-n} \text{m}^{3n-2}$

** คำนวณจากความเข้มข้น 200 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับ (q_e) ที่ความเข้มข้น 200 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของแบบจำลองไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ดังตารางที่ 25 พบว่าเซรามิกที่เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสมีความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอินมากกว่าเซรามิกที่เผาอุณหภูมิ 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส ในทุกส่วนผสมแก้ว ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pantorlawn et al. (2017) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อสมบัติการดูดซับของหญ้าแฝก ใช้อุณหภูมิในการเผา 200-1,000 องศาเซลเซียส พบว่าหญ้าแฝกที่เผาอุณหภูมิต่ำสามารถดูดซับได้ดีที่สุด เนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูงทำให้ช่องว่างภายในของวัสดุดูดซับลดลง และจากงานวิจัยของ Goss and Schwarzenbach (2002) ที่ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของมลพิษอากาศระหว่างพื้นผิวและอากาศ พบว่าพื้นผิวประเภท Quartz มีค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วนของโทลูอิน ระหว่างพื้นผิวและอากาศมากกว่าโครงสร้างอื่น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ XRD ที่เซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสมีโครงสร้าง Quartz มากกว่าเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 25 สังเกตได้ว่าการเพิ่มส่วนผสมแก้วหนักทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอินเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้น 200 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถึงแม้ว่าจากผลการวิเคราะห์พื้นที่ BET พบว่าเซรามิกที่ผลิตจากดินเพียงอย่างเดียว มีพื้นที่ BET และปริมาณรูพรุนที่มากกว่าเซรามิกที่ผสมแก้ว ซึ่งพื้นผิวและรูพรุนเหล่านั้นของเซรามิกดินล้วนอาจไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการดูดซับก๊าซโทลูอินได้

จากที่กล่าวมาในข้างต้น ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิสุดท้ายในการเผาและอัตราส่วนผสมแก้วมีผลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอิน ทางผู้วิจัยต้องการทราบว่าปัจจัยใดมีผลมากกว่ากัน จึงได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณเพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์จากสมการ ผล

ปรากฏว่าตัวแปรอิสระทั้ง 2 มีอิทธิพลต่อความสามารถของชิ้นงานในการดูดซับก๊าซโทลูอินร้อยละ 66 (Adjusted R^2) ได้สมการถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณ $X = -0.61Y + 0.50Z$ โดยสัมประสิทธิ์ของ อุณหภูมิสุดท้าย (Y) มีค่า 0.61 และสัมประสิทธิ์ของอัตราส่วนผสมเถ้าหนัก (Z) มีค่า 0.50 จึงตีความหมายได้ว่าอุณหภูมิสุดท้ายในการเผาและอัตราส่วนผสมเถ้าหนัก มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับโทลูอินใกล้เคียงกัน

4.6 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของเซรามิกผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล

งานวิจัยนี้ยังขยายขอบเขตการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยของเซรามิกที่ผสมเถ้าชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตรและอุตสาหกรรมที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง โดยเถ้าชีวมวลที่ใช้ในการเปรียบเทียบนี้มี 3 ชนิดคือ (1) เถ้าลอยซึ่งได้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง (2) เถ้าแกลบซึ่งได้มาจากโรงไฟฟ้าร้อยเอ็ดกรีน จังหวัดร้อยเอ็ด และ (3) เถ้าชานอ้อย ได้มาจากโรงงานน้ำตาลมิตรผลภูเขียว อำเภอภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ เถ้าชีวมวลถูกเตรียมโดยการบดและร่อนผ่านตะแกรงให้มีขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอน ในการผสมกับดินเหนียวเพื่อผลิตเซรามิกใช้การขึ้นรูปแบบเดียวกับการทดลอง 4.2 โดยใช้อัตราส่วนผสมเถ้าชีวมวลร้อยละ 20 แทนที่ดินเหนียวเผาที่อุณหภูมิสุดท้าย 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที

4.6.1 สมบัติทางกายภาพและทางกลของเซรามิกผสมเถ้าหนักและเถ้าชีวมวล

สมบัติเซรามิกที่ผสมเถ้าหนักและเถ้าชีวมวลที่ใช้เปรียบเทียบในการศึกษานี้คือ การดูดซึมน้ำ และความต้านแรงกดแตก โดยมีตัวอย่างควบคุม (control) คือเซรามิกที่ผลิตจากดินไม่ผสมเถ้า และผลิตภัณฑ์เซรามิกหม้อดินที่ซื้อจากบ้านหม้อ จังหวัดมหาสารคาม ดังแสดงตารางที่ 26 เมื่อพิจารณาผลของการผสมเถ้าพบว่า การผสมเถ้าทำให้การดูดซึมน้ำลดลง และความต้านแรงกดแตกเพิ่มขึ้น มากกว่าเซรามิกที่ผลิตจากดินล้วน โดยการผสมเถ้าทุกชนิดช่วยให้เซรามิกมีค่าการดูดซึมน้ำลดลงและความต้านแรงกดแตกเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 26 การดูดซึมน้ำและความต้านแรงกดแตกของเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสผสมเถ้าชนิดต่างๆ ร้อยละ 0 และ 20

ชิ้นงาน	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความต้านแรงกดแตก (N)
เซรามิกไม่ผสมเถ้า	18.6±3.14	0.67±0.11
เซรามิกผสมเถ้าหนัก	13.9±0.06	1.25±0.18
เซรามิกผสมเถ้าลอย	13.3±0.13	1.21±0.13

ตารางที่ 26 (ต่อ) การดูดซึมน้ำและความต้านแรงกดแตกของเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสผสมเถ้าชนิดต่างๆ ร้อยละ 0 และ 20

ชิ้นงาน	การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	ความต้านแรงกดแตก (N)
เซรามิกผสมเถ้าแกลบ	18.1±1.00	0.95±0.14
เซรามิกผสมเถ้าขานอ้อย	17.1±0.25	0.88±0.01
เซรามิกวางขายในพื้นที่	17.7±0.29	N.A.*

*N.A. (not analyzed)

คือ ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

4.6.2 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของเซรามิกผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล

การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโทลูอีนของเซรามิกที่ผสมจากเถ้าชนิดต่างๆ และผลิตภัณฑ์เซรามิกที่วางขายในพื้นที่ โดยใช้ความเข้มข้นโทลูอีนในช่วงการทดสอบด้วยกับในหัวข้อ 4.5 นอกจากนี้ยังศึกษาความสามารถในการดูดซับของเฉพาผงเถ้าชนิดต่างๆ และของผงดินเหนียว (กรณีนี้ไม่มีการขึ้นรูปเซรามิก) โดยการเผาผงเถ้าและดินที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสก่อนการทดสอบการดูดซับ ตารางที่ 27 แสดงค่า K_p , n , R^2 และ q_e ของความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอีนของเซรามิกไม่ผสมเถ้า ผสมเถ้าชนิดต่างๆ ร้อยละ 20 เซรามิกที่วางขายในพื้นที่ และผงของเถ้าชนิดต่างๆ โดยค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้มาจากสมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช ที่ความเข้มข้นของโทลูอีน 200 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

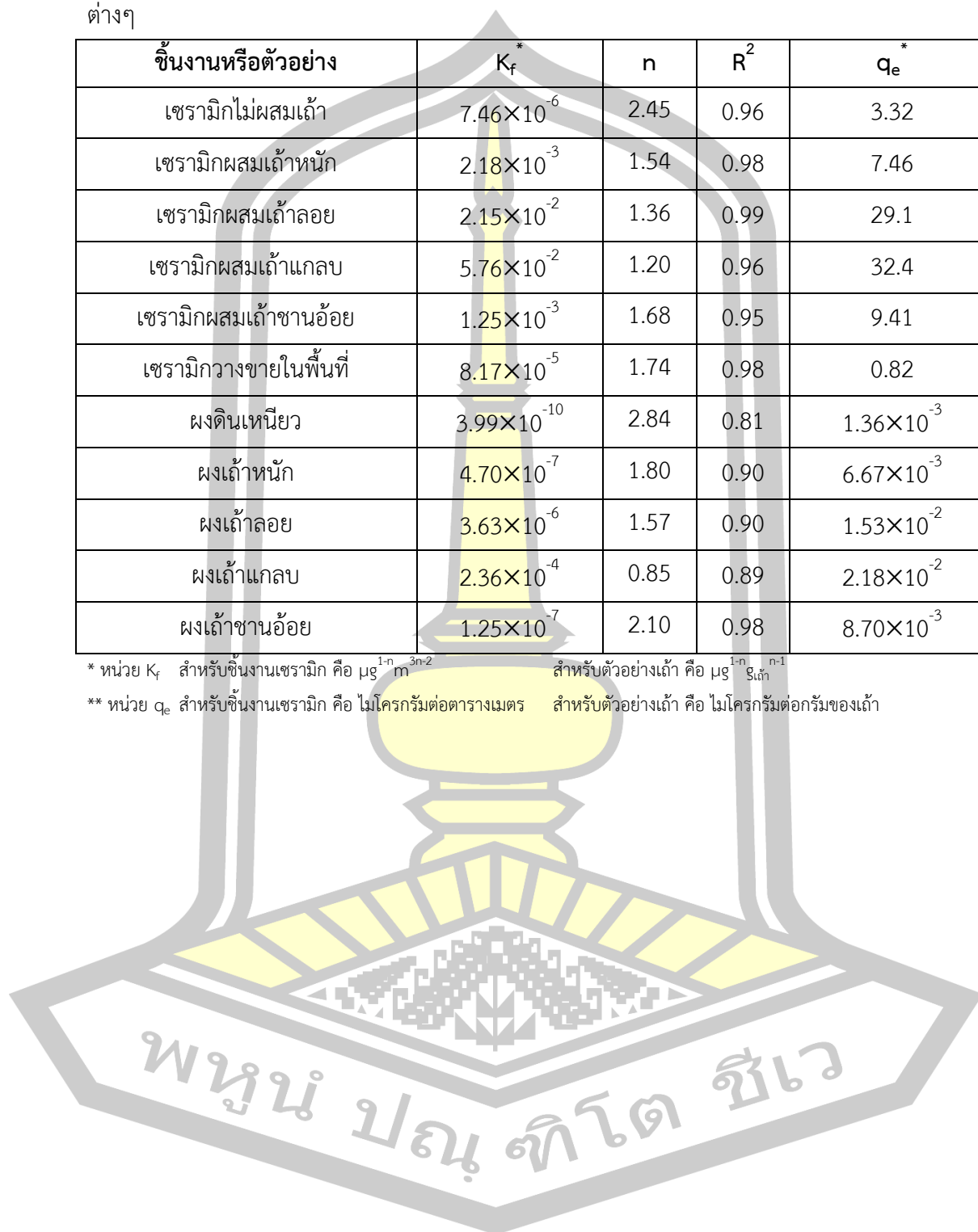
จากตารางที่ 27 เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอีนของชิ้นงานเซรามิกพบว่าชิ้นงานเซรามิกผสมเถ้าแกลบมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด มีค่า 32.4 ไมโครกรัมต่อตารางเมตร รองลงมาคือ เซรามิกผสมเถ้าลอย ผสมเถ้าขานอ้อย ผสมเถ้าหนัก ไม่ผสมเถ้า และเซรามิกวางขายในพื้นที่ ตามลำดับ ซึ่งความสามารถในการดูดซับของชิ้นงานเซรามิกที่ผลิตขึ้นมีความสอดคล้องกับความสามารถในการดูดซับของผงเถ้าชนิดต่างๆ โดยผงเถ้าแกลบมีความสามารถในการดูดซับมากที่สุด มีค่า 2.18×10^{-2} ไมโครกรัมต่อกรัมเถ้า รองลงมาคือ ผงเถ้าลอย ผงเถ้าขานอ้อย ผงเถ้าหนัก และผงดินเหนียว ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเซรามิกและผงเถ้า อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการทดสอบหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ทำให้ไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน และอาจเนื่องมาจากเถ้าแต่ละชนิดส่งผลให้เกิด mesoporous silica ที่ต่างกัน ซึ่ง mesoporous silica ส่งผลต่อการดูดซับโดยตรงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (Liu and Lan, 2019)

ตารางที่ 27 ความสามารถดูดซับก๊าซโทลูอินและค่า R^2 ของเซรามิกผสมแก้วชนิดต่างๆและผงแก้วชนิดต่างๆ

ชิ้นงานหรือตัวอย่าง	K_f^*	n	R^2	q_e^*
เซรามิกไม่ผสมแก้ว	7.46×10^{-6}	2.45	0.96	3.32
เซรามิกผสมแก้วหนัก	2.18×10^{-3}	1.54	0.98	7.46
เซรามิกผสมแก้วลอย	2.15×10^{-2}	1.36	0.99	29.1
เซรามิกผสมแก้วกลม	5.76×10^{-2}	1.20	0.96	32.4
เซรามิกผสมแก้วชานอ้อย	1.25×10^{-3}	1.68	0.95	9.41
เซรามิกวางขายในพื้นที่	8.17×10^{-5}	1.74	0.98	0.82
ผงดินเหนียว	3.99×10^{-10}	2.84	0.81	1.36×10^{-3}
ผงแก้วหนัก	4.70×10^{-7}	1.80	0.90	6.67×10^{-3}
ผงแก้วลอย	3.63×10^{-6}	1.57	0.90	1.53×10^{-2}
ผงแก้วกลม	2.36×10^{-4}	0.85	0.89	2.18×10^{-2}
ผงแก้วชานอ้อย	1.25×10^{-7}	2.10	0.98	8.70×10^{-3}

* หน่วย K_f สำหรับชิ้นงานเซรามิก คือ $\mu\text{g}^{1-n} \text{m}^{3n-2}$ สำหรับตัวอย่างแก้ว คือ $\mu\text{g}^{1-n} \text{g}^{n-1}$

** หน่วย q_e สำหรับชิ้นงานเซรามิก คือ ไมโครกรัมต่อตารางเมตร สำหรับตัวอย่างแก้ว คือ ไมโครกรัมต่อกรัมของแก้ว



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากเจ้าหน้าที่จากการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องมือการประมง ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งมาแทนที่ดินเหนียวเพื่อผลิตวัสดุเซรามิกประเภทดินเหนียว โดยศึกษาตัวแปรในกระบวนการผลิต ได้แก่ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะเผา อัตราส่วนผสมของเจ้าหน้าที่ อุณหภูมิสูงสุดในการเผา และระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย รวมทั้งวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา และความสามารถในการใช้เซรามิกที่ผลิตขึ้นดูดซับสารมลพิษอากาศประเภทสารอินทรีย์ระเหย ผลการศึกษาเชิงเทคนิคแสดงดังนี้

5.1 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของเซรามิก

1. อัตราการเพิ่มอุณหภูมิขณะเผาที่เหมาะสมโดยไม่ทำให้เกิดการแตกร้าวของชิ้นงานเซรามิก คือ 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที การให้ความร้อนด้วยอัตราที่เร็วกว่า 3 องศาเซลเซียสต่อนาทีทำให้เกิดการแตกร้าวได้เนื่องจากชิ้นงานเกิดการหดตัวเชิงเส้นมาก
2. การผสมเจ้าหน้าที่แทนที่ดินเหนียวบางส่วนสามารถช่วยลดการแตกร้าวจากการเผาได้เทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผสมเจ้า เพราะเจ้าหน้าที่ในส่วนผสมช่วยลดการหดตัวเชิงเส้นของชิ้นงานเมื่อได้รับความร้อนขณะเผาได้ อย่างไรก็ตามการผสมเจ้าที่มากเกินไป คือร้อยละ 40 โดยน้ำหนักพบว่าไม่เหมาะสมในแง่ของกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำ โดยอัตราส่วนผสมเจ้าที่เหมาะสม คือร้อยละ 20 และเผาให้ความร้อนด้วยอัตรา 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ให้เซรามิกที่มีกำลังอัดสูงถึง 47.5 เมกะปาสคาล และมีการดูดซึมน้ำเพียงร้อยละ 11.6
3. ผลของอุณหภูมิในการเผาและระยะเวลาเผาต่อจากอุณหภูมิสุดท้าย พบว่าการเผาอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ไม่เพียงพอที่จะทำให้อุณหภูมิของเซรามิกสูง การเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิที่สูงและยืดระยะเวลาการเผาต่ออีก 4 ชั่วโมง ช่วยลดการดูดซึมน้ำแต่การหดตัวเชิงเส้นของเซรามิกกลับเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสจึงอาจไม่จำเป็นต้องยืดระยะเวลาเผาต่อเพราะส่งผลเสียต่อการหดตัวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น

4. การวิเคราะห์ด้วยสมการการถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณของการหดตัวเชิงเส้น, การดูดซึมน้ำ และความต้านแรงกดแตก พบว่าอุณหภูมิสุดท้ายในการเผามีอิทธิพลต่อการหดตัวเชิงเส้น, การดูดซึมน้ำและความต้านแรงกดแตก มากกว่าอัตราส่วนผสมเถ้าหนัก

5. ผลของการชะของโลหะหนักจากตัวอย่างเซรามิกผสมเถ้าหนักพบว่า น้ำชะมีปริมาณสารหนู ตะกั่ว พรอท แคดเมียม ซีลีเนียม แบริียม โครเมียม ทองแดง และสังกะสี ไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดโดยองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา และเกณฑ์ กสอ. ของประเทศไทย

6. ผลการวิเคราะห์ออสตรูนาวิทยาด้วย XRD ยืนยันได้ว่าเถ้าหนักที่ผสมในการผลิตเซรามิกสามารถช่วยส่งเสริมให้เกิด Cristobalite ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง โดยโครงสร้างดังกล่าวจะไม่พบในเซรามิกที่ทำจากดินเหนียวเพียงอย่างเดียว ส่วนผลการวิเคราะห์พื้นผิวด้วย BET พบว่าชิ้นงานที่มีการผสมเถ้าหนัก มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดเฉลี่ยของรูพรุน และปริมาตรรูพรุน น้อยกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากดินเหนียวเพียงอย่างเดียว

7. เมื่อพิจารณามาตรฐานอิฐก่อสร้างประเภท ข มอก. 77-2545 และกระบวนการผลิตเซรามิกดินผสมเถ้าหนักที่ใช้พลังงานในการเผาต่ำที่สุดในงานวิจัยนี้พบว่า อัตราส่วนเถ้าหนักร้อยละ 20 และเผาที่อุณหภูมิสูงสุด 700 องศาเซลเซียสด้วยอัตราการให้ความร้อน 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที มีความเหมาะสมในการผลิต

5.2 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอินของเซรามิก

1. การดูดซับระหว่างชิ้นงานเซรามิกที่ผลิตขึ้นกับก๊าซโทลูอิน มีลักษณะการดูดซับที่สามารถอธิบายได้โดยโมเดลการดูดซับไอโซเทอมฟลูนดลิช ซึ่งมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.87-0.98

2. ผลของอุณหภูมิสุดท้ายในการเผา พบว่าชิ้นงานเซรามิกที่เผาอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอิน มากกว่าชิ้นงานเซรามิกที่เผาอุณหภูมิ 1,000 และ 1,300 องศาเซลเซียส ประมาณ 7-28 เท่า อาจเนื่องจากโครงสร้าง Quartz ในเซรามิกที่สามารถดูดซับโทลูอินได้ ซึ่งโครงสร้าง Quartz พบมากในชิ้นงานเซรามิกเผาอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

3. ผลของอัตราส่วนผสมเถ้าหนัก พบว่าที่ความเข้มข้นก๊าซโทลูอิน 200 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ชิ้นงานที่ผสมเถ้าหนักมากขึ้น จะมีความสามารถในการดูดซับก๊าซโทลูอินสูงขึ้นในทุกอุณหภูมิการเผา อาจเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเซรามิกที่ผลิตขึ้นจากดินเหนียวเพียงอย่างเดียว มีความสามารถในการดูดซับโทลูอินซึ่งเป็นสารในกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ไม่ดัดนัก

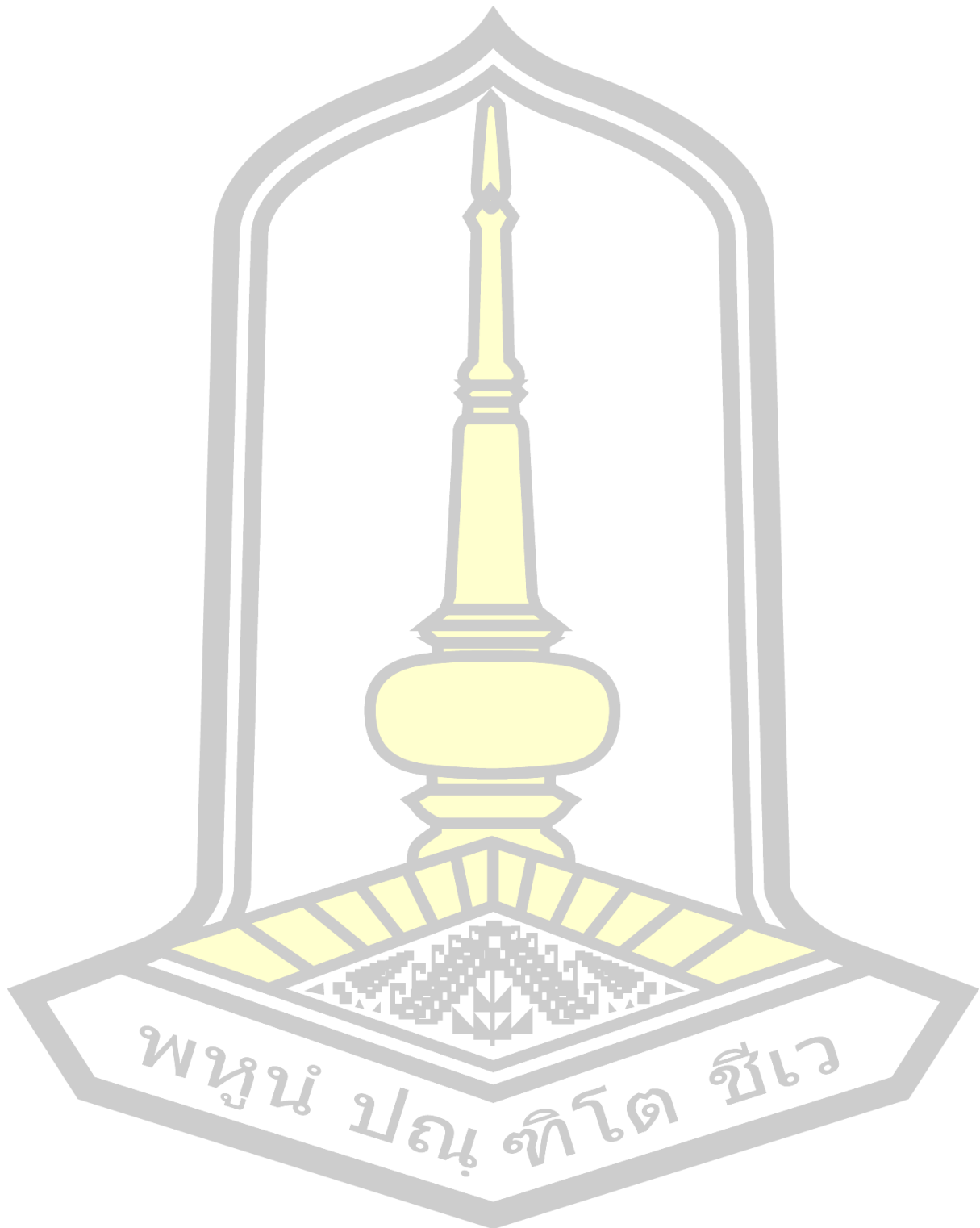
4. ผลการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับก๊าซโพลูอินระหว่างเซรามิกผสมเถ้าชนิดต่างๆ เเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบว่าความสามารถในการดูดซับของเซรามิกผสมเถ้าแกลบสูงที่สุด ($32.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) รองลงมาเป็นเซรามิกผสมเถ้าลอย ($29.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) เถ้าขานอ้อย ($9.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$) และเถ้าหนัก ($7.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับความสามารถในการดูดซับของผงเถ้า เมื่อเปรียบเทียบกับเซรามิกหม้อดินที่ขายในพื้นที่พบว่า เซรามิกผสมเถ้าที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้มีความสามารถดูดซับโพลูอินสูงกว่า 4-40 เท่า

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มอัตราส่วนผสมเถ้าหนักให้มากกว่า 3 อัตราส่วน เพื่อให้สามารถอธิบายคุณสมบัติของเซรามิกเผาที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียสได้ เนื่องจากชิ้นงานเกิดการขยายตัว
2. ชิ้นงานที่ผลิตขึ้นมีความสามารถในการดูดซับโพลูอินลดลงตามการเพิ่มอุณหภูมิการเผา ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปควรพิจารณาแค่ความสามารถในการดูด โดยไม่ต้องพิจารณาความเป็นอิฐก่อสร้าง จะได้สามารถเผาที่อุณหภูมิต่ำเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดได้
3. ควรศึกษาวิธีการทดลอง เครื่องอุปกรณ์ในการดูดซับ ให้สามารถทดสอบกับโพลูอินที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า 200 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์ เพื่อให้สอดคล้องกับความเข้มข้นของมลพิษอากาศ
4. ควรศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเซรามิก เพื่อให้สามารถอธิบายความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับของชิ้นงานที่ผสมเถ้าแต่ละชนิดได้



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- กรกนก บุญเสริม และ ปริญญา จินตาประเสริฐ. (2556). *จีโอโพลีเมอร์จากเถ้าถ่านหินทิ้งผสมยิปซัม*. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- กลม มาตยภูธร. (2550). *การพัฒนาเคลือบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ด้วยเคลือบเทมโมกุ โดยใช้ใบไม้* ตกแต่ง. มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.
- คณาธิป อิศระกุล และ จักรกฤษณ์ มหัจฉริยวงศ์. (2557). *คุณลักษณะของกระเบื้องเซรามิกที่ผสมเถ้า* แกลบและเถ้าลอยลิกไนต์ ภายใต้ สภาวะอุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกัน. 250–256. วารสาร วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การประชุมวิชาการ มหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 10.
- จิระศักดิ์ เฟิงคุณ. (2557). *การศึกษาทดลองดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยถ่านกัมมันต์และดูดซึม* โดยน้ำ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เชาวลิต เสนานุรักษ์วรกุล. (2548). *การศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับน้ำมันของเยื่อกระดาษและตัวดูด* ซับชนิดโพลี โพรไฟลีน. มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ไชยพงศ์ สมดี. (2555). *การบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ปลดปล่อยจากกากหินเนอร์จากอู่ซ่อมพ่นสี* รถยนต์. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- دنوپل ต้นนโยบาย, ผดุงเกียรติ แซ่หลี่ และ สุชาติ จันทร์มณี. (2554). *การผลิตกระเบื้องเซรามิ* กมวลเบาจากหางแร่ดินขาวและเติมโคโลไมต์และเศษอิฐดินเผา. 669–674. ภูเก็ต: การประชุม วิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ครั้งที่ 9.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. (2552). *กระบวนการดูดซับ* (สำนักพิมพ์). กรุงเทพมหานคร.
- ธราพงษ์ วิทิตสานนท์, สันติ เมฆฉาย และ รัชณี ทรัพย์มี. (2550). *ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพ* ถ่านกัมมันต์. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- ธานี อติชัยพัฒนกุล และ กิตติชัย ระมิงค์วงศ์. (2559). *การศึกษาและพัฒนาการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรา* มิกขนาดใหญ่ด้วยใยแก้วสำหรับผู้ประกอบการเซรามิก. พิษณุโลก: การประชุมวิชาการนเรศวร วิจัย ครั้งที่ 12.
- ธิตินา คุณยศยิ่ง. (2556). *การทดลองเนื้อดินเพื่อทำเซรามิกหอมโดยใช้กากดินขาวทดแทนทราย*. *Industrial Technology Lampang Rajabhat University*, 6(1), 19–30.

- นันทนา เงินเลี้ยง. (2556). รายงานการวิจัยการวิเคราะห์และพัฒนาประสิทธิภาพเนื้อดินในจังหวัดชัยนาท เพื่อใช้ในการผลิต เซรามิกส์. มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม.
- นิคม กลมเกลี้ยง. (2558). การดูดซับของของผลมที่เป็นไอระเหยว่ง เบนซีน โทลูอิน ไซลีน และน้ำในถ่านกัมมันต์ที่ทำมาจากต้นไม้การทดลองเปรียบเทียบกับกำลงแบบของมอนติคาร์โล. ฐานข้อมูลโครงสร้างพื้นฐานภาครัฐด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- เบญจลักษณ์ สงเคราะห์. (2551). รายงานการวิจัยเรื่องกำลงใช้เปลือกหอยนางรมเพื่อเป็นส่วนผลมในน้ำเคลือบเซรามิกส์. มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี.
- ประทีป ดวงเดือน. (2554). กำปรุงคุณภาพถ่านกเพื่อใช้เป็นวัสดุกำลงทาง. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยและพัฒนำแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ สำเรียง รักซ้อน. (2557). กำพัฒนำถ่านกเป็นวัสดุผลมรวมในกำลงคอนกรีต. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- พิภาค สุทธินันท์ไชย. (2549). กำศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายของแผ่นกรองผงถ่านกัมมันต์ในระบบบำบัดมลพิษทางอากาศเฉพาะที่สำหรับกำลงพ่นสีกันชนรถยนต์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภควดี ศิริหล้า. (2557). กำพัฒนำเนื้อผลมถ่านกเซรามิกส์จากทรัพยากรธรรมชาติใหม่เพื่อเพิ่มผลผลิต. มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย สถาบันวิจัยและพัฒนำ.
- ภัทรพล สุวรรณโณม. (2543). กำศึกษาอัตราส่วนผลมของโซดาแอส โฟแทลเซียมเฟลด์สปาร์ และควอทซ์ ในกำการทำฟritteสำหรับตกแต่งกระเบื้องบุผนัง. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- รัตนา ธนบูรณ์กาญจน์. (2556). ประสิทธิภาพการดูดซับไอสารอินทรีย์ระเหยด้วยถ่านกและวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมกำลงเส้นใยเรยอน. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิลาศลักษณ์ จำปา. (2557). กำลอยแร่โซเดียมเฟลด์สปาร์ เพื่ออุตสาหกรรมเซรามิก. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ศิรินุช ลอยหา. (2556). ซีโอไลต์และเทคโนโลยีซีโอไลต์. วิทยาศาสตร์ มข., 41(1), 56–66.
- ศิริพร พงศ์สันติสุข. (2541). กำกำจัดคราบน้ำมันในน้ำโดยใช้วัสดุธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ. ฐานข้อมูลวิทยานิพนธ์ไทย.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2545). มาตรฐานอัฐก้อสร้าง. มอก. 77-2545.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2553). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระเบื้องเซรามิก*. มอก. 2398-2553.

สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม. (2548). *หลักเกณฑ์หลุมฝังกลบอย่างปลอดภัยสำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตรายซึ่งผ่านการทำลายฤทธิ์หรือปรับเสถียรและทำก้อนแข็งมาแล้ว*. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. Retrieved from <http://facwaste.diw.go.th/upload/content/doc1455507460.pdf>

สุขเกษม กังวานตระกูล. (2556). *รายงานการวิจัยโครงการวิจัยย่อยการขึ้นรูปกระเบื้องเซรามิกชนิดทนกรดเกลือสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สุทัศน์ จันบัวลา และ ธนากร วาสนาเพียรพงศ์. (2560). การพัฒนาอิฐดินเผามวลเบาโดยใช้เถ้าขานอ้อยเป็นส่วนผสม. *SDU Research Journal*, 10(1), 14–30.

อัครเรศ แซ่โล้ว. (2543). *การดูดซับคราบน้ำมันที่แขวนลอยบนผิวน้ำของขนเป็ดเทศ รังไหม ขานอ้อย และก้านกล้วย*. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อัศวิน พีชทองกลาง. (2556). *ผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนต่อการเสื่อมอายุของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อาชียะ หมักหมัน, ดนุพล ตันนโยภาส และ สุชาติ จันทรมณีย์. (2556). กลไกการเผาผนึกของเนื้อกระเบื้องเซรามิกซีโอไลต์ที่เติมเศษหินชนวน. *มหาวิทยาลัยทักษิณ*, 16(1), 17–24.

Aamodt, E. J. (2006). *The Neurobiology of C. elegans*. In *International Review of Neurobiology*. Retrieved from <https://books.google.co.th/books?id=GDtGaEdSt4cC>

Abbas, S., Saleem, M. A., Kazmi, S. M. S., & Munir, M. J. (2017). Production of sustainable clay bricks using waste fly ash: Mechanical and durability properties. *Building Engineering*, 14, 7–14. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.09.008>

American Society for Testing and Materials. (2017). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile*. ASTM C67-17.

- Aras, A. (2018). The differences between alkaline- and alkaline-earth-flux effects on high-temperature phase change of clay based ceramic. *Applied Clay Science*, 164, 2–12. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.029>
- Arivudai Nambi, R., & Jayakumar, V. (2018). Comparative study on bottom ash based clay bricks with ordinary clay bricks. *Indian Journal of Science and Technology*, 14(2), 274–278.
- ASTM. (2014). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use*. 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0618>
- Bella, M. Di, Italiano, F., Magazù, S., Mottese, A. F., Interdonato, M., Gentile, F., & Sabatino, G. (2018). Risk assessment of bottom ash from fuel oil power plant of Italy: mineralogical, chemical and leaching characterization. *Environmental Earth Sciences*, 77(5).
- Bennour, A., Mahmoudi, S., Srasra, E., Boussen, S., & Htira, N. (2015). Composition, firing behavior and ceramic properties of the Sejnène clays (Northwest Tunisia). *Applied Clay Science*, 115, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.07.025>
- Biró, A., Hlavička, V., & Lublók, E. (2019). Effect of fire-related temperatures on natural stones. *Construction and Building Materials*, 10, 92–101. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.333>
- Cho, Y. K., Hwa, S. J., & Cheol, Y. C. (2019). Effects of chemical composition of fly ash on compressive strength of fly ash cement mortar. *Construction and Building Materials*, 204, 255–264. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.208>
- Dhanke, P., Patil, A., Kore, V., & Kanse, N. (2018). Phosphate Removal From Waste Effluent Using Improved Fly Ash. *Materials Today Proceedings*, 5(9), 17889–17894. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.116>
- Eliche-Quesada, D., & Leite-Costa, J. (2016). Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks. *Waste Management*, 48, 323–333. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.042>

- Godish, T. (2016). *Indoor Environmental Quality*. Retrieved from https://books.google.co.th/books?id=cGLTz8d7j_sC
- Goss, K.-U., & Schwarzenbach, R. P. (2002). Adsorption of a Diverse Set of Organic Vapors on Quartz, CaCO₃, and α -Al₂O₃ at Different Relative Humidities. *Journal of Colloid and Interface Science*, 252(1), 31–41. Retrieved from <https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8447>
- Haleem, A., Luthra, S., Mannan, B., Khurana, S., Kumar, S., & Ahmad, S. (2016). Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective. *Resources Policy*, 49, 334–348. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.07.002>
- Hutchinson, C., & Yvonne. (1996). *Ceramic technology for potters and sculptors*. University of Pennsylvania. University of Pennsylvania.
- Liu, Z. S. & Lan, H. M. (2019). Synthesis of Mesoporous Silica Materials from Incineration Bottom Ash for the Removal of Toluene. *International Journal of Environmental Science and Development*, 10(3), 96–99.
- Jankowska, H., Swiatkowski, A., & Choma, J. (1991). *Active Carbon* (Ellis Harw). New York.
- Kadir, A. A., & Mohajerani, A. (2015). Effect of heating rate on gas emissions and properties of fired clay bricks and fired clay bricks incorporated with cigarette butts. *Applied Clay Science Journal*, 104, 269–276. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.12.005>
- Mahmoudi, S., Bennour, A., Meguebli, A., Srasra, E., & Zargouni, F. (2016). Characterization and traditional ceramic application of clays from the Douiret region in South Tunisia. *Applied Clay Science*, 127–128, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.010>

- Makaratat, N., Jaturapitakkul, C., Namarak, C., & Sata, V. (2011). Effects of binder and CaCl₂ contents on the strength of calcium carbide residue-fly ash concrete. *Cement and Concrete Composites*, 3(3), 436–443. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.12.004>
- Mushtaq, F., Zahida, M., Bhatti, I. A., Nasir, S., & Hussain, T. (2019). Possible applications of coal fly ash in wastewater treatment. *Environmental Management*, 240, 27–46. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.054>
- National Center for Biotechnology Information. (2006). *Chemical entities of biological interest*.
- Ongwande, M., Moonrinta, R., Panyametheekul, S., Tangbanluekal, C., & Morrison, G. (2011). Investigation of volatile organic compounds in office buildings in Bangkok, Thailand: Concentrations, sources, and occupant symptoms. *Building and Environment*, 46(7), 1512–1522. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.026>
- Ozdes, D., Duran, C., & Basri, H. S. (2011). Adsorptive removal of Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions by using Turkish illitic clay. *Environmental Management*, 92(12), 3082–3090. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.07.022>
- Pandey, D. S., Marzena Kwapińska, Leahy, J. J., & Kwapiński, W. (2019). Fly Ash From Poultry Litter Gasification – Can it be Utilised in Agriculture Systems as a Fertiliser. *Energy Procedia*, 161, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.056>
- Pantorlawn, W., Khanitchaidecha, W., & Nakaruk, A. (2017). Effect calcination temperature on adsorption property of vetiver grass leaves. *Naresuan University Engineering Journal*, 12(2), 35–40.
- Pujari, A. S., Bhosale, C. H., Wagh, M. M., & Shinde, N. N. (2016). Effect of Temperature on Drying Rate of Various Types of Bricks. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3(5), 2793–2795.

- Ragheb, S. M. (2013). Phosphate removal from aqueous solution using slag and fly ash. *HBRC Journal*, 9(3), 270–275. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.08.005>
- Sing, K. S. W., Haul, R. A. W., Pierotti, R. A., & Siemieniowska, T. (1985). REPORTING PHYSISORPTION DATA FOR GAS / SOLID SYSTEMS with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure Appl. Chem.*, 57(4), 603–619.
- Tonnayopas, D., Kooptarnond, K., & Masae, M. (2009). Effect of Firing Temperature and Para Rubber Wood Ash on the Quarry Granite Waste Roofing Tile Body. *4th Int. Conf. Eng. Tec.- ICET 2009.*, (April 28-30 2009), 257–262. Hotel Park, Novi Sad, Serbia.
- United States Environmental Protection Agency. (1992). *Method 13–11 toxicity characteristics leaching procedure (TCLP)* (pp. 11798–11877). pp. 11798–11877. Federal Register, Washington, DC, 51.
- Wang, Y., Zhang, X., Zhang, H., Lu, Y., Huang, H., Dong, X., ... Jiang, T. (2012). Coiled-coil networking shapes cell molecular machinery. *Molecular Biology of the Cell*, 23(19), 3775–3924. Retrieved from <https://doi.org/10.1091/mbc.e12-05-0396>
- Yariv, S. (2004). The role of charcoal on DTA curves of organo-clay complexes: an overview. *Applied Clay Science*, 24(3–4), 225–236. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.04.002>
- Yuso, A. M. de, Izquierdo, M. T., Valenciano, R., & Rubio, B. (2013). Toluene and n-hexane adsorption and recovery behavior on activated carbons derived from almond shell wastes. *Fuel Processing Technology*, 110, 1–7. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.01.001>

พหุ ประถมศึกษา

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายกานต์ นามีผล
วันเกิด วันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2534
สถานที่เกิด จังหวัดอุดรธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน 62 หมู่ 9 ตำบลหมู่ม่น อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2557 ปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
พ.ศ. 2562 ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนุ่ ปณุ่ ทีโตะ ชีเว