

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

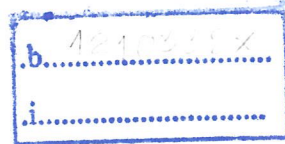
การศึกษาสมบัติเชิงกลของเรซินคอมโพสิต



T104101

กตตบงกช เพชรสังข์  
กัญญา วัลลภา

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...104101  
วัน,เดือน,ปี...3...0...๗...๒๕๕2



ปฏิญานี้พจนนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

**STUDY ON MECHANICAL PROPERTY OF RESIN COMPOSITE**

**KATABONGKOT PHETSANG  
KINIYA            WANLAPHA**

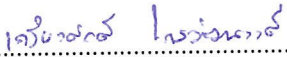
**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR DEGREE OF  
BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2008**


ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาสมบัติเชิงกลของเรซินคอม โพลีต  
โดย นางสาวกตตบงกช เพชรสังข์  
นางสาวกัญญา วัลลภา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ขจรศักดิ์ เฟื่องนวกิจ

---

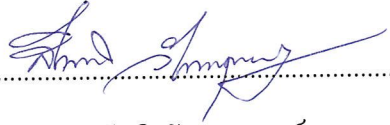
ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

.....กรรมการร่วม  
(ดร. ขจรศักดิ์ เฟื่องนวกิจ)

.....กรรมการ  
(ผศ.ดร. อภินันท์ นัมคณิสสรณ์)

.....กรรมการ  
(ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์)

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาสมบัติเชิงกลของเรซินคอมโพสิต
โดย	นางสาวกตตบงกช เพชรสังข์ นางสาวกัญญา วัลลภา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สังเคราะห์เรซินคอมโพสิต เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ซีโรเจลซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนและเปราะ โดยสังเคราะห์ได้จากกระบวนการโซลเจลพอลิคอนเดนเซชันของรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ และมีสำลีสเป็นตัวเสริมแรงด้วยร้อยละโดยมวลของสำลีสต่อรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ที่ศึกษาเท่ากับ 0 0.0897 0.3587 0.6278 0.8968 และ 2.6905 ภายใต้การทำให้แห้งแบบสุญญากาศ และการไฟโรไลซิสศึกษา 2 ลักษณะ คือ การไฟโรไลซิสที่อับอากาศด้วยอุณหภูมิ 1,000 °C และไม่มีไฟโรไลซิส เมื่อนำเรซินคอมโพสิตทั้งสองชนิดไปทดสอบความแข็งแรงพบว่าเมื่อร้อยละโดยมวลของสำลีสต่อรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสของมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่มีค่าไม่แตกต่างกันทั้งสองชนิด เนื่องจากมวลของสำลีสที่ใช้ในการสังเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกัน การไฟโรไลซิสทำให้ค่ามอดูลัสของยัง ความหนาแน่น พื้นที่ผิวจำเพาะ(BET) และปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์ของเรซินคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีในการทำโครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์ และ ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ กรรมการสอบปริญญานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำในการให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ และคุณสุวรรณ ยิ้มย่อง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่งที่ให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาและเป็นกำลังใจตลอดมา

กตตบงกช เพชรสังข์

กัญญา วัลลภา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 รีซอร์ซินอล – ฟอรั่มลดีไฮด์คาร์บอนเจล .....	3
2.1.1 กระบวนการเกิดเจล.....	3
2.1.1.1 ปฏิกิริยาการเพิ่ม.....	3
2.1.1.2 ปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน .....	3
2.1.2 การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย.....	4
2.1.3 การทำให้แห้ง.....	5
2.1.4 ไพโรไลซิส.....	5
2.2 สารตัวเติม .....	5
2.2.1 สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย .....	5

## สารบัญ (ต่อ)

2.2.2	สารตัวเติมที่มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย .....	6
2.2.3	สารตัวเติมฝ้าย .....	6
2.2.4	ฝ้าย.....	8
2.2.4.1	โครงสร้างทางกายภาพ.....	8
2.2.4.2	โครงสร้างทางเคมี.....	9
2.2.4.3	สมบัติทางกายภาพ.....	10
2.2.4.4	สมบัติทางเคมี.....	11
2.3	วัสดุคอมโพสิต .....	11
2.3.1	วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค.....	12
2.3.1.1	วัสดุผสมเม็ดผง หรืออนุภาคขนาดใหญ่.....	12
2.3.1.2	วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก.....	12
2.3.2	วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย.....	13
2.3.2.1	อิทธิพลของความยาวเส้นใย.....	13
2.3.2.2	อิทธิพลของความเข้มข้นและการจัดเรียงตัวของเส้นใย.....	14
2.3.2.3	วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวแบบอิสระ.....	14
2.3.3	วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์.....	16
2.3.3.1	วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์(GFRP).....	16
2.3.3.2	วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์(CFRP).....	16
2.3.3.3	วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด.....	17
2.3.3.4	วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดอื่น.....	17
2.3.4	วัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ.....	18
2.3.5	วัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิก.....	18
2.3.6	วัสดุผสมคาร์บอน-คาร์บอน.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

2.3.7 วัสดุผสมแบบลูกผสม.....	19
2.3.8 วัสดุผสม โครงสร้าง.....	19
2.3.8.1 วัสดุผสมลามิना.....	20
2.3.8.2 แผงประกบแบบแซนด์วิช.....	20
2.4 สมดุลของการดูดซับและไอโซเทอมของการดูดซับ.....	20
2.5 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน โดยใช้วิธีบีอีที.....	22
2.6 การทดสอบแรงอัด.....	25
2.7 การแปรรูปแบบยึดหยุ่น.....	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 การทดลอง.....	32
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้.....	32
3.2 วิธีการทดลอง.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย.....	35
4.1 การหาค่าสมบัติเชิงกลของเรซินคอมโพสิต.....	35
4.2 การหาค่าความหนาแน่นของเรซินคอมโพสิต.....	36
4.3 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน..(SEM).....	37
4.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุนของเรซินคอมโพสิต.....	39
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุป.....	48

## สารบัญ (ต่อ)

5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก. การหาคำนวณค่าโมดูลัสของยัง.....	53
ภาคผนวก ข. ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน.....	55

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ค่าแรงดึงผิวของตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 50 °C.....	4
ตารางที่ 2.2	ส่วนประกอบของวัสดุเซลล์โกลด์.....	7
ตารางที่ 2.3	ประสิทธิภาพการเสริมแรงของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีการเรียงตัวของ เส้นใยหลายแบบและรับความเค้นในทิศทางต่างกัน.....	15
ตารางที่ 2.4	สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจากพอลิเอทิลีนและชานอ้อย.....	31
ตารางที่ 3.1	เปอร์เซ็นต์โดยมวลของสำลีต่อรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ และสภาวะการสังเคราะห์.....	33
ตารางที่ 4.1	ผลการคำนวณความหนาแน่นของเรซินคอมโพสิต.....	37
ตารางที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์เรซินคอมโพสิตด้วยเครื่องดูดซับก๊าซในโตรเจน.....	47
ตารางที่ ก.1	ผลการคำนวณค่าโมดูลัสของยัง(Young's modulus).....	54
ตารางที่ ข.1	ข้อมูลการดูดซับก๊าซในโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ CX และ OX.....	55
ตารางที่ ข.2	ข้อมูลการดูดซับก๊าซในโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ FCC 1 และ FOC 1.....	56
ตารางที่ ข.3	ข้อมูลการดูดซับก๊าซในโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ FCC 2 และ FOC 2.....	58
ตารางที่ ข.4	ข้อมูลการดูดซับก๊าซในโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ FCC 3 และ FOC 3.....	60
ตารางที่ ข.5	ข้อมูลการดูดซับก๊าซในโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ FCC 4 และ FOC 4.....	61
ตารางที่ ข.6	ข้อมูลการดูดซับก๊าซในโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ FCC 5 และ FOC 5.....	63
ตารางที่ ข.7	ข้อมูลที่ได้จากการดูดซับก๊าซในโตรเจนเพื่อนำไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของ CX และ OX.....	65
ตารางที่ ข.8	ข้อมูลที่ได้จากการดูดซับก๊าซในโตรเจนเพื่อนำไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของ FCC 1 และ FOC 1.....	66
ตารางที่ ข.9	ข้อมูลที่ได้จากการดูดซับก๊าซในโตรเจนเพื่อนำไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของ FCC 2 และ FOC 2.....	67

## สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลที่ได้จากการดูดัชนีก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาด พรุณของ FCC 3 และ FOC 3.....	68
ตารางที่ ข.11 ข้อมูลที่ได้จากการดูดัชนีก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาด พรุณของ FCC 4 และ FOC 4.....	70
ตารางที่ ข.12 ข้อมูลที่ได้จากการดูดัชนีก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาด พรุณของ FCC 5 และ FOC 5.....	71

# สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	การเกิดปฏิกิริยาเพิ่มของรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์.....	3
รูปที่ 2.2	การเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันเป็นกลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่และเป็นเจล.....	4
รูปที่ 2.3	ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเส้นใยฝ้ายจากกล้องจุลทรรศน์.....	9
รูปที่ 2.4	ภาพถ่ายตามยาวของเส้นใยฝ้ายจากกล้องจุลทรรศน์.....	9
รูปที่ 2.5	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส.....	10
รูปที่ 2.6	แผนภาพประเภทของวัสดุคอมโพสิต.....	12
รูปที่ 2.7	แสดงวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย.....	14
รูปที่ 2.8	รูปแบบไอโซเทอมการดูดซับแบบต่างๆ.....	21
รูปที่ 2.9	การวัดพื้นที่ผิวโดยใช้วิธีการดูดซับของก๊าซด้วยวิธีบีอีที.....	22
รูปที่ 2.10	การพล็อตในรูปเส้นตรงของบีอีที ซึ่งมีค่า $P/P_0$ อยู่ระหว่าง 0.05-0.3 เพื่อใช้คำนวณหา ค่าการปกคลุมแบบชั้นเดียว.....	23
รูปที่ 2.11	ไอโซเทิร์มของการดูดซับและการคายของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 78 °C.....	24
รูปที่ 2.12	ไอโซเทิร์มของการดูดซับและการคายของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 °C บน MCM-41 ที่เตรียมจากซิลิกาจากแกลบ.....	25
รูปที่ 2.13.1	ผลของอุณหภูมิของการอัดแบบที่มีต่อค่า Tensile strength และ Tensile modulus ของคอมโพสิตจากชานอ้อย.....	29
รูปที่ 2.13.2	ผลของเวลาของการอัดแบบที่มีต่อค่า Tensile strength และ Tensile modulus ของ คอมโพสิตจากชานอ้อย.....	29
รูปที่ 2.14	ผลของความดันในการอัดแบบที่มีต่อค่า Tensile strength และ Tensile modulus ของคอมโพสิตจากชานอ้อย(20wt%).....	29
รูปที่ 4.1	ความเค้นของ OCC และ FCC ที่ % F/RF ต่างๆ.....	36

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.2 รูปสัณฐานวิทยาของของ FOC ที่ F/RF 2.6905 wt% a) กำลังขยาย 10,000 เท่า b) กำลังขยาย 20,000 เท่า .....	37
รูปที่ 4.3 รูปสัณฐานวิทยาของของ FCC ที่ F/RF 2.6905 wt% a) กำลังขยาย 10,000 เท่า b) กำลังขยาย 20,000 เท่า .....	38
รูปที่ 4.4 รูปสัณฐานวิทยาของของ FOC ที่ F/RF 2.6905 wt% a) กำลังขยาย 10,000 เท่า b) กำลังขยาย 20,000 เท่า .....	38
รูปที่ 4.5 รูปสัณฐานวิทยาของของ FCC ที่ F/RF 2.6905 wt% a) กำลังขยาย 2,000 เท่า b) กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	39
รูปที่ 4.6 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ CX และ OX.....	39
รูปที่ 4.7 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ FCC1 และ FOC1.....	40
รูปที่ 4.8 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ FCC2 และ FOC2.....	40
รูปที่ 4.9 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ FCC3 และ FOC3.....	41
รูปที่ 4.10 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ FCC4 และ FOC4.....	41
รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ FCC5 และ FOC5.....	42
รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ OX และ CX.....	43
รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FOC1 และ FCC1.....	43
รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FOC2 และ FCC2.....	44
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FOC3 และ FCC3.....	44
รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FOC4 และ FCC4.....	45
รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FOC5 และ FCC5.....	45
รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ OX และ FOC ค่าต่างๆ.....	46
รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ CX และ FCC ค่าต่างๆ.....	46

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ ก.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและระยะหดตัวของ FOC 1.....53

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

รีซอร์ซินอล - ฟอรั่มัลดีไฮด์คาร์บอนเจล (Resorcinol-Formaldehyde carbongel) เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุน (Porous carbon material) ซึ่งสังเคราะห์จากวิธีการโซลเจล (Sol-gel method) เนื่องจากเป็นสารที่มีความพรุนสูง มีพื้นที่ผิวมาก มีค่าการนำความร้อนต่ำ สามารถนำไฟฟ้าได้ จึงนิยมนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั้งในงานด้านอุตสาหกรรม งานด้านวิทยาศาสตร์ รวมถึงงานทางการแพทย์

เนื่องจากรีซอร์ซินอล - ฟอรั่มัลดีไฮด์คาร์บอนเจล เป็นสารที่มีความเปราะ จึงทำการเพิ่มความแข็งแรงโดยให้มีค่ากำลังอัด (compression strength) เพิ่มขึ้น และทั้งนี้การทำเป็นวัสดุคอมโพสิตสามารถปรับปรุงสมบัติสมบัติเชิงกลได้โดยใช้ตัวเสริมแรง (reinforcement)

การสังเคราะห์เรซินคอมโพสิตสามารถทำเป็นวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค วัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย วัสดุคอมโพสิตแบบโครงสร้าง โดยจากการศึกษาพบว่าการทำวัสดุคอมโพสิต เสริมแรงด้วยเส้นใย ซึ่งมีรีซอร์ซินอล ฟอรั่มัลดีไฮด์คาร์บอนเจลเป็นเนื้อพื้น (matrix) จะใช้เส้นใยและวัสดุเนื้อพื้นที่มีความหนาแน่นต่ำ ทำให้วัสดุคอมโพสิตที่ได้มีความแข็งแรงและค่ามอดูลัสจำเพาะสูง ทั้งยังเป็นวิธีการที่ง่ายและราคาถูก โดยการใช้เส้นใยต่อเนื่องเป็นตัวเสริมแรงจะได้ประสิทธิภาพเด่นชัดมากกว่าใช้เส้นใยไม่ต่อเนื่องในการปรับปรุงความแข็งแรงในวัสดุคอมโพสิต โครงการนี้จึงศึกษาการสังเคราะห์เรซินคอมโพสิตโดยใช้สำลีเป็นตัวเสริมแรง และมีการควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและรูพรุนของเรซินคอมโพสิต เนื่องจากสำลีเป็นเส้นใยต่อเนื่อง มีความหนาแน่นต่ำ ( $1.545-12.630 \text{ g/cm}^3$ ) [1] มีค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) 200-800 MPa [2] สามารถทำให้กระจายตัวในเนื้อพื้นได้ ง่ายและราคาถูก

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาสมบัติเชิงกลและความพรุนของเรซินคอมโพสิต (resin composite) ที่สังเคราะห์ได้จากรีซอร์ซินอล-ฟอรั่มัลดีไฮด์คาร์บอนซีโรเจล (Resorcinol-Formaldehyde carbon xerogel) โดยมีสำลีเป็นตัวเสริมแรง
2. ศึกษาผลของการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสำลีต่อรีซอร์ซินอล-ฟอรั่มัลดีไฮด์ ที่ใช้ในการสังเคราะห์เรซินคอมโพสิต
3. ศึกษาผลของการเปลี่ยนอุณหภูมิในการไพโรไลซิส (pyrolysis) ในการสังเคราะห์เรซินคอมโพสิต

### 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. สังเคราะห์เรซินคอมโพสิต โดยใช้สำลีเป็นตัวเสริมแรงให้กับบริซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งมีอัตราส่วนโดยมวลของสำลีต่อริซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ ดังนี้ 0, 0.0897, 0.3587, 0.6278, 0.8968 และ 2.6905
2. ศึกษาผลจากการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิ 1000°C และไม่มีไฟโรไลซิส

### 1.4 วิธีการดำเนินการ

1. ค้นคว้า ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. หาแนวทางในการสังเคราะห์เรซินคอมโพสิต โดยใช้สำลีเป็นตัวเสริมแรงให้กับบริซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์
3. ออกแบบและดำเนินการ
4. ทดสอบสมบัติเชิงกล ค่าความพรุน และศึกษาโครงสร้างของเรซินคอมโพสิต
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 รีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คาร์บอนเจล (Resorcinol-formaldehyde carbongel)[3]

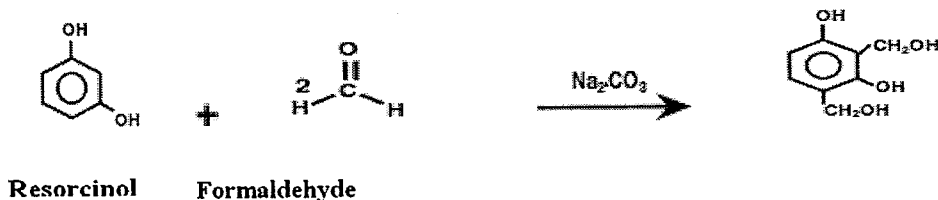
รีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เจล คือ พอลิเมอร์ที่มีรูพรุน ซึ่งสังเคราะห์จากวิธีการโซลเจล (Sol-gel processing) ของสารรีซอร์ซินอลด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ ทำให้ได้รีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เจลมีสมบัติเป็นสารที่มีความพรุนสูง (มากกว่า 80%) มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก (400-1200 m<sup>2</sup>/g) [4] มีค่าการนำความร้อนต่ำ โดยคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับสถานะในกระบวนการสังเคราะห์ รีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เจลด้วย และด้วยคุณสมบัติที่มีความพรุนมากและมีปริมาตรแบบเมโซพอร์ รีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่น ใช้เป็นตัวดูดซับทั้งในเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวแบบสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography) ใช้เป็นอิเล็กโทรดตัวเก็บประจุแบบ 2 ชั้น [4] ฉนวนกันความร้อน [4] ใช้เป็นตัวดูดซับในการตรึงเอนไซม์ [4] รวมทั้งสามารถประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ระบบควบคุมการนำส่งยา และใช้เป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนในการสังเคราะห์รีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เจล ประกอบด้วย กระบวนการเกิดเจล (Gelation) การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย การทำให้แห้ง และไพโรไลซิส (Pyrolysis) ตามลำดับ

#### 2.1.1 กระบวนการเกิดเจล

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เจล [2] คือปฏิกิริยาการเพิ่ม (Addition reaction) โดยเป็นการเพิ่มฟอร์มัลดีไฮด์เข้าสู่รีซอร์ซินอล และเกิดการรวมตัวด้วยปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชันกลายเป็นเจล ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้

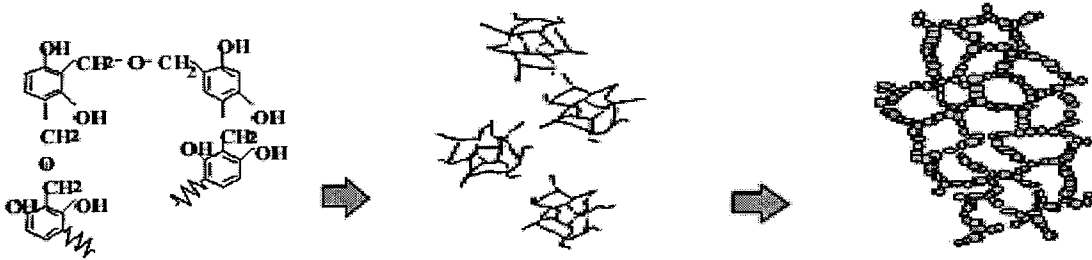
2.1.1.1 ปฏิกิริยาการเพิ่ม ฟอร์มัลดีไฮด์จะเพิ่มเข้าที่ตำแหน่งคาร์บอนของรีซอร์ซินอลดัง

แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาเพิ่มของรีซอร์ซินอลและฟอร์มัลดีไฮด์ [3]

2.1.1.2 ปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation reaction) หลังจากเกิดปฏิกิริยาการเพิ่มแล้วสารที่ได้จะเกิดการรวมตัวกันขึ้นด้วยพันธะของเมทิลีนบริดจ์ (Methylene bridge,  $-CH_2-$ ) และเมทิลีนอีเทอร์บริดจ์ (Methylene ether bridge,  $-CH_2OCH_2-$ ) กลายเป็นคอลลอยด์ในของเหลวจากนั้นคอลลอยด์เหล่านี้จะรวมตัวกันเป็นโครงสร้าง 3 มิติขึ้น ดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน เป็นกลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่ และเป็นเจล [4]

เมื่อเวลาผ่านไปริซอร์ซินอลและฟอร์มาลดีไฮด์จะฟอร์มตัวกลายเป็นเจลที่แข็งขึ้น ทั้งนี้จะเรียกชื่อของเจลนี้ตามตัวทำละลายที่ใช้ โดยปกติจะใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ซึ่งจะเรียกว่าไฮโดรเจล (Hydrogel) ไฮโดรเจลนี้จะมีตัวทำละลายอยู่ตามรูพรุน จึงต้องกำจัดออกด้วยการทำให้แห้ง

### 2.1.2 การแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย

ก่อนการนำเจลที่ได้จากการสังเคราะห์ไปทำให้แห้งนั้น การแลกเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ ในขั้นตอนนี้เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยลดแรงคาปิลลารีที่จะเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการทำให้แห้งได้ การแลกเปลี่ยนตัวทำละลายทำได้โดยการเลือกตัวทำละลายอื่นที่มีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าตัวทำละลายที่อยู่ในรูพรุนของเจล ตัวอย่างตัวทำละลายที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนตัวทำละลาย แสดงในตารางที่ 2.1 ถึงแม้ว่าการทำการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายจะช่วยลดแรงคาปิลลารีได้ แต่ในการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายนั้นจะเกิดแรงจากการแลกเปลี่ยนที่สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและความเสียหายต่อโครงสร้างของเจลได้เช่นกัน

ตารางที่ 2.1 ค่าแรงตึงผิวของตัวทำละลายที่อุณหภูมิ  $50^{\circ}\text{C}$  (จากโปรแกรม Hysys 3.3)

ตัวทำละลาย	ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	ค่าแรงตึงผิว ( $\text{dyn/cm}$ )
น้ำ	988.2	67.74
อะซิโตน	751.6	21.14
เอทานอล	764.0	19.97

### 2.1.3 การทำให้แห้ง

การทำให้แห้งแบบซัพคริติคอลล ได้แก่ การใช้ลมร้อน การอบแห้ง การใช้คลื่นไมโครเวฟ และการใช้ความดันสุญญากาศ เป็นต้น เจลที่ได้จากการทำให้แห้งด้วยวิธีนี้เรียกว่าซีโรเจล (Xerogel) การทำให้แห้งด้วยวิธีการนี้สะดวกและมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทำให้แห้งแบบซูเปอร์คริติคอลล และแบบแช่แข็ง แต่ลักษณะโครงสร้างของเจลที่ได้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากก่อนการทำให้แห้งมากที่สุด เช่น การหดตัวสูง เกิดการพังของรูพรุนเนื่องจากแรงคาปิลลารีจากการเกิดเฟสระหว่างก๊าซกับของเหลว ทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง

การทำให้แห้งที่ภาวะสุญญากาศ เป็นวิธีการหนึ่งของการทำให้แห้งแบบซัพคริติคอลล เมื่อความดันลดลงของเหลวจะเกิดการเปลี่ยนเฟสกลายเป็นไอ ทำให้ตัวทำละลายที่อยู่ในรูพรุนของเจลระเหยออกไป แต่การลดลงของความดันอย่างรวดเร็วอาจส่งผลให้เกิดแรงคาปิลลารีสูงและทำให้โครงสร้างของซีโรเจลเสียหายได้ วิธีการทำให้แห้งที่ภาวะสุญญากาศนี้ยังมีข้อดีที่สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง มีความรวดเร็ว

### 2.1.4 ไพโรไลซิส

ไพโรไลซิส คือ ขั้นตอนการเปลี่ยนเจลให้เป็นคาร์บอน โดยการกำจัดสารประเภทออกไซด์และกลุ่มไฮโดรเจนต่างๆ ที่เหลืออยู่ในเจลออกไป เพื่อให้เจลมีความเสถียรและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้ เจลที่ผ่านการทำไพโรไลซิสจะเรียกว่า คาร์บอนเจล การทำไพโรไลซิสจะใช้เตาเผา ในขั้นตอนแรกจะผ่านก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน อาร์กอน หรือฮีเลียม ในเตาเผา ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่อากาศออกจากเตาเผา หลังจากนั้นจะเผาที่ 600-2,100 องศาเซลเซียส [5] อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสส่งผลต่อสมบัติของคาร์บอนเจล การทำไพโรไลซิสของซีโรเจลจะทำให้ซีโรเจลเกิดการหดตัวเพิ่มขึ้น 20 เปอร์เซ็นต์ และมวลสารลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ วิธีที่จะช่วยลดการหดตัวได้วิธีหนึ่ง คือ การเพิ่มเส้นใยของสารอินทรีย์ลงในสารละลายของเจลในขั้นตอนการสังเคราะห์เจล

## 2.2 สารตัวเติม (Fillers) [6]

### 2.2.1 สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous filler)

การใช้เส้นใยเป็นสารตัวเติมนั้นได้มีมาเป็นระยะเวลาอันยาวนานแล้วซึ่งมีการนำทั้งเส้นใยอินทรีย์และเส้นใยอนินทรีย์มาใช้เติมหรือเสริมแรงในพอลิเมอร์ โดยเส้นใยอินทรีย์ที่ใช้สามารถแบ่งออกได้เป็นเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ เช่น ปอกระเจา และไนลอนตามลำดับ ซึ่งจะสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความทนแรงกระแทก ความแข็งตึง และความเหนียวของผลิตภัณฑ์ ส่วนเส้นใยอินทรีย์ เช่น แอสเบสตอส และเส้นใยแก้วนั้นพบว่ามีนิยมนำใช้กันอย่าง

กว้างขวางในการเป็นสารตัวเติมทั้งในเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตซึ่งต้องการสมบัติด้านความทนความร้อนและความแข็งแรง

### 2.2.2 สารตัวเติมที่มีลักษณะไม่เป็นเส้นใย (nonfibrous filler)

สารตัวเติมลักษณะนี้มีหลายรูปแบบแตกต่างกัน ขึ้นกับขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยและลักษณะรูปร่าง เช่น สารตัวเติมที่เป็นผงหรือเป็นเม็ด (particulate filler) และสารตัวเติมที่เป็นเกล็ด (flake filler) เป็นต้น ซึ่งพบว่าทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เช่นเดียวกับสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย ตัวอย่างสารที่เป็นผงหรือเป็นเม็ด เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไชนาเคลย์ และทัลก์ ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นสารที่ช่วยลดต้นทุนการผลิต เช่น เกล็ดอะลูมิเนียม เกล็ดไมกา และเกล็ดตะกั่ว เป็นต้น ซึ่งข้อดีของลักษณะก็จะเกิดการซ้อนกันของเกล็ดแต่ละแผ่นเมื่อเติมลงไป ในพอลิเมอร์ ทำให้สามารถช่วยต้านทานการขาดฉีกให้กับผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้สารที่เป็นเกล็ดของโลหะจะสามารถเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนได้ด้วย

### 2.2.3 สารตัวเติมฝ้าย (cotton fillers)[6]

นับจากอดีตได้มีการนำวัสดุจากธรรมชาติที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลสมาใช้เป็นสารตัวเติม โดยเฉพาะในรูปแบบของสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นผง (particulate filler) ซึ่งจะนิยมนำมาผสมและขึ้นรูปพลาสติกชนิดเทอร์โมเซต เช่น ฟีนอลิก และอะมิโนเรซิน อย่างไรก็ตามการใช้งานของสารตัวเติมได้ขยายออกไปโดยได้มีการนำไปผสมกับพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกและยางอีกด้วย ซึ่งข้อดีของเซลลูโลสในการทำสารตัวเติมนั้น ได้แก่ ต้นทุนต่ำ ความหนาแน่นจำเพาะต่ำ และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ส่วนความสามารถในการนำไฟฟ้า ความทนทานต่อสารเคมี และสมบัติทางกายภาพจะขึ้นกับลำดับขั้นของความอิ่มตัว (degree of impregnation) ของโครงสร้างเซลลูลาร์ ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของเซลลูโลสชนิดนั้นๆ

เส้นใยฝ้ายมีโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลสถึงกว่า 90% ในอดีตมีการนำฝ้ายมาเป็นสารตัวเติมในพลาสติก [7] โดยส่วนมากใช้ในลักษณะของปุยฝ้าย (flock) ในขณะที่เส้นใยฝ้ายยาวที่ใช้ในการปั่นด้ายจะไม่นิยมใช้เป็นสารตัวเติมเนื่องจากมีราคาแพงเกินไป นอกจากปุยฝ้ายแล้วยังมีการใช้ฝ้ายในรูปแบบอื่นๆ เช่น เส้นใยสั้นๆของฝ้าย (cotton linter) เศษเส้นใย และเศษผ้าฝ้าย ซึ่งส่วนมากจะได้อาจมาจากขั้นตอนเมอร์ซิไรซ์ (Mercerize) สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการคัดเลือกวัตถุดิบเหล่านี้คือความสม่ำเสมอ เนื่องจากเศษผ้าฝ้ายมีลักษณะแตกต่างกันตามกระบวนการถักหรือทอ เกิดการแปรผันของน้ำหนักในในผ้าฝ้ายปริมาณเดียวกัน ทำให้มีผลต่อความไม่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ที่ใช้เศษผ้าฝ้ายเป็นสารตัวเติมได้ การดูแลรักษาเศษเส้นใยหรือผ้าฝ้ายก็เป็นสิ่งจำเป็น

อย่างมาก เช่น หลีกเลี่ยงการสัมผัสกับน้ำมันหรือผงโลหะจากเครื่องจักร พร้อมทั้งเศษสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่จะติดมากับเศษวัสดุเหล่านั้น ซึ่งยากต่อการกำจัดออกภายหลัง สารตัวเติมที่ได้จากเศษผ้าฝ้ายนั้นต้องนำมาตัดเป็นชิ้นที่เล็กลงๆ สำหรับเส้นใยและด้ายก็จะถูกนำมาตัดให้มีขนาดสั้นเช่นเดียวกัน เพื่อความสม่ำเสมอก่อนจะนำมาผสมกับพลาสติก อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะทำให้อายุการใช้งานกระจายตัวอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอในเนื้อพลาสติก อีกทั้งยังยากต่อการผสมและขึ้นรูปอีกด้วย เนื่องจากจะทำให้พลาสติกมีสมบัติการไหลที่ตกลงเมื่อมีวัสดุดังกล่าวผสมอยู่ด้วย แต่ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้ โดยการปรับปรุงวัสดุที่นำมาเป็นสารตัวเติมซึ่งสามารถทำทั้งวิธีการเคมีและวิธีทางกายภาพ

นอกจากฝ้ายแล้วยังมีเซลลูโลสชนิดอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้เป็นสารตัวเติมได้นอกจากฝ้ายจากการศึกษาพบว่ามีงานวิจัยอีกเป็นจำนวนมากที่กล่าวถึงการนำเศษวัสดุทางการเกษตรเป็นสารตัวเติม [8] เช่น ชังและเปลือกของข้าวโพด ชี้อ้อย และเปลือกถั่ว เป็นต้น และมีในหลายกรณีที่ใช้พืชที่สามารถเจริญเติบโตได้เร็ว เช่น ป่าน ปอ และข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งส่วนประกอบของข้าวโพดที่ใช้เป็นสารตัวเติมต้องถูกแยกส่วนที่สามารถรับประทานได้ และส่วนที่มีน้ำมันปนออกก่อนโดยผลิตภัณฑ์ของสมบัติผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้นกับสมบัติของพืชแต่ละชนิด รวมถึงการแปรสภาพวัตถุดิบและกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วย ดังตารางที่ 2 แสดงส่วนประกอบของเซลลูโลสบางชนิดที่นำมาใช้เป็นสารตัวเติมได้

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของวัสดุเซลลูโลส [7]

วัสดุเซลลูโลส	เซลลูโลส(%)	ลิกนิน(%)	เพนโตเซน(%)
ชานอ้อย	60.2	21.7	29.1
ฟางข้าว	45.5	10.9	21.5
ลำต้นข้าวโพด	38.4	34.3	27.6
ฝ้าย	94.0	-	-
ลินิน (Flax)	92.0	4.0	2.0
ป่านเฮมพ์ (Hemp)	79.3	5.2	5.5
ปอกระเจา (Jute)	74.9	11.7	18.1
ป่านรามี่ร์ (Ramie)	85.0	1.0	2.0
ปอไซซัล (Sisal)	77.0	6.0	13.0
ต้นสน (Pine)	60.5	26.4	11.0

สำหรับขั้นตอนของการแปรสภาพวัสดุเซลลูโลสเหล่านี้จะแตกต่างกันไปตามที่มาของพืชแต่ละชนิด ซึ่งโดยส่วนมากจะนำมาบดให้มีลักษณะเป็นผงก่อนเพื่อความสม่ำเสมอของสารตัวเติม

ตัวอย่างวัสดุที่นำมาบดเช่น เปลือกถั่วหรือเปลือกพืชต่างๆ ไม้ก๊อก และเปลือกไม้ต่างๆ เป็นต้น แต่ถ้าในกรณีที่วัสดุมีลักษณะเป็นเส้นใย ก็ควรจะรักษาสภาพความเป็นเส้นใยไว้ เพราะวัสดุที่มีลักษณะเป็นผงจะมีแนวโน้มของความทนแรงดึงและทนแรงกระแทกที่ต่ำกว่าเส้นใย นอกจากนี้ผงซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่าเส้นใยจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าด้วย

ส่วนฝ้ายนั้น มีข้อดีตรงที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลสเกือบ 100% ทำให้มีการเสื่อมสภาพจากสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ น้อย และมีสมบัติทางเคมีและเชิงกลที่ดี เพราะประกอบไปด้วยโครงสร้างของท่อยาวซึ่งมีผนังเซลล์ที่แข็งแรง ทำให้ช่วยเสริมความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทกได้ เมื่อนำไปเป็นสารตัวเติมในพลาสติก

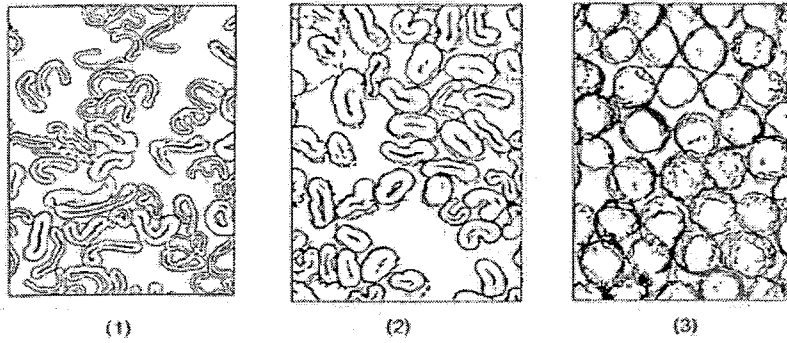
## 2.2.4 ฝ้าย [6]

ฝ้ายเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้มีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากฝ้ายรวมสมบัติที่ดีไว้มากมาย เช่น มีความทนทาน ราคาถูก ดูแลรักษาง่าย และสวมใส่สบาย เป็นต้น ทำให้ฝ้ายเหมาะสมต่อการใช้งานทั้งเป็นเครื่องนุ่งห่มและเครื่องใช้ต่างๆ นอกจากนี้ฝ้ายยังสามารถเพาะปลูกได้ง่ายเกือบทั่วทุกแห่งในโลก โดยเฉพาะสหรัฐอเมริกา จีน และรัสเซีย ซึ่งต่างก็เป็นประเทศผู้นำในการผลิตฝ้ายทั้งสิ้น ปกติแล้วฝ้ายเป็นพืชที่ปลูกได้ดีในแถบเมืองร้อน โดยฝ้ายไม่สามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $21^{\circ}\text{C}$  ( $70^{\circ}\text{F}$ ) ดังนั้นประเทศไทยซึ่งมีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นจึงสามารถทำการเพาะปลูกฝ้ายได้ผลผลิตดี และมีโรงงานสิ่งทอซึ่งทำกิจการเกี่ยวกับฝ้ายอยู่ในประเทศไทยเป็นจำนวนมาก โดยในหัวข้อนี้จะขอกกล่าวถึงรายละเอียดของโครงสร้างและสมบัติของฝ้าย ทั้งทางกายภาพและทางเคมี [9]

### 2.2.4.1 โครงสร้างทางกายภาพ

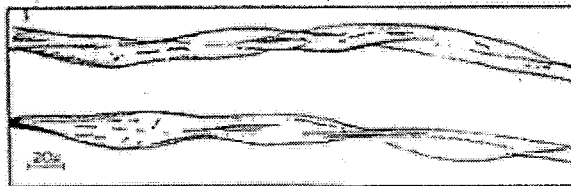
โดยทั่วไปฝ้ายดิบจะมีสีออกครีมขาว และพบว่าในบางชนิดอาจมีสีเข้มออกครีมน้ำตาลได้ ทั้งนี้ขึ้นกับการเพาะปลูกและสภาพภูมิอากาศ ซึ่งคุณภาพของฝ้ายจะขึ้นกับความยาวและความยาวของเส้นใย ปกติแล้วเส้นใยฝ้ายจะมีความยาวอยู่ในช่วง  $\frac{1}{4}$ - $2\frac{1}{2}$  นิ้ว หรือ 1,000-3,000 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ขึ้นกับที่มาของฝ้ายนั้นๆ สำหรับความกว้าง เส้นใยฝ้ายมีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันไปตั้งแต่ 16-20 ไมครอน[10] และรูปร่างภาคตัดขวางของเส้นใยมีลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นกับการเจริญเติบโตของเส้นใย ซึ่งปกติเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นรูปร่างภาคตัดขวางของเส้นใยคล้ายเมล็ดถั่ว มีช่องตรงกลางเส้นใยที่กลวงเรียกว่า ลูเมน (lumen) สำหรับเส้นใยที่ยังอ่อนอยู่จะมีลักษณะภาคตัดขวางเป็นรูปตัว U และมีผนังเซลล์ที่บางกว่าเส้นใยที่โตเต็มที่ โดยเรียกผนังเซลล์ที่เกิดขึ้นก่อนนี้ว่าผนังชั้นแรก (primary cell) ดังรูปที่ 2.3(1) แต่เมื่อเส้นใยเจริญเติบโตขึ้นเรื่อยๆ จนโตเต็มที่จะมีผนังเซลล์ที่หนาขึ้นและมีลักษณะภาคตัดขวาง

ค่อนข้างกลมมากขึ้น ทำให้ช่องตรงกลางเส้นใยเล็กและแคบลง ดังรูปที่ 2.3(2) และ 2.3(3) ซึ่งผนังที่หนาขึ้นนี้มาจากการเจริญเติบโตเป็นชั้นๆ จากผนังด้านนอกเข้าสู่ผนังด้านใน โดยเรียกรวมผนังที่หนาขึ้นดังกล่าวว่าผนังชั้นที่ 2 (secondary wall) และแต่ละชั้นของผนัง



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของเส้นใยฝ้ายจากกล้องจุลทรรศน์ (1) เส้นใยอ่อนในสภาพแห้ง (2) เส้นใยโตเต็มที่ ในสภาพแห้ง (3) เส้นใยโตเต็มที่ ในสภาพปกติ[11]

เส้นใยเกิดจากการเจริญเติบโตของสายโซ่โมเลกุลเซลลูโลส ซึ่งมีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลที่บิดเปลี่ยนทิศทางไปตามธรรมชาติ โดยส่วนนี้เองทำให้เมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นลักษณะของเส้นใยที่บิดเป็นเกลียว ซึ่งเรียกลักษณะดังกล่าวว่า เกลียวฝ้าย (convolutions) ดังรูปที่ 2.4

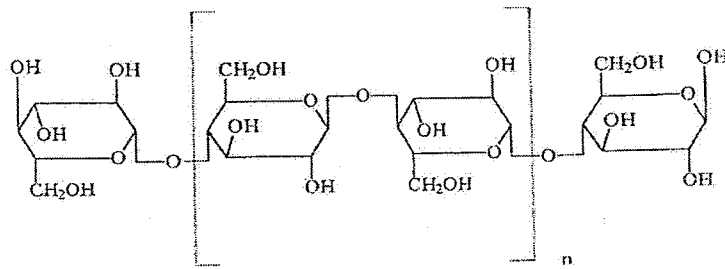


รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายตามยาวของเส้นใยฝ้ายจากกล้องจุลทรรศน์[11]

#### 2.2.4.2 โครงสร้างทางเคมี

เส้นใยฝ้ายจัดเป็นเส้นใยธรรมชาติประเภทเซลลูโลส ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส 94% และที่เหลืออีก 6% ได้แก่ สารพวกโปรตีน แร่ธาตุ แวกซ์ (wax) กรดอินทรีย์ น้ำตาล และรงสี (pigments) แต่โดยส่วนมากเมื่อนำเส้นใยฝ้ายมาใช้งาน จะต้องนำเส้นใยนั้นผ่านกระบวนการตกแต่งสำเร็จเสียก่อน เช่น กระบวนการกำจัดสิ่งสกปรก (scouring) และกระบวนการฟอกขาว (bleaching) เป็นต้น ทำให้เส้นใยฝ้ายที่ได้มีเซลลูโลสสูงถึง 99%[11] โดยโครงสร้างเซลลูโลสนั้น

มีองค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยธาตุหลักคือ คาร์บอน 44% ไฮโดรเจน 6.2% และออกซิเจน 49.4% มีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยพื้นฐานซึ่งเรียกว่า anhydro-d-glucose ( $C_6H_{10}O_5$ ) ต่อกันเป็นสายโซ่โมเลกุลยาว ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแต่ละหน่วยของกลูโคสประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด 3 หมู่ด้วยกัน ซึ่งเหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาลทั่วไป แต่เนื่องจากโมเลกุลต่อกันเป็นสายโซ่โมเลกุลยาวทำให้ไม่ละลายน้ำเหมือนกับน้ำตาล โครงสร้างทางเคมีนี้นับว่ามีบทบาทสำคัญต่อการกำหนดสมบัติของฝ้าย กล่าวคือหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จะเป็นตัวดึงดูดน้ำ ทำให้ฝ้ายมีสมบัติการชอบน้ำ (hydrophilic) และลักษณะการเรียงตัวเป็นสายโซ่โมเลกุลของกลูโคสที่ยาวนั้น มีผลทำให้ฝ้ายมีความแข็งแรงสูง ซึ่งโดยทั่วไปฝ้ายมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10,000 ไป จนถึง 2,000,000 [9]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

### 2.2.4.3 สมบัติทางกายภาพ

1. รูปร่างจากกล้องจุลทรรศน์ : เส้นใยฝ้ายมีลักษณะคล้ายหลอดที่แบน มีเกลียวเหมือนการบิดรับบิ้น ผิวของเส้นใยฝ้ายปกติจะไม่เรียบ และมีรูปร่างภาคตัดขวางเป็นรูปถั่วซึ่งมีช่องตรงกลางกลวงเป็นช่องส่งน้ำ
2. ความยาว : เส้นใยฝ้ายแต่ละเส้นมีความยาวประมาณ  $\frac{1}{4}$  ถึง  $2\frac{1}{2}$  นิ้ว ซึ่งเส้นใยฝ้ายที่ยาวจะแสดงถึงคุณภาพของเส้นใยที่ดีด้วย
3. สี : ฝ้ายดิบโดยปกติมีสีขาวออกครีม แต่บางชนิดก็มีสีครีมเข้มไปทางน้ำตาลได้
4. ความมันเงา : ฝ้ายปกติมีความมันเงาเพียงเล็กน้อย แต่ถ้าผ่านกระบวนการเมอร์ซิไรซ์ (mercerization) จะมีความมันเงามาก
5. ความแข็งแรง : เส้นใยฝ้ายมีความแข็งแรงปานกลาง โดยมีความเหนียว (tenacity) ประมาณ 26.5-44.1 cN/tex (3.0-5.0 g/den) และความทนแรงดึง (Tensile Strength) มีค่าประมาณ 2,800-8,400 kg/cm<sup>2</sup> (40,000-120,000 lb/in<sup>2</sup>) แต่เมื่อเปียกน้ำเส้นใยฝ้ายจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 10-20% และกระบวนการเมอร์ซิไรซ์สามารถทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย

6. การยืดตัว : เส้นใยฝ้ายมีความสามารถในการยืดตัวได้น้อย โดยมีค่าการยืดตัวที่จุดขาด (elongation at break) ประมาณ 5-10%
7. สมบัติการคืนตัวกลับ : เส้นใยฝ้ายมีสมบัติการคืนตัวกลับ (elastic properties) ภายหลังได้รับแรงกระทำ โดยที่การยืดดึงออก 2% เส้นใยฝ้ายมีการคืนตัวกลับ 74% ส่วนที่การยืดดึงออก 5% เส้นใยฝ้ายมีการคืนตัวกลับเพียง 45% เท่านั้น
8. ความถ่วงจำเพาะ : ฝ้ายมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.54
9. ผลกระทบต่อความชื้น : ฝ้ายมีความสามารถในการดูดซึมความชื้นได้ดี โดยที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 65% ฝ้ายสามารถดูดซึมความชื้นได้ 6-8% และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 100% พบว่า ฝ้ายสามารถดูดซึมความชื้นได้สูงถึง 25-27%
10. ผลกระทบต่อความร้อน : ฝ้ายสามารถทนต่อความร้อนได้ดี โดยสามารถแช่น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C และสามารถอบแห้งที่อุณหภูมิ 71-93 °C นอกจากนี้ฝ้ายยังสามารถทนความร้อนได้สูงถึง 204-208 °C ในระยะเวลาสั้นๆ เช่น การรีดผ้าอาจใช้ที่อุณหภูมินี้ได้ และจะเริ่มไหม้พร้อมกับเปลี่ยนสีที่อุณหภูมิ 246 °C ซึ่งที่อุณหภูมิสูงขึ้นกว่านี้ฝ้ายจะถูกทำลายได้

#### 2.2.4.4 สมบัติทางเคมี

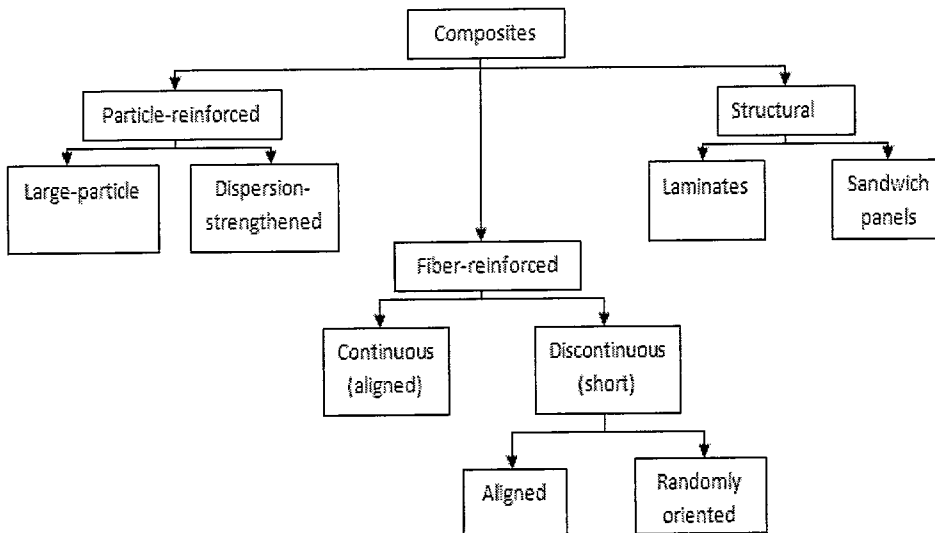
1. ผลกระทบต่อกรด : ฝ้ายสามารถถูกทำลายด้วยกรดแก่ได้ง่าย เช่น กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น เป็นต้น โดยจะทำลายฝ้ายเป็นยางเหนียว แต่สำหรับสารพวกกรดอ่อนจะไม่สามารถทำลายฝ้ายได้ เช่น กรดอะซิติก และกรดออกซาลิก เป็นต้น ซึ่งถ้าแช่เส้นใยฝ้ายในกรดออกซาลิกจะมีผลให้เส้นใยอ่อนตัวลง
2. ผลกระทบต่อด่าง : ฝ้ายมีความทนทานต่อด่างได้ดี สามารถซักล้างในสารละลายที่เป็นด่างแก่ได้โดยเส้นใยไม่เสียหาย นอกจากนั้นด่างที่เป็นสารเคมีหลักในหารทำเมอร์ซิไรซ์จะส่งผลให้เส้นใยฝ้ายมีความแข็งแรงขึ้นด้วย

### 2.3 วัสดุคอมโพสิต (Composite Materials)[12]

วัสดุผสมประกอบขึ้นจากเฟส 2 ชนิด เฟสแรกเรียกว่า เนื้อพื้น (matrix) ซึ่งอยู่ด้วยกันอย่างต่อเนื่องและล้อมรอบอีกเฟสที่สองไว้ เฟสที่สองจะถูกเรียกว่า เฟสที่กระจาย (dispersed phase) หรือตัวเสริมแรง (reinforcement)

คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จะเป็นฟังก์ชันหรือขึ้นกับคุณสมบัติของสารตั้งต้น ปริมาณของสารตั้งต้นเหล่านี้และรูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว ในเนื้อหานี้คำว่า “รูปทรงทางเรขาคณิตของเฟสที่กระจายตัว” หมายถึงรูปทรงและขนาดของอนุภาค (shape and size) การกระจายตัว (distribution) และการเรียงตัว (orientation)

ประเภทของวัสดุผสมประกอบด้วยกลุ่มหลัก 3 กลุ่ม คือ วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย และวัสดุผสมโครงสร้าง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพประเภทของวัสดุคอมโพสิต[12]

### 2.3.1 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค (particle-reinforced composites)

วัสดุที่ผสมแรงด้วยอนุภาคจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือวัสดุเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่หรือเม็ดผง และวัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็กละเอียด การจำแนกความแตกต่างระหว่าง 2 กลุ่มนี้ต้องอาศัยกลไกการเพิ่มความแข็งแรง (strengthening mechanism) หรือกลไกการเสริมแรง (reinforcement mechanism)

#### 2.3.1.1 วัสดุผสมเม็ดผง หรืออนุภาคขนาดใหญ่ (large-particle composites)

วัสดุพอลิเมอร์บางชนิดที่เติมซีลีเชีย (filler) หรือเศษผงจะจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุผสมผงหรืออนุภาคใหญ่ วัตถุประสงค์การเติมก็เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ

#### 2.3.1.2 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดเล็ก (dispersion-strengthening composites)

โลหะและโลหะผสม สามารถนำมาเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการใส่อนุภาคขนาดเล็กละเอียดและกระจายตัวสม่ำเสมอในปริมาณระดับหนึ่ง (หลายเปอร์เซ็นต์) อนุภาคเหล่านี้ต้องมีสมบัติแข็งและเหนียวต่อการเกิดปฏิกิริยาซึ่งอาจจะเป็นโลหะหรืออโลหะก็ได้

### 2.3.2 วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced composites)

ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน วัสดุผสมที่สำคัญมากที่สุดคือ วัสดุผสมที่มีเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเป็นเฟสในรูปของเส้นใย จุดมุ่งหมายในการออกแบบวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใย (fiber-reinforced composites) นี้คือต้องการความแข็งแรง และ/หรือมอดูลัสความยืดหยุ่นต่อน้ำหนักที่สูง คุณลักษณะดังกล่าวเรียกกันว่า ความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) (อัตราส่วนความแข็งแรงต่อความถ่วงจำเพาะ) วัสดุที่ผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ต้องการความแข็งแรงจำเพาะและมอดูลัสจำเพาะสูง ผลิตรขึ้นโดยใช้เส้นใยและวัสดุเนื้อพื้นที่มีความหนาแน่นต่ำ

ในรูปที่ 2.6 วัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยแบ่งออกโดยอาศัยความยาวของเส้นใย ในกรณีเส้นใยสั้นเส้นใยเหล่านี้มีความสั้นเกินไปที่จะปรับปรุงความแข็งแรงให้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

#### 2.3.2.1 อิทธิพลของความยาวเส้นใย (influence of fiber length)

สมบัติทางกลของวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยไม่เพียงขึ้นกับสมบัติของเส้นใย แต่ก็ยังขึ้นกับระดับความสามารถในการผ่านแรงกระทำจากเนื้อพื้นสู่เส้นใยอีกด้วย สิ่งที่เป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการส่งผ่านแรงกระทำ จะเห็นได้ว่าการยึดเหนี่ยวของเนื้อพื้น-เส้นใยจะสิ้นสุดที่บริเวณปลายของเส้นใย หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าไม่มีการส่งผ่านแรงกระทำจากเนื้อพื้นสู่เส้นใยอีกที่ปลายสุดของเส้นใย

ความยาวเส้นใยวิกฤตเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเพิ่มความแข็งแรงหรือมอดูลัสของวัสดุผสม ความยาววิกฤตนี้ ( $l_c$ ) ขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย ( $d$ ) และความต้านทานแรงดึงสูงสุด ( $\sigma_f^*$ ) ของเส้นใยและความแข็งแรงของพันธะเส้นใย-เนื้อพื้น (หรือความต้านทานเฉือน ณ จุดครากของเนื้อพื้น) ( $\tau_c$ ) โดยสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \quad (2-1)$$

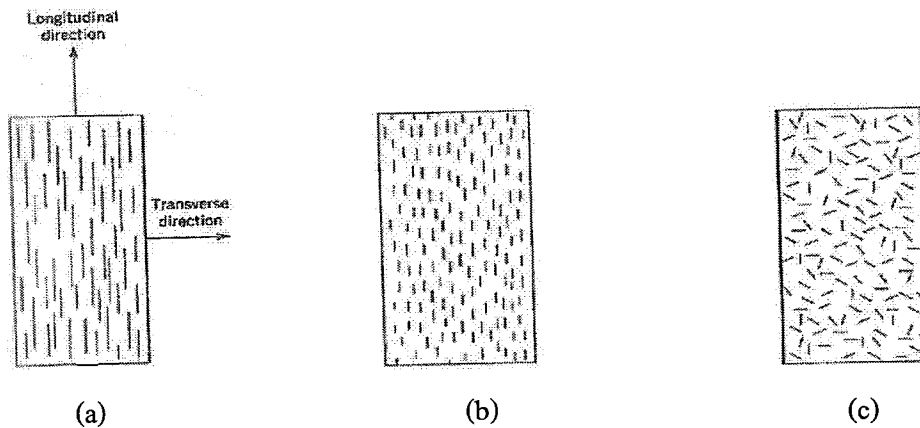
เส้นใยที่มีความยาวของเส้นใยยาวกว่าค่าความยาววิกฤตมากๆ ( $l \gg l_c$ ) เช่น  $l \gg 1.5l_c$  จะถูกเรียกว่า เส้นใยต่อเนื่อง (continuous fiber) และถ้ามีความยาวสั้นกว่านี้จะเรียกว่า เส้นใยไม่ต่อเนื่อง (discontinuous fiber) หรือเส้นใยสั้น (short fiber) ในกรณีที่เส้นใยมีความยาวสั้นกว่าความยาววิกฤต  $l < l_c$  เนื้อพื้นจะเปลี่ยนรูปรอบเส้นใยจนกระทั่งไม่เกิดการถ่ายแรงไปสู่เส้นใยอีก และลักษณะนี้ทำให้การเสริมแรงด้วยเส้นใยได้ผลเพียงเล็กน้อย สิ่งนี้เป็นสิ่งที่สำคัญโดยเฉพาะ

กรณีของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยอนุภาค ดังนั้น เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่เด่นชัดในการปรับปรุงความแข็งแรงในวัสดุผสม เส้นใยจึงต้องเป็นเส้นใยต่อเนื่องเท่านั้น

### 2.3.2.2 อิทธิพลของความเข้มข้นและการจัดเรียงตัวของเส้นใย (influence of fiber orientation and concentration)

ทั้งการจัดเรียงตัวของเส้นใย ความเข้มข้นของเส้นใยและการกระจายตัวส่งผลที่สำคัญต่อความแข็งแรงและสมบัติอื่นๆ ของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยอย่างมาก แนวการเรียงตัวมีสองแบบที่น่าสนใจคือ 1. การเรียงตัวขนานแกนตามความยาวของเส้นใยในทิศทางเดียวกัน (parallel alignment) 2. การเรียงตัวแบบอิสระ (random alignment)

โดยปกติเส้นใยต่อเนื่องจะมีแนวการเรียงตัวแบบรูปที่ 2.7(a) ในขณะที่เส้นใยไม่ต่อเนื่องอาจจะมีการเรียงตัวแนวเดียวกันดังรูปที่ 2.7(b) หรืออาจเรียงตัวแบบอิสระดังรูปที่ 2.7(c) หรือเรียงตัวแนวเดียวกันบางส่วน (partially oriented) ก็ได้



รูปที่ 2.7 แสดงวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใย (a) ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (b) ไม่ต่อเนื่องและวางแนวเดียวกัน (c) ไม่ต่อเนื่องและวางแบบอิสระ[12]

### 2.3.2.3 วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยไม่ต่อเนื่องและเรียงตัวแบบอิสระ (discontinuous and randomly oriented fiber composites)

โดยปกติแล้วเมื่อการเรียงตัวของเส้นใยเป็นแบบอิสระ เส้นใยที่นำมาใช้จะเป็นเส้นใยประเภทสั้นไม่ต่อเนื่อง ตัวเสริมแรงที่อยู่ในวัสดุผสมจะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.7(c) ในกรณีนี้สามารถนำกฎแห่งการผสม “rule-of-mixture” มาใช้หาค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นเหมือนสมการ (2-2)

$$E_{cd} = KE_f V_f + E_m V_m \quad (2-2)$$

ในสมการข้างต้น  $K$  เป็นตัวแปรแสดงประสิทธิภาพของเส้นใยซึ่งขึ้นกับ  $V_f$  และอัตราส่วน  $E/E_m$  แนนอนขนาดของค่า  $K$  จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง โดยปกติอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.6 ดังนั้น ในการเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบอิสระ มอดุลัสเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัดส่วนปริมาตรเส้นใย

วัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยแนวเดียวจะมีลักษณะเฉพาะแบบขึ้นกับทิศทางหรือแอนไอโซโทรปิกและเสริมแรงจนมีความแข็งแรงสูงสุดได้ในทิศทางการเรียงตัวตามยาว ในทิศทางตามขวางการเสริมแรงด้วยเส้นใยไม่ส่งผลเท่าใดนักเพราะการแตกหักโดยปกติจะเกิดขึ้นได้ที่ความเค้นดึงต่ำ สำหรับในทิศทางอื่นๆวัสดุผสมจะมีความแข็งแรงอยู่ระหว่างค่าดังกล่าว ตัวอย่างของประสิทธิภาพการเสริมแรงด้วยเส้นใยได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพการเสริมแรงของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีการเรียงตัวของเส้นใยในหลายแบบและรับความเค้นในทิศทางต่างกัน[12]

Fiber Orientation	Stress Direction	Reinforcement Efficiency
All fiber parallel	Parallel to fibers	1
	Perpendicular to fibers	0
Fibers randomly and uniformly distributed within a specific plane	Any direction in the plane of the fibers	$\frac{3}{8}$
Fibers randomly and uniformly distributed within three dimensions in space	Any direction	$\frac{1}{5}$

เมื่อต้องนำวัสดุผสมไปใช้รับความเค้นกระทำในระนาบเดียวกันหลายแนว วัสดุผสมจำเป็นต้องมีชั้นวัสดุเรียงตัวเดียวกันซ้อนทับหลายๆชั้น ซึ่งเรียกว่า วัสดุผสมลามิना การใช้งานกับความเค้นหลายแนวนี้ จะใช้เส้นใยต่อเนื่องที่วางตัวในเนื้อพื้นแบบอิสระ โดยคุณสมบัติทางกลเป็นแบบไอโซโทรปิกและประสิทธิภาพในการเสริมแรงมีค่าหนึ่งส่วนห้าเมื่อเทียบกับวัสดุผสมที่จัดเรียงตัวเส้นใยในทิศทางตามยาว

การผลิตวัสดุผสมเส้นใยสั้น (ทั้งแบบเรียงแนวเดียวและอิสระ) ทำได้รวดเร็วและใช้กับรูปทรงซับซ้อนได้ในขณะที่เส้นใยต่อเนื่องไม่สามารถทำได้ ยิ่งไปกว่านั้นต้นทุนการผลิตก็ประหยัดกว่าเส้นใยต่อเนื่องและเรียงแนวเดียว

### 2.3.3 วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์ (polymer-matrix composites)

วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์ (PMCs) ประกอบด้วยเรซินพอลิเมอร์ เป็นเนื้อพื้น และเส้นใยเป็นตัวเสริมแรง วัสดุเหล่านี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุดในงานวัสดุและใช้ปริมาณมากที่สุดอีกด้วย เพราะมีคุณสมบัติที่อุณหภูมิห้องดี ง่ายต่อการผลิตและราคาถูก

#### 2.3.3.1 วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์(GFRP)เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced polymer(GFRP)composites)

ใยแก้วหรือไฟเบอร์กลาส จัดเป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นจากเส้นใยแก้วทั้งแบบต่อเนื่องหรือแบบไม่ต่อเนื่องใส่อยู่ในเนื้อพื้นพอลิเมอร์ ส่วนผสมทางเคมีของแก้วที่ปกติขึ้นรูปเป็นเส้นใย เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยอยู่ในช่วงระหว่าง 3-20 ไมครอน แก้วนิยมใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงโดยมีเหตุผลสนับสนุนคือง่ายจากสภาพหลอมเหลวจนกลายเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง หัวตัดดูดิบได้ง่ายและอาจจะถูกผลิตขึ้นเป็นพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วแบบประหยัด โดยใช้เทคนิคการผลิตวัสดุผสมต่างๆ ที่มีอยู่มากมาย เมื่ออยู่ในสภาพเส้นใยก็มีความแข็งแรงสูง และเมื่อฝังลงในเนื้อพลาสติกก็ส่งผลให้วัสดุผสมมีความต้านทานแรงดึงจำเพาะที่สูงมาก เมื่อใช้คู่กับพลาสติกหลากหลายชนิด เพื่อต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจนทำให้วัสดุผสมมีคุณสมบัติที่จะนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่กัดกร่อนรุนแรงต่างๆ ได้

อย่างไรก็ตามวัสดุในกลุ่มนี้ยังมีข้อจำกัดหรือข้อเสียอยู่ มีความแข็งแรง (stiffness หรือมอดูลัสความยืดหยุ่นไม่สูงมากนัก) และไม่แสดงความแน่นแกร่ง (rigidity) วัสดุไฟเบอร์กลาสส่วนใหญ่มีข้อจำกัดที่ต้องใช้งานอุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C เพราะที่อุณหภูมิสูงพอลิเมอร์เริ่มไหลเยิ้มหรือเกิดความเสียหาย

#### 2.3.3.2 วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์(CFRP)เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber-reinforced polymer(CFRP)composites)

คาร์บอนเป็นวัสดุเส้นใยที่มีสมรรถนะสูง ปัจจุบันนิยมนำมาเสริมแรงในวัสดุเนื้อพื้นพอลิเมอร์สมัยใหม่มากที่สุด (ในกลุ่มนี้ไม่ใช่ไฟเบอร์กลาส) เหตุผลสนับสนุนมีดังนี้ เส้นใยคาร์บอนมีมอดูลัสจำเพาะและความแข็งแรงจำเพาะสูงสุดในกลุ่มวัสดุเส้นใยเสริมแรง เส้นใยเหล่านี้ยังคงมอดูลัสสูงและความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูงได้ดี ในสภาวะอุณหภูมิห้อง เส้นใยคาร์บอนทนต่อความชื้น สารเคมี ตัวทำละลายกรดและด่างต่างๆ ได้ดี เส้นใยเหล่านี้มีคุณลักษณะทางกลและฟิสิกส์ต่างๆ มากมายทำให้วัสดุผสมที่มีเส้นใยเหล่านี้อยู่ด้วยมีคุณสมบัติทางวิศวกรรมเฉพาะ

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เทคนิคการผลิตเส้นใยคาร์บอนก่อนข้างซับซ้อนอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตามวัสดุเริ่มต้นที่นำมาใช้ในการผลิตเป็นวัสดุที่ทำจากสารอินทรีย์ 3 ประเภท ได้แก่ เรยอน (rayon) พอลิอะคริโนไนไตรด (polyacrylonitrile, PAN) และพิทช์ (pitch) เทคนิคกระบวนการผลิตจะแตกต่างกันออกไปในวัสดุเริ่มต้นแต่ละชนิด และจะส่งผลให้ลักษณะเส้นใยที่ได้แตกต่างกันด้วย

2.3.3.3 วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยอะรามิด (aramid fiber-reinforced polymer composites)

เส้นใยอะรามิดเป็นเส้นใยที่มีมอดุลัสและความแข็งแรงสูงถูกนำมาใช้ในช่วงปี 1970 เป็นต้นมามีคุณสมบัติหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่ดีเยี่ยมเหนือกว่าโลหะ ในทางด้านเคมีวัสดุกลุ่มนี้เป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นพอลิพาราฟีนีลีน เทเรพธัลเอไมด์ (poly paraphenylene terephthalamide) ในปัจจุบันมีวัสดุอะรามิดหลายชนิด ชื่อทางการค้าที่รู้จักกันดีที่สุดคือ เคพลาร์ (Kevlar) และ โนเมกซ์ (Nomex) ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน ในช่วงการสังเคราะห์เคพลาร์โมเลกุลจะจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นในทิศทางแนวแกนเส้นใยเหมือนกับกลุ่มผลึกเหลว เส้นใยเหล่านี้มีความแข็งแรงและมอดุลัสดึงในแนวตามยาวสูงกว่าเส้นใยพอลิเมอร์ชนิดอื่น อย่างไรก็ตามความสามารถในการรับแรงอัดค่อนข้างต่ำกว่า นอกจากนี้วัสดุยังมีคุณสมบัติด้านความแกร่ง ความต้านทานต่อแรงกระแทก ความทนทานต่อความชื้นและความล้า แม้ว่าอะรามิดจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกแต่มันก็มีความต้านทานต่อการเผาไหม้ และมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง ช่วงอุณหภูมิที่เส้นใยยังคงคุณสมบัติทางกลที่ดีอยู่ในช่วง -200 ถึง 200 °C ปกติเส้นใยอะรามิดจะเสื่อมสภาพได้ที่กรดแก่และด่างแก่ แต่มันจะไม่เกิดปฏิกิริยากับตัวทำละลายและสารเคมีอื่น

2.3.3.4 วัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยชนิดอื่น (orther fiber-reinforced polymer composites)

แก้ว คาร์บอน และอะรามิดจัดเป็นตัวเสริมแรงชนิดเส้นใยต่างๆ ไปที่นำมาใช้ในเนื้อพื้นพอลิเมอร์ วัสดุเส้นใยชนิดอื่นก็ถูกนำมาใช้เช่นกันแต่ในระดับที่น้อยกว่ามาก วัสดุเหล่านี้ได้แก่ โบรอน ซิลิคอนคาร์ไบด์ และอลูมิเนียมออกไซด์

### 2.3.4 วัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ (metal-matrix composites)

ในวัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ (MMCs) เนื้อพื้นเป็นโลหะเหนียว ถูกนำไปใช้งานในอุณหภูมิสูงกว่าวัสดุที่มีเนื้อโลหะประเภทเดียวกัน และตัวเสริมแรงจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเฉพาะ ความแข็งแรงเฉพาะ ความต้านทานการเสียดสี ความต้านทานต่อความคืบ การนำความร้อนและช่วยรักษารูปทรงให้เสถียรภาพมากขึ้น จุดเด่นที่เหนือกว่าวัสดุผสมเนื้อพื้นพอลิเมอร์ คือใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า ไม่ติดไฟ และมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพจากสารอินทรีย์เหลว แต่มีราคาแพงกว่าจึงให้ใช้งานในวงแคบ

### 2.3.5 วัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิก (ceramic-matrix composites)

วัสดุเซรามิกจัดเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูง ถ้ามันไม่มีการแตกหักแบบเปราะเกิดขึ้นวัสดุเซรามิกบางชนิดอาจจะจัดได้ว่าเป็นวัสดุอุดมคติเลยทีเดียว เพราะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงและในระดับที่ความเค้นรุนแรง ค่าความต้านทานการแตกหักของเซรามิกค่อนข้างต่ำ ปกติจะอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 MPa

ความต้านทานการแตกหักของวัสดุเซรามิกสามารถปรับปรุงได้โดยใช้วัสดุที่ได้รับการพัฒนาใหม่คือ วัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิก (CMCs) ซึ่งเป็นการนำเอาผงอนุภาค เส้นใย วิสเกอร์ของเซรามิกชนิดหนึ่งไปฝังไว้ในเนื้อพื้นวัสดุเซรามิกอีกชนิดหนึ่ง วัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกจะมีความต้านทานการแตกหักเพิ่มถึงระหว่าง 6 ถึง 20 MPa

การปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการแตกหักนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยารอยแตกที่จะขยายตัวกับอนุภาคของเฟสขนาดเล็กที่กระจายอยู่ จุดเริ่มต้นการแตกปกติจะเกิดขึ้นขณะที่รอยแตกขยายตัวไปหรือโตขึ้น รอยแตกจะถูกยับยั้งโดยอนุภาค เส้นใย เนื้อพื้น ซึ่งเทคนิคที่นำมาใช้ทำให้การขยายรอยแตกช้าลงได้แก่การใช้วิสเกอร์เซรามิก SiC หรือ  $Si_3N_4$  โดยการเพิ่มปริมาณเส้นใยช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการแตกหัก เมื่อใช้วิสเกอร์เทียบกับวัสดุเซรามิกที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยวิสเกอร์ วัสดุ CMCs เหล่านี้ยังมีพฤติกรรมต้านทานความคืบที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น และทนทานต่อการช็อกจากความร้อน (thermal shock)

### 2.3.6 วัสดุผสมคาร์บอน-คาร์บอน (carbon-carbon composites)

เป็นวัสดุผสมเนื้อพื้นและตัวเสริมแรงทำจากคาร์บอน ผลิตออกมาล่าสุดมีราคาแพงเนื่องจากเทคนิคการผลิตที่ค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นจึงไม่ถูกนำมาใช้กว้างขวางเท่าใดนัก คุณสมบัติที่ต้องการมีทั้งมอดูลัสดี และความต้านทานแรงดึงสูงและยังคงรักษาคุณสมบัตินี้ได้ถึงอุณหภูมิเกิน  $2000^{\circ}\text{C}$  มีความต้านทานต่อความคืบดีและยังมีค่าความต้านทานต่อการแตกหักสูงมาก และยังมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงอุณหภูมิต่ำ และมีการนำความร้อนสูงมากด้วยคุณลักษณะเหล่านี้ควบคู่

กับความแข็งแรงสูงทำให้มีความไวต่อการช็อกจากความร้อนต่ำด้วย อย่างไรก็ตามข้อเสียหลักคือ การเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ง่าย

กระบวนการผลิตคือเทอร์ซินพอลิเมอร์เหลว เช่น ฟีนอลิก (phenolic) ลงบนเส้นใยต่อเนื่อง ในหุ่นแบบ เนื้อพื้น แล้วนำชิ้นงานมาขึ้นรูปตามต้องการ และปล่อยให้เกิดการบ่มแข็งตัว เรซินจะถูกไพโรไลซ์ (pyrolyze) ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของคาร์บอนโดยใช้ความร้อนในบรรยากาศเฉื่อย ในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) โมเลกุลที่เป็นออกซิเจนในโตนเจน และไฮโดรเจนจะถูกขับออกไป เหลือไว้เพียงห่วงโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ จากนั้นจึงนำไปอบที่อุณหภูมิสูงทำให้เนื้อคาร์บอนแน่นและแข็งแรงมากขึ้น วัสดุผสมที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจะประกอบด้วยเส้นใยคาร์บอนที่คงอยู่เดิม บรรจุอยู่ในเนื้อพื้นคาร์บอนที่ผ่านการไพโรไลซ์

### 2.3.7 วัสดุผสมแบบลูกผสม (hybrid composites)

วัสดุผสมแบบลูกผสมหรือแบบไฮบริด (hybrid) ซึ่งผลิตขึ้นโดยใช้เส้นใยที่แตกต่างกันมากกว่าสองชนิดในเนื้อพื้นชนิดเดียว ไฮบริดมีคุณสมบัติโดยรวมดีกว่าวัสดุผสมที่มีเส้นใยชนิดเดียว เส้นใยต่างๆ กับเนื้อพื้นถูกนำมาผสมเข้าด้วยกันอย่างหลากหลายแต่ที่จัดว่าเป็นระบบที่พบทั่วไปมากที่สุดคือ การผสมเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วลงไปในเรซินพอลิเมอร์ เส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงและเป็นตัวเสริมแรงที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำแต่มีราคาแพง ขณะที่เส้นใยแก้วมีราคาถูกแต่มีความแกร่งในช่วงยืดหยุ่น (อีลาสติก) ไม่เท่าคาร์บอน ดังนั้นไฮบริดระหว่างเส้นใยแก้วคาร์บอนจะมีความแข็งแรงสูงขึ้น แกร่งมากขึ้น มีความต้านทานต่อการกระแทกสูงขึ้นและอาจจะผลิตได้ด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับพลาสติกที่เสริมแรงด้วยคาร์บอนทั้งหมดหรือแก้วทั้งหมด

แนวทางในการผสมเส้นใยสองชนิดเข้าด้วยกันมีมากมายและจะส่งผลกระทบต่อสมบัติโดยรวมได้ในแท้จริงแล้วคุณสมบัติแบบลูกผสมนี้จัดว่าเป็นแอนไอโซโทรปิก เมื่อวัสดุแบบลูกผสมนี้ถูกนำไปปรับความเค้นในแนวตั้ง การแตกหักจะไม่เกิดขึ้นทันทีทันใด เส้นใยคาร์บอนจะเกิดการแตกหักก่อนหลังจากนั้นแรงกระทำจะถ่ายเทไปยังเส้นใยแก้ว เมื่อเส้นใยแก้วแตกหักเนื้อพื้นก็ยังรองรับแรงต่อไป และในที่สุดวัสดุผสมจะแตกหักพร้อมกับเฟสเนื้อพื้น

### 2.3.8 วัสดุผสมโครงสร้าง (structural composites)

โดยทั่วไปแล้ววัสดุผสมโครงสร้างประกอบขึ้นจากทั้งวัสดุเนื้อเดียวและเนื้อผสมคุณสมบัติของวัสดุไม่เพียงขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบยังขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างอีกด้วยวัสดุผสมลามิनाและแผงประกบแบบแซนวิชจัดเป็นวัสดุโครงสร้างที่พบทั่วไปมากที่สุด

### 2.3.8.1 วัสดุผสมลามิना (laminar composites)

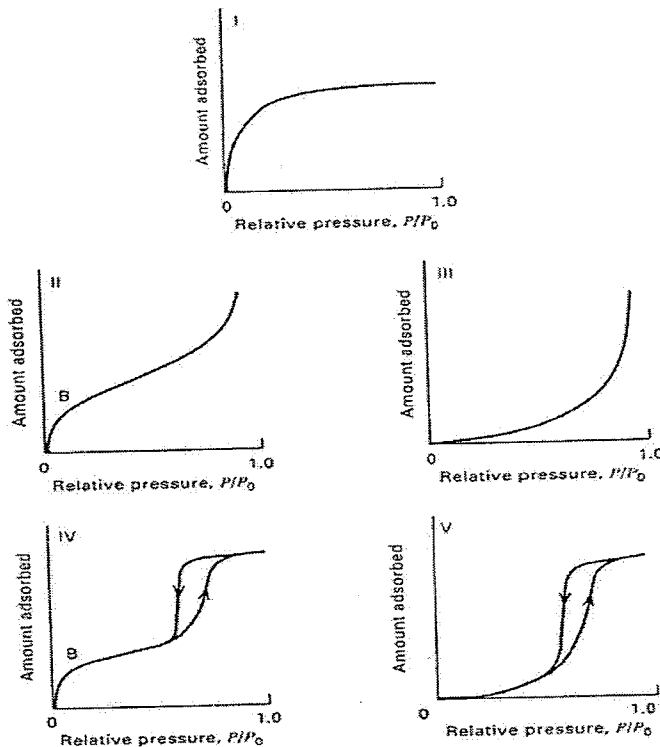
วัสดุผสมลามินาประกอบขึ้นด้วยแผ่นหรือแผงบาง 2 มิติที่มีทิศทางที่มีความแข็งแรงสูงอยู่ ชั้นต่างๆจะถูกนำมาเรียงซ้อนกันและประสานติดกัน และการจัดเรียงตัวที่มีความแข็งแรงสูงก็จะแตกต่างกันขึ้นกับชั้นแต่ละชั้น ดังนั้นวัสดุผสมลามินา จึงมีความแข็งแรงสูงมากในหลายทิศทางบนระนาบ 2 มิติ อย่างไรก็ตามความแข็งแรงในทิศทางต่างๆก็ยังคงต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการเรียงเส้นใยในแนวเดียวกัน

### 2.3.8.2 แผงประกบแบบแซนด์วิช (sandwich panels)

ประกอบขึ้นจากแผ่นด้านนอก (outer sheet) หรือแผ่นหน้า (face sheet) ที่มีความแข็งแรงและแทรกด้วยวัสดุที่หนาแน่นน้อยกว่าหรือแทรกด้วยแกนที่มีความแกร่งแบบยืดหยุ่นและความแข็งแรงต่ำกว่า ชั้นแผ่นหน้าต้องรับแรงส่วนใหญ่กระทำในแนวระนาบ และต้องรับความเค้นดัดออกจากทิศทางตามขวางอีกด้วย วัสดุที่ใช้ทำแผ่นหน้ามีทั้งอะลูมิเนียมผสม พลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใย โทเทเนียม เหล็กกล้า และแผ่นไม้อัด ส่วนวัสดุที่ใช้ทำแกน ได้แก่ โฟมพอลิเมอร์ ยางสังเคราะห์ ไม้บาร์ซา หรือแกนที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้ง

## 2.4 สมดุลของการดูดซับและไอโซเทอมของการดูดซับ (Equilibrium adsorption and adsorption isotherm)[13]

การดูดซับ คือ สภาพที่ตัวถูกละลาย (ตัวถูกดูดซับ) เคลื่อนที่ออกจากสารละลายเข้าสู่ผิวหน้าของของแข็ง (ตัวดูดซับ) และเพิ่มความเข้มข้นที่ผิวหน้าของของแข็งจนคงที่ ในเวลานั้นจะเป็นสภาวะสมดุลพลศาสตร์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายสารละลาย กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของของแข็ง โดยกำหนดให้ดูดซับตัวถูกดูดซับเป็นร้อยละของน้ำหนัก หรือน้ำหนักหรือปริมาตรของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับไว้บนตัวถูกดูดซับ 1 หน่วยน้ำหนักที่ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งอาจแสดงได้ด้วยกราฟระหว่างความเข้มข้นหรือปริมาณหรือปริมาตรตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับเทียบกับความดันย่อย หรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับนั้นในวัฏภาคของแก๊สที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งเรียกว่า ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) โดยทั่วไปจำนวนของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น แต่อาจจะไม่แปรผันเป็นเส้นตรง รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับมี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปแบบไอโซเทอมการดูดซับแบบต่างๆ[14]

จากรูปที่ 2.8 ไอโซเทอมแบบที่ 1 พบมากที่สุดเป็นการดูดซับตัวถูกดูดซับแบบชั้นเดียวบนผิวของตัวดูดซับ (Monolayer adsorption) พบทั้งการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี จะเป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่เป็นผงและมีความเป็นรูพรุน (Microporous powder) ซึ่งปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure) ต่ำๆ และเข้าใกล้ 1 ที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ จะมีการดูดซับเกิดขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย ซึ่งถ้าไอโซเทอมที่ได้มีลักษณะการดูดซับแบบนี้แสดงว่าตัวดูดซับมีรูพรุนแบบไมโครพอร์และมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับ

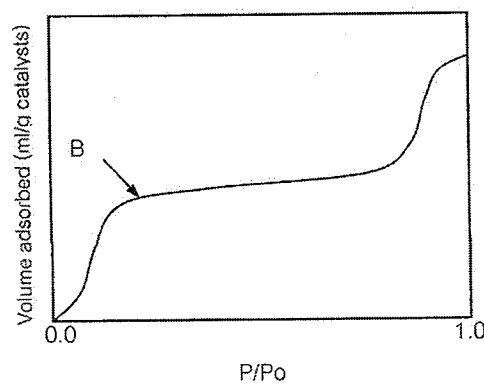
ไอโซเทอมแบบที่ 2 พบมากในปรากฏการณ์การดูดซับที่มีชั้นของตัวถูกดูดซับคลุมผิวของตัวดูดซับหนาขึ้นเรื่อยๆ โดยการเกิดบนสารที่เป็นผงที่ไม่ค่อยมีความเป็นรูพรุน (Nonporous powder) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 1.5 นาโนเมตร ซึ่งค่าความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption) ของชั้นแรกจะต่ำกว่าชั้นที่เกิดการดูดซับสมบูรณ์ และถ้าเพิ่มความดันสัมพัทธ์ จะทำให้การดูดซับเกิดมากกว่า 1 ชั้น เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)

ไอโซเทอมแบบที่ 3 เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น ลักษณะของไอโซเทอมจะมีการดูดซับที่ต่ำ ยกเว้นความดันสูง ซึ่งค่าความร้อนของการดูดซับของชั้นแรกจะต่ำกว่าชั้นที่เกิดการดูดซับสมบูรณ์ แต่ไอโซเทอมแบบที่ 3 นี้จะไม่ค่อยเกิดขึ้น ตัวอย่างของการดูดซับที่มีลักษณะไอโซเทอมแบบที่ 3 เช่น การดูดซับไอโอดีนบนซิลิกาเจล

ไอโซเทอมแบบที่ 4 และแบบที่ 5 เป็นการดูดซับแบบหลายชั้นที่เกิดบนตัวดูดซับที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 15-1,000 อังสตรอม ไอโซเทอมแบบที่ 4 และแบบที่ 5 จะเกิดปรากฏการณ์ Hysteresis คือ เกิดการดูดซับและคายซับดังในรูปที่ 2.8 กล่าวคือ เส้นกราฟที่ได้จากการดูดซับและคายซับจะไม่ซ้อนทับเป็นเส้นเดียวกัน ทั้งนี้เพราะการที่ก๊าซจะระเหยออกจากรูพรุนจะเกิดยากกว่าการที่ก๊าซเกิดการควบแน่นในรูพรุน และโมเลกุลของก๊าซที่ระเหยออกจากรูพรุนที่คดเคี้ยวมากของตัวดูดซับมีโอกาที่จะควบแน่นอีกครั้งในระหว่างการเคลื่อนที่มายังปากรูพรุนของตัวดูดซับ

## 2.5 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน โดยใช้วิธีบีอีที (BET)[15]

การวัดพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุน และการศึกษารูปร่างของรูพรุน เป็นขั้นตอนหนึ่งของการศึกษาการศึกษาการเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากพื้นที่ผิวเป็นบริเวณที่ใช้ว่างองค์ประกอบกัมมันต์ที่จะใช้ในการช่วยเกิดปฏิกิริยา การวัดพื้นที่ผิวภายในของวัสดุที่มีความพรุนทำได้โดยการศึกษาการดูดซับทางกายภาพ หรือวิธีบีอีที (BET ย่อมาจาก Brunauer-Emmett-Teller Method) ที่อุณหภูมิของก๊าซเหลว (ในที่นี้เป็นอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว) ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ โดยจะหาจำนวนโมเลกุลที่ใช้เพื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวภายในได้ การดูดซับของ  $N_2$  ดังกราฟในรูปที่ 2.8 จะเกิดขึ้นเร็วในช่วงแรกโดยจะเพิ่มตามความดัน จนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนแปลง (ตำแหน่ง B) ซึ่งเส้นกราฟจะราบ แสดงถึงปรากฏการณ์ที่การดูดซับบนพื้นที่ผิวเป็นแบบชั้นเดียว และเมื่อความดันย่อยของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจนเกินจุดที่เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว จะเกิดการควบแน่นของไนโตรเจนเหลวในรูพรุนทำให้ปริมาตรของการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



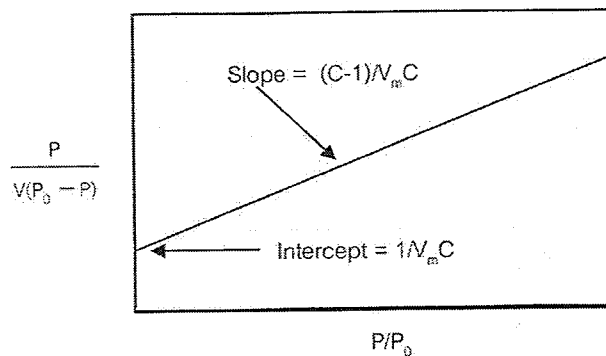
รูปที่ 2.9 การวัดพื้นที่ผิวโดยใช้วิธีการดูดซับของก๊าซด้วยวิธีบีอีที[15]

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยต่างๆ และปริมาตรที่ถูกดูดซับแล้วเกิดเป็นการดูดซับชั้นเดียว คือสมการของบีอีที

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad (2-2)$$

- เมื่อ
- $P$  คือ ความดันย่อยของ  $N_2$
  - $P_0$  คือ ความดันไออิ่มตัวของก๊าซไนโตรเจน ณ อุณหภูมิที่ศึกษา
  - $V$  คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน  $P$
  - $V_m$  คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ทำให้เกิดเป็นการปกคลุมชั้นเดียว
  - $C$  คือ ค่าคงที่

สมการนี้เขียนให้อยู่ในรูปของกราฟเส้นตรง  $Y = sx + b$  ได้ เมื่อให้  $P/P_0$  เป็น  $X$  และเทอมทางซ้ายเป็น  $Y$  ซึ่งจุดตัดแกน  $Y$  คือ ค่า  $b$  ซึ่งเท่ากับ  $1/V_m C$  และความชัน  $s$  คือ  $(C-1)/V_m$  ผลที่เชื่อถือได้จะอยู่ในช่วงที่มีค่า  $P/P_0$  อยู่ระหว่าง 0.05 และ 0.3



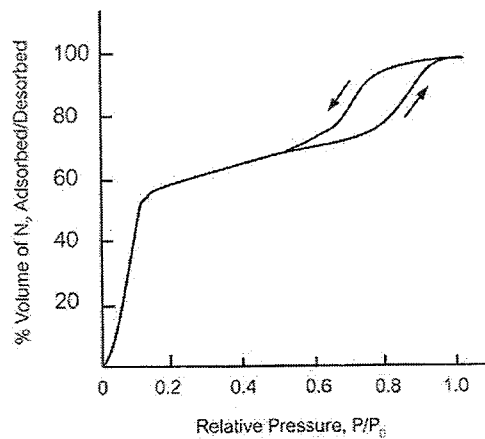
**รูปที่ 2.10** การพล็อตในรูปเส้นตรงของบีอีที ซึ่งมีค่า  $P/P_0$  อยู่ระหว่าง 0.05-0.3 เพื่อใช้คำนวณหา ค่าการปกคลุมแบบชั้นเดียว ( $V_m$ )[15]

เครื่องมืออันเดียวกันนี้สามารถใช้หาการกระจายตัวของขนาดรูพรุน ของวัสดุที่มีความพรุนซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 อังสตรอม ได้ยกเว้นในกรณีที่ใช้ความดันสูงเพื่อทำให้ก๊าซไนโตรเจนควบแน่นในรูพรุน ขั้นตอนประกอบด้วยการวัดปริมาตรที่ถูกดูดซับได้ ทั้งในขณะเพิ่มและลดค่า  $P/P_0$  ที่ความดันสัมพัทธ์มีค่าเข้าใกล้ 1 ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10 ซึ่งแสดงปริมาตรการดูดซับเมื่อความดันเพิ่มขึ้น และการคายเมื่อความดันลดลง การควบแน่นจะเกิดขึ้นในรูพรุน โดยสมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณคือสมการของเคลวิน (Kelvin) ดังนี้

$$\ln(P/P_0) = -2 \sigma V \cos \theta / rR \quad (2-3)$$

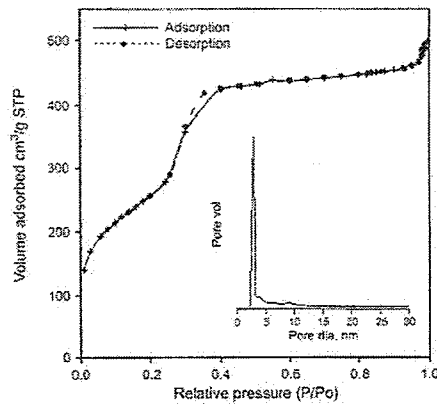
เมื่อ  $\sigma$  คือ ค่าความตึงผิว (Surface tension) ของไนโตรเจนเหลว

- $\theta$  คือ มุมสัมผัส (Contact angle)
- V คือ ปริมาตรเชิงโมลของไนโตรเจนเหลว
- r คือ รัศมีของรูพรุน
- R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ
- T คือ อุณหภูมิ
- P คือ ค่าความดันที่วัดได้
- $P_0$  คือ ค่าความดันที่เกิดการอิ่มตัว



รูปที่ 2.11 ไอโซเทอมของการดูดซับและการคายของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 78 °C [15]

รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างไอโซเทอมการดูดซับและการคายของก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 77 K บนซิลิกาชนิด MCM-41 ที่เตรียมโดยใช้ซิลิกาจากแกลบข้าว ซึ่งมีพื้นที่ผิว อยู่ในช่วง 775-1100 m<sup>2</sup>/g และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.95 นาโนเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่า ช่วงของขนาดแคบกล่าวคือ มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนต่ำ



รูปที่ 2.12 ไอโซเทอมของการดูดซับและการคายของไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 °C บน MCM-41 ที่เตรียมจากซิลิกาจากเกลบ[15]

## 2.6 การทดสอบแรงอัด [12]

ในการใช้งานจริง ภาครวมที่เกิดขึ้นเป็นรูปแบบของแรงอัด จะใช้การทดสอบแรงอัด (หรือแรงกด) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น- ความเครียดได้ การทดสอบแรงอัดก็คล้ายกับการทดสอบแรงดึง ต่างกันที่แรงกระทำเป็นแรงอัดและชิ้นทดสอบจะถูกกดอัดให้หดตัวเข้าตามแนวของความเค้นนั้น ซึ่งสามารถคำนวณ ค่าความเค้นทางวิศวกรรม  $\sigma$  จากความสัมพันธ์

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2-4)$$

โดยที่  $F$  คือแรงกระทำซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับหน้าตัดของชิ้นทดสอบมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) หรือปอนด์แรง (lb<sub>f</sub>) และ  $A_0$  คือพื้นที่หน้าตัดเดิมของชิ้นงานทดสอบก่อนถูกแรงกระทำ (หน่วย  $m^2$  หรือ  $in^2$ ) หน่วยของความเค้นทางวิศวกรรม จะมีหน่วยเป็นเมกะปาสกาล (MPa) ในระบบ SI โดย ( $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$ ) และเป็นปอนด์แรงต่อตารางนิ้ว (psi) ในระบบอังกฤษ ความเครียดทางวิศวกรรม  $\epsilon$  นิยามดังนี้

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2-5)$$

โดยที่  $l_0$  คือความยาวเดิมก่อนที่จะถูกแรงกระทำ และ  $l_i$  คือความยาวขณะนั้น ในหลายกรณี ปริมาณ  $l_0 - l_i$  จะถูกกำหนดให้เขียนเป็น  $\Delta l$  ซึ่งหมายถึงความยาวที่เปลี่ยนไป ความเครียดทางวิศวกรรม (ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า ความเครียด) เป็นปริมาณไม่มีหน่วย แต่มักจะระบุหน่วยเป็น mm/mm หรือ in/in หรืออาจจะระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ก็ได้

โดยหลักปฏิบัติแล้ว ค่าของแรงอัดมักแทนค่าเป็นลบ ทำให้ความเค้นที่ได้เป็นลบด้วย นอกจากนี้เนื่องจาก  $l_0$  ยาวกว่า  $l_i$  ดังนั้นค่าความเครียดที่ได้จากสมการข้างต้นจึงมีค่าเป็นลบด้วยเช่นกัน โดยการทดสอบแรงอัดมักจะถูกใช้เมื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมทางกลของวัสดุภายใต้ความเครียดถาวร (เช่น เกิดการแปรรูปถาวร) สูงๆ เช่นในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุ หรือในกรณีที่วัสดุนั้นมีพฤติกรรมทางกลที่เปราะ แตกหักง่ายภายใต้แรงดึง

## 2.7 การแปรรูปแบบยืดหยุ่น (elastic deformation)[12]

ระดับการแปรรูปหรือเปลี่ยนรูปของโครงสร้างหนึ่งๆ จะมากหรือน้อยขึ้นกับขนาดของแรงกระทำที่กระทำต่อระบบ สำหรับโลหะส่วนใหญ่ซึ่งถูกกระทำด้วยแรงซึ่งมีขนาดไม่สูงนัก ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงซึ่งกันและกันตามกฎของฮุก (Hook's law)

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2-6)$$

และค่าคงที่ของการแปรผัน  $E$  เรียกว่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (modulus of elasticity) หรือมอดูลัสของยัง (Young's modulus)

การแปรรูปซึ่งความเค้นและความเครียดแปรผันตรงซึ่งกันและกันนี้ เรียกว่า การแปรรูปแบบยืดหยุ่นหรือแบบอีลาสติก (elastic deformation) เมื่อพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (แกนนอน) และความเครียด (แกนตั้ง) จะได้เส้นตรงซึ่งความชันในช่วงนี้คือ มอดูลัสความยืดหยุ่น  $E$  ค่ามอดูลัสนี้อาจถูกพิจารณาว่าเป็นค่าที่บอกถึงความแข็งตึง (stiffness) ของวัสดุในการที่จะต้านทานการผิดรูปไป (แบบยืดหยุ่น) ยิ่งมอดูลัสนี้มีค่ามากขึ้นเท่าไร วัสดุก็ยิ่งมีการผิดรูปน้อยเท่านั้น หรือจะเกิดความเครียดแบบยืดหยุ่นที่ต่ำภายใต้แรงกระทำที่กำหนด ค่ามอดูลัสนี้จึงเป็นพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบที่ต้องพิจารณาปริมาณการแปรรูปแบบยืดหยุ่นด้วย

ในระดับอะตอมแล้วความเครียดแบบยืดหยุ่นซึ่งเรามองเห็นในระดับมหภาค เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างอะตอมรวมถึงการยืดออกของความยาวระหว่างพันธะระหว่างอะตอม ดังนั้นขนาดของค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นจึงสามารถบอกได้ถึงระดับความแรงที่อะตอมคู่หนึ่งในวัสดุนั้นที่อยู่ติดกันที่จะต้านทานต่อการที่มันจะต้องแยกห่างออกจากกัน ซึ่งนั่นก็คือ ความแรงของพันธะระหว่างอะตอมคู่หนึ่ง

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันมีการทำวัสดุคอมโพสิต โดยมีรีซอร์ซินอล - ฟอรั่มัลดีไฮด์เจลเป็นเมทริกซ์ และมีตัวเสริมแรงเป็นวัสดุหลากหลายชนิด ทั้งนี้จะได้วัสดุคอมโพสิตที่มีความพรุน มีผิวสัมผัสมาก อีกทั้งยังมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นอีกด้วย ที่ผ่านมามีการค้นคว้าวิจัยในเรื่องนี้อย่างกว้างขวาง ซึ่งผลงานวิจัยเหล่านั้นได้แก่

R. Petrievi, M. Glora and J. Fricke [16] ศึกษาการใช้คาร์บอนแอโรเจล (carbon aerogel) มาประยุกต์ใช้ในการทำอิเล็กโทรดใน Proton electrode membrane (PEM) ของเซลล์เชื้อเพลิง โดยอิเล็กโทรดที่ใช้มีโครงสร้างที่มีความพรุนสูง และสามารถให้ออกซิเจน ไฮโดรเจน และเมทานอล เพราะซึมผ่านได้ นอกจากนี้อิเล็กโทรดที่ใช้ต้องมีสมบัติเชิงกลที่เสถียร และสามารถให้น้ำผ่านได้รวดเร็ว ดังนั้นจึงนำ คาร์บอนแอโรเจล มาทำอิเล็กโทรด เพราะมีความพรุนสูง นำไฟฟ้าได้ และเป็นวัสดุที่ยอมให้สารผ่านได้ แต่มีสมบัติเชิงกลไม่ดี จึงต้องมีการเสริมแรงโดยใช้เส้นใยพอลิเมอร์ (novoloid, PAN, aramide) และใช้เซลล์ลูโลสที่ขบน้ำเป็นสารเติมแต่ง จากนั้นนำมาวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนแอโรเจล ที่เสริมแรงมีโครงสร้างสองชั้น โดยผิวด้านบนเป็นรูพรุนผิวเรียบ ส่วนชั้นในมีโครงสร้างรูพรุนขรุขระซึ่งมีสมบัติยอมให้น้ำผ่านได้รวดเร็ว จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิงได้

Z.L. Wang, Y.C.Li, Zhang, Z.H. Wang, X.J. Wang [17] ศึกษา Carbon/phenolic (C/PH) ซึ่งจัดเป็นวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ดีมากมาย ทั้งค่า strength และค่าความแข็งแรงสูง ทั้งยังสามารถรับแรงกระแทกได้มาก จึงเป็นวัสดุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ทั้งเป็นวัสดุในการต้านทานความร้อนและรับแรง นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ป้องกันแรงปะทะจากขีปนาวุธและแรงระเบิด ใช้เป็นส่วนที่ป้องกันความร้อนในจรวดและเครื่องบิน ใช้เป็นเบรกในยานพาหนะความเร็วสูง

Meng-Kao Yeh, Nyan-Hwa Tai, Yan-Jyun Lin [18] ศึกษาการใช้ single-walled carbon nanotubes (SWNTs) เป็นตัวเสริมแรงใน phenolic resin ทำการทดลองเพื่อหาค่า Young's modulus และ tensile strength ของวัสดุคอมโพสิต จากการทดลองจะได้ค่า Young's modulus เพิ่มขึ้น 29.7% ค่า tensile strength เพิ่มขึ้น 20.3% ที่เปอร์เซ็นต์น้ำหนัก 0.75% และ 2.0%

Gewen Yi, Fengyuan Yan [19] ศึกษาชนิดของสารเสริมแรง ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต การเสริมแรง Phenolic matrix ด้วย MWNTs มีค่า stress/strain , Young's modulus , tensile strength รวมทั้ง %elongation at break สูงที่สุด รองลงมาคือ CFs และ MWNTs/CFs มีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากขนาดที่แตกต่างกันมากระหว่าง MWNTs กับ CFs และการกระจายตัวในเมทริกซ์ที่ไม่ได้เป็นแบบทิศทางเดียวกัน

Xian, X. J. et.al. [20] ทำการศึกษาเส้นใยไผ่ (bamboo) กาบมะพร้าว (Coconut husk หรือ Coir) และหญ้า March (Phragmites) โดยใช้เสริมแรงกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ เช่น Epoxy ,

Resorcinol Formaldehyde (RF) และ Urea Formaldehyde(UF) พบว่าการเสริมแรงเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยเป็นดังนี้คือ

ไผ่สั้นยาว (Long Bamboo fibers) > ไผ่เส้นสั้น (Song Bamboo fibers) > ไผ่ฉีก (Chipped Bamboo fibers) > กาบมะพร้าว(Coair fibers) > หญ้า Marsh

เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไผ่ กาบมะพร้าว และหญ้า เป็น 16, 10, 5 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งส่งผลต่อการกระจายตัวของเส้นใย โดยใยไผ่จะเกิดการเกาะกัน(Pack) ได้ดี การรับแรงตลอดพื้นที่หน้าตัดจึงดี สำหรับเส้นใยที่ยาวและมีความต่อเนื่องจะมีความสามารถส่งผ่านแรงมากกระทำตลอดความยาว เมื่อแรงกระทำทิศทางเดียวกับเส้นใย คุณสมบัติเชิงกลจึงดีและได้รับความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ที่ดีกว่าด้วย

ส่วนลำดับความแข็งแรงหรือประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นเมทริกซ์ คือ

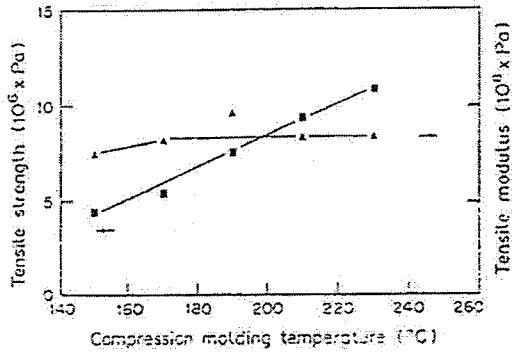
Epoxy resin > RF > UF

เฉลิมพล อิทธิวิวัฒน์ และสกุล บรรจงวุฒิ [21] ทำการศึกษาเส้นใยเซลลูโลสคือหญ้าสลาบลวง (Typha angustifolia) เป็นสารเสริมแรงในพอลิโพรพิลีน(PP) โดยผสมกับเส้นใยแก้วและสารจำพวก Silane เป็นสารเชื่อมโยง (Coupling agent) จากการทดลองพบว่าเส้นใยช่วยเพิ่มความแข็งแรงและค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของคอมโพสิต แต่มีแนวโน้มที่จะลดค่าการทนแรงดึงและค่าการยืดที่จุดขาด ซึ่งปัจจุบันยังทำการศึกษาปรับปรุงสมบัติและการใช้งานอื่นๆ เช่น ใช้ในการทำแผ่น MDF (Medium density Fiber Board) และใช้เทอร์โมเซต เช่น UF , MF เป็นตัวประสาน

พิชัย จงสกุลชัย และศิริพงษ์ โรจน์วีระ [22] ทำการศึกษาขุยมะพร้าวและฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ใช้ปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) และพอลิโพรพิลีน (PP) พบว่าขุยมะพร้าวทำให้ HDPE และ PP มีค่ามอดูลัสสูงขึ้น ความแข็งแรงไม่เปลี่ยนแปลง ค่าเปอร์เซ็นต์ความยืดที่จุดขาด (% Elongation at break ) เพิ่มขึ้น ฟางข้าวทำให้ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสเริ่มต้นสูงขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าใช้สารตัวเติมมากกว่า 10 phr จะทำให้มีปัญหาในการขึ้นรูป

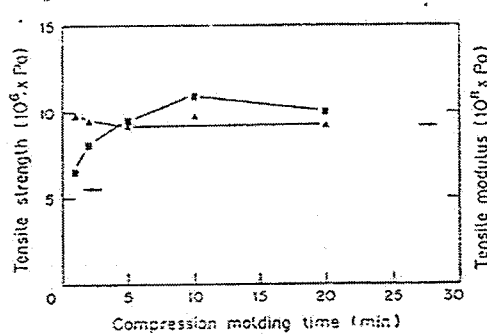
Raj ,R.G. และ Kokta,B.V. [23] ทำการศึกษาผลของสภาวะการขึ้นรูปและวัสดุยึดติดที่มีสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตจากขานอ้อย โดยใช้เส้นใยขานอ้อยที่ผ่านการทำให้แตกตัวด้วยไอน้ำขนาด Mesh 60 และใช้วัสดุยึดติด (Blinding) คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของการอัดแบบ (Compression molding temperature) จาก 150-210°C ทำให้ค่า Tensile strength เพิ่มขึ้น เนื่องจาก HDPE ที่เป็นวัสดุยึดติดเกิดการไหลได้ ทำให้มีการกระจายตัวผิวสัมผัส (Fiber wetting) มากขึ้น การเกี่ยวพันของเส้นใยขานอ้อยมากขึ้นส่งผลให้คอมโพสิตเกิดความแข็งแรง แต่ที่อุณหภูมิสูง (230°C) เส้นใยเกิดการเสียสภาพเนื่องจากความร้อน ขณะที่ Tensile modulus ไม่ได้รับผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แสดงดังกราฟรูปที่

2.13.1 เมื่อเพิ่มเวลาอัดแบบ (Compression molding) ค่า Tensile strength จะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ในช่วงแรก หลังจากนั้นแนวโน้มลดลง พบว่าเวลาที่ดียที่สุดประมาณ 10 นาที ส่วนค่า Tensile modulus เกือบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการอัดแบบเพิ่มขึ้น ผลที่ได้ดังกราฟรูปที่ 2.13.2



รูปที่ 2.13.1

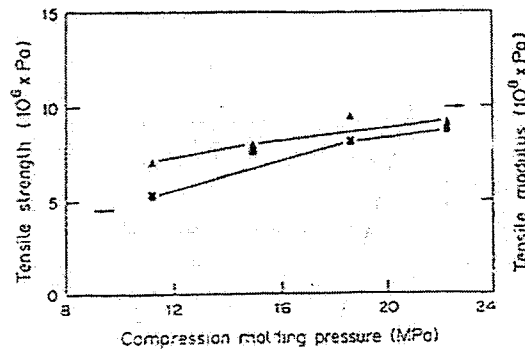
ผลของอุณหภูมิของการอัดแบบที่มีต่อค่า Tensile strength และ Tensile modulus ของคอมโพสิตจากขานคัลอย (70 wt%)



รูปที่ 2.13.2

ผลของเวลาของการอัดแบบที่มีต่อค่า Tensile strength และ Tensile modulus ของคอมโพสิตจากขานคัลอย (70 wt%)

การเพิ่มของค่า Tensile strength เกิดขึ้นอย่างคงที่ เมื่อเพิ่มความดันในการอัดแบบจาก 11.2-14.9 MPa จากนั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อเพิ่มความดันต่อไป ส่วนค่า Tensile modulus เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเพิ่มความดันในการอัดแบบ ดังนั้นเส้นใยขานอ้อยจึงสามารถยึดติดกันได้ดีที่ความดันของการอัดแบบสูง (18.69 MPa) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ผลของความดันในการอัดแบบที่มีต่อค่า Tensile strength และ Tensile modulus ของคอมโพสิตจากขานอ้อย (20wt%)

Nagaty, A., et. Al. [24] ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตจาก Lingnocellulose โดยทำการต่อกิ่ง Methyl Methacrylate (MMA) บนเส้นใยชานอ้อยและใช้ Sodium bisulphate-sodalime เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา พบว่าสมบัติของคอมโพสิตขึ้นกับปริมาณและขนาดของเส้นใยชานอ้อย

การศึกษาคอมโพสิตจากชานอ้อยโดยใช้พอลิเมอร์เมตริกซ์ คือ HDPE, MDPE และ LLDPE ที่ปริมาณชานอ้อยต่างๆ กัน ตั้งแต่ 0-20% (W/W) โดยตัวอย่างทำการอัดแบบที่ 170°C เป็นเวลา 10 นาที ที่ความดันต่ำกว่า 18.6 MPa พบว่า ค่า Tensile strength ที่ดีที่สุดอยู่ที่ปริมาณชานอ้อย 15% โดยน้ำหนัก การเพิ่มปริมาณเส้นใยมากขึ้น ไม่มีผลทำให้ค่า Tensile strength เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่า Elongation อย่างคงที่ พบได้เมื่อมีการเติมชานอ้อยลงในคอมโพสิต การเติมชานอ้อย 5% (W/W) ทำให้ค่า Tensile modulus เพิ่มขึ้น แต่การเติมต่อไปค่าเกือบไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับค่า Izod – Impact energy มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการเติมชานอ้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากวัสดุมีความเหนียวลดลง

ตัวอย่างที่เตรียมจาก MDPE และ LLDPE มี Tensile strength สูงขึ้นเมื่อประมาณชานอ้อยมากขึ้นและสูงที่สุดที่ 15% W/W เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ทั้ง 3 ชนิดพบว่า LLDPE ให้ค่า Tensile strength สูงที่สุด เพิ่มจาก LLDPE สามารถไหลได้ที่อุณหภูมิสูง เป็นสาเหตุให้ fiber wettingดี พอลิเมอร์สามารถยึดเกาะกับเส้นใยได้ดี มีช่องว่างระหว่างพอลิเมอร์กับเส้นใยน้อย ทำให้คอมโพสิตเชิงกลที่ดี

สำหรับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ พบว่า ค่า Tensile strength สูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ PE โดยพบว่า HDPE มี Tensile strength สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนเดียวกัน ค่า Elongation เพิ่มขึ้นอย่างคงที่เมื่อมีการเติมชานอ้อย ส่วน MDPE และ LLDPE จะมีค่า Elongation ที่สูงกว่า HDPE ที่อัตราส่วนเดียวกันแต่มีแนวโน้มการเพิ่มที่ไม่สม่ำเสมอ ค่า Tensile modulus ของ HDPE เพิ่มขึ้นเมื่อเติมเส้นใย 5% ต่อจากนี้เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง MDPE และ LLDPE มีการเพิ่มของ Tensile modulus มากกว่า HDPE ที่สัดส่วนเดียวกัน ส่วนค่า Izod – Impact energy ลดลงทีละน้อยเมื่อมีการเติม PE ดังแสดงในตารางที่ 2.3 เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนทานต่อความชื้นของชานอ้อยคอมโพสิตกับ HDPE และที่ไม่ทำคอมโพสิตพบว่า ตัวอย่างที่มีการทำคอมโพสิตจะมีความทนทานต่อความชื้นสูงกว่า โดยพิจารณาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (% Moisture content) และความเสถียรของรูปร่าง (Dimension stability) จากงานวิจัยของ Nagaty, A., et. Al. ได้อธิบายว่าการเติมพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic polymers) ในกรณีนี้คือ HDPE จะทำให้เส้นใยชานอ้อยมีความทนทานต่อการดูดน้ำมากกว่าการเติมพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophobic polymers)

ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของคอมโพลีเมอร์จากพอลิเอทิลีนและชานอ้อย

Properties	PE (wt%)	0	5	10	15	20
Tensile strength ( $10^5$ x Pa)	(a)	4.5	5.0	7.3	10.1	9.6
	(b)	-	6.1	7.8	9.7	9.2
	(c)	-	13.7	14.6	15.0	14.2
Elongation (%)	(a)	0.9	1.0	1.2	1.3	1.8
	(b)	-	0.8	1.2	1.8	1.4
	(c)	-	2.0	2.5	2.1	2.0
Tensile modulus ( $10^5$ x Pa)	(a)	6.9	10.1	9.2	9.9	9.7
	(b)	-	8.8	9.7	9.6	9.8
	(c)	-	9.5	11.0	10.5	10.6
Izod – Impact energy	(a)	0.05	-	-	-	0.03
	(b)	-	-	-	-	0.04
	(c)	-	-	-	-	0.04

(a) HDPE; (b) MDPE; (c) LLDPE

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้

##### สารเคมี

1. รีซอร์ซินอล ความบริสุทธิ์  $\geq 99.0\%$
2. โซเดียมคาร์บอเนต ความบริสุทธิ์  $\geq 99.8\%$
3. ฟอรั่มัลดีไฮด์ ความเข้มข้น 37.0%
4. น้ำกลั่น
5. เทอร์เชียรีบิวทานอล ความเข้มข้น  $\geq 99.0\%$
6. อะซีโตน ความเข้มข้น 99.9%
7. สำลี

##### อุปกรณ์

1. บีกเกอร์
2. แท่งแก้วคน
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 5 ตำแหน่ง
4. ขวดแก้วมีฝาปิด
5. ท่อแก้วทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3.85 มิลลิเมตร ความสูง 33.15 มิลลิเมตร
6. ตู้อบ
7. เครื่องทำให้แห้งแบบสุญญากาศ
8. เครื่องไพโรไลซิส
9. เครื่องดูดซับก๊าซไนโตรเจน (Bells Japan รุ่น bell-solb-max)
10. เครื่องวัดกำลังอัด (LR Series Materials Testing Machines )
11. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น LEO 1455VP

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### ตอนที่ 1 การสังเคราะห์เรซินคอมโพสิต

ในการทดลองได้กำหนดอัตราส่วนโดยโมลของรีซอร์ซินอล : ฟอรั่มัลดีไฮด์ (R/F) = 0.500 รีซอร์ซินอล : โซเดียมคาร์บอเนต (R/C) = 200 โซเดียมคาร์บอเนต : น้ำกลั่น (C/W) = 0.00125 และรีซอร์ซินอล : น้ำกลั่น (R/W) = 0.25 โดยสังเคราะห์เรซินคอมโพสิต ดังสภาวะและเงื่อนไขในการทดลองดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงเปอร์เซ็นต์โดยมวลของสารตั้งต้นรีซอร์ซินอล-ฟอรั่มัลดีไฮด์ และสภาวะเงื่อนไขของการสังเคราะห์

สาร	F/RF (%wt)	สภาวะที่ใช้สังเคราะห์
OX	0	ไม่ไฟโรไลซิส
FOC 1	0.0897	
FOC 2	0.3587	
FOC 3	0.6278	
FOC 4	0.8968	
FOC 5	2.6905	
CX	0	ไฟโรไลซิส ที่ 1,000°C
FCC 1	0.0897	
FCC 2	0.3587	
FCC 3	0.6278	
FCC 4	0.8968	
FCC 5	2.6905	

หมายเหตุ OX : ออร์แกนิกซีโรเจล (Organic Xerogel)  
 CX : คาร์บอนซีโรเจล (Carbon Xerogel)  
 FOC : ไฟเบอร์ออร์แกนิกเจลคอมโพสิต (Fiber - Organic gel Composites)  
 FCC : ไฟเบอร์ออร์คาร์บอนคอมโพสิต (Fiber - Carbon Composites)

ตัวอย่างขั้นตอนในการสังเคราะห์ FOC1

1. ทำการเตรียมรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์คาร์บอนซีโรเจด โดยชั่งรีซอร์ซินอล 4.50663 กรัม และโซเดียมคาร์บอเนต 0.00868 กรัม ผสมให้เข้ากันได้ ในสภาพที่เป็นผงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 13.84101 กรัม ลงในบีกเกอร์และคนให้ละลาย จากนั้นจึงค่อยๆ เติมฟอร์มัลดีไฮด์ลงไป 6.64368 กรัม คนให้เป็นเนื้อเดียวกัน

2. เทสารละลายในข้อ 1 ใส่ลงในขวดแก้วมีฝาปิด จากนั้นชั่งสำลีหนัก 0.01 กรัม แล้วนำสำลีที่ชั่งนำมาถักใส่ในสารละลายโดยทำสำลีให้บาง และใส่ในสารละลายโดยให้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นวางไว้ในที่อุณหภูมิห้องจนเจลแข็งตัว แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็น 72 ชั่วโมงตามลำดับ

3. ตัดเจลเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยมีขนาด 2.5 x 2.5 x 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วบรรจุในขวดแก้วมีฝาปิด เติมตัวทำละลาย คือ เทอร์เชียรีบิวทานอล ลงในขวดแก้วให้ท่วมเจล นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4. เปลี่ยนตัวทำละลายเทอร์เชียรีบิวทานอล โดยรินตัวทำละลายเทอร์เชียรีบิวทานอลเดิมทิ้ง แล้วเติมตัวทำละลายเทอร์เชียรีบิวทานอลใหม่ลงไปแทนให้ท่วมแจ่งเจล นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และจะทำการเปลี่ยนตัวทำละลายเทอร์เชียรีบิวทานอล 1 ครั้ง ทุก 24 ชั่วโมง เป็นจำนวน 6 ครั้ง

5. นำเจลที่ผ่านการแลกเปลี่ยนตัวทำละลายแล้ว มาทำให้แห้งด้วยเครื่องทำให้แห้งแบบสุญญากาศ ได้ FOC1 พร้อมทั้งจะวิเคราะห์

6. แต่ถ้านำเป็น FCC1-FCC5 หลังจากทำให้แห้งแล้ว ต้องเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C แล้วจึงนำไปวิเคราะห์

## ตอนที่ 2 การตรวจสอบคุณลักษณะของเรซินคอมโพสิต

1. นำเรซินคอมโพสิตที่ได้ส่งดูภาพขยายโครงสร้าง ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น LEO 1455VP แล้วนำไปตรวจสอบความพรุนด้วยเครื่องดูดซับก๊าซไนโตรเจน (Bells Japan รุ่น bell-solb-max) จะได้ค่าพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก ปริมาตรรูพรุนต่อน้ำหนัก และการกระจายตัวของขนาดของรูพรุน

2. ตรวจสอบค่ากำลังอัดของเรซินคอมโพสิตด้วยเครื่อง LR Series Materials Testing Machines

## บทที่ 4

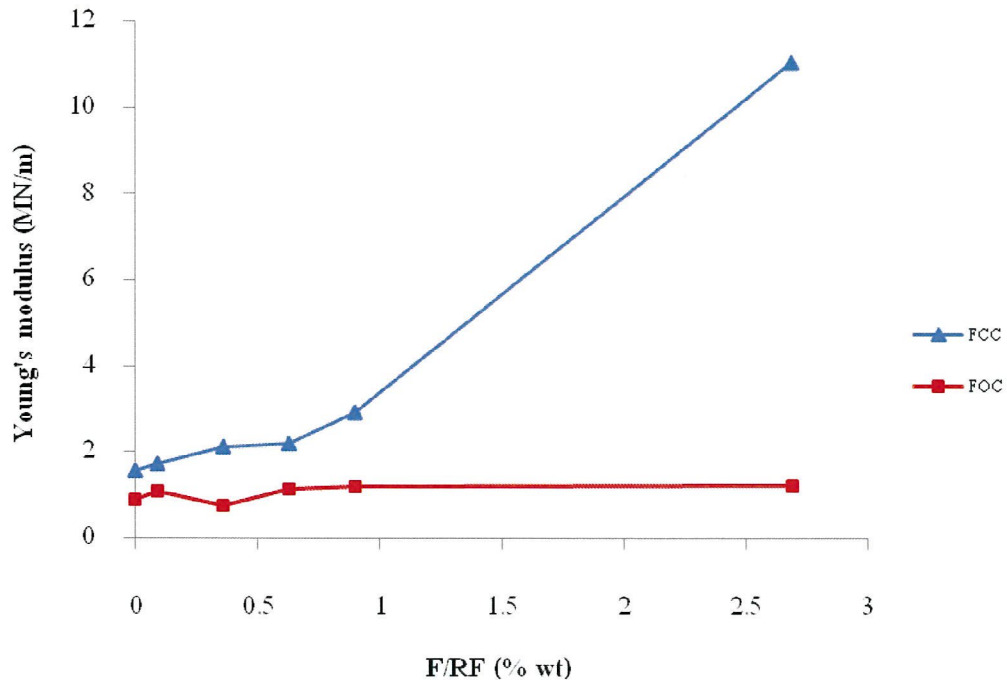
### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การทดลองนี้ เป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เจล โดยการสังเคราะห์เป็นเรซินคอมโพสิต ซึ่งมีเส้นใยเป็นตัวเสริมแรง ด้วยร้อยละโดยมวลของเส้นใยรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ ตั้งแต่ร้อยละ 0 - 2.6905 และมีการเปลี่ยนสถานะการไฟโรไลซิส กับไม่ไฟโรไลซิส เพื่อศึกษา

1. ความแข็งแรงของเรซินคอมโพสิต
2. ความหนาแน่นปรากฏของเรซินคอมโพสิต
3. สัมฐานวิทยาของเรซินคอมโพสิต
4. พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุนของเรซินคอมโพสิต โดยใช้วิธีบีอีที

#### 4.1 การหาค่าสมบัติเชิงกลของเรซินคอมโพสิต

จากรูปที่ 4.1 ในการสังเคราะห์เรซินคอมโพสิตโดยใช้เส้นใยเป็นตัวเสริมแรงให้กับรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยร้อยละโดยมวลของเส้นใยรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์(%F/RF)ต่างๆ ทั้งไม่ไฟโรไลซิส (FOC) และไฟโรไลซิส (FCC) พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเส้นใย(%F/RF) ค่ามอดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีที่มีการไฟโรไลซิส และไม่มีไฟโรไลซิสแต่มีค่าไม่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาดูปัจจัยการไฟโรไลซิส กับไม่ไฟโรไลซิส พบว่าเรซินคอมโพสิตที่ไฟโรไลซิสมีค่ามอดูลัสของยังมากกว่าเรซินคอมโพสิตที่ไม่ไฟโรไลซิส



รูปที่ 4.1 ความเค้นของ OCC และ FCC ที่ % F/RF ต่างๆ

#### 4.2 การหาค่าความหนาแน่นของเรซินคอมโพสิต

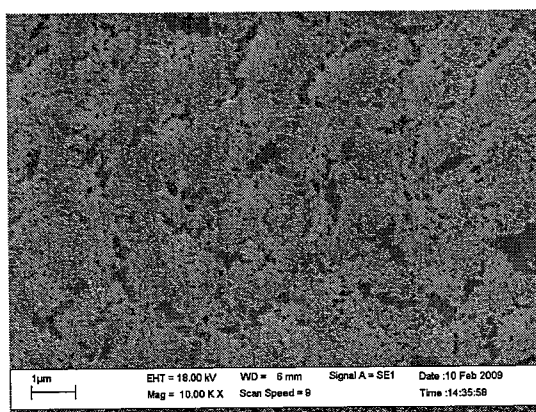
ในการทดลองผู้ทำการทดลองสังเคราะห์เรซินคอมโพสิตโดยใช้สำลีเป็นตัวเสริมแรงให้กับรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ด้วยร้อยละโดยมวลของสำลีต่อรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์(%F/RF)ต่างๆ แล้วตัดให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม จากนั้นนำมาไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส โดยค่าความหนาแน่นของเรซินคอมโพสิตก่อนการไฟโรไลซิส และหลังจากการไฟโรไลซิสแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ความหนาแน่นของเรซินคอมโพสิตหลังการไฟโรไลซิส (FCC) ที่อุณหภูมิ 1000 °C มีค่าเพิ่มขึ้นก่อนมีการไฟโรไลซิส โดยเทียบแต่ละร้อยละโดยน้ำหนักของโดยมวลของสำลีต่อรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์(%F/RF) และเมื่อพิจารณาเรซินคอมโพสิตหลังไฟโรไลซิสพบว่าคาร์บอนเจล (CX) มีความหนาแน่นน้อยกว่าเรซินคอมโพสิต (FCC)

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณความหนาแน่นของเรซินคอมโพสิต

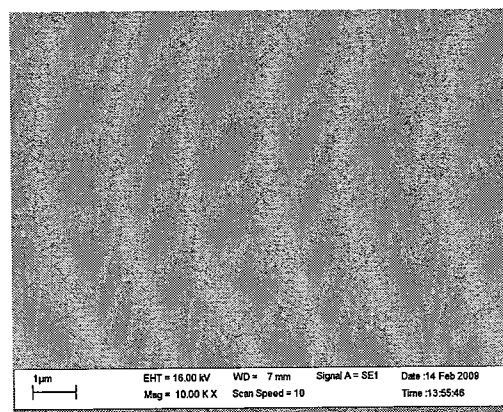
F/RF (%wt)	ก่อนไฟโรไลซิส (FOC)			หลังไฟโรไลซิส (FCC)		
	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	น้ำหนัก (g)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
0	1.3793	4.9247	0.2801	0.6352	1.1106	0.5720
0.0897	1.4000	4.7694	0.2935	0.5995	2.0349	0.2946
0.3587	1.4215	4.8017	0.3062	0.6755	1.9778	0.3415
0.6278	1.3071	4.5282	0.2887	0.5842	1.9043	0.3068
0.8968	1.2970	4.8244	0.2688	0.6205	1.9138	0.3242
2.6905	1.3095	5.0417	0.2597	0.5683	2.1546	0.2638

### 4.3 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

จากการสังเคราะห์เรซินคอมโพสิตที่มีเส้นใยลำลี เป็นตัวเสริมแรงให้กับรีซอร์ซินอล - ฟอร์มัลดีไฮด์ ที่ผ่านกระบวนการเผา และไม่เผาโดยรูปที่ 4.2 แสดงถึงฐานวิทยาของ OX และ CX พบว่า CX มีพื้นผิวเรียบกว่า OX และมีขนาด 4.3 แสดงถึงฐานวิทยาของเฟสที่เป็นเนื้อพื้น (รีซอร์ซินอล - ฟอร์มัลดีไฮด์) พบว่ามีลักษณะพรุน และเมื่อพิจารณาในเฟสของเส้นใย (ลำลี) พบว่ามีเนื้อเจล XO และ XC โดยมีลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ ยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยลำลีได้เป็นอย่างดี ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5

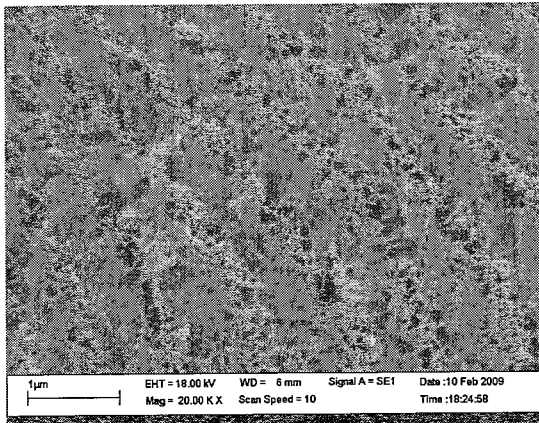


a)

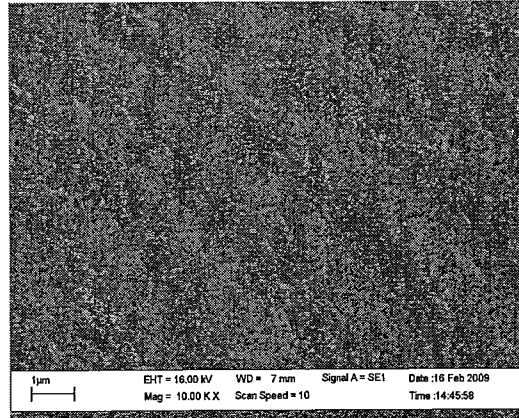


b)

รูปที่ 4.2 รูปฐานวิทยากำลังขยาย 10,000 เท่า ของ a) OX b) CX

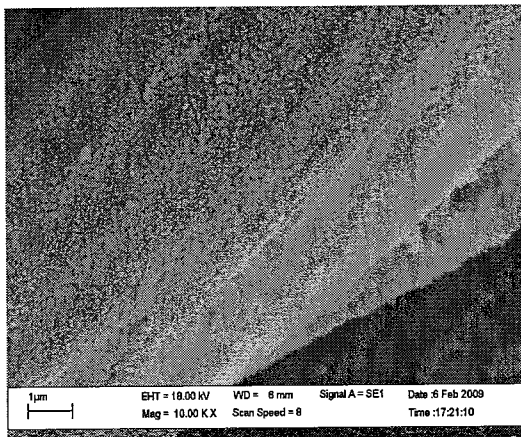


a)

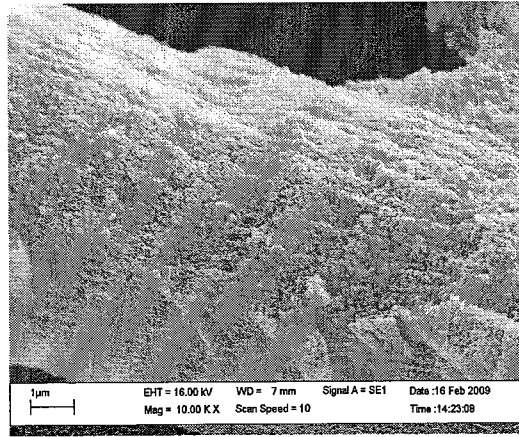


b)

รูปที่ 4.3 รูปสัณฐานวิทยา กำลังขยาย 10,000 เท่า a) FOC5 b) FCC5



a)

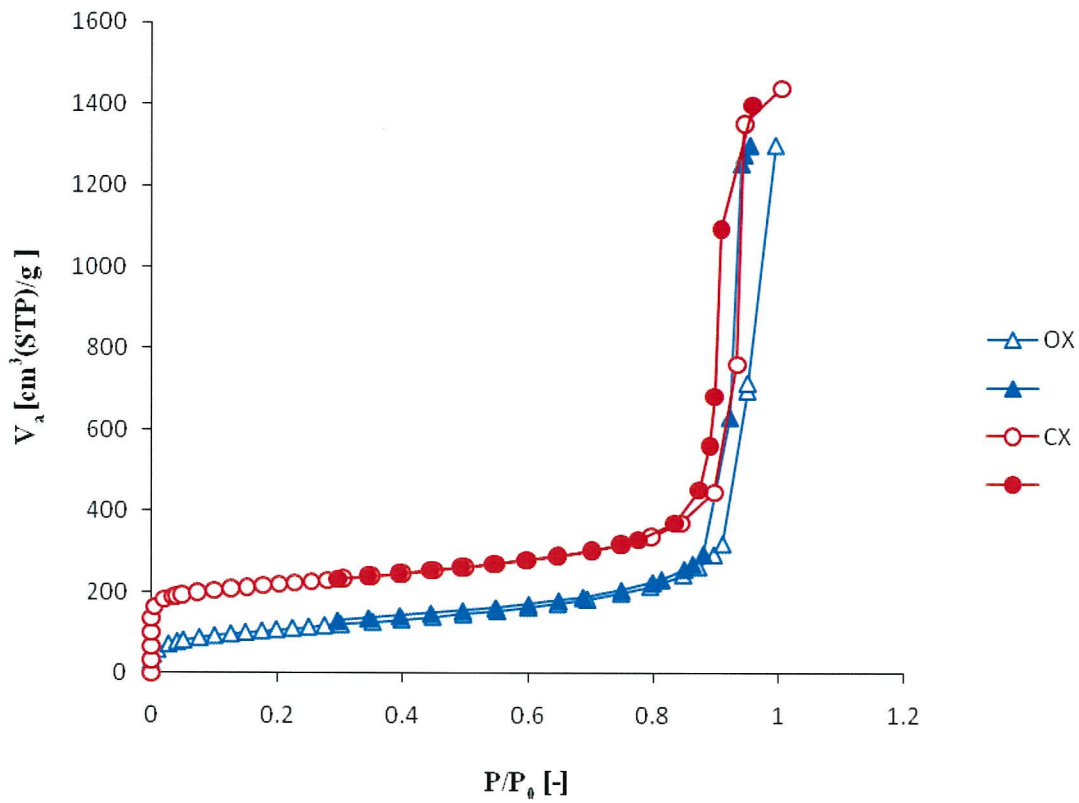


b)

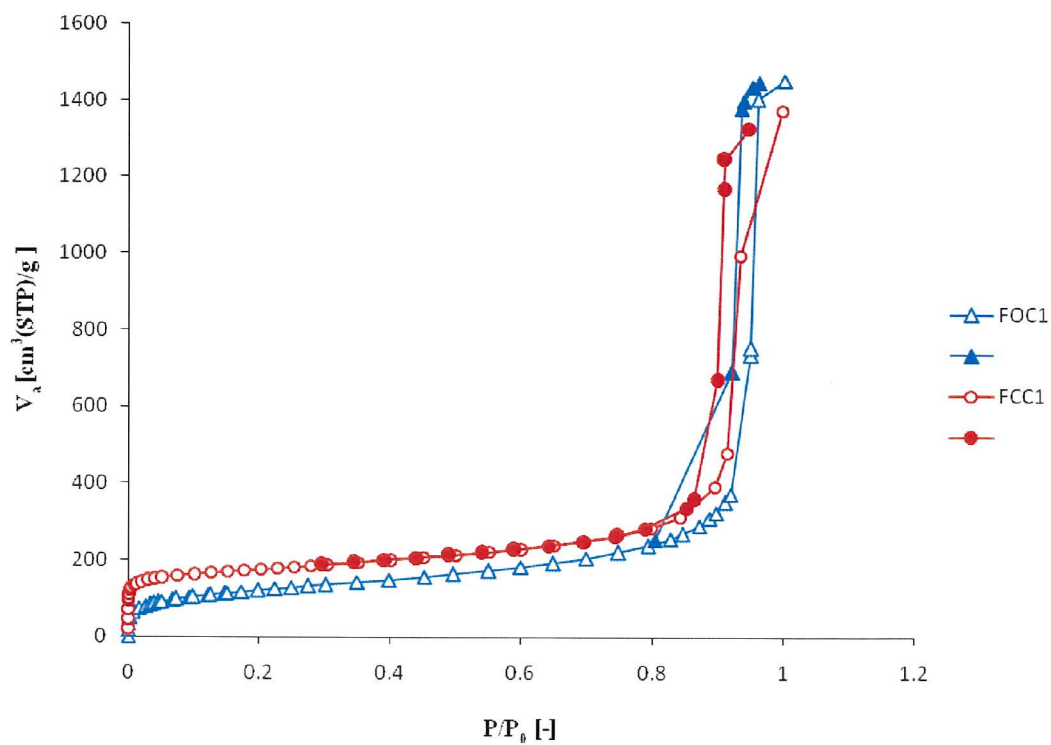
รูปที่ 4.4 รูปสัณฐานวิทยา กำลังขยาย 10,000 เท่า a) FOC5 b) FCC5

#### 4.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และการกระจายตัวของรูพรุนของเรซินคอมพอลิไตโดยใช้วิธีบีอีที

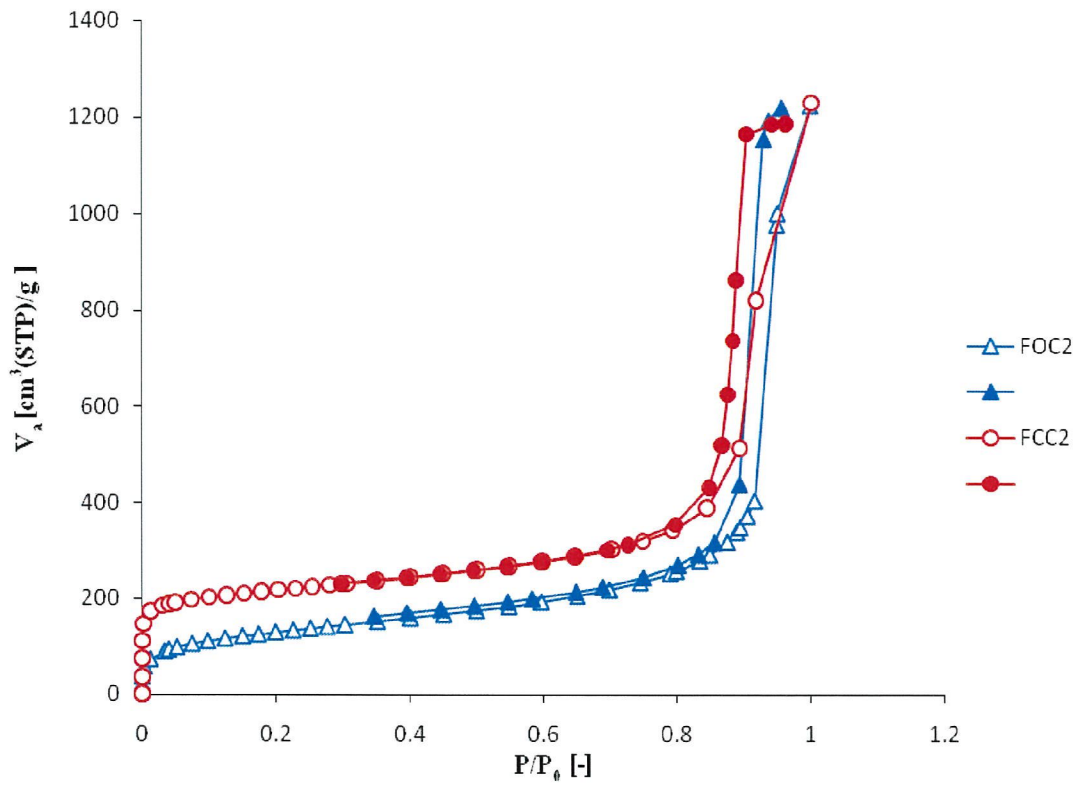
รูปที่ 4.6 ถึง 4.11 แสดงไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ OX, CX, FOC1 - FOC5 และ FCC1 - FOC5 จากรูปพบว่าเป็นไอโซเทอมชนิดที่ 4 ในระบบ IUPAC ซึ่งเป็นไอโซเทอมของวัสดุที่มีความพรุนแบบเมโซพอร์



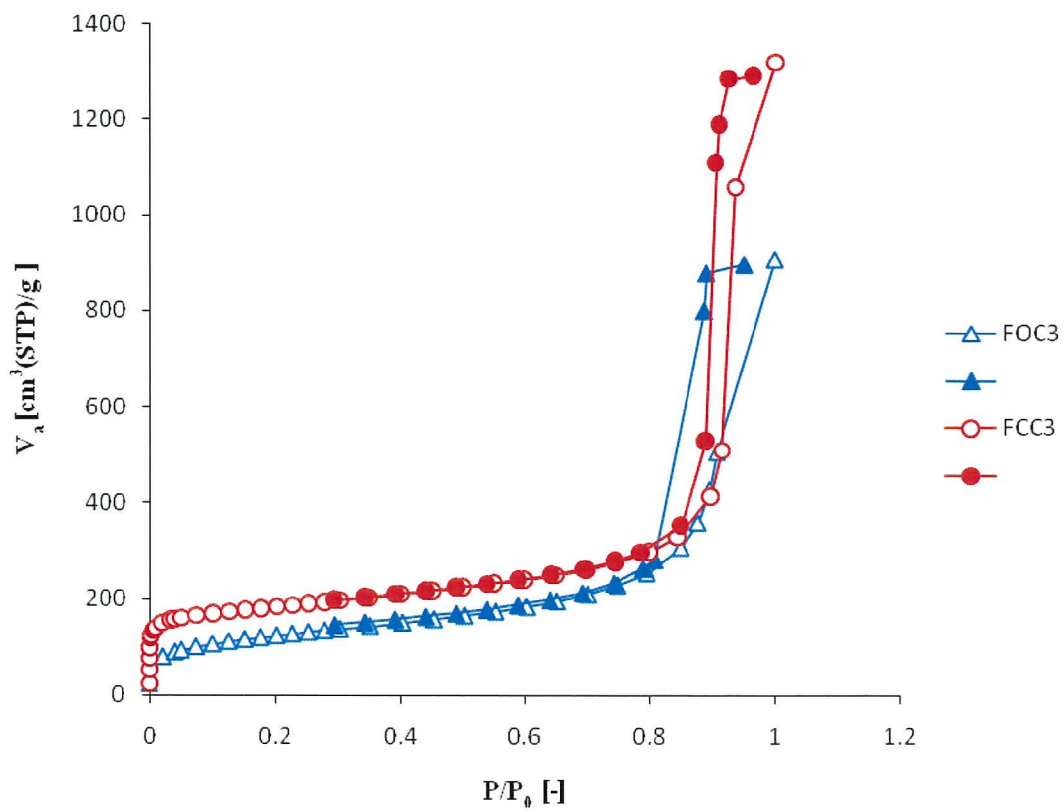
รูปที่ 4.6 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ CX และ OX



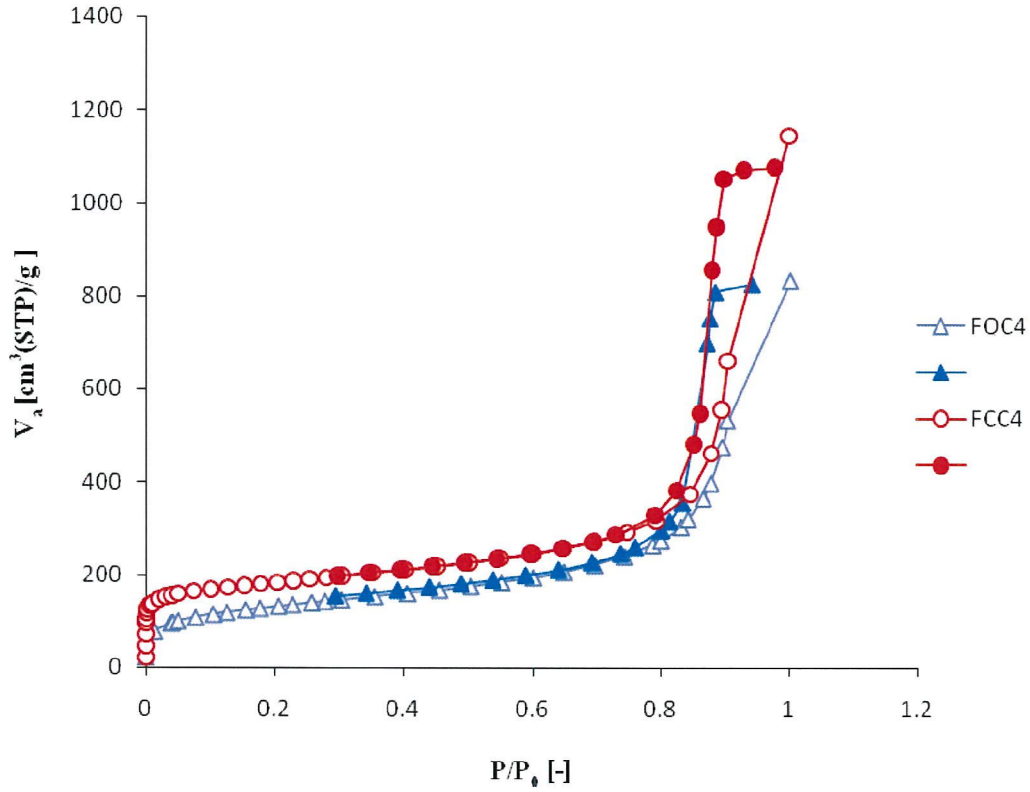
รูปที่ 4.7 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ FCC1 และ FOC1



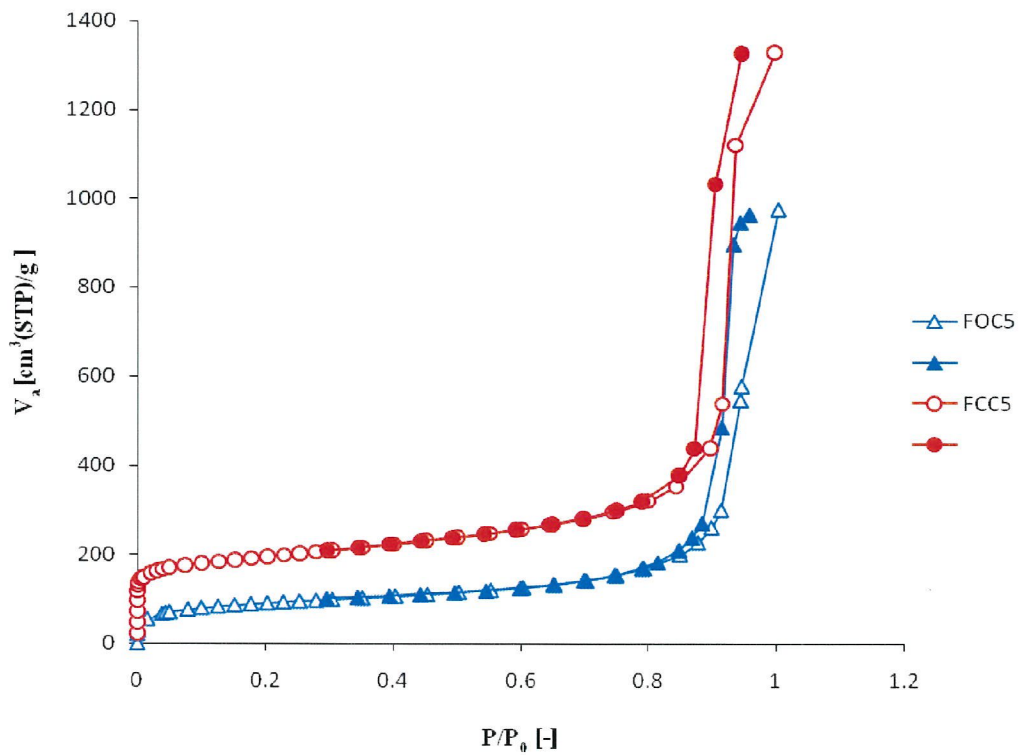
รูปที่ 4.8 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ FCC2 และ FOC2



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ FCC3 และ FOC3

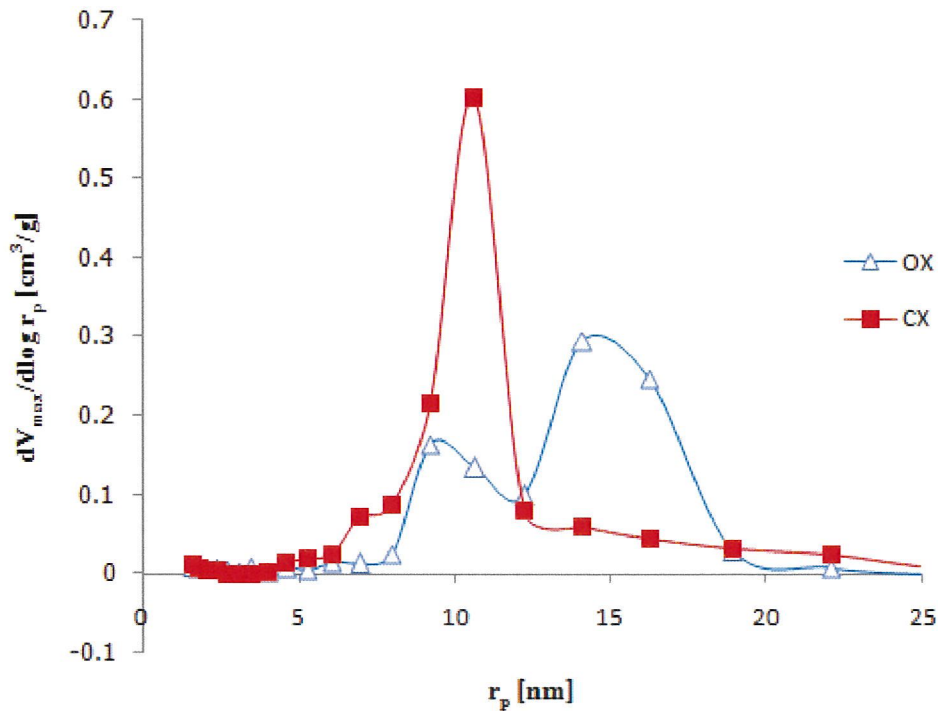


รูปที่ 4.10 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ FCC4 และ FOC4

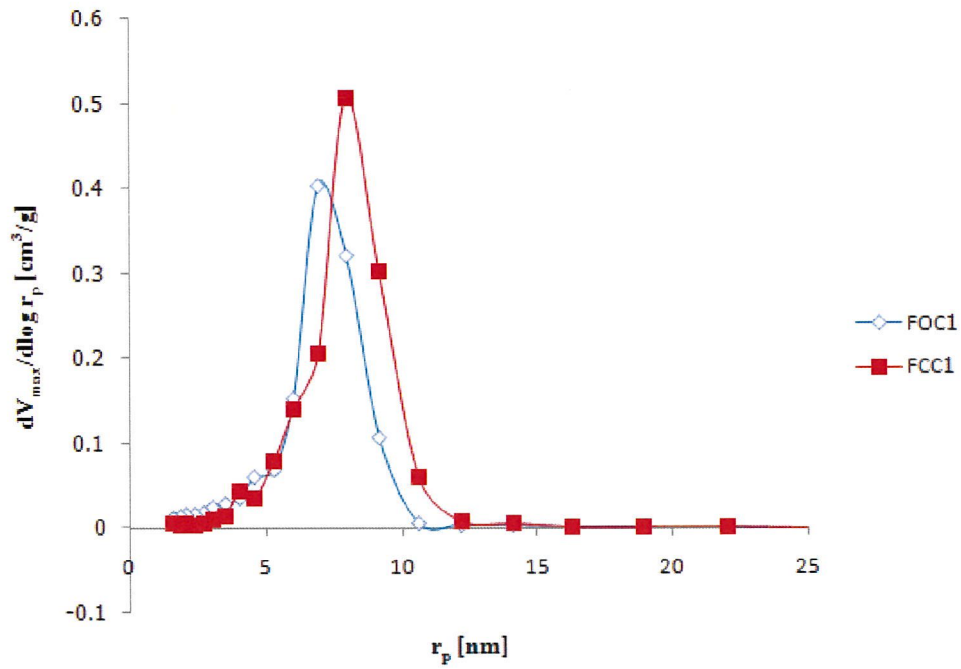


รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมของการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของ FCC5 และ FOC5

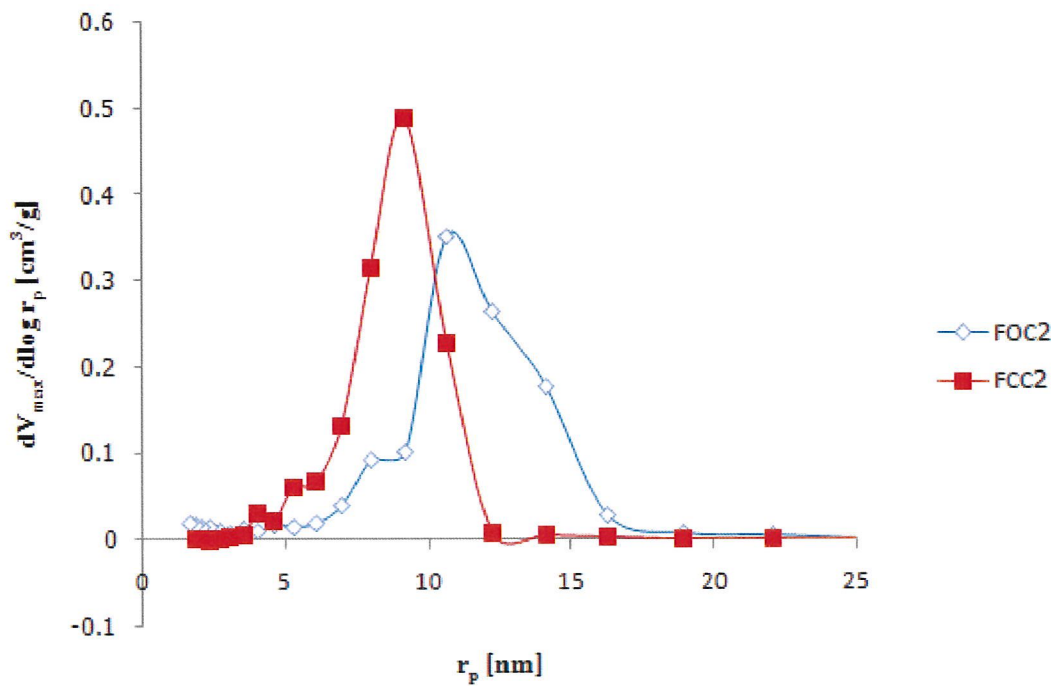
รูปที่ 4.12 ถึง 4.17 เป็นการเปรียบเทียบการกระจายตัวของขนาดรูพรุนระหว่าง FOC และ FCC ที่ร้อยละโดยมวลของสำลีต่อรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เท่ากัน ซึ่ง FCC กราฟจะมีลักษณะการกระจายตัวของขนาดรูพรุนในช่วงแคบกว่า FOC และเมื่อเปรียบเทียบการเตรียมเรซินคอมโพสิตแบบ FOC ดังรูปที่ 4.18 และ FCC ดังรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อร้อยละโดยมวลของสำลีต่อรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าการกระจายตัวของขนาดรูพรุนมีการแกว่ง จึงไม่สามารถระบุแนวโน้มได้



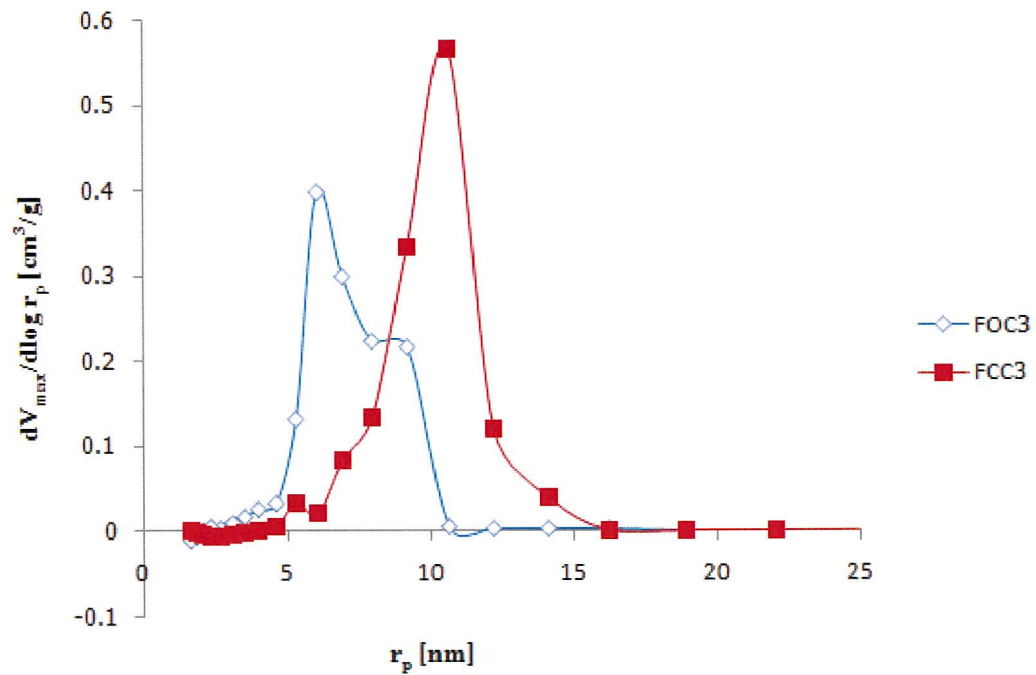
รูปที่ 4.12 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ OX และ CX



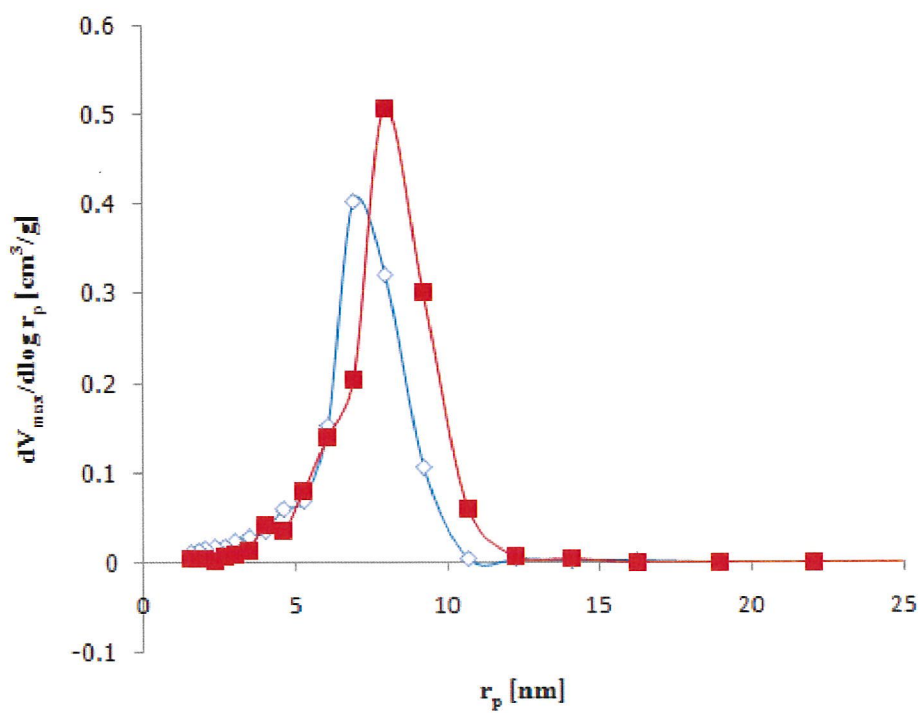
รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FOC1 และ FCC1



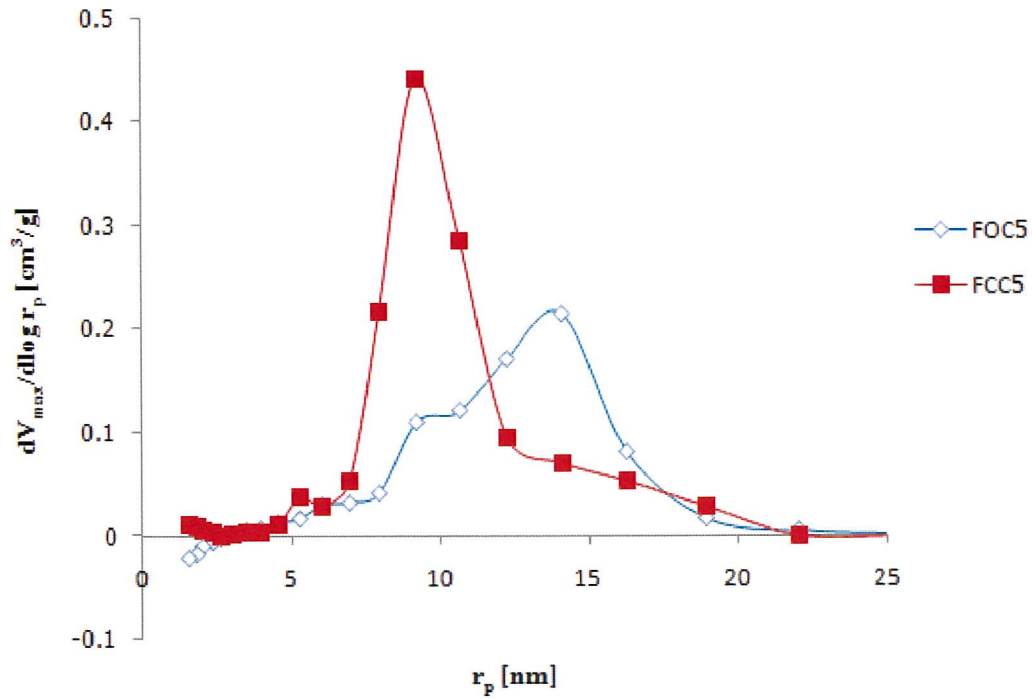
รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FOC2 และ FCC2



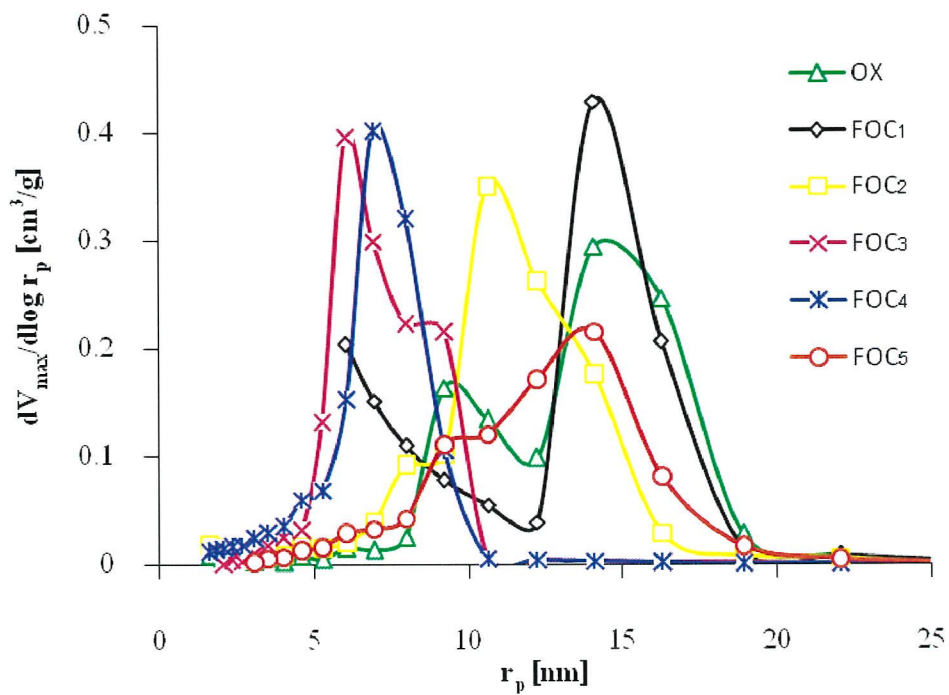
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FOC3 และ FCC3



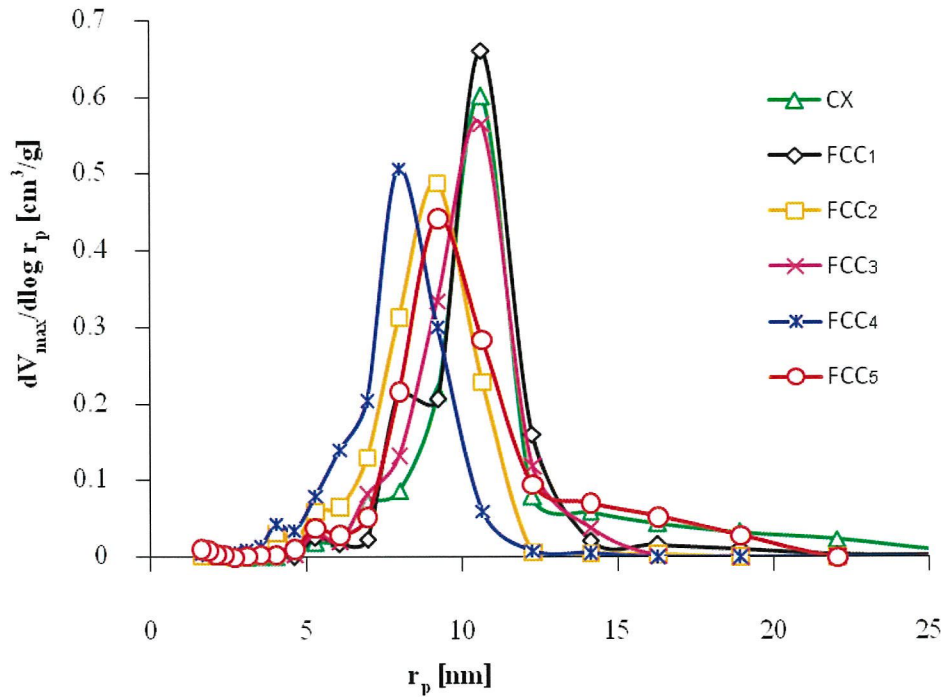
รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FOC4 และ FCC4



รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FOC5 และ FCC5



รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ OX และ FOC ค่าต่างๆ



รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ CX และ FCC ค่าต่างๆ

โดยมีค่ารัศมีของรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) และปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์ของเรซินคอมโพสิต ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่าเรซินคอมโพสิตที่ไฟโรไลซิสมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) และปริมาตรรูพรุนแบบเมโซพอร์มีแนวโน้มมากกว่าเรซินคอมโพสิตที่ไม่ไฟโรไลซิส และเรซินคอมโพสิตทั้งไฟโรไลซิส และไม่ไฟโรไลซิสมีรัศมีของรูพรุนอยู่ในช่วงเมโซพอร์

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์เรซินคอมโพสิตด้วยเครื่องดูดซับก๊าซไนโตรเจน

เรซินคอมโพสิต	พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) , (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุนแบบ เมโซพอร์ (cm <sup>3</sup> /g)	รัศมีของรูพรุน (nm)
OX	390	1.95	14.1
FCC1	440	2.13	14.1
FOC2	465	1.80	10.7
FOC3	437	1.34	6.0
FOC4	474	1.20	7.0
FOC5	326	1.45	14.1
CX	743	2.01	10.7
FCC1	601	1.99	10.7
FCC2	714	1.70	9.2
FCC3	616	1.89	10.7
FCC4	632	1.60	8.0
FCC5	661	1.90	9.2

## บทที่ 5

# สรุปและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุป

จากการทดลองการสังเคราะห์เรซินคอมโพสิต โดยมีเส้นใยสำลีเป็นตัวเสริมแรงให้กับรีซอร์-ฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งมีร้อยละโดยมวลของสำลิต่อรีซอร์ซินอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ ดังนี้ 0, 0.0897, 0.3587, 0.6278, 0.8968 และ 2.6905 และเมื่อมีการเปลี่ยนสภาวะโดยมีการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิ 1000 °C และไม่มีการไฟโรไลซิส พบว่าเมื่อสังเคราะห์เป็นเรซินคอมโพสิตโดยเพิ่มร้อยละโดยมวลของสำลิต่อรีซอร์-ฟอร์มัลดีไฮด์ ทำให้ค่าโมดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน อีกทั้งไม่สามารถระบุแนวโน้มของพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) และปริมาตรของรูพรุนแบบเมโซพอร์ได้

จากการทดสอบคุณสมบัติและเปรียบเทียบค่าระหว่างเรซินคอมโพสิตที่ไม่ไฟโรไลซิสและไฟโรไลซิสที่ 1000 °C พบว่าการไฟโรไลซิสเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าโมดูลัส ของยัง ความหนาแน่น พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) และปริมาตรของรูพรุนแบบเมโซพอร์ของเรซินคอมโพสิต มีค่าเพิ่มขึ้น

ในงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์เรซินคอมโพสิต (Fiber-carbon gel composite) ที่ความแข็งแรง และมีน้ำหนักเบาได้

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

เรซินคอมโพสิตที่สังเคราะห์ มีสมบัติความพรุนที่เกิดจากเนื้อพื้นคือรีซอร์-ฟอร์มัลดีไฮด์ และใส่เส้นใยสำลีเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล แต่ในงานวิจัยนี้เมื่อใส่เส้นใยสำลีโดยเพิ่มร้อยละโดยมวล ในอัตราที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ได้ค่าไม่แตกต่างกัน จึงควรเพิ่มเส้นใยในร้อยละโดยปริมาตรที่มากกว่านี้

ในขั้นตอนการสังเคราะห์เรซินคอมโพสิต ไม่สามารถควบคุมให้สำลีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน จึงทำให้การรับแรงของชิ้นงานในแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน อีกทั้งยังส่งผลต่อการเกิดรูพรุน จึงทำให้ไม่สามารถระบุแนวโน้มได้

งานวิจัยนี้ในขั้นตอนการตัดเรซินคอมโพสิตโดยตัดเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อนำไป การทำให้แห้งโดยแบบสูญญากาศ ทำให้มีการรอยแตกของเรซินคอมโพสิต เนื่องจากรูปทรงสี่เหลี่ยมมีส่วนที่เป็นมุม จึงไม่สามารถหัดตัวได้พร้อมกันในทุกทิศทาง ดังนั้นควรตัดเรซินคอมโพสิตให้เป็นทรงกลม

ควรออกแบบเครื่องตัดเรซินคอมโพสิตให้สามารถตัดชิ้นงานได้เรียบ ไม่มีการหลุดของเส้นใยสำลี และไม่เกิดรอยแตก อีกทั้งสามารถกำหนดขนาดความหนาของเรซินคอมโพสิตตามที่ต้องการ หรือใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูปซึ่งวิธีนี้จะลดปัญหาการตัดชิ้นงาน

ในกระบวนการทำให้แห้งแบบสุญญากาศเป็นกระบวนการที่ควรคำนึงถึงความหนาของชิ้นงาน ถ้าเรซินคอมโพสิตมีความหนามาก จะทำให้ประสิทธิภาพการทำให้แห้งลดลง และยังส่งผลให้เรซินคอมโพสิตเกิดรอยแตก เนื่องจากเกิดการหดตัวภายในกับภายนอกต่างกัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Grobe, A. **In Polymer Handbook**. 3<sup>rd</sup> ed. New York : John Wiley & Sons. 1989.
- [2] Dane, J.R. **In Encyclopedia of Polymer science and Engineering**. 2<sup>nd</sup> ed. New York : John Wiley and Sons. 1989. vol.3
- [3] G. Biesmans, A. Mertens, L. Duffours, T. Woignier and Phalippou. **Journal of Crystalline Solids**. 225(1998) : 64-69.
- [4] Shaheen A. Al-Muhtaseb and James A. Ritter. **Journal of Advanced Materials** 15(2003) : 101-114.
- [5] C. Jeffrey Brinker and George W. Scherer. **The physics and Chemistry of sol-gel Processing**. Academic Press. 1990.
- [6] กมลวรรณ บุญอารีย์. การดัดแปรฟ้ายจากเศษผ้าเพื่อใช้เป็นตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีน. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [7] Wake, W.C. **The Plastics Institute**, 1971
- [8] Saheb, D.N. and Jog, J.P. **Advances in Polymer Technology**. 18(4) (1999) : 351-363
- [9] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. วิทยาศาสตร์เส้นใย. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548
- [10] Hollen, N., Saddler, J., and Langford, A.L. **Textiles**. 5<sup>th</sup> ed. New York : Macmillan, 1979.
- [11] Cook, J. G. **Handbook of Textile**. 5<sup>th</sup> ed. Durham : Merrow, 1984
- [12] วิลเลียมส์ ดี, คาลิสเตอร์. เจ อาร์. **วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน**. กรุงเทพมหานคร : ท้อป. 2548
- [13] Samuel D. F. and Osman M.A. **Adsorption Processes for Water Treatment**. Stoneham : Butterworth Publishers. 1987
- [14] Seader J. D. and Henley E. J. **Separation Process Properties**. New York : John Wiley & Sons. 1998.
- [15] จตุพร วิทยาคุณและนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยา : พื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2547.

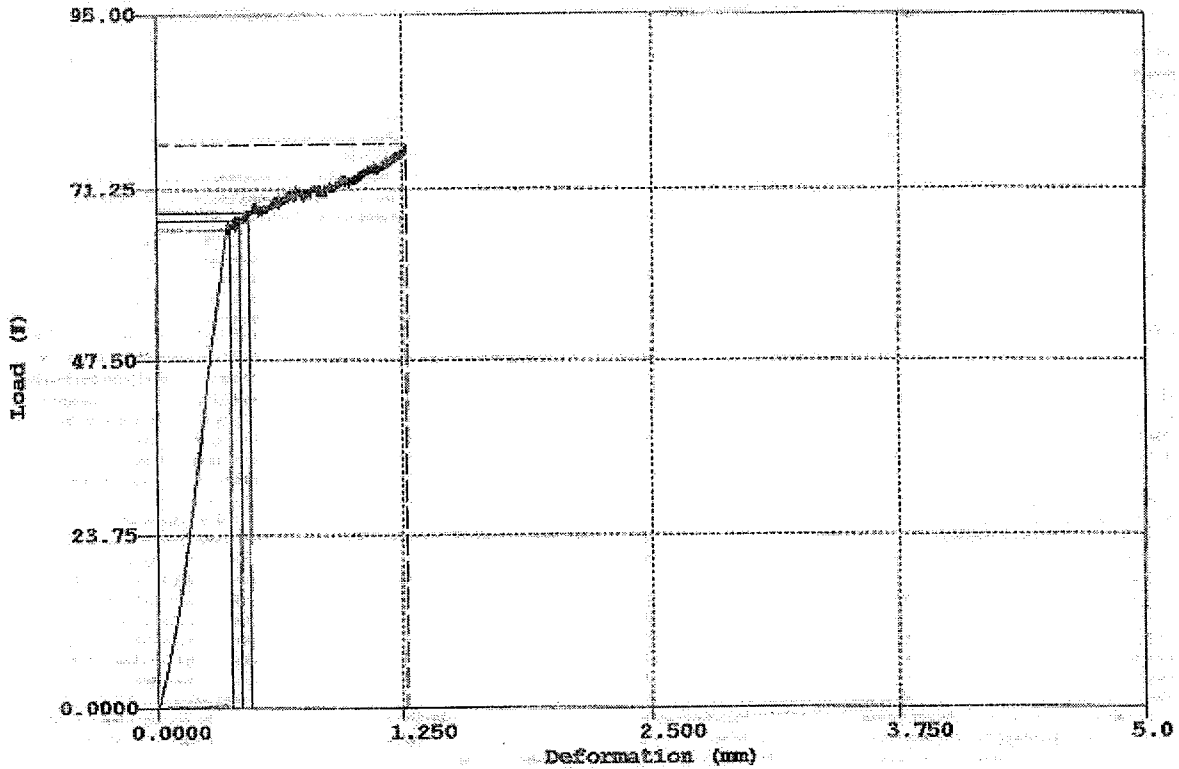
## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] R. Petrievi, M. Glora and J. Fricke. **Carbon. Sci.** 39 (2001) : 857-867
- [17] Z.L. Wang, Y.C. Li ,Zhang, Wang X.J. Wang. **Mechanics of Materials.** 40 (2008) : 418-426
- [18] Meng-Kao Yeh, Nyan-Hwa Tai, Yan-Jyun Lin. **Composites.** 39 (2008) : 677-684
- [19] Gewen Yi, Fengyuan Yan. **Wear.** 262 (2007) : 121-129
- [20] Xian, X.J.; Yipp, M. W. and Shin, F.G. **Proc.Int. Conf. Compos. Master.2** (1993) : 858-863
- [21] เฉลิมพล อธิธิวิวัฒน์ และสกุล บรรจงวุฒิ. การใช้เส้นใยเซลลูโลสผสมกับเส้นใยแก้วเพื่อเป็นสารเสริมแรงในพอลิโพรพิลีน. โครงการพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2537.
- [22] พิชัย จงสกุลชัยและศิริพงศ์ โรจน์วีระ. วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรต่อการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและพอลิโพรพิลีน. โครงการงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2533.
- [23] Raj, R.G. and Kokta, B.V. **Eur. Polym. J.** 27 (1991) : 1121-1123.
- [24] Nagaty, A., Bakr, A.B. and Monsour, O.Y. **J. Apply. Polym.Sci.** 21 (1983) : 715.

**ภาคผนวก**

**ภาคผนวก ก.**  
**การคำนวณหาค่าโมดูลัสของยัง**

รูปที่ ก.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและระยะหดตัวของ FOC 1



Fm	Rm	Agt	Rt 1	Rt 2	Rt 3	Sample Width	Sample Thick
N	N/mm <sup>2</sup>	%	N	N	N	mm	mm
77.30	0.4955	3.179	65.81	67.08	68.09	26.0000	6.00000

**ตัวอย่างการคำนวณ**

จากรูปที่ ก.1 สามารถคำนวณหาค่าความเค้น ความเครียด และโมดูลัสของยังได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ความเค้น } (\sigma) &= \frac{F}{A_0} \\
 &= \frac{65.81\text{N}}{676\text{mm}^2} \\
 &= 0.0974 \text{ N/mm}^2 \\
 &= 0.0974 \times 10^6 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเครียด } (\varepsilon) &= \frac{\Delta l}{l_0} \\ &= \frac{0.54\text{mm}}{6\text{mm}} \\ &= 0.09 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{มอดูลัสของยัง (E)} &= \frac{\sigma}{\varepsilon} \\ &= \frac{0.974 \times 10^6 \text{ N/m}^2}{0.09} \\ &= 1.08 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.1 ผลการคำนวณค่าโมดูลัสของยัง(Young's modulus)

คอมโพสิต	F/RF (%wt)	F (N)	A <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	σ (MN/m <sup>2</sup> )	Δl (mm)	l <sub>0</sub> (mm)	ε	Young's modulus (MN/m <sup>2</sup> )
CX	0	75.59	342.25	0.220861943	0.514	3.66	0.140437158	1.572674536
FCC 1	0.0897	63.57	380.25	0.167179487	0.347	3.60	0.096388889	1.734426956
FCC 2	0.3587	69.68	361.00	0.193019391	0.389	4.30	0.090465116	2.133633366
FCC 3	0.6278	79.36	342.25	0.231877283	0.361	3.44	0.104941860	2.209578539
FCC 4	0.8968	72.54	306.25	0.236865306	0.347	4.30	0.080697674	2.935218491
FCC 5	2.6905	500.00	342.25	1.460920380	0.264	2.00	0.132000000	11.067578640
OX	0	67.98	729.00	0.093251029	0.587	5.50	0.106727273	0.873731956
FOC 1	0.0897	65.81	676.00	0.097352071	0.542	6.00	0.090333333	1.077698203
FOC 2	0.3587	74.21	650.25	0.114125336	0.858	5.60	0.153214286	0.744873991
FOC 3	0.6278	74.96	650.25	0.115278739	0.602	6.00	0.100333333	1.148957531
FOC 4	0.8968	69.27	600.25	0.115401916	0.497	5.20	0.095576923	1.207424472
FOC 5	2.6905	71.40	702.25	0.101673193	0.431	5.18	0.083204633	1.221965525

**ภาคผนวก ข.**  
**ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจน**

**ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ CX และ OX**

CX				OX			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
0.000608	0.1282	0.9592	1398.9	0.000154	21.878	0.955	1299.4
0.000606	32.567	0.9089	1096.1	0.000598	30.309	0.946	1275.9
0.000668	66.098	0.8975	684.04	0.003573	45.961	0.9414	1254.1
0.00014	100.28	0.8906	563.3	0.010827	58.518	0.9225	632.51
0.00113	134.99	0.8731	454.47	0.028387	71.647	0.8802	295.9
0.006185	164.12	0.8341	372.4	0.042084	77.8	0.8632	270.83
0.021425	181.85	0.7763	331.5	0.051698	81.101	0.8499	258.23
0.035312	188.72	0.7474	319.31	0.077657	88.021	0.8139	232.94
0.040539	190.68	0.7019	304.46	0.1015	92.903	0.7999	225.74
0.04974	193.63	0.6493	291.13	0.1276	97.515	0.7502	205.87
0.07445	199.42	0.5967	280.27	0.1506	101.14	0.6892	188.9
0.1012	204.36	0.5454	270.76	0.1768	105.06	0.6502	180.35
0.1275	208.59	0.4949	262.43	0.1997	108.19	0.6014	171.09
0.1535	212.51	0.4451	254.76	0.2252	111.51	0.5498	162.62
0.1785	216.25	0.3958	247.49	0.2508	114.81	0.4977	155.13
0.2045	219.87	0.3468	240.54	0.2764	118.05	0.4467	148.42
0.2289	223.24	0.2978	233.83	0.302	121.23	0.3969	142.26
0.2553	226.83			0.3531	127.38	0.347	136.41
0.2809	230.26			0.3993	133.28	0.2977	130.76
0.3061	233.85			0.449	139.68		
0.3505	240.2			0.4978	146.5		
0.4009	247.44			0.552	154.84		
0.4504	254.85			0.6009	163.31		

CX				OX			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
0.4998	262.67			0.6489	172.54		
0.5492	270.94			0.696	183.24		
0.5978	279.93			0.7497	198.27		
0.6466	290.15			0.796	215.37		
0.703	303.86			0.8481	243.6		
0.7509	319.18			0.8725	263.54		
0.7964	338.45			0.897	293.37		
0.8448	370.89			0.911	320.21		
0.8965	447.22			0.9508	697.99		
0.9332	762.32			0.951	716.88		
0.946	1354.3			0.9962	1301.6		
1.0056	1439.9						

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ FCC 1 และ FOC 1

FCC 1				FOC 1			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
0.000029	22.081	0.9482	1327.7	0.000597	0.075113	0.9631	1447.7
0.000029	47	0.9112	1246.8	0.000724	17.087	0.9542	1436.9
-7.5E-20	71.295	0.9098	1167.5	0.000586	34.122	0.9401	1399.3
0.000264	93.426	0.8996	668.46	0.003202	50.51	0.9367	1378.9
0.000545	101.07	0.8644	357.42	0.00922	64.041	0.9224	690.54
0.001301	112.08	0.8529	335.75	0.018324	73.959	0.8041	253.3
0.00241	122.39	0.7899	281.92	0.02728	80.311		
0.002492	123.08	0.7484	264.15	0.034307	83.829		
0.004981	129.59	0.696	248.58	0.039821	86.708		

FCC 1				FOC 1			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
0.008781	133.26	0.6431	236.72	0.0465	89.379		
0.012491	138.24	0.5915	227.52	0.052536	91.52		
0.020495	144.18	0.5411	219.47	0.067883	96.163		
0.031227	149.04	0.4914	212.41	0.074538	97.965		
0.04138	152.4	0.4426	205.91	0.094007	102.59		
0.052081	155.1	0.3933	199.78	0.099726	104.03		
0.075637	159.6	0.3446	193.9	0.1221	108.41		
0.1017	163.58	0.2957	188.24	0.1259	109.3		
0.1275	167.11			0.1482	113.11		
0.153	170.33			0.1514	113.85		
0.1785	173.38			0.1737	117.38		
0.2039	176.37			0.1992	121.16		
0.2292	179.31			0.225	124.88		
0.2544	182.22			0.2502	128.47		
0.28	185.22			0.2758	132.06		
0.3049	188.22			0.302	135.66		
0.3521	193.86			0.3504	142.09		
0.4014	200.12			0.3982	148.65		
0.4519	206.64			0.4522	156.57		
0.5014	213.53			0.4967	163.36		
0.552	221.01			0.5511	172.42		
0.6004	228.81			0.6005	181.54		
0.65	237.88			0.6485	191.72		
0.6971	248.49			0.7006	204.93		
0.7446	261.9			0.7495	219.99		
0.7989	283.83			0.7943	237.53		
0.8437	312.78			0.8284	255.72		

FCC 1				FOC 1			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
0.8955	390.74			0.8465	268.1		
0.9144	479.47			0.8721	289.12		
0.9345	994.71			0.8884	308.67		
0.9989	1374.6			0.8973	323.82		
				0.911	349.78		
				0.9196	372.01		
				0.9512	734.06		
				0.9511	751.89		
				0.962	1403.3		
				1.002	1453.2		

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ FCC 2 และ FOC 2

FCC 2				FOC 2			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
0.00048	0.1863	0.9631	1187.8	3.09E-05	21.595	0.957	1220.3
0.000544	0.9315	0.9424	1185.4	0.000618	39.374	0.9378	1193
0.000479	36.954	0.9041	1165.8	0.003834	59.266	0.9305	1154.9
0.000543	74.068	0.8879	863.1	0.012668	74.823	0.8935	437.55
0.000304	111.36	0.8829	737.35	0.034407	90.881	0.8561	316.37
0.002447	147.22	0.8752	625.36	0.040787	94.771	0.8323	291.06
0.01281	173.17	0.8664	520.48	0.053255	99.799	0.8019	269.66
0.030789	184.96	0.8474	431.38	0.075855	106.66	0.7501	243.78
0.042207	189.26	0.7978	353.89	0.099402	112.44	0.6886	223.49
0.05052	191.74	0.7263	312.02	0.125	117.85	0.6488	213.35

FCC 2				FOC 2			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
0.074873	197.35	0.6951	301.17	0.1509	122.68	0.5836	199.31
0.1015	202.27	0.6484	288.26	0.1746	126.74	0.5471	192.64
0.1274	206.4	0.5964	276.81	0.2001	130.86	0.4966	184.17
0.1533	210.23	0.5449	267.23	0.2262	134.83	0.446	176.41
0.1787	213.86	0.4946	258.78	0.252	138.66	0.396	169.21
0.2044	217.36	0.445	251.17	0.277	142.47	0.3466	162.39
0.2298	220.79	0.3956	244.05	0.3029	146.29		
0.2551	224.17	0.3463	237.17	0.3518	153.29		
0.2806	227.61	0.2971	230.63	0.4011	160.47		
0.3059	231.03			0.4507	167.91		
0.3511	237.37			0.4997	175.84		
0.4014	244.38			0.5489	184.53		
0.4498	251.75			0.5975	193.94		
0.5003	259.71			0.6511	206.15		
0.5498	268.14			0.699	219.13		
0.5981	277.41			0.7457	234.44		
0.6464	288.05			0.7908	253.39		
0.7022	303.18			0.7999	258.19		
0.7489	320.09			0.8347	279.89		
0.7941	342.88			0.8493	291.89		
0.8449	388.94			0.8755	318.55		
0.894	514.18			0.8898	339.79		
0.9185	820.65			0.895	348.99		
1.0021	1230.8			0.9056	372.92		
				0.9166	404.64		
				0.9505	978.14		
				0.9514	1001.8		

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ FCC 3 และ FOC 3

FCC 3				FOC 3			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
2.09E-20	24.674	0.9669	1292	3.36E-05	23.699	0.953	897.19
2.09E-20	52.26	0.9276	1284.3	0.000853	40.807	0.8914	879.23
2.87E-05	76.147	0.9124	1188.9	0.021774	78.985	0.8879	800.33
0.000529	99.262	0.9071	1109.4	0.040831	89.159	0.809	282.43
0.001988	119.59	0.8895	528.46	0.050802	92.963	0.79	263.99
0.002419	123.72	0.8504	353.1	0.074581	99.88	0.7433	233.3
0.002507	123.92	0.7863	296.69	0.1005	105.93	0.6928	213.12
0.005528	134.1	0.7461	278.9	0.1264	110.96	0.6405	198.44
0.008126	136.96	0.6948	262.64	0.1518	115.39	0.5895	187.58
0.009919	139.65	0.6421	250.07	0.1775	119.38	0.5396	178.3
0.021201	149.76	0.5906	240.05	0.2028	123.27	0.49	170.61
0.035364	156.02	0.5402	231.51	0.2284	126.72	0.4411	163.95
0.04093	157.92	0.4908	223.96	0.2537	130.23	0.3919	157.82
0.050725	160.64	0.4417	216.94	0.279	133.49	0.3433	151.92
0.075436	165.82	0.3929	210.26	0.3042	136.89	0.2945	146.36
0.1016	170.15	0.3442	203.83	0.3527	143.09		
0.1284	174.09	0.2954	197.62	0.4046	149.74		
0.1528	177.37			0.4547	156.86		
0.1783	180.72			0.5041	164.53		
0.2038	183.95			0.5546	173.15		
0.229	187.14			0.6041	183.06		
0.2542	190.37			0.6525	194.64		
0.2796	193.58			0.7017	209.08		
0.3049	196.83			0.7495	227.64		
0.352	203.08			0.7964	253.01		
0.4021	209.9			0.8502	305.85		

FCC 3				FOC 3			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
0.452	216.83			0.877	357.78		
0.5018	224.21			0.8963	427		
0.5516	232.03			0.9086	505.79		
0.6009	240.7			1.0013	906.7		
0.65	250.34						
0.6984	261.59						
0.7455	275.68						
0.8001	298.48						
0.8443	328.59						
0.8973	414.36						
0.9161	509.24						
0.9384	1058.6						

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ FCC 4 และ FOC 4

FCC 4				FOC 4			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
5.24E-06	21.519	0.979	1077	2.89E-05	23.718	0.9448	825.31
9.6E-06	46.221	0.9309	1070.6	0.000615	40.763	0.8877	808.99
3.36E-05	70.946	0.8993	1051.8	0.01342	79.232	0.8791	752.4
0.000284	95.358	0.8882	949.25	0.039278	96.7	0.8746	699.58
0.000581	105	0.8809	856.51	0.041842	97.969	0.8352	355.66
0.001403	116.38	0.8618	548.27	0.050255	101.3	0.8154	315.76
0.002485	126.31	0.8522	482.35	0.077413	109.29	0.8029	296.29
0.005607	133.69	0.8258	382.94	0.105	115.57	0.7623	259.96
0.008977	137	0.7921	330.47	0.1259	119.85	0.7392	245.87

FCC 4				FOC 4			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
0.010194	137.09	0.7307	287.28	0.1551	125.01	0.6944	226.84
0.020608	146.86	0.6969	273.58	0.1771	128.68	0.6424	211.04
0.030829	152.16	0.6478	258.78	0.2061	133.14	0.5906	198.92
0.040503	155.71	0.5962	246.54	0.2279	136.4	0.5398	189.12
0.050803	158.74	0.5446	236.4	0.2573	140.62	0.4902	180.91
0.074835	164.1	0.4941	227.51	0.2776	143.64	0.4409	173.57
0.1011	168.81	0.4441	219.53	0.3035	147.34	0.3917	166.78
0.1271	172.88	0.3953	212.12	0.3556	154.16	0.3431	160.6
0.1527	176.62	0.3456	205.09	0.4059	161.23	0.2945	154.4
0.1783	180.18	0.2968	198.39	0.4556	168.59		
0.2036	183.64			0.5045	176.61		
0.2289	187.09			0.5525	185.29		
0.2544	190.54			0.6014	195.3		
0.2796	194.06			0.6498	207.42		
0.305	197.63			0.6981	222.03		
0.3516	203.98			0.7446	240.75		
0.4019	211.35			0.7883	265.31		
0.4515	218.96			0.8013	274.9		
0.5014	227.04			0.8323	304.35		
0.5509	235.94			0.8432	320.78		
0.5998	245.72			0.8668	365.92		
0.6482	257.04			0.8789	398.38		
0.6954	270.87			0.8967	475.66		
0.7485	291.68			0.9045	532.94		
0.7937	318.08			1.0031	832.66		
0.8462	375.23						
0.8788	462.99						

FCC 4				FOC 4			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
0.9047	661.31						

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างไอโซเทอมของ FCC 5 และ FOC 5

FCC 5				FOC 5			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
4.48E-06	22.689	0.9476	1328.2	0.000408	0.8776	0.9602	965.35
7.52E-06	47.797	0.906	1032.5	0.000304	21.672	0.946	947.86
2.07E-05	72.329	0.8727	438.03	0.00114	29.011	0.9354	898.42
0.000162	96.68	0.8492	378.48	0.015628	55.751	0.9161	487.2
0.000747	117.37	0.7907	319.71	0.038693	67.145	0.8853	271.63
0.001689	130.1	0.7512	299.86	0.044318	68.998	0.8693	239
0.002482	136.94	0.6989	281.55	0.050459	70.841	0.849	211.21
0.00553	144.25	0.6453	267.55	0.079	76.951	0.8158	183.24
0.008863	147.52	0.5934	256.42	0.1003	80.384	0.7913	170.19
0.010117	147.56	0.5432	246.89	0.126	83.588	0.751	154.66
0.020895	157.72	0.4931	238.43	0.1518	86.54	0.7035	142.49
0.030872	163	0.4439	230.48	0.177	89.048	0.6529	132.96
0.040194	166.55	0.3947	222.94	0.2029	91.326	0.5995	125.74
0.050365	169.55	0.3456	215.9	0.2283	93.453	0.546	119.84
0.075152	175.08	0.2966	209.11	0.2534	95.464	0.4966	115.32
0.1015	179.87			0.2791	97.423	0.4429	111.37
0.1275	183.88			0.3047	99.351	0.3946	108.18
0.153	187.7			0.3524	102.91	0.3441	105.14
0.1784	191.37			0.4042	106.82	0.2951	102.43
0.2039	194.83			0.4542	111		

FCC 5				FOC 5			
Adsorption		Desorption		Adsorption		Desorption	
P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]	P/P <sub>0</sub>	V <sub>a</sub> [cm <sup>3</sup> (STP)/g]
0.2293	198.36			0.5037	115.56		
0.2545	201.87			0.5539	120.57		
0.28	205.4			0.6033	126.55		
0.3054	208.95			0.6523	133.57		
0.3519	215.71			0.7002	142.35		
0.4023	223.08			0.7478	153.84		
0.4521	230.79			0.794	169.23		
0.502	238.86			0.8504	199.88		
0.5519	247.53			0.8787	227.36		
0.6012	257.05			0.8998	260.63		
0.6503	267.78			0.915	300.22		
0.6987	280.15			0.9457	546.41		
0.7457	295.62			0.9476	578.02		
0.8	320.15			1.0053	975.46		
0.8446	352.15						
0.8972	438.55						
0.9169	537.65						
0.9377	1120.2						
0.9996	1330.1						

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลที่ได้จากการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ CX และ OX

CX		OX	
$r_p$ [nm]	$dV_{max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	$r_p$ [nm]	$dV_{max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]
95.27	0.00016685	95.27	0.000010108
83.877	0.00021538	83.877	0.000013047
71.895	0.00029322	71.895	0.000017763
61.314	0.00040409	61.314	0.000024479
53.044	0.00053952	53.044	0.000032684
46.13	0.00071472	46.13	0.000043297
39.006	0.0010047	39.006	0.000060861
33.814	0.0013563	33.814	0.000082165
29.501	0.0018261	29.501	0.00011063
25.548	0.0078824	25.548	0.0001513
22.072	0.023731	22.072	0.007505
18.936	0.032464	18.936	0.028174
16.287	0.044179	16.287	0.2465
14.125	0.059227	14.125	0.2948
12.244	0.079721	12.244	0.098919
10.651	0.6017	10.651	0.1345
9.2279	0.2149	9.2279	0.1639
7.985	0.086809	7.985	0.025408
6.9462	0.071406	6.9462	0.013292
6.0589	0.024793	6.0589	0.015392
5.2867	0.019527	5.2867	0.004857
4.6128	0.013912	4.6128	0.0077614
4.0284	0.0011474	4.0284	0.0022332
3.5256	0.00036618	3.5256	0.0059666
3.0877	0.00018352	3.0877	0.0026521
2.7075	-0.00037152	2.7075	0.0050327
2.3795	0.003129	2.3795	0.0063523

CX		OX	
$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]
2.0972	0.0043212	2.0972	0.0065243
1.8527	0.0073736	1.8527	0.0076997
1.6395	0.010687	1.6395	0.0086364

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลที่ได้จากการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FCC 1 และ FOC 1

FCC 1		FOC 1	
$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]
95.27	0.000578	95.27	2.38E-05
83.877	0.000746	83.877	3.08E-05
71.895	0.001015	71.895	4.19E-05
61.314	0.001399	61.314	5.77E-05
53.044	0.001868	53.044	7.71E-05
46.13	0.000671	46.13	0.000102
39.006	7.54E-05	39.006	0.000144
33.814	0.000133	33.814	0.000194
29.501	0.000213	29.501	0.000261
25.548	0.000318	25.548	0.000357
22.072	0.000448	22.072	0.000486
18.936	0.000626	18.936	0.001034
16.287	0.000871	16.287	0.002107
14.125	0.005429	14.125	0.002823
12.244	0.007922	12.244	0.003797
10.651	0.059866	10.651	0.005091
9.2279	0.3013	9.2279	0.1062
7.985	0.5068	7.985	0.3215
6.9462	0.205	6.9462	0.4032
6.0589	0.1402	6.0589	0.1534

FCC 1		FOC 1	
$r_p$ [nm]	$dV_{max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	$r_p$ [nm]	$dV_{max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]
5.2867	0.079913	5.2867	0.068656
4.6128	0.03517	4.6128	0.059734
4.0284	0.042877	4.0284	0.035661
3.5256	0.013917	3.5256	0.029595
3.0877	0.009592	3.0877	0.024384
2.7075	0.006268	2.7075	0.01781
2.3795	0.0031	2.3795	0.017154
2.0972	0.005209	2.0972	0.015354
1.8527	0.004338	1.8527	0.013931
1.6395	0.005735	1.6395	0.011837

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลที่ได้จากการดูดซับก๊าซในโตรเจนเพื่อนำไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FCC 2 และ FOC 2

FCC 2		FOC 2	
$r_p$ [nm]	$dV_{max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	$r_p$ [nm]	$dV_{max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]
95.27	0.000208	95.27	0.000208
83.877	0.000269	83.877	0.000269
71.895	0.000366	71.895	0.000366
61.314	0.000505	61.314	0.000505
53.044	0.000674	53.044	0.000674
46.13	0.000893	46.13	0.000893
39.006	0.001255	39.006	0.001255
33.814	0.001694	33.814	0.001694
29.501	0.002254	29.501	0.002254
25.548	0.000254	25.548	0.000254
22.072	0.000364	22.072	0.000364
18.936	0.000847	18.936	0.000847
16.287	0.003702	16.287	0.003702

FCC 2		FOC 2	
$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]
14.125	0.004977	14.125	0.004977
12.244	0.006716	12.244	0.006716
10.651	0.2288	10.651	0.2288
9.2279	0.4887	9.2279	0.4887
7.985	0.3137	7.985	0.3137
6.9462	0.1305	6.9462	0.1305
6.0589	0.066333	6.0589	0.066333
5.2867	0.059779	5.2867	0.059779
4.6128	0.020896	4.6128	0.020896
4.0284	0.031527	4.0284	0.031527
3.5256	0.00514	3.5256	0.00514
3.0877	0.003372	3.0877	0.003372
2.7075	0.001001	2.7075	0.001001
2.3795	-0.00062	2.3795	-0.00062
2.0972	0.001928	2.0972	0.001928
1.8527	0.001546	1.8527	0.001546
1.6395	0.002203	1.6395	0.002203

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลที่ได้จากการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FCC 3 และ FOC 3

FCC 3		FOC 3	
$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]
95.27	0.000146	95.27	3.73E-05
83.877	0.000189	83.877	4.81E-05
71.895	0.000257	71.895	6.55E-05
61.314	0.000355	61.314	9.02E-05
53.044	0.000474	53.044	0.00012
46.13	0.000628	46.13	0.00016

FCC 3		FOC 3	
$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]
39.006	0.000882	39.006	0.000224
33.814	0.001191	33.814	0.000303
29.501	0.000635	29.501	0.000408
25.548	0.000519	25.548	0.000558
22.072	0.000715	22.072	0.000922
18.936	0.000988	18.936	0.001555
16.287	0.001358	16.287	0.00212
14.125	0.03877	14.125	0.002846
12.244	0.1195	12.244	0.003836
10.651	0.5656	10.651	0.005153
9.2279	0.3345	9.2279	0.2165
7.985	0.133	7.985	0.2239
6.9462	0.082794	6.9462	0.2998
6.0589	0.020214	6.0589	0.3966
5.2867	0.032966	5.2867	0.1323
4.6128	0.004376	4.6128	0.032055
4.0284	-0.00016	4.0284	0.025378
3.5256	-0.00109	3.5256	0.017839
3.0877	-0.00388	3.0877	0.010189
2.7075	-0.00681	2.7075	0.002714
2.3795	-0.00515	2.3795	0.004656
2.0972	-0.00399	2.0972	9.56E-05
1.8527	-0.00231	1.8527	-0.0055
1.6395	-0.00038	1.6395	-0.01045

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลที่ได้จากการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FCC 4 และ FOC 4

FCC 4		FOC 4	
$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]
95.27	0.000578	95.27	2.38E-05
83.877	0.000746	83.877	3.08E-05
71.895	0.001015	71.895	4.19E-05
61.314	0.001399	61.314	5.77E-05
53.044	0.001868	53.044	7.71E-05
46.13	0.000671	46.13	0.000102
39.006	7.54E-05	39.006	0.000144
33.814	0.000133	33.814	0.000194
29.501	0.000213	29.501	0.000261
25.548	0.000318	25.548	0.000357
22.072	0.000448	22.072	0.000486
18.936	0.000626	18.936	0.001034
16.287	0.000871	16.287	0.002107
14.125	0.005429	14.125	0.002823
12.244	0.007922	12.244	0.003797
10.651	0.059866	10.651	0.005091
9.2279	0.3013	9.2279	0.1062
7.985	0.5068	7.985	0.3215
6.9462	0.205	6.9462	0.4032
6.0589	0.1402	6.0589	0.1534
5.2867	0.079913	5.2867	0.068656
4.6128	0.03517	4.6128	0.059734
4.0284	0.042877	4.0284	0.035661
3.5256	0.013917	3.5256	0.029595
3.0877	0.009592	3.0877	0.024384
2.7075	0.006268	2.7075	0.01781
2.3795	0.0031	2.3795	0.017154

FCC 4		FOC 4	
$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]
2.0972	0.005209	2.0972	0.015354
1.8527	0.004338	1.8527	0.013931
1.6395	0.005735	1.6395	0.011837

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลที่ได้จากการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเพื่อนำไปสร้างกราฟการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ FCC 5 และ FOC 5

FCC 5		FOC 5	
$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]
95.27	6.9E-06	95.27	4.24E-05
83.877	8.9E-06	83.877	5.47E-05
71.895	1.21E-05	71.895	7.44E-05
61.314	1.67E-05	61.314	0.000103
53.044	2.23E-05	53.044	0.000137
46.13	2.95E-05	46.13	0.000181
39.006	4.15E-05	39.006	0.000255
33.814	5.61E-05	33.814	0.000344
29.501	7.55E-05	29.501	0.000464
25.548	0.000103	25.548	0.002208
22.072	0.000141	22.072	0.004844
18.936	0.028447	18.936	0.017032
16.287	0.053096	16.287	0.081348
14.125	0.070976	14.125	0.2154
12.244	0.095277	12.244	0.1715
10.651	0.2844	10.651	0.1205
9.2279	0.4423	9.2279	0.1108
7.985	0.2165	7.985	0.04213
6.9462	0.052323	6.9462	0.032691
6.0589	0.028858	6.0589	0.029211

FCC 5		FOC 5	
$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	$r_p$ [nm]	$dV_{\max}/d\log r_p$ [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]
5.2867	0.038232	5.2867	0.016079
4.6128	0.010485	4.6128	0.013363
4.0284	0.002997	4.0284	0.006774
3.5256	0.003385	3.5256	0.005011
3.0877	0.001367	3.0877	0.002136
2.7075	8.39E-05	2.7075	-0.0028
2.3795	0.003024	2.3795	-0.00519
2.0972	0.004369	2.0972	-0.00915
1.8527	0.009414	1.8527	-0.01727
1.6395	0.011289	1.6395	-0.0221