

การปรับปรุงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินสำหรับทำใส่แบบกลวง



นายจักรพันธ์ จரியานิจวัฒนา

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

IMPROVEMENT OF ESSENTIAL PROPERTIES OF RESIN COATED SAND FOR HOLLOW
CORE PRODUCTION

Mr. Jakkapan Jariyajirawatana



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

การปรับปรุงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน
สำหรับทำไส้แบบกลวง

โดย

นายจักรพันธ์ จรรย์จิรวัฒนา

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสงศ์ ไอสถศิลป์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ฉวีไชย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสงศ์ ไอสถศิลป์)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)

จักรพันธ์ จริยาจิรวัฒนา : การปรับปรุงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินสำหรับทำไส้แบบกลวง (IMPROVEMENT OF ESSENTIAL PROPERTIES OF RESIN COATED SAND FOR HOLLOW CORE PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.นภัสสวงศ์ ไอสถศิลป์, 220 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินที่ใช้ในกระบวนการผลิตไส้แบบกลวง โดยวิธีการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมของปัจจัยที่อยู่ภายในกระบวนการผสม ซึ่งคุณสมบัติที่ตรวจสอบจะประกอบไปด้วยคุณสมบัติทั้งแปดดังนี้คือ ความทนแรงดัดโค้ง ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว แก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ความโค้งงอของชิ้นงาน พิลแบค และความหนาของผนัง

งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้าโดยอาศัยเมทริกซ์ความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลในการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัย จากนั้นจึงใช้การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลางชนิด Face-Centered (CCF) เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัยที่ศึกษา ที่ส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินทั้งแปดคุณสมบัติ จากนั้นสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญกับตัวแปรตอบสนองโดยอาศัยเทคนิคการคัดเลือกตัวแปรอิสระแบบขั้นตอนชนิดวิธีลดตัวแปรอิสระ จากนั้นจึงหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งได้สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในขั้นตอนการผสมคือ อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้นเท่ากับ 120 °C เวลาในการปล่อยตัวประสานเท่ากับ 4 วินาที เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงเท่ากับ 45 วินาที เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศเท่ากับ 8 วินาที ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศเท่ากับ 100 วินาที และเวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัวเท่ากับ 9 วินาที หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลที่ได้จากค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่ พร้อมทั้งจัดทำแผนควบคุม วิธีการปฏิบัติงาน และใบตรวจสอบ เพื่อใช้ในการควบคุมปัจจัยในกระบวนการผสมและค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินให้อยู่ในเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้

ผลการปรับปรุงที่ได้จะใช้ค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) เป็นตัวเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง โดยพบว่าค่า C_{pk} ของความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นจาก -0.69 เป็น 0.54 ค่า C_{pk} ของปริมาณการสูญเสียหลังการเผา มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 1.12 ค่า C_{pk} ของอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.78 เป็น 1.18 ค่า C_{pk} ของแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.38 เป็น 1.29 ค่า C_{pk} ของการขยายตัวทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.53 เป็น 0.54 ค่า C_{pk} ของความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นจาก -0.28 เป็น 0.01 ค่า C_{pk} ของฟิลแบคมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.06 เป็น 0.26 และค่า C_{pk} ของความหนาของผนังมีค่าเพิ่มขึ้นจาก -0.07 เป็น 0.75 นอกจากนี้ยังช่วยให้ทางโรงงานสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายไปได้เท่ากับ 236,058.91 บาทต่อปี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5870327921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: RESIN COATED SAND, MIXING PROCESS, ESSENTIAL PROPERTIES OF RESIN COATED SAND, RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

JAKKAPAN JARIYAJIRAWATANA: IMPROVEMENT OF ESSENTIAL PROPERTIES OF RESIN COATED SAND FOR HOLLOW CORE PRODUCTION. ADVISOR: ASST. PROF. NAPASSAVONG OSOTHSILP, Ph.D., 220 pp.

This research aims to improve essential properties of resin coated sand used in hollow core production by finding the optimal levels of factors in the mixing process. The essential properties of resin coated sand were bending strength, loss of ignition, melting point, gas, thermal expansion, bend, peel back, and shell thickness.

This research started from prioritizing and screening process factors by using the Cause and Effect matrix. Then, the Central Composite Design of Face-Centered (CCF) type was employed to test the significance of these six factors onto the essential properties of resin coated sand. Next, Stepwise Regression analysis with Backward Elimination technique was performed to construct the regression models between process factors and responses. After that, the optimal condition of these factors was obtained using the optimization technique. It was found that the optimal condition of the mixing process was at the temperature of starting material of 120 °C, the time to release binder of 4 seconds, the time to release hardener solution of 45 seconds, the time to start air cooling system of 8 seconds, the air cooling time duration of 100 seconds, and the time to release a substance that helps flow ability of sand of 9 seconds. Finally, the optimal process factor levels were verified in the real plant scale. Finally, the control plan, work instruction and check sheet were created to control process factors and essential properties of resin coated sand after improvement.

After improvement, the process capability index (C_{pk}) was used to compare the properties of resin coated sand before and after improvement. It was found that the C_{pk} of bending strength increased from -0.69 to 0.54, the C_{pk} of loss of ignition increased from 0.01 to 1.12, the C_{pk} of melting point increased from 0.78 to 1.18, the C_{pk} of gas increased from 0.38 to 1.29, the C_{pk} of thermal expansion increased from 0.53 to 0.54, the C_{pk} of bend increased from -0.28 to 0.01, the C_{pk} of peel back increased from 0.06 to 0.26, and the C_{pk} of shell thickness increased from -0.07 to 0.75. Moreover, the improvement can possibly save the production cost up to 236,058.91 baht per year.

Department: Industrial Engineering

Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความช่วยเหลือและเสียสละเวลาในการให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังศุมาลิน เสนจันทร์ดีไชย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ กรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้อง และสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณโรงงานกรณีศึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้โอกาสผู้วิจัยได้เข้าไปทำการศึกษา วิจัยและให้ความร่วมมือในการเก็บผลการทดลองเป็นอย่างดี ตลอดจนคณะทำงานที่คอยให้ความช่วยเหลือในการระดมความคิด ให้คำแนะนำ และแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เป็น ประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาท วิชาความรู้และให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมไปถึงพนักงานและ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาทุกท่าน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้ กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด รวมทั้งขอบคุณสำหรับกำลังใจจากเพื่อนๆและผู้ที่มี ส่วนเกี่ยวข้องในงานวิจัยทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงมา ณ ที่นี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 รายละเอียดเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษา.....	3
1.2.1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา	3
1.3 การศึกษาสภาพปัญหาและความสำคัญของปัญหาในปัจจุบัน	5
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	25
1.5 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย	25
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	26
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	26
1.8 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน.....	27
1.9 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย.....	30
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
2.1 เครื่องมือทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	31
2.1.1 แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram).....	31
2.1.2 แผนผังกระบวนการผลิต (Process Mapping).....	32
2.1.3 การระดมความคิด (Brainstorming).....	33

2.1.4	แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram).....	33
2.1.5	เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix).....	35
2.1.6	การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Design of Experiment, DOE).....	36
2.2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีการหล่อโลหะ (Casting Process).....	46
2.2.1	กรรมวิธีการหล่อโลหะ (Casting Process).....	46
2.2.2	การหล่อโดยแบบหล่อทราย (Sand Casting).....	47
2.2.3	ส่วนประกอบของแบบหล่อและชิ้นงานหล่อ.....	48
2.2.4	การทำไส้แบบ (Core Making).....	49
2.3	ทฤษฎีที่เกี่ยวกับกระบวนการทรายเคลือบเรซิน (Resin Coated Sand).....	56
2.3.1	กระบวนการทรายเคลือบเรซิน (Resin Coated Sand).....	56
2.3.2	เครื่องผสมทราย (Sand Mixer).....	57
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	59
2.4.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง.....	59
2.4.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทรายเคลือบเรซิน.....	65
2.4.3	การนำงานวิจัยไปประยุกต์ใช้งาน.....	68
บทที่ 3	ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า.....	72
3.1	ขั้นตอนในการจัดตั้งทีมงาน.....	72
3.2	ขั้นตอนในการศึกษากระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน.....	73
3.3	การระดมความคิด (Brainstorming) เพื่อหาปัจจัยนำเข้า.....	75
3.4	การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยเมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล.....	75
3.5	สรุปผลขั้นตอนการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า.....	96
บทที่ 4	ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ.....	97
4.1	การออกแบบการทดลอง.....	97

4.1.1 การกำหนดปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง	97
4.1.2 การเลือกแบบการทดลอง	97
4.2 ขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง.....	104
4.3 ผลการทดลอง.....	104
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	110
4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความทนแรงดัดโค้ง	111
4.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของปริมาณการสูญเสียหลังการเผา.....	120
4.4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	128
4.4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองของค่าแก๊ส	135
4.4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองของการขยายตัวทางความร้อน	142
4.4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความโค้งงอของชิ้นงาน.....	149
4.4.7 การวิเคราะห์ผลการทดลองของฟิลแบค	157
4.4.8 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความหนาของผนัง.....	164
4.5 การหาค่าระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนำเข้า.....	171
4.6 สรุปผลขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ	177
บทที่ 5 ขั้นตอนการติดตามและควบคุมผล	178
5.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง.....	178
5.1.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อยืนยันผล.....	178
5.1.2 ผลการทดลอง.....	179
5.1.3 การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่.....	200
5.2 การตรวจติดตามและควบคุมผล	205
5.3 สรุปผลขั้นตอนการติดตามและควบคุมผล	209
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	210

6.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	210
6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	213
6.3 ข้อเสนอแนะ	213
รายการอ้างอิง	217
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	220



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการใช้งาน (ตัน/ปี) ของวัตถุดิบภายในกระบวนการทรายเคลือบเรซิน	7
ตารางที่ 1.2 เป้าหมายของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด ที่ทางโรงงานพิจารณา	8
ตารางที่ 1.3 เกณฑ์การยอมรับของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด ที่ทางโรงงานกำหนด	11
ตารางที่ 1.4 การวิเคราะห์ค่าความสามารถของกระบวนการของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด	11
ตารางที่ 1.5 ค่าคุณสมบัติของทรายทั้ง 3 ชนิด ที่เป็นส่วนประกอบของสูตรการผลิต	25
ตารางที่ 1.6 ค่าคุณสมบัติของฟีนอลิกเรซินทั้ง 2 ชนิด ที่เป็นส่วนประกอบของสูตรการผลิต	26
ตารางที่ 1.7 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย	30
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดความสัมพันธ์ของผลกระทบที่เกิดจากการเลือกใช้ค่า Resolution ต่างๆ	42
ตารางที่ 2.2 ค่า α ของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางตั้งแต่ 2-6 ปัจจัย	45
ตารางที่ 2.3 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการลดของเสียจากข้อบกพร่องเส้นด้ายเป็นขน	64
ตารางที่ 2.4 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการปรับปรุงความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ ซีเมนต์	65
ตารางที่ 2.5 เงื่อนไขที่ใช้ทดลองในกระบวนการทรายเคลือบเรซิน	66
ตารางที่ 2.6 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง	68
ตารางที่ 2.7 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน	70
ตารางที่ 3.1 ตารางความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด	76
ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด	78
ตารางที่ 3.3 เกณฑ์ในการให้คะแนนระดับความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล	80
ตารางที่ 3.4 การประเมินคะแนนของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด (ก่อนทำ การประเมินคะแนนความสัมพันธ์ใหม่)	82
ตารางที่ 3.5 การประเมินคะแนนของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด (ภายหลัง ทำการประเมินคะแนนความสัมพันธ์ใหม่)	83

ตารางที่ 3.6	สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาต่อ.....	86
ตารางที่ 3.7	สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อเพื่อนำไปออกแบบการทดลอง.....	94
ตารางที่ 4.1	ปัจจัยนำเข้าและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง.....	100
ตารางที่ 4.2	ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix).....	102
ตารางที่ 4.3	ตารางการออกแบบการทดลองและผลการทดลอง.....	105
ตารางที่ 4.4	เกณฑ์การควบคุมค่าคุณสมบัติของทรายในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน.....	107
ตารางที่ 4.5	ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการทดสอบ.....	108
ตารางที่ 4.6	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจก่อนและหลังการตัดค่าจากการทดสอบที่เกิดความผิดพลาด.....	110
ตารางที่ 4.7	การกำหนดเป้าหมายและคะแนนความสำคัญของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ.....	172
ตารางที่ 4.8	ค่าคุณสมบัติที่ได้ภายหลังจากการทำ Response Optimizer.....	176
ตารางที่ 4.9	ค่าระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง.....	176
ตารางที่ 5.1	ค่าระดับของปัจจัยนำเข้าก่อนและหลังทำการปรับปรุง.....	179
ตารางที่ 5.2	ผลการทดสอบยืนยันผลของคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน.....	180
ตารางที่ 5.3	เกณฑ์การยอมรับของคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ ที่ทางโรงงานกำหนด.....	182
ตารางที่ 5.4	การเปรียบเทียบผลการทดลองก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงของคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน.....	183
ตารางที่ 5.5	ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรก่อนการปรับปรุงและหลังปรับปรุง.....	200
ตารางที่ 5.6	ตารางการผลิตประจำวันแรกของกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน.....	202
ตารางที่ 5.7	ตารางการผลิตประจำวันที่สองของกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน.....	203
ตารางที่ 5.8	วิธีการปฏิบัติงานในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินสำหรับทำไส้แบบกลวง.....	206
ตารางที่ 5.9	แผนควบคุมปัจจัยนำเข้าของกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินสำหรับสูตรการผลิต H2.....	207
ตารางที่ 5.10	แผนควบคุมค่าคุณสมบัติของกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินสำหรับสูตรการผลิต H2.....	207

ตารางที่ 5.11 แบบฟอร์มการตรวจสอบ (Check Sheet).....	208
ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบค่าการปรับตั้งเครื่องจักรแบบ Hierarchical Model กับ Non-Hierarchical Model.....	215



สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่ 1.1	แผนผังกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา.....	4
รูปที่ 1.2	ค่าใช้จ่าย (ล้านบาท/ปี) ของวัตถุดิบภายในกระบวนการทรายเคลือบเรซิน.....	7
รูปที่ 1.3	กราฟปริมาณยอดขาย (ตัน/ปี) ของสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวง.....	10
รูปที่ 1.4	ค่าความสามารถของกระบวนการของค่าความทนแรงดัดโค้ง.....	12
รูปที่ 1.5	ค่าความสามารถของกระบวนการของปริมาณการสูญเสียหลังการเผา.....	13
รูปที่ 1.6	ค่าความสามารถของกระบวนการของอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว.....	14
รูปที่ 1.7	ค่าความสามารถของกระบวนการของค่าแก๊ส.....	15
รูปที่ 1.8	ค่าความสามารถของกระบวนการของการขยายตัวทางความร้อน.....	16
รูปที่ 1.9	ค่าความสามารถของกระบวนการของความโค้งงอของชิ้นงาน.....	17
รูปที่ 1.10	ค่าความสามารถของกระบวนการของค่าฟิลแบค.....	18
รูปที่ 1.11	ค่าความสามารถของกระบวนการของค่าความหนาของผนัง.....	19
รูปที่ 2.1	หลักการของพาเรโต.....	32
รูปที่ 2.2	ตัวอย่างแผนผังแสดงเหตุและผล.....	35
รูปที่ 2.3	แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ.....	36
รูปที่ 2.4	ตัวอย่างกราฟค่าความผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ.....	38
รูปที่ 2.5	ตัวอย่างกราฟค่าความผิดพลาดที่มีความเป็นอิสระต่อกัน.....	39
รูปที่ 2.6	ตัวอย่างกราฟค่าความผิดพลาดที่มีความแปรปรวนคงที่.....	39
รูปที่ 2.7	กราฟพื้นผิวตอบสนองและกราฟโครงร่างของตัวแปรตอบสนองที่มีค่ามากที่สุด.....	43
รูปที่ 2.8	กราฟพื้นผิวตอบสนองและกราฟโครงร่างของตัวแปรตอบสนองที่มีค่าน้อยที่สุด.....	43
รูปที่ 2.9	ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง.....	44
รูปที่ 2.10	ตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken กรณีที่มี 3 ปัจจัย.....	45
รูปที่ 2.11	ขั้นตอนการหล่อโลหะโดยแบบหล่อทราย.....	48

รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของแบบหล่อ	49
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างของการใช้ไส้แบบในงานหล่อ	50
รูปที่ 2.14 Half Core Box	51
รูปที่ 2.15 Slap or Dump Core Box	51
รูปที่ 2.16 Split Core Box	52
รูปที่ 2.17 Left and Right Hand Core Box	52
รูปที่ 2.18 Strickle Core Box	52
รูปที่ 2.19 Gang Core Box.....	53
รูปที่ 2.20 Loose Piece Core Box.....	53
รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบของเครื่องจักรในการทำให้แบบเปลือก	54
รูปที่ 2.22 เครื่องผสมทรายชนิดใบพาย (Impeller Mixer)	58
รูปที่ 2.23 เครื่องผสมทรายชนิดลูกกลิ้งบด (Roller Mill Mixer)	58
รูปที่ 2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดัดโค้งกับปริมาณเรซินของกรรมวิธี	67
รูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน	73
รูปที่ 3.2 กราฟพาเรโตของผลการประเมินคะแนนของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด	84
รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการทำงานภายในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน	93
รูปที่ 4.1 รายละเอียดของการออกแบบการทดลองในส่วนของ Factorial Run	101
รูปที่ 4.2 การกระจายตัวส่วนตกค้างของความทนแรงดัดโค้ง.....	111
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความทนแรงดัดโค้ง.....	112
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความทนแรงดัดโค้ง โดยวิธีการลดตัวแปรอิสระ.....	114
รูปที่ 4.5 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง A และ C ที่ส่งผลกระทบต่อความทนแรงดัดโค้ง.....	116

รูปที่ 4.6 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง A และ D ที่ส่งผลกระทบต่อความทนแรงดัดโค้ง.....	117
รูปที่ 4.7 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง C และ E ที่ส่งผลกระทบต่อความทนแรงดัดโค้ง.....	118
รูปที่ 4.8 ผลกระทบหลักของปัจจัย B ที่ส่งผลต่อความทนแรงดัดโค้ง.....	119
รูปที่ 4.9 การกระจายตัวส่วนตกค้างของปริมาณการสูญเสียหลังการเผา.....	120
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณการสูญเสียหลังการเผา..	121
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณการสูญเสียหลังการเผา โดยวิธีลดตัวแปรอิสระ.....	123
รูปที่ 4.12 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง A และ C ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผา.....	125
รูปที่ 4.13 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง C และ E ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผา.....	126
รูปที่ 4.14 ผลกระทบหลักของปัจจัย D ที่ส่งผลต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผา.....	127
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวส่วนตกค้างของอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	128
รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	129
รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว โดยวิธีลดตัวแปรอิสระ.....	131
รูปที่ 4.18 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง A และ E ที่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	133
รูปที่ 4.19 ผลกระทบหลักของปัจจัย C และ F ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	134
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าแก๊ส	135
รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าแก๊ส.....	136
รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าแก๊ส โดยวิธีลดตัวแปรอิสระ ..	138
รูปที่ 4.23 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง A และ E ที่ส่งผลกระทบต่อค่าแก๊ส.....	140

รูปที่ 4.24 ผลกระทบหลักของปัจจัย B, D และ F ที่ส่งผลต่อค่าแก๊ส	141
รูปที่ 4.25 การกระจายตัวส่วนตกค้างของการขยายตัวทางความร้อน	142
รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับการขยายตัวทางความร้อน.....	143
รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับการขยายตัวทางความร้อน โดย วิธีลดตัวแปรอิสระ	145
รูปที่ 4.28 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง A และ E ที่ส่งผลกระทบต่อ ต่อการขยายตัวทางความร้อน.....	147
รูปที่ 4.29 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง C และ D ที่ส่งผลกระทบต่อ ต่อการขยายตัวทางความร้อน.....	148
รูปที่ 4.30 ผลกระทบหลักของปัจจัย F ที่ส่งผลต่อการขยายตัวทางความร้อน	149
รูปที่ 4.31 การกระจายตัวส่วนตกค้างของความโค้งงอของชิ้นงาน.....	149
รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความโค้งงอของชิ้นงาน	151
รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความโค้งงอของชิ้นงาน	153
รูปที่ 4.34 ผลกระทบหลักของปัจจัย B, C, E และ F ที่ส่งผลต่อความโค้งงอของชิ้นงาน	156
รูปที่ 4.35 การกระจายตัวส่วนตกค้างของฟิลแบค	157
รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับฟิลแบค.....	158
รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับฟิลแบค.....	160
รูปที่ 4.38 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง D และ E ที่ส่งผลกระทบต่อ ต่อฟิลแบค.....	162
รูปที่ 4.39 ผลกระทบหลักของปัจจัย A และ F ที่ส่งผลต่อฟิลแบค	163
รูปที่ 4.40 การกระจายตัวส่วนตกค้างของความหนาของผนัง.....	164
รูปที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความหนาของผนัง	165
รูปที่ 4.42 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความหนาของผนัง	167
รูปที่ 4.43 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง D และ F ที่ส่งผลกระทบต่อ ต่อความหนาของผนัง	169

รูปที่ 4.44 ผลกระทบหลักของปัจจัย A และ B ที่ส่งผลต่อความหนาของผนัง	170
รูปที่ 4.45 ผลจากการทำ Response Optimizer เพื่อหาค่าการปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย	175
รูปที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของความทนแรงดัดโค้ง	185
รูปที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของปริมาณการสูญเสียหลังการเผา	187
รูปที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	189
รูปที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของแก๊ส	191
รูปที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของการขยายตัวทางความร้อน	193
รูปที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของความโค้งงอของชิ้นงาน	195
รูปที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของฟิลแบค	197
รูปที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของความหนาของผนัง	199
รูปที่ 5.9 ผลกระทบของเปอร์เซ็นต์เรซินที่มีต่อค่าความทนแรงดัดโค้ง (kgf/cm ²) และค่าใช้จ่าย (บาท/ปี)	204

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการหล่อโลหะของประเทศไทย ถือเป็นอุตสาหกรรมต้นทางที่มีความสำคัญและเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมการผลิตอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมยานยนต์ วัสดุก่อสร้าง เครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องจักรกล เพอร์นิเจอร์ ตลอดจนอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ซึ่งทุกอุตสาหกรรมที่กล่าวมาข้างต้น ล้วนต้องอาศัยการหล่อโลหะในการนำเหล็กมาขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วน หรือใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตของอุตสาหกรรมอื่นๆอีกมากมาย อีกทั้งเมื่อดูข้อมูลจากสมาคมอุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย พบว่าในปัจจุบันประเทศไทยมีอัตราการใช้โลหะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องปีละ 4.5% หรือประมาณ 650,000 ตัน/ปี [1] ส่งผลให้เกิดผู้ผลิตรายใหม่เพิ่มมากขึ้นและการแข่งขันที่สูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ผู้ประกอบการเล็งเห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพที่ดีและลดต้นทุนการผลิต เพื่อสร้างความพึงพอใจให้แก่ผู้บริโภคและเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทางธุรกิจ

ในอุตสาหกรรมการหล่อโลหะมีกรรมวิธีในการทำหลากหลายวิธี เช่น การหล่อโดยแบบหล่อทราย (Sand Casting) การหล่อโดยแบบหล่อเซรามิกส์หรือขี้ผึ้ง (Investment Casting or Lost Wax Casting) การหล่อโดยแบบหล่อถาวร (Permanent Mold Casting) เป็นต้น การหล่อโดยแบบหล่อทรายถือว่าเป็นกรรมวิธีการหล่อที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมงานหล่อมากที่สุด เนื่องจากสามารถใช้ในกระบวนการหล่อโลหะได้เกือบทุกชนิด อีกทั้งทรายที่ใช้ในกระบวนการยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยสามารถแบ่งประเภทตามวัสดุตัวประสานได้ 8 แบบ คือ แบบหล่อทรายแห้ง แบบหล่อกรีนทราย แบบหล่อซีโอทู แบบหล่อซีเมนต์บอนด์ แบบหล่อฟูนเรซิน แบบหล่อแข็งตัวได้เองและแบบหล่อเปลือก โดยวิธีการทำแบบหล่อทรายจะเริ่มต้นจากการออกแบบงานหล่อ และทำการสร้างแม่พิมพ์ที่มีการออกแบบทางวิ่งและระบบป้อนเติมเข้าไปในแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการไว้ ในบางงานที่ต้องการมีรูหรือโพรง จะต้องเพิ่มขึ้นตอนในการทำไส้แบบเข้าไปด้วย เมื่อวางไส้แบบเสร็จก็จะทำการประกบแบบหล่อให้เรียบร้อยเพื่อรอเทน้ำโลหะต่อไป ซึ่งไส้แบบถือว่าเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่ต้องสัมผัสกับน้ำโลหะโดยตรง ดังนั้นวัตถุดิบที่ใช้ทำไส้แบบจะต้องมีคุณสมบัติความแข็งแรงสูงเพื่อป้องกันการแตกหักในขณะกระบวนการหล่อโลหะ ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ทำไส้แบบจะมีความหลากหลายตามการใช้งาน ในส่วนของโรงงานอุตสาหกรรมกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตทรายเคลือบเรซิน (Resin Coated Sand) ที่ใช้ในการทำไส้แบบสำหรับงานหล่อ สามารถแบ่งสูตรการผลิตทรายเคลือบเรซินออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการนำไปใช้งานคือ สูตรการผลิตที่ใช้ในการทำไส้

แบบตัน (Solid Core) และไส้แบบกลวง (Hollow Core) โดยสูตรการผลิตทั้ง 2 ประเภท จะมีวัตถุดิบหลักที่สำคัญคือทรายและเรซิน โดยเรซินที่ใช้จะมีส่วนประกอบของฟีนอลรวมกับฟอร์มัลดีไฮด์เรียกว่าฟีนอลิกเรซิน ซึ่งฟีนอลิกเรซินเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ความทนแรงดัดโค้ง (Bending Strength) แก๊ส (Gas) การขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion) ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา (Loss of Ignition: LOI) อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว (Melting Point: MP) ค่าความโก่งงอ (Bend) พิลแบค (Peel Back) และความหนาของผนัง (Shell Thickness) จากนั้นผู้วิจัยจึงเริ่มทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นและนำมาทำการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการพบว่า ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ของค่าคุณสมบัติแต่ละตัวมีค่าค่อนข้างต่ำ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆให้ดีขึ้น โดยแนวทางในการปรับปรุงค่าคุณสมบัตินั้นสามารถทำได้ 3 แนวทาง คือ การหาสัดส่วนการผสมของสูตรการผลิตใหม่ การปรับเปลี่ยนปริมาณฟีนอลิกเรซิน และการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม จากแนวทางการปรับปรุงดังกล่าว แนวทางแรกจะเป็นการหาสัดส่วนการผสมของสูตรการผลิตใหม่ซึ่งในปัจจุบันกำลังมีการศึกษาและวิจัยอยู่ ส่วนแนวทางต่อมาจะเป็นการปรับเปลี่ยนปริมาณฟีนอลิกเรซินซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกและง่ายต่อการปฏิบัติงานมากที่สุด แต่เนื่องจากฟีนอลิกเรซินเป็นวัตถุดิบที่มีราคาค่อนข้างสูง ทำให้การปรับเปลี่ยนปริมาณฟีนอลิกเรซินโดยตรง จะทำให้ทางโรงงานกรณีศึกษาต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เพิ่มมากขึ้นยังส่งผลให้เกิดปัญหาพูนบนชิ้นงานตามมาอีกด้วย ดังนั้นการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความน่าสนใจที่จะนำมาใช้ในการปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆให้ดีขึ้น เช่น อุณหภูมิในการโม่ทราย เวลาในการปล่อยวัตถุดิบต่างๆ เป็นต้น โดยไม่เพิ่มปริมาณการเติมฟีนอลิกเรซิน ทั้งนี้ถ้าหากสามารถปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆให้ดีขึ้นเกินกว่าช่วงการใช้งานของผลิตภัณฑ์ จะทำให้ในอนาคตทางโรงงานสามารถปรับลดปริมาณการใช้ฟีนอลิกเรซินลงได้ แต่ก็ต้องพิจารณาให้ค่าคุณสมบัติต่างๆอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้เช่นเดียวกัน ซึ่งผลที่ตามมาจะทำให้ทางโรงงานสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในส่วนนี้ลงได้ อีกทั้งยังเป็นการสร้างความเชื่อมั่นให้กับลูกค้าและพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย แต่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเฉพาะในส่วนของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน จากนั้นจะทำการหาระดับของปัจจัยที่ทำให้ค่าคุณสมบัติต่างๆนั้นดีขึ้น

1.2 รายละเอียดเบื้องต้นของโรงงานการศึกษา

1.2.1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานการศึกษา

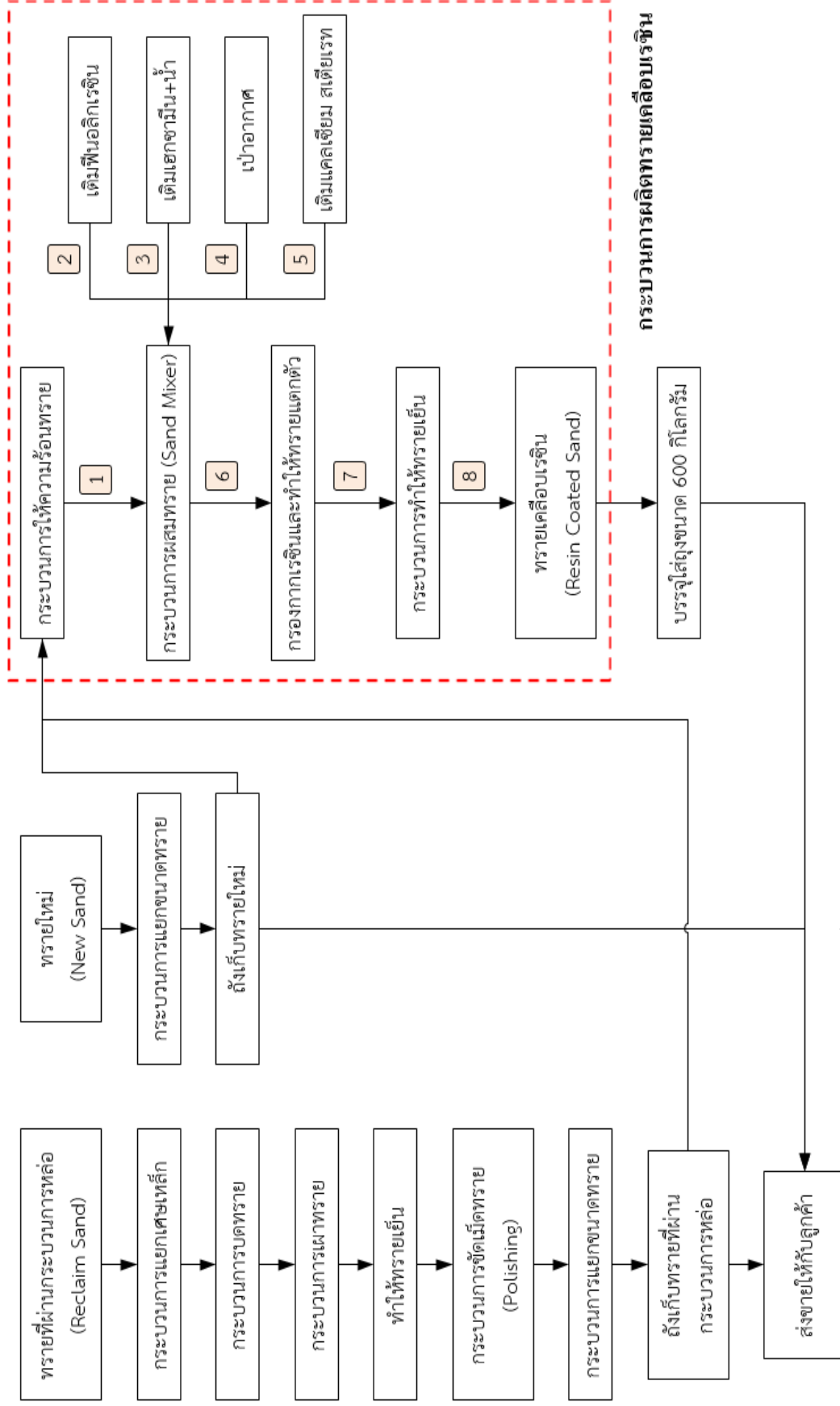
โรงงานการศึกษาเป็นโรงงานผลิตทรายเคลือบเรซิน (Resin Coated Sand) ซึ่งภายในโรงงานจะประกอบด้วย 3 สายการผลิตได้แก่ กระบวนการนำทรายหล่อกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการคัดขนาดสำหรับทรายใหม่ และกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน โดยทรายเคลือบเรซินเป็นวัตถุดิบที่ถูกนำไปใช้ในการทำไส้แบบสำหรับงานหล่อ ซึ่งส่วนมากแล้วจะถูกนำไปใช้กับงานหล่อที่เกี่ยวกับการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมหลากหลายด้าน เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์/รถจักรยานยนต์ เครื่องจักรกลทางการเกษตร หัวเตาแก๊ส เป็นต้น

ในส่วน of โรงงานผลิตทรายเคลือบเรซิน จะมีรายละเอียดผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ ดังรูปที่ 1.1 คือ

1. กระบวนการนำทรายหล่อกลับมาใช้ใหม่ เป็นกระบวนการที่ทางโรงงานจะรับซื้อทรายที่ผ่านกระบวนการหล่อกลับมาทำการแยกผงละเอียด เศษเหล็ก และสิ่งเจือปนต่างๆออก ซึ่งต่อมทรายที่ได้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการบดเพื่อทำให้ทรายที่ติดกันเป็นก้อนแตกออก จากนั้นจะถูกนำไปเผาและทำให้เย็นตามลำดับ ซึ่งทรายที่ได้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการขัดและแยกขนาดเม็ดทราย และหลังจากนั้นจะถูกส่งไปเก็บไว้ในถังเก็บทรายที่ใช้แล้วเพื่อรอจำหน่ายหรือนำไปใช้ต่อในกระบวนการทรายเคลือบเรซินต่อไป

2. กระบวนการคัดขนาดสำหรับทรายใหม่ เป็นกระบวนการที่ทางโรงงานจะรับซื้อทรายใหม่ที่ยังไม่เคยผ่านกระบวนการหล่อกลับมาทำการคัดแยกขนาดทราย จากนั้นทรายที่ได้จะถูกส่งไปเก็บไว้ในถังเก็บทรายใหม่เพื่อรอจำหน่ายหรือนำไปใช้ต่อในกระบวนการทรายเคลือบเรซินต่อไป

3. กระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน (Resin Coated Sand) เป็นกระบวนการในการนำวัตถุดิบจาก 2 กระบวนการก่อนหน้านี้มาผ่านกระบวนการให้ความร้อนและส่งไปที่เครื่องผสมทราย จากนั้นจะทำการเติมฟีนอลิกเรซิน เฮกซามีน+น้ำ และแคลเซียมสเตียเรท ตามลำดับ ซึ่งทรายเคลือบเรซินที่ได้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการรอกกาเรซินและทำให้ทรายแตกตัว หลังจากนั้นจะถูกส่งไปที่กระบวนการทำให้เย็นแล้วจึงทำการบรรจุใส่ถุงขนาด 600 กิโลกรัม เพื่อรอจำหน่ายต่อไป



รูปที่ 1.1 แผนผังกระบวนการผลิตของโรงงานนี้ศึกษา

1.3 การศึกษาสภาพปัญหาและความสำคัญของปัญหาในปัจจุบัน

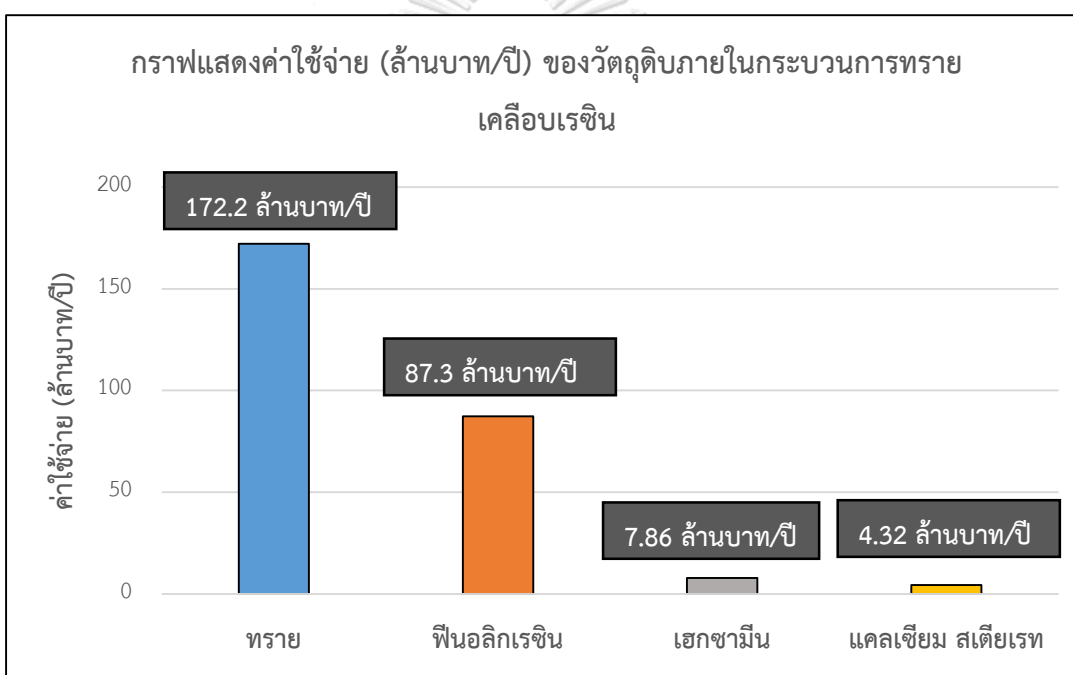
ในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินของทางโรงงานกรณีศึกษาจะมีสูตรการผลิตมากกว่า 80 สูตร โดยแบ่งสูตรการผลิตออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ สูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบตัน (Solid Core) จำนวน 73 สูตร และสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวง (Hollow Core) จำนวน 7 สูตร ซึ่งจะมีการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยแบ่งคุณสมบัติที่ตรวจสอบออกเป็น 6 ประเภท สำหรับสูตรการผลิตที่ใช้ทำไส้แบบตัน ได้แก่ ความทนแรงดัดโค้ง แก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว และค่าความโค้งงอ ในส่วนของสูตรการผลิตที่ใช้ทำไส้แบบกลวงจะมีการตรวจสอบคุณสมบัติฟิลแบคและความหนาของผนังเข้ามาด้วย โดยวัตถุดิบที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นคือ ฟีนอลิกเรซิน ซึ่งปัจจุบันในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจะมีการเติมฟีนอลิกเรซินเท่ากับ 1 – 3 % ของน้ำหนักทรายขึ้นอยู่กับสูตรการผลิตแต่ละสูตร

จากนั้นผู้วิจัยจึงได้เริ่มทำการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นตั้งแต่ปี พ.ศ.2559 ถึง พ.ศ.2560 พบว่าวัตถุดิบที่ทางโรงงานใช้ในกระบวนการทรายเคลือบเรซินประกอบด้วย ทราย ฟีนอลิกเรซิน เฮกซามีน และแคลเซียมสเตียเรท ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนการใช้งาน 97.4%, 2.1%, 0.4% และ 0.1% ตามลำดับ ดังตารางที่ 1.1 โดยวัตถุดิบที่มีปริมาณการใช้งานมากที่สุดคือ ทราย ซึ่งมีสัดส่วนการใช้งานเท่ากับ 97.4% คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่สูงถึง 172.2 ล้านบาท/ปี ดังรูปที่ 1.2 เนื่องจากการผลิตในแต่ละรอบการผลิตจะประกอบด้วยทรายจำนวน 600 กิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่ทางโรงงานกำหนดไว้ ส่งผลให้ปริมาณการใช้ทรายมีค่าที่สูง ในลำดับถัดมาจะเป็นปริมาณการใช้ฟีนอลิกเรซินที่มีสัดส่วนการใช้งานเท่ากับ 2.1% แต่มีค่าใช้จ่ายที่สูงถึง 87.3 ล้านบาท/ปี ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับปริมาณการใช้งาน เนื่องจากฟีนอลิกเรซินนั้นมีราคาค่อนข้างสูง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากวัตถุดิบในส่วนนี้มีค่าสูงขึ้นไปด้วย แม้ว่าจะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าทรายเป็นจำนวนมากก็ตาม ซึ่งจุดประสงค์หลักในการเติมฟีนอลิกเรซินลงไปก็เพื่อเพิ่มความทนแรงดัดโค้งและช่วยให้การเซตตัวในขณะนำไปทำไส้แบบเร็วขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้การขยายตัวทางความร้อนมีค่าลดลงด้วย โดยค่าคุณสมบัติที่กล่าวมาจะมีค่าขึ้นก็ต่อเมื่อปริมาณฟีนอลิกเรซินมีค่ามาก ในขณะเดียวกันถ้าปริมาณฟีนอลิกเรซินมีค่ามากจะทำให้เกิดแก๊สในชิ้นงานสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาารุพรุนในชิ้นงานตามมา จะเห็นได้ว่าการปรับเพิ่มปริมาณฟีนอลิกเรซินโดยตรงจะทำให้จะทำให้ค่าคุณสมบัติที่พิจารณาบางตัวดีขึ้นและสะดวกต่อการปฏิบัติงาน แต่ก็มีผลเสียคือ ทางโรงงานจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้เพิ่มขึ้น และปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เพิ่มมากขึ้นก็อาจจะส่งผลทำให้เกิดปัญหาารุพรุนในชิ้นงานตามมาดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจวิธีหนึ่งในการ

ปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆให้ดีขึ้น ทั้งนี้การปรับตั้งค่าเครื่องจักรจะส่งผลทำให้ค่าคุณสมบัติต่างๆที่ทางโรงงานนำเข้ามาพิจารณามีการเปลี่ยนแปลงไป เช่น ถ้าอุณหภูมิของทรายมีค่าต่ำเกินไปจะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลงและอาจจะส่งผลให้การขยายตัวทางความร้อนมีค่าสูงขึ้น แต่ข้อดีก็คือสามารถแก้ปัญหาการเกิดรูพรุนในชิ้นงานได้ดีขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำพินอลิกเรซินจะละลายไม่หมดและไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง โดยพินอลิกเรซินที่ไม่ละลายจะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการกรองกากเรซิน ซึ่งเปรียบเสมือนการเติมพินอลิกเรซินในปริมาณที่น้อยนั่นเอง ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิสูงจนเกินไปจะทำให้พินอลิกเรซินหลอมละลายหมดและไม่สามารถเคลือบเม็ดทรายได้ ทั้งนี้ค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานพิจารณาจะประกอบไปด้วย ความทนแรงดัดโค้ง แก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ค่าความโค้งงอ พิลแบค และความหนาของผนัง ซึ่งค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานต้องการจะมีค่าที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 1.2 และค่าคุณสมบัติที่กล่าวมาจะต้องทำการพิจารณาควบคู่กันไปโดยที่ค่าน้ำหนักความสำคัญของคุณสมบัติแต่ละตัวจะมีค่าไม่เท่ากัน โดยแนวความคิดดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นๆภายในโรงงาน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆให้ดีขึ้นได้อีกด้วย เนื่องจากค่าการปรับตั้งเครื่องจักรของสูตรการผลิตแต่ละสูตรนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ถ้าหากสามารถปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆให้ดีขึ้นเกินกว่าช่วงการใช้งานของผลิตภัณฑ์ จะทำให้ในอนาคตทางโรงงานสามารถปรับลดปริมาณการใช้พินอลิกเรซินลงได้ แต่ก็ต้องพิจารณาให้ค่าคุณสมบัติต่างๆอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เช่นเดียวกัน ซึ่งผลที่ตามมาจะทำให้ทางโรงงานสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในส่วนนี้ลงได้ อีกทั้งยังเป็นการสร้างความเชื่อมั่นให้กับลูกค้าและพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการใช้งาน (ตัน/ปี) ของวัตถุดิบภายในกระบวนการทรายเคลือบเรซิน

วัตถุดิบ	ปริมาณการใช้ (ตัน/ปี)	สัดส่วนการใช้งาน (%)
ทราย	50134	97.4
ฟีนอลิกเรซิน	1079	2.1
เฮกซามีน	185	0.4
แคลเซียมสเตียเรท	77	0.1



รูปที่ 1.2 ค่าใช้จ่าย (ล้านบาท/ปี) ของวัตถุดิบภายในกระบวนการทรายเคลือบเรซิน

ตารางที่ 1.2 เป้าหมายของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด ที่ทางโรงงานพิจารณา

คุณสมบัติ	หน่วย	ความต้องการ	เหตุผล
ความทนแรงดัดโค้ง	kgf/cm ²	สูง	เพื่อป้องกันไส้แบบแตกขณะกระบวนการหล่อหรือระหว่างการทำไส้แบบ
ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา	%	ต่ำ	เป็นค่าที่ใช้ในการทวนสอบน้ำหนักของวัตถุดิบที่เติมลงไปในการกระบวนการ
อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	°C	สูง	ในการทำไส้แบบกลางจะไม่ต้องการให้ทรายเกิดการเซตตัวที่บริเวณกลางไส้แบบ เนื่องจากจะทำให้ยากต่อการเททรายออกมาภายหลังจากการทำไส้แบบ ซึ่งการเซตตัวของทรายที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้ทรายไม่จับตัวกันบริเวณตรงกลางไส้แบบ และสามารถเทออกมาได้ง่าย
แก๊ส	ml/g	ต่ำ	เพื่อป้องกันการเกิดแก๊สของงานหล่อ เนื่องจาก การเกิดแก๊สมากจะส่งผลทำให้เกิดปัญหา รุพบนบนชิ้นงาน
การขยายตัวทางความร้อน	%	ต่ำ	เพื่อป้องกันปัญหา Vening (มีลักษณะคล้ายครีบที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานหล่อ) ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานโค้ง ส่งผลให้ขนาดของชิ้นงานหลังกระบวนการหล่อมีการเปลี่ยนแปลงไป
ความโค้งงอของชิ้นงาน	mm	ต่ำ	เป็นค่าที่ใช้ในการบ่งบอกถึงความโค้งงอของชิ้นงาน ซึ่งค่าดังกล่าวจะบ่งบอกถึงการเซตตัวของผนังและเวลาในการทำไส้แบบ ถ้าชิ้นงานโค้งงอน้อยนั้นแสดงว่าการเซตตัวของผนังนั้นเกิดขึ้นเร็ว ส่งผลให้การทำให้แบบก็จะใช้เวลาที่น้อยลงด้วย
ฟิลแบค	-	สูง	จะการตรวจสอบผิวข้างในของชิ้นงานว่าเกิดการแยกชั้น (Two Layer) หรือไม่ จากนั้นจะทำการคำนวณค่า Peel Back Ratio ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ใช้ในการบ่งบอกถึงความหนาของผนังไส้แบบ

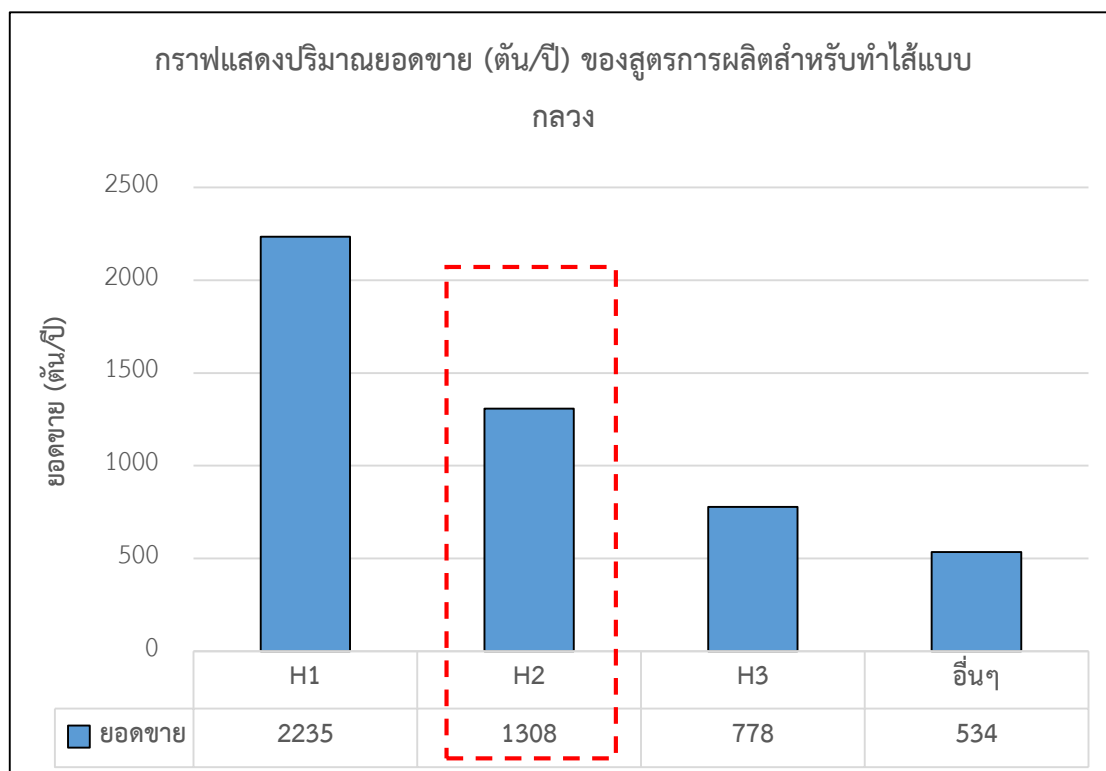
ตารางที่ 1.2 เป้าหมายของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด ที่ทางโรงงานพิจารณา (ต่อ)

คุณสมบัติ	หน่วย	ความต้องการ	เหตุผล
ความหนาของผนัง	mm	สูง	จะเป็นการตรวจสอบความหนาของผนัง ซึ่งถ้าความหนามากนั้นแสดงว่าการเซตตัวของผนังเร็ว ทำให้เวลาที่ใช้ในการทำไส้แบบเร็วขึ้นด้วย

การคัดเลือกสูตรการผลิตที่ใช้เป็นต้นแบบในการทดสอบ ในอันดับแรกจะพิจารณาเลือกประเภทของสูตรการผลิตซึ่งประกอบด้วย 2 ประเภท คือ สูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบตัน (Solid Core) และสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวง (Hollow Core) ซึ่งปัจจุบันทางโรงงานกรณีศึกษาจะให้ความสำคัญกับการพัฒนาสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวงเนื่องจากสูตรการผลิตประเภทนี้ทางโรงงานได้เริ่มผลิตออกจำหน่ายในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาและกำลังอยู่ในช่วงคิดค้นและพัฒนาเพื่อให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เทียบเท่ากับผู้ผลิตรายอื่นๆ อีกทั้งสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวงยังมีการเติมฟีนอลิกเรซินในปริมาณที่มากเนื่องจากต้องการความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ยังพบว่าสูตรการผลิตประเภทนี้ยังได้รับข้อร้องเรียนจากลูกค้าในเรื่องคุณภาพอยู่บ่อยครั้ง ส่งผลถึงความเชื่อมั่นของลูกค้าที่มีต่อทางโรงงาน ดังนั้นทางผู้วิจัยและทีมงานจึงเลือกสูตรการผลิตสำหรับทำไส้กลวงมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์กรณีศึกษา

จากนั้นจึงทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อคัดเลือกสูตรการผลิตที่จะนำมาทำการทดสอบ โดยพิจารณาจากข้อมูลยอดขายตั้งแต่ปี พ.ศ.2559 ถึง พ.ศ.2560 พบว่า สูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวงที่มีความน่าสนใจที่จะนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์กรณีศึกษามีทั้งหมด 3 สูตร โดยพิจารณาจากสูตรการผลิตที่มีจำนวนยอดขายสูงของทางโรงงาน ซึ่งสูตรการผลิตอื่นๆที่เหลือนั้นมียอดขายค่อนข้างต่ำ ดังรูปที่ 1.3 โดยผู้วิจัยได้ทำการเลือกสูตรการผลิต H2 มาทำการทดสอบ เนื่องจากสูตรการผลิต H2 มียอดขายสูงเป็นอันดับสองและช่วงเวลาในการผลิตจะอยู่ในช่วงเช้าและช่วงบ่าย ซึ่งมีความสะดวกต่อการนำมาทำการทดลอง อีกทั้งทรายที่ใช้เป็นองค์ประกอบหลักของสูตรการผลิตยังมีความคล้ายคลึงกับสูตรการผลิตอื่นๆ ทำให้สามารถนำวิธีการปรับปรุงไปประยุกต์ใช้ได้ง่าย อีกทั้งสูตรการผลิต H1 และ H3 ยังติดข้อจำกัดในเรื่องช่วงเวลาการผลิต ซึ่งสูตรการผลิตทั้งสองสูตรจะมีรอบการผลิตอยู่ในช่วงกลางคืน (หลังเวลา 18.00 น. เป็นต้นไป) ทำให้ไม่สะดวกต่อการนำมาศึกษา และวัตถุดิบที่ใช้ในการทดสอบแต่ละรอบยังมีความแปรปรวน ซึ่งอาจจะส่งกระทบทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับปรุงกระบวนการมีความไม่แน่นอน

จากการคัดเลือกสูตรการผลิตที่จะนำมาใช้เป็นต้นแบบในการปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆ ให้มีค่าที่ดีขึ้น โดยการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมสามารถสรุปได้ว่า สูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกกลางผู้วิจัยได้เลือกสูตร H2 มาทำการทดสอบ เนื่องจากสูตรการผลิตดังกล่าวมีความแปรปรวนที่เกิดจากวัตถุดิบน้อยที่สุด อีกทั้งทรายที่ใช้เป็นองค์ประกอบหลักของสูตรการผลิตยังมีความคล้ายคลึงกับสูตรการผลิตส่วนใหญ่ของโรงงาน ซึ่งง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคต



รูปที่ 1.3 กราฟปริมาณยอดขาย (ตัน/ปี) ของสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกกลาง

ต่อมาผู้วิจัยจึงทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด ของสูตรการผลิต H2 ที่ทางโรงงานการศึกษาได้ทำการบันทึกค่าเอาไว้เป็นจำนวน 60 รอบการผลิต โดยที่ค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด จะมีเกณฑ์การยอมรับดังตารางที่ 1.3 จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าความผันแปร และค่าความสามารถของกระบวนการเบื้องต้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1.4 พบว่า ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ของค่าคุณสมบัติแต่ละตัวมีค่าค่อนข้างต่ำ (มีค่าน้อยกว่า 1.33) [2] เนื่องจากค่าเฉลี่ยของค่าคุณสมบัติแต่ละตัวนั้นส่วนใหญ่จะไม่อยู่ในช่วงเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานได้กำหนดไว้ โดยการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1.3 เกณฑ์การยอมรับของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด ที่ทางโรงงานกำหนด

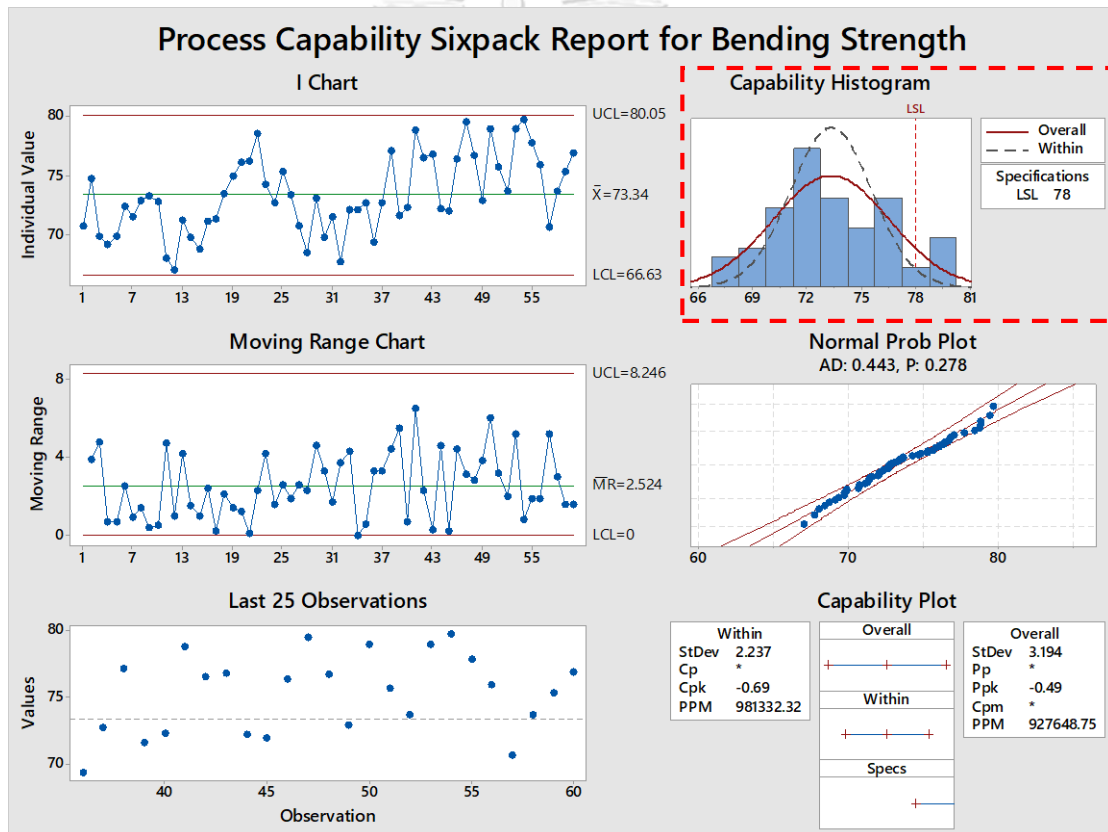
ค่าคุณสมบัติ	เกณฑ์การยอมรับ	ค่าคาดหวัง	หน่วย
1. ความทนแรงดัดโค้ง	≥ 78	≥ 86	kgf/cm ²
2. ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา	≤ 2.95	≤ 2.75	%
3. อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	≥ 100	≥ 110	°C
4. แก๊ส	≤ 11	≤ 8	ml/g
5. การขยายตัวทางความร้อน	≤ 1.25	≤ 0.9	%
6. ความโค้งงอของชิ้นงาน	≤ 0.4	0	mm
7. ฟीलแบค	≥ 70	100	-
8. ความหนาของผนัง	≥ 4.8	≥ 8	mm

ตารางที่ 1.4 การวิเคราะห์ค่าความสามารถของกระบวนการของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด

คุณสมบัติ	ค่าเฉลี่ย	ค่าความผันแปร	C _{pk}
1. ความทนแรงดัดโค้ง	73.34	3.19	-0.69
2. ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา	2.95	0.12	0.01
3. อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	103.98	1.94	0.78
4. แก๊ส	10.38	0.59	0.38
5. การขยายตัวทางความร้อน	1.13	0.07	0.53
6. ความโค้งงอของชิ้นงาน	0.43	0.04	-0.28
7. ฟीलแบค	71.77	11.46	0.06
8. ความหนาของผนัง	4.72	0.35	-0.07

1. ความทนแรงดัดโค้ง

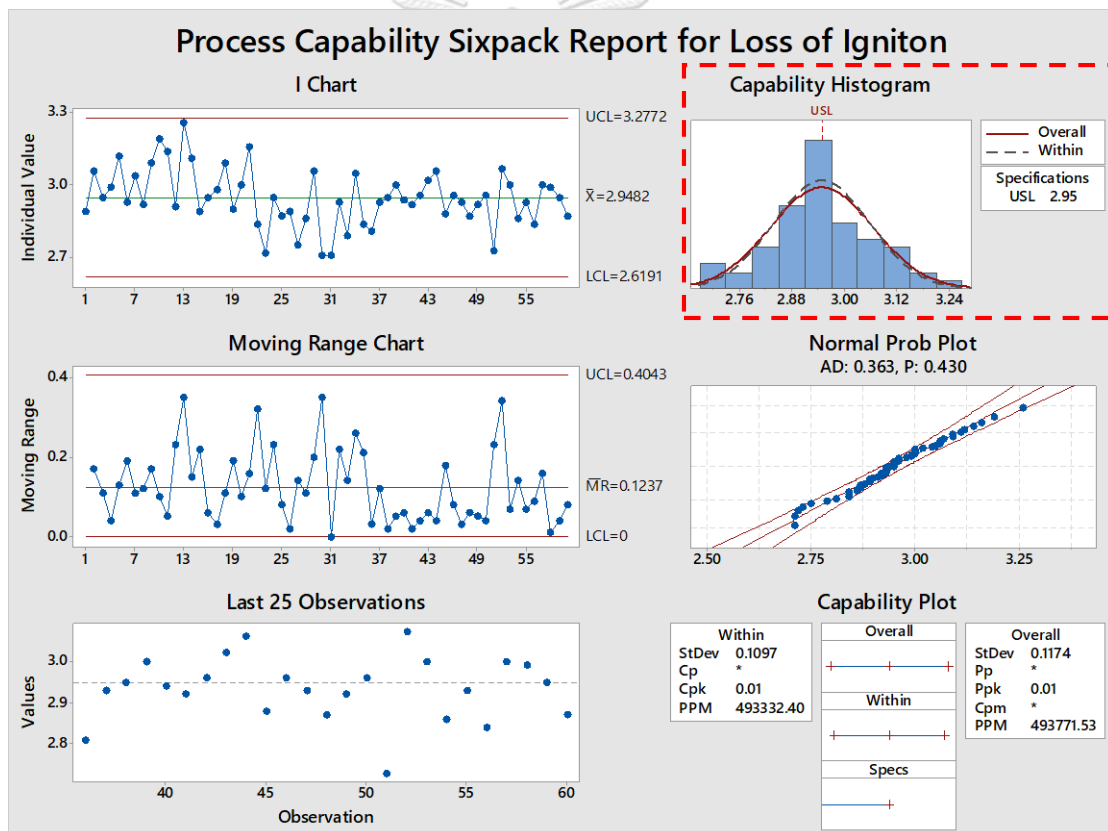
สำหรับความทนแรงดัดโค้งของสูตรการผลิต H2 จะมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ $\geq 78 \text{ kgf/cm}^2$ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการโดยพบว่า ค่าความสามารถของกระบวนการมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ -0.69 โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่นอกขีดจำกัดข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) ซึ่งออกนอกเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 1.4 (กราฟด้านบนขวา) อีกทั้งยังมีความผันแปรค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรน้อยลงและปรับปรุงให้ค่าเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 1.4 ค่าความสามารถของกระบวนการของค่าความทนแรงดัดโค้ง

2. ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

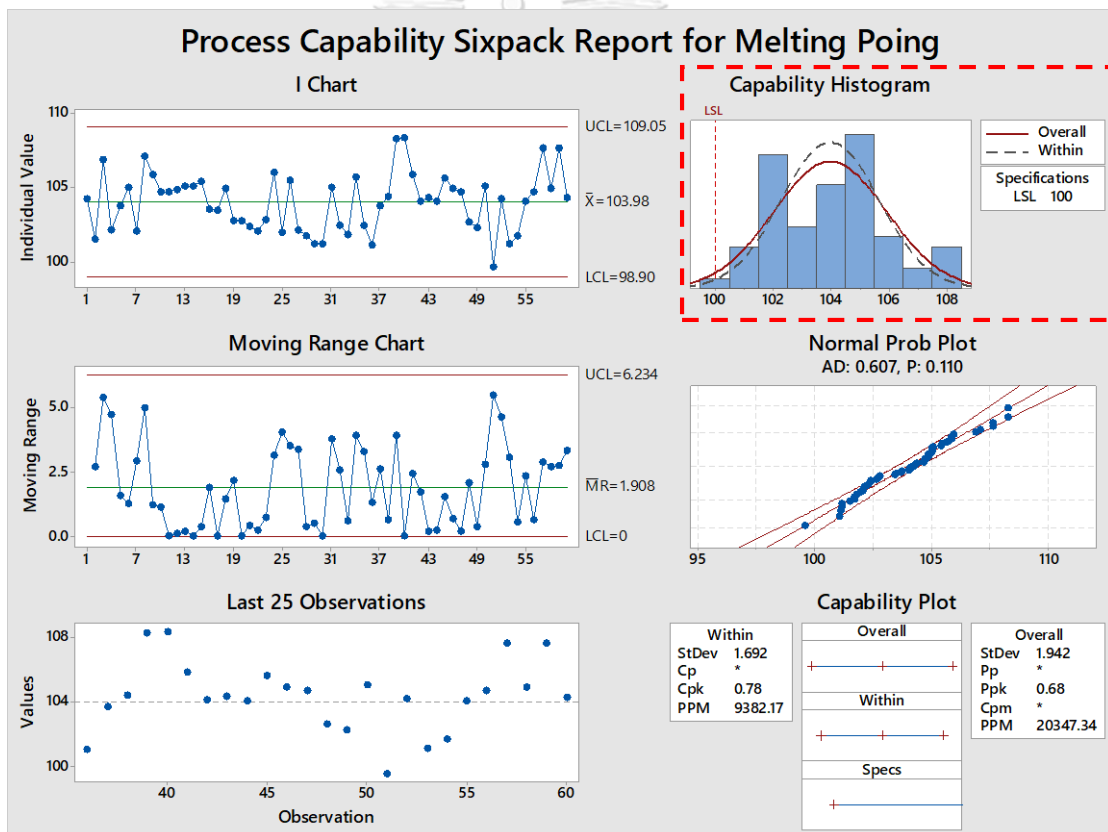
สำหรับปริมาณการสูญเสียหลังการเผาของสูตรการผลิต H2 จะมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ ≤ 2.95 เปอร์เซนต์ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการโดยพบว่า ค่าความสามารถของกระบวนการมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 0.01 โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่นอกขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน (USL) ซึ่งออกนอกเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 1.5 (กราฟด้านบนขวา) อีกทั้งยังมีความผันแปรค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรน้อยลงและปรับปรุงให้ค่าเฉลี่ยมีค่าต่ำลง



รูปที่ 1.5 ค่าความสามารถของกระบวนการของปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

3. อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

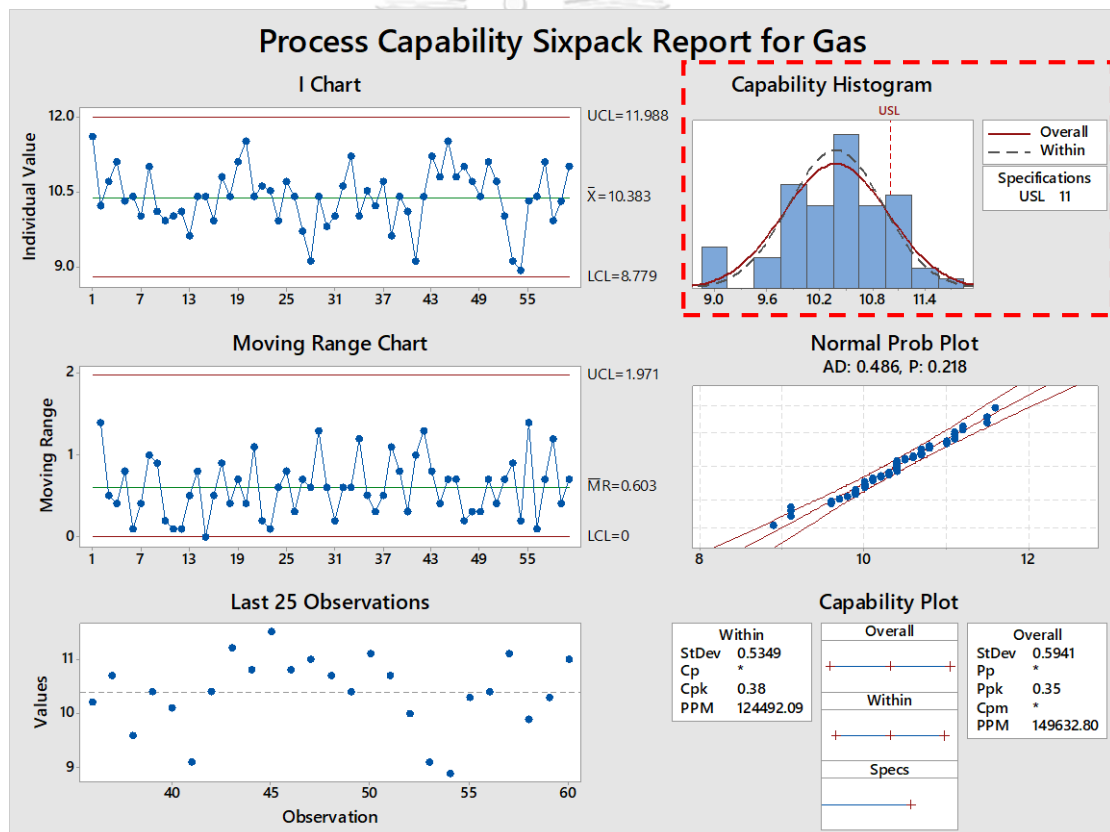
สำหรับปริมาณการสูญเสียหลังการเผาของสูตรการผลิต H2 จะมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ ≥ 100 °C หลังจากนั้นผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลเป็นจำนวน 60 รอบการผลิตเพื่อนำมาทำการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการโดยพบว่า ค่าความสามารถของกระบวนการมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 0.78 โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่ทางด้านขวาของขีดจำกัดข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) ดังแสดงในรูปที่ 1.6 (กราฟด้านบนขวา) ซึ่งยังมีค่าเฉลี่ยที่ต่ำและความผันแปรค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรน้อยลงและปรับปรุงให้ค่าเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 1.6 ค่าความสามารถของกระบวนการของอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

4. แก๊ส (Gas)

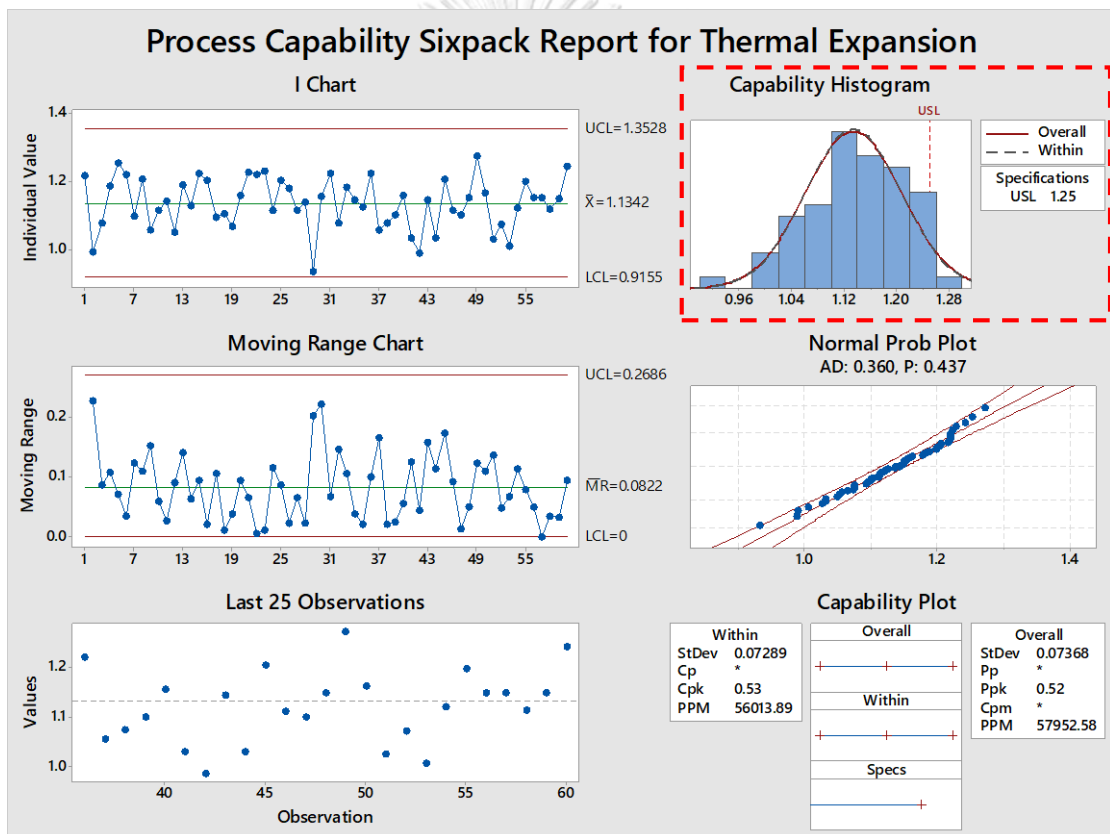
สำหรับค่าแก๊สของสูตรการผลิต H2 จะมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ ≤ 11 ml/g หลังจากนั้นผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการโดยพบว่า ค่าความสามารถของกระบวนการมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 0.38 โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่ทางด้านขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน (USL) และมีข้อมูลบางส่วนที่ออกนอกเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 1.7 (กราฟด้านบนขวา) อีกทั้งยังมีความผันแปรค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรน้อยลงและปรับปรุงให้ค่าเฉลี่ยมีค่าต่ำลง



รูปที่ 1.7 ค่าความสามารถของกระบวนการของค่าแก๊ส

5. การขยายตัวทางความร้อน

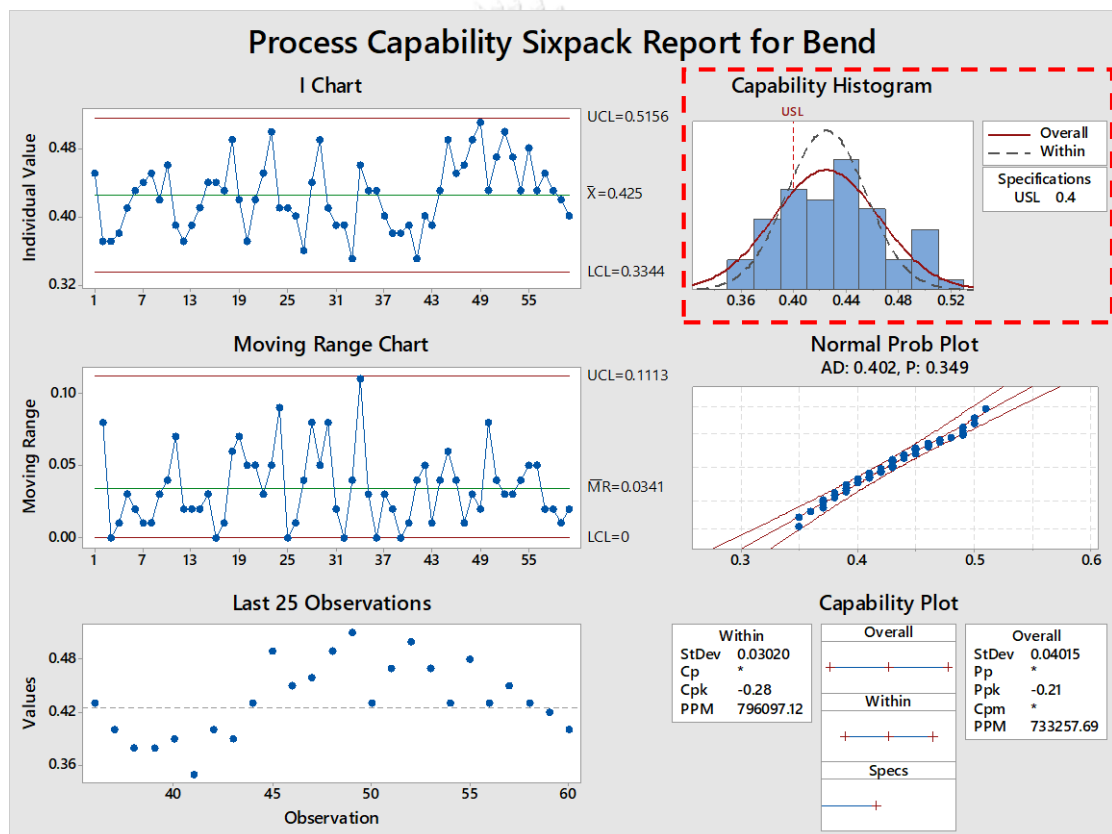
สำหรับการขยายตัวทางความร้อนของสูตรการผลิต H2 จะมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ ≤ 1.25 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการโดยพบว่า ค่าความสามารถของกระบวนการมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 0.53 โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่ทางด้านขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน (USL) ดังแสดงในรูปที่ 1.8 (กราฟด้านบนขวา) ซึ่งยังมีค่าเฉลี่ยที่สูงและความผันแปรค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรน้อยลงและปรับปรุงให้ค่าเฉลี่ยมีค่าต่ำลง



รูปที่ 1.8 ค่าความสามารถของกระบวนการของการขยายตัวทางความร้อน

6. ความโค้งงอของชิ้นงาน

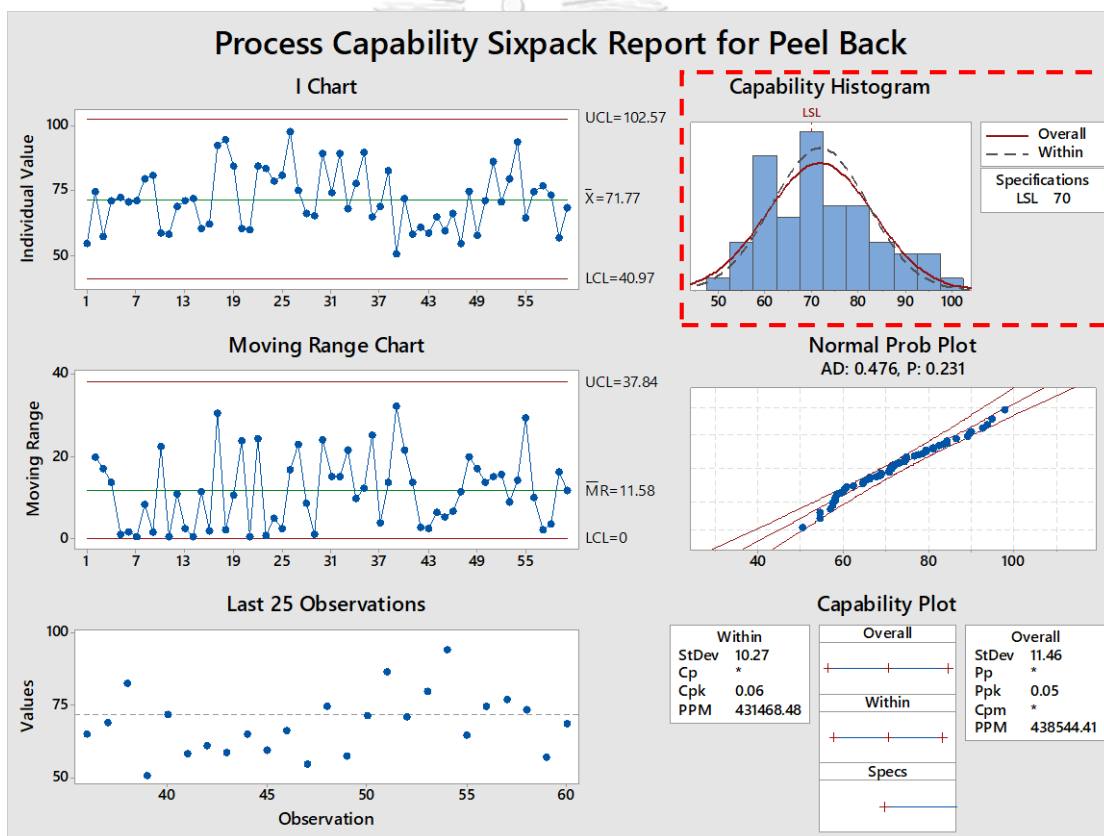
สำหรับค่าแก๊สของสูตรการผลิต H2 จะมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ ≤ 0.4 mm หลังจากนั้นผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการโดยพบว่า ค่าความสามารถของกระบวนการมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ -0.28 โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่นอกขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน (USL) ดังแสดงในรูปที่ 1.9 (กราฟด้านบนขวา) ซึ่งออกนอกเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรน้อยลงและปรับปรุงให้ค่าเฉลี่ยมีค่าต่ำลง



รูปที่ 1.9 ค่าความสามารถของกระบวนการของความโค้งงอของชิ้นงาน

7. ฟीलแบค

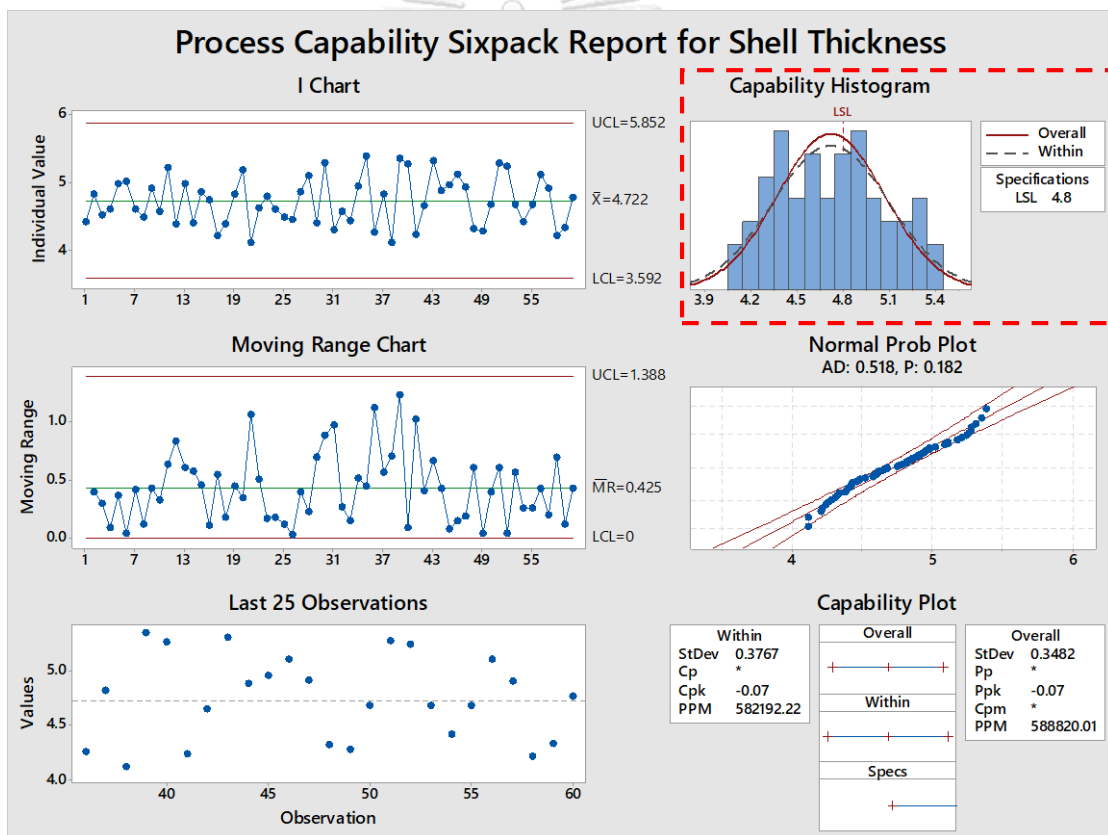
สำหรับค่าฟीलแบคของสูตรการผลิต H2 จะมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ ≥ 70 หลังจากนั้นผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการโดยพบว่า ค่าความสามารถของกระบวนการมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 0.06 โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่นอกขีดจำกัดข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) ซึ่งออกนอกเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 1.10 (กราฟด้านบนขวา) อีกทั้งยังมีความผันแปรค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรน้อยลงและปรับปรุงให้ค่าเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 1.10 ค่าความสามารถของกระบวนการของค่าฟीलแบค

8. ความหนาของผนัง

สำหรับค่าความหนาของผนังของสูตรการผลิต H2 จะมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ ≥ 4.8 mm หลังจากนั้นผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการโดยพบว่า ค่าความสามารถของกระบวนการมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยพิจารณาได้จากดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ -0.07 โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่นอกขีดจำกัดข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) ซึ่งอยู่นอกช่วงการยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 1.11 (กราฟด้านบนขวา) ซึ่งยังมีค่าเฉลี่ยที่ต่ำและความผันแปรค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรน้อยลงและปรับปรุงให้ค่าเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 1.11 ค่าความสามารถของกระบวนการของค่าความหนาของผนัง

จากการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการเบื้องต้นพบว่า ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ของค่าคุณสมบัติต่างๆ มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์การยอมรับที่กำหนดไว้ (เกณฑ์การยอมรับอยู่ที่ 1.33) โดยทางผู้วิจัยจะทำการปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆให้ดีขึ้นด้วยวิธีการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าเฉลี่ยของค่าคุณสมบัติแต่ละตัวมีค่าเข้าใกล้ค่าคาดหวังมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความผันแปรลดลงด้วยเนื่องจากการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมจะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เกินความจำเป็นในขณะปฏิบัติงาน ซึ่งผลที่ได้ก็จะทำให้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันถ้าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการของค่าคุณสมบัติบางตัวมีค่าสูงขึ้นและบางตัวมีค่าลดลง ก็จะต้องทำการพิจารณาให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมมีค่าสูงที่สุด นั่นคือสามารถปรับปรุงค่าคุณสมบัติส่วนใหญ่ให้มีค่าดีขึ้นและยอมให้ค่าคุณสมบัติบางตัวมีค่าลดลง ซึ่งจะต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ก่อนทำการส่งมอบทรายเคลือบเรซินให้ลูกค้าทางโรงงานจะต้องมีการตรวจสอบค่าคุณสมบัติที่สำคัญ ซึ่งสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบตันจะต้องตรวจสอบคุณสมบัติทั้งหมด 6 ชนิด และสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวงจะต้องตรวจสอบคุณสมบัติทั้งหมด 8 ชนิด ได้แก่

1. ความทนแรงดัดโค้ง

การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง จะเป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการแปรรูปของไส้แบบหลังจากรับแรงดัดโค้ง อีกทั้งยังเป็นการตรวจดูว่าทรายเคลือบเรซินที่ได้มีค่าความทนแรงดัดโค้งอยู่ในช่วงไหนและเหมาะกับการนำไปใช้งานหรือไม่ ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันไส้แบบแตกขณะกระบวนการหล่อหรือระหว่างการทำไส้แบบ โดยมีหลักในการทดสอบดังต่อไปนี้

- เริ่มต้นจากการทำชิ้นงานทดสอบ โดยการนำทรายเคลือบเรซินมาเทใส่ภาชนะที่เตรียมไว้แล้วจึงนำไปเทใส่แม่พิมพ์ พร้อมทำการปาดทรายให้เรียบร้อย

- ทำการเผาทรายเป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิประมาณ 260 °C เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้นำชิ้นงานทดสอบออก จากนั้นจึงทำการทดสอบค่าความทนแรงดัดโค้งโดยแบ่งการตรวจสอบออกเป็น 2 ประเภท คือ การตรวจสอบแบบปกติและการตรวจสอบในขณะที่ชิ้นงานร้อน

- ในกรณีที่เป็นการตรวจสอบแบบปกติ หลังจากที่เราครบเวลาที่กำหนดจะปล่อยให้ชิ้นงานไว้ให้เย็น แล้วทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า จากนั้นให้นำชิ้นงานไปเข้าเครื่องตรวจโดยการทำให้ชิ้นงานหักทีละชิ้นและใช้คาลกลาง

- ในกรณีที่เป็นการตรวจสอบในขณะที่ชิ้นงานร้อน จะทำการตรวจสอบในขณะที่ชิ้นงานร้อน โดยใช้เวลาไม่เกิน 10 วินาที หลังจากนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และจะทำการตรวจสอบเพียงชิ้นเดียว

2. ปริมาณความสูญเสีหลังการเผา

ปริมาณความสูญเสีหลังการเผา จะเป็นการทวนสอบเพื่อดูน้ำหนักของวัตถุดิบ (ฟีนอลิกเรซิน เฮกซามีน และแคลเซียมสเตียเรท) ที่เติมลงไปในการบวนการหลังจากผ่านกระบวนการเผา ทั้งนี้ การทดสอบนั้นจะบอกได้เพียงแค่น้ำหนักโดยรวมของวัตถุดิบทั้งหมด ไม่สามารถแยกได้ว่าเป็นวัตถุดิบชนิดใด โดยการทดสอบมีขั้นตอนในการทดสอบดังต่อไปนี้

- เริ่มต้นจากการนำถ้วยครุชิวเบล (Crusible) ไปชั่งและทำการหักน้ำหนักถ้วยออก (Tare) ให้เป็น 0.0000 จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักทรายเคลือบเรซิน 10 กรัม (น้ำหนักก่อนการทดสอบ) โดยจะวัดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

- นำทรายเคลือบเรซินไปอบที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- นำทรายที่ผ่านกระบวนการเผาแล้วมาชั่งน้ำหนักหลังการเผา

- คำนวณค่า %LOI จากสมการที่ 1.1

$$\%LOI = (\text{น้ำหนักทรายก่อนเผา} - \text{น้ำหนักทรายหลังเผา}) / (\text{น้ำหนักทรายหลังเผา}) \times 100 \quad (1.1)$$

3. แก๊ส

การทดสอบแก๊ส (Gas Test) จะเป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณแก๊สสะสมในทรายเคลือบเรซิน ซึ่งมีหน่วยเป็น ml/g แต่ในขณะที่ทดสอบจะทำการวัดโดยใช้หน่วยเป็น Liter (L) ดังนั้นเมื่อได้ค่าที่วัดมาแล้วจะต้องทำการเปลี่ยนหน่วยให้อยู่ในหน่วย ml/g โดยใช้สมการที่ 1.2

$$\text{ค่าแก๊ส (ml/g)} = \{ \text{ค่าแก๊ส ณ ช่วงเวลานั้นๆ (L)} \times 1000 \} / \{ \text{น้ำหนักของชิ้นงาน (g)} \} \quad (1.2)$$

โดยในการทดสอบแก๊สจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- เริ่มต้นจากการทำชิ้นงานทดสอบและเปิดเครื่องทดสอบ พร้อมกับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 1030 °C

- ทำการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์และขวดวัดปริมาตรที่มีน้ำกลั่นเข้ากับเครื่องวัดแก๊ส และทำการปรับตั้งเครื่องวัดแก๊สให้อยู่ที่ในตำแหน่ง 0

- นำชิ้นงานทดสอบไปทำการชั่งน้ำหนักและใส่ลงในกระบอกแก้วและทำการให้ความร้อนโดยใช้เตาเผา จากนั้นทำการบันทึกค่าแก๊สจากเกจของแก๊สมิเตอร์ทุกๆ 30 วินาที จนครบ 7 นาที

- เมื่อบันทึกค่าเสร็จให้เปลี่ยนหน่วยจาก L เป็น ml/g ถือเป็นารสิ้นสุดการทดสอบ

4. การขยายตัวทางความร้อน

การขยายตัวทางความร้อน จะเป็นการนำชิ้นงานมาทำการทดสอบเพื่อดูการขยายตัว โดยการจำลองสถานการณ์ให้เปรียบเสมือนการนำไส้แบบไปใช้ในงานหล่อ ซึ่งจะได้รับความร้อนจากน้ำโลหะ แต่ในการทดสอบจะใช้ความร้อนที่เกิดจากเตาเผาแทน โดยมีขั้นตอนในการทดสอบดังต่อไปนี้

- เริ่มจากการนำทรายเคลือบเรซินจำนวน 300 กรัม เทลงในกระบอกฉีดทราย พร้อมกับติดตั้งกระบอกฉีดทรายเข้ากับเครื่องทดสอบ

- ทำการฉีดทรายเข้าในแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้และทำการอบเป็นเวลา 150 วินาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้นำชิ้นงานออกมาวางไว้เพื่อให้ชิ้นงานเย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง

- ทำการเปิดเครื่องทดสอบและปรับตั้งอุณหภูมิ โดยงานตระกูลเหล็กจะตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 1030 °C ส่วนงานตระกูลอลูมิเนียมจะตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 700 °C

- ทำการคีบชิ้นงานวางลงบนถาดแก้วภายในเครื่องทดสอบ พร้อมทำการตั้งค่าและบันทึกผลการทดสอบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

5. ความโค้งงอของชิ้นงาน

จะเป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบหาค่าความโค้งงอของชิ้นงาน ซึ่งค่าดังกล่าวจะบ่งบอกถึงการเซตตัวของผนังและเวลาในการทำไส้แบบ กล่าวคือ ถ้าชิ้นงานโค้งน้อยนั้นแสดงว่าการเซตตัวของผนังนั้นเกิดขึ้นเร็วและการทำไส้แบบก็จะใช้เวลาอัน้อยอีกด้วย โดยการทดสอบจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ในการทดสอบจะเริ่มต้นจากการทำชิ้นทดสอบ โดยทำการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 260 °C และเปิดเครื่องทดสอบ

- ทำการเททรายเคลือบเรซินลงในแม่พิมพ์ พร้อมทั้งปาดทรายให้เรียบเสมอกัน จากนั้นทำการให้ความร้อนเป็นเวลา 45 วินาที

- นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และวางบนแท่นของเครื่องวัดค่าความโค้งงอภายใน 10 วินาที หลังจากนั้นเครื่องวัดค่าจะทำงานอัตโนมัติ จากนั้นทำการอ่านค่าที่ได้ซึ่งมีหน่วยเป็น mm

6. อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว จะเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าอุณหภูมิในขณะที่ทรายเคลือบเรซินเริ่มจับตัว โดยการทดสอบจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- เริ่มแรกจะทำการเปิดเครื่องทดสอบโดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 95 – 115 °C (ขึ้นอยู่กับทรายเคลือบเรซินแต่ละชนิด)

- ทำการตัดทรายเคลือบเรซินเหลงบน Hot Bar ของเครื่องทดสอบตามจุดต่างๆ โดยให้ทรายมีความหนาใกล้เคียงกันตลอดแนว แล้วจึงเริ่มต้นให้ความร้อนเป็นเวลา 2 นาที

- เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดจะมีการเป่าลมลงบน Hot Bar ของเครื่องทดสอบเพื่อทำให้ทรายที่ไม่เกิดการเซตตัวหลุดออก

- เมื่อลมหยุดให้ทำการอ่านค่าบริเวณแรกที่ทรายเริ่มเกาะติดกับ Hot Bar ของเครื่องทดสอบ โดยอ่านค่าจากเทอร์โมมิเตอร์และบันทึกค่า

- ในกรณีที่ตั้งค่าของเครื่องทดสอบตามอุณหภูมิข้างต้น แล้วไม่เกิดทรายเกาะติดที่ Hot Bar ให้ทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 5 °C ในทางกลับกันถ้าหากทรายเกาะติด Hot Bar จนไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าทรายเริ่มเกาะติดที่อุณหภูมิเท่าใด ให้ทำการลดอุณหภูมิทีละ 5 °C

7. ฟीलแบค

ฟीलแบคจะเป็นการตรวจสอบผิวข้างในของชิ้นงานว่าเกิดการแยกชั้น (Two Layer) หรือไม่ พร้อมทั้งคำนวณค่า Peel Back Ratio ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ใช้ในการบ่งบอกถึงความหนาของผนังไส้แบบ โดยการทดสอบจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ในการทดสอบจะเริ่มต้นจากการทำชิ้นทดสอบ โดยทำการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 260 °C และเปิดเครื่องทดสอบ พร้อมทำการเตรียมแผ่นจานร้อน (Hot Plate)

- เททรายเคลือบเรซินลงในกล่องใส่ทราย จากนั้นใช้แผ่นกั้น (Shutter) ทำการกั้นทราย ตัวอย่างไว้

- นำแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบมาติดตั้งเข้ากับปากกล่องใส่ทราย จากนั้นทำการหมุนกล่องใส่ตัวอย่างเพื่อให้แม่พิมพ์กลับลงมาด้านล่างและทำการดึงแผ่นกั้นออก เพื่อให้ทรายตกลงมาบนแม่พิมพ์พร้อมทั้งทำการจับเวลา โดยเวลาที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ที่ 20, 40 และ 60 วินาที ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของทรายเคลือบเรซิน

- เมื่อสิ้นสุดเวลาที่กำหนดให้ทำการกลับกล่องมาในตำแหน่งเดิม จากนั้นทำการถอดแม่พิมพ์แล้วนำไปวางบนแผ่นจานร้อน เพื่อให้ทรายที่เกาะติดกับแม่พิมพ์แข็งตัว ให้วางไว้จนทรายที่เกาะติดกับแม่พิมพ์ไม่ติดจะหลุดออกมาจนหมดแล้วจึงนำแม่พิมพ์ออกจากแผ่นจานร้อน

- ทำการกดกระแทกด้วยสปริงที่ด้านหลังของแบบพิมพ์ลงบนพื้น เพื่อดันชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วจึงนำไปทำการคำนวณค่า Peel Back Ratio โดยใช้วิธี Cut Check ซึ่งวิธีการทำ Cut Check จะต้องทำการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานและทำการบันทึกเป็นค่า W

- ทำการตัดชิ้นงานแบ่งครึ่งตามยาวพร้อมตรวจสอบผิวด้านในว่าเกิดการแบ่งชั้นหรือไม่ จากนั้นทำการวัดความหนาของชิ้นงาน 3 ตำแหน่ง เพื่อนำไปคำนวณหาค่า Peel Back Ratio จากสมการที่ 1.3

$$\text{Peel Back Ratio} = \{((A1+A2+A3)/3) - (A2 - ((A1+A3)/2))\} / (W \times 1000) \quad (1.3)$$

8. ความหนาของผนัง

จะเป็นการทดสอบเพื่อหาความหนาของผนังขณะทำไส้แบบ ซึ่งถ้าความหนาของผนังมากนั้น แสดงว่าการเซตตัวของผนังเกิดขึ้นเร็ว ทำให้เวลาที่ใช้ในการทำไส้แบบลดลง โดยการทดสอบจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ในการทดสอบจะเริ่มต้นจากการทำชิ้นทดสอบ โดยทำการตั้งค่าอุณหภูมิที่ 260 °C และทำการตั้งเวลาในการตรวจสอบที่ 30, 40, 50 และ 60 วินาที

- ทำการเตรียมทรายเคลือบเรซินจำนวน 400 กรัม แล้วนำไปใส่ลงในกระบอกฉีดยา จากนั้นจึงนำกระบอกฉีดยาไปติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบ

- ทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน พร้อมทั้งปาดผิวหน้าให้เรียบร้อยโดยใช้แผ่นอลูมิเนียม

- เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ทันที และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- ทำการตัดชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่ภายในกลวงแบ่งครึ่งตามขวางและทำการจุ่มลงในเมทานอลที่มีความเข้มข้น 100% เป็นเวลา 1 นาที

- ทำการวัดค่าความหนาของผนังด้านข้าง (Parting Line) ทั้งสองด้านด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ และทำการบันทึกผล พร้อมทั้งคำนวณค่าความหนาของผนังจากสมการที่ 1.4

$$\text{ความหนาของผนัง} = (\text{ความกว้างด้าน A} + \text{ความกว้างด้าน B}) / 2 \quad (1.4)$$

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อปรับปรุงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวง (Hollow Core) ให้มีค่าเข้าใกล้ค่าคาดหวังมากยิ่งขึ้น

1.5 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการศึกษาในส่วนของการปรับปรุงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวง (Hollow Core) สูตร H2 เท่านั้น โดยสูตรการผลิตดังกล่าวจะประกอบด้วยทราย 3 ชนิด และฟีนอลิกเรซิน 2 ชนิด ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 1.6 และตารางที่ 1.7 ตามลำดับ

ตารางที่ 1.5 ค่าคุณสมบัติของทรายทั้ง 3 ชนิด ที่เป็นส่วนประกอบของสูตรการผลิต

ชนิด ทราย	ค่าความกลม	ขนาดเม็ดทราย ตามมาตรฐาน AFS	%SiO ₂	ค่าความเป็น กรดต่าง (pH)	ค่าความสว่าง (Lux)
S1	1.32	55-60	93	7	44
S2	1.18		99	7	78
S3	1.25		99	7	75

ตารางที่ 1.6 ค่าคุณสมบัติของฟีนอลิกเรซินทั้ง 2 ชนิด ที่เป็นส่วนประกอบของสูตรการผลิต

ชนิดฟีนอลิกเรซิน	Gel Time (วินาที)	Flow (mm)	สี	รูปร่าง
R1	29	48	Light Cream	Needle
R2	35	100	Brown	Needle

2. ทำการศึกษาเฉพาะในกระบวนการทรายเคลือบเรซิน
3. ความเร็วรอบการหมุนของใบกวาดจะถูกปรับตั้งไว้ที่ 68 รอบ/นาที
4. ถังผสมจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกรวยตัดปลาย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.5 เมตร และสูงประมาณ 2 เมตร
5. ปริมาณการเติมฟีนอลิกเรซินจะถูกกำหนดให้คงที่เท่ากับ 2.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักทรายตลอดการทดลอง
6. ในการศึกษาสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวง (Hollow Core) จะพิจารณาค่าคุณสมบัติ 8 ชนิด ได้แก่ ความทนแรงดัดโค้ง แก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ค่าความโค้งงอ พิลแบคและความหนาของผนัง

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมของปัจจัยในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน
2. สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถปรับปรุงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินให้เข้าใกล้ค่าคาดหวังที่ทางโรงงานกำหนดไว้มากยิ่งขึ้น
2. สามารถนำแนวทางการปรับปรุงของผลิตภัณฑ์กรณีศึกษาไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นๆ ภายในโรงงานได้
3. สามารถประยุกต์ใช้เครื่องมือและขั้นตอนการดำเนินงานในการปรับปรุงคุณภาพและใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์อื่นๆต่อไป

1.8 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน

1. ศึกษากระบวนการทำงานภายในโรงงานกรณีศึกษา

1.1 ศึกษากระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินโดยละเอียดเพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงานและปัญหาที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งทำการรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.2 จัดทำแผนผังกระบวนการผลิต (Process Mapping) เพื่อระบุขั้นตอนในการทำงานของกระบวนการ

2. การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นและกำหนดหัวข้องานวิจัย

2.1 จัดตั้งคณะทำงานในโครงการโดยพิจารณาเลือกจากผู้ที่มีความรู้ ความชำนาญในส่วน of กระบวนการทรายเคลือบเรซิน

2.2 กำหนดวัตถุประสงค์ เป้าหมาย ขอบเขตของการศึกษา ตัวชี้วัด และระยะเวลาของโครงการ จากทีมงานที่จัดตั้งขึ้นมาข้างต้น

3. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อหาแนวทางและวิธีในการแก้ปัญหา พร้อมทั้งทำการรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

4. การวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า

4.1 คณะทำงานช่วยกันระดมความคิด (Brainstorming) เพื่อหาปัจจัยนำเข้า (Key Process Input Variable หรือ KPIV) ตามหลักการ 4M1E โดยอาศัยแผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล

4.2 ทำการจัดลำดับความสำคัญและทำการกรองปัจจัยนำเข้าโดยใช้เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) โดยคณะทำงานที่มีความรู้ ความชำนาญช่วยกันประเมินและให้คะแนน เพื่อทำการคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีผลหรือส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองออก

4.3 เลือกปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะมีผลกระทบสูงต่อกระบวนการทรายเคลือบเรซินไปทำการทดสอบความมีนัยสำคัญและวางแผนกำหนดแนวทางในการดำเนินงานขั้นต่อไป

5. การออกแบบการทดลอง

5.1 นำปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการทรายเคลือบเรซิน ที่ได้จากกระบวนการก่อนหน้า มาทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) พร้อมทั้งพิจารณาเลือกรูปแบบการทดลองและขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองให้มีความเหมาะสม ซึ่งในการทดลองนี้จะเลือกใช้การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลโดยเพิ่มการทดลองที่มีจุดกึ่งกลาง (Half-Fractional Factorial Design with Center Point) เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ในเชิงเส้นโค้ง (Curvature) ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับผลตอบสนอง

5.2 กำหนดระดับของปัจจัยที่จะนำไปทดลอง พร้อมทั้งพิจารณาปัญหาข้อจำกัดต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง

5.3 ดำเนินการทดลองตามแผนที่วางไว้

6. การวิเคราะห์หาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม

6.1 นำปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองไปออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อหาค่าระดับที่เหมาะสมที่สุดในการปรับตั้งเครื่องจักรให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ

6.2 กำหนดระดับของปัจจัยที่จะนำมาทำการทดลองตามความเหมาะสม พร้อมทั้งพิจารณาข้อจำกัดต่างๆ ที่อาจจะส่งผลต่อการทดลอง

6.3 ดำเนินการเก็บข้อมูลตามแผนการที่วางไว้

6.4 นำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างสมการถดถอยที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองแต่ละตัว

6.5 หาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดจากข้อมูลที่เก็บมา โดยพิจารณาถึงข้อจำกัดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องตามไปด้วย

6.6 นำค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดมาวางแผนการทดลองเพื่อใช้กับการผลิตจริง และทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตามแผนการที่ได้วางไว้

6.7 วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการนำค่าปัจจัยที่เหมาะสมไปทดสอบ เพื่อเตรียมพร้อมกับการนำไปใช้จริงต่อไป

7. การติดตามและควบคุมการทำงาน

7.1 ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยการเก็บข้อมูลหลังจากทดลองเป็นเวลา 1 เดือน

7.2 ประยุกต์ใช้เครื่องมือทางคุณภาพเข้ามาช่วยในการควบคุมคุณภาพ

7.3 สรุปผลและวิจารณ์ผลในการปรับปรุงกระบวนการและนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกระบวนการก่อนทำการปรับปรุงกระบวนการ

7.4 จัดทำแผนควบคุม (Control Plan) และกำหนดเป็นมาตรฐานในการปฏิบัติงาน

8. สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



1.9 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.7 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

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. ศึกษากระบวนการทำงานภายในโรงเรียนกรณีศึกษา	■	■										
2. การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นและกำหนดหัวข้องานวิจัย		■	■									
3. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		■	■	■								
4. การวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า			■	■								
5. การออกแบบการทดลองและเก็บข้อมูล					■	■	■					
6. การวิเคราะห์ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม							■	■				
7. การติดตามและควบคุมการทำงาน									■	■		
8. สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ										■	■	
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์								■	■	■	■	■

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

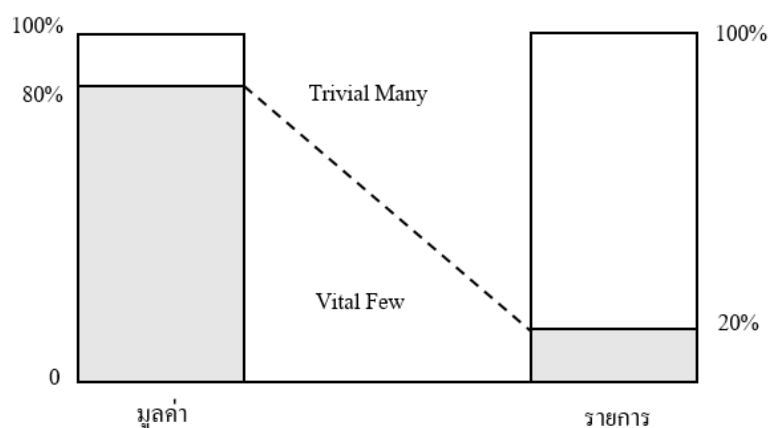
ในการดำเนินงานเพื่อปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์กรณีศึกษาในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน จำเป็นจะต้องอาศัยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาในแต่ละขั้นตอนและเครื่องมือที่ช่วยในการวิเคราะห์และหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

1. เครื่องมือทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจะเป็นส่วนที่อธิบายถึงภาพรวมของเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและเครื่องมือที่ใช้ในการหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาเพื่อคัดกรองปัจจัยนำเข้าไป
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีการหล่อโลหะจะเป็นส่วนที่อธิบายภาพรวมของกระบวนการหล่อโลหะและการนำทรายเคลือบเรซินไปใช้งาน
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวกับกระบวนการทรายเคลือบเรซินจะอธิบายถึงกรรมวิธีในการผลิตและเครื่องจักรที่ใช้ และในส่วนสุดท้ายคืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเป็นการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย โดยทฤษฎีและเครื่องมือในส่วนต่างๆจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 เครื่องมือทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1.1 แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram) [2]

แผนภูมิพาเรโตเป็นแผนภูมิที่ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบปัญหาต่างๆ เพื่อสังเกตและจัดลำดับความสำคัญของปัญหา ว่าปัญหาใดควรจะนำมาพิจารณาเป็นอันดับแรก โดยการจำแนกประเภทของข้อมูล จากนั้นทำการจัดเรียงลำดับความสำคัญของข้อมูลจากมากไปน้อย โดยการแสดงผลด้วยกราฟแท่งและค่าสะสมด้วยกราฟเส้น ซึ่งถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1897 โดยนักเศรษฐศาสตร์ชาวอิตาลีที่ชื่อว่า วิ พาเรโต ได้นำแผนภูมิพาเรโตไปใช้ในการศึกษาถึงการกระจายรายได้ของคนยุโรป และต่อมาได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการควบคุมคุณภาพเพื่อแสดงให้เห็นว่าสาเหตุความบกพร่องเพียงเล็กน้อยกลับก่อให้เกิดความสูญเสียที่มากมาย ในขณะที่ความสูญเสียเล็กน้อยที่เหลืออยู่กลับมาจากสาเหตุจำนวนมาก ซึ่งเรียกว่าหลักการ 80-20 ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการของพาเรโต [2]

ประโยชน์ของแผนภูมิพาเรโต

1. สามารถใช้เป็นแนวทางในการคัดเลือกปัจจัยที่เป็นปัญหาหลักและปัญหารอง
2. สามารถเข้าใจได้ว่าแต่ละหัวข้อมียอดส่วนเท่าใดเมื่อเปรียบเทียบกับจากอัตราส่วนทั้งหมด
3. สามารถจัดทำและใช้ในการเปรียบเทียบผลได้ง่าย เนื่องจากไม่ต้องใช้การคำนวณที่ยุ่งยาก
4. ใช้กราฟแท่งในการแสดงขนาดของปัญหาที่เกิดขึ้น ทำให้เข้าใจง่ายและโน้มน้าวจิตใจได้ดี

2.1.2 แผนผังกระบวนการผลิต (Process Mapping)

เป็นผังกระบวนการที่แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนกระบวนการทำงานทั้งหมดว่าผ่านขั้นตอนใดบ้าง และมีปัจจัยใดที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ทำความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งจะแสดงการไหลของกระบวนการผลิตตั้งแต่ปัจจัยนำเข้า (Input) จนกระทั่งได้ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการผลิต (Output) โดยประโยชน์ของแผนผังกระบวนการผลิตจะช่วยให้สามารถมองเห็นภาพรวมของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับโครงการที่เลือกมาทำการปรับปรุง ทำให้ทราบถึงตำแหน่งที่ก่อให้เกิดความสูญเสีย จากนั้นจะนำเข้าไปสู่กระบวนการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา ทำให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาและวางแผนการเก็บรวบรวมข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

2.1.3 การระดมความคิด (Brainstorming)

เป็นเทคนิคหนึ่งที่ยิมนำมาใช้ในการระดมความคิดเพื่อหาไอเดียสร้างสรรค์ใหม่ๆ หรือใช้ในการระดมความคิดเพื่อแก้ไขปัญหา โดยทุกคนสามารถแสดงความคิดเห็นได้อย่างอิสระ มักจะถูกนำมาใช้ในขั้นตอนแรกของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพตามแนวคิดซิกซ์ ซิกมา เพื่อให้สมาชิกในทีมเข้าใจถึงสภาพปัญหาที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังเป็นการหาสาเหตุของปัญหาที่สามารถเป็นไปได้ ในการระดมความคิดสามารถนำเครื่องมืออื่นๆเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อช่วยให้เห็นถึงสาเหตุรากเหง้าของปัญหาย่างขึ้น ได้แก่ แผนผังกลุ่มเชื่อมโยง (Affinity Diagram) หรือใช้แผนภูมิที่สามารถแสดงให้เห็นสาเหตุที่เป็นไปได้เบื้องต้น เช่น การวิเคราะห์ทำไม (Why-Why Analysis) โดยใช้รูปแบบของแผนภาพต้นไม้ (Tree Diagram) และ Is-Is not Analysis

หลักการของการระดมความคิดประกอบด้วย

1. หัวข้อที่ใช้ในการระดมความคิดต้องมีความชัดเจน
2. ให้สมาชิกทุกคนได้มีส่วนร่วมในการแสดงความคิดเห็นอย่างอิสระ
3. ดำเนินการระดมความคิดจากสมาชิกทุกคนให้ได้ปริมาณมากที่สุด
4. ไม่มีการตั้งกรอบหรือการประเมินถูกผิดในขณะที่ทำการระดมความคิด
5. ในการระดมความคิดควรทำให้เกิดแนวความคิดที่สร้างสรรค์และสิ่งใหม่ๆ

2.1.4 แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) [3]

แผนผังแสดงสาเหตุและผลเป็นแผนผังที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (Problem) กับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น (Possible Cause) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "แผนผังก้างปลา (Fish Bone Diagram)" เนื่องจากหน้าตาแผนภูมิมิลักษณะคล้ายปลาที่เหลือแต่ก้าง หรือหลายๆ คนอาจรู้จักในชื่อของแผนผังอิชิกาวา (Ishikawa Diagram) ซึ่งได้รับการพัฒนาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1943 โดย ศาสตราจารย์คาโอริ อิชิกาวา แห่งมหาวิทยาลัยโตเกียว แผนผังนี้จะใช้ในการค้นหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา แผนผังแสดงสาเหตุและผลจะช่วยให้การระดมความคิด(Brainstorming) เป็นระบบมากขึ้น เนื่องจากการแยกหมวดหมู่ของสาเหตุไว้อย่างชัดเจน ตั้งแต่ก่อนที่จะเริ่มระดมความคิด โดยอาศัยหลักของ 4M1E เข้ามาช่วยในการแยกแยะกลุ่มของปัจจัย ได้แก่ คน (Man), เครื่องจักร (Machine), วัตถุดิบ (Material), วิธีการดำเนินงาน (Method), เครื่องมือวัด (Measurement) และสภาพแวดล้อม (Environment) ซึ่งแต่ละกลุ่มปัจจัยจะมีการ

กำหนดสาเหตุหลักของปัญหา และแยกออกมาเป็นสาเหตุย่อยๆต่อไปดังรูปที่ 2.2 อีกทั้งยังช่วยให้การกำหนดสาเหตุมีความเป็นระบบและเป็นเหตุเป็นผลกัน

วิธีการสร้างแผนผังสาเหตุและผลหรือแผนผังก้างปลา

1. กำหนดประโยคปัญหาที่หัวปลา โดยหลักเรียงคำเชื่อมต่างๆ ได้แก่ และ แล้ว ซึ่ง อัน เนื่องจากหัวปลาหนึ่งหัวจะแทนหนึ่งสาเหตุของปัญหาเท่านั้น และควรกำหนดปัญหาให้ชัดเจน ไม่กำกวม และควรกำหนดหัวข้อปัญหาในเชิงลบ

2. กำหนดหมวดหมู่ของสาเหตุไว้ที่ปลายก้างหลัก

3. ทำการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุในหมวดหมู่นั้นๆ โดยใช้การวิเคราะห์ทำไม (Why-Why Analysis) แล้วแตกก้างปลาออกเป็นสาเหตุรองและสาเหตุย่อย ตามลำดับ

4. ให้หยุดก็ต่อเมื่อเห็นสาเหตุรากเหง้าของปัญหา นั่นคือเห็นแนวทางการแก้ไขปัญหาได้

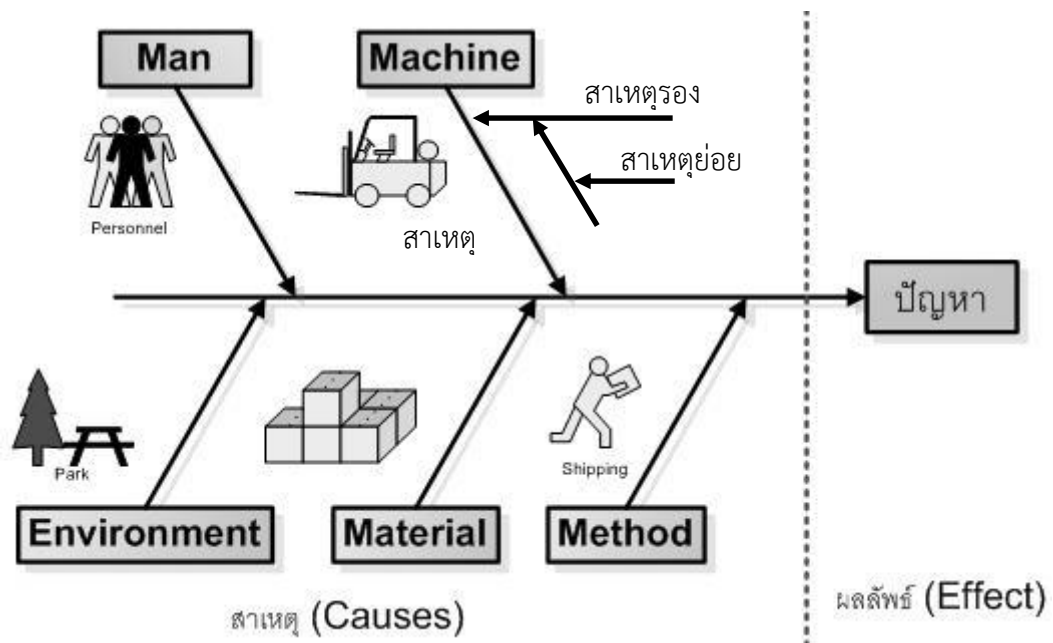
5. ให้ยืนยันความเป็นเหตุเป็นผลโดยอ่านจากปลายก้างปลาที่ย่อยที่สุด ผ่านก้างปลาในลำดับก่อนหน้าจนกระทั่งถึงหัวปลา

6. เมื่อยืนยันความเป็นเหตุเป็นผลได้แล้ว ให้ใช้การวิเคราะห์ทำไม (Why-Why Analysis) ต่อจากก้างปลาที่ย่อยที่สุดอีกครั้ง เพื่อยืนยันว่าไม่มีสาเหตุที่ลึกลงไปกว่านี้อีกแล้วและถือหลักเบื้องต้นว่า “ก้างที่ย่อยที่สุดเป็นสาเหตุรากเหง้าของปัญหา”

7. ทำการสำรวจที่หน้างานเพื่อพิสูจน์ว่าสาเหตุรากเหง้าที่นั้นเกิดขึ้นจริงหรือไม่ หากไม่ได้เกิด แสดงว่าสาเหตุนั้นไม่ได้เป็นสาเหตุรากเหง้าของปัญหา ในทางกลับกันหากสาเหตุนั้นเป็นสาเหตุรากเหง้าของปัญหา ให้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อพิสูจน์ความมีนัยสำคัญต่อไป

8. จัดลำดับความสำคัญของสาเหตุ

9. คัดเลือกสาเหตุรากเหง้าที่คิดว่าจะสามารถดำเนินการได้ขึ้นมา



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างแผนผังแสดงเหตุและผล

2.1.5 เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) [3]

เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลจะใช้แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยนำเข้าต่างๆ กับตัวแปรตอบสนองที่กำลังศึกษา ที่ได้จากการระดมความคิดโดยอาศัยแผนผังสาเหตุและผลเข้ามาช่วยให้การวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้ามีความเป็นระบบมากขึ้น โดยในขั้นแรกจะต้องทำการวิเคราะห์และศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อตัวแปรตอบสนองที่กำลังพิจารณา โดยอาศัยการระดมความคิดจากผู้ที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับส่วนของงานที่กำลังพิจารณา จากนั้นจะต้องทำการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ได้ โดยจะมีการกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนตามความสำคัญตามความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นของปัจจัยนั้นๆ ต่อตัวแปรตอบสนองที่ศึกษาแต่ในบางกรณีในตัวแปรตอบสนองมีหลายตัวและมีความสำคัญที่แตกต่างกัน จะต้องมีการให้คะแนนน้ำหนักความสำคัญเพิ่มเติมเข้าไปก่อนการให้คะแนน โดยวิธีการคิดผลคะแนนรวมจะต้องนำคะแนนที่ได้ไปคูณกับคะแนนน้ำหนักความสำคัญของตัวแปรตอบสนองแต่ละตัว แล้วจึงนำผลคูณที่ได้มารวมกัน ซึ่งผลคะแนนที่มากจะบ่งบอกความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นของปัจจัยนั้นๆ เช่นเดียวกัน จากนั้นจะนำผลคะแนนที่ได้ไปจัดลำดับความสำคัญโดยอาศัยแผนภูมิพาเรโตเพื่อเรียงลำดับปัจจัยตามผลกระทบที่มีต่อตัวแปรตอบสนองที่กำลังพิจารณา ทำให้สามารถพิจารณาเลือกปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีผลกระทบสูงในลำดับต้นๆ มาทำการแก้ไขก่อนหรือนำผลที่ได้ไปใช้ในประเมินแผนการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิต

2.1.6 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Design of Experiment, DOE) [3]

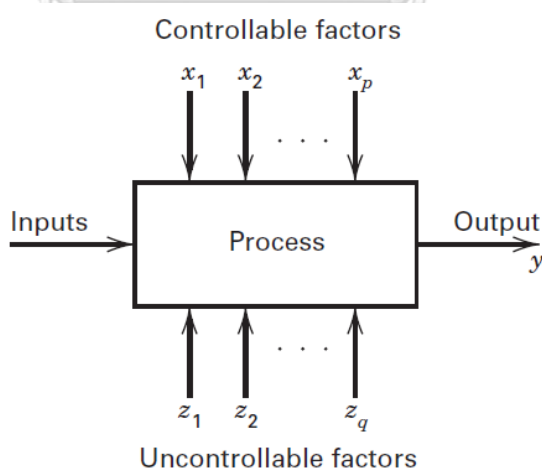
การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการออกแบบแผนการทดลองเพื่อใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลและใช้ในการตรวจสอบหาปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมต่อตัวแปรตอบสนองดังรูปที่ 2.3 โดยปัจจัยนำเข้าจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ปัจจัยนำเข้าที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ ปัจจัยที่สามารถทำการกำหนดหรือปรับเปลี่ยนค่าได้ในขณะดำเนินการทดลอง

2. ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) คือ ปัจจัยที่ไม่สามารถทำการกำหนดหรือปรับเปลี่ยนค่าได้ ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุนการผลิต โดยปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมจะแบ่งออกเป็น

2.1 ตัวแปรรบกวน (Noise Variable) จะเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่ไม่ใช่ปัจจัยที่จะนำเข้ามาศึกษา

2.2 Nuisance Variable จะเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งการสุ่มลำดับการทดลองจะช่วยให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นในส่วนนี้ลดลงได้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ [4]

1. วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง [3]

1) เพื่อทดสอบผลกระทบหลัก (Main Effects) และผลกระทบร่วม (Interaction Effects) ของปัจจัยนำเข้าที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง (Response Variable)

2) เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองเพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ตัวแปรตอบมีค่าตรงตามเป้าหมายที่ต้องการ

3) เพื่อเป็นการสนับสนุนการปรับปรุงในเรื่องการออกแบบผลิตภัณฑ์ การออกแบบกระบวนการ และการดำเนินงานของกระบวนการ

4) ช่วยให้จำนวนการทดลอง (Runs) มีเท่าที่จำเป็นในการให้ข้อมูลเพื่อสรุปผลของปัจจัยนำเข้าที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง

2. ขั้นตอนในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง [3]

1) ทำการกำหนดวัตถุประสงค์ของโครงการให้ชัดเจนเช่น การกำหนดตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) และปัจจัยนำเข้า (Input Factors) ที่จะทำการศึกษา และจะต้องกำหนดเป้าหมายว่าจะทำการศึกษาเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยหรือศึกษาเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย

2) การออกแบบการทดลอง

- การกำหนดรูปแบบการทดลองที่ใช้ โดยพิจารณาความเหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาว่าต้องการทดสอบทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยหรือทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย ซึ่งจะใช้รูปแบบการทดลองที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ในการกำหนดรูปแบบการทดลองจะต้องพิจารณาจากจำนวนปัจจัย จำนวนการทดลองที่สามารถยอมรับได้ และคุณภาพของผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง

- การเขียนเมทริกซ์การออกแบบ

- การกำหนดค่าในแต่ละระดับของปัจจัยที่ทำการทดสอบจะแบ่งเป็น 2 แบบ คือแบบหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) และแบบหน่วยที่เป็นค่ารหัส (Coded Unit) โดยใช้สมการที่ 2.1 ในการแปลงค่าแบบหน่วยจริงไปเป็นแบบหน่วยที่เป็นค่ารหัส

$$x_{coded} = \frac{x_{uncoded} - \bar{x}_{uncoded}}{\frac{1}{2}range(x_{uncoded})} \quad (2.1)$$

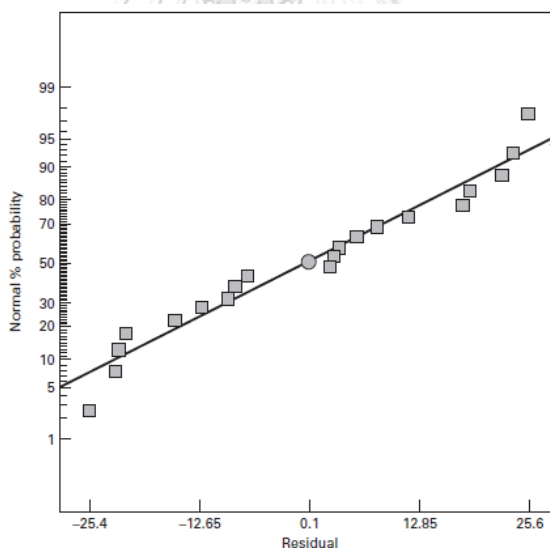
- การกำหนดตัวแปรอื่นๆที่อาจจะส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อทำการควบคุมตัวแปรเหล่านั้น

3) ดำเนินการทดลองตามแผนที่ย่างไว้ โดยจัดให้ลำดับการทดลองเป็นไปอย่างสุ่ม เพื่อขจัดผลที่เกิดจากตัวแปรรบกวน

4) การวิเคราะห์ผลการทดลอง

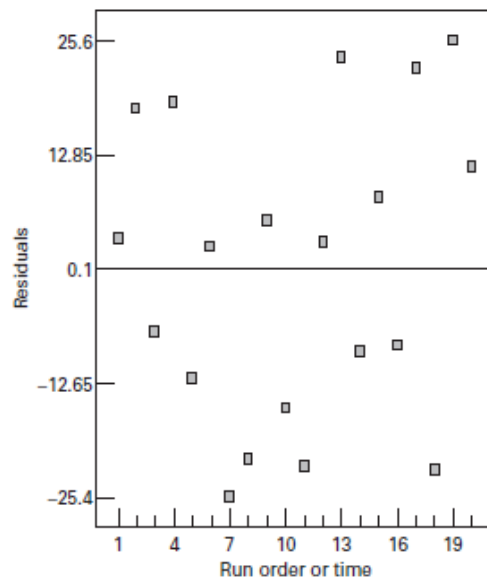
- ทำการตรวจสอบสมมติฐานของข้อมูลว่ามีลักษณะเหมาะสมที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอย (Analysis of Variance: ANOVA) ในการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยได้หรือไม่ ได้แก่

สมมติฐานข้อที่ 1 คือ ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ ดังรูปที่ 2.4



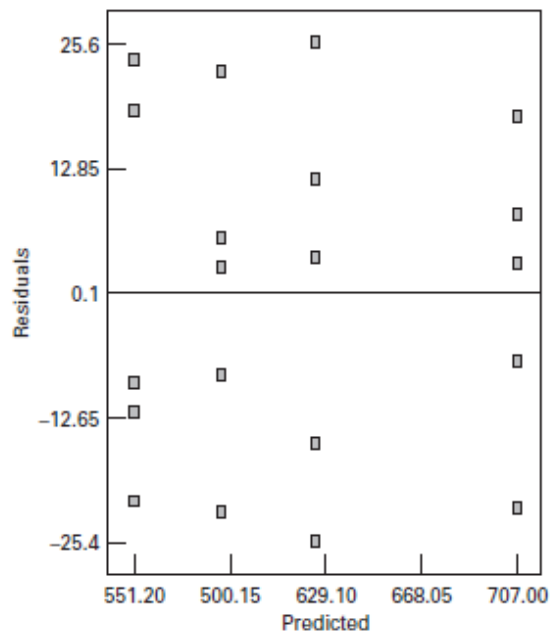
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกราฟค่าความผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ [5]

สมมติฐานข้อที่ 2 คือ ค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างกราฟค่าความผิดพลาดที่มีความเป็นอิสระต่อกัน [5]

สมมติฐานข้อที่ 3 คือ ค่าความผิดพลาดมีความแปรปรวนคงที่ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างกราฟค่าความผิดพลาดที่มีความแปรปรวนคงที่ [5]

- พิจารณากราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) และกราฟผลกระทบร่วม (Interaction Plot) ของปัจจัยว่ามีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองในทิศทางใด

- ทำการทดสอบความมีนัยสำคัญของผลกระทบของปัจจัยด้วยวิธีการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ (Hypothesis Testing) โดยอาศัยเครื่องมือทางสถิติได้แก่ การวิเคราะห์ความถดถอย (Analysis of Variance: ANOVA)

- หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างเทอมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญกับตัวแปรตอบสนอง

5) หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าตามที่ต้องการ โดยอาศัยการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design)

6) สรุปผลการทดลอง

3. ประเภทของการออกแบบการทดลอง [3, 4]

1) การออกแบบการทดลองแบบ One-Factor-at-a-Time (OFAT)

การออกแบบด้วยวิธีนี้จะเป็นการทดสอบทีละปัจจัย โดยในการทดสอบแต่ละครั้งจะมีการเปลี่ยนค่าปัจจัยใดๆ เพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น และคงค่าของปัจจัยอื่นๆที่สนใจจะศึกษาไปพร้อมกันเอาไว้ที่ค่าๆหนึ่ง ดังนั้นในการทดลองจะสามารถสรุปผลได้เพียงปัจจัยเดียวและไม่สามารถศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่นำมาทดสอบได้

2) การออกแบบการทดลองแบบ Design of Experiment (DOE)

การออกแบบด้วยวิธีนี้จะเป็นการทดสอบให้เห็นถึงผลของปัจจัยหลายๆปัจจัยที่ระดับของปัจจัยอื่นๆอย่างน้อยสองระดับ ทำให้สามารถศึกษาถึงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยได้ โดยการออกแบบการทดลองแบบ DOE จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)

คือ การทดลองที่เกิดจากการนำปัจจัยนำเข้าทั้งหมดที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองมาทำการทดลอง โดยจะทำการศึกษาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการทดลอง ทำให้สามารถวิเคราะห์และสรุปผลปัจจัยในสถานะต่างๆที่ทำการทดลองได้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่นิยมใช้กันทั่วไปจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

(ก) การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^k (2^k Factorial Design)

เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้ในกรณีที่มี k ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยจะประกอบด้วยระดับในการทดลอง 2 ระดับ คือ ระดับต่ำหรือ -1 และระดับสูงหรือ $+1$ ระดับในการทดลองอาจเกิดจากข้อมูลในเชิงปริมาณ (Quantitative) เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลา เป็นต้น หรือข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative) เช่น เครื่องจักรสองเครื่อง คนสองคน เป็นต้น ในการออกแบบการทดลองเช่นนี้จะช่วยให้จำนวนการทดลองน้อยที่สุดเพื่อศึกษาผลของปัจจัย k ชนิด ซึ่งการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^k มักจะถูกนำมาใช้ในการคัดกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในช่วงของการเริ่มต้นโครงการ

(ข) การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design)

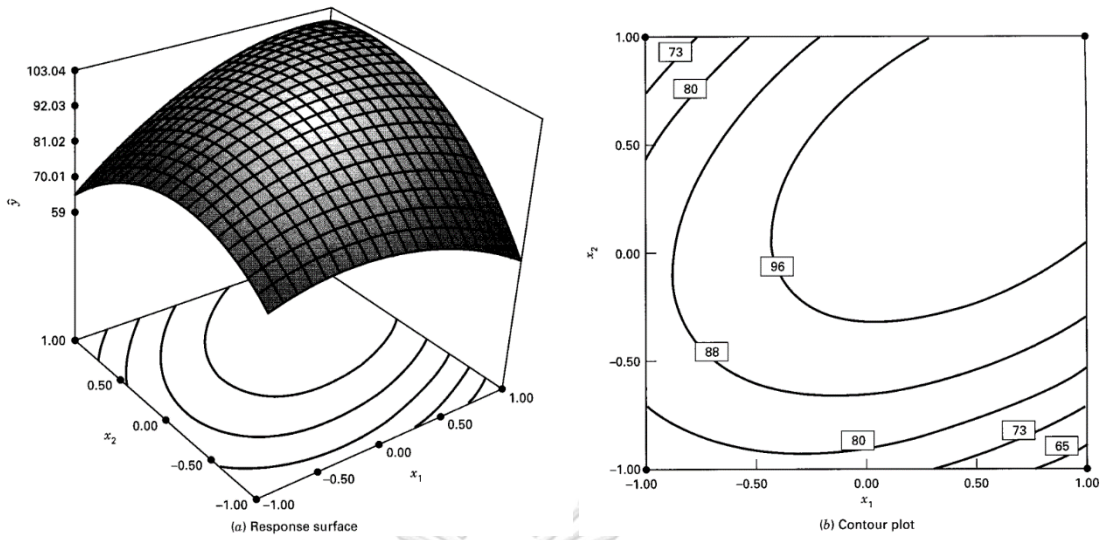
คือ แผนการทดลองที่ทำการลดรูปมาจากการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^k เนื่องจากจำนวนของปัจจัยที่นำมาศึกษามีจำนวนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนการทดลองที่ใช้จะมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดด โดยในการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วนจะสามารถหาจำนวนการทดลองได้จาก 2^{k-p} โดยที่ $k =$ จำนวนปัจจัยและ $p = 1, 2, 3, \dots$ โดยในที่นี้จะกำหนดให้ $p = 1$ นั่นคือการทดลองแบบ One-Half ซึ่งจำนวนการทดลองจะเป็นครึ่งหนึ่งของการทดลองแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป แผนการทดลองประเภทจะใช้กับกรณีที่ผู้วิจัยมีข้อจำกัดทางด้านเวลา งบประมาณและทรัพยากร หรือใช้ในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญในตอนเริ่มต้นโครงการ ซึ่งในการทดลองประเภทนี้จะมีข้อดีคือ สามารถศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมได้ (แต่ไม่ทั้งหมด) โดยที่ผลกระทบร่วมตั้งแต่สามลำดับขึ้นไปจะมีค่าน้อยมากจนเข้าใกล้ศูนย์หรือไม่มีนัยสำคัญ สามารถตัดได้ แต่ข้อเสียคือการตีความผลจะมีความยากและซับซ้อนเนื่องจากในการทดลองเกิดโครงสร้างที่ซับซ้อน (Alias Structure) ของผลกระทบ ดังนั้นในการออกแบบการทดลองจะต้องเลือก Resolution ที่มีความเหมาะสมตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายของการศึกษา โดยรายละเอียดความสัมพันธ์ของผลกระทบที่เกิดจากการเลือกใช้ค่า Resolution ต่างๆจะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดความสัมพันธ์ของผลกระทบที่เกิดจากการเลือกใช้ค่า Resolution ต่างๆ

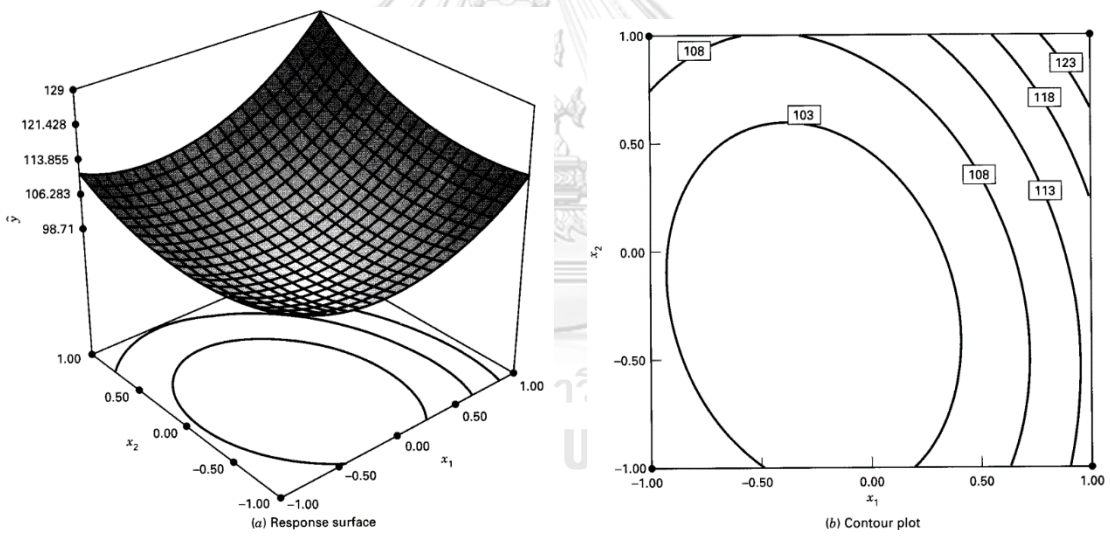
Resolution	รายละเอียดความสัมพันธ์ของผลกระทบ
III	ผลกระทบหลักจะไม่ปะปนกับผลกระทบหลักของปัจจัยอื่นๆ แต่ผลกระทบหลักจะปะปนกับผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย เหมาะกับการนำไปใช้ในการคัดเลือกปัจจัยกรณีที่มีปัจจัยนำเข้าจำนวนมาก
IV	ผลกระทบหลักจะไม่ปะปนกับผลกระทบหลักของปัจจัยอื่นๆ และไม่ปะปนกับผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย แต่ผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยจำปะปนกันเอง เหมาะกับการใช้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลักและสามารถนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ในการพยากรณ์หากไม่สามารถทำการทดลองที่มี Resolution V ได้
V	ผลกระทบหลักจะไม่ปะปนกับผลกระทบหลักของปัจจัยอื่นๆ และไม่ปะปนกับผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยก็จะไม่ปะปนกันเอง แต่ผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยจะปะปนกับผลกระทบร่วมระหว่างสามปัจจัยซึ่งสามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากมีค่าน้อยมาก ที่ Resolution V จึงเหมาะสมกับการใช้ศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยไปพร้อมๆ กัน

2. การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design)

เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคทางสถิติเข้ามาช่วยในการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ โดยผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ซึ่งแต่ละปัจจัยจะถูกทดสอบมากกว่า 2 ระดับ ทำให้สามารถเห็นจุดที่ตัวแปรตอบสนองมีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 ตามลำดับ หรือได้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ระดับที่ต้องการได้ โดยการออกแบบการทดลองประเภทจะมีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) และการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken



รูปที่ 2.7 กราฟพื้นผิวตอบสนองและกราฟโครงร่างของตัวแปรตอบสนองที่มีค่ามากที่สุด [5]

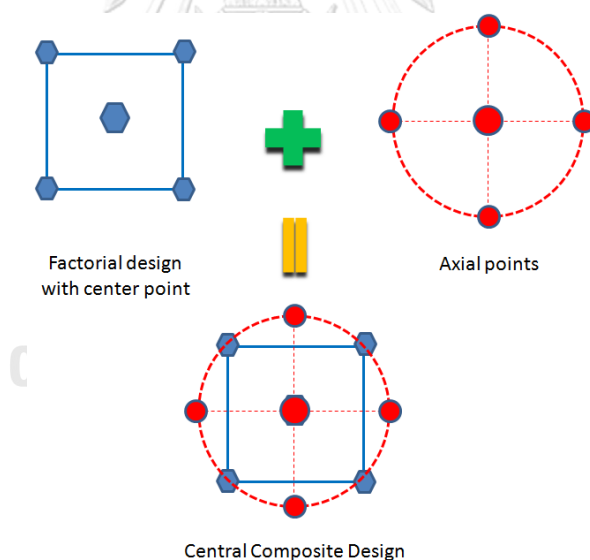


รูปที่ 2.8 กราฟพื้นผิวตอบสนองและกราฟโครงร่างของตัวแปรตอบสนองที่มีค่าน้อยที่สุด [5]

(ก) การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD)

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางเหมาะสำหรับการสร้างตัวแบบที่มีลักษณะเป็นโพลีโนเมียลกำลังสอง (Second-order Model) ซึ่งมีโครงสร้างมาจากการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^k โดยที่ระดับของปัจจัยนำเข้าจะแบ่งออกเป็น 5 ระดับ มีพื้นที่ในการออกแบบเป็นทรงกลม (Sphere) และมีการเพิ่มการออกแบบที่จุดศูนย์กลางเพื่อวัดความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง (Curvature) โดยรัศมีของทรงกลมจะมีค่าเท่ากับรากที่สองของรัศมีวงกลม ในการทดลองจะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

- ส่วนของการทดลองแฟกทอเรียล 2^k (Factorial Runs) หรือแฟกทอเรียลบางส่วน 2^{k-p}
- ส่วนของจุดแกน (Axial Runs)
- ส่วนของจุดศูนย์กลาง (Center Runs)



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

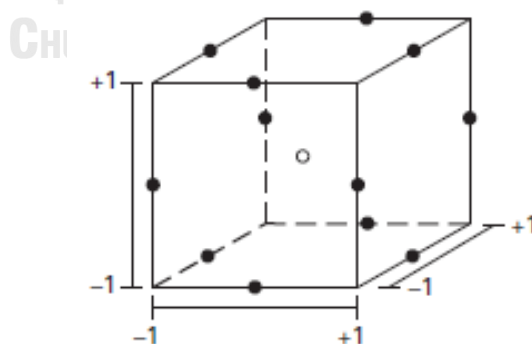
การกำหนดระดับปัจจัยของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนของการทดลองแฟกทอเรียลจะทำการทดลองอยู่ที่ระดับ +1 และ -1 ในส่วนของจุดศูนย์กลางจะใช้ระดับของการทดลอง 0 และส่วนการทดลองที่ส่วนของจุดแกนจะอยู่ที่ระดับ $+\alpha$ และ $-\alpha$ โดยค่า α จะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนปัจจัยดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่า α ของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางตั้งแต่ 2-6 ปัจจัย

จำนวนปัจจัย	ส่วนการทดลองแฟกทอเรียล	ค่า α
2	2^2	1.414
3	2^3	1.682
4	2^4	2.000
5	2^5	2.378
5	2^{5-1} (Fractional Factorial Design)	2.000
6	2^6	2.828
6	2^{6-1} (Fractional Factorial Design)	2.378

(ข) การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken จะเป็นการทดลองที่นิยมใช้ในกรณีที่มีจำนวนปัจจัยตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป แต่ละปัจจัยจะถูกทดลองที่สามระดับ โดยจะทำการสร้างตัวแบบที่มีลักษณะเป็นพอลิโนเมียลกำลังสอง ซึ่งในการทดลองจะนำหลักการของการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^k รวมกับการทดลองที่จุดกึ่งกลาง (Midpoints) แต่ในส่วนการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^k จะไม่ทำการทดลองที่จุดมุมดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken กรณีที่มี 3 ปัจจัย

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีการหล่อโลหะ (Casting Process)

2.2.1 กรรมวิธีการหล่อโลหะ (Casting Process) [6]

กรรมวิธีการหล่อโลหะหมายถึง การให้ความร้อนเพื่อหลอมโลหะให้มีสภาพเป็นของเหลว (Melting) จากนั้นจึงทำการเทน้ำโลหะที่หลอมเหลวลงไปในโพรงแบบหล่อ (Mold Cavity) ที่มีรูปร่างตามที่ต้องการแบบไว้ จากนั้นจึงปล่อยให้โลหะเย็นตัวลงและเกิดการแข็งตัว (Solidify) จะได้ชิ้นงานตามที่ต้องการ โดยขนาดของชิ้นงานหล่อจะมีตั้งแต่ขนาดเล็กน้อยๆ ไปจนถึงขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักหลายตัน ทั้งนี้คุณสมบัติของชิ้นงานหล่อจะมีความสัมพันธ์กับธรรมชาติของโลหะที่ถูกนำมาใช้ในการหล่อ ชนิดแบบหล่อ ขนาด รูปร่างของชิ้นงานหล่อ และอัตราการเย็นตัว ดังนั้นในกระบวนการหล่อโลหะจะมีขั้นตอนการทำงานที่นอกเหนือไปจากการเพิ่มความร้อนจนได้โลหะหลอมละลายแล้วจึงนำไปเทลงในแบบหล่อ เช่น การเติมอัลลอยด์บางชนิดลงไปผสมเพื่อปรับปรุงค่าคุณสมบัติทางกลหรือคุณสมบัติอื่นๆ หรือในบางกรณีจะเป็นการใช้เทคนิคในการควบคุมการผลิตเพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานหล่อที่มีคุณภาพ มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน เป็นต้น

ขั้นตอนในการหล่อโลหะ โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลักๆดังต่อไปนี้ [7]

1. การสร้างแม่พิมพ์ (Pattern Making)
2. การทำแบบหล่อและไส้แบบ (Mold and Core Making)
3. การหลอมโลหะและการเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อ (Melting and Pouring)
4. การแยกชิ้นงานออกจากแบบหล่อและการตกแต่งชิ้นงาน (Fettling and Finishing Operations)
5. การตรวจสอบและการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานหล่อ (Inspection and Quality Control)

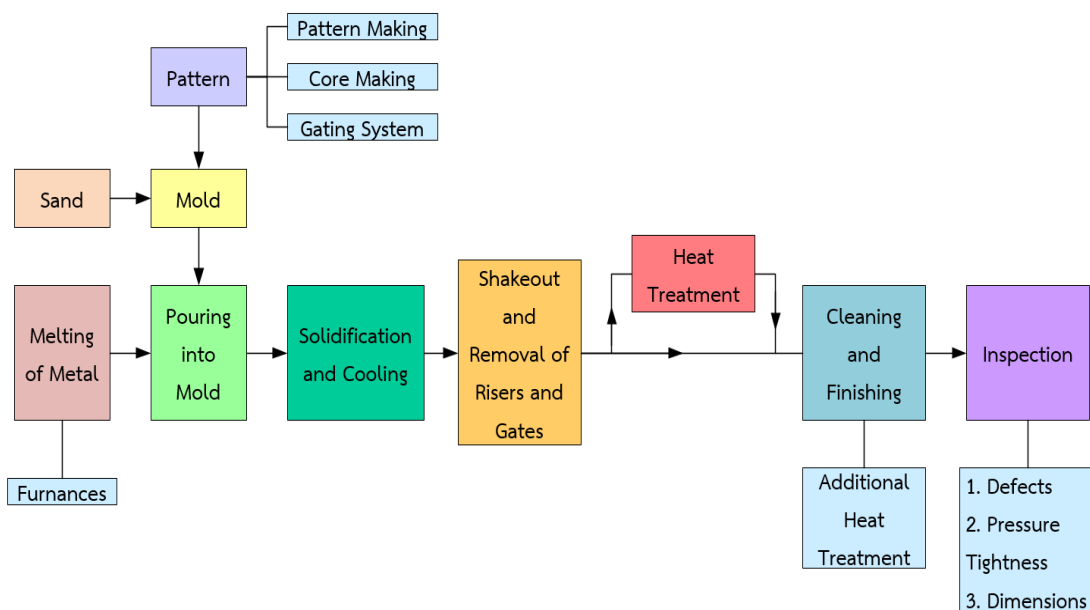
กรรมวิธีการหล่อโลหะมีกรรมวิธีการทำหลากหลายวิธี โดยกระบวนการทำในแต่ละวิธีจะมีขั้นตอนและข้อจำกัดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการนำไปใช้งานและปริมาณในการผลิต ในที่นี้จะขอกล่าวถึงกระบวนการหล่อโดยแบบหล่อทราย ซึ่งในอุตสาหกรรมการหล่อโลหะโดยทั่วไปจะนิยมใช้การหล่อโดยแบบหล่อทรายมากที่สุด เนื่องจากใช้ต้นทุนต่ำและสามารถใช้กับกระบวนการหล่อโลหะได้เกือบทุกชนิด อีกทั้งทรายที่ใช้ในกระบวนการยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย

2.2.2 การหล่อโดยแบบหล่อทราย (Sand Casting) [6]

การหล่อโดยแบบหล่อทรายเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการหล่อโลหะ โดยทั่วไป สามารถผลิตชิ้นงานหล่อได้ตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ที่น้ำหนักหลายร้อยกิโลกรัม ชิ้นงานหล่อที่ผลิตโดยแบบหล่อทรายจะประกอบไปด้วย เครื่องยนต์ ใบพัดเทอร์ไบน์ เปลือกมอเตอร์ ตลอดจนอุปกรณ์ทางการเกษตรอีกหลากหลายชนิด แบบหล่อทรายสามารถใช้กับโลหะได้หลายชนิดไม่ว่าจะเป็นเหล็กหล่อ เหล็กกล้า อะลูมิเนียม ทองแดงผสม ตลอดจนนิกเกิลหรือไทเทเนียม เป็นต้น

วัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อทรายจะประกอบไปด้วยทรายที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุทนไฟ ผสมรวมกับตัวประสานที่เป็นดินเหนียวและมีน้ำผสมเข้าไปเพื่อช่วยให้ดินเหนียวจับยึดเม็ดทรายได้ดีขึ้น ในบางครั้งอาจจะมีการเติมตัวประสานพิเศษลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างของทรายแบบหล่อให้ดียิ่งขึ้น ทรายที่ใช้ในการทำแบบหล่อนั้นมีหลากหลายชนิด เช่น ทรายแก้ว (Silica Sand) ทรายโครไมต์ (Chromite Sand) ทรายเซอร์คอน (Zircon Sand) ทรายโอลิวีน (Olivine Sand) เป็นต้น แต่ทรายที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือทรายแก้วเนื่องจากมีราคาถูกและมีความสามารถในการทนความร้อนเพียงพอสำหรับงานหล่อทั่วไป สำหรับตัวประสาน (Binder) จะใช้ดินเหนียว (Clay) เป็นตัวประสาน โดยดินเหนียวที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ ดินเหนียวเบนโทไนต์ (Bentonite Clay)

กรรมวิธีในการหล่อโดยแบบหล่อทราย จะเริ่มต้นจากการสร้างแม่พิมพ์ (Pattern Making) ที่มีการออกแบบทางวิ่งและระบบป้อนเติม (Gating and Feeding System) เอาไว้สำหรับเทน้ำโลหะเข้าไปในแม่พิมพ์ เพื่อให้ได้รูปร่างตามที่ทำการออกแบบไว้และได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์แบบไม่มีการยุบตัวหรือหล่อไม่เต็ม หากงานที่ต้องการมีโพรงหรือรู จะต้องมีขั้นตอนการทำไส้แบบ (Core Making) เพิ่มเข้ามา เมื่อทำการวางไส้แบบและประกบแบบหล่อ (Mold) เรียบร้อยแล้วให้นำมาจัดเรียงเพื่อรอเทน้ำโลหะ หลังจากเทน้ำโลหะลงแบบหล่อทรายที่เตรียมไว้เรียบร้อยแล้ว จะต้องปล่อยให้งานหล่อเย็นตัวและแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ (Solidification and Cooling) ให้ดีเสียก่อน แล้วจึงทำการรื้อแบบหล่อออก (Shakeout) จากนั้นนำมาตัดทางวิ่งและระบบป้อนเติมออก แล้วจึงนำชิ้นงานที่ได้มาทำความสะอาดโดยการยิงทรายด้วยลูกเหล็ก (Shot Blast) ถ้ามีการอบชุบ (Heat Treatment) ก็จะนำชิ้นงานไปอบชุบแล้วนำกลับมายิงทรายอีกครั้ง และขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการตกแต่งและตรวจสอบคุณภาพชิ้นงาน เช่น ขนาด คุณสมบัติทางกล เป็นต้น โดยขั้นตอนการหล่อโดยแบบหล่อทรายจะแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการหล่อโลหะโดยแบบหล่อทราย [8]

2.2.3 ส่วนประกอบของแบบหล่อและชิ้นงานหล่อ [6]

ส่วนประกอบและชื่อเรียกต่างๆของแบบหล่อทรายจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.12 โดยส่วนประกอบต่างๆจะมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

1. หนีบหล่อ (Flask) จะทำหน้าที่ในการบรรจุและจับยึดวัสดุที่ใช้ทำแบบหล่อให้มีความแข็งแรง หนีบหล่ออาจทำจากโลหะหรือไม้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงที่ต้องการ อายุการใช้งานตลอดจนต้นทุนในการผลิต โดยหนีบหล่อส่วนบนเรียกว่า โค้ป (Cope) หนีบหล่อส่วนล่างเรียกว่า แดรก (Drag) เส้นแบ่งระหว่างหนีบบนและหนีบล่างเรียกว่า แนวต่อระหว่างระหว่างแบบ (Parting Line)

2. โพรงแบบ (Mold Cavity) คือช่องว่างที่มีรูปร่างเหมือนกับชิ้นงานที่ต้องการ เกิดขึ้นจากการใช้แบบหล่อ (Pattern) ในการขึ้นรูปของกระบวนการปั้นแบบ

3. รูเท (Sprue) คือส่วนที่ทำหน้าที่ให้น้ำโลหะผ่านมาสู่ทางวิ่ง

4. ทางวิ่ง (Runner) คือส่วนที่ทำหน้าที่นำน้ำโลหะไหลลงสู่ทางเข้า

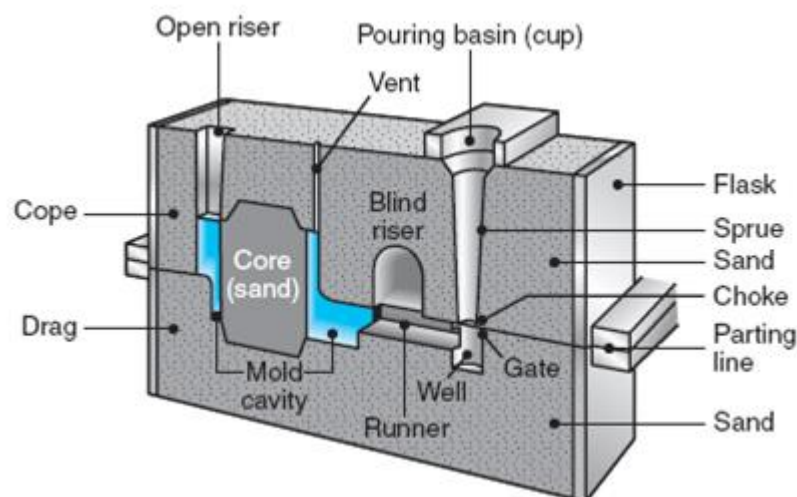
5. แอ่งรูเท (Pouring Basin, Cup) คือส่วนที่ทำหน้าที่รับน้ำโลหะไหลลงจากเบ้าเท (Ladle)

6. ป่าไส้แบบ (Core Print) คือบริเวณที่ใช้ในการจับยึดไส้แบบ

7. รูลัน (Riser) คือส่วนเพิ่มเติมในแบบหล่อที่ทำหน้าที่เก็บน้ำโลหะหลอมเหลวไว้ป้อนเติมให้กับชิ้นงานหล่อในขณะเกิดการหดตัว (Shrinkage) เมื่อโลหะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง (Solidification)

8. ทางเข้า (Gate) คือส่วนที่ทำหน้าที่ป้อนเติมและควบคุมการไหลของน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบหล่อ

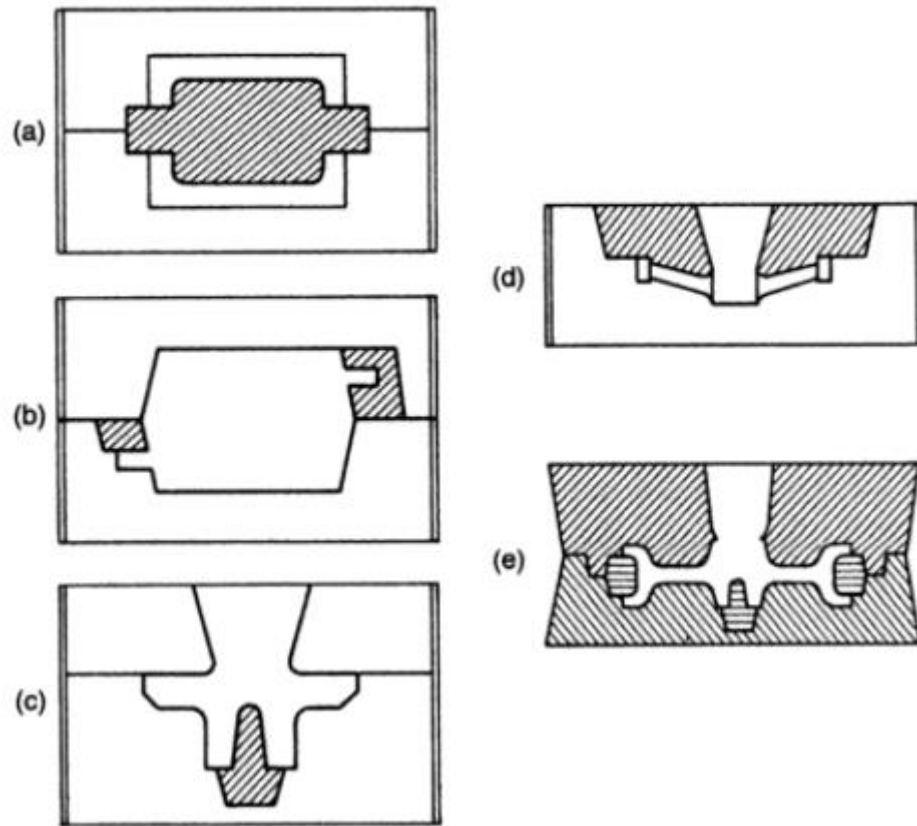
9. ระบบป้อนเติม (Gating System) คือส่วนประกอบที่ทำหน้าที่ในการรับน้ำโลหะจากการเท และนำน้ำโลหะไหลเข้าสู่โพรงแบบหล่อ ส่วนประกอบของระบบป้อนเติมจะประกอบด้วย แอ่งรูเท (Pouring Basin) รูเท (Sprue) ทางวิ่ง (Runner) และทางเข้าน้ำโลหะ (Gate)



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของแบบหล่อ [9]

2.2.4 การทำไส้แบบ (Core Making) [10]

ไส้แบบ (Core) เป็นส่วนของแบบหล่อทรายที่จะต้องติดหรือวางเอาไว้ในแบบหล่อทราย เพื่อให้ชิ้นงานหล่อเกิดช่องว่างหรือส่วนเว้าต่างๆ ซึ่งไม่สามารถทำให้เกิดขึ้นจากการใช้แบบจำลองโดยตรงได้หรือหากทำได้ก็เป็นการยากในการถอดแบบจำลองออกจากแบบหล่อทราย โดยรูปที่ 2.13 จะเป็นตัวอย่างของการใช้ไส้แบบในงานหล่อเพื่อให้เกิดรูตรงกลางหรือใช้เพื่อให้เกิดช่องว่างในลักษณะที่แตกต่างกัน

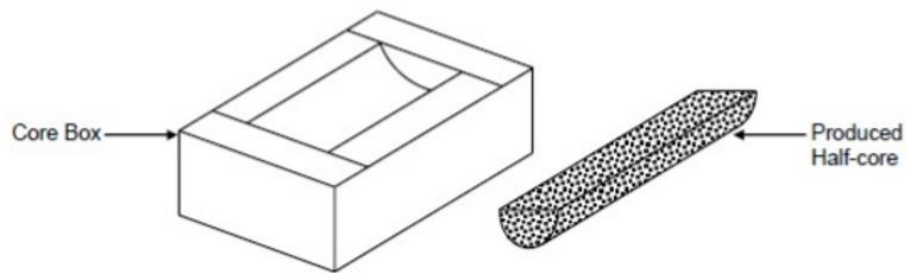


รูปที่ 2.13 ตัวอย่างของการใช้ไส้แบบในงานหล่อ [10]

1. กล่องไส้แบบ (Core box) [10, 11]

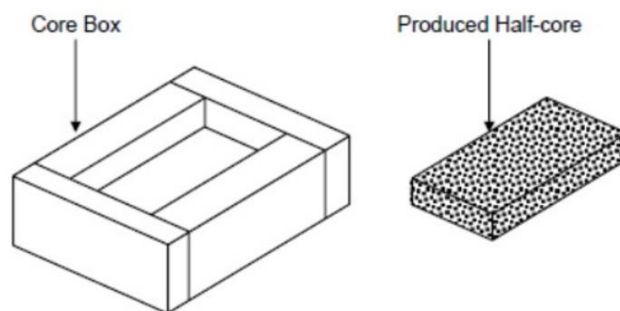
ในการทำไส้แบบจะใช้หีบที่ทำด้วยไม้หรือโลหะ เจาะให้เกิดช่องว่างตามลักษณะรูปร่างของไส้แบบตามที่ต้องการ ซึ่งเทคนิคในการทำกล่องไส้แบบมีหลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับรูปร่างและความชำนาญในการทำ โดยกล่องไส้แบบจะมีอยู่ 7 ชนิด คือ

1) Half Core Box จะเป็นการทำไส้แบบที่มีความสมมาตรขึ้นสองส่วนโดยจะมีลักษณะเป็นรูปทรงครึ่งทรงกระบอก จากนั้นจะนำมาประกบและยึดกันไว้เพื่อสร้างไส้แบบที่มีความสมบูรณ์ ดังรูปที่ 2.14



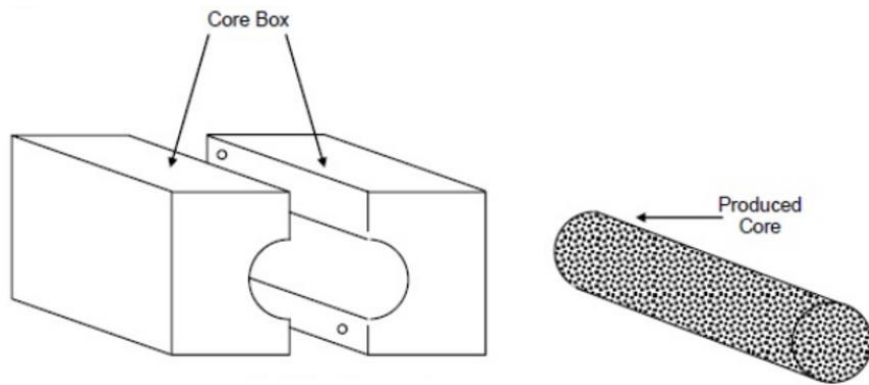
รูปที่ 2.14 Half Core Box [11]

2) Slap or Dump Core Box จะเป็นการทำไส้แบบโดยการใส่ทรายลงไปในกลุ่ม แล้วกระทุ้งให้แน่น แล้วทำการปาดทรายส่วนเกินให้เรียบร้อยแล้วนำแผ่นรองมาประกบด้านบนก่อนทำการพลิกกล่องไส้แบบคว่ำลง โดยกล่องไส้แบบจะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม หรือแบบอื่นๆก็ได้ ดังรูปที่ 2.15



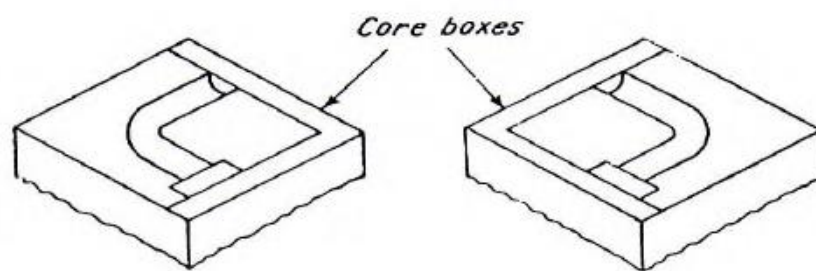
รูปที่ 2.15 Slap or Dump Core Box [11]

3) Split Core Box จะเป็นกล่องไส้แบบที่ถูกแบ่งออกเป็นสองฝั่งและมีฝาปิดอยู่ด้านใน โดยการยึดประกบจะอาศัย C-Clamp เข้ามาช่วยหรือใช้สลัก (Dowel) ในการช่วยยึดประกบเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 2.16



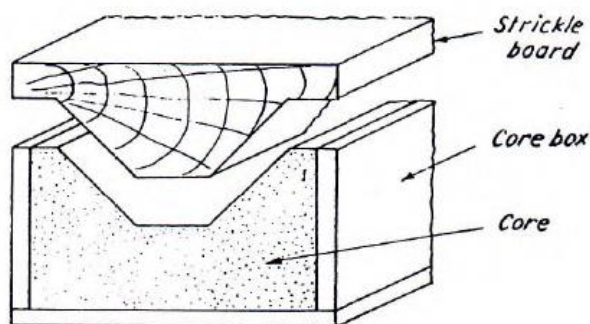
รูปที่ 2.16 Split Core Box [11]

4) Left and Right Hand Core Box จะเป็นกล่องใส่แบบที่ใช้ในการผลิตท่ออแบบต่างๆ (Pipe Bends) โดยกล่องใส่แบบจะมีสองฝั่ง และจะนำมาประกบกันภายหลัง ดังรูปที่ 2.17



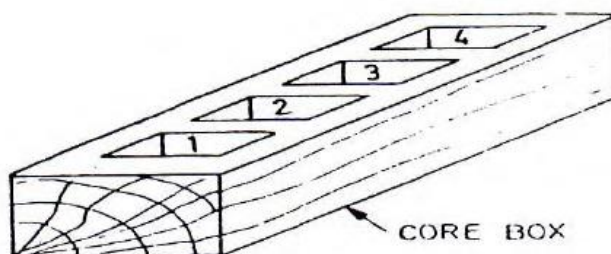
รูปที่ 2.17 Left and Right Hand Core Box [11]

5) Strickle Core Box ส่วนใหญ่จะทำมาจากไม้ซึ่งมี Strickle Board เป็นฝาปิดด้านบนคล้ายกับ Punch และมีส่วนล่างเป็นกล่องใส่แบบเปรียบเสมือนเป็น Die จากนั้นจะทำการประกบอัด Strickle Board เข้าหากัน และอาจจะพลิกกล่องใส่แบบกลับด้านอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 2.18



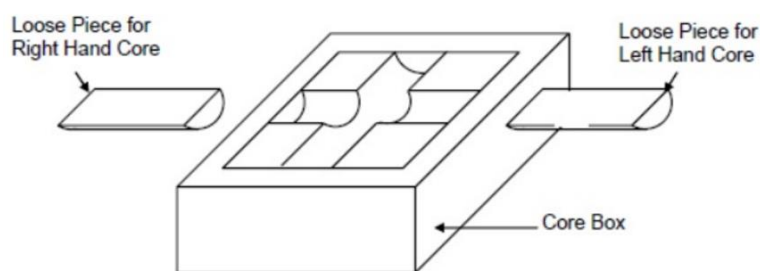
รูปที่ 2.18 Strickle Core Box [11]

6) Gang Core Box จะใช้ในการผลิตไส้แบบจำนวนมากๆในหนึ่งครั้ง ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 Gang Core Box [11]

7) Loose Piece Core Box จะใช้เมื่อไส้แบบแต่ละฝั่งมีลักษณะและขนาดที่แตกต่างกัน โดยเป็นกล่องไส้แบบจะมีฝั่งเดียว แต่มี Loose Piece ใส่ลงในตำแหน่งที่ทำไว้ เพื่อให้ได้ชิ้นงานตามที่ออกแบบ ดังรูปที่ 2.20

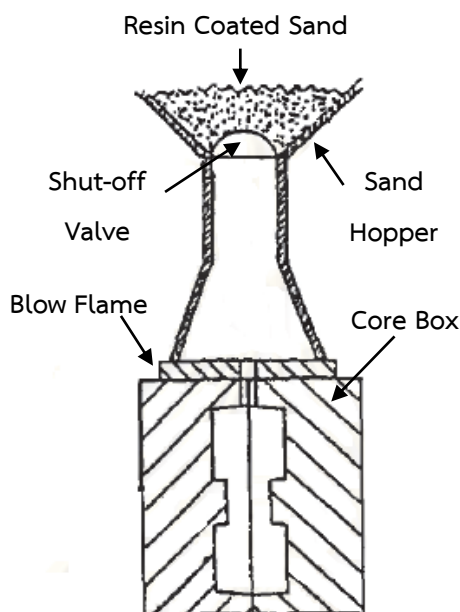


รูปที่ 2.20 Loose Piece Core Box [11]

2. ไส้แบบเปลือก (Shell Core) [12]

เป็นกรรมวิธีในการทำไส้แบบอย่างหนึ่งที่ใช้ Shell Core หมายถึงลักษณะไส้แบบที่บางคล้ายๆเปลือก (Shell) แต่มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับแรงกระแทกและการเสียดสีของน้ำโลหะหลอมเหลวได้ ในกระบวนการทำไส้แบบเปลือกจะใช้ทรายเคลือบเรซิน (Resin Coated Sand) เป็นวัตถุดิบ ซึ่งขั้นตอนในการทำไส้แบบเปลือกจะใช้กรรมวิธีการเป่า (Blowing Method) ในการทำดังรูปที่ 2.21 โดยเริ่มแรกจะต้องทำการเตรียมทรายเคลือบเรซินเอาไว้ในถังเก็บทราย พร้อมกับให้ความร้อนกับกล่องไส้แบบที่เตรียมไว้ แล้วจึงเริ่มทำการเป่าทรายเคลือบเรซินที่เตรียมไว้โดยใช้แรงอัดอากาศและเป่าเข้าไปในกล่องไส้แบบที่ถูกให้ความร้อนในขั้นตอนก่อนหน้านี้ เมื่อทรายเคลือบเรซินเจอกับความร้อนที่ผิวของกล่องไส้แบบก็จะเริ่มเซตตัวเป็นผนังบางๆขึ้นมา โดยส่วนมากแล้วทรายเคลือบเรซินที่ถูกเป่าเข้าไปจะถูกทิ้งไว้ไม่เกิน 1 นาที ขั้นตอนต่อมาจะต้องนำทรายเคลือบเรซินที่

เหลืออยู่ตรงกลางออก (สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้) แล้วจึงแกะเอาไส้แบบเปลือกที่ได้ออกจากแบบ โดยชิ้นงานที่ได้จะมีผิวเรียบและน้ำหนักเบา อีกทั้งไส้แบบเปลือกยังมีความแข็งแรงและขนาดที่แม่นยำกว่ากระบวนการทำไส้แบบอื่นๆอีกด้วย



รูปที่ 2.21 ส่วนประกอบของเครื่องจักรในการทำไส้แบบเปลือก [12]

3. ททรายทำไส้แบบ (Core Sand) และตัวประสาน (Binder) [10]

โดยส่วนมากแล้วไส้แบบจะเป็นส่วนที่ต้องสัมผัสกับน้ำโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นการเลือกททรายและตัวประสาน (Binder) จึงจำเป็นจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติสำคัญดังต่อไปนี้

1) ททรายทำไส้แบบ (Core Sand)

- ททรายจะต้องมีคุณสมบัติในการทนความร้อนสูง
- ททรายเมื่อผสมกับตัวประสานแล้วจะต้องมีคุณสมบัติความโปร่งอากาศดี เพื่อให้แก๊สที่เกิดขึ้นขณะกระบวนการหล่อสามารถระบายออกไปได้สะดวก
- ททรายทำไส้แบบจะต้องมีคุณสมบัติการยุบตัวที่ดี เพื่อความสะดวกในการรื้อแบบ และทำความสะอาดได้สะดวก

- ททรายเมื่อผสมกับตัวประสานแล้วจะต้องมีคุณสมบัติ Green, Dry และ Hot Strength อยู่ในเกณฑ์สูง เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักของตัวเองและน้ำโลหะได้จนถึงเวลาที่โลหะแข็งตัว

โดยปกติแล้วททรายที่ใช้ในการทำไส้แบบจะใช้ททรายแก้ว (Silica Sand) เป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นในบางกรณีอาจจะใช้ททรายโครไมต์ (Chromite Sand) หรือททรายเซอร์คอน (Zircon Sand) ซึ่งลักษณะของททรายที่เลือกใช้ควรจะมีขนาดของเม็ดททรายที่โตและเม็ดสม่ำเสมอ เพื่อให้มีคุณสมบัติความโปร่งอากาศที่ดี

2) ตัวประสาน (Binder)

- ตัวประสานจะต้องให้คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงสูง
- เมื่อสัมผัสกับโลหะหลอมเหลวจะต้องไม่เกิดแก๊สปริมาณมาก
- จะต้องช่วยทำให้ททรายมีคุณสมบัติการยุบตัวเองดี
- ไม่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือด่างและไม่มีการกัดกร่อน

ตัวประสานที่นิยมใช้ในโรงหล่อทั่วไปจะมีมากมายหลายประเภท ซึ่งการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับการใช้งานและต้นทุนในการผลิต โดยตัวประสานที่นิยมใช้จะมีดังต่อไปนี้

(ก) ประเภทน้ำมัน (Core Oil) โดยส่วนมากเป็นน้ำมันผสมหลายชนิด เช่น น้ำมันลินสีด น้ำมันปาล์ม หรือน้ำมันที่สกัดจากเมล็ดพืช และน้ำมันจากสัตว์ ในอัตราส่วน 1:40 โดยปริมาตร หรือประมาณ 2-4% โดยน้ำหนัก ตัวประสานประเภทนี้จะต้องอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 180-200 องศาเซลเซียส จะให้ความแข็งแรงที่ดี แต่เมื่อสัมผัสกับโลหะหลอมเหลวจะให้แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้สูง แต่จะให้คุณสมบัติทางด้านการยุบตัวเองดี

(ข) ประเภทเรซิน (Thermo Setting Resin) เป็นประเภทที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน เนื่องจากให้คุณสมบัติความแข็งแรงสูง คุณสมบัติการยุบตัวเองดี และเกิดแก๊สน้อยกว่าประเภทน้ำมัน มีทั้งประเภทที่ต้องอบให้แห้งและประเภทที่แห้งหรือแข็งเองในอากาศ ซึ่งในบางครั้งอาจเรียกว่า No Baking Sand ในส่วนประเภทเรซิน ได้แก่ Phenol หรือ Urea Formaldehyde และชนิดที่เป็น Air Set ได้แก่ Furan Resin

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทรายเคลือบเรซิน (Resin Coated Sand)

2.3.1 กระบวนการทรายเคลือบเรซิน (Resin Coated Sand) [13, 14]

ในปัจจุบันทรายเคลือบเรซินถือว่าเป็นวัสดุที่สำคัญที่ใช้สำหรับกระบวนการหล่อแบบเปลือก และการทำไส้แบบเปลือก เนื่องจากเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้ชิ้นส่วนวัสดุที่ต้องการผลิตในงานหล่อจะมีความซับซ้อนและต้องการความแข็งแรงมากขึ้น และในบางกรณีที่ชิ้นส่วนที่ต้องการมีขนาดใหญ่ การใช้แบบหล่อเปลือกหรือไส้แบบเปลือกจะช่วยลดน้ำหนักของแบบหล่อลงได้อีกด้วย ทำให้การหล่อแบบเปลือกและการทำไส้แบบเปลือกเข้ามามีบทบาทสำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ในอดีตยังไม่มีกระบวนการหรือเทคนิคที่ใช้ในการผลิตทรายเคลือบเรซิน ดังนั้นการผลิตจึงใช้ทรายแห้งผสมเข้ากับฟีนอลิกเรซินที่มีลักษณะเป็นผงกับเฮกซามีนและทำการผสมให้เข้ากัน เมื่อนำไปใช้กับการหล่อแบบเปลือกหรือการทำไส้แบบจะเกิดข้อเสียคือ ฟีนอลิกเรซินจะไม่ไปเคลือบเม็ดทรายและแยกตัวออกทำให้ชิ้นงานไม่มีความแข็งแรง อีกทั้งยังทำให้ชิ้นงานติดกับแบบหล่ออีกด้วย ทั้งนี้สาเหตุที่นั้นเกิดมาจากกรรมวิธีในการผลิตทรายเคลือบเรซินยังไม่เหมาะสม ดังนั้นในปี 1950 จึงมีการพัฒนากรรมวิธีในการผลิตทรายเคลือบเรซินขึ้นมา ซึ่งกระบวนการที่นิยมใช้จะประกอบด้วย 2 กระบวนการ คือ กระบวนการเคลือบด้วยอากาศอุ่น (Warm Air Coating Process) และกระบวนการเคลือบร้อน (Hot Coating Process)

กระบวนการเคลือบด้วยอากาศอุ่น (Warm Air Coating Process) จะเป็นการนำเฮกซามีนและแคลเซียมสเตียเรต (สารหล่อลื่น) ลงไปผสมกับทรายภายในถังผสมโดยใช้เวลาประมาณ 40-60 วินาที จากนั้นจะทำการเติมฟีนอลิกเรซินที่อยู่ในรูปของสารละลายผสมกับแอลกอฮอล์ (Liquid Resin) และน้ำลงไปผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาประมาณ 2-3 นาที ซึ่งการเติมสารทั้งสองจะถูกเติมลงไปภายในถังผสมผ่านทางท่อเป่าลมที่มีอุณหภูมิประมาณ 40-70 องศาเซลเซียส เพื่อให้ทรายมีอุณหภูมิสูงขึ้นและยังช่วยให้ทรายที่จับตัวกันเป็นก้อนแตกตัวซึ่งใช้เวลาประมาณ 4-6 นาที สุดท้ายทรายเคลือบเรซินที่ได้จะถูกนำไปบรรจุใส่ถุงเพื่อรอจำหน่ายหรือนำไปใช้งานต่อไป

กระบวนการเคลือบร้อน (Hot Coating Process) จะเริ่มต้นจากการนำทรายไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 120-150 องศาเซลเซียส และใส่ลงไปถังผสม จากนั้นจะทำการเติมฟีนอลิกเรซินที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Granule), ผง (Powder) หรือแผ่นบางๆ (Flake) ที่อุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้ฟีนอลิกเรซินละลายและไปเคลือบที่เม็ดทราย ต่อมาจะทำการเติมเฮกซามีนกับน้ำที่อยู่ในรูปของสารละลายลงไปเพื่อให้ทรายเย็นตัวลงและทำให้เกิดความแข็งแรง อีกทั้งยังช่วยทำให้ทรายมีการแตกตัวดีขึ้นอีกด้วย และจะทำการเติมแคลเซียมสเตียเรตลงไปในช่วงตอนสุดท้าย

เพื่อให้ทรายเกิดการยุบตัวที่ดีและเพิ่มคุณสมบัติการไหลของทรายให้ดีขึ้นในขณะนำไปใส่แบบ จากนั้นทรายเคลือบเรซินที่ได้จะถูกนำไปบรรจุใส่ถุงเพื่อรอจำหน่ายหรือนำไปใช้งานต่อไป

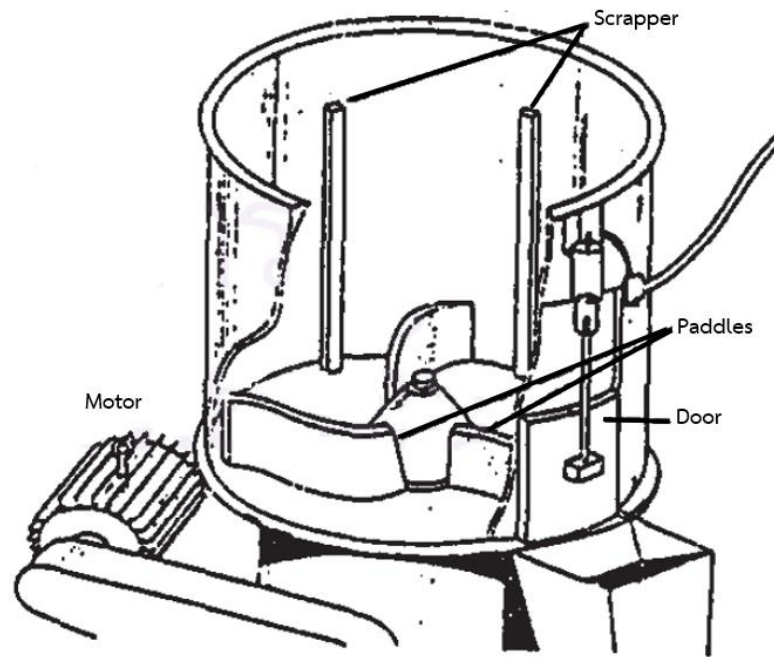
ในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินส่วนใหญ่นิยมใช้กระบวนการเคลือบร้อน เนื่องจากค่าใช้จ่ายไม่สูงมากและมีความรวดเร็ว โดยเวลาในการผลิตต่อแบบจะใช้ประมาณ 2.2-3.5 นาที ซึ่งถือว่ารวดเร็วมากเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกระบวนการเคลือบเย็น ทำให้สามารถผลิตทรายเคลือบเรซินได้ปริมาณมากในเวลาที่กำหนด นอกจากนี้กระบวนการเคลือบร้อนยังช่วยทำให้แบบหล่อเปลือกหรือใส่แบบเปลือกมีความแข็งแรงสูงอีกด้วย

2.3.2 เครื่องผสมทราย (Sand Mixer) [12]

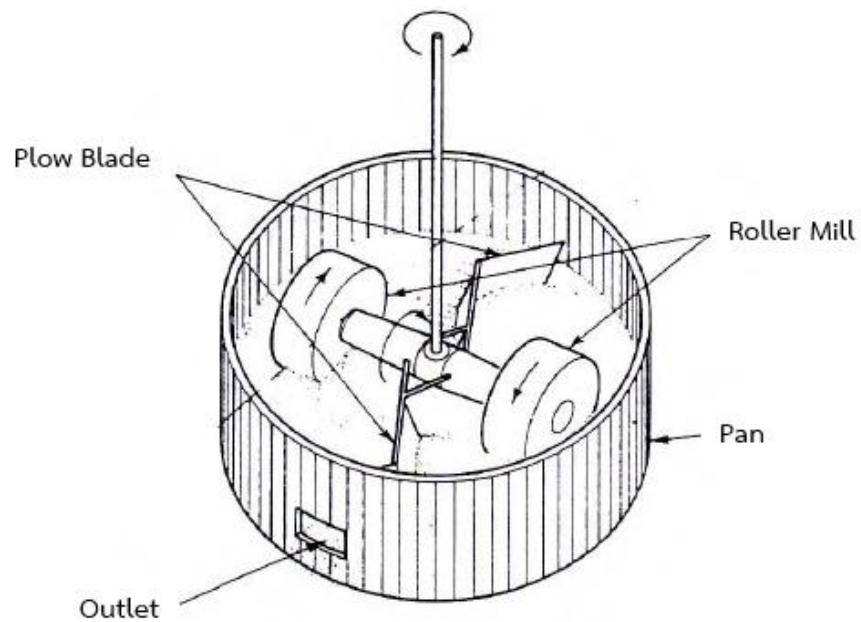
การเตรียมทรายสำหรับทำแบบหล่อหรือใส่แบบถือว่าเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญที่จะทำให้งานหล่อที่ได้มีคุณภาพสูง การเตรียมทรายหล่อหมายถึงการนำเอาทราย ตัวประสาน และน้ำ ผสมเข้าด้วยกัน เพื่อให้ส่วนผสมเหล่านั้นไปเคลือบเม็ดทรายอย่างสม่ำเสมอ โดยใช้เครื่องผสมทราย (Sand Mixer) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. เครื่องผสมทรายชนิดใบพาย (Impeller Mixer) จะมีลักษณะเป็นถังเหล็กทรงกระบอก มีใบพาย (อาจจะ 2 หรือ 3 ใบพาย ก็ได้แล้วแต่การออกแบบ) ยึดติดกับแกนกลางสามารถหมุนได้รอบตัวดังรูปที่ 2.22 โดยอาศัยแรงขับจากมอเตอร์ไฟฟ้า ใบพายจะทำหน้าที่พลิกทรายกลับไปกลับมาเพื่อให้เคลือบเคล้ากับตัวประสานอย่างทั่วถึง ซึ่งนิยมใช้กับทรายหล่อที่ตัวประสานเป็นของเหลวเช่น น้ำมัน น้ำแก้ว เรซิน เป็นต้น

2. เครื่องผสมทรายชนิดลูกกลิ้งบด (Roller Mill Mixer) จะมีลักษณะเป็นถังเหล็กทรงกระบอก มีลูกกลิ้งหมุนอยู่ภายในแนวระนาบ อาจจะมีใบพายติดอยู่กับแกนกลางเพื่อช่วยพลิกทรายให้ไหลวนไปรอบๆดังรูปที่ 2.23 ลูกกลิ้งนี้จะยึดติดกับแกนของแกนกลางและหมุนได้รอบตัว โดยอาศัยแรงขับจากมอเตอร์ไฟฟ้า มักจะนิยมใช้กับทรายหล่อที่ตัวประสานเป็นดินเหนียว



รูปที่ 2.22 เครื่องผสมทรายชนิดใบพาย (Impeller Mixer) [12]



รูปที่ 2.23 เครื่องผสมทรายชนิดลูกกลิ้งบด (Roller Mill Mixer) [12]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป การปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตถือเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้กระบวนการผลิตดำเนินการอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดผลลัพธ์สูงสุด หนึ่งในวิธีการที่นิยมนำเข้ามาประยุกต์ใช้คือ ซิกซ์ ซิกมา โดยซิกซ์ ซิกมาเป็นแนวทางในการปรับปรุงที่มีขั้นตอนที่ชัดเจน และรวบรวมเครื่องมือที่สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพไว้อย่างเป็นลำดับขั้นตอน ทำให้ผู้ใช้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพในงานต่างๆได้อย่างมีแบบแผน และเพื่อให้ผู้ใช้งานมีความเข้าใจเกี่ยวกับสาเหตุและผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนค่าปัจจัยนำเข้าที่เกี่ยวข้องและสังเกตผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น โดยอาศัยการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE) เข้ามาช่วยในการออกแบบและกำหนดปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสม Park และ Ahn [15] ได้กล่าวว่า การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนในทางอุตสาหกรรม ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้เข้าใจถึงลักษณะของกระบวนการและใช้ในการคัดกรองปัจจัยนำเข้าที่มีความสำคัญต่อผลตอบสนองโดยอาศัยหลักทางสถิติเข้ามาช่วย นอกจากนี้ยังใช้ในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมด้วยการทดลองที่น้อยอีกด้วย

2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง

ปารเมศ ชูติมา [4] ได้กล่าวว่า ในช่วงแรกเริ่มของการทดลองจะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมากที่ต้องทำการตรวจสอบและศึกษาถึงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมที่มีต่อผลตอบสนองซึ่งเกิดจากปัจจัยเหล่านั้น หนึ่งในวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการคัดกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลงคือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k หรือในบางกรณีที่สามารถตัดอันตรกิริยาระดับสูงบางตัวทิ้งได้ก็จะใช้การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-p} ซึ่งการออกแบบการทดลองทั้งสองวิธีจะทำให้เกิดจำนวนการทดลองน้อยที่สุดที่สามารถเป็นไปได้เพื่อศึกษาถึงผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมของปัจจัย k ชนิด ดังเช่นในงานวิจัยของ Chang S.H. และคณะ [16] ได้นำวิธีการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1} เข้ามาประยุกต์ใช้ในการคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสกัด Cu(II) จากตัวทำละลายอินทรีย์ที่ได้มาจากน้ำมันถั่วเหลือง โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 6 ปัจจัย ได้แก่ Mixing Time, di-2-ethylhexylphosphoric acid concentration (D2EHPA), organic to aqueous phase ratio (O:A), Sodium sulfate concentration (Na_2SO_4), equilibrium pH (pH_{eq}) และ tributylphosphate concentration (TBP) ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญสามารถแบ่งออกเป็นผลกระทบหลักคือ D2EHPA และ pH_{eq} ส่วนผลกระทบร่วมคือ $\text{D2EHPA} \times \text{pH}_{\text{eq}}$ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Park และ Ahn [15] ได้นำวิธีการออกแบบการทดลองไป

ประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก โดยแบ่งการปรับปรุงออกเป็น 2 ส่วนคือ การออกแบบพิมพ์และกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก โดยในส่วนของออกแบบแม่พิมพ์จะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ Main Runner Diameter (mm), Sub-Runner Diameter (mm), Main Gate position (mm), Sub Gate Position (mm) และ Cooling Channel Configuration และในส่วนของกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 8 ปัจจัย จากนั้นจึงทำการคัดกรองปัจจัยโดยใช้วิธีการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1} จนเหลือ 5 ปัจจัย คือ Injection Pressure (MPa), Packing Pressure (%), Injection Speed 1 (%), Injection Speed 2 (%), Injection Time (s) และ Packing Time (s) โดยในการทดลองทั้งสองส่วนจะทำการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^k ในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม ซึ่งผลจากการนำค่าปัจจัยที่เหมาะสมไปใช้ในการผลิตจริงสามารถทำให้ผลิตภาพเพิ่มขึ้น 38%

การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design) จะใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าตามที่ต้องการ ซึ่งแต่ละปัจจัยจะต้องถูกทดสอบมากกว่า 2 ระดับ ดังนั้นในการเก็บรวบรวมข้อมูลจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกรูปแบบการทดลองให้มีความเหมาะสม ซึ่งแบบการทดลองที่นิยมใช้คือ การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเทคนิค CCD และ RSM ไปประยุกต์ใช้ดังต่อไปนี้

งานวิจัยของ Niranjan และ Lakshminarayanan [17] ได้นำวิธีการออกแบบการทดลองไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหล่อของวัสดุโลหะเมทริกซ์ Al/TiB_2 เพื่อหาค่าปัจจัยที่ทำให้ค่าคุณสมบัติที่ทำการพิจารณามีค่าสูงสุด ปัจจัยที่นำมาเข้ามาพิจารณาได้แก่ Temperature ($^{\circ}C$), Reaction Time (min) และ Mass Fraction of TiB_2 (%) ผลลัพธ์ที่สนใจประกอบด้วยสองตัวแปร คือ Ultimate Tensile Strength และ Hardness ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ทำการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง (แบ่งออกเป็น การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k 8 การทดลอง, ในส่วนของจุดแกน 6 การทดลอง และส่วนของจุดศูนย์กลางอีก 6 การทดลอง) การทดลองเชิง ซึ่งมีการกำหนดระดับของปัจจัยในการทดลอง 5 ระดับ ได้แก่ +1 และ -1 ตามการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k , ในส่วนของจุดแกนที่ระดับ α เท่ากับ 1.68 และระดับ 0 หรือที่จุดศูนย์กลางของการทดลอง ทำการสร้างสมการถดถอยและหาค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology) ผลการทดลองทำให้ทราบค่าปัจจัยที่เหมาะสมได้แก่ Temperature = $949.6^{\circ}C$, Reaction Time = 33.64 min และ Mass Fraction of TiB_2 = 5.96% โดยทำให้ค่า Ultimate Tensile Strength และ Hardness มีค่าสูงถึง 261.84 MPa และ HV 70.98 ตามลำดับ

ในการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบยังสามารถใช้เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับปัจจัยนำเข้าได้อีกด้วย ดังเช่นในงานวิจัยของ Yang A. และคณะ [18] ได้นำวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางชนิด Faced-Centered (CCF) ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างสมการเพื่อใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวสำหรับโลหะผสมไทเทเนียม โดยมีปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ Cutting Speed, Feed Rate และ Depth of Cut แต่ละปัจจัยจะถูกทดสอบที่ 3 ระดับ ทำการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง ผลการทดลองที่ได้คือสมการความสัมพันธ์ที่ใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวซึ่งมีค่า R^2 สูงถึง 0.952 จากนั้นทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการพยากรณ์และค่าที่ได้จากการทดลองจริงพบว่ามีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการออกแบบการทดลองที่มีผลตอบสนองที่สนใจหลายตัว (Multi Response) โดยวิธีการ Constrained Optimization และ Desirability Function [5] โดยมีงานวิจัยที่นำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ดังต่อไปนี้

งานวิจัยของ Sung-II และคณะ [19] ได้นำการออกแบบการทดลองไปใช้ในการพัฒนาตัวต้นแบบของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิด PMLSM เพื่อปรับปรุงค่า Average Thrust และ Thrust Ripple ให้ดีขึ้นก่อนนำไปใช้งานจริง ซึ่งพบว่ามีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 8 ปัจจัย แล้วทำการคัดกรองปัจจัยนำเข้าโดยการออกแบบ Fractional Factorial Design พบว่าเหลือปัจจัยที่มีนัยสำคัญ 3 ปัจจัย ได้แก่ Air-gap (mm), Width of permanent magnet (mm) และ Height of permanent magnet (mm) จากนั้นนำปัจจัยที่ได้ไปทำการออกแบบ Full Factorial Design ทำการทดลองทั้งหมด 9 การทดลอง โดยมีการเพิ่มจุดศูนย์กลาง 1 จุด และได้กำหนดระดับของปัจจัยในการทดลอง 5 ระดับ ได้แก่ +1 และ -1 ตามการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มรูป ในส่วนของจุดแกนที่ระดับ α เท่ากับ 1.68 และระดับ 0 หรือที่จุดศูนย์กลางของการทดลอง เพื่อนำไปทำการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology) ในการหาค่าปัจจัยที่ทำให้ค่าผลตอบสนองเหมาะสมที่สุด ซึ่งมีการกำหนดเงื่อนไขผลตอบสนองที่ยอมรับได้ (Constrained Optimization) ดังนี้

$$125.4 \leq \text{Average Thrust } (Y_{AT}) \leq 127.4$$

$$0.15 \leq \text{Thrust Ripple } (Y_{TR}) \leq 0.25$$

ผลการทดลองที่ได้ทำให้ทราบค่าปัจจัยที่เหมาะสมได้แก่ Air-gap = 1.2 mm, Width of permanent magnet = 12.6 mm และ Height of permanent magnet = 6.5 mm ซึ่งทำให้ได้

ค่า Average Thrust = 125.7 และ Thrust Ripple = 0.25 ส่งผลให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า หลังปรับปรุงมีค่าเพิ่มขึ้น 37.4%

งานวิจัยของ Mohanty S. และคณะ [20] ได้นำการออกแบบการทดลองไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าโดยการเติมผงโลหะเพื่อใช้ในการตัด $AlSiC_p$ โดยมีผลตอบสนองที่สนใจอยู่ 3 ตัวด้วยกัน คือ Material Removal Rate (MRR), Surface Roughness (R_a) และ Tool Wear Rate (TWR) จากนั้นจึงทำการคัดกรองหาปัจจัยนำเข้าพบว่า มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ Low Voltage Current (LVC), High Voltage Current (HVC), Pulse-on Time (T_{on}), Pulse-off Time (T_{off}) และ Flushing Pressure (FP) โดยแต่ละปัจจัยจะถูกทดสอบที่ 3 ระดับ ต่อมาจึงนำปัจจัยที่ได้ไปทำการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design) แบบ Box-Behnken ซึ่งมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 46 การทดลอง และในขั้นตอนการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจะมีการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) เข้ามาช่วยการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยแต่ละตัว พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากค่าที่ได้จากการพยากรณ์และค่าที่ได้จากการทดสอบจริงโดยใช้ Particle Swarm Optimization (PSO) โดยผลตอบสนองทั้ง 3 ตัว คือ Material Removal Rate (MRR), Surface Roughness (R_a) และ Tool Wear Rate (TWR) จะมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดไปจากค่าที่พยากรณ์เท่ากับ 2.48, 3.13 และ 4.18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ภูธิป อินทรักษ์ [21] ได้นำวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) มาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมในการลดเวลาสูญเสียในกระบวนการติดฉลาก ซึ่งมีข้อบกพร่องที่สนใจ 3 ตัว ประกอบด้วย 1. สัดส่วนของขวดที่ฉลากพับต่อจำนวนขวดในขนาดกลุ่มตัวอย่าง 2. ระยะเฉลี่ยของฉลากเหลือมภายในกลุ่มตัวอย่าง (mm) และ 3. ระยะเฉลี่ยระหว่างเส้นศูนย์กลางแนวตั้งของฉลากหน้าและฉลากคอในกลุ่มตัวอย่าง (mm) โดยมีปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 5 ปัจจัย ประกอบด้วย A: ระยะห่างจากขวดในทิศทางเข้า-ออกจากขวดของ Labeling Station (mm) B: ระยะห่างจากขวดในทิศทางซ้าย-ขวาจากขวดของ Labeling Station (mm) C: ความหนาของกาวบน Glue Roller (μm) D: อัตราการป้อนกาวจากเครื่องปั๊ม (Stroke/min) และ E: ความดันลมเป่าฉลาก (bar) และใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design) แบบ Central Composite Design (CCD) ที่ค่า α เท่ากับ 2 ในการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม โดยปัจจัยแต่ละตัวจะถูกทดสอบที่ 5 ระดับ แต่เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวมีผลตอบสนองที่สนใจอยู่หลายตัว ดังนั้นในขั้นตอนการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจะมีการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) เข้ามาช่วยในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ผลตอบสนองทั้งสามมีค่าตรงตามเป้าหมายมากที่สุด โดยการกำหนดเป้าหมายและน้ำหนักความสำคัญของตัวแปรตอบสนอง

แต่ละตัว และแปลงค่าตัวแปรตอบสนองเหล่านั้นให้เป็นค่าความพึงพอใจ ($d_i(Y_i)$) จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าความพึงพอใจโดยรวม (Overall Desirability: D) ของตัวแปรตอบสนองและนำไปสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาค่าความพึงพอใจโดยรวมสูงสุด (ค่าความพึงพอใจจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1) โดยค่าระดับปัจจัยที่ทำให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมสูงสุดที่ค่า 0.9997 ประกอบด้วย ปัจจัย A ปรับตั้งที่ค่า 16.6 mm, ปัจจัย B ปรับตั้งที่ค่า 7.5 mm, ปัจจัย C ปรับตั้งที่ค่า 132 μm , ปัจจัย D ปรับตั้งที่ค่า 60 Stroke/min และปัจจัย E ปรับตั้งที่ค่า 1.1 bar ซึ่งสามารถลดค่าเฉลี่ยของข้อบกพร่องประเภทฉลากพับ ฉลากเหลือม และโลโก้ไม่ตรงลงได้ 89.9 75.6 และ 75.1 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และสามารถลดเวลาสูญเสียและความถี่ในการหยุดเครื่องจักรลงได้ 40.28 และ 72.72 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ภารินี แก้วสม [22] ได้นำเครื่องมือซิกซ์ ซิกมา เข้ามาประยุกต์ใช้ในการลดของเสียจากข้อบกพร่องเส้นด้ายเป็นขนในกระบวนการด้ายยัดเส้นด้าย ซึ่งข้อบกพร่องประเภทเส้นด้ายเป็นขนมีของเสียเท่ากับ 3.35% ของปริมาณการผลิตทั้งหมด จากนั้นจึงเริ่มทำการดำเนินงานตามขั้นตอนของซิกซ์ ซิกมา เริ่มจากการศึกษากระบวนการและทำการคัดกรองปัจจัยนำเข้าในการทดลองโดยอาศัยเมทริกซ์ แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause & Effect Matrix) และการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) จนเหลือปัจจัยนำเข้า 5 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของ 1st Godet Roller ($^{\circ}\text{C}$), อุณหภูมิของ 2nd Godet Roller ($^{\circ}\text{C}$), ความเร็วรอบของ 3rd Godet Roller (rpm), ความดันลมของ 1st Air Guide (kPa) และความดันลมของ 3rd Air Guide (kPa) และใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design) แบบ Central Composite Design (CCD) ที่ค่า α เท่ากับ 2 ในการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม โดยปัจจัยแต่ละตัวจะถูกทดสอบที่ 5 ระดับ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการลดของเสียจากข้อบกพร่องเส้นด้ายเป็นขน

ปัจจัยนำเข้า	ระดับปัจจัย				
	-2	-1	0	1	2
อุณหภูมิของ 1 st Godet Roller (°C)	68	70.5	73	75.5	78
อุณหภูมิของ 2 nd Godet Roller (°C)	94	99	104	109	114
ความเร็วรอบของ 3 rd Godet Roller (rpm)	2004.5	2086	2167.5	2249	2330.5
ความดันลมของ 1 st Air Guide (kPa)	0	1	2	3	4
ความดันลมของ 3 rd Air Guide (kPa)	1	2	3	4	5

ในการออกแบบการทดลองแบบ CCD จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย 1. ส่วนของ Factorial Run ผู้วิจัยเลือกใช้การทดลองแบบ Half Fractional Factorial มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 16 การทดลอง 2. ส่วนของ Axial Run จำนวน 10 การทดลอง 3. ส่วนของการทดลองที่จุดศูนย์กลางอีก 6 การทดลอง ผลการทดลองที่ได้สามารถลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทเส้นด้ายเป็นขนเหลือเพียง 1.47% โดยค่าการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิของ 1stGodet Roller เท่ากับ 72.5 °C, อุณหภูมิของ 2ndGodet Roller เท่ากับ 102 °C, ความเร็วรอบของ 3rdGodet Roller เท่ากับ 2004.5-2330.5 rpm (ปรับให้อยู่ในช่วงเนื่องจากปัจจัยไม่ส่งผล), ความดันลมของ 1stAir Guide เท่ากับ 2 kPa และความดันลมของ 3rdAir Guide 3 kPa

รัฐญา สนเฟือก [23] ได้ทำการปรับปรุงความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์ โดยการใช้แนวคิดซิกซ์ ซิกมาเข้ามาช่วยในการดำเนินการปรับปรุง มีจุดประสงค์ในการทำโครงการคือ การเพิ่มค่าความสามารถของกระบวนการในระยะยาว (P_{pk}) ให้มีค่ามากกว่า 1.33 ซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การทำให้ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นและการลดค่าความผันแปรของค่าความแข็งแรง จากนั้นจึงทำการศึกษากระบวนการและคัดกรองปัจจัยนำเข้า พบว่ามี 3 ปัจจัย ที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ค่าพรีเนสน้ำเยื่อ ความหนาของชั้นฟิล์ม และแรงอัด ต่อมาจึงนำปัจจัยที่ได้ไปทำการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design) แบบ Box-Behnken ซึ่งแต่ละปัจจัยจะถูกทดสอบที่ 3 ระดับ ดังตารางที่ 2.4 มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 15 การทดลอง

ตารางที่ 2.4 การกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการปรับปรุงความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์

ปัจจัยนำเข้า	ระดับปัจจัย		
	-1	0	1
ค่าพรีเสซัวร์เยื่อ (CSF)	430	480	530
ความหนาของฟิล์ม (mm)	0.45	0.55	0.65
แรงอัด (bar)	1.2	1.4	1.6

ผลการทดลองที่ได้พบว่า ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 15.11 MPa เป็น 18.41 MPa และค่าความผันแปรของค่าความแข็งแรงลดลงจาก 1.44 เป็น 0.72 ซึ่งทำให้ค่าความสามารถของกระบวนการในระยะยาว (P_{pk}) เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.26 เป็น 2.05 โดยการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมคือ ค่าพรีเสซัวร์เยื่อปรับตั้งที่ 430 CSF ความหนาของชั้นฟิล์ม 0.65 มิลลิเมตร และแรงอัด 1.6 บาร์

2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทรายเคลือบเรซิน

อุรวรรณ อุ้นแก้ว [13] ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงทรายเคลือบฟันออลิเกรซินที่ผลิตในประเทศสำหรับทำแบบหล่อเปลือก โดยทำการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติเชิงกลของฟันออลิเกรซินที่ผลิตในประเทศและฟันออลิเกรซินของต่างประเทศซึ่งมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น จุดหลอมเหลว สมบัติการไหล ระยะเวลาการเกิดเจล เป็นต้น ซึ่งส่งผลต่อความหนืดและการไหลของเรซิน การเกิดโครงสร้างร่างแหในขั้นตอนการทำทรายเคลือบเรซิน ตลอดจนคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินที่สำคัญคือ ความทนแรงดัดโค้ง (Bending Strength) จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง เพื่อใช้ในการศึกษาถึงคุณสมบัติของฟันออลิเกรซินและใช้ในการหาค่าความทนแรงดัดโค้งที่อยู่ในช่วงใช้งานของโรงงาน ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 เงื่อนไขที่ใช้ทดลองในกระบวนการทรายเคลือบเรซิน

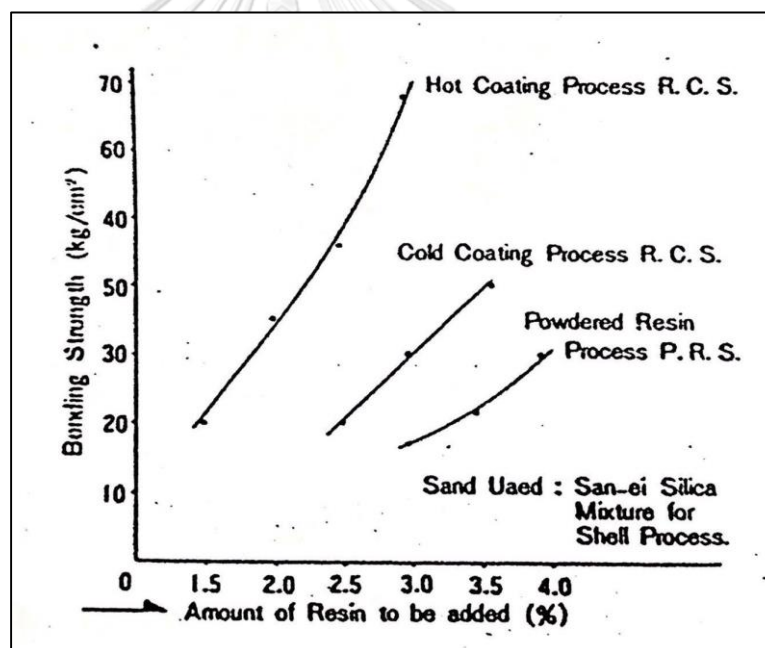
%Resin	Type of Resin	Type of Sand	Applications
1.7	Thai Resin	Australian Sand	Core
2.1	Thai Resin	Australian Sand	Core
2.4	Thai Resin	Australian Sand	Core
3.2	Thai Resin	Reclaimed Sand	Mold for Aluminum Casting
2.7	Thai + Import Resin	Reclaimed Sand	Mold for Iron Casting
4.3	Thai + Import Resin	Rayong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

กรณีที่ใช้ฟีนอลิกเรซิน 2.7 และ 4.3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักราย จะมีการเติมฟีนอลิกเรซินที่ผลิตในประเทศในอัตราส่วน 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เหลือคือฟีนอลิกเรซินของต่างประเทศ ในการทดลองจะอาศัยเครื่องผสมทรายขนาดเล็ก (Small Scale Sand Mixer) เข้ามาช่วยในการทำทรายเคลือบเรซิน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีความสำคัญมากเนื่องจากต้องทำการควบคุมปัจจัยในกระบวนการให้มีความเหมาะสม โดยเฉพาะอุณหภูมิของทรายในกระบวนการให้ความร้อนจะต้องควบคุมให้มีความเหมาะสมเพื่อให้ฟีนอลิกเรซินละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง ในกรณีที่อุณหภูมิสูงมากจนเกินไปจะทำให้เฮกซามีนเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์เกิดเป็นโครงสร้างร่างแห (Cross-Links) กับฟีนอลิกเรซินและเกิด Thermosetting ก่อนจะนำไปทำไส้แบบหรือแบบหล่อเปลือก โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 120 – 140 องศาเซลเซียส จากการทดลองที่ได้พบว่าอัตราส่วนฟีนอลิกเรซินที่ผลิตภายในประเทศต่อฟีนอลิกเรซินต่างประเทศคือ 20/80 และ 30/70 มีความทนแรงดัดโค้งเท่ากับ 50-55 kg/cm² ซึ่งอยู่ในช่วงความต้องการของโรงงาน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความทนแรงดัดโค้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของทราย ค่าความกลมของเม็ดทราย และปริมาณเรซินที่เติมลงไป (ถ้าปริมาณเรซินมีค่าสูงจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างฟีนอลิกเรซินกับทรายมีค่ามาก ส่งผลให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าสูงขึ้น)

จากหนังสือ Phenolic Resins: A Century of Progress [24] กล่าวว่า เฮกซามีน (Hexamine) จะเป็นสารที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Hardener) โดยจะเติมลงไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์กับฟีนอลิกเรซินในขณะที่นำไปทำไส้แบบหรือทำแบบหล่อเปลือก กล่าวคือในระหว่างกระบวนการทำไส้แบบหรือทำแบบหล่อเปลือก เฮกซามีนจะแตกตัวเป็น Formaldehyde และ Ammonia ไปทำปฏิกิริยากับฟีนอลิกเรซิน (Thermosetting Resin) ทำให้เกิดโครงสร้างร่างแห

(Cross-Link) ที่ช่วยให้แบบหล่อมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในขั้นตอนการให้ความร้อนทราย จะต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงจนเกินไป เพื่อไม่ให้ Hexamine เกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ก่อนที่นำไปทำไส้แบบหรือทำแบบหล่อเปลือก นอกจากการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมแล้ว การเป่าอากาศ (Air Blowing) ภายหลังจากปล่อยเฮกซามีนลงไปภายในถังผสม ถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะต้องควบคุมให้มีความเหมาะสม เนื่องจากการเป่าอากาศจะช่วยหยุดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนและช่วยให้ทรายแตกตัวไม่จับกันเป็นก้อน

จากหนังสือวิศวกรรมงานหล่อเหล็ก [10] ได้กล่าวว่าการผสมทรายกับเรซินสามารถกระทำได้ 3 วิธี คือ การผสมในสภาพร้อน (Hot Coating) การผสมในสภาพเย็น (Cold Coating) และการผสมในสภาพเป็นผง (Powder Resin) ซึ่งค่าความทนแรงดัดโค้งที่ได้ในแต่ละกรรมวิธีจะแตกต่างกัน โดยเฉพาะการผสมในสภาพร้อนจะให้ค่าความทนแรงดัดโค้งที่สูงโดยใช้ปริมาณเรซินน้อยที่สุดดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงดัดโค้งกับปริมาณเรซินของกรรมวิธีในการผสมทราย [10]

จากการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมพบว่า ปัจจัยที่อาจจะส่งผลต่อค่าความทนแรงดัดโค้งคือ อุณหภูมิในการให้ความร้อนทรายและเวลาในการเป่าอากาศ (Air Blowing) ทั้งนี้ยังไม่พบงานวิจัยอื่นๆที่ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากเวลาการปล่อยเรซิน เวลาการปล่อยเฮกซามีน+น้ำ เวลาหลังจากปล่อยเฮกซามีนจนถึงเวลาในการเป่า และเวลาการปล่อยแคลเซียมสเตียเรท ที่มีต่อค่าความ

ทนแรงดัดโค้งหรือค่าคุณสมบัติอื่นๆ จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะนำไปทำการศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อค่าความทนแรงดัดโค้งและคุณสมบัติอื่นๆที่ทางโรงงานพิจารณา

2.4.3 การนำงานวิจัยไปประยุกต์ใช้งาน

ตารางที่ 2.6 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง

งานวิจัย	เครื่องมือที่ใช้	การประยุกต์ใช้งาน
Siu Hua Chang, Tjoon Tow Teng และ Norli Ismail (2011)	การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1}	เนื่องจากในช่วงเริ่มแรกของงานวิจัยจะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก โดยการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1} เป็นเครื่องมือทางสถิติที่
Keun Park และ Jong-Ho Ahn (2004)	- การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k - การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1}	ช่วยในการคัดกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้ลดน้อยลง โดยใช้จำนวนการทดลองที่น้อย
K. Niranjan และ P. R. Lakshminarayanan (2013)	- การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) - วิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology)	ในส่วนของออกแบบการทดลองจะเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางชนิด Faced-Centered (CCF)
Yang A. และคณะ (2017)	- การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางชนิด Faced-Centered (CCF)	เนื่องจากเครื่องจักรของทางโรงงานไม่สามารถปรับตั้งระดับในการทดลองเป็นจุดเทคนิคได้ แต่การออกแบบการทดลองประเภทนี้ก็ยังถือว่ามีความคุณภาพในการทำนายสูง สามารถใช้ในการศึกษาผลกระทบร่วมของหลายๆปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องได้เช่นเดียวกันแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ก็ตาม จากนั้นจะใช้วิธีพื้นผิวตอบในการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.6 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

งานวิจัย	เครื่องมือที่ใช้	การประยุกต์ใช้งาน
Sung-II และคณะ (2006)	<ul style="list-style-type: none"> - การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1} - การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) - วิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology) 	งานวิจัยในส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับปัญหาที่มีหลายผลตอบ (Multiple Response) ซึ่งการทดลองแบบส่วนประสมกลางสามารถจัดการกับปัญหาที่มีหลายผลตอบได้อย่างดี ซึ่งมี 2 วิธีการ คือวิธีการกำหนดเงื่อนไขที่ยอมรับได้ (Constrained Optimization) และ การใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ
Shalini M. และคณะ (2017)	<ul style="list-style-type: none"> - การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken - วิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology) - ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) 	(Desirability Function) โดยจะใช้วิธีการดังกล่าวร่วมกับวิธีพื้นผิวตอบในขั้นตอนการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยการกำหนดเป้าหมายและน้ำหนักความสำคัญของตัวแปรตอบสนองแต่ละตัว และแปลง
ภูธิป อินทร์รักษ์ (2014)	<ul style="list-style-type: none"> - การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1} - การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) - วิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology) - ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) 	ค่าตัวแปรตอบสนองเหล่านั้นให้เป็นค่าความพึงพอใจ ($d_i(Y_i)$) จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าความพึงพอใจโดยรวม (Overall Desirability: D) ของตัวแปรตอบสนองและนำไปสร้างกราฟพื้นผิวตอบเพื่อหาค่าความพึงพอใจโดยรวมสูงสุด (ค่าความพึงพอใจจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1)

ตารางที่ 2.6 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

งานวิจัย	เครื่องมือที่ใช้	การประยุกต์ใช้งาน
ภารินี แก้วสม (2013)	<ul style="list-style-type: none"> - ซิกซ์ ซิกมา - การทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^{k-1} - การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) - วิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology) 	งานวิจัยนี้ได้้นำเอาขั้นตอนการดำเนินงานของซิกซ์ ซิกมา บางส่วนมาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหา โดยนำเอาขั้นตอนในส่วนของกรนิยามปัญหา เครื่องมือที่ใช้ในการคัดกรองปัจจัย ขั้นตอนในวิเคราะห์และการปรับปรุงกระบวนการโดยใช้การออกแบบการทดลอง รวมทั้งขั้นตอนในการควบคุมและติดตามผล
รัฐญา สนเฟือก (2012)	<ul style="list-style-type: none"> - ซิกซ์ ซิกมา - การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken - วิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology) 	

ตารางที่ 2.7 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน

งานวิจัย/หนังสือ	การประยุกต์ใช้งาน
อุรวารณ อุ้นแก้ว (1999)	จากงานวิจัยข้างต้นทำให้ทราบถึงคุณสมบัติที่ส่งผลต่อค่าความทนแรงดัดโค้งได้แก่ ชนิดของทราย ค่าความกลมของเม็ดทราย และปริมาณเรซิน ในส่วนของกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจะต้องควบคุมอุณหภูมิของทรายในขั้นตอนการให้ความร้อนให้อยู่ในช่วง 120 – 140 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจจะส่งผลต่อค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานพิจารณา
จากหนังสือ Phenolic Resins: A Century of Progress	จากการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมพบว่า การเป่าอากาศ (Air Blowing) ภายหลังจากปล่อยเฮกซามีนลงไปภายในถังผสม ถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะต้องควบคุมให้มีความเหมาะสม เนื่องจากการเป่าอากาศจะช่วยหยุดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนและช่วยให้ทรายแตกตัวไม่จับกันเป็นก้อน ซึ่งอาจจะส่งผลต่อค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานพิจารณา

ตารางที่ 2.7 ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน (ต่อ)

งานวิจัย/หนังสือ	การประยุกต์ใช้งาน
จากหนังสือวิศวกรรมงานหล่อเหล็ก	จากการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมพบว่า กระบวนการเคลือบร้อน (Hot Coating) จะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งของทรายเคลือบเรซินมีค่าสูงที่สุด จึงทำให้ทราบว่าอุณหภูมิของทรายในกระบวนการให้ความร้อนนั้นส่งผลต่อค่าความทนแรงดัดโค้ง เนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมจะช่วยให้ฟีนอลิกเรซินหลอมละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง



บทที่ 3

ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า

ในขั้นตอนการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้าจะเริ่มต้นจากการจัดตั้งทีมงานที่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน ต่อมาทางผู้วิจัยและทีมงานจึงได้เริ่มทำการศึกษาระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินโดยมีกระบวนการที่สำคัญอยู่ 3 กระบวนการ ซึ่งผู้วิจัยและทีมงานมีแนวความคิดที่จะปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ให้มีค่าที่ดีขึ้น ด้วยวิธีการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม ดังนั้นทางผู้วิจัยและทีมงานจึงเริ่มทำการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาและคัดกรองหาปัจจัยนำเข้า โดยอาศัยการระดมคิด (Brainstorming) และเมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล ซึ่งมีรายละเอียดการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนในการจัดตั้งทีมงาน

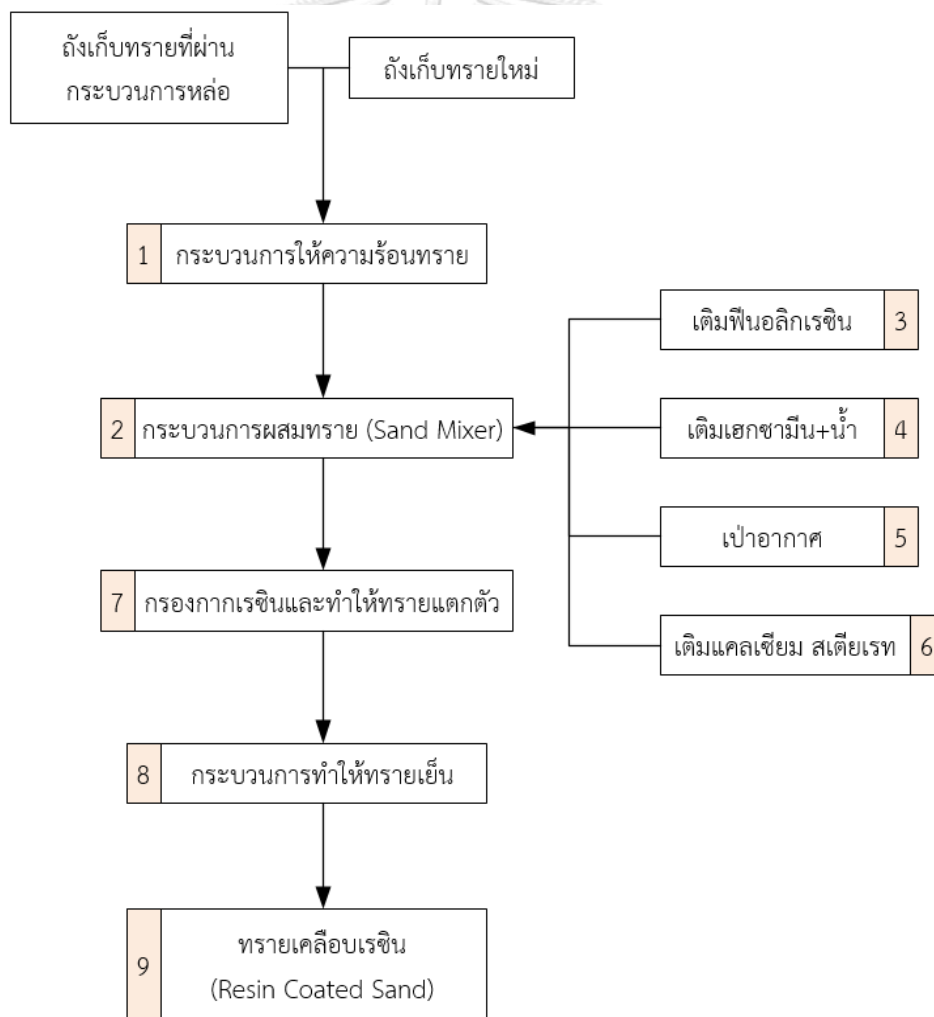
การดำเนินงานวิจัยนี้จะต้องอาศัยทีมงานที่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินเข้ามาช่วยในการระดมความคิด เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา แนวทางในแก้ไขปัญหา และการดำเนินการทดลองตามเป้าหมายที่วางไว้ให้สำเร็จลุล่วง โดยมีสมาชิกในทีมดังต่อไปนี้

1. ผู้ดำเนินงานวิจัย
2. ผู้จัดการโรงงาน
3. หัวหน้าแผนกเทคนิค
4. วิศวกรเทคนิค

โดยผู้ดำเนินงานวิจัยจะมีหน้าที่ในการออกแบบการทดลองให้มีความเหมาะสมกับจำนวนปัจจัยและสามารถใช้ในการอธิบายผลกระทบระหว่างปัจจัยและผลตอบสนองได้อย่างครบถ้วน พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้ ในส่วนของผู้จัดการโรงงาน หัวหน้าแผนกเทคนิค และวิศวกรเทคนิค จะมีหน้าที่ในการระดมความคิดและให้คะแนนเพื่อคัดกรองปัจจัยนำเข้า พร้อมทั้งช่วยสนับสนุนในเรื่องของการทดสอบตามที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบไว้ข้างต้น อีกทั้งยังช่วยสนับสนุนในเรื่องของข้อมูลที่เป็นต้องใช้ภายในงานวิจัยอีกด้วย นอกจากนี้ทีมงานที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วยังต้องอาศัยความร่วมมือจากทีมงานในแผนกอื่นๆ เข้ามาช่วยในการเตรียมวัตถุดิบ การแก้ไขปัญหาต่างๆ และดำเนินการทดสอบตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น ทั้งนี้ก็เพื่อให้การดำเนินการทดลองของงานวิจัยนั้นเกิดประสิทธิภาพที่สูงที่สุด

3.2 ขั้นตอนในการศึกษากระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน

ในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจะแบ่งสูตรการผลิตออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ สูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบตัน (Solid Core) และสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวง (Hollow Core) หลังจากที่ได้ทำการคัดเลือกสูตรการผลิตที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์กรณีศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ผู้วิจัย และทีมงานได้เลือกสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวงมาเป็นต้นแบบในการศึกษาเพื่อหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมภายในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน แต่จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นทำให้ทราบว่าสูตรการผลิตทั้งสองประเภทจะมีขั้นตอนและกระบวนการผลิตที่คล้ายคลึงกัน จึงสามารถทำการศึกษาสภาพปัญหาและกระบวนการผลิตไปพร้อมๆกันได้ โดยเริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินโดยละเอียด ซึ่งมีขั้นตอนในการผลิตที่สำคัญอยู่ 3 ขั้นตอนคือ กระบวนการให้ความร้อนทราย กระบวนการผสมทราย และกระบวนการทำให้ทรายเย็น ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน

1. กระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจะเริ่มต้นจากการนำทรายที่ถูกเก็บไว้ในถังเก็บทรายที่ผ่านกระบวนการหล่อและถังเก็บทรายใหม่ มาผ่านกระบวนการให้ความร้อน (Sand Heater) ด้วยวิธีการอัดแก๊สเข้าไปภายในถัง ซึ่งภายในจะมีใบพายคอยกวนเพื่อให้ทรายได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง เมื่อทรายที่อยู่ภายในถังให้ความร้อนมีอุณหภูมิตามที่ตั้งค่าไว้ (โดยทั่วไปแล้วทางโรงงานกรณีศึกษาได้ปรับตั้งไว้ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส) ประตูปิดไว้จะถูกรเปิดออกโดยอัตโนมัติและทรายที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังเครื่องผสมทราย (Sand Mixer) ต่อไป

2. กระบวนการผสมทราย (Sand Mixer) จะเป็นกระบวนการในการผสมทราย ตัวประสาน (Binder) และสารเติมแต่ง (Additive) เข้าด้วยกัน โดยทรายที่ได้จากกระบวนการให้ความร้อนจะถูกส่งมายังถังผสมทราย หลังจากนั้นประมาณ 5 วินาที ฟีนอลิกเรซินที่มีลักษณะเป็นเม็ดจะถูกเติมลงไป เมื่อฟีนอลิกเรซินสัมผัสกับทรายที่มีอุณหภูมิสูงก็จะเกิดการหลอมละลายไปเคลือบกับเม็ดทรายโดยใช้เวลาในการผสมประมาณ 35 วินาที จึงทำการเติมเฮกซามีนที่อยู่ในรูปของสารละลายผสมกับน้ำลงไปเพื่อลดอุณหภูมิ หลังจากนั้นประมาณ 5 วินาที จึงเริ่มทำการเป่าอากาศ (Blow Start) เข้าไปภายในถังผสมเพื่อทำให้ทรายแตกตัวและเป็นการหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างฟีนอลิกเรซินและเฮกซามีน โดยใช้เวลาประมาณ 70-80 วินาที จึงทำการปิด (Blow Stop) และเว้นระยะเวลาอีกประมาณ 5 วินาที จึงทำการเติมแคลเซียมสเตียเรตลงไปผสมเป็นระยะเวลาหนึ่ง สุดท้ายทรายเคลือบเรซินที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการทำให้ทรายเย็น (Sand Cooler) ซึ่งจะต้องผ่านกระบวนการกรองกากเรซินที่หลงเหลือและทำให้ทรายที่จับตัวเป็นก้อนแตกตัวโดยอาศัยการสั่นสะเทือน (Vibration Screen)

3. กระบวนการทำให้ทรายเย็นตัว (Sand Cooler) ภายหลังจากทรายเคลือบเรซินได้ผ่านกระบวนการกรองกากเรซินและทำให้ทรายแตกตัวเรียบร้อยแล้ว ทรายเคลือบเรซินจะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการทำให้ทรายเย็นตัว โดยเครื่องจักรจะวางไว้ในลักษณะเอียงทำมุม 2 องศา เพื่อช่วยให้ทรายสามารถเคลื่อนตัวและถูกส่งไปยังถังเก็บเพื่อรอจำหน่ายต่อไป ภายในเครื่องจักรจะประกอบไปด้วยท่อที่ติดตั้งไว้ในตำแหน่งต่างๆ มีน้ำไหลผ่านเพื่อระบายความร้อนออกจากทราย นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งระบบการเป่าอากาศไว้ด้านล่างเพื่อช่วยให้การระบายความร้อนมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จากนั้นทรายเคลือบเรซินที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการบรรจุเพื่อรอจำหน่ายต่อไป

3.3 การระดมความคิด (Brainstorming) เพื่อหาปัจจัยนำเข้า

ขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อหาสาเหตุที่เกิดขึ้นของปัญหาโดยเริ่มต้นจากการศึกษาขั้นตอนและกระบวนการทำงานของเครื่องจักรซึ่งประกอบด้วย 3 กระบวนการ และสอบถามจากทีมงานที่จัดตั้งขึ้นซึ่งประกอบไปด้วย 3 คน คือ ผู้จัดการโรงงาน หัวหน้าเทคนิค และวิศวกรเทคนิค จากนั้นจึงทำการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุและปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ โดยอาศัยเมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลซึ่งจะแบ่งแยกหมวดหมู่เอาไว้อย่างชัดเจนและทำการระดมความคิดตามหลักของ 4M1E ซึ่งประกอบไปด้วย คน (Man), เครื่องจักร (Machine), วัสดุดิบ (Material), วิธีการดำเนินงาน (Method) และสภาพแวดล้อม (Environment) เพื่อช่วยให้การระดมสมองมีความครอบคลุมในทุกประเภทของสาเหตุและช่วยในการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ได้รวบรวมมาเพื่อตัดปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลน้อยต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด ออกจากการทดลอง

3.4 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยเมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล

จากการระดมความคิดของทีมงานด้วยหลักการ 4M1E ทำให้ได้ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด ซึ่งมีทั้งหมด 32 ปัจจัย ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด

No.	Area Cause	Input Factors		Type of Factors
1	Man	พนักงานไม่ปฏิบัติตามมาตรฐานการทำงาน	พนักงานปรับอุณหภูมิการให้ความร้อนออกนอกช่วงมาตรฐาน	Controllable
2			วัดน้ำหนักวัตถุดิบไม่ตรง	Controllable
3			เปิดประตูถังผสมทิ้งไว้	Controllable
4			ผสมสารไม่ตรงตามสูตร	Controllable
5			ตั้งมุมการไหลไม่ตรง	Controllable
6	Machine	ถังไม่ทราย	เกิดความร้อนสะสมในถังไม่	Controllable
7		อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	ตรวจวัดอุณหภูมิไม่ตรง	Controllable
8		ใบกวาด	ลักษณะใบกวาด	Controllable
9			ความเร็วรอบการหมุนของใบกวาด	Controllable
10			ใบกวาดเกิดการสึกหรอ	Controllable
11		รอยเชื่อม	บริเวณ Liner มีความหนา/บางเกินไป	Controllable
12		เครื่องซังแคลเซียมสเตียเรท	ปริมาณการเติมแคลเซียมสเตียเรท	Controllable
13		น้ำระบายความร้อน	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อน	Controllable
14		ผ้าใบ	ผ้าใบเกิดการอุดตัน	Controllable
15		ท่อน้ำ	ท่อน้ำเกิดคราบตะกรัน	Controllable
16	Material	ชนิดของทราย	คุณสมบัติการคายความร้อน	Uncontrollable
17		วัตถุดิบที่ใช้	ชนิดของวัตถุดิบ	Uncontrollable
18		ทราย	เบอร์ทราย	Uncontrollable
19			ความกลม	Uncontrollable

ตารางที่ 3.1 ตารางความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด (ต่อ)

No.	Area Cause	Input Factors		Type of Factors	
20	Method	การไม่ทราย	อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น	Controllable	
21		การเป่าอากาศในถังผสม	ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ	Controllable	
22		สูตรการผลิต	ปริมาณการเติมวัตถุดิบ	Uncontrollable	
23			ความเข้มข้นของเฮกซามีน+น้ำ	Uncontrollable	
24		การปล่อยวัตถุดิบ	เวลาในการปล่อยตัวประสาน	Controllable	
25			เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง	Controllable	
26			เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ	Controllable	
27			เวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว	Controllable	
28			ระบบกรองฝุ่น	อัตราการไหลของระบบกรองฝุ่น	Controllable
29		การระบายความร้อนด้วยอากาศ	อัตราการไหลของระบบระบายความร้อน	Controllable	
30		การไหลของทราย	มุมการไหล	Controllable	
31		Environment	อุณหภูมิ	อุณหภูมิในสถานที่ปฏิบัติงาน	Noise Factor
32			ความชื้น	ความชื้นภายในสถานที่ปฏิบัติงาน	Noise Factor
33	สภาพแวดล้อม		อุณหภูมิที่ระบายความร้อน	Noise Factor	

เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลข้างต้นจะช่วยให้การวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติทั้งหมดที่ทางโรงงานพิจารณามีความละเอียดครบถ้วน โดยจะพิจารณาหาปัจจัยในทุกประเภทของสาเหตุและวิเคราะห์ไปจนถึงสาเหตุย่อย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกพิจารณาเฉพาะปัจจัยประเภทที่สามารถควบคุมและทำการปรับปรุงได้ คือ ปัจจัยที่มาจากคน (Man) เครื่องจักร (Machine) และวิธีการ (Method) ส่วนประเภทปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบ (Material) และสิ่งแวดล้อม (Environment) เป็นปัจจัยที่ทำการควบคุมได้ยาก จึงกำหนดให้อยู่นอกเหนือขอบเขตงานวิจัย ดังนั้นจึงสามารถสรุปสาเหตุหลักและสาเหตุย่อยที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติทั้งหมดที่พิจารณาดังตารางที่ 3.2 ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด

No.	Area Cause	Input Factors	
1	Man	พนักงานไม่ปฏิบัติตามมาตรฐานการทำงาน	พนักงานปรับอุณหภูมิการให้ความร้อนออกนอกช่วงมาตรฐาน
2			วัดน้ำหนักวัตถุดิบไม่ตรง
3			เปิดประตูถังผสมทิ้งไว้
4			ผสมสารไม่ตรงตามสูตร
5			ตั้งมุมการไหลไม่ตรง
6	Machine	ถังไม่ทราย	เกิดความร้อนสะสมในถังไม่
7		อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	ตรวจวัดอุณหภูมิไม่ตรง
8		ใบกวาด	ลักษณะใบกวาด
9			ความเร็วรอบการหมุนของใบกวาด
10			ใบกวาดเกิดการสึกหรอ
11		รอยเชื่อม	บริเวณ Liner มีความหนา/บางเกินไป
12		เครื่องชั่งแคลเซียมสเตียเรท	ปริมาณการเติมแคลเซียมสเตียเรท
13		น้ำระบายความร้อน	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อน
14		ผ้าใบ	ผ้าใบเกิดการอุดตัน
15		ท่อน้ำ	ท่อน้ำเกิดการคราบตะกอน

ตารางที่ 3.2 ผลการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด (ต่อ)

No.	Area Cause	Input Factors	
16	Method	การไม่ทราย	อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น
17		การเป่าอากาศในถังผสม	ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ
18		การปล่อยวัตถุดิบ	เวลาในการปล่อยตัวประสาน
19			เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง
20			เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ
21			เวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว
22		ระบบการกรองฝุ่น	อัตราการไหลของระบบกรองฝุ่น
23		การระบายความร้อนด้วยอากาศ	อัตราการไหลของระบบระบายความร้อน
24		การไหลของทราย	มุมการไหล

หลังจากการคัดกรองปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) และปัจจัยที่เป็นปัจจัยรบกวน (Noise Factors) ออกจากการทดลอง จะได้ปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด ซึ่งมีทั้งหมด 24 ปัจจัย จากนั้นจึงให้ทีมงานที่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญช่วยกันให้คะแนนความสำคัญของสาเหตุ เพื่อจัดลำดับความสำคัญและคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด และนำไปทำการวิเคราะห์หาสาเหตุอย่างละเอียดเพื่อทำการปรับปรุงต่อไป โดยใช้เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล โดยในการจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุจะใช้น้ำหนักความสำคัญรวม (Weighted Sum) เป็นเกณฑ์ในการคิดผลคะแนนรวมของสาเหตุต่างๆ ซึ่งมีหลักในการคิดคะแนนความสำคัญของสาเหตุดังสมการที่ 3.1

$$\text{คะแนนความสำคัญของสาเหตุ} = \sum_{i=1}^8 (W_i \times X_{ij}) \quad (3.1)$$

โดยที่ W_i = น้ำหนักความสำคัญของตัวแปรตอบสนองตัวที่ i

X_{ij} = คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุ j กับตัวแปรตอบสนองตัวที่ i

จากนั้นจึงเริ่มทำการให้คะแนนประเมินความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล โดยมีเกณฑ์การให้คะแนนระดับความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลดังตารางที่ 3.3 [25, 26] ซึ่งเป็นเกณฑ์การให้คะแนนที่เหมาะสมสำหรับการคัดกรองปัจจัยที่มีผลกระทบมากและน้อยออกจากกันได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 3.3 เกณฑ์ในการให้คะแนนระดับความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล

ระดับความสัมพันธ์	ความสัมพันธ์จากสาเหตุและผล	คะแนน
มาก	ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์สูงกับตัวแปรตอบสนอง	9
ปานกลาง	ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ปานกลางกับตัวแปรตอบสนอง	4
น้อย	ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์น้อยกับตัวแปรตอบสนอง	1
ไม่มีผล	ปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนอง	0

โดยเริ่มแรกจะให้ทีมงานที่ได้จัดตั้งขึ้นทำการพิจารณาให้น้ำหนักความสำคัญของค่าคุณสมบัติที่พิจารณาทั้ง 8 คุณสมบัติ คือ ความทนแรงดัดโค้ง แก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ค่าความโค้งงอ ฟิลแบคและความหนาของผนัง โดยเกณฑ์การให้น้ำหนักความสำคัญจะอยู่ในช่วง 1-10 คะแนน ซึ่งผู้วิจัยและทีมงานได้ทำการกำหนดน้ำหนักความสำคัญของคุณสมบัติเท่ากับ 10, 8, 8, 8, 9, 8, 10 และ 10 ตามลำดับ ต่อมาจึงให้ทีมงานทำการลงคะแนนตามหลักเกณฑ์ในตารางที่ 3.3 จากนั้นจึงทำการพิจารณาคะแนนที่ได้จากการประเมินว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใดโดยพิจารณาคู่อันดับปัจจัย หากผลคะแนนที่ได้ในแต่ละคุณสมบัติมีความสอดคล้องกันก็จะทำการกำหนดคะแนนความสัมพันธ์ด้วยค่าฐานนิยมและนำผลคะแนนที่ได้คูณกับน้ำหนักความสำคัญในแต่ละคุณสมบัติ แล้วจึงนำคะแนนมารวมกันก็จะได้ผลคะแนนรวมของปัจจัยนั้นๆ ส่วนปัจจัยใดที่มีผลคะแนนภายในคุณสมบัติบางตัวที่ไม่สอดคล้องกันระหว่างบุคลากรในทีมงานก็จะให้ทีมงานทำการปรึกษากันอีกครั้งเพื่อช่วยกันลงความคิดเห็นว่าจะให้คะแนนความสัมพันธ์อยู่ที่ระดับใด

ในการประเมินคะแนนความสัมพันธ์ของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิดของทีมงานพบว่าปัจจัยได้แก่ ตั้งมุมการไหลตรง อุณหภูมิ น้ำ ฟ้าใบเกิดการอุดตัน ท่อน้ำเกิดคราบตะกอน อุณหภูมิในการไม่ทราย เวลาในการเป่าอากาศ และเวลาการปล่อยแคลเซียม สเตียร์ โดยปัจจัยเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ทางทีมงานทำการประเมินคะแนนความสัมพันธ์ไม่สอดคล้องกัน ดังตารางที่ 3.4 จึงได้มีการอภิปรายร่วมกันอีกครั้งถึงปัจจัยที่กล่าวไปข้างต้น เพื่อทำการประเมินคะแนนความสัมพันธ์ให้กับแต่ละปัจจัยใหม่และกำหนดเป็นค่าฐานนิยม หลังจากทำการอภิปรายของทางทีมงานเรียบร้อยแล้ว จะได้ผลสรุปจากการประเมินคะแนนความสัมพันธ์ค่าใหม่ดังตารางที่ 3.5



ตารางที่ 3.4 การประเมินคะแนนของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด (ก่อนทำการประเมินคะแนนความล้มเหลวใหม่)

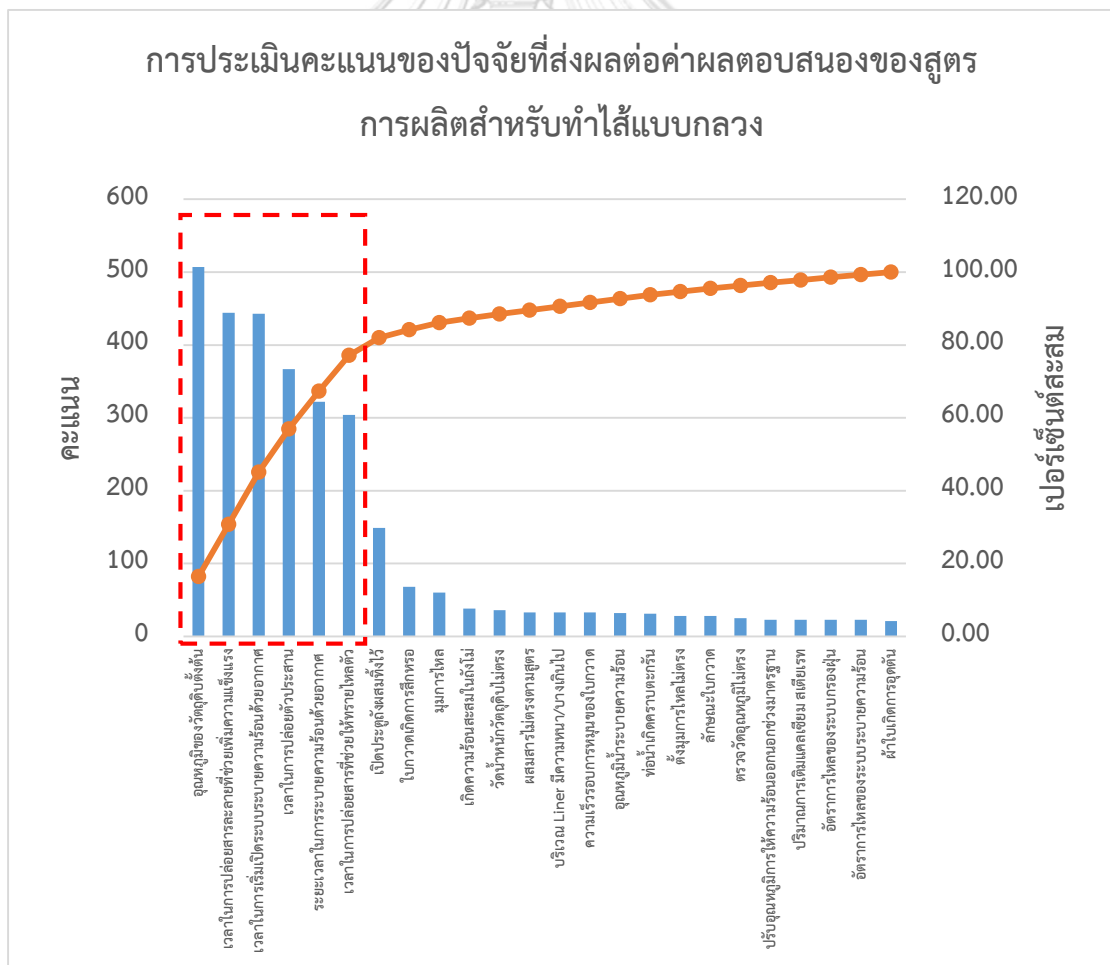
No.	Area Cause	ปัจจัยนำเข้า	Y1 = Bending Strength			Y2 = Loss of Ignition (LOI)			Y3 = Melting Point (MP)			Y4 = Coe			Y5 = Thermal Expansion			Y6 = Bend			Y7 = Peel Back			Y8 = Steel Thickness			รวม						
			10			8			9			8			8			10			10												
			ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3							
1		เปลี่ยนผู้แก้ไขความเสียหายของสายพาน	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	8	0	0	1	0	1	0	1	5	1	1	1	10	0	1	0	0	23		
2		พนักงานไม่ปฏิบัติตาม	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	8	1	0	1	8	1	0	0	0	1	4	1	10	1	1	1	10	36	
3	Man	เปิดประตูเครื่องจักร	4	4	4	1	1	4	8	4	1	4	36	4	1	8	4	4	32	4	1	1	5	1	4	1	10	1	1	4	10	149	
4		ผลการวิเคราะห์สาเหตุ	4	1	1	10	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	8	1	4	1	5	1	0	0	4	1	1	10	33		
5		ผู้ควบคุมเครื่องจักร	1	1	9	10	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	8	1	0	0	0	1	1	1	10	1	1	1	10	38	
6		ผู้ปฏิบัติงาน	1	1	1	10	1	1	1	8	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	10	1	1	1	10	39	
7		อุปกรณ์ผู้ปฏิบัติงาน	1	0	0	0	1	0	1	1	4	9	1	1	4	8	1	1	4	8	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	25	
8		ผู้ปฏิบัติงาน	1	1	4	10	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	8	0	0	0	0	1	1	1	10	0	1	0	0	28	
9		ผู้ปฏิบัติงาน	1	1	1	10	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	8	1	0	1	5	1	1	1	1	10	1	0	0	0	33	
10	Machine	ใบพัดเครื่องจักร	1	1	4	10	1	4	1	8	1	1	4	9	1	4	1	8	1	1	4	5	4	1	1	10	1	1	4	10	68		
11		ผู้ปฏิบัติงาน	1	1	4	10	0	0	1	0	1	0	0	1	4	1	8	1	0	0	1	1	4	5	0	1	0	0	1	1	10	33	
12		ผู้ปฏิบัติงาน	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	8	1	1	4	5	1	1	10	0	1	0	0	23	
13		ผู้ปฏิบัติงาน	0	1	0	0	0	0	4	1	1	9	1	0	0	0	1	0	1	1	1	5	0	1	1	1	10	4	1	1	10	24	
14		ผู้ปฏิบัติงาน	1	0	0	0	0	0	4	0	0	1	1	8	0	1	1	8	1	1	0	5	0	1	0	0	0	0	1	0	0	21	
15		ผู้ปฏิบัติงาน	1	0	0	0	0	0	4	0	0	1	1	8	1	1	1	8	1	1	1	5	1	1	1	1	10	0	1	1	10	31	
16		ผู้ปฏิบัติงาน	9	9	9	90	4	9	9	72	9	9	81	4	9	4	32	4	4	1	32	4	4	0	20	9	9	4	90	9	4	90	507
17		ผู้ปฏิบัติงาน	4	9	9	90	4	1	4	32	4	1	4	36	4	1	4	32	4	1	4	1	9	5	9	4	4	40	9	4	4	307	
18		ผู้ปฏิบัติงาน	4	9	9	90	4	4	9	32	9	9	81	4	4	9	32	4	4	4	32	4	4	4	20	4	4	4	9	40	367		
19		ผู้ปฏิบัติงาน	9	9	9	90	1	1	1	8	9	9	81	4	4	4	32	1	1	1	8	9	9	9	45	9	4	9	90	4	9	444	
20	Method	ผู้ปฏิบัติงาน	9	4	9	90	4	4	1	32	9	9	81	4	4	4	32	1	1	1	8	4	4	4	20	4	9	9	90	4	9	443	
21		ผู้ปฏิบัติงาน	4	9	9	90	9	1	1	8	4	9	81	4	4	1	32	1	1	1	8	1	1	1	5	4	0	4	40	0	4	40	304
22		ผู้ปฏิบัติงาน	1	4	1	10	0	1	0	0	1	0	1	1	1	8	0	1	0	0	4	1	1	5	0	1	0	0	1	0	0	23	
23		ผู้ปฏิบัติงาน	1	1	4	10	1	0	0	0	1	0	1	1	1	8	0	0	1	0	4	1	1	5	1	0	0	0	1	0	0	23	
24		ผู้ปฏิบัติงาน	1	4	1	10	1	0	0	0	4	1	1	9	1	1	4	8	1	1	4	8	4	1	1	5	1	4	1	10	1	4	60

ตารางที่ 3.5 การประเมินคะแนนของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด (ภายหลังทำการประเมินคะแนนสัมพัทธ์ใหม่)

No.	Area Cause	ปัจจัยที่ค่าต่ำ										Y8 = Steel Thickness			รวมคะแนน																	
		Y1 = Bending Strength			Y2 = Loss of Ignition (LOI)			Y3 = Melting Point (MP)			Y4 = Gas			Y5 = Thermal Expansion			Y6 = Bend			Y7 = Feet Back												
		ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1		ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3	ชนิดที่ 1	ชนิดที่ 2	ชนิดที่ 3						
1	Man	ปัจจัยผู้มีการบริหารอย่างเหมาะสม	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	8	0	0	1	0	1	0	1	5	1	1	1	10	0	1	0	0	23		
2		พนักงานผู้ปฏิบัติงาน	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	8	1	0	1	8	1	0	0	0	1	4	1	10	1	1	10	36		
3		มาตรฐานการทำงาน	4	4	4	1	4	8	4	1	4	36	4	1	8	4	4	4	32	4	1	1	5	1	4	1	10	1	4	149		
4		ผลการดำเนินงาน	4	1	1	10	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	8	1	4	1	5	1	0	0	4	1	1	10	33	
5		ต้นทุนการดำเนินงาน	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	8	1	0	0	0	1	1	10	1	1	10	28		
6	Machine	ลักษณะการดำเนินงาน	1	1	1	10	1	1	8	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	10	1	1	10	38		
7		อุปกรณ์ที่ทันสมัย	1	0	0	0	0	1	0	1	1	4	9	1	4	8	1	1	4	8	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	25	
8		ลักษณะความปลอดภัย	1	1	4	10	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	8	0	0	0	1	1	10	0	1	0	0	28	
9		ความปลอดภัยในการทำงาน	1	1	1	10	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	4	1	8	1	0	1	1	10	1	1	10	0	33	
10	Machine	ความปลอดภัยในการทำงาน	1	1	4	10	1	4	1	8	1	1	4	9	1	4	1	8	1	4	1	4	5	4	1	10	1	1	4	10	68	
11		ความปลอดภัยในการทำงาน	1	1	4	10	0	0	1	0	1	0	0	1	4	1	8	1	0	0	1	1	4	5	0	1	0	1	1	10	33	
12		ความปลอดภัยในการทำงาน	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	8	1	1	4	5	1	1	10	0	1	0	0	23	
13		ความปลอดภัยในการทำงาน	0	1	0	0	1	1	1	8	4	1	1	9	1	0	0	0	1	0	1	1	1	5	0	0	1	0	4	1	10	32
14		ความปลอดภัยในการทำงาน	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	8	0	1	1	8	0	1	1	0	5	0	1	0	0	0	1	0	21
15	Machine	ความปลอดภัยในการทำงาน	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	8	1	1	1	8	1	1	1	5	1	1	1	1	1	1	10	31	
16		ความปลอดภัยในการทำงาน	9	9	9	90	4	9	9	72	9	9	9	81	4	9	4	32	4	4	1	32	4	4	20	9	9	4	90	507		
17		ความปลอดภัยในการทำงาน	4	9	9	90	4	1	4	32	4	1	4	36	4	1	4	32	4	1	4	32	4	4	20	9	4	4	40	322		
18		ความปลอดภัยในการทำงาน	4	9	9	90	4	4	9	32	9	9	9	81	4	4	9	32	4	4	4	32	4	4	20	4	4	4	9	40	367	
19		ความปลอดภัยในการทำงาน	9	9	9	90	1	1	1	8	9	9	9	81	4	4	4	32	1	1	1	8	9	9	45	9	4	9	90	444		
20	Method	ความปลอดภัยในการทำงาน	9	4	9	90	4	4	1	32	9	9	9	81	4	4	4	32	1	1	1	8	4	4	20	4	9	9	90	443		
21		ความปลอดภัยในการทำงาน	4	9	9	90	1	1	1	8	4	9	9	81	4	4	1	32	1	1	1	8	1	1	5	4	4	4	40	394		
22		ความปลอดภัยในการทำงาน	1	4	1	10	0	1	0	0	1	0	0	1	1	8	0	1	1	8	0	1	0	4	1	1	5	0	1	0	0	23
23	Machine	ความปลอดภัยในการทำงาน	1	1	4	10	1	0	0	0	0	1	1	8	0	1	1	8	0	0	1	0	4	1	1	5	1	0	0	0	23	
24		ความปลอดภัยในการทำงาน	1	4	1	10	1	0	0	0	4	1	1	9	1	1	4	8	1	1	4	8	4	1	1	5	1	4	1	10	60	

ภายหลังจากการลงคะแนนของสมาชิกภายในทีม ในลำดับถัดมาจะอาศัยกราฟพาเรโตดังรูปที่ 3.2 ในการจัดลำดับความสำคัญและคัดกรองปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลกระทบต่อคุณภาพเรโตนี โดยข้อมูลจากกราฟพาเรโตข้างต้นจะสามารถแบ่งกลุ่มของปัจจัยที่จะนำไปทำการปรับปรุงออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน คือ

- กลุ่มที่ 1 เป็นปัจจัยที่ไม่ได้นำไปศึกษาต่อ โดยปัจจัยเหล่านี้สามารถทำการปรับปรุงโดยวิธีการสร้างข้อตกลงเกี่ยวกับวิธีการทำงานใหม่และจัดอบรมพนักงานเบื้องต้นเพื่อสร้างความเข้าใจในการทำงานให้ตรงกัน ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยลำดับที่ 7-24 และมีรายละเอียดในการแก้ไขดังตารางที่ 3.6
- กลุ่มที่ 2 เป็นปัจจัยที่จะถูกนำไปศึกษาต่อด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เพื่อหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม ซึ่งประกอบไปด้วยปัจจัยลำดับที่ 1-6 ดังตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.2 กราฟพาเรโตของผลการประเมินคะแนนของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด

ในส่วนของปัจจัยกลุ่มแรกจะเป็นปัจจัยในลำดับที่ 7-24 ซึ่งเป็นปัจจัยที่สามารถทำการปรับปรุงได้ง่าย โดยจะทำการปรับปรุงโดยการทบทวนวิธีการทำงาน วิธีการดูแลบำรุงรักษาเครื่องจักรในแต่ละส่วน ตลอดจนการจัดทำมาตรฐานเกี่ยวกับวิธีการทำงานหรือวิธีการดูแลรักษาเครื่องจักรขึ้นมาใหม่หากเดิมนั้นยังไม่เหมาะสม พร้อมทั้งนำวิธีการดังกล่าวมาทำการสร้างข้อตกลงเกี่ยวกับวิธีการทำงานใหม่ที่ได้ เพื่อสร้างความเข้าใจในการทำงานให้ตรงกัน โดยวิธีการปรับปรุงข้างต้นจะช่วยให้ความผันแปรที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าคุณสมบัตินั้นมีค่าลดลง โดยปัจจัยในลำดับที่ 7-24 จะมีแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขดังตารางที่ 3.6 ซึ่งภายหลังจากการปรับปรุงปัจจัยในกลุ่มแรกเสร็จสิ้นแล้ว ในลำดับถัดมาจะเป็นการนำปัจจัยในกลุ่มที่สองไปทำการศึกษาต่อโดยอาศัยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เพื่อหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม พร้อมทั้งนำมาตรฐานการปฏิบัติงานที่ได้จากการปรับปรุงปัจจัยในกลุ่มแรกมาปรับใช้จริงในขณะที่ทำการทดลอง



ตารางที่ 3.6 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาต่อ

ลำดับ ที่	ปัจจัยนำเข้า	ศึกษา ต่อ	ไม่ ศึกษา	ผลการสำรวจหน้างาน	แนวทางการปรับปรุง แก้ไข
1	อุณหภูมิของวัตถุบดตั้ง ต้น	✓		อาจจะส่งผลกระทบต่อ ผลตอบสนองมาก	นำไปพิจารณาเพื่อ คัดเลือกปัจจัย ที่จะนำมาทำการ ออกแบบการทดลอง
2	เวลาในการปล่อยตัว ประสาน	✓			
3	เวลาในการปล่อย สารละลายที่ช่วยเพิ่ม ความแข็งแรง	✓			
4	เวลาในการเริ่มเปิด ระบบระบายความร้อน ด้วยอากาศ	✓			
5	เวลาในการปล่อยสารที่ ช่วยให้ทรายไหลตัว	✓			
6	ระยะเวลาในการระบาย ความร้อนด้วยอากาศ	✓			
7	เปิดประตูถังผสมทิ้งไว้		✓	<p>ในการปฏิบัติงานปกติ พนักงานจะเปิดประตูถัง ผสมทิ้งไว้ในบางครั้ง เพื่อ เติมสารหรือวัตถุบด บางอย่างเพิ่มเติมและมักจะ เปิดทิ้งไว้ ส่งผลให้ใน ขั้นตอนการเติมแคลเซียมส เตียเรท ซึ่งมีลักษณะเป็นผง อาจจะทำให้เกิดการฟุ้ง กระจายออกจากถังผสม หรืออาจส่งผลกระทบต่อ อุณหภูมิภายในถังผสมมีการ เปลี่ยนแปลง จากการ สำรวจการทำงานในปัจจุบัน ยังพบว่า พนักงานจะเปิด ประตูถังผสมทิ้งไว้บ่อยครั้ง</p>	<p>ในปัจจุบันทางโรงงานได้ มีการจัดอบรมพนักงาน และมีข้อตกลงให้ทำการ ปิดประตูถังผสม ตลอดเวลาและให้เปิด เป็นช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในกรณีที่ต้องใส่สาร เพิ่มเติมเท่านั้น</p>

ตารางที่ 3.6 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาต่อ (ต่อ)

ลำดับ ที่	ปัจจัยนำเข้า	ศึกษา ต่อ	ไม่ ศึกษา	ผลการสำรวจหน้างาน	แนวทางการปรับปรุง แก้ไข
8	ใบกวาดเกิดการสึกหรอ		✓	เนื่องจากปริมาณการผลิตเป็นจำนวนมาก (ปริมาณการผลิตโดยเฉลี่ย 366 แบบ/วัน) จึงทำให้ใบกวาดเกิดการสึกหรอและอาจไม่สามารถผสมวัตถุดิบได้อย่างทั่วถึง ซึ่งอาจทำให้ทรายเกิดการจับตัวเป็นก้อน อีกทั้งในขณะเติมสารอื่นๆ อาจจะทำให้สารที่ผสมไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง โดยการซ่อมบำรุงจะทำการเชื่อมในจุดที่เกิดการสึกหรอ (บริเวณ Liner) ซึ่งอาจมีความหนาหรือบางกว่าสเปคที่กำหนดไว้ แต่จากการสำรวจหน้างานยังไม่พบปัญหาที่เกิดขึ้นจากปัจจัยทั้งสอง	ในปัจจุบันทางโรงงานได้มีการตรวจสอบลักษณะของใบกวาดโดยมีการวัดระยะของใบกวาดอย่างสม่ำเสมอก่อนการผลิตทุกวันและจะทำการซ่อมบำรุงทันทีเมื่อใบกวาดเกิดการสึกหรอ
9	บริเวณ Liner มีความหนา/บางเกินไป		✓		
10	มุมการไหล		✓	ปัจจัยทั้งสองจะเกี่ยวข้องกับลักษณะการวางตัวของระบบระบายความร้อน ทราย ซึ่งปัจจุบันทาง	ในการทำงานปัจจุบันทางโรงงานจะมีการทำจุดมาร์คเอาไว้ที่ตำแหน่งองศาต่างๆ
11	ตั้งมุมการไหลไม่ตรง		✓	โรงงานจะปรับตั้งไว้ที่ 2 องศา ทำการปรับตั้งโดยใช้พนักงานซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้	เพื่อให้ง่ายต่อการปรับตั้ง และจัดอบรมพนักงานก่อนทำการปฏิบัติงานจริง

ตารางที่ 3.6 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาต่อ (ต่อ)

ลำดับ ที่	ปัจจัยนำเข้า	ศึกษา ต่อ	ไม่ ศึกษา	ผลการสำรวจหน้างาน	แนวทางการปรับปรุง แก้ไข
12	ตรวจวัดอุณหภูมิไม่ตรง		✓	ปัจจัยดังกล่าวจะเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิในส่วนของกระบวนการให้ความร้อนทราย โดยการวัดอุณหภูมิจะใช้เซ็นเซอร์ที่ถูกติดตั้งไว้เป็นตัววัดและทำการแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์	ในการทำงานปัจจุบันอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิสามารถตรวจวัดได้เที่ยงตรงและไม่เกิดปัญหาใดๆ เนื่องจากเครื่องจักรมีการบำรุงรักษาและทำการสอบเทียบประจำทุกๆ 6 เดือน
13	อัตราการไหลของระบบกรองฝุ่น		✓	ปัจจัยทั้งสามจะอยู่ในส่วนของกระบวนการระบายความร้อนทราย ซึ่งจะมีการเป่าอากาศจากด้านล่างขึ้นมาเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อน ในขณะเดียวกันการเป่าอากาศจะทำให้เกิดฝุ่นละอองขึ้นภายในระบบ ดังนั้นจึงมีการติดตั้งโบลเวอร์เพื่อดูดฝุ่นละอองออกจากระบบ โดยจะมีผ้าใบติดอยู่ระหว่างระบบดูดฝุ่นกับระบบระบายความร้อน มีหน้าที่ในการดักจับฝุ่นละออง และอัตราการไหลของระบบกรองฝุ่นและระบบระบายความร้อนจะถูกตั้งไว้ตามค่าที่ทางโรงงานกำหนด ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติที่พิจารณา	ในการปฏิบัติหน้างานจริงที่ค่าอัตราการไหลของระบบกรองฝุ่นและระบบระบายความร้อนที่ทางโรงงานตั้งค่าไว้จะไม่ทำให้เกิดปัญหาใดๆ เช่น เกิดฝุ่นละอองตกค้างในระบบหรือทรายที่ได้มีอุณหภูมิสูงเกินไป และในส่วนของกำหนดการเปลี่ยนผ้าใบทางโรงงานจะมีตารางกำหนดเวลาในการเปลี่ยนผ้าใบทุกๆ 6 เดือน
14	อัตราการไหลของระบบระบายความร้อน		✓		
15	ผ้าใบเกิดการอุดตัน		✓		

ตารางที่ 3.6 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาต่อ (ต่อ)

ลำดับ ที่	ปัจจัยนำเข้า	ศึกษา ต่อ	ไม่ ศึกษา	ผลการสำรวจหน้างาน	แนวทางการปรับปรุง แก้ไข
16	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อน		✓	ปัจจัยทั้งสองจะเกี่ยวข้องกับ การระบายความร้อนทรายเป็น กล่าวคือ ภายในระบบ ระบายความร้อนจะมีท่อ ติดตั้งไว้ในตำแหน่งต่างๆ สำหรับให้น้ำไหลผ่านเพื่อ ระบายความร้อนออกจาก ทรายเป็น เมื่อใช้งานเป็นระยะ เวลานานจะทำให้ภายในท่อ น้ำเกิดคราบตะกรันขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการ ระบายความร้อนลดลง	ในการปฏิบัติงานจริง อุณหภูมิของน้ำระบาย ความร้อนจะมีค่า เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ตามสภาพอากาศซึ่ง ในขณะที่ปฏิบัติงานจริง จะไม่พบปัญหาที่เกิด จากอุณหภูมิน้ำระบาย ความร้อน อีกทั้งทาง โรงงานยังมีการ บำรุงรักษาและทำการ สอบเทียบเครื่องจักร ทุกๆ 6 เดือน
17	ท่อน้ำเกิดคราบตะกรัน		✓		
18	ผสมสารไม่ตรงตามสูตร		✓	ในการปฏิบัติงานจริงจะต้อง ใช้พนักงานในการผสมเฮก ซามีนกับน้ำเข้าด้วยกัน ซึ่ง ก่อนจะนำไปใส่ที่ถังวัดระดับ ของเครื่องจักร จะต้องมีการ ตรวจสอบโดยใช้เครื่อง	ในการปฏิบัติงานจริง เครื่องมือและอุปกรณ์จะ มีการมาร์คจุดเอาไว้เพื่อ ลดความผิดพลาดที่ อาจเกิดขึ้นในขั้นตอน การผสมสาร อีกทั้ง พนักงานยังได้รับการ อบรมและผ่านการฝึก ปฏิบัติงานก่อนทำงาน จริง
19	วัดน้ำหนักวัตถุดิบไม่ ตรง		✓	ตรวจวัดความหนาแน่นว่า ตรงตามเกณฑ์หรือไม่ และ ในส่วนของการปล่อย วัตถุดิบจะใช้คอมพิวเตอร์ เป็นในการควบคุมปริมาณ และเติมลงไปเครื่องผสม ซึ่งอาจจะเกิดความ คลาดเคลื่อนเล็กน้อย แต่ จากการสังเกตหน้างานยังไม่ พบปัญหาที่เกิดจากปัจจัย ทั้งสอง	

ตารางที่ 3.6 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาต่อ (ต่อ)

ลำดับ ที่	ปัจจัยนำเข้า	ศึกษา ต่อ	ไม่ ศึกษา	ผลการสำรวจหน้างาน	แนวทางการปรับปรุง แก้ไข
20	เกิดความร้อนสะสมใน ถังไม่		✓	<p>ในการปฏิบัติงานจริง กระบวนการผลิตทราย เคลือบเรซินจะมีการ ดำเนินการผลิตต่อเนื่องกัน ในแต่ละสูตรการผลิต ส่งผล ให้การผลิตในแบบต่างๆจะ เกิดความร้อนสะสมขึ้น ภายในถังผสม ซึ่งจะทำให้ อุณหภูมิของทรายมีการ เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โดยจะวัดอุณหภูมิที่ Sand Heater ก่อนผสมและวัด หลังผสมเสร็จเป็นทราย เคลือบเรซิน</p>	<p>ในการปฏิบัติงานปกติ การทำงานในแบบแรก จะทำการตั้งอุณหภูมิให้ สูง เช่น 130 องศา เซลเซียส และแบบต่อไป จะตั้งที่ 127 องศา เซลเซียส เป็นต้น และ สิ่งที่จะบ่งบอกว่า อุณหภูมิสะสมเกิดขึ้น มากหรือน้อยอีกตัวคือ อุณหภูมิหลังผสม ถ้า หากอุณหภูมิภายหลัง การผสมสูงเกินกว่าที่ กำหนดแสดงว่าเกิด ความร้อนสะสมมาก ทางโรงงานก็จะทำการ ลดอุณหภูมิก่อนการ ผสม และถ้าหาก อุณหภูมิหลังผสมยังไม่ ลดก็จะหยุดการผลิต ชั่วคราวเพื่อลดอุณหภูมิ สะสมภายในถัง</p>

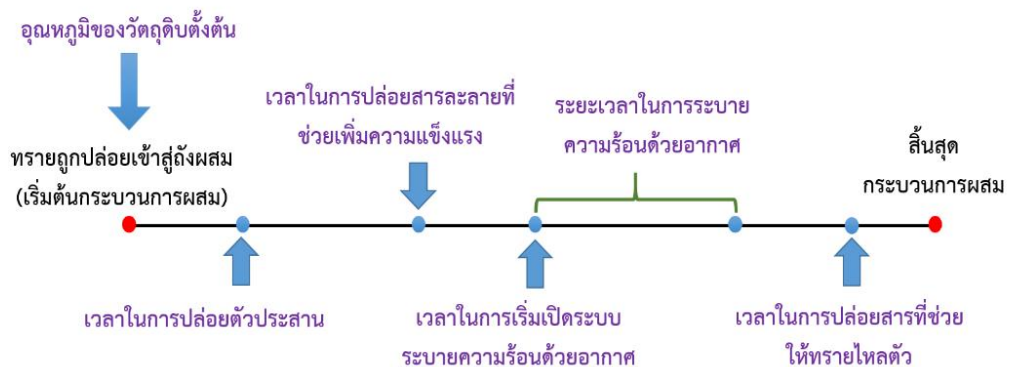
ตารางที่ 3.6 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาต่อ (ต่อ)

ลำดับ ที่	ปัจจัยนำเข้า	ศึกษา ต่อ	ไม่ ศึกษา	ผลการสำรวจหน้างาน	แนวทางการปรับปรุง แก้ไข
21	ลักษณะใบกวาด		✓	ในปัจจุบันทางโรงงานจะใช้ใบกวาดในลักษณะเดียวและในส่วนของความเร็วรอบการหมุนจะมีการ	ในอนาคตทางโรงงานมีแผนที่จะทำการทดลองถึงผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยทั้งสอง
22	ความเร็วรอบการหมุนของใบกวาด		✓	ปรับตั้งไว้ที่ 68 รอบ/นาทีซึ่งไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อรอบการผลิต โดยลักษณะใบกวาดนั้นจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของวัตุดิบในขณะทำการผสมในส่วนความเร็วรอบการหมุนนั้น ถ้าหากปรับให้ช้าเกินไปอาจจะทำให้การเคลือบตัวของวัตุดิบนั้นไม่ทั่วถึง ส่วนความเร็วรอบที่เร็วมากเกินไปจะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงที่มาก ทำให้วัตุดิบภายในถังผสมเกิดการกระจายตัว	
23	ปรับอุณหภูมิการให้ความร้อนออกนอกช่วงมาตรฐาน		✓	ในการปรับตั้งอุณหภูมิการให้ความร้อนพนักงานจะต้องปรับตั้งจากเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยสามารถทำการกำหนดค่าการปรับได้ด้วยการบินข้อมูลเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ จากการสำรวจหน้างานจึงไม่พบปัญหาที่เกิดขึ้นจากปัจจัยในส่วนนี้	เนื่องจากตัวปรับอุณหภูมิมีลักษณะเป็นดิจิตอล ดังนั้นการปรับตั้งค่าที่ต้องการจึงสามารถทำได้ง่ายและไม่ค่อยเกิดความผิดพลาด อีกทั้งก่อนการปฏิบัติงานจริงพนักงานแต่ละคนจะได้รับการฝึกอบรมเกี่ยวกับการใช้งานเครื่องจักรเป็นอย่างดี

ตารางที่ 3.6 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาต่อ (ต่อ)

ลำดับ ที่	ปัจจัยนำเข้า	ศึกษา ต่อ	ไม่ ศึกษา	ผลการสำรวจหน้างาน	แนวทางการปรับปรุง แก้ไข
24	ปริมาณการเติม แคลเซียมสเตียเรท		✓	เครื่องชั่งแคลเซียมสเตียเรท จะมีระบบการวัดเป็นแบบ ดิจิตอลและแสดงผลบน หน้าจอคอมพิวเตอร์ ทำให้ ปริมาณการเติมแคลเซียมส เตียเรทนั้นมีความแม่นยำ ตรงตามค่าที่กำหนดไว้ ซึ่ง จากการสังเกตการ ปฏิบัติงานจริงยังไม่พบ ปัญหาที่เกิดจากปริมาณการ เติมแคลเซียมสเตียเรท โดย ปริมาณการเติมแคลเซียมส เตียเรทที่ไม่ตรงตาม มาตรฐานที่กำหนดไว้จะ ส่งผลกระทบต่อค่า คุณสมบัติที่สำคัญของทราย เคลือบเรซินและอาจทำให้ ทางโรงงานต้องเสีย ค่าใช้จ่ายวัตถุดิบในส่วนนี้ เพิ่มเติมอีกด้วย (ในกรณีที่มี การเติมในปริมาณที่มาก จนเกินไป)	ในปัจจุบันทางโรงงาน จะมีตารางการ บำรุงรักษาเครื่องจักร และทำการสอบเทียบ ทุกๆ 6 เดือน

โดยปกติแล้วการดำเนินงานทั่วไปของโรงงานจะมีการจัดฝึกอบรมทั้งพนักงานเก่าและพนักงานใหม่อยู่เป็นประจำ เพื่อทบทวนขั้นตอนวิธีการในการปฏิบัติงานให้ตรงตามมาตรฐานที่ทางโรงงานกำหนดไว้ อีกทั้งยังช่วยให้พนักงานทุกคนมีความเข้าใจถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานที่ตรงกัน ทำให้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากพนักงานนั้นมีน้อยมาก เช่นเดียวกับปัญหาที่เกิดขึ้นจากเครื่องจักร เนื่องจากทางโรงงานได้มีการจัดตารางการซ่อมบำรุงเครื่องจักรและทำการสอบเทียบอย่างสม่ำเสมอ จึงทำให้เครื่องจักรสามารถดำเนินการผลิตได้อย่างต่อเนื่องไม่เกิดข้อขัดข้อง ถึงแม้ว่าเครื่องจักรจะถูกใช้งานติดต่อกันเป็นเวลานานก็ตาม จากการคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าคุณสมบัติโดยอาศัยกราฟพาเรโต ทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดมาจากปัจจัยทางด้านวิธีการที่เกิดขึ้นภายในถึงผสมของกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.3 โดยปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัย จะประกอบไปด้วย อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น เวลาในการปล่อยตัวประสาน เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ และเวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว ดังตารางที่ 3.7 โดยทั้ง 6 ปัจจัย จะถูกนำมาทดสอบสมมติฐานว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินหรือไม่ และจะนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญไปทำการปรับปรุงเพื่อหาค่าการปรับตั้งที่เหมาะสม โดยอาศัยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)



รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการทำงานภายในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน

ตารางที่ 3.7 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อเพื่อนำไปออกแบบการทดลอง

ลำดับ ที่	ปัจจัยนำเข้า	เหตุผลในการศึกษาต่อ
1	อุณหภูมิของ วัตถุดิบตั้งต้น	ในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินนั้นจะใช้ทรายเป็นวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งอุณหภูมิตั้งต้นของทรายอาจจะส่งผลต่อค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานพิจารณา กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิของทรายมีค่าต่ำเกินไปจะทำให้เรซินละลายไม่หมดและไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เรซินหลอมละลายจนหมดและไม่สามารถเคลือบเม็ดทรายได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้เรซินสามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ทั่วถึง ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้ค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานพิจารณามีค่าที่ดีขึ้น
2	เวลาในการปล่อยตัว ประสาน	ในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินโดยทั่วไปนั้นจะนิยมใช้ฟีนอลิกเรซินเป็นตัวประสาน โดยที่เวลาการปล่อยฟีนอลิกเรซินอาจจะส่งผลต่อค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานพิจารณา กล่าวคือ ถ้าปล่อยฟีนอลิกเรซินช้าเกินไปจะทำให้คุณสมบัติตั้งต้นลดลง ส่งผลให้ฟีนอลิกเรซินละลายไม่หมดและไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง ในทางกลับกันถ้าปล่อยเร็วเกินไปหรือปล่อยลงพร้อมกับทรายจะส่งผลให้ทรายบางส่วนที่ลงมาจาก Sand Heater ภายหลังการปล่อยฟีนอลิกเรซินจะไม่ถูกเรซินไปเคลือบ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้เรซินสามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้ค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานพิจารณามีค่าที่ดีขึ้น
3	เวลาในการปล่อย สารละลายที่ช่วยเพิ่ม ความแข็งแรง	ในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินโดยทั่วไปแล้วจะใช้สารละลายเฮกซามีนเป็นสารละลายที่เติมลงไปเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง โดยเวลาดังกล่าวจะมีผลต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเรซินกับเฮกซามีน ซึ่งอาจจะส่งผลต่อค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานต้องการศึกษา โดยในปัจจุบันทางโรงงานยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการศึกษาในส่วนนี้ว่ามีผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติที่พิจารณาอย่างไร จึงมีความน่าสนใจที่จะนำปัจจัยดังกล่าวเข้ามาพิจารณาเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อค่าคุณสมบัติทางโรงงานพิจารณา

ตารางที่ 3.7 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อเพื่อนำไปออกแบบการทดลอง (ต่อ)

ลำดับ ที่	ปัจจัยนำเข้า	เหตุผลในการศึกษาต่อ
4	เวลาในการเริ่มเปิดระบบ ระบายความร้อนด้วย อากาศ	ในส่วนของระบบระบายความร้อนด้วยอากาศจะทำงานโดยใช้การเป่าอากาศ เข้าไปในถังผสม ซึ่งเวลาเริ่มเป่าอากาศลงไปภายในถังผสมจะส่งผลต่อการหยุด ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเรซินกับเฮกซามีน ซึ่งอาจจะส่งผลต่อค่า คุณสมบัติที่ทางโรงงานพิจารณา ถ้าหากเริ่มเป่าอากาศช้าจนเกินไปอาจจะทำ ให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเรซินกับเฮกซามีนเกิดขึ้นก่อนที่จะนำไปทำให้แบบ ส่งผลให้ค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานพิจารณามีการเปลี่ยนแปลงไป โดยปัจจุบัน ทางโรงงานยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการศึกษาในส่วนนี้ว่ามีผลกระทบต่อค่า คุณสมบัติที่พิจารณาตัวไหนอย่างไร
5	เวลาในการปล่อยสารที่ ช่วยให้ทรายไหลตัว	ในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินโดยทั่วไปแล้วจะใช้แคลเซียมสเตียเรท เป็นสารที่ช่วยให้ทรายมีการไหลตัวที่ดี ซึ่งเวลาในการปล่อยแคลเซียมสเตียเรท จะส่งผลต่อการไหลตัวของทรายเคลือบเรซิน แต่อาจจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่า คุณสมบัติที่ทางโรงงานต้องการศึกษาโดยตรง แต่การไหลตัวของทราย เคลือบเรซิน มีความสำคัญอย่างมากในการทำแบบ เนื่องจากสารดังกล่าวจะ ช่วยป้องกันไม่ให้วัสดุที่หล่อกับแบบพิมพ์ติดกัน โดยในการผลิตทรายเคลือบเร ซิน แคลเซียมสเตียเรทจะถูกใส่เป็นลำดับสุดท้ายและมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ กว่าเรซิน ถ้าหากเวลาที่ใช้ในการเติมวัตถุดิบตัวอื่นไม่เหมาะสมก็จะส่งผลทำให้ แคลเซียมสเตียเรท ไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง และถ้าใส่ช้า จนเกินไปก็จะส่งผลทำให้แคลเซียมสเตียเรทไปเคลือบเม็ดทรายได้ไม่ทั่วถึงด้วย เช่นกัน ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานพิจารณา
6	ระยะเวลาในการระบาย ความร้อนด้วยอากาศ	ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศจะส่งผลต่อการหยุดของปฏิกิริยา ที่เกิดขึ้นระหว่างเรซินกับเฮกซามีน ซึ่งอาจจะส่งผลต่อค่าคุณสมบัติที่ทาง โรงงานพิจารณาและการจับตัวเป็นก้อนของทรายเคลือบเรซิน กล่าวคือ ถ้า ระยะเวลาในการเป่าน้อยจนเกินไปจะทำให้ไม่เพียงพอต่อการหยุดปฏิกิริยาที่ เกิดขึ้น ทำให้ทรายเคลือบเรซินเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน อีกทั้งยังทำให้น้ำที่ ผสมกับเฮกซามีนระเหยออกไม่หมดทำให้ทรายเคลือบเรซินเกิดการจับตัวกัน เป็นก้อนได้ง่ายในภายหลัง ในทางกลับกันถ้าระยะเวลาในการเป่าอากาศมาก จนเกินไปจะส่งผลทำให้ค่าคุณสมบัติมีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน เนื่องจาก อากาศที่ยังเป่าอยู่จะทำให้ทรายเคลือบเรซินไปกระทบกับใบกวาด ทำให้ฟिनอ ลิกเรซินที่เคลือบอยู่ที่เม็ดทรายเกิดการแตกตัวและหลุดออกจากเม็ดทราย จึงมี ความน่าสนใจที่จะนำปัจจัยดังกล่าวไปศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อค่าคุณสมบัติที่ ทางโรงงานพิจารณา

3.5 สรุปผลขั้นตอนการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า

ในขั้นตอนการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้าจะเริ่มต้นจากการจัดตั้งทีมงานที่เกี่ยวข้องและทำการศึกษาระบวนการผลิตทราบเคลือบเรซินอย่างละเอียด จากนั้นจึงให้ทีมงานที่จัดตั้งขึ้นทำการระดมความคิดโดยอาศัยหลักการ 4M1E เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกศึกษาเฉพาะปัจจัยประเภทที่สามารถควบคุมและทำการปรับปรุงได้ คือ ปัจจัยที่มาจากคน (Man) เครื่องจักร (Machine) และวิธีการ (Method) ส่วนประเภทปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบ (Material) และสิ่งแวดล้อม (Environment) เป็นปัจจัยที่ทำการควบคุมได้ยาก จึงกำหนดให้อยู่นอกเหนือขอบเขตงานวิจัย ซึ่งจะได้ปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติซึ่งประกอบไปด้วย 24 ปัจจัย หลังจากนั้นจึงทำการคัดกรองปัจจัยนำเข้าโดยให้ทีมงานทำการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลตามเกณฑ์การให้คะแนนที่ได้กำหนดไว้ แล้วจึงอาศัยกราฟพาเรโตเข้ามาช่วยในการจัดลำดับความสำคัญและคัดกรองปัจจัย ซึ่งปัจจัยแต่ละปัจจัยจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยปัจจัยในกลุ่มแรก จะเป็นปัจจัยที่สามารถทำการปรับปรุงได้ง่ายโดยการสร้างข้อตกลงเกี่ยวกับวิธีการทำงานใหม่และจัดอบรมพนักงานเบื้องต้นเพื่อสร้างความเข้าใจในการทำงานให้ตรงกัน ซึ่งจะประกอบไปด้วยปัจจัยลำดับที่ 7-24 ดังตารางที่ 3.6 ส่วนปัจจัยในกลุ่มที่สองจะเป็นปัจจัยที่จะถูกนำไปศึกษาต่อด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญและหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม จะประกอบไปด้วย 6 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น เวลาในการปล่อยตัวประสาน เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ และเวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว ซึ่งในขณะทำการทดสอบจะมีการนำมาตรฐานการปฏิบัติงานที่ได้จากการปรับปรุงปัจจัยในกลุ่มแรกมาปรับใช้จริงในขณะทำการทดลองเพื่อลดความผันแปรที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละค่าคุณสมบัติ

บทที่ 4

ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ

ในขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการจะเริ่มจากการนำปัจจัยทั้งหมดที่ได้มาจากการคัดกรองในขั้นตอนก่อนหน้านี้ ได้แก่ อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น เวลาในการปล่อยตัวประสาน เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ และเวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว มาทำการวิเคราะห์เพื่อทดสอบสมมติฐานว่าปัจจัยนำเข้าแต่ละตัวส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินหรือไม่ โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) จากนั้นจึงทำการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีนัยสำคัญกับค่าคุณสมบัติที่สำคัญแต่ละตัวด้วยวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward elimination)

4.1 การออกแบบการทดลอง

4.1.1 การกำหนดปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง

ในขั้นตอนการออกแบบการทดลองจะประกอบไปด้วยปัจจัยทั้งหมด 6 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น เวลาในการปล่อยตัวประสาน เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ และเวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว ซึ่งทั้ง 6 ปัจจัย จะอยู่ในขั้นตอนการผสม (Mixing Process) โดยปัจจัยเหล่านี้จะถูกนำไปทำการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งตัวแปรตอบสนองที่นำเข้ามาพิจารณาจะมีทั้งหมด 8 ตัว ซึ่งประกอบไปด้วย ความทนแรงดัดโค้ง แก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ค่าความโค้งงอ พิลแบค และความหนาของผนัง

4.1.2 การเลือกแบบการทดลอง

จากการคัดเลือกปัจจัยในขั้นตอนก่อนหน้านี้ จะได้ปัจจัยที่จะถูกนำไปศึกษาต่อด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) จำนวน 6 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น เวลาในการปล่อยตัวประสาน เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ และเวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางชนิด Faced-Centered (CCF) แบบครึ่งหนึ่ง (Half) เนื่องจากใช้จำนวนการทดลองที่

น้อยกว่าแบบอื่น เช่น การออกแบบการทดลองแบบ 3^k เป็นต้น และยังให้ความสามารถในการพยากรณ์ที่ดีกว่าอีกด้วย ส่วนข้อจำกัดที่ทำให้งานวิจัยนี้ไม่สามารถเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) ได้ นั่นคือ ที่จำนวนปัจจัยนำเข้าเท่ากับ 6 ปัจจัย การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางจะมีค่า α เท่ากับ 2.378 โดยระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบจะมีหน่วยเป็นวินาที ซึ่งต้องการความละเอียดในการกำหนดระดับสูง ดังนั้นที่ α เท่ากับ 2.378 จะทำให้ระดับของปัจจัยในการทดสอบเกิดจุดทศนิยม ส่งผลให้การปัดจุดทศนิยมขึ้นหรือลงจะส่งผลกระทบต่อข้อกำหนดระดับที่ใช้ในการทดสอบ อีกทั้งเครื่องจักรของทางโรงงานยังไม่สามารถปรับตั้งค่าความละเอียดเป็นจุดทศนิยมนี้ได้อีกด้วย ส่วนการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken จะมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 54 การทดลอง ซึ่งมีจำนวนการทดลองใกล้เคียงกับการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบบางส่วน (Half Fractional Factorial 2^{k-1}) ซึ่งมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 53 การทดลอง แต่มีคุณภาพในการพยากรณ์ที่ต่ำกว่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางชนิด Faced-Centered (CCF) ซึ่งมีการกำหนดค่า $\alpha = \pm 1$ แล้วจึงทำการกำหนดระดับที่ใช้ในการทดลองของปัจจัยแต่ละตัวดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแต่ละปัจจัยจะถูกทดสอบที่ระดับสูง (+1) ระดับกลาง (0) และระดับต่ำ (-1) โดยแต่ละปัจจัยจะมีหลักในการกำหนดระดับที่ใช้ในการทดสอบดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น โดยปกติแล้ววัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินนั้นคือทราย ซึ่งอุณหภูมิโดยทั่วไปที่ใช้จะถูกปรับตั้งไว้ที่ 130 องศาเซลเซียส ซึ่งในการทดลองจะเลือกใช้อุณหภูมิในช่วง 120-140 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 องศา จะทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนหลอมละลายไม่หมด ส่วนอุณหภูมิที่สูงเกินกว่า 140 องศา จะทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนระเหยออกไปและทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีน

2. เวลาในการปล่อยตัวประสาน โดยปกติแล้วตัวประสานที่ใช้ในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินนั้นคือฟีนอลิกเรซิน ซึ่งจะถูกละลายที่ระยะเวลา 5 วินาที ภายหลังจากการปล่อยทรายเข้าสู่ถังผสม ซึ่งในการทดลองจะเลือกใช้เวลาในช่วง 1-9 วินาที เนื่องจากเวลาการปล่อยฟีนอลิกเรซินที่น้อยกว่า 1 วินาที จะทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายบางส่วนที่ลงมาภายหลังจากการปล่อยฟีนอลิกเรซินได้ ส่วนเวลาในการปล่อยฟีนอลิกเรซินที่มากกว่า 9 วินาที จะทำให้อุณหภูมิตั้งต้นของทรายลดลงซึ่งทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนไม่สามารถหลอมละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง

3. เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง โดยปกติแล้วสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจะใช้สารละลายเฮกซามีน ซึ่งจะถูกละลายที่

ระยะเวลา 35 วินาที ภายหลังจากการปล่อยฟีนอลิกเรซินเข้าสู่ถังผสม ซึ่งในการทดลองจะเลือกใช้ เวลาในช่วง 25-45 วินาที เนื่องจากการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่เวลาต่ำกว่า 25 วินาที จะทำให้อุณหภูมิของทรายลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ฟีนอลิกเรซินที่เหลือบางส่วนไม่สามารถละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้ ส่วนการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่เวลามากกว่า 45 วินาที จะทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห

4. เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยปกติแล้วระบบระบายความร้อนด้วยอากาศจะทำงานโดยใช้การเป่าอากาศเข้าไปภายในถังผสม ซึ่งเวลาในการเริ่มเป่าอากาศจะเริ่มที่ระยะเวลา 5 วินาที ภายหลังจากการปล่อยสารละลายเฮกซามีนเข้าสู่ถังผสม ซึ่งในการทดลองจะเลือกใช้เวลาในการเริ่มเป่าอากาศในช่วง 1-9 วินาที เนื่องจากเวลาในการเริ่มเป่าอากาศที่น้อยกว่า 1 วินาที จะทำให้การเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนบนเม็ดทรายนั้นเกิดการจัดเรียงโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการเริ่มเป่าอากาศที่รวดเร็วจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีนั้นหยุดอย่างรวดเร็วจนทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นบนเม็ดทรายนั้นยังเกิดการจัดเรียงตัวที่ไม่สมบูรณ์ ส่วนเวลาในการเริ่มเป่าอากาศที่มากกว่า 9 วินาที จะทำให้การหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห (Cross-Links) นั้นช้าจนเกินไปและทำให้ทรายเกิดการจับตัวเป็นก้อน

5. ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยปกติแล้วจะใช้ระยะเวลาเท่ากับ 90 วินาที ซึ่งในการทดลองจะเลือกใช้ระยะเวลาในการเป่าอากาศที่ 90-110 วินาที เนื่องจากระยะเวลาในการเป่าอากาศที่น้อยกว่า 90 วินาที จะไม่เพียงพอต่อการหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหและจะทำให้ทรายเกิดการจับตัวเป็นก้อน ส่วนระยะเวลาในการเป่าอากาศที่มากกว่า 110 วินาที จะทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนที่เคลือบอยู่บนเม็ดไปกระทบกับใบกวาดและหลุดออก ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าช่วงที่ใช้ในการทดสอบจะมีค่ามากกว่าระดับของปัจจัยที่ใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากระยะเวลาในการเป่าอากาศที่มากขึ้นจะช่วยทำให้มีระยะเวลาเพียงพอที่จะช่วยในการหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห ซึ่งคาดว่าจะช่วยให้ทำให้ค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินมีค่าดีขึ้น

6. เวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว โดยปกติแล้วสารที่ช่วยทำให้ทรายไหลตัวที่ใช้ในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินนั้นคือแคลเซียมสเตียเรท ซึ่งจะถูกปล่อยที่ระยะเวลา 5 วินาที ภายหลังจากการระบายความร้อนด้วยอากาศเสร็จสิ้น ซึ่งในการทดลองจะเลือกใช้เวลาในการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทในช่วง 1-9 วินาที เนื่องจากการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่เวลาต่ำกว่า 1 วินาที จะทำให้แคลเซียมสเตียเรทบางส่วนซึ่งมีลักษณะเป็นผง เกิดการฟุ้งกระจายและไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ ทั้งนี้เป็นผลมาจากแรงลมที่หลงเหลือจากขั้นตอนการเป่าอากาศก่อนหน้านี้ ส่วนการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทที่เวลามากกว่า 9 วินาที จะทำให้รอบเวลาในการผลิตนั้นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 ปัจจัยนำเข้าและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

สัญลักษณ์	ปัจจัย	ระดับปัจจัย			หน่วย
		-1	0	1	
A	อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น	120	130	140	°C
B	เวลาในการปล่อยตัวประสาน	1	5	9	Sec
C	เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง	25	35	45	Sec
D	เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ	1	5	9	Sec
E	ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ	70	80	90	Sec
F	เวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว	1	5	9	Sec

ภายหลังจากการกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแล้วจึงเริ่มทำการสร้างตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix) โดยในการออกแบบการทดลองจะมีปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 6 ปัจจัย ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางชนิด Faced-Centered (CCF) จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย

1. ในส่วนของ Factorial Point ผู้วิจัยได้เลือกใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน 2^{k-1} (Half Fractional Factorial) และมี Resolution เท่ากับ VI ซึ่งมีข้อดีคือผลกระทบหลักจะไม่ซ้ำซ้อนกันกับผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยตัวอื่นๆ และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย จะไม่ซ้ำซ้อนกันเองดังรูปที่ 4.1 ซึ่งในส่วนนี้จะมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 32 การทดลอง

2. ในส่วนของ Axial Point จะมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 12 การทดลอง

3. ในส่วนของ Center Point จะมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 9 การทดลอง

โดยในการทดลองจะกำหนดให้มีการสุ่มการทดลอง (Randomization) เพื่อให้ผลการทดลองเป็นอิสระต่อกัน อีกทั้งยังช่วยลดผลกระทบของปัจจัยรบกวนที่อาจเกิดขึ้นในการทดลองได้อีกด้วย ซึ่งการออกแบบการทดลองข้างต้นจะได้การทดลองทั้งหมด 53 การทดลอง ดังตารางที่ 4.2 โดยในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะมีการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ซึ่งทำให้สามารถตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลและประมาณค่าความผันแปรอย่างสุ่มได้

Fractional Factorial Design

Factors: 6 Base Design: 6, 32 Resolution: VI
 Runs: 32 Replicates: 1 Fraction: 1/2
 Blocks: 1 Center pts (total): 0

Design Generators: F = ABCDE

Alias Structure

I + ABCDEF

A + BCDEF

B + ACDEF

C + ABDEF

D + ABCEF

E + ABCDF

F + ABCDE

AB + CDEF

AC + BDEF

AD + BCEF

AE + BCDF

AF + BCDE

BC + ADEF

BD + ACEF

BE + ACDF

BF + ACDE

CD + ABEF

CE + ABDF

CF + ABDE

DE + ABCF

DF + ABCE

EF + ABCD

ABC + DEF

ABD + CEF

ABE + CDF

ABF + CDE

ACD + BEF

ACE + BDF

ACF + BDE

ADE + BCF

ADF + BCE

AEF + BCD

รูปที่ 4.1 รายละเอียดของการออกแบบการทดลองในส่วนของ Factorial Run

ตารางที่ 4.2 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix)

Central Composite Design

Factors: 6 Replicates: 2
 Base runs: 53 Total runs: 106
 Base blocks: 1 Total blocks: 1

Two-level factorial: Half fraction

Cube points: 64
 Center points in cube: 18
 Axial points: 24
 Center points in axial: 0

α : 1

StdOrder	RunOrder	PtType	A	B	C	D	E	F
1	3	1	120	1	25	1	90	1
2	29	1	140	1	25	1	90	9
3	2	1	120	9	25	1	90	9
4	36	1	140	9	25	1	90	1
5	37	1	120	1	45	1	90	9
6	30	1	140	1	45	1	90	1
7	32	1	120	9	45	1	90	1
8	38	1	140	9	45	1	90	9
9	10	1	120	1	25	9	90	9
10	6	1	140	1	25	9	90	1
11	21	1	120	9	25	9	90	1
12	23	1	140	9	25	9	90	9
13	24	1	120	1	45	9	90	1
14	31	1	140	1	45	9	90	9
15	34	1	120	9	45	9	90	9
16	40	1	140	9	45	9	90	1
17	18	1	120	1	25	1	110	9
18	41	1	140	1	25	1	110	1
19	27	1	120	9	25	1	110	1
20	17	1	140	9	25	1	110	9

ตารางที่ 4.2 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix) (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	PtType	A	B	C	D	E	F
21	35	1	120	1	45	1	110	1
22	20	1	140	1	45	1	110	9
23	25	1	120	9	45	1	110	9
24	28	1	140	9	45	1	110	1
25	39	1	120	1	25	9	110	1
26	14	1	140	1	25	9	110	9
27	33	1	120	9	25	9	110	9
28	19	1	140	9	25	9	110	1
29	7	1	120	1	45	9	110	9
30	1	1	140	1	45	9	110	1
31	12	1	120	9	45	9	110	1
32	4	1	140	9	45	9	110	9
33	42	-1	120	5	35	5	100	5
34	43	-1	140	5	35	5	100	5
35	44	-1	130	1	35	5	100	5
36	45	-1	130	9	35	5	100	5
37	46	-1	130	5	25	5	100	5
38	47	-1	130	5	45	5	100	5
39	48	-1	130	5	35	1	100	5
40	49	-1	130	5	35	9	100	5
41	50	-1	130	5	35	5	90	5
42	51	-1	130	5	35	5	110	5
43	52	-1	130	5	35	5	100	1
44	53	-1	130	5	35	5	100	9

ตารางที่ 4.2 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Matrix) (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	PtType	A	B	C	D	E	F
45	11	0	130	5	35	5	100	5
46	26	0	130	5	35	5	100	5
47	5	0	130	5	35	5	100	5
48	13	0	130	5	35	5	100	5
49	16	0	130	5	35	5	100	5
50	9	0	130	5	35	5	100	5
51	22	0	130	5	35	5	100	5
52	15	0	130	5	35	5	100	5
53	8	0	130	5	35	5	100	5

4.2 ขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง

ผู้วิจัยได้เริ่มทำการทดลองตามตารางการออกแบบที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น ซึ่งก่อนการดำเนินการทดลองได้มีการจัดประชุมเพื่ออธิบายขั้นตอนการดำเนินงานให้กับสมาชิกภายในทีม ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานได้จัดเตรียมวัตถุดิบและทำการปรับตั้งค่าเครื่องจักรได้อย่างถูกต้องตามสภาวะการทดลองที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. จัดเตรียมวัตถุดิบที่ต้องใช้ในการดำเนินการทดลองให้พร้อม
2. ดำเนินการทดลองตามสภาวะการทดลองที่ได้กำหนดไว้ดังตารางที่ 4.2 โดยทำการปรับตั้งค่าเครื่องจักรผ่านทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม
3. ทำการเก็บตัวอย่างทรายที่จะนำไปใช้ในการทดสอบค่าคุณสมบัติ โดยเก็บที่บริเวณทำยกระบวนกรทำให้ทรายเย็นตัว
4. นำทรายตัวอย่างที่ได้เก็บมาไปทำการตรวจสอบค่าคุณสมบัติแต่ละตัว โดยจะทำภายในห้องทดลองของทางโรงงาน

4.3 ผลการทดลอง

ภายหลังจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลองข้างต้น จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการทดลอง

StdOrder	RunOrder	PtType	A	B	C	D	E	F	Bending Strength		LOI		Melting Point		Gas		Thermal Expansion		Bend		Peel Back		Shell Thickness	
									Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2
1	3	1	120	1	25	1	90	1	78.3	78.15	2.892	2.899	100.7	100	9.58	10.24	1.182	1.109	0.39	0.44	64.3	54.6	4.88	5.025
2	29	1	140	1	25	1	90	9	78	77.55	2.988	2.974	99.9	99.3	10.54	10.49	1.121	1.097	0.34	0.39	72.6	73	4.765	4.735
3	2	1	120	9	25	1	90	9	77.85	79.95	2.858	2.904	102	102.6	10.05	10.4	1.177	1.13	0.35	0.42	58.6	67.5	4.75	4.72
4	36	1	140	9	25	1	90	1	78.9	81.3	2.819	2.928	100.1	99.2	10.26	10.1	1.118	0.978	0.38	0.43	66.8	66.8	4.68	4.65
5	37	1	120	1	45	1	90	9	79.05	80.55	2.889	2.909	101.9	102.8	10.29	10.32	1.107	1.093	0.36	0.43	70.4	81.4	4.69	4.425
6	30	1	140	1	45	1	90	1	78.3	79.35	2.970	2.933	100.1	100.5	10.74	10.87	1.046	1.062	0.37	0.36	57.9	63.2	4.47	4.72
7	32	1	120	9	45	1	90	1	77.4	78.6	2.894	2.913	101.1	101	10.32	10.18	1.109	1.189	0.41	0.43	65.3	67.7	4.52	4.715
8	38	1	140	9	45	1	90	9	74.3	76.9	2.903	2.913	101.6	102.6	10.23	10.22	1.098	1.122	0.39	0.33	75.1	66.7	4.33	4.55
9	10	1	120	1	25	9	90	9	84.85	86.85	2.893	2.834	104.8	104.4	10.21	10.41	1.126	1.12	0.32	0.38	67.8	60.1	5.125	5.125
10	6	1	140	1	25	9	90	1	81.15	80.25	2.849	2.667	98.8	98.4	9.931	10.02	1.141	1.118	0.39	0.37	75.3	63.7	4.625	4.55
11	21	1	120	9	25	9	90	1	77.25	76.65	2.886	3.044	102.1	102.5	10.63	9.88	1.136	1.156	0.42	0.45	65.2	65.9	4.645	4.605
12	23	1	140	9	25	9	90	9	76.95	80.7	2.837	2.871	99.9	99.5	10.74	10.47	0.968	1.036	0.31	0.35	60.4	62.3	4.845	4.56
13	24	1	120	1	45	9	90	1	81	80.6	2.920	2.926	102.8	103.2	10.23	10.18	1.214	1.034	0.33	0.31	63.3	62.3	5.785	4.875
14	31	1	140	1	45	9	90	9	77.8	78	2.948	2.921	101	101.6	10.49	10.82	1.128	1.143	0.36	0.4	64.1	68	4.61	4.78
15	34	1	120	9	45	9	90	9	81	82.35	2.949	2.911	102.9	103.4	10.24	10.49	1.106	1.119	0.4	0.42	69.5	67	5.04	5.025
16	40	1	140	9	45	9	90	1	74.55	76.05	2.917	2.984	101.9	102.7	9.879	10.07	1.173	1.19	0.4	0.37	63.9	59.8	4.63	4.68
17	18	1	120	1	25	1	110	9	80.25	78.45	2.904	2.917	101.9	101.4	10.38	10.26	1.091	1.085	0.35	0.43	71.9	61.9	4.835	4.73
18	41	1	140	1	25	1	110	1	78.6	78.3	2.910	2.887	100.1	99.1	10.63	10.47	1.199	1.184	0.43	0.47	64.6	66.2	4.75	4.585
19	27	1	120	9	25	1	110	1	77.25	76.65	2.946	2.959	99.6	100	9.983	9.652	1.179	1.182	0.44	0.43	57.2	59.9	4.6	4.85
20	17	1	140	9	25	1	110	9	77.55	76.8	2.926	2.938	100.4	101	10.73	10.41	1.172	1.129	0.36	0.43	68.6	83.5	4.77	4.51
21	35	1	120	1	45	1	110	1	78.3	81.6	2.939	2.965	102.2	102.7	10.2	10.31	1.041	1.156	0.39	0.44	84.8	59.4	4.83	4.735
22	20	1	140	1	45	1	110	9	78.3	77.25	2.860	2.922	101.9	102.2	10.76	10.17	1.148	1.141	0.38	0.34	72.7	71.3	4.84	4.755
23	25	1	120	9	45	1	110	9	81.75	79.35	2.815	2.776	101.7	100.1	10.46	10.27	1.185	1.012	0.35	0.4	60.4	58.1	4.615	4.73
24	28	1	140	9	45	1	110	1	77.85	76.2	2.888	2.929	99.1	101.4	10.35	10.28	1.199	1.102	0.46	0.42	56	55.2	4.89	4.81
25	39	1	120	1	25	9	110	1	81	81.8	2.919	2.908	103.2	101.5	9.636	10.16	1.16	1.137	0.41	0.41	64.2	63.8	4.68	5.02

ตารางที่ 4.3 ตารางการออกแบบการทดลองและผลจากการทดลอง (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	PtType	A	B	C	D	E	F	Bending Strength		LOI		Melting Point		Gas		Thermal Expansion		Bend		Peel Back		Shell Thickness	
									Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2	Rep1	Rep2
26	14	1	140	1	25	9	110	9	75.3	72.75	2.915	2.917	99.8	100.1	10.36	10.5	1.18	1.164	0.4	0.4	81.4	78.7	4.65	4.605
27	33	1	120	9	25	9	110	9	76.8	76.2	2.917	2.928	101.8	102.6	9.809	10.1	1.244	1.104	0.41	0.49	67.1	66.8	5.01	5.09
28	19	1	140	9	25	9	110	1	77.1	74.85	2.922	2.936	100.8	100.8	10.44	10.29	1.23	1.181	0.41	0.47	59.2	67.8	4.715	4.68
29	7	1	120	1	45	9	110	9	80.4	83.7	2.820	2.876	99.3	100.2	9.879	10.11	1.187	1.125	0.35	0.38	69.1	63.9	5	5.045
30	1	1	140	1	45	9	110	1	78.15	76.8	2.855	2.891	100.9	100.1	10.3	10.52	1.196	1.186	0.44	0.4	61.4	69.2	4.875	4.995
31	12	1	120	9	45	9	110	1	86.25	82.2	2.729	2.746	100.9	100.7	9.658	10.1	1.161	1.148	0.36	0.42	75.5	61.7	4.61	4.66
32	4	1	140	9	45	9	110	9	80.1	77.55	2.869	2.898	100.6	100.1	9.759	9.931	1.182	1.268	0.55	0.5	73.6	83.2	4.875	4.95
33	42	-1	120	5	35	5	100	5	80.25	78.75	2.928	2.889	100.3	102.4	10.07	10.55	1.125	1.129	0.37	0.28	67.5	63.2	5.1	5.31
34	43	-1	140	5	35	5	100	5	79.6	80.4	2.900	2.891	101.5	102.8	9.81	10.09	1.173	1.187	0.28	0.32	76.9	82.7	4.905	5
35	44	-1	130	1	35	5	100	5	84.45	82.8	2.925	2.934	100.4	101.3	10.17	10.27	1.155	1.162	0.34	0.4	76.1	71.3	4.795	4.925
36	45	-1	130	9	35	5	100	5	75	79.5	2.827	2.885	101.9	101.6	9.845	10.21	1.136	1.146	0.39	0.35	80.2	77.3	4.735	4.92
37	46	-1	130	5	25	5	100	5	80.6	78	2.928	2.862	100.5	101.3	10.1	10.26	1.155	1.14	0.22	0.22	70.9	68.8	4.935	4.8
38	47	-1	130	5	45	5	100	5	83.1	81.3	2.871	2.920	102.4	102	10.36	10.36	1.159	1.131	0.28	0.26	72.9	66.1	4.87	5.145
39	48	-1	130	5	35	1	100	5	75.6	78.6	2.854	2.911	100.6	101.1	10.29	10.22	1.222	1.199	0.24	0.26	79	83.1	4.855	4.99
40	49	-1	130	5	35	9	100	5	77.85	78.75	2.891	2.855	100	101.4	9.589	10	1.189	1.094	0.46	0.37	85	88.2	5.135	5.14
41	50	-1	130	5	35	5	90	5	78.9	80.1	2.870	2.905	101.7	100.1	9.897	9.983	1.085	1.08	0.36	0.24	65.2	63.2	5.01	5.245
42	51	-1	130	5	35	5	110	5	82.8	79.8	2.925	2.916	100.3	100.2	10.31	10.12	1.115	1.074	0.4	0.31	65.1	61.7	5.555	5.065
43	52	-1	130	5	35	5	100	1	82.95	81.75	2.921	2.885	102.4	100.3	10.31	10.02	1.138	1.134	0.37	0.37	88.3	82.1	5.04	4.9
44	53	-1	130	5	35	5	100	9	76.95	77.85	2.909	2.880	102	102.6	10.14	10.19	1.144	1.117	0.25	0.33	65.9	65.5	5.17	5.03
45	11	0	130	5	35	5	100	5	81.21	82.1	2.926	2.948	100.3	99.7	10.36	10.22	1.134	1.156	0.37	0.39	69.6	64.4	4.915	4.74
46	26	0	130	5	35	5	100	5	78.15	78.45	2.920	2.891	101.9	102.6	10.57	10.33	1.123	1.126	0.38	0.4	61	66.7	4.88	4.77
47	5	0	130	5	35	5	100	5	82.4	81.3	2.891	2.936	100.1	100.3	10.31	10.21	1.153	1.173	0.37	0.42	61.4	71.1	5	4.625
48	13	0	130	5	35	5	100	5	81.6	80.3	2.880	2.850	101	101.6	10.3	10.03	1.146	1.146	0.38	0.36	70.3	71	4.985	4.645
49	16	0	130	5	35	5	100	5	81.3	80.3	2.930	2.921	101.9	100.6	10.71	10.56	1.1	1.056	0.43	0.42	60.6	55	4.25	3.795
50	9	0	130	5	35	5	100	5	78.15	80.55	2.931	2.919	99.1	99.8	10.42	10.12	1.195	1.148	0.42	0.45	64.8	66.6	4.59	4.54
51	22	0	130	5	35	5	100	5	77.3	78.7	3.037	2.994	102.1	102.7	10.62	10.46	1.206	1.125	0.38	0.4	63.1	74.6	4.42	5.062
52	15	0	130	5	35	5	100	5	79.15	78.15	2.956	2.910	102.8	102.8	9.704	9.931	1.186	1.173	0.39	0.41	74.8	89.5	4.85	4.65
53	8	0	130	5	35	5	100	5	80.4	81.45	2.923	2.923	99.7	100.9	10.22	10.39	1.171	1.18	0.4	0.41	57.7	66.7	4.91	4.78

จากผลการทดลองที่ได้ตั้งตารางที่ 4.3 เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน โดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) โดยผู้วิจัยได้เลือก Stepwise Regression แบบวิธีลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ของค่าคุณสมบัติแต่ละตัวมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแทปแสดงให้เห็นว่ามีข้อมูลที่มีค่าผิดปกติ (Unusual Observations) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 (ค่าในกรอบสี่เหลี่ยม) โดยทางผู้วิจัยและทีมงานได้ทำการประชุมเพื่อหาสาเหตุความผิดปกติที่เกิดขึ้นและมีความคิดเห็นตรงกันว่าสาเหตุของความผิดปกติที่เกิดขึ้นน่าจะมาจากความแปรปรวนของทรายที่ใช้ในกระบวนการ จากนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับทรายที่ใช้สำหรับผลิตสูตร H2 ซึ่งจะประกอบไปด้วยทราย 3 ชนิด คือ ทราย S1 ทราย S2 และทราย S3 โดยที่ทราย S2 และ S3 ทางโรงงานจะรับซื้อมาจากตัวแทนจำหน่ายเพียงรายเดียว ส่วนทราย S1 ทางโรงงานจะรับซื้อมาจากตัวแทนจำหน่ายทั้งหมด 5 ราย อีกทั้งทรายชนิดนี้ยังมีการผสมกันของทรายหลากหลายชนิด จึงทำให้ผู้วิจัยและทีมงานมีความคิดเห็นว่า ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นผลมาจากทราย S1 จากนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการตรวจสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการทดสอบย้อนหลัง ซึ่งทางโรงงานจะทำการตรวจสอบค่าคุณสมบัติทรายที่ใช้ในกระบวนการผลิตทุกๆ 2 ชั่วโมง โดยคุณสมบัติที่ตรวจสอบจะประกอบไปด้วย ความละเอียดของเม็ดทราย (AFS) ปริมาณดินเหนียวที่เจือปน (%Clay) ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา (%LOI) และปริมาณเหล็กเจือปน (%Iron) ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้ในการควบคุมค่าคุณสมบัติแต่ละตัวจะเป็นไปตามตารางที่ 4.4 ในกรณีที่ค่าคุณสมบัติใดมีค่าเกินเกณฑ์ที่กำหนด ทางโรงงานจะทำการติดตามควบคุมเป็นพิเศษ ถ้าหากนำไปใช้ในการผลิตแล้วไม่เกิดปัญหาก็จะดำเนินการผลิตต่อไป โดยรายละเอียดของการตรวจสอบจะเป็นไปตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 เกณฑ์การควบคุมค่าคุณสมบัติของทรายในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน

คุณสมบัติที่ตรวจสอบ	เกณฑ์ในการควบคุม
AFS	55-60
Loss of Ignition (%)	< 8%
Iron (%)	< 1.5%
Clay (%)	< 18%

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการทดสอบ

วันที่ทดสอบ: 14 มิถุนายน 2560					วันที่ทดสอบ: 15 มิถุนายน 2560				
เวลาตรวจสอบ	ค่าคุณสมบัติที่ตรวจสอบ				เวลาตรวจสอบ	ค่าคุณสมบัติที่ตรวจสอบ			
	AFS	Loss of Ignition (%)	Iron (%)	Clay (%)		AFS	Loss of Ignition (%)	Iron (%)	Clay (%)
13.00 น.	57	8.08	1.2	20.11	13.00 น.	58.3	8.39	1.3	20.55
15.00 น.	56.4	7.38	1.8	25.38	15.00 น.	57.6	6.67	0.8	23.09
17.00 น.	58.5	7.77	1.1	20.28	17.00 น.	59.1	7.56	1.8	19.82
วันที่ทดสอบ: 21 มิถุนายน 2560					วันที่ทดสอบ: 22 มิถุนายน 2560				
เวลาตรวจสอบ	ค่าคุณสมบัติที่ตรวจสอบ				เวลาตรวจสอบ	ค่าคุณสมบัติที่ตรวจสอบ			
	AFS	Loss of Ignition (%)	Iron (%)	Clay (%)		AFS	Loss of Ignition (%)	Iron (%)	Clay (%)
13.00 น.	57.7	4.98	0.9	20.55	13.00 น.	58.2	7.27	1	21.17
15.00 น.	56.1	6.95	1	23.09	15.00 น.	56.8	6.97	1.1	19.06
17.00 น.	58.2	7.5	1.2	16.41	17.00 น.	58.6	8.87	1	17.45
วันที่ทดสอบ: 28 มิถุนายน 2560					วันที่ทดสอบ: 29 มิถุนายน 2560				
เวลาตรวจสอบ	ค่าคุณสมบัติที่ตรวจสอบ				เวลาตรวจสอบ	ค่าคุณสมบัติที่ตรวจสอบ			
	AFS	Loss of Ignition (%)	Iron (%)	Clay (%)		AFS	Loss of Ignition (%)	Iron (%)	Clay (%)
13.00 น.	56.5	4.69	1.3	22.22	13.00 น.	56.1	8.69	1	24.24
15.00 น.	58.9	8.79	1.1	26.27	15.00 น.	58.4	8.48	1.5	18.45
17.00 น.	57.3	7.18	0.9	20.11	17.00 น.	56.3	8.69	1.3	21.22

จากผลการตรวจสอบข้างต้น เมื่อทำการพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากค่าคุณสมบัติแต่ละตัวจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ความละเอียดของเม็ดทราย (AFS) จะส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน เนื่องจากทรายที่มีความละเอียดสูงจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัส (Contact Area) มาก ส่งผลให้ฟีนอลิกเรซินสามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ทรายที่มีความละเอียดสูงจะช่วยให้ทรายเคลือบเรซินมีการจัดเรียงตัวที่หนาแน่นมากยิ่งขึ้นซึ่งส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน เมื่อพิจารณาค่าความละเอียดของทรายที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 4.5 แม้ว่าค่าที่ตรวจสอบจะอยู่ในเกณฑ์การควบคุมแต่ขนาดความละเอียดของเม็ดทรายที่แตกต่างกันก็น่าจะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ผลการทดลองที่ได้เกิดความแปรปรวน

2. ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา (%LOI) จะส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน เนื่องจากเป็นคุณสมบัติที่ใช้ในการตรวจสอบสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในทราย ถ้าหากปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่านั้นแสดงให้เห็นว่ามีสิ่งปนเปื้อนปะปนมากับทรายมาก โดยสิ่งปนเปื้อนที่ติดมากับทรายเหล่านี้จะไปปะปนกับฟีนอลิกเรซินในขั้นตอนการผสม ส่งผลให้การเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินบนเม็ดทรายเกิดขึ้นได้ไม่ดี อีกทั้งสิ่งเจือปนเหล่านี้้อาจจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของทรายเคลือบเรซินในขณะขึ้นรูป ส่งผลให้ค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินที่ทาง

โรงงานพิจารณามีค่าเปลี่ยนแปลงไป เมื่อพิจารณาปริมาณการสูญเสียหลังการเผาในทรายที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าที่ตรวจสอบจะมีบางค่าที่เกินเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนด ซึ่งความแปรปรวนของปริมาณการสูญเสียหลังการเผาที่มากก็น่าจะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลการทดลองที่ได้เกิดความแปรปรวน

3. ปริมาณเหล็กเจือปน (%Iron) จะส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน เนื่องจากเศษเหล็กที่ปะปนอยู่ในทรายอาจจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของทรายเคลือบเรซินในขณะขึ้นรูป โดยที่กระบวนการขึ้นรูปจะถูกทำขึ้นที่อุณหภูมิสูงซึ่งอาจทำให้เศษเหล็กที่ปะปนมาบางส่วนเกิดการหลอมละลายและไปขัดขวางการเกิดโครงสร้างร่างแหที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการขึ้นรูปได้ ส่งผลให้ค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินที่ทางโรงงานพิจารณามีค่าเปลี่ยนแปลงไป เมื่อพิจารณาปริมาณเหล็กเจือปนในทรายที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าที่ตรวจสอบส่วนใหญ่จะอยู่ในเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนด แต่ความแปรปรวนของปริมาณเหล็กที่เจือปนก็น่าจะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลการทดลองที่ได้เกิดความแปรปรวน

4. ปริมาณดินเหนียวที่เจือปน (%Clay) จะส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน เนื่องจากดินเหนียวที่เจือปนอยู่จะไปเคลือบบนเม็ดทราย ทำให้การเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินบนเม็ดทรายเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น ซึ่งการเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินที่ไม่ดีจะส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน เมื่อพิจารณาปริมาณดินเหนียวที่เจือปนในทรายที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าที่ตรวจสอบส่วนใหญ่จะเกินเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนด ซึ่งความแปรปรวนของปริมาณดินเหนียวที่เจือปนมากก็น่าจะเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลการทดลองที่ได้เกิดความแปรปรวน

จากผลการวิเคราะห์เบื้องต้นทำให้ทราบถึงสาเหตุของความแปรปรวนที่เกิดขึ้น จึงสามารถทำการตัดค่าจากการทดสอบที่เกิดความผิดปกติ (Unusual Observations) ออกจากการวิเคราะห์ได้ ซึ่งภายหลังจากการตัดค่าดังกล่าวออกจากการวิเคราะห์ผลการทดลองจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ของค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจก่อนและหลังการตัดค่าจากการทดสอบที่เกิดความผิดปกติ

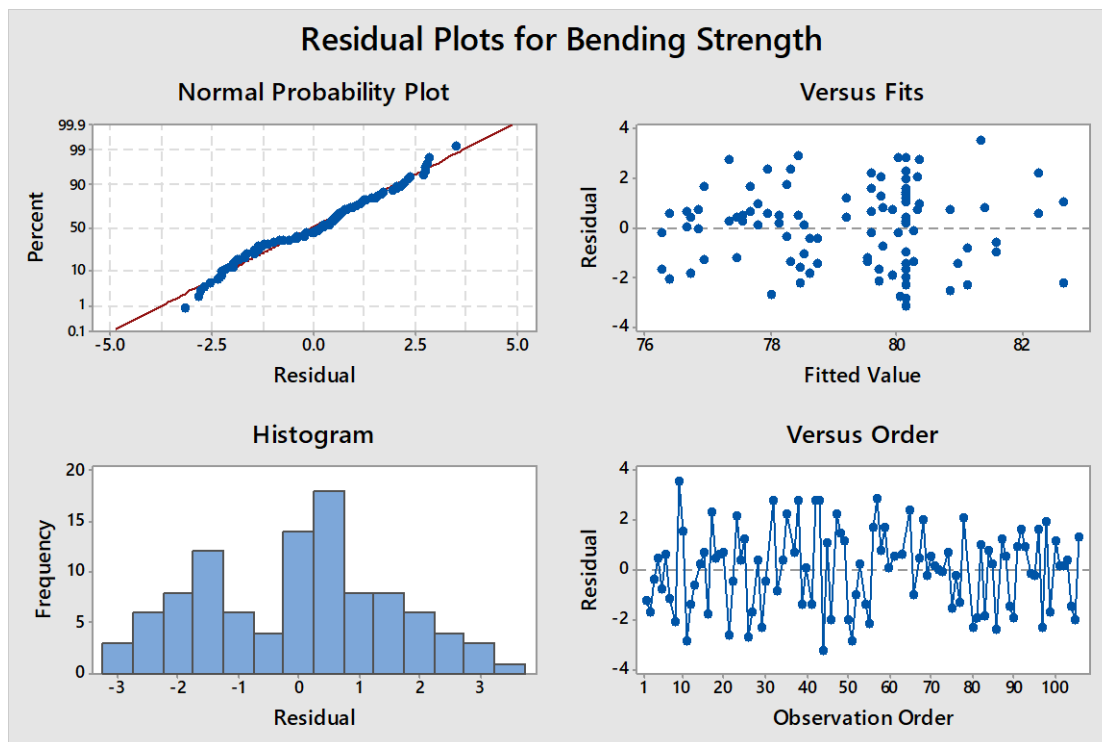
คุณสมบัติ	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ	
	ก่อนตัดค่าที่ผิดปกติ	หลังตัดค่าที่ผิดปกติ
ความทนแรงดัดโค้ง	43.76%	48.32%
ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา	20.17%	36.38%
อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	26.66%	36.78%
แก๊ส	11.83%	43.52%
การขยายตัวทางความร้อน	19.15%	48.40%
ความโค้งงอของชิ้นงาน	26.36%	37.01%
ฟิลแบค	20.67%	40.69%
ความหนาของผนัง	16.61%	31.86%

4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากทำการเก็บข้อมูลตามตารางการออกแบบการทดลองที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ข้างต้นและทำการตัดค่าจากการทดสอบที่เกิดความผิดปกติ (Unusual Observations) เรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองจะเริ่มจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ก่อน ว่าข้อมูลที่ได้มามีความเหมาะสมที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ในการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะประกอบไปด้วยสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่ สมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) สมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual) และสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ไปทำการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่มีต่อค่าคุณสมบัติแต่ละตัวโดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนและทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความทนแรงดัดโค้ง

4.4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)



รูปที่ 4.2 การกระจายตัวส่วนตกค้างของความทนแรงดัดโค้ง

จากรูปที่ 4.2 สามารถสรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของความทนแรงดัดโค้งได้ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) จะสามารถดูได้จากกราฟ Normal Probability Plot ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่จัดเรียงตัวอยู่ตามแนวเส้นตรงและมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติเท่ากับ 0.052 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Fitted Value ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) รอบแนวแกนศูนย์และข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้มหรือรูปแบบที่คล้ายกรวยปากเปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่

3) จากกราฟ Histogram จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

4) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Observation Order ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัว

ของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือรูปร่างที่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.4.1.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความทนแรงดัดโค้ง

ภายหลังจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลองข้างต้น จากนั้นจะอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่อความทนแรงดัดโค้ง โดยจะทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.3

Response Surface Regression: Bending Strength versus A, B, C, D, E, F					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	27	265.936	9.8495	3.31	0.000
Linear	6	101.022	16.8371	5.65	0.000
A	1	56.940	56.9399	19.12	0.000
B	1	27.174	27.1743	9.13	0.003
C	1	3.481	3.4810	1.17	0.283
D	1	8.777	8.7772	2.95	0.090
E	1	1.513	1.5127	0.51	0.478
F	1	0.056	0.0557	0.02	0.892
Square	6	74.125	12.3542	4.15	0.001
A*A	1	1.493	1.4932	0.50	0.481
B*B	1	10.553	10.5526	3.54	0.064
C*C	1	0.898	0.8981	0.30	0.585
D*D	1	32.146	32.1463	10.80	0.002
E*E	1	0.035	0.0355	0.01	0.913
F*F	1	0.904	0.9040	0.30	0.583
2-Way Interaction	15	89.297	5.9532	2.00	0.027
A*B	1	3.109	3.1092	1.04	0.310
A*C	1	17.803	17.8029	5.98	0.017
A*D	1	12.850	12.8496	4.32	0.041
A*E	1	1.779	1.7792	0.60	0.442
A*F	1	8.136	8.1363	2.73	0.103
B*C	1	2.627	2.6275	0.88	0.351
B*D	1	3.427	3.4268	1.15	0.287
B*E	1	0.555	0.5554	0.19	0.667
B*F	1	3.045	3.0450	1.02	0.315
C*D	1	0.884	0.8844	0.30	0.587
C*E	1	25.273	25.2729	8.49	0.005
C*F	1	2.952	2.9523	0.99	0.323
D*E	1	2.872	2.8719	0.96	0.329
D*F	1	1.490	1.4900	0.50	0.482
E*F	1	1.143	1.1428	0.38	0.538
Error	73	217.363	2.9776		
Lack-of-Fit	17	110.117	6.4775	3.38	0.000
Pure Error	56	107.245	1.9151		
Total	100	483.299			

รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความทนแรงดัดโค้ง

Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	1.72556	55.03%	38.39%	7.39%	
Coded Coefficients					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		80.190	0.298	269.39	0.000
A	-1.914	-0.957	0.219	-4.37	0.000
B	-1.339	-0.669	0.222	-3.02	0.003
C	0.473	0.237	0.219	1.08	0.283
D	0.750	0.375	0.218	1.72	0.090
E	-0.311	-0.156	0.218	-0.71	0.478
F	-0.060	-0.030	0.219	-0.14	0.892
A*A	-1.126	-0.563	0.795	-0.71	0.481
B*B	3.345	1.673	0.888	1.88	0.064
C*C	0.874	0.437	0.795	0.55	0.585
D*D	-5.226	-2.613	0.795	-3.29	0.002
E*E	0.174	0.087	0.795	0.11	0.913
F*F	-0.876	-0.438	0.795	-0.55	0.583
A*B	0.460	0.230	0.225	1.02	0.310
A*C	-1.104	-0.552	0.226	-2.45	0.017
A*D	-0.940	-0.470	0.226	-2.08	0.041
A*E	-0.350	-0.175	0.226	-0.77	0.442
A*F	-0.745	-0.372	0.225	-1.65	0.103
B*C	0.423	0.212	0.225	0.94	0.351
B*D	-0.486	-0.243	0.227	-1.07	0.287
B*E	0.194	0.097	0.225	0.43	0.667
B*F	0.456	0.228	0.226	1.01	0.315
C*D	0.247	0.123	0.226	0.55	0.587
C*E	1.318	0.659	0.226	2.91	0.005
C*F	0.449	0.224	0.225	1.00	0.323
D*E	-0.443	-0.222	0.226	-0.98	0.329
D*F	0.321	0.160	0.227	0.71	0.482
E*F	-0.279	-0.139	0.225	-0.62	0.538
Regression Equation in Uncoded Units					
Bending Strength = -25 + 1.81 A - 2.38 B - 0.293 C + 3.73 D - 0.16 E + 1.51 F - 0.00563 A*A + 0.1045 B*B + 0.00437 C*C - 0.1633 D*D + 0.00087 E*E - 0.0274 F*F + 0.00576 A*B - 0.00552 A*C - 0.01174 A*D - 0.00175 A*E - 0.00931 A*F + 0.00529 B*C - 0.0152 B*D + 0.00243 B*E + 0.0143 B*F + 0.00308 C*D + 0.00659 C*E + 0.00561 C*F - 0.00554 D*E + 0.0100 D*F - 0.00348 E*F					

รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความทนแรงดัดโค้ง (ต่อ)

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความทนแรงดัดโค้งเบื้องต้น จะเป็นการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 55.03 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 38.39 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความทนแรงดัดโค้งไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.4

Response Surface Regression: Bending Strength versus A, B, C, D, E, F

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	233.550	23.355	8.42	0.000
Linear	5	101.728	20.346	7.33	0.000
A	1	58.688	58.688	21.15	0.000
B	1	25.624	25.624	9.23	0.003
C	1	3.110	3.110	1.12	0.293
D	1	11.346	11.346	4.09	0.046
E	1	1.098	1.098	0.40	0.531
Square	2	68.489	34.244	12.34	0.000
B*B	1	13.725	13.725	4.95	0.029
D*D	1	49.482	49.482	17.83	0.000
2-Way Interaction	3	60.114	20.038	7.22	0.000
A*C	1	19.807	19.807	7.14	0.009
A*D	1	13.525	13.525	4.87	0.030
C*E	1	26.316	26.316	9.48	0.003
Error	90	249.749	2.775		
Lack-of-Fit	34	142.503	4.191	2.19	0.005
Pure Error	56	107.245	1.915		
Total	100	483.299			

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.66583	48.32%	42.58%	34.77%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		80.157	0.279	287.35	0.000
A	-1.931	-0.965	0.210	-4.60	0.000
B	-1.280	-0.640	0.211	-3.04	0.003
C	0.442	0.221	0.209	1.06	0.293
D	0.846	0.423	0.209	2.02	0.046
E	-0.263	-0.132	0.209	-0.63	0.531
B*B	2.908	1.454	0.654	2.22	0.029
D*D	-5.552	-2.776	0.657	-4.22	0.000
A*C	-1.155	-0.577	0.216	-2.67	0.009
A*D	-0.958	-0.479	0.217	-2.21	0.030
C*E	1.336	0.668	0.217	3.08	0.003

Regression Equation in Uncoded Units

Bending Strength = 80.8 + 0.1654 A - 1.069 B + 0.105 C + 3.397 D - 0.2469 E + 0.0909 B*B - 0.1735 D*D - 0.00577 A*C - 0.01197 A*D + 0.00668 C*E

รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความทนแรงดัดโค้ง โดยวิธีการลดตัวแปรอิสระ

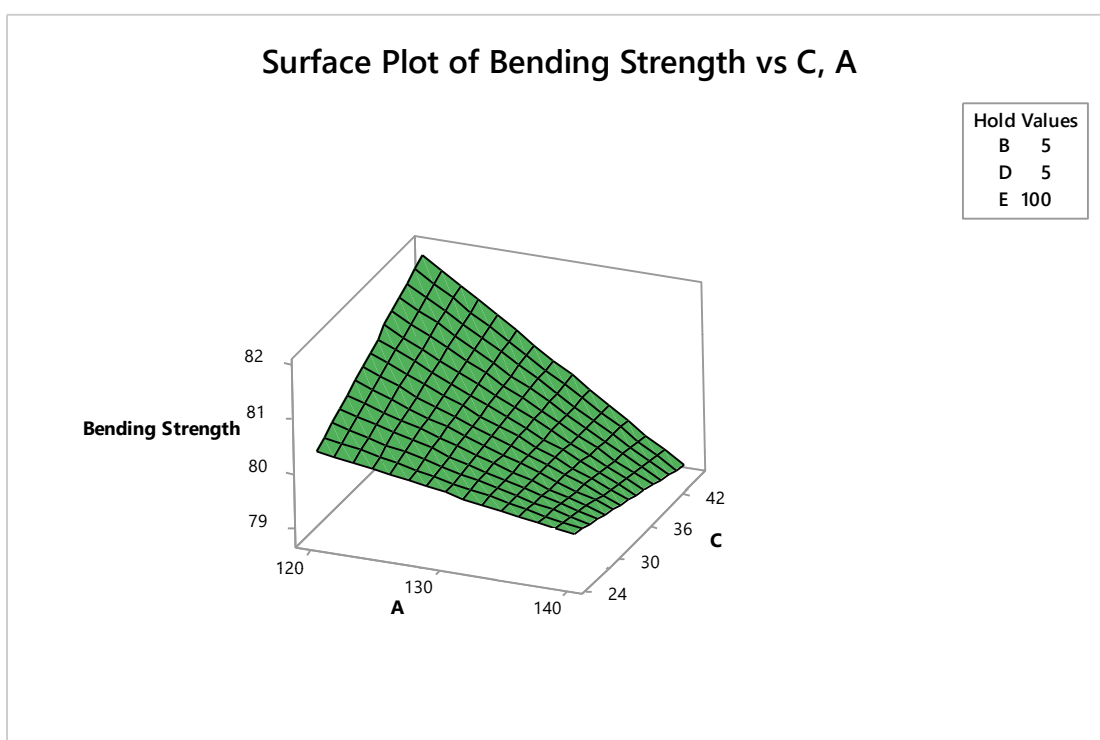
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ดังรูปที่ 4.4 พบว่า เทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความทนแรงดัดโค้งที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 หรือ เทอมของปัจจัยที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จะมีทั้งหมด 8 เทอม จากทั้งหมด 10 เทอม ซึ่งประกอบไปด้วยเทอมของผลกระทบหลัก (Main Effect Term) ได้แก่ A, B และ D ส่วนเทอมกำลังสองของปัจจัย (Second Order Term) ได้แก่ B*B และ D*D และเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Term) ได้แก่ A*C, A*D และ C*E โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความทนแรงดัดโค้งจะนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.1 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 48.32 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 42.58 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่ามากกว่าค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$\begin{aligned} \text{Bending Strength} = & 80.8 + 0.1654A - 1.069B + 0.105 C + 3.397D - 0.2469E + 0.0909B^2 \\ & - 0.1735D^2 - 0.00577AC - 0.01197AD + 0.00668CE \end{aligned} \quad (4.1)$$

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นว่าเทอมของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยส่งผลกระทบต่อความทนแรงดัดโค้ง ทำให้สามารถใช้กราฟพื้นผิวตอบสนอง (Surface Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย A, D, D*D, A*C, A*D และ C*E ไปพร้อมๆกันได้ ส่วนเทอมปัจจัย B และ B*B จะใช้กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์ เนื่องจากผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของปัจจัย B ไม่ส่งผลกระทบต่อความทนแรงดัดโค้ง

โดยเริ่มจากเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง A และ C จะใช้กราฟพื้นผิวตอบสนอง (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.5 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตั้งต้นของทรายจากระดับต่ำไปจนถึงระดับสูงจะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลงทั้งในช่วงเวลาการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่ระดับต่ำและสูง เนื่องจากอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่สูงขึ้นจะทำให้ฟิสิกเรซินบางส่วนหลอมละลายจนระเหยไปและไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่อุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่ระดับต่ำ เมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาการปล่อยสารละลายเฮกซามีนจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำจะต้องการระยะเวลาในการทำให้ฟิสิกเรซินหลอมละลายจนหมดและไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง ซึ่งการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้อุณหภูมิตั้งต้นของทรายลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ฟิสิกเรซินที่เหลือบางส่วนยังไม่ไปเคลือบเม็ดทรายส่งผลให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าต่ำกว่าการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่ช้า (ระดับสูง) เนื่องจากการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่ช้าจะทำให้อุณหภูมิตั้งต้นของทรายลดลงช้า ทำ

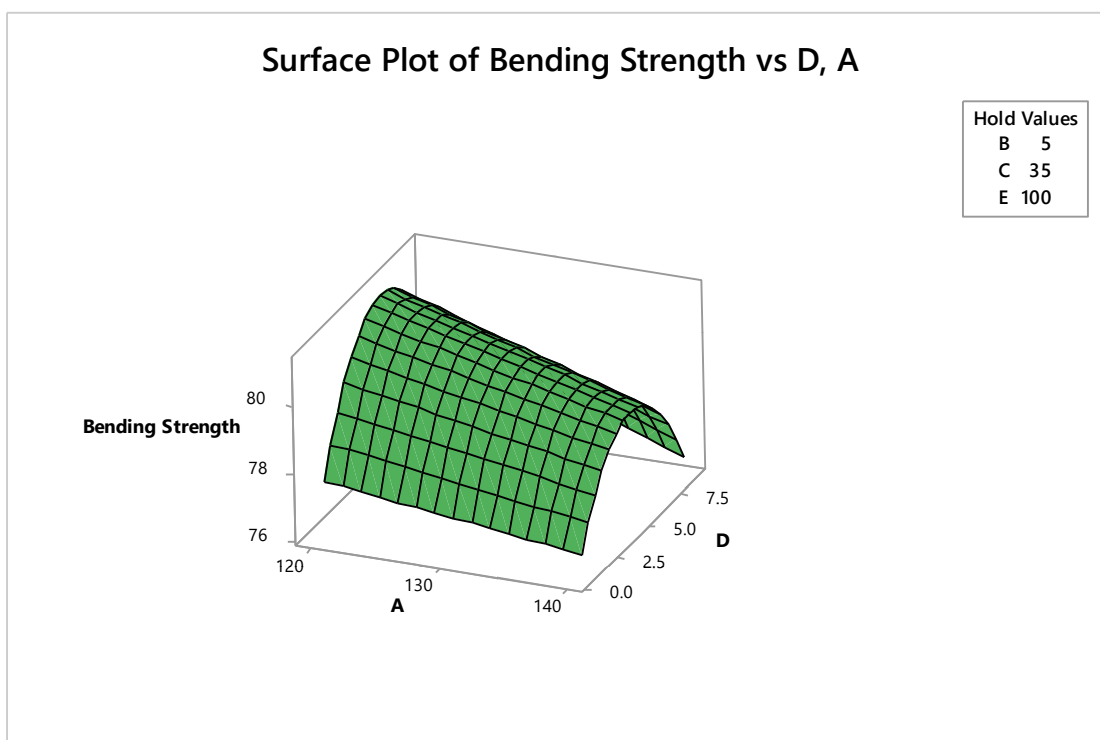
ให้พีนอลิกเรซินมีระยะเวลาในการหลอมละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่ระดับสูง เมื่อทำการเปลี่ยนระยะเวลาการปล่อยสารละลายเฮกซามีนจากระดับต่ำไปสูงพบว่าค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิตั้งต้นที่สูงจะช่วยให้พีนอลิกเรซินหลอมละลายจนหมดในเวลาอันสั้นและสามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นไม่ว่าจะปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่เวลาน้อยหรือมากก็จะส่งผลกระทบน้อยต่อค่าความทนแรงดัดโค้ง



รูปที่ 4.5 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง A และ C ที่ส่งผลกระทบต่อความทนแรงดัดโค้ง

เทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง A และ D จะใช้กราฟพื้นผิวตอบสนอง (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.6 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเวลาในการเริ่มเป่าอากาศกับความทนแรงดัดโค้งจะมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งคว่ำ โดยช่วงระดับกลางของเวลาในการเริ่มเป่าอากาศจะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับระดับต่ำและสูง ในทุกๆช่วงของอุณหภูมิตั้งต้นของทรายจากระดับต่ำไปจนถึงระดับสูง โดยการเริ่มเป่าอากาศที่เร็วเกินไป (ระดับต่ำ) จะทำให้การเคลือบตัวของพีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนบนเม็ดทรายนั้นเกิดการจัดเรียงโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการเริ่มเป่าอากาศที่รวดเร็วจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีนั้นเกิดการหยุดชะงักอย่างรวดเร็วจนทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นบนเม็ดทรายนั้นยังเกิดการจัดเรียงตัวที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ความทนแรงดัดโค้งนั้นมีค่าต่ำ ส่วนการเริ่มเป่าอากาศที่ช้าจนเกินไป (ระดับสูง) จะทำให้การหยุดปฏิกิริยาระหว่างพี

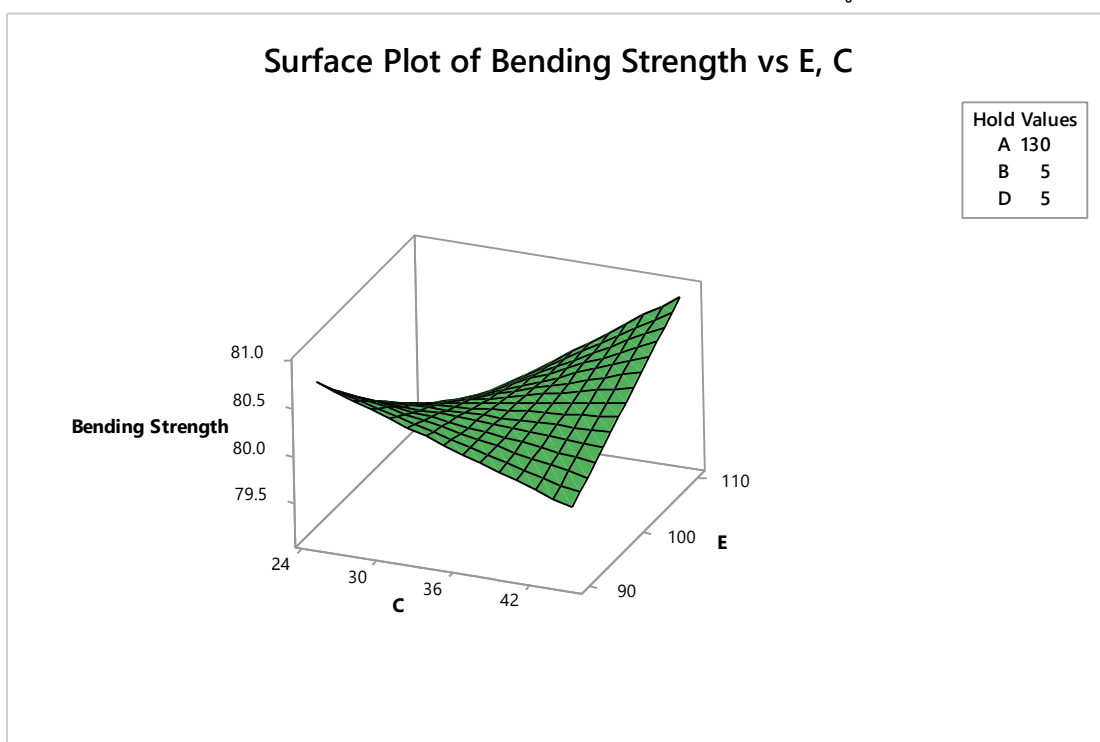
นอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหเกิดขึ้นได้ช้า ซึ่งการเกิดโครงสร้างร่างแหในขณะกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่ช่วงเวลาการเป่าอากาศที่ระดับกลางจะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งสูงสุด และจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิตั้งต้นของทรายเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง เนื่องจากอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่สูงขึ้นจะทำให้พินอลิกเรซินบางส่วนหลอมละลายจนระเหยไป ทำให้ไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง



รูปที่ 4.6 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง A และ D ที่ส่งผลกระทบต่อความทนแรงดัดโค้ง

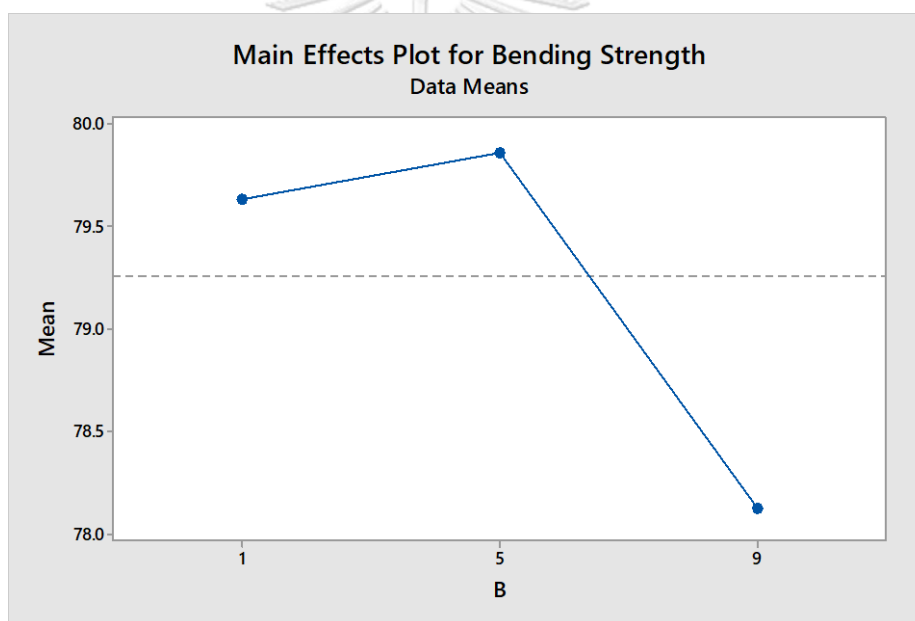
เทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง C และ E จะใช้กราฟพื้นผิวตอบสนอง (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.7 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่เวลาการปล่อยสารละลายเฮกซามีนเร็ว (ระดับต่ำ) การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง เนื่องจากการปล่อยสารละลายเฮกซามีนเร็วจะช่วยหยุดการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ระหว่างพินอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหได้ไวยิ่งขึ้น ดังนั้นระยะเวลาในการเป่าอากาศที่ระดับต่ำจึงเพียงพอที่จะช่วยทำให้ทรายแตกตัวและหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ ทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าที่สูง แต่การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเป่าอากาศที่การปล่อยสารละลายเฮกซามีนเร็วจะทำให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง เนื่องจากระยะเวลาในการเป่าอากาศที่มากเกินไปจะทำให้พินอลิกเรซินบางส่วนไปกระทบใบกวาดและหลุดออกจากเม็ดทราย ทำให้ความทนแรง

ดัดโค้งมีค่าต่ำลง ในทางกลับกันที่เวลาการปล่อยสารละลายเฮกซามีนช้า (ระดับสูง) การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่ช้าจะทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีน และทำให้ทรายบางส่วนนั้นเริ่มจับตัวเป็นก้อน ซึ่งระยะเวลาการเป่าอากาศที่น้อย (ระดับต่ำ) จะไม่เพียงพอต่อการหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหทำให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าต่ำลง แต่เมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับต่ำไปเป็นระดับสูงจะทำให้ระยะเวลาในการเป่าอากาศเพียงพอต่อการหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนและทำให้ทรายแตกตัว ส่งผลให้ค่าความทนแรงดัดโค้งมีค่าที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.7 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง C และ E ที่ส่งผลกระทบต่อความทนแรงดัดโค้ง

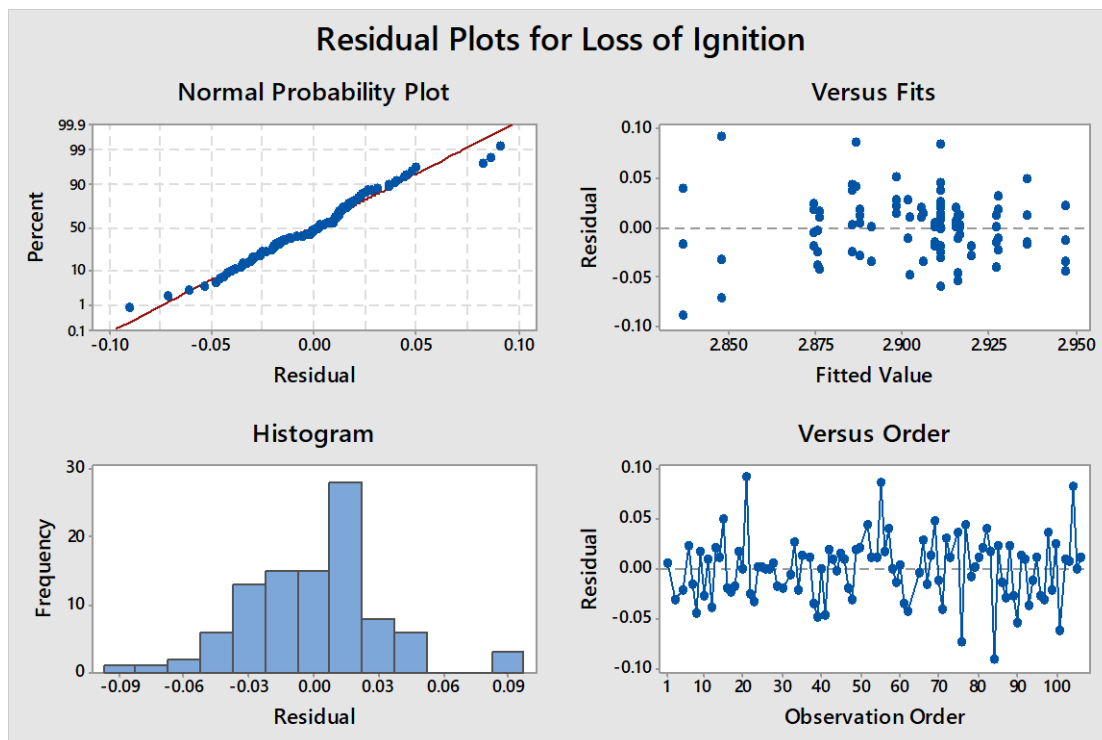
ในส่วนทอมผลกระทบหลักของปัจจัย B และ B*B จะใช้รูปที่ 4.8 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย B กับความทนแรงดัดโค้ง จะมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งคว่ำ โดยการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการปล่อยพีนอลิกเรซินจากระดับต่ำไประดับกลางจะทำให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเวลาการปล่อยพีนอลิกเรซินที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะเป็นช่วงเวลาเดียวกันกับการปล่อยทรายเข้าสู่ถังผสม ทำให้พีนอลิกเรซินบางส่วนยังไม่สามารถไปเคลือบทรายบางส่วนที่ถูกปล่อยลงมาภายหลัง ซึ่งการเคลือบตัวของพีนอลิกเรซินบนเม็ดทรายที่ไม่ดีจะทำให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าต่ำ ส่วนการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการปล่อยพีนอลิกเรซินจากระดับกลางไปยังระดับสูงจะทำให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าต่ำลง เนื่องจากการปล่อยพีนอลิกเรซินช้า (ระดับสูง) จะทำให้อุณหภูมิตั้งต้นของทรายลดลง ส่งผลให้พีนอลิกเรซินบางส่วนไม่สามารถละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้ ทำให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าต่ำลง



รูปที่ 4.8 ผลกระทบหลักของปัจจัย B ที่ส่งผลต่อความทนแรงดัดโค้ง

4.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

4.4.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)



รูปที่ 4.9 การกระจายตัวส่วนตกค้างของปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

จากรูปที่ 4.9 สามารถสรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณการสูญเสียหลังการเผา ได้ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) จะสามารถดูได้จากกราฟ Normal Probability Plot ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่จัดเรียงตัวอยู่ตามแนวเส้นตรงและมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติเท่ากับ 0.151 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Fitted Value ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) รอบแนวแกนศูนย์และข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้มหรือรูปแบบที่คล้ายกรวยปากเปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่

3) จากกราฟ Histogram จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

4) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Observation Order ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัว

ของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือรูปร่างที่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

ภายหลังจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลองข้างต้น จากนั้นจะอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผา โดยจะทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.10

Response Surface Regression: Loss of Ignition versus A, B, C, D, E, F					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	27	0.069448	0.002572	2.24	0.004
Linear	6	0.010043	0.001674	1.46	0.205
A	1	0.004136	0.004136	3.61	0.062
B	1	0.000288	0.000288	0.25	0.618
C	1	0.001039	0.001039	0.91	0.345
D	1	0.002791	0.002791	2.43	0.123
E	1	0.001308	0.001308	1.14	0.289
F	1	0.001306	0.001306	1.14	0.290
Square	6	0.005754	0.000959	0.84	0.546
A*A	1	0.000002	0.000002	0.00	0.965
B*B	1	0.000909	0.000909	0.79	0.376
C*C	1	0.000164	0.000164	0.14	0.707
D*D	1	0.002561	0.002561	2.23	0.140
E*E	1	0.000041	0.000041	0.04	0.850
F*F	1	0.000030	0.000030	0.03	0.873
2-Way Interaction	15	0.050014	0.003334	2.91	0.001
A*B	1	0.001213	0.001213	1.06	0.307
A*C	1	0.005188	0.005188	4.52	0.037
A*D	1	0.000378	0.000378	0.33	0.568
A*E	1	0.000387	0.000387	0.34	0.563
A*F	1	0.000497	0.000497	0.43	0.512
B*C	1	0.003822	0.003822	3.33	0.072
B*D	1	0.000713	0.000713	0.62	0.433
B*E	1	0.000081	0.000081	0.07	0.791
B*F	1	0.000731	0.000731	0.64	0.427
C*D	1	0.001348	0.001348	1.18	0.282
C*E	1	0.035316	0.035316	30.80	0.000
C*F	1	0.000451	0.000451	0.39	0.533
D*E	1	0.000021	0.000021	0.02	0.892
D*F	1	0.002999	0.002999	2.62	0.110
E*F	1	0.000001	0.000001	0.00	0.981
Error	70	0.080264	0.001147		
Lack-of-Fit	17	0.040863	0.002404	3.23	0.001
Pure Error	53	0.039401	0.000743		
Total	97	0.149713			

รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

Model Summary					
	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)	
	0.0338620	46.39%	25.71%	0.00%	
Coded Coefficients					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		2.91012	0.00593	490.64	0.000
A	0.01665	0.00833	0.00438	1.90	0.062
B	-0.00441	-0.00221	0.00440	-0.50	0.618
C	-0.00837	-0.00418	0.00440	-0.95	0.345
D	-0.01359	-0.00680	0.00436	-1.56	0.123
E	-0.00939	-0.00470	0.00440	-1.07	0.289
F	-0.00930	-0.00465	0.00436	-1.07	0.290
A*A	0.0014	0.0007	0.0156	0.04	0.965
B*B	0.0310	0.0155	0.0174	0.89	0.376
C*C	-0.0118	-0.0059	0.0156	-0.38	0.707
D*D	-0.0467	-0.0233	0.0156	-1.49	0.140
E*E	0.0059	0.0030	0.0156	0.19	0.850
F*F	-0.0050	-0.0025	0.0156	-0.16	0.873
A*B	0.00937	0.00468	0.00455	1.03	0.307
A*C	0.01934	0.00967	0.00455	2.13	0.037
A*D	-0.00523	-0.00261	0.00455	-0.57	0.568
A*E	0.00528	0.00264	0.00455	0.58	0.563
A*F	0.00600	0.00300	0.00456	0.66	0.512
B*C	-0.01660	-0.00830	0.00455	-1.83	0.072
B*D	0.00718	0.00359	0.00456	0.79	0.433
B*E	-0.00242	-0.00121	0.00455	-0.27	0.791
B*F	-0.00727	-0.00364	0.00455	-0.80	0.427
C*D	0.00986	0.00493	0.00455	1.08	0.282
C*E	-0.05054	-0.02527	0.00455	-5.55	0.000
C*F	-0.00575	-0.00287	0.00458	-0.63	0.533
D*E	-0.00124	-0.00062	0.00455	-0.14	0.892
D*F	0.01473	0.00736	0.00455	1.62	0.110
E*F	-0.00022	-0.00011	0.00458	-0.02	0.981
Regression Equation in Uncoded Units					
Loss of Ignition = 3.14 - 0.0076 A - 0.0152 B + 0.0172 C + 0.0152 D - 0.0007 E - 0.0077 F + 0.000007 A*A + 0.00097 B*B - 0.000059 C*C - 0.001458 D*D + 0.000030 E*E - 0.000157 F*F + 0.000117 A*B + 0.000097 A*C - 0.000065 A*D + 0.000026 A*E + 0.000075 A*F - 0.000207 B*C + 0.000225 B*D - 0.000030 B*E - 0.000227 B*F + 0.000123 C*D - 0.000253 C*E - 0.000072 C*F - 0.000016 D*E + 0.000460 D*F - 0.000003 E*F					

รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณการสูญเสียหลังการเผา (ต่อ)

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณการสูญเสียหลังการเผาเบื้องต้น จะเป็นการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 46.39 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 25.71 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผาไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.11

Response Surface Regression: Loss of Ignition versus A, B, C, D, E, F

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.054458	0.007780	7.35	0.000
Linear	4	0.009228	0.002307	2.18	0.078
A	1	0.005224	0.005224	4.94	0.029
C	1	0.001444	0.001444	1.36	0.246
D	1	0.001989	0.001989	1.88	0.174
E	1	0.001764	0.001764	1.67	0.200
Square	1	0.004573	0.004573	4.32	0.041
D*D	1	0.004573	0.004573	4.32	0.041
2-Way Interaction	2	0.040330	0.020165	19.05	0.000
A*C	1	0.005314	0.005314	5.02	0.027
C*E	1	0.036928	0.036928	34.89	0.000
Error	90	0.095255	0.001058		
Lack-of-Fit	37	0.055854	0.001510	2.03	0.009
Pure Error	53	0.039401	0.000743		
Total	97	0.149713			

S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
0.0325328	36.38%	31.43%	22.53%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		2.91094	0.00542	536.86	0.000	
A	0.01846	0.00923	0.00416	2.22	0.029	1.01
C	-0.00974	-0.00487	0.00417	-1.17	0.246	1.02
D	-0.01134	-0.00567	0.00414	-1.37	0.174	1.00
E	-0.01076	-0.00538	0.00417	-1.29	0.200	1.02
D*D	-0.02844	-0.01422	0.00684	-2.08	0.041	1.01
A*C	0.01927	0.00963	0.00430	2.24	0.027	1.01
C*E	-0.05095	-0.02547	0.00431	-5.91	0.000	1.01

Regression Equation in Uncoded Units

Loss of Ignition = 2.393 - 0.00245 A + 0.01246 C + 0.00747 D + 0.00838 E
 - 0.000889 D*D + 0.000096 A*C - 0.000255 C*E

รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณการสูญเสียหลังการเผา โดย
 วิธีลดตัวแปรอิสระ

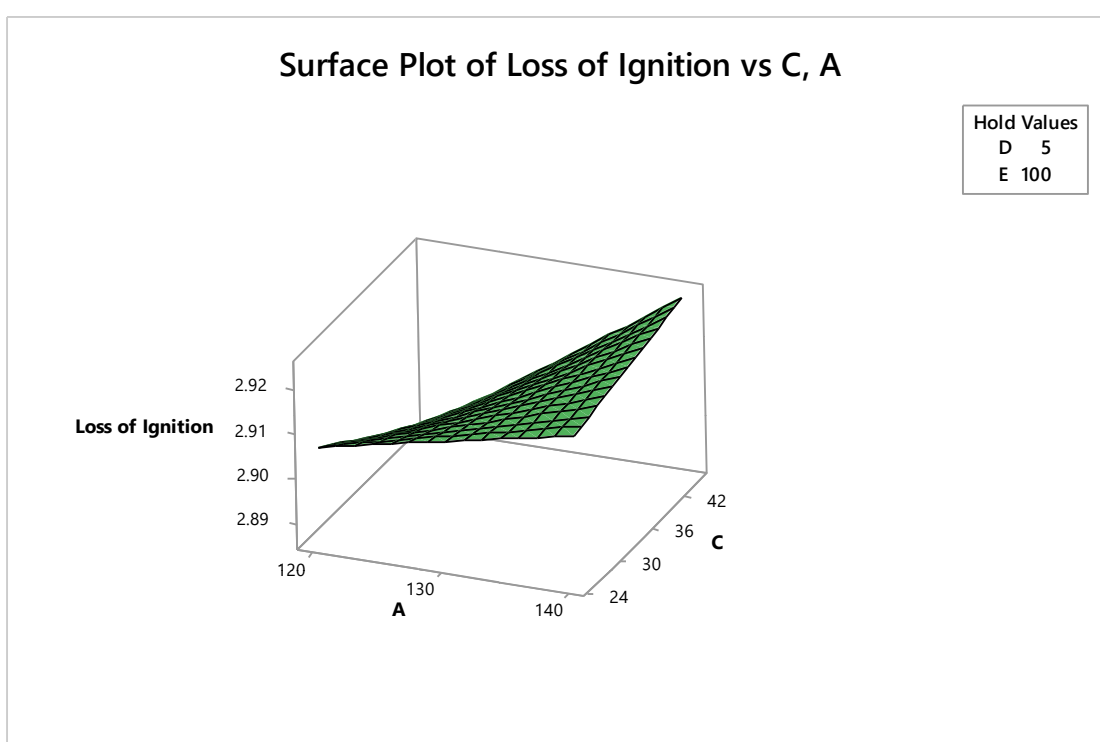
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ดังรูปที่ 4.11 พบว่า เทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผาที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 หรือเทอมของปัจจัยที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จะมีทั้งหมด 4 เทอม จากทั้งหมด 7 เทอม ซึ่งประกอบไปด้วยเทอมของผลกระทบหลัก (Main Effect Term) ได้แก่ A ส่วนเทอมกำลังสองของปัจจัย (Second Order Term) ได้แก่ D*D และเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Term) ได้แก่ A*C และ C*E โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผาสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.2 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 36.38 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 31.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีความมากกว่าค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$\begin{aligned} \text{Loss of Ignition} = & 2.393 - 0.00245A + 0.01246C + 0.00747D + 0.00838E - 0.000889D^2 \\ & + 0.000096AC - 0.000255CE \end{aligned} \quad (4.2)$$

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นว่าเทอมของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยส่งผลกระทบต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผา ทำให้สามารถใช้กราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย A, A*C และ C*E ไปพร้อมๆ กันได้ ส่วนเทอมปัจจัย D*D จะใช้กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์

โดยเริ่มจากเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง A และ C จะใช้กราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.12 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตั้งต้นของทรายจากระดับต่ำไปจนถึงระดับสูงจะทำให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผาที่มีค่าเพิ่มขึ้นทั้งในช่วงเวลาการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่ระดับต่ำและสูง เนื่องจากอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่สูงขึ้นจะทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนหลอมละลายจนระเหยไปและไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่อุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่ระดับต่ำ เมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาการปล่อยสารละลายเฮกซามีนจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผาที่มีค่าลดต่ำลง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำจะต้องการระยะเวลาในการทำให้ฟีนอลิกเรซินหลอมละลายจนหมดและไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง ซึ่งการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้อุณหภูมิตั้งต้นของทรายลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ฟีนอลิกเรซินที่เหลือบางส่วนยังไม่หลอมละลายและจะถูกกรองออกไปในขั้นตอนการกรองกากเรซินที่หลงเหลือ โดยวัตถุประสงค์ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผาจะประกอบไปด้วย ฟีนอลิกเรซิน เฮกซามีน และแคลเซียมสเตียเรท ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีฟีนอลิกเรซินบางส่วนที่ยังไม่หลอมละลายและถูกคัดกรองออกไปจากกระบวนการผสม จึงทำให้

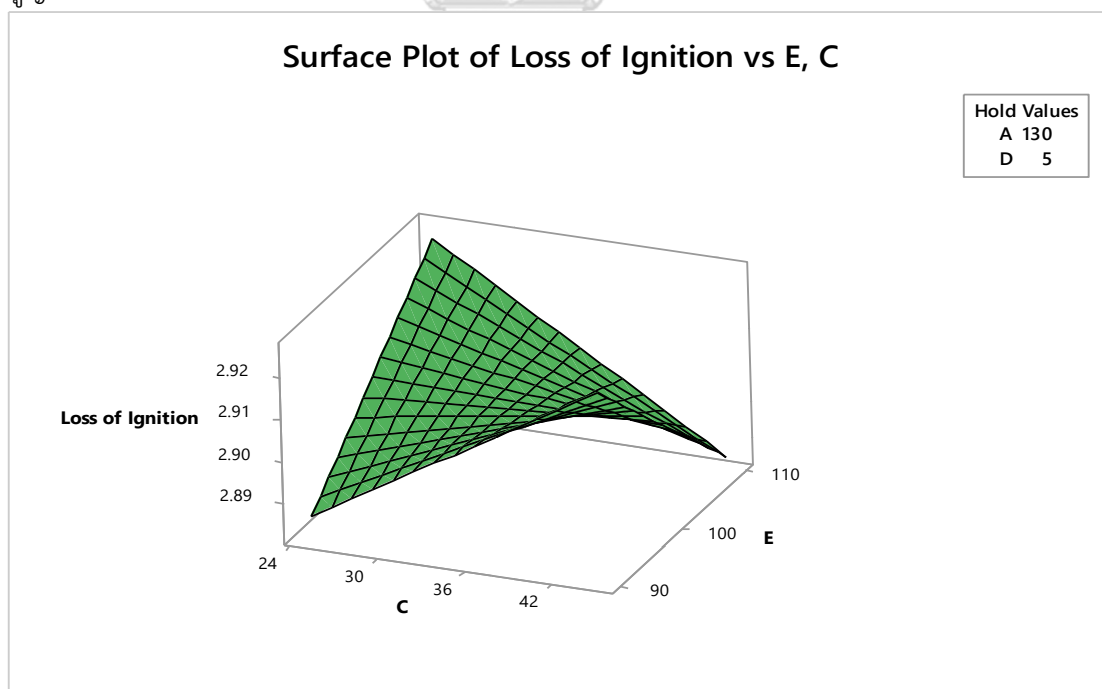
ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าสูงกว่าการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่เวลาระดับสูง เนื่องจากการปล่อยสารละลายเฮกซามีนช้า (ระดับสูง) จะทำให้อุณหภูมิตั้งต้นลดลงช้า ทำให้ฟีนอลิกเรซินมีระยะเวลาในการหลอมละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าลดลง ส่วนอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่ระดับสูง เมื่อทำการเปลี่ยนระยะเวลาการปล่อยสารละลายเฮกซามีนจากระดับต่ำไปสูงพบว่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิตั้งต้นที่สูงจะช่วยให้ฟีนอลิกเรซิน หลอมละลายจนหมดในเวลาอันสั้นและสามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง ดังนั้นไม่ว่าจะปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่เร็ว (ระดับต่ำ) หรือช้า (ระดับสูง) ก็จะส่งผลกระทบต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผา



รูปที่ 4.12 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง A และ C ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

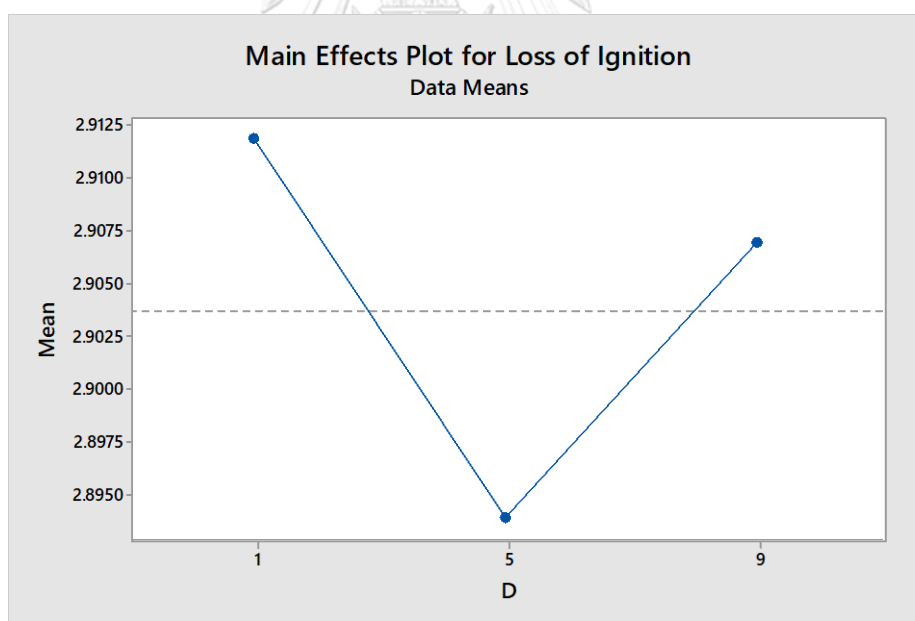
ในส่วนเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง C และ E จะใช้กราฟพื้นผิว (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.13 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่เวลาการปล่อยสารละลายเฮกซามีนเร็ว (ระดับต่ำ) การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผาเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปล่อยสารละลายเฮกซามีนเร็วจะช่วยหยุดการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหได้ไวยิ่งขึ้น ดังนั้นระยะเวลาในการเป่าอากาศที่ระดับต่ำจึงเพียงพอที่จะช่วยทำให้ทรายแตกตัวและหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ ทำให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าที่ต่ำ แต่การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเป่า

อากาศที่การปล่อยสารละลายเฮกซามีนเร็วจะทำให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาในการเป่าอากาศที่มากขึ้นจะทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนไปกระทบใบกวาด และหลุดออกจากเม็دتทราย ซึ่งฟีนอลิกเรซินในส่วนที่หลุดออกจะถูกกรองออกไปในขั้นตอนการกรองกากเรซินที่หลงเหลือทำให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าสูง ในทางกลับกันที่เวลาการปล่อยสารละลายเฮกซามีนช้า (ระดับสูง) การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าลดลง เนื่องจากการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่ช้าจะทำให้ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนและทำให้ทรายบางส่วนนั้นเริ่มจับตัวเป็นก้อน ซึ่งระยะเวลาการเป่าอากาศที่น้อย (ระดับต่ำ) จะไม่เพียงพอต่อการหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหและทำให้ทรายบางส่วนนั้นเกิดการจับตัวกันเป็นก้อน ซึ่งทรายที่จับตัวกันเป็นก้อนจะถูกคัดกรองออกไปโดยอาศัยการสั่นสะเทือน (Vibration Screen) โดยทรายในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยวัสดุที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผา นั่นคือ ฟีนอลิกเรซินและเฮกซามีน ซึ่งจะเห็นได้ว่าทรายที่จับตัวเป็นก้อนนี้จะถูกคัดกรองออกไปจากระบวนการผสม จึงทำให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับต่ำไปเป็นระดับสูงจะทำให้ระยะเวลาในการเป่าอากาศเพียงพอต่อการหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนและทำให้ทรายแตกตัว ส่งผลให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าที่ต่ำลง



รูปที่ 4.13 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ของทอมปัจจัยระหว่าง C และ E ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

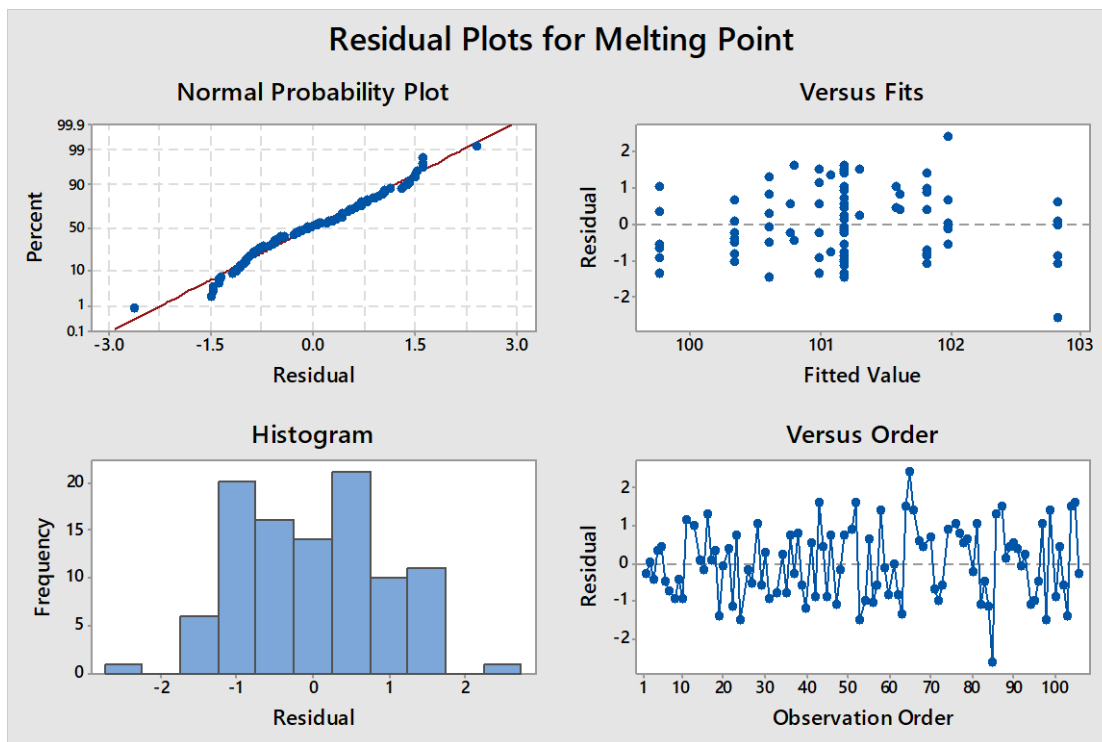
ในส่วนทอมกำลังสองของปัจจัย D*D จะใช้รูปที่ 4.14 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย D กับปริมาณการสูญเสียหลังการเผา จะมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งหงาย โดยช่วงระดับกลางของเวลาในการเริ่มเป่าอากาศจะทำให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับระดับต่ำและสูง โดยการเริ่มเป่าอากาศที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้การเคลื่อนตัวของฟिनอลิกเรซินกับเฮกซามีนบนเม็ดทรายบางส่วนยังเกิดการจัดเรียงโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์และไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ เนื่องจากการเริ่มเป่าอากาศที่รวดเร็วจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีนั้นเกิดการหยุดชะงักอย่างรวดเร็วจนทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นบนเม็ดทรายนั้นยังเกิดการจัดเรียงตัวที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าสูง ส่วนการเริ่มเป่าอากาศที่ช้า (ระดับสูง) จะทำให้การหยุดปฏิกิริยาระหว่างฟिनอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหเกิดขึ้นได้ช้า ซึ่งการเกิดโครงสร้างร่างแหในขณะกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจะทำให้ทรายบางส่วนเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนและถูกคัดกรองออกไปโดยอาศัยการสั่นสะเทือน (Vibration Screen) โดยทรายในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยวัสดุที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผา นั่นคือ ฟินอลิกเรซินและเฮกซามีน ซึ่งจะเห็นได้ว่าทรายที่จับตัวเป็นก้อนนี้จะถูกคัดกรองออกไปจากกระบวนการผสม จึงทำให้ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าสูง



รูปที่ 4.14 ผลกระทบหลักของปัจจัย D ที่ส่งผลต่อปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

4.4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

4.4.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)



รูปที่ 4.15 การกระจายตัวส่วนตกค้างของอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

จากรูปที่ 4.15 สามารถสรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ได้ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) จะสามารถดูได้จากกราฟ Normal Probability Plot ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่จัดเรียงตัวอยู่ตามแนวเส้นตรงและมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติเท่ากับ 0.066 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Fitted Value ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) รอบแนวแกนศูนย์และข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้มหรือรูปแบบที่คล้ายกรวยปากเปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่

3) จากกราฟ Histogram จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

4) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Observation Order ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัว

ของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือรูปร่างที่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.4.3.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

ภายหลังจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลองข้างต้น จากนั้นจะอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว โดยจะทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.16

Response Surface Regression: Melting Point versus A, B, C, D, E, F					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	27	79.974	2.9620	3.70	0.000
Linear	6	41.912	6.9854	8.73	0.000
A	1	22.656	22.6560	28.31	0.000
B	1	0.099	0.0992	0.12	0.726
C	1	8.138	8.1385	10.17	0.002
D	1	1.134	1.1337	1.42	0.238
E	1	2.470	2.4701	3.09	0.083
F	1	6.876	6.8761	8.59	0.005
Square	6	5.825	0.9709	1.21	0.310
A*A	1	0.877	0.8766	1.10	0.299
B*B	1	0.002	0.0021	0.00	0.959
C*C	1	0.250	0.2496	0.31	0.578
D*D	1	1.422	1.4225	1.78	0.187
E*E	1	2.655	2.6549	3.32	0.073
F*F	1	1.210	1.2101	1.51	0.223
2-Way Interaction	15	26.815	1.7876	2.23	0.012
A*B	1	2.131	2.1306	2.66	0.107
A*C	1	4.251	4.2508	5.31	0.024
A*D	1	3.123	3.1226	3.90	0.052
A*E	1	4.276	4.2758	5.34	0.024
A*F	1	0.169	0.1689	0.21	0.647
B*C	1	1.179	1.1785	1.47	0.229
B*D	1	0.428	0.4279	0.53	0.467
B*E	1	1.503	1.5034	1.88	0.175
B*F	1	0.017	0.0174	0.02	0.883
C*D	1	1.615	1.6148	2.02	0.160
C*E	1	2.372	2.3724	2.96	0.089
C*F	1	0.719	0.7193	0.90	0.346
D*E	1	2.359	2.3591	2.95	0.090
D*F	1	2.608	2.6083	3.26	0.075
E*F	1	0.836	0.8356	1.04	0.310
Error	72	57.615	0.8002		
Lack-of-Fit	17	20.735	1.2197	1.82	0.049
Pure Error	55	36.881	0.6706		
Total	99	137.589			

รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0.894545	58.13%	42.42%	19.28%		
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	
Constant		101.276	0.155	655.04	0.000	
A	-1.224	-0.612	0.115	-5.32	0.000	
B	0.081	0.041	0.115	0.35	0.726	
C	0.731	0.365	0.115	3.19	0.002	
D	0.273	0.136	0.115	1.19	0.238	
E	-0.403	-0.201	0.115	-1.76	0.083	
F	0.672	0.336	0.115	2.93	0.005	
A*A	0.858	0.429	0.410	1.05	0.299	
B*B	-0.042	-0.021	0.410	-0.05	0.959	
C*C	0.458	0.229	0.410	0.56	0.578	
D*D	-1.092	-0.546	0.410	-1.33	0.187	
E*E	-1.492	-0.746	0.410	-1.82	0.073	
F*F	1.008	0.504	0.410	1.23	0.223	
A*B	0.387	0.193	0.118	1.63	0.107	
A*C	0.546	0.273	0.118	2.30	0.024	
A*D	-0.470	-0.235	0.119	-1.98	0.052	
A*E	0.546	0.273	0.118	2.31	0.024	
A*F	-0.108	-0.054	0.118	-0.46	0.647	
B*C	-0.286	-0.143	0.118	-1.21	0.229	
B*D	0.174	0.087	0.119	0.73	0.467	
B*E	-0.324	-0.162	0.118	-1.37	0.175	
B*F	0.035	0.017	0.118	0.15	0.883	
C*D	-0.335	-0.168	0.118	-1.42	0.160	
C*E	-0.408	-0.204	0.118	-1.72	0.089	
C*F	-0.225	-0.112	0.118	-0.95	0.346	
D*E	-0.405	-0.203	0.118	-1.72	0.090	
D*F	-0.426	-0.213	0.118	-1.81	0.075	
E*F	-0.242	-0.121	0.118	-1.02	0.310	
Regression Equation in Uncoded Units						
$\text{Melting Point} = 141.0 - 1.53 A - 0.108 B - 0.222 C + 1.833 D + 1.250 E + 0.408 F + 0.00429 A^2 - 0.0013 B^2 + 0.00229 C^2 - 0.0341 D^2 - 0.00746 E^2 + 0.0315 F^2 + 0.00483 AB + 0.00273 AC - 0.00588 AD + 0.00273 AE - 0.00136 AF - 0.00357 BC + 0.00544 BD - 0.00404 BE + 0.00109 BF - 0.00419 CD - 0.00204 CE - 0.00281 CF - 0.00507 DE - 0.01332 DF - 0.00303 EF$						

รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว
(ต่อ)

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวเบื้องต้น จะเป็นการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 58.13 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 42.42 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.17

Response Surface Regression: Melting Point versus A, B, C, D, E, F					
Backward Elimination of Terms					
α to remove = 0.05					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	50.609	10.1217	10.94	0.000
Linear	4	45.851	11.4628	12.39	0.000
A	1	24.849	24.8488	26.85	0.000
C	1	10.173	10.1732	10.99	0.001
E	1	1.724	1.7242	1.86	0.176
F	1	9.315	9.3148	10.07	0.002
2-Way Interaction	1	4.166	4.1665	4.50	0.036
A*E	1	4.166	4.1665	4.50	0.036
Error	94	86.981	0.9253		
Lack-of-Fit	39	50.100	1.2846	1.92	0.013
Pure Error	55	36.881	0.6706		
Total	99	137.589			
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0.961938	36.78%	33.42%	28.72%	
Coded Coefficients					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		101.170	0.096	1049.80	0.000
A	-1.260	-0.630	0.122	-5.18	0.000
C	0.805	0.403	0.121	3.32	0.001
E	-0.332	-0.166	0.122	-1.37	0.176
F	0.770	0.385	0.121	3.17	0.002
A*E	0.533	0.267	0.126	2.12	0.036
Regression Equation in Uncoded Units					
Melting Point = 143.8 - 0.330 A + 0.0403 C - 0.363 E + 0.0963 F + 0.00267 A*E					

รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว โดยวิธีลดตัวแปรอิสระ

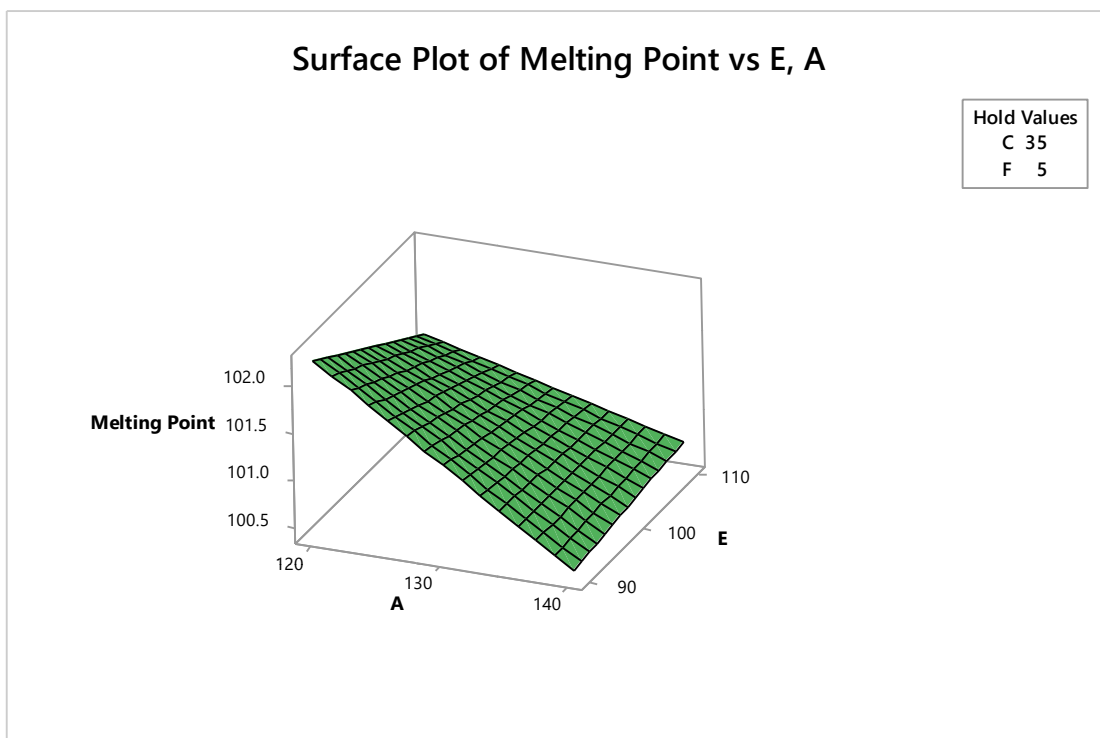
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ดังรูปที่ 4.17 พบว่า เทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวที่ระดับนัยสำคัญ เท่ากับ 0.05 หรือเทอมของปัจจัยที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จะมีทั้งหมด 4 เทอม จากทั้งหมด 5 เทอม ซึ่งประกอบไปด้วยเทอมของผลกระทบหลัก (Main Effect Term) ได้แก่ A, C และ F และ เทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Term) ได้แก่ A*E โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.3 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 36.78 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 33.42 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่าน้อยกว่าค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$\text{Melting Point} = 143.8 - 0.330 A + 0.0403 C - 0.363 E + 0.0963 F + 0.00267 A^*E \quad (4.3)$$

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นว่าเทอมของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ทำให้สามารถใช้กราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย A และ A*E ไปพร้อมๆ กันได้ ส่วนเทอมปัจจัย C และ F จะใช้กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์

โดยเริ่มจากเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง A และ E จะใช้กราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.18 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตั้งต้นของทรายจากระดับต่ำไปจนถึงระดับสูงจะทำให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าต่ำลงทั้งในช่วงระยะเวลาการเป่าอากาศที่ระดับต่ำและระดับสูง เนื่องจากอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่สูงขึ้นจะทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนหลอมละลายจนระเหยไปและไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ ซึ่งการเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินที่ไม่ดีจะทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นไม่แข็งแรงและทำให้ทรายเคลือบเรซินเกิดการเซตตัวที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าต่ำ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่อุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่ระดับต่ำ เมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับต่ำไปสูง จะทำให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าต่ำลง เนื่องจากที่อุณหภูมิระดับต่ำจะสามารถหยุดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการเกิดโครงสร้างร่างแหในขั้นตอนการผสมจะทำให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าต่ำ ดังนั้นการใช้ระยะเวลาในการเป่าอากาศที่ระดับต่ำจึงเพียงพอต่อการหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าสูง ส่วนระยะเวลาการเป่าอากาศที่มากจนเกินไปจะทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนนั้นไปกระทบกับใบกวาดและหลุดออกจากเม็ดทราย ซึ่งการเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินที่ไม่ดีจะทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นไม่แข็งแรงและทำให้ทรายเคลือบเรซินเกิดการเซตตัวที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าต่ำ ส่งผลให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

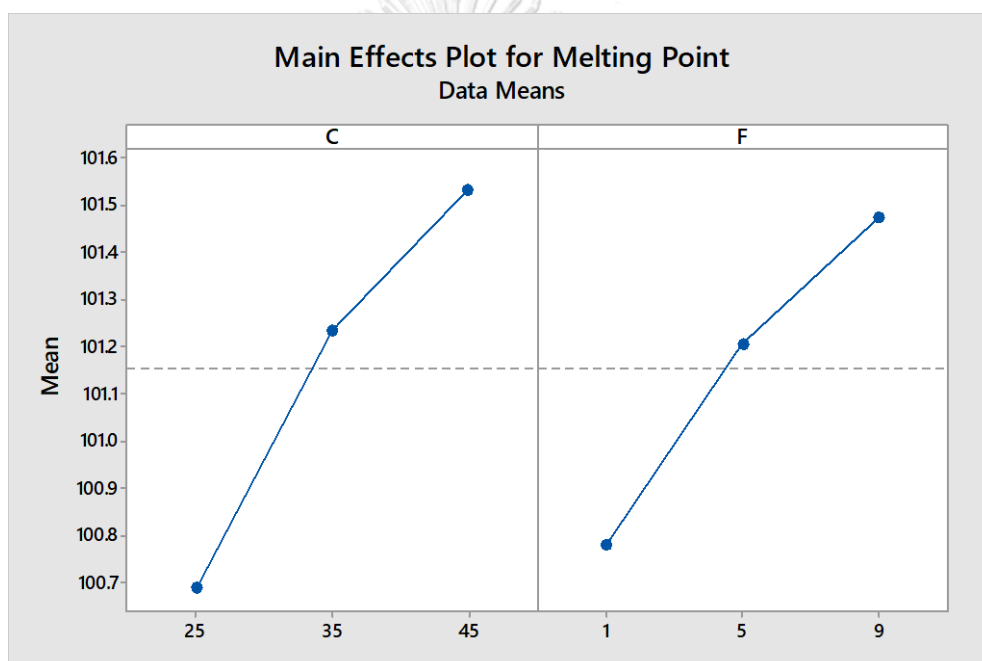
มีค่าต่ำ ในส่วนของอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่ระดับสูง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาในการเป่าอากาศที่ระดับต่ำจะไม่เพียงพอต่อการหยุดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห (Cross-Links) ส่วนการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการเป่าอากาศจะทำให้เพียงพอต่อการหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.18 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง A และ E ที่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

ในส่วนเทอมผลกระทบหลักของปัจจัย C จะใช้รูปที่ 4.19 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อเวลาในการปล่อยสารละลายเฮกซามีนมีค่าเพิ่มขึ้นจากระดับต่ำไประดับสูง เนื่องจากเวลาการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้อุณหภูมิตั้งต้นของทรายนลดลงในขณะที่ฟีนอลิกเรซินที่เหลือบางส่วนยังไม่ไปเคลือบเม็ดทราย ส่วนเวลาในการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่ช้า (ระดับสูง) จะช่วยให้ฟีนอลิกเรซินมีระยะเวลาในการหลอมละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้น โดยฟีนอลิกเรซินถือเป็นวัตถุดิบสำคัญที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่ออุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ดังนั้นการเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินบนเม็ดทรายที่ดีจึงทำให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าสูง

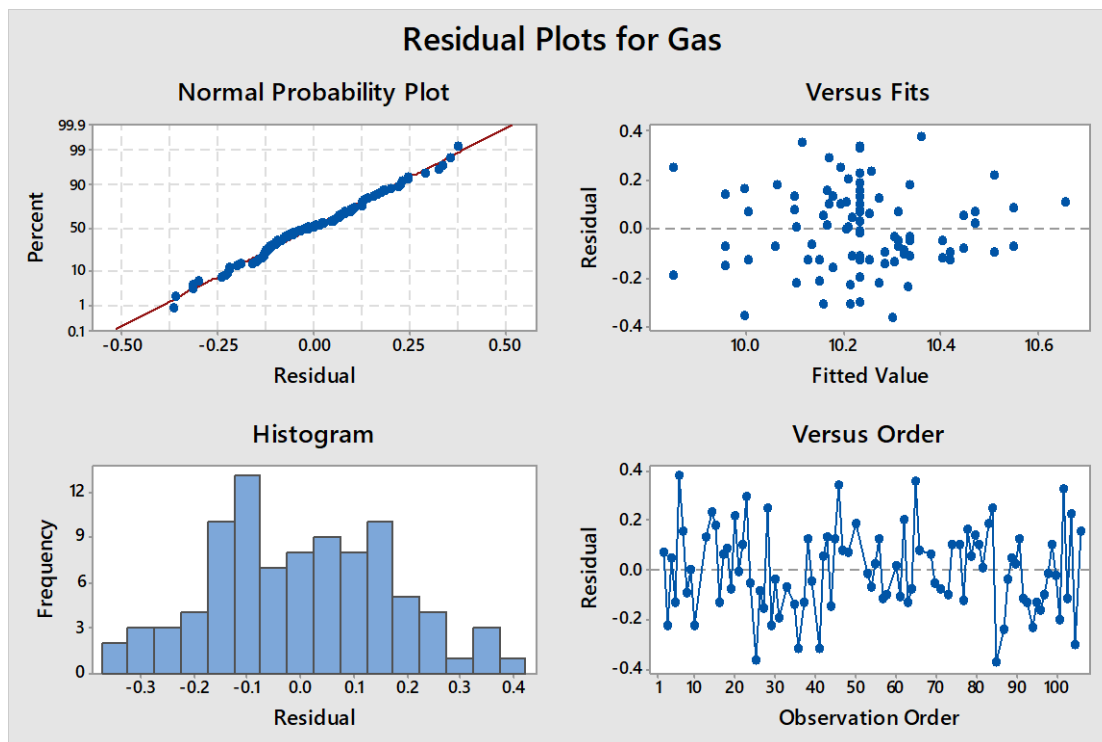
เทอมผลกระทบหลักของปัจจัย F จะใช้รูปที่ 4.19 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทมีค่าเพิ่มขึ้นจากระดับต่ำไปสูง เนื่องจากเวลาการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้แคลเซียมสเตียเรทที่มีลักษณะเป็นผงเกิดการฟุ้งกระจายได้ง่าย ซึ่งเกิดจากลมที่ตักค้ำจากขั้นตอนการเป่าอากาศก่อนหน้านั้น ทำให้แคลเซียมสเตียเรทบางส่วนยังไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ส่งผลให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าต่ำ โดยแคลเซียมสเตียเรทจะช่วยให้ทรายนั่นแตกตัวและทำให้ทรายเคลือบเรซินที่นำไปทำขึ้นทดสอบเกิดการจัดเรียงโครงสร้างที่ดีมากยิ่งขึ้น ซึ่งเวลาการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทที่ช้า (ระดับสูง) จะช่วยให้แคลเซียมสเตียเรทสามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าสูง



รูปที่ 4.19 ผลกระทบหลักของปัจจัย C และ F ที่ส่งผลต่ออุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

4.4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองของค่าแก๊ส

4.4.4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)



รูปที่ 4.20 การกระจายตัวส่วนตกค้างของค่าแก๊ส

จากรูปที่ 4.20 สามารถสรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของแก๊ส ได้ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) จะสามารถดูได้จากกราฟ Normal Probability Plot ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่จัดเรียงตัวอยู่ตามแนวเส้นตรงและมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติเท่ากับ 0.551 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Fitted Value ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) รอบแนวแกนศูนย์และข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้มหรือรูปแบบที่คล้ายกรวยปากเปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่

3) จากกราฟ Histogram จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

4) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Observation Order ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัว

ของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือรูปร่างที่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.4.4.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าแก๊ส

ภายหลังจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลองข้างต้น จากนั้นจะอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่อค่าแก๊ส โดยจะทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.21

Response Surface Regression: Gas versus A, B, C, D, E, F					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	27	2.38215	0.088228	2.68	0.001
Linear	6	1.58472	0.264119	8.01	0.000
A	1	0.58653	0.586530	17.79	0.000
B	1	0.29586	0.295865	8.97	0.004
C	1	0.01627	0.016274	0.49	0.485
D	1	0.58540	0.585403	17.75	0.000
E	1	0.01346	0.013464	0.41	0.525
F	1	0.18522	0.185224	5.62	0.021
Square	6	0.09727	0.016211	0.49	0.812
A*A	1	0.00020	0.000200	0.01	0.938
B*B	1	0.00329	0.003287	0.10	0.753
C*C	1	0.06474	0.064745	1.96	0.166
D*D	1	0.00012	0.000119	0.00	0.952
E*E	1	0.02431	0.024315	0.74	0.394
F*F	1	0.00094	0.000937	0.03	0.867
2-Way Interaction	15	0.62119	0.041413	1.26	0.257
A*B	1	0.05227	0.052266	1.58	0.213
A*C	1	0.03831	0.038313	1.16	0.285
A*D	1	0.00159	0.001587	0.05	0.827
A*E	1	0.18619	0.186188	5.65	0.021
A*F	1	0.00220	0.002196	0.07	0.797
B*C	1	0.06990	0.069896	2.12	0.150
B*D	1	0.00385	0.003853	0.12	0.734
B*E	1	0.00058	0.000578	0.02	0.895
B*F	1	0.00010	0.000096	0.00	0.957
C*D	1	0.01930	0.019304	0.59	0.447
C*E	1	0.02773	0.027725	0.84	0.363
C*F	1	0.08258	0.082575	2.50	0.119
D*E	1	0.05735	0.057348	1.74	0.192
D*F	1	0.00173	0.001727	0.05	0.820
E*F	1	0.02006	0.020062	0.61	0.438
Error	63	2.07766	0.032979		
Lack-of-Fit	17	0.89446	0.052615	2.05	0.028
Pure Error	46	1.18320	0.025722		
Total	90	4.45981			

รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าแก๊ส

Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0.181600	53.41%	33.45%	0.00%	
Coded Coefficients					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		10.2127	0.0340	300.12	0.000
A	0.2066	0.1033	0.0245	4.22	0.000
B	-0.1442	-0.0721	0.0241	-3.00	0.004
C	0.0338	0.0169	0.0241	0.70	0.485
D	-0.2059	-0.1030	0.0244	-4.21	0.000
E	0.0305	0.0153	0.0239	0.64	0.525
F	0.1146	0.0573	0.0242	2.37	0.021
A*A	-0.017	-0.009	0.110	-0.08	0.938
B*B	-0.0538	-0.0269	0.0852	-0.32	0.753
C*C	0.2387	0.1194	0.0852	1.40	0.166
D*D	0.0114	0.0057	0.0952	0.06	0.952
E*E	-0.1463	-0.0731	0.0852	-0.86	0.394
F*F	0.0287	0.0144	0.0852	0.17	0.867
A*B	-0.0641	-0.0320	0.0254	-1.26	0.213
A*C	-0.0551	-0.0275	0.0256	-1.08	0.285
A*D	-0.0112	-0.0056	0.0254	-0.22	0.827
A*E	0.1209	0.0605	0.0254	2.38	0.021
A*F	-0.0131	-0.0066	0.0254	-0.26	0.797
B*C	-0.0741	-0.0370	0.0254	-1.46	0.150
B*D	0.0174	0.0087	0.0255	0.34	0.734
B*E	0.0068	0.0034	0.0256	0.13	0.895
B*F	0.0027	0.0014	0.0255	0.05	0.957
C*D	-0.0389	-0.0195	0.0254	-0.77	0.447
C*E	-0.0467	-0.0233	0.0254	-0.92	0.363
C*F	-0.0805	-0.0403	0.0254	-1.58	0.119
D*E	-0.0674	-0.0337	0.0256	-1.32	0.192
D*F	0.0117	0.0058	0.0255	0.23	0.820
E*F	-0.0399	-0.0199	0.0256	-0.78	0.438
Regression Equation in Uncoded Units					
$\text{Gas} = 5.5 - 0.013 A + 0.124 B - 0.0106 C + 0.086 D + 0.084 E + 0.110 F - 0.00009 A*A - 0.00168 B*B + 0.001194 C*C + 0.00036 D*D - 0.000731 E*E + 0.00090 F*F - 0.000801 A*B - 0.000275 A*C - 0.000140 A*D + 0.000605 A*E - 0.000164 A*F - 0.000926 B*C + 0.00054 B*D + 0.000085 B*E + 0.00009 B*F - 0.000487 C*D - 0.000233 C*E - 0.001007 C*F - 0.000842 D*E + 0.00036 D*F - 0.000498 E*F$					

รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าแก๊ส (ต่อ)

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับแก๊สเบื้องต้น จะเป็นการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 53.41 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 33.45 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อแก๊สไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.22

Response Surface Regression: Gas versus A, B, C, D, E, F

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	1.94094	0.32349	10.79	0.000
Linear	5	1.58882	0.31776	10.60	0.000
A	1	0.53946	0.53946	17.99	0.000
B	1	0.30708	0.30708	10.24	0.002
D	1	0.62902	0.62902	20.98	0.000
E	1	0.02487	0.02487	0.83	0.365
F	1	0.16861	0.16861	5.62	0.020
2-Way Interaction	1	0.28993	0.28993	9.67	0.003
A*E	1	0.28993	0.28993	9.67	0.003
Error	84	2.51887	0.02999		
Lack-of-Fit	38	1.33567	0.03515	1.37	0.155
Pure Error	46	1.18320	0.02572		
Total	90	4.45981			

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.173166	43.52%	39.49%	33.25%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		10.2330	0.0182	562.74	0.000
A	0.1959	0.0980	0.0231	4.24	0.000
B	-0.1451	-0.0725	0.0227	-3.20	0.002
D	-0.2103	-0.1051	0.0230	-4.58	0.000
E	0.0412	0.0206	0.0226	0.91	0.365
F	0.1078	0.0539	0.0227	2.37	0.020
A*E	0.1455	0.0728	0.0234	3.11	0.003

Regression Equation in Uncoded Units

Gas = 18.37 - 0.0630 A - 0.01814 B - 0.02629 D - 0.0925 E + 0.01347 F + 0.000728 A*E

รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าแก๊ส โดยวิธีลดตัวแปรอิสระ

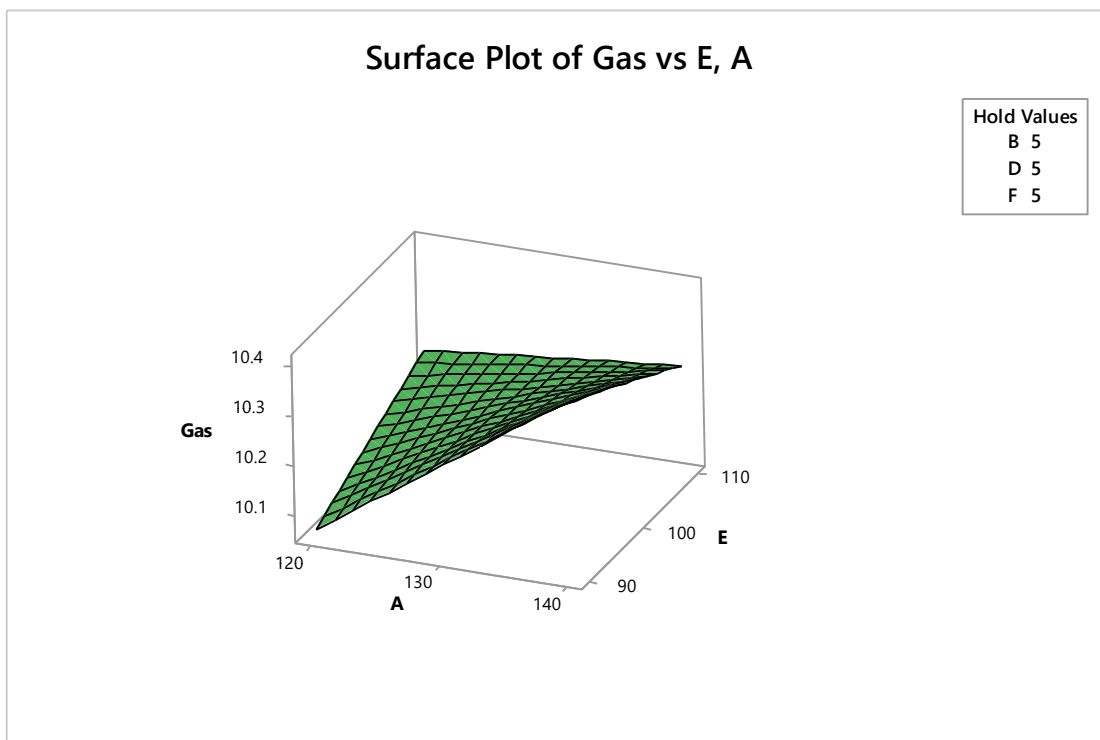
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ดังรูปที่ 4.22 พบว่า เทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแก๊สที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 หรือเทอมของปัจจัยที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จะมีทั้งหมด 5 เทอม จากทั้งหมด 6 เทอม ซึ่งประกอบไปด้วย เทอมของผลกระทบหลัก (Main Effect Term) ได้แก่ A, B, D และ F และเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Term) ได้แก่ A*E โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแก๊สที่ระดับนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.4 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 43.52 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 39.49 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่ามากกว่าค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$\begin{aligned} \text{Gas} = & 18.37 - 0.0630 A - 0.01814 B - 0.02629 D - 0.0925 E + 0.01347 F \\ & + 0.000728 A*E \end{aligned} \quad (4.4)$$

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นว่าเทอมของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยส่งผลกระทบต่อค่าแก๊ส ทำให้สามารถใช้กราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย A และ A*E ไปพร้อมๆกันได้ ส่วนเทอมปัจจัย B, D และ F จะใช้กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์

โดยเริ่มจากเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง A และ E จะใช้กราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.23 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตั้งต้นของทรายจากระดับต่ำไปจนถึงระดับสูงจะทำให้แก๊สมีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้งในช่วงระยะเวลาการเป่าอากาศที่ระดับต่ำและระดับสูง เนื่องจากอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่สูงขึ้นจะทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนหลอมละลายจนระเหยไปและไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ ซึ่งการเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินที่ไม่ดีจะทำให้เกิดแก๊สในชิ้นงานสูงและส่งผลให้เกิดปัญหาการพ่นในชิ้นงานตามมา ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่อุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่ระดับต่ำ เมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับต่ำไปสูง จะทำให้แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำจะสามารถหยุดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาข้างต้นจะทำให้ง่ายต่อการเกิดแก๊สในชิ้นงาน ดังนั้นระยะเวลาในการเป่าอากาศที่ระดับต่ำจึงเพียงพอต่อการหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่งผลให้แก๊สมีค่าต่ำ ส่วนระยะเวลาการเป่าอากาศที่มากจนเกินไปจะทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนไปกระทบกับใบกวาดและหลุดออกจากเม็ดทราย ส่งผลให้แก๊สมีค่าสูงขึ้น ในส่วนของอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่ระดับสูง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้แก๊สมีค่าลดลง เนื่องจากระยะเวลาในการเป่าอากาศที่ระดับต่ำจะไม่เพียงพอต่อการหยุดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิด

เป็นโครงสร้างร่างแหส่วนการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการเป่าอากาศจะทำให้เพียงพอต่อการหยุดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่งผลให้แก๊สมีค่าต่ำลง

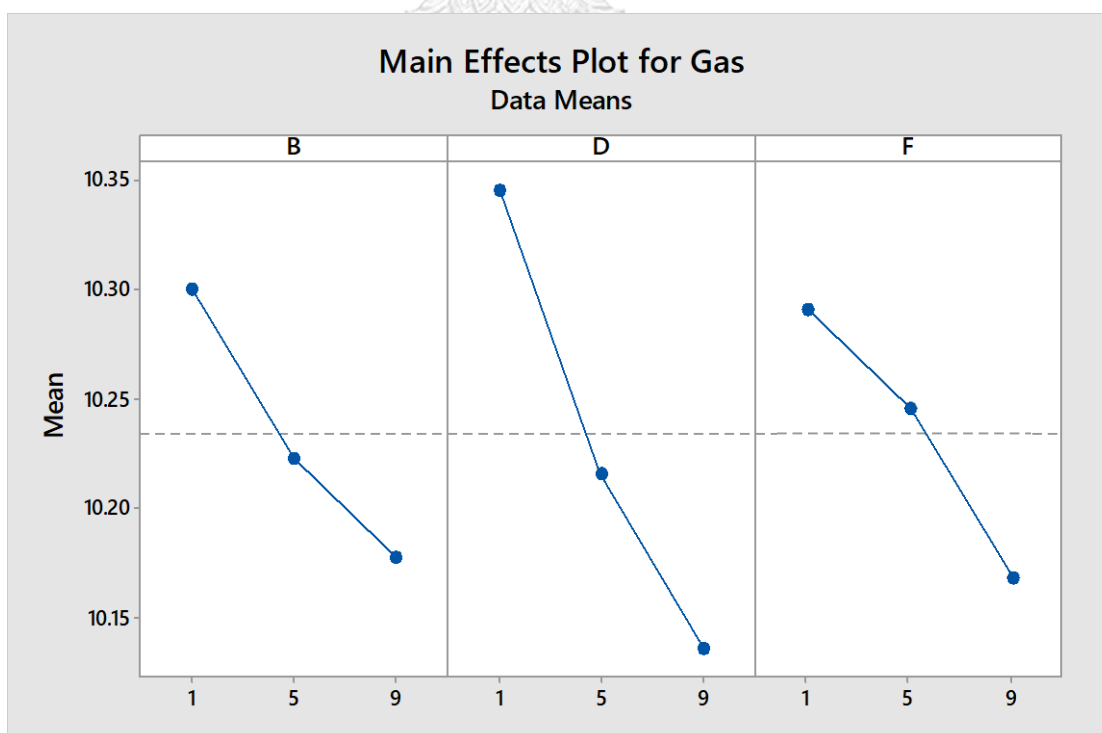


รูปที่ 4.23 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง A และ E ที่ส่งผลกระทบต่อค่าแก๊ส

ในส่วนเทอมผลกระทบหลัก B, D และ F จะใช้รูปที่ 4.24 ในการอธิบายความสัมพันธ์ โดยเริ่มจากเทอมผลกระทบหลักของปัจจัย B จะเห็นได้ว่าแก๊สจะมีค่าลดลง เมื่อเวลาในการปล่อยฟีนอลิกเรซินมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาการปล่อยฟีนอลิกเรซินที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะเป็นช่วงเวลาเดียวกันกับการปล่อยทรายเข้าสู่ถังผสม ทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนยังไม่สามารถไปเคลือบทรายบางส่วนที่ถูกปล่อยลงมาจากหลัง ซึ่งการเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินบนเม็ดทรายที่ไม่ดีจะทำให้เกิดแก๊สในชั้นงานสูงส่งผลให้เกิดปัญหา รุพ รุน ตามมา ส่วนที่เวลาการปล่อยฟีนอลิกเรซินที่ช้า (ระดับสูง) จะทำให้อุณหภูมิตั้งต้นของทรายลดลง ส่งผลให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนไม่สามารถละลายได้และจะถูกคัดกรองออกไปในขั้นตอนการกรองกากเรซิน จึงเหลือปริมาณฟีนอลิกเรซินที่น้อยซึ่งจะทำให้การเกิดแก๊สในชั้นงานมีปริมาณที่น้อยตามไปด้วย ซึ่งปริมาณฟีนอลิกเรซินที่มากจะทำให้ง่ายต่อการเกิดแก๊ส ดังนั้นเวลาการปล่อยฟีนอลิกเรซินที่ระดับสูงจึงทำให้แก๊สมีค่าต่ำ

เทอมผลกระทบหลักของปัจจัย D จะใช้รูปที่ 4.24 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแก๊สจะมีค่าลดลง เมื่อเวลาในการเริ่มเป่าอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจากระดับต่ำไปสูง เนื่องจากการเริ่มเป่าอากาศที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้การเคลื่อนตัวของฟिनอลิกเรซินกับเฮกซามีนบนเม็ดทรายนั้นเกิดการจัดเรียงโครงสร้างที่ยังไม่สมบูรณ์เพราะปฏิกิริยาทางเคมีนั้นเกิดการหยุดชะงักอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเกิดโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้การเกิดแก๊สภายในชิ้นงานเป็นไปได้ง่ายจึงทำให้แก๊สมีค่าสูง ส่วนการเริ่มเป่าอากาศที่ช้า (ระดับสูง) จะทำให้ฟिनอลิกเรซินและเฮกซามีนมีระยะเวลาในการผสมที่มากขึ้นส่งผลให้การจัดเรียงโครงสร้างที่เกิดขึ้นนั้นมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งการจัดเรียงโครงสร้างที่ดีจะทำให้แก๊สที่เกิดขึ้นในชิ้นงานนั้นมีค่าต่ำ

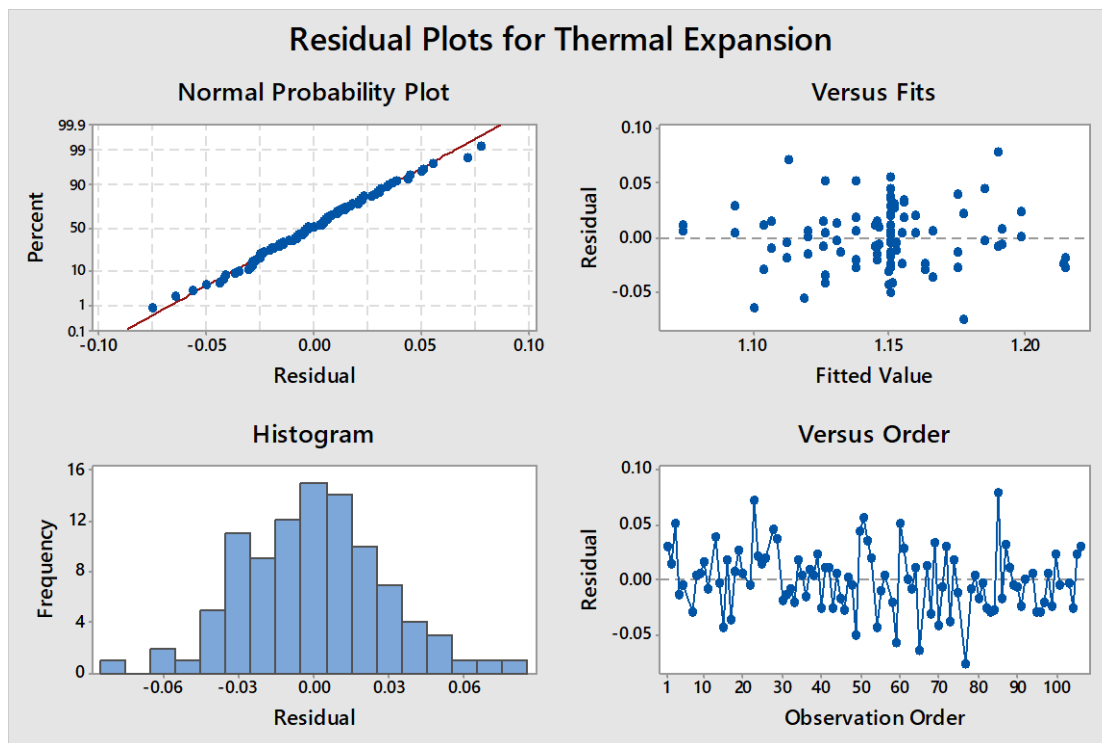
เทอมผลกระทบหลักของปัจจัย F จะใช้รูปที่ 4.24 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าแก๊สจะมีค่าลดลง เมื่อเวลาในการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเวลาการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้แคลเซียมสเตียเรทที่มีลักษณะเป็นผงเกิดการฟุ้งกระจายได้ง่าย ซึ่งเกิดจากลมที่ตักค้างจากขั้นตอนการเป่าอากาศก่อนหน้านี้ ทำให้แคลเซียมสเตียเรทบางส่วนยังไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ส่งผลให้แก๊สมีค่าสูง โดยแคลเซียมสเตียเรทจะช่วยให้ทรายนั้นแตกตัวและทำให้ทรายเคลื่อนเรซินที่นำไปทำขึ้นทดสอบเกิดการจัดเรียงโครงสร้างที่ดีมากยิ่งขึ้น ซึ่งเวลาการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทที่ช้า (ระดับสูง) จะช่วยให้แคลเซียมสเตียเรทนั้นสามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้นส่งผลให้แก๊สมีค่าต่ำลง



รูปที่ 4.24 ผลกระทบหลักของปัจจัย B, D และ F ที่ส่งผลต่อค่าแก๊ส

4.4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองของการขยายตัวทางความร้อน

4.4.5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)



รูปที่ 4.25 การกระจายตัวส่วนตกค้างของการขยายตัวทางความร้อน

จากรูปที่ 4.25 สามารถสรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของการขยายตัวทางความร้อน ได้ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) จะสามารถดูได้จากกราฟ Normal Probability Plot ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่จัดเรียงตัวอยู่ตามแนวเส้นตรงและมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติเท่ากับ 0.924 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Fitted Value ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) รอบแนวแกนศูนย์และข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้มหรือรูปแบบที่คล้ายกรวยปากเปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่

3) จากกราฟ Histogram จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

4) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Observation Order ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัว

ของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือรูปร่างที่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.4.5.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับการขยายตัวทางความร้อน

ภายหลังจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลองข้างต้น จากนั้นจะอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่อ การขยายตัวทางความร้อน โดยจะทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.26

Response Surface Regression: Thermal Expansion versus A, B, C, D, E, F						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	27	0.085215	0.003156	3.43	0.000	
Linear	6	0.032250	0.005375	5.85	0.000	
A	1	0.001249	0.001249	1.36	0.248	
B	1	0.000695	0.000695	0.76	0.388	
C	1	0.001103	0.001103	1.20	0.277	
D	1	0.003225	0.003225	3.51	0.065	
E	1	0.014119	0.014119	15.35	0.000	
F	1	0.008215	0.008215	8.93	0.004	
Square	6	0.025986	0.004331	4.71	0.000	
A*A	1	0.000159	0.000159	0.17	0.679	
B*B	1	0.000020	0.000020	0.02	0.883	
C*C	1	0.000010	0.000010	0.01	0.919	
D*D	1	0.013262	0.013262	14.42	0.000	
E*E	1	0.016479	0.016479	17.92	0.000	
F*F	1	0.000980	0.000980	1.07	0.306	
2-Way Interaction	15	0.028427	0.001895	2.06	0.023	
A*B	1	0.000002	0.000002	0.00	0.961	
A*C	1	0.000016	0.000016	0.02	0.896	
A*D	1	0.002844	0.002844	3.09	0.083	
A*E	1	0.013624	0.013624	14.82	0.000	
A*F	1	0.000692	0.000692	0.75	0.389	
B*C	1	0.000719	0.000719	0.78	0.379	
B*D	1	0.003919	0.003919	4.26	0.043	
B*E	1	0.000271	0.000271	0.29	0.589	
B*F	1	0.000119	0.000119	0.13	0.720	
C*D	1	0.007982	0.007982	8.68	0.004	
C*E	1	0.000040	0.000040	0.04	0.835	
C*F	1	0.003251	0.003251	3.54	0.064	
D*E	1	0.000038	0.000038	0.04	0.840	
D*F	1	0.001126	0.001126	1.22	0.272	
E*F	1	0.000339	0.000339	0.37	0.546	
Error	69	0.063447	0.000920			
Lack-of-Fit	17	0.026533	0.001561	2.20	0.015	
Pure Error	52	0.036914	0.000710			
Total	96	0.148661				

รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับการขยายตัวทางความร้อน

Model Summary					
	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)	
	0.0303236	57.32%	40.62%	0.00%	
Coded Coefficients					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		1.15121	0.00531	216.71	0.000
A	0.00919	0.00459	0.00394	1.17	0.248
B	0.00687	0.00343	0.00395	0.87	0.388
C	0.00865	0.00433	0.00395	1.10	0.277
D	0.01486	0.00743	0.00397	1.87	0.065
E	0.03090	0.01545	0.00394	3.92	0.000
F	-0.02361	-0.01181	0.00395	-2.99	0.004
A*A	0.0116	0.0058	0.0140	0.42	0.679
B*B	0.0041	0.0021	0.0140	0.15	0.883
C*C	-0.0029	-0.0014	0.0140	-0.10	0.919
D*D	0.1186	0.0593	0.0156	3.80	0.000
E*E	-0.1184	-0.0592	0.0140	-4.23	0.000
F*F	-0.0289	-0.0144	0.0140	-1.03	0.306
A*B	-0.00041	-0.00021	0.00415	-0.05	0.961
A*C	-0.00108	-0.00054	0.00414	-0.13	0.896
A*D	0.01460	0.00730	0.00415	1.76	0.083
A*E	0.03194	0.01597	0.00415	3.85	0.000
A*F	0.00720	0.00360	0.00415	0.87	0.389
B*C	0.00734	0.00367	0.00415	0.88	0.379
B*D	-0.01707	-0.00854	0.00414	-2.06	0.043
B*E	0.00450	0.00225	0.00415	0.54	0.589
B*F	-0.00299	-0.00149	0.00415	-0.36	0.720
C*D	0.02446	0.01223	0.00415	2.95	0.004
C*E	0.00174	0.00087	0.00415	0.21	0.835
C*F	0.01561	0.00780	0.00415	1.88	0.064
D*E	0.00168	0.00084	0.00415	0.20	0.840
D*F	-0.00918	-0.00459	0.00415	-1.11	0.272
E*F	0.00502	0.00251	0.00414	0.61	0.546
Regression Equation in Uncoded Units					
$\text{Thermal Expansion} = -1.55 - 0.0318 A - 0.0055 B - 0.0017 C - 0.0676 D + 0.0981 E - 0.0168 F + 0.000058 A*A + 0.000129 B*B - 0.000014 C*C + 0.003707 D*D - 0.000592 E*E - 0.000902 F*F - 0.000005 A*B - 0.000005 A*C + 0.000182 A*D + 0.000160 A*E + 0.000090 A*F + 0.000092 B*C - 0.000534 B*D + 0.000056 B*E - 0.000093 B*F + 0.000306 C*D + 0.000009 C*E + 0.000195 C*F + 0.000021 D*E - 0.000287 D*F + 0.000063 E*F$					

รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับการขยายตัวทางความร้อน (ต่อ)

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับการขยายตัวทางความร้อนเบื้องต้นจะเป็นการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 57.32 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 40.62 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการขยายตัวทาง

ความร้อนไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.27

Response Surface Regression: Thermal Expansion versus A, B, C, D, E, F						
Backward Elimination of Terms						
α to remove = 0.05						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	9	0.071958	0.007995	9.07	0.000	
Linear	5	0.031772	0.006354	7.21	0.000	
A	1	0.001564	0.001564	1.77	0.186	
C	1	0.001022	0.001022	1.16	0.285	
D	1	0.003542	0.003542	4.02	0.048	
E	1	0.013273	0.013273	15.06	0.000	
F	1	0.009513	0.009513	10.79	0.001	
Square	2	0.024679	0.012340	14.00	0.000	
D*D	1	0.020268	0.020268	22.99	0.000	
E*E	1	0.024292	0.024292	27.55	0.000	
2-Way Interaction	2	0.017142	0.008571	9.72	0.000	
A*E	1	0.012036	0.012036	13.65	0.000	
C*D	1	0.006652	0.006652	7.54	0.007	
Error	87	0.076704	0.000882			
Lack-of-Fit	35	0.039790	0.001137	1.60	0.060	
Pure Error	52	0.036914	0.000710			
Total	96	0.148661				
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0.0296926	48.40%	43.07%	33.96%		
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	
Constant		1.15061	0.00504	228.13	0.000	
A	0.01018	0.00509	0.00382	1.33	0.186	
C	0.00822	0.00411	0.00382	1.08	0.285	
D	0.01545	0.00773	0.00386	2.00	0.048	
E	0.02970	0.01485	0.00383	3.88	0.000	
F	-0.02512	-0.01256	0.00382	-3.28	0.001	
D*D	0.1119	0.0560	0.0117	4.79	0.000	
E*E	-0.1232	-0.0616	0.0117	-5.25	0.000	
A*E	0.02936	0.01468	0.00397	3.69	0.000	
C*D	0.02180	0.01090	0.00397	2.75	0.007	
Regression Equation in Uncoded Units						
Thermal Expansion = -3.19 - 0.01417 A - 0.000952 C - 0.04258 D + 0.1056 E - 0.003139 F + 0.003497 D*D - 0.000616 E*E + 0.000147 A*E + 0.000273 C*D						

รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับการขยายตัวทางความร้อน โดยวิธีลดตัวแปรอิสระ

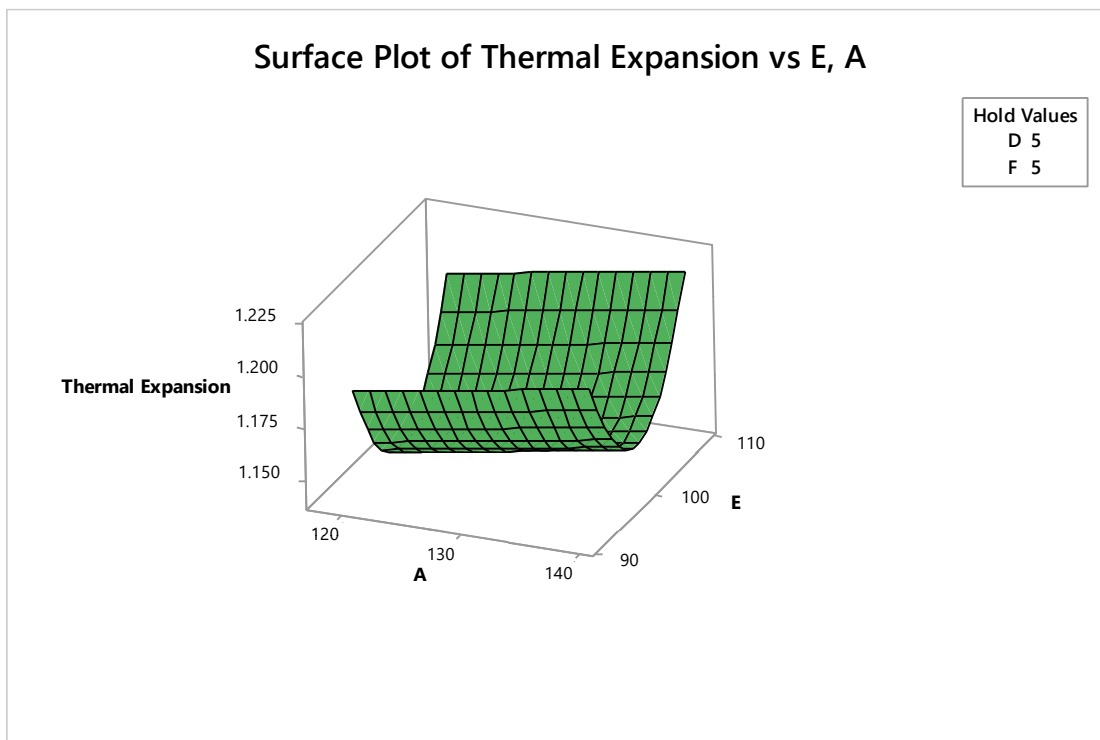
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ดังรูปที่ 4.27 พบว่า เทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการขยายตัวทางความร้อนที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 หรือเทอมของปัจจัยที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จะมีทั้งหมด 7 เทอม จากทั้งหมด 9 เทอม ซึ่งประกอบไปด้วยเทอมของผลกระทบหลัก (Main Effect Term) ได้แก่ D, E และ F ส่วนเทอมกำลังสองของปัจจัย (Second Order Term) ได้แก่ D*D และ E*E และเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Term) ได้แก่ A*E และ C*D โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.5 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 48.40 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 43.07 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่ามากกว่าค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$\text{Thermal Expansion} = -3.19 - 0.01417 A - 0.000952 C - 0.04258 D + 0.1056 E - 0.003139 F + 0.003497 D*D - 0.000616 E*E + 0.000147 A*E + 0.000273 C*D \quad (4.5)$$

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นว่าเทอมของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อการขยายตัวทางความร้อน ทำให้สามารถใช้กราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย D, E, D*D, E*E, A*E และ C*D ไปพร้อมๆกันได้ ส่วนเทอมปัจจัย F จะใช้กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์

โดยเริ่มจากเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง A และ E จะใช้กราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.28 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการเป่าอากาศกับการขยายตัวทางความร้อนจะมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งหงาย โดยที่ช่วงระดับกลางของระยะเวลาในการเป่าอากาศจะทำให้การขยายตัวทางความร้อนมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับระดับต่ำและสูง ในทุกๆช่วงของอุณหภูมิตั้งต้นของทรายจากระดับต่ำไปจนถึงระดับสูง โดยระยะเวลาในการเป่าอากาศที่น้อยจนเกินไป (ระดับต่ำ) จะทำให้ไม่เพียงพอต่อการหยุดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห ซึ่งการเกิดโครงสร้างร่างแหในขณะกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจะทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นนั้นไม่แข็งแรง ส่งผลให้การขยายตัวทางความร้อนมีค่าสูงขึ้น ส่วนระยะเวลาในการเป่าอากาศที่มากจนเกินไป (ระดับสูง) จะทำให้เม็ดทรายไปกระทบกับใบกวาดทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนหลุดออกส่งผลให้การขยายตัวทางความร้อนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าในช่วงระยะเวลาการเป่าอากาศที่ระดับกลางจะทำให้การขยายตัวทางความร้อนมีค่าต่ำสุด และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิตั้งต้นของทรายเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง เนื่องจากอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่สูงขึ้นจะทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนหลอมละลายจนระเหยไป ทำให้ไม่

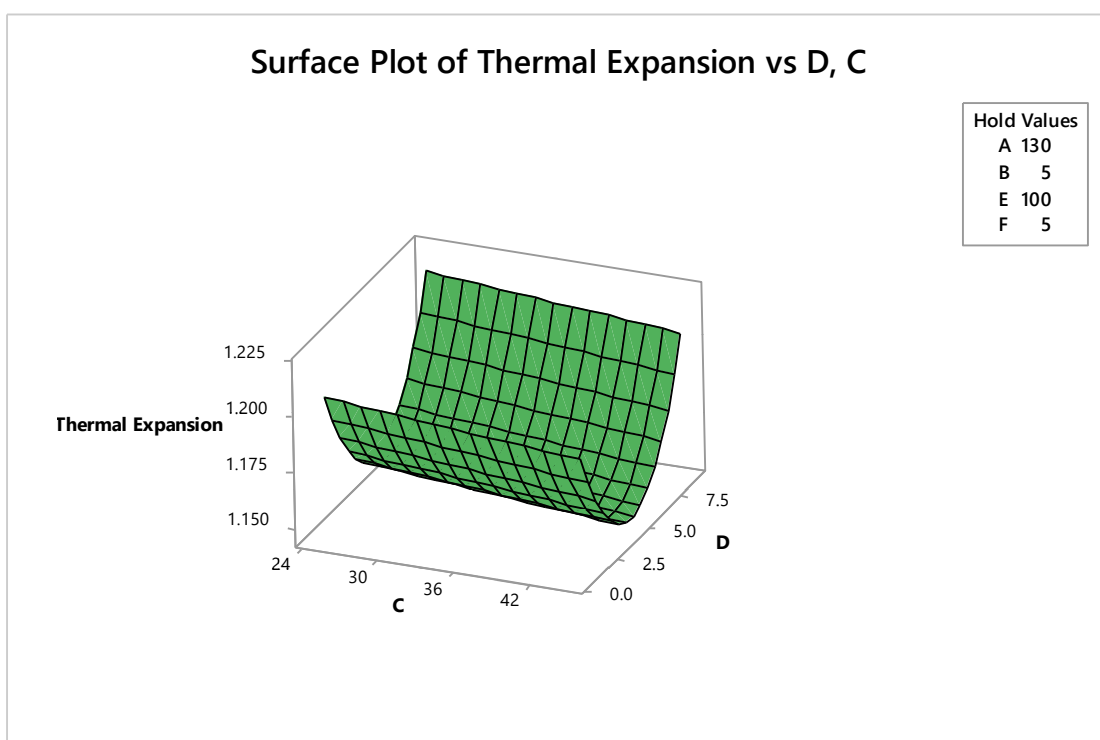
สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง ซึ่งการเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินที่ไม่ดีจะทำให้การขยายตัวทางความร้อนมีค่าสูง



รูปที่ 4.28 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง A และ E ที่ส่งผลกระทบต่อ การขยายตัวทางความร้อน

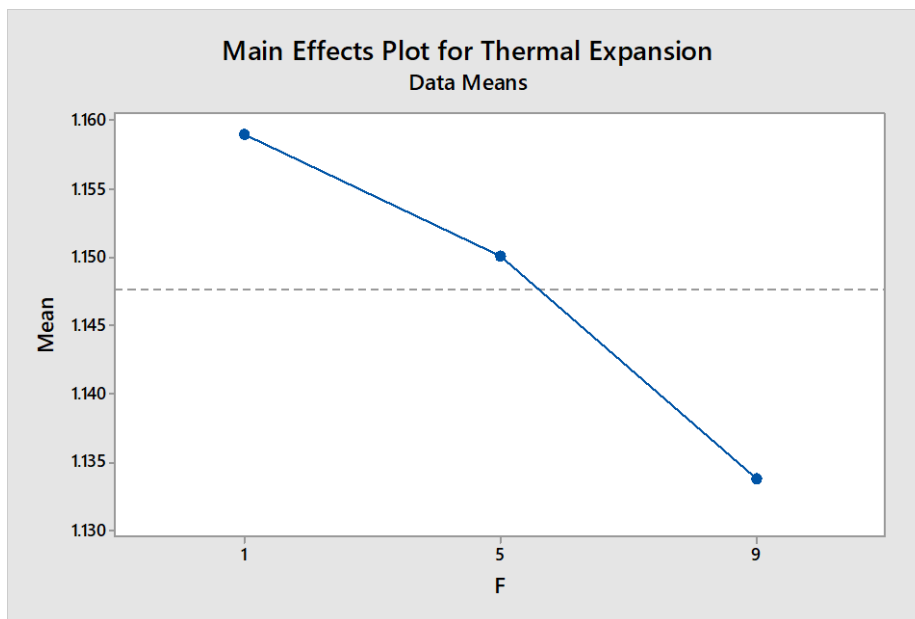
ส่วนเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง C และ D จะใช้กราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.29 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเวลาในการเริ่มเป่าอากาศกับการขยายตัวทางความร้อนจะมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งหงาย โดยที่ช่วงระดับกลางของเวลาในการเริ่มเป่าอากาศจะทำให้การขยายตัวทางความร้อนมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับระดับต่ำและสูง ในทุกๆช่วงของเวลาในการปล่อยสารละลายเฮกซามีนจากระดับต่ำไปจนถึงระดับสูง โดยการเริ่มเป่าอากาศที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้การเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนบนเม็ดทรายบางส่วนยังเกิดการจัดเรียงโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการเริ่มเป่าอากาศที่รวดเร็วจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีนั้นเกิดการหยุดชะงักอย่างรวดเร็วจนทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นบนเม็ดทรายนั้นยังเกิดการจัดเรียงตัวที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้การขยายตัวทางความร้อนมีค่าสูง ส่วนการเริ่มเป่าอากาศที่ช้า (ระดับสูง) จะทำให้การหยุดปฏิกิริยาระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหเกิดขึ้นได้ช้า ซึ่งการเกิดโครงสร้างร่างแหในขณะกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจะทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นนั้นไม่แข็งแรง ส่งผลให้การขยายตัวทางความร้อนมีค่าสูง โดยจะสังเกตเห็นว่าที่เวลาในการเริ่มเป่าอากาศที่ระดับกลางจะทำให้การขยายตัวทางความร้อนมีค่าต่ำสุด และจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาในการปล่อย

สารละลายเฮกซามีนเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง เนื่องจากการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้อุณหภูมิตั้งต้นของทรายลดลง ในขณะที่ฟีนอลิกเรซินที่เหลือบางส่วนยังไม่ไปเคลือบเม็ดทราย ส่วนเวลาในการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่ช้าลง (ระดับสูง) จะช่วยทำให้ฟีนอลิกเรซินมีระยะเวลาในการหลอมละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้น โดยฟีนอลิกเรซินถือเป็นวัตถุดิบสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อตรงต่อการขยายตัวทางความร้อน ดังนั้นการเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินบนเม็ดทรายที่ดีจึงทำให้การขยายตัวทางความร้อนมีค่าต่ำลง



รูปที่ 4.29 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ของทอมปัจจัยระหว่าง C และ D ที่ส่งผลกระทบต่อ การขยายตัวทางความร้อน

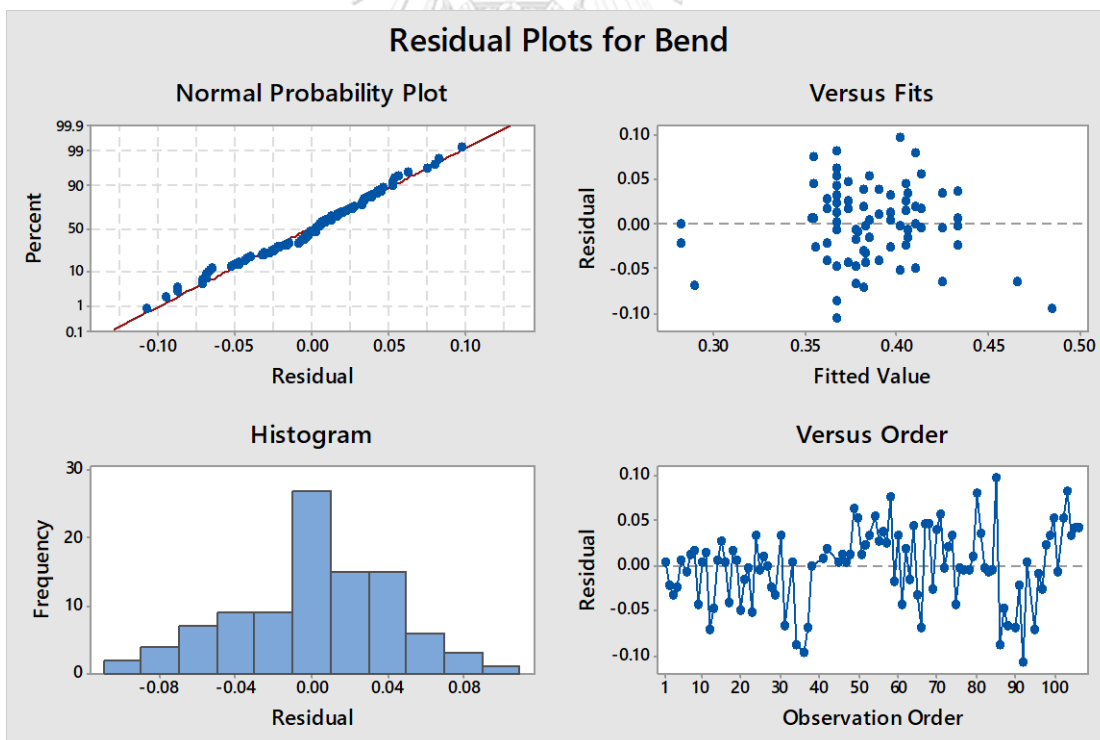
ในส่วนทอมผลกระทบหลักของปัจจัย F จะใช้รูปที่ 4.30 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่ง จะเห็นได้ว่าการขยายตัวทางความร้อนจะมีค่าลดลง เมื่อเวลาในการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทมีค่าเพิ่ม มากขึ้น เนื่องจากเวลาการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทที่ระดับต่ำจะทำให้แคลเซียมสเตียเรทที่มีลักษณะ เป็นผงเกิดการฟุ้งกระจายได้ง่าย ซึ่งเกิดจากลมที่ตักค้ำจากขั้นตอนการเป่าอากาศก่อนหน้านี้ ทำให้ แคลเซียมสเตียเรทบางส่วนยังไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ส่งผลให้การขยายตัวทางความร้อนมี ค่าสูง โดยแคลเซียมสเตียเรทจะช่วยให้ทรายนั่นแตกตัวและทำให้ทรายเคลือบเรซินที่นำไปทำชิ้น ทดสอบเกิดการจัดเรียงโครงสร้างที่ดีมากยิ่งขึ้น ซึ่งเวลาการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทที่ระดับสูงจะช่วยให้ แคลเซียมสเตียเรทนั้นสามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้นส่งผลให้การขยายตัวทาง ความร้อนมีค่าต่ำลง



รูปที่ 4.30 ผลกระทบหลักของปัจจัย F ที่ส่งผลต่อการขยายตัวทางความร้อน

4.4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความโค้งงอของชิ้นงาน

4.4.6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)



รูปที่ 4.31 การกระจายตัวส่วนตกค้างของความโค้งงอของชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.31 สามารถสรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของความโค้งงอของชิ้นงาน ได้ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) จะสามารถดูได้จากกราฟ Normal Probability Plot ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่จัดเรียงตัวอยู่ตามแนวเส้นตรงและมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติเท่ากับ 0.093 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Fitted Value ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) รอบแนวแกนศูนย์และข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้มหรือรูปแบบที่คล้ายกรวยปากเปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่

3) จากกราฟ Histogram จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

4) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Observation Order ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือรูปร่างที่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.4.6.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความโค้งงอของชิ้นงาน

ภายหลังจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลองข้างต้น จากนั้นจะอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่อความโค้งงอของชิ้นงาน โดยจะทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.32

Response Surface Regression: Bend versus A, B, C, D, E, F

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	27	0.136493	0.005055	2.70	0.000
Linear	6	0.030138	0.005023	2.68	0.021
A	1	0.000059	0.000059	0.03	0.860
B	1	0.007173	0.007173	3.83	0.054
C	1	0.000659	0.000659	0.35	0.555
D	1	0.000046	0.000046	0.02	0.875
E	1	0.014139	0.014139	7.55	0.008
F	1	0.007553	0.007553	4.03	0.048
Square	6	0.080257	0.013376	7.14	0.000
A*A	1	0.003094	0.003094	1.65	0.203
B*B	1	0.017925	0.017925	9.57	0.003
C*C	1	0.038431	0.038431	20.52	0.000
D*D	1	0.000041	0.000041	0.02	0.883
E*E	1	0.001659	0.001659	0.89	0.350
F*F	1	0.003866	0.003866	2.06	0.155
2-Way Interaction	15	0.028012	0.001867	1.00	0.468
A*B	1	0.000985	0.000985	0.53	0.471
A*C	1	0.002515	0.002515	1.34	0.250
A*D	1	0.001826	0.001826	0.98	0.327
A*E	1	0.005980	0.005980	3.19	0.078
A*F	1	0.000575	0.000575	0.31	0.581
B*C	1	0.000923	0.000923	0.49	0.485
B*D	1	0.003313	0.003313	1.77	0.188
B*E	1	0.000066	0.000066	0.04	0.851
B*F	1	0.000001	0.000001	0.00	0.987
C*D	1	0.000242	0.000242	0.13	0.720
C*E	1	0.000575	0.000575	0.31	0.581
C*F	1	0.004549	0.004549	2.43	0.124
D*E	1	0.002769	0.002769	1.48	0.228
D*F	1	0.005604	0.005604	2.99	0.088
E*F	1	0.000084	0.000084	0.04	0.833
Error	70	0.131096	0.001873		
Lack-of-Fit	17	0.078168	0.004598	4.60	0.000
Pure Error	53	0.052928	0.000999		
Total	97	0.267589			

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความโค้งงอของชิ้นงาน

Model Summary					
	S	R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)	
	0.0432759	51.01%	32.11%	0.00%	
Coded Coefficients					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		0.36749	0.00809	45.44	0.000
A	-0.00188	-0.00094	0.00531	-0.18	0.860
B	0.02109	0.01054	0.00539	1.96	0.054
C	-0.00630	-0.00315	0.00531	-0.59	0.555
D	0.00169	0.00085	0.00539	0.16	0.875
E	0.02945	0.01472	0.00536	2.75	0.008
F	-0.02164	-0.01082	0.00539	-2.01	0.048
A*A	-0.0535	-0.0267	0.0208	-1.29	0.203
B*B	0.1680	0.0840	0.0272	3.09	0.003
C*C	-0.1885	-0.0942	0.0208	-4.53	0.000
D*D	0.0080	0.0040	0.0272	0.15	0.883
E*E	0.0439	0.0219	0.0233	0.94	0.350
F*F	0.0780	0.0390	0.0272	1.44	0.155
A*B	-0.00794	-0.00397	0.00547	-0.73	0.471
A*C	0.01268	0.00634	0.00547	1.16	0.250
A*D	0.01081	0.00540	0.00547	0.99	0.327
A*E	0.01956	0.00978	0.00547	1.79	0.078
A*F	-0.00607	-0.00303	0.00547	-0.55	0.581
B*C	0.00768	0.00384	0.00547	0.70	0.485
B*D	0.01456	0.00728	0.00547	1.33	0.188
B*E	0.00206	0.00103	0.00547	0.19	0.851
B*F	0.00018	0.00009	0.00547	0.02	0.987
C*D	0.00393	0.00197	0.00547	0.36	0.720
C*E	-0.00607	-0.00303	0.00547	-0.55	0.581
C*F	0.01706	0.00853	0.00547	1.56	0.124
D*E	0.01331	0.00665	0.00547	1.22	0.228
D*F	0.01893	0.00947	0.00547	1.73	0.088
E*F	-0.00232	-0.00116	0.00547	-0.21	0.833
Regression Equation in Uncoded Units					
Bend = -1.44 + 0.0576 A - 0.0452 B + 0.0586 C - 0.0435 D - 0.0549 E - 0.0248 F - 0.000267 A*A + 0.00525 B*B - 0.000942 C*C + 0.00025 D*D + 0.000219 E*E + 0.00244 F*F - 0.000099 A*B + 0.000063 A*C + 0.000135 A*D + 0.000098 A*E - 0.000076 A*F + 0.000096 B*C + 0.000455 B*D + 0.000026 B*E + 0.000006 B*F + 0.000049 C*D - 0.000030 C*E + 0.000213 C*F + 0.000166 D*E + 0.000592 D*F - 0.000029 E*F					

รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความโค้งงอของชิ้นงาน (ต่อ)

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความโค้งงอของชิ้นงานเบื้องต้น จะเป็นการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 51.01 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 32.11 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความโค้งงอของ

ขั้นตอนไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.33

Response Surface Regression: Bend versus A, B, C, D, E, F						
Backward Elimination of Terms						
α to remove = 0.05						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	6	0.099040	0.016507	8.91	0.000	
Linear	4	0.029766	0.007442	4.02	0.005	
B	1	0.006151	0.006151	3.32	0.072	
C	1	0.001037	0.001037	0.56	0.456	
E	1	0.013388	0.013388	7.23	0.009	
F	1	0.008785	0.008785	4.74	0.032	
Square	2	0.069882	0.034941	18.86	0.000	
B*B	1	0.066279	0.066279	35.78	0.000	
C*C	1	0.036621	0.036621	19.77	0.000	
Error	91	0.168549	0.001852			
Lack-of-Fit	38	0.115621	0.003043	3.05	0.000	
Pure Error	53	0.052928	0.000999			
Total	97	0.267589				
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0.0430371	37.01%	32.86%	25.13%		
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	
Constant		0.36738	0.00782	46.98	0.000	
B	0.01946	0.00973	0.00534	1.82	0.072	
C	-0.00787	-0.00394	0.00526	-0.75	0.456	
E	0.02851	0.01425	0.00530	2.69	0.009	
F	-0.02326	-0.01163	0.00534	-2.18	0.032	
B*B	0.2170	0.1085	0.0181	5.98	0.000	
C*C	-0.1639	-0.0819	0.0184	-4.45	0.000	
Regression Equation in Uncoded Units						
Bend = -0.593 - 0.0654 B + 0.0570 C + 0.001425 E - 0.00291 F + 0.00678 B*B - 0.000819 C*C						

รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความโค้งงอของชิ้นงาน

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ดังรูปที่ 4.33 พบว่า เทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความโค้งงอของชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 หรือเทอมของปัจจัยที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จะมีทั้งหมด 4 เทอม จากทั้งหมด 6 เทอม ซึ่งประกอบไปด้วยเทอมของผลกระทบหลัก (Main Effect Term) ได้แก่ E และ F และเทอมกำลังสองของปัจจัย (Second Order Term) ได้แก่ B*B และ C*C โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความโค้งงออย่างมีนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.6 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 37.01 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 32.86 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่ามากกว่าค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$\begin{aligned} \text{Bend} = & -0.593 - 0.0654 B + 0.0570 C + 0.001425 E - 0.00291 F + 0.00678 B*B \\ & - 0.000819 C*C \end{aligned} \quad (4.6)$$

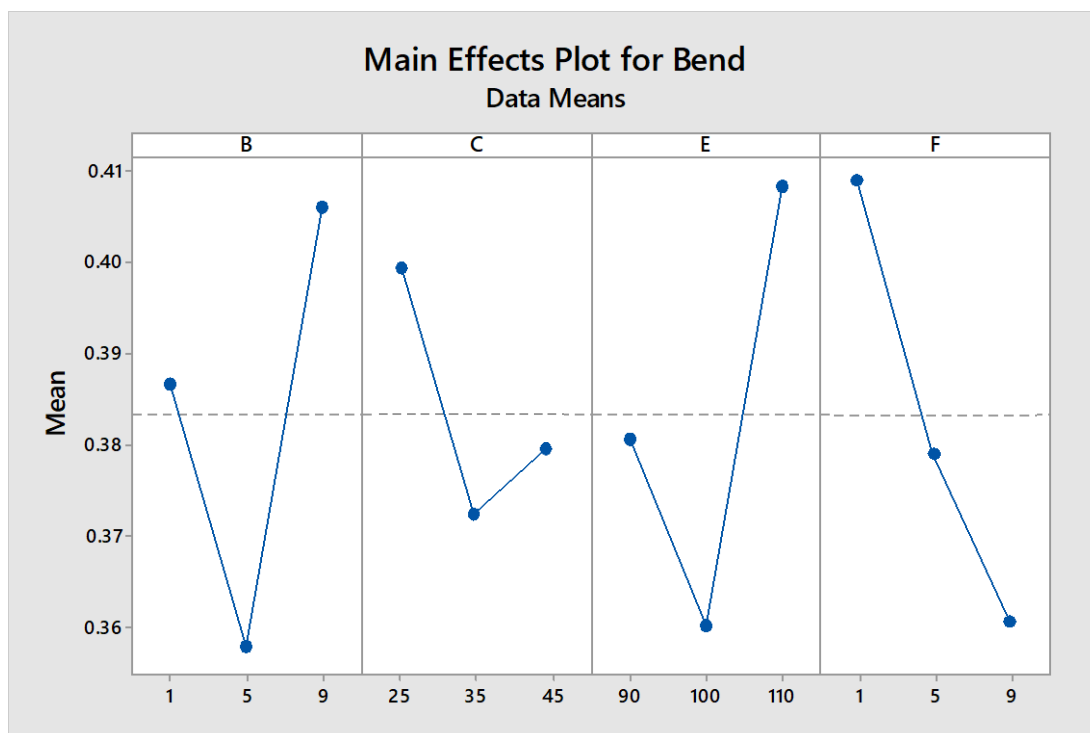
จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นว่าเทอมของผลกระทบหลักและกำลังสองของปัจจัยส่งผลกระทบต่อความโค้งงอของชิ้นงาน ทำให้สามารถใช้กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย E, F, B*B และ C*C ไปพร้อมๆ กันได้

โดยเริ่มจากเทอมกำลังสองของปัจจัย B*B จะใช้รูปที่ 4.34 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย B กับความโค้งงอของชิ้นงาน จะมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งหงาย โดยการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการปล่อยพินอลิกเรซินจากระดับต่ำไประดับกลาง จะทำให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าลดต่ำลง เนื่องจากเวลาการปล่อยพินอลิกเรซินที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะเป็นช่วงเวลาเดียวกันกับการปล่อยทรายเข้าสู่ถังผสม ทำให้พินอลิกเรซินบางส่วนยังไม่สามารถไปเคลือบทรายบางส่วนที่ถูกปล่อยลงมาภายหลัง ซึ่งการเคลือบตัวของพินอลิกเรซินบนเม็ดทรายที่ไม่ดี จะทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นนั้นไม่แข็งแรงส่งผลให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าสูง ส่วนการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการปล่อยพินอลิกเรซินจากระดับกลางไปยังระดับสูงจะทำให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการปล่อยพินอลิกเรซินที่ช้า (ระดับสูง) จะทำให้อนุภาคนิวเคลียสของทรายลดลง ในขณะที่พินอลิกเรซินบางส่วนไม่สามารถละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้ จึงทำให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าสูง

เทอมกำลังสองของปัจจัย C^2 จะใช้รูปที่ 4.34 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย C กับความโค้งงอของชิ้นงาน จะมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งหงาย โดยการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการปล่อยสารละลายเฮกซามีนจากระดับต่ำไประดับกลาง จะทำให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าลดลง เนื่องจากการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้อุณหภูมิตั้งต้นของทรายลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ฟินอลิกเรซินที่เหลือบางส่วนยังไม่สามารถละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้ โดยฟินอลิกเรซินถือว่าเป็นวัตถุดิบสำคัญที่ช่วยให้ทรายเคลือบเรซินมีโครงสร้างที่แข็งแรง ดังนั้นการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่เร็วจึงทำให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าสูง ส่วนการเพิ่มขึ้นของเวลาในการปล่อยสารละลายเฮกซามีนจากระดับกลางไประดับสูง จะทำให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการปล่อยสารละลายเฮกซามีนที่ระดับกลางและสูง จะทำให้ฟินอลิกเรซินมีระยะเวลาในการหลอมละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้น ทำให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าลดลง

เทอมผลกระทบหลักของปัจจัย E จะใช้รูปที่ 4.34 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย E กับความโค้งงอของชิ้นงาน จะมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งหงาย โดยการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับต่ำไประดับกลางจะทำให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าลดต่ำลง เนื่องจากระยะเวลาในการเป่าอากาศที่น้อย (ระดับต่ำ) จะไม่เพียงพอต่อการหยุดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟินอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห ทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นของทรายเคลือบเรซินในขณะนั้นไปทำขึ้นทดสอบไม่แข็งแรง ส่งผลให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าสูง ส่วนการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับกลางไปสูง จะทำให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากระยะเวลาในการเป่าอากาศที่มากเกินไป (ระดับสูง) จะทำให้เม็ดทรายไปกระทบกับใบกวาดทำให้ฟินอลิกเรซินบางส่วนนั้นหลุดออก ส่งผลให้การความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น

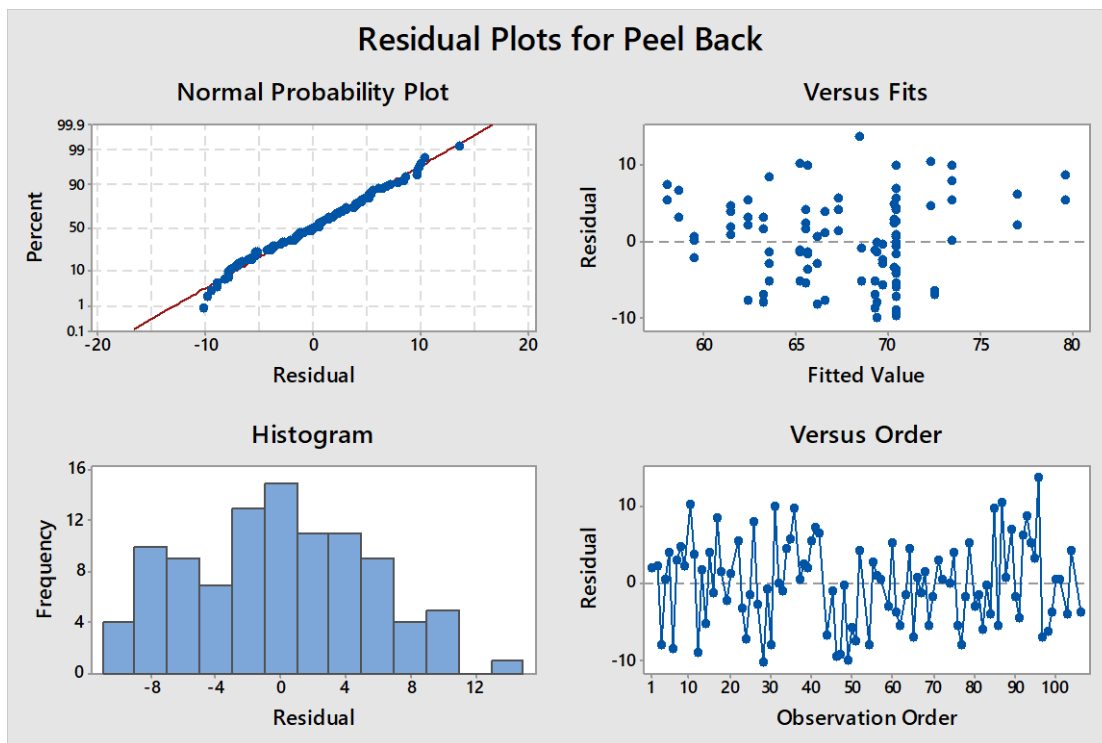
ในส่วนเทอมผลกระทบหลักของปัจจัย F จะใช้รูปที่ 4.34 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความโค้งงอของชิ้นงานจะมีค่าลดลง เมื่อเวลาในการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเวลาการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้แคลเซียมสเตียเรทที่มีลักษณะเป็นผงเกิดการฟุ้งกระจายได้ง่าย ซึ่งเกิดจากลมที่ตักค้ำจากขั้นตอนการเป่าอากาศก่อนหน้านี้ ทำให้แคลเซียมสเตียเรทบางส่วนยังไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ส่งผลให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าสูง โดยแคลเซียมสเตียเรทจะช่วยให้การเซตตัวของทรายเคลือบเรซินนั้นเกิดได้เร็วทำให้ขึ้นทดสอบมีความหนาและแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ซึ่งเวลาการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทที่ช้า (ระดับสูง) จะช่วยให้แคลเซียมสเตียเรทนั้นสามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้นส่งผลให้ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่าต่ำลง



รูปที่ 4.34 ผลกระทบหลักของปัจจัย B, C, E และ F ที่ส่งผลต่อความโค้งงอของชิ้นงาน

4.4.7 การวิเคราะห์ผลการทดลองของฟิลแบค

4.4.7.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)



รูปที่ 4.35 การกระจายตัวส่วนตกค้างของฟิลแบค

จากรูปที่ 4.35 สามารถสรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของฟิลแบค ได้ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) จะสามารถดูได้จากกราฟ Normal Probability Plot ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่จัดเรียงตัวอยู่ตามแนวเส้นตรงและมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติเท่ากับ 0.520 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Fitted Value ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) รอบแนวแกนศูนย์และข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้มหรือรูปแบบที่คล้ายกรวยปากเปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่

3) จากกราฟ Histogram จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

4) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Observation Order ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัว

ของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือรูปร่างที่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.4.7.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับฟิลแบค

ภายหลังจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลองข้างต้น จากนั้นจะอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่อค่าฟิลแบค โดยจะทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.36

Response Surface Regression: Peel Back versus A, B, C, D, E, F						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	27	2777.46	102.869	3.49	0.000	
Linear	6	697.51	116.251	3.94	0.002	
A	1	263.17	263.168	8.92	0.004	
B	1	5.49	5.491	0.19	0.667	
C	1	6.27	6.265	0.21	0.646	
D	1	126.20	126.195	4.28	0.042	
E	1	4.57	4.568	0.15	0.695	
F	1	298.15	298.150	10.11	0.002	
Square	6	1386.44	231.073	7.83	0.000	
A*A	1	3.29	3.287	0.11	0.740	
B*B	1	37.26	37.256	1.26	0.265	
C*C	1	65.66	65.659	2.23	0.140	
D*D	1	510.22	510.216	17.29	0.000	
E*E	1	434.55	434.545	14.73	0.000	
F*F	1	56.55	56.554	1.92	0.171	
2-Way Interaction	15	785.65	52.376	1.78	0.056	
A*B	1	66.59	66.586	2.26	0.137	
A*C	1	36.12	36.119	1.22	0.272	
A*D	1	14.92	14.922	0.51	0.479	
A*E	1	48.16	48.163	1.63	0.206	
A*F	1	102.62	102.618	3.48	0.066	
B*C	1	92.83	92.834	3.15	0.080	
B*D	1	3.40	3.402	0.12	0.735	
B*E	1	21.10	21.102	0.72	0.401	
B*F	1	27.80	27.804	0.94	0.335	
C*D	1	15.11	15.109	0.51	0.477	
C*E	1	10.82	10.817	0.37	0.547	
C*F	1	22.48	22.477	0.76	0.386	
D*E	1	197.41	197.415	6.69	0.012	
D*F	1	26.03	26.034	0.88	0.351	
E*F	1	96.73	96.729	3.28	0.074	
Error	71	2094.78	29.504			
Lack-of-Fit	17	1159.54	68.208	3.94	0.000	
Pure Error	54	935.24	17.319			
Total	98	4872.24				

รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับฟิลแบค

Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	5.43176	57.01%	40.66%	14.92%	
Coded Coefficients					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		70.712	0.982	72.02	0.000
A	4.076	2.038	0.682	2.99	0.004
B	-0.589	-0.294	0.682	-0.43	0.667
C	-0.629	-0.314	0.682	-0.46	0.646
D	2.812	1.406	0.680	2.07	0.042
E	0.535	0.267	0.680	0.39	0.695
F	4.366	2.183	0.687	3.18	0.002
A*A	-1.67	-0.84	2.50	-0.33	0.740
B*B	5.63	2.81	2.50	1.12	0.265
C*C	-7.47	-3.74	2.50	-1.49	0.140
D*D	20.83	10.41	2.50	4.16	0.000
E*E	-19.22	-9.61	2.50	-3.84	0.000
F*F	-7.74	-3.87	2.80	-1.38	0.171
A*B	-2.109	-1.055	0.702	-1.50	0.137
A*C	-1.553	-0.777	0.702	-1.11	0.272
A*D	-1.003	-0.501	0.705	-0.71	0.479
A*E	1.794	0.897	0.702	1.28	0.206
A*F	2.618	1.309	0.702	1.86	0.066
B*C	2.490	1.245	0.702	1.77	0.080
B*D	0.479	0.239	0.705	0.34	0.735
B*E	-1.187	-0.594	0.702	-0.85	0.401
B*F	-1.363	-0.681	0.702	-0.97	0.335
C*D	1.009	0.504	0.705	0.72	0.477
C*E	-0.850	-0.425	0.702	-0.61	0.547
C*F	1.225	0.613	0.702	0.87	0.386
D*E	3.632	1.816	0.702	2.59	0.012
D*F	-1.319	-0.659	0.702	-0.94	0.351
E*F	2.553	1.276	0.705	1.81	0.074
Regression Equation in Uncoded Units					
Peel Back = -993 + 1.78 A + 2.13 B + 3.72 C - 9.38 D + 17.92 E - 4.60 F - 0.0084 A*A + 0.176 B*B - 0.0374 C*C + 0.651 D*D - 0.0961 E*E - 0.242 F*F - 0.0264 A*B - 0.00777 A*C - 0.0125 A*D + 0.00897 A*E + 0.0327 A*F + 0.0311 B*C + 0.0150 B*D - 0.0148 B*E - 0.0426 B*F + 0.0126 C*D - 0.00425 C*E + 0.0153 C*F + 0.0454 D*E - 0.0412 D*F + 0.0319 E*F					

รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับฟิลแบค (ต่อ)

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับฟิลแบคเบื้องต้น จะเป็นการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 57.01 เปอร์เซนต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 40.66 เปอร์เซนต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อฟิลแบคไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.37

Response Surface Regression: Peel Back versus A, B, C, D, E, F

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	1982.57	283.22	8.92	0.000
Linear	4	613.24	153.31	4.83	0.001
A	1	232.09	232.09	7.31	0.008
D	1	111.48	111.48	3.51	0.064
E	1	5.30	5.30	0.17	0.684
F	1	270.06	270.06	8.50	0.004
Square	2	1178.30	589.15	18.55	0.000
D*D	1	449.77	449.77	14.16	0.000
E*E	1	1077.83	1077.83	33.94	0.000
2-Way Interaction	1	196.11	196.11	6.18	0.015
D*E	1	196.11	196.11	6.18	0.015
Error	91	2889.67	31.75		
Lack-of-Fit	37	1954.42	52.82	3.05	0.000
Pure Error	54	935.24	17.32		
Total	98	4872.24			

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5.63512	40.69%	36.13%	29.98%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		70.468	0.997	70.65	0.000
A	3.781	1.891	0.699	2.70	0.008
D	2.623	1.312	0.700	1.87	0.064
E	0.572	0.286	0.700	0.41	0.684
F	4.112	2.056	0.705	2.92	0.004
D*D	15.72	7.86	2.09	3.76	0.000
E*E	-24.33	-12.17	2.09	-5.83	0.000
D*E	3.592	1.796	0.723	2.49	0.015

Regression Equation in Uncoded Units

Peel Back = -1143 + 0.1891 A - 9.07 D + 24.14 E + 0.514 F + 0.491 D*D - 0.1217 E*E + 0.0449 D*E

รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับฟิลแบค

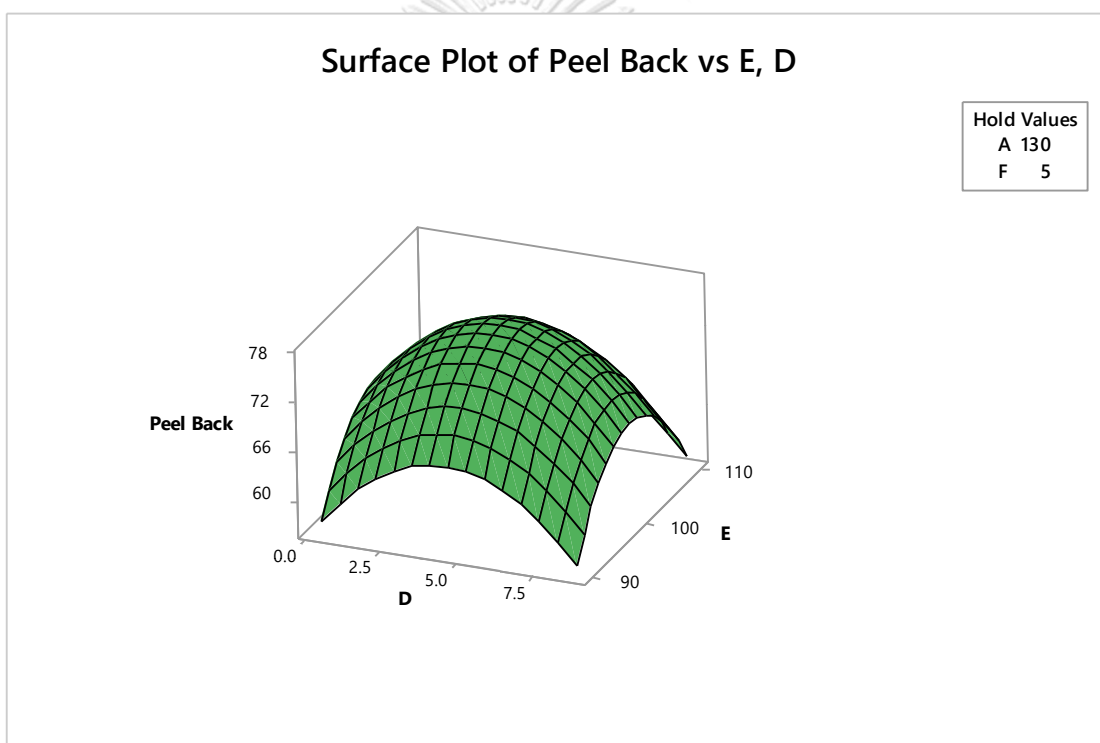
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ดังรูปที่ 4.37 พบว่า เทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อฟิลแบคที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 หรือเทอมของปัจจัยที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จะมีทั้งหมด 5 เทอม จากทั้งหมด 7 เทอม ซึ่งประกอบไปด้วยเทอมของผลกระทบหลัก (Main Effect Term) ได้แก่ A และ F ส่วนเทอมกำลังสองของปัจจัย (Second Order Term) ได้แก่ D*D และ E*E และเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Term) ได้แก่ D*E โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนังจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.7 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 40.69 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 36.13 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่าน้อยกว่าค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$\begin{aligned} \text{Peel Back} = & -1143 + 0.1891 A - 9.07 D + 24.14 E + 0.514 F + 0.491 D*D - 0.1217 E*E \\ & + 0.0449 D*E \end{aligned} \quad (4.7)$$

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นว่าเทอมของผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยส่งผลกระทบต่อความหนาของผนัง ทำให้สามารถใช้กราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย D*D, E*E, และ D*E ไปพร้อมๆ กันได้ ส่วนเทอมปัจจัย A และ F จะใช้กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์

โดยเริ่มจากเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง D และ E จะใช้กราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.38 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเวลาในการเริ่มเป่าอากาศและระยะเวลาในการเป่าอากาศจะมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งคว่ำกับค่าฟิลแบคและมีจุดที่ทำให้ฟิลแบคมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดยอดของเส้นโค้งระฆังคว่ำ โดยการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการเริ่มเป่าอากาศจากระดับต่ำไปกลางจะทำให้ค่าฟิลแบคมีค่าสูงขึ้นและจะมีค่าลดลงเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการเริ่มเป่าอากาศจากระดับกลางไปสูง เนื่องจากการเริ่มเป่าอากาศที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้การเคลือบตัวของพินอลิกเรซินกับเฮกซามีนบนเม็ดทรายบางส่วนยังเกิดการจัดเรียงโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการเริ่มเป่าอากาศที่รวดเร็วจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีนั้นเกิดการหยุดชะงักอย่างรวดเร็วจนทำให้โครงสร้างที่เกิดขึ้นบนเม็ดทรายนั้นยังเกิดการจัดเรียงตัวที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้การเซตตัวของผนังนั้นเกิดขึ้นได้ช้า ซึ่งฟิลแบคจะเป็นค่าที่ใช้แสดงอัตราส่วนความหนาของผนังในชิ้นงาน โดยการเซตตัวของผนังที่เกิดขึ้นช้าจึงทำให้ฟิลแบคมีค่าต่ำ ส่วนการเริ่มเป่าอากาศที่ช้า (ระดับสูง) จะทำให้การหยุดปฏิกิริยาระหว่างพินอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหเกิดขึ้นได้ช้า ซึ่งการเกิดโครงสร้างร่างแหในขณะกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจะทำให้การเซตตัวของผนังนั้น

เกิดขึ้นได้ซ้ำ จึงส่งผลให้ฟิลแบคมีค่าต่ำลง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าฟิลแบคจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับต่ำไปกลางและจะมีค่าลดต่ำลงเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการเป่าอากาศจากระดับกลางไปสูง ในทุกๆช่วงของเวลาในการเริ่มเป่าอากาศจากระดับต่ำไประดับสูง เนื่องจากระยะเวลาในการเป่าอากาศที่น้อย (ระดับต่ำ) จะทำให้ไม่เพียงพอต่อการหยุดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างระหว่างฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห ซึ่งการเกิดโครงสร้างร่างแหในขณะกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจะทำให้ฟิลแบคมีค่าลดต่ำลง ส่วนระยะเวลาในการเป่าอากาศที่มากจนเกินไปจะทำให้เม็ดทรายไปกระทบกับใบกวาด ทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนนั้นหลุดออก ซึ่งปริมาณฟีนอลิกเรซินที่เคลือบตัวอยู่บนเม็ดทรายจะส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อการเซตตัวของผนังไส้แบบ จึงทำให้ฟิลแบคนั้นมีค่าต่ำลง



รูปที่ 4.38 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง D และ E ที่ส่งผลกระทบต่อฟิลแบค

ในส่วนทอมผลกระทบหลักของปัจจัย A จะใช้รูปที่ 4.39 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าฟิลแบคจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิตั้งต้นของทรายเพิ่มขึ้นจากระดับต่ำไปสูง เนื่องจากอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่ระดับต่ำจะทำให้ฟินอลิเกรซินสามารถหลอมละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึงส่งผลให้ฟิลแบคมีค่าสูง ส่วนอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่สูงขึ้นจะทำให้ฟินอลิเกรซินบางส่วนหลอมละลายจนระเหยไปและไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ ซึ่งปริมาณฟินอลิเกรซินจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเซตตัวของผนังไส้แบบจึงทำให้ฟิลแบคมีค่าต่ำ

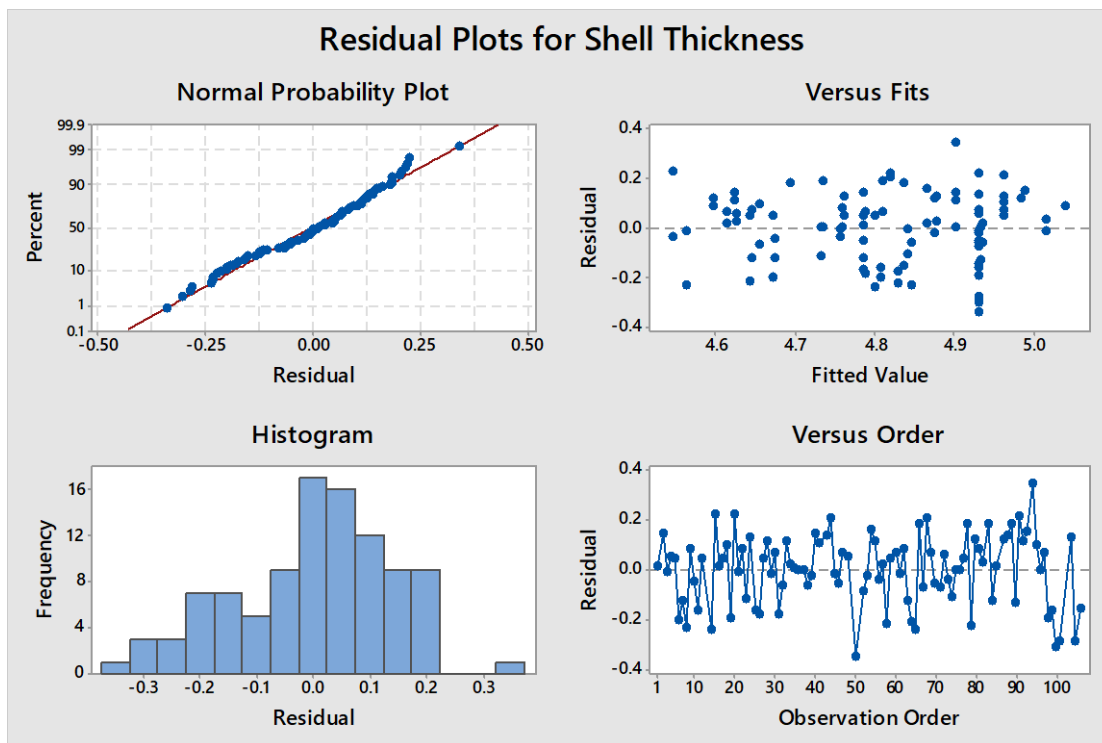
ส่วนทอมผลกระทบหลักของปัจจัย F จะใช้รูปที่ 4.39 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะเห็นว่าฟิลแบคจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากระดับต่ำไปสูง เนื่องจากเวลาการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะทำให้แคลเซียมสเตียเรทที่มีลักษณะเป็นผงเกิดการฟุ้งกระจายได้ง่าย ซึ่งเกิดจากลมที่ตกค้างจากขั้นตอนการเป่าอากาศก่อนหน้านี้ ทำให้แคลเซียมสเตียเรทบางส่วนยังไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ส่งผลให้ฟิลแบคมีค่าต่ำ โดยแคลเซียมสเตียเรทจะช่วยให้การเซตตัวของทรายเคลือบเรซินนั้นเกิดขึ้นได้เร็วทำให้ชั้นทดสอบมีความหนาที่มากขึ้น ซึ่งเวลาการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทที่ช้า (ระดับสูง) จะช่วยให้แคลเซียมสเตียเรทนั้นสามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้นส่งผลให้ฟิลแบคมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.39 ผลกระทบหลักของปัจจัย A และ F ที่ส่งผลต่อฟิลแบค

4.4.8 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความหนาของผนัง

4.4.8.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)



รูปที่ 4.40 การกระจายตัวส่วนตกค้างของความหนาของผนัง

จากรูปที่ 4.40 สามารถสรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของความหนาของผนัง ได้ดังต่อไปนี้

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) จะสามารถดูได้จากกราฟ Normal Probability Plot ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่จัดเรียงตัวอยู่ตามแนวเส้นตรงและมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติเท่ากับ 0.119 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Fitted Value ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) รอบแนวแกนศูนย์และข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้มหรือรูปแบบที่คล้ายกรวยปากเปิด จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีค่าความแปรปรวนคงที่

3) จากกราฟ Histogram จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

4) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Observation Order ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัว

ของส่วนตกค้าง (Residual) ที่ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือรูปร่างที่แน่นอน จึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.4.8.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความหนาของผนัง

ภายหลังจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลองข้างต้น จากนั้นจะอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหนาของผนัง โดยจะทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.41

Response Surface Regression: Shell Thickness versus A, B, C, D, E, F					
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	27	1.85489	0.068700	2.47	0.001
Linear	6	0.59127	0.098544	3.55	0.004
A	1	0.19805	0.198054	7.13	0.009
B	1	0.05335	0.053347	1.92	0.170
C	1	0.00001	0.000014	0.00	0.982
D	1	0.22910	0.229105	8.25	0.005
E	1	0.05256	0.052562	1.89	0.173
F	1	0.05466	0.054664	1.97	0.165
Square	6	0.53092	0.088486	3.19	0.008
A*A	1	0.00209	0.002091	0.08	0.785
B*B	1	0.12901	0.129013	4.65	0.034
C*C	1	0.02467	0.024674	0.89	0.349
D*D	1	0.00179	0.001792	0.06	0.800
E*E	1	0.01953	0.019527	0.70	0.404
F*F	1	0.00282	0.002821	0.10	0.751
2-Way Interaction	15	0.73676	0.049117	1.77	0.056
A*B	1	0.03392	0.033920	1.22	0.273
A*C	1	0.08934	0.089343	3.22	0.077
A*D	1	0.05690	0.056899	2.05	0.157
A*E	1	0.06357	0.063567	2.29	0.135
A*F	1	0.06348	0.063481	2.29	0.135
B*C	1	0.00034	0.000340	0.01	0.912
B*D	1	0.00137	0.001367	0.05	0.825
B*E	1	0.00815	0.008150	0.29	0.590
B*F	1	0.02092	0.020920	0.75	0.388
C*D	1	0.07192	0.071924	2.59	0.112
C*E	1	0.09688	0.096881	3.49	0.066
C*F	1	0.01184	0.011839	0.43	0.516
D*E	1	0.00147	0.001473	0.05	0.818
D*F	1	0.19885	0.198850	7.16	0.009
E*F	1	0.00087	0.000874	0.03	0.860
Error	72	1.99906	0.027765		
Lack-of-Fit	17	0.90957	0.053504	2.70	0.003
Pure Error	55	1.08950	0.019809		
Total	99	3.85395			

รูปที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความหนาของผนัง

Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0.166628	48.13%	28.68%	12.92%	
Coded Coefficients					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		4.9103	0.0305	160.94	0.000
A	-0.1102	-0.0551	0.0206	-2.67	0.009
B	-0.0566	-0.0283	0.0204	-1.39	0.170
C	0.0009	0.0005	0.0204	0.02	0.982
D	0.1174	0.0587	0.0204	2.87	0.005
E	0.0568	0.0284	0.0206	1.38	0.173
F	0.0573	0.0287	0.0204	1.40	0.165
A*A	-0.0474	-0.0237	0.0863	-0.27	0.785
B*B	-0.3332	-0.1666	0.0773	-2.16	0.034
C*C	-0.1457	-0.0729	0.0773	-0.94	0.349
D*D	0.0393	0.0196	0.0773	0.25	0.800
E*E	0.1448	0.0724	0.0863	0.84	0.404
F*F	0.0493	0.0246	0.0773	0.32	0.751
A*B	0.0466	0.0233	0.0211	1.11	0.273
A*C	0.0756	0.0378	0.0211	1.79	0.077
A*D	-0.0603	-0.0302	0.0211	-1.43	0.157
A*E	0.0638	0.0319	0.0211	1.51	0.135
A*F	-0.0637	-0.0319	0.0211	-1.51	0.135
B*C	0.0047	0.0023	0.0211	0.11	0.912
B*D	0.0094	0.0047	0.0211	0.22	0.825
B*E	0.0228	0.0114	0.0211	0.54	0.590
B*F	0.0366	0.0183	0.0211	0.87	0.388
C*D	0.0678	0.0339	0.0211	1.61	0.112
C*E	0.0787	0.0394	0.0211	1.87	0.066
C*F	-0.0275	-0.0138	0.0211	-0.65	0.516
D*E	-0.0097	-0.0049	0.0211	-0.23	0.818
D*F	0.1128	0.0564	0.0211	2.68	0.009
E*F	-0.0075	-0.0037	0.0211	-0.18	0.860
Regression Equation in Uncoded Units					
Shell Thickness = 14.3 + 0.016 A - 0.016 B - 0.0403 C + 0.064 D - 0.198 E + 0.093 F - 0.000237 A*A - 0.01041 B*B - 0.000729 C*C + 0.00123 D*D + 0.000724 E*E + 0.00154 F*F + 0.000582 A*B + 0.000378 A*C - 0.000754 A*D + 0.000319 A*E - 0.000797 A*F + 0.000058 B*C + 0.00029 B*D + 0.000285 B*E + 0.00114 B*F + 0.000848 C*D + 0.000394 C*E - 0.000344 C*F - 0.000121 D*E + 0.00352 D*F - 0.000093 E*F					

รูปที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความหนาของผนัง (ต่อ)

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความหนาของผนังเบื้องต้น จะเป็นการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 48.13 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 28.68 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนาของผนังไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.42

Response Surface Regression: Shell Thickness versus A, B, C, D, E, F

Backward Elimination of Terms

α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	1.22805	0.20467	7.25	0.000
Linear	4	0.53244	0.13311	4.71	0.002
A	1	0.20022	0.20022	7.09	0.009
B	1	0.05241	0.05241	1.86	0.176
D	1	0.22786	0.22786	8.07	0.006
F	1	0.05628	0.05628	1.99	0.161
Square	1	0.48488	0.48488	17.17	0.000
B*B	1	0.48488	0.48488	17.17	0.000
2-Way Interaction	1	0.20264	0.20264	7.18	0.009
D*F	1	0.20264	0.20264	7.18	0.009
Error	93	2.62591	0.02824		
Lack-of-Fit	38	1.53641	0.04043	2.04	0.008
Pure Error	55	1.08950	0.01981		
Total	99	3.85395			

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.168034	31.86%	27.47%	22.47%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant		4.9104	0.0293	167.83	0.000
A	-0.1102	-0.0551	0.0207	-2.66	0.009
B	-0.0560	-0.0280	0.0205	-1.36	0.176
D	0.1167	0.0584	0.0205	2.84	0.006
F	0.0580	0.0290	0.0205	1.41	0.161
B*B	-0.2962	-0.1481	0.0357	-4.14	0.000
D*F	0.1135	0.0568	0.0212	2.68	0.009

Regression Equation in Uncoded Units

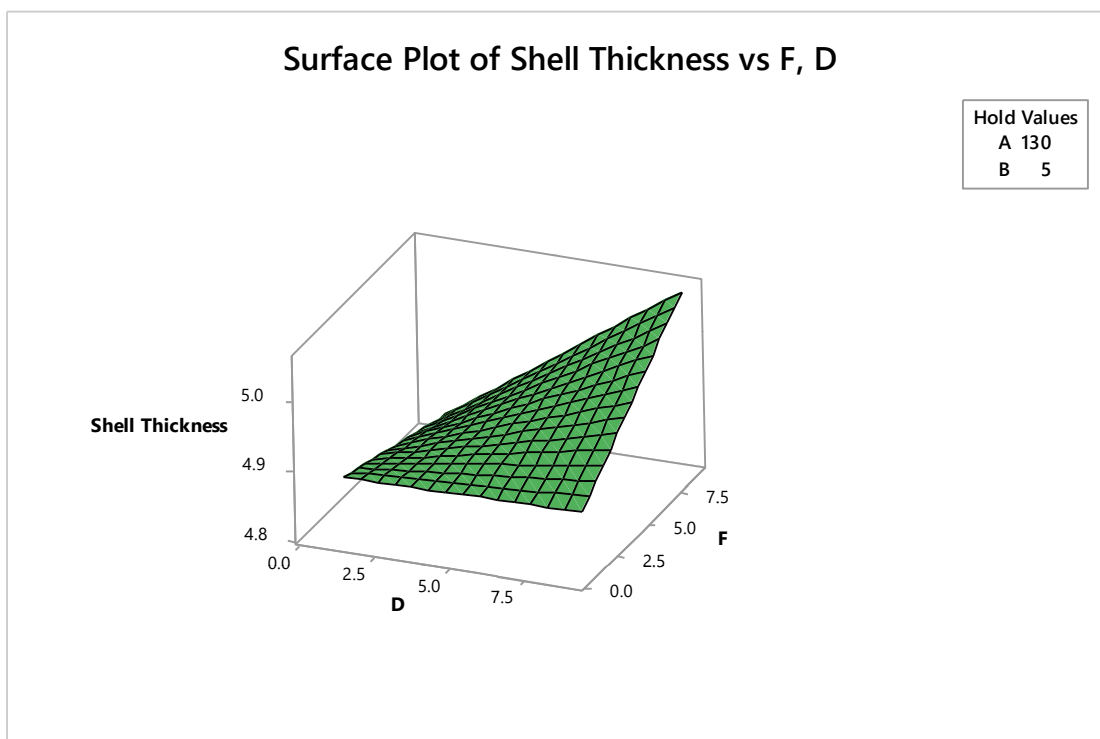
Shell Thickness = 5.410 - 0.00551 A + 0.0856 B - 0.00315 D - 0.01048 F
- 0.00926 B*B + 0.00355 D*F

รูปที่ 4.42 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับความหนาของผนัง

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ดังรูปที่ 4.42 พบว่า เทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนังที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 หรือเทอมของปัจจัยที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จะมีทั้งหมด 4 เทอม จากทั้งหมด 6 เทอม ซึ่งประกอบไปด้วยเทอมของผลกระทบทหลัก (Main Effect Term) ได้แก่ A และ D ส่วนเทอมกำลังสองของปัจจัย (Second Order Term) ได้แก่ B*B และเทอมของผลกระทบทร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Term) ได้แก่ D*F โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนังที่ระดับนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.8 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 31.86 เปอร์เซ็นต์ และ R-Sq (adj) เท่ากับ 27.47 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่าน้อยกว่าค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

$$\text{Shell Thickness} = 5.410 - 0.00551 A + 0.0856 B - 0.00315 D - 0.01048 F - 0.00926 B*B + 0.00355 D*F \quad (4.8)$$

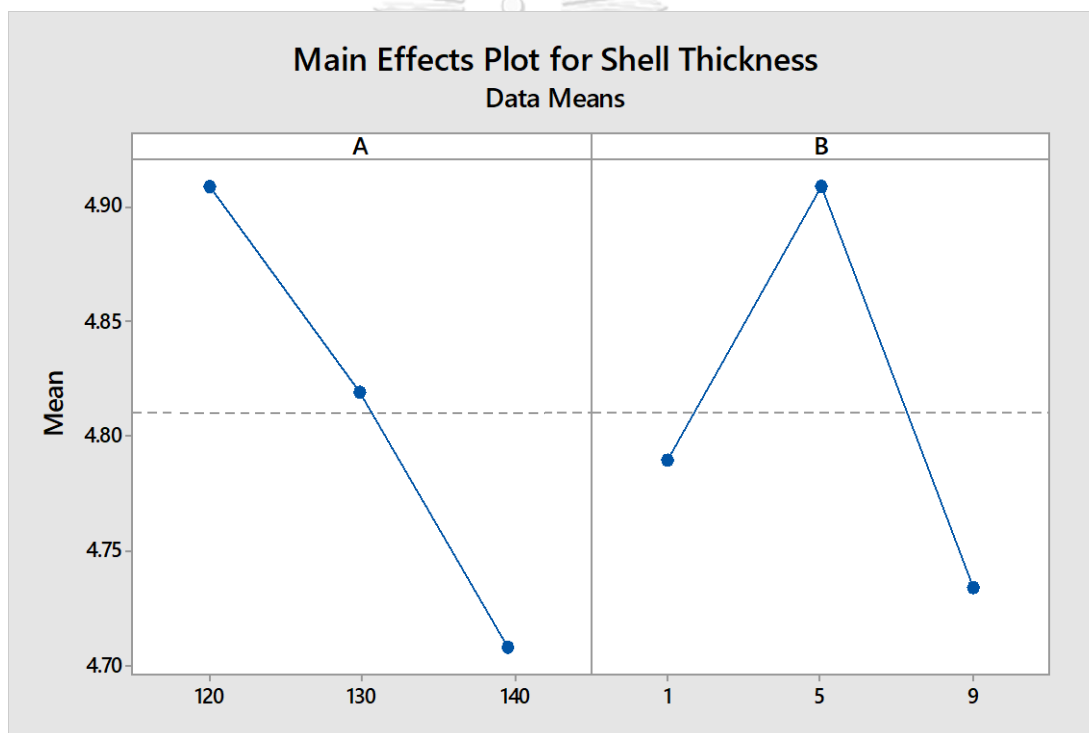
โดยเริ่มจากเทอมของผลกระทบทร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง D และ F จะใช้กราฟพื้นผิวตอบ (Surface Plot) ดังรูปที่ 4.43 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่เวลาในการเริ่มเป่าอากาศที่เร็ว (ระดับต่ำ) เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้ความหนาของผนังมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการเริ่มเป่าอากาศที่รวดเร็วจะทำให้การเคลือบตัวของฟีนอลิกเรซินกับเฮกซามีนบนเม็ดทรายนั้นเกิดการจัดเรียงโครงสร้างที่ยังไม่สมบูรณ์เพราะปฏิกิริยาทางเคมีนั้นเกิดการหยุดชะงักอย่างรวดเร็ว โดยการเกิดโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้การเซตตัวของผนังนั้นเกิดขึ้นได้ช้าแม้ว่าจะมีการเคลือบตัวที่ดีของแคลเซียมสเตียเรทก็ตาม จึงส่งผลให้ความหนาของผนังมีค่าต่ำ ส่วนเวลาในการเริ่มเป่าอากาศที่ช้า (ระดับสูง) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการปล่อยแคลเซียมสเตียเรทจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้ความหนาของผนังมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเริ่มเป่าอากาศที่ช้าจะทำให้ฟีนอลิกเรซินและเฮกซามีนมีระยะเวลาในการผสมที่มากขึ้นส่งผลให้การจัดเรียงโครงสร้างที่เกิดขึ้นนั้นมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ถึงแม้ว่าจะทำให้ทรายบางส่วนเกิดการทำปฏิกิริยาจนเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห แต่การเคลือบตัวที่ดีของฟีนอลิกเรซินและแคลเซียมสเตียเรทจะช่วยให้การเซตตัวของผนังนั้นรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ความหนาของผนังมีค่าสูง



รูปที่ 4.43 กราฟพื้นผิวตอบสนองความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัยระหว่าง D และ F ที่ส่งผลกระทบต่อความหนาของผนัง

เทอมผลกระทบหลักของปัจจัย A จะใช้รูปที่ 4.44 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าความหนาของผนังจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิตั้งต้นของทรายเพิ่มขึ้นจากระดับต่ำไปสูง เนื่องจากอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่ระดับต่ำจะทำให้ฟีนอลิกเรซินสามารถหลอมละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้อย่างทั่วถึง ส่งผลให้ความหนาของผนังมีค่าสูง ส่วนอุณหภูมิตั้งต้นของทรายที่สูงขึ้นจะทำให้ฟีนอลิกเรซินบางส่วนหลอมละลายจนระเหยไปและไม่สามารถไปเคลือบเม็ดทรายได้ ซึ่งปริมาณฟีนอลิกเรซินจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเซตตัวของผนังใส่แบบ ทำให้ความหนาของผนังมีค่าต่ำ

ส่วนเทอมกำลังสองของปัจจัย B*B จะใช้รูปที่ 4.44 ในการอธิบายความสัมพันธ์ ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย B กับความโค้งงอของชิ้นงาน จะมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งคว่ำ โดยการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการปล่อยพินอลิเกรซินจากระดับต่ำไประดับกลางจะทำให้ความหนาของผนังมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาการปล่อยพินอลิเกรซินที่เร็ว (ระดับต่ำ) จะเป็นช่วงเวลาเดียวกันกับการปล่อยทรายเข้าสู่ถังผสม ทำให้พินอลิเกรซินบางส่วนยังไม่สามารถไปเคลือบทรายบางส่วนที่ถูกปล่อยลงมาภายหลัง ซึ่งการเคลือบตัวของพินอลิเกรซินบนเม็ดทรายที่ไม่ดีจะทำให้ความหนาของผนังมีค่าต่ำ ส่วนการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการปล่อยพินอลิเกรซินจากระดับกลางไปยังระดับสูงจะทำให้ความหนาของผนังมีค่าต่ำลง เนื่องจากการปล่อยพินอลิเกรซินช้าจะทำให้อุณหภูมิตั้งต้นของทรายลดลง ส่งผลให้พินอลิเกรซินบางส่วนไม่สามารถละลายและไปเคลือบเม็ดทรายได้ ทำให้ความหนาของผนังมีค่าต่ำ



รูปที่ 4.44 ผลกระทบหลักของปัจจัย A และ B ที่ส่งผลต่อความหนาของผนัง

4.5 การหาค่าระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนำเข้า

ภายหลังจากที่ได้สมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ ได้แก่ ความทนแรงดัดโค้ง แก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ค่าความโก่งงอของชิ้นงาน พิลแบค และความหนาของผนัง จากนั้นจึงทำการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าทั้ง 6 ปัจจัย โดยอาศัยฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าคุณสมบัติที่สำคัญมีค่าอยู่ในเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้ โดยเริ่มจากการกำหนดเป้าหมาย (Goal) และคะแนนความสำคัญ (Importance) ของค่าคุณสมบัติแต่ละตัว ซึ่งทางทีมงานและผู้วิจัยได้ทำการกำหนดเป้าหมายและค่าระดับความสำคัญไว้ดังตารางที่ 4.7

โดยการกำหนดเป้าหมายในงานวิจัยนี้จะใช้หลักเกณฑ์ในการกำหนดเป้าหมายแบบ Minimize และ Maximize โดยมีหลักเกณฑ์ในการกำหนดดังต่อไปนี้

1. การกำหนดเป้าหมายแบบ Minimize

- ค่าต่ำสุด (Lower) จะพิจารณาจากค่าคาดหวังของค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานกำหนดไว้กับผลการทดสอบที่ได้จากตารางการออกแบบการทดลองว่าค่าที่น้อยที่สุดอยู่ที่เท่าใด แล้วจึงนำค่านั้นมากำหนดเป็นค่าต่ำสุด
- ค่าเป้าหมาย (Target) จะกำหนดตามค่าต่ำสุดที่ได้
- ค่าสูงสุด (Upper) จะกำหนดจากเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้ของค่าคุณสมบัติแต่ละตัว

2. การกำหนดเป้าหมายแบบ Maximize

- ค่าสูงสุด (Upper) จะพิจารณาจากค่าคาดหวังของค่าคุณสมบัติที่ทางโรงงานกำหนดไว้กับผลการทดสอบที่ได้จากตารางการออกแบบการทดลองว่าค่าที่มากที่สุดอยู่ที่เท่าใด แล้วจึงนำค่านั้นมากำหนดเป็นค่าสูงสุด
- ค่าเป้าหมาย (Target) จะกำหนดตามค่าสูงสุดที่ได้
- ค่าต่ำสุด (Lower) จะกำหนดจากเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้ของค่าคุณสมบัติแต่ละตัว

ในส่วนของการกำหนดคะแนนความสำคัญทางผู้วิจัยและทีมงานทำการกำหนดให้คะแนนความสำคัญของความทนแรงดัดโค้ง พิลแบค และความหนาของผนัง ให้มีค่าเท่ากับ 10 คะแนน ส่วนค่าคุณสมบัติตัวอื่นๆจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 8 คะแนน เนื่องจากความทนแรงดัดโค้งจะเป็นค่าที่ใช้ในการตรวจสอบความแข็งแรงของไส้แบบและเพื่อป้องกันไม่ให้ไส้แบบแตกในขณะกระบวนการหล่อ ส่วนพิลแบคและความหนาของผนังจะเป็นค่าคุณสมบัติที่แสดงให้เห็นถึงค่าความหนาของผนังไส้แบบ โดยความหนาของผนังที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการทำไส้แบบ กล่าวคือความหนาของผนังที่มากจะแสดงให้เห็นถึงการเซตตัวของผนังที่รวดเร็วภายในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งในกระบวนการผลิตไส้แบบจะมีการกำหนดความหนาของผนังที่ต้องการเอาไว้ ดังนั้นการเซตตัวของผนังที่รวดเร็วจึงช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตให้น้อยลงได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นจะมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการหล่อ ดังนั้นทางโรงงานจึงให้ความสำคัญกับค่าคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นมากกว่าคุณสมบัติอื่นๆ

ตารางที่ 4.7 การกำหนดเป้าหมายและคะแนนความสำคัญของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ

คุณสมบัติ	เป้าหมาย	คะแนนความสำคัญ	เหตุผล	
ความทนแรงดัดโค้ง	Maximize	10	เพื่อป้องกันไส้แบบแตกขณะกระบวนการหล่อหรือระหว่างการทำไส้แบบ	
	Lower			78
	Target			88.2
	Upper			88.2
ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา	Minimize	8	เพื่อควบคุมให้วัสดุดิบที่เติมลงไป ในกระบวนการเกิดการสูญเสียที่น้อยที่สุด	
	Lower			2.7455
	Target			2.7455
	Upper			2.95

ตารางที่ 4.7 การกำหนดเป้าหมายและคะแนนความสำคัญของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ (ต่อ)

คุณสมบัติ	เป้าหมาย		คะแนน ความสำคัญ	เหตุผล
อุณหภูมิต่ำสุดที่ทราย เริ่มเซตตัว	Maximize		8	จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงอุณหภูมิที่ ทรายเริ่มเซตตัวเป็นผนัง โดยใน การทำใส่แบบกลวงจะต้องการให้ ทรายเกิดการเซตตัวที่บริเวณผนัง ใส่แบบเท่านั้นเพื่อให้เกิดช่องว่าง บริเวณตรงกลาง ซึ่งการเซตตัว ของทรายที่อุณหภูมิสูงจะช่วย ป้องกันไม่ให้เกิดการจับตัว กันที่บริเวณกลางใส่แบบ เนื่องจากจะทำให้ยากต่อนำ ทรายส่วนเกินที่อยู่บริเวณตรง กลางออกมาภายหลังจากการทำ ใส่แบบเสร็จ
	Lower	100		
	Target	110		
	Upper	110		
แก๊ส	Minimize		8	เพื่อควบคุมให้วัสดุดิบที่เติมลงไป ในกระบวนการเกิดการสูญเสียที่ น้อยที่สุด
	Lower	8		
	Target	8		
	Upper	11		
การขยายตัวทางความ ร้อน	Minimize		8	เพื่อป้องกันปัญหา Vening (มี ลักษณะคล้ายครีปที่เกิดขึ้นบน ชิ้นงานหล่อ) ซึ่งจะทำให้ชิ้นงาน โก่ง ส่งผลให้ขนาดของชิ้นงาน หลังกระบวนการหล่อมีการ เปลี่ยนแปลงไป
	Lower	0.9		
	Target	0.9		
	Upper	1.25		

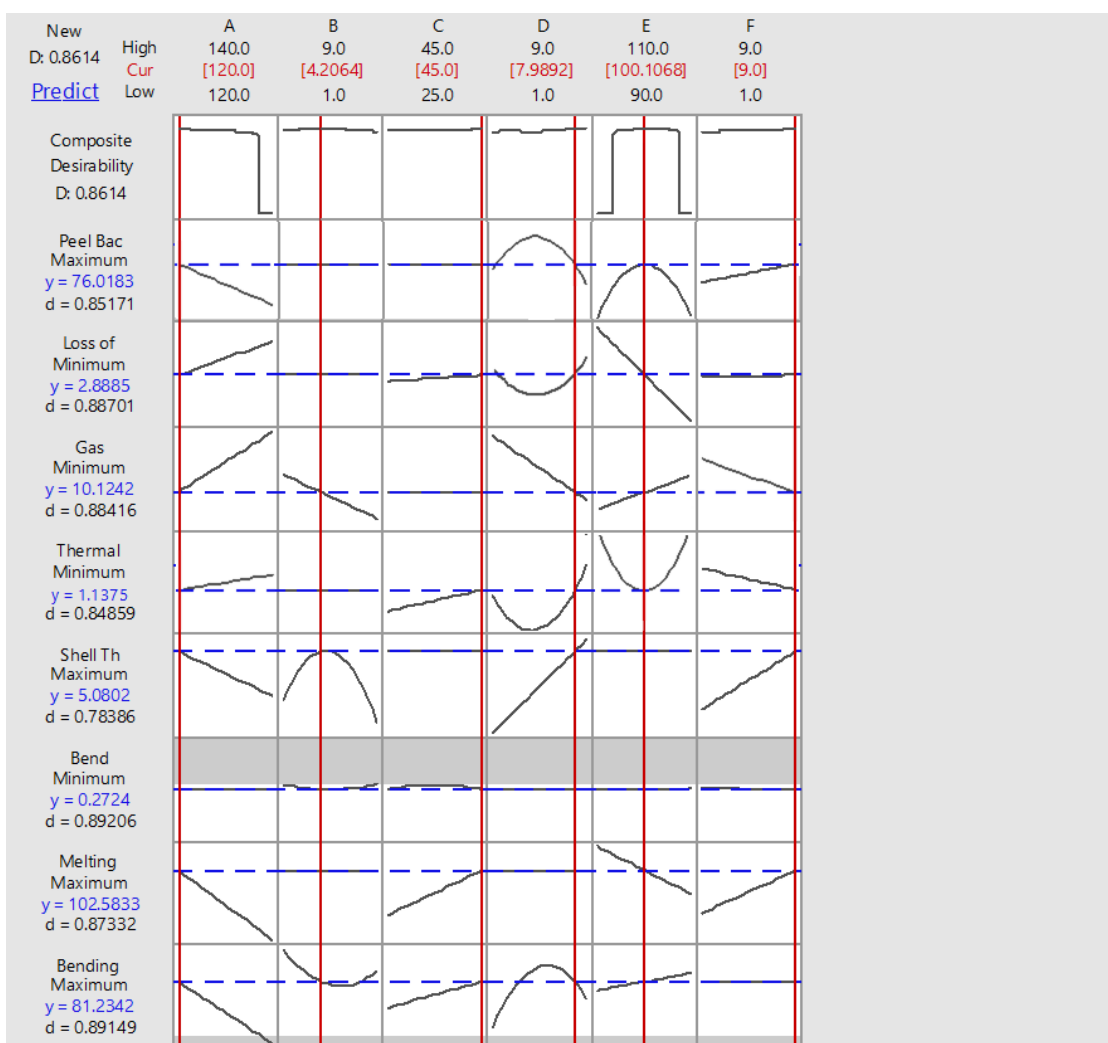
ตารางที่ 4.7 การกำหนดเป้าหมายและคะแนนความสำคัญของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ (ต่อ)

คุณสมบัติ	เป้าหมาย		คะแนน ความสำคัญ	เหตุผล
ความโค้งงอของชิ้นงาน	Minimize		8	เป็นค่าที่ใช้ในการบ่งบอกถึงค่าความโค้งงอของชิ้นงาน ซึ่งค่าดังกล่าวจะบ่งบอกถึงการเซตตัวของผนังและเวลาในการทำให้แบบ ถ้าชิ้นงานโค้งน้อยนั้นแสดงว่าการเซตตัวของผนังนั้นเกิดขึ้นเร็วส่งผลให้การทำให้แบบก็จะใช้เวลาอันน้อยลงด้วย
	Lower	0		
	Target	0		
	Upper	0.4		
ฟิลแบค	Maximize		10	จะการตรวจสอบผิวข้างในของชิ้นงานว่าเกิดการแยกชั้น (Two Layer) หรือไม่ จากนั้นจะทำการคำนวณค่า Peel Back Ratio ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ใช้ในการบ่งบอกถึงความหนาของผนังไส้แบบ
	Lower	70		
	Target	100		
	Upper	100		
ความหนาของผนัง	Maximize		10	จะเป็นการตรวจสอบความหนาของผนัง ซึ่งถ้าความหนามากนั้นแสดงว่าการเซตตัวของผนังเร็วทำให้เวลาที่ใช้ในการทำให้แบบเร็วขึ้นด้วย
	Lower	4.8		
	Target	8		
	Upper	8		

จากการกำหนดเป้าหมายของค่าคุณสมบัติข้างต้น จะเห็นได้ว่าเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานได้กำหนดไว้จะประกอบไปด้วยขีดจำกัดข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) ขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน (USL) และค่าคาดหวัง โดยค่าคาดหวังจะเป็นค่าที่ทางโรงงานตั้งเป้าหมายไว้และต้องการปรับปรุงให้มีค่าเข้าใกล้หรือมากกว่าค่าคาดหวังที่กำหนดโดยที่ต้นทุนวัตถุดิบไม่เพิ่ม ซึ่งค่าคุณสมบัติที่มีการกำหนดเป้าหมายแบบ Maximize ค่าที่ได้จากการทดสอบจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าขีดจำกัดข้อกำหนดด้านล่างจึงจะถือว่าค่านั้นผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนค่าที่เกินจากค่าคาดหวังที่ทางโรงงานกำหนดจะถือว่ามีความดีมากกว่าหากสามารถทำได้โดยที่ต้นทุนวัตถุดิบไม่เพิ่ม ในส่วนของค่าคุณสมบัติที่มีการกำหนดเป้าหมาย

แบบ Minimize ค่าที่ได้จากการทดสอบจะต้องมีค่าไม่เกินขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบนจึงจะถือว่าค่านั้นผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนค่าที่เกินจากค่าคาดหวังที่ทางโรงงานกำหนดจะถือว่ามีความค่าที่ดีมากถ้าหากสามารถทำได้โดยที่ต้นทุนวัตถุดิบไม่เพิ่ม

เมื่อทำการกำหนดเป้าหมายและคะแนนความสำคัญของค่าคุณสมบัติแต่ละตัวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะใช้คำสั่ง Response Optimizer ในโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เพื่อหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยนำเข้าทั้ง 6 ปัจจัย ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทำ Response Optimizer จะเป็นดังรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 ผลจากการทำ Response Optimizer เพื่อหาค่าการปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

จากผลลัพธ์ที่ได้ดังรูปที่ 4.45 พบว่า ค่าคุณสมบัติที่ได้ภายหลังจากการปรับปรุงจะเป็นไปดังตารางที่ 4.8 โดยที่ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลลัพธ์ (Composite Desirability) จะมีค่าอยู่ที่ 0.8164 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 นั่นคือ ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแทปมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่กำหนดไว้ แต่เนื่องจากเครื่องจักรของทางโรงงานกรณีศึกษาไม่สามารถปรับตั้งค่าระดับปัจจัยให้อยู่ในรูปจุดทศนิยมได้ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยที่ได้จากการทำ Response Optimizer ให้เป็นจำนวนเต็มซึ่งผลที่ได้จะเป็นไปดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 ค่าคุณสมบัติที่ได้ภายหลังจากการทำ Response Optimizer

คุณสมบัติ	ผลลัพธ์ที่ได้	หน่วย
ความทนแรงดัดโค้ง	81.2342	kgf/cm ²
ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา	2.8885	%
อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	102.5883	°C
แก๊ส	10.1242	ml/g
การขยายตัวทางความร้อน	1.1375	%
ความโค้งงอของชิ้นงาน	0.2724	mm
ฟิลแบค	76.0183	-
ความหนาของผนัง	5.0802	mm

ตารางที่ 4.9 ค่าระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

สัญลักษณ์	ปัจจัย	ค่าการปรับตั้ง	ค่าการปรับตั้งจริง	หน่วย
A	อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น	120	120	°C
B	เวลาในการปล่อยตัวประสาน	4.2064	4	Sec
C	เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง	45	45	Sec
D	เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ	7.9892	8	Sec
E	ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ	100.1068	100	Sec
F	เวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว	9	9	Sec

โดยค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.9 จะถูกนำไปปรับใช้กับสูตรการผลิต H₂ ในสายการผลิตจริงเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

4.6 สรุปผลขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ

ในขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการจะเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าคุณสมบัติที่สำคัญทั้ง 8 คุณสมบัติ โดยอาศัยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) แบบส่วนประสมกลางชนิด Faced-Centered (CCF) ซึ่งพบว่าปัจจัยนำเข้าทั้ง 6 ปัจจัย ส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน จากนั้นจึงทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าคุณสมบัติที่สำคัญทั้ง 8 คุณสมบัติ ได้แก่ ความทนแรงดัดโค้ง แก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ค่าความโค้งงอของชิ้นงาน พิลแบค และความหนาของผนัง แล้วจึงทำการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้คำสั่ง Response Optimizer ในโปรแกรมมินิแทป พบว่าค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น เท่ากับ 120 °C เวลาในการปล่อยตัวประสาน เท่ากับ 4 วินาที เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง เท่ากับ 45 วินาที เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ เท่ากับ 8 วินาที ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ เท่ากับ 100 วินาที และเวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว เท่ากับ 9 วินาที หลังจากนั้นผู้วิจัยจะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนนี้ไปปรับใช้กับสูตรการผลิต H₂ ในสายการผลิตจริงเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ ซึ่งจะกล่าวในขั้นตอนถัดไป

บทที่ 5

ขั้นตอนการติดตามและควบคุมผล

ในขั้นตอนการติดตามและควบคุมผลจะเป็นการนำค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนการปรับปรุงก่อนหน้านี้อมาทดลองปรับใช้กับกระบวนการผลิตจริงเพื่อยืนยันผลการปรับปรุงที่ได้ พร้อมทั้งจัดทำแผนควบคุมและวิธีการปฏิบัติงานใหม่ในส่วนที่ได้มีการปรับปรุงเพื่อสร้างเป็นมาตรฐานในการทำงานใหม่ให้พนักงานมีความเข้าใจในการทำงานที่ตรงกัน

5.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

ภายหลังจากที่ได้ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมจากขั้นตอนการปรับปรุงแล้ว จากนั้นจะเป็นการนำค่าการปรับตั้งดังกล่าวไปทำการยืนยันผลกับเครื่องจักรในกระบวนการผลิตจริงเพื่อให้มั่นใจว่าค่าการปรับตั้งที่ได้สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินให้มีค่าเข้าใกล้ค่าคาดหวังมากขึ้นจริง และนำผลการทดสอบที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับค่าก่อนปรับปรุง

5.1.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อยืนยันผล

ในการทดลองเพื่อยืนยันผลจะเริ่มต้นจากการจัดประชุมเพื่ออธิบายขั้นตอนการดำเนินงานให้กับสมาชิกภายในทีมและผู้ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานได้จัดเตรียมวัตถุดิบและทำการปรับตั้งค่าเครื่องจักรได้อย่างถูกต้องตามค่าสภาวะที่เหมาะสมจากขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการในบทที่ 4 โดยรายละเอียดของขั้นตอนในการทดลองเพื่อยืนยันผลจะประกอบไปด้วย

1. ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการจัดเตรียมวัตถุดิบของสูตรการผลิต H2 ให้พร้อมสำหรับการทดสอบ
2. ทำการปรับตั้งค่าปัจจัยนำเข้าที่อยู่ในขั้นตอนการผสมตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการในบทที่ 4 ซึ่งประกอบไปด้วย
 - อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น เท่ากับ 120 °C
 - เวลาในการปล่อยตัวประสาน เท่ากับ 4 วินาที
 - เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง เท่ากับ 45 วินาที
 - เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ เท่ากับ 8 วินาที
 - ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ เท่ากับ 100 วินาที
 - เวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว เท่ากับ 9 วินาที

3. ทำการปรับตั้งค่าเครื่องจักรตามสภาวะที่เหมาะสมผ่านทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม
4. ทำการเก็บตัวอย่างทรายที่จะนำไปใช้ในการทดสอบค่าคุณสมบัติ โดยเก็บที่บริเวณท้ายกระบวนกรทำให้ทรายเย็นตัว
5. นำทรายตัวอย่างที่ได้เก็บมาไปทำการตรวจสอบค่าคุณสมบัติแต่ละตัว โดยจะทำภายในห้องทดลองของทางโรงงาน
6. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการยืนยันผลการทดลอง

5.1.2 ผลการทดลอง

จากการทดลองยืนยันผลเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ โดยจะทำการเปรียบเทียบ 2 ช่วงเวลา คือ ก่อนทำการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง ซึ่งจะมีการกำหนดปัจจัยนำเข้าดังตารางที่ 5.1 และทำการเปรียบเทียบข้อมูลของค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของสูตรการผลิต H2 ซึ่งก่อนการปรับปรุงนั้นจะใช้ข้อมูลจำนวน 60 รอบการผลิต และในช่วงหลังการปรับปรุงจะใช้ข้อมูลจำนวน 60 รอบการผลิต ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ค่าระดับของปัจจัยนำเข้าก่อนและหลังทำการปรับปรุง

สัญลักษณ์	ปัจจัย	ค่าปรับตั้งก่อนการปรับปรุง	ค่าปรับตั้งหลังการปรับปรุง	หน่วย
A	อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น	130	120	°C
B	เวลาในการปล่อยตัวประสาน	5	4	Sec
C	เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง	35	45	Sec
D	เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ	5	8	Sec
E	ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ	90	100	Sec
F	เวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว	5	9	Sec

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบยืนยันผลของคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน

RCS Name	H2							
Lot	Bending Strength	Loss of Igniton	Melting Poing	Gas	Thermal Expansion	Bend	Peel Back	Shell Thickness
1	82.15	2.913	102.6	10.24	1.182	0.41	74.67	5.33
2	80.8	2.937	102.1	9.47	1.169	0.43	88.09	5.125
3	83.95	2.910	103.4	10.07	1.237	0.42	81.71	5.44
4	85.45	2.926	105.2	10.02	1.204	0.42	83.26	5.455
5	82.45	2.914	102.5	9.98	1.193	0.40	80.14	5.14
6	83.2	2.910	103.8	9.79	1.198	0.39	69.85	5.48
7	81.1	2.905	102.2	10.05	1.087	0.47	61.37	5.64
8	83.05	2.893	102.9	10.09	1.185	0.44	80.45	5.13
9	85.35	2.882	103.3	9.80	1.126	0.40	76.13	4.97
10	83.25	2.898	103.1	9.42	1.202	0.37	65.08	5.36
11	85.95	2.921	104.5	10.14	1.143	0.37	78.85	5.155
12	83.55	2.922	102.5	10.07	1.157	0.42	67.84	5.165
13	82.05	2.918	103.3	10.33	1.089	0.40	83.41	5.015
14	84.15	2.893	105.1	10.12	1.176	0.41	62.35	5.45
15	84.75	2.912	103.4	10.48	1.221	0.42	79.73	5.065
16	84.3	2.918	105.9	9.61	1.207	0.39	71.94	5.275
17	79.15	2.920	104.5	10.04	1.143	0.43	75.12	5.345
18	82.2	2.927	106.5	9.49	1.179	0.45	75.45	5.225
19	80.1	2.892	104.8	10.04	1.148	0.43	67.40	5.07
20	82.05	2.887	103.4	10.06	1.119	0.39	70.92	5.345
21	84.9	2.899	104.4	9.97	1.168	0.35	77.79	5.135
22	80.55	2.892	105.4	10.14	1.234	0.35	75.09	5.09
23	78.15	2.908	102.8	10.02	1.088	0.34	71.52	5.315
24	80.85	2.904	103.4	9.64	1.194	0.39	84.73	5.175
25	81.75	2.924	103.7	9.95	1.156	0.36	78.14	4.915
26	84.3	2.898	102.6	9.79	1.136	0.35	67.85	5.24
27	83.1	2.883	103.8	10.30	1.235	0.39	77.79	5.265
28	81.9	2.910	103.4	9.76	1.069	0.35	75.09	5.525
29	83.25	2.885	105.1	9.86	1.089	0.35	81.52	5.36
30	81.03	2.900	105.9	10.26	1.113	0.41	87.73	5.62

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบยืนยันผลของคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน (ต่อ)

RCS Name	H2							
Lot	Bending Strength	Loss of Igniton	Melting Poing	Gas	Thermal Expansion	Bend	Peel Back	Shell Thickness
31	79.68	2.916	104.5	9.93	1.169	0.42	76.53	5.375
32	82.83	2.906	104.8	10.02	1.045	0.45	81.40	5.495
33	81.33	2.907	102.8	10.35	1.126	0.41	77.28	5.14
34	82.53	2.915	103.7	10.02	1.113	0.33	81.37	5.405
35	84.03	2.897	104.5	9.61	1.163	0.34	82.15	5.055
36	80.13	2.893	104.2	9.86	1.285	0.36	72.29	5.235
37	79.23	2.884	104.1	10.05	1.176	0.38	68.72	4.995
38	79.83	2.900	103.7	9.65	1.04	0.44	81.93	5.34
39	85.98	2.931	105.4	10.15	1.087	0.4	75.34	4.805
40	84.78	2.912	106.2	9.55	1.02	0.41	63.52	4.955
41	86.13	2.910	104.8	9.75	1.134	0.44	76.73	5.115
42	82.25	2.870	105.1	9.85	1.212	0.46	70.14	5.305
43	81.35	2.893	103.1	9.6	1.163	0.38	59.85	5.245
44	81.95	2.936	104	9.57	1.163	0.42	66.12	5.145
45	79.25	2.903	104.8	9.55	1.129	0.47	78.72	5.405
46	81.95	2.891	102.6	10.35	1.162	0.42	81.93	5.265
47	84.65	2.918	105.4	9.45	1.256	0.38	73.73	5.205
48	79.55	2.913	103.7	9.55	1.129	0.43	88.52	5.115
49	85.15	2.904	105.2	10.05	1.003	0.4	79.79	5.46
50	83.8	2.867	104.8	9.66	1.089	0.38	77.95	4.925
51	86.95	2.895	102.4	9.85	1.196	0.37	67.40	5.075
52	85.45	2.907	103.7	9.65	1.267	0.39	73.67	5.205
53	86.65	2.899	106.5	10.25	1.233	0.38	68.92	5.345
54	85.15	2.884	103.3	9.85	1.11	0.44	69.42	5.125
55	84.25	2.895	104.4	9.55	1.219	0.37	74.15	5.105
56	83.35	2.885	102.5	9.95	1.067	0.36	71.79	4.95
57	83.95	2.874	102.8	9.85	1.126	0.43	86.95	5.225
58	81.25	2.890	103.4	10.05	1.152	0.39	75.67	5.045
59	83.95	2.915	103.7	9.95	1.062	0.42	72.78	5.215
60	86.25	2.912	104.2	9.83	1.126	0.38	81.29	5.285

ต่อมาผู้วิจัยได้นำข้อมูลจากตารางที่ 5.2 ไปทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าความผันแปร และค่าความสามารถของกระบวนการเบื้องต้น โดยที่ค่าคุณสมบัติทั้ง 8 ชนิด จะมีเกณฑ์การยอมรับดังตารางที่ 5.3 ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงจะเป็นไปตามตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.3 เกณฑ์การยอมรับของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ ที่ทางโรงงานกำหนด

ค่าคุณสมบัติ	เป้าหมาย	เกณฑ์การยอมรับ	ค่าคาดหวัง	หน่วย
1. ความทนแรงดัดโค้ง	Maximize	≥ 78	≥ 86	kgf/cm ²
2. ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา	Minimize	≤ 2.95	≤ 2.75	%
3. อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว	Maximize	≥ 100	≥ 110	°C
4. แก๊ส	Minimize	≤ 11	≤ 8	mL/g
5. การขยายตัวทางความร้อน	Minimize	≤ 1.25	≤ 0.9	%
6. ความโก่งงอของชิ้นงาน	Minimize	≤ 0.4	0	mm
7. พิลแบค	Maximize	≥ 70	100	-
8. ความหนาของผนัง	Maximize	≥ 4.8	≥ 8	mm

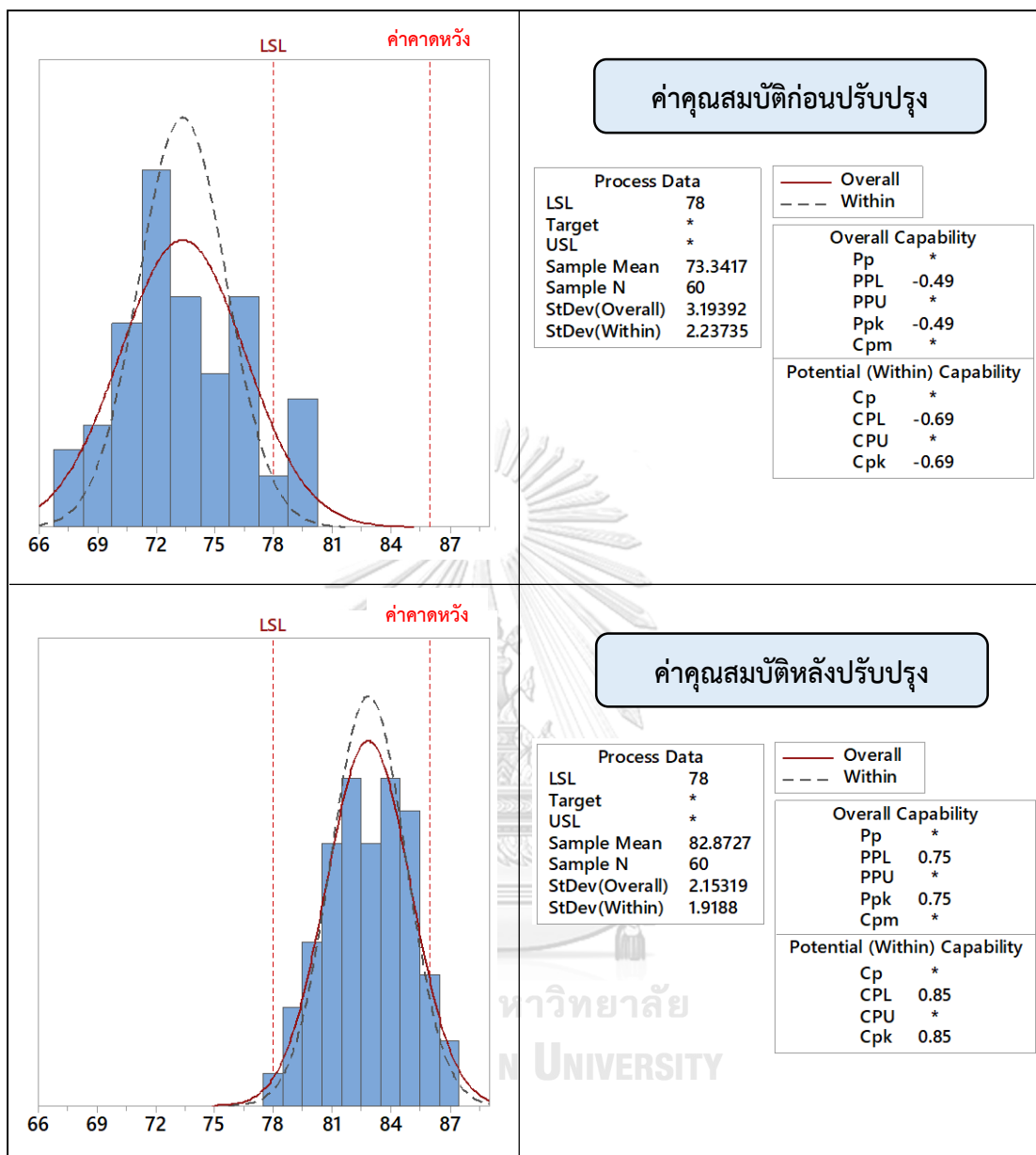
ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงของค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน

คุณสมบัติ	เป้าหมาย	เกณฑ์การยอมรับ	ค่าคาดหวัง	ค่าเฉลี่ย		ค่าความผันแปร		ความสามารถของกระบวนการ (C _{pk})	
				ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
1. ความทนแรงดัดโค้ง (Bending Strength)	Maximize	$\geq 78 \text{ kgf/cm}^2$	$\geq 86 \text{ kgf/cm}^2$	73.34	82.87	3.19	2.15	-0.69	0.85
2. ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา (Loss of Ignition: LOI)	Minimize	$\leq 2.95 \%$	$\leq 2.75 \%$	2.95	2.90	0.12	0.02	0.01	1.12
3. อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว (Melting Point: MP)	Maximize	$\geq 100 \text{ }^\circ\text{C}$	$\geq 110 \text{ }^\circ\text{C}$	103.98	104.00	1.94	1.13	0.78	1.18
4. แก๊ส (Gas)	Minimize	$\leq 11 \text{ ml/g}$	$\leq 8 \text{ ml/g}$	10.38	9.91	0.59	0.26	0.38	1.29
5. การขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion)	Minimize	$\leq 1.25 \%$	$\leq 0.9 \%$	1.13	1.15	0.07	0.06	0.53	0.54
6. ความโค้งงอของชิ้นงาน (Bend)	Minimize	$\leq 0.4 \text{ mm}$	0 mm	0.43	0.40	0.04	0.03	-0.28	0.01
7. ฟิล์มเบค (Peel Back)	Maximize	≥ 70	100	71.77	75.45	11.46	6.81	0.06	0.26
8. ความหนาของผนัง (Shell Thickness)	Maximize	$\geq 4.8 \text{ mm}$	$\geq 8 \text{ mm}$	4.72	5.22	0.35	0.18	-0.07	0.75

จากผลการปรับปรุงดังตารางที่ 5.4 พบว่า ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับปรุงค่าเฉลี่ยให้เป็นไปในทิศทางของค่าที่ต้องการมากขึ้น อีกทั้งความผันแปรของค่าคุณสมบัติแต่ละตัวที่มีค่าลดลง จึงทำให้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการในแต่ละค่าคุณสมบัติมีค่าที่เพิ่มขึ้น โดยการวิเคราะห์ผลการปรับปรุงของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ความทนแรงดัดโค้ง

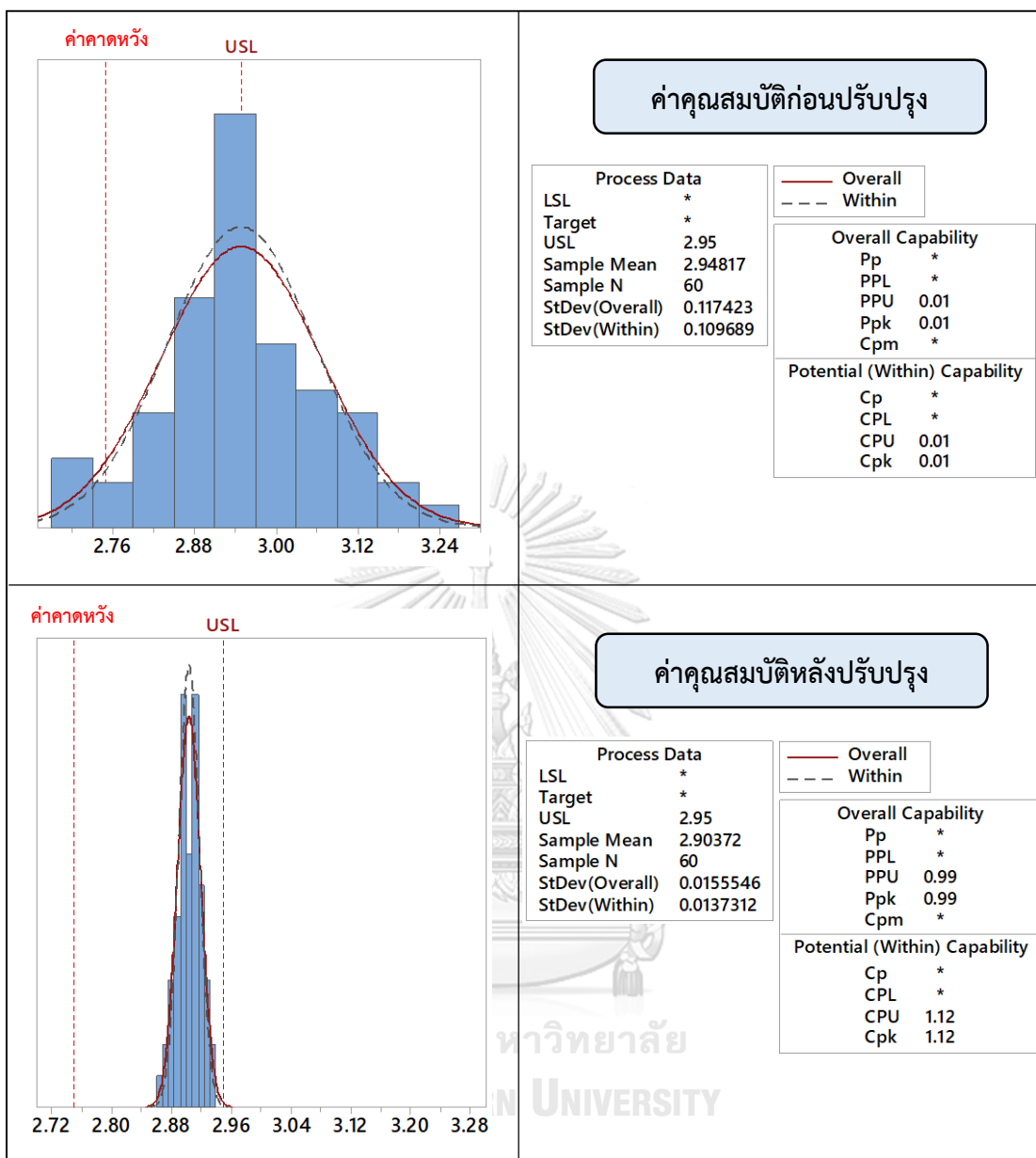
สำหรับความทนแรงดัดโค้งของสูตรการผลิต H2 จะมีค่าเป้าหมายที่ต้องการคือ ค่าสูงสุด และมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ $\geq 78 \text{ kgf/cm}^2$ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อยืนยันผลการทดสอบเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าความผันแปร และใช้ในการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการ โดยจะอาศัยกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.1 เข้ามาช่วยในการเปรียบเทียบผลที่ได้ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง จากรูปข้างต้นพบว่า ค่าเฉลี่ยของความทนแรงดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 73.34 kgf/cm^2 เป็น 82.87 kgf/cm^2 ซึ่งค่าเฉลี่ยหลังการปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าค่าคาดหวังที่มีค่า $\geq 86 \text{ kgf/cm}^2$ นอกจากนี้ค่าความผันแปรยังมีค่าลดลงจาก 3.19 kgf/cm^2 เป็น 2.15 kgf/cm^2 ส่งผลให้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk} = C_p$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก -0.69 เป็น 0.85 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่มีค่าเท่ากับ 1.33 [2] แต่เมื่อสังเกตกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.1 ของค่าคุณสมบัติหลังการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่ทางด้านขวาของขีดจำกัดข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) และมีค่าความทนแรงดัดโค้งที่สูงขึ้น ซึ่งในอนาคตทางโรงงานควรจะมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรที่ลดลงและทำให้ค่าเฉลี่ยมีค่าที่สูงขึ้นเพื่อให้เข้าใกล้ค่าคาดหวังที่ทางโรงงานกำหนดไว้



รูปที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของ
ความทนแรงดัดโค้ง

2. ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

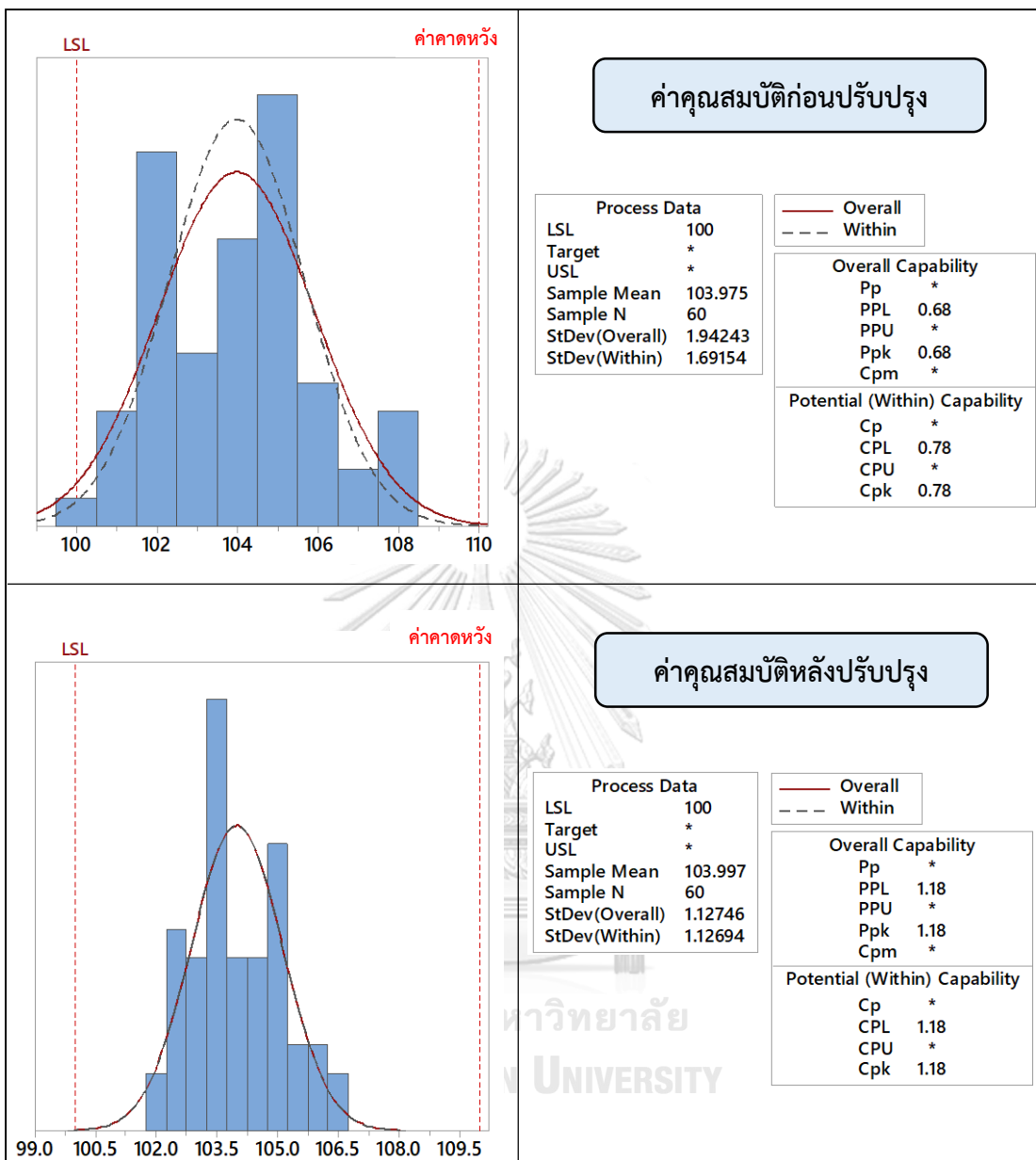
สำหรับปริมาณการสูญเสียหลังการเผาของสูตรการผลิต H2 จะมีค่าเป้าหมายที่ต้องการคือค่าต่ำสุด และมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ $\leq 2.95\%$ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อยืนยันผลการทดสอบเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าความผันแปร และใช้ในการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการ โดยจะอาศัยกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.2 เข้ามาช่วยในการเปรียบเทียบผลที่ได้ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง จากรูปข้างต้นพบว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าลดลงจาก 2.95% เป็น 2.90% ซึ่งค่าเฉลี่ยหลังการปรับปรุงมีค่ามากกว่าค่าคาดหวังที่มีค่า $\leq 2.75\%$ นอกจากนี้ค่าความผันแปรยังมีค่าลดลงจาก 0.12% เป็น 0.02% ส่งผลให้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk} = C_{pu}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 1.12 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่มีค่าเท่ากับ 1.33 [2] แต่เมื่อสังเกตกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.2 ของค่าคุณสมบัติหลังการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่ทางด้านซ้ายของขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน (USL) และมีค่าปริมาณการสูญเสียหลังการเผาที่ลดลง ซึ่งในอนาคตทางโรงงานควรจะมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรที่ลดลงและทำให้ค่าเฉลี่ยมีค่าที่ต่ำลงเพื่อให้เข้าใกล้ค่าคาดหวังที่ทางโรงงานกำหนดไว้



รูปที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของ ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา

3. อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

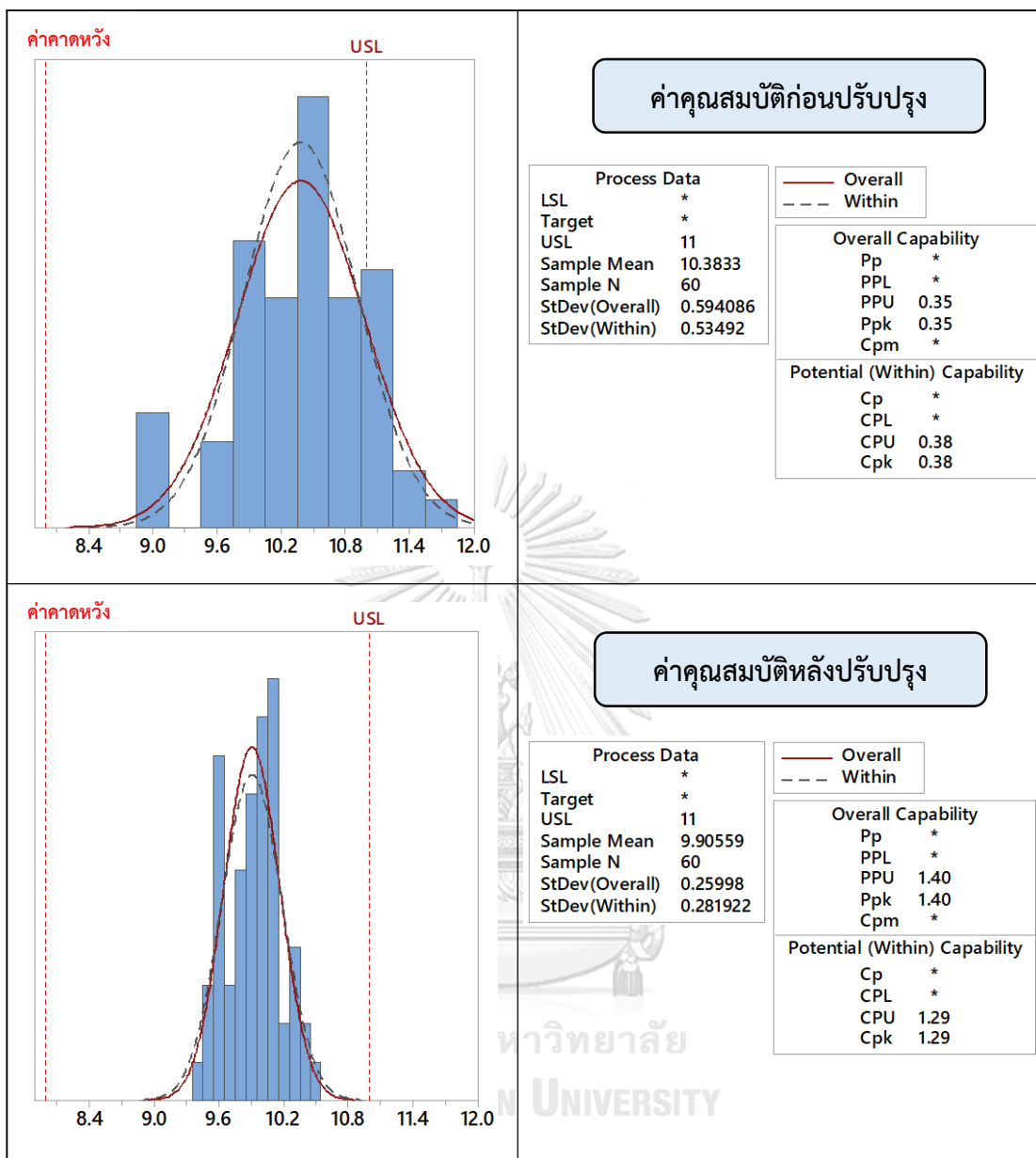
สำหรับอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวของสูตรการผลิต H2 จะมีค่าเป้าหมายที่ต้องการคือค่าสูงสุด และมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ ≥ 100 °C หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อยืนยันผลการทดสอบเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าความผันแปร และใช้ในการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการ โดยจะอาศัยกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.3 เข้ามาช่วยในการเปรียบเทียบผลที่ได้ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง จากรูปข้างต้นพบว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 103.98 °C เป็น 104 °C ซึ่งค่าเฉลี่ยหลังการปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าค่าคาดหวังที่มีค่า ≥ 110 °C นอกจากนี้ค่าความผันแปรยังมีค่าลดลงจาก 1.94 °C เป็น 1.13 °C ส่งผลให้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk} = C_{pl}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.78 เป็น 1.18 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่มีค่าเท่ากับ 1.33 [2] แต่เมื่อสังเกตกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.3 ของค่าคุณสมบัติหลังการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่ทางด้านขวาของขีดจำกัดข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) และมีค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวที่สูงขึ้น ซึ่งในอนาคตทางโรงงานควรจะมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรที่ลดลงและทำให้ค่าเฉลี่ยมีค่าที่สูงขึ้นเพื่อให้เข้าใกล้ค่าคาดหวังที่ทางโรงงานกำหนดไว้



รูปที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของ
อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว

4. แก๊ส

สำหรับแก๊สของสูตรการผลิต H₂ จะมีค่าเป้าหมายที่ต้องการคือ ค่าต่ำสุด และมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ ≤ 11 ml/g หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อยืนยันผลการทดสอบเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการคำนวณค่าเฉลี่ย ค่าความผันแปร และใช้ในการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการ โดยจะอาศัยกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.4 เข้ามาช่วยในการเปรียบเทียบผลที่ได้ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง จากรูปข้างต้นพบว่าค่าเฉลี่ยของแก๊สมีค่าลดลงจาก 10.38 ml/g เป็น 9.91 ml/g ซึ่งค่าเฉลี่ยหลังการปรับปรุงมีค่ามากกว่าค่าคาดหวังที่มีค่า ≤ 8 ml/g นอกจากนี้ค่าความผันแปรยังมีค่าลดลงจาก 0.59 ml/g เป็น 0.26 ml/g ส่งผลให้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk} = C_{pu}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.38 เป็น 1.29 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่มีค่าเท่ากับ 1.33 [2] แต่เมื่อสังเกตกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.4 ของค่าคุณสมบัติหลังการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่ทางด้านซ้ายของขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน (USL) และมีค่าแก๊สที่ต่ำลง ซึ่งในอนาคตทางโรงงานควรมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรที่ลดลงและทำให้ค่าเฉลี่ยมีค่าที่สูงขึ้นเพื่อให้เข้าใกล้ค่าคาดหวังที่ทางโรงงานกำหนดไว้

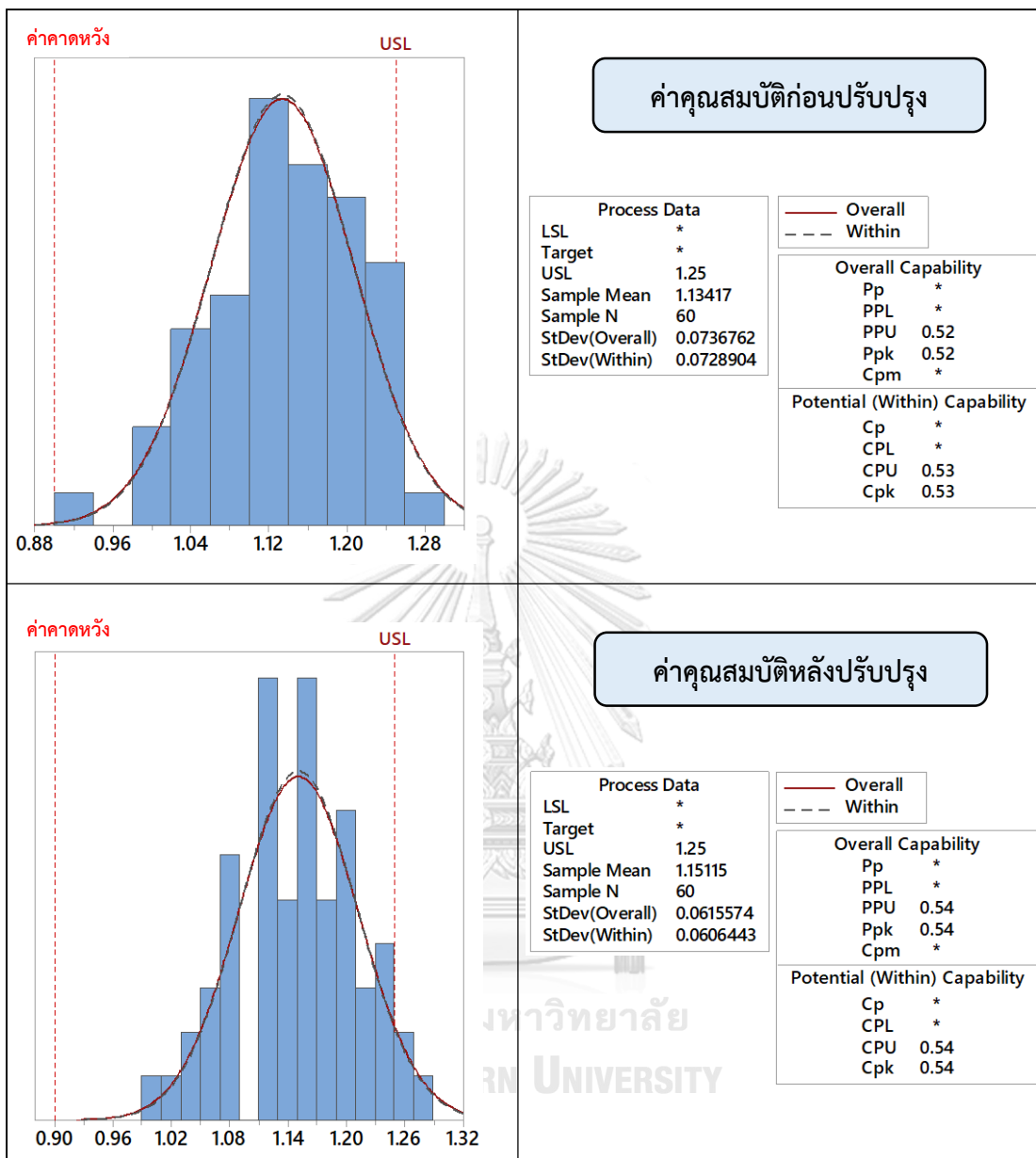


รูปที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของ แก๊ส

5. การขยายตัวทางความร้อน

สำหรับการขยายตัวทางความร้อนของสูตรการผลิต H2 จะมีค่าเป้าหมายที่ต้องการคือค่าต่ำสุด และมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ $\leq 1.25\%$ หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อยืนยันผลการทดสอบเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าความผันแปร และใช้ในการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการ โดยจะอาศัยกราฟฮิสโตแกรม ดังรูปที่ 5.5 เข้ามาช่วยในการเปรียบเทียบผลที่ได้ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง จากรูปข้างต้นพบว่าค่าเฉลี่ยของการขยายตัวทางความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.13% เป็น 1.15% ซึ่งค่าเฉลี่ยหลังการปรับปรุงมีค่ามากกว่าค่าคาดหวังที่มีค่า $\leq 0.9\%$ นอกจากนี้ค่าความผันแปรยังมีค่าลดลงจาก 0.07% เป็น 0.06% ส่งผลให้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk} = C_{pu}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.53 เป็น 0.54 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่มีค่าเท่ากับ 1.33 [2] แต่เมื่อสังเกตกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.5 ของค่าคุณสมบัติหลังการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่ทางด้านซ้ายของขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน (USL) และมีข้อมูลบางส่วนที่อยู่นอกขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน ซึ่งในอนาคตทางโรงงานควรจะมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรที่ลดลงและทำให้ค่าเฉลี่ยมีค่าลดต่ำลงเพื่อให้เข้าใกล้ค่าคาดหวังที่ทางโรงงานกำหนดไว้

ในส่วนของการขยายตัวทางความร้อนจะสังเกตเห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยหลังการปรับปรุงของการขยายตัวทางความร้อนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย โดยข้อมูลจากรูปที่ 5.5 จะแสดงให้เห็นว่าข้อมูลภายหลังการปรับปรุงจะมีค่าที่ออกนอกขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบนจำนวน 3 ค่า จากทั้งหมด 60 ค่า ซึ่งเพิ่มขึ้นจากก่อนปรับปรุงที่มีจำนวน 2 ค่า จากทั้งหมด 60 ค่า ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าจำนวนข้อมูลภายหลังการปรับปรุงจะมีค่าออกนอกขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบนที่มากกว่าข้อมูลก่อนปรับปรุงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

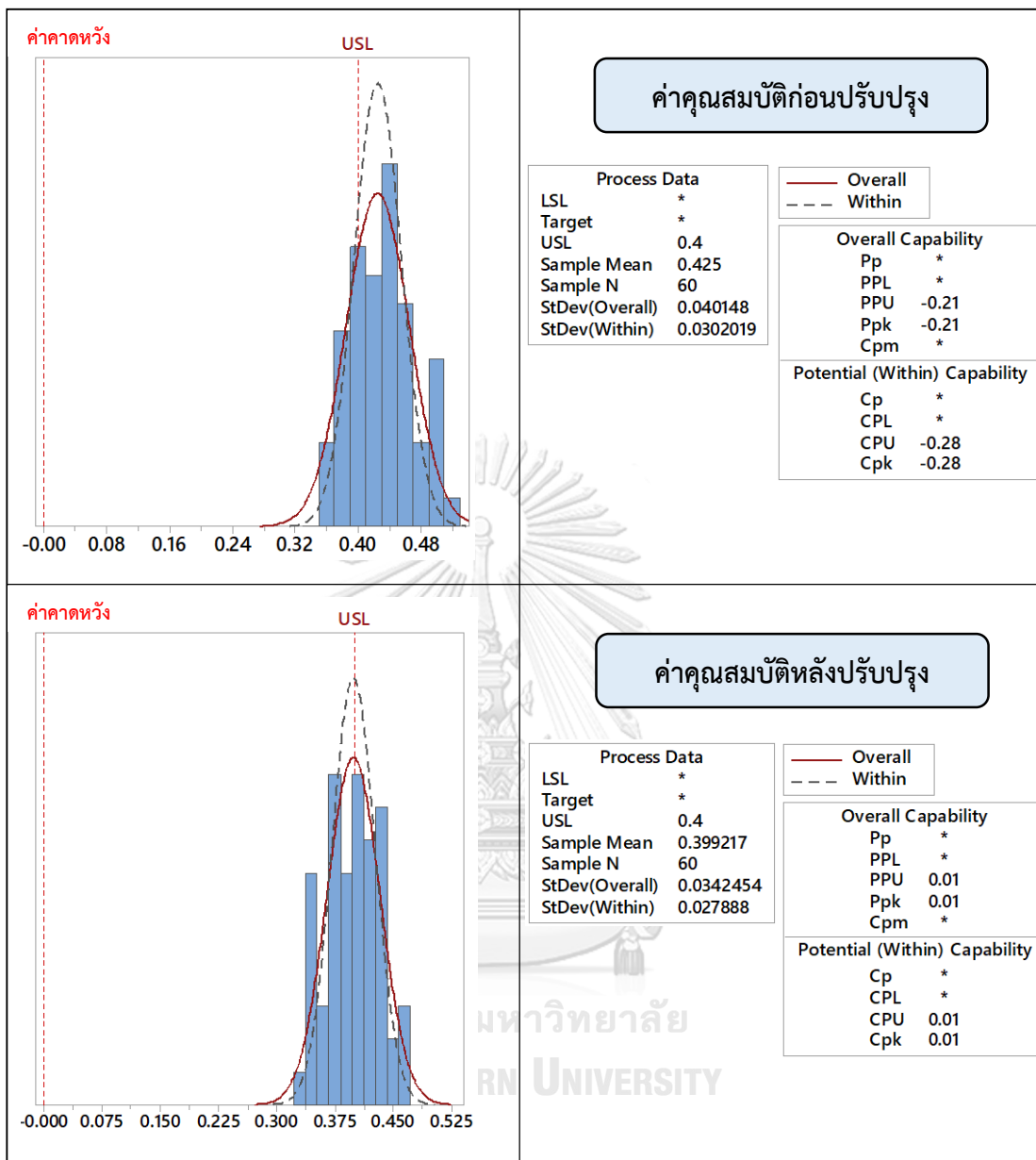


รูปที่ 5.5 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของการขยายตัวทางความร้อน

6. ความโก่งงอของชิ้นงาน

สำหรับความโก่งงอของชิ้นงานของสูตรการผลิต H2 จะมีค่าเป้าหมายที่ต้องการคือ ค่าต่ำสุด และมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ ≤ 0.4 mm หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อยืนยันผลการทดสอบเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าความผันแปร และใช้ในการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการ โดยจะอาศัยกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.6 เข้ามาช่วยในการเปรียบเทียบผลที่ได้ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง จากรูปข้างต้นพบว่า ค่าเฉลี่ยของความโก่งงอของชิ้นงานมีค่าลดลงจาก 0.43 mm เป็น 0.40 mm ซึ่งค่าเฉลี่ยหลังการปรับปรุงมีค่ามากกว่าค่าคาดหวังที่มีค่าเท่ากับ 0 mm นอกจากนี้ค่าความผันแปรยังมีค่าลดลงจาก 0.04 mm เป็น 0.03 mm ส่งผลให้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk} = C_{pu}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก -0.28 เป็น 0.01 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่มีค่าเท่ากับ 1.33 [2] ซึ่งเมื่อสังเกตกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.6 ของค่าคุณสมบัติหลังการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่บริเวณขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน (USL) และมีค่าความโก่งงอของชิ้นงานที่ต่ำลง แต่ยังมีข้อมูลบางส่วนที่มีค่าเกาะกลุ่มอยู่นอกขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน ซึ่งในอนาคตทางโรงงานควรจะมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรที่ลดลงและทำให้ค่าเฉลี่ยมีค่าที่ต่ำลงเพื่อให้เข้าใกล้ค่าคาดหวังที่ทางโรงงานกำหนดไว้

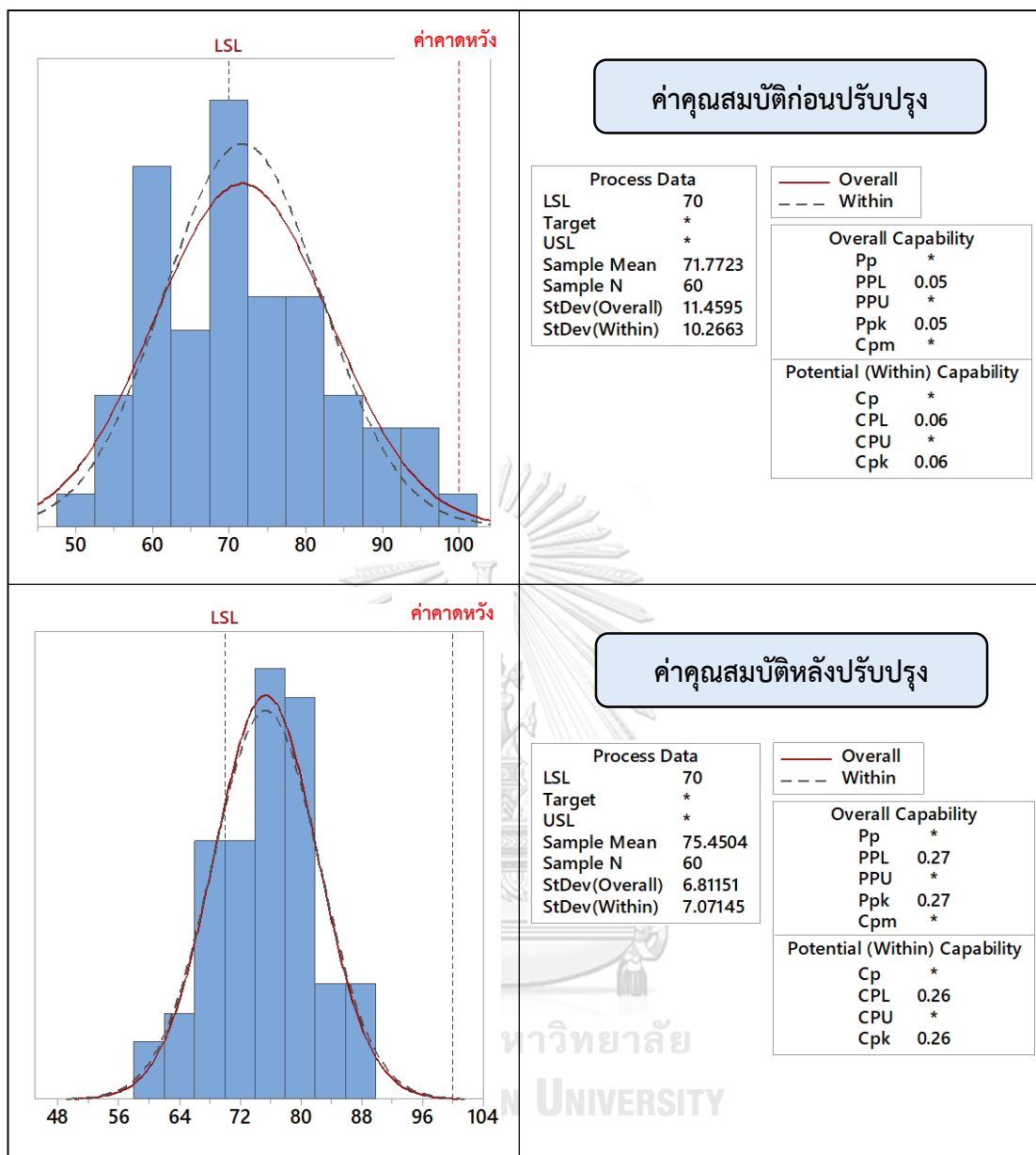
ในส่วนความโก่งงอของชิ้นงานนั้น เมื่อสังเกตจากรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าข้อมูลภายหลังการปรับปรุงจะมีค่าเฉลี่ยและจำนวนข้อมูลที่อยู่บนนอกขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบนที่ลดลงจากก่อนปรับปรุงที่มีจำนวน 40 ค่า เหลือเพียง 27 ค่า (จากทั้งหมด 60 ค่า) แม้ว่าจะมีข้อมูลบางส่วนที่ยังมีค่าเกินขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน แต่ทว่ารายเคลือบเรซินในส่วนนี้ก็ยังสามารถนำไปใช้งานในกระบวนการผลิตจริงได้โดยไม่เกิดปัญหา



รูปที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของ
ความถี่ของชิ้นงาน

7. ఫీల్‌బ్యాక్

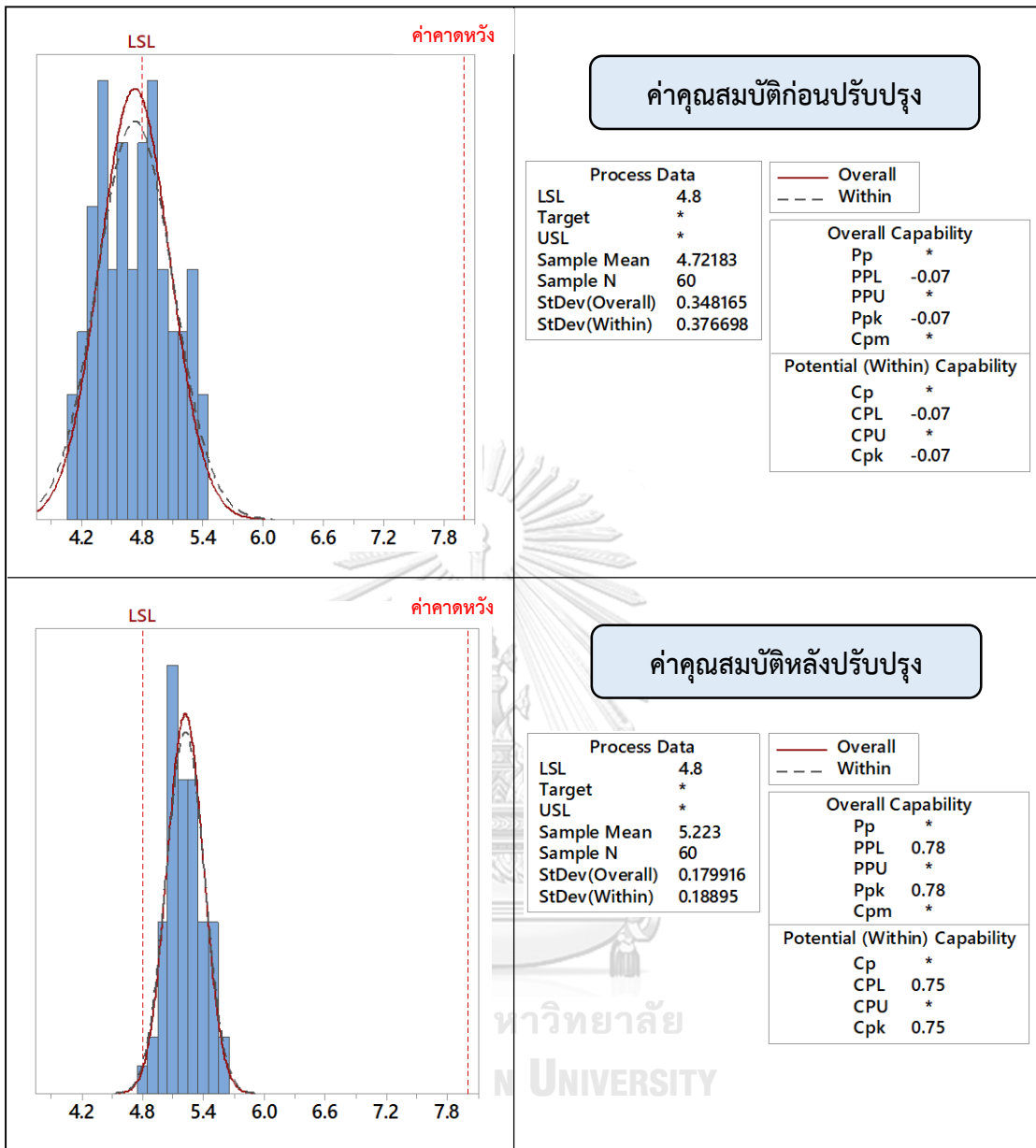
สำหรับฟิลแบคของสูตรการผลิต H2 จะมีค่าเป้าหมายที่ต้องการคือ ค่าสูงสุด และมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ ≥ 70 หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อยืนยันผลการทดสอบเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าความผันแปร และใช้ในการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการ โดยจะอาศัยกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.7 เข้ามาช่วยในการเปรียบเทียบผลที่ได้ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง จากรูปข้างต้นพบว่าค่าเฉลี่ยของฟิลแบคมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 71.77 เป็น 75.45 ซึ่งค่าเฉลี่ยหลังการปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าค่าคาดหวังที่มีค่าเท่ากับ 100 นอกจากนี้ค่าความผันแปรยังมีค่าลดลงจาก 11.46 เป็น 6.81 ส่งผลให้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk} = C_{pl}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.06 เป็น 0.26 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่มีค่าเท่ากับ 1.33 [2] แต่เมื่อสังเกตกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.7 ของค่าคุณสมบัติหลังการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่ทางด้านขวาของขีดจำกัดข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) และมีค่าฟิลแบคที่สูงขึ้น และมีข้อมูลบางส่วนที่อยู่นอกขีดจำกัดข้อกำหนดด้านล่าง ซึ่งในอนาคตทางโรงงานควรจะมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรที่ลดลงและทำให้ค่าเฉลี่ยมีค่าที่สูงขึ้นเพื่อให้เข้าใกล้ค่าคาดหวังที่ทางโรงงานกำหนดไว้



รูปที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของฟิล์มเบค

8. ความหนาของผนัง

สำหรับความหนาของผนังของสูตรการผลิต H2 จะมีค่าเป้าหมายที่ต้องการคือ ค่าสูงสุด และมีเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้คือ ≥ 4.8 mm หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อยืนยันผลการทดสอบเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต เพื่อนำมาทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าความผันแปร และใช้ในการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการ โดยจะอาศัยกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.8 เข้ามาช่วยในการเปรียบเทียบผลที่ได้ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง ซึ่งจากรูปข้างต้นพบว่าค่าเฉลี่ยของความหนาของผนังมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 4.72 mm เป็น 5.22 mm ซึ่งค่าเฉลี่ยหลังการปรับปรุงมีค่าน้อยกว่าค่าคาดหวังที่มีค่า 8 mm นอกจากนี้ค่าความผันแปรยังมีค่าลดลงจาก 0.35 mm เป็น 0.18 mm ส่งผลให้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ ($C_{pk} = C_{pl}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก -0.07 เป็น 0.75 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่มีค่าเท่ากับ 1.33 [2] แต่เมื่อสังเกตกราฟฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5.8 ของค่าคุณสมบัติหลังการปรับปรุง จะเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะเกาะกลุ่มอยู่ทางด้านขวาของขีดจำกัดข้อกำหนดด้านล่าง (LSL) และมีค่าความหนาของผนังที่สูงขึ้น ซึ่งในอนาคตทางโรงงานควรจะมีการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการให้มีความผันแปรที่ลดลงและทำให้ค่าเฉลี่ยมีค่าที่สูงขึ้นเพื่อให้เข้าใกล้ค่าคาดหวังที่ทางโรงงานกำหนดไว้



รูปที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงของความหนาของผนัง

5.1.3 การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่

ในส่วนของการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่จะเป็นการวิเคราะห์ถึงข้อดีและข้อเสียที่เกิดจากการนำค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่ไปปรับใช้ในสายการผลิตจริง ซึ่งรายละเอียดในการวิเคราะห์ข้อมูลจะมีดังต่อไปนี้

- การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากระยะเวลาต่อรอบการผลิตที่เพิ่มขึ้น

จากผลการวิเคราะห์เพื่อหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมในขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการก่อนหน้าจะทำให้ระยะเวลาต่อรอบการผลิตของสูตรการผลิต H2 เพิ่มขึ้นจาก 140 วินาที เป็น 166 วินาที ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 26 วินาที ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรก่อนการปรับปรุงและหลังปรับปรุง

สัญลักษณ์	ปัจจัย	ค่าปรับตั้งก่อนการปรับปรุง	ค่าปรับตั้งหลังการปรับปรุง	หน่วย
B	เวลาในการปล่อยตัวประสาน	5	4	Sec
C	เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง	35	45	Sec
D	เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ	5	8	Sec
E	ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ	90	100	Sec
F	เวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว	5	9	Sec
ระยะเวลารวม		140	166	Sec

โดยการผลิสูตรการผลิต H2 จะถูกผลิต 2 วัน ใน 1 สัปดาห์ โดยทำการผลิตวันละ 31 รอบการผลิต ซึ่งในวันที่ทำการผลิตจะมีการผลิตสูตรการผลิตอื่นๆ ดังตารางที่ 5.6 และ 5.7 ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการผลิตจะเริ่มตั้งแต่เวลา 9.00 นาฬิกา ไปจนถึงเวลา 6.00 นาฬิกา โดยที่พนักงานกะแรกจะทำงานในช่วงเวลา 9.00 – 17.00 นาฬิกา ส่วนพนักงานกะที่สองจะเริ่มงานเวลา 17.00 – 1.00 นาฬิกา และตั้งแต่เวลา 1.00 – 6.00 นาฬิกา จะเป็นช่วงของการทำงานล่วงเวลา (Overtime: OT) ซึ่งปกติแล้วระยะเวลาที่ใช้ต่อรอบการผลิตจะมีค่าเท่ากับ 180 วินาที (3 นาที) ประกอบไปด้วยระยะเวลาในการผสมเท่ากับ 140 วินาที และมีการเผื่อระยะเวลาลำช้าของแต่ละรอบการผลิตเท่ากับ

40 วินาที ซึ่งค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่จะทำให้ระยะเวลาต่อรอบการผลิตเพิ่มขึ้นจากเดิม 26 วินาที นั่นคือจะใช้เวลาต่อรอบการผลิตเท่ากับ 206 วินาที ส่งผลให้ระยะเวลารวมในการผลิตของสูตรการผลิต H2 ต่อสัปดาห์ เพิ่มขึ้นจากเดิมคือ 190 นาที ($[31 \text{ รอบการผลิต} \times 2 \text{ (จำนวนวันในการผลิตต่อสัปดาห์)} \times 180 \text{ วินาที}]/60 = 186 \text{ นาที}$) ไปเป็น 213 นาที ($[31 \text{ รอบการผลิต} \times 2 \text{ (จำนวนวันในการผลิตต่อสัปดาห์)} \times 206 \text{ วินาที}]/60 \approx 213 \text{ นาที}$) ดังนั้นระยะเวลาในการผลิตจะเพิ่มขึ้นจากเดิม 23 นาที ($213 - 190 = 23 \text{ นาที}$) จากนั้นจึงทำการพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดจากเวลาที่เพิ่มขึ้นพบว่า รอบเวลาในการผลิตที่เพิ่มขึ้นนั้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อการผลิตทรายเคลือบเรซินสูตรอื่นๆในแต่ละวัน แต่จะทำให้ระยะเวลาสิ้นสุดของการผลิตในตารางการผลิตวันแรกและวันที่สองเปลี่ยนเป็นเวลา 5.36 นาฬิกา และ 4.36 นาฬิกา ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงเวลาของพนักงานที่ต้องทำงานล่วงเวลา ในช่วงเวลา 1.00 – 6.00 นาฬิกา และในกระบวนการผลิตนั้นจะใช้พนักงานจำนวน 5 คน ค่าล่วงเวลาที่ทางโรงงานจ่ายให้จะเท่ากับ 80 บาทต่อชั่วโมง ($\approx 1.33 \text{ บาทต่อนาที}$) ดังนั้นทางโรงงานจะต้องเสียค่าล่วงเวลาของพนักงานเพิ่มขึ้นเท่ากับ $1.33 \text{ บาทต่อนาที} \times 23 \text{ นาทีต่อสัปดาห์} \times 5 \text{ (จำนวนพนักงานที่ทำงานล่วงเวลา)}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 152.95 บาทต่อสัปดาห์ หรือเท่ากับ $152.95 \text{ บาทต่อสัปดาห์} \times 52 \text{ สัปดาห์ต่อ 1 ปี} = 7953.4 \text{ บาทต่อปี}$ (ต่อสูตรการผลิตเพียงสูตรเดียว)

นอกจากรอบเวลาในการผลิตที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ทางโรงงานต้องเสียค่าล่วงเวลาของพนักงานเพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้ทางโรงงานจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วน of ค่าไฟฟ้าและค่าน้ำที่ใช้ในการผลิตเพิ่มเติม ซึ่งปกติแล้วในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจะมีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 154.2 บาทต่อชั่วโมง หรือเท่ากับ 2.57 บาทต่อนาที ดังนั้นระยะเวลาในการผลิตที่เพิ่มขึ้นมา 23 นาทีต่อสัปดาห์ จะคิดเป็นค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ $2.57 \text{ บาทต่อนาที} \times 23 \text{ นาทีต่อสัปดาห์} = 59.11 \text{ บาทต่อสัปดาห์}$ หรือเท่ากับ $59.11 \text{ บาทต่อสัปดาห์} \times 52 \text{ สัปดาห์ต่อ 1 ปี} = 3073.72 \text{ บาทต่อปี}$ (ต่อสูตรการผลิตเพียงสูตรเดียว)

ตารางที่ 5.6 ตารางการผลิตประจำวันแรกของกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน

ลำดับที่	สูตรการผลิต	เวลาในการผลิต			จำนวนที่ผลิต
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	ระยะเวลารวม (ชั่วโมง)	
1	NOJ	9:00	10:40	1.40	31
2	NOC	10:40	11:55	1.15	23
3	H2	13:00	14:35	1.35	31
4	MOZ(SNF)	14:35	15:45	1.10	23
5	NOB	15:45	17:05	1.20	23
6	OA(SF)	17:05	17:55	0.50	17
7	NOA	17:55	18:45	0.50	17
8	NOC(2)	18:45	19:35	0.50	17
9	NOA(2)	19:35	20:05	0.30	7
10	NOB(250)	20:05	21:05	1.00	17
11	LOY	21:05	22:20	1.15	25
12	LFB	22:20	23:00	0.40	11
13	HBI	23:00	00:40	1.40	32
14	LOC	00:40	1:05	0.25	9
15	LOC(2)	1:05	3:15	2.10	46
16	LOC(3)	3:15	5:25	2.10	46

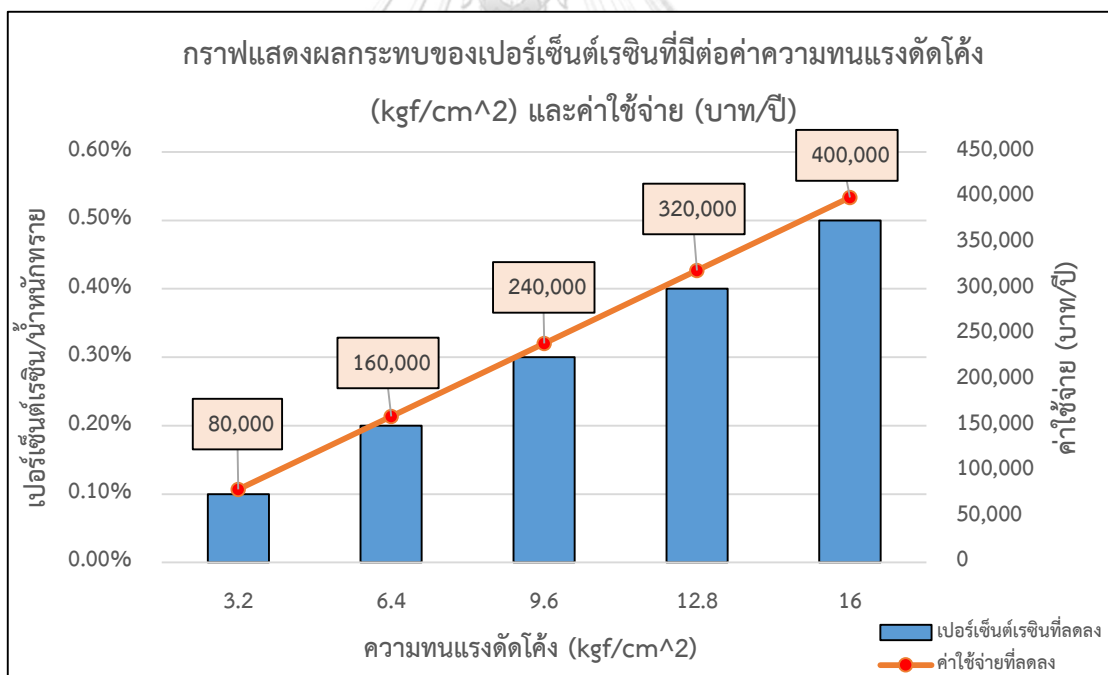
ตารางที่ 5.7 ตารางการผลิตประจำวันที่สองของกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน

ลำดับที่	สูตรการผลิต	เวลาในการผลิต			จำนวนที่ผลิต
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	ระยะเวลารวม	
1	LOC	9:00	11:00	2:00	38
2	HBI	11:00	12:00	1:00	20
3	LOC(2)	13:00	15:30	2:30	50
4	H2	15:30	17:05	1:35	31
5	NOY	17:05	17:25	0:20	6
6	LON	17:25	18:40	1:15	25
7	PLY	18:40	19:40	1:00	16
8	NOA(TFC)	19:40	20:30	0:50	17
9	LOT	20:30	23:30	3:00	62
10	LOC(NIC)	23:30	00:40	1:10	23
11	NKG	00:40	1:50	1:10	24
12	HOK	1:50	3:10	1:20	28
13	LON(2)	3:10	4:25	1:15	25

- การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่

เนื่องจากค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่จะทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการม่ทรายนั้นมีค่าลดลงจาก 130 °C เหลือเพียง 120 °C ซึ่งจะช่วยให้ทางโรงงานประหยัดค่าแก๊ส LPG ที่ใช้ในการให้ความร้อนทรายได้ โดยปกติแล้วที่อุณหภูมิในการม่ทรายเท่ากับ 130 °C การผลิตทรายเคลือบเรซินจะใช้แก๊ส LPG ในการผลิตเท่า 1.42 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต ส่วนค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่จะใช้อุณหภูมิในการม่ทรายลดลงเหลือเท่ากับ 120 °C ซึ่งจะใช้แก๊ส LPG ในการผลิตเท่ากับ 1.3 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต โดยแก๊ส LPG ที่ใช้จะมีค่าลดลง 1.42 – 1.3 เท่ากับ 0.12 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต โดยที่แก๊ส LPG จะมีราคาเท่ากับ 18.29 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ลดลงได้เท่ากับ 0.12 กิโลกรัมต่อรอบการผลิต x 18.29 บาทต่อกิโลกรัม x 62 รอบการผลิตต่อสัปดาห์ = 136.1 บาทต่อสัปดาห์ หรือเท่ากับ 136.1 บาทต่อสัปดาห์ x 52 สัปดาห์ต่อ 1 ปี = 7076.03 บาทต่อปี

นอกจากนี้แล้วค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่ยังทำให้ค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินมีค่าอยู่ในช่วงเกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้มากขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วทางโรงงานจะต้องทำการเพิ่มปริมาณฟีนอลิกเรซินลงไปเพื่อให้ค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินมีค่าเข้าใกล้เกณฑ์การยอมรับที่ทางโรงงานกำหนดไว้มากยิ่งขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของปริมาณฟีนอลิกเรซินนั้นอาจจะส่งผลกระทบต่อทำให้ค่าแก๊สและปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่าเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้ทางโรงงานต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนนี้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการปรับปรุงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินโดยการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม จึงเป็นแนวทางในการปรับปรุงที่ทำให้ทางโรงงานไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายวัตถุดิบในส่วนนี้เพิ่มเติม โดยต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลงในส่วนนี้สามารถประเมินได้จากค่าความทนแรงดัดโค้งที่เพิ่มมากขึ้น โดยในงานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากเดิมเท่ากับ $82.87 - 73.34 = 9.53 \text{ kgf/cm}^2$ ซึ่งเทียบเท่าได้กับการเติมฟีนอลิกเรซินเพิ่มลงไปประมาณ 0.3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักทราย ซึ่งจะช่วยให้ทางโรงงานประหยัดค่าใช้จ่ายไปได้เท่ากับ 240,000 บาทต่อปี (ต่อสูตรการผลิตเพียงสูตรเดียว) ดังรูปที่ 5.9 อีกทั้งค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินที่ดีขึ้นยังช่วยให้สร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าอีกด้วย



รูปที่ 5.9 ผลกระทบของเปอร์เซ็นต์เรซินที่มีต่อค่าความทนแรงดัดโค้ง (kgf/cm^2) และค่าใช้จ่าย (บาท/ปี)

จากผลการวิเคราะห์เบื้องต้นจะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายที่ทางโรงงานจะต้องจ่ายเพิ่มเติมมาจากสองส่วน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมของพนักงานที่ทำงานล่วงเวลาเท่ากับ 7943.4 บาทต่อปี และค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในส่วนของค่าไฟฟ้าและค่าน้ำเท่ากับ 3073.72 บาทต่อปี ในส่วนของค่าใช้จ่ายที่ทางโรงงานสามารถลดได้จะมาจากสองส่วนเช่นกัน ได้แก่ ค่าแก๊ส LPG ที่ใช้ในการผลิตจะมีค่าใช้จ่ายลดลงเท่ากับ 7076.03 บาทต่อปี และค่าใช้จ่ายในส่วนของวัตถุดิบสามารถลดลงได้เท่ากับ 240,000 บาทต่อปี จากนั้นเมื่อนำค่าใช้จ่ายที่สามารถลดลงได้มาหักลบกับค่าใช้จ่ายในส่วนที่จะต้องจ่ายเพิ่มเติมพบว่า ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่จะช่วยให้ทางโรงงานสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายไปได้เท่ากับ $(240,000 + 7076.03) - (7943.4 + 3073.72) = 236,058.91$ บาทต่อปี

5.2 การตรวจติดตามและควบคุมผล

ภายหลังจากการปรับปรุงกระบวนการโดยการนำค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมจากขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการไปทำการประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตจริงเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นจะต้องมีการจัดทำเอกสารวิธีการปฏิบัติงานตามวิธีการปรับปรุงที่ได้มีการพัฒนาขึ้นดังตารางที่ 5.8-5.10 และจัดทำเอกสารที่ใช้ในการตรวจสอบ (Check Sheet) เพื่อใช้ในการควบคุมค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่ของปัจจัยทั้ง 6 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น เวลาในการปล่อยตัวประสาน เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ และเวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว อีกทั้งยังใช้ในการตรวจสอบค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินดังตารางที่ 5.11 และจะต้องมีการจัดอบรมเพื่อให้พนักงานมีความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการปฏิบัติงานใหม่ที่ตรงกัน

ตารางที่ 5.8 วิธีการปฏิบัติงานในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินสำหรับทำไส้แบบกลวง

วิธีการปฏิบัติงานในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซิน		
ขั้นตอน	รายละเอียดการปฏิบัติงาน	หมายเหตุ
1	เตรียมความพร้อมก่อนการปฏิบัติงานโดยการสวมอุปกรณ์ป้องกันภัยในขณะปฏิบัติงาน	หมวกนิรภัย รองเท้านิรภัย ถุงมือ หน้ากากอนามัย
2	ตรวจสอบระยะห่างและสภาพของใบควาดว่ามีารสึกหรอหรือไม่	ระยะห่างระหว่างใบควาดกับถังผสมจะต้องอยู่ในช่วง 2-3 มิลลิเมตร
3	ตรวจสอบมุมการไหลของอุปกรณ์ระบายความร้อน	ตรวจสอบจุดมาร์คว่า ทำมุม 2 องศา กับพื้นหรือไม่
4	ตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำระบายความร้อน	น้ำระบายความร้อนจะต้องมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส
5	จัดเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสำหรับสูตรการผลิต H2	วัตถุดิบที่ใช้จะประกอบไปด้วย ทราย ฟินอลิกเรซิน สารละลายเฮกซามีน และ แคลเซียมสเตียเรท
6	ทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ในกระบวนการผสมผ่านทางคอมพิวเตอร์ควบคุม ซึ่งประกอบไปด้วย - อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น เท่ากับ 120 °C - เวลาในการปล่อยตัวประสาน เท่ากับ 4 วินาที - เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง เท่ากับ 45 วินาที - เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ เท่ากับ 8 วินาที - ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ เท่ากับ 100 วินาที - เวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว เท่ากับ 9 วินาที	เป็นค่าการปรับตั้งที่ใช้สำหรับสูตรการผลิต H2
7	ปิดประตูถังผสม	เพื่อป้องกันแคลเซียมสเตียเรทเกิดการฟุ้งกระจายออกนอกถังผสม
8	ดำเนินการผลิตทรายเคลือบเรซินตามจำนวนรอบการผลิตที่กำหนดไว้	-
9	เมื่อทรายเคลือบเรซินออกจากขั้นตอนการผสมจะต้องนำทรายตัวอย่างมาตรวจสอบค่าความทนแรงดัดโค้ง ซึ่งเป็นการตรวจสอบระหว่างกระบวนการ (In Process)	เพื่อตรวจสอบค่าคุณสมบัติเบื้องต้น
10	ทำการเก็บทรายตัวอย่างจำนวน 15 รอบการผลิต ที่บริเวณท้ายกระบวนการระบายความร้อน	เพื่อนำไปตรวจสอบค่าคุณสมบัติ
11	ตรวจสอบค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ ได้แก่ ความทนแรงดัดโค้ง แก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ค่าความโค้งงอของชิ้นงาน พิลแบค และความหนาของผนัง	เพื่อตรวจสอบว่าตรงตามความต้องการของลูกค้าหรือไม่
12	บรรจุภัณฑ์ถังละ 600 กิโลกรัม	-

ตารางที่ 5.9 แผนควบคุมปัจจัยนำเข้าของกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินสำหรับสูตรการผลิต H2

ลำดับที่	ปัจจัยนำเข้า	ค่าการปรับตั้ง	หน่วย	เครื่องมือ	ความถี่	ผู้รับผิดชอบ	เอกสาร	การแก้ปัญหา
1	อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น	120	องศาเซลเซียส		ก่อนการผลิต	พนักงานประจำเครื่อง	แบบบันทึก	แจ้งหัวหน้าวิศวกร
2	เวลาในการปล่อยตัวประสาน	4	วินาที	คอมพิวเตอร์	สูตรที่ใช้สำหรับทำ		ปัจจัยนำเข้า	ผู้ทำการควบคุม
3	เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง	45	วินาที	ควบคุม	ใส่แบบกลวง			เพื่อทำการแก้ไข
4	เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ	8	วินาที					การปรับตั้งค่า
5	ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ	100	วินาที					ตามที่กำหนด
6	เวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว	9	วินาที					

ตารางที่ 5.10 แผนควบคุมค่าคุณสมบัติของกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินสำหรับสูตรการผลิต H2

ลำดับที่	ค่าคุณสมบัติ	เกณฑ์การยอมรับ	หน่วย	เครื่องมือ	ความถี่	ผู้รับผิดชอบ	เอกสาร	การแก้ปัญหา
1	ความหนาแน่นตัก	78-86	kgf/cm ²	แผนภูมิควบคุม I-MR	ทุกรอบการผลิต (In Process)	พนักงานประจำเครื่อง		แจ้งหัวหน้าวิศวกร
2	ปริมาณการสูญเสียหลังการเผา	2.75-2.95	%				แบบบันทึก	ผู้ทำการควบคุม
3	อุณหภูมิสุดท้ายที่ทรายเริ่มเซตตัว	100-110	°C		หลังจากการผลิต	พนักงานประจำห้องแลป	ค่าคุณสมบัติ	เพื่อทำการ
4	แก๊ส	8-11	mL/g	แผนภูมิควบคุม I-MR	จำนวน 15 รอบการผลิต			ตรวจสอบปัญหา
5	การขยายตัวทางความร้อน	0.9-1.25	%					
6	ความโค้งงอของชิ้นงาน	0.00-0.4	mm					
7	พิลแบบ	70-100	-					
8	ความหนาของผนัง	4.8-8.0	mm					

5.3 สรุปผลขั้นตอนการติดตามและควบคุมผล

ในขั้นตอนการติดตามและควบคุมผลจะเป็นการนำค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมจากขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการมาปรับใช้ในกระบวนการผลิตทรายเคลือบเรซินจริง จากนั้นจึงทำการติดตามและควบคุมการปฏิบัติงาน โดยผู้วิจัยได้จัดทำเอกสารวิธีการปฏิบัติงานตามวิธีการปรับปรุงที่ได้มีการพัฒนาขึ้นและเอกสารที่ใช้ในการตรวจสอบ (Check Sheet) เพื่อใช้ในการควบคุมค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่และใช้ในการตรวจสอบค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน อีกทั้งยังต้องมีการจัดอบรมเพื่อให้พนักงานมีความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการปฏิบัติงานใหม่ที่ตรงกัน

จากการทดลองยืนยันผลเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงของค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน จำนวน 60 รอบการผลิต พบว่า ค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ของค่าคุณสมบัติมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความทนแรงดัดโค้งมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก -0.69 เป็น 0.54 ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 1.12 อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก 0.78 เป็น 1.18 แก๊สมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก 0.38 เป็น 1.29 การขยายตัวทางความร้อนมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก 0.53 เป็น 0.54 ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก -0.28 เป็น 0.01 ฟิลแบคมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก 0.06 เป็น 0.26 และความหนาของผนังมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก -0.07 เป็น 0.75

ในส่วน of ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นค่าใช้จ่ายที่ทางโรงงานจะต้องจ่ายเพิ่มเติมซึ่งมาจากสองส่วน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมของพนักงานที่ทำงานล่วงเวลาเท่ากับ 7943.4 บาทต่อปี และค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในส่วน of ค่าไฟฟ้าและค่าน้ำเท่ากับ 3073.72 บาทต่อปี ในที่สองจะเป็นค่าใช้จ่ายที่ทางโรงงานสามารถลดได้ซึ่งมาจากสองส่วนเช่นกัน ได้แก่ ค่าแก๊ส LPG ที่ใช้ในการผลิตจะมีค่าใช้จ่ายลดลงเท่ากับ 7076.03 บาทต่อปี และค่าใช้จ่ายในส่วน of วัสดุสามารถลดลงได้เท่ากับ 240,000 บาทต่อปี จากนั้นเมื่อนำค่าใช้จ่ายที่สามารถลดลงได้มาหักลบกับค่าใช้จ่ายในส่วน of ที่จะต้องจ่ายเพิ่มเติมพบว่า ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่จะช่วยให้ทางโรงงานสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายไปได้เท่ากับ 236,058.91 บาทต่อปี

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดโดยสรุปของการปรับปรุงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินและผลการดำเนินงานวิจัยที่ได้จากการออกแบบการทดลองและการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการผลิตจริงภายในโรงงานกรณีศึกษา ตลอดจนข้อเสนอแนะและข้อจำกัดของงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยเพื่อทำการปรับปรุงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน จะเริ่มต้นจากการศึกษาสภาพปัญหาในปัจจุบันของทางโรงงานกรณีศึกษา แล้วจึงทำการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของปัญหา รวมทั้งทำการศึกษาขั้นตอนการผลิตทรายเคลือบเรซินโดยละเอียด โดยพบว่า สูตรการผลิตทรายเคลือบเรซินสามารถออกได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการนำไปใช้งานคือ สูตรการผลิตที่ใช้ในการทำไส้แบบตัน (Solid Core) และไส้แบบกลวง (Hollow Core) ซึ่งผู้วิจัยและทีมงานได้เลือกสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวงมาทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงค่าคุณสมบัติ เนื่องจากสูตรการผลิตประเภทนี้กำลังอยู่ในช่วงคิดค้นและพัฒนาให้มีคุณภาพเทียบเท่ากับผู้ผลิตรายอื่น อีกทั้งสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวงยังมีการเติมฟีนอลิกเรซินในปริมาณที่มาก เนื่องจากต้องการความแข็งแรงสูงส่งผลให้ต้นทุนวัตถุดิบมีค่าสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าสูตรการผลิตประเภทนี้ยังได้รับข้อร้องเรียนเรื่องคุณภาพจากลูกค้าอยู่บ่อยครั้งในเรื่องคุณภาพ โดยสูตรการผลิตประเภทนี้จะมีคุณสมบัติที่จำเป็นจะต้องตรวจสอบทั้งหมด 8 คุณสมบัติ ได้แก่ ความทนแรงดัดโค้ง แก๊ส การขยายตัวทางความร้อน ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ค่าความโค้งงอ ฟิลแบค และความหนาของผนัง จากนั้นผู้วิจัยจึงทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อคัดเลือกสูตรการผลิตที่จะนำมาทำการทดสอบ โดยพิจารณาจากข้อมูลยอดขายตั้งแต่ปี พ.ศ.2559 ถึง พ.ศ.2560 ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกสูตรการผลิต H2 มาทำการทดสอบเนื่องจากสูตรการผลิตดังกล่าวมีปริมาณการผลิตสูงและมีความแปรปรวนที่เกิดจากวัตถุดิบน้อยที่สุดซึ่งช่วยให้ผลการทดลองที่ได้จะเกิดความแปรปรวนจากวัตถุดิบน้อยที่สุด อีกทั้งทรายที่ใช้เป็นองค์ประกอบหลักของสูตรการผลิตยังมีความคล้ายคลึงกับสูตรการผลิตส่วนใหญ่ของโรงงาน ซึ่งง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคต ต่อมาผู้วิจัยจึงได้เริ่มทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับค่าคุณสมบัติเบื้องต้นจำนวน 60 รอบการผลิต แล้วจึงนำมาทำการประเมินค่าความสามารถของกระบวนการพบว่า ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ของค่าคุณสมบัติแต่ละตัวมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยที่ความทนแรงดัดโค้งจะมีค่า C_{pk} เท่ากับ -0.69 ปริมาณการสูญเสียหลังการเผาจะมีค่า C_{pk} เท่ากับ 0.01 อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซต

ตัวจะมีค่า C_{pk} เท่ากับ 0.78 แก๊สจะมีค่า C_{pk} เท่ากับ 0.38 การขยายตัวทางความร้อนจะมีค่า C_{pk} เท่ากับ 0.53 ความโก่งงอของชิ้นงานจะมีค่า C_{pk} เท่ากับ -0.28 ฟิลแบคจะมีค่า C_{pk} เท่ากับ 0.06 และความหนาของผนังจะมีค่า C_{pk} เท่ากับ -0.07 จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆให้ดีขึ้น เนื่องจากดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับคือ 1.33 โดยแนวทางในการปรับปรุงค่าคุณสมบัตินั้นสามารถทำได้ 3 แนวทาง คือ การหาสัดส่วนการผลิตของสูตรการผลิตใหม่ การปรับเปลี่ยนปริมาณพินอลิเกรซิน และการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม ซึ่งผู้วิจัยและทีมงานได้เลือกวิธีการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมเข้ามาใช้ในการปรับปรุงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน

จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่อาจจะส่งผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซินโดยการระดมความคิดตามหลักการ 4M1E กับสมาชิกภายในทีม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกศึกษาเฉพาะปัจจัยประเภทที่สามารถควบคุมและทำการปรับปรุงได้ คือ ปัจจัยที่มาจากคน เครื่องจักร และวิธีการ ส่วนประเภทปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบและสิ่งแวดล้อม เป็นปัจจัยที่ทำการควบคุมได้ยาก จึงกำหนดให้อยู่นอกเหนือขอบเขตงานวิจัย จากนั้นจึงทำการคัดกรองปัจจัยนำเข้าโดยให้ทีมงานทำการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลตามเกณฑ์การให้คะแนนที่ได้กำหนดไว้ แล้วจึงอาศัยกราฟพาเรโตเข้ามาช่วยในการจัดลำดับความสำคัญและคัดกรองปัจจัย ซึ่งปัจจัยแต่ละปัจจัยจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยปัจจัยในกลุ่มแรก จะเป็นปัจจัยที่สามารถทำการปรับปรุงได้โดยการสร้างข้อตกลงเกี่ยวกับวิธีการทำงานใหม่และจัดอบรมพนักงานเบื้องต้นเพื่อสร้างความเข้าใจในการทำงานให้ตรงกัน ส่วนปัจจัยในกลุ่มที่สองจะเป็นปัจจัยที่จะถูกนำไปศึกษาต่อด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญและหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม จะประกอบไปด้วย 6 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น เวลาในการปล่อยตัวประสาน เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ และเวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว ซึ่งในขณะที่ทำการทดสอบจะมีการนำมามาตรฐานการปฏิบัติงานที่ได้จากการปรับปรุงปัจจัยในกลุ่มแรกมาปรับใช้จริงในขณะที่ทำการทดลองเพื่อลดความผันแปรที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละค่าคุณสมบัติ

ต่อมาจึงเริ่มต้นดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน โดยอาศัยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) แบบส่วนประสมกลางชนิด Faced-Centered (CCF) ซึ่งพบว่าปัจจัยนำเข้าทั้ง 6 ปัจจัย ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญและทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับค่าคุณสมบัติที่สำคัญทั้ง 8 คุณสมบัติ ดังสมการที่ 4.1-4.8 แล้วจึงทำการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมโดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป โดยค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิของวัตถุดิบ

ตั้งต้น เท่ากับ 120 °C เวลาในการปล่อยตัวประสาน เท่ากับ 4 วินาที เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง เท่ากับ 45 วินาที เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ เท่ากับ 8 วินาที ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ เท่ากับ 100 วินาที และเวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว เท่ากับ 9 วินาที

ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการนำค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมไปทำการทดสอบในกระบวนการผลิตจริงอีกครั้งเพื่อยืนยันผลที่ได้ แล้วจึงจัดทำเอกสารวิธีการปฏิบัติงานตามวิธีการปรับปรุงที่ได้มีการพัฒนาขึ้นและเอกสารที่ใช้ในการตรวจสอบ (Check Sheet) เพื่อใช้ในการควบคุมค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่และใช้ในการตรวจสอบค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรายเคลือบเรซิน อีกทั้งยังต้องมีการจัดอบรมเพื่อให้พนักงานมีความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการปฏิบัติงานใหม่ที่ตรงกัน จากการทดลองเพื่อยืนยันผลเป็นจำนวน 60 รอบการผลิต พบว่า ค่าดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการ (C_{pk}) ของค่าคุณสมบัติมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ความทนแรงดัดโค้งมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก -0.69 เป็น 0.54 ปริมาณการสูญเสียหลังการเผามีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก 0.01 เป็น 1.12 อุณหภูมิต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัวมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก 0.78 เป็น 1.18 แก๊สมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก 0.38 เป็น 1.29 การขยายตัวทางความร้อนมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก 0.53 เป็น 0.54 ความโค้งงอของชิ้นงานมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก -0.28 เป็น 0.01 พิลแบคมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก 0.06 เป็น 0.26 และความหนาของผนังมีค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นจาก -0.07 เป็น 0.75 ในส่วนของค่าใช้จ่ายที่เกิดจากค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นค่าใช้จ่ายที่ทางโรงงานจะต้องจ่ายเพิ่มเติมซึ่งมาจากสองส่วน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมของพนักงานที่ทำงานล่วงเวลาเท่ากับ 7943.4 บาทต่อปี และค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในส่วนของค่าไฟฟ้าและค่าน้ำเท่ากับ 3073.72 บาทต่อปี ในที่สองจะเป็นค่าใช้จ่ายที่ทางโรงงานสามารถลดได้ซึ่งมาจากสองส่วนเช่นกัน ได้แก่ ค่าแก๊ส LPG ที่ใช้ในการผลิตจะมีค่าใช้จ่ายลดลงเท่ากับ 7076.03 บาทต่อปี และค่าใช้จ่ายในส่วนของวัตถุดิบสามารถลดลงได้เท่ากับ 240,000 บาทต่อปี จากนั้นเมื่อนำค่าใช้จ่ายที่สามารถลดลงได้มาหักลบกับค่าใช้จ่ายในส่วนที่จะต้องจ่ายเพิ่มเติมพบว่า ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่จะช่วยให้ทางโรงงานสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายไปได้เท่ากับ 236,058.91 บาทต่อปี

6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมที่ได้จากงานวิจัยสามารถใช้ได้กับสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวงสูตร H2 เท่านั้น
2. ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมที่ได้จากงานวิจัยจะมาจากข้อกำหนดค่าระดับของปัจจัยอื่นๆ ที่ระดับการใช้งานปัจจุบัน เช่น ปริมาณการเติมพีนอลิเกรซิน ปริมาณสารละลายเฮกซามีน ปริมาณแคลเซียมสเตียเรท และปัจจัยในกระบวนการอื่นๆ ที่กล่าวไปดังตารางที่ 3.6

6.3 ข้อเสนอแนะ

1. ทางโรงงานกรณีศึกษาสามารถนำค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมไปทดลองประยุกต์ใช้กับสูตรการผลิตสำหรับทำไส้แบบกลวงสูตรอื่นๆ ได้
2. จากงานวิจัยนี้พบว่า ทราयीที่ใช้ในกระบวนการผลิตทราयीเคลือบเรซินนั้นยังมีความแปรปรวนค่อนข้างมาก ซึ่งในอนาคตควรจะมีการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากความแปรปรวนในส่วนนี้ และทำการควบคุมค่าคุณสมบัติของทราयीก่อนนำเข้ากระบวนการผลิตให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด
3. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของปริมาณการเติมพีนอลิเกรซินกับค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทราयीเคลือบเรซินตัวอื่นๆ นอกจากความทนแรงดัดโค้ง
4. ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมเข้ามาช่วยในการปรับปรุงค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทราयीเคลือบเรซินให้มีค่าเฉลี่ยเข้าใกล้ค่าคาดหวังที่มากขึ้นและมีค่าความผันแปรที่ลดลง โดยอาศัยดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการเป็นตัวชี้วัดในการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงซึ่งพบว่า ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ จะมีค่าที่สูงขึ้น โดยคุณสมบัติส่วนใหญ่ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน แต่ก็ยังมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์การยอมรับที่กำหนดไว้เท่ากับ 1.33 ซึ่งเป็นเกณฑ์การยอมรับที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยอุตสาหกรรมประเภทนี้จะมีเกณฑ์การยอมรับที่สูง เนื่องจากเป็นงานที่ต้องมีความผันแปรในระดับที่ต่ำมาก ซึ่งต่างจากอุตสาหกรรมการผลิตทราयीเคลือบเรซินที่มีช่วงการยอมรับที่ค่อนข้างกว้างและธรรมชาติของทราयीโดยทั่วไปแล้วจะมีความผันแปรที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นในกระบวนการผลิตทราयीเคลือบเรซินควรพิจารณาดัชนีชี้วัด

วัดความสามารถของกระบวนการไปพร้อมกับค่าเฉลี่ยและความผันแปรที่สามารถปรับปรุงได้ โดยผลการปรับปรุงที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่าสามารถทำการปรับปรุงค่าคุณสมบัติให้เข้าใกล้ค่าคาดหวังได้ 7 จาก 8 คุณสมบัติ และมีค่าความผันแปรที่ลดลงอย่างชัดเจนในทุกๆค่าคุณสมบัติ

5. ในงานวิจัยนี้ได้เลือกปัจจัยที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องจักรของขั้นตอนการผสมทั้งหมดมาทำการทดสอบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ซึ่งผลการปรับปรุงที่ได้นั้นช่วยทำให้ค่าเฉลี่ยและความผันแปรของค่าคุณสมบัติแต่ละตัวมีค่าที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน ดังนั้นแนวทางการปรับปรุงในอนาคตนั้นควรจะเริ่มจากการควบคุมคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละรอบการผลิตให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งผลที่ได้จะช่วยลดความผันแปรที่เกิดขึ้นและทำให้ดัชนีชี้วัดความสามารถของกระบวนการมีค่าที่สูงมากขึ้นได้
6. ในขั้นตอนสร้างสมการความสัมพันธ์โดยใช้วิธีลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) จะมีทางเลือกในการวิเคราะห์ห้อยู่ 2 ทางเลือก คือ Hierarchical Model และ Non-Hierarchical Model โดยที่
 - Hierarchical Model จะเป็นการสร้างสมการโดยการเก็บเทอมผลกระทบหลักของปัจจัยที่ปรากฏอยู่ในเทอมผลกระทบร่วมและเทอมกำลังสองของปัจจัยที่มีนัยสำคัญไว้ 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 Minitab จะถูกแสดงอยู่ในรูปของหน่วยที่เป็นคาร์รหัส (Coded Unit) เท่านั้น

โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีลดตัวแปรอิสระแบบ Hierarchical ซึ่งมีข้อดีคือสมการที่ได้จะสามารถแสดงอยู่ในรูปหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) และทำให้ง่ายต่อการตีความ ซึ่งต่างจาก Non-Hierarchical ที่สมการจะแสดงอยู่ในรูปของหน่วยที่เป็นคาร์รหัส (Coded Unit) เท่านั้น จากนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบค่า R^2 และ R^2_{adj} ระหว่าง Hierarchical Model กับ Non Hierarchical Model โดยอาศัยข้อมูลของค่าคุณสมบัติทั้ง 8 คุณสมบัติ ที่ได้ทำการทดสอบไว้ข้างต้นพบว่า

- ค่า R^2 ของ Hierarchical Model จะมีค่ามากกว่า R^2 ของ Non-Hierarchical เสมอ ซึ่ง มีค่ามากกว่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.97%
- Hierarchical Model มี R^2_{adj} ที่สูงกว่าของ Non-Hierarchical Model สำหรับ 6 คุณสมบัติ ได้แก่ การขยายตัวทางความร้อน ปริมาณความสูญเสียหลังการเผา อุณหภูมิ ต่ำสุดที่ทรายเริ่มเซตตัว ค่าความโก่งงอ พิลแบคและความหนาของผนัง จากทั้งหมด 8 คุณสมบัติ ซึ่งคุณสมบัติที่ Hierarchical Model มีค่า R^2_{adj} สูงกว่า Non-Hierarchical Model จะมีค่า R^2_{adj} ที่สูงกว่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.07%
- Hierarchical Model มี R^2_{adj} ที่น้อยกว่าของ Non-Hierarchical Model สำหรับ 2 คุณสมบัติ ได้แก่ ความทนแรงดัดโค้งและแก๊ส จากทั้งหมด 8 คุณสมบัติ ซึ่งคุณสมบัติที่ Hierarchical Model มีค่า R^2_{adj} น้อยกว่า Non-Hierarchical Model จะมีค่า R^2_{adj} ที่ น้อยกว่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.2%

สำหรับงานวิจัยนี้พบว่า ผลการเปรียบเทียบข้างต้นจะแสดงให้เห็นว่าค่า R^2 และ R^2_{adj} ของ Hierarchical Model กับ Non-Hierarchical Model จะมีค่าไม่แตกต่างกันมาก โดยแบบจำลองที่สร้างจากวิธี Hierarchical Model ส่วนใหญ่จะให้ค่า R^2 และ R^2_{adj} ที่สูงกว่าแบบ Non-Hierarchical Model นอกจากนี้ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมที่ได้จาก Hierarchical Model กับ Non-Hierarchical Model ยังมีค่าที่ใกล้เคียงกันดังตารางที่ 6.1 ซึ่งเมื่อทำการปิดค่าระดับของปัจจัยให้เป็นจำนวนเต็มเพื่อให้เครื่องจักรสามารถทำการปรับตั้งได้พบว่า ค่าการปรับตั้งของปัจจัยส่วนใหญ่จะมีค่าเท่ากันและจะมีค่าที่แตกต่างกันเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้นคือ เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

ตารางที่ 6.1 ผลการเปรียบเทียบค่าการปรับตั้งเครื่องจักรแบบ Hierarchical Model กับ Non-Hierarchical Model

ปัจจัยนำเข้า	Backward Elimination (Hierarchical Model)			Backward Elimination (Non Hierarchical Model)			หน่วย
	Coded	Uncoded	ค่าปรับตั้งจริง	Coded	Uncoded	ค่าปรับตั้งจริง	
อุณหภูมิของวัตถุดิบตั้งต้น	-1	120	120	-1	120	120	°C
เวลาในการปล่อยตัวประสาน	-0.1984	4.2064	4	-0.15633	4.3747	4	Sec
เวลาในการปล่อยสารละลายที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง	1	45	45	1	45	45	Sec
เวลาในการเริ่มเปิดระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ	0.7473	7.9892	8	0.899	8.596	9	Sec
ระยะเวลาในการระบายความร้อนด้วยอากาศ	0.01068	100.1068	100	0.04801	100.4801	100	Sec
เวลาในการปล่อยสารที่ช่วยให้ทรายไหลตัว	1	9	9	0.934	8.736	9	Sec

7. ในอนาคตควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการสร้างแบบจำลองด้วย Best Subsets ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ค่า $R\text{-sq (adj)}$ ที่สูง และค่า S ที่ต่ำ แต่ในขั้นตอนการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดจะต้องระมัดระวัง เนื่องจากจะต้องพิจารณาตัวชี้วัดหลายตัวไปพร้อมกัน และต้องใช้โปรแกรมที่ซับซ้อนขึ้นในการหาค่าที่เหมาะสม
8. ผลงานวิจัยนี้จะถูกนำไปเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ 2018 The 8th International Conference on Advanced Materials Research ที่ประเทศญี่ปุ่น ในวันที่ 21 มกราคม 2561 และจะถูกตีพิมพ์ลงใน Key Engineering Materials



รายการอ้างอิง

1. ประชาชาติธุรกิจ. อุตสาหกรรมหล่อโลหะ. 2559 10 มีนาคม 2560]; Available from: http://www.prachachat.net/news_detail.php?newsid=1423042209.
2. กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ, หลักการการควบคุมคุณภาพ. 2550, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
3. นภัตสวางค์ โอสถศิลป์, เอกสารประกอบการเรียนวิชา *Quality Improvement*. 2559, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
4. ปารเมศ ชูติมา, การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. 2545, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*. 8th ed. 2009: John Wiley & Sons.
6. ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, กระบวนการผลิต. 2559, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดยูเคชั่น.
7. IFOUNDRYMAN. การหล่อโลหะ (*Casting*). 2560 10 มีนาคม 2560]; Available from: <http://www.ifyfoundryman.com/casting/>.
8. IFOUNDRYMAN. แบบหล่อ (*Casting Molds*). 2560 10 มีนาคม 2560]; Available from: <http://www.ifyfoundryman.com/molds/>.
9. Serope Kalpakjian, S.R.S., *Manufacturing Engineering & Technology*. 6th ed. 2009, USA: Prentice-Hall, Inc.
10. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ, วิศวกรรมงานหล่อเหล็ก. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
11. Sharma, C., เอกสารประกอบการเรียนวิชา *Manufacturing Technology II*. 2015: Department of Mechanical Engineering: Rustamji Institute of Technology.
12. ทริส สุตตะบุตร, เคนยิ จิยิวา, หล่อโลหะ. 2517: สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่างประเทศ.
13. อูรารวรรณ อุ้นแก้ว, การปรับปรุงทรายเคลือบพินอลิกเรซินที่ผลิตในประเทศสำหรับทำแบบหล่อเปลือก วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, in สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์. 2542, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
14. Dhumal, R.D., *SHELL CASTS OUT AN ADVANCED MOULD TECHNOLOGY*, in *Metalworld*. 2007. p. 26-30.

15. Park, K. and J.-H. Ahn, *Design of experiment considering two-way interactions and its application to injection molding processes with numerical analysis*. Journal of Materials Processing Technology, 2004. 146(2): p. 221-227.
16. Chang, S.H., T.T. Teng, and N. Ismail, *Screening of factors influencing Cu(II) extraction by soybean oil-based organic solvents using fractional factorial design*. Journal of Environmental Management, 2011. 92(10): p. 2580-2585.
17. Niranjana, K. and P.R. Lakshminarayanan, *Optimization of process parameters for in situ casting of Al/TiB₂ composites through response surface methodology*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013. 23(5): p. 1269-1274.
18. Amin Yang, Y.H., Yuhang Pan, Hongwei Xing and Jinze Li, *Optimum surface roughness prediction for titanium alloy by adopting response surface methodology*. Results in Physics, 2017. 7: p. 1046-1050.
19. Sung-II Kim, J.-P.H., Young-Kyoun Kim, Hyuk Nam, Han-Ik Cho, *Optimal Design of Slotless-Type PMLSM Considering Multiple Responses by Response Surface Methodology*. IEEE TRANSACTIONS MAGNETICS, 2006. 42: p. 1219-1222.
20. Shalini Mohanty, A.M., B.K. Nanda and B.C. Routara, *Multi-objective parametric optimization of nano powder mixed electrical discharge machining of AlSiCp using response surface methodology and particle swarm optimization*. Alexandria Engineering Journal, 2017.
21. ฐิติป อินทร์เกษียร, การลดเวลาสูญเสียในกระบวนการตัดฉลาก วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, in สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2557, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
22. ภาวรินทร์ แก้วสม, การลดของเสียจากข้อบกพร่องเส้นด้ายเป็นขนในกระบวนการด้ายยัดเส้นด้าย วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, in สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
23. วรัญญา สนเผือก, การปรับปรุงความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์ซีเมนต์ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, in สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2555, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
24. Pilato, L., *Phenolic Resins: A Century of Progress*. 2010: Springer Heidelberg Dordrecht London New York.

25. Lee, K.-L. and C.-C. Wei, *Reducing Mold Changing Time by Implementing Lean Six Sigma*. Quality and Reliability Engineering International, 2009. 26: p. 387-395.
26. Garlan, R.W., *Six Sigma Project to Improve a Management of Change Process*. Process Safety Progress, 2010. 30(1): p. 18-23.



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจักรพันธ์ จริยาจิรวัฒนา เกิดเมื่อวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพนัสพิทยาคาร จังหวัดชลบุรี และได้เข้าศึกษาต่อจน สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2557 หลังจากนั้น จึงได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558

