

โครงการที่ 807/2562 (วศบ.อุตสาหกรรม)



การหาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของ
แผ่นมาส์กหน้าที่ทำจากไคโตซานและไฟโบรอิน

นายณัฐชนนท์ ก้อนจันทร์ รหัสนักศึกษา 580612136
นายภาวัต ดิยะพัฒนกุล รหัสนักศึกษา 580612158

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ปีการศึกษา 2562

หัวข้อโครงการ	การหาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์กหน้า ที่ทำจากไคโตซานและไฟโบรอิน		
โดย	นายณัฐชนนท์	ก้องจันทร์	รหัสนักศึกษา 580612136
	นายภวัต	ดิยะพัฒนกุล	รหัสนักศึกษา 580612158
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อนิรุท ไชยจารุณิช		
ปีการศึกษา	2562		

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อนุมัติให้นับ
โครงการนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

กรรมการโครงการ

.....	ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.อนิรุท ไชยจารุณิช)	

.....	กรรมการ
(รศ.ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินไหว)	

.....	กรรมการ
(รศ.ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์)	

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องการหาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์กหน้าที่ทำจากไคโตซาน และไฟโบรอินโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. อนิรุท ไชยจารุณิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยนี้ที่ท่านได้เสียสละให้คำปรึกษาแนะแนวทางคำแนะนำการแก้ไขปัญหา และยังคงคอยเคียงข้างผู้จัดทำมาโดยตลอดจนทำให้การดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จเสร็จสมบูรณ์

โครงการวิจัยนี้จะสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีไม่ได้เลย หากไม่ได้รับการช่วยเหลือให้การสนับสนุนจาก ที่ให้ความกรุณามอบความรู้แก่ผู้วิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณพี่ พันธุ์ระวี ศรีประภากร ที่ช่วยแนะนำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน และขอขอบคุณพี่ ๆ ประจำห้อง SEM ที่ช่วยแนะนำการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Scanning Electron Microscopy) ครู อัคริน ปศุศุทธาทร ที่ช่วยแนะนำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน และทุก ๆ คนที่คอยช่วยเหลือและให้ความรู้ข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยนี้จนประสบความสำเร็จโดยผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ไม่มากนักน้อย

ผู้วิจัยยังใคร่ขอขอบคุณคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า และพี่ ๆ เจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการที่คอยอำนวยความสะดวก และกำลังใจที่คอยเป็นแรงผลักดันในการทำงานวิจัยจากพี่ ๆ ที่คอยช่วยเหลือ และให้ความรู้จากเพื่อน ๆ ที่คอยเป็นกำลังใจซึ่งกันและกัน และจะก้าวผ่านไปด้วยกันที่สำคัญที่สุดในชีวิตที่เป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยเสมอมา คือ บิดา มารดา งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้การกระทำใดซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัยนี้มีข้อผิดพลาดประการใดซึ่งเกิดจากความไม่รู้เท่าไม่ถึงการณ์ของผู้วิจัยก็ขออภัยพร่องในรูปเล่มงานวิจัยก็ดี ผู้วิจัยกราบขออภัยเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย และหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจไม่มากนักน้อย ขอกราบขอบพระคุณ

ณัฐชนนท์ ก้อนจันทร์
ภาวัต ตียะพัฒนกุล

หัวข้อโครงการ	การหาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์กหน้า ที่ทำจากไคโตซานและไฟโบรอิน			
โดย	นายณัฐชนนท์	ก้อนจันทร์	รหัสนักศึกษา	580612136
	นายภวัต	ดิยะพัฒนกุล	รหัสนักศึกษา	580612158
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่			
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อนิรุท ไชยจารุณิช			
ปีการศึกษา	2562			

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์กหน้าที่ทำจากไฟโบรอิน และไคโตซานด้วยการขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพของการผลิตแบบเดิม และแบบใหม่ โดยงานวิจัยนี้นำเอาเทคนิคการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการหาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์กหน้า

โดยปัจจัยที่ใช้ทำการศึกษา คือ อัตราส่วนไคโตซาน ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) และความเข้มข้นของกรดที่ใช้ละลายไคโตซาน โดยจากการดำเนินงานตามหลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k และทำซ้ำ 2 ครั้ง จากผลการทดลองพบว่าปริมาณไคโตซานมีผลต่อความแข็งแรงมากที่สุด ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์มีผลต่อความแข็งแรงรองลงมา และความเข้มข้นของกรดมีผลต่อความแข็งแรงน้อยที่สุด ซึ่งสถานะที่ทำให้ได้ความแข็งแรงมากที่สุด คือ ปริมาณไคโตซาน 70 เปอร์เซ็นต์ (-1) ความเข้มข้นของกรด 1 เปอร์เซ็นต์ (+1) ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) 1 เปอร์เซ็นต์ (+1) ในด้านของผลการเปรียบเทียบการผลิตแบบเดิม และแบบใหม่ พบว่า ความแข็งแรงกับลักษณะรูพรุนของแผ่นมาส์กหน้าไม่มีความแตกต่างกัน

Project Title	Determining Factors Affecting Strength of Facial Mask Made of Chitosan and Fibroin		
Name	Natchanon	Konchan	Code 580612136
	Pawat	Thiyapatanakul	Code 580612158
Department	Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University		
Project Advisor	Assistant Professor Anirut Chaijaruwanich, Ph.D.		
Academic	2018		

ABSTRACT

A research project aims to find factors which affect the strength of the mask made from Fibroin and Chitosan by forming the freezing process in order to compare the mechanical and physical properties of the production of ordinary and new mask sheets. With technical design of the experiment, the project has been determined and brought out possible techniques in order to seek for the most effective factors that affect the strength of the mask sheet.

According to the research, there are factors used in the study, including chitosan ratio, an amount of Glutaraldehyde and the concentration level of acids used to dissolve chitosan. In addition, ongoing processes are based on twice repeated test of the 2^k factorial experimental principle and the conversion of results from these three initial factors. It is resulted that the amount of chitosan affect the strength of sheet masks the most, following by the amount of Glutaraldehyde and the concentration level of acids as the least. Conditions that affect the strength the most are as follows: 70 percent of chitosan (-1), 1 percent of acid concentration level (+1) and 1 percent of Glutaraldehyde (+1). In case of a comparison between the original and the new mask sheets, the result has been shown that the strength and porosity of the mask sheets makes no difference.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษาของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 คุณสมบัติของไคโตซาน	3
2.2 คุณสมบัติของไฟโบรอิน	3
2.3 คุณสมบัติของกลูตาร์ลดีไฮด์	4
2.4 หลักการและทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)	4
2.5 กระบวนการขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง (Freeze Dehydration)	20
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 การทดลองแบบใหม่	23
3.2 กำหนดปัจจัยที่จะนำมาทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพ	28
3.3 การทดลองเบื้องต้น	29
3.4 ทำการทดลองจริง	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกลและกายภาพ	31
3.6 การทดลองแบบเดิม	32
3.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลและกายภาพระหว่างการผลิตแบบเดิมและแบบใหม่	33
3.8 สรุปผลการทดลองและการดำเนินงาน	33
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง	34
4.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพการผลิตแบบใหม่	47
4.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลการผลิตแบบใหม่	49
4.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกล และ ทางกายภาพระหว่างการผลิตแบบใหม่กับแบบเดิม	50
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 ปัญหาและอุปสรรคในการทำวิจัย	53
5.2 สรุปและข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก	
ภาค ก กราฟที่แสดงค่าการทดสอบแรงดึง (Maximum Strength)	55
ประวัติผู้เขียน	73

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	30
4.1	ระดับของปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์ก	37
4.2	ตารางแสดงข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน 2^3	38
4.3	ประมาณค่าผลกระทบและค่าสัมประสิทธิ์	39
4.4	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของทุกพจน์	42
4.5	ประมาณค่าผลกระทบ และค่าสัมประสิทธิ์คิดเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญ	43
4.6	ระดับที่เหมาะสมของการทดลอง	46
4.7	ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติกายภาพแบบใหม่	47
4.8	ตารางแสดงยืนยันผลจากข้อมูลผลการทดสอบแรงดึง	49
4.9	ค่าเฉลี่ยการทดสอบคุณสมบัติทางกลการผลิตแบบเดิม	50
4.10	ค่าเฉลี่ยการทดสอบคุณสมบัติทางกลการผลิตแบบเดิม	50

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
3.1	วิธีการผลิตแบบใหม่	23
3.2	การตัดไหม	24
3.3	กระบวนการ Degum	24
3.4	กระบวนการอบไหม	25
3.5	กระบวนการ Extract	25
3.6	การต้มไหมในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)	26
3.7	เทไหมใส่หลอดเซลลูโลส	26
3.8	การปั่นเหวี่ยง	26
3.9	การละลายไคโตซาน	27
3.10	การเทสารละลายลงกล่อง	27
3.11	เครื่องขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง (Freeze Dryer)	28
3.12	การละลายไคโตซานในสารละลายกรด 0.4 เปอร์เซ็นต์	29
3.13	การละลายไคโตซานในสารละลายกรด 0.5 เปอร์เซ็นต์	29
3.14	สารละลายไฟโบรอิน ไคโตซาน และกลูตาร์ดีไฮด์	30
3.15	การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการผลิตแบบใหม่	30
3.16	เครื่องทดสอบแรงดึง	31
3.17	ชิ้นงานขนาด 5 มิลลิเมตร x 5 มิลลิเมตร	31
3.18	กล้องจุลทรรศน์ (Scanning Electron Microscope)	32
3.19	วิธีการผลิตแบบเดิม	32
4.1	การขึ้นรูปที่มีปริมาณไคโตซาน 70 เปอร์เซ็นต์	35
4.2	การขึ้นรูปที่มีปริมาณไคโตซาน 90 เปอร์เซ็นต์	35
4.3	การเปรียบเทียบระหว่าง 70:1:0.5 แบบใหม่ กับ 70:1:1.5 แบบใหม่ กำลังขยาย 100x	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.4	ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป37
4.5	ลักษณะภายนอกของชิ้นงาน 70:1:1 และ ลักษณะภายนอกของชิ้นงาน 80:1:137
4.6	การนำไปทดสอบแรงดึง38
4.7	แผนภูมิ Normal Plot40
4.8	แผนภูมิพาเรโตที่แสดงปัจจัยที่มีนัยสำคัญ41
4.9	ภาพแสดงการวิเคราะห์ส่วนค้ำของผลตอบการทดลอง44
4.10	Main Effect Plot45
4.11	Interaction Plot46
4.12	การเปรียบเทียบระหว่าง 70:1:1 กำลังขยาย 100x กับ 80:1:1 กำลังขยาย 100x47
4.13	การเปรียบเทียบระหว่าง 70:1:1 กำลังขยาย 100x กับ 70:0.5:1 กำลังขยาย 100x48
4.14	การเปรียบเทียบระหว่าง 70:1:1 กำลังขยาย 100x กับ 70:1:0.5 กำลังขยาย100x48
4.15	การเปรียบเทียบระหว่าง70:1:1 กำลังขยาย 100x แบบใหม่ กับ 70:1:1 กำลังขยาย100x แบบเดิม50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันผู้คนหันมาสนใจดูแลสุขภาพตัวเองมากขึ้นในเรื่องของความสวยงามและแผ่นมาสก์หน้าเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่ผู้หญิงส่วนมากเลือกใช้และมีแนวโน้มว่าในอนาคตแผ่นมาสก์หน้าจะเข้ามามีบทบาทมากขึ้น เนื่องจากกระแสความนิยมในการใช้เวชสำอางที่มาจากธรรมชาติมาช่วยดูแลผิวพรรณในปัจจุบันมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อช่วยในการดูแลผิวพรรณให้ดียิ่งขึ้นซึ่งในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่สามารถสกัดสารจากวัตถุดิบธรรมชาติเพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็นผลทำให้อุตสาหกรรมการผลิตเวชสำอางมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในยุคปัจจุบัน ซึ่งผลิตภัณฑ์มาสก์หน้าก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกของผู้ที่ต้องการจะดูแลผิวหน้าเนื่องจากพกพาได้ง่าย มีวิธีการใช้งานที่ง่าย และสามารถหาซื้อได้ง่ายตามร้านสะดวกซื้อจึงเป็นที่นิยมมากสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการความสะดวกสบาย ซึ่งสารอาหารในแผ่นมาสก์หน้าจะซึมเข้าสู่ผิวหน้าโดยตรงเป็นการทำทรีทเมนต์แบบพิเศษที่จะช่วยคืนความชุ่มชื้นให้ใบหน้าและลดปัญหาผิวพรรณแห้งหย่อนคล้อยหรือลดเลือนริ้วรอยนอกจากนี้แผ่นมาสก์หน้าจะเป็นการเติมสารบำรุงต่างๆ ที่จะช่วยปรับสภาพผิวให้แลดูกระจ่างใส นุ่มนวล

ผลิตภัณฑ์แผ่นมาสก์หน้าจากสารสกัดธรรมชาติเป็นอีกหนึ่งทางเลือกหนึ่งในการทำแผ่นมาสก์หน้าซึ่งไฟโบรอินและโคไคซาน เป็นหนึ่งในสารที่สามารถสกัดมาขึ้นรูปแผ่นมาสก์ได้แต่ก็มีข้อเสียในเรื่องระยะเวลาในการผลิต ดังนั้นเพื่อลดข้อเสียในเรื่องระยะเวลาการผลิตแผ่นมาสก์หน้า ผู้วิจัยจึงคิดที่จะประยุกต์ลดขั้นตอนการขึ้นรูปแบบเยือกแข็งออกซึ่งใช้ในการสกัดไฟโบรอินซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการผลิตได้ 2 วัน เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแผ่นมาสก์ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบเยือกแข็งโดยการทดสอบความแข็งแรงของมาสก์และทดสอบความพรุนของแผ่นมาสก์จากสารสกัด

ธรรมชาติ

ผู้เสนอโครงการวิจัยนี้ได้ค้นพบปัญหา จากปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์ก จึงมีแนวคิดที่จะนำ วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) มาช่วยวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์ก โดยปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์จะเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเป็นอย่างมากและเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ เช่น อัตราส่วนไคโตซาน ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) และความเข้มข้นของกรดที่ใช้ละลายไคโตซาน

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์กหน้า

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพของการผลิตแผ่นมาส์กแบบเดิมและแบบใหม่

1.3 ขอบเขตการศึกษาของโครงการ

1.3.1 ไฟโบรอินสังเคราะห์จากรังไหม และไคโตซานสกัดจากแกนปลาหมึกแผ่นมาส์กขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง

1.3.2 ตัวแปรในการออกแบบการทดลอง มี 3 ตัวแปร

1. อัตราส่วนไคโตซาน และไฟโบรอิน
2. ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde)
3. ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการละลายไคโตซาน

1.3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกล (Tensile Test) โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine และ การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์ (Scanning Electron Microscopy)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ลดเวลาในกระบวนการขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง

1.4.2 ได้แนวทางในการพัฒนาคุณภาพการผลิตแผ่นมาส์กหน้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

จากการหาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์กหน้าที่ทำจากไคโตซานและไฟโบรอิน โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง ผู้วิจัยได้ศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยโดยจำแนกเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้ คุณสมบัติของไคโตซาน คุณสมบัติของไฟโบรอิน คุณสมบัติของกลูตารัลดีไฮด์ หลักการและทฤษฎีการออกแบบการทดลอง และหลักการและทฤษฎีการขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง

2.1 คุณสมบัติของไคโตซาน

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินสารสกัดที่ได้จากธรรมชาติซึ่งสามารถสกัดได้จากเปลือกกุ้ง กระจดปู แกนปลาหมึก ไคโตซาน มีคุณสมบัติอ่อนตัวสามารถขึ้นรูปเป็นเจลเม็ด เส้นใย หรือ คอลลอยด์ (สารผสมเพื่อรวมตัวให้เป็นเนื้อเดียวกันสำหรับขึ้นรูป) รวมถึงการใช้ประโยชน์ในการเคลือบสิ่งต่างๆได้ และยังเป็นสารที่มีสรรพคุณสามารถไปอยู่ในอุตสาหกรรมหลายอย่างทั้งการแพทย์ การเกษตรอุตสาหกรรมอาหารเครื่องสำอาง โดยรวมก็คือสารนี้มีสรรพคุณที่ครอบคลุมหลากหลายนำไปใช้อย่างถูกวิธีไฟโบรอินเป็นโปรตีนเส้นใยที่มีโครงสร้างประกอบด้วย 3 โปรตีนหน่วยย่อยได้แก่

1. สายโซ่โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (Heavy chain)
2. สายโซ่โปรตีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Light chain)
3. ไกลโคโปรตีน P25 (Glycoprotein P25)

2.2 คุณสมบัติของไฟโบรอิน

โครงสร้างทุติยภูมิของไฟโบรอินประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่มีการจัดเรียงตัวเป็น

ผลึก และส่วนที่มีการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน (Amorphous) นอกจากนี้ส่วนที่มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวเป็นผลึกยังสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ โครงสร้างใหม่ I โครงสร้างใหม่ II และโครงสร้างใหม่ III โดยโครงสร้างใหม่ I มีโครงสร้างก่อนเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลึกเส้นใย (Pre-Spun Pseudo Crystalline) หรือที่เรียกว่าโครงสร้างแบบนี้ว่า (Random Coil) หรือโครงสร้างแบบเกลียว α -helix สามารถละลายน้ำได้ (Water Soluble) เป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียรสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นโครงสร้างใหม่ II ได้ เมื่อได้รับความร้อน (Heating) การปั่นกววน (Spinning) หรือการให้แรงทางไฟฟ้า (Electric Field) การเติมด้วยสารละลายที่มีซัลเฟน เมทานอล หรือ อะซิโตน โครงสร้างใหม่ II มีรูปแบบโครงสร้างเป็นเส้นใยไหมสั้นและถือเป็นโครงสร้างหลักของไฟโบรอิน ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบพลีทเบตต้า (β -Pleated sheet) สายโซ่โปรตีนเชื่อมกันแบบไม่ขนาน (Anti-Parallel) ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลกับหมู่อะมิโนโดยระหว่างแผ่นพลีทเบตต้าแต่ละแผ่นซ้อนทับกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ส่งผลให้ไฟโบรอินมีคุณสมบัติเชิงกลที่มีความแข็งแรงสูง ทำให้ไฟโบรอินไม่สามารถละลายน้ำได้โดยตรง

2.3 คุณสมบัติของกลูตารัลดีไฮด์

สารละลายกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงที่เติมลงในพอลิเมอร์ผสม เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างแบบร่างแหภายในแผ่นฟิล์ม โดยศึกษาผลของอัตราส่วนในการผสมของไคโตซานและไฟโบรอินที่มีต่อสมบัติทางกล สมบัติการบวมตัวในสารละลาย

2.4 หลักการและทฤษฎีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การออกแบบและวางแผนการทดลอง (Design of Experiment) กลยุทธ์ในการออกแบบการวางแผน และทำการทดลองอย่างมีระบบแบบแผน และมีประสิทธิภาพเพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่มีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความเที่ยงตรง แม่นยำ สามารถนำผลการทดลองมาวิเคราะห์และใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพนอกจากนี้ยังสามารถประมาณค่าผลกระทบของปัจจัยที่สำคัญจากการทดลองโดยใช้ทรัพยากรในการทดลองที่มีจำกัดได้อย่างคุ้มค่า

ปัจจัย (Factor) เป็นปัจจัยอิสระ (Independence) ที่ผู้วิเคราะห์สงสัยว่าจะส่งผลต่อผลลัพธ์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor หรือ Noise Factor) แทนด้วย $z_1, z_2, \dots, z_n$ และ ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) แทนด้วย $x_1, x_2, \dots, x_n$ โดย DOE จะมุ่งเน้นที่การศึกษาเพื่อป้องกันผลกระทบจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ต่อผลลัพธ์ที่สนใจ ในขณะที่ต้องการกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ไม่ให้ส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญปัจจัยที่ควบคุมได้จะเรียกว่า ทรีตเมนต์ (Treatment) จำนวนครั้งในการทำการทดลองซ้ำ (Replication) เป็นการทำการทดลองซ้ำด้วยเงื่อนไขที่เหมือนกัน โดยในการทดลองหนึ่ง ๆ จะมีจำนวนเงื่อนไขการทดลอง

(Treatment Combination) เท่ากับผลคูณของจำนวนปัจจัยและจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย เช่น การทดลองที่มี 2 ปัจจัยๆละ 2 ระดับจะมีทั้งหมด 4 เงื่อนไขการทดลอง

ผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ ซึ่งเป็นปัจจัยไม่อิสระ (Dependence) ต้องการศึกษาควคุมซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามการเปลี่ยนแปลงของ ทรีตเมนต์ต่าง ๆ

การสุ่ม (Randomization) เป็นส่วนหนึ่งของ DOE ที่พยายามให้ผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) กระจายอย่างสม่ำเสมอเกี่ยวกับค่าของผลตอบ (Response) ที่ได้จากการทดลอง

2.4.1 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- บ่งชี้ปัจจัย x 's ที่มีอิทธิพลต่อผลตอบ (Response)
- กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x 's ที่มีอิทธิพลต่อผลตอบ (Response Y) เพื่อให้ มีค่าเท่ากับหรือเข้าใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด
- กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x 's ที่มีอิทธิพลต่อผลตอบ (Response Y) เพื่อให้มีความผันแปรของค่า Y ต่ำ
- กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัย x 's อิทธิพลต่อผลตอบ (Response Y) เพื่อให้ อิทธิพลของปัจจัยที่ไม่ได้ (Uncontrollable Factor) มีน้อยที่สุด

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งของการควบคุม กระบวนการเชิงสถิติ เช่น หากผลของการติดตามกระบวนการด้วยแผนภูมิควบคุมบ่งชี้ว่ากระบวนการ ที่ควบคุมไม่ได้ (Out-of-Control) ซึ่งอาจมีปัจจัยจำนวนมากที่เป็นไปได้ที่จะเป็นสาเหตุของความ ผิดปกติ การที่จะปรับปรุง แก้ไขเพื่อนำกระบวนการกลับสู่ภาวะภายใต้การควบคุมจะเป็นไปได้ยาก หากไม่ทราบว่ามีปัจจัยตัวใดที่ส่งผลต่อผลตอบ (Response) อย่างมีนัยสำคัญการออกแบบการทดลอง จึงเป็นเครื่องมือนิยมใช้เพื่อบ่งชี้ปัจจัยเหล่านี้

นอกจากนี้การออกแบบการทดลองยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการปรับปรุง ผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่แล้วให้ดียิ่งขึ้น ดังนี้

- 1) ประเมินและเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบไว้แล้ว
- 2) บ่งชี้พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญซึ่งกล่าวได้ว่าการประยุกต์ใช้ DOE อย่างมีประสิทธิภาพจะส่งผลต่อการปรับปรุงด้านความสามารถในการผลิต (Manufacturability) สมรรถนะ (Performance) และความน่าเชื่อถือ (Reliability) ต้นทุน (Cost) และ ระยะเวลาในการพัฒนา (Development Time) ของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น

2.4.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน 2^k

ความสำคัญและประโยชน์ของการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน 2^k จะเน้นในกรณีศึกษาผลของปัจจัย k ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมีการเปลี่ยนแปลงระดับจำนวนเท่ากันคือ 2 ระดับ ดังนั้นจำนวนเงื่อนไขการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวนคือ $2_1 \times 2_2 \times 2_3 \times \dots \times 2_k = 2^k$ การทดลองเรียกว่าการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน 2^k เป็นกรณีการออกแบบการทดลองที่สำคัญและนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุด สำหรับการประยุกต์ใช้แก้ปัญหาในโรงงานอุตสาหกรรม และในงานศึกษาวิจัย จุดประสงค์ของการออกแบบการทดลองคือเพื่อคัดกรองปัจจัย (Factor Screening Experiment) โดยเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญเท่านั้นและใช้สำหรับสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของกระบวนการ

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) สามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยทุกปัจจัยพร้อมกันทำให้สามารถประมาณค่าผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ถึง k ปัจจัย (Interaction Effect) ครบทุกเทอมได้อย่างเป็นอิสระต่อกันจากนั้นคัดกรองเฉพาะเทอมที่มีนัยสำคัญเพื่อใช้สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากผลการทดลอง (Empirical Model) เพื่อใช้สำหรับการทำนายผลการทดลองและกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการปฏิบัติงาน (Optimum Condition) โดยแบบจำลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นผสมเทอมผลกระทบ (Linear Model With Interaction Terms) เนื่องจากจำนวนระดับของปัจจัยในการทดลองมีเพียงสองระดับจึงสามารถประมาณเฉพาะความสัมพันธ์เชิงเส้นซึ่งประกอบไปด้วยผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วม แม้แบบจำลองที่ประกอบด้วยผลกระทบร่วมจะมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับแบบเส้นโค้งโดยเฉพาะถ้าประกอบด้วยผลกระทบอันดับสูงพื้นผิวตอบจะมีความเป็นเส้นโค้งมากขึ้น แต่โดยปกติในทางปฏิบัติผลกระทบร่วมระหว่างสามปัจจัยขึ้นไปมักไม่มีผลต่อกระบวนการที่ศึกษาน้อยมาก

2.4.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวนกรณีทดลองซ้ำ

มีความสำคัญและขั้นตอนการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียลกรณีทำการทดลองซ้ำ และการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวนกรณีทดลองซ้ำคือทำการทดลองเงื่อนไขเดียวกันมากกว่า 1 ครั้งปกติการทดลองซ้ำสำหรับแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะมีจำนวนเท่ากัน การทำการทดลองซ้ำช่วยให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นโดยเฉพาะในงานวิจัย หรือการศึกษาที่ต้องการระดับความน่าเชื่อถือหรือความถูกต้องสูง การวิเคราะห์ผลเช่นการคำนวณค่าผลกระทบใช้เฉลี่ยในการคำนวณนอกจากนี้การทดลองซ้ำทำให้สามารถประมาณค่าความแปรปรวนที่เกิดจากความผิดพลาดในการทดลองได้ (MS_E หรือ S^2_E) หรือเรียกว่า "Replication Errors" หรือ "Pure Error" การทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขเดียวกันผู้ทดลองอาจคาดหวังว่าผลตอบจากการทดลองจะมีค่าเท่ากัน แต่ในการทดลองจริงเป็นไปได้ยากแม้จะทำการทดลองอย่างระมัดระวังและมีการวางแผนอย่างดี แต่ก็ยังเกิดความผิดพลาดในการทดลองเพราะมีปัจจัยรบกวนอื่นอยู่เหนือการควบคุมเช่นเครื่องมือ ผู้ทดลองวัตถุดิบ สภาวะแวดล้อมต่างๆ โดยค่าความแปรปรวนดังกล่าวใช้สำหรับตรวจสอบว่ามี

ผลกระทบใดบ้างมีผลต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญและใช้สำหรับวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงกระบวนการโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2 ระดับ 2^k ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) คำนวณค่าผลกระทบได้แก่ ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมจากสมการ 2.1

$$\text{Effect} = \frac{1}{2^{k-1}xn}(\text{Contrast of Effect}) \quad (2.1)$$

และ ผลรวมกำลังสอง (Sum of Square) ของผลกระทบของปัจจัย AB คำนวณ K จากสมการ 2.2

$$SS_{\text{effect}} = \frac{1}{2^k xn} (\text{Contrast of Effect})^2 \quad (2.2)$$

โดย k = จำนวนปัจจัยที่เลือกในการศึกษา

n = จำนวนทดลองซ้ำ

2) เขียนแบบจำลอง (Initial Model) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมว่ามีผลต่อกระบวนการอย่างไรบ้างโดยเบื้องต้นเขียนในรูปแบบจำลองแบบเต็มจำนวน (Full Model) ซึ่งประกอบด้วยค่าคงที่ผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วม (ปกติอาจไม่จำเป็นเพียงแต่ทราบว่าแบบจำลองแบบเต็มจำนวนมีเทอมใดบ้าง)

3) คัดกรองเฉพาะผลกระทบที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญ

- กรณีมีการทดลองซ้ำโดยใช้การทดสอบทางสถิติได้จากการทดสอบแบบ T-test หรือตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

- กรณีไม่มีการทดลองซ้ำใช้กราฟปกติของผลกระทบ หรือประมาณค่าความแปรปรวนจากผลกระทบร่วมอันดับสูงหรือใช้การทดลองซ้ำแบบเต็ม หรือการทดลองซ้ำเฉพาะที่จุดกึ่งกลาง

4) เขียนแบบจำลอง (Refine Model) การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีนัยสำคัญกับผลตอบ โดยแบบจำลองจะรวมเฉพาะเทอมที่จำเป็น ได้แก่ เทอมที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญ และตัดเทอมที่ไม่จำเป็นออกเพื่อให้แบบจำลองมีความกระชับและไม่ซับซ้อนเกินไปเพื่อใช้ทำนายผลการทดลองโดยแบบจำลองความสัมพันธ์ต้องมีการตรวจสอบความเหมาะสม (Appropriateness) และความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

5) ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง (Appropriateness) โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ หรือ R-squared (Coefficient of Correlation) หรือ R-squared (adj) หรือค่า LOF (Lack of Fit)

6) ตรวจสอบความพอเพียง (Model Adequacy Checking) ของแบบจำลองโดยวิธีวิเคราะห์ส่วนค้ำ (Residual Analysis) เพื่อตรวจสอบข้อกำหนดเบื้องต้นของคุณสมบัติของความแปรปรวนของแบบจำลอง

7) แปลผลและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดและแสดงผลการวิเคราะห์โดยใช้กราฟตามความจำเป็นเช่น กราฟผลกระทบหลัก กราฟผลกระทบร่วม กราฟพื้นผิวตอบ

8) ทำการทดลองยืนยันผลสำหรับเงื่อนไขที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากการทดลองยืนยันผลกับช่วงความเชื่อมั่นของค่าทำนาย

โดยปกติการทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวนมักมีข้อกำหนดเบื้องต้นในการทดลองดังนี้

1) ปัจจัยในการทดลองเป็นแบบกำหนดระดับ (Fixed Factors) หมายถึงค่าของระดับปัจจัยกำหนดโดยผู้ออกแบบการทดลองมิใช่เลือกระดับการทดลองแบบสุ่ม

2) ใช้การออกแบบการทดลองแบบสุ่มโดยอาจใช้การทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRD) คือลำดับในการทดลองทั้งหมดจะใช้ลำดับสุ่มในคราวเดียวกัน (ลำดับสุ่ม 1 ถึง N) หรือ กรณีมีความจำเป็นอาจเลือกใช้การทดลองสุ่มแบบบล็อกสุ่มอย่างสมบูรณ์ (CRBD) คือสุ่มเฉพาะภายในบล็อกเท่านั้น

3) ข้อกำหนดเบื้องต้นเกี่ยวกับค่าความแปรปรวนของแบบจำลอง มีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกันโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนคงที่ หรือ $\epsilon \rightarrow NID(0, \sigma^2)$

2.4.4 การตรวจสอบนัยสำคัญของผลกระทบ

เมื่อจำนวนปัจจัยในการทดลองมีจำนวนมากขึ้น จำนวนเทอมที่รวมในแบบจำลองจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วคือ 2^k เทอมดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองไม่ซับซ้อนและ กะทัดรัดควรรวมเฉพาะเทอมที่จำเป็นคือเฉพาะที่มีนัยสำคัญเท่านั้นโดยเทอมที่มีผลกระทบต่อการกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญมักเป็นเทอมของผลกระทบหลักจำนวน k เทอมหรือผลกระทบร่วมอันดับต่ำได้แก่ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย $\frac{kx(k-1)}{2}$ เทอม ส่วนเทอมอื่นๆ ที่เหลืออีกจำนวนมากได้แก่ผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัยขึ้นไปจากประสบการณ์พบว่าส่วนใหญ่ผลกระทบร่วมอันดับสูงมักมีผลต่อการกระบวนการน้อยและการอธิบายปรากฏการณ์เกี่ยวกับผลกระทบร่วมอันดับสูงมักซับซ้อนเกินไปดังนั้นในการสร้างแบบจำลองจะเลือกเฉพาะเทอมที่มีความจำเป็นและมีนัยสำคัญเท่านั้น หรือวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนส่วนผลกระทบเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญเท่านั้นการพิจารณาว่าผลกระทบใดมีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญจะใช้วิธีการทดสอบทางสถิติแบบ T-test

คัดกรองผลกระทบว่ามีนัยสำคัญโดยใช้การทดสอบแบบ t-test เพื่อตัดสินว่าผลกระทบเทอมใดบ้างมีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญโดยสมมติฐานหลักในการทดสอบจากสมการ 2.3

$$H_0 : \mu_{effect} = 0 \quad (2.3)$$

(สมมติฐานหลักคือค่าผลกระทบเฉลี่ยมีเท่ากับศูนย์ถ้ายอมรับสมมติฐานหลักแสดงว่าผลกระทบเทอมดังกล่าวไม่มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ) และสมมติฐานรองในการทดสอบจากสมการ 2.4

$$H_1 : \mu_{effect} \neq 0 \quad (2.4)$$

(สมมติฐานรองคือค่าผลกระทบเฉลี่ยมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นถ้าปฏิเสธสมมติฐานหลักแสดงว่าผลกระทบเทอมดังกล่าวมีผลกระทบต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ) ค่าทดสอบทางสถิติจากสมการ 2.5

$$t_0 = \frac{E_i - \mu_{effect}}{S_{effect}} \quad (2.5)$$

องศาอิสระเท่ากับ $m(n-1)$

หรือถ้าแทนค่า $\mu_{effect} = 0$ ในค่าทดสอบสถิติจะได้ดังสมการ 2.6

$$t_0 = \frac{E_i}{S_{effect}} \quad (2.6)$$

องศาอิสระเท่ากับ $m(n-1)$

จากสมการข้างต้นค่าทดสอบทางสถิติแสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างขนาดของผลกระทบกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากความผิดพลาดในการทดลองของผลกระทบ โดยถ้าสัดส่วนดังกล่าว มีขนาดใหญ่สามารถสรุปได้ว่าผลกระทบนั้นมีผลต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญข้อแนะนำโดยทั่วไปถ้าค่าดังกล่าว มีขนาดตั้งแต่สามเท่าขึ้นไป โดยประมาณสามารถสรุปได้ว่าผลกระทบเทอมดังกล่าว มีนัยสำคัญแต่ถ้ามีค่าน้อยคือน้อยกว่าหนึ่งสามารถสรุปได้ว่าผลกระทบเทอมดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญแต่ถ้าค่าอยู่ระหว่างหนึ่งถึงสามควรเปรียบเทียบค่าวิกฤตเปิดจากตาราง โดยกำหนด

E_i คือ ค่าผลกระทบจากการทดลองแบบแฟคทอเรียลมีจำนวนเท่ากับ 2^k-1 เทอม

S_{effect} คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลกระทบโดยกำหนดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลกระทบทุกเทอมมีค่าเท่ากัน

M คือ จำนวนเงื่อนไขการทดลองกรณีการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน 2^k การทดลอง

n คือ จำนวนทดลองซ้ำสำหรับแต่ละเงื่อนไขการทดลอง (ปกติกำหนดจำนวนทดลองซ้ำเท่ากัน)

ปฏิเสธสมมติฐานหลัก (ที่ว่าค่าเฉลี่ยของผลกระทบมีค่าเท่ากับศูนย์ $H_0: \mu_{effect} = 0$) ที่ระดับนัยสำคัญ (α)

- พิจารณาจากขนาดของค่าทดสอบทางสถิติ $|t_0|$ โดยปฏิเสธสมมติฐานหลักเมื่อค่าทดสอบทางสถิติ $|t_0|$ มีค่ามากกว่าค่าวิกฤตที่เปิดจากตารางดังนี้ $|t_0| > t_{\alpha/2, m(n-1)}$

- หรือปฏิเสธสมมติฐานหลักโดยพิจารณาจากช่วงความเชื่อมั่น (ของค่าผลกระทบเฉลี่ย) ไม่รวมค่า "ศูนย์" แสดงว่าผลกระทบมีผลอย่างมีนัยสำคัญและช่วงความเชื่อมั่นของผลกระทบเฉลี่ยที่ระดับ (α) คำนวณได้จากสมการ 2.7

$$E \pm t_{\alpha/2, m(n-1)} x S_{effect} \quad (2.7)$$

โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลกระทบกรณีมีจำนวนทดลองซ้ำ (จำนวนเท่ากันทุกเงื่อนไข) คำนวณได้จากสมการ 2.8

$$S_{effect} = \sqrt{\frac{4xS_E^2}{N}} \quad (2.8)$$

และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าคงที่ใน แบบจำลองคำนวณได้จากสมการ 2.9

$$S_{average} = \sqrt{\frac{S_E^2}{N}} \quad (2.9)$$

โดยกำหนด N แทนจำนวนการทดลองทั้งหมดหรือเท่ากับผลคูณระหว่างจำนวนเงื่อนไขการทดลอง (m) กับจำนวนการทดลองซ้ำ (n) (หรือ $N=m \times n$ หรือ $2^k \times n$)

S_E^2 แทนค่าความแปรปรวนที่แสดงความผิดพลาดในการทดลองหรือ กรณีที่มีการทดลองซ้ำ แทนด้วยสัญลักษณ์ MS_{rep}

โดยคำนวณค่าความแปรปรวน (S_E^2) ที่แสดงความผิดพลาดในการทดลองซ้ำจากสมการ 2.10

$$S_E^2 = \frac{\sum_{i=1}^m s_i^2}{m(n-1)} \quad (2.10)$$

$i = 1, 2, \dots, m$ (เงื่อนไขการทดลองที่)

กำหนด S_E^2 แทนค่าความแปรปรวนจากการทดลองซ้ำสำหรับแต่ละเงื่อนไขและคำนวณได้จากสมการ 2.11

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{m(n-1)} \quad (2.11)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, m$ (เงื่อนไขการทดลองที่)

$j = 1, 2, 3, \dots, n$ (จำนวนทดลองซ้ำ)

หรือ ถ้าแทนค่า S_i^2 ในสมการ S_E^2 สามารถคำนวณค่าความแปรปรวนที่แสดงความผิดพลาดในการทดลองกรณีที่มีการทดลองซ้ำได้จากสมการ 2.12

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{m(n-1)} \quad (2.12)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, m$ (เงื่อนไขการทดลองที่)

$j = 1, 2, 3, \dots, n$ (จำนวนทดลองซ้ำ)

ส่วนกรณีทั่วไปเมื่อจำนวนทดลองซ้ำสำหรับแต่ละเงื่อนไขไม่เท่ากันสามารถหาค่าความแปรปรวนที่แสดงความผิดพลาดในการทดลอง ได้จากสมการ 2.13

$$S_E^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)} \quad (2.13)$$

$l = 1, 2, 3, \dots, m$ (เงื่อนไขการทดลองที่)

N_i = แกนจำนวนทดลองซ้ำสำหรับเงื่อนไขที่ i

2.4.5 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลอง (Empirical Model) การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาการทำงานของระบบหรือกระบวนการ จุดประสงค์ที่สำคัญประการหนึ่งในการทดลองคือสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงกลไกการทำงานของระบบโดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระในการศึกษา (Independent Input Variable) กับผลตอบในการทดลอง (Response/Output/Dependent Variable) ที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการทดลอง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองแสดงดังสมการ 2.14

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_i) + \mathcal{E} \quad (2.14)$$

โดย y คือผลตอบหรือตัวแปรตาม

x คือตัวแปรอิสระที่มีผลต่อกระบวนการและสามารถปรับค่าได้

$\mathcal{E}$ คือ ความคลาดเคลื่อนในการทดลองโดยมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และความแปรปรวนคงที่ หรือ

$$\mathcal{E} \rightarrow NID(0, \sigma^2)$$

ในเบื้องต้นผู้ทดลองมักมีความรู้จำกัดเกี่ยวกับการทำงานของกระบวนการที่ศึกษาดังนั้นการสร้างแบบจำลองกระบวนการจากผลการทดลอง (Empirical Models) จะช่วยให้เข้าใจการทำงานของกระบวนการได้ง่ายขึ้นและสามารถคาดการณ์การทำงานของกระบวนการได้โดยอาศัยข้อมูลและความรู้ที่ได้จากการทดลอง กรณีเลือกใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวนโดยอาศัยข้อมูลและความรู้ที่ได้จากการทดลองกรณีเลือกใช้ทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวนโดยตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการทำงานของระบบมีจำนวน 2 และ 3 ปัจจัยสามารถสร้างแบบจำลองแบบเต็มจำนวน (Full Model) รวมผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมทุกเทอมที่เขียนได้ดังสมการ 2.15 และ 2.16

$$\hat{y} = b_1 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 \quad (\text{สำหรับสองปัจจัย}) \quad (2.15)$$

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (\text{สำหรับสามปัจจัย}) \quad (2.16)$$

โดยสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองจะมีค่าครึ่งหนึ่งของค่าผลกระทบเนื่องจากสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลตอบต่อหนึ่งหน่วยของตัวแปรอิสระ แต่ค่าผลกระทบแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของผลตอบต่อสองหน่วยของตัวแปรอิสระ (จาก -1 เป็น +1) ซึ่งสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองดังกล่าวจะเหมือนกับการคำนวณสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยโดยใช้วิธี "กำลังสองน้อยที่สุด" (Least Square Method) และเทอมต่าง ๆ ที่รวมอยู่ในแบบจำลองควรเป็นเทอมที่มีผลกระทบต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญเท่านั้นโดยตัดเทอมที่ไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญเพื่อให้แบบจำลองมีความกะทัดรัดและไม่ซับซ้อนจนเกินไปเรียกว่าแบบจำลองแบบลดจำนวน (Reduced Model) นอกจากนี้จากหลัก "Hierarchy Principal" แนะนำว่า "ถ้าแบบจำลองประกอบด้วยเทอมโพลิโนเมียลอันดับสูงของตัวแปรใด ควรจะรวมเทอมโพลิโนเมียลอันดับต่ำของตัวแปรนั้นด้วย" สำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียล คือ ควรรวมผลกระทบหลักในแบบจำลองแม้ผลกระทบหลักนั้นจะไม่มีนัยสำคัญถ้าผลกระทบรวมของปัจจัยดังกล่าวมีนัยสำคัญโดยหลักดังกล่าวเป็นข้อแนะนำที่ได้รับการยอมรับและปฏิบัติตามทำให้แบบจำลองมีความสม่ำเสมอ (Consistency)

2.4.6 วิธีการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

สมการแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลในการทดลองมีประโยชน์สำหรับใช้ทำนายผลพฤติกรรมของกระบวนการโดยกำหนดให้ $\hat{y}_i$ คือค่าทำนายที่ได้จากการแทนค่าตัวแปรอิสระสำหรับแต่ละเงื่อนไขการทดลองโดยแบบจำลองที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพควรประกอบด้วยเทอมที่จำเป็นและสามารถทำนายผลตอบที่เงื่อนไขต่าง ๆ ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง และกำหนดค่าส่วนค้าง หรือ Residual คือค่าที่แสดงความแตกต่างหรือที่ค่าความคลาดเคลื่อนจากการเทียบระหว่างค่าทำนายผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองจริงเพื่อแสดงความผันแปร (Variation) ที่เกิดขึ้นในการทดลองที่ไม่สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองสำหรับทำนายผล (Fitted Model) คำนวณได้ดังสมการ 2.17

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_i \quad (2.17)$$

สำหรับเงื่อนไขการทดลองที่ i จากการทดลองซ้ำครั้งที่ j โดยส่วนค้าง e ควรมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) มีการแจกแจงแบบปกติ
- 2) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์
- 3) มีค่าความแปรปรวนคงที่
- 4) มีความเป็นอิสระต่อกัน

ค่าส่วนค้ำ (Residuals) ใช้สำหรับตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองได้โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ส่วนค้ำ (Residual Analysis) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับตรวจสอบความผันแปรในการทดลองแบบจำลองว่ามีคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนดเบื้องต้นที่ว่า "ความคลาดเคลื่อนในการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ เป็นอิสระต่อกัน มีค่าคงที่และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์"

วิเคราะห์ส่วนค้ำเป็นวิธีการตรวจสอบเป็นวิธีการตรวจสอบเบื้องต้นที่ไม่ซับซ้อน โดยคำนวณส่วนค้ำจากสมการแบบจำลองที่มีความเหมาะสมกับกระบวนการดังกล่าว และตรวจสอบจากกราฟส่วนค้ำกับตัวแปรอิสระอื่นที่เกี่ยวข้องในกระบวนการได้แก่ ค่าทำนาย ลำดับการทดลองหรือเวลา และตัวแปรอิสระอื่นๆ กราฟปกติของส่วนค้ำ โดยกราฟส่วนค้ำไม่ควรมีรูปแบบใดๆ (Patterns) และมีการกระจายตัวแบบสุ่ม (Random Patterns) มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- 1) วิเคราะห์กราฟแบบปกติของส่วนค้ำ เพื่อตรวจสอบว่าส่วนค้ำมีการแจกแจงแบบปกติและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์หรือไม่ โดยถ้าส่วนค้ำแจกแจงแบบปกติหรือใกล้เคียงปกติข้อมูลส่วนค้ำส่วนใหญ่ควรจะอยู่บนเส้นที่ลากผ่านแกนกำเนิด (Imaginary Line) ของกราฟปกติและไม่สอดคล้องกับข้อกำหนดดังกล่าวในกรณีที่บางจุดไม่อยู่บนเส้นตรงดังกล่าวและมีค่าห่างมากจากค่าบนเส้นตรง ควรตรวจสอบเพื่อหาสาเหตุที่เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว

- 2) วิเคราะห์กราฟส่วนค้ำกับตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง โดยส่วนค้ำควรมีการกระจายตัวแบบสุ่มไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มที่แน่นอน โดยทั่วไปพิจารณาจาก

- 2.1) กราฟส่วนค้ำกับเวลาหรือลำดับในการทดลอง (Run Order) เพื่อตรวจสอบว่าส่วนค้ำมีการแจกแจงอย่างเป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใด ๆ ที่ขึ้นกับเวลาและลำดับในการทดลอง

- 2.2) กราฟส่วนค้ำกับค่าทำนาย (Fitted Value) เพื่อตรวจสอบว่าส่วนค้ำมีการกระจายตัวแบบสุ่มเป็นอิสระไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใดๆที่ขึ้นกับขนาดของค่าทำนาย

- 2.3) กราฟส่วนค้ำกับตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง เช่นระดับของปัจจัยในการทดลอง รุ่นของวัตถุดิบ พนักงานทดลอง เพื่อตรวจสอบว่าส่วนค้ำมีการกระจายตัวแบบสุ่มและมีความเป็นอิสระไม่ขึ้นกับตัวแปรอิสระ

2.4.7 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองเนื่องจากแบบจำลองที่คาดการณ์ไว้ในเบื้องต้นอาจไม่สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลอง ส่งผลให้แบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถทำนายพฤติกรรมของกระบวนการได้อย่างเหมาะสม และการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้จะก่อให้เกิดความผิดพลาดและ

คลาดเคลื่อนได้ไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมของกระบวนการที่แท้จริง ในขั้นตอนนี้มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบและวินิจฉัยแบบจำลองโดยมีคำถามเบื้องต้น 2 ประการ คือ

ประการที่ 1 เทอมต่าง ๆ ที่รวมในแบบจำลองเป็นเทอมที่จำเป็นหรือไม่ โดยในแบบจำลองจะเลือกเฉพาะเทอมที่มีนัยสำคัญเท่านั้น เพื่อให้แบบจำลองมีความกะทัดรัดไม่ซับซ้อนจนเกินไป โดยใช้วิธีแบบ T-test

ประการที่ 2 เทอมต่าง ๆ ที่รวมในแบบจำลองพอเพียงหรือไม่ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ในบางกรณีโดยใช้การวิเคราะห์ส่วนค่า และใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระในกระบวนการที่ศึกษา แต่ก่อนที่จะนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการจริง จะต้องตรวจสอบแบบจำลองก่อนว่าเหมาะสมหรือเพียงพอที่จะให้นำเสนอพฤติกรรมของกระบวนการหรือไม่ ถ้าไม่เหมาะสมผู้วิจัยต้องปรับปรุงแบบจำลองภายใต้ชุดข้อมูลเดิมหรืออาจจะต้องเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาแบบจำลองที่เหมาะสมต่อไป

2.4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน

วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป็นเทคนิคที่ใช้อย่างแพร่หลายในทางสถิติโดยหลักการคือ ต้องคำนวณขนาดความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในการทดลอง จากนั้นแยกแยะสาเหตุของแหล่งที่ก่อให้เกิดความผันแปรของข้อมูลในการทดลองว่าเกิดจากผลของการปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัยที่ศึกษา หรือเกิดจากผลของปัจจัยรบกวนที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการทดลองหลังจากแบ่งความผันแปรออกเป็น ส่วน ๆ ตามแหล่งของความผันแปร ต่อไปพิจารณาว่าแต่ละแหล่งมีผลต่อการทดลองมากน้อยเพียงใด เทคนิควิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนช่วยตัดสินว่า ผลกระทบจากแหล่งใดมีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ และผลกระทบใดบ้างควรรวมอยู่ในแบบจำลอง นอกจากนี้ยังใช้สำหรับตรวจสอบแบบจำลองสุดท้ายว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ และแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในการทดลองได้มากน้อยเพียงใด

การสร้างแบบจำลองจะเริ่มต้นจากแบบจำลองแบบเต็มจำนวน (Full Model) ที่มีเทอมต่าง ๆ ที่สามารถประมาณค่าทั้งหมดจากการทดลอง จากนั้นจึงปรับแบบจำลองโดยตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญ ออกจากแบบจำลองเรียกว่า แบบจำลองแบบลดจำนวน (Reduce Model) โดยอธิบายรายละเอียด ต่อไปนี้

จุดประสงค์ของการใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับแบบจำลองเต็มจำนวนจากการทดลองแบบแฟคทอเรียล คือ การแบ่งแหล่งของความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในการทดลองทั้งหมด SS_T แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักดังนี้

1) ความผันแปรที่เกิดจากค่าเฉลี่ย $SS_{average}$ (แต่ต่อไปจะไม่นำมาวิเคราะห์เพื่อให้การวิเคราะห์ง่ายขึ้นเพราะปกติค่าคงที่มักมีนัยสำคัญและรวมอยู่ในแบบจำลองเสมอ)

2) ความผันแปรที่เกิดขึ้นระหว่างกลุ่มซึ่งสามารถแยกแหล่งของความผันแปรออกเป็น ส่วนย่อยๆ ที่เกิดจากผลกระทบในแบบจำลอง ได้แก่ความผันแปรจากผลกระทบหลัก (Main Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย (Interactions) รวมเรียกว่า SS_{effect}

3) ความผันแปรที่เกิดขึ้นภายในแต่ละกลุ่ม หรือจากการทดลองซ้ำ SS_{rep} ซึ่งแสดงความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการทดลอง SS_E โดยเขียนสมการทำนายผลการทดลองได้สมการ 2.18

$$\hat{y}_{ij} = \overline{y_{\bullet\bullet}} + (\overline{y_{i\bullet}} - \overline{y_{\bullet\bullet}}) + (y_{ij} - \overline{y_{i\bullet}}) \quad (2.18)$$

โดย $i = 1, 2, \dots, m$ (เงื่อนไขของการทดลองที่)

$j = 1, 2, \dots, n$ (จำนวนการทดลองซ้ำครั้งที่)

หรือเขียนในรูปของความแปรผันหรือผลรวมกำลังสองได้ดังสมการ 2.19 หรือ 2.20

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 = (\overline{y_{\bullet\bullet}})^2 + n \sum_{i=1}^m (\overline{y_{i\bullet}} - \overline{y_{\bullet\bullet}})^2 + \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \overline{y_{i\bullet}})^2 \quad (2.19)$$

หรือ

$$SS_t = SS_{SSAverage} + SS_{Effect} + SS_{Rep} \quad (2.20)$$

และกำหนดเพิ่มเติมให้ความแปรผันจากแบบจำลองแบบเต็มจำนวนประกอบด้วยความผันแปรที่เกิดจากค่าคงที่ รวมกับผลกระทบทั้งหมดในแบบจำลองดังสมการ 2.21

$$SS(\text{Full Model}) = SS_{average} + SS_{effect} = (nm)\overline{y_{\bullet\bullet}}^2 + \sum_{i=1}^m (\overline{y_{i\bullet}} - \overline{y_{\bullet\bullet}})^2 \quad (2.21)$$

และผลรวมกำลังสองสำหรับผลกระทบสามารถคำนวณได้ง่ายโดยใช้ค่าผลกระทบของเทอมนั้นแสดงได้จากสมการ 2.22 และ 2.23

$$SS(\text{Effect}) = \frac{(nm)E_{effect}^2}{4} \quad (2.22)$$

หรือคำนวณจากสูตรทั่วไป
$$SS(\text{Effect}) = \frac{1}{2^k x n} (\text{Contrast Effect})^2 \quad (2.23)$$

2.4.9 วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2 ระดับ สำหรับแบบการลดจำนวน (ANOVA for Reduced Model)

การสร้างแบบจำลองจะเริ่มต้นจากแบบจำลองแบบเต็มจำนวน (Full Model) ที่ประกอบด้วยทุกเทอมที่สามารถประมาณค่าได้จากการทดลองจากนั้นจึงปรับแบบจำลองโดยตัดเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเรียกว่า "แบบจำลองแบบลดจำนวน" (Reduced Model) โดยสัมประสิทธิ์ของผลกระทบเทอมต่างๆ ที่เหลือในแบบจำลองแบบลดจำนวนจะมีค่าเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าความผันแปรที่เกิดจากส่วนตกค้างของแบบจำลองที่ลดจำนวนจะมีความผันแปรเพิ่มมากขึ้น (ขนาด) โดยมีค่าเท่ากับ ความผันแปรที่เกิดจากการทดลองซ้ำ (Pure Error/Replication Error) รวมกับความผันแปรของเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญที่แสดงถึงความผันแปรที่แสดงความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลอง (Error Variation in Regression) หรือโดยทั่วไปเรียกว่า "Lack of Fit Error" ดังนั้นค่าความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้ทั้งหมดโดยแบบจำลองเขียนดังสมการ 2.24

$$\text{Residual Error} = \text{Lack of Fit} + \text{Pure Error/Replication Error} \quad (2.24)$$

$$(\text{ส่วนที่ทำซ้ำ}) \quad \left(\begin{array}{c} \text{ส่วนที่ไม่สามารถอธิบายได้โดย} \\ \text{แบบจำลองแบบลดจำนวน} \end{array} \right) (\text{ส่วนค้าง})$$

เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับการตรวจสอบสมรรถนะของแบบจำลองได้ง่ายและชัดเจนขึ้น จะแบ่งความผันแปรในการทดลองออกเป็นแหล่งดังนี้

1. ความผันแปรที่สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองแทนด้วย SS_{Model}
2. ความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองแทนด้วย ผลรวมกำลังสองของส่วนตกค้าง SS_{Residual} หรือแทนด้วยผลรวมกำลังสองจากความคาดเคลื่อนในการทดลอง SS_E ดังนั้นความผันแปรทั้งหมดแสดงได้ดังสมการ 2.25

$$SS_T = SS_{\text{Model}} + SS_E \quad (2.25)$$

หรือความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองคำนวณได้จากสมการ 2.26

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Model}} \quad (2.26)$$

โดยความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้โดยแบบจำลองประกอบด้วยความผันแปรจาก 2 ส่วนคือ

2.1 SS_{LOF} (Lack of Fit) ผลรวมกำลังสองที่ไม่สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองแบบลดจำนวน (Reduced Mode) โดยความผันแปรส่วนนี้เกิดจากส่วนตกค้างที่เพิ่มขึ้นจากจำนวนเทอมที่ไม่มีนัยสำคัญที่ตัดออกจากจำนวนเทอมในแบบจำลองแบบครบทุกเทอม เขียนสมการ 2.27

$$SS_{LOF} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\bar{y}_{i\bullet} - \hat{y}_{ij})^2 \quad (2.27)$$

2.2 SS_{REP} (Replications) หรือ $SS_{pure\ error}$ ผลรวมกำลังสองที่เกิดจากการทดลองซ้ำ หรือความคาดเคลื่อนเกิดจากการทำการทดลองดังสมการ 2.28 และ 2.29

$$SS_{REP} = (n-1) \sum_{i=1}^m S_i^2 \quad (2.28)$$

หรือ
$$SS_{REP} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\bar{y}_{i\bullet} - \hat{y}_{ij})^2 \quad (2.29)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, m$ (เงื่อนไขการทดลองที่ i)

$j = 1, 2, 3, \dots, n$ (การทดลองซ้ำครั้งที่ j)

ดังนั้นความแปรปรวนที่แสดงความผิดพลาดในการทดลองทั้งหมดเขียนได้ดังสมการ 2.30 หรือ 2.31

$$SS_E \text{ (Errors)} = SS_{rep} \text{ (Replications)} + SS_{LOF} \text{ (Lack of Fit)} \quad (2.30)$$

หรือ
$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\bar{y}_{ij} - \hat{y}_{ij})^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i\bullet})^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{i\bullet} - \bar{y}_{ij})^2 \quad (2.31)$$

ข้อควรระวัง โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปส่วนใหญ่ไม่แยก SS_E ออกเป็น 2 ส่วนสำหรับคำนวณค่าทดสอบทางสถิติและมักจะใช้ SS_E แทน SS_{rep} (ในโปรแกรมแทนด้วย $(SS_{pure\ error})$) ถ้าเลือกใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในตารางคำนวณค่า $(SS_{pure\ error})$ ถ้าเลือกวิเคราะห์โดยวิธีสมการถดถอยจะคำนวณสัมประสิทธิ์ทุกเทอมในแบบจำลองแยกกัน แต่ไม่คำนวณค่า $(SS_{pure\ error})$ สำหรับทดสอบทางสถิติ

2.4.10 การวัดสมรรถนะของแบบจำลองโดยรวมของแบบจำลอง

แม้ว่าแบบจำลองจะรวมเทอมที่จำเป็นหรือเฉพาะเทอมที่มีนัยสำคัญแล้วก็ตาม และแบบจำลองมีความเหมาะสม (Not Lack of Fit) มิได้หมายความว่า แบบจำลองนั้นจะเป็นแบบจำลองที่ดี ถ้ามีความคลาดเคลื่อนในการทดลองมากเนื่องจากผลของปัจจัยรบกวนในการทดลอง หรือมีปัจจัยที่สำคัญบางตัวที่ไม่ถูกเลือกในกรณีศึกษา ดังนั้นอาจเป็นไปได้ที่ขนาดของความผันแปรของข้อมูลไม่สามารถอธิบายโดยแบบจำลองจะมีมาก หรือมีความผันแปรที่เกิดจากส่วนค้ำงมาก ดังนั้นเพื่อวัดสมรรถนะโดยรวมของแบบจำลอง โดยใช้ดัชนีชี้วัด ที่เรียกว่า "Coefficient of Determination" หรือ R^2 เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองสามารถใช้อธิบายความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากผลการทดลองได้มากน้อยเพียงใด โดยปกติแบบจำลองควรสามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้มากกว่าร้อยละ 80 ดังสมการ 2.32

$$\text{กำหนดให้} \quad R^2 = \frac{SS_{\text{model}}}{SS_{\text{Total}}} \quad (2.32)$$

ดังนั้น R^2 แสดงถึงร้อยละความแปรปรวนทั้งหมดจากข้อมูลการทดลองที่สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง โดยปกติควรมีค่าน้อย 0.80

โดยปกติถ้าเพิ่มจำนวนเทอมในแบบจำลองค่า R^2 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเสมอ อาจส่งผลให้แบบจำลองรวมเทอมที่ไม่จำเป็นเพื่อให้ดัชนีชี้วัดมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงตัดแปลงดัชนีชี้วัดสมรรถนะของแบบจำลองขึ้นมาใหม่คือ R_{adj}^2 โดยค่าดัชนีนี้อาจมีค่าลดลงถ้าเพิ่มเทอมที่ไม่จำเป็นลงในสมการแบบจำลอง โดยคำนวณได้จากสมการ 2.33 และ 2.34

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_{\text{error}}/(n-p)}{SS_{\text{Total}}/(n-1)} \quad (2.33)$$

$$\text{หรือคำนวณได้จากสมการ} \quad R_{adj}^2 = 1 - \left(\frac{n-p}{n-1}\right)(1-R^2) \quad (2.34)$$

โดย p แทนจำนวนเทอม (ที่รวมค่าคงที่) ในแบบจำลอง
 n แทนจำนวนทดลองซ้ำ

ข้อสังเกตถ้าดัชนีชี้วัด R^2 และ R_{adj}^2 มีค่าต่างกันมาก แสดงว่าอาจมีเทอมบางเทอมที่ไม่จำเป็นรวมอยู่ในสมการแบบจำลอง ดังนั้นอาจเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับตรวจสอบแบบจำลองว่าควรตัดเทอมที่ไม่จำเป็นออกจากแบบจำลองเพื่อให้แบบจำลองมีความกะทัดรัดมากขึ้น

ในกรณีที่แบบจำลองไม่เหมาะสมอาจเกิดจากความแปรปรวนที่เกิดจากปัจจัยรบกวนในการทดลอง (Noise Factors) มีมากเกินไป หรืออาจเกิดจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลอง เพราะไม่นำหลักพื้นฐานในการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสม ได้แก่ หลักการบล็อก และหลักการสุ่ม หรืออาจเกิดจากไม่รวมปัจจัยบางตัวที่มีผลต่อกระบวนการที่ศึกษา

2.4.11 ทำการทดลองยืนยันผล

หลังจากวิเคราะห์ผลการทดลอง สร้างแบบจำลองที่เหมาะสม และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น ก่อนนำเงื่อนไขดังกล่าวไปประยุกต์ใช้จริงควรทำการทดลองยืนยันผลก่อนเพื่อตรวจสอบความถูกต้องก่อนนำไปใช้จริงว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับแบบจำลองหรือไม่ เพราะบางครั้งในสภาวะในกระบวนการจริงอาจแตกต่างกับสภาวะตอนทดลองผู้วิจัยไม่ควรคาดหวังว่าผลการทดลองจริงจะมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากแบบจำลองทำนายผล โดยค่าทำนายขึ้นอยู่กับสมรรถนะของแบบจำลอง (Fitted Model) ว่ามีประสิทธิภาพในการจำลองการทำงานของกระบวนการที่ได้ศึกษาได้ใกล้เคียงมากน้อยเพียงใด แบบจำลองดังกล่าวควรจะรวมเทอมเฉพาะที่นัยสำคัญเท่านั้น และแบบจำลองดังกล่าวสร้างมาจากข้อมูลผลการทดลอง ดังนั้นขั้นตอนการออกแบบ วางแผน และการทำการทดลองจึงมีส่วนสำคัญที่จะช่วยให้ข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ ในการทำการทดลองยืนยันผลควรทำ 3-5 ครั้ง และทดสอบสมมติฐานว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับค่าทำนายไว้หรือไม่

2.5 กระบวนการขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง (Freeze Dehydration)

หมายถึงการทำแห้ง (Dehydration) ด้วยการแช่เยือกแข็ง (Freezing) ทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นผลึกน้ำแข็งก่อน แล้วจึงลดความดันเพื่อให้ผลึกน้ำแข็งระเหิด (Sublimation) เป็นไอ ด้วยการลดความดันให้ต่ำกว่าบรรยากาศปกติ ขณะควบคุมให้อุณหภูมิต่ำ (ที่อุณหภูมิเท่ากับหรือต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส น้ำแข็งระเหิดที่ความดันเท่ากับ 4.7 มิลลิเมตรปรอทหรือต่ำกว่า)

2.5.1 ขั้นตอนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

ขั้นตอนเบื้องต้นสำหรับการผลิตอาหารด้วยวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ก็เหมือนกับการผลิตอาหารแห้งโดยทั่วไปคือเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม เช่น การล้าง การปอกเปลือก การลดขนาดจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการหลักซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- 1) การแช่เยือกแข็ง (Freezing) เป็นการลดอุณหภูมิของอาหารให้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (Freezing Point) เพื่อให้เกิดผลึกน้ำแข็ง (Ice Crystal Formation) อัตราเร็วของการแช่เยือกแข็ง (Freezing Rate) ควรเป็นการแช่เยือกแข็งแบบเร็ว เพื่อให้เกิดผลึกและผลึกที่เกิดขึ้นจะมีขนาด

เล็ก การแช่เยือกแข็งแบบเร็ว ที่นิยมใช้กันมีหลายวิธี เช่น การแช่เยือกแข็งแบบใช้ลมเย็นเป่า (Air Blast Freezing) การแช่เยือกแข็งแบบไครโอเจน (Cryogenic Freezing) และการแช่เยือกแข็งแบบจุ่มในของเหลวเย็นจัด (Immersion Freezing)

2) การทำแห้งขั้นต้น (Primary Drying) เป็นการลดปริมาณน้ำ (Dehydration) โดยการระเหิด น้ำแข็งให้เป็นไอโดยการลดความดันบรรยากาศ เพื่อให้ผลึกน้ำแข็งที่อยู่ภายในเกิดการระเหิดเป็นไอ ออกไปจากผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ระดับของสุญญากาศ (Vacuum) ควรอยู่ต่ำกว่า 132 ปาสคาล (Pa) และ 132 เมกะปาสคาล (MPa) ตามลำดับ การระเหิดของผลึกน้ำแข็งจึงเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์การระเหิดของชั้นน้ำแข็ง (Ice Layer) จะเริ่มจากชั้นน้ำแข็งบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ระเหิดไปเป็นไอ ทำให้บริเวณนี้กลายเป็นชั้นแห้ง (Dry Layer) จากนั้นเป็นการระเหิดของชั้นน้ำแข็งที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ ระเหิดผ่านชั้นแห้ง ออกไปสู่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ระยะเวลาการระเหิด ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และโครงสร้างของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

3) การทำแห้งขั้นที่สอง (Secondary Drying) เมื่อการทำแห้งขั้นต้นเสร็จสมบูรณ์ น้ำแข็งจะละลายไปหมด จะมีความชื้นที่หลงเหลืออยู่ จึงต้องมีการทำแห้งด้วยการเพื่ออุณหภูมิให้สูงขึ้น เพื่อดึงเอาความชื้นที่เหลืออกอยู่จนถึงระดับความชื้นที่ปลอดภัยสำหรับการเก็บรักษา

4) ข้อดีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง เป็นการทำให้แห้งขณะที่อาหารมีอุณหภูมิต่ำจึงลดการสูญเสียของอาหารเนื่องจากความร้อน ลดการทำลายเนื้อเยื่อและโครงสร้างอาหาร ทำให้ได้อาหารแห้งที่ได้มีคุณภาพสูง มีการคืนตัว (Rehydration) ที่ดี รักษาคุณภาพอาหาร เช่น สี กลิ่น รสชาติ และลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทำแห้งแบบอื่น เช่น การทำแห้งแบบพ่นละออง (Spray Drier) การทำแห้งด้วยลมร้อน เช่น ตู้อบลมร้อน (Tray Drier, Carbinet Drier) แต่มีค่าใช้จ่ายสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งที่ใช้ลมร้อนทั่วไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตมีโครงการงานวิจัยของ กัญญวรา ทุนประเสริฐ และชุตินา ยอดแก้ว (2560) เรื่องการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแผ่นมาร์กหน้าจากไฟโบรอิน ไคโตซาน และเซลลูโลส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแผ่นมาร์กหน้าจากไฟโบรอิน ไคโตซาน และเซลลูโลส โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบซิมเพล็กซ์แอกเซียล และเปรียบเทียบความแข็งแรงระหว่างมาร์กหน้าที่มีขายตามท้องตลาด และมาร์กจากไฟโบรอิน ไคโตซาน และเซลลูโลส

จากผลการศึกษาและหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของไฟโบรอิน ไคโตซาน และเซลลูโลส จากการขึ้นรูปโดยการทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยทำการทดลองผสมสารละลายไฟโบรอิน ไคโตซาน และเซลลูโลส ตามอัตราส่วนในการทดลอง แล้วนำสารละลายเทลงในแม่พิมพ์ โดยในการออกแบบการทดลองนั้น ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ Simplex Axial โดยมีจำนวน 10 ชิ้นงาน ทำซ้ำ

2 ชั่วโมง จึงมีชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปเองอยู่ทั้งหมด 20 ชิ้นงาน อีกทั้งยังมีชิ้นงานที่เป็นตัวอย่างแผ่นมาสก์หน้าห้องตลาดมาช่วยเป็นหลักการประเมินค่าของชิ้นงานที่สังเคราะห์ขึ้นว่ามีคุณภาพใกล้เคียงกับแผ่นมาสก์หน้าห้องตลาดหรือไม่ โดยแผ่นมาสก์หน้าจากห้องตลาดที่นำมาทดลองมี 2 ชนิด และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จึงมีชิ้นงานในการทดลองรวมเป็น 58 ชิ้น โดย 24 ชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงดึง และอีก 24 ชิ้นงานสำหรับทดสอบความพรุนของแผ่นมาสก์ เมื่อทำการผสมชิ้นงานตามอัตราส่วน และได้ปริมาณตามที่จะใช้ในการทดลองแล้ว จึงนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องการขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง (Freeze Dryer) เพื่อทำการระเหิดน้ำออกจากชิ้นงานที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน แล้วจึงนำชิ้นงานไปอบไล่ความชื้น เป็นเวลา 2 วันก่อนที่จะนำไปทดสอบแรงดึง และทดสอบความพรุน

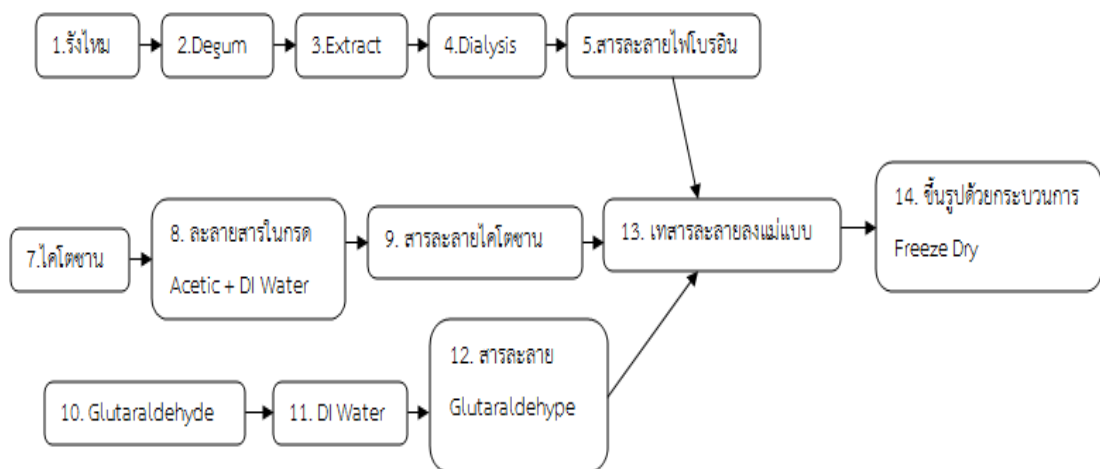
บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาสก์หน้าที่ทำจากไคโตซาน และไฟโบรอิน ซึ่งเป็นการศึกษาอัตราส่วนปริมาณไคโตซาน ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ และความเข้มข้นของกรด และทำการประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน (Full Factorial Design) 2^k เพื่อให้ทราบปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาสก์หน้า และระดับปัจจัยที่เหมาะสมกับการผลิตแผ่นมาสก์ สรุปขั้นตอนแนวทางการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 การทดลองแบบใหม่

วิธีการผลิตแบบใหม่ ดังภาพ 3.1



ภาพ 3.1 วิธีการผลิตแบบใหม่

3.1.1 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลขั้นตอนการทำเบื้องต้น และเก็บข้อมูลคุณสมบัติของไฟโบรอิน โดยการศึกษาวิธีการเตรียมไฟโบรอินจากการตัดรังไหม

1) นำไหมมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาด 3×3 มิลลิเมตร ดังภาพ 3.2



ภาพ 3.2 การตัดไหม

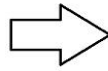
2) เข้าสู่กระบวนการ Degum โดยการนำไหมมาชั่ง 10 กรัม แล้วเตรียมสารโซเดียมคาร์บอเนต 2.122 กรัม ทำการต้มไหมในสารละลายโซเดียม 500 มิลลิลิตรเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นต้มในน้ำดีไอ (DI Water) 1000 มิลลิลิตร เป็นเวลา 10 นาที ทำซ้ำ 3 รอบแล้วนำไหมที่ต้มในน้ำดีไอ (DI Water) เพื่อกำจัดสารที่ไม่ต้องการทิ้งไป เช่น กำจัดกาสออกจากตัวไหม ดังภาพ 3.3 เสร็จแล้วมาอบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังภาพ 3.4



ภาพ 3.3 กระบวนการ Degum



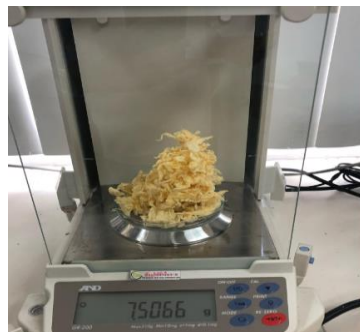
ภาพ 3.4



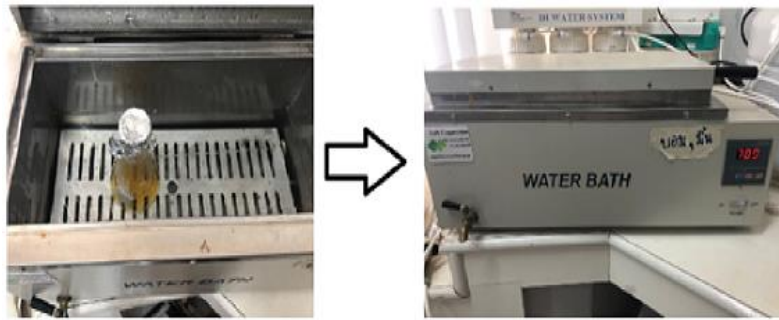
กระบวนการ

อบไหม

3) เข้าสู่กระบวนการ Extract ชั่งไหมที่อบแล้ว 7.5 กรัม เตรียมสารละลายไตรภาค (Ternary Solution) ที่ประกอบด้วยน้ำดีไอ (DI Water) 36.0356 กรัม แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride) 27.75 กรัม และ เอทานอล (Ethanol) 23.035 กรัม ละลายไหมในสารละลายไตรภาค (Ternary Solution) จนกว่าไหมจะละลายหมดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเพื่อละลายไฟโบรอินในรูปสารละลาย ดังภาพ 3.5 จากนั้นต้มไหมต่อในเครื่องอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง ดังภาพ 3.6

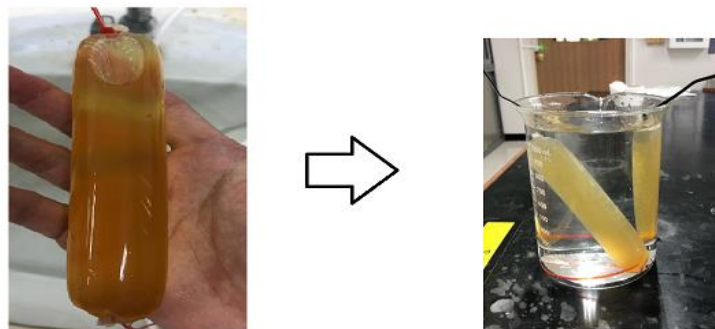


ภาพ 3.5 กระบวนการ Extract



ภาพ 3.6 การต้มไหมในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)

4) เข้าสู่กระบวนการ Dialysis โดยการเทไหมใส่หลอดเซลลูโลส (Cellulose tube) และแช่ในน้ำดีไอ (DI Water) เก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แช่ไว้ 3 วันโดยเปลี่ยนน้ำทุกวัน ดังภาพ 3.7 หลังจากการแช่นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 2000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเทส่วนที่ปั่นเหวี่ยงใส่ปิกรเกอร์ เพื่อแยกไฟโบรอินออกจากสารละลายไตรภาค (Ternary Solution) ดังภาพ 3.8



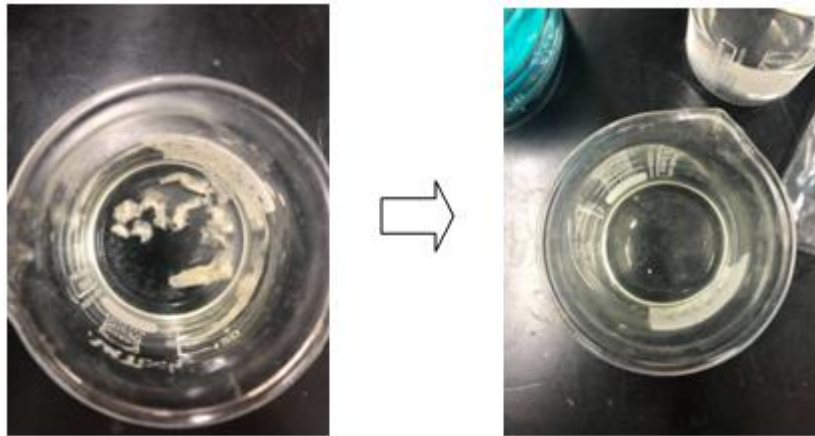
ภาพ 3.7 เทไหมใส่หลอดเซลลูโลส



ภาพ 3.8 การปั่นเหวี่ยง

3.1.2 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลขั้นตอนการทำเบื้องต้น และเก็บข้อมูลคุณสมบัติของไคโตซาน

1) ไคโตซานปริมาณ 1 กรัมแช่ลงในสารละลายกรดและผสมลงในน้ำดีไอ (DI Water) ดังภาพ 3.9



ภาพ 3.9 การละลายไคโตซาน

3.1.3 การผสมสารละลายการผลิตแบบใหม่

โดยการนำไฟโบรอินที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงไปขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง (Freeze Dry) มาละลายและนำมาผสมกับสารละลายไคโตซานแล้วนำไปขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง (Freeze Dry) ขึ้นรูป โดยมีปริมาณ 25 มิลลิลิตร ต่อ กล่อง ดังภาพ 3.10



ภาพ 3.10 การเทสารละลายลงกล่อ

3.1.4 ขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง (Freeze Dry)

ขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง (Freeze Dry) ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน ดังภาพ 3.11



ภาพ 3.11 เครื่องขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง (Freeze Dryer)

3.2 กำหนดปัจจัยที่จะนำมาทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพ

- 1) อัตราส่วนโคโตะซาน
- 2) ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์
- 3) ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ละลายโคโตะซาน

3.3 การทดลองเบื้องต้น

3.3.1 ทดสอบปริมาณกรด Acetic ที่จะนำมาละลายไคโตซานโดยใช้ค่าระหว่าง 0.4 เปอร์เซ็นต์ และ 0.5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหาค่าที่น้อยที่สุดที่ทำให้ไคโตซานละลายเนื่องจากปริมาณกรดมีผลต่อกลิ้น

1) การละลายไคโตซานในสารละลายกรด Acetic 0.4 เปอร์เซ็นต์ ในพื้นที่วงกลม แสดงถึงส่วนไคโตซานที่ไม่ละลาย ดังภาพ 3.12



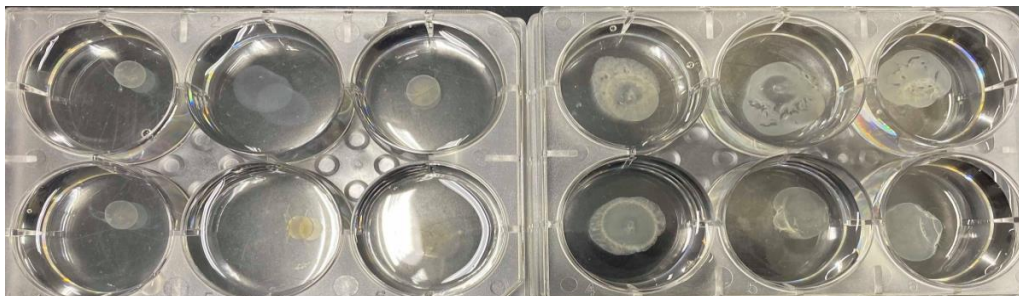
ภาพ 3.12 การละลายไคโตซานในสารละลายกรด 0.4 เปอร์เซ็นต์

2) การละลายไคโตซานในสารละลายกรด Acetic 0.5 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพ 3.13



ภาพ 3.13 การละลายไคโตซานในสารละลายกรด 0.5 เปอร์เซ็นต์

3) การผสมสารละลายไฟโบรอินและสารละลายไคโตซานในอัตราส่วน 70:30 และ 90:10 และมีการผสมกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) ในปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ 1 เปอร์เซ็นต์ และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ต่างกันเพื่อดูลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน ดังภาพ 3.14



ภาพ 3.14 สารละลายไฟโบรอิน ไคโตซาน และกลูตารัลดีไฮด์

ตาราง 3.1 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	หน่วย	ต่ำ(-1)			สูง(+1)		
อัตราส่วนไคโตซานโดยปริมาตร	เปอร์เซ็นต์	70			90		
ปริมาณ Glutaraldehyde	เปอร์เซ็นต์	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5
ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ละลายไคโตซาน	เปอร์เซ็นต์	1			1		

3.4 ทำการทดลองจริง

ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการผลิตแบบใหม่ ดังภาพ 3.15

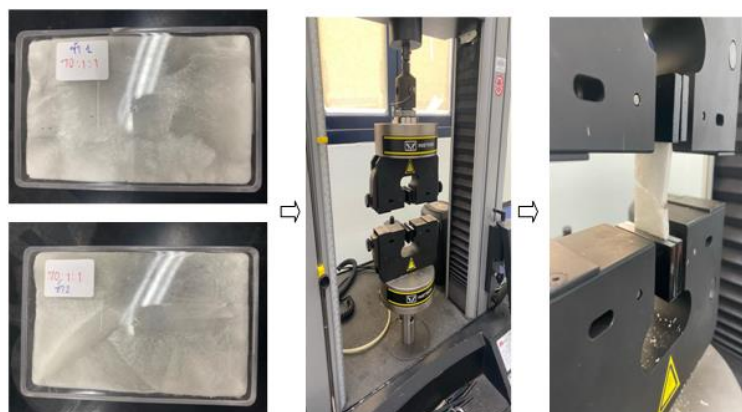


ภาพ 3.15 การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวิธีการผลิตแบบใหม่

3.5 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกลและกายภาพ

3.5.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกล

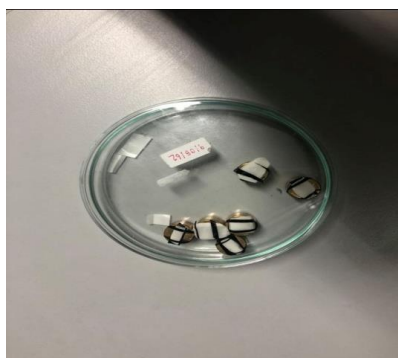
โดยการทดสอบแรงดึงนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วไปทดสอบความแข็งแรงโดยการทดสอบแรงดึงโดยใช้หัวจับแบบลม (Numetic) แรง 0 – 500 นิวตัน ความเร็วในการดึงที่ 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาที และมีแรงจับ 10 ปอนด์ ดังภาพ 3.16



ภาพ 3.16 เครื่องทดสอบแรงดึง

3.5.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

โดยการส่องกล้องจุลทรรศน์นำชิ้นงานไปตัดเป็นชิ้นขนาด 5 มิลลิเมตร x 5 มิลลิเมตร ดังภาพ 3.17 แล้วนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์ (Scanning Electron Microscopy) เป็นกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะของสามมิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษารายละเอียดของลักษณะพื้นผิว ดังภาพ 3.18



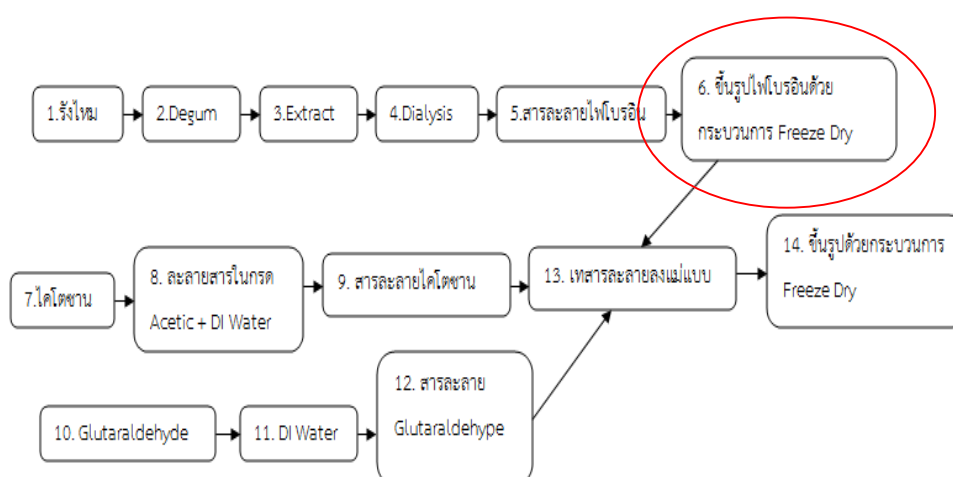
ภาพ 3.17 ชิ้นงานขนาด 5 มิลลิเมตร x 5 มิลลิเมตร



ภาพ 3.18 กล้องจุลทรรศน์ (Scanning Electron Microscope)

3.6 การทดลองแบบเดิม

โดยการนำไฟโบรอินที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงมาขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง (Freeze Dry) แล้วนำไปผสมกับสารละลายไคโตซานแล้วนำไปขึ้นรูปแบบเยือกแข็ง (Freeze Dry) อีกครั้ง แสดงวิธีการผลิตแบบเดิม ดังภาพ 3.19



ภาพ 3.19 วิธีการผลิตแบบเดิม

3.7 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลและกายภาพระหว่างการผลิตแบบเดิมและแบบใหม่

โดยการดูโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์ (Scanning Electron Microscopy) และทดสอบความแข็งแรงจากเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine)

3.8 สรุปผลการทดลองและการดำเนินงาน

บทที่ 4

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์กที่ทำจากไคโตซานและไฟโบรอินโดยทำการศึกษาการผลิตตั้งแต่กระบวนการแรกจนถึงกระบวนการสุดท้าย โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน (Full Factorial Design) 2^k เพื่อช่วยในการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมโดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

4.1 ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

ผู้วิจัยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน 2^k มาช่วยในการคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์ก และหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้แผ่นมาส์กมีความแข็งแรงมากที่สุด โดยการออกแบบการทดลองจะมีขั้นตอนพื้นฐานดังนี้

4.1.1 ทำการเลือกปัจจัยหลังจากทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์กโดยทำการคัดเลือกปัจจัยมา 3 ปัจจัย ที่น่าจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์ก ก็คือ

- 1) ปริมาณไคโตซาน
- 2) ความเข้มข้นของกรดที่ละลายไคโตซาน
- 3) ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์

4.1.2 ทำการกำหนดช่วงของปัจจัย

1) ปัจจัยในการทดลองที่ 1 ปริมาณไคโตซาน คือสารโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharide) เป็นสารสกัดที่ได้จากปลาหมึกสามารถดูดซับน้ำได้ดี จึงนิยมนำมาเป็นส่วนประกอบในการผลิตแผ่นมาส์ก ในการขึ้นรูปแผ่นมาส์กจึงกำหนดปริมาณไคโตซานในช่วง 70 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพ 4.1 และ 4.2 และจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าที่ปริมาณไคโตซาน 90

เปอร์เซ็นต์ มีรุกรุนจำนวนมาก จึงได้กำหนดปัจจัยที่ระดับต่ำไว้ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดปัจจัยระดับสูงไว้ที่ 80 เปอร์เซ็นต์



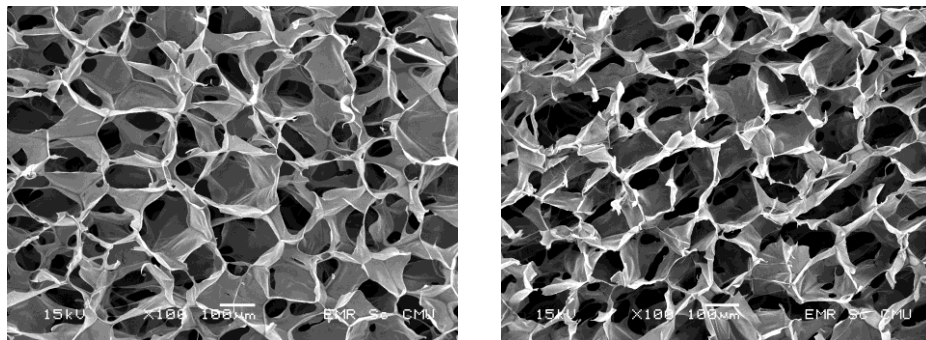
ภาพ 4.1 การขึ้นรูปที่มีปริมาณโคโคซาน 70 เปอร์เซ็นต์



ภาพ 4.2 การขึ้นรูปที่มีปริมาณโคโคซาน 90 เปอร์เซ็นต์

2) ปัจจัยในการทดลองที่สอง ความเข้มข้นของกรดที่ใช้ละลายโคโตซาน คือ กรดที่ใช้ละลายโคโตซานที่อยู่ในรูปของแข็งให้อยู่ในรูปสารละลาย โดยปกติควรจะกำหนดความเข้มข้นของกรดไว้ที่ 1 เปอร์เซ็นต์ แต่เนื่องจากความเข้มข้นของกรดมีผลต่อกลิ่นของแผ่นมาส์กและอาจจะมีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์กผู้วิจัยจึงได้กำหนดค่าปัจจัยระดับต่ำไว้ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดค่าปัจจัยระดับสูงไว้ที่ 1 เปอร์เซ็นต์

3) ปัจจัยในการทดลองที่สาม ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงที่เติมลงไปในพอลิเมอร์ผสมเพื่อทำให้เกิดโครงสร้างแบบร่างแหภายในแผ่นมาส์กซึ่งมีผลต่อความแข็งแรง จากการทดลองเบื้องต้นมีการผสมกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) ในปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ 1 เปอร์เซ็นต์ และ 1.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ต่างกันเพื่อดูลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานปริมาณผสมกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) ในปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์ มีรูพรุนที่เล็กกว่า 1.5 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพ 4.3 ผู้วิจัยจึงกำหนดค่าปัจจัยระดับต่ำไว้ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์ และ กำหนดค่าปัจจัยระดับสูงไว้ที่ 1 เปอร์เซ็นต์



ภาพ 4.3 การเปรียบเทียบระหว่าง 70:1:0.5 กำลังขยาย 100x แบบใหม่ กับ 70:1:1.5 กำลัง 100x แบบใหม่

4.1.3 การกำหนดสัญลักษณ์เงื่อนไขการทดลอง

โดยปกติการกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองจะกำหนดโดยใช้ค่าจริง (Actual Values) และค่าแปลง (Code Value) แต่การกำหนดแต่ละแบบมีประโยชน์ และจุดประสงค์ต่างกันแต่รายงานวิจัยนี้จะใช้ค่าแปลงเพราะว่าเหมาะในการใช้ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง เนื่องจากสะดวกในการตรวจสอบความถูกต้อง และคุณสมบัติที่จำเป็นของตารางการออกแบบการทดลองที่ใช้ คือ (-1) และ

(+1) โดยค่าแปลง (-1) ใช้แทนค่าจริงที่ระดับต่ำของปัจจัย และ (+1) ใช้แทนค่าจริงที่ระดับสูงของปัจจัย ดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 แสดงระดับของปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์ก

ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย	ต่ำ (-1)	สูง (+1)
ปริมาณไคโตซาน	A	เปอร์เซ็นต์	70	80
ความเข้มข้นของกรด	B	เปอร์เซ็นต์	0.5	1
ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์	C	เปอร์เซ็นต์	0.5	1

4.1.4 ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป และการทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

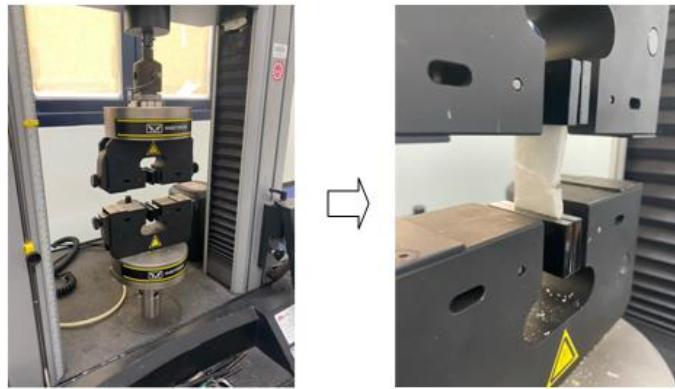
ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป ดังภาพ 4.4 จากการสังเกตลักษณะภายนอกของชิ้นงานพบว่า เจือปน 70:1:1 มีลักษณะภายนอกที่เรียบเนียน และ เจือปน 80:1:1 มีลักษณะภายนอกที่มีรอยขรุขระมากซึ่งอาจหมายถึงชิ้นงานมีรูพรุนมาก ดังภาพ 4.5 และ การนำไปทดสอบแรงดึง ดังภาพ 4.6



ภาพ 4.4 ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป



ภาพ 4.5 ลักษณะภายนอกของชิ้นงาน 70:1:1 และ ลักษณะภายนอกของชิ้นงาน 80:1:1



ภาพ 4.6 การนำไปทดสอบแรงดึง

4.1.5 การเลือกผลตอบ

การเลือกผลตอบของการทดลองทำการเลือกจากเป้าหมายที่ต้องการโดยระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการที่จะได้ผลตอบคือ ความแข็งแรงของแผ่นมาส์ก โดยผลตอบของการทดลองนี้ คือ ความแข็งแรงของแผ่นมาส์ก (Maximum Strength)

4.1.6 การเขียนตารางการออกแบบการทดลองพร้อมผลการทดลอง

ตารางการทดลองแสดงดังตาราง 4.2 ที่เขียนขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้จะเรียงลำดับมาตรฐานโดยเริ่มจากเงื่อนไขที่ทุกปัจจัยอยู่ในระดับต่ำทั้งหมด (-1) และเงื่อนไขสุดท้ายอยู่ระดับปัจจัยที่ระดับสูงทั้งหมด (+1) แต่เมื่อทำการทดลองจริงจะทำการสุ่มลำดับการทดลองเพื่อลดปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น เวลาในการทดลอง

ตาราง 4.2 ตารางแสดงข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน 2^3

Std Order	Run Order	ปริมาณไคโตซาน	ความเข้มข้นของกรด	กลูตารัลดีไฮด์	ค่าเฉลี่ยการทดสอบแรงดึง 2 ชั้น (กิโลปาสคาล)
16	1	+1	+1	+1	28.514
8	2	+1	+1	+1	28.107
10	3	+1	-1	-1	11.489
6	4	+1	-1	+1	25.170
12	5	+1	+1	-1	19.987
2	6	+1	-1	-1	8.483
7	7	-1	+1	+1	70.030
13	8	-1	-1	+1	34.406

ตาราง 4.2 ตารางแสดงข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน 2^3 (ต่อ)

Std Order	Run Order	ปริมาณไคโตซาน	ความเข้มข้นของกรด	กลูตาไรต์ไฮต์	ค่าเฉลี่ยการทดสอบแรงดึง 2 ชั้น (กิโลปาสคาล)
5	9	-1	-1	+1	34.920
11	10	-1	+1	-1	31.655
1	11	-1	-1	-1	51.427
15	12	-1	+1	+1	94.549
3	13	-1	+1	-1	29.081
9	14	-1	-1	-1	60.662
4	15	+1	+1	-1	21.059
14	16	+1	-1	+1	23.293

เมื่อได้ผลการทดลอง และผลตอบที่ทำการแปลงค่าให้เป็นผลตอบที่เราต้องการแล้วต่อไปจะเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมมินิแทป (Minitab V.16) เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ขั้นตอนการวิเคราะห์แบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวนกรณีทำการทดลองซ้ำ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 8 ขั้นตอน ดังนี้

1) ทำการทดสอบผลกระทบว่ามีผลจากการทดลองที่มีปัจจัยหรือมีปัจจัยร่วมใดบ้างที่มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญโดยวิเคราะห์จากตารางวิเคราะห์ผลดังตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ประมาณค่าผลกระทบและค่าสัมประสิทธิ์

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		35.79	1.672	21.40	0.000
A	-30.06	-15.03	1.672	-8.99	0.000
B	9.12	4.56	1.672	2.73	0.026
C	13.12	6.56	1.672	3.92	0.004
A*B	-1.81	-0.91	1.672	-0.54	0.603
A*C	-2.10	-1.05	1.672	-0.63	0.547
B*C	16.69	8.34	1.672	4.99	0.001
A*B*C	-19.92	-9.96	1.672	-5.96	0.000

$$S = 6.68927 \text{ PRESS} = 1431.46$$

$$R - Sq = 95.37\% \quad R - Sq \text{ (pred)} = 81.46\% \quad R - Sq \text{ (adj)} = 91.31\%$$

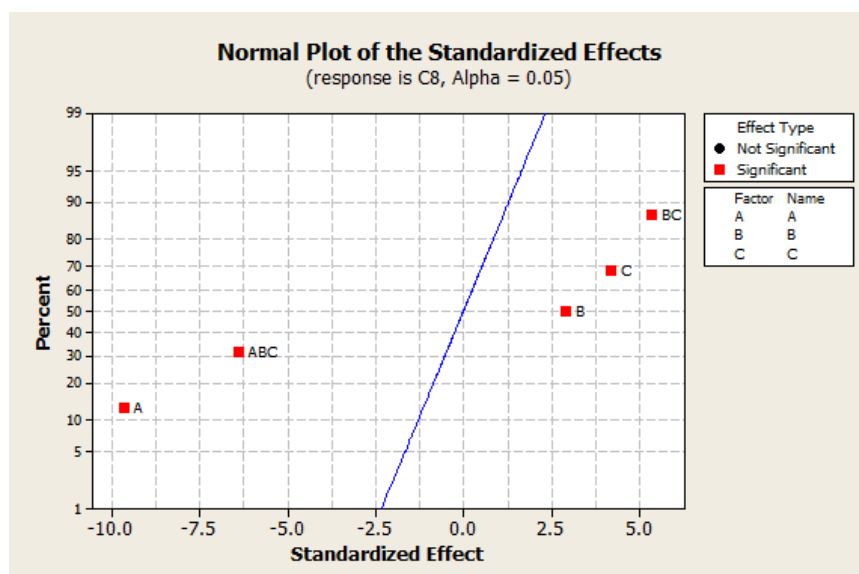
$$\text{จาก } H_0 : U_{\text{effect}} = 0 \quad H_1 : U_{\text{effect}} \neq 0$$

สมมติฐานหลัก คือ ค่าผลกระทบเฉลี่ย (U_{effect}) มีค่าเท่ากับศูนย์ถ้ายอมรับสมมติฐานหลัก แสดงว่าผลกระทบทั้งหมดดังกล่าวไม่มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ และถ้าหากปฏิเสธสมมติฐานหลักแสดงว่ายอมรับสมมติฐานรองปัจจัยนั้นจะมีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ

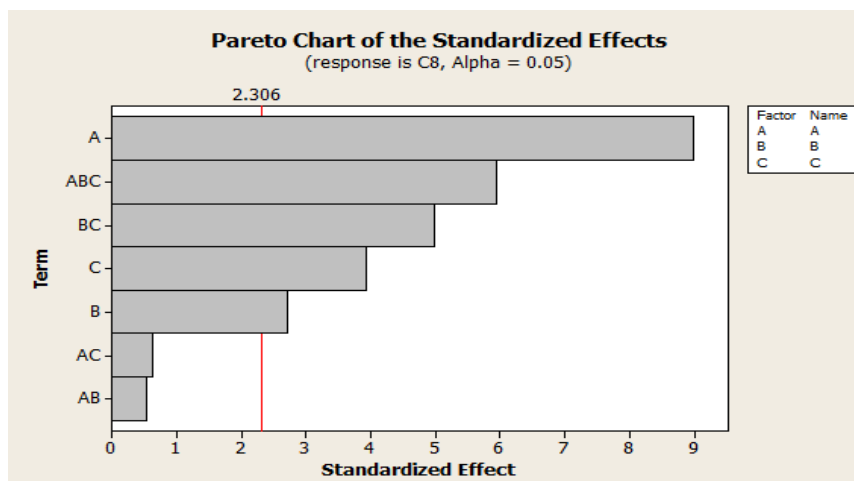
โดยกำหนดให้มีระดับนัยสำคัญอยู่ที่ 0.05 จากตาราง 4.3 จะสังเกตได้ว่าปัจจัย A B C และ ปัจจัยร่วม B*C A*B*C มีค่า P น้อยกว่า 0.05 หมายความว่าปัจจัย A B C และ ปัจจัยร่วม B*C และ A*B*C มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญหรืออาจพิจารณาจากค่าการทดสอบทางสถิติ T_0 ว่ามีค่ามากกว่าค่าที่เปิดจากตารางค่าวิกฤตของการแจกแจงแบบ T หรือไม่ T_0 มากกว่า $\frac{t_{\alpha, m(n-1)}}{2}$

โดย n = จำนวนการทดลองซ้ำ m = จำนวนเงื่อนไขการทดลอง α = ระดับนัยสำคัญ (0.05)

เมื่อเปิดตารางค่าวิกฤตของการแจกแจงแบบ T หรือ $t_{0.05/2, 16(2-1)}$ พบว่าค่า T มีค่าเท่ากับ 2.12 ซึ่งมีขนาดน้อยกว่า T หรือ T_0 ที่ได้จากตาราง 4.3 ของปัจจัย A B C และ ปัจจัยร่วม B*C A*B*C ซึ่งสามารถสรุปผลได้ว่าผลกระทบ A B C และ ผลกระทบร่วม B*C A*B*C มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญหรืออาจพิจารณาว่าเทอมใดมีนัยสำคัญจากกราฟที่ได้จากโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ดังภาพ 4.7 และจะเห็นได้ว่าเทอม A B C B*C และ A*B*C อยู่ห่างจากเส้นตรง และมีสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมหมายความว่า 5 เทอมนี้นับว่ามีนัยสำคัญ ดังภาพ 4.8



ภาพ 4.7 Normal Plot



ภาพ 4.8 แผนภูมิพาเรโตที่แสดงปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

จากภาพ 4.8 จะเห็นได้ว่าเทอม A B C B*C และ A*B*C มีกราฟแท่งที่มีค่ามากกว่าเส้น
นัยสำคัญสามารถสรุปได้ว่าเทอม A B C B*C และ A*B*C มีนัยสำคัญ

2) เขียนแบบจำลอง (Initial Model)

เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมว่ามีผลตอบของ
กระบวนการอย่างไรบ้าง โดยแบบจำลองแบบเต็มจำนวนที่ได้จากการทดลองมีดังสมการ 4.1

แบบจำลองแบบเต็มจำนวน (Full Model)

$$\hat{y} = 35.79 - 15.03X_A + 4.56X_B + 6.56X_C - 0.91X_{AB} - 1.05X_{AC} + 8.34X_{BC} - 9.96X_{ABC} \quad (4.1)$$

โดย $\hat{y}$ = ผลตอบที่ทำการแปลงค่าทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

X = ตัวแปรอิสระที่สามารถปรับค่าได้ (-1, +1)

3) วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มจำนวน

ดังตาราง 4.4

ตาราง 4.4 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของทุกพจน์

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	4634.85	4634.85	1544.95	34.53	0.000
A	1	3613.54	3613.54	3613.54	80.76	0.000
B	1	332.65	332.65	332.65	7.43	0.026
C	1	688.66	688.66	688.66	15.39	0.004
2-Way Interactions	3	1144.95	1144.95	381.65	8.53	0.007
A*B	1	13.12	13.12	13.12	0.29	0.603
A*C	1	17.72	17.72	17.72	0.40	0.547
B*C	1	1114.11	1114.11	1114.11	24.90	0.001
3-Way Interactions	1	1586.93	1586.93	1586.93	35.46	0.000
A*B*C	1	1586.93	1586.93	1586.93	35.46	0.000
Residual Error	8	357.97	357.97	44.75		
Pure Error	8	357.97	357.97	44.75		
Total	15	7724.70				

โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้จะช่วยตัดสินว่าผลกระทบจากปัจจัยหรือปัจจัยร่วมใดมีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญและผลกระทบใดบ้างที่ควรอยู่ในแบบจำลอง จากตาราง 4.4 พบว่าค่า Seq SS หรือ ความแปรปรวนทั้งหมดของปัจจัย A B C B*C และ ปัจจัยร่วม A*B*C มีค่ามากเมื่อเทียบกับปัจจัยร่วม A*B และ A*C และมีเพียง 2 เทอมนี้เท่านั้นที่มีค่า P มากกว่า 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองควรจะตัด A*B และ A*C ออกเนื่องจากไม่มีนัยสำคัญ

4) เขียนแบบจำลองที่แก้ไข (Refine Model)

โดยแบบจำลองนี้จะรวมเฉพาะเทอมที่มีนัยสำคัญ และตัดเทอมที่ไม่จำเป็นออก เพื่อให้แบบจำลองมีความกะทัดรัด และไม่ซับซ้อนเกินไป เพื่อใช้ทำนายผลการทดลองโดยแสดงแบบจำลองดังสมการ 4.2

$$\hat{y} = 35.79 - 15.03X_A + 4.56X_B + 6.56X_C + 8.34X_{BC} - 9.96X_{ABC} \quad (4.2)$$

โดย $\hat{y}$ = ผลตอบที่ทำการแปลงค่าทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

X = ตัวแปรอิสระที่สามารถปรับค่าได้ (-1, +1)

5) ทำการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง (Appropriateness)

ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองเนื่องจากแบบจำลองที่ได้ทำการคาดการณ์ไว้ อาจไม่สอดคล้องกับข้อมูลผลการทดลองส่งผลให้แบบจำลองไม่สามารถนำไปใช้ได้เพราะอาจก่อให้เกิดความผิดพลาด และไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมที่แท้จริงโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ หรือ R – squared (Coefficient of Correlation) หรือ R-squared (adj) ดังตาราง 4.5

ตาราง 4.5 ประมาณค่าผลกระทบ และค่าสัมประสิทธิ์คิดเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		35.79	1.559	22.96	0.000
A	-30.06	-15.03	1.559	-9.64	0.000
B	9.12	4.56	1.559	2.92	0.015
C	13.12	6.56	1.559	4.21	0.002
B*C	16.69	8.34	1.559	5.35	0.000
A*B*C	-19.92	-9.96	1.559	-6.49	0.000

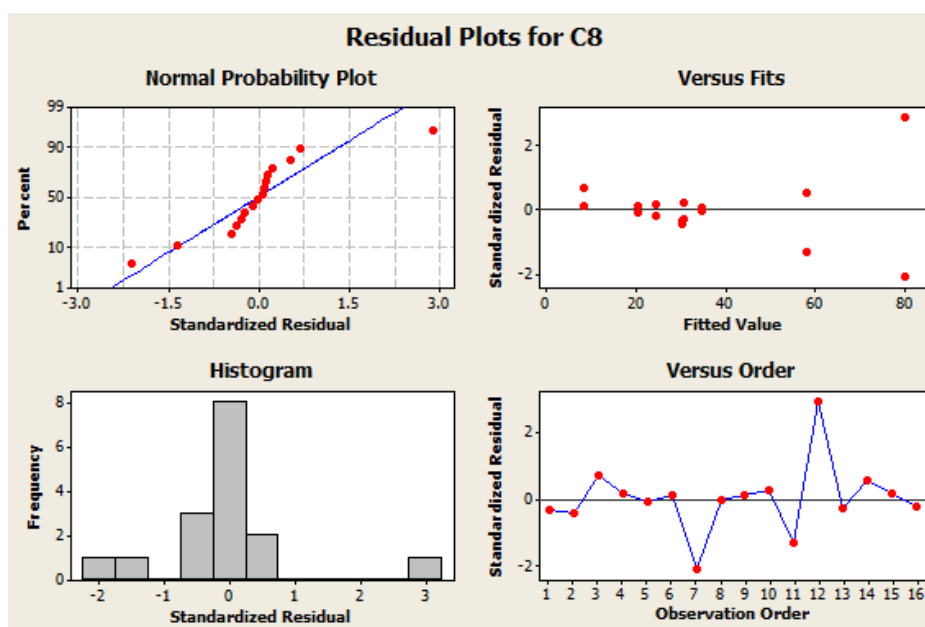
$$S = 6.23549 \text{ PRESS} = 995.361$$

$$R\text{-Sq} = 94.97\% \text{ R-Sq (pred)} = 87.11\% \text{ R-Sq (adj)} = 92.45\%$$

จากตาราง 4.5 จะเห็นว่าค่า R-Sq มีค่าเท่ากับ 94.97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงถึงร้อยละความแปรปรวนทั้งหมดจากข้อมูลการทดลองที่สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง ซึ่งโดยปกติควรมีค่าน้อยกว่า 0.80 หรือ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยปกติถ้าหากเพิ่มจำนวนเทอมในแบบจำลองค่า R-Sq จะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งอาจหมายความว่าแบบจำลองได้รวมเทอมที่ไม่จำเป็นเพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงตัดแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจแบบจำลองขึ้นมาใหม่คือ R-Sq (adj) โดยค่าดัชนีนี้อาจมีค่าลดลงถ้าเพิ่มเทอมที่จำเป็นในสมการแบบจำลองซึ่งในแบบจำลองนี้จะเห็นได้ว่า R-Sq (adj) มีค่าเท่ากับ 92.45 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าแบบจำลองมีความเหมาะสม

6) ทำการตรวจสอบความพอเพียง (Model Adequacy Checking)

โดยทำการตรวจสอบความพอเพียงแบบจำลองโดยวิธีวิเคราะห์ส่วนค้ำ (Residual Analysis) เพื่อตรวจสอบข้อกำหนดเบื้องต้นของคุณสมบัติของความแปรปรวนแบบจำลอง ดังภาพ 4.8 เมื่อเราได้สมการแบบจำลองที่มีความเหมาะสมแล้วจะทำการตรวจสอบคุณสมบัติว่าสมการแบบจำลองมีความพอเพียงหรือไม่โดยพิจารณาค่าส่วนค้ำ จากภาพ 4.9 สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติได้ดังนี้



ภาพ 4.9 ภาพแสดงการวิเคราะห์ส่วนค้ำของผลการทดลอง

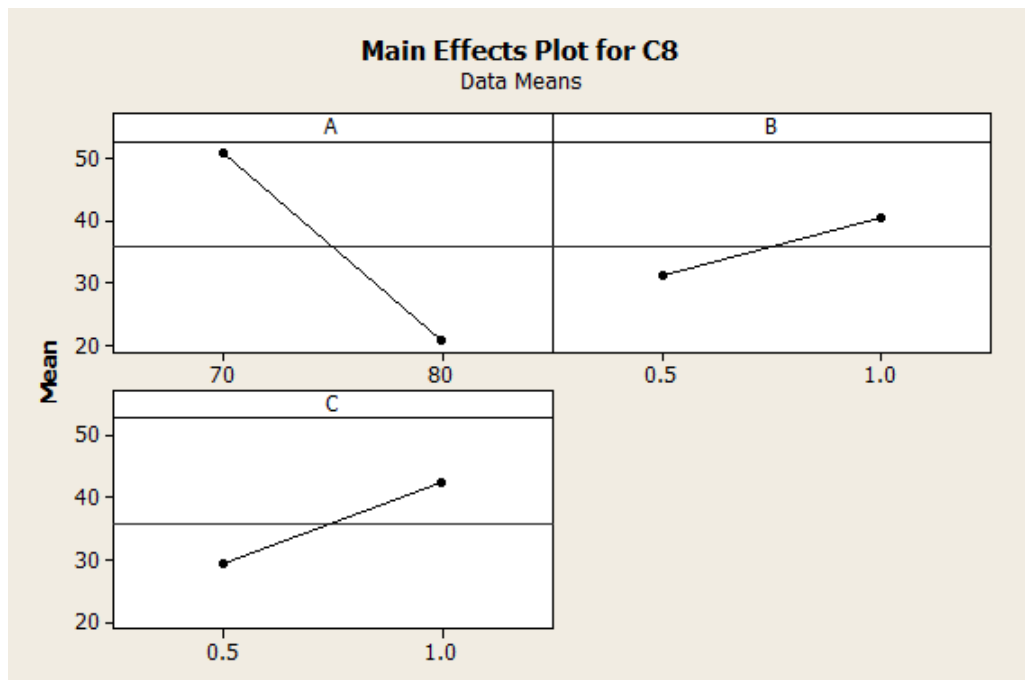
1) วิเคราะห์กราฟแบบปกติของส่วนค้ำจากกราฟ (Normal Probability) ข้อมูลส่วนค้ำส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอยู่ใกล้เส้นแกนกำเนิด (Imaginary Line) ของกราฟปกติ และมีข้อมูลส่วนค้ำที่เห็นได้ชัดเจนว่อกนอกเส้นเพียง 1 จุด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลส่วนค้ำมีการแจกแจงแบบปกติ

2) วิเคราะห์กราฟส่วนค้ำค่าทำนาย (Fitted Values) จากกราฟ (Versus Fits) จะเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนค้ำมีการกระจายตัวแบบสุ่มเป็นอิสระไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใดๆ ที่ขึ้นค่าทำนายที่เกี่ยวข้องกับการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลส่วนค้ำมีความสม่ำเสมอของความผันแปรตลอดช่วงของปัจจัย

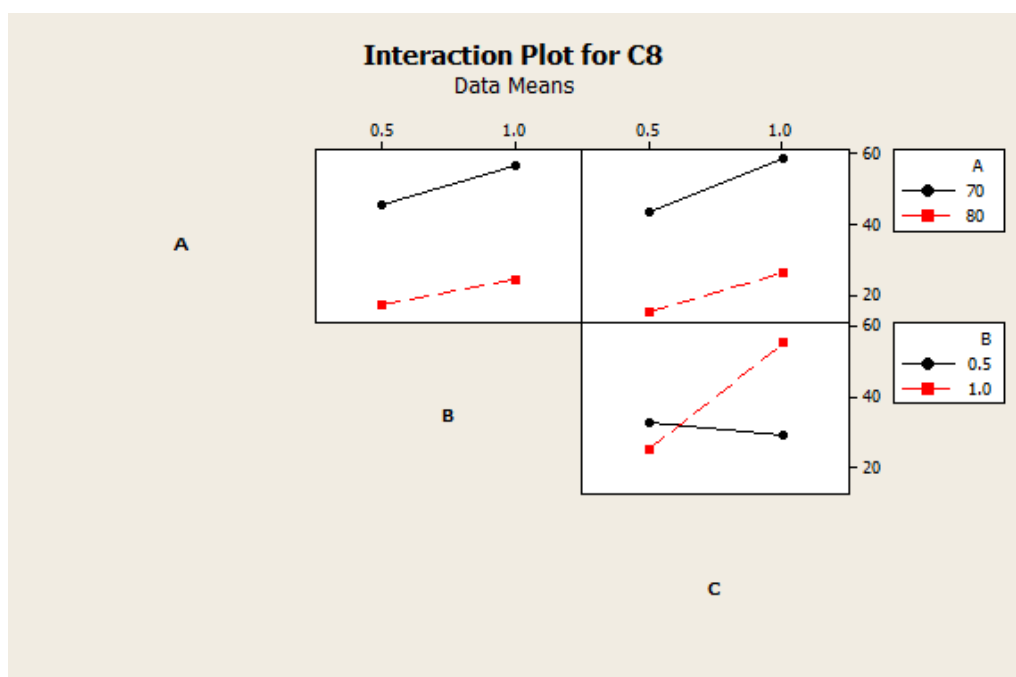
3) วิเคราะห์กราฟส่วนโค้งกับเวลาหรือลำดับการทดลอง (Run Orders) จากกราฟ (Versus Order) ข้อมูลส่วนโค้งมีการแกว่งขึ้นลงไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มใดๆ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลส่วนโค้งมีความเป็นอิสระต่อกัน ไม่ขึ้นอยู่กับลำดับการทดลอง

เมื่อข้อมูลส่วนโค้งมีคุณสมบัติครบทุกประการจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองมีความพอเพียงสามารถนำไปใช้ได้

4) แปลผล และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ดังภาพ 4.10 และ 4.11



ภาพ 4.10 Main Effect Plot



ภาพ 4.11 Interaction Plot

จากภาพ 4.10 จะเห็นได้ว่า ปัจจัย A B C นั้นมีนัยสำคัญอย่างที่กล่าวไว้ในก่อนหน้านี้แล้ว ดังนั้นสามารถเลือกระดับปัจจัย A ที่ระดับต่ำ (-1) ส่วนปัจจัย B และ C สามารถเลือกระดับปัจจัยที่ระดับสูง (+1) เพื่อจะทำให้ผลตอบค่าสูง และนำไปสู่การตั้งเงื่อนไขที่เหมาะสม

จากภาพ 4.11 จะเห็นได้ว่าปัจจัยร่วม $B \times C$ และ $A \times B \times C$ นั้นมีนัยสำคัญจึงทำการพิจารณาหาเงื่อนไขการตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยเลือกจุด ที่ให้ผลตอบสูงที่สุดซึ่งการตั้งค่าที่ให้ผลตอบที่สูงที่สุดควรตั้ง ปัจจัย B และ C ไว้ที่ระดับสูง (+1) หรืออาจทำการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากสมการที่แก้ไขแล้วดังสมการ

ถ้าหากตั้งปัจจัย B และ C ไว้ที่ระดับสูง (+1) จะให้ค่าผลตอบที่มากที่สุดที่แบบจำลองนี้สามารถทำได้ ดังนั้นระดับที่เหมาะสมของการทดลอง แสดงดังตาราง 4.6

ตาราง 4.6 ระดับที่เหมาะสมของการทดลอง

สัญลักษณ์	ปัจจัย	ระดับที่เหมาะสม
ปัจจัย A	ปริมาณไคโตซาน	70 เปอร์เซ็นต์
ปัจจัย B	ความเข้มข้นของกรด	1 เปอร์เซ็นต์
ปัจจัย C	ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์	1 เปอร์เซ็นต์

5) ขั้นตอนการทดลองยืนยันผลของระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง

4.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพการผลิตแบบใหม่

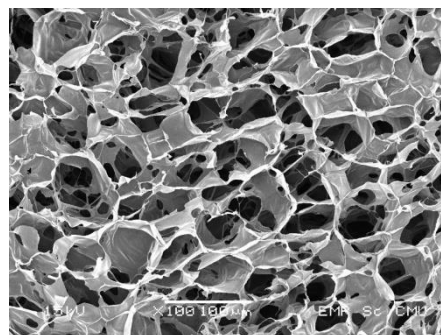
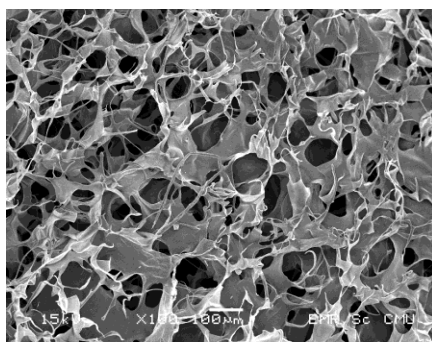
หลังจากทำการทดลองซ้ำ 2 ซ้ำ และนำภาพที่ได้มาในแต่ละเงื่อนไข (Condition) เพื่อยืนยันผลการทดลองเพื่อเป็นการยืนยันว่า ระดับปัจจัยนั้นมีความน่าเชื่อถือ จึงนำระดับปัจจัยที่ดีที่สุดไปทำการทดลองแบบเดิม

การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพที่อัตราส่วนโคโตะซานที่ต่างกัน ปริมาณกรดที่ต่างกัน และปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ที่ต่างกัน ดังตาราง 4.7

ตาราง 4.7 ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติกายภาพแบบใหม่

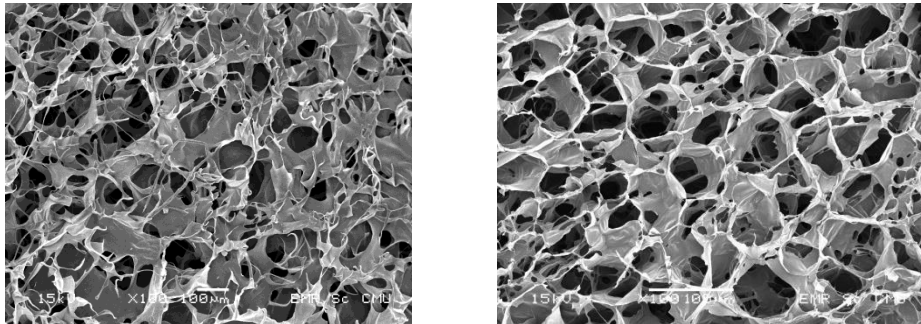
การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพระหว่างการผลิตแบบเดิม และแบบใหม่ในอัตราส่วนที่ต่างกัน		
ปริมาณโคโตะซานต่างกัน	70:1:1	80:1:1
ปริมาณกรดต่างกัน	70:1:1	70:0.5:1
ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ต่างกัน	70:1:1	70:1:0.5

4.2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพที่อัตราส่วนโคโตะซานต่างกันระหว่างการผลิตแบบใหม่ในอัตราส่วน 70:1:1 กับ อัตราส่วน 80:1:1 จากการวิเคราะห์พบว่าที่ปริมาณโคโตะซาน 70 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นงานมีรูพรุนที่เล็กกว่าที่ปริมาณโคโตะซาน 80 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพ 4.12



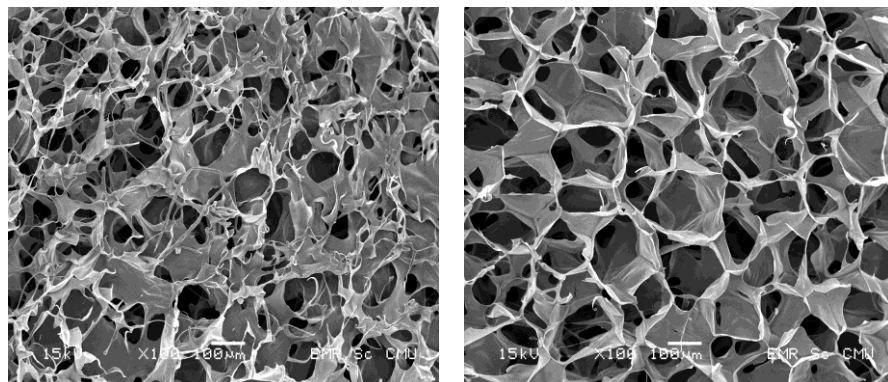
ภาพ 4.12 การเปรียบเทียบระหว่าง 70:1:1 กำลังขยาย 100x กับ 80:1:1 กำลังขยาย 100x

4.2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพการผลิตแบบใหม่ที่อัตราส่วนกรดต่างกันในส่วนอัตราส่วน 70:1:1 กับ 70:0.5:1 พบว่าที่ปริมาณกรด 1 เปอร์เซ็นต์ชิ้นงานมีรูพรุนที่เล็กกว่าที่ปริมาณกรด 0.5 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพ 4.13



ภาพ 4.13 การเปรียบเทียบระหว่าง 70:1:1 กำลังขยาย 100x กับ 70:0.5:1 กำลังขยาย 100x

4.2.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพการผลิตแบบใหม่ที่อัตราส่วนกลูตารัลดีไฮด์ต่างกันในส่วนอัตราส่วน 70:1:1 กับ 70:1:0.5 พบว่าที่ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ 1 เปอร์เซ็นต์ชิ้นงานมีรูพรุนที่เล็กกว่าที่ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพ 4.14



ภาพ 4.14 การเปรียบเทียบระหว่าง 70:1:1 กำลังขยาย 100x กับ 70:1:0.5 กำลังขยาย 100x

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพเพื่อเป็นการยืนยันผลพบว่าเงื่อนไข (Condition) 70:1:1 มีรูพรุนที่มีขนาดเล็กที่สุดซึ่งสามารถสรุปได้ว่าแผ่นมาร์กในเงื่อนไขนี้มีความแข็งแรงมากที่สุด

4.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลการผลิตแบบใหม่

การแสดงค่าเฉลี่ยการทดสอบแรงดึงเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลอง ซึ่งเงื่อนไขที่มีความแข็งแรงมากที่สุด คือ ปริมาณโคโตะซาน 70 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของกรด 1 เปอร์เซ็นต์ และ ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) 1 เปอร์เซ็นต์ ดังตาราง 4.8

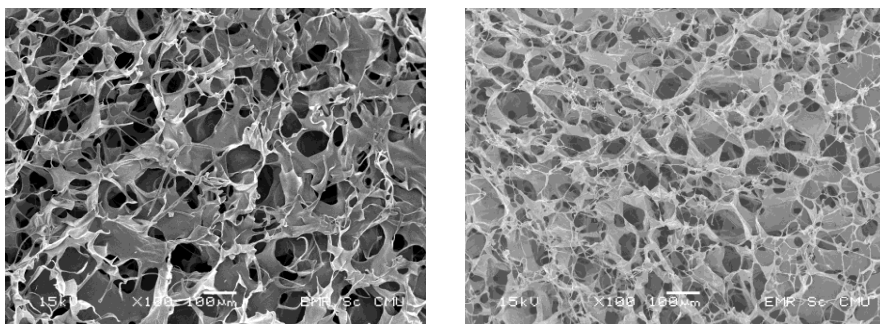
ตาราง 4.8 ตารางแสดงยืนยันผลจากข้อมูลผลการทดสอบแรงดึง

ลำดับที่	อัตราส่วน	ค่าเฉลี่ยการทดสอบแรงดึง 2 ชั้น (กิโลปาสคาล)
1	80:1:1	28.514
2	80:1:1	28.107
3	80:0.5:0.5	11.489
4	80:0.5:1	25.170
5	80:1:0.5	19.987
6	80:0.5:0.5	8.483
7	70:1:1	70.030
8	70:0.5:1	34.406
9	70:0.5:1	34.920
10	70:1:0.5	31.655
11	70:0.5:0.5	51.427
12	70:1:1	94.549
13	70:1:0.5	29.081
14	70:0.5:0.5	60.662
15	80:1:0.5	21.059
16	80:0.5:1	23.293

จากการเปรียบเทียบการทดสอบแรงดึงจากทุกเงื่อนไข (Condition) พบว่าค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข (Condition) 70:1:1 มีความแข็งแรงมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับความแข็งแรงทางกายภาพจึงได้นำเงื่อนไข (Condition) 70:1:1 มาทำการผลิตแบบเดิมว่าคุณสมบัติทางกล และคุณสมบัติทางกายภาพแตกต่างกับการผลิตแบบใหม่หรือไม่

4.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกล และ ทางกายภาพระหว่างการผลิตแบบใหม่กับแบบเดิม

4.4.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพระหว่างการผลิตแบบใหม่กับแบบเดิมในอัตราส่วน 70:1:1 กับ 70:1:1 ดังภาพ 4.15 ตามลำดับ และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยคุณสมบัติทางกลระหว่างการผลิตแบบเดิม และแบบใหม่ ดังตาราง 4.9 และ ตาราง 4.10



ภาพ 4.15 การเปรียบเทียบระหว่าง 70:1:1 กำลังขยาย 100x แบบใหม่ กับ 70:1:1 กำลังขยาย 100x แบบเดิม

ตาราง 4.9 ค่าเฉลี่ยการทดสอบคุณสมบัติทางกลการผลิตแบบเดิม

การผลิต	อัตราส่วน	ค่าการทดสอบแรงดึง ชั้นที่ 1 (กิโลปาสคาล)	ค่าการทดสอบแรงดึง ชั้นที่ 2 (กิโลปาสคาล)	ค่าเฉลี่ยการ ทดสอบแรงดึง
การผลิตแบบเดิม	70:1:1	96.328	88.404	92.366

ตาราง 4.10 ค่าเฉลี่ยการทดสอบคุณสมบัติทางกลการผลิตแบบใหม่

การผลิต	อัตราส่วน	ค่าการทดสอบแรงดึง ชั้นที่ 1 (กิโลปาสคาล)	ค่าการทดสอบแรงดึง ชั้นที่ 2 (กิโลปาสคาล)	ค่าเฉลี่ยการ ทดสอบแรงดึง
การผลิตแบบใหม่	70:1:1	70.030	94.549	82.289

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพพบว่าเงื่อนไข (Condition) 70:1:1 การผลิตแบบใหม่ มีรูพรุนที่มีใกล้เคียงกับการผลิตแบบเดิม และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลพบว่าเงื่อนไข (Condition) 70:1:1 การผลิตแบบใหม่มีค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum Strength) ชั้นที่ 1 เท่ากับ 70.030 กิโลปาสคาล และ ชั้นที่ 2 เท่ากับ 94.549 กิโลปาสคาล ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 82.289 กิโลปาสคาล เปรียบเทียบกับการผลิตแบบเดิมมีค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum Strength) ชั้นแรกเท่ากับ

96.328 กิโลปาสคาล และชั้นที่สองเท่ากับ 88.404 กิโลปาสคาล ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 92.366 กิโลปาสคาล พบว่าค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum Strength) การผลิตแบบเดิม และการผลิตแบบใหม่มีค่าค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum Strength) ใกล้เคียงกัน

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การจัดทำโครงงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์กหน้าที่ทำจากไคโตซานและไฟโบรอินเริ่มต้นจากการศึกษาขั้นตอนการทำเบื้องต้น และเก็บข้อมูลคุณสมบัติของไฟโบรอิน และศึกษาขั้นตอนการทำเบื้องต้น และเก็บข้อมูลคุณสมบัติของไคโตซานจากนั้นทำการเขียนสรุปผลกระบวนการออกมาเป็นผังกระบวนการ (Process Chart) ให้ง่ายต่อความเข้าใจจากนั้นนำข้อมูลในอดีตมาทำการศึกษา และทำการเลือกปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นมาส์ก

เมื่อทำการเลือกปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อความแข็งแรงแล้วจึงทำการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) เชิงแฟคทอเรียลเต็มจำนวน 2^3 มาช่วยในการประเมินปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรง และการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมนั้นเริ่มต้นจากการคัดเลือกปัจจัยที่น่าจะส่งผลในกระบวนการ โดยเลือกปัจจัยมาทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ A = ปริมาณไคโตซาน B = ความเข้มข้นของกรด C = ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์

จากการวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อความแข็งแรงพบว่าปัจจัย A B C B^*C A^*B^*C มีผลต่อความแข็งแรงอย่างมีนัยสำคัญ และปัจจัย A^*B และ A^*C มีผลต่อความแข็งแรงอย่างไม่มีนัยสำคัญ และ ปัจจัย A B C นั้นมีนัยสำคัญอย่างที่ได้กล่าวไว้ในก่อนหน้านี้นี้แล้วดังนั้นสามารถเลือกระดับปัจจัย A ที่ระดับต่ำ (-1) ส่วนปัจจัย B และ C สามารถเลือกระดับปัจจัยที่ระดับสูง (+1) เพื่อจะทำให้ผลตอบค่าสูง และปัจจัยร่วม B^*C และ A^*B^*C นั้นมีนัยสำคัญจึงทำการพิจารณาหาเงื่อนไขการตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยเลือกจุด ที่ให้ผลตอบสูงที่สุดซึ่งการตั้งค่าที่ให้ผลตอบที่สูงที่สุดควรตั้ง ปัจจัย B และ C ไว้ที่ระดับสูง (+1) ซึ่งเป็นระดับปัจจัยที่ดีที่สุดที่มีผลต่อความแข็งแรง ดังนั้นจึงกำหนดปริมาณไคโตซานอยู่ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้นของกรดอยู่ที่ 1 เปอร์เซ็นต์ และ ปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ อยู่ที่ 1

เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกล ระหว่างการผลิตแผ่นมาส์กแบบเดิมและแบบใหม่ จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกลพบว่าเงื่อนไข (Condition) 70:1:1 การผลิตแบบใหม่มีค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum Strength) ซ้ำที่ 1 เท่ากับ 70.030 กิโลปาสคาล และ ซ้ำที่ 2 เท่ากับ 94.549 กิโลปาสคาล ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 82.289 กิโลปาสคาล เปรียบเทียบกับการผลิตแบบเดิมมีค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum Strength) ขึ้นแรกเท่ากับ 96.328 กิโลปาสคาล และขึ้นที่สองเท่ากับ 88.404 กิโลปาสคาล ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 92.366 กิโลปาสคาล พบว่าค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum Strength) การผลิตแบบเดิม และการผลิตแบบใหม่มีค่าค่าแรงดึงสูงสุด (Maximum Strength) ใกล้เคียงกัน และจากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพระหว่างการผลิตแบบใหม่และแบบเดิมมีขนาดรูพรุนที่ใกล้เคียงกัน แต่การผลิตแบบใหม่สามารถลดเวลาการขึ้นรูปแบบเยือกแข็งได้ 2 วัน ซึ่งสามารถลดเวลาในกระบวนการขึ้นรูปไฟโบรอินแผ่นมาส์ก

5.1 ปัญหาและอุปสรรคในการทำวิจัย

- 1) ระยะเวลาในการเตรียมไฟโบรอินใช้เวลานาน
- 2) ขนาดของโคโตะซานมีผลการละลาย
- 3) การผสมส่วนที่มีปริมาณมากเกินไปลงแม่แบบส่งผลต่อการขึ้นรูปทำให้ชิ้นงานไม่สมบูรณ์
- 4) มีการทดลองส่วนผสมในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้ชิ้นงานไม่สมบูรณ์ และทำให้การวิเคราะห์ทางกล และกายภาพล่าช้ากว่าเวลาที่กำหนดไว้

5.2 ข้อเสนอแนะ

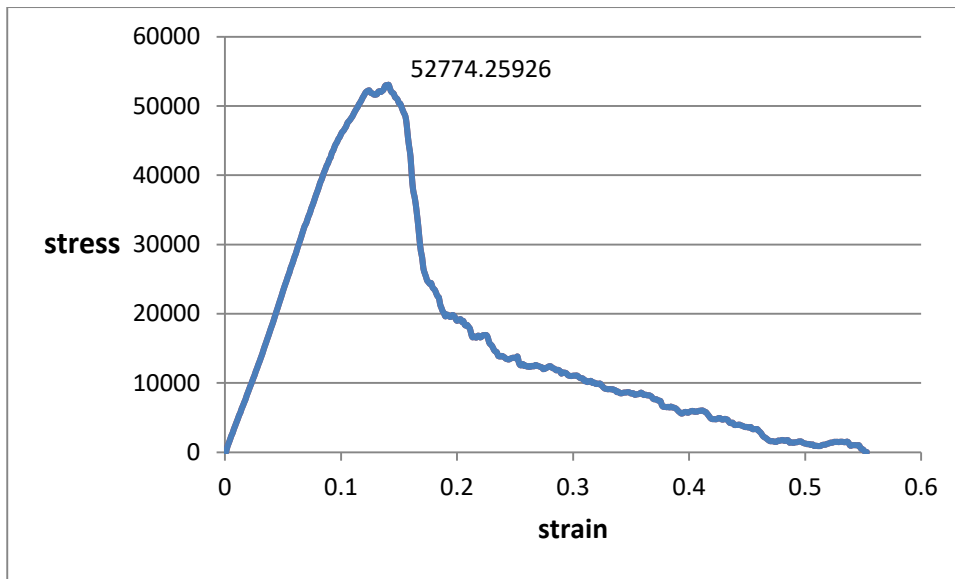
- 1) ควรเตรียมไฟโบรอินไว้ในปริมาณที่เหมาะสมให้เพียงพอต่อการใช้งานเนื่องจากการสกัดไฟโบรอินใช้เวลานาน ซึ่งทำให้การทดลองเกิดการล่าช้า
- 2) ในขั้นตอนการผสมสารละลายทั้งหมดควรใช้แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Bar) เพื่อให้สารละลายกระจายตัวคงที่
- 3) ระดับปัจจัยที่ได้จากการทดลองนี้ในกรณีศึกษาการทดลองอาจไม่เหมาะสมเพราะความแตกต่างในด้านต่างๆ เช่น ปัจจัยในการผลิต สภาพแวดล้อม เป็นต้น

บรรณานุกรม

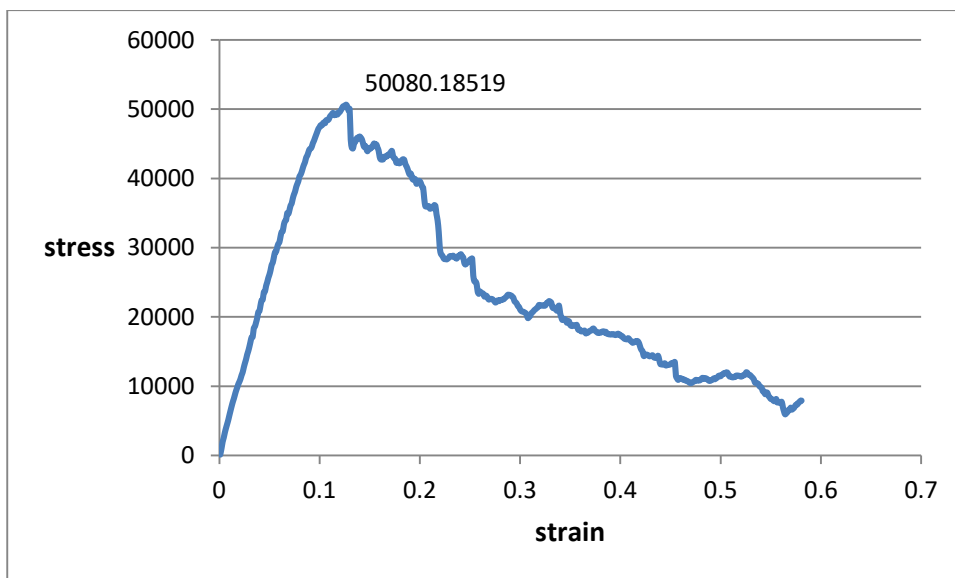
- กัญญ์วรา ทุนประเสริฐ และชุติภา ยอดแก้ว. (2560). การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแผ่นมาสก์
หน้าจากไฟโบรอิน ไคโตซาน และเซลลูโลส , หน้า 45 (1 กันยายน 2562)
- จุฬาริทยานุกรม. “ไฟโบรอิน” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
<http://www.chulapedia.chula.ac.th/> (1 กันยายน 2562)
- พลสัน นกน่วม. “ไคโตซานคืออะไร” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
<https://www.mangozero.com> (3 กันยายน 2562)
- รัตนา รุจิรวนิชย์. “การเตรียมและการศึกษาคุณสมบัติของไฮโดรเจลที่เตรียมจากอนุพันธ์ของไคติน
และโปรตีนจากเส้นใยไหม” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://cuir.car.chula.ac.th> (15
ตุลาคม 2562)
- สุกิจ ลิตีกรณ. “การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง” [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
<https://www.harn.co.th> (3 กันยายน 2562)
- สรรดิษฐ์ ชีวสุทธิศิลป์. (2546). การพัฒนาคุณภาพเชิงปริมาณสำหรับงานด้านวิศวกรรมโดยใช้หลักการ
ออกแบบการทดลอง, หน้า 2 (15 ตุลาคม 2562)
- สรรดิษฐ์ ชีวสุทธิศิลป์. (2557). กลยุทธ์การออกแบบการทดลองสำหรับวิศวกรรม, หน้า 207 (15
ตุลาคม 2562)

ภาคผนวก ก.

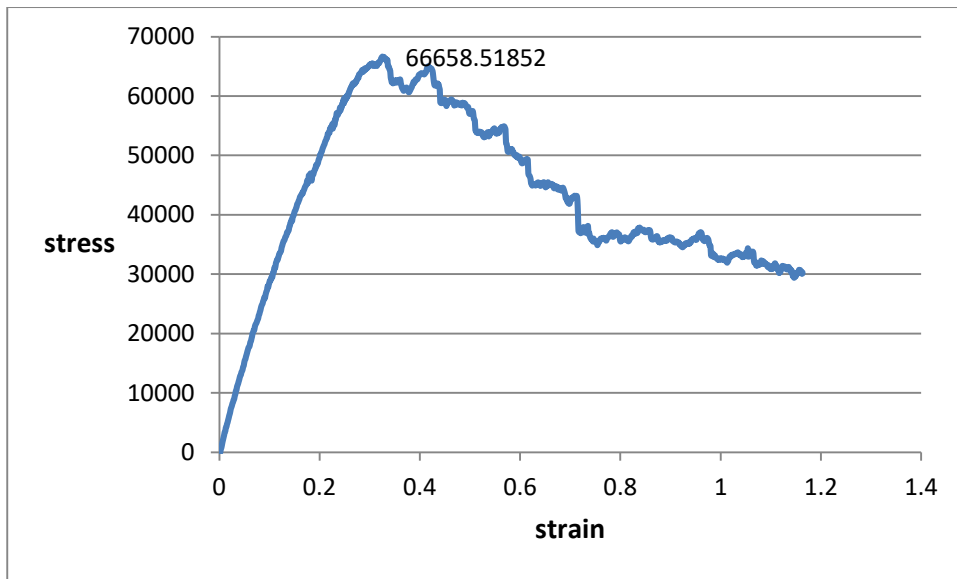
แสดงกราฟที่มีค่าการทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) โดยแกน X เป็น
ความเครียด (Stress) และ แกน Y เป็นความเค้น (Strain) ของแต่ละเงื่อนไข
(Condition) ที่ได้จากการทดสอบแรงดึง และนำมาคำนวณออกมา แสดงดังกราฟ
ต่อไปนี้



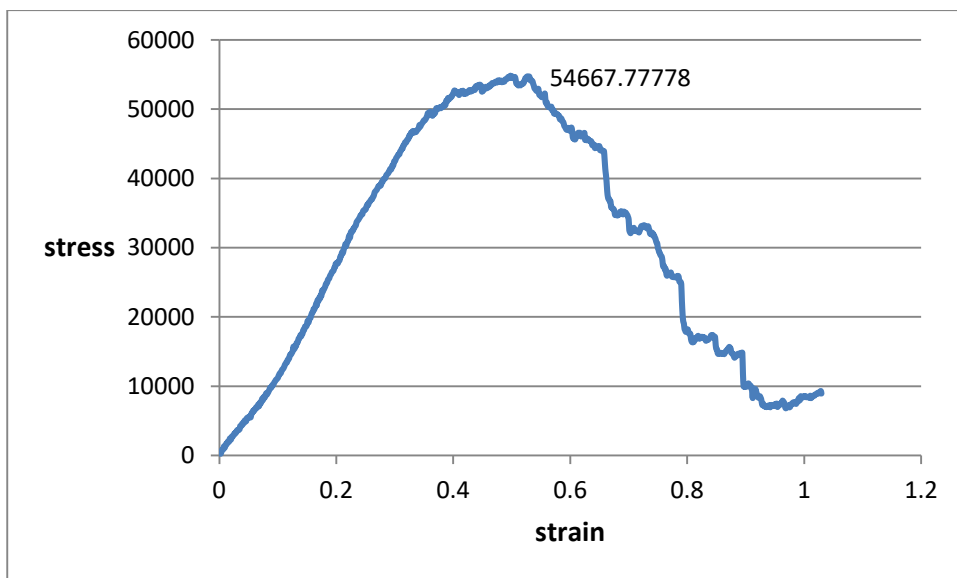
ภาพ ก - 1 กราฟแสดงค่าการทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:0.5:0.5 ชั้นที่ 1 แบบใหม่



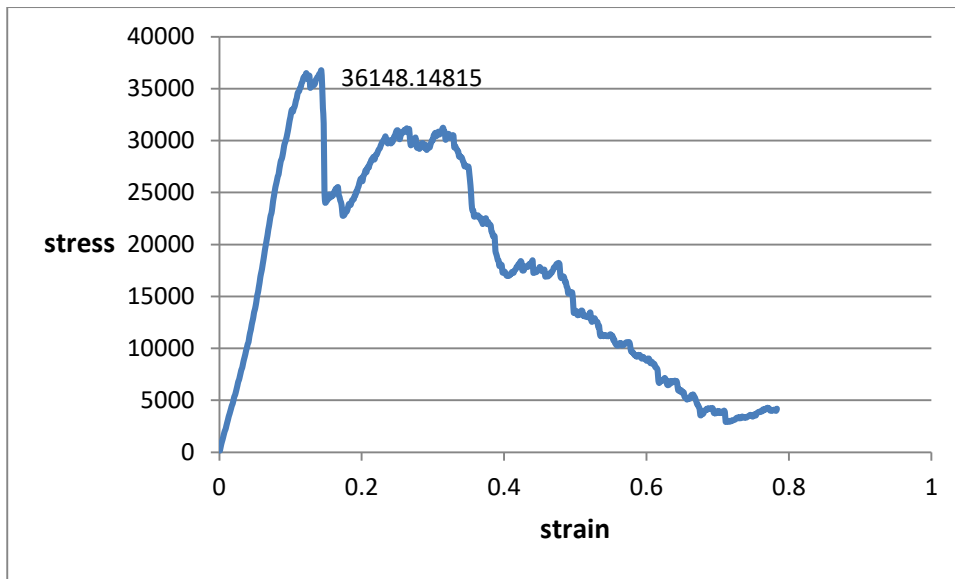
ภาพ ก - 2 กราฟแสดงค่าการทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:0.5:0.5 ชั้นที่ 2 แบบใหม่



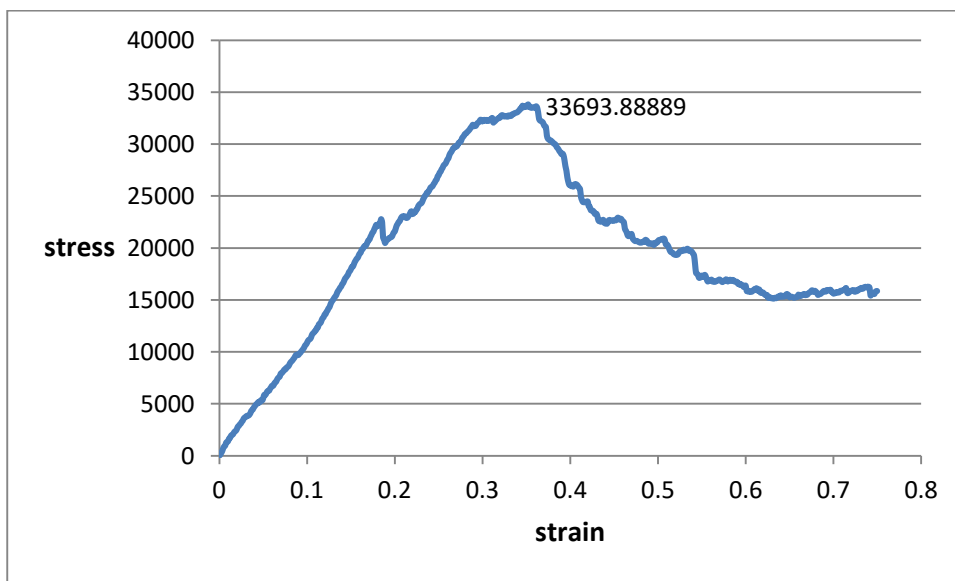
ภาพ ก - 3 กราฟแสดงค่าการทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:0.5:0.5 ชั้นที่ 1 แบบใหม่



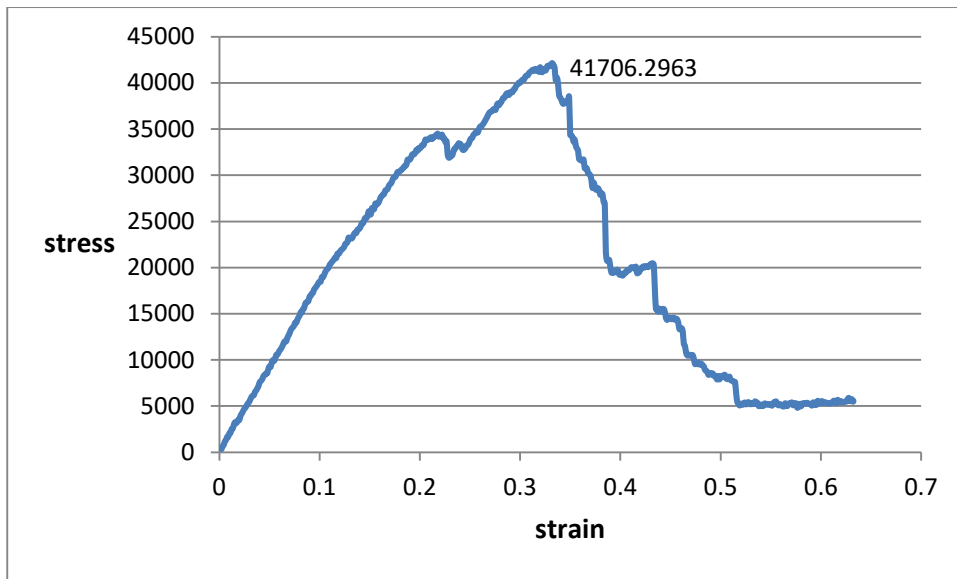
ภาพ ก - 4 กราฟแสดงค่าการทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:0.5:0.5 ชั้นที่ 2 แบบใหม่



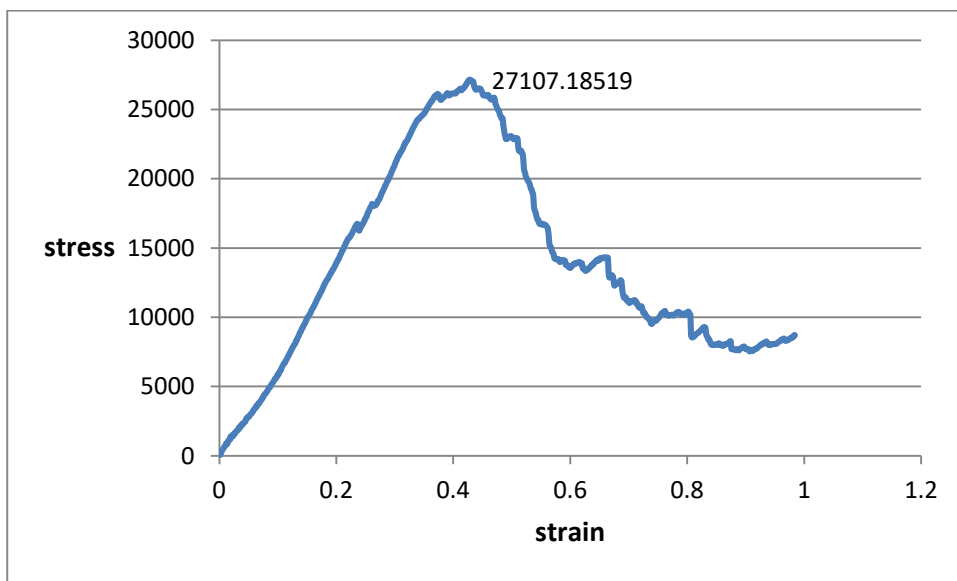
ภาพ ก - 5 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:0.5:1 ซ้ำ 1 ครั้งที่ 1 แบบใหม่



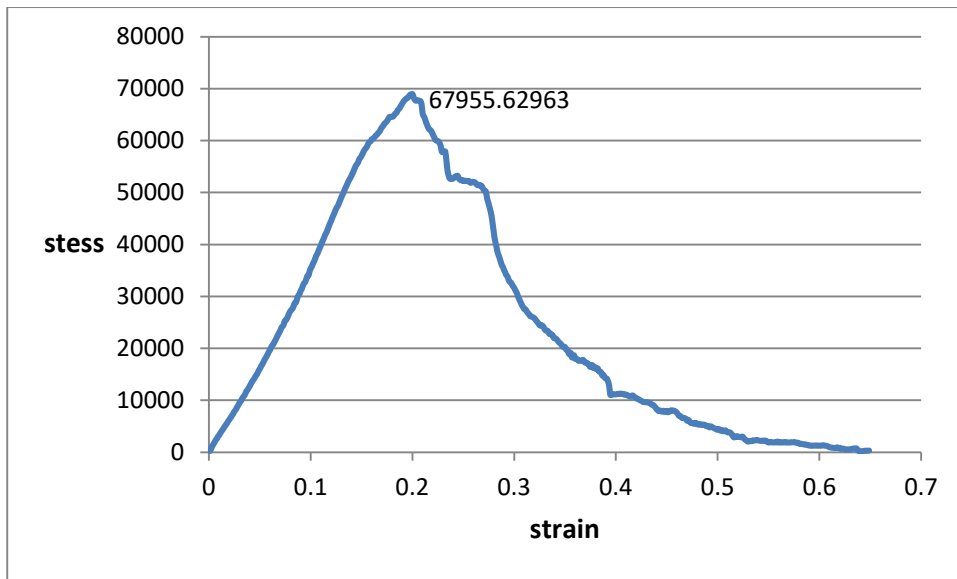
ภาพ ก - 6 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:0.5:1 ซ้ำ 1 ครั้งที่ 2 แบบใหม่



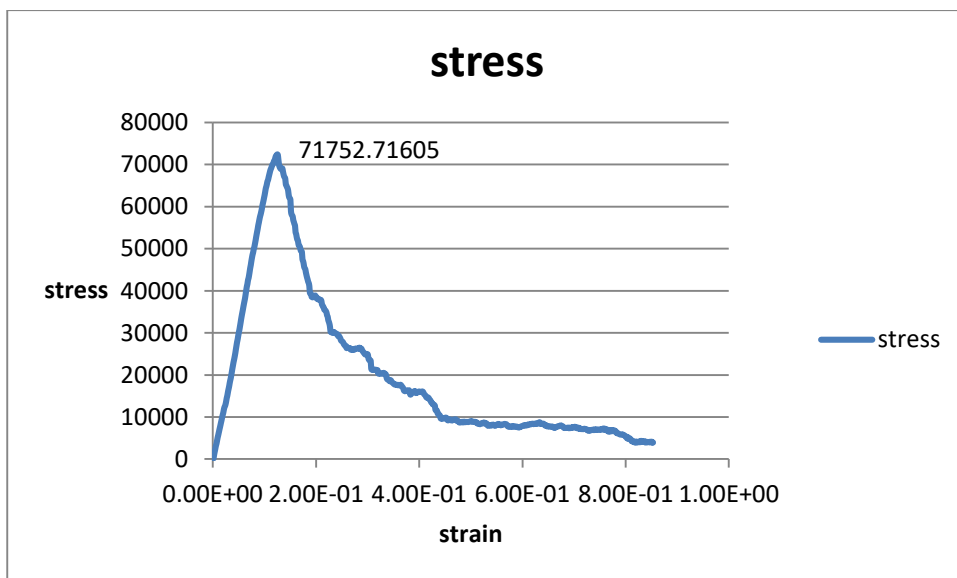
ภาพ ก - 7 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:0.5:1 ซ้ำ 2 ชั้นที่ 1 แบบใหม่



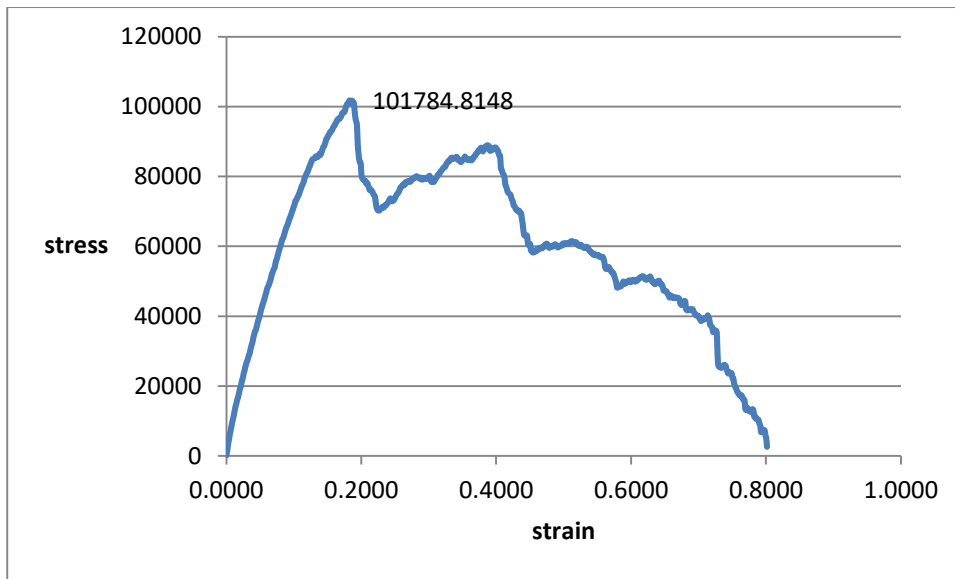
ภาพ ก - 8 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:0.5:1 ซ้ำ 2 ชั้นที่ 2 แบบใหม่



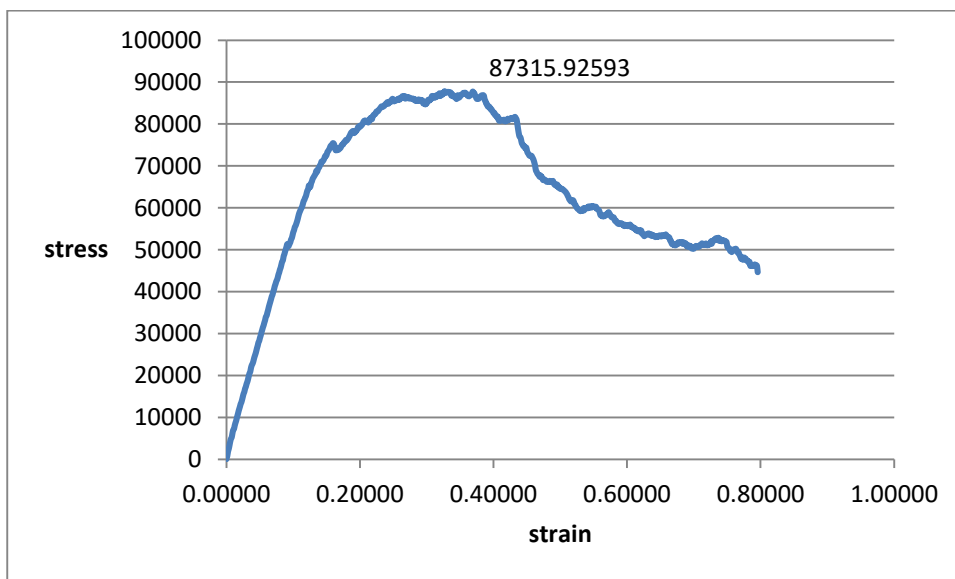
ภาพ ก - 9 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:1:1 ซ้ำ 1 ขั้นที่ 1 แบบใหม่



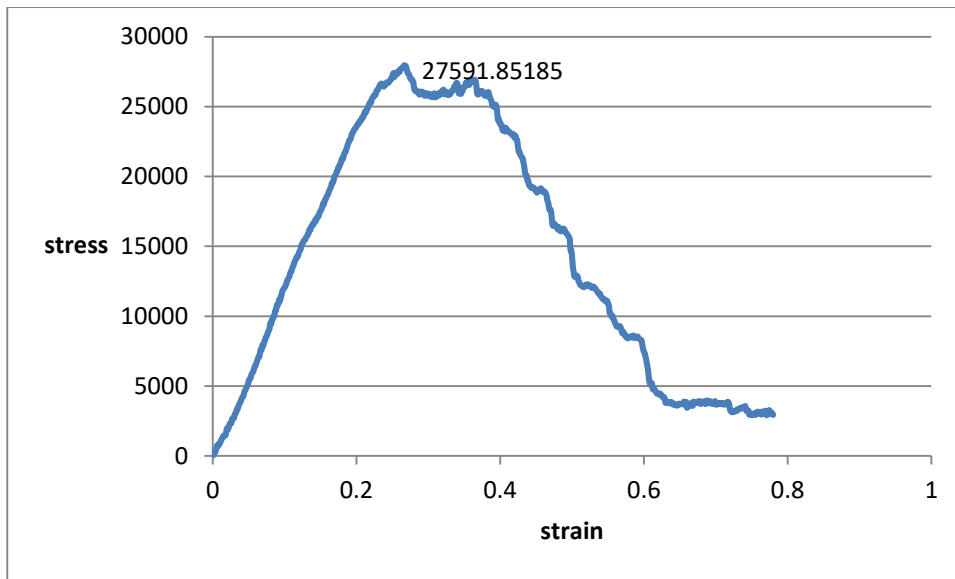
ภาพ ก - 10 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:1:1 ซ้ำ 1 ขั้นที่ 2 แบบใหม่



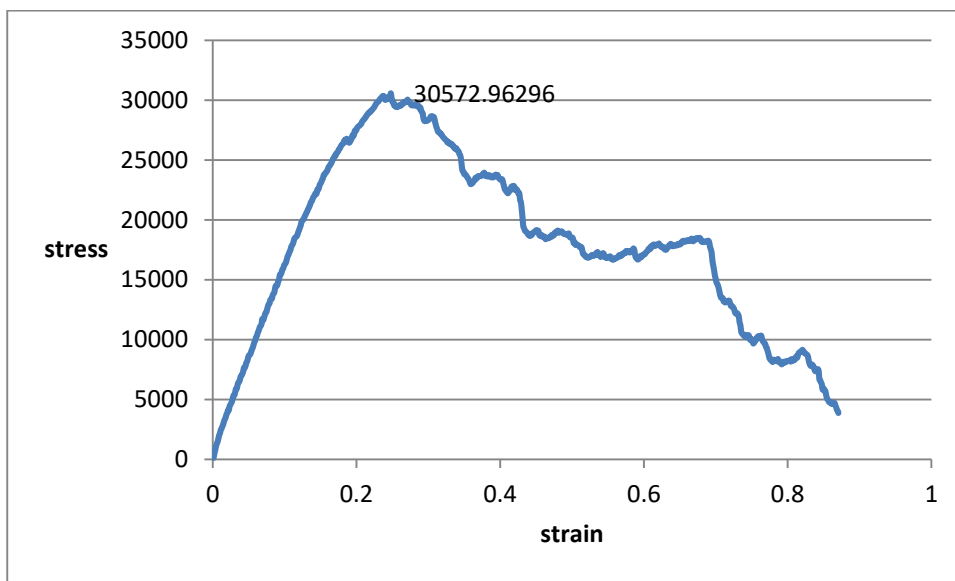
ภาพ ก - 11 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:1:1 ซ้ำ 2 ชั้นที่ 1 แบบใหม่



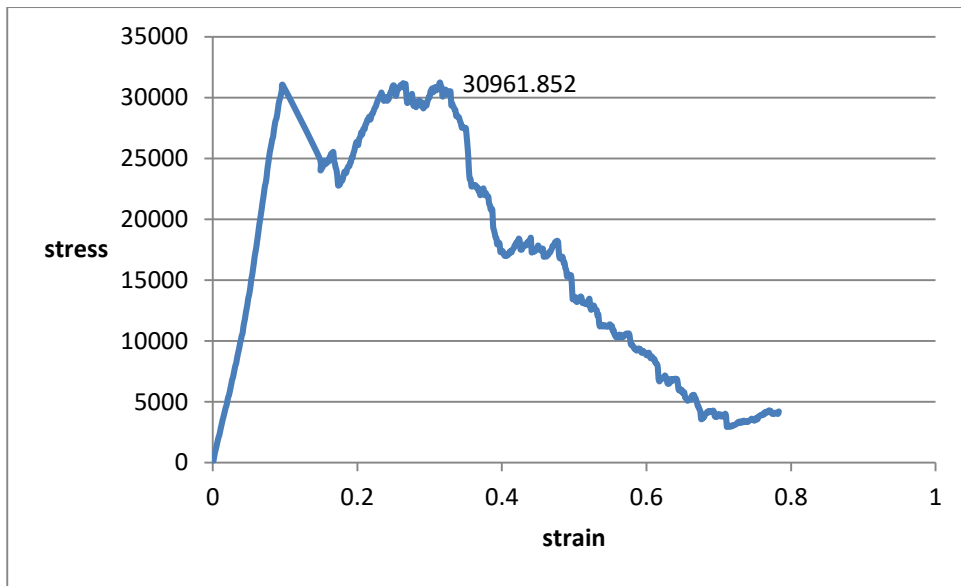
ภาพ ก - 12 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:1:1 ซ้ำ 2 ชั้นที่ 2 แบบใหม่



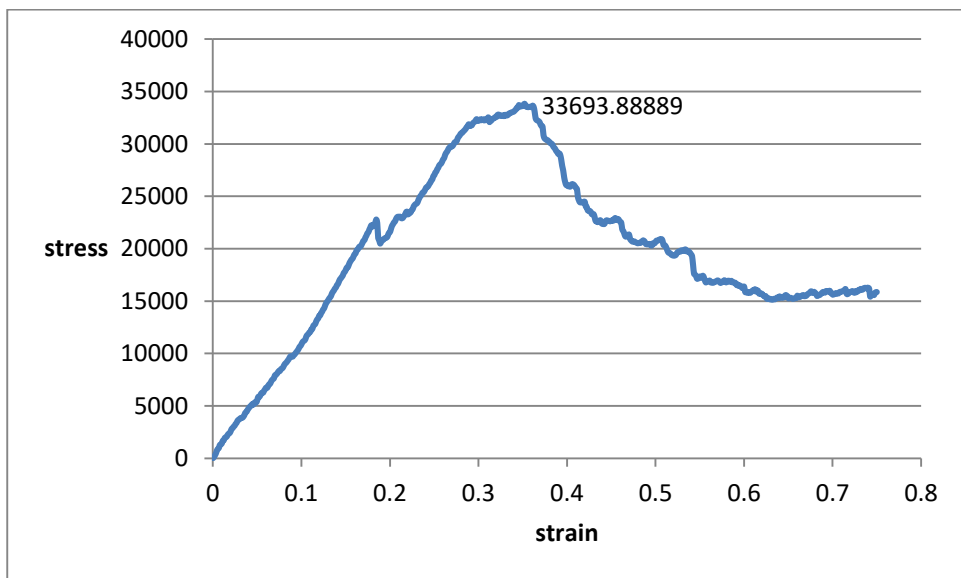
ภาพ ก - 13 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:1:0.5 ซ้ำ 1 ชั้นที่ 1 แบบใหม่



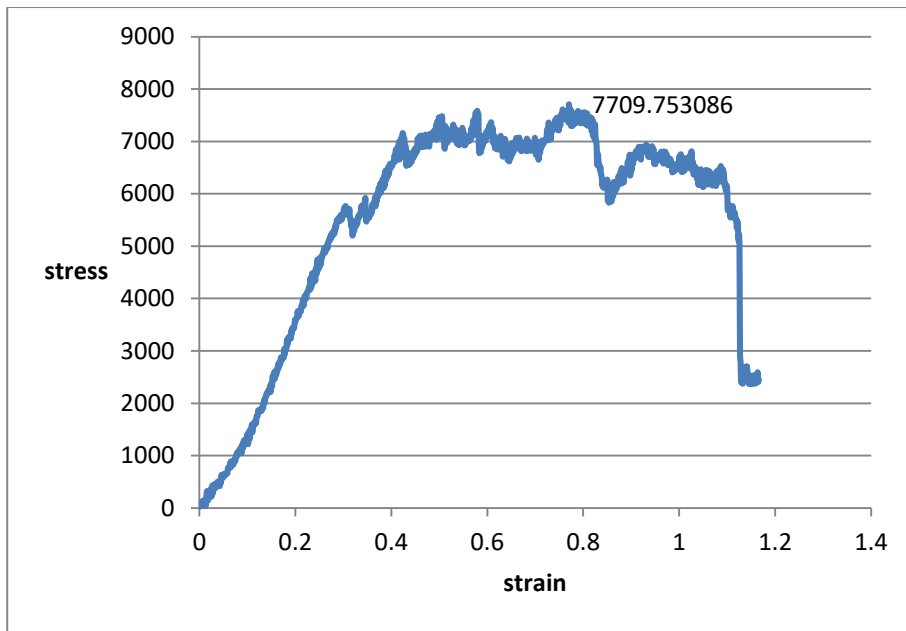
ภาพ ก - 14 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:1:0.5 ซ้ำ 1 ชั้นที่ 2 แบบใหม่



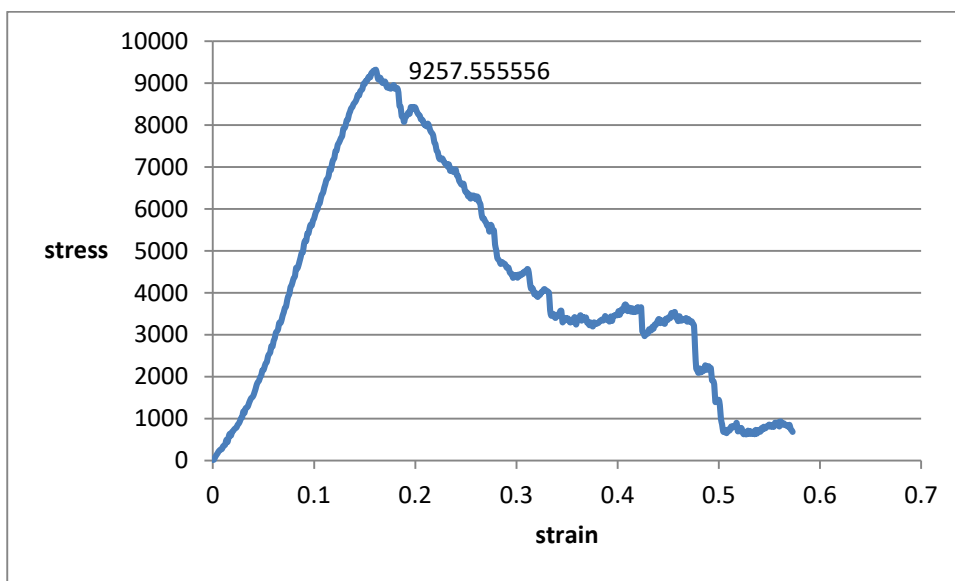
ภาพ ก - 15 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:1:0.5 ซ้ำ 2 ครั้งที่ 1 แบบใหม่



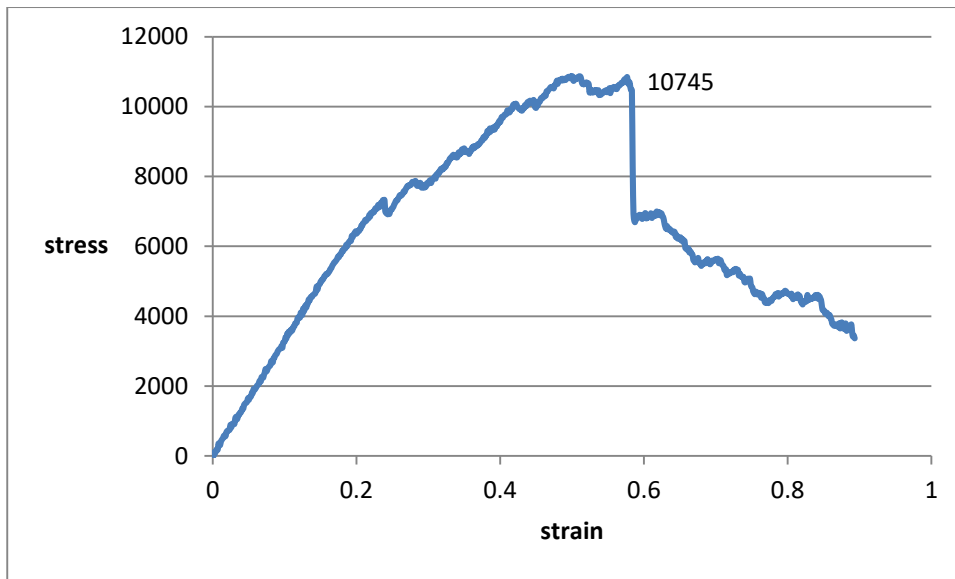
ภาพ ก - 16 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:1:0.5 ซ้ำ 2 ครั้งที่ 2 แบบใหม่



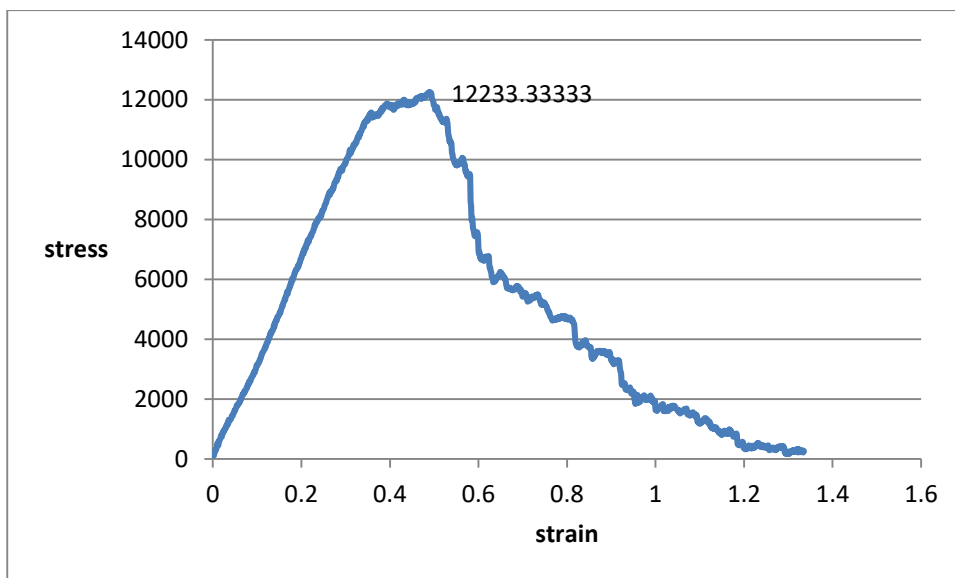
ภาพ ก - 17 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:0.5:0.5 ซ้ำ 1 ชั้นที่ 1 แบบใหม่



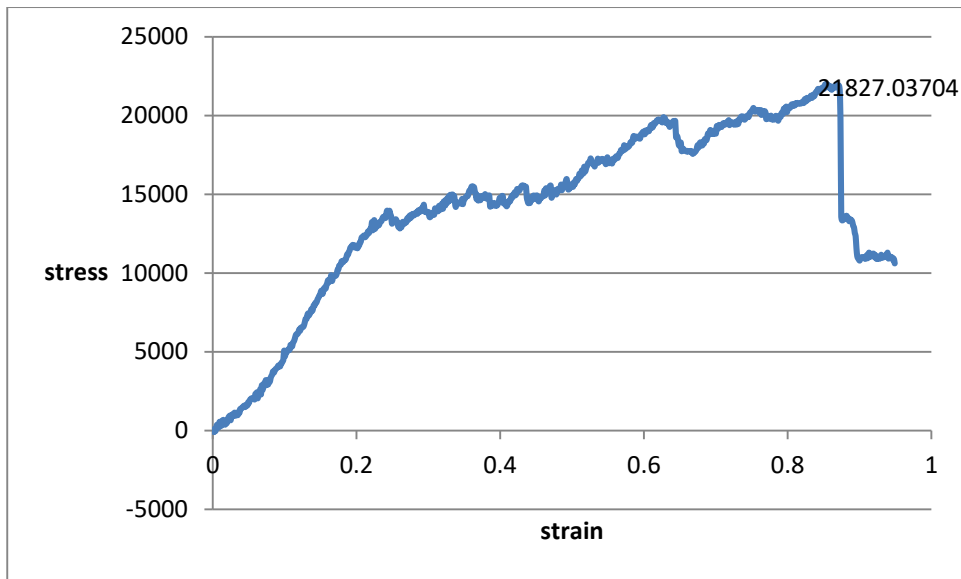
ภาพ ก - 18 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:0.5:0.5 ซ้ำ 1 ชั้นที่ 2 แบบใหม่



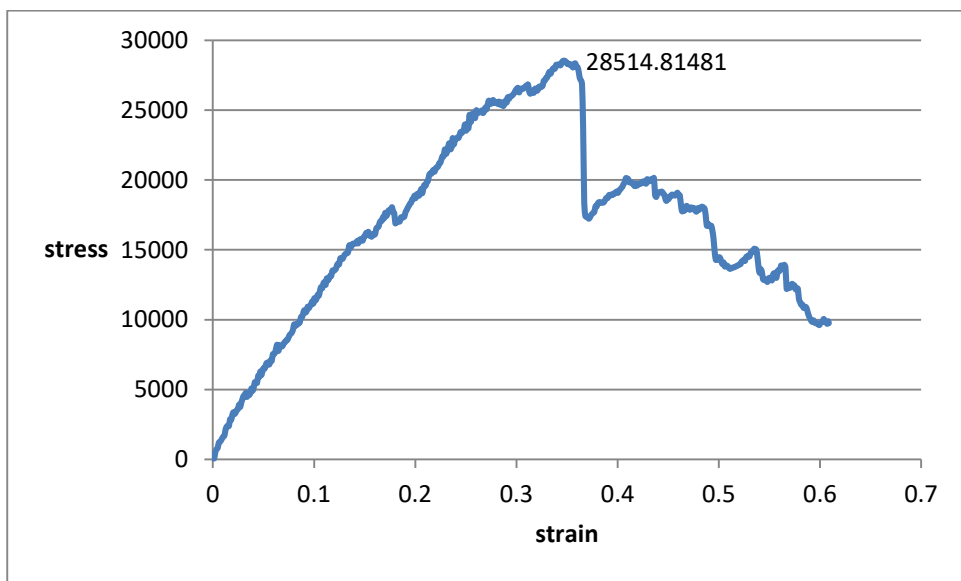
ภาพ ก - 19 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:0.5:0.5 ซ้ำ 2 ขั้นที่ 1 แบบใหม่



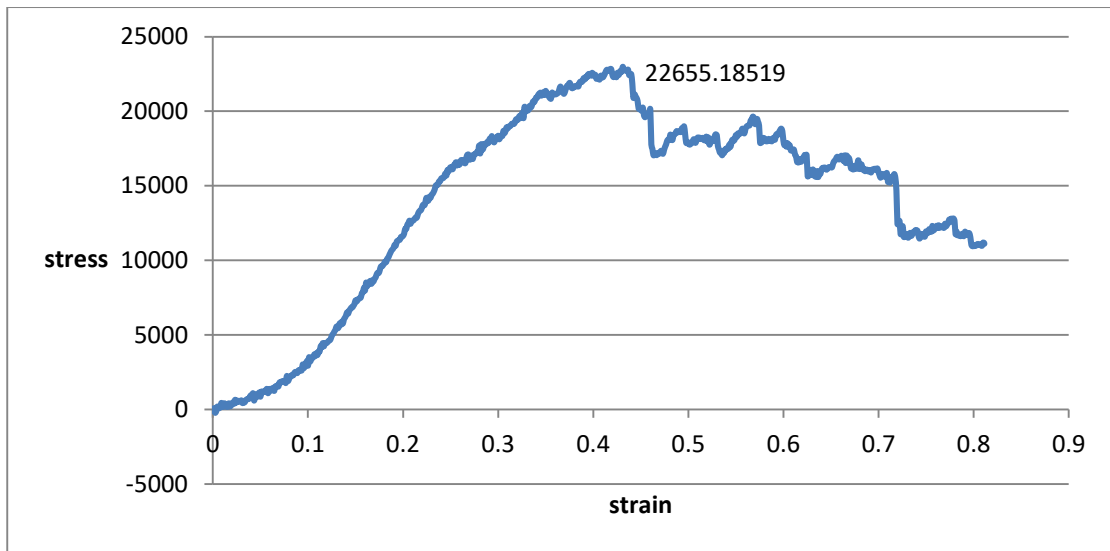
ภาพ ก - 20 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง Maximum Strength ของเงื่อนไข
(Condition) 80:0.5:0.5 ซ้ำ 2 ขั้นที่ 2 แบบใหม่



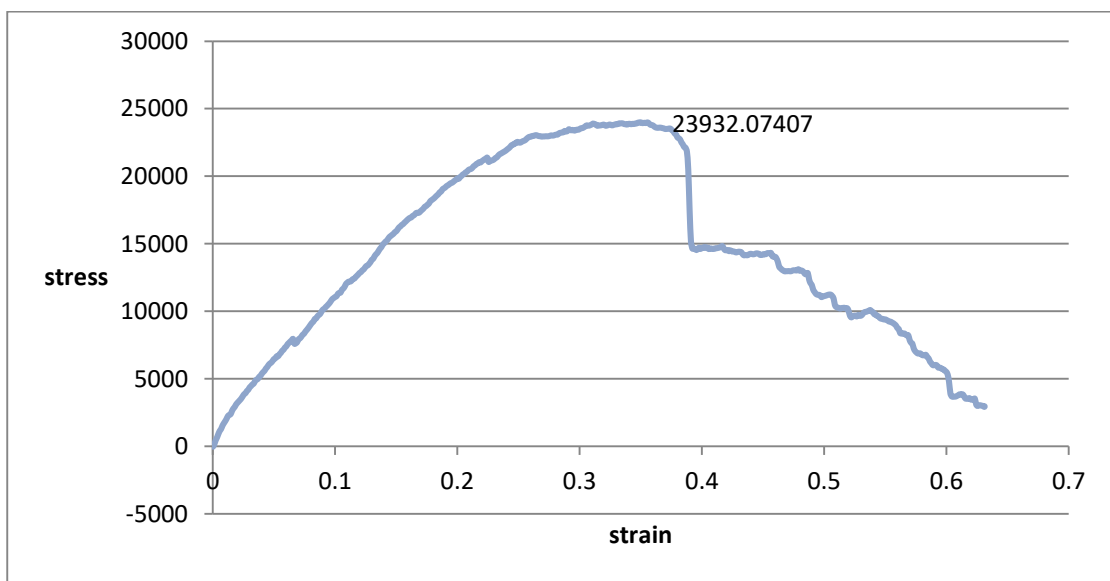
ภาพ ก - 21 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:0.5:1 ซ้ำ 1 ชั้นที่ 1 แบบใหม่



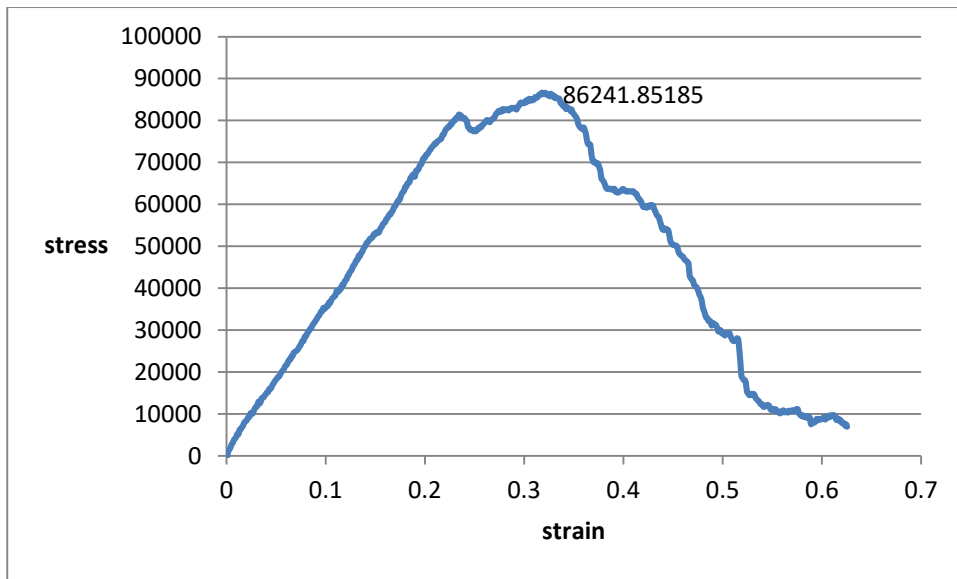
ภาพ ก - 22 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:0.5:1 ซ้ำ 1 ชั้นที่ 2 แบบใหม่



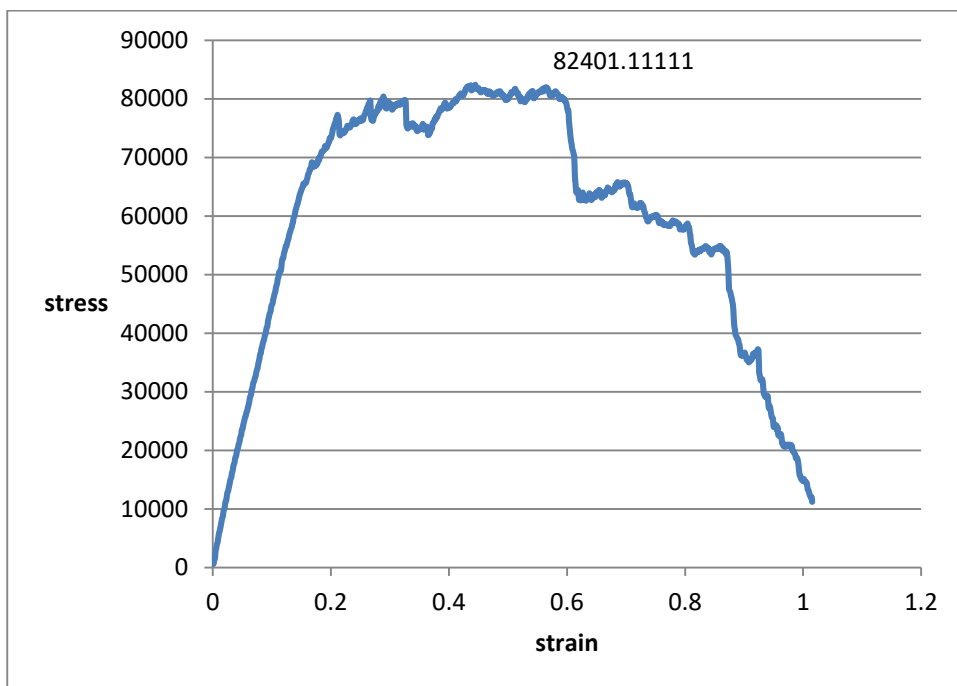
ภาพ ก - 23 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:0.5:1 ซ้ำ 2 ครั้งที่ 1 แบบใหม่



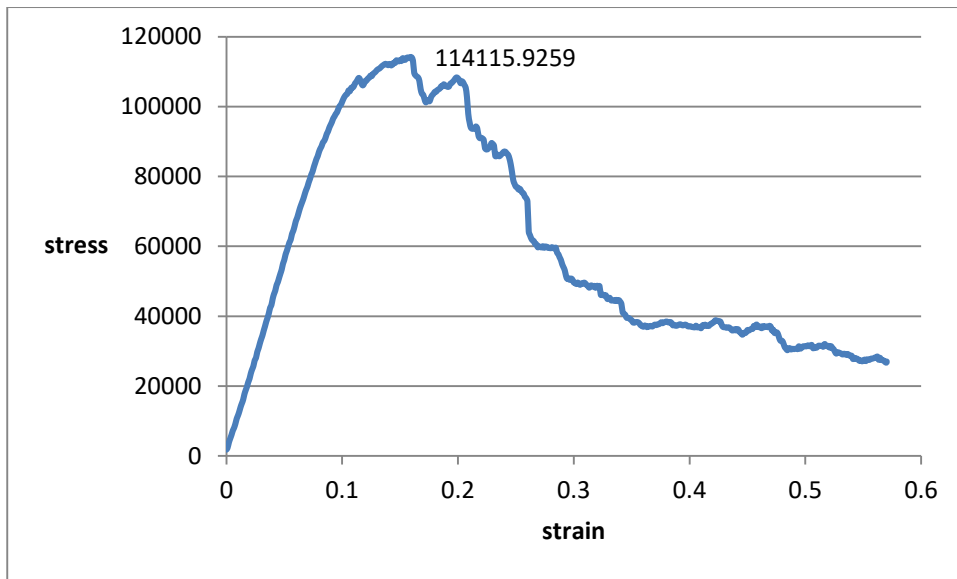
ภาพ ก - 24 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:0.5:1 ซ้ำ 2 ครั้งที่ 2 แบบใหม่



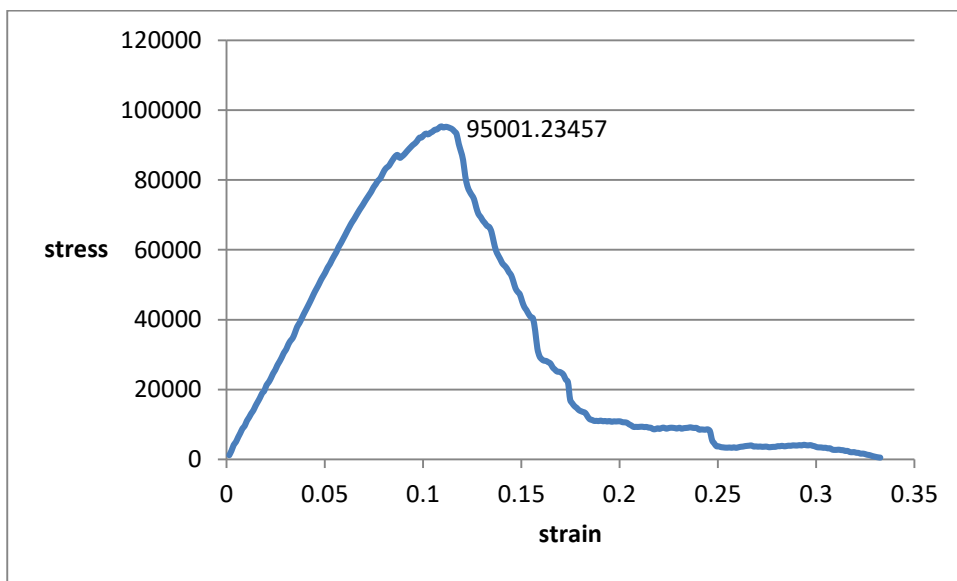
ภาพ ก - 25 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:1:1 ซ้ำ 1 ชั้นที่ 1 แบบใหม่



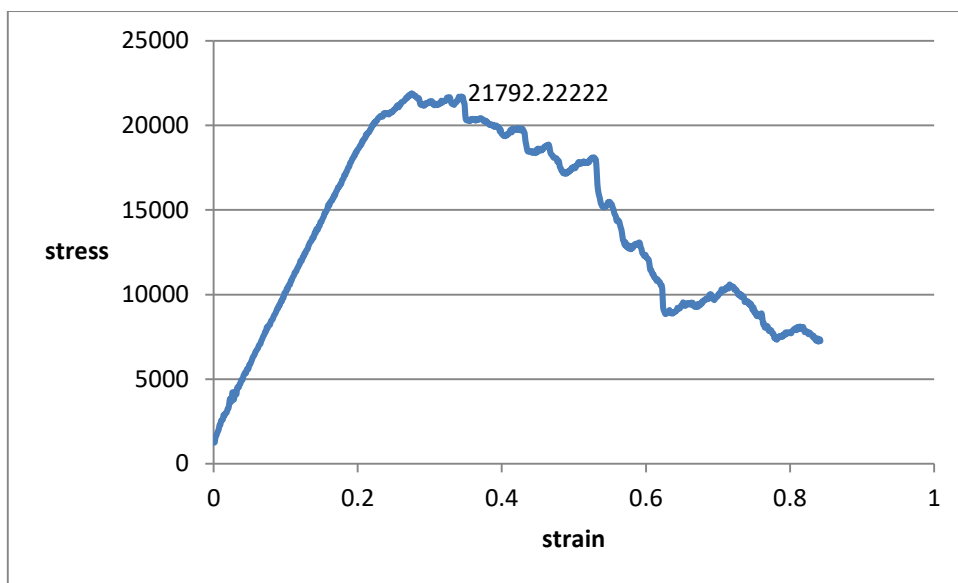
ภาพ ก - 26 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:1:1 ซ้ำ 1 ชั้นที่ 2 แบบใหม่



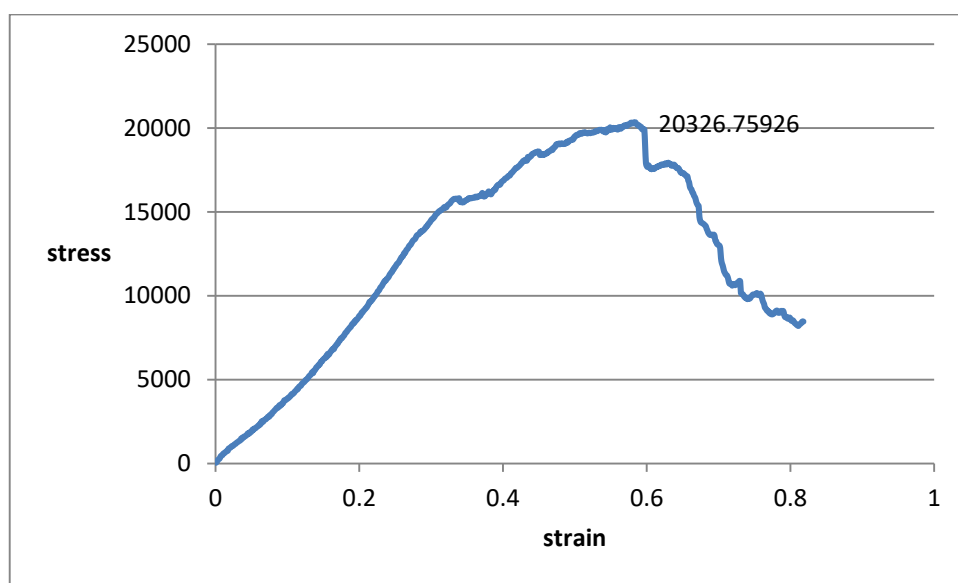
ภาพ ก - 27 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:1:1 ซ้ำ 2 ชั้นที่ 1 แบบใหม่



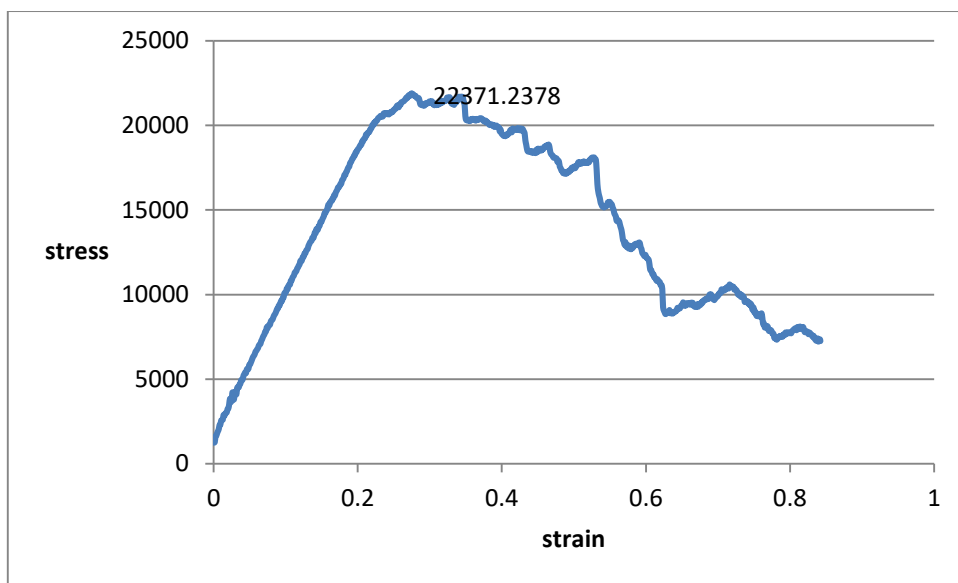
ภาพ ก - 28 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:1:1 ซ้ำ 2 ชั้นที่ 2 แบบใหม่



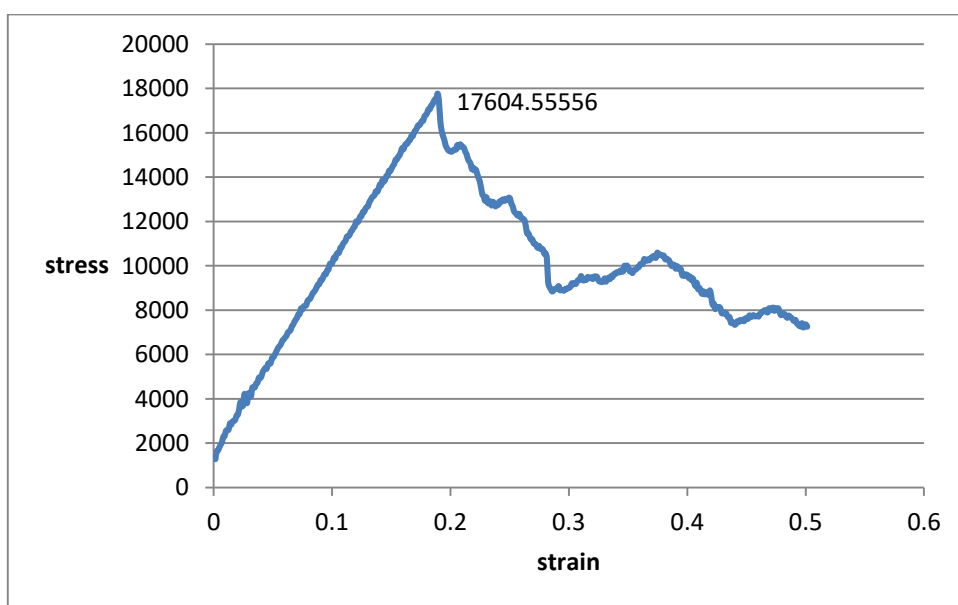
ภาพ ก - 29 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:1:0.5 ซ้ำ 1 ชั้นที่ 1 แบบใหม่



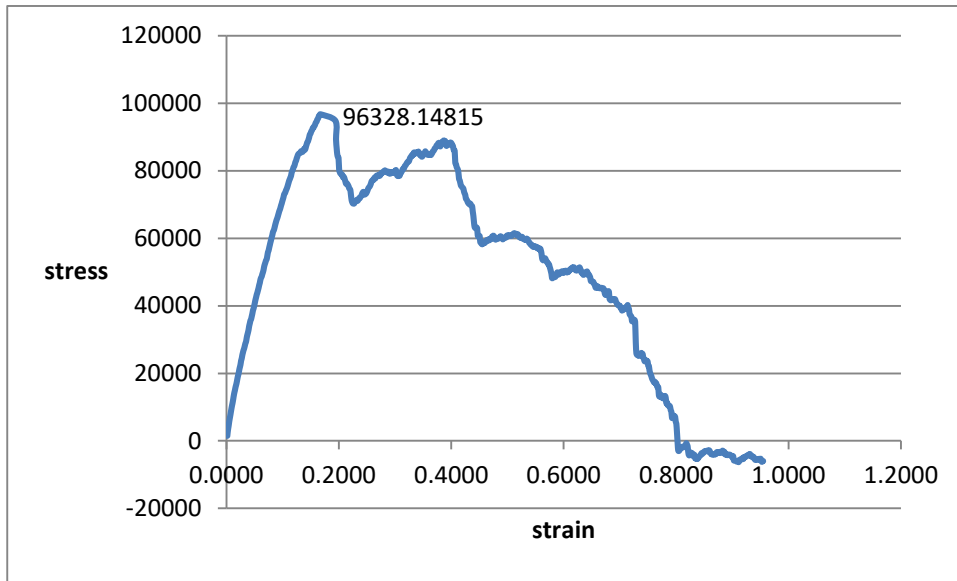
ภาพ ก - 30 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:1:0.5 ซ้ำ 1 ชั้นที่ 2 แบบใหม่



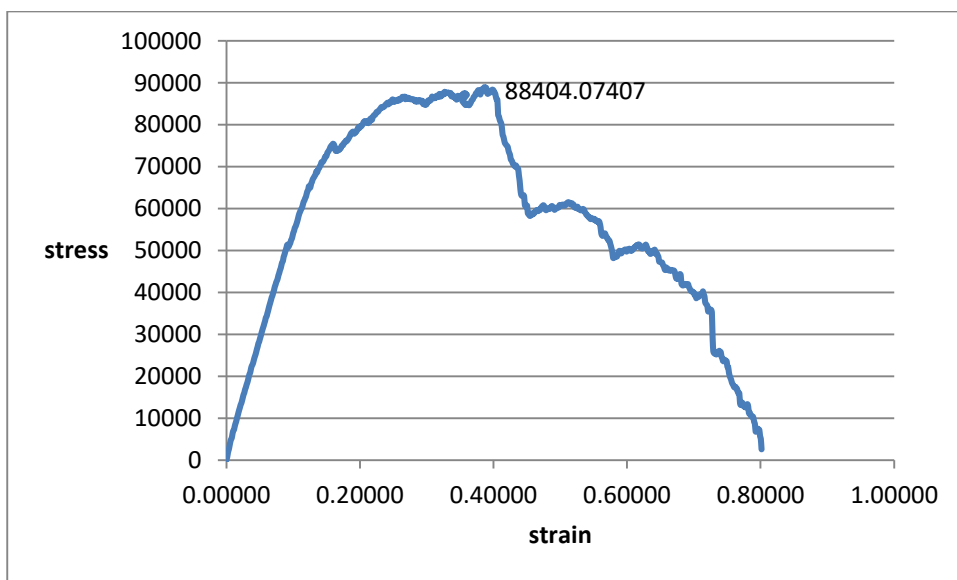
ภาพ ก - 31 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:1:0.5 ซ้ำ 2 ครั้งที่ 1 แบบใหม่



ภาพ ก - 32 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 80:1:0.5 ซ้ำ 2 ครั้งที่ 2 แบบใหม่



ภาพ ก - 33 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:1:1 ชั้นที่ 1 แบบเดิม



ภาพ ก - 34 กราฟแสดงค่าทดสอบแรงดึง (Maximum Strength) ของเงื่อนไข
(Condition) 70:1:1 ชั้นที่ 2 แบบเดิม

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นาย ณัฐชนนท์ ก้อนจันทร์

รหัสนักศึกษา 580612136

วัน เดือน ปี เกิด 9 เมษายน 2540

ที่อยู่ปัจจุบัน 12/4 ถ.เทวัญ อ.เมือง ต.ช้างเผือก จ.เชียงใหม่ 50300

ประวัติการศึกษา :

ระดับมัธยมปลายจาก โรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัยแผนกมัธยม จังหวัดเชียงใหม่

ปัจจุบัน ศึกษาในระดับอุดมศึกษา ชั้นปีที่ 5 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สถานที่ฝึกงาน บริษัท เคฮิน (ไทยแลนด์) จำกัด



ชื่อ นาย ภาวัต ดิยะพัฒนกุล

รหัสนักศึกษา 580612158

วัน เดือน ปี เกิด 8 มกราคม 2540

ที่อยู่ปัจจุบัน 180 หมู่ 5 ถ.พิษณุโลก – เด่นชัย ต.ป่าเป้า อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์ 53000

ประวัติการศึกษา :

ระดับมัธยมปลายจาก โรงเรียนมงฟอร์ตวิทยาลัยแผนกมัธยม จังหวัดเชียงใหม่

ปัจจุบัน ศึกษาในระดับอุดมศึกษา ชั้นปีที่ 5 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สถานที่ฝึกงาน บริษัท เคฮิน (ไทยแลนด์) จำกัด



