ผลกระทบของสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินที่มีผลต่อคุณสมบัติและต้นทุน

นายภูวดล ศิริวิมลพันธุ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF RESIN COATED SAND MIXTURE ON PROPERTIES AND COST

Mr. Puvadol Sirivimonpan

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2017
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินที่มีผลต่อคุณสมบัติและต้นทุน
โดย	นายภูวดล ศิริวิมลพันธุ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภูวดล ศิริวิมลพันธุ์ : ผลกระทบของสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินที่มีผลต่อคุณสมบัติและต้นทุน (EFFECTS OF RESIN COATED SAND MIXTURE ON PROPERTIES AND COST) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์, 174 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินที่มีค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงความต้องการของลูกค้า และเพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบของทรายเคลือบเรซิน เนื่องจากก่อนการปรับปรุงแต่ละสูตรการผลิตจะถูกผสมจากผู้เชี่ยวชาญเท่านั้น และยังไม่มีวิธีการที่แน่ชัดสำหรับการหาสัดส่วนการผสมเพื่อให้ตรงตามความต้องการของลูกค้า ทำให้ต้องเสียเวลาในการลองผิดลองถูกเพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติตามที่ต้องการและเกิดต้นทุนวัตถุดิบที่สูงเกินความจำเป็น

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เพื่อหาสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินที่เหมาะสม โดยมีปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 5 ปัจจัยได้แก่ ทรายเอ ทรายบี เรซินเอ เรซินบี และเปอร์เซ็นต์เรซิน และมีตัวแปรตอบสนองทั้งหมด 7 ปัจจัย ได้แก่ ความทนแรงดัดโค้ง การขยายตัวทางความร้อน ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา ค่าความโก่งงอ อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเซตตัว ค่าแก๊ส และต้นทุนวัตถุดิบในส่วนของทรายและเรซิน จากนั้นทำการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับตัวแปรตอบสนองโดยใช้เทคนิคการคัดเลือกตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (Stepwise Regression) ชนิดการเลือกตัวแปรโดยวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) จากนั้นทำการหาสัดส่วนการผสมใหม่ด้วยวิธีการหาจุดที่เหมาะสม

ผลที่ได้จากการหาสัดส่วนการผสมใหม่ทั้งหมด 25 สูตรการผลิต พบว่าค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดของทั้ง 25 สูตรการผลิตอยู่ในช่วงการยอมรับของโรงงาน และสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ลง 28.36% จากต้นทุนวัตถุดิบที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า ซึ่งคิดเป็นต้นทุนที่ลดลง 42,293,318 บาทต่อปี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ	ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....
ปีการศึกษา 2560	

5870355421 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORDS: RESIN COATED SAND, RESPONSE SURFACE METHODOLOGY, MIXING RATIO

PUVADOL SIRIVIMONPAN: EFFECTS OF RESIN COATED SAND MIXTURE ON PROPERTIES AND COST. ADVISOR: ASST. PROF. NAPASSAVONG OSOTHSILP, Ph.D., 174 pp.

This research aims to find the optimal mixing ratio of resin coated sand, which yields product properties that meet customer requirements and also has the minimal total cost of sand and resin. Previously, each formulae was mixed by trial and error since there was no clear mixing standard to find the proper mixing ratio. This leads to excessive time and cost of raw material.

This research applied the Central Composite design (CCD) for finding the optimal mixing ratio. The independent factors were the proportions of Sand A, Sand B, Resin A, Resin B, and %Resin. The responses of interest were Bending Strength, Loss of Ignition, Thermal Expansion, Bend, Melting Point, Gas and total cost of sand and resin materials. After obtaining all experimental results, Stepwise Regression analysis with backward elimination technique was used to determine the relationship equation of independent factors and responses. Next, the optimization technique was applied to determine the optimal mixing ratio given the required property levels.

After testing the new mixing ratio of 25 product formula. It was found that the six properties of these product formula were within the acceptable ranges. In addition, the total cost of sand and resin materials was reduced by 28.36% comparing with previous mixing ratio. The total cost of sand and resin materials of these 25 formula was reduced by 42,293,318 baht per year.

Department:	Industrial Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Industrial Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2017		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆอันมีค่า อีกทั้งยังคอยให้ข้อคิดและกำลังใจในการทำงาน ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้สละเวลามาเข้าร่วมฟัง พร้อมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขข้อบกพร่อง จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณโรงงานกรณีศึกษาสำหรับความกรุณาที่ให้เข้าไปทำการศึกษาวิจัยและให้ความช่วยเหลือในการเก็บผลการทดลองเป็นอย่างดี รวมถึงคณะทำงานที่คอยให้คำแนะนำและแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมไปถึงพนักงานและเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาทุกท่าน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด รวมทั้งกำลังใจจากเพื่อนๆและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในงานวิจัยทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงมา ณ ที่นี้ด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูป ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 ข้อมูลทั่วไปและรายละเอียดโรงงานกรณีศึกษาเกี่ยวกับการผลิตไส้แบบหล่อ 2

1.3 สภาพปัญหาปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา 3

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 17

1.5 ขอบเขตงานวิจัย 17

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 17

1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 19

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 20

1.9 ตารางการดำเนินงาน 21

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22

2.1 งานหล่อ 22

2.1.1 การหล่อ (Casting) 22

2.1.2 ขั้นตอนการหล่อโลหะ 23

2.1.3 ระบบจ่ายน้ำโลหะ (Gating System) 23

2.1.4 แบบหล่อ (Mold) 24

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.1.5 ไส้แบบหล่อหรือคอร์ (Core) 26
2.1.6 ส่วนประกอบของไส้แบบ 28
2.1.7 หีบคอร์ (Core Boxes) 28
2.2 ทรายหล่อ 32
2.2.1 คุณสมบัติของทรายหล่อ (Molding Sand Properties) 32
2.2.2 ทรายสำหรับงานแบบหล่อ (Sand) 34
2.3. ตัวประสาน (Binder) 36
2.4. สารเติมแต่ง (Additive) 39
2.5 ทรายเคลือบเรซิน (Resin Coated Sand) 40
2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับสถิติ 41
2.6.1 แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) 41
2.6.2 สมการถดถอย (Regression Model) 42
2.6.3 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square: R^2) 44
2.6.4 วิธีการคัดเลือกตัวแปร 44
2.7 การออกแบบการทดลอง 45
2.7.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) 45
2.7.2 ประเภทของการแบบการทดลอง 46
2.7.3 ส่วนประกอบต่างๆของการทดลอง 47
2.7.4 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง 47
2.7.5 หลักการพื้นฐาน 3 ข้อสำหรับการออกแบบการทดลอง 47
2.7.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 48
2.7.7 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k (2^k Factorial Design) 49
2.7.8 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design) 49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.7.8.1 มิติการออกแบบ (Design Resolution) 51
2.7.8.2 การเลือกรูปแบบการทดลองแฟคทอเรียล 52
2.7.8.3 ขั้นตอนในการสร้างแผนการทดลองเชิงแฟคทอเรียลบางส่วนแบบ 2k-p 53
2.7.8.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 53
2.7.9 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) 54
2.8 ฟังก์ชั่นความพึงพอใจ (Desirability Function) 56
2.8.1 การใช้งานฟังก์ชั่นความพึงพอใจมีขั้นตอนดังนี้ 58
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 58
2.9.1 งานวิจัยเกี่ยวข้องกับการผสมสาร 58
2.9.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง 60
2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ 60
2.9.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) 64
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 74
3.1 ขั้นตอนการผลิตทรายเคลือบเรซิน 74
3.2 วัตถุดิบหลักสำหรับกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน 75
3.3 การเลือกแบบการทดลอง 76
3.4 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัย 77
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง 81
4.1 ผลการทดลอง 81
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 83
4.2.1 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของค่าความทนแรงดัดโค้ง (Y_1) 83
4.2.2 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเซตตัว (Y_2) 93

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

4.2.3 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของค่าความโก่งงอ (Y_3) 100

4.2.4 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของค่าการขยายตัวค่าความร้อน (Y_4) 106

4.2.5 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา (Y_5) 114

4.2.6 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของค่าแก๊ส (Y_6) 123

4.3 การคัดเลือกผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปทำการยืนยันผลการทดลอง 129

4.3.1 หลักการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ 129

4.4 การหากำหนดระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนำเข้า 134

บทที่ 5 การทดลองเพื่อยืนยันผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง 138

5.1 ขั้นตอนการทดลองเพื่อยืนยันผล 138

5.2 ผลการทดลอง 139

5.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 144

5.3.1 การวิเคราะห์สัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซิน 144

5.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเปรียบเทียบกับช่วงการยอมรับของโรงงาน 145

5.3.3 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบระหว่างสูตรการผสมเก่ากับสูตรการผสมใหม่ 158

5.4 สรุปผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง 164

บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 166

6.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย 166

6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย 167

6.3 ข้อเสนอแนะ 168

รายการอ้างอิง 171

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 174

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการใช้วัตถุดิบทั้ง 4 ชนิดภายในปี 2559 4

ตารางที่ 1.2 ช่วงความต้องการของค่าคุณสมบัติต่างๆในผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซิน.......... 9

ตารางที่ 1.3 ค่าเฉลี่ยของค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดและต้นทุนวัตถุดิบจากผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 45 ชนิด (จำนวน 600 กิโลกรัม/รอบการผลิต).......... 11

ตารางที่ 1.4 ค่าเฉลี่ยของค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดและต้นทุนวัตถุดิบจากผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 45 ชนิด (จำนวน 600 กิโลกรัม/รอบการผลิต) (ต่อ) 12

ตารางที่ 1.5 ค่าเฉลี่ยของค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดและต้นทุนวัตถุดิบจากผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 45 ชนิด (จำนวน 600 กิโลกรัม/รอบการผลิต) (ต่อ) 13

ตารางที่ 1.6 การเปรียบเทียบความต้องการในผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซินของทั้ง 2 บริษัท 15

ตารางที่ 1.7 กำหนดระดับของการทดลองสำหรับปัจจัยแต่ละชนิด 18

ตารางที่ 2.1 เครื่องหมายบวกและลบสำหรับการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3.......... 50

ตารางที่ 2.2 ค่า α กรณีของการทดลองแบบส่วนผสมกลางเมื่อมีช่วงปัจจัยที่ 2-6 55

ตารางที่ 2.3 การเตรียมทราย เรซิน และเปอร์เซ็นต์สำหรับการผสม 59

ตารางที่ 2.4 การออกแบบระดับของปัจจัยแต่ละชนิดสำหรับการออกแบบการทดลอง.......... 61

ตารางที่ 2.5 ช่วงการออกแบบสำหรับปัจจัยเพื่อใช้ในการออกแบบการทดลอง 66

ตารางที่ 2.6 การออกแบบการทดลองแบบ Simplex Centroid.......... 66

ตารางที่ 2.7 การออกแบบการทดลองแบบ Simplex Centroid.......... 66

ตารางที่ 2.8 ตารางการออกแบบการทดลองสูตรพื้นฐานของลูกชิ้นเอ็นไก่ผสมผักพื้นบ้าน 4 ชนิด ได้แก่ สาหร่าย ฟักทอง ตำลึง และโหรพา 67

ตารางที่ 2.9 ข้อจำกัดสำหรับการออกแบบการทดลองแบบเอ็กทรีมเวอร์ทิส 68

ตารางที่ 2.10 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง 69

ตารางที่ 2.11 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design).......... 72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.12 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน 73

ตารางที่ 3.1 ชนิดทรายและคุณสมบัติของทราย 76

ตารางที่ 3.2 ชนิดเรซินและคุณสมบัติของเรซิน 76

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยและระดับของปัจจัยสำหรับการทดลอง 79

ตารางที่ 3.4 เมทริกซ์การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง 80

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดของทรายเคลือบเรซินที่ได้จากการทดลอง 82

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเฉพาะตัวของเรซินในด้านค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว 97

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของค่าการขยายตัวทางความร้อนของทรายและเรซิน................................ 110

ตารางที่ 4.4 การแบ่งผลิตภัณฑ์ตามค่าความทนแรงดัดโค้งโดยโรงงานกรณีศึกษา 130

ตารางที่ 4.5 สัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินสำหรับยืนยันผลการทดลองทั้ง 25 ผลิตภัณฑ์ 136

ตารางที่ 5.1 ช่วงการยอมรับของคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิด สำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์............................. 140

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองทั้ง 25 ผลิตภัณฑ์ 141

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติ 150

ตารางที่ 5.4 ราคาทรายสำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซิน 158

ตารางที่ 5.5 ราคาเรซินสำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซิน.. 158

ตารางที่ 5.6 ต้นทุนวัตถุดิบระหว่างสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงเทียบกับสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง (คิดในปริมาณ 600 กิโลกรัม).. 159

ตารางที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลง 163

ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินแบบ Hierarchical Model กับ Non- Hierarchical Model 170

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 แนวโน้มการผลิตเหล็กและผลิตภัณฑ์จากเหล็ก 1

รูปที่ 1.2 สัดส่วนการเลือกใช้ทรายแต่ละประเภทสำหรับการผสมสูตรในการผลิต 4

รูปที่ 1.3 สัดส่วนการเลือกใช้เรซินแต่ละประเภทสำหรับการผสมสูตรในการผลิต 5

รูปที่ 2.1 การทำแบบหล่อโลหะ 23

รูปที่ 2.2 ขั้นตอนในการทำงานในกระบวนการหล่อโลหะ 23

รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบระบบจ่ายน้ำโลหะภายในแบบหล่อ 24

รูปที่ 2.4 ภาพตัวอย่างชิ้นงานที่ต้องการไส้แบบ 26

รูปที่ 2.5 หน้าที่ของทรายคอร์ที่จะทำให้เกิดรูหรือช่องในชิ้นงานหล่อ 27

รูปที่ 2.6 ภาพตัวอย่างหีบคอร์ (Core Box) 29

รูปที่ 2.7 ภาพตัวอย่าง Half Core Box 29

รูปที่ 2.8 ภาพตัวอย่าง Dump Core Box 30

รูปที่ 2.9 ภาพตัวอย่าง Split Core Box 30

รูปที่ 2.10 ภาพตัวอย่าง Left and Right Hand Box 30

รูปที่ 2.11 ภาพตัวอย่าง Strickle Core Box 31

รูปที่ 2.12 ภาพตัวอย่าง Gang Core Box 31

รูปที่ 2.13 ภาพตัวอย่าง Loose Piece Core Box 31

รูปที่ 2.14 แผนภาพอธิบายกฎ 20/80 ของพาเรโต 42

รูปที่ 2.15 ประเภทของสมการถดถอย 42

รูปที่ 2.16 ลักษณะการเกิดผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B 49

รูปที่ 2.17 Resolution ที่เป็นไปได้ของแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ที่จำนวนปัจจัยต่างๆ 52

รูปที่ 2.18 แบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบที่เป็นไปได้ และจำนวนการทดลองที่สอดคล้อง 56

รูปที่ 2.19 ตารางการออกแบบการทดลองแบบผสมแบบ Simplex lattice 64

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 2.20 ตารางการออกแบบการทดลองแบบผสมที่มีการเปลี่ยนชนิดการใช้ทราย C1-MC, C2-MC และ BBC-MC 65

รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน 75

รูปที่ 4.1การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าความทนแรงดัดโค้ง 83

รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าความทนแรงดัดโค้งด้วยสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป 86

รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าความทนแรงดัดโค้งด้วยวิธีการลดตัวแปรอิสระ 87

รูปที่ 4.4 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SA-RA และกราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SA-RB ที่ส่งผลต่อความทนแรงดัดโค้ง 89

รูปที่ 4.5 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SB-RA และกราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SB-RB ที่ส่งผลต่อความทนแรงดัดโค้ง 90

รูปที่ 4.6 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ RA-RB ที่ส่งผลต่อความทนแรงดัดโค้ง 91

รูปที่ 4.7 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณทรายแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์เรซิน และปริมาณเรซินแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์เรซินที่ส่งผลต่อความทนแรงดัดโค้ง 92

รูปที่ 4.8 การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว 93

รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าอุณภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวด้วยสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป 95

รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวด้วยวิธีการลดตัวแปรอิสระ 96

รูปที่ 4.11 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ RA และปริมาณ RB ที่มีต่อค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว 98

รูปที่ 4.12 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณทรายกับเปอร์เซ็นต์เรซิน และปริมาณเรซินแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์เรซินที่มีต่อค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว 99

รูปที่ 4.13 การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าความโก่งงอ (Y_3: Bend) 100

Chulalongkorn University

รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าความโก่งงอด้วยสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป 102

รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าความโก่งงอ 103

รูปที่ 4.16 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของเปอร์เซ็นต์ของเรซินกับเรซิน และเปอร์เซ็นต์ของเรซินกับทราย ที่ส่งผลต่อค่าความโก่งงอ 105

รูปที่ 4.17 การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าการขยายตัวทางความร้อน (Y_4: Thermal Expansion) 106

รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าการขยายตัวทางความร้อนด้วยสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป 108

รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าการขยายตัวทางความร้อนด้วยวิธีการลดตัวแปรอิสระ 109

รูปที่ 4.20 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SB กับปริมาณ RA ที่มีต่อค่าการขยายตัวทางความร้อน 111

รูปที่ 4.21 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SB กับปริมาณ RB ที่มีต่อค่า การขยายตัวทางความร้อน 112

รูปที่ 4.22 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณเรซินกับเปอร์เซ็นต์เรซินแต่ละชนิดและเปอร์เซ็นต์เรซินกับทรายแต่ละชนิด ที่ส่งผลต่อค่าการขยายตัวทางความร้อน 113

รูปที่ 4.23 การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าปริมาณความสูญเสียหลังการเผา 114

รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาด้วยสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป 116

รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าปริมาณความสูญเสียหลังการเผาด้วยวิธีการลดตัวแปรอิสระ 118

รูปที่ 4.26 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SA-SB, ปริมาณ SA-RA และปริมาณ SA-RB ที่ส่งผลต่อค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา 120

รูปที่ 4.27 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SB-RA และปริมาณ SB-RB ที่ส่งผลต่อค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา 121

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.28 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ RA-RB ที่ส่งผลต่อค่า ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา 121

รูปที่ 4.29 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณเรซินแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์ของเรซิน และปริมาณทรายแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์ของเรซิน ที่ส่งผลต่อค่าปริมาณความสูญเสียหลังการเผา 122

รูปที่ 4.30 การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าแก๊ส 123

รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าแก๊สด้วยสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป 125

รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าแก๊สด้วยวิธีการลดตัวแปรอิสระ 126

รูปที่ 4.33 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SA-RB และปริมาณ RA-RB ที่ส่งผลต่อค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา 128

รูปที่ 4.34 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณเรซินแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์เรซินและปริมาณทรายแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์เรซินที่ส่งผลต่อค่าแก๊ส 128

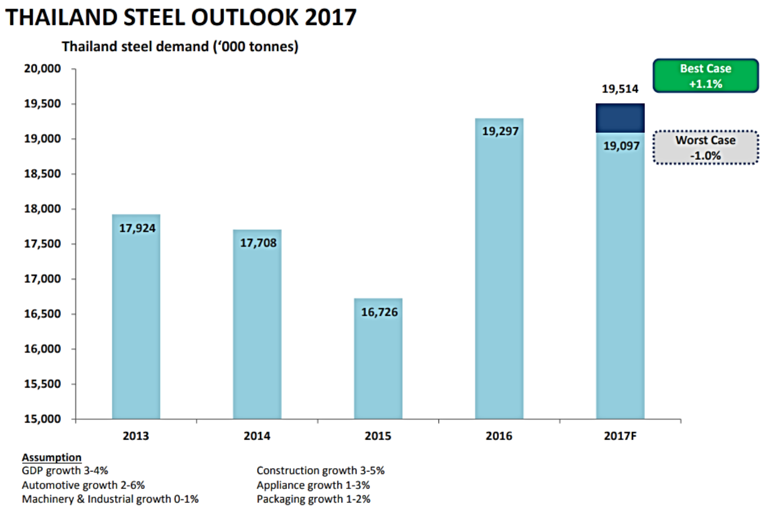
รูปที่ 4.35 การแบ่งกลุ่มของผลิตภัณฑ์โดยใช้เทคนิค Cluster Analysis 132

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อุตสาหกรรมเกี่ยวกับเหล็กมีความเติบโตอย่างมากในประเทศไทย ซึ่งแนวโน้มในปี 2559 ที่ผ่านมามีปริมาณการผลิตเหล็กอยู่ที่ประมาณ 7 เมตริกตัน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี 2558 ร้อยละ 18.98 และทางสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรมได้มีการคาดการณ์แนวโน้มว่าอุตสาหกรรมเกี่ยวกับเหล็กจะมีการผลิตเพิ่มสูงขึ้นเป็น 17.8 ล้านตัน โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.1-2.8 ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากการขยายตัวของธุรกิจอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น เครื่องปรับอากาศ หรืออุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น การผลิตชิ้นส่วนอะไหล่รถยนต์ และยังมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมอื่นอีกมากมาย ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกล เป็นต้น ซึ่งมีแนวโน้มดังแสดงในรูปที่ 1.1 (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2559)



รูปที่ 1.1 แนวโน้มการผลิตเหล็กและผลิตภัณฑ์จากเหล็ก

ปัจจุบันงานด้านการหล่อโลหะเข้ามามีส่วนสำคัญอย่างมากในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ไม่ว่าจะอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า ตลอดจนสิ่งของที่ถูกใช้ในชีวิตประจำวันล้วนแล้วแต่มีการขึ้นรูปด้วยวิธีการต่างๆที่เหมาะสมตามแบบชิ้นงานนั้นๆ โดยการหล่อโลหะนั้นมีความเหมาะสมกับการผลิตชิ้นงานที่มีข้อจำกัดด้วยวิธีการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่นๆ เช่นการปั๊ม การเชื่อม การกลึงหรือการขึ้นรูปที่ราคาต้นทุนที่สูง ในอุตสาหกรรมการหล่อทั่วไปสามารถแบ่งกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตได้ 7 ประเภท คือ หล่อโดยแบบหล่อทราย (Sand Casting), หล่อโดยแบบหล่อขี้ผึ้ง (Investment

Casting or Lost Wax Casting), หล่อโดยแบบหล่อถาวร (Permanent Mold Casting), หล่อโดยแบบหล่อปูนพลาสเตอร์ (Plaster Mold Casting), หล่อโดยวิธีการแกว่งชิ้นงานหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Casting), หล่อโดยแบบหล่อทรายเปลือกบาง (Shell Mold Casting), หล่อโดยแบบหล่อถาวรร่วมกับการอัดน้ำโลหะ (Die Casting) ซึ่งประเภทของงานหล่อที่ได้รับความนิยมในการใช้งานมากเป็นอันดับต้นๆคือ การหล่อแบบทราย เนื่องจากมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ ทรายที่ใช้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกหลายครั้ง และสามารถใช้งานได้กลับงานโลหะได้หลายชนิด ซึ่งสิ่งสำคัญที่จะต้องมีในงานหล่อทุกชนิดเพื่อใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการเรียกว่า แบบหล่อ (mold) มีหน้าที่ในการรองรับน้ำโลหะที่ผ่านกระบวนการหลอมเหลวแล้วเพื่อนำมาสร้างชิ้นงาน และสำหรับบางประเภทที่ต้องการโพรงในชิ้นงาน เช่นการผลิตอะไหล่รถยนต์บางชนิด หรือวัสดุอุปกรณ์หรือชิ้นงานทุกประเภทที่ต้องมีโพรงในชิ้นงานทั้งที่มีความยากซับซ้อนหรือเรียบง่ายก็ตามจำเป็นจะต้องอาศัยไส้แบบหล่อ (Core) เพื่อให้ชิ้นงานมีโพรงตามที่ต้องการ และเพื่อลดปริมาณทรายและเรซินในส่วนที่ไม่จำเป็นลง

ปัจจุบันไส้แบบหล่อจะถูกผลิตมาจากทรายเคลือบเรซิน โดยมีส่วนผสมหลักคือทรายและเรซิน และมีตัวประสานอื่นๆที่ช่วยเสริมความแข็งแรง โดยไส้แบบหล่อนั้นต้องทนความร้อนสูง เนื่องจากน้ำโลหะที่เทเข้ามาในแบบหล่อจะมีอุณหภูมิสูง ซึ่งทรายที่เลือกมาใช้งานนั้นต้องมีคุณสมบัติทนความร้อนสูง เมื่อผสมกับตัวประสานต้องมีความโปร่งอากาศเพื่อให้แก๊สถ่ายโอนไปสู่ภายนอกได้สะดวก และมีการยุบตัวที่ดีเพื่อการนำชิ้นงานออกจากแบบหล่อ ส่วนเรซินที่นำมาผสมต้องมีคุณสมบัติในเรื่องของความแข็งแรง การเกิดแก๊สน้อย และการยุบตัวได้ดี ไส้แบบหล่อที่ทำจากทรายเคลือบเรซินเป็นที่ได้รับความนิยมในการใช้งาน เนื่องจากมีความแข็งแรง ราคาถูก และสามารถนำทรายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งทรายเคลือบเรซินนั้นถูกผลิตขึ้นตามความต้องการของลูกค้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซินจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ทางโรงงานต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรก ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่ผู้ผลิตจะต้องพัฒนาผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซินให้มีคุณภาพที่เหมาะสมและตรงตามความต้องการของลูกค้า อีกทั้งเพื่อเพิ่มศักยภาพในด้านการแข่งขันให้กับโรงงานกรณีศึกษาและมุ่งเน้นสู่ความเป็นผู้นำในด้านการผลิตทรายเคลือบเรซินเพื่อนำไปผลิตเป็นไส้แบบหล่อทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ

1.2 ข้อมูลทั่วไปและรายละเอียดโรงงานกรณีศึกษาเกี่ยวกับการผลิตไส้แบบหล่อ

โรงงานกรณีศึกษาดำเนินการผลิตทรายเคลือบเรซินเพื่อนำไปใช้สำหรับการทำไส้แบบหล่อให้กับบริษัทรถยนต์ บริษัทเครื่องใช้ไฟฟ้า รวมไปถึงบริษัทเกี่ยวกับเครื่องจักรอุตสาหกรรมเกษตร เป็นต้น โดยมีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันด้วยวัตถุดิบ 3 กระบวนการ ดังนี้

1. กระบวนการผลิตทรายหล่อนำกลับมาใช้ใหม่ (Reclaim Sand) คือ การนำทรายที่ใช้แล้วจากโรงหล่อหรือที่อื่นๆมาผ่านกระบวนการแยกสิ่งสกปรกเช่น เศษเหล็กที่ติดมาจากการหล่องานครั้งก่อนหน้าโดยใช้แม่เหล็กในการดูดออก จากนั้นนำทรายมาบดเพื่อทำให้ทรายที่เกาะกันเป็นก้อนเกิดการแตกตัว และนำไปเผาเพื่อให้ความร้อนจากนั้นรอให้ทรายเย็นตัวลงแล้ว จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการขัดเม็ดทราย และกระบวนการคัดแยกขนาดเม็ดทรายเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสม เมื่อผ่านกระบวนการครบถ้วนแล้วจึงนำไปเก็บที่ถังเก็บทรายเพื่อรอนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

2. กระบวนการผลิตทรายใหม่ (New Sand) คือทรายที่ยังไม่ถูกใช้งานหรือยังไม่ผ่านกระบวนการหล่อจะนำมาผ่านกระบวนการคัดแยกขนาดเม็ดทรายเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสม จากนั้นนำไปเก็บพักไว้ที่ถังสำหรับเก็บทรายใหม่ เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

3. กระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน (Resin Coated Sand) คือกระบวนการที่นำทรายหล่อนำกลับมาใช้ใหม่หรือทรายใหม่มาผ่านกระบวนการให้ความร้อน จากนั้นปล่อยทรายเข้าสู่เครื่องผสมแล้วทำการเติมฟีนอลิกเรซิน จากนั้นทำการเติมเฮกซามีนและน้ำ ต่อด้วยการเติมแคลเซียมสเตียเรท เมื่อมาถึงขั้นตอนนี้เราจะได้ทรายเคลือบเรซิน จากนั้นนำมาคัดแยกขนาดเม็ดทรายเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสม จากนั้นรอให้ทรายเย็นตัวลงเพื่อนำไปเก็บที่ถังเก็บทรายเคลือบเรซิน

จากกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินเพื่อนำไปทำไส้แบบหล่อข้างต้นจะเห็นได้ว่าวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่นำมาใช้ในการผสมสูตรคือทรายและเรซิน ซึ่งสูตรที่ใช้ในการผลิตนั้นมีหลากหลายสูตรเพื่อรองรับความต้องการของลูกที่สั่งผลิตไส้แบบหล่อ โดยไส้แบบหล่อนี้ยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ไส้แบบหล่อตัน และไส้แบบหล่อกลวง และทางโรงงานได้จัดตั้งโรงเก็บสินค้า เพื่อนำเข้าและส่งออกสินค้าของทางโรงงานเป็นสำคัญ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.3 สภาพปัญหาปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา

ปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษามีผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซินมากกว่า 70 ผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เพื่อรองรับความต้องการของบริษัทมากกว่า 30 แห่งทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยมียอดขายจากทุกผลิตภัณฑ์รวมกันมากกว่า 50,000 ตันต่อปี คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 6,000 ล้านบาท ซึ่งในอนาคตโรงงานยังมีการวางแผนที่จะเพิ่มผลิตภัณฑ์ให้ครอบคลุมกับความต้องการอีกมากในตลาดการค้าทรายเคลือบเรซิน รวมไปถึงการพัฒนาปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับบริษัทชั้นนำในต่างประเทศ

จากผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซินทั้งหมดของโรงงานกรณีศึกษา พบว่าวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตคือ ทรายและเรซินซึ่งคิดเป็นร้อยละ 99% ของวัตถุดิบการผสมทั้งหมดที่ประกอบไปด้วย ทราย

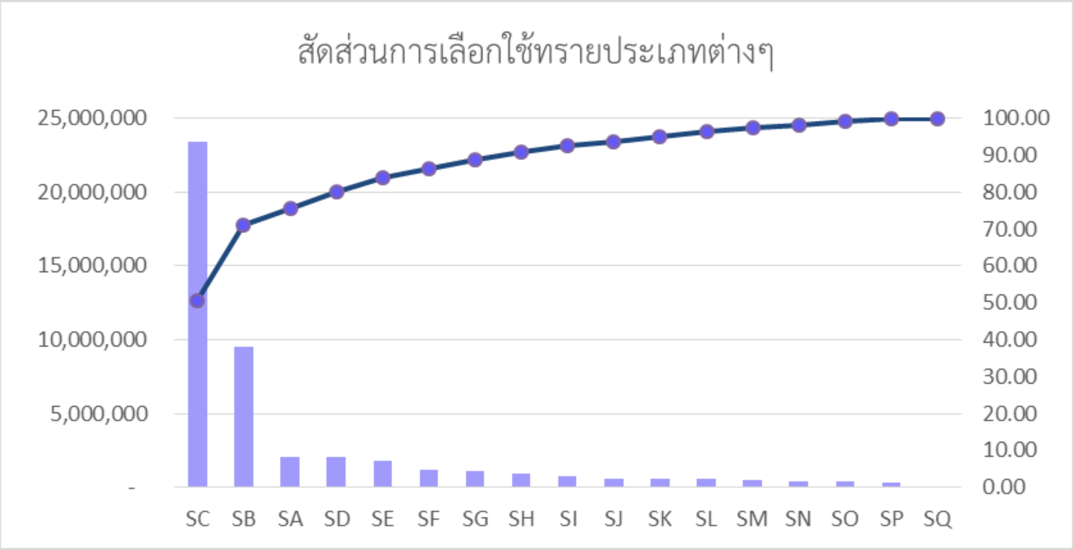
เรซิน เฮกซามีน และแคลเซียมสเตียเรท ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ซึ่งแสดงปริมาณการใช้วัตถุดิบทั้ง 4 ชนิดภายในปี 2559

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการใช้วัตถุดิบทั้ง 4 ชนิดภายในปี 2559

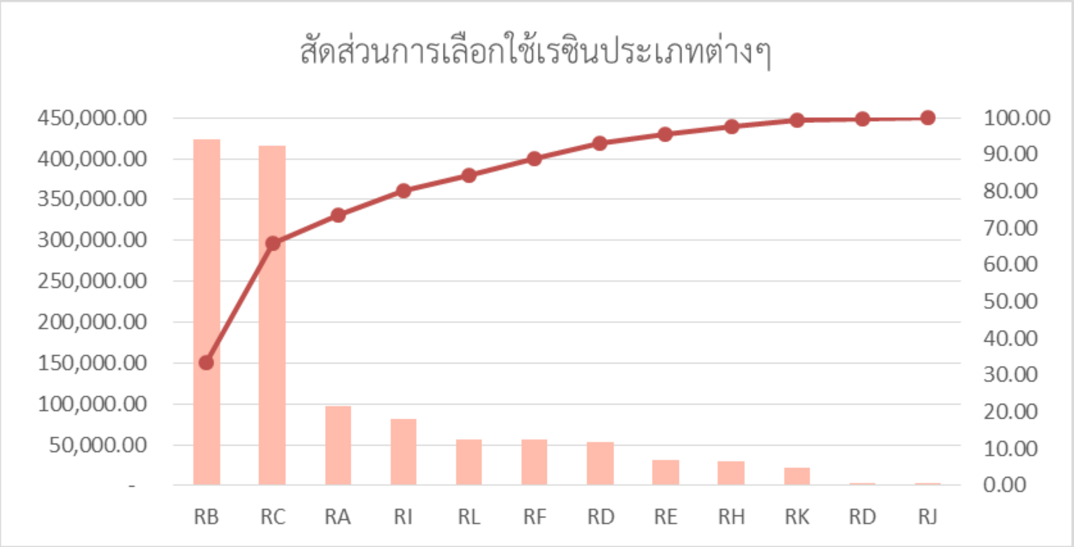
วัตถุดิบ	ปริมาณการใช้งาน (kg.)	เปอร์เซ็นต์การใช้งาน (%)
ทราย	59,638,786	97.42
เรซิน	1,271,691	2.08
เฮกซามีน	219,173	0.36
แคลเซียมสเตียเรท	91,119	0.15
รวม	61,220,769	100.00

จากตารางที่ 1.1 เป็นตารางที่แสดงปริมาณการใช้ ทราย เรซิน เฮกซามีน และแคลซียมสเตอเลท พบว่าทรายมีปริมาณการใช้งานสูงที่สุดถึงร้อยละ 97.42 ของทั้งหมด รองลงมาเป็นเรซินร้อยละ 2.08 เฮกซามีนร้อยละ 0.36 และแคลเซียมสเตียเรทร้อยละ 0.15 โดยทรายและเรซินที่นำมาใช้ในการผลิตทรายเคลือบเรซินประกอบไปด้วยทั้งหมด 14 ชนิด และเรซิน 9 ชนิด ซึ่งทรายและเรซินนั้นมีการใช้งานในปริมาณที่สูงและมีผลต่อค่าคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำข้อมูลการใช้งานทรายและเรซินของแต่ละชนิดในปี 2559 มาทำการคัดเลือกด้วยแผนภูมิพาเรโต ดังแสดงในรูปที่ 1.2 และ รูปที่ 1.3 โดยจะทำการคัดเลือกทรายและเรซินส่วนใหญ่ที่ถูกนำมาใช้สำหรับการผสมทรายเคลือบเรซินดังที่ปรากฏในแผนภูมิ เพื่อนำมาใช้สำหรับการพิจารณาในการแก้ปัญหาต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.2 สัดส่วนการเลือกใช้ทรายแต่ละประเภทสำหรับการผสมสูตรในการผลิต



รูปที่ 1.3 สัดส่วนการเลือกใช้เรซินแต่ละประเภทสำหรับการผสมสูตรในการผลิต

จากการพิจารณาแผนภูมิพาเรโตของสัดส่วนการเลือกใช้ทรายประเภทต่างๆ จากทั้งหมด 14 ชนิด เมื่อใช้กฎ 80/20 ของพาเรโตที่กล่าวว่าข้อมูลที่มีความสำคัญมากจะมีจำนวนน้อย และข้อมูลที่มีความสำคัญน้อยจะมีจำนวนมาก หรืออาจจะกล่าวได้ว่าปัญหาทั้งหมด 100% มีปัญหาจำนวน 80% ที่มีผลมาจากสาเหตุ 20% และปัญหาที่เหลือ 20% จะส่งผลมาจากสาเหตุ 80% ซึ่งจะพบว่าชนิดทรายที่ถูกใช้งานส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 80% มีทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ Sand C, Sand B, Sand A และ Sand D มีปริมาณการใช้งานรวมกันเป็น 79.96% ของปริมาณการใช้ทรายทั้งหมด แต่ข้อจำกัดสำหรับการผสมทรายในแต่ละผลิตภัณฑ์จะใช้อย่างมากที่สุด 3 ชนิด ซึ่งในการผสมนั้นทรายจะรวมกันเป็น 100% ซึ่ง Sand C และ Sand B จะถูกเลือกมาใช้สำหรับการผสมมากที่สุด และรองลงมาคือ Sand A และ Sand D แต่เนื่องจาก Sand A ถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ของบริษัทผู้วิจัยจึงทำการเลือกทรายประเภท Sand C, Sand B, และ Sand A มาทำการศึกษาต่อ จากนั้นทำการพิจารณาแผนภูมิพาเรโตของสัดส่วนการเลือกใช้เรซินประเภทต่างๆ ตามกฎ 80/20 ของพาเรโตเช่นกัน พบว่ามีเรซินจำนวน 4 ชนิดที่ถูกใช้มากเป็น 80% ของปริมาณการใช้งานเรซินทั้งหมด ซึ่งประกอบไปด้วย Resin B, Resin C, Resin A และ Resin I ซึ่งมีปริมาณการใช้งานรวมกันเป็น 80.11% จากข้อจำกัดของการผสมเรซินสำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์ พบว่าในการผสมเรซินนั้นจะผสมเรซินเข้าไปอย่างมากที่สุดได้ 3 ชนิดเช่นเดียวกับทราย แต่ทั้งนี้การเติมเรซินนั้นจะถูกเติมเป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ตามที่โรงงานกรณีศึกษาได้กำหนดไว้และทำการเติมในปริมาณที่ขึ้นตามน้ำหนักของทรายที่ถูกใช้ในสูตรนั้นๆ ตัวอย่างเช่นถ้าทรายในสูตรหนึ่งมีจำนวนการใช้งานที่ 600 กิโลกรัม หากโรงงานต้องการเติมเรซินที่ 2.5% ดังนั้นจะต้องใช้ปริมาณเรซินทั้งหมด 15 กิโลกรัม ซึ่งผู้วิจัยจะทำการเลือก Resin ชนิด B, C

และ A ตามลำดับ และยังถือว่าเป็นเรซินที่ถูกใช้ในผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ของบริษัท มาทำการศึกษาเพื่อหาสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินที่ให้ค่าคุณสมบัติที่ตรงตามความต้องการ

อีกทั้งยังพบว่าทรายและเรซินที่ทำการเลือกมาศึกษาต่อนั้นยังเป็นทรายและเรซินที่ถูกใช้เป็นส่วนผสมหลักของผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซินภายในบริษัทกว่า 45 สูตรการผสมจากทั้งหมด 70 สูตรการผสม คิดเป็น 64.29% ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งถือเป็นผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่สร้างกำไรให้กับบริษัทเป็นอย่างมากอีกด้วย

ค่าคุณสมบัติของทรายเคลือบเรซินที่ทางบริษัทให้ความสำคัญในการพิจารณาก่อนการส่งมอบมีด้วยกันทั้งหมด 6 ประเภท ดังนี้

1. ความทนแรงดัดโค้ง (Bending Strength)

การทดสอบความทนแรงดัดโค้งดัดโค้ง (Bending Test) เป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการแปรรูปของวัสดุหลังจากการทำการดัดโค้ง โดยทำการตรวจสอบเพื่อดูว่าผิวงานด้านนอกของชิ้นทดสอบตรงบริเวณที่ทำทดสอบเกิดรอยแตกหักขึ้นหรือไม่ อีกทั้งเพื่อเป็นการป้องกันไส้แบบเกิดการแตกขณะทำการหล่อหรือการแตกขณะทำไส้แบบ ซึ่งหลักการในการทดสอบการดัดโค้งสำหรับทรายเคลือบเรซิน คือการนำทรายเคลือบเรซินที่ได้มาเทใส่ในแบบสำหรับการทดสอบ ทำการปาดหน้าทรายในเรียบเสมอกัน จากนั้นทำการเผาทรายเป็นเวลา 60 วินาที ที่อุณหภูมิประมาณ 260℃ เมื่อครบเวลานำชิ้นงานออกจากเครื่องแล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงจึงนำไปชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกค่า จากนั้นทำการทดสอบความทนแรงดัดโค้ง ซึ่งมี 2 ประเภท คือการตรวจสอบแบบปกติ โดยการทำให้ชิ้นงานหักเพื่อหาค่าทีละชิ้น และใช้ค่ากลาง อีกประเภทคือ การตรวจสอบในขณะที่ชิ้นงานร้อนโดยจะทำการตรวจสอบชิ้นงานเพียงครั้งเดียวแล้วบันทึกค่า

2. ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา (Loss of Ignition: LOI)

ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา เป็นการทดสอบเพื่อดูปริมาณมลทินที่เจือปนอยู่ในผลิตภัณฑ์หลังจากผ่านกระบวนการเผาเพื่อเอามลทินออก โดยการนำเอาผลิตภัณฑ์มาชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ไปเผาที่อุณหภูมิสูง หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เหลือจากการเผาไปทำการชั่งน้ำหนักหลังการเผา จากนั้นนำค่าที่ได้มาเข้าสูตรการคำนวณ

$$\%LOI = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนการเผา} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังการเผา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนการเผา}} \times 100$$

ซึ่งจากการทดสอบ LOI นั้นจะบอกได้เพียงว่าผลิตภัณฑ์มีมลทินเจือปนอยู่เท่าไร แต่การทดสอบไม่สามารถบอกได้ว่ามลทินที่เจือปนนั้นเป็นสารชนิดใด โดยขั้นตอนในการทดสอบ %LOI มีดังนี้

- นำทรายเคลือบเรซินจำนวน 10 กรัมที่ต้องการทดสอบมาใส่ถ้วยครูซิเบิล (Crucible) ที่ผ่านการเผาที่ 1000℃ เป็นเวลา 30 นาที โดยถ้วยครูซิเบิลนั้นต้องผ่านการชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งดิจิตอล โดยใช้ปุ่ม Tare บนเครื่องปรับให้น้ำหนักเริ่มต้นของเครื่องชั่งเป็นศูนย์โดยหักลบน้ำหนักของภาชนะบรรจุ
- นำทรายพร้อมถ้วยครูซิเบิลไปชั่งน้ำหนักก่อนทำการทดสอบ โดยจะวัดที่ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- นำทรายไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1000℃ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- นำทรายที่ผ่านการเผาแล้วมาชั่งน้ำหนักหลังการเผา
- นำค่าที่ได้มาคำนวณตามสูตร

3. การทดสอบแก๊ส (Gas Test)

การทดสอบแก๊สเป็นการทดสอบเพื่อใช้ในการหาปริมาณแก๊สสะสมที่อยู่ภายในผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซิน โดยมีหน่วยเป็น ml/g แต่ในขณะทำการวัดจะมีหน่วยเป็น L ดังนั้นเมื่อได้ค่าที่วัดมาแล้วต้องทำการเปลี่ยนหน่วยให้อยู่ในหน่วย ml/g โดยใช้สูตรการแปลงหน่วยดังนี้

$$\text{ค่าแก๊ส } \left(\frac{ml}{g}\right) = \frac{\text{ค่าแก๊ส ณ ช่วงเวลานั้นๆ } (L) \times 1000}{\text{น้ำหนักของชิ้นงาน } (g)}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยในการทดสอบทำการเปิดเครื่องทดสอบโดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ประมาณ 1000℃ จากนั้นทำการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการวัดอุณหภูมิ โดยโรงงานกรณีศึกษาจะใช้ เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) ยึดติดกับเครื่องวัดแก๊ส และทำการปรับตั้งเครื่องวัดแก๊สให้อยู่ที่ 0 จากนั้นนำชิ้นงานที่ต้องการทดสอบทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าก่อนการทดสอบ เมื่อชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้วให้น้ำชิ้นงานใส่ลงในกระบอกแก้ว จากนั้นให้ความร้อนโดยใช้เตาเผา และทำการจับเวลาโดยจะทำการบันทึกค่าทุก 30 วินาที เป็นเวลา 7 นาที เมื่อบันทึกค่าเสร็จเรียบร้อยทำการแปลงหน่วยจาก L ให้เป็น ml/g ถือเป็นการสิ้นสุดการทดสอบ

4. การขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion)

การขยายตัวทางความร้อนเป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแล้วส่งผลให้ปริมาตรของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยการขยายตัวทางความร้อนนั้นเกิดจากการสั่นของโมเลกุลเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงทำให้โมเลกุลมีพลังงานสูงขึ้น ซึ่งทางโรงงานทำการทดสอบเพื่อหาค่าการขยายตัวของทรายเคลือบเรซินเมื่อนำไปทำเป็นชิ้นงานไส้แบบ โดยในการทดสอบการขยายตัวทางความร้อนจะนำทรายเคลือบเรซินมาจำนวน 300 กรัม เทลงในกระบอกฉีดทราย จากนั้นทำการติดตั้งกระบอกฉีดทรายเข้ากับเครื่องสำหรับการทดสอบการขยายตัวทางความร้อน และทำการฉีดทรายเข้าในแบบสำหรับการทดสอบแล้วทำการอบเป็นเวลา 150 วินาที เมื่อครบกำหนดเวลาให้นำชิ้นงานออกมาวางไว้เพื่อให้ชิ้นงานเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการเปิดเครื่องทดสอบการขยายตัวทางความร้อนโดยตั้งอุณหภูมิสำหรับงานตระกูลเหล็กที่ 1030℃ หรืองานตระกูลอะลูมิเนียมที่ 700℃ จากนั้นคีบชิ้นงานวางลงบนถาดแก้วภายในเครื่องทดสอบ โดยจะทำการตั้งค่าและบันทึกผลการทดสอบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งการขยายตัวทางความร้อนมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

5. ค่าความโก่งงอของชิ้นงาน (Bend)

ค่าความโก่งงอของชิ้นงานเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบหาค่าความโก่งงอของชิ้นงานทรายเคลือบเรซินในการเซตตัว โดยการทดสอบจะทำการตั้งค่าเครื่องทดสอบดังนี้หากต้องการตรวจสอบค่าความโก่งงอของชิ้นงานที่ 250℃ × 500g จะต้องตั้งอุณหภูมิที่ 260℃ ใช้ตุ้มถ่วงน้ำหนัก 500g จากนั้นจะทำการเททรายเคลือบเรซินลงในแบบพิมพ์ ทำการปาดทราบให้เรียบเสมอกัน และทำการให้ความร้อนเป็นเวลาประมาณ 45 วินาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากแบบพิมพ์ โดยคีบชิ้นงานไปวางบนแท่นของเครื่องวัดค่าความโก่งงอของชิ้นงานโดยทันที ภายในเวลา 10 วินาทีหลังจากนำชิ้นงานออกจากแบบพิมพ์ ซึ่งเครื่องวัดจะทำงานอัตโนมัติ จากนั้นทำการอ่านค่าโดยมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

6. อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว (Melting Point)

อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าอุณหภูมิในขณะที่ทรายเคลือบเรซินเริ่มจับตัว โดยการทดสอบจะทำการเปิดเครื่องทดสอบไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 95-115℃ (โดยขึ้นอยู่กับทรายเคลือบเรซินแต่ละชนิด) จากนั้นจะทำการตักทรายใส่ภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากับภาชนะ (Hot Bar) ภายในเครื่องทดสอบ จากนั้นนำทรายมาเทใส่ลงในภาชนะของเครื่องทดสอบ โดยให้ทรายมีความหนาใกล้เคียงกันตลอดแนวและให้ความร้อนเป็นเวลา 2 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาจะมีปล่อยลมเพื่อเป่าไปมาบนภาชนะของเครื่องเมื่อลมหยุด ทำการอ่านค่าบริเวณ

แรกที่ทรายเริ่มเกาะติดกับภาชนะของเครื่องทดสอบ โดยอ่านค่าจากเทอร์โมมิเตอร์ และทำการบันทึกค่า โดยถ้าหากตั้งอุณหภูมิของเครื่องตามข้างต้นแล้วไม่เกิดทรายเกาะติดที่ภาชนะของเครื่องตรวจสอบให้ทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 5℃ แต่ถ้าหากทรายเกาะติดภาชนะจนไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าทรายเริ่มเกาะติดที่อุณหภูมิเท่าไร ให้ทำการลดอุณหภูมิลงทีละ 5℃

โดยค่าคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซินที่ลูกค้าต้องการส่วนใหญ่แล้ว จะมีแนวโน้มความต้องการค่าคุณสมบัติต่างๆอยู่ในระดับต่างๆ ซึ่งถือเป็นเป้าหมายสำคัญที่ทางโรงงานกรณีศึกษาต้องการให้ผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซินที่ได้ออกมามีค่าตรงตามความต้องการของลูกค้าดังแสดงในตารางที่ 1.2 เหตุผลประกอบว่าต้องการค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงนั้นๆเพราะเหตุใด

ตารางที่ 1.2 ช่วงความต้องการของค่าคุณสมบัติต่างๆในผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซิน

คุณสมบัติ	**หน่วย**	**ความต้องการ**	**เหตุผล**
ความทนแรงดัดโค้ง	kgf/cm^2	สูง	เพื่อป้องกันไส้แบบแตกขณะกระบวนการหล่อหรือระหว่างการทำไส้แบบ
ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา	%	ต่ำ	เป็นค่าที่ใช้ในการทวนสอบน้ำหนักของวัตถุดิบที่เติมลงไปในกระบวนการ
อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	℃	สูง	เพื่อทำให้ไส้แบบมีการอัดตัวที่แน่นมากขึ้น
แก๊ส	ml/g	ต่ำ	เพื่อป้องกันการเกิดแก๊สของงานหล่อ เนื่องจากการเกิดแก๊สมากจะส่งผลทำให้เกิดปัญหารูพรุนบนชิ้นงาน
การขยายตัวทางความร้อน	%	ต่ำ	เพื่อป้องกันปัญหา Vening (มีลักษณะคล้ายครีบที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหล่อ) ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานโก่งส่งผลให้ขนาดของชิ้นงานหลังกระบวนการหล่อมีการเปลี่ยนแปลงไป
ความโก่งงอของชิ้นงาน	mm	ต่ำ	เป็นค่าที่ใช้ในการบ่งบอกถึงค่าความโก่งงอของชิ้นงาน ซึ่งค่าดังกล่าวจะบ่งบอกถึงการเซตตัวของผนังและเวลาในการทำไส้แบบ ถ้าชิ้นงานโก่งน้อยนั่นแสดงว่าการเซตตัวของผนังนั้นเกิดขึ้นเร็วส่งผลให้การทำไส้แบบก็จะใช้เวลาน้อยลงด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ซึ่งจากการผลิตทรายเคลือบเรซินในปัจจุบันเมื่อนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์มาทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิด ก่อนทำการส่งมอบให้ลูกค้าพบว่าค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดของแต่ละผลิตภัณฑ์มีค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 1.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1.3 ค่าเฉลี่ยของค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดและต้นทุนวัตถุดิบจากผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 45 ชนิด (จำนวน 600 กิโลกรัม/รอบการผลิต)

No.	Formula	Sand (kg)			Resin (kg)				Output						Total Cost (Bath)
		Sand A	Sand B	Sand C	%Resin	Resin A	Resin B	Resin C	Bending Strength	Bend	LOI	Thermal expansion	Melting Point	Gas	
1	MATFB520LFN	0	0	240	12.6	0	10.08	2.52	51.3	0.238	2.60	0.840	100.4	9.955	3,467
2	MATFB515NOS	42	78	480	9.9	0	2.97	5.94	43.2	0.277	2.14	1.059	104.3	8.197	2,553
3	MATFB522LOB	0	0	360	13.8	0	11.04	0	65.1	0.220	2.88	0.771	99.1	10.471	3,339
4	RATFB525HBI	0	0	360	15.6	0	3.12	0	58.7	0.105	3.18	0.726	107.9	11.175	3,375
5	MATFB521LOU	180	0	300	12.6	0	3.78	6.3	75.8	0.164	2.55	0.243	104.1	9.36	4,327
6	MATFB523PLY	0	330	240	13.8	0	2.76	0	48.3	0.224	2.61	1.194	105.7	9.473	2,606
7	MSKMT525NOP	0	60	480	15	0	6	3.75	72.3	0.154	3.02	0.851	100.2	10.983	3,205
8	MSKM520LOC	0	60	450	12	0	7.2	3.6	56.7	0.247	2.49	0.952	101.4	9.434	2,616
9	MSKM520NOK	0	0	540	12	0	0	8.4	59.5	0.215	2.51	0.961	106.9	10.51	2,584
10	MSKM522LOY	0	0	300	13.5	3.375	6.75	3.375	60.8	0.216	3.05	0.739	100.1	9.65	3,255
11	MNIC517NLR	90	0	420	10.2	2.04	4.08	3.06	36.9	0.345	2.10	1.149	103.5	8.496	3,027
12	RNIC515LON	60	0	540	9	0	4.5	4.5	31.8	1.085	1.84	1.220	102.2	7.731	2,828
13	RS523LOC(NIC)	0	0	540	12.9	0	7.74	0	63.1	0.310	2.62	0.887	98.5	10.43	2,626
14	MNIC527HOK	0	0	600	16.2	0	0	0	58.2	0.089	3.18	0.930	112.2	10.757	2,909
15	MATFB520LFN(NIC)	0	0	240	12.6	0	10.08	2.52	51.2	0.309	2.59	0.856	101.4	9.856	3,467

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 1.4 ค่าเฉลี่ยของค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดและต้นทุนวัตถุดิบจากผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 45 ชนิด (จำนวน 600 กิโลกรัม/รอบการผลิต) (ต่อ)

No.	Formula	Sand (kg)			Resin (kg)				Output						Total Cost (Bath)
		Sand A	Sand B	Sand C	%Resin	Resin A	Resin B	Resin C	Bending Strength	Bend	LOI	Thermal expansion	Melting Point	Gas	
16	MATFB523NOL(NIC)	0	270	330	13.2	0	2.64	10.56	66.2	0.105	2.77	1.142	105.0	10.87	2,405
17	RSNF518NOJ	120	0	480	9.9	4.455	4.455	0	44.1	0.193	2.12	1.097	102.8	8.61	2,964
18	RSNF523NOY	0	0	180	14.1	3.525	3.525	7.05	67.2	0.167	2.87	0.788	103.5	11.21	3,493
19	RSNF523LOD	0	0	330	13.8	1.38	11.04	1.38	68.8	0.218	2.87	0.772	101.6	11.033	3,266
20	RATFB525HBI(SNF)	0	0	300	15.6	0	3.12	0	56.6	0.106	3.12	0.701	107.9	9.86	3,319
21	MSNF526HOV	180	0	240	15	4.5	0	0	76.4	0.123	2.94	1.110	103.5	10.129	3,361
22	MATFB521MOZ(SNF)	0	240	300	12.6	0	2.52	3.78	52.9	0.138	2.38	1.082	106.3	8.53	2,397
23	NSNF515NOP(KKF5)	0	600	0	9	0	0	9	38.9	0.305	1.92	1.363	107.3	8.24	1,759
24	RM617NOA (KPC)	0	90	420	9.6	0	0	9.6	43.6	0.270	2.06	1.181	107.5	9.72	2,344
25	RM617NOA	0	0	540	10.5	0	0	9.45	45.2	0.245	2.22	1.131	107.3	8.422	2,509
26	RMNT518LFB	0	0	600	10.8	0	9.72	1.08	43.4	0.367	2.29	0.997	100.7	9.083	2,638
27	MMNT520LFG	0	0	480	12	0	10.8	1.2	44.7	0.390	2.57	0.893	100.0	9.23	2,936
28	MKTH517CFO	0	60	540	10.2	3.06	0	5.1	33.8	0.385	2.18	1.130	106.6	8.379	2,426
29	MKTH524HOZ	0	240	360	14.7	5.88	0	8.82	70.1	0.154	2.93	1.031	104.6	10.59	2,529
30	MKTH520LFI	0	300	300	12	0	7.2	4.8	52.0	0.288	2.49	1.033	103.2	9.93	2,360

ตารางที่ 1.5 ค่าเฉลี่ยของค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดและต้นทุนวัตถุดิบจากผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 45 ชนิด (จำนวน 600 กิโลกรัม/รอบการผลิต) (ต่อ)

No.	Formula	Sand (kg)			Resin (kg)				Output						Total Cost (Bath)
		Sand A	Sand B	Sand C	%Resin	Resin A	Resin B	Resin C	Bending Strength	Bend	LOI	Thermal expansion	Melting Point	Gas	
31	NKKF513NOC	0	510	0	7.8	2.34	0	5.46	29.3	0.243	1.74	1.396	107.4	8.95	1,902
32	NKKF513NOC(Wisansap)	0	510	0	8.4	2.52	0	5.88	34.6	0.240	1.83	1.383	107.4	9.16	1,839
33	NAIF615NOB	0	390	0	9	0	0	9	32.8	0.346	1.99	1.318	107.1	9.82	1,612
34	MAIF624HOC	0	150	360	14.7	0	0	0	53.8	0.116	2.99	0.979	111.9	10.3	2,651
35	NTFC513NOA(TFC)	0	600	0	8.1	1.62	3.645	2.835	25.6	0.616	1.78	1.347	101.6	9.73	1,762
36	MBOS524HLA	0	0	450	13.8	2.76	0	0	51.7	0.131	2.94	0.979	109.0	10.26	2,503
37	RMSC517NOI	0	0	600	10.2	0	4.08	6.12	41.2	0.417	2.16	1.040	104.8	9.68	2,525
38	RYS522NOC	0	0	540	13.2	0	0	10.56	61.9	0.226	2.70	0.996	105.7	11.44	2,657
39	RYS525NOA	0	0	540	15	0	0	12	70.7	0.210	2.97	0.876	104.2	11.39	2,602
40	MYMH522NOR(2.2%R)	0	0	360	13.2	0	3.96	6.6	85.3	0.153	2.72	1.002	104.1	10.288	2,831
41	MYMH525SOI	0	0	240	15	0	0	3	109.0	0.261	3.03	0.288	102.9	10.479	8,768
42	MICP525AFO	0	0	120	15	0	6	3	63.5	0.383	3.09	0.245	103.6	11.495	3,920
43	NSNF515NOP(TYMW)	0	600	0	9	0	0	9	38.4	0.369	1.93	1.330	107.2	9.28	1,759
44	NSNF518NOE(RCR)	0	600	0	11.1	0	4.44	0	55.0	0.246	2.37	1.207	102.0	10.52	2,172
45	MSPM615NOB	0	270	0	9.6	1.92	0	4.32	40.7	0.327	2.20	1.134	108.5	9.69	2,160

ปัจจุบันปัญหาสำคัญในการผสมสูตรสำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซินชนิดต่างๆ เพื่อจำหน่ายให้กับลูกค้าได้ถูกผสมขึ้นจากประสบการณ์ของพนักงานผู้เชี่ยวชาญทำให้ไม่มีมาตรฐานสำหรับการเลือกสัดส่วนการผลิตทรายเคลือบเรซินภายในโรงงาน อีกทั้งยังมีการลองผิดลองถูกเพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติบางประการของทรายเคลือบเรซินให้ได้คุณสมบัติตามความเหมาะสม และเพื่อให้ได้ทรายเคลือบเรซินตรงตามความต้องการลูกค้า อีกทั้งที่ผ่านมาทางโรงงานไม่มีการบันทึกสูตรการผลิตในแต่ละครั้งเพื่อที่จะได้นำมาใช้ในการผลิตครั้งถัดไป กล่าวคือหากมีคำสั่งการผลิตครั้งต่อไปเข้ามา ทางโรงงานจะทำการผสมสารตามประสบการณ์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งทำให้เกิดความล่าช้าและต้องสูญเสียเวลารวมถึงค่าใช้จ่ายในการผลิตสำหรับการลองผิดลองถูกอีกด้วย ในบางครั้งหากลูกค้าต้องการคุณสมบัติบางข้อที่มีความแตกต่างจากเดิมที่ทางโรงงานเคยผลิตมา ทางโรงงานก็จะต้องมาทำทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติให้ตรงตามความต้องการของลูกค้าก่อนที่จะทำการผลิตจริงซึ่งในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลาอย่างมากในการปฏิบัติงาน อีกทั้งพนักงานแต่ละคนยังมีการเลือกใช้ทรายและเรซินที่ต่างชนิดกันแต่ให้ค่าคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันจึงส่งผลให้ต้นทุนในเรื่องของวัตถุดิบที่ใช้มีความแตกต่างกัน อีกประเด็นที่สำคัญคือการผสมสูตรทรายเคลือบเรซินนั้นมีความซับซ้อนอย่างมากในเรื่องความสัมพันธ์ของชนิดของทราย ชนิดของเรซิน และสัดส่วนของเรซินที่ใช้สำหรับการผสม ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ได้ส่งผลกับค่าคุณสมบัติของทรายเคลือบเรซิน (ความทนแรงดัดโค้ง ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา แก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ค่าความโก่งของชิ้นงาน และอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว) โดยสามารถแยกอธิบายความสัมพันธ์ของส่วนผสมต่อค่าคุณสมบัติออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. ความสัมพันธ์ของทรายต่อค่าคุณสมบัติ โดยทรายแต่ละชนิดนั้นจะมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไป เช่น ปริมาณซิลิก้า (Sio_2) ลักษณะความกลม ปริมาณดินที่ปนเปื้อน (Clay) หรือขนาดของเม็ดทรายและลักษณะการกระจายตัวของเม็ด เป็นต้น จากลักษณะเฉพาะตัวที่กล่าวมาข้างต้นนี้เอง ที่ทำให้ทรายแต่ละชนิดให้คุณสมบัติที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เวลาที่จะเลือกทรายเพื่อใช้ในการผสมสูตรนั้นต้องคำนึงถึงลักษณะเฉพาะของทรายที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติที่ลูกค้าต้องการก่อนนำมาใช้งานจริง เช่นหากลูกค้าต้องการทรายเคลือบเรซินที่มีความทนแรงดัดโค้ง เราควรเลือกทรายที่มีลักษณะเม็ดกลม มีปริมาณดินเหนียวปนอยู่น้อย และมีปริมาณซิลิกาสูง หรือถ้าหากต้องการเปอร์เซ็นต์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ เราควรเลือกทรายที่มีปริมาณซิลิกาที่ต่ำ เป็นต้น ทั้งนี้ควรพิจารณาลักษณะทางเคมีอื่นๆควบคู่กันไป โดยยอมลดค่าคุณสมบัติอื่นลง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ออกมาตรงตามความต้องการ

2. ความสัมพันธ์ของเรซินต่อค่าคุณสมบัติ ในการผลิตทรายเคลือบเรซินนั้น เรซินถือเป็นอีกส่วนผสมที่มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเรซินนั้นมีผลต่อค่าคุณสมบัติหลายชนิดมากเช่น ความทนแรงดัดโค้ง การขยายตัวทางความร้อน แก๊ส เป็นต้น กล่าวคือเมื่อเราทำการ

เติมปริมาณเรซินเข้าไปในสูตรการผสมในปริมาณที่มากจะส่งผลให้การขยายตัวมีค่าต่ำทำให้ทรายเคลือบเรซินมีการทนความร้อนที่สูงขึ้นเมื่อนำไปขึ้นรูปที่ต้องผ่านการเทน้ำโลหะที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ไม่แตกง่าย แต่ถ้าปริมาณเรซินมากจะส่งผลให้ค่าแรงดัดโค้งและแก๊สจะมีค่าสูงขึ้นด้วย การที่แก๊สสูงขึ้นนั้นถือว่าเป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ต่อชิ้นงาน เนื่องจากเมื่อแก๊สสูงขึ้นนั้นจะทำให้เกิดรูพรุนภายในผลิตภัณฑ์ทำให้ชิ้นงานไม่เกิดความเรียบ ในทางกลับกันหากเราเติมปริมาณเรซินลงไปในสูตรการผสมน้อยค่าคุณสมบัติก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามสูตรการผสมนั้นๆ

ด้วยความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างทรายกับเรซินนี้เอง จึงเป็นปัญหาสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องทำการตัดสินใจในการเลือกสัดส่วนการผสมระหว่างทรายกับเรซินและปริมาณเปอร์เซ็นต์เรซินที่ต้องใช้สำหรับการผสม เนื่องจากค่าคุณสมบัติบางประการมีความขัดแย้งกันหากเราเติมทรายหรือเรซินในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้คุณสมบัติบางประการของทรายเคลือบเรซินเป็นที่พึงพอใจต่อลูกค้าและโรงงานแต่ในขณะเดียวกันก็จะส่งทำให้ค่าคุณสมบัติบางประการมีค่าด้อยลงด้วยเช่นกัน ซึ่งการตัดสินใจในการผลิตแต่ละครั้งนั้นก็จะขึ้นอยู่กับความต้องการของลูกค้า ซึ่งก็มีความต้องการที่หลากหลายยกตัวอย่างดังตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.6 การเปรียบเทียบความต้องการในผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซินของทั้ง 2 บริษัท

บริษัท	คุณสมบัติที่ต้องการ	ช่วงการใช้งาน		
		สูง	ต่ำ	ค่าเป้าหมาย
A	ความทนแรงดัดโค้ง	✓		
	ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา		✓	
	แก๊ส		✓	
	การขยายตัวทางความร้อน		✓	
	ค่าความโก่งงอของชิ้นงาน	✓		
	อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว			✓
B	ความทนแรงดัดโค้ง	✓		
	ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา		✓	
	แก๊ส		✓	
	การขยายตัวทางความร้อน	✓		
	ค่าความโก่งงอของชิ้นงาน	✓		
	อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว			✓

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 1.4 จะเห็นได้ว่าคำสั่งการผลิตแต่ละบริษัทที่เข้าจะมีความต้องการที่แตกต่างกันสำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซิน ซึ่งจะเห็นได้ว่าบริษัท A และบริษัท B จะมีความต้องการต่างกันใน

เรื่องการขยายตัวทางความร้อนและค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว (ต้องการที่อุณหภูมิต่างกัน) ดังนั้นจึงต้องพิจารณาลำดับความสำคัญว่าต้องการค่าคุณสมบัติใดเป็นสำคัญแล้วสามารถยอมลดความสำคัญของค่าคุณสมบัติใดลงได้ เพื่อลดปัญหาในเรื่องของความขัดแย้งกันของค่าคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับประเภทของทราย ประเภทเรซิน และปริมาณของเรซินที่ใช้สำหรับการผสม ซึ่งค่าคุณสมบัติต่างๆนั้นได้ส่งผลต่อเรื่องคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นสำหรับจัดจำหน่ายทั้งภายในประเทศและต่างประเทศเป็นอย่างมาก ซึ่งทางโรงงานจึงหันมาให้ความสนใจกับการพัฒนาสูตรการผสมเพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติตามที่ต้องการ และเพื่อให้ได้มาตรฐานสำหรับการจัดจำหน่าย สิ่งสำคัญอีกประการที่เราต้องคำนึงถึงก็คือต้นทุนวัตถุดิบ เนื่องจากทรายและเรซินมีราคาที่สูง หากเราคำนวณเฉพาะปริมาณทรายชนิด SA, SB และ SC กับเรซินชนิด RA, RB และ RC ที่เรานำมาทำการวิจัย พบว่าในปี 2559 ที่ผ่านมาทางโรงงานกรณีศึกษาได้ใช้ทรายในการผสมสูตรทรายเคลือบเรซินกว่า 45 ผลิตภัณฑ์รวมเป็นปริมาณกว่า 35,019 ตัน คิดเป็นมูลค่ากว่า 104 ล้านบาท และปริมาณเรซินใช้ไปทั้งสิ้น 937 ตัน คิดเป็นมูลค่ากว่า 64 ล้านบาท จากการคำนวณมูลค่าวัตถุดิบเบื้องต้นนั้นเราคิดมาจากราคาทรายและเรซินที่แตกต่างกัน กล่าวคือทรายและเรซินบางตัวมีราคาต่ำ ทรายและเรซินบางตัวมีราคาสูง ดังนั้นเวลาที่ทางโรงงานกรณีศึกษาต้องการผลิตทรายเคลือบเรซินให้ได้ตามความต้องการนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงราคาต้นทุนที่ใช้ในการผลิต เนื่องจากในบางกรณีผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซินที่มาจากผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันแต่ให้ค่าคุณสมบัติตรงตามที่ลูกค้าและโรงงานกรณีศึกษาตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ ดังนั้นทางโรงงานกรณีศึกษาจึงต้องพิจารณาต้นทุนสำหรับการผลิตควบคู่ไปพร้อมๆกัน ซึ่งในปัจจุบันทางโรงงานกรณีศึกษาได้ทำการบันทึกข้อมูลการใช้งานสัดส่วนทรายและเรซินในแต่ละสูตรไว้อย่างคร่าวๆ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลการใช้งานทรายและเรซินที่ใช้ผลิตอยู่ในปัจจุบันมาทำการประเมินต้นทุนวัตถุดิบ (ในกรณีนี้คิดเฉพาะราคาทรายและเรซินเท่านั้น) สำหรับการผลิตในแต่ละสูตรที่ทางโรงงานกรณีศึกษาได้ทำการผลิตเพื่อส่งขายในลูกค้า ซึ่งราคาสำหรับการผลิตในแต่ละสูตรนั้นจะแสดงในตารางที่ 1.3

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญของการหาสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมจากทรายและเรซินที่ได้รับความนิยมในการใช้งานสูงสุดในปีที่ผ่านมา ซึ่งในการผสมสูตรทรายเคลือบเรซินส่วนใหญ่นั้น มักจะถูกผสมจากทราย 3 ชนิดเป็นส่วนใหญ่ซึ่งรวมกันจะอยู่ที่ปริมาณ 600 กิโลกรัมต่อแบตช์ จากนั้นจะเติมเรซินแต่ละชนิดในอัตราส่วนที่ขึ้นกับปริมาณของปริมาณทรายที่ใช้ โดยส่วนมากจะเติมเรซินอยู่ที่ร้อยละ 1.5-3 ของปริมาณทรายที่ใช้ไป ยกตัวอย่างเช่นหากต้องการผสมทรายเคลือบเรซินที่มีค่าความทนแรงดัดโค้งสูงทางผู้วิจัยจะเลือกทรายที่ตรงกับคุณสมบัติดังกล่าวมาใช้งาน จากนั้นทำการเติมเรซินที่ร้อยละ 2 ของปริมาณทรายเพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติตามที่ทางโรงงานต้องการ เป็นต้น ซึ่งจากขั้นตอนนี้ในปัจจุบันทางโรงงานยังต้องทำการทดลองผิดลองถูกจึงทำให้สูญเสียเวลาไปมากกว่าจะได้เริ่มทำผลิตจริง อีกทั้งยังสูญเสียต้นทุนในการทดลองอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งภายในประเทศนั้นมี

โรงงานที่ทำเกี่ยวกับการผลิตทรายเคลือบเรซินมากถึง 6 บริษัท และต้องทำการแข่งขันกับบริษัทคู่แข่งที่สำคัญอีกแห่งในประเทศญี่ปุ่น ดังนั้นทางโรงงานกรณีศึกษาจึงต้องการเพิ่มศักยภาพการผลิตให้อยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ และก้าวสู่การเป็นผู้นำในด้านการผลิตและส่งออกทรายเคลือบเรซินทั้งในและต่างประเทศต่อไป

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อหาสัดส่วนการผสมของทรายเคลือบเรซินที่มีค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงความต้องการของลูกค้าและลดต้นทุนวัตถุดิบของทรายและเรซิน

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเพื่อหาสูตรการผลิตทรายเคลือบเรซินที่เหมาะสม โดยใช้ทราย 3 ชนิด คือ ทรายชนิด A, ทรายชนิด B และทรายชนิด C นำมาผสมกับเรซิน 3 ชนิด คือ เรซินชนิด A, เรซินชนิด B และเรซินชนิด C

2. งานวิจัยนี้จะครอบคลุมคุณสมบัติทั้งหมด 7 ชนิดดังนี้ ความทนแรงดัดโค้ง ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา แก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ค่าความโก่งของชิ้นงาน อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว และต้นทุนวัตถุดิบของทรายและเรซิน

3. งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาในเรื่องของต้นทุน คือต้นทุนวัตถุดิบของทรายประเภท Sand A, Sand B, และ Sand C และเรซินประเภท Resin A, Resin B, และ Resin C

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาสภาพปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา เพื่อให้เข้าใจกระบวนการในการผลิตทรายเคลือบเรซิน สภาพปัญหาที่เกิดขึ้น โดยทำการสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญและจากการบันทึกข้อมูลของทางโรงงาน พร้อมทั้งศึกษาลำดับขั้นตอนในการทำงานในด้านเทคนิคการเลือกทรายและเรซินมาทำการผสมสูตรทรายเคลือบเรซิน

2. กำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตของการศึกษา ซึ่งทำโดยการปรึกษากับผู้เชี่ยวชาญภายในโรงงานเพื่อให้บอกเล่าถึงปัญหาสำคัญที่ทางโรงงานสนใจที่จะทำการศึกษา

3. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองที่สอดคล้องกับสภาพปัญหาที่จะทำการศึกษาเพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหา

4. รวบรวมข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัย เช่น ปริมาณการใช้ทรายและเรซิน สัดส่วนการเลือกใช้ทรายและเรซินในจากแต่ละผลิตภัณฑ์ ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเลือกใช้ทรายและเรซินที่นำมาผลิตในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น

5. ออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) โดยมีตัวแปรตอบสนองที่สนใจศึกษาจำนวน 7 ชนิดได้แก่ ความทนแรงดัดโค้ง ปริมาณการสูญเสียหลังการเผาแก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ค่าความโก่งของชิ้นงาน และอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว และต้นทุนวัตถุดิบในส่วนของทรายกับเรซิน โดยต้องการให้ได้สัดส่วนการผสมที่ต้องการและต้นทุนต่ำสุด โดยมีปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 5 ตัว ประกอบไปด้วย Sand A, Sand B, Resin A, Resin B และ %Resin ซึ่งจากการออกแบบการทดลองสามารถกำหนดขอบเขตการผสมทรายและเรซินให้อยู่ในระดับที่กำหนดตามตารางที่ 1.5

ตารางที่ 1.7 กำหนดระดับของการทดลองสำหรับปัจจัยแต่ละชนิด

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย				
		-2	-1	0	1	2
Sand A	SA	0	7.5	15	22.5	30
Sand B	SB	0	21.25	42.5	63.75	85
Resin A	RA	0	12.5	25	37.5	50
Resin B	RB	0	18.75	37.5	56.25	75
%Resin	%R	1	1.5	2	2.5	3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6. นำผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผลโดยอาศัยโปรแกรม Minitab เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของอัตราส่วนผสมระหว่างทรายกับเรซินจากจุดบนกราฟพื้นผิว (Response Surface Methodology; RSM) โดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจโดยรวม (Desirability Function) ที่ทำให้ผลลัพธ์รวมของผลตอบหลายผลตอบ (Multiple Response Optimization) ดีที่สุด พร้อมทั้งคำนวณหาสมการถดถอยแบบพหุคูณซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติแต่ละคุณสมบัติกับปัจจัยที่มีนัยสำคัญและหาค่าที่เหมาะสม

7. ติดตามผลการทดลอง ผู้วิจัยจะนำข้อมูลการทดสอบค่าคุณสมบัติของทางโรงงานที่ได้จากการผสมสูตรก่อนการปรับปรุงมาใส่ในโปรแกรมเพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการผสมสูตรหลังการปรับปรุง โดยโปรแกรมจะบอกถึงชนิดทรายและเรซินที่ใช้ สัดส่วนของทรายและเรซิน เปอร์เซ็นต์เรซินที่ใช้สำหรับผสมสูตร รวมถึงหาค่าต่ำสุดสำหรับค่าใช้จ่าย โดยจะนำสูตรการผสมหลังการปรับปรุงที่ค่าที่เหมาะสมซึ่งได้จากการพยากรณ์มาทำการเก็บผลในกระบวนการผลิตจริงเพื่อนำไปตรวจสอบค่า

คุณสมบัติ จากนั้นนำค่าคุณสมบัติไปเปรียบเทียบกับสูตรก่อนการปรับปรุงว่าได้ค่าคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันหรือไม่ และทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่ำสุดสำหรับวัตถุดิบที่ใช้สำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซินระหว่างผลิตภัณฑ์ก่อนการปรับปรุงกับผลิตภัณฑ์หลังการปรับปรุงเพื่อเป็นตัวชี้วัดก่อนการนำไปใช้งานจริง ซึ่งตัวชี้วัดดังกล่าวจะแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่

1) การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิด ก่อนการทดลองและหลังการทดลองโดยใช้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเพื่อใช้สำหรับตรวจสอบว่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ เมื่อนำมาทำการทดลองแล้วจะมีความแม่นยำ หรือตรงกับค่าพยากรณ์หรือไม่ ซึ่งเปรียบเสมือนการตรวจสอบความแม่นยำของการพยากรณ์ด้วย โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$\left|\frac{\text{ค่าคุณสมบัติก่อนการทดลอง} - \text{ค่าคุณสมบัติหลังการทดลอง}}{\text{ค่าคุณสมบัติก่อนการทดลอง}}\right|$$

2) การเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดหลังจากการทำการทดลองเพื่อยืนยัน ค่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดลองแต่ละชนิดควรจะอยู่ในช่วงการยอมรับของโรงงานกรณีศึกษา

3) การเปรียบเทียบในเรื่องของต้นทุนวัตถุดิบก่อนการทดลองและหลังการทดลองเพื่อดูว่าลดลงไปกี่เปอร์เซ็นต์ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\left|\frac{\text{ต้นทุนก่อนการทดลอง} - \text{ต้นทุนหลังการทดลอง}}{\text{ต้นทุนก่อนการทดลอง}}\right|$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง พร้อมเสนอข้อเสนอแนะ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สมการที่ใช้สำหรับการทำนายสัดส่วนเพื่อการผสมทรายเคลือบเรซินโดยสามารถระบุได้ว่าต้องใช้ทรายและเรซินประเภทใดบ้างในปริมาณที่เท่าใด โดยต้องมีความสอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า

2. สูตรการผสมทรายและเรซินหลังการปรับปรุงที่ทำให้ได้ค่าคุณสมบัติตรงตามที่ลูกค้าต้องการมีต้นทุนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรการผสมทรายก่อนการปรับปรุง

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถลดต้นทุนวัตถุดิบสำหรับการผสมสูตรทรายเคลือบเรซินลงได้

2. สามารถลดระยะเวลาในการหาสัดส่วนการผสมและใช้เป็นมาตรฐานให้กับพนักงานภายในโรงงานให้ง่ายต่อการนำมาใช้งาน

3. สามารถเป็นแนวทางในการศึกษาหาอัตราส่วนการผสมของทรายและเรซินชนิดอื่นๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.9 ตารางการดำเนินงาน

ขั้นตอน	ม.ค.				ก.พ.				มี.ค.				เม.ย.				พ.ค.				มิ.ย.				ก.ค.				ส.ค.				ก.ย.				ต.ค.				พ.ย.				ธ.ค.			
1. ศึกษาสภาพปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา	■	■	■	■	■	■	■	■																																								
2. กำหนดหัวข้อปัญหา และขอบเขตงานวิจัย							■	■	■	■																																						
3. ศึกษางานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																														
4. รวบรวมข้อมูลต่างๆของโรงงานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย											■	■	■	■	■	■																																
5. ออกแบบการทดลองและเก็บผลการทดลอง																	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■																						
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง																											■	■	■	■	■	■																
7. ติดตามผลการทดลอง																																	■	■	■	■												
8. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ																																					■	■	■	■								
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์																									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

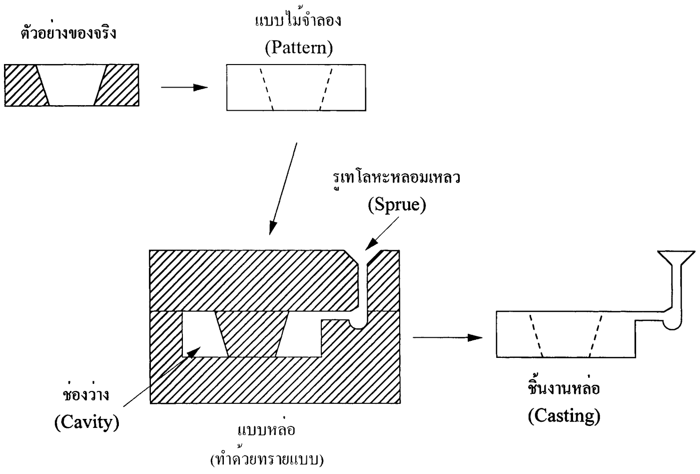
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเรื่องงานหล่อซึ่งประกอบไปด้วย ประเภทของงานหล่อ ประเภทของไส้แบบหล่อรวมถึงขั้นตอนการผลิตแบบหล่อและไส้แบบหล่อ รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทรายเคลือบเรซินเป็นวัตถุดิบหลัก ตัวอย่างเช่น แบบหล่อและไส้แบบหล่อสำหรับงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ งานผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักร เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงข้อจำกัดบางประการของงานหล่อ ในส่วนถัดไปผู้วิจัยจะทำการศึกษาประเภทของทรายและเรซิน ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักสำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซิน โดยทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของทรายและเรซินที่เหมาะสำหรับการนำผลิตทรายเคลือบเรซินสำหรับการทำไส้แบบ โดยในส่วนของการทดลองนั้นผู้วิจัยได้อาศัยการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีการประยุกต์ใช้สถิติเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสม โดยเลือกการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) เพื่อใช้สำหรับการเก็บข้อมูลและนำมาทำการวิเคราะห์แก้ไขปัญหาเรื่องการหาสัดส่วนสำหรับการผสมสูตรผลิตภัณฑ์สำหรับโรงงานกรณีศึกษา ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแก้ปัญหาให้โรงงานกรณีศึกษา รวมถึงการศึกษาเพื่อหาข้อจำกัดในด้านต่างๆสำหรับงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อนำมาปรับใช้งานให้เกิดความสอดคล้องและเกิดประสิทธิภาพสูงสุดกับงานวิจัยฉบับนี้

2.1 งานหล่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.1 การหล่อ (Casting) [1]

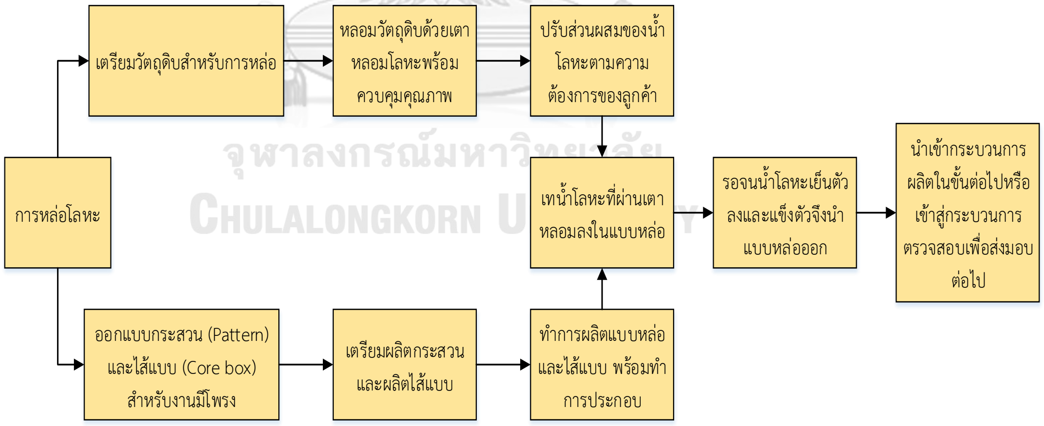
การหล่อเป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปแบบหนึ่งที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เป็นการนำวัตถุดิบประเภทโลหะมาทำการหลอมในอยู่ในสถานะของเหลวโดยใช้อุณหภูมิที่สูง จากนั้นนำน้ำโลหะมาทำการเทหรือฉีดเข้าสู่แบบหล่อ (Mold) หรือแม่พิมพ์ (Die) จากนั้นทำการทิ้งชิ้นงานไว้เพื่อให้เกิดการแข็งตัวของชิ้นงานแล้วนำชิ้นงานที่ได้ไปผ่านกระบวนการทางความร้อนจึงจะได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์และนำไปใช้งานได้ ดังแสดงในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 การทำแบบหล่อโลหะ [1]

2.1.2 ขั้นตอนการหล่อโลหะ

ขั้นตอนการหล่อโลหะโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบหรือน้ำโลหะสำหรับงานหล่อ และขั้นตอนในการออกแบบแบบหล่อและการออกแบบไส้หล่อ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

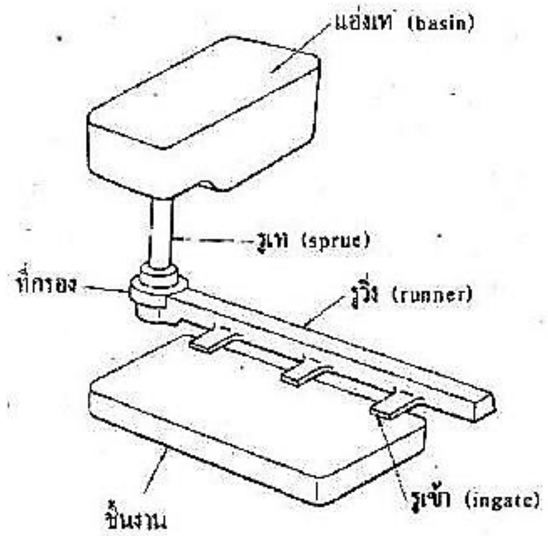


รูปที่ 2.2 ขั้นตอนในการทำงานในกระบวนการหล่อโลหะ [2]

2.1.3 ระบบจ่ายน้ำโลหะ (Gating System) [3]

ระบบจ่ายน้ำโลหะคือทางที่น้ำโลหะสำหรับงานหล่อเข้าสู่แบบหล่อตามที่ได้ทำการออกแบบ ไว้ ซึ่งในแบบหล่อแต่ละชิ้นจะมีระบบจ่ายน้ำโลหะที่แตกต่างกันไปตามชิ้นงานที่ทำ

การออกแบบไว้ โดยภายในระบบจ่ายน้ำโลหะนั้นจะมีลักษณะที่เหมือนกัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบระบบจ่ายน้ำโลหะภายในแบบหล่อ [3]

2.1.4 แบบหล่อ (Mold) [4]

แบบหล่อเปรียบเสมือนการสร้างภาชนะขึ้นมาสำหรับรองรับน้ำโลหะเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานตามที่ต้องการ ซึ่งการเตรียมแบบหล่อโลหะนั้นเป็นขั้นตอนที่เรานำแม่พิมพ์มาสร้างแบบหล่อโลหะ โดยวัสดุที่นำมาใช้ทำแบบหล่อมีหลายประเภทแต่ทุกประเภทนั้นต้องเป็นวัสดุที่ทนความร้อนและเทคนิคในการทำแบบหล่อมีหลากหลาย ดังนั้นจึงสามารถแบ่งกระบวนการในการทำแบบหล่อจากประเภทวัสดุที่ใช้ในการผลิตแบบหล่อได้ดังนี้

1) หล่อโดยแบบหล่อทราย (Sand Casting)
2) หล่อโดยแบบหล่อขี้ผึ้ง (Investment Casting or Lost Wax Casting)
3) หล่อโดยแบบหล่อถาวร (Permanent Mold Casting)
4) หล่อโดยแบบหล่อปูนพลาสเตอร์ (Plaster Mold Casting)
5) หล่อโดยแบบวิธีการแกว่งชิ้นงานหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Casting)
6) หล่อโดยแบบหล่อทรายที่เติมเรซิน (Shell Mold Casting)
7) หล่อโดยแบบหล่อถาวรร่วมกับการอัดน้ำโลหะ (Die Casting)
8) อื่นๆ

จากการจำแนกข้างต้นจะพบว่าเราสามารถแบ่งแบบหล่อออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ แบบหล่อทราย (Sand System) และแบบหล่อที่ไม่ใช้ทราย (Non-Sand System) แต่ใน

ปัจจุบันแบบหล่อทรายเป็นที่นิยมอย่างมากเนื่องจากมีต้นทุนวัสดุดิบที่ใช้ในการผลิตที่ถูกกว่าแบบหล่อที่ไม่ใช้ทราย สามารถรองรับน้ำหนักชิ้นงานที่มากๆได้ ทรายที่ใช้ในการผลิตสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีกครั้ง ซึ่งแบบหล่อทรายที่ได้รับความนิยมสามารถแบ่งได้ดังนี้ [5]

- การหล่อด้วยแบบหล่อทรายชื้น หรือทรายดำ (Green Sand Molding) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด ประกอบไปด้วยทราย เบนโทไนต์ น้ำ และสารปรุงแต่งอื่นๆเพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติของทรายให้ดีขึ้น สามารถทำได้โดยการกระทุ้งทรายบนกระสวนด้วยการเททรายลงบนแผ่นไม้ หรือใช้ทรายเป็นแกนกลางก็ได้ การหล่อแบบนี้ไม่เหมาะกับงานที่ต้องใช้ความละเอียดสูง

- การหล่อด้วยแบบหล่อทรายผิวแบบทรายแห้ง (Skin-Dried Sand Mold) เป็นวิธีที่ใช้ทรายเขียวชื้น (Green Sand) ทำแบบหล่อแล้วเคลือบผิวด้วยการพ่นน้ำยาที่ทำให้แข็งเมื่อถูกความร้อน น้ำยาพ่นที่ใช้ได้จากน้ำมันลินสิด Molasses Water, Gelatinzed Starch และสารละลายของเหลวที่มีลักษณะคล้ายกัน โดยวิธีการหล่อนี้จะช่วยลดความชื้นของพื้นผิวและวัสดุอื่นๆที่เกิดขึ้นจากแม่พิมพ์ ซึ่งจะมีราคาสูงและต้องรอให้แม่พิมพ์แห้งและเย็นลงก่อนที่จะทำการประกอบ

- การหล่อด้วยแบบหล่อทรายผสมโซเดียมซิลิเกต (CO_2 Molding) กระบวนการนี้ต้องทำให้ทรายสะอาดผสมกับเกลือโซเดียมและผสมให้ทั่วๆกระสวน เมื่อใช้ความดันอัดอากาศ CO_2 เข้าไปในแบบทรายแล้วจะทำให้ทรายที่ผสมนั้นแข็งตัวขึ้นวิธีนี้จะทำให้ได้โลหะหล่อเรียบขึ้นดีมาก ต่อมาวิธีนี้ได้ถูกนำมาใช้ทำไส้แบบด้วย

- การหล่อแบบ Lost Foam หรือ Full Mold (Expanded Polystyrene) เป็นการนำโฟมมาใช้ทำเป็นแบบ แล้วนำไปฝังลงในแบบทราย

- การหล่อด้วยแบบหล่อทรายผสมเรซิน (Resin-Bonded Sand Molding) เป็นแบบหล่อสังเคราะห์ที่มีทรายเป็นองค์ประกอบหลัก มีตัวประสานเป็นฟูรานเรซิ่น (Furan Resin) หรือฟีนอลิกเรซิ่น (Phenolic Resin) และต้องมีสารเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาให้แบบหล่อเกิดการแข็งตัวตามระยะเวลาที่เหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในการทำแบบหล่อในปัจจุบัน

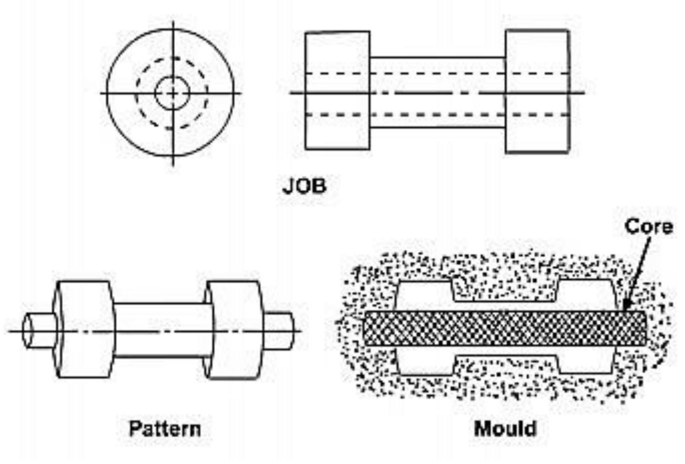
แบบหล่อที่ใช้ทรายที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่าแบบหล่อที่ใช้ทรายเป็นส่วนผสมนั้นมีมากมายหลายวิธี และยังเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตแบบหล่อและไส้หล่ออย่างแพร่หลาย เนื่องจากทรายนั้นมีราคาค่อนข้างถูกและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งในปัจจุบันยังได้มีการเติมตัวประสานบางชนิดเพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามความ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

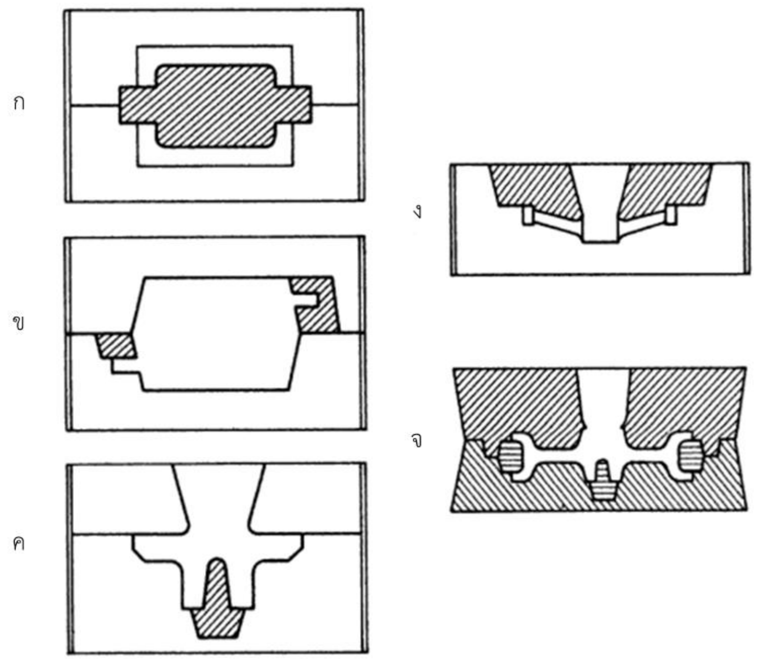
ต้องการของลูกค้า ซึ่งทางโรงงานกรณีศึกษานั้นได้เลือกเพิ่มตัวประสานประเภทฟีโรลิคเรซิน เพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของทรายเคลือบเรซินให้มีคุณสมบัติที่เด่นขึ้น ซึ่งกระบวนการในการผลิตผลิตภัณฑ์ทรายเคลือบเรซินจะเรียกว่า การหล่อด้วยแบบทรายผสมเรซิน (Resin-Bonded Sand, Resin Coated Sand) โดยทรายส่วนใหญ่ที่ทางโรงงานกรณีศึกษาเลือกมาใช้นั้นมีมากมายหลายชนิดทั้งนี้เพื่อรองรับตามความต้องการของลูกค้าโดยทรายที่นำมาทำแบบหล่อนั้นต้องมีคุณสมบัติพิเศษบางประการซึ่งกล่าวต่อไปภายหลัง ในส่วนเรซินทางโรงงานเลือกใช้ฟีนอลิกเรซินซึ่งตัวเรซินนี้ยังต้องมีคุณสมบัติบางประการเพื่อให้เหมาะสมงานหล่อด้วยเช่นกัน

2.1.5 ไส้แบบหล่อหรือคอร์ (Core) [3]

โดยทั่วไปชิ้นงานหล่อส่วนใหญ่มักจะมีช่องว่างในชิ้นงาน หรือชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นท่อกลวงอยู่ด้านในชิ้นงาน ซึ่งในการทำแบบหล่อนั้นสามารถเพิ่มช่องว่าง ชิ้นงานที่มีลักษณะกลวงดังกล่าวโดยใช้ไส้แบบหล่อ (Core) ในการวางตำแหน่งของไส้แบบนี้ต้องอาศัย Core Print เพื่อเป็นฐานรองรับให้กับไส้แบบในตัวของแบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยส่วนใหญ่ไส้แบบนั้นทำจากทรายหรือโลหะขึ้นอยู่กับกระบวนการหล่อ ซึ่งไส้แบบที่ทำจากทรายนั้นต้องใส่ตัวประสาน (Binder) ใน Core Box ที่มีช่องว่างภายในเป็นรูปทรงตามที่ต้องการ ซึ่งการใช้งานไส้แบบหล่อนั้นมีได้หลายวิธีขึ้นกับความต้องการตามลักษณะชิ้นงาน ซึ่งเริ่มตั้งแต่แบบที่ใช้ไส้แบบหล่อทำให้เกิดรูตรงกลาง จนถึงแบบการใช้ไส้แบบหล่อเพื่อให้เกิดช่องว่างในลักษณะต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ภาพตัวอย่างชิ้นงานที่ต้องการไส้แบบ [1]



รูปที่ 2.5 หน้าที่ของทรายคอร์ที่จะทำให้เกิดรูหรือช่องในชิ้นงานหล่อ [5]

หน้าที่ของทรายคอร์ที่จะทำให้เกิดรูหรือช่องว่างในชิ้นงานหล่อมีลักษณะดังนี้ (ก) โพรงในรูปกลวง (ข) ลักษณะรูปร่างรอยแหว่งขอบแนว (ค) รอยเว้าโค้งที่ก้น (ง) ฝาครอบ (จ) คลุมทั้งหมดของแบบหล่อ ในปัจจุบันไส้แบบที่โรงงานใช้กันทั่วไปมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ ไส้แบบทรายชื้น (Green Sand Cores) ไส้แบบทรายแห้ง (Dry Sand Cores) ไส้แบบเปลือกบาง (Shell Cores) ไส้แบบหีบร้อน (Hot-Box Cores) ไส้แบบซินโฟล (Synflo Cores) ไส้แบบซิลิเกต (CO_2 Cores) และไส้แบบฟูราน (Furan Cores) เป็นต้น ซึ่งไส้แบบที่นิยมใช้กันมากจะมี 2 แบบคือ

1. ไส้แบบทรายชื้น (Green Sand Core)

เป็นไส้แบบที่ทำมากจากทรายชื้น (Green Sand) ซึ่งถือเป็นองค์ประกอบหนึ่งสำหรับแบบหล่อ (Mold) ที่ทำขึ้นมาพร้อมกันได้ เพราะทำจากทรายชนิดเดียวกัน หรือนำมาประกอบกันภายหลังก่อนที่จะเทน้ำโลหะก็ได้เช่นกัน

2. ไส้แบบทรายแห้ง (Dry Sand Core)

ทำจากทรายซิลิก้า (SiO_2 Sand) ซึ่งต้องปราศจากสิ่งสกปรกหรือขจัดสิ่งสกปรกออกให้หมดเสียก่อน จากนั้นทำการผสมกับตัวประสาน (Binder) และน้ำ (Water) และทำการผสมให้เข้ากัน ในส่วนของตัวประสานจะเพิ่มความแข็งแรงในขณะที่ชื้น (Green) หรือขณะแห้ง (Dry) ซึ่งอาจจะต้องมีการเติมเบนโทไนท์ลงไปอีกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงขณะชื้น (Green

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Strength) โดยตัวประสานที่ใช้กันทั่วไปคือ ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ น้ำมันลินซีด และ Core Oil เป็นต้น

โดยคุณสมบัติที่สำคัญทั่วไปของไส้แบบจะประกอบไปด้วย [5]

1. ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สสูง
2. ความชื้น (Green Strength)สูงเมื่อเข้าเตาอบ
3. มีความแห้ง (Dry Strength)สูงเพื่อคงรูปร่างในขณะที่ทำการอบ
4. มี Baked Strength สูงเพื่อคงรูปร่างหลังการอบ
5. ผิวไส้แบบมีความเรียบ
6. ทำลายง่ายเมื่อชิ้นงานแห้งแล้ว

2.1.6 ส่วนประกอบของไส้แบบ [5]

ส่วนประกอบสำหรับการทำไส้แบบ โดยทั่วไปจะประกอบด้วยกัน 3 ชนิดดังนี้

1). ทราย (Sand) ซึ่งทรายที่ใช้ในการทำไส้แบบนั้นควรมีปริมาณดินเหนียวน้อยที่สุด ขนาดเม็ดทรายจะโตกว่าทรายแบบหล่อ เพื่อให้มีฝุ่นละออง (Particulate Matter) สูง

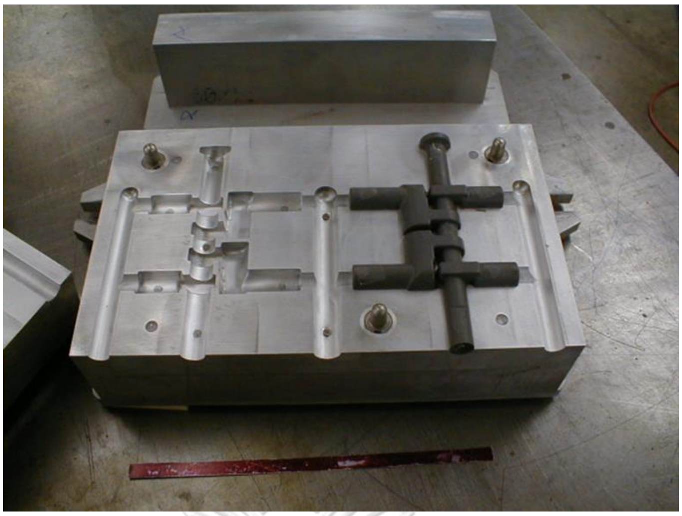
2). ตัวประสาน (Binder) ในงานทำแบบหล่อหรือไส้แบบนั้นตัวประสานถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญเพื่อช่วยในการเกาะยึดเม็ดทรายในแต่ละเม็ดให้เกาะแน่นรวมตัวกันเพื่อให้เป็นรูปร่างตามที่ต้องการ เช่น น้ำแก้ว ยางสังเคราะห์ ซีเมนต์ ปูนพลาสเตอร์ น้ำมันต่างๆ น้ำอ้อย แป้งมัน และเรซิน เป็นต้น

3). น้ำ (Water) ถือเป็นตัวประสานด้วยเช่นกัน แต่ที่นำออกมาอธิบายให้ชัดเจนเนื่องจากว่าน้ำนั้นเป็นตัวประสานราคาถูก หาได้ง่าย มีผลกับไส้แบบมากที่สุด อีกทั้งยังเป็นหัวใจสำคัญในกระบวนการทำไส้แบบอีกด้วย ซึ่งเราไม่สามารถมองข้ามไปได้

2.1.7 หีบคอร์ (Core Boxes) [6]

ในการทำคอร์นั้นจะมีอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งคือหีบที่ทำจากไม้หรือโลหะ เจาะให้เกิดช่องว่างตามลักษณะรูปร่างของคอร์ที่ทำการออกแบบไว้ ซึ่งเทคนิคในการทำหีบคอร์มีหลายแบบ ขึ้นอยู่กับรูปร่างและความชำนาญของคนทำหีบคอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.6 หลังจากชิ้นงานเย็นตัวแล้วก็จะทำการทำลายไส้แบบและนำไปเข้าเตาอบต่อไป โดยทั่วไปแล้วกล่องไส้แบบประกอบไปด้วยทั้งหมด 7 แบบ

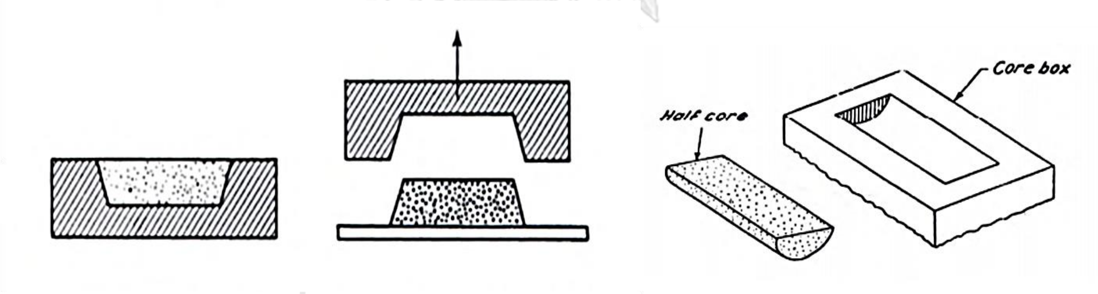
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.6 ภาพตัวอย่างหีบคอร์ (Core Box) [2]

กล่องไส้แบบสามารถจำแนกได้เป็น 7 ชนิดดังนี้

a. Half Core Box มีลักษณะเป็นทรงกระบอก มีอยู่ชิ้นเดียวไม่มีฝาปิดหรือตัวประกบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



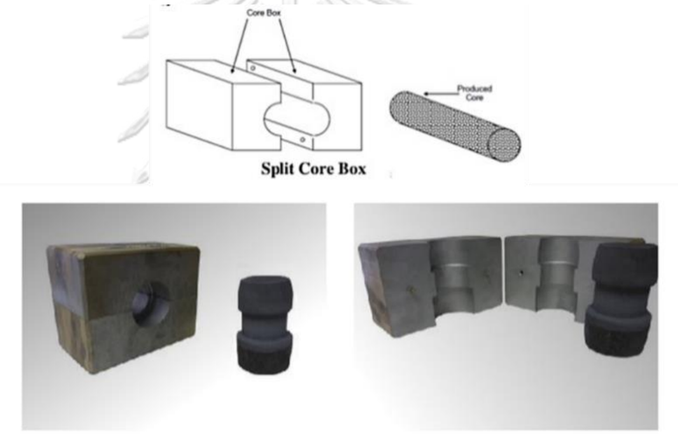
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.7 ภาพตัวอย่าง Half Core Box [5]

b. Slab หรือ Dump Core Box จะมีชิ้นเดียวแบบชนิดแรก ไม่มีฝาปิด เมื่อใส่ทรายลงไปในกล่องไส้แบบ จะต้องทำการกระทุ้งให้ได้ระดับขอบบนของกล่องไส้แบบ แล้วเกลี่ยทรายส่วนเกินให้เรียบเสมอกัน แล้วน้ำแผ่นรองมาประกบด้านบนอีกที จากนั้นทำการพลิกกล้องไส้แบบคว่ำลง ส่วนใหญ่จะทำในรูปแบบสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หรืออื่นๆตามแต่ลักษณะงานที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 2.8

รูปที่ 2.8 ภาพตัวอย่าง Dump Core Box [2]

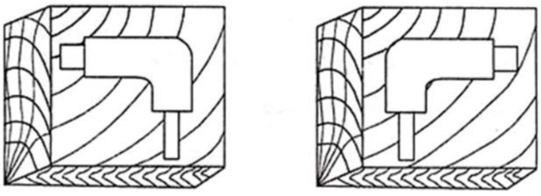
c. Split Core Box เป็นกล้องไส้แบบที่มี 2 ซีกมีฝาปิดเปิดอยู่ด้านใน และต้อง C-Clamp ในการยึดจับหรือใช้สลัก (Dowel) ประกบกันก็ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ภาพตัวอย่าง Split Core Box [5]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

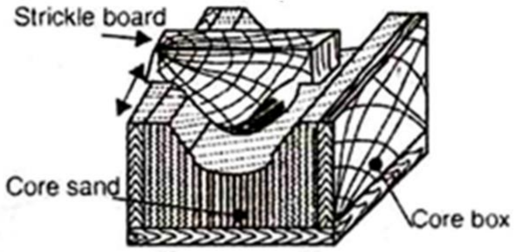
d. Left and Right Hand Box เป็นกล่องไส้แบบที่เหมาะสำหรับงานที่ผลิตท่องอแบบต่างๆ (Pipe Bends) มี 2 ชิ้นนำมาประกบกันทีหลัง ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ภาพตัวอย่าง Left and Right Hand Box [3]

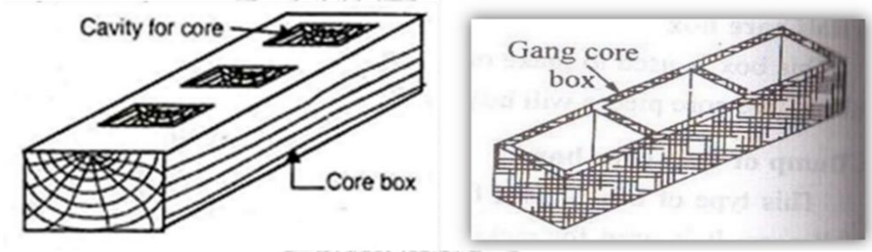
e. Strickle Core Box กล่องไส้แบบลักษณะนี้ส่วนใหญ่ทำจากไม้ มีส่วนด้านล่างเป็นกล่องไส้แบบ เปรียบเสมือนเป็น Die และมี Strickle Board เป็นฝาด้านบนคล้ายๆ Punch

จากนั้นจะประกบเข้าหากัน และอาจจะพลิกกล่องไส้แบบกลับด้านอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ภาพตัวอย่าง Strickle Core Box [6]

f. Gang Core Box เป็นกล่องไส้แบบที่มีลักษณะสามารถผลิตไส้แบบได้ครั้งละหลายชิ้นดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ภาพตัวอย่าง Gang Core Box [5]

g. Loose Piece Core Box เป็นกล่องไส้แบบที่มีลักษณะเป็นซีกเดียว (Half Core Box) แต่มี Loose Piece ที่ผลิตจากไม้ จากนั้นนำไปใส่ในตำแหน่งที่ทำเว้นว่างไว้ เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 2.13

Chulalongkorn University

รูปที่ 2.13 ภาพตัวอย่าง Loose Piece Core Box [1]

2.2 ทรายหล่อ

2.2.1 คุณสมบัติของทรายหล่อ (Molding Sand Properties) [5]

ทรายสำหรับทำแบบที่ใช้ในโรงงานหล่อหลอมนั้นมีหลายประเภท ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของตัวประสาน และลักษณะของโลหะที่จะนำมาเทลงในแบบหล่อ รวมถึงกรรมวิธีของการผลิตแบบหล่อ ซึ่งทรายที่ใช้ในงานหล่อนั้นไม่ว่าจะเป็นทรายประเภทใดจำเป็นที่จะต้องมีคุณสมบัติโดยพื้นฐานดังนี้

- ความโปร่งแสง (Permeability) ทรายที่นำมาใช้งานนั้นจะต้องยอมให้แก๊สหรือไอน้ำที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะหลอมเหลวสัมผัสกับแบบหล่อทรายมีทางซึมออกไปได้สะดวก เนื่องจากหากแก๊สที่เกิดขึ้นไม่สามารถซึมผ่านออกมาได้จะทำให้เกิดความดันและกลับเข้าไปแทรกตัวเนื้อโลหะได้ ซึ่งถ้าหากเกิดแก๊สในขณะที่ยังไม่แข็งตัว จะส่งผลให้ชิ้นงานหล่อนั้นเกิดรูพรุนบริเวณผิวชิ้นงาน
- ความแข็งแรงในสภาพมีความชื้น (Green Strength) ทรายแบบหล่อที่ดีนั้นจะต้องมีความแข็งแรงคงทนในสภาพที่ยังไม่แห้ง และจะต้องแข็งแรงพอที่จะรองรับน้ำหนักตัวเองได้ในขณะที่ถอดแบบไม้ออกแล้ว และสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายโดยที่ชิ้นงานไม่ชำรุดเสียหายหรือบิดเบี้ยวจนส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปทรง
- ความแข็งแรงในสภาพแห้ง (Dry Strength) เป็นคุณสมบัติสำหรับทรายแบบหล่อที่ต้องมีความแข็งแรงคงทนในขณะที่แห้ง เมื่อทำการย่าง (Baking) เพื่อไล่ความชื้น ซึ่งความสามารถนี้เพื่อที่จะรับแรงที่เกิดจากการเทน้ำโลหะลงไปในแบบหล่อซึ่งต้องรับทั้งน้ำหนักและการเซาะ (Erosion) ซึ่งเกิดจากการไหลผ่านของน้ำโลหะ โดยแบบหล่อจะต้องไม่เกิดการบิดเบี้ยวเสียรูปทรง (Deformation) ความแข็งแรงในสภาพแห้งนี้กำหนดอุณหภูมิของทรายไว้ไม่เกิน 120°C
- ความแข็งแรงในสภาพร้อน (Hot Strength) เมื่อทรายแบบหล่อที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 120°C ความแข็งแรงในช่วงนี้มีความสำคัญเช่นกัน เนื่องจากทรายแบบหล่ออาจจะมีการขยายตัวของเม็ดทรายและตัวประสานอาจจะอ่อนตัวลง เป็นสาเหตุให้แบบหล่อเกิดการเปลี่ยนรูปทรงในขณะที่ชิ้นงานยังไม่เกิดการแข็งตัว ทรายแบบหล่อที่ดีจะต้องมีความแข็งแรงรับน้ำหนักของโลหะอยู่ได้จนถึงจุดที่ชิ้นงานเกิดการแข็งตัวจนหมดแล้ว

- คุณสมบัติยุบตัวเอง (Collapsibility) คุณสมบัตินี้ถือเป็นสิ่งสำคัญอีกประการของทรายแบบหล่อ ในขณะที่โลหะแข็งตัวคงรูปร่างแล้วทรายแบบหล่อที่ดีจะต้องไม่คงสภาพความแข็งแรงไว้ จะต้องยุบตัวเอง หรืออยู่ในสภาพขาดความแข็งแรง เนื่องจากจะได้ง่ายต่อการรื้อแบบหล่อเพื่อเอาชิ้นงานออกมาได้อย่างสะดวก และอีกประเด็นที่สำคัญคือทรายแบบหล่อจะต้องไม่ไปต้านการหดตัวของโลหะในขณะที่เย็นตัวในแบบหล่อ เนื่องจากชิ้นงานสามารถเกิดตำหนิ (Defect)

- คุณสมบัติคงรูปในสภาพความร้อน (Thermal Stability) ความร้อนจากน้ำโลหะเมื่อสัมผัสกับผนังของแบบหล่อ จะเกิดการขยายตัวของเม็ดทรายเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหากับแบบหล่อได้ เช่น แบบหล่อเกิดรอยแยก ผิวแอ่นโค้งงอ หรืออาจจะทำให้ทรายส่วนบนแตกหลุดตกลงมาในขณะที่น้ำโลหะยังไม่เต็มแบบหล่อ จากปัญหาทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นจะส่งผลให้คุณภาพของชิ้นงานโดยเฉพาะบริเวณผิวไม่ดี ดังนั้นทรายแบบหล่อที่ดีควรจะต้องมีการขยายตัวน้อยที่สุดเมื่อได้รับความร้อน

- คุณสมบัติคงทนต่อความร้อน (Refractoriness) ทรายแบบหล่อที่ดีจะต้องมีความทนอุณหภูมิที่สูงได้โดยไม่ละลาย โดยเฉพาะงานหล่อโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงๆ เช่น เหล็กกล้า (Cast Steel) หรือเหล็กผสมสูง (High Alloy Steel) ซึ่งโลหะประเภทนี้จะมีจุดหลอมเหลวตั้งแต่ 1,300-1,650°C ถ้าทรายแบบหล่อไม่ทนต่อความร้อนระดับนี้ได้ ทรายจะเกิดการละลายและผสมติดแน่นรวมไปกับโลหะ ซึ่งเป็นการยากที่จะแยกนำทรายออกมา ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงหรืออาจจะต้องทิ้งชิ้นงานและต้องนำกลับไปทำการหลอมใหม่

- คุณสมบัติการเคลื่อนตัวง่าย (Flow Ability) ซึ่งคำว่า การเคลื่อนตัวนั้น หมายถึงทรายแบบหล่อเมื่อนำมาปั้นแบบหล่อ โดยถูกแรงกดหรือแรงกระแทกทรายแบบจะต้องเคลื่อนตัวไปตามจุดต่างๆ ภายในหีบแบบหล่อได้ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้แรงอัดมาก ซึ่งคุณสมบัตินี้จะมีผลถึงความยากง่ายต่อการปั้นแบบหล่อ โดยแบบหล่อที่ได้มีความสมบูรณ์มากน้อยจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในข้อนี้เป็นสำคัญ

จากคุณสมบัติของทรายแบบหล่อที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น ยังมีคุณสมบัติอื่นๆ อีกประการที่ต้องคำนึงถึงก่อนการเลือกใช้ทรายสำหรับงานหล่อ เช่น ทรายแบบหล่อที่ดีจะต้องให้ผิวงานหล่อเรียบ (Surface Finish) ทรายแบบหล่อที่ดีจะต้องสามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำใหม่ได้หลายๆรอบ มีความง่ายต่อการผสม (Mixing) และอีกประเด็นสำคัญที่โรงงานควรให้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ความสำคัญคือเรื่องของราคาควรมีราคาถูก ซึ่งทรายที่นำมาใช้ในงานหล่อนั้นมีมากมายหลายประเภท ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.2.2 ทรายสำหรับงานแบบหล่อ (Sand) [5]

1. ทรายแก้ว (Silica Sand) ทรายซิลิกา (SiO_2) เป็นทรายเป็นทรายที่พบมากตามแหล่งต่างๆโดยธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น ทรายบนทรายหาด ทรายบริเวณแม่น้ำ เป็นต้น โดยจะมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงถึง 1760 C (3,200 F) แต่อาจจะมีจุดหลอมเหลวต่ำลงเนื่องจากมีสิ่งปนเปื้อนและสิ่งสกปรก เช่น เหล็กออกไซด์ ไลม์ และพวกอาลคาลไลด์ ลักษณะของทรายจะมีสีขาว หากถ้าไม่มีสิ่งปนเปื้อนจะมีค่าซิลิก้าอย่างน้อย98% แต่ถ้ามีสิ่งปนเปื้อนจะมีค่าซิลิก้าอยู่ในช่วง 94%-98% มีความละเอียดประมาณ 50-100 เมซ มีความถ่วงจำเพาะ 2.5-2.8 ซึ่งทรายแก้วที่ใช้กันในประเทศส่วนใหญ่มาจากจังหวัดระยอง และจังหวัดสงขลา เนื่องจากทรายทั้ง 2 แหล่งมีคุณภาพเหมาะสมสำหรับการทำแบบหล่อ โดยทรายแก้วยังเป็นทรายที่มีความนิยมมากที่สุดเนื่องจากหาง่าย มีจำนวนมากและค่าใช้จ่ายต่ำ แต่ทรายแก้วยังมีข้อเสียที่สำคัญคือ ทรายแก้วจะมีการขยายตัวทางความร้อนค่อนข้างสูง อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 500 C-600 C ซึ่งเป็นช่วงที่ทรายแก้วจะเปลี่ยนสถานะจากแอลฟาไปเป็นเบต้า การเปลี่ยนสถานะในช่วงอุณหภูมินี้จะมีอัตราการขยายตัวสูง ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อแบบหล่อ ถ้าหากไม่หาทางลดการขยายตัวของทรายแบบหล่ออาจจะทำให้แบบหล่อเกิดข้อบกพร่องขึ้น อีกทั้งยังไม่สามารถใช้กับงานหลอมเหล็กที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง เพราะจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดข้อบกพร่องกับผิวงานหล่อ และก็ทำให้เกิด สารซิลิกา ในงานหล่อ

2.ทรายโครไมต์ (Chromite Sand) เป็นทรายที่มีสีดำ มีสูตรทางเคมี $FeO.Cr_2O_3$ มีสภาพเป็นด่าง ความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 4.3.6 อัตราการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างสูง ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 1850 C ทรายโครไมต์มีทั้งที่พบตามธรรมชาติและที่ได้มาจากแสลกของการถลุงเฟอร์โรโครเมียม โดยทรายชนิดนี้ถ้าพบตามธรรมชาติส่วนใหญ่มักจะมีเหล็กปนอยู่มาก ทำให้จุดหลอมเหลวต่ำ และพบในลักษณะที่เป็นแร่ไม่ใช่ลักษณะที่เป็นเม็ดทรายอย่างที่พบแหล่งทรายแก้ว ดังนั้นจึงต้องนำมาย่อย ล้างทำความสะอาด และทำการคัดขนาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงเพื่อให้ได้ขนาดของเม็ดทรายที่พอเหมาะสำหรับใช้ในงานหล่อ ทำให้ทรายชนิดนี้มีราคาสูงจึงถูกใช้เฉพาะกับการหลอมเหล็กที่มีราคาสูง เหล็กโลหะผสม และเพื่อใช้ทำไส้แบบหล่อ

3.ทรายเซอร์คอน (Zircon Sand) เป็นทรายที่มีสีขาวจนถึงสีน้ำตาล เป็นสารประกอบของเซอร์คอนออกไซด์ (Zr_2O)สองในสามของสารประกอบทั้งหมด และอีกส่วนเป็นซิลิก้า มี

สูตรทางเคมีคือ $ZrSiO_2$ มีสภาพเป็นกรด ความถ่วงจำเพาะ 4.4-4.7 ความแข็ง 7-7.5 สเกลเมอร์ มีอัตราการขยายตัวต่ำมากอยู่ที่ 0.003 อัตราถ่ายเทความร้อนสูง ซึ่งจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 2038 C-2200 C ทรายเซอร์คอนพบตามแหล่งธรรมชาติซึ่งปะปนอยู่กับแร่ต่างๆ โดยเฉพาะแร่ดีบุก ในประเทศไทยจะได้ทรายเซอร์คอนในสภาพที่มาจากแร่ดีบุก จึงมีขนาดเม็ดเล็กละเอียด เนื่องจากทรายชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ดีจึงเป็นที่นิยมใช้เมื่อการหล่อโลหะผสมและโลหะผสมอื่นๆ อีกทั้งยังใช้เป็นสารเคลือบ ป้องกันการจับตัวของขี้โลหะ (Slag) นอกจากนี้ยังทำให้ผิวงานสวย แต่ทรายชนิดนี้มีราคาสูงและไม่สามารถใช้งานได้อย่างง่ายดาย

4.ทรายโอลิวีน (Olivine Sand) เป็นทรายที่มีสีเขียวปนเทา มีสภาพเป็นด่าง ความถ่วงจำเพาะ 3.2-3.6 ความแข็งอยู่ที่ 6.5-7 มีอัตราการขยายตัว 0.0083 อัตราการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างต่ำ มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 1,538-1,760 C เป็นทรายที่พบตามแหล่งธรรมชาติที่พบมากคือประเทศนอร์เวย์ ซึ่งในประเทศไทยไม่ปรากฏทรายโอลิวีนในที่ใด ประโยชน์หลักของมันก็คือไม่มีส่วนผสมจากซิลิกาจึงสามารถนำมาใช้กับโลหะที่เป็นด่างได้ดีเช่นเหล็กเหนียวแมงกานีส ประโยชน์อื่น ๆทรายประเภทนี้จะมีราคาสูงซึ่งปลอดภัยกว่าการใช้ซิลิก้าจึงเป็นที่นิยมในยุโรป

5.ทรายอลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminum Silicate) หรือที่เรียกว่าซิลิไนท์ (Silimanite) เป็นทรายที่มีสีน้ำตาลอ่อน มีสูตรทางเคมี $Al_2O_3.SiO_2$ มีสภาพเป็นกลาง ความถ่วงจำเพาะ 3.5 ความแข็งระดับ 6 มีอัตราการขยายตัวที่ 0.007 ซึ่งสูงกว่าทรายโครไมต์ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง จุดหลอมเหลว 1849 C เป็นทรายที่พบตามแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะอเมริกา พบมากในรัฐฟลอลิดา ยังไม่ปรากฏพบในประเทศไทย ถือเป็นทรายที่ถูกเป็นอันดับสองรองจากทรายซิลิก้า แต่ยังมีราคาแพงเป็นสองเท่าของราคาทรายซิลิก้าด้วยเช่นกัน ข้อเสียคือมีขนาดเม็ดทรายที่หยาบมากซึ่งส่งผลให้ผิวแบบหล่อไม่ดี โดยทั่วไปมักเคลือบด้วยสารเคลือบ ส่วนใหญ่มักใช้ในงานเหล็กเหนียวขนาดใหญ่

นอกจากทรายที่เป็นส่วนผสมหลักของการผลิตทรายเคลือบเรซินแล้ว ทางโรงงานกรณีศึกษายังได้เติมตัวประสานบางประเภทลงไป เพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางประการให้ดีขึ้น เช่น ความทนแรงดัดโค้ง การขยายตัวทางความร้อน เป็นต้น อีกทั้งหากเราใช้ทรายอย่างเดียวในการผลิตจะไม่สามารถปั้นแบบหล่อได้ เนื่องจากขาดความแข็งแรง และเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ถึงเป้าหมายที่ลูกค้าแต่ละรายต้องการ ซึ่งทางโรงงานกรณีศึกษาได้เลือกฟีนอลิกเรซินเพื่อใช้เป็นตัวประสานในการเพิ่มคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น และทำการใส่แต่งเติมแต่งบ้างชนิด ซึ่งชนิดของตัวประสานและคุณสมบัติตัวประสานจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3. ตัวประสาน (Binder) [2]

ตัวประสานสำหรับงานหล่อทรายนั้นมีหลายประเภท ซึ่งการเลือกใช้จะเลือกในต้องกับความต้องการหรือเป้าหมายของลูกค้าและโรงงาน ซึ่งขึ้นคุณสมบัติที่สำคัญของตัวประสานมีดังนี้

- ควรให้คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงเพียงพอ
- เมื่อสัมผัสกับโลหะหลอมเหลวไม่เกิดแก๊สมากนัก
- ช่วยทำให้ทรายมีคุณสมบัติการยุบตัวเองดี
- ไม่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือด่าง และไม่มีกลิ่น
- ควรมีราคาถูก

ตัวประสานสำหรับงานหล่อไส้แบบสำหรับโรงงานทั่วไปมีมากมายหลายชนิดสามารถจำแนกได้ดังต่อไป

ก. ประเภทน้ำมัน (Core Oil) ส่วนมากเป็นน้ำมันผสมหลายชนิด เช่น น้ำมันลินซีด น้ำมันปาล์ม หรือน้ำมันที่สกัดจากเมล็ดพืช และน้ำมันจากสัตว์ ในอัตราส่วนประมาณ 1:40 โดยปริมาตร หรือประมาณ 2-4% โดยน้ำหนัก ตัวประสานประเภทนี้ต้องอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 180-200 C จะให้ความแข็งแรงดี แต่เมื่อสัมผัสกับโลหะหลอมเหลวจะให้แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้มาก แต่จะให้คุณสมบัติทางด้านการยุบตัวเองดี

ข. ประเภทเรซิน (Thermo Setting Resin) เป็นประเภทที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะให้คุณสมบัติความแข็งแรงสูง คุณสมบัติการยุบตัวเองดี และเกิดแก๊สน้อยกว่าประเภทน้ำมัน มีทั้งประเภทต้องอบให้แห้งหรือแข็งในอากาศ (Air Setting)ซึ่งบางประเภทเรียกว่ากรรมวิธีแบบหล่อชนิดไม่ต้องย่าง (No Baking Sand) ประเภทเรซินนี้ได้แก่ ฟีนอล (Phenol) หรือ Urea Formaldehyde และชนิดที่เป็นประเภทต้องอบให้แห้งหรือแข็งในอากาศเช่น ฟูรานเรซิน (Furan Resin)

ค. กรรมวิธีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Process) กรรมวิธีนี้ถูกค้นพบมาแล้วเป็นเวลานาน และเพิ่งนำมาเผยแพร่ใน พ.ศ.2491 ซึ่งหลักการของวิธีนี้จะนำทรายแก้วที่แห้งปราศจากความชื้นมาผสมกับโซเดียมซิลิเกต 50-60 โมเม ประมาณ 3-5% ผสมเข้ากันกับทรายด้วยเครื่องผสมจนเข้ากันดี จากนั้นนำทรายผสมนี้ไปใช้ทำคอร์ ซึ่งในตอนนี้ทรายจะมีความแข็งแรงเริ่มต้นต่ำ หลักจากทรายถูกอัดตัวแน่นดีแล้วในหีบทำคอร์ จะใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป่าผ่าน ซึ่งจะส่งผลให้ทรายเกิดความแข็งแรง เมื่อโซเดียมซิลิเกตเปลี่ยนเป็น Na_2CO_3 และ silica gel ดังปฏิกิริยา

$$Na_2SiO_3 + CO_2 \longrightarrow Na_2CO_3 + SiO_2 \text{ (Silica Gel)}$$

การเป่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านทรายผสมโซเดียมซิลิเกต มีหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของแบบและความยากง่ายในการเป่า ซึ่งข้อดีที่ทำให้กรรมวิธีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นที่แพร่หลายในโรงงานหล่อมากเนื่องจาก

- การทำคอร์ด้วยวิธีการคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ต้องผ่านการอบแห้ง
- คอร์ประเภทนี้ไม่เกิดแก๊สมากเมื่อสัมผัสกับโลหะหลอมเหลว
- ทำให้ได้ขนาดของชิ้นงานหล่อใกล้เคียงและมีผิวเรียบ
- สามารถทำได้ในเวลาสั้น และราคาไม่สูงมาก

โดยข้อเสียของวิธีการนี้มีอยู่ประการหนึ่ง คือ ทรายประเภทนี้มีความแข็งแรงสูง และขาดคุณสมบัติการยุบตัว ทำให้การรื้อแบบทำได้ยาก ซึ่งในบางกรณีอาจจะทำให้ชิ้นงานหล่อเกิดการแตกเสียหายได้ เนื่องจากเมื่อโลหะหดตัวแต่ทรายคาร์ต้านทานการหดตัวของโลหะไว้ ควรผสมสารที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติการยุบตัวตัวเอง นอกจากตัวประสาน (Binder) ทั้งสามประเภท ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นยังมีตัวประสานที่นิยมใช้กันอีกหลายชนิด เช่น พวกกาวทำจากแป้ง น้ำเหลืองน้ำตาล (Molasses) กาวเด็คทริน และพวกซัลไฟต์ (ผลพลอยได้จากโรงงานทำกระดาษ)

จากตัวประสานสำหรับงานหล่อไส้แบบสำหรับโรงงานทั่วไปที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าตัวประสานประเภทเรซิน (Thermosetting Resin) ถือเป็นตัวประสานประเภทที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ซึ่งทางโรงงานกรณีศึกษายังได้ใช้ตัวประสานประเภทนี้สำหรับเป็นสารเพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้กับทรายเคลือบเรซินเช่นกัน ซึ่งตัวประสานชนิดที่ใช้คือ ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Phenol Formaldehyde Resin) หรือที่เรียกกันว่าฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resin) โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

[7] ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (Phenol Formaldehyde Resin) ซึ่งมีชื่อเรียกทางการค้าว่า เบคิไลต์ (Bakelite) หรือที่ถูกเรียกกันโดยทั่วไปว่า ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resin) ซึ่งฟีนอลิกนั้นถือเป็นโพลิเมอร์ที่ได้ถูกทำการสังเคราะห์ขึ้นมาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1907 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเบลเยี่ยมชื่อเบคเคแลนด์ (Baekeland) ที่ทำการผสมฟีนอล (Phenol) กับฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เข้าด้วยกัน จากนั้นทำการให้ความร้อน และกลั่นเอาน้ำออกด้วยกระบวนการควบแน่น ซึ่งจะได้สารเหนียวๆออกมา เมื่อปล่อยไว้ให้เย็นตัวลงจะเกิดการแข็งตัว ด้วยเหตุนี้ฟีนอลิกเรซินที่ออกจำหน่ายครั้งแรกจึงมีทางการค้าว่าเบคิไลต์ ฟีนอกลิกเรซินเป็นพลาสติกประเภทพลาสติกคงรูปหรือเทอร์โมเซตติ้ง (Thermosetting) คือพลาสติกประเภทที่ไม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สามารถนำกลับมาเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้ แต่พลาสติกประเภทนี้จะทนต่อความร้อนที่มีอุณหภูมิและความกดดันสูง จึงเหมาะที่จะนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้ทนต่อความร้อนและเกิดความแข็งแรง ฟินอลิกเรซินสามารถทนความร้อนในสภาวะปกติได้ประมาณ 70-85 C ถ้าหากผสมวัตถุทนความร้อนบางชนิดจะสามารถทนความร้อนได้สูงถึง 210 C มีสีออกน้ำตาล-ดำ ไม่เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีอ่อน

[8] ฟีนอลิกเรซินนั้นได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการเติมฟินอลิกเรซินมีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติในกระบวนการผลิต เช่น มีความเหนียวติด Tack สูงขึ้น ทำให้ยางคอมพาวด์ไหลได้ง่าย และทำให้สารเติมแต่งผสมเข้ากับยางได้ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างยางกับโลหะได้อีกด้วย ปัจจุบันฟินอลิกเรซินถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอีกหลายประเภท เช่นการผลิตสวิตซ์ไฟ การผลิตกล่องพักสาย (Junction Box) การทำแบบหล่อสำหรับการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ และทางโรงงานกรณีศึกษาได้เลือกฟินอลิกเรซินมาใช้ในการผลิตทรายเคลือบเรซินเพื่อช่วยในการเพิ่มคุณสมบัติบางประการของทรายเคลือบเรซิน ซึ่งฟีนอลิกเรซินโดยทั่วไปสามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ รีโซลเรซิน (Resole Resin) และโนโวแลกเรซิน (Novolac Resin)

a. รีโซลเรซิน (Resole Resin)

[9] รีโซลเรซินเป็นเรซินที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีและความร้อนสูง โดยการสังเคราะรีโซลเรซินเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ภายใต้สภาวะที่มีฟอร์มัลดีไฮด์ในปริมาณที่สูงกว่าฟีนอลและใช้สารที่มีสภาพเป็นเบสเป็นสารเร่งปฏิกิริยาเช่น NaOH, $Ca(OH)_2$, NH_3 และ$Ba(OH)_2$ เป็นต้น โดยทั่วไปการเตรียมรีโซลเรซินจะใช้สัดส่วนของฟอร์มัลดีไฮด์ต่อฟีนอลตั้งแต่ 1:2:1 ถึง 3:0:1 โดยโมล โดยใช้อุณภูมิประมาณ 80-95 C ซึ่งในการทำปฏิกิริยานั้นจะเกิดหมู่เมทิลอล (Methylol) ซึ่งหมู่เมทิลอลนี้มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เมื่อหมู่เมทินอลทำการสร้างพันธะกันเองจะเกิดเป็นพันธะอีเทอร์ (Ether Linkage) ถ้าหากหมู่เมทิลอลสร้างพันธะกับไฮโดรเจนของอีกโมเลกุลก็จะเกิดเป็นพันธะเมธิลีน เนื่องจากโมเลกุลของรีโซลเรซินมีหมู่เมทิลอลอยู่เป็นจำนวนมากเมื่อให้ความร้อนกับรีโซลเรซินจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เป็น Crosslink Polymer ส่งผลให้รีโซลเรซินไม่หลอมเหลวและไม่ละลายในตัวทำละลาย

b. โนโวแลคเรซิน (Novalac Resin)

[10] โนโวแลคเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์ภายใต้สภาวะที่มีฟีนอลในปริมาณที่สูงกว่าฟอร์มัลดีไฮด์ เช่นฟอร์มัลดีไฮด์ต่อฟีนอลประมาณ 0.8/1 และใช้สารที่มีสภาพเป็นกรดแก่ (ค่า PH ต่ำกว่า2) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาเช่น กรดออกซาลิด (Oxalic Acid) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) และกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) เป็นต้น โนโวแลค

ถูกพิจารณาให้เป็นพลาสติกประเภทพลาสติกคงรูป (Thermoplastic Resin) และอุณหภูมิที่สารโมเลกุลของพอลิเมอร์เปลี่ยนสถานะจากแก้วไปเป็นสถานะยาง (Glass-Transition Temperature) อยู่ที่ 45-70 C ในการสังเคราะห์โนโวแลกนี้จะได้พรีพอลิเมอร์ที่มีลักษณะต่างไปจากรีโซลเรซินเล็กน้อยในด้านน้ำหนักโมเลกุล ความหลากหลายของโครงสร้าง และจำนวน linkage ที่เชื่อมโยงระหว่างหน่วยย่อยหรือวงแหวนของเบนซีนในฟีนอล ทั้งนี้เนื่องจากกรณีของโนโวแลคนั้น สารตั้งต้นฟอร์มัลดีไฮด์ถูกเติมลงไปในปริมาณที่จำกัดทำให้การเชื่อมโยงระหว่างหน่วยย่อยหรือแม้แต่การเกิด Poly-Fucntion Methylol Phenol เป็นไปได้ยาก ซึ่งการทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลในกรณีของโนโวแลคนั้นจะไม่สามารถกระทำได้โดยการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นเหมือนในกรณีของรีโซล ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลจึงต้องอาศัยการเติมสาร Curing Agent เช่น Hexamethylene Tetraamine ลงไป โดยปฏิกิริยาจะเกิดที่อุณหภูมิสูงและทำให้ได้โครงสร้างแบบร่างแห ด้วยเหตุนี้โนโวแลคจึงมีสมบัติเป็น Thermoplastic และยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์และยังสามารถหลอมเหลวได้

2.4. สารเติมแต่ง (Additive) [10]

จากการผลิตทรายเคลือบเรซินนั้นนอกจากทรายกับเรซินที่เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตแล้วนอกจากนี้ทางโรงงานกรณีศึกษายังมีการเติมสารเติมแต่ง 2 ชนิดลงไปในการผลิตทรายเคลือบเรซินซึ่งสารเติมแต่งเป็นวัสดุหรือสารเคมีที่ถูกเติมลงไปในเรซินด้วยปริมาณที่น้อยกว่าเพื่อทำการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการให้เกิดความเหมาะสม โดยปกติสารเติมแต่งนั้นจะเข้าไปกระจายอยู่ในเนื้อของเรซินโดยทางกายภาพ และไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างสำคัญๆของพอลิเมอร์นั้น โดยประเภทของสารเติมแต่งสามารถแบ่งตามประเภทของการใช้งานได้ 5 ประเภทดังนี้

1. สารช่วยให้สมบัติเชิงกล (Mechanical Properties Modifiers)
2. สารช่วยให้สมบัติทางเคมี (Chemical Properties Modifiers)
3. สารช่วยเพื่อความสวยงาม (Aesthetic Properties Modifiers)
4. สารช่วยให้สมบัติที่พื้นผิว (Surface Properties Modifiers)
5. สารช่วยดัดแปรสำหรับกระบวนการผลิต (Processing Modifiers)

ซึ่งสารเติมแต่งทางโรงงานกรณีศึกษาที่ใช้มี 2 ชนิดคือ Hexamethylenetetramine เป็นสารที่ช่วยให้ความแข็งแรงกับไส้แบบหล่อ โดยเฮกซามีนจะเกิดการแตกตัวและไปทำปฏิกิริยากับฟีนอริกเรซิน โดยจะเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห มีส่วนช่วยทำให้ไส้แบบหล่อมีความแข็งแรง ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงเกินไปจนทำให้เฮกซามีนเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ก่อนนำไปทำไส้แบบหล่อ ส่วนสำคัญอีกประการที่ต้องทำการควบคุมคือเมื่อปล่อยเฮกซามีนเข้าถังผสมแล้วต้องควบคุมการเป่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ลมอากาศเพื่อช่วยในการหยุดปฏิกิริยาที่เฮกซามีนทำกับทรายก่อนเกิดการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ และป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของทรายเคลือบเรซิน และสารเติมแต่งชนิดที่ 2 คือ Calcium Stearate ถูกเติมลงไปในทรายเคลือบเรซินในลักษณะผง เพื่อช่วยในการปรับปรุงค่าความสามารถในการไหล (Flow Ability) และการกระจายตัว (Rheology) ลดการถูกกัดกร่อน ของทรายใหดีขึ้น อีกทั้งยังมีส่วนช่วยทำให้ไส้แบบมีคุณสมบัติที่สม่ำเสมอด้วย

2.5 ทรายเคลือบเรซิน (Resin Coated Sand) [11]

ในอดีตที่ผ่านมากระบวนการหล่อแบบเปลือกและการทำไส้แบบนั้นมีกระบวนการผลิตที่ง่ายไม่มีความซับซ้อน คือการนำทรายซิลิก้า เรซินประเภทโนโวแลคแบบผง และเฮกซามีน มาทำการผสมเข้าด้วยกันจากนั้นนำไปเทขึ้นรูป แต่แบบหล่อเปลือกและไส้แบบที่ได้นั้นไม่มีความแข็งแรงคงทน เนื่องจากในขั้นตอนการผสมนั้นทรายและเรซินไม่ถูกผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกที่ง่าย และชิ้นงานที่ออกมายังคงติดกับแบบหล่ออยู่ โดยสาเหตุเหล่านี้มีผลมาจากขั้นตอนการผสมทรายกับเรซินยังไม่มีความเหมาะสมและถูกต้อง ต่อมาในปีค.ศ.1950 ได้มีการพัฒนากระบวนการผสมทรายเคลือบเรซินขึ้นมาเพราะเพิ่มประสิทธิภาพของทรายเคลือบเรซิน โดยมีอยู่ 2 กระบวนการที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก คือ กระบวนการเคลือบร้อน (Hot Coating Process) และกระบวนการเคลือบอุ่น (Warm Coating Process)

กระบวนการเคลือบอุ่น (Warm Coating Process) เป็นกระบวนการที่ทำในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำ ซึ่งจะนำเฮกซามีนและสารหล่อลื่น (แคลเซียมสเตียเรท) มาทำการผสมเข้าด้วยกันกับทรายในถังผสมเป็นเวลา 40-60 วินาที จากนั้นนำฟีนอลิกเรซินประเภทโนโวแลทในรูปแบบของสารละลายแอลกอฮอล์ (เมททานอล) และน้ำผสมลงไปในถังผสมใช้เวลาประมาณ 2-3 นาที ซึ่งในขณะที่ทำการเติมเรซินและน้ำลงไปนั้นจะใช้เครื่องเป่าลมอุ่นให้ผ่านเข้าไประหว่างขั้นตอนการผสมทรายในถังผสมในช่วงอุณหภูมิ 40-70℃ เพื่อทำให้ทรายมีอุณหภูมิสูงและเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนของทรายโดยในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 4-6 นาที จากนั้นจึงนำออกจากถังผสม

กระบวนการเคลือบร้อน (Hot Coating Technique) เป็นกระบวนการที่ใช้เรซินชนิดของแข็ง (Solid Resin) ที่อยู่ในรูปของเม็ดเล็กๆ (Granule), ผง (Powder) หรือผลึก (Flake) รวมตัวกันขณะใส่ลงไปในทรายที่มีอุณหภูมิสูง โดยในขั้นแรกทรายจะได้รับความร้อนเบื้องต้นที่อุณหภูมิช่วง 125-130 ℃ ซึ่งที่อุณหภูมินี้จะทำให้เรซินละลายและเคลือบไปบนเม็ดทรายโดยมีเฮกซามีนเป็นตัวทำละลาย โดยที่ในขณะเกิดกระบวนการเคลือบและผสมจะมีการเติมสารหล่อลื่นลงไปเพื่อช่วยให้การผสมกันระหว่างทรายและเรซินทั่วถึงมากยิ่งขึ้น ปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการเคลือบร้อนคือจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่กำหนด เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงจะช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดอย่างสมบูรณ์

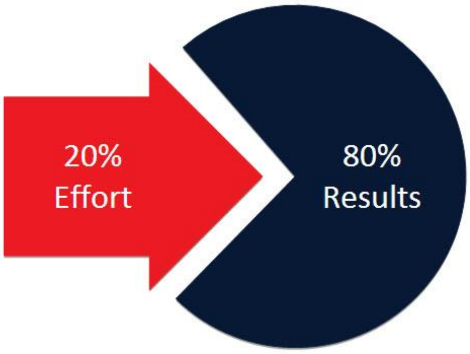
กระบวนการเคลือบร้อนเป็นกระบวนการหลักที่นำมาใช้ในโรงหล่อทรายเนื่องจากมีต้นทุนต่ำกว่ากระบวนการแบบอื่น อีกทั้งยังมีความปลอดภัยรวมถึงสามารถผลิตได้ภายในเวลารวดเร็ว โดยมีเวลาการผลิตอยู่ในช่วง 2 – 3 นาทีต่อแบชเท่านั้น และเนื่องจากสามารถผลิตได้เร็วทำให้มีอัตราการผลิตสูงตามไปด้วย นอกจากนี้กระบวนการเคลือบร้อนยังสามารถผลิตแบบหล่อได้มากกว่ากระบวนการอื่นอีกด้วย

การใช้เรซินเคลือบทรายมีข้อดีหลายข้อด้วยกัน ข้อแรกได้แก่ มีสัดส่วนการใช้เรซินกับทรายต่ำในการผสมและมีอัตราการระเหยของแก๊สจากแม่แบบต่ำ ข้อต่อมาคือ เรซินสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับทราย ข้อสุดท้ายคือ ทรายเคลือบเรซินสามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตแบบอัตโนมัติได้โดยมีการไหลผสมกันได้ดีขึ้นด้วย

2.6 ทฤษฎีเกี่ยวกับสถิติ

2.6.1 แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) [12]

แผนภูมิพาเรโตเป็นแผนภูมิที่ประกอบด้วยกราฟ 2 ชนิด คือ กราฟแท่ง และกราฟเส้นตรง ซึ่งแกนด้านซ้ายมือจะแสดงถึง เปอร์เซ็นต์ของปัญหาในแต่ละตัว ส่วนแกนด้านขวามือจะแสดงถึง จำนวนเปอร์เซ็นต์สะสมที่ได้จากการสะสมเปอร์เซ็นต์ของข้อมูลแต่ละตัว และแกนนอนจะแสดงถึง ชื่อของปัญหาแต่ละตัว โดยส่วนใหญ่นั้นแผนภูมิพาเรโตจะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงให้เห็นถึงขนาดของปัญหา โดยมีการนำเอาสาเหตุของปัญหา หรือข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์มาทำการแย่งประเภท จากนั้นเรียงลำดับความสำคัญของข้อมูลจากมากไปหาน้อย แต่ข้อมูลอื่นๆจะถูกวางไว้ตำแหน่งสุดท้ายของแกนนอนเสมอซึ่งแผนภูมิพาเรโตนั้นมีหลักการคือ ข้อมูลที่มีความสำคัญมากจะมีจำนวนน้อย และข้อมูลที่มีความสำคัญน้อยจะมีจำนวนมาก หรือที่เรียกว่ากฎ 80/20 ซึ่งหมายความว่า ปัญหาทั้งหมด 100% มีปัญหาจำนวน 80% ที่มีผลมาจากสาเหตุ 20% และปัญหาที่เหลือ 20% จะส่งผลมาจากสาเหตุ 80% (80% Trivial Many, 20% Vital Few) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

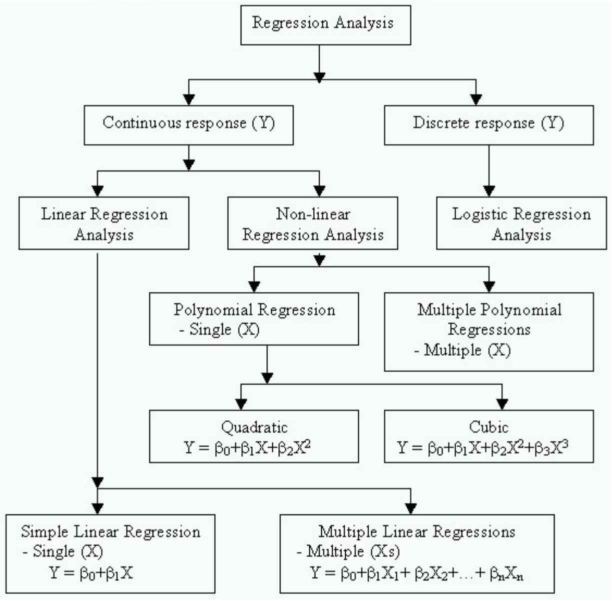


รูปที่ 2.14 แผนภาพอธิบายกฎ 20/80 ของพาเรโต

แผนภูมิพาเรโตจะถูกใช้เมื่อต้องการกำหนดหรือหาเหตุผลที่มีความสำคัญต่อปัญหาและทำการแยกออกปัญหาที่สำคัญนั้นออกมาจากปัญหาอื่นๆ อีกทั้งเพื่อยืนยันผลของการทดลองที่มาจากการแก้ปัญหา โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างก่อนแก้ปัญหา และหลังทำการแก้ปัญหาสุดท้ายใช้เพื่อค้นหาปัญหาและหาคำตอบสำหรับการดำเนินการเพื่อแก้ปัญหา

2.6.2 สมการถดถอย (Regression Model) [13, 14]

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นเทคนิคทางสถิติอย่างหนึ่งที่มีไว้เพื่อสร้างสมการถดถอยสำหรับใช้ทำนายปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งสมการถดถอยนั้นยังสามารถแบ่งได้อีกหลายรูปแบบโดยขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งาน รวมถึงประเภทของข้อมูลที่ถูกนำมาวิเคราะห์ โดยการเลือกใช้งานสมการถดถอยนั้นสามารถดูได้จากรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ประเภทของสมการถดถอย

โดยในงานวิจัยนี้ข้อมูลตัวแปรตอบสนอง (Y) จะมีลักษณะเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous response) กล่าวคือสามารถควบคุมได้โดยผู้ทดลองที่มีลักษณะเป็นแบบ Linear Regression Analysis ซึ่งจะสามารถเลือกการวิเคราะห์การถดถอยได้ 2 รูปแบบ โดยพิจารณาจากข้อมูลที่นำมาสร้างสมการสำหรับการทำนายนั้นประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระ (Predictor, Independent Variable: X) กี่ตัวและตัวแปรตอบสนอง (Response, Dependent Variable: Y) กี่ตัว

- กรณีที่ 1 ถ้าหากต้องการสร้างสมการเพื่อทำนายตัวแปรตอบสนองเพียงตัวเดียวและตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวเช่นกัน ดังนั้นจะต้องใช้การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่ายสำหรับการสร้างสมการถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$Y_i = a + bX + e_i$$

โดยที่ Y = ค่าตัวแปรตอบสนอง

a = ค่าคงที่ของสมการ

b = ค่าสัมประสิทธิ์หรือพารามิเตอร์ของเส้นตรง

X = ตัวแปรอิสระ

e_i = ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม

- กรณีที่ 2 ถ้าหากต้องการสร้างสมการเพื่อทำนายตัวแปรตอบสนอง ที่ประกอบด้วยตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวแปร ตัวอย่างเช่น ปริมาณผลผลิต (Y) อาจจะขึ้นอยู่กับ ความดัน (X_1) อุณหภูมิ (X_2) ระยะเวลาในการผลิต (X_3) เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อสร้างสมการถดถอยเช่นนี้มีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว ดังนั้นสมการถดถอยที่ได้จะเป็นสมการถดถอยแบบพหุคูณ (Multiple Regression) ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \ldots + b_kX_k$$

โดยที่ Y = ค่าตัวแปรตอบสนอง

a = ค่าคงที่ของสมการ

X_1 = ตัวแปรอิสระตัวที่ 1

X_2 = ตัวแปรอิระตัวที่ 2

X_k = ตัวแปรอิสระตัวที่ k

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

b_1 = ค่าสัมประสิทธิ์หรือพารามิเตอร์ของ X_1

b_2 = ค่าสัมประสิทธิ์หรือพารามิเตอร์ของ X_2

b_k = ค่าสัมประสิทธิ์หรือพารามิเตอร์ของ X_k

โดยในงานวิจัยนี้จะมีลักษณะข้อมูลเป็นเหมือนกรณีที่ 2 คือมีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวแปร ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณเพื่อทำการสร้างสมการถดถอยแบบพหุคูณเพื่อใช้สำหรับการทำนายสัดส่วนของสูตรการผสมทรายเคลือบเรซิน ทีมีตัวแปรอิสระ 7 ตัวที่ประกอบไปด้วย ทราย 3 ชนิด เรซิน 3 ชนิด และปริมาณเรซินที่ใช้ และมีตัวแปรตอบสนองสนองทั้งหมด 6 ตัวแปร

2.6.3 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square: R^2) [15]

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ใช้สำหรับแสดงค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย ซึ่งจะแสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งค่าของ R^2 จะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 หรือ $0 \leq R^2 \leq 1$ โดยที่ถ้าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยทุกตัวมีค่าเป็น 0 และถ้าค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าค่าของตัวแปรตอบสนองทุกตัวมีค่าเท่ากับค่าพยากรณ์ เนื่องจากค่า R^2 นั้นสามารถหามาจากการใช้ข้อมูลในการคำนวณทำให้ช่วงพิสัยของตัวประอิสระจะมีผลต่อค่า R^2 ซึ่งการที่ค่า R^2 มีค่าสูงนั้นไม่ได้หมายความว่าสมการถดถอยนั้นเหมาะสำหรับทุกช่วงของค่าตัวแปรอิสระ ซึ่งถ้าหากพยากรณ์ออกนอกช่วงของตัวแปรอิสระที่เก็บข้อมูลมาแล้ว สมการถดถอยที่ได้อาจจะไม่เหมาะสมหรือทำให้การทำนายเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งสามารถทำการแก้ไขได้ด้วยการหารค่า SSE และ SST ด้วยองศาเสรี จะเรียก R^2 หลังการแก้ไขแล้วว่า สัมประสิทธิ์การตัดใจที่ปรับแล้ว (Adjusted Coefficient) R^2_{adj}

2.6.4 วิธีการคัดเลือกตัวแปร

วิธีการคัดเลือกตัวแปรมาใส่ในสมการเพื่อให้สมการสามารถทำนายตัวแปรตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดมีดังนี้

- วิธีการเลือกแบบก้าวหน้า (Forward Selection) เป็นวิธีที่ทำการเลือกตัวแปรอิสระที่มีสหสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนองสูงสุดเข้าสมการก่อน ส่วนตัวแปรอิสระที่เหลือจะถูกคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยในรูปแบบคะแนนมาตรฐาน โดยใช้ t-test ถ้าหากมีนัยสำคัญทางสถิติก็จะนำเข้ามาพิจารณา จะทำแบบนี้จนกระทั่งไม่เหลือตัวแปรอิสระที่ไม่มีนัยสำคัญก็จะทำการหยุดลเลือก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- วิธีการเลือกแบบถอยหลัง (Backward Selection) เป็นวิธีการที่นำตัวแปรอิสระเข้ามาในสมการทั้งหมดก่อน จากนั้นจะค่อยๆทำการกำจัดตัวแปรอิสระออกทีละตัว ซึ่งพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระที่อยู่ในสมการ หากทดสอบแล้วไม่มีนัยสำคัญทางสถิติก็ทำการกำจัดออก

- การคัดเลือกแบบลำดับขั้น (Stepwise Selection) เป็นวิธีการคัดเลือกแบบการผสมผสานระหว่างวิธีทั้งที่กล่าวมาข้างต้นเข้ามาประยุกต์ใช้ โดยเริ่มแรกจะเลือกตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์สูงสุดกับตัวแปรเพื่อนำเข้ามาในสมการเป็นอันดับแรก จากนั้นทำการทดสอบตัวแปรอิสระที่ยังไม่ได้อยู่ในสมการเพื่อตรวจสอบดูว่ามีตัวแปรใดบ้างที่สามารถเพิ่มเข้ามาได้ด้วยวิธีการคัดเลือกแบบก้าวหน้า ในเวลาเดียวกันก็จะทำการทดสอบตัวแปรที่อยู่ในสมการว่าตัวแปรอิสระตัวใดมีโอกาสที่จะถูกกำจัดออกจากสมการด้วยวิธีการคัดเลือกแบบถอยหลัง โดยจะทำแบบนี้ไปจนกระทั่งไม่มีตัวแปรใดที่ถูกคัดออกจากสมการ

2.7 การออกแบบการทดลอง

2.7.1 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) [16]

การออกแบบการทดลอง เป็นกระบวนการเพื่อที่จะทำการทดลองสำหรับค้นหาคำตอบจากกระบวนการหรือวิธีการที่ไม่ทราบผลอย่างชัดเจนให้เกิดความชัดเจนขึ้น หรือเป็นการทำการทดลองเพื่อการทดสอบสมมุติฐานถ้าหากกล่าวอย่างง่ายก็คือการตรวจสอบว่าปัจจัยที่เราสนใจศึกษานั้นส่งผลกระทบอย่างไรกับตัวแปรตอบสนอง โดยมีจุดมุ่งหมายที่สำคัญคือ เพื่อยืนยันข้อเท็จจริงหรือเพื่อค้นหาข้อเท็จจริงนั่นเอง ซึ่งทั้งหมดจะต้องดำเนินการอย่างเป็นระบบขั้นตอน โดยอาศัยเทคนิคทางสถิติขั้นสูงเพื่อใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่เราต้องการ หรือให้ได้สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยกับผลตอบสนอง โดยที่ต้องคำนึงถึงทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งผู้ทำการทดลองต้องเข้าใจถึงปัญหา กำหนดวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนและเลือกใช้เทคนิคในการเก็บข้อมูลที่เหมาะสม เช่น One Factor at A Time, Full Factorial, Fractional Factorial, 2^k Factorial เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7.2 ประเภทของการแบบการทดลอง [17]

ประเภทของการออกแบบการทดลองสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

a. การออกแบบการทดลองแบบ One-Factor-at-A-Time (OFAT) เป็นการทดสอบทีละปัจจัย โดยในการทดลองจะทำการคงที่ค่าปัจจัยอื่นๆไว้ แล้วจะเปลี่ยนค่าปัจจัยที่ผู้ทำการทดลองสนใจเพียงตัวเดียว จากการทำการทดลองเช่นนี้เราจะได้ผลกระทบหลักที่เกิดตัวแปรตอบสนองเพียงอย่างเดียว ผู้ทดลองไม่สามารถวิเคราะห์ผลของปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองได้ อีกทั้งการทดลองประเภทนี้ยังมีจำนวนการทดลองที่มากและต้องใช้เวลามากในการทำทดลอง เมื่อเทียบกับวิธีการทดลองแบบ Design of Experiment (DOE)

b. การออกแบบการทดลองแบบ Design of Experiment (DOE) เป็นวิธีการทดสอบที่มีระดับของปัจจัยอื่นๆอย่างน้อย 2 ระดับ ซึ่งส่งผลให้วิธีการนี้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบหลักของปัจจัยที่มีผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง และผลกระทบร่วมของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรสอบสนอง อีกทั้งยังมีจำนวนการทดลองที่น้อยและขนาดตัวอย่างน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการทดลองแบบ OFAT โดยวิธีการทดลองแบบ DOE ยังสามารถแบ่งได้อีกเป็น 2 ประเภทโดยแบ่งตามวัตถุประสงค์ของการทดลองดังนี้

- แบบที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อต้องการวิเคราะห์ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการทดลองแบบนี้จะเป็นการทดสอบปัจจัยที่ 2 ระดับเท่านั้น เพื่อเป็นการประหยัดจำนวนการทดลอง ตัวอย่างการออกแบบการทดลองประเภทนี้คือ แบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) และแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- แบบที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองเพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองตามที่ต้องการ โดยการทดลองแบบนี้แต่ละปัจจัยจะต้องถูกทดสอบที่มากกว่า 2 ระดับ ตัวอย่างการออกแบบการทดลองประเภทนี้คือ การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) และการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เป็นต้น

2.7.3 ส่วนประกอบต่างๆของการทดลอง

1. วิธีการปฏิบัติหรือทรีทเมนต์ (Treatment) คือสิ่งหรือวิธีการที่ผู้ทำการทดลองปฏิบัติต่อสิ่งทดลอง เพื่อทำการวัดผลเปรียบเทียบตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. หน่วยทดลอง (Experiment Unit) เป็นหน่วยหรือมาตราสำหรับการวัดอิทธิพลของทรีทเมนต์

3. ตัวแปรนำเข้าหรือปัจจัย (Factor) หมายถึงตัวแปรที่สามารถควบคุมและกำหนดค่าได้ ซึ่งได้มาจากการระดมสมองว่ามีปัจจัยใดมีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองบ้าง โดยที่ปัจจัยอาจมีลักษณะเป็นเชิงคุณภาพหรือเชิงปริมาณก็ได้

4. ตัวแปรตอบสนอง (Responses) หมายถึงตัวแปรที่ถูกสังเกต หรือสิ่งที่สนใจปรับปรุง ซึ่งสามารถทำการวัดค่าได้ เช่นสัดส่วนของเสีย ปริมาณที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ความหนา ความยาว เป็นต้น ในการทดลองใดๆอาจจะมีตัวแปรตอบสนองมากกว่า 1 ตัวก็ได้

5. ตัวแปรรบกวน (Noise Variables) หมายถึงตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้และไม่ใช้ปัจจัยที่ทำการศึกษาในการทดลองนั้น

6. ระดับของปัจจัย (Level) ค่าที่จะทำการทดสอบของปัจจัย

2.7.4 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

1. ทดสอบผลกระทบหลักของปัจจัยที่ผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Main Effect)

2. ทดสอบผลกระทบร่วม (อันตรกิริยา) ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Interaction Effect)

3. หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองเพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย เพื่อให้ได้ค่าตามที่ผู้ทดลองต้องการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.7.5 หลักการพื้นฐาน 3 ข้อสำหรับการออกแบบการทดลอง

1. การทำการทดลองซ้ำ (Replication) มีความสำคัญอยู่ 2 ประการคือ ประการแรกเพื่อให้ผู้ทำการทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลองดังนั้นการทำซ้ำสามารถทำให้ผู้ทำการทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบ

2. บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลอง และเพื่อลดผลปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

3. การทำแบบสุ่ม (Randomization) การสุ่มลำดับการทดลองเป็นการทำเพื่อกระจายโอกาสให้แต่ละหน่วยการทดลองได้รับการทรีทเมนต์อย่างเท่าเทียมกัน หลีกเลี่ยงความลำเอียง

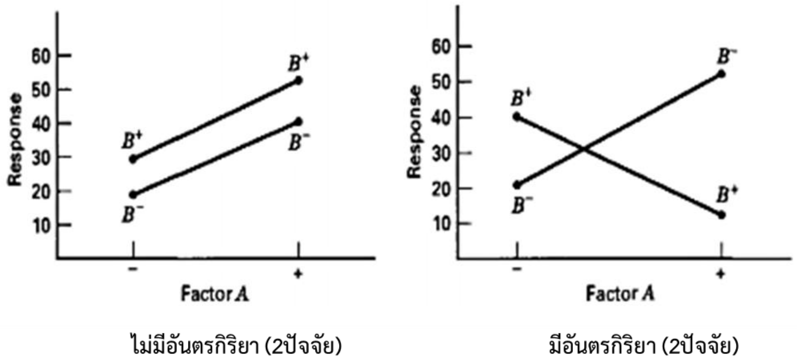
จากผู้ทดลอง เพื่อให้เกิดความแน่ใจว่าแต่ลำดับการทดลองจะได้รับการปฏิบัติที่เท่าเทียมกัน ไม่เกิดการเอนเอียง ซึ่งการสุ่มการทดลองสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองในแต่ละการทดลอง โดยการสุ่มยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีดังนี้

- การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
- การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
- การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก (Complete Randomization within Blocks)

2.7.6 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล [17]

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design) เป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยทุกๆ Treatment Combination ของปัจจัยทุกตัวที่ศึกษาจะถูกพิจารณาไปพร้อมๆกัน

ผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลกระทบหลัก (Main Effect) ในการทดลองที่มีผลแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆทั้งหมดของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งหมายถึงผลตอบของปัจจัยหนึ่งขึ้นอยู่กับระดับของปัจจัยอื่นๆ เรียกว่าการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยค่าที่จุดต่างๆคือตัวแปรตอบสนอง เมื่อมีปัจจัย 2 ตัวคือ A จะประกอบด้วย a ระดับ และ B จะประกอบด้วย b ระดับโดยที่แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับ “ต่ำ” และ “สูง” ซึ่งสามารถแทนระดับทั้งสองด้วยเครื่องหมาย “-” และ “+” ตามลำดับ โดยในแต่ละการทำซ้ำของการทดลองจะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด $a \times b$ การทดลอง และมีจำนวนการทำซ้ำเป็น n ครั้ง ซึ่งประโยชน์ที่สำคัญของการทดลองแบบแฟคทอเรียลคือ สามารถทราบถึงผลกระทบร่วมชองปัจจัย (Interaction Effect) ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญมาก เนื่องจากถ้าหากเราละเลยผลของผลกระทบร่วมของปัจจัยอาจจะส่งผลให้ผู้ทำการทดลองสรุปผลผิดพลาดได้ ดังรูปที่ 2.16 แสดงลัษณะของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัย A และ ปัจจัย B ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง อีกจุดเด่นคือมีจำนวนการทดลองที่น้อยกว่าการทดลองแบบอื่น



รูปที่ 2.16 ลักษณะการเกิดผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B [17]

2.7.7 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k (2^k Factorial Design) [17]

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้ในกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงาน และใน 2 ระดับที่กล่าวมานั้นจะแทนด้วยระดับสูงและต่ำของปัจจัยหนึ่งๆ ใน 1 การทำซ้ำที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งหมด 2^k โดยมีสมมติฐานว่า ปัจจัยทั้งหมดมีค่าคงที่ การออกแบบเป็นแบบเชิงสุ่มบริบูรณ์ และสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติเป็นที่ยอมรับได้ ข้อมูลการออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อทำการศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์โดยใช้การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบ 2^k จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง

2.7.8 การออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design) [17]

เมื่อจำนวนของปัจจัยในการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k เพิ่มขึ้น โดยส่วนมากแล้วจำนวนการทดลองสำหรับเรพลิเคตที่บริบูรณ์จะเพิ่มมากขึ้นเกินกว่าที่ทรัพยากรที่มีอยู่จะสามารถรองรับได้ เช่น เวลา ค่าใช้จ่าย เป็นต้น เช่นใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์ของการออกแบบ 2^6 จะต้องมีการทดลองทั้งหมด 64 ครั้ง ในการออกแบบนี้แค่ 6 ตัว จากระดับขั้นความเสรี 63 ตัวเท่านั้นที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลัก ระดับขั้นเสรี 15 ตัวจะเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาแบบสองปัจจัย และระดับขั้นความเสรีที่เหลืออีก 42 ตัวจะเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาแบบ

สามปัจจัย หรืออันตรกิริยาแบบสี่ปัจจัย จนกระทั่งถึงอันตรกิริยาของ k ปัจจัย ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษากรณีศึกษาที่หลากหลายพบว่าผลกระทบร่วมตั้งแต่ลำดับสามขึ้นไป จะสามารถละเลยการประมาณค่าเหล่านี้ได้ จึงส่งผลให้สามารถทำการทดลองที่จำนวนสภาวะเพียงบางส่วนได้ เช่นการทำการทดลองเพียงครึ่งหนึ่งของการทดลองทั้งหมด หรือการทำการทดลองเพียงหนึ่งในสี่ หรืออาจจะน้อยกว่านั้นแล้วแต่กรณีไป ซึ่งเราเรียกการออกแบบการทดลองแบบนี้ว่าการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design) ซึ่งการออกแบบประเภทนี้จำเป็นต้องเลือกสภาวะการทดลองให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดจากการทดลอง ซึ่งหากเลือกไม่ครอบคลุมจะส่งผลกับการวิเคราะห์ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองได้

หลักการเลือกสภาวะการทดลองแบบ One-Half คือให้เลือกสภาวะการทดลองที่เครื่องหมายของ Highest-Order Interaction ที่มีค่าเป็นเครื่องหมายบวก หรือเครื่องหมายลบ อย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งเครื่องหมาย Highest-Order Interaction สามารถหาได้จากผลคูณของเครื่องหมายของระดับทุกปัจจัยในสภาวะการทดลองนั้นดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เครื่องหมายบวกและลบสำหรับการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^3

Treatment Combination	Factorial Effect							
	I	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
c	+	-	-	+	+	-	-	+
abc	+	+	+	+	+	+	+	+
ab	+	+	+	-	+	-	-	-
ac	+	+	-	+	-	+	-	-
bc	+	-	+	+	-	-	+	-
(1)	+	-	-	-	+	+	+	-

จากตารางที่ 2.1 แสดงกรณีของสามปัจจัย เมื่อทำการทดลองแบบ One-Half ควรจะเลือกสภาวะการทดลองที่มีเครื่องหมาย Highest-Order Interaction ซึ่งในตารางจะพบว่า ABC จะมีเครื่องหมายที่เหมือนกัน โดยในที่นี้เราจะทำการเลือกทำการทดลองที่เครื่องหมายบวก ดังนั้นจะได้สภาวะการทดลอง a, b, c และ abc ดังแสดงในตารางช่องซ้ายสุด ซึ่งจะเห็นว่าเป็นการทดลองเพียงครึ่งหนึ่งของการทดลองทั้งหมดจาก 8 สภาวะการทดลอง ดังนั้นถ้าหากเลือกทำการทดลองใน 4 สภาวะที่เลือกมาข้างต้น พบว่าเราจะไม่สามารถประมาณค่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลกระทบรวมของ ABC ได้ เนื่องจากเราต้องทำการทดลองที่สภาวะบวกทั้งหมด แต่เราสามารถประมาณค่าผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของสองปัจจัยได้ทุกผลกระทบ เนื่องจากเครื่องหมายบวกและลบในช่องผลกระทบเหล่านั้นมีจำนวนที่เท่ากันในทั้งเครื่องหมายบวกและเครื่องหมายลบ

ABC จากตารางจะถูกเรียกว่า "ตัวกำเนิด" (Generator) ของแผนการทดลองเศษส่วนนี้ การที่เราสามารถลดจำนวนการทดลองลงได้ครึ่งหนึ่ง ทำให้เราไม่สามารถประมาณค่าผลกระทบได้อย่างอิสระหรือผลของปัจจัยบางตัวอยู่ในรูปที่ไม่สามารถแยกแยะออกมาได้เราเรียกเหตุการณ์นี้ว่า "การคอนฟาวด์" (Confounding) เช่นในกรณีที่มี 3 ปัจจัย ทำการทดลองแบบ one-half จะได้จำนวนการทดลอง 4 การทดลอง ซึ่งเราสามารถประมาณค่าผลกระทบได้ 4 ค่า ซึ่งค่าแรกเป็นจุดตัดแกน อีก 3 ค่า เป็นผลกระทบต่างๆปะปนกันไป โดยที่มีตัวกำเนิดเป็นตัวกำหนดว่าผลกระทบใดจะปะปนกับผลกระทบใดเราเรียกว่า "โครงสร้างคู่แฝด" (Alias structure) ซึ่งในการหาโครงสร้างคู่แฝดนั้น อันดับแรกเราต้องทำการเขียน "ตัวกำหนดความสัมพันธ์" (Defining Relation) คือ I=ABC หมายความว่าเราจะทำการเลือกการสภาวะการทดลองที่ ABC เป็นเครื่องหมายบวก โดยที่ I (Identity Element) หมายถึงการเป็นบวก ใน Alias structure จะมีจำนวนค่าประมาณที่สามารถคำนวณได้จากผลการทดลองเท่ากับจำนวนสภาวะการทดลองที่ทำ

2.7.8.1 มิติการออกแบบ (Design Resolution)

มิติการออกแบบ (Resolution) เป็นการบ่งบอกถึงคุณภาพของผลสรุปที่จะได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นผลจากการเลือกใช้ตัวก่อกำเนิด (Generator)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การออกแบบมิติ III (Resolution III) การออกแบบนี้จะไม่มีผลกระทบหลักใดๆ ที่จะคู่แฝดแฝงกับผลกระทบหลักตัวอื่นๆ แต่ผลกระทบหลักจะคู่แฝดกับผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยอาจจะคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกันซึ่งทำให้ผลปะปนกัน

การออกแบบมิติ IV (Resolution IV) การออกแบบนี้จะไม่มีผลกระทบหลักใดๆที่จะคู่แฝดแฝงกับผลหลักตัวอื่นๆ หรือกับผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยใดๆ แต่ผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยจะคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกันทำให้ผลปะปนกัน

การออกแบบมิติ V (Resolution V) การออกแบบนี้จะไม่มีผลกระทบหลักหรือผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยสองปัจจัยใดๆ ที่จะคู่แฝดแฝงกับผลหลักหรือผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยตัวอื่นๆ แต่ผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยจะคู่แฝดแฝงกับผลกระทบร่วมระหว่างสามปัจจัย

Available Factorial Designs (with Resolution)

Run	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Full	III												
8		Full	IV	III	III	III								
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

Available Resolution III Plackett-Burman Designs

Factors	Runs	Factors	Runs	Factors	Runs
2-7	12,20,24,28,...,48	20-23	24,28,32,36,...,48	36-39	40,44,48
8-11	12,20,24,28,...,48	24-27	28,32,36,40,44,48	40-43	44,48
12-15	20,24,28,36,...,48	28-31	32,36,40,44,48	44-47	48
16-19	20,24,28,32,...,48	32-35	36,40,44,48		

รูปที่ 2.17 Resolution ที่เป็นไปได้ของแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ที่จำนวนปัจจัยต่างๆ

จากรูปที่ 2.17 แสดง Resolution ที่สามารถเป็นไปได้ที่จำนวนปัจจัยต่างๆ โดยในขั้นแรกเราต้องทำการกำหนดจำนวนการทดลอง (Run) ที่ค่าที่ต้องการ จากนั้นนำมาพิจารณาควบคู่กับ Resolution ที่ต้องการ และดูความเป็นไปได้ในการทดลอง ว่าสามารถยอมรับเงื่อนไขของ Resolution ได้หรือไม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่า Resolution ยิ่งสูง จะทำให้มีข้อจำกัดน้อยลงในเรื่องสมมติฐานเกี่ยวกับว่าอันตรกิริยาตัวใดจะถูกละเลยได้เพื่อที่จะได้มาซึ่งการตีความหมายข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

2.7.8.2 การเลือกรูปแบบการทดลองแฟคทอเรียล

นอกจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนแบบ One-Half แล้ว เรายังสามารถเลือกรูปแบบการออกแบบทดลองที่ทำให้จำนวนการทดลองน้อยลงไปได้อีก ซึ่งเรียกว่าการออกแบบการทดลองแบบ 2^{k-p} ซึ่งถ้าหากจำนวนการทดลองมีน้อยลงย่อมส่งผลดีในด้านต้นทุน แรงงานในการปรับปรุงคุณภาพ ทั้งนี้เราต้องเชื่อมั่นได้ว่าแผนการทดลองที่เราเลือกมานั้นมีความเหมาะสมและได้สารสนเทศที่เป็นประโยชน์

ยกตัวอย่างเช่น ในการศึกษาออกแบบการทดลอง สนใจปัจจัยจำนวน 15 ตัว (k=15) จะเห็นได้ว่า

- หากเราทำการทดลองแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป เราจะต้องทำการทดลองทั้งหมด 2^{15} = 32,768 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจำนวนการทดลองจะมากเกินกว่าที่เราจะทำการทดลองไหว อีกทั้งยังสิ้นเปลืองทุนและแรงงานสำหรับการทดลอง

- หากเราทำการทดลองแฟคทอเรียลแบบบางส่วน 2^{k-1} (One-Half) เราจะต้องทำการทดลองทั้งหมด 2^{15-1} = 16,384 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจำนวนการทดลองจะลดลงอย่างมาก แต่จำนวนการทดลองยังถือว่ามากเกินกว่าที่เราจะทำการทดลองได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตัวอย่างข้างต้นเราจะพบว่าถ้าหากจำนวนปัจจัยยิ่งมีมาก จะทำให้จำนวนการทดลองที่เราต้องทำการเก็บข้อมูลมากตามไปด้วย ซึ่งการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบบางส่วน 2^{k-1} อาจจะยังไม่เหมาะสมมากนัก จึงทำให้มีรูปแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลบางส่วนแบบ 2^{k-p} เพื่อให้มีจำนวนการทดลองที่น้อยลง เช่นจากตัวอย่างเดิมที่มีปัจจัยทั้งหมด 15 ตัว หากเราต้องการจำนวนการทดลองที่ 64 การทดลอง เราต้องทำการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนแบบ One-Nine หมายถึง การทำการทดลองแบบ 2^{15-9} โดยถ้าหากเราทำการทดลองแบบนี้เราจะได้จำนวนการทดลอง 64 การทดลอง จากการศึกษาปัจจัยทั้งสิ้น 15 ปัจจัย ทั้งนี้เราจำเป็นที่จะต้องพิจารณาว่าจะสามารถยอมรับ Resolution ที่จะได้รับได้หรือไม่

2.7.8.3 ขั้นตอนในการสร้างแผนการทดลองเชิงแฟคทอเรียลบางส่วนแบบ 2k-p

1. กำหนดค่า Resolution ที่ต้องการได้รับ และจำนวนการทดลองที่สามารถทำการทดลองได้

2. สร้างรูปแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปสำหรับ k-p ปัจจัย

3. สร้าง p คอลัมน์สำหรับปัจจัยที่ยังเหลืออยู่โดยเลือก Design Generators ที่เหมาะสม

4. พิจารณา Alias Structure ที่ได้รับ

5. ทำการทดลองและเก็บข้อมูลของค่าตอบสนอง

6. วิเคราะห์ผลกระทบหลักของปัจจัย โดยพิจารณาจากกราฟผลกระทบและความมีนัยสำคัญของผลกระทบ

7. สรุปผลการทดลองและกำหนดขั้นตอนถัดไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7.8.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ตรวจสอบสมมติฐานว่าข้อมูลมีลักษณะที่เหมาะสมที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอย (Analysis of Variance: ANOVA) ในการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยหรือไม่

โดยสมมติฐานประกอบด้วย ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ ค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน และค่าความผิดพลาดมีค่าความแปรปรวนคงที่

2. พิจารณากราฟผลกระทบหลักของปัจจัยและกราฟผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย โดยอาศัยโปรแกรม MINITAB

3.คำนวณค่าผลกระทบหลักของปัจจัยและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย

4. ทดสอบความมีนัยสำคัญของผลกระทบของปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Hypothesis Testing)

กรณีไม่มีการทำการทดลองซ้ำ จะพิจารณาจากกราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) ของค่าผลกระทบของปัจจัย จะไม่สามารถพิจารณาจากค่า p-value ได้ เนื่องจากไม่สามารถประมาณค่าความผิดพลาดย่างสุ่มได้

กรณีมีการทำการทดลองซ้ำ สามารถพิจารณาได้จากค่า p-value จากการทำการทดสอบ t (t-test) สำหรับค่าผลกระทบของปัจจัย

2.7.9 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) [17, 18]

แบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบมีวัตถุประสงค์สำหรับการต้องการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษานั้นจะถูกทดสอบที่มากกว่า 2 ระดับ ตัวอย่างแบบการทดลองประเภทนี้ได้แก่ แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) และแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เป็นต้น

- **การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD)**

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางเป็นวิธีการในการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวแปรตอบสนอง โดยการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์และทางสถิติเพื่อใช้ในการหาพื้นพื้นผิวตอบ โดยทั่วไปนั้นจะประกอบด้วยกันทั้งหมด 3 ส่วนด้วยกันคือ

1. ส่วนการทดลองแฟคทอเรียล 2^k (Factorial Runs) หรือแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{k-p} โดยที่ส่วนการทดลองแฟคทอเรียลอยู่ที่ระดับ ±1 หน่วยจากการทดลองที่จุดศูนย์กลางที่ระดับ 0

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. ส่วนระยะห่างจากจุดศูนย์กลางการทดลองในแนวแกนด้วยระยะ α (Axial Runs) โดยจะมีจำนวนการทดลอง 2k การทดลอง ส่วนการทดลองที่ส่วนของจุดแกนจะอยู่ที่ระดับ $\pm\alpha$ หน่วยจากการทดลองที่จุดศูนย์กลาง โดยที่ $\alpha = (2^{k-p})^{1/4}$ ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 2.2 แสดงค่า α ที่นิยมใช้เมื่อมีจำนวนปัจจัยเป็นค่าต่างๆ

ตารางที่ 2.2 ค่า α กรณีของการทดลองแบบส่วนผสมกลางเมื่อมีช่วงปัจจัยที่ 2-6

จำนวนปัจจัย	ส่วนการทดลองแฟคทอเรียล	α
2	2^2	$2^{2/4}$=1.414
3	2^3	$2^{3/4}$=1.682
4	2^4	$2^{4/4}$=2.000
5	2^5	$2^{5/4}$=2.378
6	2^6	$2^{6/4}$=2.828

3. ส่วนการทดลองที่จุดศูนย์กลางการทดลอง (Center Runs) โดยจะมีจำนวนการทดลองเป็น nc การทดลอง

ดังนั้นจำนวนการทดลองทั้งหมดของการออกแบบการทดลองส่วนผสมกลางจะเท่ากับ 2^k+2k+nc

- **การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken**

[17] การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เป็นการออกแบบการทดลองสำหรับปัจจัย 3 ปัจจัยขึ้นไปโดยปัจจัยนั้นๆจะถูกทดลองที่ 3 ระดับ ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขของกระบวนการผลิตและเงื่อนไขในการผลิตที่เหมาะสม ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken จะมีจำนวนครั้งสำหรับการทดลองที่ลดลง รวมถึงต้นทุนที่ถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองแบบส่วนประสมกลางในกรณีที่มี 3-4 ปัจจัย หากมากกว่านั้นจำนวนการทดลองแบบ Box-Behnken อาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่าจำนวนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งขึ้นอยู่ว่าจะเลือก Full Factorial Design หรือ Fractional Factorial Design และประสิทธิภาพสำหรับการพยากรณ์ของสมการที่ได้จากแบบการทดลอง Box-Behnken จะด้อยประสิทธิผลกว่าในการพยากรณ์สมการของการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Available Response Surface Designs

Design		Continuous Factors								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Central composite full	unblocked	13	20	31	52	90	152			
	blocked	14	20	30	54	90	160			
Central composite half	unblocked				32	53	88	154		
	blocked				33	54	90	160		
Central composite quarter	unblocked							90	156	
	blocked							90	160	
Central composite eighth	unblocked									158
	blocked									160
Box-Behnken	unblocked		15	27	46	54	62		130	170
	blocked			27	46	54	62		130	170

รูปที่ 2.18 แบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบที่เป็นไปได้ และจำนวนการทดลองที่สอดคล้อง

จากรูปที่ 2.18 เป็นตารางจากโปรแกรม Minitab เพื่อแสดงแสดงแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบที่เป็นไปได้ ได้แก่ การทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบเต็มรูป การทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ 1/2 การทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ 1/4 การทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบ 1/8 และการทดลองแบบ Box-Behnken พร้อมทั้งแสดงจำนวนการทดลองที่สอดคล้องกับจำนวนปัจจัย

2.8 ฟังก์ชั่นความพึงพอใจ (Desirability Function) [19]

ฟังก์ชั่นความพึงพอใจ (Desirability Function) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับการทำ Optimization สำหรับการจัดการปัญหาในรูปแบบของการศึกษาปัญหาหลายผลตอบ เช่นเมื่อต้องการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่ผลิตภัณฑ์ตัวนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด เช่น ความหนา ความยาว ความชื้น อุณหภูมิ ความดัน ทีนี้เราไม่สามารถแก้ปัญหาทั้งหมดพร้อมกันได้ เราจึงนำเอาฟังก์ชันความพึงพอใจเข้ามาช่วยในการตัดสินซึ่งถ้าหากค่าผลตอบไม่อยู่ในขอบเขตจะถือว่าไม่เป็นที่พึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าของฟังก์ชั่นความพึงพอใจ (Desirability: d) ของผลตอบจะอยู่ในช่วง 0-1 โดยที่เมื่อ d มีค่าเท่ากับศูนย์หมายถึง ผลตอบนั้นอยู่นอกขอบเขตการยอมรับ (พึงพอใจน้อยสุด) ค่าความพึงพอใจจะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ จน d มีค่าเท่ากับหนึ่ง หมายถึงผลตอบนั้นได้ความพึงพอใจเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อะไรก็ตามเราต้องกำหนดเป้าหมายของการพัฒนาก่อนว่าต้องการค่าเป้าหมายมากที่สุด น้อยที่สุด หรือให้ตรงตามค่าเป้าหมาย

- **กรณีต้องการผลตอบสูงสุด (Maximize)**

$$d(y_i) = \begin{cases} 0 & \text{If} \quad y_i < L_i \\ \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i}\right)^s & \text{If} \quad L_i \le y_i \le T_i \\ 1 & \text{If} \quad y_i > T_i \end{cases}$$

- **กรณีต้องการผลตอบน้อยสุด (Minimize)**

$$d(y_i) = \begin{cases} 1 & \text{If} \quad y_i < L_i \\ \left(\frac{y_i - U_i}{T_i - U_i}\right)^s & \text{If} \quad L_i \le y_i \le T_i \\ 0 & \text{If} \quad y_i > T_i \end{cases}$$

- **กรณีต้องการผลตอบอยู่ที่ค่าที่กำหนด (Target)**

$$d(y_i) = \begin{cases} 0 & \text{If} \quad y_i < L_i \\ \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i}\right)^s & \text{If} \quad L_i \le y_i \le T_i \\ \left(\frac{y_i - U_i}{T_i - U_i}\right)^t & \text{If} \quad T_i \le y_i \le U_i \\ 0 & \text{If} \quad y_i > U_i \end{cases}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยที่

d คือ ค่าความพึงพอใจของผลตอบ

y_i คือ ค่าของผลตอบ

U_i คือ ค่าขีดจำกัดสูงสุดของผลตอบ

T_i คือ ค่าขีดจำกัดต่ำสุดของผลตอบ

s, t คือ ค่าน้ำหนักการให้ความสำคัญ

เมื่อค่าของความพึงพอใจของผลตอบมีหลายค่า ดังนั้นเราต้องทำการหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Overall Desirability, D)

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4 \times \ldots \times d_k)^{1/k}$$

โดยที่ k คือจำนวนของตัวแปรตอบสนองที่ต้องการปรับปรุงแก้ไข

2.8.1 การใช้งานฟังก์ชั่นความพึงพอใจมีขั้นตอนดังนี้

- ทำออกแบบการทดลอง เก็บผลการทดลอง และสร้างสมการความสัมพันธ์ของผลตอบทั้งหมด k คำตอบ
- กำหนดรูปแบบความต้องการของแต่ละผลตอบ (ค่าผลตอบสูงสุด ค่าผลตอบต่ำสุด ค่าผลตอบตรงตามค่าที่กำหนด)
- คำนวณหาค่ามากที่สุดของความพึงพอใจโดยรวม ภายใต้ค่าขีดจำกัดควบคุมของปัจจัยนำเข้า

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 งานวิจัยเกี่ยวข้องกับการผสมสาร

อุราวรรณ อุ่นแก้ว [11] ศึกษาการปรับปรุงทรายเคลือบเรซินที่ผลิตในประเทศสำหรับการทำแบบหล่อเปลือก ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติโดยการเลือกใช้ระหว่างเรซินที่ผลิตในประเทศไทยกับเรซินของต่างประเทศ โดยเริ่มต้นทำการศึกษาสมบัติของเรซินพบว่าเรซินที่ผลิตในประเทศมีคุณสมบัติที่แตกต่างกับเรซินของต่างประเทศ เช่น ระยะเวลาการเกิดเจล สมบัติการไหล จุดหลอมเหลว และโครงสร้างไอโซเมอร์ เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติในเรื่องของโครงสร้างไอโซเมอร์นั้นจะส่งผลทำให้คุณสมบัติมีความแตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการไหลของเรซินและความหนืด รวมไปถึงคุณสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดัดโค้ง รวมถึงการศึกษาคุณสมบัติของทรายสำหรับงานหล่อด้วย โดยส่วนผสมของทรายเคลือบเรซินนั้นจะประกอบไปด้วย ทราย เรซิน เฮกซามีน และแคลเซียมสเตียเรท โดยจะทำการผสมสูตรสำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซินด้วยเครื่องผสมทรายขนาดเล็ก (เครื่องผสมทรายสำหรับการทำการทดลอง) โดยการเตรียมส่วนผสมสำหรับการทดลองนั้นสามารถแบ่งได้ดังตารางที่ 2.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2.3 การเตรียมทราย เรซิน และเปอร์เซ็นต์สำหรับการผสม

Resin Content, %	Type of Resin	Type of Sand	Application
1.7	Thai Resin	Australian Sand	Core
2.1	Thai Resin	Australian Sand	Core
2.4	Thai Resin	Australian Sand	Core
3.2	Thai Resin	Reclaimed Sand	Mold for Aluminum Casting
2.7	Import Resin	Reclaimed Sand	Mold for Iron Casting
4.3	Import Resin	Rayong Sand	Mold for Iron Casting

โดยจากตาราง 2.3 ข้างต้นจะใช้เฮกซามีนที่ 15% และแคลเซียมสเตียเรท 0.125% สำหรับเรซินต่างประเทศ และใช้เฮกซามีน 17% และแคลเซียมสเตียเรท 0.2% สำหรับเรซินในประเทศ โดยน้ำหนัก ซึ่งขั้นตอนสำหรับการผสมทรายเคลือบเรซินจะเริ่มต้นจากการนำทรายไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300℃ เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำทรายไปใส่เครื่องผสมทราย รอจนอุณหภูมิอยู่ 125-135℃ แล้วทำการเติมเรซินลงไปผสมกับทรายใช้เวลาประมาณ 60 นาที หลังจากนั้นเติมเฮกซามีนลงไปพร้อมทำการเป่าลมเข้าไปเพื่อป้องกันการจับตัวกันของส่วนผสม ลดอุณหภูมิ และเร่งความเร็วในการระเหยตัวของน้ำ และสุดท้ายทำการเติมแคลเซียมสเตียเรทลงไปและทำการผสมกันเป็นเวลา 30 วินาที เมื่อได้ทรายเคลือบเรซินแล้วทำการตักแบ่งเพื่อนำตัวอย่างทรายไปทำการทดสอบพบว่า

●คุณสมบัติที่แตกต่างระหว่างเรซินที่ผลิตในประเทศไทยกับเรซินต่างประเทศ

(ก) ช่วงเวลาที่เรซินกลายเป็นเจล (Gel Time) ของเรซินภายในประเทศกับเรซินต่างประเทศอยู่ที่ 44 และ 61 วินาที (ที่อุณหภูมิ 150℃) ตามลำดับ

(ข) ช่วงเวลาในการไหลของเรซินภายในประเทศกับเรซินต่างประเทศอยู่ที่ 37 และ 48 มิลลิเมตร (ที่อุณหภูมิ 125℃) ตามลำดับ

●เครื่องผสมทรายที่มีสเกลการวัดที่มีขนาดเล็กสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการทำการทดลองผสมทรายเคลือบเรซินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

●จากผลการศึกษาทรายเคลือบเรซินพบว่าความทนแรงดัดโค้งขึ้นอยู่กับสัดส่วนหรือปริมาณของเรซินที่ผสม จากการเปรียบเทียบสูตรของทางโรงงาน พบว่าทรายรีเคลม (Reclaimed Sand) ที่เคลือบเรซินจากต่างประเทศที่ 2.7% โดยน้ำหนัก มีค่าทนแรงดัดโค้งที่ 48-58 kg/cm^2 เมื่อทำการผสมกับเรซินภายในประเทศที่ร้อยละ 20 และ 30 ต่อเรซินต่างประเทศร้อยละ 80 และ 70 ตามลำดับ พบว่าค่าทนแรงดัดโค้งอยู่ที่ 50-55 kg/cm^2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.9.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง

Martinet S. และคณะ [20] ได้อธิบายเกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) ไว้อย่างสั้นๆว่า เป็นเครื่องมือในการใช้สำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อผลแปรตอบสนองที่เราสนใจทำการศึกษา โดยนำเอาเทคนิคหรือวิธีการทางสถิติเข้ามาช่วยเพื่อแก้ปัญหา อีกทั้งยังกล่าวว่าการออกแบบการทดลองนั้นใช้เพื่อลดจำนวนในการทดลองเพื่อประหยัดต้นทุนและแรงงาน

2.9.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ

C. Zhu และคณะ [21] การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) เป็นวิธีการที่เหมาะสำหรับการศึกษาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองที่เราทำการศึกษา และที่สำคัญใช้สำหรับเพื่อลดจำนวนการทดลองเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลอง โดยการออกแบบการทดลองที่ถูกนิยมใช้คือการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design: CCD) โดยมีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ทำการศึกษาปัญหาด้วยวิธีการ CCD ซึ่งจะยกตัวอย่างให้เห็นดังนี้

C. Cojocaru และคณะ [22] ศึกษาการสร้างแบบจำลองและหาค่าที่เหมาะสมของตอบแปรตอบสนอง 2 ชนิด คือ Total Permeate Flux (J) และ Selectivity (α) ในกระบวนการแยกของผสมโดยการใช้เมมเบรน (Pervaporation) ในสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ Water/Acetonitrile (W/A) และ Water/Ethanol (W/E) โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k Factorial) ซึ่งมีปัจจัยสำหรับการทดลองจำนวน 3 ปัจจัยได้แก่ Feed Temperature, Organic Concentration และ Downstream Pressure ทำการทดลองที่ 3 ระดับ (-1 0 1) มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 10 การทดลอง ซึ่งมาจากการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k Factorial) จำนวน 8 การทดลอง และทำการเพิ่มการทดลองที่จุดศูนย์กลางอีก 2 การทดลอง นำค่าที่ได้ไปสร้างสมการถดถอยแบบพหุคูณเพื่อใช้สำหรับทำนายค่าตัวแปรตอบสนองที่ต้องการ และนำวิธีการพื้นผิวตอบเข้ามาเพื่อใช้หาค่าคำตอบที่เหมาะสมและใช้ฟังก์ชั่นการตัดสินใจเข้ามาให้คะแนนความสำคัญของตอบแปรตอบสนองในกรณีที่มีมากกว่า 1 ตัว ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการค่าที่สูงสุดของผลตอบสนองจึงใช้ฟังก์ชั่นสำหรับค่าสูงสุดเข้ามาคำนวณเพื่อหาค่าให้ตัวแปรตอบสนองทั้งสอง ซึ่งค่าที่เหมาะสมในกรณี water acetonitrile คือ Feed Temperature (55℃), Initial Concentration (6.58%) และ Downstream Pressure (13.99kPa) และในกรณีของ Water/Ethanol คือ Feed Temperature (55℃), Initial Concentration (4.53%) และ Downstream Pressure (9.57 kPa)

Zhao Y.และคณะ [23] ศึกษาการใช้อัลตราซาวด์เสริมในการสกัดฟีนอริกจากสมุนไพร โดยมีการนำการออกแบบการทดลองเข้ามาเพื่อช่วยในการปรับตั้งค่าปัจจัยในการใช้อัลตราซาวด์เสริมในการสกัดฟีนอริกจากสมุนไพร ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัย 3 ปัจจัย ดังนี้ Ethanol Concentration (X_1), Extraction Time (X_2) และRatio of Aqueous Ethanol to Raw Material (X_3) เมื่อได้ปัจจัยที่จะทำการศึกษาแล้ว จากนั้นนำปัจจัยที่ได้มาทำการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design) แบบ Central Composite Design (CCD) โดยปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยจะถูกทดสอบที่ 5 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 โดยทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วงได้แก่ การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Runs) โดยทำการทดลองที่ช่วงระดับ -1 และ +1 ส่วนที่สองเป็นการทดลองที่จุดแกน (Axial Runs) โดยทำการทดลองที่ระดับ $\pm\alpha$ (α=1.682) และส่วนสุดท้ายเป็นการทดลองที่จุดศูนย์กลาง (Center Runs) โดยทำการทดลองที่ระดับ 0 จากการออกแบบการทดลองข้างต้นจะได้จำนวนการทดลองทั้ง 20 การทดลอง

ตารางที่ 2.4 การออกแบบระดับของปัจจัยแต่ละชนิดสำหรับการออกแบบการทดลอง

Factor	Level				
	-1.682	-1	0	1	1.682
Ethanol Concentration (%) (v/v)	20	32.16	50	67.84	80
Ultrasonic Extraction Time (min)	5	14.12	27.5	40.88	50
Liquid-Solid Ratio (mL/g)	50	90.55	150	209.45	250

เมื่อทำการเก็บข้อมูลตามการออกแบบการทดลองเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำมาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับตั้งปัจจัยด้วยวิธีการพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology) พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปัจจัยทั้ง 3 ชนิด คือ คือ X_1 เท่ากับ 50% (v/v), X_2 เท่ากับ 27.5 mm และ X_3 เท่ากับ 250 mL/g ซึ่งทำให้ได้ค่าผลตอบสนอง (ผลผลิตจากการสกัดฟีนอริก) เท่ากับ 4.29% ซึ่งมีค่าเพิ่มจากเดิม 1.68% จากนั้นได้ทำกรสร้างสมการความสัมพันธ์สำหรับการพยากรณ์ค่าผลผลิตจากการสกัดฟีนอลิกและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสมการที่ได้มีค่า R^2 และ R^2(Adj) เท่ากับ 0.9905 และ 0.9782 ตามลำดับ

Derossi A และคณะ [24] ศึกษาเกี่ยวกระบวนการการทำแห้งบนมะเขือเทศด้วยวิธีการออสโมซิส โดยมีตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษา 3 ชนิด ได้แก่ Water Activity, Red Index, และ Consistency ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง 3 ตัวคือ Treatment Time, Mass Fraction of Sucrose และ Mass Fraction of Sodium Chloride จากนั้นทำใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design) แบบ Central Composite Design (CCD) โดยแต่ละ

ปัจจัยถูกทดลองที่ 5 ระดับ มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง จากนั้นทำการหาผลตอบที่ดีที่สุด แต่เนื่องจากมีผลตอบสนองที่สนใจนั้นมีหลายผลตอบสนอง จึงได้มีการนำฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) เข้ามาช่วยในการหาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งจะมีการหาค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองแต่ละตัวภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะมีกำหนดเป้าหมายและน้ำหนักความสำคัญของตัวแปรตอบสนองแต่ละตัว แล้วแปลงเป็นค่าความพึงพอใจโดยรวมของ (Overall Desirability) โดยค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม คือ Treatment Time ปรับตั้งที่ 22 hour, Mass Fraction of Sucrose ปรับตั้งที่ 55.62% และ Mass Fraction of Sodium Chloride ปรับตั้งที่ 2.45% ซึ่งทำให้ผลตอบสนอบทั้ง 3 คือ Water Activity, Red Index และ Consistency มีค่าเท่ากับ 0.935, 23.03 และ 2.36 N ตามลำดับ มีค่าความพึงพอใจโดยรวมมีค่าเท่ากับ 0.736

Yadav R และคณะ [25] ทำการศึกษาหาค่าที่เมาะสมของกระบวนการสำหรับการสังเคราะห์ Cardanol-based ประเภทโนโวแลค โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design) แบบ Central Composite Design (CCD) ที่มีปัจจัยสำหรับการทดลอง 5 ปัจจัย คือ Mole ratio, Catalyst Concentration, Reaction Temperature, Reaction Time, pH โดยแต่ละปัจจัยทำการทดลองที่ 5 ระดับ ซึ่งแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial runs) โดยทำการทดลองที่ช่วงระดับ -1 และ +1 ส่วนที่สองเป็นการทดลองที่จุดแกน (Axial Runs) โดยทำการทดลองที่ระดับ $\pm\alpha$ (α=2) และส่วนสุดท้ายเป็นการทดลองที่จุดศูนย์กลาง (Center Runs) โดยทำการทดลองที่ระดับ 0 จากการออกแบบการทดลองข้างต้นจะได้จำนวนการทดลองทั้ง 32 การทดลอง จากนั้นสร้างสมการถดถอยสำหรับการทำนายผลของตัวแปรตอบสนอง ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดคือ Mole ratio (1:0.652) ที่ 119.84℃, Catalyst Concentration (1.988%), Reaction Temperature, Reaction Time (3 hrs.), pH (3)

Gaddafi I.และคณะ [26] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของปัจจัยการทดลองที่มีผลต่อการดูดกลืนรังสีดูดซับในกระบวนการที่มีระบบการไหลอย่างต่อเนื่องโดยประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวตอบเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งในตอนแรกจะทำการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ซึ่งมีปัจจัยในการทดลองทั้งหมด 5 ตัว ประกอบไปด้วย Concentration (X_1), Dosage (X_2), Column (X_3), Flow Rate (X_4) และ Contact Time (X_5) โดยมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 3 3 การทดลอง แบ่งเป็นการทดลองที่ลูกบากศ์ 16 การทดลอง จุดกึ่งกลาง 6 การทดลอง ที่จุดแกน 10 การทดลอง และทำการเพิ่มกึ่งกลางของจุดแกนอีก 1 การทดลอง โดยทำการทดลองที่ 3 ระดับ คือ –1, 0 และ 1 จากนั้นทำการวิเคราะห์สร้างสมการถดถอยแบบพหุคูณเพื่อใช้ในการทำนาย %Removal of DBT ซึ่งมีค่า R^2 = 84.26% ทำให้สมการถดถอยแบบพหุคูณมีความน่าเชื่อถือ และทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิต ตรวจสอบความเป็นปกติ เป็นต้น จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าสามารถหาค่า %Removal of DBT ได้สูงสุดเท่ากับ 96% ต้องตั้งค่าปัจจัยต่างๆที่ระดับต่อไปนี้ Concentration

(59 ppm), Dosage (0.5 g.), Column (11 cm.), Flow Rate (50 rpm) และ Contact Time (5 min) ซึ่งจะได้ค่า %Removal of DBT ได้สูงสุดตามที่ต้องการ

B.Surekha และคณะ [27] ศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวตอบสำหรับการสร้างแบบจำลองคุณสมบัติของเรซินโครเมตเคลือบทรายไส้แบบ โดยคุณภาพงานหล่อประเภทไส้แบบหล่อส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติหลายชนิด แต่ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาที่ 4 ชนิดดังนี้ Compression Strength, Shear Strength, Tensile Strength และ Permeability ซึ่งค่าคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับปัจจัยที่จะนำมาทำการทดลองดังนี้ %Resin, %Hardener, Number of Strokes และ Curing Time ซึ่งค่าความสัมพันธ์ของคุณสมบัติกับค่าปัจจัยนั้นส่วนใหญ่จะมีความซับซ้อนกันโดยธรรมชาติ ดังนั้นผู้วิจัยจึงพยายามที่จะสร้างสมการความสัมพันธ์ขึ้นมา โดยอาศัยการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design) แบบ Central Composite Design (CCD) มีระดับการทดลองทั้งหมด 3 ระดับ (-1 0 1) มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง ประกอบไปด้วยการออกแบบการทดลองแบบ 2^k 16 การทดลอง การทดลองที่จุดศูนย์กลาง 3 การทดลอง และการทดลองที่แกน 8 การทดลอง มีการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นทำการสร้างสมการถดถอยแบบพหุคูณสำหรับตัวแปรตอบสนองทั้ง 4 ตัว ซึ่งจะได้สมการสำหรับการทำนาย 4 สมการ และนำวิธีการพื้นผิวตอบมาหาค่าที่เหมาะสมและความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อค่าตัวแปรตอบสนอง

ภูธิป อินทรักษ์ [19] ศึกษาการลดเวลาสูญเสียในกระบวนการติดฉลาก โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) เพื่อใช้หาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหา 3 ประเภท ดังนี้ 1) เวลาสูญเสียจากข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ประเภทฉลากพับ 2) เวลาสูญเสียจากข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ประเภทฉลากเหลื่อม 3) เวลาสูญเสียจากข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ประเภทโลโก้ฉลากไม่ตรง โดยมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบอยู่ 5 ชนิดได้แก่ (A) ระยะของการปรับตั้งในทิศเข้า-ออก (B) ระยะของการปรับตั้งในทิศซ้าย-ขวา (C) ความหนากาวฉลาก (D) อัตราการจ่ายกาวจากปั๊มกาว (E) ความดันของลมเป่าฉลาก ซึ่งแต่ละปัจจัยจะประกอบไปด้วย 5 ระดับการทดลอง (α = 2) ซึ่งมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 64 การทดลอง มีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แต่เนื่องจากผลตอบสนองที่ผู้วิจัยสนใจนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายตัว ทำให้ต้องนำฟังก์ชั่นความพึงพอใจ (Desirability Function) เข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อหารูปแบบการปรับที่สามารถแก้ไขปัญหาทั้ง 3 ข้อได้อย่างเหมาะสมที่สุด โดยทำการกำหนดค่าความพึงพอใจของแต่ละตัวแปรตอบสนองและกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญ จากนั้นนำเข้าโปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์หาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับตั้งปัจจัยเพื่อให้ได้ค่าตอบสนองตามที่ต้องการ ผลที่ได้คือ (A) ระยะของการปรับตั้งในทิศเข้า-ออก อยู่ที่ 16.60 mm. (B) ระยะของการปรับตั้งในทิศซ้าย-ขวา อยู่ที่ 7.50 mm. (C) ความหนากาวฉลาก อยู่ที่ 132 μm (D) อัตราการจ่ายกาวจากปั๊มกาว อยู่ที่ 60 stroke/min และ (E) ความดันของลมเป่าฉลาก อยู่ที่ 1.1 bar ซึ่งจากการติดตามผลพบว่าค่าเฉลี่ยของข้อบกพร่อง

ทั้ง 3 มีค่าลดลงดังนี้ 1) เวลาสูญเสียจากข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ประเภทฉลากพับลดลง 88.9% 2) เวลาสูญเสียจากข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ประเภทฉลากเหลี่อมลดลง 75.6% 3) เวลาสูญเสียจากข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ประเภทโลโก้ฉลากไม่ตรงลดลง 75.1%

2.9.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design)

Bun Kim Ngun และคณะ [28] ศึกษาองค์ประกอบของกระเบื้องเซรามิคที่มีดินเขมรเป็นองค์ประกอบโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบผสมเพื่อหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งสูตรการทำกระเบื้องนั้นจะประกอบไปด้วยส่วนผสมหลักได้แก่ แร่ฟันม้า (Feldspar) ส่วนผสมหลักของเซรามิก ทรายซิลิก้า และดินมาเลเซียถูกนำมาใช้ในการเปรียบเทียบ ซึ่งการทดลองนั้นถูกออกแบบด้วยการออกแบบการทดลองผสมแบบ Simplex-lattice โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาอยู่ 3 ชนิดได้แก่ ดิน (Clay) แร่ฟันม้า (Feldspar) และแร่ควอทซ (Quartz) โดยมีตารางการออกแบบการทดลองดังรูปที่ 2.19

Raw Materials (wt%)	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Clay	70	15	15	42.5	42.5	15	33.3	51.6	24.2	24.2
Feldspar	15	70	15	42.5	15	42.5	33.3	24.2	51.6	24.2
Quartz	15	15	70	15	42.5	42.5	33.3	24.2	24.2	51.6
Total	100	100	100	100	100	100	99.9	100	100	100

รูปที่ 2.19 ตารางการออกแบบการทดลองแบบผสมแบบ Simplex lattice

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากการทดลองมีตัวแปรตอบสนองที่สนใจศึกษาอยู่ 3 ชนิดได้แก่ LSF (%), WA (%) และ MOR (MPa) โดยทำการทดลองทั้งหมด 5 การทดลอง ซึ่งใน 5 การทดลองนี้จะทำการเปลี่ยนทรายที่ใช้ในการทดลองได้อีก 3 ชนิดได้แก่ C1-MC, C2-MC และ BBC-MC ซึ่งตัวอย่างจะแสดงในรูปที่ 2.20 จากนั้นทำการบันทึกผลและทำการหาสมการถดถอยแบบพหุคูณเพื่อหาสมการสำหรับการทำนายและทำการเปรียบเทียบทรายแต่ละชนิดที่ถูกนำมาผสมในการทดลอง รวมถึงทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีหาผลตอบพื้นผิว ซึ่งจากการทดลองโดยการใช้ส่วนผสมเป็นกัมพูชาและดินมาเลเซีย มีการทดสอบนัยสำคัญที่ 95% และพบว่ามีความแปรผันเพียงเล็กน้อย เมื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมพบว่าทั้งทรายกัมพูชาและทรายมาเลเซียมีความเหมาะสมสำหรับการผลิตกระเบื้องเซรามิคให้มีคุณภาพสูงตามข้อกำหนดมาตรฐานได้

Design Mixture	C1-MC*			C4-MC*			BBC-MC*		
Measurement I	LFS	WA	MOR	LFS	WA	MOR	LFS	WA	MOR
M1	5.38	3.08	36.26	8.57	0.4	60.5	5.92	6.91	36.27
M2	11.14	0.14	60.87	12.65	0.01	52.64	7.69	10.19	34.08
M3	1.69	19.4	10.99	1.63	19.11	10.14	0.72	23.94	6.73
M4	8.62	1.93	73.13	9.29	0.06	71.66	7.1	2.05	48.85
M5	4.45	7.89	38.69	7.52	0.77	51.29	5.86	12.61	19.59
M6	5.16	9.9	17.65	7.48	5.42	31.05	3.23	14.02	16.02
M7	9.47	2.01	73.1	9.51	0.13	78.7	5.74	4.8	40.07
M8	6.63	3.06	49.27	8.66	0.13	78.7	5.74	4.8	40.07
M9	10.18	1.71	78.65	9.93	0	68.38	10	4.56	54.86
M10	4.86	10.3	36.94	7.85	3.9	41.87	3.84	12.45	27.98

รูปที่ 2.20 ตารางการออกแบบการทดลองแบบผสมที่มีการเปลี่ยนชนิดการใช้ทราย C1-MC, C2-MC และ BBC-MC

B. Campisi [29] และคณะ (1999) ทำการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการหลอมละลายของแกรนูล ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการตกตะกอนของเม็ดยาของ Theophylline ที่ประกอบด้วยแลคโตส เซลลูโลส และไฮดรอกซีโพรพิลเมธิล ที่อยู่ภายในเครื่องผสมที่ใช้แรงเฉือนสูง โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลอง 2 ชนิด ได้แก่ การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) และการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อทำการศึกษาผลของสัดส่วนสารอาหารต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์บางชนิด ซึ่งตัวแปรที่จะทำการศึกษาและช่วงของการออกแบบการทดลองทั้งของ Mixture Component และ Response Variables ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ช่วงการออกแบบสำหรับปัจจัยเพื่อใช้ในการออกแบบการทดลอง

Process variables	Coded units	Original units
Impeller speed	−1	300 rpm
	+1	500 rpm
Massing time	−1	10 min
	+1	15 min
Original mixture components	Lower bound (a_i)	Upper bound (b_i)
Lactose (x_1)	0.6	1
Microcrystalline cellulose (x_2)	0	0.4
Hydroxypropylmethyl-cellulose (x_3)	0	0.4
Response variables	Units	
Geometric mean diameter (η_1)	μm	
Granules < 250 μm (η_2)	%	

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^k นั้นมีปัจจัยที่ทำการทดลอง 2 ตัวคือ Impeller Speed และ Massing Time ซึ่งถูกทดสอบที่ 2 ระดับคือ -1 และ +1 ในส่วนของการออกแบบการทดลองแบบผสมมีปัจจัยการทดลอง 3 ตัวคือ Lactose (X_1), Microcrystalline Cellulose (X_2), Hydroxypropylmethyl (X_3) โดยการออกแบบการทดลองแบบผสมจะใช้รูปแบบ Simplex Centroid ผสมกับการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k โดยมีตารางการออกแบบการทดลองเป็นดังตารางที่ 2.6 และตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 การออกแบบการทดลองแบบ Simplex Centroid

Trial no.	Mixture composition			Process variable settings (z'_1, z'_2)			
	x'_1	x'_2	x'_3	(−1, −1)	(−1, +1)	(+1, −1)	(+1, +1)
1	1	0	0	292	327	309	373
2	0	1	0	374	462	375	478
3	0	0	1	546	726	555	628
4	0.5	0.5	0	396	475	335	416
5	0.5	0	0.5	495	610	457	550
6	0	0.5	0.5	454	520	467	608
7	0.333	0.333	0.333	436, 410	549, 521	440, 417	528, 572
8	0.667	0.167	0.167	388	510	385	466
9	0.167	0.667	0.167	412	517	400	501
10	0.167	0.167	0.667	525	591	474	561

ตารางที่ 2.7 การออกแบบการทดลองแบบ Simplex Centroid

Trial no.	Mixture composition			Process variable settings (z'_1, z'_2)			
	x'_1	x'_2	x'_3	(−1, −1)	(−1, +1)	(+1, −1)	(+1, +1)
1	1	0	0	47.36	36.09	51.34	27.00
2	0	1	0	15.86	12.83	23.44	12.00
3	0	0	1	3.59	1.51	4.73	2.07
4	0.5	0.5	0	15.67	9.17	36.23	13.86
5	0.5	0	0.5	6.36	2.05	6.67	1.94
6	0	0.5	0.5	8.30	8.91	9.84	2.45
7	0.333	0.333	0.333	12.98, 14.04	4.07, 5.58	11.47, 10.00	3.18, 1.20
8	0.667	0.167	0.167	18.60	12.18	25.41	8.23
9	0.167	0.667	0.167	15.76	7.59	19.35	7.05
10	0.167	0.167	0.667	6.68	2.87	3.21	3.83

จากนั้นใช้วิธีพื้นผิวตอบมาคำนวณหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการปรับตั้งเครื่องผสมซึ่งค่าที่เหมาะสมของ $\widehat{y_1}$ อยู่ที่ 482.5 -14.25 $\leq \widehat{y_1} \leq$ 482.5 + 14.25 และค่าที่เหมาะสมของ $\widehat{y_2}$ อยู่ที่ 1.58 – 1.25 $\leq \widehat{y_2} \leq$ 1.58 + 1.25 สำหรับสัดส่วนของการผสมที่เหมาะสมคือ Lactose (0.25), Microcrystalline Cellulose (0.10), Hydroxypropylmethyl (0.65)

สมศักดิ์ แก้วพลอย [30] ศึกษาสูตรการผลิตลูกชิ้นเอ็นไก่ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการพัฒนาสูตรลูกชิ้นเอ็นไก่ผสมผักพื้นบ้าน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกใช้การทดลองแบบโครงตาข่ายอย่างง่ายเพื่อทำการศึกษาสูตรพื้นฐานของลูกชิ้นเอ็นไก่ผสมผักพื้นบ้าน 4 ชนิด ได้แก่ สาหร่าย ฟักทอง ตำลึง และโหรพา โดยมีสูตรการผสมตามการออกแบบการทดลองแบบผสมตามตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ตารางการออกแบบการทดลองสูตรพื้นฐานของลูกชิ้นเอ็นไก่ผสมผักพื้นบ้าน 4 ชนิด ได้แก่ สาหร่าย ฟักทอง ตำลึง และโหรพา

ส่วนผสม	ลูกชิ้นเอ็นไก่	ผักพื้นบ้าน (ร้อยละ)			
		สาหร่าย	ฟักทอง	ตำลึง	โหรพา
1	90	3.33	3.33	3.33	-
2	90	3.33	3.33	-	3.33
3	80	6.66	6.66	6.66	-
4	80	6.66	6.66	-	6.66
5	70	10	10	10	-
6	70	10	10	-	10
7	60	13.33	13.33	13.33	-
8	60	13.33	13.33	-	13.33

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากนั้นทำการเก็บผลการทดลองแล้วทำการคัดเลือกสูตรโดยใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 10 คน เพื่อหาสูตรพื้นฐานลูกชิ้นเอ็นไก่ผสมผักพื้นบ้านที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ทดลองในส่วนที่สอง ซึ่งการทดลองในส่วนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อหาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตลูกชิ้นเอ็นไก่ผสมผักพื้นบ้าน โดยนำสูตรลูกชิ้นที่คัดเลือกได้จากการทดลองแรก มาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีการแบบเอ็กทรีมเวอร์ทิส คือแบบมีข้อจำกัดในเรื่องสัดส่วนการผสม โดยมีส่วนผสมที่จะทำการศึกษาดังนี้ สาหร่าย (10-100%) ฟักทอง (10-100%) ตำลึง (10-100%) โดยกำหนดสัดส่วนการผสมให้ได้ 100% จะได้สูตรการทดลอง 10 สูตร ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าสูตรผสมลูกชิ้นเอ็นผสมผักพื้นบ้านที่เหมาะสมประกอบด้วยสาหร่าย ฟักทอง และตำลึง ที่ร้อยละ 22.80, 38.99 และ 38.21 ตามลำดับ

ชาญณรงค์ สายแก้ว เสริมศักดิ์ เวียงวิเศษ และอภัย ศรีบุญเรือง [31] ศึกษาหาอัตราส่วนส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทราย โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม ด้วยวิธีการแบบเอ็กทรีมเวอร์ทิส ซึ่งส่วนผสมที่จะทำการศึกษามี 3 ชนิด ประกอบไปด้วย ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่1 (A) เบนโทไนต์ (B) และน้ำ (C) โดยมีข้อจำกัดในแต่ละส่วนผสมดังตารางที่ 2.9 และได้ทำการออกแบบส่วนผสมได้ 14 การทดลอง โดยแต่ละทำการทดลองจะทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งการทดลองที่ 12-14 เป็นการทดลองซ้ำเพื่อทดสอบหาค่า Lack of Fit จากการวิเคราะห์ผลหาสมการถดถอยของสมบัติแบบหล่อทราย วิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมีการวิเคราะห์ร่วมกับฟังก์ชั่นความพึงพอใจ พบว่าส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ ส่วนผสม A ร้อยละ 93.3 ส่วนผสม B ร้อยละ 5 และส่วนผสม C ร้อยละ 1.7 ซึ่งให้ค่าคุณสมบัติที่พึงพอใจมากที่สุด

ตารางที่ 2.9 ข้อจำกัดสำหรับการออกแบบการทดลองแบบเอ็กทรีมเวอร์ทิส

ส่วนผสม	สัญลักษณ์	ข้อจำกัด	
		ต่ำสุด	สูงสุด
ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว	A	90	99.9
เบนโทไนต์	B	0.05	5
น้ำ	C	0.05	5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.10 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง

<table>
<tr><th>งานวิจัย</th><th>เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย</th><th>การประยุกต์ใช้งาน</th></tr>
<tr><td>Martinet S. และคณะ</td><td>Design of Experiment: (DOE)</td><td>ใช้สำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษา และใช้เพื่อลดจำนวนการทดลองที่ไม่จำเป็น เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลอง</td></tr>
<tr><td>B. Surekha และคณะ</td><td>- การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1}
- การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD)
-วิธีการพื้นผิวตอบ (RSM)
- สมการถดถอย</td><td rowspan="2">จากงานวิจัยของ B.Surekha มีความคล้ายกับงานวิจัยที่ผู้วิจัยทำการศึกษาเนื่องจากมีตัวแปรตอบสนองคือค่าคุณสมบัติหลายชนิดและแต่ละตัวมีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนต่อกัน อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับปัจจัยเรซินและทราย จึงได้นำแนวทางการออกแบบการทดลองแบบ 2^{k-1} เข้ามาเพื่อช่วยในการลดจำนวนการทดลอง เนื่องจากงานวิจัยนี้มีปัจจัยสำหรับการศึกษาจำนวน 5 ปัจจัย หากใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^k จะทำให้มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง แต่ถ้าหากใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2^{k-1} ชนิดการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง จะทำให้จำนวนการทดลองลดลงเหลือ 16 การทดลอง อีกทั้งยังมีความสามารถในการแยกผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยออกมาได้เนื่องจากผลกระทบร่วมที่มากกว่านี้จะประมาณค่าได้เป็น 0 แต่ทั้งนี้ยังคงต้องดูความเหมาะสมสำหรับการใช้งานการออกแบบการทดลองประเภทนี้ในภายหลัง</td></tr>
<tr><td>Zhao Y และคณะ</td><td>- การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1}
- การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD)
- วิธีการพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology)
- สมการถดถอยแบบพหุคูณ</td></tr>
</table>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2.10 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

<table>
<tr><th>งานวิจัย</th><th>เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย</th><th>การประยุกต์ใช้งาน</th></tr>
<tr><td>Gaddafi I และคณะ</td><td>- การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1}
- การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD)
-วิธีการพื้นผิวตอบ (RSM)
- สมการถดถอย</td><td rowspan="2">งานวิจัยมากมายที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองไม่ว่าจะเป็นการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ การออกแบบการทดลองแบบบางส่วน การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง การออกแบบการทดลองแบบผสม ซึ่งพบว่ามีการออกแบบการทดลองที่มากมายแต่การทดลองนั้นๆจะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่างานวิจัยฉบับนี้ควรจะใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design) แบบส่วนประสมกลาง Central Composite Design (CCD) เนื่องจากมีจำนวนปัจจัยที่มาก สามารถหาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของ 2 ปัจจัยได้ เป็นวิธีที่สามารถหาหาที่เหมาะสมสำหรับคำตอบได้ รวมถึงสามารถลดจำนวนการทดลองลงได้เมื่อมีจำนวนปัจจัยการทดลองที่มาก</td></tr>
<tr><td>Yadav R. และคณะ</td><td>การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1}
-การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD)
-วิธีการพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology)
- สมการถดถอยแบบพหุคูณ</td></tr>
</table>

ตารางที่ 2.10 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

<table>
<tr><th>งานวิจัย</th><th>เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย</th><th>การประยุกต์ใช้งาน</th></tr>
<tr><td>C. Cojocaru และคณะ</td><td>- การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k factorial)
- ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function)
- วิธีการพื้นผิวตอบ (RSM)
- สมการถดถอยแบบพหุคูณ</td><td rowspan="3">เมื่อผู้วิจัยทำการเลือกประเภทของการออกแบบการทดลองสำหรับการเก็บข้อมูลได้แล้ว จากนั้นทำการสร้างสมการถดถอยแบบพหุคูณทำนายตัวแปรตอบสนอง ที่ประกอบด้วยตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวแปร ซึ่งในงานวิจัยนี้มีตัวแปรตอบสนอง 6 ตัวซึ่งสามารถใช้สมการถดถอยแบบพหุคูณได้ โดยสมการจะเขียนอยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้
$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \ldots + b_kX_k$
จากนั้นจะทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสมการจากค่า R^2 หากมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสมการถดถอยนั้นมีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปใช้ทำนายค่าตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษาได้ ซึ่งถ้าหากงานวิจัยที่ทำการศึกษามีตัวแปรตอบสนองหลายตัวแปร และมีความซับซ้อนต่อการหาค่าที่เหมาะสม จะนำฟังก์ชั่นความพึงพอใจเข้ามาร่วมพิจารณา ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับการทำ optimization โดยค่าของฟังก์ชั่นความพึงพอใจ (Desirability: d) ของผลตอบจะอยู่ในช่วง 0-1 โดยที่เมื่อ d มีค่าเท่ากับศูนย์หมายถึง ผลตอบนั้นอยู่นอกขอบเขตการยอมรับ (พึงพอใจน้อยสุด) ค่าความพึงพอใจจะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ จน d มีค่าเท่ากับหนึ่ง โดยจะทำการคำนวณค่าความพึงพอใจของคุณสมบัติที่ละ จากนั้นจะนำค่าที่ได้มาทำการหาค่าความพึงพอใจโดยรวม (Overall Desirability, D)</td></tr>
<tr><td>Derossi A.และคณะ</td><td>-การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1}
- การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD)
-วิธีการพื้นผิวตอบ (RSM)
-ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function)</td></tr>
<tr><td>ภูธิป อินทรักษ์ (2014)</td><td>- การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1}
- การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD)
-วิธีการพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology)
-ฟังก์ชั่นความพึงพอใจ (Desirability Function)</td></tr>
</table>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2.11 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design)

<table>
<tr><th>งานวิจัย</th><th>เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย</th><th>การประยุกต์ใช้งาน</th></tr>
<tr><td>สมศักดิ์ แก้วพลอย</td><td>- การออกแบบการทดลองแบบผสม ชนิดโครงตาข่าย
- การออกแบบการทดลองแบบผสม ชนิดเอ็กทรีมเวอร์ทิส
-วิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology)</td><td rowspan="2">จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนนี้จะทำให้ทราบถึงวิธีการออกแบบการทดลองที่ใช้กับการหาส่วนผสมที่ดีที่สุด โดยผู้วิจัยได้ทดลองนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย พบว่า ยังติดข้อจำกัดในเรื่องการรวมกันของส่วนผสม โดยการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) มีข้อจำกัดคือ ส่วนผสมทั้งหมดจะต้องรวมกันเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้โดยตรง เนื่องจากส่วนผสมทุกตัวที่ใช้ในงานวิจัยไม่ได้รวมกันเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ ในขั้นตอนการผสมทรายแต่ละชนิดจะต้องรวมกันเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณการเติมฟีนอลิกเรซินจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของทราย โดยมีช่วงการเติมอยู่ที่ 1-3% ซึ่งฟีนอลิกเรซินแต่ละชนิดก็จะรวมกันเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกัน จากข้อจำกัดเบื้องต้นทำให้งานวิจัยนี้ไม่สามารถใช้การออกแบบการทดลองแบบผสมได้โดยตรง ผู้วิจัยจึงได้ทดลองทำการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมโดยแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของทรายกับฟีนอลิกเรซิน แล้วนำการทดลองทั้งสองส่วนมาจับรวมกัน ซึ่งพบว่าจะต้องทำการลองเป็นจำนวนมากและผลการทดลองที่ได้อาจจะไม่ตอบสนองต่อความต้องการทั้งหมดที่ทางผู้วิจัยต้องการ</td></tr>
<tr><td>ชาญณรงค์ สายแก้ว เสริมศักดิ์ เวียงวิเศษ และอภัย ศรีบุญ</td><td>- การออกแบบการทดลองแบบผสม ชนิดเอ็กทรีมเวอร์ทิส
-วิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology)</td></tr>
</table>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.11 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) (ต่อ)

งานวิจัย	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	การประยุกต์ใช้งาน
B. Campisi และคณะ	- การออกแบบการทดลองแบบผสม - การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล - สมการถดถอย - วิธีการพื้นผิวตอบ	
Bun Kim Ngun และคณะ	-การออกแบบการทดลองแบบผสม ชนิดโครงตาข่าย (Simplex Lattice) -สมการถดถอยแบบพหุคูณ -วิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology)	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2.12 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน

งานวิจัย	การประยุกต์ใช้งาน
การปรับปรุงทรายเคลือบฟีนอลิกเรซินที่ผลิตในประเทศสำหรับทำแบบหล่อเปลือก	ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติที่แตกต่างกันของเรซินภายในประเทศกับต่างประเทศ คือช่วงเวลาที่เรซินกลายเป็นเจลเรซินภายในประเทศจะกลายเป็นเจลเร็วกว่าของต่างประเทศ และช่วงเวลาในการไหลของเรซินภายในประเทศจะน้อยกว่าของต่างประเทศ อีกทั้งเครื่องผสมทรายที่มีขนาดเล็กสามารถนำมาใช้สำหรับการทดลองได้ ซึ่งมีความตรงกับงานวิจัยฉบับนี้ที่ต้องใช้เครื่องผสมทรายขนาดเล็กในการทดลอง และค่าคุณสมบัติที่ส่งผลกระทบกับค่าความทนแรงดัดโค้งประกอบไปด้วย ชนิดของทราย ค่าความกลมของเม็ดทราย และปริมาณเรซิน

บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงขั้นตอนการผลิตทรายเคลือบเรซินในระดับห้องทดลอง คุณสมบัติเฉพาะตัวของทรายและเรซินที่ถูกใช้เป็นวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซิน และวิธีการเลือกใช้การออกแบบการทดลองเพื่อนำมาเก็บข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง รวมถึงข้อจำกัดบางประการและวิธีการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อให้เกิดความเหมาะสมและครอบคลุมเป้าหมายตามที่ทางโรงงานต้องการ

3.1 ขั้นตอนการผลิตทรายเคลือบเรซิน

กระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินโดยทั่วไปจะไม่มีความซับซ้อนในขั้นตอนการผลิตมากนัก แต่จุดสำคัญที่ต้องทำการระวังคือ เวลาสำหรับการปล่อยวัตถุดิบแต่ละชนิดเพื่อทำการผสม และอุณหภูมิของทรายที่ต้องควบคุมให้อยู่ในค่าที่เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้ทรายเกิดการไหม้ ซึ่งขั้นตอนสำหรับการผลิตสามารถอธิบายและแสดงเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 3.1

1. ทำการจัดเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ทำการผสม โดยทำการชั่ง ตวง วัด เพื่อให้ได้ปริมาณสารตามที่ออกแบบการทดลอง
2. นำทรายเข้าเครื่องผสม และให้ความร้อนทรายจนอุณหภูมิถึง 130 ℃ เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดเครื่องจักรจะปล่อยทรายเข้าสู่ถังผสม
3. ทำการเติมเรซินลงในถังผสม หลังจากเวลาผ่านไป 5 วินาที
4. ทำการเติมเฮกซามีนลงในถังผสม หลักจากเวลาผ่านไป 50 วินาที
5. ทำการเป่าอากาศในถังผสมเพื่อไม่ให้ทรายเกิดการจับตัวเป็น หลังจากเวลาผ่านไป 70 วินาที
6. ทำการเติมแคลเซียมสเตียเรตลงในถังผสม หลังจากเวลาผ่านไป 110 วินาที
7. ทำการปล่อยทรายเคลือบเรซินจากถังผสมลงบนถาดทราย เมื่อครบเวลา 120 วินาที
8. ทำการวัดอุณหภูมิทรายทันทีเมื่อทรายถูกปล่อยออกจากถังผสมจนหมด โดยต้องทำการควบคุมอุณหภูมิทรายเคลือบเรซินให้อยู่ที่ 75 ℃ จากนั้นปล่อยในทรายเย็นตัวลง เพื่อนำไปทำการทดสอบค่าคุณสมบัติในขั้นตอนต่อไป

รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน

3.2 วัตถุดิบหลักสำหรับกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน

สำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซินนั้นโดยส่วนใหญ่จะมีผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับค่าของคุณสมบัติตามที่โรงงานต้องการ ทำให้ในแต่ละครั้งชนิดทรายหรือเรซินที่ใช้จะไม่เท่ากัน โดยชนิดทรายและเรซินที่ใช้มากที่สุดในแต่ละผลิตภัณฑ์จะเป็นสูตรละ 3 ชนิด โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกทรายและเรซินที่ถูกใช้ผลิตทรายเคลือบเรซินมากที่สุด 3 อันดับแรกมาทำการศึกษา ซึ่งทรายและเรซินแต่ละชนิดมีค่าคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันซึ่งค่าคุณสมบัติทรายสามารถแสดงได้ในตารางที่ 3.1 และคุณสมบัติเรซินสามารถแสดงได้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ชนิดทรายและคุณสมบัติของทราย

ประเภททราย	คุณสมบัติ					
	ปริมาณซิลิกา (%)	ความสว่าง (ลักซ์)	ค่ากรด-ด่าง	ความกลม	ขนาดเม็ด (AFS)	ราคา (บาท)
ทรายเอ (SA)	99	77	7	1.18	55	6.02
ทรายบี (SB)	97	65		1.32		2
ทรายซี (SC)	93	44		1.3		3.06

ตารางที่ 3.2 ชนิดเรซินและคุณสมบัติของเรซิน

ประเภทเรซิน	คุณสมบัติ			
	ความยาวในการไหล (มม.)	เวลาในการกลายเป็นเจล (วินาที)	รูปทรง	ราคา (บาท)
เรซินเอ (RA)	60	80	คล้ายเข็ม	68
เรซินบี (RB)	85	105		75.57
เรซินซี (RC)	75	90		62.14

3.3 การเลือกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองนั้นมีหลากหลายวิธีด้วยกัน เช่น การออกแบบการทดลองแบบ One-Factor-at-A-Time (OFAT) แบบการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Design) แบบการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design) และการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) เป็นต้น ดังนั้นเวลาที่จะเลือกการออกแบบการทดลองวิธีต่างๆมาใช้จึงจำเป็นที่ต้องศึกษาข้อจำกัดและวิธีการออกแบบทดลองให้เกิดความเข้าใจเสียก่อน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพต่อการวิเคราะห์ผลการทดลองและการหาค่าที่เหมาะสมของคำตอบของงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาสัดส่วนการผสมของทรายเคลือบเรซิน โดยมีองค์ประกอบของวัตถุดิบที่สำคัญคือทรายและเรซินอย่างละ 3 ชนิด และสัดส่วนการเติมปริมาณเรซิน เพื่อให้ได้ทรายเคลือบเรซินที่มีค่าคุณสมบัติตามที่ต้องการและลดต้นทุนวัตถุดิบลง จากการศึกษาการออกแบบการทดลองวิธีต่างๆ ผู้วิจัยได้ข้อสรุปสำหรับการออกแบบการทดลองดังนี้

ในตอนแรกผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองที่เหมาะสำหรับการหาสัดส่วนการผสมเช่น การหาสูตรยา การหาส่วนผสมทางเคมี เป็นต้น การออกแบบการการทดลองแบบผสมมีข้อจำกัดคือ ปัจจัยทุกตัวต้องมีความเป็นอิสระต่อกันและปัจจัยทุกตัวต้องมีสัดส่วนการผสมรวมกันเป็น 100% กล่าวคือส่วนผสมทุกชนิดต้องสามารถผสมรวมกันได้โดยไม่มีเงื่อนอะไร เช่นการหาสูตรยาที่มีปัจจัยเป็น A, B และ C เมื่อ

ทำการผสม ปัจจัยทั้ง 3 ชนิดนี้สามารถผสมกันได้หมดโดยไม่มีเงื่อนใดๆ แต่ในงานวิจัยนี้เป็นการหาสัดส่วนการผสมของทรายเคลือบเรซิน ซึ่งในการผสมนั้นมีปัจจัยทั้ง 6 ตัว เป็นทราย 3 ชนิดคือ SA, SB, SC, และเป็นเรซิน 3 ชนิดคือ RA, RB และ RC ซึ่งทรายจะผสมกันเป็น 100% ได้ และเรซินจะผสมรวมกันเป็น 100% เช่นกัน แต่มีข้อจำกัดของการผสมเรซินคือ เปอร์เซ็นต์การเติมเรซินนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณทรายที่ใช้ทั้งหมดในผลิตภัณฑ์นั้น เช่นสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินสูตรหนึ่ง ใช้ทราย 3 ชนิดรวมกันได้ 600 กิโลกรัม มีการเติมเปอร์เซ็นต์เรซินเท่ากับ 2 ดังนั้นแสดงว่าต้องทำการเติมเรซินในปริมาณเท่ากับ 12 กิโลกรัม เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถนำการออกแบบการทดลองแบบผสมมาประยุกต์ใช้เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมได้ และถ้าหากทำการประยุกต์ใช้งานจะทำให้จำนวนการทดลองมีจำนวนที่สูงมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาการออกแบบการทดลองวิธีอื่นต่อไป พบว่าการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) สามารถประยุกต์เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ โดยในตอนแรกจะมีปัจจัยที่สนใจจะทำการศึกษาทั้งหมด 7 ชนิดได้แก่ Sand A, Sand B, Sand C, Resin A, Resin B, Resin C และ %Resin แต่เนื่องจากข้อกำหนดสำหรับการผสมสูตรของโรงงานกรณีศึกษานั้นคือทรายต้องผสมรวมกันเป็น 100% โดยจะใช้ทราย 1 ชนิด, 2 ชนิด หรือ 3 ชนิด และเรซินต้องผสมรวมกันเป็น 100% เช่นกัน โดยอาจจะใช้เรซิน 1 ชนิด, 2 ชนิด หรือ 3 ชนิดก็ได้ แต่ปริมาณการเติมเรซินนั้นจะใส่โดยขึ้นอยู่กับปริมาณทรายที่ใช้ไป แต่เนื่องด้วยข้อกำหนดในเรื่องของการออกแบบการทดลองหากผู้วิจัยออกแบบการทดลองโดยให้มีปัจจัยของทรายและเรซินทั้งหมดอย่างละ 3 ชนิดจะทำให้การกำหนดช่วงของการออกแบบนั้นแคบกว่าช่วงการใช้งานจริงของโรงงาน และอาจมีบางการทดลองของการออกแบบที่ส่วนผสมของทรายหรือเรซินมีโอกาสที่จะผสมกันมากกว่า 100% ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการประยุกต์การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางจากเดิมที่มี 7 ปัจจัยให้เหลือเพียง 5 ปัจจัยที่สำคัญสำหรับนำไปออกแบบการทดลองได้แก่ สัดส่วนSand B, สัดส่วนSand C, สัดส่วนResin B, สัดส่วนResin C และ %Resin

3.4 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัย

ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาสัดส่วนการผลิตทรายเคลือบเรซิน โดยให้มีค่าคุณสมบัติตรงตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งในการผลิตทรายเคลือบเรซินในแต่ละสูตรนั้นจะประกอบไปด้วยทรายและเรซินอย่างน้อย 1 ชนิด และอย่างมากที่สุดไม่เกิน 3 ชนิด รวมไปถึงการปริมาณการเติมเรซินนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของทรายที่ใช้ในผลิตภัณฑ์นั้นๆ ซึ่งในการกำหนดช่วงการใช้งานของทราย เรซิน และปริมาณการเติมเรซิน ควรคำนึงถึงข้อจำกัดในเรื่องของการผสมวัตถุดิบ และข้อจำกัดของแต่ละแบบการทดลอง โดยการกำหนดระดับการใช้งานของทรายจะไม่กำหนดให้เป็น 86%-100% และระดับของเรซินจะไม่กำหนดให้เกิน 76%-100% เนื่องจากมีข้อกำหนดของ

การผสมทรายต้องรวมกันเป็น 100% และเรซินต้องรวมกันเป็น 100% เช่นเดียวกัน และการออกแบบการทดลองบางเงื่อนไขจะทำให้ส่วนผสมของทรายและเรซินในเงื่อนไขนั้นมีค่าเกิน 100% ทำให้ไม่สามารถนำเงื่อนไขนั้นไปใช้งานสำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซินจริงได้ จึงเป็นข้อควรระวังในการออกแบบการทดลอง ดังนั้นในงานวิจัยผู้วิจัยได้ทำการกำหนดระดับของการทดลองได้ดังนี้

1) Sand A จะถูกกำหนดปริมาณสำหรับการทดลองให้อยู่ในช่วง 0%-30% โดยอ้างอิงจากข้อมูลการใช้งานจริงของโรงงานกรณีศึกษาที่ใช้อยู่ในช่วง 0%-25% ซึ่งจากการกำหนดปริมาณการใช้ Sand A นั้นจะเพิ่มปริมาณสูงสุดที่ใช้เป็น 30% เพื่อให้ครอบคลุมการใช้งานจริงและครอบคลุมผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นของโรงงานกรณีศึกษา

2) Sand B จะถูกกำหนดปริมาณสำหรับการทดลองให้อยู่ในช่วง 0%-85% โดยอ้างอิงจากข้อมูลการใช้งานจริงของโรงงานกรณีศึกษาที่ใช้อยู่ในช่วง 0%-80% ซึ่งจากการกำหนดปริมาณการใช้ Sand B นั้นจะเพิ่มปริมาณสูงสุดที่ใช้เป็น 85% เพื่อให้ครอบคลุมช่วงการใช้งานจริงและครอบคลุมผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นของโรงงานกรณีศึกษา

3) Sand C จะถูกกำหนดปริมาณการใช้งานจาก Sand A และ Sand B โดยสามารถคำนวณปริมาณ Sand C ได้จาก 100 – (Sand A + Sand B)

4) Resin A จะกำหนดปริมาณสำหรับการทดลองให้อยู่ในช่วง 0%-50% โดยอ้างอิงจากข้อมูลการใช้งานจริงของโรงงานกรณีศึกษาที่ใช้อยู่ในช่วง 0%-45% ซึ่งจากการกำหนดปริมาณการใช้ Resin A นั้นจะเพิ่มปริมาณสูงสุดที่ใช้เป็น 50% เพื่อให้ครอบคลุมช่วงการใช้งานจริงและครอบคลุมผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นของโรงงานกรณีศึกษา

5) Resin B จะกำหนดปริมาณสำหรับการทดลองให้อยู่ในช่วง 0%-75% โดยอ้างอิงจากข้อมูลการใช้งานจริงของโรงงานกรณีศึกษาที่ใช้อยู่ในช่วง 0%-65% ซึ่งจากการกำหนดปริมาณการใช้ Resin B นั้นจะเพิ่มปริมาณสูงสุดที่ใช้เป็น 75% เพื่อให้ครอบคลุมช่วงการใช้งานจริงและครอบคลุมผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้นของโรงงานกรณีศึกษา

6) Resin C จะถูกกำหนดปริมาณการใช้งานจาก Resin A และ Resin B โดยสามารถคำนวณปริมาณ Resin C ได้จาก 100 – (Resin A + Resin B)

7) %Resin โดยปกติโรงงานกรณีศึกษาจะใช้ %Resin อยู่ที่ 1.5, 1.75, 2 และ 2.5 ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดระดับการทดลองให้อยู่ในช่วง 1%-3% เพื่อให้ครอบคลุมเปอร์เซ็นต์ที่ใช้ในสูตรเดิมของทางโรงงาน อีกทั้งเพื่อเพิ่มผลิตภัณฑ์ใหม่ที่อาจจะให้ค่าคุณสมบัติตรงตามความต้องการของโรงงานมากขึ้น

ถึงแม้ว่าการกำหนดปัจจัยจะมีทางเลือกสำหรับการเลือกค่าการทดลองที่ระดับต่ำหรือค่าการทดลองที่ระดับสูงได้มากกว่า 1 เงื่อนไข แต่ในงานวิจัยนี้ต้องระวังการเลือกระดับสำหรับการทดลองเนื่องสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินต้องไม่เกิน 100% หากพิจารณาที่ตารางที่ 3 เมทริกซ์การ

ออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ใน Run order ที่ 20 จะพบว่าสัดส่วนการผสมทราย SA กับทราย SB รวมกันได้ 100% พอดี ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดระดับปัจจัยสูงสุดของ SA เท่ากับ 30 และ SB เท่ากับ 85 เนื่องจากหากกำหนดระดับปัจจัยของ SB มากกว่า 85 และกำหนดระดับปัจจัยของ SA ให้ลดลงเท่ากับ 25 พบว่าสัดส่วนการผสมใน Run order ที่ 20 จะมีสัดส่วนการผสมทราย SA และ SB เท่ากับ 102.5 ซึ่งส่งผลทำให้สัดส่วนการผสมเกินข้อจำกัดของการผสมสำหรับงานวิจัยนี้ จากการที่ผู้วิจัยได้ลองทำการปรับเปลี่ยนค่าเพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดและไม่เกิน 100% พบว่าที่ SA เท่ากับ 30 และที่ SB เท่ากับ 85 เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ในส่วนของการกำหนดระดับปัจจัยของเรซินและมีแนวคิดเช่นเดียวกับการกำหนดระดับของทราย

ดังนั้นจากการกำหนดระดับของปัจจัยข้างต้นสามารถออกแบบตารางของปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้สำหรับการทดลองได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยและระดับของปัจจัยสำหรับการทดลอง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย				
		-2	-1	0	1	2
Sand A	SA	0	7.5	15	22.5	30
Sand B	SB	0	21.25	42.5	63.75	85
Resin A	RA	0	12.5	25	37.5	50
Resin B	RB	0	18.75	37.5	56.25	75
%Resin	%R	1	1.5	2	2.5	3

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยปัจจัย 5 ชนิด ได้แก่ Sand A, Sand B, Resin A, Resin B และ %Resin ซึ่งแต่ละปัจจัยจะทำการทดลองที่ 5 ระดับ ได้แก่ ระดับ $-\alpha$, -1, 0, -1, α โดยค่า α จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 โดยมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง โดยมีค่า Resolution เท่ากับ V ซึ่งมีความหมายว่าผลกระทบหลักจะไม่ปะปนกับผลกระทบร่วมหรือผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย และผลของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยจะไม่ปะปนกันเอง ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกเรียกว่าการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Half Factorial Factorial) มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 16 (2^{k-1}) ครั้ง ส่วนที่สองเรียกว่าจุดศูนย์กลาง (Center point) มีจำนวนการทดลองทั้ง 6 (n) ครั้ง และส่วนสุดท้ายเรียกว่าจุดแกน (Axial Point) มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 10 (2k) ครั้ง และมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง โดยตารางออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เมทริกซ์การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

Design CCD									
StdOrder	RunOrder	PtType	SA	SB	RA	RB	%R	SC	RC
1	1	1	7.5	21.25	12.5	18.75	2.5	71.25	68.75
2	2	1	22.5	21.25	12.5	18.75	1.5	56.25	68.75
3	3	1	7.5	63.75	12.5	18.75	1.5	28.75	68.75
4	4	1	22.5	63.75	12.5	18.75	2.5	13.75	68.75
5	5	1	7.5	21.25	37.5	18.75	1.5	71.25	43.75
6	6	1	22.5	21.25	37.5	18.75	2.5	56.25	43.75
7	7	1	7.5	63.75	37.5	18.75	2.5	28.75	43.75
8	8	1	22.5	63.75	37.5	18.75	1.5	13.75	43.75
9	9	1	7.5	21.25	12.5	56.25	1.5	71.25	31.25
10	10	1	22.5	21.25	12.5	56.25	2.5	56.25	31.25
11	11	1	7.5	63.75	12.5	56.25	2.5	28.75	31.25
12	12	1	22.5	63.75	12.5	56.25	1.5	13.75	31.25
13	13	1	7.5	21.25	37.5	56.25	2.5	71.25	6.25
14	14	1	22.5	21.25	37.5	56.25	1.5	56.25	6.25
15	15	1	7.5	63.75	37.5	56.25	1.5	28.75	6.25
16	16	1	22.5	63.75	37.5	56.25	2.5	13.75	6.25
17	17	-1	0	42.5	25	37.5	2	57.5	37.5
18	18	-1	30	42.5	25	37.5	2	27.5	37.5
19	19	-1	15	0	25	37.5	2	85	37.5
20	20	-1	15	85	25	37.5	2	0	37.5
21	21	-1	15	42.5	0	37.5	2	42.5	62.5
22	22	-1	15	42.5	50	37.5	2	42.5	12.5
23	23	-1	15	42.5	25	0	2	42.5	75
24	24	-1	15	42.5	25	75	2	42.5	0
25	25	-1	15	42.5	25	37.5	1	42.5	37.5
26	26	-1	15	42.5	25	37.5	3	42.5	37.5
27	27	0	15	42.5	25	37.5	2	42.5	37.5
28	28	0	15	42.5	25	37.5	2	42.5	37.5
29	29	0	15	42.5	25	37.5	2	42.5	37.5
30	30	0	15	42.5	25	37.5	2	42.5	37.5
31	31	0	15	42.5	25	37.5	2	42.5	37.5
32	32	0	15	42.5	25	37.5	2	42.5	37.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นส่วนของผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง ในส่วนของผลการทดลองเป็นการนำสัดส่วนที่ได้จากตารางการออกแบบการทดลองไปทำการผสมจริงในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน ซึ่งการทดลองเป็นการทดลองในเครื่องผสมขนาดเล็ก จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างทรายเคลือบเรซินไปทำการตรวจสอบค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ ความทนแรงดัดโค้ง การขยายตัวทางความร้อน แก๊ส อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา และค่าความโก่งงอ ในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะอาศัยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อทำการวิเคราะห์ว่าตัวแปรนำเข้าตัวใดบ้างที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้ากับตัวแปรตอบสนองด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรอิสระแบบขั้นตอน (Stepwise Multiple Regression Analysis) ชนิดการเลือกตัวแปรโดยวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) ซึ่งเป็นวิธีที่พยายามคัดเลือกตัวแปรที่ดีที่สุดเข้าสู่แบบจำลองและเป็นการประหยัดจำนวนเทอมของแบบจำลอง

4.1 ผลการทดลอง

เมื่อผู้วิจัยทำการออกแบบตารางการทดลองเรียบร้อยแล้วจึงนำค่าสัดส่วนการผสมที่ได้จากตารางการออกแบบการทดลองมาทำการเก็บค่า โดยใช้เครื่องผสมขนาดเล็กที่จำนวน 15 กิโลกรัม แต่ใช้เวลาเดินเครื่องและผสมตามสายการผลิตจริง ซึ่งเมื่อนำตัวอย่างทรายเคลือบเรซินในแต่ละเงื่อนไขไปทำการทดสอบค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิด โดยแต่ละเงื่อนไขทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง พบว่าค่าคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 4.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดของทรายเคลือบเรซินที่ได้จากการทดลอง

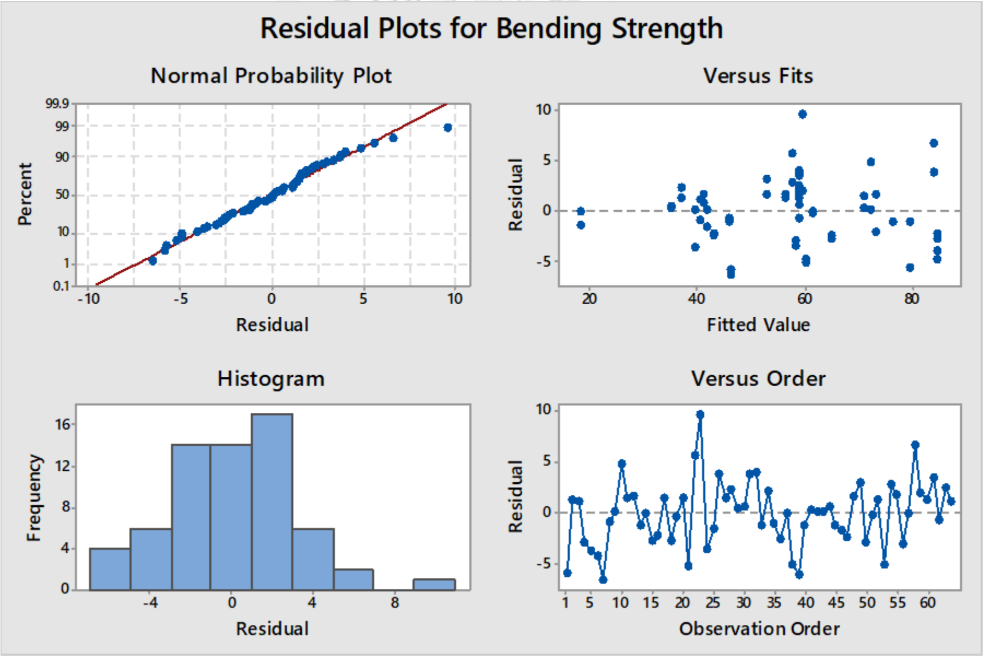
No.	Bending Strength		melting point		Bend		Thermal Expansion		LOI		Gas	
	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2
1	73.75	78.3	106.4	105.9	0.5	0.5	0.95	0.94	2.95	3.13	9.7	9.664
2	38.3	39.25	106.7	108.7	1.27	1.26	1.18	1.12	1.90	1.98	7.708	8.354
3	41.75	39.6	110.4	108.7	1.06	0.09	1.30	1.22	1.98	2.01	8.021	8.348
4	81.8	82.15	102.8	103.1	0.43	0.4	1.16	1.10	3.14	3.14	7.961	8.077
5	35.75	39.45	101.5	101.5	4.3	3.21	1.07	1.10	2.06	2.09	9.559	10.415
6	80.7	79.9	101.3	101.4	0.6	0.66	0.98	1.01	3.10	3.14	9.459	9.68
7	39.65	40.25	99.3	100.4	0.93	0.78	1.15	1.07	1.93	1.94	8.158	8.424
8	45	44.65	101.3	101.5	1.46	1.4	1.32	1.38	1.97	2.01	9.402	9.659
9	35.25	35.5	105.4	103.9	0.85	0.81	1.30	1.21	1.95	1.96	11.613	11.574
10	77	72.25	101.5	101.5	0.27	0.24	0.92	1.00	3.04	3.08	11.287	11.528
11	72.6	71.35	102	102.6	0.29	0.45	0.96	0.82	3.10	3.16	11.064	11.187
12	42.65	41.7	103.5	103.7	0.65	0.49	1.33	1.26	1.98	1.96	8.207	8.289
13	75.25	75.25	100.6	100.1	0.36	0.27	0.96	0.83	3.08	3.10	11.219	11.385
14	41.7	40.1	100	100.4	0.9	0.93	1.30	1.26	1.95	1.99	8.472	8.518
15	40.55	40.85	100.2	100.4	2.91	2.76	1.30	1.28	2.00	2.00	8.035	8.995
16	71.25	74.95	97.4	97.7	0.29	0.27	1.12	1.13	3.11	3.13	6.344	6.661
17	54.35	55.85	102.9	104.2	1.07	0.57	1.00	0.95	2.48	2.56	9.63	9.752
18	62.5	62.2	99.8	100.3	0.59	0.62	1.16	1.20	2.52	2.57	9.381	10.27
19	61.1	61.3	100.8	101.2	0.61	0.63	0.93	1.01	2.58	2.56	8.116	8.444
20	57.9	57.65	103.9	100.6	0.67	0.47	0.95	1.17	2.54	2.58	10.178	10.196
21	55.05	55.3	103.1	104.2	0.54	0.54	1.11	1.03	2.52	2.51	9.699	9.752
22	63.25	60.45	99.6	99	0.5	0.57	1.04	1.06	2.54	2.56	9.912	10.48
23	69.05	61.3	102.4	105.9	0.95	0.55	1.04	0.91	2.50	2.47	9.146	9.206
24	54.95	55.4	98.8	99.3	0.25	0.3	1.10	1.12	2.50	2.54	8.063	8.351
25	16.75	18.1	107.7	107	5.2	4.9	1.32	1.37	1.36	1.39	9.753	9.631
26	87.9	90.8	101.3	100.9	0.4	0.43	0.88	0.99	3.69	3.67	11.593	11.828
27	60.45	60.85	101.1	100.8	0.65	0.6	1.07	1.03	2.56	2.58	11.815	11.324
28	61.2	60.25	105.3	104.1	0.76	0.57	1.11	1.04	2.49	2.54	9.895	9.929
29	59.5	62.35	104.9	105.1	0.48	0.52	1.12	0.99	2.49	2.58	9.227	9.645
30	59.55	58.2	101	100.5	0.37	0.41	1.05	1.08	2.47	2.50	9.279	9.947
31	62.7	61.35	100.1	100.4	0.85	0.81	1.04	1.07	2.55	2.56	12.95	13.115
32	62.95	60.1	103.5	103.1	0.68	0.69	1.04	1.07	2.52	2.55	10.951	11.241

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองจะใช้โปรแกรม Minitab เข้ามาช่วยเพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์ และนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาใช้ได้อย่างรวดเร็ว โดยในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นจะประกอบไปด้วย การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) เพื่อดูความเหมาะสมของแบบจำลองที่มีต่อข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะทดลองด้วยสมมติฐาน 3 ประการได้แก่ สมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ สมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล และสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ จากนั้นเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปรนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้ากับตัวแปรตอบสนอง

4.2.1 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของค่าความทนแรงดัดโค้ง (Y_1)

4.2.1.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง



รูปที่ 4.1การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าความทนแรงดัดโค้ง

จากรูปที่ 4.1 สามารถอธิบายผลของความถูกต้องของแบบจำลองในส่วนของค่าคุณสมบัติความทนแรงดัดโค้งได้ดังนี้

- กราฟ Histogram เป็นกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ

- การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal Assumption) จากกราฟ Normal Probability Plot พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) มีการเรียงตัวอยู่ใกล้แนวเส้นตรงซึ่งหมายถึงข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยมีค่า P-Value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) เท่ากับ 0.56
- การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จากกราฟ Residual Versus Fitted value พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้างส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอย่างสุ่ม เมื่อค่า Fit Value เพิ่มขึ้น ข้อมูลไม่มีลักษณะกระจายที่เป็นแนวโน้ม และข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่บริเวณเส้นแนวศูนย์ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนที่คงที่
- การทดสอบสมมติฐานของค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independence of Residual) จากกราฟ Residual Versus Order พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้างไม่เกิดแนวโน้มหรือรูปแบบของการกระจายตัว และมีการกระจายแบบสุ่ม จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.2.1.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าความทนแรงดัดโค้ง

หลังจากการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองด้วยสมมติฐานทั้ง 3 ข้อพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ มีค่าความแปรปรวนที่คงที่ และมีความเป็นอิสระต่อกัน จากนั้นผู้วิจัยจึงนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์ เพื่อดูว่ามีปัจจัยนำเข้าตัวใดบ้างที่มีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญกับค่าความทนแรงดัดโค้ง โดยนำเครื่องมือทางสถิติเข้ามาใช้เพื่อหาคำตอบ โดยทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Response Surface Regression: B/S versus SA, SB, RA, RB, %Resin

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	20	15877.3	793.9	72.95	0.000
Linear	5	13621.4	2724.3	250.34	0.000
SA	1	451.7	451.7	41.51	0.000
SB	1	76.6	76.6	7.04	0.011
RA	1	20.3	20.3	1.87	0.179
RB	1	3.0	3.0	0.28	0.601
%Resin	1	13069.7	13069.7	1201.01	0.000
Square	5	315.6	63.1	5.80	0.000
SA*SA	1	36.2	36.2	3.33	0.075
SB*SB	1	20.8	20.8	1.91	0.174
RA*RA	1	41.3	41.3	3.79	0.058
RB*RB	1	10.5	10.5	0.97	0.331
%Resin*%Resin	1	263.7	263.7	24.23	0.000
2-Way Interaction	10	1940.3	194.0	17.83	0.000
SA*SB	1	184.6	184.6	16.96	0.000
SA*RA	1	129.0	129.0	11.85	0.001
SA*RB	1	243.4	243.4	22.36	0.000
SA*%Resin	1	148.6	148.6	13.65	0.001
SB*RA	1	281.7	281.7	25.89	0.000
SB*RB	1	91.6	91.6	8.42	0.006
SB*%Resin	1	377.1	377.1	34.65	0.000
RA*RB	1	205.8	205.8	18.91	0.000
RA*%Resin	1	231.4	231.4	21.26	0.000
RB*%Resin	1	47.2	47.2	4.33	0.043
Error	43	467.9	10.9		
Lack-of-Fit	6	364.2	60.7	21.65	0.000
Pure Error	37	103.7	2.8		
Total	63	16345.3			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.29882	97.14%	95.81%	93.16%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		61.058	0.930	65.63	0.000
SA	12.271	6.135	0.952	6.44	0.000
SB	-5.054	-2.527	0.952	-2.65	0.011
RA	-2.604	-1.302	0.952	-1.37	0.179
RB	-1.004	-0.502	0.952	-0.53	0.601
%Resin	66.004	33.002	0.952	34.66	0.000
SA*SA	-6.29	-3.14	1.72	-1.82	0.075
SB*SB	-4.76	-2.38	1.72	-1.38	0.174
RA*RA	-6.71	-3.36	1.72	-1.95	0.058
RB*RB	-3.39	-1.69	1.72	-0.98	0.331
%Resin*%Resin	-16.96	-8.48	1.72	-4.92	0.000
SA*SB	19.21	9.61	2.33	4.12	0.000
SA*RA	16.06	8.03	2.33	3.44	0.001
SA*RB	-22.06	-11.03	2.33	-4.73	0.000
SA*%Resin	17.24	8.62	2.33	3.69	0.001
SB*RA	-23.74	-11.87	2.33	-5.09	0.000
SB*RB	13.54	6.77	2.33	2.90	0.006
SB*%Resin	-27.46	-13.73	2.33	-5.89	0.000
RA*RB	20.29	10.14	2.33	4.35	0.000
RA*%Resin	-21.51	-10.76	2.33	-4.61	0.000
RB*%Resin	9.71	4.86	2.33	2.08	0.043

```
Regression Equation in Uncoded Units

B/S = -61.6 - 0.761 SA + 0.593 SB + 0.825 RA - 0.339 RB + 77.94 %Resin
- 0.01397 SA*SA - 0.001318 SB*SB - 0.00537 RA*RA - 0.00120 RB*RB
- 8.48 %Resin*%Resin + 0.01507 SA*SB + 0.02142 SA*RA - 0.01961 SA*RB
+ 0.575 SA*%Resin - 0.01117 SB*RA + 0.00425 SB*RB - 0.3231 SB*%Resin
+ 0.01082 RA*RB - 0.4302 RA*%Resin + 0.1295 RB*%Resin
```

รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าความทนแรงดัดโค้งด้วยสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความทนแรงดัดโค้ง โดยพิจารณาจากสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 97.14% และ R-Sq (adj) 95.81% ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความทนแรงดัดโค้งไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.3

Response Surface Regression: Bending Strength versus SA, SB, RA, RB, %Resin

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	15741.3	1049.4	83.40	0.000
Linear	5	13621.4	2724.3	216.50	0.000
SA	1	451.7	451.7	35.90	0.000
SB	1	76.6	76.6	6.09	0.017
RA	1	20.3	20.3	1.62	0.210
RB	1	3.0	3.0	0.24	0.626
%Resin	1	13069.7	13069.7	1038.66	0.000
Square	1	226.7	226.7	18.02	0.000
%Resin*%Resin	1	226.7	226.7	18.02	0.000
2-Way Interaction	9	1893.2	210.4	16.72	0.000
SA*SB	1	184.6	184.6	14.67	0.000
SA*RA	1	129.0	129.0	10.25	0.002
SA*RB	1	243.4	243.4	19.34	0.000
SA*%Resin	1	148.6	148.6	11.81	0.001
SB*RA	1	281.7	281.7	22.39	0.000
SB*RB	1	91.6	91.6	7.28	0.010
SB*%Resin	1	377.1	377.1	29.97	0.000
RA*RB	1	205.8	205.8	16.35	0.000
RA*%Resin	1	231.4	231.4	18.39	0.000
Error	48	604.0	12.6		
Lack-of-Fit	11	500.2	45.5	16.22	0.000
Pure Error	37	103.7	2.8		
Total	63	16345.3			

```
      S    R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
3.54727  96.30%     95.15%      92.91%

Coded Coefficients

Term             Effect     Coef  SE Coef  T-Value  P-Value
Constant                  58.943    0.561   105.09    0.000
SA                12.27     6.14     1.02     5.99    0.000
SB                -5.05    -2.53     1.02    -2.47    0.017
RA                -2.60    -1.30     1.02    -1.27    0.210
RB                -1.00    -0.50     1.02    -0.49    0.626
%Resin            66.00    33.00     1.02    32.23    0.000
%Resin*%Resin    -15.55    -7.78     1.83    -4.24    0.000
SA*SB             19.21     9.61     2.51     3.83    0.000
SA*RA             16.06     8.03     2.51     3.20    0.002
SA*RB            -22.06   -11.03     2.51    -4.40    0.000
SA*%Resin         17.24     8.62     2.51     3.44    0.001
SB*RA            -23.74   -11.87     2.51    -4.73    0.000
SB*RB             13.54     6.77     2.51     2.70    0.010
SB*%Resin        -27.46   -13.73     2.51    -5.47    0.000
RA*RB             20.29    10.14     2.51     4.04    0.000
RA*%Resin        -21.51   -10.76     2.51    -4.29    0.000

Regression Equation in Uncoded Units

B/S = -60.1 - 1.181 SA + 0.481 SB + 0.556 RA - 0.170 RB + 79.97 %Resin
- 7.78 %Resin*%Resin + 0.01507 SA*SB + 0.02142 SA*RA - 0.01961 SA*RB
+ 0.575 SA*%Resin - 0.01117 SB*RA + 0.00425 SB*RB - 0.3231 SB*%Resin
+ 0.01082 RA*RB - 0.430 RA*%Resin
```

รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าความทนแรงดัดโค้งด้วยวิธีการลดตัวแปรอิสระ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังรูปที่ 4.3 พบว่าปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนแรงดัดโค้งมีทั้งที่อยู่ในรูปผลกระทบหลัก (Main Effect) เทอมกำลังสองของปัจจัย (Quadratic Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Effect) โดยอ้างอิงที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งหากค่า P-Value ของเทอมของปัจจัยใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าเทอมปัจจัยนั้นๆมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญกับค่าความทนแรงดัดโค้ง ซึ่งจากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าเทอมที่มีนัยสำคัญได้แก่ เทอมของผลกระทบหลัก SA, SB และ %Resin เทอมของเทอมกำลังสองของปัจจัยของ %Resin และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยได้แก่ SA-SB, SA-RA, SA-RB, SA-%Resin, SB-RA, SB*RB, SB-%Resin, RA-RB และ RA-%Resin โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.1 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 96.30% และ R-Sq (adj) เท่ากับ 95.15% ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่าน้อยกว่าค่า R-Sq (adj) สมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

B/S = -60.1 - 1.181SA + 0.481SB + 0.556RA - 0.170RB + 79.97%Resin - 7.78%Resin^2 + 0.01507SA*SB + 0.02142SA*RA - 0.01961SA*RB + 0.575SA*%Resin - 0.01117SB*RA + 0.00425SB*RB - 0.3231SB*%Resin + 0.01082RA*RB - 0.430RA*%Resin (4.1)

ซึ่งปัจจัยแต่ละตัวมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกัน ดังนั้นวัตถุดิบหลักทั้งทรายและเรซิน จึงมีผลโดยตรงต่อค่าความทนแรงดัดโค้งดังนี้

1.) คุณสมบัติของทรายที่มีผลต่อค่าความทนแรงดัดโค้ง ในส่วนแรกจะพิจารณาในเรื่องของความละเอียดของทราย (Roundness) ถ้าหากทรายมีความละเอียดมากจะทำให้มีพื้นผิวสัมผัสมากส่งผลให้เวลา Resin มาเคลือบที่เม็ดทรายจะทำให้มีโอกาสยึดเกาะได้ดีกว่าทรายที่มีพื้นผิวสัมผัสที่น้อยส่งผลทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งสูง ซึ่งจากทรายชนิด SA, SB และ SC จะมีค่าความละเอียดทรายอยู่ที่ 1.18, 1.32 และ 1.3 ตามลำดับ และถ้าหากมาพิจารณาที่ปริมาณของซิลิก้าจะพบว่าถ้าหากทรายที่มีปริมาณซิลิก้าที่สูงจะส่งผลให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าสูงได้เช่นเดียวกัน และทรายชนิด SA, SB และ SC จะมีปริมาณซิลิก้าอยู่ที่ 99, 97 และ 93 ตามลำดับ

2.) คุณสมบัติของเรซินที่มีผลต่อค่าความทนแรงดัดโค้ง ในส่วนแรกจะพิจารณาที่ระยะเวลาการละลายกลายเป็นเจลของเรซิน (Gel Time) หากเรซินชนิดใดมีระยะเวลาการละลายกลายเป็นเจลที่มากแสดงว่าเรซินชนิดนั้นสามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึงส่งผลให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าสูง ซึ่งถ้าหากเรซินที่มีช่วงระยะเวลากลายเป็นเจลที่น้อยเมื่อเรซินถึงช่วงระยะเวลาที่เกิดเจล (Gel Point) จะทำให้เรซินนั้นเกิดการจับตัวกันเองจนกลายเป็นก้อนวุ้น ทำให้เรซินเหล่านั้นไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งที่ได้มีค่าต่ำ ซึ่งยังมีคุณสมบัติที่สำคัญของเรซินอีกชนิดคือ Flow Length ซึ่ง flow length มีความสัมพันธ์กับค่า cure rate และ melt viscosity ถ้าหากค่าทั้งสองมีค่าต่ำ จะส่งผลให้ flow length มีค่าที่สูงทำให้มีโอกาสเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหในขณะที่ไปทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน ส่งผลทำให้ชิ้นงานเกิดความคงทนแข็งแรง

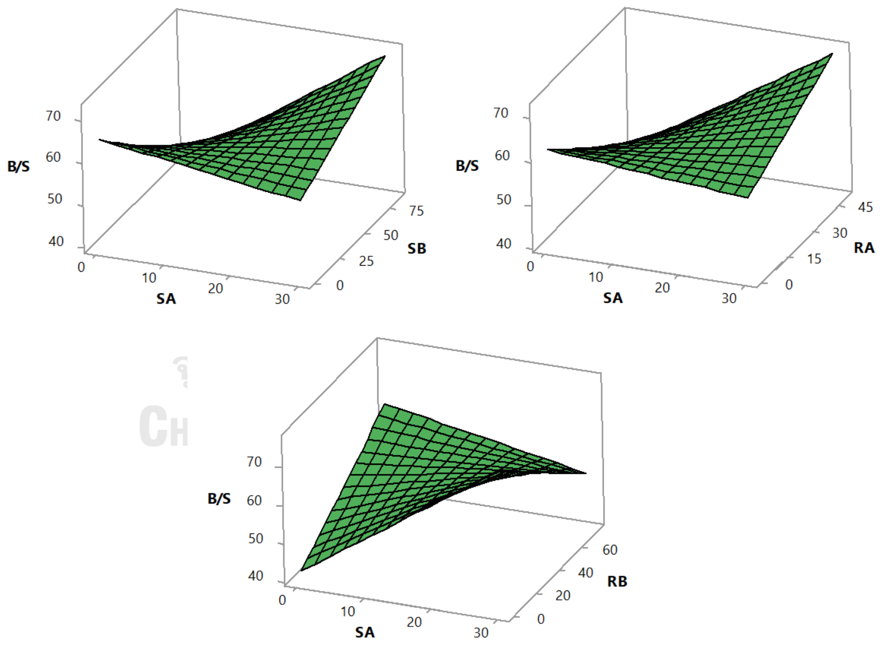
จากผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญข้างต้น พบว่าเทอมของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทนแรงดัดโค้ง ทำให้สามารถใช้กราฟพื้นผิวในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย SA, SB, RA, RB, %Resin, SA-SB, SA-RA, SA-RB, SA-%Resin, SB-RA, SB-RB, SB-%Resin, RA-RB, RA-%Resin ได้ และทางผู้วิจัยจะพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของปริมาณทรายและปริมาณเรซินต่อเปอร์เซ็นต์ด้วย

ในส่วนแรกจะทำการพิจารณาเทอมของผลกระทบร่วมระหว่าง SA กับ SB, RA และ RB โดยอาศัยกราฟพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.4

- จากกราฟผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SA กับ SB พบว่าที่การเติม SA ปริมาณน้อย (ระดับต่ำ) การเพิ่มขึ้นของ SB จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ

SB หมายถึงการเติม SC ในปริมาณที่มากหรือไม่เติมเลย ในขณะที่การเติม SA ปริมาณมาก (ระดับสูง) นั่นหมายถึงการเติม SC ในปริมาณที่น้อยหรือไม่เติมเลย การเพิ่มขึ้นของ SB จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้น

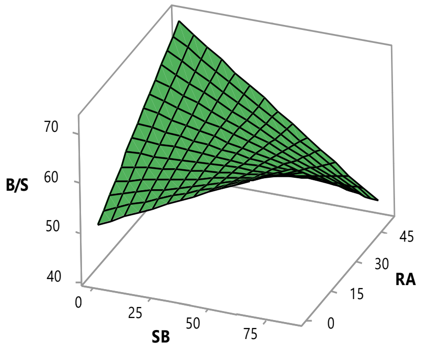
- จากกราฟผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SA กับ RA พบว่าที่การเติม SA ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม SB หรือ SC ในปริมาณที่มาก การเพิ่มขึ้นของ RA จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง ในขณะที่การเติม SA ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม SB หรือ SC ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มขึ้นของ RA จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้น
- จากกราฟผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SA กับ RB พบว่าที่การเติม SA ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม SB หรือ SC ในปริมาณที่มาก การเพิ่มขึ้นของ RB จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่ามากขึ้น ในขณะที่การเติม SA ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม SB หรือ SC ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มขึ้นของ RB จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง

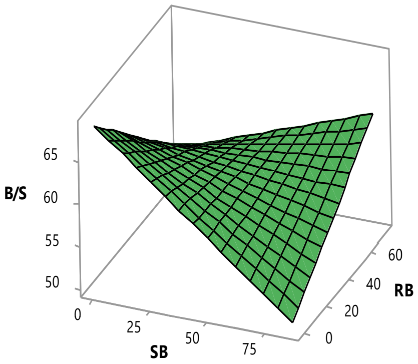


รูปที่ 4.4 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SA-RA และกราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SA-RB ที่ส่งผลต่อความทนแรงดัดโค้ง

ในส่วนถัดมาจะทำการพิจารณาเทอมของผลกระทบร่วมระหว่าง SB-RA และ SB-RB โดยอาศัยกราฟพื้นผิวตอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

- จากกราฟผลกระทบร่วมระหว่างของปัจจัยของ SB-RA พบว่าที่การเติม SB ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม SA หรือ SC ในปริมาณที่มาก การเพิ่มขึ้นของ RA จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่ามากขึ้น ในขณะที่การเติม SB ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม SA หรือ SC ในปริมาณที่น้อยลง การเพิ่มขึ้นของ RA จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง
- จากกราฟผลกระทบร่วมระหว่างของปัจจัยของ SB-RB พบว่าที่การเติม SB ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม SA หรือ SC ในปริมาณที่มาก การเพิ่มขึ้นของ RB จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าน้อยลง ในขณะที่การเติม SB ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม SA หรือ SC ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มขึ้นของ RB จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่ามากขึ้น

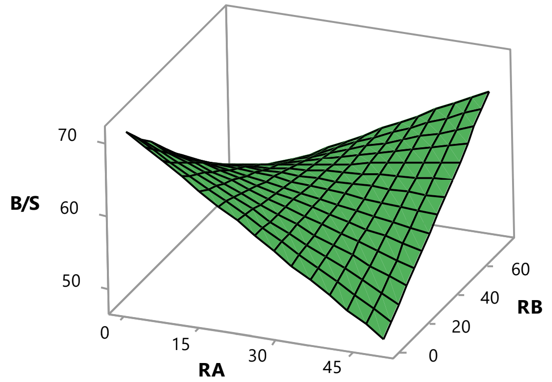




รูปที่ 4.5 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SB-RA และกราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SB-RB ที่ส่งผลต่อความทนแรงดัดโค้ง

ในส่วนถัดมาจะทำการพิจารณาเทอมของผลกระทบร่วมระหว่าง RA-RB โดยอาศัยกราฟพื้นผิวตอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

- จากกราฟผลกระทบร่วมระหว่างของปัจจัยของ RA-RB พบว่าที่การเติม RA ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม RC ในปริมาณที่มาก การเพิ่มขึ้นของ RB จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าน้อยลง ในขณะที่การเติม RA ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม RC ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มขึ้นของ RB จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่ามากขึ้น

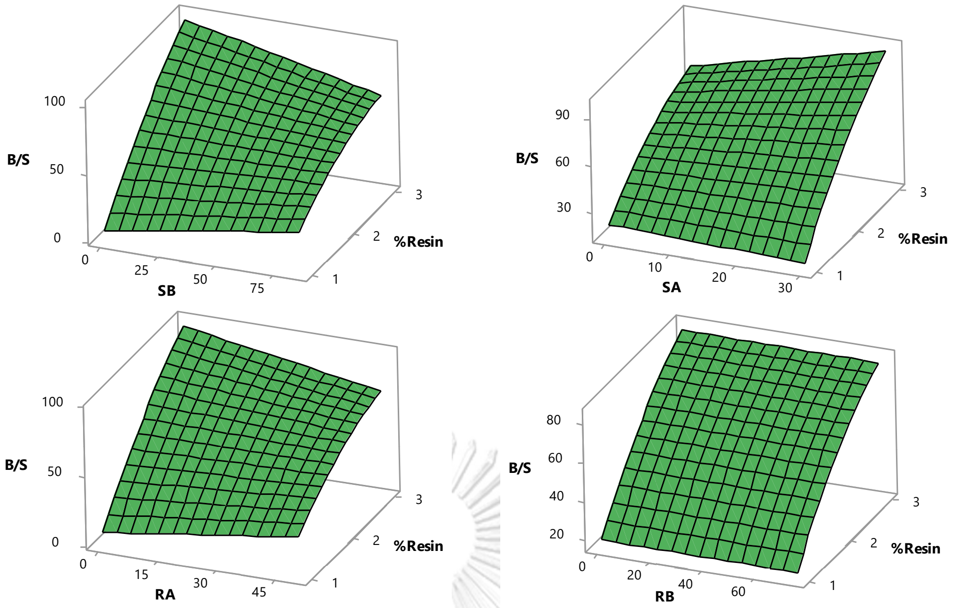


รูปที่ 4.6 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ RA-RB ที่ส่งผลต่อความทนแรงดัดโค้ง

สุดท้ายพิจารณาถึงผลกระทบของปริมาณทรายและเปอร์เซ็นต์เรซินและปริมาณเรซินกับเปอร์เซ็นต์เรซินที่มีต่อค่าความทนแรงดัดโค้ง โดยพิจารณาจากกราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.7

- พบว่าทรายทั้ง 2 ชนิดเมื่อนำมาผสมในสูตรการผลิตทรายเคลือบเรซินที่เปอร์เซ็นต์เรซินคงที่ เมื่อเพิ่มปริมาณทรายมากขึ้นเท่าไร ค่าความทนแรงดัดโค้งที่ได้จะไม่เพิ่มสูงขึ้นมากตามปริมาณทรายที่ใช้ไป เมื่อมาพิจารณาที่ปริมาณการใช้เรซินทั้ง 2 ชนิดพบว่า ที่เปอร์เซ็นต์เรซินคงที่การเพิ่มปริมาณเรซินในแต่ละชนิดก็ไม่ช่วยทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งเพิ่มสูงมากนัก ในทางกลับกันหากมาพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์เรซินที่ใช้ พบว่าหากผลิตภัณฑ์ใดมีการใช้เปอร์เซ็นต์ที่สูง ค่าความทนแรงดัดโค้งจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งจากกราฟพื้นผิวจะเห็นได้ว่าไม่ว่าจะใช้ SA, SB, RA และ RB ที่ปริมาณเท่าใดหากใช้เปอร์เซ็นต์เรซินที่สูงค่าความทนแรงดัดโค้งที่ได้ก็จะมีค่าสูงขึ้น แต่ทั้งนี้ทรายและเรซินก็ยังถือเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่ามากหรือน้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

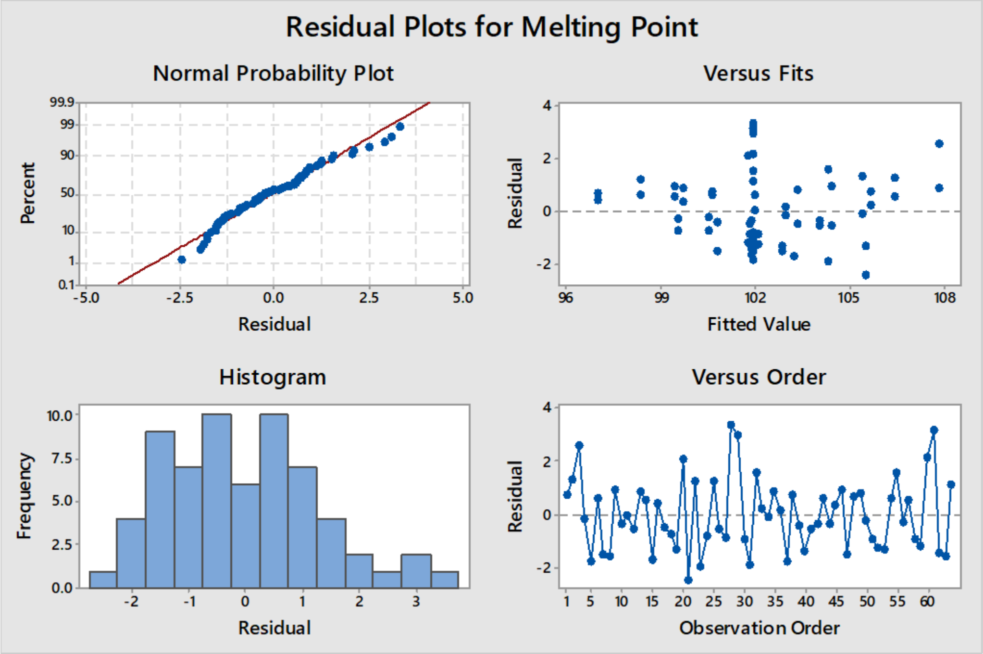


รูปที่ 4.7 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณทรายแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์เรซิน และปริมาณเรซินแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์เรซินที่ส่งผลต่อความทนแรงดัดโค้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.2 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเซตตัว (Y_2)

4.2.2.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง



รูปที่ 4.8 การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

จากรูปที่ 4.8 สามารถอธิบายผลของความถูกต้องของแบบจำลองในส่วนของค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- กราฟ Histogram เป็นกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ
- การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal Assumption) จากกราฟ Normal Probability Plot พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) มีการเรียงตัวอยู่ใกล้แนวเส้นตรงซึ่งหมายถึงข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยมีค่า P-Value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) เท่ากับ 0.163
- การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จากกราฟ Residual Versus Fitted value พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้างส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอย่างสุ่ม เมื่อค่า Fit Value เพิ่มขึ้น ข้อมูลไม่มีลักษณะกระจายที่เป็นแนวโน้ม และข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่บริเวณเส้นแนวศูนย์ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนที่คงที่

- การทดสอบสมมติฐานของค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independence of Residual) จากกราฟ Residual Versus Order พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้างไม่เกิดแนวโน้มหรือรูปแบบของการกระจายตัว และมีการกระจายแบบสุ่ม จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.2.2.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

หลังจากการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองด้วยสมมติฐานทั้ง 3 ข้อพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ มีค่าความแปรปรวนที่คงที่ และมีความเป็นอิสระต่อกัน จากนั้นผู้วิจัยจึงนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์ต่อเพื่อดูว่ามีปัจจัยนำเข้าตัวใดบ้างที่มีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญกับค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวโดยนำเครื่องมือทางสถิติเข้ามาใช้เพื่อหาคำตอบ โดยทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.9

Response Surface Regression: Melting Point versus SA, SB, RA, RB, %Resin

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	20	390.199	19.510	9.25	0.000
Linear	5	334.523	66.905	31.73	0.000
SA	1	19.763	19.763	9.37	0.004
SB	1	0.963	0.963	0.46	0.503
RA	1	165.763	165.763	78.62	0.000
RB	1	76.003	76.003	36.05	0.000
%Resin	1	72.030	72.030	34.16	0.000
Square	5	21.850	4.370	2.07	0.087
SA*SA	1	0.398	0.398	0.19	0.666
SB*SB	1	0.933	0.933	0.44	0.509
RA*RA	1	1.571	1.571	0.75	0.393
RB*RB	1	1.028	1.028	0.49	0.489
%Resin*%Resin	1	16.100	16.100	7.64	0.008
2-Way Interaction	10	33.825	3.383	1.60	0.138
SA*SB	1	2.645	2.645	1.25	0.269
SA*RA	1	3.645	3.645	1.73	0.196
SA*RB	1	0.151	0.151	0.07	0.790
SA*%Resin	1	0.605	0.605	0.29	0.595
SB*RA	1	0.911	0.911	0.43	0.514
SB*RB	1	0.000	0.000	0.00	1.000
SB*%Resin	1	7.031	7.031	3.33	0.075
RA*RB	1	9.245	9.245	4.38	0.042
RA*%Resin	1	8.611	8.611	4.08	0.050
RB*%Resin	1	0.980	0.980	0.46	0.499
Error	43	90.666	2.109		
Lack-of-Fit	6	25.422	4.237	2.40	0.046
Pure Error	37	65.244	1.763		
Total	63	480.864			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.45207	81.15%	72.38%	66.35%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		102.401	0.410	250.04	0.000
SA	-2.567	-1.283	0.419	-3.06	0.004
SB	-0.567	-0.283	0.419	-0.68	0.503
RA	-7.433	-3.717	0.419	-8.87	0.000
RB	-5.033	-2.517	0.419	-6.00	0.000
%Resin	-4.900	-2.450	0.419	-5.84	0.000
SA*SA	-0.659	-0.330	0.758	-0.43	0.666
SB*SB	-1.009	-0.505	0.758	-0.67	0.509
RA*RA	-1.309	-0.655	0.758	-0.86	0.393
RB*RB	-1.059	-0.530	0.758	-0.70	0.489
%Resin*%Resin	4.191	2.095	0.758	2.76	0.008
SA*SB	-2.30	-1.15	1.03	-1.12	0.269
SA*RA	2.70	1.35	1.03	1.31	0.196
SA*RB	-0.55	-0.27	1.03	-0.27	0.790
SA*%Resin	-1.10	-0.55	1.03	-0.54	0.595
SB*RA	-1.35	-0.67	1.03	-0.66	0.514
SB*RB	0.00	0.00	1.03	0.00	1.000
SB*%Resin	-3.75	-1.87	1.03	-1.83	0.075
RA*RB	4.30	2.15	1.03	2.09	0.042
RA*%Resin	4.15	2.08	1.03	2.02	0.050
RB*%Resin	1.40	0.70	1.03	0.68	0.499

Regression Equation in Uncoded Units

Melting Point = 123.56 + 0.037 SA + 0.1483 SB - 0.375 RA - 0.1262 RB
- 11.18 %Resin - 0.00146 SA*SA - 0.000279 SB*SB - 0.00105 RA*RA
- 0.000377 RB*RB + 2.095 %Resin*%Resin - 0.00180 SA*SB + 0.00360 SA*RA
- 0.00049 SA*RB - 0.0367 SA*%Resin - 0.000635 SB*RA + 0.000000 SB*RB
- 0.0441 SB*%Resin + 0.00229 RA*RB + 0.0830 RA*%Resin + 0.0187 RB*%Resin

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย Chulalongkorn University

รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าอุณภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวด้วยสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าอุณภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว โดยพิจารณาจากสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 81.15% และ R-Sq (adj) เท่ากับ 72.38% ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าอุณภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.10

Response Surface Regression: Melting Point versus SA, SB, RA, RB, %Resin

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	370.065	52.866	26.72	0.000
Linear	4	333.560	83.390	42.15	0.000
SA	1	19.763	19.763	9.99	0.003
RA	1	165.763	165.763	83.78	0.000
RB	1	76.003	76.003	38.41	0.000
%Resin	1	72.030	72.030	36.41	0.000
Square	1	18.648	18.648	9.43	0.003
%Resin*%Resin	1	18.648	18.648	9.43	0.003
2-Way Interaction	2	17.856	8.928	4.51	0.015
RA*RB	1	9.245	9.245	4.67	0.035
RA*%Resin	1	8.611	8.611	4.35	0.042
Error	56	110.800	1.979		
Lack-of-Fit	19	45.556	2.398	1.36	0.207
Pure Error	37	65.244	1.763		
Total	63	480.864			

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.40662	76.96%	74.08%	72.01%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		101.998	0.222	458.61	0.000
SA	-2.567	-1.283	0.406	-3.16	0.003
RA	-7.433	-3.717	0.406	-9.15	0.000
RB	-5.033	-2.517	0.406	-6.20	0.000
%Resin	-4.900	-2.450	0.406	-6.03	0.000
%Resin*%Resin	4.460	2.230	0.726	3.07	0.003
RA*RB	4.300	2.150	0.995	2.16	0.035
RA*%Resin	4.150	2.075	0.995	2.09	0.042

Regression Equation in Uncoded Units

Melting Point = 129.63 - 0.0856 SA - 0.4007 RA - 0.1244 RB - 13.45 %Resin + 2.230 %Resin*%Resin + 0.00229 RA*RB + 0.0830 RA*%Resin

รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวด้วยวิธีการลดตัวแปรอิสระ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังรูปที่ 4.10 พบว่าปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีทั้งที่อยู่ในรูปผลกระทบหลัก (Main Effect) เทอมกำลังสองของปัจจัย (Quadratic Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Effect) โดยอ้างอิงที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งหากค่า P-Value ของเทอมของปัจจัยใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าเทอมปัจจัยนั้นๆมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญกับค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ซึ่งจาก

การวิเคราะห์ สามารถสรุปได้ว่าเทอมที่มีนัยสำคัญได้แก่ เทอมของผลกระทบหลักคือ SA, RA, RB และ %Resin เทอมของกำลังสองของปัจจัย %Resin และเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ RA-RB และ RA-%Resin โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.2 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 76.96% และ R-Sq (adj) เท่ากับ 72.01% ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่าน้อยกว่าค่า R-Sq (adj) สมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$\text{Melting Point} = 129.63 - 0.0856SA - 0.4007RA - 0.1244RB - 13.45\%Resin + 2.230\%Resin^2 + 0.00229RA*RB + 0.0830RA*\%Resin \quad (4.2)$$

ซึ่งปัจจัยแต่ละตัวมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกันจึงทำให้ค่าคุณสมบัติที่พิจารณาแต่ละตัวมีค่าต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผสมในผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเซตตัวนั้นจะขึ้นอยู่กับเรซินเป็นส่วนใหญ่ คือถ้าหากใช้เรซินในปริมาณที่มากค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเซตตัวก็จะมีค่ามากขึ้นเช่นกัน โดยชนิดของทรายนั้นจะไม่ส่งผลมากนักต่อค่าคุณสมบัตินี้ ซึ่งคุณสมบัติเฉพาะตัวของเรซินในเรื่องค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวจะสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเฉพาะตัวของเรซินในด้านค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

ปัจจัย	RA	RB	RC
อุณหภูมิ (เซลเซียล)	115	98	108

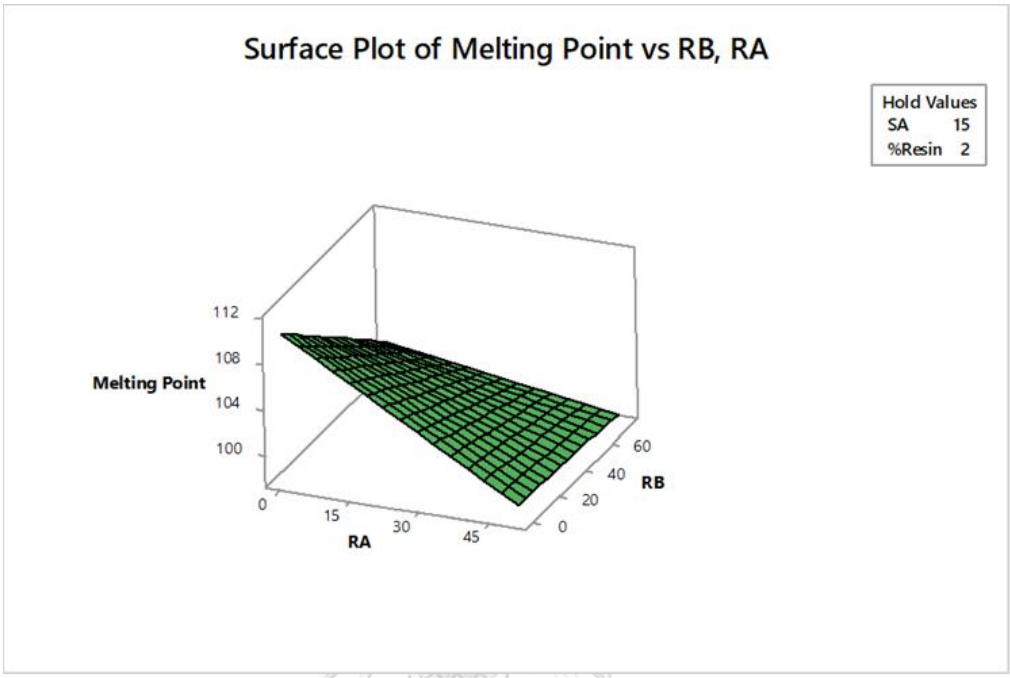
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญข้างต้น พบว่าเทอมของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ทำให้สามารถใช้กราฟพื้นในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย RA, RB, %Resin, RA-RB และ RA-%Resin ได้ ส่วนเทอมของปัจจัย SA จะใช้กราฟผลกระทบหลักในการอธิบายความสัมพันธ์แทน และทางผู้วิจัยจะพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของปริมาณทรายและปริมาณเรซินต่อเปอร์เซ็นต์ด้วย

ในส่วนแรกจะทำการพิจารณาเทอมของผลกระทบร่วมระหว่าง RA-RB โดยอาศัยกราฟพื้นผิวตอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.11

- ซึ่งจากกราฟพบว่าที่การเติม RA ปริมาณน้อย (ระดับต่ำ) การเพิ่มขึ้นของปริมาณ RB จะทำให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเซตตัวมีค่าลดลง นั่นหมายถึงการเติม RC ในปริมาณที่ลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่การเติม RA ในปริมาณที่มากขึ้น (ระดับสูง) การเพิ่มขึ้นของปริมาณ RB จะทำให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย นั่นหมายการเติม RC ใน

ปริมาณที่น้อยลงหรืออาจจะไม่มีการเติม RC เลยก็ได้ และถ้าหากต้องการค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าสูงสุดสามารถทำได้โดยการเติมปริมาณ RC เพียงชนิดเดียว



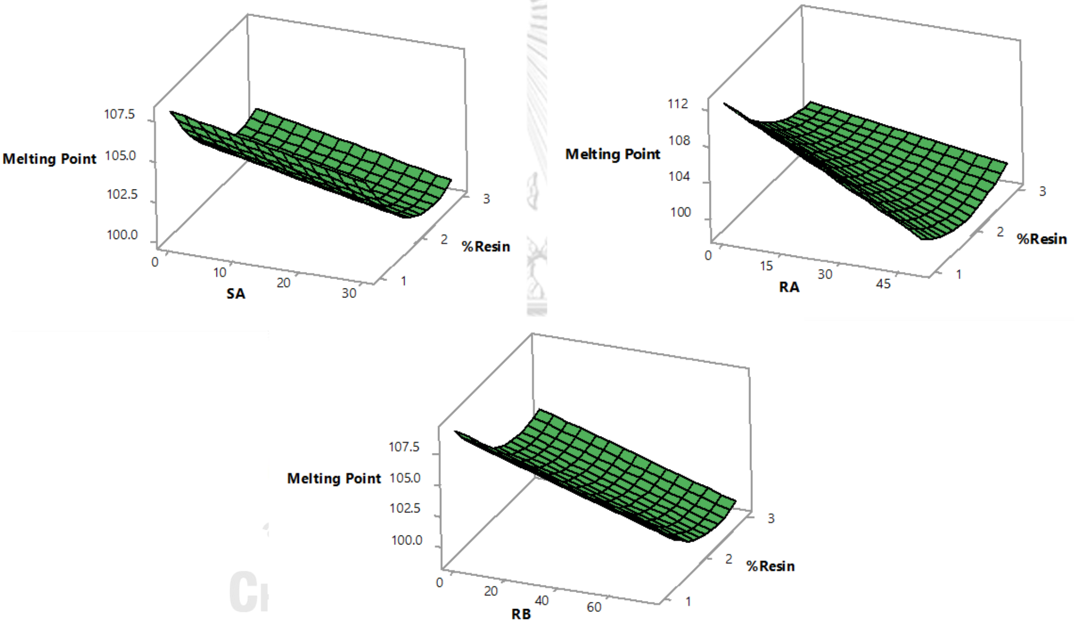
รูปที่ 4.11 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ RA และปริมาณ RB ที่มีต่อค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

ในส่วนถัดมาเป็นพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายกับเปอร์เซ็นต์เรซิน และปริมาณเรซินกับเปอร์เซ็นต์เรซินที่มีต่อค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว โดยพิจารณาจากกราฟพื้นผิวตอบ ดังรูปที่ 4.12

- จากกราฟผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย SA-%Resin พบว่าการเติม SA ที่ปริมาณน้อย (ระดับต่ำ) นั่นหมายถึงการเติม SB หรือ SC ที่ปริมาณมาก การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์เรซินจะทำให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่การเติม SA ในปริมาณที่มาก นั่นหมายถึงการเติม SB หรือ SC ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์เรซินจะทำให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าสูงเช่นกัน
- จากกราฟความสัมพันธ์ของเรซินกับเปอร์เซ็นต์ของเรซิน พบว่าการเติม RA ที่ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม RB หรือ RC ที่ปริมาณมาก การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์เรซินจะทำให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่การเติม RA ที่ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม RB หรือ RC ที่ปริมาณน้อย การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์เรซินจะทำให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

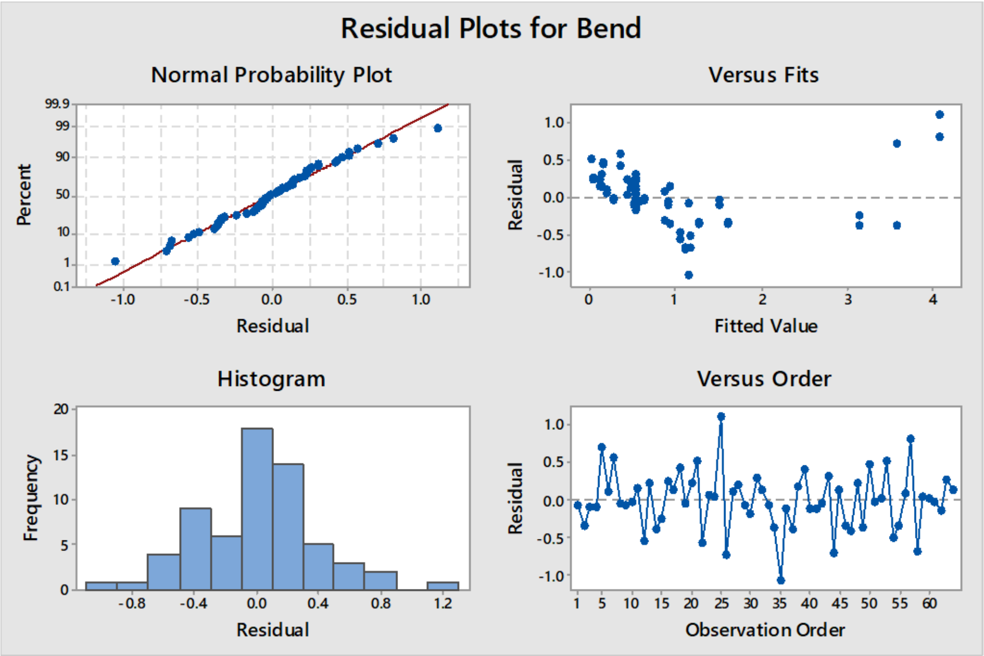
ที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่ามากขึ้น สุดท้ายหากพิจารณาที่การเติม RB ในปริมาณที่น้อย นั่นหมายถึงการเติม RA หรือ RC ในปริมาณที่มาก การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์เรซินจะทำให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่ามากขึ้น เช่นเดียวกันที่การเติม RB ในปริมาณที่มากนั่นหมายถึงการเติม RA หรือ RC ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์เรซินจะทำให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่ามากขึ้นด้วย จากทุกกรณีที่กล่าวมานั้นจะพบว่าที่เปอร์เซ็นต์เรซินเท่ากับ 1 จะให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าสูง จากนั้นเมื่อใช้เปอร์เซ็นต์เรซินที่มากขึ้นจนถึงที่เปอร์เซ็นต์เรซินเท่ากับ 2 จะให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าต่ำสุด หลังจากนั้นเมื่อใช้เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นจาก 2% ไปที่เปอร์เซ็นต์เรซินเท่ากับ 3 พบว่าค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวกลับมาค่าสูงขึ้นอีกครั้ง



รูปที่ 4.12 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณทรายกับเปอร์เซ็นต์เรซิน และปริมาณเรซินแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์เรซินที่มีต่อค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

4.2.3 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของค่าความโก่งงอ (Y_3)

4.2.3.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง



รูปที่ 4.13 การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าความโก่งงอ (Y_3: Bend)

จากรูปที่ 4.13 สามารถอธิบายผลของความถูกต้องของแบบจำลองในส่วนของค่าความโก่งงอได้ดังนี้

- กราฟ Histogram เป็นกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ
- การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal Assumption) จากกราฟ Normal Probability Plot พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) มีการเรียงตัวอยู่ใกล้แนวเส้นตรงซึ่งหมายถึงข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยมีค่า P-Value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) เท่ากับ 0.246
- การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จากกราฟ Residual Versus Fitted value พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้างส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอย่างสุ่ม เมื่อค่า Fit Value เพิ่มขึ้น ข้อมูลไม่มีลักษณะกระจายที่เป็นแนวโน้ม และข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่บริเวณเส้นแนวศูนย์ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนที่คงที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- การทดสอบสมมติฐานของค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independence of Residual) จากกราฟ Residual Versus Order พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้างไม่เกิดแนวโน้มหรือรูปแบบของการกระจายตัว และมีการกระจายแบบสุ่ม จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.2.3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าความโก่งงอด้วยโปรแกรม Minitab

หลังจากการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองด้วยสมมติฐานทั้ง 3 ข้อพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ มีค่าความแปรปรวนที่คงที่ และมีความเป็นอิสระต่อกัน จากนั้นผู้วิจัยจึงนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์ต่อเพื่อดูว่ามีปัจจัยนำเข้าตัวใดบ้างที่มีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญกับค่าความโก่งงอโดยนำเครื่องมือทางสถิติเข้ามาใช้เพื่อหาคำตอบ โดยทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.14

Response Surface Regression: Bend versus SA, SB, RA, RB, %Resin

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	20	60.0831	3.0042	15.82	0.000
Linear	5	33.0153	6.6031	34.76	0.000
SA	1	1.8448	1.8448	9.71	0.003
SB	1	0.1271	0.1271	0.67	0.418
RA	1	3.2292	3.2292	17.00	0.000
RB	1	1.3367	1.3367	7.04	0.011
%Resin	1	26.4776	26.4776	139.40	0.000
Square	5	16.0856	3.2171	16.94	0.000
SA*SA	1	0.0000	0.0000	0.00	0.996
SB*SB	1	0.0496	0.0496	0.26	0.612
RA*RA	1	0.1108	0.1108	0.58	0.449
RB*RB	1	0.1450	0.1450	0.76	0.387
%Resin*%Resin	1	14.9783	14.9783	78.86	0.000
2-Way Interaction	10	10.9822	1.0982	5.78	0.000
SA*SB	1	0.0195	0.0195	0.10	0.750
SA*RA	1	2.8025	2.8025	14.76	0.000
SA*RB	1	0.0185	0.0185	0.10	0.756
SA*%Resin	1	1.4070	1.4070	7.41	0.009
SB*RA	1	0.0621	0.0621	0.33	0.570
SB*RB	1	2.6623	2.6623	14.02	0.001
SB*%Resin	1	0.3101	0.3101	1.63	0.208
RA*RB	1	0.3180	0.3180	1.67	0.203
RA*%Resin	1	3.3218	3.3218	17.49	0.000
RB*%Resin	1	0.0604	0.0604	0.32	0.576
Error	43	8.1672	0.1899		
Lack-of-Fit	6	6.5129	1.0855	24.28	0.000
Pure Error	37	1.6543	0.0447		
Total	63	68.2503			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.435816	88.03%	82.47%	70.45%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		0.640	0.123	5.20	0.000
SA	-0.784	-0.392	0.126	-3.12	0.003
SB	-0.206	-0.103	0.126	-0.82	0.418
RA	1.038	0.519	0.126	4.12	0.000
RB	-0.668	-0.334	0.126	-2.65	0.011
%Resin	-2.971	-1.485	0.126	-11.81	0.000
SA*SA	0.002	0.001	0.228	0.00	0.996
SB*SB	-0.233	-0.116	0.228	-0.51	0.612
RA*RA	-0.348	-0.174	0.228	-0.76	0.449
RB*RB	-0.398	-0.199	0.228	-0.87	0.387
%Resin*%Resin	4.042	2.021	0.228	8.88	0.000
SA*SB	0.197	0.099	0.308	0.32	0.750
SA*RA	-2.368	-1.184	0.308	-3.84	0.000
SA*RB	-0.193	-0.096	0.308	-0.31	0.756
SA*%Resin	1.678	0.839	0.308	2.72	0.009
SB*RA	0.353	0.176	0.308	0.57	0.570
SB*RB	2.307	1.154	0.308	3.74	0.001
SB*%Resin	0.787	0.394	0.308	1.28	0.208
RA*RB	-0.797	-0.399	0.308	-1.29	0.203
RA*%Resin	-2.577	-1.289	0.308	-4.18	0.000
RB*%Resin	0.347	0.174	0.308	0.56	0.576

Regression Equation in Uncoded Units

Bend = 11.50 - 0.0594 SA - 0.0491 SB + 0.1940 RA - 0.0251 RB
- 9.69 %Resin + 0.00001 SA*SA - 0.000064 SB*SB - 0.000278 RA*RA
- 0.000141 RB*RB + 2.021 %Resin*%Resin + 0.000155 SA*SB - 0.003157 SA*RA
- 0.000171 SA*RB + 0.0559 SA*%Resin + 0.000166 SB*RA + 0.000724 SB*RB
+ 0.00926 SB*%Resin - 0.000425 RA*RB - 0.0516 RA*%Resin
+ 0.00463 RB*%Resin

รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าความโก่งงอด้วยสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าความโก่งงอโดยพิจารณาจากสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 88.03% และ R-Sq (adj) เท่ากับ 82.47% ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าความโก่งงอไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.15

Response Surface Regression: Bend versus SA, SB, RA, RB, %Resin

```
Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source               DF   Adj SS   Adj MS  F-Value  P-Value
Model                10  59.0247   5.9025    33.91    0.000
  Linear              5  33.0153   6.6031    37.93    0.000
    SA                1   1.8448   1.8448    10.60    0.002
    SB                1   0.1271   0.1271     0.73    0.397
    RA                1   3.2292   3.2292    18.55    0.000
    RB                1   1.3367   1.3367     7.68    0.008
    %Resin            1  26.4776  26.4776   152.11    0.000
  Square              1  15.8158  15.8158    90.86    0.000
    %Resin*%Resin     1  15.8158  15.8158    90.86    0.000
  2-Way Interaction   4  10.1936   2.5484    14.64    0.000
    SA*RA             1   2.8025   2.8025    16.10    0.000
    SA*%Resin         1   1.4070   1.4070     8.08    0.006
    SB*RB             1   2.6623   2.6623    15.29    0.000
    RA*%Resin         1   3.3218   3.3218    19.08    0.000
Error                53   9.2256   0.1741
  Lack-of-Fit        16   7.5713   0.4732    10.58    0.000
  Pure Error         37   1.6543   0.0447
Total                63  68.2503

       S    R-sq  R-sq(adj)  R-sq(pred)
0.417215  86.48%     83.93%      77.30%

Coded Coefficients

Term           Effect    Coef  SE Coef  T-Value  P-Value
Constant               0.5421   0.0660     8.22    0.000
SA             -0.784  -0.392    0.120    -3.26    0.002
SB             -0.206  -0.103    0.120    -0.85    0.397
RA              1.037   0.519    0.120     4.31    0.000
RB             -0.668  -0.334    0.120    -2.77    0.008
%Resin         -2.971  -1.485    0.120   -12.33    0.000
%Resin*%Resin   4.107   2.054    0.215     9.53    0.000
SA*RA          -2.367  -1.184    0.295    -4.01    0.000
SA*%Resin       1.677   0.839    0.295     2.84    0.006
SB*RB           2.307   1.154    0.295     3.91    0.000
RA*%Resin      -2.577  -1.289    0.295    -4.37    0.000

Regression Equation in Uncoded Units

Bend = 11.11 - 0.0591 SA - 0.02957 SB + 0.1712 RA - 0.03967 RB
- 9.250 %Resin + 2.054 %Resin*%Resin - 0.003157 SA*RA + 0.0559 SA*%Resin
+ 0.000724 SB*RB - 0.0516 RA*%Resin
```

รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าความโก่งงอ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังรูปที่ 4.15 พบว่าปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความโก่งงอมีทั้งที่อยู่ในรูปผลกระทบหลัก (Main Effect) เทอมกำลังสองของปัจจัย (Quadratic Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Effect) โดยอ้างอิงที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

ซึ่งหากค่า P-Value ของเทอมของปัจจัยใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าเทอมปัจจัยนั้นๆมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญกับค่าความโก่งงอ ซึ่งจากการวิเคราะห์ สามารถสรุปได้ว่าเทอมที่มีนัยสำคัญได้แก่ เทอมของผลกระทบหลักคือ SA, RA, RB และ %Resin เทอมของกำลังสองของปัจจัย %Resin และเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SA-RA, SA-%Resin, SB-RB และ RA-%Resinโดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.3 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 86.48% และ R-Sq (adj) เท่ากับ 83.93% ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่ามากกว่าค่า R-Sq (adj) สมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$Bend = 11.11 - 0.0591SA - 0.02957SB + 0.1712RA - 0.03967RB - 9.250\%Resin + 2.054\ \%Resin^2 - 0.003157SA*RA + 0.0559SA*\%Resin + 0.000724SB*RB - 0.0516RA*\%Resin \quad (4.3)$$

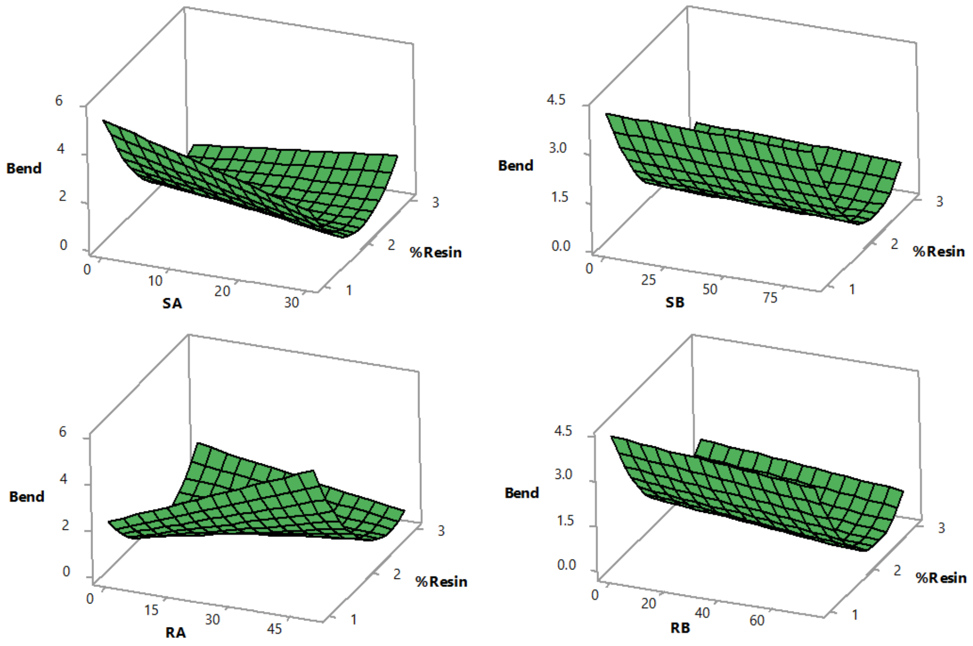
ซึ่งปัจจัยแต่ละตัวมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกันจึงทำให้ค่าคุณสมบัติที่พิจารณาแต่ละตัวมีค่าต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผสมในผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยค่าความโก่งงอนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณเรซินเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งถ้าหากใช้ปริมาณเรซินที่น้อยเกินไปเมื่อนำชิ้นตัวอย่างไปทำการทดสอบพบว่าชิ้นตัวอย่างมีค่าความโก่งงอที่สูง ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักที่ง่าย ทำให้เวลาที่นำไปใช้ในการผลิตนั้นแบบหล่ออาจจะเกิดการแตกหักที่ง่ายเช่นกัน ในทางเดียวกันหากใช้ปริมาณเรซินที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้ค่าความโก่งงอมีค่าสูงเช่นกันแต่จะไม่มากเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ปริมาณเรซินที่น้อย ดังนั้นปริมาณเรซินที่ใช้ควรอยู่ในระดับปานกลางซึ่งจะส่งผลให้ค่าความโก่งงอมีค่าน้อย ทำให้เมื่อนำทรายเคลือบเรซินไปใช้ผลิตแบบหล่อจริงมีการเซตตัวเร็วและทำให้แบบหล่อมีความแข็งแรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หากพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดทรายกับเปอร์เซ็นต์เรซิน และชนิดเรซินกับเปอร์เซ็นต์เรซิน โดยพิจารณาจากกราฟพื้นผิวตอบดังรูปที่ 4.16

- พบว่าที่ SA และ SB ถ้าหากใช้ทรายที่ระดับต่ำหรือระดับสูง แต่ใช้เปอร์เซ็นต์เรซินที่ระดับต่ำจะส่งผลให้ค่าความโก่งงอมีค่าสูง ทำให้เวลาที่นำไปใช้งานจริงจะส่งผลให้แบบหล่อเกิดการแตกหักง่าย ในทางเดียวหากใช้สัดส่วน SA และ SB ที่ระดับสูง คู่กับการใช้เปอร์เซ็นต์เรซินที่ระดับสูง ค่าความโก่งงอที่วัดได้ก็จะมีค่าสูงเช่นกัน แต่จะมีค่าความโก่งงอต่ำกว่าในกรณีแรกเนื่องจากยังมีการใช้ปริมาณเรซินที่มากพอที่สามารถนำไปทำแบบหล่อได้ ในทางตรงกันข้ามหากใช้ SA และ SB ที่ระดับสูงหรือระดับต่ำ แต่มีเปอร์เซ็นต์เรซินที่พอเหมาะเท่ากับ 2% จะ

ส่งผลในค่าความโก่งงอมีค่าต่ำที่สุด เมื่อนำทรายเคลือบเรซินที่มีค่าความโก่งงอที่ต่ำมาใช้งาน จะทำให้แบบหล่อมีความแข็งแรงมากกว่าทรายเคลือบเรซินที่มีค่าความโก่งงอที่สูง

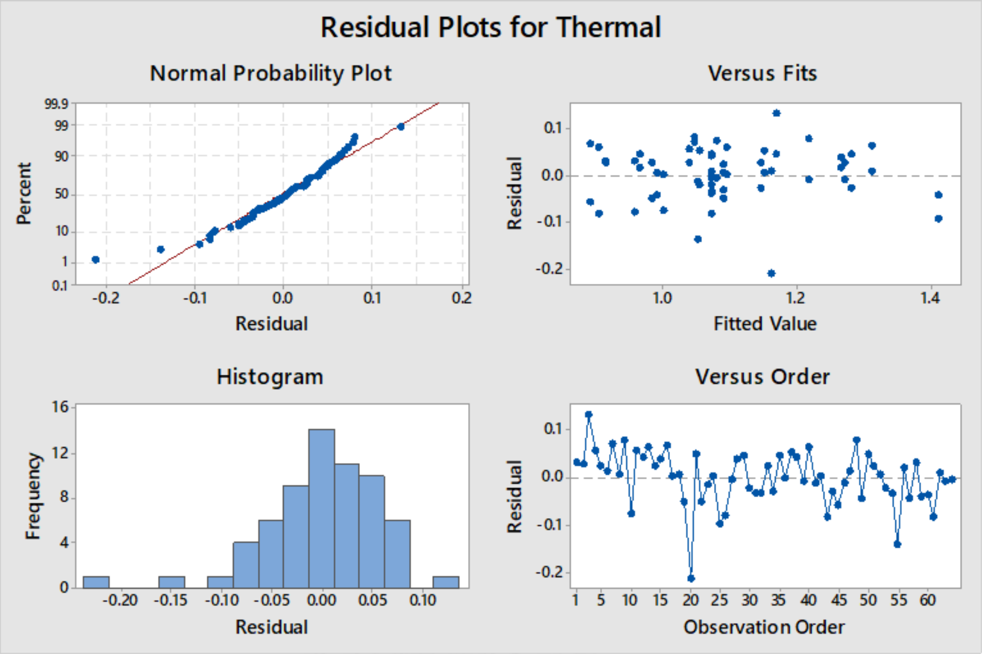


รูปที่ 4.16 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของเปอร์เซ็นต์ของเรซินกับเรซิน และเปอร์เซ็นต์ของเรซินกับทราย ที่ส่งผลต่อค่าความโก่งงอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.4 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของค่าการขยายตัวค่าความร้อน (Y_4)

4.2.4.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง



รูปที่ 4.17 การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าการขยายตัวทางความร้อน (Y_4: Thermal Expansion)

จากรูปที่ 4.17 สามารถอธิบายผลของความถูกต้องของแบบจำลองในส่วนของค่าการขยายตัวทางความร้อนได้ดังนี้

- กราฟ Histogram เป็นกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ
- การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal Assumption) จากกราฟ Normal Probability Plot พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) มีการเรียงตัวอยู่ใกล้แนวเส้นตรงซึ่งหมายถึงข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยมีค่า P-Value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) เท่ากับ 0.114
- การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จากกราฟ Residual Versus Fitted value พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้างส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอย่างสุ่ม เมื่อค่า Fit Value เพิ่มขึ้น ข้อมูลไม่มีลักษณะกระจาย

ที่เป็นแนวโน้ม และข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่บริเวณเส้นแนวศูนย์ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนที่คงที่

- การทดสอบสมมติฐานของค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independence of Residual) จากกราฟ Residual Versus Order พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้างไม่เกิดแนวโน้มหรือรูปแบบของการกระจายตัว และมีการกระจายแบบสุ่ม จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.2.3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าการขยายตัวทางความร้อน

หลังจากการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองด้วยสมมติฐานทั้ง 3 ข้อพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ มีค่าความแปรปรวนที่คงที่ และมีความเป็นอิสระต่อกัน จากนั้นผู้วิจัยจึงนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์ต่อ เพื่อดูว่ามีปัจจัยนำเข้าตัวใดบ้างที่มีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญกับค่าการขยายตัวทางความร้อนโดยนำเครื่องมือทางสถิติเข้ามาใช้เพื่อหาคำตอบ โดยทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.18

Response Surface Regression: Thermal versus SA, SB, RA, RB, %Resin

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	20	0.96283	0.048142	12.40	0.000
Linear	5	0.79264	0.158529	40.84	0.000
SA	1	0.07696	0.076960	19.83	0.000
SB	1	0.09363	0.093633	24.12	0.000
RA	1	0.00371	0.003710	0.96	0.334
RB	1	0.00452	0.004524	1.17	0.286
%Resin	1	0.61382	0.613816	158.14	0.000
Square	5	0.06658	0.013316	3.43	0.011
SA*SA	1	0.01306	0.013060	3.36	0.074
SB*SB	1	0.00001	0.000012	0.00	0.956
RA*RA	1	0.00637	0.006370	1.64	0.207
RB*RB	1	0.00193	0.001928	0.50	0.485
%Resin*%Resin	1	0.05318	0.053181	13.70	0.001
2-Way Interaction	10	0.10361	0.010361	2.67	0.012
SA*SB	1	0.00180	0.001800	0.46	0.500
SA*RA	1	0.00437	0.004371	1.13	0.295
SA*RB	1	0.00115	0.001152	0.30	0.589
SA*%Resin	1	0.00419	0.004186	1.08	0.305
SB*RA	1	0.01656	0.016562	4.27	0.045
SB*RB	1	0.02844	0.028441	7.33	0.010
SB*%Resin	1	0.00007	0.000072	0.02	0.892
RA*RB	1	0.00205	0.002048	0.53	0.472
RA*%Resin	1	0.00293	0.002926	0.75	0.390
RB*%Resin	1	0.04205	0.042050	10.83	0.002
Error	43	0.16690	0.003882		
Lack-of-Fit	6	0.06421	0.010701	3.86	0.004
Pure Error	37	0.10270	0.002776		
Total	63	1.12973			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0623017	85.23%	78.35%	64.92%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		1.0491	0.0176	59.70	0.000
SA	0.1602	0.0801	0.0180	4.45	0.000
SB	0.1767	0.0883	0.0180	4.91	0.000
RA	0.0352	0.0176	0.0180	0.98	0.334
RB	0.0388	0.0194	0.0180	1.08	0.286
%Resin	-0.4523	-0.2262	0.0180	-12.58	0.000
SA*SA	0.1194	0.0597	0.0325	1.83	0.074
SB*SB	-0.0036	-0.0018	0.0325	-0.06	0.956
RA*RA	0.0834	0.0417	0.0325	1.28	0.207
RB*RB	0.0459	0.0229	0.0325	0.70	0.485
%Resin*%Resin	0.2409	0.1204	0.0325	3.70	0.001
SA*SB	0.0600	0.0300	0.0441	0.68	0.500
SA*RA	0.0935	0.0467	0.0441	1.06	0.295
SA*RB	0.0480	0.0240	0.0441	0.54	0.589
SA*%Resin	0.0915	0.0458	0.0441	1.04	0.305
SB*RA	0.1820	0.0910	0.0441	2.07	0.045
SB*RB	-0.2385	-0.1192	0.0441	-2.71	0.010
SB*%Resin	0.0120	0.0060	0.0441	0.14	0.892
RA*RB	0.0640	0.0320	0.0441	0.73	0.472
RA*%Resin	0.0765	0.0382	0.0441	0.87	0.390
RB*%Resin	-0.2900	-0.1450	0.0441	-3.29	0.002

Regression Equation in Uncoded Units

Thermal = 1.895 - 0.01544 SA + 0.00184 SB - 0.01248 RA + 0.00871 RB
- 0.653 %Resin+ 0.000265 SA*SA - 0.000001 SB*SB + 0.000067 RA*RA
+ 0.000016 RB*RB + 0.1204 %Resin*%Resin% + 0.000047 SA*SB
+ 0.000125 SA*RA + 0.000043 SA*RB + 0.00305 SA*%Resin + 0.000086 SB*RA
- 0.000075 SB*RB + 0.00014 SB*%Resin + 0.000034 RA*RB + 0.00153 RA*%Resin
- 0.00387 RB*%Resin

รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าการขยายตัวทางความร้อนด้วยสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าการขยายตัวทางความร้อน โดยพิจารณาจากสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 85.23% และ R-Sq (adj) เท่ากับ 78.35% ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าการขยายตัวทางความร้อนไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.19

Response Surface Regression: Thermal versus SA, SB, RA, RB, %Resin

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.92696	0.102996	27.43	0.000
Linear	5	0.79264	0.158529	42.22	0.000
SA	1	0.07696	0.076960	20.49	0.000
SB	1	0.09363	0.093633	24.94	0.000
RA	1	0.00371	0.003710	0.99	0.325
RB	1	0.00452	0.004524	1.20	0.277
%Resin	1	0.61382	0.613816	163.46	0.000
Square	1	0.04726	0.047264	12.59	0.001
%Resin*%Resin	1	0.04726	0.047264	12.59	0.001
2-Way Interaction	3	0.08705	0.029018	7.73	0.000
SB*RA	1	0.01656	0.016562	4.41	0.040
SB*RB	1	0.02844	0.028441	7.57	0.008
RB*%Resin	1	0.04205	0.042050	11.20	0.001
Error	54	0.20277	0.003755		
Lack-of-Fit	17	0.10007	0.005887	2.12	0.028
Pure Error	37	0.10270	0.002776		
Total	63	1.12973			

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0612786	82.05%	79.06%	73.85%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		1.07358	0.00969	110.80	0.000
SA	0.1602	0.0801	0.0177	4.53	0.000
SB	0.1767	0.0883	0.0177	4.99	0.000
RA	0.0352	0.0176	0.0177	0.99	0.325
RB	0.0388	0.0194	0.0177	1.10	0.277
%Resin	-0.4523	-0.2262	0.0177	-12.79	0.000
%Resin*%Resin	0.2245	0.1123	0.0316	3.55	0.001
SB*RA	0.1820	0.0910	0.0433	2.10	0.040
SB*RB	-0.2385	-0.1193	0.0433	-2.75	0.008
RB*%Resin	-0.2900	-0.1450	0.0433	-3.35	0.001

Regression Equation in Uncoded Units

Thermal = 1.451 + 0.00534 SA + 0.00274 SB - 0.00294 RA + 0.01143 RB
- 0.530 %Resin + 0.1123 %Resin*%Resin + 0.000086 SB*RA - 0.000075 SB*RB
- 0.00387 RB*%Resin

รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าการขยายตัวทางความร้อนด้วยวิธีการลดตัวแปรอิสระ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังรูปที่ 4.19 พบว่าปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการขยายตัวทางความร้อนมีทั้งที่อยู่ในรูปผลกระทบหลัก (Main Effect) เทอมกำลังสองของปัจจัย

(Quadratic Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Effect) โดยอ้างอิงที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งหากค่า P-Value ของเทอมของปัจจัยใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าเทอมปัจจัยนั้นๆมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญกับค่าการขยายตัวทางความร้อน ซึ่งจากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าเทอมที่มีนัยสำคัญได้แก่ เทอมของผลกระทบหลักคือ SA และSB เทอมของกำลังสองของปัจจัย %Resin และเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SB-RA, SB-RB และ RB-%Resin โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.4 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 82.05% และ R-Sq (adj) เท่ากับ 79.06% ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่ามากกว่าค่า R-Sq (adj) สมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$\text{Thermal} = 1.451 + 0.00534SA + 0.00274SB - 0.00294RA + 0.01143RB - 0.530\%Resin + 0.1123\,\%Resin^2 + 0.000086SB*RA - 0.000075SB*RB - 0.00387RB*\%Resin \quad (4.4)$$

ซึ่งปัจจัยแต่ละตัวมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกันจึงทำให้ค่าคุณสมบัติที่พิจารณาแต่ละตัวมีค่าต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผสมในผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยค่าการขยายตัวทางความร้อนนั้นจะขึ้นอยู่กับทรายและเรซิน ซึ่งในด้านการนำไปใช้งานทรายเคลือบเรซินที่ได้นั้นควรมีค่าการขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำ ซึ่งข้อมูลจากทางโรงงานกรณีศึกษาจะบอกว่าทรายและเรซินชนิดใดที่จะให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนอยู่ในช่วงการใช้งานใด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งหากต้องการทรายเคลือบเรซินที่มีค่าการขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำควรใส่เรซินในปริมาณมากเพื่อทำให้เรซินเป็นตัวสร้างพันธะกับทรายและต้องให้เรซินเคลือบทรายได้ดีเพื่อเป็นตัวช่วยทำให้เกิดพันธะที่แข็งแรงมีการขยายตัวที่ต่ำ ส่วนการเลือกใช้ทรายนั้นก็จะดูจากช่วงการใช้งานของทรายแต่ละชนิด ถ้าหากต้องการค่าขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำควรเลือกใช้ปริมาณทราย SB ที่ระดับต่ำ นั่นคือปริมาณ SA สูง หรือ SC สูง ซึ่ง SA และ SC ให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนที่ต่ำมากกว่า SB และเลือกเรซินที่ให้ช่วงการใช้งานที่ต่ำเช่นกันแต่เติมเรซินที่ปริมาณมากเพื่อทำให้แบบหล่อมีความแข็งแรง

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของค่าการขยายตัวทางความร้อนของทรายและเรซิน

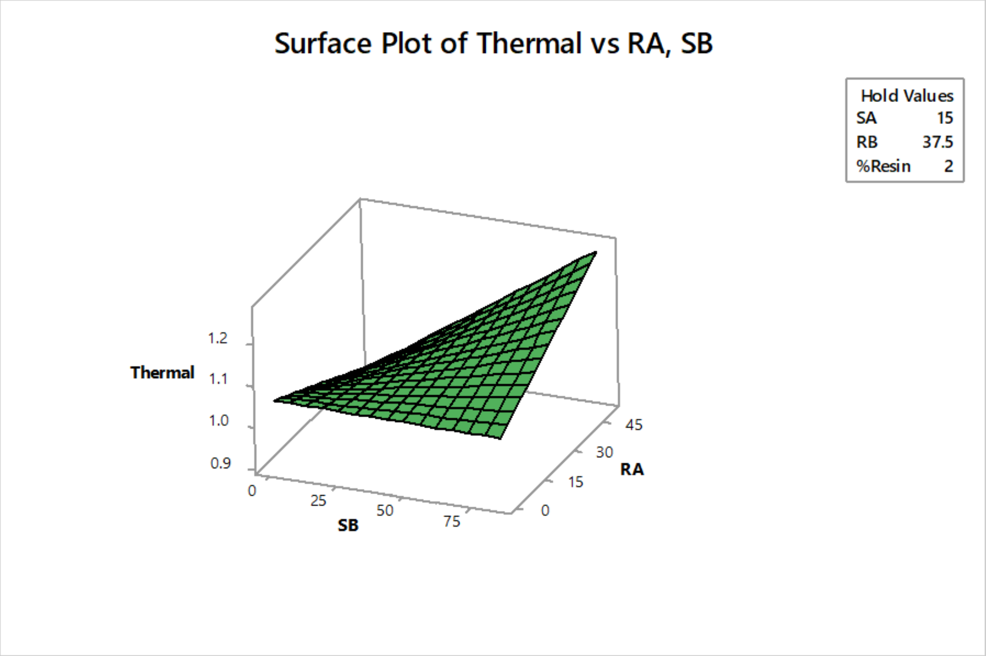
วัตถุดิบ	การขยายตัวทางความร้อน		
	ต่ำ	กลาง	สูง
ทราย	SA	SC	SB
เรซิน	RA	RC	RB

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญข้างต้น พบว่าเทอมของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าการขยายตัวทางความร้อน ทำให้สามารถใช้กราฟพื้นผิวในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย SB, %Resin, SB-RA, SB-RB และ RB-%Resin ได้ และทางผู้วิจัยจะพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของปริมาณทรายและปริมาณเรซินต่อเปอร์เซ็นต์ด้วย

ในส่วนแรกจะทำการพิจารณาเทอมของผลกระทบร่วมระหว่าง SB-RA โดยอาศัยกราฟพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.20

- ซึ่งจากกราฟพบว่าที่การเติม SB ปริมาณน้อย (ระดับต่ำ) นั่นหมายถึงการเติม SA หรือ SC ในปริมาณที่มาก การเพิ่มขึ้นของ RA จะทำให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าลดลง ในขณะที่การเติม SB ในปริมาณที่มากขึ้น (ระดับสูง) นั่นหมายถึงการเติม SA หรือ SC ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มขึ้นของปริมาณ RA จะทำให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเติม SB ที่มีค่าการขยายตัวทางความร้อนที่สูง ดังนั้นการเติม SB ในปริมาณที่มาก อาจส่งผลให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าสูงนั่นเอง

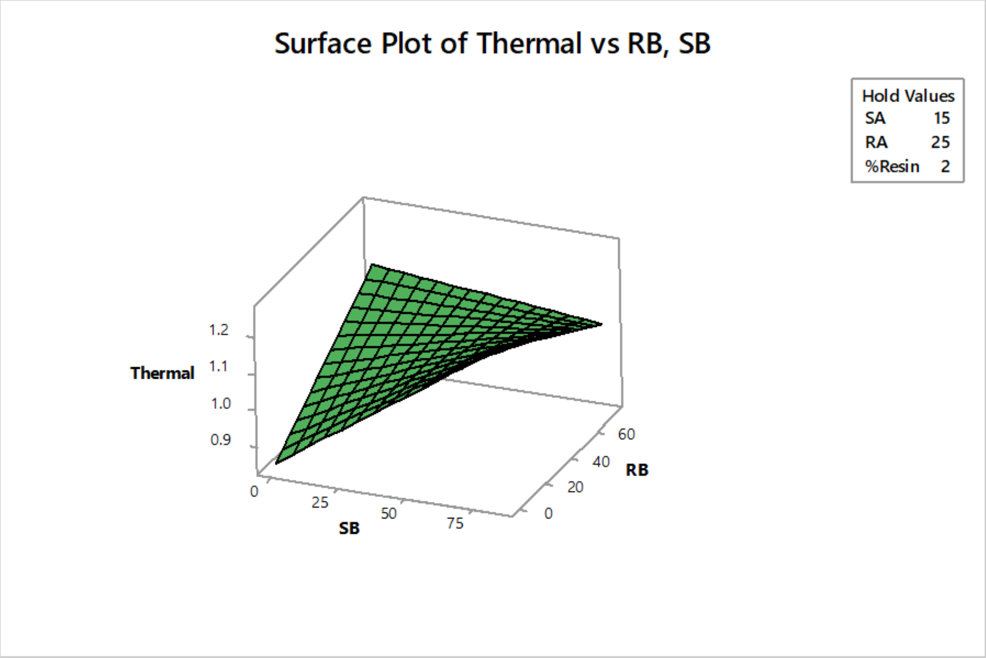


รูปที่ 4.20 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SB กับปริมาณ RA ที่มีต่อค่าการขยายตัวทางความร้อน

ต่อมาจะทำการพิจารณาเทอมของผลกระทบร่วมระหว่าง SB-RB โดยอาศัยกราฟพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.21

- ซึ่งจากกราฟพบว่าที่การเติม RB ปริมาณน้อย (ระดับต่ำ) การเพิ่มขึ้นของ SB นั่นหมายถึงการเติม SA และ SC ในปริมาณที่ลดลงด้วยเช่นกัน จะทำให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่า

เพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่การเติม RB ปริมาณมาก (ระดับสูง) การเพิ่มขึ้นของ SB นั่นหมายถึงการเติม SA และ SC ในปริมาณที่ลดลงด้วยเช่นกัน จะทำให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่จะมีค่าน้อยกว่าในกรณีที่เติม RB ในปริมาณน้อย ซึ่งค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าเป้าหมายอยู่ที่ค่าน้อย ดังนั้นหากต้องการค่าการขยายตัวทางความร้อนที่ค่าน้อยควรจะเติม SB ที่ปริมาณน้อย และทำการเติม RB ที่น้อยเช่นกัน

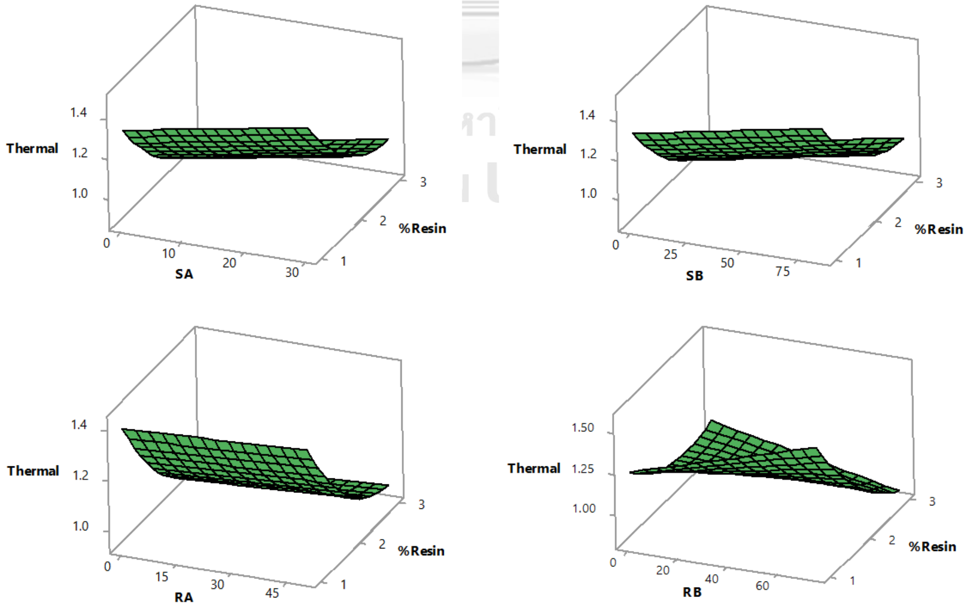


รูปที่ 4.21 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SB กับปริมาณ RB ที่มีต่อค่าการขยายตัวทางความร้อน

หากพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทรายกับเปอร์เซ็นต์เรซินและปริมาณเรซินกับเปอร์เซ็นต์เรซิน โดยพิจารณาจากกราฟพื้นผิว (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.22

- พิจารณาที่ SA หรือ SB กับ %Resin พบว่าการเติม SA ที่ปริมาณน้อย (ระดับต่ำ) นั่นหมายถึงการเติม SB หรือ SC ในปริมาณที่มาก และการเติม SB ที่ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม SA หรือ SC ในปริมาณมาก การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นเรซินจะทำให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าน้อยลง ในขณะที่การเติม SA ที่ปริมาณมาก (ระดับสูง) นั่นหมายถึงการเติม SB หรือ SC ที่ปริมาณน้อยลง และการเติม SB ที่ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม SA หรือ SC ที่ปริมาณน้อยลง การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์เรซินจะทำให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าน้อยลงด้วยเช่นกัน

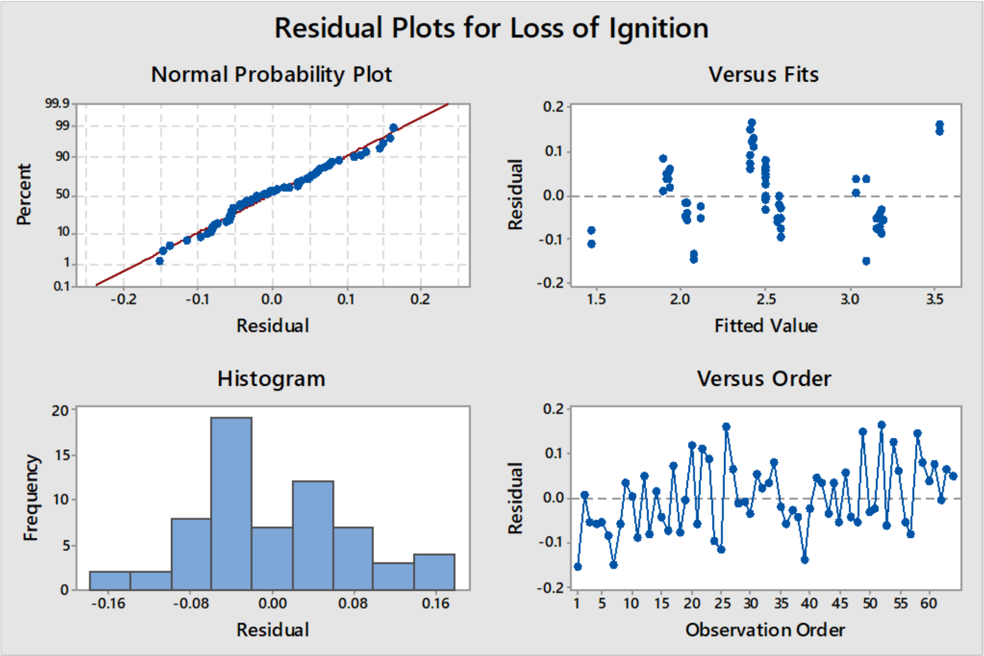
- พิจารณาการเติม RA ที่ปริมาณน้อยและปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม RB หรือ RC ที่ปริมาณมากในกรณี RA มีปริมาณน้อยและการเติม RB หรือ RC ที่ปริมาณน้อยในกรณี RA มีปริมาณมาก การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์เรซินจะทำให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าน้อยลงเช่นเดียวกัน
- พิจารณาการเติม RB ที่ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม RA หรือ RC ที่ปริมาณมาก การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์เรซินจะทำให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าน้อยลง ในขณะที่การเติม RB ที่ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม RA หรือ RC ที่ปริมาณน้อย การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์เรซินจะทำให้ค่าการขยายทางความร้อนมีค่าน้อยลง แต่สาเหตุที่การเติม RB ที่ปริมาณมากจะมีค่าการขยายตัวทางความร้อนที่สูงกว่าที่ปริมาณน้อย เนื่องจากค่าคุณสมบัติเฉพาะตัวของ RB จะให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนที่สูงกว่า RA และ RC ดังนั้นปริมาณ RB ที่ระดับสูงมีจำนวนที่มากกว่า RA หรือ RC จึงทำให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าสูงขึ้นอีกทั้งยังมีการใช้เปอร์เซ็นต์เรซินที่ระดับต่ำจึงส่งผลให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าสูงกว่าปกตินั่นเอง ซึ่งถ้าหากต้องการทรายเคลือบเรซินที่มีค่าการขยายตัวที่ต่ำควรเลือกใช้ทรายและเรซินที่ให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนอยู่ในช่วงที่ต้องการ และต้องใช้เปอร์เซ็นต์ที่สูงเนื่องจากปริมาณเรซินที่มากจะช่วยให้โครงสร้างร่างแหที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างเรซินกับเฮกซามีนมีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 4.22 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณเรซินกับเปอร์เซ็นต์เรซินแต่ละชนิดและเปอร์เซ็นต์เรซินกับทรายแต่ละชนิด ที่ส่งผลต่อค่าการขยายตัวทางความร้อน

4.2.5 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา (Y_5)

4.2.5.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง



รูปที่ 4.23 การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าปริมาณความสูญเสียหลังการเผา

จากรูปที่ 4.23 สามารถอธิบายผลของความถูกต้องของแบบจำลองในส่วนของค่าปริมาณความสูญเสียหลังการเผาได้ดังนี้

- กราฟ Histogram เป็นกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ
- การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal Assumption) จากกราฟ Normal Probability Plot พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) มีการเรียงตัวอยู่ใกล้แนวเส้นตรงซึ่งหมายถึงข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยมีค่า P-Value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) เท่ากับ 0.176
- การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จากกราฟ Residual Versus Fitted value พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้างส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอย่างสุ่ม เมื่อค่า Fit Value เพิ่มขึ้น ข้อมูลไม่มีลักษณะกระจายที่เป็นแนวโน้ม และข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่บริเวณเส้นแนวศูนย์ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนที่คงที่

- การทดสอบสมมติฐานของค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independence of Residual) จากกราฟ Residual Versus Order พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้างไม่เกิดแนวโน้มหรือรูปแบบของการกระจายตัว และมีการกระจายแบบสุ่ม จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.2.5.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าปริมาณความสูญเสียหลังการเผา

หลังจากการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองด้วยสมมติฐานทั้ง 3 ข้อพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ มีค่าความแปรปรวนที่คงที่ และมีความเป็นอิสระต่อกัน จากนั้นผู้วิจัยจึงนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์ต่อ เพื่อดูว่ามีปัจจัยนำเข้าตัวใดบ้างที่มีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญกับค่าปริมาณความสูญเสียหลังการเผาโดยนำเครื่องมือทางสถิติเข้ามาใช้เพื่อหาคำตอบ โดยทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.24

Response Surface Regression: LOI versus SA, SB, RA, RB, %Resin

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	20	15.0037	0.7502	97.07	0.000
Linear	5	13.0659	2.6132	338.15	0.000
SA	1	0.1086	0.1086	14.06	0.001
SB	1	0.0821	0.0821	10.63	0.002
RA	1	0.0627	0.0627	8.11	0.007
RB	1	0.1066	0.1066	13.80	0.001
%Resin	1	12.7059	12.7059	1644.16	0.000
Square	5	0.0372	0.0074	0.96	0.451
SA*SA	1	0.0082	0.0082	1.06	0.309
SB*SB	1	0.0005	0.0005	0.06	0.804
RA*RA	1	0.0077	0.0077	0.99	0.324
RB*RB	1	0.0212	0.0212	2.74	0.105
%Resin*%Resin	1	0.0086	0.0086	1.11	0.298
2-Way Interaction	10	1.9006	0.1901	24.59	0.000
SA*SB	1	0.1914	0.1914	24.77	0.000
SA*RA	1	0.1522	0.1522	19.69	0.000
SA*RB	1	0.1791	0.1791	23.18	0.000
SA*%Resin	1	0.2401	0.2401	31.07	0.000
SB*RA	1	0.2665	0.2665	34.48	0.000
SB*RB	1	0.1981	0.1981	25.64	0.000
SB*%Resin	1	0.1251	0.1251	16.19	0.000
RA*RB	1	0.1374	0.1374	17.78	0.000
RA*%Resin	1	0.2079	0.2079	26.90	0.000
RB*%Resin	1	0.2029	0.2029	26.25	0.000
Error	43	0.3323	0.0077		
Lack-of-Fit	6	0.2819	0.0470	34.49	0.000
Pure Error	37	0.0504	0.0014		
Total	63	15.3360			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0879084	97.83%	96.83%	94.80%

```
Coded Coefficients

Term             Effect     Coef  SE Coef  T-Value  P-Value
Constant                  2.5441   0.0248   102.61    0.000
SA               0.1903   0.0951   0.0254     3.75    0.001
SB              -0.1655  -0.0827   0.0254    -3.26    0.002
RA              -0.1445  -0.0723   0.0254    -2.85    0.007
RB               0.1885   0.0943   0.0254     3.71    0.001
%Resin           2.0580   1.0290   0.0254    40.55    0.000
SA*SA           -0.0945  -0.0472   0.0459    -1.03    0.309
SB*SB           -0.0230  -0.0115   0.0459    -0.25    0.804
RA*RA           -0.0915  -0.0458   0.0459    -1.00    0.324
RB*RB           -0.1520  -0.0760   0.0459    -1.66    0.105
%Resin*%Resin   -0.0968  -0.0484   0.0459    -1.05    0.298
SA*SB            0.6187   0.3093   0.0622     4.98    0.000
SA*RA            0.5516   0.2758   0.0622     4.44    0.000
SA*RB           -0.5985  -0.2992   0.0622    -4.81    0.000
SA*%Resin        0.6930   0.3465   0.0622     5.57    0.000
SB*RA           -0.7300  -0.3650   0.0622    -5.87    0.000
SB*RB            0.6295   0.3147   0.0622     5.06    0.000
SB*%Resin       -0.5002  -0.2501   0.0622    -4.02    0.000
RA*RB            0.5242   0.2621   0.0622     4.22    0.000
RA*%Resin       -0.6448  -0.3224   0.0622    -5.19    0.000
RB*%Resin        0.6370   0.3185   0.0622     5.12    0.000


Regression Equation in Uncoded Units

LOI = 0.761 - 0.0526 SA + 0.00427 SB + 0.01965 RA - 0.01782 RB
+ 1.130 %Resin
- 0.000210 SA*SA - 0.000006 SB*SB - 0.000073 RA*RA - 0.000054 RB*RB
- 0.0484 %Resin*%Resin + 0.000485 SA*SB + 0.000736 SA*RA - 0.000532 SA*RB
+ 0.02310 SA*%Resin - 0.000344 SB*RA + 0.000197 SB*RB - 0.00588 SB*%Resin
+ 0.000280 RA*RB - 0.01290 RA*%Resin + 0.00849 RB*%Resin
```

รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาด้วยสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาโดยพิจารณาจากสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 97.83% และ R-Sq (adj) เท่ากับ 96.83% ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.25

Response Surface Regression: LOI versus SA, SB, RA, RB, %Resin

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	14.9665	0.9978	129.62	0.000
Linear	5	13.0659	2.6132	339.47	0.000
SA	1	0.1086	0.1086	14.11	0.000
SB	1	0.0821	0.0821	10.67	0.002
RA	1	0.0627	0.0627	8.14	0.006
RB	1	0.1066	0.1066	13.85	0.001
%Resin	1	12.7059	12.7059	1650.59	0.000
2-Way Interaction	10	1.9006	0.1901	24.69	0.000
SA*SB	1	0.1914	0.1914	24.86	0.000
SA*RA	1	0.1522	0.1522	19.77	0.000
SA*RB	1	0.1791	0.1791	23.27	0.000
SA*%Resin	1	0.2401	0.2401	31.19	0.000
SB*RA	1	0.2665	0.2665	34.62	0.000
SB*RB	1	0.1981	0.1981	25.74	0.000
SB*%Resin	1	0.1251	0.1251	16.25	0.000
RA*RB	1	0.1374	0.1374	17.85	0.000
RA*%Resin	1	0.2079	0.2079	27.00	0.000
RB*%Resin	1	0.2029	0.2029	26.36	0.000
Error	48	0.3695	0.0077		
Lack-of-Fit	11	0.3191	0.0290	21.30	0.000
Pure Error	37	0.0504	0.0014		
Total	63	15.3360			

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0877370	97.59%	96.84%	95.36%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		2.5012	0.0110	228.06	0.000
SA	0.1903	0.0951	0.0253	3.76	0.000
SB	-0.1655	-0.0827	0.0253	-3.27	0.002
RA	-0.1445	-0.0723	0.0253	-2.85	0.006
RB	0.1885	0.0943	0.0253	3.72	0.001
%Resin	2.0580	1.0290	0.0253	40.63	0.000
SA*SB	0.6187	0.3093	0.0620	4.99	0.000
SA*RA	0.5516	0.2758	0.0620	4.45	0.000
SA*RB	-0.5985	-0.2992	0.0620	-4.82	0.000
SA*%Resin	0.6930	0.3465	0.0620	5.59	0.000
SB*RA	-0.7300	-0.3650	0.0620	-5.88	0.000
SB*RB	0.6295	0.3147	0.0620	5.07	0.000
SB*%Resin	-0.5002	-0.2501	0.0620	-4.03	0.000
RA*RB	0.5242	0.2621	0.0620	4.22	0.000
RA*%Resin	-0.6448	-0.3224	0.0620	-5.20	0.000
RB*%Resin	0.6370	0.3185	0.0620	5.13	0.000

```
Regression Equation in Uncoded Units

LOI = 1.092 - 0.0589 SA + 0.00373 SB + 0.01598 RA - 0.02187 RB
+ 0.936 %Resin + 0.000485 SA*SB + 0.000736 SA*RA - 0.000532 SA*RB
+ 0.02310 SA*%Resin - 0.000344 SB*RA + 0.000197 SB*RB - 0.00588 SB*%Resin
+ 0.000280 RA*RB - 0.01290 RA*%Resin + 0.00849 RB*%Resin
```

รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าปริมาณความสูญเสียหลังการเผาด้วยวิธีการลดตัวแปรอิสระ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังรูปที่ 4.25 พบว่าปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าปริมาณความสูญเสียหลังการเผามีทั้งที่อยู่ในรูปผลกระทบหลัก (Main Effect) เทอมกำลังสองของปัจจัย (Quadratic Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Effect) โดยอ้างอิงที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งหากค่า P-Value ของเทอมของปัจจัยใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าเทอมปัจจัยนั้นๆมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญกับค่าการขยายตัวทางความร้อน ซึ่งจากการวิเคราะห์ สามารถสรุปได้ว่าเทอมที่มีนัยสำคัญได้แก่ เทอมของผลกระทบหลักคือ SA, SB, RA, RB และ %Resin และเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SA-SB, SA-RA, SA-RB, SA-%Resin, SB-RA, SB-RB, SB-%Resin, RA-RB, RA-%Resin และRB-%Resin โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.5 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 97.59% และ R-Sq (adj) เท่ากับ 96.84% ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่ามากกว่าค่า R-Sq (adj) สมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$LOI = 1.092 - 0.0589SA + 0.00373SB + 0.01598RA - 0.02187RB + 0.936\%Resin + 0.000485SA*SB + 0.000736SA*RA - 0.000532SA*RB + 0.02310SA*\%Resin - 0.000344SB*RA + 0.000197SB*RB - 0.00588SB*\%Resin + 0.000280RA*RB - 0.01290RA*\%Resin + 0.00849RB*\%Resin \quad (4.5)$$

ซึ่งปัจจัยแต่ละตัวมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกันจึงทำให้ค่าคุณสมบัติที่พิจารณาแต่ละตัวมีค่าต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผสมในผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยค่าปริมาณความสูญเสียหลังการเผานั้นจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์เรซิน ซึ่งค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผานั้นมีไว้เพื่อทวนสอบค่าวัตถุดิบที่เติมในผลิตภัณฑ์มีปริมาณการสูญเสียหลังการเผาว่ามีปริมาณเท่าไร ซึ่งทางโรงงานกรณีศึกษาต้องการให้ค่าปริมาณการสูญเสียมีค่าน้อย ดังนั้นเพื่อให้เป็นไปตามความต้องการของทางโรงงานในผลิตภัณฑ์ใดๆจะต้องไม่มีเปอร์เซ็นต์เรซินที่สูงเกินไป เนื่องจากถ้าเปอร์เซ็นเรซินสูงจะส่งผลให้ต้องใส่ปริมาณเรซินไปในปริมาณที่มากทำให้ค่าปริมาณความสูญเสียหลังการเผามีค่าสูง อันเนื่องมาจากเรซินที่ใส่เข้ามาถูกเผาออกไป แต่เปอร์เซ็นต์เรซินในผลิตภัณฑ์ใดๆก็ต้องไม่น้อยเกินไป เนื่องจากบางคุณสมบัติที่ทางโรงงานต้องการนั้นขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์เรซินและปริมาณเรซิน ถ้าน้อยเกินไปอาจส่งให้แบบหล่อ

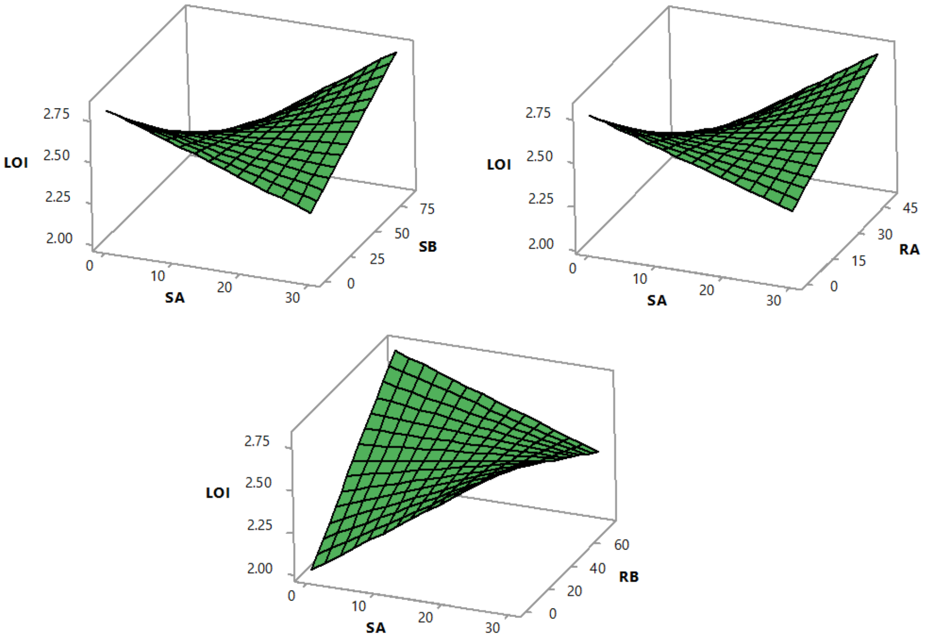
ไม่มีความแข็งแรง หรือเปราะแตกหักง่ายเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ใดๆว่าต้องการคุณสมบัติใดเป็นสำคัญ

จากผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญข้างต้น พบว่าเทอมของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา ทำให้สามารถใช้กราฟพื้นผิวในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย SA, SB, RA, RB, SA-SB, SA-RA, SA-RB, SA-%Resin, SB-RA, SB-RB, SB-%Resin, RA-RB, RA-%Resin และ RB-%Resin ได้ และทางผู้วิจัยจะพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของปริมาณทรายและปริมาณเรซินต่อเปอร์เซ็นต์เรซินด้วย

ในส่วนแรกจะทำการวิเคราะห์เทอมของผลกระทบร่วมระหว่าง SA-SB กับ SA-RA และ SA-RB โดยอาศัยกราฟพื้นผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.26

- ซึ่งจากกราฟผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SA-SB พบว่าการเติม SA ที่ปริมาณน้อย การเพิ่มขึ้นของ SB จะทำให้ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าน้อยลง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ SB หมายถึงการเติม SC ที่ปริมาณมาก ในขณะที่การเติม SA ที่ปริมาณมาก การเพิ่มขึ้นของ SB จะทำให้ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่ามากขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ SB หมายถึงการเติม SC ที่ปริมาณน้อย
- พิจารณาที่กราฟผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SA-RA พบว่าการเติม SA ที่ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม SB หรือ SC ที่ปริมาณมาก การเพิ่มขึ้นของ RA จะทำให้ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าน้อยลง ในขณะที่การเติม SA ที่ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม SB หรือ SC ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มขึ้นของ RA จะทำให้ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าเพิ่มขึ้น
- พิจารณาที่กราฟผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SA-RB พบว่าการเติม RB ที่ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม RA หรือ RC ในปริมาณที่มาก การเพิ่มขึ้นของ SA จะทำให้ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่ามากขึ้น ในขณะที่การเติม RB ที่ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม RA หรือ RC ที่ปริมาณน้อย การเพิ่มขึ้นของ SA จะทำให้ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่ามากขึ้นเช่นกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

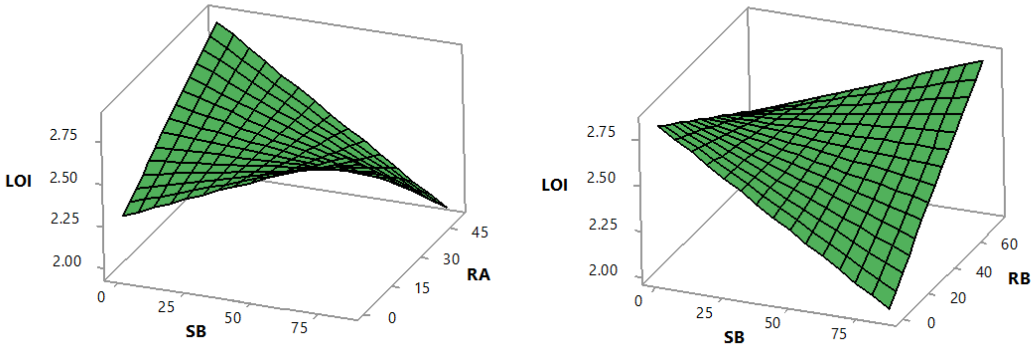


รูปที่ 4.26 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SA-SB, ปริมาณ SA-RA และปริมาณ SA-RB ที่ส่งผลต่อค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

ต่อมาจะทำการวิเคราะห์เทอมของผลกระทบร่วมระหว่าง SB-RA และ SB-RB โดยอาศัยกราฟพื้นผิวตอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.27

- พิจารณากราฟผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SB-RA พบว่าการเติม SB ที่ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม SA หรือ SC ที่ปริมาณมาก การเพิ่มขึ้นของ RA จะทำให้ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่ามากขึ้น ในขณะที่การเติม SB ที่ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม SA หรือ SC ที่ปริมาณน้อย การเพิ่มขึ้นของ RA จะทำให้ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าลดลง
- พิจารณาที่กราฟผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SB-RB พบว่าการเติม SB ที่ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม SA หรือ SC ที่ปริมาณมาก การเพิ่มขึ้นของ RB จะทำให้ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าน้อยลง ในขณะที่การเติม SB ที่ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม SA หรือ SC ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มขึ้นของ RB จะทำให้ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าเพิ่มขึ้น

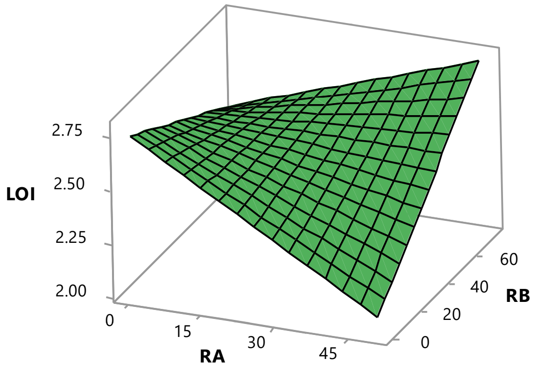
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.27 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SB-RA และปริมาณ SB-RB ที่ส่งผลต่อค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

ทำการพิจารณาเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ RA-RB โดยอาศัยกราฟพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 4.28

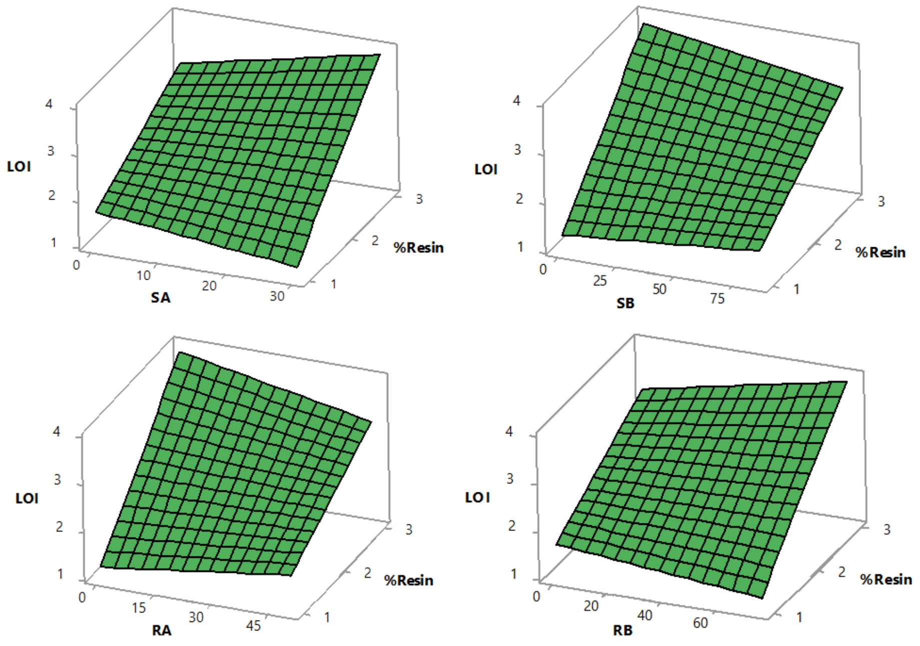
- พิจารณากราฟผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยของ RA-RB พบว่าที่การเติม RA ปริมาณน้อย นั่นหมายถึงการเติม RC ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มขึ้นของปริมาณ RB จะทำให้ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าลดลง ในขณะที่การเติม RA ในปริมาณที่มากขึ้น การเพิ่มขึ้นของปริมาณ RB จะทำให้ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่ามากขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ RB หมายถึงการเติม RC ในปริมาณที่น้อยลงหรืออาจจะไม่มีการเติม RC เลยก็ได้



รูปที่ 4.28 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ RA-RB ที่ส่งผลต่อค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

สุดท้ายจะพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของปริมาณทรายกับเปอร์เซ็นต์เรซินและปริมาณเรซินกับเปอร์เซ็นต์เรซินที่มีต่อค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา โดยพิจารณาจากกราฟพื้นผิว ดังรูปที่ 4.29

- พบว่าที่ปริมาณ SA, SB, RA และ RB ในระดับใดๆ มีผลต่อค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาน้อยมาก เนื่องจากค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์เรซิน โดยถ้าหากต้องการค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาที่ต่ำควรใช้เปอร์เซ็นเรซินที่ระดับต่ำควบคู่กับ SA ที่ปริมาณมาก SB ที่ปริมาณน้อย RA ที่ปริมาณน้อย และ RB ที่ปริมาณมาก

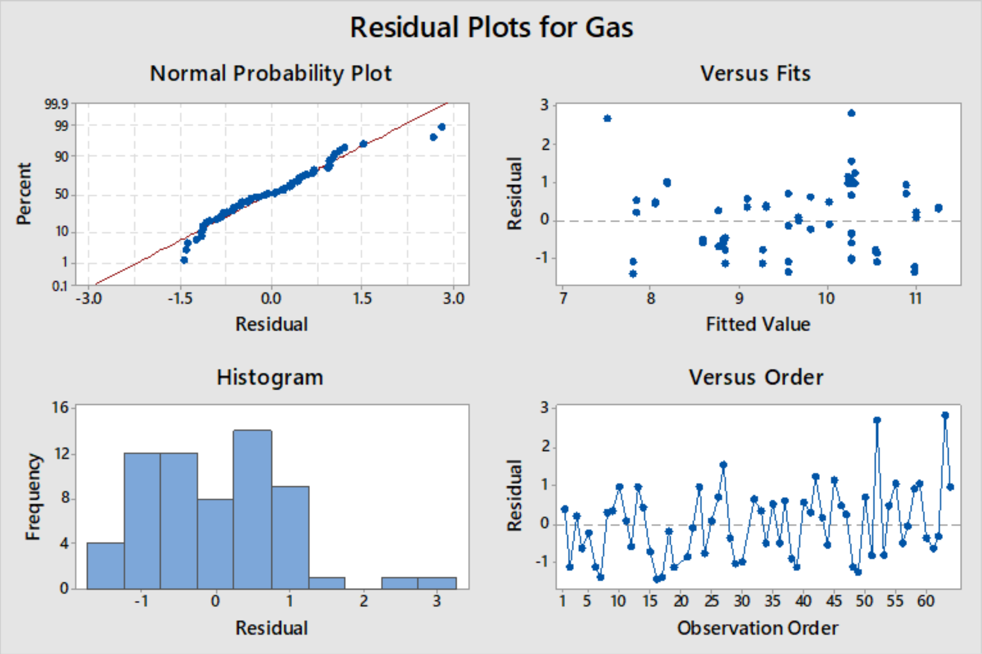


รูปที่ 4.29 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณเรซินแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์ของเรซิน และปริมาณทรายแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์ของเรซิน ที่ส่งผลต่อค่าปริมาณความสูญเสียหลังการเผา

Chulalongkorn University

4.2.6 การวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองของค่าแก๊ส (Y_6)

4.2.6.1 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง



รูปที่ 4.30 การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าแก๊ส

จากรูปที่ 4.30 สามารถอธิบายผลของความถูกต้องของแบบจำลองในส่วนของค่าแก๊สได้ดังนี้

- กราฟ Histogram เป็นกราฟแสดงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ
- การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normal Assumption) จากกราฟ Normal Probability Plot พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) มีการเรียงตัวอยู่ใกล้แนวเส้นตรงซึ่งหมายถึงข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยมีค่า P-Value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) เท่ากับ 0.097
- การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จากกราฟ Residual Versus Fitted value พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้างส่วนใหญ่มีการกระจายตัวอย่างสุ่ม เมื่อค่า Fit Value เพิ่มขึ้น ข้อมูลไม่มีลักษณะกระจายที่เป็นแนวโน้ม และข้อมูลมีการกระจายตัวอยู่บริเวณเส้นแนวศูนย์ จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนที่คงที่

- การทดสอบสมมติฐานของค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independence of Residual) จากกราฟ Residual Versus Order พบว่าข้อมูลการกระจายตัวของส่วนตกค้างไม่เกิดแนวโน้มหรือรูปแบบของการกระจายตัว และมีการกระจายแบบสุ่ม จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.2.6.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าแก๊ส

หลังจากการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองด้วยสมมติฐานทั้ง 3 ข้อพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ มีค่าความแปรปรวนที่คงที่ และมีความอิสระต่อกัน จากนั้นผู้วิจัยจึงนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์ เพื่อดูว่ามีปัจจัยนำเข้าตัวใดบ้างที่มีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญกับค่าแก๊สโดยนำเครื่องมือทางสถิติเข้ามาใช้เพื่อหาคำตอบ โดยทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.31

Response Surface Regression: Gas versus SA, SB, RA, RB, %Resin

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	20	76.865	3.8433	4.09	0.000
Linear	5	20.628	4.1257	4.39	0.003
SA	1	6.176	6.1755	6.57	0.014
SB	1	7.814	7.8137	8.31	0.006
RA	1	0.831	0.8308	0.88	0.353
RB	1	1.304	1.3045	1.39	0.246
%Resin	1	4.504	4.5037	4.79	0.034
Square	5	25.292	5.0585	5.38	0.001
SA*SA	1	2.446	2.4461	2.60	0.114
SB*SB	1	11.340	11.3404	12.07	0.001
RA*RA	1	1.397	1.3968	1.49	0.230
RB*RB	1	12.795	12.7947	13.62	0.001
%Resin*%Resin	1	0.046	0.0464	0.05	0.825
2-Way Interaction	10	32.343	3.2343	3.44	0.002
SA*SB	1	0.194	0.1939	0.21	0.652
SA*RA	1	0.097	0.0974	0.10	0.749
SA*RB	1	5.931	5.9314	6.31	0.016
SA*%Resin	1	0.107	0.1073	0.11	0.737
SB*RA	1	0.237	0.2372	0.25	0.618
SB*RB	1	3.331	3.3314	3.55	0.067
SB*%Resin	1	2.414	2.4140	2.57	0.117
RA*RB	1	15.184	15.1842	16.16	0.000
RA*%Resin	1	3.175	3.1746	3.38	0.073
RB*%Resin	1	1.672	1.6722	1.78	0.190
Error	41	38.529	0.9397		
Lack-of-Fit	6	21.766	3.6276	7.57	0.000
Pure Error	35	16.763	0.4790		
Total	61	115.394			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.969399	66.61%	50.32%	29.38%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		10.581	0.285	37.08	0.000
SA	-1.435	-0.717	0.280	-2.56	0.014
SB	-1.707	-0.854	0.296	-2.88	0.006
RA	-0.526	-0.263	0.280	-0.94	0.353
RB	0.659	0.330	0.280	1.18	0.246
%Resin	1.225	0.613	0.280	2.19	0.034
SA*SA	-1.658	-0.829	0.514	-1.61	0.114
SB*SB	-3.910	-1.955	0.563	-3.47	0.001
RA*RA	-1.253	-0.626	0.514	-1.22	0.230
RB*RB	-3.791	-1.896	0.514	-3.69	0.001
%Resin*%Resin	0.228	0.114	0.514	0.22	0.825
SA*SB	0.623	0.311	0.685	0.45	0.652
SA*RA	0.441	0.221	0.685	0.32	0.749
SA*RB	-3.444	-1.722	0.685	-2.51	0.016
SA*%Resin	-0.463	-0.232	0.685	-0.34	0.737
SB*RA	-0.689	-0.344	0.685	-0.50	0.618
SB*RB	-2.581	-1.291	0.685	-1.88	0.067
SB*%Resin	-2.197	-1.099	0.685	-1.60	0.117
RA*RB	-5.511	-2.755	0.685	-4.02	0.000
RA*%Resin	-2.520	-1.260	0.685	-1.84	0.073
RB*%Resin	1.829	0.914	0.685	1.33	0.190

Regression Equation in Uncoded Units

```
Gas = -2.92 + 0.173 SA + 0.1548 SB + 0.2555 RA + 0.2149 RB + 1.83 %Resin
- 0.00368 SA*SA - 0.001082 SB*SB - 0.001002 RA*RA - 0.001348 RB*RB
+ 0.114 %Resin*%Resin + 0.00049 SA*SB + 0.00059 SA*RA - 0.00306 SA*RB
- 0.0154 SA*%Resin - 0.000324 SB*RA - 0.000810 SB*RB - 0.0259 SB*%Resin
- 0.002939 RA*RB - 0.0504 RA*%Resin + 0.0244 RB*%Resin
```

รูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าแก๊สด้วยสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าแก๊ส โดยพิจารณาจากสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 66.61% และ R-Sq (adj) เท่ากับ 50.32% ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าแก๊สไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.32

Response Surface Regression: Gas versus SA, SB, RA, RB, %Resin

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	61.916	6.8795	6.69	0.000
Linear	5	21.051	4.2103	4.09	0.003
SA	1	6.176	6.1755	6.00	0.018
SB	1	8.237	8.2369	8.01	0.007
RA	1	0.831	0.8308	0.81	0.373
RB	1	1.304	1.3045	1.27	0.265
%Resin	1	4.504	4.5037	4.38	0.041
Square	2	21.571	10.7855	10.49	0.000
SB*SB	1	10.757	10.7567	10.46	0.002
RB*RB	1	11.560	11.5596	11.24	0.001
2-Way Interaction	2	21.116	10.5578	10.27	0.000
SA*RB	1	5.931	5.9314	5.77	0.020
RA*RB	1	15.184	15.1842	14.76	0.000
Error	52	53.478	1.0284		
Lack-of-Fit	17	36.715	2.1597	4.51	0.000
Pure Error	35	16.763	0.4790		
Total	61	115.394			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.01412	53.66%	45.63%	27.81%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		10.288	0.196	52.38	0.000
SA	-1.435	-0.717	0.293	-2.45	0.018
SB	-1.750	-0.875	0.309	-2.83	0.007
RA	-0.526	-0.263	0.293	-0.90	0.373
RB	0.659	0.330	0.293	1.13	0.265
%Resin	1.225	0.613	0.293	2.09	0.041
SB*SB	-3.798	-1.899	0.587	-3.23	0.002
RB*RB	-3.550	-1.775	0.529	-3.35	0.001
SA*RB	-3.444	-1.722	0.717	-2.40	0.020
RA*RB	-5.511	-2.755	0.717	-3.84	0.000

Regression Equation in Uncoded Units

Gas = 2.44 + 0.0670 SA + 0.0688 SB + 0.0997 RA + 0.2229 RB + 0.613 %Resin
- 0.001051 SB*SB - 0.001262 RB*RB - 0.00306 SA*RB - 0.002939 RA*RB

รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในสูตรการผสมและค่าแก๊สด้วยวิธีการลดตัวแปรอิสระ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังรูปที่ 4.32 พบว่าปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าแก๊สมีทั้งที่อยู่ในรูปผลกระทบหลัก (Main Effect) เทอมกำลังสองของปัจจัย (Quadratic Effect) และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Effect) โดยอ้างอิงที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่ง

หากค่า P-Value ของเทอมของปัจจัยใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าเทอมปัจจัยนั้นๆมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญกับค่าการขยายตัวทางความร้อน ซึ่งจากการวิเคราะห์ สามารถสรุปได้ว่าเทอมที่มีนัยสำคัญได้แก่ เทอมของผลกระทบหลักคือ SA, SB และ %Resin เทอมของกำลังสองของปัจจัย SB-SB และ RB-RB และเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SA-RB และ RA-RB โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.6 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 53.66% และ R-Sq (adj) เท่ากับ 45.63% ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่าน้อยกว่าค่า R-Sq (adj) สมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$Gas = 2.44 + 0.0670SA + 0.0688SB + 0.0997RA + 0.2229RB + 0.613\%Resin - 0.001051SB2 - 0.001262RB2 - 0.00306SA*RB - 0.00293\ RA*RB \quad (4.6)$$

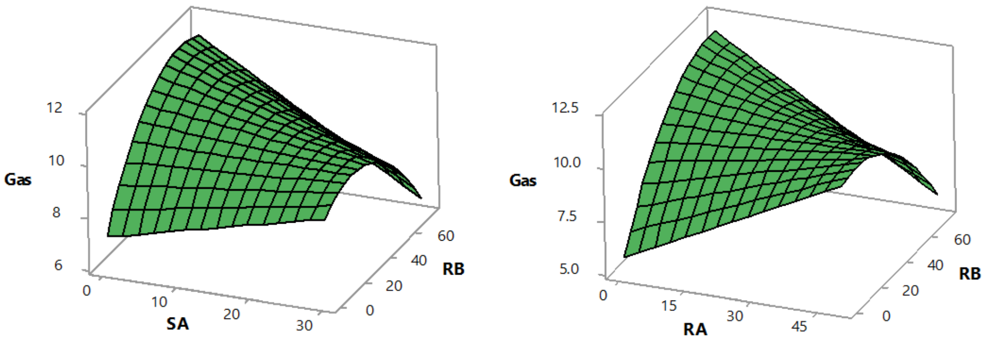
ซึ่งปัจจัยแต่ละตัวมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกันจึงทำให้ค่าคุณสมบัติที่พิจารณาแต่ละตัวมีค่าต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผสมในผลิตภัณฑ์นั้นๆ โดยค่าแก๊สนั้นจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์เรซิน โดยค่าแก๊สเป็นค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานต้องการให้มีค่าต่ำ เพื่อป้องกันการเกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อ ซึ่งถ้าหากผลิตภัณฑ์ใดๆมีปริมาณเรซินที่มากเกินไปแล้วเรซินไม่สามารถเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วไปถึงเมื่อนำทรายเคลือบเรซินนั้นไปใช้ขึ้นเป็นแบบหล่อจะทำให้ชิ้นงานเกิดรูพรุนได้ ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดแก๊สต้องใส่ปริมาณเรซินในปริมาณที่พอดี เพื่อให้คุณสมบัติตัวอื่นเป็นไปตามความต้องการของโรงงานด้วย

จากผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญข้างต้น พบว่าเทอมของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าแก๊ส ทำให้สามารถใช้กราฟพื้นผิวในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย SA, SB, %Resin, SA-RB และ RA-RB ได้ และทางผู้วิจัยจะพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของปริมาณทรายและปริมาณเรซินต่อเปอร์เซ็นต์ด้วย

พิจารณาเทอมของผลกระทบร่วมระหว่าง SA กับ RB และ RA กับ RB โดยอาศัยกราฟพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 4.33

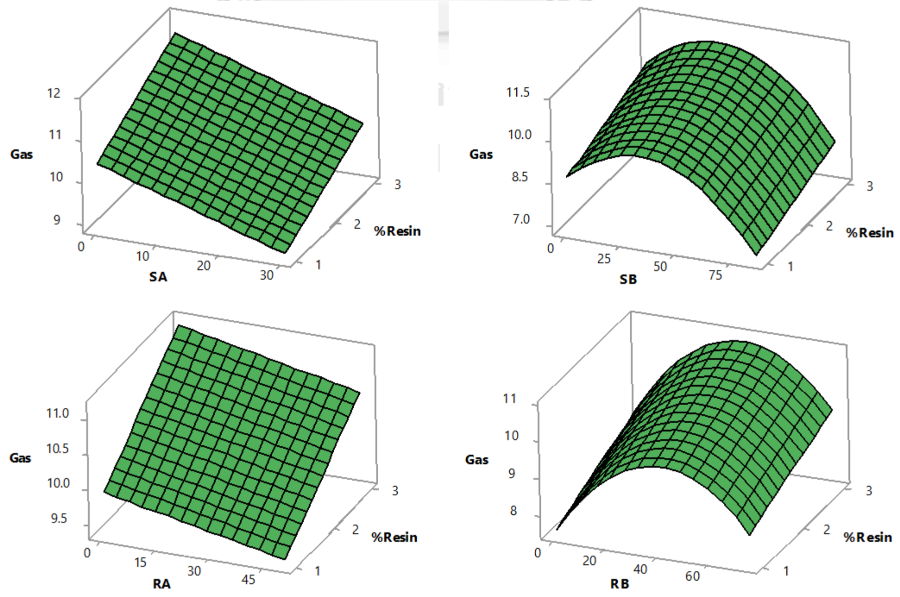
- ซึ่งจากกราฟผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ SA-RA พบว่าที่การเติม SA ปริมาณน้อยนั่นหมายถึงการเติม SB หรือ SC ในปริมาณที่มาก การเพิ่มขึ้นของ RB จะทำให้ค่าแก๊สมีค่ามากขึ้น ในขณะที่การเติม SA ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม SB หรือ SC ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มขึ้นของ RB จะทำให้ค่าแก๊สมีค่าน้อย
- พิจารณากราฟผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของ RA-RB พบว่าที่การเติม RA ปริมาณน้อยนั่นหมายถึงการเติม RC ในปริมาณที่มาก การเพิ่มขึ้นของ RB จะทำให้ค่าแก๊สมีค่ามากขึ้น

ในขณะที่การเติม RA ปริมาณมาก นั่นหมายถึงการเติม RC ในปริมาณที่น้อย การเพิ่มขึ้นของ RB จะทำให้ค่าแก๊สมีค่าน้อย



รูปที่ 4.33 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณ SA-RB และปริมาณ RA-RB ที่ส่งผลต่อค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

หากพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของปริมาณทรายกับเปอร์เซ็นต์เรซินและปริมาณเรซินกับเปอร์เซ็นต์เรซินที่มีผลต่อค่าแก๊ส โดยพิจารณาจากกราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.34 จากกราฟทั้ง 4 พบว่าหากต้องการค่าแก๊สที่ต่ำตามที่โรงงานกรณีศึกษากำหนดไว้ ควรเลือกเติม SA ที่ปริมาณมาก SB ที่ปริมาณมาก RA ที่ปริมาณมาก และ RB ที่ปริมาณน้อย โดยต้องใช้เปอร์เซ็นต์เรซินที่น้อย



รูปที่ 4.34 กราฟพื้นผิวแสดงผลกระทบของปริมาณเรซินแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์เรซินและปริมาณทรายแต่ละชนิดกับเปอร์เซ็นต์เรซินที่ส่งผลต่อค่าแก๊ส

หลังจากทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับตัวแปรตอบสนอง และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับตัวแปรตอบสนองทุกตัวเรียบร้อยแล้ว ซึ่งผลที่สมการมีความน่าเชื่อถือสูง สามารถนำไปใช้สำหรับการทำนายต่อไป ดังนั้นในส่วนถัดไปผู้วิจัยจึงต้องการทำการยืนยันผลการทดลองโดยใช้คำสั่ง Response Optimizer เพื่อทำการหาสัดส่วนการผลิตทรายเคลือบเรซินของผลิตภัณฑ์ที่ทางโรงงานใช้อยู่ในปัจจุบันเพื่อทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย และเพื่อดูว่าสัดส่วนดังกล่าวสามารถให้ค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงที่ทางโรงงานต้องการหรือไม่ โดยผู้วิจัยจะทำการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ให้ครอบคลุมช่วงความต้องการของคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิด จากนั้นทำสัดส่วนที่ได้ไปทำการผสมจริงอีกครั้งหนึ่ง

4.3 การคัดเลือกผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปทำการยืนยันผลการทดลอง

จากผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 45 ผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัยจะทำการคัดเลือกผลิตภัณฑ์เพื่อนำมาทำการยืนยันผลการทดลองเพียงครึ่งหนึ่ง เพื่อประหยัดเวลาในการทดลอง และเพื่อประหยัดต้นทุนวัตถุดิบให้กับโรงงานกรณีศึกษา แต่ทุกผลิตภัณฑ์ที่เลือกมายืนยันผลการทดลองจะต้องครอบคลุมทุกช่วงความต้องการของคุณสมบัติที่โรงงานต้องการ ซึ่งจะนำเครื่องทางสถิติเข้าช่วยสำหรับการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาทำการเก็บผลการทดลองเพื่อเป็นตัวแทนของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

4.3.1 หลักการคัดเลือกผลิตภัณฑ์

ในขั้นแรกสำหรับการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัยได้ขอความอนุเคราะห์ทางโรงงานให้ทำการแบ่งผลิตภัณฑ์ออกเป็นกลุ่มเพื่อให้ง่ายต่อการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ โดยทางโรงงานได้แบ่งผลิตภัณฑ์ตามค่าคุณสมบัติความทนแรงดัดโค้งเป็นหลัก ซึ่งสามารถแบ่งได้ 8 กลุ่ม โดยแบ่งเป็นช่วงจากน้อยไปหามาก ดังตารางที่ 4.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

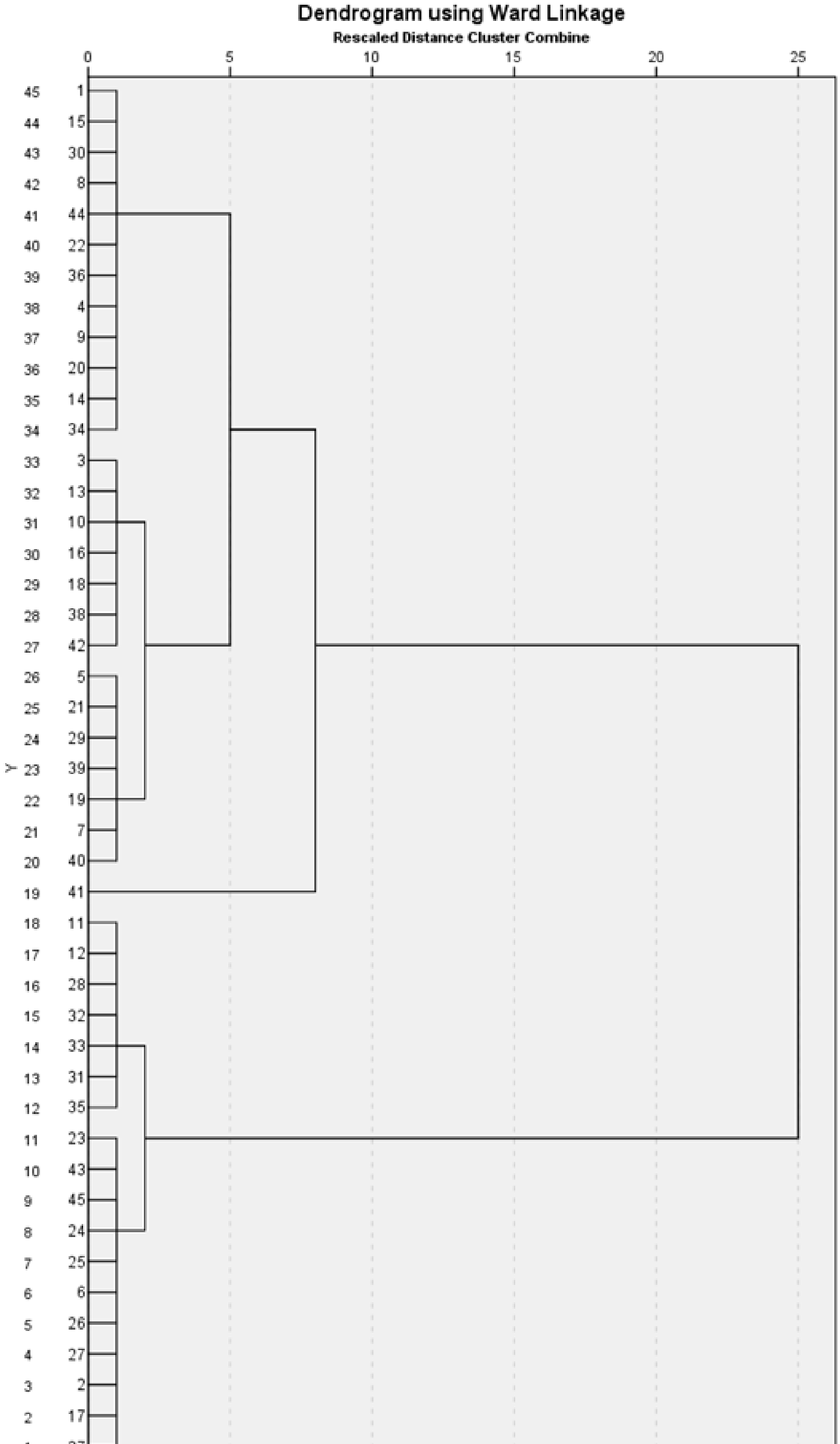
ตารางที่ 4.4 การแบ่งผลิตภัณฑ์ตามค่าความทนแรงดัดโค้งโดยโรงงานกรณีศึกษา

No.	Formula	Output						
		Bending Strength	Bend	LOI	Thermal expansion	Melting Point	Gas	interval of Bending Strength
1	NTFC513NOA(TFC)	25.6	0.616	1.78	1.347	101.6	9.73	20-30
2	NKKF513NOC	29.3	0.243	1.74	1.396	107.4	8.95	
3	RNIC515LON	31.8	1.085	1.84	1.220	102.2	7.731	31-40
4	NAIF615NOB	32.8	0.346	1.99	1.318	107.1	9.82	
5	MKTH517CFO	33.8	0.385	2.18	1.130	106.6	8.379	
6	NKKF513NOC(Wisansap)	34.6	0.240	1.83	1.383	107.4	9.16	
7	MNIC517NLR	36.9	0.345	2.10	1.149	103.5	8.496	
8	NSNF515NOP(TYMW)	38.4	0.369	1.93	1.330	107.2	9.28	
9	NSNF515NOP(KKF5)	38.9	0.305	1.92	1.363	107.3	8.24	
10	MSPM615NOB	40.7	0.327	2.20	1.134	108.5	9.69	
11	RMSC517NOI	41.2	0.417	2.16	1.040	104.8	9.68	41-50
12	MATFB515NOS	43.2	0.277	2.14	1.059	104.3	8.197	
13	RMNT518LFB	43.4	0.367	2.29	0.997	100.7	9.083	
14	RM617NOA (KPC)	43.6	0.270	2.06	1.181	107.5	9.72	
15	RSNF518NOJ	44.1	0.193	2.12	1.097	102.8	8.61	
16	MMNT520LFG	44.7	0.390	2.57	0.893	100.0	9.23	
17	RM617NOA	45.2	0.245	2.22	1.131	107.3	8.422	
18	MATFB523PLY	48.3	0.224	2.61	1.194	105.7	9.473	
19	MATFB520LFN(NIC)	51.2	0.309	2.59	0.856	101.4	9.856	51-60
20	MATFB520LFN	51.3	0.238	2.60	0.840	100.4	9.955	
21	MBOS524HLA	51.7	0.131	2.94	0.979	109.0	10.26	
22	MKTH520LFI	52.0	0.288	2.49	1.033	103.2	9.93	
23	MATFB521MOZ(SNF)	52.9	0.138	2.38	1.082	106.3	8.53	
24	MAIF624HOC	53.8	0.116	2.99	0.979	111.9	10.3	
25	NSNF518NOE(RCR)	55.0	0.246	2.37	1.207	102.0	10.52	
26	RATFB525HBI(SNF)	56.6	0.106	3.12	0.701	107.9	9.86	
27	MSKM520LOC	56.7	0.247	2.49	0.952	101.4	9.434	
28	MNIC527HOK	58.2	0.089	3.18	0.930	112.2	10.757	
29	RATFB525HBI	58.7	0.105	3.18	0.726	107.9	11.175	
30	MSKM520NOK	59.5	0.215	2.51	0.961	106.9	10.51	
31	MSKM522LOY	60.8	0.216	3.05	0.739	100.1	9.65	
32	RYS522NOC	61.9	0.226	2.70	0.996	105.7	11.44	61-70
33	RS523LOC(NIC)	63.1	0.310	2.62	0.887	98.5	10.43	
34	MICP525AFO	63.5	0.383	3.09	0.245	103.6	11.495	
35	MATFB522LOB	65.1	0.220	2.88	0.771	99.1	10.471	
36	MATFB523NOL(NIC)	66.2	0.105	2.77	1.142	105.0	10.87	
37	RSNF523NOY	67.2	0.167	2.87	0.788	103.5	11.21	
38	RSNF523LOD	68.8	0.218	2.87	0.772	101.6	11.033	
39	MKTH524HOZ	70.1	0.154	2.93	1.031	104.6	10.59	
40	RYS525NOA	70.7	0.210	2.97	0.876	104.2	11.39	
41	MSKMT525NOP	72.3	0.154	3.02	0.851	100.2	10.983	71-80
42	MATFB521LOU	75.8	0.164	2.55	0.243	104.1	9.36	
43	MSNF526HOV	76.4	0.123	2.94	1.110	103.5	10.129	
44	MYMH522NOR(2.2%R)	85.3	0.153	2.72	1.002	104.1	10.288	80-90
45	MYMH525SOI	109.0	0.261	3.03	0.288	102.9	10.479	101-110

เนื่องจากข้อมูลการแบ่งกลุ่มตามตารางที่ 4.4 เป็นการแบ่งกลุ่มตามค่าความทนแรงดัดโค้งเท่านั้น ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าจากการแบ่งกลุ่มเช่นนี้ อาจส่งผลให้ค่าคุณสมบัติตัวอื่นๆจะไม่ได้ถูกนำมาพิจารณา หรือให้ความสำคัญในการแบ่งกลุ่มอย่างเท่าเทียม ผู้วิจัยจึงนำเทคนิคทางสถิติเกี่ยวกับการจัดกลุ่มข้อมูลมาช่วยในการแบ่งกลุ่มผลิตภัณฑ์ โดยการแบ่งกลุ่มนั้นจะพิจารณาจากค่าคุณสมบัติของทรายเคลือบเรซินทั้ง 6 ชนิด เพื่อให้ได้กลุ่มที่มีผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงกันที่สุด โดยเทคนิคดังกล่าวมีชื่อว่าการวิเคราะห์การจัดกลุ่ม (Cluster Analysis)

การวิเคราะห์การจัดกลุ่ม (Cluster Analysis) เป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสำรวจที่พยายามจะแบ่งกรณีที่มีลักษณะใกล้เคียงกันมาไว้ในกลุ่มเดียวกัน และระหว่างกลุ่มจะมีความแตกต่างกัน โดยใช้วิธีการจัดกลุ่มแบบ Hierarchical Clustering ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด และใช้วิธีการรวมกลุ่มแบบ Ward’s Method ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณค่าเฉลี่ยของตัวแปรทุกตัวของแต่ละกลุ่ม จากนั้นทำการคำนวณ Squared Euclidean Distance จากค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม และมีการหาผลรวมของระยะทางนี้ของทุกๆกลุ่ม กลุ่มสองกลุ่มที่จะมีการมารวมกันจะต้องมีผลรวมของ Squared Distance ภายในกลุ่มเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถคำนวณได้โดยอาศัยโปรแกรม SPSS Statistics ซึ่งจากการแบ่งกลุ่มผลิตภัณฑ์ โดยมีค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดเป็นตัวพิจารณาสามารถแบ่งได้ดังรูปที่ 4.35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.35 การแบ่งกลุ่มของผลิตภัณฑ์โดยใช้เทคนิค Cluster Analysis

จากรูปที่ 4.35 พบว่าสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ออกเป็นกลุ่มๆได้ 6 กลุ่ม ดังนี้

- กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ที่ 1, 15, 30, 8, 44, 22, 36, 4, 9, 20, 14 และ 34 ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะมีค่าคุณสมบัติต่างๆอยู่ในช่วงดังนี้ ค่าความทนแรงดัดโค้งเท่ากับ 51.2-59.5 kgf/cm^2 ค่าความโก่งงอเท่ากับ 0.1-0.3 mm. ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาเท่ากับ 2.4-3.2% ค่าการขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 0.7-1.2% ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว 100.4-112.2℃ และค่าแก๊สเท่ากับ 8.5-11.2 ml/g
- กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ที่ 3, 13, 10, 16, 18, 38 และ 42 ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะมีค่าคุณสมบัติต่างๆอยู่ในช่วงดังนี้ ค่าความทนแรงดัดโค้งเท่ากับ 60.8-67.2 kgf/cm^2 ค่าความโก่งงอเท่ากับ 0.1-0.4 mm. ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาเท่ากับ 2.6-3.1% ค่าการขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 0.2-1.1% ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว 98.5-105.7℃ และค่าแก๊สเท่ากับ 9.7-11.5 ml/g
- กลุ่มที่ 3 ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ที่ 5, 21, 29, 39, 19, 7 และ 40 ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะมีค่าคุณสมบัติต่างๆอยู่ในช่วงดังนี้ ค่าความทนแรงดัดโค้งเท่ากับ 68.8-85.3 kgf/cm^2 ค่าความโก่งงอเท่ากับ 0.1-0.2mm. ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาเท่ากับ 2.6-3.0% ค่าการขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 0.2-1.1% ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว 100.2-104.6℃ และค่าแก๊สเท่ากับ 9.4-11.4 ml/g
- กลุ่มที่ 4 ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ที่ 41 ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะมีค่าคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ ค่าความทนแรงดัดโค้งเท่ากับ 109.0 kgf/cm^2 ค่าความโก่งงอเท่ากับ 0.3mm. ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาเท่ากับ 3% ค่าการขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 0.3% ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว 102.9℃ และค่าแก๊สเท่ากับ 10.5ml/g
- กลุ่มที่ 5 ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ที่ 11, 12, 28, 32, 33, 31 และ 35 ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะมีค่าคุณสมบัติต่างๆอยู่ในช่วงดังนี้ ค่าความทนแรงดัดโค้งเท่ากับ 25.6-36.9kgf/cm^2 ค่าความโก่งงอเท่ากับ 0.2-1.1mm. ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาเท่ากับ 1.7-2.2% ค่าการขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 1.1-1.4% ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว 101.6-107.4℃ และค่าแก๊สเท่ากับ 9.8ml/g
- กลุ่มที่ 6 ประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ที่ 23, 43, 45, 24, 25, 6, 26, 27, 2, 17 และ 37 ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะมีค่าคุณสมบัติต่างๆอยู่ในช่วงดังนี้ ค่าความทนแรงดัดโค้งเท่ากับ 38.4-48.3 kgf/cm^2 ค่าความโก่งงอเท่ากับ 0.2-0.4mm. ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาเท่ากับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.9-2.6% ค่าการขยายตัวทางความร้อนเท่ากับ 0.9-1.4% ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว 100.0-108.5℃ และค่าแก๊สเท่ากับ 8.2-9.7ml/g

ซึ่งผลิตภัณฑ์ในแต่ละกลุ่มนั้นจะมีช่วงคุณสมบัติที่อยู่ในช่วงการพิจารณาเดียวกันหรือมีลักษณะความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงทำการเลือกผลิตภัณฑ์ในแต่ละกลุ่มออกมาเพื่อนำไปทำการยืนยันผล โดยจะทำการเลือกเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของทั้งหมดในแต่ละกลุ่ม ซึ่งจะได้ทั้งหมด 25 สูตรการทดลองที่ประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์ที่ 41, 1, 9, 44, 34, 20, 14, 3, 10, 18, 42, 21, 19, 7, 40, 11, 28, 31, 35, 43, 45, 24, 25, 6 และ 17

4.4 การหากำหนดระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนำเข้า

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยนำเข้ากับตัวแปรตอบสนองเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อมาผู้วิจัยได้ทำการหาสูตรการผสมที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคัดเลือกผลิตภัณฑ์จากทั้งหมด 44 ผลิตภัณฑ์ ให้เหลือเพียง 25 ผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นตัวแทนของการยืนยันผลการทดลอง ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสัดส่วนการผสมนั้นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดที่ทางโรงงานมีความต้องการในแต่ละตัวที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน และต้นทุนของวัตถุดิบในแต่ละผลิตภัณฑ์ ซึ่งในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสัดส่วนการผสมนั้นจะหาจากคำสั่ง Response Optimizer ซึ่งในขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้น ผู้วิจัยต้องทำการกำหนดเป้าหมาย (Goal) และคะแนนความสำคัญ (Importance) ของคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิด และกำหนดความต้องการในเรื่องของต้นทุนวัตถุดิบอีกด้วย ซึ่งในการกำหนดเป้าหมายนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ ค่าเป้าหมายสูงสุด (Maximize), ค่าเป้าหมายต่ำสุด (Minimize) และค่าตามเป้าหมาย (Target) ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผลิตภัณฑ์แต่ละสูตรจะมีค่าความต้องการที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานอยู่แล้ว ดังนั้นเวลาที่ทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสัดส่วนการผสมนั้นผู้วิจัยจะกำหนดเป้าหมายของคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดให้อยู่ที่ค่าตามเป้าหมาย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่จะนำมาทำการทดลอง ส่วนในเรื่องของต้นทุนวัตถุดิบผู้วิจัยจะกำหนดค่าเป้าหมายให้อยู่ที่ค่าเป้าหมายต่ำสุด เพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบราคาในเรื่องของต้นทุนวัตถุดิบ โดยใช้เป็นตัวเลือกในการตัดสินใจสำหรับการเลือกใช้สูตรการผสมที่ได้จากการหาสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมที่สุด เพื่อที่จะในไปใช้ในการผลิตจริงต่อไป ในส่วนของคะแนนความสำคัญในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะไม่ได้ทำการกำหนดเนื่องจากค่าคุณสมบัติที่พิจารณานั้นต้องการให้เข้าใกล้ค่าเป้าหมายทุกตัว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หลังจากการกำหนดเป้าหมายของค่าคุณสมบัติเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจึงทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินสำหรับผลิตภัณฑ์ทั้ง 25 ผลิตภัณฑ์ เพื่อนำไปทำการเก็บผลการทดลองสำหรับนำมาใช้เพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยในการเก็บผลการทดลองนั้นจะทำการทดลองจริงในกระบวนการผลิตระดับห้องทดลอง พร้อมทั้งทำการทดสอบค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิด เพื่อนำค่าที่ได้จากการพยากรณ์มาเปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผลิตเก่า และทำการเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบระหว่างสัดส่วนการการผสมเก่ากับสัดส่วนการผสมใหม่ ซึ่งตารางการเก็บตัวอย่างเพื่อยืนยันผลการทดลองจะแสดงได้ดังตารางที่ 4.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.5 สัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินสำหรับยืนยันผลการทดลองทั้ง 25 ผลิตภัณฑ์

ลำดับ	สูตรการผลิต	Sand A	Sand B	Sand C	%Resin	Resin A	Resin B	Resin C	Total Cost	Cost Reduction	Bending Strength	Bend	LOI	Thermal expansion	Melting Point	Gas
1	MATFB520LFN	0	0	6	2.1	0	1.68	0.42	3,467	1,199	51.3	0.238	2.60	0.840	100.4	9.96
	พยากรณ์	0	12.3	2.7	2.25	0.47	1.22	0.56	2,268		53.34	0.39	2.6	0.93	101.84	9.94
2	MSKM520NOK	0	0	13.5	2	0	0	1.4	2,584	192	59.5	0.215	2.51	0.961	106.9	10.51
	พยากรณ์	0	6.9	8.1	2.1	0.36	0.65	1.09	2,392		56.53	0.22	2.51	0.97	104.95	10.44
3	MNIC527HOK	0	0	15	2.7	0	0	0	2,909	461	58.2	0.356	3.18	0.930	112.2	10.757
	พยากรณ์	0	4.05	10.95	1.95	0.2	0.62	1.13	2,448		58.18	0.362	2.6	0.97	106.1	10.69
4	RATFB525HBI(SNF)	0	0	7.5	2.6	0	0.52	0	3,319	1,146	56.6	0.341	3.12	0.701	107.9	9.86
	พยากรณ์	0	12.75	2.25	2.1	0.29	1.05	0.76	2,173		56.66	0.353	2.64	0.96	103.22	9.9
5	MAIF624HOC	0	3.75	9	2.45	0	0	0	2,651	602	53.8	0.466	2.99	0.979	111.9	10.3
	พยากรณ์	0	9.15	5.85	1.5	0	0.51	0.99	2,049		45.38	0.66	2.29	1.11	110.2	10.3
6	NSNF518NOE(RCR)	0	15	0	1.85	0	0.74	0	2,172	-340	55.0	0.246	2.37	1.207	102.0	10.52
	พยากรณ์	0	0.75	14.25	1.6	0.4	1.2	0	2,512		52.41	0.71	2.38	1.204	102.07	10.51
7	MATFB522LOB	0	0	9	2.3	0	1.84	0	3,339	1,091	65.1	0.220	2.88	0.771	99.1	10.471
	พยากรณ์	0	12.45	2.55	2.2	0.31	1.36	0.53	2,248		61.54	0.283	2.88	0.909	102.13	10.47
8	MSKM522LOY	0	0	7.5	2.25	0.563	1.125	0.563	3,255	940	60.8	0.216	3.05	0.739	100.1	9.65
	พยากรณ์	0	12.75	2.25	2.3	0.46	1.73	0.12	2,315		63.55	0.35	3.05	0.864	100.5	9.67
9	RSNF523NOY	0	0	4.5	2.35	0.588	0.588	1.175	3,493	1,330	67.2	0.348	2.87	0.788	103.5	11.21
	พยากรณ์	0.6	12.75	1.65	1.85	0	1.26	0.59	2,163		63.62	0.422	2.89	0.967	103.58	11.22
10	MICP525AFO	0	0	3	2.5	0	1	0.5	3,920	1,369	63.5	0.383	3.09	0.245	103.6	11.495
	พยากรณ์	0	11.4	3.6	2.85	0.5	1.47	0.88	2,551		62.35	0.21	3.09	0.852	102.21	10.51
11	MSKMT525NOP	0	1.5	12	2.5	0	1	0.625	3,205	1,037	72.3	0.354	3.02	0.851	100.2	10.983
	พยากรณ์	0	12.75	2.25	2	0.18	1.5	0.32	2,168		65.41	0.38	3.03	0.907	101.76	10.95
12	RSNF523LOD	0	0	8.25	2.3	0.23	1.84	0.23	3,266	1,065	68.8	0.218	2.87	0.772	101.6	11.033
	พยากรณ์	0	12	3	2	0.24	1.48	0.28	2,201		63.74	0.4	2.95	0.932	101.6	11.03
13	MSNF526HOV	4.5	0	6	2.5	0.75	0	0	3,361	946	76.4	0.123	2.94	1.110	103.5	10.129
	พยากรณ์	1.95	11.85	1.2	2	0.02	1.1	0.88	2,415		65.79	0.152	2.87	1.003	103.54	10.134

ตารางที่ 4.5 สัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินสำหรับยืนยันผลการทดลองทั้ง 25 ผลิตภัณฑ์ (ต่อ)

ลำดับ	สูตรการผลิต	Sand A	Sand B	Sand C	%Resin	Resin A	Resin B	Resin C	Total Cost	Cost Reduction	Bending Strength	Bend	LOI	Thermal expansion	Melting Point	Gas
14	MYMH522NOR(2.2%R)	0	0	9	2.2	0	0.66	1.1	2,831	194	85.3	0.153	2.72	1.002	104.1	10.288
	พยากรณ์	1.5	6.6	6.9	2.2	0.31	0.68	1.21	2,637		64.83	0.157	2.71	1	104.1	10.265
15	MYMH525SOI	0	0	6	2.5	0	0	0.5	8,768	6,494	109.0	0.261	3.03	0.288	102.9	10.479
	พยากรณ์	0.45	12.75	1.8	2.15	0.18	1.42	0.55	2,274		65.84	0.261	3.03	0.904	102	10.476
16	MNIC517NLR	2.25	0	10.5	1.7	0.34	0.68	0.51	3,027	858	36.9	0.345	2.10	1.149	103.5	8.496
	พยากรณ์	0.9	12.75	1.35	1.83	0.45	0.68	0.72	2,169		44.99	0.42	2.1	1.152	103.5	8.628
17	MKTH517CFO	0	1.5	13.5	1.7	0.51	0	0.85	2,426	333	33.8	0.385	2.18	1.130	106.6	8.379
	พยากรณ์	0.6	12.3	2.1	1.75	0.22	0.53	1	2,093		46.4	0.473	2.16	1.13	106.59	8.378
18	NKKF513NOC	0	12.75	0	1.3	0.39	0	0.91	1,902	-194	29.3	0.243	1.74	1.396	107.4	8.95
	พยากรณ์	2.14	11.85	1	1.15	0.02	0.77	0.36	2,096		32.42	0.93	1.742	1.364	107.33	10.05
19	NTFC513NOA(TFC)	0	15	0	1.35	0.27	0.608	0.473	1,762	-621	25.6	0.616	1.78	1.347	101.6	9.73
	พยากรณ์	2.1	7.8	5.1	1.4	0.22	1.05	0.13	2,383		34.27	0.77	1.778	1.337	102.96	9.74
20	MATFB523PLY	0	8.25	6	2.3	0	0.46	0	2,606	394	48.3	0.224	2.61	1.194	105.7	9.473
	พยากรณ์	2.25	12.75	0	1.5	0	0.93	0.57	2,212		49.17	0.58	2.259	1.19	105.67	9.56
21	RSNF518NOJ	3	0	12	1.65	0.743	0.743	0	2,964	768	44.1	0.193	2.12	1.097	102.8	8.61
	พยากรณ์	0.6	12.75	1.65	2	0.52	0.76	0.72	2,196		44.62	0.236	2.118	1.101	102.76	8.75
22	RM617NOA (KPC)	0	2.25	10.5	1.6	0	0	1.6	2,344	299	43.6	0.270	2.06	1.181	107.5	9.72
	พยากรณ์	0.6	11.25	3.15	1.5	0.15	0.57	0.78	2,045		43.75	0.54	2.143	1.169	107.49	9.71
23	RM617NOA	0	0	13.5	1.75	0	0	1.58	2,509	431	45.2	0.245	2.22	1.131	107.3	8.422
	พยากรณ์	0.68	12.38	1.95	1.7	0.18	0.52	1	2,078		48.3	0.366	2.22	1.127	107.01	8.4
24	NSNF515NOP(TYMW)	0	15	0	1.5	0	0	1.5	1,759	-479	38.4	0.531	1.93	1.330	107.2	9.28
	พยากรณ์	1.95	10.8	2.25	1.5	0.18	0.53	0.8	2,238		41.57	0.622	2.01	1.256	107.2	9.266
25	MSPM615NOB	0	6.75	0	1.6	0.32	0	0.72	2,160	101	40.7	0.327	2.20	1.134	108.5	9.69
	พยากรณ์	0	9.9	5.1	1.6	0.16	0.5	0.94	2,059		41.72	0.556	2.133	1.129	108.49	9.69

บทที่ 5
การทดลองเพื่อยืนยันผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าตัวแปรตอบสนองและสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง พร้อมทั้งหาสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินที่เหมาะสมและสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบลงได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลว่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินหลังปรับปรุงที่ได้จาก Response Optimizer ว่ามีค่าที่น่าพอใจหรือไม่ โดยในการยืนยันผลการทดลองนั้นผู้วิจัยจะทำการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีมาทั้งหมด 25 ผลิตภัณฑ์ จากจำนวนผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 44 ผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นตัวแทนในการทำการยืนยันผล

5.1 ขั้นตอนการทดลองเพื่อยืนยันผล

หลังจากการหาค่าสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ทั้ง 25 ผลิตภัณฑ์เรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้นำเสนอข้อมูลสัดส่วนการผสมสูตรทรายเคลือบเรซินทั้ง 25 สูตรกับโรงงานกรณี เพื่อขออนุญาตทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยในการทดลองยืนยันผลจะประกอบไปด้วยขั้นตอนดังนี้

1. ทำการจัดเตรียมวัตถุดิบที่ใช้สำหรับการทดลองในแต่ละผลิตภัณฑ์
    1.1 การเตรียมทรายสำหรับการผสม จะถูกเตรียมตามสัดส่วนการผสมหลังการปรับปรุงที่ได้จากการกด Response Optimizer โดยสัดส่วนการผสมจะทำการเติมทรายแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ
    1.2 การเตรียมเรซินสำหรับการผสม การเตรียมทรายสำหรับการผสม จะถูกเตรียมตามสัดส่วนการผสมหลังการปรับปรุงที่ได้จากการกด Response Optimizer โดยสัดส่วนการผสมจะทำการเติมเรซินแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ
    1.3 การเตรียมเฮกซามีนสำหรับการผสม จะขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมเรซินในแต่ละสัดส่วนการผสม
    1.4 การเตรียมแคลเซียมสเตียเรทสำหรับการผสม การเตรียมเฮกซามีนสำหรับการผสม จะขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมเรซินในแต่ละสัดส่วนการผสม
2. นำทรายที่เตรียมไว้เทใส่เครื่องผสมเพื่อทำการโม่ทรายให้ได้อุณหภูมิตามที่โรงงานกำหนด
3. เมื่อถึงอุณหภูมิตามที่ต้องการ เครื่องจะปล่อยทรายเข้าสู่ถังผสม
4. ทำการเติมเรซินลงในถังผสม
5. ทำการเติมเฮกซามีนลงในถังผสม

6. ทำการเป่าอากาศในถังผสมเพื่อไม่ให้ทรายจับตัวกันเป็นก้อน

7. ทำการเติมแคลเซียมสเตียเรทลงในถังผสม

8. ทำการปล่อยทรายเคลือบเรซินออกจากถังผสมลงบนถาด พร้อมทั้งทำการวัดอุณหภูมิทรายหลังการผสม โดยควบคุมให้อยู่ในค่าที่โรงงานกำหนด

9. ทำการร่อนกากเรซินที่หลอมละลายไม่หมด ทรายที่จับตัวกันเป็นก้อน และเศษตะกอนที่ติดมาขณะทำการผสม

10. นำทรายเคลือบเรซินที่ได้ไปตากลมไว้เพื่อให้อุณหภูมิลดลงแล้วจึงเก็บทรายเคลือบเรซินใส่ถุงเพื่อรอนำไปตรวจคุณสมบัติต่อไป

11. นำข้อมูลการตรวจสอบคุณสมบัติที่ได้มาทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองต่อไป

5.2 ผลการทดลอง

จากการหาค่าที่เหมาะสมของสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินของผลิตภัณฑ์ทั้ง 25 ผลิตภัณฑ์ เมื่อนำค่าที่ได้ไปทำการทดลองโดยการผสมสูตรตามสัดส่วนที่ได้และทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมขนาดเล็กที่จำนวน 15 กิโลกรัม ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งในทุกผลิตภัณฑ์ที่คัดเลือกมาพร้อมทั้งทำการทดสอบค่าคุณสมบัติของทรายเคลือบเรซินทั้งหมด 6 ชนิด ซึ่งค่าคุณสมบัติเหล่านี้จะมีช่วงของการใช้งานที่ยอมรับได้โดยขึ้นอยู่กับสูตรของการผลิตซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 และค่าที่ได้จากการทดลองสำหรับการยืนยันผลสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.1 ช่วงการยอมรับของคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิด สำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์

สูตรการผลิต	ช่วงค่าคุณสมสมบัติที่โรงงานยอมรับ					
	Bending Strength (kgf/cm^2)	Bend (mm.)	LOI (%)	Thermal expansion (%)	Melting Point (℃)	Gas (ml/g)
	Max	Min	Min	Min	Max	Min
MATFB520LFN	48-57	0-0.4	2.35-2.75	0.7-1.1	98-105	9.5-11.5
MSKM520NOK	55-62	0-0.3	2.4-2.7	0.8-1.15	104-110	8.5-10.5
MNIC527HOK	55-65	0-0.3	2.9-3.4	0.7-1.3	105-115	10.0-12.0
RATFB525HBI(SNF)	74-80	0-0.15	2.9-3.3	0.6-0.9	102-110	8.0-10.0
MAIF624HOC	45-58	0-0.17	2.8-3.1	0.2-0.4	105-115	7.0-10.0
NSNF518NOE(RCR)	50-60	0-0.4	2.2-2.4	1.1-1.4	95-105	7.0-10.0
MATFB522LOB	60-67	0-0.4	2.7-3.0	0.5-1.0	96-102	10.2-11
MSKM522LOY	55-65	0-0.4	2.6-3.5	0.5-0.9	95-104	8.0-10.0
RSNF523NOY	65-73	0-0.4	2.7-3.0	0.5-0.9	99-106	8.5-11
MICP525AFO	60-68	0-0.5	2.85-3.25	0-0.35	100-110	11-12.5
MSKMT525NOP	65-80	0-0.6	2.8-3.2	0.6-1.0	94-105	10.4-11.7
RSNF523LOD	57-69	0-0.4	2.7-3.1	0.6-1.0	95-105	10.4-11.7
MSNF526HOV	65-80	0-0.3	2.7-3.2	0.9-1.25	95-110	8.4-11.7
MYMH522NOR(2.2%R)	75-88	0-0.2	2.6-2.8	0.8-1.1	100-107	9.6-10.8
MYMH525SOI	70-90	0-0.35	2.8-3.2	0.2-1.0	101-108	9.0-12.0
MNIC517NLR	34-48	0-0.8	2.0-2.3	0.8-1.3	100-106	7.4-9.4
MKTH517CFO	33-44	0-0.6	2.0-2.3	0.8-1.35	103-109	7.4-9.4
NKKF513NOC	28-35	0-0.4	1.6-1.9	1.1-1.7	100-110	7.5-10.5
NTFC513NOA(TFC)	22-30	0-0.8	1.6-1.8	1.0-1.6	95-105	8-10.5
MATFB523PLY	45-55	0-0.6	2.4-2.6	0.8-1.3	101-108	8.5-10
RSNF518NOJ	38-46	0-0.3	2.0-2.25	0.7-1.2	99-105	8.5-10
RM617NOA (KPC)	35-42	0-0.5	2.0-2.3	0.8-1.25	103-110	7.5-9.0
RM617NOA	40-48	0-0.4	2.1-2.4	0.8-1.2	103-110	7.5-9.0
NSNF515NOP(TYMW)	36-43	0-0.5	1.75-2.0	1.0-1.65	102-112	7.0-8.5
MSPM615NOB	30-40	0-0.5	1.8-2.1	0.9-1.5	102-112	8.5-10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองทั้ง 25 ผลิตภัณฑ์

ลำดับ	รุ่น	Sand A	Sand B	Sand C	%Resin	Resin A	Resin B	Resin C	Bending Strength	Bend	LOI	Thermal expansion	Melting Point	Gas
1	MATFB520LFN	0	0	240	2.1	0	10.08	2.52	51.3	0.238	2.60	0.840	100.4	9.96
	พยากรณ์	0	492	108	2.25	2.82	7.32	3.36	53.34	0.39	2.6	0.93	101.84	9.94
	ทดลอง	0	492	108	2.25	2.82	7.32	3.36	59.55	0.3	2.71	1.05	100.8	8.64
2	MSKM520NOK	0	0	540.0	2	0	0	8.4	59.5	0.215	2.51	0.961	106.9	10.51
	พยากรณ์	0	276	324	2.1	2.2	3.9	6.5	56.53	0.22	2.51	0.97	104.95	10.44
	ทดลอง	0	276	324	2.1	2.2	3.9	6.5	57.24	0.22	2.6	1.04	104.2	9.51
3	MNIC527HOK	0	0	600	2.7	0	0	0	58.2	0.356	3.18	0.930	112.2	10.757
	พยากรณ์	0	162	438	1.95	1.2	3.7	6.8	58.18	0.362	2.6	0.97	106.1	10.69
	ทดลอง	0	162	438	1.95	1.2	3.7	6.8	57.26	0.23	2.51	1.04	105	8.23
4	RATFB525HBI(SNF)	0	0	300.0	2.6	0	3.12	0	56.6	0.341	3.12	0.701	107.9	9.86
	พยากรณ์	0	510	90	2.1	1.7	6.3	4.6	56.66	0.353	2.64	0.96	103.22	9.9
	ทดลอง	0	510	90	2.1	1.7	6.3	4.6	55.7	0.33	2.65	0.85	104.3	7.23
5	MAIF624HOC	0	150	360	2.45	0	0	0	53.8	0.466	2.99	0.979	111.9	10.3
	พยากรณ์	0	366	234	1.5	0	3.1	5.9	45.38	0.66	2.29	1.11	110.2	10.3
	ทดลอง	0	366	234	1.5	0	3.1	5.9	48.63	0.41	2	1.26	108.5	6.67
6	NSNF518NOE(RCR)	0	600	0	1.85	0	4.44	0	55.0	0.246	2.37	1.207	102.0	10.52
	พยากรณ์	0	30	570	1.6	2.4	7.2	0	52.41	0.71	2.38	1.204	102.07	10.51
	ทดลอง	0	30	570	1.6	2.4	7.2	0	29.4	0.59	2.08	1.13	102.3	7.13
7	MATFB522LOB	0	0	360	2.3	0	11.04	0	65.1	0.220	2.88	0.771	99.1	10.471
	พยากรณ์	0	498	102	2.2	1.9	8.1	3.2	61.54	0.283	2.88	0.909	102.13	10.47
	ทดลอง	0	498	102	2.2	1.9	8.1	3.2	59.65	0.3	2.83	1.02	98.8	8.33
8	MSKM522LOY	0	0	300.0	2.25	3.38	6.75	3.38	60.8	0.216	3.05	0.739	100.1	9.65
	พยากรณ์	0	510	90	2.3	2.8	10.4	0.7	63.55	0.35	3.05	0.864	100.5	9.67
	ทดลอง	0	510	90	2.3	2.8	10.4	0.7	57.9	0.31	2.93	0.912	99.2	8.23
9	RSNF523NOY	0	0	180.0	2.35	3.5	3.5	7.05	67.2	0.348	2.87	0.788	103.5	11.21
	พยากรณ์	24	510	66	1.85	0	7.6	3.5	63.62	0.422	2.89	0.967	103.58	11.22
	ทดลอง	24	510	66	1.85	0	7.6	3.5	64.62	0.38	2.41	0.903	100	7.32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองทั้ง 25 ผลิตภัณฑ์ (ต่อ)

ลำดับ	รุ่น	Sand A	Sand B	Sand C	%Resin	Resin A	Resin B	Resin C	Bending Strength	Bend	LOI	Thermal expansion	Melting Point	Gas
10	MICP525AFO	0	0	120	2.5	0	6	3	63.5	0.383	3.09	0.245	103.6	11.495
	พยากรณ์	0	456	144	2.85	3	8.8	5.3	62.35	0.21	3.09	0.852	102.21	10.51
	ทดลอง	0	456	144	2.85	3	8.8	5.3	76.4	0.25	2.97	1.06	100	9.82
11	MSKMT525NOP	0	60	480	2.5	0	6	3.75	72.3	0.354	3.02	0.851	100.2	10.983
	พยากรณ์	0	510	90	2	1.1	9	1.9	65.41	0.38	3.03	0.907	101.76	10.95
	ทดลอง	0	510	90	2	1.1	9	1.9	67.23	0.29	2.59	1.1	100.5	8.55
12	RSNF523LOD	0	0	330.00	2.3	1.38	11.04	1.38	68.8	0.218	2.87	0.772	101.6	11.033
	พยากรณ์	0	480	120	2	1.4	8.9	1.7	63.74	0.4	2.95	0.932	101.6	11.03
	ทดลอง	0	480	120	2	1.4	8.9	1.7	59.21	0.31	2.59	0.981	100.8	7.77
13	MSNF526HOV	180	0	240	2.5	4.5	0	0	76.4	0.123	2.94	1.110	103.5	10.129
	พยากรณ์	78	474	48	2	0.12	6.6	5.3	65.79	0.152	2.87	1.003	103.54	10.134
	ทดลอง	78	474	48	2	0.12	6.6	5.3	67.8	0.3	2.78	1.23	101.7	7.7
14	MYMH522NOR(2.2%R)	0	0	360	2.2	0	3.96	6.6	85.3	0.153	2.72	1.002	104.1	10.288
	พยากรณ์	60	264	276	2.2	1.9	4.1	7.3	64.83	0.157	2.71	1	104.1	10.265
	ทดลอง	60	264	276	2.2	1.9	4.1	7.3	69.4	0.17	2.73	1	103.2	7.81
15	MYMH525SOI	0	0	240	2.5	0	0	3	109.0	0.261	3.03	0.288	102.9	10.479
	พยากรณ์	18	510	72	2.15	1.1	8.5	3.3	65.84	0.261	3.03	0.904	102	10.476
	ทดลอง	18	510	72	2.15	1.1	8.5	3.3	70.51	0.2	2.78	1.09	103.2	8.17
16	MNIC517NLR	90	0	420.0	1.7	2.04	4.08	3.06	36.9	0.345	2.10	1.149	103.5	8.496
	พยากรณ์	36	510	54	1.83	2.7	4.1	4.3	44.99	0.42	2.1	1.152	103.5	8.628
	ทดลอง	36	510	54	1.83	2.7	4.1	4.3	46.6	0.25	2.23	1.21	103	7.01
17	MKTH517CFO	0	60	540.0	1.7	3.06	0	5.1	33.8	0.385	2.18	1.130	106.6	8.379
	พยากรณ์	24	492	84	1.75	1.3	3.2	6	46.4	0.473	2.16	1.13	106.59	8.378
	ทดลอง	24	492	84	1.75	1.3	3.2	6	43.1	0.38	2.26	1.22	103.4	6.9
18	NKKF513NOC	0	510	0	1.3	2.34	0	5.46	29.3	0.243	1.74	1.396	107.4	8.95
	พยากรณ์	86	474	40	1.15	0.12	4.6	2.2	32.42	0.93	1.742	1.364	107.33	10.05
	ทดลอง	86	474	40	1.15	0.12	4.6	2.2	22.8	0.82	1.6	1.43	103.3	5.47

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองทั้ง 25 ผลิตภัณฑ์ (ต่อ)

ลำดับ	รุ่น	Sand A	Sand B	Sand C	%Resin	Resin A	Resin B	Resin C	Bending Strength	Bend	LOI	Thermal expansion	Melting Point	Gas
19	NTFC513NOA(TFC)	0	600	0	1.35	1.6	3.7	2.8	25.6	0.616	1.78	1.347	101.6	9.73
	พยากรณ์	84	312	204	1.4	1.3	6.3	0.8	34.27	0.77	1.778	1.337	102.96	9.74
	ทดลอง	84	312	204	1.4	1.3	6.3	0.8	31	0.65	1.86	1.33	101.1	6.63
20	MATFB523PLY	0	330	240	2.3	0	2.8	0	48.3	0.224	2.61	1.194	105.7	9.473
	พยากรณ์	90	510	0	1.5	0	5.6	3.4	49.17	0.58	2.259	1.19	105.67	9.56
	ทดลอง	90	510	0	1.5	0	5.6	3.4	47.24	0.36	2.01	1.23	103	6.82
21	RSNF518NOJ	120	0	480	1.65	4.5	4.5	0	44.1	0.193	2.12	1.097	102.8	8.61
	พยากรณ์	24	510	66	2	3.1	4.6	4.3	44.62	0.236	2.118	1.101	102.76	8.75
	ทดลอง	24	510	66	2	3.1	4.6	4.3	46.21	0.24	2.151	1.2	100.2	7.76
22	RM617NOA (KPC)	0	90	420.0	1.6	0	0	9.6	43.6	0.270	2.06	1.181	107.5	9.72
	พยากรณ์	24	450	126	1.5	0.9	3.4	4.7	43.75	0.54	2.143	1.169	107.49	9.71
	ทดลอง	24	450	126	1.5	0.9	3.4	4.7	41.2	0.37	2.02	1.27	101.7	6.45
23	RM617NOA	0	0	540.0	1.75	0	0	9.45	45.2	0.245	2.22	1.131	107.3	8.422
	พยากรณ์	27	495	78	1.7	1.1	3.1	6	48.3	0.366	2.22	1.127	107.01	8.4
	ทดลอง	27	495	78	1.7	1.1	3.1	6	46.1	0.27	2.24	1.24	105.4	7.08
24	NSNF515NOP(TYMW)	0	600	0	1.5	0	0	9	38.4	0.531	1.93	1.330	107.2	9.28
	พยากรณ์	78	432	90	1.5	1.1	3.2	4.8	41.57	0.622	2.01	1.256	107.2	9.266
	ทดลอง	78	432	90	1.5	1.1	3.2	4.8	39.8	0.41	2	1.32	109.8	6.39
25	MSPM615NOB	0	270	0	1.6	1.92	0	4.32	40.7	0.327	2.20	1.134	108.5	9.69
	พยากรณ์	0	396	204	1.6	1	3	5.6	41.72	0.556	2.133	1.129	108.49	9.69
	ทดลอง	0	396	204	1.6	1	3	5.6	39.3	0.46	2.13	1.24	105.2	6.84

5.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในส่วนของการวิเคราะห์ผลการทดลองจากข้อมูลที่ได้หลังจากการปรับปรุง จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) วิเคราะห์สัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินที่เปลี่ยนไปจากก่อนปรับปรุง 2) วิเคราะห์เปรียบเทียบผลหลังการปรับปรุงกับช่วงการยอมของค่าคุณสมบัติ และ 3) วิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลงได้

จากการหาสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินหลังการปรับปรุง พบว่าสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสัดส่วนการผสมใหม่ที่ได้นั้นในเบื้องต้นมีข้อสมมุติฐานว่าจะให้ค่าคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง

5.3.1 การวิเคราะห์สัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซิน

เมื่อพิจารณาสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงพบว่าส่วนใหญ่จะเลือกใช้ทราย SC เป็นหลักโดยคิดเป็น 48.6% ของทรายทั้งหมดของโรงงานที่ใช้ผลิตภายใต้ 25 ผลิตภัณฑ์ และใช้เรซิน RB และ RC เท่ากับ 26.2% และ 28.4% ตามลำดับ ซึ่งถือเป็นปริมาณส่วนใหญ่จากเรซินทั้งหมดของโรงงาน อีกทั้งยังมีการใช้ทรายและเรซินที่มีคุณสมบัติพิเศษอื่นๆ เพื่อช่วยทำให้ค่าคุณสมบัติบางชนิดอยู่ในช่วงยอมรับของโรงงาน ส่วนสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงส่วนใหญ่จะเน้นใช้ทราย SB เป็นหลักซึ่งคิดเป็น 70.86% ของปริมาณการใช้ทรายทั้งหมด และใช้เรซิน RB เป็นหลักคิดเป็น 51.3% ของการใช้ปริมาณเรซินทั้งหมด ซึ่งภายใต้ผลิตภัณฑ์ใหม่จะใช้ทรายเพียง 3 ชนิดเท่านั้นคือ SA SB และ SC และเรซิน 3 ชนิดคือ RA RB และ RC เท่านั้น ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการผสมนี้ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขคือค่าคุณสมบัติต้องการยังคงอยู่ในช่วงการยอมรับของโรงงานกรณีศึกษาและต้นทุนวัตถุดิบลดลงด้วย ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 5.3

- การเปลี่ยนแปลงทรายจะมีผลต่อค่าคุณสมบัติได้แก่ ค่าความทนแรงดัดโค้ง และค่าการขยายตัวทางความร้อนเป็นหลัก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจากทราย SC มาใช้ทราย SB เป็นหลักแทน เนื่องจากจะให้ค่าคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันแต่ทราย SB จะมีราคาต่ำกว่าทราย SC ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวคือทรายทั้ง 2 ชนิดมีค่าความกลมของเม็ดทรายที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งความกลมนี้จะส่งผลต่อพื้นที่ของผิวสัมผัสของเรซินที่จะมาเคลือบบนเม็ดทราย การที่พื้นที่ผิวสัมผัสของเม็ดทรายมีมากนั้นจะส่งผลทำให้เรซินมีโอกาสเกิดการยึดเกาะกับทรายได้มากส่งผลทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งที่ต้องการไม่

เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมาก อีกทั้งเมื่อทรายกับเรซินมีพื้นที่ในการยึดเกาะกันที่ดี ส่งผลให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าที่ดีอีกด้วย

- การเปลี่ยนแปลงเรซินจะส่งผลถึงค่าความโก่งงอ และค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ซึ่งในสูตรการผสมใหม่จะเห็นว่าปริมาณเรซินที่ใช้จะลดลง หรือเปลี่ยนมาใช้เรซินแค่ 3 ชนิดนี้เท่านั้น ซึ่งในสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงพบว่าเรซินที่ใช้ส่วนใหญ่จะใช้เรซินที่มีคุณสมบัติพิเศษและมีราคาแพงเข้าผสมในสัดส่วนการผสมด้วย ดังนั้นเพื่อการลดต้นทุนวัตถุดิบลง ผู้วิจัยจึงจำกัดชนิดของเรซินที่ใช้ให้เหลือเพียง RA RB และ RC จากการศึกษาพบว่าเรซินทั้ง 3 ชนิดนี้มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไปคือ ถ้าหากต้องการค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวให้มีค่าสูง ควรเลือกเติม RA มากกว่า RC และ RB ตามลำดับ แต่ถ้าหากต้องการค่าความโก่งงอที่ต่ำเป็นหลัก ควรเลือกเติม RA มากกว่า RC และ RB ตามลำดับ เหตุผลที่สำคัญในการเลือกเรซินที่สำคัญอีกข้อคือเรื่องของต้นทุนวัตถุดิบ เนื่องจากเรซินจะมีราคาที่สูงกว่าทรายหลายเท่า ดังนั้นการเติมเรซินมากไปอาจทำให้ต้องเสียต้นทุนวัตถุดิบไปโดยไม่จำเป็น และบางครั้งปริมาณเรซินที่มากเกินก็อาจจะไม่ได้ทำให้ค่าคุณสมบัติบางอย่างอยู่ในช่วงที่ต้องการ หรือไม่ได้ช่วยในค่าคุณสมบัติดีขึ้นกว่าเดิม
- การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์เรซินจะส่งผลกระทบโดยตรงกับค่าคุณสมบัติทุกชนิด และที่สำคัญคือคุณสมบัติแต่ละชนิดจะมีความต้องการเปอร์เซ็นต์เรซินที่แตกต่างกันไปดังนี้ หากเป็นค่าคุณสมบัติในเรื่องของค่าความทนแรงดัดโค้ง ค่าการขยายตัวทางความร้อน ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว และค่าความโก่งงอ ค่าคุณสมบัติเหล่านี้จะต้องการเปอร์เซ็นต์เรซินที่สูง ถ้าหากเป็นค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา และค่าแก๊ส จะมีความต้องการใช้เปอร์เซ็นต์เรซินที่น้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเปรียบเทียบกับช่วงการยอมรับของโรงงาน

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงกับสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง โดยใช้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%Error) เป็นตัวเปรียบเทียบ โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์กับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง และค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง โดยจะพิจารณาควบคู่ไปกับช่วงการยอมรับที่ทางโรงงานกำหนด คือถ้าหากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่ามากแต่หาก

ค่าคุณสมบัติยังอยู่ในช่วงที่โรงงานยอมรับ จะถือว่าสัดส่วนการผลิตนั้นยังสามารถนำมาผลิตใช้งานได้จริง

5.3.2.1 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความทนแรงดัดโค้ง

จากตารางที่ 5.3 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่ของค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์เปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงส่วนใหญ่เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยกว่า 10% ถ้าหากพิจารณาที่ค่าคุณสมบัติที่ได้พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันซึ่งยังอยู่ในช่วงการยอมรับ ส่วนค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง พบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีค่าความแปรปรวนมาก แต่ค่าคุณสมบัติจากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงส่วนใหญ่ยังอยู่ในช่วงที่ทางโรงงานยอมรับได้ โดยจะมีสัดส่วนการผสม 4 สูตรจาก 25 สูตร ที่มีค่าออกนอกช่วงการยอมรับได้แก่ สูตรที่ 4, 6, 14 และ 18 เนื่องจากที่สัดส่วนการผลิตก่อนปรับปรุงของทางโรงงานมีการใช้ทรายและเรซินที่มีคุณสมบัติพิเศษเป็นส่วนผสมเพื่อต้องการดึงค่าความทนแรงดัดโค้งให้ถึงค่าเป้าหมาย การใช้ทรายและเรซินอย่างละ 3 ชนิดนี้อาจเกิดข้อจำกัดในเรื่องของค่าคุณสมบัติบางประการขึ้นได้ อีกทั้งค่าคุณสมบัติที่พิจารณานั้นมีจำนวนมาก การที่จะให้ค่าคุณสมบัติทั้งหมดตรงค่าเป้าหมายอาจจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องยอมให้ค่าคุณสมบัติบางประการมีค่าที่ด้อย ซึ่งขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งานต่อไป และอาจจะมีบางสัดส่วนการผสมที่ให้ค่าความทนแรงดัดโค้งที่สูง ซึ่งถือเป็นข้อดีเนื่องจากค่าความทนแรงดัดโค้งนั้นทางโรงงานต้องการให้มีค่าสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.3.2.2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความโก่งงอ

จากตารางที่ 5.3 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่ของค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์เปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงมีค่าแตกต่างกันมาก แต่ถ้าหากพิจารณาที่ค่าคุณสมบัติที่ได้พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันซึ่งยังอยู่ในช่วงการยอมรับ ส่วนค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงมีค่าความแปรปรวนสูง เนื่องจากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงที่ได้นั้นมีการใช้เปอร์เซ็นต์เรซินที่ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรการผสมเก่า ทำให้ค่าความโก่งงอจากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง ซึ่งถือเป็นผลที่ดีเนื่องจากต้นทุนวัตถุดิบในส่วนของเรซินจะลดลงมาก แต่การลดลงยังคงทำให้ค่าคุณสมบัติที่ต้องการอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และทำให้บางสัดส่วนการผสมมีค่าความโก่งงอที่น้อยลงอีกด้วย แต่ยังมีสัดส่วนการผสมจำนวน 4 สูตรจาก 25 สูตร ที่ให้ค่า

ความโก่งงอที่มากกว่าช่วงการยอมรับได้แก่ สูตรที่ 4, 5, 6 และ 18 เนื่องจากถ้าปริมาณเรซินที่ใช้น้อยเกินไป จะทำให้เฮกซามีนถูกเติมลงไปน้อย เนื่องจากปริมาณการเติมเฮกซามีนจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์เรซิน ส่งผลให้ทรายกับเรซินเกาะกันไม่แข็งแรง ส่งผลให้ค่าความโก่งงอมีค่ามากขึ้นนั่นเอง ซึ่งจะส่งผลต่อการขึ้นรูปเนื่องจะทำให้แบบหล่อแตกหักได้ง่าย ซึ่งจากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงนั้นได้ใช้เรซินที่ทำให้ค่าความโก่งงอมีค่าน้อยหรือเลือกใช้เรซินชนิดพิเศษแทน ซึ่งจะมีราคาที่สูงมากเมื่อเทียบกับเรซินทั้ง 3 ชนิดที่ทำการศึกษา

5.3.2.3 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

จากตารางที่ 5.3 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่ของค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์เปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง และค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงมีค่าน้อยกว่า 5% ซึ่งหมายถึงค่าพยากรณ์และค่าการทดลองเมื่อเทียบกับสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นสัดส่วนการผสมที่ 3, 4, 5, 9, 11, 16, 18 และ 20 ที่จะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่า 5% แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าพยากรณ์และค่าทดลองกับช่วงการยอมรับ พบว่าค่าทั้งหมดยังอยู่ในช่วงการยอมรับ ซึ่งถือว่าสามารถนำสัดส่วนการผสมที่ได้ไปใช้ต่อได้ อีกทั้งค่าคุณสมบัติที่ได้ยังถือว่าตรงกับความต้องการของโรงงาน เนื่องจากค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของเรซินดังนั้นเมื่อเรซินถูกเติมน้อยลง จึงส่งผลให้ค่าคุณสมบัติชนิดนี้ลดลงด้วย อีกทั้งยังเป็นการประหยัดต้นทุนวัตถุดิบในส่วนของเรซินอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.3.2.4 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการขยายตัวทางความร้อน

จากตารางที่ 5.3 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่ของค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์เปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสูตรการผสมหลังปรับปรุงมีค่าแตกต่างมัน แต่ถ้าหากพิจารณาที่ค่าคุณสมบัติพบว่าค่าพยากรณ์กับค่าที่ได้จริง จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ส่วนค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงมีค่าสูงมาก เนื่องจากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงที่ได้นั้นมีการใช้เปอร์เซ็นต์เรซินที่ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรการผสมเก่า ทำให้ค่าการขยายตัวทางความร้อนจากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง เนื่องจากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงเกือบทั้งหมดมีการใช้เปอร์เซ็นต์เรซินที่น้อยลง ทำให้ปริมาณการเติมเรซินน้อยลงตาม สิ่งที่ตามมา

คือปริมาณการเติมเฮกซามีนน้อยลงด้วย ส่งผลให้การจับตัวของทรายและเรซินในสัดส่วนการผสมที่ใช้เรซินน้อยมากจะเกิดการยึดเกาะไม่ดี

5.3.2.5 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

จากตารางที่ 5.3 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่ของค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์เปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง และค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% ในทุกสัดส่วนการผสม ซึ่งหมายถึงค่าคุณสมบัติทั้งหมดเข้าใกล้ค่าเป้าหมายและอยู่ในช่วงการยอมรับของโรงงาน พิจารณาที่สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงพบว่าการเติมปริมาณเรซินจะมากกว่าเมื่อเทียบกับสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง แต่จากการทดลองโดยใช้สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง พบว่าค่าคุณสมบัติที่ได้ใกล้กับค่าเก่ามาก ดังนั้นการใส่ปริมาณเรซินที่ลดลงก็ถือว่าเพียงพอแล้วที่จะทำให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวอยู่ในช่วงการยอมรับ

5.3.2.6 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าแก๊ส

จากตารางที่ 5.3 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่ของค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์เปรียบเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง และค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงเทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงมีค่าสูงมาก ถ้าพิจารณาจากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง จะเห็นได้ว่ามีการเติมปริมาณเรซินที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง ปริมาณเรซินที่สูงนี้เป็นเป็นสาเหตุทำให้ค่าแก๊สมีค่าที่สูงมาก ดังนั้นเมื่อสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงใช้ปริมาณเรซินที่น้อยลง จึงทำให้ค่าแก๊สมีค่าลดลงด้วย จากผลการทดลองเมื่อเทียบกับช่วงการยอมรับของโรงงานจะเห็นได้ว่า ค่าแก๊สจากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงนั้นมีค่าต่ำกว่าช่วงการยอมรับเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้ค่าแก๊สที่ต่ำลงถือว่าเป็นผลดีสำหรับชิ้นงาน เนื่องจากทรายเคลือบเรซินที่ได้จากสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงเมื่อนำไปทำเป็นแบบหล่อ จะทำให้ชิ้นงานเกิดรูพรุนที่น้อย ส่งผลให้ชิ้นงานมีผิวเรียบอีกด้วย

ทั้งนี้หากพิจารณาค่าคุณสมบัติที่ได้จากค่าพยากรณ์เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง พบว่าค่าของคุณสมบัติบางตัวของค่าพยากรณ์จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าคุณสมบัติเก่า ในขณะเดียวกันค่าคุณสมบัติบางตัวของค่าพยากรณ์กลับมีค่าที่แตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับคุณสมบัติเก่า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก คุณสมบัติทุกตัวที่ได้จากการพยากรณ์ไม่มีค่าความพึงพอใจเท่ากับ 1 เป็นผลมาจากสัดส่วนการผสมในแต่ละสูตรไม่สามารถให้ค่าคุณสมบัติทุกตัวเข้าใกล้ค่าเป้าหมาย อีกส่วนหนึ่งเป็นผลมากจากผู้วิจัยได้ทำการปัดตำแหน่งทศนิยมของสัดส่วนการผลิตในหน่วยเปอร์เซ็นต์ให้เป็นทศนิยมสองตำแหน่งก่อนที่จะนำมาแปลงค่าให้อยู่ในหน่วยกิโลกรัม ทำให้เมื่อนำไปทำการทดลองค่าคุณสมบัติจึงมีความคลาดเคลื่อนมากนั่นเอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติ

ลำดับ	รุ่น	ประเภทสัดส่วนการผสม	Sand A (kg)	Sand B (kg)	Sand C (kg)	%Resin	Amount of Resin (kg)	Resin A (kg)	Resin B (kg)	Resin C (kg)	Cost SA (Bath)	Cost SB (Bath)	Cost SC (Bath)	Cost RA (Bath)	Cost RB (Bath)	Cost RC (Bath)	Total Cost (Bath)	Cost Reduction (Bath)	Bending Strength (kgf/cm^2)	Bend (mm.)	LOI (%)	Thermal expansion (%)	Melting Point (°C)	Gas (ml/g)
1	MATFB520LFN	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			48-57	0-0.4	2.35-2.75	0.7-1.1	98-105	9.5-11.5
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	0	240	2.1	12.6	0	10.08	2.52	-	-	734	-	762	157	3,467	1,199	51.3	0.238	2.60	0.840	100.4	9.96
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	0	492	108	2.25	13.5	2.82	7.32	3.36	-	984	330	192	553	209	2,268		53.34	0.39	2.6	0.93	101.84	9.94
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	0	492	108	2.25	13.5	2.82	7.32	3.36	-	984	330	192	553	209	2,268		59.55	0.3	2.71	1.05	100.8	8.64
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	11.64	23.08	4.23	12.90	1.02	13.08
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	16.08	26.05	4.23	25.00	0.37	13.25
2	MSKM520NOK	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			55-62	0-0.3	2.4-2.7	0.8-1.15	104-110	8.5-10.5
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	0	540.0	2	12	0	0	8.4	-	-	1,652	-	-	522	2,584	192	59.5	0.215	2.51	0.961	106.9	10.51
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	0	276	324	2.1	12.6	2.2	3.9	6.5	-	552	991	150	295	404	2,392		56.53	0.22	2.51	0.97	104.95	10.44
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	0	276	324	2.1	12.6	2.2	3.9	6.5	-	552	991	150	295	404	2,392		57.24	0.22	2.6	1.04	104.2	9.51
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	1.26	0.00	3.59	7.22	0.71	8.91
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	3.83	2.33	3.59	8.22	2.53	9.51
3	MNIC527HOK	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			55-65	0-0.3	2.9-3.4	0.7-1.3	105-115	10-12
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	0	600	2.7	16.2	0	0	0	-	-	1,836	-	-	-	2,909	461	58.2	0.356	3.18	0.930	112.2	10.757
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	0	162	438	1.95	11.7	1.2	3.7	6.8	-	324	1,340	82	280	423	2,448		58.18	0.362	2.6	0.97	106.1	10.69
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	0	162	438	1.95	11.7	1.2	3.7	6.8	-	324	1,340	82	280	423	2,448		57.26	0.23	2.51	1.04	105	8.23
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	1.58	36.46	3.46	7.22	1.04	23.01
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	1.56	35.39	21.17	11.83	6.44	23.49

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติ (ต่อ)

ลำดับ	รุ่น	ประเภทสัดส่วนการผสม	Sand A (kg)	Sand B (kg)	Sand C (kg)	%Resin	Amount of Resin (kg)	Resin A (kg)	Resin B (kg)	Resin C (kg)	Cost SA (Bath)	Cost SB (Bath)	Cost SC (Bath)	Cost RA (Bath)	Cost RB (Bath)	Cost RC (Bath)	Total Cost (Bath)	Cost Reduction (Bath)	Bending Strength (kgf/cm^2)	Bend (mm.)	LOI (%)	Thermal expansion (%)	Melting Point (°C)	Gas (ml/g)
4	RATFB525HBI(SNF)	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			74-80	**0-0.15**	**2.9-3.3**	**0.6-0.9**	**102-110**	**8-10**
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	0	300.0	2.6	15.6	0	3.12	0	-	-	918	-	236	-	3,319	1,146	56.6	0.341	3.12	0.701	107.9	9.86
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	0	510	90	2.1	12.6	1.7	6.3	4.6	-	1,020	275	116	476	286	2,173		56.66	0.353	2.64	0.96	103.22	9.9
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	0	510	90	2.1	12.6	1.7	6.3	4.6	-	1,020	275	116	476	286	2,173		55.7	0.33	2.65	0.85	104.3	7.23
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	1.69	6.52	0.38	11.46	1.05	26.97
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	1.50	3.23	14.98	21.26	3.29	26.67
5	MAIF624HOC	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			45-58	**0-0.17**	**2.8-3.1**	**0.2-0.4**	**105-115**	**7-10**
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	150	360	2.45	14.7	0	0	0	-	300	1,102	-	-	-	2,651	602	53.8	0.466	2.99	0.979	111.9	10.3
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	0	366	234	1.5	9	0	3.1	5.9	-	732	716	-	234	367	2,049		45.38	0.66	2.29	1.11	110.2	10.3
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	0	366	234	1.5	9	0	3.1	5.9	-	732	716	-	234	367	2,049		48.63	0.41	2	1.26	108.5	6.67
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	7.16	37.88	12.66	13.51	1.54	35.24
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	9.58	12.02	33.11	28.70	3.06	35.24
6	NSNF518NOE(RCR)	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			50-60	**0-0.4**	**2.2-2.4**	**1.1-1.4**	**95-105**	**7-10**
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	600	0	1.85	11.1	0	4.44	0	-	1,200	-	-	336	-	2,172	(340)	55.0	0.246	2.37	1.207	102.0	10.52
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	0	30	570	1.6	9.6	2.4	7.2	0	-	60	1,744	163	544	-	2,512		52.41	0.71	2.38	1.204	102.07	10.51
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	0	30	570	1.6	9.6	2.4	7.2	0	-	60	1,744	163	544	-	2,512		29.4	0.59	2.08	1.13	102.3	7.13
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	43.90	16.90	12.61	6.15	0.23	32.16
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	46.51	139.84	12.31	6.38	0.27	32.22

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติ (ต่อ)

ลำดับ	รุ่น	ประเภทสัดส่วนการผสม	Sand A (kg)	Sand B (kg)	Sand C (kg)	%Resin	Amount of Resin (kg)	Resin A (kg)	Resin B (kg)	Resin C (kg)	Cost SA (Bath)	Cost SB (Bath)	Cost SC (Bath)	Cost RA (Bath)	Cost RB (Bath)	Cost RC (Bath)	Total Cost (Bath)	Cost Reduction (Bath)	Bending Strength (kgf/cm^2)	Bend (mm.)	LOI (%)	Thermal expansion (%)	Melting Point (°C)	Gas (ml/g)
7	MATFB522LOB	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			60-67	**0-0.4**	**2.7-3.0**	**0.5-1.0**	**96-102**	**10.2-11**
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	0	360	2.3	13.8	0	11.04	0	-	-	1,102	-	834	-	3,339	1,091	65.1	0.220	2.88	0.771	99.1	10.471
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	0	498	102	2.2	13.2	1.9	8.1	3.2	-	996	312	129	612	199	2,248		61.54	0.283	2.88	0.909	102.13	10.47
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	0	498	102	2.2	13.2	1.9	8.1	3.2	-	996	312	129	612	199	2,248		59.65	0.3	2.83	1.02	98.8	8.33
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	3.07	6.01	1.74	12.21	3.26	20.44
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	8.43	36.36	1.74	32.30	0.31	20.45
8	MSKM522LOY	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			55-65	**0-0.4**	**2.6-3.5**	**0.5-0.9**	**95-104**	**8-10**
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	0	300.0	2.25	13.5	3.38	6.75	3.38	-	-	918	230	510	210	3,255	940	60.8	0.216	3.05	0.739	100.1	9.65
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	0	510	90	2.3	13.8	2.8	10.4	0.7	-	1,020	275	190	786	43	2,315		63.55	0.35	3.05	0.864	100.5	9.67
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	0	510	90	2.3	13.8	2.8	10.4	0.7	-	1,020	275	190	786	43	2,315		57.9	0.31	2.93	0.912	99.2	8.23
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	8.89	11.43	3.93	5.56	1.29	14.89
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	4.77	43.52	3.93	23.41	0.88	14.72
9	RSNF523NOY	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			65-73	**0-0.4**	**2.7-3.0**	**0.5-0.9**	**99-106**	**8.5-11**
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	0	180.0	2.35	14.1	3.5	3.5	7.05	-	-	551	238	264	438	3,493	1,330	67.2	0.348	2.87	0.788	103.5	11.21
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	24	510	66	1.85	11.1	0	7.6	3.5	149	1,020	202	-	574	217	2,163		63.62	0.422	2.89	0.967	103.58	11.22
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	24	510	66	1.85	11.1	0	7.6	3.5	149	1,020	202	-	574	217	2,163		64.62	0.38	2.41	0.903	100	7.32
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	1.57	9.95	16.61	6.62	3.46	34.76
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	3.90	9.20	16.03	14.59	3.34	34.70

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติ (ต่อ)

ลำดับ	รุ่น	ประเภทสัดส่วนการผสม	Sand A (kg)	Sand B (kg)	Sand C (kg)	%Resin	Amount of Resin (kg)	Resin A (kg)	Resin B (kg)	Resin C (kg)	Cost SA (Bath)	Cost SB (Bath)	Cost SC (Bath)	Cost RA (Bath)	Cost RB (Bath)	Cost RC (Bath)	Total Cost (Bath)	Cost Reduction (Bath)	Bending Strength (kgf/cm^2)	Bend (mm.)	LOI (%)	Thermal expansion (%)	Melting Point (°C)	Gas (ml/g)
10	MICP525AFO	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			60-68	0-0.5	2.85-3.25	0-0.35	100-110	11-12.5
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	0	120	2.5	15	0	6	3	-	-	367	-	453	186	3,920	1,369	63.5	0.383	3.09	0.245	103.6	11.495
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	0	456	144	2.85	17.1	3	8.8	5.3	-	912	441	204	665	329	2,551		62.35	0.21	3.09	0.852	102.21	10.51
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	0	456	144	2.85	17.1	3	8.8	5.3	-	912	441	204	665	329	2,551		76.4	0.25	2.97	1.06	100	9.82
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	22.53	19.05	3.88	24.41	2.16	6.57
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	20.26	34.73	3.95	332.65	3.51	14.57
11	MSKMT525NOP	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			65-80	0-0.6	2.8-3.2	0.6-1	94-105	10.4-11.7
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	60	480	2.5	15	0	6	3.75	-	120	1,469	-	453	233	3,205	1,037	72.3	0.354	3.02	0.851	100.2	10.983
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	0	510	90	2	12	1.1	9	1.9	-	1,020	275	75	680	118	2,168		65.41	0.38	3.03	0.907	101.76	10.95
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	0	510	90	2	12	1.1	9	1.9	-	1,020	275	75	680	118	2,168		67.23	0.29	2.59	1.1	100.5	8.55
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	2.78	23.68	14.52	21.28	1.24	21.92
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	7.06	18.08	14.24	29.26	0.28	22.15
12	RSNF523LOD	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			57-69	0-0.4	2.7-3.1	0.6-1	95-105	10.4-11.7
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	0	330.00	2.3	13.8	1.38	11.04	1.38	-	-	1,010	94	834	86	3,266	1,065	68.8	0.218	2.87	0.772	101.6	11.033
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	0	480	120	2	12	1.4	8.9	1.7	-	960	367	95	673	106	2,201		63.74	0.4	2.95	0.932	101.6	11.03
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	0	480	120	2	12	1.4	8.9	1.7	-	960	367	95	673	106	2,201		59.21	0.31	2.59	0.981	100.8	7.77
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	7.11	22.50	12.20	5.26	0.79	29.56
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	13.94	42.20	9.76	27.07	0.83	29.57

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติ (ต่อ)

ลำดับ	รุ่น	ประเภทสัดส่วนการผสม	Sand A (kg)	Sand B (kg)	Sand C (kg)	%Resin	Amount of Resin (kg)	Resin A (kg)	Resin B (kg)	Resin C (kg)	Cost SA (Bath)	Cost SB (Bath)	Cost SC (Bath)	Cost RA (Bath)	Cost RB (Bath)	Cost RC (Bath)	Total Cost (Bath)	Cost Reduction (Bath)	Bending Strength (kgf/cm^2)	Bend (mm.)	LOI (%)	Thermal expansion (%)	Melting Point (°C)	Gas (ml/g)
13	MSNF526HOV	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			65-80	0-0.3	2.7-3.2	0.9-1.25	95-110	8.4-11.7
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	180	0	240	2.5	15	4.5	0	0	1,116	-	734	306	-	-	3,361	946	76.4	0.123	2.94	1.110	103.5	10.129
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	78	474	48	2	12	0.12	6.6	5.3	484	948	147	8	499	329	2,415		65.79	0.152	2.87	1.003	103.54	10.134
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	78	474	48	2	12	0.12	6.6	5.3	484	948	147	8	499	329	2,415		67.8	0.3	2.78	1.23	101.7	7.7
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	3.06	97.37	3.14	22.63	1.78	24.02
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	11.24	143.90	5.35	10.86	1.75	23.98
14	MYMH522NOR(2.2%R)	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			75-88	0-0.2	2.6-2.8	0.8-1.1	100-107	9.6-10.8
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	0	360	2.2	13.2	0	3.96	6.6	-	-	1,102	-	299	410	2,831	194	85.3	0.153	2.72	1.002	104.1	10.288
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	60	264	276	2.2	13.2	1.9	4.1	7.3	372	528	845	129	310	454	2,637		64.83	0.157	2.71	1	104.1	10.265
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	60	264	276	2.2	13.2	1.9	4.1	7.3	372	528	845	129	310	454	2,637		69.4	0.17	2.73	1	103.2	7.81
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	7.05	8.28	0.74	0.00	0.86	23.92
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	18.60	11.48	0.22	0.20	0.83	24.09
15	MYMH525SOI	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			70-90	0-0.35	2.8-3.2	0.2-1.0	101-108	9-12
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	0	240	2.5	15	0	0	3	-	-	734	-	-	186	8,768	6,494	109.0	0.261	3.03	0.288	102.9	10.479
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	18	510	72	2.15	12.9	1.1	8.5	3.3	112	1,020	220	75	642	205	2,274		65.84	0.261	3.03	0.904	102	10.476
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	18	510	72	2.15	12.9	1.1	8.5	3.3	112	1,020	220	75	642	205	2,274		70.51	0.2	2.78	1.09	103.2	8.17
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	7.09	23.37	8.25	20.58	1.18	22.01
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	35.30	23.37	8.22	278.47	0.34	22.03

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติ (ต่อ)

ลำดับ	รุ่น	ประเภทสัดส่วนการผสม	Sand A (kg)	Sand B (kg)	Sand C (kg)	%Resin	Amount of Resin (kg)	Resin A (kg)	Resin B (kg)	Resin C (kg)	Cost SA (Bath)	Cost SB (Bath)	Cost SC (Bath)	Cost RA (Bath)	Cost RB (Bath)	Cost RC (Bath)	Total Cost (Bath)	Cost Reduction (Bath)	Bending Strength (kgf/cm^2)	Bend (mm.)	LOI (%)	Thermal expansion (%)	Melting Point (°C)	Gas (ml/g)
16	MNIC517NLR	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			34-48	**0-0.8**	**2.0-2.3**	**0.8-1.3**	**100-106**	**7.4-9.4**
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	90	0	420.0	1.7	10.2	2.04	4.08	3.06	558	-	1,285	139	308	190	3,027	858	36.9	0.345	2.10	1.149	103.5	8.496
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	36	510	54	1.83	11	2.7	4.1	4.3	223	1,020	165	184	310	267	2,169		44.99	0.42	2.1	1.152	103.5	8.628
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	36	510	54	1.83	11	2.7	4.1	4.3	223	1,020	165	184	310	267	2,169		46.6	0.25	2.23	1.21	103	7.01
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	3.58	40.48	6.19	5.03	0.48	18.75
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	26.32	27.54	6.19	5.31	0.46	17.49
17	MKTH517CFO	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			33-44	**0-0.6**	**2.0-2.3**	**0.8-1.35**	**103-109**	**7.4-9.4**
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	60	540.0	1.7	10.2	3.06	0	5.1	-	120	1,652	208	-	317	2,426	333	33.8	0.385	2.18	1.130	106.6	8.379
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	24	492	84	1.75	10.5	1.3	3.2	6	149	984	257	88	242	373	2,093		46.4	0.473	2.16	1.13	106.59	8.378
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	24	492	84	1.75	10.5	1.3	3.2	6	149	984	257	88	242	373	2,093		43.1	0.38	2.26	1.22	103.4	6.9
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	7.11	19.66	4.63	7.96	2.99	17.64
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	27.48	1.30	3.57	7.96	2.98	17.65
18	NKKF513NOC	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			28-35	**0-0.4**	**1.6-1.9**	**1.1-1.7**	**100-110**	**7.5-10.5**
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	510	0	1.3	7.8	2.34	0	5.46	-	1,020	-	159	-	339	1,902	(194)	29.3	0.243	1.74	1.396	107.4	8.95
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	86	474	40	1.15	6.9	0.12	4.6	2.2	533	948	122	8	348	137	2,096		32.42	0.93	1.742	1.364	107.33	10.05
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	86	474	40	1.15	6.9	0.12	4.6	2.2	533	948	122	8	348	137	2,096		22.8	0.82	1.6	1.43	103.3	5.47
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	29.67	11.83	8.15	4.84	3.75	45.57
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	22.24	237.45	7.89	2.44	3.85	38.88

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติ (ต่อ)

ลำดับ	รุ่น	ประเภทสัดส่วนการผสม	Sand A (kg)	Sand B (kg)	Sand C (kg)	%Resin	Amount of Resin (kg)	Resin A (kg)	Resin B (kg)	Resin C (kg)	Cost SA (Bath)	Cost SB (Bath)	Cost SC (Bath)	Cost RA (Bath)	Cost RB (Bath)	Cost RC (Bath)	Total Cost (Bath)	Cost Reduction (Bath)	Bending Strength (kgf/cm^2)	Bend (mm.)	LOI (%)	Thermal expansion (%)	Melting Point (°C)	Gas (ml/g)
19	NTFC513NOA(TFC)	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			22-30	**0-0.8**	**1.6-1.8**	**1.0-1.6**	**95-105**	**8-10.5**
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	600	0	1.35	8.1	1.6	3.7	2.8	-	1,200	-	109	280	174	1,762	(621)	25.6	0.616	1.78	1.347	101.6	9.73
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	84	312	204	1.4	8.4	1.3	6.3	0.8	521	624	624	88	476	50	2,383		34.27	0.77	1.778	1.337	102.96	9.74
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	84	312	204	1.4	8.4	1.3	6.3	0.8	521	624	624	88	476	50	2,383		31	0.65	1.86	1.33	101.1	6.63
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากการพยากรณ์ (%)																	9.54	15.58	4.61	0.52	1.81	31.93
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	21.28	5.52	4.67	1.26	0.46	31.86
20	MATFB523PLY	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			45-55	**0-0.6**	**2.4-2.6**	**0.8-1.3**	**101-108**	**8.5-10**
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	330	240	2.3	13.8	0	2.8	0	-	660	734	-	212	-	2,606	394	48.3	0.224	2.61	1.194	105.7	9.473
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	90	510	0	1.5	9	0	5.6	3.4	558	1,020	-	-	423	211	2,212		49.17	0.58	2.259	1.19	105.67	9.56
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	90	510	0	1.5	9	0	5.6	3.4	558	1,020	-	-	423	211	2,212		47.24	0.36	2.01	1.23	103	6.82
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	3.93	37.93	11.02	3.36	2.53	28.66
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	2.13	60.71	22.99	3.02	2.53	28.01
21	RSNF518NOJ	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			38-46	**0-0.3**	**2.0-2.25**	**0.7-1.2**	**99-105**	**8.5-10**
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	120	0	480	1.65	9.9	4.5	4.5	0	744	-	1,469	306	340	-	2,964	768	44.1	0.193	2.12	1.097	102.8	8.61
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	24	510	66	2	12	3.1	4.6	4.3	149	1,020	202	211	348	267	2,196		44.62	0.236	2.118	1.101	102.76	8.75
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	24	510	66	2	12	3.1	4.6	4.3	149	1,020	202	211	348	267	2,196		46.21	0.24	2.151	1.2	100.2	7.76
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	3.56	1.69	1.56	8.99	2.49	11.31
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	4.69	24.35	1.46	9.39	2.49	9.87

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติ (ต่อ)

ลำดับ	รุ่น	ประเภทสัดส่วนการผสม	Sand A (kg)	Sand B (kg)	Sand C (kg)	%Resin	Amount of Resin (kg)	Resin A (kg)	Resin B (kg)	Resin C (kg)	Cost SA (Bath)	Cost SB (Bath)	Cost SC (Bath)	Cost RA (Bath)	Cost RB (Bath)	Cost RC (Bath)	Total Cost (Bath)	Cost Reduction (Bath)	Bending Strength (kgf/cm^2)	Bend (mm.)	LOI (%)	Thermal expansion (%)	Melting Point (°C)	Gas (ml/g)
22	RM617NOA (KPC)	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			35-42	0-0.5	2.0-2.3	0.8-1.25	103-110	7.5-9.0
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	90	420.0	1.6	9.6	0	0	9.6	-	180	1,285	-	-	597	2,344	299	43.6	0.270	2.06	1.181	107.5	9.72
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	24	450	126	1.5	9	0.9	3.4	4.7	149	900	386	61	257	292	2,045		43.75	0.54	2.143	1.169	107.49	9.71
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	24	450	126	1.5	9	0.9	3.4	4.7	149	900	386	61	257	292	2,045		41.2	0.37	2.02	1.27	101.7	6.45
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	5.83	31.48	5.74	8.64	5.39	33.57
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	5.40	37.04	1.85	7.54	5.43	33.64
23	RM617NOA	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			40-48	0-0.4	2.1-2.4	0.8-1.2	103-110	7.5-9.0
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	0	540.0	1.75	10.5	0	0	9.45	-	-	1,652	-	-	587	2,509	431	45.2	0.245	2.22	1.131	107.3	8.422
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	27	495	78	1.7	10.2	1.1	3.1	6	167	990	239	75	234	373	2,078		48.3	0.366	2.22	1.127	107.01	8.4
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	27	495	78	1.7	10.2	1.1	3.1	6	167	990	239	75	234	373	2,078		46.1	0.27	2.24	1.24	105.4	7.08
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	4.55	26.23	0.90	10.03	1.50	15.71
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	2.04	10.20	0.90	9.64	1.72	15.93
24	NSNF515NOP(TYMW)	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			36-43	0-0.5	1.75-2.0	1.0-1.65	102-112	7-8.5
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	600	0	1.5	9	0	0	9	-	1,200	-	-	-	559	1,759	(479)	38.4	0.531	1.93	1.330	107.2	9.28
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	78	432	90	1.5	9	1.1	3.2	4.8	484	864	275	75	242	298	2,238		41.57	0.622	2.01	1.256	107.2	9.266
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	78	432	90	1.5	9	1.1	3.2	4.8	484	864	275	75	242	298	2,238		39.8	0.41	2	1.32	109.8	6.39
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	4.26	34.08	0.50	5.10	2.43	31.04
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	3.55	22.79	3.84	0.75	2.46	31.14
25	MSPM615NOB	Spec																	Max	Min	Min	Min	Max	Min
																			30-40	0-0.5	1.8-2.1	0.9-1.5	102-112	8.5-10
		สัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง	0	270	0	1.6	9.6	1.92	0	4.32	-	540	-	131	-	268	2,160	101	40.7	0.327	2.20	1.134	108.5	9.69
		สัดส่วนการผสมจากการพยากรณ์	0	396	204	1.6	9.6	1	3	5.6	-	792	624	68	227	348	2,059		41.72	0.556	2.133	1.129	108.49	9.69
		สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง	0	396	204	1.6	9.6	1	3	5.6	-	792	624	68	227	348	2,059		39.3	0.46	2.13	1.24	105.2	6.84
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	5.80	17.27	0.14	9.83	3.03	29.41
		เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมใหม่เทียบกับค่าคุณสมบัติที่ได้จากสัดส่วนการผสมเก่า (%)																	3.46	40.67	3.14	9.35	3.05	29.41

5.3.3 การวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบระหว่างสูตรการผสมเก่ากับสูตรการผสมใหม่

ต้นทุนวัตถุดิบสำหรับการผลิตถือเป็นอีกเรื่องที่สำคัญ เนื่องจากถ้าโรงงานใช้ต้นทุนในการผลิตที่สูง อาจส่งทำให้กำไรลดน้อยลง หรือบางครั้งอาจจะต้องขาดทุน ดังนั้นต้นทุนการผลิตจึงเป็นอีกเรื่องที่สำคัญที่หลายๆ โรงงานให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก พร้อมทั้งยังหาวิธีที่จะลดต้นทุนการบริษัทให้กับโรงงาน แต่ยังคงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในช่วงการยอมรับของโรงงาน และให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจต่อสินค้าอย่างมากที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญอีกข้อคือการลดต้นทุนวัตถุดิบ ซึ่งจากการทดลองพบว่าสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบลงได้ 21 ผลิตภัณฑ์ จากสูตรการผสมที่เลือกมาทั้งหมด 25 สูตรการผสม ซึ่งการคิดต้นทุนวัตถุดิบผู้วิจัยจะทำการปรับสัดส่วนการผสมจาก 15 กิโลกรัม ในอยู่ในน้ำหนักการผลิตจริงคือ 600 กิโลกรัม จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบราคาต้นทุนวัตถุดิบ โดยจะคิดต้นทุนวัตถุดิบเฉพาะทรายและเรซินเท่านั้น ซึ่งราคาทรายและเรซินจะแสดงดังตารางที่ 5.4 และตารางการเปรียบเทียบราคาจะแสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.4 ราคาทรายสำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซิน

ชนิดทราย	SA	SB	SC
ราคา (บาท/กก.)	6.2	2	3.06

ตารางที่ 5.5 ราคาเรซินสำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซิน

ชนิดเรซิน	RA	RB	RC
ราคา (บาท/กก.)	68	75.57	62.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.6 ต้นทุนวัตถุดิบระหว่างสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงเทียบกับสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง (คิดในปริมาณ 600 กิโลกรัม)

ลำดับ	รุ่น	Sand A (kg)	Sand B (kg)	Sand C (kg)	Resin A (kg)	Resin B (kg)	Resin C (kg)	Cost SA (baht)	Cost SB (baht)	Cost SC (baht)	Cost RA (baht)	Cost RB (baht)	Cost RC (baht)	Other Costs (baht)		Total Cost (baht)	Cost Reduction (baht)
														Sand Cost	Resin Cost		
1	สัดส่วนการผสมเก่า	0	0	240	0	10.08	2.52	-	-	734	-	762	157	1,814	-	3,467	1,199
	สัดส่วนการผสมใหม่	0	492	108	2.82	7.32	3.36	-	984	330	192	553	209	-	-	2,268	
2	สัดส่วนการผสมเก่า	0	0	540.0	0	0	8.4	-	-	1,652	-	-	522	184	226	2,584	192
	สูตรการผลิตใหม่	0	276	324	2.2	3.9	6.5	-	552	991	150	295	404	-	-	2,392	
3	สัดส่วนการผสมเก่า	0	0	600	0	0	0	-	-	1,836	-	-	-	-	1,073	2,909	461
	สูตรการผลิตใหม่	0	162	438	1.2	3.7	6.8	-	324	1,340	82	280	423	-	-	2,448	
4	สัดส่วนการผสมเก่า	0	0	300.0	0	3.12	0	-	-	918	-	236	-	1,498	668	3,319	1,146
	สูตรการผลิตใหม่	0	510	90	1.7	6.3	4.6	-	1,020	275	116	476	286	-	-	2,173	
5	สัดส่วนการผสมเก่า	0	150	360	0	0	0	-	300	1,102	-	-	-	275	974	2,651	602
	สูตรการผลิตใหม่	0	366	234	0	3.1	5.9	-	732	716	-	234	367	-	-	2,049	
6	สัดส่วนการผสมเก่า	0	600	0	0	4.44	0	-	1,200	-	-	336	-	-	636	2,172	-340
	สูตรการผลิตใหม่	0	30	570	2.4	7.2	0	-	60	1,744	163	544	-	-	-	2,512	
7	สัดส่วนการผสมเก่า	0	0	360	0	11.04	0	-	-	1,102	-	834	-	1,195	208	3,339	1,091
	สูตรการผลิตใหม่	0	498	102	1.9	8.1	3.2	-	996	312	129	612	199	-	-	2,248	
8	สัดส่วนการผสมเก่า	0	0	300.0	3.38	6.75	3.38	-	-	918	230	510	210	1,388	-	3,256	940
	สูตรการผลิตใหม่	0	510	90	2.8	10.4	0.7	-	1,020	275	190	786	43	-	-	2,315	
9	สัดส่วนการผสมเก่า	0	0	180.0	3.5	3.5	7.05	-	-	551	239	267	438	1,998	-	3,493	1,330
	สูตรการผลิตใหม่	24	510	66	0	7.6	3.5	149	1,020	202	-	574	217	-	-	2,163	
10	สัดส่วนการผสมเก่า	0	0	120	0	6	3	-	-	367	-	454	186	2,304	608	3,920	1,369
	สูตรการผลิตใหม่	0	456	144	3	8.8	5.3	-	912	441	204	665	329	-	-	2,551	

ตารางที่ 5.6 ต้นทุนวัตถุดิบระหว่างสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงเทียบกับสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง (คิดในปริมาณ 600 กิโลกรัม) (ต่อ)

ลำดับ	รุ่น	Sand A (kg)	Sand B (kg)	Sand C (kg)	Resin A (kg)	Resin B (kg)	Resin C (kg)	Cost SA (baht)	Cost SB (baht)	Cost SC (baht)	Cost RA (baht)	Cost RB (baht)	Cost RC (baht)	Other Costs (baht)		Total Cost (baht)	Cost Reduction (baht)
														Sand Cost	Resin Cost		
11	สัดส่วนการผสมเก่า	0	60	480	0	6	3.75	-	120	1,469	-	453	233	184	746	3,205	1,037
	สูตรการผลิตใหม่	0	510	90	1.1	9	1.9	-	1,020	275	75	680	118	-	-	2,168	
12	สัดส่วนการผสมเก่า	0	0	330.00	1.38	11.04	1.38	-	-	1,010	94	834	86	1,242	-	3,266	1,065
	สูตรการผลิตใหม่	0	480	120	1.4	8.9	1.7	-	960	367	95	673	106	-	-	2,201	
13	สัดส่วนการผสมเก่า	180	0	240	4.5	0	0	1,116	-	734	306	-	-	565	640	3,361	946
	สูตรการผลิตใหม่	78	474	48	0.12	6.6	5.3	484	948	147	8	499	329	-	-	2,415	
14	สัดส่วนการผสมเก่า	0	0	360	0	3.96	6.6	-	-	1,102	-	299	410	854	165	2,831	194
	สูตรการผลิตใหม่	60	264	276	1.9	4.1	7.3	372	528	845	129	310	454	-	-	2,637	
15	สัดส่วนการผสมเก่า	0	0	240	0	0	3	-	-	734	-	-	186	7,093	755	8,768	6,494
	สูตรการผลิตใหม่	18	510	72	1.1	8.5	3.3	112	1,020	220	75	642	205	-	-	2,274	
16	สัดส่วนการผสมเก่า	90	0	420.0	2.04	4.08	3.06	558	-	1,285	139	308	190	432	114	3,027	858
	สูตรการผลิตใหม่	36	510	54	2.7	4.1	4.3	223	1,020	165	184	310	267	-	-	2,169	
17	สัดส่วนการผสมเก่า	0	60	540.0	3.06	0	5.1	-	120	1,652	208	-	317	-	129	2,426	333
	สูตรการผลิตใหม่	24	492	84	1.3	3.2	6	149	984	257	88	242	373	-	-	2,093	
18	สัดส่วนการผสมเก่า	0	510	0	2.34	0	5.46	-	1,020	-	159	-	339	384	-	1,902	-194
	สูตรการผลิตใหม่	86	474	40	0.12	4.6	2.2	533	948	122	8	348	137	-	-	2,096	
19	สัดส่วนการผสมเก่า	0	600	0	1.6	3.7	2.8	-	1,200	-	109	280	174	-	-	1,762	-621
	สูตรการผลิตใหม่	84	312	204	1.3	6.3	0.8	521	624	624	88	476	50	-	-	2,383	
20	สัดส่วนการผสมเก่า	0	330	240	0	2.8	0	-	660	734	-	212	-	92	908	2,606	394
	สูตรการผลิตใหม่	90	510	0	0	5.6	3.4	558	1,020	-	-	423	211	-	-	2,212	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.6 ต้นทุนวัตถุดิบระหว่างสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงเทียบกับสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง (คิดในปริมาณ 600 กิโลกรัม) (ต่อ)

ลำดับ	รุ่น	Sand A (kg)	Sand B (kg)	Sand C (kg)	Resin A (kg)	Resin B (kg)	Resin C (kg)	Cost SA (baht)	Cost SB (baht)	Cost SC (baht)	Cost RA (baht)	Cost RB (baht)	Cost RC (baht)	Other Costs (baht)		Total Cost (baht)	Cost Reduction (baht)
														Sand Cost	Resin Cost		
21	สัดส่วนการผสมเก่า	120	0	480	4.5	4.5	0	744	-	1,469	302	338	-	-	111	2,964	768
	สูตรการผลิตใหม่	24	510	66	3.1	4.6	4.3	149	1,020	202	211	348	267	-	-	2,196	
22	สัดส่วนการผสมเก่า	0	90	420.0	0	0	9.6	-	180	1,285	-	-	597	282	-	2,344	299
	สูตรการผลิตใหม่	24	450	126	0.9	3.4	4.7	149	900	386	61	257	292	-	-	2,045	
23	สัดส่วนการผสมเก่า	0	0	540.0	0	0	9.45	-	-	1,652	-	-	587	78	192	2,509	431
	สูตรการผลิตใหม่	27	495	78	1.1	3.1	6	167	990	239	75	234	373	-	-	2,078	
24	สัดส่วนการผสมเก่า	0	600	0	0	0	9	-	1,200	-	-	-	559	-	-	1,759	-479
	สูตรการผลิตใหม่	78	432	90	1.1	3.2	4.8	484	864	275	75	242	298	-	-	2,238	
25	สัดส่วนการผสมเก่า	0	270	0	1.92	0	4.32	-	540	-	131	-	268	1,010	211	2,160	101
	สูตรการผลิตใหม่	0	396	204	1	3	5.6	-	792	624	68	227	348	-	-	2,059	

จากตารางที่ 5.6 จะเห็นว่าสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงจะลดค่าใช้จ่ายในเรื่องต้นทุนวัตถุดิบต่อรอบการผลิตลงอย่างมากเมื่อเทียบกับสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ส่วนถัดไปผู้วิจัยจึงทำการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตต่อปี โดยจะคิดจากยอดขายในปี 2559 ที่ผ่านมาเป็น ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบที่สัดส่วนการผสมทั้ง 25 การผลิต พบว่าในปี 2559 ที่ผ่านมา ต้นทุนทรายและเรซินสำหรับการผลิตทรายเคลือบเรซินมีค่าเท่ากับ 149,114,085 บาท ซึ่งถ้าเปรียบเทียบสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงพบว่าต้นทุนการผลิตมีค่าเท่ากับ 106,820,767 บาท ซึ่งลดลงจากต้นทุนวัตถุดิบเก่าเป็นจำนวนเงิน 42,293,318 บาท หรือคิดเป็น 28.36% ของต้นทุนวัตถุดิบทั้งหมด ซึ่งจะแสดงได้ดังตารางที่ 5.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลง

ลำดับ	รุ่น	จำนวนรอบการผลิต	ต้นทุน (บาท)	ต้นทุนเก่า (บาท)	ต้นทุนใหม่ (บาท)	ต้นทุนที่ลดลง (บาท)
1	สัดส่วนการผสมเก่า	1,805	3,467	6,257,935	4,094,106.05	2,163,828.95
	สัดส่วนการผสมใหม่		2,268			
2	สัดส่วนการผสมเก่า	837	2,584	2,161,946.67	2,001,033.08	160,913.59
	สูตรการผลิตใหม่		2,392			
3	สัดส่วนการผสมเก่า	1,307	2,909	3,801,093.33	3,198,773.57	602,319.76
	สูตรการผลิตใหม่		2,448			
4	สัดส่วนการผสมเก่า	922	3,319	3,059,011.67	2,002,721.76	1,056,289.91
	สูตรการผลิตใหม่		2,173			
5	สัดส่วนการผสมเก่า	137	2,651	362,303.33	280,020.84	82,282.49
	สูตรการผลิตใหม่		2,049			
6	สัดส่วนการผสมเก่า	370	2,172	803,640	929,256.48	-125,616
	สูตรการผลิตใหม่		2,512			
7	สัดส่วนการผสมเก่า	4,058	3,339	13,550,775	9,124,289.96	4,426,485.04
	สูตรการผลิตใหม่		2,248			
8	สัดส่วนการผสมเก่า	2,748	3,255	8,945,825	6,363,012.79	2,582,812.21
	สูตรการผลิตใหม่		2,315			
9	สัดส่วนการผสมเก่า	2,082	3,493	7,271,261.67	4,501,774.86	2,769,486.80
	สูตรการผลิตใหม่		2,163			
10	สัดส่วนการผสมเก่า	412	3,920	1,613,733.33	1,050,160.84	563,572.49
	สูตรการผลิตใหม่		2,551			
11	สัดส่วนการผสมเก่า	12,913	3,205	41,387,233.33	28,001,220.35	13,386,012.99
	สูตรการผลิตใหม่		2,168			
12	สัดส่วนการผสมเก่า	7,038	3,266	22,987,196.67	15,488,633.76	7,498,562.91
	สูตรการผลิตใหม่		2,201			
13	สัดส่วนการผสมเก่า	2,152	3,361	7,231,751.67	5,195,724.17	2,036,027.49
	สูตรการผลิตใหม่		2,415			
14	สัดส่วนการผสมเก่า	158	2,831	448,241.67	417,559.68	30,681.99
	สูตรการผลิตใหม่		2,637			
15	สัดส่วนการผสมเก่า	200	8,768	1,753,600	454,825.40	1,298,774.60
	สูตรการผลิตใหม่		2,274			
16	สัดส่วนการผสมเก่า	1,302	3,027	3,940,145	2,823,417.83	1,116,727.17
	สูตรการผลิตใหม่		2,169			
17	สัดส่วนการผสมเก่า	1,380	2,426	3,347,880	2,888,207.52	459,672.48
	สูตรการผลิตใหม่		2,093			
18	สัดส่วนการผสมเก่า	1,327	1,902	2,523,320	2,780,812.73	-257,493
	สูตรการผลิตใหม่		2,096			

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลง

ลำดับ	รุ่น	จำนวนรอบการผลิต	ต้นทุน (บาท)	ต้นทุนเก่า (บาท)	ต้นทุนใหม่ (บาท)	ต้นทุนที่ลดลง (บาท)
19	สัดส่วนการผสมเก่า	1,010	1,762	1,779,620	2,407,075.43	-627,455
	สูตรการผลิตใหม่		2,383			
20	สัดส่วนการผสมเก่า	255	2,606	664,530	564,179.34	100,350.66
	สูตรการผลิตใหม่		2,212			
21	สัดส่วนการผสมเก่า	2,622	2,964	7,770,620	5,758,186.72	2,012,433.28
	สูตรการผลิตใหม่		2,196			
22	สัดส่วนการผสมเก่า	1,090	2,344	2,554,960	2,228,566.04	326,393.96
	สูตรการผลิตใหม่		2,045			
23	สัดส่วนการผสมเก่า	1,723	2,509	4,323,843.33	3,581,064.26	742,779.07
	สูตรการผลิตใหม่		2,078			
24	สัดส่วนการผสมเก่า	248	1,759	436,818.33	555,744.17	-188,926
	สูตรการผลิตใหม่		2,238			
25	สัดส่วนการผสมเก่า	63	2,160	136,800	130,399.15	6,400.85
	สูตรการผลิตใหม่		2,059			

5.4 สรุปผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงจะถูกกำหนดให้ใช้ทราย SA, SB และ SC ส่วนเรซินจะถูกกำหนดให้ใช้ RA, RB และ RC เป็นหลักเท่านั้น ซึ่งภายใต้สูตรการผสมใหม่จะใช้ทราย SB เป็นหลักเนื่องจากมีราคาต้นทุนที่ต่ำและมีค่าคุณสมบัติใกล้เคียงกับทราย SC ที่ถูกใช้มากในสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง ส่วนการเติมเรซินนั้นจะถูกเปลี่ยนจาก RB และ RC ที่ใช้ในสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุง มาเป็น RB ที่ใช้ในสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุง เมื่อทำการเปรียบเทียบสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงกับสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงด้วยค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ชนิดสามารถสรุปได้ดังนี้

- ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าน้อยกว่า 10% และสัดส่วนการผสมส่วนใหญ่ให้ค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงที่โรงงานยอมรับ ยกเว้นสัดส่วนการผสมที่ 4, 6, 14 และ 18 ที่มีค่าออกนอกช่วงการยอมรับ
- ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความโก่งงอมีความแปรปรวนอยู่มาก แต่สัดส่วนการผสมส่วนใหญ่ให้ค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงที่โรงงานยอมรับ ยกเว้นสัดส่วนการผสมที่ 4, 5, 6 และ 18 ที่มีค่าออกนอกช่วงการยอมรับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าน้อยกว่า 5% และสัดส่วนการผสมส่วนใหญ่ให้ค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงที่โรงงานยอมรับ ยกเว้นสัดส่วนการผสมที่ 3, 4, 5, 9, 11, 16, 18 และ 20 แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าพยากรณ์และค่าทดลองกับช่วงการยอมรับ
- ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าการขยายตัวทางความร้อนมีค่าแปรปรวนสูงมาก แต่สัดส่วนการผสมส่วนใหญ่ให้ค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงที่โรงงานยอมรับ
- ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าน้อยกว่า 5% และสัดส่วนการผสมส่วนใหญ่ให้ค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงที่โรงงานยอมรับ
- ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าแก๊สมีค่าแปรปรวนสูงมาก แต่สัดส่วนการผสมส่วนใหญ่จะให้ค่าแก๊สต่ำกว่าช่วงการยอมรับที่โรงงานกำหนด แต่ถือว่าเป็นข้อดีเนื่องจากโรงงานต้องการให้ค่าแก๊สมีค่าต่ำ

ซึ่งจากการทดลองพบว่าทรายชนิด SA SB และ SC รวมถึงเรซินชนิด RA RB และ RC เมื่อนำสัดส่วนการผสมที่ใช้ทรายและเรซินดังกล่าวมาทำการทดลอง พบว่าค่าคุณสมบัติส่วนใหญ่อยู่ในช่วงการยอมรับของทางโรงงานกรณีศึกษา ดังนั้นการใช้ทรายและเรซินดังกล่าวสามารถให้ค่าคุณสมบัติที่ครอบคลุมผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ของโรงงาน ทำให้ในอนาคตไม่ต้องนำเข้าทรายและเรซินบางชนิดที่ให้ค่าคุณสมบัติใกล้เคียงกัน แต่ยังคงนำเข้าทรายและเรซินที่มีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะเช่นเดิม ส่งผลให้ทางโรงงานไม่ต้องเก็บทรายและเรซินบางชนิด ทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนของคลังสินค้าลดลงอีกด้วย

ในส่วนของการเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบระหว่างสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงและสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงพบว่าหากใช้สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงจะสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบจากปีละ 149,114,085 บาท ลดลงเหลือปีละ 106,820,767 บาท ซึ่งลดลงปีละ 42,293,318 หรือคิดเป็น 28.36% ของต้นทุนวัตถุดิบทั้งหมด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6
สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปรายละเอียดของงานวิจัยที่ประกอบไปด้วย การศึกษาปัญหา วัตถุประสงค์ ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหา รวมถึงผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง และสุดท้ายจะเป็นการกล่าวถึงข้อจำกัดของงานวิจัยนี้ รวมถึงข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไป ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้

6.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินที่มีค่าคุณสมบัติอยู่ในช่วงความต้องการของลูกค้า และเพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบของทรายและเรซิน เนื่องจากปัจจุบันการหาสัดส่วนการผสมของทรายเรซินจะถูกผสมโดยผู้เชี่ยวชาญเท่านั้น ทำให้ไม่มาตรฐานสำหรับพนักงานคนอื่นในการเลือกสัดส่วนการผสมมาทำการผลิต บางครั้งสัดส่วนที่นำมาผลิตให้ค่าคุณสมบัติไม่ตรงตามความต้องการ จึงต้องมีการลองผิดลองถูกเพื่อให้ได้ค่าคุณสมบัติตามที่ต้องการ ส่งผลทำให้เสียเวลา และเกิดต้นทุนวัตถุดิบของทรายกับเรซินที่สูงเกินความจำเป็น ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งถึงความสำคัญของการเลือกสัดส่วนการผสมที่ถูกต้องไปทำการผลิต อีกทั้งเพื่อให้ค่าคุณสมบัติตรงตามความต้องการอีกด้วย ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินที่โรงงานต้องการตรวจสอบได้แก่ ค่าความทนแรงดัดโค้ง ค่าการขยายตัวทางความร้อน ค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ค่าความโก่งงอ ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา และค่าแก๊ส ซึ่งค่าคุณสมบัติเหล่านี้จะถูกตรวจสอบก่อนที่จะส่งมอบผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้า เมื่อทราบถึงปัญหาของงานวิจัยแล้ว ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาจากผลิตภัณฑ์ในปัจจุบันเพื่อคัดเลือกทรายและเรซินที่ถูกนำมาเป็นส่วนผสมบ่อยที่สุดมาทำการศึกษาหาสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซิน ซึ่งจากการศึกษาพบว่าทรายที่ใช้งานบ่อยได้แก่ SA SB และ SC ส่วนเรซินที่ใช้งานบ่อยได้แก่ RA RB และ RC ซึ่งงานวิจัยจะศึกษาหาสัดส่วนการผสมภายใต้ทรายและเรซินอย่างละ 3 ชนิดนี้เท่านั้น

จากการกำหนดปัญหา วัตถุประสงค์ และขอบเขตของการศึกษาเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเพื่อหาวิธีการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ เพื่อใช้สำหรับการแก้ปัญหาให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งวิธีการออกแบบที่ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้คือ วิธีการพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology: RSM) ชนิดการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) โดยมีปัจจัยนำเข้ามีทั้งหมด 7 ปัจจัยได้แก่ SA SB SC RA RB RC และ %Resin แต่เนื่องจากติดข้อจำกัดของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง ทำให้ต้องประยุกต์วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อให้นำมาปรับใช้ได้ โดยสุดท้ายปัจจัยนำเข้าที่จะทำการศึกษา

จะมีทั้งหมด 5 ปัจจัยได้แก่ SA SB RA RB และ %Resin โดยที่ SC และ RC มีค่าขึ้นอยู่กับทรายและเรซินชนิดSA และ SB โดยทราย SA SB และ SC ต้องมีสัดส่วนรวมกันเท่ากับ 100% เช่นเดียวกันกับเรซิน RA RB และ RC นั่นคือสามารถหาค่าได้จาก SC=100-(SA+SB) และ RC=100-(RA+RB) โดยปัจจัยนำเข้าแต่ละตัวจะถูกทดลองที่ 5 ระดับ ซึ่งการกำหนดระดับจะกำหนดมาจากประวัติการใช้ทรายและเรซินแต่ละชนิดในสัดส่วนการผลิตเก่า และทำการทดลองซ้ำที่ 2 ครั้ง ส่วนตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่ ความทนแรงดัดโค้ง การขยายตัวทางความร้อน ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา ค่าความโก่งงอ อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเซตตัว ค่าแก๊ส และต้นทุนวัตถุดิบในส่วนของทรายและเรซิน

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าปัจจัยนำเข้าทั้ง 5 ปัจจัยมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง จากนั้นทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับตัวแปรตอบสนองคือค่าคุณสมบัติทั้ง 6 ปัจจัย และจากนั้นจึงทำการหาสัดส่วนการผสมที่เหมาะสม เพื่อที่จะนำไปยืนยันผลการทดลอง โดยทำการคัดเลือกผลิตภัณฑ์มา 25 ผลิตภัณฑ์ จากทั้งหมด 45 ผลิตภัณฑ์

จากการวิเคราะห์การทดลองเพื่อการยืนยันผลการทดลอง พบว่าค่าคุณสมบัติประเภท ค่าความทนแรงดัดโค้ง ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา และค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10% และค่าคุณสมบัติที่ได้ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงการยอมรับของโรงงาน ส่วนค่าคุณสมบัติประเภท ค่าความโก่งงอ ค่าการขยายตัวทางความร้อน และค่าแก๊ส มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับสูงโดยส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 20% แต่ค่าคุณสมบัติที่ได้ส่วนใหญ่ที่ได้ยังอยู่ในช่วงการยอมรับของโรงงานเช่นกัน มีเพียงค่าแก๊สที่ต่ำกว่าช่วงการยอมรับของโรงงานแต่นั่นถือเป็นข้อดี เนื่องจากค่าแก๊สค่าโรงงานต้องการให้มีค่าต่ำ ดังนั้นแสดงว่าสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงให้ค่าแก๊สต่ำตามที่โรงงานต้องการ

สุดท้ายจากการวิเคราะห์ต้นทุนวัตถุดิบระหว่างสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงกับสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงพบว่าที่สัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงจำนวน 21 สัดส่วนการผสมมีค่าต้นทุนของวัตถุดิบที่ต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนวัตถุดิบจากยอดขายในปี 2559 ในผลิตภัณฑ์ทั้ง 25 สูตรมีต้นทุนวัตถุดิบเท่ากับ 149,114,085 บาทต่อปี เมื่อเทียบกับสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงที่มีต้นทุนวัตถุดิบเท่ากับ 106,820,767 บาทต่อปี พบว่ามีค่าลดลงเท่ากับ 42,293,318 บาทต่อปี

6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. สัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินใหม่ที่ได้จะถูกผสมจากทราย SA, SB และ SC และเรซิน RA, RB และ RC เท่านั้น
2. การทดลองเป็นการทดลองในระดับห้องทดลองที่ 15 กิโลกรัมเท่านั้น

6.3 ข้อเสนอแนะ

1. จากงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาสัดส่วนการผสมที่ทราย SA, SB, และ SC และเรซิน RA, RB และ RC เพียงอย่างละ 3 ชนิดเท่านั้น แต่จากสัดส่วนการผสมก่อนปรับปรุงทั้งหมดของทางงานเป็นการใช้ทรายและเรซินหลายชนิด ทั้งนี้เพื่อให้ครอบคลุมช่วงของการใช้งานทั้งหมดของโรงงาน ควรมีการศึกษาผลกระทบของสัดส่วนของทรายและเรซินชนิดอื่นๆ เพิ่มเติม
2. ควรนำสัดส่วนการผสมหลังปรับปรุงที่ได้ไปลองทำการผลิตบนสายการผลิตจริง และนำทรายเคลือบเรซินที่ได้มาทำการตรวจสอบคุณสมบัติ ว่ามีค่าตรงตามความต้องการของโรงงานกรณีศึกษาหรือไม่
3. ในงานวิจัยนี้เป็นการหาสัดส่วนการผสมทรายเครือบเรซินใหม่ที่ให้ได้ค่าคุณสมบัติตามสัดส่วนการผสมเก่าแต่มีต้นทุนวัตถุดิบที่ต่ำลง และในอนาคตทางโรงงานกรณีศึกษาสามารถหาสัดส่วนการผสมที่ให้ค่าคุณสมบัติที่ดีขึ้นและมีต้นทุนวัตถุดิบอยู่ในระดับที่ทางณรงงานกรณีศึกษาพึงพอใจ
4. ในขั้นตอนสร้างสมการความสัมพันธ์โดยใช้วิธีลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) จะมีทางเลือกในการวิเคราะห์อยู่ 2 ทางเลือก คือ Hierarchical Model และ Non-Hierarchical Model โดยที่

   - Hierarchical Model จะเป็นการสร้างสมการโดยการเก็บเทอมผลกระทบหลักของปัจจัยที่ปรากฎอยู่ในเทอมผลกระทบร่วมและเทอมกำลังสองของปัจจัยที่มีนัยสำคัญไว้ แม้ว่าเทอมผลกระทบหลักนั้นจะไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญก็ตาม ยกตัวอย่างเช่น แบบจำลองที่เทอมผลกระทบร่วม A*B มีนัยสำคัญก็จะต้องมีเทอมของผลกระทบหลัก A และ B ภายในสมการด้วยถึงแม้ว่าเทอมของผลกระทบหลัก A และ B จะไม่มีนัยสำคัญก็ตาม เช่นเดียวกันกับแบบจำลองที่เทอมผลกระทบหลักกำลังสองของปัจจัย B*B มีนัยสำคัญก็จะต้องมีเทอมของผลกระทบหลัก B ภายในสมการด้วยถึงแม้ว่าเทอมของผลกระทบหลัก B จะไม่มีนัยสำคัญก็ตาม

   - Non-Hierarchical Model จะเป็นการสร้างสมการโดยการตัดเทอมของปัจจัยที่ไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญออกทั้งหมด ซึ่งสมการที่ได้จากโปรแกรม Minitabจะถูกแสดงอยู่ในรูปของหน่วยที่เป็นค่ารหัส (Coded Unit) เท่านั้น

   โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีลดตัวแปรอิสระแบบ Hierarchical ซึ่งมีข้อดีคือสมการที่ได้จะสามารถแสดงอยู่ในรูปหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) และทำให้ง่ายต่อการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตีความ ซึ่งต่างจาก Non-Hierarchical ที่สมการจะแสดงอยู่ในรูปของหน่วยที่เป็นค่ารหัส (Coded Unit) เท่านั้น จากนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบค่า R^2 และ R^2_{adj} ระหว่าง Hierarchical Model กับ Non Hierarchical Model โดยอาศัยข้อมูลของค่าคุณสมบัติทั้ง 6 คุณสมบัติ ที่ได้ทำการทดสอบไว้ข้างต้นพบว่า

- ค่า R^2 ของ Hierarchical Model จะมีค่ามากกว่า R^2 ของ Non-Hierarchical เสมอ ซึ่งมีค่ามากกว่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.73%
- Hierarchical Model มี R^2_{adj} ที่สูงกว่าของ Non-Hierarchical Model สำหรับ 2 คุณสมบัติ จากทั้งหมด 6 คุณสมบัติได้แก่ ค่าการขยายตัวทางความร้อน และแก๊ส ซึ่งคุณสมบัติที่ Hierarchical Model มีค่า R^2_{adj} สูงกว่า Non-Hierarchical Model จะมีค่า R^2_{adj} ที่สูงกว่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.07%
- Hierarchical Model มี R^2_{adj} ที่น้อยกว่าของ Non-Hierarchical Model สำหรับ 2 คุณสมบัติ จากทั้งหมด 6 คุณสมบัติได้แก่ ค่าความทนแรงดัดโค้ง และค่าความโก่งงอ ซึ่งคุณสมบัติที่ Hierarchical Model มีค่า R^2_{adj} น้อยกว่า Non-Hierarchical Model จะมีค่า R^2_{adj} ที่น้อยกว่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.045%
- สำหรับ 2 คุณสมบัติจาก 6 คุณสมบัติที่ Hierarchical Model และ Non-Hierarchical Model มีค่า R^2_{adj} ที่เท่ากันได้แก่ ค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผา และค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

สำหรับงานวิจัยนี้พบว่า ผลการเปรียบเทียบข้างต้นจะแสดงเห็นว่าค่า R^2 และ R^2_{adj} ของ Hierarchical Model กับ Non-Hierarchical Model จะมีค่าไม่แตกต่างกันมาก นอกจากนี้สัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินที่เหมาะสมในแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก Hierarchical Model กับ Non-Hierarchical Model ยังมีค่าที่ใกล้เคียงกันดังตารางที่ 6.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนการผสมทรายเคลือบเรซินแบบ Hierarchical Model กับ Non- Hierarchical Model

ปัจจัยนำเข้า	Backward Elimination (Hierarchical Model)			Backward Elimination (Non Hierarchical Model)			หน่วย
	Coded	Uncoded	ค่าจริง	Coded	Uncoded	ค่าจริง	
SA	-2	0	0	-2	0	0	kg
SB	0.14	45.5	6.83	0.27	48.3	7.25	kg
RA	-0.704	16.2	0.51	-0.76	15.5	0.47	kg
RB	-0.34	31.1	0.98	-0.37	30.6	0.92	kg
%Resin	0.2	2.1	2.1	0	2	2	%

ในส่วนของสัดส่วนการผสมของ SC และ RC จาก Hierarchical Model เท่ากับ 8.18 และ 1.66 ตามลำดับ และสัดส่วนของ SC และ RC จาก Non Hierarchical Model เท่ากับ 7.76 และ 1.62 ตามลำดับ ซึ่งเป็นสัดส่วนการผสมจริงในหน่วยกิโลกรัม

- ผลงานวิจัยนี้จะถูกนำไปเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ 2018 The 8th International Conference on Advanced Materials Research ที่ประเทศญี่ปุ่น ในวันที่ 21 มกราคม 2561 และจะถูกตีพิมพ์ลงใน Key Engineering Materials

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

1. IFOUNDRYMAN. การหล่อโลหะ (*Casting*). 2560 17 มีนาคม 2560]; Available from: http://www.ifoundryman.com/casting/.
2. วิหาร ดีปัญญา, วิศกรรมการหล่อโลหะ. Vol. 200. 2005: โอเดียนสโตร์.
3. หริส สูตะบุตร, เคนยิ จิยิอิวา, หล่อโลหะ. 2517: สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ.
4. นิกร มหกรรมโกลา และ พิพัฒน์ สุจิตธรรมกุล, กรรมวิธีการหล่อโลหะ. 1996: สกายบุ๊กส์.
5. ภาควิชาวิศวกรรมโลหะการ, วิศวกรรมงานหล่อเหล็ก. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. Sarkar, A.D., *Mould And Core Material For The Steel Foundry*. 1th ed. 1967, London: Headington Hill Hall.
7. Ibeh, C.C., *2 - Phenol-Formaldehyde Resins A2 - Goodman, Sidney H*, in *Handbook of Thermoset Plastics (Second Edition)*. 1998, William Andrew Publishing: Westwood, NJ. p. 23-71.
8. Pilato, L., *Phenolic Resins: A Century of Progress*. 2010: Springer Heidelberg Dordrecht London New York.
9. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, การสังเคราะห์เทอร์โมเซต. 2010, กรุงเทพมหานคร: คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคดนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
10. Detlefsen, W.D., *Chapter 20 - Phenolic resins: some chemistry, technology, and history A2 - Chaudhury, M*, in *Adhesion Science and Engineering*, A.V. Pocius, Editor. 2002, Elsevier Science B.V.: Amsterdam. p. 869-945.
11. อุราวรรณ อุ่นแก้ว, การปรับปรุงทรายเคลือบฟีนอลิกเรซินที่ผลิตในประเทศสำหรับทำแบบหล่อเปลือก วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, in สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์. 2542, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
12. กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, หลักการการควบคุมคุณภาพ. 2550, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
13. จิราวัลย์ จิตรถเวช, การวิเคราะห์สมการถดถอย. 2558: บัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์. 450.
14. ทรงศิริ แต้สมบัติ, การวิเคราะห์สมการถดถอย. 1. 2541: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 247.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

15. สรชัย พิศาล, สถิติวิศวกรรม. 2 ed, ed. 2. 2554, กรุงเทพมหานคร: บริษัทวิทยพัฒน์. 280.

16. ปารเมศ ชุติมา, การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. 2545, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

17. นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์, เอกสารประกอบการเรียนวิชา *Quality Improvement*. 2559, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

18. กัลยาณี เต็งพงศธร, เอกสารประกอบการสอนวิชาการวางแผนการทดลองทางอุตสาหกรรมเกษตร. 2554: คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 15.

19. ภูธิป อินทรักษ์, การลดเวลาสูญเสียในกระบวนการติดฉลาก วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, in สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2557, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.

20. Martinet, S., et al., *Design of experiment methodology to improve the energy density of lithiated metal phosphates.* Solid State Ionics, 2014. **268, Part B**: p. 247-251.

21. Zhu, C. and X. Liu, *Optimization of extraction process of crude polysaccharides from Pomegranate peel by response surface methodology.* Carbohydrate Polymers, 2013. **92**(2): p. 1197-1202.

22. Cojocaru, C., et al., *Modeling and multi-response optimization of pervaporation of organic aqueous solutions using desirability function approach.* Journal of Hazardous Materials, 2009. **167**(1–3): p. 52-63.

23. Zhao, Y., et al., *Optimization of Ultrasonic Extraction of Phenolic Compounds from Epimedium brevicornum Maxim Using Response Surface Methodology and Evaluation of Its Antioxidant Activities In Vitro.* Analytical Methods in Chemistry, 2014. **2014**.

24. Derossi, A., et al., *Study and optimization of osmotic dehydration of cherry tomatoes in complex solution by response surface methodology and desirability approach.* LWT - Food Science and Technology, 2015. **60**(2): p. 641-648.

25. Yadav, R., et al., *Optimization of the process variables for the synthesis of cardanol-based novolac-type phenolic resin using response surface methodology.* European Polymer Journal, 2007. **43**(8): p. 3531-3537.

26. Danmaliki, G.I., T.A. Saleh, and A.A. Shamsuddeen, *Response surface methodology optimization of adsorptive desulfurization on nickel/activated carbon.* Chemical Engineering Journal, 2017. **313**: p. 993-1003.

27. B. Surekha, et al., *Application of Response Surface Methodology for Modeling the Properties of Chromite-based Resin Bonded Sand Cores.* International Journal of Mechanics, 2013. **7**(4): p. 443-458.

28. Ngun, B.K., et al., *Using design of mixture experiments to optimize triaxial ceramic tile compositions incorporating Cambodian clays.* Applied Clay Science, 2014. **87**: p. 97-107.

29. Campisi, B., et al., *Melt granulation in a high shear mixer: optimization of mixture and process variables using a combined experimental design.* Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1999. **48**(1): p. 59-70.

30. แก้วพลอย, ส., การพัฒนาสูตรที่เหมาะสมสำหรับลูกชิ้นเอ็นไก่ผสมผักพื้นบ้านโดยวิธีการออกแบบกรทดลอง. Social Development for Sustainability in ASEAN Community, 2557. **1**.

31. ชาญณรงค์ สายแก้ว เสริมศักดิ์ เวียงวิเศษ และอภัย ศรีบุญเรือง, การปรับปรุงสมบัติแบบหล่อทรายในอุตสาหกรรมเหล็กหล่อโดยใช้การทดลองแบบส่วนผสม. KKU Research Journal, 2011.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภูวดล ศิริวิมลพันธุ์ เกิดเมื่อวันที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพนัสพิทยาคาร จังหวัดชลบุรี และได้เข้าศึกษาต่อจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากคณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2557 หลังจากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University