

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการดำเนินงานวิจัยในการหาส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสมสำหรับแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยความร้อนของพลาสติกชนิดแผ่น ทำการดำเนินงานโดยประยุกต์ใช้เทคนิคเชิงวิศวกรรม ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการออกแบบการทดลองเพื่อหาสูตรที่เหมาะสมในการหาส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุผสมสำหรับแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยความร้อนของพลาสติกแผ่นที่ให้ค่าความแข็งแรงมากที่สุด

จากการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณส่วนผสม คือ เรซิน อลูมิเนียม ทัลคัม อูณหภูมิจ และระยะเวลาในการเซตตัว โดยสัดส่วนที่กำหนดมาจากสัดส่วนทั่วไปที่ใช้ผลิตในผู้ประกอบการผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยความร้อนของพลาสติกชนิดแผ่น

จากนั้นผู้วิจัยนำปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยมาออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบส่วนผสม (Combined Mixture-Process Design) แบบคือออปติมอล (D-Optimal) และเลือกแบบจำลองควอดเรติกส์คูณควอดเรติกส์ (Quadratic x Quadratic) และในการทดลองมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 46 การทดลอง ดังตารางที่ 4-2 แสดงตัวแปรและระดับของการทดลอง

ตารางที่ 4-1 ตัวแปรและระดับของการออกแบบการทดลอง

| ตัวแปร | ระดับ | | หน่วย |
|-----------------------------|-------|-----|--------------|
| | ต่ำ | สูง | |
| น้ำหนักของเรซิน (กรัม) | 50 | 70 | ร้อยละ |
| น้ำหนักของอลูมิเนียม (กรัม) | 14 | 24 | ร้อยละ |
| น้ำหนักของทัลคัม (กรัม) | 16 | 26 | ร้อยละ |
| การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ | 70 | 90 | องศาเซลเซียส |
| ระยะเวลาในการเซตตัว | 7 | 10 | ชั่วโมง |

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าสัดส่วนการทดลองน้ำหนักของเรซิน น้ำหนักของอลูมิเนียม และน้ำหนักของทัลคัม เมื่อนำค่าต่ำของน้ำหนักเรซินมาไว้กับค่าสูงของน้ำหนักอลูมิเนียม และน้ำหนักทัลคัม จะทำให้ได้ส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 100 หรือ 100% เช่นเดียวกัน เมื่อนำค่าสูงของน้ำหนักเรซินมาไว้กับค่าต่ำของน้ำหนักอลูมิเนียม และน้ำหนักทัลคัม จะทำให้ได้ส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 100 หรือ 100% ซึ่งจะทำให้ได้ส่วนผสม 100% ซึ่งเป็นเงื่อนไขของการออกแบบส่วนผสม

และด้านการทดลองนั้นจะวัดค่าความแข็งจากชั้นทดสอบ ของส่วนผสมสำหรับใช้ทำแม่พิมพ์ขึ้นรูป ด้วยความร้อนของพลาสติกแผ่น

จะเห็นว่าค่าต่าง ๆ ที่นำมาใช้กำหนดค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของการทดลองนั้น ผู้ดำเนินการวิจัย ได้เก็บข้อมูลการทดลองจากบริษัทดิจิทัลรีเสิร์ทแอนด์ดีเวลอปเมนต์จำกัด และบริษัทเฟสตัด อุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมบางปู ทั้งสองบริษัทอยู่ที่จังหวัดสมุทรปราการ โดยค่าต่าง ๆ ที่กำหนดขึ้น ได้จากข้อมูลที่ผู้ดำเนินงานวิจัยเป็นที่ปรึกษาของบริษัททั้งสอง และยังเก็บรวบรวม ข้อมูลจากบริษัทที่ผลิต ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบขณะเป็นที่ ปรึกษาอยู่ได้มีการทดลองทำวัสดุขึ้นมาทดแทนการใช้ฮีฟ็อกซ์เรซินต่างประเทศ ซึ่งในการทดลอง ได้ใช้ลูมิเนียมและทังสเตม เบอร์ 325 เมช (325 Mesh) หรือ 44 ไมครอน (Microns) ซึ่งการเติมทังสเตม ลงไปจะช่วยเพิ่มความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน (Thermal shock resistance) และจากการออกแบบการทดลอง ทำให้ได้ค่าที่นำมาใช้ในการผลิตวัสดุทดแทนฮีฟ็อกซ์เรซินมีค่า ต่างๆดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4-2 ตารางออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบส่วนผสม

| มาตรฐาน | ลำดับการทดลอง | ร้อยละของการใช้ (กรัม) | | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (ชั่วโมง) |
|---------|---------------|------------------------|------------|---------|-------------------------|----------------|
| | | เรซิน | อลูมิเนียม | ทังสเตม | | |
| 1 | 2 | 60 | 19 | 21 | 90 | 8.5 |
| 2 | 32 | 50 | 24 | 26 | 90 | 8.5 |
| 3 | 30 | 60 | 24 | 16 | 90 | 7 |
| 4 | 18 | 55 | 19 | 26 | 70 | 10 |
| 5 | 5 | 70 | 14 | 16 | 90 | 8.5 |
| 6 | 19 | 55 | 24 | 21 | 90 | 7 |
| 7 | 10 | 70 | 14 | 16 | 70 | 10 |
| 8 | 42 | 60 | 14 | 26 | 80 | 7 |
| 9 | 17 | 55 | 24 | 21 | 90 | 10 |
| 10 | 37 | 60 | 19 | 21 | 70 | 10 |
| 11 | 27 | 60 | 24 | 16 | 70 | 7 |
| 12 | 46 | 60 | 14 | 26 | 70 | 8.5 |

ตารางที่ 4-2 แสดงการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบส่วนผสม (ต่อ)

| มาตรฐาน | ลำดับการทดลอง | ร้อยละของการใช้ (กรัม) | | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (ชั่วโมง) |
|---------|---------------|------------------------|----|----|-------------------------|----------------|
| | | 50 | 24 | 26 | | |
| 13 | 6 | 50 | 24 | 26 | 70 | 7 |
| 14 | 34 | 65 | 14 | 21 | 70 | 7 |
| 15 | 24 | 55 | 19 | 26 | 90 | 7 |
| 16 | 25 | 50 | 24 | 26 | 90 | 10 |
| 17 | 45 | 50 | 24 | 26 | 80 | 8.5 |
| 18 | 35 | 70 | 14 | 16 | 80 | 10 |
| 19 | 38 | 70 | 14 | 16 | 70 | 7 |
| 20 | 11 | 60 | 24 | 16 | 70 | 10 |
| 21 | 40 | 60 | 24 | 16 | 90 | 10 |
| 22 | 8 | 50 | 24 | 26 | 90 | 7 |
| 23 | 4 | 60 | 14 | 26 | 70 | 7 |
| 24 | 44 | 60 | 24 | 16 | 80 | 8.5 |
| 25 | 28 | 50 | 24 | 26 | 70 | 10 |
| 26 | 26 | 60 | 14 | 26 | 90 | 7 |
| 27 | 1 | 60 | 24 | 16 | 80 | 7 |
| 28 | 12 | 55 | 19 | 26 | 90 | 10 |
| 29 | 39 | 60 | 14 | 26 | 70 | 10 |
| 30 | 23 | 60 | 14 | 26 | 90 | 10 |
| 31 | 13 | 70 | 14 | 16 | 90 | 7 |
| 32 | 33 | 70 | 14 | 16 | 90 | 10 |
| 33 | 3 | 60 | 19 | 21 | 80 | 7 |
| 34 | 7 | 55 | 19 | 26 | 80 | 10 |
| 35 | 14 | 65 | 14 | 21 | 80 | 8.5 |
| 36 | 22 | 55 | 19 | 26 | 70 | 7 |
| 37 | 31 | 70 | 14 | 16 | 70 | 8.5 |
| 38 | 41 | 50 | 24 | 26 | 70 | 8.5 |

ตารางที่ 4-2 แสดงการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบส่วนผสม (ต่อ)

| มาตรฐาน | ลำดับการทดลอง | ร้อยละของการใช้ (กรัม) | | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (ชั่วโมง) |
|---------|---------------|------------------------|----|----|-------------------------|----------------|
| | | 60 | 24 | 16 | | |
| 39 | 36 | 60 | 24 | 16 | 70 | 8.5 |
| 40 | 16 | 70 | 14 | 16 | 80 | 7 |
| 41 | 21 | 50 | 24 | 26 | 80 | 7 |
| 42 | 43 | 55 | 19 | 26 | 80 | 10 |
| 43 | 20 | 55 | 19 | 26 | 90 | 7 |
| 44 | 15 | 60 | 14 | 26 | 70 | 7 |
| 45 | 9 | 60 | 19 | 21 | 80 | 7 |
| 46 | 29 | 55 | 24 | 21 | 90 | 10 |

จากตารางที่ 4.2 เป็นการแสดงให้เห็นค่าของผลการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบส่วนผสมที่จะนำไปใช้ในการทดลอง ยกตัวอย่างเช่น มาตรฐานที่ 1 ได้ลำดับการทดลองที่ 2 เพราะฉะนั้นในการทดลอง ก็จะใช้ผลของการออกแบบการทดลองมาตรฐานที่ 2 ในการทดลอง ก็คือ ใช้เรซิน 50 กรัม อลูมิเนียม 24 กรัม และทัลคัม 26 กรัม เป็นฐานของสัดส่วนในการทดลอง ดังนั้นถ้าต้องการใช้คิดเป็นน้ำหนัก 1 กิโลกรัม หรือ 1,000 กรัมก็จะต้องใช้ เรซิน 50% อลูมิเนียม 24% และทัลคัม 26% ของปริมาณที่ใช้ และใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการอบ 8.5 ชั่วโมง

4.2 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบ

เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4-3 พบว่า ค่าพีแวลู (P-value) มีค่า <0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ($P < 0.05$) แสดงว่ามีตัวแปรถดถอยอย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับผลตอบ แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณ ได้มีประโยชน์ต่อการทำนายค่าผลตอบ และเมื่อพิจารณาแลคออฟฟิต (Lack of fit) มีค่า 0.6813 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ($P \geq 0.05$) แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูล

ตารางที่ 4-3 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยของผลตอบ

| Source | Df | SS | MS | F-value | P |
|-------------|-----|------------|------------|---------|---------|
| Model | 34 | 55.15 | 1.50 | 2822.68 | <0.0001 |
| Lack-of-Fit | 6 | 2.463E-003 | 4.105E-004 | 0.60 | 0.7228 |
| Pure error | 5 | 3.400E-003 | 6.800E-004 | | |
| Residual | 211 | 5.863E-003 | 5.330E-004 | | |
| Total | 45 | 51.16 | | | |

ตารางที่ 4-4 แสดงผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลอง

| Source | Std. | | | | |
|------------------------|--------------|----------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------|
| [Mix]*Process | Dev. | R ² | R ² _{adj} | R ² _{Pred} | PRESS |
| [Mean]*Linear | 1.066 | 0.044 | 0.000 | -0.094 | 55.942 |
| [Mean]*2FI | 1.076 | 0.049 | -0.019 | -0.144 | 58.531 |
| [Mean]*Quadratic | 1.100 | 0.054 | -0.065 | -0.255 | 64.197 |
| [Mean]*Cubic | 1.120 | 0.068 | -0.103 | -0.375 | 70.350 |
| [Linear]*Mean | 0.191 | 0.969 | 0.968 | 0.965 | 1.782 |
| [Linear]*Linear | 0.183 | 0.976 | 0.971 | 0.959 | 2.101 |
| [Linear]*2FI | 0.175 | 0.980 | 0.973 | 0.954 | 2.368 |
| [Linear]*Quadratic | 0.182 | 0.982 | 0.971 | 0.941 | 3.038 |
| [Linear]*Cubic | 0.196 | 0.983 | 0.966 | 0.902 | 5.032 |
| [Quadratic]*Mean | 0.185 | 0.973 | 0.970 | 0.964 | 1.817 |
| [Quadratic]*Linear | 0.179 | 0.982 | 0.972 | 0.911 | 4.544 |
| [Quadratic]*2FI | <u>0.120</u> | <u>0.994</u> | <u>0.987</u> | <u>0.892</u> | <u>5.523</u> |
| [Quadratic]*Quadratic | <u>0.024</u> | <u>1.000</u> | <u>1.000</u> | | + |
| [Quadratic]*Cubic | 0.026 | 1.000 | 0.999 | | + |
| [Special Cubic]*Mean | 0.188 | 0.973 | 0.969 | 0.963 | 1.870 |
| [Special Cubic]*Linear | 0.178 | 0.984 | 0.972 | | + |
| [Special Cubic]*2FI | 0.088 | 0.997 | 0.993 | | + |

ตารางที่ 4-4 แสดงผลทางสถิติในแต่ละแบบจำลอง (ต่อ)

| Source [Mix]*Process | Std. Dev. | R^2 | R^2_{adj} | R^2_{Pred} | PRESS |
|---------------------------|--------------|-------|-------------|--------------|-------|
| [Special Cubic]*Quadratic | 0.024 | 1.000 | 1.000 | | + |
| [Special Cubic]*Cubic | 0.026 | 1.000 | 0.999 | | + |
| [Cubic]*Mean | 0.178 | 0.976 | 0.972 | 0.967 | 1.666 |
| [Cubic]*Linear | 0.160 | 0.988 | 0.978 | | + |
| [Cubic]*2FI | 0.077 | 0.998 | 0.995 | | + |
| [Cubic]*Quadratic | 0.024 | 1.000 | 1.000 | | + |
| [Cubic]*Cubic | 0.026 | 1.000 | 0.999 | | + |

M = Mean; L = Linear; 2FI = two-factor interaction terms;

Q = Quadratic; SC = Special Cubic; C = Cubic

จากตารางที่ 4-4 โปรแกรมดีซายส์เอ็กซ์เพิร์ตเวอร์ชัน 6.2 (Design Expert 6.02) จะทำการแนะนำให้เลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยที่ทำการศึกษา ในที่นี้โปรแกรมแนะนำแบบจำลองควอดเรติกส์คูณทวูเอฟไอ (Quadratic x 2FI) และควอดเรติกส์คูณควอดเรติก (Quadratic x Quadratic) และเมื่อพิจารณาทั้ง 2 ทางเลือกแล้วตัดสินใจเลือกแบบจำลองควอดเรติกส์คูณควอดเรติก (Quadratic x Quadratic) เนื่องจากให้ผลการทดลองที่มีความละเอียดกว่าแบบจำลองควอดเรติกส์คูณทวูเอฟไอ (Quadratic x 2FI) ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Std. Dev.) ให้ค่าต่ำกว่าแบบจำลองอื่น ค่า R^2 และ $Adj-R^2$ ให้มีค่าสูงกว่าแบบจำลองอื่น ซึ่งจะเห็นได้ว่าแบบจำลองควอดเรติกส์คูณควอดเรติก (Quadratic x Quadratic) เป็นแบบจำลองที่เหมาะสม

4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวในแบบจำลองที่เลือก

นำแบบจำลองที่เลือกไว้มาทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม Y หรือผลตอบ ผลการวิเคราะห์เป็นดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของรูปแบบครอสส์รีดิวซ์ควอดเรติกส์คูณควอดเรติก (Crossed Reduced Quadratic x Quadratic Model)

| Analysis of variance table [Partial of square] | | | | | |
|--|---------------|----|-------------|-----------|----------|
| Source | Sum of Square | DF | Mean Square | F Value | Prob>F |
| Model | 51.152 | 34 | 1.504 | 2822.679 | < 0.0001 |
| Linear Mixture | 49.595 | 2 | 24.798 | 46525.694 | < 0.0001 |
| AB | 0.091 | 1 | 0.091 | 170.157 | < 0.0001 |
| AC | 0.017 | 1 | 0.017 | 31.536 | 0.0002 |
| AD | 0.045 | 1 | 0.045 | 84.554 | < 0.0001 |
| AE | 0.000 | 1 | 0.000 | 0.500 | 0.4941 |
| BC | 0.085 | 1 | 0.085 | 160.102 | < 0.0001 |
| BD | 0.149 | 1 | 0.149 | 279.754 | < 0.0001 |
| BE | 0.016 | 1 | 0.016 | 29.661 | 0.0002 |
| CD | 0.016 | 1 | 0.016 | 29.407 | 0.0002 |
| CE | 0.027 | 1 | 0.027 | 51.417 | < 0.0001 |
| AD2 | 0.008 | 1 | 0.008 | 14.072 | 0.0032 |
| AE2 | 0.074 | 1 | 0.074 | 138.151 | < 0.0001 |
| BD2 | 0.005 | 1 | 0.005 | 9.320 | 0.0110 |
| BE2 | 0.185 | 1 | 0.185 | 346.355 | < 0.0001 |
| CD2 | 0.096 | 1 | 0.096 | 180.257 | < 0.0001 |
| CE2 | 0.121 | 1 | 0.121 | 227.139 | < 0.0001 |
| ABD | 0.181 | 1 | 0.181 | 338.969 | < 0.0001 |
| ABE | 0.032 | 1 | 0.032 | 59.937 | < 0.0001 |
| ACD | 0.039 | 1 | 0.039 | 73.781 | < 0.0001 |
| ACE | 0.026 | 1 | 0.026 | 47.960 | < 0.0001 |
| ADE | 0.005 | 1 | 0.005 | 9.193 | 0.0114 |
| BCD | 0.043 | 1 | 0.043 | 80.291 | < 0.0001 |

ตารางที่ 4-5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของรูปแบบครอสส์รีดิวซ์ควอดเรติกส์ควอดเรติกส์ (Crossed Reduced Quadratic x Quadratic Model) (ต่อ)

| Analysis of variance table [Partial of square] | | | | | |
|--|---------------|----|-------------|---------|----------|
| Source | Sum of Square | DF | Mean Square | F Value | Prob>F |
| BCE | 0.053 | 1 | 0.053 | 98.608 | < 0.0001 |
| BDE | 0.043 | 1 | 0.043 | 80.599 | < 0.0001 |
| CDE | 0.008 | 1 | 0.008 | 15.025 | 0.0026 |
| ABE2 | 0.171 | 1 | 0.171 | 321.731 | < 0.0001 |
| ACD2 | 0.103 | 1 | 0.103 | 193.998 | < 0.0001 |
| ACE2 | 0.154 | 1 | 0.154 | 289.046 | < 0.0001 |
| BCD2 | 0.107 | 1 | 0.107 | 201.387 | < 0.0001 |
| BCE2 | 0.056 | 1 | 0.056 | 104.554 | < 0.0001 |
| ABDE | 0.033 | 1 | 0.033 | 61.365 | < 0.0001 |
| ACDE | 0.053 | 1 | 0.053 | 98.933 | < 0.0001 |
| BCDE | 0.009 | 1 | 0.009 | 16.280 | 0.0020 |
| Residual | 0.006 | 11 | 0.001 | | |
| Lack of Fit | 0.002 | 6 | 0.000 | 0.604 | 0.7228 |
| Pure Error | 0.003 | 5 | 0.001 | | |

A = เรซิน; B = อลูมิเนียม; C = ทังคัม; D = อุณหภูมิ; E = เวลา

จากตารางที่ 4-5 เป็นแบบจำลองที่ตัดตัวแปรที่ไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม Y หรือผลตอบออกจากแบบจำลองการถดถอยแล้ว ($P \geq 0.05$) โดยยังคงตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับอิทธิพลหลักเข้าไป (Model Hierarchy Check) เมื่อวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยดังกล่าว จะได้ผลทางสถิติและสมการความสัมพันธ์ที่มีต่อผลตอบหรือความเหมาะสมของส่วนผสมดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4-6 แสดงผลทางสถิติของแบบจำลองควอดเรติกส์คูณควอดเรติกส์ (Quadratic x Quadratic Model) และสมการถดถอยสำหรับส่วนผสมของวัสดุผสม

| | | | |
|-----------|-------|----------------|---------|
| Std. Dev. | 0.023 | R-Squared | 0.9999 |
| Mean | 85.05 | Adj R-Squared | 0.9995 |
| C.V. | 0.027 | Pred R-Squared | N/A |
| PRESS | N/A | Adeq Precision | 158.739 |

$$\begin{aligned} \text{Shore (D)} = & 83.85A+82.76B+85.79C+10.07AB-2.83AC+0.087A-6.667E-03AE+9BC \\ & -1.78BD-0.58BE+0.61CD-0.8CE-0.075AD^2-0.24AE^2+0.15BD^2+7.99BE^2 \\ & +3.61CD^2+5CE^2+3.82ABD+1.6ABE+1.92ACD+1.54ACE+0.35ADE \\ & +2.67BCD+3.02BCE-0.99BDE+0.44CDE-15.16ABE^2-7.15ACD^2 \\ & +10.79ACE^2-7.85BCD^2-6.03BCE^2+1.68ABDE-2.22ACDE+1.22BCDE \end{aligned}$$

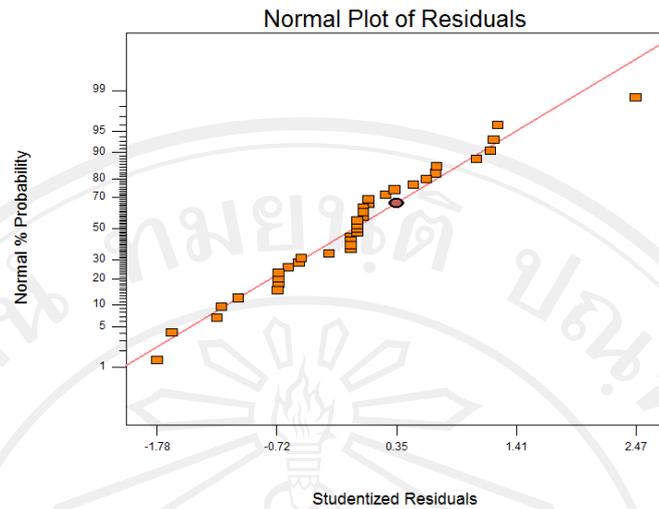
A = เรซิน; B = อลูมิเนียม; C = ทดลัม; D = อุณหภูมิ; E = เวลา

4.4 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบ (Diagnostics)

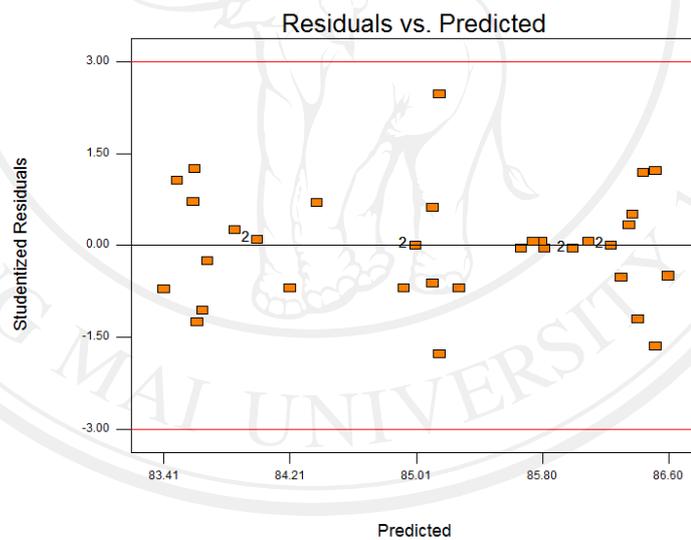
การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบ สามารถพิจารณาได้จากข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้ ได้แก่ การตรวจสอบส่วนตกค้าง การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากตัวแปรอิสระ การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากตัวแปรตาม และการตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล โดยผลการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอยแสดงในภาคผนวก 2ก

4.4.1 การตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual Analysis)

การตรวจสอบคุณสมบัติของรูปแบบการถดถอยจะใช้วิธีวิเคราะห์กราฟของส่วนตกค้าง 2 วิธี ได้แก่ การพล็อตส่วนตกค้าง (Residual Plots) และการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Plots)



รูปที่ 4-1 กราฟส่วนตกค้างแบบการพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติ
(Normal probability plot of the residuals)

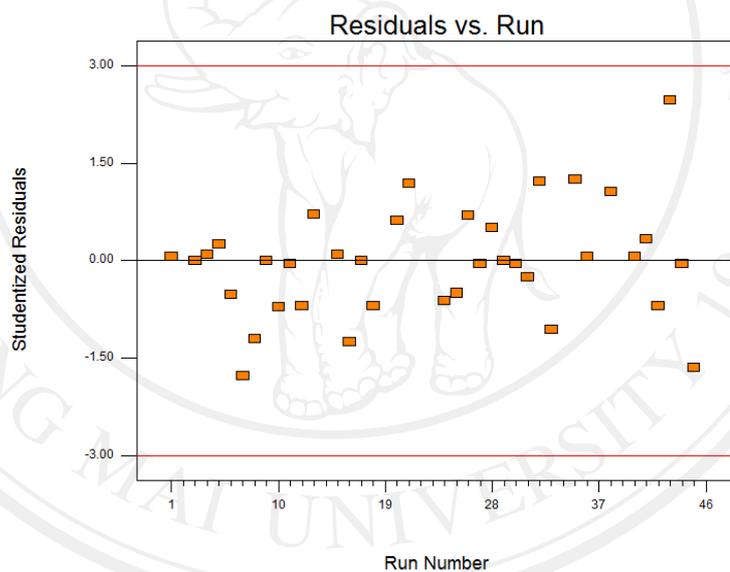


ภาพที่ 4-2 กราฟระหว่างส่วนตกค้าง (Residual e_i) กับ ค่าประมาณบนเส้นถดถอย \hat{Y}_i

จากภาพที่ 4-1 จะเห็นได้ว่า กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงว่ามีการแจกแจงแบบปกติและภาพที่ 4-2 กราฟระหว่างส่วนตกค้าง (Residual e_i) กับ ค่าประมาณบนเส้นถดถอย \hat{Y}_i มีลักษณะการกระจายแบบสุ่ม แสดงว่าความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนคงที่ ดังนั้นสมการถดถอยมีรูปแบบที่เหมาะสมกับข้อมูล

4.4.2 ผลวิเคราะห์การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของตัวแปรอิสระ

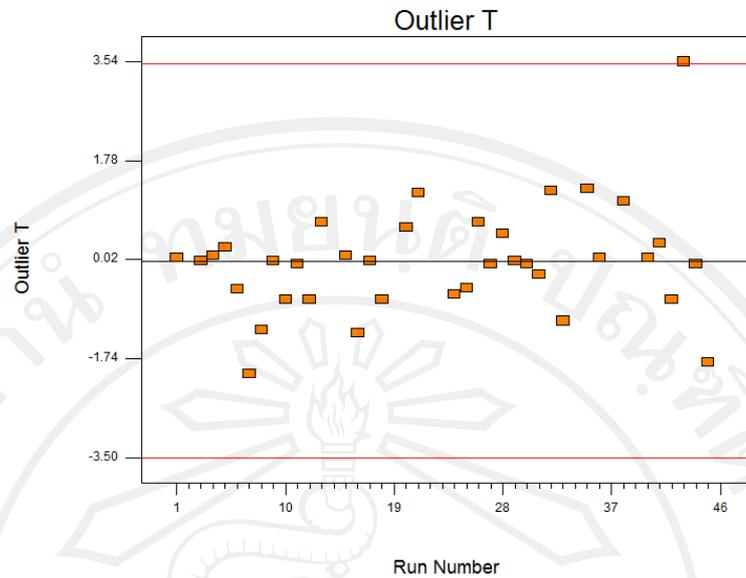
การตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของตัวแปรอิสระเป็นการสังเกตค่าที่มีอิทธิพลที่มีผลกระทบต่อการประมาณสมการถดถอย โดยพิจารณาจากค่า h_{ii} หรือค่าเลฟเวอร์เลจ (leverage) ภายใต้งี้อื่นไข $h_{ii} \geq \frac{2p}{n}$, p คือจำนวนพารามิเตอร์ในสมการถดถอย ($p = k + 1$ เมื่อ k คือจำนวนตัวแปรอิสระในสมการถดถอย) และ n คือ จำนวนการทดลอง ดังนั้นสมการถดถอยของผลตอบมีจำนวนพารามิเตอร์ในสมการทั้งหมด 35 ตัว และจำนวนการทดลองทั้งหมด 46 การทดลอง จะได้ค่า $h_{ii} \geq 1.522$ ถ้าค่าเลฟเวอร์เลจ (leverage) มากกว่า 1.522 พิจารณาได้ว่าค่าไม่ปกติสำหรับตัวแปรอิสระ และระบุได้ว่าเป็นจุดไฮเลฟเวอร์เลจ (high leverage) จากภาพที่ 4-3 แสดงให้เห็นว่าไม่มีค่าผิดปกติเนื่องจากค่าตัวแปรอิสระเกินค่า h_{ii} หรือมีจุดเลฟเวอร์เลจ (high leverage เกิดขึ้น)



ภาพที่ 4-3 กราฟแสดงค่าระหว่างเลฟเวอร์เลจ (Leverage) กับ ลำดับการทดลอง

4.4.3 ผลการตรวจสอบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของตัวแปรตาม

เป็นการวัดว่ามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จริงเบี่ยงเบนจากค่าทำนายเท่าไร โดยพิจารณาค่าเออร์ไลเออร์ (Outlier d_i) และค่าส่วนตกค้างการศึกษา (Studentized Residuals r_i) หากมากกว่าช่วงกำหนดควบคุมจำกัด ± 3.5 แสดงว่าข้อมูลนั้นเป็นค่าผิดปกติเนื่องจากตัวแปรตาม หากเกิดค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของตัวแปรตาม ควรนำมาตรวจสอบด้วยว่าเป็นค่าที่มีอิทธิพลหรือไม่เพื่อดำเนินการแก้ไขปัญหาต่อไป จากภาพที่ 4-4

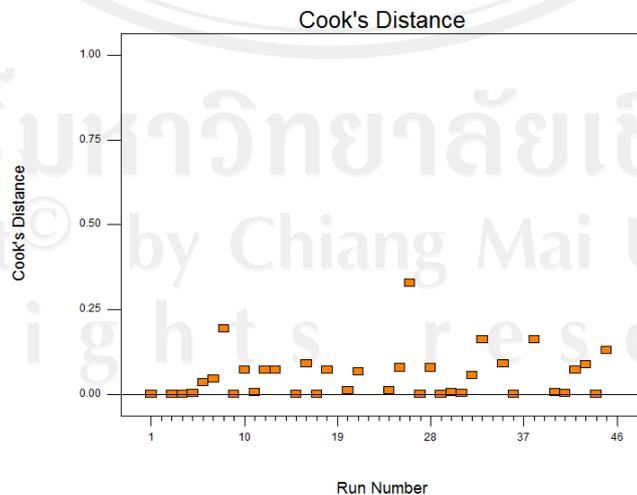


ภาพที่ 4-4 กราฟแสดงค่าเออร์ไลเออร์ที (Outlier t) กับลำดับการทดลอง

จากภาพที่ 4-4 ค่าเออร์ไลเออร์ที (Outlier t) ในแต่ละลำดับการทดลอง (Run) นั้นมีค่าอยู่ในช่วงค่าควบคุมจำกัด ไม่เกิน ± 3.5 แสดงว่าไม่พบค่าผิดปกติเนื่องจากค่าของตัวแปรตาม

4.4.4 ผลวิเคราะห์การตรวจสอบค่าที่มีอิทธิพล

พิจารณาคู่คิสเตนค์ (Cook's Distance : D_i) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้วัดความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การถดถอย ที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัวในตัวอย่าง และสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ประมาณจากข้อมูลทุกตัวยกเว้นค่าสังเกตที่ i ดังนั้นถ้า $D_i > F_{0.5, p, n-p}$ เมื่อ p คือจำนวนพารามิเตอร์ในสมการถดถอย หรือ $D_i > 1$ พิจารณาได้ว่าค่าสังเกตนั้นมีอิทธิพล



ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงค่าคูคิสเตนค์ (Cook's Distance) กับลำดับการทดลอง

จากภาพที่ 4-5 ค่าคูกคิสแตนต์ (Cook's Distance $ซ D_j$) มีค่าไม่เกิน 1 สรุปได้ว่าไม่พบค่ามีอิทธิพล หลังจากตรวจสอบค่าสังเกตที่มีอิทธิพล ถ้าข้อมูลมีค่าสังเกตเป็นค่าผิดปกติ เนื่องจากตัวแปรอิสระหรือตัวแปรตาม แต่ไม่เป็นค่าสังเกตที่มีอิทธิพล แสดงว่าค่าผิดปกตินั้นเป็นค่าจริงตามธรรมชาติของข้อมูล ให้นำมาวิเคราะห์ด้วย

4.5 พิจารณาพื้นผิวผลตอบแทน

เมื่อนำสมการถดถอยมาหาค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยการสร้างแบบจำลองพื้นผิวผลตอบแทนที่เหมาะสมจากสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าผลตอบแทน ภายใต้การกำหนดเงื่อนไขดังนี้

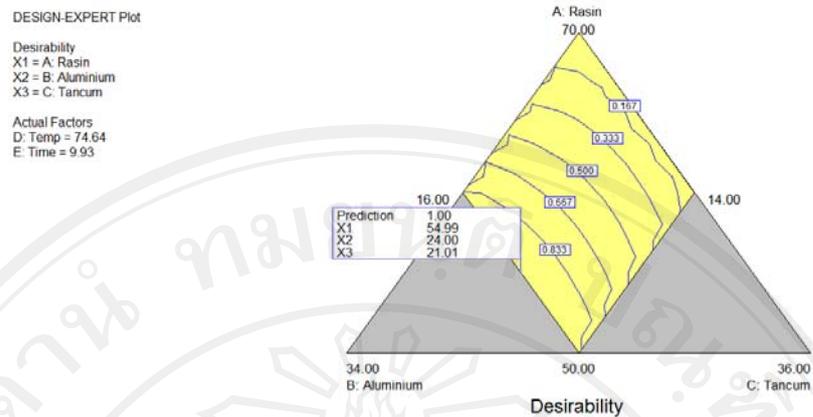
ตารางที่ 4-7 การกำหนดเกณฑ์ของระดับปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของส่วนผสม เพื่อวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสม

| ตัวแปร | ระดับ | | หน่วย |
|-----------------------------------|-------|------|--------------|
| | ต่ำ | สูง | |
| น้ำหนักของเรซิน (กรัม) หรือ A | 50 | 70 | ร้อยละ |
| น้ำหนักผงอลูมิเนียม (กรัม) หรือ B | 14 | 24 | ร้อยละ |
| น้ำหนักผงทัลคัม (กรัม) หรือ C | 16 | 26 | ร้อยละ |
| การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หรือ D | 70 | 90 | องศาเซลเซียส |
| ระยะเวลาในการเซตตัว หรือ E | 7 | 10 | ชั่วโมง |
| ค่าความแข็งแรง หรือ Y | 83.4 | 86.6 | ชอร์ดี |

การกำหนดเงื่อนไขของส่วนผสมคือ เรซิน (A) อลูมิเนียม (B) ทัลคัม (C) อุณหภูมิ (D) และเวลา (E) พิจารณาจากสัดส่วนทั่วไปที่ใช้ในการผลิตของผู้ประกอบการและข้อมูลจากทางโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนค่าความแข็งแรง (Y) เป็นเป้าหมายในการทดลองที่จะทำให้มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด

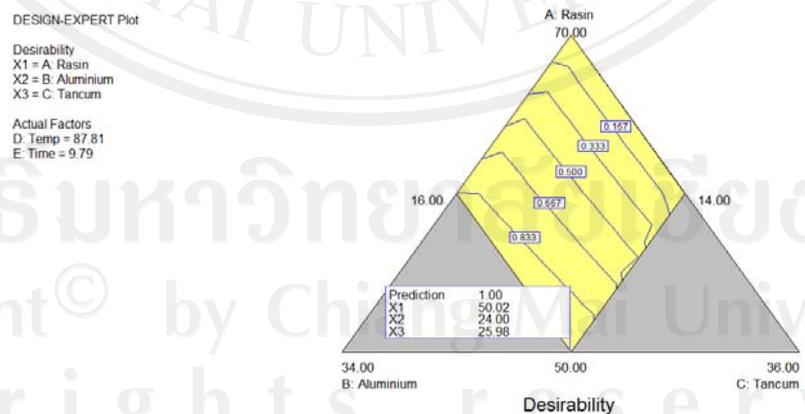
4.6 แสดงผลตอบแทนของค่าความแข็งแรงของวัสดุผสมที่ให้ค่าความแข็งแรงมากที่สุด

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขดังกล่าวสามารถหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุผสมที่มีค่าความแข็งแรงมากที่สุดอยู่หลายคำตอบ โดยคำตอบดังกล่าวมีผลต่อ ผลตอบ คือ ค่าความแข็งแรงของวัสดุผสมมีค่ามากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4-6 ถึงภาพที่ 4-14 ตารางที่ 1ง 1จ-9จ และ 1ฉ



ภาพที่ 4-6 กราฟแสดงการทำนายการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่ 1

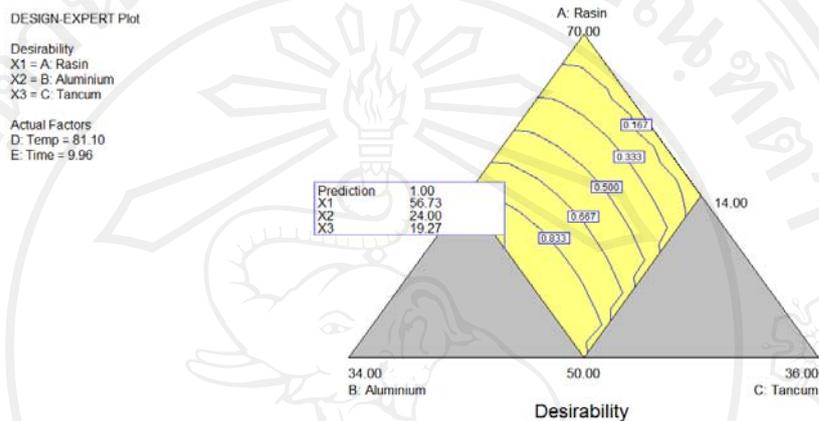
จากภาพที่ 4-6 จะเห็นว่าวัสดุผสมใหม่มีค่า $X_1 = A = \text{Resin}$ ซึ่งต้องใช้เรซินในการผลิตร้อยละ 54.99 ส่วน ค่า $X_2 = B = \text{Aluminum}$ จะต้องใช้อลูมิเนียมในการผลิตร้อยละ 24.00 ส่วนค่า $X_3 = C = \text{Talcum}$ จะต้องใช้ทัลคัมในการผลิตร้อยละ 24.01 ซึ่งทั้งหมดเมื่อนำค่าร้อยละของทั้งเรซิน อลูมิเนียม และทัลคัม มารวมกันจะได้เท่ากับร้อยละร้อย หรือ 100% พอดี และปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมก็มีค่า $D = \text{Temperatures}$ ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบเท่ากับ 74.64 องศาเซลเซียส และค่า $E = \text{Times}$ ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาในการอบเท่ากับ 9.93 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.6 ชอว์ดี



ภาพที่ 4-7 กราฟแสดงการทำนายการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่ 2

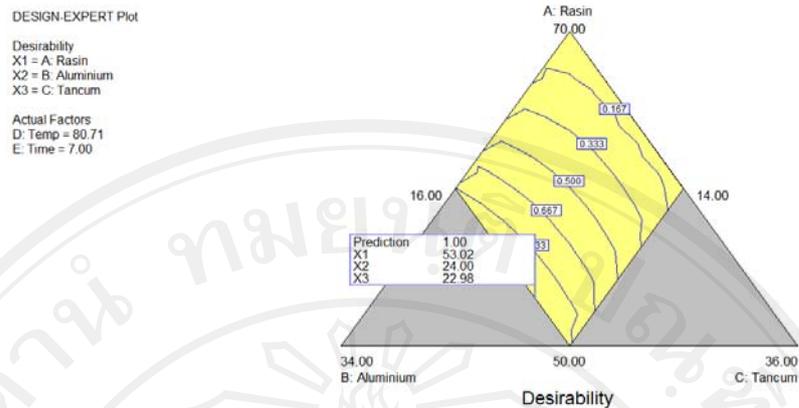
จากภาพที่ 4-7 จะเห็นว่าวัสดุผสมใหม่มีค่า $X_1 = A = \text{Resin}$ ซึ่งต้องใช้เรซินในการผลิตร้อยละ 50.02 ส่วน ค่า $X_2 = B = \text{Aluminum}$ จะต้องใช้อลูมิเนียมในการผลิตร้อยละ 24.00 ส่วนค่า

$X_3 = C = \text{Talcum}$ จะต้องใช้ทัลคัมในการผลิตร้อยละ 25.98 ซึ่งทั้งหมดเมื่อนำค่าร้อยละของทั้งเรซิน อลูมิเนียม และทัลคัม มารวมกันจะได้เท่ากับร้อยละร้อย หรือ 100% พอดี และปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมก็มีค่า $D = \text{Temperatures}$ ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบเท่ากับ 87.81 องศาเซลเซียส และค่า $E = \text{Times}$ ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาในการอบเท่ากับ 9.79 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.6 ซอร์ดี



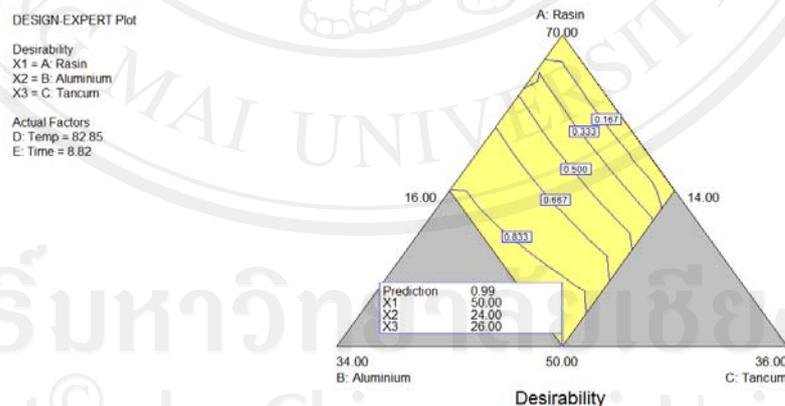
ภาพที่ 4-8 กราฟแสดงการทำนายการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่ 3

จากภาพที่ 4-8 จะเห็นว่าวัสดุผสมใหม่มีค่า $X_1 = A = \text{Resin}$ ซึ่งต้องใช้เรซินในการผลิตร้อยละ 56.73 ส่วนค่า $X_2 = B = \text{Aluminum}$ จะต้องใช้ใช้อลูมิเนียมในการผลิตร้อยละ 24.00 ส่วนค่า $X_3 = C = \text{Talcum}$ จะต้องใช้ทัลคัมในการผลิตร้อยละ 19.27 ซึ่งทั้งหมดเมื่อนำค่าร้อยละของทั้งเรซิน อลูมิเนียม และทัลคัม มารวมกันจะได้เท่ากับร้อยละร้อย หรือ 100% พอดี และปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมก็มีค่า $D = \text{Temperatures}$ ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบเท่ากับ 81.10 องศาเซลเซียส และค่า $E = \text{Times}$ ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาในการอบเท่ากับ 9.96 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.6 ซอร์ดี



ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงการทำนายการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่ 4

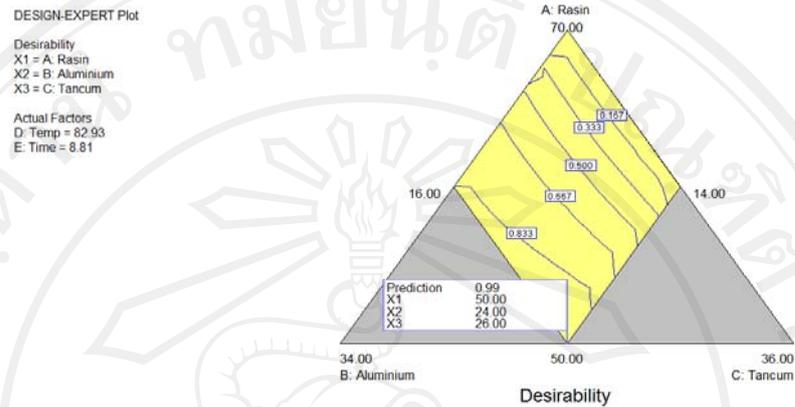
จากภาพที่ 4-9 จะเห็นว่าวัสดุผสมใหม่มีค่า $X_1 = A = \text{Resin}$ ซึ่งต้องใช้เรซินในการผลิตร้อยละ 53.02 ส่วน ค่า $X_2 = B = \text{Aluminium}$ จะต้องใช้อลูมิเนียมในการผลิตร้อยละ 24.00 ส่วนค่า $X_3 = C = \text{Talcum}$ จะต้องใช้ทัลคัมในการผลิตร้อยละ 22.98 ซึ่งทั้งหมดเมื่อนำค่าร้อยละของทั้งเรซิน อลูมิเนียม และทัลคัม มารวมกันจะได้เท่ากับร้อยละร้อย หรือ 100% พอดี และปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมก็มีค่า $D = \text{Temperatures}$ ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบเท่ากับ 80.71 องศาเซลเซียส และค่า $E = \text{Times}$ ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาในการอบเท่ากับ 7.00 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.6 ชอว์ดี



ภาพที่ 4-10 กราฟแสดงการทำนายการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่ 5

จากภาพที่ 4-10 จะเห็นว่าวัสดุผสมใหม่มีค่า $X_1 = A = \text{Resin}$ ซึ่งต้องใช้เรซินในการผลิตร้อยละ 50.00 ส่วน ค่า $X_2 = B = \text{Aluminium}$ จะต้องใช้อลูมิเนียมในการผลิตร้อยละ 24.00 ส่วนค่า $X_3 = C = \text{Talcum}$ จะต้องใช้ทัลคัมในการผลิตร้อยละ 26.00 ซึ่งทั้งหมดเมื่อนำค่าร้อยละของทั้งเรซิน อลูมิเนียม และทัลคัม มารวมกันจะได้เท่ากับร้อยละร้อย หรือ 100% พอดี และปัจจัยที่ต้องทำการ

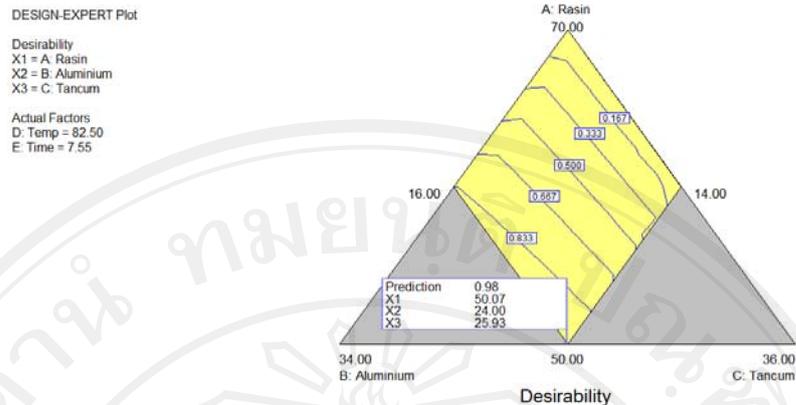
ควบคุมก็มีค่า $D = \text{Temperatures}$ ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบเท่ากับ 82.85 องศาเซลเซียส และค่า $E = \text{Times}$ ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาในการอบเท่ากับ 8.82 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.6 ชอร์ดี



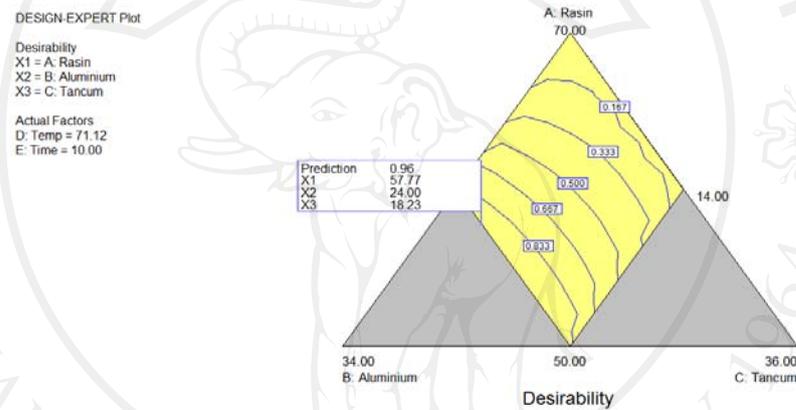
ภาพที่ 4-11 กราฟแสดงการทำนายการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่ 6

จากภาพที่ 4-11 จะเห็นว่าวัสดุผสมใหม่มีค่า $X_1 = A = \text{Resin}$ ซึ่งต้องใช้เรซินในการผลิตร้อยละ 50.00 ส่วนค่า $X_2 = B = \text{Aluminum}$ จะต้องใช้อลูมิเนียมในการผลิตร้อยละ 24.00 ส่วนค่า $X_3 = C = \text{Talcum}$ จะต้องใช้ทัลคัมในการผลิตร้อยละ 26.00 ซึ่งทั้งหมดเมื่อนำค่าร้อยละของทั้งเรซิน อลูมิเนียม และทัลคัม มารวมกันจะได้เท่ากับร้อยละร้อย หรือ 100% พอดี และปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมก็มีค่า $D = \text{Temperatures}$ ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบเท่ากับ 82.93 องศาเซลเซียส และค่า $E = \text{Times}$ ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาในการอบเท่ากับ 8.81 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.6 ชอร์ดี

จากภาพที่ 4-12 จะเห็นว่าวัสดุผสมใหม่มีค่า $X_1 = A = \text{Resin}$ ซึ่งต้องใช้เรซินในการผลิตร้อยละ 50.07 ส่วนค่า $X_2 = B = \text{Aluminum}$ จะต้องใช้อลูมิเนียมในการผลิตร้อยละ 24.00 ส่วนค่า $X_3 = C = \text{Talcum}$ จะต้องใช้ทัลคัมในการผลิตร้อยละ 25.93 ซึ่งทั้งหมดเมื่อนำค่าร้อยละของทั้งเรซิน อลูมิเนียม และทัลคัม มารวมกันจะได้เท่ากับร้อยละร้อย หรือ 100% พอดี และปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมก็มีค่า $D = \text{Temperatures}$ ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบเท่ากับ 82.50 องศาเซลเซียส และค่า $E = \text{Times}$ ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาในการอบเท่ากับ 7.55 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.6 ชอร์ดี



ภาพที่ 4-12 กราฟแสดงการทำนายการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่ 7

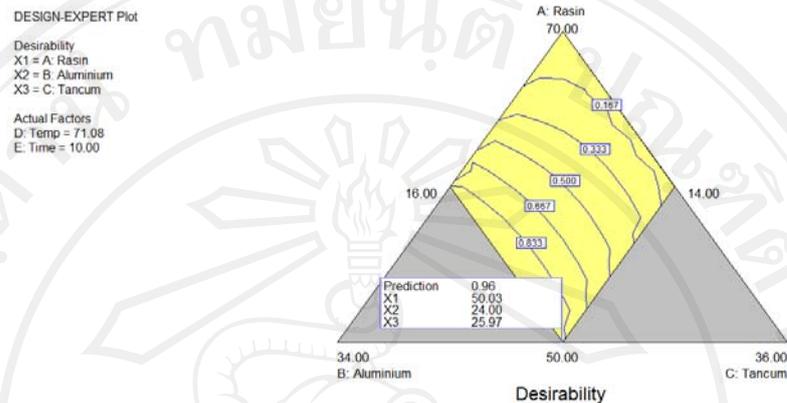


ภาพที่ 4-13 กราฟแสดงการทำนายการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่ 8

จากภาพที่ 4-13 จะเห็นว่าวัสดุผสมใหม่มีค่า $X_1 = A = \text{Resin}$ ซึ่งต้องใช้เรซินในการผลิตร้อยละ 57.77 ส่วน ค่า $X_2 = B = \text{Aluminum}$ จะต้องใช้อลูมิเนียมในการผลิตร้อยละ 24.00 ส่วนค่า $X_3 = C = \text{Talcum}$ จะต้องใช้ทัลคัมในการผลิตร้อยละ 18.23 ซึ่งทั้งหมดเมื่อนำค่าร้อยละของทั้งเรซิน อลูมิเนียม และทัลคัม มารวมกันจะได้เท่ากับร้อยละร้อย หรือ 100% พอดี และปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมก็มีค่า $D = \text{Temperatures}$ ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบเท่ากับ 71.12 องศาเซลเซียส และค่า $E = \text{Times}$ ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาในการอบเท่ากับ 10.00 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.6 ชอร์ดี

จากภาพที่ 4-14 จะเห็นว่าวัสดุผสมใหม่มีค่า $X_1 = A = \text{Resin}$ ซึ่งต้องใช้เรซินในการผลิตร้อยละ 50.03 ส่วน ค่า $X_2 = B = \text{Aluminum}$ จะต้องใช้อลูมิเนียมในการผลิตร้อยละ 24.00 ส่วนค่า $X_3 = C = \text{Talcum}$ จะต้องใช้ทัลคัมในการผลิตร้อยละ 25.97 ซึ่งทั้งหมดเมื่อนำค่าร้อยละของทั้งเรซิน อลูมิเนียม และทัลคัม มารวมกันจะได้เท่ากับร้อยละร้อย หรือ 100% พอดี และปัจจัยที่ต้องทำการ

ควบคุมก็มีค่า $D = \text{Temperatures}$ ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบเท่ากับ 71.08 องศาเซลเซียส และค่า $E = \text{Times}$ ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาในการอบเท่ากับ 10.00 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.6 ซอร์ดี



ภาพที่ 4-14 กราฟแสดงการทำนายการหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับคำตอบที่ 9

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขดังกล่าวสามารถหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตวัสดุผสมที่มีค่าความแข็งมากที่สุดอยู่หลายคำตอบ โดยคำตอบดังกล่าวมีผลต่อ ผลตอบ คือ ค่าความแข็งของวัสดุผสมมีค่ามากที่สุด และจะเห็นว่าในการใช้ผงอลูมิเนียมในการผลิตนั้น ทุก ๆ ค่าจะใช้ผงอลูมิเนียมในการผลิตเท่ากันหมด คือ ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตร้อยละ 24.00 ดังนั้น จากคำตอบทั้ง 9 คำตอบที่ให้ค่าความแข็งเท่ากันหมด จึงตัดสินใจเลือกใช้คำตอบจากภาพที่ 4-9 จะเห็นว่าวัสดุผสมใหม่มีค่า $X_1 = A = \text{Resin}$ ซึ่งต้องใช้เรซินในการผลิตร้อยละ 53.02 ส่วนค่า $X_2 = B = \text{Aluminium}$ จะต้องใช้ใช้อลูมิเนียมในการผลิตร้อยละ 24.00 ส่วนค่า $X_3 = C = \text{Talcum}$ จะต้องใช้ใช้ทัลคัมในการผลิตร้อยละ 22.98 ซึ่งทั้งหมดเมื่อนำค่าร้อยละของทั้งเรซิน อลูมิเนียม และทัลคัม มารวมกันจะได้เท่ากับร้อยละร้อย หรือ 100%พอดี และปัจจัยที่ต้องทำการควบคุมก็มีค่า $D = \text{Temperatures}$ ซึ่งจะต้องใช้อุณหภูมิในการอบเท่ากับ 80.71 องศาเซลเซียส และค่า $E = \text{Times}$ ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาในการอบเท่ากับ 7.00 ชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.6 ซอร์ดี ที่เลือกใช้คำตอบนี้เพราะว่า ใช้ระยะเวลาในการอบสั้นที่สุด ซึ่งจะทำให้เราสามารถผลิตวัสดุผสมใหม่ได้รวดเร็วมากที่สุด

4.7 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

นำผลการทดลองที่ได้จากการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมมาผลิตและทดลองซ้ำจำนวน 10 ครั้ง (90การทดลอง) ในแต่ละคำตอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง และเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดสอบดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 แสดงผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

| คำตอบ | A | B | C | D | E | ค่าความแข็งเฉลี่ย | P-value (2-tailed) |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|--------------------|
| 1 | 54.99 | 24.00 | 21.01 | 74.64 | 9.93 | 0.011±0.025 | 0.193 |
| 2 | 50.02 | 24.00 | 25.98 | 87.81 | 9.79 | 0.012±0.028 | 0.206 |
| 3 | 56.73 | 24.00 | 19.17 | 81.10 | 9.96 | 0.011±0.022 | 0.146 |
| 4 | 53.02 | 24.00 | 22.98 | 80.71 | 7.00 | 0.011±0.019 | 0.102 |
| 5 | 50.00 | 24.00 | 26.00 | 82.85 | 8.52 | 0.016±0.028 | 0.100 |
| 6 | 50.00 | 24.00 | 26.00 | 82.93 | 8.81 | 0.018±0.030 | 0.088 |
| 7 | 50.07 | 24.00 | 25.93 | 82.50 | 7.55 | 0.017±0.037 | 0.178 |
| 8 | 52.77 | 24.00 | 18.23 | 71.72 | 10.00 | 0.018±0.034 | 0.128 |
| 9 | 50.03 | 24.00 | 25.97 | 71.08 | 10.00 | 0.020±0.042 | 0.170 |

A = เรซิน; B = อลูมิเนียม; C = ทัลคัม; D = อุณหภูมิ; E = เวลา

จากการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะเห็นว่าค่าพีแวลู (P-value) มากกว่า 0.05 ในแต่ละคำตอบ แสดงว่าค่าผลตอบทั้งหมดจากการทดลองไม่มีความแตกต่างกับค่าผลตอบจากการทำนายอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถยืนยันการทดลองว่า ในการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมหลายคำตอบสามารถทำให้ได้ค่าความแข็งที่มากที่สุด

4.8 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การหดตัวของวัสดุผสมที่ให้ค่าความแข็งมากที่สุด

ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวนั้น ได้สร้างแบบที่ใช้ในการคำนวณให้มีขนาด 100 x 100 x 25 มิลลิเมตร หรือมีปริมาตร 250,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยมีสัดส่วนผสมดังนี้ เรซิน 50 กรัม อลูมิเนียม 24 กรัม ทัลคัม 26 กรัม อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการเซตตัว 10 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าความแข็งมากที่สุดคือ 86.6 ชอร์ด

ดังนั้น หลังจากวัสดุผสมอยู่ในสถานะที่แห้งหรือแข็งตัวแล้ว

วัสดุผสมมีขนาด 99 x 99 x 24.5 มิลลิเมตร หรือมีปริมาตร 240,124.5 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

เพราะฉะนั้นสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัว(ของปริมาตรส่วนผสมสภาวะของเหลวและสถานะแข็งตัวสมบูรณ์)ได้จากการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ได้ดังต่อไปนี้

วัสดุผสมปริมาตร 250,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร มีเปอร์เซ็นต์ในการหดตัว 100 เปอร์เซ็นต์
 วัสดุผสมปริมาตร 240,124.5 ลูกบาศก์มิลลิเมตรมีเปอร์เซ็นต์การหดตัว 96.05 เปอร์เซ็นต์
 ดังนั้นสามารถหาเปอร์เซ็นต์การหดตัว(จากผลต่างของปริมาตร)คือ $100 - 96.05 = 3.95$ เปอร์เซ็นต์

4.9 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-even analysis) เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการคำนวณเพื่อหาค่าต้นทุนการผลิตที่เหมาะสมที่บริษัทสามารถทำได้ จุดมุ่งหมายของการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนคือต้องการหาตำแหน่งที่รายรับเท่ากับรายจ่ายเพื่อแสดงให้เห็นว่า จะต้องผลิตสินค้าจำนวนเท่าใดเพื่อที่จะเพียงพอต่อรายจ่ายและสามารถทำให้บริษัทสามารถดำเนินงานได้ ดังนั้น ในการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนถือว่ามีความสำคัญต่อการทำงานอย่างมาก เพราะจะเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องใช้ในการตัดสินใจในการดำเนินงาน

4.9.1 อีพ็อกซีเรซินต่างประเทศ

- ขนาดของวัสดุที่ผลิตจากต่างประเทศมีขนาด 500 x 1,550 x 50 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 38,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และมีราคา 22,000 บาท
 - จากแบบที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่นมีขนาด 250 x 300 x 50 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 3,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร (จากภาพที่ 1-7)
 - สามารถหาต้นทุนของอีพ็อกซีเรซินขนาดที่ใช้ ดังต่อไปนี้
 - อีพ็อกซีเรซินแผ่นเต็ม 38,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ราคา 22,000 บาท
 - อีพ็อกซีเรซินที่ใช้ 3,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
 - ราคา $\frac{3,750,000 \times 22,000}{38,750,000} = 2,129.03 \approx 2,130$ บาท
 - ต้นทุนในการสร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่นทั้งหมดประกอบไปด้วย
 - ต้นทุนอีพ็อกซีเรซินที่ใช้ตามแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่น 2,130 บาท
 - ค่าจ้างในการทำแม่พิมพ์ 3,000 บาท
 - รวมต้นทุนทั้งสิ้น 5,130 บาท
 - จำหน่ายแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่นราคาประมาณ (กำไร 35%) 7,000 บาท
- เพราะฉะนั้น มีกำไรจากการจำหน่ายแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่น เท่ากับ 7,000 - 5,130 = 1,870 บาท

ดังนั้นระยะเวลาคืนทุน สำหรับอีพ็อกซีเรซินจากต่างประเทศ เท่ากับ $22,000 / 1,870 = 11.77$ ชั้น หรือประมาณ 12 ชั้น ในการสร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่น

4.9.2 วัสดุผสม

- สำหรับส่วนผสมของวัสดุผสมที่ใช้มีสูตรดังนี้

| | | | | | |
|------------------|-------|------|------|-------|----------|
| - เรซิน | 1,000 | กรัม | ราคา | 100 | บาท |
| เรซิน | 1 | กรัม | ราคา | 0.1 | บาท/กรัม |
| เรซินที่ใช้ | 50 | กรัม | ราคา | 5 | บาท |
| - อลูมิเนียม | 1,000 | กรัม | ราคา | 300 | บาท |
| อลูมิเนียม | 1 | กรัม | ราคา | 0.3 | บาท/กรัม |
| อลูมิเนียมที่ใช้ | 24 | กรัม | ราคา | 7.2 | บาท |
| - ทัลคัม | 1,000 | กรัม | ราคา | 8 | บาท |
| ทัลคัม | 1 | กรัม | ราคา | 0.008 | บาท/กรัม |
| ทัลคัมที่ใช้ | 26 | กรัม | ราคา | 0.208 | บาท |
 - สำหรับส่วนผสมวัสดุผสมที่ใช้สามารถผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่นได้ขนาด 50 x 80 x 25 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 100,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
 - ต้นทุนในการในการผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่นได้ตามขนาด 50 x 80 x 25 มิลลิเมตร เท่ากับ $5+7.2+0.208 = 12.208$ บาท
 - จากแบบที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่นมีขนาด 250 x 300 x 50 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 3,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร (จากภาพที่ 1-7)
 - ต้นทุนที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสมที่ใช้สามารถหาได้ ดังนี้
 - วัสดุผสม 100,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร มีต้นทุน 12.208 บาท
 - ต้องการใช้วัสดุผสม 3,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
 - มีต้นทุนในการผลิต เท่ากับ $\frac{3,750,000 \times 12.208}{100,000} = 457.8 \approx 460$ บาท
 - ต้นทุนในการสร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่นทั้งหมดประกอบไปด้วย
 - ต้นทุนวัสดุผสมที่ใช้ตามแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่น 460 บาท
 - ค่าจ้างในการทำแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่น 3,000 บาท
 - รวมต้นทุนทั้งสิ้น 3,460 บาท
 - จำหน่ายแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่นราคาเดียวกับอิพ็อกซีเรซินต่างประเทศ 7,000 บาท
- เพราะฉะนั้น มีกำไรจากการจำหน่ายแม่พิมพ์ขึ้นรูปชนิดแผ่น เท่ากับ $7,000 - 3,460 = 3,540$ บาท
- เมื่อผลิตวัสดุผสมให้มีขนาดมาตรฐานเท่ากับอิพ็อกซีเรซินต่างประเทศซึ่งมีขนาดเท่ากับ 500 x 1,550 x 50 มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 38,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

- สามารถหาต้นทุนของขนาดที่ใช้ จากการเทียบบัญชีไตรยางศ์ ดังนี้
- วัสดุผสม 3,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ต้นทุน 460 บาท
วัสดุผสมผลิตให้ขนาดเท่ากับอีพ็อกซีเรซินมีปริมาตร 38,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
มีต้นทุนในการผลิต $\frac{38,750,000 \times 460}{3,750,000} = 4,753.33 \approx 4,755$ บาท

ดังนั้นระยะเวลาการลงทุน สำหรับวัสดุผสม เท่ากับ $4,755/3,540 = 1.34$ ชั้น หรือประมาณ 2 ชั้น
ในการสร้างแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่น

เพราะฉะนั้นสามารถสรุปเป็นตารางให้เห็นถึงระยะเวลาการลงทุนของทั้ง 2 ประเภท ดังนี้

ตารางที่ 4-9 แสดงการเปรียบเทียบจุดคุ้มทุนในการผลิตของวัสดุทั้ง 2 ประเภท

| รายการ | อีพ็อกซีเรซินต่างประเทศ | วัสดุผสม |
|---|------------------------------|------------------------------|
| ปริมาตรชิ้นวัตถุดิบที่ผลิต | 38,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร | 38,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร |
| ต้นทุน | 22,000 บาท/ชิ้น | 4,755 บาท/ชิ้น |
| ปริมาตรที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่น | 3,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร | 3,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร |
| ต้นทุนในการผลิตตามแบบ | 2,130 บาท/ชิ้น | 460 บาท/ชิ้น |
| ค่าแรง | 3,000 บาท/แบบ | 3,000 บาท/แบบ |
| ราคาขาย | 7,000 บาท/แบบ | 7,000 บาท/แบบ |
| รวมต้นทุนในการผลิตตามแบบที่ใช้จริง | 5,130 บาท/แบบ | 3,460 บาท/แบบ |
| กำไร | 1,870 บาท/แบบ | 3,540 บาท/แบบ |
| ระยะเวลาในการคืนทุน เมื่อเทียบเป็นรายชิ้นกับราคาต้นทุนในการผลิตแผ่นเต็ม | 11.77 หรือ ประมาณ 12 ชั้น | 1.34 หรือ ประมาณ 2 ชั้น |

จากตารางที่ 4-9 จะเห็นว่า ระยะเวลาในการคืนทุนของวัสดุผสมจะคืนทุนเร็วกว่าอีพ็อกซีเรซินจากต่างประเทศ เพราะว่าต้นทุนในการผลิตวัสดุผสมต่ำกว่าต้นทุนในการผลิตอีพ็อกซีเรซินจากต่างประเทศ

ตัวอย่าง ในการคำนวณเปรียบเทียบการผลิตอีพ็อกซีเรซินจากต่างประเทศกับวัสดุผสม โดยกำหนดระยะเวลาในการผลิต 1 ปีเท่ากัน โดยใช้พื้นที่จากการผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชนิดแผ่นซึ่งมีปริมาตร 3,750,000 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

การคำนวณต้นทุนในการผลิตอีพ็อกซีเรซินต่างประเทศ เป็นระยะเวลา 1 ปี

ดังนั้นถ้า 1 เดือน มีคำสั่งผลิต 12 ชิ้น มีต้นทุนในการผลิต 22,000 บาท

และ 1 ปี จะมีคำสั่งผลิต 144 ชิ้น มีต้นทุนในการผลิต $= (22,000 \times 144)/12 = 264,000$ บาท

การคำนวณต้นทุนในการผลิตวัสดุผสม เป็นระยะเวลา 1 ปี

ดังนั้นถ้า 1 เดือน มีคำสั่งผลิต 2 ชิ้น มีต้นทุนในการผลิต 4,755 บาท

และ 1 ปี จะมีคำสั่งผลิต 24 ชิ้น มีต้นทุนในการผลิต $= (4,755 \times 24)/12 = 9,510$ บาท

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการคืนทุนของวัสดุผสมเร็วกว่าอีพ็อกซีเรซินต่างประเทศอยู่ $= 264,000/9,510 = 27.76$ เท่าในระยะเวลา 1 ปี

ความสามารถในการลดต้นทุน

อีพ็อกซีเรซินต่างประเทศราคา 22,000 บาท/ชิ้น คิดเป็นต้นทุน 100%

วัสดุผสมราคา 4,755 บาท/ชิ้น คิดเป็นต้นทุน $= (4,755 \times 100)/22,000 = 21.6\%$

จะเห็นว่าวัสดุผสมมีต้นทุนที่ต่ำกว่าอีพ็อกซีเรซินต่างประเทศ $= 100 - 21.6 = 78.4\%$

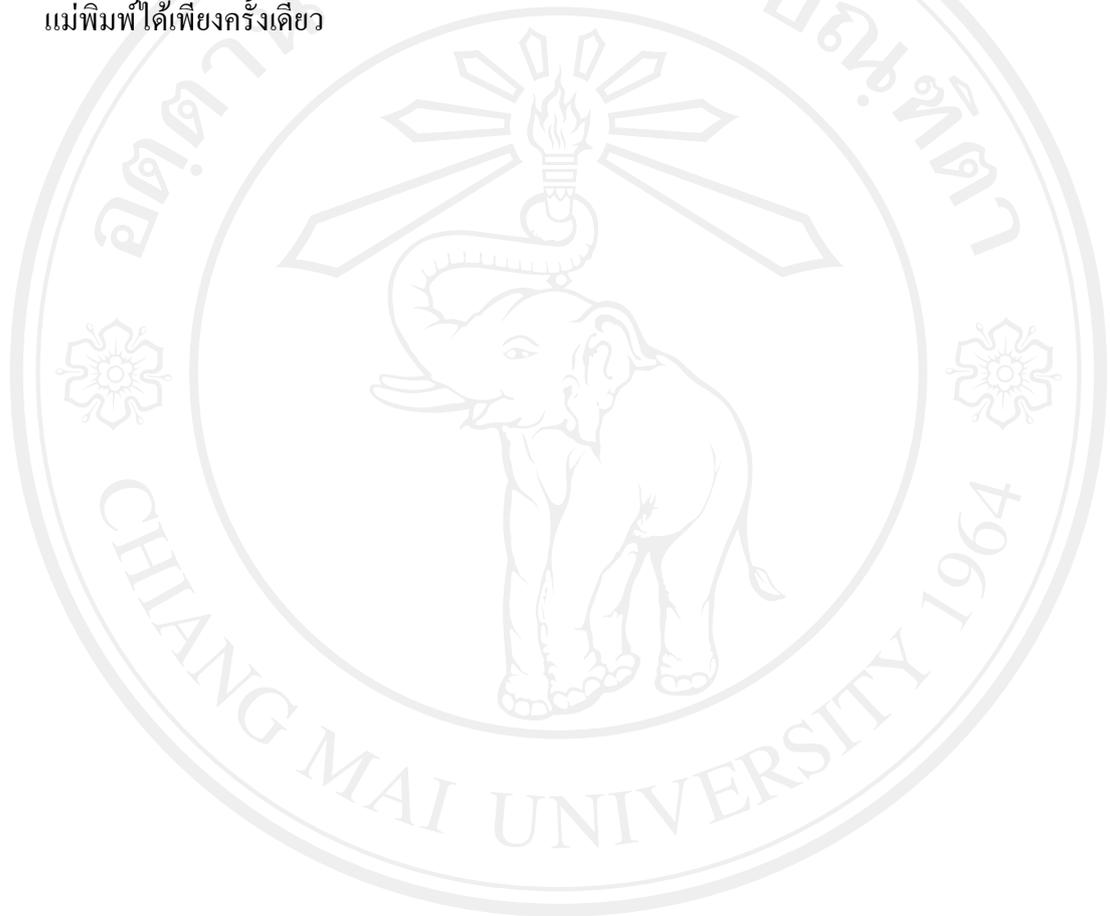
4.9.3 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวัสดุผสม

ในการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวัสดุผสมใหม่นั้น จะนำเสนอให้เห็นโดยการเปรียบเทียบในตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ตารางแสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวัสดุผสมใหม่

| ข้อดี | ข้อเสีย |
|---|---|
| 1. มีราคาที่ย่ำแย่กว่าอีพ็อกซีเรซินต่างประเทศ | 1. มีน้ำหนักมากกว่าอีพ็อกซีเรซินต่างประเทศ |
| 2. สามารถซ่อมแซมแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยความร้อนได้ ถ้าเกิดการชำรุดเสียหาย (ในกรณีที่ยังสามารถใช้งานได้อยู่) | 2. อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดในการขึ้นรูปแม่พิมพ์ของวัสดุผสม จะมีอายุการใช้งานสั้นกว่าอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดที่ใช้ในการขึ้นรูปอีพ็อกซีเรซินต่างประเทศ |
| 3. เศษที่เหลือจากการขึ้นรูปแม่พิมพ์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ | |
| 4. มีค่าความแข็งมากกว่าอีพ็อกซีเรซินต่างประเทศ | |

จากตารางที่ 4-10 จะเห็นว่าข้อดีและข้อเสียของวัสดุผสมใหม่นั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเรื่องของการใช้งาน เมื่อพิจารณาจากข้อ 2 และข้อ 3 ของข้อดีจากวัสดุผสม ทำให้เห็นว่าอายุการใช้งานของวัสดุผสมจะใช้งานได้ยาวนานกว่าเมื่อเทียบกับอีพ็อกซีเรซินต่างประเทศ เพราะว่าวัสดุผสมใหม่ที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์นั้นสามารถซ่อมแซมได้ รวมไปถึงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย ซึ่งในขณะเดียวกันอีพ็อกซีเรซินต่างประเทศที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์ สามารถนำมาสร้างแม่พิมพ์ได้เพียงครั้งเดียว



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved