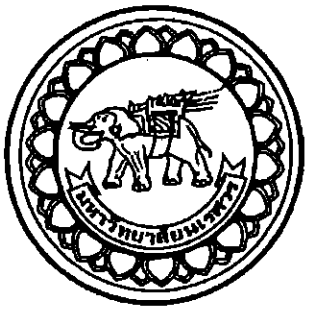


สมบัติเชิงกลและการพยากรณ์การเสื่อมสภาพของแผ่นพอลิโพรพิลีน ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ

MECHANICAL PROPERTIES AND DETERIORATION PREDICTION OF POLYPROPYLENE SHEET USING THE MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS

นางสาวมนุษยา มนประเสริฐ รหัส 52365145

นายอนุชา กงถัน รหัส 52365213

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 25 / มี.ค. / 57
เลขทะเบียน 16550149
เลขเรียกหนังสือ ม5.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ม/73 ส 2555

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2555

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน สมบัติเชิงกลและการพยากรณ์การเสื่อมสภาพของแผ่นพอลิโพรพิลีน ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ

ผู้ดำเนินโครงงาน นางสาวมนุษยา มนประเสริฐ รหัส 52365145

นายอนุชา กงถัน รหัส 52365213

ที่ปรึกษาโครงงาน ดร.นพวรรณ โม้ทอง

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2555

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....ที่ปรึกษาโครงงาน

(ดร.นพวรรณ โม้ทอง)

.....กรรมการ

(อาจารย์อาภาภรณ์ จันทร์ปิรักษ์)

.....กรรมการ

(ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์)

.....กรรมการ

(ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	สมบัติเชิงกลและการพยากรณ์การเสื่อมสภาพของแผ่นพอลิโพรพิลีน ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณ
ผู้ดำเนินโครงงาน	นางสาวมนุษยา มนประเสริฐ รหัส 52365145
	นายอนุชา กงถัน รหัส 52365213
ที่ปรึกษาโครงงาน	ดร.นพวรรณ โม้ทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2555

.....

บทคัดย่อ

ปัจจุบันแผ่นพีพี ชีท ถูกใช้งานอย่างหลากหลาย ทั้งงานด้านบรรจุภัณฑ์ และงานด้านโครงสร้างมากมาย ด้วยมีคุณสมบัติเด่น คือ การนำมาใช้งานทดแทนวัสดุอย่าง เช่น ไม้ กระดาษ และเนื่องจากตัวพีพี ชีทนั้นยังมีสมบัติพิเศษที่มีความเหนียวทนทานการแตกหักหรือฉีกขาด สามารถป้องกันการเสียหายจากแรงกระแทกและกันน้ำได้ ทนการกัดกร่อนจากสารเคมีและน้ำมัน จึงเหมาะกับการใช้งานเพื่อประโยชน์สูงสุดสำหรับธุรกิจอุตสาหกรรมและสถานประกอบการต่างๆ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิโพรพิลีนและนำแผ่นพอลิโพรพิลีนมาผ่านสภาพอากาศตามธรรมชาติ เป็นระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือน ในช่วงเดือนมีนาคม-ตุลาคม พ.ศ. 2555 การศึกษาสมบัติเชิงกลจะเน้นศึกษาสมบัติที่จำเป็นต่อการนำไปใช้งานประกอบด้วยสมบัติแรงดึง สมบัติแรงดัดโค้ง สมบัติแรงอัด และสมบัติแรงกระแทก โดยทำการทดสอบชิ้นงานทุกระยะเวลาจากการผ่านสภาพอากาศ และสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากผลการทดสอบจากนั้นเลือกค่าสมบัติทางกลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Minitab Version 16 เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสมบัติทางกลและสร้างสมการคณิตศาสตร์ที่ทำนายการเสื่อมสภาพที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

จากการศึกษาผลการทดสอบสมบัติทางกลพบว่าชิ้นงานแต่ละชิ้นมีค่าสมบัติทางกลเปลี่ยนไปตามระยะเวลาที่เกิดจากการย่อยสลายทางธรรมชาติ แต่ในระยะเวลา 6 เดือนหลังจากผ่านสภาพอากาศชิ้นงานยังคงมีความแข็ง ความเหนียวลดลง เมื่อคำนวณการลดลงของสมบัติทางกลพบว่า เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีค่าสมบัติทางกลลดลงร้อยละ 30-70 และเมื่อระยะเวลา 6 เดือน ค่าสมบัติทางกลลดลงร้อยละ 70-230 จากค่าสมบัติทางกลที่ลดลงของชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 และ 6 เดือนจะมีค่าสมบัติทางกลไม่เท่ากันตามขนาดพื้นที่หน้าตัด และความหนาของแต่ละชิ้นงาน ดังนั้นตัวแปรที่เน้นศึกษาเพื่อการพยากรณ์การเสื่อมสภาพจากการนำไปใช้งานจึงเลือก ศึกษาตัวแปรต้น คือ ระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศ ขนาดพื้นที่หน้าตัดและความหนา

ส่วนตัวแปรตามคือ ค่าสมบัติทางกลเนื่องจากระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศ ขนาดพื้นที่หน้าตัด และความหนา มีผลต่อค่าสมบัติทางกล จากตัวแปรดังกล่าวที่นำมาสร้างสมการถดถอยแบบพหุคูณ จะเลือกจากสมบัติแรงดัดโค้ง เนื่องจากชิ้นงานทั้งหมดถูกทดสอบผ่านสมบัติ และสมบัติแรงดัดโค้งเป็นสมบัติพื้นฐานที่สุดที่จำเป็นต่อการนำไปใช้งาน เมื่อทำการสร้างสมการถดถอยพหุคูณ มีค่า R-sq อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 75-95

จากการศึกษาสมบัติทางกลทั้งหมดของ พีพี ซีท และทำการสร้างสมการถดถอยแบบพหุคูณจากการทดสอบสมบัติแรงดัดโค้ง ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลของชิ้นงาน เมื่อนำมาผ่านสภาพอากาศ ปัจจัยที่มีผลคือรูปแบบโปรไฟล์ของชิ้นงานและขนาดความหนาของชิ้นงาน

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของหลายๆ ฝ่าย โดยเฉพาะ ดร. นพวรรณ โม้ทอง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา แนะนำวิธีการ แก้ปัญหา รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนความดูแลเอาใจใส่ ติดตามการดำเนินโครงงานมาโดยตลอดผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ที่ดีเยี่ยม และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ ยังต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์อาภาภรณ์ จันทร์ปิรักษ์ ดร.อิศราวุธ ประเสริฐสังข์ ดร.ภมรรัตน์ จันธรรม ที่กรุณาสละเวลา เป็นอาจารย์สอบโครงงาน พร้อมทั้งให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงงานนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ศิริกาญจน์ ขันสัมฤทธิ์ ครูช่างประเทือง โมราราย ครูช่างอิสรีย์ วัตถุภาพ ที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำโครงงาน อีกทั้งยังคอยแนะนำการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆอย่างถูกต้องอีกด้วย

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงงานใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้การดูแล อบรม สั่งสอน และคอยเป็นแรงบันดาลใจและเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยมีความมุมานะในการศึกษาปริญญาตรีครั้งนี้ และคอยสนับสนุนการเรียนและการดำเนินโครงงานจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิศวกรรม
นางสาวมนุษยา มนประเสริฐ
นายอนุชา กงถัน

เมษายน 2556

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์.....ก

บทคัดย่อ.....ข

กิตติกรรมประกาศ.....ง

สารบัญ.....จ

สารบัญตาราง.....ช

สารบัญรูป.....ซ

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....ญ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....2

1.3 ขอบเขตการดำเนินโครงงาน.....2

1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงงาน.....2

1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงงาน.....2

1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....7

2.3 การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์.....14

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงงาน.....29

3.1 แผนการดำเนินงาน.....29

3.2 การเตรียมชิ้นงานจากพีพี ซีท.....30

3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....31

3.4 ขั้นตอนการทดสอบชิ้นงาน.....35

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....41

4.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล.....41

4.2 การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์.....60

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... 96
5.1 บทสรุป..... 96
5.2 ข้อเสนอแนะ.....102
5.3 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ปัญหา.....103

เอกสารอ้างอิง.....104

ภาคผนวก ก 107
ภาคผนวก ข 111
ภาคผนวก ค 116

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1-1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน (Gantt Chart).....3

2-1 การหาค่า F-test.....16

3-1 แสดงขนาดของชิ้นงานในการทดสอบแรงดึง.....32

3-2 แสดงขนาดของชิ้นงานในการทดสอบแรงอัด.....33

3-3 แสดงขนาดของชิ้นงานในการทดสอบแรงกระแทก.....34

3-4 แสดงขนาดของชิ้นงานในการทดสอบแรงดัดโค้ง.....34

3-5 แสดงระยะที่ใช้รับแรงกดหรือระยะวัดของความหนาขนาดต่างๆ.....40

4-1 ตารางแสดงชิ้นงานทดสอบ.....41

4-2 ตารางเปรียบเทียบการสร้างสมการถดถอยพหุคูณ ของชิ้นงานที่มีความหนา 10 มม. 61

4-3 ตารางเปรียบเทียบการสร้างสมการถดถอยพหุคูณ ของชิ้นงานที่มีความหนา 16, 18 มม. 61

4-4 ตารางแสดงค่าผลการวิเคราะห์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10TE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] 64

4-5 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดวงรี [10TE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] 68

4-6 แสดงผลลัพธ์จากการแทนค่าสมการถดถอยของชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดวงรี [10TE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS].....69

4-7 ตารางแสดงค่าผลการวิเคราะห์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10AE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS].....72

4-8 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดวงรี [10AE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS].....76

4-9 แสดงผลลัพธ์จากการแทนค่าสมการถดถอยของชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดวงรี [10AE] และ ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS].....78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4-10 ตารางแสดงค่าผลการวิเคราะห์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [16TR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [18TR].....81

4-11 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [16TR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [18TR].....84

4-12 แสดงผลลัพธ์จากการแทนค่าสมการถดถอยของชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [16TR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [18TR].....86

4-13 ตารางแสดงค่าผลการวิเคราะห์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [16AR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [18AR].....89

4-14 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [16AR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [18AR].....92

4-15 แสดงผลลัพธ์จากการแทนค่าสมการถดถอยของชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [16AR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [18AR].....94

5-1 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าสมบัติแรงดึง จากการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน.....97

5-2 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าสมบัติแรงดัดโค้ง จากการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน.....98

5-3 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าสมบัติแรงดัดอัด จากการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน.....99

5-4 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าสมบัติแรงกระแทก จากการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน.....99

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดจากงานวิจัยของ A. Mashael.....4

2-2 แสดงภาพการย่อยสลายภายในโปรไฟล์ของชิ้นงานที่มีความลึกถึง 3 มม. 5

2-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงโค้งงอจาก งานวิจัย L. Bedia.....6

2-4 แสดงลักษณะโครงสร้างขอพอลิโพรพิลีนทิศทางการจับของหมู่เอธิลกับอะตอมคาร์บอน.....9

2-5 สูตรทางเคมี $(C_3H_6)_n$.....10

2-6 แสดงสัญลักษณ์ตัวเลขที่เป็นสากลของพอลิโพรพิลีน.....10

2-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด.....12

2-8 แสดงรูปแบบความเค้นต่างๆ.....13

2-9 แสดงรูปแบบความเครียดทั้ง 3 แบบ.....13

2-10 กรอบแนวคิดการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเกณฑ์ (Y) กับตัวพยากรณ์ (X) 19

2-11 สมการเส้นตรงของการถดถอยเมื่อ b มีค่าแตกต่างกัน.....27

3-1 แผนภาพไดอะแกรมการดำเนินงาน.....29

3-2 ลักษณะชิ้นงานที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....30

3-3 ลักษณะชิ้นงานที่มีหน้าตัดเป็นวงรี.....30

3-4 ลักษณะชิ้นงานที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมพื้นผ้าซ้อนกัน.....31

3-5 แสดงส่วนประกอบของขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....32

3-6 แสดงส่วนประกอบของขนาดชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก.....33

3-7 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) สำหรับทดสอบแรงดึง.....35

3-8 รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึง.....35

3-9 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) สำหรับทดสอบแรงอัด.....36

3-10 รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงอัด.....37

3-11 เครื่องทดสอบแรงกระแทกสำหรับพลาสติก.....38

3-12 รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงกระแทก.....38

3-13 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) สำหรับทดสอบดัดโค้ง.....39

3-14 รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ทดสอบสมบัติแรงดึง.....39

4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความแข็งแรงดึง.....42

4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่ามอดูลัสแรงดึง.....42

4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืดหยุ่น.....43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความแข็งแรงอัด....46

4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าการกระแทก....47

4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่ามอดูลัสความโค้งงอ....49

4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความแข็งแรงโค้งงอ....55

4-8 แผนภูมิกราฟแสดงส่วนตกค้างของข้อมูลค่าความแข็งแรงโค้งงอชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10TE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS]....62

4-9 แผนภูมิแสดงผลจากปัจจัยหลักของชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดวงรี [10TE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส....65

4-10 แผนภูมิแสดงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของชิ้นงานความหนา 10 มม. ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10TE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป....66

4-11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงโค้งงอจากสมการพยากรณ์ ผลการทดลองงานวิจัย L. Bedia ของชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10TE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] 69

4-12 แผนภูมิกราฟแสดงส่วนตกค้างของข้อมูลค่าความแข็งแรงโค้งงอ ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10AE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS]....71

4-13 แผนภูมิแสดงผลจากปัจจัยหลักของชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10AE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS]....73

4-14 แผนภูมิแสดงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดวงรี [10AE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS]....75

4-15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงโค้งงอจากสมการพยากรณ์ ผลการทดลองและงานวิจัยของ L.Bedia ของชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10AE] และชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS].....78

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4-16 แผนภูมิกราฟแสดงส่วนตกค้างของข้อมูลค่าความแข็งแรงโค้งงอชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....79

4-17 แผนภูมิแสดงผลจากปัจจัยหลักของชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....82

4-18 แผนภูมิแสดงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18TR].....83

4-19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงโค้งงอจากสมการพยากรณ์ ผลการทดลองและงานวิจัย L. Bedia ของชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18TR].....86

4-20 แผนภูมิกราฟแสดงส่วนตกค้างของข้อมูลค่าความแข็งแรงโค้งงอ ชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16AR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18AR].....87

4-21 แผนภูมิแสดงผลจากปัจจัยหลักของชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16AR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18AR].....90

4-22 แผนภูมิแสดงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยของชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16AR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18AR].....91

4-23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงโค้งงอจากสมการพยากรณ์ ผลการทดลองและงานวิจัย L.Bedia ของชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16AR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18AR].....94

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

PP	=	พอลิโพรพิลีน
KPa	=	กิโลปาสคาล
MPa	=	เมกะปาสคาล
KN	=	กิโลนิวตัน
J	=	จูล (พลังงานหน่วยจูล)
10TE	=	ชิ้นงานความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดแบบวงรี
10AE	=	ชิ้นงานความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบวงรี
10TS	=	ชิ้นงานความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส
10AS	=	ชิ้นงานความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส
16TS	=	ชิ้นงานความหนา 16 มิลลิเมตร ตัดตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมพื้นผ้า
16AS	=	ชิ้นงานความหนา 16 มิลลิเมตร ตัดตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมพื้นผ้า
18TR	=	ชิ้นงานความหนา 18 มิลลิเมตร ตัดตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมพื้นผ้า
18AR	=	ชิ้นงานความหนา 18 มิลลิเมตร ตัดตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมพื้นผ้า

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

พอลิโพรพิลีนชีท (Polypropylene Sheet) หรือแผ่นฟิวเจอร์บอร์ด เป็นแผ่นพลาสติกแข็งขึ้นรูปจากพอลิโพรพิลีน มีลักษณะคล้ายกับกระดาษลูกฟูก ซึ่งเป็นลักษณะแผ่นพลาสติกประกบกันสองข้าง และตรงกลางเป็นสันและเป็นช่องว่างสลับกันไปโดยลักษณะของช่องว่างและขนาดของช่องว่างหรือความหนาของสินค้านั้นก็มีลักษณะแตกต่างกันไปตามแต่ผู้ผลิต เรียกได้หลายแบบ [28] เพื่อให้การสื่อสารเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ในการทำการศึกษาความสามารถทางกลของแผ่นฟิวเจอร์บอร์ดชนิดพอลิโพรพิลีน ในครั้งนี้จึงขอใช้คำแทนวัสดุของในการทำการศึกษาว่า "พอลิโพรพิลีนชีทหรือพีพีชีท" (Polypropylene Sheet : PP Sheet)

พีพีชีท นั้นมีคุณสมบัติเด่น คือการนำมันมาใช้งานทดแทนวัสดุอย่างเช่น ไม้ กระดาษ และเนื่องจากตัวพีพีชีทนั้นยังมีสมบัติพิเศษที่มีความเหนียวทนทานการแตกหักหรือฉีกขาด สามารป้องกันการเสียหายจากแรงกระแทกและยังกันน้ำได้ ทนการกัดกร่อนจากสารเคมีและน้ำมัน ทั้งนี้ยังมีน้ำหนักเบาเหมาะกับการเคลื่อนย้ายขนส่งและทำความสะอาดง่าย สามารถพิมพ์สกรีนได้ ปลอดสารพิษอันตรายและสามารถปั๊มตัดขึ้นรูปได้มีสีสันสวยงามให้เลือกหลากสี [18] นอกจากนี้ยังมีกาประยุกต์ใช้พีพีชีท โดยการนำมาพัฒนาได้หลากหลายรูปแบบตามลักษณะการบรรจุสินค้าเพื่อป้องกันไม่ให้สินค้าเกิดการเสียหาย ในกรณีพิเศษสามารถเสริมโฟมเพื่อป้องกัน การกระแทกตามความเหมาะสมของการผลิตเคลื่อนย้าย ขนส่ง จัดเก็บและยังช่วยการบรรจุสินค้าแต่ละขนาดและรูปแบบตามลักษณะการใช้งานเพื่อประโยชน์สูงสุดสำหรับธุรกิจอุตสาหกรรมและสถานประกอบการต่างๆ [7]

ดังนั้นเมื่อมีการใช้ พีพีชีท กันอย่างแพร่หลายมาก เราจึงต้องมีการทำการทดสอบสมบัติทางกลคือความสามารถในการทนต่อแรงกระทำต่างๆ เพื่อจะได้เป็นแนวทางในการเลือกขนาดและชนิดให้เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของชิ้นงานต่อไป

ทางคณะผู้จัดทำจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาสมบัติเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์พลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนแบบชีท เพื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติทางกล ไปสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ และเพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการทำนายถึงอายุการใช้งานเพื่อให้เหมาะกับงานที่จะนำแผ่นพีพีชีทไปใช้ได้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 ศึกษาและทดสอบสมบัติทางกล ซึ่งได้แก่ทดสอบสมบัติแรงดึง ทดสอบสมบัติแรงอัด ทดสอบสมบัติแรงกระแทก และทดสอบสมบัติแรงดัดโค้ง ออกแบบชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM (American Society for the Testing of Materials)

1.2.2 ศึกษาและออกแบบจำลองความสัมพันธ์ที่แสดงถึงค่าความสัมพันธ์ของสมบัติทางกลที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับเวลาที่ได้จากการทดสอบชิ้นงาน

1.3 ขอบเขตในการดำเนินโครงงาน

1.3.1 ตัวแปรควบคุม

1.3.1.1 ลักษณะของชิ้นงานที่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM

1.3.2 ตัวแปรต้น

1.3.2.1 ระยะเวลาและอุณหภูมิที่นำไปตากตามสภาพอากาศ (Weathering)

1.3.2.2 ลักษณะของพื้นที่หน้าตัด และความหนา

1.3.3 ตัวแปรตาม

1.3.3.1 ค่าของสมบัติทางกลที่ได้ที่มีการเปลี่ยนแปลงไป

1.4 สถานที่ในการดำเนินโครงงาน

1.4.1 อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยา**ลัยนเรศวร**

1.4.2 อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยา**ลัยนเรศวร**

1.5 ระยะเวลาในการดำเนินโครงงาน

ตั้งแต่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2555 ถึง 30 เมษายน พ.ศ. 2556

1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน

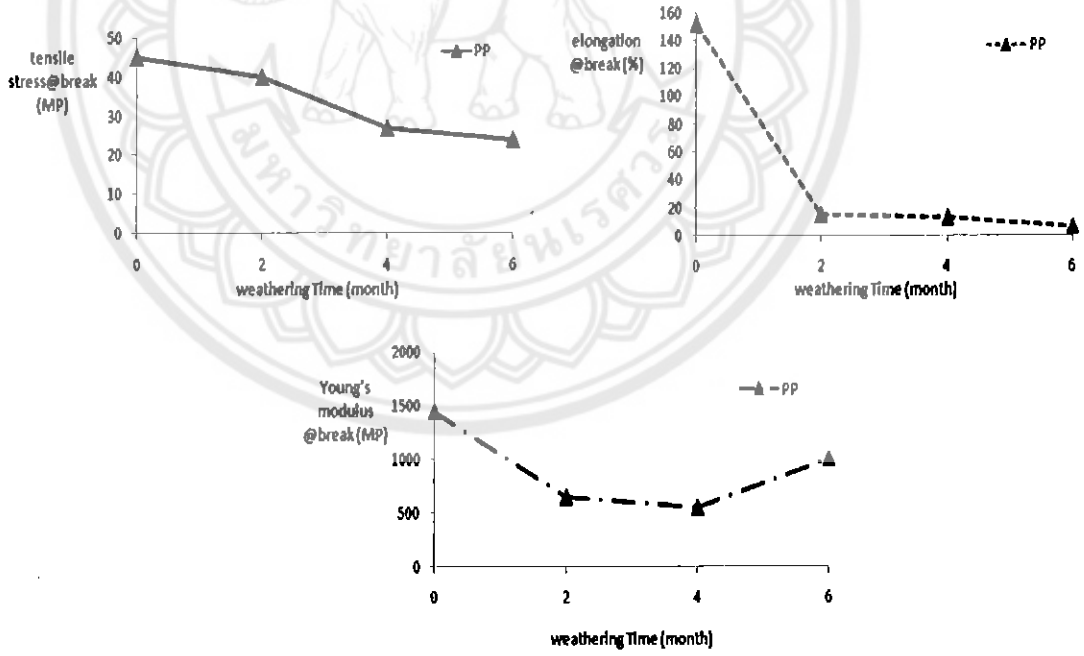
	การดำเนินโครงงาน	ช่วงเวลา											
		มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	
1.6.1	ทดสอบชิ้นงานเพื่อหา Condition ที่เหมาะสม												
1.6.2	ทดสอบชิ้นงาน												
1.6.3	ทดสอบชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศต่างๆ เป็นเวลา 3 เดือน												
1.6.4	ทดสอบชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศต่างๆ เป็นเวลา 6 เดือน												
1.6.5	ทำการคำนวณค่าคุณสมบัติเชิงกลต่างๆ												
1.6.6	ทำการศึกษาหาค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อใช้ในการทำสมการ												
1.6.7	จัดการสร้างสมการทำนายผลค่าความ-สัมพันธ์ที่ได้เพื่อทำนายค่าของแนวโน้มคุณสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไป												
1.6.8	จัดทำรูปเล่มรายงานการศึกษา												

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 งานวิจัย

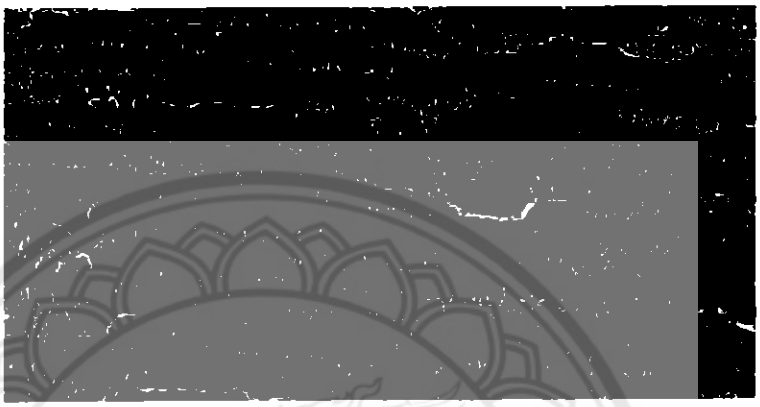
A. Mashael (2011) [23] ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติบนพอลิโพรพิลีน จากสมบัติทางสัณฐานวิทยาและสมบัติทางกล ในกลุ่มตัวอย่างของพอลิโพรพิลีนที่ถูกผลิตขึ้นมาโดยการฉีดขึ้นรูปและนำกลุ่มตัวอย่างบางส่วนที่เตรียมไว้ไปผ่านสภาพอากาศ จากนั้นทำการศึกษาโดยเครื่องอินฟราเรต FT-IR และการส่องด้วยกล้อง SEM เพื่อมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง พบว่าเมื่อชิ้นงานผ่านสภาพอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง เกิดการผุกร่อน เนื่องจากออกซิเดชันเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น และจากนั้นได้ทำการทดสอบสมบัติทางกล โดยทำการศึกษา ความเค้นที่จุดขาด การยืดตัวที่จุดขาด และยังมอดูลัสยืดหยุ่น จากผลการทดสอบสมบัติแรงดึง ดังรูปที่ 2-1 เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศพบว่า ค่าความเค้นและการยืดตัวที่จุดขาด มีค่าลดต่ำลงเมื่อระยะเวลามากขึ้น และส่วนค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น มีค่าลดลงในช่วงแรก หลังจากระยะเวลา 2 เดือน พบว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 2-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว และมอดูลัสยืดหยุ่น ณ จุดขาด [23]

J. Turton and J.White (2001) [22] ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเสื่อมสภาพของชิ้นงาน และโครงสร้างแบบโปรไฟล์ของพอลิโพรพิลีนที่เกิดการย่อยสลายที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ก่อนเป็นส่วนแรก จากนั้นเข้าสู่โครงสร้างของพอลิเมอร์โดยแสดงเป็นภาพการเกิดออกซิเดชัน ภายใต้เงื่อนไขจากการนำ

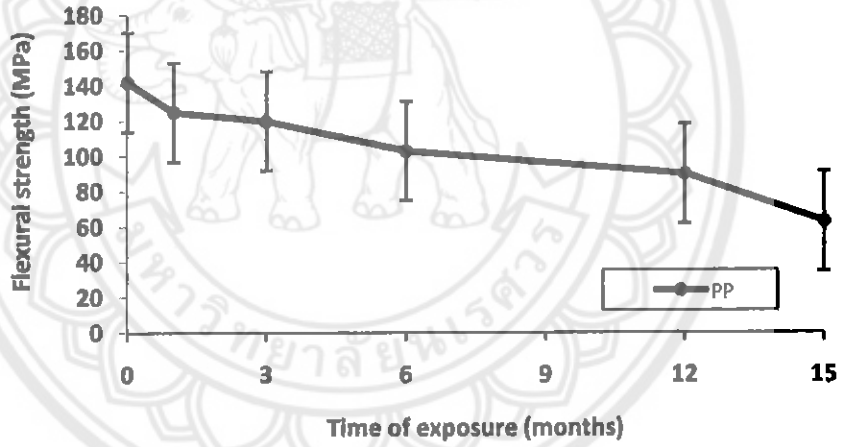
ชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศจริงและเครื่องจำลองสภาพอากาศ เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของรังสี-อัลตราไวโอเรต (UV) ที่ส่งผ่านพอลิเมอร์และปริมาณความชื้นสัมพันธ์ของสภาพอากาศในแต่ละวัน โดยที่ออกซิเจนจะเป็นตัวทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเนื้อพอลิโพรพิลีนซึ่งจะก่อให้เกิดการย่อยสลาย ที่ส่งผลต่อการยืดเกาะภายในโมเลกุลของเนื้อพอลิโพรพิลีน โดยแสดงการสลายโปรไฟล์เชิงลึกดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 แสดงภาพการย่อยสลายภายในชิ้นงานที่มีความลึกถึง 3 มม. [22]

K. Rajakumar และคณะ (2009) [14] ศึกษาผลจากการผ่านสภาพอากาศของพอลิโพรพิลีน PP ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการย่อยสลายในฤดูร้อนและฤดูหนาว และทำทดสอบสมบัติเชิงกล ประกอบด้วย สมบัติความต้านทานแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และสมบัติทางสัณฐานวิทยาที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM จากนั้นทำนายอายุการใช้งานโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนการนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศ ตัวอย่างชิ้นงานพอลิโพรพิลีน PP จะถูกนำไปวางไว้บนแผ่นกระจกแก้วและเปิดให้มีการสัมผัสโดยตรงกับสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ ในประเทศอินเดีย ที่มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปี ประมาณ 60-80 ซม. อุณหภูมิทั้งปีเฉลี่ยสูงกว่า 27.5 °C ผลจากการผ่านสภาพอากาศ พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาด เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กๆน้อยในระยะเวลา 30 วันแรก จากนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงของการยืดตัว ณ จุดขาด อย่างกะทันหัน ที่ระยะเวลา 50 วัน หลังจากนั้นการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงอย่างรวดเร็ว และเกิดความแตกหักที่เกิดขึ้น ในระยะ 65 วัน และการยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าศูนย์ที่ระยะเวลาประมาณ 70 วัน ส่วนความแข็งแรงดึงการผุกร่อนเกิดในฤดูร้อนและฤดูหนาว ซึ่งทุกฤดูเกิดการการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงดึงในช่วงแรกของการผุกร่อน และเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อวัสดุเกิดความเปราะ สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา พบว่าในระยะเวลา 20-40 วันแรกของการผ่านสภาพอากาศชิ้นงานมีพื้นผิวเรียบโดยไม่มีรอยแตก แต่หลังจากระยะ 40 วันหลังเกิดรอยแตกที่พื้นผิวเนื่องจากสายโซ่หลักเกิดการแตกตัว และการทำนายอายุการใช้งานของ PP ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายช่วงชีวิตของ PP ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยทั้งหมดที่มีผลและทำการประมวลผลเพื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS ที่สร้างสมการขึ้นทั้งช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาว

L. Bedia และคณะ (2001) [13] ทำการศึกษาแผ่นพีพีที่มีการจัดเรียงตัวของหมู่เมธิลแบบไอโซเทคติคโดยแผ่นพีพีมีความหนา 2 มิลลิเมตร นำไปผ่านสภาพอากาศตามธรรมชาติเป็นเวลา 15 เดือนที่ประเทศฟิลิปปินส์ จากนั้นทำการทดสอบสมบัติเชิงกล และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงไปของชั้นผิวของแผ่นพีพีด้วยเครื่อง Optical Microscopy เครื่อง Scanning Electron Microscopy และเครื่อง Atomic Force Microscopy เพื่อทำการส่องดูชั้นผิว (ความหนาประมาณ 200-300 นาโนเมตร) โดยผลที่ได้คือในเดือนแรกเกิดผลกระทบต่อชิ้นงาน และรอยแตกที่เกิดขึ้นนั้นจะลึกลงไปยังชั้นที่ลึกลงไป การสังเกตผลนั้นทำโดยกล้องจุลทรรศน์พร้อมกับเครื่อง FTIR เครื่อง DSC และเครื่อง GPC พร้อมทั้งทำการวัดความต้านทานแรงดึง และแรงดัดโค้งงอร่วมกับกลไกการย่อยสลายของ PP ถูกนำเสนอด้วยวิธีแรกคือการผ่านออกซิเจนเข้าสู่พีพี ที่พื้นผิวเพียงอย่างเดียวและดูเหมือนว่าจะเกิดผลกระทบต่อพีพีอย่างค่อยๆเป็นไปทีละชั้นผิวจากนั้นสายโซ่โมเลกุลของชั้นผิวด้านในจะเริ่มต้นถูกสลายแล้วมาพร้อมกับการสูญเสียที่สำคัญของคุณสมบัติต้านทานแรงดึงเป็นส่วนหนึ่งของชิ้นงานที่ย่อยสลายดูเหมือนว่าจะถูกกัดเซาะนำไปสู่การก่อตัวของรอยแตกบนพื้นผิวของเปลือกชั้นในที่เปลือยเปล่าออกในที่สุดชั้นผิวเดิมอาจถูกกัดเซาะโดยสิ้นเชิงทำให้โครงสร้างของชั้นในอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 2-3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงโค้งงอ [13]

P.Phulkerda และคณะ (2011) [21] ทำการศึกษาแผ่นอัด PP แบบที่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวแบบเรียงตัว Isotactic โดยที่มีการทดสอบค่า Tensile โดยการตัดแล้วออกแรงดึงโดยส่วนที่ออกแรงดึงนั้นมีสองลักษณะ คือ ตามแนวทิศทางของที่ขึ้นรูปไว้ (MD) กับขวางช่องที่ขึ้นรูปไว้ (TD) โดยใช้เครื่องมือในการตรวจวัดวิเคราะห์ผลแบบ anisotropy คือสมบัติการไหลแบบทิศทาง โดยทำการทดสอบค่าTensile ในที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูงผลที่ได้นั้นคือในการทดสอบแรงดึงนั้นค่ายังมอดูลัสและมีค่าความเค้น ณ จุดคราก Yield Stress ใน MD สูงกว่าใน TD แต่ ณ ที่อัตราการการเปลี่ยนแปลงความเครียดสูง Strain Rate นั้นค่าของ TD กลับสูงกว่าของ MD อย่างเห็นได้ชัด

ณัฐสุดา และวราภรณ์ (2553) [19] ทำการศึกษาผลกระทบจากการขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนจากยางธรรมชาติ ที่ทำการศึกษาค่าความทนทานต่อแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดหยุ่น โดยทำการเลือกทั้ง 2 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิและระยะเวลา ในการอัดขึ้นรูปที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืดหยุ่น จากการประมวลผลและวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab Version 16 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ปัจจัยมีความสัมพันธ์กัน ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์ยืดหยุ่นที่เพิ่มสูงขึ้นหรือลดลง จากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression) ได้สมการความสัมพันธ์ในรูปแบบเชิงเส้นตรง แบบพหุคูณ และนำสมการที่ได้นี้ไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีความต้องการยืดหยุ่นสูง

2.2 ทฤษฎีพอลิเมอร์

2.2.1 พอลิเมอร์ (Polymer) [2, 10]

พอลิเมอร์ที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรมส่วนมากได้มาจากการสังเคราะห์โดยกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลขนาดเล็กมาเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ด้วยพันธะโควาเลนต์จนเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่และยาวขึ้น โมเลกุลขนาดเล็กที่เป็นตัวเริ่มต้นเรียกว่า โมโนเมอร์ (Monomer) ซึ่งมาจากคำสองคำจากภาษากรีกคือ คำว่า โมโน (Mono) ที่แปลว่า หนึ่ง และ เมรัส (Meros) ที่แปลว่า ส่วน (Part) รวมกันแล้วจึงมีความหมาย เป็นส่วนเดียว หน่วยเดียวหรือหน่วยย่อย โมโนเมอร์ที่มาต่อกันเป็นสายโซ่ยาวเรียกว่าพอลิเมอร์ ซึ่งมาจากภาษากรีก 2 คำ คือ โพลิส (Polys) แปลว่าหลายๆ หรือมาก และ เมรัส (Meros) แปลว่าหน่วยหรือส่วนประกอบ ดังนั้นเมื่อนำคำทั้งสองคำมารวมกัน พอลิเมอร์จึงหมายถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่ประกอบไปด้วยหน่วยที่ซ้ำๆ กัน ที่เรียกว่า เมอร์หรือโมโนเมอร์จำนวนมาก ดังนั้น ชื่อของพอลิเมอร์ต่างๆ จึงมักมีคำว่า พอลิ- และตามด้วยชื่อของโมโนเมอร์ที่ประกอบอยู่ในโครงสร้าง

2.2.2 พลาสติก (Plastic) [1, 4]

พลาสติก หมายถึง พอลิเมอร์ที่มีการผสมสารเติมแต่งต่างๆลงไปผสมเข้าด้วยกันเพื่อให้พอลิเมอร์บริสุทธิ์นั้นมีสมบัติที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตหรือการใช้งานเพิ่มมากขึ้น เช่น ผงสี สาร-หน่วงการติดไฟเป็นต้น โดยที่พลาสติกนั้นเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นใช้แทนวัสดุธรรมชาติ บางชนิดเมื่อเย็นก็แข็งตัว เมื่อถูกความร้อนก็อ่อนตัว บางชนิดแข็งตัวถาวร มีหลายชนิด เช่น ไนลอน ยางเทียม ใช้ทำสิ่งต่างๆ เช่น เสื้อผ้า ฟิล์ม ภาชนะ ส่วนประกอบเรือหรือรถยนต์ในอดีตวัสดุดั้งเดิมที่มนุษย์คุ้นเคยและใช้ในชีวิตประจำวันล้วนเป็นวัสดุจากธรรมชาติทั้งสิ้นไม่ว่าจะเป็นแก้ว ไม้ กระดาษ โลหะ ยางหรือขนสัตว์ สิ่งเหล่านี้เคยเป็นวัสดุที่ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้เป็นอย่างดี แต่มนุษย์ยังคงพยายามค้นหาวัสดุใหม่ๆ มาใช้งานอยู่เสมอ จนกระทั่งกลางศตวรรษที่ 19 พลาสติกเป็นวัสดุที่มนุษย์คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นเพื่อการใช้ชีวิตที่สะดวกสบาย พลาสติกจัดเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน (Hydro Carbon) ประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน

และออกซิเจน นอกจากนี้อาจมีธาตุอื่นๆ เป็นส่วนประกอบย่อย ได้แก่ ไนโตรเจน ฟลูออรีน คลอรีน และกำมะถัน เป็นต้น ในปัจจุบันพลาสติกที่ใช้กันอยู่สามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆได้ 2 ประเภท คือ เทอร์โมพลาสติก และเทอร์โมเซตติงพลาสติก

2.2.3 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) [1, 10]

เทอร์โมพลาสติก คือ พลาติกที่ประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลขนาดยาวที่ถูกยึดกันอยู่ด้วยพันธะแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งไม่แข็งแรงมากนัก หากเปรียบเทียบก็จะคล้ายกับเส้นขนมจีนที่พันทับกันไปมา เมื่อสายโซ่โมเลกุลได้รับความร้อน พันธะที่ยึดแต่ละสายโซ่เข้าด้วยกันจะมีความอ่อนแอลงและสายโซ่นั้นก็จะเกิดการเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ทำให้พลาสติกประเภทนี้มีลักษณะที่อ่อนนิ่มลงและหลอมเหลว ในที่สุดเมื่ออุณหภูมิสูงเพียงพอ แต่ภายหลังจากปล่อยให้เย็นตัวลงพลาสติกหลอมเหลวดังกล่าวสามารถที่จะแข็งตัวได้อีกครั้ง เปรียบเทียบกับการหลอมของเทียนไขเมื่อได้รับความร้อนและจะสามารถแข็งตัวเป็นก้อนได้อีกเมื่อเย็นตัวลง ความสามารถในการหลอมเหลวและแข็งตัวได้ใหม่หลายครั้งถือเป็นข้อดีของเทอร์โมพลาสติก เนื่องจากสามารถทำให้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่าย แต่ในขณะเดียวกันข้อเสีย คือ พลาสติกประเภทนี้มักจะไม่ทนทานต่ออุณหภูมิสูง นอกจากนี้ในแต่ละรอบของการหลอมเหลวนั้น พลาสติกที่แข็งตัวกลับมาใหม่มักจะมีคุณสมบัติที่ด้อยลงกว่าเดิมอีกด้วย

เทอร์โมพลาสติกสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็นอีก 2 ประเภท คือพลาสติกกึ่งผลึก (Semi-crystalline) และพลาสติกอสัณฐาน (Amorphous) โดยพลาสติกอสัณฐานนั้นจะมีโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบ มีลักษณะทั่วไปคือ แข็ง ใส และเปราะ ในขณะที่พลาสติกกึ่งผลึกนั้นจะมีโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลที่มีระเบียบ แต่ไม่ทั้งหมดจึงทำให้ภายในโครงสร้างมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน พลาสติกกลุ่มนี้จะมีคุณสมบัติทั่วไปที่ยืดหยุ่นและเหนียวพอสมควร

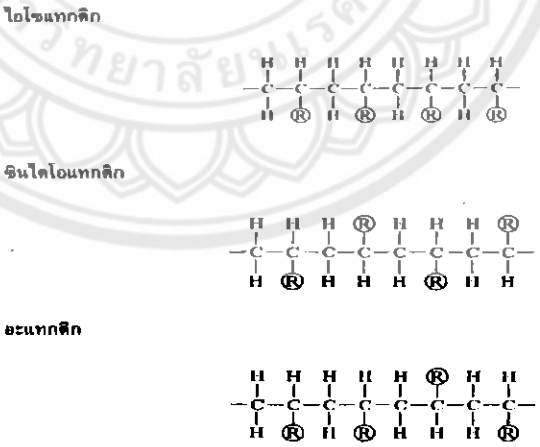
2.2.4 เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting Plastic) [1, 10]

พลาสติกในกลุ่มนี้จะมีรูปทรงถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตและไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างกลับไปกลับมาใหม่ได้โดยการให้ความร้อนเหมือนกันพลาสติกในกลุ่มเทอร์โมพลาสติก ทั้งนี้เนื่องจากก่อนกระบวนการผลิต โครงสร้างของพลาสติกจะยังเป็นสายโซ่ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ แต่เมื่อผ่านกระบวนการผลิตแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลในลักษณะสามมิติด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งมีความแข็งแรง จึงมีผลทำให้เทอร์โมเซตติงนี้ไม่สามารถใช้ความร้อนเพื่อหลอมเหลวได้ แต่จะไหม้และเสื่อมสภาพไป มีสมบัติที่เปลี่ยนไปจากเดิม เปรียบง่ายๆ คล้ายกับไข่เจียวซึ่งไม่สามารถกลับไปเป็นไข่เหลวได้อีกแล้วเมื่อได้รับความร้อน แต่จะไหม้เกรียมแทน หากทิ้งไว้นานเกินไปซึ่งเราสามารถนับมันเป็นข้อเสียของพลาสติกประเภทนี้เลยก็ได้ แต่ข้อดีของพลาสติกในกลุ่มนี้ คือ มีความแกร่ง แข็งแรงสูง และทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ดี

2.2.5 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene; PP) [3, 4, 5, 14]

พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดย Giulio Natta และนักเคมีชาวเยอรมัน Karl Rehn ในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 1954 ในประเทศสเปน โดย PP ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบผลึกชนิด ไอโซแทคติก (Isotactic) การค้นพบครั้งนี้เป็นการบุกเบิกนำไปสู่การผลิตเพื่อการค้าต่อมาในปี ค.ศ. 1957 เมื่อ Giulio Natta และผู้ร่วมงานยังได้สังเคราะห์ PP ชนิดซินไดโอแทคติก (Syndiotactic) จากโพรพิลีน เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ไม่มีสี มีทั้งโปร่งใส โปร่งแสง ผิวเป็นมันเงา ทนกรด เบส และสารเคมีต่างๆ ยกเว้นไฮโดรคาร์บอนและคลอริเนเทตไฮโดรคาร์บอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามโครงสร้างของโพลิโพรพิลีน ได้แก่ ไอโซแทกทิกโพลิโพรพิลีน ซินดิโอแทกทิกโพลิโพรพิลีน และแอแทกทิกโพลิโพรพิลีน มีสมบัติดีกว่าโพลิเอทิลีนหลายอย่าง ได้แก่ ทนแรงกระแทกสูง ทนการขีดข่วน ทนสารเคมี มีจุดอ่อนตัวสูง มีความหนาแน่นต่ำ และมีอุณหภูมิในการหลอมสูง ทำให้ใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 120 °C

พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติก คือ พอลิเมอร์พลาสติกที่สามารถขึ้นรูปโดยใช้ความร้อนซ้ำๆ ได้หลายครั้ง พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ประกอบด้วยโมโนเมอร์ของโพรพิลีน (C_3H_6) หลายๆ ตัว เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของก๊าซโพเพน โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารประกอบพวกโลหะ เช่น ไทเทเนียมคลอไรด์ การใช้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและสภาวะของการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ทำให้ได้พอลิโพรพิลีนที่มีการจัดเรียงโครงสร้างต่างกัน 3 ชนิด คือ ไอโซแทคติก (Isotactic) ซินไดโอแทคติก (Syndiotactic) และอะแทกติก (Atactic) ขึ้นอยู่กับทิศทางการจับของหมู่เมธิลกับอะตอมคาร์บอน ดังแสดงรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 แสดงลักษณะโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนทิศทางการจับของหมู่เมธิลกับอะตอมคาร์บอน [3]

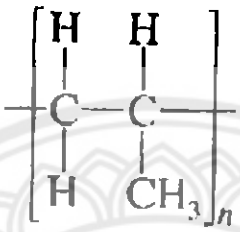
พอลิโพรพิลีน ชนิดไอโซเทกติกนิยมนำมาผลิตเป็นพลาสติกที่ใช้อยู่โดยทั่วไป เนื่องจากโครงสร้างมีการจัดเรียงของหมู่เมธิล อยู่ด้านเดียวกันอย่างเป็นระเบียบจึงมีความเป็นผลึกสูง ทำให้พอลิเมอร์มีความแข็ง ทนทานตรงข้ามกับชนิดอะแทกติกที่จะมีความเหนียวมากกว่าเนื่องจากหมู่เมธิ

ลมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ส่วนชนิดซินไดโอแทคติกนั้นหมู่เมธิลจัดเรียงตรงข้ามกันมีความแข็งน้อยกว่า แต่จะทนทานมากกว่าชนิดไอโซเทกติก

ชื่อทางเคมี (Chemical Name) : Poly (1-Methylethylene)

ชื่อพ้อง (Synonyms) : Polypropene, Polipropene 25 [USAN], Propylene Polymers, 1-Propene Homopolymer

สูตรเคมี : $(C_3H_6)_n$



รูปที่ 2-5 สูตรโครงสร้างทางเคมี (Chemical Structure) [3]

2.2.5.1 คุณสมบัติของพอลิโพรพิลีน [3, 4, 5]

พอลิโพรพิลีนหรือพีพี เป็นพลาสติกที่แข็งทนต่อแรงกระแทกได้ดีทนต่อสารเคมี ความร้อน และน้ำมันทำให้มีสีสันสวยงามได้ส่วนใหญ่นิยมนำมาทำภาชนะบรรจุอาหารเช่นกล่องชาม จานถังตะกร้าหรือกระบอกสำหรับใส่น้ำแช่เย็น พีพีสามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ โดยนิยมผลิตเป็นกล่องแบตเตอรี่รถยนต์ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น กันชน และกรวยสำหรับกรอกน้ำมันพลาสติกที่ใช้ในชีวิตประจำวัน มีประมาณ 7 ชนิด ที่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้และมีการให้สัญลักษณ์ตัวเลขที่เป็นสากล เพื่อง่ายต่อการแยกประเภทของพลาสติก โดยตัวเลข 1 ถึง 7 โดยโพลิโพรพิลีนจะมีหมายเลข 5 อยู่ตรงกลางซึ่งจะอยู่ในสัญลักษณ์ลูกศรสามเหลี่ยมสามตัวที่วิ่งตามกันดังรูปที่ 2-6 ด้านล่างมักปรากฏบริเวณก้นของภาชนะพลาสติก

รูปที่ 2-6 แสดงสัญลักษณ์ตัวเลขที่เป็นสากลของพอลิโพรพิลีน [17]

ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพีพี ได้แก่ กล่อง ของเล่นเด็ก ถุงปุ๋ย ไหมเทียม พรม แผ่นรองพรม ผ้าใบกันน้ำ เชือก สายรัดบรรจุภัณฑ์ ถุงร้อน ขวดใส่เครื่องดื่ม ซองขนม ท่อ ปลอกหุ้มสายไฟ สายเคเบิล งานเคลือบกระดาษ วัสดุอุดรอยรั่ว กาว และอุปกรณ์ภายในรถยนต์

2.2.6 คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุ [8]

2.2.6.1 คุณสมบัติทางกล (Mechanical Properties)

คือสมบัติที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงกระทำ [8]

ก. **ความแข็งแรง** (Strength) [9] **คือความสามารถของวัสดุในการต้านทานหรือรับแรงโดยปราศจาก จากความเสียหาย โดยความเสียหายในที่นี้อาจอยู่ในรูปของการแตกหักเสียหายอันเนื่องจากแรงเค้นที่สูงหรือจากการเสียรูปที่มากเกินไป ประกอบด้วย**

ก.1 **แรงดึง** (Tension Strength) **คือ แรงเค้นดึงสูงสุดที่วัสดุรองรับได้ในขณะทดสอบ ความแข็งแรงแตกร้าวหรือแตกหัก คือแรงเค้นหรือแรงกระทำ ณ จุดแตกหักต่อพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น**

ก.2 แรงอัด (Compression Strength) คือ ความแข็ง**แรงอัดสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ โดยวัสดุเหนียวนั้นจะมีความแข็งแรงอัดขึ้นอยู่กับปริมาณการเสียรูป**สูงสุด

ก.3 แรงเฉือน (Shear Strength) คือ ความต้านทานต่อ**แรงที่มากระทำต่อวัสดุจะอยู่ในลักษณะเฉือน เพื่อให้วัสดุฉีกขาด**

ก.4 แรงดัด (Flexure) คือ ความต้านทานต่อแรงในการ**งอตัว**

ก.5 แรงกระแทก (Impact) คือ ความต้านทานต่อแรง**ที่มากระทำต่อวัสดุ**โดยแรงที่มากระทำนั้นเป็นแรงที่มากระแทกใส่

ข. สติฟเนส (Stiffness) คือ ความต้านทานของวัสดุต่อการ**เสียรูปภายใต้แรงกระทำในช่วงยืดหยุ่น** (elastic state) [12]

ข.1 ความยืดหยุ่น (Elasticity) คือ ความสามารถของ**วัสดุในการเสียรูป**และคืนรูปอย่างสมบูรณ์โดยไม่ปรากฏการเสียรูปถาวรเมื่อนำแรงที่กระทำออก

ข.2 ความเป็นพลาสติกหรือการเสียรูปอย่างถาวร [9] (Plasticity) **คือ**ความสามารในการเสียรูปของวัสดุเหนือช่วงการเสียรูป แบบยืดหยุ่นโดยไม่เกิดการ**แตกหักเสียหาย**

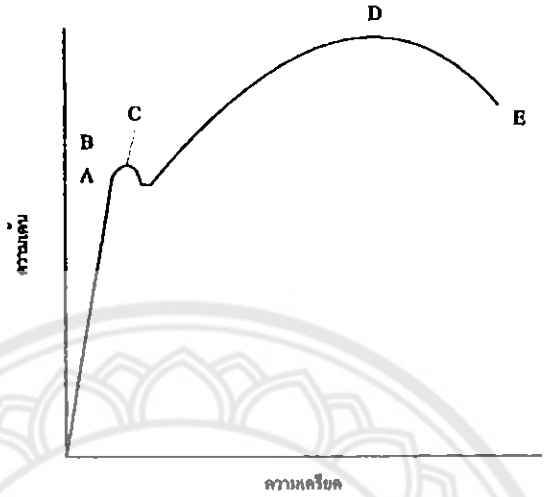
ข.3 ความเหนียว (Ductility) คือ คุณสมบัติของวัสดุที่**เสียรูปไปโดยการยืดและไม่คืนรูปเดิม** แม้แรงกระทำยืดจะหมดไป

ข.4 ความเปราะ (Brittleness) คือ คุณสมบัติตรงข้ามกับความทนแรงและเหนียว หมายความว่าวัสดุมีความต้านทานน้อยต่อแรงปะทะทันที โดยมีการยืดออกเล็กน้อยหรือไม่ยืดออกเลย จะถือว่าวัสดุนั้นเปราะ

2.2.7 คุณสมบัติของวัสดุเมื่อถูกทดสอบ [8]

2.2.7.1 ความเค้นและความเครียด (Stress and Strain) คือ เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อวัสดุจะทำให้เกิดแรงต้านภายในวัสดุ ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงภายนอก แรงต้านภายในนี้จะกระจายตลอดพื้นที่หน้าตัดของวัสดุ อัตราส่วนระหว่างค่าของแรงต้านภายในพื้นที่หน้าตัดที่รับแรง

กระทำ เรียกว่า "ความเค้น" มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร หรือกิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร ดังรูปที่ 2-7 คือ กราฟความเค้น-ความเครียดของการทดสอบแรงดึง



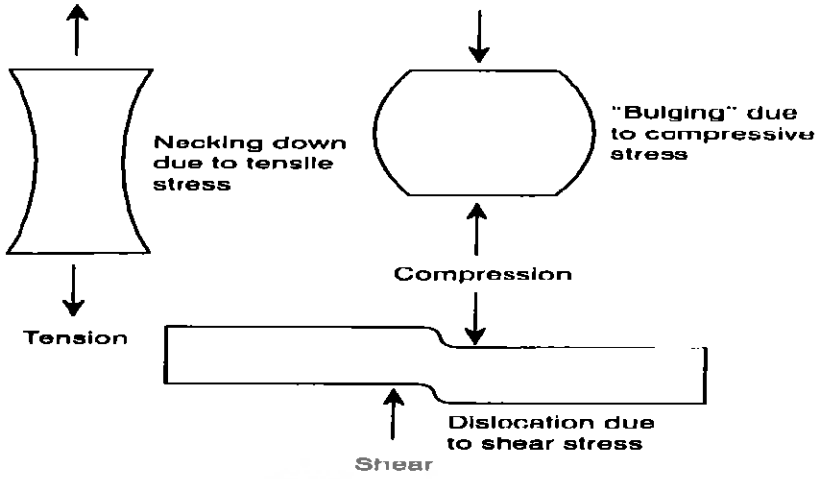
รูปที่ 2-7 กราฟแสดงระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Curve) **แบบมีจุดคราก** (Yield Point) [9]

ช่วงต่างๆ ของกราฟความเค้น-ความเครียดที่น่าสนใจได้แก่ช่วง AB เป็**นช่วงที่วัสดุเริ่มยืดตัว** โดยที่ระยะยืดตัวจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่มาดึงเป็นแนวเส้นตรง เราเรียก**ช่วงนี้ของกราฟว่า** Proportional Limit หรือ Limit of Proportionality โดยความชันของเส้นตรง**ดังกล่าวจะเรียกว่า** Young's Modulus of Elasticity

เมื่อวัสดุยืดตัวอีกเล็กน้อยจะถึงจุด C ซึ่งเป็นจุดที่เริ่มที่จะมีการแปรรูป**แบบถาวร** (Plastic Deformation) โดยวัสดุที่ได้รับแรงดึงในช่วง AC เมื่อทำการหยุดดึงชิ้นงานจะหดก**ลับไปยังความยาวเริ่มแรก**ของวัสดุนั้น เราเรียกการแปรรูปในช่วง AC ว่า Elastic Deformation **ในทางปฏิบัติ จุด B** และ C จะอยู่ใกล้กันมากจนสามารถถือได้ว่าเป็นจุดเดียวกัน

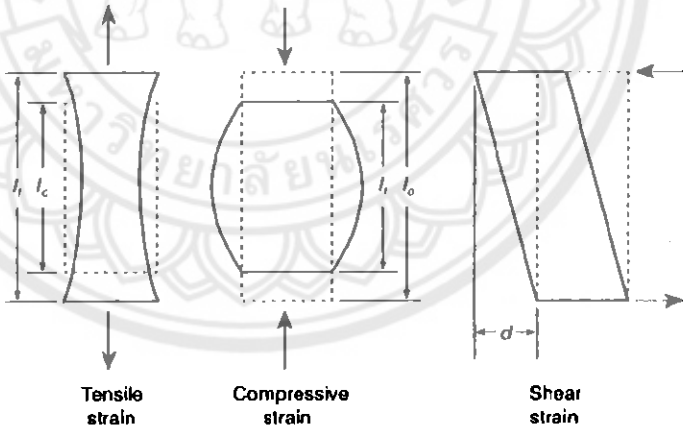
เมื่อดึงวัสดุต่อจากจุด D ไปเรื่อย ค่าความเค้นจะค่อยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะ**ยืดเพิ่มขึ้นจนถึงจุด E ซึ่งเป็นจุดที่ความเค้นสูงสุดของกราฟที่เป็นเส้นเต็ม เราเรียกค่าความเค้นสูงสุดนี้ว่า ความต้านทานแรงดึง** (Tensile Strength) **ซึ่งถ้าวัสดุถูกดึงออกจากจุด D พื้นที่หน้าตัดบางส่วนของชิ้นงานจะเริ่มเกิดการคอด** (Non-uniform Deformation) **และทำให้รับแรงได้น้อยลงอย่างมาก**

ความเค้นที่เกิดขึ้นมี 3 ลักษณะ คือ ความเค้นดึง (Tensile Stress) **ความเค้นอัด** (Compressive Stress) **และความเค้นเฉือน** (Shear Stress) **ดังรูปที่ 2-8**



รูปที่ 2-8 แสดงรูปแบบความเค้นแบบต่างๆ [9]

นอกจากวัสดุจะเกิดความเค้นแล้ว ยังมีผลทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดไปจากเดิมอีกด้วย อัตราส่วนระหว่างขนาดที่เปลี่ยนไปต่อจากขนาดเดิมของวัสดุ เรียกว่า "**ความเครียด**" ขนาดที่กล่าวถึงนั้นอาจจะเป็นความยาว พื้นที่ หรือปริมาตรก็ได้ ความเครียดที่เกิดขึ้นมี 3 ลักษณะเช่นเดียวกับความเค้น คือ ความเครียดดึง (Tensile Strain) ความเครียดอัด (Compressive Strain) และความเครียดเฉือน (Shear Strain)



รูปที่ 2-9 แสดงรูปแบบความเครียดทั้ง 3 แบบ [9]

2.2.7.2 โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity; E) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดซึ่งเป็นเส้นตรง นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อ โรเบิร์ต ฮุค ได้ตั้งกฎว่า "ภายใต้ขีดจำกัดของสัดส่วนความยืดหยุ่น อัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุแต่ละชนิดมีค่าคงที่" เรียกค่าคงที่นี้ว่า โมดูลัสความยืดหยุ่น หรือยังส์ มอดูลัส (Young's Modulus)

2.2.7.3 ความไม่คืนตัว (Plasticity) คือคุณสมบัติของวัสดุเมื่อเสียรูป โดยแรงกระทำจะคงอยู่ในรูปนั้นโดยไม่คืนรูปเดิมเมื่อแรงกระทำหมดไป วัสดุบางชนิดมีคุณสมบัติกึ่งยืดหยุ่นได้และไม่

คืนตัว โดยจะคืนสู่รูปเดิมบางส่วนเมื่อน้ำหนักหรือแรงที่ได้รับหมดไป บางชนิดจะเป็นกึ่งไม่คืนตัว ณ อุณหภูมิสูง การหาความไม่คืนตัวของโลหะจะกระทำได้โดยทดสอบความต้านทานแรงดึง

2.2.7.4 ความเหนียว (Ductility) คือคุณสมบัติของวัสดุที่เสียรูปไปโดยการยืดและไม่คืนรูปเดิม แม้แรงกระทำหมดไป เราจะหาความเหนียวได้โดยความยาวที่ยืดออกแม้พื้นที่หน้าตัดจะเล็กลง ทดสอบหาโดยหาความต้านทานแรงดึง

2.2.7.5 ความเปราะ (Brittleness) คือคุณสมบัติตรงข้ามกับความทนแรงและเหนียว หมายความว่าวัสดุมีความต้านทานน้อยต่อแรงปะทะทันที ซึ่งจะเปราะและแตกหักทันทีโดยไม่เกิดการเสียรูปเลย

2.3 ทฤษฎีการสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

2.3.1 การวิเคราะห์ทางสถิติ [26]

2.3.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ 2 ทาง เป็นการทดสอบโดยพิจารณาเลือกปัจจัย 2 ปัจจัยพร้อมกัน จากหลายๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลองมากที่สุด แล้วนำมาทำการทดสอบที่วิธีการทดสอบ (Treatment) ที่แตกต่างกัน แล้วพิจารณาว่าปัจจัยที่นำมาพิจารณานั้นมีผลกระทบต่อการทดลองหรือไม่โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น อาจมีลักษณะเชิงคุณภาพที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่างๆ ส่วนตัวแปรตามมีลักษณะเชิงปริมาณ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง นอกจากจะสามารถศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองตัวไปพร้อมๆกันแล้ว ยังสามารถศึกษาผลร่วม (Interaction) ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัวด้วยว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวหนึ่งนอกจากจะส่งผลต่อตัวแปรตามแล้วยังส่งผลใดๆ ต่อตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอีกตัวหนึ่งหรือไม่

ในงานวิจัยเชิงทดลอง ตัวแปรแรกมักจะเรียกว่า องค์ประกอบ A และตัวแปรตัวที่สองมักจะเรียกว่าองค์ประกอบ B ในองค์ประกอบ A จะแบ่งออกเป็น p ระดับและองค์ประกอบ B จะแบ่งเป็น q ระดับ เราจะเรียกรูปแบบนี้อีกชื่อหนึ่งว่า p x q Factorial Design สมมุติว่าองค์ประกอบ A มี 3 ระดับ และองค์ประกอบ B มี 4 ระดับ จะเรียกว่า 3 x 4 Factorial Design

การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกรณีมีตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป และตัวแปรตาม 1 ตัวแปร ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะในกรณีมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวและตัวแปรตาม 1 ตัว เรียกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง

ก. สมมติฐาน

1. $H_0 : a_j = 0$ ทุกค่าของ j

   $H_1 : a_j \neq 0$ บางค่าของ j

2. $H_0 : b_k = 0$ ทุกค่าของ k

   $H_1 : b_k \neq$ บางค่าของ k

3. $H_0 : (ab)_{jk} = 0$ ทุกค่าของ j และ k

   $H_1 : (ab)_{jk} \neq$ บางค่าของ j และ k

ข. สูตรทดสอบ

$$SS_{TO} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p}\sum_{k=1}^{q} Y_{ijk}^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p}\sum_{k=1}^{q} Y_{ijk}\right)^2}{npq} \quad (2.1)$$

$$SS_A = \sum_{j=1}^{p} \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{q} Y_{ijk}\right)^2}{nq} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p}\sum_{k=1}^{q} Y_{ijk}\right)^2}{npq} \quad (2.2)$$

$$SS_B = \sum_{k=1}^{q} \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{q} Y_{ijk}\right)^2}{nq} - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p}\sum_{k=1}^{q} Y_{ijk}\right)^2}{npq} \quad (2.3)$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p}\sum_{k=1}^{q} Y_{ijk}^2 - \sum_{j=1}^{p} \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{q} Y_{ijk}\right)^2}{nq} - \sum_{k=1}^{q} \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p} Y_{ijk}\right)^2}{nq} + \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p}\sum_{k=1}^{q} Y_{ijk}\right)^2}{npq} \quad (2.4)$$

$$SS_{Wcel} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{p}\sum_{k=1}^{q} Y_{ijk}^2 - \sum_{j=1}^{p}\sum_{k=1}^{q} \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} Y_{ijk}\right)^2}{n} \quad (2.5)$$

$$MS_A = \frac{SS_A}{p-1} \quad (2.6)$$

$$MS_B = \frac{SS_B}{q-1} \quad (2.7)$$

$$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(p-1)(q-1)} \quad (2.8)$$

$$MS_{Wcel} = \frac{MS_{Wcel}}{pq(n-1)} \quad (2.9)$$

และนำค่าที่ได้มาใส่ลงในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ 2.2 การหาค่า F-test

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F
1. A	SS_A	p-1	MS_A	MS_A / MS_{wcell}
2. B	SS_B	q-1	MS_B	MS_B / MS_{wcell}
3. AB	SS_{AB}	(p-1)(q-1)	MS_{AB}	MS_{AB} / MS_{wcell}
4. Within Cell	SS_{wcell}	pq(n-1)	MS_{wcell}	
5. Total	SS_{TO}	44		

$F^*_{ตาราง} = F_{\alpha,p-1,(pq)(n-1)}$; $F^{**}_{ตาราง} = F_{\alpha,q-1,(pq)(n-1)}$; $F^{***}_{ตาราง} = F_{\alpha,(p-1)(q-1),(pq)(n-1)}$

จากตารางที่ 2-2 พิจารณาค่า F-test

- ถ้า $F^*_c > F_{\alpha,p-1,(pq)(n-1)}$ ให้ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 **ปัจจัย A มีผลกระทบ**
- ถ้า $F^{**}_c > F_{\alpha,q-1,(pq)(n-1)}$ ให้ปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 **ปัจจัย B มีผลกระทบ**
- ถ้า $F^{***}_c > F_{\alpha,(p-1)(q-1),(pq)(n-1)}$ ให้ปฏิเสธ H_0 **ยอมรับ H_1 ปัจจัย AB มีผลกระทบ**

2.3.1.2 **วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ความแปรปรวน**

การทดสอบสมมติฐานของผลต่างระหว่างต่างระหว่างค่า**เฉลี่ยประชากร** 2 ประชากร หรือ 2 กลุ่ม เช่น เปรียบเทียบยอดขายสินค้า 2 ยี่ห้อ จะใช้สถิติทดสอบ t **หรือ** Z **แต่ถ้าต้องการเปรียบเทียบยอดขายสินค้า** 3 ยี่ห้อ การใช้สถิติทดสอบ Z หรือ t จะต้อง**ทำการทดสอบครั้งละ** 1 **คู่ เช่น ถ้ามี** 3 **คู่ประชากรจะต้องทดสอบ** 3 **ครั้ง หรือ** 3 **คู่ ดังนี้**

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \quad (2.10)$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

$$H_0 : \mu_1 = \mu_3 \quad (2.11)$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_3$$

$$H_0 : \mu_2 = \mu_3 \quad (2.12)$$

$$H_1 : \mu_2 \neq \mu_3$$

จึงมีการวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งเป็นวิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยประชากรตั้งแต่ 3 ประชากรขึ้นไป โดยทำการทดสอบเพียงครั้งเดียว

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \qquad (2.13)$$

H_1 : มี $\mu_1 \neq \mu_2$ อย่างน้อย 1 คู่ ; i , j =1,2,3

ถ้าผลของการทดสอบ คือ ปฏิเสธสมมุติฐาน H_0 ก็จะไม่สามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของประชากรใดบ้างที่ต่างกัน อาจจะเป็นประชากร ที่ 1 ต่างจาก 2 หรือ ต่างจาก 3 หรือ 2 ต่างจาก 3 หรือแตกต่างกันทั้ง 3 ประชากรก็ได้ ดังนั้นถ้าผลการทดสอบ คือ ปฏิเสธสมมุติฐาน H_0 จะต้องการทดสอบเพิ่มเติมต่อไปว่าประชากรใดบ้างที่มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน โดยการทดสอบครั้งละคู่ ผลการทดสอบคือ ยอมรับสมมุติฐาน H_0 นั้นจะสามารถสรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ประชากรไม่แตกต่างกัน จะไม่ต้องทำการทดสอบเพิ่มเติม

2.3.1.3 หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน

เป็นเทคนิควิธีการที่ใช้ในการแยกแหล่งความแปรปรวนของข้อมูล ว่าความแปรปรวนของข้อมูลหรือความแตกต่างของข้อมูลเป็นความแตกต่างอันเนื่อง มาจากตัวแปรอิสระ (ต้องเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ) หรือเป็นความแตกต่างอันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อน (Error) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบหรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย โดยตัวแปรตามต้องเป็นตัวแปรต่อเนื่อง (ตัวแปรเชิงปริมาณ) หรือมีมาตราวัดตั้งแต่มาตราอันตรภาค (Interval Scale) ขึ้นไป และมีจำนวนตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ส่วนตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรแบ่งกลุ่ม (Categories) ซึ่งแบ่งกลุ่มตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป เพื่อให้เห็นความชัดเจนของความแตกต่างในการเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน การวิเคราะห์ความแปรปรวนพหุคูณสามารถจำแนกเป็น 2 ประเภท ขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวแปรต้น ดังนี้

1. กรณีมีตัวแปรต้นตัวเดียว ซึ่งมีระดับมากกว่า 2 ระดับขึ้นไปเรียกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนพหุคูณทางเดียว (One –Way ANOVA)

2. กรณีที่มีตัวแปรต้นตั้งแต่ 2 ตัว ซึ่งแต่ละตัวมีระดับตั้งแต่ 2 ระดับขึ้นไปและมีตัวแปรตามมากกว่า 1 ตัว เรียกว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนพหุคูณ 2 ทาง (2 – Way ANOVA)

2.3.2 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) [24, 25]

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นกลวิธีทางสถิติหนึ่งที่ใช้ในการวินิจฉัยและสร้างตัวแบบสำหรับความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ให้ความสนใจ โดยที่ค่าการถดถอย (Regression) จะหมายถึงจุดที่

ข้อมูลมีแนวโน้มถอยเข้าหา ซึ่งจะมีความหมายเป็นค่าที่ควรจะเป็นของตัวแปรตอบสนองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

ตัวแบบโดยทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์การถดถอยนี้จะได้มาจากการกำหนดตัวแปรอิสระจำนวน k ตัว ซึ่งจะต้องเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ อาทิ มุมมีดตัด ความเร็วรอบ ส่วนผสม ระยะเวลา อุณหภูมิ ฯลฯ โดยจะเรียกตัวแปรนี้ว่า ตัวแปรถดถอย (Regression) หรือตัวนำ (Carrier) หรือตัวทำนาย (Predictor) และเมื่อทำการกำหนดค่าของตัวแปรถดถอยค่าหนึ่งๆ แล้วจะกระทำการศึกษาค่าของตัวแปรตามที่มีลักษณะเป็นตัวแปรสุ่ม และจะเรียกตัวแปรประเภทนี้ว่าตัวแปรตอบสนอง (Response Variable)

ผลของการศึกษาจะให้ทราบถึง

- ขนาดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ ที่มีต่อตัวแปรตาม
- แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม

2.3.2.1 ชนิดการวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยจะขึ้นกับลักษณะของตัวแปรตามรูปแบบความสัมพันธ์และการกำหนดตัวแปรอิสระ (ตัวแปรต้น) ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งการวิเคราะห์การถดถอยได้เป็น 2 ประเภท

ก. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Aanalysis) เป็นการวิเคราะห์การถดถอยที่ตัวแปรอิสระส่วนใหญ่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ส่วนตัวแปรตามเป็นจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณเท่านั้น รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามสามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น (Linear Model)

ข. การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear Regression) เป็นการวิเคราะห์การถดถอยที่รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอสิระและตัว แปรตามสามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non – Linear Model) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น มี 2 แบบ คือ

- การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย จะประกอบด้วยตัวแปรตาม 1 ตัว และ ตัวแปรอิสระเพียง 1 ตัว การวิเคราะห์เป็นการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสอง และสร้างรูป แบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่การพยากรณ์ของค่าตัวแปร

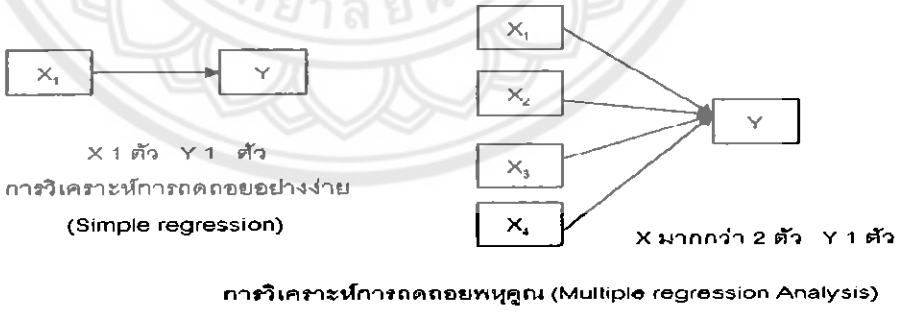
- การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ (Multiple Linear Regression) จะประกอบด้วยตัวแปรตาม 1 ตัว และ ตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป การวิเคราะห์เป็นการหาขนาดของความสัมพันธ์ และสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็น การพยากรณ์ค่าของตัว แปรตามโดยใช้ตัวแปรอิสระที่ศึกษา เช่น ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอายุ เพศ ปัญหาในการทำงาน ความขัดแย้งในครอบครัว กับความรู้สึกเก็บกดของผู้ป่วยในโรงพยาบาลแห่งหนึ่ง เป็นต้น

2.3.2.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ

การวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Y) หรือตัวแปรเกณฑ์ (Criterion Variable) จำนวน 1 ตัว กับตัวแปรอิสระ (X) หรือตัวแปรพยากรณ์ หรือตัวแปรทานาย (Predictor Variable) ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป เป็นเทคนิคทางสถิติที่อาศัยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรมาใช้ในการทำนาย โดยเมื่อทราบค่าตัวแปรหนึ่งก็สามารถทำนายอีกตัวแปรหนึ่งได้ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้อยู่ในรูปของสมการทำนาย สิ่งสำคัญที่ต้องการหาในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ สมการพยากรณ์ในรูปคะแนนดิบ หรือในรูปคะแนนมาตรฐาน หรือทั้งคู่ และความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ [25] บทความนี้จะนำเสนอเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นแนวคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ และในส่วน ที่สองจะเป็นการนำเสนอการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณด้วยโปรแกรม

2.3.2.3 กรอบแนวคิดในการวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเป็นหลัก และคำตอบที่ต้องการคือ มีตัวแปรใดบ้างที่สามารถพยากรณ์ตัวแปรเกณฑ์ที่สนใจจะศึกษา และตัวแปรใดพยากรณ์ได้มากน้อยกว่ากัน รวมทั้งส่งผลในทางบวกหรือทางลบ ซึ่งการวิจัยในลักษณะนี้จะต้องอาศัยการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Review Literature) มาเป็นอย่างดี และสรุปเป็นกรอบแนวคิดในการทำวิจัย และนำไปสร้างเครื่องมือตามกรอบแนวคิดที่กำหนดไว้ สามารถเขียนเป็นกรอบแนวคิดดังรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-10 กรอบแนวคิดการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเกณฑ์ (Y) กับตัวแปรพยากรณ์ (X) [25]

2.3.2.4 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนพหุคูณ

ก. ตัวแปรตาม (Dependent Variable) ต้องเป็นตัวแปรต่อเนื่อง (Continuous) จัดอยู่ในมาตรการวัดตั้งแต่อันตรภาค (Interval Scale) ขึ้นไป และมีจำนวนตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป

ข. ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) เป็นตัวแปรแบ่งกลุ่ม (Categories) หรืออยู่ในมาตรานามบัญญัติ (Nominal Scale) หรือถ้าอยู่ในมาตราที่สูงกว่านี้ ให้ปรับลงมาอยู่ในมาตรานามบัญญัติ มีจำนวนตั้งแต่ 1 ตัวแปรขึ้นไป

ค. ตัวแปรร่วม (Covariate Variable) มีลักษณะเหมือนกันตัวแปรตามคือต้องอยู่ในมาตราอันตรภาค (Interval Scale) ขึ้นไป เป็นตัวแปรที่ผู้วิจัยคาดว่าทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกลุ่มในตอนต้น ซึ่งหากไม่ขจัดอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวแล้ว ผลการวิจัยจะขาดความเที่ยงตรงภายใน (Internal Validity) นั่นคือการที่เกิดความแตกต่างของตัวแปรตาม ไม่ใช่เป็นผลอันเนื่องมาจากตัวแปรอิสระ แต่เป็นเหตุที่กลุ่มมีความแตกต่างกันมาก่อนแล้ว

ขั้นตอนการวิเคราะห์

- ตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้น
- คำนวณค่า r_{xy} ของตัวแปรพยากรณ์กับตัวแปรเกณฑ์
- คัดเลือกตัวแปรพยากรณ์ที่มีความสัมพันธ์สูงสุดกับตัวแปรเกณฑ์เข้าสมการและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (R)
- ทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (R) ว่าทดสอบว่าตัวแปรพยากรณ์ที่เข้าในสมการยังคงอยู่ในสมการต่อไปได้หรือไม่ด้วยสถิติ F
- หาค่าน้ำหนักความสำคัญของตัวแปรพยากรณ์ (b) หรือทั้งสองอย่าง เพื่อนำมาใช้ในการเขียนสมการพยากรณ์
- ทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์การถดถอย เพื่อตรวจสอบว่าตัวแปรพยากรณ์สามารถพยากรณ์ตัวแปรเกณฑ์ได้หรือไม่ ด้วยสถิติ t
- คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของตัวแปรพยากรณ์ที่เข้าสมการ (SE_b) และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์ (SE_{est})
- คัดเลือกตัวแปรพยากรณ์ที่มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปรเกณฑ์รองลงมาเข้าสมการ

จากนั้นทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่เปลี่ยนแปลง (R^2 Change) ด้วยสถิติ F ถ้า R^2 Change ไม่มีนัยสำคัญก็แสดงว่าตัวแปรพยากรณ์ไม่สามารถอยู่ในสมการพยากรณ์ได้ แต่ถ้ามี

นัยสำคัญเท่ากับ 0.01-0.10 หรือระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 90-99 เปอร์เซ็นต์ จึงดำเนินการตามข้อ 4 5 6 และ7 แล้วดำเนินการต่อไปจนกว่าจะไม่มีตัวแปรพยากรณ์ใดเข้าในสมการ

2.3.2.5 ข้อตกลงเบื้องต้นในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

ก. Normality ประชากรมีการแจกแจงแบบปกติ (Normality) ตรวจสอบได้โดยการดูกราฟหรือวิธีการทางสถิติ เช่น เช่นใช้ Kolmogorov-Smirnov Test ในกรณีที่ไม่ทราบค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของประชากร จะใช้ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างแทน หรือใช้ Shapiro-Wilk Test ในกรณีที่ทราบหรือไม่ทราบค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของประชากรก็ได้ แต่ กลุ่มตัวอย่างต้องมีขนาดไม่เกิน 50 หรือ Lilliefors Test ซึ่งเป็นวิธีการที่ปรับปรุงมาจากวิธีของ Kolmogorov-Smirnov แต่จะให้ค่าความน่าจะเป็นในการทดสอบน้อยกว่าวิธีของ Kolmogorov-Smirnov

ข. Linearlity ตัวแปรพยากรณ์กับตัวแปรเกณฑ์มีความสัมพันธ์กันเชิงเส้นตรง (Linearity) ตรวจสอบได้โดยใช้วิธีการทางสถิติ เช่น ดูจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ r_{xy}

ค. Homoscedasticity หมายถึง ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีความคงที่ทุก ค่าการสังเกตตรวจสอบได้โดยการดูจากกราฟ หรือใช้วิธีการทาง สถิติ เช่น Non-constant Variance Score Test หรือ The Spearman Rank-Correlation Test หรือ The Goldfeld and Quarndt Test หรือ White's Test

ง. ตัวแปรที่นามาใช้พยากรณ์ต้องไม่มีปัญหาเรื่อง Multicol Linearity หมายถึง ตัวแปรที่นำมาใช้พยากรณ์ไม่ควรมีความสัมพันธ์กันสูงเกินไปตรวจสอบได้ ด้วยการดูกราฟหรือด้วยวิธีการทางสถิติ เช่น ดูจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ r_{xy} หรือดูจากค่า Variance Inflation Factors (VIF)

2.3.2.6 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

ก. สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายใน (Inter-Correlation)

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียรสัน หรือบางครั้งเรียกว่าสหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple Correlation) โดยใช้สัญลักษณ์ r ข้อมูลหรือระดับการวัดของตัวแปรแต่มาตราอันตรภาคถึงมาตราอัตราส่วน โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้นมักจะใช้สัญลักษณ์ของตัวแปรเป็นตัวแปร xและY โดยค่าสหสัมพันธ์เพียร์สัน (r_{xy})

$$r_{xy} = \frac{n\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \qquad (2.14)$$

ข. ค่า b หาจากสูตร

$$b_j = \beta_j \frac{S_y}{S_j} \quad (2.15)$$

เมื่อ b_j คือ ค่าน้ำหนักคะแนนหรือสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวพยากรณ์ (ตัวแปรอิสระ) ตัวที่ j ต้องการหาค่าน้ำหนักคะแนน

β_j คือ ค่าน้ำหนักเบต้า ของตัวพยากรณ์ (ตัวแปรอิสระ) ตัวที่ j

S_y คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวเกณฑ์ (ตัวแปรตาม)

S_j คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวพยากรณ์ (ตัวแปรอิสระ) ตัวที่ j

สัมประสิทธิ์การถดถอย b_j เป็นค่าที่ชี้ถึงว่า เมื่อตัวแปรอิสระ (ตัวพยากรณ์) (X) ตัวนั้นเปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วยจะทำให้ตัวแปรตรา (ตัวเกณฑ์) (คะแนนพยากรณ์ของตัวแปรตาม) เปลี่ยนแปลงไป b_j หน่วย

ค. ค่า β จากสูตร

$$\beta_j = b_j \frac{S_j}{S_y} \quad (2.16)$$

ง. สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) แทนด้วย R คำนวณหาค่า โดยใช้สูตร

$$R = \sqrt{\beta_1 r_{1y} + \beta_2 r_{2y} + \ldots + \beta_P r_{Py}} \quad (2.17)$$

จ. การทดสอบนัยสำคัญทางสถิติของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (หรือสัมประสิทธิ์การถดถอย) ทดสอบโดยใช้สถิติ F จากสูตร

$$F = \frac{R^2/k}{(1-R^2)/(N-k-1)} \quad (2.18)$$

เมื่อ F คือ ค่าสถิติที่จะใช้เปรียบเทียบค่าวิฤติจากการแจกแจงแบบ F เพื่อทราบความมีนัยสำคัญของ R

R คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ

N คือ จำนวนสมาชิกกลุ่มตัวอย่าง

k คือ จำนวนพยากรณ์ (ตัวแปรอิสระ)

ฉ. การทดสอบนัยสำคัญของตัวแปรที่เพิ่มเข้าในสมการถดถอย มีสูตรการทดสอบนัยสำคัญดังนี้

$$F = \frac{(R^2_{Y.12..l} - R^2_{Y.12...k})/(1-k)}{(1-R^2_{Y.12...l})/(N-1-1)} \quad (2.19)$$

เมื่อ F คือ ค่าสถิติที่จะใช้เปรียบเทียบกับค่าวิกฤตจากการแจกแจงแบบ F เพื่อทราบความมีนัยสำคัญ

$R_{Y.12..k}$ คือ กำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณสำหรับการถดถอยของ Y บนตัวแปร k ตัว

$R_{Y.12...l}$ คือ กำลังสองของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณสำหรับการถดถอยของ Y บนตัวแปร i ตัว

K คือ จำนวนของตัวพยากรณ์ที่มีจำนวนน้อยกว่า

I คือ จำนวนของตัวพยากรณ์ที่จำนวนมากกว่า

ช. ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์ (Standard Error of Estimate) เขียนแทนด้วยตัวย่อ SE_{est} สูตรในการหา SE_{est} ดังนี้

$$SE_{est} = \sqrt{\frac{SS_{res}}{N-k-1}} \quad (2.20)$$

เมื่อ SE_{est} คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์

SE_{res} คือ ผลรวมของกำลังสอง (Sum of Squares) ของส่วนที่เหลือ (ของ Residual) = $\sum d^2$

ซ. การหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอย (Standard Error of b Coefficients) เขียนแทนด้วยตัวย่อ SE_{bj} สามารถคำนวณได้หลายวิธี สูตรที่นิยมได้แก่

$$SE_{bj} = \sqrt{\frac{SE^2_{est}}{SS_{xj}(1-R^2_j)}} \quad (2.21)$$

เมื่อ SE_{bj} คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอย (ของb)

SE^2_{est} คือ กำลังสองของความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์

SS_{xj} คือ ผลรวมกำลังสองของความเบี่ยงเบน (Sum of Squares) ของตัวพยากรณ์ตัวที่ j

R^2_j คือ กำลังสองสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณระหว่างตัวพยากรณ์ตัวที่ j

ฌ. การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์การถดถอย เพื่อทดสอบว่าตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวส่งผลต่อการทำนายตัวเกณฑ์หรือไม่ ทดสอบโดยใช้ สูตร

$$t_j = \frac{b_j}{SE_{bj}} \qquad (2.22)$$

เมื่อ t_i คือ ค่าสถิติที่จะใช้เปรียบเทียบกับค่าวิกฤติจากการแจกแจงแบบ t เพื่อทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ

b_j คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวพยากรณ์ที่ j ที่ต้องการทดสอบนัยสำคัญ

SE_{bj} คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอย

2.3.2.7 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของสมการถดถอยเชิงพหุ

ก. สมการเงื่อนไขของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_k X_k + e \qquad (2.23)$$

เงื่อนไข

- ความคลาดเคลื่อน e เป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงแบบปกติ
- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ นั่น คือ E (e) = 0
- ค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า V (e) $=\sigma_e^2$

- ei และ ej เป็นอิสระต่อกัน ; $i \neq j$ นั่นคือ Convariance $(ei,ej) = 0$

โดยมีเงื่อนไขที่เพิ่มจากการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายอีก 1 เงื่อนไข คือตัวแปร อิสระ X_i และ X_j ต้องเป็นอิสระต่อกัน

ข. สมการเชิงเส้นในรูปคะแนนดิบ

$$Y' = a+b_1x_1 + b_2x_2 + ... +b_Kx_K \qquad (2.24)$$

เมื่อ Y' คือ คะแนนพยากรณ์ของตัวเกณฑ์ (ตัวแปรตาม)

a คือ ค่าคงที่ของสมการในรูปแบบคะแนนดิบ

b_1 , b_2 , ... b_K คือ น้ำหนักคะแนนหรือสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวพยากรณ์ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ k ตามลำดับ

X_1 , X_2 , ... , X_3 คือ คะแนนของตัวพยากรณ์ (ตัวแปรอิสระ) ตัวที่ 1 ถึงตัวที่ k

K คือ จำนวนพยากรณ์ (ตัวแปรอิสระ)

และค่า a จากสูตร

$$a = \overline{Y} - b_1 \overline{X}_1 - b_2 \overline{X}_2 - - b_k \overline{X}_k \qquad (2.25)$$

เมื่อ a คือ ค่าคงที่สำหรับสมการพยากรณ์ในรูปคะแนนดิบ

$\overline{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยสำหรับตัวแปรตาม

$\overline{X}_1$, $\overline{X}_2$, $\overline{X}_k$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปรอิสระ (ตัวแปรพยากรณ์) ตัวที่ 1 ถึง k ตามลำดับ

b_1, b_2, b_k คือ ค่าน้ำหนักของตัวแปรอิสระ (ตัวแปรพยากรณ์) ตัวที่ 1 ถึง k ตามลำดับ

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ (ตัวแปรพยากรณ์)

2.3.2.8 การทดสอบสมการความถดถอยเชิงพหุโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกทางเดียว

จากสมการความถดถอยเชิงพหุ $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_k X_k + e$ ค่าแปรปรวนของ Y = ค่าความแปรปรวนที่เกิดจากอิทธิพลของ X_1, X_2 ... X_K + ค่าความแปรปรวนอย่างสุ่มหรือ

$$SST = SSR + SSE \qquad (2.26)$$

โดยที่ SST (Sum Square of Total) คือ ค่าแปรปรวนรวมทั้งหมด

SSR (Sum Square of Regression) คือ ค่าแปรปรวนของ Y เนื่องจากอิทธิของ $X_{1...}X_k$

SSE (Sum Square of Error or Sum Square of Residual) คือ ค่าแปรปรวนของ Y เนื่องจากอิทธิพลอื่นๆ หรือ เรียกว่า ค่าแปรปรวนอย่างสุ่ม

ก. สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวและความสัมพันธ์นี้จะบอกให้ทราบว่าตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันในระดับใด สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) เขียนแทนด้วยตัวย่อ R หรือย่อชนิดเต็มรูปเป็น $R_{Y, 12...k}$ จำแนกลักษณะสหสัมพันธ์ได้ดังนี้

ก.1 สหสัมพันธ์เชิงบวก (Positive Correlations) ซึ่งหมายความว่า เมื่อตัวแปรตัวหนึ่งเพิ่มหรือลดลงอีกตัวแปรหนึ่งก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย

ก.2 สหสัมพันธ์เชิงลบ (Negative Correlations) หมายถึง เมื่อตัวแปรตัวหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงอีกตัวหนึ่งจะมีค่าเพิ่มหรือลดลงตรงข้ามเสมอ

ก.3 สหสัมพันธ์เป็นศูนย์ (Zero Correlations) หมายถึง ตัวแปรสองตัวไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

ข. สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ เป็นค่าของ b ที่เป็นความชันของกราฟเส้นตรง ที่เกิดจากสมการเชิงเส้น ถ้าทราบค่าของ b และค่าของ aแล้ว ก็จะสามารถพยากรณ์ค่าของตัวแปร Y ได้ซึ่งสรุปได้ดังนี้

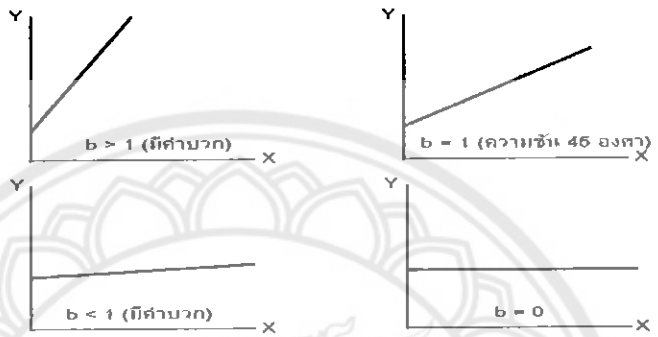
- ถ้า $b > 0$ แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกันกล่าวคือ ถ้า X มีค่าสูงขึ้น ค่าของ Y ก็จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

- ถ้า $b < 0$ แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันในทิศทางตรงกันข้ามกล่าว คือ ถ้า X มีค่าสูงขึ้น ค่าของ Y จะต่ำลง

- ถ้า b มีค่าใกล้0 แสดงว่า X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย

- ถ้า b = 0 แสดงว่า X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์กันเลยเส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง ค่าของ Y จะมีค่าเท่ากับค่าคงที่ (a)

- ถ้า b = 1 แสดงว่าความชันของเส้นกราฟมีค่าเท่ากับ 45 องศา ค่า X และ Y จะมีค่าเท่ากับ ในกรณีที่ค่าคงที่ a เท่ากับศูนย์



รูปที่ 2-11 สมการเส้นตรงของการถดถอยเมื่อ b มีค่าแตกต่างกัน [20]

ค. ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการพยากรณ์ (Standard Error of Estimate) การพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม Y ที่เกิดจากการกำหนดค่าของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้น X จากสมการถดถอยที่ได้ จะมีประโยชน์ ต่อการพยากรณ์มากเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่รวบรวมมาว่ามีการกระจัดกระจายไปจากเส้นกราฟหรือสมการถดถอยมากน้อยเพียงใด ถ้าค่าของตัวแปรตาม Y แต่ละค่าแตกต่างไปจากเส้นกราฟถดถอยที่ประมาณขึ้นมามาก การพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม Y โดยใช้เส้นกราฟถดถอยก็จะเกิดความคลาดเคลื่อนมาก แต่ถ้าค่าที่รวบรวมมาแต่ละค่าอยู่บนเส้นกราฟถดถอยหรืออยู่ใกล้ๆ เส้นกราฟถดถอยมากเท่าใด การพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม Y โดยใช้เส้นกราฟถดถอยก็จะถูกต้องมากขึ้น เท่านั้น ความแตกต่างระหว่างค่าของตัวแปรตาม Y ที่เกิดจากการพยากรณ์กับค่าที่ได้จากการรวบรวม เรียกว่า ความคลาดเคลื่อน (Error หรือ Residual) ใช้ตัวย่อว่า e โดยที่ e = Y-Y' ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน สามารถหาได้จากสมการดังต่อ ไปนี้

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum(Y-Y')^2}{N-k-1}} \qquad (2.27)$$

เมื่อ SEE คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของตัวพยากรณ์

Y' คือ คะแนนพยากรณ์ของตัวแปรตาม

N คือ จำนวนสมาชิก

$\sum(Y-Y')^2$ คือ ผลรวมกำลังสองของส่วนที่เหลือ (Sum Squares of Residuals) ซึ่งใช้ตัวย่อว่า SSRหรือSS_{res}

ง. สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Deter – Mination)

คือ ค่าสัมประ-สิทธิ์ของการตัดสินใจ เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ r^2 เป็นค่าที่อธิบายว่าสมการการถดถอยที่ใช้ประมาณค่ามีความสามารถอธิบายความผันผวน (Variation) ของตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใด หรือตัวแปรอิสระในแบบจำลองอธิบายตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใด มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ยกกำลังสอง ดังนั้นสูตรที่ใช้ก็คือ

$$R^2 = \frac{(\sum XY - N\bar{X}\bar{Y})^2}{(\sum X^2 - N\bar{X}^2)(\sum Y^2 - N\bar{Y}^2)}$$ หรือ

$$R^2 = \frac{(N\sum XY - (\sum X)(\sum Y))^2}{(N\sum X^2 - (\sum X)^2)(N\sum Y^2 - (\sum Y)^2)}$$ (2.28)

- ถ้า R^2 = 1 หมายความว่าความแปรปรวนทั้งหมดมาจากสมการถดถอยและไม่มีความแปรปรวนที่มาจากปัจจัยอื่นๆเลย (ไม่มี error หรือ SSE = 0)

- ถ้า R^2 = 0 หมายความว่าความแปรปรวนทั้งหมดมาจาก Error และค่าของ y ที่เปลี่ยนแปลงไป ไม่ได้มีสาเหตุมาจากค่า x ที่เปลี่ยนแปลงไป อาจกล่าวได้ว่าไม่มีเส้นตรงถดถอยระหว่าง x กับ y

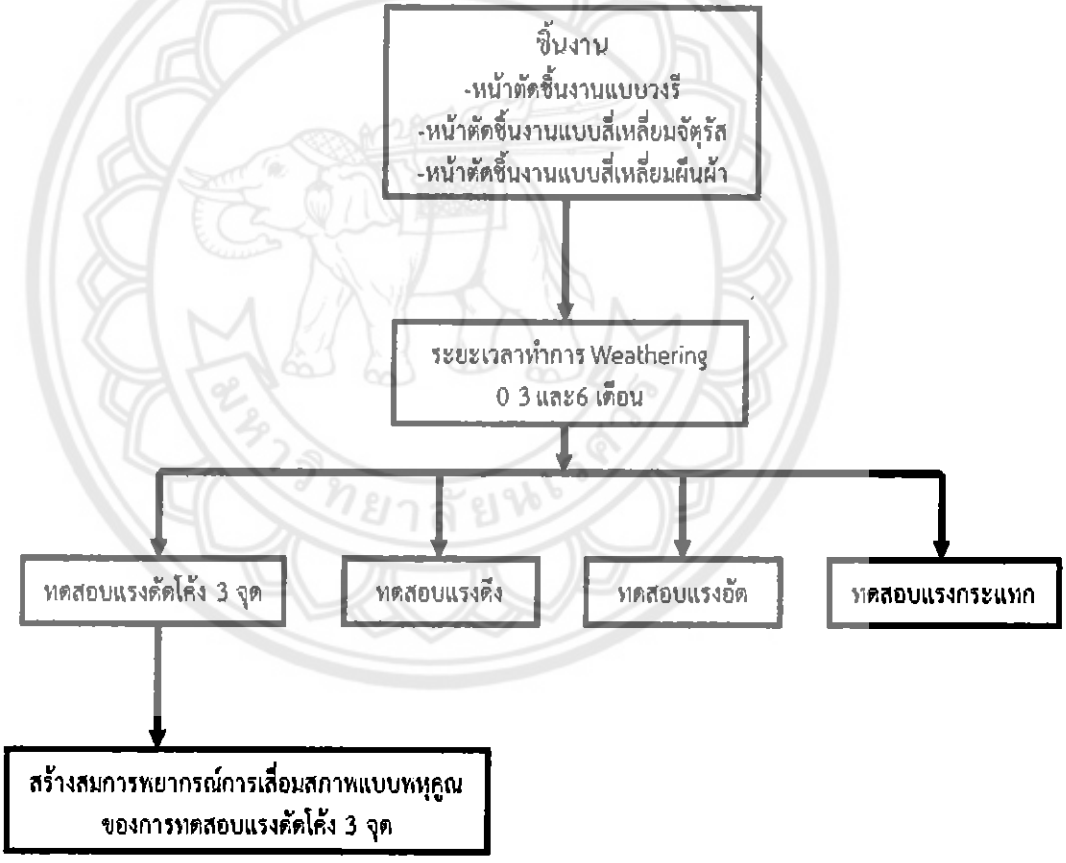
- ถ้า R^2 = 0.90 หมายความว่าร้อยละ 90 ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นใน y มาจากสมการถดถอย และอีกร้อยละ 10 ของความแปรปรวนทั้งหมดมาจาก Error

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของพีพี ซีท เพื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติก่อนและหลังการผ่านสภาพอากาศเป็นเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน ที่ชิ้นงานแต่ละชิ้นมีโครงสร้างของความหนาและ ลักษณะพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกัน การออกแบบขนาดชิ้นงานทดสอบทั้งหมดจะใช้มาตรฐานการทดสอบ โดยเลือกใช้มาตรฐาน ASTM (American Society of Testing and Materials)

3.1 แผนการดำเนินงาน



รูปที่ 3-1 แผนภาพไดอะแกรมการดำเนินงาน

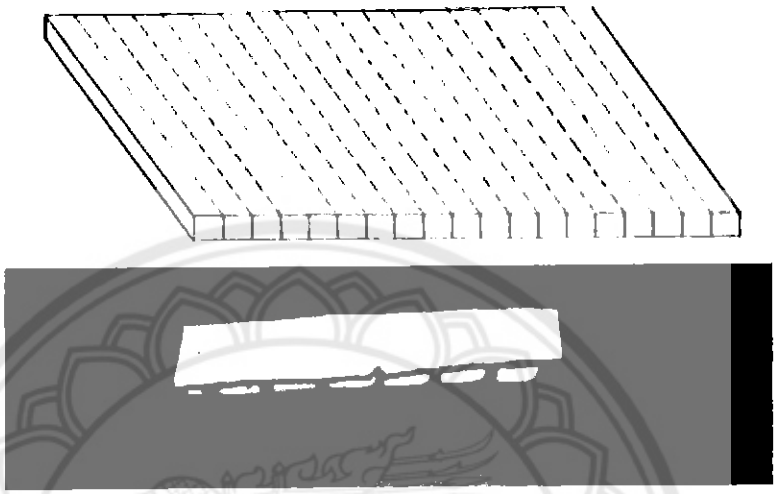
จากภาพการแสดงการทดสอบชิ้นงาน คือการนำชิ้นงานกลุ่มแรกไปศึกษาสมบัติเชิงกลและนำชิ้นงานกลุ่มที่ 2และ3 ไปตากแดด ฝนและลม และเมื่อได้ตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วเราจะนำชิ้นงานดังกล่าวไปศึกษาสมบัติเชิงกล ได้แก่ การทดสอบสมบัติแรงดัดโค้ง การทดสอบสมบัติแรงกระแทก การทดสอบสมบัติแรงดึงและการทดสอบสมบัติแรงอัด

3.2 การเตรียมชิ้นงานจากพีพี ซีท

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.2.1.1 แผ่นพีพี ซีท

ก. รูปแบบพีพี ซีท ที่ด้านหน้าตัดมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

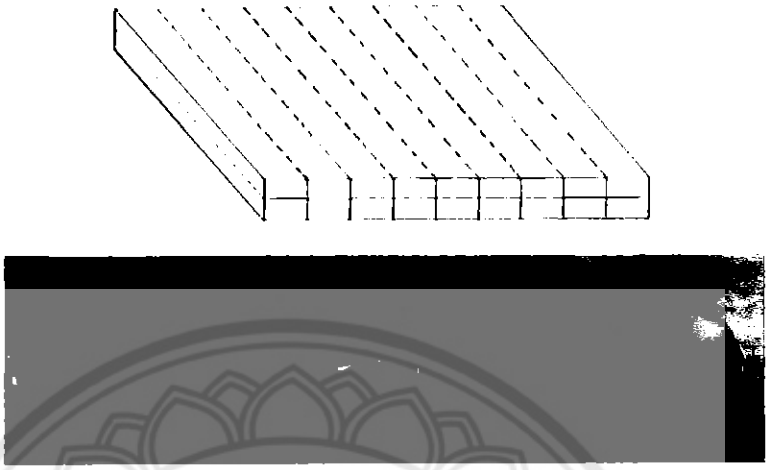


รูปที่ 3-2 ลักษณะชิ้นงานที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ข. รูปแบบพีพี ซีท ที่ด้านหน้าตัดมีรูปร่างเป็นรูปวงรี

รูปที่ 3-3 ลักษณะชิ้นงานที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงรี

ค. รูปแบบพีพี ชีท ที่ด้านหน้าตัดมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบสองช่องซ้อนทับกัน



รูปที่ 3-4 ลักษณะชิ้นงานที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซ้อนทับกัน

3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.2.1 ปากกาเมจิกสำหรับลอกแบบชิ้นงาน

3.2.2.2 กระดาษแข็งสำหรับทำแบบชิ้นงาน

3.2.2.3 คัดเตอร์

3.2.2.4 กระดาษทราย

3.2.2.5 ไม้บรรทัด

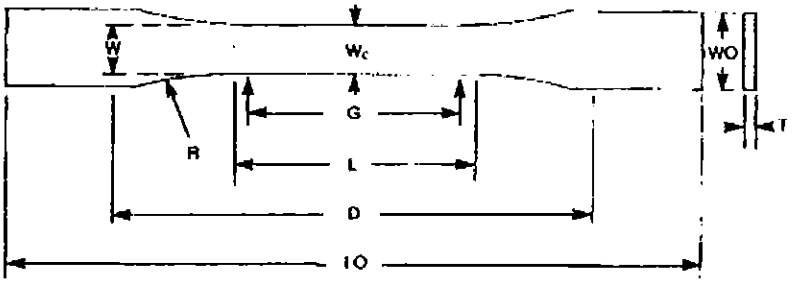
3.2.2.6 จิ๊กซอว์สำหรับตัดขึ้นรูปชิ้นงาน

3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

3.3.1 วิธีเตรียมชิ้นงาน

3.3.1.1 การทดสอบสมบัติแรงดึง ASTM D638

ก. ตัดชิ้นงานให้มีขนาดตามความหนาของวัสดุ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ ประเภทชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ โดยในการทดสอบนี้เป็นวัสดุชนิดพลาสติกที่มีความหนา 10 - 18 มิลลิเมตร ซึ่งในหลักเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM สามารถจะกำหนดขนาดของชิ้นงานได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3-5 แสดงส่วนประกอบของขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึง [11]

ตารางที่ 3-1 แสดงขนาดของชิ้นงานในการทดสอบแรงดึง

ส่วนประกอบของชิ้นงาน (ดูจากรูปภาพ)	ขนาดของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)
ช่องความกว้างของ (W)	19
ช่องความยาวของ (L)	57
ความกว้างทั้งหมด (WO)	29
ความยาวทั้งหมด (LO)	160
ระยะวัด (G)	50
ระยะห่างระหว่างปากจับ (D)	115
รัศมีความโค้ง (R)	76

ข. หลังจากนั้นเมื่อวาดแบบชิ้นงานตามที่กำหนดเรียบร้อยแล้ว ทำการขึ้นรูปชิ้นงานโดยวิธีการใช้เครื่องมือตัดชนิดจิ๊กซอว์ ซึ่งควรตัดด้วยความระมัด เพราะจะทำให้ชิ้นงานเสียสภาพรูปร่างจนไม่สามารถนำมาทดสอบได้ การตัดชิ้นงานจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งในกรณีนี้เป็นชิ้นงานรูปแบบโปร่งบริเวณตรงกลางซึ่งในการทดสอบนั้นผลการทดสอบจะได้ผลการทดสอบไม่เท่ากันจึงถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังต่อไปนี้

ข.1 ส่วนการตัดแบบตามแนวการขึ้นรูป

ข.2 ส่วนการตัดแบบตามแนวขวางการขึ้นรูป

ค. หลังจากตัดเสร็จเรียบร้อยแล้วใช้คัตเตอร์หรือกระดาษทรายชนิดหยาบ ขัดตรงบริเวณด้านข้างขอบของชิ้นงานที่โดนรอยตัด เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเป็นขลุย ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานมีรูปร่างที่สมบูรณ์มากขึ้น

3.3.1.2 การทดสอบสมบัติแรงอัด ASTM D695

ก. ขนาดของชิ้นงานขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ นอกจากนั้นแล้วยังขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงานด้วย โดยเกณฑ์มาตรฐานการกำหนดของ ASTM กำหนดให้ชิ้นงานมีกว้างมีค่าเท่ากับกับความหนา และความยาวมีค่าเป็น 2 เท่าของความหนา และความกว้าง ซึ่งจะได้อัตราส่วน ความหนา : ความกว้าง : ความยาว คือ 1:1:2 ซึ่งชิ้นงานที่ทำการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

ตารางที่ 3.2 แสดงขนาดของชิ้นงานในการทดสอบแรงอัด

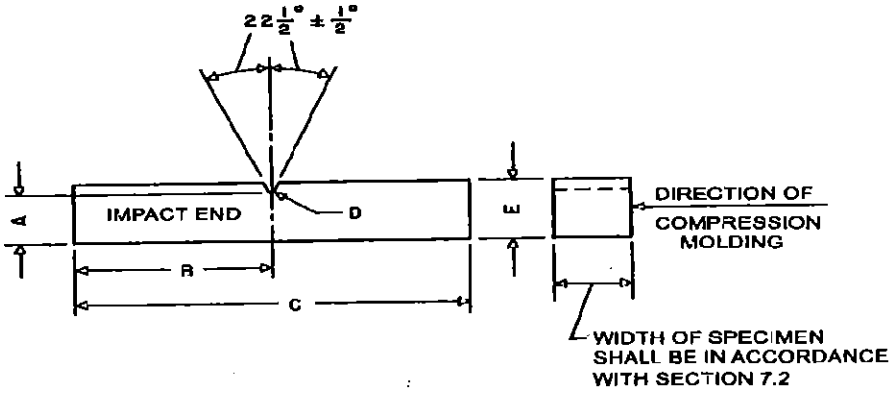
ความหนาของชิ้นงาน (mm.)	ความกว้างของชิ้นงาน (mm.)	ความยาวของชิ้นงาน (mm.)
10	10	20
16	16	32
18	18	36

ข. จากนั้นทำการวาดชิ้นงานตามความหนาที่กำหนดไว้แล้วทำการตัดชิ้นงานโดยใช้คัตเตอร์ขนาดใหญ่ที่มีใบมีดคม หรือใช้จิ๊กซอล์ตัดในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่ที่พอตัดได้ โดยตัดด้วยความระมัดระวังเพื่อไม่ให้ชิ้นงานนั้นเสียรูป จนไม่สามารถนำมาทดสอบได้

ค. หลังจากนั้นทำการตัดแต่งชิ้นงานให้มีสภาพสมบูรณ์มากขึ้น

3.3.1.3 การทดสอบสมบัติแรงกระแทก ASTM D256

ก. ขนาดของชิ้นงานขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ นอกจากนั้นแล้วยังขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงานด้วย โดยเกณฑ์มาตรฐานการกำหนดของ ASTM กำหนดให้ชิ้นงานที่จะใช้มาตรฐานนี้ทดสอบมีความหนาไม่เกิน 1.2 ซม. และขนาดการตัดหรือหล่อชิ้นงาน มีรูปแบบและมีขนาดดังนี้



รูปที่ 3-5 แสดงส่วนประกอบของขนาดชิ้นงานทดสอบแรงกระแทก [12]

ตารางที่ 3-3 แสดงขนาดของชิ้นงานในการทดสอบแรงกระแทก

สัญลักษณ์(ดูตามรูปด้านบน)	ขนาด(มิลลิเมตร)
A	10.16±0.05
B	31.8±1.0
C	63.5±2.0
D	0.25R±0.05
E	12.70±0.20

ข. จากนั้นทำการวาดชิ้นงานตามความหนาที่กำหนดไว้แล้วทำการตัดชิ้นงานโดยใช้คัตเตอร์ขนาดใหญ่ที่มีใบมีดคม หรือใช้จิ๊กซอล์ตัดในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่ที่พอตัดได้ โดยตัดด้วยความระมัดระวังเพื่อไม่ให้ชิ้นงานนั้นเสียรูป จนไม่สามารถนำมาทดสอบได้

ค. หลังจากนั้นทำการตัดแต่งชิ้นงานให้มีสภาพสมบูรณ์มากขึ้น

3.3.1.4 การทดสอบสมบัติแรงดัดโค้ง ASTM 790

ก. การตัดขนาดของชิ้นงานขึ้นรูปทรงของชิ้นงานให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุและประเภทของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ โดยการทดสอบนี้จะชิ้นงานออกเป็น 3 ขนาดโดยยึดเอาตามความหนาของชิ้นงานเป็นเกณฑ์ที่จะใช้บอกถึงขนาดในการทดสอบ

ตารางที่ 3-4 แสดงขนาดของชิ้นงานในการทดสอบแรงดัดโค้ง

ความหนาของชิ้นงาน (mm.)	ความกว้างของชิ้นงาน (mm.)	ความยาวของชิ้นงาน (mm.)
10	20	160
16	32	256
18	32	288

ข. จากนั้นทำการวาดชิ้นงานตามความหนาที่กำหนดไว้แล้วทำการตัดชิ้นงานใช้จิ๊กซอล์ ขณะควรทำด้วยความระมัดระวังเพื่อไม่ให้ชิ้นงานนั้นเสียรูป จนไม่สามารถนำมาทดสอบได้

ค. หลังจากนั้นทำการตัดแต่งชิ้นงานให้มีสภาพสมบูรณ์มากขึ้น

3.4 ขั้นตอนการทดสอบชิ้นงาน

3.4.1 การทดสอบสมบัติแรงดึง

ชิ้นงานที่จะนำมาใช้ในการทดสอบมี จำนวน 120 ชิ้น โดยจะแบ่งลักษณะของชิ้นงานตามความหนาและหน้าตัด ดังนี้ ชิ้นงานหน้าตัดแบบวงรี มีความหนา 10 มม. จำนวน 60 ชิ้น ชิ้นงานหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความหนา 10 มม. จำนวน 60 ชิ้น นำมาทดสอบสมบัติแรงดึงที่ 0 3 และ 6 เดือน จากชิ้นงานที่นำมาทดสอบนั้นมีเพียงชิ้นงานหน้าตัดแบบวงรี ความหนา 10 มม. และชิ้นงานหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 10 มม. เท่านั้น เพราะว่าเครื่องทดสอบแรงดึง มีบริเวณความกว้างของปากจับยึดชิ้นงานแคบที่ใส่ชิ้นงานได้เพียงความหนา 10 มม. เท่านั้น จึงทำให้ไม่สามารถทดสอบชิ้นงานที่มีความหนา 16 มม. และ18 มม.

3.4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติแรงดึง

ก. เครื่องทดสอบสมบัติแรงดึง

รูปที่ 3-7 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) สำหรับทดสอบแรงดึง

ข. ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์

รูปที่ 3-8 รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงดึง

ค. หัวโหลด

ง. สกรูที่ใช้ยึดจับหัวโหลด

3.4.1.2 วิธีการทดสอบชิ้นงาน

ก. แบ่งชิ้นงานที่เตรียมไว้เรียบร้อยแล้วออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่เป็นแนวตามและส่วนที่เป็นแนวขวาง

ข. นำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายชนิดหยาบอีกครั้งเพื่อให้ชิ้นงานจับกับหัวดึงชิ้นงานได้

ค. ทำการติดตั้งเครื่องหัวจับยึดชิ้นงานที่ เครื่องทดสอบเอนกประสงค์

ง. ทำการทดสอบชิ้นงาน โดยใช้ความเร็วในการทดสอบ 10 มิลลิเมตรต่อนาที

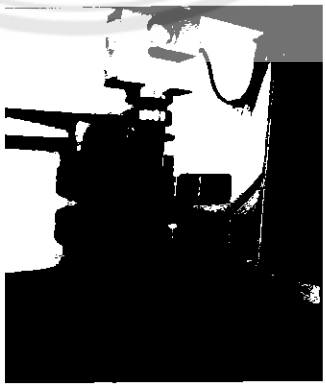
จ. จากนั้นรอชิ้นงานให้มีระยะยืดจนเกิดการเสียรูปอย่างถาวร ให้หยุดทำการทดสอบและบันทึกค่าที่ได้จากการทดสอบ

3.4.2 การทดสอบสมบัติแรงอัด

ชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบมีจำนวน 120 ชิ้น โดยแบ่งตาม ความหนาและลักษณะหน้าตัดดังนี้ หน้าตัดแบบวงรีความหนา 10 มม. จำนวน 30 ชิ้น หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสความหนา 10 มม. จำนวน 30 ชิ้น หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าความหนา 16 มม. จำนวน 30 ชิ้น และหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าความหนา 18 มม. จำนวน 30 ชิ้น ตามลำดับ นำมาทดสอบสมบัติแรงอัดที่ 0 3 และ 6 เดือน ชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีเพียงตามแนวขวางการขึ้นรูปเนื่องจากชิ้นงานที่ความหนา 16 และ 18 มม. ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบตามแนวการขึ้นรูปได้เนื่องจากบริเวณด้านหน้าของชิ้นงานมีความกว้างระหว่างช่องมากเกินไป ทำให้ไม่ได้ตามขนาดมาตรฐาน ASTM เมื่อทำการตัดชิ้นงานจะทำให้ได้ชิ้นงานออกมาไม่สมบูรณ์ และไม่สามารถนำมาทดสอบได้ ดังนั้นจึงเลือกตามแนวขวางการขึ้นรูปมาทดสอบเพียงแนวเดียว

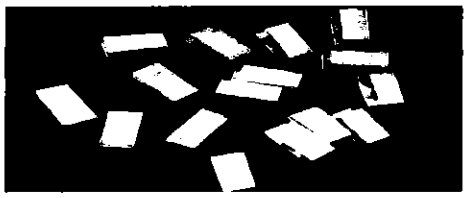
3.4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติแรงอัด

ก. เครื่องทดสอบสมบัติแรงอัด



รูปที่ 3-9 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) สำหรับทดสอบแรงอัด

ข. ชิ้นงานทดสอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูปที่ 3-10 รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงอัด

ค. หัวโหลด

ง. สกรูที่ใช้ยึดจับหัวโหลด

3.4.2.2 วิธีการทดสอบสมบัติชิ้นงาน

ก. แบ่งชิ้นงานที่เตรียมไว้เรียบร้อยแล้วออกเป็น 3 ส่วน แบ่งตามความหนาที่ใช้ในการทดสอบ คือ 10 มิลลิเมตร 16 มิลลิเมตร และ18 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ข. ทำการติดตั้งเครื่องกดชิ้นงาน โดยใช้น้ำหนักที่กดทับชิ้นงาน 10 กิโลนิวตัน

ค. จากนั้นทำการทดสอบโดยใช้ความเร็ว เริ่มต้นใช้ความเร็ว 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที หลังจากผ่านจุดคราก (Yield point) ให้เปลี่ยนความเร็วเป็น 5-6 มิลลิเมตรต่อนาที

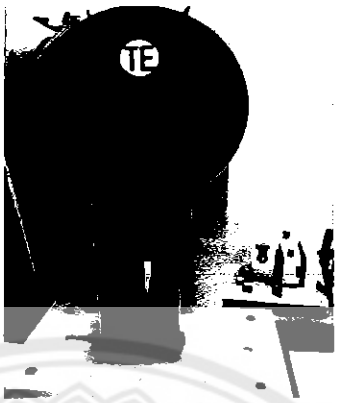
ง. รอจนกระทั่งชิ้นงานเสียรูปร่าง แตก หรือ หัก จากนั้นทำการบันทึกผลการทดลองและบันทึกผลที่ได้

3.4.3 การทดสอบสมบัติแรงกระแทก

ชิ้นงานที่จะนำมาทดสอบมี จำนวน 120 ชิ้น โดยแบ่งตาม ความหนาและลักษณะหน้าตัด ดังนี้ หน้าตัดแบบวงรีความหนา 10 มม. จำนวน 60 ชิ้น หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 10 มม. จำนวน 60 ชิ้น นำมาทดสอบสมบัติแรงกระแทกที่ 0 3 และ 6 เดือน ตามลำดับ ชิ้นงานที่นำมาทดสอบมีเพียงชิ้นงานหน้าตัดวงรี และหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่านั้น เนื่องจากเครื่องทดสอบแรงกระแทกความกว้างของปากจับยึดชิ้นงานมีความกว้างเพียง 12 มม. จึงไม่สามารถนำชิ้นงานที่มีความหนา 16 มม. และ 18 มม. มาทดสอบได้

3.4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติแรงกระแทก

ก. เครื่องทดสอบสมบัติแรงกระแทก



รูปที่ 3-11 เครื่องทดสอบแรงกระแทกสำหรับพลาสติก

ข. ชิ้นงานทดสอบรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้าและทำการบากรอยบาก

รูปที่ 3-12 รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ทดสอบแรงกระแทก

ค. ลูกตุ้มเหวี่ยงที่ใช้ในการกระแทก

3.4.3.2 วิธีการทดสอบชิ้นงาน

ก. ทำการเตรียมเครื่องให้เรียบร้อยโดยการใช้ลูกตุ้มเหวี่ยง 2.97 J

ข. ทำการวางชิ้นงานที่เครื่องทดสอบแบบ Izod ให้เรียบร้อย

ค. จากนั้นปล่อยลูกตุ้มเหวี่ยงมากระทบกับชิ้นงาน

ง. อ่านค่าและบันทึกค่าที่ได้จากเข็มหน้าปัดด้านบน

3.4.4 การทดสอบสมบัติแรงดัดโค้ง

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบมี จำนวน 240 ชิ้น โดยแบ่งตามความหนาและลักษณะหน้าตัด ดังนี้ หน้าตัดแบบวงรี ความหนา 10 มม. จำนวน 60 ชิ้น หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 10 มม. จำนวน 60 ชิ้น หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมพื้นผ้าความหนา 16 มม. จำนวน 60 ชิ้น และหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมพื้นผ้า ความหนา 18 มม. จำนวน 60 ชิ้น ตามลำดับ

3.4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติแรงดัดโค้ง

ก. เครื่องทดสอบสมบัติแรงดัดโค้ง

รูปที่ 3-13 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) สำหรับทดสอบแรงดัดโค้ง

ข. ชิ้นงานทดสอบรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้า

รูปที่ 3-14 รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ทดสอบสมบัติแรงดัดโค้ง

ค. หัวโหลด

ง. สกรูที่ใช้ยึดจับหัวโหลด

3.4.4.2 วิธีการทดสอบชิ้นงาน

ก. แบ่งชิ้นงานที่เตรียมไว้เรียบร้อยแล้วออกเป็น 3 ส่วน โดยแบ่งตามความหนาที่ใช้ในการทดสอบ คือ 10 มิลลิเมตร 16 มิลลิเมตร และ18 มิลลิเมตรและแบ่งตามแนวแกนออกเป็นอีก 2 แนว คือ แนวตามและแนวขวาง

ข. ทำการติดตั้งฐานรองรับชิ้นงานด้านล่างที่มีหัวดันอยู่ 2 อัน และหัวกดที่อยู่ด้านบนที่จะกดลงบนชิ้นงานอีก 1 อัน ใช้ขนาดโหลดเซลล์ 10 กิโลนิวตัน จากนั้นทำการปรับค่าเงื่อนไขที่ต้องการที่ระบบคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมทดสอบ โดยกำหนดช่วงวัด (Gage Range) ตามความหนาและความยาวของชิ้นงานแต่ละชิ้นได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.5 แสดงระยะที่ใช้รับแรงกดหรือระยะวัดของความหนาขนาดต่างๆ

ความหนาของชิ้นงาน (mm.)	ช่วงวัด (Gage Range) mm.
10	60
16	160
18	175

ค. จากนั้นทำการทดสอบโดยใช้ความเร็วใช้ความเร็วในการทดสอบ 5 มิลลิเมตรต่อนาที ในบางครั้งขณะทำการทดลองอยู่อาจต้องทำการปรับหมุนด้านขวาง เพื่อป้องกันการบิดเกลียวของปลายชิ้นทดสอบด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเค้นบิดเกิดขึ้นในชิ้น ชิ้นงานจึงมีพื้นที่สัมผัสกับหัวกดน้อยลง

ง. จากนั้นทำการบันทึกข้อมูล โดยการไม่ต้องรอให้ชิ้นงานแตกหรือหักก่อน เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็นวัสดุประเภทเหนียวจึงทำให้วัสดุมีการแตกหรือหักเป็นได้ยากจึงทำการกำหนดระยะยืดที่เหมาะสม และจึงหยุดทำการทดสอบ

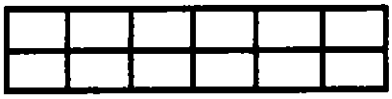
บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

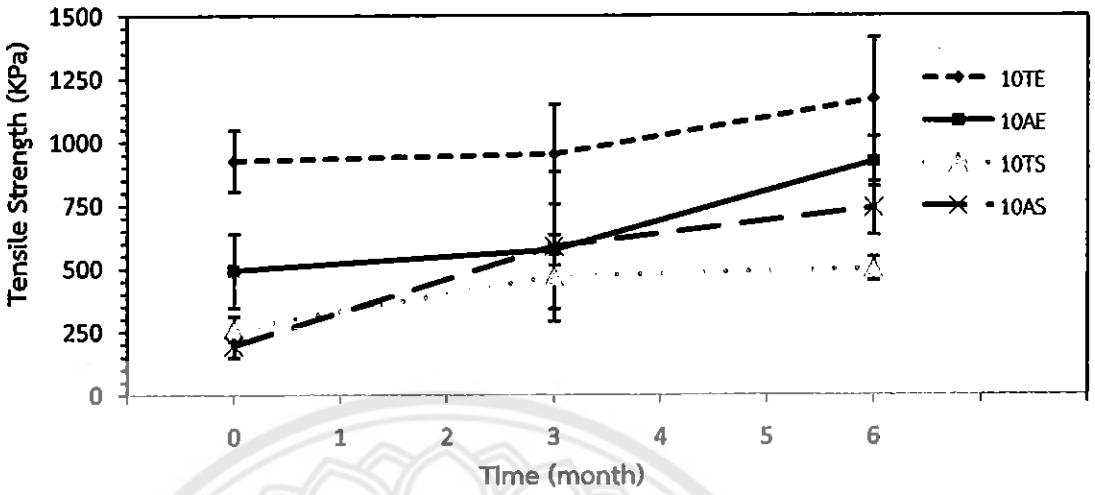
4.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

โครงงานนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางกล ของพอลิโพรพิลีนชีท หรือ พีพี ชีท และนำผลการทดสอบสมบัติทางกลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (Mathematics Model) เพื่อทำนายความเป็นไปได้ของการเสื่อมสภาพของชิ้นงาน ที่นำชิ้นงานไปใช้งานตามระยะเวลาต่างๆ ชิ้นงานที่นำมาทดสอบแต่ละชิ้นมีความหนาแตกต่างกันที่มีความหนา 10 16 และ 18 mm. และลักษณะหน้าตัดแบบวงรี แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแบบสี่เหลี่ยมพื้นผ้า จากนั้นนำชิ้นงานมาผ่านสภาพอากาศ (Weathering) ที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือนโดยในช่วงระยะเวลาที่ทำการผ่านสภาพอากาศมีอุณหภูมิเฉลี่ย 29.6 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยร้อยละ 71.78 และมีปริมาณน้ำฝนรวม 836.4 มิลลิเมตร ในระหว่างเดือน มีนาคม – ตุลาคม ปี 2555 และทำการศึกษาสมบัติแรงดึง สมบัติแรงอัด สมบัติแรงกระแทก และสมบัติแรงดัดโค้ง 3 จุด ของชิ้นงานทดสอบในแต่ละเดือน จากการนำชิ้นงานมาทดสอบทั้งหมด เพื่อให้ง่ายในการสื่อสารจึงมีการกำหนดรหัสชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 4-1

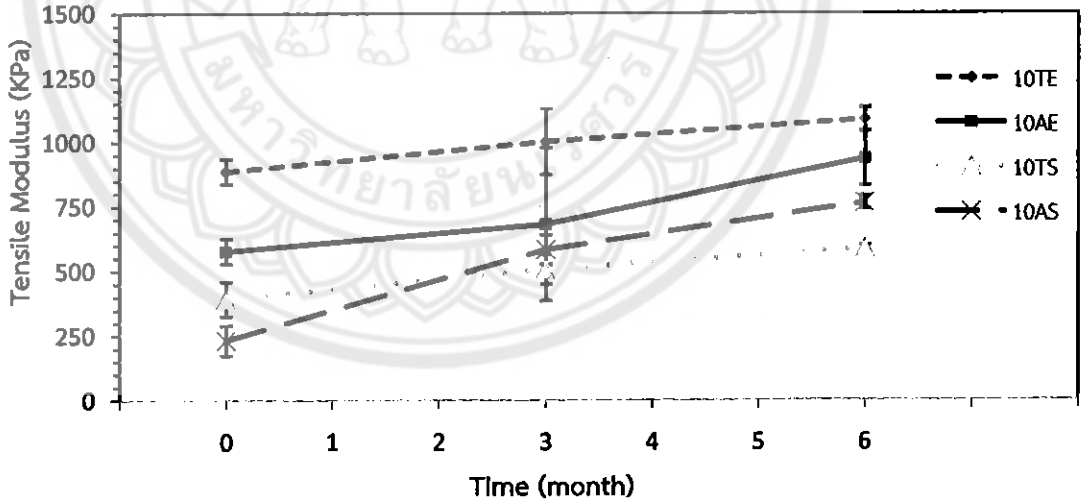
ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงรหัสชิ้นงานทดสอบ

รหัสของชิ้นงานทดสอบ			
ลักษณะหน้าตัด	ความหนา (มิลลิเมตร)	ลักษณะการตัดชิ้นงาน	
		ตามแนวการขึ้นรูป	ตามขวางแนวการขึ้นรูป
	10	10AE	10TE
	10	10AS	10TS
	16	16AR	16TR
	18	18AR	18TR

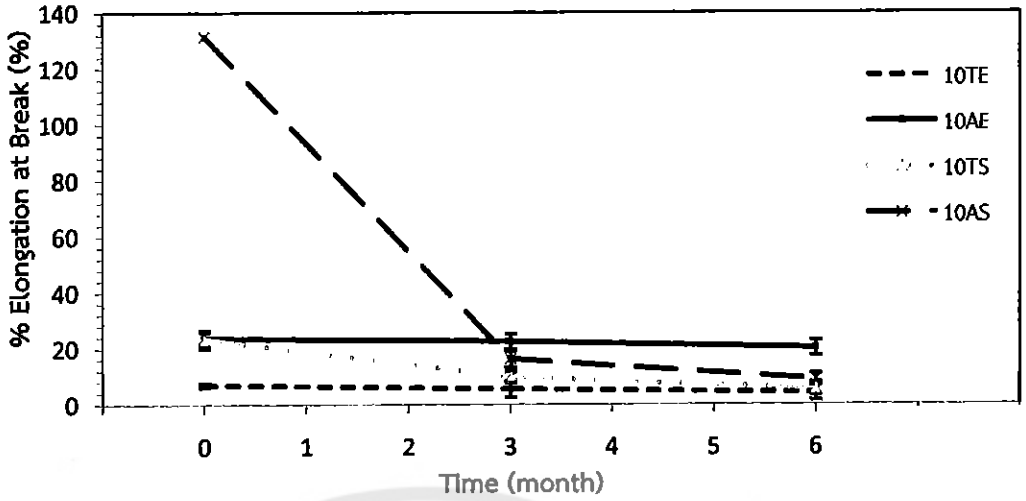
4.1.1 การทดสอบสมบัติแรงดึง (Tensile Testing)



รูปที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความแข็งแรงดึง ก) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10TE] ข) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูปหน้าตัดวงรี [10AE] ค) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] และ ง) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS]



รูปที่ 4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่ามอดูลัสแรงดึง ก) ชิ้นงาน ความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10TE] ข) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10AE] ค) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] และ ง) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS]



รูปที่ 4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ก) ชิ้นงาน ความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10TE] ข) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10AE] ค) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] และ ง) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS]

จากรูปที่ 4-1 4-2 และ 4-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัสแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด โดยความแข็งแรงดึง มอดูลัสแรงดึง เป็นความทนต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ที่เกิดจากลักษณะการยืดตัวออกของชิ้นงานเมื่อได้รับแรงดึงจากภายนอก ซึ่ง จะอาศัยเทอมทั้ง 2 เทอม ที่สัมพันธ์กัน คือ ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) เมื่อชิ้นงานได้รับความเค้นจากแรงดึง จะทำให้พอลิเมอร์ยืดยาวออกจนถึงจุดที่พอลิเมอร์เกิดการเสียสภาพเนื่องจากการขยายตัวของชิ้นงาน จึงทำให้ชิ้นงานขาดออกจากกันในที่สุด และเมื่อพอลิเมอร์ถูกดึงยืดออกที่ความเครียดสูงๆ หลังจุดคราก (Yield Point) สายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดการไหลเลื่อนออกจากการยืดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ (Slip) จึงทำให้เกิดการเสียสภาพแบบพลาสติก (Plastic Deformation) [4] จากการทดสอบสมบัติแรงดึง เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศพบว่า ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสแรงดึง มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อผ่านระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน เพราะว่าชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อดูจากเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลง แสดงว่าชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่เป็นความแข็งชนิดเปราะจากงานวิจัย Mashael Al-Shabanat [23] ศึกษาการผ่านสภาพอากาศของแผ่นพอลิโพรพิลีนและทำการทดสอบแรงดึง พบว่าค่าสมบัติเชิงกลมีค่าลดลงเมื่อผ่านสภาพอากาศนานขึ้น เนื่องจากเกิดการผุกร่อนที่พื้นที่ผิวก่อน และลึกลงไปยังบริเวณพื้นที่ด้านใน แต่เนื่องจากชิ้นงานมีแนวการขึ้นรูปและลักษณะพื้นที่หน้าตัดไม่เหมือนกัน จึงทำให้การผุกร่อนเกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวไม่เท่ากัน และเมื่อลึกลงไปในพื้นที่ด้านในการผุกร่อนจะไม่เท่ากัน ที่ระดับความลึกเท่ากันชิ้นงานแต่ละชิ้นอาจจะขาดหรือไม่ขาดออกจากกันก็ได้

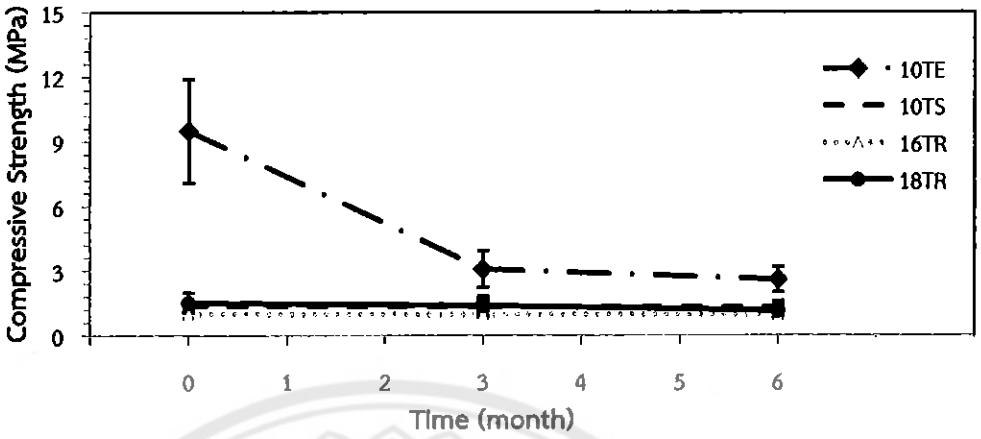
เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศ ตามลักษณะการขึ้นรูป พบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรี [10TE] มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุดก่อนนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศ และเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน พบว่าชิ้นงานมีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 927 953.1 และ 1168.3 KPa ตามลำดับ และ เมื่อพิจารณาค่ามอดูลัสแรงดึงของ ชิ้นงาน [10TE] มีค่ามอดูลัสแรงดึงมากที่สุดก่อนจะนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศและเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน พบว่ามีค่ามอดูลัสแรงดึงเท่ากับ 886.89 1000.40 และ 1087.14 KPa ตามลำดับ ชิ้นงาน [10TE] มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงมากที่สุด เนื่องจากชิ้นงาน [10TE] มีโปรไฟล์ที่ช่วยเสริมแรงมากกว่าจึงทำให้ต้านทานแรงดึงได้มากกว่าชิ้นงาน [10AE] โดยเทียบจากแรงต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ดังนั้นชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปที่มีเส้นของการเสริมแรงมากกว่าชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปจึงทำให้ลักษณะโปรไฟล์มีผลต่อการรับแรง ส่งผลให้ชิ้นงานโปรไฟล์ที่ตัดตามแนวขวางการขึ้นรูป มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีความหนาเท่ากันและมีพื้นที่หน้าตัดต่างกัน ที่ทำให้การกระจายแรงบนพื้นผิวของชิ้นงานได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งที่สอดคล้องกับงานวิจัย P. Phulakerda และคณะ [21] ของการทดสอบสมบัติแรงดึง และเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงาน ก่อนนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศและเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน พบว่าชิ้นงาน ที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS] มีความอ่อนตัวหรือเหนียวตัวมากกว่าชิ้นงานอื่นเพราะมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมากที่สุด เท่ากับ 131.58 16.41 และ 9.12 พบว่าก่อนนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศมีความสามารถในการยืดตัวมากที่สุด เนื่องจากชิ้นงานทดสอบตามแนวการขึ้นรูปมีการจัดเรียงตัวที่เป็นลักษณะเฉพาะ และรวมทั้งมีการตัดชิ้นงานตามแนวการฉีดขึ้นรูปของพอลิเมอร์ทำให้มีความสามารถในการยืดตัวออกได้มาก แต่เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน พบว่าค่าการยืดตัวชิ้นงานมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ใกล้เคียงกับชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป เนื่องจากผลของสภาพอากาศทำลายโครงสร้างบางส่วนของชิ้นงาน แต่ชิ้นงานยังมีความสามารถรับแรงได้ดี ไม่ได้เสียหาย และเมื่อดูจากกราฟที่ 4-3 พบว่าชิ้นงานมีการยืดตัวลดลง ที่เกิดจากการแข็งตัวขึ้นของชิ้นงาน แต่เป็นการแข็งตัวขึ้นแบบเปราะ

เมื่อพิจารณาการผ่านสภาพอากาศเป็นกรณีของลักษณะหน้าตัด พบว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบวงรี มีค่าความแข็งแรงดึง และมอดูลัสแรงดึงมากกว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส จากการคำนวณพื้นที่ภายในโปรไฟล์ พบว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบวงรีมีปริมาณเนื้อพอลิเมอร์ มากกว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ส่งผลต่อการรับแรงและการถ่ายเทแรงที่มากกว่า แต่เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมากกว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบวงรี เนื่องจากขนาดพื้นที่หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดแบบวงรีจึงทำให้เกิดเสียรูปจากการยืดตัวได้ง่าย

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานจากการผ่านสภาพอากาศ พบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS] มีค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงดึงเฉลี่ยเป็นเปอร์เซ็นต์เพิ่มมากที่สุด เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน มีค่าเท่ากับ 200.36 และ 277.18 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่ามอดูลัสแรงดึงเป็นเปอร์เซ็นต์เพิ่มมากที่สุด คือชิ้นงาน [10AS] เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน มีค่าเท่ากับ 151.32 และ 229.34 จากการเปรียบเทียบลักษณะหน้าตัดทั้งสอง พบว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีเปอร์เซ็นต์เพิ่มมากกว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบวงรี แสดงว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส แข็งตัวมากขึ้นในช่วงระยะเวลา 6 เดือนแรกและมีการกระจายแรงภายในชิ้นงานได้ดีกว่า และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ จากการยืดตัวของชิ้นงาน พบว่า ชิ้นงาน [10AS] มีค่าการลดลงเป็นเปอร์เซ็นต์ มากที่สุด เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน มีค่าเท่ากับ 87.53 และ 93.07 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัสแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ได้รับผลกระทบมาจากการผ่านสภาพอากาศ ที่ภายในเนื้อพอลิเมอร์เกิดการหลุดเลื่อน จากการเกิดออกซิเดชันภายในโปรไฟล์ ที่สอดคล้องกับงานวิจัย Mashael Al-Shabanat [23] ศึกษาการผ่านสภาพอากาศของพอลิโพรพิลีน และทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวพอลิเมอร์เมื่อผ่านสภาพอากาศ

จากรูปที่ 4-3 พบว่าเส้นกราฟของชิ้นงาน [10AS] ที่ระยะเวลา 0 เดือน ไม่มีเส้นค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น เนื่องจากเครื่องทดสอบมีการกำหนดระยะยืดของชิ้นงานได้ไม่เกิน 140 มิลลิเมตร และชิ้นงานยังไม่ถึงจุดขาดออกจากกัน จึงทำให้ไม่สามารถสร้างเส้นความคลาดเคลื่อนได้

4.1.2 การทดสอบสมบัติแรงอัด (Compression Testing)



รูปที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความแข็งแรงอัด ก) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10TE] ข) ชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] ค) ชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] และ ง) ชิ้นงานความหนา18 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18TR]

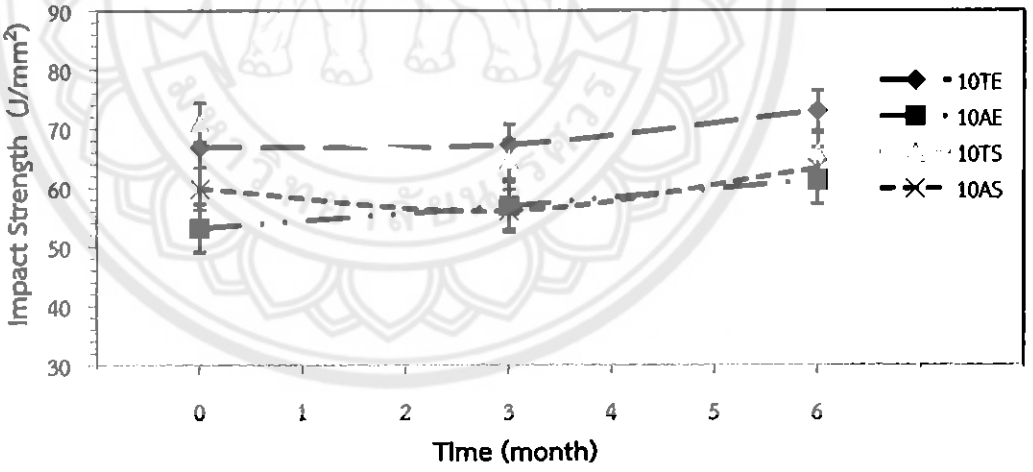
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะเวลา กับ ค่าความแข็งแรงอัด โดยความแข็งแรงอัดเป็นแรงที่กระทำกับชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ผิว ที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวหรือ อัดตัวภายใต้แรงอัดนั้น ซึ่งค่าความแข็งแรงอัดจะแสดงถึงความสามารถในการทนต่อแรงอัดหรือการบีบทำให้เกิดความเค้นอัดจนวัสดุยุบตัวไปตามแนวแรง ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวชิ้นงาน [9] ซึ่งถ้ามีค่าความแข็งแรงอัดมากแสดงว่าชิ้นงานสามารถรับแรงอัดได้มาก และเสียรูปจากแรงอัดได้น้อย แต่ถ้ามีค่าความแข็งแรงน้อย แสดงว่าชิ้นงานรับแรงอัดได้น้อย และเสียรูปจากการแรงอัดได้มาก [12] ดังแสดงในรูปที่ 4-4 ชิ้นงานลักษณะหน้าตัดแบบวงรี หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ที่มีการตัดชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศ ที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน พบว่าชิ้นที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดแบบวงรี [10TE] มีค่าความแข็งแรงอัดลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากชิ้นงานเกิดการเสื่อมสภาพ จากการผุกร่อน ทำให้เกิดการเปราะภายในโปรไฟล์ และโมเลกุลเกิดการจับตัวกันอย่างหลวมๆ ที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง [14]

เมื่อพิจารณาการผ่านสภาพอากาศเป็นกรณีของลักษณะหน้าตัด พบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรี [10TE] มีค่าความแข็งแรงอัดเฉลี่ยมากที่สุด เท่ากับ 9.5 MPa เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็ง และเนื้อพอลิเมอร์ของชิ้นงานที่มีหน้าตัดรูปวงรีมีมากกว่าหน้าตัดรูปอื่นๆ โดยคิดปริมาณต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน มีค่าความแข็งแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 3.09 MPa และ 2.60 MPa จากการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน พบว่ามีค่าลดลง เนื่องจากการทำลายจากการผ่านสภาพอากาศที่เริ่มจากพื้นที่ผิวด้านบนจึงทำให้ค่าความแข็งแรงอัดลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงอัดของชิ้นงาน [10TE] ยังมีค่าความแข็งแรงอัดมากกว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เมื่อพิจาณาการเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานจากการผ่านสภาพอากาศ พบว่าชิ้นงาน [10TE] มีค่าการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงอัดเฉลี่ยเป็นเปอร์เซ็นต์ลดลงมากที่สุด เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน มีค่าเท่ากับ 67.47 และ 72.63 จากการเปรียบเทียบลักษณะพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน หน้าตัดแบบวงรี หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า พบว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบวงรีก่อนผ่านสภาพอากาศรับแรงอัดได้ดีที่สุด แต่เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การลดลงมากที่สุด เนื่องจากชิ้นงานมีการเสื่อมสภาพที่พื้นที่ผิว และพื้นที่ภายในหน้าตัดอย่างรวดเร็ว [23] แต่ชิ้นงานยังคงมีค่าความแข็งแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่าชิ้นงานที่มีหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

4.1.3 การทดสอบสมบัติแรงกระแทก (Impact Resistance)



รูปที่4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับการรับแรงกระแทก ก) ชิ้นงาน ความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10TE] ข) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10AE] ค) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] และ ง) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS]

จากกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างระยะเวลากับการรับแรงกระแทก โดยแรงกระแทกเป็นการวัดการส่งถ่ายพลังงานที่จำเป็นในการแตกหักของ วัสดุ ค่าความแข็งแรงการกระแทกจะบ่งบอกถึง

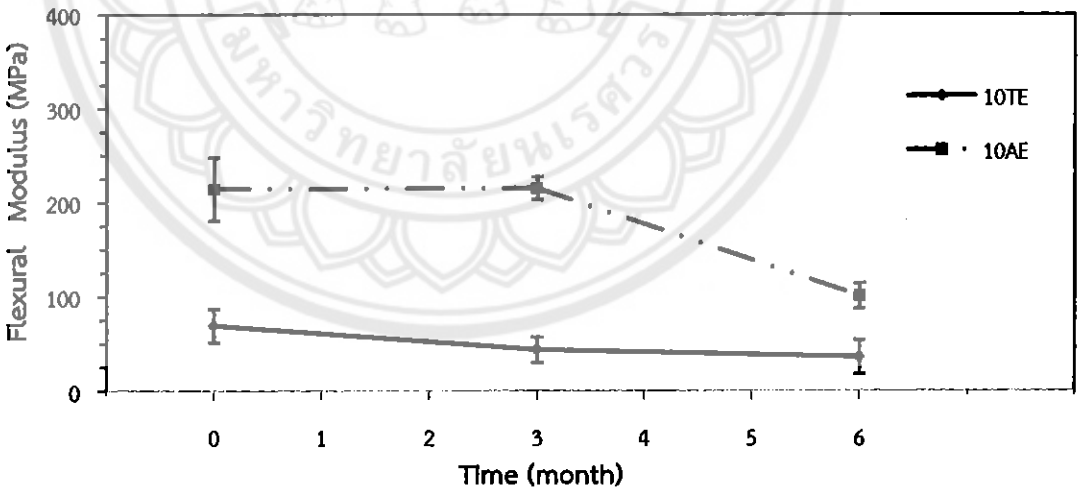
ความสามารถในการรับแรงแบบฉับพลัน (Shock Load) แม้พลังงานไม่สามารถสร้างและทำลาย แต่พลังงานการกระแทกจะสูญเสียไปในการเสียรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวรของวัสดุ ชิ้นงานที่มีการการตัดตามแนวขวางการขึ้นรูป และตามแนวการขึ้นรูป จะส่งผลต่อพลังงานการกระแทกที่สูญเสียให้แก่ชิ้นงาน เนื่องจากเกิดแรงเสียดทานจากการจัดเรียงตัวในแนวโปรไฟล์ที่ไม่เหมือนกัน [9] จากสมบัติการรับแรงกระแทก ดังรูปที่ 4-5 เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศ เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าการรับแรงกระแทกเกิดขึ้น พบว่าชิ้นงานบางส่วนมีค่าการรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้น คือชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดขวางแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบวงรี [10TE] และชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบวงรี [10AE] นอกจากนี้ยังมีชิ้นงานบางส่วนมีค่าการรับแรงกระแทกลดลง คือชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดขวางแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] และชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS] เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่าชิ้นงานบางส่วนมีค่าการรับแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้น คือชิ้นงาน [10TE] และชิ้นงาน [10AE] และชิ้นงานบางส่วนมีค่าการรับแรงกระแทกลดลง คือชิ้นงาน [10TS] และ ชิ้นงาน [10AS] ดังนั้นจากผลของการผ่านสภาพอากาศของชิ้นงาน จึงสรุปได้ว่า ชิ้นงาน [10TE] และชิ้นงาน [10AE] ที่มีค่าการรับแรงกระแทกเพิ่มสูง เนื่องจากชิ้นงานแข็งมากขึ้น อาจจะแข็งเปราะ และมีการกระจายแรงไปยังพื้นที่ผิวหน้าตัดสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงาน [10TE] และชิ้นงาน [10AE] ที่มีลักษณะแนวการขึ้นรูปต่างกันแต่มีพื้นที่หน้าตัดแบบวงรีเหมือนกัน พบว่าค่าการกระแทกของชิ้นงาน [10TE] มีค่ามากกว่าชิ้นงาน [10AE] เนื่องจากชิ้นงานมีโปรไฟล์ที่ช่วยเสริมแรงมากกว่าจึงทำให้ต้านทานแรงได้กว่าต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ดังนั้นชิ้นงานเป็นโปรไฟล์ที่มีการเสริมแรงจึงรับแรงได้ดีกว่าชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปที่มีการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะเฉพาะตามแนว ชิ้นงาน [10TS] ที่มีค่าการรับแรงกระแทกลดลง เนื่องจากชิ้นงานการเสื่อมสภาพที่เกิดจากการผ่านสภาพอากาศที่ทำให้มีการทำลายโครงสร้างบางส่วนของชิ้นงาน การเสื่อมสภาพจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวด้านบนของชิ้นงานก่อนและ แตกลึงลงไปภายในโปรไฟล์ และส่วนชิ้นงานที่มีค่าการรับแรงกระแทกลดลงใน 3 เดือนแรก และ 3 เดือนหลังมีค่าเพิ่มสูงขึ้น คือชิ้นงาน [10AS] เนื่องจากเมื่อผ่านสภาพอากาศใน 3 เดือนแรก ชิ้นงานเกิดการเสื่อมสภาพและเกิดการทำลายโครงสร้างบางส่วน จึงทำพื้นที่ผิวที่รับแรงกระแทกรับแรงได้น้อยลง และเมื่อผ่านระยะเวลา 3 เดือนหลัง พบว่าชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้น อาจเกิดมาจากพื้นที่ผิวที่รับแรงกระแทกเป็นส่วนที่ยังไม่ถูกทำให้เกิดเสื่อมสภาพหรือถูกทำลายโครงสร้าง ซึ่งส่วนที่ถูกทำให้เสื่อมสภาพหรือถูกทำลายโครงสร้างจะอยู่บนส่วนอื่นของพื้นผิวชิ้นงาน

เมื่อพิจารณาการผ่านสภาพอากาศเป็นกรณีของลักษณะหน้าตัด พบว่า เมื่อผ่านสภาพอากาศ 0 3 และ 6 เดือน ชิ้นงาน [10TE] มีค่าการรับแรงกระแทกเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 66.86 67.36 และ73.00 J/mm^2 ซึ่งมากกว่าชิ้นงานอื่น ชิ้นงาน [10TE] มีค่าการรับแรงกระแทกเฉลี่ยมากกว่าชิ้นงานอื่น เนื่องจากชิ้นงานมีโปรไฟล์ที่ช่วยเสริมแรงมากกว่าจึงทำให้ต้านทานแรงได้กว่าต่อหน่วยพื้นที่หน้า

ตัดเท่ากัน ดังนั้นชิ้นงานเป็นโปรไฟล์ที่มีการเสริมแรงมากกว่าจึงรับแรงได้ดีกว่า [14] และเมื่อพิจารณาลักษณะการแตกหักของชิ้นงานจากการทดสอบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ การแตกหักแบบสมบูรณ์ และการแตกหักแบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งการแตกหักแบบไม่สมบูรณ์จะแตกในชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านสภาพอากาศเป็นส่วนใหญ่ ร้อยละ 30 ส่วนการแตกหักแบบสมบูรณ์จะเป็นชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศ ร้อยละ 70 จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า ชิ้นงานก่อนนำไปผ่านสภาพอากาศอาจจะมีความแข็งเหนี่ยวที่ยังไม่มีการเสื่อมสภาพเกิดขึ้น แต่เมื่อผ่านสภาพอากาศชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงอาจจะมีความแข็งเปราะ อ่อนเปราะ ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของชิ้นงานอธิบายเพิ่มเติมจากทฤษฎีในหัวข้อ (2.274, 2.275)

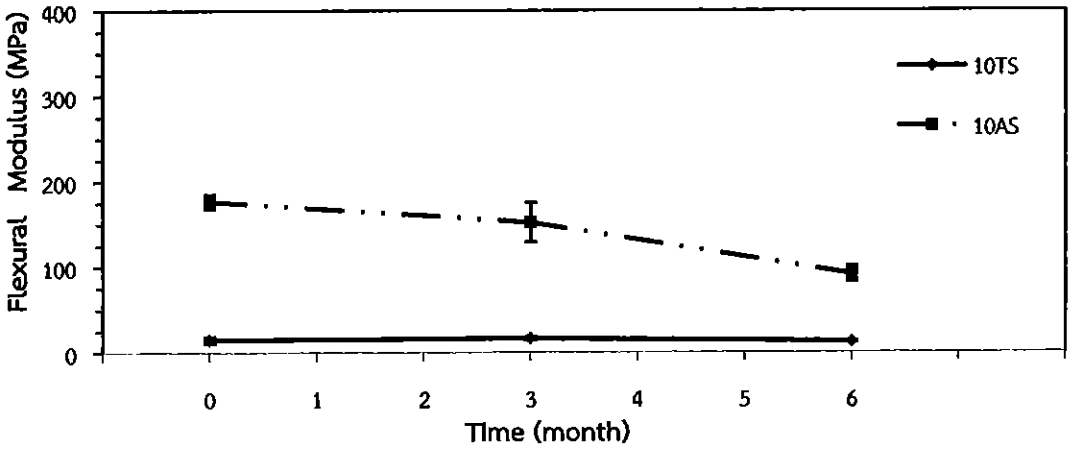
เมื่อพิจาณาการเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์ของชิ้นงานจากการผ่านสภาพอากาศ พบว่าชิ้นงาน [10AE] มีค่าการเปลี่ยนแปลงการรับแรงกระแทกเฉลี่ยเป็นเปอร์เซ็นต์เพิ่มมากที่สุด เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน มีค่าเท่ากับ 7.10 และ 15.25 ที่เปรียบเทียบจากหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมพื้นผ้า ชิ้นงานพื้นที่หน้าตัดแบบวงรี มีค่าการรับแรงกระแทกได้เพิ่มสูงกว่า จากการผ่านสภาพอากาศ เนื่องจากชิ้นงานมีพื้นที่หน้าตัดมากกว่า และเมื่อรับแรงกระแทกมีการกระจายแรงได้ดีทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานที่มีค่าการทนต่อแรงกระแทกสูงจะมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานด้านกล่องบรรจุภัณฑ์ หรือ อุปกรณ์กีฬา [13]

4.1.4 การทดสอบสมบัติแรงดัดโค้ง 3 จุด (Three-point Flexural)

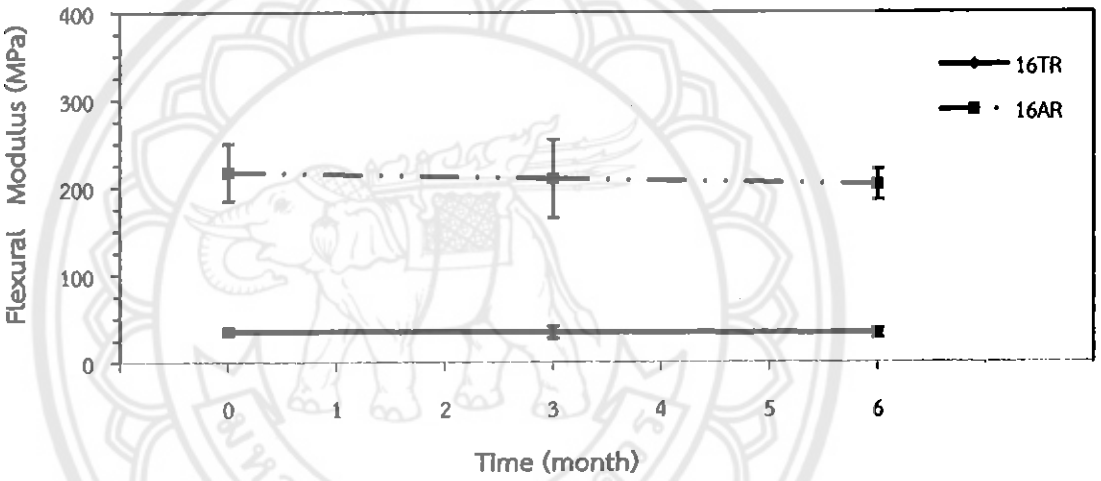


ก)

รูปที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่ามอดูลัสความโค้งงอ ก) ชิ้นงาน ความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10TE] และ ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10AE]

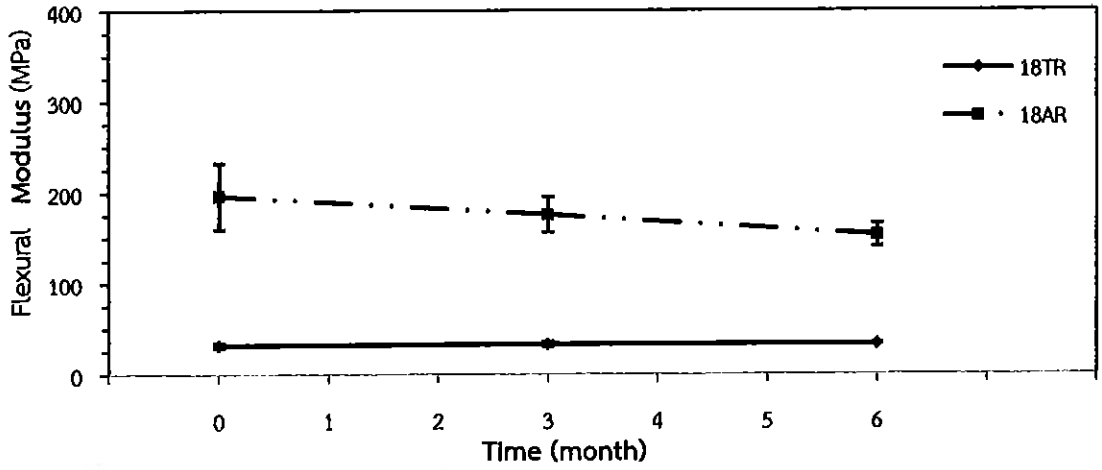


ข)



ค)

รูปที่ 4-6 (ต่อ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่ามอดูลัสความโค้งงอ ข) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] และชิ้นงานความหนา 10มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS] ค) ชิ้นงาน ความหนา 16 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] และ ชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16AR]



ง)

รูปที่ 4-6 (ต่อ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่ามอดูลัสความโค้งงอ ง) ชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18TR] และชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18AR]

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่ายังมอดูลัสความโค้งงอ ของพอลิโพรพิลีนโดยมอดูลัสความโค้งงอ คือ แรงที่เกิดจากการกดอัดแบบโค้งงอทำให้เกิดความเค้นขึ้นบริเวณภายในชิ้นงาน จากรูปที่ 4-6 พบว่าชิ้นงานทั้งหมดทุกความหนาและทุกลักษณะหน้าตัด เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งแรงโค้งงอเกิดขึ้น มอดูลัสความโค้งงอมีค่าลดต่ำลง เนื่องจากชิ้นงานเกิดการเสื่อมสภาพและเกิดการผุกร่อนบนพื้นที่ผิวและลึกลงไปยังพื้นที่หน้าตัด ที่โครงสร้างบ้างส่วนถูกทำลาย และส่งผลต่อการจับตัวกันอย่างหลวมๆ ของโมเลกุล [14]

จากรูปที่ 4-6 ก) คือ ชิ้นงานหน้าตัดแบบวงรี ที่มีการขึ้นรูปแบบตามแนวขวางการขึ้นรูปและตามแนวการขึ้นรูป พบว่าก่อนนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศและนำไปผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน ชิ้นงานที่มีค่ายังมอดูลัสความโค้งงอมากที่สุด คือ ชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรี [10AE] มีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยก่อนผ่านสภาพอากาศเท่ากับ 214.43 MPa เนื่องจากชิ้นงาน [10AE] มีแนวการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะเฉพาะตามแนว เมื่อมีการรับแรงจึงมีการกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิวชิ้นงาน และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 215.63 MPa และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน มีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 101.276 MPa พบว่าค่ามอดูลัสโค้งงอลดลง เนื่องจากเกิดการทำลายจากการผ่านสภาพอากาศที่เริ่มจากพื้นที่ผิวด้านบนจึงทำให้ค่ามอดูลัสความโค้งงอลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่ามอดูลัสความโค้งงอของชิ้นงาน [10AE] ยังมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรี [10TE] ที่มากกว่าก่อนผ่านสภาพ

อากาศเท่ากับ 3.1 เท่า และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน เท่ากับ 4.9 และ 2.8 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบการเสื่อมสภาพจากการผ่านสภาพอากาศของชิ้นงาน พบว่า ชิ้นงาน [10AE] จะเสียรูปได้มากกว่า ชิ้นงาน [10TE] และเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงาน [10AE] ที่ระยะเวลา 3 เดือน เท่ากับ 0.56 พบว่ามีเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากบริเวณพื้นที่ผิวที่รับแรงยังอาจยังไม่ใช่ส่วนที่ถูกทำลายโครงสร้าง แต่ส่วนที่ถูกทำลายโครงสร้างอยู่บริเวณพื้นผิวส่วนอื่นของชิ้นงาน และที่ระยะเวลา 6 เดือนเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอลดลง เท่ากับ 52.77 เนื่องจากพื้นที่ผิวรับแรงถูกทำลายโครงสร้าง ที่เกิดจากการผ่านสภาพอากาศ ส่วนเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอลดลงของชิ้นงาน [10TE] ที่ระยะเวลา 3 เดือน เท่ากับ 3.89 และที่ระยะเวลา 6 เดือนเท่ากับ 5.92 พบว่าชิ้นงานตัดตามแนวการขึ้นรูปมีเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอลดลงมากกว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป แสดงว่าชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปถูกทำลายโครงสร้างมากกว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป แต่ชิ้นงานยังมีความสามารถรับแรงได้ดี ไม่ได้เสียหาย

จากรูปที่ 4-6 ข) คือ ชิ้นงานหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีการขึ้นรูป ตัดชิ้นงานแบบตามแนวขวางการขึ้นรูป [10TS] และตามแนวการขึ้นรูป [10AS] พบว่าชิ้นงานที่มีค่ายังมอดูลัสความโค้งงอมากที่สุด คือ ชิ้นงาน [10AS] ซึ่งมีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 176.65 MPa เนื่องจากชิ้นงาน [10AS] มีแนวการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะเฉพาะตามแนว เมื่อมีการรับแรงจึงมีการกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิวชิ้นงานและเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 152.29 MPa และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน มีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 91.85 MPa ตามลำดับ พบว่าค่ามอดูลัสโค้งงอลดลงเนื่องจากเกิดการทำลายจากการผ่านสภาพอากาศที่เริ่มจากพื้นที่ผิวด้านบนจึงทำให้ค่ามอดูลัสความโค้งงอลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่ามอดูลัสความโค้งงอของชิ้นงาน [10AS] ยังมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] ที่มากกว่าก่อนผ่านสภาพอากาศเท่ากับ 11.9 เท่า และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน เท่ากับ 9.2 และ 7.2 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบการเสื่อมสภาพของชิ้นงานจากการผ่านสภาพอากาศพบว่าชิ้นงาน [10AS] จะเสียรูปได้มากกว่า ชิ้นงาน [10TS] และเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอที่ลดลงของชิ้นงาน [10AS] ที่ระยะเวลา 3 เดือน เท่ากับ 13.79 และที่ระยะเวลา 6 เดือน เท่ากับ 48.00 ส่วนเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอเพิ่มขึ้นของชิ้นงาน [10TS] ที่ระยะเวลา 3 เดือน เท่ากับ 12.50 เปอร์เซ็นต์มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากบริเวณพื้นที่ผิวที่รับแรงยังอาจยังไม่ใช่ส่วนที่ถูกทำลายโครงสร้าง แต่ส่วนที่ถูกทำลายโครงสร้างอยู่บริเวณพื้นส่วนอื่นบนชิ้นงาน และที่ระยะเวลา 6 เดือน เปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอลดลงเท่ากับ 13.74 เนื่องจากพื้นที่ผิวรับแรงถูกทำลายโครงสร้างที่เกิดจากการผ่านสภาพอากาศ จึงสรุปได้ว่าชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูป มีเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอลดลงมากกว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป เนื่องจากชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปถูกทำลายโครงสร้างมากกว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป

จากรูปที่ 4-6 ค) คือ ชิ้นงานที่มีหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ระดับความหนา 16 mm. พบว่าค่ายังมอดูลัสความโค้งงอของชิ้นงานมีค่ามากที่สุด คือ ชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16AR] ซึ่งมีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 217.35 MPa เนื่องจากชิ้นงาน [16AR] มีแนวการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะเฉพาะตามแนว เมื่อมีการรับแรงจึงมีการกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิวชิ้นงานเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 209.90 MPa และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน มีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 203.24 MPa ตามลำดับ พบว่าค่ามอดูลัสโค้งงอลดลงเนื่องจากเกิดการทำลายจากการผ่านสภาพอากาศที่เริ่มจากพื้นที่ผิวด้านบนจึงทำให้ค่ามอดูลัสความโค้งงอลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่ามอดูลัสความโค้งงอของชิ้นงาน [16AR] ยังมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] ที่มากกว่าก่อนผ่านสภาพอากาศเท่ากับ 6.1 เท่า และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน เท่ากับ 6.0 และ 6.1 เท่า ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าชิ้นงาน [16AR] สามารถยืดหยุ่นจากการดัดโค้งงอ ได้มากกว่าชิ้นงาน [16TR] ที่การเสียรูปจากการดัดโค้งงอของชิ้นงาน [16AR] จะเสียรูปได้มากกว่า ชิ้นงาน [16TR] และเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอที่ลดลงของชิ้นงาน [16AR] ที่ระยะเวลา 3 เดือน เท่ากับ 3.38 และที่ระยะเวลา 6 เดือน เท่ากับ 6.49 ส่วนเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอลดลงของชิ้นงาน [16TR] ที่ระยะเวลา 3 เดือน เท่ากับ 2.49 และที่ระยะเวลา 6 เดือนเท่ากับ 6.13 พบว่าชิ้นงานตัดตามแนวการขึ้นรูปมีเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอลดลงมากกว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป แสดงว่าชิ้นงานตามการขึ้นรูปถูกทำลายโครงสร้างมากกว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป แต่ชิ้นงานยังมีความสามารถรับแรงได้ดี ไม่ได้เสียหาย

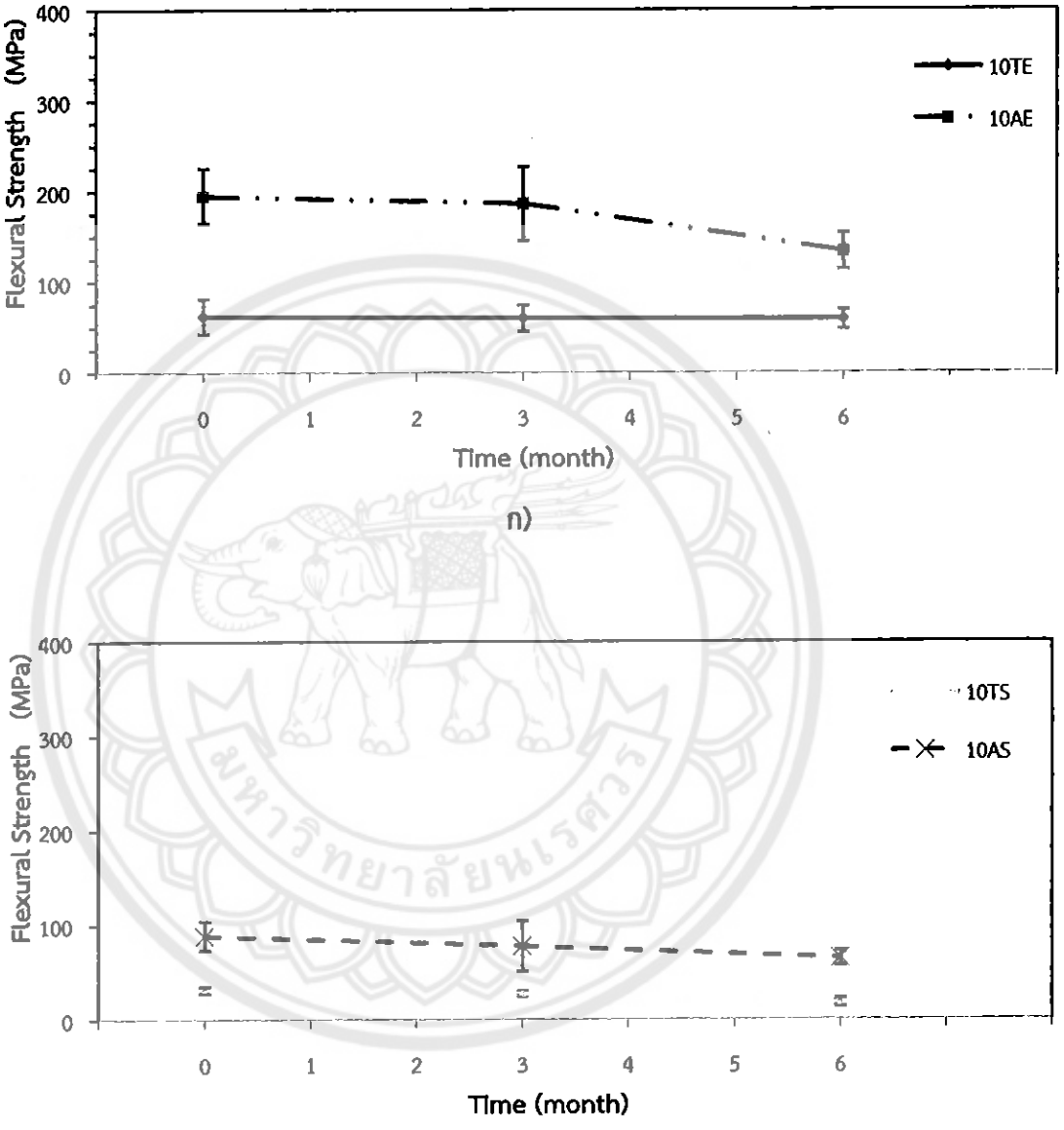
จากรูปที่ 4-6 ง) คือ ชิ้นงานหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ระดับความหนา 18 mm. พบว่าค่ายังมอดูลัสความโค้งงอของชิ้นงานที่มีค่ามากที่สุด คือ ชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18AR] ซึ่งมีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 195.93 MPa เนื่องจากชิ้นงาน [18AR] มีแนวการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะเฉพาะตามแนว เมื่อมีการรับแรงจึงมีการกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิวชิ้นงาน เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 175.70 MPa และผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือนมีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 150.03 MPa พบว่าค่ามอดูลัสโค้งงอลดลงเนื่องจากเกิดการทำลายจากการผ่านสภาพอากาศที่เริ่มจากพื้นที่ผิวด้านบนจึงทำให้ค่ามอดูลัสความโค้งงอลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่ามอดูลัสความโค้งงอของชิ้นงาน [16AR] ยังมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18TR] ที่มากกว่าก่อนผ่านสภาพอากาศเท่ากับ 6.11 เท่า และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน เท่ากับ 5.29 และ 4.55 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบการเสื่อมสภาพของชิ้นงานจากการผ่านสภาพอากาศ พบว่าชิ้นงาน [18AR] จะเสียรูปได้

น้อยกว่า ชิ้นงาน [18TR] และเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอที่ลดลงของชิ้นงาน [18AR] ที่ระยะเวลา 3 เดือน เท่ากับ 10.33 และที่ระยะเวลา 6 เดือน เท่ากับ 21.89 ส่วนเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอของชิ้นงาน [18TR] กลับมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลา 3 เดือนเพิ่มขึ้น เท่ากับ 3.56 และที่ระยะเวลา 6 เดือน เท่ากับ 4.88 พบว่าเปอร์เซ็นต์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากบริเวณพื้นที่ผิวที่รับแรงยังอาจยังไม่ใช่ส่วนที่ถูกทำลายโครงสร้าง แต่ส่วนที่ถูกทำลายโครงสร้างอยู่บริเวณพื้นส่วนอื่นบนชิ้นงาน และเนื่องจากชิ้นงานมีพื้นที่ผิวมากและเนื้อพอลิเมอร์มากจึงทำให้การเสื่อมสภาพจึงเป็นไปอย่างช้าๆ ดังนั้นจะเห็นว่าชิ้นงานตัดตามแนวการขึ้นรูปมีเปอร์เซ็นต์มอดูลัสโค้งงอลดลงมากกว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป แสดงว่าชิ้นงานตามการขึ้นรูปถูกทำลายโครงสร้างมากกว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป แต่ชิ้นงานยังมีความสามารถรับแรงได้ดี ไม่ได้เสียหาย

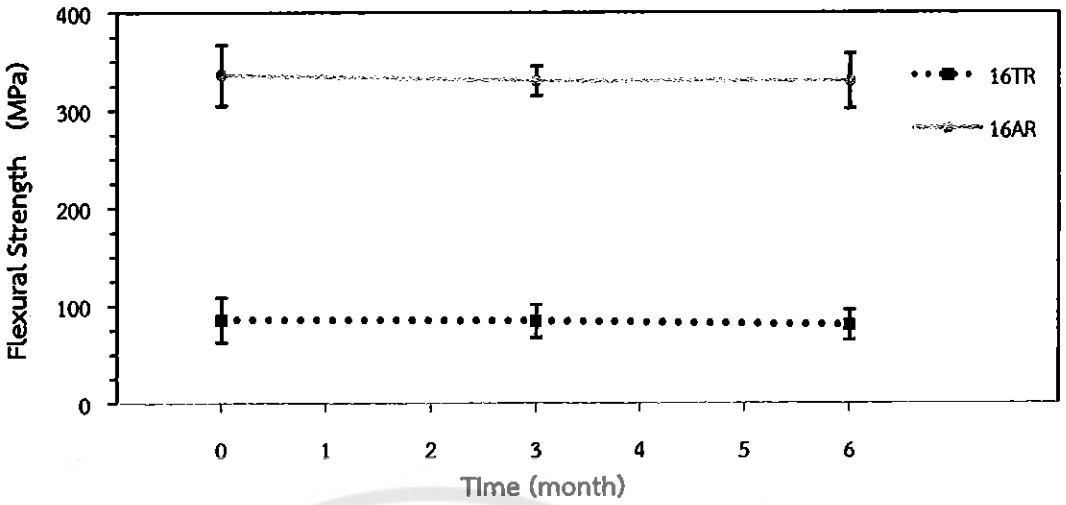
เมื่อพิจารณาจากชิ้นงานทุกความหนาและทุกลักษณะหน้าตัด จากรูป 4-6 ก-ง) พบว่าค่ายังมอดูลัสความโค้งงอของชิ้นงานที่มีค่ามากที่สุดที่ชิ้นงานยังไม่ผ่านสภาพอากาศ คือ ชิ้นงาน [16AR] ซึ่งมีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 217.35 MPa ซึ่งมากกว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบวงรี หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส และหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร เนื่องจากชิ้นงานมีโปรไฟล์ที่เสริมแรงได้ดี และมีเนื้อพอลิเมอร์ปริมาณมาก และเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่าค่ายังมอดูลัสความโค้งงอของชิ้นงานที่มีค่ามากที่สุด คือ ชิ้นงาน [10AE] ซึ่งมีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 215.63 MPa แสดงว่าชิ้นงาน [10AE] เป็นชิ้นงานที่มีโปรไฟล์ที่เสริมแรงได้ดี และเกิดการทำลายจากการผ่านสภาพอากาศที่เริ่มจากพื้นที่ผิวด้านบนได้น้อยกว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่าค่ายังมอดูลัสความโค้งงอของชิ้นงานที่มีค่ามากที่สุด คือ ชิ้นงาน [16AR] มีค่ามอดูลัสความโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 203.44 MPa แสดงว่าเป็นชิ้นงานโปรไฟล์ที่เสริมแรงได้ดีและเกิดการทำลายจากการผ่านสภาพอากาศที่เริ่มจากพื้นที่ผิวด้านบนและโครงสร้างภายในได้น้อยกว่าชิ้นงานหน้าตัดแบบวงรี แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ซึ่งจากที่กล่าวมาค่ายังมอดูลัสของความโค้งงอนั้นคือ ค่าความแข็งแรงของวัสดุเมื่อเกิดการโค้งงอ หากมีค่ายังมอดูลัสความโค้งงอ มากแสดงว่าชิ้นงานนั้นมีการกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอและมีโครงสร้างของพื้นที่หน้าตัดแข็งแรงมากที่สามารถถ่ายเทความเค้นได้ดี

ดังนั้นมอดูลัสความโค้งงอในชิ้นงานแต่ละชิ้นที่มีลักษณะหน้าตัดต่างกัน แบบการขึ้นรูปต่างกัน และความหนาต่างกัน จะมีค่ามอดูลัสความโค้งงอไม่เท่ากัน และเมื่อคิดการเสียรูปของชิ้นงานเป็นเปอร์เซ็นต์การเสียรูปของชิ้นงานที่เปอร์เซ็นต์การเสียรูปสูงสุดที่ขึ้นอยู่กับแบบการขึ้นรูป พบว่าชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปที่ระยะเวลา 3 เดือน มีเปอร์เซ็นต์ค่ามอดูลัสโค้งงอลดลงเท่ากับ 13.79 และที่ระยะเวลา 6 เดือน มีเปอร์เซ็นต์ค่ามอดูลัสโค้งงอลดลงเท่ากับ 52.77 และชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป ที่ระยะเวลา 3 เดือน มีเปอร์เซ็นต์ค่ามอดูลัสโค้งงอลดลงเท่ากับ 36.70 และที่ระยะเวลา 6 เดือน มีเปอร์เซ็นต์ค่ามอดูลัสโค้งงอลดลงเท่ากับ 48.00 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อผ่านสภาพอากาศ 3

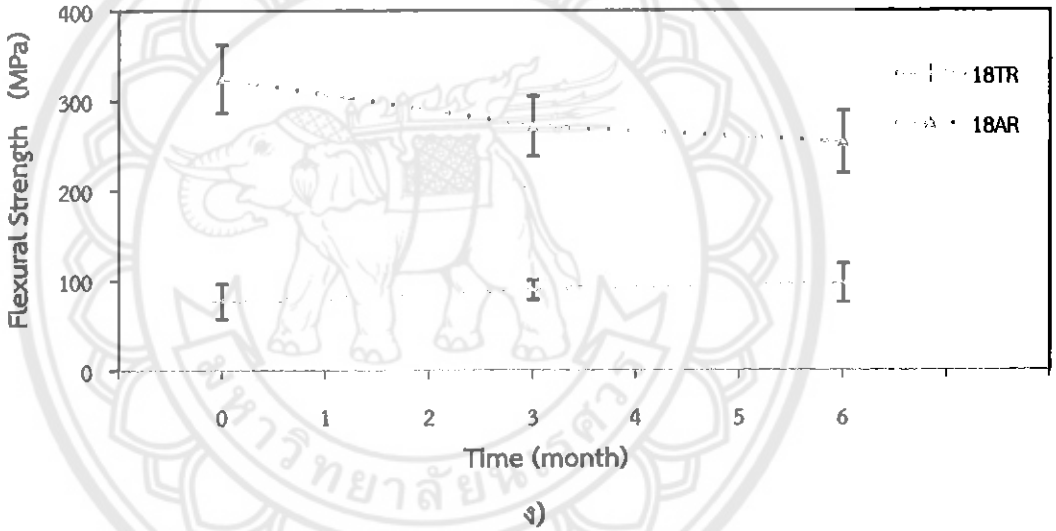
เดือน และ 6 เดือน ชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปจะมีเปอร์เซ็นต์ค่ายังมอดูลัสลดลงมากกว่า ชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป ทั้งนี้ค่าที่ยังมอดูลัสที่นำมาเปรียบเทียบเป็นค่าเฉลี่ยจึงมีค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่ลักษณะแนวโน้มเป็นไปตามทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความแข็งแรงโค้งงอ ก) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10TE] และ ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดวงรี [10AE] ข) ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] และ ชิ้นงานความหนา 10 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS]



ค)



ง)

รูปที่ 4-7 (ต่อ) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความแข็งแรงโค้ง ค) ชิ้นงานความ หนา 16 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] และชิ้นงานความหนา 16 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16AR] และ ง) ชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18TR] และ ชิ้นงานความหนา 18 มม. ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18AR]

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน โดยความแข็งแรงโค้งงอ คือ ความเค้นสูงสุดที่ให้แก่ชิ้นงานก่อนการเสียรูปของชิ้นงานอย่างถาวร จากรูปที่ 4-7 พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานมีค่าเปลี่ยนแปลงไป เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน เพราะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงาน [23] ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ และการผุกร่อน ที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง [15] ในรูปที่ 4-7 ก) คือ ชิ้นงานหน้า

ตัดแบบวงรี ที่มีการขึ้นรูปแบบตามแนวขวางการขึ้นรูป และตามแนวการขึ้นรูป พบว่าก่อนนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศ พบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรี [10AE] มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 195.08 MPa เนื่องจากชิ้นงาน [10AE] มีแนวการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะเฉพาะตามแนว เมื่อมีการรับแรงจึงมีการกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิวชิ้นงาน และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 186.24 และ 133.74 MPa ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการทำลายจากการผ่านสภาพอากาศที่เริ่มจากพื้นที่ผิวด้านบนจึงทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงาน [10AE] ยังมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปวงรี [10TE] ที่มากกว่าก่อนผ่านสภาพอากาศเท่ากับ 3.1 เท่า และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน เท่ากับ 3.1 และ 2.3 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบการเสื่อมสภาพของชิ้นงานจากการผ่านสภาพอากาศ พบว่าชิ้นงาน [10AE] จะเสียรูปได้มากกว่าชิ้นงาน [10TE] และเปอร์เซ็นต์ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงของชิ้นงาน [10AE] ที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือนเท่ากับ 4.53 และ 31.45 ส่วนเปอร์เซ็นต์ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงของชิ้นงาน [10TE] ที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือนเท่ากับ 3.89 และ 5.91 พบว่าชิ้นงานตัดตามแนวการขึ้นรูปมีเปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงโค้งงอลดลงมากกว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป แสดงว่าชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปถูกทำลายโครงสร้างมากกว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป แต่ชิ้นงานยังมีความสามารถรับแรงได้ดีไม่ได้เสียหาย

จากรูปที่ 4-7 ข) คือ ชิ้นงานหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่มีการขึ้นรูปแบบตามแนวขวางการขึ้นรูป และตามแนวการขึ้นรูป พบว่า ชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงโค้งงอมากที่สุด คือ ชิ้นงาน [10AS] ซึ่งมีค่าความแข็งแรงโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 88.44 MPa เนื่องจากชิ้นงาน [10AS] มีแนวการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะเฉพาะตามแนว เมื่อมีการรับแรงจึงมีการกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิวชิ้นงาน เมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 77.62 MPa และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 64.72 MPa พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเนื่องจากเกิดการทำลายจากการผ่านสภาพอากาศที่เริ่มจากพื้นที่ผิวด้านบนจึงทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงาน [10AS] ยังมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] ที่มากกว่าก่อนผ่านสภาพอากาศเท่ากับ 2.8 เท่า และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน เท่ากับ 2.8 และ 3.7 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบการเสื่อมสภาพของชิ้นงานจากการผ่านสภาพอากาศ พบว่าชิ้นงาน [10TS] จะเสียรูปได้มากกว่า ชิ้นงาน [10AS] และเปอร์เซ็นต์ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงของชิ้นงาน [10TS] ที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือนเท่ากับ 13.65 และ 44.54 ส่วนเปอร์เซ็นต์ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงของชิ้นงาน [10AS] ที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือนเท่ากับ 12.23 และ 26.81 พบว่าชิ้นงาน

ตัดตามแนวขวางการขึ้นรูปมีเปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงโค้งงอลดลงมากกว่าชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูป แสดงว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปถูกทำลายโครงสร้างมากกว่าชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูป แต่ชิ้นงานยังมีความสามารถรับแรงได้ดี ไม่ได้เสียหาย

จากรูปที่ 4-7 ค) คือ ชิ้นงานที่มีหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ระดับความหนา 16 mm. พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานมีค่ามากที่สุด คือ ชิ้นงาน [16AR] มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 336.02 MPa เนื่องจากชิ้นงาน [16AR] มีแนวการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะเฉพาะตามแนวเมื่อมีการรับแรงจึงมีการกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิวชิ้นงาน เมื่อนำชิ้นงานผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 330.2 MPa และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 329.75 MPa พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเนื่องจากเกิดการทำลายจากการผ่านสภาพอากาศที่เริ่มจากพื้นที่ผิวด้านบนจึงทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงาน [16AR] ยังมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] ที่มากกว่าก่อนผ่านสภาพอากาศเท่ากับ 3.9 เท่า และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน เท่ากับ 3.9 และ 4.1 เท่า ตามลำดับเมื่อเปรียบการเสื่อมสภาพของชิ้นงานจากการผ่านสภาพอากาศ พบว่าชิ้นงาน [16TR] จะเสียรูปได้มากกว่า ชิ้นงาน [16AR] และเปอร์เซ็นต์ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงของชิ้นงาน [16TR] ที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือนเท่ากับ 1.49 และ 6.41 ส่วนเปอร์เซ็นต์ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงของชิ้นงาน [16AR] ที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือนเท่ากับ 1.22 และ 1.86 พบว่าชิ้นงานตัดตามแนวขวางการขึ้นรูปมีเปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงโค้งงอลดลงมากกว่าชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูป แสดงว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปถูกทำลายโครงสร้างมากกว่าชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูป แต่ชิ้นงานยังมีความสามารถรับแรงได้ดี ไม่ได้เสียหาย

จากรูปที่ 4-7 ง) คือ ชิ้นงานที่มีหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ระดับความหนา 18 mm. พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานมีค่ามากที่สุด คือ ชิ้นงาน [18AR] มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 324.66 MPa เนื่องจากชิ้นงาน [18AR] มีแนวการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะเฉพาะตามแนวเมื่อมีการรับแรงจึงมีการกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ผิวชิ้นงาน เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 271.88 MPa และเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือนมีค่าความแข็งแรงโค้งงอเฉลี่ยเท่ากับ 253.93 MPa พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเนื่องจากเกิดการทำลายจากการผ่านสภาพอากาศที่เริ่มจากพื้นที่ผิวด้านบนจึงทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงาน [18AR] ยังมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ตัดชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปลักษณะโปรไฟล์มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] ที่มากกว่าก่อนผ่านสภาพอากาศเท่ากับ 4.2 เท่า และเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน เท่ากับ 3.1 และ 2.6

เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบการเสื่อมสภาพของชิ้นงานจากการผ่านสภาพอากาศ พบว่าชิ้นงาน [18AR] จะเสียรูปได้มากกว่า ชิ้นงาน [18TR] และเปอร์เซ็นต์ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงของชิ้นงาน [18AR] ที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือนเท่ากับ 16.26 และ 21.79 ส่วนเปอร์เซ็นต์ค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงาน [18TR] เพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือนเท่ากับ 16.35 และ 25.88 พบว่าชิ้นงานตัดตามแนวการขึ้นรูปมีเปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงโค้งงอลดลงมากกว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป แสดงว่าชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปถูกทำลายโครงสร้างมากกว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป แต่ชิ้นงานยังมีความสามารถรับแรงได้ดี ไม่ได้เสียหาย

ค่าความแข็งแรงโค้งงอในชิ้นงานแต่ละชิ้นที่มี แบบแนวการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัด และความหนาที่แตกต่างกัน จะทำให้ค่าความแข็งโค้งงอมีค่าต่างกัน หากพิจารณาเปอร์เซ็นต์การลดลงของความแข็งแรงโค้งงอตามแบบแนวการขึ้นรูปชิ้นงาน ที่มีแบบแนวการขึ้นรูปเป็นตามแนวขวางการขึ้นรูปและตามแนวการขึ้นรูป เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์มากที่สุดของทุกชิ้น พบว่าชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป ที่ระยะเวลา 3 เดือน มีเปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงโค้งงอการลดลงเท่ากับ 13.65 และที่ระยะเวลา 6 เดือน มีเปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงโค้งงอลดลงเท่ากับ 44.53 และชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูป ที่ระยะเวลา 3 เดือน มีเปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงโค้งงอลดลงเท่ากับ 16.26 และที่ระยะเวลา 6 เดือน มีเปอร์เซ็นต์ความแข็งแรงโค้งงอลดลงเท่ากับ 26.81 จึงสรุปได้ว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 เดือน ชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปจะมีเปอร์เซ็นต์ค่ายังมอดูลัสลดลงสูงกว่า ชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูป แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป 6 เดือนชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปจะมีเปอร์เซ็นต์ค่ายังมอดูลัสลดลงสูงกว่า ชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูป

อย่างไรก็ตามลักษณะแนวโน้มของกราฟแสดงว่าเมื่อชิ้นงานผ่านสภาพอากาศเป็นเวลานานขึ้นชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปมีแนวโน้มความแข็งแรงโค้งงอต่ำลงตามระยะเวลาและต่ำสุดที่ระยะเวลา 6 เดือน ในขณะที่ในส่วนของชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่มีค่าต่ำกว่าชิ้นงานตามแนวขึ้นรูปเนื่องจากชิ้นงานตามแนวขวางการขึ้นรูปมีโปรไฟล์ที่ช่วยเสริมแรงมากกว่าจึงทำให้ต้านทานแรงได้สม่ำเสมอต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ดังนั้นชิ้นงานที่เป็นโปรไฟล์ที่มีการเสริมแรงมากจึงมีความคงทนและเสื่อมสภาพจากการผ่านสภาพอากาศได้น้อยมาก ทั้งนี้ชิ้นงานตามแนวการขึ้นรูปสามารถรับแรงได้มากกว่าเนื่องจากมีการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะเฉพาะตามแนว ทำให้พื้นที่ผิวด้านบนที่รับแรงสามารถกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวชิ้นงาน

จากการทดสอบสมบัติทางกลจะนำผลการทดสอบที่ได้มาพยากรณ์การเสื่อมสภาพของชิ้นงานโดยจะเลือกเฉพาะบางสมบัติเท่านั้น โดยเลือกสมบัติแรงดัดโค้ง เนื่องจากการทดสอบบางสมบัติไม่ครอบคลุมชิ้นงานทั้งหมดที่นำมาทดสอบที่แบ่งตามความหนาและแบบแนวตัดขึ้นรูป การพยากรณ์การเสื่อมสภาพจะใช้หลักการทางคณิตศาสตร์และหลักทางสถิติโดยใช้เทคนิคสร้างสมการถดถอยแบบพหุคูณเพื่อพยากรณ์การเสื่อมสภาพ

4.2 การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

จากการทดสอบสมบัติทางกลของพอลีโพรพิลีน ที่ชิ้นงานก่อนผ่านสภาพอากาศและผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน เพื่อต้องการพยากรณ์การเสื่อมสภาพ ที่เป็นไปได้ของการนำไปใช้งานที่ระยะเวลาต่างๆ จึงทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ขึ้น โดยเลือกใช้โปรแกรม Minitab Version 16 สร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปของสมการถดถอยแบบพหุคูณ ที่เป็นการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ซึ่งโปรแกรม Minitab เป็นโปรแกรมที่มีลักษณะพิเศษในการวิเคราะห์ ประมวลผลข้อมูลทางสถิติ ทั้งปัจจัยที่มีผลทางสถิติ ตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระที่สอดคล้องตรงกับความต้องการในการพยากรณ์การเสื่อมสภาพของชิ้นงาน การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จะเลือกเฉพาะบ้างสมบัติที่จำเป็นต่อการนำไปใช้งานที่ผ่านการทดสอบ และค่าการทดสอบสมบัติทางกลที่นำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ คือ ค่าความแข็งแรงดัดโค้ง ของการทดสอบสมบัติแรงดัดโค้ง (Flexural Testing) ซึ่งดำเนินการสร้างสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าความแข็งแรงโค้งงอ

การวิเคราะห์ผลของค่าความแข็งแรงโค้งงอ ของชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศ 0 3 และ 6 เดือน และขนาดของหน้าตัดของชิ้นงานแต่ละชิ้นที่แตกต่างกัน จะนำมาวิเคราะห์ข้อมูล และประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลจะต้องผ่านขั้นตอนในการวิเคราะห์ดังนี้

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1) ตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์การกระจายตัวของกราฟในทางสถิติว่ายอมรับได้หรือยอมรับไม่ได้

2) วิเคราะห์ตารางความแปรปรวนของข้อมูล (Table ANOVA)

3) ตรวจสอบผลของปัจจัยหลัก (Main Effects)

4) วิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากการมีอันตรกิริยา (Interaction)

5) วิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล

การพยากรณ์การเสื่อมสภาพของชิ้นงานจะใช้เทคนิคการสร้างสมการถดถอยแบบพหุคูณ การสร้างสมการพบปัญหาที่เกิดขึ้นตามมาว่า กรณีที่ 1 หากมีการสร้างสมการรวม โดยใช้วิธีการรวมชิ้นงานที่มีความหนา 10 มม. ทุกแนวตัดขึ้นรูปและทุกลักษณะหน้าตัดเข้าด้วยกัน และวิธีการรวมชิ้นงานที่มีความหนา 16 และ 18 มม. ทุกแนวตัดขึ้นรูปเข้าด้วยกัน พบว่าสมการถดถอย

พหุคูณที่สร้างขึ้นมามีความผิดพลาดสูงมาก และเมื่อผ่านขั้นตอนในการประมวลผลทางสถิติไม่สามารถยอมรับได้ดังนั้นจึงเลือกกรณีที่ 2 วิธีการสร้างโดยใช้วิธีการแยกตามแนวตัดการขึ้นรูป ของชิ้นงานความหนา 10 มม. และวิธีการแยกตามแนวตัดการขึ้นรูปของชิ้นงานความหนา 16 และ 18 มม. ตารางที่ 4-2 และ ตารางที่ 4-3 เปรียบเทียบวิธีการสร้างรวมและสร้างแยก ดังนี้

ตารางที่ 4-2 เปรียบเทียบการสร้างสมการถดถอยพหุคูณ ของชิ้นงานที่ความหนา 10 มม.

กรณีที่ 1 รวมชิ้นงาน [10TE, 10AE, 10TS, 10AS]	**กรณีที่ 2 แยกชิ้นงาน** [10TE, 10TS] กับ [10AE, 10AS]
1. การตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นอยู่ในเกณฑ์ปกติ	1. การตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นอยู่ในเกณฑ์ปกติ
2. ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ปกติ	2. ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ปกติ
3. การวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลักอยู่ในเกณฑ์ปกติ	3. การวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลักอยู่ในเกณฑ์ปกติ
4. การมีอันตรกิริยา ชิ้นงานทุกชิ้นมีอันตรกิริยาต่อกัน	4. การมีอันตรกิริยา ชิ้นงานทุกชิ้นมีอันตรกิริยาต่อกัน
5. เมื่อลองแทนในสมการถดถอยแล้วพบว่า ชิ้นงานบ้างชิ้นมีค่าออกมาติดลบ ตั้งแต่ระยะเวลา เพียง 3 เดือน ซึ่งในผลการทดลองไม่มีค่าติดลบ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับไม่ได้และไม่ถูกต้อง	5. เมื่อลองแทนค่าในสมการถดถอยแล้วพบว่า ชิ้นงานทุกชิ้นมีแนวโน้มลดลงตามค่าการถดลองถึงแม้ว่าบางชิ้นงานจะมีค่าที่ห่างกันมากก็ตาม

ตารางที่ 4-3 เปรียบเทียบการสร้างสมการถดถอยพหุคูณ ของชิ้นงานที่ความหนา 16 และ 18 มม.

กรณีที่ 1 รวมชิ้นงาน [16TR, 16AR, 18TR, 18AR]	กรณีที่ 2 แยกชิ้นงาน [16TR, 18TR] กับ [16AR, 18AR]
1. การตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นอยู่ในเกณฑ์ปกติ	1. การตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นอยู่ในเกณฑ์ปกติ
2. ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ปกติ	2. ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ปกติ

ตารางที่ 4-3 (ต่อ) เปรียบเทียบการสร้างสมการถดถอยพหุคูณของชิ้นงานที่ความหนา 16 และ 18 มม.

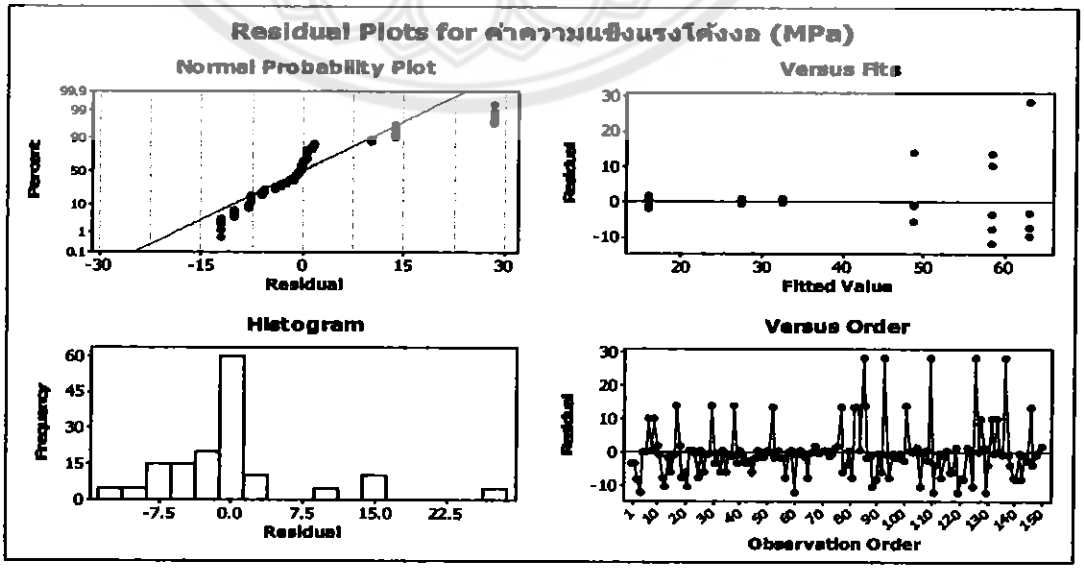
กรณีที่ 1 รวมชิ้นงาน [16TR, 16AR, 18TR, 18AR]	กรณีที่ 2 แยกชิ้นงาน [16TR, 18TR] กับ [16AR, 18AR]
3. การวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลักอยู่ในเกณฑ์ปกติ	3. การวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลักอยู่ในเกณฑ์ปกติ
4. การมีอันตรกิริยา ชิ้นงานทุกไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน	4. การมีอันตรกิริยา ชิ้นงานบางชิ้นมีอันตรกิริยาต่อกัน
5. การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล เมื่อลองแทนในสมการถดถอยแล้วพบว่า ชิ้นงานบางชิ้นมีค่าออกมาติดลบ ตั้งแต่ระยะเวลา เพียง 3 เดือน ซึ่งในผลการทดลองไม่มีค่าติดลบ เป็นค่าที่ยอมรับไม่ได้และไม่ถูกต้อง	5. การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล เมื่อลองแทนค่าในสมการถดถอยแล้วพบว่า ชิ้นงานทุกชิ้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองถึงแม้ว่าบางชิ้นงานจะมีค่าที่คำนวณมาแล้วต่างจากผลการทดลองมากก็ตาม

จากการเลือกวิธีการสร้างสมการถดถอยแบบแยกชิ้นงาน สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

ก. ชิ้นงานระดับความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดแบบวงรีและแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TE] และ [10TS]

ก.1 การวิเคราะห์จากกราฟ

รูปที่ 4-8 แสดงแผนภูมิกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ผลของโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ



รูปที่ 4-8 แผนภูมิกราฟแสดงส่วนตกค้างของข้อมูล ค่าความแข็งแรงโค้งงอ

แผนภูมินี้เป็นการนำส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้จากการเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ดูว่าข้อมูลที่ได้เก็บมานั้นมีความเชื่อถือหรือว่าเพียงพอต่อการวิเคราะห์โดยวิธีการปกติหรือไม่ ซึ่งในรูปที่ 4-8 นี้จะแสดงถึงการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

a) Normal Probability Plot of the Residual คือ กราฟที่แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) ว่ามีการกระจายตัวเป็นแบบปกติหรือไม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลบนกราฟเรียงตัวกันเป็นลักษณะเส้นตรง ที่มีการกระจายเข้าสู่ศูนย์เพียงจุดเดียว ซึ่งในทางทฤษฎีหากข้อมูลมีกระจายตัวแบบนี้จะมีความสัมพันธ์กันมาก จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติ

b) Residuals Versus the Fitted Values คือ กราฟที่ตรวจสอบว่าข้อมูลนั้นมีการกระจายตัวของส่วนตกค้างในแต่ละช่วงของข้อมูลนั้นเป็นอย่างไร ซึ่งการกระจายตัวของข้อมูลที่ถูกต้องควรมีการกระจายตัวในแนวนอนสุ่มรอบค่าศูนย์ที่มีการสลับขึ้นลงและไม่เป็นรูปลำโพงบานออก หรือเป็นรูปร่างใดๆ อย่างชัดเจน จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวของส่วนตกค้างเป็นเป็นปกติ

c) Histogram of the Residuals คือ กราฟที่ตรวจสอบว่าส่วนตกค้างนั้นมีการกระจายตัวที่เป็นปกติหรือไม่ ซึ่งกราฟฮิสโตแกรมนั้นควรจะมีรูปทรงสมมาตรเป็นรูประฆังคว่ำและมีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ จากผลที่ได้จากกราฟข้อมูลของส่วนตกค้างมีความสมมาตรกันและอยู่ในลักษณะรูประฆังคว่ำ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นปกติ

d) Residuals Versus the Order of the Data คือ กราฟที่ใช้ตรวจสอบดูว่าส่วนตกค้างนั้นขึ้นอยู่กับลำดับการสังเกตการณ์ที่เปลี่ยนไปของการเก็บข้อมูลหรือไม่ ซึ่งจากกราฟนี้ไม่ควรปรากฏลักษณะของแนวโน้มหรือรูปแบบใดๆ อย่างชัดเจน ซึ่งควรจะมีการกระจายตัวที่ขึ้นลงอย่างสม่ำเสมอจึงสรุปได้ว่าข้อมูลการกระจายตัวเป็นปกติ

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าจากกราฟทั้ง 4 กราฟนี้ ที่ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอสามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและเชื่อถือได้

ก.2 การวิเคราะห์ตารางความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงโค้งงอ

จากตารางที่ 4-4 แสดงการวิเคราะห์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งทำการวิเคราะห์ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยว่ามีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4-4 ตารางแสดงค่าผลการวิเคราะห์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอ

ปัจจัย	DF	SS	MS	F	P
ขนาดหน้าตัด	1	37151.1	37151.1	577.95	0.000
เวลา	2	6129.6	3064.8	47.68	0.000
ขนาดหน้าตัด*เวลา	2	41.8	20.9	0.33	0.037
Error	144	9256.4	64.3		
Total	149	52579			

หมายเหตุ DF = Degree of Freedom , SS = Sum of Squares , MS = Mean Squares

F = F-Value , P = P-Value

จากตารางที่ 4-4 จะพิจารณาความน่าจะเป็นทางสถิติหรือเรียกว่าค่าของ P-Value ที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งค่า P-Value คือ ค่าความน่าจะเป็นทางสถิติของพื้นที่ใต้เส้นโค้ง (Normal Curve) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ในกรณีนี้ต้องการที่จะกำหนดระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือ ระดับความเชื่อมั่น 95% จะใช้เกณฑ์ในการพิจารณาจากค่า P-Value ดังนี้

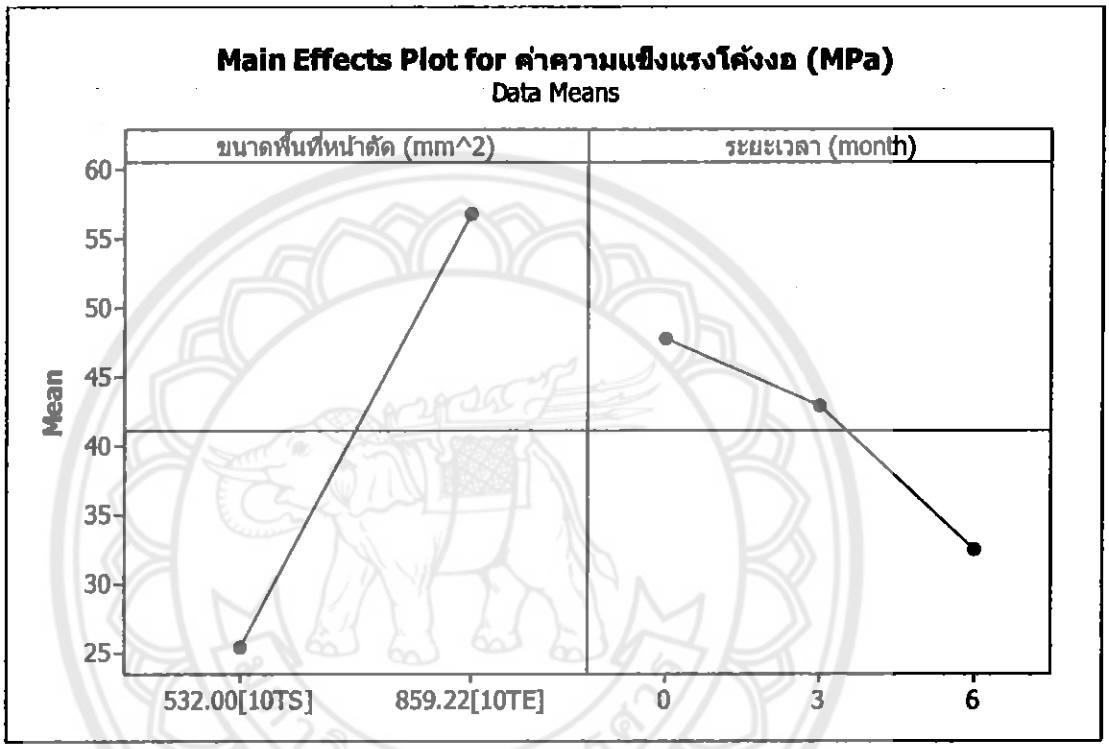
a) ถ้าค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระดับนัยสำคัญ 0.05 จะยอมรับว่าข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 95% Confidence Interval

b) ถ้าค่า P-Value มีค่ามากกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะปฏิเสธว่าข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์นั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 95% Confidence Interval

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้วิเคราะห์ผ่านกระบวนการนี้ ปัจจัยของ ขนาดหน้าตัด มีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ เพราะว่ามีค่า P-value ต่ำกว่าที่ระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้และปัจจัยของระยะเวลามีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ เพราะว่ามีค่า P-Value ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ และเมื่อพิจารณาปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยพร้อมกัน พบว่าขนาดหน้าตัดและระยะเวลา มีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่มีผลมาจากปัจจัยของขนาดหน้าตัดและระยะเวลา สามารถกำหนดให้มีระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือ ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้อย่างเหมาะสม

ก.3 การวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลัก (Main Effects)

ปัจจัยหลัก คือ ผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยนั้นๆ ที่มีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยที่ระดับต่างๆของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งผลที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรมสถิติ จะได้ดังรูปที่ 4-9 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4-9 แผนภูมิแสดงผลจากปัจจัยหลัก

จากรูปที่ 4-9 สามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้ Main Effects Plot (Data Means) for Flexural Strength (MPa) ในการวิเคราะห์นั้นถ้าพิจารณาในส่วนของปัจจัยหลัก (Main Effect) ทั้ง 2 ส่วนสามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้

a) ขนาดพื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)

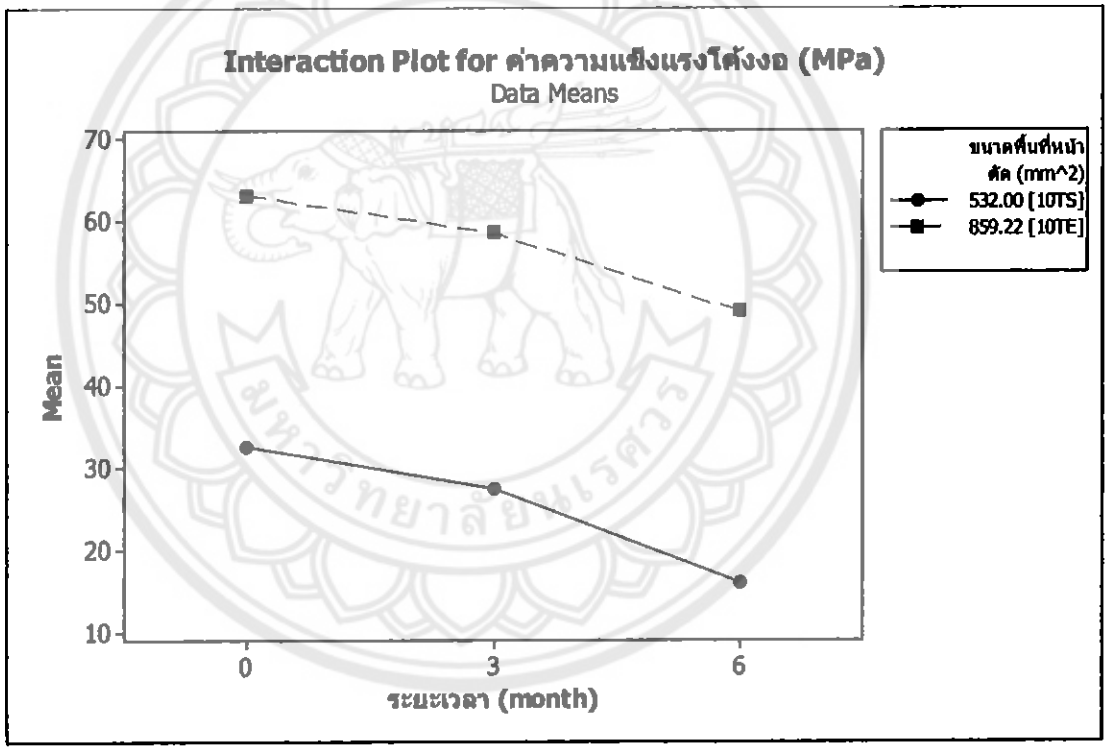
จากขนาดพื้นที่หน้าตัด 532-859.22 ตารางมิลลิเมตร พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานขนาดพื้นที่หน้าตัด 859.22 ตารางมิลลิเมตร จะให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงกว่าชิ้นงานที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 532 ตารางมิลลิเมตร ดังรูปที่ 4-9 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอจะลดลงเมื่อมีขนาดหน้าตัดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งในกรณีนี้จึงสรุปได้ว่า ชิ้นงานขนาดพื้นที่หน้าตัด 859.22 ตารางมิลลิเมตร จะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงสุด

b) ระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศ (เดือน)

จากระยะเวลาของการผ่านสภาพอากาศพบว่าที่ระยะเวลา 6 เดือน จะมีค่าความแข็งโค้งงอน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศเพียงระยะเวลา 0 เดือนและ 3 เดือน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลาต่างๆ จะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดน้อยลง

ก.4 การวิเคราะห์ผลที่เกิดจากอันตรกิริยา

การมีอันตรกิริยาเป็นผลตอบของปัจจัยหนึ่ง จะขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ จะได้ดังรูปที่ 4-10 ดังนี้



รูปที่ 4-10 แผนภูมิแสดงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

จากรูปที่ 4-10 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ คือ Interaction Plot (Data Means) for Flexural Strength (MPa) สำหรับการวิเคราะห์อันตรกิริยานั้น ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการเกิดขึ้นร่วมกันระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการมีอันตรกิริยาต่อกันเส้นตรงบนกราฟทั้งสองเส้นจะต้องไม่ขนานกันจากรูปเส้นตรงสองเส้นไม่ขนานกันแสดงว่ามีอันตรกิริยาต่อกันและสามารถพิจารณาได้ดังนี้ คือ

a) ในส่วนของอันตรกิริยาระหว่างขนาดพื้นที่หน้าตัด กับ ระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศ (Month) พบว่าชิ้นงานที่มีขนาดพื้นที่หน้า 859.22 ตารางมิลลิเมตร และผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน จะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงสุด และยังพบอีกว่า ชิ้นงานที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด532 ตารางมิลลิเมตร ที่ผ่านสภาพอากาศ 6 เดือน จะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอต่ำสุด

ดังนั้น หากพิจารณาในส่วนของค่าความแข็งแรงโค้งงอเพื่อที่จะดูถึงขนาดพื้นที่หน้าตัดและระยะเวลาของการผ่านสภาพอากาศ 3 และ 6 เดือน เพื่อที่จะพิจารณาการนำไปใช้งานอย่างเหมาะสม ควรพิจารณาดังนี้

ชิ้นงานที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 859.22 ตารางมิลลิเมตร ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะมีค่าสูงสุดเมื่อผ่านสภาพอากาศระยะเวลา 6 เดือน ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศเพียงระยะเวลา 0 เดือน และ 3 เดือน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอเพิ่มสูงขึ้น

ชิ้นงานที่มีขนาดหน้าตัด 532 ตารางมิลลิเมตร ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาผ่านสภาพอากาศ 0 เดือน และหลังจากผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะมีค่าลดลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศมากขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดต่ำลง

ก.5 การวิเคราะห์ผลการถดถอยของข้อมูล

ก.5.1 การวิเคราะห์การถดถอยของความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลิน โดยมีชิ้นงานที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 532 และ 859.22 ตารางมิลลิเมตร กับระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศ 3 เดือน 6 เดือนตามลำดับ

การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล คือ ขนาดหน้าตัดกับระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ เมื่อนำมาประมวลผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติได้ผลดังตารางที่ 4-3 ดังนี้

ตารางที่ 4-5 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน ตามขนาดหน้าตัดกับการผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน ดังนี้

Predictor	Coefficients
Constant	-10.033
ขนาดพื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	0.096
ระยะเวลา (เดือน)	-2.555
ขนาดพื้นที่หน้าตัด * ระยะเวลา	-0.00388
Std. Error of Estimate = 8.01	
R-Square = 82.40%	

จากตารางที่ 4-5 การวิเคราะห์การถดถอยค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีนที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 532 และ 859.22 ตารางมิลลิเมตร และระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศ 0 3 และ 6 เดือนตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า

ค่า R-Square = 82.40 % คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด มีค่าใกล้ 100 % แสดงว่าขนาดพื้นที่หน้าตัดและระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน ดังนั้นสมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

ค่า Std. Error of Estimate = 8.01 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ตัวแปรผล คือ ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลินจะมีความคลาดเคลื่อนด้วยตัวแปรอิสระอื่นๆ ประมาณ 8.01

จากการคำนวณค่าความถดถอยของขนาดโปรไฟล์กับระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอจะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์เป็นสมการถดถอยเชิงเส้นตรงที่ระดับนัยสำคัญที่ 95% ดังสมการที่ 4.1

$$Y = -10.033+0.096X_1-2.555X_2-0.00388X_1X_2 \qquad (4.1)$$

โดยที่ Y คือ ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน (MPa)

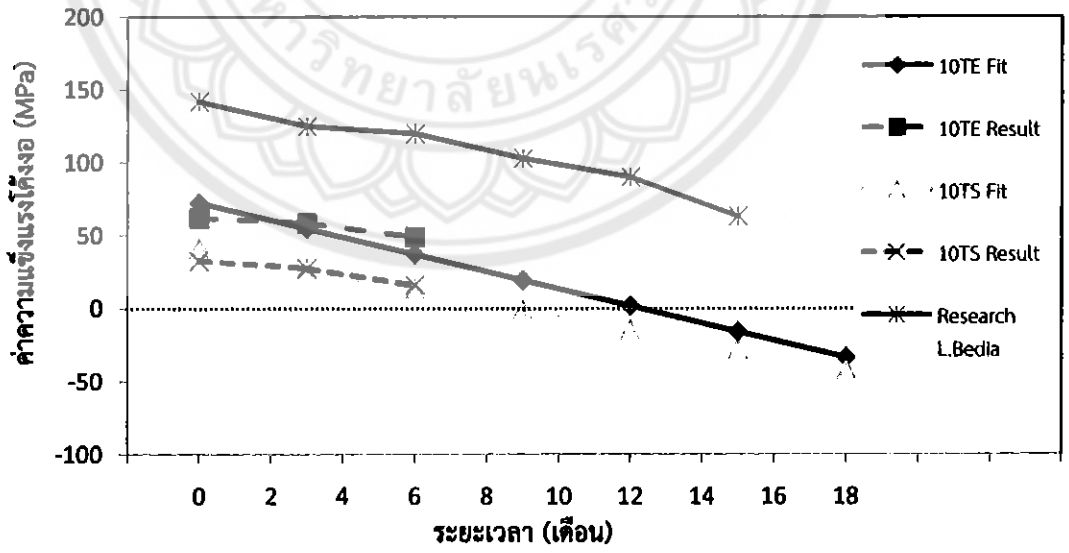
X_1 คือ ขนาดของพื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)

X_2 คือ ระยะเวลาของการผ่านสภาพอากาศ (เดือน)

จากสมการ 4.1 คือ สมการถดถอยเชิงเส้นตรงที่คำนวณหาค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานโดยใช้ข้อมูลผลการทดลองที่ชิ้นงานผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน ในการสร้างสมการและนำสมการไปใช้ในการพยากรณ์การเสื่อมสภาพในระยะเวลาที่มากกว่า

ตารางที่ 4-6 แสดงผลลัพธ์จากการแทนค่าสมการถดถอยของชิ้นงาน

รหัสชิ้นงาน	ขนาดพื้นที่หน้าตัด X_1 (mm^2)	ระยะเวลา X_2 (month)	ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	ผลการทดลองค่าความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)
10TE	859.22	0	72.452	62.092
10TE	859.22	3	54.786	58.5
10TE	859.22	6	37.119	49.06
10TE	859.22	9	19.453	-
10TE	859.22	12	1.787	-
10TS	532	0	41.039	32.668
10TS	532	3	27.182	27.418
10TS	532	6	13.324	16.086
10TS	532	9	-0.533	-
10TS	532	12	-14.391	-



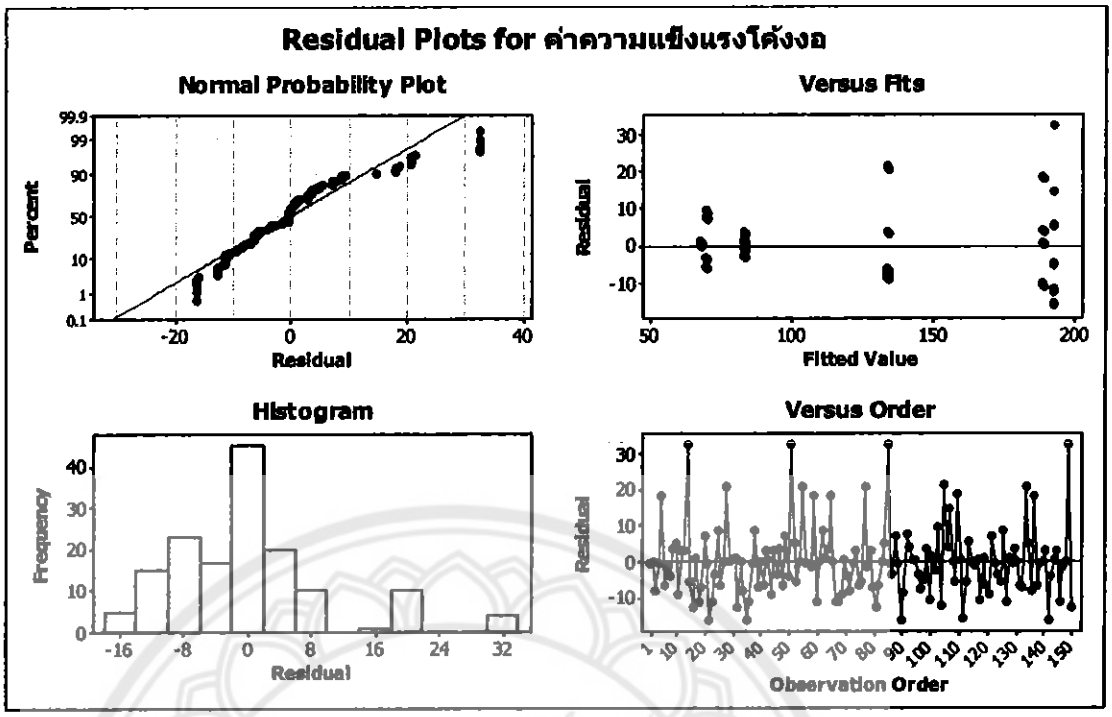
รูปที่ 4-11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงโค้งงอจากสมการพยากรณ์ ผลการทดลองและงานวิจัยของ L. Bedia

จากรูปที่ 4-11 เมื่อแทนค่าลงในสมการถดถอยแบบพหุคูณพบว่า ชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดแบบวงรี [10TE] และชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS] มีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบจากผลการทดลอง พบว่าชิ้นงาน [10TS] มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในแนวเดียวกันกับผลการทดลองและมีค่าความแข็งแรงโค้งงอใกล้เคียงกันมากในช่วงระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศ 0 3 และ 6 เดือน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ L. Bedia มีลักษณะแนวโน้มเป็นไปในแนวเดียวกันที่มีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเมื่อผ่านสภาพอากาศ 0 3 และ 6 เดือน จากชิ้นงาน [10TE] มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในแนวเดียวกับผลการทดลอง ที่มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 และ 6 เดือน และที่ระยะเวลาผ่านสภาพอากาศ 0 เดือนจะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก จะเห็นได้ว่าสมการที่ 4.1 มีความสอดคล้องกับชิ้นงาน [10TE] ในระยะเวลา 6 เดือนแรก ผลจากการแทนสมการที่ 4.1 ที่ระยะเวลา 9 เดือน มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเป็น 0 ดังนั้นสมการอาจจะใช้ไม่ได้ในระยะเวลาที่มากกว่า 9 เดือน แต่เนื่องจากระยะเวลาในการทดสอบมีจำกัดจึงไม่สามารถสรุปได้ว่าหลังจากระยะเวลา 6 เดือนค่าความแข็งแรงโค้งงอจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง และสอดคล้องกับสมการที่ 4.1 หรือไม่ และเมื่อประมาณค่าร้อยละความแตกต่างระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือนมีค่าเท่ากับ 16.69 6.34 และ 24.33

ข. ชิ้นงานระดับความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดแบบวงรีและแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AE] และ [10AS]

ข.1 การวิเคราะห์จากกราฟ

รูปที่ 4-12 แสดงแผนภูมิกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ผลของโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ



รูปที่ 4-12 แผนภูมิกราฟแสดงส่วนตกค้างของข้อมูล ค่าความแข็งแรงโค้งงอ

แผนภูมินี้เป็นการนำส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้จากการเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ดูว่าข้อมูลที่ได้เก็บมานั้นมีความเชื่อถือหรือว่าเพียงพอต่อการวิเคราะห์โดยวิธีการปกติหรือไม่ ซึ่งในรูปที่ 4-12 นี้จะแสดงถึงการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

a) Normal Probability Plot of the Residual คือ กราฟที่แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) ว่ามีการกระจายตัวเป็นแบบปกติหรือไม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลบนกราฟเรียงตัวกันเป็นลักษณะเส้นตรง ที่มีการกระจายเข้าสู่ศูนย์เพียงจุดเดียว ซึ่งในทางทฤษฎีหากข้อมูลมีกระจายตัวแบบนี้จะมีความสัมพันธ์กันมาก จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติ

b) Residuals Versus the Fitted Values คือ กราฟที่ตรวจสอบว่าข้อมูลนั้นมีการกระจายตัวของส่วนตกค้างในแต่ละช่วงของข้อมูลนั้นเป็นอย่างไร ซึ่งการกระจายตัวของข้อมูลที่ถูกต้องควรมีการกระจายตัวในแนวนอนสุ่มรอบค่าศูนย์ที่มีการสลับขึ้นลงและไม่เป็นรูปลำโพงบานออก จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวของส่วนตกค้างเป็นเป็นปกติ

c) Histogram of the Residuals คือ กราฟที่ตรวจสอบว่าส่วนตกค้างนั้นมีการกระจายตัวที่เป็นปกติหรือไม่ ซึ่งกราฟฮิสโตแกรมนั้นควรจะมีรูปทรงสมมาตรเป็นรูประฆังคว่ำและมีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ จากผลที่ได้จากกราฟข้อมูลของส่วนตกค้างมีความสมมาตรกันและอยู่ในลักษณะรูประฆังคว่ำ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นปกติ

d) Residuals Versus the Order of the Data คือ กราฟที่ใช้ตรวจสอบดูว่าส่วนตกค้างนั้นขึ้นอยู่กับลำดับการสังเกตการณ์ที่เปลี่ยนไปของการเก็บข้อมูลหรือไม่ ซึ่งจากกราฟนี้ไม่ควรปรากฏลักษณะของแนวโน้มหรือรูปแบบใดๆอย่างชัดเจน ซึ่งควรจะมีการกระจายตัวที่ขึ้นลงอย่างสม่ำเสมอจึงสรุปได้ว่าข้อมูลการกระจายตัวเป็นปกติ

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าจากกราฟทั้ง 4 กราฟนี้ ที่ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอสามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและเชื่อถือได้

ข.2 การวิเคราะห์ตารางความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงโค้งงอ

จากตารางที่ 4-7 แสดงการวิเคราะห์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งทำการวิเคราะห์ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยว่ามีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4-7 ตารางแสดงค่าผลการวิเคราะห์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอ

ปัจจัย	DF	SS	MS	F	P
ขนาดหน้าตัด	1	361633	361633	3552.97	0.000
เวลา	2	36693	18346	180.25	0.000
ขนาดหน้าตัด*เวลา	2	20988	10494	103.10	0.000
Error	140	14250	102		
Total	149	433572			

หมายเหตุ DF = Degree of Freedom , SS = Sum of Squares ,

MS = Mean Squares , F = F-Value , P = P-Value

จากตารางที่ 4-7 จะพิจารณาความน่าจะเป็นทางสถิติหรือเรียกว่าค่าของ P-Value ที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งค่า P-Value คือ ค่าความน่าจะเป็นทางสถิติของพื้นที่ใต้เส้นโค้ง (Normal Curve) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ในกรณีนี้ต้องการที่จะกำหนดระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือ ระดับความเชื่อมั่น 95% จะใช้เกณฑ์ในการพิจารณาจากค่า P-Value ดังนี้

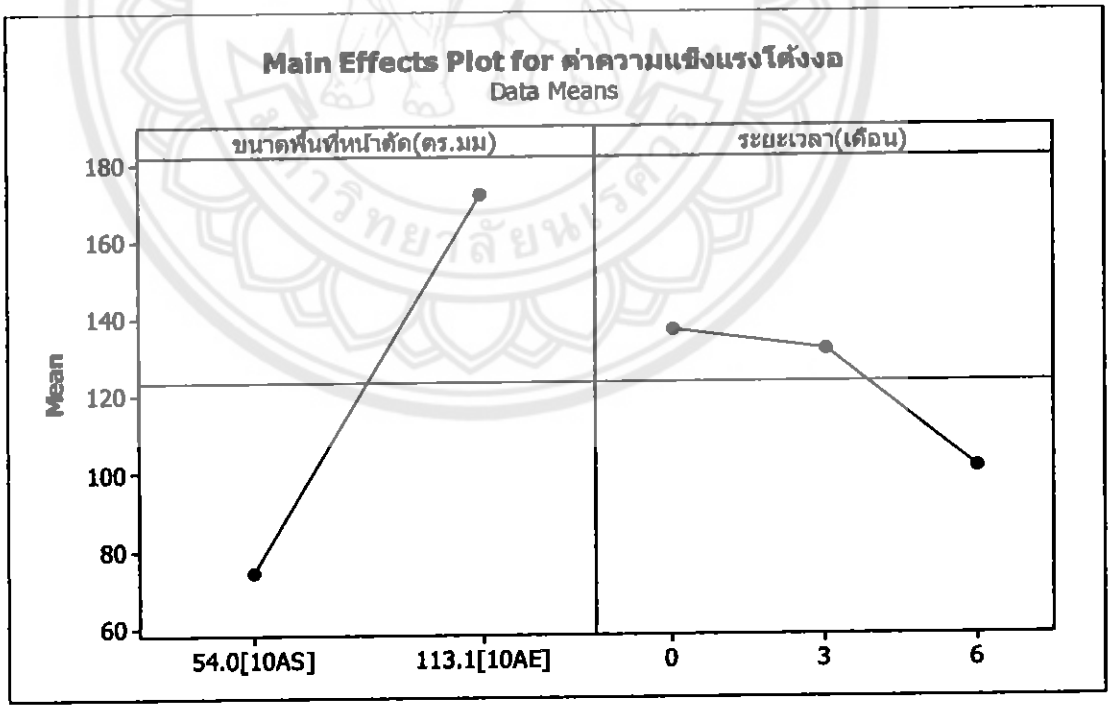
a) ถ้าค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระดับนัยสำคัญ 0.05 จะยอมรับว่าข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 95% Confidence Interval

b) ถ้าค่า P-Value มีค่ามากกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะปฏิเสธว่าข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์นั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 95% Confidence Interval

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้วิเคราะห์ผ่านกระบวนการนี้ ปัจจัยของ ขนาดหน้าตัด มีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ เพราะว่ามีค่า P-value ต่ำกว่าที่ระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้และปัจจัยของระยะเวลามีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ เพราะว่ามีค่า P-Value ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ และเมื่อพิจารณาปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยพร้อมกัน พบว่าขนาดหน้าตัดและระยะเวลา มีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่มีผลมาจากปัจจัยของขนาดหน้าตัดและระยะเวลา สามารถกำหนดให้มีระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือ ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้อย่างเหมาะสม

ข.3 การวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลัก (Main Effects)

ปัจจัยหลัก คือ ผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยนั้นๆ ที่มีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งผลที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรมสถิติ จะได้ดังรูปที่ 4-13 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4-13 แผนภูมิแสดงผลจากปัจจัยหลัก

จากรูปที่ 4-13 สามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้ Main Effects Plot (Data Means) for Flexural Strength (MPa) ในการวิเคราะห์นั้นถ้าพิจารณาในส่วนของปัจจัยหลัก (Main Effect) ทั้ง 2 ส่วนสามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้

a) ขนาดพื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)

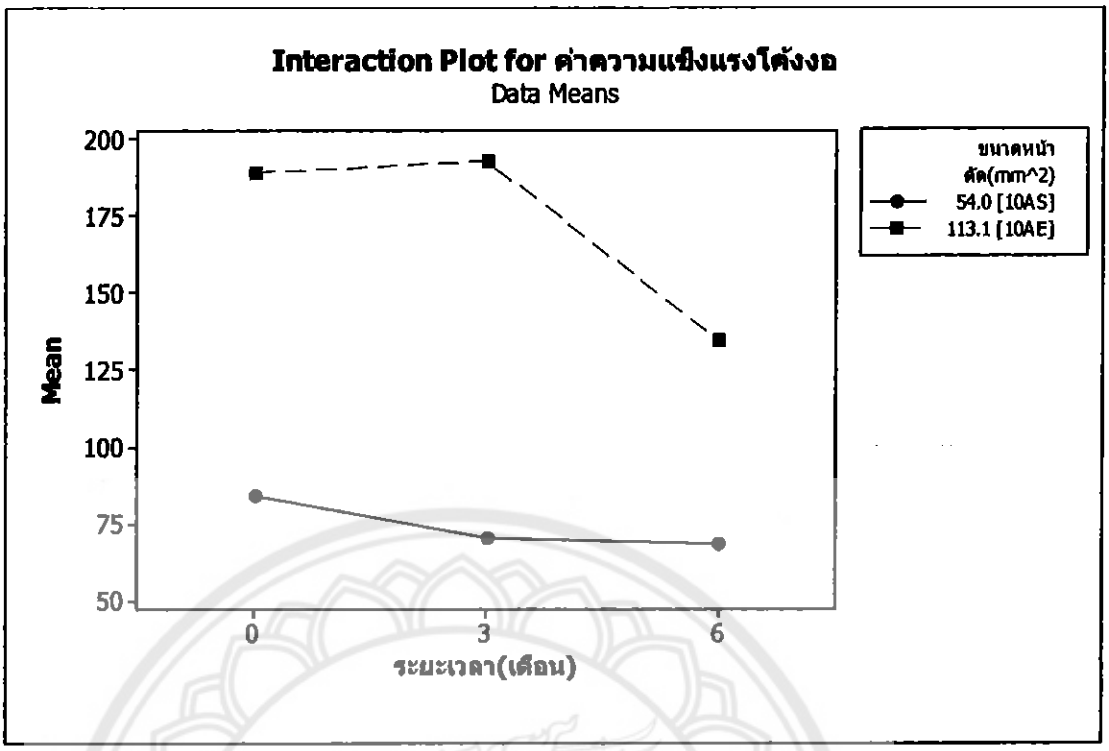
จากขนาดพื้นที่หน้าตัด 54.0 -113.1 ตารางมิลลิเมตร พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานขนาดหน้าตัด 113.1 ตารางมิลลิเมตร จะให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงกว่าชิ้นงานที่มีขนาดหน้าตัด 54 ตารางมิลลิเมตร ดังรูปที่ 4-13 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอจะลดลงเมื่อมีขนาดหน้าตัดลดลง ซึ่งในกรณีนี้จึงสรุปได้ว่า ชิ้นงานขนาดหน้าตัด 113.1 ตารางมิลลิเมตร จะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงสุด

b) ระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศ (เดือน)

จากระยะเวลาของการผ่านสภาพอากาศพบว่าที่ระยะเวลา 6 เดือน จะมีค่าความแข็งโค้งงอน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศเพียงระยะเวลา 0 เดือนและ 3 เดือน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลาต่างๆ จะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดน้อยลง

ข.4 การวิเคราะห์ผลที่เกิดจากอันตรกิริยา

การมีอันตรกิริยาเป็นผลตอบของปัจจัยหนึ่ง จะขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ จะได้ดังรูปที่ 4-14 ดังนี้



รูปที่ 4-14 แผนภูมิแสดงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

จากรูปที่ 4-14 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ คือ Interaction Plot (Data Means) for Flexural Strength (MPa) สำหรับการวิเคราะห์อันตรกิริยานั้น ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการเกิดขึ้นร่วมกันระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการมีอันตรกิริยาต่อกันเส้นตรงบนกราฟทั้งสองเส้นจะต้องไม่ขนานกัน จากรูปเส้นตรงสองเส้นไม่ขนานกันแสดงว่ามีอันตรกิริยาต่อกันและสามารถพิจารณาได้ดังนี้ คือ

a) ในส่วนของอันตรกิริยาระหว่างขนาดพื้นที่หน้าตัด กับ ระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศ (Month) พบว่าชิ้นงานที่มีขนาดหน้าตัด 113.1 ตารางมิลลิเมตร และผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน จะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงสุด และยังพบอีกว่า ชิ้นงานที่มีขนาดหน้าตัด 54 ตารางมิลลิเมตร ที่ผ่านสภาพอากาศ 6 เดือน จะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอต่ำสุด

ดังนั้น หากพิจารณาในส่วนของค่าความแข็งแรงโค้งงอเพื่อที่จะดูถึงขนาดหน้าตัดและระยะเวลาของการผ่านสภาพอากาศ 3 และ 6 เดือน เพื่อพิจารณาการนำไปใช้งานอย่างเหมาะสมควรพิจารณาดังนี้

ชิ้นงานที่มีขนาดหน้าตัด 113.1 ตารางมิลลิเมตร ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะมีค่าสูงสุดเมื่อผ่านสภาพอากาศระยะเวลา 3 เดือน ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศระยะเวลา 0

และ 6 เดือน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศค่าความแข็งแรงโค้งงอเพิ่มขึ้นช่วง 3 เดือนแรก แต่เมื่อผ่านสภาพอากาศจนกระทั่งครบ 6 เดือน ชิ้นงานจะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลง

ชิ้นงานที่มีขนาดหน้าตัด 54 ตารางมิลลิเมตร ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาผ่านสภาพอากาศ 0 เดือน และหลังจากผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะมีค่าลดลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศมากขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดต่ำลง

ข.5 การวิเคราะห์ผลการถดถอยของข้อมูล

ข.5.1 การวิเคราะห์การถดถอยของความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลิน โดยมีชิ้นงานที่มีขนาดหน้าตัด 54 และ 113.1 ตารางมิลลิเมตร กับระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศ 3 เดือน 6 เดือนตามลำดับ

การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล คือ ขนาดหน้าตัดกับระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ เมื่อนำมาประมวลผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติได้ผลดังตารางที่ 4-8 ดังนี้

ตารางที่ 4-8 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน ตามขนาดหน้าตัดกับการผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน ดังนี้

Predictor	Coefficients
Constant	-1.6389
ขนาดพื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	1.662
ระยะเวลา (เดือน)	-5.897
ขนาดพื้นที่หน้าตัด * ระยะเวลา	0.01493
Std. Error of Estimate = 10.088	
R-Square = 96.71%	

จากตารางที่ 4-8 การวิเคราะห์การถดถอยค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีนที่มีขนาดหน้าตัด 54 และ 113.1 ตารางมิลลิเมตร และระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศ 0 3 และ 6 เดือนตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า

ค่า R-Square = 96.71 % คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด มีค่าใกล้ 100 % แสดงว่าขนาดของหน้าตัดและระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน ดังนั้นสมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

ค่า Std. Error of Estimate = 10.088 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ตัวแปรผล คือ ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลินจะมีความคลาดเคลื่อนด้วยตัวแปรอิสระอื่นๆประมาณ 10.088

จากการคำนวณค่าความถดถอยของขนาดโปรไฟล์กับระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอจะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์เป็นสมการถดถอยเชิงเส้นตรงที่ระดับนัยสำคัญที่ 95% ดังสมการที่ 4.2

$$Y = -1.6389+1.662X_1-5.897X_2+0.01493X_1X_2 \quad \textbf{(4.2)}$$

โดยที่ Y คือ ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน (MPa)

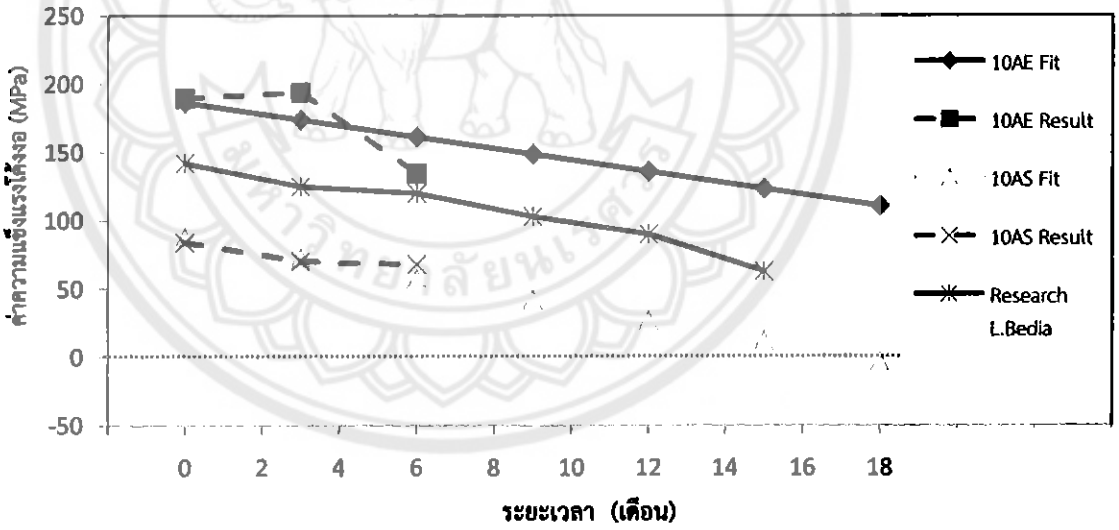
X_1 คือ ขนาดของพื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)

X_2 คือ ระยะเวลาของการผ่านสภาพอากาศ (เดือน)

จากสมการ 4.2 คือ สมการถดถอยเชิงเส้นตรงที่คำนวณหาค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานโดยใช้ข้อมูลผลการทดลองที่ชิ้นงานผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน ในการสร้างสมการและนำสมการไปใช้ในการพยากรณ์การเสื่อมสภาพในระยะเวลาที่มากกว่า

ตารางที่ 4-9 แสดงผลลัพธ์จากการแทนค่าสมการถดถอยของชิ้นงาน

รหัสชิ้นงาน	ขนาดพื้นที่หน้าตัด X_1 (mm^2)	ระยะเวลา X_2 (month)	ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	ผลการทดลองค่าความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)
10AE	113.1	0	186.333	189.34
10AE	113.1	3	173.708	193.938
10AE	113.1	6	161.083	134.47
10AE	113.1	9	148.458	-
10AE	113.1	12	135.832	-
10AS	54	0	88.109	84.022
10AS	54	3	72.837	70.248
10AS	54	6	57.564	68.138
10AS	54	9	42.292	-
10AS	54	12	27.020	-



รูปที่ 4-15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงโค้งงอจากสมการพยากรณ์ ผลการทดลอง และงานวิจัย L. Bedia

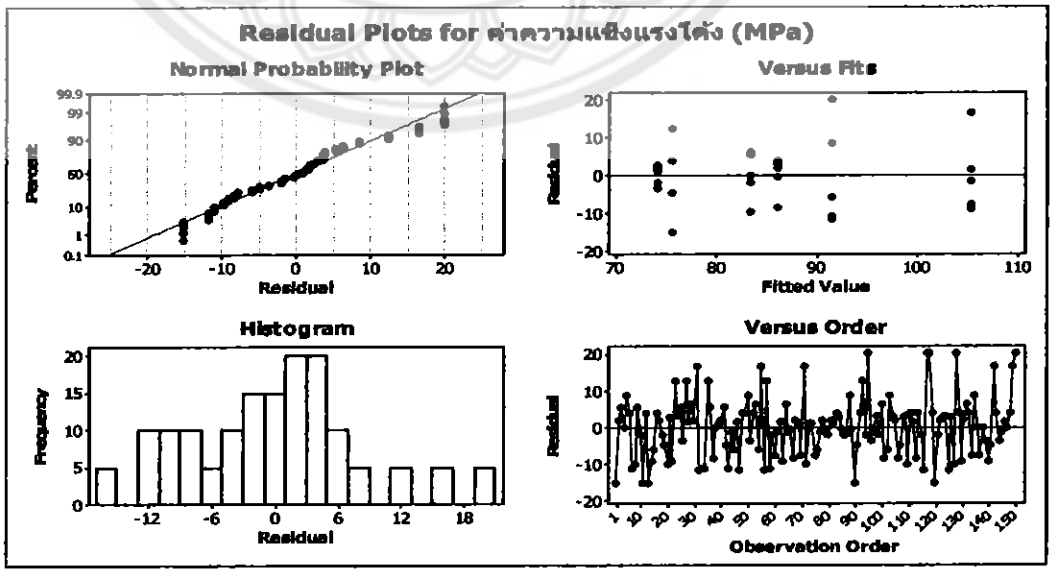
จากรูปที่ 4-15 เมื่อแทนค่าลงในสมการถดถอยแบบพหุคูณพบว่า ชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบวงรี [10AE] และชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS] มีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบจากผลการทดลอง พบว่าชิ้นงาน [10AE] มีค่าความ

แตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือน มีค่าเท่ากับ 1.59 10.43 และ 19.79 จะเห็นว่าสมการที่ 4.2 มีความสอดคล้องกับชิ้นงาน [10AE] ที่มีความแตกต่างระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองน้อยมาก และ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ L. Bedia มีลักษณะแนวโน้มเป็นไปในแนวเดียวกันที่ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน จากชิ้นงาน [10AS] มีค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือนมีค่าเท่ากับ 4.86 3.68 และ 15.51 จะเห็นว่าสมการที่ 4.2 มีความสอดคล้องกับชิ้นงาน [10AS] ในระยะเวลา 6 เดือนแรก แต่จากผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัย L.Bedia และผลจากการแทนสมการที่ 4.2 ที่ระยะเวลา 18 เดือน มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเป็น 0 ทำให้สมการอาจจะใช้ไม่ได้ในระยะเวลาที่มากกว่า 18 เดือน ทั้งนี้เหตุผลที่เลือกใช้สมการที่ 4.2 เพื่อพยากรณ์การเสื่อมสภาพ เนื่องจากผ่านการพิสูจน์ที่ยอมรับได้ทางสถิติและกำหนดให้มีระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 เมื่อแทนค่าลงในชิ้นงาน [10AE] มีความใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เพื่อการพยากรณ์การเสื่อมสภาพได้แม่นยำมากขึ้น อาจจะต้องใช้เทคนิคในการสร้างสมการขั้นสูงหรือเพิ่มปัจจัยในการวิเคราะห์

ค. ชิ้นงานระดับความหนา 16 และ 18 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [16TR] และ [18TR]

ค.1. การวิเคราะห์จากกราฟ

รูปที่ 4-16 แสดงแผนภูมิกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ผลของโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ



รูปที่ 4-16 แผนภูมิกราฟแสดงส่วนตกค้างของข้อมูล ค่าความแข็งแรงโค้งงอ

แผนภูมินี้เป็นการนำส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้จากการเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ดูว่าข้อมูลที่ได้เก็บมานั้นมีความเชื่อถือหรือว่าเพียงพอต่อการวิเคราะห์โดยวิธีการปกติหรือไม่ ซึ่งในรูปที่ 4-16 นี้จะแสดงถึงการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

a) Normal Probability Plot of the Residual คือ กราฟที่แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) ว่ามีการกระจายตัวเป็นแบบปกติหรือไม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลบนกราฟเรียงตัวกันเป็นลักษณะเส้นตรง ที่มีการกระจายเข้าสู่ศูนย์เพียงจุดเดียว ซึ่งในทางทฤษฎีหากข้อมูลมีกระจายตัวแบบนี้จะมีความสัมพันธ์กันมาก จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติ

b) Residuals Versus the Fitted Values คือ กราฟที่ตรวจสอบว่าข้อมูลนั้นมีการกระจายตัวของส่วนตกค้างในแต่ละช่วงของข้อมูลนั้นเป็นอย่างไร ซึ่งการกระจายตัวของข้อมูลที่ถูกต้องควรมีการกระจายตัวในแนวนอนสุ่มรอบค่าศูนย์ที่มีการสลับขึ้นลงและไม่เป็นรูปลำโพงบานออก จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวของส่วนตกค้างเป็นเป็นปกติ

c) Histogram of the Residuals คือ กราฟที่ตรวจสอบว่าส่วนตกค้างนั้นมีการกระจายตัวที่เป็นปกติหรือไม่ ซึ่งกราฟฮิสโตแกรมนั้นควรจะมีรูปทรงสมมาตรเป็นรูประฆังคว่ำและมีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ จากผลที่ได้จากกราฟข้อมูลของส่วนตกค้างมีความสมมาตรกันและอยู่ในลักษณะรูประฆังคว่ำ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นปกติ

d) Residuals Versus the Order of the Data คือ กราฟที่ใช้ตรวจสอบดูว่าส่วนตกค้างนั้นขึ้นอยู่กับลำดับการสังเกตการณ์ที่เปลี่ยนไปของการเก็บข้อมูลหรือไม่ ซึ่งจากกราฟนี้ไม่ควรปรากฏลักษณะของแนวโน้มหรือรูปแบบใดๆอย่างชัดเจน ซึ่งควรจะมีการกระจายตัวที่ขึ้นลงอย่างสม่ำเสมอจึงสรุปได้ว่าข้อมูลการกระจายตัวเป็นปกติ

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าจากกราฟทั้ง 4 กราฟนี้ ที่ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอสามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและเชื่อถือได้

ค.2 การวิเคราะห์ตารางความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงโค้งงอ

จากตารางที่ 4-10 แสดงการวิเคราะห์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งทำการวิเคราะห์ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยว่ามีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4-10 ตารางแสดงค่าผลการวิเคราะห์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอ

ปัจจัย	DF	SS	MS	F	P
ความหนา	1	1360.2	1360.2	20.29	0.000
ระยะเวลา	2	1062.4	531.2	7.92	0.001
ความหนา*ระยะเวลา	2	14080.2	7040.1	105.30	0.000
Error	144	9652.3	67		
Total	149	26155.1			

หมายเหตุ DF = Degree of Freedom , SS = Sum of Squares , MS = Mean Squares

F = F-Value , P = P-Value

จากตารางที่ 4-10 จะพิจารณาความน่าจะเป็นทางสถิติหรือเรียกว่าค่าของ P-Value ที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งค่า P-Value คือ ค่าความน่าจะเป็นทางสถิติของพื้นที่ใต้เส้นโค้ง (Normal Curve) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ในกรณีนี้ต้องการที่จะกำหนดระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือ ระดับความเชื่อมั่น 95% จะใช้เกณฑ์ในการพิจารณาจากค่า P-Value ดังนี้

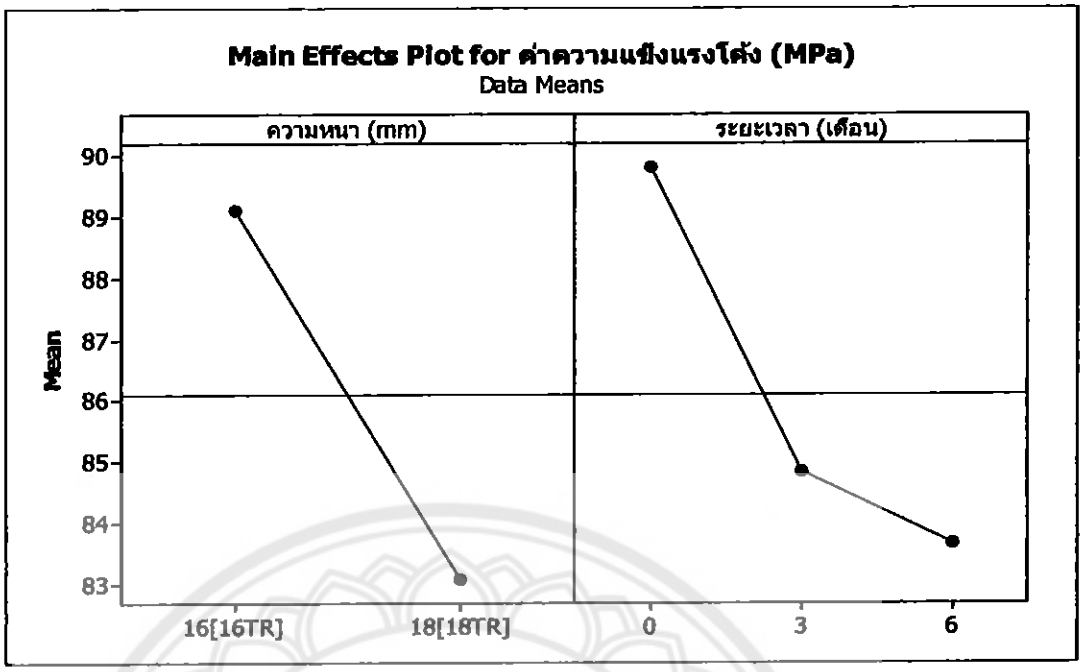
a) ถ้าค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระดับนัยสำคัญ 0.05 จะยอมรับว่าข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 95% Confidence Interval

b) ถ้าค่า P-Value มีค่ามากกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะปฏิเสธว่าข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์นั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 95% Confidence Interval

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้วิเคราะห์ผ่านกระบวนการนี้ ปัจจัยของ ความหนา มีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ เพราะว่ามีค่า P-value ต่ำกว่าที่ระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้และปัจจัยของระยะเวลามีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ เพราะว่ามีค่า P-Value ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ และเมื่อพิจารณาปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยพร้อมกัน พบว่าขนาดหน้าตัดและระยะเวลา มีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่มีผลจากปัจจัยของความหนาและระยะเวลา สามารถกำหนดให้มีระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือ ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้อย่างเหมาะสม

ค.3 การวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลัก (Main Effects)

ปัจจัยหลัก คือ ผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยนั้นๆ ที่มีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งผลที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรมสถิติ จะได้ดังรูปที่ 4-17 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4-17 แผนภูมิแสดงผลจากปัจจัยหลัก

จากรูปที่ 4-17 สามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้ Main Effects Plot (Data Means) for Flexural Strength (MPa) ในการวิเคราะห์นั้นถ้าพิจารณาในส่วนของปัจจัยหลัก (Main Effect) ทั้ง 2 ส่วนสามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้

a) ความหนา (มิลลิเมตร)

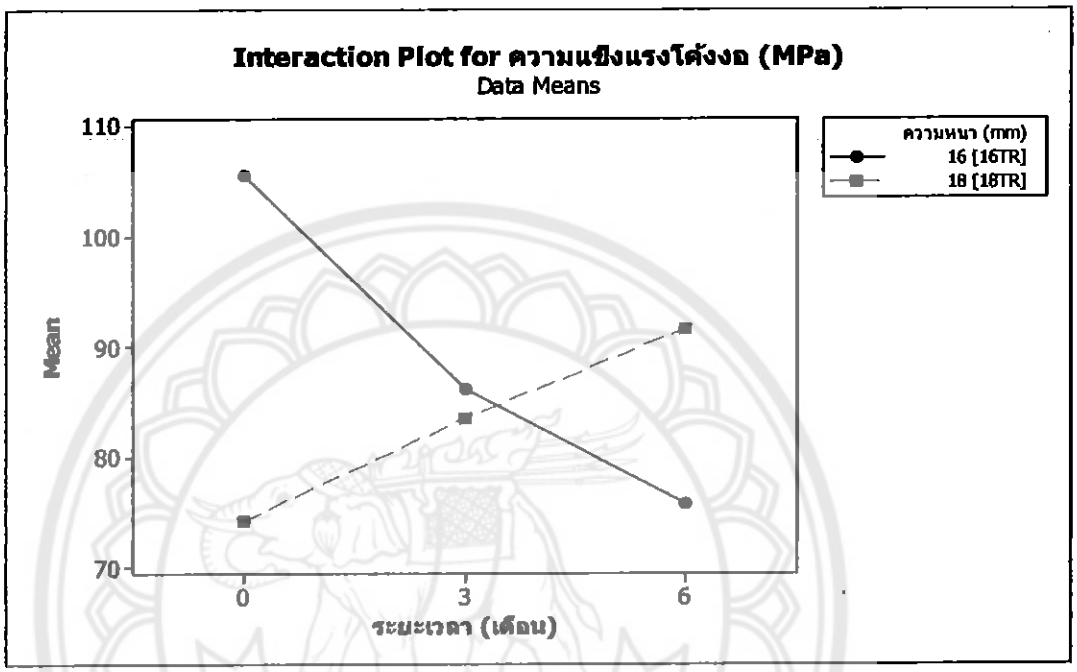
จากความหนา 16 -18 มิลลิเมตร พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงาน 16 มิลลิเมตร จะให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4-17 ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอจะลดลงเมื่อมีขนาดความหนาเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งในกรณีนี้จึงสรุปได้ว่า ชิ้นงานความหนา 16 ตารางมิลลิเมตร จะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงสุด

b) ระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศ (เดือน)

จากระยะเวลาของการผ่านสภาพอากาศพบว่าที่ระยะเวลา 6 เดือน จะมีค่าความแข็งโค้งงอน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศเพียงระยะเวลา 0 เดือนและ 3 เดือน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลาต่างๆ จะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดน้อยลง

ค.4 การวิเคราะห์ผลที่เกิดจากอันตรกิริยา

การมีอันตรกิริยาเป็นผลตอบของปัจจัยหนึ่ง จะขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ จะได้ดังรูปที่ 4-18 ดังนี้



รูปที่ 4-18 แผนภูมิแสดงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

จากรูปที่ 4-18 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ คือ Interaction Plot (Data Means) for Flexural Strength (MPa) สำหรับการวิเคราะห์อันตรกิริยานั้น ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการเกิดขึ้นร่วมกันระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการมีอันตรกิริยาต่อกันเส้นตรงบนกราฟทั้งสองเส้นจะต้องไม่ขนานกัน จากรูปเส้นตรงสองเส้นไม่ขนานกันแสดงว่ามีอันตรกิริยาต่อกันและสามารถพิจารณาได้ดังนี้ คือ

a) ในส่วนของอันตรกิริยาระหว่างความหนา กับ ระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศ (Month) พบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร และผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 0 เดือน จะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงสุด และยังพบอีกว่า ชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ที่ผ่านสภาพอากาศ 0 เดือน จะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอต่ำสุด

ดังนั้น หากพิจารณาในส่วนของค่าความแข็งแรงโค้งงอเพื่อที่จะดูถึงความหนาและระยะเวลาของการผ่านสภาพอากาศ 3 เดือน และ 6 เดือน เพื่อพิจารณาการนำไปใช้งานอย่างเหมาะสม ควรพิจารณาดังนี้

ชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะมีค่าสูงสุดเมื่อผ่านสภาพอากาศระยะเวลา 0 เดือน ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 และ 6 เดือน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดลง

ชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะมีค่าน้อยสุดที่ระยะเวลาผ่านสภาพอากาศ 0 เดือน และหลังจากผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศมากขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอเพิ่มมากขึ้น

ค.5 การวิเคราะห์ผลการถดถอยของข้อมูล

ค.5.1 การวิเคราะห์การถดถอยของความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลิน โดยมีชิ้นงานที่มีความหนา 16 และ 18 มิลลิเมตร กับระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศ 3 เดือน 6 เดือน ตามลำดับ

การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล คือ ความหนากับระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ เมื่อนำมาประมวลผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติได้ผลดังตารางที่ 4-11 ดังนี้

ตารางที่ 4-11 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน ตามขนาดหน้าตัดกับการผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน ดังนี้

Predictor	Coefficients
Constant	142.955
ความหนา (มิลลิเมตร)	-3.010
ระยะเวลา (เดือน)	-1.022
ความหนา * ระยะเวลา	-0.0514
Std. Error of Estimate = 8.18	
R-Square = 63.10%	

จากตารางที่ 4-11 การวิเคราะห์การถดถอยค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน ที่มีความหนา 16 และ 18 มิลลิเมตร และระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศ 0 3 และ 6 เดือน ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า

ค่า R-Square = 63.10 % คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด มีค่าใกล้ 100 % แสดงว่าขนาดของหน้าตัดและระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน ดังนั้นสมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

ค่า Std. Error of Estimate = 8.18 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ตัวแปรผล คือ ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีนจะมีความคลาดเคลื่อนด้วยตัวแปรอิสระอื่นๆ ประมาณ 8.18

จากการคำนวณค่าความถดถอยของขนาดโปรไฟล์กับระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอจะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์เป็นสมการถดถอยเชิงเส้นตรงที่ระดับนัยสำคัญที่ 95% ดังสมการที่ 4.3

$$Y = 142.955-3.010X_1-1.022X_2-0.0514X_1X_2 \quad \textbf{(4.3)}$$

โดยที่ Y คือ ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน (MPa)

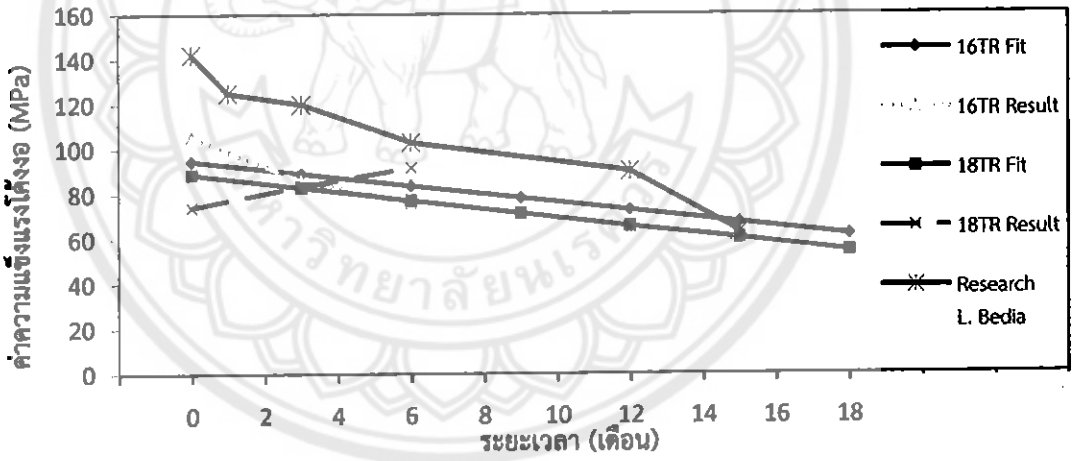
X_1 คือ ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

X_2 คือ ระยะเวลาของการผ่านสภาพอากาศ (เดือน)

จากสมการ 4.3 คือ สมการถดถอยเชิงเส้นตรงที่คำนวณหาค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานโดยใช้ข้อมูลผลการทดลองที่ชิ้นงานผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน ในการสร้างสมการและนำสมการไปใช้ในการพยากรณ์การเสื่อมสภาพในระยะเวลาที่มากกว่า

ตารางที่ 4-12 แสดงผลลัพธ์จากการแทนค่าสมการถดถอยของชิ้นงาน

รหัสชิ้นงาน	ความหนา X_1 (mm.)	ระยะเวลา X_2 (month)	ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	ผลการทดลองค่าความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)
16TR	16	0	94.795	105.436
16TR	16	3	89.264	86.138
16TR	16	6	83.732	75.752
16TR	16	9	78.201	-
16TR	16	12 (1 ปี)	72.670	-
18TR	18	0	88.775	74.166
18TR	18	3	82.935	83.512
18TR	18	6	77.096	91.58
18TR	18	9	71.256	-
18TR	18	12 (1 ปี)	65.417	-



รูปที่ 4-19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงโค้งงอจากสมการพยากรณ์ ผลการทดลองและงานวิจัยของ L. Bedia

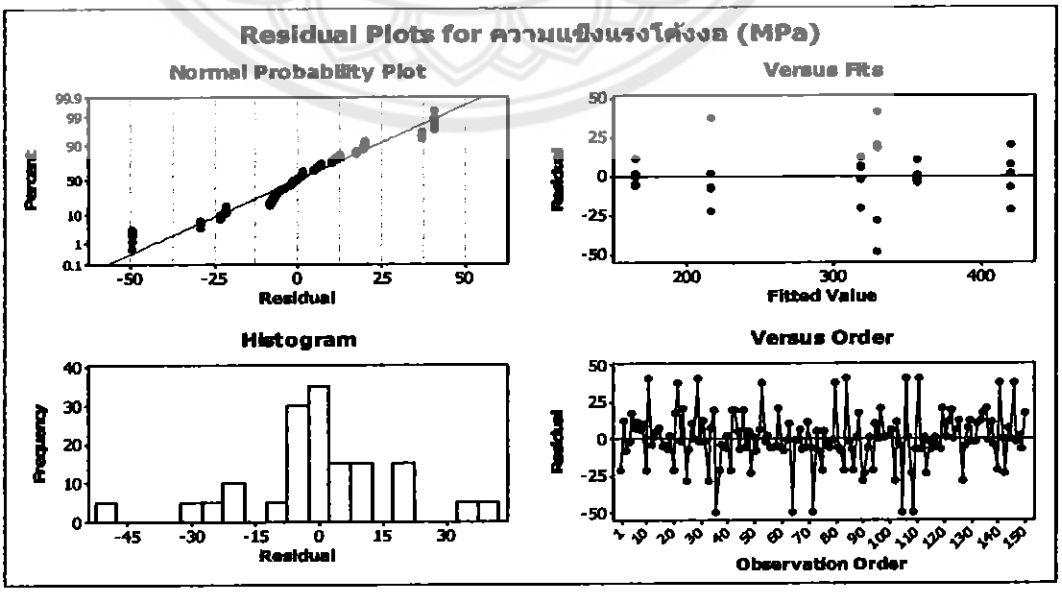
จากรูปที่ 4-19 เมื่อแทนค่าลงในสมการถดถอยแบบพหุคูณพบว่า ชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] และชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18TR] มีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบจากผลการทดลอง พบว่าชิ้นงาน [16TR] มีค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือนเท่ากับ 10.09 3.63 และ 10.54 จะเห็นว่าสมการที่ 4.3 มีความสอดคล้องกับ

ชิ้นงาน [16TR] เพราะมีความแตกต่างกันน้อยมาก และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ L. Bedia มีลักษณะแนวโน้มเป็นไปในแนวเดียวกันที่มีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเมื่อผ่านสภาพอากาศ 3 และ 6 เดือน และเมื่อพิจารณาจากชิ้นงาน [18TR] ยังไม่สอดคล้องกับสมการที่ 4.3 ในระยะเวลา 6 เดือนแรกซึ่งมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในแนวตรงข้ามกัน ทั้งนี้จากสมการที่ 4.3 ผ่านการพิสูจน์และยอมรับได้ทางสถิติและกำหนดให้มีระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งมีความใกล้เคียงกับชิ้นงาน [16TR] แต่มีความผิดเพี้ยนมากขึ้นเมื่อแทนกับชิ้นงาน [18TR] เนื่องจากผลการทดลองของชิ้นงาน [18TR] มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ไม่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ L.Bedia จากลักษณะชิ้นงานเป็นแบบโปรไฟล์ 2 ชั้น จึงส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนามากและแกนภายในโปรไฟล์ที่ต้านทานแรงมากกว่า และเมื่อนำไปผ่านสภาพอากาศจึงทำให้การเสื่อมสภาพของพื้นที่ผิวด้านบนเป็นไปได้น้อยและไม่ทั่วบนพื้นผิวชิ้นงาน ทั้งนี้อาจเนื่องจากระยะเวลาในการทดสอบมีจำกัดจึงไม่สามารถสรุปได้ว่าหลังจากระยะเวลา 6 เดือนค่าความแข็งแรงโค้งงอจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง และสอดคล้องกับสมการที่ 4.3 หรือไม่ แต่เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือนมีค่าเท่ากับ 19.698 0.690 และ 15.816

ง ชิ้นงานระดับความหนา 16 และ 18 มิลลิเมตร ตามแนวการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [16AR, 18AR]

ง.1 การวิเคราะห์จากกราฟ

รูปที่ 4-20 แสดงแผนภูมิกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ผลของโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ



รูปที่ 4-20 แผนภูมิกราฟแสดงส่วนตกค้างของข้อมูล ค่าความแข็งแรงโค้งงอ

แผนภูมินี้เป็นการนำส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้จากการเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ดูว่าข้อมูลที่ได้เก็บมานั้นมีความเชื่อถือหรือว่าเพียงพอต่อการวิเคราะห์โดยวิธีการปกติหรือไม่ ซึ่งในรูปที่ 4-20 นี้จะแสดงถึงการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

a) Normal Probability Plot of the Residual คือ กราฟที่แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residuals) ว่ามีการกระจายตัวเป็นแบบปกติหรือไม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลบนกราฟเรียงตัวกันเป็นลักษณะเส้นตรง ที่มีการกระจายเข้าสู่ศูนย์เพียงจุดเดียว ซึ่งในทางทฤษฎีหากข้อมูลมีกระจายตัวแบบนี้จะมีความสัมพันธ์กันมาก จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติ

b) Residuals Versus the Fitted Values คือ กราฟที่ตรวจสอบว่าข้อมูลนั้นมีการกระจายตัวของส่วนตกค้างในแต่ละช่วงของข้อมูลนั้นเป็นอย่างไร ซึ่งการกระจายตัวของข้อมูลที่ถูกต้องควรมีการกระจายตัวในแนวนอนสุ่มรอบค่าศูนย์ที่มีการสลับขึ้นลงและไม่เป็นรูปลำโพงบานออก จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวของส่วนตกค้างเป็นเป็นปกติ

c) Histogram of the Residuals คือ กราฟที่ตรวจสอบว่าส่วนตกค้างนั้นมีการกระจายตัวที่เป็นปกติหรือไม่ ซึ่งกราฟฮิสโตแกรมนั้นควรจะมีรูปทรงสมมาตรเป็นรูประฆังคว่ำและมีการกระจายตัวแบบสุ่มรอบค่าศูนย์ จากผลที่ได้จากกราฟข้อมูลของส่วนตกค้างมีความสมมาตรกันและอยู่ในลักษณะรูประฆังคว่ำ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นปกติ

d) Residuals Versus the Order of the Data คือ กราฟที่ใช้ตรวจสอบดูว่าส่วนตกค้างนั้นขึ้นอยู่กับลำดับการสังเกตการณ์ที่เปลี่ยนไปของการเก็บข้อมูลหรือไม่ ซึ่งจากกราฟนี้ไม่ควรปรากฏลักษณะของแนวโน้มหรือรูปแบบใดๆอย่างชัดเจน ซึ่งควรจะมีการกระจายตัวที่ขึ้นลงอย่างสม่ำเสมอจึงสรุปได้ว่าข้อมูลการกระจายตัวเป็นปกติ

ง.2 การวิเคราะห์ตารางความแปรปรวนของค่าความแข็งแรงโค้งงอ

จากตารางที่ 4-13 แสดงการวิเคราะห์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ซึ่งทำการวิเคราะห์ปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยว่ามีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4-13 ตารางแสดงค่าผลการวิเคราะห์ของค่าความแข็งแรงโค้งงอ

ปัจจัย	DF	SS	MS	F	P
ความหนา	1	171420	171420	508.13	0.000
ระยะเวลา	2	601847	300929	892.02	0.000
ความหนา*ระยะเวลา	2	334118	168059	495.21	0.000
Error	144	48579	337		
Total	149	1155964			

หมายเหตุ DF = Degree of Freedom , SS = Sum of Squares , MS = Mean Squares

F = F-Value , P = P-Value

จากตารางที่ 4-13 จะพิจารณาความน่าจะเป็นทางสถิติหรือเรียกว่าค่าของ P-Value ที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งค่า P-Value คือ ค่าความน่าจะเป็นทางสถิติของพื้นที่ใต้เส้นโค้ง (Normal Curve) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ในกรณีนี้ต้องการที่จะกำหนดระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือระดับความเชื่อมั่น 95% จะใช้เกณฑ์ในการพิจารณาจากค่า P-Value ดังนี้

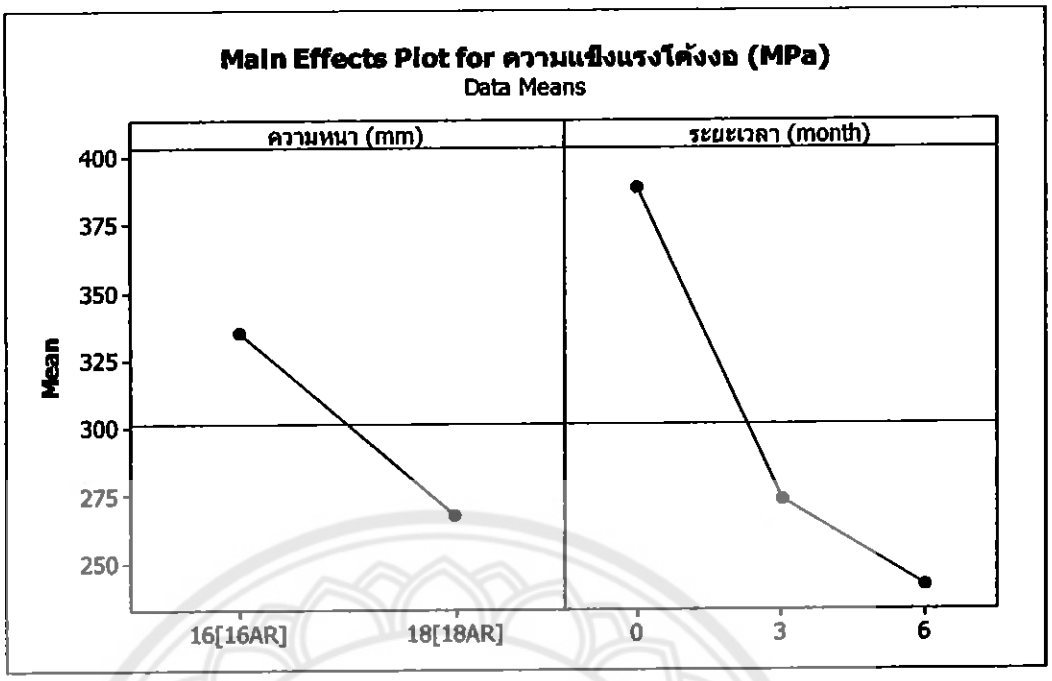
a) ถ้าค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระดับนัยสำคัญ 0.05 จะยอมรับว่าข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 95% Confidence Interval

b) ถ้าค่า P-Value มีค่ามากกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 จะปฏิเสธว่าข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์นั้นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 95% Confidence Interval

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ได้วิเคราะห์ผ่านกระบวนการนี้ ปัจจัยของ ความหนา มีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ เพราะว่ามีค่า P-value ต่ำกว่าที่ระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้และปัจจัยของระยะเวลามีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ เพราะว่ามีค่า P-Value ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ และเมื่อพิจารณาปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยพร้อมกัน พบว่าขนาดหน้าตัดและระยะเวลา มีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ จึงสรุปได้ว่าข้อมูลของค่าความแข็งแรงโค้งงอที่มีผลจากปัจจัยของความหนาและระยะเวลา สามารถกำหนดให้มีระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือ ระดับความเชื่อมั่น 95% ได้อย่างเหมาะสม

ง.3) การวิเคราะห์ผลของปัจจัยหลัก (Main Effects)

ปัจจัยหลัก คือ ผลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยนั้นๆ ที่มีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยที่ระดับต่างๆ ของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งผลที่ได้จากการประมวลผลของโปรแกรมสถิติ จะได้ดังรูปที่ 4-21 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4-21 แผนภูมิแสดงผลจากปัจจัยหลัก

จากรูปที่ 4-21 สามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้ Main Effects Plot (Data Means) for Flexural Strength (MPa) ในการวิเคราะห์นั้นถ้าพิจารณาในส่วนของปัจจัยหลัก (Main Effect) ทั้ง 2 ส่วนสามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังนี้

a) ความหนา (มิลลิเมตร)

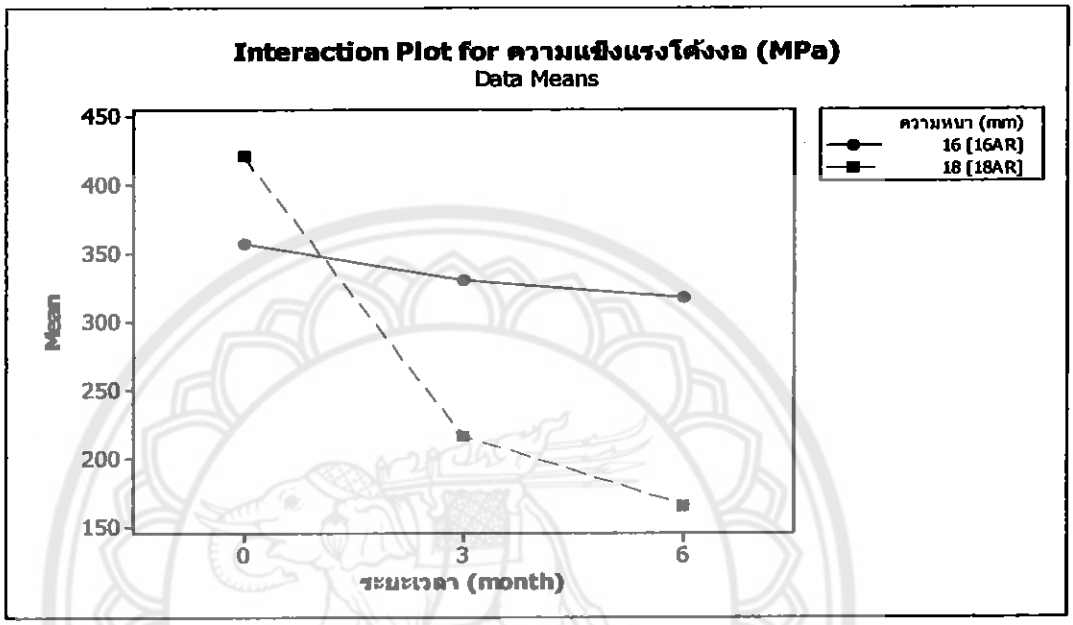
จากความหนา 16-18 มิลลิเมตร พบว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงาน 16 มิลลิเมตร จะให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4-21 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความแข็งแรงโค้งงอจะลดลงเมื่อมีขนาดความหนาเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งในกรณีนี้จึงสรุปได้ว่า ชิ้นงานความหนา 16 ตารางมิลลิเมตร จะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงสุด

b) ระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศ (เดือน)

จากระยะเวลาของการผ่านสภาพอากาศ พบว่าที่ระยะเวลา 6 เดือน จะมีค่าความแข็งโค้งงอน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศเพียงระยะเวลา 0 เดือนและ 3 เดือน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลาต่างๆ จะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอที่ทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดน้อยลง

ง.4) การวิเคราะห์ผลที่เกิดจากอันตรกิริยา

การมีอันตรกิริยาเป็นผลตอบของปัจจัยหนึ่ง จะขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรมประมวลผลทางสถิติ จะได้ดังรูปที่ 4-22 ดังนี้



รูปที่ 4-22 แผนภูมิแสดงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

จากรูปที่ 4-22 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ คือ Interaction Plot (Data Means) for Flexural Strength (MPa) สำหรับการวิเคราะห์อันตรกิริยานั้น ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการเกิดขึ้นร่วมกันระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการมีอันตรกิริยาต่อกันเส้นตรงบนกราฟทั้งสองเส้นจะต้องไม่ขนานกัน จากรูปเส้นตรงสองเส้นไม่ขนานกันแสดงว่ามีอันตรกิริยาต่อกันและสามารถพิจารณาได้ดังนี้ คือ

a) ในส่วนของอันตรกิริยาระหว่างความหนา กับ ระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศ พบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ที่ผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 0 เดือน จะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงสุด แต่เมื่อผ่านสภาพอากาศ 3 เดือนและ 6 เดือน พบว่า ชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร มีค่าลงต่ำลงมากกว่าชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร แสดงว่าชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร มีความทนต่อสภาพอากาศมากกว่าชิ้นงานที่มีความหน 18 มิลลิเมตร ดังนั้นหากพิจารณาในส่วนของค่าความแข็งแรงโค้งงอเพื่อที่จะดูถึงความหนาและระยะเวลาของการผ่านสภาพอากาศ 3 และ 6 เดือน เพื่อพิจารณาการนำไปใช้งานอย่างเหมาะสม ควรพิจารณาดังนี้

ชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะมีค่าสูงสุดเมื่อผ่านสภาพอากาศระยะเวลา 0 เดือน ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 และ 6 เดือน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า เมื่อนำชิ้นงานไปผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าลดลง

ชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะมีค่ามากที่สุดที่ระยะเวลาผ่านสภาพอากาศ 0 เดือน และหลังจากผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน ค่าความแข็งแรงโค้งงอจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วมากกว่าชิ้นงาน 16 มิลลิเมตร

ง.5 การวิเคราะห์ผลการถดถอยของข้อมูล

ง.5.1 การวิเคราะห์การถดถอยของความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลิน โดยมีชิ้นงานที่มีความหนา 16 และ 18 มิลลิเมตร กับระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศ 3 เดือน 6 เดือน ตามลำดับ

การวิเคราะห์การถดถอยของข้อมูล คือ ความหนากับระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอ เมื่อนำมาประมวลผลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติได้ผลดังตารางที่ 4-14 ดังนี้

ตารางที่ 4-14 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน ตามขนาดหน้าตัดกับการผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน ดังนี้

Predictor	Coefficients
Constant	1028.661
ความหนา (มิลลิเมตร)	-33.800
ระยะเวลา (เดือน)	-24.567
ความหนา * ระยะเวลา	-1.5522
Std. Error of Estimate = 95.80%	
R-Square = 18.37	

จากตารางที่ 4-14 การวิเคราะห์การถดถอยค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีนที่มีความหนา 16 และ 18 มิลลิเมตร และระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศ 0 3 และ 6 เดือน ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า

ค่า R-Square = 95.80 % คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด มีค่าใกล้ 100 % แสดงว่าขนาดของหน้าตัดและระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศมีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน ดังนั้นสมการถดถอยมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

ค่า Std. Error of Estimate = 18.37 คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ตัวแปรผล คือ ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีนจะมีความคลาดเคลื่อนด้วยตัวแปรอิสระอื่นๆ ประมาณ 18.37

จากการคำนวณค่าความถดถอยของขนาดโปรไฟล์กับระยะเวลาในการผ่านสภาพอากาศที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงโค้งงอจะสามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์เป็นสมการถดถอยเชิงเส้นตรงที่ระดับนัยสำคัญที่ 95% ดังสมการที่ 4.4

$$Y = 1028.661-33.800X_1-24.567X_2-1.552X_1X_2 \quad \textbf{(4.4)}$$

โดยที่ Y คือ ค่าความแข็งแรงโค้งงอของพอลิโพรพิลีน (MPa)

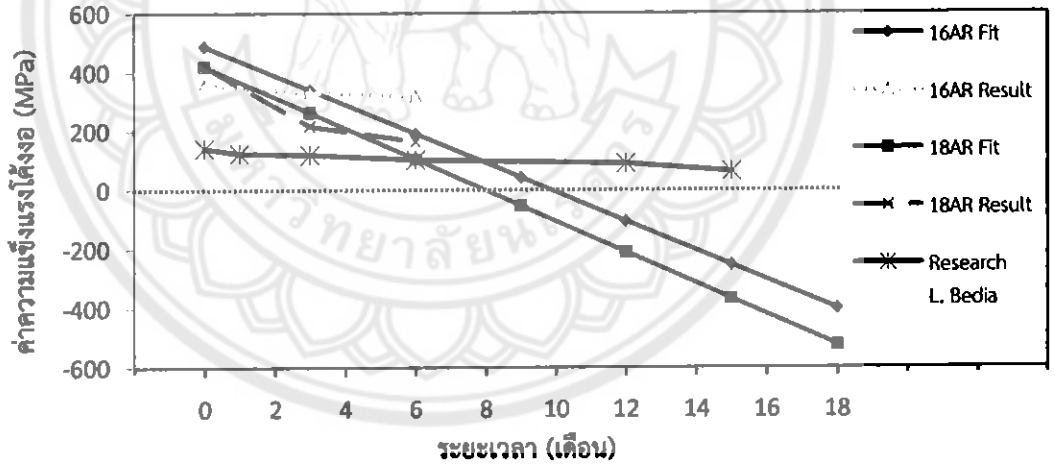
X_1 คือ ความหนาของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

X_2 คือ ระยะเวลาของการผ่านสภาพอากาศ (เดือน)

จากสมการ 4.4 คือ สมการถดถอยเชิงเส้นตรงที่คำนวณหาค่าความแข็งแรงโค้งงอของชิ้นงานโดยใช้ข้อมูลผลการทดลองที่ชิ้นงานผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน ในการสร้างสมการและนำสมการไปใช้ในการพยากรณ์การเสื่อมสภาพในระยะเวลาที่มากกว่า

ตารางที่ 4-15 แสดงผลลัพธ์จากการแทนค่าสมการถดถอยของชิ้นงาน

รหัสชิ้นงาน	ความหนา X_1 (mm.)	ระยะเวลา X_2 (month)	ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)	ผลการทดลองค่าความแข็งแรงโค้งงอ (MPa)
16AR	16	0	487.861	356.936
16AR	16	3	339.657	330.128
16AR	16	6	191.452	318.012
16AR	16	9	43.248	-
16AR	16	12 (1 ปี)	-104.957	-
18AR	18	0	420.261	420.89
18AR	18	3	262.744	216.300
18AR	18	6	105.226	165.054
18AR	18	9	-52.291	-
18AR	18	12 (1 ปี)	-209.809	-



รูปที่ 4-23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงโค้งงอจากสมการพยากรณ์ ผลการทดลองและงานวิจัยของ L. Bedia

จากรูปที่ 4-23 เมื่อแทนค่าลงในสมการถดถอยแบบพหุคูณพบว่า ชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [16AR] และชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมพื้นผ้า [18AR] มีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลง เมื่อทำการเปรียบเทียบจากผลการทดลองและจากงานวิจัย L. Bedia พบว่าชิ้นงาน [16AR] มีค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6

เดือนมีค่าเท่ากับ 36.68 2.89 และ -39.80 ซึ่งยังไม่สรุปได้ว่ามีความสอดคล้องกับสมการที่ 4.4 หรือไม่ เนื่องจากในระยะเวลา 6 เดือนแรกแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในผลการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากและจากระยะเวลาในการทดสอบมีจำกัด ซึ่งหลังระยะเวลา 6 เดือนค่าความแข็งแรงโค้งงออาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ L. Bedia มีลักษณะแนวโน้มเป็นไปในแนวเดียวกันที่มีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเมื่อผ่านสภาพอากาศ 3 เดือนและ 6 เดือน จากชิ้นงาน [18AR] มีค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือนมีค่าเท่ากับ -0.15 21.47 และ -36.25 และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ L. Bedia มีลักษณะแนวโน้มเป็นไปในแนวเดียวกันที่มีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเมื่อผ่านสภาพอากาศ 3 และ 6 เดือน แต่ค่าความแข็งแรงโค้งงอจากสมการถดถอยพหุคูณลดลงเร็วมาก จึงทำให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอมีค่าห่างกันเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศเพิ่มสูงขึ้น จึงไม่สามารถสรุปได้ว่ามีความสอดคล้องกับสมการที่ 4.4 หรือไม่ และในระยะเวลาการทดสอบมีจำกัด ซึ่งหลังระยะเวลา 6 เดือนค่าความแข็งแรงโค้งงออาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้

จากสมการที่ 4.3 และ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร ที่แบ่งตามแนวขวางการขึ้นรูป และตามแนวการขึ้นรูป พบว่าชิ้นที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] มีความใกล้เคียงระหว่างสมการถดถอยกับผลการทดลองมากที่สุดที่มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือน เท่ากับ -10.09 3.63 และ 10.54 และเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ที่แบ่งตามแนวขวางการขึ้นรูป และตามแนวการขึ้นรูป พบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 18 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18TR] มีความใกล้เคียงระหว่างสมการถดถอยกับผลการทดลองมากที่สุดที่มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือน เท่ากับ 19.70 -0.69 และ -15.82

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การศึกษาสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกล ได้แก่ สมบัติแรงดึง สมบัติแรงอัด สมบัติแรงกระแทก และสมบัติแรงดัดโค้ง ของแผ่นพอลิโพรพิลีนที่มีลักษณะรูปแบบพื้นที่หน้าตัดและความหนาของชิ้นงานที่แตกต่างกัน และทำการผ่านสภาพอากาศตามธรรมชาติเป็นระยะเวลา 3 เดือนและ 6 เดือน สามารถสรุปได้ดังนี้

ก) การทดสอบสมบัติแรงดึง พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นมีค่าทดสอบสมบัติแรงดึงเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการผ่านสภาพอากาศ ชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือ ชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดแบบวงรี [10TE] มีค่าความแข็งแรงดึงมากสุดเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน มีค่าเท่ากับ 1168 KPa เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งที่มีการจับตัวกันของโมเลกุลภายในเนื้อพอลิเมอร์อย่างเหนียวแน่น และสามารถกระจายแรงไปยังบนผิวชิ้นงานได้อย่างสม่ำเสมอ และชิ้นงานที่มีค่ามอดูลัสแรงดึงสูงสุด คือ ชิ้นงาน [10TE] ที่มีค่ามอดูลัสแรงดึงมากสุดเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน เท่ากับ 1087.14 KPa เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็ง และเหนียว ที่สามารถรับแรงดึงได้สูง โดยมีการเสียรูปได้น้อยที่สุด ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึง คือ แบบการตัดขึ้นรูป ลักษณะพื้นที่หน้าตัด ซึ่งเห็นได้ชัดจากการทดลองว่า ชิ้นงานที่มีแนวการขึ้นรูป และลักษณะหน้าตัดไม่เหมือนกัน จะมีค่าความแข็งแรงดึง และมอดูลัสแรงดึงต่างกัน เพราะพื้นที่ในการรับแรง และการถ่ายเทแรงได้ไม่เท่ากัน ชิ้นงานที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมากสุด คือ ชิ้นงาน [10AE] ที่มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมากสุด ในเดือนที่ 6 เท่ากับ 20.35 จาก Gage Range ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัว คือ แบบแนวการตัดขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัด

ตารางที่ 5-1 แสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสมบัติแรงดึง จากการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน

ชิ้นงาน \ ระยะเวลา (เดือน)	0	3	6
ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)			
10TE	927.00	953.10 (+2.81)	1168.30 (+26.30)
10AE	492.42	573.80 (+16.52)	922.90 (+87.42)
10TS	262.40	469.37 (+78.88)	499.24 (+90.26)
10AS	195.90	588.40 (+200.36)	738.90 (+277.18)
ค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile Modulus)			
10TE	886.89	1001.40 (+12.91)	1087.14 (+22.58)
10AE	578.05	681.59 (+17.91)	936.61 (+62.03)
10TS	393.03	507.74 (+29.19)	589.10 (49.89)
10AS	232.34	583.92 (+151.32)	765.20 (+220.34)
ค่าร้อยละการยืดตัว (% Elongation)			
10TE	7.11	5.63 (-20.82)	4.34 (-38.96)
10AE	23.87	22.71 (-4.86)	20.35 (-14.75)
10TS	23.51	9.90 (-57.89)	5.82 (-75.24)
10AS	131.58	16.41 (-87.53)	9.12 (-93.07)

หมายเหตุ ค่าที่แสดงลงในตารางที่ 5-1 คือ ค่าทางกล (ร้อยละการเปลี่ยนแปลง)

ข) การทดสอบแรงดัดโค้ง พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นมีค่าทดสอบสมบัติแรงดัดโค้งเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการผ่านสภาพอากาศ ชิ้นงานที่ให้ค่ามอดูลัสความโค้งงอสูงสุดเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน คือ ชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16AR] มีค่ามอดูลัสความโค้งงอ เท่ากับ 203.44 MPa เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งและเหนียว มีโครงสร้างที่แข็งแรง มีขนาดพื้นที่การรับแรงมากกว่าและมีกระจายแรงบนพื้นผิวชิ้นงานได้อย่างสม่ำเสมอ และชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงโค้งงอสูงสุดเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน คือ ชิ้นงาน [16AR] มีค่าความแข็งแรงโค้งงอ เท่ากับ 329.75 MPa ดังนั้นจากการทดสอบจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่ามอดูลัสความโค้งงอและค่าความแข็งแรงโค้งงอ คือ แบบการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัด และความหนาของชิ้นงาน

ตารางที่ 5-2 แสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสมบัติแรงดัดโค้ง จากการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน

ชิ้นงาน \ ระยะเวลา (เดือน)	0	3	6
ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength)			
10TE	62.43	59.96 (-3.89)	58.73 (-5.91)
10AE	195.08	186.24 (-4.53)	133.76 (-31.45)
10TS	31.45	27.16 (-13.65)	17.45 (-44.53)
10AS	88.44	77.62 (-12.23)	64.72 (-26.81)
16TR	85.57	84.29 (-1.49)	80.07 (-6.42)
16AR	336.00	330.20 (-1.73)	329.75 (-1.86)
18TR	77.06	89.66 (16.36)	97.00 (25.88)
18AR	324.66	271.88 (-16.25)	253.93 (-21.79)
ค่ามอดูลัสความโค้งงอ (Flexural Modulus)			
10TE	69.36	43.90 (-36.71)	36.23 (-47.58)
10AE	214.43	215.63 (+0.36)	101.28 (-52.77)
10TS	14.78	16.62 (+12.51)	12.75 (-13.74)
10AS	176.65	152.29 (-13.79)	91.85 (-48.00)
16TR	35.46	34.57 (-2.49)	33.28 (-6.14)
16AR	217.35	209.98 (-3.38)	203.24 (-6.49)
18TR	32.05	33.19 (+3.56)	33.61 (+4.88)
18AR	195.93	175.70 (-10.33)	153.03 (-21.89)

หมายเหตุ ค่าที่แสดงลงในตารางที่ 5-2 คือ ค่าทางกล (ร้อยละการเปลี่ยนแปลง)

ค) การทดสอบแรงอัด พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นมีค่าทดสอบสมบัติแรงอัดเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการผ่านสภาพอากาศ ชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดแบบวงรี [10TE] มีค่าความแข็งแรงอัดมากสุดเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน มีค่าเท่ากับ 9.5 MPa และชิ้นงานที่มีค่าความแข็งแรงอัดต่ำสุดเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน คือ ชิ้นงานที่มีความหนา 16 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] ทั้งนี้พบว่าแม้ชิ้นงานมีความหนามากกว่าแต่ไม่ได้ช่วยในการรับแรงอัดเพราะรูปแบบของหน้าตัดนั้นมีความแตกต่างกันเนื่องมาจากรูปแบบของหน้าตัดส่งผลถึงปริมาณของเนื้อพอลิเมอร์ที่มีในชิ้นงานที่ใช้จะรองรับแรงอัดด้วย

ตารางที่ 5-3 แสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสมบัติแรงอัด จากการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน

ชิ้นงาน \ ระยะเวลา (เดือน)	0	3	6
ค่าความแข็งแรงอัด (Compressive Strength)			
10TE	9.50	3.09 (-67.47)	2.60 (-72.63)
10TS	1.38	1.34 (-2.89)	1.31 (-5.07)
16TR	1.01	0.99 (-1.98)	0.97 (-3.96)
18TR	1.53	1.41 (-7.84)	1.15 (-24.84)

หมายเหตุ ค่าที่แสดงลงในตารางที่ 5-3 คือ ค่าทางกล (ร้อยละการเปลี่ยนแปลง)

ง) การทดสอบแรงกระแทก พบว่าชิ้นงานทุกชิ้นมีค่าทดสอบสมบัติแรงกระแทกเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการผ่านสภาพอากาศ ชิ้นงานที่มีค่าการรับแรงกระแทกสูงสุดเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 6 เดือน คือ ชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป หน้าตัดแบบวงรี [10TE] มีค่าการรับแรงกระแทกเท่ากับ 73.0 J/mm^2 และชิ้นงานที่มีค่าการรับแรงกระแทกต่ำสุด คือ ชิ้นงานที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวการขึ้นรูป หน้าตัดแบบวงรี [10AE] ดังนั้นจากการทดสอบจะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการกระแทก คือ การผ่านสภาพอากาศ แนวการขึ้นรูป และลักษณะหน้าตัด

ตารางที่ 5-4 แสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสมบัติแรงกระแทก จากการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน

ชิ้นงาน \ ระยะเวลา (เดือน)	0	3	6
ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact Strength)			
10TE	65.98	67.23 (+1.89)	73.00 (+10.65)
10AE	53.19	57.75 (+8.56)	61.18 (15.00)

ตารางที่ 5-4 (ต่อ) แสดงร้อยละการเปลี่ยนแปลงของค่าสมบัติแรงกระแทก จากการผ่านสภาพอากาศที่ระยะเวลา 3 เดือน และ 6 เดือน

ระยะเวลา (เดือน) / ชิ้นงาน	0	3	6
10TS	71.10	72.91 (+2.55)	74.19 (+4.34)
10AS	59.88	62.36 (+4.15)	63.28 (+5.68)

หมายเหตุ ค่าที่แสดงลงในตารางที่ 5-4 คือ ค่าทางกล (ร้อยละการเปลี่ยนแปลง)

5.1.2 การพยากรณ์การเสื่อมสภาพจากสมการถดถอยแบบพหุคูณ

จากการสร้างสมการถดถอยแบบพหุคูณที่เลือกใช้ค่าความแข็งแรงดัดโค้ง ของการทดสอบสมบัติแรงดัดโค้ง จากการสร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ สามารถสรุปได้ดังนี้

ก) ชิ้นงานระดับความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดวงรี [10TE] และ ชิ้นงานระดับความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10TS]

พบว่าชิ้นงาน [10TS] มีผลการทดลองที่สอดคล้องกับผลจากการแทนค่าสมการที่ 4.1 ที่มีค่าความแข็งแรงโค้งงอใกล้เคียงกันในช่วงระยะเวลาผ่านสภาพอากาศ 0 3 และ 6 เดือน และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ L. Bedia มีความสอดคล้องกันที่มีลักษณะแนวโน้มเป็นไปในแนวเดียวกัน ดังนั้นสมการที่ 4.1 สามารถนำไปใช้พยากรณ์การเสื่อมสภาพของชิ้นงานได้จากชิ้นงาน [10TE] มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในแนวเดียวกับผลการทดลอง ที่มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 และ 6 เดือน และที่ระยะเวลาผ่านสภาพอากาศ 0 เดือนจะมีค่าความแข็งแรงโค้งงอใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก จะเห็นได้ว่าสมการที่ 4.1 มีความสอดคล้องกับชิ้นงาน [10TE] ในระยะเวลา 6 เดือนแรก ผลจากการแทนสมการที่ 4.1 ที่ระยะเวลา 9 เดือน มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเป็น 0 แต่เนื่องจากความเป็นจริงแล้วชิ้นงานถูกนำไปใช้ในงานด้านโครงสร้าง ความทนทานต่อการนำไปใช้งานจึงมีสูง จึงส่งผลให้ค่าผลการทดลองของชิ้นงาน [10TE] มีค่าเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามหากชิ้นงานผ่านสภาพอากาศ 9 เดือน ค่าผลการทดลองของชิ้นงานอาจจะลดลงได้ ซึ่งจะทำให้ชิ้นงาน [10TE] มีความสอดคล้องกับสมการที่ 4.1 และ งานวิจัย L.Bedia

ข) ชิ้นงานระดับความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดวงรี [10AE] และชิ้นงานระดับความหนา 10 มิลลิเมตร ตามแนวการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส [10AS]

พบว่าชิ้นงาน [10AE] มีค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือนมีค่าเท่ากับ 1.59 10.43 และ 19.79 จะเห็น

ว่าสมการที่ 4.2 มีความสอดคล้องกับชิ้นงาน [10AE] ที่มีความแตกต่างระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองน้อยมาก และ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ L. Bedia มีลักษณะแนวโน้มเป็นไปในแนวเดียวกันที่ค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเมื่อผ่านสภาพอากาศเป็นระยะเวลา 3 และ 6 เดือน จากชิ้นงาน [10AS] มีค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือนมีค่าเท่ากับ 4.86 3.68 และ 15.51 จะเห็นว่าสมการที่ 4.2 มีความสอดคล้องกับชิ้นงาน [10AS] ในระยะเวลา 6 เดือนแรก แต่จากผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัย L.Bedia และผลจากการแทนสมการที่ 4.2 ที่ระยะเวลา 18 เดือน มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเป็น 0 ทำให้สมการอาจจะใช้ไม่ได้ในระยะเวลาที่มากกว่า 18 เดือน เนื่องจากความเป็นจริงแล้วชิ้นงานถูกนำไปใช้ในงานด้านโครงสร้าง การทนทานเมื่อถูกนำไปใช้งานจึงมีสูง ชิ้นงานจึงควรจะใช้งานได้นานถึง 18 เดือน

ค) ชิ้นงานระดับความหนา 16 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16TR] และ ชิ้นงานระดับความหนา 18 มิลลิเมตร ตามแนวขวางการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18TR]

พบว่าชิ้นงาน [16TR] มีค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างจากการแทนค่าสมการที่ 4.3 กับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือนเท่ากับ 10.09 3.63 และ 10.54 จะเห็นว่าสมการที่ 4.3 มีความสอดคล้องกับชิ้นงาน [16TR] เพราะมีความแตกต่างกันน้อยมาก และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ L. Bedia มีลักษณะแนวโน้มเป็นไปในแนวเดียวกันที่มีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเมื่อผ่านสภาพอากาศ 3 และ 6 เดือน และจากชิ้นงาน [18TR] ไม่มีความสอดคล้องกับสมการที่ 4.3 ในระยะเวลา 6 เดือนแรกซึ่งมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในแนวตรงข้ามกัน ทั้งนี้จากสมการที่ 4.3 ผ่านการพิสูจน์และยอมรับได้ทางสถิติและกำหนดให้มีระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 และมีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงาน [16TR] แต่ค่ามีความผิดพลาดเพิ่มมากขึ้นเมื่อแทนกับชิ้นงาน [18TR] เนื่องจากผลการทดลองชิ้นงาน [18TR] มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเพิ่มสูงขึ้นและไม่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ L.Bedia จากลักษณะชิ้นงานเป็นแบบโปรไฟล์ 2 ชั้น จึงทำให้ชิ้นงานมีความหนามากและแกนภายในโปรไฟล์ที่ต้านทานแรงมาก เมื่อนำไปผ่านสภาพอากาศจึงทำให้การเสื่อมสภาพของพื้นที่ผิวด้านบนเป็นไปได้น้อยและไม่ทั่วบนพื้นผิวชิ้นงาน เนื่องจากความเป็นจริงแล้วชิ้นงานถูกนำไปใช้ในงานด้านโครงสร้าง การทนทานเมื่อถูกนำไปใช้งานจึงมีสูง และจากระยะเวลาในการทดสอบมีจำกัดจึงไม่สามารถสรุปได้ว่าหลังจากระยะเวลา 6 เดือนค่าความแข็งแรงโค้งงอจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง และสอดคล้องกับสมการที่ 4.3 หรือไม่ แต่เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือนมีค่าเท่ากับ 19.698 0.690 และ 15.816

ง) ชิ้นงานระดับความหนา 16 มิลลิเมตร ตามแนวการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [16AR] และ ชิ้นงานระดับความหนา 18 มิลลิเมตร ตามแนวการขึ้นรูป ลักษณะหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า [18AR]

ชิ้นงาน [16AR] มีค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างจากการแทนค่าสมการที่ 4.4 กับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือนเท่ากับ 36.68 2.89 และ 39.80 ซึ่งยังไม่สรุปได้ว่ามีความสอดคล้องกับสมการที่ 4.4 หรือไม่ และผลจากการแทนสมการที่ 4.4 ที่ระยะเวลา 10 เดือน มีค่าความแข็งแรงโค้งงอเป็น 0 ดังนั้นสมการอาจจะใช้ไม่ได้ในระยะเวลาที่มากกว่า 10 เดือน แต่จากลักษณะของชิ้นงาน [16AR] ถูกนำไปใช้ในงานด้านโครงสร้าง การทนทานเมื่อถูกนำไปใช้งานจึงมีสูง ที่ความเป็นจริงแล้วชิ้นงานไม่ควรจะเสียรูปในระยะเวลา 10 เดือน ทั้งนี้เหตุผลที่เลือกใช้สมการที่ 4.4 เพื่อพยากรณ์การเสื่อมสภาพ เนื่องจากผ่านการพิสูจน์ที่ยอมรับได้ทางสถิติและกำหนดให้มีระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 และค่ามีความใกล้เคียงกับชิ้นงาน [18AR] และเมื่อดูจากกราฟในระยะเวลา 6 เดือนแรกมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปตามผลการทดลองที่มีความแตกต่างน้อยมาก ทั้งนี้อาจจะต้องใช้เทคนิคในการสร้างสมการขั้นสูงเพื่อการพยากรณ์การเสื่อมสภาพได้แม่นยำมากขึ้น และจากระยะเวลาในการทดสอบมีจำกัดจึงไม่สามารถบอกได้ว่าสมการที่ 4.4 สามารถนำไปใช้พยากรณ์การเสื่อมสภาพได้หรือไม่ ซึ่งหลังระยะเวลา 6 เดือนค่าความแข็งแรงโค้งงออาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ L. Bedia มีลักษณะแนวโน้มเป็นไปในแนวเดียวกันที่มีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเมื่อผ่านสภาพอากาศ 3 เดือนและ 6 เดือน จากชิ้นงาน [18AR] มีค่าความแตกต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ระหว่างสมการถดถอยพหุคูณกับผลการทดลองที่ระยะเวลา 0 3 และ 6 เดือน มีค่าเท่ากับ 0.15 21.47 และ 36.25 ทั้งนี้ค่าความแข็งแรงโค้งงอจากสมการถดถอยพหุคูณลดลงอย่างรวดเร็วจึงเมื่อระยะเวลาการผ่านสภาพอากาศเพิ่มสูงขึ้น แต่จากผลการทดลองมีค่าลดลงน้อยมาก เนื่องจากลักษณะของชิ้นงาน [18AR] ถูกนำไปใช้ในงานด้านโครงสร้างการทนทานเมื่อถูกนำไปใช้งานจึงมีสูง ที่ความเป็นจริงชิ้นงานจะเสื่อมสภาพได้ยากและสามารถนำไปใช้งานได้นาน อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ L. Bedia ที่มีลักษณะแนวโน้มเป็นไปในแนวเดียวกันที่มีค่าความแข็งแรงโค้งงอลดลงเมื่อผ่านสภาพอากาศ 3 และ 6 เดือน ดังนั้นสมการที่ 4.4 ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าใช้พยากรณ์การเสื่อมสภาพได้หรือไม่ เนื่องจากระยะเวลาการทดสอบมีจำกัดและหลังจากผ่านสภาพอากาศ 6 เดือนค่าความแข็งแรงโค้งงออาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เพิ่มระยะเวลาในการทดสอบให้มากขึ้น เพื่อดูลักษณะแนวโน้มของการเสียสภาพของชิ้นงานหรือใช้เครื่องมือจำลองสภาวะเพื่อให้ได้ข้อมูลการย่อยสลายที่มากขึ้นในเวลาจำกัด

5.2.2 ควรศึกษาสมบัติที่จำเป็นต่อการใช้งานของพอลิโพรพิลีนให้มากกว่านี้ เช่นทดสอบสมบัติอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

5.2.3 สมการถดถอยพหุคูณที่ใช้ในการพยากรณ์การเสื่อมสภาพยังไม่เพียงพอในการนำไปในการพยากรณ์ในระยะเวลาที่ยาวนาน เนื่องจากชิ้นงานทดสอบเป็นแบบโปรไฟล์ไม่เหมือนชิ้นงานแบบตัน

5.2.4 ปัจจัยที่ใช้วิเคราะห์ผลของค่าสมบัติเชิงกลยังน้อยเกินไป

5.3 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ปัญหา

5.3.1 การทดสอบสมบัติทางกล ทดสอบสมบัติแรงดึงบางครั้งได้ค่าที่คลาดเคลื่อน เนื่องจากตัวจับยึดชิ้นงานมีพื้นผิวที่ลื่นทำให้การจับชิ้นงานเลื่อนหลุด จึงควรนำชิ้นงานบริเวณที่จับยึดทำให้เกิดความขรุขระเพื่อป้องกันการเลื่อนหลุด และการทดสอบแรงอัดไม่สามารถตัดชิ้นงานให้มีการวางแนวแบบตามแนวได้เพราะเมื่อทำการตัดชิ้นงานแล้วทำให้ลักษณะหน้าตัดแปลกไป ผิดรูปไม่สามารถมานำทดสอบได้

5.3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ยังไม่เพียงพอ เพราะโหลดที่มีใช้ในภาควิชามีค่อนค้างต่ำ เพราะการทดสอบแรงดึงจะต้องใช้โหลดที่สูง โดยใช้ขนาดโหลด 50 KN แต่ในภาควิชามีโหลดให้ใช้สูงสุดเพียง 10 KN เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดใหญ่ แข็ง และเหนียว จึงจำเป็นต้องใช้แรงมากพอที่จะดึงชิ้นงานให้ขาดออกจากกัน

5.3.3 ชิ้นงานทดสอบเป็นลักษณะโปรไฟล์ การดำเนินการทดสอบและการวิเคราะห์ผล จึงต้องปรับให้สอดคล้องกับชิ้นงานแบบตัน

เอกสารอ้างอิง

[1] จินตมัย สุวรรณประทีป. (2547). **การทดสอบสมบัติทางกลของพลาสติก. (พิมพ์ครั้งที่ 1).** กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

[2] ณรงศักดิ์ ธรรมโชติ. (2549). **วัสดุวิศวกรรม.** (พิมพ์ครั้งที่1). กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น

[3] William F. Smith. (2551) **วัสดุวิศวกรรม. (แม้น อมรสิทธิ์ และสมชัย อัครทิวา, แปล).** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป. (ต้นฉบับภาษาอังกฤษ พิมพ์ ค.ศ. 2008)

[4] ทานตวรรณ เต็กชื่น และนิรันดร์ จันรัสมี. (2544). **พลาสติก 1.** กรุงเทพฯ: สกาย**บุ๊กส์.**

[5] พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. (2536). **พลาสติก.** (พิมพ์ครั้งที่ 10). กรุงเทพฯ : สัมพันธ์พาณิชย์

[6] มานพ ตันตระบัณฑิตย์. (2546). **งานทดสอบวัสดุอุตสาหกรรม.** (พิมพ์ครั้งที่ 6). **กรุงเทพฯ :** สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.

[7] บริษัท อัมพรดีไซน์อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด. (2012). **แผ่นพีพี บอร์ด.** สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2555), จาก http://www.amporndesign.com/e-mail/enews001.htm.

[8] อุดมวิทย์ กาญจนวรงค์. (2545). **การทดสอบวัสดุ.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สกายบุ๊ก.

[9] อรรถพล ตะเระ. (2551). **คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ.** (พิมพ์ครั้งที่1). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

[10] เล็ก สีคง. (2540). **วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม.** (พิมพ์ครั้งที่1). สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[11] William D. Callister, Jr. (2548) **วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน. (อ.สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ และคณะ, แปล).** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป (ต้นฉบับภาษาอังกฤษ พิมพ์ ค.ศ. 2005)

[12] ไพศาล นาคพิพัฒน์. (2552). **พลาสติกในชีวิตประจำวัน.** (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี .

[13] L. Bedia, Marrissa A. Paglicawan. (2003). Natural Weathering of Polypropylene in a Tropical Zone.**Journal of Polymer**, 931-938

[14] K. Rajakumar , V.sarasvathy , A.Thamarai Chelvan. (2009). Natural Weathering studies of Polypopylene. **Joural of polymer envlronment ,** 17,191-202

[15] ASTM D-256. Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics

[16] ASTM D-638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics

[17] Brydson, J.A. (1989). **Plastics materials**. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann

[18] **บริษัท ภัทรวิทย์ไฮเทค จำกัด. (2010). แผ่นพลาสติกและพีพี บอร์ด.** สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2555.จาก http://www.officesmiles.com/store/product/view/PP_Board_th.html.

[19] ณัฐสุดา วราภรณ์. (2553). **การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมภายในท้องถิ่น** , พิษณุโลก: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

[20] กิตติศักดิ์ พลอยพาณิชเจริญ. (2554). **สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 2.** (พิมพ์ครั้งที่ 9). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.

[21] P. Phulkerd, S. Nobukawa, Y. Uchiyama, & M. Yamaguchi, (2011). Anomalous mechanical anisotropy of b form polypropylene sheet with N,N0-dicyclohexyl-2,6-naphthalenedicarboxamide. Journal of Polymer ,52 ,4867-4872

[22] T.J. Turton , J.R. White, (2001).Effect of stabilizer and pigment on photo degradationdepth profiles in polypropylene. Journal of Polymer Degradation and Stability 74 (2011) 4867-4872

[23] Mashael Al-Shabanat , (2011). Study of the Effect of Weathering in Natural Environment Polypropylene and Its Composites : Morphological and Mechanical properties.Journal of Chemisty Vol3, No.1,February 2011

[24] ปรเมศ ชุติมา. (2545) **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม.** พิมพ์ครั้งที่ 1. **บริษัทด่านสุทธาการพิมพ์จำกัด. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545**

[25] สมบัติ ท้ายเรือคา. (2545). **การวิเคราะห์การถดถอยพหุ (MRA) การวิเคราะห์เส้นทาง (PA) และการวิเคราะห์องค์ประกอบ(FA).** วารสารการวัดผลการศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (ปีที่ 8 หน้า 37-46)

[26] กานต์ ลี่วัฒนายิ่งยง. (2553). **การวิเคราะห์ความแปรปรวน สถิติวิศวกรรม, พิษณุโลก : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.**

[27] กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. (2551). **สถิติสำหรับงานวิศวกรรม ประมวลผลด้วยโปรแกรม minitab.** (พิมพ์ครั้งที่ 12). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.

[28] บริษัท ซายน์ มาสเตอร์โปร จำกัด. (2010). **แผ่นพลาสติกและพีพี บอร์ด.** สืบค้นเมื่อ 25 สิงหาคม 2555. จาก http://www.signmasterpro.co.th/th17.3

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงข้อมูลการทดสอบสมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีน

ตารางที่ ก.1 มอดูลัสแรงดึง (Tensile Modulus)

ระยะเวลา (เดือน) / ชิ้นงาน	0			3			6		
	ค่าทางกล (KPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล (KPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล (KPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง
10TE	886.9	86.5	-	1001.4	48.5	+12.9	1087.1	33.7	+22.6
10AE	587.1	74.4	-	681.6	52.4	+17.9	936.6	22.54	+63.0
10TS	393.0	66.4	-	507.8	57.1	+29.2	589.1	11.09	+48.9
10AS	232.34	58.4	-	583.9	57.0	+151.3	760.2	26.3	+229.3

ตารางที่ ก.2 ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)

ระยะเวลา (เดือน) / ชิ้นงาน	0			3			6		
	ค่าทางกล (KPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล (KPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล (KPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง
10TE	927.0	121.2	-	953.1	196.3	+2.81	1168.3	244.3	+26.03
10AE	492.4	146.2	-	573.8	59.4	+16.5	922.9	97.5	+87.4
10TS	262.4	48.8	-	469.4	127.8	+78.9	499.2	46.9	+90.3
10AS	195.9	48.3	-	588.4	296.2	+200.4	738.9	105.8	+277.2

ตารางที่ ก.3 ค่าร้อยละการตึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at Break)

ระยะเวลา (เดือน) / ชิ้นงาน	0			3			6		
	ค่าทางกล %	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล %	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล %	SD	% การเปลี่ยนแปลง
10TE	7.11	0.76	-	5.63	0.90	-20.82	4.34	0.74	-38.96
10AE	23.87	1.40	-	22.71	1.76	-4.86	20.35	1.80	-14.75
10TS	23.51	2.38	-	9.90	1.00	-57.89	5.82	1.28	-75.24
10AS	131.58	0	-	16.41	1.96	-87.53	9.12	1.15	-93.07

ตารางที่ ก.4 ค่ามอดูลัสความคัดโค้งงอ (Flexural Modulus)

ระยะเวลา (เดือน) / ชิ้นงาน	0			3			6		
	ค่าทางกล (MPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล (MPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล (MPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง
10TE	69.34	33.5	-	43.9	12.1	-36.7	36.2	13.3	-47.6
10AE	214.4	17.8	-	215.6	13.6	+0.4	101.3	18.2	-52.8
10TS	14.8	3.9	-	16.6	1.8	+12.5	12.8	1.1	-13.7
10AS	176.7	8.4	-	152.3	23.0	-13.8	91.9	9.1	-48.0
16TR	35.5	4.4	-	34.6	7.1	-2.5	33.3	5.2	-6.1
16AR	217.4	32.7	-	209.9	44.54	-3.38	203.2	17.4	-6.5
18TR	32.1	2.9	-	33.2	2.8	+3.6	33.6	0.9	+4.9
18AR	195.9	36.4	-	175.7	19.3	-10.3	153.0	12.7	-21.9

ตารางที่ ก.5 ค่าความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural Strength)

ระยะเวลา (เดือน) / ชิ้นงาน	0			3			6		
	ค่าทางกล (MPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล (MPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล (MPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง
10TE	62.4	19.4	-	59.9	14.7	-3.9	58.7	10.8	-5.9
10AE	195.1	30.4	-	186.2	40.7	-4.5	133.8	19.7	-31.5
10TS	31.5	3.5	-	27.2	2.74	-13.6	17.5	4.4	-44.5
10AS	88.4	15.4	-	77.6	26.6	-12.2	64.7	8.0	-26.8
16TR	85.6	22.8	-	84.3	16.8	-1.5	80.1	15.5	-6.4
16AR	336.0	31.07	-	330.2	15.4	-1.73	329.8	28.2	-1.9
18TR	77.1	19.6	-	89.7	10.7	+16.36	97.0	21.4	+25.9
18AR	324.7	37.6	-	271.9	33.4	-16.3	253.9	34.7	-21.8

ตารางที่ ก.6 ค่าความแข็งแรงอัด (Compressive Strength)

ระยะเวลา (เดือน) / ชิ้นงาน	0			3			6		
	ค่าทางกล (MPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล (MPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล (MPa)	SD	% การเปลี่ยนแปลง
10TE	9.50	2.40	-	3.09	0.85	-67.47	2.60	0.59	-72.63
10TS	1.38	0.20	-	1.34	0.32	-2.89	1.31	0.29	-5.07
16TR	1.01	0.22	-	0.99	0.15	-1.98	0.97	0.24	-3.96
18TR	1.53	0.46	-	1.41	0.40	-7.84	1.15	0.35	-24.84

ตารางที่ ก.7 ความต้านทานแรงกระแทก (Impact Strength)

ระยะเวลา (เดือน) / ชิ้นงาน	0			3			6		
	ค่าทางกล (J/mm^2)	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล (J/mm^2)	SD	% การเปลี่ยนแปลง	ค่าทางกล (J/mm^2)	SD	% การเปลี่ยนแปลง
10TE	65.98	3.73	-	67.23	1.79	+1.89	73.00	1.35	+10.65
10AE	53.19	2.92	-	57.75	5.35	+8.56	61.18	3.12	+15.00
10TS	71.10	2.46	-	72.91	1.84	+2.55	74.19	1.64	+4.34
10AS	59.88	3.15	-	62.36	3.66	+4.15	63.28	3.33	+5.68

ภาคผนวก ข

ชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกล

ก)

ข)

รูปที่ ข.1 ชิ้นงานที่ทดสอบความแข็งแรงดึงของพอลิโพรพิลีน ของชิ้นงาน [10TE] **ตามแนวขวางการขึ้นรูป**

ก) ชิ้นงานก่อนการทดสอบ ข) ชิ้นงานหลังการทดสอบ

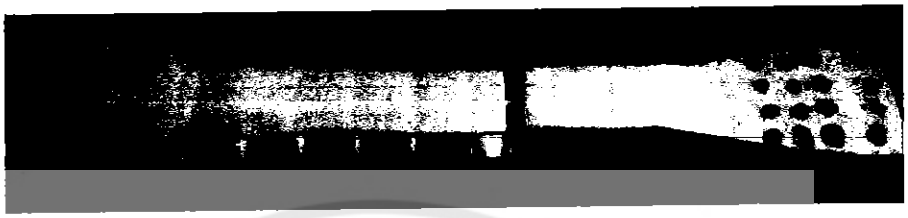
ก)

ข)

รูปที่ ข.2 ชิ้นงานที่ทดสอบความแข็งแรงดึงของพอลิโพรพิลีน ของชิ้นงาน [10AE] ฉีดขึ้นรูปตามแนว

ก) ชิ้นงานก่อนการทดสอบ ข) ชิ้นงานหลังการทดสอบ

ก)



ข)

รูปที่ ข.3 ชิ้นงานที่ทดสอบความแข็งแรงดึงของพอลิโพรพิลีน ของชิ้นงาน [10TS] **ฉีดขึ้นรูปขวางแนว**

ก) ชิ้นงานก่อนการทดสอบ ข) ชิ้นงานหลังการทดสอบ

ก)

ข)

รูปที่ ข.3 ชิ้นงานที่ทดสอบความแข็งแรงดึงของพอลิโพรพิลีน ของชิ้นงาน [10AS] ฉีดขึ้นรูปตามแนว

ก) ชิ้นงานก่อนการทดสอบ ข) ชิ้นงานหลังการทดสอบ

ก)

ข)

รูปที่ ข.4 ชิ้นงานที่ทดสอบการกระแทกของพอลิโพรพิลีน ของชิ้นงาน [10TE] ฉีดขึ้นรูปขวางแนว

ก) ชิ้นงานก่อนการทดสอบ ข) ชิ้นงานหลังการทดสอบ

ก)

ข)

รูปที่ ข.5 ชิ้นงานที่ทดสอบการกระแทกของพอลิโพรพิลีน ของชิ้นงาน [10AE] ฉีดขึ้นรูปตามแนว

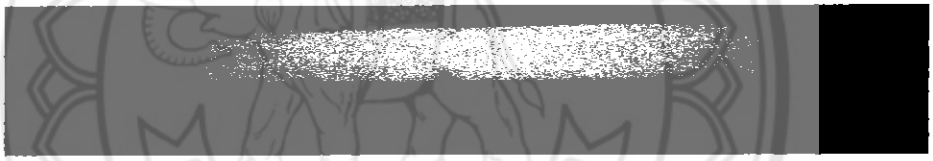
ก) ชิ้นงานก่อนการทดสอบ ข) ชิ้นงานหลังการทดสอบ

ก)

ข)

รูปที่ ข.6 ชิ้นงานที่ทดสอบการกระแทกของพอลิโพรพิลีน ของชิ้นงาน [10TS] ฉีดขึ้นรูปขวางแนว

ก) ชิ้นงานก่อนการทดสอบ ข) ชิ้นงานหลังการทดสอบ



ก)

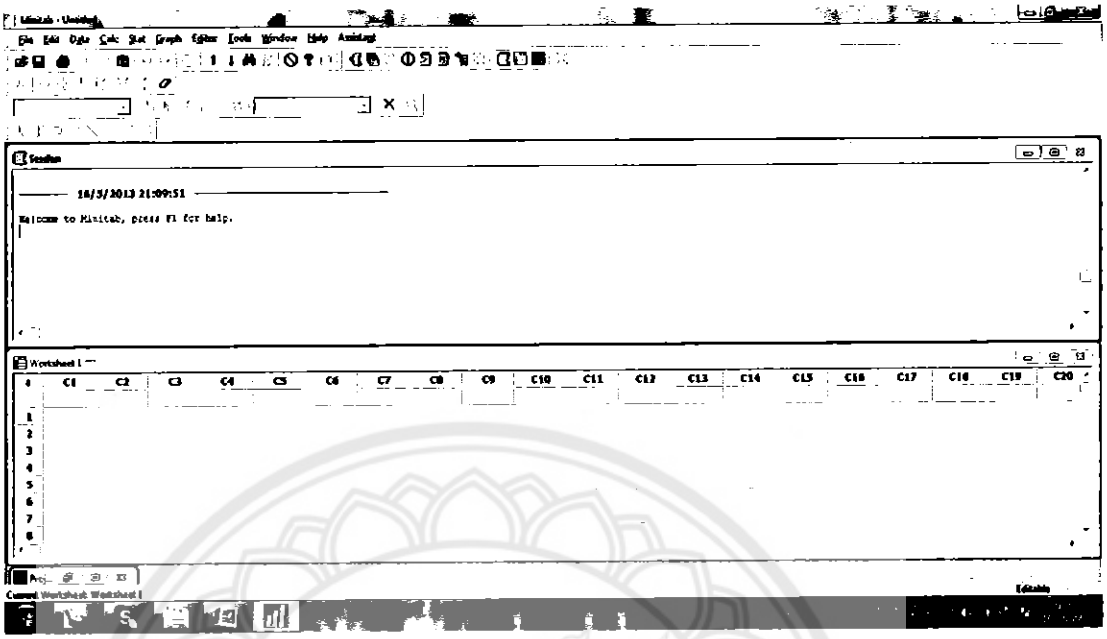
ข)

รูปที่ ข.7 ชิ้นงานที่ทดสอบการกระแทกของพอลิโพรพิลีน ของชิ้นงาน [10AS] ฉีดขึ้นรูปตามแนว

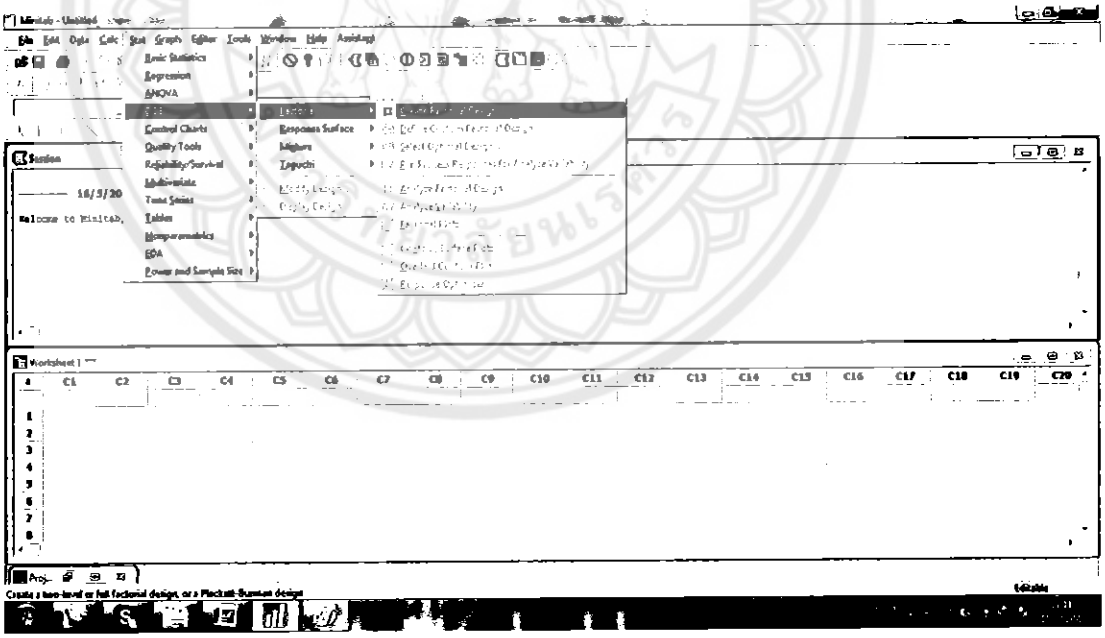
ก) ชิ้นงานก่อนการทดสอบ ข) ชิ้นงานหลังการทดสอบ

ภาคผนวก ค

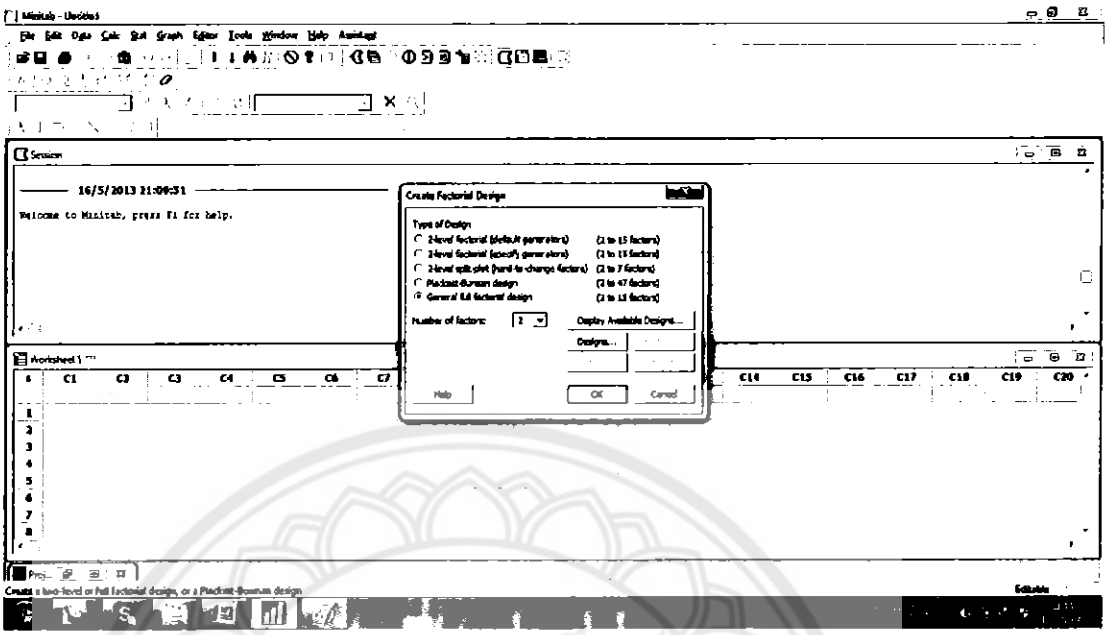
การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ



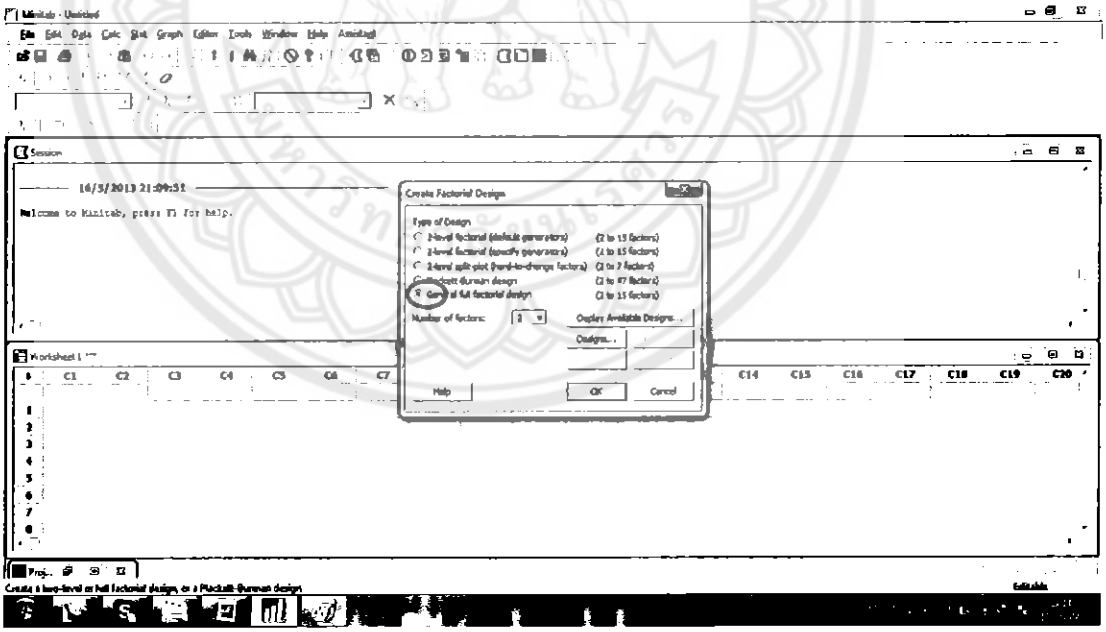
รูปที่ ค.1 เปิดโปรแกรมวิเคราะห์ผลสถิติ



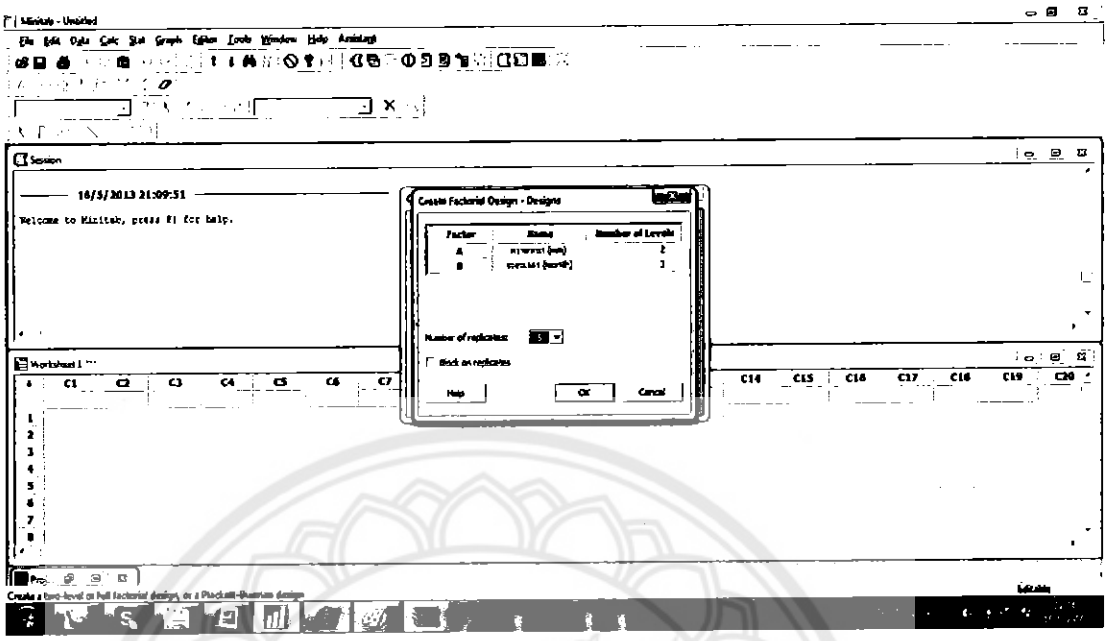
รูปที่ ค.2 เริ่มออกแบบการทดลอง



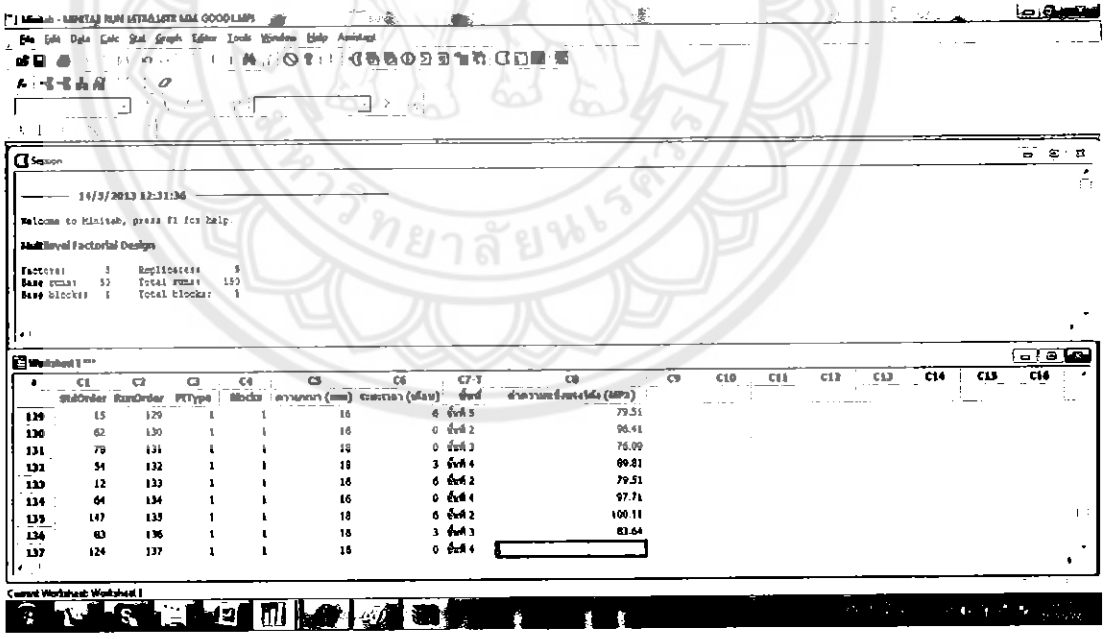
รูปที่ ค.3 เลือกวิธีการออกแบบการทดลอง



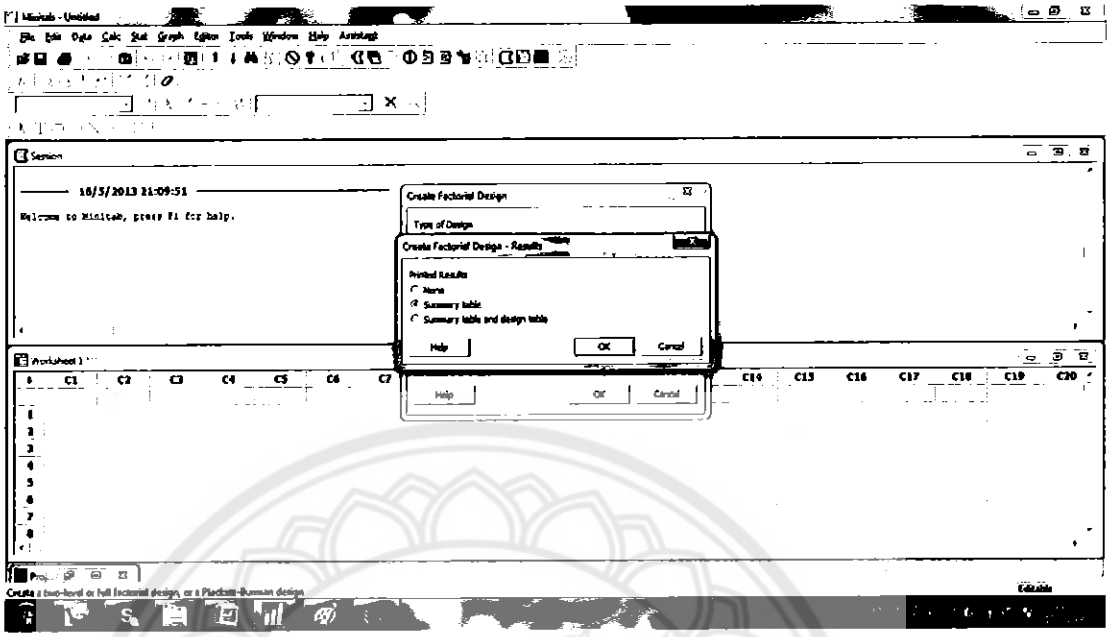
รูปที่ ค.4 ออกแบบแบบ full factorial design



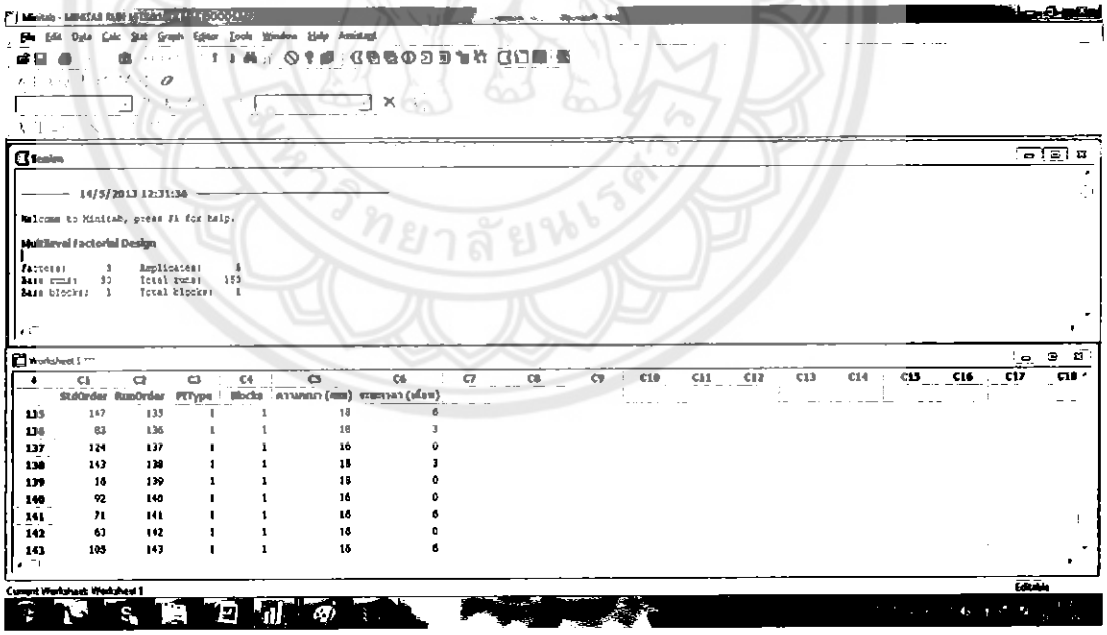
รูปที่ ค.5 จำนวนและระดับของแต่ละปัจจัย



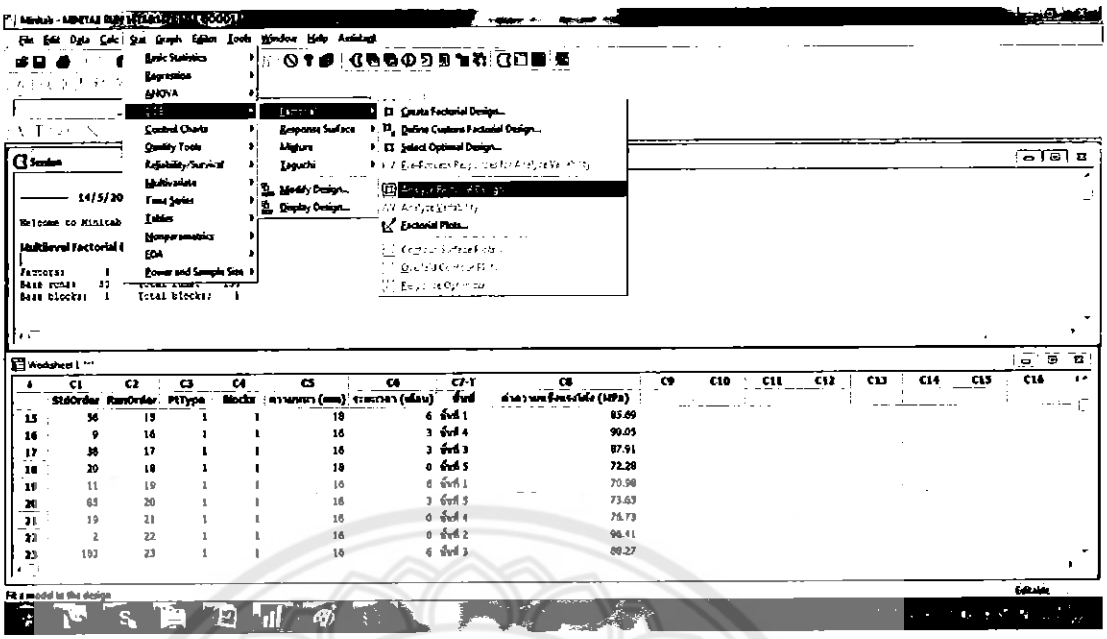
รูปที่ ค.6 ระดับต่างๆของแต่ละปัจจัย



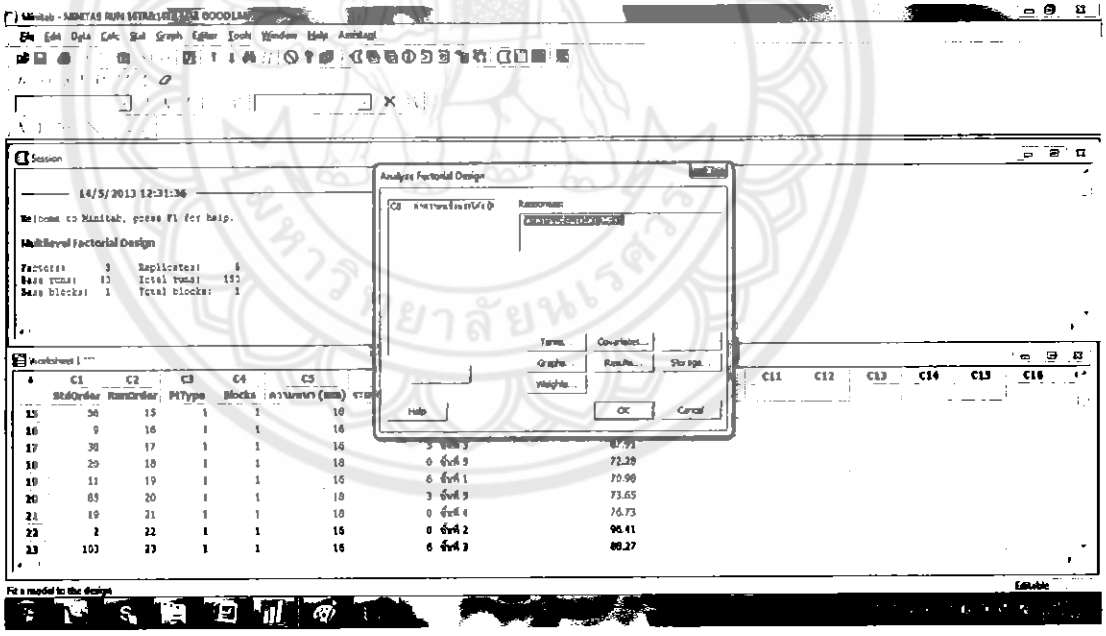
รูปที่ ค.7 การแสดงผลลำดับของการทดลอง



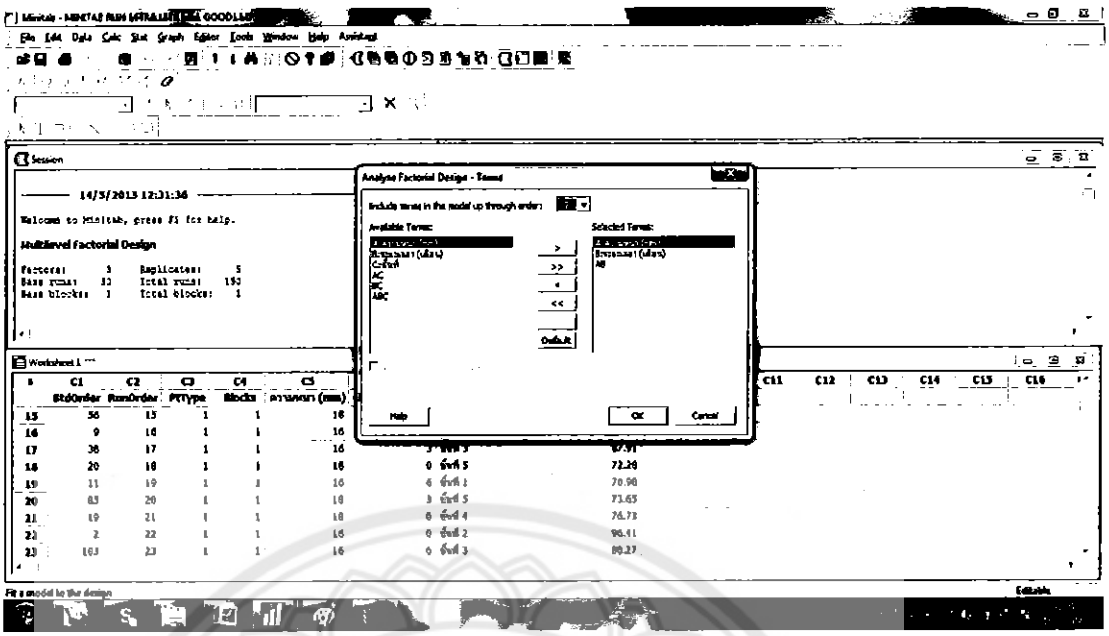
รูปที่ ค.8 ลำดับในการทดลอง



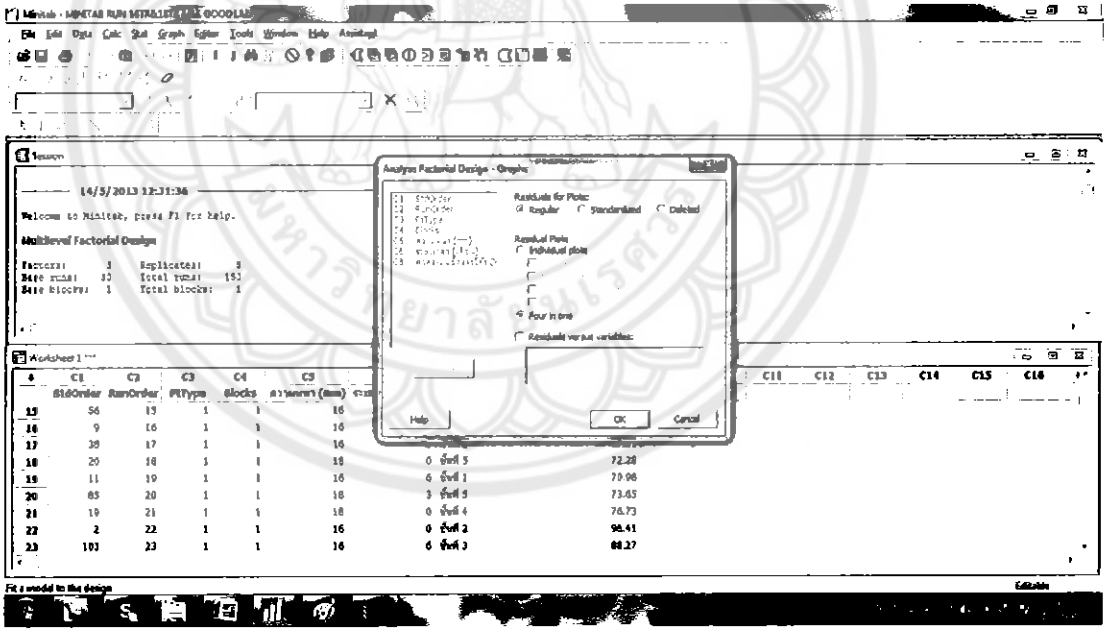
รูปที่ ค.9 การเริ่มวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ



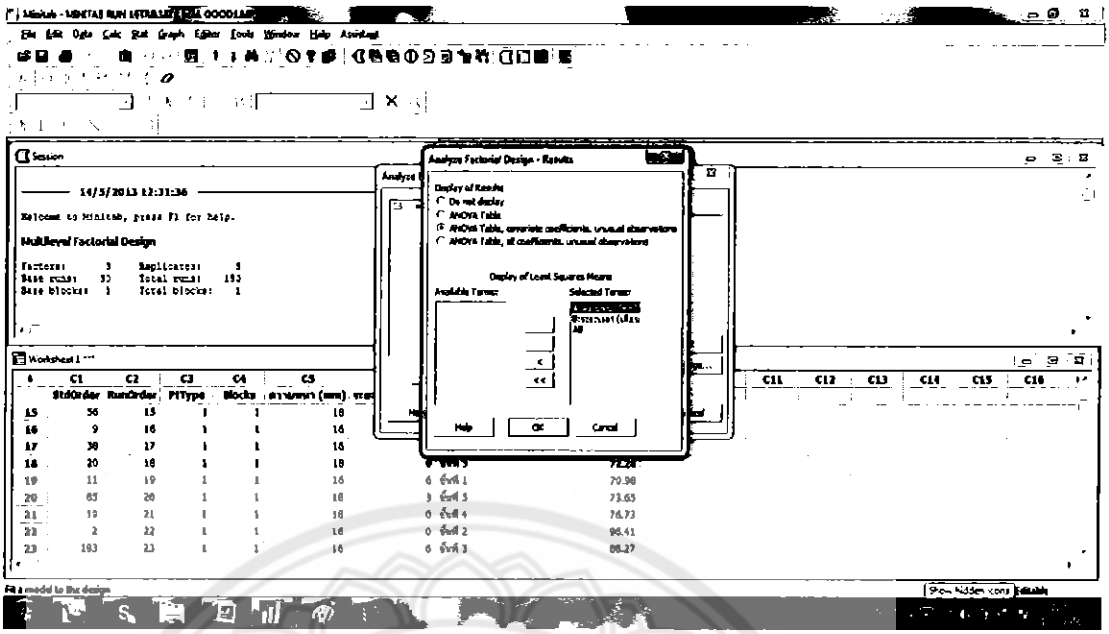
รูปที่ ค.10 การเลือกช่องของข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์



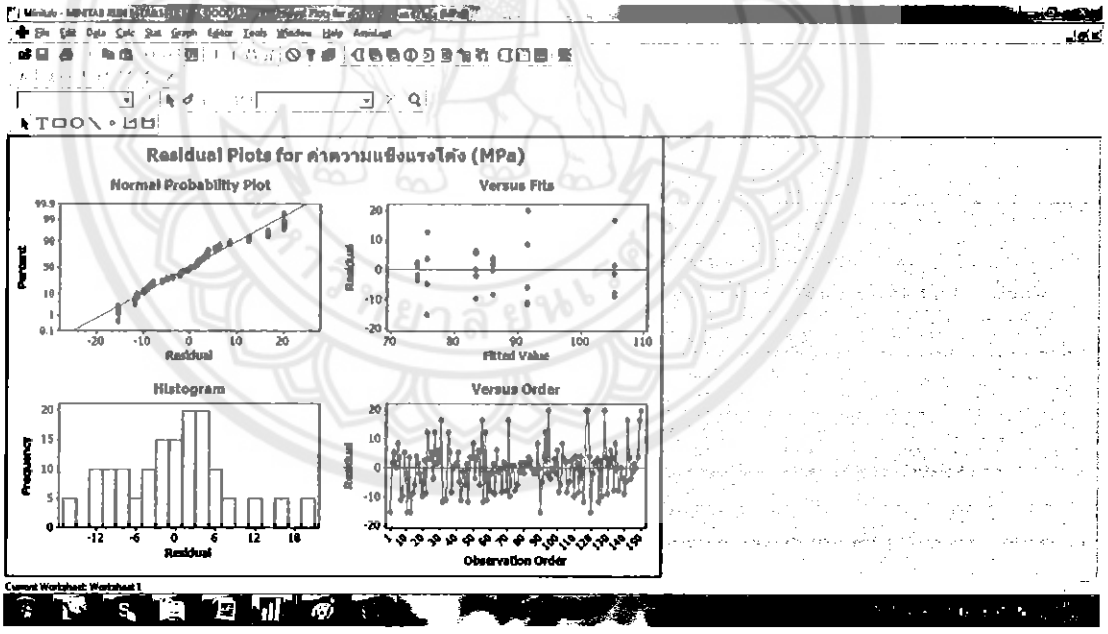
รูปที่ ค.11 การเลือกวิเคราะห์ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม



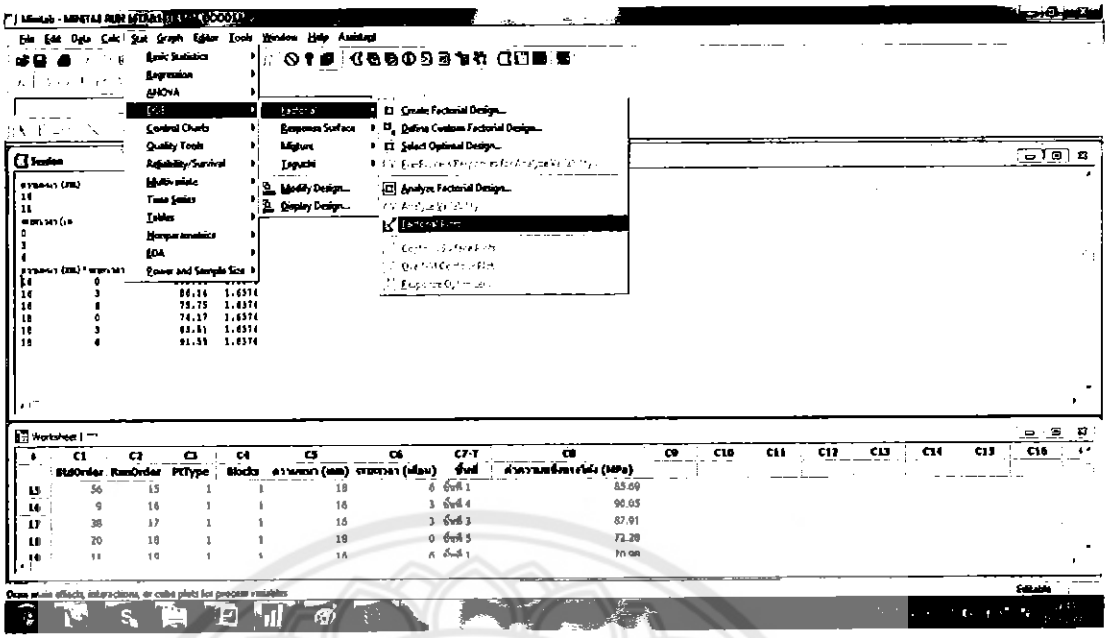
รูปที่ ค.12 การสร้างกราฟ



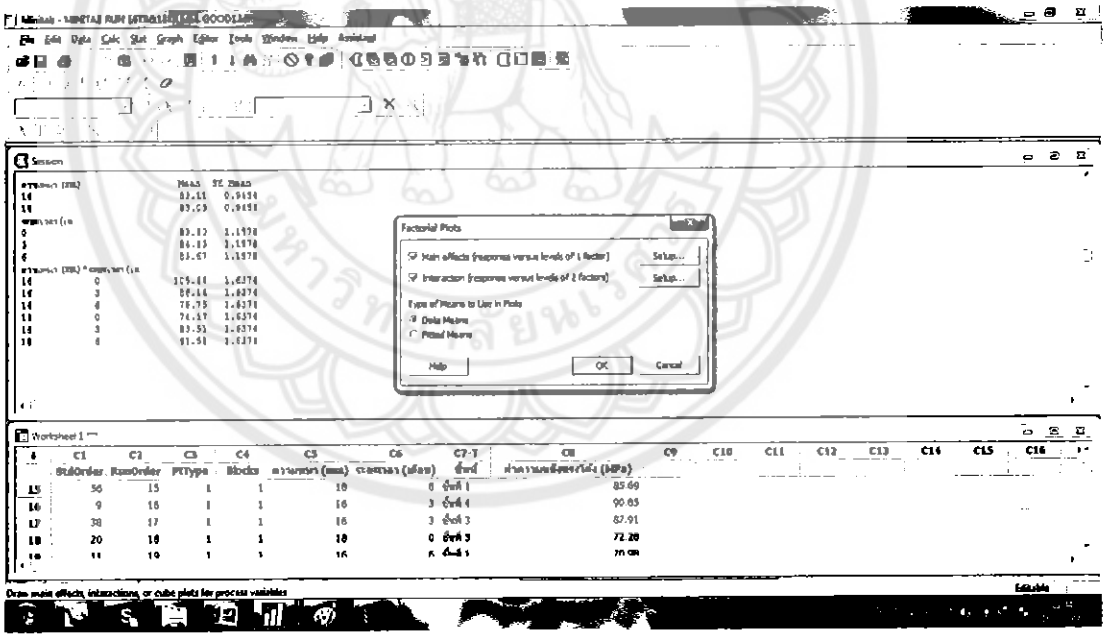
รูปที่ ค.13 การเลือกการแสดงผลของการวิเคราะห์ของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม



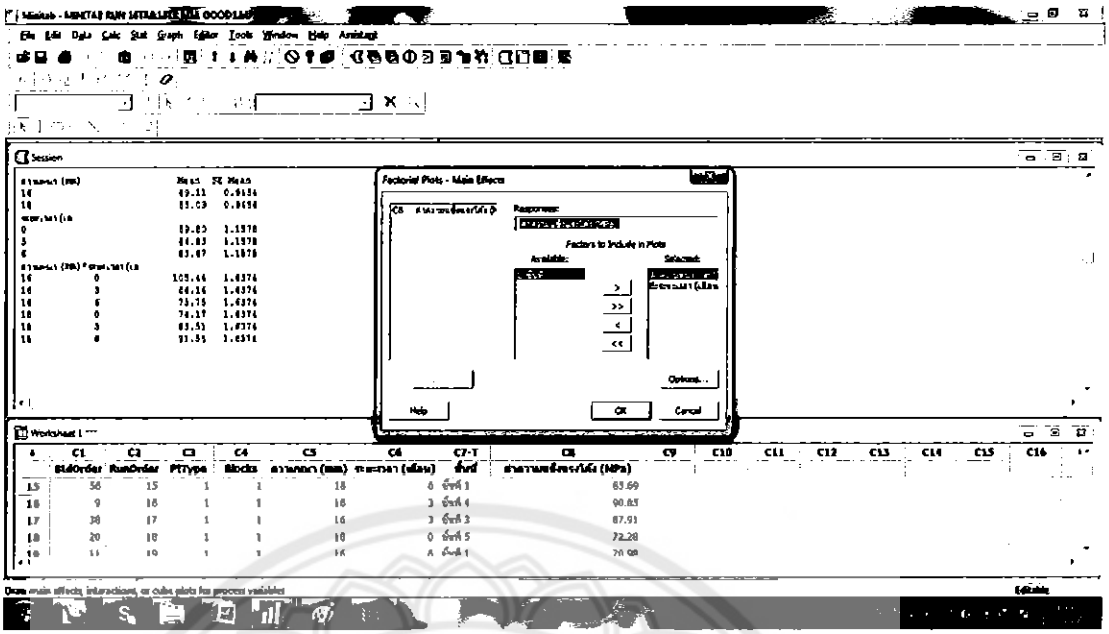
รูปที่ ค.14 ผลการวิเคราะห์



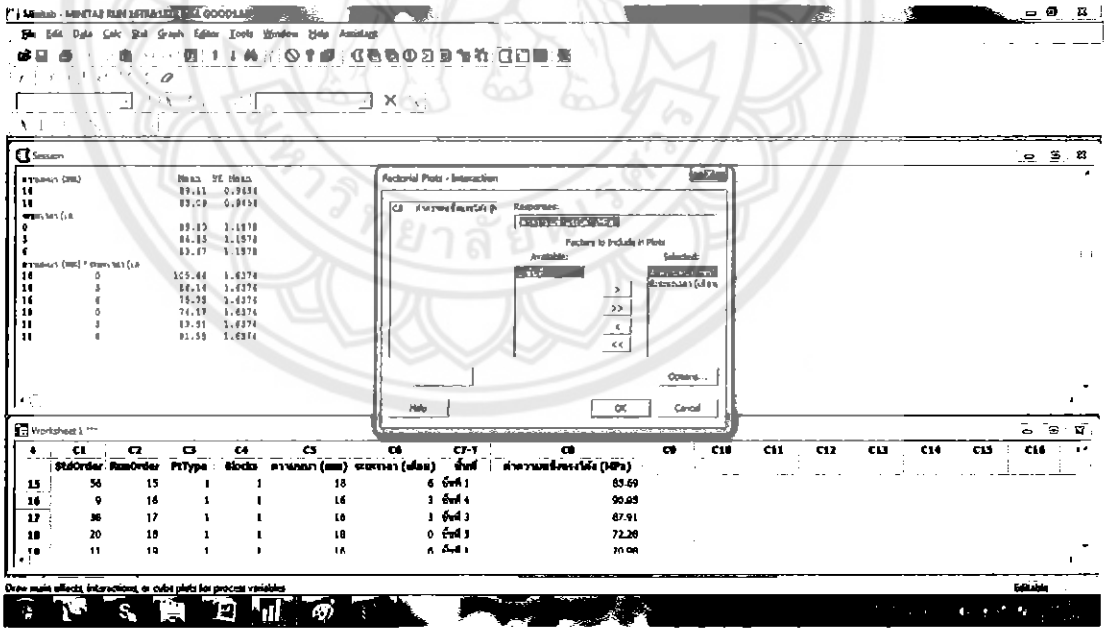
รูปที่ ค.15 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม



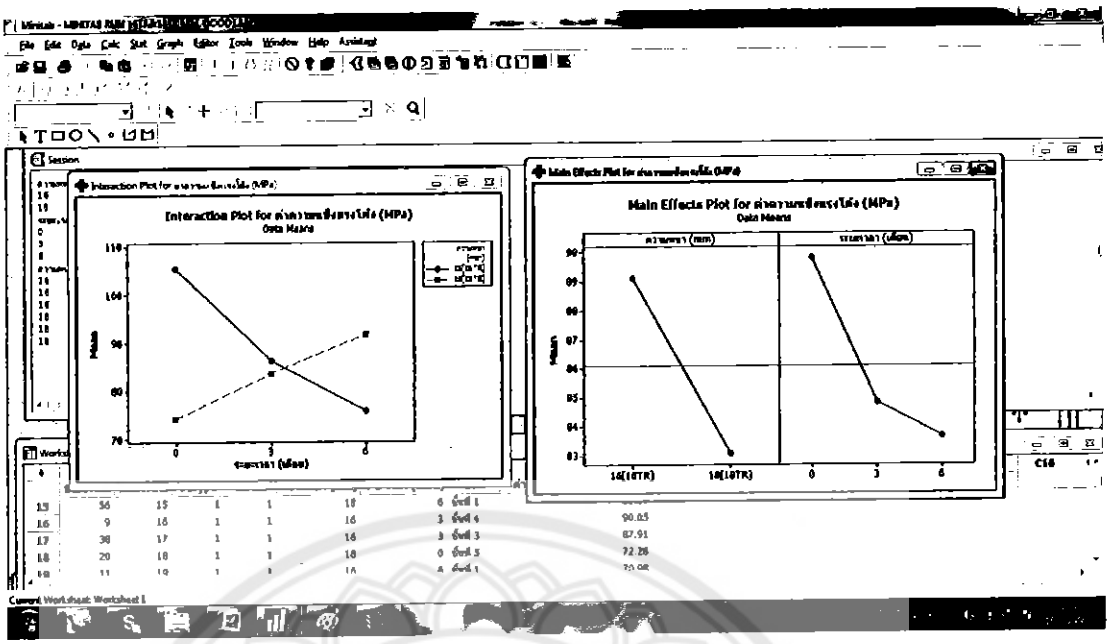
รูปที่ ค.16 การเลือกวิเคราะห์ทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม



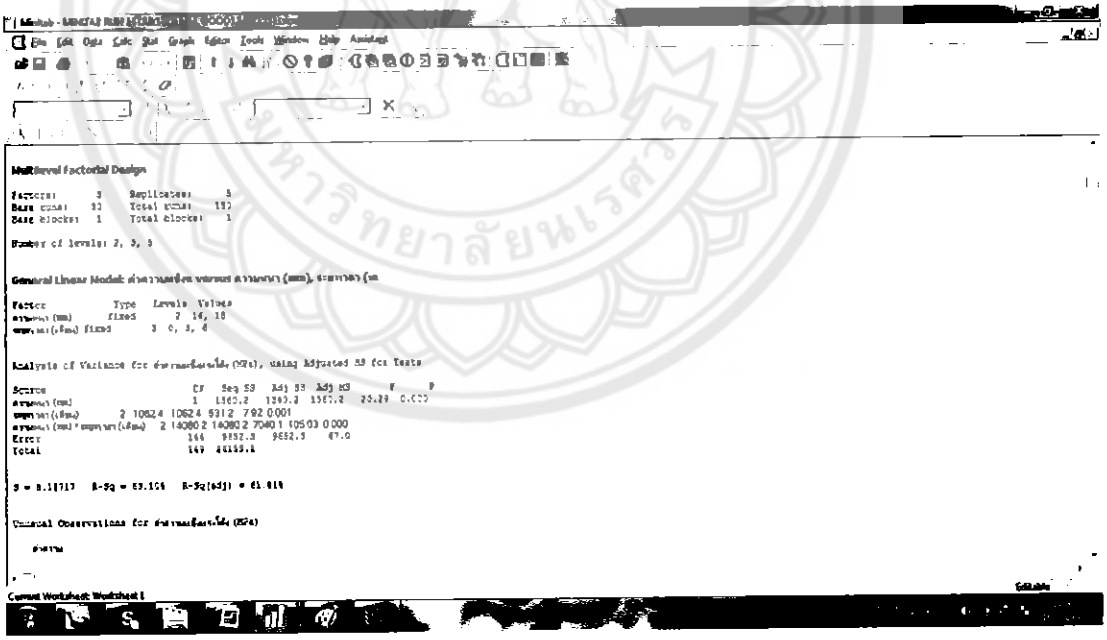
รูปที่ ค.17 การเลือกปัจจัยหลัก



รูปที่ ค.18 การเลือกปัจจัยหลักร่วม



รูปที่ ค.19 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม



รูปที่ ค.20 ตารางแสดงค่าที่ได้จากการวิเคราะห์