

SUT 7-708-43-12-39



**อภินันทนาการ  
รายงานการวิจัย**

**การศึกษาผลของวัตถุดิบและส่วนผสมต่ออัตราการขึ้นรูปโดยวิธี  
Slip Casting ในอุตสาหกรรมเซรามิก  
( The Effect of Raw Materials and Composition on Casting Rate  
of Ceramic Products formed by Slip Casting Process in  
Ceramic Industries )**

**ผู้วิจัย**

**หัวหน้าโครงการ  
วิระยุทธ ลอประยูร  
สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี**

**ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2543  
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว**

**กันยายน 2546**

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัย ขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้สนับสนุนงบประมาณเป็นทุนอุดหนุนการวิจัยทั้งหมด ผลงานวิจัยจะช่วยในการพัฒนาการเรียนการสอนของสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิกเป็นอย่างยิ่ง

วิระยุทธ ลอประยูร  
หัวหน้าโครงการวิจัย  
กันยายน 2546

## บทคัดย่อ

เป็นการศึกษาถึงผลของวัตถุดิบและส่วนผสมต่ออัตราการขึ้นรูปเซรามิกโดยกระบวนการ slip casting ตัวแปรในกระบวนการดังกล่าวเช่น ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ คุณสมบัติการไหล และสารเติมแต่ง ความโปร่งของเนื้อโครงสร้าง และ อัตราการหล่อ จะได้รับการประเมินและศึกษาหาความสัมพันธ์ รวมถึงตัวแปรที่เกี่ยวกับแบบพลาสติกอร์ ผลการทดลองคาดว่าจะนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมและปรับปรุงกระบวนการ slip casting ในอุตสาหกรรมเซรามิกของประเทศไทยทั้งขนาดเล็กและขนาดกลางรวมถึงอุตสาหกรรมท้องถิ่นคือ เซรามิกด่านเกวียน

## Abstract

Studies on the effect of raw materials and compositions on casting rate of ceramics formed by conventional slip casting process are carried out. process parameters such as raw material characteristics, rheological properties and additives, permeability and casting rate are evaluated and investigated their correlations. Parameters concerning plaster mold are also studied. The results are expected to be applied to control and improvement of slip casting process in small and medium scale Thai ceramic industries including local Dan Kian ceramic sector.

## สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญรูปภาพ .....	ฉ

## บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย .....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และหน่วยงานที่นำผลวิจัย ไปใช้ประโยชน์ .....	2
1.4 ขอบเขตและระเบียบวิธีวิจัย .....	4

## บทที่ 2 ทฤษฎีและตัวแปรในการควบคุมในระบบ Slip Casting

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการขึ้นรูปแบบ slip casting.....	7
2.2 ผลของตัวแปรและการควบคุม.....	10

## บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการทดลองและผลการทดลอง .....	13
3.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบและ ส่วนผสม .....	13
3.1.1ก ส่วนประกอบทางเคมี .....	16
(Chemical Compositions)	
3.1.1ข ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของ ....	16
อนุภาค (Particle Sizes and Particle Size Distribution)	
3.1.1ค สารประกอบ .....	16
(Phases)	

	หน้า
3.1.1ง สมบัติเชิงความร้อน .....	16
(Thermal Behaviours)	
3.1.1จ จลโครงสร้าง (Microstructure) .....	28
3.1.2 การศึกษา rheological behaviour ของวัตถุดิบ และส่วนผสม .....	28
3.1.2.1 วิธีการทดลองเพื่อวัดความหนืด (Viscosity) .....	28
3.1.2.2 วิธีการทดลองเพื่อวัด thixotropy .....	32
3.1.3 การศึกษา permeability ของวัตถุดิบและ ส่วนผสม.....	32
3.1.3.1 วิธีการทดลองเพื่อวัดค่า permeability ของวัตถุดิบ และส่วนผสม .....	35
3.1.4 การศึกษา casting rate ของวัตถุดิบและ ส่วนผสม.....	45
3.1.4ก การวัด Casting Rate โดย Baroid Filter .....	45
3.1.4ข การวัด Casting Rate โดย Plaster Mold .....	46
3.1.5 การศึกษาหาตัวแปรในการควบคุมคุณสมบัติ ของแบบหล่อ Plaster Mold .....	51
3.1.5.1 การศึกษาการดูดซึมน้ำ (water absorption ) ของปลาสเตอร์ ...	51
3.1.5.1ก การทดลองหาความสัมพันธ์ ระหว่าง water:plaster ratio กับ water absorption ของแบบ plaster mold .....	51

3.1.5.1ข	การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสารเติมแต่ง (Additives) กับ water absorption ของแบบ plaster mold.....	52
3.1.5.2	การศึกษาความแข็งแรง (strength) ของแบบปลาสเตอร์ .....	53
3.1.5.2ก	การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง water:plaster ratio กับ strength .....	55
3.1.5.2ข	การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสารเติมแต่ง (Additives) กับ strength .....	55
3.1.5.3	การศึกษาเวลาการแข็งตัว ( setting time ) ของปูนปลาสเตอร์ .....	57
3.1.5.3ก	การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง water:plaster ratio กับ setting time .....	57
3.1.5.3ข	การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง สารเติมแต่ง (Additives) กับ setting time .....	58
3.1.5.4	การศึกษา microstructure ของปลาสเตอร์ด้วย Scanning Electron Microscope .....	60

บทที่ 4 ข้อวิจารณ์

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1	Characterization ของวัสดุดิบและส่วนผสม .....	61
4.1.1	Particle Size and Distribution .....	61
4.1.2	Phase Analysis ของดิน .....	61

	หน้า
4.1.3 Thermal Analysis ของดิน .....	61
4.2 Rheological behaviour ของวัตถุดิบและส่วนผสม .....	63
4.3 Permeability ของวัตถุดิบและส่วนผสม .....	68
4.3.1 Permeability ของดินชนิดต่างๆ กรณีไม่มี Deflocculant .....	68
4.3.2 Permeability ของดินชนิดต่างๆ กรณีที่มี Deflocculant .....	68
4.3.3 Permeability ของส่วนผสมของดิน .....	73
4.3.3ก กรณีส่วนผสมของดินด้านเกรียน (DK) และ ดินขาวระนอง (KR) .....	73
4.3.3ข กรณีส่วนผสมของดินเหนียว (CPD) และ ดินขาวระนอง (KR) .....	73
4.4 Casting rate ของวัตถุดิบและส่วนผสม .....	76
4.4.1 Casting Rate วัดโดย Baroid Filter .....	76
4.4.1ก Casting Rate ของดินชนิดต่างๆ .....	76
4.4.1ข Casting Rate ของส่วนผสมของดิน .....	76
4.4.2 Casting Rate วัดโดย Plaster Mold .....	94
4.4.2ก Casting Rate ของดินชนิดต่างๆ .....	94
4.4.2ข Casting Rate ของส่วนผสมของดิน .....	94
4.5 ผลการทดลองเกี่ยวกับตัวแปรในการควบคุมสมบัติของ แบบหล่อ plaster mold .....	94
4.5.1 การดูดซึมน้ำของปลาสเตอร์ ( water absorption ) .....	94
4.5.1ก ผลของ Water : Plaster Ratio .....	94
4.5.1ข ผลของ Additives .....	98
4.5.2 ความแข็งแรงของปลาสเตอร์ ( strength ) .....	99
4.5.2ก ผลของ Water : Plaster Ratio .....	99
4.5.2ข ผลของ Additives .....	103
4.5.3 เวลาการแข็งตัวของปลาสเตอร์ ( setting time ) .....	103
4.5.3ก ผลของ Water : Plaster Ratio .....	103
4.5.3ข ผลของ Additives .....	103
4.5.4 Microstructure ของปลาสเตอร์ .....	107



บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	110
บรรณานุกรม .....	114
ประวัตินักวิจัย .....	116

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติทั่วไปของดินเหนียวที่ใช้ในการทดลอง ผลิตโดย บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด .....	14
2	คุณสมบัติทั่วไปของดินขาวระนองที่ใช้ในการ ทดลอง ผลิตโดย บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด .....	15
3	ค่า viscosity ของ slip ดินเหนียว CPD เมื่อมี deflocculant ชนิดต่างๆ .....	33
4	ค่า viscosity ของ slip ดินขาวระนอง เมื่อมี deflocculant ชนิดต่างๆ .....	33
5	ค่า viscosity ของ slip ดินด่านเกวียน เมื่อมี deflocculant ชนิดต่างๆ .....	34
6	ผลการวัดความหนืด (viscosity) ของดินและส่วนผสมต่างๆ..	34
7	ผลการวัด Permeability ของดินขาวระนอง (KR) ด้วย เครื่อง Baroid filter .....	37
8	ผลการวัด Permeability ของดินเหนียว (CPD) ด้วย เครื่อง Baroid filter .....	37
9	ผลการวัด Permeability ของดินด่านเกวียน (DK) ด้วย เครื่อง Baroid filter .....	37
10	ผลการวัด Permeability ของดินขาวระนอง (KR) เมื่อ เติม Deflocculant ชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter.....	38
11	ผลการวัด Permeability ของดินเหนียว (CPD) เมื่อ เติม Deflocculant ชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter.....	39
12	ผลการวัด Permeability ของดินด่านเกวียน (DK) เมื่อ เติม Deflocculant ชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter.....	40
13	ผลการวัด Permeability ของดินด่านเกวียน (DK) ผสม กับดินขาวระนอง (iKR) ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter .....	41
14	ผลการวัด Permeability ของดินเหนียว (CPD) ผสม กับดินขาวระนอง (KR) ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter.....	42

ตารางที่	หน้า
15	ผลการวัด Permeability ของส่วนผสมของดิน ควอตซ์ (quartz) และ เฟลสปาร์ ( feldspar) ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter ..... 43
16	ผลการวัด Permeability ของส่วนผสมของดิน ควอตซ์ (quartz) และ เฟลสปาร์ ( feldspar) ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter ..... 44
17	ผลเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting rate ของดิน ชนิดต่างๆ วัดโดย Baroid Filter..... 47
18	ผลเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting rate ของ ส่วนผสมของดินชนิดต่างๆ วัดโดย Baroid Filter ..... 48
19	ผลเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting rate ของ ส่วนผสมของดินชนิดต่างๆ วัดโดย Baroid Filter ..... 48
20	ผลเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting rate ของดิน ชนิดต่างๆ วัดโดย Plaster Mold Method ..... 49
21	ผลเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting rate ของ ส่วนผสมต่างๆ วัดโดยวิธีหล่อใน Plaster Mold ..... 50
22	ผลของ Water : Plaster Ratio ต่อ Water Absorption ของ Plaster Mold ..... 54
23	ผลของปริมาณ ตัวเร่ง (accelerator),Potassium Sulfate, ต่อ Water Absorption ของ Plaster Mold ณ Water : plaster ratio = 80:100 คงที่ ..... 54
24	ผลของปริมาณ ตัวชะลอ (retarder), Boric acid , ต่อ Water Absorption ของ Plaster Mold ณ Water : plaster ratio = 80:100 คงที่ ..... 56
25	ผลของ Water : Plaster Ratio ต่อ Strength ของ Plaster Mold
26	ผลของปริมาณ ตัวเร่ง (accelerator),Potassium Sulfate, ต่อ Strength ของ Plaster Mold ณ Water : plaster ratio = 80:100 คงที่ ..... 56

ตารางที่	หน้า
27	ผลของปริมาณ ตัวชะลอ (retarder), Boric acid , ต่อ Strength ของ Plaster Mold ณ Water : plaster ratio = 80:100 คงที่ ..... 56
28	ผลของ Water : Plaster Ratio ต่อ Setting Time ของ Plaster Mold ..... 59
29	ผลของปริมาณ ตัวเร่ง (accelerator), Potassium Sulfate, ต่อ Setting Time ของ Plaster Mold ณ Water : plaster ratio = 80:100 คงที่ ..... 59
30	ผลของปริมาณ ตัวชะลอ (retarder), Boric acid , ต่อ Setting Time ของ Plaster Mold ณ Water : plaster ratio = 80:100 คงที่ ..... 59
31	ขนาดอนุภาค Particle Size and Distribution ของดินและ ส่วนผสมต่างๆ วัดโดย Laser Diffraction Method..... 62
32	ปริมาณ Deflocculants ชนิดต่างๆที่เกิด Optimum Deflocculating ของดินประเภทต่างๆ ..... 67
33	ผลสรุปค่า Permeability ของดินและส่วนผสมของดินต่างๆ ทั้งที่มีและไม่มี Deflocculants ..... 77
33	ผลสรุปค่า Permeability ของดินและส่วนผสมต่างๆ..... 80

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1	ผังกระบวนการผลิตโดยระบบ Slip Casting ในอุตสาหกรรมเซรามิก .....	3
2	Particle Size Distribution ของดินเหนียว CPD โดย Laser Diffraction Method .....	17
3	Particle Size Distribution ของดินขาวระนอง KR โดย Laser Diffraction Method .....	18
4	Particle Size Distribution ของดินด่านเกวียน DK โดย Laser Diffraction Method .....	19
5	Particle Size Distribution ของส่วนผสมของ ดินเหนียว CPD : ดินด่านเกวียน DK = 50:50 โดย Laser Diffraction Method .....	20
6	Particle Size Distribution ของส่วนผสมของ ดินเหนียว CPD : ดินขาวระนอง KR = 50:50 โดย Laser Diffraction Method .....	21
7	Particle Size Distribution ของส่วนผสมของ ดินด่านเกวียน DK : ดินขาวระนอง KR = 50:50 โดย Laser Diffraction Method .....	22
8	Particle Size Distribution ของส่วนผสมของ ดินเหนียว CPD : ดินขาวระนอง KR:Quartz:Feldspar = 25:25:25:25 โดย Laser Diffraction Method .....	23
9	Particle Size Distribution ของส่วนผสมของ ดินเหนียว CPD : ดินด่านเกวียน DK:Quartz:Feldspar = 25:25:25:25 โดย Laser Diffraction Method .....	24
10	Particle Size Distribution ของส่วนผสมของ ดินด่านเกวียน DK:ดินขาวระนอง KR:Quartz:Feldspar = 25:25:25:25 โดย Laser Diffraction Method .....	25

รูปที่		หน้า
11	X-ray Diffraction Pattern ของดินขาวระนอง KR .....	26
12	X-ray Diffraction Pattern ของดินเหนียว CPD .....	26
13	X-ray Diffraction Pattern ของดินดานเกวียน DK .....	27
14	DTA Thermograph ของดินขาวระนอง KR .....	29
15	TGA Thermograph ของดินขาวระนอง KR .....	29
16	DTA Thermograph ของดินดานเกวียน DK .....	30
17	TGA Thermograph ของดินดานเกวียน DK .....	30
18	DTA Thermograph ของดินเหนียว CPD .....	31
19	TGA Thermograph ของดินเหนียว CPD .....	31
20	ค่า viscosity ของ slip ดินเหนียว เมื่อมี deflocculant ชนิดต่างๆ .....	64
21	ค่า viscosity ของ slip ดินขาวระนอง เมื่อมี deflocculant ชนิดต่างๆ .....	65
22	ค่า viscosity ของ slip ดินดานเกวียน เมื่อมี deflocculant ชนิดต่างๆ .....	66
23	ผลเปรียบเทียบ Permeability ของดินชนิดต่างๆ.....	69
24	ผลของ Deflocculant ชนิดต่างๆ ต่อ Permeability ของดินขาวระนอง KR .....	70
25	ผลของ Deflocculant ชนิดต่างๆ ต่อ Permeability ของดินดานเกวียน DK .....	71
26	ผลของ Deflocculant ชนิดต่างๆ ต่อ Permeability ของดินเหนียว CPD .....	72
27	ผลเปรียบเทียบ Permeability ของส่วนผสมของ ดินดานเกวียนและดินขาวระนอง .....	74
28	ผลเปรียบเทียบ Permeability ของส่วนผสมของ ดินดินเหนียว CPD และดินขาวระนอง .....	75
29	ผลของปริมาณดินขาวระนอง KR ต่อค่า Permeability (Kp) ของดินดานเกวียน DK .....	78
30	ผลของปริมาณดินขาวระนอง KR ต่อค่า Permeability (Kp) ของดินเหนียว CPD .....	79

รูปที่		หน้า
31	ผลเปรียบเทียบ Permeability ของส่วนผสมของ Slip Cast Body .....	81
32	ผลเปรียบเทียบ Permeability ของส่วนผสมของ Slip Cast Body .....	82
34	กราฟเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate ( L vs. T) ของดินชนิดต่างๆ วัดโดย Baroid Filter .....	83
34	กราฟเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มความหนา Casting Rate ( L <sup>2</sup> vs. T) ของดินชนิดต่างๆ วัดโดย Baroid Filter .....	84
35	กราฟเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate ( L vs. T) ของส่วนผสมของดินชนิดต่างๆ วัดโดย Baroid Filter .....	85
36	กราฟเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มความหนา Casting Rate ( L <sup>2</sup> vs. T) ของส่วนผสมของดินชนิดต่างๆ วัดโดย Baroid Filter .....	86
37	กราฟเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate ( L vs. T) ของส่วนผสมของดินชนิดต่างๆ วัดโดย Baroid Filter .....	87
38	กราฟเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มความหนา Casting Rate ( L <sup>2</sup> vs. T) ของส่วนผสมของดินชนิดต่างๆ วัดโดย Baroid Filter .....	88
39	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permeability (Kp) กับ Casting Rate ของดินชนิดต่างๆ .....	89
40	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permeability (Kp) กับ Casting Rate ของส่วนผสมของดินดานเกวียนและ ดินขาวระนองที่อัตราส่วนต่างๆ .....	90
41	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permeability (Kp) กับ Casting Rate ของส่วนผสมของดินเหนียว CPD และ ดินขาวระนองที่อัตราส่วนต่างๆ .....	90
42	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Permeability (Kp) กับ Casting Rate ของดินและส่วนผสมในระบบต่างๆ .....	91

รูปที่	หน้า
43	กราฟเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate (L <sup>2</sup> vs. T) ของดินชนิดต่างๆ วัตโดย Plaster Mold..... 92
44	ผลเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate ของ ส่วนผสมต่างๆ วัตโดยวิธี Plaster Mold Method..... 93
45	ผลของ Water:Plaster Ratio ต่อ Water Absorption ของ Plaster Mold ..... 95
46	ผลของปริมาณตัวเร่ง Potassium Sulfate ต่อ Water Absorption ของ Plaster Mold ณ Water:Plaster Ratio = 80:100 คงที่ ..... 96
47	ผลของปริมาณตัวชะลอ Boric Acid ต่อ Water Absorption ของ Plaster Mold ณ Water:Plaster Ratio = 80:100 ... 97
48	ผลของ Water:Plaster Ratio ต่อ Strength ของ Plaster.. 100
49	ผลของปริมาณตัวเร่ง Potassium Sulfate ต่อ Strength ของ Plaster Mold ณ Water:Plaster Ratio = 80:100 ... 101
50	ผลของปริมาณตัวชะลอ Boric Acid ต่อ Strength ของ Plaster Mold ณ Water:Plaster Ratio = 80:100 ... 102
51	ผลของ Water:Plaster Ratio ต่อ Setting Time ของ Plaster ..... 104
52	ผลของปริมาณตัวเร่ง Potassium Sulfate ต่อ Setting Time ของ Plaster Mold ณ Water:Plaster Ratio = 80:100 ... 105
53	ผลของปริมาณตัวชะลอ Boric Acid ต่อ Setting Time ของ Plaster Mold ณ Water:Plaster Ratio = 80:100 ... 106
54	ลักษณะ Microstructure ของ Plaster ที่ผสมด้วยอัตราส่วน ของน้ำต่อปลาสเตอร์ (W:P Ratios) ต่างๆกัน ตั้งแต่ 0.60 ถึง 0.90 ..... 108
55	ลักษณะ Microstructure ของ Plaster ที่เติม Additives เป็น ปริมาณต่างๆ ..... 109



# บทที่ 1

## บทนำ

ชื่อโครงการ	การศึกษาผลของวัตถุดิบและส่วนผสมต่ออัตราการขึ้นรูปโดยวิธี Slip Casting ในอุตสาหกรรมเซรามิก The Effect of Raw Materials and Composition on Casting Rate of Ceramic Product formed by Slip Casting Process in Ceramic Industries
ลักษณะของงานวิจัย	การวิจัยเพื่อพัฒนาประเทศ ( Research for National Development )
แผนงานวิจัย	แผนงานวิจัยเพื่อพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ( Primary Research Plan for Science and Technology Development )
แผนงานย่อย	แผนงานย่อยวิจัยเพื่อส่งเสริมการใช้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภาคการผลิตที่สำคัญ ( Promotion of Science and Technology Usage in Major Manufacturing Sectors )
หัวหน้าโครงการ	ดร. วีระยุทธ ลอประยูร

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย ( Research Background )

กระบวนการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ ( Slip Casting Process ) เป็นกระบวนการหลักแบบหนึ่งในการผลิต ผลิตภัณฑ์เซรามิก ในอุตสาหกรรมทั้งขนาดเล็ก กลาง และขนาดใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ผลิตสุขภัณฑ์เซรามิก จนถึงอุตสาหกรรมขนาดกลาง และขนาดเล็กที่ผลิตของชำร่วยและตุ๊กตาเซรามิก กระบวนการผลิตโดยทั่วไปจะทำโดยนำวัตถุดิบ คือ ดิน (clays) หินฟีนมา ( feldspars ) และหินแข็งขาวหนามาน ( quartz ) มาบดผสมและเติมน้ำกับสารเคมี เพื่อให้อยู่ในรูปของของเหลว ( slip ) ที่มีความหนืด ( viscosity ) เหมาะสม จากนั้นจะนำดิน ( slip ) ไปเทลงแบบปูนปลาสเตอร์ ( plaster molds ) ที่เตรียมไว้ จนได้ความหนาที่ต้องการ จึงถอดชิ้นงานจากแบบ อบจนแห้งสนิท นำไปเคลือบสี ( ceramic glaze ) และทำการเผาจนเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จและตรวจสอบคุณสมบัติเพื่อส่งจำหน่ายต่อไป แผนผังกระบวนการผลิตโดยวิธี slip casting process ในอุตสาหกรรม มี

ดังแสดงในรูปที่ 1

การขึ้นรูปโดยวิธี slip casting โดยทั่วไปอัตราการผลิตค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับกระบวนการขึ้นรูปทางเซรามิกแบบอื่นๆ แต่จะเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่รูปร่างซับซ้อน (complex shape) จึงยังคงหลักการผลิตไว้จนถึงปัจจุบัน ในภาคอุตสาหกรรมผลิตสุขภัณฑ์ (sanitaryware) มีการพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการหล่อให้เร็วและคุณภาพสม่ำเสมอขึ้นโดยใช้แรงดันเข้าช่วยเร่งอัตราการหล่อ ซึ่งเรียกว่าระบบ pressure casting process แต่ต้องมีการปรับคุณสมบัติของวัตถุดิบและส่วนผสมให้สอดคล้องกับเทคโนโลยีนี้

ปัญหาสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศที่ใช้กระบวนการ slip casting ในการผลิต คือส่วนใหญ่จะทำโดยประสบการณ์และความชำนาญ หรือ ชื่อ know-how จากต่างประเทศ แต่มักขาดความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของตัวแปร (process parameters) ต่างๆ อย่างเป็นระบบในกระบวนการผลิต การแก้ปัญหาต่างๆจะอาศัยประสบการณ์หรือคำแนะนำจากต่างประเทศเป็นหลักทำให้ปัญหาเกิดซ้ำแล้วซ้ำอีกเนื่องจากไม่เข้าใจสาเหตุของปัญหาทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติอย่างถ่องแท้ ทำให้ปริมาณของเสียค่อนข้างสูงและการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเป็นไปค่อนข้างลำบาก จากปัญหาดังกล่าว การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆในกระบวนการผลิต เช่น ผลของคุณสมบัติของวัตถุดิบและสารเคมีต่างๆต่ออัตราการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์อย่างเป็นระบบ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการควบคุมกระบวนการผลิตและการแก้ปัญหา รวมทั้งการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ มีเป้าหมายเพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆทางด้านวัตถุดิบ ส่วนผสม และความสัมพันธ์ในระบบการขึ้นรูปแบบ slip casting เพื่อนำผลไปเผยแพร่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนาเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมเซรามิกในประเทศต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

### ( Objectives of Research Project )

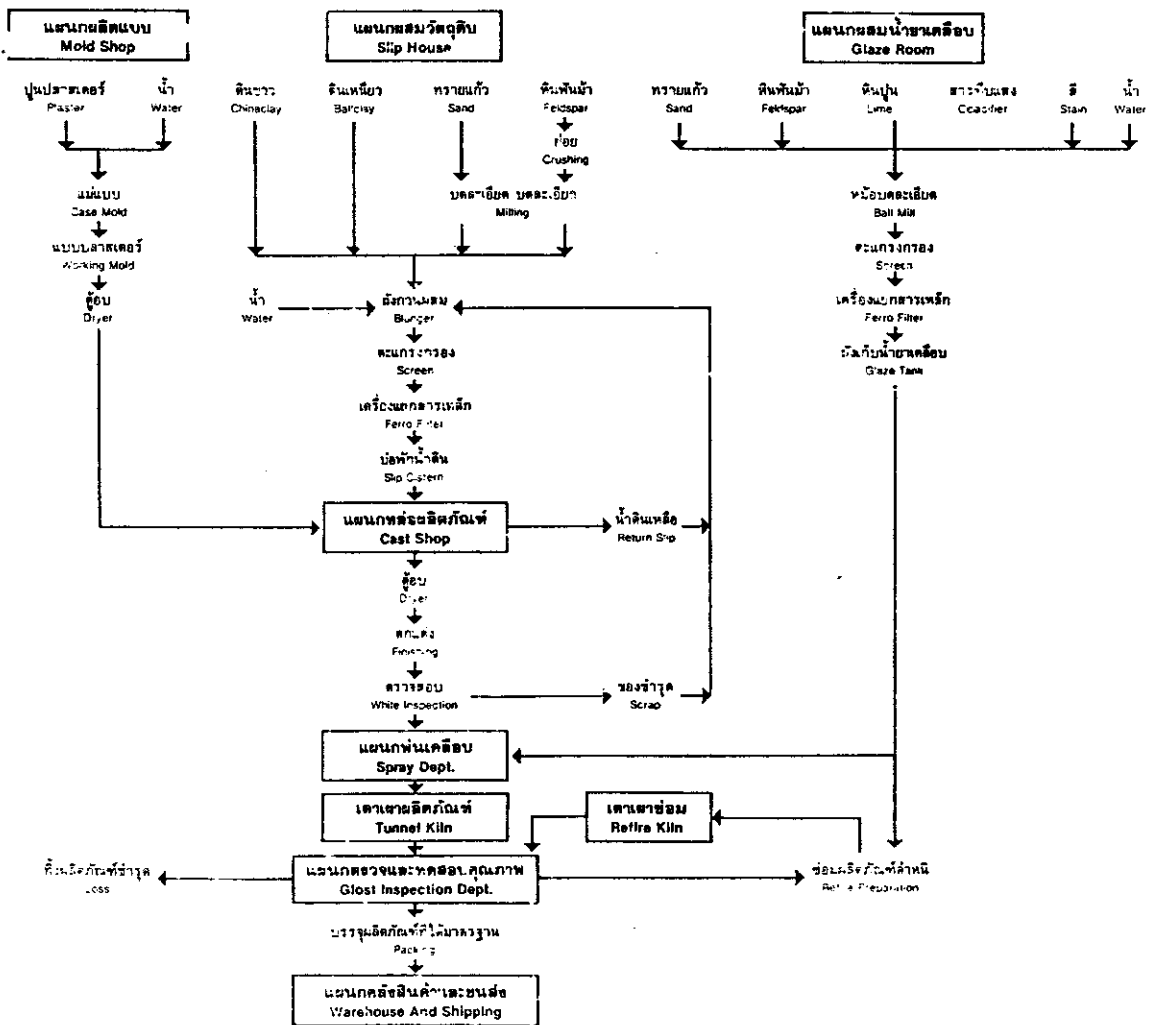
เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบและส่วนผสม ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออัตราการผลิต ผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยกระบวนการหล่อแบบ (Slip Casting) ตัวแปรต่างๆจะเป็นที่รู้จักกันทั่วไป แต่งานวิจัยนี้จะพยายามสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในรูปของกราฟหรือสมการเพื่อใช้ในการควบคุมได้ชัดเจนขึ้นและสามารถประยุกต์กับวัตถุดิบในประเทศได้ งานวิจัยจะเป็นประเภทงานวิจัยประยุกต์ เพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีพื้นฐานของอุตสาหกรรมในประเทศให้เข้าใจถึงคุณสมบัติต่างๆของวัตถุดิบในประเทศและผลต่อกระบวนการผลิต

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่น่าผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

### ( Expected Benefits from Research Project and End Users )

ผลของงานวิจัย จะช่วยให้ทราบความสัมพันธ์และผลของตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวกับ

แผนผังการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ชนิดวิเทียสไฮเน่า Flow Chart of Vitreous China Sanitaryware Manufacturing



รูปที่ 1 ผังกระบวนการผลิตโดยระบบ Slip Casting ในอุตสาหกรรมเซรามิก [1]

วัตถุดิบและส่วนผสม ต่อกระบวนการผลิตแต่ละขั้นตอน โดยเฉพาะผลต่ออัตราการหล่อขึ้นรูปในกระบวนการผลิต โดยจะแสดงความสัมพันธ์เป็นสมการหรือกราฟต่างๆ เพื่อการควบคุม ผลที่ได้หรือหลักการในการทดลองจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตจริง ทำให้การปรับเปลี่ยนวัตถุดิบและส่วนผสมเป็นไปอย่างมีระบบ มีหลักวิชาการและถูกต้องมากยิ่งขึ้นแทนที่จะใช้ประสบการณ์หรือวิธี trial and error ในการแก้ปัญหาหรือควบคุม

หน่วยงานที่คาดว่าจะได้รับประโยชน์จากผลการทดลองวิจัย คือ

- ก. การเรียนการสอนในระดับปริญญาตรีและบัณฑิตศึกษาของสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลวิจัยจะช่วยในการพัฒนาเนื้อหาการสอนและความเข้าใจแก่นักศึกษาให้สูงขึ้น
- ข. อุตสาหกรรมผลิต ผลิตภัณฑ์เซรามิกโดยวิธีการหล่อแบบ (Slip Casting ) โดยเน้นที่อุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก รวมทั้งอุตสาหกรรมท้องถิ่น คือ อุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาด่านเกวียน เป็นหลัก

#### 1.4 ขอบเขตและระเบียบวิธีการวิจัย

##### ( Scope of Research and Methodology )

ขอบเขตของงานวิจัยจะเน้นเฉพาะผลของตัวแปรและความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องของวัตถุดิบและส่วนผสมต่ออัตราการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ (Slip Casting ) ในอุตสาหกรรมเซรามิกเป็นหลัก ไม่รวมถึงผลในกระบวนการผลิตขั้นต่อไป เช่น การเผาและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สำเร็จ ( finished product ) ซึ่งจะเป็นโครงการต่อเนื่องต่อไปในอนาคต

ระเบียบวิธีการวิจัย ประกอบด้วย

##### ก. แบบการวิจัย

##### (Research Design)

การศึกษาวิจัยจะเริ่มจากการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุดิบที่ใช้กันทั่วไปในกระบวนการ เพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทั้งทางเคมีและกายภาพ หลังจากนั้นจะนำวัตถุดิบต่างๆมาจัดส่วนผสมและกำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่ต้องการศึกษาและมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการหล่อ ดังเช่น ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ อัตราส่วนวัตถุดิบในส่วนผสม สารเคมีที่เติมเพื่อช่วยการกระจายตัว (Deflocculants) ฯลฯ เพื่อหาความสัมพันธ์กับอัตราการหล่อขึ้นงาน ผลการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์และประเมินเพื่อนำเสนอในรูปแบบของกราฟและสมการ เพื่อใ้เข้าใจต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

ข. ขั้นตอนและวิธีการในการเก็บข้อมูล  
( Steps and Methods used in Data Collection )

ขั้นตอนและวิธีการเก็บข้อมูล เป็นดังนี้ คือ

ข.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ  
( Raw Material Characterization )

อันได้แก่

- ส่วนประกอบทางเคมี (Chemical Composition)
- ขนาดอนุภาคและการกระจายของขนาด (Particle Size and Distributions)
- สารประกอบ ( Phase Analysis ; XRD )
- ลักษณะเฉพาะที่อุณหภูมิสูง (Thermal Analysis:DTA,TGA)

ข.2 กำหนดส่วนผสมและตัวแปรที่ต้องการศึกษา  
( Body Preparation and Process Parameters )

อันได้แก่

- Rheological property ของวัตถุดิบ
- Permeability ของวัตถุดิบและส่วนผสม
- ผลจาก Deflocculant ต่อสมบัติของวัตถุดิบ
- อัตราการหล่อ (Casting Rate )
- ตัวแปรในการเตรียมแบบพลาสติกเทอร์โมในการหล่อ
- ผลของ microstructure

ข.3 วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล  
( Data Analysis and Report )

อันได้แก่

- ตารางผลทดลอง (Table of data )
- กราฟหรือสมการความสัมพันธ์ของตัวแปร
- คำอธิบายทางทฤษฎีและการประยุกต์ใช้งาน

ข.4 ขั้นตอนและวิธีการในการวิเคราะห์ข้อมูล  
 ( Steps and Methods used in Data Analysis )  
 ขั้นตอนและวิธีการในการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นดังนี้ คือ

[EXPERIMENTS] .....	Controlled Conditions Different Variables/Parameters
[SET OF DATA] .....	Mean, Standard deviation Reproducibility
[DATA ANALYSIS] .....	Correlation of Data
[PRESENTATION OF DATA] .....	Graphs Empirical Formulas Theoretical Explanations

## บทที่ 2

## ทฤษฎีและตัวแปรในการควบคุมระบบ Slip Casting

## 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการขึ้นรูปในระบบ Slip Casting

กระบวนการขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อ หรือ Slip Casting เป็นกระบวนการพื้นฐานหนึ่งซึ่งใช้กันทั่วไปในการผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกในอุตสาหกรรมทั้งประเภท Conventional เช่น สุขภัณฑ์ และ ชิ้นส่วนทางวิศวกรรมขั้นสูง ทฤษฎีต่างๆเกี่ยวกับ Mechanism ของกระบวนการ Slip Casting มีผู้ศึกษาและทดลองไว้มากพอควร ทฤษฎีที่ใช้เป็นพื้นฐานในการทดลองครั้งนี้ ได้แก่

ทฤษฎีของ Kozeny [ 10 ]

เป็นทฤษฎีหนึ่งซึ่งประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของกลไกและตัวแปรต่างๆ ในระบบ slip casting และ filtration คือ

Kozeny Equation :

$$P = [L^2 / t] \cdot [ 5 (S_p)^2 \eta (Y-1) \cdot (1-E) / 2 g \cdot E^3 ]$$

เมื่อ L คือ ความหนาของเนื้อส่วนผสม ณ เวลา t

t คือ เวลาในการหล่อแบบ

P คือ แรงดูด (Suction Pressure) ของแบบ หรือ Pressure ที่ให้แก่ น้ำ Slip

$S_p$  คือ พื้นที่ผิวของของแข็งในน้ำ Slip (Surface Area of Solid Particles)

$\eta$  คือ ความหนืด (Viscosity) ของน้ำ Slip

Y คือ ปริมาตรน้ำ Slip ในแบบ

E คือ ความโปร่งหรือรูพรุน (Void Fraction) ของชิ้นส่วนผสมความหนา L

g คือ Acceleration due to Gravity

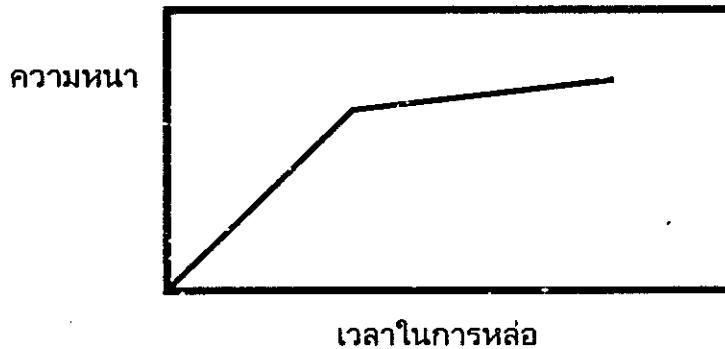
จากความสัมพันธ์นี้ อัตราการเพิ่มความหนาหรือความเร็วในการผลิตโดยวิธีการหล่อแบบ จะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัตถุดิบและส่วนผสมที่ใช้ในกระบวนการผลิตเป็นอย่างดี ได้แก่

- ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ (surface area)
- แรงเกาะยึดของอนุภาคในน้ำ slip (viscosity) ซึ่งเกี่ยวข้องกับสารเคมี (deflocculants) ที่ใช้
- การจัดเรียงตัวของอนุภาคในส่วนผสม ขณะทำการหล่อ (void fraction)

ผลสรุปที่สำคัญมากประการหนึ่งจาก Kozeny's equation คือ

- ถ้าควบคุมตัวแปร (parameters) ต่างๆ ให้คงที่ ความหนาของชั้นส่วนผสมระหว่างหล่อ (L) จะสัมพันธ์กับเวลาในการหล่อ (casting time, t) โดยตรง ถ้า plot ค่า  $L^2$  กับเวลา t จะได้กราฟเส้นตรง เพื่อใช้หาเวลาในการหล่อผลิตภัณฑ์ความหนาต่างๆได้

Mechanism ของการเกิดชั้นดิน (cast formation) ในระบบ slip casting จะเป็นกระบวนการที่ควบคุมโดยการแพร่ (diffusion controlled process) [18] ซึ่งความเร็วหรืออัตราการเกิดชั้นดินจะขึ้นกับอัตราการแพร่ของน้ำหรือของเหลวผ่านชั้นดินไปยังแบบพลาสติก (plaster mold) โดยมีแรงขับเคลื่อน (driving force) คือ แรงดูดจากความพรุนตัวของแบบ (suction pressure of porous plaster mold) ลักษณะการเกิดความหนาของชั้นดิน (rate of cast) ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังรูปด้านล่าง คือ



Initial Stage : เกิดชั้นดินที่ผนังแบบอย่างรวดเร็วจากการดูดน้ำของแบบ ซึ่งควบคุมโดยอัตราการแพร่ของน้ำหรือของเหลวไปยังแบบพลาสติก

Second Stage : อัตราการเพิ่มความหนาของชั้นดินช้าลงอย่างมาก เนื่องจากการแพร่ของน้ำจากเนื้อ solid ใน slip ยากขึ้นเนื่องจากต้องแพร่ผ่านชั้นดินซึ่งมีแรงต้านอยู่และมีความหนาเพิ่มขึ้น

จากกลไกดังกล่าว ตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวกับส่วนผสมต่อ casting rate คือ ลักษณะและโครงสร้างการเรียงตัวของวัตถุดิบและส่วนผสม ซึ่งจะมีผลอย่างยิ่งต่ออัตราการแพร่ของน้ำไปยังแบบพลาสติก



ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดลองวัดคุณสมบัติโดย Baroid Filter

โครงสร้าง permeability ของเนื้อเซรามิก เป็นคุณสมบัติหนึ่งที่สำคัญมากทั้งในการเตรียมวัตถุดิบ เช่น การแยกน้ำโดย filter press การขึ้นรูป หรือ ระบบการอบแห้ง (drying process) ฯลฯ ในระบบการเตรียมวัตถุดิบโดย filter press ค่า permeability ต้องมีการปรับเพื่อให้อัตราการเตรียม filter cake เร็วและความชื้นใน cake สม่ำเสมอ ในระบบการรีดเนื้อเซรามิก (extrusion) ค่า permeability ของส่วนผสมควรต่ำเพื่อให้การแยกตัว (migrate) ของน้ำซาลงมีฉะนั้นความชื้นในเนื้อจะแตกต่างกันมาก ในระบบขึ้นรูปแบบ slip casting ค่า permeability ควรมีค่าสูงเพียงพอ เพื่อให้อัตราการผลิตโดยการหล่อเร็วเหมาะสม

วิธีการวัดค่า permeability ของเนื้อส่วนผสมทางเซรามิกวิธีหนึ่ง คือ การใช้เครื่องมือพื้นฐานที่เรียกว่า Baroid Filter [17] ซึ่งมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง คือ

สัมประสิทธิ์ความโปร่งของเนื้อ (coefficient of permeability,  $K_p$ ) ของตัวอย่างซึ่งมีความหนาเท่ากับ  $H$  และพื้นที่หน้าตัด เท่ากับ  $A$  อาจแสดงได้ดังสมการ

$$K_p = \eta LV / PA t$$

เมื่อ  $V$  = ปริมาตรของของเหลว ที่แยกผ่านเนื้อ ณ เวลา  $t$  โดยมีความดัน  $P$

และ  $K_p = \theta R_H^2 / \eta$

เมื่อ  $\theta$  = Pore fraction in body

$R_H$  = Effective hydraulic radius of pores

$\eta$  = Coefficient of viscosity of migrating liquid

ความพรุนตัว (porosity) และ  $R_H$  จะได้รับผลอย่างยิ่งจากรูปปร่างการเรียงตัวของอนุภาค (particle packing geometry)

วิธีการทดลองและเครื่องมือ Baroid filter จะมีดังอธิบายในบทที่ 3 ซึ่งการหาอัตราการหล่อ (casting rate) และ permeability จะเป็นดังสมการ

$$\text{Casting Rate} = L^2 / t = 2 K_p J \Delta P / \eta$$

เมื่อ  $L$  = cast thickness

$T$  = casting time

$\Delta P$  = pressure different across cast (applied pressure in Baroid cell)

$\eta$  = viscosity of liquid migrating through cast

$K_p$  = coefficient of permeability

$J = L / V$  เมื่อ  $V =$  volume of filtrate to produce  $L$  of cast

$J$  อาจคำนวณได้จาก

$$J = W / [ D_s - QD_s - WQ ]$$

เมื่อ

$$W = (\text{weight of solids in slip}) / (\text{volume of liquid in slip}) \dots \text{g/cc}$$

และ

$D_s =$  pycnometer density of solids

$Q =$  pore fraction of cake

$$= 1 - [ \text{dry weight/wet volume of cast} ] / D_s$$

จากการทดลอง ถ้า plot ค่า  $V^2$  กับเวลา  $t$  จะได้กราฟ ซึ่ง slope จะแทนได้ด้วยค่า  $K_p$  ของ cake หน่วยเป็น  $m^2$

## 2.2 ผลของตัวแปรและการควบคุม

การเตรียมส่วนผสมของน้ำ slip จากวัตถุดิบต่างๆ เพื่อใช้ในการหล่อโดยทั่วไปจะมักถูกมองว่าเป็นสิ่งที่ง่ายโดยเฉพาะในกระบวนการผลิตในลักษณะที่ไม่เป็น mass production ซึ่งโดยความจริงแล้วการปรับคุณสมบัติของน้ำ slip ให้เหมาะสมและได้ผลิตภัณฑ์ที่สม่ำเสมอเป็นสิ่งที่ยาก เพราะคุณสมบัติที่ต้องการของ slip จะมีหลากหลายประการอันได้แก่

1. มีปริมาณ solid มากที่สุดใน slip โดยที่ยังเหลวไหลได้ดี
2. Viscosity หรือ fluidity ไม่เปลี่ยนแปลงมากจนควบคุมไม่ได้ระหว่างเทหรือทิ้งในแบบ
3. ไม่มีการแยกตัวของส่วนผสม (segregation) ระหว่างเทแบบ
4. Viscosity ต่ำสุดเท่าที่เป็นได้ ไหลไปตามซอกมุมของแบบได้ง่าย ฟองอากาศแยกตัวไม่ขังในเนื้อ
5. Drain น้ำ slip ส่วนเกินออกได้ดี ผิวเรียบไม่เป็นคลื่นตำหนิ (good drain properties)
6. มีอัตราการหล่อหรือเพิ่มความหนาเร็ว (high casting rate) แต่ควบคุมได้เพื่อให้มีคุณภาพผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอและอัตราการผลิตเหมาะสม
7. แยกจากแบบได้ง่าย (good release) ไม่ติดแบบ ในเวลาที่เหมาะสม
8. ชิ้นงานหลังถอดแบบมีความแข็งแรง (green strength) สูงเพียงพอต่อการเคลื่อนย้ายหรือตกแต่ง (fettling) ในกระบวนการขั้นต่อไปได้

9. เนื้อแน่น มีการหดตัวต่ำระหว่างกระบวนการอบแห้ง

ดังกล่าวข้างต้น การปรับควบคุมคุณสมบัติของส่วนผสมใน slip ให้มีคุณสมบัติที่ต้องการในการผลิตแบบ mass production จะต้องใช้ทั้งประสบการณ์ การทดลองในสถานะจริงและความรู้ทางทฤษฎีทางเซรามิกเป็นอย่างมาก ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อคุณสมบัติของ slip และอัตราการหล่อมีมากมายและมีความผูกพันกันอย่างซับซ้อน แม้จะเป็นกระบวนการเก่าแก่ แต่ก็เป็นที่ทราบกันดีว่าเป็นกระบวนการที่ควบคุมยากที่สุด กระบวนการหนึ่งในด้านการผลิตเซรามิก

ดังกล่าวในหัวข้อ 2.1 ตัวแปรในกระบวนการที่มีผลต่ออัตราการหล่อแบบได้แก่

- ก. ขนาดอนุภาคของ solid ในน้ำ slip โดยเฉพาะขนาดในช่วง colloidal size ( $< 0.1$  microns) โดยทั่วไปขนาดยิ่งลดลง อัตราการหล่อจะช้าลงเนื่องจากการเรียงตัวของโครงสร้างที่เกิดจะแน่นขึ้นน้ำแพร่ออกยากขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลจากพื้นที่ผิว (surface area) ที่มากขึ้นทำให้ผิวอนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าอยู่เกิดแรงดึงดูดโมเลกุลของน้ำไว้ทำให้การแยกตัวโดยการแพร่ช้าลง
- ข. แรงดูด (suction pressure) ของแบบพลาสติกซึ่งแปรผันโดยตรงกับปริมาณปริมาตรความพรุนตัว (%porosity) ขนาดของรูพรุนและการกระจายของขนาดลักษณะความต่อเนื่องของรูพรุน นอกจากแรงดูดจากแบบแล้ว แรงดัน (external pressure) ที่กดลงบนผิวหน้า slip จะมีผลอย่างยิ่งเนื่องจากช่วยผลักดันให้น้ำแพร่แยกออกเร็วขึ้น ตัวอย่างเช่น ในระบบ pressure casting
- ค. ความหนืด (viscosity) ของของเหลวใน slip ยิ่ง viscosity ต่ำ การแพร่จะเร็วขึ้น ซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิของน้ำ slip ในการหล่อด้วยเพราะมีผลต่อ viscosity โดยตรง สารเคมีบางชนิดที่สามารถลด viscosity ของของเหลวจะส่งผลต่ออัตราการหล่อด้วย
- ง. Permeability ของโครงสร้างชั้นดินที่เกิดระหว่างการหล่อ ดังกล่าวแล้วเป็นอีกตัวแปรหนึ่งซึ่งมีผลอย่างยิ่ง
- จ. ปริมาณสารเติมแต่ง (additives) ทั้งประเภท deflocculants และ flocculants ซึ่งใช้กันทั่วไปในการปรับความหนืดของน้ำ slip สารประเภทนี้จะมีผลต่อการเรียงตัวของอนุภาคระหว่างเกิดชั้นดินที่แบบสามารถทำให้ permeability เปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้ ยังมีผลต่อแรงดึงดูดของอนุภาคซึ่งจะมาเกาะกันเป็นชั้นดินให้ช้าหรือเร็วได้ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีของ electrical double layer หรือ ค่า zeta potential [13,18]

นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่นๆที่มีผลทั้งในแง่วัตถุดิบ ส่วนผสมและจากกระบวนการ เช่น

- pH ของน้ำ slip
- สารละลายในน้ำที่ใช้ในการหล่อ
- สิ่งปลอมปนจากวัตถุดิบ โดยเฉพาะเกลือ sulfate หรือ humic acid [15]
- ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่อเวลา (thixotropy) ของ slip
- การบ่ม (aging )
- ขั้นตอนการผสม และ ชนิดของเครื่องผสม  
เป็นต้น

ตัวแปรต่างๆเหล่านี้จะมีความสำคัญต่อการควบคุมกระบวนการให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอและอัตราการผลิตที่เหมาะสม ความสัมพันธ์ของตัวแปรจะมีผู้เชี่ยวชาญอธิบายไว้ค่อนข้างมากแต่ไม่มีการรวบรวมสร้างความสัมพันธ์ต่างๆเพื่อการประยุกต์ใช้งานจริงอย่างเป็นระบบเนื่องจากความซับซ้อนจากผลของตัวแปรต่างๆ ซึ่งหากมีการรวบรวมความสัมพันธ์เหล่านี้ในรูปแบบการเพื่อการคำนวณประมาณเพื่อปรับคุณสมบัติและอัตราของกระบวนการจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนากระบวนการผลิตต่อไปในอนาคต

## บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 วิธีการทดลองและผลการทดลอง

จุดมุ่งหมายของโครงการวิจัยจะเน้นไปที่คุณสมบัติของวัตถุดิบ อันได้แก่ ดินชนิดต่างๆ feldspar และ หิน quartz ซึ่งเป็นวัตถุดิบพื้นฐานในส่วนผสมทั่วไปในน้ำ slip ว่าจะมีผลอย่างไรต่ออัตราการผลิตและการควบคุม โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาจะเป็นวัตถุดิบจากแหล่งต่างๆในประเทศเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาและถ่ายทอดแก่ภาคอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต นอกจากนี้ยังศึกษาผลของสารเคมีประเภท deflocculants ต่อระบบการหล่อด้วย

วิธีดำเนินการวิจัยจะเป็นดังอธิบายในบทที่ 1 ซึ่งมีวิธีการทดลอง ดังนี้ คือ

#### 3.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบและส่วนผสม

วัตถุดิบต่างๆที่ใช้ในการทดลองศึกษาครั้งนี้ จะเป็นวัตถุดิบพื้นฐานที่ใช้ในส่วนผสมของเนื้อดินในระบบ slip casting อันได้แก่ ดินชนิดต่างๆ หิน quartz บด และ หินฟันม้าบด (feldspar) ซึ่งมีการผลิตขายกันทั่วไป การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะ (Characterization) โดยเทคนิคต่างๆ จะจำเป็นเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการอธิบายหาความสัมพันธ์กับผลการทดลองอื่นๆ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ได้แก่

#### 1. ดินเหนียว compound clay

เป็นเนื้อดินผสมประเภท ball clay สีดำมี plasticity สูงมาก ผลิตในประเทศโดย บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด

คุณสมบัติทั่วไป มีดังแสดงในตารางที่ 1

#### 2. ดินขาวระนอง

ดินขาวประเภท Kaolinite สีขาวออกเหลือง

Grade Ranong 325 ผลิตในประเทศโดย บริษัท คอมพาวด์เคลย์

จำกัด คุณสมบัติทั่วไป มีดังแสดงในตารางที่ 2

#### 3. ดินด่านเกวียน

เป็นเนื้อดินปั้น มีความเหนียวสูง สีออกแดงชมพู เป็นดินท้องถิ่น

นำมาศึกษาเพื่อเป็นแนวทางการพัฒนากระบวนการ slip casting สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาด่านเกวียน

ผลิตโดย บริษัท ดินเผา จังหวัดนครราชสีมา

#### 4. หินเขี้ยวหนุमानบด ( Quartz )

ผลิตโดย บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด

#### 5. หินฟันม้าบด ( Feldspar )

ผลิตโดย บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทั่วไป ของดินเหนียว (Ball clay, compound clay)  
ที่ใช้ในการทดลอง  
ผลิตโดย บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด

### PRODUCT SPECIFICATION

#### Chemical Composition ( Typical, Mass % )

SiO <sub>2</sub>	64.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.3
TiO <sub>2</sub>	0.19
Na <sub>2</sub> O	0.78
K <sub>2</sub> O	3.54
MgO	0.42
CaO	0.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.15

#### Physical Properties

- Drying shrinkage, % 3.5 – 4.8
- Firing shrinkage, % (1200 C) 9.0 – 11.0
- Strength, kg/cm<sup>2</sup> (1200 C) 450 – 650
- COE , 25-500 C, x10<sup>-7</sup> /K 152-189

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทั่วไป ของดินขาวระนอง ที่ใช้ในการทดลอง  
ผลิตโดย บริษัท คอมพาวด์เคลย์ จำกัด

**RANONG 325**  
**PRODUCT SPECIFICATION**

**Chemical Composition ( Typical, Mass % )**

SiO <sub>2</sub>	46.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38.00
TiO <sub>2</sub>	0.03
Na <sub>2</sub> O	< 0.001
K <sub>2</sub> O	1.00
MgO	< 0.001
CaO	< 0.001
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.80
LOI	13.8

**Mineral Composition ( Mass%)**

Kaolinite	83
Quartz	3.5
Micaceous	8.5
Gibbsite	3
Feldspar	< 1

**Physical Properties**

- Size finer than : 10 micron(mass%) 60.0  
1 micron(mass%) 12.0
- Firing shrinkage ( %, @ 1250 C) 8.0

6. ปูนปลาสเตอร์ (Plaster of Paris)  
 วัตถุประสงค์ในการทำแบบหล่อ (plaster mold)  
 เป็นปูนปลาสเตอร์ประเภท beta  
 ผลิตโดย บริษัท Asia Plaster จำกัด
7. สารเติมแต่ง (Additives)  
 เป็นสารเคมีประเภทสารกระจายอนุภาค (deflocculants) ซึ่งใช้กันทั่วไปในการปรับความหนืด (viscosity) และการไหลตัว (rheology) ของน้ำ slip อันได้แก่ Sodium Silicate , Sodium hexametaphosphate, และ Sodium tripolyphosphate จากโรงงานวัสดุทนไฟ บริษัทปูนซิเมนต์ไทย จำกัด

การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบจะเน้นที่ดินชนิดต่างๆเป็นหลัก สมบัติ และเทคนิคการวิเคราะห์ ได้แก่

### 3.1.1ก ส่วนประกอบทางเคมี ( Chemical Composition )

วิเคราะห์โดย X-ray fluorescence spectrometer (XRF) รุ่น ED 2000 ผลิตโดย บริษัท Oxford ประเทศอังกฤษ ผลการวิเคราะห์โดยเครื่อง XRF ของศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากไม่มี calibration curve ที่เป็นมาตรฐานในการวิเคราะห์สารทางเซรามิก จึงไม่ขอแสดงผลวิเคราะห์ในรายงานนี้ แต่จะอ้างอิงถึงส่วนประกอบทางเคมีในตารางที่ 1 และ 2 จากผู้ผลิตแทน

### 3.1.1ข ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค ( Particle Size and Particle Size Distribution )

วิเคราะห์สำหรับดินและส่วนผสมบางส่วนผสม โดยเครื่อง Laser Diffraction Particle sizer รุ่น Mastersizers จาก บริษัท Malvern Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา ผลมีดังแสดงในรูปที่ 2 ถึง 10

### 3.1.1ค สารประกอบ (Phases)

การวิเคราะห์สารประกอบ (phase analysis) ทำโดยเทคนิค x-ray diffraction โดยเครื่อง x-ray diffractometer รุ่น D5005 ผลิตโดย บริษัท Bruker ประเทศเยอรมันนี ผลมีดังแสดงในรูปที่ 11 ถึง 13

### 3.1.1ง สมบัติเชิงความร้อน ( Thermal Behaviours )

วิเคราะห์ โดย Differential Thermal Analysis (DTA) รุ่น DTA7 และ Thermogravimetric Analysis (TGA) รุ่น TGA 7 ผลิตโดย บริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา ผลการวิเคราะห์มีดังแสดงในรูป





# MASTERSIZER

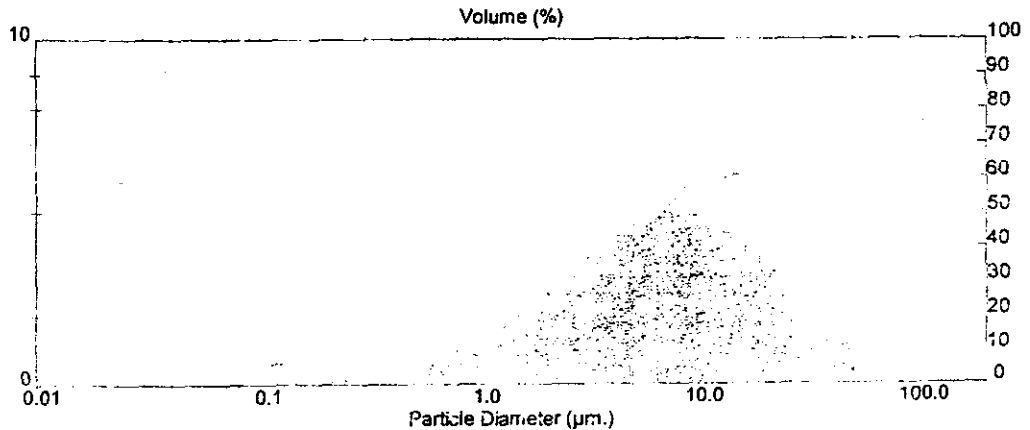
## Result: Histogram Report

Sample Details		
Sample ID: Sample 1	Run: Number: 44	Measured: 7 Aug 2002 14:59PM
Sample File: FLY ASH	Record Number: 190	Analysed: 7 Aug 2002 14:59PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: 2545/PT/1339		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 10.9 %
Presentatic: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 7.518 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0057 %Vol	Density = 1.000 g/cub. cm	Specific S.A. = 2.5146 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 1.12 um	D (v, 0.5) = 7.02 um	D (v, 0.9) = 31.56 um
D [4, 3] = 12.34 um	D [3, 2] = 2.39 um	Span = 4.336E+00	Uniformity = 1.313E+00

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	6.07	7.31	51.32	84.15	99.74
0.061	0.00	0.700	6.62	8.06	54.55	92.79	99.90
0.067	0.01	0.772	7.20	8.89	57.77	102.3	99.99
0.074	0.01	0.851	7.85	9.80	60.95	112.8	100.00
0.082	0.02	0.938	8.58	10.81	64.07	124.4	100.00
0.090	0.04	1.03	9.34	11.91	67.09	137.2	100.00
0.099	0.06	1.14	10.21	13.14	70.00	151.3	100.00
0.109	0.09	1.26	11.16	14.49	72.79	166.8	100.00
0.121	0.14	1.39	12.27	15.97	75.44	183.9	100.00
0.133	0.20	1.53	13.47	17.62	77.93	202.8	100.00
0.147	0.29	1.69	14.80	19.42	80.26	223.6	100.00
0.162	0.41	1.86	16.27	21.42	82.46	246.6	100.00
0.178	0.58	2.05	17.87	23.62	84.52	271.9	100.00
0.196	0.78	2.26	19.63	26.04	86.48	299.6	100.00
0.217	1.04	2.49	21.54	28.72	88.32	330.6	100.00
0.239	1.35	2.75	23.60	31.66	90.06	364.6	100.00
0.263	1.72	3.03	25.81	34.92	91.68	402.0	100.00
0.290	2.13	3.34	28.15	38.50	93.19	443.3	100.00
0.320	2.58	3.69	30.64	42.45	94.56	488.8	100.00
0.353	3.05	4.07	33.26	46.81	95.79	539.0	100.00
0.389	3.53	4.48	36.01	51.62	96.85	594.3	100.00
0.429	4.02	4.94	38.89	56.92	97.75	655.4	100.00
0.473	4.51	5.45	41.87	62.78	98.48	722.7	100.00
0.522	5.02	6.01	44.95	69.21	99.04	796.9	100.00
0.576	5.54	6.63	48.11	76.32	99.46	878.7	100.00



ern Instruments Ltd.  
ern, UK  
+44 (0)1684-892456 Fax: +44 (0)1684-892789

Mastersizer S Ver. 2.15  
Serial Number: 33544-156

07 Aug 02 15.00

รูปที่ 2 Particle Size Distribution ของดินเหนียว CPD โดย Laser Diffraction Method

# MAVERN MASTERSIZER

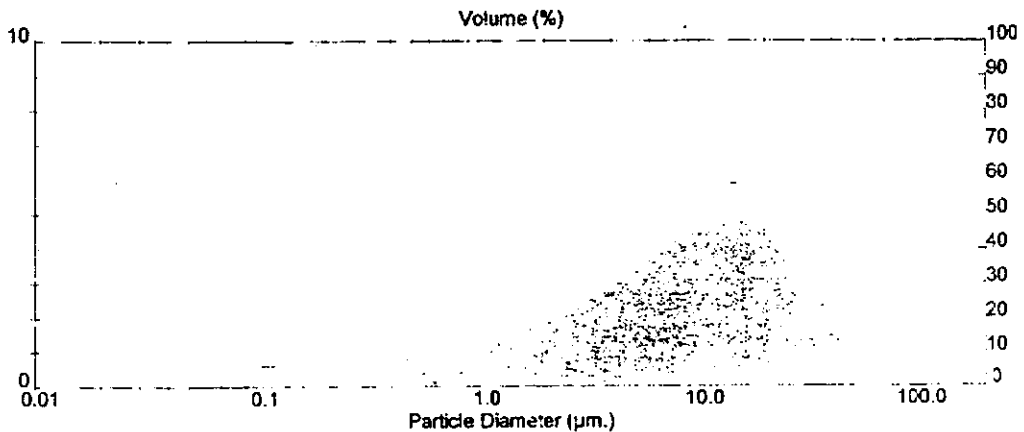
## Result: Histogram Report

Sample Details		
Sample ID: Sample 2	Run Number: 47	Measured: 7 Aug 2002 15:11PM
Sample File: FLY ASH	Record Number: 193	Analyzed: 7 Aug 2002 15:11PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: 2545/PT/1390		

System Details			
Range Lens: 300RF rom.	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obecuration: 12.6 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.L. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.L. = 1.3300]	Residual: 0.739 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0068 %Vol	Density = 1.000 g/cub. cm	Specific S.A. = 3.2085 sq. m/g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 0.60 um	D (v, 0.5) = 8.89 um	D (v, 0.9) = 35.37 um
D [4, 3] = 14.04 um	D [3, 2] = 1.87 um	Span = 3.900E+00	Uniformity = 1.205E+00

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	10.42	7.31	44.63	84.15	99.95
0.061	0.00	0.700	11.19	8.06	47.25	92.79	100.00
0.057	0.01	0.772	11.94	8.89	49.98	102.3	100.00
0.074	0.01	0.851	12.70	9.80	52.80	112.8	100.00
0.062	0.02	0.938	13.46	10.89	55.71	124.4	100.00
0.090	0.04	1.03	14.24	11.91	58.67	137.2	100.00
0.099	0.07	1.14	15.05	13.14	61.68	151.3	100.00
0.109	0.11	1.26	15.90	14.48	64.72	166.8	100.00
0.121	0.18	1.39	16.79	15.97	67.76	183.9	100.00
0.133	0.28	1.53	17.74	17.62	70.81	202.8	100.00
0.147	0.43	1.69	18.74	19.42	73.83	223.8	100.00
0.162	0.63	1.86	19.82	21.42	76.77	246.6	100.00
0.178	0.90	2.05	20.97	23.62	79.62	271.9	100.00
0.196	1.26	2.26	22.20	26.04	82.36	299.8	100.00
0.217	1.72	2.49	23.52	28.72	84.97	330.8	100.00
0.239	2.28	2.75	24.93	31.68	87.43	364.8	100.00
0.263	2.95	3.03	26.42	34.92	89.71	402.0	100.00
0.290	3.71	3.34	28.01	38.50	91.79	443.3	100.00
0.320	4.53	3.69	29.69	42.45	93.66	488.8	100.00
0.353	5.38	4.07	31.47	46.81	95.29	539.0	100.00
0.389	6.24	4.48	33.37	51.62	96.66	594.3	100.00
0.429	7.10	4.94	35.37	56.92	97.78	655.4	100.00
0.473	7.95	5.45	37.50	62.76	98.65	722.7	100.00
0.522	8.80	6.01	39.75	69.21	99.27	796.9	100.00
0.576	9.62	6.63	42.12	76.32	99.68	878.7	100.00



Mvern Instruments Ltd  
 Mvern, UK  
 Tel: +44 (0)1684-892456 Fax: +44 (0)1684-892789

Mastersizer S Ver. 2.15  
 Serial Number: 33544-156

07 Aug 02 15 12

รูปที่ 3 Particle Size Distribution ของดินขาวระนอง KR โดย Laser Diffraction Method

# MALVERN MASTERSIZER

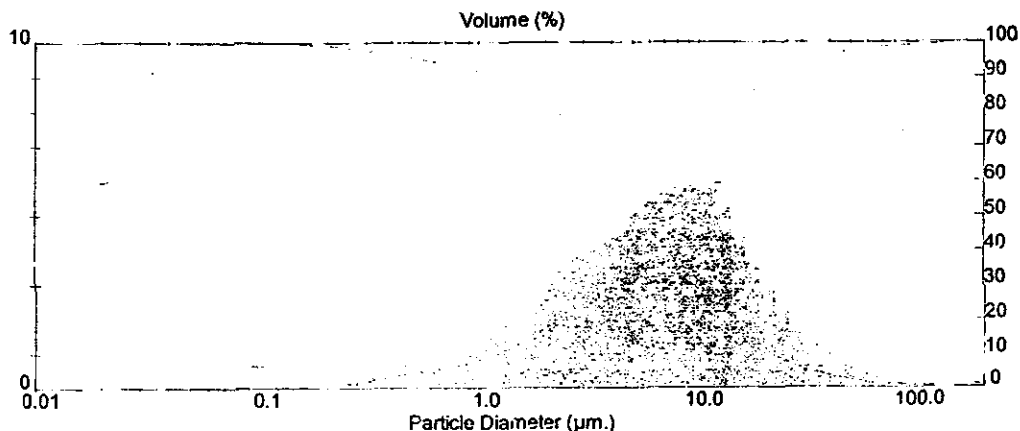
## Result: Histogram Report

Sample Details		
Sample ID: Sample 3	Run Number: 50	Measured: 7 Aug 2002 15:20PM
Sample File: FLY ASH	Record Number: 196	Analysed: 7 Aug 2002 15:20PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: 2545/PT/1391		

System Details			
Range Lens: 300RF, mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 12.3 %
Presentation: 3CHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.463 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0062 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 2.4949 sq. m / g
Mean Diameters:	D [v, 0.1] = 1.21 um	D [v, 0.5] = 8.41 um	D [v, 0.9] = 21.80 um
D [4, 3] = 10.82 um	D [3, 2] = 2.40 um	Span = 3.210E+00	Uniformity = 1.226E+00

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	5.56	7.31	54.79	84.15	99.02
0.061	0.00	0.700	6.01	8.06	58.47	92.79	99.14
0.067	0.00	0.772	6.51	8.89	62.19	102.3	99.25
0.074	0.01	0.851	7.08	9.80	65.92	112.8	99.34
0.082	0.02	0.938	7.76	10.81	69.67	124.4	99.44
0.090	0.03	1.03	8.53	11.91	73.38	137.2	99.53
0.099	0.04	1.14	9.41	13.14	76.28	151.3	99.62
0.109	0.07	1.26	10.43	14.49	80.10	166.8	99.72
0.121	0.11	1.39	11.60	15.97	83.01	183.9	99.81
0.133	0.17	1.53	12.94	17.62	85.57	202.8	99.88
0.147	0.25	1.69	14.44	19.42	87.80	223.6	99.94
0.162	0.36	1.86	16.11	21.42	89.69	246.6	99.98
0.178	0.52	2.05	17.95	23.62	91.29	271.9	100.00
0.196	0.72	2.26	19.96	26.04	92.63	299.8	100.00
0.217	0.97	2.49	22.13	28.72	93.75	330.6	100.00
0.239	1.27	2.75	24.44	31.66	94.70	364.6	100.00
0.263	1.63	3.03	26.89	34.92	95.50	402.0	100.00
0.290	2.04	3.34	29.47	38.50	96.19	443.3	100.00
0.320	2.48	3.69	32.18	42.45	96.79	488.8	100.00
0.353	2.92	4.07	35.01	46.81	97.31	539.0	100.00
0.389	3.37	4.48	37.98	51.62	97.75	594.3	100.00
0.429	3.81	4.94	41.08	56.92	98.12	655.4	100.00
0.473	4.25	5.45	44.32	62.76	98.42	722.7	100.00
0.522	4.68	6.01	47.69	69.21	98.67	796.9	100.00
0.576	5.12	6.63	51.19	76.32	98.87	878.7	100.00



Malvern Instruments Ltd.  
 Malvern, UK  
 Tel: +44 (0)1684-892456 Fax: +44 (0)1684-892789

Mastersizer S Ver. 2.15  
 Serial Number: 33544-156

07 Aug 02 15:21

รูปที่ 4 Particle Size Distribution ของดินดานเกวียน DK โดย Laser Diffraction Method

# MAVERN MASTERSIZER

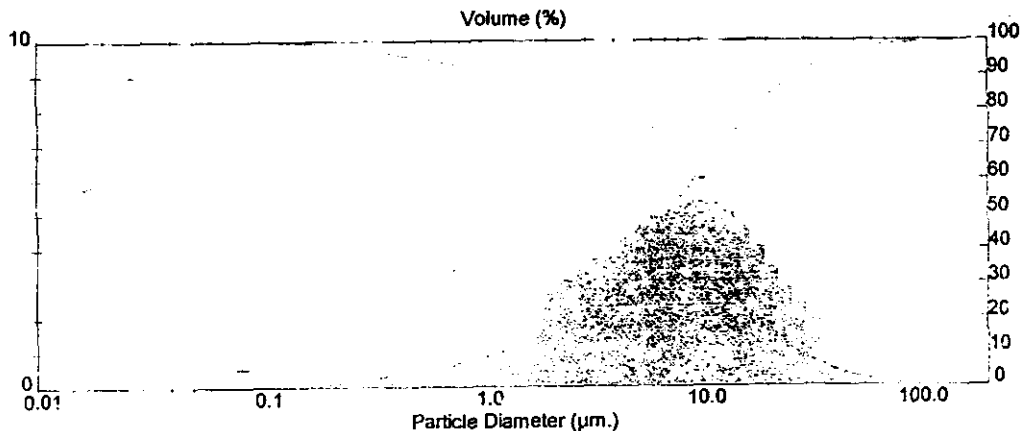
## Result: Histogram Report

Sample Details		
Sample ID: Sample 5	Run Number: 56	Measured: 7 Aug 2002 15:36PM
Sample File: FLY ASH	Record Number: 202	Analysed: 7 Aug 2002 15:36PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: 2545/PT/1393		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 11.6 %
Pressure: 30FID	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.504 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: Nona			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0061 %Vol	Density = 1.000 g/cub. cm	Specific S.A. = 2.4741 sq. m/g
Mean Diameter:	D (v, 0.1) = 1.13 um	D (v, 0.5) = 7.13 um:	D (v, 0.9) = 27.49 um
D [4, 3] = 12.17 um	D [3, 2] = 2.43 um	Span = 3.691E+00	Uniformity = 1.260E+00

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	5.78	7.31	50.85	84.15	99.18
0.061	0.00	0.700	6.25	8.06	54.22	92.79	99.34
0.067	0.01	0.772	6.77	8.89	57.65	102.3	99.46
0.074	0.01	0.851	7.36	9.80	61.09	112.8	99.55
0.082	0.02	0.938	8.04	10.81	64.53	124.4	99.62
0.090	0.04	1.03	8.79	11.91	67.93	137.2	99.68
0.099	0.06	1.14	9.65	13.14	71.29	151.3	99.74
0.109	0.10	1.26	10.61	14.49	74.53	166.8	99.80
0.121	0.14	1.39	11.70	15.97	77.55	183.9	99.85
0.133	0.21	1.53	12.93	17.62	80.33	202.8	99.91
0.147	0.30	1.69	14.30	19.42	82.87	223.8	99.95
0.162	0.43	1.88	15.80	21.42	85.17	246.6	99.98
0.178	0.59	2.05	17.45	23.62	87.22	271.9	99.99
0.196	0.80	2.26	19.26	26.04	89.06	299.8	100.00
0.217	1.05	2.49	21.20	28.72	90.71	330.8	100.00
0.239	1.36	2.75	23.28	31.66	92.17	364.6	100.00
0.263	1.72	3.03	25.48	34.92	93.47	402.0	100.00
0.290	2.12	3.34	27.81	38.50	94.61	443.3	100.00
0.320	2.55	3.69	30.25	42.45	95.61	488.8	100.00
0.353	3.00	4.07	32.83	46.81	96.47	539.0	100.00
0.389	3.45	4.48	35.52	51.62	97.20	594.3	100.00
0.429	3.90	4.94	38.34	56.92	97.81	655.4	100.00
0.473	4.36	5.45	41.29	62.78	98.29	722.7	100.00
0.522	4.82	6.01	44.36	69.21	98.68	796.9	100.00
0.576	5.29	6.63	47.55	76.32	98.97	878.7	100.00



Mvern Instruments Ltd.  
 vern, UK  
 =+44(0)1684-852456 Fax:+44(0)1624-892789

Mastersizer S Ver. 2.15  
 Serial Number: 33544-156

07 Aug 02 15:37

รูปที่ 5 Particle Size Distribution ของส่วนผสมของดินเหนียว CPD : ดินดานแก้ว  
 DK = 50:50 โดย Laser Diffraction Method

# MAERN MASTERSIZER

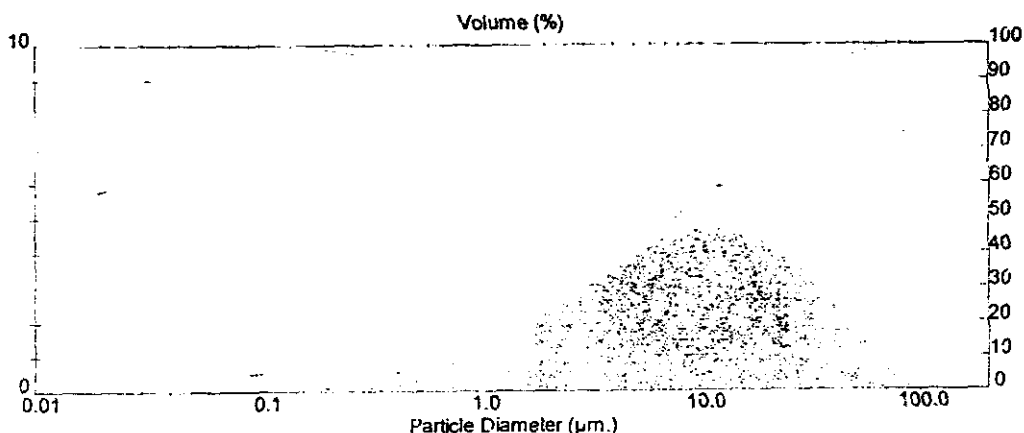
## Result: Histogram Report

Sample Details		
Sample ID: Sample 4	Run Number: 53	Measured: 7 Aug 2002 15:29PM
Sample File: FLYASH	Record Number: 199	Analysed: 7 Aug 2002 15:29PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: 2545/PT/1392		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 10.3 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = { 1.5295, 0.1000};	Dispersant R.I. = 1.3390]	Residual: 0.558 %
Analysis Model: Polydispers			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0052 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 2.9290 sq. m / g
Mean Diameters:	D [v, 0.1] = 0.77 um	D [v, 0.5] = 7.80 um	D [v, 0.9] = 32.45 um
D [4, 3] = 12.83 um	D [3, 2] = 2.05 um	Span = 4.060E+00	Uniformity = 1.243E+00

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	8.59	7.31	48.09	84.15	99.95
0.061	0.00	0.700	9.28	8.06	50.96	92.79	100.00
0.067	0.01	0.772	9.58	8.89	53.90	102.3	100.00
0.074	0.01	0.851	10.70	9.80	56.87	112.8	100.00
0.082	0.02	0.938	11.48	10.81	59.86	124.4	100.00
0.090	0.04	1.03	12.26	11.91	62.83	137.2	100.00
0.099	0.06	1.14	13.12	13.14	65.84	151.3	100.00
0.109	0.10	1.26	14.04	14.49	68.80	166.8	100.00
0.121	0.16	1.39	15.03	15.97	71.74	183.9	100.00
0.133	0.24	1.53	16.12	17.62	74.60	202.8	100.00
0.147	0.36	1.69	17.29	19.42	77.36	223.6	100.00
0.162	0.53	1.86	18.56	21.42	80.03	246.6	100.00
0.178	0.75	2.05	19.93	23.62	82.59	271.9	100.00
0.196	1.04	2.26	21.42	26.04	85.03	299.8	100.00
0.217	1.41	2.49	23.03	28.72	87.34	330.6	100.00
0.239	1.87	2.75	24.75	31.66	89.49	364.6	100.00
0.263	2.40	3.03	26.59	34.92	91.47	402.0	100.00
0.290	3.01	3.34	28.53	38.50	93.25	443.3	100.00
0.320	3.68	3.69	30.59	42.45	94.83	488.8	100.00
0.353	4.37	4.07	32.76	46.81	96.18	539.0	100.00
0.389	5.07	4.48	35.05	51.62	97.32	594.3	100.00
0.429	5.78	4.94	37.44	56.92	98.23	655.4	100.00
0.473	6.49	5.45	39.95	62.76	98.92	722.7	100.00
0.522	7.20	6.01	42.57	69.21	99.47	796.9	100.00
0.576	7.90	6.63	45.28	76.32	99.80	878.7	100.00



Mvern Instruments Ltd.  
 Mvern, UK  
 Tel: +44 (0)1684-892456 Fax: +44 (0)1684-892789

Mastersizer S Ver. 2.15  
 Serial Number: 33544-156

07 Aug 02 15:30

รูปที่ 6 Particle Size Distribution ของส่วนผสมของดินเหนียว CPD : ดินขาวระนอง  
 KR = 50:50 โดย Laser Diffraction Method

# MAVERN MASTERSIZER

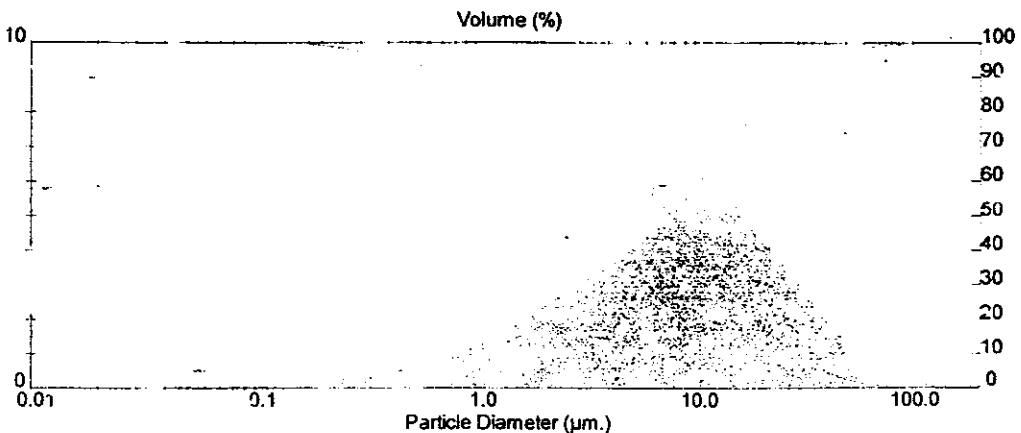
## Result: Histogram Report

Sample Details		
Sample ID: Sample 6	Run Number: 59	Measured: 7 Aug 2002 15:43PM
Sample File: FLY ASH	Record Number: 205	Analysed: 7 Aug 2002 15:43PM
Sample Path: C:\SIZER\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: 2545/PT/1394		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 10.5 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.514 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0055 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 2.6306 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 0.93 um	D (v, 0.5) = 7.62 um	D (v, 0.9) = 29.50 um
D [4, 3] = 12.38 um	D [3, 2] = 2.26 um	Span = 3.652E+00	Uniformity = 1.167E+00

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	7.43	7.31	47.86	84.15	99.81
0.061	0.00	0.700	8.05	8.06	50.95	92.79	99.75
0.067	0.00	0.772	8.68	8.89	54.16	102.3	99.86
0.074	0.00	0.851	9.35	9.80	57.43	112.8	99.95
0.082	0.01	0.938	10.06	10.81	60.76	124.4	100.00
0.090	0.01	1.03	10.83	11.91	64.10	137.2	100.00
0.099	0.02	1.14	11.66	13.14	67.43	151.3	100.00
0.109	0.04	1.26	12.58	14.49	70.73	166.8	100.00
0.121	0.07	1.39	13.59	15.97	73.99	183.9	100.00
0.133	0.12	1.53	14.71	17.62	77.09	202.8	100.00
0.147	0.19	1.69	15.93	19.42	79.99	223.6	100.00
0.162	0.29	1.86	17.26	21.42	82.68	246.8	100.00
0.178	0.45	2.05	18.70	23.62	85.17	271.9	100.00
0.196	0.67	2.26	20.27	26.04	87.43	299.8	100.00
0.217	0.96	2.49	21.96	28.72	89.47	330.6	100.00
0.239	1.34	2.75	23.75	31.66	91.31	364.6	100.00
0.263	1.80	3.03	25.65	34.92	92.94	402.0	100.00
0.290	2.35	3.34	27.65	38.50	94.36	443.3	100.00
0.320	2.95	3.69	29.78	42.45	95.59	488.8	100.00
0.353	3.58	4.07	31.97	46.81	96.63	539.0	100.00
0.389	4.23	4.48	34.29	51.62	97.49	594.3	100.00
0.429	4.97	4.94	36.74	56.92	98.17	655.4	100.00
0.473	5.52	5.45	39.32	62.76	98.71	722.7	100.00
0.522	6.16	6.01	42.03	69.21	99.11	796.9	100.00
0.576	6.80	6.63	44.88	76.32	99.40	878.7	100.00



Mvern Instruments Ltd.  
Mvern, UK  
Tel: +44 (0)1684-892456 Fax: +44 (0)1684-892789

Mastersizer S Ver. 2.15  
Serial Number: 33544-156

07 Aug 02 15:44

รูปที่ 7 Particle Size Distribution ของส่วนผสมของดินดานเกวียนDK : ดินขาวระนอง  
KR = 50:50 โดย Laser Diffraction Method



# MASTERSIZER

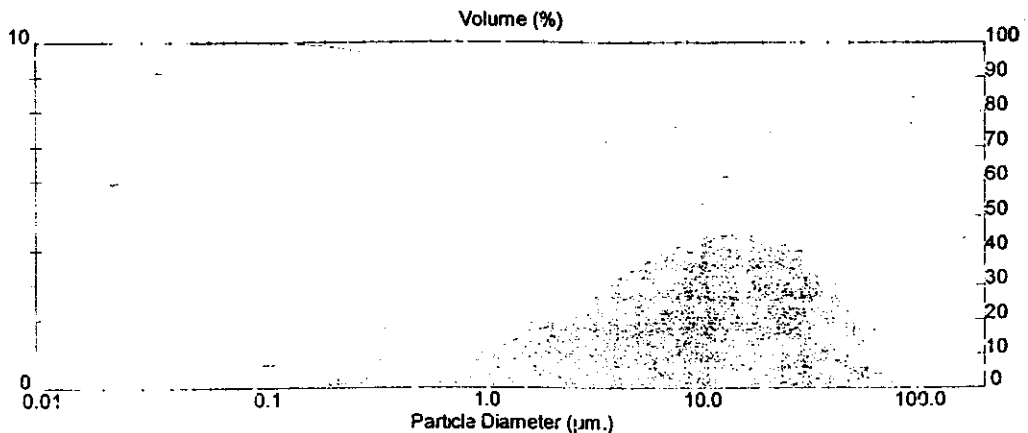
## Result: Histogram Report

Sample Details		
Sample ID: Sample 7	Run Number: 62	Measured: 7 Aug 2002 15:51PM
Sample File: FLY ASH	Record Number: 208	Analysed: 7 Aug 2002 15:51PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: 2545/PT/1395		

System Details			
Range Lens: 300RF.µm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 10.3 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.632 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0057 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 2.6312 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 0.96 µm	D (v, 0.5) = 9.36 µm	D (v, 0.9) = 39.75 µm
D [4, 3] = 15.63 µm	D [3, 2] = 2.28 µm	Span = 4.146E+00	Uniformity = 1.279E+00

Size (µm)	Volume Under %	Size (µm)	Volume Under %	Size (µm)	Volume Under %	Size (µm)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	7.21	7.31	43.33	84.15	99.48
0.061	0.00	0.700	7.81	8.06	45.91	92.79	99.84
0.067	0.01	0.772	8.45	8.89	48.57	102.3	99.96
0.074	0.02	0.851	9.12	9.80	51.30	112.3	100.00
0.082	0.03	0.938	9.85	10.81	54.08	124.4	100.00
0.090	0.05	1.03	10.63	11.91	56.90	137.2	100.00
0.099	0.08	1.14	11.47	13.14	59.74	151.3	100.00
0.109	0.13	1.26	12.38	14.49	62.60	166.8	100.00
0.121	0.19	1.39	13.37	15.97	65.46	183.9	100.00
0.133	0.28	1.53	14.44	17.62	68.32	202.8	100.00
0.147	0.40	1.69	15.58	19.42	71.16	223.8	100.00
0.162	0.56	1.86	16.81	21.42	73.98	246.6	100.00
0.178	0.78	2.05	18.12	23.62	76.77	271.9	100.00
0.196	1.02	2.26	19.53	26.04	79.49	299.8	100.00
0.217	1.33	2.49	21.02	28.72	82.12	330.6	100.00
0.239	1.71	2.75	22.60	31.66	84.66	364.6	100.00
0.263	2.15	3.03	24.27	34.92	87.06	402.0	100.00
0.290	2.65	3.34	26.02	38.50	89.31	443.3	100.00
0.320	3.18	3.69	27.85	42.45	91.56	488.8	100.00
0.353	3.73	4.07	29.78	46.81	93.20	539.0	100.00
0.389	4.29	4.48	31.80	51.62	94.82	594.3	100.00
0.429	4.86	4.94	33.91	56.92	96.20	655.4	100.00
0.473	5.44	5.45	36.12	62.76	97.34	722.7	100.00
0.522	6.02	6.01	38.42	69.21	98.25	796.9	100.00
0.576	6.61	6.63	40.83	76.32	98.96	878.7	100.00



Mamern Instruments Ltd.  
 Mamern, UK  
 Tel: +44 (0)1684-892456 Fax: +44 (0)1684-892789

Mastersizer S Ver. 2.15  
 Serial Number: 33544-156

07 Aug 02 15:52

### รูปที่ 8 Particle Size Distribution ของส่วนผสมของ

ดินเหนียว CPD : ดินขาวระนอง KR : Quartz : Feldspar = 25:25:25:25

โดย Laser Diffraction Method

# MAVERN MASTERSIZER

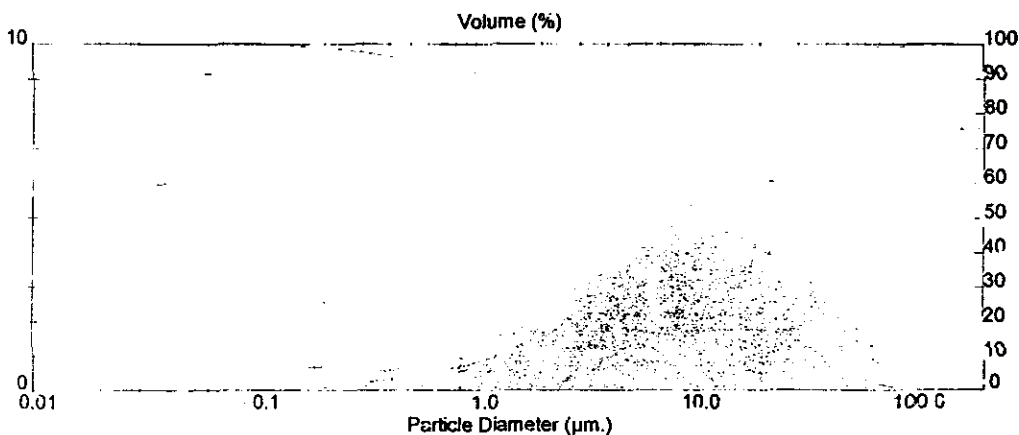
## Result: Histogram Report

Sample Details		
Sample ID: Sample 8	Run Number: 65	Measured: 7 Aug 2002 15:57PM
Sample File: FLY ASH	Record Number: 211	Analysed: 7 Aug 2002 15:57PM
Sample Path: C:\SIZEP\SDATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: 2545/PT/1396		

System Details			
Range Lens: 300RE,mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 10.8 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.588 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0061 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 2.3771 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 1.20 um	D (v, 0.5) = 8.54 um	D (v, 0.9) = 37.61 um
D [4, 3] = 14.81 um	D [3, 2] = 2.52 um	Span = 4.265E+00	Uniformity = 1.316E+00

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	5.60	7.31	45.40	84.15	99.21
0.061	0.01	0.700	6.09	8.06	48.28	92.79	99.53
0.067	0.01	0.772	6.63	8.89	51.22	102.3	99.76
0.074	0.02	0.851	7.23	9.80	54.21	112.8	99.93
0.082	0.03	0.938	7.91	10.81	57.22	124.4	99.99
0.090	0.05	1.03	8.68	11.91	60.23	137.2	100.00
0.099	0.08	1.14	9.51	13.14	63.21	151.3	100.00
0.109	0.12	1.26	10.45	14.49	66.15	166.8	100.00
0.121	0.18	1.39	11.50	15.97	69.03	183.9	100.00
0.133	0.26	1.53	12.66	17.62	71.85	202.8	100.00
0.147	0.36	1.69	13.93	19.42	74.58	223.8	100.00
0.162	0.49	1.86	15.31	21.42	77.19	246.8	100.00
0.178	0.66	2.05	16.80	23.62	79.69	271.9	100.00
0.196	0.86	2.26	18.41	26.04	82.06	299.8	100.00
0.217	1.11	2.49	20.12	28.72	84.35	330.6	100.00
0.239	1.41	2.75	21.93	31.66	86.51	364.6	100.00
0.263	1.75	3.03	23.84	34.92	88.55	402.0	100.00
0.290	2.12	3.34	25.85	38.50	90.44	443.3	100.00
0.320	2.52	3.69	27.94	42.45	92.18	488.8	100.00
0.353	2.94	4.07	30.13	46.81	93.75	539.0	100.00
0.389	3.36	4.48	32.42	51.62	95.13	594.3	100.00
0.429	3.79	4.94	34.81	56.92	96.32	655.4	100.00
0.473	4.22	5.45	37.31	62.76	97.31	722.7	100.00
0.522	4.67	6.01	39.91	69.21	98.12	796.9	100.00
0.576	5.13	6.62	42.61	76.32	98.74	878.7	100.00



Mvern Instruments Ltd.  
 Mern, UK  
 Tel: +44 (0)1684-892456 Fax: +44 (0)1684-892769

Mastersizer S Ver. 2.15  
 Serial Number: 33544-156

07 Aug 02 15:58

รูปที่ 9 Particle Size Distribution ของส่วนผสมของ

ดินเหนียว CPD : ดินดานเกวียน DK : Quartz : Feldspar = 25:25:25:25

โดย Laser Diffraction Method



# MAVERN MASTERSIZER

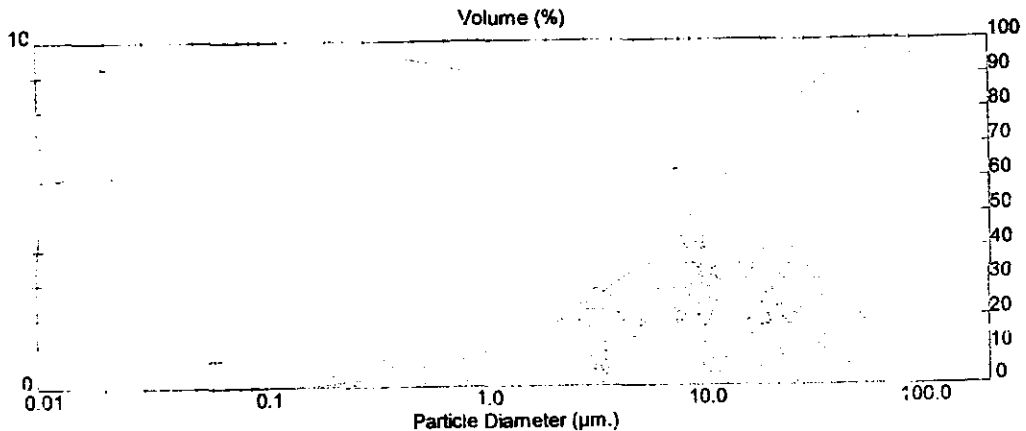
## Result: Histogram Report

Sample Details		
Sample ID: Sample 9	Run Number: 67	Measured: 7 Aug 2002 16:04PM
Sample File: FLY ASH	Record Number: 213	Analysed: 7 Aug 2002 16:04PM
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\		Result Source: Analysed
Sample Notes: 2545/PT/1397		

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 10.4 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = ( 1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.624 %
Analysis Model: Polydisperse			
Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0058 %Vol	Density = 1.000 g/cub. cm	Specific S.A. = 2.5205 sq. m/g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 1.02 um	D (v, 0.5) = 9.12 um	D (v, 0.9) = 37.68 um
D [4, 3] = 14.93 um	D [3, 2] = 2.38 um	Span = 4.020E+00	Uniformity = 1.237E+00

Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %	Size (um)	Volume Under %
0.055	0.00	0.635	6.80	7.31	43.70	84.15	99.61
0.061	0.00	0.700	7.38	8.06	46.42	92.79	99.89
0.067	0.01	0.772	7.97	8.89	49.24	102.3	100.00
0.074	0.01	0.851	8.52	9.80	52.14	112.8	100.00
0.082	0.02	0.938	9.33	10.81	55.11	124.4	100.00
0.090	0.03	1.03	10.10	11.91	58.12	137.2	100.00
0.099	0.05	1.14	10.93	13.14	61.15	151.3	100.00
0.109	0.09	1.26	11.85	14.49	64.17	166.8	100.00
0.121	0.13	1.39	12.85	15.97	67.18	183.9	100.00
0.133	0.20	1.53	13.94	17.62	70.17	202.8	100.00
0.147	0.30	1.59	15.12	19.42	73.10	223.6	100.00
0.162	0.43	1.86	16.39	21.42	75.94	246.6	100.00
0.178	0.61	2.05	17.75	23.62	78.67	271.9	100.00
0.196	0.84	2.26	19.21	26.04	81.29	299.8	100.00
0.217	1.14	2.49	20.76	28.72	83.79	330.6	100.00
0.239	1.49	2.75	22.39	31.66	86.16	364.6	100.00
0.253	1.92	3.03	24.10	34.92	88.38	402.0	100.00
0.290	2.40	3.34	25.90	38.50	90.44	443.3	100.00
0.320	2.91	3.69	27.77	42.45	92.31	488.8	100.00
0.353	3.46	4.07	29.74	46.81	93.98	539.0	100.00
0.389	4.00	4.48	31.79	51.62	95.44	594.3	100.00
0.429	4.55	4.94	33.95	56.92	96.69	655.4	100.00
0.473	5.11	5.45	36.21	62.76	97.72	722.7	100.00
0.522	5.67	6.01	38.59	69.21	98.54	796.9	100.00
0.576	6.24	6.83	41.09	76.32	99.16	878.7	100.00



lvm Instruments Ltd.  
lvm, UK  
+44(0)1684-892456 Fax +44(0)1684-892789

Mastersizer S Ver. 2.15  
Serial Number: 33544-156

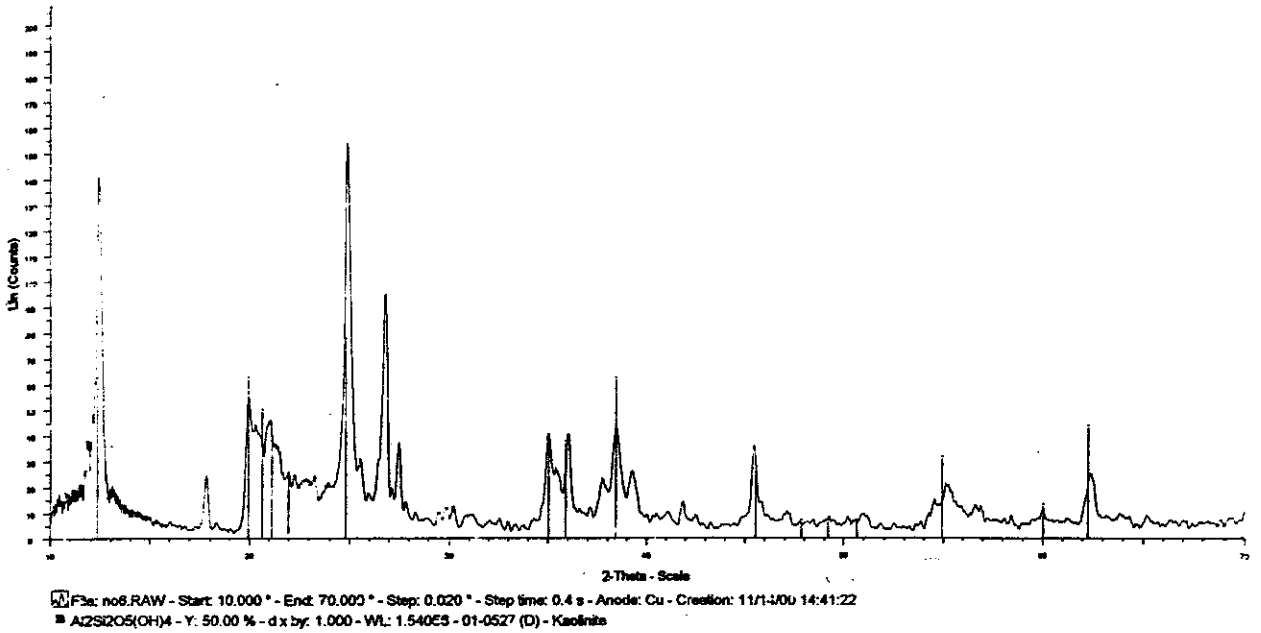
07 Aug 02 16:05

### รูปที่ 10 Particle Size Distribution ของส่วนผสมของ

ดินดานเกวียน DK : ดินขาวระนอง KR : Quartz : Feldspar = 25:25:25:25

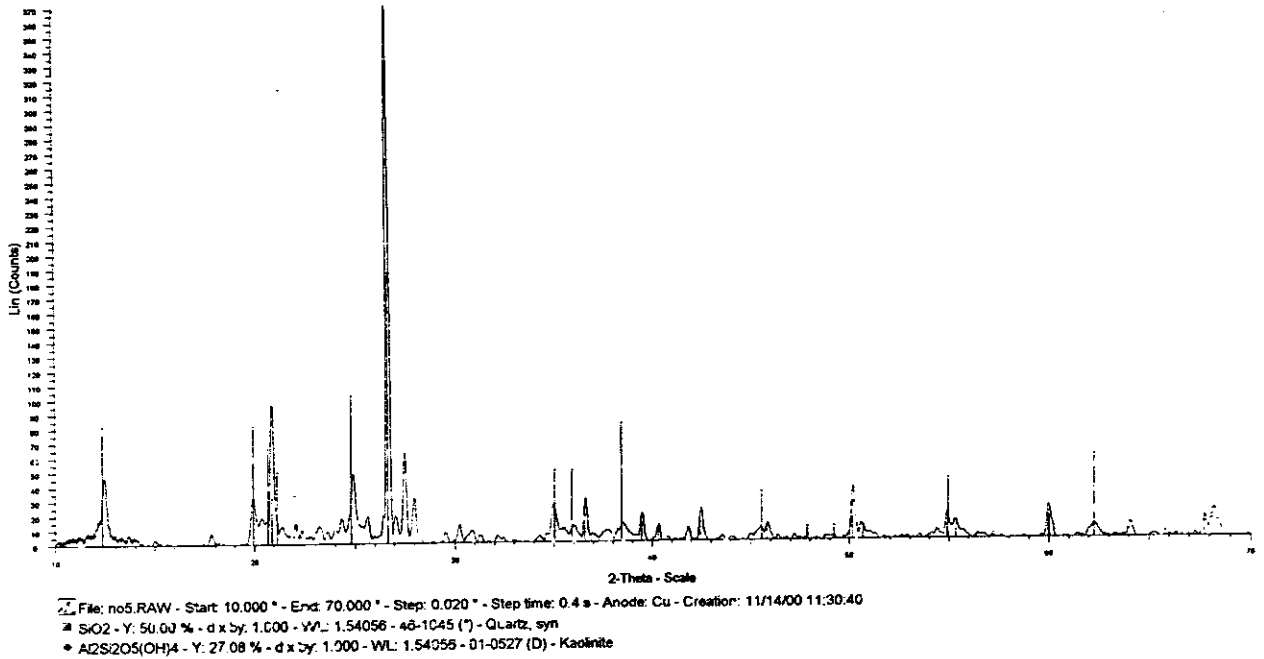
โดย Laser Diffraction Method

kaolin R



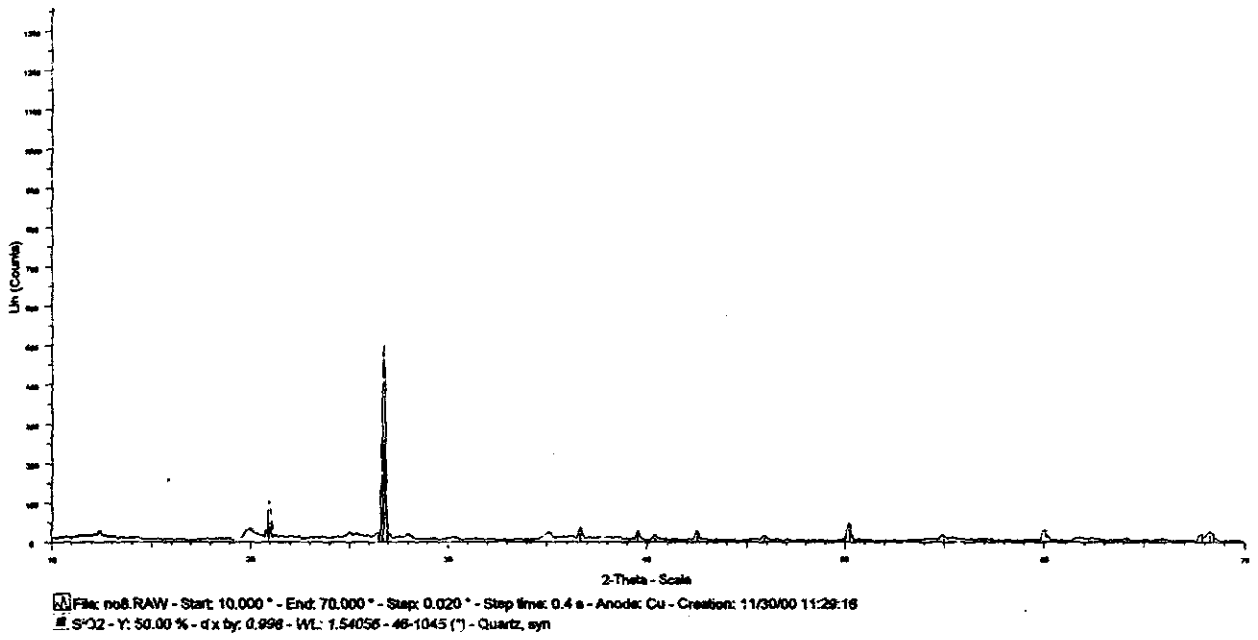
รูปที่ 11 X-ray Diffraction Pattern ของดินขาวระนอง KR

compound clay



รูปที่ 12 X-ray Diffraction Pattern ของดินเหนียว CPD

Dk1



รูปที่ 13 X-ray Diffraction Pattern ของดินด้านเกรียน DK

ที่ 14 ถึง 19

### 3.1.1 จุลโครงสร้าง (Microstructure)

การวิเคราะห์ microstructure จะเน้นที่ปูนปลาสเตอร์หลังผสมน้ำ โดย Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM 6400 จากบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น

### 3.1.2 การศึกษา rheological behavior ของวัสดุติบและส่วนผสม

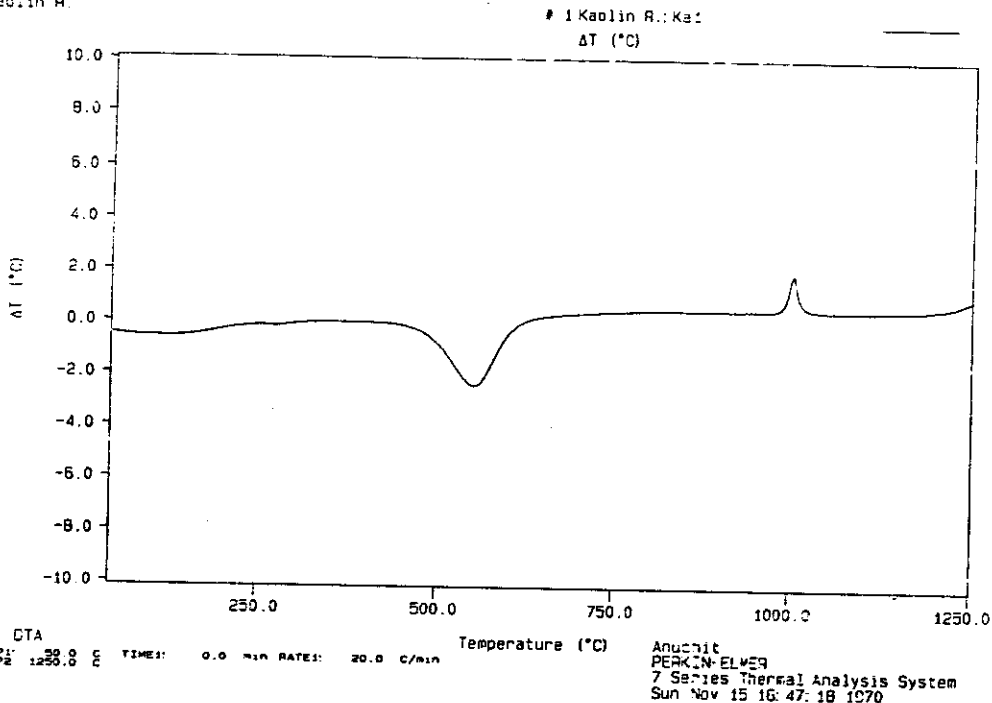
คุณสมบัติด้าน rheological properties เช่น viscosity fluidity หรือ thixotropy จะมีผลอย่างยิ่งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และอัตราการขึ้นรูป คุณสมบัติเหล่านี้จะเป็นผลจากลักษณะเฉพาะของวัสดุติบและส่วนผสมโดยตรง การทดสอบวัด rheological properties จึงมีความสำคัญในการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในระบบ กล่าวคือ ความหนืด (viscosity) ของน้ำ slip ควรควบคุมให้มีค่าต่ำสุดเท่าที่เป็นได้เพื่อให้สามารถไหลในแบบได้ดี ซึ่งโดยทั่วไปจะอาศัยสารเติมแต่ง ประเภท deflocculants เข้าช่วย แต่ถ้าไม่ควบคุมปริมาณสาร deflocculant ให้เหมาะสม การก่อตัวของเนื้อดินในแบบปลาสเตอร์จะช้าหรือเร็วเกินไปทำให้ casting rate ไม่สม่ำเสมอ คุณสมบัติอีกประการหนึ่งในการควบคุมน้ำ slip คือ ค่า thixotropy ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า viscosity เมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลาต่างๆ ค่า thixotropy ของน้ำ slip ถ้ามีค่าสูงมาก อัตราการหล่อจะเร็วแต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์จะด้อยลง ในขณะที่ถ้า thixotropy ต่ำเกินไป อัตราการหล่อจะช้ามาก ตัวแปรที่ควบคุม rheological properties ของ slip นอกจากขึ้นกับลักษณะเฉพาะของวัสดุติบแล้ว จะได้รับผลโดยตรงจากสารเติมแต่ง deflocculants เป็นหลัก rheological properties ที่ทำการทดสอบในการศึกษาครั้งนี้ คือ ค่า viscosity และ thixotropy เป็นหลัก

#### 3.1.2.1 วิธีการทดลองเพื่อวัดความหนืด (Viscosity)

การวัด viscosity ของ slip จะทำดังนี้ คือ

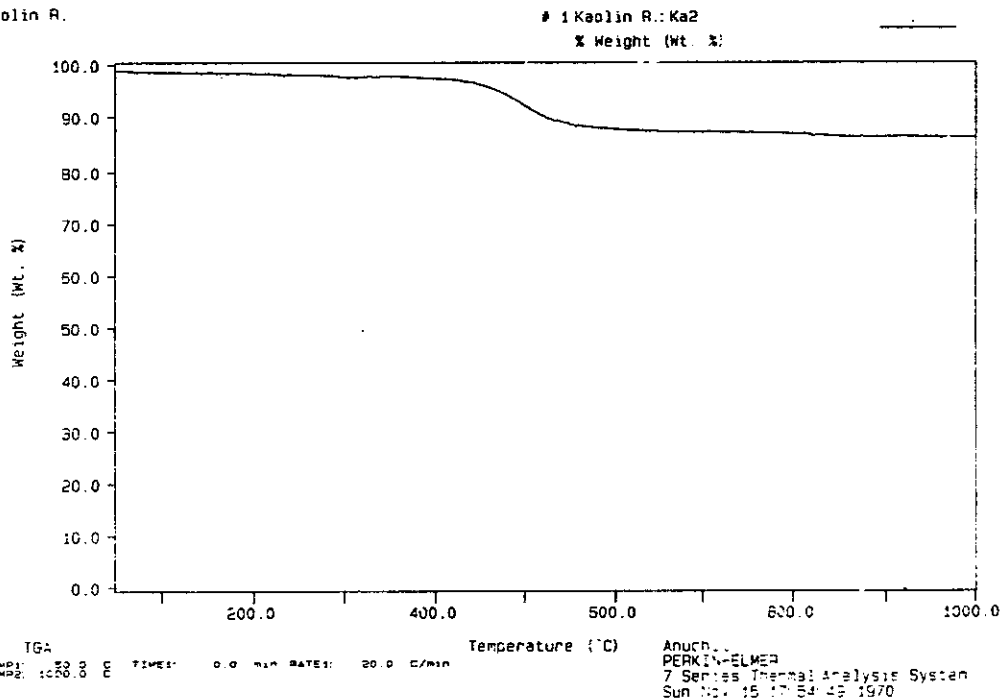
- ก. เตรียมน้ำ slip โดยใช้ส่วนผสม Solid : น้ำกลั่น = 1:1 โดยน้ำหนัก
- ข. กวนผสม ด้วย stirrer จนเข้ากันดี ไม่มีเม็ดหยาบเหลืออยู่ โดยทั่วไปประมาณ 20 นาที ในกรณีที่เติมสาร deflocculants ชนิดต่างๆหลังจากเติมจะกวนทิ้งไว้ 60 นาที แล้วกวนใหม่ก่อนทำการวัด
- ค. นำไปวัดค่า viscosity โดยเครื่อง Brookfield Dial Viscometer ซึ่งผลิตโดย บริษัท Brookfield Engineering Laboratories, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา ค่าที่อ่านได้มีหน่วยเป็น centipoises (cp)

Curve 1: DTA in DTA Mode  
 File info: Ka1 Sun Nov 15 15:53:07 1970  
 Sample Weight: 0.000 mg  
 Kaolin R.



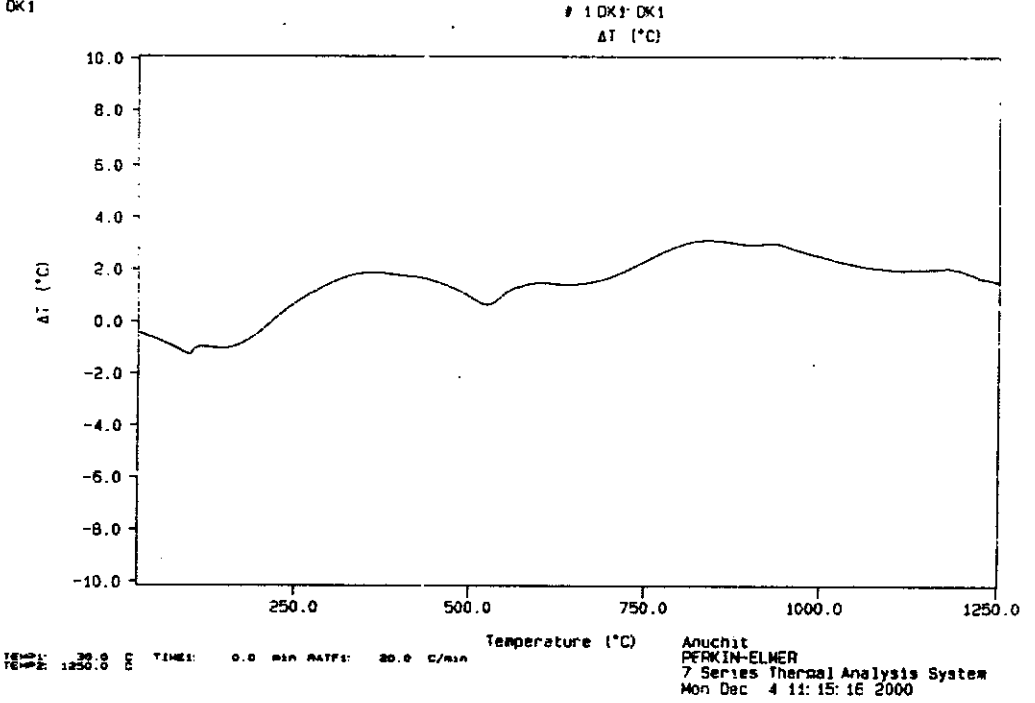
รูปที่ 14 DTA Thermograph ของดินขาวระนอง KR

Curve 1: TGA  
 File info: Ka2 Sun Nov 15 17:44:20 1970  
 Sample Weight: 9.507 mg  
 Kaolin R.



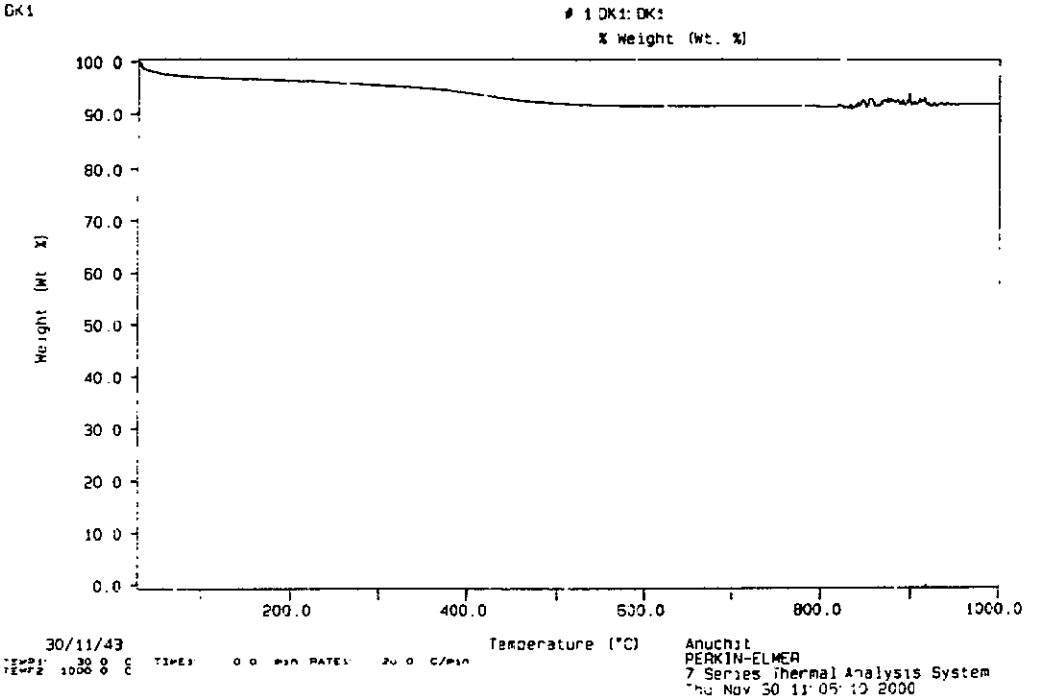
รูปที่ 15 TGA Thermograph ของดินขาวระนอง KR

Curve 1: DTA in DTA Mode  
 File info: DK1 Mon Dec 4 11:10:35 2000  
 Sample Weight: 0.000 mg  
 DK1



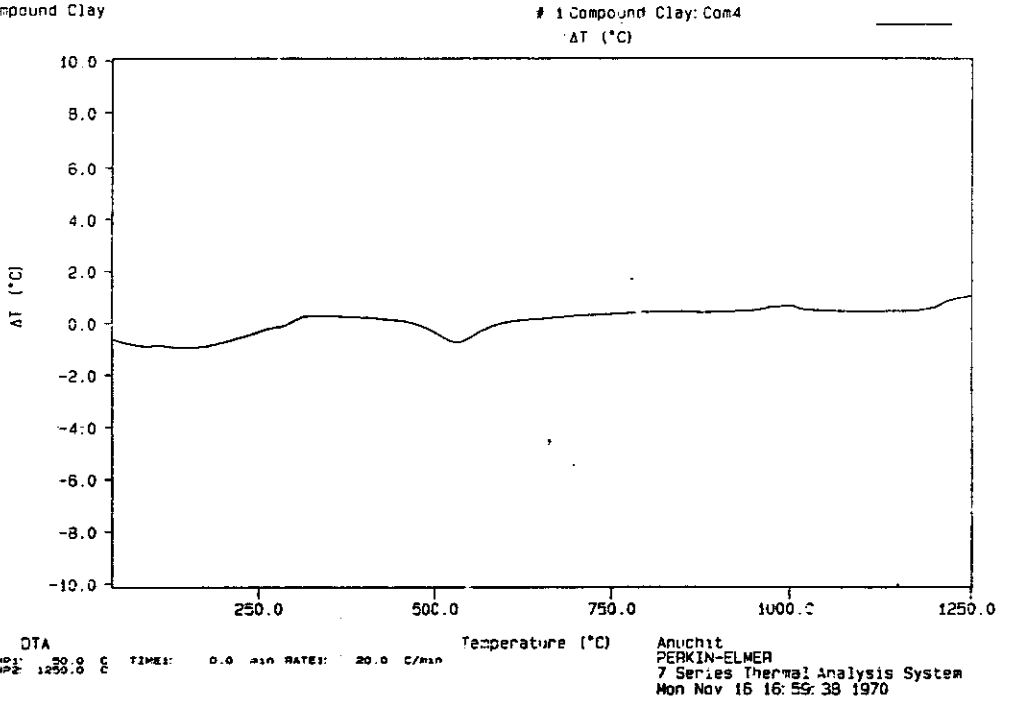
รูปที่ 16 DTA Thermograph ของดินค่านเกวียน DK

Curve 1: TGA  
 File info: DK1 Thu Nov 30 10:30:00 2000  
 Sample Weight: 15.555 mg  
 DK1



รูปที่ 17 TGA Thermograph ของดินค่านเกวียน DK

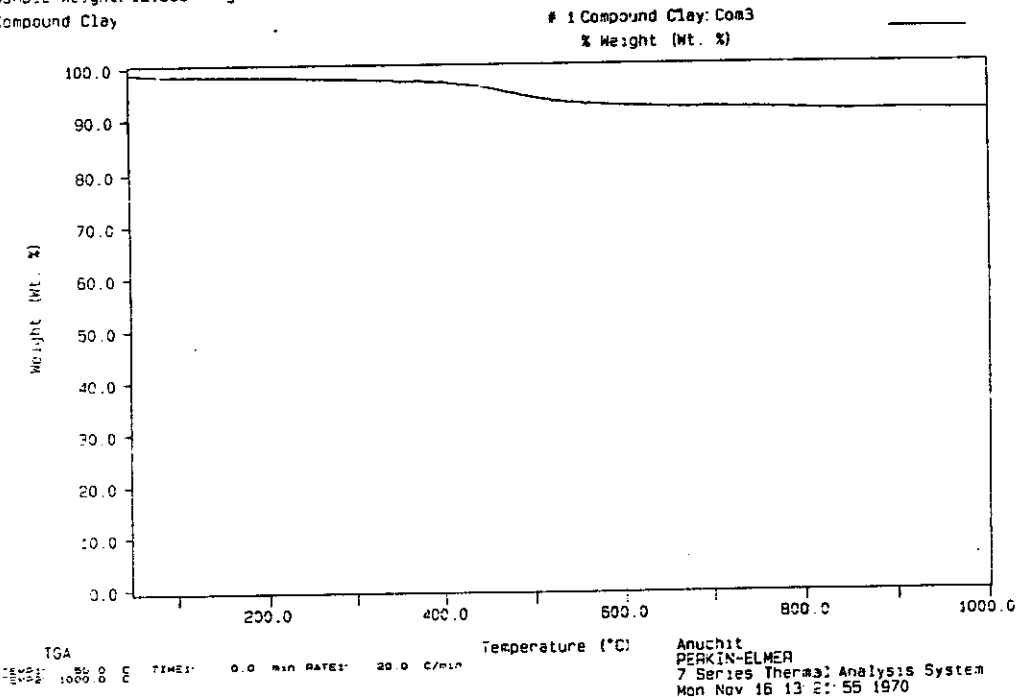
Curve 1: DTA in DTA Mode  
 File info: Com4 Mon Nov 16 15: 27: 45 1970  
 Sample Weight: 0.000 mg  
 Compound Clay



รูปที่ 18

DTA Thermograph ของดินเหนียว CPD

Curve 1: TGA  
 File info: Com3 Mon Nov 16 13: 07: 35 1970  
 Sample Weight: 12.558 mg  
 Compound Clay



รูปที่ 19

TGA Thermograph ของดินเหนียว CPD

ผลการวัดค่า viscosity ของ slip ส่วนผสมต่างๆ มีดังแสดงในตารางที่ 3 ถึง 5

### 3.1.2.2 วิธีการทดลองเพื่อวัด thixotropy

วิธีการวัด thixotropy ของ slip จะคล้ายกับการวัด viscosity แต่จะวัดในช่วงเวลาต่างๆ เพื่อดูการจับตัวของอนุภาค หรือ gel time ซึ่งป็นดังนี้ คือ

- ก. เตรียม slip ของส่วนผสม ดังใน 3.1.2.1
- ข. วัดค่า viscosity ด้วย Brookfield Viscometer บันทึกเป็น  $\eta_0$  หรือ Viscosity ที่เวลา 0 นาที
- ค. ทิ้งน้ำ slip ไว้ให้เกิดการเกาะตัว เป็นเวลา 15 และ 30 นาที
- ง. หลัง 15 และ 30 นาที วัดค่า viscosity บันทึกเป็น  $\eta_{15}$  และ  $\eta_{30}$  ตามลำดับ
- จ. ค่า thixotropy (gel time) หลัง 15 นาที [  $T_{15}$  ] คือ

$$T_{15} = \eta_{15} - \eta_0$$

$$T_{30} = \eta_{30} - \eta_0$$

ผลจากการวัด thixotropy ของส่วนผสม มีดังแสดงใน ตารางที่ 6

### 3.1.3 การศึกษา Permeability ของวัตถุดิบและส่วนผสม

Permeability ของเนื้อวัตถุดิบและส่วนผสมในการหล่อแบบ Slip casting มีผลอย่างมากต่ออัตราการหล่อแบบ ซึ่งถูกควบคุมด้วยกลไกของการแพร่ (Diffusion) ของน้ำจากเนื้อ solid ในน้ำ slip และเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งในการควบคุมของกระบวนการแยกน้ำด้วยระบบ filter press และ การขึ้นรูปแบบ slip casting ในอุตสาหกรรมเซรามิก โดยทั่วไปถ้าเนื้อวัตถุดิบหรือส่วนผสมมี permeability สูง อัตราการหล่อแบบในการขึ้นรูปจะเร็ว เนื่องจากโครงสร้าง solid structure จะมีช่องว่างรูพรุนสูงทำให้น้ำแยกตัวจาก slip ได้เร็ว ในทางกลับกันถ้า permeability ของเนื้อส่วนผสมต่ำ น้ำแทรกตัวออกยาก อัตราการขึ้นรูปจะช้าลงอย่างมากบางครั้งต้องมีการปรับส่วนผสมเพื่อให้มีอัตราการขึ้นรูปเหมาะสมกับกระบวนการผลิต

ตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่า permeability ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของเนื้อวัตถุดิบหรือส่วนผสมได้แก่

1. ขนาดอนุภาค หรือ พื้นที่ผิว ( particle size and surface area )
2. รูปร่างของอนุภาค ( particle shapes )
3. การเรียงตัวของอนุภาคต่างๆในส่วนผสม เมื่อเกิดเป็นชั้นในแบบ ( particle packing )



ตารางที่ 3 ค่า Viscosity ของ Slip ดินเหนียว compound clay เมื่อมี Deflocculants ชนิดต่างๆ  
ดิน : น้ำ = 1:1 SS = Sodium silicate SHMP = Sodiumhexametaphosphate  
STP = Sodium tripolyphosphate

ส่วนผสม	SS		SHMP		STP	
	ปริมาณ %	Viscosity cp	ปริมาณ %	Viscosity	ปริมาณ %	Viscosity
ดิน CPD 100%	0.00	130	0.00	130	0.00	130
	0.15	96	0.15	50	0.05	88
	0.30	62	0.30	40	0.10	49
	0.45	54	0.45	40	0.15	43
	0.60	54	0.60	40	0.20	43
	0.75	56	0.75	39	0.25	43
	0.90	56	0.90	40	0.30	43
	1.05	56	1.05	40	0.35	42
	1.20	56	1.20	40		
	1.35	58	1.35	40		
	1.50	56	1.50	42		
	1.65	59	1.65	40		
	1.80	60	1.80	42		

ตารางที่ 4 ค่า Viscosity ของ Slip ดินขาวระนอง เมื่อมี Deflocculants ชนิดต่างๆ  
ดิน : น้ำ = 1:1 SS = Sodium silicate SHMP = Sodiumhexametaphosphate

ส่วนผสม	SS		SHMP		STP	
	ปริมาณ %	Viscosity cp	ปริมาณ %	Viscosity cp	ปริมาณ %	Viscosity cp
ดิน KR 100%	0.00	4700	0.00	4700	0.00	4700
	0.50	3650	0.25	2550.0	0.13	3400
	1.00	81	0.50	134.0	0.25	1400
	1.50	65	0.75	94.0	0.38	640
	2.00	64	1.00	75.0	0.50	200
	2.50	68	1.25	73.0	0.63	88
	3.00	76	1.50	73.0	0.75	72
	3.50	81	1.75	75.0	0.88	63
	4.00	92	2.00	77.0	1.00	62
	4.50	99	2.25	79.0	1.13	62
			2.50	80.0	1.25	62
			2.75	81.0	1.38	64
			3.00	85.0	1.50	60



4. ขนาด รูปร่าง และลักษณะความต่อเนื่องของช่องว่างรูพรุนในเนื้อส่วนผสม ในแบบ ( porosity, pore size and distribution, pore fraction)
5. สารเติมแต่ง (additives/deflocculants) และสิ่งปลอมปน (impurities) โดยเฉพาะสารอนินทรีย์ในวัตถุดิบ

ในการศึกษาครั้งนี้จึงทำการวัดคุณสมบัติด้าน permeability ของวัตถุดิบและส่วนผสมต่างๆ เพื่อหาความสัมพันธ์ที่เป็นรูปธรรม เพื่อใช้ในการปรับและควบคุม อัตราการหล่อแบบขึ้นรูปในระบบ slip casting โดยใช้เครื่องมือ คือ Baroid Filter ซึ่งใช้กันทั่วไป

### 3.1.3.1 วิธีการทดลองเพื่อวัดค่า permeability ของวัตถุดิบและส่วนผสม

วัตถุดิบและส่วนผสมที่ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบ ได้แก่

ก. Plastic components ได้แก่ ดินชนิดต่างๆ คือ

ดินเหนียว (ball clay) จาก บริษัท Compound Clay,Co.,Ltd  
ดินต่านเกวียน จังหวัด นครราชสีมา จาก บริษัท ดินเผา  
ดินขาวระนอง

ข. Non-plastic components ได้แก่

แร่ควอตซ์บด ( quartzite)  
แร่เฟลสปาร์บด ( Feldspar )

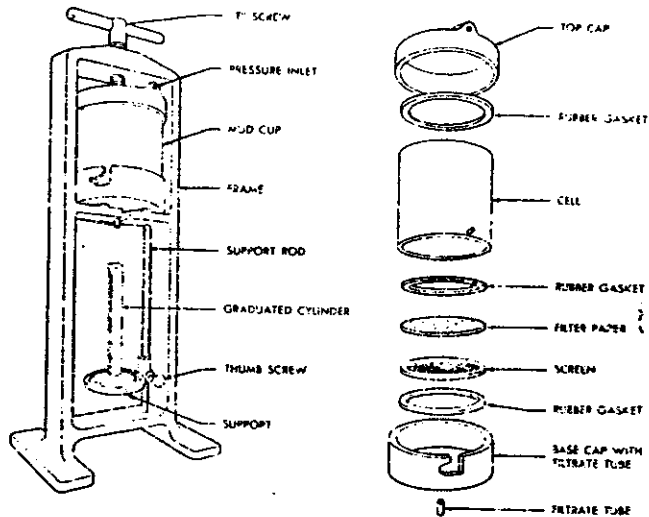
ซึ่งเป็นวัตถุดิบพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไปกับส่วนผสมในระบบ slip casting

#### การวัด Permeability โดยเครื่องมือ Baroid Filter

ขั้นตอนการวัดมีดังนี้ คือ

1. ผสมเนื้อวัตถุดิบหรือส่วนผสมแห้งกับน้ำกลั่นเป็น slip ในอัตราส่วน คือ  
Solid : water = 1 : 4 โดยน้ำหนัก กวนผสมด้วยเครื่องกวน (Stirrer) เป็น  
เวลา 15 นาที ที่ 300 rpm
2. เตรียมเครื่อง Baroid Filter โดย
  - ก. ล้างทำความสะอาด cell
  - ข. ใส่ filter paper ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบครั้งนี้จะใช้ standard  
filter paper No. 42 ชนิดเดียวตลอดทุกการทดลอง

## ค. ประกอบเครื่องดังรูป



3. วาง beaker ขนาด 25 cc. เพื่อรองรับของเหลว (filtrate) ด้านล่าง Baroid filter
4. เทน้ำ slip ลงใน filter cell ปิดฝาให้แน่น
5. ตั้ง pressure คงที่ เท่ากับ 0.5 MPa ตลอดทุกการทดลอง
6. เปิด valve ลม พร้อมจับเวลาตั้งต้น
7. วัดและบันทึกปริมาณของเหลว (filtrate) เป็น cc. ณ เวลาต่างๆ
8. จากข้อมูล ปริมาณ filtrate ( V ) ณ เวลาต่างๆ ( t ) นำค่า  $[V]^2$  vs. t ไป plot เป็นกราฟท์
9. ค่า Permeability ( $K_p$ ) จะหาได้จาก Slope ของเส้นจากกราฟท์ของ  $V^2$  vs. t

ผลการทดลองหาค่า Permeability ของวัตถุดิบ และส่วนผสม ต่างๆ ทั้งที่มี additives ( Deflocculant ) และไม่มี additives โดยวิธีของ Baroid Filter มีดังแสดงในตารางที่ 7 ถึง 16

หมายเหตุ เวลาในการ filter จะไม่เท่ากันในบางกรณี เนื่องจากบางตัวอย่างมีการแยกตัวของ filtrate เร็ว ช้า ต่างกันมาก

ตารางที่ 7 ผลการวัด Permeability ของดินขาวระนอง (KR) ด้วยเครื่อง Baroid filter  
อัตราส่วน ดิน : น้ำกลั่น = 1:4 โดยน้ำหนัก กวนผสม 15 นาที ที่ 300 rpm  
Filter Paper No. 42 Baroid pressure = 0.5 Mpa

ส่วนผสม	% น้ำ	Additive Added	Filter Time minutes	Volume of Filtrate V, cc.	V2 (cc.) <sup>2</sup>
KR 100 %	80	NONE	1	83	6889
			2	112	12544
			3	137	18769
			4	152	23104

ตารางที่ 8 ผลการวัด Permeability ของดินเหนียว (Compound Clay;CPD) ด้วยเครื่อง Baroid filter  
อัตราส่วน ดิน : น้ำกลั่น = 1:4 โดยน้ำหนัก กวนผสม 15 นาที ที่ 300 rpm  
Filter Paper No. 42 Baroid pressure = 0.5 Mpa

ส่วนผสม	% น้ำ	Additive Added	Filter Time minutes	Volume of Filtrate V, cc.	V2 (cc.) <sup>2</sup>
CPD 100 %	80	NONE	5	29	841
			10	46	2116
			20	60	3600
			30	81	6561
			40	95	9025

ตารางที่ 9 ผลการวัด Permeability ของดินด่านเกวียน (DK) ด้วยเครื่อง Baroid filter  
อัตราส่วน ดิน : น้ำกลั่น = 1:4 โดยน้ำหนัก กวนผสม 15 นาที ที่ 300 rpm  
Filter Paper No. 42 Baroid pressure = 0.5 Mpa

ส่วนผสม	% น้ำ	Additive Added	Filter Time minutes	Volume of Filtrate V, cc.	V2 (cc.) <sup>2</sup>
DK 100 %	80	NONE	5	61	3721
			10	81	6561
			20	108	11664
			30	127	16129
			40	139	19321

ตารางที่ 10 ผลการวัด Permeability ของดินขาวระนอง (KR) เมื่อเติม Deflocculant ชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter  
อัตราส่วน ดิน : น้ำกลั่น = 1:4 โดยน้ำหนัก กวนผสม 15 นาที ที่ 300 rpm  
Filter Paper No. 42 Baroid pressure = 0.5 Mpa

ส่วนผสม	% น้ำ	Additive Added	Filter Time minutes	Volume of Filtrate V, cc.	V2 (cc.) <sup>2</sup>
KR 100 %	80	NONE	1	83	6889
			2	112	12544
			3	137	18769
			4	152	23104
KR 100 %	80	Sodium Silicate (SS) 1.00%	2	82	6724
			3	99	9801
			4	117	13689
			5	128	16384
			6	139	19321
KR 100 %	80	Sodium HMP (SHMP) 0.50%	1	58	3364
			2	78	6084
			3	107	11449
			4	120	14400
			5	132	17424
KR 100 %	80	Sodium TPP (STP) 0.44%	1	60	3600
			2	81	6561
			3	103	10609
			4	118	13924
			5	134	17956

NOTE : SS = SODIUM SILICATE  
SHMP = SODIUM HEXAMETAPHOSPHATE  
STP = SODIUM TRIPOLYPHOSPHATE

ตารางที่ 11 ผลการวัด Permeability ของดินเหนียว compound clay (CPD) เมื่อเติม Deflocculant ชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter  
อัตราส่วน ดิน : น้ำกลั่น = 1:4 โดยน้ำหนัก กวนผสม 15 นาที ที่ 300 rpm  
Filter Paper No. 42 Baroid pressure = 0.5 Mpa

ส่วนผสม	% น้ำ	Additive Added	Filter Time minutes	Volume of Filtrate V, cc.	V2 (cc.) <sup>2</sup>
CPD 100 %	80	NONE	5	29	841
			10	46	2116
			20	60	3600
			30	81	6561
			40	95	9025
			50	105	11025
CPD 100 %	80	Sodium Silicate (SS) 0.38%	5	61	3721
			10	89	7921
			20	108	11664
			30	126	15876
			40	143	20449
CPD 100 %	80	Sodium HMP (SHMP) 0.23%	5	57	3249
			10	83	6889
			20	106	11236
			30	121	14641
			40	139	19321
CPD 100 %	80	Sodium TPP (STP) 0.13%	5	59	3481
			10	88	7744
			20	111	12321
			30	130	16900
			40	145	21025

NOTE : SS = SODIUM SILICATE  
SHMP = SODIUM HEXAMETAPHOSPHATE  
STP = SODIUM TRIPOLYPHOSPHATE

ตารางที่ 12 ผลการวัด Permeability ของดินด้านเหนียว (DK) เมื่อเติม Deflocculant ชนิดต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter  
อัตราส่วน ดิน : น้ำกลั่น = 1:4 โดยน้ำหนัก กวนผสม 15 นาที ที่ 300 rpm  
Filter Paper No. 42 Baroid pressure = 0.5 Mpa

ส่วนผสม	% น้ำ	Additive Added	Filter Time minutes	Volume of Filtrate V, cc.	V2 (cc.) <sup>2</sup>
DK 100 %	80	NONE	5	61	3721
			10	81	6561
			20	108	11664
			30	127	16129
			40	139	19321
DK 100 %	80	Sodium Silicate (SS) 0.30%	5	72	5184
			10	102	10404
			20	121	14641
			30	140	19600
			40	154	23716
DK 100 %	80	Sodium HMP (SHMP) 0.23%	5	76	5776
			10	99	9801
			20	122	14884
			30	134	17956
			40	148	21904
DK 100 %	80	Sodium TPP (STP) 0.38%	5	71	5041
			10	98	9604
			20	119	14161
			30	137	18769
			40	152	23104

NOTE : SS = SODIUM SILICATE  
SHMP = SODIUM HEXAMETAPHOSPHATE  
STP = SODIUM TRIPOLYPHOSPHATE



ตารางที่ 13 ผลการวัด Permeability ของดินด้านเหนียว (DK) ผสมกับ ดินขาวระนอง (KR) ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter  
อัตราส่วน ดิน : น้ำกลั่น = 1:4 โดยน้ำหนัก กวนผสม 15 นาที ที่ 300 rpm  
Filter Paper No. 42 Baroid pressure = 0.5 Mpa

ส่วนผสม		% น้ำ	Additive Added	Filter Time( t ) minutes	Volume of Filtrate V, cc.	V2 (cc.) <sup>2</sup>
%DK	%KR					
100	0	80	NONE	5	61	3721
				10	81	6561
				20	108	11664
				30	127	16129
				40	139	19321
90	10	80	NONE	5	75	5625
				10	105	11025
				20	134	17956
				30	148	21904
50	50	80	NONE	2	73	5329
				3	91	8281
				4	106	11236
				5	124	15376
				6	132	17424
10	90	80	NONE	1	83	6889
				2	119	14161
				3	137	18769
				4	148	21904
0	100	80	NONE	1	83	6889
				2	112	12544
				3	137	18769
				4	152	23104

ตารางที่ 14 ผลการวัด Permeability ของดินเหนียว (CPD) ผสมกับ ดินขาวระยอง (KR) ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter  
อัตราส่วน ดิน : น้ำกลั่น = 1:4 โดยน้ำหนัก ภาวนผสม 15 นาที ที่ 300 rpm  
Filter Paper No. 42 Baroid pressure = 0.5 Mpa

ส่วนผสม		% น้ำ	Additive Added	Filter Time( t ) minutes	Volume of Filtrate V, cc.	V2 (cc.) <sup>2</sup>
%CPD	%KR					
100	0	80	NONE	5	29	841
				10	46	2116
				20	60	3600
				30	81	6561
				40	95	9025
90	10	80	NONE	5	44	1936
				10	62	3844
				20	81	6561
				30	98	9604
				40	110	12100
50	50	80	NONE	5	98	9604
				8	130	16900
				9	137	18769
				11	144	20736
10	90	80	NONE	1	73	5329
				2	106	11236
				3	128	16384
				4	146	21316
0	100	80	NONE	1	83	6889
				2	112	12544
				3	137	18769
				4	152	23104

ตารางที่ 15 ผลการวัด Permeability ของส่วนผสมของดิน ควอทซ์ (quartz) และ เฟลสปาร์ (feldspar) ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter  
 อัตราส่วน ส่วนผสมแห้ง : น้ำกลั่น = 1:4 โดยน้ำหนัก กวนผสม 15 นาที ที่ 300 rpm  
 Filter Paper No. 42 Baroid pressure = 0.5 Mpa  
 ไม่มี deflocculant

ส่วนผสม				Filter Time( t ) minutes	Volume of Filtrate V, cc.	V2 (cc.) <sup>2</sup>
ดิน CPD	ดิน KR	quartz	feldspar			
100	0	0	0	5	29	841
				10	46	2116
				20	60	3600
				30	81	6561
				40	95	9025
50	50	0	0	5	98	9604
				8	130	16900
				9	137	18769
				11	144	20736
50	0	50	0	5	99	9801
				10	128	16384
				15	144	20736
25	25	50	0	5	70	4900
				10	78	6084
				15	95	9025
25	25	25	25	5	88	7744
				10	98	9604
				15	107	11449

ตารางที่ 16 ผลการวัด Permeability ของส่วนผสมของดิน ควอทซ์ (quartz) และ เฟลสปาร์ (feldspar) ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่อง Baroid filter  
 อัตราส่วน ส่วนผสมแห้ง : น้ำกลั่น = 1:4 โดยน้ำหนัก กวนผสม 15 นาที ที่ 300 rpm  
 Filter Paper No. 42 Baroid pressure = 0.5 Mpa  
 ไม่มี deflocculant

ส่วนผสม				Filter Time( t ) minutes	Volume of Filtrate V, cc.	V2 (cc.) <sup>2</sup>
ดิน DK	ดิน KR	quartz	feldspar			
100	0	0	0	5	61	3721
				10	81	6561
				20	108	11664
				30	127	16129
				40	139	19321
50	50	0	0	2	73	5329
				3	91	8281
				4	106	11236
				5	124	15376
				6	132	17424
50	0	50	0	2	86	7396
				5	121	14641
				10	153	23409
25	25	50	0	2	81	6561
				5	132	17424
				10	157	24649
25	25	25	25	2	99	9801
				5	137	18769
				10	160	25600

### 3.1.4 การศึกษา Casting Rate ของวัตถุดิบและส่วนผสม

อัตราการหล่อ casting rate ของการขึ้นรูปด้วยระบบ slip casting จะมีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตและคุณสมบัติของชิ้นงานหลังการหล่อ โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมเซรามิกจะต้องการให้มีอัตราการหล่อสูงสุดเพื่อให้สามารถผลิตได้รวดเร็วเหมาะสมกับกระบวนการขั้นอื่นๆ ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบและอัตราส่วนผสมจะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อ casting rate และเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องควบคุม เพื่อการออกแบบกระบวนการผลิตให้สม่ำเสมอต่อเนื่อง มีคุณสมบัติที่ต้องการของผลิตภัณฑ์คงที่

การศึกษ้อัตราการหล่อ คือการวัดอัตราการเพิ่มความหนาของเนื้อส่วนผสมเปรียบเทียบกับในสภาวะที่ควบคุมคงที่ การศึกษานี้ทำเพื่อหาความสัมพันธ์ของอัตราการหล่อ กับ ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบหรือส่วนผสม ได้แก่ permeability ขนาดอนุภาค ฯลฯ วิธีการศึกษา casting rate จะทำโดย 2 วิธีการ คือ

- ก. วัดความหนาของเนื้อส่วนผสม ณ เวลาต่างๆ ด้วย Baroid Filter
- ข. วัดความหนาของเนื้อส่วนผสม ณ เวลาต่างๆ ในแบบ plaster mold

ซึ่งวิธีการวัดเป็นดังนี้ คือ

#### 3.1.4 ก การวัด Casting Rate โดย Baroid Filter

วิธีการวัดจะคล้ายกับการวัด permeability คือ

1. ผสมเนื้อวัตถุดิบหรือส่วนผสมแห้งกับน้ำกลั่นเป็น slip ในอัตราส่วนคือ solid : water = 1 : 4 โดยน้ำหนัก กวนผสมด้วยเครื่องกวน (Stirrer) เป็นเวลา 15 นาที ที่ 300 rpm
2. เตรียมเครื่อง Baroid Filter โดย
  - ก. ล้างทำความสะอาด cell
  - ข. ใส่ filter paper ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบครั้งนี้จะใช้ standard filter paper No. 42 ชนิดเดียวตลอดทุกการทดลอง
3. เทน้ำ slip ลงใน filter cell ปิดฝาให้แน่น
4. ตั้ง pressure คงที่ เท่ากับ 0.3 MPa ตลอดทุกการทดลอง
5. เปิด valve ลม พร้อมจับเวลาดังต้น
6. ณ เวลาต่าง ๆ ปิด Valve ลม เปิดฝา cell เทน้ำดินส่วนที่เหลือออกทิ้งไว้ บนกระดาษกรองจนแห้ง วัดความหนาของชั้นดินด้วย vernier ณ จุดต่างๆหาค่าเฉลี่ยและบันทึกผลเป็นความหนา L (mm) ต่อเวลา T (minutes)
7. จากข้อมูล ความหนา (L) ณ เวลาต่างๆ (T) นำไป plot เป็นกราฟของ L vs. T และ  $L^2$  vs. T เพื่อหา casting rate

ผลการทดลองหาค่า Casting Rate ของวัตถุดิบและส่วนผสมต่างๆ โดยวิธีของ Baroid Filter มีดังแสดงในตารางที่ 17 ถึง 19

### 3.1.4ข การวัด Casting Rate โดย Plaster Mold

หลักการวัดทำโดยเทน้ำ slip ใน plaster mold ที่ควบคุม ทิ้งไว้ ณ เวลาต่างๆ และวัดความหนาของชั้นดินที่เกิดจากการดูดซึมของแบบ การทดลองวิธีนี้จะใกล้เคียงกับสภาวะผลิจจริงมากกว่า แต่จะควบคุมตัวแปรในการทดลองให้คงที่ ยากกว่า ผลจะใช้เปรียบเทียบกับวิธีการวัดแบบ Baroid Filter ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้ คือ

1. ผสมเนื้อวัตถุดิบหรือส่วนผสมแห้งกับน้ำกลั่นเป็น slip ในอัตราส่วน คือ solid : water = 1 : 1 โดยน้ำหนัก กวนผสมด้วยเครื่องกวน (Stirrer) เป็นเวลา 15 นาที ที่ 300 rpm กรณีที่เติม deflocculant จะปม (age) ไว้ 1 วัน
2. เตรียมแบบพลาสติกสำหรับการทดลองโดยใช้ Water:Plaster ratio เท่ากับ 80:100 โดยน้ำหนัก อบแบบจนแห้งสนิทก่อนใช้ในการทดลอง
3. กวนน้ำ slip 5 นาที ก่อนเทลงแบบ เทลงแบบพลาสติกอร์จนเต็ม
4. ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 5, 10, 20,30 และ 40 นาที เทน้ำ slip ส่วนที่เหลือออก ทิ้งไว้ในแบบประมาณ 10 นาที
5. วัดความหนาของเนื้อดินที่แบบทั้ง 4 ด้าน แล้วหาค่าเฉลี่ยเป็นความหนา L เป็น mm.
6. นำค่า ความหนา (L) ,mm มาplot กราฟ กับ เวลา (T), minutes

ผลการทดลองหาค่า Casting Rate ของวัตถุดิบและส่วนผสมต่างๆ โดยวิธี Plaster Mold มีดังแสดงในตารางที่ 20 และ 21

ตารางที่ 17 ผลเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate ของดินชนิดต่างๆ วัตโดย Baroid Filter

CASTING RATE : DIFFERENT CLAYS BAROID FILTER								
DK100			CPD100			KR100		
T	L	L <sup>2</sup>	T	L	L <sup>2</sup>	T	L	L <sup>2</sup>
min	mm	mm <sup>2</sup>	min	mm	mm <sup>2</sup>	min	mm	mm <sup>2</sup>
5	4.35	24	5	4.05	16	1	6.90	48
10	5.25	28	10	4.10	17	2	7.30	53
15	5.30	28	15	4.15	17	3	7.50	56
20	5.60	31	20	4.75	23	4	7.70	59
25	5.70	32	25	4.85	24	5	7.75	60
30	5.85	34	30	4.90	24	10	7.75	
35	6.40	41	35	5.00	25	15	7.75	
			40	5.00	25	20	7.75	
			45	5.30	28	25	7.75	
						30	7.85	

L = ความหนาของเนื้อส่วนผสม ณ เวลาต่างๆ , mm

T = เวลาในการแยกน้ำใน Baroid cell , minutes

DK100 = ดินค่านเกวียน 100 %

CPD100 = ดินเหนียว compound clay 100 %

KR100 = ดินขาวระนอง 100 %

Note ; ดินขาวระนองมีอัตราการเพิ่มความหนาเร็วมาก เนื้อดินแยกจากน้ำอย่างรวดเร็วภายใน 10 นาที

ตารางที่ 18 ผลเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate ของส่วนผสมของดินชนิดต่างๆ วัดโดย Baroid Filter

CASTING RATE: MIXTURE ดินเหนียว + ดินขาวระนอง							
BAROID FILTER							
M1		M2		M3		M4	
CPD50	DK50	CPD50	KR50	DK50	KR50	CPD10	KR90
T	L	T	L	T	L	T	L
min	mm	min	mm	min	mm	min	mm
5	4.05	5	4.35	5	6.78	1	6.78
10	4.10	10	4.98	8	7.10	2	7.45
15	4.15	15	5.40	9	7.16	3	7.50
20	4.75	20	5.44	10	7.20	4	7.58
25	4.85	25	5.50	11	7.23	5	7.73
30	4.90	30	6.00				
35	5.00	35	6.18				
40	5.00	40	6.28				
45	5.30	45	6.63				

L = ความหนาของเนื้อส่วนผสม ณ เวลาต่างๆ , mm  
T = เวลาในการแยกน้ำใน Baroid cell , minutes

M1 = ดิน CPD 100% + ดินขาวระนอง KR 0%  
M2 = ดิน CPD 90% + ดินขาวระนอง KR 10%  
M3 = ดิน CPD 50% + ดินขาวระนอง KR 50%  
M4 = ดิน CPD 10% + ดินขาวระนอง KR 90%

ตารางที่ 19 ผลเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate ของส่วนผสมของดินชนิดต่างๆ วัดโดย Baroid Filter

CASTING RATE: MIXTURE ดินด่านเกวียน + ดินขาวระนอง							
M1		M2		M3		M4	
DK100	KR0	DK90	KR10	DK50	KR50	DK10	KR90
T	L	T	L	T	L	T	L
min	mm	min	mm	min	mm	min	mm
5	4.85	5	6.00	2	4.35	1	5.55
10	5.25	10	6.20	3	6.03	2	7.15
15	5.30	15	6.50	4	6.20	3	7.20
20	5.60	20	6.65	5	6.95	4	7.58
25	5.70	25	6.75	6	7.10	5	7.60
30	5.85	30	6.80	10	7.28		
35	6.40						

L = ความหนาของเนื้อส่วนผสม ณ เวลาต่างๆ , mm  
T = เวลาในการแยกน้ำใน Baroid cell , minutes

M1 = ดินด่านเกวียน 100% + ดินขาวระนอง KR 0%  
M2 = ดินด่านเกวียน 90% + ดินขาวระนอง KR 10%  
M3 = ดินด่านเกวียน 50% + ดินขาวระนอง KR 50%  
M4 = ดินด่านเกวียน 10% + ดินขาวระนอง KR 90%



ตารางที่ 20 ผลเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate ของดินชนิดต่างๆ  
วัดโดยวิธีหล่อใน Plaster mold

CASTING RATE : DIFFERENT CLAYS PLASTER MOLD METHOD								
DK100			CPD100			KR100		
T	L	L <sup>2</sup>	T	L	L <sup>2</sup>	T	L	L <sup>2</sup>
min	mm	mm <sup>2</sup>	min	mm	mm <sup>2</sup>	min	mm	mm <sup>2</sup>
5	3.4	12	5	2.9	8	5	5.9	34
10	4.2	18	10	3.3	11	10	6.6	43
20	5.0	25	20	4.3	19	20	7.6	58
30	5.8	34	30	5.2	27	30	8.3	69
40	8.0	64	40	6.5	42	40	9.3	86

L = ความหนาของเนื้อส่วนผสม ณ เวลาต่างๆ , mm  
T = เวลาในการหล่อ , minutes

DK100 = ดินดานเกวียน 100 %  
CPD100 = ดินเหนียว compound clay 100 %  
KR100 = ดินขาวระนอง 100 %

Note ; ดินขาวระนองมีอัตราการเพิ่มความหนาเร็วมาก เนื้อดินแยกจากน้ำอย่างรวดเร็วภายใน 10 นาที

ตารางที่ 21 ผลเปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate ของส่วนผสมต่างๆ วัตโดยวิธีหล่อใน Plaster Mold

CASTING RATE: MIXTURE ดินเหนียว + ดินขาวระนอง PLASTER MOLD METHOD														
M1			M2			M3			M4			M5		
CPD50	DK50	KR50	CPD50	KR50	DK50	DK50	CPD25	DK25	Q25	F25	CPD25	KR25	Q25	F25
T	L	L	T	L	T	T	T	T	L	L	T	T	L	L
min	mm	mm	min	mm	min	min	min	min	mm	mm	min	min	mm	mm
5	2.44	3.33	5	6.48	5	5	5	5	2.88				4.38	
10	2.61	4.01	10	6.70	10	10	10	10	3.11				5.10	
20	4.76	5.76	20	7.74	20	20	20	20	5.41				5.63	
30	5.66	8.03	30	9.05	30	30	30	30	5.80				6.81	
40	6.88	9.30	40	9.75	40	40	40	40	6.26				8.70	

L = ความหนาของเนื้อส่วนผสมในแบบ ณ เวลาต่างๆ , mm  
T = เวลาในการหล่อ , minutes

2.44
2.61
4.76
5.66
6.88

- M1 = ดินเหนียว CPD 50% + ดินดานเกรียน 50%
- M2 = ดินเหนียว CPD 50% + ดินขาวระนอง 50%
- M3 = ดินดานเกรียน 50% + ดินขาวระนอง 50%
- M4 = ดินเหนียว CPD 25% + ดินดานเกรียน 25% + Quartz 25% + Feldspar 25%
- M5 = ดินเหนียว CPD 25% + ดินขาวระนอง 25% + Quartz 25% + Feldspar 25%

### 3.1.5 การศึกษาหาตัวแปรในการควบคุมคุณสมบัติของแบบหล่อ Plaster Mold

คุณสมบัติสำคัญของแบบหล่อผลิตจากปูนปลาสเตอร์ ซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการหล่อที่ทำการศึกษาในการทดลองครั้งนี้ คือ

1. การดูดซึมน้ำ Water Absorption ของแบบ  
Water absorption ของแบบควรมีค่าที่เหมาะสม เพื่อให้อัตราการหล่อแบบรวดเร็วสัมพันธ์กับกระบวนการผลิต
2. ความแข็งแรงของแบบ Mold Strength  
Strength ของแบบหล่อจะมีความสำคัญในด้านความคงทนของแบบเพื่อให้งานใช้งานยาวนาน
3. เวลาการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์  
เวลาการแข็งตัวทั้งขั้นต้น ( Initial setting time ) และขั้นสุดท้าย ( Final setting Time ) จะมีผลต่อเวลาในการทำงาน เทแบบ ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของแบบด้วย

ตัวแปรเกี่ยวกับการผลิตแบบที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติดังกล่าวที่ทำการศึกษา คือ

1. อัตราส่วนของน้ำกับปูนปลาสเตอร์ (water : plaster ratio) ในการหล่อเตรียมแบบ Plaster mold
2. สารเติมแต่ง (Additives ) ซึ่งมักใช้ในการปรับเวลาการทำงานในการผสมเตรียมแบบ plaster mold ทั้งชนิดตัวเร่ง (accelerator) และตัวชะลอ (retarder)

#### 3.1.5.1 การศึกษาการดูดซึมน้ำ Water Absorption ของปลาสเตอร์

ปูนปลาสเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้ มาจาก บริษัท Asia Plaster , Co.Ltd. ปลาสเตอร์ชนิด Beta-plaster ซึ่งใช้งานเป็นแบบหล่อทั่วไป

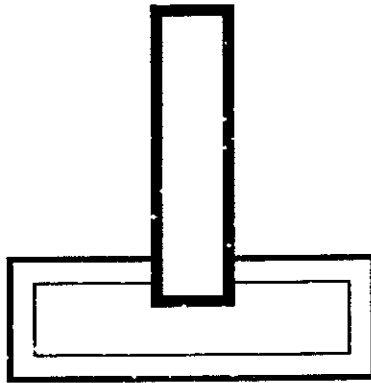
#### 3.5.1ก การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง Water : Plaster Ratio กับ Water Absorption ของแบบ Plaster Mold

หลักการวัด water absorption ของตัวอย่าง ทำโดยวัดอัตราความเร็วในการดูดซึมน้ำสีในระยะเวลาที่เท่ากันเป็นตัวเปรียบเทียบ ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้ คือ

- ก. เตรียมแท่งตัวอย่างขนาด 15 mm x 15 mm x 100 mm โดยการหล่อด้วยอัตราส่วนของน้ำต่อปูนปลาสเตอร์ (water : plaster ratio) เท่ากับ 60:100, 70:100, 80:100 และ 90:100 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยน้ำที่ใช้เป็นน้ำกลั่น

- ข. ถอดแบบหลังทิ้งไว้ 30 นาที ทิ้งให้แห้งในอากาศ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- ค. ชัดตัวอย่างด้วยกระดาษทรายละเอียดจนได้ขนาด ล้างน้ำให้สะอาด
- ง. อบแห้งตัวอย่างที่ 45 °C จนน้ำหนักคงที่ เก็บใน dissiccator จนถึงเวลาทดลอง
- จ. ทาไขมันตามความยาวทั้ง 4 ด้าน ยกเว้นผิวด้านบนและล่างของแห้งตัวอย่างที่ต้องการให้เกิดการดูดซึม
- ฉ. นำแห้งตัวอย่างที่ต้องการวัด water absorption ไปจุ่มในอ่างน้ำสี ดังแสดงในภาพ หลังจาก 1 นาที นำแห้งตัวอย่างออกจากอ่างน้ำสีและวัดระยะการดูดซึมน้ำจากสีของน้ำสีที่ซึมเข้าตัวอย่างเป็น cm.

แห้งตัวอย่าง



อ่างน้ำสี

- ซ. รายงานผลที่ได้เป็นอัตราการซึมซับ (Absorption Rate) หน่วยเป็น cm /minute

การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของ water : plaster ratio กับ water absorption ของแบบPlaster mold ให้ผลดังแสดงใน ตารางที่ 22

### 3.5.1ข การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของสารเติมแต่ง (Additives) กับ Water Absorption ของแบบ plaster mold

สารเติมแต่งที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นสารที่ใช้กันทั่วไปในการปรับเวลาการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์ในการเตรียมแบบหล่อ คือ

#### 1. Potassium Sulfate

Potassium sulfate ( $K_2SO_4$ ) เป็นสารเติมแต่งที่ใช้กันทั่วไปในลักษณะตัวเร่ง (accelerator) เพื่อปรับเวลาการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์ให้เร็วขึ้น

## 2. Boric Acid

Boric acid ( $H_3BO_3$ ) เป็นสารเติมแต่งที่ใช้กันทั่วไปในลักษณะตัวชะลอหรือหน่วง (retarder) เพื่อปรับเวลาการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์ให้ช้าลง

การทดลองเพื่อหาผลของ Potassium Sulfate และ Boric Acid ต่อ Water Absorption

ขั้นตอนการทดลองทำดังนี้ คือ

1. เตรียมแท่งตัวอย่างโดยการหล่อ และใช้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนปลาสเตอร์ (water:plaster ratio) คงที่ เท่ากับ 80:100 โดยน้ำหนัก
2. เติมน้ำ potassium sulfate และ boric acid เป็นปริมาณ 0.125, 0.250 และ 0.500 % โดยน้ำหนัก ในส่วนผสมของปลาสเตอร์และน้ำ การผสมสารเติมแต่ง จะเตรียมเป็นลักษณะสารละลายกับน้ำกลั่นก่อนแล้วจึงเติมพร้อมกับน้ำระหว่างผสม
3. ถอดแบบหลังทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ทิ้งให้แห้งในอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. ชัดตัวอย่างด้วยกระดาษทรายละเอียดจนได้ขนาด 15mm x 15mmX100 mm ล้างน้ำให้สะอาด
5. อบแท่งตัวอย่างที่ 45 °C จนน้ำหนักคงที่ เก็บใน dessiccator จนถึงเวลาทดลอง
6. วัด absorption rate โดยจุ่มในอ่างน้ำสี่และวัดระยะ ณ เวลา 1 นาที ดังกล่าวแล้วข้างต้น

การทดลองเพื่อหาผลของ Additives กับ water absorption ของแบบ Plaster mold ให้ผลดังแสดงใน ตารางที่ 23 และ 24

### 3.1.5.2 การศึกษาความแข็งแรง (Strength) ของแบบปลาสเตอร์

การหา strength ของตัวอย่างปูนปลาสเตอร์ ทำโดยการวัดค่า Modulus of Rupture (MOR) โดยวิธี 3-point bending test โดยใช้เครื่อง Bending Strength Tester รุ่น 401 ของ บริษัท Netzsch เยอรมันนี ( ดู Appendix I เกี่ยวกับรายละเอียดของเครื่องทดสอบ ) การวัดค่า MOR จะให้ผลที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานมากกว่าการวัด compressive strength เพราะจะเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของพันธะในเนื้อแบบและการสึกหรอของแบบระหว่างใช้งาน

ตารางที่ 22 ผลของ Water/Plaster Ratio ต่อ Water Absorption ของ Plaster Mold

water:plaster ratio	Absorption Rate , cm/min				
	sample1	sample2	sample3	average	std.dev.
60:100	2.2	2.2	2.3	2.2	0.05
70:100	2.8	2.7	2.5	2.7	0.15
80:100	3.0	2.9	3.2	3.0	0.15
90:100	4.1	3.6	3.9	3.9	0.25

Note : Absorption Rate คือ ระยะทางที่น้ำซึมผ่านตัวอย่างในเวลา 1 นาที  
ตัวอย่างขนาด 15mmX15mmX100mm

ตารางที่ 23 ผลของปริมาณตัวเร่ง (accelerator), Potassium Sulfate,  
ต่อ Water Absorption ของ Plaster Mold  
water:plaster ratio = 80:100 คงที่

%Potassium sulfate	Absorption Rate , cm/min				
	sample1	sample2	sample3	average	std.dev.
Added					
0.125	3.3	3.5	3.4	3.4	0.10
0.250	3.6	3.7	3.6	3.6	0.06
0.500	4.0	3.8	4.0	3.9	0.12

Note : Absorption Rate คือ ระยะทางที่น้ำซึมผ่านตัวอย่างในเวลา 1 นาที  
ตัวอย่างขนาด 15mmX15mmX100mm

ตารางที่ 24 ผลของปริมาณตัวชะลอ (retarder), Boric Acid ,  
ต่อ Water Absorption ของ Plaster Mold  
water:plaster ratio = 80:100 คงที่

% Boric Acid	Absorption Rate , cm/min				
	sample1	sample2	sample3	average	std.dev.
Added					
0.125	3.0	2.8	2.8	2.9	0.12
0.250	2.7	2.6	2.5	2.5	0.06
0.500	2.4	2.4	2.3	2.4	0.06

Note : Absorption Rate คือ ระยะทางที่น้ำซึมผ่านตัวอย่างในเวลา 1 นาที  
ตัวอย่างขนาด 15mmX15mmX100mm

### 3.1.5.2ก การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง Water : Plaster Ratio กับ Strength

ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้ คือ

- ก. เตรียมแท่งตัวอย่างขนาด 120 mm x 11.3 mm x 3 mm โดยการหล่อด้วยอัตราส่วนของน้ำตอปูนปลาสเตอร์ (water : plaster ratio) เท่ากับ 60:100, 70:100, 80:100 และ 90:100 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยน้ำที่ใช้เป็นน้ำกลั่น
  - ข. ถอดแบบหลังทิ้งไว้ 30 นาที ทิ้งให้แห้งในอากาศ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
  - ค. ชัดตัวอย่างด้วยกระดาษทรายละเอียดจนได้ขนาด ล้างน้ำให้สะอาด
  - ง. อบแท่งตัวอย่างที่ 45 °C จนน้ำหนักคงที่ เก็บใน dissiccator จนถึงเวลาทดลอง
  - จ. นำแท่งตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบในลักษณะ 3 –point bending test โดยใช้สภาวะในการทดสอบคงที่ คือ ระยะ Span = 105 mm ตั้ง scale การวัดเท่ากับ 75 N และ loading speed = 1
- หลังจากใช้แรงกดตัวอย่างจนหัก แล้วจะอ่านค่า load จาก scale เป็นหน่วย N ( Newton ) แล้วนำมาคำนวณค่า Modulus of Rupture (MOR) จากสูตร คือ

$$\text{MOR} = [3 \times F \times L] / [2 \times b \times h^2] \dots\dots\dots \text{หน่วยเป็น N / cm}^2$$

เมื่อ F = Load เมื่อตัวอย่างหัก เป็น Newton

L = ระยะ span ของจุดหนุนระหว่างทดสอบ = 105 mm

b = ความกว้างของตัวอย่าง = 11.3 mm

h = ความหนาของตัวอย่าง = 3 mm

การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของ water : plaster ratio กับ Strength ของแบบ Plaster mold ให้ผลดังแสดงใน ตารางที่ 25

### 3.1.5,2ข การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสารเติมแต่ง (Additives) กับ Strength

ขั้นตอนการทดลองเป็นดังนี้ คือ

1. สาร additives ที่ศึกษา คือ Potassium sulfate และ Boric acid
2. เตรียมแท่งตัวอย่างโดยการหล่อ และใช้อัตราส่วนของน้ำตอปูนปลาสเตอร์ (water:plaster ratio) คงที่ เท่ากับ 80:100 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 25 ผลของ Water/Plaster ratio ต่อ Strength ของ Plaster Mold

Water : plaster ratio	Load (N)					MOR
	Sample1	Sample2	Sample3	average	Std.dev.	(N/cm <sup>2</sup> )
60 : 100	5.0	5.0	5.0	5.0	0.00	774.3
70 : 100	4.5	3.7	3.5	3.9	0.53	603.9
80 : 100	3.0	3.5	3.0	3.2	0.29	495.6
90 : 100	2.7	2.6	2.5	2.6	0.10	402.7

NOTE : ขนาดตัวอย่าง 120 mm x 11.3 mm x 3 mm

Span = 105 mm Scale = 75 N Speed = 1

Modulus of Rupture (MOR) =  $(3 \times \text{Load} \times \text{Span}) / (2 \times b \times h^2)$

ตารางที่ 26 ผลของปริมาณ ตัวเร่ง (accelerator), Potassium Sulfate, ต่อ Strength ของ Plaster Mold ณ water : plaster ratio = 80 : 100 คงที่

% Potassium sulfate Added	Load (N)					MOR
	Sample1	Sample2	Sample3	average	Std.dev.	(N/cm <sup>2</sup> )
0.000	3.0	3.5	3.0	3.2	0.29	495.6
0.125	3.0	3.1	3.3	3.1	0.15	480.1
0.250	3.1	3.0	2.7	2.9	0.21	449.1
0.500	2.0	2.3	2.4	2.2	0.21	340.7

ตารางที่ 27 ผลของปริมาณ ตัวชะลอ (retarder), Boric acid, ต่อ Strength ของ Plaster Mold ณ Water : plaster ratio = 80 : 100 คงที่

% Boric Acid Added	Load (N)					MOR
	Sample1	Sample2	Sample3	average	Std.dev.	(N/cm <sup>2</sup> )
0.000	3.0	3.5	3.0	3.2	0.29	495.6
0.125	3.1	2.8	2.8	2.9	0.17	449.1
0.250	2.8	2.5	2.9	2.7	0.21	418.1
0.500	2.5	2.5	2.5	2.5	0.00	387.2



3. เติม potassium sulfate และ boric acid เป็นปริมาณ 0.125, 0.250 และ 0.500 % โดยน้ำหนัก ในส่วนผสมของปลาสเตอร์และน้ำ การผสมสารเติมแต่งจะเตรียมเป็นลักษณะสารละลายกับน้ำกลั่นก่อนแล้วจึงเติมพร้อมกับน้ำระหว่างผสม
4. ถอดแบบหลังทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ทิ้งให้แห้งในอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. ชัดตัวอย่างด้วยกระดาษทรายละเอียดจนได้ขนาด 120mm x 11.3mm x 3 mm ล้างน้ำให้สะอาด
6. อบแห้งตัวอย่างที่ 45 °C จนน้ำหนักคงที่ เก็บใน dessicator จนถึงเวลาทดลอง
7. ทดสอบหาค่า Modulus of Rupture โดยเครื่องทดสอบ ตามวิธีที่กล่าวแล้วข้างต้น

การทดลองเพื่อหาผลของ Additives กับ Strength ของแบบ Plaster mold ให้ผลดังแสดงใน ตารางที่ 26 และ 27

### 3.1.5.3 การศึกษาเวลาการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์

การทดลองหาเวลาการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์หลังผสมน้ำ จะทำโดยการสังเกตการไหลตัวของปูนปลาสเตอร์โดยการกรีดด้วยใบมีด ซึ่งวิธีทดสอบแบบนี้จะเรียกว่า Knife Set ซึ่งใช้ทดสอบเพื่อควบคุมคุณภาพตามโรงงานผลิตปลาสเตอร์ทั่วไป

เวลาการแข็งตัวโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ระยะ คือ

1. เวลาการแข็งตัวขั้นต้น ( Initial Setting Time )  
คือ เวลาที่ปลาสเตอร์เริ่มแข็งอยู่ตัว ไม่ไหล แต่ความแข็งแรงยังไม่ถึงค่าสูงสุด เกิดเมื่อผลึกเข็มของ gypsum เริ่มต้นสานตัวกัน ซึ่งมีความสำคัญมากต่อเวลาในการผสม กล่าวคือหลัง initial setting แล้วปูนปลาสเตอร์จะไม่สามารถเทแบบได้แต่ความแข็งแรงยังต่ำสามารถขีดตบแต่งแบบได้
2. เวลาการแข็งตัวขั้นสุดท้าย ( Final Setting Time )  
เกิดหลัง initial setting ผลึกเข็มของ gypsum สานตัวกันแน่น ให้ความแข็งแรงเกือบถึงจุดสูงสุด

### 3.1.5.3ก การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง Water : Plaster Ratio กับ Setting Time

ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้ คือ

1. นำปลาสเตอร์มาผสมกับน้ำกลั่น ในอัตราส่วน water : plaster ratio เท่ากับ

60:100, 70:100, 80:100 และ 90:100 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

2. กวนผสม 2 นาที แล้วเทลงในกระบอกกลาง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.93 cm สูง 3.81 cm ซึ่งวางอยู่บนแผ่นกระจกเรียบ จนเต็ม
3. ยกกระบอกขึ้นตรงๆ วัสดุจะไหลแผ่ตัวออกเป็นรูปค่อนข้างกลม ซึ่งถ้าวัด เส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุจะเปรียบเทียบการไหลตัว (Flowability) ได้
3. ใช้ใบมีดวางลากผ่านกองวัสดุเป็นระยะเวลาต่างๆ ณ เวลาซึ่งเมื่อลากใบมีดผ่านเนื้อวัสดุแล้ว เนื้อจะขาดจากกันเห็นชัดเจนไม่ไหลกลับมา รวมตัวกันอีก จะแสดงว่าวัสดุเริ่มแตกผลึกเกาะตัวกัน ณ เวลานั้นนับจากเวลาเริ่มต้นผสมน้ำจะเป็นเวลาแข็งตัวเริ่มต้น ( initial setting time )
4. หลังจาก initial setting ถ้าลากใบมีด ณ ระยะเวลาต่างๆนานขึ้น จะถึงจุดที่เนื้อแข็งตัวเต็มที่จนใบมีดกดเข้าเนื้อวัสดุไม่ได้ ณ เวลานั้น จะเป็นเวลาแข็งตัวสุดท้าย ( Final setting time )

การทดลองเพื่อหาผลของ Water : Plaster Ratio กับ Setting Time ของแบบ Plaster ให้ผลดังแสดงใน ตารางที่ 28

### 3.1.5.3ข การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสารเติมแต่ง (Additives) กับ Setting Time

ขั้นตอนการทดลองเป็นดังนี้ คือ

1. Additives ที่ ศึกษา คือ accelerator (potassium sulfate,  $K_2SO_4$ ) และ retarder ( boric acid,  $H_3BO_3$ )
2. ผสมปูนปลาสเตอร์กับน้ำในอัตราส่วน water : plaster = 60:100 คงที่ โดยเติม additives เป็นปริมาณ 0.125, 0.250 และ 0.500 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
3. หาเวลา initial และ final setting time โดยวิธี Knife set ดังกล่าวแล้วข้างต้น

การทดลองเพื่อหาผลของ Additives กับ Setting Time ของแบบ Plaster ให้ผลดังแสดงใน ตารางที่ 29 และ 30

ตารางที่ 28 ผลของ Water/Plaster ratio ต่อ Setting Time ของ Plaster

Water : plastic ratio	Initial Setting Time (Knife) minutes	Final Setting Time (Knife) minutes
60 : 100	4	9
70 : 100	5	12
80 : 100	7	19
90 : 100	8	23

ตารางที่ 29 ผลของปริมาณ ตัวเร่ง (accelerator), Potassium Sulfate ต่อ Setting Time ของ Plaster Mold ณ water : plaster ratio = 80 : 100 คงที่

% Potassium sulfate Added	Initial Setting Time (Knife) minutes	Final Setting Time (Knife) minutes
0.000	7	19
0.125	4	15
0.250	3	10
0.500	3	6

ตารางที่ 30 ผลของปริมาณ ตัวชะลอ (retarder), Boric acid, ต่อ Setting Time ของ Plaster Mold ณ Water : plaster ratio = 80 : 100 คงที่

% Boric Acid Added	Initial Setting Time (Knife) minutes	Final Setting Time (Knife) minutes
0.000	7	19
0.125	7	23
0.250	8	24
0.500	9	26

### 3.1.5.4 การศึกษา Microstructure ของ plaster ด้วย Scanning Electron Microscope

คุณสมบัติของ plaster หลังหล่อจะเกี่ยวข้องกับ microstructure เป็นอย่างมาก เพราะ การดูดซึมน้ำหรือความแข็งแรง จะขึ้นกับขนาดของผลึกรูปเข็มของ gypsum และความแน่นหนาของการสานตัวกันของผลึกเป็นหลัก ในการทดลองครั้งนี้จึงนำตัวอย่าง plaster จากการทดลองไปวิเคราะห์ จุลโครงสร้างด้วย scanning electron microscope (SEM) เพื่อพยายามหาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาคกับ โครงสร้างของผลึกต่างๆ

ขั้นตอนการทดลองเป็นดังนี้ คือ

1. นำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มาหักเป็นชิ้นเล็กๆ โดยจะขยายดู fracture surface เป็นหลัก
2. ติดชิ้นงานบน stub ด้วย silver paste และเคลือบผิวด้วยทอง
3. นำเข้าวิเคราะห์ด้วย SEM ใช้กำลังขยายโดยทั่วไปเท่ากับ 2,000 เท่า ที่ 15 kV

## บทที่ 4 ข้อวิจารณ์

ข้อวิจารณ์จากการวิเคราะห์ผลการทดลองในบทที่ 3 อาจสรุปเรียงตามลำดับได้ดังนี้ คือ

### 4.1 Characterization ของวัตถุติดและส่วนผสม

จากการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัตถุติดในการทดลอง ซึ่งเน้นที่ดินชนิดต่างๆ มีข้อวิจารณ์ดังนี้ คือ

#### 4.1.1 Particle Size and Distribution

จากผลวิเคราะห์ โดย laser diffraction ในรูปที่ 2 ถึง 10 อาจสรุปเปรียบเทียบได้ดังแสดงในตารางที่ 31

เมื่อพิจารณา particle size และ distribution ของดินเหนียว compound clay ดินด่านเกวียน และ ดินขาวระนอง ถ้าเปรียบเทียบขนาดอนุภาคเฉลี่ย (mean size,  $d_{4,3}$ ) อาจเรียงลำดับได้ดังนี้

ดินขาวระนอง ( $14.04 \mu\text{m}$ ) > ดินเหนียว CPD ( $12.34 \mu\text{m}$ ) > ดินด่านเกวียน ( $10.82 \mu\text{m}$ )

ดินทั้ง 3 ชนิดมี cumulative % finer than ของขนาดที่  $9.80 \mu\text{m}$  อยู่ในช่วง 52.80 – 65.92 % wt ซึ่งถือว่าค่อนข้างละเอียด

ผลจากการวิเคราะห์ดินทั้ง 3 ชนิด ไม่แสดงความแตกต่างที่ชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องจากข้อจำกัดของระบบการวัดโดย laser diffraction ซึ่งความถูกต้องในการแยกแยะขนาดในระดับ colloidal size ค่อนข้างจำกัด

#### 4.1.2 Phase Analysis ของดิน

จากผลวิเคราะห์แบบ qualitative analysis โดย x-ray diffraction ในรูปที่ 11 ถึง 13 อาจสรุปถึงส่วนประกอบ (mineral composition) ได้ คือ

ดินขาวระนอง ส่วนประกอบหลัก คือ แร่ kaolinite และ quartz

ดินเหนียว compound clay มีส่วนประกอบหลัก เป็น quartz และมี kaolinite น้อยกว่าดินขาวระนอง

ดินด่านเกวียน มีส่วนประกอบหลักเป็นแร่ quartz มีปริมาณ kaolinite น้อยมาก

#### 4.1.3 Thermal Analysis ของดิน

จากผลวิเคราะห์ด้านความร้อนของดินต่างๆ โดย DTA และ TGA ดังแสดงในรูปที่ 14 ถึง 19 อาจวิจารณ์ได้ดังนี้

ดินขาวระนอง

DTA thermograph แสดง endothermic peak ในช่วง 500-600 C ซึ่งเกิดจากการระเหยแตกตัวของ chemical water ในโครงสร้างของ kaolinite และ exothermic peak ประมาณ 1000 C เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิด metakaolinite

ตารางที่ 31 ขนาดอนุภาค Particle Size and Distribution ของดินและส่วนผสมต่างๆ  
วัดโดย Laser Diffraction Method

MIX No.	ส่วนผสม						% For Each Size					Mean Size d (4.3)
	ดิน CPD	ดิน KR	ดิน DK	Quartz	Feldspar		0.473	1.03	9.80	19.42		
1	100	0	0	0	0		4.51	9.34	60.95	80.26	12.34	
2	0	100	0	0	0		7.95	14.24	52.80	73.83	14.04	
3	0	0	100	0	0		4.25	8.53	65.92	87.80	10.82	
4	50	50	0	0	0		6.49	12.26	56.87	77.36	12.83	
5	50	0	50	0	0		4.36	8.79	61.09	82.87	12.17	
6	0	50	50	0	0		5.52	10.83	57.43	79.99	12.38	
7	25	25	0	25	25		5.44	10.63	51.30	71.16	15.63	
8	25	0	25	25	25		4.22	8.66	54.21	74.58	14.81	
9	0	25	25	25	25		5.11	10.10	52.14	73.10	14.93	

จากแร่ kaolinite peak ทั้งสองเป็นลักษณะเฉพาะของแร่ kaolinite ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก x-ray diffraction ซึ่งแสดงว่าส่วนประกอบหลักของดินขาวระนอง คือ kaolinite

TGA thermograph แสดง weight loss ที่ประมาณ 400 C เนื่องจาก chemical Water จาก kaolinite เช่นกัน

ดินเหนียว compound clay และดินดานเกวียน

DTA และ TGA thermograph ของดินทั้งสองมี peak และ weight loss คล้ายดินขาวระนอง แต่มี peak area ต่ำกว่ามาก แสดงว่ามีแร่ kaolinite ค่อนข้างน้อย ดินทั้งสองอาจประกอบด้วยแร่อื่นๆ แต่ไม่สามารถ identify ได้อย่างชัดเจน โดยเทคนิคที่ใช้

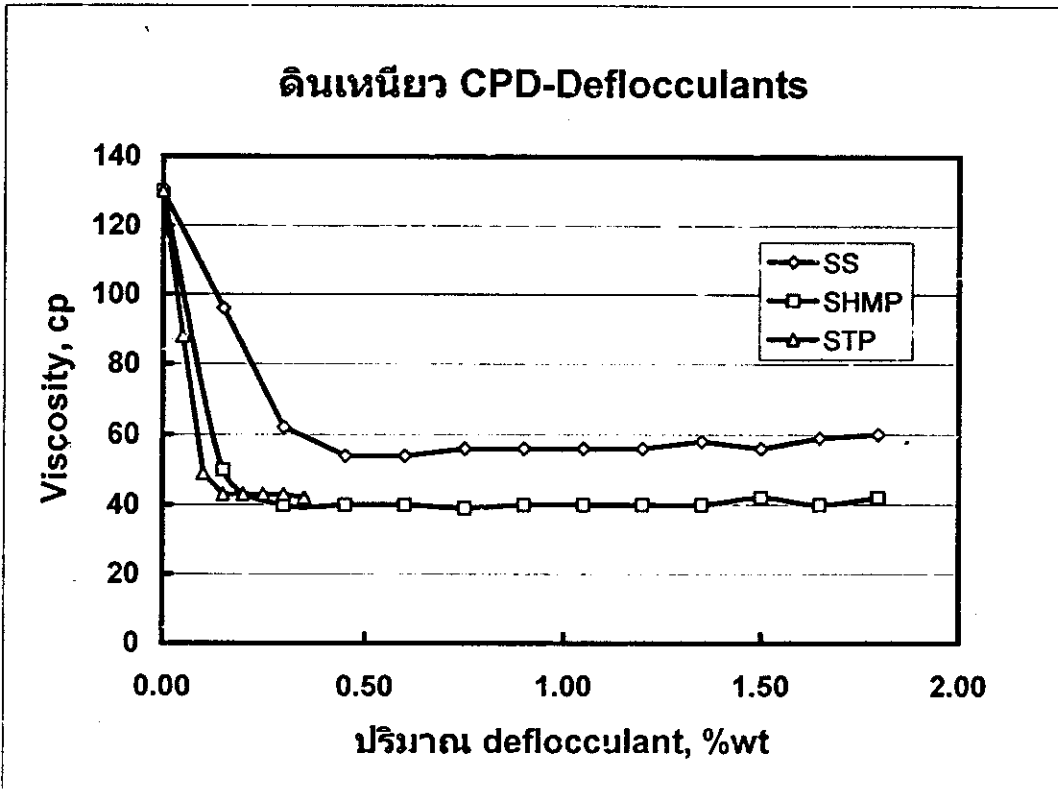
#### 4.2 Rheological Behaviour ของวัตถุติบและส่วนผสม

ผลการศึกษาสมบัติทางด้าน rheological behaviour ของวัตถุติบ โดยเฉพาะดินต่างๆ เช่น ความหนืด (viscosity) และ thixotropy ดังแสดงในตารางที่ 3 ถึง 6 ทั้งเมื่อใช้และไม่ใช้ สารกระจายอนุภาค (deflocculants) อาจวิจารณ์สรุปโดยอ้างอิงจากรูปที่ 20 ถึง 22 ได้ดังนี้ คือ

ดินดานเกวียน จะมี viscosity สูงสุด เมื่อเทียบกับดินอื่นๆ ดินเหนียว compound clay จะมีค่า viscosity ต่ำสุด อาจเนื่องจากเป็นดินผสม เปรียบเทียบในอัตราส่วน ดินแห้ง ต่อ น้ำ ที่เท่ากัน

ในแง่การกระจายตัวเมื่อเติม สาร deflocculant ชนิดต่างๆ เป็นปริมาณต่างๆกัน โดยใช้สารที่ใช้กันอยู่แพร่หลายในระบบอุตสาหกรรม คือ sodium silicate (SS), sodium hexametaphosphate (SHMP) และ sodium tripolyphosphate (STP) ดินทั้ง 3 ชนิด จะสามารถปรับให้มี viscosity ลดลงได้อย่างมากโดย deflocculant ปริมาณสาร deflocculant ชนิดต่างๆ ในการปรับ viscosity ของน้ำดิน ณ จุดที่มี Viscosity ต่ำสุด จะมีดังแสดงสรุปในตารางที่ 31 ค่าปริมาณ deflocculant ต่างๆ ที่แสดงในตาราง จะได้จากการหาจุดเปลี่ยนของ slope ของ กราฟท์ ในรูปที่ 20 ถึง 22 จากตารางที่ 31 สำหรับดินดานเกวียน สาร deflocculant ที่มีประสิทธิผลมากที่สุด คือ SHMP ในขณะที่ ดินขาวระนองและดินเหนียว compound clay สาร STP จะเกิดประสิทธิผลในการกระจายตัวมากที่สุด ค่าปริมาณ deflocculant ต่างๆนี้ จะนำไปใช้ในการศึกษาคุณสมบัติด้านอื่นๆ เมื่อต้องการเติมสาร deflocculant ด้วย

ส่วนผสม	SS		SHMP		STP	
	ปริมาณ %	Viscosity cp	ปริมาณ %	Viscosity cp	ปริมาณ %	Viscosity cp
ดิน CPD 100%	0.00	130	0.00	130	0.00	130
	0.15	96	0.15	50	0.05	88
	0.30	62	0.30	40	0.10	49
	0.45	54	0.45	40	0.15	43
	0.60	54	0.60	40	0.20	43
	0.75	56	0.75	39	0.25	43
	0.90	56	0.90	40	0.30	43
	1.05	56	1.05	40	0.35	42
	1.20	56	1.20	40		
	1.35	58	1.35	40		
	1.50	56	1.50	42		
	1.55	59	1.65	40		
	1.80	60	1.80	42		

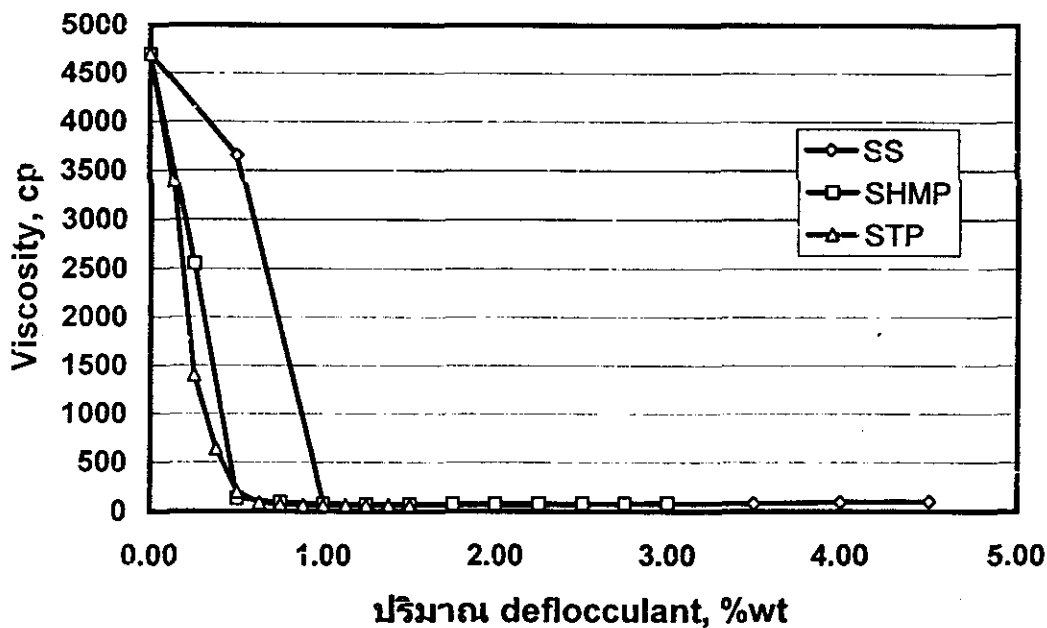


รูปที่ 20 ค่า Viscosity ของ Slip ดินเหนียว CPD เมื่อมี Deflocculants ชนิดต่างๆ ดิน : น้ำ = 1:1  
 SS = Sodium silicate SHMP = Sodiumhexametaphosphate  
 STP = Sodium tripolyphosphate



ส่วนผสม	SS		SHMP		STP	
	ปริมาณ	Viscosity	ปริมาณ	Viscosity	ปริมาณ	Viscosity
	%	cp	%	cp	%	cp
ดิน KR 100%	0.00	4700	0.00	4700	0.00	4700
	0.50	3650	0.25	2550.0	0.13	3400
	1.00	81	0.50	134.0	0.25	1400
	1.50	66	0.75	94.0	0.38	640
	2.00	64	1.00	75.0	0.50	200
	2.50	68	1.25	73.0	0.63	88
	3.00	76	1.50	73.0	0.75	72
	3.50	81	1.75	75.0	0.88	63
	4.00	92	2.00	77.0	1.00	62
	4.50	99	2.25	79.0	1.13	62
			2.50	80.0	1.25	62
			2.75	81.0	1.38	64
			3.00	85.0	1.50	60

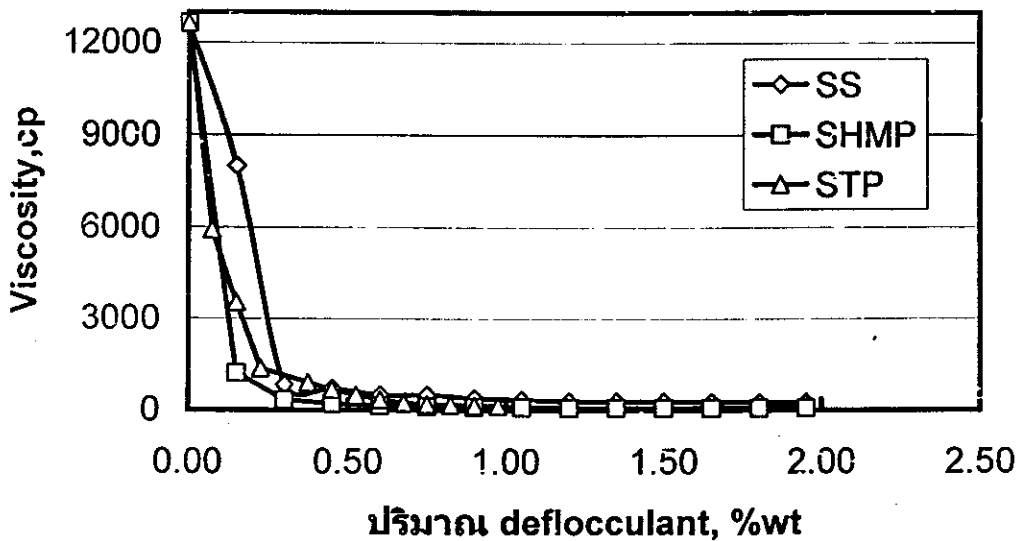
### ดินขาวระนอง - Deflocculants



รูปที่ 21 ค่า Viscosity ของ Slip ดินขาวระนอง เมื่อมี Deflocculants ชนิดต่างๆ  
ดิน : น้ำ = 1:1  
SS = Sodium silicate SHMP = Sodiumhexametaphosphate  
STP = Sodium tripolyphosphate

ส่วนผสม	SS		SHMP		STP	
	ปริมาณ	Viscosity	ปริมาณ	Viscosity	ปริมาณ	Viscosity
	%	cp	%	cp	%	cp
ดิน DK 100%	0.00	12640	0.00	12640	0.00	12640
	0.15	8000	0.15	1200	0.08	5920
	0.30	820	0.30	324	0.15	3540
	0.45	710	0.45	210	0.23	1360
	0.60	500	0.60	144	0.38	900
	0.75	500	0.75	122	0.45	660
	0.90	390	0.90	106	0.53	480
	1.05	334	1.05	94	0.60	340
	1.20	300	1.20	83	0.68	240
	1.35	290	1.35	84	0.75	190
	1.50	280	1.50	78	0.83	166
	1.65	260	1.65	78	0.90	150
	1.80	254	1.80	78	0.98	139
	1.95	250	1.95	78		

### ดินด้านเกวียน-Deflocculants



รูปที่ 22 ค่า Viscosity ของ Slip ดินด้านเกวียน เมื่อมี Deflocculants ชนิดต่างๆ  
ดิน : น้ำ = 1:1

SS = Sodium silicate SHMP = Sodium hexametaphosphate

STP = Sodium tripolyphosphate

ตารางที่ 32 ปริมาณ Deflocculants ชนิดต่างๆ ที่เกิด Optimum Deflocculating ของดินประเภทต่างๆ ( วัดจากรูปที่ 20 ถึง 22 )

Deflocculant	ประเภทของดิน		
	ดินค้ำแควียน (DK)	ดินขาวระนอง (KR)	ดินเหนียว (CPD)
Sodium Silicate (SS)	0.300	1.000	0.375
Sodium Hexameta- phosphate (SHMP)	0.225	0.500	0.225
Sodium Tripoly- phosphate (STP)	0.375	0.440	0.125

#### 4.3 Permeability ของวัตถุติดและส่วนผสม

ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่า Permeability ของวัตถุติดและส่วนผสมอาจสรุปได้ ดังนี้ คือ

##### 4.3.1 Permeability ของดินชนิดต่างๆ กรณีไม่มี Deflocculant

จากการหา permeability จาก filtration rate ของดินชนิดต่างๆ คือ ดินดาน เกรียน ดินเหนียว compound clay และ ดินขาวระนอง โดยไม่ได้เติมสารกระจายอนุภาค (deflocculant) จากตารางที่ 7 8 และ 9 เมื่อนำมา plot กราฟ ให้ผลดังแสดงในรูปที่ 23 ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้ คือ

ก. ดินขาวระนองมีค่า permeability ( $K_p$ ) สูงกว่าดินเหนียวและดินดานเกรียนมาก เมื่อเรียงลำดับค่า  $K_p$  จากสูงไปหาลด โดยเปรียบเทียบค่า slope ของเส้นกราฟที่ให้ผล คือ

ดินขาว ( $K_p = 5487$ ) >> ดินดานเกรียน ( $K_p = 450$ ) > ดินเหนียว ( $K_p = 232$ )

ขณะทดลองดินขาวระนองจะมี filtration rate เร็วมากในช่วง 5 นาทีแรก ในขณะที่ดินเหนียว compound clay (CPD) มีการไหลของ filtrate ช้ามาก ทั้งนี้อาจเนื่องจากดินขาวระนอง (KR) มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่ทำให้โครงสร้างการเรียงตัวของอนุภาคหลวมกว่าดินอื่น ในขณะที่ดินดานเกรียนและดินเหนียว CPD ซึ่งมีความเหนียวสูง โดยเฉพาะดินเหนียว CPD ซึ่งมี plasticity สูงมากแสดงถึงขนาดอนุภาคที่เล็กเกาะตัวกันแน่นและมีปริมาณสาร carbonaceous สูง จะเรียงตัวกันแน่นกว่ามากทำให้น้ำแยกตัวออกยาก

ข. จากค่า  $K_p$  อาจทำนายได้ว่า ดินขาว KR จะมีอัตราการแยกน้ำหรืออัตราการหล่อแบบสูงกว่าดินดานเกรียน(DK) หรือดินเหนียว (CPD) มาก

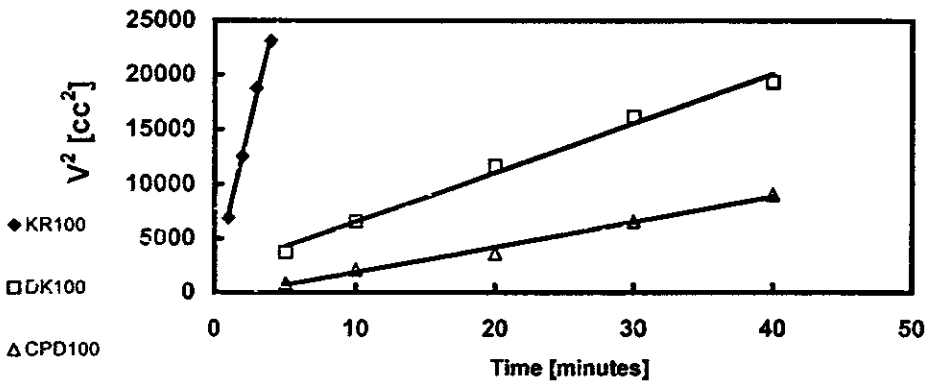
##### 4.3.2 Permeability ของดินชนิดต่างๆ กรณีที่มี Deflocculant

สารกระจายอนุภาค (deflocculants) ชนิดต่างๆ คือ Sodium silicate (SS) Sodium Hexametaphosphate ( SHMP, Calgon) และ Sodium Tripolyphosphate (STP) ซึ่งมักใช้กันทั่วไปในระบบ slip casting แสดงผลต่อ permeability ของดินชนิดต่างๆ ที่ศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 10 11 และ 12 และกราฟ ในรูปที่ 24 25 และ 26 ตามลำดับ ซึ่งอาจสรุปผลได้ดังนี้ คือ

Deflocculants แสดงผลต่อดินขาวระนอง (KR) ในเชิงลด permeability ของเนื้อลงเป็นไปได้ว่า deflocculants เพิ่มแรงผลักระหว่างอนุภาคดินทำให้การเรียงตัวของอนุภาคช้าลงและเป็นระเบียบแน่นขึ้น ทำให้น้ำซึมผ่านแยกตัวออกช้าลง (รูปที่ 24)

KR100%		DK100%		CPD100%	
t	V <sup>2</sup>	t	V <sup>2</sup>	t	V <sup>2</sup>
1	6889	5	3721	5	841
2	12544	10	6561	10	2116
3	18769	20	11664	20	3600
4	23104	30	16129	30	6561
		40	19321	40	9025
Slope	5487	Slope	450	Slope	232

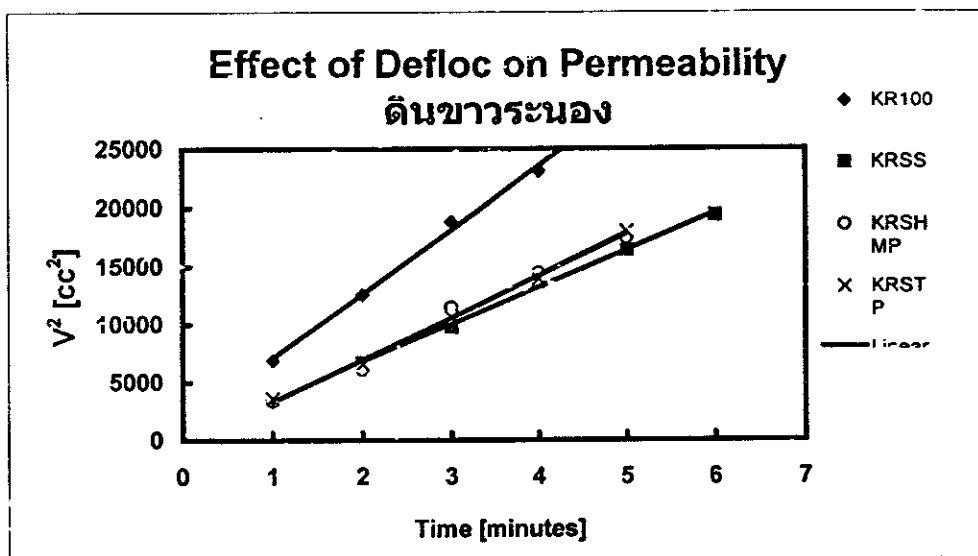
### Permeability of Clays



รูปที่ 23 ผลเปรียบเทียบ Permeability ของดินชนิดต่างๆ

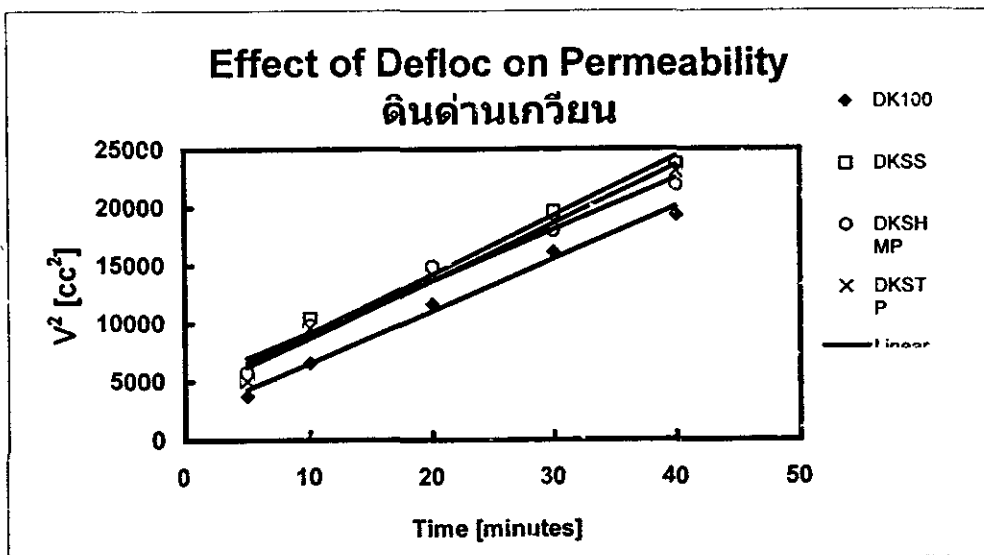
KR = ดินขาวระนอง DK = ดินด่านเกวียน CPD = ดินเหนียว compound clay

KR100% No Defloc.		KR100% Sodium Silicate		KR100% SHMP		KR100% STP	
1	6889	2	6724	1	3364	1	3600
2	12544	3	9801	2	6084	2	6561
3	18769	4	13689	3	11449	3	10609
4	23104	5	16384	4	14400	4	13924
		6	19321	5	17424	5	17956
Slope	5487	Slope	3178	Slope	3644	Slope	3608



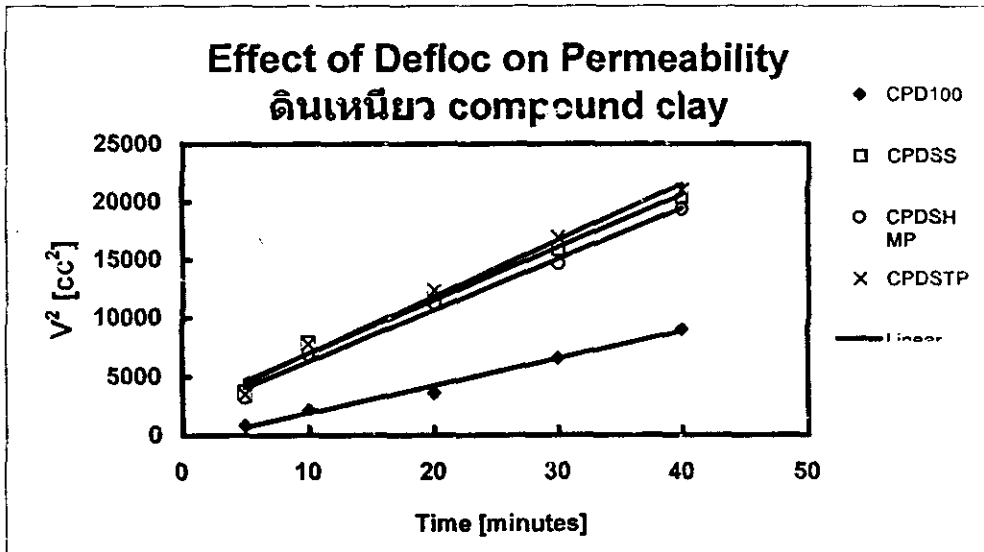
รูปที่ 24 ผลของ Deflocculant ชนิดต่างๆ ต่อ Permeability ของดินขาวระนอง (KR)  
 KR100 = ดินระนอง ไม่มี defloc  
 KRSS = ดินระนอง + sodium silicate  
 KRSHMP = ดินระนอง + sodium hexametaphosphate  
 KRSTP = ดินระนอง + sodium tripolyphosphate

DK100% No Defloc.		DK100% Sodium Silicate		DK100% SHMP		DK100% STP	
5	3721	5	5184	5	5776	5	5041
10	6561	10	10404	10	9801	10	9604
20	11664	20	14641	20	14884	20	14161
30	16129	30	19600	30	17956	30	18769
40	19321	40	23716	40	21904	40	23104
Slope	450	Slope	506	Slope	442	Slope	497



รูปที่ 25 ผลของ Deflocculant ชนิดต่างๆ ต่อ Permeability ของดินด่านเกวียน (DK)  
 DK100 = ดินด่านเกวียน ไม่มี defloc  
 DKSS = ดินด่านเกวียน + sodium silicate  
 DKSHMP = ดินด่านเกวียน + sodium hexametaphosphate  
 DKSTP = ดินด่านเกวียน + sodium tripolyphosphate

CPD100% No Defloc.		CPD100% Sodium Silicate		CPD100% SHMP		CPD100% STP	
5	841	5	3721	5	3249	5	3481
10	2116	10	7921	10	6889	10	7744
20	3600	20	11664	20	11236	20	12321
30	6561	30	15876	30	14641	30	16900
40	9025	40	20449	40	19321	40	21025
Slope	232	Slope	455	Slope	439	Slope	495



รูปที่ 26 ผลของ Deflocculant ชนิดต่างๆ ต่อ Permeability ของดินเหนียว (CPD)  
 CPD100 = ดินเหนียว ไม่มี defloc  
 CPDSS = ดินเหนียว + sodium silicate  
 CPDSHMP = ดินเหนียว + sodium hexametaphosphate  
 CPDSTP = ดินเหนียว + sodium tripolyphosphate



ในทางกลับกัน deflocculants แสดงผลต่อดินเหนียว CPD และดินด้านเกวียน (DK) ในลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ ช่วยเพิ่ม permeability ของเนื้อดินทั้งสองชนิด (รูปที่ 25 และ 26) โดยมีผลกับดินเหนียว CPD มากกว่าดินด้านเกวียน อาจเป็นไปได้ว่าแรงผลักรังของอนุภาคดินทำให้อนุภาคขนาดเล็กไม่อาจเรียงตัวกันได้แน่นอนเหมือนกรณีไม่มี สาร deflocculant เนื่องจากแรงผลักรังที่ผิวอนุภาคเมื่อเคลื่อนเข้าหากันเพื่อเรียงตัว

สำหรับคำอธิบายที่แน่ชัด จะต้องอาศัยการศึกษา microstructure pore size distribution และการวัดค่า zeta potential โดยละเอียดในอนาคตต่อไป

#### 4.3.3 Permeability ของส่วนผสมของดิน (Clay Mixtures)

ผลการวัดค่า permeability ของเนื้อดิน เมื่อนำดินที่ศึกษามาผสมกันด้วย อัตราส่วนต่างๆ จากตารางที่ 13 และ 14 และ กราฟ รูปที่ 27 และ 28 อาจวิเคราะห์สรุปได้ คือ

##### 4.3.3ก กรณีส่วนผสมของ ดินด้านเกวียน (DK) และ ดินขาวระนอง (KR)

จากกราฟ รูปที่ 27 ซึ่งแสดงค่า permeability ของดินด้านเกวียน ผสมกับดินขาวระนองด้วยอัตราส่วน 100:0 90:10 50:50 10:90 และ 0:100 ตามลำดับ ให้ผลเป็นไปตามที่คาดหมายไว้กล่าวคือ เมื่อผสมดินขาวระนอง (KR) ซึ่งมีค่า permeability สูง กับดินด้านเกวียน (DK) ซึ่งมี permeability ต่ำกว่ามาก จะช่วยให้เนื้อส่วนผสมมี permeability อยู่ในช่วงระหว่างค่า  $K_p$  ของดินทั้งสองชนิด จากผลนี้แสดงว่าอัตราการหล่อแบบหรือแยกน้ำของ slip จะสามารถปรับและควบคุมได้ ถ้าทราบค่า  $K_p$  ของดิน ที่ใช้ดินด้านเกวียน (DK) ซึ่งมี permeability ต่ำ อัตราการหล่อช้า อาจปรับให้มีอัตราการหล่อเร็วขึ้นได้ ในลักษณะที่สามารถประมาณได้ โดยการผสมดินขาวระนองเพิ่มขึ้นในปริมาณต่างๆที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 29

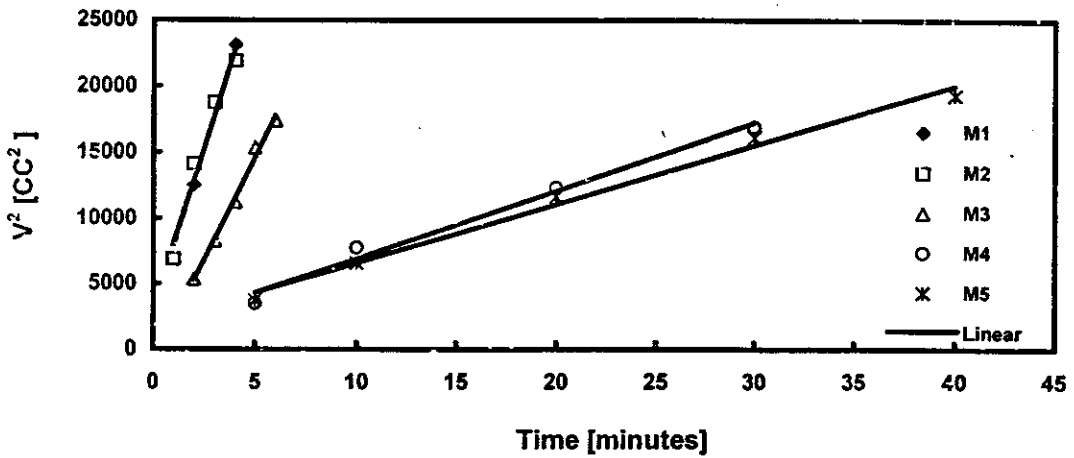
##### 4.3.3ข กรณีส่วนผสมของดินเหนียว (CPD) และ ดินขาวระนอง (KR)

จากกราฟ รูปที่ 28 ซึ่งแสดงค่า permeability ของดินเหนียว CPD ผสมกับดินขาวระนองด้วยอัตราส่วน 100:0 90:10 50:50 10:90 และ 0:100 ตามลำดับ ให้ผลคล้ายกับกรณี 4.3.3ก คือ ค่า permeability หรือ อัตราการหล่อ ของดินเหนียว CPD สามารถปรับให้สูงขึ้นได้ โดยการเติมดินขาวระนองในส่วนผสม ดังแสดงในรูปที่ 30

ตารางที่ 32 และ 33 สรุปรวมค่า permeability ของดินและส่วนผสมต่างๆ

MIXTURE									
M1		M2		M3		M4		M5	
KR100	DK0	KR90	DK10	KR50	DK50	KR10	DK90	KR0	DK100
1	6889	1	6889	2	5329	5	3481	5	3721
2	12544	2	14161	3	8281	10	7744	10	6561
3	18769	3	18769	4	11236	20	12321	20	11664
4	23104	4	21904	5	15376	30	16900	30	16129
				6	17424			40	19321
Slope	5487	Slope	4965	Slope	3129	Slope	518	Slope	450

### Permeability of Clay Mixture ดินด่านเกวียน - ดินขาวระนอง

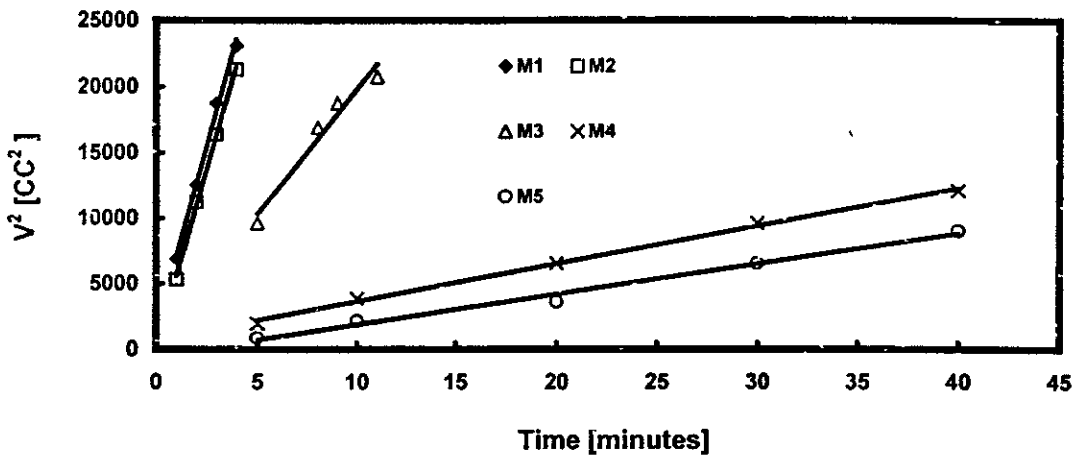


รูปที่ 27 ผลเปรียบเทียบ Permeability ของส่วนผสมของดินด่านเกวียนและดินขาวระนอง

- M1 = ดินขาวระนอง 100% + ดินด่านเกวียน 0% (โดยน้ำหนัก)
- M2 = ดินขาวระนอง 90% + ดินด่านเกวียน 10% (โดยน้ำหนัก)
- M3 = ดินขาวระนอง 50% + ดินด่านเกวียน 50% (โดยน้ำหนัก)
- M4 = ดินขาวระนอง 10% + ดินด่านเกวียน 90% (โดยน้ำหนัก)
- M5 = ดินขาวระนอง 0% + ดินด่านเกวียน 100% (โดยน้ำหนัก)

MIXTURE									
M1		M2		M3		M4		M5	
KR100	CPD0	KR90	CPD10	KR50	CPD50	KR10	CPD90	KR0	CPD100
1	6889	1	5329	5	9604	5	1936	5	841
2	12544	2	11236	8	16900	10	3844	10	2116
3	18769	3	16384	9	18769	20	6561	20	3600
4	23104	4	21316	11	20736	30	9604	30	6561
						40	12100	40	9025
Slope	5487	Slope	5311	Slope	1902	Slope	288	Slope	232

### Permeability of Clay Mixture ดินเหนียว CPD - ดินขาวระนอง



- รูปที่ 28 ผลเปรียบเทียบ Permeability ของส่วนผสมของดินเหนียว compound clay และดินขาวระนอง
- M1 = ดินขาวระนอง 100% + ดินเหนียว CPD 0% (โดยน้ำหนัก)
  - M2 = ดินขาวระนอง 90% + ดินเหนียว CPD 10% (โดยน้ำหนัก)
  - M3 = ดินขาวระนอง 50% + ดินเหนียว CPD 50% (โดยน้ำหนัก)
  - M4 = ดินขาวระนอง 10% + ดินเหนียว CPD 90% (โดยน้ำหนัก)
  - M5 = ดินขาวระนอง 0% + ดินเหนียว CPD 100% (โดยน้ำหนัก)

#### 4.4 Casting rate ของวัตถุดิบและส่วนผสม

อัตราการหล่อของวัตถุดิบและส่วนผสม ซึ่งวัดจากอัตราการเพิ่มความหนาของเนื้อวัตถุดิบหรือส่วนผสมภายใต้สภาวะควบคุม โดยวิธีใช้ Baroid Filter และ Plaster mold ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 17 ถึง 21

##### 4.4.1 Casting Rate วัดโดย Baroid Filter

ผลจากการวัดจากตารางที่ 17 ถึง 21 เมื่อนำมา plot เป็นกราฟ ให้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 33 ถึง 44 ซึ่งอาจอธิบายได้ดังนี้ คือ

##### 4.4.1ก Casting Rate ของดินชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 33 และ 34 อัตราการเพิ่มความหนาหรือ casting rate ดินขาวระนองจะเร็วมากเมื่อเทียบกับดินดานเกวียนหรือดินเหนียว compound clay

Casting rate ของดินที่ศึกษาเปรียบเทียบโดยดูจาก slope ของเส้นกราฟ อาจเรียงลำดับจากสูงไปหาล่าง ได้ดังนี้ คือ

ดินขาวระนอง >>> ดินดานเกวียน > ดินเหนียว compound clay  
ผลที่ได้จะเป็นไปตามที่คาดหมาย เมื่อพิจารณาว่า อัตราการเพิ่มความหนาของเนื้อดินหรือ casting rate จะขึ้นกับความเร็วของน้ำที่จะแยกตัวโดยการแพร่ผ่านอนุภาคของเนื้อของแข็งที่เรียงตัวกันอยู่ ความโปร่งของการเรียงตัวของโครงสร้าง (solid structure) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อ casting rate ผลการวัดค่า permeability ของดินที่ศึกษาในรูปที่ 23 และ casting rate ในรูปที่ 34 จะแสดงความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ตัวแปร อย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อนำค่า permeability มา plot กับค่า casting rate (ค่า slope ของแต่ละเส้นกราฟ) ดังรูปที่ 39 จะให้ผลแนวโน้มที่สอดคล้องกัน

##### 4.4.1ข Casting Rate ของส่วนผสมของดิน

จากรูปที่ 36 และรูปที่ 38 ซึ่งแสดง casting rate ของส่วนผสมของดินดานเกวียนกับดินขาวระนอง และ ดินเหนียว compound clay กับดินขาวระนอง ให้ความสัมพันธ์ที่อธิบายได้ในแง่ของค่า permeability เมื่อเทียบกับรูปที่ 39 เช่นเดียวกับผลวิเคราะห์ใน 4.4.1ก เมื่อนำค่า permeability มา plot กับ casting rate ในส่วนผสมของดินเหนียว compound clay กับดินขาวระนอง ดังรูปที่ 41 หรือ ส่วนผสมของดินดานเกวียนกับดินขาวระนอง ดังรูปที่ 40 ตัวแปรทั้งสองแสดงความสัมพันธ์กันในรูปของสมการเส้นตรง

ความพยายามในการหาความสัมพันธ์ของค่า permeability กับ casting rate โดยรวมจากผลทดลองของทั้ง 3 ระบบ จากค่าในตารางที่ 33

และรูปที่ 42 กลับไม่พบความสัมพันธ์ที่เด่นชัด แสดงว่าในแต่ละระบบหรือส่วนผสมมีตัวแปรอื่นๆที่จากการทดลองและวัตถุดิบเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

ตารางที่ 33 ผลสรุปค่า Permeability ของดินและส่วนผสมของดินต่างๆ  
ทั้งที่มีและไม่มี Deflocculants

ส่วนผสม (Mixture)			Additive	Permeability , Kp
ดิน KR	ดิน DK	ดิน CPD		
100	0	0	none	5487
			SS	3178
			SHMP	3644
			STP	3608
0	100	0	none	450
			SS	506
			SHMP	442
			STP	497
0	0	100	none	232
			SS	455
			SHMP	439
			STP	486
90	10	0	none	4965
50	50	0	none	3129
10	90	0	none	518
90	0	10	none	5311
50	0	50	none	1902
10	0	90	none	288

ดิน KR = ดินขาวระนอง

ดิน DK = ดินด่านเกวียน

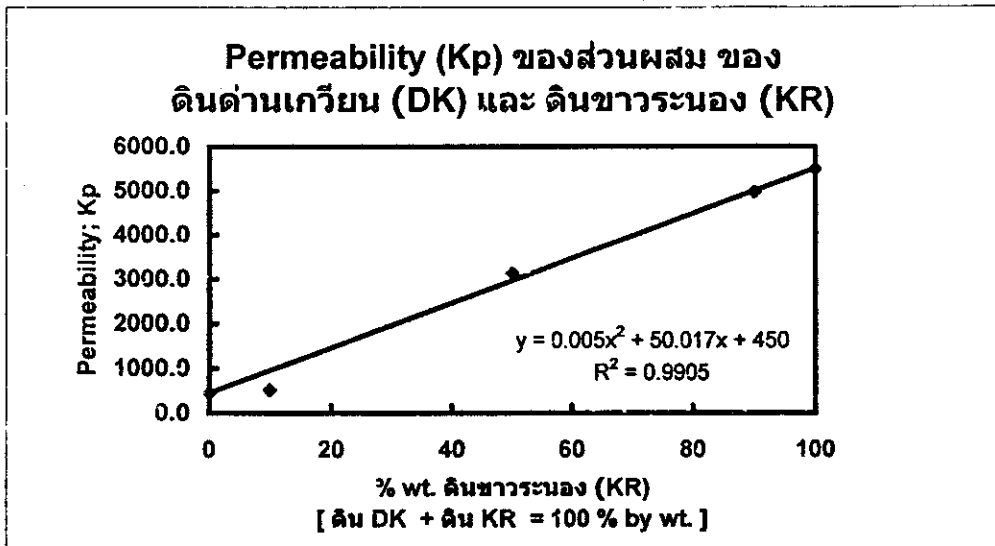
ดิน CPD = ดินเหนียว compound clay

SS = Sodium Silicate

SHMP = Sodium Hexametaphosphate

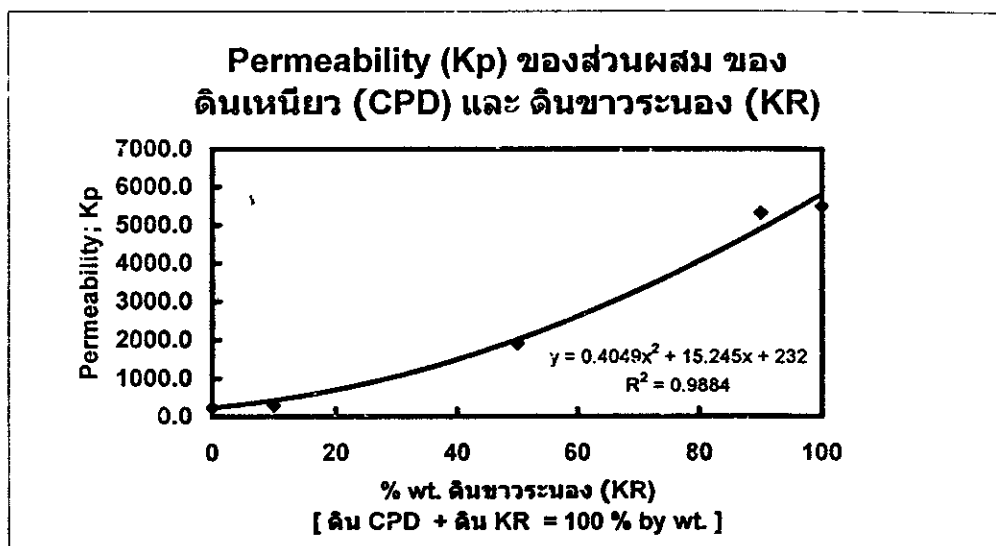
STP = Sodium Tripolyphosphate

%ดินขาวระนอง KR ในส่วนผสม	Permeability K <sub>p</sub>
100	5487
90	4965
50	3129
10	518
0	450



รูปที่ 29 ผลของปริมาณดินขาวระนอง (KR) ต่อค่า Permeability (K<sub>p</sub>) ของดินด่านเกวียน (DK)

%ดินขาวระนอง KR ในส่วนผสม	Permeability K <sub>p</sub>
100	5487
90	5311
50	1902
10	288
0	232



รูปที่ 30 ผลของปริมาณดินขาวระนอง (KR) ต่อค่า Permeability (K<sub>p</sub>) ของดินเหนียว compound clay (CF)

ตารางที่ 34 ผลสรุปค่า Permeability ของดินและส่วนผสมต่างๆ

ส่วนผสม (Mixture)					Permeability , Kp
ดิน KR	ดิน DK	ดิน CPD	Quartz	Felds.	
100	0	0	0	0	5487
0	100	0	0	0	450
0	0	100	0	0	232
90	10	0	0	0	4965
50	50	0	0	0	3129
10	90	0	0	0	518
90	0	10	0	0	5311
50	0	50	0	0	1902
10	0	90	0	0	288
0	50	0	50	0	1976
25	25	0	50	0	2178
25	25	0	25	25	1913
0	0	50	50	0	1094
25	0	25	50	0	413
25	0	25	25	25	371

ดิน KR = ดินขาวระนอง

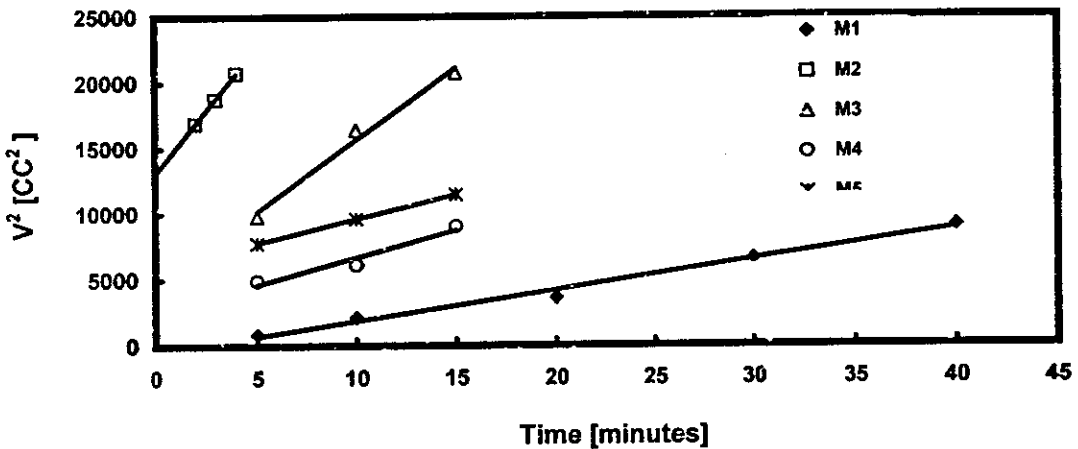
ดิน DK = ดินด่านเกวียน

ดิน CPD = ดินเหนียว compound clay



COMPOUND CLAY MIXTURE : CLAYS + QUARTZ + FELDSPAR														
M1		M2		M3		M4		M5						
CPD100		CPD50KR50		CPD50Q50		CPD25KR25Q50		CPD25KR25Q25F25						
5	841	5	9604	5	9801	5	4900	5	7744					
10	2116	8	16900	10	16384	10	6084	10	9604					
20	3600	9	18769	15	20736	15	9025	15	11449					
30	6561	11	20736											
40	9025													
Slope		232	Slope		1902	Slope		1094	Slope		413	Slope		371

### Permeability of Slip Cast Body ดินเหนียว CPD - ดินขาวระนอง-Quartz-Feldspar



รูปที่ 31 ผลเปรียบเทียบ Permeability ของส่วนผสมของ Slip Cast Body

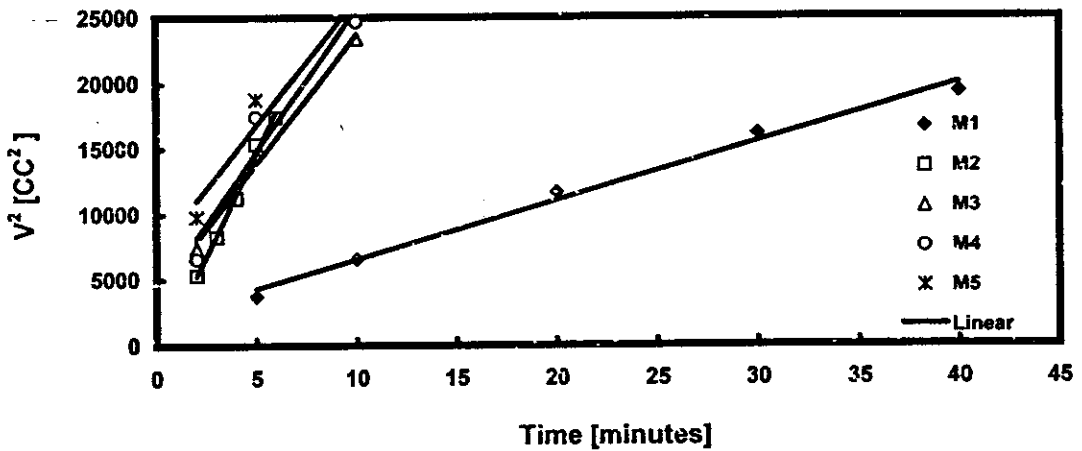
- M1 = ดินเหนียว CPD 100% (โดยน้ำหนัก)
- M2 = ดินเหนียว CPD 50% + ดินขาวระนอง 50% (โดยน้ำหนัก)
- M3 = ดินเหนียว CPD 50% + Quartz บด 50% (โดยน้ำหนัก)
- M4 = ดินเหนียว CPD 25% + ดินขาวระนอง 25% + Quartz บด 50%
- M5 = ดินเหนียว CPD 25% + ดินขาวระนอง 25% + Quartz บด 25% + Feldspar 25%

## DANKIAN CLAY MIXTURE : CLAYS + QUARTZ + FELDSPAR

M1		M2		M3		M4		M5	
DK100		DK50KR50		DK50Q50		DK25KR25Q50		DK25KR25Q25F25	
5	3721	2	5329	2	7396	2	6561	2	9801
10	6561	3	8281	5	14641	5	17424	5	18769
20	11664	4	11236	10	23409	10	24649	10	25600
30	16129	5	15376						
40	19321	6	17424						
Slope	450	Slope	3129	Slope	1976	Slope	2178	Slope	1913

## Permeability of Slip Cast Body

## ดินด่านเกวียน - ดินขาวระนอง-Quartz-Feldspar



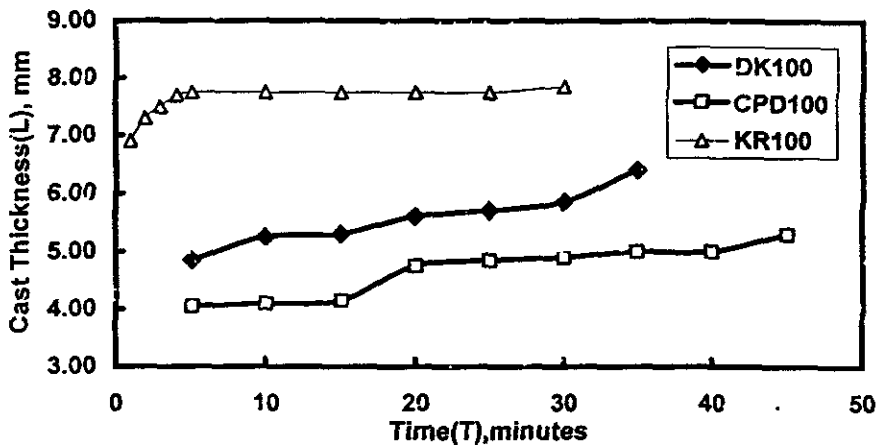
รูปที่ 32 ผลเปรียบเทียบ Permeability ของส่วนผสมของ Slip Cast Body

- M1 = ดินด่านเกวียน 100% (โดยน้ำหนัก)  
M2 = ดินด่านเกวียน 50% + ดินขาวระนอง 50% (โดยน้ำหนัก)  
M3 = ดินด่านเกวียน 50% + Quartz บด 50% (โดยน้ำหนัก)  
M4 = ดินด่านเกวียน 25% + ดินขาวระนอง 25% + Quartz บด 50%  
M5 = ดินด่านเกวียน 25% + ดินขาวระนอง 25% + Quartz บด 25%  
+ Feldspar 25%

## CASTING RATE

DK100			CPD100			KR100		
T	L	L <sup>2</sup>	T	L	L <sup>2</sup>	T	L	L <sup>2</sup>
min	mm	mm <sup>2</sup>	min	mm	mm <sup>2</sup>	min	mm	mm <sup>2</sup>
5	4.85	24	5	4.05	16	1	6.90	48
10	5.25	28	10	4.10	17	2	7.30	53
15	5.30	28	15	4.15	17	3	7.50	56
20	5.60	31	20	4.75	23	4	7.70	59
25	5.70	32	25	4.85	24	5	7.75	60
30	5.85	34	30	4.90	24	10	7.75	
35	6.40	41	35	5.00	25	15	7.75	
			40	5.00	25	20	7.75	
			45	5.30	28	25	7.75	
						30	7.85	

**Casting Rate of Different Clays**  
ดินด่านเกวียน-ดินขาวระนอง-ดินเหนียว CPD



รูปที่ 33 กราฟที่เปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate (L vs. T) ของดินชนิดต่างๆ วัสดุโดย Baroid Filter

DK100 = ดินด่านเกวียน 100 %

CPD100 = ดินเหนียว compound clay 100 %

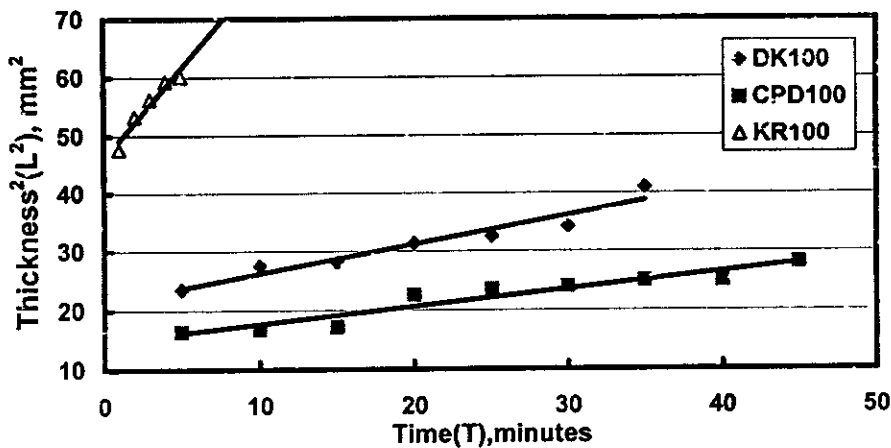
KR100 = ดินขาวระนอง 100 %

Note ; ดินขาวระนองมีอัตราการเพิ่มความหนาเร็วมาก เนื้อดินแยกจากน้ำอย่างรวดเร็วภายใน 10 นาที

## CASTING RATE

DK100			CPD100			KR100		
T	L	L <sup>2</sup>	T	L	L <sup>2</sup>	T	L	L <sup>2</sup>
min	mm	mm <sup>2</sup>	min	mm	mm <sup>2</sup>	min	mm	mm <sup>2</sup>
5	4.85	24	5	4.05	16	1	6.90	48
10	5.25	28	10	4.10	17	2	7.30	53
15	5.30	28	15	4.15	17	3	7.50	56
20	5.60	31	20	4.75	23	4	7.70	59
25	5.70	32	25	4.85	24	5	7.75	60
30	5.85	34	30	4.90	24			
35	6.40	41	35	5.00	25			
			40	5.00	25			
			45	5.30	28			
Slope 0.500			Slope 0.332			Slope 3.090		

Casting Rate of Different Clays  
ดินด่านเกวียน-ดินขาวระนอง-ดินเหนียว CPD

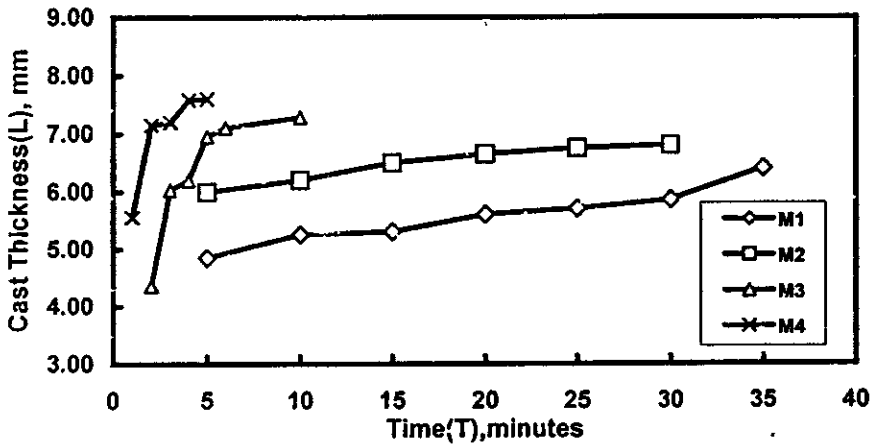


รูปที่ 34 กราฟเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มความหนา Casting Rate ( $L^2$  vs. T) ของดินชนิดต่างๆ วัสดุโดย Baroid Filter  
DK100 = ดินด่านเกวียน 100 %  
CPD100 = ดินเหนียว compound clay 100 %  
KR100 = ดินขาวระนอง 100 %

Note ; ค่าความหนาของดินขาวระนองหลัง 5 นาที ไม่ได้นำมา plot เนื่องจากเนื้อดินแยกจากน้ำเกือบหมด

CASTING RATE: MIXTURE ดินด่านเกวียน + ดินขาวระนอง							
M1		M2		M3		M4	
DK100	KR0	DK90	KR10	DK50	KR50	DK10	KR90
T	L	T	L	T	L	T	L
min	mm	min	mm	min	mm	min	mm
5	4.85	5	6.00	2	4.35	1	5.55
10	5.25	10	6.20	3	6.03	2	7.15
15	5.30	15	6.50	4	6.20	3	7.20
20	5.60	20	6.65	5	6.95	4	7.58
25	5.70	25	6.75	6	7.10	5	7.60
30	5.85	30	6.80	10	7.28		
35	6.40						

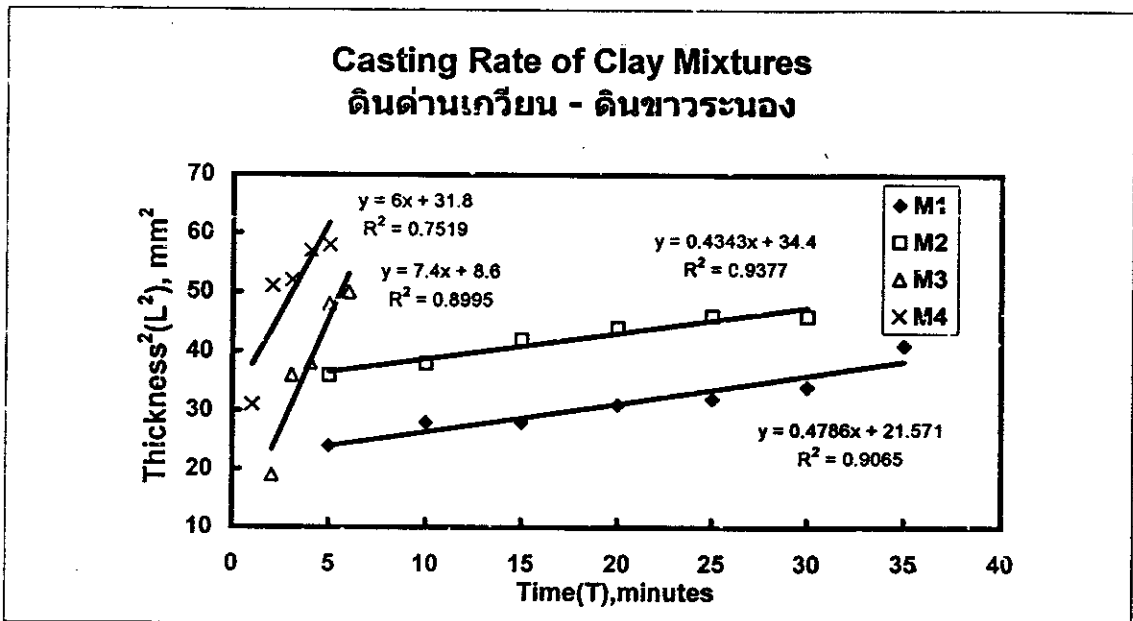
**Casting Rate of Clay Mixtures**  
ดินด่านเกวียน - ดินขาวระนอง



รูปที่ 35 กราฟที่เปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate (L vs. T) ของส่วนผสมของดินชนิดต่างๆ วัลโดย Baroid Filter

- M1 = ดินด่านเกวียน 100% + ดินขาวระนอง KR 0%  
M2 = ดินด่านเกวียน 90% + ดินขาวระนอง KR 10%  
M3 = ดินด่านเกวียน 50% + ดินขาวระนอง KR 50%  
M4 = ดินด่านเกวียน 10% + ดินขาวระนอง KR 90%

CASTING RATE: MIXTURE ดินด่านเกวียน + ดินขาวระนอง							
M1		M2		M3		M4	
DK100	KR0	DK90	KR10	DK50	KR50	DK10	KR90
T	L <sup>2</sup>	T	L <sup>2</sup>	T	L <sup>2</sup>	T	L <sup>2</sup>
min	mm <sup>2</sup>	min	mm <sup>2</sup>	min	mm <sup>2</sup>	min	mm <sup>2</sup>
5	24	5	36	2	19	1	31.00
10	28	10	38	3	36	2	51.00
15	28	15	42	4	38	3	52.00
20	31	20	44	5	48	4	57.00
25	32	25	46	6	50	5	58.00
30	34	30	46				
35	41						
SLOPE	0.48	SLOPE	0.43	SLOPE	7.40	SLOPE	6.00

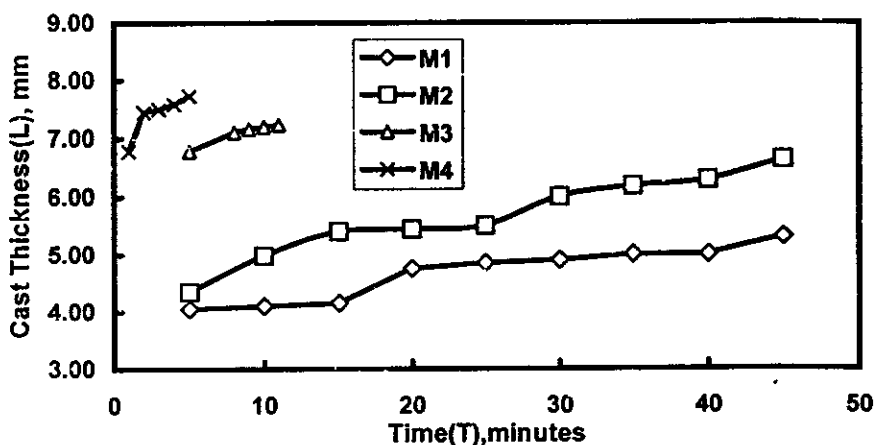


รูปที่ 36 กราฟเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มความหนา Casting Rate ( L<sup>2</sup> vs. T) ของส่วนผสมของดินต่างๆ วัลโดย Baroid Filter

- M1 = ดินด่านเกวียน 100% + ดินขาวระนอง KR 0%
- M2 = ดินด่านเกวียน 90% + ดินขาวระนอง KR 10%
- M3 = ดินด่านเกวียน 50% + ดินขาวระนอง KR 50%
- M4 = ดินด่านเกวียน 10% + ดินขาวระนอง KR 90%

CASTING RATE: MIXTURE ดินเหนียว + ดินขาวระนอง							
M1		M2		M3		M4	
CPD100	KR0	CPD90	KR10	CPD50	KR50	CPD10	KR90
T	L	T	L	T	L	T	L
min	mm	min	mm	min	mm	min	mm
5	4.05	5	4.35	5	6.78	1	6.78
10	4.10	10	4.98	8	7.10	2	7.45
15	4.15	15	5.40	9	7.16	3	7.50
20	4.75	20	5.44	10	7.20	4	7.58
25	4.85	25	5.50	11	7.23	5	7.73
30	4.90	30	6.00				
35	5.00	35	6.18				
40	5.00	40	6.28				
45	5.30	45	6.63				

**Casting Rate of Clay Mixtures**  
ดินเหนียว CPD- ดินขาวระนอง

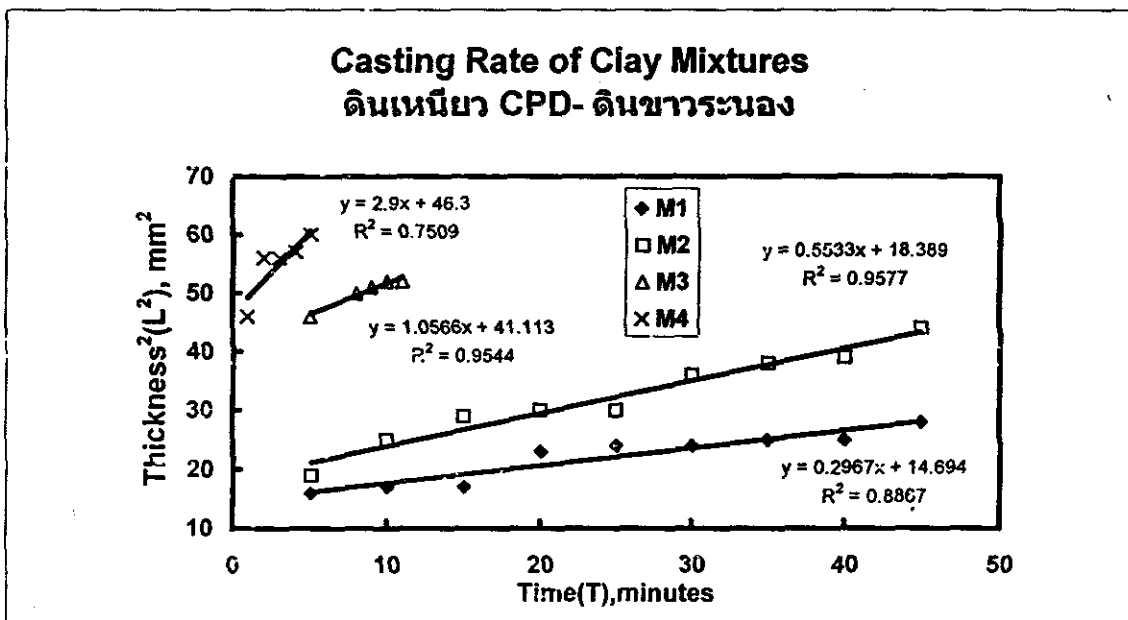


รูปที่ 37 กราฟที่เปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate (L vs. T) ของส่วนผสมของดินชนิดต่างๆ วัสดุโดย Baroid Filter

- M1 = ดิน CPD 100% + ดินขาวระนอง KR 0%  
M2 = ดิน CPD 90% + ดินขาวระนอง KR 10%  
M3 = ดิน CPD 50% + ดินขาวระนอง KR 50%  
M4 = ดิน CPD 10% + ดินขาวระนอง KR 90%

Note ; ส่วนผสม M3 และ M4 มีอัตราการเพิ่มความหนาเร็วมาก เนื่องดินแยกจากกันอย่างรวดเร็วกภายใน 10 นาที

CASTING RATE: MIXTURE ดินเหนียว + ดินขาวระนอง							
M1		M2		M3		M4	
CPD100	KR0	CPD90	KR10	CPD50	KR50	CPD10	KR90
T	L <sup>2</sup>	T	L <sup>2</sup>	T	L <sup>2</sup>	T	L
min	mm <sup>2</sup>	min	mm <sup>2</sup>	min	mm <sup>2</sup>	min	mm
5	16	5	19	5	46	1	46
10	17	10	25	8	50	2	56
15	17	15	29	9	51	3	56
20	23	20	30	10	52	4	57
25	24	25	30	11	52	5	60
30	24	30	36				
35	25	35	38				
40	25	40	39				
45	29	45	44				
slope	0.297	slope	0.553	slope	1.057	slope	2.900

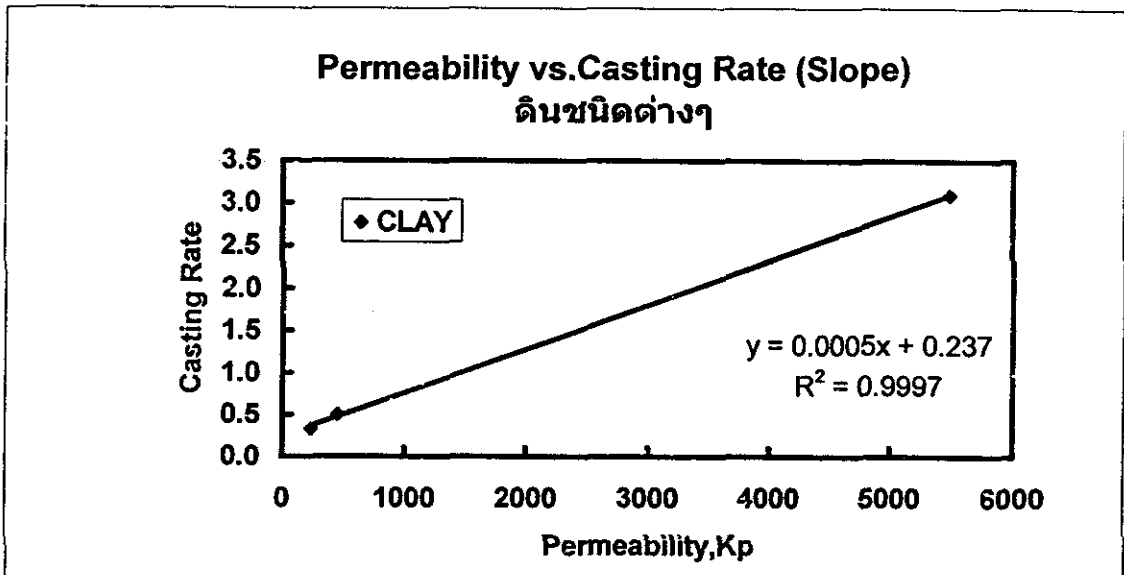


รูปที่ 38 กราฟเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มความหนา Casting Rate ( $L^2$  vs. T) ของส่วนผสมของดินต่างๆ วัสดุโดย Baroid Filter

- M1 = ดิน CPD 100% + ดินขาวระนอง KR 0%
- M2 = ดิน CPD 90% + ดินขาวระนอง KR 10%
- M3 = ดิน CPD 50% + ดินขาวระนอง KR 50%
- M4 = ดิน CPD 10% + ดินขาวระนอง KR 90%

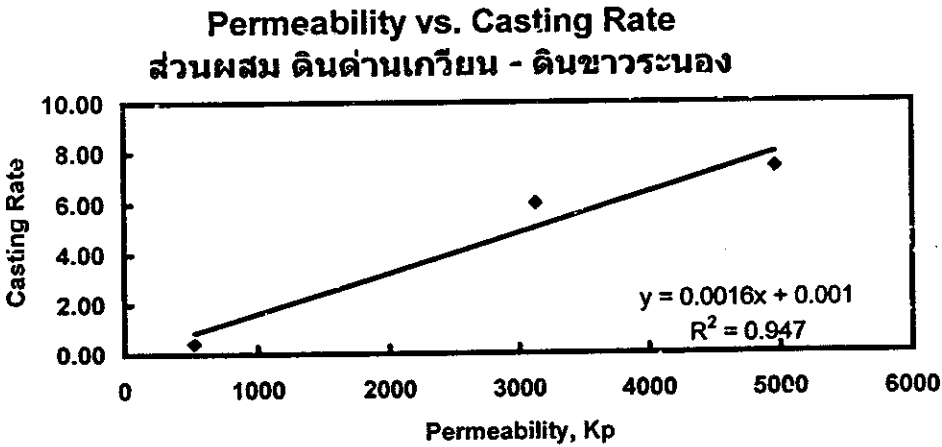


ชนิดของดิน	Permeability(Kp)	Casting Rate ค่าจาก slope
ดินระนอง KR	5487	3.09
ดินด่านเกวียน DK	450	0.50
ดินเหนียว CPD	232	0.33



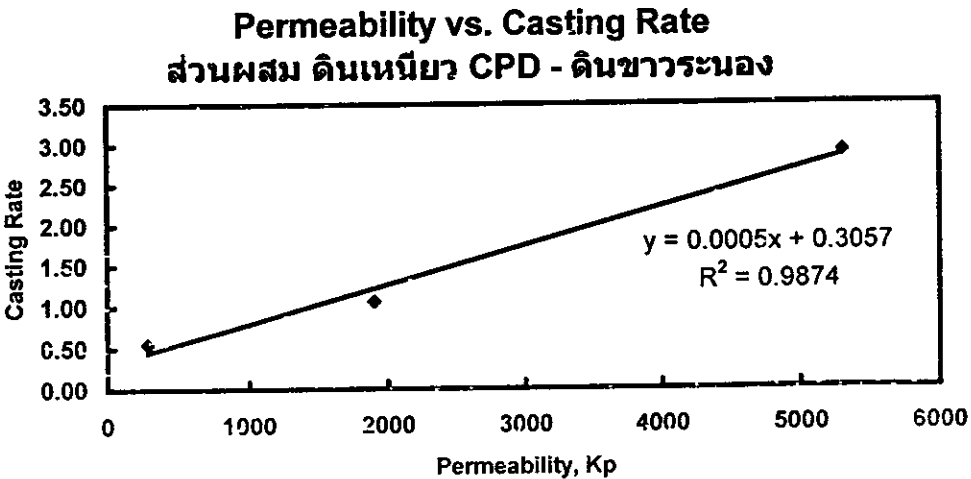
รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Permeability (Kp) กับ Casting Rate ของดินชนิดต่างๆ

ส่วนผสมของดิน		Permeability(Kp)		Casting Rate ค่าจาก slope	
KR	DK				
10	90	518		0.43	
50	50	3129		6.00	
90	10	4965		7.40	



รูปที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Permeability (Kp) กับ Casting Rate ของส่วนผสมของดินดานเกวียนและดินขาวระนองที่อัตราส่วนต่างๆ

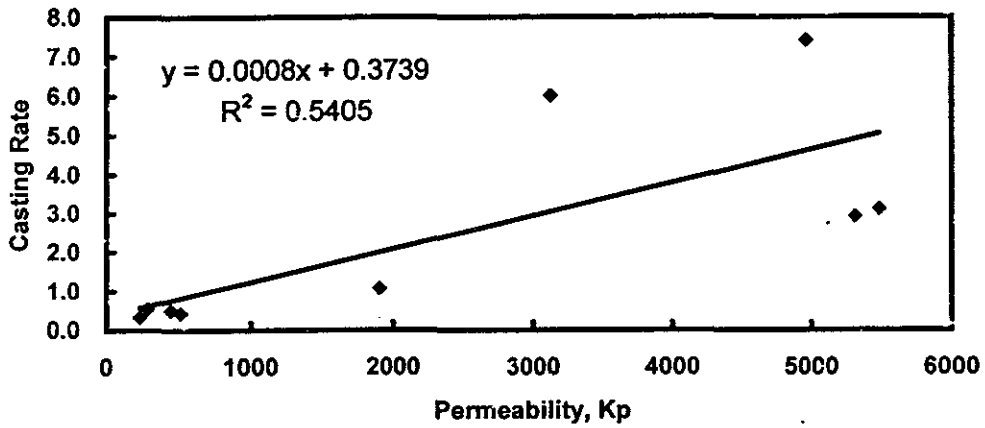
ส่วนผสมของดิน		Permeability(Kp)		Casting Rate ค่าจาก slope	
KR	CPD				
10	90	288		0.55	
50	50	1902		1.06	
90	10	5311		2.90	



รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Permeability (Kp) กับ Casting Rate ของส่วนผสมของดินเหนียว compound clay และดินขาวระนองที่อัตราส่วนต่างๆ

ส่วนผสมของดิน			Permeability(Kp)	Casting Rate ค่าจาก slope
DK	KR	CPD		
0	10	90	288	0.55
0	50	50	1902	1.06
0	90	10	5311	2.90
90	10	0	518	0.43
50	50	0	3129	6.00
10	90	0	4965	7.40
0	100	0	5487	3.09
100	0	0	450	0.50
0	0	100	232	0.33

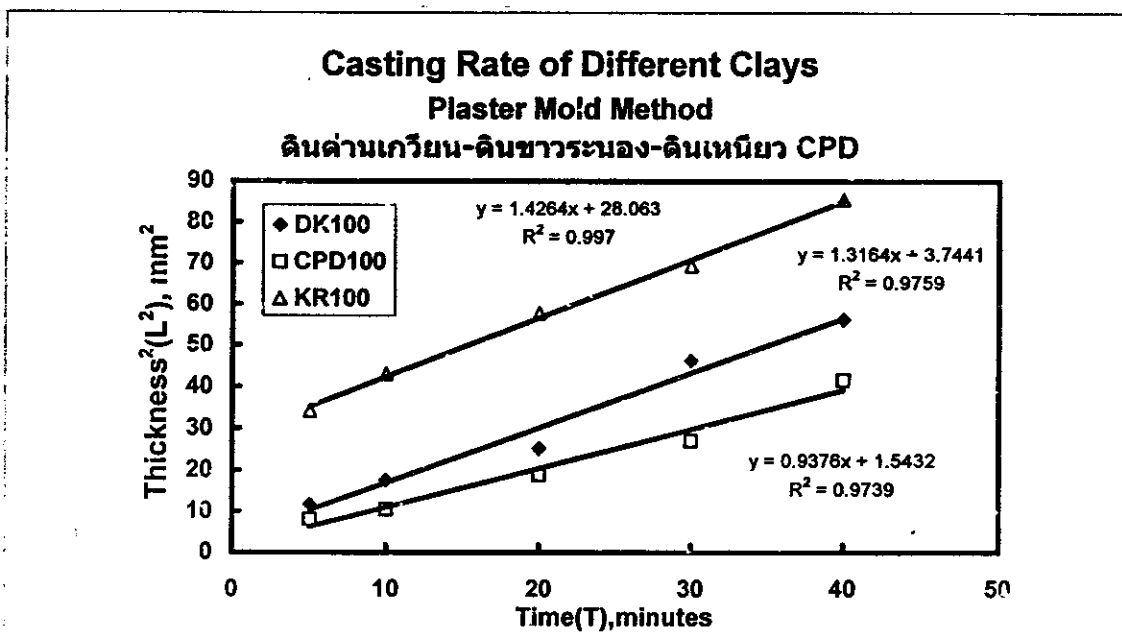
**Permeability vs.Casting Rate**  
ดินและส่วนผสมของดินต่างๆ



รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Permeability (Kp) กับ Casting Rate ของดิน และส่วนผสมในระบบต่างๆ

**CASTING RATE : DIFFERENT CLAYS  
PLASTER MOLD METHOD**

DK100			CPD100			KR100		
T	L	L <sup>2</sup>	T	L	L <sup>2</sup>	T	L	L <sup>2</sup>
min	mm	mm <sup>2</sup>	min	mm	mm <sup>2</sup>	min	mm	mm <sup>2</sup>
5	3.4	12	5	2.9	8	5	5.9	34
10	4.2	18	10	3.3	11	10	6.6	43
20	5.0	25	20	4.3	19	20	7.6	58
30	6.8	46	30	5.2	27	30	8.3	69
40	7.5	56	40	6.5	42	40	9.3	86
<b>SLOPE</b>	<b>1.32</b>		<b>SLOPE</b>	<b>0.94</b>		<b>SLOPE</b>	<b>1.43</b>	

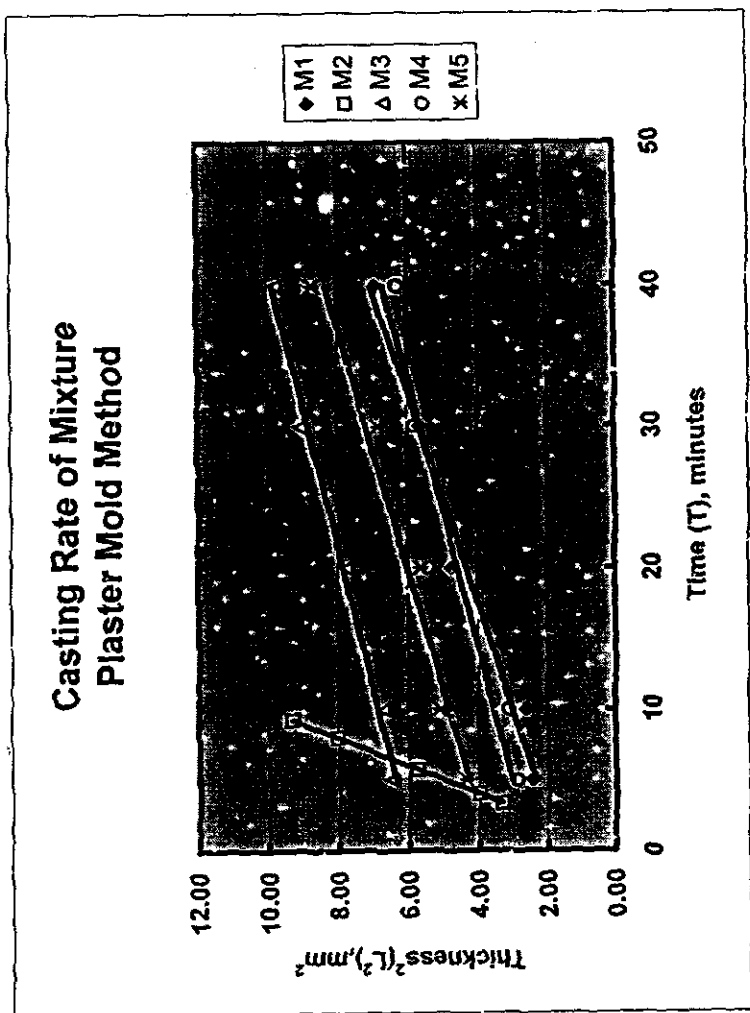


รูปที่ 43 กราฟเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มความหนา Casting Rate (L<sup>2</sup> vs. T) ของดินชนิดต่างๆ วัสดุโดย Baroid Filter

L = ความหนาของเนื้อส่วนผสม ณ เวลาต่างๆ , mm  
T = เวลาในการหล่อ , minutes

DK100 = ดินด่านเกวียน 100 %  
CPD100 = ดินเหนียว compound clay 100 %  
KR100 = ดินขาวระนอง 100 %

Note : Slip ของดินขาวระนองแห้งตัวเร็วมาก เกิดการหดตัวและแตกร้าวในแบบ



รูปที่ 44 เปรียบเทียบการเพิ่มความหนา Casting Rate ของส่วนผสมต่าง ๆ วัสดุวิธีหล่อใน Plaster Mold

- M1 = ดินเหนียว CPD 50% + ดินดานเกือบ 50%
- M2 = ดินเหนียว CPD 50% + ดินขาวระยอง 50%
- M3 = ดินดานเกือบ 50% + ดินขาวระยอง 50%
- M4 = ดินเหนียว CPD 25% + ดินดานเกือบ 25% + Quartz 25% + Foldspar 25%
- M5 = ดินเหนียว CPD 25% + ดินขาวระยอง 25% + Quartz 25% + Feldspar 25%

#### 4.4.2 Casting Rate วัตโดย Plaster Mold

ผลการวัดความหนา โดยการหล่อใน plaster mold ณ เวลาต่างๆ ให้ผลสรุปดังแสดงในตารางที่ 20 และ 21 และกราฟ ในรูปที่ 43 และ 44 เมื่อเปรียบเทียบผลจากวิธีการวัดโดย Baroid filter จะมีความแตกต่างกันในค่าที่วัดค่อนข้างมาก ทั้งนี้ เนื่องจากสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน เช่น อัตราส่วนของ solid ต่อ น้ำ สภาวะคุณสมบัติของ plaster mold เป็นต้น อย่างไรก็ตามแนวโน้มความสัมพันธ์ต่างๆจะเป็นไปในแนวทางเดียวกับการวัดโดย Baroid filter

##### 4.4.2ก Casting Rate ของดินชนิดต่างๆ

ดังแสดงในรูปที่ 43 casting rate ของดินที่ศึกษาจะให้ผลคล้ายกับการวัดโดย Baroid filter กล่าวคือ

ดินขาวระนอง >> ดินด่านเกวียน > ดินเหนียว compound clay

แต่ค่า casting rate จากการวัดทั้งสองวิธีจะแตกต่างกันด้วยเหตุผลดังอธิบายข้างต้น

##### 4.4.2ข Casting Rate ของส่วนผสม

ดังแสดงในรูปที่ 44 casting rate ของส่วนผสมต่างๆ โดยเฉพาะเมื่อมี quartz และ feldspar จะแสดงผลและแนวโน้มที่แตกต่างจากการวัดโดย Baroid Filter ค่อนข้างมาก และมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นระบบ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการควบคุมสภาวะต่างๆในการทดลองไม่ดีพอ จึงไม่ขอสรุปอธิบายผลในการทดลองครั้งนี้จนกว่าจะทำการทดลองซ้ำเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลที่เชื่อถือได้มากขึ้น

#### 4.5 ผลการทดลองเกี่ยวกับตัวแปรในการควบคุมสมบัติของแบบหล่อ Plaster Mold

ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปร คือ อัตราส่วนของ น้ำ ต่อ plaster ( water:plaster ratio) และ สารเติมแต่ง (additives) ต่อคุณสมบัติทางกายภาพ คือ การดูดซึมน้ำ (water absorption) ความแข็งแรง (strength) และเวลาการแข็งตัว (setting time) รวมทั้ง microstructure อาจวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้ คือ

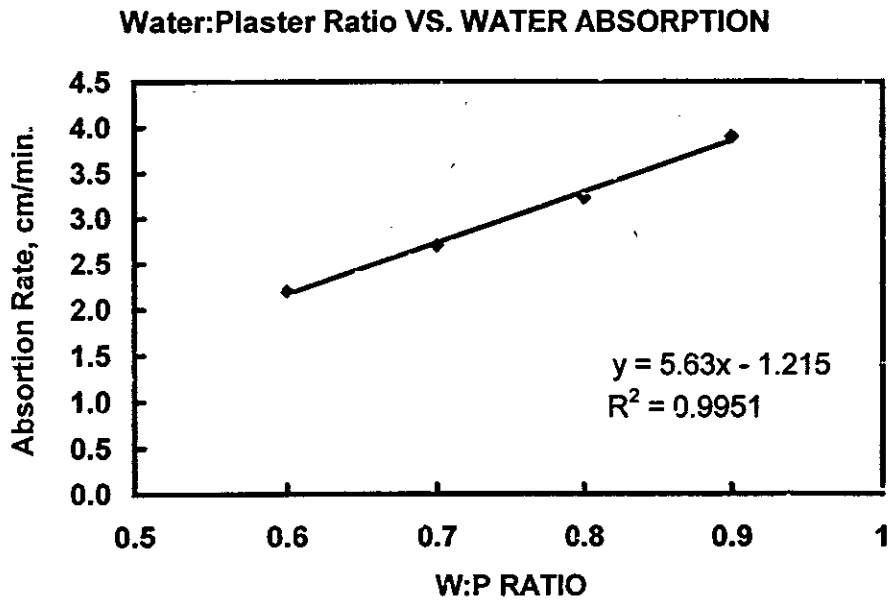
##### 4.5.1 การดูดซึมน้ำของ plaster ( Water Absorption)

ความสัมพันธ์ของ water:plaster ratio และ additives กับ water absorption ของ plaster เป็นดังแสดงในกราฟ รูปที่ 45 46 และ 47 ซึ่งอาจสรุปได้ คือ

##### 4.5.1ก ผลของ Water : Plaster Ratio

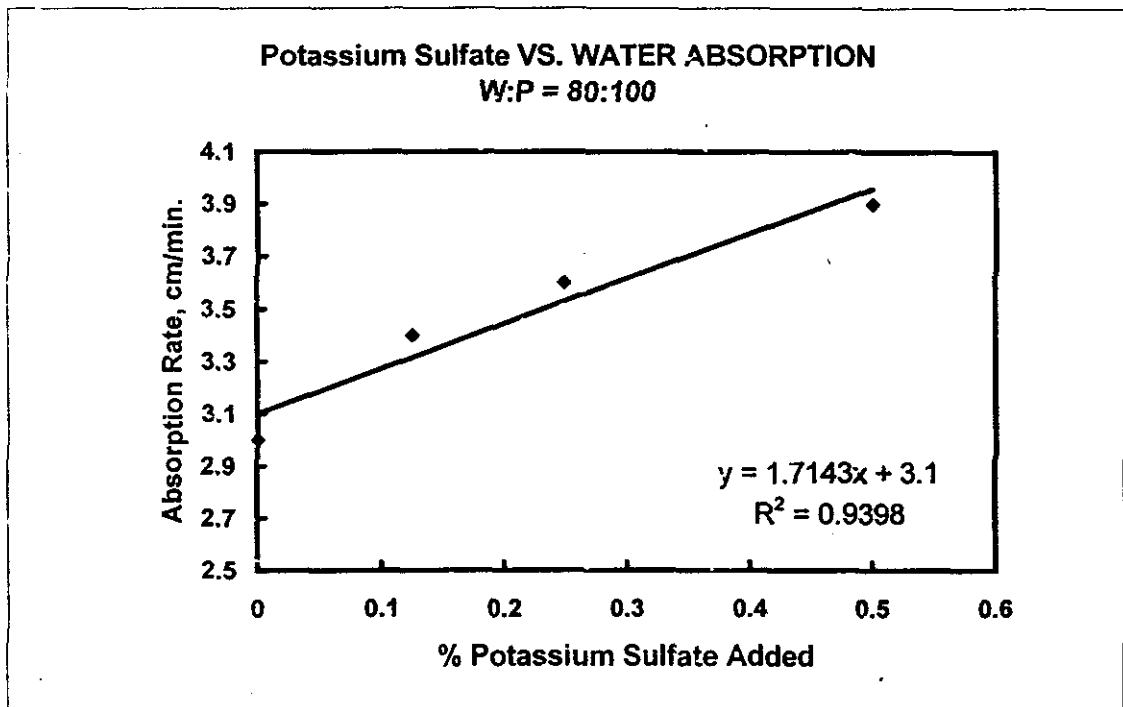
จากรูปที่ 45 จะเห็นว่า ถ้าเพิ่มปริมาณน้ำในการผสมทำปฏิกิริยากับปูน plaster อัตราการดูดซึมน้ำของปูน plaster จะเพิ่มขึ้นอย่างค่อนข้างเป็น linear

Water:Plaster Ratio	Absorption Rate cm/minute
0.60	2.2
0.70	2.7
0.80	3.2
0.90	3.9



รูปที่ 45 ผลของ Water : Plaster Ratio ต่อ Water Absorption ของ Plaster Mold

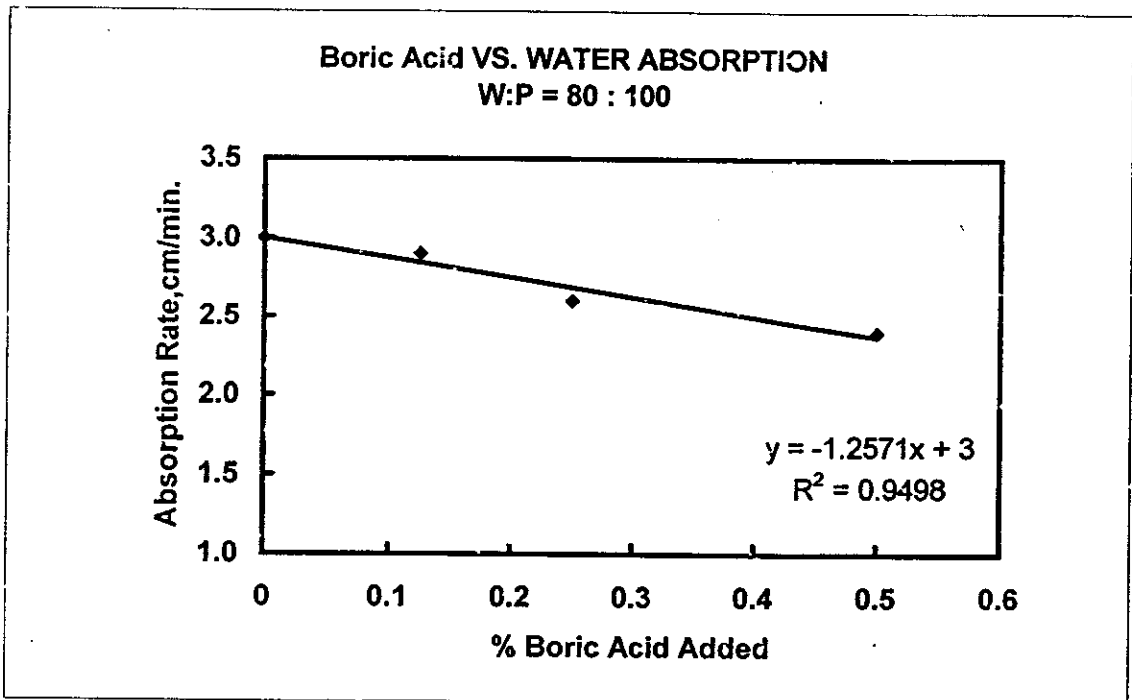
% Potassium Sulfate	Absorption Rate cm/minute
0.000	3.0
0.125	3.4
0.250	3.5
0.500	3.9



รูปที่ 46 ผลของปริมาณตัวเร่ง Potassium Sulfate ต่อ Water Absorption ของ Plaster ณ Water : Plaster ratio = 80 : 100 คม.



% Boric Acid	Absorption Rate cm/minute
0.000	3.0
0.125	2.9
0.250	2.6
0.500	2.4



รูปที่ 47 ผลของปริมาณตัวชะลอ Boric Acid ต่อ Water Absorption ของ Plaster  
ณ Water : Plaster ratio = 80 : 100 คงที่

ทั้งนี้เนื่องจาก free water ที่ระเหยออกจะทิ้งช่องว่างหรือรูพรุน (porosity) ไว้ ทำให้โครงสร้างเนื้อพลาสติกแข็งขึ้น เป็นผลให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ลักษณะจุลโครงสร้างจากการวิเคราะห์โดย SEM โดยทั่วไปแสดงช่องว่างรูพรุนในเนื้อพลาสติกมากขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในการผสมสูงขึ้น ผลดังกล่าวจะเป็นที่ทราบกันอยู่ทั่วไป แต่การทดลองครั้งนี้จะเป็นความพยายามเพื่อ quantify หาความสัมพันธ์ ในเชิงสมการเพื่อใช้ในการควบคุมและประมาณค่า

จากรูปที่ 45 ความสัมพันธ์ของค่า water absorption (WA) และ water : plaster ratio (WP) อาจเขียนเป็น empirical formula ได้ คือ

$$(WA) = 5.6 (WP) - 1.2$$

เมื่อ WA = Water Absorption หรือ Absorption Rate , cm / min.  
จากวิธีการวัดดังที่ระบุ

WP = Water : Plaster Ratio

ทั้งนี้ความสัมพันธ์ นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของปูนปลาสเตอร์ที่ใช้เป็นอย่างยิ่ง กล่าวคือ หากต้องการคำนวณประมาณค่า water absorption โดยเติมน้ำปริมาณต่างๆ แต่ใช้ปูนปลาสเตอร์ชนิดแตกต่างกันไป ต้องทดลองหาสมการความสัมพันธ์ใหม่โดยวิธีการที่กล่าวแล้วเพื่อการควบคุม

#### 4.5.1ข ผลของ Additives

ผลของสารเติมแต่ง (additives) ซึ่งมักใช้ในการปรับเวลาการแข็งตัวของพลาสติก ทั้งประเภท ตัวเร่ง (accelerator) และ ตัวชะลอ (retarder) ต่อ water absorption ของ พลาสติก เป็นดังแสดงในรูปที่ 46 และ 47 เมื่อใช้ water : plaster ratio คงที่ เท่ากับ 80:100 โดยน้ำหนัก

กรณี accelerator ,  $K_2SO_4$

รูปที่ 46 แสดงว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งเวลาแข็งตัว จะทำให้การดูดซึมน้ำของพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างมาก ปกติตัวเร่ง เช่น potassium sulfate จะไปเร่งการละลายของ plaster hemihydrate ( $CaSO_4 \cdot 0.5 H_2O$ ) และการอัตราการตกผลึก (crystallization) ของ gypsum dihydrate ( $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$ ) ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยานี้อาจทำให้ผลึกรูปเข็มของ gypsum มีเวลาการเรียงสานตัวกันแน่นเป็นระเบียบน้อยลง เป็นผลให้โครงสร้างโปร่งขึ้นและ water absorption เพิ่มขึ้น การวิเคราะห์ microstructure ด้วย SEM ให้ผลเกี่ยวกับการเรียงตัวของผลึกไม่ชัดเจนนัก แต่โดยทั่วไปจะพบว่า การเรียงสานตัวของผลึกจะโปร่งขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า

รูปร่าง ( morphology ) ของผลึก gypsum เมื่อเติม additive จะมีขนาดหรือความสมบูรณ์ น้อยกว่าปกติ

กรณี retarder ,  $H_3BO_3$

รูปที่ 47 แสดงว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวชะลอ จะทำให้การดูดซับของปลาสเตอร์เปลี่ยนไป ซึ่งในกรณี boric acid จะมีผลทำให้ water absorption ลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการชะลอปฏิกิริยาการตกผลึกของ gypsum โดย boric acid ทำให้ morphology และการเรียงตัวของผลึกเปลี่ยนไป การวิเคราะห์ microstructure โดย SEM ไม่ให้ผลที่เด่นชัดเพื่อการอธิบาย ในการทดลองครั้งนี้ยังไม่มีคำอธิบายที่แน่ชัดเกี่ยวกับปรากฏการณ์นี้เพราะต้องอาศัยการศึกษาการพัฒนาของ microstructure ในระยะต่างๆของปฏิกิริยาโดยละเอียดต่อไปในการวิจัยในอนาคต

#### 4.5.2 ความแข็งแรงของปลาสเตอร์ ( Strength )

ความสัมพันธ์ของ water:plaster ratio และ additives กับ strength ของ plaster เป็นดังแสดงในกราฟ รูปที่ 48 49 และ 50 ซึ่งอาจสรุปได้ดังนี้ คือ

##### 4.5.2ก ผลของ Water : Plaster Ratio

จากรูปที่ 48 จะเห็นว่า ถ้าเพิ่มปริมาณน้ำในการผสมทำปฏิกิริยากับปูนปลาสเตอร์ ค่าความแข็งแรง (MOR) ของปลาสเตอร์จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจาก free water ที่ระเหยออกจะทำให้ปริมาณรูพรุน (porosity) เพิ่มขึ้นและโครงสร้างเนื้อปลาสเตอร์รับแรงได้น้อยลง ลักษณะจุลโครงสร้างจากการวิเคราะห์โดย SEM โดยทั่วไปแสดงช่องว่างรูพรุนในเนื้อปลาสเตอร์มากขึ้นเมื่อปริมาณน้ำในการผสมสูงขึ้น

จากรูปที่ 48 ความสัมพันธ์ของค่า Strength และ water : plaster ratio ค่อนข้างเป็น linear และ อาจเขียนเป็น empirical formula ได้ คือ

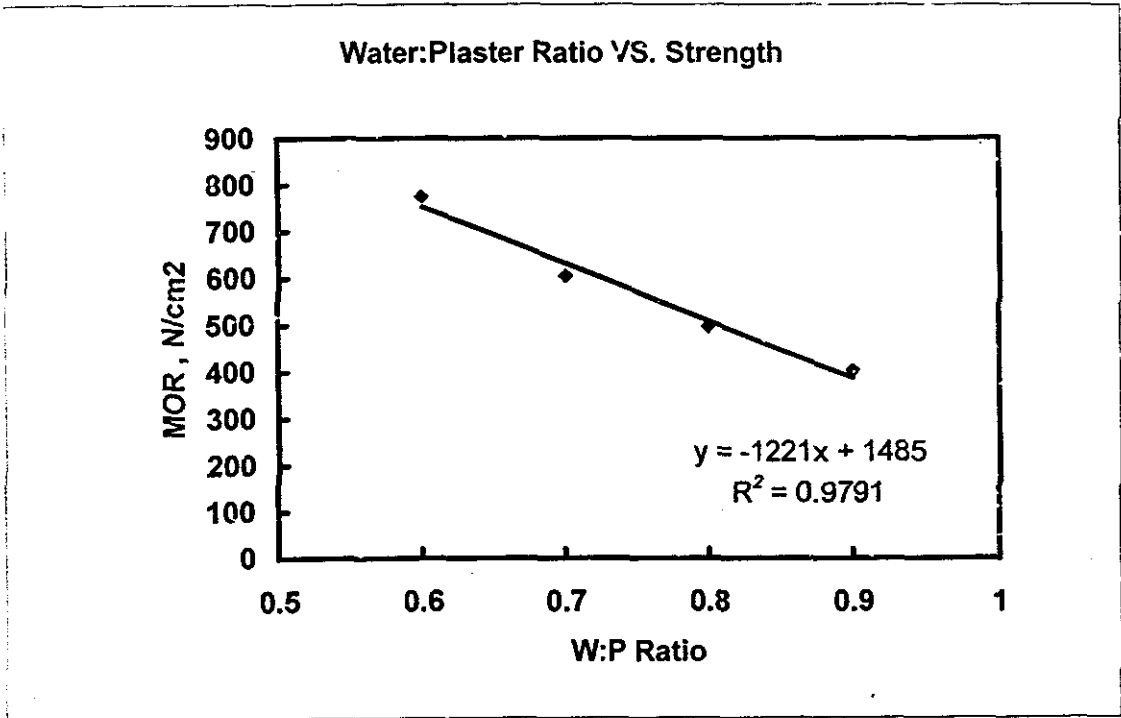
$$(MOR) = 1485 - 1221 (WP)$$

เมื่อ MOR = Modulus of Rupture , N /cm<sup>2</sup>

WP = Water : Plaster Ratio ( by wt. )

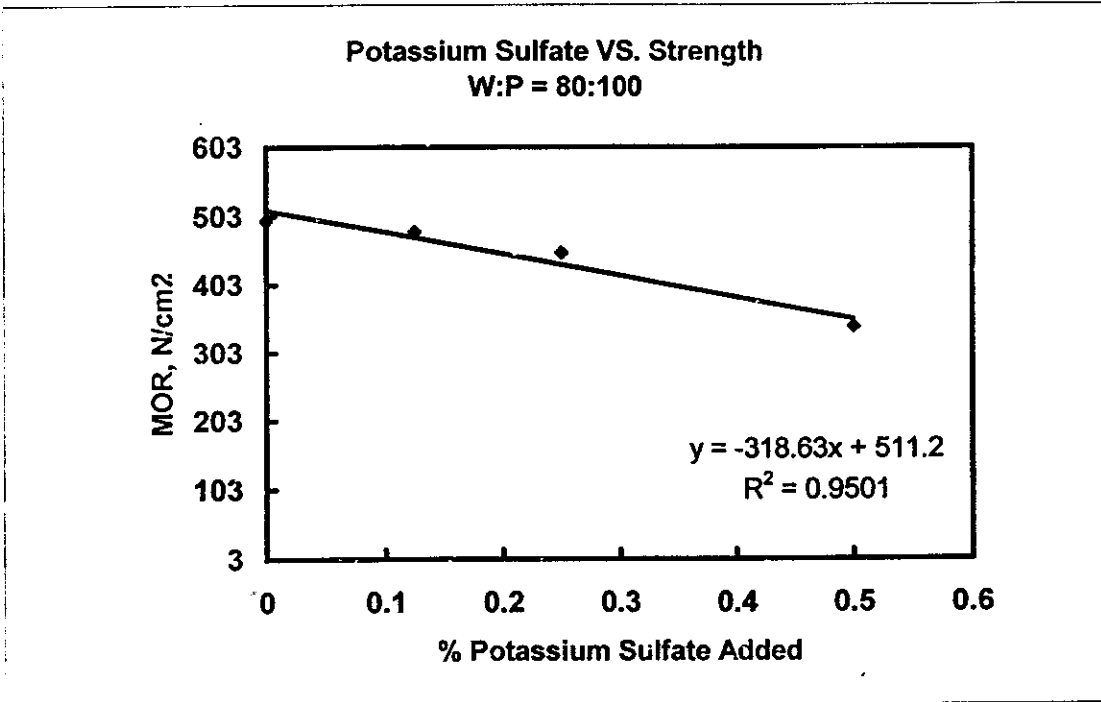
ทั้งนี้ความสัมพันธ์ จะขึ้นอยู่กับชนิดของปูนปลาสเตอร์ที่ใช้เป็นอย่างไร กล่าวคือ หากต้องการคำนวณประมาณค่า strength (MOR) โดยเติมน้ำปริมาณต่างๆ แต่ใช้ปูนปลาสเตอร์ชนิดแตกต่างกันไป ต้องทดลองหาสมการความสัมพันธ์ใหม่โดยวิธีการที่กล่าวแล้วเพื่อการควบคุม

Water:Plaster Ratio	Modulus of Rupture N/cm <sup>2</sup>
0.60	774
0.70	604
0.80	496
0.90	403



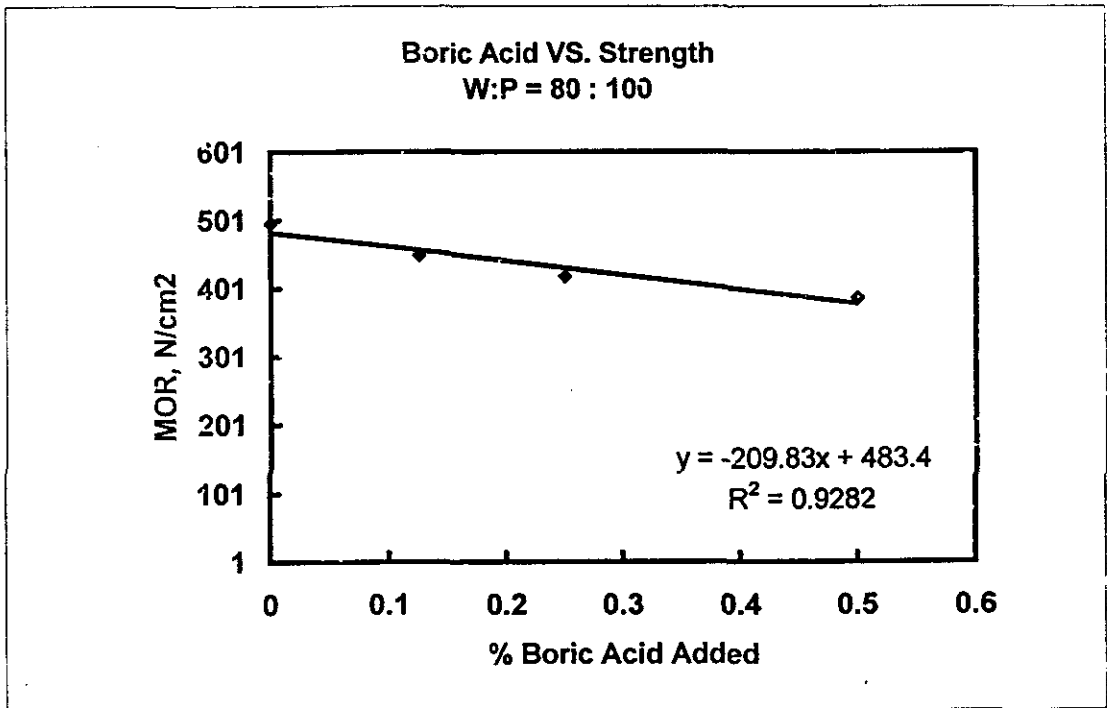
รูปที่ 48 ผลของ Water : Plaster Ratio ต่อ Strength ของ Plaster

% Potassium Sulfate	Modulus of Rupture N/cm <sup>2</sup>
0.000	496
0.125	480
0.250	449
0.500	341



รูปที่ 49 ผลของปริมาณตัวเร่ง Potassium Sulfate ต่อ Strength ของ Plaster Mold  
ณ Water : Plaster ratio = 80 : 100 คงที่

% Boric Acid	Modulus of Rupture N/cm <sup>2</sup>
0.000	496
0.125	449
0.250	418
0.500	387



รูปที่ 50 ผลของปริมาณตัวชะลอ Boric Acid ต่อ Strength ของ Plaster  
ณ Water : Plaster ratio = 80 : 100 คงที่

#### 4.5.2ข ผลของ Additives

ผลของสารเติมแต่ง (additives) ต่อ strength ของ ปลาสเตอร์ เป็นดังแสดงในรูปที่ 49 และ 50 เมื่อใช้ water : plaster ratio คงที่ เท่ากับ 80:100 โดยน้ำหนัก

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 49 และ 50 แสดงว่าการใช้ additives ไม่ว่าประเภท ตัวเร่ง (accelerator) คือ  $K_2SO_4$  หรือ ตัวชะลอ (retarder) คือ Boric acid มีผลทำให้ความแข็งแรงของ ปลาสเตอร์ลดลง โดย potassium sulfate มีผลให้ strength ลดลงมากกว่า boric acid ทั้งนี้อาจเนื่องจาก additives มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของผลึกและการเรียงตัว ทำให้การรับน้ำหนักลดลง

#### 4.5.3 เวลาการแข็งตัวของปลาสเตอร์ ( Setting Time )

ความสัมพันธ์ของ water:plaster ratio และ additives กับ setting time ของปลาสเตอร์ เป็นดังแสดงในกราฟที่ รูปที่ 51 52 และ 53 ซึ่งอาจสรุปได้ คือ

##### 4.5.3ก ผลของ Water : Plaster Ratio

จากรูปที่ 51 จะเห็นว่า ถ้าเพิ่มปริมาณน้ำในการผสมทำปฏิกิริยากับปูนปลาสเตอร์ เวลาการแข็งตัวของปูนปลาสเตอร์จะเพิ่มขึ้นทั้ง initial และ final setting time โดยจะมีผลอย่างมากต่อ final setting time ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ free water ที่เพิ่มจะทำให้การอิมตัวของ solution ในระบบ การตกผลึก รวมถึงการสานตัวของผลึกช้าลง

##### 4.5.3ข ผลของ Additives

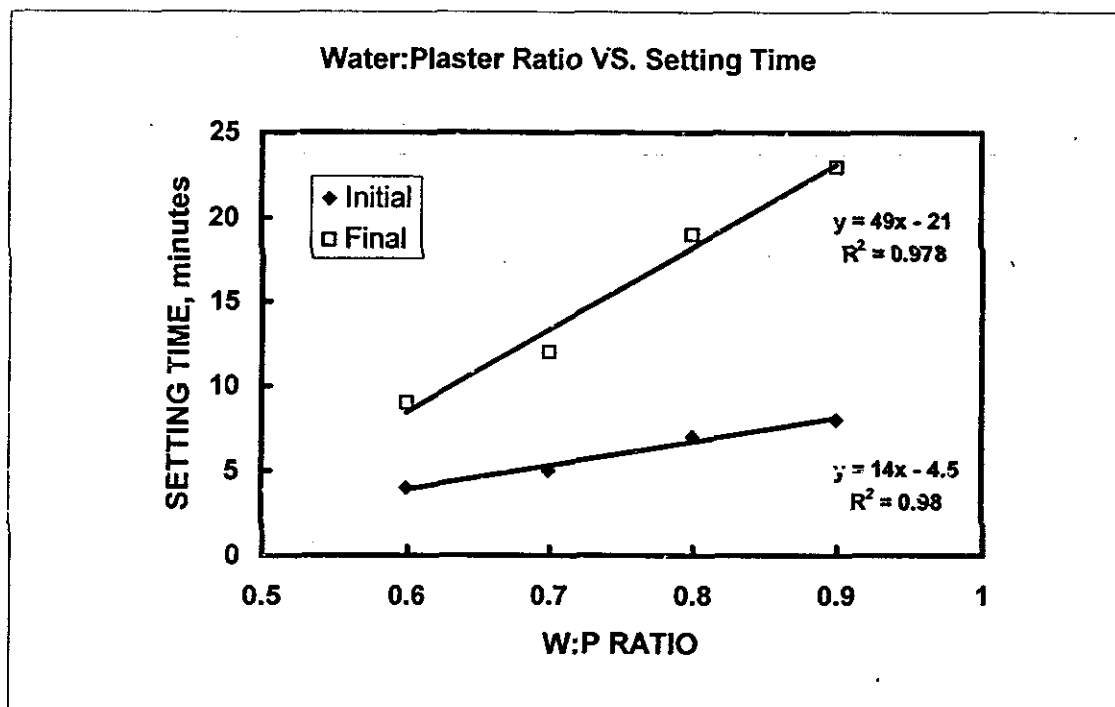
ผลของสารเติมแต่ง (additives) ต่อ setting time ของ ปลาสเตอร์ เป็นดังแสดงในรูปที่ 52 และ 53 เมื่อใช้ water : plaster ratio คงที่ เท่ากับ 80:100 โดยน้ำหนัก

Potassium Sulfate ;  $K_2SO_4$  , ซึ่งเป็น accelerator ที่ใช้กันทั่วไป ซึ่งจะเร่งปฏิกิริยาการตกผลึกของ gypsum จากการเพิ่มอัตราการละลาย (solubility) ของ plaster ในน้ำมีผลค่อนข้างมากต่อ final setting time

Boric acid,  $H_3BO_3$  , ซึ่งเป็น retarder มีผลไม่มากนักต่อ initial setting time แต่จะมีผลมากกว่าต่อ final setting time

โดยทั่วไป การใช้ additives จะต้องใช้ด้วยความระมัดระวังเป็นอย่างยิ่งโดยเฉพาะการปรับ Initial setting time ถ้าเร่งปฏิกิริยาเร็วเกินไป จะทำให้เวลาในการทำงานและการผสมเทแบบไม่เพียงพอ

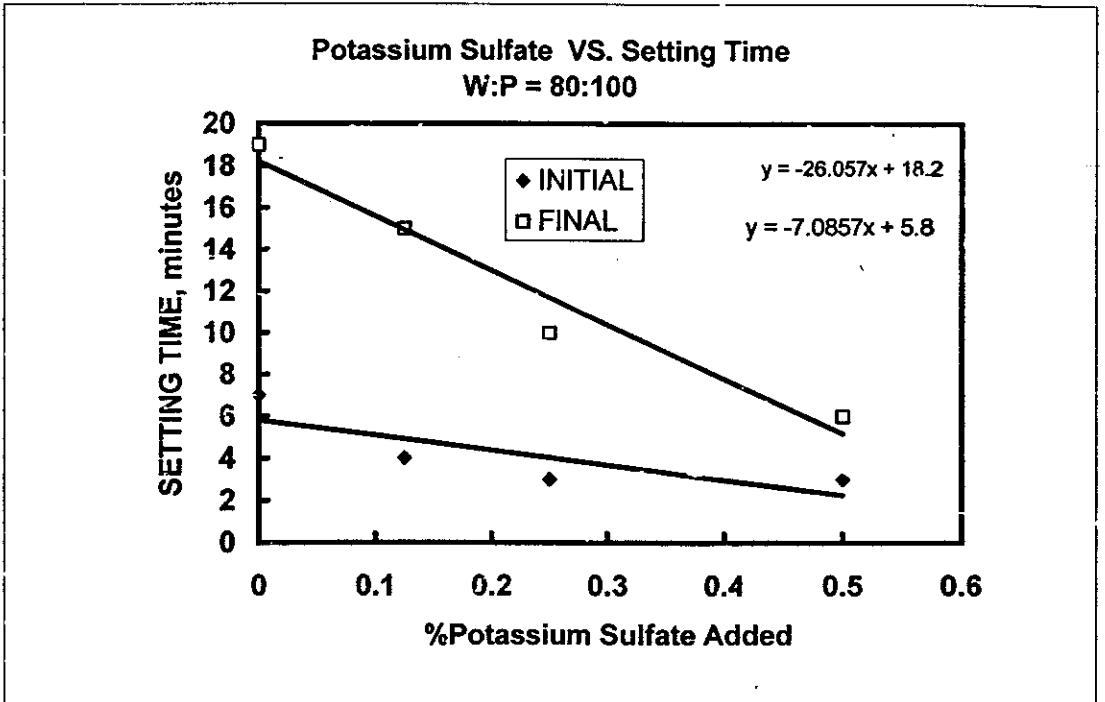
Water:Plaster Ratio	Initial Setting Time minutes	Final Setting Time minutes
0.60	4	9
0.70	5	12
0.80	7	19
0.90	8	23



รูปที่ 51 ผลของ Water : Plaster Ratio ต่อ Setting Time ของ Plaster

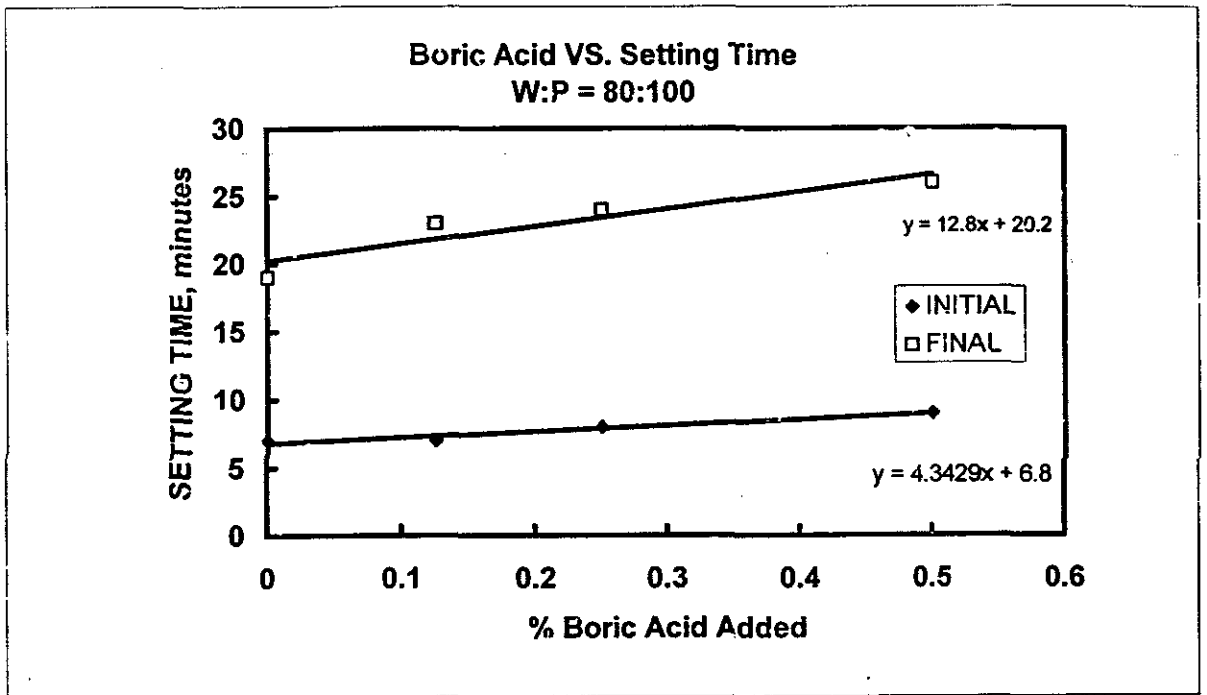


% Potassium Sulfate	Initial Setting Time minutes	Final Setting Time minutes
0.000	7	19
0.125	4	15
0.250	3	10
0.500	3	6



รูปที่ 52 ผลของปริมาณตัวเร่ง Potassium Sulfate ต่อ Setting Time ของ Plaster ณ Water : Plaster Ratio = 80:100 คงที่

% Boric Acid	Initial Setting Time minutes	Final Setting Time minutes
0.000	7	19
0.125	7	23
0.250	8	24
0.500	9	26



รูปที่ 53 ผลของปริมาณตัวชะลอ Boric Acid ต่อ Setting Time ของ Plaster  
ณ Water : Plaster Ratio = 80:100 คงที่

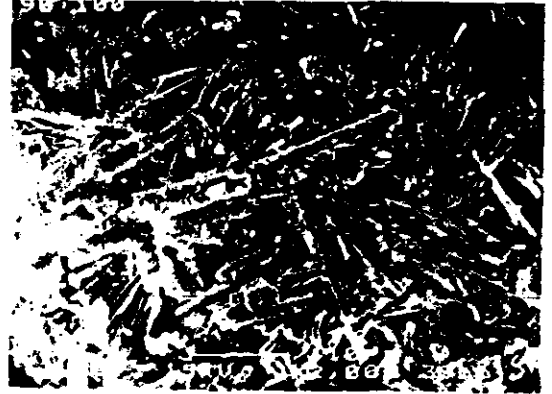
#### 4.5.4 Microstructure ของปลาสเตอร์

ผลการศึกษา microstructure ของตัวอย่าง plaster ที่ทำการทดลองโดย SEM มีดังแสดง ในรูป ที่ 54 และ 55

ผลจากการวิเคราะห์ ลักษณะและขนาดของผลึก gypsum รวมถึงการสานเรียงตัวของผลึกเพื่อประกอบการอธิบายถึงคุณสมบัติไม่ให้ผลที่สรุปได้อย่างชัดเจน จึงไม่ขอสรุปผลในการทดลองครั้งนี้ จนกว่าจะมีการศึกษาโดยละเอียดในอนาคตอีกครั้ง  
หนึ่ง



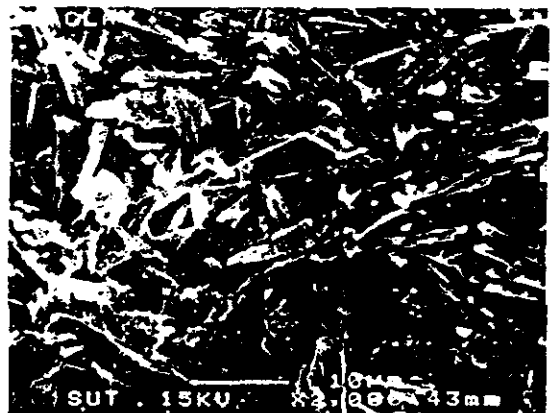
รูป a) W:P = 60:100



รูป b) W:P = 70:100



รูป c) W:P = 80:100

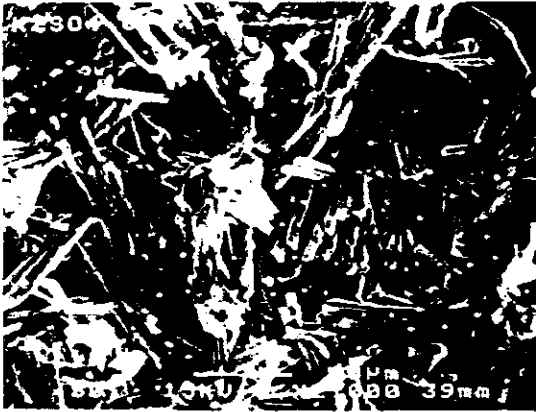
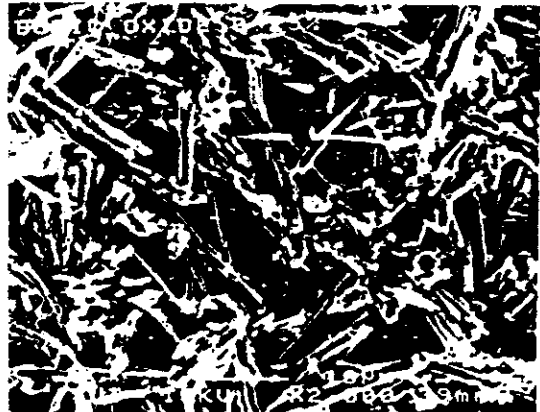


รูป d) W:P = 90:100

รูปที่ 54

ลักษณะ Microstructure ของ Plaster ที่ผสมด้วยอัตราส่วนของน้ำต่อ  
 ปลาสเตอร์ (W:P Ratios) ต่างๆกัน ตั้งแต่ 0.60 ถึง 0.90 [ รูป a) ถึง d) ]  
 ตามลำดับ โดยทั่วไปโครงสร้างผลึกเข็มของ gypsum จะโปร่งขึ้น  
 เมื่อเพิ่ม W:P Ratio

วิเคราะห์โดย SEM ที่กำลังขยาย 2,000X 15 kV

รูป a) Plaster +  $K_2SO_4$  0.5%รูป b) Plaster +  $K_2SO_4$  0.125%รูป c) Plaster +  $H_3BO_3$  0.5%รูป d) Plaster +  $H_3BO_3$  0.125%

- รูปที่ 55 ลักษณะ Microstructure ของ Plaster ที่เติม Additives เป็นปริมาณต่างๆ อัตราส่วนของน้ำ ต่อ ปลาสเตอร์ (W:P Ratios) คงที่ = 0.80 โดยทั่วไปโครงสร้างผลึกเข็มของ gypsum จะโปร่งขึ้น เมื่อเพิ่ม Additives ทั้ง accelerator ( $K_2SO_4$ ) และ retarder ( $H_3BO_3$ ) วิเคราะห์โดย SEM ที่กำลังขยาย 2,000X 15 kV

## บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆเกี่ยวกับวัตถุดิบ ส่วนผสม และ แบบ ปลายเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการหล่อ (casting rate) ในระบบการขึ้นรูปแบบ slip casting ดังวิจารณ์ในบทที่ 4 อาจสรุปได้ดังนี้ คือ

- ก. ลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบ เช่น ขนาดอนุภาค ซึ่งมีผลต่อการเรียงตัว (particle packing) ของอนุภาคขณะหล่อและมีผลโดยตรงต่อ permeability ของชั้นเนื้อส่วนผสม จะมีความสัมพันธ์กับ casting rate อย่างใกล้ชิด ดิน ซึ่งมีค่า permeability สูง เช่น ดินขาวระนอง จะให้ casting rate เร็ว เนื่องจากน้ำสามารถแพร่ผ่านไปยังแบบปลายเตอร์ได้เร็ว ในขณะที่ดินที่มี permeability ต่ำ เช่น ดินด่านเกวียน หรือ ดินเหนียว CPD จะให้ casting rate ที่ช้ากว่ามาก ดังนั้นถ้าสามารถวัดค่า permeability ของดินหรือวัตถุดิบได้ อัตรา casting rate ในระบบการหล่อ จะสามารถปรับหรือควบคุม ได้โดยผสมวัตถุดิบที่มีค่า permeability ต่างๆกันในอัตราที่เหมาะสม

จากการวัด casting rate และ permeability จะพบว่ามีความสัมพันธ์ เป็นสมการเส้นตรง ซึ่งสามารถเขียนในรูปทั่วไปเป็น Empirical Formula ได้ คือ

$$\text{Casting Rate (R)} = a [\text{Permeability}] + b$$

เมื่อ  $a$  = slope ของเส้นกราฟท์

$b$  = จุดตัด (intercept) ของเส้นกราฟท์

ค่าของ  $a$  และ  $b$  จะขึ้นกับระบบของวัตถุดิบและวิธีการวัด  
ดังตัวอย่างในรูปที่ 40 และ 41

ดินซึ่งมี plasticity สูง และ casting rate ช้า เช่น ดินด่านเกวียน อาจปรับให้มี casting rate พอเหมาะกับกระบวนการได้ โดยการผสมดินขาวระนองในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อปรับค่า permeability

จากผลการทดลอง ในสภาวะการผลิตจริง ถ้าทราบค่า permeability ของวัตถุดิบหรือ ส่วนผสม จากการวัดและทดลอง การปรับค่าอัตราการผลิตจะสามารถควบคุมได้ง่ายและเป็นระบบมากขึ้น รวมถึงการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบก็จะสามารถทำได้ง่ายขึ้น และสามารถควบคุมได้อย่างใกล้ชิดขึ้น

ข. สาร deflocculants ที่เติมในน้ำ slip จะมีผลต่อ permeability และ casting rate ของดิน ทั้งในแง่เพิ่มและลด permeability ของดิน ทั้งนี้จะขึ้นกับ ชนิดและลักษณะเฉพาะของดินที่ใช้เป็นหลัก เช่น deflocculants จะทำให้ permeability ของดินขาวระนองลดลง ในขณะที่ทำให้ permeability ของดินที่มี plasticity สูง เช่น ดินด่านเกวียนหรือ ดินเหนียว CPD สูงขึ้น ทั้งนี้ ผลจาก deflocculants ต่อ permeability จะเป็นไปในแนวเดียวกัน ไม่ว่าจะ ใช้ deflocculant ประเภทใด

ค. สำหรับการควบคุมแบบป्लाสเตอร์สำหรับการหล่อ ค่าการดูดซึมน้ำและความแข็งแรงจะแปรผันตาม ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหล่อ (water:plaster ratio) เป็นหลัก ทั้งค่า water absorption และ strength ของป्लाสเตอร์ จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ water:plaster ratio ดังรูปที่ 45 และ 48 จนสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการเส้นตรงได้ ซึ่งในสภาวะของการทดลองและชนิดของป्लाสเตอร์ที่ใช้ครั้งนี้

$$\text{Water Absorption} = 5.6(\text{Water/Plaster}) - 1.2$$

และ

$$\text{Strength (MOR)} = 1485 - 1221 (\text{Water/Plaster})$$

ความสัมพันธ์ในลักษณะนี้จะสามารถใช้ในการควบคุมคุณสมบัติของแบบป्लाสเตอร์ได้ง่ายและเป็นระบบขึ้น ทั้งนี้การสร้างความสัมพันธ์ในการควบคุมจะต้องทดลองใหม่ให้เหมาะสมกับชนิดของป्लाสเตอร์และระบบในโรงงานอีกครั้งหนึ่ง

ง. การใช้สารเติมแต่งต่างๆ เพื่อปรับเวลาในการแข็งตัวของป्लाสเตอร์ขณะผสมเตรียมแบบ จะต้องทำด้วยความระมัดระวังทั้งชนิดตั้งเร่ง accelerator และตัวชะลอ retarder เนื่องจากจะทำให้ ค่า strength ของป्लाสเตอร์ลดลง และมีผลต่อ water absorption ด้วย กล่าว คือ accelerator ที่ศึกษา ( $K_2SO_4$ ) จะเพิ่ม water adsorption ในขณะที่ retarder ( $H_3BO_3$ ) จะลด water absorption ของป्लाสเตอร์

## ข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยครั้งนี้ คือ ความพยายามที่จะหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในระบบการขึ้นรูปแบบ slip casting และรวมความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ สร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ที่สามารถประยุกต์กับกระบวนการผลิตได้ ทั้งนี้เพื่อใช้ในการคำนวณประมาณอัตราการผลิตเพื่อการพัฒนา ปรับปรุงและควบคุม ตัวแปรเหล่านี้มีหลากหลายทั้งที่เกี่ยวกับวัตถุดิบ ส่วนผสม และกระบวนการ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันอย่างซับซ้อนมาก ผลจากการทดลองวิจัยครั้งนี้เป็นเพียงส่วนย่อยส่วนหนึ่งในการหาความสัมพันธ์โดยเน้นลักษณะของวัตถุดิบและส่วนผสมบางชนิดเท่านั้น และยังมีได้ทำต่อเนื่องถึงคุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ดังเช่น การหดตัวหลังอบแห้ง ความหนาแน่นของชิ้นงาน ความแข็งแรงหลังอบแห้งและเผา ฯลฯ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งเช่นกัน ดังนั้นการทดลองวิจัยในอนาคตเพื่อรวบรวมตัวแปรทั้งหมดในกระบวนการ จึงยังมีอีกมาก นอกจากนี้คำอธิบายเกี่ยวกับผลของตัวแปรต่างๆ ทางทฤษฎีที่ชัดเจนยังต้องอาศัยการวิเคราะห์โดยเครื่องมือขั้นสูงโดยละเอียดต่อไป

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยที่เกี่ยวกับระบบ slip casting ในอนาคต ได้แก่

1. การศึกษาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบโดยละเอียดเพื่อหาความสัมพันธ์ที่เด่นชัดกับอัตราการหล่อ อันได้แก่ ขนาดอนุภาคและการกระจายของอนุภาคโดยเฉพาะขนาดใน colloidal size range particle shape ส่วนประกอบทางเคมี สิ่งปลอมปน ฯลฯ
2. การศึกษาผลของ deflocculant ต่อวัตถุดิบชนิดต่างๆ โดยการวัดค่า zeta potential
3. การศึกษา microstructure ของโครงสร้างเนื้อส่วนผสมต่างๆ และการเรียงตัวโดยละเอียดด้วยเทคนิค SEM และหา pore size และ distribution ของโครงสร้าง (cast structure) โดย mercury porosimeter เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ที่เด่นชัดกับ permeability และ casting rate
4. ศึกษาผลของวัตถุดิบและส่วนผสม กับสมบัติของชิ้นงานจากการหล่อ เพื่อพิจารณาความเหมาะสมสอดคล้องกับกระบวนการผลิตขั้นต่อไป เช่น การหดตัวหลังอบแห้งและเผา ความแข็งแรง (green strength) ฯลฯ
5. ศึกษาผลของแบบพลาสติกในการหล่อ (plaster mold) โดยละเอียดมากขึ้น เช่น ด้าน microstructure การเรียงตัวของผลึก ผลต่อแรงดุดของแบบและความแข็งแรง ชนิดของพลาสติกประเภท alpha และ beta ฯลฯ รวมถึงการศึกษาพัฒนาแบบประเภทอื่นๆ เช่น resin mold ต่อไป
6. พัฒนาเนื้อส่วนผสมสำหรับการขึ้นรูปแบบ slip casting พร้อมระบบเครื่องจักร อุปกรณ์การผลิตและควบคุม สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา ด้านแก้ว เพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมท้องถิ่น
7. ในการวิจัยครั้งนี้ จะสามารถหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเป็นสมการได้ทีละ 2 ตัวแปร แต่ยังไม่สามารถรวมตัวแปรต่างๆ เข้าเป็นสมการเดียวกันได้อย่างถูกต้องแสดงว่าการควบคุมการทดลองยังไม่สอดคล้องเกี่ยวเนื่องกันดีพอ



- จึงควรทำวิจัยเพิ่มเติมเพื่อรวมตัวแปรทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับ casting rate เป็นสมการเดียว พร้อมคำอธิบายทางทฤษฎีที่ถูกต้องมากขึ้น
8. ควรพัฒนาการขึ้นรูปด้วยระบบการหล่อแบบอื่นๆ ในอนาคต ดังเช่น ระบบ pressure casting ระบบ ultrasonic casting ระบบการอบแบบพลาสติกให้เร็วขึ้นด้วยคลื่น microwave ฯลฯ เป็นต้น
  9. ศึกษากระบวนการหล่อชิ้นส่วนประเภท advanced ceramic ซึ่งวัตถุดิบเป็นพวก non-plastic และหา additives ที่เหมาะสมในแต่ละระบบ

โดยสรุปถึงแม้ระบบ slip casting จะเป็นระบบการผลิตที่ใช้มานาน แต่ยังมีสิ่งที่ต้องศึกษา ทำความเข้าใจอีกมาก เพื่อการปรับปรุง ความคุมและพัฒนากระบวนการให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

## บรรณานุกรม

1. เอกสารกรรมวิธีการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ดินเผาเคลือบ บริษัทเครื่องสุขภัณฑ์อเมริกันสแตนดาร์ด (ประเทศไทย) จำกัด
2. G. Pouskouleli and T.A.Wheat, *Statistical Design in Ceramics: I. Role of Statistics in Materials development and Production*, J. Canadian Ceramic Society, 59(4) 41-46, 1990.
3. G. Pouskouleli and T.A.Wheat, *Statistical Design in Ceramics: I. Role of Statistics in Materials development and Production*, J. Canadian Ceramic Society, 59(4) 41-46, 1990.
4. R. Herrmann, *Slip Casting in Practice*, Interceram Monograph, No. 1.4.2.1, 1-6, 1989.
5. G.W. Phelps, *Slip Casting*, Interceram Monograph, No. 1.4.2, 1-9, 1982
6. R.A. McCauley, *Rheology*, Interceram Monograph, No. 3.3.2, 1-7, 1983
7. W. Knotts, *Trends in Slip Casting Sanitaryware*, Ceramic Bulletin, 71(2), 185-186, 1992
8. P. Rado, *Slip Casting of Non-clay Ceramics*, Interceram No.4, 34-37, 1987
9. E.G. Blanchard, *Pressure casting Improves Productivity*, Ceramic Bulletin. 67(10), 1680-1683, 1988
10. D.S. Adcock and I.C. McDowall, *The Mechanism of Filter Pressing and Slip Casting*, J.American Ceram. Soc., 40(10) 355-361, 1957
11. K. Hauswurz, *Pressure Casting in Sanitaryware Production-Trend Setter for Structural Change*, Interceram , 43(3), 174-176, 1994
12. D. Luchs, *Pressure Casting-A New Dimension*, Interceram No.4, 42-44, 1985
13. R.J. Akers, *Zeta Potential and the Use of the Electrophoretic Mass Transport Analyser*, American Laboratory, June, 1972
14. T.J. Fennelly and J.S. Reed, *Compression Permeability of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Cakes Formed by Pressure Slip Casting*, 55(8), 381-385, 1972

15. G.W. Phelps and S.G. Maguire, Jr., Water as a Ceramic Raw Material, Ceramic Bulletin, 35(11), 422-426, 1956
16. A.L. Johnson and F.H. Norton, Fundamental Study of Clay, II Mechanism of Deflocculation in the Clay-Water System, 24(6), 189-203, 1941
17. J.S. Reed, Ceramic Fabrication Principles ; Permeability, Casting Rate Cast Density, New York State College of Ceramics, Alfred, New York USA. 1980
18. Treatise on Materials Science and technology Vol.9 ; Ceramic Fabrication Process, Slip Casting, p. 154-169, edited by F.F.Y. Wang, Academic Press, Inc., 1976
19. S.M. Leese and S.G. Maguire, Effect of Organics in Casting Slip, American Ceram. Soc. Bull., 75(9) 66-68, 1996
20. P. Rado, Slip-Casting of Non-Clay Ceramics, Interceram No.4, 34-37, 1987

## ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

ดร.วีระยุทธ ลอประยูร

### ประวัติการศึกษา

- 2512 - 2516 วท.บ. เคมีเทคนิค สาขาเทคโนโลยีเซรามิก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
2517 - 2519 M.S. in Ceramic Engineering, New York State College of Ceramics,  
Alfred, New York, U.S.A.  
2519 - 2523 Ph.D. in Ceramic Sciences, New York State College of Ceramic,  
Alfred, New York, U.S.A.

### ประวัติการทำงาน

- 2523 - 2524 Research, Postdoctoral Fellowship, Chemistry and Chemical  
Engineering Department, Michigan Technological University,  
Michigan, U.S.A.  
2524 - 2533 หัวหน้าการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์,กิจการวัสดุทนไฟ, บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย  
จำกัด  
2533 - 2540 หัวหน้าการวิจัย เซรามิกและวัสดุทนไฟ, ศูนย์วิจัยและพัฒนา (กรุงเทพฯ)  
บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด  
2540-ปัจจุบัน หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีสุรนารี

### สาขาที่มีความชำนาญพิเศษ

- ④ Refractories and Ceramic Materials for High Temperature application
- ④ Activated Clays
- ④ Phase Analysis of Cement Materials
- ④ Ceramic Construction Materials
- ④ Wear Resistant and High Strength Ceramics

### ประสบการณ์งานวิจัย

- ④ Postdoctoral Fellowships, Michigan Technological University, USA
  - 0 Laser raman Study of Coal-Diesel Particulate
  - 0 DSC Study of Calcium Doped Nickel Oxides
  - 0 Raman and Infrared Spectra, and X-ray Crystal Structure of  
Trans-di-ter-Butyl Hyponitrite
  - 0 TGA and DTA Study of Coals
  - 0 Electrical Conductivity of Nickel Oxides

- ④ R&D Manager, บริษัท สยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ เครื่องซิเมนต์ไทย
  - 0 Research and Production Development, and Technology Transfer in Refractory Materials and processes
- ④ Head of Ceramic Research Group, R&D Center บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย
  - 0 Development of Ceramic Construction Materials
  - 0 Development of New Ceramic Products
  - 0 Development of Raw Materials and Processes for Ceramics
  - 0 Characterization and Problem Solving in Ceramics