



รายงานวิจัย

การเตรียมพอลิเมอร์เอนแคปซูลชันจากแอลจินเตผสมกับซิลิกาฟุ้ง
ที่มีสมบัติคงทนต่อความร้อน

**Preparation of Polymer Encapsulation from Alginate Mixed
with Silica Fume which Thermal Resistance Property**

นางสาวบุญศรี คู่สุขธรรม

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณภายนอก ปี พ.ศ. 2557

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

รายงานวิจัย

การเตรียมพอลิเมอร์เอนแคปซูลชันจากแอลจิเนตผสมกับซิลิกาฟุ้ง
ที่มีสมบัติคงทนต่อความร้อน

**Preparation of Polymer Encapsulation from Alginate Mixed
with Silica Fume which Thermal Resistance Property**

คณะผู้วิจัย

สังกัด

นางสาวบุญศรี คู่สุขธรรม สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
กรุงเทพ

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณภายนอก ปี พ.ศ. 2557

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ฯ ที่ให้
ทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2556



บทคัดย่อ

ซิลิกาฟุ้งที่เอนเคปซูลेटด้วยเม็ดลูกปัดแอลจินेटได้ศึกษา วัตถุประสงค์เพื่อเตรียมเม็ดลูกปัดที่มีสมบัติคงทนต่อความร้อนของแอลจินेटที่เอนเคปซูลेटซิลิกาฟุ้ง เม็ดลูกปัดเตรียมโดยผสมซิลิกาฟุ้งที่ปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนลงในสารละลายแอลจินेट จากนั้นหยด แอลจินेटที่มีซิลิกาฟุ้งกระจายตัวอยู่ลงในสารละลายของแคลเซียมคลอไรด์

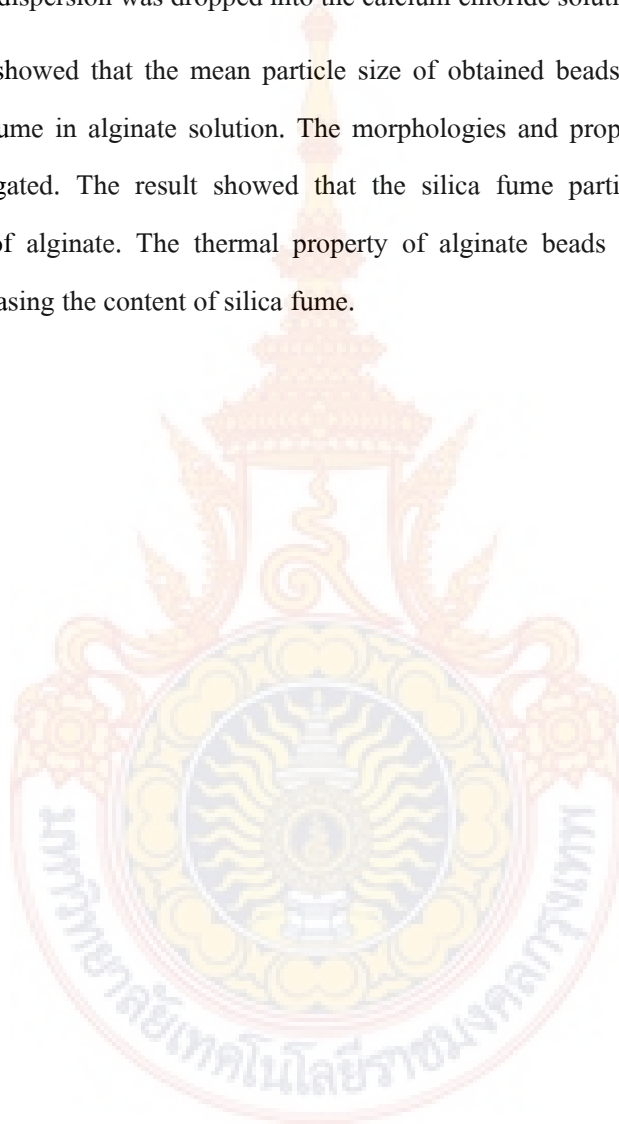
ผลจากการศึกษาพบว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเม็ดลูกปัดขึ้นอยู่กับปริมาณของแคลเซียม-ซิลิเกตในสารละลายแอลจินेट ตรวจสอบพื้นฐานวิทยาและสมบัติของเม็ดลูกปัดเอนเคปซูลेटซิลิกาฟุ้งจากการศึกษาพบว่าอนุภาคของซิลิกาฟุ้งกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของแอลจินेट สมบัติทางความร้อนของเม็ดลูกปัดแอลจินेटที่เอนเคปซูลेटซิลิกาฟุ้งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซิลิกาฟุ้งเพิ่มขึ้น



ABSTRACT

The silica fume encapsulated with alginate bead was studied. The objective was to prepare heat resistance bead of alginate encapsulating silica fume. The beads were prepared by a mixing of modified silica fume with vinyltriethoxysilane in the alginate solution. And then the alginate/silica fume dispersion was dropped into the calcium chloride solution.

The result showed that the mean particle size of obtained beads depended on the content of modified silica fume in alginate solution. The morphologies and properties of the encapsulated beads were investigated. The result showed that the silica fume particles were well dispersed within the matrix of alginate. The thermal property of alginate beads encapsulating silica fume increased with increasing the content of silica fume.



สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	
สารบัญเรื่อง	
สารบัญตาราง	
สารบัญภาพประกอบ	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 แอลจิเน็ต	3
2.1.1 กระบวนการผลิตแอลจิเน็ต	3
2.1.2 โครงสร้างทางเคมีของกรดแอลจินิก	3
2.1.3 สมบัติของแอลจิเน็ต	5
2.1.4 ประโยชน์ของแอลจิเน็ต	5
2.2 การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับแอลจิเน็ต	6
2.3 ชิลิกาฟุ่ม	7
2.3.1 สมบัติของชิลิกาฟุ่ม	7
2.3.2 สมบัติทางความร้อนของชิลิกาฟุ่ม	7
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	9
3.1 สารเคมี	9
3.2 การศึกษาการปรับปรุงชิลิกาฟุ่ม	9
3.3 การตรวจสอบสมบัติของชิลิกาฟุ่ม	10
3.3.1 การตรวจสอบสมบัติการเปียกน้ำ	10
3.3.2 การวัดการกระจายขนาดอนุภาคของชิลิกาฟุ่ม	10
3.3.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมี โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโตร-โฟโตมิเตอร์	10

	หน้า
3.3.4 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	10
3.4 การเตรียมเม็ดยกปิดพอลิเมอร์ของแอลจินต์ร่วมกับซิลิกาฟูม	11
3.5 การตรวจสอบสมบัติของเม็ดยกปิดพอลิเมอร์	11
3.5.1 การวัดการกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดยกปิดพอลิเมอร์	11
3.5.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	11
3.5.3 การตรวจสอบสมบัติความคงทนต่อความร้อน	11
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	12
4.1 การปรับปรุงซิลิกาฟูมด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน	12
4.2 การเตรียมเม็ดยกปิดแอลจินต์	19
4.3 การเตรียมเม็ดยกปิดแอลจินต์เอนแคปซูเลตซิลิกาฟูม	22
4.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของเม็ดยกปิดแอลจินต์	25
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและการอภิปรายผล	28
เอกสารอ้างอิง	29
ภาคผนวก ก	32
ภาคผนวก ข	36
ประวัติผู้วิจัย	38



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณการใช้แอลจินต์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ	5
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	9
4.1	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของซิลิกาฟุ้ง	15
4.2	ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเม็ดลูกปัดแอลจินต์และเม็ดลูกปัดแอลจินต์ เอนเคปซูเลตซิลิกาฟุ้ง	23
4.3	ร้อยละของปริมาณสารที่เหลืออยู่หลังจากได้รับความร้อนของเม็ด ลูกปัดแอลจินต์และเม็ดลูกปัดแอลจินต์เอนเคปซูเลตซิลิกาฟุ้ง	27



สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของกรดแมนนูโรนิกและกรดกลูโรนิก	3
2.2	พอลิเมอร์ของกรดกลูโรนิกแบบจิบลิค	4
2.3	พอลิเมอร์ของกรดแมนนูโรนิกแบบเอ็มบลิค	4
2.4	การทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไอออนกับโซ่พอลิเมอร์ของ จิบลิคในแอลจินต	5
4.1	สมบัติการเปียกน้ำของซิลิกาฟุ่ม (ผ่านการบด) และซิลิกาฟุ่ม (บด) ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน	12
4.2	การทำปฏิกิริยาระหว่างไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนกับพื้นผิว ของวัสดุ	14
4.3	การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาฟุ่มและซิลิกาฟุ่ม ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน	15
4.4	ลักษณะอนุภาคของซิลิกาฟุ่มที่ไม่ผ่านการบด	16
4.5	ลักษณะอนุภาคของซิลิกาฟุ่มที่ผ่านการบด	17
4.6	อินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกาฟุ่มและซิลิกาฟุ่มที่ผ่านการปรับปรุง ด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน	18
4.7	การทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไอออนกับโซ่เดิมแอลจินต	19
4.8	การกระจายขนาดของเม็ดลูกปัดแอลจินตในสถานะแห้ง ที่เตรียมจากสารละลายโซเดียมแอลจินตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 6 (น้ำหนัก/ปริมาตร)	20
4.9	ลักษณะพื้นผิวของเม็ดลูกปัดแอลจินตในสถานะแห้ง	21
4.10	การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดแอลจินตในสถานะแห้ง และเม็ดลูกปัดแอลจินตเอนเคปซูลตซิลิกาฟุ่มในปริมาณต่าง ๆ	22
4.11	ลักษณะของเม็ดลูกปัดแอลจินตเอนเคปซูลตซิลิกาฟุ่ม โดยผสมซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 15 (โดยน้ำหนักของแอลจินต)	24
4.12	เทอร์โมแกรมของเม็ดลูกปัดแอลจินต (ก) และเม็ดลูกปัดแอลจินต เอนเคปซูลตซิลิกาฟุ่ม (ข-ง)	25
4.13	อัตราการสลายตัวของเม็ดลูกปัดแอลจินต (ก) และเม็ดลูกปัด แอลจินตเอนเคปซูลตซิลิกาฟุ่ม (ข-ง)	26

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

แอลจิเนต เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งสกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล แอลจิเนตเป็นวัสดุชีวภาพ ที่ย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อาหาร และอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารทำข้น (thickening agent) และสารที่ทำให้เกิดเจล (gelling agent)

แอลจิเนต มีการศึกษาเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุปิดแผล (Wang et al. 2010: 910-919) ใช้ร่วมกับไคโทซานเพื่อบำบัดน้ำเสีย (Qin et al. 2007: 3581-3587) นอกจากนี้มีการนำมาใช้ใน ระบบนำส่งยา (Dai et al. 2008: 493-500; Wu et al. 2010: 32-43) โดยเตรียมให้อยู่ในรูปเอนแคปซูล (encapsulation) ของยานุพันธ์ต่าง ๆ (Tan et al. 2009: 866-877) กองจี้ และคณะ (Kong et al. 2009: 807-812) ศึกษาการเตรียมเส้นใยแคลเซียมแอลจิเนต และพบว่าเส้นใยชนิดนี้มีสมบัติ ด้านทานการดัดไฟ และลวกดัดไฟได้ยาก

ซิลิกาฟุ้ง เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (by product) ที่เกิดจากการผลิตโลหะซิลิกอน หรือ เพอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ ผิวของซิลิกาฟุ้งมีความหยาบสูง จึงดูดน้ำได้ดี ทำให้อนุภาคของซิลิกาฟุ้ง เกาะรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ซิลิกาฟุ้ง เป็นวัสดุที่ใช้ในวิศวกรรมโยธา เช่น เป็นส่วนประกอบในการผสมคอนกรีต นอกจากนี้ใช้เป็นสารตัวเติมในอีลาสโตเมอร์ พอลิเมอร์ และยาง (Iler. 1979) รายงานจากการศึกษาค้นคว้าพบว่า ซิลิกาฟุ้งช่วยเพิ่มความคงทนต่อ ความร้อนให้กับพอลิโพรพิลีน (Ye, Wu and Qu. 2010: 3508)

โครงการนี้จะผลิตเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ (bead) ของแอลจิเนต โดยมีลักษณะเป็นเอนแคปซูลของแอลจิเนตที่มีซิลิกาฟุ้งอยู่ภายในเม็ดของแอลจิเนต เพื่อใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มเส้นใย การดัดไฟ เพิ่มความคงทนต่อความร้อนให้กับวัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น พลาสติก คอนกรีต ซึ่งจะช่วยลดความเสียหายของวัสดุชนิดอื่น ๆ จากการการเกิดเพลิงไหม้ได้ ซึ่งมีความเป็นไปได้สูง ที่จะผลิตพอลิเมอร์เอนแคปซูลชนิดนี้ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อเตรียมพอลิเมอร์เอนแคปซูลจากซิลิกาฟุ้งและ โซเดียมแอลจิเนตที่มีสมบัติ ห่อหุ้มเส้นใยการดัดไฟ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เอนเคปซูเลชันจากซิลิกาฟุ้งและ โซเดียม-แอลจินेटที่มีสมบัติหน่วงเหนี่ยวการติดไฟ โดยมีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

1. ศึกษาการเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์จากโซเดียมแอลจินेटร่วมกับซิลิกาฟุ้ง
2. ศึกษาการปรับปรุงซิลิกาฟุ้งด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน
3. การตรวจสอบสมบัติของซิลิกาฟุ้งและซิลิกาฟุ้งที่ผ่านการปรับปรุง
โดยตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้
 - 3.1 การตรวจสอบสมบัติการเปียกน้ำ
 - 3.2 การวัดการกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกาฟุ้ง
 - 3.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
 - 3.4 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
4. ศึกษาการเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ของแอลจินेटร่วมกับซิลิกาฟุ้ง
5. การตรวจสอบสมบัติของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ โดยตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้
 - 5.1 การวัดการกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์
 - 5.3 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
 - 5.3 การตรวจสอบสมบัติความคงทนต่อความร้อน
 - 5.4 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาฟุ้งต่อสมบัติของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากการวิจัยนี้สามารถนำเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ไปใช้เพื่อเป็นวัสดุต้านทานการติดไฟ ซึ่งอาจนำไปใช้งานในด้านอื่น ๆ เช่น งานวิศวกรรมโยธา ผลิตภัณฑ์ด้านต้านทานการติดไฟ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

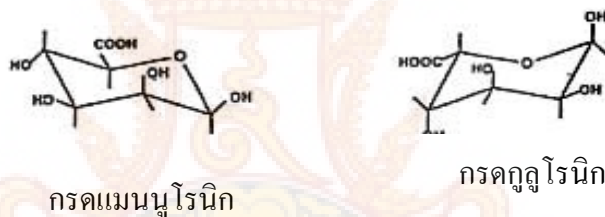
2.1 แอลจิเนต

2.1.1 กระบวนการผลิตแอลจิเนต (Roberts. 1995: 3)

สาหร่ายทะเลเป็นทรัพยากรธรรมชาติทางทะเลที่สำคัญ เพราะเป็นแหล่งผลิตและเริ่มต้นของระบบนิเวศในน้ำ ใช้เป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์ แอลจิน (algin) หรือ แอลจิเนตเป็นสิ่งที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล

2.1.2 โครงสร้างทางเคมีของกรดแอลจินิก (McHugh. 1987: 51-96)

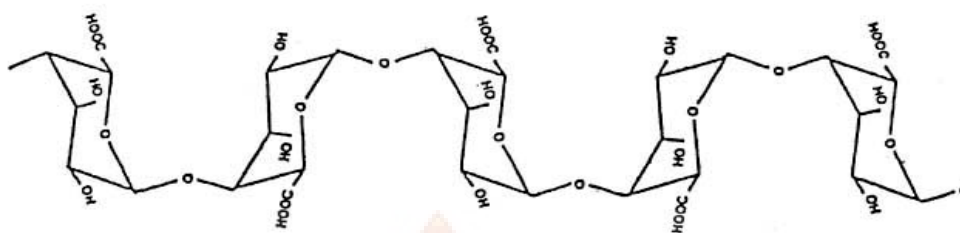
แอลจิเนตเป็นเกลือของกรดแอลจินิก ประกอบด้วยกรดแมนนูโรนิก (mannuronic acid) และกรดกลูโรนิก (gluronic acid) โครงสร้างทางเคมีแสดงดังในภาพประกอบที่ 2.1



ภาพประกอบที่ 2.1 โครงสร้างของกรดแมนนูโรนิกและกรดกลูโรนิก

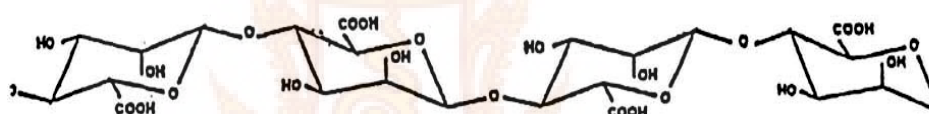
พอลิเมอร์ของกรดแอลจินิกเกิดโดยการเชื่อมต่อกันของมอนอเมอร์ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 4 โดยโซ่พอลิเมอร์ ที่สร้างขึ้นมี 3 ชนิด คือ

1. จีบบล็อก (G blocks) ซึ่งประกอบด้วยกรดกลูโรนิกเพียงอย่างเดียวสายโซ่พอลิเมอร์มีลักษณะคดไปมาแบบฟันเลื่อยดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.2



ภาพประกอบที่ 2.2 พอลิเมอร์ของกรดกลูโคโนิกแบบจิบลิค

2. เอ็มบล็อก (M blocks) ซึ่งประกอบด้วยกรดแมนนูโรนิกเพียงตัวเดียวสายโซ่พอลิเมอร์เป็นแบบเส้นตรงดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.3

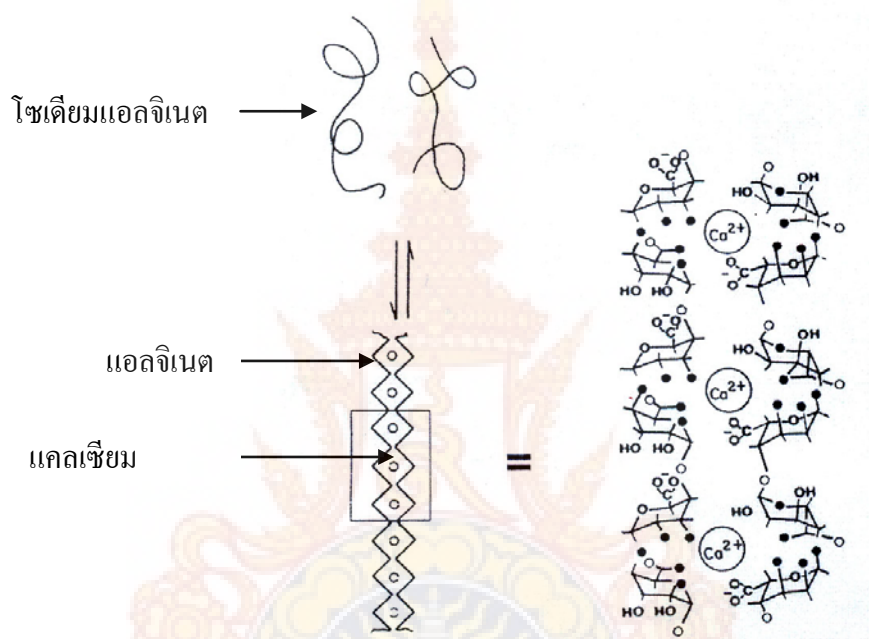


ภาพประกอบที่ 2.3 พอลิเมอร์ของกรดแมนนูโรนิกแบบเอ็มบล็อก

3. เอ็มจิบลิค (M G blocks) ซึ่งประกอบด้วยกรดแมนนูโรนิกและกรดกลูโคโนิก อัตราส่วนของกรดแมนนูโรนิกและกรดกลูโคโนิก (M/G ratio) ในแอลนิเจตมีผลต่อสมบัติของแอลจินตสำหรับที่มีอัตราส่วนของกรดแมนนูโรนิกและกรดกลูโคโนิกต่ำ จะทำให้แอลจินตมีคุณภาพดีเกิดเจลที่มีความแข็งแรงสูง

2.1.3 สมบัติของแอลจินต (Salomone. 1996 a: 151)

โซเดียมแอลจินตละลายน้ำได้ สารละลายมีความหนืดสูง เกิดแคลเซียมของแอลจินตไม่ละลายน้ำ เนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไอออนกับสายโซ่พอลิเมอร์ของจีบลีค ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.4 ในแอลจินตช่องว่างระหว่างโซ่ของจีบลีคจะเกิดการจับกับแคลเซียมไอออน ความแข็งแรงของเจล ขึ้นอยู่กับปริมาณของจีบลีคในแอลจินตและความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน



ภาพประกอบที่ 2.4 การทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไอออนกับโซ่พอลิเมอร์ของจีบลีคในแอลจินต

2.1.4 ประโยชน์ของแอลจินต (McHugh. 1987: 51-96)

แอลจินตสามารถใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณการใช้แอลจินตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ชนิดของอุตสาหกรรม	ร้อยละของปริมาณการใช้แอลจินต
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	50
อุตสาหกรรมอาหาร	30
อุตสาหกรรมกระดาษ	5

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ปริมาณการใช้แอลจินตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ชนิดของอุตสาหกรรม	ร้อยละของปริมาณการใช้แอลจินต
อุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง	5
เภสัชกรรม	5
อื่น ๆ	5

อุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้แอลจินตเป็นสารลงแป้งในเส้นด้าย เพื่อให้เส้นด้ายแข็งแรง ป้องกันการขาดของเส้นด้ายในระหว่างการทอ ใช้ในงานพิมพ์โดยทำหน้าที่เป็นสารทำขึ้น การใช้แอลจินตในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารทำขึ้น สารทำให้เกิดอิมัลชัน (emulsifying agent) และสารทำให้เกิดความเสถียร (stabilizing agent)

การใช้แอลจินตร่วมกับถ่านกัมมันต์ (activated carbon) มีการศึกษาโดยนำถ่านกัมมันต์ความเข้มข้นร้อยละ 1 ผสมกับสารละลายโซเดียมแอลจินตความเข้มข้นร้อยละ 2 และนำมาหยดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05 โมล/ลิตร (Annadurai, 2002: 191-198) ผลลัพธ์ที่ได้มีถ่านกัมมันต์กระจายตัวอยู่ในเม็ดของแอลจินต

2.2 การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับแอลจินต

การเตรียมนุภาคของแอลจินต เตรียมโดยละลายแอลจินตในน้ำกลั่นจำนวน 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 22 °C ทำให้เย็น และหยดสารละลายแอลจินตลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 นาที อนุภาคที่ได้มีขนาด 2.69 ± 0.09 มิลลิเมตร (Lázaro et al. 2003: 2118-2126)

โจโทห์ เมทสึชิม่า และคิกุชิ (Gotoh, Matsushima and Kikuchi, 2004: 57-64) เตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โดยพ่นสารละลายแอลจินตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ลงในท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร และผ่านลงไปนสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 150 มิลลิโมล/ลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พร้อมทั้งกวนอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นโดยอนุภาคที่เตรียมได้มีขนาด 504 ± 96 ไมครอน และมีความหนาแน่น 1.051 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

เม็ดลูกปัดแอลจินตถูกเตรียมโดยเตรียมสารละลายแอลจินตที่มีความเข้มข้นร้อยละ

2 (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) โดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย จากนั้นหยดสารละลายแอลจินตลงใน

สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) และคนเป็นเวลา 30 นาที โดยใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรระหว่างสารละลายแอลจินเตและสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เท่ากับ 1: 50 ส่วนเม็ดลูกบิดแอลจินเตที่มีสารชนิดอื่นอยู่ในเม็ดเตรียมโดยละลายแอลจินเต ในกลีเซอรอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30 (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) และเตรียมเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 จากนั้นผสมไคทิน คาโอลิน หรือเบนโทไนด์ ลงในสารละลายของแอลจินเตโดยให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.5 (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) เม็ดลูกบิดแอลจินเตชนิดต่าง ๆ มีขนาด 4.33-4.49 มิลลิเมตร

2.3 ซิลิกาฟุ่ม

2.3.1 สมบัติของซิลิกาฟุ่ม (ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2550: ออนไลน์)

ซิลิกาฟุ่ม เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตโลหะซิลิกอนและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 มิลลิเมตร และมีพื้นที่ผิวประมาณ 20 ถึง 25 ตารางเมตร/กรัม เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กมาก จึงมี พื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ทำให้ซิลิกาฟุ่มเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการผสมคอนกรีตได้เร็วมาก ปัญหาของซิลิกาฟุ่มเมื่อใช้ในคอนกรีต คือ ต้องเพิ่มปริมาณน้ำในส่วนผสมเพื่อให้ได้ความชื้นเหลวเท่าเดิม เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟุ่ม จึงมีการใช้น้ำ ที่ค่อนข้างสูงในการเคลือบผิวหน้า นอกจากนี้ซิลิกาฟุ่มมีความละเอียดสูงมากจึงมีปัญหาในเรื่องการขนส่ง และปลิวลมได้ง่าย

องค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 ส่วนที่เหลือจะเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ โพแทสเซียมออกไซด์ และออกไซด์อื่น ๆ

การเติมซิลิกาฟุ่มลงในคอนกรีต จะช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออนเข้าไปในคอนกรีต ซึ่งจะช่วยป้องกันการเกิดการกัดกร่อนของโลหะที่ใช้ในการเสริมแรงคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่อยู่ใกล้กับน้ำทะเล ซึ่งมีปริมาณคลอไรด์สูง นอกจากนี้มีการผสมซิลิกาฟุ่มลงในคอนกรีต อาจมีการผสมลงในยาง และพอลิเมอร์

2.3.2 สมบัติทางความร้อนของซิลิกาฟุ่ม

คาชิวากิ และคณะ (Kashiwaki et al. 2000: 277-289) ศึกษาอิทธิพลของซิลิกาฟุ่มต่อสมบัติของพอลิโพรพิลีน พบว่าการเติมซิลิกาฟุ่มในพอลิโพรพิลีนลดการปล่อยความร้อนและ การเผาไหม้ของพอลิโพรพิลีน โดยซิลิกาฟุ่มจะสะสมอยู่ใกล้กับผิวหน้าของพอลิโพรพิลีน และทำหน้าที่เป็นชั้นฉนวนความร้อน และลดความเข้มข้นของพอลิเมอร์บริเวณผิวหน้า จึงทำให้วัสดุมีสมบัติติดไฟลดลง

คาชิวากิ และคณะ (Kashiwaki et al. 2003: 1541-1553) ศึกษาการเติมซิลิกาฟูลลงในพอลิเมทิลเมทาคริเลต พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการป้องกันการติดไฟของวัสดุขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของซิลิกาฟูล ซิลิกาฟูลที่มีพื้นที่ผิวมาก เมื่อเติมลงไปในพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะช่วยลดปริมาณสารที่สูญเสียจากการเผาไหม้ และอัตราการปลดปล่อยความร้อนจากการเผาไหม้ โดยกลไกการหน่วงเหนี่ยวการติดไฟของพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยซิลิกาฟูล คือ ซิลิกาฟูลเมื่อได้รับความร้อนจะสะสมเป็นชั้นฉนวนความร้อนที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์ และป้องกันไม่ให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ

ลีพาท และคณะ (Sipaut et al. 2007: 27-34) ศึกษาการปรับปรุงพื้นที่ผิวของซิลิกาฟูล จากนั้นนำซิลิกาฟูลเติมในอีพอกซีเรซิน การเติมซิลิกาฟูลลงในเมทริกซ์ของคอมโพสิตทำให้สมบัติความคงทนต่อความร้อนเพิ่มสูงขึ้น และพบว่าซิลิกาฟูลเกิดการยึดเกาะกับเมทริกซ์ของคอมโพสิตได้ดี

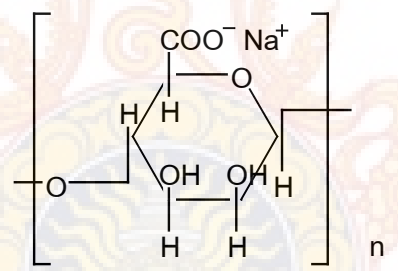


บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองมี ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	บริษัทผู้ผลิต
แคลเซียมคลอไรด์	CaCl_2	Fluka
ซิลิกาฟุ่ม	SiO_2	Wacker (Thailand)
ไดเอทิลอีเทอร์	$(\text{CH}_3\text{-CH}_2)_2\text{O}$	Fluka
ไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน	$\text{CH}_2=\text{CH}\text{-(O-CH}_2\text{-CH}_3)_3$	Fluka
แอลจินेट		Fluka
แอซีโตน	$\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$	Fluka

3.2 การศึกษาการปรับปรุงซิลิกาฟุ่ม

ซิลิกาฟุ่มมีสมบัติชอบน้ำ และจมตัวลงในน้ำ ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงผิวของซิลิกาฟุ่ม เพื่อให้ซิลิกาฟุ่มแขวนลอยและกระจายตัวอยู่ในสารละลายไซเดียมแอลจินेटได้ ซึ่งมี วิธีการทดลอง ดังนี้

- เตรียมสารละลายไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1-5 (ปริมาตร/ปริมาตร) โดยใช้ไดเอทิลอีเทอร์เป็นตัวทำละลาย
- เติมซิลิกาฟุ่มลงไปในสารละลายไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน โดยใช้อัตราส่วนซิลิกาฟุ่ม: สารละลายไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน เท่ากับ 1: 2 (น้ำหนัก/ปริมาตร)

3. ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองซิลิกาฟุ้งออกจากสารละลายล้างด้วยเอซีโตนจำนวน 3 ครั้ง และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4. บดซิลิกาฟุ้ง ด้วยเครื่องบดสารเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมซิลิกาฟุ้งลงไป ในสารละลายไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1-3 (ปริมาตร/ปริมาตร) โดยใช้ อัตราส่วนซิลิกาฟุ้ง: สารละลายไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน เท่ากับ 1: 2 (น้ำหนัก/ปริมาตร)

5. ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองซิลิกาฟุ้งออกจากสารละลายล้างด้วยเอซีโตนจำนวน 3 ครั้ง และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.3 การตรวจสอบสมบัติของซิลิกาฟุ้ง

ตรวจสอบสมบัติของซิลิกาฟุ้งและซิลิกาฟุ้งที่ผ่านการปรับปรุง โดยตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

3.3.1 การตรวจสอบสมบัติการเปียกน้ำ

ซังซิลิกาฟุ้งและซิลิกาฟุ้งที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนจำนวน 2 กรัม จากนั้นโปรยลงบนน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร และสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

3.3.2 การวัดการกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกาฟุ้ง

ซิลิกาฟุ้งและซิลิกาฟุ้งที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนถูกนำมาตรวจสอบการกระจายของขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดการกระจายขนาดอนุภาค (Laser Particle Size Distribution Mastersizer S long bed Version 2.19, Malvern Instrument Ltd., England)

3.3.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมี โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ซิลิกาฟุ้งและซิลิกาฟุ้งที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนถูกนำมาตรวจสอบโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Perkin-Elmer FT-IR Spectrometer System 2000) ในช่วง $4000\text{--}370$ เซนติเมตร⁻¹ โดยผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์

3.3.4 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ซิลิกาฟุ้งและซิลิกาฟุ้งที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนถูกเคลือบด้วยทองใน JEOL JEC-1200 Fine Coater และถูกนำมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-5410 LV Scanning Electron Microscope)

3.4 การเตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ของแอลจินตร่วมกับซิลิกาฟุ่ม

1. เตรียมสารละลายโซเดียมแอลจินเตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2-6 โดยละลายโซเดียม-แอลจินเตในน้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 30 นาที
2. เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.3 โมล/ลิตร
3. เตรียมเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์โดยนำสารละลายโซเดียมแอลจินเตและซิลิกาฟุ่ม เติมลงในบิวเรต แล้วหยดสารละลายโซเดียมแอลจินเตลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.3 โมล/ลิตร และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที
4. เมื่อสารละลายแอลจินเตรวมตัวกันเป็นเม็ด นำมากรองเพื่อแยกเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ออกจากของเหลว แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นจำนวน 3 ครั้ง และอบให้แห้ง
5. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณของซิลิกาฟุ่มต่อสมบัติของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

3.5 การตรวจสอบสมบัติของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

ตรวจสอบสมบัติของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ โดยตรวจสอบสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

3.5.1 การวัดการกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์

วัดการกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ด้วยตะแกรงร่อน Laboratory Test Sieve (Endecotts Ltd. London England)

3.5.2 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ถูกเคลือบด้วยทองใน JEOL JEC-1200 Fine Coater และถูกนำมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-5410 LV Scanning Electron Microscope)

3.5.3 การตรวจสอบสมบัติความคงทนต่อความร้อน

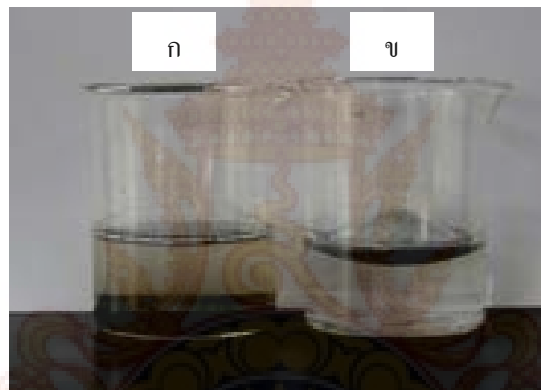
เม็ดลูกปัดพอลิเมอร์ถูกนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักโดยความร้อน (thermogravimetric analysis) ด้วยเครื่อง Netzsch Simultaneous Thermal Analyzer STA 409 Jupiter ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเม็ดลูกปัดพอลิเมอร์กับอุณหภูมิ โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิห้อง ถึง 800°C ซึ่งมีอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนเท่ากับ $20^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ ข้อมูลจากการวิเคราะห์จะบอกถึงความคงทนต่อความร้อนของตัวอย่างที่วิเคราะห์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การปรับปรุงซิลิกาฟุ้งด้วยไวน์ไตรเอทอกซีไซเลน

ซิลิกาฟุ้ง มีลักษณะเป็นอนุภาคสีเทา ฟุ้งกระจายได้ง่าย มีสมบัติชอบน้ำ ดูดน้ำและความชื้นได้ดี และเกาะรวมกันเป็นกลุ่มได้ง่าย ทำให้อนุภาคของซิลิกาฟุ้งมีขนาดใหญ่ จากสมบัติดังกล่าวเมื่อนำซิลิกาฟุ้งผสมลงในสารละลายโซเดียมแอจิเนต ซิลิกาฟุ้งจะจมตัวลงอยู่ในสารละลายโซเดียมแอจิเนต การเตรียมเม็ดลูกปัดแอลจิเนตเอนเคปซูเลตซิลิกาฟุ้ง จะทำให้ซิลิกาฟุ้งไม่กระจายตัวอยู่ในเม็ดลูกปัดของแอลจิเนต ดังนั้นจึงศึกษาการปรับปรุงซิลิกาฟุ้งด้วยไวน์ไตรเอทอกซีไซเลน จากการตรวจสอบสมบัติการเปียกน้ำของซิลิกาฟุ้ง และซิลิกาฟุ้งที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวน์ไตรเอทอกซีไซเลน ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.1

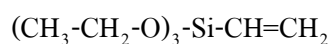


ภาพประกอบที่ 4.1 สมบัติการเปียกน้ำของซิลิกาฟุ้ง (ผ่านการบด) และซิลิกาฟุ้ง (บด) ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวน์ไตรเอทอกซีไซเลน

- ก. ซิลิกาฟุ้งเริ่มต้นที่ผ่านการบด
- ข. ซิลิกาฟุ้ง (บด) ที่ผ่านปรับปรุงด้วยไวน์ไตรเอทอกซีไซเลนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 (ปริมาตร/ปริมาตร)

ผลจากการศึกษาพบ ว่าซิลิกาฟุ่มที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนมีสมบัติไม่ชอบน้ำ ซึ่งแตกต่างจากซิลิกาฟุ่มก่อนการปรับปรุงที่มีสมบัติชอบน้ำ

ไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน เป็นสารประกอบประเภทไซเลน มีโครงสร้างทางเคมี ดังนี้



ไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน ประกอบด้วยหมู่แอลคอกไซด์ (alkoxide) หรือ หมู่ R-O- จำนวน 3 หมู่ เชื่อมต่อกับอะตอมของซิลิกอน (Si) หมู่แอลคอกไซด์ในไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนถูกไฮโดรไลส์ได้ง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดไซเลนอล (Si-OH) หมู่ไซเลนอลจะเกิดการควบแน่นซึ่งกันและกัน หรือเกิดการควบแน่นกับเอทอกซีไซเลน ทำให้เกิดพันธะไซลอกเซน (Si-O-Si) นอกจากนี้หมู่ไซเลนอลสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะในสารอนินทรีย์เกิดพันธะออกเซน (Si-O-โลหะ) ซิลิกาฟุ่มเป็นสารอนินทรีย์ซึ่งมีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนจึงเกิดพันธะออกเซนกับซิลิกอนในซิลิกาฟุ่มได้ การปรับปรุงพื้นผิวซิลิกาฟุ่มด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน จึงทำให้เกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างซิลิกาฟุ่มกับไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน (Salomone. 1996 c: 7636-7639)

นอกจากนี้หมู่ไซเลนอลจะเกิดการควบแน่นซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดพันธะไซลอกเซน (Si-O-Si) ปฏิกิริยาเกิดขึ้น ดังนี้ (Salomone. 1996 b: 7636-7639)

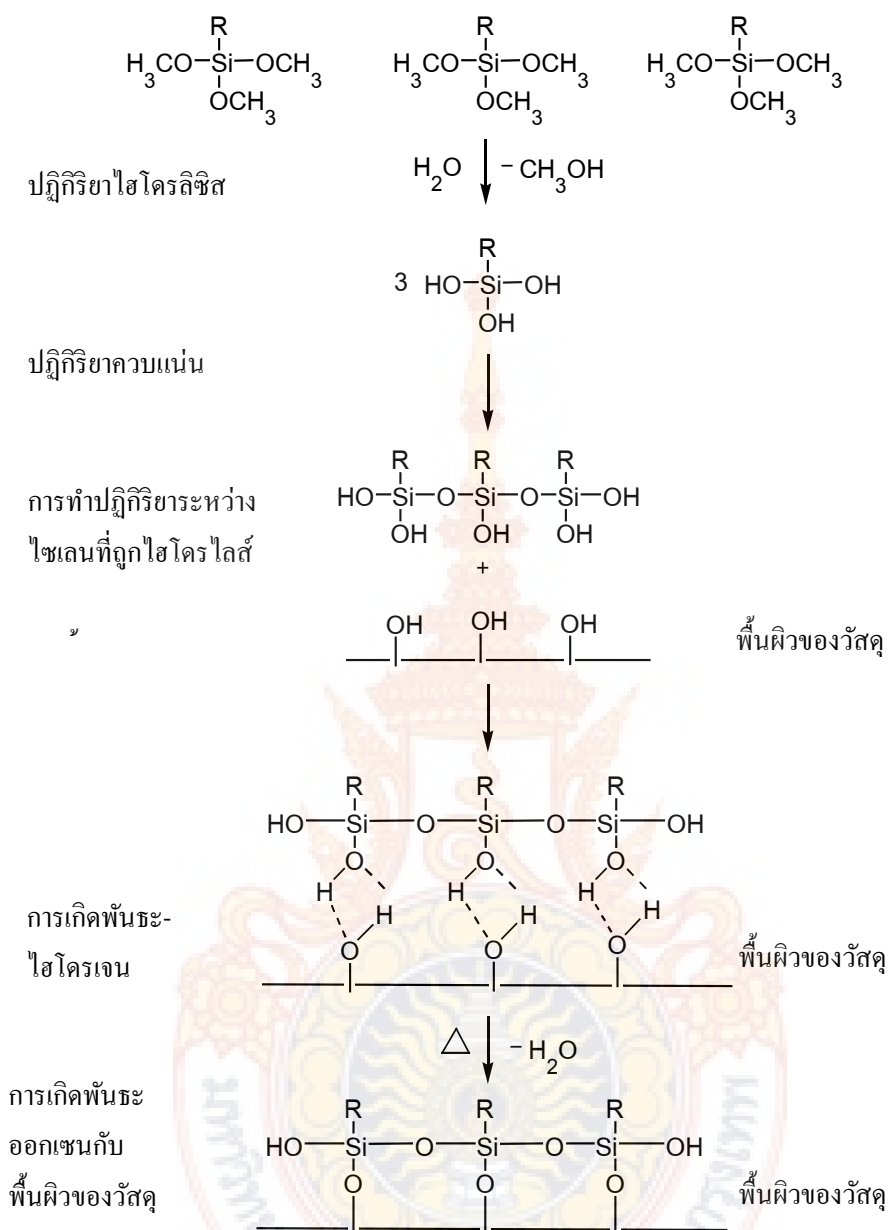
ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส



ปฏิกิริยาควบแน่น



ไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน อาจจะทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของซิลิกาฟุ่ม หลังจากที่หมู่เอทอกซีในไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนถูกไฮโดรไลส์เป็นไซเลนอล (Si-OH) ไซเลนอลจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (หมู่ -OH) บนพื้นผิวของซิลิกาฟุ่ม ทำให้เกิดพอลิไซลอกเซนบนพื้นผิวของซิลิกาฟุ่ม ปฏิกิริยาเกิดขึ้น ดังนี้ (Venables. 1995: 40)

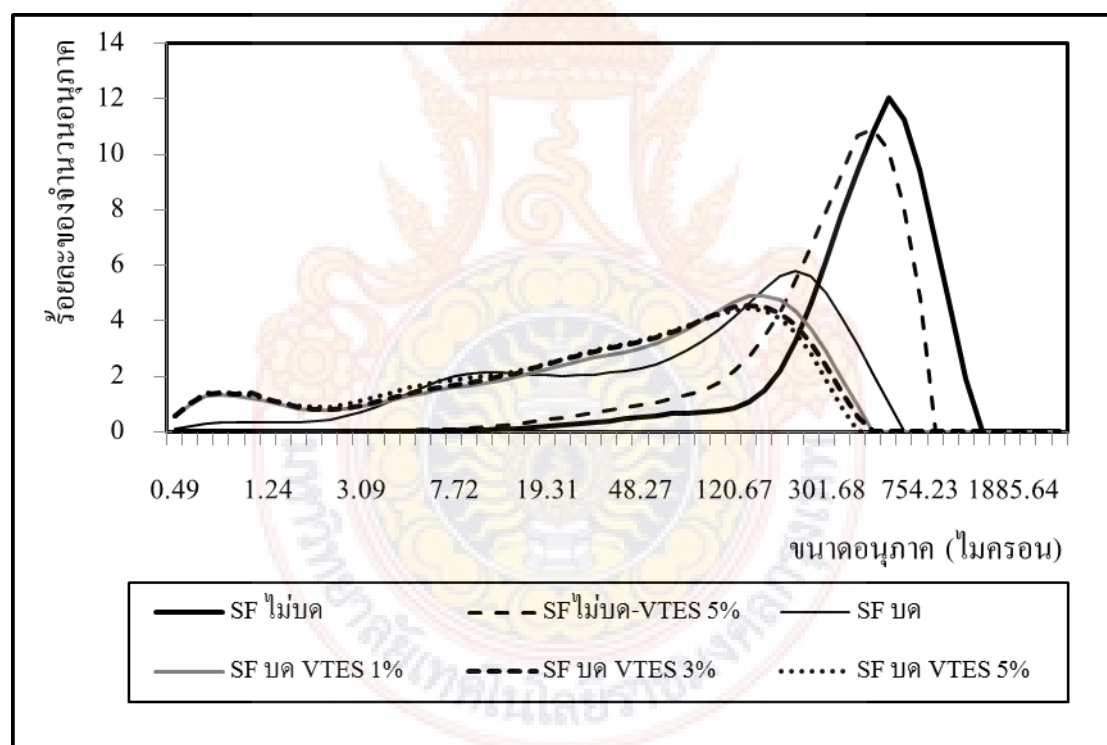


ภาพประกอบที่ 4.2 การทำปฏิกิริยาระหว่างไวน์ลไตร์เอทอกซีไซเลนกับพื้นผิวของวัสดุ

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และการกระจายขนาดอนุภาคของซิลิกาฟุ้ง และการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงลักษณะของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการศึกษาแสดงดังในตารางที่ 4.1 และภาพประกอบที่ 4.3-4.5

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของซิลิกาฟุ้ง

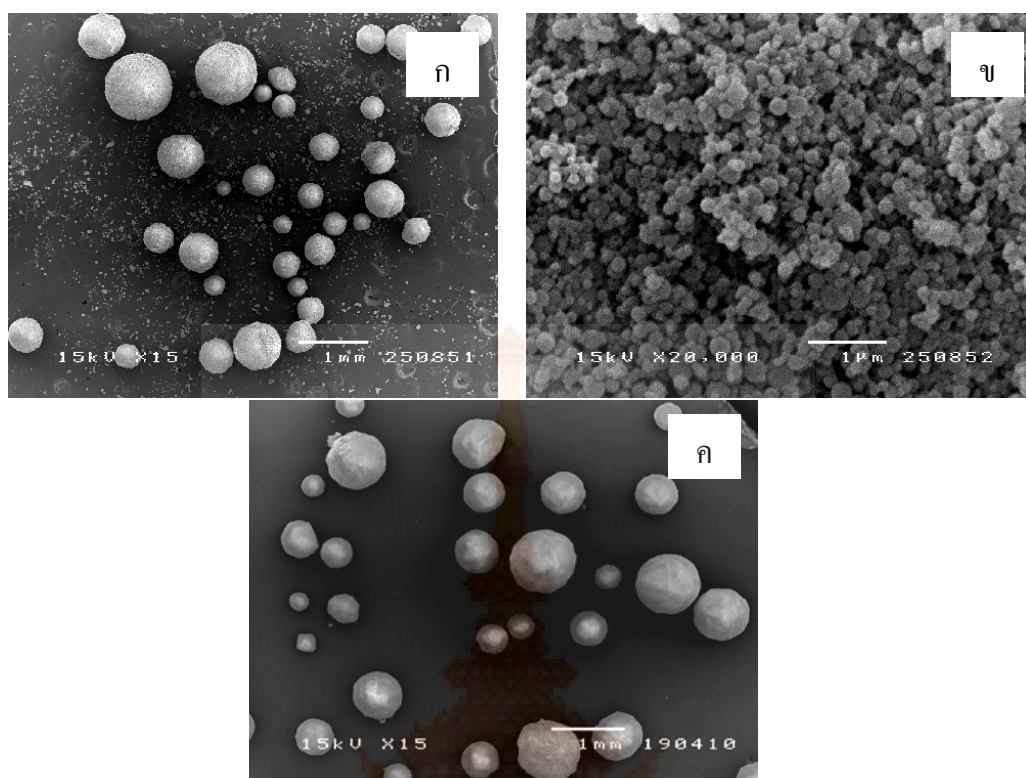
ชนิดของซิลิกาฟุ้ง	ความเข้มข้นของไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน (ปริมาตร/ปริมาตร)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)
ไม่ผ่านการบด	0	273.26
	5	154.56
ผ่านการบด	0	13.59
	1	7.11
	3	6.45
	5	6.36



SF = ซิลิกาฟุ้ง

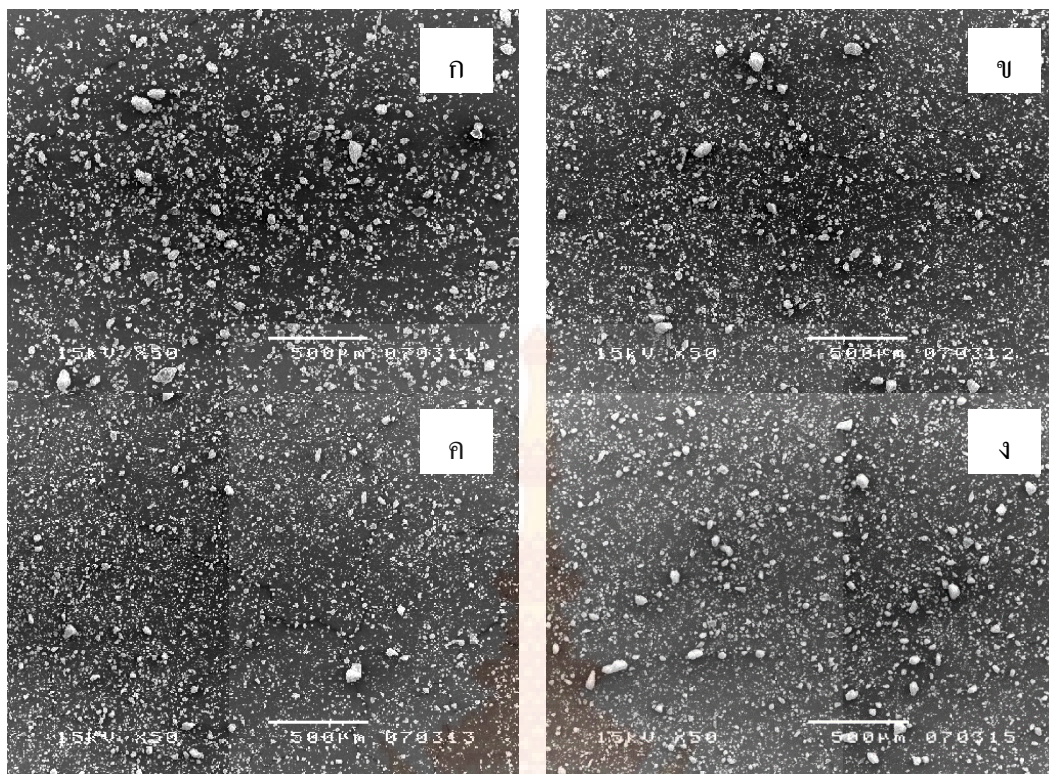
VTES = ไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน

ภาพประกอบที่ 4.3 การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาฟุ้งและซิลิกาฟุ้งที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน



ภาพประกอบที่ 4.4 ลักษณะอนุภาคของซิลิกาฟุ้งที่ไม่ผ่านการบด

- ก. ซิลิกาฟุ้งเริ่มต้น (กำลังขยาย 15x)
- ข. ซิลิกาฟุ้งเริ่มต้น (กำลังขยาย 20,000x)
- ค. ซิลิกาฟุ้งที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 (ปริมาตร/ปริมาตร) (กำลังขยาย 15x)



ภาพประกอบที่ 4.5 ลักษณะอนุภาคของซิติกาฟุ่มที่ผ่านการบด

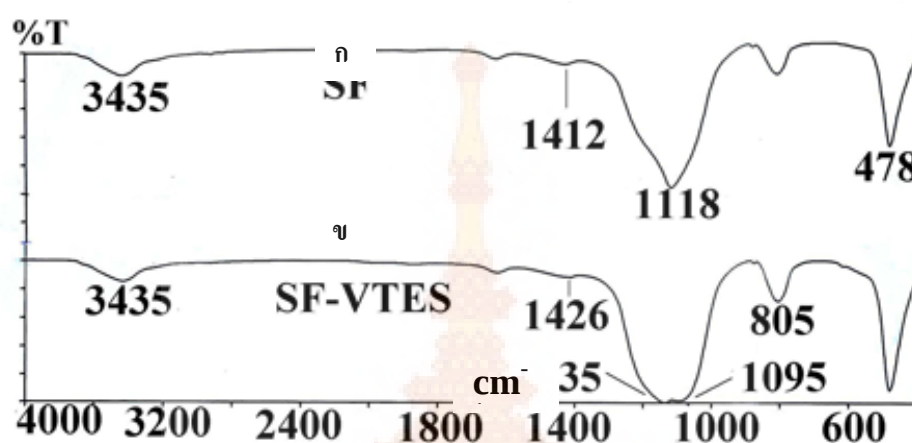
- ก. ซิติกาฟุ่มเริ่มต้นที่ผ่านการบด (กำลังขยาย 50x)
- ข. ซิติกาฟุ่มที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 (ปริมาตร/ปริมาตร) (กำลังขยาย 50x)
- ค. ซิติกาฟุ่มที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 (ปริมาตร/ปริมาตร) (กำลังขยาย 50x)
- ง. ซิติกาฟุ่มที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 (ปริมาตร/ปริมาตร) (กำลังขยาย 50x)

ผลจากการศึกษาพบว่า ซิติกาฟุ่มที่ไม่ผ่านการบดมีอนุภาคขนาดใหญ่ การปรับปรุงซิติกาฟุ่มที่ไม่ผ่านการบดด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนยังคงทำให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่เช่นเดิม (ภาพประกอบที่ 4.4) ดังนั้นการศึกษาในงานวิจัยนี้จึงนำซิติกาฟุ่มมาทำการบดก่อนที่จะปรับปรุงซิติกาฟุ่มด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน

การบดซิติกาฟุ่มทำให้อนุภาคของสารมีขนาดเล็กลง (ภาพประกอบที่ 4.5) นอกจากนี้การปรับปรุงซิติกาฟุ่มที่ผ่านด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน ทำให้อนุภาคของซิติกาฟุ่มมีการกระจายตัวออกจากกันตัวดีขึ้น การเกาะรวมตัวกันของอนุภาคซิติกาฟุ่มมีแนวโน้มลดลง

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของซิลิกาฟุ้งที่ปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนมีขนาดลดลงเนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นการศึกษาในขั้นต่อไปจึงปรับปรุงซิลิกาฟุ้งที่ผ่านการบดด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 (ปริมาตร/ปริมาตร)

จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาฟุ้งและซิลิกาฟุ้งที่ปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนโดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.6



ภาพประกอบที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของซิลิกาฟุ้งและซิลิกาฟุ้งที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน

ก. ซิลิกาฟุ้ง

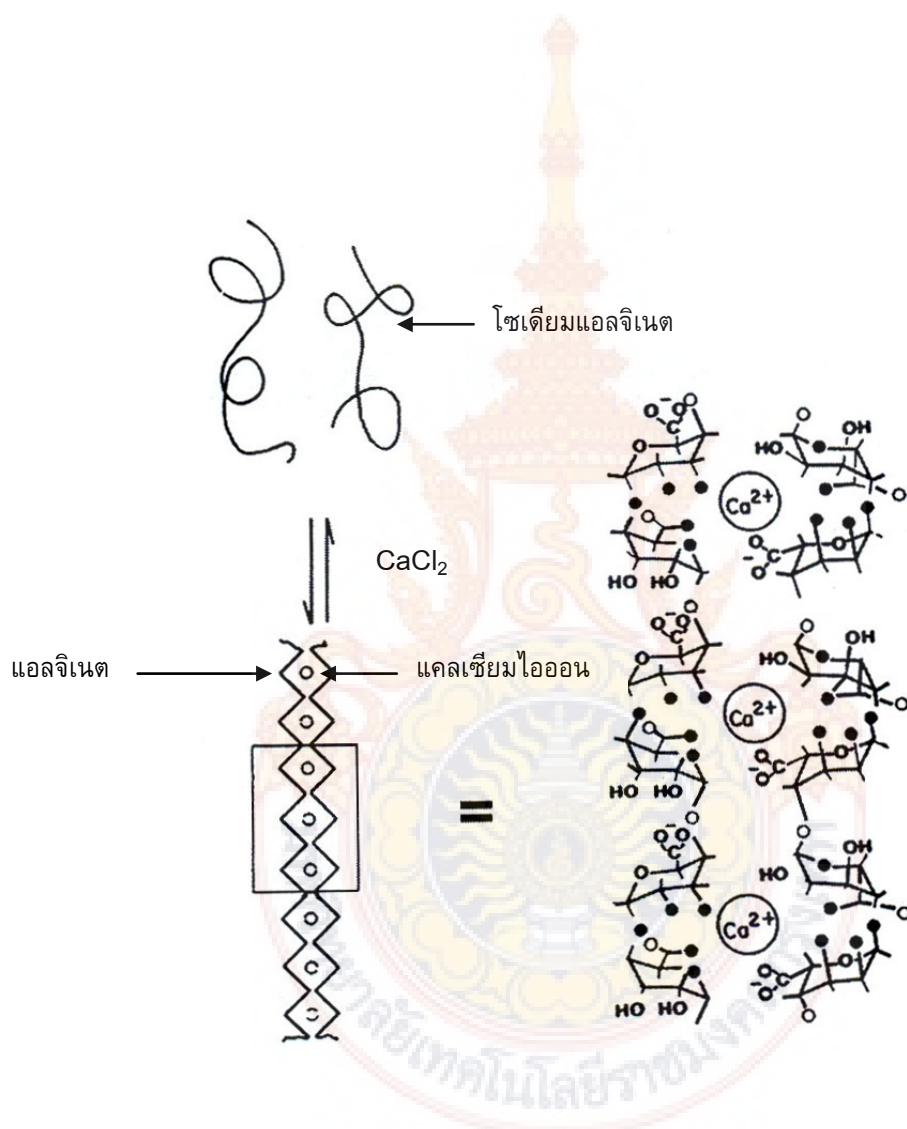
ข. ซิลิกาฟุ้งที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนที่มีความเข้มข้น

ร้อยละ 5 (ปริมาตร/ปริมาตร)

ผลจากการศึกษาพบว่า ซิลิกาฟุ้งที่ไม่ผ่านการปรับปรุงปรากฏสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของหมู่ -OH ที่บริเวณ 3435 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของ Si-OH ในซิลิกาฟุ้ง ปรากฏสเปกตรัมของหมู่ Si-O ที่บริเวณ 1118 เซนติเมตร⁻¹ และ 805 เซนติเมตร⁻¹ ปรากฏสเปกตรัมของ Si-O-Si ที่บริเวณ 467 เซนติเมตร⁻¹ (Xie et al. 2000: 379) การปรับปรุงซิลิกาฟุ้งด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 (ปริมาตร/ปริมาตร) ผลการศึกษาพบว่า ปรากฏสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงที่บริเวณ 1135 เซนติเมตร⁻¹ และ 1095 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Si-O-CH₂-CH₃ (Shieh and Liu. 1999: 3404)

4.2 การเตรียมเม็ดลูกปัดแอลจินेट

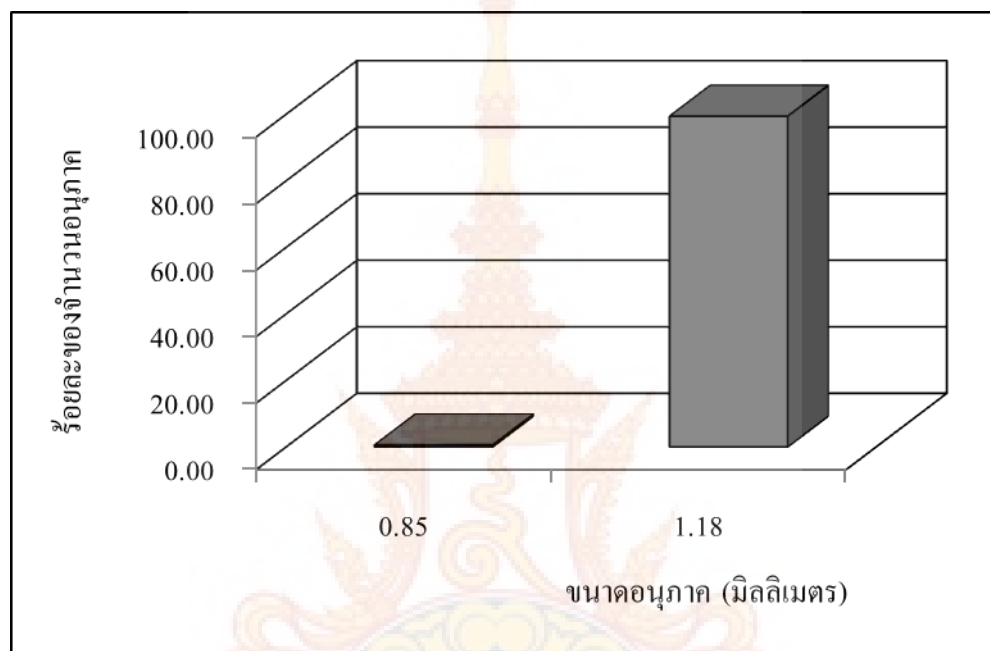
การเตรียมเม็ดลูกปัดแอลจินेट เตรียมโดยนำสารละลายโซเดียมแอลจินेटที่มีความเข้มข้นร้อยละ 6 (น้ำหนัก/ปริมาตร) หยดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.3 โมล/ลิตร และทิ้งทิ้งไว้เป็นเวลา 60 นาที สารละลายโซเดียมแอลจินेटจะปรากฏเป็นเม็ดเจลทันทีที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เนื่องจากเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไอออนกับโซพอลิเมอร์ของโซเดียมแอลจินेटดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.7



ภาพประกอบที่ 4.7 การทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไอออนกับโซเดียมแอลจินेट

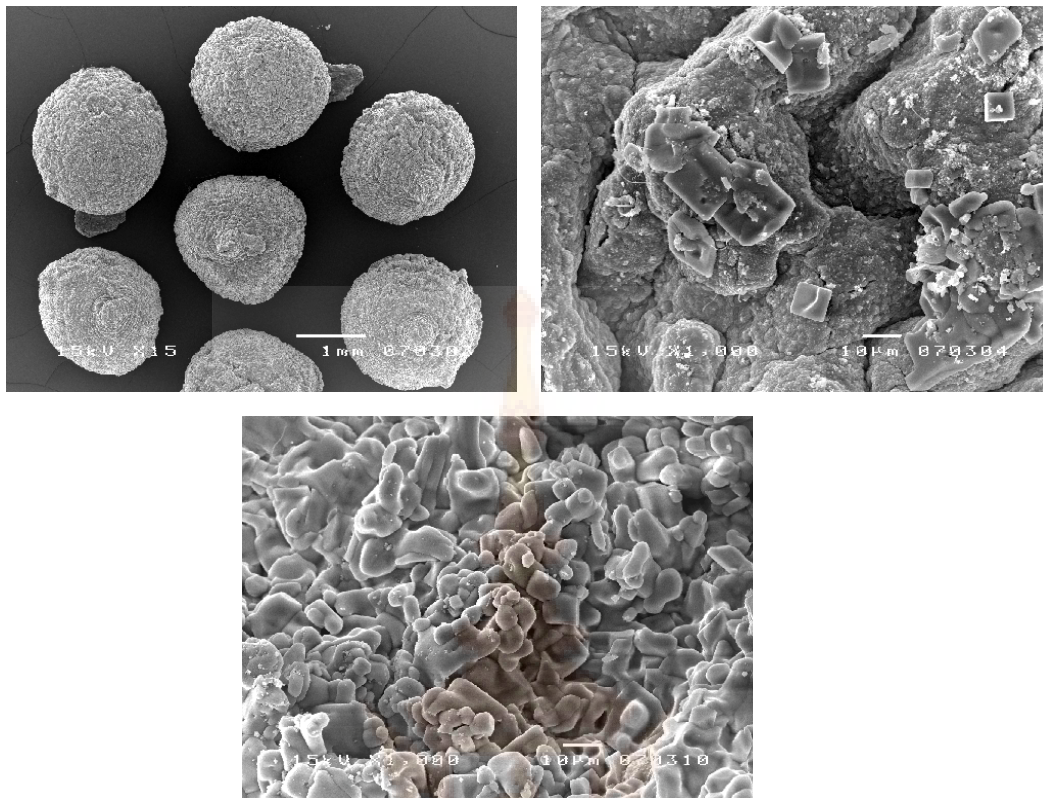
(Salomone, 1996 a: 151)

เม็ดยูกัดแอลจินเตในสภาวะเป็ยกมีสีเหลืองอ่อน ยึดหยุ่น มีรูปร่างกลม เมื่อคู้ด้วยดาเปล่า จะมีผิวเรียบ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 5.5 มิลลิเมตร เมื่ออบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 60 นาที เม็ดยูกัดแอลจินเตมีขนาดเล็กกลง การกระจายขนาดของเม็ดยูกัดแอลจินเตในสภาวะแห้ง แสดงดังในภาพประกอบที่ 4.8 ผลจากการศึกษาพบว่า เม็ดยูกัดแอลจินเตในสภาวะแห้งมีการกระจายขนาดอนุภาคระหว่าง 0.85-1.18 มิลลิเมตร โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1.18 มิลลิเมตร



ภาพประกอบที่ 4.8 การกระจายขนาดของเม็ดยูกัดแอลจินเตในสภาวะแห้งที่เตรียมจากสารละลายโซเดียมแอลจินเตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 6 (น้ำหนัก/ปริมาตร)

จากการตรวจสอบลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.9



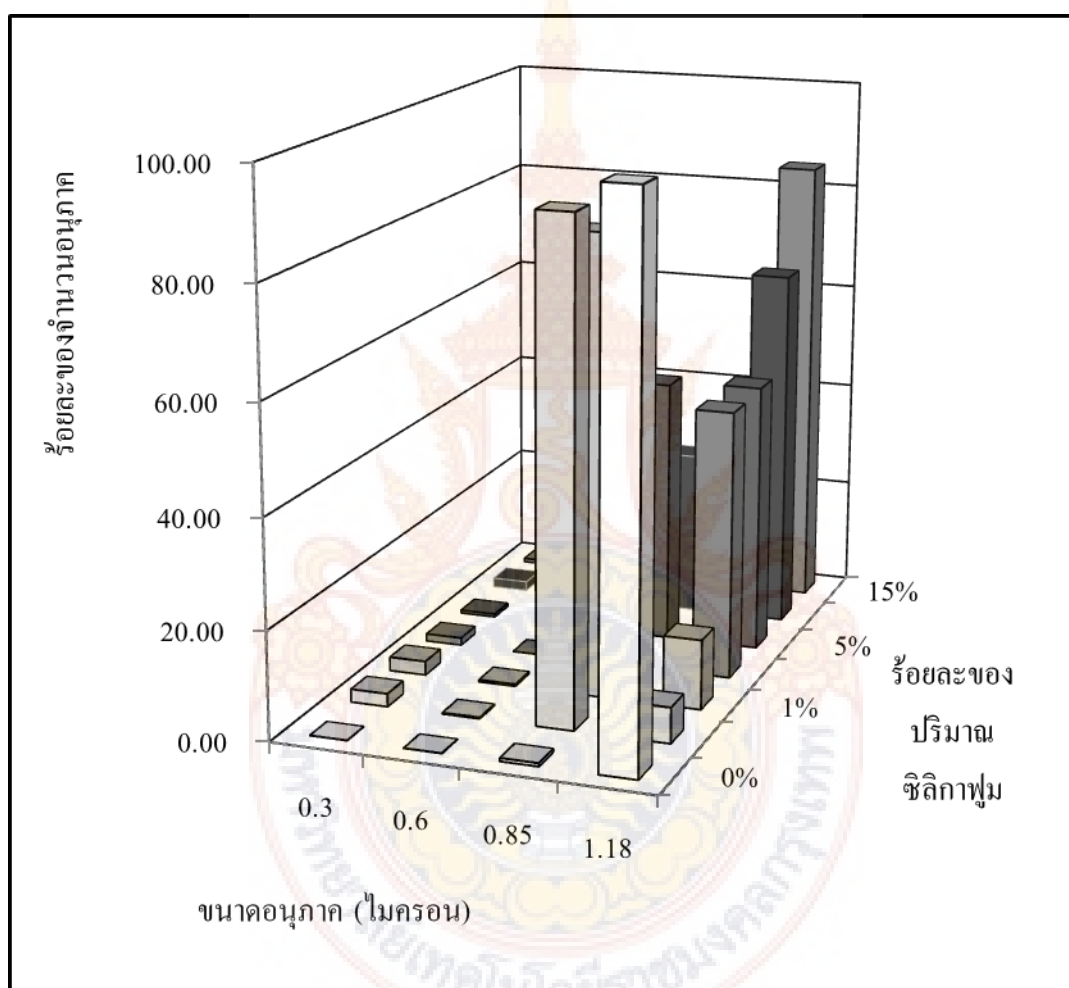
ภาพประกอบที่ 4.9 ลักษณะพื้นผิวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตในสถานะแห้ง

- ก. ลักษณะผิวภายนอก (กำลังขยาย 15x)
- ข. ลักษณะผิวภายนอก (กำลังขยาย 1,000x)
- ค. ลักษณะภาคตัดขวาง (กำลังขยาย 1,000x)

ผลจากการศึกษาพบว่า ผิวของเม็ดลูกปัดมีลักษณะไม่เรียบ ลักษณะภาคตัดขวางของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต มีลักษณะคล้ายกับมีอนุภาคขนาดเล็กเรียงซ้อนกัน (ภาพประกอบที่ 4.9 (ค)) ซึ่งอาจเกิดขึ้นในระหว่างการเชื่อมขวางสารละลายแอลจิเนตในขั้นตอนการเชื่อมขวางด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

4.3 การเตรียมเม็ดลูกปัดแอลจินเตนเคปซูเลตซิติกาฟุ่ม

เม็ดลูกปัดแอลจินเตนเคปซูเลตซิติกาฟุ่ม เตรียมโดยผสมสารละลายโซเดียมแอลจินเต และซิติกาฟุ่มที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนเข้าด้วยกัน โดยผสมซิติกาฟุ่ม ในปริมาณต่าง ๆ ลงไปในสารละลายโซเดียมแอลจินเต ซิติกาฟุ่มจะแขวนลอยอยู่ในสารละลาย โซเดียมแอลจินเต จากนั้นหยดลงไปในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัด แอลจินเต และเม็ดลูกปัดแอลจินเตเคปซูเลตซิติกาฟุ่มแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.10 และ ตารางที่ 4.2



ภาพประกอบที่ 4.10 การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดแอลจินเตในสถานะแห้ง และเม็ดลูกปัดแอลจินเตเคปซูเลตซิติกาฟุ่มในปริมาณต่าง ๆ

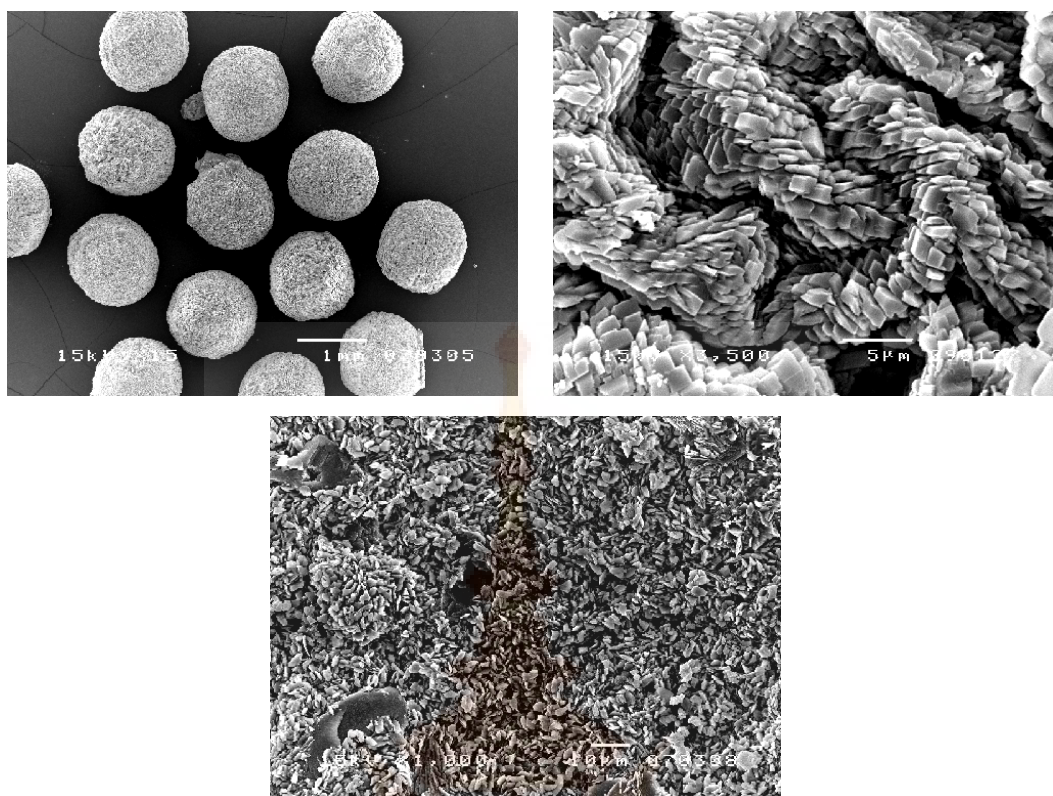
ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเม็ดลูกปัดแอลจินเตและเม็ดลูกปัดแอลจินเตเอนเคปซูเลต ซิลิกาฟุ่ม

ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟุ่ม (โดยน้ำหนักของแอลจินเต)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)
0	1.18
0.5	0.86
1.0	0.88
3.0	1.01
5.0	1.01
10.0	1.06
15.0	1.12

ผลจากการศึกษาพบว่า เม็ดลูกปัดแอลจินเตเอนเคปซูเลตซิลิกาฟุ่ม มีการกระจายขนาดอนุภาคระหว่าง 0.3-1.18 มิลลิเมตร โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.86-1.18 มิลลิเมตร

การผสมซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 0.5-1.0 (โดยน้ำหนักของแอลจินเต) ทำให้อนุภาคของเม็ดลูกปัดแอลจินเตเอนเคปซูเลตซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กลง เมื่อเทียบกับเม็ดลูกปัดแอลจินเต ทั้งนี้ อาจเนื่องจากซิลิกาฟุ่มทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลของแอลจินเต แต่เมื่อผสมซิลิกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 3.0-15.0 (โดยน้ำหนักของแอลจินเต) อนุภาคของเม็ดลูกปัดแอลจินเตเอนเคปซูเลตซิลิกาฟุ่มจะมีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณซิลิกาฟุ่มที่เติมลงไปจะทำให้ปริมาณพื้นที่ผิวในเม็ดลูกปัดเพิ่มขึ้นเม็ดลูกปัดจึงมีขนาดเพิ่มขึ้น

จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของเม็ดลูกปัดแอลจินเตเอนเคปซูเลตซิลิกาฟุ่มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.11



ภาพประกอบที่ 4.11 ลักษณะของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตเอนเคปซูเลตซิติกาฟุ่ม

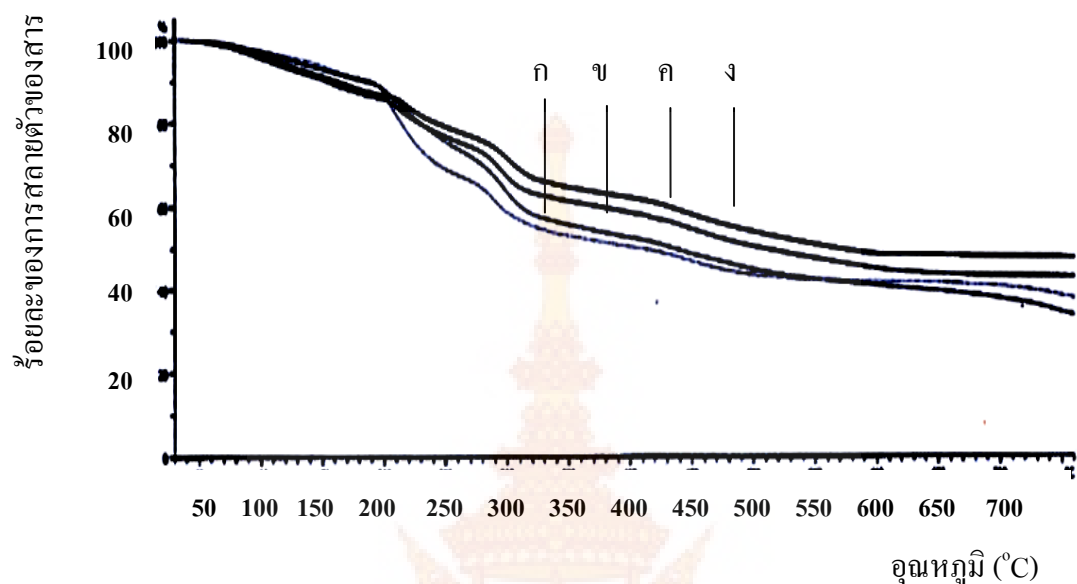
โดยผสมซิติกาฟุ่มในปริมาณร้อยละ 15 (โดยน้ำหนักของแอลจิเนต)

- ก. ลักษณะพื้นผิว (กำลังขยาย 15x)
- ข. ลักษณะพื้นผิว (กำลังขยาย 3,500x)
- ค. ลักษณะภาคตัดขวาง (กำลังขยาย 1,000x)

ผลจากการศึกษาพบว่า พื้นผิวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตเอนเคปซูเลตซิติกาฟุ่ม (ภาพประกอบที่ 4.11) มีลักษณะขรุขระมากกว่าเม็ดลูกปัดแอลจิเนต (ภาพประกอบที่ 4.9) และปรากฏผลึกของซิติกาฟุ่มที่ผิวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตเอนเคปซูเลตซิติกาฟุ่ม ในทำนองเดียวกัน ลักษณะภาคตัดขวางของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตเอนเคปซูเลตซิติกาฟุ่ม ปรากฏผลึกของซิติกาฟุ่มอยู่ภายในซึ่งแตกต่างจากภาคตัดขวางของเม็ดลูกปัดแอลจิเนตที่ไม่ได้ผสมซิติกาฟุ่ม

4.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

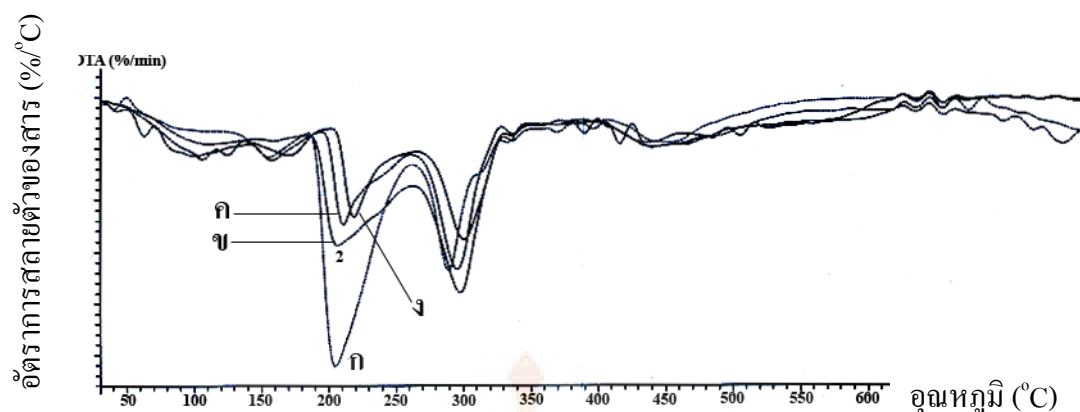
เม็ดลูกปัดแอลจิเนต และเม็ดลูกปัดแอลจิเนตเอนเคปซูเลตซิติกาฟุ่ม ถูกนำมาตรวจสอบสมบัติทางความร้อนที่อุณหภูมิห้อง ถึง 800°C ผลการศึกษาแสดงดังในภาพประกอบที่ 4.11-4.12



ภาพประกอบที่ 4.12 เทอร์โมแกรมของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต (ก) และเม็ดลูกปัดแอลจิเนต

เอนเคปซูเลตซิติกาฟุ่ม (ข-ง)

- ก. ไม่ผสมซิติกาฟุ่ม
- ข. ผสมซิติกาฟุ่มปริมาณร้อยละ 5 (โดยน้ำหนักของแอลจิเนต)
- ค. ผสมซิติกาฟุ่มปริมาณร้อยละ 10 (โดยน้ำหนักของแอลจิเนต)
- ง. ผสมซิติกาฟุ่มปริมาณร้อยละ 15 (โดยน้ำหนักของแอลจิเนต)



ภาพประกอบที่ 4.13 อัตราการสลายตัวของเม็ดลูกปัดแอลจิเนต (ก) และเม็ดลูกปัดแอลจิเนต-เอนเคปซูเลตซิลิกาฟุ่ม (ข-ง)

- ก. ไม่ผสมซิลิกาฟุ่ม
- ข. ผสมซิลิกาฟุ่มปริมาณร้อยละ 5 (โดยน้ำหนักของแอลจิเนต)
- ค. ผสมซิลิกาฟุ่มปริมาณร้อยละ 10 (โดยน้ำหนักของแอลจิเนต)
- ง. ผสมซิลิกาฟุ่มปริมาณร้อยละ 15 (โดยน้ำหนักของแอลจิเนต)

ผลจากการศึกษาพบว่า แอลจิเนต (ภาพประกอบที่ 4.11 (ก)) เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 100-120°C จะเกิดการระเหยของน้ำออกไปจากแอลจิเนต และเสื่อมสภาพ (degradation) ไปเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C จากนั้นเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 220-280°C น้ำหนักที่หายไปจากการได้รับความร้อนเกิดจากการแตกของโซ่พอลิเมอร์ของแอลจิเนตไปเป็นสารมัธยันตร์ (intermediate) ที่มีความเสถียร และมีการสูญเสียหมู่ไฮดรอกซิลออกไปจากแอลจิเนตในรูปของน้ำ เมื่อได้รับความร้อนต่อไปที่อุณหภูมิสูง ๆ จะเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ที่อุณหภูมิ 700°C จะเกิดแคลเซียมออกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Kong et al. 2009: 807-812) การเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิ 150°C) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้แคลเซียมแอลจิเนตมีสมบัติต้านทานการติดไฟ โดยแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นจะสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเจือจางแก๊สที่ถูกติดไฟได้ในขณะที่เกิดการลุกติดไฟของวัสดุอื่น จึงทำให้การเผาไหม้ของวัสดุอื่นลดลง ดังนั้นแคลเซียมแอลจิเนตจึงมีสมบัติต้านทานการติดไฟ

การผสมชิลิกาฟูลงในแอลจินต (ภาพประกอบที่ 4.11 (ข-ง)) ลักษณะเทอร์โมแกรมที่เกิดขึ้นจะคล้ายคลึงกับเทอร์โมแกรมของแอลจินต (ภาพประกอบที่ 4.11 (ก)) แต่ร้อยละของปริมาณสารที่เหลืออยู่ (residue) ภายหลังจากการได้รับความร้อนแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ร้อยละของปริมาณสารที่เหลืออยู่ภายหลังจากได้รับความร้อนของเม็ดลูกปัดแอลจินต และเม็ดลูกปัดแอลจินตเอนเคปชูลิตชิลิกาฟูล

ร้อยละของปริมาณชิลิกาฟูล (โดยน้ำหนักของแอลจินต)	ร้อยละของปริมาณสารที่เหลืออยู่ ภายหลังจากได้รับความร้อน
0	33.60
10	37.65
20	42.80
30	56.57

ผลจากการศึกษาพบว่า การผสมชิลิกาฟูลลงในแอลจินต ทำให้มีปริมาณสารที่เหลืออยู่จากการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากสารที่เกิดการไหม้เกรียม (char) ของชิลิกาฟูล นอกจากนี้ปริมาณสารที่เหลืออยู่ภายหลังจากการได้รับความร้อนมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณชิลิกาฟูลเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปกลไกการต้านทานการติดไฟของชิลิกาฟูลคือ เมื่อชิลิกาฟูลได้รับความร้อน การเกิดการเสื่อมสภาพของชิลิกาฟูลจะให้น้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ น้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะช่วยเจือจางแก๊สที่เกิดการเผาไหม้ได้ในขณะที่วัสดุอื่นเกิดการลุกติดไฟ นอกจากนี้จะช่วยลดปริมาณออกซิเจนที่จะช่วยให้ไฟติดในระหว่างการลุกไหม้ รวมทั้งแคลเซียมออกไซด์จะปกคลุมอยู่บนผิวของวัสดุอื่นที่กำลังเกิดการเผาไหม้ ทำให้การส่งผ่านความร้อนและออกซิเจนไปยังวัสดุที่กำลังเกิดการเผาไหม้ลดลง การติดไฟของวัสดุอื่นจึงลดลง การผสมชิลิกาฟูลลงในแอลจินต จะให้สารที่เกิดการไหม้เกรียมเพิ่มขึ้น จึงช่วยทำให้แอลจินตมีความคงทนต่อความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลจากการศึกษาพบว่า การผสมชิลิกาฟูลลงในแอลจินตทำให้อัตราการเผาไหม้ของแอลจินตลดลง (ภาพประกอบที่ 4.12) ดังนั้นการผสมชิลิกาฟูลร่วมกับแอลจินต จึงทำให้เกิดสถานะเสริมซึ่งกันและกัน (synergistic effect) ต่อสมบัติการต้านทานการติดไฟ หรือความคงทนต่อความร้อน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. การปรับปรุงซิลิกาฟุ่มด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน ทำให้ซิลิกาฟุ่มมีสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น
2. ซิลิกาฟุ่มที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กลง และอนุภาคมีการกระจายตัวออกจากกันมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของไวนิลไตรเอทอกซีไซเลนเพิ่มขึ้น
3. ในการเตรียมเม็ดลูกปัดแอลจินเตนเคปซูล์ซิลิกาฟุ่ม ขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซิลิกาฟุ่มในเม็ดลูกปัดแอลจินเตนเพิ่มขึ้น
4. เม็ดลูกปัดแอลจินเตนเคปซูล์ซิลิกาฟุ่ม มีสมบัติคงทนต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซิลิกาฟุ่มเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการเตรียมเม็ดลูกปัดแอลจินเตนโดยผสมสารชนิดอื่น ๆ ลงไปในเม็ดลูกปัด-แอลจินเตน เช่น เกล็ด ฝุ่นฝ้าย (cotton dust) และขี้เถ้า และตรวจสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากการเตรียม
2. ศึกษาอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อขนาดของเม็ดลูกปัดแอลจินเตน



เอกสารอ้างอิง

- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. “ซิลิกาฟลูม” วารสารคอนกรีต [ออนไลน์]. 1 (สิงหาคม 2550). เข้าถึงได้
จาก: www.thaica.or.th. สืบค้น 21 มกราคม 2557.
- พงศ์พันธ์ วรสุนทรโรต และวรพงศ์ วรสุนทรโรต. **วัสดุก่อสร้าง**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2546.
- Annadurai, G., Juarg Ruey-Shin, J. and Lee Duu-Jong “Factorial Design Analysis for Adsorption
of Dye on Activated Carbon Beads Incorporated with Calcium Alginates” **Advances in
Environmental Research**. 6, 2 (2002): 191-198.
- Dai, Y.N., Li, P., Zhang, J.P., Wang, A.Q. and Wei, Q. “Swelling Characteristics and Drug
Delivery Properties of Nifedipine-loaded pH Sensitive AlginateChitosan Hydrogel Beads”
Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials. 86 B, 2 (August,
2008): 493-500.
- Gotoh. T., Matsushima, K. and Kikuchi, Ken-Ichi. “Preparation of Alginate-Chitosan Hybrid Gel
Beads and Adsorption of Divalent Metal Ions” *Chemosphere*. 55,(2004): 135-140.
- Iler, R.K. *The Chemistry of Silica*, John Wiley & Sons, New York, 1979.
- Kashiwagi, T. et al. “Flame Retardant Mechanism of Silica Gel/Silica” **Fire and
Materials**. 24, 6 (2000): 277-289.
- _____. “Flame-Retardant Mechanism of Silica: Effects of resin molecular weight”
Journal of Applied Polymer Science. 87, 9 (2003): 1541-1553.
- Kong, Q.S., Wang, B.B., Ji, Q., Xia, Y.Z., Guo, Z.X. and Yu, J. “Thermal Degradation and
Flame Retardancy of Calcium Silicate Alginate Fibres” *Chinese Journal of Polymer
Science*. 27, 6 (June, 2009): 807-812.
- La’zaro Nu’rai et. el. “Heavy Metal Biosorption by Gellan Gum Gel Beads” **Water Research**. 37,
5 (2003): 2118-2126.
- Liu, X.D., Bao, D.C., Xue, W.M., Xiong, Y., Yu, W.T., Yu, X.J., Ma, X.J. and Yuan, Q.
“Preparation of Uniform Calcium Alginate Gel Beads by Membrane Emulsification Coupled
with Internal Gelation” **Journal of Applied Polymer Science**. 87, 3 (2003): 848-852.
- McHugh, D.J. **Production and Utilization of Product from Commercial Seaweeds**. Rome:
Food and Agriculture Organization of United State Nations, 1987.

- Qin, Y., Cai, L., Feng, D., Shi, B., Liu, J., Zhang, W. and Shen, Y. "Combined Use of Chitosan and Alginate in the Treatment of Wastewater" **Journal of Applied Polymer Science**. 104, 6 (June, 2007): 3581-3587.
- Robert, J.H. **The Development of Sodium Alginate as a Textile Print Thickener**. London: Kelo International, 1995.
- Salomone, J.C. **Polymeric Materials Encyclopedia**. Volume 1. Boca Ration: CRC Press, 1996 a.
- _____. **Polymeric Materials Encyclopedia**. Volume 8. Boca Raton: CRC Press, 1996 b.
- _____. **Polymeric Materials Encyclopedia**. Volume 10. Boca Raton: CRC Press, 1996 c.
- Shieh, V.T.; Liu, C.M. "Silane Grafting Reactions of LDPE, HDPE, and LLDPE" **Journal of Applied Polymer Science**. 74, 14 (1999): 3404-3411.
- Sipaut, C.S. et al. "Prpperties and Morphology Bulk Epoxy Composites Filled with Modified Fumed Silica-Epoxy Nanocomposites" **Journal of Applied Polymer Science**. 7, 1 (2007): 27-34.
- Tan, C.S., Jejurikar, A., Rai, B., Bostrom, T., Lawrie, G. and Grondahl, L. "Encapsulation of a Glycosaminoglycan in Hydroxyapatite/Alginate Capsules" **Journal of Biomedical Materials Research Part A**. 91A, 3 (December, 2009): 866-877.
- Venables, R.A. **Polymer Additives**. n.p. Polymer Science and Technology Mahidal University: 1995.
- Wang, J.Z., Huang, X.B., Xiao, J., Yu, W.T., Wang, W., Xie, W.Y., Zhang, Y. and Ma, X.Y. "Hydro-Spinning: A novel technology for making alginate/chitosan fibrous scaffold" **Journal of Biomedical Materials Research Part A**. 93A, 3 (June, 2010): 910-919.
- Wu, C., Zhu, Y., Chang, J., Zhang, Y. and Xiao, Y. "Bioactive Inorganic-Materials/Alginate Composite Microspheres with Controllable Drug-Delivery Ability" **Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials**. 94B, 1 (July, 2010): 32-43.
- Xie, T.; Zhou, Q.; Feng, S.; Wang, X. "Study of Poly(methyl methacrylate–maleic anhydride)/Silica Hybrid Materials" **Journal of Applied Polymer Science**. 75, 3 (2000): 379-383.
- Ye, L.; Wu, Q.; Qu, B. "Synergistic Effects of Fumed Silica on Intumescent Flame-Retardant Polypropylene" **Journal of Applied Polymer Science**. 115, 6 (2010): 3508-3515.

ภาคผนวก ก

การกระจายอนุภาคของซิลิกาฟุ่ม



ตารางที่ 1 การกระจายอนุภาคของซิลิกาฟุ่ม

ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	ร้อยละของจำนวนอนุภาค					
	ชนิดของซิลิกาฟุ่ม					
	ไม่ผ่านการบด		ผ่านการบด			
	ซิลิกาฟุ่ม เริ่มต้น	ซิลิกาฟุ่ม- VTES 5%*	ซิลิกาฟุ่ม- เริ่มต้น	ซิลิกาฟุ่ม- VTES 1%*	ซิลิกาฟุ่ม- VTES 3%*	ซิลิกาฟุ่ม- VTES 5%*
0.49	0	0	0.12	0.53	0.56	0.56
0.58	0	0	0.22	0.98	1.04	1.04
0.67	0	0	0.30	1.30	1.37	1.38
0.78	0	0	0.32	1.31	1.39	1.40
0.91	0	0	0.34	1.29	1.37	1.38
1.06	0	0	0.34	1.21	1.38	1.30
1.24	0	0	0.34	1.09	1.16	1.18
1.44	0	0	0.34	0.95	1.01	1.05
1.68	0	0.01	0.35	0.84	0.89	0.94
1.95	0	0.01	0.38	0.77	0.81	0.89
2.28	0	0.02	0.44	0.76	0.80	0.90
2.65	0	0.02	0.55	0.81	0.85	0.98
3.09	0	0.02	0.70	0.90	0.94	1.10
3.60	0	0.03	0.89	1.02	1.07	1.26
4.19	0.01	0.03	1.11	1.16	1.21	1.42
4.88	0.01	0.04	1.36	1.29	1.35	1.57
5.69	0.02	0.06	1.60	1.40	1.47	1.70
6.63	0.03	0.08	1.82	1.50	1.58	1.80
7.72	0.04	0.1	1.99	1.59	1.68	1.88
9.00	0.05	0.13	2.10	1.67	1.77	1.94
10.48	0.07	0.18	2.14	1.76	1.86	1.99
12.21	0.09	0.23	2.13	1.86	1.98	2.07
14.22	0.12	0.29	2.10	1.98	2.11	2.17
16.57	0.15	0.36	2.05	2.11	2.26	2.29

ตารางที่ 1 (ต่อ) การกระจายอนุภาคของซิลิกาฟุ้ง

ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	ร้อยละของจำนวนอนุภาค					
	ชนิดของซิลิกาฟุ้ง					
	ไม่ผ่านการบด		ผ่านการบด			
	ซิลิกาฟุ้ง เริ่มต้น	ซิลิกาฟุ้ง- VTES 5%*	ซิลิกาฟุ้ง- เริ่มต้น	ซิลิกาฟุ้ง- VTES 1%*	ซิลิกาฟุ้ง- VTES 3%*	ซิลิกาฟุ้ง- VTES 5%*
19.31	0.18	0.43	2.03	2.26	2.43	2.45
22.49	0.23	0.51	2.02	2.41	2.60	2.62
26.20	0.27	0.6	2.03	2.55	2.76	2.78
30.53	0.33	0.69	2.07	2.66	2.90	2.93
35.56	0.39	0.77	2.12	2.76	3.01	3.06
41.43	0.46	0.86	2.20	2.86	3.12	3.18
48.27	0.53	0.96	2.30	2.99	3.23	3.30
56.23	0.59	1.05	2.44	3.16	3.38	3.44
65.51	0.64	1.17	2.64	3.39	3.56	3.61
76.32	0.67	1.31	2.92	3.67	3.78	3.81
88.91	0.7	1.49	3.27	4.00	4.02	4.02
103.58	0.74	1.75	3.68	4.33	4.25	4.24
120.67	0.84	2.14	4.15	4.67	4.48	4.38
140.58	1.07	2.69	4.64	4.87	4.56	4.43
163.77	1.5	3.41	5.13	4.90	4.50	4.34
190.80	2.2	4.35	5.63	4.73	4.27	4.07
222.28	3.23	5.48	5.79	4.33	3.84	3.58
258.95	4.58	6.7	5.60	3.69	3.20	2.83
301.68	6.17	7.99	5.02	2.84	2.37	1.87
351.46	7.85	9.33	4.14	1.89	1.43	0.90
409.45	9.44	10.67	3.10	0.94	0.50	0
477.01	10.83	10.92	2.06	0	0	0
555.71	12.02	10.14	1.01	0	0	0
647.41	11.26	8.15	0	0	0	0

ตารางที่ 1 (ต่อ) การกระจายอนุภาคของซิลิกาฟุ้ง

ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	ร้อยละของจำนวนอนุภาค					
	ชนิดของซิลิกาฟุ้ง					
	ไม่ผ่านการบด		ผ่านการบด			
	ซิลิกาฟุ้ง เริ่มต้น	ซิลิกาฟุ้ง- VTES 5%*	ซิลิกาฟุ้ง- เริ่มต้น	ซิลิกาฟุ้ง- VTES 1%*	ซิลิกาฟุ้ง- VTES 3%*	ซิลิกาฟุ้ง- VTES 5%*
754.23	9.44	4.81	0	0	0	0
878.67	6.93	0	0	0	0	0
1023.66	4.43	0	0	0	0	0
1192.56	1.92	0	0	0	0	0
1389.33	0	0	0	0	0	0
1618.57	0	0	0	0	0	0
1885.64	0	0	0	0	0	0
2196.77	0	0	0	0	0	0
2559.23	0	0	0	0	0	0
2981.51	0	0	0	0	0	0

* VTES = ไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน

ภาคผนวก ข

การกระจายขนาดอนุภาคของแอลจินเตและแอลจินเตเอ็นแคปซูลตจิลิกาฟูม



ตารางที่ 1 การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดแอลจินต

ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	ร้อยละของจำนวนอนุภาค (โดยน้ำหนัก)
0.30	0.00
0.60	0.00
0.85	0.59
1.18	99.41

ตารางที่ 2 การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดลูกปัดแอลจินตเอ็นแคปซูลเลตซิลิกาฟูม

ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	ร้อยละของจำนวนอนุภาค (โดยน้ำหนัก)						
	ร้อยละของปริมาณซิลิกาฟูมที่เติมลงในสารละลายโซเดียมแอลจินต (โดยน้ำหนักของแอลจินต)						
	0	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0	15.0
0.30	0.00	2.39	2.57	1.38	0.56	1.76	0.68
0.60	0.00	0.22	0.37	0.00	0.37	0.19	0.34
0.85	0.59	90.85	84.19	48.95	49.07	30.86	14.29
1.18	99.41	6.54	12.87	49.67	50.00	67.19	84.69

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวบุญศรี คู่สุขธรรม
วัน เดือน ปี เกิด	20 กรกฎาคม พ.ศ. 2507
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	
ปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปทุมวัน (2525-2528) การศึกษามหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์-เคมี)
ปริญญาโท	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร (2528-2531) การศึกษามหาบัณฑิต (เคมี)
ปริญญาโท	มหาวิทยาลัยมหิดล (2536-2539) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์)
ปริญญาเอก	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2544-2547) วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)
ประวัติการทำงาน	2532-ปัจจุบัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ