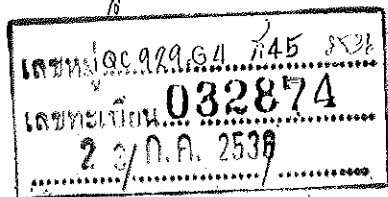


ภาวะเหมาะสมของการเคลือบในการผลิตเซรามิกส์พื้นบ้าน  
Suitable Conditions of Glazing for Conventional  
Ceramic Manufacturing



bib 34083

สมศักดิ์ ทิพยรัตน์พรทวี  
Somsak Tippayaratprontawee



วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Science Thesis in Physics

Prince of Songkla University

2536

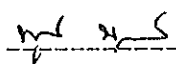
ชื่อวิทยานิพนธ์ ภาวะเหมาะสมของการเคลื่อนย้ายในการผลิตเซรามิกส์พื้นบ้าน

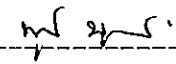
ผู้เขียน นายสมศักดิ์ ทิพย์รัตน์พรทวี

สาขาวิชา ฟิลิกส์

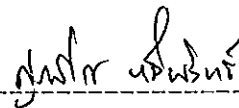
คณะกรรมการที่ปรึกษา

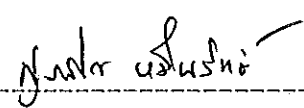
คณะกรรมการสอบ

 ประธานกรรมการ

 ประธานกรรมการ


( รองศาสตราจารย์ ดร. พูลพงษ์ บุญพราหมณ์ ) ( รองศาสตราจารย์ ดร. พูลพงษ์ บุญพราหมณ์ )

 กรรมการ


 กรรมการ

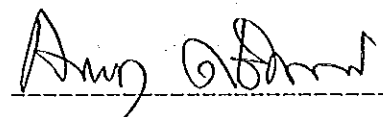
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภสรโรช ภูมิเลิศสิทธิ์ ) ( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภสรโรช ภูมิเลิศสิทธิ์ )

 กรรมการ

 กรรมการ

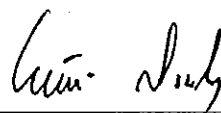
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาลิต โอหาพิริยกุล ) ( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาลิต โอหาพิริยกุล )

 กรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ บุญเหลือ พงศ์ดารา )

 กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กัญญา ศรีสุวรรณ )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย

ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิลิกส์



( ดร. ไพรัตน์ สงวนไทร )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์ ภาวะเหมาะสมของการเคลือบในการผลิตเซรามิกส์พื้นบ้าน

ผู้เขียน นายสมศักดิ์ ทิพย์รัตน์พรทวี

สาขาวิชา ฟิลิกส์

ปีการศึกษา 2535

### บทคัดย่อ

การศึกษาสมบัติกายภาพด้านความพรุนตัว การดูดซึมน้ำ ความแข็งแรง มอดูลัสความยืดหยุ่น และการประสานเป็นเนื้อเดียวกันของน้ำเคลือบกับเนื้อดินปั้น สามารถจะแสดงถึงภาวะเหมาะสมในการเผาติดผลิตภัณฑ์จากดินคอมพาวด์-เคลย์ ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์พื้นบ้านได้โดยแต่เดิมการเผาติดผลิตภัณฑ์จากดินดังกล่าว กระทำที่  $800^{\circ}\text{C}$  โดยไม่ปรากฏรายงานทางวิชาการที่เสนอถึงข้อดีในการเผาติด ที่อุณหภูมินี้ ดังนั้นหากมีอุณหภูมิการเผาติดที่ต่ำกว่า  $800^{\circ}\text{C}$  แต่ให้สมบัติกายภาพที่ใกล้เคียงหรือดีกว่าก็จะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมเซรามิกส์พื้นบ้านได้โดยตรง

จากการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติกายภาพ ของดินคอมพาวด์-เคลย์ พบว่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ที่เผาที่  $650^{\circ}\text{C}$  ใกล้เคียงกับค่า ของดินที่เผาที่  $800^{\circ}\text{C}$  คือมีค่าระหว่าง 30-33 % หลังการเผาติด และ 0.01-0.03 % หลังการเผาเคลือบแต่ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงทั้งก่อนและหลังการเผาเคลือบที่สูงกว่า คือมีค่าระหว่าง 120-160 กิโลปาสกาล หลังการเผาติด และ 4.66-5.66 เมกกะปาสกาล หลังการเผาเคลือบ และจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงหนึ่งยังได้แสดงให้เห็นว่าการประสานเป็นเนื้อเดียวกันของผลิตภัณฑ์ที่เผาที่  $650^{\circ}\text{C}$  ดีกว่าด้วยเอกจากนี้ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ ที่ได้จากวิธีอุญญภาคและวิธีการแช่น้ำ นุ่มต่างกับค่าที่ได้จากวิธีการต้มซึ่งเป็นวิธีมาตรฐาน อย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นจึงเป็นการสมเหตุสมผล ที่จะทำการเผาติดผลิตภัณฑ์จากดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่  $650^{\circ}\text{C}$  แทนการเผาติดที่  $800^{\circ}\text{C}$  เพราะจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพในการผลิต

Thesis Title Suitable Conditions of Glazing for  
Conventional Ceramic Manufacturing

Author Mr.Somsak Tippayaratprontawee.

Major Program Physics Science

Academic Year 1992

### Abstract

A study of the following physical properties : porosity water-absorption strength modulus of elasticity and compatibility with the glaze ; can show the suitable condition for biscuit-firing of compound-clays products in conventional ceramic manufacturing. So far, those products have been biscuit fired at 800 °C , but the advantage of this firing temperature has never been confirmed. So , if a biscuit temperature of lower than 800 °C can produce physical properties which are nearly the same or better than those of conventionally fired products , this information would be of use to traditional ceramic manufacturing.

---

A comparative study was made of physical properties of the compound-clays products have found that the porosity and water absorption of the 650 °C fired products were nearly the same as those of 800 °C fired products their have 30-33 % after biscuit firing and 0.01-0.03 % after glaze firing but the average strength both

before and after glaze firing of the 650°C fired products was higher than that of 800°C fired products their strength 120-160 KPa after biscuit firing and 4.66-5.66 MPa after glaze firing.

Electron micrography show that compatibility with the glazing of 650 °C fired products is better.

The results of investigation of porosity and water absorption using a vacuum method and submersing method are not significantly different from those the standard boiling method.

It is concluded that biscuit firing the compound-clay products at 650 °C instead of 800 °C is beneficial leads to an increased efficiency and quality of production.

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก คณาจารย์  
ภาควิชาฟิสิกส์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขต้นฉบับอย่างละเอียดโดยเฉพาะ  
อย่างยิ่ง รองศาสตราจารย์ ดร. พูลพงษ์ บุญพราหมณ์ ผู้ได้มอบความเมตตากรุณา  
แก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างมากและเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า อาจารย์ใหญ่ลย์  
นวลนิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภสรเดช หมั่นสิทธิ์ ผู้ซึ่งได้ชี้แนะแนวทางใน  
การทดลองแก่ข้าพเจ้าและที่จะลืมเสียมิได้คือ อาจารย์ผดุงเกียรติ รัตนศรี  
ตลอดจนภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งข้าพเจ้าขอเฝ้า  
กราบขอพระคุณคณาจารย์เหล่านี้ไว้ ณ. ที่นี้ เป็นอย่างสูง

นอกจากนี้แล้วข้าพเจ้าขอเฝ้ากราบระลึกถึงพระคุณของ ท่านแม่ และ  
ญาติพี่น้องในตระกูล "ทิพย์รัตน์พรทวี" ทุกท่าน ที่ได้เป็นกำลังใจและให้การ  
สนับสนุนส่งเสริมข้าพเจ้าทราบจนกระทั่ง วันนี้ ซึ่งข้าพเจ้ามีความสามารถที่จะทดแทน  
บุญคุณดังกล่าวได้หมดสิ้น นอกเสียจากการประพฤติตนให้ควรแก่การ เป็นผู้สืบสกุล  
ที่ดี มีน้ckenงานธรรม และ กตัญญูทดแทน ต่อท่านเหล่านี้ตลอดไป

สมศักดิ์ ทิพย์รัตน์พรทวี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
Abstract.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(6)
สารบัญ.....	(7)
รายการตาราง.....	(8)
รายการภาพประกอบ.....	(9)
บทที่	
1. บทนำ.....	1
บทนำสั้นเรื่อง.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
2. วิธีการวิจัย.....	4
วัสดุ.....	4
อุปกรณ์.....	5
วิธีดำเนินการ.....	8
3. ผลและการอภิปรายผล.....	34
4. บทวิจารณ์และสรุป.....	58
5. บรรณานุกรม.....	66
6. ภาคผนวก.....	69
7. ประวัติผู้เขียน.....	75

## รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1. แสดงผลการศึกษาสมบัติเฉพาะของดินคอมพาวด์-เคลย์	35
2. แสดงค่าความพรุนตัวของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยวิธีการต้ม วิธีสูญอากาศ และวิธีการแช่น้ำ	40
3. แสดงค่าการดูดซึมน้ำของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยวิธีการต้ม วิธีสูญอากาศ และวิธีการแช่น้ำ	45
4. แสดงค่าความถ่วงจำเพาะ และความหนาแน่นอัดรวม ของตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยวิธีการต้ม	46
5. แสดงค่าความแข็งแรง โดยวิธีการโค้งงอแบบสามด้านหนึ่งของดินคอมพาวด์-เคลย์ ก่อนการเผาเคลือบ	48
6. แสดงค่าความเร็วและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ในดินคอมพาวด์-เคลย์ ก่อนการเผาเคลือบ โดยวิธีอัลตราโซนิค	50
7. แสดงค่าความแข็งแรง โดยวิธีการโค้งงอแบบสามด้านหนึ่งของผลิตภัณฑ์ ภายหลังจากการเผาเคลือบ	52



## รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1. แสดงส่วนประกอบของแท่นหัวกดตัวอย่าง	6
2. แสดงส่วนประกอบของแท่นรับน้ำหนักกดตัวอย่าง	7
3. แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C	11
4. แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 1160 °C	13
5. แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C	17
6. แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 650 °C	18
7. แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ทดลอง โดยวิธีสุญญากาศ	21
8. แสดงภาคตัดขวางของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการศึกษา ความพรุนตัว โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงกึ่ง	23
9. แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C	24
10. แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C	24
11. แสดงการทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการโค้งงอแบบสามตำแหน่ง	25
12. แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 850 °C	27
13. แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 1100 °C	27
14. แสดงการประกอบอุปกรณ์ในการทดสอบหาค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น	28
15. แสดงขั้นตอนการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1250 °C	31
16. แสดงภาคตัดขวางบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำยาเคลือบและเนื้อดินปั้น ที่นำไปใช้ในการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงกึ่ง	33
17. ลักษณะ สี ของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่เผาที่ 500 °C	36
18. ลักษณะ สี ของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่เผาที่ 650 °C	37
19. ลักษณะ สี ของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่เผาที่ 700 °C	37
20. ลักษณะ สี ของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่เผาที่ 800 °C	38
21. ลักษณะ สี ของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่เผาที่ 1100 °C	38

22. ภาพถ่ายบริเวณภาคตัดขวาง ของเนื้อตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 500°C จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงหนึ่ง (กำลังขยาย 600 เท่า) 42
23. ภาพถ่ายบริเวณภาคตัดขวาง ของเนื้อตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 650°C จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงหนึ่ง (กำลังขยาย 600 เท่า) 42
24. ภาพถ่ายบริเวณภาคตัดขวาง ของเนื้อตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 800°C จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงหนึ่ง (กำลังขยาย 600 เท่า) 43
25. ภาพถ่ายบริเวณภาคตัดขวางของเนื้อตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 1160°C จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงหนึ่ง (กำลังขยาย 600 เท่า) 43
26. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความแข็งแรงกับอุณหภูมิการเผา 48
27. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงหลังการเผาดิบ และหลังการเผาเคลือบ โดยวิธีการโค้งงอแบบสามตาแหน่งกับอุณหภูมิในการเผาดิบผลิตภัณฑ์ 52
28. ภาพถ่ายฝัวยรอยต่อของน้ำเคลือบและเนื้อดินปั้น ในตัวอย่างที่เผาดิบ ที่ 500 °C แล้วนำเข้าเผาเคลือบที่ 1250 °C จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงหนึ่ง (กำลังขยาย 100 เท่า) 55
29. ภาพถ่ายฝัวยรอยต่อของน้ำเคลือบและเนื้อดินปั้น ในตัวอย่างที่เผาดิบ ที่ 650 °C แล้วนำเข้าเผาเคลือบที่ 1250 °C จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงหนึ่ง (กำลังขยาย 100 เท่า) 55
30. ภาพถ่ายฝัวยรอยต่อของน้ำเคลือบและเนื้อดินปั้น ในตัวอย่างที่เผาดิบ ที่ 700 °C แล้วนำเข้าเผาเคลือบที่ 1250 °C จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงหนึ่ง (กำลังขยาย 100 เท่า) 56
31. ภาพถ่ายฝัวยรอยต่อของน้ำเคลือบและเนื้อดินปั้น ในตัวอย่างที่เผาดิบ ที่ 800 °C แล้วนำเข้าเผาเคลือบที่ 1250 °C จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงหนึ่ง (กำลังขยาย 100 เท่า) 56

# บทที่ 1

## บทนำ

การศึกษาทางด้านเซรามิกส์ในปัจจุบันนั้น ยังคงมีอยู่ในวงวิชาการ และในอุตสาหกรรมขนาดกลาง และขนาดใหญ่เท่านั้น ส่วนในอุตสาหกรรมที่เบา หรืออุตสาหกรรมขนาดเล็กนั้นยังมิได้มีการเผยแพร่ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีการผลิตมากเท่าใดนัก ดังนั้นการศึกษาและพัฒนาความรู้ในด้านเทคโนโลยีการผลิตจึงควรได้รับความสนใจและให้การสนับสนุนจากหน่วยงานและนักวิชาการให้มากยิ่งขึ้น เพื่อให้อุตสาหกรรมเซรามิกส์พื้นบ้านเป็นอุตสาหกรรมที่มีคุณภาพและมีประสิทธิภาพในการผลิต ที่ยิ่งขึ้นไปกว่าในปัจจุบัน

### 1. บทนำต้นเรื่อง

ประเทศไทยได้มี อุตสาหกรรมเซรามิกส์ มาแล้วกว่า 20 ปี โดยเริ่มในปี 2514 ซึ่งการพัฒนาทางเทคโนโลยีการผลิต มีขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะภายหลังปี 2516 เป็นต้นมา ซึ่งจนถึงปัจจุบันสามารถเผาเคลือบผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ภายในเวลาเพียง 2 ชั่วโมง ซึ่งแต่เดิมต้องใช้เวลาในการเผาเคลือบถึงกว่า 6 ชั่วโมง ซึ่งความรู้ในด้านเทคโนโลยีดังกล่าวยังมิได้เผยแพร่ไปวงการของอุตสาหกรรมเซรามิกส์พื้นบ้าน ( อุตสาหกรรมซึ่งเน้นงานฝีมือมากกว่างานการผลิตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ ) เท่าใดนัก ซึ่งในปัจจุบันนี้อุตสาหกรรมดังกล่าวได้มีจำนวนเพิ่มขึ้นมาก และเกือบจะทั้งหมดที่ยังคงเผาเพื่อคงรูปผลิตภัณฑ์หรือเผาดิบ ( Biscuit fire ) ที่  $800^{\circ}\text{C}$  ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปชุบเคลือบและเผาเคลือบต่อไปที่อุณหภูมิของการเผาเคลือบ โดยไม่ปรากฏรายงานผลการยืนยันถึงสมบัติ ทางกายภาพจากการเผาดิบที่อุณหภูมินี้จึงมีความที่น่าสนใจว่า มีข้อดีอะไรในการเผาดิบที่อุณหภูมินี้ และหากจะเผาดิบที่อุณหภูมิซึ่งต่ำกว่านี้จะได้หรือไม่

ซึ่งหากสามารถจะเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ได้ ก็จะเป็นการลดพลังงานในการเผา เพิ่มอัตราการผลิตต่อวัน ซึ่งส่งผลต่อการ ลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มทุนรายได้โดยตรงให้แก่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเซรามิกส์พื้นบ้าน

การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาถึง สมบัติทางกายภาพ ต่าง ๆ ของ ดินคอมพาวด์-เคลย์ ( Compound-clays ) ซึ่งเป็นดินที่ใช้งานกันมากในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ เนื่องจากเป็นดินที่ผ่านกระบวนการผลิตที่มีมาตรฐาน มีสมบัติที่เหมาะสมดีกล่าวคือ มีเนื้อเนียนละเอียด ความเหนียวพอเหมาะแก่การขึ้นรูปและทำให้สีหลังการเผาเป็นสีขาว จึงเป็นที่นิยมแม้ว่าจะได้มีการพัฒนาดินท้องถิ่นมาใช้บ้างแล้วก็ตาม ทั้งนี้ก็เพื่อ หาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเผาเคลือบดินคอมพาวด์-เคลย์ ซึ่งต่ำกว่า  $800^{\circ}\text{C}$  ว่ามีหรือไม่ ถ้ามี ศึกษาอย่างไรและหากไม่มีก็จะต้องสามารถอธิบายยืนยันได้ว่าการเผาเคลือบที่  $800^{\circ}\text{C}$  เหมาะสมอย่างไร โดยศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ เช่น ความพรุนตัว (Porosity) , การดูดซึมน้ำ ( Water absorption ) เพื่อประโยชน์ในการเปรียบเทียบมาตรฐานผลิตภัณฑ์ ความแข็งแรง ( Strength ) เพื่อเป็นสิ่งป้องกันถึงการลดความเสียหายในระหว่างการขนย้าย และมอดูลัสความยืดหยุ่น ( Modulus of elasticity ) เพื่อใช้พิจารณาแรงยึดเหนี่ยวภายในผลิตภัณฑ์ เพื่อเลือกหาเงื่อนไขที่ทำให้สมบัติภายหลังการเผาเคลือบ ชุบเคลือบและเผาเคลือบที่ดี กล่าวคือ ให้ความแข็งแรงต่อผลิตภัณฑ์สูง ไม่เกิดแตกหักในขณะขนย้าย และภายหลังการเผาเคลือบแล้วให้ผิวเคลือบสวยงามแข็งแรง เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพและยกระดับมาตรฐานของงานอุตสาหกรรมเซรามิกส์พื้นบ้าน ให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิภาพในการผลิตสูงขึ้น

นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์เอา วิธีอัลตราโซนิคเทคนิค ( Ultrasonic technique ) มาใช้ในการศึกษาการวัดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น วิธีสูญญากาศ ( Vacuum method ) และ วิธีการแช่น้ำ ( Submersing method ) เพื่อใช้ในการศึกษาการหาค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ ของผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการพัฒนาวิธีการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเซรามิกส์อีกด้วย

## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสม (อุณหภูมิ) ในการเผาเคลือบผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ ที่ทำจากดินคอมพาวด์-เคลย์ ต่อการเผาเคลือบของอุตสาหกรรมเซรามิกส์พื้นบ้านโดยพิจารณาจาก สมบัติทางกายภาพในด้านความพรุนตัว การดูดซึมน้ำ ความแข็งแรง มอดูลัสความยืดหยุ่น และการประสานเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อดินกับน้ำเคลือบ ซึ่งเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันแล้วผ่านการชุบเคลือบและเข้าเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1250 °C

2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ วิธีการหาค่า ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ โดยเทคนิคการต้ม ( Boiling method ) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐาน แต่ต้องใช้ เวลาในการทดลองมากกว่า 12 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับเทคนิคอีก 2 วิธีคือ เทคนิคสูญญากาศ และเทคนิคการแช่น้ำ เพื่อเป็นการค้นหาวิธีการทดสอบใหม่ ๆ ที่อาจจะสะดวกรวดเร็วและประหยัดพลังงานในการทดลองได้

2.2 เพื่อศึกษาความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ซึ่งทำจากดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่ผ่านการเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ และภายหลังการนำไปชุบเคลือบและเผาเคลือบ โดยวิธี การโก่งงอแบบสามตำแหน่ง ( Three point bending test ) ซึ่งสำคัญกล่าวเป็นประโยชน์ในการพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์โดยตรง

2.3 เพื่อศึกษาการวัดค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ ที่ทำจาก ดินคอมพาวด์-เคลย์ โดยวิธีอัลตราโซนิก ทั้งก่อนการเผาเคลือบและภายหลัง การเผาเคลือบ เพื่อให้ทราบค่า มอดูลัสความยืดหยุ่นของเนื้อเซรามิกส์ ซึ่งเป็น ประโยชน์ในการวิเคราะห์แรงยึดเหนี่ยวภายในผลิตภัณฑ์อีกทั้ง เพื่อเป็นการควบคุม คุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย

2.4 เพื่อศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค ( Micro structure ) ด้าน ความพรุนตัวของเนื้อดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ ทั้งก่อน และหลังการชุบเคลือบ เพื่อให้ทราบถึงลักษณะและขนาดของความพรุนตัวของ ตัวอย่างที่ผ่านการเผาเคลือบที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน อีกทั้งเพื่อศึกษาลักษณะการเชื่อม ประสานกันของเนื้อดินที่เผามาต่างกับกับน้ำยาเคลือบ ภายหลังการเผาเคลือบที่ 1250°C ว่าขั้นตอนการเผาเคลือบ มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลัง การเผาเคลือบหรือไม่อย่างไร

## บทที่ 2

### วิธีการวิจัย

การวิจัยเพื่อให้ทราบถึงอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สัมพันธ์กับสภาวะหลังการเผาไหม้ก่อนและหลังการเผาเคลือบที่ดี จำเป็นต้องพิจารณาสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วใน บทนำที่เรื่อง ซึ่งจำเป็นต้องใช้วัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย ดังแสดงในรายการต่อไปนี้

#### 1. วัสดุ

วัสดุทั้งหมดที่ใช้ไปในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ แสดงได้ดังรายการต่อไปนี้ คือ

1.1 ดินเหนียว คอมพาวด์-เคลย์ ซึ่งประกอบไปด้วย ดินขาวและดินดำ 50 % ควอตซ์ 35 % และหินฟันม้า 15 % (ที่มา: โรงงานหาคาใหญ่ เชรามิกส์)

1.2 แป้งอัดดินเหนียวทำด้วยปูนพลาสเตอร์ขนาด  $2 \times 2 \times 0.25$  นิ้ว หรือ  $5.08 \times 5.08 \times 0.64$  เซนติเมตร (cm)

1.3 พี.วี.ซี. เรซิน สำหรับทำภาชนะแบบปูนพลาสเตอร์ ที่เพิ่งจะเทแบบเสร็จ เพื่อให้แบบมีผิวเรียบเนียน ไม่ติดติดดินเหนียวที่จะมาอัดแบบ

1.4 ไม้กั้น สำหรับการต้มตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่จะใช้ ศึกษาความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ

1.5 ไม้ขาวเคลือบขาว ซึ่งประกอบไปด้วย หินฟันม้า 35 % ควอตซ์ 28 % ดินขาวระนอง 16 % ดินดำสุราษฎร์ธานี 17 % ทิตานเนียมออกไซด์ 3 % และ แอมกาไฟส 1 % (ที่มา: โรงงานหาคาใหญ่ เชรามิกส์)

1.6 ซิลิโคน-เจ็ล สำหรับทำผิวหน้าของตัวอย่างและห้ววัด ที่จะใช้ศึกษา ค่า มอดูลัสความยืดหยุ่นของตัวอย่าง

1.7 ผงอลูมินา สำหรับขัดผิวตัวอย่าง ที่ใช้ในการทดลองหาค่ามอดูลัส ความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์

## 2. อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้แบ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ แยกตามประเภทของแต่ละการทดลอง ดังแสดงในหัวข้อย่อยต่อไปนี้

### 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาเรื่อง ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ

2.1.1 ภาชนะบรรจุไว้เพื่อต้ม ขนาดความจุประมาณ 2-4 ลิตร

2.1.2 เตาอบไฟฟ้าขนาด 1 ลูกบาศก์ฟุต เพื่อใช้อบไล่ความชื้นออกจากตัวอย่าง (ยี่ห้อ NATIONAL รุ่น NB-7500E) ก่อนที่จะนำตัวอย่างไปซึ่งใช้หนักแห้ง

2.1.3 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตัวเลขที่มีความละเอียดสุด  $\pm 0.001$  กรัม(g) เป็นเครื่องชั่งระบบคอมพิวเตอร์ (ยี่ห้อ METTLER รุ่น AE200) คัดแปลงให้ชั่งน้ำหนักในหน่วยกรัมได้ เพราะด้านหลังของเครื่องชั่ง จะมีตะขอสำหรับเกี่ยวท่วงที่ใส่ตัวอย่างซึ่งขณะเดียวกันก็ขึ้นอยู่กับภาชนะบรรจุไว้

2.1.4 ผ้าฝ้าย 100 % สำหรับซับน้ำตัวอย่างภายหลังต้นและแช่ในน้ำค้างคืนไว้แล้วกว่า 12 ชั่วโมง

2.1.5 ปืนกลสูญญากาศ แบบโรตารี ที่สามารถปรับได้ต่ำกว่า 350 มิลลิเมตรปรอท (บริษัท CENCO ยี่ห้อ Pressovac หมายเลขเครื่อง 07415)

### 2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาเรื่องความแข็งแรง

2.2.1 เครื่อง ยูนิเวอร์ซัลเทสติ้งแมชชีน ( Universal testing machine ) ซึ่งเป็นแท่นสำหรับส่งแรงกดมาที่หัวกดซึ่งต้องการใช้งาน มีชื่อทางการค้าคือ Triaxial testing loading frames รุ่นที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือ CE 60-051 E, L.E Ltd, RICK MANS WORTH ซึ่งสามารถให้แรงส่งในการกดตั้งแต่ 0-5000 กิโลกรัม (Kg) ระบบการสั่งกด 2 ระบบคือ อัตโนมัติและหมุนด้วยมือ และในแบบอัตโนมัติจะมีอัตราการสั่งกดให้เลือกใช้ดังนี้

2.2.1.1 อัตรา 0.406 เซนติเมตร/นาที

2.2.1.2 อัตรา 0.183 เซนติเมตร/นาที

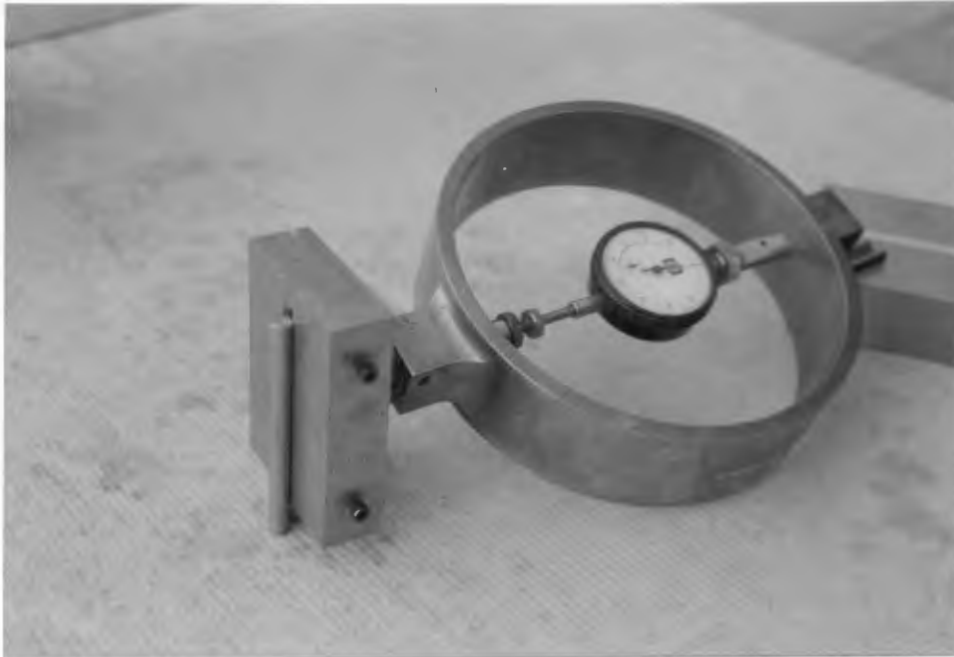
2.2.1.3 อัตรา 0.152 เซนติเมตร/นาที

2.2.1.4 อัตรา 0.071 เซนติเมตร/นาที

เนื่องจากอัตราเร็วในการให้แรงกดดันตรงต่อความสามารถในการรับแรงกด ดังนั้นเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน จึงเลือกใช้อัตราเร็วในการส่งแรงกดน้อยที่สุดเป็น 0.071 เซนติเมตร/นาที

2.2.2 แทนทดสอบการโค้งงอแบบสามตาแหลง ซึ่งได้ดัดแปลงมาจากแทนทดสอบการโค้งงอแบบสี่ตาแหลง เป็นแทนเหล็กทั้งหัวกดและหัวรับน้ำหนัก ซึ่งได้แสดงชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไว้ดังนี้

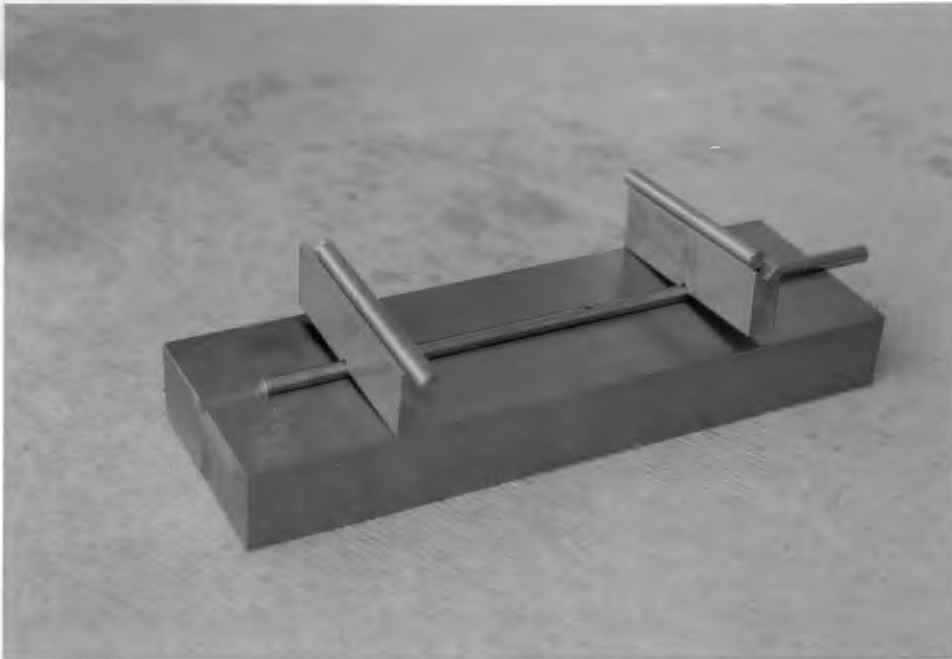
ภาพ 1 แสดงส่วนประกอบของแทนหัวกดตัวอย่าง



2.2.2.1 ขนาดแทนกดน้ำหนักซึ่งเป็นแทน สี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 7 X 10 X 2.5 เซนติเมตร และได้เจาะรูรูปตัว วี ไว้ตามแนวยาวของแทนและใช้เหล็กทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร เป็นเพลากลาง ซึ่งใช้เป็นหัวกดตัวอย่างในการวิจัย



ภาพ 2 แสดงส่วนประกอบของแท่นรับน้ำหนักรัดตัวอย่าง



2.2.2.2 ขนาดแท่นรับน้ำหนักซึ่งเป็นแท่น สี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 10 X 30 X 3.7 เซนติเมตร และได้เจาะรูรูปตัว วี ตามแนวยาวของแท่นและใช้เหล็กทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร เป็นเพลากลางสำหรับวางแท่นรับน้ำหนักกวด ซึ่งมีอยู่ 2 ชั้น แต่ละชั้นมีขนาด 2 X 10 X 2.5 เซนติเมตร และเจาะรูตัววี ในแนวขวาง ด้านล่างและในแนวยาวด้านบน ตามแนวศูนย์กลางโดยมีเหล็กทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร วางอยู่บนรูตัววี และทำท่อน้ำที่เป็นหัวรับน้ำหนักกวด

2.2.2.3 อุปกรณ์วัดน้ำหนักกวด ซึ่งสามารถอ่านค่าน้ำหนักกวดได้ในช่วงที่เหมาะสมกับตัวอย่างที่กำลังทดสอบ

## 2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาเรื่องมอดูลัสความยืดหยุ่น

2.3.1 ออสซิลโลสโคป ( Oscilloscope ) ซึ่งสามารถแยกแยะคลื่นที่ระดับความถี่ 60 เมกกะเฮิรตซ์ ( MHz )

2.3.2 เครื่องกำเนิดความถี่ คลื่นอัลตราซาวด์

2.3.3 เครื่องขยายสัญญาณ

2.3.4 หัวส่งและรับ ความถี่คลื่นอัลตราซาวด์

2.3.5 กล้องโพลาไรซ์ สำหรับถ่ายภาพสัญญาณจากหน้าจอของออสซิลโลสโคป

## 2.4 อุปกรณ์ประกอบอื่น ๆ

2.4.1 เตาเผาไฟฟ้าขนาด 2 ลูกบาศก์ฟุต ที่สามารถเผาได้ถึง  $1250^{\circ}\text{C}$  และเตาเผาไฟฟ้าขนาด 1 ลูกบาศก์ฟุต ที่สามารถเผาได้ถึง  $1100^{\circ}\text{C}$  โดยมีความละเอียดสุด  $\pm 5^{\circ}\text{C}$

2.4.2 เวอร์เนียร์

2.4.3 เครื่องชั่งระบบคอมพิวเตอร์

2.4.4 ตะแกรงคัดขนาดมีจำนวนช่อง 45 ช่องต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว

2.4.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสกนนิ่ง ( Scanning electron microscope )

2.4.6 ไมโครมิเตอร์

2.4.7 เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท

## 3. วิธีดำเนินการ

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ได้แบ่งแยกกลุ่มของการศึกษาตามลำดับขั้นของสมบัติทางกายภาพ ( Physical properties ) ที่จำเป็นต้องทราบ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการที่จะศึกษาได้อย่างเป็นขั้นเป็นตอน ดังนี้คือ

ตอนที่ 1 ศึกษาสมบัติเฉพาะของดินคอมพาวด์-เคลย์

ตอนที่ 2 ศึกษาสมบัติก่อนการเผาเคลือบของดินคอมพาวด์-เคลย์

ตอนที่ 3 ศึกษาสมบัติภายหลังจากการเผาเคลือบของดินคอมพาวด์-เคลย์

### ตอนที่ 1 สมบัติเฉพาะของดินคอมพาวด์-เคลย์

ในตอนนี้จะได้ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของดินคอมพาวด์-เคลย์ ก่อนที่จะได้ไปทำการศึกษาถึงสมบัติภายหลังการเผาดิบ ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการดำเนินการในตอนต่อ ๆ ไป โดยทดสอบสมบัติต่อไปนี้คือ

1. ปริมาณน้ำเฉลี่ย ( The average water content ) ที่ดินคอมพาวด์-เคลย์ ต้องการ เพื่อคืนความเหนียว
2. ค่าการหดตัวเฉลี่ยเมื่อแห้ง ( The average shrinkage ) ของดินคอมพาวด์-เคลย์
3. ค่าการสูญเสียน้ำเฉลี่ย ( The average water loss ) ของดินคอมพาวด์-เคลย์
4. ลักษณะของ ฝู ดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งแต่ละสมบัติมีวิธีการศึกษาดังต่อไปนี้

1. วิธีศึกษาปริมาณน้ำเฉลี่ย ที่ดินคอมพาวด์-เคลย์ ต้องการเพื่อคืนความเหนียว

1.1 นำดินเหนียวคอมพาวด์-เคลย์ ประมาณ 500 กรัม มารีดเป็นแผ่นบางที่มีความหนาประมาณ 0.3-0.5 เซนติเมตร แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

1.2 นำตัวอย่างที่เตรียมได้จาก 1.1 ไปเข้าอบที่ 120 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

1.3 นำดินที่อบแล้วมาบดแล้วคัดขนาด ด้วยตะแกรงที่มีความถี่ของจำนวนช่อง 45 ช่องต่อพื้นที่ 1 ตารางนิ้ว

1.4 ชั่งน้ำหนักของดินในข้อ 1.3 มาจำนวนหนึ่งประมาณ 250 กรัม แล้วเกลี่ยดินออกเป็นชั้นบาง ๆ จากนั้นก็ค่อย ๆ เติมน้ำกลั้ลงบนผิวหน้าของดินและเกลี่ยให้เข้ากัน จนดินมีความเหนียวเหมือนกับดินตอนต้น (น้ำ 20 %) ทำการบันทึกปริมาณน้ำที่ใช้ไปบนหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{cm}^3$ ) และถ้าหากไม่ได้ใช้น้ำกลั้น ก็จะต้องทำการหาความหนาแน่นของน้ำที่ใช้ก่อนด้วย

1.5 ทำการคำนวณค่าความต้องการน้ำเพื่อคืนความเหนียวดังสมการที่ 1

$$WC = V / M \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ WC คือ ค่าความต้องการน้ำเพื่อคืนความเหนียว ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อกรัม ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )

V คือ ปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อคืนความเหนียวให้แก่ดิน

M คือ น้ำหนักดินแห้งที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้ว

1.6 ทำการทดสอบซ้ำจากข้อ 1.1 ถึง 1.5 จำนวน 5 ครั้ง แล้วทำการหาปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ ดินคอมพาวด์-เคลย์ ต้องการเพื่อคืนความเหนียว

2. วิธีการศึกษาสำหรับการหดตัวเฉลี่ยเมื่อแห้งของดินคอมพาวด์-เคลย์

2.1 ขึ้นรูปดินเหนียวคอมพาวด์-เคลย์ โดยวิธีอัดลงแบบบุนพลาสติกเตอร์ ขนาด  $5.08 \times 5.08 \times 0.64$  เซนติเมตร ( จากการทดลองพบว่า ขนาดดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพที่ทำการศึกษานการวิจัย และเพื่อความประหยัดตลอดจนป้องกันการโค้งงอที่มุมของตัวอย่าง อันเนื่องมาจากการอัดขึ้นรูปด้วยมือ ) จำนวน 90 ตัวอย่าง

2.2 วัสดุลักษณะแก่ตัวอย่างแต่ละขึ้นที่ขึ้นรูปเสร็จ พร้อมทั้งกดตัวอย่างให้เป็นร่องด้วยใบเลื่อยเหล็กยาว 3 เซนติเมตร ลึกลงใบ 0.3 เซนติเมตร

2.3 ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 2 วัน แล้วบันทึกค่าความยาวร่องที่วัดได้ โดยใช้ตัวอย่างในข้อ 2.2 ที่นำแตกขารูตามทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเมื่อแห้งที่อุณหภูมิห้อง (Green shrinkage) ดังสมการที่ 2

$$GS = ( ( L_0 - L_1 ) / L_0 ) \times 100 \% \dots\dots(2)$$

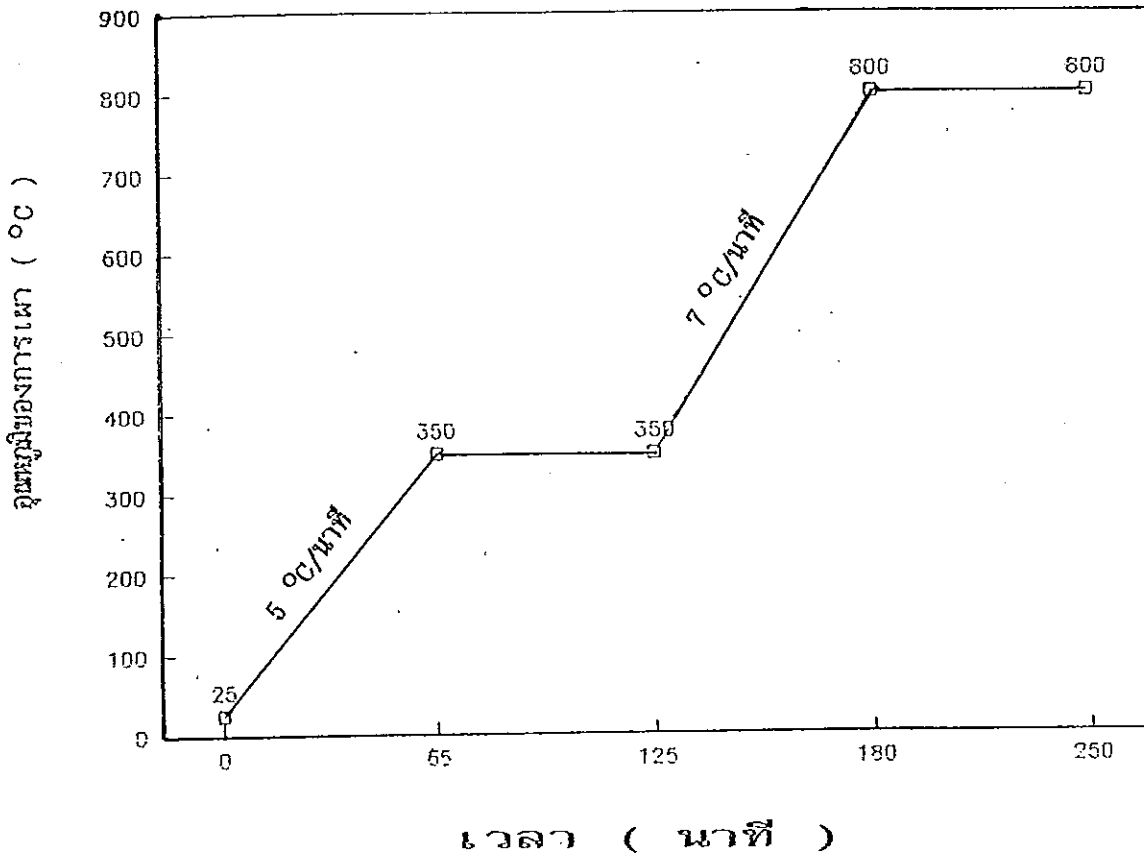
เมื่อ GS คือ เปอร์เซ็นต์การหดตัวเมื่อแห้งที่อุณหภูมิห้อง

$L_0$  คือ ความยาวของร่องที่กดไว้ตอนแรก

$L_1$  คือ ความยาวของร่องที่วัดได้เมื่อแห้งที่อุณหภูมิห้อง

2.4 นำตัวอย่างในข้อ 2.3 ที่ไม่แตกขารุด เข้าเผาที่อุณหภูมิ 800 °C  
 ดังนี้ขั้นตอนการเผาในภาพ 3

ภาพ 3 แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C



จากการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ดินคอมพาวด์-เคลย์มักจะแตกที่อุณหภูมิใน

ช่วง 350-400 °C โดยเฉพาะหากทำการเผาด้วยอัตราการให้ความร้อนสูงกว่า 5°C/นาที ดังนั้นในการวิจัยจึงเลือกเงื่อนไขในการให้อัตราความร้อน 5°C/นาที ในช่วงต้นและขึ้นไปที่ 350 °C ในการเผาทุกครั้งส่วนเหตุผลในการกำหนด เวลาการขึ้นไฟเป็น 1 ชั่วโมงเนื่องจากเตาเผาต้องใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะ อิ่มตัวประมาณ 5-15 นาที อีกทั้งเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนสม่ำเสมอและ พบว่าไม่มีความเปลี่ยนแปลงแม้จะขึ้นไฟนานกว่านี้ จากนั้นเลือกเงื่อนไขในการให้อัตราความร้อนเป็น 7 °C/นาที ไปจนกระทั่งถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการเผา

เสมอ ทั้งนี้เพราะพบว่า การเผาด้วยอัตราที่ช้ากว่านี้ไม่เป็นประโยชน์และหากเผาเร็วกว่านี้สำหรับเตาที่ใช้ในการวิจัย จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอและยีนไฟที่อุณหภูมิสุดท้ายเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เข้าสู่สภาวะอิมตัว

โดยในการเผาให้วางตัวอย่างที่ระดับความสูงของเตา คงที่ทุกครั้งที่เผา โดยจัดวางตัวอย่างชิดกันแนวดิ่งเสมอ สำหรับการเผาในทุกอุณหภูมิของการวิจัยนี้ ทั้งนี้ก็เพื่อกำจัดตัวแปรอื่น ๆ ที่ไม่สนใจให้น้อยลงหลังจากเผาเสร็จทุกครั้งก็จะปล่อยให้เตาเย็นตัวลงเอง และสามารถที่จะเปิดเตาเพื่อนำตัวอย่างออกได้เมื่ออุณหภูมิห้องเตาต่ำกว่า 150 °C ทั้งนี้เพื่อมิให้เป็นอันตรายต่อการทดลองและป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับตัวเตาเผาไฟฟ้า

2.5 นำตัวอย่างออกมาวัดค่าความยาวของร่อง ที่กดไว้ในตอนแรกแล้ว บันทึกค่า เพื่อนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเมื่อแห้งภายหลังการเผา ( Dry shrinkage ) ดังสมการที่ 3

$$DS = ( ( L_1 - L_2 ) / L_1 ) \times 100 \% \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ DS คือ เปอร์เซ็นต์การหดตัวเมื่อแห้งภายหลังการเผา

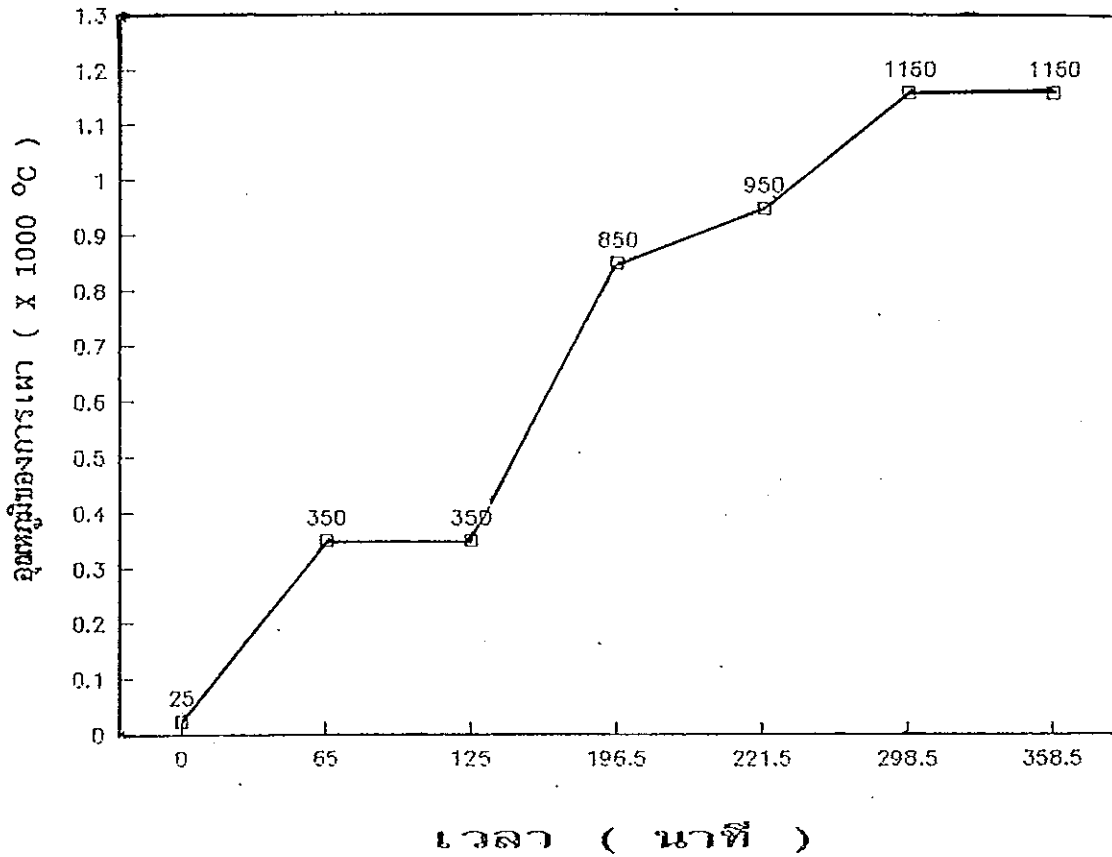
$L_1$  คือ ความยาวของร่องที่วัดได้เมื่อแห้งที่อุณหภูมิห้อง

$L_2$  คือ ความยาวร่องที่วัดได้ภายหลังการเผาแล้ว

2.6 นำตัวอย่างในข้อ 2.4 เข้าเผาที่อุณหภูมิ 1160 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิแรกของเนื้อดินแบบชนิดนี้ที่จะเกิดเนื้อแก้วขึ้นบนเนื้อผลิตภัณฑ์ โดยขั้นตอนการเผา

ได้แสดงไว้ดังภาพ 4

ภาพ 4 แสดงขั้นตอนการเผาที่ อุณหภูมิ 1160 °C



จากภาพ 4 ยังคงเป็นการเผาด้วยอัตราการให้ความร้อน 5°C/นาที และ 7°C/นาที เช่นเดิมแต่จากการตรวจสอบอุณหภูมิภายในเตาเผาที่แท้จริงพบว่า อัตราความร้อนที่เพิ่มขึ้นไม่เป็นไปตามที่ตั้งไว้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 850 °C ขึ้นไปซึ่ง อาจเนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อม ทำให้อัตราความร้อนที่ เพิ่มขึ้นจริงลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า

ในช่วง 350-850 °C มีอัตราการให้ความร้อนเป็น 7 °C/นาที

ในช่วง 850-950 °C มีอัตราการให้ความร้อนประมาณ 4 °C/นาที

ในช่วง 950-1160 °C มีอัตราการให้ความร้อนประมาณ 3 °C/นาที

ในช่วง 1160-1250 °C มีอัตราการให้ความร้อนประมาณ 2 °C/นาที

โดยหลักในการขึ้นไฟก็ยังถือปฏิบัติเช่นเคยคือ ที่ 350 °C และอุณหภูมิสุดท้าย เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

โดยการจัดเรียงตัวอย่างในการเผาเป็นแบบเดียวกับ ข้อ 2.4 ซึ่งในทางปฏิบัตินี้มักจะให้ความสำคัญต่อการหดตัวให้มากที่สุดท้ายของการผลิตแต่จากการทดลองพบว่าแม้จะเผาสูงกว่า 1160 °C ก็ไม่หดตัวเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำการเผาที่ 1160 °C แทนการเผาที่อุณหภูมิ 1250 °C

2.7 นำตัวอย่างออกมาวัดค่าความยาวของร่อง ที่กดไว้ในตอนแรกแล้ว บันทึกค่า เพื่อเอาไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเมื่อแห้งภายหลังการเผา 1160 °C ดังสมการที่ 4

$$FS = ( ( L_2 - L_3 ) / L_2 ) \times 100 \% \dots\dots\dots(4)$$

- เมื่อ FS คือ เปอร์เซ็นต์การหดตัวหลังเผาเคลือบ
- L<sub>2</sub> คือ ความยาวร่องที่วัดได้ภายหลังการเผาดิบแล้ว
- L<sub>3</sub> คือ ความยาวร่องที่วัดได้ภายหลังการเผาเคลือบแล้ว

2.8 คำนวณหาค่าการหดตัวสุทธิ ( Net shrinkage ) ของเนื้อดินในคอมพาวด์-เคลย์ ดังสมการที่ 5

$$NS = ( ( L_0 - L_3 ) / L_0 ) \times 100 \% \dots\dots\dots(5)$$

- เมื่อ NS คือ เปอร์เซ็นต์การหดตัวสุทธิของดินคอมพาวด์-เคลย์
- L<sub>0</sub> คือ ความยาวของร่องที่กดไว้ตอนแรก
- L<sub>3</sub> คือ ความยาวร่องที่วัดได้ภายหลังการเผาเคลือบแล้ว

2.9 คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวสุทธิเฉลี่ยของตัวอย่าง



### 3. วิธีการศึกษาค่าการสูญเสียน้ำเฉลี่ยของดินคอมพาวด์-เคลย์

3.1 ขี้รูปดินเหนียวคอมพาวด์-เคลย์ โดยวิธีอัดลงแบบบุงพลาสติกเตอร์ซึ่งมีขนาด  $5.08 \times 5.08 \times 0.64$  เซนติเมตร จำนวน 30 ตัวอย่าง

3.2 ให้นำสัญลักษณ์แก่ตัวอย่างแต่ละชิ้น แล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องซึ่งใช้เวลา 2 วัน จากนั้นชั่งน้ำหนักแห้งของตัวอย่าง ด้วยเครื่องชั่งที่มีค่าละเอียดสุด  $\pm 0.01$  กรัม แล้วบันทึกค่าน้ำหนัก

3.3 นำตัวอย่างในข้อ 3.2 เข้าเผาที่  $800^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงไว้ในภาพ 3

3.4 นำตัวอย่างออกจากเตาเผา ภายหลังจากที่อุณหภูมิในห้องเตาต่ำกว่า  $150^{\circ}\text{C}$  เพื่อนำไปชั่งน้ำหนักภายหลังการเผาแล้ว ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก

3.5 คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำของดินคอมพาวด์-เคลย์ ดังแสดงในสมการที่ 6

$$WL = ((d_1 - D) / D) \times 100 \% \dots\dots\dots(6)$$

เมื่อ WL คือ ค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำของดินคอมพาวด์-เคลย์

$d_1$  คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่างก่อนการเผา

D คือ ค่าน้ำหนักแห้งของตัวอย่างภายหลังการเผาที่  $800^{\circ}\text{C}$

3.6 คำนวณค่าการสูญเสียน้ำเฉลี่ยของตัวอย่าง

### 4. วิธีการศึกษาลักษณะของ สี ดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ถ่ายภาพตัวอย่าง ดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่เผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 500, 650, 800 และ  $1100^{\circ}\text{C}$  เพื่อตรวจสอบลักษณะเกี่ยวกับ สี ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อดินถูกเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของ วัตถุเดิมที่เป็นส่วนผสมของดินคอมพาวด์-เคลย์

## ตอนที่ 2 สมบัติก่อนการเผาเคลือบของดินคอมพาวด์-เคลย์

ได้ทำการศึกษาสมบัติของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่ผ่านเอกซเรย์การเผา มาต่ำกว่า 1250 °C ก่อนที่จะนำไปทำการชุบเคลือบและเผาเคลือบ 1250 °C ต่อไป โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติต่าง ๆ ที่จะเป็ประโยชน์ต่อการผลิตหรือ การพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ อีกทั้งเพื่อให้ทราบถึงสมบัติของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่ ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งสมบัติเหล่านั้นได้แก่

1. การศึกษาความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ
2. การศึกษาความแข็งแรง
3. การศึกษาค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น

### 1. วิธีการศึกษาความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของดินคอมพาวด์-เคลย์

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาถึงเทคนิคใหม่ ๆ ในการศึกษาหาค่าความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้รับจากการศึกษาในแต่ละวิธีว่ามี ข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบ กันอย่างไรโดยศึกษาด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ

1. วิธีการต้ม ( Boiling method ) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานกำหนด โดย เอเอสทีเอ็ม ( ASTM, American Standard for Testing of Material )

---

2. วิธีสุญญากาศ ( Vacuum method )

3. วิธีการแช่น้ำ ( Submersing method )

---

4. ศึกษาความพรุนตัวของผลิตภัณฑ์โดยภาพถ่ายจาก กล้องจุลทรรศน์

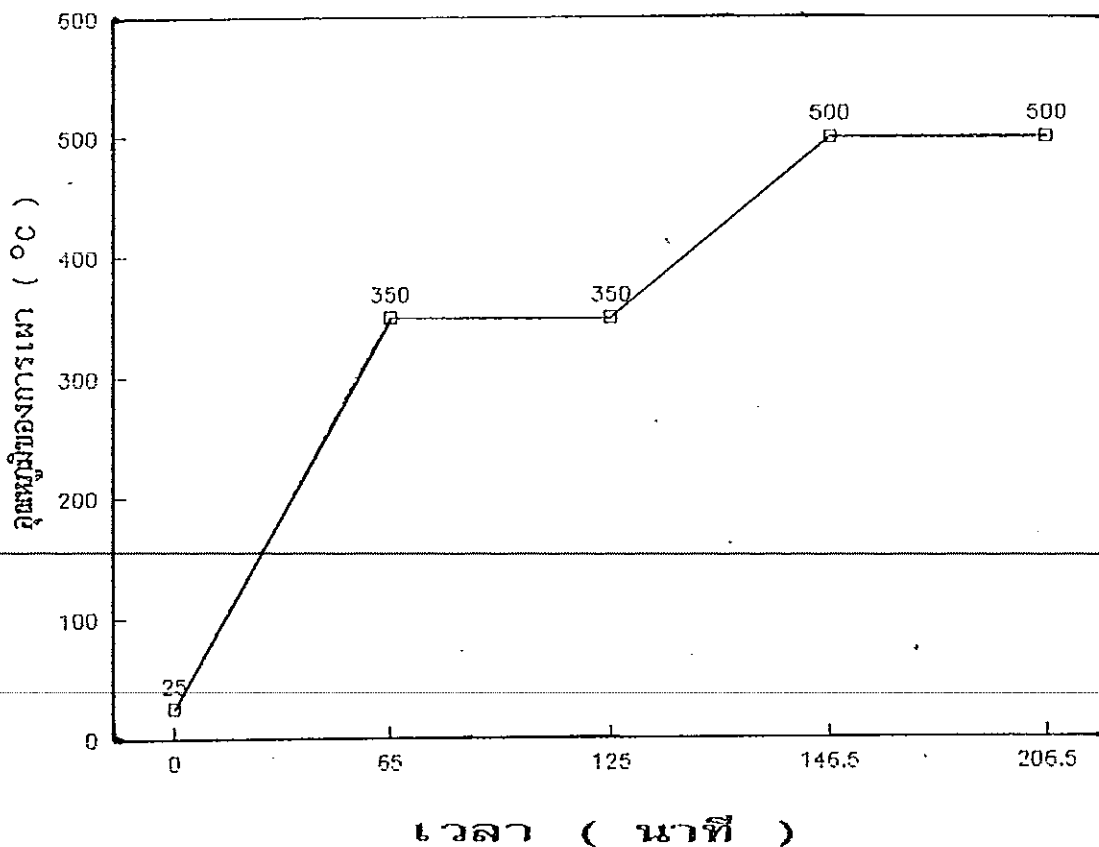
อีเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง

## 1.1 วิธีศึกษาความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำโดยวิธีการต้ม

1.1.1 นำดินเหนียวคอมพาวด์-เคลย์ มาขึ้นรูป โดยการอัดแบบในแบบรูปพลาสติกที่มีขนาด  $5.08 \times 5.08 \times 0.64$  เซนติเมตร เป็นจำนวน 240 แผ่น แล้วแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ตามอุณหภูมิของการเผาที่อุณหภูมิ 500 650 800 และ 1160 °C กลุ่มละ 60 แผ่นโดยในจำนวนนี้แบ่งไปทดสอบความพรุนตัว 30 แผ่นและทดสอบการดูดซึมน้ำ 30 แผ่น

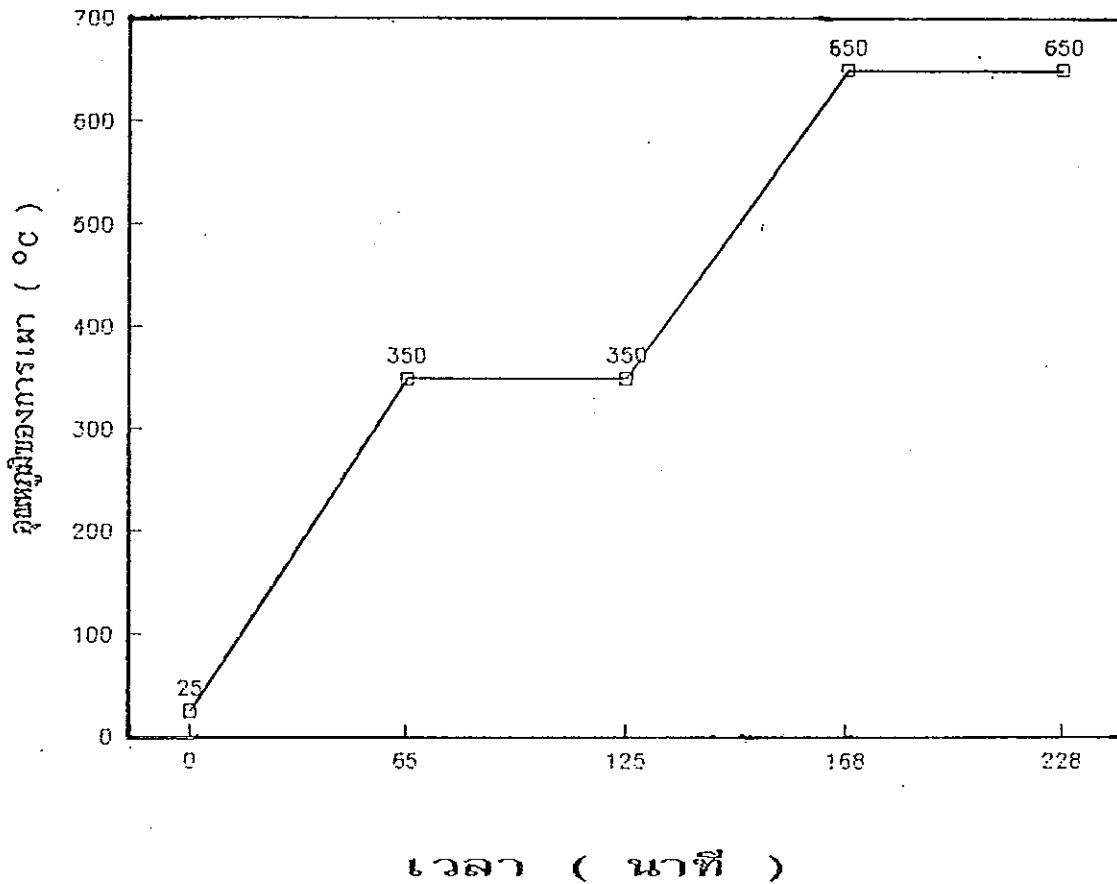
1.1.2 ให้สัญลักษณ์แก่ตัวอย่างทุก ๆ แผ่นตามกลุ่มของอุณหภูมิของการเผาและประเภทของสมบัติที่จะทดสอบ แล้วนำไปตั้งไว้ในที่ร่มให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นก็นำเข้าเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังแสดงในภาพ 5-6 ดังนี้

ภาพ 5 แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 500 °C



ในทุก ๆ ครั้งของการเผาที่อุณหภูมินี้ จะใช้ขั้นตอนของการเผาเป็นเช่นนี้เสมอในการวิจัยครั้งนี้

ภาพ 6 แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 650 °C



ส่วนการเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 1160 °C ก็ให้เผาเช่นเดียวกัน

กับที่ได้แสดงขั้นตอนการเผาไว้แล้วดัง ภาพ 3 และ 4

1.1.3 นำตัวอย่างที่เผาเรียบร้อยแล้วออกจากเตาภายหลังจาก

ที่ได้ปล่อยให้อุณหภูมิตั้งในห้องเตาลดลงเองจนต่ำกว่า 150 °C แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

แห้งทันทีที่ตัวอย่างเย็นตัวลงพอที่จะหยิบจับได้สะดวก บันทึกน้ำหนัก

1.1.4 นำตัวอย่างทั้งหมดไปต้ม ในน้ำกลั่นซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะ

ขนาดบรรจุประมาณ 4 ลิตร (เพื่อให้เพียงพอกับตัวอย่าง 30 ตัวอย่าง) โดยวาง

ตัวอย่างน้ำให้ยู่ติดกันภาชนะและน้ำให้เชื่อมทับกัน ต้มน้ำไปจนเดือด วนขณะต้ม

ต้องระวังอย่าให้ระดับน้ำอยู่ต่ำกว่าผิวหน้าของตัวอย่างที่กำลังต้มอยู่ เมื่อน้ำเริ่ม

เดือดให้จับเวลานับแต่นั้นไป 2 ชั่วโมง (มาตรฐาน ASTM) แล้วจึงหยุดต้ม

1.1.5 ปล่อยตัวอย่างให้แช่อยู่ในน้ำ เช่นนั้นเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 12 ชั่วโมง แล้วทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างในน้ำ บันทึกน้ำหนัก

1.1.6 นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำแล้วชั่งน้ำหนักให้หมด ๆ ด้วยผ้าฝ้าย 100% แล้วทำการชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนัก

1.1.7 นำค่าที่บันทึกได้สำหรับแต่ละตัวอย่างมาทำการคำนวณหาค่า ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของตัวอย่างดังสมการที่ 7 และ 8

$$P = (( W-D ) / ( W-S )) \times 100 \% \dots\dots\dots(7)$$

$$A = (( W-D ) / D ) \times 100 \% \dots\dots\dots(8)$$

เมื่อ P คือ เปอร์เซ็นต์ความพรุนตัวของตัวอย่าง

A คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของตัวอย่าง

D คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่างก่อนการต้ม

S คือ น้ำหนักที่ชั่งภายในน้ำของตัวอย่าง ภายหลังจากการต้มและแช่ในน้ำ มาแล้วนานกว่า 12 ชั่วโมง

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ชั่งภายหลังจากการต้ม และปล่อยให้ดูดซึมน้ำ มาแล้วนานกว่า 12 ชั่วโมง

นอกจากนี้แล้วยังสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้อีกด้วยเช่น ค่าความถ่วงจำเพาะ ( Specific gravity ) และค่าความหนาแน่นอัตรา

( Bulk density ) ดังแสดงความสัมพันธ์ไว้ในสมการที่ 9 และ 10

$$T = D / ( D-S ) \dots\dots\dots(9)$$

$$B = D / ( W-S ) \dots\dots\dots(10)$$

เมื่อ T คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่าง

B คือ ค่าความหนาแน่นแอ็ครวมของตัวอย่าง กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

D คือ น้ำหนักแห้งของตัวอย่างก่อนการต้ม (กรัม)

S คือ น้ำหนักที่ชั่งน้ำหนักของตัวอย่าง ภายหลังจากต้มและแช่น้ำมาแล้ว นานกว่า 12 ชั่วโมง (กรัม)

W คือ น้ำหนักของตัวอย่าง ที่ชั่งภายหลังจากต้มและปล่อยให้ตัวอย่าง คูดซึมน้ำมาแล้วนานกว่า 12 ชั่วโมง (กรัม)

## 1.2 วิธีศึกษาความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำโดยเทคนิคสุญญากาศ

1.2.1 นำดินเหนียวคอมพาวด์-เคลย์ มาขึ้นรูป โดยการอัดแบบใน ปูนพลาสติก ที่มีขนาด  $5.08 \times 5.08 \times 0.64$  เซนติเมตร เป็นจำนวน 240 แผ่น แล้วแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ( ตามอุณหภูมิของการเผาไหม้ ซึ่งทำการเผา ที่  $500 \ 650 \ 800$  และ  $1160 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ) กลุ่มละ 60 แผ่น เพื่อนำไปทดสอบ ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ

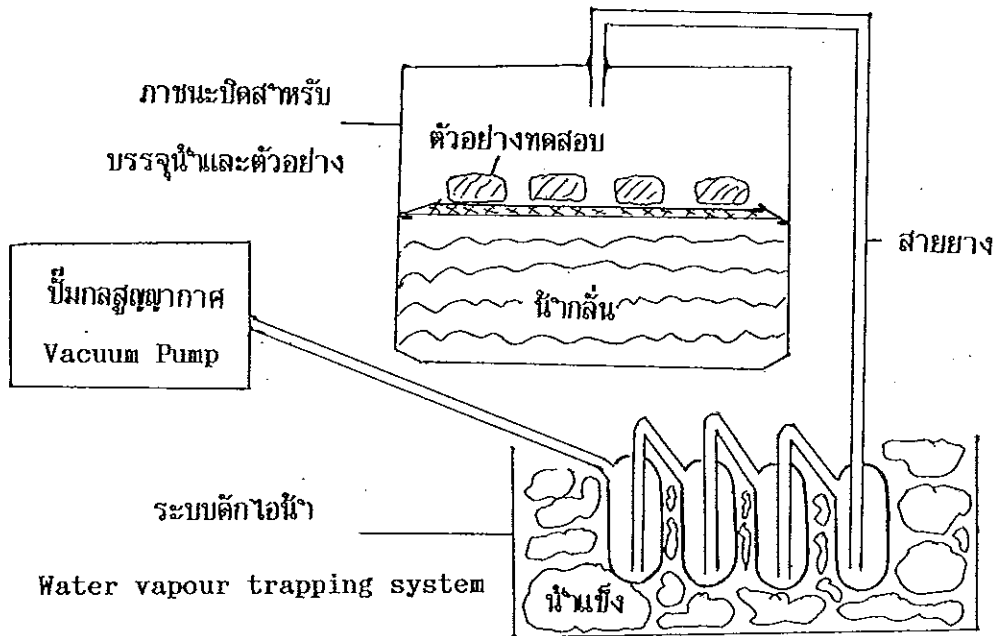
1.2.2 ให้สัญลักษณ์แก่ตัวอย่างทุก ๆ แผ่นตามกลุ่มของอุณหภูมิ ของ การเผาไหม้และประเภทของสมบัติที่จะทดสอบ แล้วนำไปตั้งไว้ในที่ร่มให้แห้งเป็น เวลา 2 วัน จากนั้นก็นำเข้าเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เช่นเดียวกับวิธีต้ม

1.2.3 นำตัวอย่างที่เผาไหม้เรียบร้อยแล้วออกจากเตาภายหลังจาก ที่ได้ปล่อยให้อุณหภูมิลดลงจนต่ำกว่า  $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแห้งทันทีที่ตัวอย่างเย็นตัวลงพอที่จะหยิบจับได้สะดวกแล้วบันทึกน้ำหนัก

1.2.4 นำตัวอย่างทั้งหมดเข้าบรรจุในภาชนะสุญญากาศ ซึ่งมีน้ำอยู่ในตอนล่าง โดยจัดวางตัวอย่างไม่ให้ซ้อนกัน ตั้งแสดงในภาพ 7 แล้วปิดอากาศในภาชนะสุญญากาศให้มีความดันอากาศภายในประมาณ 300 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งทำให้ น้ำเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า เดิม ( อุณหภูมิประมาณ  $38-44 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ) เมื่อไฟ เริ่มเดือดแล้ว 15 นาที ให้ปิดปั๊มสุญญากาศนั้นเสียจากนั้นกระแทกชั้นวางตัวอย่าง เพื่อให้ตัวอย่างตกลงไปในน้ำ

1.2.5 ปล่อยให้ตัวอย่างแช่อยู่ในน้ำเช่นนี้เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างในน้ำแล้วบันทึกน้ำหนัก

ภาพ 7 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ทดลอง โดยวิธีสูญญากาศ



1.2.6 นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำแล้วซับให้หมาด ๆ ด้วยผ้าฝ้าย 100% แล้วทำการชั่งน้ำหนัก และบันทึกน้ำหนัก

1.2.7 ทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ ต่างๆ ดังแสดงไว้ในสมการที่ 7 และ 8

1.3 วิธีศึกษาความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำโดยเทคนิคการแช่น้ำ

1.3.1 นำดินเหนียวคอมพาวด์-เคลย์ มาขึ้นรูป โดยการอัดแบบใน

แบบรูปพลาสติกเทอร์รี่ ที่มีขนาด  $5.08 \times 5.08 \times 0.64$  เซนติเมตร เป็นจำนวน 240 แผ่น แล้วแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ( ตามอุณหภูมิของการเผาที่  $500$   $650$   $800$  และ  $1160$   $^{\circ}\text{C}$  ) กลุ่มละ 60 แผ่นเพื่อนำไปทดสอบความพรุนตัว และทดสอบการดูดซึมน้ำ

1.3.2 ให้สัญลักษณ์แก่ตัวอย่างทุก ๆ แผ่นตามกลุ่มของอุณหภูมิ ของการเผาและประเภทของสมบัติที่จะทดสอบ แล้วนำไปฝังไว้ในที่ร่มให้แห้งเป็นเวลา 2 วัน จากนั้นก็เอาเข้าเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ เช่นเดียวกับวิธีต้ม

1.3.3 นำตัวอย่างที่เผาดิบ เรียบร้อยแล้วออกจากเตาภายหลังจาก  
ที่ได้อบสลายให้อุณหภูมิในห้องเตาลดลงจนต่ำกว่า  $150^{\circ}\text{C}$  แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง  
และบันทึกน้ำหนัก

1.3.4 นำตัวอย่างทั้งหมดมาบดเข้าในโถปั่น ซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะ  
ขนาด 4 ลิตร โดยจัดวางตัวอย่างอย่าให้ซ้อนกันและต้องไม่วางติดกันภาชนะด้วย  
ทั้งนี้เพื่อป้องกันเชื้อผิดพลาดซึ่งอาจจะเกิดเนื่องจากตัวอย่างไม่ได้สัมผัสกับน้ำอย่าง  
ทั่วถึง ทั้งนี้ให้เคยใช้ตะแกรงสวดต่อกันเป็นชั้นๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการจัดเรียงตัวอย่าง

1.3.5 แخذตัวอย่างให้อยู่ในน้ำเช่นนี้ นาน 12 ชั่วโมงแล้วทำการ  
ชั่งน้ำหนักตัวอย่างในน้ำ และบันทึกน้ำหนัก

1.3.6 นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำแล้วซับให้หมาด ๆ ด้วยผ้าสำย 100%  
แล้วทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนัก

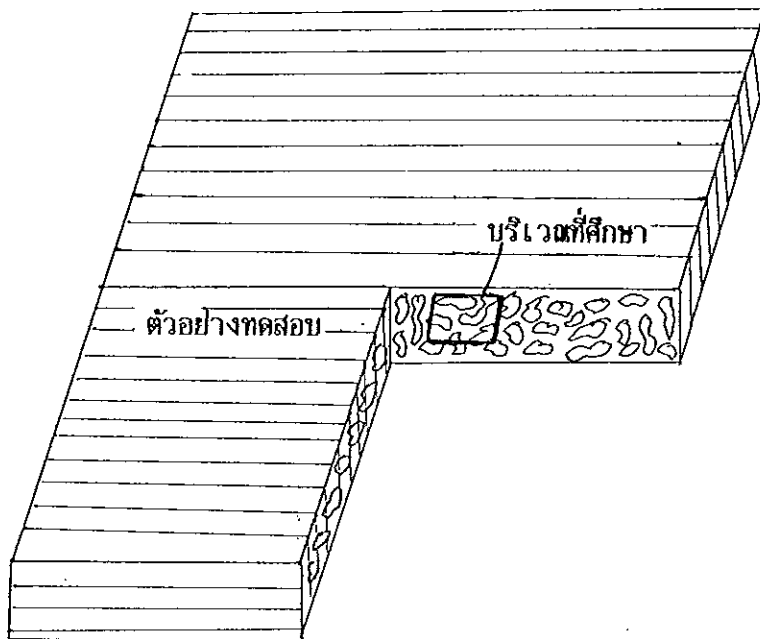
1.3.7 ทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ ต่างๆ ดังแสดงไว้ในสมการ  
ที่ 7 และ 8

1.4 วิธีศึกษาความพรุนตัวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงนิ่ง

1.4.1 นำตัวอย่างที่ต้องการศึกษาอุณหภูมิละ 10 ชิ้น ทำการเลือก  
ตัวอย่างที่ไม่ขรุขระแบบสุ่ม มาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อดูพื้นผิวภาคตัดขวางของ  
ผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในภาพ 8 ซึ่งมีขนาดประมาณ  $0.5 \times 0.5 \times 0.5$  เซนติเมตร  
แล้วนำไปอบที่  $120^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อไม่ให้เกิดไอระเหยของน้ำใน  
ภาชนะแล้วลากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงนิ่ง ทำให้เกิดความเสียหายแก่  
ตัวกล้องได้



ภาพ 8 แสดงภาคตัดขวางของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการศึกษา ความพรุนตัวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแอสแกนนิ่ง



- 1.4.2 นำตัวอย่างที่เตรียมได้ไปจากผิวบริเวณที่ต้องการดูด้วยกล้อง
- 1.4.3 นำเข้าไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแอสแกนนิ่ง
- 1.4.4 ถ่ายภาพบริเวณพื้นผิวที่ทำการศึกษา โดยเลือกภาพที่เป็น

ตัวแทนของกลุ่มตัวอย่างที่ศึกษา

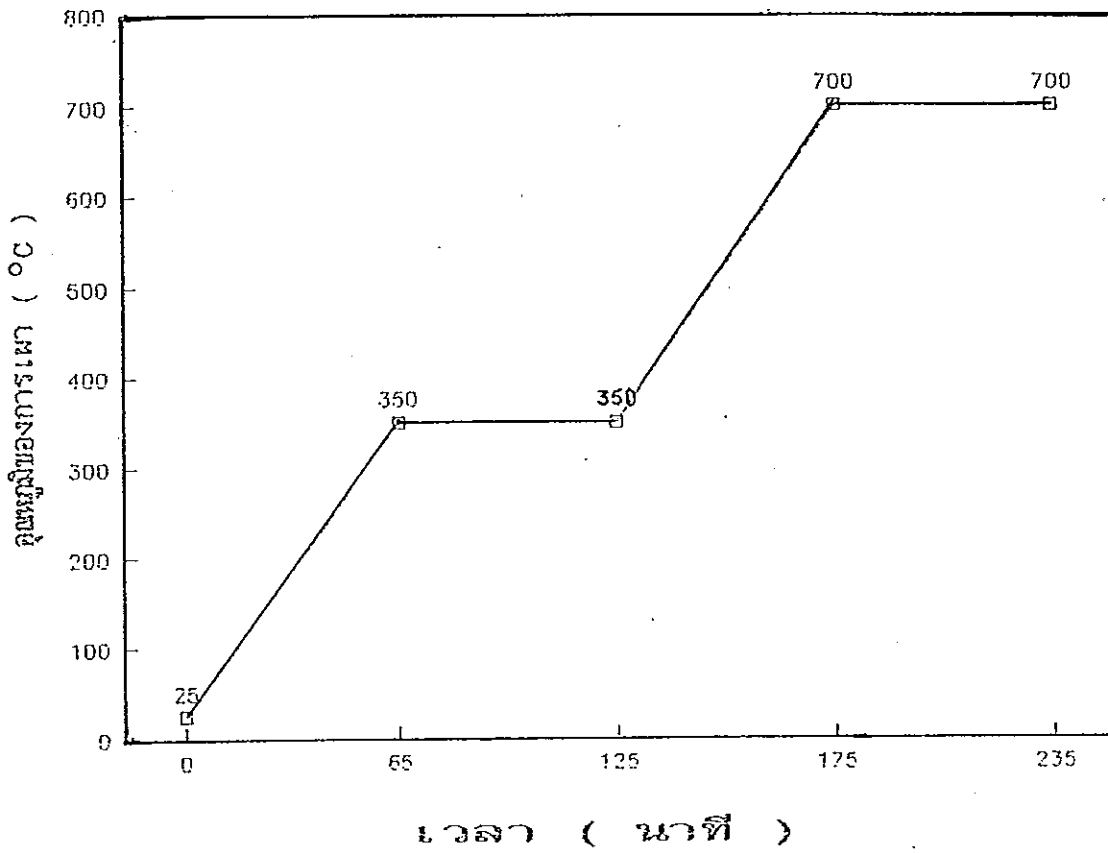
## 2. วิธีศึกษาความแข็งแรงของดินคอมพาวด์-เคลย์

2.1 นำดินเหนียวคอมพาวด์-เคลย์ มาขึ้นรูปโดยการอัดด้วยมือ ในแบบ

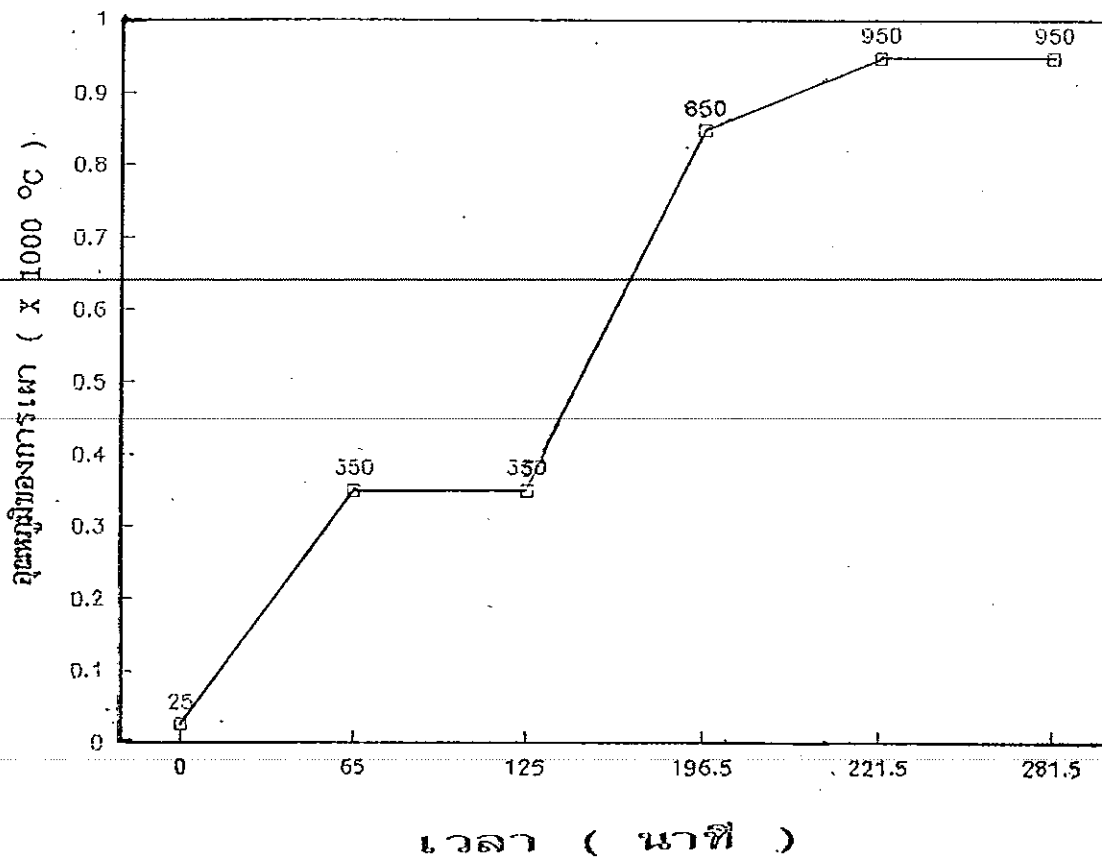
บุรพลาสเตอร์ ที่มีขนาด  $5.08 \times 5.08 \times 0.64$  เซนติเมตร เป็นจำนวน 150 ตัวอย่าง แล้วแบ่งออกเป็นกลุ่ม ๆ ทั้งสิ้น 5 กลุ่ม ๆ ละ 30 ตัวอย่าง

2.2 ให้สัญลักษณ์แก่ตัวอย่างทั้งหมด แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้ คือ 500, 650, 700, 800, 950, และ  $1160^{\circ}\text{C}$  โดยในกลุ่มที่เผาที่ 500, 650, 800, และ  $1160^{\circ}\text{C}$  ก็เผาตามขั้นตอนวิธีดังแสดงไว้ในภาพ 5, 6, 3, และ 4 ตามลำดับส่วนขั้นตอนการเผาที่ 700 และ  $950^{\circ}\text{C}$  แสดงไว้ดังภาพ 9 และ 10 บนเงื่อนไขและขั้นตอนการเผาตามที่ได้กล่าวมาก่อนแล้ว ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์หลังการเผาว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง อย่างไร

ภาพ 9 แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 700 °C

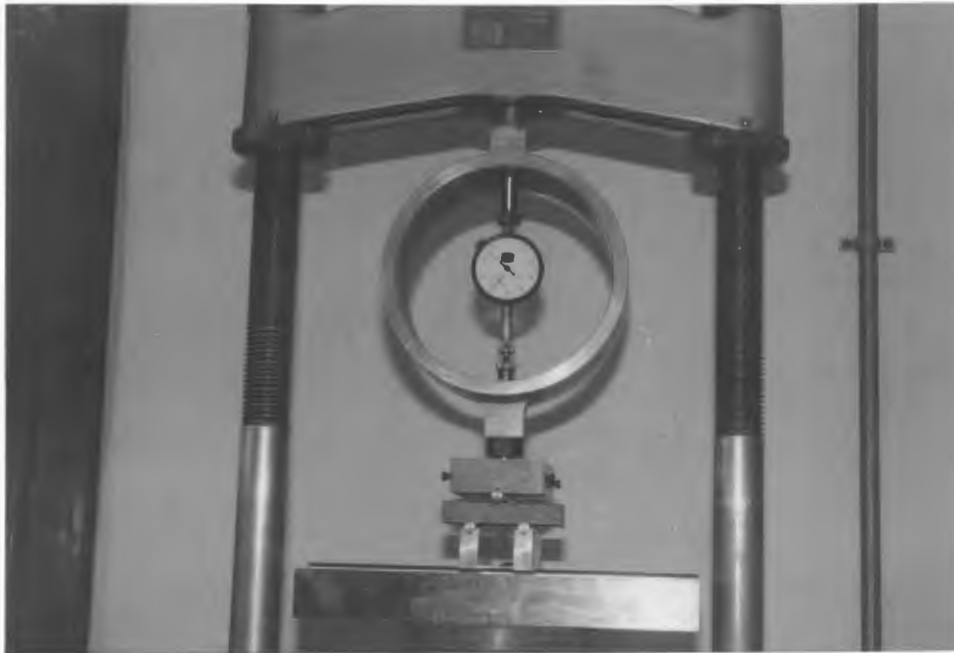


ภาพ 10 แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C



2.3 เมื่อได้ตัวอย่างที่เผาตามอุณหภูมิที่ต้องการศึกษาแล้ว ก็นำไปทดสอบด้วยแทนทดสอบการโค้งงอแบบสามตาแหน่ง ซึ่งได้แสดงภาพขั้นตอนและวิธีการทดสอบไว้ดังภาพ 11

ภาพ 11 แสดงการทดสอบความแข็งแรงด้วยวิธีการโค้งงอแบบสามตาแหน่ง



2.4 ตั้งระยะห่างหัวรับน้ำหนักกดค้ำให้ห่างกัน 4 เซนติเมตร

2.5 ก่อนทำการทดสอบ ต้องวัดค่าความกว้างและความหนาของตัวอย่างทุกชิ้นไว้เสียก่อน ทั้งนี้อาจพบว่าบางตัวอย่างมีการโค้งงอและการหดตัวของด้านกว้างและยาวไม่เท่ากัน ดังนั้นการวัดให้ใช้วิธีสุ่มแล้วหาค่าเฉลี่ยที่เป็นตัวแทนของค่าความกว้างและความหนาของตัวอย่าง โดยวัดด้วยเวอร์เนียร์ บันทึกราคาไว้

2.6 อ่านค่าจากหน้าปัทม์ ในขณะที่ตัวอย่างแตกหักแล้วนำมาแปลงเป็นหน่วยแรงที่กระทำ โดยเปิดเทียบค่าหน่วยแรงกับจำนวนช่องของหน้าปัทม์ขณะที่กดแตกจากคู่มือของอุปกรณ์อ่านค่าหน้าปัทม์คนั้น

## 2.7 ค่ามอดูลัสความแข็งแรงของตัวอย่างได้ดังสมการที่ 11

$$M = 3Pa/(2bd^2) \dots\dots\dots(11)$$

เมื่อ M คือ มอดูลัสการแตกหัก หน่วย ปาสกาล (Pa) หรือ  $N/m^2$

P คือ แรงที่กระทำจตัวอย่างแตกหัก หน่วย นิวตัน (N)

a คือ ระยะห่างของขาจับเข้าหักกด หน่วย เมตร (m)

b คือ ความกว้างของตัวอย่างทดสอบ หน่วย เมตร

d คือ ความหนาของตัวอย่างทดสอบ หน่วย เมตร

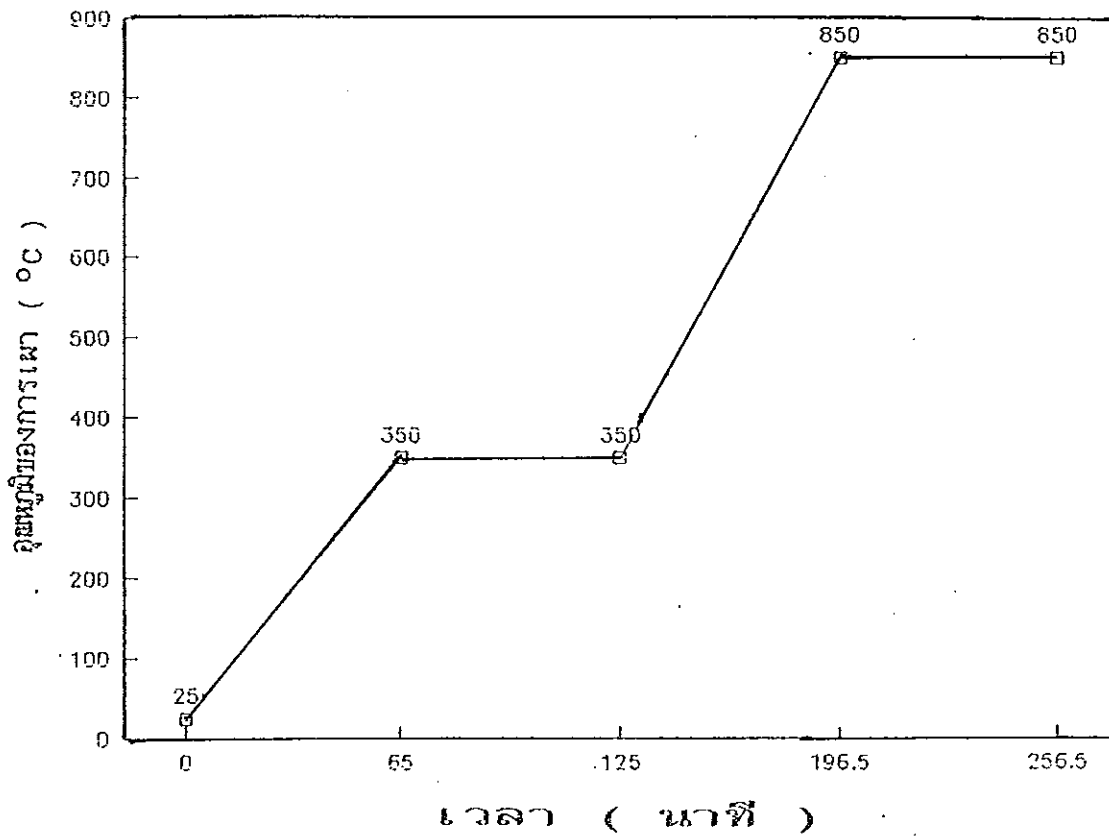
## 2.8 หาค่ามอดูลัสการแตกหักเฉลี่ยของตัวอย่างจากสมการที่ 11

### 3. วิธีศึกษาค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของดินคอมพาวด์-เคลย์

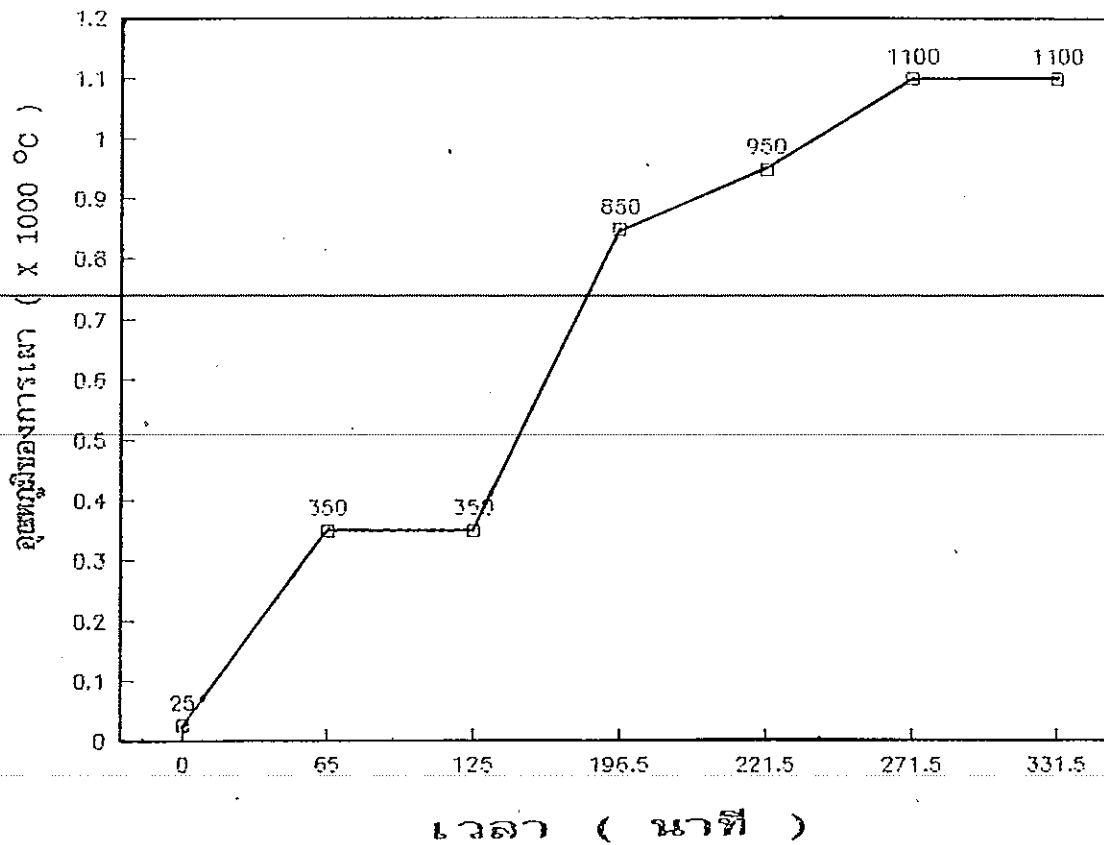
3.1 นำดินเหนียวคอมพาวด์-เคลย์ มาขึ้นรูปด้วยการอัดด้วยมือในแบบ ปูนพลาสติก ขนาด 5.08 X 5.08 X 0.64 เซนติเมตร เป็นจำนวน 210 ตัวอย่างแล้วแบ่งออกเป็น 7 กลุ่ม ๆ ละ 30 ตัวอย่าง

3.2 นำสัญลักษณ์แก่ตัวอย่างทั้งหมด แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้ คือ 500, 650, 700, 800, 850, 1100, และ 1160°C โดยในกลุ่มที่เผาที่อุณหภูมิ 500, 650, 700, 800, และ 1160 °C นั้น ก็เผาดังขั้นตอนการเผาดังที่ได้แสดงไว้ในภาพ 5, 6, 9, 3, และ 4 ตามลำดับส่วนการเผาที่อุณหภูมิ 850 และ 1100°C นั้น เนื่องจากได้พิจารณาความแข็งแรงที่อุณหภูมิอื่นๆ มาแล้วแต่ที่อุณหภูมิช่วง 800 - 1160°C ยังไม่ได้พิจารณาที่อุณหภูมิ 850 และ 1100°C โดยการเผาก็ให้เผาดังขั้นตอนการเผาต่อไปตามเงื่อนไขดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้น

ภาพ 12 แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 850 °C



ภาพ 13 แสดงขั้นตอนการเผาที่อุณหภูมิ 1100 °C



3.3 เมื่อได้ตัวอย่างที่ผ่านการเผาตามอุณหภูมิที่ต้องการศึกษาเรียบร้อยแล้ว ก็ให้นำตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 500, 650, 700, 800, 850 และ 1100°C มาทำการขัดผิวให้เรียบทั้งสองด้าน ด้วยผงอลูมินากับน้ำ เพื่อให้สามารถประกบตัวอย่างเข้ากับทรานสดิวเซอร์ได้สนิท ส่วนตัวอย่างที่เผาที่ 1160°C นั้นเนื่องจากมีความแข็งผิวสูงจึงไม่สามารถขัดผิวได้

3.4 นำตัวอย่างที่ผ่านการขัดผิวนั้นไปอบใส่ในโถอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปวัดความเร็วคลื่นอัลตราซาวด์ต่อไปเพื่อป้องกันความผิดพลาดในการทดลอง เพราะจะกลายเป็นการวัดความเร็วในหลายตัวกลาง

3.5 เมื่อได้ตัวอย่างที่พร้อมจะนำไปทดสอบหาค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นแล้วก็ทำการประกอบอุปกรณ์ต่อไปให้เรียบร้อย ( อุปกรณ์ข้อ 3.5.2-3.5.4 เป็นของบริษัท PAR Scientific instrument )

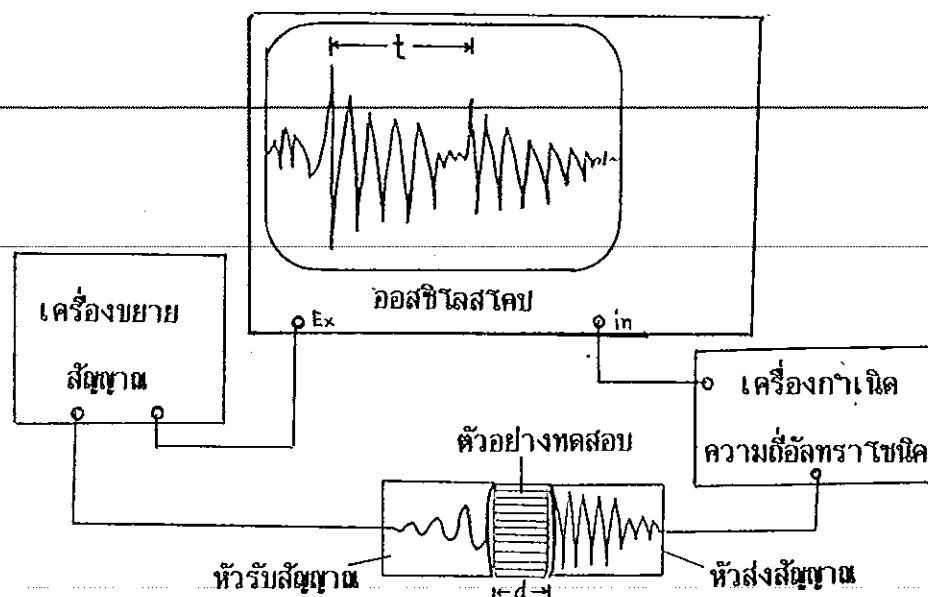
3.5.1 ออสซิลโลสโคป 60 เมกกะเฮิรตซ์

3.5.2 เครื่องกำเนิดความถี่อัลตราโซนิก ( Ultrasonic pulse generators )

3.5.3 ทรานสดิวเซอร์ (Transducers) ขนาด 5 เมกกะเฮิรตซ์

3.5.4 เครื่องขยายสัญญาณ ( Amplifier )

ภาพ 14 แสดงการประกอบอุปกรณ์ในการทดสอบหาค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น



3.6 ทา ซิลิโคน-เจล ที่หัววัดและบริเวณที่ประกบตัวอย่างทั้งสองหน้าเพื่อป้องกันการสูญเสียสัญญาณของหัววัด

3.7 ทาการคำนวณค่าความเร็วของคลื่น ที่เคลื่อนที่ในตัวอย่างโดยอ่านค่าเวลาในการสะท้อนกลับของคลื่นจากจอภาพออสซิลโลสโคปแล้วนำไปคำนวณค่าความเร็วตั้งสมการที่ 12

$$v = 2d/t \dots\dots\dots(12)$$

เมื่อ  $v$  คือความเร็วที่คลื่นเดินทางในตัวกลางเซรามิกส์ หน่วย เมตร/วินาที

$d$  คือความหนาของตัวอย่างทดสอบ หน่วย เมตร

$t$  คือคาบของคลื่นที่ใช้ในการเดินทางทั้งขาไปและกลับ หน่วย วินาที (s)

3.8 คำนวณหาค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของตัวอย่างจากสมการที่ 13

$$E(1-\nu)/(1+\nu)(1-2\nu) = Bv^2 \dots\dots\dots(13)$$

เมื่อ  $E$  คือ ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของตัวอย่าง หน่วย ปาสกาล

$B$  คือ ค่าความหนาแน่นอัตราวมของตัวอย่าง หน่วย กิโลกรัมต่อ  
ลูกบาศก์เมตร ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$v$  คือ ความเร็วที่คลื่นอัลตราซาวด์เคลื่อนที่ในตัวอย่าง หน่วยเมตร/วินาที

$\nu$  คือ ค่าอัตราส่วนไวนของส์ ( Poisson's ratio )

ซึ่งค่าความหนาแน่นอัตราวม เป็นค่าที่ได้จากการทดลองเรื่องความพรุณตัวและการดูดซึมน้ำ ในตอนที่ 2 ตามสมการที่ 10 ส่วนค่าความเร็วคำนวณได้โดยตรงจากการทดลองตามสมการที่ 12

### ตอนที่ 3 สมบัติภายหลังจากเผาเคลือบของดินคอมพาวด์-เคลย์

ได้ทำการศึกษา สมบัติทางกายภาพของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่ผ่านการเผาติดมาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันในช่วง 500-800 °C ซึ่งได้พิจารณามาแล้วจากการทดลองในสองตอนแรก ซึ่งสมบัติที่จะทำการศึกษาในตอนนี้ได้แก่

1. การศึกษาความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของดินคอมพาวด์-เคลย์
2. การศึกษาความแข็งแรงของดินคอมพาวด์-เคลย์
3. การศึกษาค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของดินคอมพาวด์-เคลย์
4. การศึกษาการประสานเบ้เน เนื้อเดียวกันของน้ำยาเคลือบและเนื้อ

ดินบั้นคอมพาวด์-เคลย์ ที่ผ่านการเตรียมมาดำเนินการเผาติดมาต่างกัน

#### 1. วิธีการศึกษาความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของดินคอมพาวด์-เคลย์

1.1 นำดินเหนียวคอมพาวด์-เคลย์ มาขึ้นรูปด้วยการอัดด้วยมือในแบบปูนพลาสติก ขนาด 5.08 X 5.08 X 0.64 เซนติเมตร เป็นจำนวน 120 ตัวอย่าง แล้วแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ๆ ละ 30 ตัวอย่าง

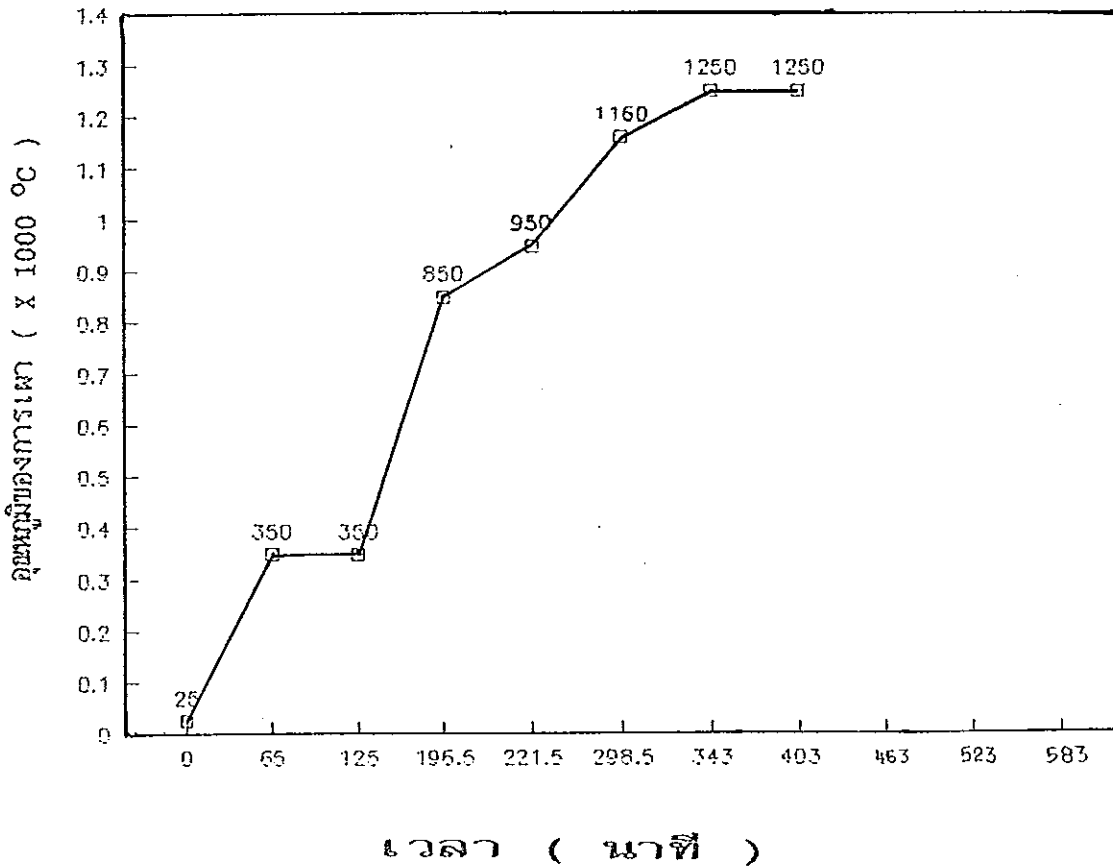
1.2 นำตัวอย่างดินเหนียวทั้งหมด แล้วนำไปเผาติดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้ คือ 500, 650, 700, และ 800°C ดังแสดงในภาพ 5, 6, 9 และ 3 ตามลำดับ

1.3 เมื่อได้ตัวอย่างที่ผ่านการเผาติดมาเรียบร้อยแล้ว ตามข้อ 1.2 ก็ให้นำตัวอย่างเหล่านี้ไปทำการหุงเคลือบ โดยการหุงให้เย็นตัวอย่างที่อุณหภูมิประมาณ 15 องศาเซลเซียส ก่อนหุงต้องกวนน้ำเคลือบให้เนื้อน้ำเคลือบสม่ำเสมอ ก่อนหุงให้หนาทประมาณ 0.2-0.3 เซนติเมตร (จากการทดลอง) โดยการจับเวลาหรืออาจจะใช้การนับนาฬิกาก็ได้

1.4 เมื่อหุงเคลือบเสร็จแล้ว ให้ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 1 วัน จากนั้นนำไปทำการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1250 °C โดยมีขั้นตอนการเผาดังแสดงในภาพ 15



ภาพ 15 แสดงขั้นตอนการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1250 °C



1.5 นำตัวอย่างที่ผ่านการเผาเคลือบมาเรียบร้อยแล้วไปทำการศึกษาความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ โดยวิธีการต้ม เช่นเดียวกับที่เคยกล่าวมาแล้วในตอนที่ 1 หัวข้อ 1.1 จากนั้นก็คำนวณค่าต่าง ๆ ดังสมการที่ 7-10

## 2. วิธีการศึกษาความแข็งแรงของดินคอมพาวด์-เคลย์ ภายหลังการเผาเคลือบ

2.1 นำดินเหนียวคอมพาวด์-เคลย์ มาขึ้นรูปด้วยการอัดด้วยมือในแม่แบบปูนพลาสติก ขนาด 5.08 x 5.08 x 0.64 เซนติเมตร เป็นจำนวน 120 ตัวอย่าง แล้วแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ๆ ละ 30 ตัวอย่าง

2.2 นำตัวอย่างทั้งหมดแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้ คือ 500, 650, 700, และ 800°C ดังแสดงในภาพ 5, 6, 9 และ 3 ตามลำดับ

2.3 เมื่อได้ตัวอย่างที่ผ่านการเผาเคลือบเรียบร้อยแล้ว ตามข้อ 2.2 ก็ให้นำตัวอย่างเหล่านี้ไปทำการชุบเคลือบ เช่นเดียวกับข้อ 1.3

2.4 เมื่อชุบเคลือบเสร็จแล้ว ให้นำสอยทิ้งไว้ให้น้ำเคลือบแห้งที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 1 วัน จากนั้นจึงนำไปทำการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1250°C โดยขั้นตอนการเผาดังแสดงในภาพ 15

2.5 เมื่อเผาเคลือบตัวอย่างทั้งหมดแล้วก็นำตัวอย่างในแต่ละอุณหภูมิมาทำการทดลองตามขั้นตอนเช่นเดียวกับตอนที่ 2 ข้อ 2 แล้วคำนวณค่า ความแข็งแรง ตามสมการที่ 11

### 3. วิธีการศึกษาค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นหลังการเผาเคลือบ

3.1 นำดินเหนียวคอมพาวด์-เคลย์ มาขึ้นรูปด้วยการอัดด้วยมือในแม่แบบ ปูนพลาสติก ขนาด 5.08 X 5.08 X 0.64 เซนติเมตร เป็นจำนวน 120 ตัวอย่าง แล้วแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ๆ ละ 30 ตัวอย่าง

3.2 ให้นำสัญลักษณ์แก่ตัวอย่างทั้งหมด แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้ คือ 500, 650, 700, และ 800°C ดังแสดงในภาพ 5, 6, 9 และ 3 ตามลำดับ

3.3 เมื่อได้ตัวอย่างที่ผ่านการเผาดินมาเรียบร้อยแล้ว ตามข้อ 3.2 ก็ให้นำตัวอย่างเหล่านี้ไปทำการชุบเคลือบ เช่นเดียวกับข้อ 2.3

3.4 เมื่อชุบเคลือบเสร็จแล้ว ให้นำสอยทิ้งไว้ให้น้ำเคลือบแห้งที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 1 วัน จากนั้นจึงนำไปทำการเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1250 °C ดังภาพ 13

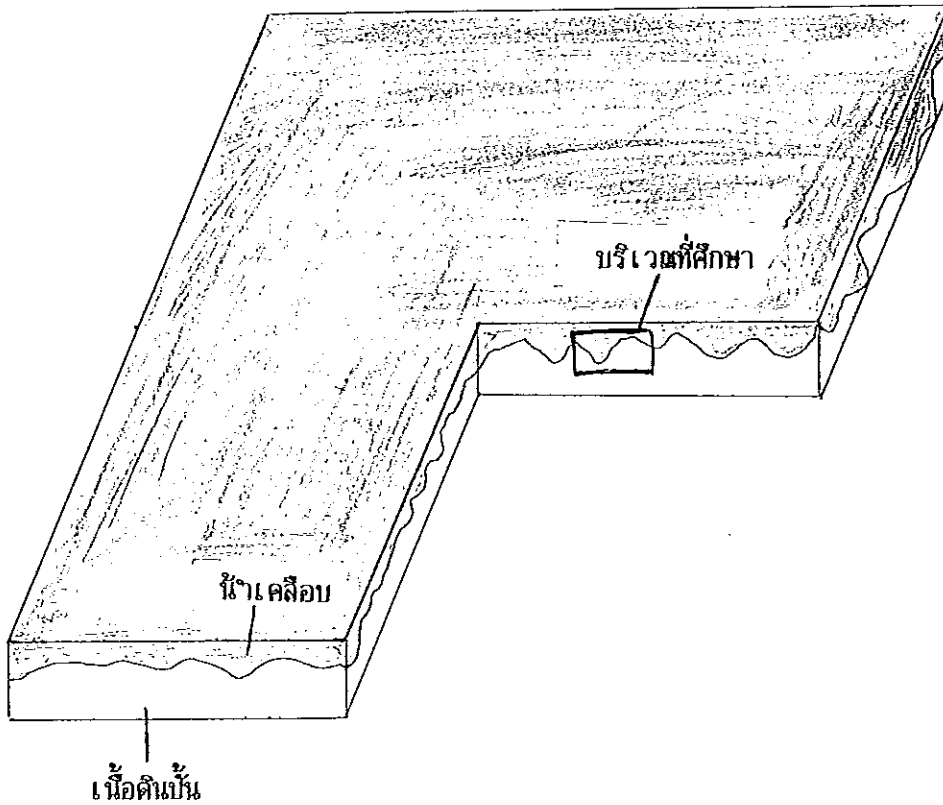
3.5 นำตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.4 มาทำซิลิโคน-เจ็ล รวมทั้งห้ววัด เพื่อทดลองเช่นเดียวกับขั้นตอนที่ 2 ข้อ 3.7

3.6 ความหนาแน่นค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของตัวอย่างจากสมการที่ 12

### 4. วิธีการศึกษาการประสานเป็นเนื้อเดียวกันของน้ำยาเคลือบและเนื้อดินปั้น

4.1 นำเศษตัวอย่างจากการทดลองหาความแข็งแรงของตัวอย่าง ในตอนที่ 2 ของแต่ละชุดตัวอย่างที่ผ่านการเผาดินมาต่าง ๆ กันมาเตรียมเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาด 0.5 X 0.5 X 0.5 เซนติเมตร โดยการตัดด้วยใบมีดตัดหินตรงบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำยาเคลือบและเนื้อดินปั้น ดังแสดงในภาพ 16 จากตัวอย่างประมาณ 10 ชิ้นสำหรับแต่ละอุณหภูมิที่ศึกษา

ภาพ 16 แสดงภาคตัดขวางบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำยาเคลือบและเนื้อดินปั้น ที่นำไปใช้ในการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงหนึ่ง



4.2 นำตัวอย่างมาทำการอบแห้งที่  $120^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้ว จึงนำไปฉายด้วยทอง ก่อนนำไปทำการศึกษากับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงหนึ่งต่อไป  
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนต่อไป

4.3 ทำการศึกษาลักษณะของรอยต่อระหว่างน้ำยาเคลือบและเนื้อดินปั้น

4.4 ถ่ายภาพที่บริเวณรอยต่อที่ทำการศึกษา จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงหนึ่ง เพื่อพิจารณาบริเวณรอยต่อดังกล่าวของตัวอย่างแต่ละชุด

4.5 วิเคราะห์ภาพที่ได้กับสมบัติอื่น ๆ ที่ได้ทำการหาค่ามาก่อนหน้านี้ เพื่อพิจารณาประกอบว่ามีความสอดคล้องกันในด้านใดและเป็นประโยชน์อย่างไร

### บทที่ 3

#### ผลและการอภิปรายผล

บทนี้ได้แสดงผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย โดยเสนอผลการวิจัย ตามลำดับที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 เนื่องจากกลุ่มข้อมูลส่วนใหญ่มีขนาดเล็กดังนั้น จึงได้แสดงผลการวิจัยและอภิปรายผลควบคู่กันไปด้วยเพื่อความต่อเนื่อง ส่วนข้อ วิเคราะห์และสรุป จะได้กล่าวไว้ในบทต่อไป

ผลและการอภิปรายผล แบ่งออกเป็นตอน ๆ ตามลำดับดังนี้

ตอนที่ 1 ผลการศึกษาสมบัติเฉพาะของดินคอมพาวด์-เคลย์

ตอนที่ 2 ผลการศึกษา สมบัติก่อนการเผาเคลือบ ของดิน  
คอมพาวด์-เคลย์

ตอนที่ 3 ผลการศึกษา สมบัติภายหลังการเผาเคลือบ ของดิน  
คอมพาวด์-เคลย์

#### ตอนที่ 1 ผลการศึกษาสมบัติเฉพาะของดินคอมพาวด์-เคลย์

ตอนที่ 1 ได้แสดงผลการวิจัยของสมบัติที่ทำการศึกษา ดังต่อไปนี้

1. ผลการศึกษาริมาณน้ำเฉลี่ยที่ ดินคอมพาวด์-เคลย์ ต้องการเพื่อ  
คืนความชุ่มชื้น
2. ผลการศึกษาค่าการหดตัวเฉลี่ยเมื่อแห้งของดินคอมพาวด์-เคลย์
3. ผลการศึกษาค่าการสูญเสียน้ำเฉลี่ยของดินคอมพาวด์-เคลย์
4. ผลการศึกษาลักษณะ สี ของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่ผ่านการเผา  
มาที่อุณหภูมิต่าง ๆ

โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของดิน เพื่อ  
ประโยชน์ในการควบคุมและออกแบบ ขั้นตอนการทดลองในตอนต่อไป

ตาราง 1 เป็นตารางแสดงสมบัติกายภาพเชิงปริมาณของดินที่ใช้ในการวิจัย เพื่อประโยชน์ในการกำหนดขนาดของตัวอย่างทดสอบ และการควบคุมปริมาณน้ำในเนื้อดินที่นำมาใช้ให้คงที่

ตาราง 1 แสดงผลการศึกษาสมบัติเฉพาะของดินคอมพาวด์-เคลย์

1. ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ ดินคอมพาวด์-เคลย์ ต้อง การเพื่อคืนความเหนียว	19.45 ± 0.20 %
2. ค่าการหดตัวเฉลี่ยของ ดินคอมพาวด์-เคลย์	
- เมื่อแห้งที่อุณหภูมิห้อง (%GS)	7.42 ± 0.60 %
- ภายหลังการเผาที่ 800°C (%DS)	0.20 ± 0.10 %
- ภายหลังการเผาที่ 1160°C (%FS)	7.92 ± 0.60 %
- สุทธิ	15.02 ± 0.60 %
3. ค่าการสูญเสียน้ำเฉลี่ย ภายหลังการเผาที่ ที่ 800°C	26.56 ± 1.00 %

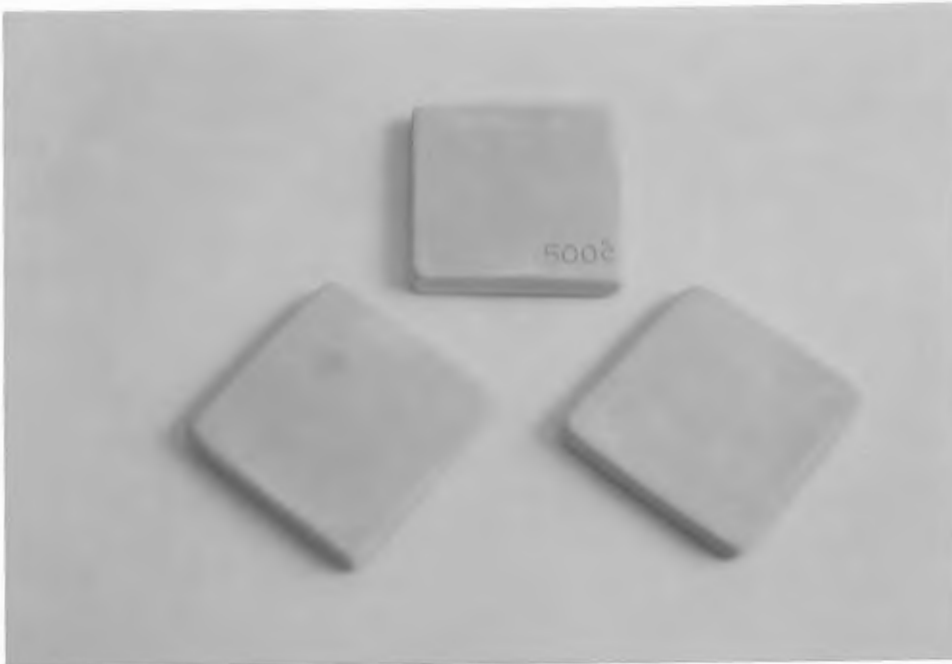
จากตาราง 1 ข้อมูลที่ 1 จากการทดลองพบว่าดินคอมพาวด์-เคลย์

มีความต้องการน้ำเพื่อคืนความเหนียว ให้แก่ดินเหนียวที่แห้งและผ่านการอบที่ 120°C ในปริมาณที่ค่อนข้างแน่นอน หากเติมใช้น้ำมากหรือน้อยเกินไปก็ทำให้การขึ้นรูปตัวอย่างด้วยการอัดด้วยมือในแม่แบบปูนพลาสเตอร์ ไม่คล่องตัว กล่าวคือถ้ามีน้ำมากจะถอดตัวอย่างออกจากแบบยากเพราะดินลู่ติดกับแม่แบบ แต่ถ้าน้ำน้อยก็ทำให้การอัดตัวอย่างทำได้ยากและไม่สม่ำเสมอ

จากตาราง 1 ข้อมูลที่ 2 พบว่าตัวอย่างทดสอบมีการหดตัวมากในขณะที่บดย่อยให้ดินเหนียว แห้งที่อุณหภูมิห้องและหลังการนำเข้าเผาที่  $1160^{\circ}\text{C}$  และหดตัวเพียงเล็กน้อยในขั้นตอนการเผาที่  $800^{\circ}\text{C}$  โดยมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสุทธิ 15.02 % ข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาขั้นตอนการกำหนด ขนาดตัวอย่าง และขั้นตอนการเผา ในตอนต่อ ๆ ไป ทั้งนี้เพราะทำให้ทราบว่า หลังการเผาตัวอย่างจะหดตัวลงเป็นเท่าใด โดยค่าสถิติที่ได้มีได้รวมถึงตัวอย่างที่รอยการหดตัวมีการโก่งงอ (เลือกพิจารณาวัตถุประสงค์ความยาวของรอยกดเฉพาะในแนวเส้นตรง ไม่รวมความยาวของการโก่งงอ) ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างที่นำมาพิจารณาประมาณ 85 % ส่วนข้อมูลที่ 3 ในตาราง 1 นั้นชี้ให้เห็นว่ามีน้ำหายไปในช่วงขั้นตอนการเผาที่ 7.11 % ( $26.56\%-19.45\%$ )

ผลการศึกษาลักษณะของสีของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่เผามาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบลักษณะสีของเนื้อดินคอมพาวด์-เคลย์ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500, 650, 700, 800 และ  $1100^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในภาพ 17-21 ทั้งนี้เพื่อพิจารณา สีหลังการเผา ซึ่งอาจใช้ประโยชน์ในการพิจารณาอุณหภูมิการเผาที่ มีความเหมาะสมต่อการเผาได้โดยสีที่ต้องการคือ สีน้ำตาล

ภาพ 17 ลักษณะ สี ของดินคอมพาวด์-เคลย์ที่เผาที่  $500^{\circ}\text{C}$



ภาพ 18 ลักษณะ สี ของดินคอมพาวด์-เคลย์ที่เผาที่ 650 °C



ภาพ 19 ลักษณะ สี ของดินคอมพาวด์-เคลย์ที่เผาที่ 700 °C



ภาพ 20 ลักษณะ สี ของดินคอมพาวด์-เคลย์ที่เผาที่ 800 °C



ภาพ 21 ลักษณะ สี ของดินคอมพาวด์-เคลย์ที่เผาที่ 1100 °C





จากภาพ 17-21 พบว่า สีของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่ให้สีน้ำตาลตามต้องการ ( ความรู้ทั่วไปในการเผาดิน ) คือตัวอย่างดินที่ผ่านการเผาในช่วง  $650-800^{\circ}\text{C}$  และยังสามารถเห็นได้ชัดเจนว่าดินที่เผาที่  $500^{\circ}\text{C}$  นั้นยังมีสีออกสีเทา ซึ่งชี้ให้เห็นว่าดินยังผ่านการเผาไม่เพียงพอ ส่วนดินที่เผาที่  $1100^{\circ}\text{C}$  ที่สีหลังการเผาเป็นสีขาว ซึ่งเป็นสีที่ต้องการหลังการเผาออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เพราะทำให้สามารถใช้สีเคลือบตกแต่งผลิตภัณฑ์ให้ได้สีตามต้องการได้โดยง่าย

## ตอนที่ 2 ผลการศึกษาสมบัติก่อนการเผาเคลือบของดินคอมพาวด์-เคลย์

ตอนนี้ได้แสดงผลการวิจัยเกี่ยวกับ สมบัติของดินคอมพาวด์-เคลย์ ก่อนการเผาเคลือบ (ไม่ได้ชุบเคลือบและเผาสูงกว่า  $1250^{\circ}\text{C}$ ) ดังต่อไปนี้

1. ผลการศึกษาหา ค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ
2. ผลการศึกษาหา ค่าความแข็งแรง ของดินคอมพาวด์-เคลย์
3. ผลการศึกษาหา ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น ของดินคอมพาวด์-เคลย์

### 1. ผลการศึกษาหา ค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของดินคอมพาวด์-เคลย์

ส่วนนี้ได้แบ่งย่อยออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนที่หาค่าความพรุนตัวและส่วนที่หาค่าการดูดซึมน้ำ โดยในแต่ละส่วนได้แบ่งไปตามวิธีการต่าง ๆ อีก 3 วิธี คือ วิธีการต้ม วิธีการสูญอากาศ และวิธีการแช่น้ำ ดังที่ได้แสดงต่อไปนี้

#### 1.1 ผลการศึกษาหา ค่าความพรุนตัว

ตาราง 2 จะเป็นตารางแสดงค่าความพรุนตัวที่ได้จาก วิธีการต้ม วิธีการสูญอากาศ และวิธีการแช่น้ำ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบค่าความพรุนตัวที่ได้จากวิธีทั้ง 3 ว่าให้ผลแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร เพื่อประโยชน์ในการหา เทคนิควิธีที่สะดวกรวดเร็วและประหยัดพลังงานในการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลในตาราง 2 ทั้งในแนวตั้ง (เปรียบเทียบแต่ละวิธีกับแต่ละตัวอย่าง) และแนวนอน (เปรียบเทียบแต่ละตัวอย่างกับแต่ละวิธี)

ตาราง 2 แสดงค่าความพรุนตัวของดินคอมพาวด์-เคลย์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยวิธีการต้ม วิธีสูญญากาศ และวิธีการแช่น้ำ

อุณหภูมิที่เผา (°C)	ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนตัว (%)		
	วิธีการต้ม	วิธีสูญญากาศ	วิธีการแช่น้ำ
500	31.24 ± 0.50	31.58 ± 0.40	30.16 ± 0.40
650	31.83 ± 0.20	32.10 ± 0.30	30.24 ± 0.40
800	32.16 ± 0.20	32.52 ± 0.30	30.45 ± 0.50
1160	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01

หมายเหตุ ตัวอย่างที่ใช้ในแต่ละวิธีมีใช้ตัวอย่างชุดเดียวกันและไม่ได้นำตัวอย่างที่มีการแตกขรุขระ (ประมาณ 10 %) มาทำการคำนวณค่าเฉลี่ย

พิจารณาวิธีการต้มกับแต่ละตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 500 °C มีค่าความพรุนตัวไม่ต่างกับตัวอย่างที่เผาที่ 650 °C แต่ต่างกับตัวอย่างที่เผาที่ 800 °C อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 650 °C ไม่ต่างกับที่เผาที่ 800 °C แต่ทั้งหมด ( 500 650 และ 800 °C ) มีความพรุนตัวต่างจากตัวอย่างที่ 1160 °C อย่างมีนัยสำคัญ ( ที่อุณหภูมิระหว่าง 800-1160 °C ไม่ได้ทำการพิจารณาจุดกลับทั้งนี้ เพราะเป้าหมายของการวิจัยอยู่ที่การหาอุณหภูมิเผาที่ต่ำกว่า 800 °C แต่ที่ทำการพิจารณาความพรุนตัว ที่ 1160 °C เพื่อให้ทราบค่าความพรุนตัวของเนื้อดิน ที่อุณหภูมิของการเกิดแก้วของเนื้อดินชนิดนี้ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในวิธีการวิจัย )

พิจารณาวิธีสูญญากาศกับแต่ละตัวอย่าง พบว่าให้ผลในลักษณะเดียวกันกับวิธีการต้มแต่ให้ค่าความพรุนตัวเฉลี่ยสูงกว่า

พิจารณาวิธีการแช่น้ำกับแต่ละตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 500 650 และ 800°C มีค่าความพรุนตัวไม่ต่างกัน และทั้งหมดนี้ต่างกับกับตัวอย่างที่เผาที่ 1160°C อย่างมีนัยสำคัญ จะเห็นได้ว่าวิธีการแช่น้ำ ให้ผลไม่เหมือนกับในวิธีการต้มและวิธีสูญญากาศ เพราะใน 2 วิธีนี้ความพรุนตัวของตัวอย่างที่เผาที่ 500°C ต่างกับ 800°C อย่างมีนัยสำคัญ

พิจารณาค่าความพรุนตัวของตัวอย่างที่เผาที่ 500°C ที่ได้จากวิธีต่าง ๆ กัน 3 วิธี พบว่าให้ค่าไม่แตกต่างกัน

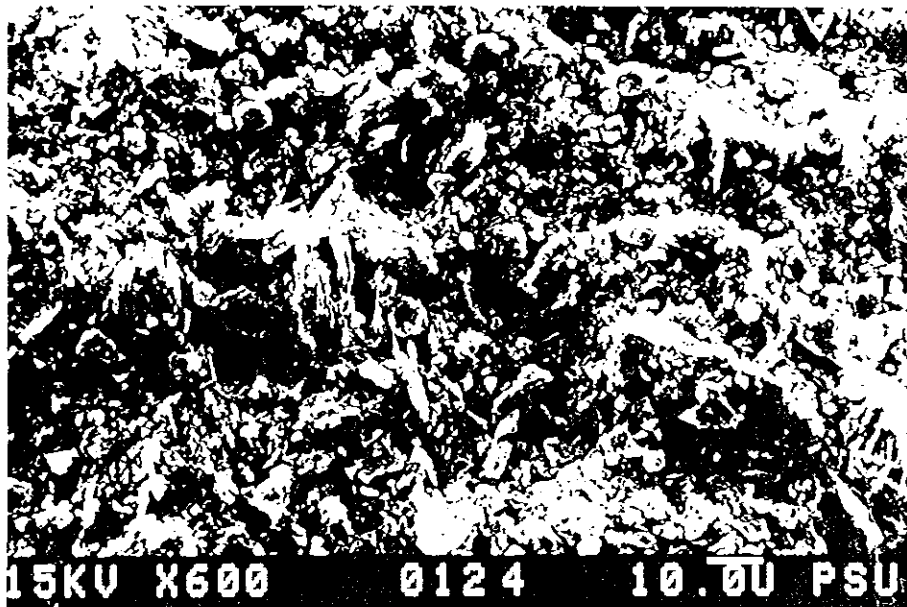
พิจารณาค่าความพรุนตัวของตัวอย่างที่เผาที่ 650°C ที่ได้จากวิธีต่าง ๆ กัน 3 วิธี พบว่าให้ค่าไม่แตกต่างกัน

พิจารณาค่าความพรุนตัวของตัวอย่างที่เผาที่ 800°C ที่ได้จากวิธีต่าง ๆ กัน 3 วิธี พบว่าวิธีการต้มและวิธีสูญญากาศ ให้ค่าไม่ต่างกัน ในขณะที่ทั้ง 2 วิธีให้ค่าที่ต่างกับวิธีการแช่น้ำอย่างมีนัยสำคัญ

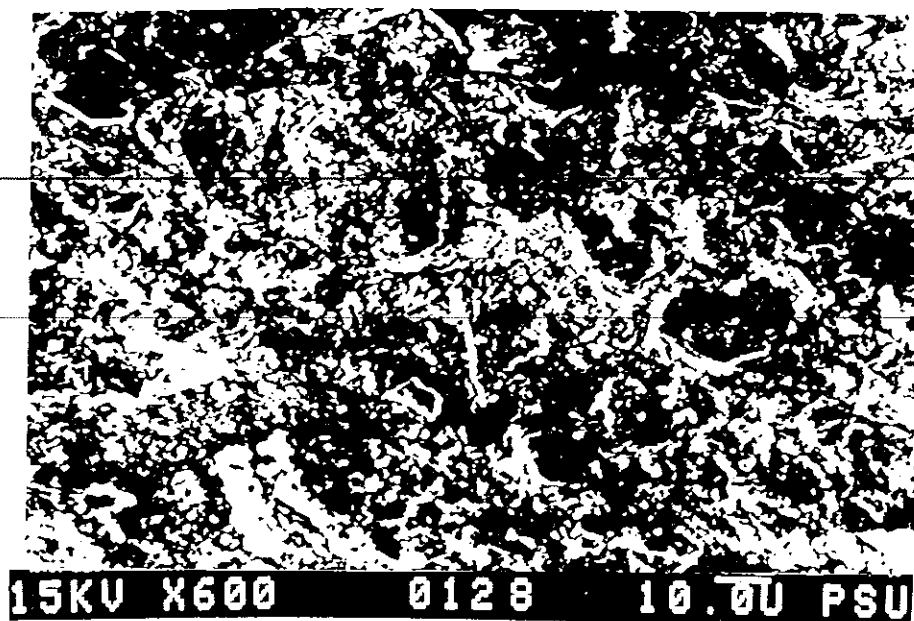
ส่วนในตัวอย่างที่เผาที่ 1160°C พบว่าค่าความพรุนตัวที่ได้จากทั้ง 3 วิธีนั้นให้ผลไม่แตกต่างกัน

ผลการศึกษาความพรุนตัวของตัวอย่าง บริเวณภาคตัดขวางภายในเนื้อของตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 500 650 800 และ 1160 °C กลุ่มละ 10 ชิ้น ที่ผ่านการเลือกแบบสุ่มจากชิ้นตัวอย่างภายหลังการเตรียมให้มีขนาดเล็กแล้ว โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบสแกนนิ่ง และถ่ายภาพลักษณะความพรุนตัวของตัวอย่างในแต่ละกลุ่มโดยเลือกถ่ายมาเพียง 1 ภาพที่เป็นตัวแทนของกลุ่มตัวอย่างทั้งนี้ก็เพื่อสะดวกในการแสดงด้วยภาพไปให้มีปริมาณมากจนเกินไปโดยถ่ายที่กำลังขยาย 600 เท่า ( พิจารณาแล้วพบว่าเหมาะสมแก่การแสดงรายละเอียด ) เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ ซึ่งภาพแสดงลักษณะความพรุนตัวนี้ ก็ได้แสดงไว้ในภาพ 22-25 ซึ่งจะได้อธิบายในรายละเอียดต่อไป

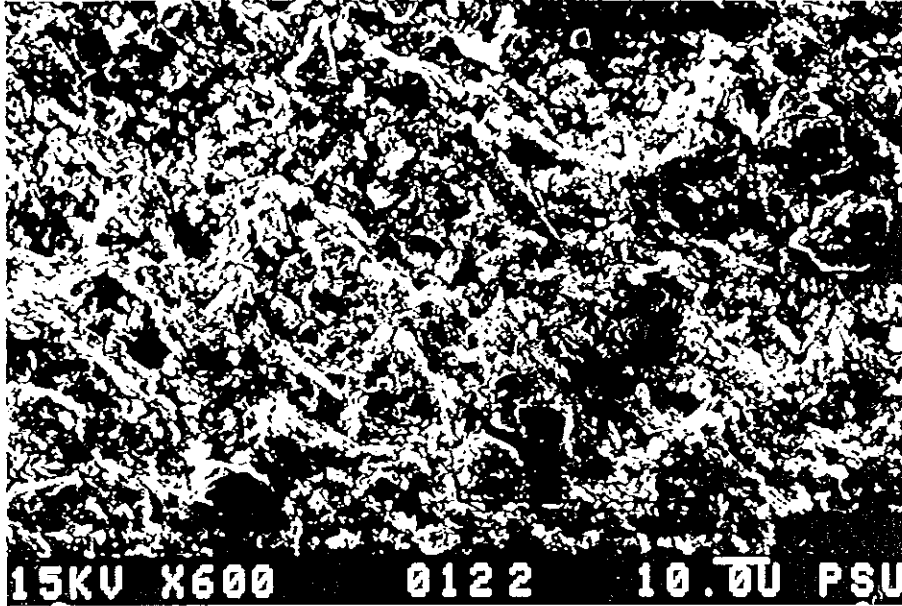
ภาพ 22 ภาพถ่ายบริเวณภาคตัดขวาง ของเนื้อตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 500°C จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงกนัง (กำลังขยาย 600 เท่า)



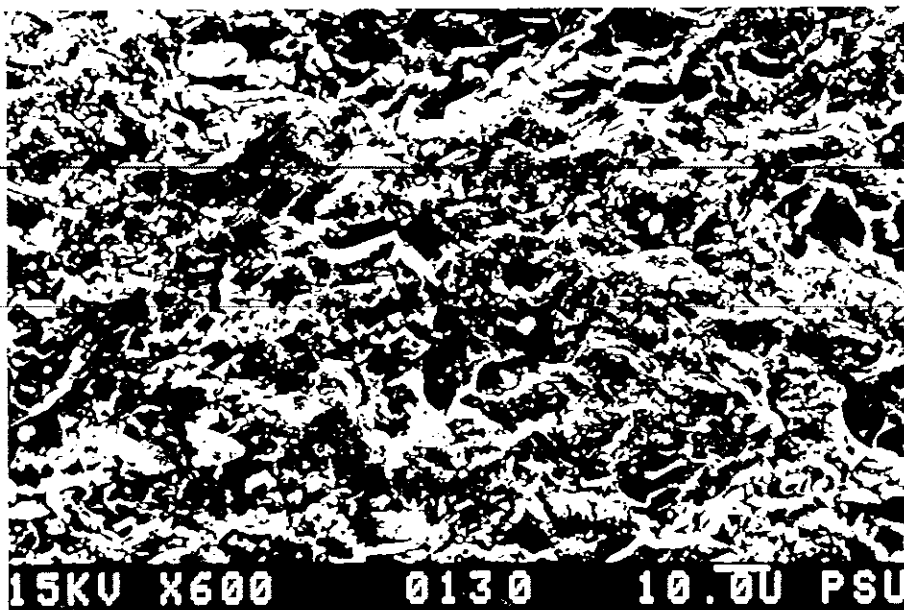
ภาพ 23 ภาพถ่ายบริเวณภาคตัดขวาง ของเนื้อตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 650°C จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงกนัง (กำลังขยาย 600 เท่า)



ภาพ 24 ภาพถ่ายบริเวณภาคตัดขวาง ของเนื้อตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่  $800^{\circ}\text{C}$   
จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงกึ่งเงา (กำลังขยาย 600 เท่า)



ภาพ 25 ภาพถ่ายบริเวณภาคตัดขวางของเนื้อตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่  $1160^{\circ}\text{C}$   
จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงกึ่งเงา (กำลังขยาย 600 เท่า)



จากภาพ 22-25 บริเวณส่วนที่เป็นแถบมืดหมายถึง บริเวณที่เป็นรูพรุน ทั้งนี้โดยหลักการถ่ายภาพของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงหนึ่ง ลานแสง อิเล็กตรอนเมื่อกระทบผิวตัวอย่าง ซึ่งหมายถึงส่วนที่เป็นเนื้อตัวอย่าง ทำให้เกิดการสะท้อนกลับของลาอิเล็กตรอน จึงเกิดเป็นแถบสว่าง ภายหลังจากถ่ายภาพ ซึ่งจากภาพ 22 พบว่าในตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 500 °C มีรูพรุนขนาดใหญ่ซึ่งมีการกระจายของรูพรุนขนาดใหญ่ไม่สม่ำเสมอ ในภาพ 23 พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 650 °C มีรูพรุนขนาดเล็กกรองลงมาจากที่เผาที่ 500 °C และมีการกระจายของรูพรุนซับซ้อนกว่าในภาพ 22 ในภาพ 24 พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 800 °C มีรูพรุนขนาดเล็กกว่าในภาพ 22 และ 23 มีการกระจายของรูพรุนสม่ำเสมอกว่าในภาพ 22 และ 23 ส่วนในภาพ 25 นั้น พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 1160°C มีรูพรุนในเนื้อตัวอย่างน้อยที่สุดและยังสามารถเห็นเนื้อแก้วภายในตัวอย่างได้ชัดเจน (บริเวณที่สว่างจ้า) ซึ่งสอดคล้องกับที่ได้กล่าวแล้วในตอนต้นว่าอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิที่เริ่มเกิดแก้วในเนื้อดิน

#### 1.2 ผลการศึกษาค่าการดูดซึมน้ำ

ตาราง 3 เป็นตารางแสดงค่าการดูดซึมน้ำ ที่ได้จาก วิธีการต้ม วิธีสูญญากาศ และวิธีการแช่น้ำ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำที่ได้จากวิธี ทั้ง 3 ว่าให้ผลแตกต่างกันหรือไม่อย่างไร เพื่อประโยชน์ในการหา เทคนิควิธี ที่สะดวกรวดเร็วและประหยัดพลังงานในการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูล ในตาราง 3 ทั้งในแนวตั้ง (เปรียบเทียบแต่ละวิธีกับแต่ละตัวอย่าง) และแนวนอน (เปรียบเทียบแต่ละตัวอย่างกับแต่ละวิธี) โดยในแต่ละวิธีนั้น ได้ใช้ตัวอย่างชุด เดียวกันกับที่ได้ใช้ในการหาค่าความพรุนตัว

ตาราง 3 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของดินคอมพอสต์-เคลย์ ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยวิธีการต้ม วิธีสูญญากาศ และวิธีการแช่ไข่

อุณหภูมิที่เผา(°C)	ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (%)		
	วิธีการต้ม	วิธีสูญญากาศ	วิธีการแช่ไข่
500	17.47 ± 0.40	17.78 ± 0.30	16.34 ± 0.40
650	17.92 ± 0.20	18.14 ± 0.30	16.38 ± 0.40
800	18.19 ± 0.10	18.49 ± 0.20	16.59 ± 0.50
1160	0.01	0.02 ± 0.01	0.01

หมายเหตุ ตัวอย่างที่ใช้ในแต่ละวิธีมีใช้ตัวอย่างชุดเดียวกันและไม่ได้นำตัวอย่างที่มีการแตกขรุขระ(ประมาณ 10 %)มาทำการคำนวณค่าเฉลี่ย

พิจารณาวิธีการต้มกับแต่ละตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการเผาเดิมมาที่ 500 °C มีค่าการดูดซึมน้ำไม่ต่างกับตัวอย่างที่เผาเดิมที่ 650°C แต่ต่างกับตัวอย่างที่ผ่านการเผาเดิมที่ 800 °C อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการเผาเดิมที่ 650°C ไม่ต่างกับที่เผาที่ 800°C แต่ทั้งหมด ( 500 650 และ 800°C ) มีค่าการดูดซึมน้ำต่างจากตัวอย่างที่ 1160°C อย่างมีนัยสำคัญ ( ที่อุณหภูมิระหว่าง 800-1160 °C ไม่ได้ทำการพิจารณาจุดตกกลับ ด้วยเหตุผลเดียวกับที่ได้กล่าวไว้แล้วในการหาค่าความพรุนตัว )

พิจารณาวิธีสูญญากาศกับแต่ละตัวอย่าง พบว่าให้ผลในลักษณะเดียวกับกับวิธีการต้มแต่ให้ค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยสูงกว่า

พิจารณาวิธีการแช่น้ำกับแต่ละตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 500 650 และ 800 °C มีค่าการดูดซึมน้ำไม่ต่างกัน ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 650 °C ก็มีค่าการดูดซึมน้ำไม่ต่างกับตัวอย่างที่เผาที่ 800 °C ซึ่งไม่เหมือนกับในวิธีการต้มและวิธีสูญญากาศ เพราะใน 2 วิธีนี้ ค่าการดูดซึมน้ำ ของตัวอย่างที่เผาที่ 500 °C ต่างกับ 800 °C อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนในตัวอย่างที่เผาที่ 1160 °C มีค่าการดูดซึมน้ำแตกต่างกับอุณหภูมิอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ

พิจารณาค่าความพรุนตัวของตัวอย่างที่เผาที่ 500 650 และ 800 °C ที่ได้จากวิธีต่าง ๆ กัน 3 วิธีพบว่าวิธีการต้มและวิธีสูญญากาศให้ค่าไม่แตกต่างกัน ในขณะที่ทั้ง 2 วิธีนี้ ให้ผลต่างกับวิธีการแช่น้ำอย่างมีนัยสำคัญ

ส่วนในตัวอย่างที่เผาที่ 1160 °C พบว่าค่าความพรุนตัวที่ได้จากทั้ง 3 วิธีนี้ให้ผลไม่แตกต่างกัน

นอกจากนี้แล้วจากการทดลองโดยวิธีการต้มน้ำ ก็ยังสามารถคำนวณหาค่า ความว่างจำเพาะ และ ความหนาแน่นอัดรวม ของตัวอย่างได้อีกด้วยดังแสดงในตาราง 4 ดังต่อไปนี้

ตาราง 4 แสดงค่าความว่างจำเพาะและความหนาแน่นอัดรวม ของตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยวิธีการต้มน้ำ

อุณหภูมิที่เผา (°C)	ค่าความว่างจำเพาะ $T=D/(D-S)$	ค่าความหนาแน่นอัดรวม (g/cm <sup>3</sup> ) $B=D/(W-S)$
500	2.60 ± 0.02	1.79 ± 0.02
650	2.61 ± 0.01	1.78 ± 0.01
800	2.61 ± 0.01	1.77 ± 0.01
1160	2.54 ± 0.01	2.54 ± 0.01



จากตาราง 4 พิจารณาค่าเฉลี่ยความถี่จำเพาะ ของกลุ่มตัวอย่างที่เผาที่ 500 650 800 และ 1160°C พบว่าไม่แตกต่างกันแต่ทั้งหมดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 1160°C และเมื่อพิจารณา ค่าความหนาแน่นอัตราส่วนของกลุ่มตัวอย่างกับอุณหภูมิของการเผา ก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตามค่าความถี่จำเพาะกับค่าความหนาแน่นอัตราส่วน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสำหรับตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 500 650 และ 800°C แต่มีค่าไม่แตกต่างกันสำหรับตัวอย่างที่เผาที่ 1160 °C (ทั้งนี้ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 800-1160 °C ไม่ได้ทำการทดลอง ด้วยเหตุผลซึ่งกล่าวมาแล้วข้างต้น) โดยค่าสถิติที่ได้ให้ได้จากกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดลองในวิธีการต้ม

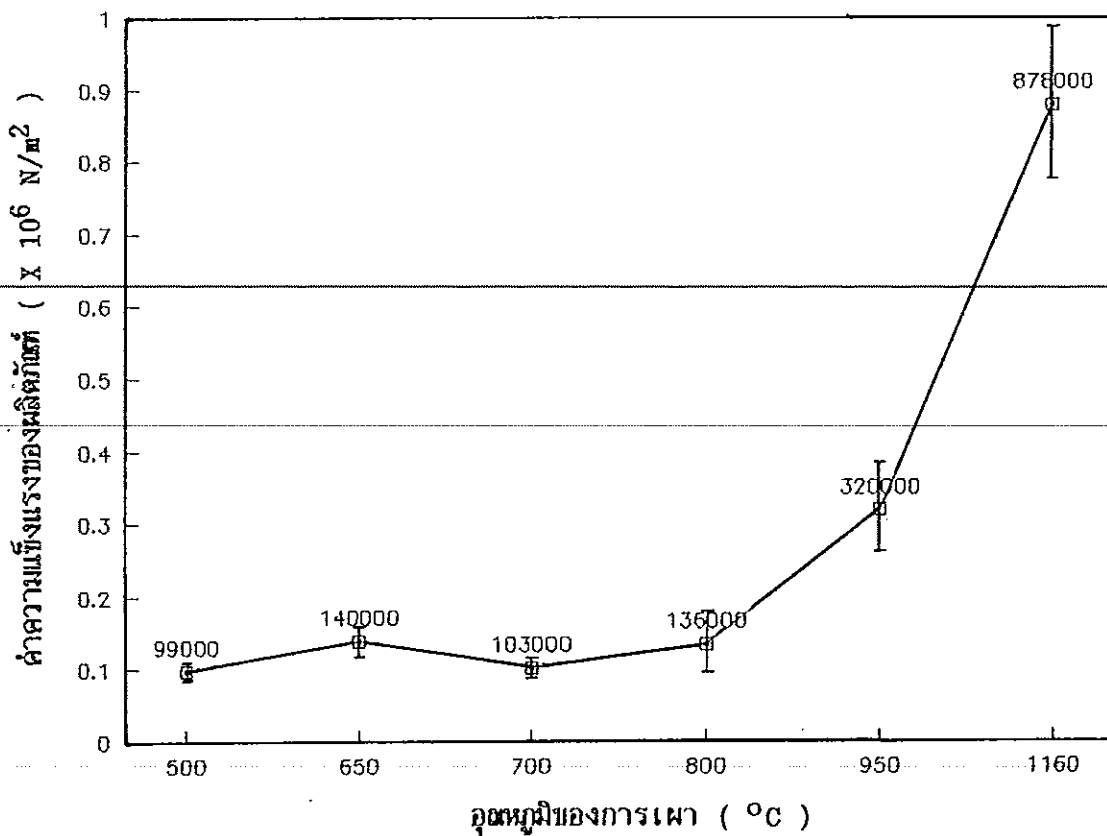
## 2. ผลการศึกษาค่าความแข็งแรงก่อนการเผาเคลือบของดินคอมพาวด์-เคลย์

ค่าความแข็งแรง เป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญเนื่องจากเป็นเครื่องมือป้องกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยตรง ซึ่งการทราบค่าความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ ที่ผ่านการเตรียมมาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ก่อนการนำไปชุบเคลือบ และเผาเคลือบย่อมเป็นประโยชน์ต่อการเลือกพิจารณาหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเผาเคลือบ เป็นขั้นต้น โดยได้ทำการศึกษาค่าความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ ในช่วงอุณหภูมิของการเผาเคลือบคือ 500-800 °C เพื่อเปรียบเทียบหาอุณหภูมิการเผาเคลือบที่ต่ำกว่า 800°C แต่ให้ความแข็งแรงที่ใกล้เคียงหรือสูงกว่า อีกทั้งเพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ ที่ผ่านการเผาเคลือบมาสูงกว่า 800°C ว่ามีความแข็งแรง เพิ่มขึ้นมากหรือน้อยอย่างไร โดยพิจารณาที่อุณหภูมิ 950 และ 1160 °C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ยังไม่ได้ทราบค่าความแข็งแรงมาก่อน โดยผลการหาค่าความแข็งแรงในการวิจัยกำหนดอยู่ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบคือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวกดและรับน้ำหนักมีค่าเป็น 0.8 เซนติเมตร ระยะห่างของขารับน้ำหนักกด 4 เซนติเมตร และใช้อัตราการใช้แรงกดที่ 0.071 เซนติเมตร/นาที่ ซึ่งผลการทดลองได้แสดงไว้ดังตาราง 5 และภาพ 26

ตาราง 5 แสดงค่าความแข็งแรง โดยวิธีการโก่งงอแบบสามตาแหล่ของ ดินเคอมพาวด์-เคลย์ ก่อนการเผาเคลือบ

อุณหภูมิที่ทำการเผา (°C)	ค่าความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ หน่วย กิโลปาสกาล ( KPa )
500	99 ± 10
650	140 ± 20
700	103 ± 20
800	136 ± 40
950	320 ± 60
1160	878 ± 100

ภาพ 26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความแข็งแรงกับอุณหภูมิการเผา



จากตาราง 10 และภาพ 26 พบว่าความแข็งแรงของตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่  $500^{\circ}\text{C}$  นั้น ต่ำกว่าตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่  $650$   $950$  และ  $1160^{\circ}\text{C}$  อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีความแข็งแรงไม่ต่างกับตัวอย่างที่เผาที่  $700$  และ  $800^{\circ}\text{C}$  ส่วนตัวอย่างที่เผาที่  $650$   $700$  และ  $800^{\circ}\text{C}$  มีความแข็งแรงไม่ต่างกัน โดยที่ทั้งหมดนี้ ( $500$   $650$   $700$  และ  $800^{\circ}\text{C}$ ) มีความแข็งแรงต่ำกว่าตัวอย่างที่เผาที่  $950$  และ  $1160^{\circ}\text{C}$  อย่างเห็นได้ชัด และจากภาพ 26 ซึ่งแสดงให้เห็นแนวโน้มและช่วงของความเบี่ยงเบนของกลุ่มตัวอย่าง พบว่าในช่วงอุณหภูมิที่เผาต่ำกว่า  $800^{\circ}\text{C}$  นั้นตัวอย่างที่เผาที่  $650^{\circ}\text{C}$  ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงที่สูงใกล้เคียงกับการเผาที่  $800^{\circ}\text{C}$  แม้ว่าตัวอย่างที่เผาที่  $800^{\circ}\text{C}$  จะให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าก็ตาม ส่วนความแข็งแรงของตัวอย่างที่เผาที่  $950$  และ  $1160^{\circ}\text{C}$  จะให้ค่าความแข็งแรงสูงมาก ( ซึ่งจากการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาที่  $950$  และ  $1160^{\circ}\text{C}$  นั้น ไม่สามารถนำไปชุบเคลือบต่อไปได้อีกเพราะไม่ดูดซึมน้ำเคลือบเลย )

### 3. ผลการศึกษา ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ของดินคอมพาวด์-เคลย์ ก่อนการเผาเคลือบ

ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น เป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ เนื่องจากเป็นเครื่องบ่งชี้ถึงแรงยึดเหนี่ยวภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ ซึ่งการทราบค่าดังกล่าวของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเตรียมที่อุณหภูมิต่าง ๆ ก่อนการนำไปชุบเคลือบและเผาเคลือบย่อมเป็นประโยชน์ต่อการเลือกพิจารณาหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเผาเคลือบเป็นขั้นต้น โดยได้ทำการศึกษาค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ ด้วยวิธีอัลตราโซนิก ซึ่งกำหนดอยู่ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบคือ ความถี่ของคลื่นเทโอะเสียงที่ใช้เป็น 5 เมกกะเฮิรตซ์ ค่าอัตราส่วนบัพของส ซึ่ง เป็นอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของหน่วยของพื้นที่หน้าตัดต่อการเปลี่ยนแปลงของหน่วยในแนวยาวของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0-0.5 โดยกำหนดให้ตัวอย่างที่เผาสูงกว่า  $1000^{\circ}\text{C}$  มีค่าเป็น 0.25 และสำหรับตัวอย่างที่ผ่านการเผาในช่วง  $500-1100^{\circ}\text{C}$  มีค่าเป็น 0.30 โดยค่าดังกล่าวเป็นค่าประมาณ ที่ได้จากการพิจารณาค่าบัพของสในช่วง 0.20 ของคอนกรีตกับ 0.33 ซึ่งเป็นของโลหะ โดยผลการทดลองได้แสดงในตาราง 6

ตาราง 6 แสดงค่าความเร็วและค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น ในดินคอมพาวด์-เคลย์ ก่อนการเผาเคลือบ โดยวิธีอัลตราโซนิค

อุณหภูมิที่เผา (°C)	ความเร็วของคลื่น เหนือเสียง ในตัวกลาง (m/s)	ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น ของตัวอย่าง หน่วย จิกกะปาสกาล (GPa)	ค่าประมาณ อัตราส่วน ปัวซองส์ที่ใช้
500	2184 ± 90	6.28 ± 0.50	0.30
650	1323 ± 80	2.43 ± 0.30	0.30
700	1052 ± 40	1.54 ± 0.10	0.30
800	1308 ± 100	2.38 ± 0.40	0.30
850	1627 ± 50	3.68 ± 0.20	0.30
1100	3620 ± 40	21.47 ± 0.50	0.30
1160	5943 ± 150	74.46 ± 3.00	0.25

จากตาราง 6 ตัวอย่างที่สามารถคำนวณค่าความเร็ว ได้สูงที่สุดคือ ตัวอย่างที่เผาที่ 1160°C รองลงมาคือ 1100°C จากนั้นก็เป็น 500 850 800 650 และ 700°C ตามลำดับ โดยกลุ่มตัวอย่างที่เผาที่ 650-800°C นั้นพบว่า คลื่นเหนือเสียงสามารถเดินทางผ่านได้ด้วยความเร็วไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ แล้วยังเห็นได้ชัดเจนว่าตัวอย่างที่เผาที่ 1100 และ 1160°C นั้นคลื่นเหนือเสียง สามารถเดินทางผ่านได้ด้วยความเร็วสูง แต่ความเร็วแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาถึงค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น ก็พบว่ามีความสอดคล้องในลักษณะ เช่นเดียวกันกับความเร็ว โดยค่าเบี่ยงเบนที่ได้ คำนวณจากอนุพันธ์ของค่ามอดุลัส ความยืดหยุ่น เทียบกับความเร็วคูณกับค่าช่วงความผิดพลาดของความเร็วนี้ เป็นที่ น่าสังเกตว่า ความเร็วที่คลื่นเหนือเสียงที่ระดับความถี่ 5 เมกะเฮิรตซ์ เดินทางในตัวกลางที่เผาในช่วง 650-800°C มีค่าต่ำกว่าตัวกลางที่เผาที่ 500°C

### ตอนที่ 3 ผลการศึกษาสมบัติภายหลังจากเผาเคลือบของดินคอมพาวด์-เคลย์

ตอนนี้ได้แสดงผลการวิจัยเกี่ยวกับ สมบัติของดินคอมพาวด์-เคลย์ หลังการเผาเคลือบ โดยเลือกพิจารณาอุณหภูมิการเผาติดในช่วง 500-800 °C มาทำการชุบน้ำเคลือบ ( รายละเอียดกล่าวไว้ในส่วนตอนต้น ) ที่อุณหภูมิ 1250 °C แล้วศึกษาสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ผลการศึกษาหา ค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ
2. ผลการศึกษาหา ค่าความแข็งแรง ของดินคอมพาวด์-เคลย์
3. ผลการศึกษาหา ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ของดินคอมพาวด์-เคลย์
4. ผลการศึกษาการประสาน เป็นเนื้อเดียวกันของน้ำเคลือบและเนื้อดินชั้นคอมพาวด์-เคลย์ ที่ผ่านการเผาติดมาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

1. ผลการศึกษาค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำในผลิตภัณฑ์หลังการเผาเคลือบ จากการศึกษาค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาติดที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน แล้วนำใบชุบน้ำเคลือบและเข้าเผาเคลือบที่อุณหภูมิ 1250 °C โดยวิธีการต้ม (ดังกล่าวมาแล้วในส่วนตอนต้น) พบว่ามีค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ เป็น 0.01 x นอกจากนี้แล้วค่าความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นอัดรวม ที่ได้มีค่าเท่ากันคือ  $2.54 \pm 0.20$

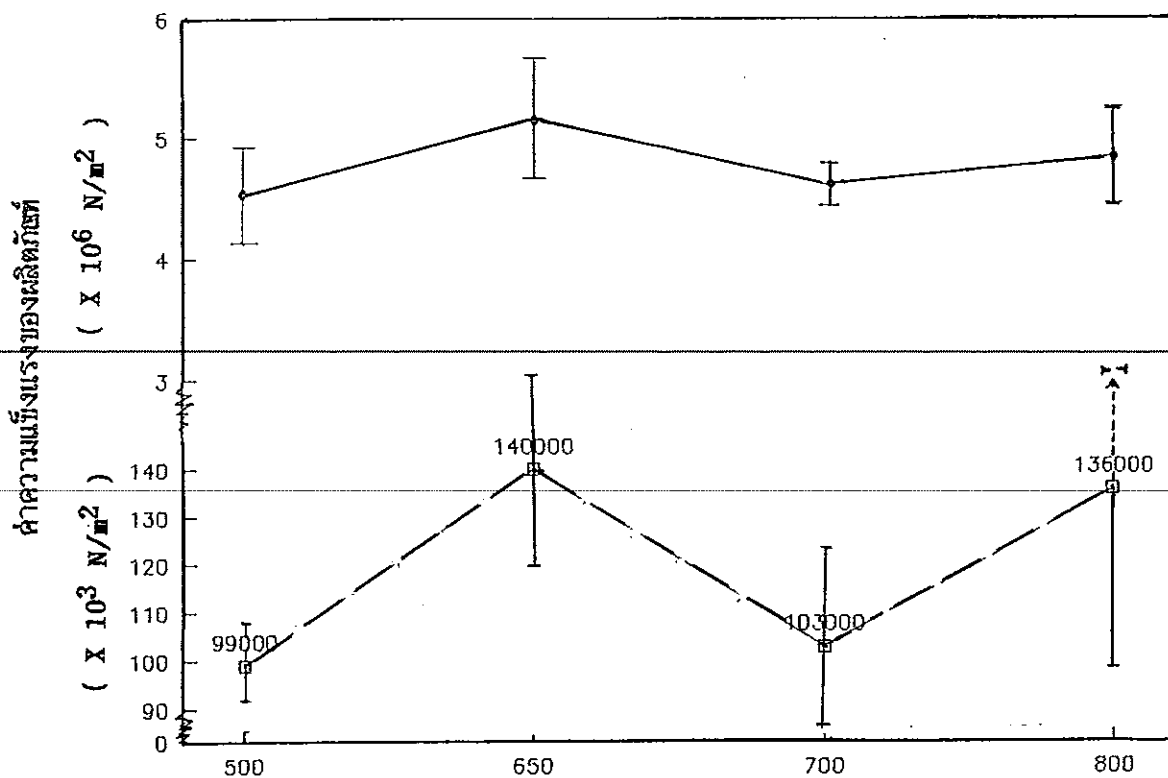
2. ผลการศึกษาค่าความแข็งแรง ของผลิตภัณฑ์ภายหลังจากเผาเคลือบ เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ ภายหลังจากเผาเคลือบที่ 1250 °C จากตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเผาติดมาต่างอุณหภูมิกัน โดยวิธีการแก้งอแบบสามตาแหง เพื่อศึกษาถึงแนวโน้มความแข็งแรงสุทธิของผลิตภัณฑ์ว่าขึ้นกับขั้นตอนการเผาติดหรือไม่อย่างไร ซึ่งผลการทดลองก็ได้แสดงไว้ดังตาราง 7 และภาพ 27 ดังต่อไปนี้

ตาราง 7 แสดงค่าความแข็งแรง โดยวิธีการโก่งงอแบบสามตำแหน่ง ของผลิตภัณฑ์ภายหลังจากเผาเคลือบ

อุณหภูมิการเผาติด/เผาเคลือบ (°C)	ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ หน่วย เมกกะปาสกาล (MPa)
500 / 1250	4.53 ± 0.40
650 / 1250	5.16 ± 0.50
700 / 1250	4.63 ± 0.20
800 / 1250	4.86 ± 0.40

หมายเหตุ เงื่อนไขการทดลอง เช่นเดียวกับกับการทดลองในตอนี่ 2

ภาพ 27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความแข็งแรงหลังการเผาติด และหลังการเผาเคลือบ โดยวิธีการโก่งงอแบบสามตำแหน่งกับอุณหภูมิในการเผาติดผลิตภัณฑ์



จากตาราง 7 พบว่าผลิตภัณฑ์ทั้งหมดทำให้ค่าความแข็งแรงไม่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามจากภาพ 27 ได้แสดงแนวโน้มของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาที่  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  นั้น ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงที่ดี ทั้งก่อนและหลังการเผาเคลือบ

### 3. ผลการศึกษาค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ภายหลังการเผาเคลือบ

จากการศึกษาค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์ภายหลังการเผาเคลือบ โดยวิธีอัลตราโซนิค ในตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน แล้วนำมาชุบเคลือบและเข้าเผาเคลือบที่  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$  ได้ค่าเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่างตั้ง ผลการทดลองซึ่งจะได้แสดงในตาราง ดังต่อไปนี้

ตาราง 8 แสดงค่าความเร็วและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ในดินคอมพาวด์-เคลย์ ภายหลังการเผาเคลือบ โดยวิธีอัลตราโซนิค

อุณหภูมิที่เผา ดิบ/เคลือบ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ความเร็วของคลื่น เหนือเสียง ในตัวกลาง (m/s)	ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ของตัวอย่าง หน่วย จิกกะปาสกาล (GPa)	ค่าประมาณ อัตราส่วน ปัวซองส์ที่ใช้
500/1250	$5694 \pm 100$	$68.35 \pm 2.00$	0.25
650/1250	$5741 \pm 200$	$69.48 \pm 5.00$	0.25
700/1250	$5520 \pm 100$	$64.28 \pm 2.00$	0.25
800/1250	$5638 \pm 100$	$67.01 \pm 2.00$	0.25

จากตาราง 8 พบว่าค่าเฉลี่ยความเร็ว ที่คลื่นเหนือเสียงเดินทาง ในตัวกลางเซรามิกส์ที่ผ่านการเผาเคลือบแล้วที่  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$  ไม่แตกต่างกันซึ่งเป็น

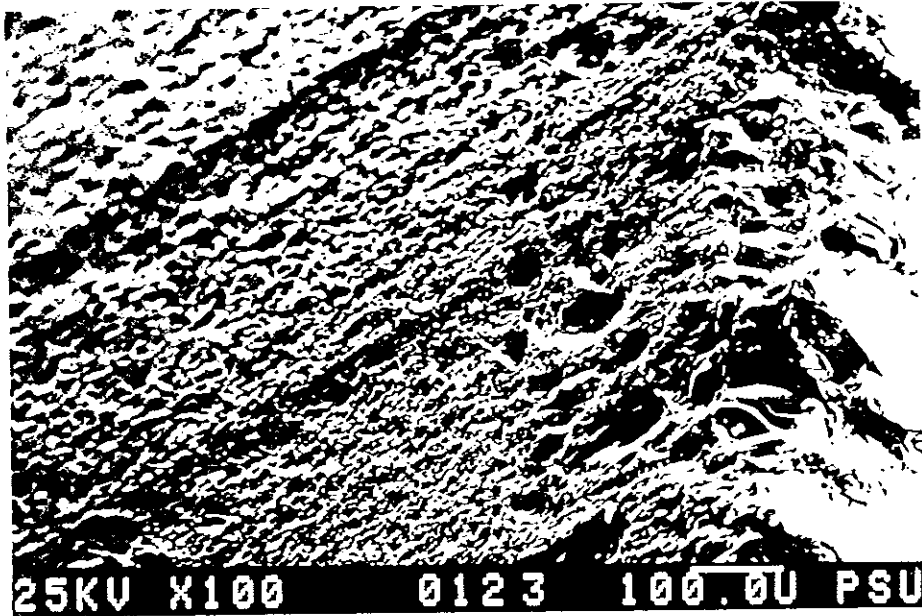
สิ่งที่ชี้ให้เห็นว่าการพิจารณาแรงยึดเหนี่ยวภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาไหม้มาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน โดยวิธีอัลตราซาวด์ ว่าขึ้นกับอุณหภูมิของการเผาไหม้หรือไม่ นั้นพบว่า ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นสุทธิของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาเคลือบที่  $1250^{\circ}\text{C}$  ไม่ขึ้นกับ อุณหภูมิเผาไหม้ โดยค่าเบี่ยงเบนของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเป็นค่าที่ได้จากผลคูณของค่าช่วงความผิดพลาดของค่าเฉลี่ยความเร็ว กับอนุพันธ์ของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นเทียบกับความเร็ว แล้วปรับเศษเพื่อให้เหลือเลขนัยสำคัญเพียงหนึ่งตำแหน่ง ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนของค่าความเร็วที่ได้ต่ำกว่า วนกรณของตัวอย่างที่ยังไม่ได้เผาเคลือบ ( จากตาราง 6 ) และเป็นที่น่าสังเกตว่า ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของตัวอย่างที่เผาที่  $1160^{\circ}\text{C}$  มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ผ่านการชุบเคลือบมาแล้ว อย่างมีนัยสำคัญ

#### 4. ผลการศึกษาการประสานเป็นเนื้อเดียวกัน ของน้ำเคลือบ และ เนื้อดินปั้น ภายหลังการเผาเคลือบ

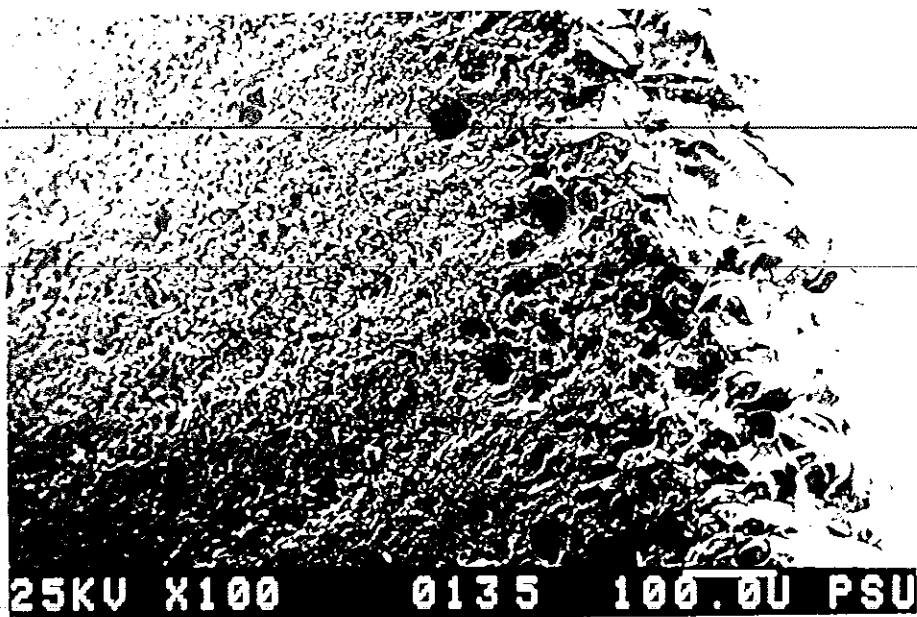
จากการศึกษาถึงลักษณะของการประสานเป็นเนื้อเดียวกันของ น้ำเคลือบกับ เนื้อผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาไหม้มาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน แล้วนำเข้าไปเผาเคลือบที่  $1250^{\circ}\text{C}$  เพื่อที่จะศึกษาถึงบริเวณผิวรอยต่อของน้ำเคลือบกับเนื้อดินปั้น ภายหลังการเผาเคลือบแล้ว โดยพิจารณาจากการเชื่อมประสานที่ดีในบริเวณรอยต่อของเนื้อดินปั้นกับน้ำเคลือบ ต้องมีความพรุนตัวต่ำหรือไม่มีเลย ซึ่งแสดงว่าน้ำเคลือบสามารถจับติดกับเนื้อดินปั้นได้ดี นอกจากนี้แล้วการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค เนื้อจะเป็นส่วนประกอบสำคัญต่อความแข็งแรงที่ สมบัติมหภาค ทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย ซึ่งผลการศึกษา ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงหนึ่ง ที่กำลังขยาย 100 เท่า ( ศึกษามาแล้วว่าเหมาะสมต่อการแสดงรายละเอียด ) ได้แสดงไว้ในภาพต่าง ๆ ต่อไปนี้



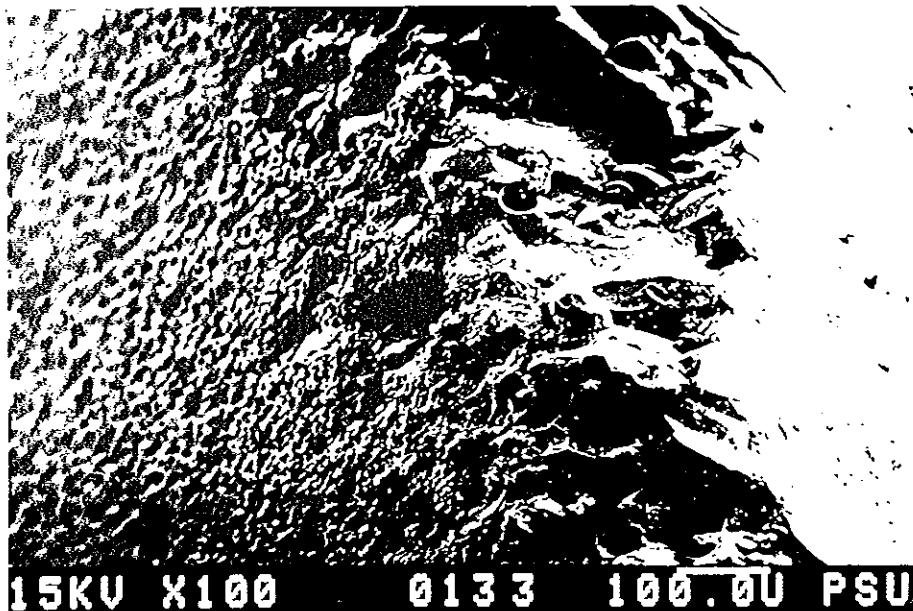
ภาพ 28 ภาพถ่ายฟิวรอยต่อ ของน้ำเคลือบและเนื้อดินปั้น ในตัวอย่างที่เผาติดที่ 500°C แล้วนำเข้าเผาเคลือบที่ 1250 °C จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงหนึ่ง (กำลังขยาย 100 เท่า)



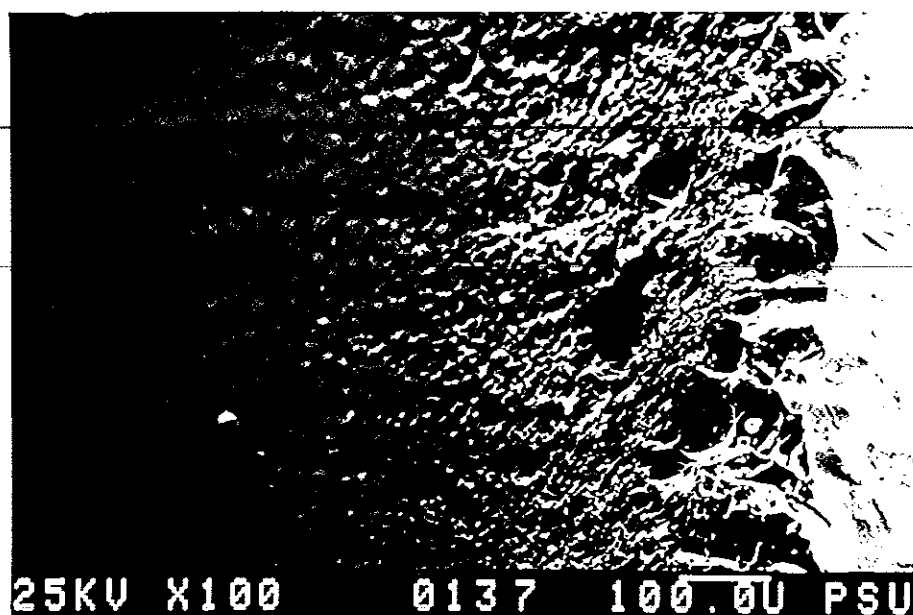
ภาพ 29 ภาพถ่ายฟิวรอยต่อ ของน้ำเคลือบและเนื้อดินปั้น ในตัวอย่างที่เผาติดที่ 650°C แล้วนำเข้าเผาเคลือบที่ 1250 °C จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงหนึ่ง (กำลังขยาย 100 เท่า)



ภาพ 30 ภาพถ่ายพหุรอยต่อ ของน้ำเคลือบและเนื้อดินปั้น ในตัวอย่างที่เผาติดที่ 700°C แล้วนำเข้าเผาเคลือบที่ 1250 °C จากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน แบบแสงกึ่ง (กำลังขยาย 100 เท่า)



ภาพ 31 ภาพถ่ายพหุรอยต่อ ของน้ำเคลือบและเนื้อดินปั้น ในตัวอย่างที่เผาติดที่ 800°C แล้วนำเข้าเผาเคลือบที่ 1250 °C จากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน แบบแสงกึ่ง (กำลังขยาย 100 เท่า)



จากภาพ 28-31 จะเห็นว่า บริเวณรอยต่อของน้ำเคลือบกับเนื้อดินปั้น  
ในภาพ 30 มีขนาดรูพรุนโตที่สุด รองมาคือ ภาพ 28 31 และ 29 ตามลำดับ  
โดยพบว่าแถบความพรุนตัว (ส่วนที่อยู่ระหว่างเนื้อเคลือบกับเนื้อดินปั้น ที่มีรูพรุน )  
ของผลิตภัณฑ์ในภาพ 28 และ 30 มีบริเวณกว้าง ส่วนในภาพ 29 และ 31 นี้มี  
บริเวณแคบ นอกจากนั้นแล้วเมื่อพิจารณาเนื้อดินปั้นที่ผ่านการเผาติดมาที่อุณหภูมิ  
ต่าง ๆ กันดังภาพ 28-31 พบว่าภายหลังการเผาเคลือบที่  $1250^{\circ}\text{C}$  แล้วเนื้อดิน  
ที่ผ่านการเผาติดที่  $650$  และ  $800^{\circ}\text{C}$  นี้มีเนื้อในของผลิตภัณฑ์ที่เนียนละเอียด  
มากกว่าเนื้อในของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาติดที่  $500$  หรือ  $700^{\circ}\text{C}$

## บทที่ 4

### บทวิจารณ์และสรุป

บทนี้เป็นข้อวิจารณ์และสรุป ผลการวิจัย ซึ่งได้แสดงไว้ในบทที่ 3 ทั้งนี้เพื่อแสดงเหตุผลและหรือ วิเคราะห์ตีความผลการวิจัย ให้ชัดเจนขึ้นว่า เหตุใดผลการวิจัยจึงเป็นเช่นนั้น พร้อมทั้งชี้ว่าผลดังกล่าวสนับสนุน สมมุติฐานหรือ ผลการค้นคว้าวิจัยอื่น ๆ อย่างไร โดยจะแบ่งการวิจารณ์ออกเป็นข้อ ๆ ดังแสดงไว้ตามสมบัติทางกายภาพที่ได้ทำการศึกษาต่อไปนี้

1. ข้อวิจารณ์ค่าการหดตัวเฉลี่ยของดินคอมพาวด์-เคลย์
2. ข้อวิจารณ์การหาค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ โดยวิธีแช่ในวิธีสูญญากาศ เปรียบเทียบกับ วิธีการต้ม
3. ข้อวิจารณ์ค่าความแข็งแรงของดินคอมพาวด์-เคลย์ โดยวิธีการโค้งงอ แบบสามตาแหน่ง
4. ข้อวิจารณ์ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของดินคอมพาวด์-เคลย์ โดยวิธีอัลตราโซนิค
5. ข้อวิจารณ์การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงกึ่งเงา ของดินคอมพาวด์-เคลย์

จากนั้นก็สรุปผลการวิจัย ตามลำดับวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

#### 1. ข้อวิจารณ์ค่าการหดตัวเฉลี่ยของดินคอมพาวด์-เคลย์

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อดินแห้งที่อุณหภูมิห้องหดตัวลง 7.42 % จากนั้นก็หดตัวต่อไปภายหลังจากการนำเข้าเผาที่ 800 °C อีก 0.20 % และหลังจากเผาที่ 1160 °C อีก 7.92 % ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการวิจัยวัตถุประสงค์ที่นำมาใช้งานเซรามิกส์ ซึ่งกล่าวไว้ว่า ในผลิตภัณฑ์จะมีน้ำระอบกันอยู่ใน 4 ลักษณะคือ

1. น้ำที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาคของวัตถุดิบ ( Absorbed water )
2. น้ำที่เป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์หดตัวเมื่ออบแห้ง ( Shrinkage water )
3. น้ำซึ่งยังอยู่ในช่องว่างผลิตภัณฑ์ ( Pore water )
4. น้ำซึ่งอยู่ในโครงสร้างผลึกของวัตถุดิบ ( Crystal lattice water )

ซึ่งในส่วนที่ 1 และ 2 คือส่วนที่ถูกกำจัดออกไปในขั้นต้น ในขณะที่น้ำส่วนที่ 3 และ 4 จะถูกกำจัดออกไปที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้จากผลการวิจัยพบว่าค่าการหดตัวสุทธิของดินคือ  $15.02 \pm 0.60 \%$  ค่าเบี่ยงเบนดังกล่าวเป็นผลสืบเนื่องมาจาก การวัดค่าความยาวในการหดตัวนั้น วัดเฉพาะในแนวความยาวของการหดตัวที่เป็นแนวเส้นตรง มิได้รวมเอาความยาวในแนวการโค้งงอของตัวอย่างมาพิจารณาแต่อย่างไร

2. ข้อวิจารณ์การหาค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำโดยวิธีแช่น้ำ วิธีสูญญากาศ เปรียบเทียบกับ วิธีการต้ม

พิจารณาผลการวิจัยทั้งค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ ที่ได้จากวิธีการต้ม กับวิธีสูญญากาศ พบว่าให้ผลไม่แตกต่างกันโดยนัยสำคัญในทุกกรณีของตัวอย่างที่ ทากการศึกษาและพบว่าค่าเฉลี่ยต่าง ๆ ที่ได้จากวิธีสูญญากาศนั้นสูงกว่าวิธีการต้ม อย่างไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ เมื่อตัวอย่างทดสอบอยู่ภายใต้สภาพ สูญญากาศ (300 มิลลิเมตรปรอท) ทำให้ห้องอากาศในเนื้อตัวอย่างหลุดออกมา ซึ่งส่งผลให้ภายในเนื้อตัวอย่างนั้นเกิดสภาพสูญญากาศขึ้น จึงเกิดแรงพยายามที่จะ ดูดสิ่งทีแวดล้อมที่อยู่รอบ ๆ เข้ามาแทนที่ เมื่อตัวอย่างถูกทำให้จมลงลงในน้ำ น้ำก็ เข้าไปแทนที่รูพรุนในเนื้อตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว (อาจพิจารณาจากห้องอากาศ ที่ดูดขึ้นมาอย่างรวดเร็ว มากกว่าการแช่ตัวอย่างในน้ำแล้วต้ม) อย่างไรก็ตามยังไม่อาจสรุปได้ว่าวิธีสูญญากาศดีกว่าวิธีต้ม เนื่องจากเงื่อนไขในการทดสอบยังไม่รัดกุม เช่น ยังไม่ได้ทดสอบกับตัวอย่างขนาดใหญ่ อีกทั้งขาดการตรวจสอบสภาพ สูญญากาศว่าควรเป็นเท่าใด เป็นต้น แต่ก็พอจะเห็นได้ว่า โดยวิธีสูญญากาศ ตาม เงื่อนไขที่ได้ทดลองวิจัย สามารถลดเวลาในการทดลองจาก 12 ชั่วโมงโดยวิธี การต้มเหลือเพียง 6 ชั่วโมงได้ โดยให้ผลไม่แตกต่างกัน

ส่วนงานวิธีการแช่ไฟนั้นพบว่า วัสดุไม่แตกต่างกับวิธีการต้ม สำหรับ ตัวอย่างที่เผาที่ 1160 และ 1250 °C ทั้งนี้ก็สอดคล้องกับความจริงที่ว่า เนื้อดินที่ อุณหภูมิดังกล่าว เริ่มเกิด เนื้อแก้วและมีการหลอมตัวกันเอง ทำให้ไม่สามารถใส่ ฟองอากาศในตัวอย่างได้แม้โดยวิธีการต้มหรือวิธีสูญญากาศ จึงส่งผลให้ค่า ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ ของตัวอย่างที่เผาที่ 1160 และ 1250 °C ที่ได้ โดยวิธีการทั้ง 3 ไม่แตกต่างกัน ส่วนตัวอย่างที่เผาต่ำกว่าให้พบว่าโดยวิธีแช่ไฟ วัสดุจะแข็งตัวกว่าโดยวิธีการต้มหรือวิธีสูญญากาศ ซึ่งก็สอดคล้องกับความจริง แบบตรงไปตรงมา เพราะโดยวิธีแช่ไฟไม่มีการกระทำใด ๆ กับตัวอย่างเพื่อทำให้ ฟองอากาศหลุดออกมาแต่อย่างใด (อาจพิจารณาจากปริมาณฟองอากาศที่หลุดขึ้นมา นั้นมีปริมาณน้อย และหลุดก็อย่างช้า ๆ)

นอกจากนี้แล้วการที่พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความหนาแน่น อัดรวมของตัวอย่างที่เผาที่ 1160 และ 1250 °C มีค่าเท่ากับอธิบายได้โดยการ พิจารณาจากสมการ การหาค่าความถ่วงจำเพาะ ( $T=D/D-S$ ) และสมการการหา ค่าความหนาแน่นอัดรวม ( $B=D/W-S$ ) ก็จะได้ว่า ค่าทั้งสองเท่ากันได้ที่ต่อเมื่อ  $D-S$  เท่ากับ  $W-S$  ซึ่งก็หมายถึงไม่มีการดูดซึมน้ำเข้าไปในตัวอย่างไม่เอง โดยที่

$D-S$  คือ ปริมาตรส่วนที่น้ำซึมผ่านไม่ได้

( Volume of impervious portion )

$W-S$  คือ ปริมาตรภายนอก ( Exterior volume )

$W-D$  คือ ปริมาตรรูพรุน ( Volume of open pore )

---

การที่เบอร์เซิ่ต์ความพรุนตัวมีค่าสูงถึงกว่า 30 % หรือเป็น 1 ใน 3 ของตัวอย่างทดสอบเป็นสิ่งที่ชี้ให้เห็นว่า วิธีการขึ้นรูปโดยการอัดแบบด้วยมือ นั้น ไม่สามารถที่จะขึ้นรูปให้มีควมหนาแน่นเน เนื้อผลิตภัณฑ์สูง ๆ ได้

---

### 3. ข้อวิจารณ์ค่าความแข็งแรงของดินคอมพาวด์-เคลย์ โดยวิธีการโคงงอแบบสามตาแทง

พิจารณาผลการทดลองหา ค่าความแข็งแรงของตัวอย่าง ที่เผาในช่วง 500-800 °C พบว่ามีความแข็งแรงไม่ต่างกันโดยนัยสำคัญ และจากภาพ 27 ซึ่งได้แสดงแนวโน้มของค่าความแข็งแรง ทั้งก่อนและหลังการเผาเคลือบ พบว่า ดินที่เผาที่ 650 °C มีค่าเฉลี่ยความแข็งแรงใกล้เคียงกับดินที่เผาที่ 800 °C แต่ภายหลังการเผาเคลือบพบว่าให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงที่สุด (แต่ไม่แตกต่างกันโดยนัยสำคัญ) ทั้งนี้อธิบายได้ว่า ภายใต้งานวิชาการทดลองตามที่กล่าวมาแล้ว ค่าความแข็งแรงขึ้นกับ น้ำหนักกดที่ทำให้ตัวอย่างแตกหัก ความกว้าง ความหนา ของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งจากที่ได้ทราบค่าการหดตัวหลังการเผาที่ (7.42 %) มาแล้วในเท่าที่ทราบได้ว่า ความกว้างและความหนา ของตัวอย่างทดสอบจะมีค่าประมาณ 4.71 และ 0.59 เซนติเมตร โดยที่ระยะห่างของบาร์รับน้ำหนักกดนี้มีค่า 4 เซนติเมตร และโดยที่ทราบว่า ความหนาแน่นของตัวอย่างที่ขึ้นรูปด้วยการอัดด้วยมือใน ที่มุมทั้ง 4 ของตัวอย่างทดสอบจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ ครั้นนำมาทดสอบกดก็จะแตกได้โดยง่าย ทำให้ผลการหาค่าความแข็งแรงของตัวอย่างที่เผาในช่วง 500-800°C ไม่แตกต่างกัน ซึ่งการควบคุมความหนาแน่นของตัวอย่างให้สม่ำเสมอ อาจจะทำให้ผลการทดลองโดยวิธีดังกล่าว ให้ค่าความแข็งแรงแตกต่างกันโดยนัยสำคัญได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความจำกัดในการนำตัวอย่างเข้าเผาจึงไม่อาจขยายขนาดตัวอย่างทดสอบได้

ส่วนเหตุที่ตัวอย่างที่เผาที่ 650°C แล้วเข้าเผาเคลือบที่ 1250 °C กลับให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าตัวอย่างที่เผาที่ 800°C เนื่องจากโครงสร้างภายในเนื้อผลิตภัณฑ์มีการเรียงตัวกันอย่างสลับซับซ้อนมากกว่า (จากภาพ 22-25) และภายหลังการเคลือบ มีการประสานเป็นเนื้อเดียวกันกับเคลือบได้ดีกว่า ซึ่งได้แสดงรายละเอียดมาแล้วในบทที่ 3

#### 4. ข้อวิจารณ์การหา ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น ของดินคอมพาวด์-เคลย์ โดยวิธีอัลตราโซนิค

จากการทดลองนำวิธีอัลตราโซนิค มาประยุกต์เพื่อการศึกษาหาค่ามอดุลัสความยืดหยุ่น กับผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ (ซึ่งยังไม่เคยมีรายงานการประยุกต์ดังกล่าว) พบว่า สำหรับตัวอย่างที่ผ่านการเผาในช่วง  $500 - 1100^{\circ}\text{C}$  ให้ค่าต่ำกว่า 22 จิกกะปาสกาล ซึ่งอยู่ในช่วงของวัสดุครากตัว เช่น ตะกั่ว เป็นต้น (โดยการทดสอบด้วยการดึงหรือการทดสอบการต้าน ) และสำหรับตัวอย่างที่เผาที่ 1160 และ  $1250^{\circ}\text{C}$  นั้นพบว่ามีค่าสูงกว่า 60 จิกกะปาสกาล ซึ่งอยู่ในช่วงของวัสดุเปราะ เช่น อลูมินา เป็นต้น ( โดยการทดสอบการต้าน ) ซึ่งผลการทดลองได้สอดคล้องกับหลักการซึ่งกล่าวไว้ว่า คลื่นเสียงไม่ว่าจะอยู่ในยานใดก็ตามย่อมเกิดจากการสั่นของวัตถุ ( Mechanical Vibration ) ซึ่งมีลักษณะสำคัญคือ เป็นคลื่นตามยาว ( Longitudinal Wave ) การเคลื่อนที่ของเสียงในตัวกลาง ก็เป็นการส่งถ่ายพลังงานในรูปของการสั่น ระหว่างอนุภาคข้างเคียงของตัวกลาง ความเร็วของตัวกลางใด ๆ จึงขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการส่งถ่ายพลังงาน ในรูปของการสั่นระหว่างอนุภาคของตัวกลางนั้น ๆ ซึ่งจะมีค่าต่าง ๆ กันไปในตัวกลางแต่ละชนิด และขณะที่เสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง จะมีพลังงานลดลงเนื่องจากความหนืด ( Frictional losses ) ซึ่งโดยทั่วไปจะเรียกว่าเป็น พลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยตัวกลาง ซึ่งตัวกลางแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานเสียงต่างกัน และ ที่ความถี่ต่างกันในตัวกลางเดียวกันก็ดูดกลืนต่างกัน

นอกจากนี้แล้วยังมีลักษณะสำคัญอีกประการหนึ่งนั่นก็คือ เมื่อคลื่นเสียง

เคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง จะมีคลื่นบางส่วนสะท้อนกลับ ( Reflect ) การสะท้อนกลับจะขึ้นอยู่กับ ค่าความต้านทานเสียงของตัวกลาง ( Acoustic impedance , ใช้ตัวย่อเป็น  $Z$  ) ทั้งสองและมุมตกกระทบของคลื่นเสียง ซึ่งค่าดังกล่าวก็เป็นผลคูณของ ค่าความหนาแน่นกับความเร็วเสียงที่แท้จริง ของตัวกลางนั้น ๆ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้พอจะอธิบายได้ว่าสาเหตุสำคัญซึ่งทำให้ผลการวัด ค่าความเร็วของคลื่นเหนือเสียง ... ที่เคลื่อนที่ในตัวกลางเซรามิกส์



ในช่วงอุณหภูมิการเผาจาก 500 - 1100 °C มีค่าค่า เนื่องจากตัวอย่างมีการดูดกลืนพลังงาน ซึ่งพลังงานกับความถี่ แปรผันตรงต่อกัน ( $E = hf$ ) ในขณะที่ ความเร็วก็แปรผันตรงกับความถี่ ( $v = f\lambda$ ) เช่นกัน นั้นก็มีความหมายว่าคลื่นอัลตราโซนิคที่ระดับความถี่ 5 เมกกะเฮิรตซ์ เมื่อเดินทางผ่านตัวกลางเซรามิกส์ แล้วมีการดูดกลืนพลังงานดังกล่าว ซึ่งทำให้ความถี่มีค่าลดลง และเมื่อเดินทางมายังหัวรับสัญญาณ ก็ย่อมจะทำให้การวัดคาบเวลาในการเดินทางไปและกลับของตัวอย่างผิดพลาดไป โดยไม่อาจทราบได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความถี่เป็นไปอย่างไร แต่สำหรับตัวอย่างที่เผาที่ 1160 และ 1250 °C นั้นพบว่าผลการศึกษาให้ค่าอยู่ในระดับเลขครรชยี่ ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้โดยวิธีอื่น ๆ ซึ่งหากอธิบายด้วยหลักการเดิมก็จะเห็นได้ว่าตัวอย่างทั้ง 2 กรณีนี้ มีค่าความหนาแน่นอัตราสูง ( 2.54 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ) อีกทั้งจากภาพ 25 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าตัวอย่างมีเนื้อแน่น ดังนั้นการส่งต่อพลังงานจึงมีการสูญเสียน้อย ซึ่งย่อมทำให้ผลการวัดคาบเวลาในการเดินทางไปและกลับ ตลอดจนการคำนวณค่าความเร็ว เป็นไปได้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้นนั่นเอง

##### 5. ข้อวิจารณ์การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาค โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงกึ่งเงา ของดินคอมพาวด์-เคลย์

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในเนื้อดินคอมพาวด์-เคลย์ ทั้งก่อนและหลังการเผาเคลือบ พบว่าโครงสร้างในด้านความพรุนตัว ทั้งขนาด ปริมาณ และการกระจาย มีลักษณะต่าง ๆ กัน ตามอุณหภูมิของการเผา ซึ่งอธิบายได้ว่าการที่โครงสร้างความพรุนตัว การกระจาย และขนาดของความพรุนตัว เปลี่ยนแปลง เบี่ยงเบน เนื่องจากความพยายามการปรับตัวเพื่อลดแรงกระทำภายนอก ซึ่งในที่นี้หมายถึง อุณหภูมิของการเผา ตลอดจนเวลาที่ตัวอย่างต้องรับภาระในการปรับตัวให้พลังงานภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ มีค่าค่าที่สุด ( หลักสมมูลย์พลังงาน ) และผลของโครงสร้างหลังการเผาย่อมต้องเป็นเงื่อนไขในการปรับตัวของเนื้อดินภายหลังการนำเข้าไปเผาเคลือบนั่นเอง

### สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยได้ข้อสรุป ซึ่งแสดงตามลำดับข้อวัตถุประสงค์ใน การวิจัย ตามที่ได้เคยกล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังต่อไปนี้ คือ

จากการวิจัยภาวะเหมาะสม ( อุณหภูมิ ) ของการเคลือบในการผลิต เซรามิกส์ที่ขึ้นสำหรับดินคอมพาวด์-เคลย์ โดยศึกษาถึงสมบัติกายภาพต่าง ๆ สรุปว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผา คือ  $650^{\circ}\text{C}$  ทั้งนี้เพราะ ค่าความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำ ทั้งก่อนและหลังการเผาเคลือบ ไม่ต่างกับการเผาที่  $800^{\circ}\text{C}$  ที่ปฏิบัติกันอยู่เดิมคือมีค่าระหว่าง 30-37 % หลังการเผาเคลือบและ 0.01-0.03 % หลังการเผาเคลือบทั้งยังให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงทั้งก่อนและหลังการเผาเคลือบ ที่สูงกว่าอีกด้วยคือมีค่าระหว่าง 120-160 กิโลปาสกาล หลังการเผาเคลือบและมีค่า 4.66-5.66 เมกกะปาสกาล หลังการเผาเคลือบ นอกจากนี้แล้วการประสาน เบ็นเนื้อเดียวกันกับน้ำเคลือบก็ยิ่งดีกว่ากล่าวคือ มีรูพรุน บริเวณรอยต่อของเนื้อ ดินกับน้ำเคลือบน้อย

1. จากการศึกษาเปรียบเทียบ วิธีการหาค่า ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ โดยเทคนิคต่าง ๆ เปรียบเทียบกับ เทคนิคการต้ม ซึ่งเป็นเทคนิคมาตรฐานได้ข้อสรุปดังนี้

-วิธีสุญญากาศให้ผลไม่แตกต่างกับวิธีการต้มในทุกกรณี และมีข้อดีในการลดเวลา ในขั้นตอนการแช่น้ำจาก 12 ชั่วโมง โดยวิธีการต้มเหลือเพียง 6 ชั่วโมง และน้ำทำให้ตัวอย่างเปลี่ยนสภาพ อีกทั้งไม่ต้องระมัดระวังระดับน้ำในขณะทดลอง ทาให้สะดวกและสามารถทดลองได้ปริมาณมาก ๆ ในเวลาเดียวกัน

( ภายใต้งานโครงการทดลองดังกล่าวมาแล้ว )

-วิธีการแช่น้ำให้ผลไม่แตกต่างกับวิธีการต้ม สำหรับตัวอย่างที่เผาที่ 1160 และ  $1250^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานในการทดลองมากที่สุด

2. จากการศึกษา ความแข็งแรง ของผลิตภัณฑ์ โดยวิธีการโคงงอแบบสามตำแหน่ง พบว่า ค่าความแข็งแรง ของตัวอย่างที่ผ่านการเผาในช่วง  $500-800^{\circ}\text{C}$  ไม่แตกต่างกันคือมีค่าอยู่ระหว่าง 89-176 กิโลปาสกาล และ ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ  $1250^{\circ}\text{C}$  มีค่าระหว่าง 4.13-5.66 เมกกะปาสกาล

3. จากการศึกษา ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น โดยวิธีอัลตราโซนิค ที่ระดับความถี่ 5 เมกกะเฮิรตซ์ พบว่า ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น ของตัวอย่างที่เผาในช่วง 500-850 °C มีค่าระหว่าง 1.44-6.78 จิกกะปาสกาล และหลังการเผาเคลือบที่ 1250 °C มีค่าระหว่าง 62.28-74.48 จิกกะปาสกาล

4. จากการศึกษา โครงสร้างระดับจุลภาคด้านความพรุนตัว โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบแสงหนึ่ง พบว่า อุณหภูมิการเผาติด ส่งผลต่อลักษณะความพรุนตัว ขนาดของรูพรุน และการกระจายของรูพรุน ทั้งก่อนและหลังการเผาเคลือบ โดยพบว่า การเผาติดที่ 650 °C (พิจารณาจาก 500-800 °C) ทำให้เนื้อผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก การกระจายของรูพรุน สลับซับซ้อน หลังการเผาติดและมีการประสานเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำเคลือบที่ตีกล่าวคือ มีรูพรุนบริเวณเนื้อดินปนกับน้ำเคลือบน้อยและขนาดเล็ก

ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อ จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ยังพบว่า มีสิ่งที่น่าสนใจได้ศึกษาต่อไปอยู่หลาย ๆ ประการด้วยกันดังจะได้เสนอไว้ดังนี้

ในการศึกษาเรื่อง มอดูลัสความยืดหยุ่นของ เซรามิกส์ เนื่องจากยังมีสิ่งหนึ่งซึ่งไม่เคยทราบค่ากันมาก่อนสำหรับ เซรามิกส์ นั่นก็คือ ค่าพลังงานการดูดกลืนคลื่นเสียงของ เซรามิกส์ ที่มีความพรุนต่าง ๆ กัน เพราะหากทราบค่าดังกล่าวแล้วก็สามารถวิเคราะห์หรือวิจารณ์ การหาค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น โดยวิธีอัลตราโซนิค ที่ระดับความถี่ต่าง ๆ กันได้มากขึ้น ซึ่งเป็นการพัฒนาการประยุกต์เอาวิธีดังกล่าวมาทำในห้องปฏิบัติการได้

จากการศึกษา การหาค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ พบว่ายังมีเงื่อนไขที่ไม่ได้พิจารณา เช่น ชั่วขณะที่จะเป็นในการแช่น้ำ เพื่อให้ตัวอย่างเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ระดับของสภาพสุญญากาศซึ่งถ้าต่ำกว่าที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ จะเป็นอย่างไรบ้าง เป็นต้น

ท้ายสุดนี้ การทดสอบความแข็งแรง ในผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ โดยวิธีการแก้งงอบแบบสี่ตาแหน่ง ซึ่งมีความท้าทายในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างไม่ให้แก้งงอบก็เป็นสิ่งที่น่าสนใจอยู่เป็นอย่างมาก เพราะข้าพเจ้าเชื่อว่าการทดสอบโดยวิธีนี้จะให้ค่าความแข็งแรงที่เ็น เชื่อถือสูงกว่า

### บรรณานุกรม

กอบกิตต์ รัฐวัฒนกุล. 2524. อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา. กรุงเทพฯ :  
กองเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

จาตุรงค์ บุญทันใจ. 2520. วัสดุศาสตร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

ชนะ กลีภรณ์. 2526. ความแข็งแรงของวัสดุ. พิมพ์ครั้งที่ 7.  
กรุงเทพฯ : ชวนพิมพ์.

ชาตวุฒิ ตั้งจิตวิทยา และ สาโรช ฐิติเกียรติพงศ์. 2521.  
วัสดุในงานวิศวกรรม เล่ม 1. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด.

-----, 2523. วัสดุในงานวิศวกรรม เล่ม 2. กรุงเทพฯ :  
บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด.

ชาโตะ หุจิอิ. 2530. การทดสอบแบบไม่ทำลาย. หจก.เอช-เอน การพิมพ์.

ประเสริฐ ผลิตี. 2527. กลศาสตร์ของวัสดุ. พิสิกส์เซ็นเตอร์ การพิมพ์.

มนัส สถิตจินดา, ผาสุข กุลละวณิชย์ และ ขนาด หัสศิริ. 2513. Engineering  
Materials. โรงพิมพ์ของสมาคมสังคมศาสตร์แห่งประเทศไทย.

มานพ ตันตระบัณฑิตย์. 2530. งานทดสอบวัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพฯ :  
สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

เล็ก สีคง. 2533. วัสดุวิศวกรรม. คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

สังสิทธิ์ ศรีสุวรรณ. 2529. โครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุ เล่ม 1:  
พฤติกรรมทางโครงสร้าง. กรุงเทพฯ : ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ การพิมพ์.

----- . 2529. โครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุ เล่ม 2 :  
พฤติกรรมทางกล. กรุงเทพฯ : ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ การพิมพ์.

Ashby, M.F. and Jones, D.R.H. 1980. Engineering Materials :  
An Introduction to their Properties and Applications.  
Oxford : Pergamon Press, Ltd.,

Bever, M.E., Hench, L.L. and Perterlin, A. 1972.  
Introduction to Materials Science. Tokyo :  
McGraw-Hill Koogakusha, Ltd.,

Clauser, H.R. 1975. Industrial and Engineering Materials.  
New York : McGraw-Hill Book Company.

Schlenker, B.R. 1969. Introduction to Materials Science.  
Sydney : John Wiley & Sons Australasia Pty. Ltd.,

Van Vlack, L.H. 1973. A Textbook of Materials Technology.  
New Jersey : Addison Wesley Publishing Company.

Van Vlack, L.H. 1978. Element of Materials Science and Engineering.

3rd ed., Massachusetts : Addison Wesley Publishing Company.

----- . 1982. Materials For Engineering : Concepts and

Application. Massachusetts : Addison Wesley Publishing Company.

----- . 1980. Materials science for Engineering.

Massachusetts : Addison Wesley Publishing Company.

Wyatt, O.H. and Hughes, D.D. 1974. Metals, Ceramic and Polymers.

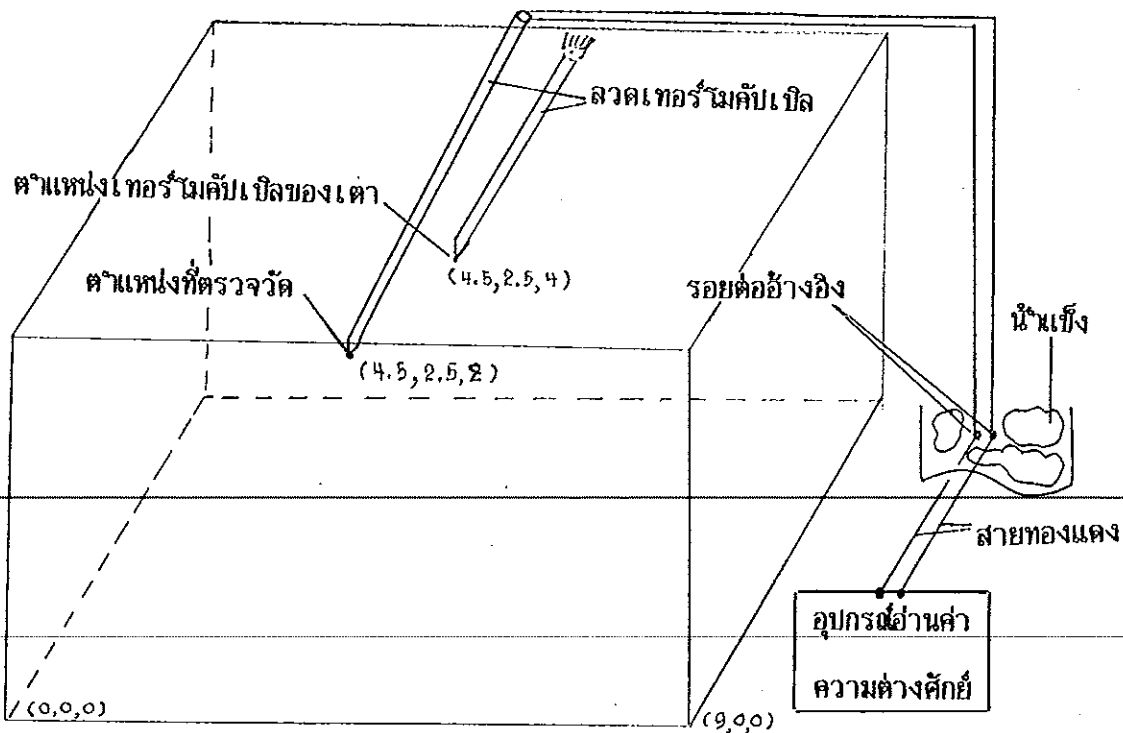
Cambridge University Press, London.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
การตรวจสอบอุณหภูมิในเตาเผา

จากการตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตาเผาโดยเทอร์โมคัปเปิล ชนิด อาร์ ( R type : แพลทินัม-13% โรเดียมแพลทินัม ) ซึ่งให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเป็น  $-2.26 \sim 21.108$  มิลลิโวลต์ ( mV ) ภายใต้บรรยากาศ แบบออกซิไดซ์ และทำการชดเชยอุณหภูมิที่รอยต่ออ้างอิง เพื่อตรวจสอบการกระจายของอุณหภูมิที่พิกัดต่าง ๆ ตามแนวแกนซึ่งได้แสดงตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลของเตาเผาและตำแหน่งที่ตรวจสอบโดยเทอร์โมคัปเปิล แบบ อาร์ ไว้ดังภาพ 1

ภาพ 1 แสดงการตรวจสอบอุณหภูมิในเตาเผา โดยเทอร์โมคัปเปิล แบบ อาร์ ซึ่งได้ชดเชยอุณหภูมิที่รอยต่ออ้างอิงแล้ว



หมายเหตุ \_ ขนาดพื้นที่ห้องเตาเป็น 5 X 5 X 9 นิ้ว

พิกัดที่ใช้บอกตำแหน่ง ที่ตรวจสอบเป็น ( X,Y,Z ) โดยแบ่งแต่ละแกนออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน



ตาราง 1 แสดงค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้โดยเทอร์โมคัปเบิล แบบอาร์ (T) ที่  
ตำแหน่งพิกัดต่าง ๆ เทียบกับ อุณหภูมิที่เทอร์โมคัปเบิลของเตา ที่  
ตำแหน่งพิกัด (4.5, 2.5, 4) นิ้ว ( $T/^{\circ}\text{C}$ )

ตำแหน่งพิกัดที่ตรวจวัด	$T/^{\circ}\text{C}$	$T/^{\circ}\text{C}$
(4.50, 2.25, 1.25)	293 $\pm$ 3	300
(4.50, 2.25, 2.50)	302 $\pm$ 3	300
(4.50, 2.25, 3.75)	308 $\pm$ 3	300
(4.50, 2.25, 1.25)	393 $\pm$ 3	400
(4.50, 2.25, 2.50)	401 $\pm$ 3	400
(4.50, 2.25, 3.75)	407 $\pm$ 3	400
(4.50, 2.25, 1.25)	494 $\pm$ 3	500
(4.50, 2.25, 2.50)	505 $\pm$ 3	500
(4.50, 2.25, 3.75)	509 $\pm$ 3	500
(4.50, 2.25, 1.25)	597 $\pm$ 3	600
(4.50, 2.25, 2.50)	602 $\pm$ 3	600
(4.50, 2.25, 3.75)	608 $\pm$ 3	600
(4.50, 2.25, 1.25)	697 $\pm$ 5	700
(4.50, 2.25, 2.50)	705 $\pm$ 5	700
(4.50, 2.25, 3.75)	710 $\pm$ 5	700
(4.50, 2.25, 1.25)	790 $\pm$ 5	800
(4.50, 2.25, 2.50)	811 $\pm$ 5	800
(4.50, 2.25, 3.75)	819 $\pm$ 5	800
(4.50, 2.25, 1.25)	884 $\pm$ 5	900
(4.50, 2.25, 2.50)	903 $\pm$ 5	900
(4.50, 2.25, 3.75)	917 $\pm$ 5	900

ตาราง 1 เป็นตารางซึ่งแสดงค่าอุณหภูมิ ในแนวกลางเตาเผาที่ระดับความสูงจากพื้น (แกน Z) เป็น 1.25 2.50 และ 3.75 นิ้ว ตามลำดับ โดยทำการยื่นไฟไว้ที่อุณหภูมิที่ทำการตรวจสอบ 15 นาที และพบว่าหากยื่นไฟนานกว่า 45 นาทีไปแล้ว สำหรับการเผาในทุกอุณหภูมิ จะให้ค่าผิดไปจากที่เทอร์โมคัปเบิลของเตาเผาอ่านได้ ( ปรากฏบนหน้าจอ ) ไม่เกิน  $10^{\circ}\text{C}$  โดยบริเวณใจกลางตัวเตาจะมีค่าใกล้เคียงกับที่เทอร์โมคัปเบิลของเตาเผาอ่านได้ ถัดจากใจกลางเตาขึ้นไปด้านบนจะพบว่าหากยื่นไฟนานพออุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จะสูงกว่าบริเวณกลางเตาได้ถึง  $20^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไป ( เตาสูงกว่า  $500^{\circ}\text{C}$  ) ส่วนด้านล่างของเตาถัดจากบริเวณกลางเตาลงมาอุณหภูมิจะต่ำกว่าบริเวณกลางเตาประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณที่เตา ( Z ต่ำกว่า 1.25 นิ้ว ) นอกจากนี้ตามมุมของเตาจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณกลางเตาที่ระดับความสูงเดียวกัน ประมาณ  $3-5^{\circ}\text{C}$  ทั้งนี้เพราะเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับขดลวดทำความร้อน แต่ที่ด้านเหนือเตาเผาจะไม่มีขดลวดอยู่ ( ระนาบ XZ ซึ่งค่า Y ต่ำกว่า 1.25 นิ้ว ) ทำให้อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้มีค่าต่ำกว่าบริเวณอื่น ๆ พบว่าหากเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นเท่าใดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเตาก็จะมากขึ้นเท่านั้น แต่ปัญหาจะลดลงหากการยื่นไฟนานกว่า 45 นาที ไปแล้ว

การตรวจวัดดังกล่าวยังมีความบกพร่อง ทำให้ไม่สามารถวัดอุณหภูมิสูงมาก ๆ ได้ ทั้งที่เทอร์โมคัปเบิล แบบอาร์ สามารถจะใช้วัดอุณหภูมิได้สูงสุดถึง  $1768^{\circ}\text{C}$  ทั้งนี้เพราะการห่อหุ้มฉนวนสายเทอร์โมคัปเบิลไม่ดีเพียงพอ ทำให้ลวดเทอร์โมคัปเบิลอาจเกิดปฏิกิริยากับอากาศ ซึ่งส่งผลต่อค่าที่อ่านได้จากสวิตช์ของลวดจะหมอง จึงเสียสภาพ ( ความไวเทอร์โมอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงไป ) นอกจากนี้การใช้ทองแดงเป็นสายต่อชุดเขยก่อนการต่อเข้าเครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ ก็เป็นข้อจำกัดในการตรวจสอบอุณหภูมิ อีกประการหนึ่งด้วย

ภาคผนวก ข  
ค่าอัตราส่วนปัวซองส์

ตาราง 2 แสดงค่าอัตราส่วนปัวซองส์ ที่อุณหภูมิห้อง ของวัสดุต่าง ๆ

Material	Approximate Poisson's ratio
SiC	0.14
MoSi <sub>2</sub>	0.17
HfC	0.17
Concrete	0.20
B <sub>4</sub> C	0.21
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0.24
SiO <sub>2</sub>	0.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.26
Steels	0.25-0.30
Most metals	0.33
BeO	0.34
MgO	0.36

( ที่มา : David W. Richerson, Modern Ceramic Engineering, 1982 )

## ภาคผนวก ค

## มอดูลัสความยืดหยุ่น ของวัสดุในงานวิศวกรรม

ตาราง 3 แสดงค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง

Material	Average elastic modulus, E ( GPa )
Rubber	0.0035 - 3.5
Nylon	2.8
Polymethyl methacrylate	3.5
Urea-formaldehyde	10.4
Bulk graphite	6.9
Concrete	13.8
NaCl	44.2
Aluminum alloys	69
Typical glass	69
ZrO <sub>2</sub>	138
Mullite (Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub> )	145
MgO	207
Spinel (MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	284
BeO	311
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	380
SiC	414
Diamond	1035

( ที่มา : David W. Richerson, Modern Ceramic Engineering, 1982 )

## ภาคผนวก ง

## ตัวอย่างการบันทึกผลการทดลองหาค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำ

ในการทดลองแต่ละกลุ่มตัวอย่างที่ทดลองจำนวน 30 ตัวอย่างขึ้นไป  
ต้องทำการบันทึกสิ่งต่าง ๆ ดังแสดงตัวอย่างในตาราง 4 ดังนี้

ตาราง 4 แสดงตัวอย่างข้อมูลดิบในการทดลองหาค่าความพรุนตัว และการดูด  
ซึมน้ำ โดยวิธีสูญญากาศ ของตัวอย่างที่เผาที่ 650 °C

ตัวอย่างที่	น้ำหนักแห้ง หลังการอบ (กรัม)	น้ำหนักที่ชั่งภายใต้น้ำ หลังการปล่อยแช่น้ำแล้ว 6 ชั่วโมง (กรัม)	น้ำหนักที่ชั่งภายหลัง การดูดซึมน้ำแล้ว 6 ชั่วโมง (กรัม)
1	26.62	16.48	31.40
2	27.27	16.77	32.19
3	25.24	15.54	29.83
4	27.47	16.92	32.48
5	26.43	16.29	31.27
6	27.57	17.01	32.63
7	27.97	17.23	32.98
8	26.42	16.28	31.27
9	27.95	17.23	33.04
10	26.45	16.30	31.31

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายสมศักดิ์ ทัพรัตน์เพรทวิ

วัน เดือน ปีเกิด 21 มีนาคม 2512

## วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2533