

การใช้ประโยชน์ผงแร่เหลือทิ้งในอีพอกซีเคลือบผิวพื้นโรงงานอุตสาหกรรม



นายธีระพงษ์ บัวศรี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF MINERAL POWDER WASTES  
IN INDUSTRIAL FLOOR COATING EPOXY



Mr. Theeraphong Buasri

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Georesources Engineering  
Department of Mining and Petroleum Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2010  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้ประโยชน์ผงแร่เหลือทิ้งในอิพอกซีเคลือบผิวพื้น  
โรงงานอุตสาหกรรม

โดย

นายธีระพงษ์ บัวศรี

สาขาวิชา

วิศวกรรมทรัพยากรธรณี

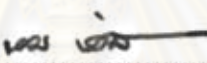
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวิตย์ วิวรรณะเดช


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทรฉาย ทองปิ่น

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरุญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภิญโญ มีชำนะ)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาวิตย์ วิวรรณะเดช)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทรฉาย ทองปิ่น)

  
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทียนไชย ตันไทย)

ธีระพงษ์ บัวศรี : การใช้ประโยชน์ผงแร่เหลือทิ้งในอีพอกซีเคลือบผิวพื้นโรงงาน  
อุตสาหกรรม. (UTILIZATION OF MINERAL POWDER WASTES IN INDUSTRIAL  
FLOOR COATING EPOXY) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ดาวัลย์ วิจารณ์ระ  
เดช, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น, 58 หน้า.

การใช้ประโยชน์ของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแร่ จะนำมาซึ่งข้อได้เปรียบทั้งเชิง  
เศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม ในการศึกษาครั้งนี้จึงทดลองนำผงหินปูน ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากโรงโม่  
หินและผงแกรนิตซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากโรงตัดแต่งหินแกรนิต มาใช้เป็นสารเติมแต่ง ทดแทน  
การใช้ผงทรายในอีพอกซีเรซินเคลือบผิวพื้นโรงงาน แล้วทดสอบเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล ซึ่ง  
ได้แก่ ความทนต่อแรงกระแทก ความแข็ง และความทนต่อแรงกดอัด ผลการศึกษาพบว่าสมบัติ  
เชิงกลของอีพอกซีเรซินสูงสุดเมื่อใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างเรซินต่อสารช่วยการแข็งตัว  
เท่ากับ 2:1 แต่กลับพบว่าความทนต่อแรงกระแทกลดลงเมื่อเติมผงแร่ทั้งสามชนิด อย่างไรก็ตาม  
ตามความทนต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มสูงสุดเมื่อใช้ผงแกรนิตขนาด -45+38 ไมโครเมตรไม่เกิน  
20 phr ขณะที่ผงแร่ทั้งสามชนิด มีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งของเรซินเล็กน้อย โดยที่ขนาดอนุภาค  
และปริมาณผงแร่ ไม่มีผลต่อความแข็งของเรซินอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนกรณีความทนต่อแรงกด  
อัดผลการศึกษาพบว่าความทนต่อแรงกดอัดของเรซิน ลดลงอย่างมากเมื่อเติมผงทราย แต่กลับ  
ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อแทนที่ผงทรายด้วยผงหินปูนหรือผงแกรนิต โดยที่ขนาดอนุภาคและ  
ปริมาณผงแร่ ไม่มีผลต่อความทนต่อแรงกดอัดของเรซินอย่างมีนัยสำคัญ จึงอาจสรุปได้ว่าการ  
ทดแทนทรายที่ใช้ในเรซินเคลือบผิวพื้นโรงงานด้วยผงหินปูนหรือผงแกรนิต นอกจากจะช่วย  
ปรับปรุงสมบัติเชิงกลแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่อีกด้วย

ศูนย์วิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม..ลายมือชื่อนิสิต.....ธีระพงษ์ บัวศรี.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมทรัพยากรธรณี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา..2553.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 5170578421: MAJOR GEORESOURCES ENGINEERING

KEYWORDS : MINERAL POWDER WASTES / GRANITE POWDER / LIMESTONE POWDER / FLOOR COATING EPOXY RESIN

THEERAPHIONG BUASRI : UTILIZATION OF MINERAL POWDER WASTES IN INDUSTRIAL FLOOR COATING EPOXY. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. DAWAN WIWATTANADATE, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : CHANCHAI THONGPIN, Ph.D., 58 pp.

Utilization of wastes from mining industry would bring to advantages for both environmental and economical concerns. In this study, limestone powder waste from a rock crushing plant as well as granite powder waste from a granite polishing and cutting plant was used as mineral filler to replace sand particle commercially used in epoxy resin industrial floor coating. Mechanical properties like compressive strength, impact strength, and hardness were comparatively investigated. The results indicate that mechanical properties of epoxy resin exhibits the highest value at resin to hardener weight ratio of 2:1, but *the impact strength* becomes decreasing with addition of all three kinds of mineral fillers. However, the highest impact strength was observed with addition of -45+38 micron granite powder not exceed 20 phr. While *hardness* of the resin slightly increased with addition of each kind of mineral filler; and no significant hardness dependency on either particle size or amount of mineral filler was observed. In case of *compressive strength*, the results indicate remarkably decreasing with sand addition, but slightly decreasing if replacing with either limestone or granite powder. In addition, no significant compressive strength dependency on either particle size or amount of mineral filler was observed. Therefore, it might be concluded that replacing sand particles in the commercial floor coating epoxy resin with either limestone or granite powder waste would enhance not only mechanical properties of the resin, but also value added for mineral wastes.

Department :...Mining and Petroleum Engineering...  
Field of Study :.Georesources Engineering.....  
Academic Year :..2010.....

Student's signature...  
Advisor's signature...  
Co-Advisor's signature...

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์จากองค์กรและบุคคลหลายฝ่าย ได้แก่ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ดาวัลย์ วิวรรณเดชะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ในการให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางในการวิจัยและตรวจแก้ไขข้อผิดพลาด ทำให้การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ในความอนุเคราะห์ด้าน เครื่องมือห้องปฏิบัติการ และคำปรึกษา ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน รศ.ดร.ภิญโญ มีชำนะ และ ผศ.ดร.เทียนไชย ตันไทย สำหรับข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียมและภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ทุกท่านในส่วนของ การทดลอง รวมถึงการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่าง ได้รับความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีจากการช่วยเหลือและให้คำแนะนำเกี่ยวกับการวิเคราะห์ตัวอย่าง

นอกจากนี้ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ ในห้องพักนิสิตปริญญาโททุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอ กราบขอบ พระคุณบิดา มารดา คุณตา คุณยาย ญาติพี่น้อง ที่ได้ให้การสนับสนุน และคอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาในทุกๆ เรื่อง รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้มา โดยตลอดจนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ Industrial Floor Surface Coating และ Epoxy Surface Coating.....	4
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกระบวนการตัดแต่งหินแกรนิต.....	6
2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกระบวนการบดย่อยหินปูน.....	7
2.4 ต้นทุนการผลิตอีพอกซีเคลือบผิวของบริษัท ซอสเอนจิเนียร์ริง จำกัด.....	7
2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนิน.....	12
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	12
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	12
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	12
3.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	13

บทที่	ช หน้า
4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	15
4.1 ผลการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับสารช่วยแข็ง.....	15
4.1.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength)การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ.....	15
4.1.2 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness).....	15
4.1.3 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกดอัด (Compressive Strength).....	16
4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของการใช้เม็ดทราย (Sand Particle) เป็นสารตัวเติมกราฟมาตรฐานของสารละลายเนฟธาไลน์.....	17
4.2.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength).....	17
4.2.2 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness).....	19
4.2.3 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกดอัด (Compressive Strength).....	20
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของการใช้หินปูน (Limestone Powder) เป็นสารตัวเติม.....	21
4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของการใช้ผงแกรนิต (Granite Powder) เป็นสารตัวเติม.....	25
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	33
รายการอ้างอิง.....	36
ภาคผนวก.....	37
ภาคผนวก ก.....	38
ภาคผนวก ข.....	42
ภาคผนวก ค.....	46
ภาคผนวก ง.....	50
ภาคผนวก จ.....	53
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	58



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบสมบัติของเรซินสังเคราะห์ .....	5
2.2	การใช้เรซินสังเคราะห์สำหรับการเคลือบผิววัสดุต่างๆและสภาพแวดล้อมต่างๆ.	6



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	14
4.1	เปรียบเทียบสัดส่วน Epoxy:Hardener ที่มีผลต่อความทนต่อแรงกระแทกของ ชิ้นงาน.....	15
4.2	เปรียบเทียบสัดส่วน Epoxy:Hardener ที่มีผลต่อความแข็งของชิ้นงาน.....	16
4.3	เปรียบเทียบสัดส่วน Epoxy:Hardener ที่มีผลต่อความทนต่อแรงกดอัดของ ชิ้นงานและลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน.....	16
4.4	ลักษณะรูปร่างทางกายภาพของเม็ดทรายขนาด 600 ไมโครเมตร.....	17
4.5	ลักษณะการวางชิ้นงานในการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod.....	17
4.6	ลักษณะชิ้นงานอีพอกซีเรซินที่ใช้เม็ดทรายเบอร์ 3 ปริมาณ 30 phr เป็นสารตัว เติม.....	18
4.7	ลักษณะชิ้นงานอีพอกซีเรซินที่ใช้เม็ดทรายเบอร์ 4 ปริมาณ 30 phr เป็นสารตัว เติม.....	19
4.8	อิทธิพลของปริมาณและขนาดอนุภาคสารตัวเติมเม็ดทรายที่มีต่อความทนต่อ แรงกระแทกของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน.....	19
4.9	อิทธิพลของสารตัวเติมเม็ดทรายที่มีต่อความแข็งของชิ้นงาน.....	20
4.10	อิทธิพลของสารตัวเติมเม็ดทรายที่มีต่อความทนต่อแรงกดอัดของชิ้นงาน.....	21
4.11	ลักษณะรูปร่างทางกายภาพของผงหินปูน.....	22
4.12	อีพอกซีเรซินที่ใช้สารตัวเติมเป็นผงหินปูนขนาด-45+38 ไมโครเมตร.....	22
4.13	อิทธิพลของขนาดอนุภาคและปริมาณผงหินปูนที่มีต่อความทนต่อแรงกระแทก ของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน.....	23
4.14	อิทธิพลของขนาดอนุภาค ปริมาณ และการปรับสภาพผิวของผงหินปูนที่มีต่อ ความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน.....	24
4.15	อิทธิพลของขนาดอนุภาคและปริมาณผงหินปูนที่มีต่อความแข็งชิ้นงาน.....	24
4.16	อิทธิพลของขนาดอนุภาคและปริมาณผงหินปูนที่มีต่อความทนต่อแรงกดอัด ของชิ้นงาน.....	25
4.17	ลักษณะรูปร่างทางกายภาพของผงหินแกรนิต.....	27
4.18	อีพอกซีเรซินที่ใช้สารตัวเติมเป็นผงหินแกรนิต.....	28

4.19	อิทธิพลของ ขนาดอนุภาค ปริมาณ และการปรับสภาพผิวผงแกรนิตที่มีต่อ ความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน.....	29
4.20	อิทธิพลของ ขนาดอนุภาค และ ปริมาณ ผงแกรนิตที่มีต่อความแข็งของชิ้นงาน อีพอกซีเรซิน .....	30
4.21	อิทธิพลของ ขนาดอนุภาค และ ปริมาณ ผงแกรนิตที่มีต่อความทนต่อแรงกดอัด ของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน.....	30
5.1	อิทธิพลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ ชิ้นงานอีพอกซีเรซิน.....	34



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพื้นโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมเทพื้นโรงงานด้วยคอนกรีตซึ่งมีความแข็งแรงทนทานสูง แต่เนื่องจากอุตสาหกรรมบางประเภทมีลักษณะการใช้งานที่พื้นผิวของโรงงานต้องได้รับแรงกระแทกเป็นรอบๆ ในระยะเวลาต่างๆ เช่น บริเวณพื้นที่ติดตั้งเครื่องจักร บริเวณที่มีการขนย้ายวัสดุดิบ ซึ่งพื้นที่บริเวณเหล่านี้ต้องสัมผัสกับสารเคมี กรด ด่าง และความชื้นจากกระบวนการล้างทำความสะอาดเครื่องจักร ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการสึกกร่อนและการแตกร้าว สารเคมี กรด ด่าง และความชื้นสามารถซึมผ่านเข้าไปภายในเนื้อคอนกรีตได้ง่าย ส่งผลให้ความแข็งแรงของคอนกรีตลดลง ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมผลิตอาหาร เมื่อเศษอาหารหรือน้ำที่ปนเปื้อนอาหารแพร่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตจะเกิดการสึกกร่อน ทำความสะอาดได้ยาก ส่งกลิ่นเหม็นแฉะ และติดเชื้อได้ง่าย ดังนั้นโรงงานเหล่านี้จึงมีความต้องการสารเคลือบผิวที่มีคุณสมบัติสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้ ซึ่งปัจจุบันมีสารเคลือบผิวมากมายหลายชนิดที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ เช่น Polyurethane resin, Polyester resin และ Epoxy resin ซึ่งในบรรดาสารทั้ง 3 ชนิดนี้ Epoxy resin เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกที่สุดและเป็นที่ยอมรับมากในการใช้เป็นสารเคลือบผิวในระบบงานพื้น ขณะที่ Polyurethane resin และ Polyester resin นั้นมีราคาค่อนข้างสูง เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ เช่น ใช้ Polyurethane resin กรณีที่ต้องการ ความต้านทานต่อการขีดถูสูง ทนการกัดกร่อนต่อสารเคมีได้ดี มีความยืดหยุ่นและยืดเกาะสูง ด้วยการปรับสภาพความแข็งและนุ่มได้ด้วยยางและเส้นใย จึงนิยมนำไปใช้ในงานประดับตกแต่งหรืองานเชื่อมคอนกรีต ส่วน Polyester resin นั้น กระบวนการขึ้นรูปเป็นปฏิกิริยาคาย ความร้อน และต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา หากใส่ตัวเร่งมากเกินไปจะเกิดความร้อนสูงและอาจติดไฟได้ ส่วนสารเสริมแรงที่นิยมใช้กับ Polyester resin คือ เส้นใยแก้ว (Glass fiber) ไม่ใช่ผงแร่ ซึ่งไม่เหมาะกับงานระบบพื้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ Epoxy resin ในการศึกษาครั้งนี้

Epoxy resin เป็นสารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยเฟสของเหลว 2 องค์ประกอบ คือ Epoxy resin และ Hardener (Curing Agent) เมื่อผสมเฟสของเหลวทั้ง 2 องค์ประกอบเข้าด้วยกัน จะเกิดปฏิกิริยาแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible Reaction) และถ้าปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จะเกิดเป็นเฟสของแข็งขึ้นในรูปของพลาสติกเทอร์โมเซต ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งแรง ทนต่อกรดและด่าง

ด้านทานความร้อน และมีการยึดเกาะกับวัสดุชนิดอื่นได้ดี ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้สามารถ ปรับแต่งได้ Epoxy resin จึงเป็นสารเคลือบผิวที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาดังกล่าว

สำหรับการประยุกต์ใช้งานของ Epoxy resin มีอยู่อย่างกว้างขวาง ทั้งการเคลือบ และการผลิตวัสดุคอมโพสิต สำหรับในงานวิจัยนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้งานผงแร่เหลือทิ้งจำพวก Granite powder และ Limestone powder ซึ่งได้จากอุตสาหกรรมเหมืองหิน เป็นสารเพิ่มเนื้อและปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซินให้เหมาะกับการใช้งานเคลือบผิวพื้นโรงงาน

การนำหินจากเหมืองธรรมชาติมาแปรรูปเป็นวัสดุดิบ เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่สำคัญมาก สำหรับเศรษฐกิจประเทศ โดยที่ปริมาณความต้องการใช้หินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สังเกตได้จากในช่วงทศวรรษที่ 1920 มีปริมาณการผลิตหินอยู่ที่  $1.80 \times 10^6$  ตัน/ปี ปัจจุบันมีการผลิตมากถึง  $81.25 \times 10^6$  ตัน/ปี และคาดว่าในปี 2025 จะเพิ่มขึ้นเป็น  $450 \times 10^6$  ตัน/ปี อย่างไรก็ตาม การนำหินมาใช้ประโยชน์นั้นต้องผ่านกระบวนการทำเหมือง ต้องมีการระเบิด ขุด ขน บดย่อย และตัดแต่ง ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดเศษหินเหลือใช้จำนวนมาก โดยเฉพาะชั้นตอน บด ย่อย และตัดแต่งหิน มักเกิดฝุ่นหินฟุ้งกระจาย ส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตรอบข้าง หากมีการจัดการอย่างเหมาะสม นอกจากจะลดปัญหาดังกล่าวแล้ว ยังอาจนำฝุ่นหินเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นได้ ซึ่งเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม เพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้ง และอาจใช้เป็นวัสดุทดแทนเพื่อลดต้นทุนการผลิตหรือปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ บางชนิดได้ อันจะนำไปสู่การอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ ลดการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด และเป็นการแก้ปัญหาสภาพแวดล้อมอย่างยั่งยืนต่อไป

สำหรับการศึกษาคั้งนี้ จะศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์ผงหินแกรนิต และ/หรือ ผงฝุ่นหินปูน ซึ่งได้จากกระบวนการแปรรูป ตัดแต่ง บด ย่อย เป็นวัสดุทดแทน และ/หรือ ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเคลือบผิวพื้นโรงงานอุตสาหกรรม

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อใช้ประโยชน์เศษหินเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเหมืองหิน ในอีพอกซีเคลือบผิว
- 1.2.2 เพื่อหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างสารเคลือบผิว (Epoxy resin) กับสารตัวเติมต่างๆ (เศษหินเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเหมืองหิน) เพื่อให้ได้สารเคลือบผิวที่มีสมบัติเชิงกลตามต้องการ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาสูตรผสมของสารเคลือบผิว Epoxy Resin เคลือบผิวพื้นโรงงาน ได้แก่

- 1.3.1 **เรซิน** เป็น Epoxy Resin เกรด YD 128 หรือ Diglycidyl Ether of Bisphenol A (DGEBA)
- 1.3.2 **สารตัวเติม** คือ Silica particle จากบริษัท ซอสเอนจิเนียร์ริง จำกัด Granite powder จากโรงงานตากแกรนิต และ Limestone powder จากโรงโม่หินปูนจังหวัดชลบุรี
- 1.3.3 **สารปรับสภาพผิว** คือ Silane coupling agent หรือสารปรับสภาพผิวอื่นๆ เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ Epoxy resin กับ เฟสของผงแร่
- 1.3.4 **สารช่วยการแข็งตัว (Hardener)** คือ สารประกอบเอมีน สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาได้แก่
  - **Compression** ตามมาตรฐาน ASTM D 695
  - **Impact** ตามมาตรฐาน ASTM D-256 แบบ Izod
  - **Hardness** ตามมาตรฐาน ASTM D 2240

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถใช้ประโยชน์จากเศษหินจากอุตสาหกรรมเหมืองหินในงานเคลือบพื้นผิว เป็นการเพิ่มมูลค่าผงแร่เหลือทิ้ง และ/หรือ ลดต้นทุนการผลิตสารเคลือบผิว
- 1.4.2 ผงแร่ที่เติมในเรซินอาจมีส่วนช่วยเสริมแรงเรซิน และ/หรือ เพิ่มลวดลายเรซินเคลือบผิว

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับ Industrial Floor Surface Coating และ Epoxy Surface Coating

เรซินสังเคราะห์ ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวพื้น มีมากมายหลายชนิด ได้แก่

2.1.1 **อัลคิเดเรซิน** (Alkyd resin) เป็นเรซินที่จัดอยู่ในประเภทโพลีเอสเตอร์ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวมาก เนื่องจากราคาถูก มีสมบัติการเปียกผิวดี ราคาถูก งามทนทานต่อความร้อนและตัวทำละลายได้ดี แต่ไม่นิยมนำมาใช้ในการเคลือบผิวพื้นเนื่องจากสมบัติเชิงกลของเรซินชนิดนี้ยังไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรม

2.1.2 **โพลียูรีเทน** (Polyurethane) เป็นเรซินที่มีความทนกรด-ด่างและน้ำมันได้ดี มีแรงยึดผิวหน้าดี ทนการขัดสีได้สูง แต่ความทนกรด-ด่างต่ำกว่าอีพอกซีเรซิน เหลืองง่ายเมื่อถูกแสงแดด และมีราคาสูง จึงไม่นิยมใช้ในงานเคลือบผิวพื้น แต่นิยมนำไปใช้ในงานประดับตกแต่ง แก้วหรือรั้วรอยต่อมากกว่า

2.1.3 **อีพอกซีเรซิน** (Epoxy resin) เป็นเรซินที่ใช้ประโยชน์ได้มากทางอุตสาหกรรม โดยใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวมากถึง 60% และเป็นที่ยอมรับมากในการนำมาใช้เป็นสารเคลือบผิวพื้นเนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมดังนี้

- มีความทนทานต่อสารเคมีได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งทนต่อต่างทั้งหลาย เนื่องจากโมเลกุลไม่มีหมู่เอสเตอร์ที่ถูกสaponifyได้ง่าย
- มีสมบัติยึดผิวหน้าต่างๆได้ดี
- มีความแข็งแรงดีและอ่อนตัวได้ไม่เปราะ เนื่องจากมีหมู่อะโรแมติกและพันธะเดี่ยวอยู่ในสายโซ่
- มีหมู่อีพอกซีและไฮดรอกซิลอยู่ในโมเลกุล จึงทำให้เกิดโพลีเมอร์หรือเกิดการบ่มต่อไปเรื่อยๆทำให้เกิดโครงสร้าง 3 มิติที่แข็งแรงทนทานและใช้ประโยชน์ได้ดี

ส่วนข้อเสียของอีพอกซี คือ ตัวทำละลายมีราคาค่อนข้างแพง ไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับเรซินบางชนิด นอกจากนี้ฟิล์มที่ได้จากอีพอกซีมักจะร่วนและเมื่ออยู่ภายนอกนานๆความทนต่อน้ำจะด้อยลง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบสมบัติของเรซินสังเคราะห์

สมบัติ	เรซินสังเคราะห์		
	อัลคิด	อีพอกซี	โพลียูรีเทน
การยึดกับผิวหน้า	VG	E	G
ความแข็ง	G	VG	E
ความอ่อนตัวไม่เปราะ	G	E	VG
ความทนทานต่อการขีดสี	G	VG	E
ความทนกรด	F	G	E
ความทนด่าง	F	E	VG
ความทนผงซักฟอก	F	E	VG
ความทนต่อความร้อน	G	G	G
ความทนตัวทำละลายรุนแรง	F	E	E
ความทนน้ำ	G	G	VG
ความทนทานต่อการเปลี่ยนสี (fade resistance)	VG	G	F
ความทนทานต่อการเป็นฝุ่น (chalk resistance)	G	F	F

Key: F = Fair                      VG = Very good                      P = Poor  
 G = Good or average    E = Excellent, outstanding    NR = Not recommend

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ตารางที่ 2.2 การใช้เรซินสังเคราะห์สำหรับการเคลือบผิววัสดุต่างๆและสภาพแวดล้อมต่างๆ

สมบัติ	เรซินสังเคราะห์		
	อัลคิด	อีพอกซี	โพลียูรีเทน
ไม้	G	G	G
คอนกรีต	NR	VG	G
โลหะ	VG	VG	G
ตกแต่งภายใน	G	G	G
ตกแต่งภายนอก			
ชนบท	G	G	G
ชายทะเล	G	VG	VG
เขตอุตสาหกรรม	F	E	VG

Key: F = Fair                      VG = Very good                      P = Poor  
 G = Good or average    E = Excellent, outstanding    NR = Not recommend

### 2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกระบวนการตัดแต่งหินแกรนิต

กระบวนการซึ่งทำให้เกิดฝุ่นผงแกรนิต ได้แก่ กระบวนการแปรรูปหินแกรนิตที่ใช้ในงานประดับตกแต่ง โดยกระบวนการเริ่มจากการนำหินแกรนิตจากเหมือง ขนาดประมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร มาตัดให้เป็นแผ่นด้วยใบเลื่อยขนาดใหญ่ หลังจากนั้นนำมาตัดแต่งให้เข้ารูป แล้วนำมาเข้าเครื่องขัด ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนี้จะเกิดเศษหินขึ้นประมาณ 41% ของวัตถุดิบเริ่มต้น โดยที่กระบวนการ เลื่อย ตัดแต่ง และขัดเงา จะก่อให้เกิดเศษหินแกรนิตขึ้น 25 wt%, 15 wt% และ 1 wt% ตามลำดับ กล่าวอีกนัยหนึ่งจะเกิดเศษหินแกรนิตขึ้นประมาณ 1 ลูกบาศก์เมตรต่อวัตถุดิบเริ่มต้น 1 ตัน จึงก่อให้เกิดปัญหาด้านการจัดการเศษหินแกรนิตเหล่านี้เป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันการจัดการกับเศษหินแกรนิตเหล่านี้ มักกระทำโดยการฝังกลบ ขณะที่เศษหินแกรนิตเหล่านี้เป็นวัสดุเหลือใช้ ที่ยังคงคุณสมบัติเชิงกล และความสวยงาม นำที่จะนำกลับมาเป็นวัตถุดิบเพื่อเพิ่มมูลค่า โดยอาจนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนในเรซินเคลือบผิวโรงงานอุตสาหกรรม เป็นการลดต้นทุนการผลิต และ/หรือ ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเรซินเคลือบผิวได้

## 2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับกระบวนการบดย่อยหินปูน

กระบวนการบดย่อยหินปูนนั้น เกิดขึ้นในโรงโม่หิน ซึ่งจะต้องมีการกอง ตัก ขนย้าย บดย่อย คัดขนาด ลำเลียงเปลี่ยนถ่าย ซึ่งมักเกิดฝุ่นฟุ้งกระจายและตกสะสมอยู่ที่บริเวณพื้นโรงโม่ หากมีการติดตั้งระบบบำบัดฝุ่นที่เหมาะสม นอกจากช่วยลดปัญหาสุขภาพและสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังสามารถรวบรวมฝุ่นผงหินปูนเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุทดแทนในในเรซินเคลือบผิวโรงงานอุตสาหกรรม

## 2.4 ต้นทุนการผลิตอีพอกซีเคลือบผิวของบริษัท ซอสเอนจิเนียร์ริง จำกัด

สูตรผสม Epoxy composite	ต้นทุนการผลิต (บาท/กิโลกรัม)
Part A + Part B	180.00
YD-128	105.00
Hardener	160.00

## 2.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ C.B.Ng (1999) ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ Epoxy Nanocomposite จากการเติม  $\text{TiO}_2$  Nanoparticle โดยใช้ Ultrasonic method ในการทำให้ Nano-particle กระจายตัวใน epoxy resin

ระดับของ Nano  $\text{TiO}_2$  ที่ผสมภายใน composite มีด้วยกัน 4 ระดับ คือ 5, 10, 15 และ 20 wt% แต่ปรากฏว่าที่ 10 wt% ได้ผลเหมาะสมที่สุด จึงนำมาเป็นสูตรในการผสม Epoxy composite แล้วทดลองใช้ขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน และสุดท้ายก็ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ซึ่งได้แก่ Tensile test, Scratch test พร้อมทั้งตรวจดูโครงสร้าง Morphology ด้วย SEM

การทดลองดังกล่าว  $\text{TiO}_2$  particle ที่ใช้ มี 2 ขนาด คือ nanometer size ( $D=32\text{nm}$ ) และ micron size ( $0.24\ \mu\text{m}$  หรือ  $240\ \text{nm}$ ) หลักการในการผสมทั้งสองขนาดมีหลักการเดียวกัน คือ ประกอบด้วย 90%  $\text{TiO}_2$  และ 10% Rutile แล้วเติมเข้าไปใน epoxy resin ที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  จะได้เรซินที่มีความเหนียวต่ำ จากนั้นทำการกวนด้วยแท่งแก้ว แล้วนำไปวางใน ultrasonic bath เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่  $60^\circ\text{C}$  และ hardener (1,3 phenylenediamine) จะถูกเติมลงไปหลังสุด แล้วรีบเทสารผสมลงในแม่พิมพ์ซิลิโคน เพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ Tensile

และ Scratch (ขูดสี) โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาการกระจายตัวโดยใช้ กล้อง SEM และ micrographs ที่ได้แสดงพื้นผิวของ Nanocomposite พบว่า  $\text{TiO}_2$  Nanoparticle มีการรวมตัวกัน แต่ส่วนใหญ่จะเกิดการกระจายตัวที่ดีใน epoxy matrix

จากผลการทดลองพบว่า Neat epoxy และ epoxy resin ที่มีการเติมด้วย 10wt% micron-size และ nanometer – size  $\text{TiO}_2$  โดย Nanometer – size  $\text{TiO}_2$  ที่เติมลงใน epoxy แสดงการเพิ่มของ scratch resistance เมื่อเปรียบเทียบกับ Neat epoxy และ micron-  $\text{TiO}_2$  - filled epoxy ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าที่สัดส่วน Nano-  $\text{TiO}_2$  10wt% ทำให้ epoxy composite มีค่า modulus และ elongation at break หรือ strain-to-failure เพิ่มขึ้น แต่สำหรับ micron-size ของ  $\text{TiO}_2$  เมื่อเพิ่มปริมาณขึ้นจะพบว่าค่า modulus มีการเพิ่มขึ้นแต่ strain-to-failure จะลดลง ดังนั้นการใส่ Nanoparticle จะทำให้ได้ composite ที่มีความเหนียวมากกว่า การใส่ micro-particle และ nano-  $\text{TiO}_2$  ยังทำให้ได้ epoxy composite ที่ทนต่อการขูดสีได้ดีกว่า ทั้ง pure epoxy และ micron-  $\text{TiO}_2$  /epoxy composite นั่นคือ ขนาดอนุภาคสารตัวเติมยังมีขนาดเล็กยิ่งให้วัสดุคอมโพสิตที่มีคุณภาพสูง

**งานวิจัยของ วิชา วิทยาภย บุนนาค (2543)** ซึ่งได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปัจจัยในการบ่มต่อสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซินเสริมเส้นใยแก้ว สำหรับเคลือบคอนกรีตและมอร์ตาร์ (Influences of curing factors on mechanical properties of glass fiber-reinforced epoxy composite for coating concrete and mortar) โดยงานวิจัยนี้เน้นการศึกษาผลของปัจจัยในการบ่มต่อสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีสำหรับเคลือบพื้นโรงงานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่ง (Composite resin) นี้ประกอบด้วย

อีพอกซีเรซิน [diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)] สารบ่ม Diethylene triamine (DETA) เส้นใยแก้ว และทราย งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีเรซินทั้งในรูปแบบของสารเคลือบที่ยังไม่ได้นำไปเคลือบผิว และแบบที่เคลือบแล้ว โดยจำลองขึ้นจากการเคลือบผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีเรซินลงบนคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ งานวิจัยนี้มีการออกแบบการทดลองแปรสภาวะในการบ่มสารเคลือบผิวโดยประยุกต์ใช้หลักการออกแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตโรเตทาบิล (Central Composite Rotatable, CCR) และเลือกใช้การวิเคราะห์ผลโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ทำให้ได้สมการพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในการบ่มกับสมบัติเชิงกลตอบสนองของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีเรซิน ผลจากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการบ่มซึ่งได้แก่ อุณหภูมิการบ่ม ระยะเวลาในการบ่ม และปริมาณทรายที่ใช้เป็นสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติเชิงกล พบว่าผลิตภัณฑ์อีพอกซีเรซิน [diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)] ที่มี Diethylene triamine (DETA) เป็นสารบ่ม ซึ่ง

ทำการบ่ม ณ อุณหภูมิห้อง ( $31^{\circ}\text{C}$ ) จะมีความสามารถในการรับแรงกระแทก ( impact strength) และค่าความเหนียวเมื่อแตก ( fracture toughness) สูง ในขณะที่ความสามารถในการรับแรงกด (compressive strength) ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการรับแรงกดตันของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่ง ที่บ่ม ณ อุณหภูมิสูง ( $99^{\circ}\text{C}$ )

การเพิ่มเวลาในการบ่มจะช่วยให้คุณสมบัติในการรับแรงกดดีขึ้น ส่วนการใส่ทรายเพื่อเป็นสารเติมแต่งไม่ได้มีผลต่อการรับแรงกดเท่าใดนัก แต่กลับช่วยให้พลังงานการแตก ( fracture energy) ของผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีเรซินสูงขึ้นมาก ขณะเดียวกันก็ทำให้สมบัติในการรับแรงกดและแรงกระแทกลดลงเล็กน้อย ผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า สมบัติเชิงกลที่ได้จะมีสภาวะที่เหมาะสมในการบ่มจะแตกต่างกันออกไป ผลิตภัณฑ์ประกอบแต่งอีพอกซีเรซินจะมีคุณสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุดเมื่อบ่มที่  $31^{\circ}\text{C}$  นาน 56.2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาบ่มที่นานที่สุดในงานวิจัย โดยใส่ทราย 23-25% สมบัติเชิงกลที่ลดลงมากที่สุด ณ สภาวะการบ่มนี้ ได้แก่ ความสามารถในการรับแรงกด ซึ่งลดลง 24.2% อย่างไรก็ตามแนวโน้มของความสามารถในการรับแรงกดจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มออกไปอีก

**งานวิจัยของ Y. Zheng (2003)** ได้ทำการศึกษาผลของ  $\text{SiO}_2$  Nanoparticle ที่มีต่อประสิทธิภาพของ Epoxy composite ซึ่งผสม Nanoparticle เข้ากับเรซินโดยใช้วิธีของ Ultrasonic และวิธีทางเชิงกล เมื่อทำการผสม Resin แล้วนำไปศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ Tensile testing, Impact testing และศึกษา Morphology โดยใช้เทคนิค TEM และศึกษา free volume ในเนื้อเรซินที่ได้ โดยใช้ Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy

สำหรับงานวิจัย ดังกล่าว ได้ ทำการผสม epoxy resin (CYD-128) เข้ากับ  $\text{SiO}_2$  Nanoparticle โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  Nanoparticle ที่ระดับต่างๆกัน  $\text{SiO}_2$  Nanoparticle ที่ใช้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 nm ในการเตรียม Epoxy resin/ $\text{SiO}_2$  Nanocomposite มีหลักการดังนี้ คือ ผสม  $\text{SiO}_2$  Nanoparticle กับ coupling agent แล้วให้ความร้อนในระดับหนึ่งแล้วจึงใส่ลงใน epoxy resin ที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  จะได้เรซินที่มีความหนืดต่ำ จากนั้นก็ลดอุณหภูมิลงมาที่  $70-80^{\circ}\text{C}$  แล้วจึงใส่ hardener แล้วรีบเทลงบนแม่พิมพ์ ทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่  $130^{\circ}\text{C}$  แล้วเพิ่มเป็น  $150^{\circ}\text{C}$  ทิ้งไว้อีก 5 ชั่วโมง

สำหรับการทดสอบสมบัติของ Nano-composite ที่ได้ พบว่า Impact testing (ASTM-D256) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ  $\text{SiO}_2$  Nanoparticle โดยสามารถเพิ่ม  $\text{SiO}_2$  Nanoparticle ได้สูงสุด 3 wt% หากเกินกว่านี้แล้วจะทำให้ค่า Impact strength ลดลง เหตุผลที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจาก  $\text{SiO}_2$  Nanoparticle มีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ บริเวณที่  $\text{SiO}_2$  Nanoparticle กระจายตัวไม่สม่ำเสมอและจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเป็นบริเวณที่มี Stress concentration ตกค้าง

อยู่มาก จึงเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน สำหรับ Tensile testing (ASTM-D638) ผลที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับ Impact strength นั่นคือ สามารถเพิ่มความแข็งแรงของ epoxy resin / SiO<sub>2</sub> Nanocomposite ได้สูงสุดที่สัดส่วนของ SiO<sub>2</sub> Nanoparticle เท่ากับ 3wt% เท่านั้น

สำหรับการศึกษา Morphology ของ Nanocomposite ด้วย TEM microscope พบว่า Nanoparticle กระจายตัวใน epoxy resin ได้อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ Nanocomposite ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม กล่าวคือ มีค่า Tensile strength, Modulus และ Impact strength เพิ่มขึ้น 114%, 12.6% และ 56% ตามลำดับ นอกจากนี้จะใช้ TEM ศึกษาการกระจายตัวของ Nanoparticle แล้ว ยังใช้ SEM ศึกษาผิวหน้ารอยแตกหักจาก Impact testing อีกด้วย จากภาพ SEM ที่ได้ พบว่าผิวหน้ารอยแตกหักของ Nanocomposite (3wt% SiO<sub>2</sub>) มีเส้นรอยฉีกขาดน้อยกว่า Neat epoxy resin แสดงให้เห็นว่า matrix ของ Nanocomposite เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้เนื้อวัสดุรับแรงได้เท่าๆกัน จึงได้สมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยเฉพาะสมบัติการรับแรงกระแทก

จากการศึกษา Free volume ของ Nanocomposites ด้วย PATFIT (finite-term lifetime analysis) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ Nanoparticle ขนาดของ free volume มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ถ้าพิจารณาสัดส่วนของ free volume ต่อปริมาตรทั้งหมด ที่ระดับ SiO<sub>2</sub> Nanoparticle 3 wt% จะมีค่าต่ำสุดและได้ค่า Impact strength สูงสุด แสดงว่า ที่ 3 wt% SiO<sub>2</sub> Nanoparticle เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผสม SiO<sub>2</sub> Nanoparticle และเมื่อ SiO<sub>2</sub> Nanoparticle มีค่ามากกว่า 3 wt% พบว่าสัดส่วนของ free volume เพิ่มขึ้นและส่งผลให้ค่า Impact strength ลดต่ำลงเรื่อยๆ

ดังนั้นสรุปได้ว่า ปริมาณของ SiO<sub>2</sub> Nanoparticle ส่งผลต่อสัดส่วน free volume ในชิ้นงาน แล้วทำให้ได้ composite มีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน และยังพบว่าสัดส่วนของ SiO<sub>2</sub> Nanoparticle ที่เหมาะสมที่สุดคือ 3wt%

**งานวิจัยของ** T. Maity, B.C. Samanta, Dalai, A.K. Banthia (2007) ซึ่งได้ศึกษาเกี่ยวกับ curing agent สองชนิด คือ AFAC (amine functional *aniline* formaldehyde condensates) และ AFCFC (amine functional *chloroaniline* formaldehyde condensates) ผลการเปรียบเทียบ ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของสารทั้งสอง และหา glass transition temperature (Tg) โดยใช้ DSC และ DMA

ผลที่ได้ปรากฏว่า AFAC มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาในระหว่าง curing สูงกว่า AFCFA (ซึ่งมี chlorine เป็นหมู่แทนที่ภายในโมเลกุล) ส่วนค่า Tg ของสารทั้งสองที่นำมาทำปฏิกิริยากับ resin ปรากฏว่า formulation A (DGEBA+AFAC) มีค่า Tg สูงกว่า formulation B (DGEBA+AFCFC) นอกจากนี้ผลการทดสอบ Mechanical property ของทั้งสองสูตร พบว่า

formulation A มี tensile and flexural strength ที่สูงกว่า formulation B ซึ่งแสดงว่าการมี chlorine เป็นหมู่แทนที่ภายในโมเลกุลของสารบ่ม (curing agent) ทำให้มีความยืดหยุ่นลดลง เกิด curing ได้น้อยกว่า ความแข็งแรงเชิงกลจึงต่ำกว่า Formula A



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

- 3.1.1 ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคสารตัวเติม ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซิน
- 3.1.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติม ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซิน
- 3.1.3 ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลที่เกิดขึ้นระหว่างข้อ 3.1.1 และข้อ 3.1.2

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่อง Universal testing machine (UTM) รุ่น LLOYD model LR 50K
- 3.2.2 เครื่อง Hardness testing machine รุ่น PTC model 402 shoreD
- 3.2.3 เครื่อง Impact testing machine แบบPendulum รุ่น Zwick model GT7016A2
- 3.2.4 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) JSM-35CF ของบริษัท JEOL

#### 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.3.1 เรซินที่ใช้ เป็น Epoxy Resin เกรด YD 128 หรือ Diglycidyl Ether of Bisphenol A (DGEBA) และสารช่วยแข็งตัว (hardener) ที่ใช้ คือ สารประกอบเอมีนจากบริษัท ZOS Engineering
- 3.3.2 สารตัวเติมที่ใช้ คือ Silica particle จากบริษัท ZOS Engineering, Granite powder จากโรงงานตากแกรนิต และ Limestone powder จากโรงโม่หินปูนจังหวัดชลบุรี
- 3.3.3 สารปรับผิวที่ใช้ คือ 3-aminopropyl triethoxysilane จากบริษัท Fluka

### 3.4 วิธีดำเนินการวิจัย

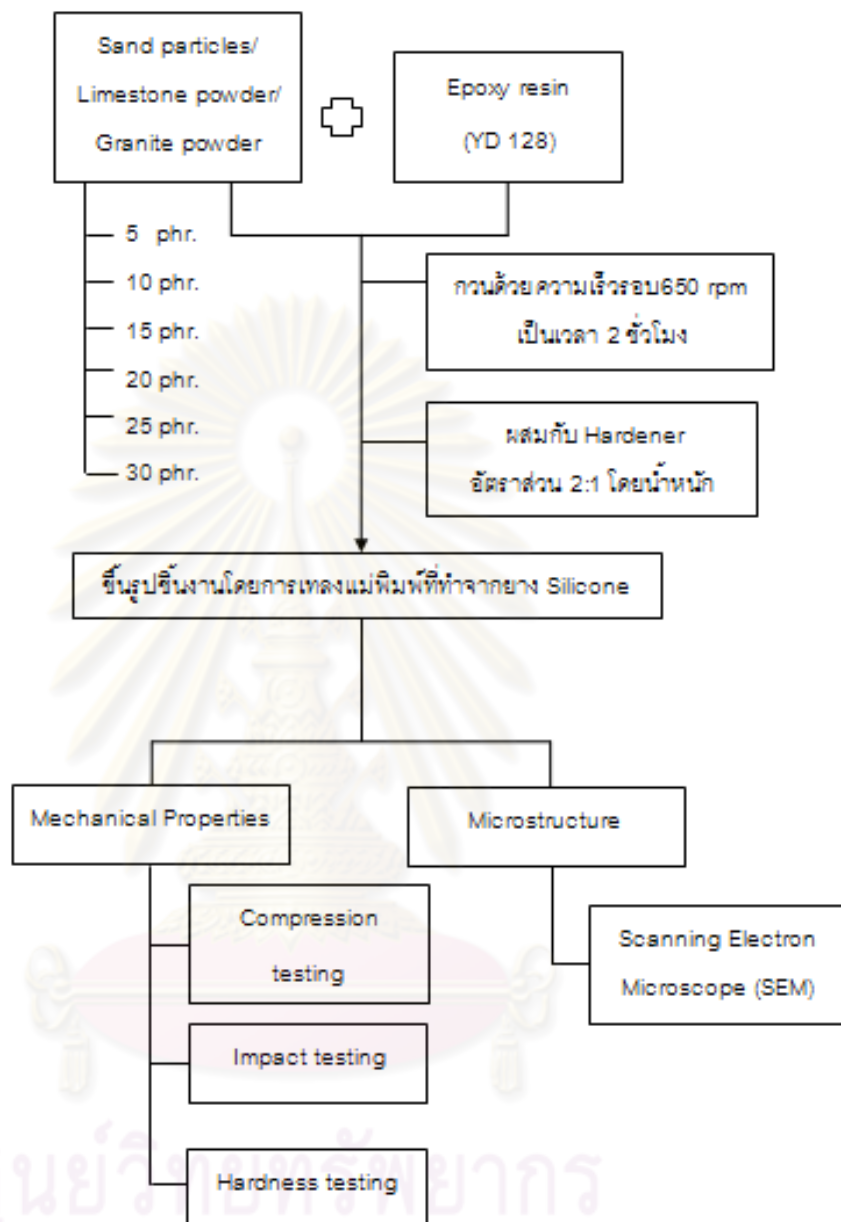
3.4.1 นำเม็ดทราย (Silica particles) ผงแกรนิต (Granite powder) และผงหินปูน (Limestone powder) มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.3 นำเม็ดทราย (Silica particle) ที่คัดขนาดแล้วจาก บริษัท ซอสเอนจิเนียร์ จำกัด มาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) หลังจากนั้นทำการผสม Epoxy resin กับ silica particles ที่สัดส่วน 5,10,15,20,25,30 phr โดยใช้ความเร็วรอบในการกวน 650 rpm เติม Hardener แล้วขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลโดยเทเรซินลงในแม่พิมพ์ซิลิโคน

3.4.4 ทำเช่นเดียวกับข้อ 3. 4.3 แต่แทนที่เม็ดทรายด้วยผงหินปูนที่สัดส่วน 5,10,15,20,25,30 phr โดยใช้ความเร็วรอบในการกวน 650 rpm เติม Hardener แล้วขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลโดยเทเรซินลงในแม่พิมพ์ซิลิโคน

3.4.5 ทำเช่นเดียวกับข้อ 3.4.4 แต่ใช้ผงแกรนิตแทนที่ผงหินปูน





รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

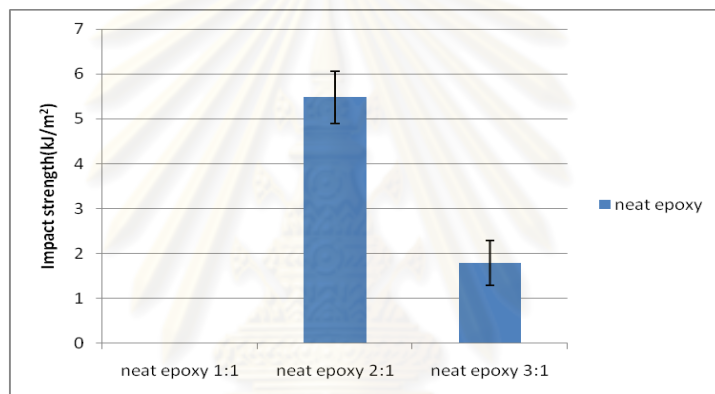
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์เคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับสารช่วยแข็ง

##### 4.1.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

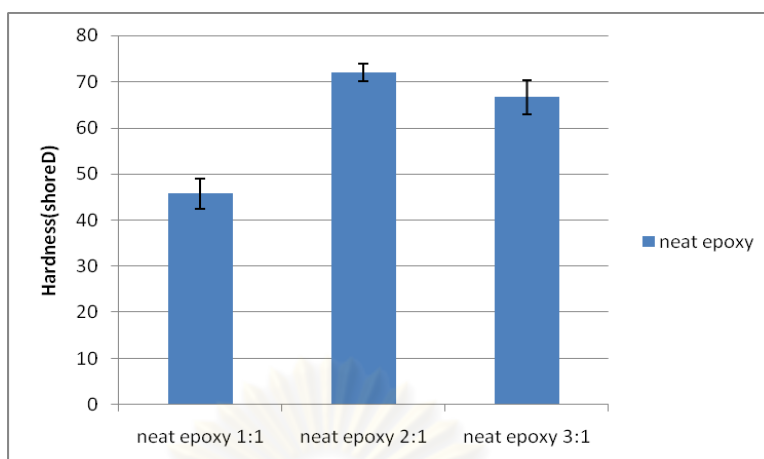
เมื่อทำการทดสอบความทนต่อแรงกระแทกพบว่า ชิ้นงานจากการใช้สัดส่วนอีพอกซีเรซินกับสารช่วยแข็ง (Epoxy : Hardener) ที่ 2:1 ให้ชิ้นงานที่มีค่าความสามารถในการรับแรงกระแทกสูงสุด



#### รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบสัดส่วน Epoxy:Hardener ที่มีผลต่อความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน

##### 4.1.2 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness)

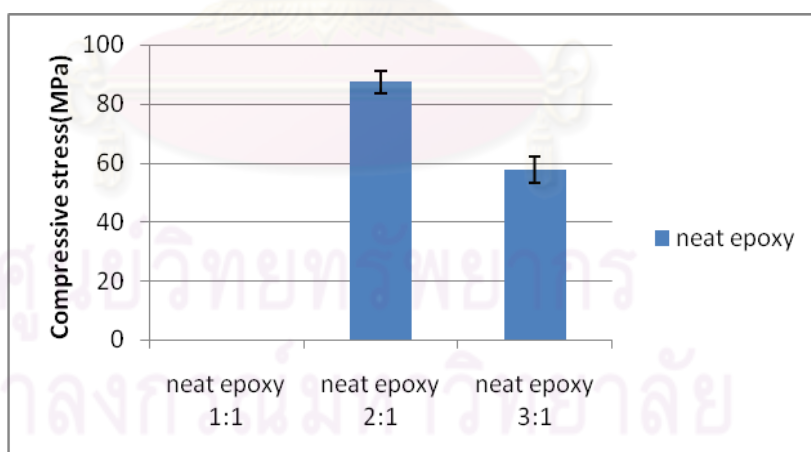
เมื่อทำการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้สัดส่วนอีพอกซีเรซินกับสารช่วยแข็งที่ 1:1, 2:1, และ 3:1 พบว่าสัดส่วนอีพอกซีเรซินกับสารช่วยแข็งที่ 2:1 ให้ชิ้นงานที่มีค่าความแข็งสูงสุด (ดังรูป 4.2) ทำนองเดียวกับสมบัติความทนต่อแรงกระแทก



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบสัดส่วน Epoxy:Hardener ที่มีผลต่อความแข็งของชิ้นงาน

#### 4.1.3 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกดอัด (Compressive Strength)

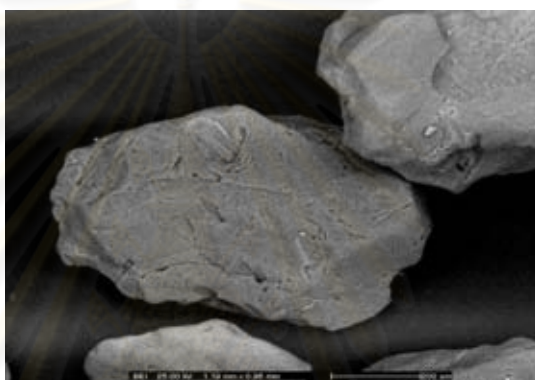
เมื่อทำการทดสอบความทนต่อแรงกดอัดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปโดยใช้สัดส่วนอีพอกซีเรซินกับสารช่วยแข็งที่ 1:1, 2:1, และ 3:1 พบว่าสัดส่วนอีพอกซีเรซินกับสารช่วยแข็งที่ 2:1 ให้ชิ้นงานที่มีค่าความทนต่อแรงกดอัดสูงที่สุด (ดังรูป 4.3) ทำนองเดียวกับสมบัติความทนต่อแรงกระแทกและความแข็งของชิ้นงาน



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบสัดส่วน Epoxy:Hardener ที่มีผลต่อความทนต่อแรงกดอัดของชิ้นงาน

## 4.2 สมบัติทางกายภาพ และทางกลของเรซินผสมเม็ดทราย ขนาด 600 ไมโครเมตร และขนาด 525 ไมโครเมตร

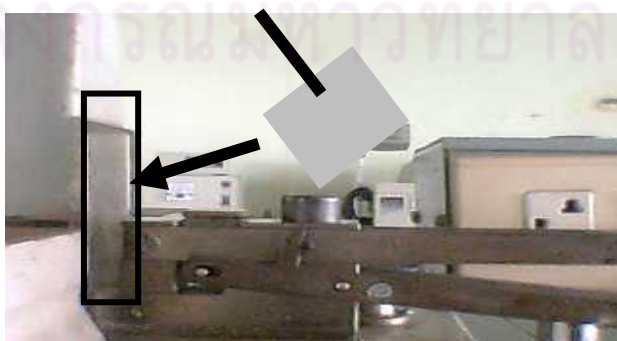
โดยทั่วไป ในการประยุกต์ใช้อีพอกซีสำหรับงานเคลือบผิวพื้นโรงงานนั้น มักนิยมผสมเม็ดทรายเป็นสารตัวเติม เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และเพิ่มความแข็งให้กับเรซิน เพื่อให้สามารถทนแรงกดสูงๆได้ การศึกษานี้จึงใช้ชิ้นงานผสมเม็ดทราย เพื่อใช้เป็น ตัวอย่างเปรียบเทียบ(Reference) โดยขนาดของเม็ดทรายเบอร์ 3 มีขนาด 600 ไมโครเมตร ทรายเบอร์ 4 มีขนาด 525 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยที่รูปร่างของเม็ดทรายนั้นมีเหลี่ยมมนน้อยลักษณะค่อนข้างกลม(ดังรูปที่ 4.4)



รูปที่ 4.4 ลักษณะรูปร่างทางกายภาพของเม็ดทรายขนาด 600 ไมโครเมตร

### 4.2.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength)

ในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นศึกษาสมบัติของวัสดุที่เตรียมเบื้องต้น โดยจะเปรียบเทียบกับวัสดุอ้างอิง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทดสอบ สมบัติ ความทนทานต่อแรงกระแทกแบบ Izod โดยที่ลักษณะการทดสอบจะเป็นการปล่อยหัวค้อนขนาด 4 จูลมากระแทกชิ้นงานที่วางอยู่ในแนวตั้ง(ดังรูปที่ 4.5)

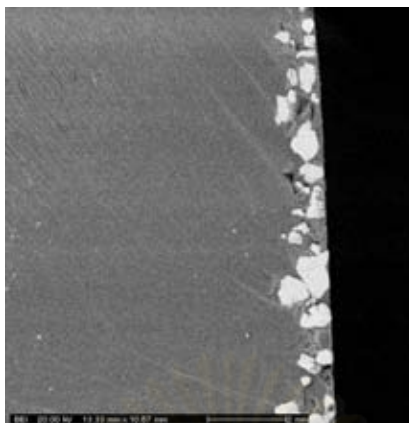


รูปที่ 4.5 ลักษณะการวางชิ้นงานในการทดสอบแรงกระแทกแบบ Izod

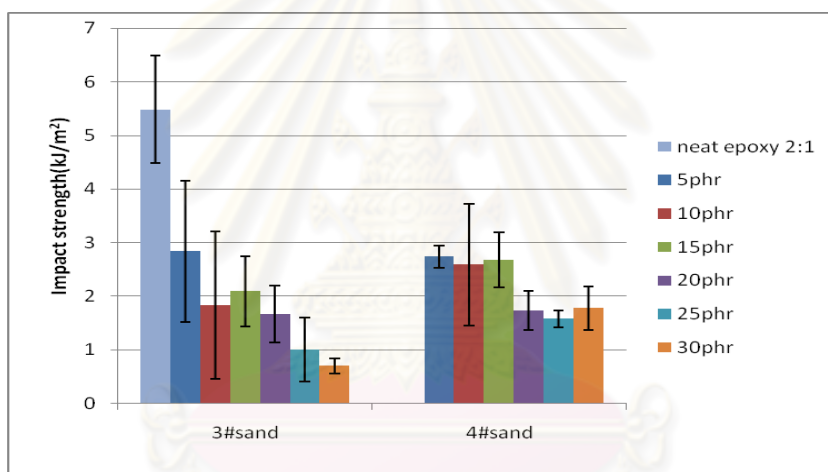
เมื่อทำการทดสอบความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานที่มีการเติมสารตัวเติมชนิดเม็ดทราย (Sand Particles) โดยปรับเปลี่ยนปริมาณ 5,10,15,20,25,30 phr และปรับเปลี่ยนขนาดเม็ดทรายเบอร์ 3 และเบอร์ 4 พบว่า ความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ของชิ้นงาน ลดต่ำลงประมาณ 40-50% (ดังรูปที่ 4.8) เมื่อเทียบกับชิ้นงานอีพอกซีที่ไม่ผสมเม็ดทราย (Neat Epoxy) และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อสัดส่วนปริมาณเม็ดทรายในส่วนผสมเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีทรายเบอร์ 4 ที่ปริมาณ 25 phr และ 30 phr พบว่ามีค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าทรายเบอร์ 3 ที่ปริมาณเดียวกัน เนื่องจากทรายเบอร์ 4 นั้นมีขนาดเล็กกว่าจึงมีพื้นที่ผิวมากกว่า และตกตะกอนน้อยกว่าจึงสามารถกระจายตัวในชิ้นงานได้ดีกว่า ดังนั้นเมื่อได้รับแรงกระแทก กระบวนการถ่ายเทแรงสู่เม็ดทรายเบอร์ 4 จึงทำดีกว่าทรายเบอร์ 3 อย่างไรก็ตามเม็ดทรายเบอร์ 3 มีขนาด 600 ไมโครเมตร และทรายเบอร์ 4 นั้น มีขนาด 525 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองเบอร์นั้นมีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่จึงทำให้เม็ดทรายตกตะกอนและเกิดการรวมตัวกันไม่กระจายตัวทั่วทั้งชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดจุดบกพร่องในชิ้นงาน เมื่อได้รับแรงกระแทก จึงแตกหักได้ง่าย (ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7)



รูปที่ 4.6 ลักษณะชิ้นงานอีพอกซีเรซินที่ใช้เม็ดทรายเบอร์ 3 ปริมาณ 30 phr เป็นสารตัวเติม



รูปที่ 4.7 ลักษณะชิ้นงานอีพอกซีเรซินที่ใช้เม็ดทรายเบอร์ 4 ปริมาณ 30 phr เป็นสารตัวเติม

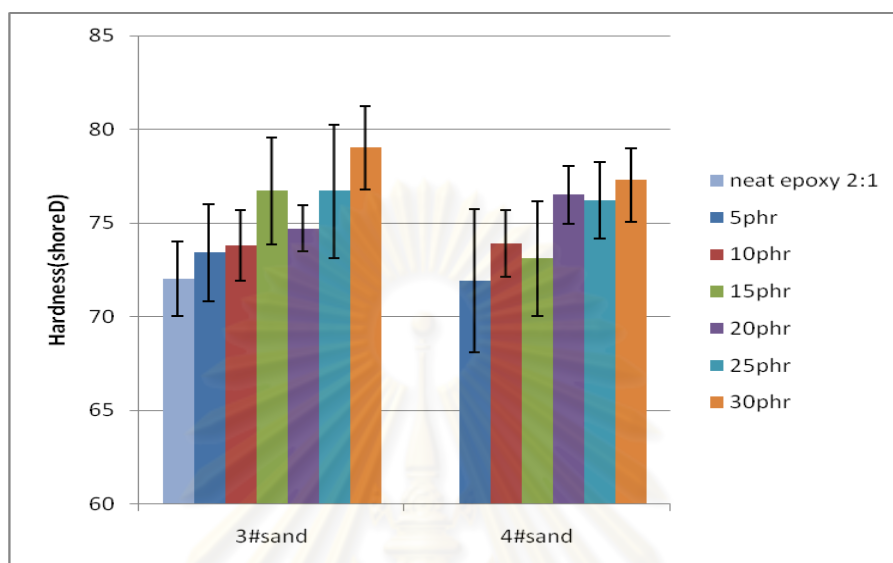


รูปที่ 4.8 อิทธิพลของปริมาณและขนาดอนุภาคสารตัวเติมเม็ดทราย ที่มีต่อความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน

#### 4.2.2 ผลการทดสอบความแข็ง (Hardness)

เมื่อทำการทดสอบความแข็งของชิ้นงานที่มีการเติมเม็ดทรายที่ปริมาณและขนาด ต่างๆกัน พบว่า ชิ้นงานอีพอกซีเรซินที่ผสมเม็ดทราย จะมีค่าความแข็งที่ผิวโดยเฉลี่ย (Hardness) สูงขึ้นเรื่อยๆตามปริมาณเม็ดทรายที่เพิ่มขึ้น โดยที่ทรายเบอร์ 3 มีแนวโน้มเพิ่มความแข็งที่ผิวโดย เฉลี่ยของชิ้นงานได้สูงกว่าชิ้นงานที่ผสมทรายเบอร์ 4 เล็กน้อย (ดังรูป 4. 9) ทั้งนี้เนื่องจากการวัด ความแข็งของชิ้นงานนั้นเป็นการวัดที่บริเวณผิวของชิ้นงานซึ่งทรายเบอร์ 3 นั้นมีขนาดใหญ่กว่าจึง มีการตกตะกอนรวมตัวกันอยู่ที่บริเวณผิวของชิ้นงานมากกว่าดังนั้นเมื่อทำการทดสอบจึงมีความ น่าจะเป็นที่หัวเข็มจะกดโดนบริเวณเม็ดทรายมากขึ้นซึ่งเม็ดทรายมีความแข็งมากกว่าเรซินดังนั้น

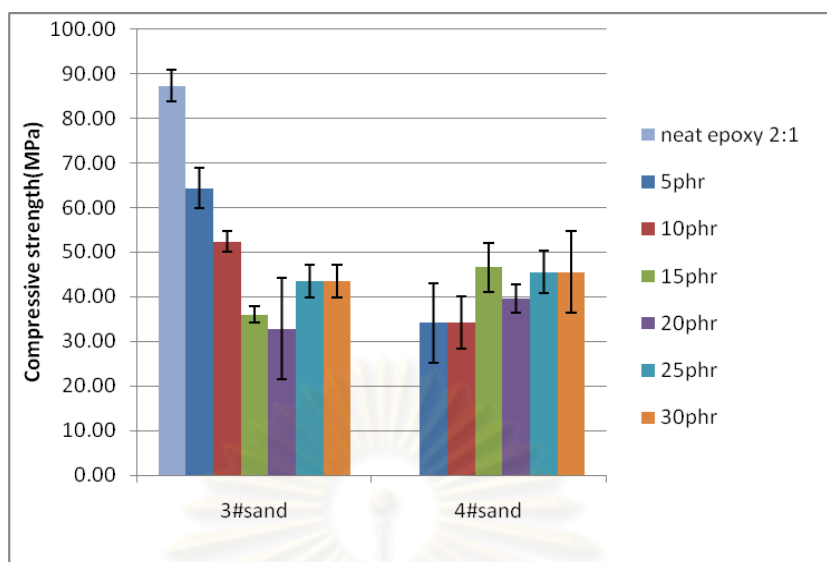
ชิ้นงานที่ผสมทรายเบอร์ 3 นั้นจึงมีแนวโน้มเพิ่มความแข็งที่ผิวโดยเฉลี่ยของชิ้นงานได้สูงกว่าชิ้นงานที่ผสมทรายเบอร์ 4 เล็กน้อย



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของสารตัวเติมเม็ดทรายที่มีต่อความแข็งของชิ้นงาน

#### 4.2.3 ผลการทดสอบความทนทานต่อแรงกดอัด (Compressive Strength)

เมื่อทำการทดสอบความทนทานต่อแรงกดอัดของชิ้นงานที่มีการเติมเม็ดทรายที่ปริมาณและขนาดต่างๆกัน พบว่า ความทนทานต่อแรงกดอัดของชิ้นงานนั้นลดต่ำลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานอีพอกซีที่ไม่ผสมเม็ดทราย (Neat Epoxy) ประมาณ 50-60% เนื่องจากขนาดเม็ดทรายนั้นมีขนาดใหญ่จึงตกตะกอนรวมตัวกันจึงทำให้การกระจายตัวนั้นเกิดขึ้นได้ไม่ดีส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงกดอัดลดลง และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณเม็ดทรายที่ใส่เข้าไปพบว่าทรายเบอร์ 3 มีค่าลดลงเนื่องจากขนาดเม็ดทรายนั้นมีขนาดใหญ่กระจายตัวไม่ดีจึงตกตะกอนรวมตัวกันทำให้เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเม็ดทรายเข้าไปนั้นเปรียบเสมือนการเพิ่ม stress concentrator ให้กับชิ้นงาน ส่วนชิ้นงานที่ผสมทรายเบอร์ 4 นั้นเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณเม็ดทรายที่ใส่เข้าไปพบว่าชิ้นงานที่ผสมทรายเบอร์ 4 มีแนวโน้มให้ความทนทานต่อแรงกดอัดสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเม็ดทรายในชิ้นงานมากขึ้นเนื่องจาก ทรายเบอร์ 4 นั้นมีขนาดเล็กกว่าทรายเบอร์ 3 ดังนั้นจึงกระจายตัวในชิ้นงานได้ดีกว่า(ดังรูปที่ 4.10)



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของสารตัวเติมเม็ดทรายที่มีต่อความทนต่อแรงกดอัดของชิ้นงาน

#### 4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของการใช้ผงหินปูน (Limestone Powder) เป็นสารตัวเติม

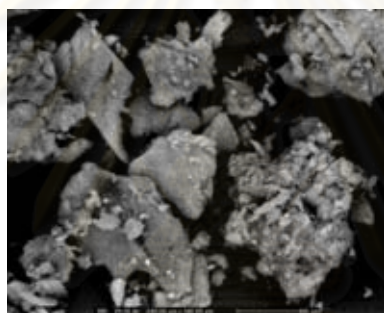
สารตัวเติมชนิดผงหินปูนนั้นนำมาจากโรงโม่หินบริเวณเขตเหมืองหินเชิงเทียนจังหวัดชลบุรีซึ่งผงหินปูนนี้เป็นสิ่งเหลือทิ้งจากโรงโม่หินที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมใกล้เคียงและยังไม่มีมีการนำไปใช้ประโยชน์ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแร่แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งมีรูปร่างผลึกที่ไม่แน่นอนแต่ลักษณะทางกายภาพมีเหลี่ยมมุมมากและแหลมคม (ดังรูปที่...) เมื่อทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ และขนาดของผงหินปูน (ดังรูปที่ 4.13-4.15) พบว่า ความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน ลดต่ำลงประมาณ 40-50% (ดังรูป 4.13) เนื่องจากการเพิ่มปริมาณผงหินปูนนั้นเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่ม stress concentrator ให้กับชิ้นงานเนื่องจากสภาพผิวของเรซินและผงหินปูนนั้นเข้ากันได้ไม่ดีสังเกตได้จากรอยต่อระหว่างเฟสทั้งสองนั้นยังแยกกันอยู่อย่างชัดเจน (ดังรูปที่ 4.11) ส่วนขนาดที่เล็กของอนุภาคผงหินปูนนั้นมีแนวโน้มทำให้ชิ้นงานรับแรงกระแทกได้มากขึ้นเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กลงนั้นจะทำให้พื้นที่ผิวในการถ่ายเทพลังงานจากเรซินไปยังผงหินปูนเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้น

สำหรับสมบัติด้านความแข็งนั้น อิทธิพลด้านปริมาณหินปูนที่มากขึ้นเมื่อใส่เข้าไปในชิ้นงานนั้นมีแนวโน้มช่วยเพิ่มความแข็งโดยเฉลี่ยให้กับชิ้นงานมากขึ้น เนื่องจากปริมาณผงหินปูนที่มากขึ้นนั้นมีความน่าจะเป็นสูงที่หัวเข็มจะกดโดนบริเวณที่เป็นหินปูนซึ่งมีความแข็งมากกว่าเรซิน จึงทำให้ความแข็งของชิ้นงานโดยเฉลี่ยสูงขึ้นตามปริมาณหินปูนที่ผสมเข้าไปในชิ้นงาน ส่วนอิทธิพลทางด้านขนาดของผงหินปูนคือ ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานนั้นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น



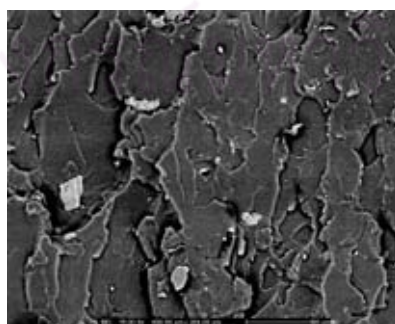
เมื่อมีการใช้ผงหินปูนที่ขนาดเล็กลง เนื่องจากขนาดที่เล็กลงช่วยเพิ่มการกระจายตัวของผงหินปูนในเนื้อเรซินได้ทั่วทั้งชิ้นงาน เนื่องจากขนาดที่เล็กใช้ในการทดลองนี้จะไม่มีการตกตะกอนจึงทำให้การกระจายตัวเกิดขึ้นได้ดีทั่วทั้งชิ้นงานโดยเฉพาะผงหินปูนที่มีขนาดเล็กดังนั้นก็จึงทำให้ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผสมผงหินปูนขนาดเล็กดีกว่าชิ้นงานที่ผสมผงหินปูนขนาดใหญ่

สำหรับสมบัติด้านความทนต่อแรงกดอัดนั้น อิทธิพลด้านปริมาณหินปูนที่มากขึ้นเมื่อใส่เข้าไปในชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับชิ้นงานอีพอกซีที่ไม่ผสมผงหินปูน (Neat Epoxy) แม้จะเพิ่มปริมาณผงหินปูนในส่วนผสมสูงถึง 30 phr (ดังรูปที่ 4.16) ส่วนอิทธิพลทางด้านขนาดของผงหินปูนต่อความทนต่อแรงกดอัดของชิ้นงานนั้นไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน เมื่อเทียบกับชิ้นงานอีพอกซีที่ไม่ผสมผงหินปูน (Neat Epoxy) ดังนั้น คุณสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงกดอัดจึงเปรียบเสมือนการควบคุมโดยเรซิน(resin control)



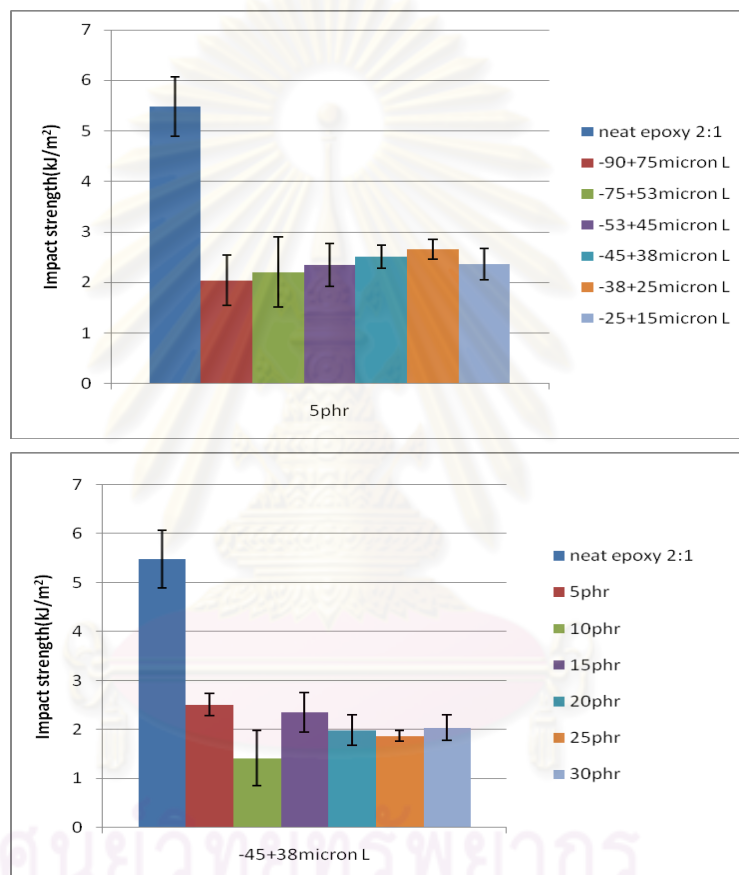
รูปที่ 4.11 ลักษณะรูปร่างทางกายภาพของผงหินปูน

ส่วนการใช้ผงหินปูนขนาด (As received) มีความทนต่อแรงกระแทกใกล้เคียงกับการใช้ผงหินปูนขนาดอนุภาค -45+38 ไมโครเมตร (ดังรูป 4.14)

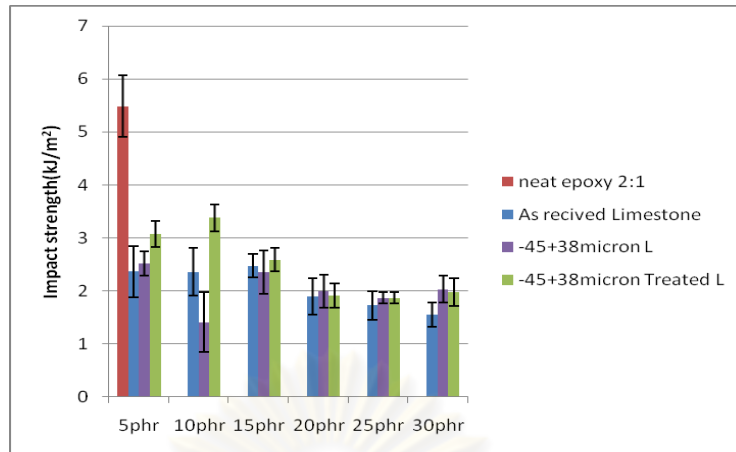


รูปที่ 4.12 อีพอกซีเรซินที่ใช้สารตัวเติมเป็นผงหินปูนขนาด-45+38 ไมโครเมตร

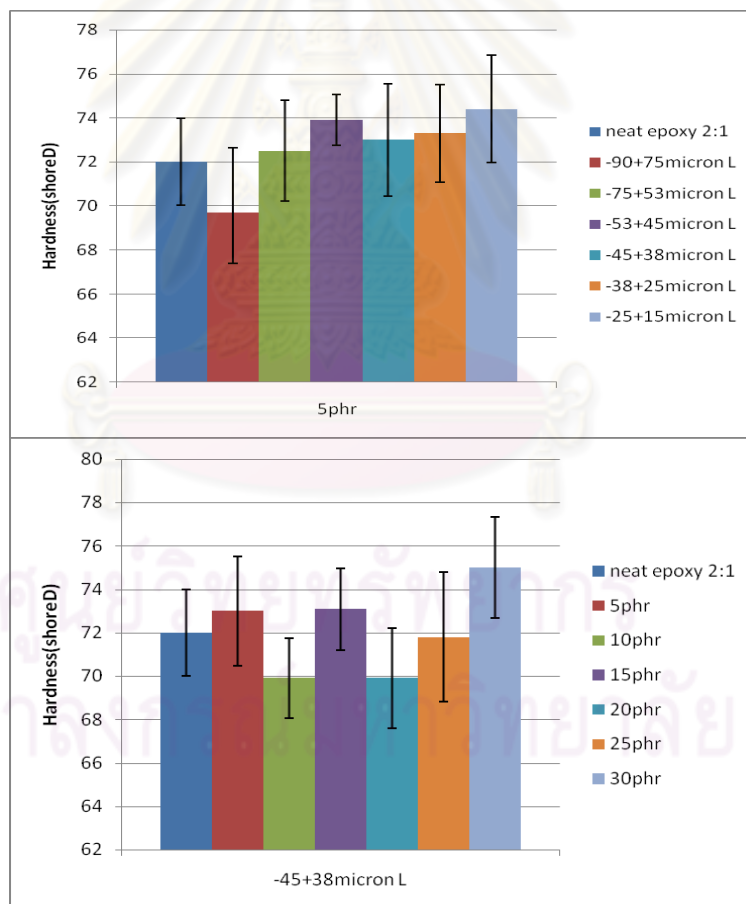
นอกจากนี้ยังพบว่าหากทำการปรับสภาพผิวผงหินปูนด้วย Silane Coupling Agent จะช่วยเพิ่มความทนต่อแรงกระแทกเพียงเล็กน้อย (ดังรูป 4.14) เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของหินปูนนั้นมีแร่ควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบเพียง 20-25 % ซึ่งสารปรับสภาพผิวสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้เฉพาะแร่ควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) จึงทำให้การปรับสภาพผิวนั้นเกิดขึ้นได้ไม่ทั่วถึงจึงส่งผลให้สมบัติด้านแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และเพื่อเป็นการลดต้นทุน จึงไม่จำเป็นต้องทำการปรับสภาพผิวสารตัวเติม



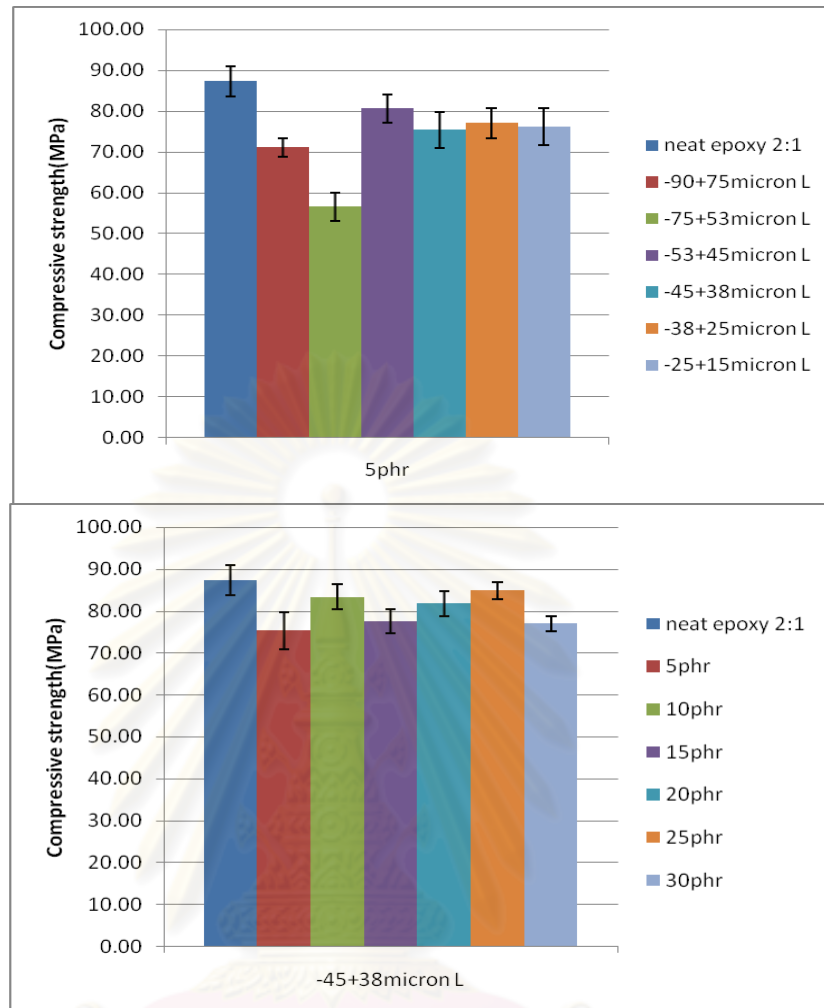
รูปที่ 4.13 อิทธิพลของขนาดอนุภาคและปริมาณผงหินปูนที่มีต่อความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน



รูปที่ 4.14 อิทธิพลของขนาดอนุภาค ปริมาณ และการปรับปรุงผิวของผงหินปูน ที่มีต่อความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของขนาดอนุภาคและปริมาณผงหินปูนที่มีต่อความแข็งชิ้นงาน



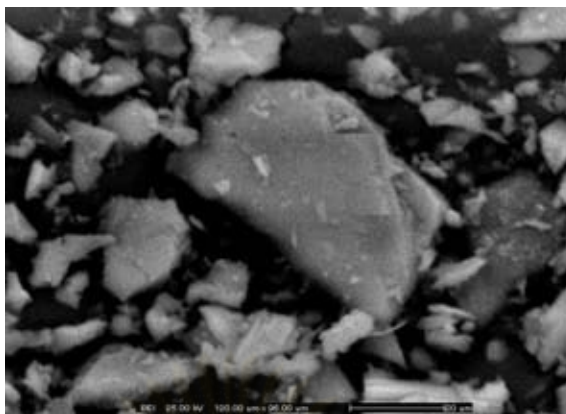
รูปที่ 4.16 อิทธิพลของขนาดอนุภาคและปริมาณผงหินปูนที่มีต่อความทนต่อแรงกดอัดของชิ้นงาน

#### 4.4 การศึกษาสมบัติของอีพอกซีเรซินที่ผสมผงหินแกรนิต(Granite Powder)

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวัสดุสารตัวเติมที่เป็นผงหินแกรนิต โดยผงหินแกรนิตที่นำมาศึกษานั้นนำมาจากโรงตัดแต่งหินแกรนิต จังหวัดตาก องค์ประกอบทางเคมีนั้นประกอบด้วยแร่ควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก ลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปรูปร่างของอนุภาคผงหินแกรนิตนั้นมีเหลี่ยมมุมและแหลมคมสูง (ดังรูปที่ 4.17) ซึ่งงานวิจัยนี้จะศึกษาโดยการเติมผงหินแกรนิตด้วยปริมาณ 5, 10, 15, 20, 25, 30 phr โดยผลการทดสอบเป็นดังนี้

สมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ของชิ้นงาน ลดต่ำลงประมาณ 40-50% เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่การใส่สารตัวเติม (ดังรูปที่ 4.19) สารตัวเติมที่ใส่เข้าไปนั้น

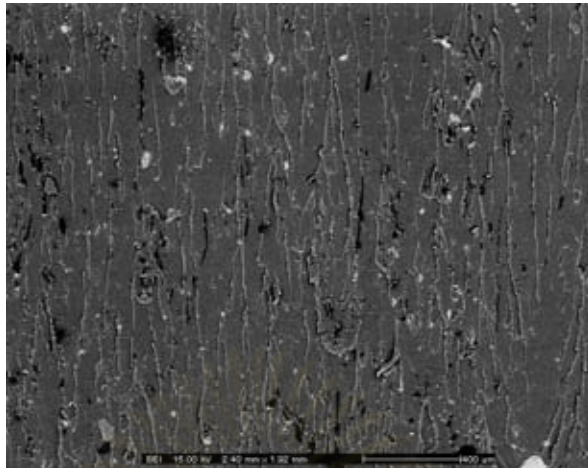
เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่ม stress concentrator ให้กับชิ้นงานเนื่องจากสภาพผิวของเรซินและผงหินปูนนั้นเข้ากันได้ไม่ดีสังเกตได้จากรอยต่อระหว่างเฟสทั้งสองนั้นยังแยกกันอยู่อย่างชัดเจน(ดังรูปที่ 4.17ก) แต่เมื่อพิจารณากรณีผงหินแกรนิตที่ใช้ปริมาณต่ำกว่า 20 phr พบว่าคุณสมบัติด้านแรงกระแทกนั้นจะถูกควบคุมด้วยเรซิน (resin control)เปรียบเสมือน stress concentrator ที่เกิดจากผงหินแกรนิตที่ให้กับชิ้นงานนั้นยังไม่มากเพียงพอที่จะส่งผลกระทบต่อชิ้นงานโดยรวม แต่เมื่อพิจารณากรณีการใช้ผงหินแกรนิตที่ปริมาณสูงกว่า 20 phr พบว่า คุณสมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทกนั้นถูกควบคุมด้วยสารตัวเติม (filler control) เปรียบเสมือน stress concentrator ที่เกิดจากผงหินแกรนิตที่ให้กับชิ้นงานนั้นมากเพียงพอที่จะส่งผลกระทบต่อชิ้นงานโดยรวมเนื่องจากสภาพผิวของเรซินและผงหินปูนนั้นเข้ากันได้ไม่ดี จึงส่งผลให้ความทนต่อแรงกระแทกนั้นลดลงอย่างชัดเจน ส่วนอิทธิพลด้านขนาดของผงหินแกรนิตต่อความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานนั้นพบว่าชิ้นงานที่ผสมผงหินแกรนิตแต่ละขนาดเมื่อนำไปทดสอบความทนต่อแรงกระแทกมีค่าลดลง 50-60% เมื่อเปรียบเทียบกับเรซินที่ไม่มีการผสมสารตัวเติมแต่เมื่อพิจารณาเฉพาะเรซินที่มีการผสมสารตัวเติมพบว่าความทนต่อแรงกระแทกนั้นมีแนวโน้มคงที่หรือไม่มีนัยสำคัญ ยกเว้นชิ้นงานที่ผสมผงหินแกรนิตขนาด -45+38 ไมโครเมตร สามารถรับแรงกระแทกได้สูงที่สุด เนื่องจากขนาดอนุภาค -90+75 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่านั้นพบว่าผงหินแกรนิตนั้นกระจายตัวได้ดีแต่มีฟองอากาศเยอะ(ดังรูปที่ 4.18ก) จึงเป็น stress concentrator ของชิ้นงานแต่เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ผสมผงหินปูนขนาด -25+38 ไมโครเมตรซึ่งมีขนาดเล็กกว่าพบว่าการกระจายตัวไม่ดีเกิดการรวมตัวกันของผงหินแกรนิตเป็นกลุ่มๆ (ดังรูปที่ 4.18ข) จึงเป็น stress concentrator ของชิ้นงานเช่นกันดังนั้นที่ขนาดผงหินแกรนิต -45+38 ไมโครเมตรนั้นจึงเป็นจุดสมดุล (optimum)ของการกระจายตัวที่ดีและการเกิดฟองอากาศที่น้อย(ดังรูปที่4.17ค)จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่ผสมผงหินแกรนิตที่ขนาด -45+38 ไมโครเมตรมีค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าขนาดอื่น และเมื่อนำผงหินแกรนิตที่ขนาด -45+38 ไมโครเมตรไปปรับสภาพผิวด้วย Silane coupling agent พบว่าสมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทกนั้นเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากผงหินแกรนิตมีควอดซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นองค์ประกอบหลักจึงสามารถทำปฏิกิริยากับสารปรับสภาพผิวได้ดีทำให้การถ่ายเทพลังงานจากเรซินสู่ผงหินแกรนิตนั้นดีขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากรูปร่างของหินแกรนิตนั้นมีเหลี่ยมมุมเยอะและแหลมคมจึงเป็นการง่ายต่อการเปิดผิวของการแตกหักจึงทำให้คุณสมบัติด้านความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อมีการปรับสภาพผิว



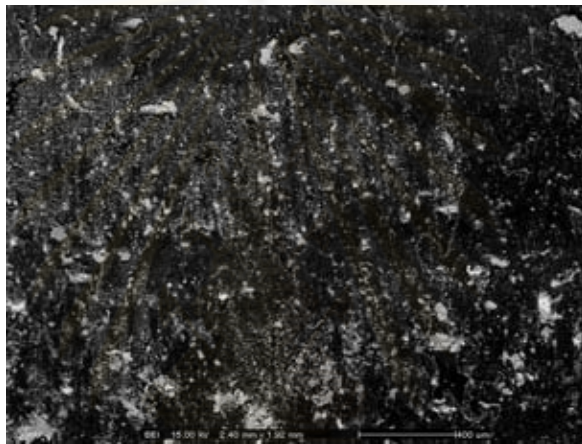
รูปที่ 4.17 ลักษณะรูปร่างทางกายภาพของผงหินแกรนิต

สมบัติด้านความแข็ง (Hardness) เมื่อพิจารณาอิทธิพลของผงหินแกรนิตที่ใส่เข้าไปในชิ้นงานพบว่าชิ้นงานมีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ใส่สารตัวเติม(ดังรูปที่ 4.20) เนื่องจากผงหินแกรนิตนั้นมีความแข็งมากกว่าเรซินจึงทำให้ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานนั้นสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณและขนาดผงแกรนิตที่ผสมเข้าไปในชิ้นงานนั้นพบว่า เมื่อมีชิ้นงานมีการผสมผงหินแกรนิตในปริมาณที่มากขึ้นสมบัติด้านความแข็งของชิ้นงานนั้นมีแนวโน้มคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากการกระจายตัวของผงหินแกรนิตเกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นงานและไม่มีการตกตะกอน ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยนั้นจึงค่อนข้างคงที่แม้ว่าจะมีการเพิ่มหรือปรับเปลี่ยนปริมาณและขนาดของผงหินแกรนิตในชิ้นงานก็ตาม

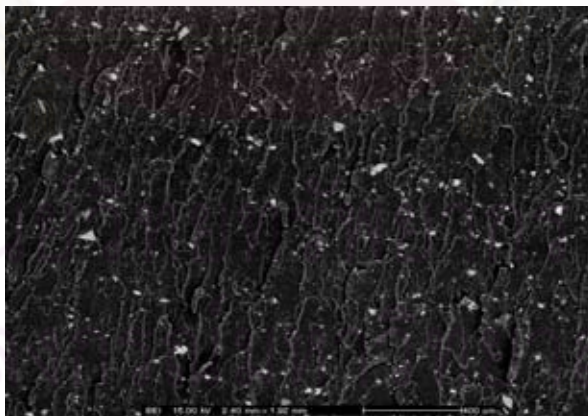
สมบัติด้านความทนต่อแรงกดอัด (Compressive Strength)เมื่อพิจารณาอิทธิพลของผงหินแกรนิตที่ใส่เข้าไปในชิ้นงานพบว่าชิ้นงานมีค่าความความทนต่อแรงกดอัดลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชิ้นงานอีพอกซีที่ไม่ผสมผงแกรนิต (Neat Epoxy) (ดังรูปที่ 4.21) เนื่องจากอนุภาคของหินแกรนิตนั้นมีเหลี่ยมมุมและแหลมคมจึงเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีในการเปิดผิวของการแตกหักทำให้ชิ้นงานนั้นแตกหักได้ง่ายขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบ ชิ้นงานที่มีการผสมผงหินแกรนิตด้วยตัวเองพบว่าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนปริมาณและขนาดของผงหินแกรนิตค่าความทนต่อแรงกดอัดนั้นมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงหรือคงที่แม้จะเพิ่มปริมาณผงแกรนิตในส่วนผสมสูงถึง 30 phr เนื่องจาก stress concentrator ที่เกิดจากผงหินแกรนิตในชิ้นงานนั้นมีค่าน้อยเกินไปที่จะส่งผลต่อความทนต่อแรงกดอัดโดยรวมของชิ้นงานเนื่องจากสมบัติที่เกิดขึ้นนั้นถูกควบคุมด้วยเรซิน (resin control)



4.18ก)

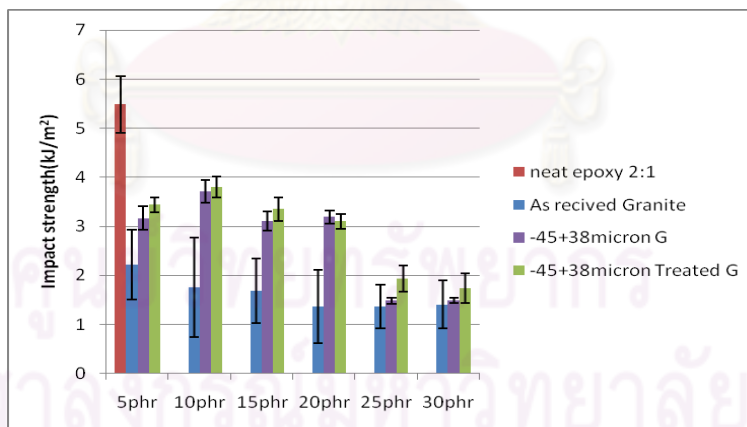
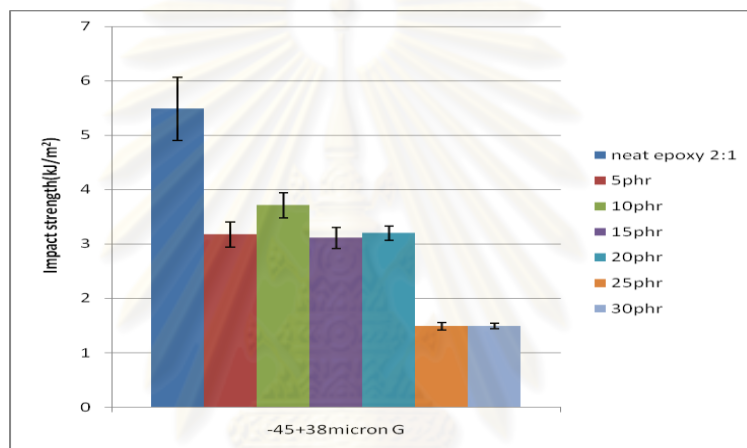
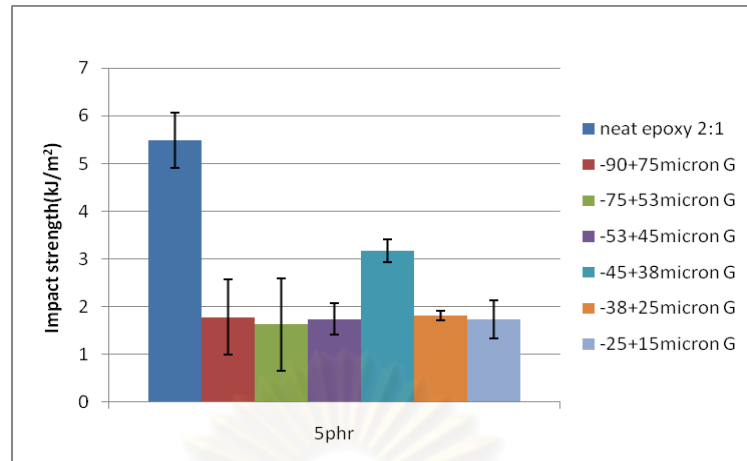


4.18ข)



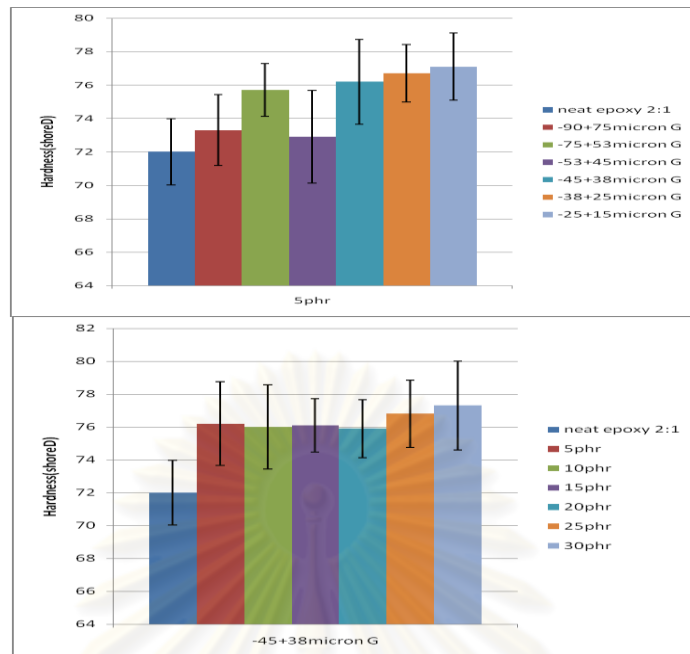
4.18ค)

รูปที่ 4.18 อีพอกซีเรซินที่ใช้สารตัวเติมเป็นผงหินแกรนิต  
 ก)ผงหินแกรนิตขนาด-90+75 ไมโครเมตร  
 ข)ผงหินแกรนิตขนาด-25+38 ไมโครเมตร  
 ค)ผงหินแกรนิตขนาด-45+38 ไมโครเมตร

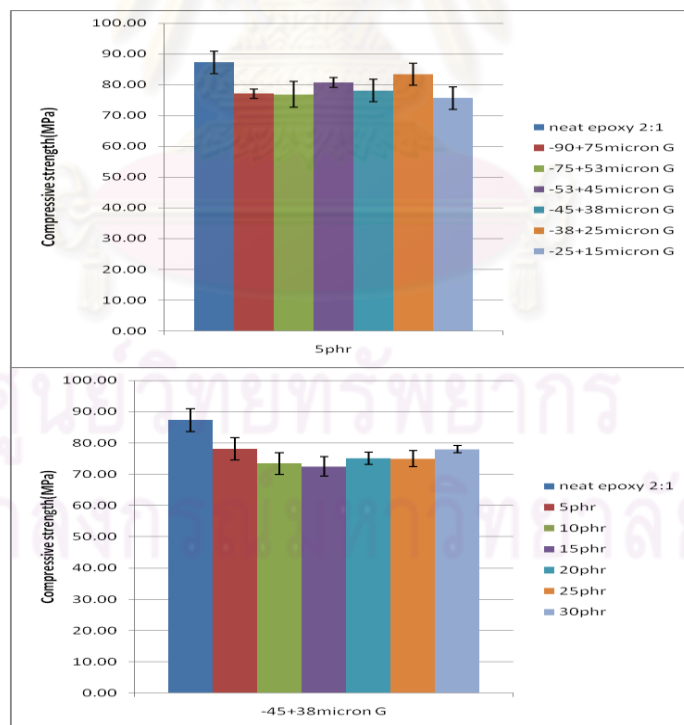


รูปที่ 4.19 อิทธิพลของ ขนาดอนุภาค ปริมาณ และการปรับสภาพผิว ผงแกรนิต ที่มีต่อความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน





รูปที่ 4.20 อิทธิพลของ ขนาดอนุภาค และ ปริมาณ ผงแกรนิต ที่มีต่อความแข็งของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน



รูปที่ 4.21 อิทธิพลของ ขนาดอนุภาค และ ปริมาณ ผงแกรนิต ที่มีต่อความทนต่อแรงกดอัดของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน

จากผลการศึกษาอิทธิพลของการเติมเม็ดทราย ผงหินปูน และผงแกรนิต ทั้ง 3 ชนิดที่ ขนาดและปริมาณต่างๆกัน ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซิน สรุปได้ดังนี้

- หากเปรียบเทียบอิทธิพลของสารตัวเติมแต่ละชนิดที่มีต่อความทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ของชิ้นงาน จะพบว่าสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้ความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานลดลงในสัดส่วนใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 40-50% เมื่อเทียบกับชิ้นงานจากอีพอกซีเรซินที่ไม่ผสมสารตัวเติม (Neat Epoxy) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการกระจายตัวของผงแร่ในเนื้อเรซิน ซึ่งแสดงผลเด่นชัดกรณีใช้ผงแกรนิตขนาดอนุภาค  $-45+38$  ไมโครเมตร จะมีแนวโน้มให้ค่า Impact Strength สูงสุด
- หากเปรียบเทียบอิทธิพลของสารตัวเติมแต่ละชนิดที่มีต่อความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงาน จะพบว่าเม็ดทรายกับผงแกรนิต ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง ส่งผลให้ความแข็งของชิ้นงานสูงกว่าชิ้นงานจากอีพอกซีเรซินที่ไม่ผสมสารตัวเติม (Neat Epoxy) เล็กน้อย ขณะที่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญกรณีผงหินปูน
- หากเปรียบเทียบอิทธิพลของสารตัวเติมแต่ละชนิดที่มีต่อความทนต่อแรงกดอัด (Compressive Strength) ของชิ้นงาน จะพบว่าการใช้ผงหินปูนหรือผงแกรนิต ทดแทนเม็ดทราย จะช่วยเพิ่ม Compressive Strength ให้มีค่ากลับไปใกล้เคียงชิ้นงานจาก อีพอกซีเรซินที่ไม่ผสมสารตัวเติม (Neat Epoxy)
- หากพิจารณาเฉพาะกรณี **อีพอกซีเรซินผสมเม็ดทราย** จากผลการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล อาจสรุปได้ดังนี้
  - การเลือกใช้ขนาดเม็ดทรายนั้นอาจกล่าวโดยรวมได้ว่า หากความแข็ง และ/หรือ ความทนต่อแรงกดอัด เป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ ทรายเบอร์ 3 มีแนวโน้มเหมาะสมกว่า ขณะที่ทรายเบอร์ 4 จะเหมาะสมกว่า หากความทนต่อแรงกระแทก เป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์

- ขนาดอนุภาคของผงแกรนิตไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ จึงสามารถใช้ผงแกรนิตโดยไม่ต้องคัดขนาด ยกเว้นขนาด  $-45+38$  ไมโครเมตร ซึ่งมีแนวโน้มให้ชิ้นงานที่มี Impact Strength สูงสุด (รูปที่ 4.12)
- การใช้สารปรับสภาพผิวกับหินปูนและหินแกรนิตช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลกับชิ้นงานได้เพียงเล็กน้อย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

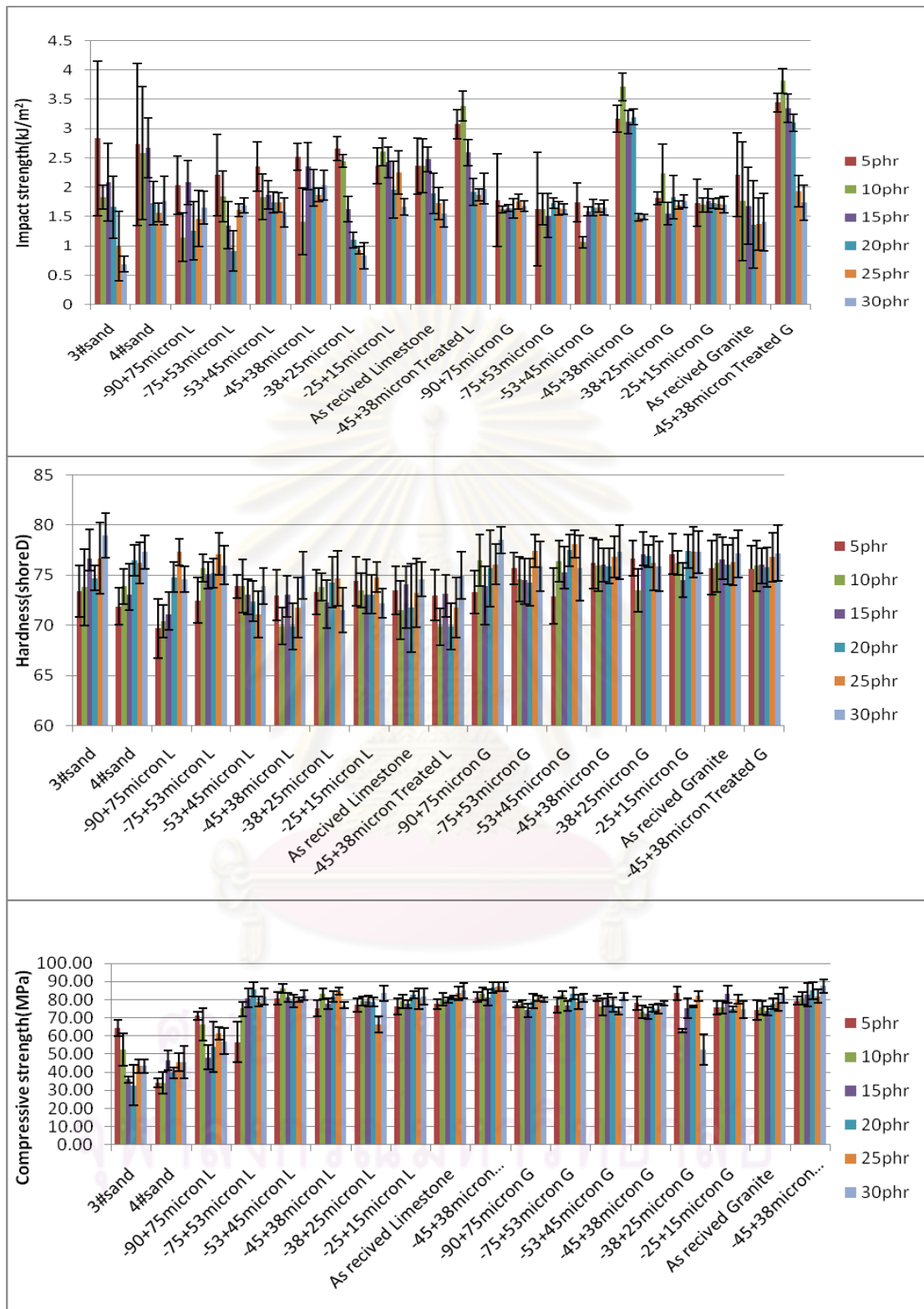
## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สืบเนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการพื้นผิวที่มีสมบัติทนต่อสารเคมี และ /หรือ ทนต่อการขีดขูด (มีความแข็งสูงพอ) ทนต่อแรงกระแทก และ /หรือ แรงกดอัด อีพอกซีเรซินผสมเม็ดทราย จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความนิยมในปัจจุบัน ทั้งนี้การผสมเม็ดทรายมี 2 วัตถุประสงค์หลัก คือ การลดต้นทุนจากการลดปริมาณการใช้เรซิน กับ การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการหาสารตัวเติมประเภทแร่ (Mineral Fillers) ที่สามารถใช้ทดแทนเม็ดทรายในอีพอกซีเคลือบผิวพื้นโรงงาน โดยที่ต้นทุนไม่สูงขึ้น สารตัวเติมที่เลือกใช้จึงมุ่งเน้นการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้หรือของเสียจากอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่า และ /หรือ ลดปัญหาการจัดการวัสดุเหลือใช้หรือของเสียดังกล่าว ทั้งนี้ได้เลือกใช้ **ผงหินปูน** ซึ่งเป็นของเสียจากโรงโม่หิน และ **ผงแกรนิต** ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานตัดแต่งหินแกรนิต เป็นสารตัวเติมเพื่อทดแทนการใช้เม็ดทรายในผลิตภัณฑ์ปัจจุบัน

การศึกษาเริ่มต้นจากการหาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างอีพอกซีเรซินกับสารช่วยการแข็งตัว (Epoxy : Hardener) โดยทดสอบเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานอีพอกซีเรซินผสมสารช่วยแข็ง สัดส่วน 1:1, 2:1, 3:1 ผลปรากฏว่าสัดส่วน Epoxy : Hardener = 2:1 มีแนวโน้มเหมาะสมที่สุด จึงเลือกใช้สัดส่วนนี้สำหรับเตรียมชิ้นงานตลอดการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซินผสมเม็ดทราย ผงหินปูน และผงแกรนิต ที่มีขนาดและปริมาณต่างๆกัน ปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- การใช้สารตัวเติมชนิดผงหินปูน และผงหินแกรนิตในอีพอกซีเรซินนั้นช่วยเพิ่ม strength ได้มากกว่าการใช้งานในปัจจุบันซึ่งใช้สารตัวเติมชนิดเม็ดทราย
- ขนาดและปริมาณของอนุภาคผงหินปูนและผงหินแกรนิตไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงกลในการใช้เป็นสารตัวเติมในอีพอกซีเรซิน ยกเว้น ผงหินแกรนิตที่ขนาด  $-45+38$  ไมโครเมตร จะมีสมบัติด้านแรงกระแทกโดดเด่นกว่าขนาดอื่นๆ
- สมบัติเชิงกลด้านแรงกระแทกในการใช้สารตัวเติมชนิดผงหินปูนและผงหินแกรนิตจะมากที่สุดที่ 25 phr และ 15 phr ตามลำดับ และจะลดลงเมื่อใช้สารตัวเติมมากขึ้น



รูปที่ 5.1 อิทธิพลของ ขนาดอนุภาค และ ปริมาณ สารตัวเติม ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานอีพอกซีเรซิน

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษากลไกหรือแนวทางการเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างเรซินกับสารตัวเติม รวมถึงแนวทางการเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของสารตัวเติม เช่นการใช้ coupling agent ปรับสภาพผิวสารตัวเติมก่อนการผสม การกวนหรือเขย่าหรือใช้แรงสั่น ช่วยการกระจายตัวของผงแร่ ก่อนการใส่ Hardener ฯลฯ โดยคาดว่า Impact Strength ของอีพอกซีเรซินที่มีสารตัวเติม น่าจะสูงขึ้นได้
2. ควรศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่มีการใช้สารตัวเติมผสมระหว่าง
  - เม็ดทราย + ผงหินปูน
  - เม็ดทราย + ผงแกรนิต
  - ผงหินปูน + ผงแกรนิต
  - เม็ดทราย + ผงหินปูน + ผงแกรนิต
3. ควรศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่มีการใช้สารตัวเติมคละขนาด คือ ไม่ผ่านการคัดขนาด หรือใช้ผสมระหว่างละเอียดน้อยกับละเอียดมาก โดยคาดว่าความสามารถในการกระจายตัวอาจสูงขึ้น
4. ควรใช้เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบ Weight Impact เนื่องจากลักษณะการทดสอบสอดคล้องกับลักษณะการใช้งานมากกว่าการใช้ Pendulum Impact
5. สารเติมหินปูนนั้นมีคุณสมบัติเป็นเบสอ่อนๆควรศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก่อนการนำไปใช้งานจริง

## รายการอ้างอิง

ดาวัลย์ วิวรรณะเดช. โครงการจัดทำแผนการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมในพื้นที่การทำเหมืองหิน.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

วิชาญ วิชาภัย บุนนาค. อิทธิพลของปัจจัยในการบ่มต่อสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซินเสริมใย

แก้วสำหรับเคลือบคอนกรีตและมอร์ตาร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

2543.

อรอุษา สรวารี. สารเคลือบผิว(สี วาร์นิช และแล็กเกอร์). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

C.B.Ng, L.S. Schadler, and R.W.Siegel, Synthesis And Mechanical Properties of TiO<sub>2</sub>

Epoxy Nanoparticle. Material Science and Engineering Polytechnic Institute,

1999.

T.Maity, B.C.Samanta ,Dalai , A.K.Banthia. Curing study of epoxy resin by new aromatic

amine functional curing agent along with mechanism and thermal evaluation.

Material Science and Engineering Vidyasagar University, 2007.

Y. Zhang, Y. Zhang, and R.Ning. Effect of nanoparticle SiO<sub>2</sub> on the performance of

nanoparticle. Department of Chemical Engineering Northwestern Polytechnical

University, 2003.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลองการทดลองการทดสอบแรงกระทำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก 1 ข้อมูลการทดลองการทดสอบแรงกระแทกของวัสดุเสริมองค์ประกอบชนิดอีพอกซีเรซินที่ผสมกับสารตัวเติมชนิดต่างๆโดยมีการปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคสารตัวเติมและปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ในการผสม

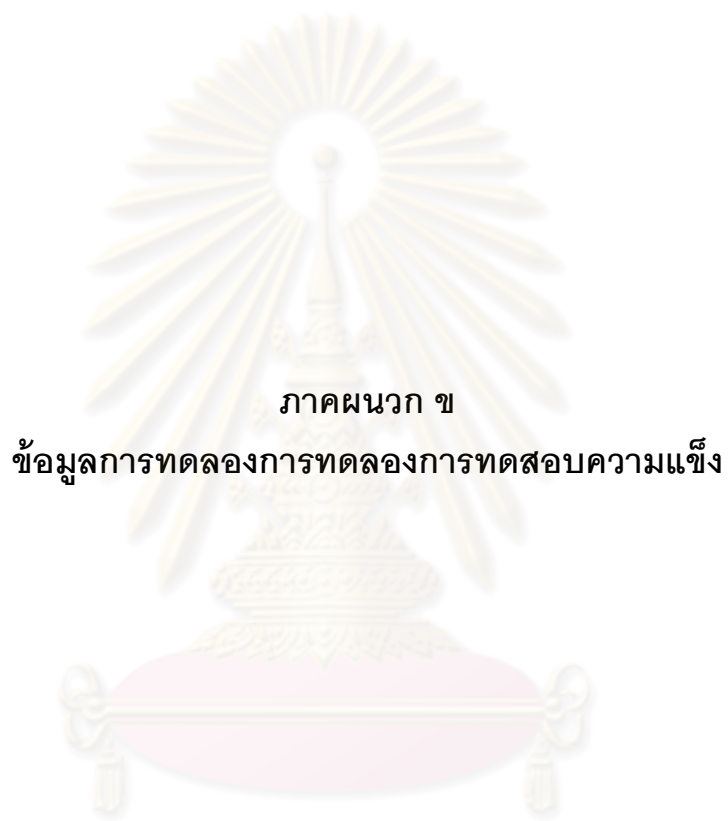
ชนิดและปริมาณ สารเสริมแรง	Impact strength(kJ/m <sup>2</sup> )													
	neat epoxy		5phr		10phr		15phr		20phr		25phr		30phr	
	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD
neat epoxy 1:1	ไม่แตก	ไม่แตก												
neat epoxy 2:1	5.482	0.582												
neat epoxy 3:1	1.789	0.498												
3#sand			2.829	1.317	1.828	0.204	2.086	0.658	1.662	0.532	0.997	0.595	0.692	0.137
4#sand			2.729	1.378	2.582	1.132	2.67	0.511	1.731	0.372	1.569	0.159	1.773	0.413

ชนิดและปริมาณสารเสริมแรง	Impact strength(kJ/m <sup>2</sup> )													
	neat epoxy		5phr		10phr		15phr		20phr		25phr		30phr	
	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD
-90+75micron L			2.040	0.496	1.148	0.410	2.085	0.376	1.261	0.494	1.468	0.482	1.65	0.281
-75+53micron L			2.206	0.689	1.847	0.433	1.35	0.401	0.914	0.340	1.61	0.113	1.692	0.132
-53+45micron L			2.349	0.421	1.835	0.385	1.869	0.247	1.742	0.180	1.738	0.165	1.571	0.249
-45+38micron L			2.515	0.228	1.414	0.567	2.357	0.404	1.989	0.314	1.872	0.113	2.034	0.258
-38+25micron L			2.659	0.199	2.445	0.107	1.626	0.219	1.101	0.131	0.925	0.066	0.835	0.225
-25+15micron L			2.368	0.308	2.606	0.236	2.422	0.265	1.962	0.485	2.255	0.370	1.667	0.144
As recived Limstone			2.364	0.478	2.362	0.456	2.475	0.216	1.894	0.346	1.726	0.274	1.551	0.226
-45+38micron Treated L			3.073	0.244	3.383	0.256	2.591	0.223	1.916	0.229	1.867	0.105	1.975	0.260

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดและปริมาณสารเสริมแรง	Impact strength(kJ/m <sup>2</sup> )													
	neat epoxy		5phr		10phr		15phr		20phr		25phr		30phr	
	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD
-90+75micron G			1.780	0.795	1.623	0.061	1.643	0.059	1.635	0.166	1.752	0.128	1.683	0.089
-75+53micron G			1.631	0.969	1.624	0.267	1.515	0.378	1.726	0.091	1.644	0.116	1.628	0.092
-53+45micron G			1.741	0.329	1.065	0.095	1.587	0.079	1.652	0.136	1.65	0.069	1.65	0.125
-45+38micron G			3.169	0.234	3.712	0.234	3.110	0.195	3.196	0.133	1.485	0.067	1.491	0.047
-38+25micron G			1.815	0.105	2.237	0.499	1.551	0.193	1.83	0.367	1.692	0.070	1.765	0.108
-25+15micron G			1.735	0.399	1.699	0.124	1.772	0.199	1.724	0.083	1.72	0.093	1.707	0.140
As recived Granite			2.214	0.710	1.761	1.016	1.681	0.658	1.364	0.744	1.370	0.449	1.408	0.490
-45+38micron Treated G			3.441	0.156	3.809	0.212	3.349	0.238	3.103	0.146	1.930	0.267	1.738	0.303

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองการทดลองการทดสอบความแข็ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข1 ข้อมูลการทดลองการทดสอบความแข็งของวัสดุเสริมองค์ประกอบชนิดอีพอกซีเรซินที่ผสมกับสารตัวเติมชนิดต่างๆโดยมีการปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคสารตัวเติมและปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ในการผสม

ชนิดและปริมาณสารเสริมแรง	Hardness(shore D)													
	neat epoxy		5phr		10phr		15phr		20phr		25phr		30phr	
	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD
neat epoxy 1:1	45.7	3.4												
neat epoxy 2:1	72	2.0												
neat epoxy 3:1	66.6	3.6												
3#sand			73.4	2.6	73.8	3.8	76.7	2.8	74.7	1.2	76.7	3.6	79	2.2
4#sand			71.9	1.9	73.9	1.8	73.1	3.1	76.5	1.6	76.2	2.0	77.3	1.7

ชนิดและปริมาณสารเสริมแรง	Hardness(shore D)													
	neat epoxy		5phr		10phr		15phr		20phr		25phr		30phr	
	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD
-90+75micron L			69.7	2.9	70.4	1.6	71.1	2.2	74.8	1.5	77.3	1.3	74.6	1.3
-75+53micron L			72.5	2.3	75.7	1.3	75.1	1.2	75.2	1.4	77.1	2.1	76	1.9
-53+45micron L			73.9	1.2	73.9	2.7	73.1	1.5	72.4	2.0	71.1	2.3	73.9	1.8
-45+38micron L			73	2.5	69.9	1.8	73.1	1.9	69.9	2.3	71.8	3.0	75	2.3
-38+25micron L			73.3	2.2	73.8	1.4	72.3	2.2	74.3	2.5	74.7	2.7	71.5	2.2
-25+15micron L			74.4	2.4	73.5	1.7	73.1	3.5	73.1	1.9	74.8	1.5	72.2	1.5
As recived Limstone			73.5	2.4	71.5	2.9	74.1	1.8	71.7	4.4	73.3	3.4	74.6	1.7
-45+38micron Treated L			73.0	2.5	69.9	1.8	73.1	1.9	69.9	2.3	71.8	3.0	75.0	2.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดและปริมาณสาร เสริมแรง	Hardness(shore D)													
	neat epoxy		5phr		10phr		15phr		20phr		25phr		30phr	
	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD
-90+75micron G			73.3	2.1	76.5	2.6	73.9	1.9	75.7	3.8	76.1	2.0	78.5	1.3
-75+53micron G			75.7	1.6	74.6	2.3	74.5	2.2	74.3	2.4	77.4	1.6	75.9	2.5
-53+45micron G			72.9	2.8	76.4	2.0	75.3	2.6	77.5	1.6	78.1	1.4	75.7	3.2
-45+38micron G			76.2	2.5	76	2.6	76.1	1.6	75.9	1.8	76.8	2.0	77.3	2.7
-38+25micron G			76.7	1.7	73.5	2.2	77.1	2.2	76.9	1.1	76.2	2.7	75.9	2.5
-25+15micron G			77.1	2.0	76.2	1.2	74.5	1.8	77.4	1.7	77.3	2.5	77.3	2.1
As recived Granite			75.7	2.7	76.2	2.9	76.6	2.2	76.1	2.0	76.3	2.4	77.1	2.4
-45+38micron Treated G			75.6	2.4	75.9	2.5	76.1	1.6	75.8	1.9	76.8	2.4	77.2	2.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลองการทดลองการทดสอบแรงกดอัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค 1 ข้อมูลการทดลองการทดสอบแรงกดอัดของวัสดุเสริมองค์ประกอบชนิดอีพอกซีเรซินที่ผสมกับสารตัวเติมชนิดต่างๆโดยมีการปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคสารตัวเติมและปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ในการผสม

ชนิดและปริมาณสารเสริมแรง	Compressive strength(MPa)													
	neat epoxy		5phr		10phr		15phr		20phr		25phr		30phr	
	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD
neat epoxy 1:1	ไม่แตก	ไม่แตก												
neat epoxy 2:1	87.31	3.64												
neat epoxy 3:1	57.72	4.28												
3#sand			64.33	4.53	52.44	8.91	36.06	1.78	32.85	11.27	43.41	3.69	43.41	3.69
4#sand			34.20	2.40	34.20	5.86	46.61	5.52	39.57	3.17	45.51	4.79	45.51	9.10

ชนิดและปริมาณสารเสริมแรง	Compressive strength(MPa)													
	neat epoxy		5phr		10phr		15phr		20phr		25phr		30phr	
	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD
-90+75micron L			71.15	2.25	66.39	8.99	48.05	6.72	54.01	14.06	61.40	3.50	57.17	7.22
-75+53micron L			56.56	11.16	75.01	3.98	80.91	5.35	85.72	4.03	78.93	2.88	81.70	4.27
-53+45micron L			80.61	3.45	86.12	2.43	81.22	2.60	79.39	3.42	80.02	1.22	82.35	2.77
-45+38micron L			75.37	4.46	83.36	2.96	77.60	2.93	81.74	2.94	84.86	1.93	76.95	1.73
-38+25micron L			77.05	3.71	79.12	2.59	79.30	2.86	78.88	2.38	66.22	4.52	83.48	4.04
-25+15micron L			76.18	4.50	79.05	3.70	77.51	2.40	82.76	2.13	80.68	5.72	81.70	4.27
As recived Limstone			77.68	2.78	80.22	3.45	79.76	1.42	81.30	1.10	83.46	3.77	85.04	4.12
-45+38micron Treated L			81.28	2.70	83.05	3.42	81.19	4.54	86.55	2.88	87.21	2.55	86.94	2.49

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนิดและปริมาณสาร เสริมแรง	Compressive strength(MPa)													
	neat epoxy		5phr		10phr		15phr		20phr		25phr		30phr	
	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD	Energy	SD
-90+75micron G			77.07	1.52	77.83	1.91	74.02	3.57	79.31	4.01	80.56	1.43	80.08	1.33
-75+53micron G			76.84	4.20	82.86	1.90	76.63	2.60	83.30	3.17	78.79	3.90	81.02	2.32
-53+45micron G			80.71	1.63	76.20	4.77	79.70	3.29	77.20	4.04	73.83	1.93	81.55	2.05
-45+38micron G			78.12	3.62	73.47	3.44	72.51	3.09	75.17	1.98	74.97	2.57	78.02	1.18
-38+25micron G			83.43	3.53	63.09	1.03	75.29	5.38	76.32	0.54	81.93	2.83	52.32	8.40
-25+15micron G			75.70	3.66	75.91	3.46	83.03	4.81	74.83	1.41	80.25	2.71	74.55	4.73
As recived Granite			74.21	5.29	75.59	3.57	73.91	2.57	77.77	2.77	78.60	4.56	82.43	4.31
-45+38micron Treated G			79.40	2.34	80.79	3.53	82.76	6.31	85.00	4.80	81.89	3.65	87.43	3.56

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง  
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

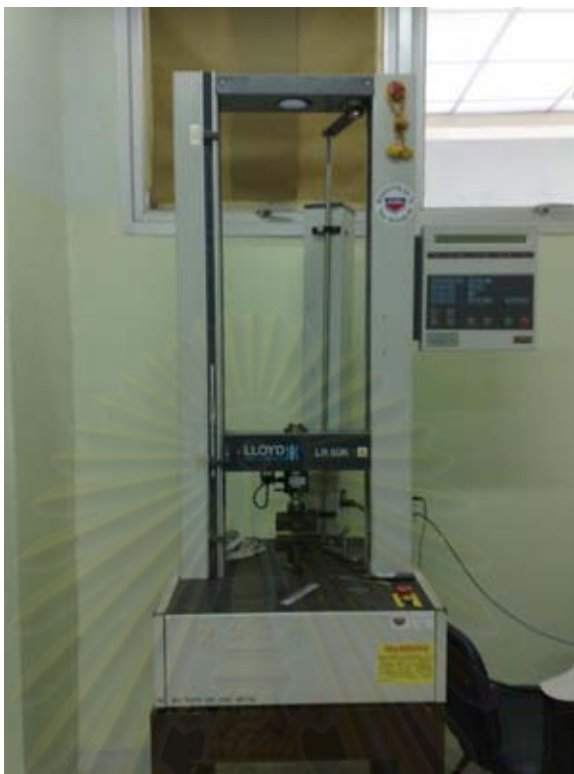
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ง1 เครื่อง Impact testing machine รุ่น Zwick model GT7016A2



รูปที่ ง2 เครื่อง Hardness testing machine รุ่น PTC model 402



รูปที่ ๓3 เครื่อง Universal testing machine (UTM) รุ่น LLOYD model LR 50K



รูปที่ ๓4 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) JSM-35CF



ภาคผนวก จ

ข้อมูลทั่วไปของสารตัวเติมที่ใช้การทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### หินทราย (sandstone)

เป็นหินมีลักษณะ เนื้อหยาบ จับดูระคายมือ เพราะประกอบด้วยเม็ดทรายขนาดแตกต่างกัน (1/16 – 2 มม.) เม็ดแร่ส่วนใหญ่เป็นแร่ควอร์ตซ์ แต่อาจมีแร่อื่นและเศษหินดินปะปนอยู่ด้วย เพราะมีวัสดุประสานมีความแข็งแรงมากสามารถขุดเหล็กเป็นรอยได้ มีสีต่าง ๆ เช่น แดง น้ำตาล เทา เขียว เหลืองอ่อน อาจแสดงรอยชั้นให้เห็น มีซากดึกดำบรรพ์

เกิดจากการรวมตัวกันของเม็ดทราย ประกอบด้วยควอร์ตซ์เป็นส่วนใหญ่ อาจมีแร่แมกเนไทต์และไมกาปะปนอยู่ วัสดุประสาน (ซีเมนต์) ส่วนมากเป็นพวกซิลิกา (ควอร์ตซ์ หรือ เซิร์ต) แคลไซต์ โดโลไมต์ เหล็กออกไซด์ ซึ่งมักทำให้หินมีสีเหลือง น้ำตาล แดง

- ในประเทศไทย พบมากทางภาคอีสาน จังหวัดราชบุรี เพชรบุรี กาญจนบุรี และทางภาคใต้ บางแห่ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## หินปูน (limestone)

เป็นหินในกลุ่มหินตะกอน มีชื่อวิทยาศาสตร์ที่รู้จักกันในหมู่นักธรณีว่า แร่แคลไซต์ (Calcite)(CaCO<sub>3</sub>) เป็นหินตะกอนคาร์บอเนต เกิดจากการทับถมของตะกอนคาร์บอเนตในท้องทะเล ทั้งจากสารอนินทรีย์ และซากสิ่งมีชีวิต เช่น ปะการัง และกระดองของสัตว์ทะเล ซึ่งทับถมกันภายใต้ความกดดันและตกผลึกใหม่เป็นแร่แคลไซต์จึงทำปฏิกิริยากับกรด เนื้อแน่นละเอียดทึบ มีสีออกขาว เทา ชมพู หรือสีดำ อาจมีซากดึกดำบรรพ์ในหินได้ เช่น ซากหอย ปะการัง ภูเขาหินปูนมักมีรอยแตกแหว่งเป็นหน้าผา และเป็นหินที่ละลายน้ำได้ดี

- บริเวณที่พบ จังหวัดสระบุรี เพชรบุรี กระบี่ นครศรีธรรมราช พังงา
- ประโยชน์ ใช้ในอุตสาหกรรมทาง ทำถนน ทางรถไฟ เมาทำปูนซีเมนต์ ปูนขาว หรือปูนกินหมาก ทำแคลเซียมคาร์ไบด์ ทำวัสดุทนไฟ ทำปุ๋ย และทำสี

## องค์ประกอบทางเคมี

- (CaO) 38-42%, Silica (SiO<sub>2</sub>) 20-25%, Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 2-4%,  
Other Oxides like Na, Mg 1.5 to 2.5% Loss On Ignition (LOI) 30-32%.
- Hardness 3 to 4 on Moh's Scale
- Density 2.5 to 2.65 Kg/m<sup>3</sup>
- Compressive Strength 1800 to 2100 Kg/cm<sup>2</sup>
- Water Absorption Less than 1% Porosity Quite low Weather Impact Resistant

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## หินแกรนิต(Granite)

แกรนิตอยด์เป็นองค์ประกอบของชั้นเปลือกโลกที่มีอยู่ทั่วไป มันตกผลึกจากแมกมาที่มีองค์ประกอบอยู่ที่จุดหรือใกล้เคียงกับจุดยูเทคติก (eutectic point) (หรือที่จุดต่ำสุดของอุณหภูมิบนเส้นกราฟโคเทคติก) แมกมาจะวิวัฒนาการไปสู่จุดยูเทคติกเนื่องจากการแยกส่วนทางอัคนี (igneous differentiation) หรือเพราะว่ามันอยู่ที่ระดับล่างๆของการหลอมละลายบางส่วน การตกผลึกแบบแยกส่วนนี้ทำให้เกิดการลดลงในการหลอมเหลวของเหล็ก แมกนีเซียม ไททาเนียม แคลเซียม และโซเดียม และเพิ่มการหลอมเหลวของโปแตสเซียมและซิลิกอน – แอลคาไลน์เฟลด์สปาร์ (อุดมไปด้วยโปแตสเซียม) และควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) ถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของแกรนิต

กระบวนการนี้ดำเนินไปโดยไม่คำนึงถึงแหล่งของแมกมาต้นกำเนิดที่จะพัฒนาไปเป็นแกรนิต และไม่คำนึงถึงองค์ประกอบทางเคมีของมันด้วย อย่างไรก็ตามแหล่งและองค์ประกอบของแมกมาที่ได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นแกรนิตนั้นได้ทั้งหลักฐานทางแร่และธรณีเคมีที่แน่นอนชัดเจนเอาไว้ที่จะระบุถึงหินต้นกำเนิดของแกรนิตนั้นได้ วิทยาแร่ เนื้อหิน และองค์ประกอบทางเคมีสุดท้ายของหินแกรนิตหนึ่งๆปรกติแล้วจะมีลักษณะเฉพาะตามหินต้นกำเนิด ยกตัวอย่างเช่น หินแกรนิตที่เกิดจากการหลอมละลายของตะกอนอาจมีแอลคาไลน์เฟลด์สปาร์สูง ขณะที่แกรนิตที่เกิดจากการหลอมมาจากหินบะซอลต์อาจอุดมไปด้วยแพลจีโอเคลสเฟลด์สปาร์ มันอยู่บนพื้นฐานนี้ที่ว่า การจำแนกแบบอัลฟาเบตสมัยใหม่ได้ถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์

### องค์ประกอบทางเคมี

- $\text{SiO}_2$  72.04%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  14.42%,  $\text{K}_2\text{O}$  4.12%,  $\text{Na}_2\text{O}$  3.69%,  $\text{CaO}$  1.82%  
 $\text{FeO}$  1.68%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  1.22%,  $\text{MgO}$  0.71%,  $\text{TiO}_2$  0.30%,  $\text{P}_2\text{O}_5$  0.12%,  
 $\text{MnO}$  0.05%

**Absorption**

% by weight	0.11
-------------	------

**Density**

lbs/ft <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	166.1 (2,660)
Conv: lb/ft <sup>3</sup> x16.0283=kg/m <sup>3</sup>	

**Modulus of Rupture**

lbs/in <sup>2</sup> (Mpa)	2,720 (18.8)
Conv: x,xxxpsi/145=Mpa	

**Compressive Strength**

lbs/in <sup>2</sup> (Mpa)	26,600 (240)
Conv: x,xxxpsi/145=Mpa	

**Abrasion Resistance**

Ha (mm)	81.5
---------	------

**Flexural Strength**

lbs/in <sup>2</sup> (Mpa)	2,520 (17.4)
Conv: x,xxxpsi/145=Mpa	

**Flexural Modulus of Elasticity**

<b>Parallel to Riff Direction</b>	7.15E+06 (49.3)
lbs/in <sup>2</sup> (Gpa)	
Conv: x.xxE+06psi/.145=Gpa	

**Flexural Modulus of Elasticity**

<b>Perpendicular to Riff Direction</b>	6.28E+06 (43.3)
lbs/in <sup>2</sup> (Gpa)	
Conv: x.xxE+06psi/.145=Gpa	

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีระพงษ์ บัวศรี เกิดวันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 25 28 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จ การศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดดอนทอง มัธยมศึกษาจากโรงเรียนเบญจมราช รั้งสถูปฉะเชิงเทรา และสำเร็จการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการ และวิศวกรรมวัสดุ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2550

ปัจจุบันได้เข้ารับการศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย