



การใช้ใบของหญ้าแฝกในกระบวนการเผาประสานเซรามิค  
THE USE OF VETIVER GRASS'S LEAF IN CERAMIC SINTERING PROCESS

นางสาวชนาพร	หอมสุวรรณ	รหัส 54361534
นางสาวปริญญช	อินทา	รหัส 54365167
นางสาวอุมารณ	เมืองแดง	รหัส 54365297

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2557



ชื่อหัวข้อโครงการ	การใช้ใบของหญ้าแฝกในกระบวนการเผาประสานเซรามิค		
ผู้ดำเนินโครงการ	นางสาวชนาพร	หอมสุวรรณ	รหัส 54361534
	นางสาวปริยานุช	อินทา	รหัส 54365167
	นางสาวอุมาภรณ์	เมืองแดง	รหัส 54365297
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์อุปลักษณ์	นาครักษ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ		
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2557		

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ใบหญ้าแฝกทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ชนิดโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิคแบบอัด ชิ้นงานทดสอบที่มีอัตราส่วนระหว่างแร่เฟลด์สปาร์ชนิดโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์กับหญ้าแฝกในชิ้นงานเป็น 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 ร้อยละโดยน้ำหนักตามลำดับนอกจากนี้ยังได้ศึกษาสมบัติและประสิทธิภาพของชิ้นงานที่ผลิตขึ้นมาเมื่อนำไปทดสอบการหดตัวพบว่า การหดตัวของชิ้นงานในทุกอัตราส่วนมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทดสอบความหนาแน่นพบว่าชิ้นงานที่มีแร่เฟลด์สปาร์ในอัตราส่วน 100:0 มีความหนาแน่นเท่ากับ 2.08 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรแต่ชิ้นงานที่มีการผสมหญ้าแฝกที่อัตราส่วน 20:80 นั้นทำให้ความหนาแน่นลดลงเหลือเพียง 1.91 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและในการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งและการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดพบว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสมของหญ้าแฝกในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ชิ้นงานนั้นมีความแข็งแรงลดลง

**Project title**            The Use of Vetiver Grass's Leaf in Ceramic Sintering Process

**Name**                    Miss Chanaphon            Homsuwan            ID.54361534

                                 Miss Pariyanut            Inta                    ID.54365167

                                 Miss Umaporn            Muangdang            ID.54365297

**Project advisor**        Mr. Auppatham            Nakaruk

**Major**                    Materials Engineering

**Department**            Industrial Engineering

**Academic year**        2014

---

### Abstract

The objective of this project is to study the using of vetiver grass's leaf for replacement of the potassium feldspars in the ceramic compressive molding process. The ratios between potassium feldspars and vetiver grass's leaf in the specimen are 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, and 0:100 wt%, respectively. Also this project studies the properties and performance of the produced specimen. In the shrinkage test, the results showed the same shrinkage value in every specimen ratios. In the density tests, the specimen ratio of 100:0 showed the highest density of  $2.08 \text{ g/cm}^3$ . While the specimen ratio of 20:80 showed the lowest density of  $1.91 \text{ g/cm}^3$ . Finally, the bending and the compressive tests showed that the increase of vetiver grass's leaf amount in the specimen caused the decrease of bending stress and compressive strength.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงขอแสดงความขอบพระคุณบุคคลผู้มีพระคุณ โดยเฉพาะอาจารย์อุบลรัตน์ นาครักษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ในการให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ รวมถึงข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนดูแลติดตามโครงการมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทศพล ตรีรัฐวิภาภพงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ คอยช่วยเหลือทางด้านการใช้โปรแกรมต่าง ๆ ตลอดจนการทำโครงการ และกรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอบโครงการนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์นฤมล สีพลไกร และอาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นอาจารย์สอบโครงการ พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอขอบพระคุณคุณครูช่างประเทือง โมรราราย ครูช่างรมภตุต แสงผ่อง และนักวิทยาศาสตร์ อิศรีย์ วัตฤภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และคำแนะนำในการใช้งานเครื่องมือต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ และคอยสนับสนุนค่าใช้จ่ายจนสามารถทำโครงการเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ และเพื่อนทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การดูแลตลอดการทำโครงการจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นางสาวชนาพร หอมสุวรรณ

นางสาวปริยานุช อินทา

นางสาวอุมภรณ์ เมืองแดง

พฤษภาคม 2558

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการวิจัย .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
กิตติกรรมประกาศ .....	ง
สารบัญ .....	จ
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ซ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ .....	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ .....	2
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผล .....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ .....	2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ .....	2
1.6 สถานที่การดำเนินโครงการ .....	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ .....	2
1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ .....	3
<b>บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี .....</b>	<b>4</b>
2.1 กลุ่มแร่เฟลด์สปาร์ .....	4
2.2 หลง้าแฝก .....	9
2.3 กระบวนการขึ้นรูปเซรามิค .....	12
2.4 กระบวนการในการทดสอบสมบัติเชิงกล .....	13
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ .....</b>	<b>23</b>
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ .....	24
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....	24

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	28
4.1 ผลการตรวจสอบจากเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมตรี (XRF).....	28
4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติของไบโพลิเมอร์.....	29
4.3 ลักษณะการหดตัวของชิ้นงาน.....	30
4.4 ผลการตรวจสอบความหนาแน่น.....	32
4.5 ผลการตรวจสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง.....	34
4.6 ผลการตรวจสอบความต้านทานแรงกดอัด.....	35
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	37
5.1 บทสรุปของโครงการ .....	37
5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา.....	38
5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางแก้ปัญหา.....	38
เอกสารอ้างอิง.....	39
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ .....	42

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ.....	3
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของใบหญ้าแฝกทั้งสองสายพันธุ์.....	11
2.2 ส่วนประกอบไนซี้เถ้าของหญ้าแฝก.....	12
2.3 สูตรการคำนวณในการทดสอบแรงดัดงอแบบ 3 จุด.....	15
2.4 สูตรการคำนวณในการทดสอบแรงดัดงอแบบ 4 จุด.....	16
3.1 อัตราส่วนของใบหญ้าแฝกและโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	25
4.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของใบหญ้าแฝก.....	28
4.2 ความยาวของชิ้นงานก่อนและหลังเผา.....	30
4.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานรูปแบบต่าง ๆ.....	32





## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แร่อัลไบต์ ประเทศบราซิล.....	4
2.2 แร่ออร์โทเคลส ชนิดชั้นสโตน ประเทศนอร์เวย์.....	5
2.3 แร่ออร์โทเคลส ชนิดมูนสโตน ประเทศอินเดีย.....	5
2.4 แร่พลาจิโอเคลส ชนิดแอนดีซีน.....	5
2.5 แร่ลาบราเตอร์ไรต์ ประเทศมาดากัสการ์.....	6
2.6 แร่ไบทาวไนต์ ประเทศเม็กซิโก.....	6
2.7 แร่อะนอร์ไทต์ เกาะฮอกไกโด ประเทศญี่ปุ่น.....	7
2.8 แร่ไมโครไคลน์รัฐโคโลราโด สหรัฐอเมริกา.....	7
2.9 แร่ชานีดีน ประเทศเม็กซิโก.....	8
2.10 แร่ออร์โทเคลส ประเทศบราซิล.....	8
2.11 หลักการทดสอบแรงดัดงอ.....	14
2.12 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด.....	14
2.13 การทดสอบการดัดงอแบบ 4 จุด.....	15
2.14 ลักษณะรูปร่างของชิ้นทดสอบแรงดัดงอ.....	16
2.15 สมบัติเชิงกลของวัสดุเซรามิกทางวิศวกรรมบางชนิด.....	18
2.16 เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก.....	19
2.17 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	20
3.1 ลำดับขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	23
3.2 การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน.....	26
3.3 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงาน.....	27
3.4 การทดสอบความต้านทานการแตกหักของชิ้นงาน.....	27
4.1 กราฟการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของใบหญ้าแฝก.....	29
4.2 ชิ้นงานที่ 1 ในรูปแบบ 80% Vetiver.....	31
4.3 กราฟการหาค่าเฉลี่ยของชิ้นงานในแต่ละรูปแบบ.....	31
4.4 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน.....	32
4.5 กราฟความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานในรูปแบบต่าง ๆ.....	33
4.6 กราฟการรับแรงดัดโค้งสูงสุดของชิ้นงานในแต่ละรูปแบบ.....	34
4.7 กราฟการรับแรงกดอัดสูงสุดของชิ้นงานในแต่ละรูปแบบ.....	35
4.8 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานเซรามิก.....	35

## สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

EIA	=	Environmental Impact Assessment
V.	=	Vetiveria
WAPP	=	Weakly Acidic pectic Polysaccharides
psi	=	ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
MPa	=	เมกะปาสคาล
g/cm	=	กรัมต่อเซนติเมตร
ksi	=	กิโลกรัมต่อตารางนิ้ว
mol	=	โมล
$\mu\text{m}$	=	ไมโครเมตร
g	=	กรัม
m	=	เมตร
N	=	นิวตัน
mm	=	มิลลิเมตร
$\text{g}/\text{cm}^3$	=	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
TGA	=	Thermogravimetric Analysis
DSC	=	Differential Scanning Calorimetry
ASTM	=	American Standard Test Method
K	=	เคลวิน
J/K	=	จูลต่อเคลวิน
$\text{m}^2$	=	ตารางเมตร
$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	=	วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
%wt	=	ร้อยละโดยน้ำหนัก

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

เป็นที่ทราบกันอย่างดีว่าประเทศไทยมีการทำอุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมเครื่องปั้นถ้วยชาม และอุตสาหกรรมแก้วกันอย่างแพร่หลาย และหนึ่งในวัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบส่วนสำคัญของอุตสาหกรรมดังกล่าวนี้คือ แร่เฟลด์สปาร์ ทั้งประเภทโซเดียมเฟลด์สปาร์และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ในการได้มาของแร่เฟลด์สปาร์นั้น จำเป็นต้องมีการทำเหมืองแร่หรืออุตสาหกรรมเหมืองแร่ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและทำลายสุนทรียภาพบริเวณนั้น ๆ ตามมา โดยเหมืองแร่ทุกประเภทและทุกขนาดต้องมีการจัดทำรายงานประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Environmental impact assessment; EIA) ก่อนได้รับอนุญาตให้ดำเนินการ

แต่ขณะเดียวกันในปัจจุบันได้มีการทำโครงการรณรงค์การปลูกหญ้าแฝกเพื่อการอนุรักษ์ดินและน้ำ โดยดำเนินการปลูกหญ้าแฝกในพื้นที่ต่าง ๆ ตามความเหมาะสม ซึ่งเป็นการใช้ระบบรากของหญ้าแฝกเพื่อป้องกันการชะล้างของหน้าดินให้น้อยลง ขณะเดียวกันก็ยังมีประสิทธิภาพในการดักตะกอนดิน ดูดซับโลหะหนักจากดิน จากลักษณะดังกล่าวจึงมีการนำหญ้าแฝกมาปลูกเพื่อใช้บำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าในส่วนของใบหญ้าแฝกมีส่วนผสมของสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และสารประกอบโพแทสเซียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{O}$ ) อยู่ในปริมาณที่สูง ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับสารประกอบในแร่เฟลด์สปาร์ ชนิดโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) ที่มีสมบัติเป็นตัวเริ่มก่อให้เกิดปฏิกิริยาเกิดเนื้อแก้วในเนื้อผลิตภัณฑ์ หรือเป็นตัวส่งเสริมทำให้เกิดความแกร่งและความโปร่งใสของชิ้นงาน ทั้งนี้ยังทำหน้าที่ให้ผลิตภัณฑ์หลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ และภายหลังจากการหลอมแล้วได้ความหนืดสูงกว่าแร่เฟลด์สปาร์ ชนิดโซเดียมเฟลด์สปาร์ จึงเป็นผลให้รูปทรงของชิ้นงานอยู่ตัวไม่บิดเบี้ยวในช่วงการเผา อีกทั้งยังมีสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้า [1]

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ใบหญ้าแฝกทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ชนิดโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ในอุตสาหกรรมเซรามิกและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยชิ้นงานทดสอบนั้นมีอัตราส่วนของแร่เฟลด์สปาร์ ชนิดโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ และใบหญ้าแฝกที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีการนำชิ้นงานทดสอบไปศึกษาสมบัติและประสิทธิภาพของการใช้งาน และเพื่อเป็นการนำใบหญ้าแฝกซึ่งเป็นสินค้าภาคเกษตรกรรมมาสร้างมูลค่าเพิ่มอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติของชิ้นงานที่มีการประยุกต์ใช้ไบโหลู่าแฝกแทนแร่เฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นส่วนผสมในน้ำดินของชิ้นงานเซรามิก
- 1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการใช้งานของไบโหลู่าแฝกทดแทนแร่เฟลด์สปาร์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการใช้ไบโหลู่าแฝกที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน

## 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผล

- 1.3.1 สามารถนำไบโหลู่าแฝกเป็นส่วนผสมของน้ำดินเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานได้
- 1.3.2 ได้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไบโหลู่าแฝกที่ผสมในน้ำดิน

## 1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ

- 1.4.1 สามารถนำไบโหลู่าแฝกใช้แทนแร่เฟลด์สปาร์ได้
- 1.4.2 สามารถวัดผลสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของไบโหลู่าแฝกได้

## 1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

- 1.5.1 ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ไบโหลู่าแฝกแทนแร่เฟลด์สปาร์ในอัตราส่วนแร่เฟลด์สปาร์ต่อไบโหลู่าแฝก 100:0 80:20 60:40 40:60 20:80 และ 0:100
- 1.5.2 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไบโหลู่าแฝก
- 1.5.3 ศึกษาประสิทธิภาพของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของไบโหลู่าแฝกและแร่เฟลด์สปาร์โดยการเปรียบเทียบการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง และการรับแรงก่อนการแตกหัก

## 1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ

- 1.6.1 อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 1.6.2 ห้อง TC413 อาคารมหาธรรมราชาหน่วยวิจัยวัสดุขั้นสูงเพื่อการประยุกต์ทางด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

## 1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ

ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2557 ถึง พฤษภาคม พ.ศ. 2558

## 1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงการ

ลำดับ	การดำเนินโครงการ	ช่วงเวลา									
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.8.1	ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←————→									
1.8.2	ทดสอบสมบัติของใบหญ้าแฝก	←————→									
1.8.3	ออกแบบและวางแผนการทดลอง	←————→									
1.8.4	จัดซื้อสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง					←————→					
1.8.5	ทำการทดลอง						←————→				
1.8.6	ศึกษาสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของใบหญ้าแฝกและแร่ฟอสฟอรัส			←————→							
1.8.7	ทดสอบหาประสิทธิภาพของชิ้นงานที่มีส่วนผสมของใบหญ้าแฝกและแร่ฟอสฟอรัส						←————→				
1.8.8	เขียนรูปเล่ม				←————→						

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 กลุ่มแร่เฟลด์สปาร์

เฟลด์สปาร์ เป็นแร่หินกลุ่มซิลิเกต (Silicates) ที่มีธาตุโพแทสเซียม โซเดียม และแคลเซียม เป็นส่วนประกอบสำคัญ ลักษณะโครงสร้างผลึกอยู่ในระบบโมโนคลินิกและไตรคลินิก มีค่าความแข็งในระบบของ Moh's scale ประมาณ 6 มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.55-2.75 กลุ่มแร่เฟลด์สปาร์เป็นกลุ่มแร่ค่อนข้างใหญ่มีเกือบ 20 ชนิดด้วยกัน [2] แต่ที่รู้จักกันมากมีประมาณ 9 ชนิดด้วยกันและมีเพียง 2-3 ชนิดเท่านั้นที่พบและมีการผลิตขึ้นมาใช้ประโยชน์กันมาก

##### 2.1.1 กลุ่มพลาจิโอเคลสเฟลด์สปาร์ (Plagioclase Feldspars)

###### 2.1.1.1 แร่อัลไบต์ (Albite: Sodium Aluminum Silicate)

เป็นแร่ที่มีสีมีสีขาว สีเทา เขียว สีแดงเข้มเหลือง หรืออาจไม่มีสี บางครั้งมีความโปร่งแสงโปร่งใสจนถึงทึบแสง มีความวาวคล้ายแก้วหรือคล้ายมุก หรือด้านแบบดิน มีโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก (Triclinic) มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{NaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  มีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 6-6.5 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.61 มักเกิดร่วมกับแร่ควอตซ์ (Quartz) แร่ทัวร์มาลีน (Tourmaline) และแร่มีสโคไวต์ (Muscovite) ไบโอไทต์ (Biotite)



รูปที่ 2.1 แร่อัลไบต์ ประเทศบราซิล [2]

###### 2.1.1.2 แร่ออริโกเคลส (Oligoclase: Sodium Calcium Aluminum Silicate)

เป็นแร่ที่ไม่ค่อยเป็นที่รู้จักกันมากนัก ส่วนใหญ่ของแร่ประกอบไปด้วยแร่อัลไบต์ร้อยละ 70-90 และแร่อะนอร์ไทต์ร้อยละ 10-30 แต่เคยมีการนำแร่อริโกเคลสมาทำเป็นแร่กึ่งรัตนชาติ (Semi-precious Stone) เรียกว่า ซันสโตน (Sunstone) และมูนสโตน (Moonstone) โดยหินซันสโตน (Sunstone) มีสีแดงสดเนื่องจากมีส่วนประกอบของแร่เหล็กชนิดเฮมาไทต์ (Hematite)

ผสมอยู่ ส่วนหินมูนสโตน (Moonstone) มีสีคล้ายแร่แลบราโดเรสเซนซ์ (Labradorescence) แต่สีจางกว่า แร่ชนิดนี้มักมีสีเทา สีเขียวอ่อน สีน้ำตาล หรือสีเหลือง ความวาวคล้ายแก้ว มีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 6-6.5 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.65-2.68 มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก (Triclinic) มักเกิดร่วมกับแร่ควอตซ์ (Quartz) แร่มีส์โคไวต์ (Muscovite) และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ (K-feldspars)



รูปที่ 2.2 แร่ออร์โทเคลส ชนิดซันสโตน ประเทศนอร์เวย์ [2]



รูปที่ 2.3 แร่ออร์โทเคลส ชนิดมูนสโตน ประเทศอินเดีย [2]

#### 2.1.1.3 แร่แอนดีซีน (Andesine: Sodium Calcium Aluminum Silicate)

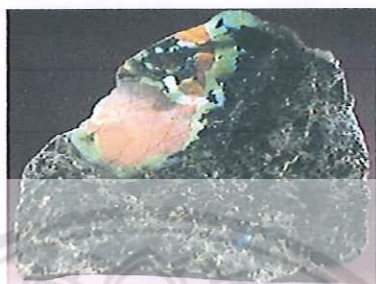
มีส่วนประกอบหลักของแร่อัลไบต์ร้อยละ 50-70 และแร่อะนอร์ไทต์ถึงร้อยละ 30-50 มีโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก (Triclinic) มีความวาวคล้ายแก้ว หรือด้านคล้ายดิน มีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 6-6.5 มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.68-2.71



รูปที่ 2.4 แร่พลาจิโอเคลส ชนิดแอนดีซีน [2]

#### 2.1.1.4 แร่ลาบราดอไรต์ (Labradorite: Calcium Sodium Aluminum Silicate)

มีส่วนประกอบหลักของแร่อัลไบต์ถึงร้อยละ 30-50 และแร่อะนอร์ไทต์ถึงร้อยละ 50-70 โครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก (Triclinic) มีความวาวคล้ายแก้ว มีสีเทาจนถึงสีควีนไฟ มีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 6-6.5 ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.70-2.74 มักเกิดร่วมกับแร่ไบโอไทต์ (Biotite) แร่ไพโรซีน (Pyroxene) และแร่ฮอร์นเบลนด์ (Hornblende)



รูปที่ 2.5 แร่ลาบราดอไรต์ ประเทศมาดากัสการ์ [2]

#### 2.1.1.5 แร่ไบทาวไนต์ (Bytownite: Calcium Sodium Aluminum Silicate)

มีส่วนประกอบหลักของแร่อัลไบต์อยู่ร้อยละ 10-30 และแร่อะนอร์ไทต์ร้อยละ 70-90 มีคุณสมบัติต่าง ๆ คล้ายกับแร่ลาบราดอไรต์ แตกต่างกันในดัชนีการหักเหของแสง



รูปที่ 2.6 แร่ไบทาวไนต์ ประเทศเม็กซิโก [2]

#### 2.1.1.6 แร่อะนอร์ไทต์ (Anorthite: Calcium Aluminum Silicate)

มีส่วนประกอบของแร่อัลไบต์ร้อยละ 0-10 และแร่อะนอร์ไทต์ร้อยละ 90-100 มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก (Triclinic) มีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 6-6.5 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.76 มีความวาวคล้ายแก้ว แต่หากมีการผุพังทำลายจะมีความด้านคล้ายดินมักเกิดร่วมกับแร่ไบโอไทต์ (Biotite) แร่ออไจท์ (Augite) แร่ไพโรซีน (Pyroxene) และแร่ฮอร์นเบลนด์ (Hornblende)





รูปที่ 2.7 แร่อะนอร์ไทต์ เกาะฮอกไกโด ประเทศญี่ปุ่น [2]

## 2.1.2 กลุ่มอัลคาไลด์เฟลด์สปาร์ (Alkali Feldspars)

### 2.1.2.1 แร่ไมโครไคลน์ (Microcline: Potassium Aluminum Silicate)

อาจรู้จักกันในชื่อของแร่อะเมซอนไนต์ (Amazonite) แร่อะเมซอนไนต์ มีโครงสร้างผลึกแบบไตรคลินิก (Triclinic) มีค่าความแข็งอยู่ที่ 6 มีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 2.54-2.57 มีสีขาว เหลืองอ่อน สีเขียวอ่อน หรือสีแดง เรียกว่า อะเมซอนสโตน (Amazon stone) เนื้อผลึกมีลักษณะโปร่งใสจนถึงโปร่งแสง มีสูตรทางเคมี คือ  $KAl_2Si_2O_8$  เหมือนกับออร์โทเคลสซึ่งบางส่วนอาจมีการแทนที่ของโซเดียมแทนที่โพแทสเซียม มักประโยชน์ในอุตสาหกรรมเซรามิคเช่นเดียวกับออร์โทเคลส ส่วนแร่อะเมซอนสโตนมักนำไปขัดเป็นหินประดับชนิดดี ๆ เนื้อสีเขียวสวย และนิยมนำไปเจียรไนเป็นรัตนชาติ



รูปที่ 2.8 แร่ไมโครไคลน์ รัฐโคโลราโด สหรัฐอเมริกา [3]

### 2.1.2.2 แร่ซานิดีน (Sanidine: Potassium Sodium Aluminum Silicate)

มีลักษณะโครงสร้างผลึกระบบโมโนคลินิก ผลึกอาจไม่มีสี หรือมีสีขาว สีเทา และสีเหลือง ลักษณะผลึกโปร่งใส มีค่าความแข็ง 6 มีความถ่วงจำเพาะ 2.52 มีความวาวคล้ายแก้วหรือมุก



รูปที่ 2.9 แร่ซานิดีน ประเทศเม็กซิโก [3]

### 2.1.2.3 แร่ออร์โทเคลส (Orthoclase: Potassium Aluminum Silicate)

มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ซึ่งมักเกิดเป็นผลึกขนาดใหญ่ที่มีเนื้อสมานกันแน่นในรูปของหิน อาจเป็นเกิดเป็นสีขาว สีเทา สีแดงเข้ม หรือไม่มีสี ออร์โทเคลสชนิดไม่มีสีและมีเนื้อโปร่งใสถึงโปร่งแสง มีค่าความแข็งเท่ากับ 6 มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 2.57 มีสูตรทางเคมีคือ  $KAlSi_3O_8$  โดยประกอบไปด้วยสารประกอบโพแทสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ ) ร้อยละ 16.9 สารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ร้อยละ 18.4 และสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) ร้อยละ 64.7 ซึ่งแร่ออร์โทเคลสมีความแตกต่างจากแร่เฟลด์สปาร์ชนิดอื่น ๆ ตรงที่มีแนวแตกเรียบตั้งฉากกัน และไม่มีร่องขนานถี่ ๆ (Striation) บนผิวหน้า มักเกิดร่วมกับแร่ควอตซ์ มัสโคไวต์ และอัลไบต์ ส่วนใหญ่มักใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบ นอกจากนี้ ยังใช้ในอุตสาหกรรมแก้วอีกด้วย



รูปที่ 2.10 แร่ออร์โทเคลส ประเทศบราซิล [3]

### 2.1.3 สำหรับในประเทศไทยแร่เฟลด์สปาร์ที่มี 2 กลุ่มคือ

#### 2.1.3.1 กลุ่มแรโซเดียมเฟลด์สปาร์

อยู่ในกลุ่มแร่เฟลด์สปาร์กลุ่มพลาจิโอเคลสที่มีกลุ่มของโซดา (Soda) และไลม์ (Lime) รวมถึงอัลไบต์ (Albite) ซึ่งมีการแทนที่ของโซเดียมและแคลเซียมในอัตราส่วนที่ต่างกัน ส่วนใหญ่มักเป็นแร่ออร์โทเคลส (Orthoclase) หรือแร่ไมโครไคลน์ (Microcline)

### 2.1.3.2 กลุ่มแร่โพแทสเซียมคลอไรด์

ส่วนใหญ่มักเป็นแร่ออร์โทคลาส (Orthoclase) มีสีขาว สีเทา สีแดงเข้ม หรืออาจไม่มีสี ซึ่งแร่โพแทสเซียมคลอไรด์กลุ่มนี้ส่วนที่เป็นธาตุโซเดียมหรือแคลเซียมจะถูกแทนที่ด้วยธาตุโพแทสเซียม

## 2.2 หญ้าแฝก

หญ้าแฝกเป็นพืชที่มีการส่งเสริมให้ประชาชนโดยทั่วไปโดยหญ้าแฝกในโลกมีอยู่ประมาณ 11-12 ชนิด ซึ่งในประเทศไทยนั้นพบเพียงแค่ 2 ชนิด [6] คือ หญ้าแฝกหอมหรือหญ้าแฝกกลุ่ม (*Vetiveria zizanioides* Nash.) และหญ้าแฝกดอน (*Vetiveria nemoralis* A. Camus.) โดยมีการสันนิษฐานว่าถิ่นกำเนิดดั้งเดิมนั้นอยู่ที่ประเทศอินเดีย

### 2.2.1 อุนกรมวิธาน

หญ้าแฝกเป็นพืชในตระกูลหญ้า (Gramineae) เช่นเดียวกับหญ้าคา หญ้าขจรจบ ข้าวฟ่าง ใฝ่ อยู่ใน Tribe Andropogoneae สกุล *Vetiveria* มีอยู่ 16 ชนิด และ 3 พันธุ์ ดังนี้ (Chase, A. and Niles, C.D. 1962) [7]

2.2.1.1 *Vetiveria arguta* (Steud.) C.E. Hubb.

2.2.1.2 *V. arundinacea* Griseb.

2.2.1.3 *V. elongate* (R.Br.) Stapf ex C.E. Hubb.

2.2.1.4 *V. festacoides* (Presl.) Ohwi.

2.2.1.5 *V. filipes* (Benth.) C.E. Hubb.

2.2.1.6 *V. filipes* var. *arundinacea* (Reeder) Jansen.

2.2.1.7 *V. Fulvibarbis* (Trin.) Stapf.

2.2.1.8 *V. intermedia* S.T. Brake.

2.2.1.9 *V. lawsoni* (Hook.f.) Blatle & McCann.

2.2.1.10 *V. muricata* (Retz.) Griseb.

2.2.1.11 *V. nemoralis* (Bal.) A. Camus.

2.2.1.12 *V. nigritana* (Benth.) Stapf.

2.2.1.13 *V. odoratissima* Bory.

2.2.1.14 *V. panciflora* S.T. Blake.

2.2.1.15 *V. Venustus* (Thwaites) Willis.

2.2.1.16 *V. zizanioides* (L) Nash.

2.2.1.17 *V. zizanioides* var. *chrysopogonoides* (Heck.) A. Camus.

2.2.1.18 *V. zizanioides* var. *nigritana* (Benth.) A. Camus.

### 2.2.1.19 *V. zizanioides* var *tonkinesis* A. Camus.

#### 2.2.3 ลักษณะ

หญ้าแฝก จัดอยู่ในกลุ่มจำพวกหญ้า มีอายุนานหลายปี ลักษณะพุ่มขึ้นเป็นกอแน่น ใบยาวตั้งตรง ขนาดกอก่อนข้างใหญ่ ส่วนโคนของลำต้น มีรากเป็นฝอยอยู่ใต้ดินขึ้นเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ หรือขึ้นกระจายกัน ส่วนกอนั้นพบว่าจะมีการแตกหน่อใหม่ทดแทนต้นเก่าอยู่เสมอ โดยจะแตกออกทางด้านข้างรอบ ๆ กอ ในประเทศไทยมักพบหญ้าแฝกได้มากในบริเวณที่โล่งแจ้ง โดยเฉพาะบริเวณที่มีความชื้นสูง หรือใกล้น้ำ และในป่าเต็งรัง [8]

การศึกษาจากเอกสาร Grasses of the malaya 1971. โดย H.B.Gilliland [9] พบว่า *Vetiveria nemoralis* มีลักษณะพิเศษดังนี้ คือ เป็นพืชที่อยู่ข้ามปี ลำต้นแตกกอแน่น สูงถึง 75 เซนติเมตร กาบใบที่โคนแบนกลมยาว 3-4 เซนติเมตร ไม่มีขน ข้อห่าง ใบยาว 15-20 เซนติเมตร กว้าง 3-5 มิลลิเมตร ใบแคบปลายแหลมมักม้วน เกือบไม่มีขน ขอบใบคม ที่กาบใบมีหูยาว 3 มิลลิเมตร อยู่ด้านโคนใบ ข้อดอกเป็นข้อดอกแยกแขนง ยาว 12 เซนติเมตร กว้าง 6 เซนติเมตร แขนงของข้อประกอบด้วยดอกย่อยที่ไม่มีก้าน 1 หรือ 2 ดอก ส่วนดอกที่อยู่ปลายข้อมีก้านและเป็นดอกตัวผู้ ดอกที่อยู่ถัดลงมาเป็นดอกย่อยมีก้าน 1 ดอก มีข้อห่างกัน 5 มิลลิเมตร ก้านข้อดอกต่ำลงมา 2 มิลลิเมตร จะมีขน เกสรตัวผู้มี 3 เกสรตัวเมีย 2 เกสรตัวเมียมีขนมาก

##### 2.2.3.1 รากของหญ้าแฝก

รากของหญ้าแฝกมีลักษณะเป็นรากฝอยที่แตกจากส่วนของลำต้นใต้ดิน โดยจะกระจายแผ่กว้างออกเพื่อยึดพื้นดินไปตามแนวนอน การเจริญของระบบรากจะเป็นไปในแนวตั้งแตกต่างจากรากหญ้าทั่วไป คือ มีรากที่เจริญโตเร็ว สานกันแน่น หยั่งลึกในแนวตั้งลงใต้ดินไม่แผ่ขนาน และมีรากฝอยขนาดใหญ่อยู่เป็นจำนวนมาก เปลือกรากจะมีลักษณะอวบน้ำคล้ายกับนม ช่วยทำหน้าที่เพิ่มความหนา เพิ่มความแข็งแรง ช่วยดูดน้ำ และความชื้น และช่วยป้องกันส่วนลำเลียงน้ำ สารอาหารที่อยู่ภายใน

##### 2.2.3.2 ใบของหญ้าแฝก

ใบเป็นใบเดี่ยว ออกเรียงสลับ โดยใบจะแทงออกมาจากเหง้าที่อยู่ใต้ดิน ลักษณะของใบเรียวยาว หรือแคบยาว ขอบใบขนาดปลายใบสอบแหลม ขอบใบเรียบ หลังใบและท้องใบเรียบ ท้องใบจะมีสีจางกว่าด้านหลังใบ เนื้อใบกร้านสาก และคายมือ

#### 2.2.4 ประโยชน์ของหญ้าแฝก

ในทุก ๆ ส่วนของลำต้นและรากของหญ้าสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ [11] โดยถ้าเป็นส่วนของใบ มักนำมาใช้ประโยชน์ในการกรองเศษพืช หรือตะกอนดิน หรืออาจนำมาใช้เป็นวัสดุคลุมหลังคา เชือก หมวก ตะกร้า แต่ถ้าเป็นส่วนของรากมักนำมาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยในการดูดซับน้ำ

แร่ธาตุ อาหาร และสารพิษ ทั้งนี้รากยังช่วยในการปรับปรุงสภาพดิน โดยการรักษาความชุ่มชื้น โดย  
หญ้าแฝกบางกลุ่มรากนั้นสามารถนำมาทำน้ำหมักได้อีกด้วย

### 2.2.5 ขี้เถ้าของหญ้าแฝก

องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าแฝกทั้ง 2 สายพันธุ์ (แม่แสบและสงขลา 3) นั้นถูกแสดง  
ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของใบหญ้าแฝกทั้งสองสายพันธุ์ [12]

องค์ประกอบทางเคมี	แม่แสบ		สงขลา 3	
	ปริมาณ (ร้อยละ) <sup>๑</sup>	ปริมาณหลัง การอบ (ร้อยละ)	ปริมาณ (ร้อยละ) <sup>๑</sup>	ปริมาณหลัง การอบ (ร้อยละ)
ขี้เถ้า	4.91±0.30	3.33	4.96±0.34	3.66
สารละลาย	2.32±0.17	1.57	3.15±0.29	2.33
โปรตีน	1.97±0.20	1.34	5.37±0.50	3.97
สารที่ละลายในน้ำร้อน	10.52±0.74	7.13	7.75±1.13	5.72
พอลิแซคคาไรด์				
WAPP <sup>๒</sup>	10.00±0.81	6.78	0.90±0.40	0.66
สารที่ละลายในเอทานอล	2.87±0.20	1.95	2.60±0.57	1.92
ลิกนิน	14.88±1.03	10.09	10.66±1.92	7.87
เฮมิเซลลูโลส	58.36±1.63	39.57	53.35±1.17	39.40
เซลลูโลส	41.64±1.63	28.24	46.65±1.17	34.46

หมายเหตุ: <sup>๑</sup> ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน n = 5

<sup>๒</sup> WAPP—กรดแพคติกพอลิแซคคาไรด์

หญ้าแฝกทั้งสายพันธุ์แม่แสบและสงขลา 3 มีองค์ประกอบโดยทั่วไปในปริมาณที่  
ใกล้เคียงกัน [12] ซึ่งมีอยู่ 3 องค์ประกอบหลัก ๆ นั่นคือ เซลลูโลส (ประมาณร้อยละ 30-35)  
เฮมิเซลลูโลส (ประมาณร้อยละ 40) และลิกนิน (ประมาณร้อยละ 10) และเมื่อเปรียบเทียบ  
องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าแฝกทั้ง 2 สายพันธุ์ พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน นอกเหนือจากปริมาณ  
โปรตีนและปริมาณกรดแพคติกพอลิแซคคาไรด์ โดยโปรตีนที่พบในหญ้าแฝกสายพันธุ์แม่แสบ  
(ประมาณร้อยละ 1) มีปริมาณต่ำกว่าที่พบในหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 (ประมาณร้อยละ 4) ขณะที่  
ปริมาณกรดแพคติกพอลิแซคคาไรด์ที่พบในหญ้าแฝกสายพันธุ์แม่แสบ (ประมาณร้อยละ 7) มีสูงกว่า

ในหญ้าแฝกสายพันธุ์สงขลา 3 (ประมาณร้อยละ 1) และจากปริมาณขี้เถ้าของทั้งสองตัวอย่าง โดยประมาณร้อยละ 3 นั้นมีอัตราส่วนที่สำคัญต่าง ๆ ลดลง ไปมากกว่าฟางข้าวจากแหล่งต่าง ๆ โดยอาจมีช่วงที่ลดลงร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 17

อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบที่พบในขี้เถ้าของตัวอย่างใบหญ้าแฝกถูกแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งประกอบไปด้วยซิลิกา โปแทสเซียม ฟอสฟอรัส และแคลเซียม เนื่องจากแร่ธาตุตั้งที่กล่าวมานั้นเป็นที่รู้จักกันขึ้นอยู่กับปัจจัยทางการเกษตร และปริมาณของดินที่ปนเปื้อน

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบในขี้เถ้าของหญ้าแฝก [12]

องค์ประกอบ	ร้อยละของปริมาณ
ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	50.80
อะลูมินาออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.14
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.61
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	6.98
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	3.02
โซเดียมออกไซด์ (Na <sub>2</sub> O)	0.51
โพแทสเซียมออกไซด์ (K <sub>2</sub> O)	19.52
ไดฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	7.28
แมงกานีสออกไซด์ (MnO)	0.43
ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO <sub>2</sub> )	0.05
แคลเซียม (Cl)	2.51
สารปนเปื้อนอื่น ๆ	0.05

ปริมาณของซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) ในขี้เถ้าของใบหญ้าแฝกอยู่ที่ประมาณร้อยละ 50 บทบาทของซิลิกาในผนังเซลล์ของพืชที่เพิ่มมากขึ้นยังไม่มีที่มาอย่างชัดเจน แต่มีรายงานว่า ซิลิกามีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช มีส่วนช่วยให้พืชมีความต้านทานต่อแมลง เชื้อรา และเพิ่มความต้านทานเชิงกลในหญ้าแฝกประมาณร้อยละ 2 เราจะพบว่ามันคือส่วนทำให้เป็นคลอโรฟิลล์สีเขียว และพอลิเมอร์ประเภทอื่น ๆ เช่น คิวติน ซูเบอร์ิน

### 2.3 กระบวนการขึ้นรูปเซรามิก

ในการขึ้นรูปเซรามิกเป็นผลิตภัณฑ์นั้น สามารถขึ้นรูปได้หลากหลายวิธี โดยผลิตภัณฑ์เซรามิกที่เราพบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน เช่น ถ้วยชาม กระเบื้อง สุขภัณฑ์ หรือแม้กระทั่งชิ้นส่วนของอุปกรณ์เครื่องใช้ชนิดต่าง ๆ เหล่านี้มีรูปร่างลักษณะแตกต่างกัน [13] จึงทำให้กระบวนการในการขึ้นรูปแตกต่างกัน ทั้งนี้การขึ้นรูปแต่ละวิธีมีข้อแตกต่างกันขึ้นกับลักษณะเนื้อดิน อุปกรณ์เครื่องมือ

และรูปร่างที่ต้องการขึ้นรูป โดยทั่วไปกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิก [14] สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

### 2.3.1 การขึ้นรูปโดยอาศัยความเหนียว (Plastic Forming)

วิธีการขึ้นรูปลักษณะนี้เป็นการเตรียมเนื้อดินปั้นจะกระทำโดยการผสมดินกับวัตถุติดอื่น ๆ และนวดให้เข้ากันดี หรืออาจผสมในรูปของน้ำดินแล้วนำไปกรองให้เป็นแผ่น จากนั้นจึงนำไปขึ้นรูป ซึ่งอาจแบ่งได้เป็นอีกหลายวิธีย่อย ๆ เช่น การปั้นด้วยมือ (Hand Forming) จิกเกอร์ริง (Jiggering) และการรีด (Extrude)

### 2.3.2 การหล่อแบบ (Casting)

วิธีนี้จะเตรียมเนื้อดินปั้นให้อยู่ในรูปน้ำดินชั้น ๆ (Slip) ที่ไหลตัวได้ดี จากนั้นจึงเทลงในแบบปูนพลาสติก โดยปูนจะดูดน้ำและทำให้เนื้อดินเกาะติดกับผนังแบบ ได้เป็นผลิตภัณฑ์ตามต้องการ วิธีนี้สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปทรง แต่ต้องใช้น้ำในการขึ้นรูปมาก ทำให้การหดตัวหลังอบแห้งสูง ซึ่งอาจเกิดการแตกหรือบิดเบี้ยวได้ง่าย [15] การหล่อแบบมี 2 ลักษณะ คือ

การหล่อแบบโดยให้น้ำดินแข็งตัวอยู่ในแบบ เรียก Solid Casting ซึ่งเหมาะกับการหล่อแบบผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาและรูปร่างที่ซับซ้อน

การหล่อแบบโดยมีการเหนี่ยวน้ำดินที่เหลือทิ้ง เรียก Drain Casting ซึ่งเหมาะกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผนังบางและต้องการความหนาสม่ำเสมอ

### 2.3.3 การอัด (Pressing)

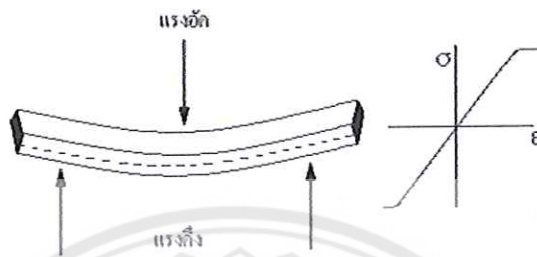
วิธีนี้จะเตรียมเนื้อดินปั้นให้อยู่ในรูปของผงกลม ๆ ที่ไหลตัวได้ดี จากนั้นจึงนำไปอัดด้วยเครื่องอัดแรงดันสูงเพื่อให้เกาะติดกันเป็นแผ่น วิธีนี้จะใช้น้ำในการขึ้นรูปน้อยที่สุด ทำให้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง มีการหดตัวน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ แต่รูปทรงผลิตภัณฑ์ที่สามารถขึ้นรูปได้จำกัดกว่า การขึ้นรูปโดยวิธีการนี้ใช้แพร่หลายในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกชนิดพิเศษ โดยแรงอัดจะอัดลงบนแบบ ซึ่งมีผงเนื้อดินปั้นแห้ง ๆ หรือความชื้นเล็กน้อยอยู่ภายในแบบ แบบที่ใช้เป็นโลหะแข็ง การขึ้นรูปโดยวิธีนี้จะต้องคำนึงถึงขนาดและรูปร่างและการกระจายตัวของอนุภาคของเนื้อดินปั้น [16] เป็นสำคัญ

## 2.4 กระบวนการในการทดสอบสมบัติเชิงกล

### 2.4.1 การทดสอบแรงดัดงอ (Bending Test)

เป็นอีกวิธีหนึ่งสำหรับการทดสอบแบบอัตราเร็วคงที่ ซึ่งนิยมใช้ในการทดสอบพลาสติก [17] และมักใช้เป็นวิธีประมาณค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุ เนื่องจากวิธีนี้จะไม่ค่อยมีปัญหาซึ่งเกิดจากการเยื้องศูนย์ระหว่างชิ้นงาน และเครื่องทดสอบเหมือนการทดสอบแรงดึง นอกจากนี้

การกระจายตัวของแนวแรงยังถูกจำกัดอยู่แต่ในบริเวณที่จะเสียหายอีกด้วย อย่างไรก็ตามสภาพของแรงที่เกิดขึ้นทั้งสองประเภทนี้แตกต่างกัน ในการทดสอบแรงดึงนั้น ชิ้นทดสอบจะได้รับแรงที่เท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัด (Uniform Tension) แต่ในการทดสอบแรงดัดงอชิ้นทดสอบจะได้รับแรงที่ไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด เนื่องจากในสภาวะที่ชิ้นงานถูกดัดงอนั้น ชิ้นงานทดสอบจะได้รับแรงสูงสุดบนผิวผิวหนึ่ง และได้รับแรงอัดบนผิวตรงกันข้าม

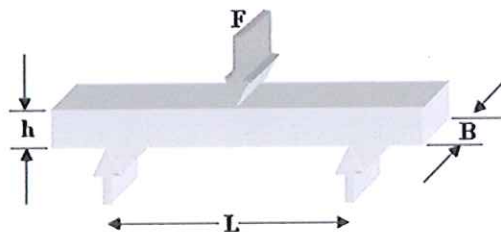


รูปที่ 2.11 หลักการทดสอบแรงดัดงอ [17]

โดยทั่วไปการทดสอบการดัดงอแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดัดงอแบบ 3 จุด (Three-pointed Bending) และการทดสอบแบบ 4 จุด (Four-pointed Bending)

#### 2.4.1.1 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด

การทดสอบแบบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่จุดกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบ และจุดรับรองในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางเท่ากัน หัวกดที่ใช้ให้แรงกระทำและส่วนที่รองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมน (Round Knife Edges) การที่ชุดกดและชุดรองรับต้องมีลักษณะเป็นผิวโค้งที่จุดสัมผัสดังกล่าวเพื่อเป็นการลดความเข้มข้นของความเค้น (Stress Concentration) ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณจุดสัมผัสดังกล่าว และอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักบริเวณจุดสัมผัสนั้น นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองสามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนของระยะห่างระหว่างจุดรองรับทั้งสองกับความหนาของชิ้นทดสอบโดยมีค่าได้ระหว่าง 16:1 ถึง 60:1



รูปที่ 2.12 การทดสอบการดัดงอแบบ 3 จุด [17]



ตารางที่ 2.3 สูตรการคำนวณในการทดสอบแรงดัดงอแบบ 3 จุด [17]

พื้นที่หน้าตัด	สี่เหลี่ยม	ทรงกระบอก
ความเค้น	$\sigma = \frac{3FL}{2Bh^2}$	$\sigma = \frac{8FL}{\pi D^2}$
ความเครียด	$\varepsilon = \frac{6Yh}{L^2}$	$\varepsilon = \frac{6YD}{L^2}$
มอดูลัส	$E = \frac{L^3}{4Bh^2} \left( \frac{F}{Y} \right)$	$E = \frac{4L^3}{3\pi D^2} \left( \frac{F}{Y} \right)$

เมื่อ

F คือ แรงกระทำ มีหน่วยเป็นนิวตัน

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน มีหน่วยเป็นเมตร

h คือ ความหนา มีหน่วยเป็นเมตร

B คือ ความกว้าง มีหน่วยเป็นเมตร

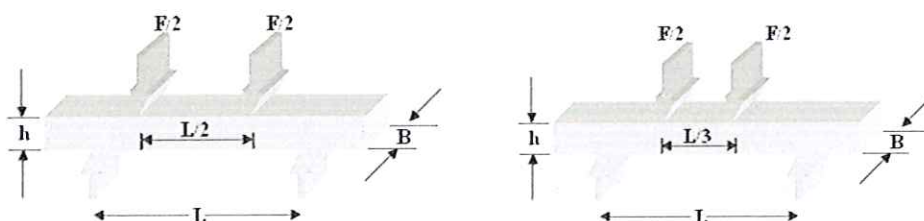
Y คือ ระยะการดัดงอของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นเมตร

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกตัน มีหน่วยเป็นเมตร

ดังนั้นอัตราส่วนระหว่าง F และ Y ในวงเล็บจะเท่ากับความชันในช่วงแรก  
ของกราฟที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะการดัดงอของชิ้นงานในช่วงแรกที่กราฟยังเป็นเส้นตรง

#### 2.4.1.2 การทดสอบการดัดงอแบบ 4 จุด

การทดสอบแบบนี้เป็นการให้แรงกระทำที่ 2 จุด ในบริเวณกึ่งกลางของชิ้น  
ทดสอบและจุดรองรับในทิศทางตรงกันข้ามบริเวณปลายทั้งสองด้านที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลาง  
เท่ากัน เหมาะสำหรับการทดสอบวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงกว่าในกรณีของการทดสอบ  
การดัดงอแบบ 3 จุด หัวกดที่ให้ภาระและจุดรองรับมีลักษณะเป็นใบมีดมนหรือเพลาลูโลหะแข็ง  
เช่นเดียวกับในวัสดุกลุ่มโลหะ



รูปที่ 2.13 การทดสอบการดัดงอแบบ 4 จุด [17]

ตารางที่ 2.4 สูตรการคำนวณในการทดสอบแรงดัดงอแบบ 4 จุด [17]

พื้นที่หน้าตัด	สี่เหลี่ยม		ทรงกระบอก	
	1/3 ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน	1/4 ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน	1/3 ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน	1/4 ของระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน
ความเค้น	$\sigma = \frac{FL}{Bh^2}$	$\sigma = \frac{3FL}{4Bh^2}$	$\sigma = \frac{16FL}{3\pi D^3}$	$\sigma = \frac{4FL}{\pi D^3}$
ความเครียด	$\varepsilon = \frac{4.70Yh}{L^2}$	$\varepsilon = \frac{4.36Yh}{L^2}$	$\varepsilon = \frac{4.70YD}{L^2}$	$\varepsilon = \frac{4.36YD}{L^2}$
มอดุลัส	$E = \frac{0.21L^3}{Bh^3} \left( \frac{F}{Y} \right)$	$E = \frac{0.17L^3}{Bh^3} \left( \frac{F}{Y} \right)$	$E = \frac{1.12L^3}{\pi D^4} \left( \frac{F}{Y} \right)$	$E = \frac{0.91L^3}{\pi D^4} \left( \frac{F}{Y} \right)$

เมื่อ

F คือ แรงกระทำ มีหน่วยเป็นนิวตัน

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน มีหน่วยเป็นเมตร

h คือ ความหนา มีหน่วยเป็นเมตร

B คือ ความกว้าง มีหน่วยเป็นเมตร

Y คือ ระยะการดัดงอของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นเมตร

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกตัน มีหน่วยเป็นเมตร

ลักษณะชิ้นงานสำหรับการทดสอบการดัดงอทั้งแบบ 3 จุดและ 4 จุดนั้นจะอยู่ในลักษณะของคาน โดยอาจจะมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปร่างกลม หรือสี่เหลี่ยมก็ได้ แต่ส่วนใหญ่แล้วจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม ในการเตรียมชิ้นงานนั้น ชิ้นงานที่ได้จะต้องมีขนาดตรงตามที่กำหนดไว้ พื้นผิวจะต้องมีความขนาน และไม่มีจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยชิ้นงานจะไม่มีกำบังยึดแต่จะถูวางอยู่ตรงกลางบนแท่นรองระหว่างจุดที่จะรับแรงสองจุด จากนั้นก็จะให้แรงแล้วชิ้นงานจะถูกกดด้วยแท่นด้านบนตามจำนวนจุดที่กำหนดไว้ ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะการทดสอบ



รูปที่ 2.14 ลักษณะรูปร่างของชิ้นทดสอบแรงดัดงอ [17]

#### 2.4.2 การหดตัวของเซรามิค

ผลิตภัณฑ์เซรามิคส่วนมากในอัตราส่วนผสมมักใช้น้ำร่วมกับดิน เพื่อช่วยเพิ่มความเหนียวไม่ว่าจะเป็นน้ำดิน ดินเหนียว หรือแม้กระทั่งดินผง ดังนั้นเนื้อดินที่ได้จะมีความชื้นมากน้อยแตกต่างกัน แต่เมื่อน้ำนั้นระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ทำให้อนุภาคของวัตถุดิบเข้ามาใกล้ชิดกัน เป็นผลให้ขนาดของผลิตภัณฑ์เล็กลง หรือเกิดการหดตัว ซึ่งผลของการหดตัวเมื่อแห้ง หรือหลังเผา อาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการชำรุด แตกร้าว หรือบิดเบี้ยวได้อีกทั้งขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเล็กกว่าที่ต้องการ [18]

โดยทั่วไปการหดตัว หมายถึงการมีขนาดเล็กลง ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งเชิงเส้น ได้แก่ ความยาว ความกว้าง ความสูง ที่มีขนาดลดลงกว่าเดิม หรือสามารถวัดได้ในเชิงปริมาตร คือความจุ และสาเหตุหลักของการหดตัวนี้ คือ การสูญเสียองค์ประกอบ และการรวมตัวกันของโครงสร้างภายใน การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิคโดยทั่วไปต้องอาศัยความเหนียว ซึ่งความเหนียวนี้อาจจะได้จากดินหรือน้ำในของส่วนผสม หลังการขึ้นรูปขึ้นงานอาจมีความชื้นตั้งแต่ร้อยละ 0-2 หากขึ้นรูปด้วยการอัด (Isostatic Press) แต่ถ้าขึ้นรูปด้วยการหล่อแบบอาจมีความชื้นถึงร้อยละ 40 การขึ้นรูปที่ใช้น้ำปริมาณมากจะเสียเวลาในการทำให้แห้งนาน และมีการหดตัวมาก

เมื่อทำการเผาจะส่งผลให้ดินเกิดการหดตัวอีกครั้งหนึ่งโดยการหดตัว หลังการเผา มีองค์ประกอบสำคัญ คือ ชนิดของดิน ขนาดความละเอียดของดินสารอินทรีย์ที่อยู่ในดิน วิธีการขึ้นรูป และอุณหภูมิการเผา เพราะจะเกิดสลายตัวของสารอินทรีย์ และน้ำในองค์ประกอบของโมเลกุลตลอดจนสารที่สลายตัวที่อุณหภูมิสูง แล้วมีการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งมีผลให้ขนาดของชิ้นงานลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเผาผลิตภัณฑ์เซรามิคอย่างช้า ๆ และควบคุมอุณหภูมิให้มีความสม่ำเสมอ

การหดตัวของดินที่นำมาทำเซรามิคมี 2 ระยะ คือ การหดตัวหลังการอบแห้ง และการหดตัวหลังการเผา ซึ่งการหดตัวนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าควรผึ่งแห้ง หรือเผาผลิตภัณฑ์ในอัตราที่ช้า หรือเร็วเพียงใด โดยปกติแล้วดินที่มีความเหนียวมากมักจะมีการหดตัวมาก ร้อยละของการหดตัวเชิงเส้นหลังการอบแห้ง (Prevents Drying Linear Shrinkage) ของวัตถุดิบที่ใช้ในงานเซรามิคจะมีตั้งแต่ร้อยละ 0 สำหรับดินเหนียวบางชนิด และร้อยละการหดตัวจะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของวัตถุดิบ ปริมาณวัตถุดิบในอัตราส่วนผสม และอุณหภูมิที่ใช้เผา

#### 2.4.3 การทดสอบการแตกร้าวในเซรามิค

โดยปกติวัสดุประเภทเซรามิคมีคุณสมบัติที่ค่อนข้างเปราะ และค่าความแข็งแรงตึงนั้นก็มีความแตกต่างกันมาก อาจมีค่าตั้งแต่ต่ำกว่า 100 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (0.69 เมกะปาสกาล) จนถึงค่าสูงประมาณ  $10^6$  ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ( $7 \times 10^3$  เมกะปาสกาล) และที่สำคัญวัสดุเซรามิคมีค่าความแข็งแรงกดแตกต่างกับค่าความแข็งแรงตึงอย่างมาก นั่นคือมีค่าความแข็งแรงกดสูงกว่าความแข็งแรงตึงประมาณ 5-10 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และวัสดุเซรามิคโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีความแข็ง และมีค่าความแข็งแรงที่ต้านทานการแตกหักที่ต่ำ

วัสดุ	ความหนาแน่น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร	ความแข็งแรงกด		ความแข็งแรงดึง		ความแข็งแรงโค้งงอ		ความแข็งแรงที่ต้านทานการแตกหัก	
		เมกะปาสคาล	กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว	เมกะปาสคาล	กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว	เมกะปาสคาล	กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว	เมกะปาสคาล	กิโลปอนด์ต่อตารางนิ้ว
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ร้อยละ 99)	3.85	2585	375	207	30	345	50	4.00	3.63
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (hot-pressed)	3.19	3450	500	-	-	690	100	6.60	5.99
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (reaction-bonded)	2.80	770	112	-	-	255	37	3.60	3.27
SiC (sintered)	3.10	3860	560	170	25	550	80	4.00	3.63
ZrO <sub>2</sub> ร้อยละ 9 MgO (partially stabilized)	5.50	1860	270	-	-	690	100	8.00+	7.26+

รูปที่ 2.15 สมบัติเชิงกลของวัสดุเซรามิกทางวิศวกรรมบางชนิด [18]

#### 2.4.3.1 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุเซรามิก

ก. ความบกพร่องในโครงสร้าง (Structural Defects) เช่น รอยแตกร้าวที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการแตงผิว รูพรุน (Voids หรือ Porosity) สิ่งแปลกปลอม เกรนที่มีขนาดใหญ่ เป็นต้น ความบกพร่องเหล่านี้จะมีผลทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเซรามิกลดลง นั่นคือเมื่อวัสดุเซรามิกมีรูพรุน หรือรอยแตกร้าวเกิดขึ้น จะมีความเค้นเกิดขึ้นมากในบริเวณนั้น ทำให้วัสดุถูกทำลายได้ง่าย แต่ถ้าวัสดุเซรามิกนั้นไม่มีรูพรุน หรือรอยแตกร้าว ความแข็งแรงจะขึ้นกับขนาดของเกรนวัสดุที่มีเกรนขนาดเล็กจะมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุที่มีเกรนขนาดใหญ่

ข. องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้าง และสภาพพื้นผิว

ค. อุณหภูมิและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งความเค้นที่มีให้กับวัสดุ

#### 2.4.3.2 ความแกร่งของวัสดุเซรามิก

เนื่องจากพันธะที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของเซรามิกนั้นเป็นพันธะแบบไอออนิกโคเวเลนต์ จึงส่งผลให้วัสดุเซรามิกมีความแกร่งที่ต่ำ มีการศึกษาวิจัยมากมายที่พยายามปรับปรุงความแกร่งของวัสดุเซรามิก เช่น การทำการอัดขึ้นงานขณะเผาและเติมสารเคมีบางชนิด ในการทดสอบหาความแข็งแรงที่วัสดุเซรามิกสามารถต้านทานการแตกหักได้นั้นสามารถกระทำได้เช่นเดียวกับที่กระบวนการทดสอบในวัสดุกลุ่มโลหะเพื่อให้ได้มาซึ่งค่า  $K_{IC}$  นั้น โดยในกลุ่มวัสดุเซรามิก จะใช้การทดสอบแรงดัดงอแบบ 4 จุด

ในปัจจุบัน นักวิจัยได้พยายามพัฒนาวัสดุเซรามิกให้มีสมบัติความแข็งแรงที่ต้านทานการแตกหักสูงขึ้น และพบว่าการเปลี่ยนแปลงวัฏภาคในเซอร์โคเนีย (ZrO<sub>2</sub>) และเติมสารประกอบออกไซด์ที่ทนไฟบางชนิด (CaO MgO และ Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ลงไป จะได้เซรามิกที่มีสมบัติดังกล่าว เช่น Partially Stabilized Zirconia (PSZ) ซึ่งประกอบด้วย MgO ร้อยละ 9 โดยโมล

#### 2.4.4 เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis; TGA) [19]

เป็นเครื่องมือในห้องปฏิบัติการที่จำเป็นในการจำแนกวัสดุ ซึ่งเป็นเทคนิคที่จะอธิบายลักษณะวัสดุที่ใช้ในสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ อาหาร ยา และการใช้งานทางปิโตรเคมี เรามีการผลิตเครื่องมือวิเคราะห์ความร้อนตั้งแต่ ค.ศ. 1960 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเป็นเทคนิคที่ตรวจสอบมวลของสาร เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ หรือเป็นตัวอย่างที่ถูกควบคุมภายใต้อุณหภูมิที่กำหนด



รูปที่ 2.16 เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก [19]

การวิเคราะห์ นำตัวอย่างวางบนถาดที่มีความสมดุลความแม่นยำ ซึ่งเชื่อมด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง ซึ่งจะอยู่ในเตาที่มีการควบคุมอุณหภูมิ มวลของตัวอย่างที่ถูกตรวจสอบในการทดลองจะมีน้ำหนักที่เปลี่ยนไป เนื่องจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ

#### 2.4.5 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimetry; DSC) [19]

เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ จะใช้ในการวัดอุณหภูมิหลอมละลาย ความร้อนของการหลอมเหลว ความร้อนแฝงในการหลอม พลังงานปฏิกิริยาและอุณหภูมิ การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสและพลังงาน การเกิดออกซิเดชัน ความร้อนจำเพาะหรือความจุความร้อน

เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ เป็นการวัดปริมาณของพลังงานที่ดูดกลืนหรือปล่อยพลังงานความร้อนออกมา ให้ข้อมูลเชิงปริมาณและคุณภาพในการดูความร้อน (ดูดซับความร้อน) และกระบวนการคายความร้อน

ใช้เพื่อตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพลาสติก กาว โลหะ ไม้ ใยอาหาร น้ำมันหล่อลื่น น้ำมัน ตัวเร่งปฏิกิริยา และปุ๋ย



รูปที่ 2.17 เครื่องติฟเฟอร์นเซียสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ [19]

#### 2.4.6 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมตรี (X-Ray Fluorescence; XRF)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การวิเคราะห์ธาตุที่มีความเป็นพิษในอากาศ ด้านธรณีวิทยา เช่น การวิเคราะห์แร่ดิน หิน โดยไม่ทำลายตัวอย่างมีการเตรียมตัวอย่างเพียงเล็กน้อย และให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็วด้านชีววิทยา ด้านการแพทย์ เช่น การวิเคราะห์สารอยู่ในเส้นผม และเล็บ การตรวจวัดโบรมีนในซีรัมด้านอุตสาหกรรม เช่น ใช้ในการควบคุมกระบวนการและคุณภาพ การตรวจวัดตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นพิษในน้ำมันดิบและอื่น ๆ อีกมากมาย โดยปกติแล้วเครื่อง X-Ray Spectrometer จะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-Ray Tube หรือใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสี) และเครื่องตรวจวัดรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นเมื่อ X-Ray Tube เร่งอิเล็กตรอนให้มีความศักย์สูงพุ่งเข้าชนเป้าโลหะแล้วให้รังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูงออกมา ทั้งนี้การเลือกชนิดของเป้าขึ้นกับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ทั้งสแตนโรเดียม โมลิบดีนัม หรือโคเบียม ส่วนไอโซโทปกัมมันตรังสีที่นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ Fe-55 Co-57 Cd-109 และ Am-33 [20]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นายพรภณ สนทอง และนายศักรินทร์ เฟ็งดี (2556) [22] ได้ทำการศึกษาการสลายตัวของลิกนินด้วยความร้อน โดยมีการศึกษาถึงโครงสร้าง สมบัติพิเศษของลิกนิน และกระบวนการสลายตัวของลิกนิน ซึ่งโครงสร้างของลิกนินนั้นจะอยู่ร่วมกับเซลลูโลสที่มีพันธะโคเวเลนต์เชื่อมระหว่างลิกนินกับเฮมิเซลลูโลส ในกระบวนการสลายตัวของสารชีวมวลซึ่ง ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นไปตามการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (Pyrolysis) ที่สารชีวมวลจะเกิดการย่อยสลายตัวเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น เศษที่เหลือสุดท้ายคือ ชาร์ (Char) ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสนั้นเมื่อมีอุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 110 องศาเซลเซียส ความชื้นจะระเหยออกไป หลังจากนั้นที่อุณหภูมิช่วง 200 ถึง 206 องศาเซลเซียส เฮมิเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัว ตามด้วยเซลลูโลสที่เกิดการสลายตัวเมื่อมีอุณหภูมิในช่วง 240 ถึง 340 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 280 ถึง 500 องศาเซลเซียส ลิกนินจะเกิดการสลายตัวซึ่งสารชีวมวลเหล่านี้จะสลายตัวกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และก๊าซอื่น ๆ ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของปริมาณสารชีวมวลนั้น ๆ ซึ่งปฏิกิริยาไพโรไลซิส (Pyrolysis) นี้จะสิ้นสุดลงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เบญจมาศ รักจัญ (2548) [21] ได้ทำการทดลองหาอัตราส่วนผสมระหว่างโพแทสเซียมเพลต์สปาร์ ดินแดง สุราษฎร์ธานี ชี้เถ้าเปลือกหอยนางรม และชี้เถ้าแกลบ เพื่อผลิตเคลือบชี้เถ้า ซึ่งคำนวณหาอัตราส่วนผสมจากแผนภาพสี่เหลี่ยมด้านเท่าจำนวน 36 สูตร ทำการทดลองโดยเตรียมวัตถุดิบคือ ดินแดง สุราษฎร์ธานี นำมาผ่านตะแกรงร่อนขนาด 120 เมช ชี้เถ้าแกลบเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช และชี้เถ้าเปลือกหอยนางรมเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 60 เมช นำวัตถุดิบดังกล่าวมาบดผสมที่ละสูตร เพื่อชูปบนแผ่นทดสอบเคลือบสี่เหลี่ยมด้านเท่า ขนาดความกว้าง 3.50 เซนติเมตร 3.50 เซนติเมตร หนา 0.80 เซนติเมตร นำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศออกซิเดชัน และรีดักชัน แล้วตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำเคลือบในด้านสีเคลือบ ความมันของเคลือบ และความสมบูรณ์ของเคลือบ เพื่อพิจารณาสูตรที่เหมาะสมที่สุดไปเคลือบผลิตภัณฑ์เซรามิก

ภาวดี เมธะคานนท์ และคณะ (2546) [12] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของเฮมิเซลลูโลสพอลิเมอร์จากหญ้าแฝกสองสายพันธุ์ ใบของหญ้าแฝกนั้นจะใช้การตรวจสอบด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก โดยบอบองค์ประกอบหลักของพืชทั่วไป เช่น พบว่าในหญ้าแฝกนั้นมีเซลลูโลสประมาณร้อยละ 30 ถึง 35 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสอยู่ประมาณร้อยละ 40 และมีปริมาณของลิกนินอยู่ประมาณร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบหญ้าแฝกทั้งสองสายพันธุ์แล้วองค์ประกอบทางเคมีของทั้งสองนั้นไม่มี

ความแตกต่างกันมากทั้งปริมาณโปรตีนหรือปริมาณกรดพอลิแซคคาไรด์ แต่ในปริมาณซีเถ้าของหญ้าแฝกที่ร้อยละ 3 นั้นพบว่าปริมาณสารประกอบซิลิกา สารประกอบโพแทสเซียม และสารประกอบแคลเซียมสูงกว่าพืชชนิดอื่น ๆ ในตระกูลเดียวกัน เช่น ข้าวบาเลย์ โดยปริมาณสารประกอบซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ของซีเถ้าใบหญ้าแฝกนั้นมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 50 รองลงมาคือ ปริมาณสารประกอบโพแทสเซียมที่มีอยู่ร้อยละ 19 ซึ่งมากกว่าในข้าวบาเลย์ถึงร้อยละ 70

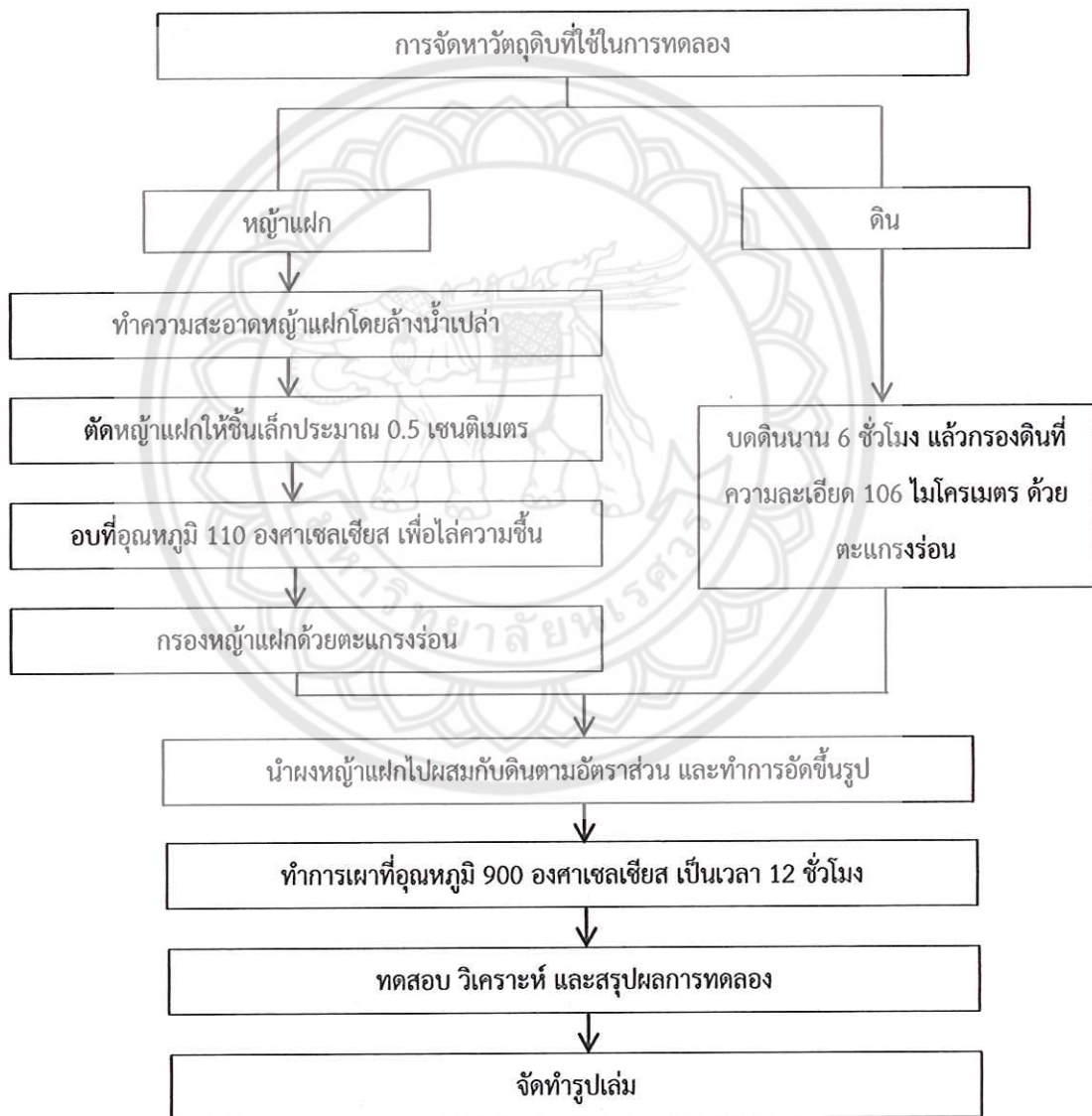




### บทที่ 3

### วิธีดำเนินโครงการ

วิธีดำเนินโครงการนี้จะกล่าวถึงลำดับขั้นตอนในการดำเนินงาน วัสดุ และอุปกรณ์ รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง โดยขั้นตอนการดำเนินงานในการศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างผงหญาแฝกและโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ต่อคุณสมบัติของชิ้นงานเซรามิก แสดงในรูปที่ 3.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ลำดับขั้นตอนในการดำเนินงาน

### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

#### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1.1	กรรไกร	3	เล่ม
3.1.1.2	ถังน้ำ	3	ใบ
3.1.1.3	เครื่องปั่น	1	เครื่อง
3.1.1.4	เตาให้ความร้อน	1	ตัว
3.1.1.5	เตาเผาชนิดกล่อง	1	ตัว
3.1.1.6	ตะแกรงร่อน (Sieve) 106 ไมโครเมตร	1	อัน
3.1.1.7	ตะแกรงร่อน (Sieve) 212 ไมโครเมตร	1	อัน
3.1.1.8	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมตรี	1	เครื่อง
3.1.1.9	เครื่องทดสอบแรงดัดงอและแรงกดอัด	1	เครื่อง
3.1.1.10	เครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก	1	เครื่อง
3.1.1.11	เครื่องดีฟเพอเรนเซียสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์	1	เครื่อง

#### 3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1	ดิน	5	กิโลกรัม
3.1.2.2	หญ้าแฝก	20	กิโลกรัม
3.1.2.3	โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์	5	กิโลกรัม

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.2.1 การศึกษาสมบัติของหญ้าแฝก

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าแฝก โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางความร้อน และเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน

#### 3.2.2 การจัดหาวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

โครงการวิจัยนี้ใช้หญ้าแฝกที่ปลูกในพื้นที่ตำบลชุมแสงสงคราม อำเภอบางระกำ จังหวัดพิษณุโลก โดยได้รับการสนับสนุนจากคุณเฉลา บดีรัฐ และเครือข่ายหญ้าแฝกภาคเหนือตอนล่าง และสั่งซื้อโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์จากบริษัท ธนวัฒน์การแร่ จังหวัดนครปฐม

### 3.2.3 ขั้นตอนการทำผงหญ้าแฝก

3.2.3.1 เลือกเก็บเฉพาะใบที่สะอาด นำมาล้างด้วยน้ำความสะอาด และตัดหญ้าแฝกสดให้เป็นชิ้นเล็กขนาด 0.5 เซนติเมตร

3.2.3.2 ทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในเตา

3.2.3.3 ย่อยหญ้าแฝกอีกครั้งให้ละเอียด โดยการนำมาปั่น หลังจากนั้นกรองเอาผงหญ้าแฝกอีกที่มีความละเอียดตั้ง 106–212 ไมโครเมตร ด้วยตะแกรงร่อน (Sieve)

### 3.2.4 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

นำผงหญ้าแฝกมาผสมกับดิน และน้ำตามอัตราส่วน ในตารางที่ 3.1 แล้วอัดขึ้นรูปเป็นแท่งขนาดความหนา 2.5 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร ความกว้าง 1 เซนติเมตร โดยในแต่ละอัตราส่วนอัดขึ้นรูปจำนวน 3 ชิ้น จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปเผาแกร่งที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในเตา

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของใบหญ้าแฝก และโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ที่ใช้ในการทดลอง

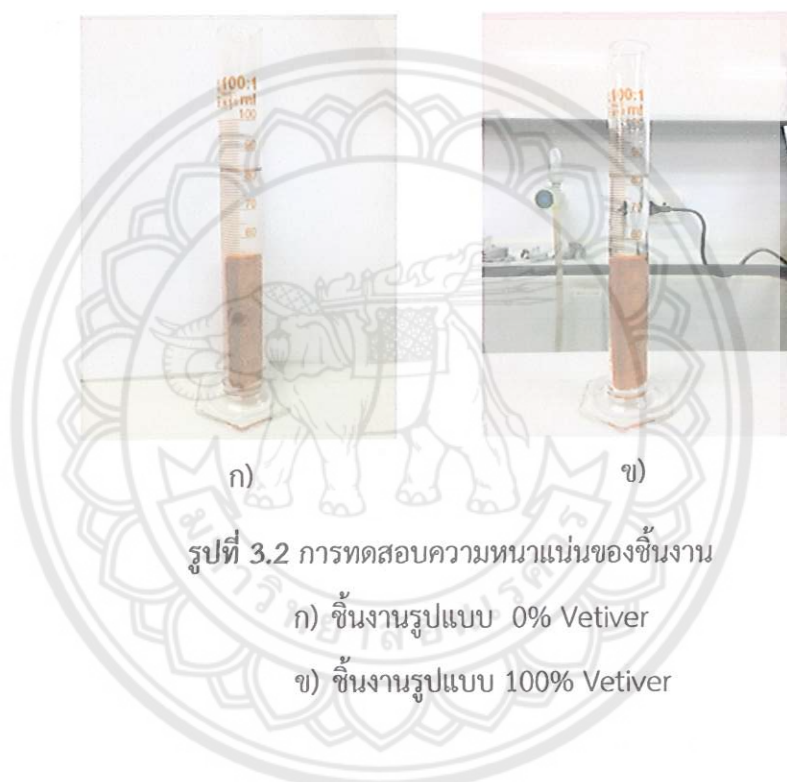
รูปแบบที่	อัตราส่วนใบหญ้าแฝก (กรัม)	อัตราส่วนโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ (กรัม)	น้ำ (กรัม)	ดิน (กรัม)
0% Vetiver	0	20	190	1000
20% Vetiver	4	16	190	1000
40% Vetiver	8	12	190	1000
60% Vetiver	12	8	190	1000
80% Vetiver	16	4	190	1000
100% Vetiver	20	0	190	1000

### 3.2.5 การทดสอบ

นำชิ้นงานที่ได้ทั้งหมดไปทดสอบการหดตัว ความหนาแน่น ความต้านทานแรงดัดโค้ง และความต้านทานการแตกหัก โดยในแต่ละรูปแบบจะทดสอบ 3 ตัวอย่าง

3.2.5.1 การวัดการหดตัว จะวัดความยาวของชิ้นงานก่อนเผา และหลังเผาด้วยไม้บรรทัดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อดูความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป

3.2.5.2 การทดสอบความหนาแน่น ใช้การทดสอบที่อุณหภูมิห้องโดยกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร เพื่อดูการแทนที่ของชิ้นงานในน้ำ



รูปที่ 3.2 การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน

ก) ชิ้นงานรูปแบบ 0% Vetiver

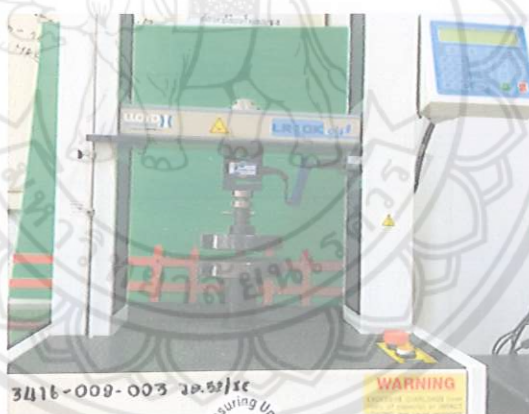
ข) ชิ้นงานรูปแบบ 100% Vetiver

3.2.5.3 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง ใช้การทดสอบแบบการดัดงอ 3 จุด ที่ความเร็วกดเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที โดยทิศทางการทดสอบแบบกด (Compression) ใช้โหลดที่ 5 กิโลกรัมแรง ทดสอบในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.3 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงาน

3.2.5.4 ในการทดสอบความต้านทานการแตกหัก ใช้โหลดที่ 5 กิโลกรัมแรง โดยมีทิศทางการทดสอบแบบกด (Compression) ที่ความเร็วกด 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที ในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.4 การทดสอบความต้านทานการแตกหักของชิ้นงาน

### 3.2.6 วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

นำชิ้นงาน และผลการทดลองในแต่ละรูปแบบไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของอัตราส่วนระหว่างไบพญาแฝก และแร่เฟลด์สปาร์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ และนำไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของการรับแรงก่อนการแตกหัก จากนั้นทำการสรุปผลการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ในผลการทดลองและการวิเคราะห์นี้ จะกล่าวถึงผลการศึกษารองค์ประกอบทางเคมีของใบหญ้าแฝก ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของใบหญ้าแฝก ตลอดจนการทดสอบการหดตัว การทดสอบความหนาแน่น การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง และการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดของชิ้นงาน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการตรวจสอบจากเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมตรี (XRF)

ในการตรวจสอบจากเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมตริ์นั้นใช้ตัวอย่างทดสอบเป็นผงหญ้าแฝกที่ผ่านการอบไล่ความชื้นก่อนการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของใบหญ้าแฝก

ลำดับที่	รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ (%w/w)
1	K	Balance
2	Si	12.9188
3	Ca	11.1217
4	Cl	10.6218
5	S	2.8926
6	P	1.8871
7	Fe	1.5541

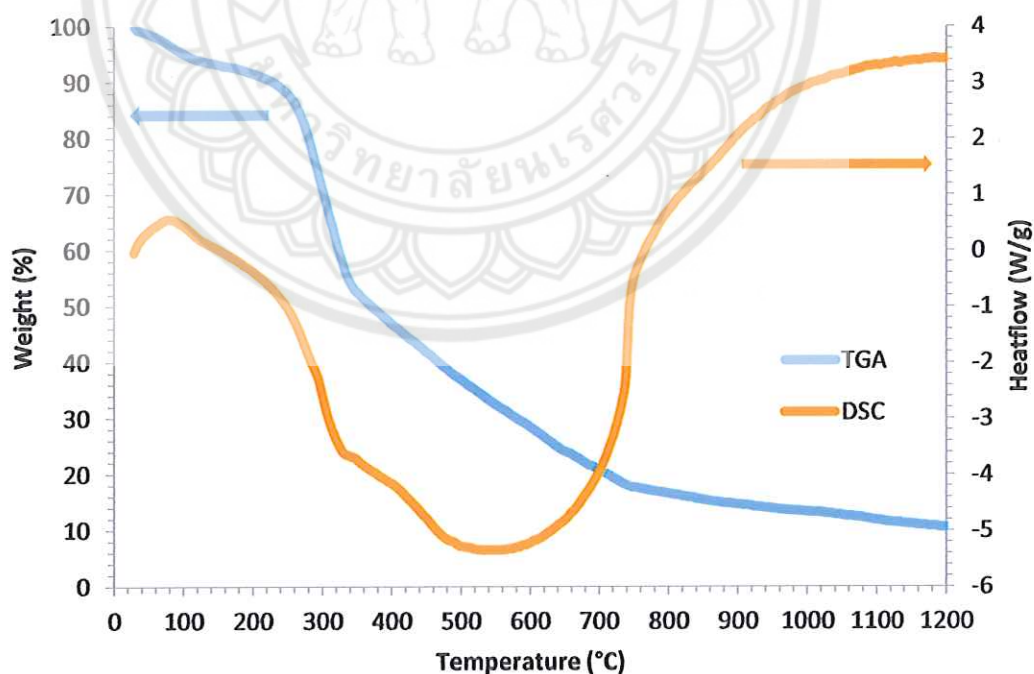
หมายเหตุ: %w/w คือ ร้อยละโดยมวลของธาตุที่ตรวจพบ

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าแฝกจากเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์-สเปกโทรเมตรี (XRF) พบว่าในหญ้าแฝกมีปริมาณของธาตุโพแทสเซียมอยู่ที่ร้อยละ 59.01 มีปริมาณธาตุซิลิคอนประมาณร้อยละ 12.92 มีปริมาณธาตุแคลเซียมร้อยละ 11.12 มีปริมาณธาตุคลอรีนอยู่ที่ร้อยละ 10.62 และองค์ประกอบของธาตุอื่น ๆ อีก เช่น กำมะถัน ฟอสฟอรัส และเหล็ก ตามตารางที่ 4.1 การที่หญ้าแฝกมีธาตุโพแทสเซียมและธาตุซิลิคอนในปริมาณที่สูงใกล้เคียงกับแร่เฟลด์สปาร์ ชนิดโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ( $KAlSi_3O_8$ ) ซึ่งมีสารประกอบจำพวกโพแทสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ ) อยู่ร้อยละ 16.9 สารประกอบซิลิคอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) ร้อยละ 64.7 ซึ่งปริมาณสัดส่วนของธาตุโพแทสเซียม

(K) ในใบหญ้าแห้งนั้นมีปริมาณสูงกว่าสารประกอบโพแทสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ ) ที่อยู่ในแร่เฟลด์สปาร์ ชนิดโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ แต่ในทางกลับกันปริมาณของธาตุซิลิคอน (Si) ที่พบในหญ้าแห้งกลับมีปริมาณที่น้อยกว่าสารประกอบซิลิคอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) ที่อยู่ในแร่เฟลด์สปาร์ แต่ทางคณะผู้จัดทำ คาดว่าหญ้าแห้งนั้นจะสามารถนำไปใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ชนิดโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ได้ เมื่อเทียบจากปริมาณสัดส่วนของธาตุโพแทสเซียม (K) และสารประกอบโพแทสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ )

#### 4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติของใบหญ้าแห้ง

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของหญ้าแห้งพบว่าใบของหญ้าแห้งมีองค์ประกอบของธาตุโพแทสเซียม (K) มากกว่าร้อยละ 50 และเมื่อได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของหญ้าแห้งโดยใช้เทคนิควิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (Thermal Analysis Technique; TA) จากเครื่องวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) และเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC) เพื่อดูปริมาณความร้อนที่หญ้าแห้งดูดความร้อน (Endothermic) หรือคายความร้อน (Exothermic) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีภายใต้การเพิ่มอุณหภูมิ และยังได้ศึกษาถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงเฟสของหญ้าแห้งภายใต้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลา ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของใบหญ้าแห้ง

จากกราฟการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของหญ้าแฝกพบว่า ที่อุณหภูมิในช่วง 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส หญ้าแฝกมีน้ำหนักที่ลดลง เนื่องจากน้ำได้ระเหยออกจากโครงสร้างภายในของหญ้าแฝก เมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่ 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส น้ำหนักของหญ้าแฝกเกิดการลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสารชีวะมวลซึ่งเป็นสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ในโครงสร้างของหญ้าแฝก ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน จะเกิดการสลายตัว [23] กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และก๊าซอื่น ๆ ขึ้นกับสัดส่วนของปริมาณสารชีวะมวลเหล่านั้น ซึ่งการสลายตัวจะสิ้นสุดลงเมื่อมีอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส และในช่วงอุณหภูมิ 600 ถึง 1200 องศาเซลเซียสจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงทางของปฏิกิริยาเคมีในหญ้าแฝกโดยเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของผลึกภายในโครงสร้าง ซึ่งคาดว่าปฏิกิริยาคายความร้อนนี้อาจก่อให้เกิดเป็นสารประกอบชนิดอีกชนิดหนึ่ง

#### 4.3 ลักษณะการหดตัวของชิ้นงาน

ในการตรวจสอบการหดตัวของชิ้นงานนั้น จะทำการวัดความยาวของชิ้นงานก่อนเผา และหลังเผาซึ่งจะทำการวัดความยาวชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้นงานในแต่ละรูปแบบ

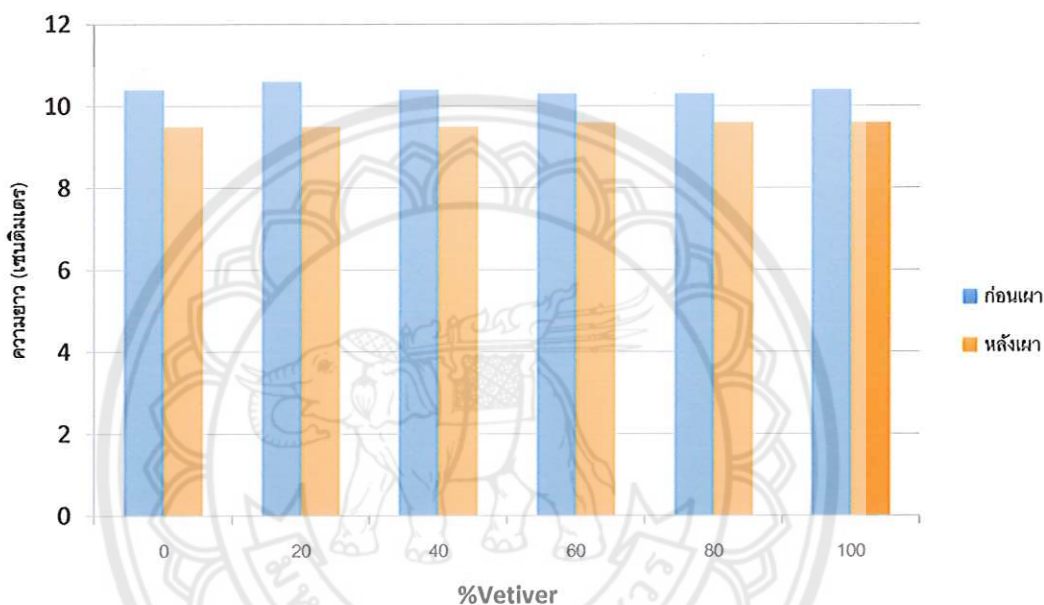
ตารางที่ 4.2 ความยาวของชิ้นงานก่อน และหลังเผา

รูปแบบ	ความยาว (เซนติเมตร)								ร้อยละการหดตัวเฉลี่ย
	ชิ้นงานที่ 1		ชิ้นงานที่ 2		ชิ้นงานที่ 3		ค่าเฉลี่ย		
	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	ก่อนเผา	หลังเผา	
0% Vetiver	10.4	9.6	10.5	9.5	10.4	9.5	10.4	9.5	8.7
20% Vetiver	10.7	9.5	10.5	9.6	10.5	9.5	10.6	9.5	9.7
40% Vetiver	10.4	9.4	10.4	9.5	10.5	9.6	10.4	9.5	8.7
60% Vetiver	10.3	9.6	10.3	9.5	10.2	9.6	10.3	9.6	6.8
80% Vetiver	10.4	9.7	10.4	9.6	10.3	9.6	10.3	9.6	6.8
100% Vetiver	10.4	9.5	10.4	9.6	10.5	9.6	10.4	9.6	7.7





รูปที่ 4.2 ชิ้นงานที่ 1 ในรูปแบบ 80% Vetiver



รูปที่ 4.3 กราฟการหัดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานในแต่ละรูปแบบ

จากผลการทดสอบการหัดตัวของชิ้นงานตามอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าหลังทำการเผาชิ้นงานที่มีส่วนผสมของใบหญ้าแฝกในอัตราส่วนที่ต่างกัน ชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของใบหญ้าแฝกมีร้อยละการหัดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 8.7 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของใบหญ้าแฝกมากขึ้นชิ้นงานที่มีส่วนผสมของใบหญ้าแฝกเพียงอย่างเดียวมีร้อยละการหัดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 6.8 ซึ่งอัตราการหัดตัวมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นการเพิ่มอัตราส่วนของใบหญ้าแฝกจึงไม่ส่งผลต่อการหัดตัวของชิ้นงานเซรามิค เนื่องจากการหัดตัวดังกล่าวเกิดจากการสูญเสียน้ำภายในโครงสร้างของชิ้นงานขณะทำการเผาส่งผลให้อนุภาคของเนื้อดินภายในจับตัวกันมากขึ้น ขนาดชิ้นงานจึงมีขนาดเล็กลง และเป็นสาเหตุหลักทำให้เกิดการหัดตัวของชิ้นงานขึ้น [24]

#### 4.4 ผลการตรวจสอบความหนาแน่น

ในการตรวจสอบหาความหนาแน่นของชิ้นงานในแต่ละรูปแบบนั้น ก่อนการทดสอบจะมีการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานแต่ละชิ้น ซึ่งในแต่ละรูปแบบจะทดสอบจำนวน 3 ชิ้นงาน

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานรูปแบบต่าง ๆ

รูปแบบ	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )			
	ชิ้นงานที่ 1	ชิ้นงานที่ 2	ชิ้นงานที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0% Vetiver	2.24	1.98	2.02	2.08
20% Vetiver	2.10	2.06	2.10	2.09
40% Vetiver	2.10	2.11	2.04	2.08
60% Vetiver	2.00	2.05	1.97	2.01
80% Vetiver	1.94	1.83	1.96	1.91
100% Vetiver	2.07	2.02	1.94	2.01



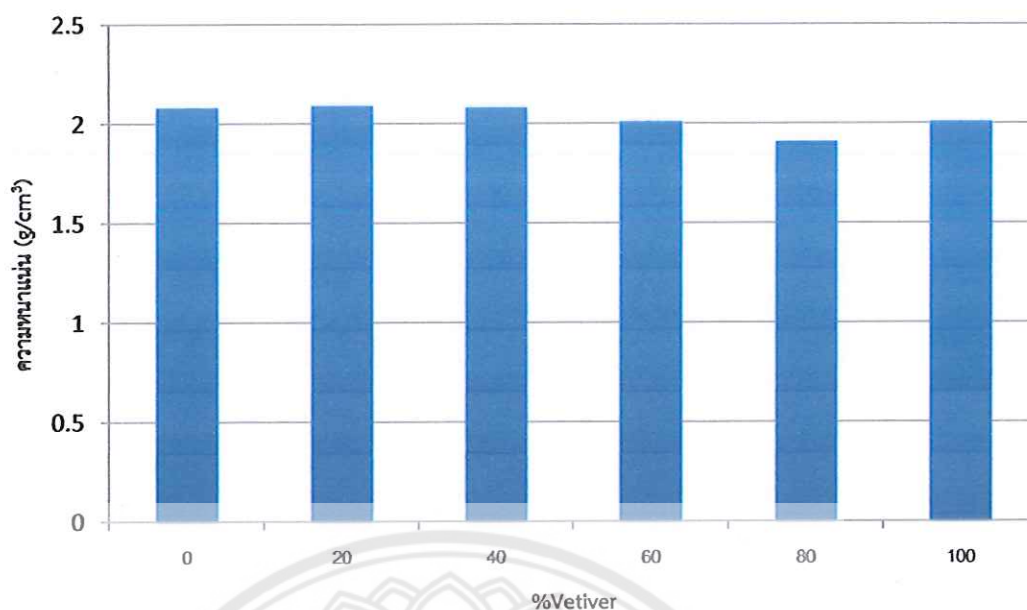
ก)

ข)

รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางของชิ้นงาน

ก) ชิ้นงานรูปแบบ 0% Vetiver

ข) ชิ้นงานรูปแบบ 100% Vetiver

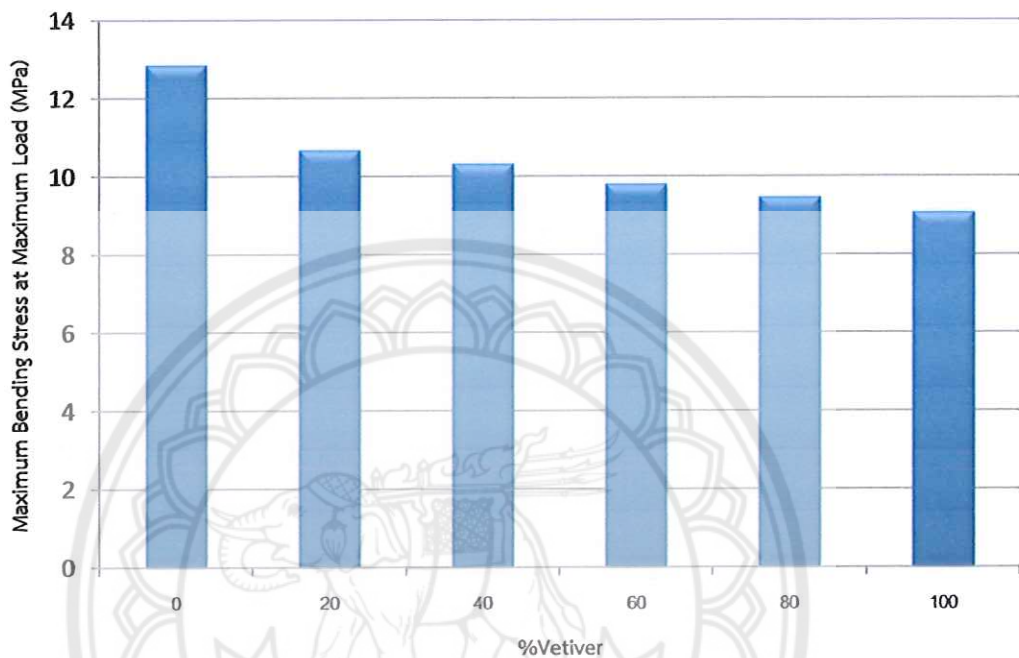


รูปที่ 4.5 กราฟความหนาแน่นเฉลี่ยของชั้นงานในรูปแบบต่าง ๆ

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของชั้นงานตามอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าชั้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของใบหญ้าแฝกเมื่อนำไปเผาจะมีความหนาแน่นเท่ากับ 2.08 g/cm<sup>3</sup> แต่เมื่อมีส่วนผสมของใบหญ้าแฝกเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนดังกล่าวจะทำให้ความหนาแน่นของชั้นงานลดลง โดยที่อัตราส่วนระหว่างแร่เฟลด์สปาร์กับใบหญ้าแฝกเป็น 20:80 หรือรูปแบบที่ 80% Vetiver นั้นมีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.91 g/cm<sup>3</sup> และเมื่อสังเกตจากภาพตัดขวางของชั้นงานที่อัตราส่วน 0:100 หรือรูปแบบที่ 100% Vetiver แสดงดังรูปที่ 4.4 ข) จะพบว่ามีความเข้มของสีบริเวณภายนอกกับบริเวณตรงกลางนั้นมีความแตกต่างกัน โดยบริเวณตรงกลางจะมีความเข้มของสีที่น้อยกว่า ซึ่งคาดว่าอาจเป็นสารประกอบอีกชนิดหนึ่งที่เกิดมาจากการสลายตัวของสารชีวมวลในใบหญ้าแฝกที่ก่อให้เกิดก๊าซ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นก๊าซนั้น ๆ ไม่สามารถออกจากชั้นงานได้จึงทำให้ก๊าซเหล่านี้สร้างรูพรุนภายในเนื้อชั้นงาน [25]

#### 4.5 ผลการตรวจสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง

ในการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งนั้นใช้ชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยก่อนการทดสอบมีการวัดความยาว ความกว้าง และความหนา เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง ซึ่งใช้ชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้นในแต่ละรูปแบบ

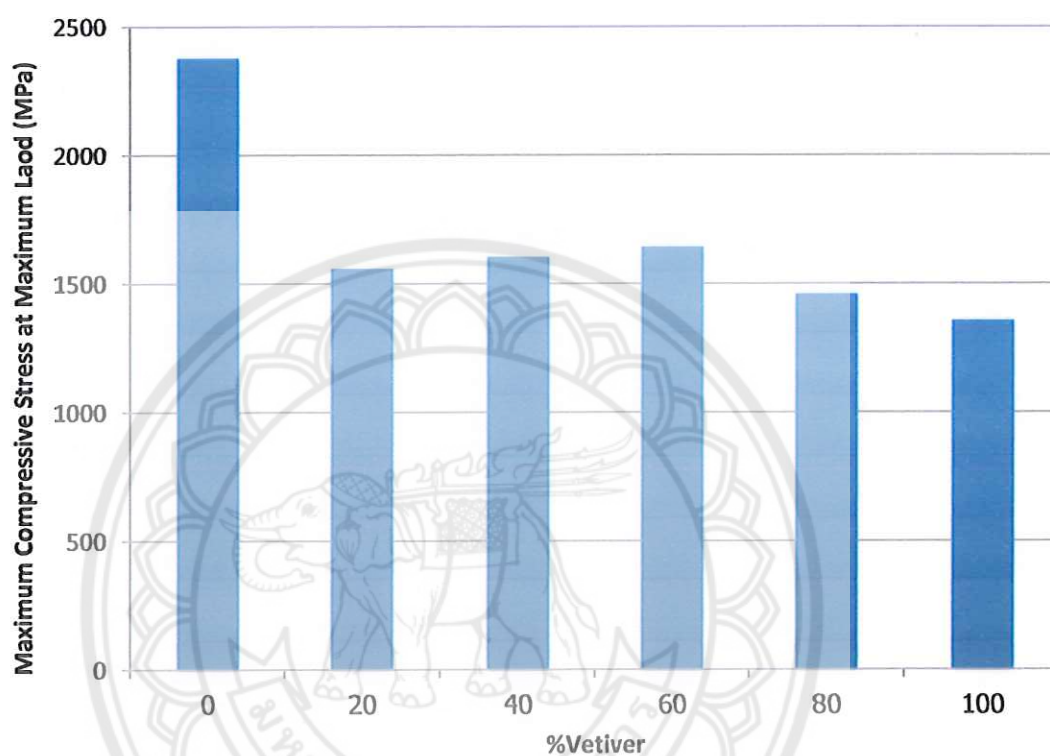


รูปที่ 4.6 กราฟการรับแรงดัดโค้งสูงสุดของชิ้นงานในรูปแบบต่าง ๆ

จากการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานตามอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของใบหญ้าแฝกนั้นมีความสามารถในการรับแรงดัดโค้งได้มากกว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสมของใบหญ้าแฝก เนื่องจากชิ้นงานที่มีส่วนผสมของใบหญ้าแฝกจะมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่า และทำให้ชิ้นงานมีความพรุนมากกว่า ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการรับแรงดัดโค้ง เมื่อให้แรงกดขนาดเท่าเดิมกระทำกับชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง แต่ชิ้นงานมีพื้นที่ในการรับแรงน้อยลง ซึ่งเป็นผลจากความพรุนในชิ้นงานทำให้ชิ้นงานนั้นมีความสามารถในการรับแรงดัดโค้งที่น้อยลงตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.6 จะสังเกตว่าความสามารถในการรับแรงดัดโค้งจะลดลง เมื่อมีอัตราส่วนของใบหญ้าแฝกเพิ่มขึ้น

#### 4.6 ผลการตรวจสอบความต้านทานแรงกดอัด

ในการตรวจสอบความต้านทานแรงดัดโค้งนั้น ก่อนการทดสอบจะมีการตัดชิ้นงานให้มีขนาดที่เล็กลง และมีการขัดพื้นผิวเพื่อให้พื้นผิวความสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งใช้ชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้นงานในแต่ละรูปแบบ



รูปที่ 4.7 กราฟการรับแรงกดอัดสูงสุดของชิ้นงานในรูปแบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานเซรามิก

จากการทดสอบความต้านทานแรงกดอัดของชิ้นงานในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของใบหญ้าแฝกมีความแข็งแรงกดสูงสุด ซึ่งคาดว่าที่อัตราส่วน 100:0 หรือรูปแบบที่ 0% Vetiver นั้นมีแร่เฟลด์สปาร์ ชนิดโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์เข้าไปเสริมส่วนต่าง ๆ ภายในโครงสร้างของเนื้อดิน ส่วนชิ้นงานที่มีส่วนผสมของใบหญ้าแฝกนั้นจะมีความแข็งแรงกดต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการตรวจสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง เมื่อมีอัตราส่วนของใบหญ้าแฝกเพิ่มขึ้นความสามารถในการต้านทานแรงกดอัดจะลดลง เนื่องจากภายในชิ้นงานที่มีส่วนผสมของใบหญ้าแฝกมีความพรุนที่มากกว่า เมื่อให้แรงกดกระทำกับชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง แต่ชิ้นงานดังกล่าวมีพื้นที่ในการรับแรงน้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจากความพรุนภายในชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานแรงกดอัดที่ลดลง และในทุก ๆ การทดสอบลักษณะการแตกหักของชิ้นงานมีการแตกหักในแนวเฉียง ซึ่งเป็นลักษณะการแตกหักของวัสดุแข็งเปราะ ตามรูปที่ 4.8



## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทสรุปและข้อเสนอแนะนี้ จะกล่าวถึงข้อสรุปของโครงการที่ได้ทดลองชิ้นงานตามอัตราส่วนต่าง ๆ รวมถึงได้รวบรวมข้อเสนอแนะ การพัฒนา ปัญหาที่พบ และแนวทางการแก้ไข ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 5.1 บทสรุปของโครงการ

5.1.1 ใบหญ้าแผ่นนั้นสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ได้ เนื่องจากในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่าหญ้าแผ่นมีธาตุโพแทสเซียมที่สูงมากเมื่อเทียบกับพืชชนิดอื่น ๆ และความคล้ายคลึงกับสารประกอบในแร่เฟลด์สปาร์ ชนิดโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ที่มีปริมาณของสารประกอบโพแทสเซียมเช่นกัน

5.1.2 ในการทดสอบการหดตัวพบว่าชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสมของใบหญ้าแผ่นและแร่เฟลด์สปาร์ในทุก ๆ อัตราส่วนมีลักษณะการหดตัวที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการสูญเสียน้ำภายในโครงสร้างของชิ้นงาน

5.1.3 ในการทดสอบความหนาแน่นพบว่า ชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของใบหญ้าแผ่นมีความหนาแน่นมากกว่าชิ้นงานที่มีส่วนผสมของใบหญ้าแผ่น เนื่องมาจากการสลายตัวของสารชีวะมวลในหญ้าแผ่นจึงทำให้ชิ้นงานที่ผสมด้วยใบหญ้าแผ่นนั้นมีน้ำหนักเบา และมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่า

5.1.4 ในการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งพบว่าชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของใบหญ้าแผ่นนั้นมีความต้านทานแรงดัดโค้งสูงที่สุด ส่วนชิ้นงานที่มีส่วนผสมของใบหญ้าแผ่นนั้นความต้านทานแรงดัดโค้งลดลงเมื่อมีอัตราส่วนของใบหญ้าแผ่นเพิ่มขึ้น

5.1.5 ในการทดสอบความต้านทานแรงกดอัด พบว่าชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของใบหญ้าแผ่นมีความต้านทานแรงกดอัดสูงที่สุด และมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของใบหญ้าแผ่น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดัดโค้งโดยชิ้นงานที่ไม่มีส่วนผสมของใบหญ้าแผ่นจะมีความต้านทานแรงดัดโค้งสูงที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ และการพัฒนา

5.2.1 อาจทำการศึกษาประสิทธิภาพชิ้นงานที่มีส่วนผสมของแร่เฟลด์สปาร์ และชิ้นงานที่มีส่วนผสมของไบฮญาแฝกเทียบกับประสิทธิภาพของอิฐชนิดอื่น ๆ

5.2.2 อาจทำการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำลงเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อความแกร่งของชิ้นงานเซรามิกที่มีส่วนผสมของแร่เฟลด์สปาร์และไบฮญาแฝก

## 5.3 ปัญหาที่พบ และแนวทางแก้ปัญหา

5.3.1 มีกระบวนการในการเตรียมวัสดุหลายขั้นตอน จำเป็นต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์หลายชนิดในกระบวนการเตรียม ซึ่งจำเป็นต้องซื้อเพิ่มเติม

5.3.2 ผลการทดลองในบางการทดสอบมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากการออกแบบระบบกระบวนการทดสอบไม่ดี และชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีความไม่สม่ำเสมอ

5.3.3 ชิ้นงานที่มีส่วนผสมของไบฮญาแฝกสามารถใช้ทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ได้ แต่อาจส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลง เนื่องจากไบฮญาแฝกจะส่งผลให้เกิดรูพรุนในชิ้นงาน





## เอกสารอ้างอิง

- [1] วิสุทธิ์ พิสุทธอนานนท์. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. เฟลด์สปาร์. สืบค้นเมื่อ 27 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/เฟลด์สปาร์>
- [2] Nancy Meedee. (กันยายน 2556). เฟลด์สปาร์(Feldspar)ตอนที่ 1. สืบค้นเมื่อ 27 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.thaijewelrytv.com/?p=64>
- [3] Nancy Meedee. (กันยายน 2556). เฟลด์สปาร์(Feldspar)ตอนที่ 2. สืบค้นเมื่อ 27 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.thaijewelrytv.com/?p=69>
- [4] งามพิศ แยมนิยม. (2543). ทรัพยากรแร่ในประเทศไทย. สืบค้นเมื่อ 27 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/mine/feldspar2.htm>
- [5] มยุรี ปาลวงศ์. (2550). แร่ หิน ดิน ททราย. สำนักพัฒนาและส่งเสริมกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. กรุงเทพฯ: บริษัท สยามออฟเซ็ท จำกัด
- [6] หล้าแฝกเฉลิมพระเกียรติ. (2556). สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2557, จาก [http://www.ddd.go.th/link\\_vetiver/index.htm](http://www.ddd.go.th/link_vetiver/index.htm)
- [7] อนุกรมวิธานและลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของหล้าแฝก. (2551). สืบค้นเมื่อ 27 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.haii.or.th/wiki84/index.php>.
- [8] ฐานข้อมูลพรรณไม้ องค์การสวนพฤกษศาสตร์. สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2557, จาก [http://www.qsbg.org/database/botanic\\_book](http://www.qsbg.org/database/botanic_book).
- [9] Gilliland, H.B., (1791). *Flora of Malaya*. Volume 3. *Grasses of Malaya* Lim Bian Han: Government Printer
- [10] หล้าแฝก. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 29 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.dnp.go.th/watershed/vetiver.htm>
- [11] วิฑูร ชินพันธุ์. (2541). *ความรู้เรื่องหล้าแฝก*. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (หน้า 21-38)
- [12] Pawadee Mathacanon. (2003). *Hemicellulosic polymer from Vetiver grass and its physicochemical properties*. Thesis, Mahidol University, Rajdhevee, Bangkok สืบค้นเมื่อวันที่ 29 ตุลาคม 2557 จาก <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861703001826>

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2532). เซรามิกส์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [14] สุรศักดิ์ ไวทยาวงศ์สกุล. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกส์. สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://www.material.chula.ac.th/RADIO45/July/radio7-1.htm>
- [15] มาซึเอะโร เจ๊ะดาโอ๊ะ. (กันยายน 2556). การขึ้นรูปตามลักษณะของดิน. สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2557, จาก [http://masuross.blogspot.com/2013/09/blog-post\\_15.html](http://masuross.blogspot.com/2013/09/blog-post_15.html)
- [16] การขึ้นรูปด้วยการอัดแบบแห้ง. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2557, จาก [http://www.thaiceramicsociety.com/pc\\_press\\_feature.php](http://www.thaiceramicsociety.com/pc_press_feature.php)
- [17] จินตมัย สุวรรณประทีป. (2547). การทดสอบสมบัติเชิงกลของพลาสติก. สืบค้นเมื่อ 29 พฤศจิกายน 2557, จาก <http://data.thaiauto.or.th>.
- [18] สมบัติเชิงกลของเซรามิก. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. สืบค้นเมื่อ 28 พฤศจิกายน 2557, จาก [http://www.teacher.ssru.ac.th/reudee\\_ni/file.php/1/Book-CeramicTest/physic-chapter6.html](http://www.teacher.ssru.ac.th/reudee_ni/file.php/1/Book-CeramicTest/physic-chapter6.html)
- [19] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. Thermogravimetric Analysis (TGA) และ Differential Scanning Calorimetry (DSC). สืบค้นเมื่อ 1 พฤษภาคม 2558, จาก <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/thermal-analysis-instrument-menu/item/111-thermogravimetric-analysis-tga.html>
- [20] เครื่องวิเคราะห์ตัวอย่างโดยเทคนิคการเรืองแสงรังสีเอกซ์. สืบค้นเมื่อ 5 เมษายน 2558, จาก <http://www.vcharkarn.com/vblog/38694>
- [21] เบญจมาศ รักจัญ. (2548). การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของโพแทสเซียมเฟลด์สปาร์ ดินแดง สุราษฎร์ธานี ขี้เถ้าเปลือกหอยนางรม และขี้เถ้าแกลบ เพื่อผลิตเคลือบ ขี้เถ้า. สืบค้นเมื่อ 27 ธันวาคม 2557, จาก <http://e-research.sru.ac.th/?q=node/165>

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [22] พชรภณ สนทอง. ศักรินทร์ เพ็งดี. (2556). การสลายลิกนินด้วยความร้อน. โครงการของนักศึกษาชั้นปีที่ 4 วศ.บ., มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2558, จาก [https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc\\_upload/20140303143542.pdf](https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc_upload/20140303143542.pdf)
- [23] กรมวิทยาศาสตร์บริการ. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. วิธีทดสอบการหดตัวหลังอบและ หลังเผาของเนื้อดินเซรามิก. สืบค้นเมื่อ 16 พฤษภาคม 2558, จาก <http://ceramic.dss.go.th/files/pdf/tm-4.pdf>
- [24] ประดุจฤดี สารสิทธิ์. (2543). การทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ในงานเซรามิกส์. สืบค้นเมื่อ 16 พฤษภาคม 2558, จาก [http://www.teacher.ssru.ac.th/reudee\\_ni/file.php/1/Book-CeramicTest/physic-chapter3.html](http://www.teacher.ssru.ac.th/reudee_ni/file.php/1/Book-CeramicTest/physic-chapter3.html)



## ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นางสาวชนาพร หอมสุวรรณ  
ภูมิลำเนา 246 หมู่ 4 ต. ปากแคว อ. เมือง  
จ. สุโขทัย 64000

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุดมดรุณี จ. สุโขทัย
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: chanaphonh25@gmail.com



ชื่อ นางสาวปริยานุช อินทา  
ภูมิลำเนา 333/3 หมู่ 9 ซ. สามัคคี 7 ต. อรัญญิก อ. เมือง  
จ. พิษณุโลก 65000

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพุทธชินราชพิทยา จ. พิษณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: Pariyanuti54@email.nu.ac.th



ชื่อ นางสาวอุมาภรณ์ เมืองแดง  
ภูมิลำเนา 330 หมู่ 2 ต. เนินมะปราง อ. เนินมะปราง  
จ. พิษณุโลก 65190

### ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเนินมะปรางวิทยา จ. พิษณุโลก
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: umaporn.m29@gmail.com