

การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของเกล็ดผสมกากกาแฟต่อคุณสมบัติทางกลและกายภาพของ
วัสดุไมซีเลียคอมโพสิตสำหรับโคมบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้

กัลยรัตน์ พุฒวงศ์สกุล

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
บัณฑิตศึกษา สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีการศึกษา 2568

AN INFLUENCE OF PARTICLE SIZE OF RICE HUSK AND SPENT COFFEE GROUNDS ON
MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF MYCELIUM-BASED COMPOSITE FOR
BIODEGRADABLE FOAM PACKAGING MATERIALS

Kanyarat Puttawongsakul

TNI

A thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate Studies

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2025

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของแกลบผสมกากกาแฟต่อ
คุณสมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุไมซีลเลียมคอมโพสิต
สำหรับโฟมบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้

โดย

กัลยรัตน์ พุ่มวงศ์สกุล

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์เพชร สระทองอ่อน

บัณฑิตศึกษา สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

.....รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วรารกร ศรีเชวงทรัพย์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.แคลิยา ปัทมพรหม)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์อัญชลี สุพิทักษ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.จันทวัฒน์ ไชยชนะวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์เพชร สระทองอ่อน)

กัลยรัตน์ พุฒวงศ์สกุล: การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของแกลบผสมกากกาแฟต่อคุณสมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตสำหรับโฟมบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้. อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์เพชร สระทองอุ่น, 79 หน้า.

งานวิจัยนี้พัฒนาวัสดุไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต (MBC) จากกากกาแฟ-แกลบเพื่อเป็นทางเลือกในการเพิ่มมูลค่ากากกาแฟและแกลบ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือเพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของแกลบที่ผสมในกากกาแฟสำหรับเป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุ MBC ต่อการเจริญเติบโตของไมซีเลียม คุณสมบัติทางกลและอัตราการดูดซึมน้ำโดยกำหนดอัตราส่วนของกากกาแฟ-แกลบ = 70:30 ชิ้นงาน MBC กากกาแฟ-แกลบถูกจำแนกตามเวลาที่บดแกลบเป็น 3 กลุ่มคือ 1. MBC/SCG-RHG-60sec จากกากกาแฟ-แกลบบดที่เวลา 60 วินาที 2. MBC/SCG-RHG-120sec จากกากกาแฟ-แกลบบดที่ 120 วินาที และ 3. MBC/SCG-RH จากกากกาแฟ-แกลบที่ไม่ผ่านการบด ผลการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนจานเพาะ พบว่าเส้นใยไมซีเลียมที่เติบโตบน SCG-RH มีการแผ่ขยายในแนวนอนได้ดีกว่าแต่มีความหนาแน่นของเส้นใยที่ต่ำทำให้เส้นใยไมซีเลียมมีความแข็งแรงน้อยกว่าที่เติบโตบน SCG-RHG องค์ประกอบทางเคมีของ RH และ RHG ถูกตรวจสอบด้วยวิธีการ Chesson Datta พบว่าเมื่อบดแกลบด้วยระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นทำให้เฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้นและลิกนินลดลงซึ่งสอดคล้องกับการเจริญเติบโตที่ช้าของเส้นใยไมซีเลียมใน MBC/SCG-RH เนื่องจากมีลิกนินเป็นส่วนประกอบมากและความพรุนจากแกลบสูงกว่า MBC/SCG-RHG ดังนั้นเส้นใยไมซีเลียมจึงมีความหนาแน่นน้อยส่งผลต่อการยึดเกาะอนุภาคของ MBC/SCG-RH ที่น้อยลงและความต้านทานแรงกดต่ำ (0.164 ± 0.019 MPa) ในทางกลับกันการบดแกลบทำให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดีช่วยยึดเกาะวัสดุได้ดีเนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรงมากขึ้น โดย MBC/SCG-RHG-120sec มีความต้านทานแรงกดอยู่ที่ 0.235 ± 0.074 MPa อีกทั้งยังสามารถลดการดูดซึมน้ำของวัสดุได้ประมาณ 58.06% เนื่องจากการอัดแน่นของอนุภาคและเส้นใยไมซีเลียมที่หนาแน่น ส่งผลให้น้ำซึมผ่านได้ยากจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ MBC ด้วยเทคนิค FTIR พบพีคของไคตินและโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบของไมซีเลียม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการบดอนุภาคแกลบสามารถลดการดูดซึมน้ำและเพิ่มความแข็งแรงให้กับ MBC เพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้เป็นแนวทางในการผลิตโฟม MBC จากกากกาแฟและแกลบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้น

บัณฑิตศึกษา

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2568

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

KANYARAT PUTTAWONGSAKUL: AN INFLUENCE OF PARTICLE SIZE OF RICE HUSK AND SPENT COFFEE GROUNDS ON MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF MYCELIUM-BASED COMPOSITE FOR BIODEGRADABLE FOAM PACKAGING MATERIALS. ADVISOR: ASST. PROF. DR. PIMPET SRATONG-ON, 79 PP.

This research developed mycelium biocomposites (MBC) from spent coffee grounds mixed with rice husks (MBC/SCG-RH) as a means of agricultural waste valorization. The study investigated the influence of RH particle size on the mechanical, physical, and chemical properties of MBC. Samples were fabricated using SCG:RH ratio of 70:30 and categorized into three groups based on RH grinding duration: 60 seconds (MBC/SCG-RHG-60sec), 120 seconds (MBC/SCG-RHG-120sec), and a non-ground control (MBC/SCG-RH). Digital microscopy disclosed that although SCG-RH substrate allowed for greater radial expansion of mycelium, it resulted in lower density and inferior strength compared to SCG-RHG. Chemical analysis via the Chesson-Datta method revealed that grinding increased hemicellulose accessibility while reducing lignin content compared to raw RH. The poor structural integrity of the MBC/SCG-RH (control group) was attributed to higher lignin content and porosity, yielding a compressive strength of only 0.164 ± 0.019 MPa. Conversely, the MBC/SCG-RHG achieved higher packing density, which significantly enhanced mycelial density. The MBC/SCG-RHG-120sec demonstrated the highest compressive strength (0.235 ± 0.074 MPa) and a 58.06% reduction in water absorption compared to the control, as the denser mycelium network effectively inhibited water penetration. FTIR analysis confirmed the presence of chitin and protein peaks, verifying the components of the mycelium growth on substrate. These findings demonstrate that reducing RH particle size effectively enhances the mechanical and hydrophobic properties of MBC/SCG-RH for sustainable packaging applications.

Graduate Studies

Field of Engineering Technology

Academic Year 2025

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาในการให้คำปรึกษา ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย และให้ความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล กลุ่มบุคคล และหน่วยงานต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์เพชร สระทองอุ่น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพดล ศรีพุทธา ผู้อำนวยการหลักสูตร และอาจารย์ประจำหลักสูตรเทคโนโลยีวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ให้คำแนะนำ ชี้แนะ ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้คำปรึกษาแก่ผู้วิจัย รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

ศาสตราจารย์ ดร.แคลิยา บัณฑพรม อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนะ และให้คำปรึกษาแก่ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ อัญชลี สุพิทักษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม และรองศาสตราจารย์ ดร.จินตวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมยานยนต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางในการวิจัยแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากมูลนิธิทาคาฮาชิ มูลนิธิ MSWIF และมูลนิธิโทรเพื่อการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ ประเทศไทย ทุนสนับสนุน อุปกรณ์จากห้องวิจัยห้องวิจัยวัสดุคอมโพสิตและโครงสร้างน้ำหนักเบา ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการออกแบบสำหรับการผลิตขั้นสูง ห้องปฏิบัติการเคมี ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ ศูนย์สาริิตการวิจัยและพัฒนาไบโอไค้ก และอาจารย์ผู้ดูแลห้องทดลอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น ที่คอยให้การช่วยเหลือในการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ให้ทุนการศึกษาในการศึกษาต่อระดับปริญญาโท ตลอดระยะเวลาการศึกษา กราบขอพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ท้ายที่สุดของความสำเร็จในครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยจนสำเร็จไปได้ด้วยดี ทั้งบุคคลที่ได้กล่าวถึงและยังไม่ได้กล่าวถึง ขอขอบพระคุณบิดา มารดา อาจารย์ เพื่อน ๆ น้อง ๆ และพี่ ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือทุกอย่างด้วยดีเสมอมา

กัลยรัตน์ พุ่มวงศ์สกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1. ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2. ขอบเขตของการศึกษา	5
1.3. วัตถุประสงค์	6
1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.5. ขั้นตอนและระยะเวลาดำเนินงาน	6
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 วัสดุไมซีเลียมไบโอบีโคมโพสิต (Mycelium bio composite: MBC).....	8
2.2. ประเภทของอาหารเชื้อ	10
2.3. การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเกล็ดด้วยวิธีการ Chesson Datta.....	11
2.4. ความต้านทานแรงกดของวัสดุ (Compressive Strength)	11
2.5. ความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุ (Water Absorption).....	15
2.6. ปริมาณและโครงสร้างรูพรุนภายในของวัสดุ.....	16
2.7. ความหนาแน่นแห้งของวัสดุ	16
2.8. วิธีการวิเคราะห์ผลทางสถิติ.....	17
3 วิธีการดำเนินงาน	18
3.1. กระบวนการผลิต	18
3.2. การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเกล็ด	21

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	3.3 โครงสร้างจุลภาค ลักษณะพื้นผิวของวัสดุ การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของ เส้นใยไมซีเลียมบนงานเพาะ.....	22
	3.4. การทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงาน.....	27
	_Toc229141285	
4	ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	30
	4.1 การเจริญเติบโตของเส้นใย.....	30
	4.2. การกระจายตัวของขนาดอนุภาควัสดุ.....	32
	4.3. การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ.....	34
	4.4. ผลการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงาน.....	39
	4.5. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และลักษณะพื้นผิวของวัสดุ.....	58
	4.6 เปรียบเทียบความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัสดุทดแทนโฟมกับวัสดุอื่น.....	62
	4.7 อิทธิพลที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ.....	63
5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	68
	5.1. สรุปผลการทดลอง.....	68
	5.2. แนวทางการต่อยอดและพัฒนาวัสดุ MBC ในอนาคต.....	70
	บรรณานุกรม.....	72
	ประวัติย่อผู้วิจัย.....	79

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 อัตราส่วนผสมระหว่างกากกาแฟและเกลบสำหรับอาหารเลี้ยงไมซีเลียม	5
1.2 ขั้นตอนและระยะเวลาการดำเนินงาน	7
4.1 ตารางแสดงองค์ประกอบทางเคมีของเกลบ	34
4.2 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของมวลวัสดุเนื่องจากการดูดซึมน้ำ.....	52
4.3 อัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ ของวัสดุ.....	54
4.4 ความหนาแน่นแห้งของวัสดุ	57
4.5 ภาพถ่ายตัวอย่างชิ้นงานด้วยรังสีเอ็กซเรย์โดยไม่ทำลายชิ้นงาน และภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย ImageJ.....	58
4.6 ตารางแสดงรูปทรงและปริมาตรของชิ้นงานโดยละเอียด.....	60
4.7 ตารางเปรียบเทียบความต้านทานแรงกดของ MBC กับวัสดุอื่น.....	62

TNI

TAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ปริมาณขยะการเกษตรในประเทศไทยประจำปี 2566	2
1.2 เห็ดนางรม (<i>Pleurotus ostreatus</i>).....	5
2.1 เส้นใยไมซีเลียม.....	8
2.2 ตัวอย่างชิ้นงาน MBC.....	9
2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของ MBC กับวัสดุตั้งเดิมระหว่างค่า Elastic modulus กับความหนาแน่น	9
2.4 a)ค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุ b)ค่าโมดูลัสของวัสดุบนอาหารเลี้ยงที่แตกต่างกัน.....	13
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุ a) ค่าความเครียดสูงสุด 2.2% b) ค่าความเครียดสูงสุด 17%	13
3.1 เครื่องบดเนื้อกระดูกความเร็วสูง Power Grinder TQ-500Y.....	18
3.2 ตะแกรงร่อน Retsch.....	18
3.3 กระบวนการขึ้นรูป MBC	19
3.4 เครื่อง Portable Pressure Steam Sterilizer DGS-280B	20
3.5 ตู้อบ redLINE BINDER RF115	20
3.6 วิธีการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของแกลบ	21
3.7 เตาเผาอุณหภูมิสูง ADVANTEC รุ่น FUW232PB	22
3.8 กล้องจุลทรรศน์ IPS HD กำลังขยาย 2000X.....	23
3.9 โปรแกรม ImageJ	23
3.10 วิธีการนำเข้าไฟล์.....	24
3.11 วิธีปรับชนิดไฟล์	24
3.12 วิธีการตั้งค่า scale	24
3.13 การตั้งค่า Specify	25
3.14 วิธีการลบพื้นหลัง และรูปตัวอย่าง.....	25
3.15 วิธีการคำนวณพื้นที่ภาพ.....	25
3.16 การตั้งค่าระดับ Threshold.....	26
3.17 การตั้งค่า Analyze Particles.....	26
3.18 ตัวอย่างรูป และข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลผ่านโปรแกรม ImageJ	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19	เครื่อง Shimadzu's AGS-X series universal test..... 28
3.20	a) แม่พิมพ์ขนาด 70×70×40 mm b) ตัวอย่างชิ้นงานสำหรับการทดสอบความสามารถในการรับแรงกด..... 28
3.21	a) แม่พิมพ์ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm สูง 25 mm b) รูปตัวอย่างทดสอบ ... 29
3.22	ตัวอย่างการทดสอบการดูดซึมน้ำ 29
4.1	การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยงระหว่างกากกาแฟ-แกลบ (SCG-RH) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ..... 30
4.2	การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยงระหว่างกากกาแฟ-แกลบบด (SCG-RHG) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ 31
4.3	ลักษณะของกากกาแฟ (SCG) แกลบที่ไม่ผ่านการบด (RH) และแกลบบดที่ 60 (RHG-60sec) และ 120 (RHG-120sec) วินาที..... 32
4.4	กราฟฮิสโตแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของ กากกาแฟ แกลบบดที่ 60 วินาที (RHG-60sec) และแกลบบดที่ 120 วินาที (RHG-120sec)..... 33
4.5	การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยงแกลบที่ไม่ผ่านการบด (RH) แกลบบดที่ 60 วินาที (RHG100-60sec) แกลบบดที่ 120 วินาที (RHG100-120sec) และกากกาแฟ(SHG100) วันที่ 7 35
4.6	องค์ประกอบของกากกาแฟ (SCG), แกลบ (RH), แกลบบดที่ 60 วินาที (RHG-60sec) และแกลบบด 120 วินาที (RHG-120sec) ด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FTIR..... 36
4.7	องค์ประกอบของ MBC ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FTIR จากกากกาแฟล้วน (MBC/SCG100), MBC จากแกลบล้วนที่ไม่ผ่านการบด (MBC/RH), MBC จากแกลบบดล้วน 60 วินาที (MBC/RHG100-60sec) และ MBC จากแกลบบดล้วน 120 วินาที (MBC/RHG100-120sec)..... 37
4.8	องค์ประกอบของ MBC จากกากกาแฟ-แกลบไม่บดอัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RH30), MBC จากกากกาแฟ-แกลบบด 60 วินาทีที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-60sec) และ MBC จากกากกาแฟ-แกลบบด 120 วินาที ที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-120sec) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FTIR..... 38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 a) ตัวอย่างวัสดุ MBC ก่อนทดสอบ b) ตัวอย่างวัสดุ MBC ก่อนทดสอบ 1. MBC/SCG100 2. MBC/RHG100-60sec 3. MBC/RHG100-120sec 4. MBC/SCG70-RH30 5. MBC/SCG70-RHG30-60sec และ 6. MBC/SCG70-RHG30-120sec.....	39
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดเฉลี่ยของวัสดุ MBC/SCG100....	41
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดเฉลี่ยของ MBC/RHG100-60sec, MBC/RHG100-120sec, MBC/SCG70-RH30, MBC/SCG70-RHG30-60sec และMBC/SCG70-RHG30-120sec	41
4.12 ค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุ	43
4.13 ค่าโมดูลัสของยัง ของวัสดุ.....	44
4.14 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยโปรแกรม Minitab.....	45
4.15 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยโปรแกรม Minitab.....	46
4.16 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยโปรแกรม Minitab.....	47
4.17 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าโมดูลัสของวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc ด้วยโปรแกรม Minitab.....	48
4.18 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าโมดูลัสของวัสดุวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยวิธีการTukey post-hoc ด้วยโปรแกรม Minitab.....	49
4.19 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าโมดูลัสของวัสดุวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc ด้วยโปรแกรม Minitab	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	กราฟเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นเฉลี่ยและเวลาของมวลวัสดุ ตัวอย่างวัสดุ MBC จากกากกาแฟล้วน (MBC/SCG100), วัสดุ MBC จากเกลบบดล้วน 60 วินาที (MBC/RHG100-60sec) วัสดุ MBC จากเกลบบดล้วน 120 วินาที (MBC/RHG100-120sec) วัสดุ MBC จากกากกาแฟ-เกลบ ไม่บดอัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RH30) วัสดุ MBC จากกากกาแฟ-เกลบบด 60 วินาทีที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-60sec) และ วัสดุ MBC จากกากกาแฟ-เกลบบด 120 วินาทีที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-120sec) 51
4.21	a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำและเวลาของตัวอย่าง MBC/SCG100, MBC/RHG100-120sec, MBC/SCG70-RH30, MBC/SCG70-RHG30-60sec และ MBC/SCG70-RHG30-120sec b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยและเวลาของตัวอย่าง MBC/RHG100-60sec 53
4.22	ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc ด้วยโปรแกรม Minitab 55
4.23	ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc ด้วยโปรแกรม Minitab 56
4.24	ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc ด้วยโปรแกรม Minitab 57
4.25	ลักษณะพื้นผิวและเนื้อวัสดุของชิ้นงานตัวอย่าง a) วัสดุ MBC จากกากกาแฟล้วน (MBC/SCG100), b) วัสดุ MBC จากเกลบบดล้วน 60 วินาที (MBC/RHG100-60sec), c) วัสดุ MBC จากเกลบบดล้วน 120 วินาที (MBC/RHG100-120sec) d) วัสดุ MBC จากกากกาแฟ-เกลบไม่บดอัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RH30) e) วัสดุ MBC จากกากกาแฟ-เกลบบด 60 วินาทีที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-60sec) และ f) วัสดุ MBC จากกากกาแฟ-เกลบบด 120 วินาทีที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-120sec) 61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงภายในชิ้นงานและการดูดซึมน้ำของ MBC ที่อัตราส่วน 70:30	65
4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงภายในชิ้นงานและความหนาแน่นของ MBC ที่อัตราส่วน 70:30	65
4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงภายในชิ้นงานกับความต้านทานแรงกดและ โมดูลัสของยังของ MBC ที่อัตราส่วน 70:30	66
4.29 ความเครียดสูงสุดและความเครียดที่คืนตัวได้ของ MBC อัตราส่วน 70:30	67



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันทั่วโลกกำลังประสบปัญหาเกี่ยวกับปริมาณขยะที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งขยะจากอุตสาหกรรม การอุปโภคบริโภค การเกษตร รวมถึงขยะอิเล็กทรอนิกส์และพลาสติกที่เกิดจากการเติบโตของอุตสาหกรรมซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงไม่มีแนวทางในการกำจัดขยะและการแก้ไขปัญหาอย่างยั่งยืน ทำให้ส่งผลเสียและเป็นการสร้างมลพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยเริ่มให้การสนใจเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาขยะ จึงได้มีการกำหนดแนวทางและมาตรการในการกำจัดขยะอย่างยั่งยืน สหภาพยุโรปได้มีการกำหนดนโยบายเกี่ยวกับการลดขยะพลาสติกเพื่อตอบสนองแนวทางการลดของเสียและการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยมีเป้าหมายในการปกป้องสิ่งแวดล้อม มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรให้เกิดความคุ้มค่าเพื่อลดปริมาณขยะที่ไม่ถูกรีไซเคิลลงครึ่งหนึ่งภายในปี 2030 และเปลี่ยนสังคมให้ยั่งยืนเข้าสู่ภาวะของเสียเป็นศูนย์ [1], [2] ส่งเสริมผลิตภัณฑ์ที่มีความยั่งยืนและสามารถนำปรีไซเคิลได้ และยังเป็นการสนับสนุนแนวคิดของ BCG Model ซึ่งเป็นหลักของการพัฒนาเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมให้มีความยั่งยืน ประกอบไปด้วยเศรษฐกิจชีวภาพ (Bio Economy) เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และการพัฒนาเศรษฐกิจโดยคำนึงถึงความยั่งยืนของทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม (Green Economy) [3] ใช้ทรัพยากรธรรมชาติและใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด อาทิเช่น การนำสิ่งของที่ยังสามารถใช้ได้กลับมาใช้ซ้ำ หรือนำไปรีไซเคิลแทนการผลิตสินค้าใหม่ การดำเนินการดังกล่าวช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสามารถช่วยบรรเทาภาวะโลกร้อนได้

ปัญหาขยะในประเทศไทยโดยเฉพาะในภาคการเกษตรมีปริมาณของวัสดุเหลือทิ้งปริมาณมาก เช่น ชังข้าวโพด ฟางข้าว ใบอ้อย เปลือกผลไม้ แกลบข้าว เป็นต้น โดยจากข้อมูลของกรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้ระบุไว้ว่าปริมาณขยะการเกษตรในประเทศไทยปี 2023 ประเทศไทยมีปริมาณของกากวัสดุทางการเกษตรประมาณ 44.49 ล้านตันต่อปี โดยปริมาณของกากวัสดุประมาณ 35.75 ล้านตัน หรือร้อยละ 80.36 ดังรูปที่ 1.1 [4] ไม่สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้และต้องทำการกำจัดทิ้ง เช่น การทิ้งลงแหล่งน้ำ ฝังกลบ และการเผาทำลาย ซึ่งวิธีการกำจัดขยะเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เริ่มมีการนำขยะเหล่านี้มาใช้ประโยชน์มากขึ้นเพื่อเป็นการลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้ลดลง เช่น ผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล ปุ๋ยสำหรับบำรุงดิน วัสดุเพาะปลูก ผลิตสารชีวภาพ และพัฒนาเป็นวัสดุใหม่ [5] เป็นต้น เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับ

ทรัพยากรทางธรรมชาติตามหลักของเศรษฐกิจหมุนเวียน และเป็นการคำนึงถึงความยั่งยืนของสิ่งแวดล้อม

ผลการดำเนินงานบริหารจัดการวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ปี 2567 ภายใต้โครงการและกิจกรรมของกรมส่งเสริมการเกษตร							
กิจกรรม	ปริมาณ เศษวัสดุเหลือใช้ ทางการเกษตร ทั้งหมด (ตัน)	ปริมาณที่นำไปใช้แล้ว				ปริมาณคงเหลือ	
		จำนวน (ตัน)	ร้อยละ	มูลค่า (บาท)	ราคาเฉลี่ย/ตัน (บาท)	จำนวน (ตัน)	ร้อยละ
การใช้ประโยชน์เศษวัสดุเหลือใช้ ทางการเกษตร รายพืช 4 ชนิด (ข้าว ข้าวโพด อ้อย มันแกว) ช่วงเดือน ก.พ - พ.ค 67	44,492,310	8,739,841.54	19.64	2,344,341,755	268.23	35,752,468.46	80.36
ข้าว	29,936,604	6,342,451.54	21.19	697,035,877	109.9	23,594,152.46	78.81
ข้าวโพด	4,437,652	212,847	4.80	121,268,189	569.74	4,224,805	95.20
อ้อย	7,627,292	1,252,653	16.42	849,764,059	678.37	6,374,639	83.58
มันแกว มันอื่น ๆ	2,490,762	931,890	37.41	676,273,630	725.7	1,558,872	62.59

หมายเหตุ : 1. ปริมาณและมูลค่าประเมินเบื้องต้นจากเกษตรกรที่ได้รับเงินปลงศพ
2. ข้อมูลนำไปใช้ประเมินราคา 9 หากมีการจัดการเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ 1) โภชนาเกษตรกรรม 2) ใช้ผลิตปุ๋ยหมัก 3) แปรรูปเป็นอาหารสัตว์ 4) ใช้เป็นวัสดุปลูก 5) ผลิตเป็นพลังงานทดแทน
6) ผลิตเป็นวัสดุเพาะปลูก 7) ผลิตเป็นวัสดุอื่น ๆ 8) ส่งไปกำจัดขยะ 9) แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์

รูปที่ 1.1 ปริมาณขยะการเกษตรในประเทศไทยประจำปี 2566 [4]

ในประเทศไทยมีขยะเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรในปริมาณมากโดยเฉพาะแกลบที่เหลือทิ้งจากกระบวนการสีข้าวและมีปริมาณสูงเนื่องจากจำนวนผู้บริโภคข้าวมีปริมาณมากเกือบทั่วโลก จากรูปที่ 1.1 แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณของแกลบเหลือทิ้งและไม่ถูกนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์อยู่ที่ประมาณ 23.59 ล้านตัน [4] จึงได้มีแนวทางนำไปใช้ประโยชน์มากขึ้น เช่น ใช้เป็นอาหารสัตว์ วัสดุรองคอก วัสดุเพาะปลูก ปุ๋ยชีวภาพ วัสดุคลุมดิน และใช้ในการเพาะเห็ด [5], [6], [7] เป็นต้น เพื่อแก้ไขปัญหาและลดปริมาณแกลบเหลือทิ้งทางการเกษตรให้ต่ำลง แต่จากการที่มีปริมาณของแกลบเหลือทิ้งมากจึงยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมดทำให้ยังคงมีการเผาทำลายเพื่อลดปริมาณแกลบเหลือทิ้งซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกทั้งยังเป็นก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ดังนั้นจากปัญหาแกลบเหลือทิ้งที่มีปริมาณมากทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำแกลบมาพัฒนาเป็นวัสดุใหม่ คือ วัสดุไบโอคอมโพสิต เพื่อเป็นการลดขยะทางเกษตรในต่ำลงและยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุการเกษตรเหลือทิ้งตามแนวของของหลักการ BCG Model

ปัจจุบันมีการบริโภคกาแฟที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมถึงอุตสาหกรรมการผลิตกาแฟสำเร็จรูปก็มีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลจากงานวิจัยของณัฐพงศ์ ดันติวัฒน์พันธ์ [8] ระบุว่าประเทศไทยมีปริมาณกากกาแฟเหลือทิ้งประมาณ 300,000 ตันต่อปี และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการที่กากกาแฟมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณกากกาแฟเหลือทิ้งเพิ่มสูงขึ้นตามไป

ด้วย ทำให้ต้องกำจัดทั้งด้วยการฝังกลบหรือทิ้งลงแหล่งน้ำ [5] เป็นวิธีการกำจัดที่ไม่ยั่งยืนอีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงได้มีแนวทางในการนำกากกาแฟเหลือทิ้งมาทำให้เกิดประโยชน์ เช่น ปุ๋ยอินทรีย์ สกรับผิว เชื้อเพลิงอัดแท่งหรือชีวมวล และวัสดุไบโอคอมโพสิต [5], [9]

การนำกลบและกากกาแฟมาพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ทดแทนโฟมและพลาสติกเพื่อลดปริมาณขยะทางการเกษตร โฟม และพลาสติกที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งเป็นการนำวัสดุการเกษตรไปใช้ให้เกิดประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเริ่มมีการแพร่หลายมากขึ้น บริษัทในเยอรมนี [10] และ Huskee ในออสเตรเลีย [11] นำกากกาแฟมาพัฒนาเป็นแก้วกาแฟโดยนำกากกาแฟผสมกับพอลิเมอร์ชีวภาพแล้วขึ้นรูปเป็นแก้ว เพื่อลดการใช้แก้วพลาสติกและเพิ่มมูลค่าให้กับกากกาแฟ อีกทั้งการผสมกากกาแฟลงไปยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุได้ แต่ในกระบวนการผลิตยังมีข้อจำกัดในการผสมกากกาแฟและพอลิเมอร์ชีวภาพให้เข้ากันได้ยาก และในขณะเดียวกันก็ได้มีการนำกลบมารีไซเคิลบริษัท Proservation ในเยอรมนีได้พัฒนากลบเพื่อใช้เป็นวัสดุกันกระแทกทดแทนโฟมที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อลดขยะที่เกิดจากโฟมและบรรจุภัณฑ์สามารถย่อยสลายได้ง่าย แต่วัสดุยังมีข้อจำกัดในเรื่องของน้ำหนักมากและทนต่อความชื้นได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมกันกระแทก [12] ดังนั้นจึงยังต้องมีการพัฒนาให้วัสดุสามารถรับน้ำหนักได้ดีและทนความชื้นได้มากยิ่งขึ้น

บรรจุภัณฑ์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น EPS โฟม ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์กันกระแทกสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แผ่นฉนวนความร้อน ซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ทนความชื้นได้ดีและราคาถูก แต่ไม่สามารถย่อยสลายได้ กระบวนการผลิตใช้พลังงานสูง [13] นอกจากนั้นยังมีไม้พลาสติกคอมโพสิต (Wood-Plastic Composites (WPC)) ได้จากการนำเศษไม้และพลาสติกมารีไซเคิล ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เอง รวมถึงในกระบวนการผลิตและรีไซเคิลให้พลังงานที่สูง กระบวนการรีไซเคิลทำได้ยาก [14] เมื่อ EPS โฟมและ WPC เกิดการเผาไหม้จะก่อให้เกิดมลพิษต่ออากาศ ส่งผลกระทบและเป็นอันตรายกับระบบหายใจ ดังนั้นจึงได้มีการแนะนำวัสดุคอมโพสิตชีวภาพเข้ามาใช้ในการทดแทนวัสดุเหล่านี้เพื่อให้มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เช่น วัสดุคอมโพสิตจากแป้ง และวัสดุไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต เป็นต้น ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า EPS โฟมและ WPC จึงเหมาะกับการพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ทดแทนโฟมและพลาสติกที่มีอยู่ในปัจจุบัน วัสดุไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต (Mycelium biocomposite: MBC) เป็นวัสดุที่มีความยั่งยืนและสามารถรีไซเคิลได้จึงเหมาะกับการนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาขยะที่กำลังมีอยู่ในปัจจุบัน MBC เป็นวัสดุที่ได้จากการนำเศษวัสดุการเกษตร เช่น แกลบ และกากกาแฟ โดยเส้นใยไมซีเลียมที่เจริญเติบโตบนอาหารเลี้ยงจะทำหน้าที่เป็นวัสดุเนื้อพื้น (Matrix) ทำหน้าคล้ายกับกาวธรรมชาติช่วยยึดเกาะวัสดุอาหารเลี้ยงไว้ด้วยกัน โดยเส้นใยไมซีเลียมจะค่อย ๆ แผ่ขยายไปบนอาหารเลี้ยงจนปกคลุมอาหารเลี้ยงทั้งหมด เพื่อดูดซึมสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของเส้นใย และอาหารเลี้ยงทำหน้าที่เป็นเป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ช่วยให้วัสดุมีความแข็งแรงที่สูงขึ้น อาหารเลี้ยงที่นิยมนำมา

ทำอาหารเลี้ยงเชื้อเห็ด คือ ขี้เลื่อยไม้ยางพารา กากกาแฟ ฟางข้าว เปลือกถั่วลิสง เศษฝ้าย เป็นต้น [15], [16] การที่ MBC สามารถผลิตได้จากการเพาะเลี้ยงเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยงเห็ดเหมือนกับการปลูกเห็ด ดังนั้น MBC จึงเป็นวัสดุที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ถูกจัดอยู่ในวัสดุจำพวกโฟม ทำให้ MBC เป็นหนึ่งในวัสดุทางเลือกสำหรับการนำไปใช้ทดแทนพลาสติก โฟม หรือบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้

จากการที่แกลบสามารถใช้เป็นวัสดุเพาะเห็ดดังนั้นจึงสามารถนำมาพัฒนาเป็น MBC ได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากในแกลบมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส [7] ที่ช่วยให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ แต่ MBC ที่ได้จากแกลบมีการเจริญของเส้นใยไมซีเลียมที่ไม่ค่อยหนาแน่น ส่งผลให้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความแข็งแรงของวัสดุที่ต่ำ ค่าการดูดซึมน้ำที่สูง และมีปริมาณของรูพรุนมาก เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดียิ่งขึ้นและเพื่อให้สามารถใช้งานได้หลากหลายยิ่งขึ้น โดยแนวทางในการพัฒนาคือการนำมาผสมกับกากกาแฟ เพื่อให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญได้ดีและมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

จากการพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการใช้ทั้งแกลบและกากกาแฟสำหรับเป็นวัสดุเพาะเลี้ยงเห็ดแกลบและกากกาแฟมีเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบช่วยให้เห็ดสามารถเจริญเติบโตได้ดี การผสมแกลบลงในก้อนเชื้อเห็ดจะช่วยให้อากาศถ่ายเทได้ดี ก้อนเห็ดไม่อัดแน่นเกินไป แต่ถ้าใส่ในปริมาณสูงจะทำให้เส้นใยเจริญเติบโตได้ไม่ดีเนื่องจากมีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่สูงเส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ยาก [17] อีกทั้งในส่วนของการนำกากกาแฟมาใช้เป็นวัสดุเพาะเห็ด เริ่มมีเพิ่มขึ้นในปัจจุบันเนื่องจากในกากกาแฟมีองค์ประกอบของไนโตรเจน โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงานช่วยให้เจริญเติบโตได้ดี แต่ในกากกาแฟเองก็มีส่วนประกอบของของลิกนินและกรดฟีนอลิก [18] ที่สูงส่งผลให้การเจริญเติบโตของเส้นใยใช้ระยะเวลานานได้ผลผลิตช้าจากสาเหตุเหล่านี้ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าสามารถนำแกลบและกากกาแฟมาผสมกันเพื่อเป็นการปรับปรุงให้เส้นใยเห็ดสามารถเจริญเติบโตได้ดียิ่งขึ้นในอัตราส่วนของแกลบและกากกาแฟที่เหมาะสม และนำไปต่อยอดเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุ MBC

ดังนั้นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของ MBC ให้ดียิ่งขึ้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของ MBC ที่ได้จากอาหารเลี้ยงระหว่างกากกาแฟผสมแกลบที่ไม่ผ่านการบด และกากกาแฟผสมแกลบที่ผ่านการบดที่ 60 และ 120 วินาที ที่อัตราส่วนกากกาแฟ:แกลบเท่ากับ 70:30 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุที่มีขนาดของเกรนที่ต่างกัน และยืนยันสมมติฐานว่าขนาดของเกรนวัสดุส่งผลต่อความแข็งแรงและคุณสมบัติของวัสดุ สำหรับนำไปต่อยอดและพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้เพื่อใช้ทดแทนโฟมและพลาสติก

1.2 ขอบเขตของการศึกษา

1. เห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) ดังรูปที่ 1.2
2. กากกาแฟที่นำมาจากร้าน Starbucks Thailand Ltd
3. แกลบบดที่ระยะเวลา 60 วินาที และ 120 วินาที
4. อัตราส่วนอาหารเลี้ยงระหว่างกากกาแฟและแกลบ ดังตารางที่ 1.1
5. ทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 1.2 เห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*)

ตารางที่ 1.1 อัตราส่วนผสมระหว่างกากกาแฟและแกลบสำหรับอาหารเลี้ยงไมซีเลียม

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก	กากกาแฟ (SCG) (%)	แกลบ (RH/RHG) (%)	หมายเหตุ
SCG100	100	0	-
RHG100-60sec	0	100	แกลบบด (RHG) 60 วินาที
RHG100-120sec	0	100	แกลบบด (RHG) 120 วินาที
SCG70-RH30	70	30	แกลบไม่บด (RH)
SCG70-RHG30-60sec	70	30	แกลบบด (RHG) 60 วินาที
SCG70-RHG30-120sec	70	30	แกลบบด (RHG) 120 วินาที

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติทางกลและอัตราการดูดซึมน้ำของ MBC ที่ได้จากกากกาแฟผสมกับเกลบสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้
2. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยงกากกาแฟและเกลบในอัตราส่วนกากกาแฟ:เกลบ (SCG:RH) เท่ากับ 70:30
3. เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของคุณสมบัติทางกลและอัตราการดูดซึมน้ำของ MBC ที่ได้จากกากกาแฟผสมกับเกลบไม่บด และเกลบบดที่เวลา 60 และ 120 วินาที ที่อัตราส่วนกากกาแฟ:เกลบ (SCG:RH) เท่ากับ 70:30

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. MBC จากกากกาแฟผสมกับเกลบสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้มีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้นและอัตราการดูดซึมน้ำลดลงจากการปรับขนาดอนุภาคของเกลบ
2. MBC จากกากกาแฟผสมกับเกลบบดสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายเจริญเติบโตได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเกลบที่ไม่ผ่านการบด
3. การปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคของเกลบของอาหารเลี้ยงกากกาแฟ-เกลบนำไปสู่ความแตกต่างของคุณสมบัติทางกลและอัตราการดูดซึมน้ำของ MBC ที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน

1.5 ขั้นตอนและระยะเวลาดำเนินงาน

ขั้นตอนและระยะเวลาดำเนินงานดังตารางที่ 1.2

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ตารางที่ 1.2 ขั้นตอนและระยะเวลาการดำเนินงาน

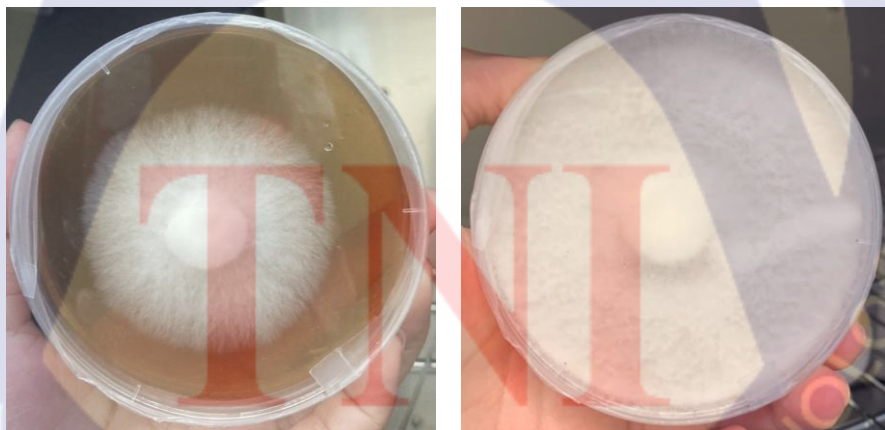
ขั้นตอนดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2568							ปีการศึกษา 2569					
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1. ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการวิเคราะห์ผลการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนงานเพาะเชื้อ													
2. เพาะเลี้ยงเส้นใยไมซีเลียมบนงานเพาะสำหรับวิเคราะห์การเจริญเติบโตของเส้นใย													
3. เพาะเลี้ยงเชื้อเห็ดในงานเพาะเชื้อ													
4. ขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ													
5. วิเคราะห์ผลการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม													
6. ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเกล็ดด้วยวิธีการ Chesson Datta													
7. ทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุ													
8. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภายในวัสดุด้วยเทคนิค X-ray Micro-CT													
9. วิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกล การดูดซึมน้ำ และโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ													
10. สรุปผล นำเสนอ และเขียนเล่มวิทยานิพนธ์													
11. เข้าร่วม conference													

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต (Mycelium biocomposite: MBC)

เส้นใยไมซีเลียม คือ รากของเห็ดราลักษณะคล้ายกับเส้นด้ายสีขาว ดังรูปที่ 2.1 ทำหน้าที่คล้ายรากของพืชคอยดูดซึมสารอาหารจากแหล่งอาหาร เช่น ชากไม้ กองฟาง สำหรับใช้เป็นพลังงานในการเจริญเติบโตของเห็ดรา [19], [20] ปัจจุบันมีการนำเส้นใยไมซีเลียมมาพัฒนาเป็นวัสดุใหม่หรือวัสดุชีวภาพที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติเนื่องจากเป็นวัสดุหมุนเวียน เพื่อนำไปใช้ทดแทนวัสดุที่มีอยู่ในปัจจุบัน เช่น วัสดุก่อสร้าง วัสดุฉนวน ของแต่งบ้าน และวัสดุบรรจุภัณฑ์ [21], [22], [23], [24] เนื่องจากเส้นใยไมซีเลียมมีความแข็งแรงต่ำจึงนำมาพัฒนาเป็นวัสดุความพืดที่เรียกว่า วัสดุไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต (Mycelium biocomposite: MBC) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเส้นใยไมซีเลียมทำหน้าที่เป็นวัสดุเนื้อพื้น และเสริมความแข็งแรงของวัสดุให้สูงขึ้นด้วยการใช้อาหารเลี้ยงเชื้อเห็ด เช่น กากวัสดุทางการเกษตร แกลบ ชี้เลื้อย กากกาแฟ มาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้กับ MBC เพื่อเป็นการปรับปรุงให้วัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้น ซึ่งความแข็งแรงของวัสดุเองก็ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารเลี้ยงที่ใช้เป็นวัสดุเสริมแรง ถ้าอาหารเลี้ยงที่ใช้มีความแข็งที่ต่ำก็จะส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ

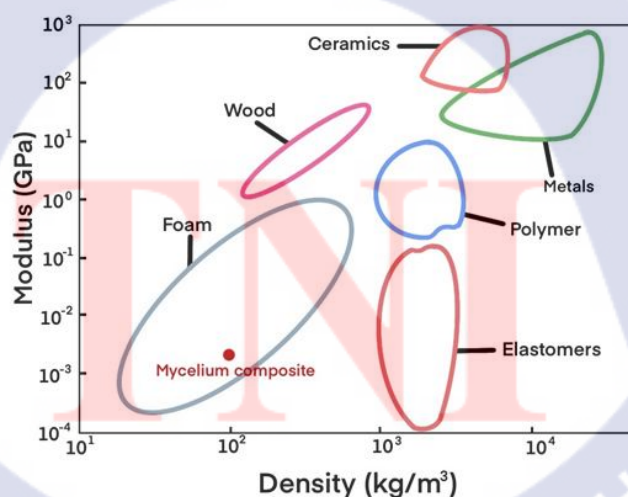


รูปที่ 2.1 เส้นใยไมซีเลียม



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างชิ้นงาน MBC

MBC เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ และเป็นวัสดุที่ถูกจัดอยู่ในจำพวกของโฟม ดังรูปที่ 2.3 มีความแข็งแรงเทียบเท่ากับ Styrofoam [25] อีกทั้งยังมีไคโตซานเป็นส่วนประกอบของไมซีเลียม ซึ่งไคโตซานมีคุณสมบัติที่สามารถชะลอการลามไฟได้ [26], [27] จึงสามารถนำไปใช้ทดแทนโฟมที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ เช่น โฟมกันกระแทกสำหรับแพ็คเกจจิ้ง โฟมกันลามไฟ เมื่อ MBC ถูกเผาไหม้จะไม่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุหนึ่งของภาวะโลกร้อน



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของ MBC กับวัสดุดั้งเดิมระหว่างค่า Elastic modulus กับความหนาแน่น [20]

2.2 ประเภทของอาหารเชื้อ

อาหารเลี้ยงเชื้อเห็ดเป็นแหล่งพลังงานสำคัญของไมซีเลียมในการเจริญเติบโต โดยอาหารเลี้ยงเชื้อแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ อาหารเลี้ยงชนิดแข็ง และชนิดเหลว อาหารเลี้ยงชนิดเหลวมีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบหลักทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารของเส้นใย โดยน้ำตาลที่นิยมนำมาทำอาหารเลี้ยงเชื้อ ได้แก่ น้ำตาลจากมอลต์สก็ด ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นสารละลายสีใส ช่วยให้ง่ายต่อการตรวจสอบการติดเชื้อ และสามารถสังเกตการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมได้ง่าย น้ำตาลกลูโคส ทำให้เส้นใยแข็งแรง และเจริญเติบโตเร็ว และน้ำผึ้งเป็นน้ำตาลที่ได้จากธรรมชาติ [28] ในส่วนของอาหารเลี้ยงชนิดแข็งสามารถพบได้ทั่วไป โดยอาหารเลี้ยงชนิดแข็งที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ชี้อเลื่อย และฟางข้าว และในปัจจุบันได้เริ่มมีการนำกากกาแฟเป็นส่วนผสมของอาหารเลี้ยงชนิดแข็ง

จากงานวิจัยของนางลักขณ์ และคณะศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มค่าโภชนาการเห็ดนางรมด้วยกากกาแฟเหลือทิ้ง [29] เนื่องจากกากกาแฟประกอบด้วยธาตุไนโตรเจน โพแทสเซียม ฟอสฟอรัสและสารอื่นที่ช่วยเพิ่มค่าโภชนาการ โดยใช้กากกาแฟผสมชี้อเลื่อยไม่ย่างพาราเป็นวัสดุเพาะปลูกเห็ดนางรม ภูฐาน อัตราส่วนร้อยละ 50:50, 25:75 และ 0:100 พบว่าเมื่อมีปริมาณของกากกาแฟที่สูงจะส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการเจริญของเส้นใยจนเต็มก้อนจะใช้เวลามากกว่าสูตรที่มีอัตราส่วนของกากกาแฟน้อย และความหนาแน่นของเส้นใยก็น้อยกว่าเช่นเดียวกัน ซึ่งก้อนเชื้อที่ใช้กากกาแฟบดจะมีปริมาณของเส้นใยที่หนาแน่นมากกว่าเปลือกกากกาแฟที่ไม่บด จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากากกาแฟมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุเพาะปลูกเห็ด และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกากกาแฟ จากงานของคุณอัครพิชญโชติที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาวัสดุเพาะเลี้ยงเห็ดจากกากกาแฟและใบจามจุรี [30] โดยนำมาใช้ทดแทนชี้อเลื่อยไม่ย่างพาราพบว่าเมื่อนำกากกาแฟมาใช้เป็นส่วนผสม 30% กับชี้อเลื่อย 60% ช่วยเพิ่มสารอาหารให้กับเห็ดได้ดีกว่าการใช้ชี้อเลื่อยอย่างเดียว แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อเสียในด้านของระยะเวลาในการเจริญของเส้นใยที่นานกว่าการใช้ชี้อเลื่อยเป็นวัสดุเพาะเพียงอย่างเดียว

งานวิจัยของเจษฎาบัณฑิต แก้วมณี [31] ศึกษาเกี่ยวกับการนำกลับมาพัฒนาเป็นวัสดุทดแทนพลาสติกโดยใช้เส้นใยไมซีเลียมจากเห็ดนางฟ้าเป็นตัวเชื่อมประสาน เส้นใยไมซีเลียมที่เจริญเติบโตบนแกลบมีปริมาณของเส้นใยที่ปกคลุมแกลบได้น้อยเนื่องจากแกลบมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหลวม ๆ ไม่เกาะกันเป็นก้อนทำให้เกิดช่องว่างภายในวัสดุส่งผลให้เส้นใยไมซีเลียมประสานอนุภาคของวัสดุได้น้อยและขึ้นรูปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการผสมวัสดุอื่นเพื่อช่วยลดช่องว่างที่เกิดขึ้นในชั้นงานให้ต่ำลง และช่วยให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดี

ดังนั้นจากงานวิจัยข้างต้น [29], [30], [31] แสดงให้เห็นว่าสามารถนำกากกาแฟหรือแกลบมาใช้ในการทำเป็นวัสดุเพาะเลี้ยงเห็ดหรือเส้นใยไมซีเลียมได้ แต่ต้องมีการนำวัสดุทั้งสองอย่างมาผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเส้นใย เพื่อเป็นการลดระยะเวลาการผลิต อีกทั้งยัง

ช่วยให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดี มีความหนาแน่นของเส้นใยสูง ทำให้สามารถยืดเกาะอนุภาคของวัสดุได้ดียิ่งขึ้น

2.3 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของแกลบด้วยวิธีการ Chesson Datta

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของแกลบสามารถทำได้โดยใช้วิธีการ Chesson Datta ตามวิธีการทดลองในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.4 ซึ่งเป็นวิธีการอย่างง่ายที่สามารถวิเคราะห์ปริมาณของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินในวัสดุชีวมวล [32], [33], [34] ซึ่งเป็นการแยกองค์ประกอบตามลำดับความยากง่ายในการย่อยสลาย เริ่มจากสารที่ละลายได้ในน้ำ กรดซัลฟิวริกเจือจาง และกรดซัลฟิวริกเข้มข้นตามลำดับ เพื่อตรวจสอบว่าองค์ประกอบทางเคมีของแกลบเมื่อถูกบดที่เวลาแตกต่างกันมีองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไปจากเดิมและส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมหรือไม่ และเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการปริมาณร้อยละของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน และซิลิกาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1, 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

$$\text{Hemicellulose} = \frac{(b-c)}{a} \times 100\% \quad (2.1)$$

$$\text{cellulose} = \frac{(c-d)}{a} \times 100\% \quad (2.2)$$

$$\text{lignin} = \frac{(d-e)}{a} \times 100\% \quad (2.3)$$

กำหนดให้

a = น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (1 g)

b = น้ำหนักแห้งของตัวอย่างหลังการ reflux ด้วยน้ำ (g)

c = น้ำหนักแห้งของตัวอย่างหลังการ reflux ด้วยซัลฟิวริกเจือจาง (0.5 M) (g)

d = น้ำหนักแห้งของตัวอย่างหลังการแช่ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (72% v/v) และ reflux ด้วยซัลฟิวริกเจือจาง (0.5 M) (g)

e = น้ำหนักเถ้าของตัวอย่าง (g)

2.4 ความต้านทานแรงกดของวัสดุ (Compressive Strength)

ค่าความต้านทานแรงกด (Compressive Strength) เป็นหนึ่งในคุณสมบัติของวัสดุ ใช้บอกความแข็งแรงของวัสดุ เมื่อวัสดุถูกแรงกระทำตั้งฉากกับผิววัสดุ สามารถนำความสามารถในการรับแรง

กดของวัสดุมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและค่าความเครียดโดยคำนวณจากสมการที่ 2.4 และสมการที่ 2.5 ตามลำดับ [35]

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

กำหนดให้

σ = ความเค้นของวัสดุ (Pa)

F = แรงกระทำที่ตั้งฉากกับหน้าตัดของวัสดุ (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (m^2)

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.5)$$

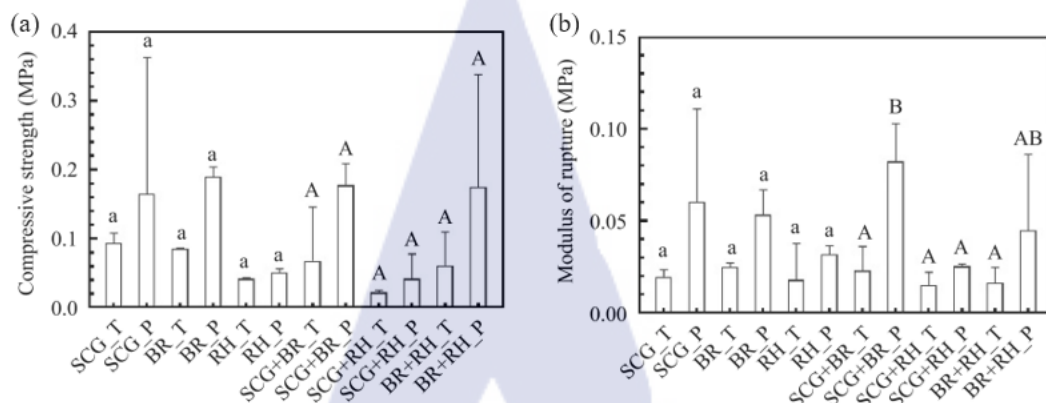
กำหนดให้

ϵ = ความเครียดของวัสดุ

Δl = ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุ (m)

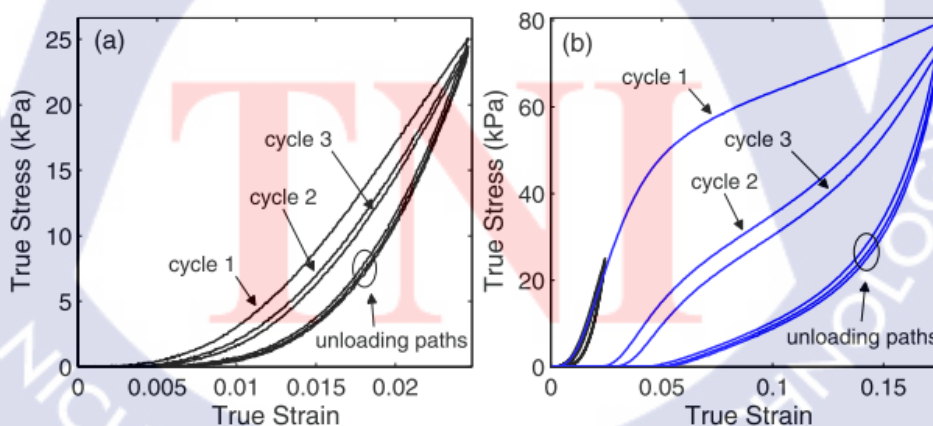
l_0 = ความยาวเริ่มต้นของวัสดุ (m)

ในงานวิจัยของ Benchaphong และคณะได้ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของ MBC ที่ได้จาก เศษไม้ไผ่, กากกาแฟ และแกลบ [36] โดยศึกษาจากเห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) และเชื้อรา *Trichoderma virens* ในอัตราส่วน เศษไม้ไผ่, กากกาแฟ และแกลบ 100% และ เศษไม้ไผ่ต่อกากกาแฟ, เศษไม้ไผ่ต่อแกลบ และกากกาแฟต่อแกลบ ในอัตราส่วน 1:1 พบว่า MBC ที่มีค่าความต้านทานแรงกดอยู่ในช่วง 0.022–0.190 MPa ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งค่าความต้านทานแรงกดสูงที่สุดคือ MBC จากเห็ดนางรมบนเศษไม้ไผ่ อยู่ที่ 0.190 MPa รองลงมาเป็น MBC จากเห็ดนางรมบนเศษไม้ไผ่ผสมกากกาแฟ 0.177 MPa และ เศษไม้ไผ่ผสมแกลบ 0.176 MPa โดยค่าความต้านทานแรงกดที่ได้จากเห็ดนางรมสูงกว่าเชื้อรา *Trichoderma virens* เนื่องจากเส้นใยไมซีเลียมของเห็ดนางรมมีความหนาแน่นที่มากกว่าทำให้สามารถยึดเกาะอนุภาคของวัสดุไว้ด้วยกันได้ดี ส่งผลให้ MBC จากเห็ดนางรมมีความแข็งแรงมากกว่า MBC จากเชื้อรา *Trichoderma virens* อีกทั้งอาหารเลี้ยงที่นำมาใช้เองก็ส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ



รูปที่ 2.4 a) ค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุ b) ค่าโมดูลัสของวัสดุบนอาหารเลี้ยงที่แตกต่างกัน [36]

งานวิจัยของ Islam และคณะศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของเส้นใยไมซีเลียมเพื่อนำมาพัฒนาเป็นวัสดุใหม่ [20] พบว่าเส้นใยไมซีเลียมมีคุณสมบัติที่คล้ายกับโฟม เหมาะกับการพัฒนาเป็นโฟมชีวภาพเพื่อใช้ทดแทนโฟมที่มีอยู่ในปัจจุบัน และทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุแบบวัฏจักร พบว่าการทดสอบการกดครั้งแรกส่งผลให้วัสดุเกิดความเสียหายมากที่สุด และในการทดสอบมีการเกิดฮิสเทอรีซิสทุกครั้งของการทดสอบ ซึ่งการทดสอบครั้งแรกมีช่วงของฮิสเทอรีซิสกว้างที่สุด ส่วนในครั้งที่ 2 และ 3 มีลักษณะของฮิสเทอรีซิสที่คล้ายกัน ดังรูปที่ 2.5 และในการทดสอบพบว่าพฤติกรรมของวัสดุในช่วงแรกของการทดสอบมีความเค้นที่ลดลงอย่างรวดเร็ว และค่อยๆ ซาลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของวัสดุ (a) ค่าความเครียดสูงสุด 2.2% (b) ค่าความเครียดสูงสุด 17% [20]

จากงานวิจัยของ Ghazvinian และคณะศึกษาเกี่ยวกับประเภทของอาหารเลี้ยงเชื้อเห็ดและสารอาหารเสริมที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงกดของวัสดุ [37] เพื่อพัฒนาเป็นอิฐสำหรับการก่อสร้าง โดยศึกษาอาหารเลี้ยงเชื้อเห็ด ฟาง และเชื้อเห็ดผสมฟาง มีรำข้าวสาลีเป็นอาหารเสริม และเห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) พิจารณาการกดของวัสดุที่ 20% ของความสูงชิ้นงาน ความแข็งแรงของวัสดุอยู่ในช่วง 20–188 kPa MBC ที่มีความแข็งแรงสูงที่สุดคือ MBC จากเชื้อเห็ดผสมรำข้าว 188 kPa และความแข็งแรงต่ำที่สุดคือ MBC จากฟาง 20 kPa แต่ในขณะทดสอบ MBC จากฟางมีความสามารถในการคืนตัวที่สูงและมีความยืดหยุ่นมากกว่า MBC จากเชื้อเห็ด และเชื้อเห็ดผสมฟาง แต่จากความแข็งแรงของวัสดุที่ยังต่ำอยู่ จึงไม่สามารถนำมาใช้ทดแทนอิฐที่เป็นวัสดุก่อสร้างได้ ต้องมีการพัฒนาความแข็งแรงของวัสดุให้เพิ่มสูงขึ้นเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานและสามารถนำไปใช้ทดแทนอิฐที่เป็นวัสดุก่อสร้างได้

จากงานของ Islam และคณะศึกษาเกี่ยวกับขนาดอนุภาควัสดุที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของ MBC [38] แบ่งช่วงของขนาดอนุภาคที่สนใจออกเป็น 4 ช่วง คือ ขนาดเล็ก (0.4–0.9 mm) ขนาดกลาง (0.9–1.7 mm) ขนาดใหญ่ (1.7–6.7 mm) และผสม (0.4–6.7 mm) โดยขนาดอนุภาคทั้ง 4 ช่วงมีลักษณะการเรียงตัวของอนุภาคภายในเนื้อวัสดุที่แตกต่างกัน ทำให้การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมแตกต่างกันตามเช่นเดียวกัน แต่ในด้านของความแข็งแรงของวัสดุพบว่าขนาดของอนุภาคส่งผลต่อค่าของความเค้นและความเครียดของวัสดุที่ต่ำ ค่าโมดูลัสของวัสดุอยู่ในช่วง 0.14–0.19 MPa และได้ทำการทดสอบความต้านทานแรงกดของวัสดุแบบวัฏจักรพบว่ามีเกิดเกิดฮิสเทอรีซิส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก

Rigobello และคณะศึกษาเกี่ยวกับขนาดของอนุภาคของไม้ปืท [39] โดยแบ่งขนาดของอนุภาคออกเป็น 4 ช่วง คือ ขนาดเล็ก (0.5–1.0 mm) ขนาดกลาง (0.75–3.0 mm) ขนาดใหญ่ (4.0–12.0 mm) และผสม (0.5–12.0 mm) MBC มีความแข็งแรงอยู่ในช่วง 171.86–306.38 kPa โดย MBC ที่ได้จากอาหารเลี้ยงขนาดกลาง มีความแข็งแรงสูงที่สุดคือ 306.39 kPa รองลงมาคือ ขนาดใหญ่และขนาดรวม มีความแข็งแรงเท่ากับ 245.60 kPa และ 237.09 kPa ตามลำดับ และ MBC ที่ได้จากอาหารเลี้ยงขนาดอนุภาคเล็กมีความแข็งแรงที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 171.86 kPa แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของวัสดุส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ

จากงานวิจัยของ Rigobello แสดงให้เห็นว่าเส้นใยไมซีเลียมที่ทำหน้าที่ยึดเกาะอนุภาคของวัสดุส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ อีกทั้งชนิดของอาหารเลี้ยงเองก็ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม เมื่อเส้นใยไมซีเลียมมีความหนาแน่นความแข็งแรงของวัสดุจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพื่อที่จะปรับปรุงความแข็งแรงของวัสดุจึงต้องมีการใช้ชนิดของอาหารเลี้ยง และอัตราส่วนที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม และจากงานวิจัยของคุณ Islam และคณะ [38] พบว่าขนาดของ

อนุภาควัสดุไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ จึงทำให้ยังมีความขัดแย้งกันอยู่ผู้วิจัยจึงต้องการพิสูจน์ว่าขนาดของอนุภาควัสดุนั้นส่งผลค่าความแข็งแรงของวัสดุจริงหรือไม่

2.5 ความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุ (Water Absorption)

การดูดซึมน้ำของวัสดุเป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุ MBC เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำสูงเนื่องจากวัสดุมีความเป็นรูพรุนมาก ดังนั้นในการพัฒนา MBC ให้สามารถใช้งานได้ในสภาวะที่หลากหลายมากขึ้นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำของวัสดุให้ลดลง โดยการลดปริมาณของรูพรุนของวัสดุ นอกจากนี้ความไม่ชอบน้ำของวัสดุที่ใช้เป็นอาหารเลี้ยงเองก็ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำเช่นเดียวกัน [40] หากนำคุณสมบัติในเรื่องการดูดซึมน้ำของ MBC มาใช้ประโยชน์จะสามารถพัฒนาวัสดุ MBC สำหรับทดแทนวัสดุจำพวกพองน้ำได้ อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น [37] แต่ก็ขึ้นอยู่กับอาหารเลี้ยงที่นำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรง สามารถหาค่าการดูดซึมน้ำและอัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุได้ตามสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ

$$\%water\ absorption = \frac{(m_{wet}-m_{dry})}{m_{dry}} \times 100\% \quad (2.6)$$

$$\dot{m} = \frac{(m_i - m_{dry})}{t_i} \quad (2.7)$$

กำหนดให้

$\dot{m}$ = อัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุ (mg/s)

m_i = น้ำหนักของชิ้นงานที่เวลาใด ๆ

t_i = เวลาใด ๆ เมื่อ $i = 15, 30, 45$ นาที และ $1, 4, 24, 48, 72$ และ 96 ชั่วโมง

งานวิจัยของ Islam และคณะศึกษาเกี่ยวกับวัสดุชีวภาพจากแป้งผสมเศษฝ้าย [41] พบว่าวัสดุมีการดูดซึมน้ำที่สูง โดยการดูดซึมน้ำที่เวลา 10 นาทีแรกอยู่ในช่วง 163.5%–436.7% เกิดจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคของวัสดุรวมถึงแป้งที่ผสมกับฝ้ายดูดซึมน้ำได้มาก และจากงานวิจัยของ Lyubushkin และคณะศึกษาเกี่ยวกับแกลบลผสมพลาสติกชีวภาพ PLA เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [40] วัสดุมีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุผสมแกลบลในอัตราส่วนที่มากขึ้นเนื่องจากแกลบลที่มีปริมาณสูงขึ้นทำให้วัสดุเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมากส่งผลให้รูพรุนภายในเนื้อวัสดุเพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของวัสดุ แต่มีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำเนื่องจากเป็นการผสมระหว่างแกลบลและ PLA ที่ไม่ชอบน้ำทำให้ค่าการดูดซึมน้ำที่ 24 ชั่วโมง ไม่ถึง 1% แต่เป็นวัสดุที่มีข้อจำกัดในการ

ย่อยสลายไม่สามารถย่อยสลายได้เป็นเหมือนกับ MBC ที่ได้จากธรรมชาติ อีกทั้งกระบวนการผลิตตลอดจนการรีไซเคิลต้องใช้พลังงานที่สูง

2.6 ปริมาณและโครงสร้างรูพรุนภายในของวัสดุ

โครงสร้างภายในของวัสดุมีรูพรุนซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุ เมื่อวัสดุมีรูพรุนมากทำให้วัสดุมีความหนาแน่นที่ต่ำ ค่าการดูดซึมน้ำมาก สามารถตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภายในของวัสดุได้จากการส่องชิ้นงานด้วยเทคนิค Micro CT และวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนผ่านโปรแกรม ImageJ จากงานวิจัยของ Manan และคณะศึกษาเกี่ยวกับลักษณะความเป็นรูพรุนของ MBC มีความสามารถในการใช้เป็นฉนวนกันเสียงได้เพื่อใช้ในการทดแทนกับโฟมสังเคราะห์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน นอกจากนี้ MBC ยังมีความสามารถในการเป็นฉนวนความร้อนและทนไฟ [42] จากการศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าปริมาณของรูพรุนภายในส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ และค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ [43]

ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณรูพรุนภายในวัสดุ คือ ขนาดอนุภาควัสดุ สายพันธุ์เห็ด ความหนาแน่นและการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม ซึ่งเห็ดแต่ละสายพันธุ์ก็มีปริมาณของเส้นใยที่แตกต่างกัน จากงานวิจัยของคุณ Rigobello และคณะ [39] แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดอนุภาคของวัสดุที่มีขนาดเล็กช่วยรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของวัสดุลดลงเส้นใยไมซีเลียมจึงเจริญเติบโตได้ดี ทำให้ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น

2.7 ความหนาแน่นแห้งของวัสดุ

MBC เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนมากน้ำหนักเบา โดยความหนาแน่นของ MBC นอกจากรูพรุนภายในโครงสร้างวัสดุยังขึ้นอยู่กับอาหารเลี้ยงหรือวัสดุที่นำมาใช้เสริมแรงให้ MBC ถ้าวัสดุมีขนาดอนุภาคใหญ่จะทำให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคมีช่องว่างและรูพรุนที่มากกว่าวัสดุที่มีขนาดอนุภาคเล็ก รวมถึงวิธีในการขึ้นรูปวัสดุ จากงานวิจัยของ Elsacker เมื่อวัสดุได้รับแรงอัดขณะทำการขึ้นรูปวัสดุทำให้วัสดุมีรูพรุนที่ลดลงซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของวัสดุ โดย MBC ที่ได้รับแรงอัดระหว่างขึ้นรูปมีปริมาณรูพรุนน้อยกว่าและมีความแข็งแรงที่สูงกว่า MBC ที่ไม่ได้รับการอัดระหว่างขึ้นรูป [44] ดังนั้นความหนาแน่นของวัสดุจึงส่งผลต่อความแข็งแรง เมื่อวัสดุมีความหนาแน่นมากความแข็งแรงก็จะมากตามไปด้วย สามารถคำนวณหาความหนาแน่นของวัสดุได้จากการคำนวณมวลของวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุ ดังสมการที่ 2.8 [35]

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.8)$$

กำหนดให้

ρ = ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

m = น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง (kg)

V = ปริมาตรของวัสดุ (m^3)

2.8 วิธีการวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ในงานวิจัยนี้นอกจากการวิเคราะห์ผลจากการทดสอบคุณสมบัติยังมีการนำวิธีการทางทางสถิติเข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ โดยวิธีการที่ใช้คือ Tukey post-hoc บนโปรแกรม Minitab โดยเป็นนำมาใช้ในการช่วยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างเพื่อตรวจสอบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุด้วย ANOVA เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลมีค่า P-value มีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยใช้ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ถ้าข้อมูลมีนัยสำคัญทางสถิติสามารถใช้ Tukey post-hoc ในการวิเคราะห์ต่อไปได้ [45]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 กระบวนการผลิต

3.1.1 การเตรียมวัสดุ

บดเกลบดิบด้วยเครื่องบดเนกประสงค์ความเร็วสูง Power Grinder TQ-500Y ดังรูปที่ 3.1 เป็นเวลา 60 และ 120 วินาที หลังจากนั้นนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อน Retsch ดังรูปที่ 3.2 เพื่อดูการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเกลบบดที่เวลา 60 และ 120 วินาที



รูปที่ 3.1 เครื่องบดเนกประสงค์ความเร็วสูง Power Grinder TQ-500Y

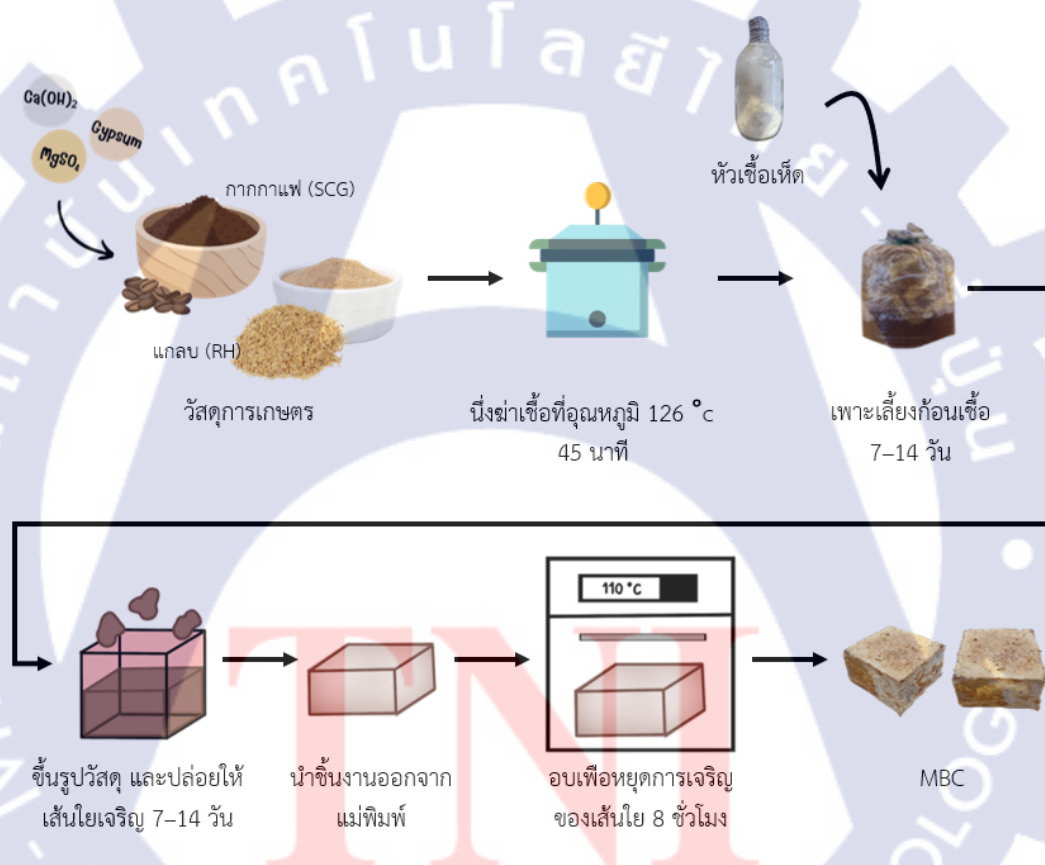


รูปที่ 3.2 ตะแกรงร่อน Retsch

3.1.2 การตรวจสอบการกระจายตัวของอนุภาคเกลบบดที่เวลา 60 และ 120 วินาที

- i. บดเกลบด้วยบดอเนกประสงค์ ดังรูปที่ 3.1 ที่เวลา 60 และ 120 วินาที
- ii. นำเกลบไปร่อนด้วยตะแกรงร่อน Retsch ขนาด 600 μm , 425 μm , 250 μm และ 150 μm ดังรูปที่ 3.2
- iii. ชั่งน้ำหนักเกลบที่เหลืออยู่บนตะแกรงแต่ละชั้น
- iv. คำนวณสัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคเกลบ

3.1.3. การเตรียมก้อนเชื้อและการขึ้นรูปวัสดุ MBC



รูปที่ 3.3 กระบวนการขึ้นรูป MBC

จากรูปที่ 3.3 กระบวนการผลิต MBC ปรับปรุงวิธีการจากวิธีการเพาะเห็ดนางฟ้า [17] ผสมอาหารเลี้ยงกากกาแฟและเกลบที่อัตราส่วนของกากกาแฟ:เกลบ(SCG:RH, SCG:RHG)เท่ากับ 70:30 จากนั้นผสมปูนขาว ดีเกลือ และยิปซัมตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักอาหารเลี้ยง 1000 :ปูนขาว 10 :ดี

เกลือ 2 : ยิปซัม 2-5 เติมน้ำ 1.5 เท่าของน้ำหนักแห้ง นำอาหารเลี้ยงที่ได้ไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 126 °C เวลา 45 นาที ด้วยเครื่อง Portable Pressure Steam Sterilizer DGS-280B ดังรูปที่ 3.3 จากนั้นปล่อยให้อาหารเลี้ยงเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง นำอาหารเลี้ยงที่เย็นไปหยอดเชื้อเห็ดนางรมสายพันธุ์ *Pleurotus ostreatus* (ฟาร์มลัดณ์ลิล จ.สระบุรี) ที่ปริมาณ 15% ของน้ำหนักแห้งนี้ บ่มให้เชื้อเจริญเติบโตเป็นเวลา 7-14 วันในสภาวะควบคุมที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% RH อุณหภูมิ 25-28 °C ด้วยระบบ Mini Smart farm จากนั้นนำก้อนเชื้อมาอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ที่ต้องการด้วยตุ้มน้ำหนัก 500 กรัม นำกลับไปบ่มอีกครั้งเพื่อให้เส้นใยเจริญเติบโตเป็นเวลา 7-14 วัน ต่อมานำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และนำไปอบเพื่อหยุดการเจริญของเส้นใย และนำความชื้นออกเพื่อป้องกันการเกิดราอื่นด้วยตู้อบ redLINE BINDER RF115 ดังรูปที่ 3.5 ที่อุณหภูมิ 110 °C ระยะเวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 เครื่อง Portable Pressure Steam Sterilizer DGS-280B



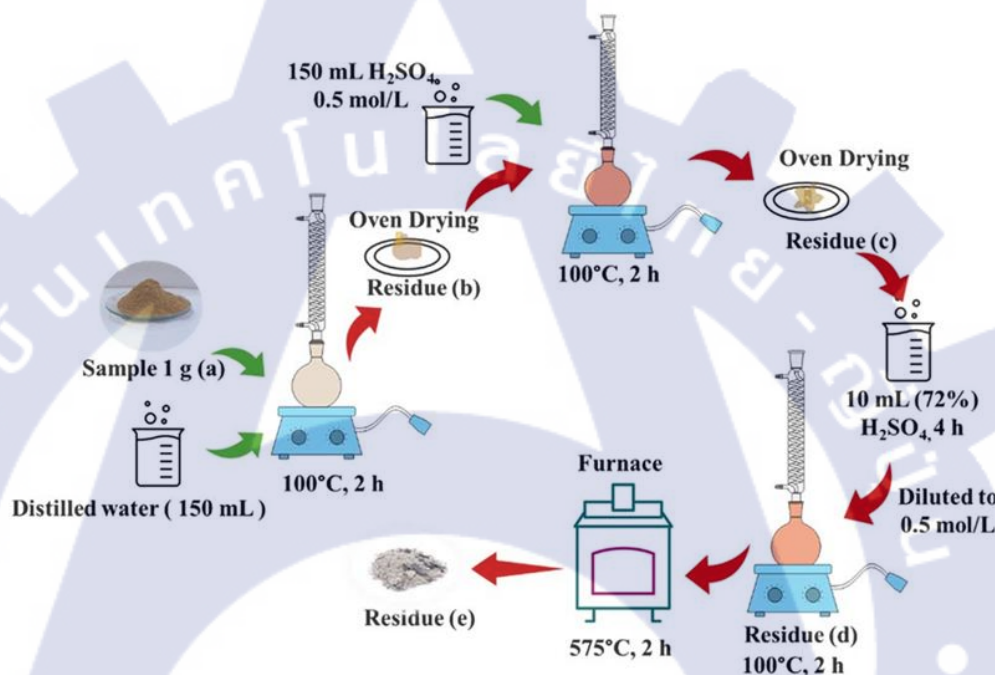
รูปที่ 3.5 ตู้อบ redLINE BINDER RF115

3.2 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของแกลบ

3.2.1 การวิเคราะห์ FTIR Daimond ATR

วิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุด้วยวิธีการ FTIR เทคนิค Daimond ATR ด้วยเครื่อง Nicolet iS50, Thermo Scientific, USA Beamsplitter: KBr สแกน 64 รอบ ช่วงคลื่นที่สแกน 4,000 ถึง 400 cm^{-1} ความละเอียด 4 cm^{-1}

3.2.2 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของแกลบด้วยวิธีการ Chesson Datta



รูปที่ 3.6 วิธีการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของแกลบ [34]

วิธีการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของแกลบ

- i. เตรียมตัวอย่างแกลบน้ำหนัก 1 กรัม (a)
- ii. รีฟลักซ์ตัวอย่าง a ด้วยน้ำ 150 ml อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- iii. อบตัวอย่างให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ และชั่งน้ำหนัก (b)
- iv. รีฟลักซ์ตัวอย่าง b ด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 m ปริมาตร 150 ml อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- v. อบตัวอย่างให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ และชั่งน้ำหนัก (c)
- vi. แฉตัวอย่าง (c) ในกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 725 v/v

- vii. รีฟลักซ์ตัวอย่าง c ด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 m ปริมาตร 150 ml อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- viii. อบตัวอย่างให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ และชั่งน้ำหนัก (d)
- ix. เผาตัวอย่าง d ที่อุณหภูมิ 575 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง ดังรูปที่ 3.7
- x. ชั่งน้ำหนักเถ้าที่เหลือจากการเผา (e)
- xi. คำนวณปริมาณร้อยละของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน



รูปที่ 3.7 เตาเผาอุณหภูมิสูง ADVANTEC รุ่น FUW232PB

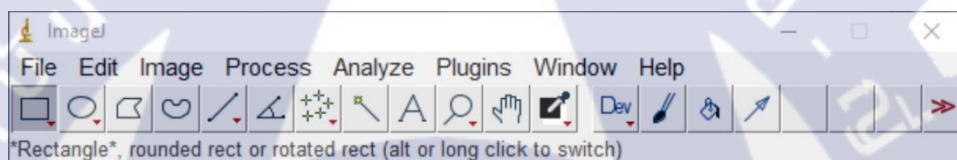
3.3 โครงสร้างจุลภาค ลักษณะพื้นผิวของวัสดุ การวิเคราะห์การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนจานเพาะ

3.3.1 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ

ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์ IPS HD กำลังขยาย 2000X ดังรูปที่ 3.8 เพื่อดูลักษณะของเส้นใยเส้นใยไมซีเลียมที่ผิวของวัสดุ และใช้เครื่อง Micro CT ถ่ายภาพชิ้นงานด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์โดยไม่ทำลาย เพื่อดูลักษณะของรูพรุนภายในชิ้นงาน ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ ดังรูปที่ 3.9 ในการตรวจสอบปริมาตรของรูพรุนภายในวัสดุ เปรียบเทียบกับปริมาตรของชิ้นงาน และตรวจสอบขนาดของรูพรุนภายในชิ้นงาน



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์ IPS HD กำลังขยาย 2000X



รูปที่ 3.9 โปรแกรม ImageJ

3.3.2 วิธีการวิเคราะห์รูพรุนของชิ้นงานและการเจริญของเส้นใยไม่ซีเลี่ยมด้วย โปรแกรม

ImageJ

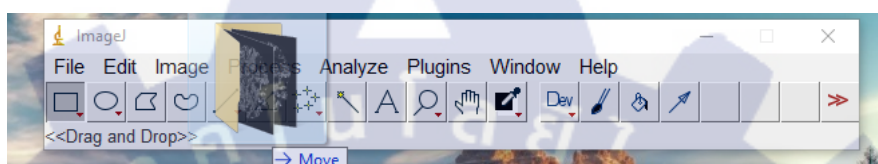
- i. นำเข้าไฟล์ที่ต้องการวิเคราะห์โดยเลือกไฟล์เดอร์ที่ต้องการไปวางที่โปรแกรม ดังรูปที่ 3.10
- ii. ตั้งค่าไฟล์ให้เป็น 8 bit ที่เมนู Image > Type > 8 bit ดังรูปที่ 3.11
- iii. Set scale ของรูปโดยลากเส้นตรงบนรูปบริเวณที่เป็นตัวอย่างชิ้นงาน และกำหนดค่าตามขนาดจริงของตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.12
- iv. วาดวงกลมให้อยู่ในขอบเขตของชิ้นงาน ปรับค่า Specify ให้เหมาะสม ดังรูปที่ 3.13
- v. ลบพื้นหลังโดยเลือก Edit > Clear Outside ดังรูปที่ 3.14 และ กดปุ่ม Ctrl + Shift + x เพื่อตัดรูป
- vi. คำนวณพื้นที่รูปโดยเลือก Analyze > Measure หรือกดปุ่ม Ctrl + M ดังรูปที่

3.15

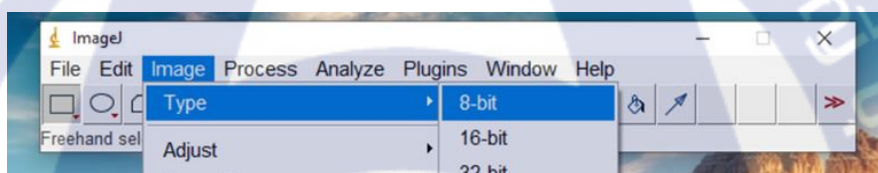
vii. ตั้งระดับของ Threshold ที่ช่วง 0-40 เพื่อวิเคราะห์รูพรุนของชิ้นงาน โดยกำหนดช่วงจากการมองด้วยตา Image > Adjust > Threshold ดังรูปที่ 3.16 พื้นที่สีแดงเป็นรูพรุนภายในชิ้นงานตัวอย่าง

viii. วิเคราะห์รูพรุนที่ได้จากการกำหนดช่วงของ Threshold จาก Analyze Particles ที่เมนู Analyze > Analyze Particles เลือก Show เป็น Masks และเลือก Summarize ตามรูปที่ 3.17

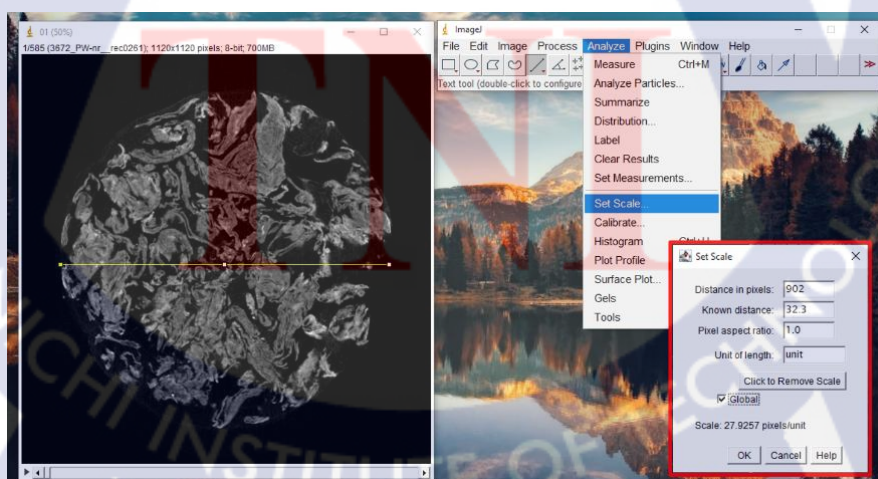
ix. บันทึกค่าที่ได้ ดังรูปที่ 3.18 และนำไปวิเคราะห์ผลปริมาตรของรูพรุนภายในชิ้นงาน



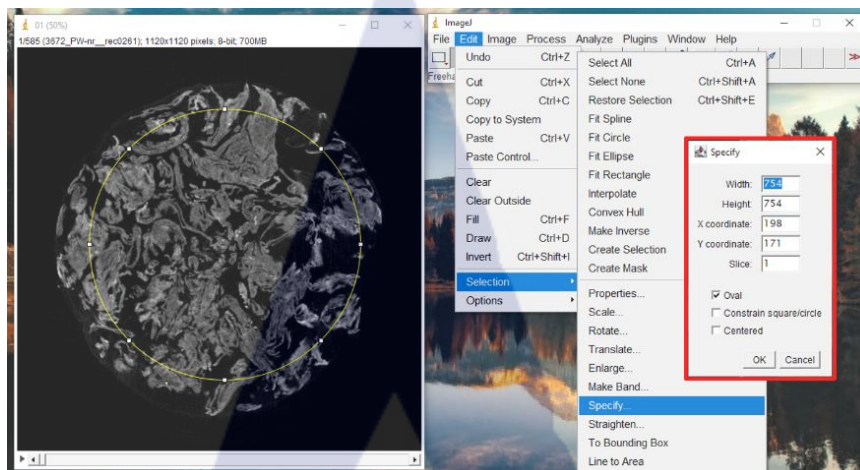
รูปที่ 3.10 วิธีการนำเข้าไฟล์



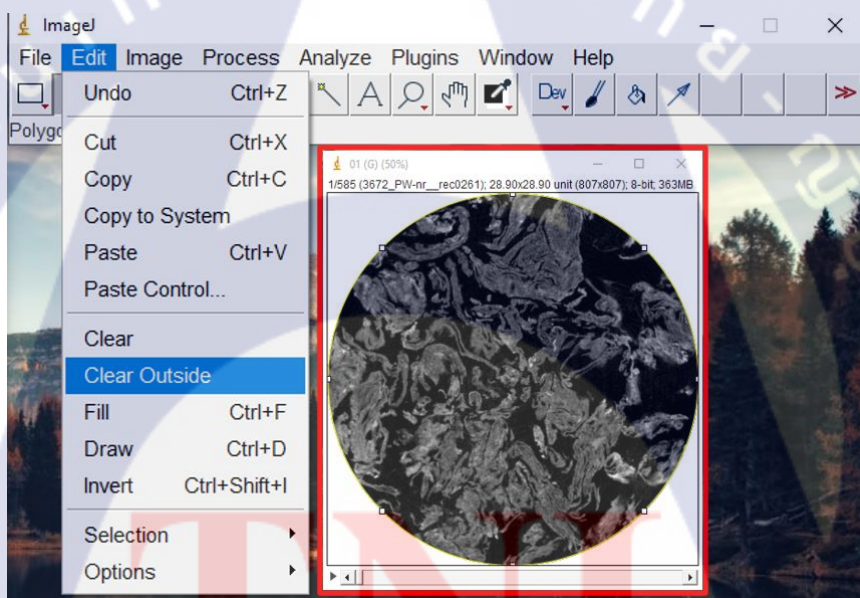
รูปที่ 3.11 วิธีปรับชนิดไฟล์



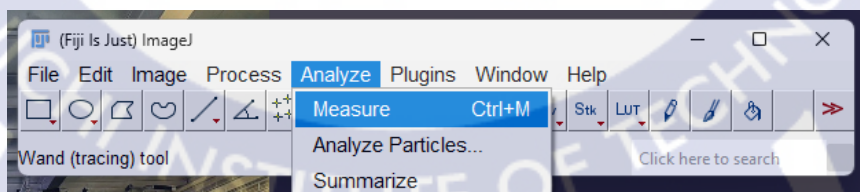
รูปที่ 3.12 วิธีการตั้งค่า scale



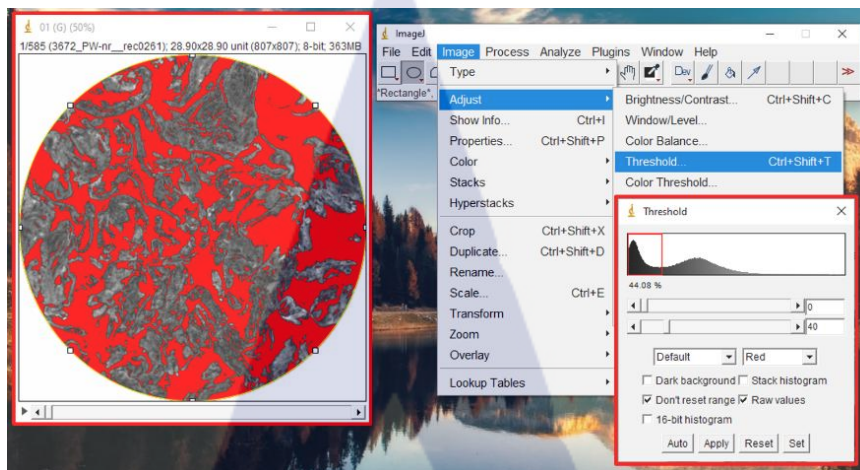
รูปที่ 3.13 การตั้งค่า Specify



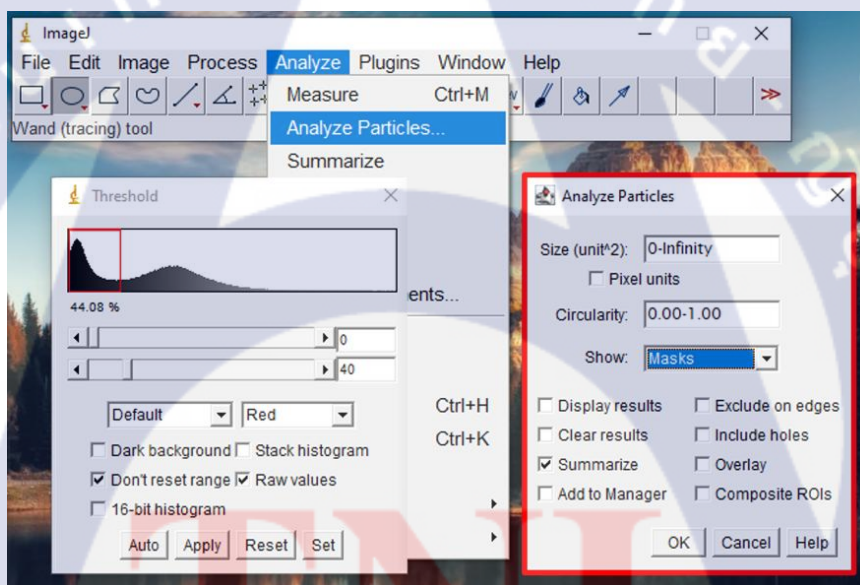
รูปที่ 3.14 วิธีการลบพื้นหลัง และรูปตัวอย่าง



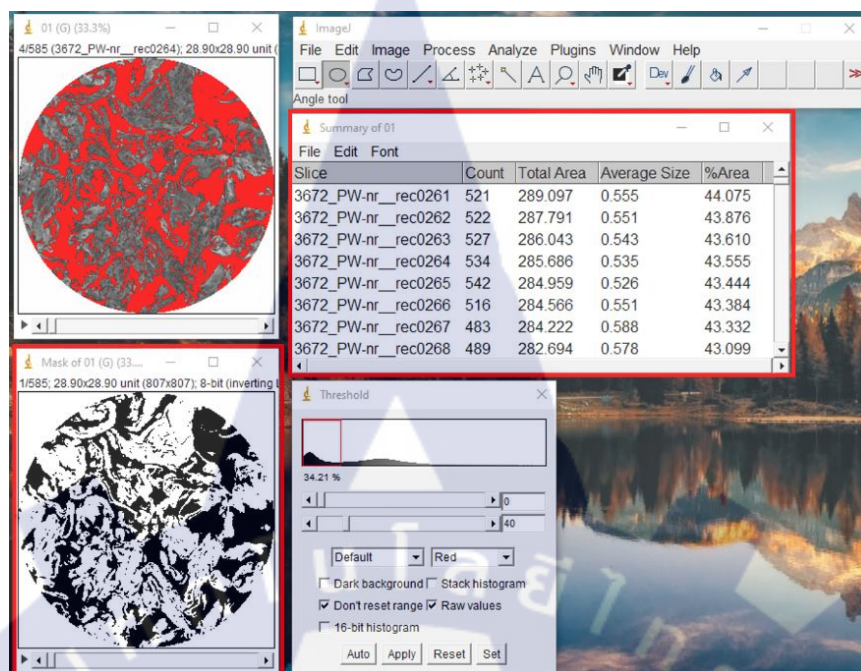
รูปที่ 3.15 วิธีการคำนวณพื้นที่ภาพ



รูปที่ 3.16 การตั้งค่าระดับ Threshold



รูปที่ 3.17 การตั้งค่า Analyze Particles



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างรูป และข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลผ่านโปรแกรม ImageJ

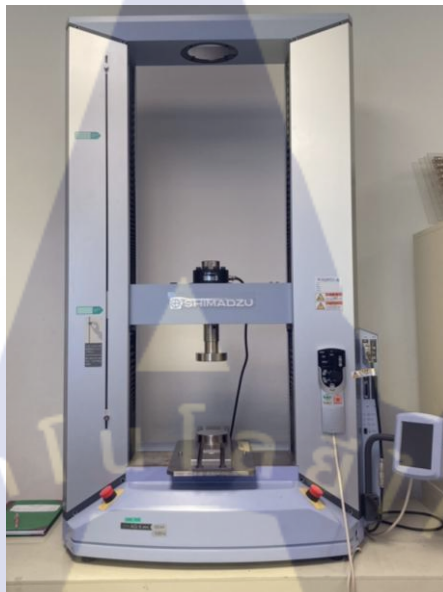
3.4 การทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงาน

3.4.1 ความต้านทานแรงกดแบบวัฏจักร (Compression test)

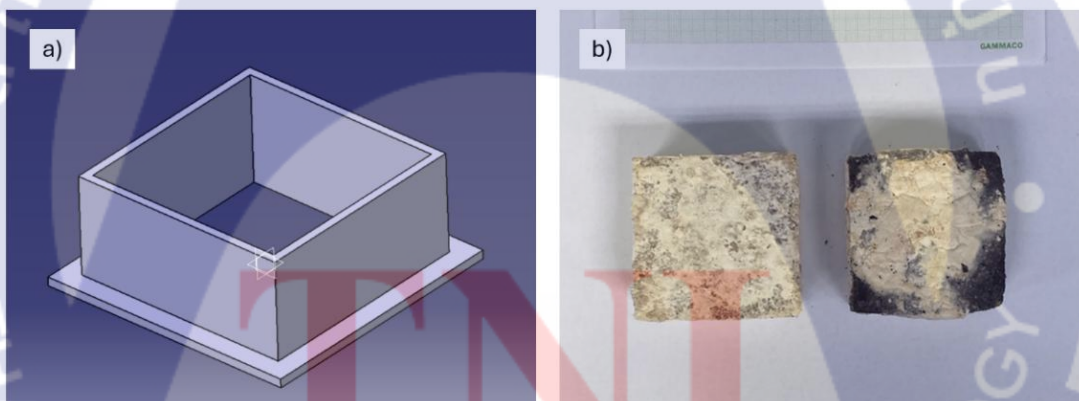
ทดสอบความต้านทานแรงกดของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM D1621 [46] แบบวัฏจักรทั้งหมด 3 รอบ/ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Shimadzu universal testing machine รุ่น AG-Xplus ดังรูปที่ 3.19

- i. ชิ้นรูปชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์จาก 3D Printer ขนาด 70x70x40 mm ดังรูป 3.20
- ii. ตั้งค่าเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ กำหนดค่า Displacement control 2.5 mm/min
- iii. ค่า Stroke 6–10 mm และตั้งค่าเป็นการทดสอบแบบ cyclic compression ในโปรแกรม TRAPEZIUM LITE X
- iv. วัดขนาดตัวอย่างของชิ้นทดสอบ ใส่ค่าลงในโปรแกรม และ Calibrate เครื่องมือวัดก่อนทำการทดสอบ
- v. วางชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบให้อยู่กึ่งกลางของฐานของหัวกด
- vi. ตั้งตำแหน่งของหัวกดให้สัมผัสกับผิวของชิ้นงาน และเริ่มทดสอบการกดชิ้นงาน
- vii. บันทึกผลการทดสอบ และนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stress และ Strain วัสดุ

viii. ทำการทดสอบในแต่ละสูตรทั้งหมด 6 ซ้ำ



รูปที่ 3.19 เครื่อง Shimadzu's AGS-X series universal test

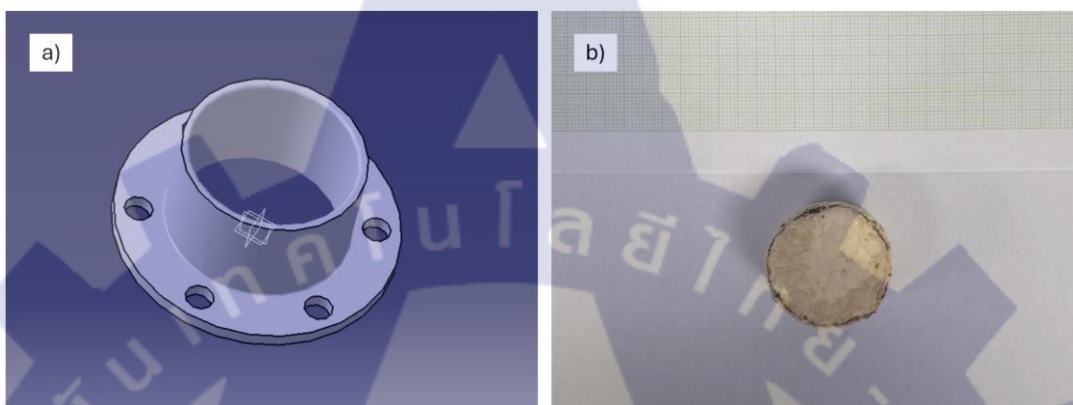


รูปที่ 3.20 a) แม่พิมพ์ขนาด 70×70×40 mm b) ตัวอย่างชิ้นงานสำหรับการทดสอบความสามารถในการรับแรงกด

3.4.2 การดูดซึมน้ำของวัสดุ (Water absorption)

- i. ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์จาก 3D Printer ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm สูง 25 mm ดังรูปที่ 3.21
- ii. เตรียมภาชนะใส่น้ำกลั่นโดยให้ความสูงของระดับน้ำสูงกว่าความสูงของชิ้นงาน

- iii. ชั่งน้ำหนักแห้งของชิ้นงานก่อนทดสอบ
- iv. แช่ชิ้นงานลงในภาชนะที่เตรียมไว้ ดังรูปที่ 3.22
- v. ชั่งน้ำหนักของชิ้นงานทุก 15 นาที และบันทึกผล (15 นาที, 30 นาที, 45 นาที, 1 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง 48 ชั่วโมง 72 ชั่วโมง และ 96 ชั่วโมง)
- vi. ทดสอบการดูดซึมน้ำแต่ละสูตรทั้งหมด 6 ซ้ำ



รูปที่ 3.21 a) แม่พิมพ์ทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm สูง 25 mm b) รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบ

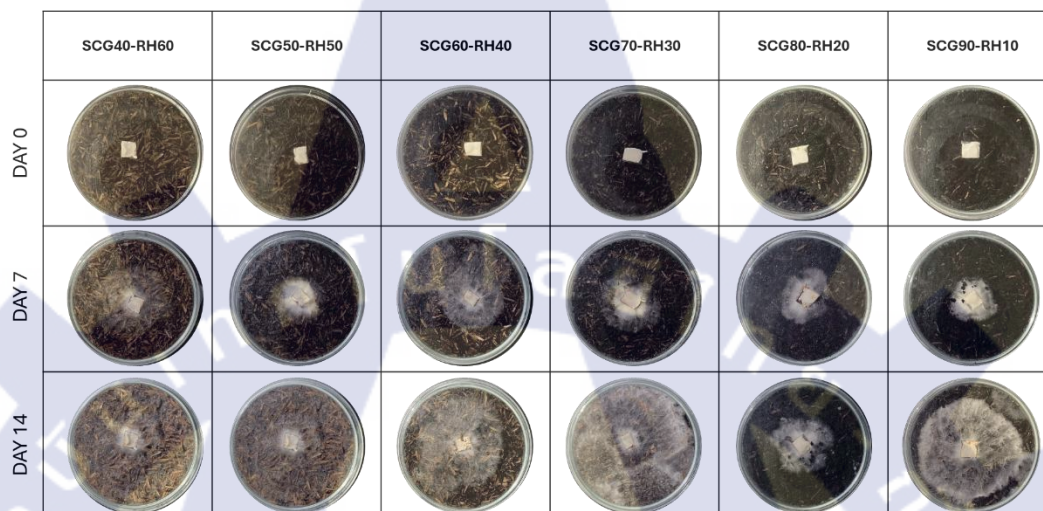


รูปที่ 3.22 ตัวอย่างการทดสอบการดูดซึมน้ำ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

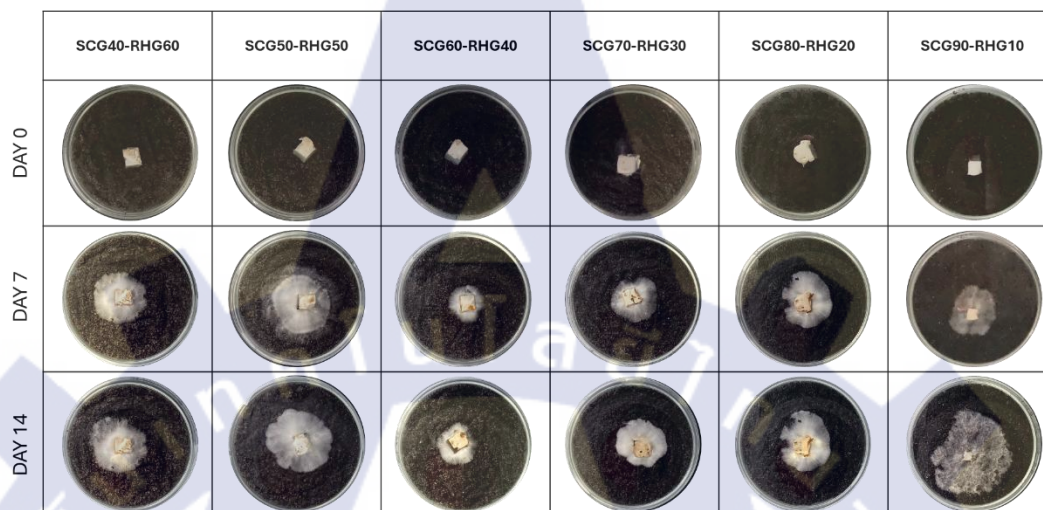
4.1 การเจริญเติบโตของเส้นใย



รูปที่ 4.1 การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยงระหว่างกากกาแฟ-แกลบ (SCG-RH) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.1 แสดงการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมในระยะเวลา 14 วัน บนอาหารเลี้ยงกากกาแฟ-แกลบ (SCG-RH) โดยเส้นใยไมซีเลียมมีการเจริญเติบโตแบบแผ่ขยายตามแนวรัศมีค่อย ๆ กระจายตัวจนเต็มจานเพาะเชื้อแต่มีความหนาแน่นของเส้นใยที่ต่ำ เส้นใยไมซีเลียมบน SCG40-RH60 และ SCG60-RH40 มีการแผ่ขยายของเส้นใยในวันที่ 7 มากกว่าอาหารเลี้ยง SCG50-RH50, SCG70-RH30, SCG80-RH20 และ SCG90-RH10 แต่ความหนาแน่นของเส้นใยที่ต่ำ จากภาพ SCG50-RH50, SCG70-RH30, SCG80-RH20 และ SCG90-RH10 พื้นที่สีขาวซึ่งแสดงถึงเส้นใยไมซีเลียมมีความชัดเจนกว่าบนอาหารเลี้ยง SCG40-RH60 และ SCG60-RH40 ในวันที่ 14 เส้นใยไมซีเลียมบน SCG40-RH60, SCG50-RH50 และ SCG70-RH30 เจริญเติบโตและแผ่ขยายจนเต็มจานเพาะ ซึ่งเส้นใยไมซีเลียมที่ได้จาก SCG70-RH30 มีความหนาแน่นมากกว่า SCG40-RH60 และ SCG50-RH50 และเส้นใยไมซีเลียมที่ได้จาก SCG60-RH40, SCG80-RH20 และ SCG90-RH10 มีการแผ่ขยายของเส้นใยเพิ่มขึ้นแต่ยังมีพื้นที่ของอาหารเลี้ยงที่ยังเหลืออยู่ จะเห็นได้ว่า SCG90-RH10 เส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้มากกว่า SCG60-RH40 และ SCG80-RH20 อีกทั้งมีความหนาแน่น

ของเส้นใยมากกว่าบนอาหารเลี้ยง SCG40-RH60 และ SCG50-RH50 แต่มีการเกิดราชนิดอื่นบริเวณขอบด้านขวาที่ติดกับจานเพาะ เนื่องจากปริมาณของกากกาแฟที่สูงส่งผลให้อาหารเลี้ยงมีโอกาสในการปนเปื้อนของเชื้อรามากกว่าบนอัตราส่วนอื่น

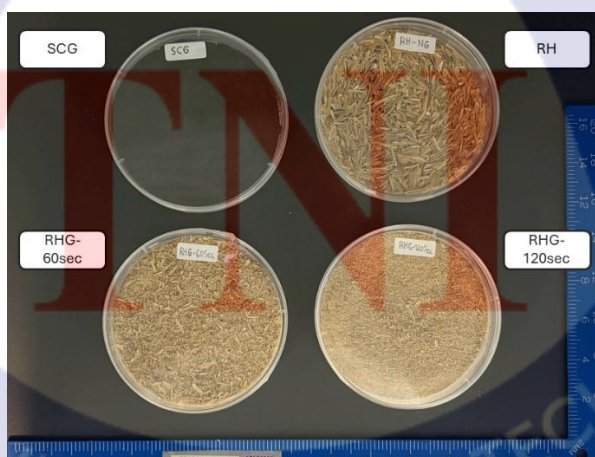


รูปที่ 4.2 การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยงระหว่างกากกาแฟ-แกลบคด (SCG-RHG) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.2 แสดงการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยงกากกาแฟ-แกลบคด (SCG-RHG) ระยะเวลา 14 วัน เส้นใยไมซีเลียมมีการเจริญเติบโตแบบแผ่ขยายในแนวรัศมีเช่นเดียวกับบนอาหารเลี้ยงกากกาแฟ-แกลบที่ไม่ผ่านการบด (SCG-RH) มีการกระจายตัวที่ต่ำกว่า แต่ความหนาแน่นของเส้นใยมาก โดยในวันที่ 7 จะเห็นได้ว่าเส้นใยไมซีเลียมบน SCG40-RHG60 และ SCG50-RHG50 มีการแผ่ขยายมากกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ ในวันที่ 14 เส้นใยไมซีเลียมบน SCG40-RHG60 และ SCG50-RHG50 มีการแผ่ขยายเพิ่มเติมในแนวรัศมีต่ำ แต่มีความหนาแน่นและความฟูของเส้นใยไมซีเลียมเพิ่มขึ้น เส้นใยไมซีเลียมที่ได้จาก SCG60-RHG40 มีการแผ่ขยายของเส้นใยที่ต่ำที่สุดในทุกอัตราส่วน แต่ยังคงมีความหนาแน่นของเส้นใยอยู่ การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบน SCG70-RHG30 และ SCG80-RHG20 มีการแผ่ขยายในแนวรัศมีที่น้อยเช่นเดียวกับเส้นใยไมซีเลียมบน SCG40-RHG60 และ SCG50-RHG50 ซึ่งจะเห็นได้ว่าบน SCG70-RHG30 มีความหนาแน่นและความฟูของเส้นใยไมซีเลียมมากกว่าบน SCG80-RHG20 และเส้นใยไมซีเลียมบน SCG90-RHG10 มีการแผ่ขยายของเส้นใยไมซีเลียมในแนวรัศมีมากที่สุด แต่ความหนาแน่นและความฟูของเส้นใยไมซีเลียมต่ำกว่าบนอาหารเลี้ยงอัตราส่วนอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด

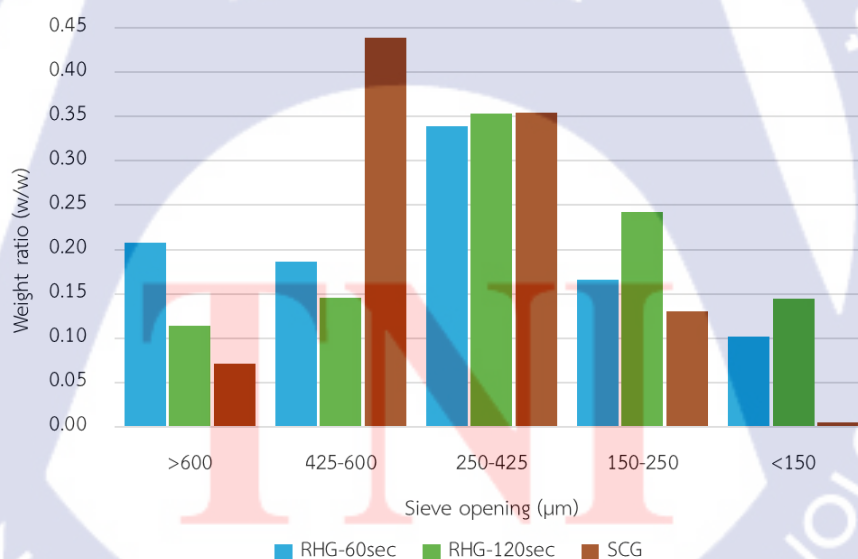
จากการศึกษาการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยงกากกาแฟผสมเกลบที่ไม่ผ่านการบด (SCG-RH) และกากกาแฟผสมเกลบบด (SCG-RHG) ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน พบว่าเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยง SCG-RH เส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตโดยการแผ่ขยายในแนวรัศมีได้ดีกว่าบน SCG-RHG โดยอัตราส่วนที่มีการเจริญเติบโตของเส้นใยดีที่สุดคือ 70:30 ในขณะเดียวกัน ถึงแม้ว่า SCG-RHG มีการแผ่ขยายของเส้นใยในแนวรัศมีที่ต่ำกว่าบน SCG-RH แต่ก็มี ความหนาแน่นและความฟูของเส้นใยที่มากกว่า ซึ่งสังเกตได้จากความทึบของเส้นใยโดยเส้นใยที่มีความหนาแน่นสูง เส้นใยจะเจริญเติบโตจนเห็นเป็นสีขาวทึบได้อย่างชัดเจน โดยอัตราส่วนที่ให้ความหนาแน่นของเส้นใยไมซีเลียมได้มากที่สุดคือ 70:30 ซึ่งการเจริญเติบโตได้ดีในแนวรัศมีจะช่วยให้เส้นใยกระจายตัวได้ดี รวมถึงความหนาแน่นของเส้นใยไมซีเลียมก็ส่งผลโดยตรงต่อการยึดเกาะอนุภาคของวัสดุ เมื่อเส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ดีและมีความหนาแน่นของเส้นใยมากจะทำให้เส้นใยไมซีเลียมสามารถยึดเกาะอนุภาคของวัสดุไว้ด้วยกันได้ดีกว่าเส้นใยไมซีเลียมที่มีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาการเจริญเติบโตของเส้นใยทั้งในแนวรัศมีและความหนาแน่นของเส้นใยควบคู่กัน และจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ดีบน SCG-RH และ SCG-RHG ที่อัตราส่วน 70:30 ผู้วิจัยจึงได้เลือกอัตราส่วน 70:30 มาศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของขนาดอนุภาคเกลบที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุ เพื่อปรับปรุงและพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุให้ดียิ่งขึ้น

4.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาควัสดุ



รูปที่ 4.3 ลักษณะของกากกาแฟ (SCG) เกลบที่ไม่ผ่านการบด (RH) และเกลบบดที่ 60 (RHG-60sec) และ 120 (RHG-120sec) วินาที

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของอนุภาคกากกาแฟ (SCG) แกลบที่ไม่ผ่านการบด (RH) แกลบบดที่ 60 วินาที (RHG-60sec) และแกลบบดที่ 120 วินาที (RHG-120sec) จากภาพลักษณะของอนุภาคกากกาแฟเมื่อเปรียบเทียบกับ RH, RHG-60sec และ RHG-120sec อนุภาคจะละเอียดกว่า RH สังเกต RH พบว่ามีลักษณะของอนุภาคเป็นทรงตามแนวยาวและอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่กว่า $600\ \mu\text{m}$ โดยขนาดของอนุภาคตามแนวยาวเฉลี่ยประมาณ $10\ \text{mm}$ ส่งผลให้แกลบมีการจัดเรียงตัวอย่างหลวม ๆ และมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก ซึ่งแกลบบดที่ไม่ผ่านการบดมีความหนาแน่นรวมประมาณ $98\text{--}106.5\ \text{kg/m}^3$ [47] เมื่ออบแกลบจะทำให้ลักษณะของอนุภาคของแกลบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยลักษณะอนุภาคของ RHG-60sec มีความยาวลดลงจากเดิมและมีขนาดอนุภาคที่เล็กลง แต่ยังคงมีอนุภาคบางส่วนที่ยังไม่ถูกบด และเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการบดลักษณะอนุภาคของ RHG-120sec แสดงถึงเปลี่ยนแปลงของอนุภาคอย่างชัดเจน อนุภาคมีขนาดเล็กและมีความละเอียดมากขึ้นเมื่อเทียบกับ RH และ RHG-60sec จากการที่ลักษณะของอนุภาคมีขนาดเล็กและมีความเป็นฝุ่นผงมากขึ้นทำให้การเรียงตัวของอนุภาคมีช่องว่างที่ต่ำ เนื่องจากอนุภาคที่เล็กหรือฝุ่นผงที่เกิดจากการบดแกลบสามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างได้มาก จึงลดช่องว่างที่เกิดจากการเรียงตัวของอนุภาคได้ดีกว่า RH



รูปที่ 4.4 กราฟฮิสโตแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของ กากกาแฟ แกลบบดที่ 60 วินาที (RHG-60sec) และแกลบบดที่ 120 วินาที (RHG-120sec)

จากรูปที่ 4.4 แสดงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบบด จะเห็นได้ว่า SCG มีการกระจายตัวของอนุภาคสูงสุดอยู่ในช่วง 425 – 600 μm รองลงมาคือ 245 – 425 μm , 150 – 250 μm และขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 600 μm ตามลำดับ และกระจายตัวที่ขนาดอนุภาคเล็ก 150 μm RHG-60sec มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 245 – 425 μm รองลงมาเป็นขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 600 μm , 425 – 600 μm , 150 – 250 μm และขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 μm ตามลำดับ เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการบดแกลบเป็นสองเท่าทำให้สัดส่วนการกระจายตัวของอนุภาคเกิดการเปลี่ยนแปลง โดย RHG-120sec ยังคงมีสัดส่วนของอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของ 245 – 425 μm เช่นเดียวกันกับ RHG-60sec แต่อนุภาคในช่วงที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 600 μm และ 425 – 600 μm มีสัดส่วนที่ลดลงจาก RHG-60sec เนื่องจากเวลาบดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอนุภาคเหล่านี้ถูกบดให้มีขนาดที่เล็กลงทำให้ขนาดอนุภาคในช่วง 150 – 250 μm และขนาดอนุภาคเล็กกว่า 150 μm มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ RHG-60sec

4.3 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

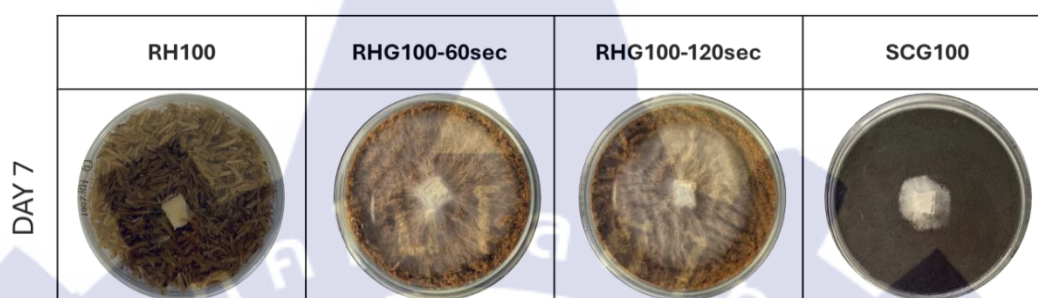
4.3.1 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของแกลบด้วยวิธีการ Chesson Datta

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงองค์ประกอบทางเคมีของแกลบ

	RH	RHG-60sec	RHG-120sec	กากกาแฟ [48]
เฮมิเซลลูโลส	13.86%	15.70%	19.96%	30–40%
เซลลูโลส	45.24%	49.75%	38.43%	8.6–13.3%
ลิกนิน	19.47%	18.60%	17.18%	25–33%

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ที่เป็นองค์ประกอบของแกลบซึ่งปริมาณของเฮมิเซลลูโลสที่ได้จาก RHG-120sec มีปริมาณสูงที่สุดเท่ากับ 19.96% รองลงมาคือ RHG-60sec 15.70% และ RH 13.86% ตามลำดับ และปริมาณของเซลลูโลสที่สูงที่สุดคือ RHG-60sec เท่ากับ 49.75% รองลงมาคือ RH 45.24% และ RHG-120sec ต่ำที่สุดเท่ากับ 38.43% ซึ่งเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม เนื่องจากบน RHG-60sec และ RHG-120sec มีปริมาณของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสที่มากกว่าบน RH จึงทำให้เส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ดีและมีความหนาแน่นของเส้นใยที่สูงกว่าบน RH นอกจากนี้ปริมาณของลิกนินเองก็ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม เช่นเดียวกัน เมื่อมีปริมาณลิกนินสูงจะทำให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ช้า เนื่องจากในการย่อย

สลายลิกนินไมซีเลียมจะต้องใช้พลังงานที่สูงกว่าการย่อยเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส [20], [49] ส่งผลให้การเจริญของเส้นใยไมซีเลียมบน RH เจริญเติบโตได้ไม่ดีเท่ากับบน RHG-60sec และ RHG-120sec เนื่องจากใน RH มีปริมาณของลิกนินสูงที่สุดเท่ากับ 19.47% รองลงมาคือ RHG-60sec 18.60% และ RHG-120sec 17.18% และจากข้อมูลอ้างอิงพบว่ากากกาแฟมีปริมาณของเฮมิเซลลูโลสประมาณ 30–40% เซลลูโลส 8.6–13.3% และลิกนิน 25–33% [48]



รูปที่ 4.5 การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยงกลบที่ไม่ผ่านการบด (RH) แกลบบดที่ 60 วินาที (RHG100-60sec) แกลบบดที่ 120 วินาที (RHG100-120sec) และกากกาแฟ (SHG100) วันที่ 7

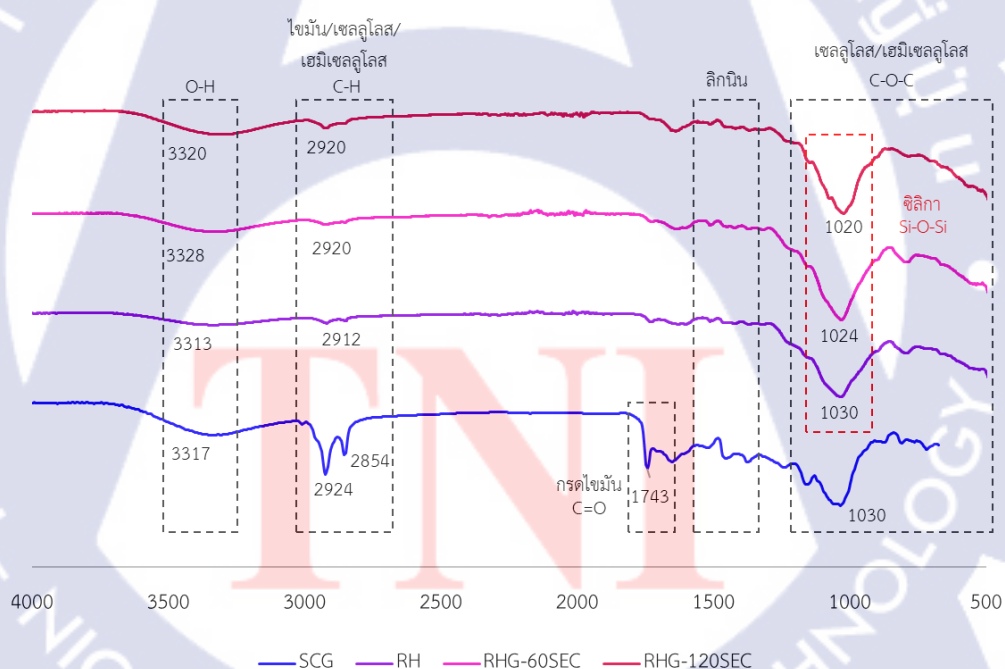
จากรูปที่ 4.5 แสดงลักษณะการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนกลบที่ไม่ผ่านการบด (RH) และกลบบด (RHG) วันที่ 7 เส้นใยไมซีเลียมบน RH เจริญเติบโตได้ยากเนื่องจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคกลบมีช่องว่างสูง อีกทั้งใน RH เองก็มีปริมาณของลิกนินที่สูงส่งผลให้เส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ยากเมื่อเปรียบเทียบกับ RHG-60sec และ RHG-120sec จากรูปแสดงให้เห็นว่า RHG-60sec สามารถเจริญเติบโตได้ดีในแนวนอน เส้นใยมีการแผ่ขยายในแนวนอนได้มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ RH และ RHG-120sec โดยบนอาหารเลี้ยง RHG-60sec มีเซลลูโลสสูงที่สุด (ตารางที่ 4.1) และเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่เส้นใยไมซีเลียมใช้ในการเจริญเติบโต และเส้นใยไมซีเลียมบน RHG-120sec สามารถเจริญเติบโตในแนวนอนได้ดีต่ำกว่า RHG-60sec แต่ดีกว่าบน RH แต่เมื่อดูจากความหนาแน่นของปริมาณของเส้นใยไมซีเลียมจะเห็นว่าเส้นใยไมซีเลียมบน RHG-120sec มีความหนาแน่นและความฟูของเส้นใยที่มากกว่าบน RH และ RHG-60sec เนื่องจาก RHG-120sec มีลิกนินต่ำส่งผลให้เส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าบน RH เนื่องจากปริมาณลิกนินที่สูงส่งผลให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ช้ากว่าบนกลบบด รวมถึงขนาดอนุภาคของกลบที่มีขนาดเล็กลงช่วยให้เส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าบน RH และทำให้เส้นใยไมซีเลียมมีความหนาแน่นสูงขึ้นส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ และการเจริญเติบโตของเส้นใย

ไมซีเลียมบนกากกาแฟแม้จะมีปริมาณของลิแกนด์ที่สูงแต่ก็มีปริมาณของเฮมิเซลลูโลสที่สูงเช่นเดียวกัน จึงทำให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดีกว่าบน RH แต่มีการแผ่ขยายในแนวรัศมีที่น้อยกว่าบน RHG-60sec และ RHG-120sec

ดังนั้นการบดเกลบทำให้อนุภาคของวัสดุมีขนาดเล็กลง และยังส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุอีกด้วย สามารถสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุมีผลต่อการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม ปริมาณของลิแกนด์และช่องว่างระหว่างอนุภาคที่ต่ำลงช่วยให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดี เส้นใยไม่ความหนาแน่นและแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุดีขึ้น

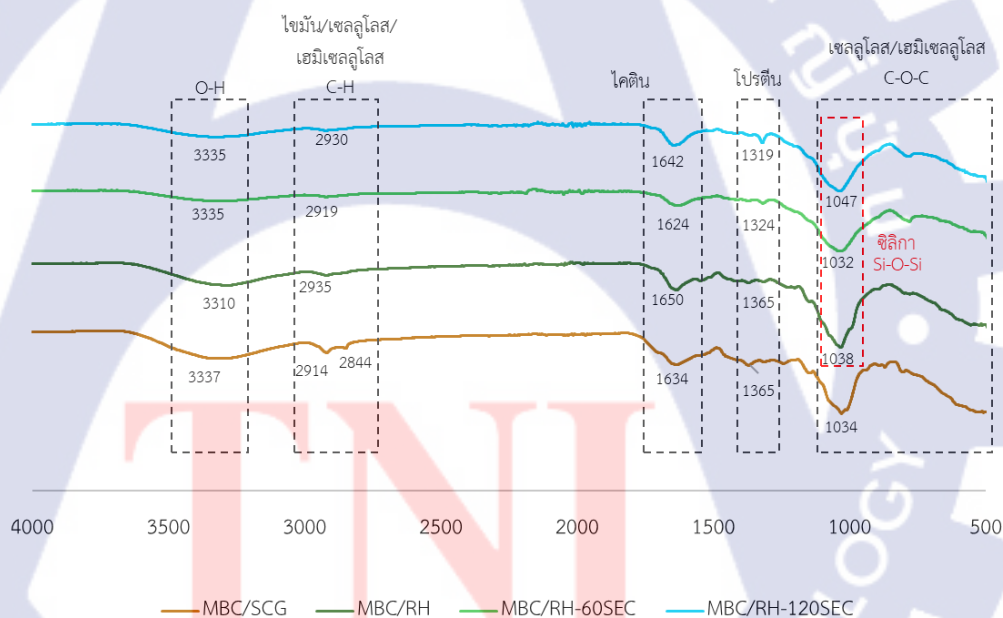
4.3.2 การวิเคราะห์ FTIR Diamond ATR

นำเทคนิค FTIR Diamond ATR มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในวัตถุดิบ และดูการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีของกากกาแฟและเกลบ ก่อนและหลังการเพาะเลี้ยงเส้นใยไมซีเลียมบนวัสดุ MBC



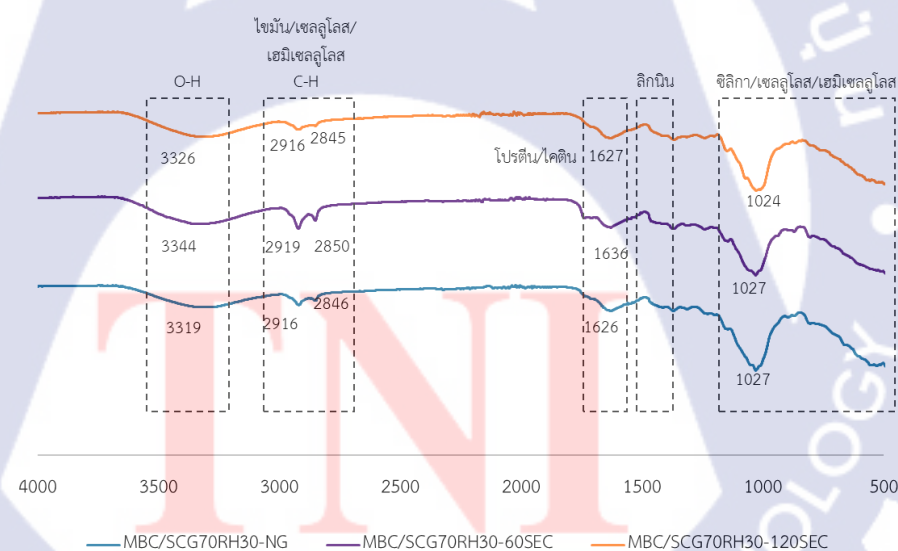
รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของกากกาแฟ (SCG), เกลบ (RH), เกลบบดที่ 60 วินาที (RHG-60sec) และ เกลบบด 120 วินาที (RHG-120sec) ด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FTIR

จากรูปที่ 4.6 เป็นการวิเคราะห์ FTIR ของกากกาแฟ (SCG) แกลบ (RH) แกลบบดที่เวลา 60 วินาที (RHG-60sec) และแกลบบดที่เวลา 120 วินาที (RHG-120sec) พบพีกของ O-H ในช่วง $\sim 3300\text{ cm}^{-1}$ ในทุกอย่างแสดงถึงความชอบน้ำของวัสดุ ซึ่งส่งผลให้วัสดุมีการดูดซึมน้ำสูง และพบพันธะ C-H อยู่ในช่วง $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ บ่งบอกถึงองค์ประกอบของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยในตัวอย่าง SCG มีลักษณะของพีกที่แตกต่างจาก RH, RHG-60sec และ RHG-120sec ซึ่งบ่งบอกถึงองค์ประกอบของไขมัน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสว่ามีปริมาณที่สูงกว่า RH, RHG-60sec และ RHG-120sec นอกจากนี้ SCG ยังมีพีกที่ 1743 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง C=O ที่เป็นกรดไขมันซึ่งเป็นองค์ประกอบในกากกาแฟ และในช่วง $1400\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ คือวงแหวนอะโรมาติก C=C โดยใน SCG พีกจะเด่นกว่าในแกลบ แสดงถึงปริมาณของลิกนินที่สูง ส่งผลให้เส้นใยไมซีเลียมบนกากกาแฟเจริญเติบโตได้ช้ากว่าบนแกลบ และในช่วง Fingerprint ของวัสดุแสดงถึง C-O-C ซึ่งคือองค์ประกอบของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในวัสดุ โดย RH, RHG-60sec และ RHG-120sec มีลักษณะแตกต่างจาก SCG บ่งบอกถึงองค์ประกอบของ Si-O-Si หรือการมีอยู่ของซิลิกา



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบของ MBC ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FTIR จากกากกาแฟล้วน (MBC/SCG100), MBC จากแกลบล้วนที่ไม่ผ่านการบด (MBC/RH), MBC จากแกลบบดแล้ว 60 วินาที (MBC/RHG100-60sec) และ MBC จากแกลบบดแล้ว 120 วินาที (MBC/RHG100-120sec)

จากรูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ FTIR ของ MBC จากกากกาแฟล้วน (MBC/SCG100) แกลบล้วน (MBC/RH100) แกลบบดล้วนที่เวลา 60 วินาที (MBC/RHG100-60sec) และแกลบบดล้วนที่เวลา 120 วินาที (MBC/RHG100-120sec) พบพีคของ O-H ในทุกตัวอย่างเช่นเดียวกับกากกาแฟและแกลบที่ยังไม่ได้เพาะเลี้ยงเส้นใยไมซีเลียม เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพาะเส้นใยไมซีเลียมบนกากกาแฟและแกลบพีคในช่วง $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ ลดลง ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่ไมซีเลียมเข้ามาเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีส่งผลให้ พีคในช่วง $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงถึงไขมัน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสมีขนาดที่ลดลง เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมที่อยู่ในกากกาแฟและแกลบ นอกจากนี้ยังพบพีคของไคตินและโปรตีนเพิ่มขึ้นมาซึ่งบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีหลังจากการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนกากกาแฟและแกลบ เมื่อทำการเปรียบเทียบพีคของ MBC/SCG100 กับ SCG จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าพีคในช่วง 1743 cm^{-1} ลดลงอย่างชัดเจนซึ่งเป็นการย่ำว่าเส้นใยไมซีเลียมได้เข้าไปเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ และในช่วง Fingerprint ของวัสดุยังคงแสดงให้เห็นถึงเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสบนกากกาแฟและแกลบเช่นเดียวกับ SCG, RH, RHG-60sec และ RHG-120sec และ MBC/RH100, MBC/RHG100-60sec และ MBC/RHG100-120sec ยังพบพีคของ Si-O-Si

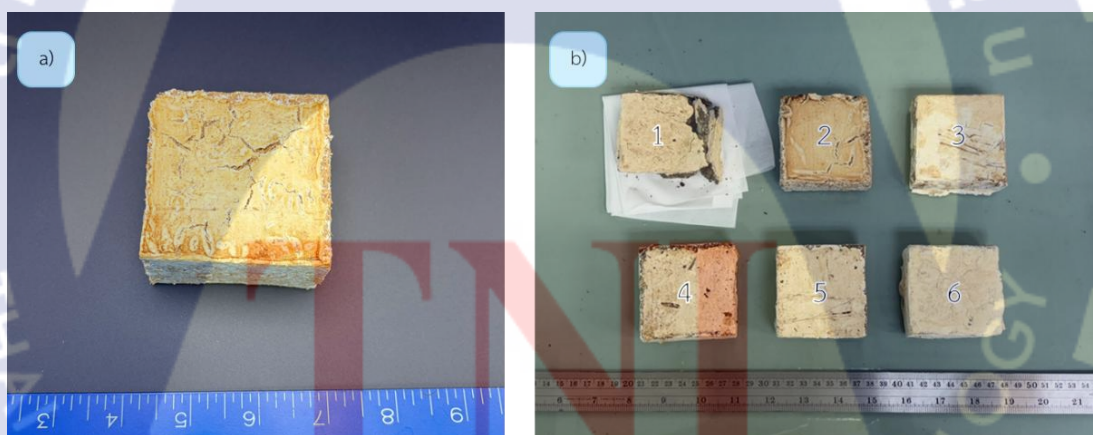


รูปที่ 4.8 องค์ประกอบของ MBC จากกากกาแฟ-แกลบไม่บดอัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RH30), MBC จากกากกาแฟ-แกลบบด 60 วินาทีที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-60sec) และ MBC จากกากกาแฟ-แกลบบด 120 วินาทีที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-120sec) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FTIR

จากรูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ FTIR ของ MBC จากกากกาแฟผสมแกลบที่ไม่ผ่านการบด อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RH30), MBCจากกากกาแฟผสมแกลบบดที่ 60 วินาทีอัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-60sec) และ MBCจากกากกาแฟผสมแกลบบดที่ 120 วินาทีอัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-120sec) ยังพบพีคของ O-H ในช่วง $\sim 3300\text{ cm}^{-1}$ เช่นเดียวกับรูปที่ 4.5 และ 4.6 แต่ลักษณะของพีคในช่วง $2800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ มีลักษณะเช่นเดียวกับ MBC/SCG100 และ SCG ซึ่งเป็นลักษณะของพีคที่เกิดจากกากกาแฟ ดังนั้นการผสมกากกาแฟลงไปจึงเข้าไปปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ แต่ความเด่นชัดของพีคยังคงต่ำกว่า SCG เนื่องจากการที่เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตเข้าไปปรับเปลี่ยนโครงสร้างของไขมัน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังพบองค์ประกอบของโปรตีนและไคตินในช่วง $\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการที่เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตบนวัสดุและเข้าไปเปลี่ยนโครงสร้างทำให้โปรตีนและไคตินที่เป็นองค์ประกอบของไมซีเลียมแสดงออกมาเด่นชัดมากยิ่งขึ้น และในช่วง Fingerprint ของวัสดุยังแสดงถึงเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส รวมถึงซิลิกาที่เป็นเอกลักษณ์ของกากกาแฟและแกลบ

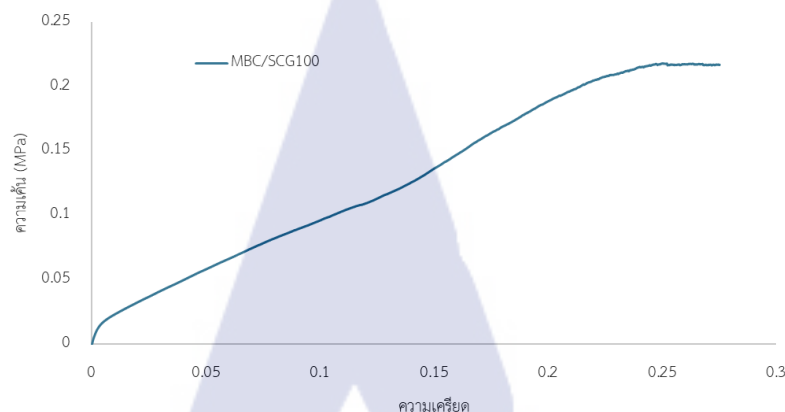
4.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของชิ้นงาน

4.4.1 ผลการทดสอบการต้านทานแรงกด (Compressive Strength)



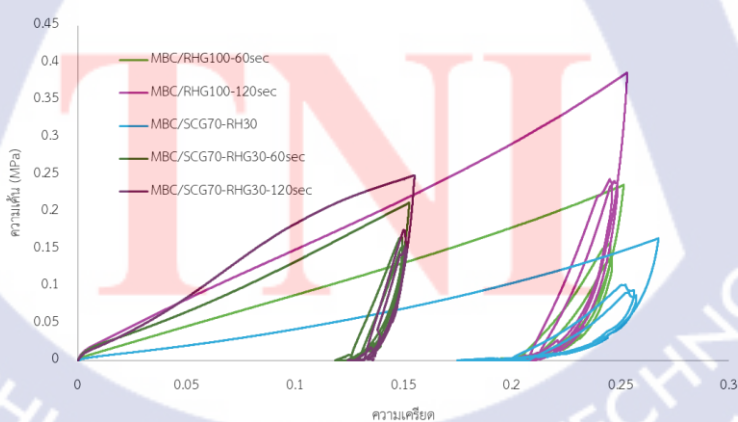
รูปที่ 4.9 a) ตัวอย่างวัสดุ MBC ก่อนทดสอบ b) ตัวอย่างวัสดุ MBC ก่อนทดสอบ 1. MBC/SCG100 2. MBC/RHG100-60sec 3. MBC/RHG100-120sec 4. MBC/SCG70-RH30 5. MBC/SCG70-RHG30-60sec และ 6. MBC/SCG70-RHG30-120sec

รูปที่ 4.9 a) แสดงตัวอย่างชิ้นงานของ MBC/RHG100-120sec ก่อนการทดสอบแรงกด ซึ่งทุกตัวอย่างก่อนการทดสอบแรงกดมีลักษณะเช่นเดียวกับ MBC/RHG100-120sec ดังแสดง รูปที่ 4.9 b-1) แสดงลักษณะของ MBC/SCG100 หลังการทดสอบความต้านทานแรงกดที่ระยะการกดเท่ากับ 10 mm เมื่อทดสอบวัสดุค่อย ๆ เกิดความเสียหายและแตกออกจากกัน โดย MBC/SCG100 เป็นสูตรเดียวที่แสดงการแตกหักจากการที่ผนังไมซีเลียมด้านนอกแตกหักจากแรงกดและอนุภาคของกากกาแฟเกิดการกระจายแยกออกมา รูปที่ 4.9 b-2) แสดงลักษณะของ MBC/RHG100-60sec หลังทดสอบความต้านทานแรงกดที่ระยะการกดเท่ากับ 10 mm วัสดุยังไม่เกิดการแตกออกจากกันแต่เกิดรอยแตกที่บริเวณผิวของวัสดุเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการขาดของเส้นใยไมซีเลียมที่คอยยึดเกาะอนุภาคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไว้ด้วยกัน รูปที่ 4.9 b-3) แสดงลักษณะของ MBC/RHG100-120sec หลังการทดสอบแรงกดที่ระยะการกดเท่ากับ 10 mm วัสดุเกิดรอยแตกที่ผิวและแสดงให้เห็นได้ชัดเจนกว่าบน MBC/RHG100-60sec ซึ่งเกิดจากการขาดของเส้นใยไมซีเลียมที่คอยยึดเกาะวัสดุไว้ด้วยกัน เช่นเดียวกับ MBC/RHG100-60sec รูปที่ 4.9 b-4) MBC/SCG70-RH30 หลังการทดสอบความต้านทานแรงกดที่ระยะกด 10 mm เมื่อทดสอบกดวัสดุไม่เกิดการแตกออกจากกันของวัสดุ แต่เกิดความเสียหายที่บริเวณผิวของวัสดุเพียงเล็กน้อยซึ่งเกิดจากการฉีกขาดของเส้นใยไมซีเลียม รูปที่ 4.9 b-5) แสดงลักษณะ MBC/SCG70-RHG30-60sec หลังทดสอบโดยทำการทดสอบที่ระยะการกดเท่ากับ 6 mm เนื่องจากไม่สามารถทดสอบความต้านทานแรงกดแบบวัฏจักรที่ 10 mm เพราะเมื่อทำการกดที่ระยะ 10 mm วัสดุจะแตกออกจากกัน เส้นใยไมซีเลียมฉีกขาดจนไม่สามารถยึดเกาะอนุภาคของวัสดุไว้ด้วยกันได้เช่นเดียวกับ MBC/SCG100 เมื่อทำการทดสอบความต้านทานแรงกดพบว่าวัสดุเกิดรอยแตกที่ผิวของวัสดุชัดเจนกว่าบน MBC/RHG100-60sec เริ่มมีการปริออกของวัสดุเล็กน้อยแต่ยังไม่เกิดการแตกกระจายออกจากกัน และรูปที่ 4.9 b-6) แสดงลักษณะของ MBC/SCG70-RHG30-120sec หลังทดสอบที่ระยะกดเท่ากับ 6 mm เนื่องจากเมื่อทำการทดสอบที่ 10 mm วัสดุจะเกิดความเสียหายและแตกออกจากกันเช่นเดียวกับ MBC/SCG100 และ MBC/SCG70-RHG30-60sec ดังนั้นเพื่อทำการทดสอบความต้านทานแรงกดของวัสดุแบบวัฏจักรจึงได้ปรับให้ระยะการกดเท่ากับ 6 mm เพื่อไม่ให้เกิดการแตกของชิ้นงาน เมื่อทำการทดสอบวัสดุเกิดรอยแตกที่ผิวและมีการฉีกขาดของเส้นใยไมซีเลียมบางส่วนเช่นเดียวกับตัวอย่าง MBC/RHG100-60sec, MBC/RHG100-120sec, MBC/SCG70-RH30 และ MBC/SCG70-RHG30-60sec



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดเฉลี่ยของวัสดุ MBC/SCG100

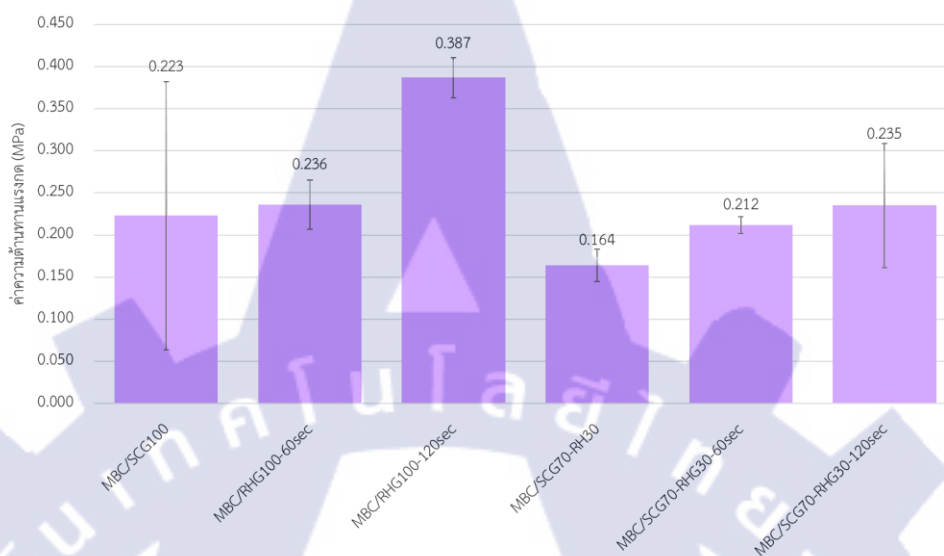
จากรูปที่ 4.10 แสดงกราฟความเค้น-ความเครียดเฉลี่ยของ MBC/SCG100 ที่เกิดความเสียหายเนื่องจากภาระการกดตามแนวแกนที่ระยะกระจัด 10 mm ซึ่งแสดงพฤติกรรมของช่วงอีลาสติกในช่วงระยะกระจัดสั้น ๆ อยู่ที่ความเครียดประมาณ 0.004 mm/mm ตามด้วยพฤติกรรมที่ไม่เชิงเส้นจนกระทั่งความเครียดอยู่ที่ 0.250 mm/mm โดยขณะที่ทำการทดสอบวัสดุเกิดการแตกของเนื้อวัสดุรวมถึงการขาดของเส้นใยไมซีเลียมที่ทำหน้าที่ยึดเกาะวัสดุไว้ด้วยกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 4.9 b-1) ตัวอย่าง MBC/SCG100 แสดงการแยกของอนุภาคโดยไม่เกิดการคอดกัว (Necking) ซึ่งเป็นพฤติกรรมของวัสดุเปราะจึงไม่ได้ทำการทดสอบความต้านทานแรงกดของวัสดุแบบวัฏจักร



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดเฉลี่ยของ MBC/RHG100-60sec, MBC/RHG100-120sec, MBC/SCG70-RH30, MBC/SCG70-RHG30-60sec และ MBC/SCG70-RHG30-120sec

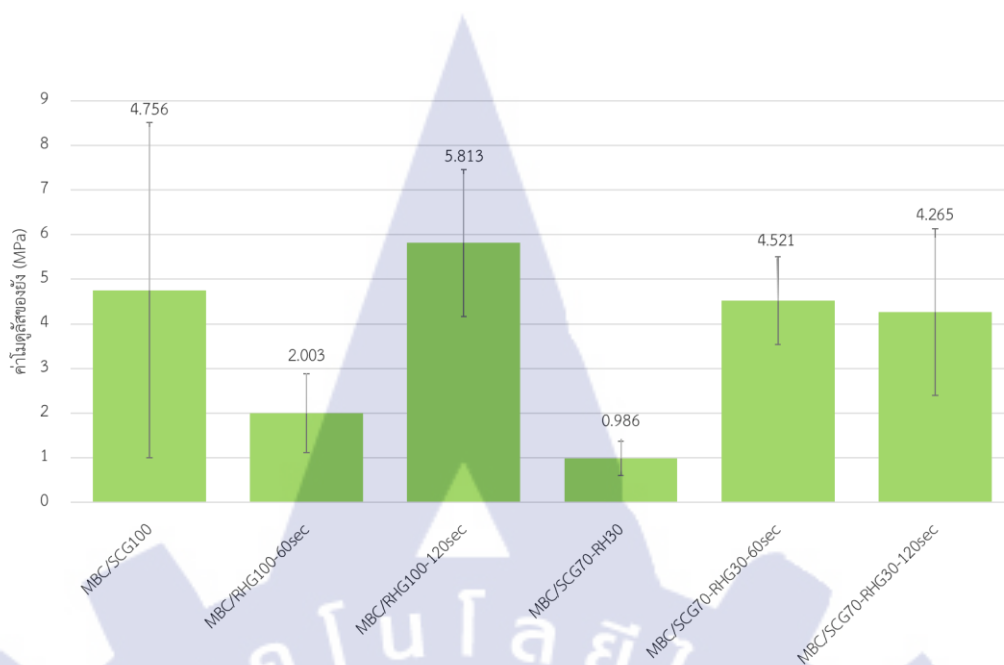
จากรูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดเฉลี่ยของวัสดุ เมื่อทำการทดสอบความต้านทานแรงกดของวัสดุแบบวัฏจักร โดยทำการทดสอบความต้านทานแรงกดของวัสดุที่ระยะการกด 6 – 10 mm MBC/RHG100-60sec เกิดช่วงอีลาสติกในช่วงระยะการจัดสั้น ๆ อยู่ที่มีความเครียดประมาณ 0.005 mm/mm ขณะที่ทำการทดสอบวัสดุนั้นวัสดุเกิดรอยแตกที่บริเวณผิวซึ่งเกิดจากการฉีกขาดของเส้นใยโพลีเอทิลีน MBC/RHG100-120sec เกิดช่วงอีลาสติกในช่วงระยะการจัดสั้น ๆ อยู่ที่มีความเครียดประมาณ 0.010 mm/mm เมื่อดูจากกราฟจะเห็นว่าวัสดุมีความเค้นที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น และเมื่อขณะที่ทดสอบวัสดุพบวัสดุเกิดรอยแตกที่สามารถเห็นได้ชัดเจนกว่าบน MBC/RHG100-60sec เนื่องจากวัสดุมีความเปราะที่มากแต่ยังมีเส้นใยโพลีเอทิลีนที่คอยช่วยยึดเกาะให้วัสดุยังคงสภาพเดิมไว้ได้ไม่แตกออกจากกัน MBC/SCG70-RH30 เมื่อทำการทดสอบพบว่าวัสดุมีช่วงอีลาสติกในช่วงระยะการจัดสั้น ๆ อยู่ที่มีความเครียดประมาณ 0.002 mm/mm และจากภาพแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าวัสดุเมื่อได้รับการกดแล้วมีการคืนตัวได้ดีกว่า MBC สูตรอื่นอย่างชัดเจน เมื่อทำการทดสอบความต้านทานแรงกดของวัสดุแบบวัฏจักรพบว่าระยะการกระจัดสูงสุดของวัสดุอยู่ที่ความเครียดเท่ากับ 0.267 mm/mm และเมื่อทำการยกหัวกดที่ใช้ในการทดสอบขึ้นจนแรงที่ใช้ในการกดวัสดุมีค่าเท่ากับศูนย์ค่าระยะการกระจัดของวัสดุอยู่ที่ความเครียดประมาณ 0.174 mm/mm ซึ่งระยะการคืนตัวของวัสดุที่ประมาณ 1.5 เท่า ซึ่งการที่วัสดุสามารถคืนตัวได้นั้นแสดงถึงพฤติกรรมที่คล้ายกับฟองน้ำ นั่นคือเมื่อวัสดุได้รับแรงกดจะเกิดการยุบตัวลง และเมื่อวัสดุไม่ได้รับแรงกดหรือไม่เกิดแรงกระทำวัสดุจะค่อย ๆ คืนตัวเหมือนกับพฤติกรรมของฟองน้ำ MBC/SCG70-RHG30-60sec เกิดช่วงอีลาสติกในช่วงระยะการจัดสั้น ๆ อยู่ที่มีความเครียดประมาณ 0.006 mm/mm และ MBC/SCG70-RHG30-120sec เกิดช่วงอีลาสติกในช่วงระยะการจัดสั้น ๆ อยู่ที่มีความเครียดประมาณ 0.006 mm/mm เช่นเดียวกับ MBC/SCG70-RHG30-60sec โดยตัวอย่าง MBC/SCG70-RHG30-60sec และ MBC/SCG70-RHG30-120sec ทำการทดสอบความต้านทานแรงกดที่ระยะการกดเท่ากับ 6 mm เนื่องจากวัสดุมีความเปราะ จึงต้องปรับลดระยะการกดเพื่อให้สามารถทดสอบความต้านทานแรงกดของวัสดุแบบวัฏจักรได้ โดยเมื่อทำการทดสอบพบว่าวัสดุเกิดรอยแตกที่บริเวณผิวรอบ ๆ อีกทั้งยังสามารถเห็นรอยแตกและความเสียหายของวัสดุได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับ MBC/RHG100-60sec, MBC/RHG100-120sec และ MBC/SCG70-RH30 นอกจากนี้จากรูปที่ 4.11 ยังแสดงให้เห็นว่าในการทดสอบความต้านทานแรงกดของวัสดุแบบวัฏจักรในทุกตัวอย่างจะมีการเกิดฮิสเทอรีซิส ซึ่งฮิสเทอรีซิสในวัฏจักรที่ 1 จะมีลักษณะที่กว้างที่สุด ซึ่งเกิดจากการที่วัสดุเกิดการเสียรูปภายในชิ้นงาน รวมถึงเกิดการฉีกขาดของเส้นใยโพลีเอทิลีนในบางส่วน และในวัฏจักรที่ 2 – 3 จะเห็นว่าพฤติกรรมการเกิดฮิสเทอรีซิสลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุไม่มีการเสียรูปเพิ่มเติมหรือมีการเสียรูปของวัสดุที่น้อยแต่จะมีค่าความเค้นของวัสดุที่ลดต่ำลงใน

ทุกตัวอย่าง และจากการเกิดฮีสเทอรีซิสเป็นพฤติกรรมที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุที่สามารถรับแรงกระแทกซ้ำ ๆ ได้ ดังนั้นวัสดุจึงเหมาะกับการนำมาพัฒนาเป็นโฟมบรรจุภัณฑ์



รูปที่ 4.12 ค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุ

จากรูปที่ 4.12 แสดงค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุ MBC/RHG100-120sec มีค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุสูงที่สุด เท่ากับ 0.387 ± 0.024 MPa รองลงมาคือ MBC/RHG100-60sec และ MBC/SCG70-RHG30-120sec กับ 0.236 ± 0.029 MPa และ 0.235 ± 0.074 MPa ตามลำดับ และค่าความต้านทานแรงกดต่ำที่สุดเท่ากับ 0.164 ± 0.019 MPa คือ MBC/SCG70-RH30 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า MBC/SCG100 และ MBC/SCG70-RHG30-120sec มีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่า MBC สูตรอื่น ๆ ซึ่งเกิดจากกระบวนการขึ้นรูปวัสดุส่งผลให้ข้อมูลมีการกระจายตัวมาก โดยสามารถปรับปรุงได้โดยการควบคุมกระบวนการขึ้นรูป เช่น การกำหนดน้ำหนักรวมของชิ้นงานสำหรับทดสอบให้เท่ากันทั้งหมด เพื่อลดความคลาดเคลื่อนและการกระจายตัวของข้อมูล



รูปที่ 4.13 ค่าโมดูลัสของยัง ของวัสดุ

รูปที่ 4.13 แสดงค่าโมดูลัสของยัง MBC /RHG100-120sec มีค่าโมดูลัสของยังสูงที่สุดเท่ากับ 5.813 ± 1.645 MPa รองลงมาคือ MBC/SCG100, MBC/SCG70RHG30-60sec และ MBC/SCG70RHG30-120sec เท่ากับ 4.756 ± 0.065 MPa, 4.521 ± 0.980 MPa และ 4.265 ± 1.828 MPa ตามลำดับ และ MBC/SCG70-RH30 มีค่าโมดูลัสของยังต่ำที่สุดเท่ากับ 0.986 ± 0.386 MPa เมื่อพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลพบว่า MBC/SCG100 และ MBC/SCG70-RHG30-120sec มีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่า MBC สูตรอื่น ๆ เช่นเดียวกับค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุ ซึ่งเกิดความคลาดเคลื่อนจากกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมกระบวนการผลิตเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

Method

Null hypothesis	All means are equal
Alternative hypothesis	Not all means are equal
Significance level	$\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
time	3	0, 120, 60

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
time	2	0.01580	0.007900	3.36	0.062
Error	15	0.03531	0.002354		
Total	17	0.05111			

Model Summary

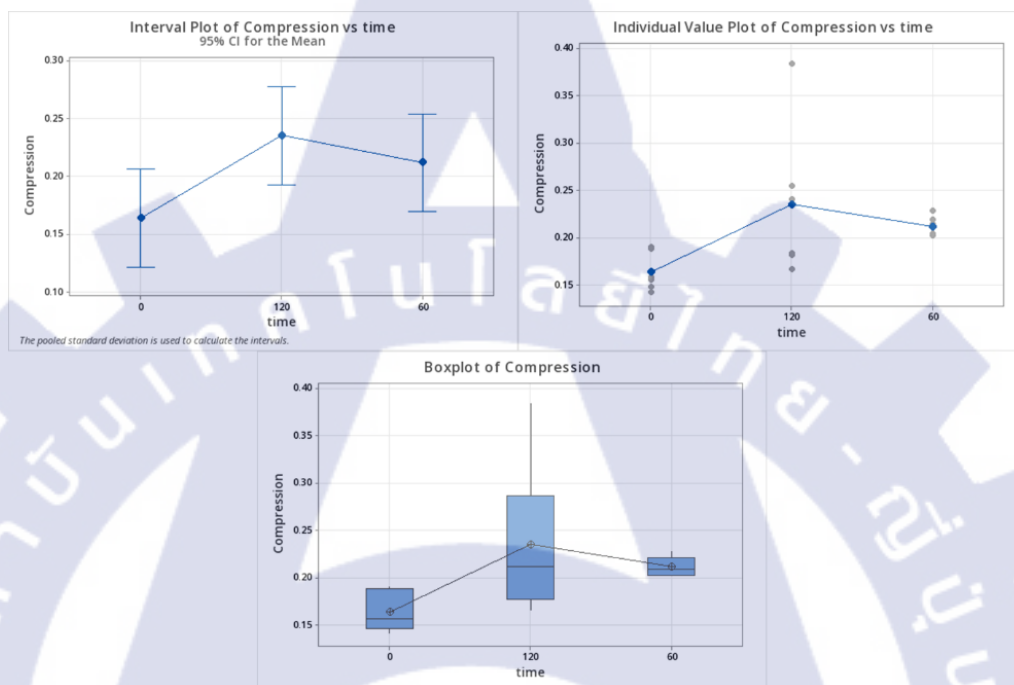
Means

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	time	N	Mean	StDev	95% CI
0.0485199	30.91%	21.70%	0.51%	0	6	0.16404	0.02069	(0.12182, 0.20626)
				120	6	0.2352	0.0808	(0.1930, 0.2774)
				60	6	0.21196	0.01063	(0.16974, 0.25418)

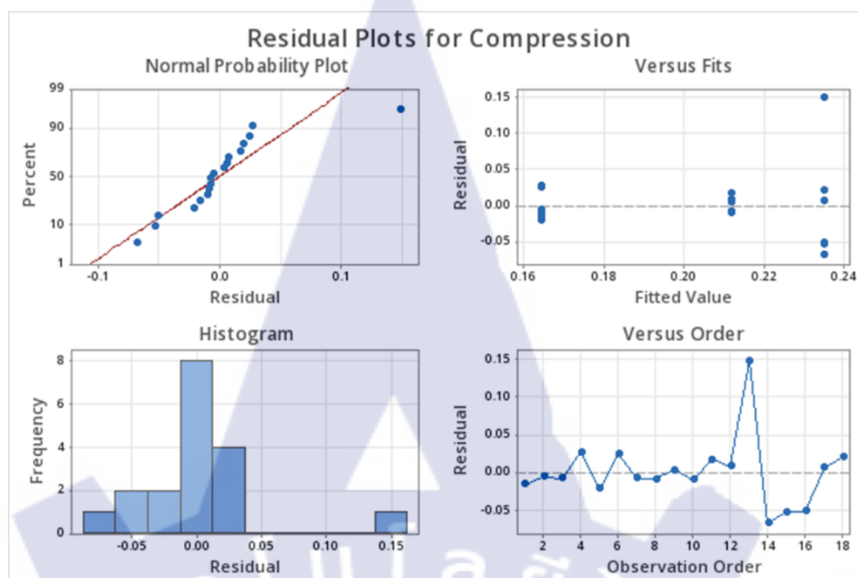
Pooled StDev = 0.0485199

รูปที่ 4.14 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงกดของ MBC ที่อัตราส่วนเท่ากับ 70:30 ด้วยวิธีการทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการวิเคราะห์ ANOVA ค่า P-value ของค่าความต้านทานแรงกดเท่ากับ 0.062 $P\text{-value} > 0.05$ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 4.15 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยโปรแกรม Minitab



รูปที่ 4.16 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของข้อมูล ซึ่ง MBC/SCG70-RHG30-120sec มีความแปรปรวนของข้อมูลสูงกว่า MBC/SCG70-RH30 และ MBC/SCG70-RHG30-60sec และจากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลของค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุมีการแจกแจงแบบปกติ

Method

Null hypothesis	All means are equal
Alternative hypothesis	Not all means are equal
Significance level	$\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
time	3	0, 120, 60

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
time	2	46.64	23.321	13.10	0.001
Error	15	26.71	1.781		
Total	17	73.35			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.33441	63.59%	58.73%	47.56%

Means

time	N	Mean	StDev	95% CI
0	6	0.986	0.423	(-0.175, 2.147)
120	6	4.265	2.003	(3.104, 5.427)
60	6	4.521	1.073	(3.360, 5.683)

Pooled StDev = 1.33441

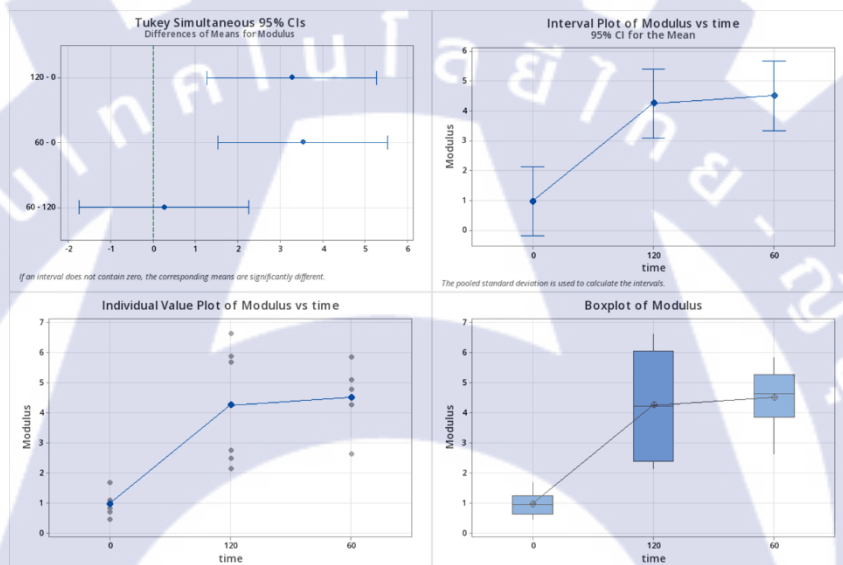
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

time	N	Mean	Grouping
60	6	4.521	A
120	6	4.265	A
0	6	0.986	B

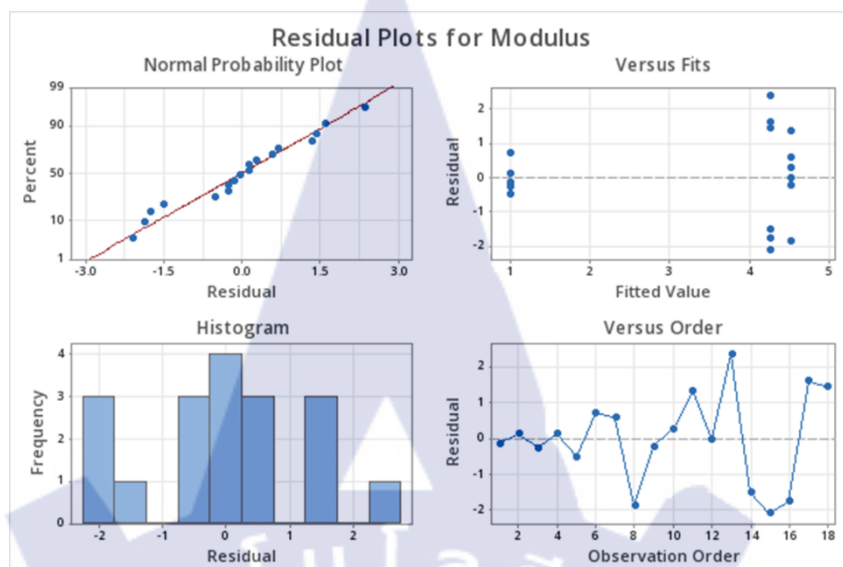
Means that do not share a letter are significantly different.

รูปที่ 4.17 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าโมดูลัสของวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสโมดุลัสของยังของ วัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าอาหารเลี้ยงที่ผสมเกลบที่ไม่ผ่านการบด เกลบบดที่ 60 วินาที และเกลบบดที่ 120 วินาที มีค่า P-value เท่ากับ 0.001 ซึ่งค่า P-value ≤ 0.05 แสดงให้เห็นว่าการบดเกลบที่ระยะเวลาต่าง ๆ ส่งผลให้ค่าโมดูลัสของยังของ MBC มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc พบว่า MBC/SCG70-RHG30-120sec และ MBC/SCG70-RHG30-60sec ถูกจัดอยู่ในกลุ่ม A ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอาหารเลี้ยงทั้งสองสูตรสัมพันธ์กัน แต่ MBC/SCG70-RH30 ถูกจัดอยู่ในกลุ่ม B ซึ่งจะแตกต่างจาก MBC/SCG70-RHG30-120sec และ MBC/SCG70-RHG30-60sec อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.18 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าโมดูลัสของวัสดุวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc ด้วยโปรแกรม Minitab

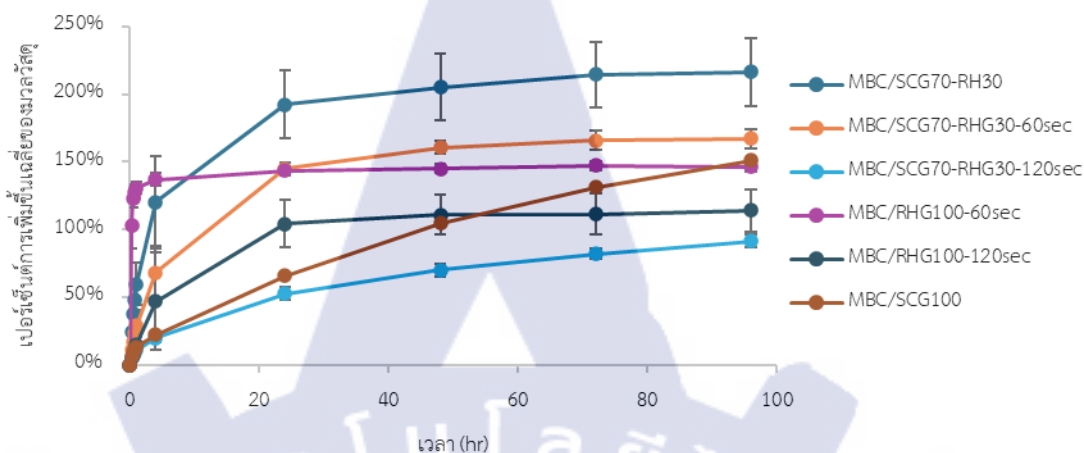


รูปที่ 4.19 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าโมดูลัสของวัสดุวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของข้อมูล โดย MBC/SCG70-RHG30-120sec มีความแปรปรวนของข้อมูลมากที่สุด รองลงมาคือ MBC/SCG70-RHG30-60sec และ MBC/SCG70-RHG30 ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

จากการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงกดและค่าโมดูลัสของยังด้วยวิธีการทางสถิติพบว่า อาหารเลี้ยงส่งผลต่อพฤติกรรมในช่วงอีลาสติกของวัสดุ โดยค่าค่าโมดูลัสของยังมีค่า $P\text{-value} \leq 0.05$ เมื่อทำการแบ่งกลุ่มด้วยวิธีการ Tukey post-hoc พบว่า MBC/SCG70-RHG30-60sec และ MBC/SCG70-RHG30-120sec ถูกจัดอยู่ในกลุ่ม A ซึ่งมีความแข็งแกร่งมากกว่า MBC/SCG70-RHG30 ที่ถูกจัดในกลุ่ม B อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุแสดงให้เห็นว่า การบดเกลบสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานแรงกดได้ แต่จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าการบดเกลบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อความต้านทานแรงกดของวัสดุ จึงยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเป็นการยืนยันว่าการบดเกลบส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุหรือไม่

4.4.2 ผลการทดลองการดูดซึมน้ำของวัสดุ (Water absorption)



รูปที่ 4.20 กราฟเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นเฉลี่ยและเวลาของมวลวัสดุ ตัวอย่างวัสดุ MBC จากกากกาแฟ (MBC/SCG100), วัสดุ MBC จากแคลบดล้วน 60 วินาที (MBC/RHG100-60sec) วัสดุ MBC จากแคลบดล้วน 120 วินาที (MBC/RHG100-120sec) วัสดุ MBC จากกากกาแฟ-แคลบด 60 วินาทีที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RH30) วัสดุ MBC จากกากกาแฟ-แคลบด 60 วินาทีที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-60sec) และ วัสดุ MBC จากกากกาแฟ-แคลบด 120 วินาทีที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-120sec)

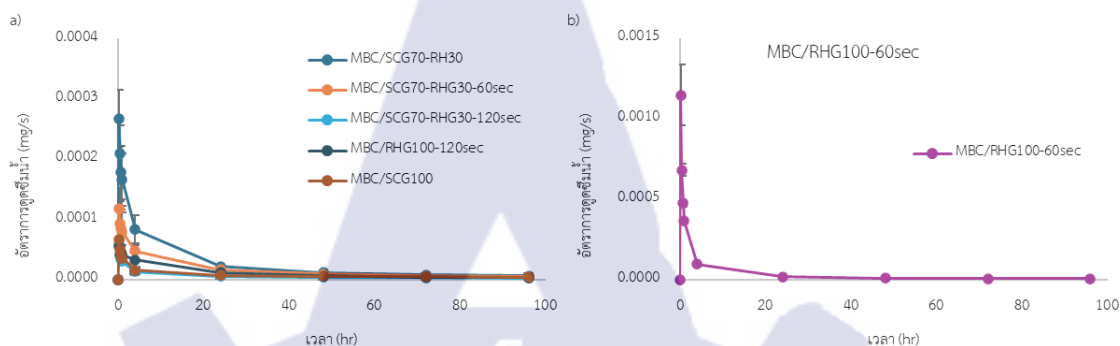
จากรูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักวัสดุที่เวลาต่าง ๆ พบว่าตัวอย่าง MBC/SCG70-RH30 มีค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักสูงที่สุด รองลงมาคือ MBC/SCG70-RHG30-60sec, MBC/SCG100, MBC/RHG100-60sec และ , MBC/RHG100-120sec ตามลำดับ และ MBC/SCG70-RHG30-120sec มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักวัสดุต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาแนวการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของวัสดุพบว่า MBC/RHG100-60sec มีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่รวมเร็วและสูงที่สุดในช่วง 4 ชั่วโมงแรก จากนั้นจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคง MBC/RHG100-120sec เริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง เช่นเดียวกัน MBC/SCG100 และ MBC/SCG70-RHG30-120sec ในช่วง 4 ชั่วโมงแรกมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักจะต่ำที่สุดแต่แนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ของมวลวัสดุมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องยังไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นเฉลี่ยของมวลวัสดุเนื่องจากการดูดซึมน้ำ

เวลา (ชั่วโมง)	MBC/SCG100	MBC/RHG100- 60sec	MBC/RHG100- 120sec	MBC/SCG70-RH30	MBC/SCG70- RHG30-60sec	MBC/SCG70- RHG30-120sec
0	0	0	0	0	0	0
0.25	6% ± 0.025	103% ± 0.172	5% ± 0.010	24% ± 0.042	11% ± 0.030	5% ± 0.008
0.5	9% ± 0.031	122% ± 0.067	8% ± 0.015	38% ± 0.084	17% ± 0.066	7% ± 0.011
0.75	11% ± 0.036	128% ± 0.055	11% ± 0.031	48% ± 0.119	23% ± 0.084	9% ± 0.012
1	13% ± 0.039	131% ± 0.043	15% ± 0.046	60%± 0.156	29% ± 0.115	11% ± 0.013
4	22% ± 0.059	137% ± 0.047	47% ± 0.362	120%±0.345	68% ± 0.198	20% ± 0.031
24	66% ± 0.139	143% ± 0.034	104% ± 0.174	192% ± 0.251	145% ± 0.041	53% ± 0.048
48	105% ± 0.222	145% ± 0.032	111% ± 0.147	205% ± 0.246	161% ± 0.047	70% ± 0.044
72	131% ± 0.257	147% ± 0.032	111% ± 0.150	214% ± 0.240	166% ± 0.072	82% ± 0.040
96	151% ± 0.299	146% ± 0.032	114% ±0.156	217% ± 0.252	167% ± 0.071	91% ± 0.046

จากตารางที่ 4.2 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุที่เวลาต่าง ๆ MBC/SCG70-RHG30-120sec มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักต่ำที่สุดเท่ากับ 91% และที่มีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักถัดมาคือ MBC/RHG100-120sec และ MBC/RHG100-60sec เท่ากับ 114% และ 146% ตามลำดับ และเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักของ MBC/SCG70-RH30 เท่ากับ 217% ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักวัสดุสูงที่สุด เนื่องจากจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคส่งผลต่อปริมาณรูพรุนและช่องว่างภายในเนื้อวัสดุ โดย MBC/SCG70-RH30 ที่มีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักมากที่สุดเพราะเกิดจากการที่ภายในเนื้อวัสดุมีรูพรุนที่มากเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ ที่ได้มี

การบดกลบเพื่อลดขนาดอนุภาคลงทำให้รูปพูนภายในเนื้อวัสดุลดลงตามไปด้วย ส่งผลให้วัสดุมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่ต่ำกว่า MBC/SCG70-RH30



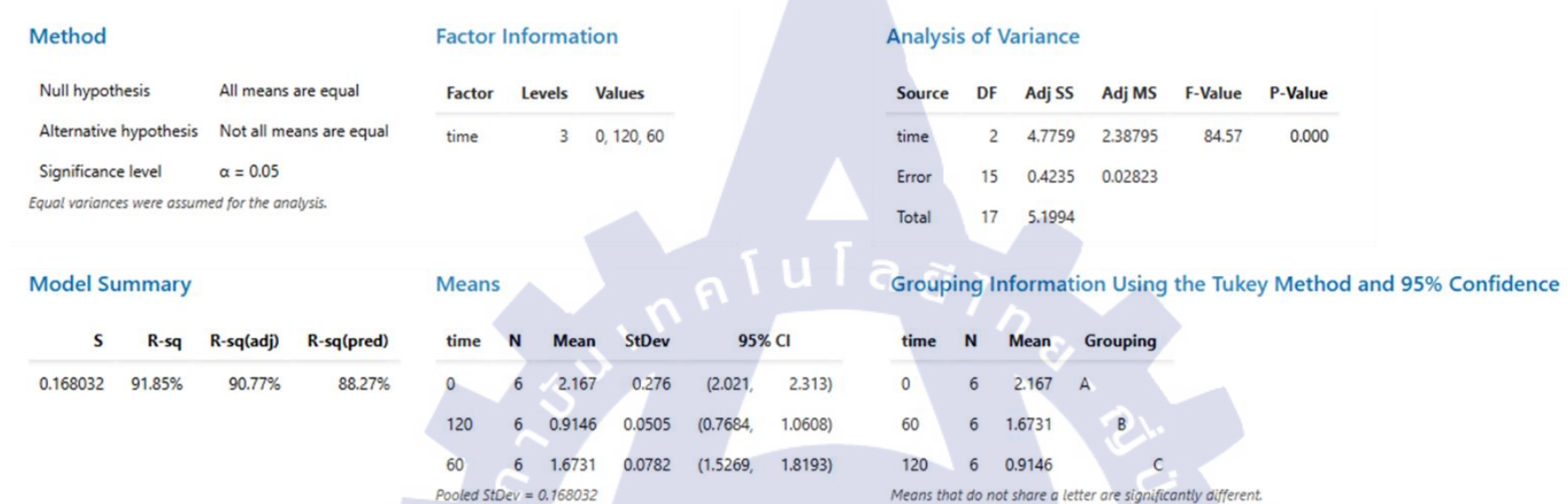
รูปที่ 4.21 a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำและเวลาของตัวอย่าง MBC/SCG100, MBC/RHG100-120sec, MBC/SCG70-RH30, MBC/SCG70-RHG30-60sec และ MBC/SCG70-RHG30-120sec b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยและเวลาของตัวอย่าง MBC/RHG100-60sec

จากรูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของวัสดุและเวลา รูปที่ 4.13 a) MBC/SCG100 และ MBC/SCG70-RHG30-120sec มีอัตราการดูดซึมน้ำที่คล้ายกันซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักจากรูปที่ 4.21 โดยอัตราการดูดซึมน้ำที่มากที่สุดจะอยู่ที่ช่วง 15 นาทีแรกและจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ในช่วง 4 ชั่วโมงแรกยังแสดงให้เห็นว่า MBC/RHG100-120sec, MBC/SCG70-RH30 และ MBC/SCG70-RHG30-60sec มีอัตราการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า MBC/SCG100 และ MBC/SCG70-RHG30-120sec ส่งผลให้มีการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าและเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากผ่านไป 48 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.21 b) แสดงอัตราการดูดซึมน้ำของ MBC/RHG100-60sec ซึ่งมีอัตราการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ อย่างชัดเจนโดยที่เวลา 15 นาทีแรกอัตราการดูดซึมน้ำสูงถึง 6.613 mg/s ดังตารางที่ 4.3 จากนั้นลดลงอย่างรวดเร็วและเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.3 อัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ ของวัสดุ

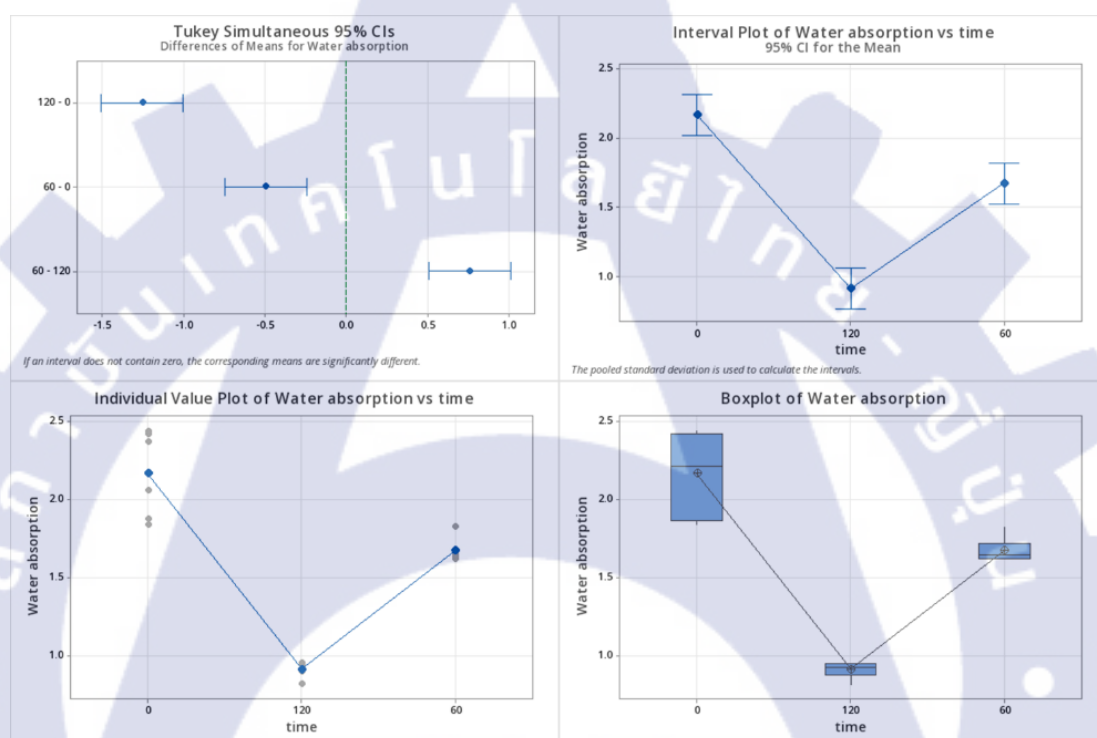
เวลา (ชั่วโมง)	MBC/SCG100 (mg/s)	MBC/RHG100- 60sec (mg/s)	MBC/RHG100- 120sec (mg/s)	MBC/SCG70-RH30 (mg/s)	MBC/SCG70- RHG30-60sec (mg/s)	MBC/SCG70- RHG30-120sec (mg/s)
0	0	0	0	0	0	0
0.25	0.271 ± 0.070	6.613 ± 1.147	0.329 ± 0.059	1.152 ± 0.186	0.750 ± 0.189	0.335 ± 0.056
0.5	0.185 ± 0.072	3.323 ± 1.305	0.218 ± 0.064	0.764 ± 0.302	0.506 ± 0.288	0.193 ± 0.089
0.75	0.143 ± 0.061	2.272 ± 1.012	0.193 ± 0.082	0.633 ± 0.302	0.471 ± 0.222	0.172 ± 0.066
1	0.130 ± 0.055	1.735 ± 0.784	0.203 ± 0.078	0.598 ± 0.286	0.421 ± 0.248	0.142 ± 0.065
4	0.059 ± 0.021	0.452 ± 0.207	0.184 ± 0.132	0.317 ± 0.126	0.256 ± 0.096	0.067 ± 0.026
24	0.030 ± 0.007	0.080 ± 0.035	0.051 ± 0.023	0.085 ± 0.024	0.090 ± 0.017	0.033 ± 0.007
48	0.023 ± 0.007	0.040 ± 0.018	0.027 ± 0.014	0.042 ± 0.019	0.045 ± 0.019	0.020 ± 0.007
72	0.018 ± 0.007	0.027 ± 0.012	0.018 ± 0.009	0.029 ± 0.013	0.031 ± 0.013	0.015 ± 0.006
96	0.016 ± 0.007	0.020 ± 0.010	0.014 ± 0.007	0.022 ± 0.011	0.023 ± 0.011	0.013 ± 0.005

ตารางที่ 4.3 แสดงอัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุที่เวลาต่าง ๆ พบว่าวัสดุมีอัตราการดูดซึมน้ำในช่วง 15 นาทีแรกสูงที่สุด โดย MBC/RHG100-60sec มีอัตราการดูดซึมน้ำที่สูงที่สุดเท่ากับ 6.613 ± 1.147 รองลงมาคือ MBC/SCG70-RHG30-60sec เท่ากับ 0.750 ± 0.189 และวัสดุที่มีอัตราการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดคือ MBC/SCG100 เท่ากับ 0.271 ± 0.070 และอัตราการดูดซึมน้ำจะค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น

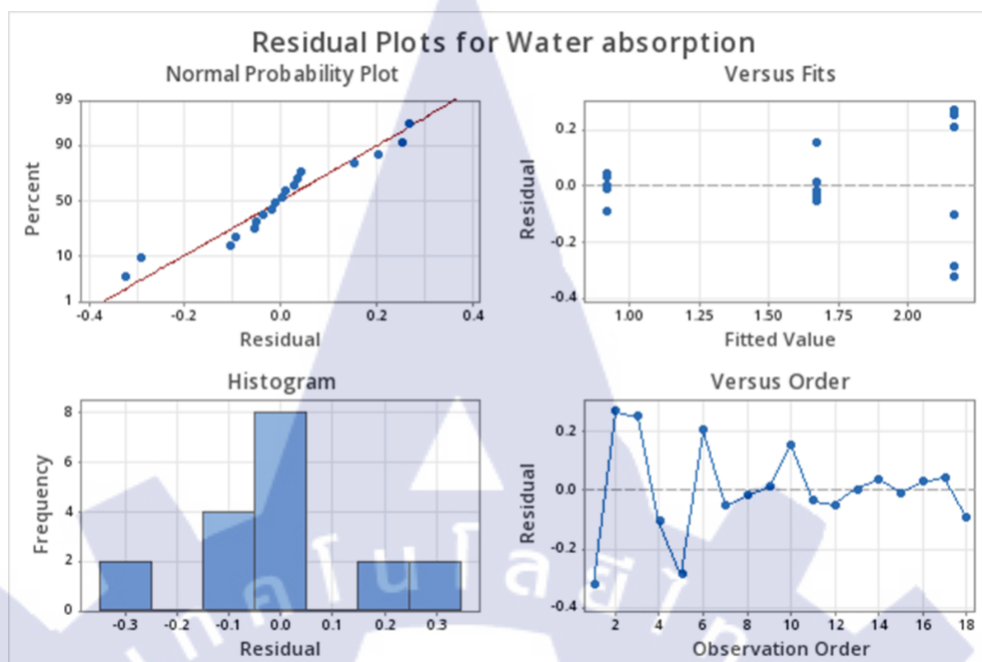


รูปที่ 4.22 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc ด้วยโปรแกรม Minitab

รูปที่ 4.22 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่าอาหารเลี้ยงที่ผสมเกลบที่ไม่ผ่านการบดเกลบบดที่ 60 วินาที และเกลบบดที่ 120 วินาที ค่า $P\text{-value} \leq 0.05$ แสดงให้เห็นว่าการบดเกลบที่ระยะเวลาต่าง ๆ ส่งผลให้ค่าโมดูลัสของยังของ MBC มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc MBC จาก RH, RHG-60sec และ RHG-120sec ถูกจัดอยู่ในกลุ่มที่แตกต่างกันทั้งหมด ดังนั้นอาหารเลี้ยงทั้ง 3 สูตรจึงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.23 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc ด้วยโปรแกรม Minitab



รูปที่ 4.24 ข้อมูลการวิเคราะห์ทางสถิติของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักวัสดุ MBC อัตราส่วน 70:30 ด้วยวิธีการ Tukey post-hoc ด้วยโปรแกรม Minitab

จากรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของข้อมูล MBC/SCG70-RH30 มีความแปรปรวนของข้อมูลสูงที่สุด รองลงมาคือ MBC/SCG70-RHG30-60sec และ MBC/SCG70-RHG30-120sec ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักวัสดุมีการแจกแจงแบบปกติ

4.4.3 ความหนาแน่นแห้งของวัสดุ

ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นแห้งของวัสดุ

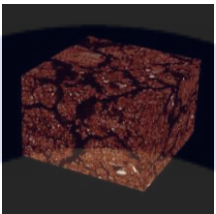
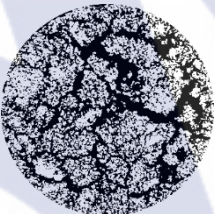
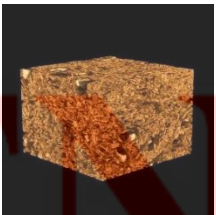
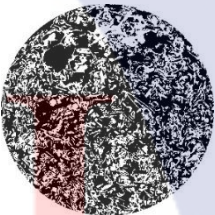
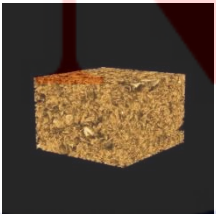
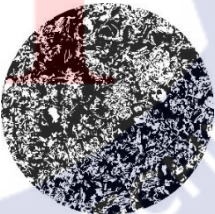
ตัวอย่าง	ความหนาแน่น (kg/m^3)
MBC/SCG100	313.792 ± 9.351
MBC/RHG-60sec	280.484 ± 4.428
MBC/RHG-120sec	328.727 ± 3.631
MBC/SCG70RH30	245.886 ± 1.637
MBC/SCG70RHG30-60sec	341.458 ± 4.096
MBC/SCG70RHG30-120sec	353.081 ± 6.002

จากตารางที่ 4.4 แสดงความหนาแน่นแห้งของวัสดุ โดย MBC/SCG70RHG30-120sec มีความหนาแน่นมากที่สุดอยู่ที่ $353.081 \pm 6.002 \text{ kg/m}^3$ รองลงมาคือ MBC/SCG70RHG30-60sec และ MBC/RHG-120sec เท่ากับ $341.458 \pm 4.096 \text{ kg/m}^3$ และ $328.727 \pm 3.631 \text{ kg/m}^3$ ตามลำดับ และ MBC/SCG70RH30 มีความหนาแน่นต่ำที่สุดเท่ากับ $245.886 \pm 1.637 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ เมื่อวัสดุมีรูพรุนต่ำส่งผลให้มีความหนาแน่นที่สูงขึ้น

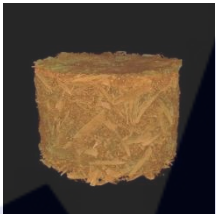
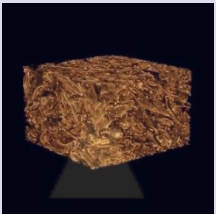
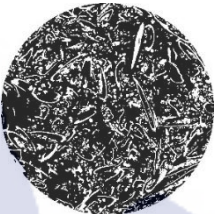
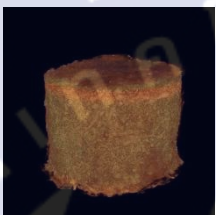
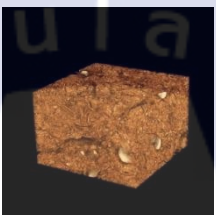
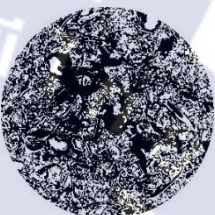
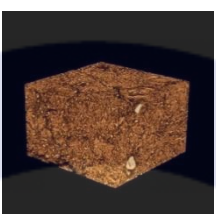
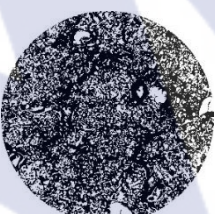
4.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และลักษณะพื้นผิวของวัสดุ

4.5.1 รูพรุนภายในชิ้นงาน

ตารางที่ 4.5 ภาพถ่ายตัวอย่างชิ้นงานด้วยรังสีเอ็กซเรย์โดยไม่ทำลายชิ้นงาน และภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย ImageJ

ตัวอย่าง	ภาพชิ้นงาน	ภาพตัดชิ้นงาน	ภาพจากโปรแกรม ImageJ	ปริมาณรูพรุน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)
MBC/SCG100				47.68%
MBC/RHG100-60sec				59.62%
MBC/RHG100-120sec				59.37%

ตารางที่ 4.5 ภาพถ่ายตัวอย่างชิ้นงานด้วยรังสีเอ็กซ์เรย์โดยไม่ทำลายชิ้นงาน และภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย ImageJ (ต่อ)

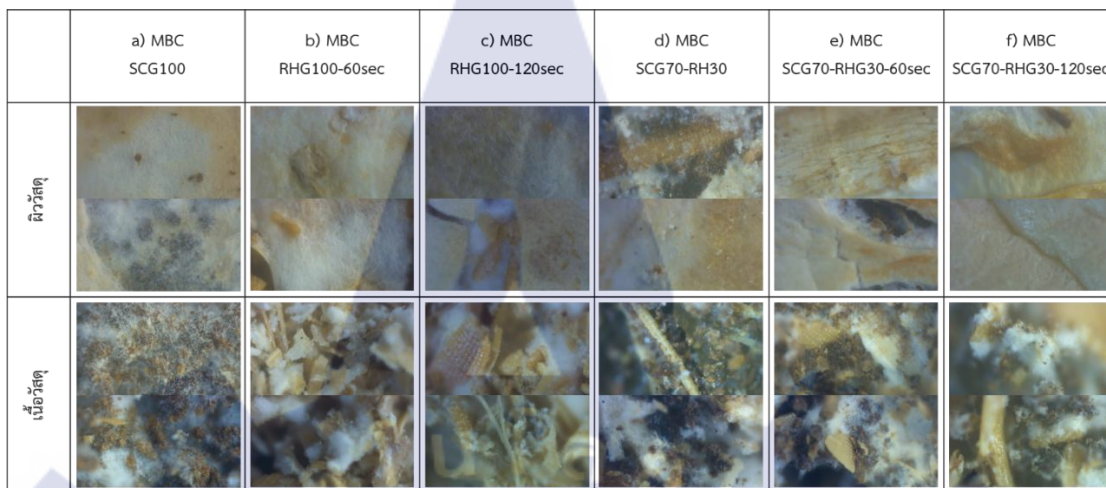
ตัวอย่าง	ภาพชิ้นงาน	ภาพตัดชิ้นงาน	ภาพจากโปรแกรม ImageJ	ปริมาณรูพรุน (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร)
MBC/SCG70-RH30				73.33%
MBC/SCG70- RHG30-60sec				58.90%
MBC/SCG70- RHG30-120sec				56.81%

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงรูพรุนและปริมาตรของชิ้นงานโดยละเอียด

	MBC/SCG100	MBC/RHG100- 60sec	MBC/RHG100- 120sec	MBC/SCG70-RH30	MBC/SCG70- RHG30-60sec	MBC/SCG70- RHG30-120sec
Total area (mm ²)	474412.96	429421.04	465357.39	417702.44	409668.56	465568.01
Total volume (mm ³)	15548.41	14073.84	15251.62	13689.78	13426.47	15258.52
Total area of porosity (mm ²)	226218.14	256019.16	276301.74	306282.09	241288.59	264506.36
Volume of porosity (mm ³)	7414.07	8390.77	9055.51	10038.09	7907.99	8668.93
Percentage of porosity by volume (mm ³ /mm ³)	47.68%	59.62%	59.37%	73.33%	58.90%	56.81%

จากตารางที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างชิ้นงานด้วยรังสีเอ็กซเรย์โดยไม่ทำลาย และภาพจากการวิเคราะห์รูพรุนภายในวัสดุด้วยโปรแกรม ImageJ โดย MBC/SCG70-RH30 มีรูพรุนอยู่ที่ 73.33% และ MBC ที่ได้จากการปรับปรุงขนาดของเกลบด้วยการบดมีเปอร์เซ็นต์รูพรุนที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 56 – 60% และที่มีรูพรุนต่ำที่สุดคือ MBC/SCG100 เท่ากับ 47.68% แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของเกลบที่ใช้ส่งผลเรียงตัวของอนุภาคภายในวัสดุทำให้วัสดุเกิดความเป็นรูพรุนที่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเกลบบดและเกลบไม่บด

4.5.2 ลักษณะพื้นผิววัสดุ



รูปที่ 4.25 ลักษณะพื้นผิวและเนื้อวัสดุของชิ้นงานตัวอย่าง a) วัสดุ MBC จากกากกาแฟล้วน (MBC/SCG100), b) วัสดุ MBC จากแกลบบดล้วน 60 วินาที (MBC/RHG100-60sec), c) วัสดุ MBC จากแกลบบดล้วน 120 วินาที (MBC/RHG100-120sec) d) วัสดุ MBC จากกากกาแฟ-แกลบไม่บดอัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RH30) e) วัสดุ MBC จากกากกาแฟ-แกลบบด 60 วินาทีที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-60sec) และ f) วัสดุ MBC จากกากกาแฟ-แกลบบด 120 วินาทีที่อัตราส่วน 70:30 (MBC/SCG70-RHG30-120sec)

จากรูปที่ 4.14 แสดงลักษณะของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยง โดยรูปที่ 4.14 a) เป็นเส้นใยไมซีเลียมบน MBC/SCG100 เส้นใยมีลักษณะที่สั้นและกระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อวัสดุเนื่องจากวัสดุมีช่องว่างและรูพรุนที่ต่ำช่วยให้เส้นใยสามารถเจริญเติบโตได้ง่าย แต่ยังคงมีความหนาแน่นของเส้นใยจะต่ำกว่าอาหารเลี้ยงที่มีแกลบเป็นส่วนผสม รูปที่ 4.14 b) เส้นใยไมซีเลียมจาก MBC/RHG100-60sec สามารถเจริญเติบโตได้ดีและมีความหนาแน่นของเส้นใยมากกว่าบน MBC/SCG100 และเส้นใยมีการกระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อวัสดุแต่น้อยกว่าบน MBC/SCG100 เนื่องจากขนาดอนุภาคของวัสดุมีระยะห่างที่มากกว่ากากกาแฟ รูปที่ 4.14 c) เส้นใยไมซีเลียมที่เจริญบน MBC/RHG100-120sec คล้ายกับ MBC/RHG100-60sec แต่มีการกระจายตัวของเส้นใยไมซีเลียมที่มากกว่า รูปที่ 4.14 d) ลักษณะเส้นใยไมซีเลียมบน MBC/SCG70-RH30 มีปริมาณของเส้นใยที่น้อยกว่าบน MBC อื่น ๆ รวมถึงมีการกระจายตัวของเส้นใยและความหนาแน่นของเส้นใยที่น้อยที่สุด เนื่องจากแกลบทำให้ช่องว่างภายในชิ้นงานมากเส้นใยไมซีเลียมจึงเจริญเติบโตได้น้อย รูปที่ 4.14 e) เส้นใยไมซีเลียมบน MBC/SCG70-RHG30-60sec มีการเจริญเติบโตที่ดีและมีความหนาแน่นมากกว่าบน MBC/SCG70-RH30 และ

MBC/SCG100 เนื่องจากการผสมกับระหว่างกากกาแฟและเกลบบดเป็นการช่วยลดช่องว่างภายในเนื้อวัสดุและการผสมเกลบบดช่วยให้เส้นใยเจริญเติบโตได้ดียิ่งขึ้น และจากรูปที่ 4.14 f) เส้นใยโม่ซีเลี่ยมบน MBC/SCG70-RHG30-120sec มีการเจริญเติบโตที่คล้ายกับ MBC/SCG70-RHG30-60sec แต่จะมีความหนาแน่นของเส้นใยที่มากกว่า

4.6 เปรียบเทียบความเป็นไปได้ในการใช้เป็นวัสดุทดแทนโฟมกับวัสดุอื่น

ตารางที่ 4.7 ตารางเปรียบเทียบความต้านทานแรงกดของ MBC กับวัสดุอื่น

วัสดุ	ความต้านทานแรงกดของวัสดุ (MPa)	ค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ (%)
MBC จากกากกาแฟ	0.223	151
MBC จากเกลบบด	0.236 – 0.387	114 – 146
MBC จากกากกาแฟผสมเกลบบด	0.212 – 0.235	91 – 167
MBC จากกากกาแฟผสมเกลบไม่บด	0.164	217
MBC จากเศษไม้ไผ่, กากกาแฟ และเกลบของ Benchaphong [36]	0.022 – 0.190	196 – 294
MBC จากงานวิจัยของ Islam [38]	0.040 – 0.060	-
MBC จากไม้ปืทของ Rigobello [39]	0.172 – 0.306	-
MBC จากงานวิจัยของ Ghazvinian [37]	0.020 – 0.188	-
วัสดุไบโอคอมโพสิตจากแป้ง [41]	-	163 – 437
EPS foam [50]	275 – 690	0.1

จากตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบความต้านทานแรงกดของวัสดุและค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ MBC จากเกลบบดมีช่วงความต้านทานแรงกดอยู่ที่ 0.236 – 0.387 MPa ซึ่งมากกว่า MBC จากกากกาแฟ MBC จากกากกาแฟผสมเกลบ และ MBC จากงานวิจัยอ้างอิงอื่น ๆ และ MBC จากเกลบบดมีความแข็งแรงในบางช่วงที่เทียบเท่ากับ EPS โฟมแสดงให้เห็นว่าสามารถนำ MBC มาใช้ในการทดแทนโฟมได้แต่ยังต้องมีการพัฒนาให้มีความแข็งแรงที่สูงขึ้น เพื่อให้ใช้ทดแทนโฟมได้อย่างครอบคลุมมากขึ้น ค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ MBC จากกากกาแฟผสมเกลบบดมีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับ MBC บนอาหารเลี้ยงชนิดอื่น แต่ยังมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า EPS โฟม เนื่องจาก

กากกาแฟและแกลบมีความชอบน้ำที่มากกว่า EPS โฟมรวมถึงปริมาณของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเองก็ส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุ ส่งผลให้ MBC มีค่าการดูดซึมน้ำที่มาก

4.7 อิทธิพลที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ

4.7.1 อิทธิพลของขนาดอนุภาคแกลบต่อองค์ประกอบทางเคมีของแกลบและการเจริญเติบโตของไมซีเลียม

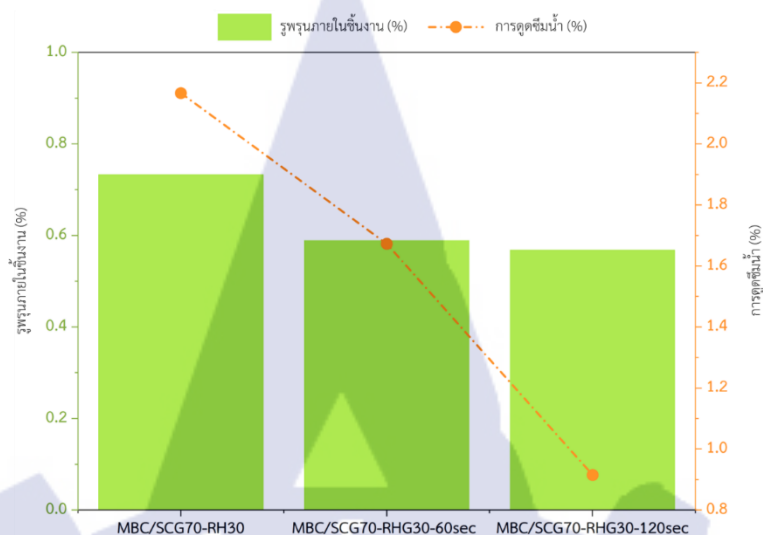
เมื่อวิเคราะห์การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนจานเพาะเห็ดพบว่าอัตราส่วนระหว่างกากกาแฟ-แกลบส่งผลต่อการเจริญเติบโตและปริมาณของเส้นใยไมซีเลียม โดยประเมินการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมคร่าว ๆ จากการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนจานเพาะเชื้อ โดยทำการศึกษานอาหารเลี้ยงระหว่างกากกาแฟ-แกลบที่ไม่ผ่านการบด (SCG-RH) และกากกาแฟ-แกลบบด (SCG-RHG) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ สัดส่วนของกากกาแฟ-แกลบ และขนาดอนุภาคส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม โดย SCG-RH มีการเจริญเติบโตในแนวรัศมีที่ดีกว่าบน SCG-RHG แต่มีความหนาแน่นของเส้นใยที่ต่ำกว่า ซึ่งความหนาแน่นของเส้นใยส่งผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยไมซีเลียม เมื่อเส้นใยไมซีเลียมมีความแข็งแรงมากขึ้นนำไปสู่คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดีขึ้น โดยอัตราส่วนของกากกาแฟ-แกลบที่ช่วยให้เส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตในแนวรัศมีได้ดีและมีความหนาแน่นสูงคืออัตราส่วน 70:30 จาก SCG-RH และ SCG-RHG

จากการศึกษาพบว่าการบดแกลบส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเมื่อทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของแกลบพบว่าแกลบที่ยังไม่ผ่านการบด (RH) มีเปอร์เซ็นต์ของลิกนินมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแกลบบดที่ 60 วินาที (RHG-60sec) และ 120 วินาที (RHG-120sec) ซึ่งลิกนินเป็นส่วนที่มีความแข็งแรงที่สุดเมื่อเทียบกับเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โดยลิกนินจะเข้าไปยับยั้งหรือชะลอการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม ส่งผลให้เส้นใยไมซีเลียมบน RH มีการเจริญเติบโตในแนวรัศมีและความหนาแน่นของเส้นใยที่ต่ำกว่าบน RHG-60sec และ RHG-120sec เมื่อบดแกลบที่ 60 วินาทีทำให้ขนาดอนุภาคของแกลบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอนุภาคบางส่วนถูกบดให้มีขนาดเล็กลง แต่เนื่องจากเวลาที่สั้นจึงทำให้ยังเหลืออนุภาคที่มีความแข็งแรงมากกว่าบนแกลบ RHG-120sec และเมื่อเพิ่มเวลาในการบดแกลบเป็น 120 วินาที จะเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนว่าอนุภาคมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัดโดยส่วนที่แข็งของแกลบเริ่มมีขนาดเล็กลง และส่วนที่มีความอ่อนนุ่มจะถูกบดให้ขนาดเล็กลงกว่าเดิม โดยจากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงสัดส่วนของขนาดอนุภาคของแกลบขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $600\ \mu\text{m}$ และ $425 - 600\ \mu\text{m}$ จาก RHG-60sec เมื่อทำการเพิ่มเวลาบดเป็น 120 วินาทีอนุภาคเหล่านี้มีสัดส่วนที่ต่ำลงและมีปริมาณของอนุภาคที่ขนาด $150 - 250\ \mu\text{m}$ และขนาดเล็กกว่า $150\ \mu\text{m}$ เพิ่มขึ้น ซึ่งจากการที่ขนาดอนุภาคของแกลบมีขนาดเล็กลงทำให้อนุภาคเหล่านี้สามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่าง

อนุภาคได้มากขึ้น ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างโมเลกุลลดลงเส้นใยไมซีเลียมจึงเจริญเติบโตได้ดีขึ้น ดังนั้นการบดเกลบนอกจากจะเป็นการปรับขนาดอนุภาคของเกลบให้เล็กลงเพื่อลดช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ ยังเป็นการปรับโครงสร้างทางเคมีของวัสดุอีกด้วยเมื่อบดเกลบด้วยเวลาที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดปริมาณของลิกนินที่เข้ามายับยั้งการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม ยังจะเป็นการช่วยให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดียิ่งขึ้น เส้นใยมีความหนาแน่นและแข็งแรงช่วยยึดเกาะอนุภาควัสดุได้มากขึ้นนำไปสู่คุณสมบัติที่ดีขึ้น

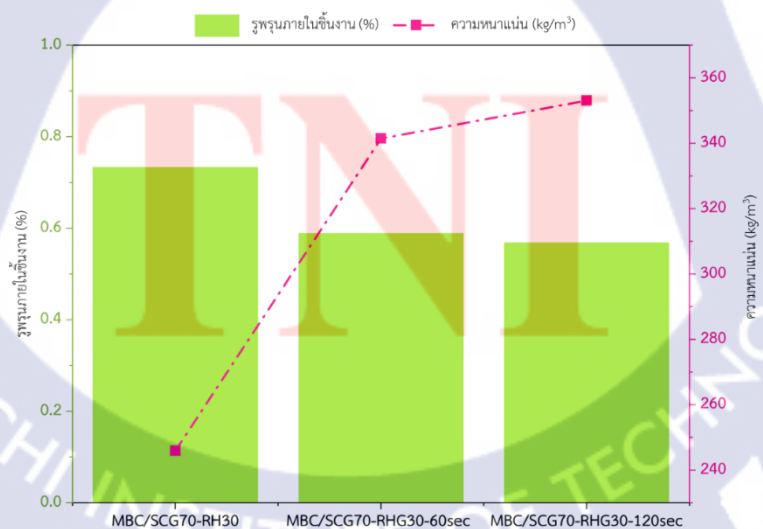
4.7.2 อิทธิพลของขนาดของอนุภาคเกลบต่อคุณสมบัติทางกายภาพ

ขนาดอนุภาคของวัสดุที่เล็กลงส่งผลให้รูพรุนและช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุลดลง โดย MBC/SCG70-RH30 มีรูพรุนภายในวัสดุประมาณ 73.33% ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวกันอย่างหลวม ๆ ของเกลบและกากกาแฟ ซึ่งกากกาแฟสามารถเข้าไปแทรกตัวระหว่างช่องว่างได้เพียงบางส่วนจึงทำให้ยังมีปริมาณของรูพรุนที่สุด และเมื่อทำการบดเกลบจะเห็นได้ว่าช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุลดต่ำลงโดยมีค่ารูพรุนของวัสดุอยู่ในช่วงประมาณ 56 – 60% ซึ่งเกิดจากการที่เกลบสามารถเรียงตัวกันได้ชิดมากขึ้นอีกทั้งเกลบที่มีขนาดเล็กลงสามารถเข้าไปแทรกตัวในช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุได้มากขึ้น ซึ่งการที่รูพรุนภายในวัสดุลดต่ำลงช่วยให้วัสดุมีการดูดซึมน้ำที่ลดลงตามไปด้วย (รูปที่ 4.26) เนื่องจากน้ำสามารถซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุได้น้อยลง รูพรุนภายในเนื้อวัสดุที่ใช้ในการอุ้มน้ำมีปริมาณต่ำลง อีกทั้งปริมาณของรูพรุนที่ลดลงยังส่งผลให้วัสดุมีความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย (รูปที่ 4.27)



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรุกรณภายในถังงานและการดูดซึมน้ำของ MBC ที่อัตราส่วน 70:30

จากรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรุกรณภายในถังงานและการดูดซึมน้ำ เมื่อทำการบดเกลบช่วยลดปริมาณรุกรณที่เกิดขึ้นภายในถังงาน ซึ่งเมื่อทำการบดแล้วสามารถลดปริมาณของรุกรณได้ประมาณ 19 – 23% ซึ่งสอดคล้องกับการดูดซึมน้ำเมื่อปริมาณของรุกรณลดลงส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุลดลงซึ่งสามารถลดค่าการดูดซึมน้ำได้ประมาณ 22 – 58%

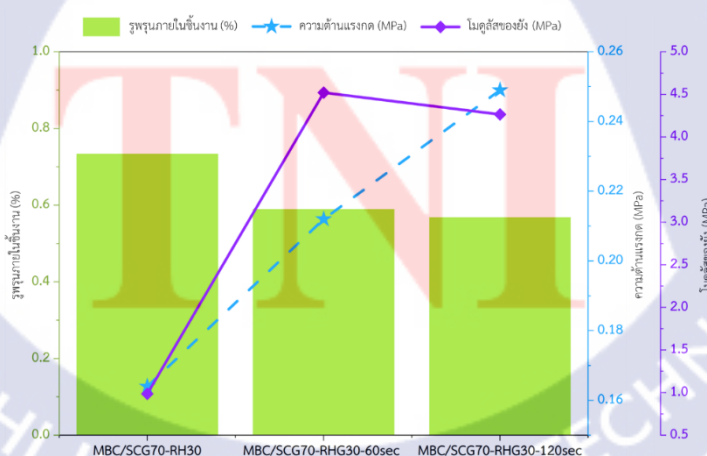


รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรุกรณภายในถังงานและความหนาแน่นของ MBC ที่อัตราส่วน 70:30

จากรูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปพูนภายในชิ้นงานและความหนาแน่นของ MBC เมื่อปริมาณรูปพูนภายในเนื้อวัสดุลดลงส่งผลให้วัสดุมีความหนาแน่นที่สูงขึ้นตามไปด้วย โดยการบดเกลบทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 38 – 44% เมื่อเปรียบเทียบกับ MBC/SCG70-RH30

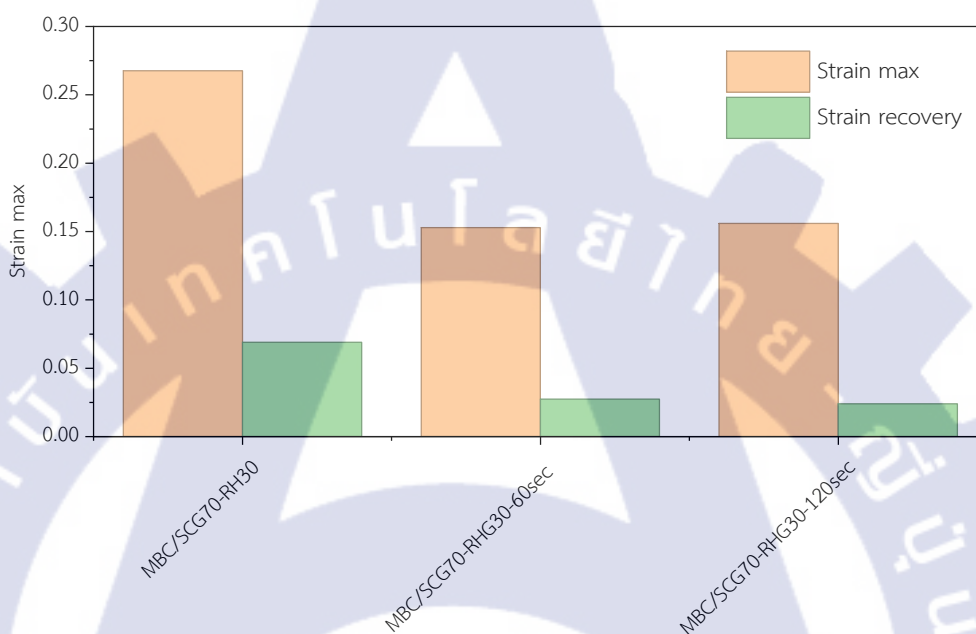
4.7.3 อิทธิพลของขนาดของอนุภาคเกลบต่อคุณสมบัติทางกล

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุแสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดอนุภาคของวัสดุมีขนาดที่เล็กลงจะทำให้วัสดุสามารถรับความต้านทานแรงกดได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่เส้นใยโมซีเลียมมีความแข็งแรงมากขึ้น และเส้นใยโมซีเลียมจากอาหารเลี้ยงที่ผสมเกลบบดมีความหนาแน่นมากกว่าเกลบที่ไม่ผ่านการบด (RH) เมื่อทำการทดสอบความต้านทานแรงกดเส้นใยโมซีเลียมสามารถที่เป็นตัวประสานคอยยึดเกาะอนุภาคของวัสดุไว้ด้วยกันเกิดการฉีกขาดได้ยากกว่าบน (RH) แต่ก็มีความเปราะที่มากกว่าเพราะการเรียงตัวของอนุภาคที่อัดแน่นเมื่อเทียบกับ RH โดยจากการทดสอบจะเห็นได้ว่า MBC/SCG70-RH30 มีความต้านทานแรงกดที่ต่ำที่สุดแต่วัสดุมีการคืนตัวที่มากกว่า MBC สูตรอื่น เนื่องจากอนุภาคของวัสดุมีการเรียงตัวอย่างหลวม ๆ เกิดรูปพูนมากทำให้วัสดุมีพฤติกรรมคล้ายฟองน้ำมีความยืดหยุ่นมากกว่า MBC/SCG100, MBC/RHG-60sec, MBC/RHG-120sec, MBC/SCG70RHG30-60sec และ MBC/SCG70RHG30-120sec ดังนั้นการบดเกลบให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลงเป็นการช่วยปรับปรุงให้วัสดุมีความต้านทานแรงกดที่สูงขึ้น (รูปที่ 4.28) แต่ความสามารถในการคืนตัวของวัสดุก็จะลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับเกลบที่ยังไม่ผ่านการบด



รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรูปพูนภายในชิ้นงานกับความต้านทานแรงกดและโมดูลัสของยังของ MBC ที่อัตราส่วน 70:30

จากรูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปพรรณภายในชิ้นงานกับความต้านทานแรงกด เมื่อปริมาณของรูปพรรณภายในวัสดุลดลงส่งผลให้ความต้านทานแรงกดของวัสดุเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และในส่วนของคุณสมบัติของยังจะเห็นได้ว่า MBC /SCG70RHG30-60sec มีค่าโมดูลัสของยังที่สูงที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลมาลิกนินที่เป็นองค์ประกอบที่มีความแข็งแรงในเกลบบดที่ 60 วินาทีที่มีปริมาณที่สูงกว่าเกลบบด 120 วินาทีจึงทำให้มีค่าโมดูลัสของยังที่สูงกว่า



รูปที่ 4.29 ความเครียดสูงสุดและความเครียดที่คืนตัวได้ของ MBC อัตราส่วน 70:30

จากรูปที่ 4.29 แสดงค่าความเครียดสูงสุดของวัสดุและค่าความเครียดที่วัสดุสามารถคืนตัวได้ MBC/SCG70-RH30 มีความเครียดของวัสดุสูงที่สุดอีกทั้งยังสามารถคืนตัวได้มากกว่า MBC ที่ได้จากกากกาแฟผสมเกลบบด ซึ่งเกิดจากการที่ปริมาณของรูปพรรณภายในเนื้อวัสดุของตัวอย่าง MBC/SCG70-RH30 มีปริมาณมาก ส่งผลให้วัสดุมีความสามารถคล้ายคลึงกับฟองน้ำ และสามารถคืนตัวได้มากกว่า MBC ที่ผสมเกลบบดประมาณ 60 – 65%

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยงกากกาแฟ-กลบดเปรียบเทียบกับกากกาแฟ-กลบไม่บด

จากการศึกษาพบว่าสัดส่วนของกากกาแฟ-กลบ และขนาดอนุภาคส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม เส้นใยไมซีเลียมจาก SCG-RH สามารถเจริญเติบโตและแผ่ขยายตามแนวรัศมีได้ดีแต่มีความหนาแน่นของเส้นใยต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยไมซีเลียมจาก SCG-RHG อย่างไรก็ตามเส้นใยไมซีเลียมที่ได้จากการเพาะเลี้ยงบน SCG-RHG มีการแผ่ขยายในแนวรัศมีที่ลดลง แต่เส้นใยไมซีเลียมมีความหนาแน่นมากขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงของเส้นใยไมซีเลียม โดยในงานวิจัยนี้ทำการพิจารณาการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมจากการขยายตัวในแนวรัศมีประกอบกับความหนาแน่นของเส้นใยไมซีเลียม เนื่องจากเส้นใยไมซีเลียมทำหน้าที่เสมือนกับภาวธรรมชาติคอยยึดเกาะอนุภาคของวัสดุไว้ด้วยกันเมื่อเส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ดีและมีความหนาแน่นของเส้นใยมากจะช่วยให้เส้นใยมีความแข็งแรงสามารถทนต่อวัสดุได้ดี ซึ่งนำไปสู่คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดีขึ้น

5.1.2 อิทธิพลของขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของกลบหลังการบดที่ส่งผลต่อ

การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม

การผสมกลบดลงในอาหารเลี้ยงช่วยให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้รวดเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ MBC/SCG100 และยังเป็นการช่วยให้เส้นใยไมซีเลียมมีความแข็งแรงมากขึ้น ปริมาณและความหนาแน่นของเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ MBC/SCG70-RH30 เนื่องจากการบดกลบเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของเนื้อวัสดุ อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณของรูพรุนภายในชิ้นงาน โดยกลบที่ถูกบดจะเข้าไปแทรกตัวที่บริเวณช่องว่างภายในเนื้อวัสดุได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของรูพรุนลดลงและง่ายต่อการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม จึงนำไปสู่คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพที่ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ MBC/SCG70-RH30

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของกลบไม่บด (RH) กลบด (RHG) และกากกาแฟ (SCG) แสดงให้เห็นว่าในกลบและกากกาแฟมีเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นแหล่งพลังงานให้กับเส้นใยไมซีเลียมใช้ในการเจริญเติบโต เมื่อเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของลักษณะของพีคในช่วง $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงถึงเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสที่อยู่ใน RH, SCG และ

RHG ก่อนและหลังเพาะเลี้ยงไมซีเลียมพบว่าเมื่อเส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตบนอาหารเลี้ยงไมซีเลียม จะเข้าไปเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุทำให้พีคในช่วง $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ ลดลง

5.1.3 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

การบดเกลบเพื่อปรับปรุงขนาดของอนุภาคเกลบให้เล็กลงสามารถช่วยลดปริมาณของ ช่องว่างและรูพรุนที่เกิดขึ้นในวัสดุ MBC ได้ และยังสามารถช่วยลดอัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุให้ต่ำลง โดย MBC ที่ผสมเกลบที่ยังไม่ผ่านการบด (RH) จะมีปริมาณรูพรุนที่สูงกว่า MBC จากสูตรอื่น MBC/RH100 ไม่สามารถระบุปริมาณของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุได้เนื่องจากเส้นใยไมซีเลียม เจริญเติบโตได้ไม่ดีเมื่อนำมาขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบทำให้วัสดุไม่สามารถคงรูปเป็นชิ้นงานสำหรับการ ทดสอบการดูดซึมน้ำได้ MBC/ SCG70-RH30 มีปริมาณของรูพรุนเท่ากับ 73.33% ซึ่งสูงที่สุดเมื่อ เปรียบเทียบกับ MBC สูตรอื่น ๆ ซึ่งการที่วัสดุมีรูพรุนที่สูงนั้นส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูด ซึมน้ำของวัสดุ จากการที่วัสดุมีปริมาณของรูพรุนสูงทำให้วัสดุมีค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่ง ค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของ MBC/ SCG70-RH30 ประมาณ $217\% \pm 0.252$ เมื่อทำการปรับปรุงขนาด อนุภาคเกลบให้เล็กลงด้วยการบดเกลบช่วยให้อนุภาคของวัสดุสามารถเรียงตัวกันได้แน่นมากขึ้น และทำให้อนุภาคขนาดเล็กและฝุ่นผงที่เกิดจากการบดเกลบสามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างได้ดีขึ้น จึงช่วยลดปริมาณของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุได้ประมาณ $18.70 - 23.53\%$ โดย MBC/RHG100-60sec, MBC/RHG100-120sec, MBC/SCG70-RHG30-60sec และ MBC/SCG70- RHG30-120sec มีปริมาณของรูพรุนประมาณ $56.81 - 59.62\%$ ซึ่งยังสูงกว่า MBC/SCG100 จาก การที่รูพรุนภายในเนื้อวัสดุลดลงส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุต่ำลง MBC/SCG70-RHG30- 120sec มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ $91\% \pm 0.046$ รองลงมาคือ MBC/RHG100-120sec และ MBC/RHG100-60sec เท่ากับ $114\% \pm 0.156$ และ $146\% \pm 0.032$ เมื่อเปรียบเทียบกับ MBC/SCG100 แสดงให้เห็นว่าแม้ว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุจะมีค่าที่ต่ำกว่า MBC/RHG100- 60sec, MBC/RHG100-120sec, MBC/SCG70-RHG30-60sec และ MBC/SCG70-RHG30-120sec แต่มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ $151\% \pm 0.299$ ซึ่งสูงกว่า MBC/SCG70-RHG30-120sec, MBC/RHG100-120sec และ MBC/RHG100-60sec

5.1.4 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

การทดสอบความต้านทานแรงกดของวัสดุบนอาหารเลี้ยงแต่ละสูตรให้ค่าความต้านทานแรง กดและค่าโมดูลัสที่แตกต่างกัน เนื่องจากการเรียงตัวของอนุภาคเกลบ และปริมาณลิกนินที่เป็น องค์ประกอบในเกลบส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม โดยปริมาณลิกนินจะส่งผลต่อค่า โมดูลัสของแข็งของ MBC เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง MBC/SCG70RH30, MBC/SCG70RHG30-

60sec และ MBC/SCG70RHG30-120sec พบว่า MBC/SCG70RHG30-60sec มีปริมาณลิกนินมากกว่าบน MBC/SCG70RHG30-120sec ทำให้ MBC/SCG70RHG30-60sec มีค่าโมดูลัสเท่ากับ 4.521 ± 0.980 MPa ซึ่งมากกว่า MBC/SCG70RHG30-120sec มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ 4.265 ± 1.828 MPa แต่ในขณะเดียวกัน MBC/SCG70RH30 มีปริมาณของลิกนินมากที่สุดแต่มีค่าโมดูลัสของยังต่ำเท่ากับ 0.986 ± 0.386 เนื่องจากจากการเรียงตัวของขนาดอนุภาคที่หลวมส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคมากทำให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ไม่ดี เส้นใยไมซีเลียมมีความแข็งแรงต่ำยึดเกาะอนุภาคของวัสดุได้ไม่ดี แต่จากการที่วัสดุมีการเรียงตัวอย่างหลวม ๆ ส่งผลให้วัสดุมีพฤติกรรมคล้ายกับฟองน้ำ เมื่อวัสดุได้รับแรงกดจะเกิดการยุบตัว และหลังจากยกหัวกดที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานแรงกดออกวัสดุจะมีการคืนตัว ซึ่งแตกต่างจาก MBC/SCG100, MBC/RHG100-60sec, MBC/RHG100-120sec, MBC/SCG70-RHG30-60sec และ MBC/SCG70-RHG30-120sec ที่มีความเปราะเพิ่มขึ้นจากการที่ฝุ่นผงและอนุภาคขนาดเล็กแทรกตัวเข้าไปยังช่องว่างได้ง่ายขึ้นส่งผลให้การเรียงตัวของอนุภาคภายในวัสดุแน่นขึ้น และเส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ดีส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น ดังนั้นการบดกลบให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงจะเป็นการช่วยให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดี ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุได้เช่นเดียวกัน เมื่อเส้นใยไมซีเลียมมีความหนาแน่นสูงจะทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงช่วยยึดเกาะอนุภาคของวัสดุได้ดี นำไปสู่ความแข็งแรงของวัสดุที่ดีขึ้น

5.2 แนวทางการต่อยอดและพัฒนาวัสดุ MBC ในอนาคต

ในการพัฒนาวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์ต้องคำนึงถึงการที่บรรจุภัณฑ์ได้รับแรงกระแทกซ้ำๆ ขณะขนส่ง อีกทั้งยังต้องสามารถคงสภาพเดิมหรือเกิดความเสียหายน้อย ดังนั้นวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์จึงควรมีคุณสมบัติความยืดหยุ่นและการดูดซับแรงกระแทกที่ดี จากผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าวัสดุ MBC/SCG-RHG ที่ทำจากแคลสเบด (RHG) ผสมกับกากกาแฟ (SCG) ความต้านทานแรงกดสูงขึ้นจากการอัดแน่นของอนุภาคและเส้นใยไมซีเลียมที่ช่วยยึดเกาะอนุภาควัสดุได้มาก แต่ MBC ก็มีความเปราะที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นของวัสดุเพิ่มขึ้นประมาณ 29.27–43.29% ในขณะเดียวกัน MBC ที่ทำจากกากกาแฟ-แคลสเบดที่ไม่ผ่านการบด (RH) พบว่าวัสดุ MBC มีความต้านทานแรงกดที่ต่ำ เนื่องจากแคลสเบดที่ไม่ผ่านการบดมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากจึงมีความหนาแน่นรวม (Bulk density) ที่ต่ำ จึงทำให้ MBC/SCG-RH มีความยืดหยุ่นและสามารถคืนตัวได้มากกว่า MBC สูตรอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากอนุภาคของแคลสเบดไม่บดมีช่องว่างระหว่างกันมากทำให้พื้นที่ผิวในการเจริญเติบโตของไมซีเลียมลดน้อยลงจึงเป็นสาเหตุให้การยึดเกาะระหว่างอนุภาคของแคลสเบดและกากกาแฟนั้นไม่ดี ดังนั้นแนวทางในการพัฒนาในอนาคตของ MBC ที่ทำจากกากกาแฟ-แคลสเบดให้มีความแข็งแรงและสามารถรับแรงได้มากพร้อมกับการดูดซับแรงกระแทกได้ดีสามารถทำได้โดยการนำ RHG และ RH มาผสมกันเพื่อให้คุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นของ RHG และ RH มารวมกันช่วยให้วัสดุ

สามารถแสดงคุณสมบัติในด้านของความแข็งแรงที่สูงขึ้นและยังคงมีความยืดหยุ่นของวัสดุอยู่ ลดความเปราะของวัสดุให้ต่ำลงสามารถรับแรงกระแทกซ้ำ ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การปรับปรุงการดูดซึมน้ำของวัสดุจากการบดกลบเพื่อลดปริมาณของช่องว่างและรูพรุนภายในวัสดุสามารถช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุกับบรรจุภัณฑ์อื่น ๆ จะเห็นได้ว่า MBC ยังคงมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูง เพื่อที่จะพัฒนา MBC ให้เป็นบรรจุภัณฑ์สามารถใช้ได้ในสภาวะที่หลากหลายมากขึ้น ยังต้องมีการปรับปรุงให้วัสดุมีการดูดซึมน้ำที่ต่ำลง แนวทางในการพัฒนาคือการเคลือบผิววัสดุเพื่อเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ผิวของวัสดุให้สูงขึ้น จะทำให้วัสดุสามารถดูดซึมน้ำได้ลดลง เช่น การนำซีฟิ่งมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวเนื่องจากซีฟิ่งมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูง และเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ นอกจากนี้การเคลือบผิวยังสามารถช่วยยืดระยะเวลาในการใช้งานวัสดุให้มากขึ้น เก็บรักษาได้ง่าย และเป็นป้องกันหรือลดการเกิดราที่วัสดุได้อีกด้วย เนื่องจากเมื่อวัสดุได้รับความชื้นต่อเนื่องเป็นเวลานานวัสดุจึงมีโอกาที่จะเกิดการติดเชื้อได้ การเคลือบผิววัสดุจึงเป็นการช่วยลดการซึมผ่านของน้ำเข้าไปในวัสดุได้ ส่งผลให้บรรจุภัณฑ์มีความคงทนและปลอดภัยต่อการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น



TNI



บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] European Commission, “*Single-Use Plastics*,” [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/single-use-plastics_en [Accessed: July 21, 2025].
- [2] European Environment Agency, “*Single-Use Plastics*,” [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/single-use-plastics_en [Accessed: July 21, 2025].
- [3] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.), “*BCG เป็นมายังไง?*,” [Online]. Available: <https://www.bcg.in.th/background/> [Accessed: November 2, 2024].
- [4] อิชย์อาณิคม์ ชิตวิเศษ และ ชลธิชา จันแปงเงิน, “*แนวทางการพัฒนาเศรษฐกิจหมุนเวียนเพื่อลดการเผาในภาคการเกษตร*,” [Online]. Available: <https://think.moveforwardparty.org/article/agriculture/4243/> [Accessed: July 12, 2025].
- [5] จุไรรัตน์ ฝอยถาวร และคณะ, “*เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีค่าอย่างไร?*,” [Online]. Available: <https://hkm.hrdi.or.th/Knowledge/detail/700> [Accessed: August 5, 2025].
- [6] P. Trail, “*Rice Hull Gold - 10 On-Farm Uses of Rice Hulls*,” [Online]. Available: <https://www.echocommunity.org/th/resources/9f9bcb3a-ed2e-4209-bf90-38a759ff3340> [Accessed: March 5, 2026].
- [7] กรมการข้าว, “*องค์ความรู้เรื่องข้าว*,” [Online]. Available: https://rkb.ricethailand.go.th/web/content_page.php?code=A-3BLRLOVQEZ [Accessed: March 6, 2026].
- [8] ณัฐพงศ์ ตันตวิฒนพันธ์, “*กากกาแฟจากแก้วกาแฟสู่แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนสำหรับผลิตภัณฑ์ชีวภาพ*,” *Thai Environment*, vol. 23, no. 1, pp. 1-8, January 2019, [Online]. Available: <https://digital.car.chula.ac.th/cuej/vol23/iss1/8> [Accessed: March 5, 2024].
- [9] Nespresso, “*20 ประโยชน์ของกากกาแฟที่คุณอาจยังไม่เคยรู้เกี่ยวกับกากกาแฟ*,” [Online]. Available: <https://www.nespresso.com/th/en/nespresso-coffee-talk/ground-coffee?msockid=0a7109f7f1886aad0aa21b9ff0216bae> [Accessed: March 5, 2026].

- [10] Kaffeeform, “Coffee Grounds in a New Form,” [Online]. Available: <https://www.kaffeeform.com/en/> [Accessed: March 13, 2026].
- [11] Huskee, “Designed for a Waste Free World,” [Online]. Available: <https://www.huskee.co/us/> [Accessed: March 13, 2026].
- [12] S. Sheth, “Your Next Package Might Be Cushioned by Upcycled Grain Husk Instead of Plastic Styrofoam,” [Online]. Available: <https://www.yankodesign.com/2024/01/24/your-next-package-might-be-cushioned-by-upcycled-grain-husk-instead-of-plastic-styrofoam/> [Accessed: March 13, 2026].
- [13] B. Marten and A. Hicks, “Expanded polystyrene life cycle analysis literature review: An analysis for different disposal scenarios,” *Sustainability*, vol. 11, no. 1, pp. 29-35, February 2018, doi: 10.1089/sus.2017.0015.
- [14] P. F. Sommerhuber et al., “Life cycle assessment of wood-plastic composites: Analysing alternative materials and identifying an environmental sound end-of-life option,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 117, pp. 235-248, February 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.10.012.
- [15] A. Philippoussis and P. Diamantopoulou, “Agro-food industry wastes and agricultural residues conversion into high value products by mushroom cultivation,” *Proceedings of the 7th International Conference on Mushroom Biology and Mushroom Products*, ICMBMP7, Lykovrysi Athens, Greece, October 4-7, 2011, pp. 339-351.
- [16] W. Y. Chai et al., “Assessment of coffee waste in formulation of substrate for oyster mushrooms *Pleurotus pulmonarius* and *Pleurotus florida*,” *Future Foods*, vol. 4, pp. 1-9, December 2021, doi: 10.1016/J.FUFO.2021.100075.
- [17] ชนิตา ยุบลไธย์ และคณะ, *คู่มือการผลิตเห็ดฟางและเห็ดนางฟ้าแบบครบวงจร*, กรุงเทพฯ: สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.), 2566.
- [18] วิภาดา แจ่มใส, *การปรับสภาพกากกาแฟด้วยไมโครเวฟเพื่อผลิตน้ำตาล*, วิทยานิพนธ์ วท.ม. (สาขาชีววิทยา), มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, จังหวัดมหาสารคาม, 2563.
- [19] Encyclopedia Britannica, “Mycelium,” [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/mycelium> [Accessed: August 20, 2025].

- [20] M. R. Islam et. al., “Morphology and mechanics of fungal mycelium,” *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, pp. 1-12, December 2017, doi: 10.1038/s41598-017-13295-2.
- [21] N. Klaysuban, “Mycelium Home Products เส้นใยจากเห็ดสู่ “ไมซีเลียม” วัสดุใหม่ปลูกได้,” [Online]. Available: <https://room.baanlaesuan.com/358020/design/mycelium-home-products> [Accessed: August 21, 2025].
- [22] Biohm, “Mycelium Tech,” [Online]. Available: <https://www.biohm.co.uk/mycelium> [Accessed: August 21, 2025].
- [23] J. M. C. Ongpeng et. al., “Using waste in producing bio-composite mycelium bricks,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 15, pp. 1-13, August 2020, doi: 10.3390/APP10155303.
- [24] M. Jones et al., “Thermal degradation and fire properties of fungal mycelium and mycelium - biomass composite materials,” *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1-10, December 2018, doi: 10.1038/s41598-018-36032-9.
- [25] The Foam Company, “A Guide to Understanding EPS Foam Density: SL, M, H, and VH,” [Online]. Available: <https://www.thefoamcompany.com.au/blogs/news/a-guide-to-understanding-eps-foam-density> [Accessed: April 4, 2025].
- [26] J. Zhang et al., “Sustainable biomass-based composite biofilm: Sodium alginate, TEMPO-oxidized chitin nanocrystals, and MXene nanosheets for fire-resistant materials and next-generation sensors,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 654, pp. 795–804, January 2024, doi: 10.1016/J.JCIS.2023.10.080.
- [27] T. Zhang et al, “Chitin nanofibril-based flame retardant for paper application,” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 8, no. 33, pp. 12360–12365, July 2020, doi: 10.1021/acssuschemeng.0c02016.
- [28] S. Smith, “How to Make Liquid Culture: A Step-by-Step Guide for Mushroom Growers,” [Online]. Available: <https://folkfungi.com/blogs/mush-blog/how-to-make-liquid-culture-a-step-by-step-guide-for-mushroom-growers> [Accessed: October 25, 2024].

- [29] นงลักษณ์ บรรยงวิมลณัฐ และคณะ, “การเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเห็ดนางรมด้วยวัสดุเหลือทิ้งกากกาแฟ,” *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, vol. 8, no. 8, pp. 96-105, October 2019.
- [30] จิตรภาณุ อัสวพิชญโชติ, “การพัฒนาวัสดุเพาะเลี้ยงเห็ดจากกากกาแฟและใบจามจุรี,” วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2566.
- [31] เจษฎาบัณฑิต แก้วมณี, “การนำเส้นใยเห็ดมาขึ้นรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร,” วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (สาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ปทุมธานี, 2562.
- [32] N. Novia et al., “Kinetics of lignin removal from rice husk using hydrogen peroxide and combined hydrogen peroxide–aqueous ammonia pretreatments,” *Fermentation*, vol. 8, no. 4, pp. 1-16, April 2022, doi: 10.3390/fermentation8040157.
- [33] A. Ma’Ruf et al., “Lignin isolation process from rice husk by alkaline hydrogen peroxide: Lignin and silica extracted,” *International Conference on Chemistry, Chemical Process and Engineering*, IC3PE, Diponegoro University, Indonesia, March 17, 2017, pp. 020013-1-020013-5.
- [34] G. S. Vanisree et al., “Sustainable bioethanol synthesis from Queen sago seed shells via sequential acid hydrolysis and fermentation,” *Materials Research Express*, vol. 12, no. 8, pp. 1-12, August 2025, doi: 10.1088/2053-1591/adf695.
- [35] W. D. Callister and J. G. David Rethwisch, *Materials Science and Engineering*, 9th ed., USA.: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [36] A. Benchaphong et al., “Assessing mycelium-based blocks utilizing pleurotus ostreatus versus trichoderma virens: material characterization and substrate ratios of bamboo residues, spent coffee grounds, and rice husks,” *Studies in Fungi*, vol. 10, no. e007, pp. 1-11, January 2025, doi: 10.48130/sif-0025-0007.
- [37] A. Ghazvinian et al., “Mycelium-based bio-composites for architecture: assessing the effects of cultivation factors on compressive strength,” *Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, vol. 2, pp. 505-514, September 2019, doi: 10.5151/proceedings-ecaadesigradi 2019_465.

- [38] M. R. Islam et al., “Mechanical behavior of mycelium-based particulate composites,” *Journal of Materials Science*, vol. 53, no. 24, pp. 16371–16382, December 2018, doi: 10.1007/s10853-018-2797-z.
- [39] A. Rigobello and P. Ayres, “Compressive behaviour of anisotropic mycelium-based composites,” *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, pp. 1-13, December 2022, doi: 10.1038/s41598-022-10930-5.
- [40] R. A. Lyubushkin et al., “Polylactide-based polymer composites with rice husk filler,” *Journal of Composites Science*, vol. 8, no. 10, pp. 1-11, October. 2024, doi: 10.3390/jcs8100427.
- [41] M. R. Islam et al., “Sustainable development of three distinct starch based bio-composites reinforced with the cotton spinning waste collected from fiber preparation stage,” *Heliyon*, vol. 10, no. 10, pp. 1-14, May 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e31534.
- [42] S. Manan et al., “Synthesis and applications of fungal mycelium-based advanced functional materials,” *Journal of Bioresources and Bioproducts*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, February 2021, doi: 10.1016/J.JOBAB.2021.01.001.
- [43] กัลยรัตน์ พุฒวงศ์สกุล, “การศึกษาคุณสมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากกากกาแฟและเกลบสำหรับโฟมย่อยสลายได้,” วศ.บ. (สาขาวิศวกรรมยานยนต์), สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพฯ, 2567.
- [44] E. Elsacker et al., Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates,” *PLoS One*, vol. 14, no. 7, pp. 1-20, June 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0213954.
- [45] J. Frost, “Using Post Hoc Tests with ANOVA,” [Online]. Available: <https://statisticsbyjim.com/anova/post-hoc-tests-anova/> [Accessed: August 30, 2025].
- [46] ASTM, “ASTM D1621-16,” [Online]. Available: <https://store.astm.org/d1621-16.html> [Accessed: March 8, 2026].
- [47] S. K. Jha and A. Singh, “Physical and thermal properties of untreated and chemically treated rice husk,” *JAE*, vol. 44, no. 4, no page, December 2007, [Online]. Available: <https://epubs.icar.org.in/index.php/JAE/article/view/14468> [Accessed: May 12, 2026].

- [48] V. Savov et al., “Development and characterization of sustainable biocomposites from wood fibers, spent coffee grounds, and ammonium lignosulfonate,” *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 19, pp. 1-19, October 2025, doi: 10.3390/polym17192589.
- [49] C. G. Yoo et al., “The critical role of lignin in lignocellulosic biomass conversion and recent pretreatment strategies: A comprehensive review,” *Bioresource Technology*, vol. 301, pp. 122784, April 2020, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2020.122784.
- [50] DuPont, *DuPont™ Styrofoam™ Brand Highload 40, 60 and 100 Insulation*, Canada: DuPont, 2024.

