การลดต้นทุนโดยการปรับส่วนผสมแก้วและปัจจัยในกระบวนการหลอม

น.ส.อนุธิดา ทองอร่าม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Cost Reduction by Adjusting Glass Batch and Melting Process Factors

Miss Anuthida Thongaram

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดต้นทุนโดยการปรับส่วนผสมแก้วและปัจจัยในกระบวนการหลอม
โดย	น.ส.อนุธิดา ทองอร่าม
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญวา ธรรมพิทักษ์กุล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อนุธิดา ทองอร่าม : การลดต้นทุนโดยการปรับส่วนผสมแก้วและปัจจัยในกระบวนการหลอม. (Cost Reduction by Adjusting Glass Batch and Melting Process Factors) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมแก้วที่มีต่อต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศในบล็อกแก้ว และหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้มีต้นทุนที่เกี่ยวข้องต่ำที่สุดและมีจำนวนฟองอากาศอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาในงานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องมือแผนผังสาเหตุและผล และเลือกใช้เมทริกซ์ของความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลในการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต ในขั้นตอนการปรับปรุงได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย โดยใช้แบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จากนั้นจึงทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้มีต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศต่ำที่สุด พบว่าค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม คือ คือ อุณหภูมิเตาหลอม 1530 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นส่วนผสม 2.5 เปอร์เซ็นต์ และสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก 26 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลที่ได้จากการปรับตั้งค่าระดับปัจจัยใหม่ พร้อมทั้งจัดทำวิธีการปฏิบัติงาน แผนควบคุมและแผ่นตรวจสอบการตั้งค่าเครื่องจักรก่อนเข้ากระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอม

ผลการปรับปรุงจากการใช้ค่าปรับตั้งที่เหมาะสม พบว่าต้นทุนการผลิตเฉลี่ยก่อนปรับปรุงที่มีค่าเท่ากับ 513,760 บาทต่อวัน เปรียบเทียบกับหลังปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 499,457 บาทต่อวัน ลดลงไปได้ 14,303 บาทต่อวัน หรือ 5,220,648 บาทต่อปี คิดเป็นต้นทุนการผลิตที่ลดลงไปได้ 2.78 เปอร์เซ็นต์ และจำนวนฟองอากาศเฉลี่ยหลังปรับปรุงเท่ากับ 244 ฟองต่อหนึ่งชิ้นงานบล็อกแก้ว เปรียบเทียบกับก่อนปรับปรุงที่เป็น 262 ฟองต่อหนึ่งชิ้นงานบล็อกแก้ว คิดเป็นจำนวนฟองอากาศที่ลดลงไปได้ 6.83 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2561 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

5970354921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORD:

Anuthida Thongaram : Cost Reduction by Adjusting Glass Batch and Melting Process Factors. Advisor: Asst. Prof. Napassavong Osothsilp, Ph.D.

The objective of this research is to study the effects of factors in the preparation of glass batch and the glass melting process related the total cost and the number of bubbles in glass block. Then, the optimal levels of factors were determined with the objective to minimize the total cost and make the number of bubbles acceptable.

The Cause and Effect Diagram was used to analyze the causes of the problem and the Cause and Effect Matrix was used to prioritize factors affecting the total cost and the number of bubbles. In the improvement phase, the Box-Behnken Design was employed to find out the equation of relationship between the total cost and the number of bubbles and significant factors. In addition, the optimal levels of factors were determined. The optimal setting was at the furnace temperature of 1530 degrees Celsius, the moisture content of 2.5 percent, and the cullet proportion of 24.14 percent. Then, the optimal levels of factors were verified in the real plant scale. Finally, the researcher has developed the work instruction, control plan and check sheet to control the preparation of glass batch and the glass melting process.

After improvement, it was found that the average total cost was 513,760 baht per day, compared with before the improvement that was 499,457 baht per day, the total cost was reduced by 14,303 baht per day or 5,220,648 baht per year, equivalent to 2.78 percent reduction. Moreover, the average number of bubbles after improvement was 244 bubbles per block, compare with before the improvement of 262 bubbles per block, which equivalent to 6.83 percent reduction.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study:	Industrial Engineering	Student's Signature .....
Academic Year:	2018	Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญวา ธรรมพิทักษ์กุล กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. พิชญ์รัตน์ อินทร์เอื้อ ที่ปรึกษาโรงงานกรณีศึกษา ที่ให้โอกาสผู้วิจัยเข้าไปทำการศึกษาวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำวิธีการทำงาน วิธีการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น ตลอดระยะเวลาที่ได้ทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาที่ให้โอกาสผู้วิจัยเข้าไปทำการศึกษาวิจัย และให้ความร่วมมือในการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดี ตลอดจนคณะทำงานที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมไปถึงพนักงานและเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาทุกท่าน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจ รวมทั้งขอบคุณสำหรับกำลังใจจากผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในงานวิจัยทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงมา ณ ที่นี้ด้วย

อนุธิดา ทองอร่าม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

..... ค

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูปภาพ ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 รายละเอียดเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษา 2

1.2.1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา 2

1.3 การศึกษาสภาพปัญหาและความสำคัญของปัญหาในปัจจุบัน 5

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 7

1.5 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย 7

1.6 ผลที่ได้รับ 8

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ 8

1.8 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน 8

1.9 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย 11

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 12

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับต้นทุนการผลิต (Cost of production) 12

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.1 ความหมายของต้นทุนการผลิต 12
2.1.2 องค์ประกอบของต้นทุนการผลิต 12
2.1.3 การคำนวณต้นทุนการผลิต 13
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับแก้วและกระบวนการหลอม 14
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแก้ว 14
2.2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว 14
2.2.3 ขั้นตอนการผลิตแก้ว 15
2.2.4 เตาหลอมแก้ว 17
2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องมือทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 21
2.3.1 แผนผังกระบวนการผลิต (Process Mapping) 21
2.3.2 การระดมความคิด (Brainstorming) 21
2.3.3 แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) 22
2.3.4 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) 23
2.3.5 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Design of Experiment, DOE) 24
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 34
2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดต้นทุนการผลิต 34
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า 37
3.1 ขั้นตอนในการจัดตั้งทีมงาน 37
3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Root cause Analysis) 38
3.2.1 การระดมความคิด (Brainstorming) เพื่อหาปัจจัยนำเข้า 38
3.2.2 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) 38
3.3 สรุปผลขั้นตอนการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า 51
บทที่ 4 ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ 52

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1 การออกแบบการทดลอง 52
4.1.1 การกำหนดปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง 52
4.1.2 การเลือกแบบการทดลอง 52
4.2 ขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง 55
4.3 ผลการทดลอง 55
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 56
4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของต้นทุนการผลิต 57
4.4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) 57
4.4.1.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิต 58
4.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของจำนวนฟองอากาศ 63
4.4.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) 63
4.5 การหาระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนำเข้า 69
4.6 สรุปขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ 72
บทที่ 5 ขั้นตอนการติดตามและควบคุมผล 73
5.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง 73
5.1.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อยืนยันผล 73
5.1.2 ผลการทดลองการยืนยันผล 74
5.2 การติดตามและควบคุมผล 77
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 84
6.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย 84
6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย 86
6.3 ข้อเสนอแนะ 86

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม..... 87

ประวัติผู้เขียน..... 90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย 11

ตารางที่ 2.1 รูปแบบของเมทริกซ์ความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล 24

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดความสัมพันธ์ของผลกระทบที่เกิดจากการเลือกใช้ค่า Resolution ต่าง ๆ 29

ตารางที่ 2.3 ค่า α ของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางตั้งแต่ 2-6 ปัจจัย 32

ตารางที่ 2.4 สรุปข้อเด่น ข้อด้อยของแบบการทดลองต่าง ๆของการออกแบบพื้นผิวผลตอบ..... 33

ตารางที่ 3.1 ผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตสูง 40

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์การให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล 42

ตารางที่ 3.3 การประเมินคะแนนความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตสูง 42

ตารางที่ 3.4 ปัจจัยที่นำมาไปศึกษาต่อและผลกระทบของปัจจัยต่อตัวชี้วัดต่าง ๆ 47

ตารางที่ 3.5 ปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและไม่นำไปศึกษาต่อและแนวทางการปรับปรุงแก้ไข 47

ตารางที่ 3.6 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและเหตุผล 49

ตารางที่ 4.1 ปัจจัยนำเข้าและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง..... 54

ตารางที่ 4.2 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Metrix)..... 54

ตารางที่ 4.3 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการทดลอง..... 56

ตารางที่ 4.4 การกำหนดเป้าหมายและคะแนนความสำคัญของต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ 70

ตารางที่ 4.5 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศต่ำที่สุด..... 72

ตารางที่ 5.1 ค่าระดับปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยของกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอม ... 73

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบยืนยันผลของต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ 74

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบค่าตัวแปรตอบสนองต่อ 1 วัน ระหว่างก่อนปรับปรุงและหลังการปรับปรุงกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมแก้ว..... 76

ตารางที่ 5.4 วิธีการปฏิบัติงานใหม่ของกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมแก้ว..... 78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.5 แผนควบคุมการตั้งค่าเครื่องจักร 80
ตารางที่ 5.6 แผ่นตรวจสอบการตั้งค่าเครื่องจักร (Check Sheet)..... 81
ตารางที่ 5.7 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด 83

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 แผนผังกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา 3

รูปที่ 1.2 น้ำแก้วที่ได้จากกระบวนการหลอม 4

รูปที่ 1.3 ต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอม 6

รูปที่ 2.1 เตาหลอมแบบหม้อ (Pot furnace) 18

รูปที่ 2.2 เตาหลอมแบบแท้งค์ (Tank furnace) 20

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแผนผังแสดงเหตุและผล 23

รูปที่ 2.4 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ (ปารเมศ ชุติมา, 2545) 25

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างกราฟค่าความผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ (MONTGOMERY, 2009) 26

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างกราฟค่าความผิดพลาดที่มีความเป็นอิสระต่อกัน (MONTGOMERY, 2009) 27

รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟค่าความผิดพลาดที่มีความแปรปรวนคงที่ (MONTGOMERY, 2009) 27

รูปที่ 2.8 กราฟพื้นผิวตอบและกราฟโครงร่างของตัวแปรตอบสนองที่มีค่ามากที่สุด 30

รูปที่ 2.9 กราฟพื้นผิวตอบและกราฟโครงร่างของตัวแปรตอบสนองที่มีค่าน้อยที่สุด 31

รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง 32

รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken กรณีที่มี *3* ปัจจัย 33

รูปที่ 3.1 แผนผังสาเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตสูง 39

รูปที่ 3.2 กราฟแสดงคะแนนความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตสูง 43

รูปที่ 3.3 ฟองอากาศในชิ้นงานบล็อกแก้ว 46

รูปที่ 3.4 ชิ้นงานบล็อกแก้วลายที่ทำการศึกษา 46

รูปที่ 4.1 การกระจายตัวส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิต 57

รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิต 59

Chulalongkorn University

รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิต โดยวิธีการเพิ่มตัวแปร 60

รูปที่ 4.4 กราฟพื้นผิวผลตอบแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยปริมาณความชื้นส่วนผสมและสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักที่มีผลต่อต้นทุนการผลิต 62

รูปที่ 4.5 กราฟผลกระทบหลักของปัจจัยอุณหภูมิเตาหลอมที่มีผลต่อต้นทุนรวม 63

รูปที่ 4.6 การกระจายตัวส่วนตกค้างของจำนวนฟองอากาศ 63

รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับจำนวนฟองอากาศ 65

รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับจำนวนฟองอากาศ โดยวิธีการเพิ่มตัวแปร 66

รูปที่ 4.9 กราฟพื้นผิวผลตอบแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยระหว่างอุณหภูมิเตาหลอมและปริมาณความชื้นส่วนผสมที่มีผลต่อจำนวนฟองอากาศ 68

รูปที่ 4.10 กราฟผลกระทบของปัจจัยสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักที่มีผลต่อจำนวนฟองอากาศ 69

รูปที่ 4.11 ผลจากการทำ Response Optimizer เพื่อหาค่าการปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย 71

รูปที่ 5.1 ผลจากการทำ Response Optimizer เพื่อหาค่าการปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด 82

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมแก้วและกระจกแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ กลุ่มที่ผลิตสินค้าขั้นสุดท้าย เช่น เครื่องแก้วที่ใช้บนโต๊ะอาหาร และกลุ่มที่เป็นอุตสาหกรรมสนับสนุนหรือรองรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น ฉนวนใยแก้ว บล็อกแก้ว และกระจก ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมเกี่ยวเนื่องกับอุตสาหกรรมก่อสร้าง ยานยนต์ และบรรจุภัณฑ์ ปัจจุบันอุตสาหกรรมแก้วเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญกับเศรษฐกิจในประเทศไทยเป็นอย่างมาก โดยมีกำลังการผลิตกว่า 4,000 ล้านตันต่อปี ซึ่งสร้างงานกับคนไทยกว่า 13,000 ราย และนอกจากนี้ประเทศไทยยังเป็นผู้นำด้านอุตสาหกรรมการผลิตแก้วและกระจกที่ใหญ่ที่สุดในอาเซียน ซึ่งมูลค่าอยู่ที่ประมาณ 60,000 ล้านบาท (ชาติชาย พานิชชีวะ, 2561) กล่าวได้ว่าอุตสาหกรรมแก้วเป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าสูง ซึ่งทำให้มีการแข่งขันที่สูงตามไปด้วย โรงงานผลิตบล็อคแก้วกรณีศึกษาจึงเห็นถึงความสำคัญของการปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพที่ดี รวมถึงการลดต้นทุนในการผลิต เพื่อสร้างความพึงพอใจให้กับผู้บริโภคและเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันอีกด้วย

ในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมเป็นกระบวนการสำคัญที่อุตสาหกรรมแก้วและกระจกให้ความสำคัญเป็นอันดับต้น เนื่องจากต้นทุนการผลิตหลักของแก้ว คือ ต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนแก๊ส โดยปกติต้นทุนวัตถุดิบจะมีมูลค่าสูง เนื่องจากวัตถุดิบ เช่น ทราย โซดาแอช โดโลไมต์ และโซเดียมซัลเฟต เป็นต้น เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดแก้ว จึงทำให้ต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมมีมูลค่าสูง และต้นทุนการผลิตที่มีมูลค่าสูงเช่นกันก็คือต้นทุนการผลิตในกระบวนการหลอม เนื่องจากกระบวนการหลอมจะใช้อุณหภูมิในการหลอมแก้วที่สูงกว่า 1,200 องศา ทำให้มีการใช้ปริมาณแก๊สมาก และปัจจุบันต้นทุนแก๊สมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นจากทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ส่งผลให้โรงงานมีต้นทุนการผลิตในกระบวนการหลอมที่สูงตามไปด้วย ด้วยสาเหตุนี้โรงงานผลิตบล็อคแก้วกรณีศึกษาจึงต้องการลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง จากข้อมูลเดือนมกราคมถึงธันวาคม 2560 พบว่าต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมมีมูลค่าสูงถึง 187.52 ล้านบาทต่อระยะเวลา 1 ปี โดยการคำนวณจะคิดจากต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนแก๊ส

จากต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมที่สูง ทางโรงงานจึงมีความต้องการที่จะลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง โดยแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตใน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมนั้นสามารถทำได้ 2 แนวทาง คือ การใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มเข้าไปในสัดส่วนวัตถุดิบ และการหาค่าปัจจัยในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมที่เหมาะสม จากแนวทางแรกจะเป็นการใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มเข้าไปในสัดส่วนวัตถุดิบ ซึ่งเป็นวิธีการนำขี้เถ้าที่ได้จากเตาหลอมกลับมาใช้อีกรอบ เพื่อช่วยลดปริมาณแก๊สที่ใช้ในการหลอม ซึ่งวิธีนี้จะช่วยลดต้นทุนแก๊สและสะดวกต่อการปฏิบัติงานมากที่สุด แต่เนื่องจากเมื่อนำมาทดลองใช้ในการผลิตจริงพบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้มีค่าเหล็กสูงเกินกว่าสูตรที่โรงงานต้องการ จึงทำให้ยังไม่สามารถนำไปใช้ในการผลิตจริงได้ ดังนั้นการหาค่าปัจจัยในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมที่เหมาะสมจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความน่าสนใจที่จะนำมาใช้ในการลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง เช่น สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก ปริมาณความชื้นส่วนผสม และอุณหภูมิเตาหลอม เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยลดการใช้ปริมาณแก๊สที่มากเกินความจำเป็น เพื่อลดต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมให้ลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเฉพาะในส่วนของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับต้นทุนการผลิต จากนั้นจะทำการหาค่าระดับของปัจจัยที่ทำให้ต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมมีค่าต่ำที่สุด

1.2 รายละเอียดเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษา

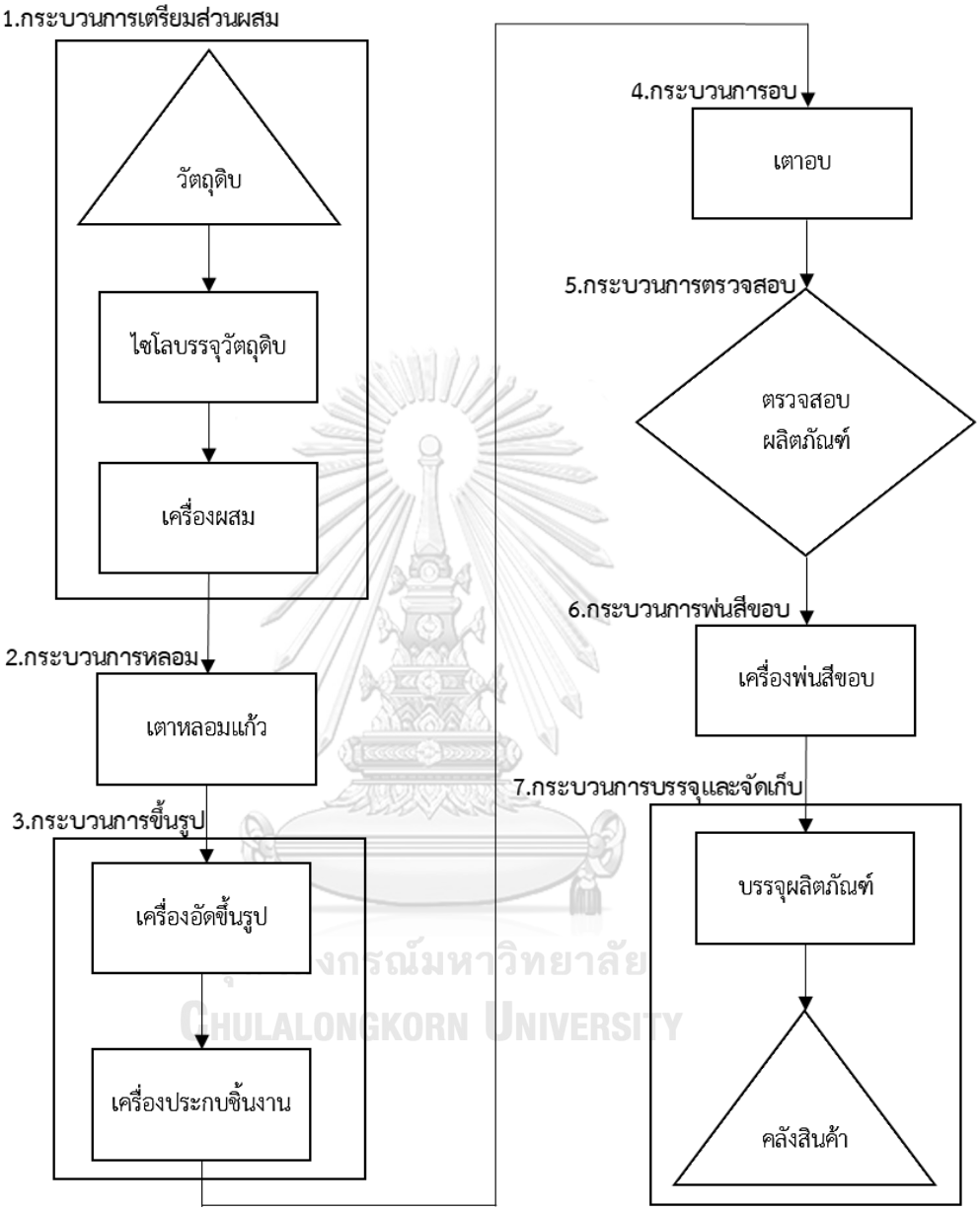
1.2.1 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตบล็อกแก้ว (Glass Block) ก่อตั้งขึ้นในเดือนธันวาคม ปีพ.ศ. 2537 ด้วยทุนจดทะเบียน 250 ล้านบาท ซึ่งโรงงานจะประกอบด้วย 3 สายการผลิต โดยมีกำลังการผลิตบล็อกแก้วประมาณ 100 ตันต่อวันหรือประมาณ 50,000 ชิ้นต่อวัน

ซึ่งกระบวนการผลิตจะประกอบด้วย 7 กระบวนการ ได้แก่

1. กระบวนการเตรียมส่วนผสม
2. กระบวนการหลอม
3. กระบวนการขึ้นรูป
4. กระบวนการอบ
5. กระบวนการตรวจสอบผลิตภัณฑ์
6. กระบวนการพ่นสีขอบ
7. กระบวนการบรรจุและจัดเก็บ

กระบวนการผลิตบล็อกแก้วทั้ง 7 กระบวนการของโรงงานกรณีศึกษาแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนผังกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา

กระบวนการในการผลิตแก้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 กระบวนการ ดังนี้

1. กระบวนการเตรียมส่วนผสม

กระบวนการนี้จะเริ่มจากการนำวัตถุดิบ ได้แก่ ทรายแก้ว โซดาแอช โดโลไมต์ โซเดียมซัลเฟต ซีลีเนียม และโคบอลต์ที่อยู่ในโรงเก็บวัตถุดิบ มาลำเลียงเข้าสู่ไซโลหรือถังบรรจุวัตถุดิบแต่ละชนิด

จากนั้นชั่งน้ำหนักวัตถุดิบแต่ละชนิดให้ได้ตามสัดส่วนที่โรงงานกำหนดแล้วผสมวัตถุดิบทั้งหมดเข้าด้วยกันโดยมีปริมาณความชื้นตามที่โรงงานกำหนด เมื่อวัตถุดิบผสมเข้าด้วยกันแล้วจะมีการใส่เศษแก้วเพิ่มเข้าไปบนวัตถุดิบในขณะที่ลำเลียงไปยังเตาหลอม

2. กระบวนการหลอม

ส่วนผสมที่เตรียมไว้จะถูกป้อนเข้าสู่เตาหลอมทางช่องด้านท้ายของเตา และมีการปรับตั้งค่าอุณหภูมิของเตาหลอมให้เหมาะแก่การหลอมแก้ว เมื่อส่วนผสมวัตถุดิบหลอมละลายแล้วจะได้ออกมาเป็นน้ำแก้วดังรูปที่ 1.2 สำหรับใช้ในกระบวนการขึ้นรูปต่อไป

รูปที่ 1.2 น้ำแก้วที่ได้จากกระบวนการหลอม

3. กระบวนการขึ้นรูป

น้ำแก้วที่ได้จากกระบวนการหลอมจะไหลไปตามรางแล้วหล่นเข้าสู่เครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูป โดยมีกรรไกรคอยตัดน้ำแก้วให้เป็นก้อน เรียกว่า ก้อนแก้ว เมื่อก้อนแก้วหล่นเข้าสู่เครื่องจักรแล้วเครื่องจักรจะอัดขึ้นรูปชิ้นงานแก้วด้วยความดัน จะได้ออกมาเป็นชิ้นงานแก้วหนึ่งด้าน จากนั้นนำชิ้นงานแก้วหนึ่งด้าน 2 ชิ้น มาประกบเข้าด้วยกันเป็นบล็อกแก้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4. กระบวนการอบ

เมื่อได้ผลิตภัณฑ์บล็อกแก้วออกมาแล้ว จะต้องนำมาอบเพื่อควบคุมอุณหภูมิในการเย็นตัวของแก้วให้ค่อยๆเย็นตัวลงอย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดความความเค้นที่อาจเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว โดยอุณหภูมิของเตาจะเริ่มตั้งแต่ 1200 จนถึง 600 องศาเซลเซียส

5. กระบวนการตรวจสอบผลิตภัณฑ์

ในกระบวนการนี้จะตรวจสอบรอยตำหนิต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ทุกชิ้น จากนั้นจะมีการสุ่มผลิตภัณฑ์ไปทดสอบคุณภาพตามความต้องการและมาตารฐานที่กำหนด เช่น ทดสอบความสามารถ

ในการรับแรงอัดและแรงกระแทก ทดสอบการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เป็นต้น

6. กระบวนการพ่นสีขอบ

เมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านการตรวจสอบแล้วจะถูกนำไปพ่นสีขาวที่ขอบ เพื่อให้มีความสวยงามตรงกับความต้องการของลูกค้า

7. กระบวนการบรรจุและจัดเก็บ

เมื่อผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการพ่นสีขอบแล้ว จะถูกบรรจุลงในกล่องและนำไปจัดเก็บไว้ที่คลังสินค้า

งานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมเท่านั้น เนื่องจากต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมมีมูลค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับต้นทุนการผลิตในกระบวนการอื่น ผู้วิจัยจึงนำกระบวนการหลอมนี้มาศึกษาเป็นอันดับแรก

1.3 การศึกษาสภาพปัญหาและความสำคัญของปัญหาในปัจจุบัน

จากการศึกษากระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมต้นตั้งแต่เดือนมกราคม จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2560 พบว่าต้นทุนการผลิตที่เกี่ยวข้องในขอบเขตงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1.ต้นทุนวัตถุดิบ

ต้นทุนวัตถุดิบนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งส่วนแรกคือ วัตถุดิบหลักที่ทำให้เกิดแก้วจะประกอบด้วย ทรายแก้ว โซดาแอช โดโลไมต์ โซเดียมซัลเฟต ซีลีเนียม และโคบอลต์ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนการใช้งาน 61%, 18%, 19%, 1%, 0.1-0.5% และ 0.1-0.5% ตามลำดับ และวัตถุดิบอีกส่วนจะเป็นวัตถุดิบที่ช่วยลดการใช้ปริมาณแก๊สในการหลอมแก้ว ซึ่งก็คือ เศษแก้ว ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนการใช้งาน 20-30% ของวัตถุดิบหลัก การใส่เศษแก้วเข้าไปในวัตถุดิบจะช่วยลดการใช้ปริมาณแก๊สในการหลอมแก้ว เนื่องจากเศษแก้วใช้อุณหภูมิในการหลอมต่ำกว่าวัตถุดิบอื่น จึงทำให้เตาหลอมใช้ความร้อนลดลง ส่งผลให้ใช้ปริมาณแก๊สลดลงตามไปด้วย

2.ต้นทุนแก๊ส

ในกระบวนการหลอมนั้นเตาหลอมจะใช้พลังงานจากแก๊สเปลี่ยนไปเป็นความร้อนเพื่อทำให้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อุณหภูมิในเตาหลอมสูงเพียงพอที่จะหลอมวัตถุดิบให้เป็นน้ำแก้วก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปในกระบวนการต่อไป

การคำนวณต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมสามารถคำนวณได้ ดังนี้

ต้นทุนการผลิต (บาท) = ต้นทุนวัตถุดิบ + ต้นทุนแก๊ส

= [ต้นทุนวัตถุดิบหลัก + ต้นทุนเศษแก้ว] + ต้นทุนแก๊ส

= [(ปริมาณวัตถุดิบหลัก (หน่วยเป็นตัน) × ราคาวัตถุดิบหลักต่อ 1 ตัน) +
(ปริมาณเศษแก้ว (หน่วยเป็นตัน) × ราคาเศษแก้วต่อ 1 ตัน)] +
(ปริมาณแก๊ส (หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน) × ราคาแก๊สต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน)

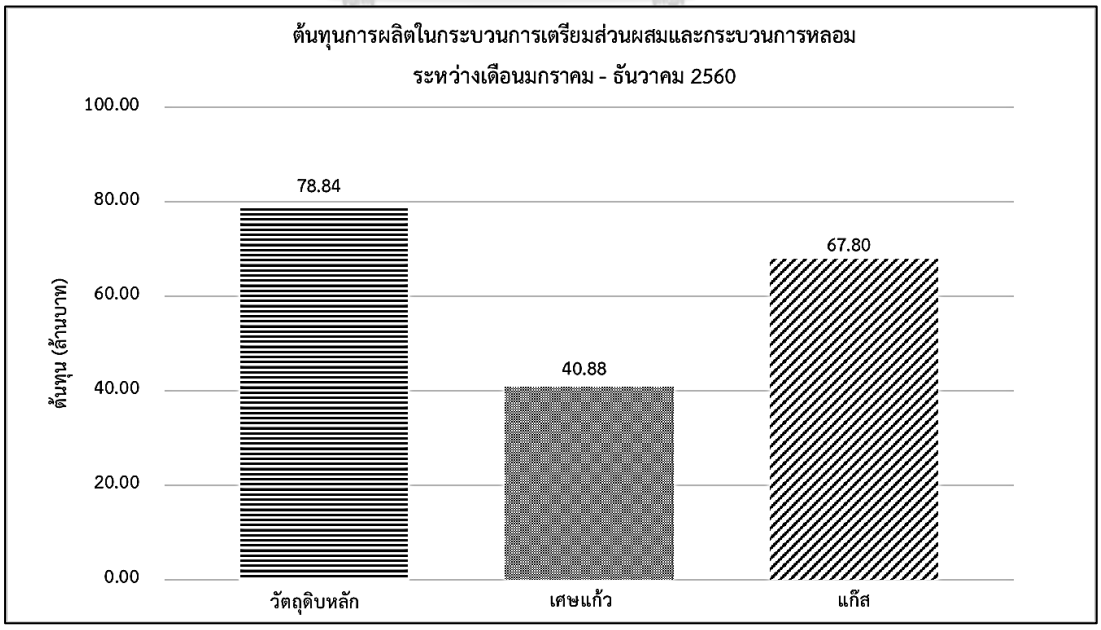
โดยต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมมีราคาต่อหน่วย ดังนี้

ราคาวัตถุดิบหลัก เท่ากับ 3,000 บาท/ตัน

ราคาเศษแก้ว เท่ากับ 4,000 บาท/ตัน

ราคาแก๊ส เท่ากับ 10.64 บาท/ลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน

จากข้อมูลของโรงงานเดือนมกราคม – ธันวาคม 2560 สามารถแสดงต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมได้ ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอม

จากข้อมูลต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมพบว่าต้นทุนวัตถุดิบหลักมีมูลค่าสูงถึง 78.84 ล้านบาท รองลงมาเป็นต้นทุนแก๊สและเศษแก้ว มีมูลค่า 67.78 และ 40.88 ล้านบาท ตามลำดับ จากต้นทุนดังกล่าวทำให้โรงงานกรณีศึกษามีต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมสูงถึง 187.52 ล้านบาทต่อปี

จากการศึกษาปัญหาต้นทุนในการผลิตสูง จะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิตทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิเตาหลอม ปริมาณความชื้นส่วนผสม และสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก ซึ่งปัจจัยแต่ละปัจจัยนั้นนอกจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตแล้วยังส่งผลต่อจำนวนฟองอากาศด้วย โดยมีสมมติฐานดังนี้ คือ เมื่ออุณหภูมิเตาหลอมมากขึ้น จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น แต่เมื่ออุณภูมิเตาหลอมน้อยลง จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่ำลงและจำนวนฟองอากาศสูงขึ้น ส่วนเมื่อปริมาณความชื้นส่วนผสมมากขึ้น จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง แต่เมื่อปริมาณความชื้นส่วนผสมมากเกินไป จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศสูงขึ้น และเมื่อสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักมากขึ้น จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง แต่เมื่อสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักมากขึ้นมากเกินไป จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น โดยที่คาดว่าไม่มีผลต่อจำนวนฟองอากาศ จากนั้นผู้วิจัยจะนำปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย มาทดสอบสมมติฐานว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศหรือไม่ แล้วจึงนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญไปสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศเพื่อหาค่าระดับปัจจัยในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมที่เหมาะสมที่ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดและมีจำนวนฟองอากาศอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งจะวิเคราะห์อย่างละเอียดในบทที่ 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อลดต้นทุนโดยการปรับส่วนผสมแก้วและปัจจัยในกระบวนการหลอม

1.5 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้จะศึกษาต้นทุนการผลิตที่มาจากต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนแก๊สเท่านั้นและศึกษาในส่วนกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมแก้วเท่านั้น ซึ่งไม่รวมขั้นตอนการขึ้นรูปบล็อกแก้วและขั้นตอนการบรรจุภัณฑ์

2. งานวิจัยนี้จะศึกษาจำนวนฟองอากาศในบล็อกแก้วเฉพาะลายที่ทำการศึกษาเท่านั้น

1.6 ผลที่ได้รับ

1. สมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญกับต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ

2. ค่าการปรับตั้งที่เหมาะสมของปัจจัยในข้อ 1.

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถปรับปรุงต้นทุนการผลิตให้มีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับต้นทุนการผลิตก่อนการปรับปรุงและมีจำนวนฟองอากาศอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

2. เป็นแนวทางให้กับทางโรงงาน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรเครื่องอื่น ๆต่อไป

1.8 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน

1. ศึกษากระบวนการทำงานภายในโรงงานกรณีศึกษา

1.) ศึกษากระบวนการผลิตบล็อกแก้วโดยละเอียดเพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงานและปัญหาที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งทำการรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.) จัดทำแผนผังกระบวนการผลิต (Process Mapping) เพื่อระบุขั้นตอนในการทำงานของกระบวนการ

2. การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นและกำหนดหัวข้องานวิจัย

1.) จัดตั้งคณะทำงานในโครงการโดยพิจารณาเลือกจากผู้ที่มีความรู้ ความชำนาญในส่วนของกระบวนการหลอมแก้ว

2.) กำหนดวัตถุประสงค์ เป้าหมาย ขอบเขตของการศึกษา ตัวชี้วัด และระยะเวลาของโครงการ จากทีมงานที่จัดตั้งขึ้นมาข้างต้น

3. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อหาแนวทางและวิธีในการแก้ปัญหา พร้อมทั้งทำการรวบรวมข้อมูลสภาพปัญหาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

4. การวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า

1.) ผู้วิจัยและคณะทำงานช่วยกันระดมความคิด (Brainstorming) เพื่อหาปัจจัยนำเข้าตามหลักการ 4M1E โดยอาศัยแผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล

2.) ทำการจัดลำดับความสำคัญและทำการกรองปัจจัยนำเข้าโดยใช้ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) โดยคณะทำงานที่มีความรู้ ความชำนาญช่วยกันประเมินและให้คะแนน เพื่อทำการคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีผลหรือส่งผลกระทบน้อยต่อผลตอบสนองออก

3.) เลือกปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าอาจจะมีผลกระทบสูงต่อต้นทุนการผลิตไปทำการทดสอบความมีนัยสำคัญและวางแผนกำหนดแนวทางในการดำเนินงานขั้นต่อไป

5. การออกแบบการทดลอง

1.) นำปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตที่ได้จากกระบวนการก่อนหน้า มาทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) พร้อมทั้งพิจารณาเลือกรูปแบบการทดลองและขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองให้มีความเหมาะสม

2.) กำหนดระดับของปัจจัยที่จะนำไปทดลอง พร้อมทั้งพิจารณาปัญหาข้อจำกัดต่าง ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อการทดลอง

3.) ดำเนินการทดลองตามแผนที่วางไว้

6. การวิเคราะห์หาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม

1.) นำปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองไปออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology : RSM) เพื่อหาค่าระดับที่เหมาะสมที่สุดในการสัดส่วนวัตถุดิบและค่าปรับตั้งเตาหลอมให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ

2.) กำหนดระดับของปัจจัยที่จะนำมาทำการทดลองตามความเหมาะสม พร้อมทั้งพิจารณาข้อจำกัดต่าง ๆที่อาจจะส่งผลต่อการทดลอง

3.) ดำเนินการเก็บข้อมูลตามแผนการที่วางไว้

4.) นำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างสมการถดถอยที่มีความสัมพันธ์กับผลตอบสนองแต่ละตัว

5.) หาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดจากข้อมูลที่เก็บมา โดยพิจารณาถึงข้อจำกัดต่าง ๆที่เกี่ยวข้องตามไปด้วย

6.) นำค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดมาวางแผนการทดลองเพื่อใช้กับการผลิตจริง และทำการเก็บ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

7.) วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการนำค่าปัจจัยที่เหมาะสมไปทดสอบ เพื่อเตรียมพร้อมกับการนำไปใช้จริงต่อไป

7. การติดตามและควบคุมการทำงาน

1.) ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

2.) ประยุกต์ใช้เครื่องมือทางคุณภาพเข้ามาช่วยในการควบคุมคุณภาพ

3.) สรุปผลและวิจารณ์ผลในการปรับปรุงกระบวนการและนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกระบวนการก่อนทำการปรับปรุงกระบวนการ

4.) จัดทำแผนควบคุม (Control Plan) และกำหนดเป็นมาตรฐานในการปฏิบัติงาน

8. สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.9 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอน	เดือน/ปี																	
	ม.ค./61	ก.พ./61	มี.ค./61	เม.ย./61	พ.ค./61	มิ.ย./61	ก.ค./61	ส.ค./61	ก.ย./61	ต.ค./61	พ.ย./61	ธ.ค./61	ม.ค./62	ก.พ./62	มี.ค./62	เม.ย./62	พ.ค./62	มิ.ย./62
1. ศึกษากระบวนการทำงานภายในโรงงาน																		
2. การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นและกำหนดหัวข้องานวิจัย																		
3. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง																		
4. การวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า																		
5. การออกแบบการทดลอง																		
6. การวิเคราะห์หาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม																		
7.การติดตามและควบคุมการทำงาน																		
8. สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ																		
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์																		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการดำเนินงานเพื่อปรับปรุงค่าประสิทธิภาพเตาหลอมจำเป็นจะต้องอาศัยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวข้องกับเพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยและเป็นการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับเรื่องที่ต้องการศึกษา โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับต้นทุนการผลิต

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับแก้วและกระบวนการหลอม เป็นส่วนที่อธิบายถึงแก้ว ขั้นตอนในการผลิตและเครื่องจักรที่ใช้

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องมือทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เป็นส่วนที่อธิบายถึงภาพรวมของเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับต้นทุนการผลิต (Cost of production)

2.1.1 ความหมายของต้นทุนการผลิต

มนวิกา ผดุงสิทธิ์ กล่าวว่า ต้นทุนการผลิต คือ ต้นทุนที่ทำให้ได้สินค้าสำเร็จรูปใด ๆ ประกอบด้วย วัตถุดิบทางตรงที่เบิกใช้ในการผลิต แรงงานทางตรงที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตและค่าใช้จ่ายในการผลิต เมื่อทั้ง 3 ส่วนประกอบ ได้เข้าสู่ขั้นตอนต่าง ๆของการผลิตก็จะถูกแปรสภาพเป็นสินค้าสำเร็จรูปต่อไป (มนวิกา ผดุงสิทธิ์, 2556)

จิรพัฒน์ เงาประเสริฐ กล่าวว่า ต้นทุนการผลิต คือ ต้นทุนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในการผลิตสินค้าสำหรับงวดหนึ่ง เป็นค่าใช้จ่ายที่จ่ายออกไปเป็นตัวเงิน (จิรพัฒน์ เงาประเสริฐ, 2549)

2.1.2 องค์ประกอบของต้นทุนการผลิต

องค์ประกอบของต้นทุนการผลิต (กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2561) ประกอบด้วย

1. ต้นทุนด้านวัตถุดิบ (material cost)

เป็นค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.) วัตถุดิบทางตรง (direct material cost) คือ วัตถุดิบที่ใช้เพื่อการผลิตโดยตรง โดยส่วนมากมักจะเป็นส่วนประกอบหนึ่งของผลิตภัณฑ์ เช่น ยางรถยนต์มียางเป็นวัตถุดิบทางตรง ปากกามี พลาสติกและหมึกเป็นวัตถุดิบทางตรง เป็นต้น จำนวนในการใช้งานวัตถุดิบทางตรงนี้จะแปรผันกับหน่วยในการผลิตโดยตรง

2.) วัตถุดิบทางอ้อม (indirect material cost) เช่น วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้สนับสนุนในการผลิตโดยส่วนมากจะไม่แปรผันกับปริมาณการผลิตโดยตรง เช่น กระดาษทราย ผ้าเช็ดมือ กาว และตะปู เป็นต้น ในบางครั้งวัตถุดิบทางอ้อมก็อาจถูกจัดให้อยู่ในหมวดหมู่ของวัตถุดิบทางตรง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับนโยบายทางการบัญชีของแต่ละองค์กร เช่น มีดกลึงสำหรับเครื่องจักรซีเอ็นซี ซึ่งเป็นวัตถุดิบทางอ้อม สามารถถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของวัตถุดิบทางตรงก็ได้ เนื่องจากเหตุผลด้านราคาที่สูงและสามารถคำนวณอายุการใช้งานต่อจำนวนชิ้นงานที่ทำการผลิตได้ (tool life) ถึงแม้ว่ามีดกลึงจะไม่ได้ถูกประกอบไปกับชิ้นงานก็ตาม

2. ต้นทุนด้านแรงงาน (labor cost)

เป็นค่าใช้จ่ายด้านแรงงานในการทำงานและผลิตสินสินค้าเพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป สามารถแบ่งออกได้คล้ายๆ กับต้นทุนวัตถุ คือค่าใช้จ่ายด้านแรงงานทางตรง และค่าจ่ายด้านแรงงานทางอ้อม ดังนี้

1.) ค่าใช้จ่ายด้านแรงงานทางตรง (direct labor cost) เช่น ค่าจ้ารายวันหรือเงินเดือนของพนักงานฝ่ายผลิต ซึ่งจะแปรผันกับปริมาณการผลิตโดยตรง

2.) ค่าใช้จ่ายด้านแรงงานทางอ้อม (indirect labor cost) เช่น เงินเดือนของพนักงานขาย เงินเดือนของผู้จัดการ เงินดือนของวิศวกร ค่าใช้จ่ายเหล่านี้จะไม่แปรผันกับปริมาณในการผลิตโดยตรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. ต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงานหรือค่าโสหุ้ยในการผลิต (overhead cost)

เป็นต้นทุนค่าใช้จ่ายที่นอกเหนือจากต้นทุนของวัตถุดิบและต้นทุนแรงงาน เช่น ค่าสาธารณูปโภค ค่าเช่าโรงงาน ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร และสวัสดิการต่าง ๆ เป็นต้น

2.1.3 การคำนวณต้นทุนการผลิต

ต้นทุนการผลิต สามารถคำนวณได้ดังนี้

ต้นทุนการผลิต = ต้นทุนวัตถุดิบ + ต้นทุนแรงงาน + ค่าใช้จ่ายโรงงาน

ในงานวิจัยนี้ต้นทุนการผลิต หมายถึง ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายที่ใช้สำหรับผลิตสินค้า โดยต้นทุนการผลิตในขอบเขตงานวิจัยนี้จะสนใจเฉพาะต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนค่าใช้จ่ายโรงงานที่เกิดจากแก๊สเท่านั้น โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนแก๊ส ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

ต้นทุนการผลิต = ต้นทุนวัตถุดิบ + ต้นทุนแก๊ส

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับแก้วและกระบวนการหลอม (ฤดี นิยมรัตน์, 2555)

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแก้ว

แก้ว เป็นวัสดุเซรามิกส์ที่มีคุณสมบัติเด่นในเรื่องความโปร่งใส ความแข็งแกร่ง และความมันแวววาว แก้วเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหลอมซิลิกากับสารโลหะออกไซด์แล้วทำให้เย็นตัวจนกระทั่งแข็งโดยไม่มีการตกผลึก ซึ่งสมบัติของแก้วมีหลายประการ เช่น มีความแข็งแต่เปราะจึงแตกหักง่าย มีลักษณะโปร่งใส นำไฟฟ้าได้ไม่ดีที่อุณหภูมิห้องแต่จะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่อุณหภูมิสูง มีลักษณะโปร่งใส เป็นต้น แต่ทั้งลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของแก้วจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แก้วแบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีได้หลายประเภท เช่น แก้วซิลิกาหลอมเหลว (Silica glass) แก้วโซดาไลม์ (Soda lime glass) แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass) แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate glass) เป็นต้น โดยโรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตบล็อกแก้ว ซึ่งจัดเป็นแก้วชนิดแก้วโซดาไลม์ (Soda lime glass) ซึ่งเป็นแก้วที่นิยมนำมาใช้มากที่สุด มีทรายเป็นส่วนผสมหลักและใช้โซดาหรือโพแทส (Potash) เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อช่วยหลอมละลาย เพื่อลดจุดหลอมเหลวให้ต่ำลง ลดความหนืดเพื่อให้สะดวกในการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังมีไลม์ (Calcium oxide : CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide : MgO) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide : Al_2O_3) ปนอยู่เล็กน้อย เพื่อปรับปรุงสมบัติให้แก้วมีความคงทนต่อสารเคมี ซึ่งแก้วชนิดนี้ถ้าขึ้นรูปบางเกินไปจะไม่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบกะทันหัน (Thermal shock) นิยมใช้ทำขวด กระจกหน้าต่าง กระจกแผ่น ถ้วยแก้ว แก้วกันกระสุน แก้วกระจกรถยนต์ เป็นต้น

2.2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว

วัตถุดิบแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดสมบัติและลักษณะเฉพาะของแก้ว โดยแบ่งออกได้เป็น 5 ชนิด คือ

1. ตัวทำให้เกิดเนื้อแก้ว (Glass former materials)

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วเพื่อที่จะทำให้เกิดเนื้อแก้วหรือความเป็นแก้วก็คือ ทรายแก้ว

ซึ่งทรายแก้วจะต้องมีปริมาณของเหล็กต่ำและสารประกอบอื่นเจือปนอยู่เล็กน้อย มิฉะนั้นจะได้เนื้อแก้วที่ไม่ใส มีสีอยู่ในเนื้อแก้ว และยากต่อการหลอมละลาย

2. ตัวช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมแก้ว (Fluxing agent)

วัตถุดิบที่มีสมบัติเป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมที่นิยมใช้ ได้แก่ โซดาแอช โดยเมื่อนำโซดาแอชไปผสมกับทรายแก้วในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 ถึง 16 จะช่วยลดอุณหภูมิการหลอมลงมาได้ 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส นอกจากโซดาแอชแล้ว เศษแก้ว (Cullet) ก็เป็นอีกวัตถุดิบหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นตัวลดอุณหภูมิเช่นเดียวกันและนิยมใช้มาก ซึ่งจะใช้ประมาณร้อยละ 10 ถึง 75 ในอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ แต่ถ้าใส่วัตถุดิบที่ช่วยการลดอุณหภูมิการหลอมในปริมาณน้อยจะได้เนื้อแก้วที่มีคุณภาพดี แต่ก็จะส่งผลให้แก้วมีต้นทุนที่แพงขึ้น

3. ตัวฟอกสี (Decolorizing agent)

วัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้เพื่อฟอกสีของแก้ว ได้แก่ ซีลีเนียม (Selenium) และโคบอลท์ (Cobalt) แต่จะใช้ในปริมาณน้อยเนื่องจากเป็นสารที่มีราคาแพง โดยใช้สำหรับฟอกสีเขียวที่เกิดจากออกไซด์ของเหล็ก แต่หากมีปริมาณเหล็กออกไซด์เกินกว่าร้อยละ 0.06 ตัวฟอกสีก็ไม่สามารถกำจัดสีได้ ฉะนั้นจะต้องควบคุมปริมาณของตัวที่ทำให้เกิดสีควบคู่กันด้วย การใช้ซีลีเนียมมีข้อเสียบางประการคือหากใช้ปริมาณมากเกินจะทำให้เนื้อแก้วมีความใสลดลง

4. ตัวไล่ฟอง (Oxidizing agent)

วัตถุดิบที่มีสมบัติช่วยในการไล่ฟองอากาศในเนื้อแก้วที่หลอมเป็นน้ำแก้วแล้ว ได้แก่ อาร์ซินิกออกไซด์ และโซเดียมไนเตรท (Sodium nitrate : $NaNO_3$) โดยการหลอมแก้วแต่ละครั้งจะเกิดฟองแก๊สขึ้นมาก เนื่องจากสารพวกคาร์บอเนต (Carbonate) ในวัตถุดิบที่ทำปฏิกิริยาในขณะการหลอมจนเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide : CO_2) ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดฟองในเนื้อแก้ว

5. ตัวควบคุมความหนืดหรือควบคุมการไหลตัวของแก้ว (Viscosity fluidity)

วัตถุดิบที่นิยมใช้เพื่อควบคุมการไหลตัวของน้ำแก้ว ได้แก่ อะลูมินา และหินฟันม้าทั้งชนิดโซดา (Soda feldspar) และชนิดโพแทส (Potash feldspar) ซึ่งมีสมบัติช่วยลดอุณหภูมิการหลอม

2.2.3 ขั้นตอนการผลิตแก้ว

กระบวนการผลิตแก้วประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 5 ขั้นตอนคือ

1. การเตรียมส่วนผสม (Batch preparing and mixing raw material)

ลำเลียงวัตถุดิบทั้งหมดสู่ไซโลที่โรงผสมวัตถุดิบและเมื่อต้องการจะใช้ก็เปิดส่วนล่างของไซโล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แล้วปล่อยให้วัตถุดิบที่เตรียมไว้ลงสู่ภาชนะรองรับ ชั่งให้ได้น้ำหนักตามความต้องการเพื่อที่จะนำไปใช้ผสมกับส่วนผสมอื่น ๆ

2. การหลอม (Melting process)

การหลอมแก้วนั้นมีขั้นตอนย่อย 3 ขั้นตอน คือ การหลอมแก้ว (Melting) การกำจัดฟองก๊าซ (Fining) การทำให้ส่วนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว (Homogenisation) และเป็นส่วนที่ใช้พลังงานความร้อนที่สูงที่สุด ส่วนผสมที่เตรียมไว้แล้วจะถูกป้อนเข้าสู่เตาหลอมโดยเครื่องเติมส่วนผสมทางช่องด้านท้ายของเตา (Dog house) ซึ่งก่อด้วยอิฐทนไฟ ในขณะที่เกิดการหลอม วัตถุดิบในส่วนผสมจะเกิดปฏิกิริยาสลายตัวให้ออกไซด์และก๊าซที่ห้องหลอมละลาย (Melting zone) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 1400 องศาเซลเซียส สารประกอบที่ได้จากการหลอมนี้จะมีลักษณะเป็นน้ำแก้ว (Glass melt) ที่เหลว ส่วนก๊าซจะออกจากน้ำแก้วที่หลอมเหลวทางปล่องเตา เนื้อแก้วจะไหลสู่บริเวณของการไล่ฟองซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมินี้เองก๊าซที่หลงเหลืออยู่ในน้ำแก้วจะถูกไล่ออกจนหมด น้ำแก้วเหลวที่ปราศจากก๊าซมีความหนาแน่นสูงกว่าจะจมลงสู่ระดับพื้นของเตาหลอมแล้วผ่านช่อง (Throat) ไปยังห้องแก้วใส (Refining zone) เพื่อให้น้ำแก้วเตรียมพร้อมสำหรับการขึ้นรูปช่วงนี้อุณหภูมิจะลดลงเหลือประมาณ 1200 องศาเซลเซียส เพื่อให้แก้วมีความหนืดเหมาะสมเพื่อใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งจุดประสงค์ในการหลอมแก้วก็เพื่อที่จะเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นของเหลวที่มีเนื้อแก้วสม่ำเสมอเข้ากัน ดังนั้นขนาดของเม็ดวัตถุดิบจึงมีส่วนสำคัญ หากขนาดของวัตถุดิบละเอียดมากเกินไป จะมีสภาพเป็นฝุ่นและกระจายตัวทำให้ประสิทธิภาพในการผสมต่ำและใช้เวลานานกว่า ในการหลอมแก้วต้องให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์คือไม่ให้มีฟองอากาศหลงเหลืออยู่หลังจากการหลอมตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้ ซึ่งแก้วแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิในการหลอมแตกต่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. การขึ้นรูป (Forming process)

น้ำแก้วเหลวจากห้องแก้วใสจะไหลเข้าสู่ส่วนที่เรียกว่า ฟอร์ฮาร์ท (Forehearth) ไปตามรางที่ทำด้วยอิฐทนไฟผ่านบริเวณควบคุมอุณหภูมิ (Cooling and conditioning section) เข้าสู่สเปาท์ (Spout) แล้วหล่นลงสู่เครื่องจักรทางช่องเล็ก ๆ (Orifice ring) โดยมีกรรไกรคอยตัดน้ำแก้วเหลวให้เป็นก้อนเรียกว่าก้อนน้ำแก้ว (Gob) หลังจากนั้นจึงนำก้อนน้ำแก้วไปขึ้นรูปด้วยวิธีต่าง ๆ ซึ่งการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แก้วจะต้องขึ้นรูปในขณะที่อยู่ในสภาพที่ก้อนน้ำแก้วมีความหนืด (Viscosity) ที่อุณหภูมิสูง โดยวิธีการขึ้นรูปมี 5 วิธีคือ การเป่า (Blowing) การอัดด้วยความดัน (Pressing) การดึง (Drawing) การรีด (Rolling) และการหล่อแบบ (Casting) การขึ้นรูปในแต่ละวิธีก็จะทำในขณะที่ก้อนน้ำแก้วมี

อุณหภูมิและความหนืดในช่วงที่แตกต่างกัน ไม่เช่นนั้นการผลิตออกมาจะทำให้แก้วแตกได้ในระหว่างการขึ้นรูป

4. การอบ (Annealing)

ทุกขั้นของกรรมวิธีการผลิตแก้วจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความเค้น (Stress) ขึ้นในเนื้อแก้ว หลังจากการขึ้นรูปจะต้องนำชิ้นงานแก้วที่ได้มาอบเพื่อควบคุมอัตราการเย็นตัวของเนื้อแก้วให้เป็นไปโดยสม่ำเสมอ มิฉะนั้นแก้วจะแตกเนื่องจากความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อแก้ว เตาที่ใช้สำหรับอบแก้วในอุตสาหกรรมจะมีความยาวประมาณ 20 เมตร มีสายพานโลหะขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วได้ อุณหภูมิจากหัวอบประมาณ 600 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของแก้ว

5. การตรวจสอบคุณสมบัติและคุณภาพของแก้ว (Inspection and quality control)

ภาชนะแก้วที่ผ่านการอบแล้วจะต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ขนาดความสูง ความกว้าง ขนาดปาก และรอยตำหนิต่าง ๆ เมื่อผลิตภัณฑ์แก้วผ่านการทดสอบเบื้องต้นแล้ว จะมีการสุ่มแก้วไปทดสอบคุณภาพตามความต้องการและตามมาตรฐานที่กำหนดเป็นระยะ ๆ เช่น การทดสอบความเครียดของเนื้อแก้ว ความสามารถในการรับแรงอัดแรงกระแทก หรือการทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหัน เป็นต้น

2.2.4 เตาหลอมแก้ว (PFAENDER, 1996)

เตาหลอมแก้ว (Glass furnace) สามารถแบ่งประเภทได้ตามลักษณะการใช้งาน และพลังงานงานที่ใช้ในการหลอมได้ ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แบ่งตามลักษณะการใช้งานออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เตาหลอมแบบหม้อ (Pot furnace)

เตาหลอมแบบนี้จะมีความจุไม่เกิน 2 ตัน ปกติใช้หลอมแก้วพิเศษซึ่งต้องป้องกันไม่ให้แก๊สที่เกิดจากการสันดาป ของเชื้อเพลิงสัมผัสโดยตรงกับแก้วเหลว หรือในกรณีที่ต้องการผลิตแก้วในปริมาณน้อย ส่วนมากจึงใช้ในงานผลิตแก้วที่ใช้ในงานทางแสง (Optical glass), แก้วสำหรับงานศิลป์ (Art glass) และแก้วแผ่น (Plate glass) ที่ผลิตโดยกระบวนการหล่อแบบ (Casting process) หม้อหลอมแก้วนี้จะทำจากดินเหนียวพิเศษหรือแพลตินัม ในกรณีที่ใช้ดินเหนียวจะมีปัญหาที่แก้วเหลวมักถูกปนเปื้อนด้วยสารที่หลุดอกจากผนังหม้อ การใช้แพลตินัมจึงดีกว่าที่ปลอดจากการปนเปื้อน แต่มีข้อเสียที่มีราคาสูง

รูปที่ 2.1 เตาหลอมแบบหม้อ (Pot furnace)

2. เตาหลอมแบบแท้งค์ (Tank furnace)

เตาหลอมแบบนี้จะมีลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยมหลังคารูปโดมดังแสดงในรูปที่ 2.2 เตาประเภทนี้จะมีความจุสูงกว่าแบบหม้อ เช่น อาจมีขนาดกว้าง 30 ฟุต ยาว 120 ฟุต สูง 5 ฟุต ซึ่งจะหลอมแก้วได้ 1,400 ตัน ส่วนผสมของวัตถุดิบที่บดได้ขนาดและผสมเข้ากันแล้ว จะไหลไปที่ปลายหนึ่งของเตาซึ่งเป็นบริเวณที่เรียกว่า ย่านหลอมตัว (Melting zone) แก้วเหลวจะรวมตัวกันอยู่ในแท้งค์ ผนัง 2 ด้านข้างทั้ง 2 ด้าน ติดไว้ด้วยหัวเตาเผา เชื้อเพลิงซึ่งส่วนมากใช้น้ำมันเตาจะถูกฉีดผ่านหัวเตาด้านใดด้านหนึ่ง เปลวไฟจะพ่นอยู่เหนือแก้วเหลว และแก๊สที่เกิดจากการสันดาปนั้นหลังจากการถ่ายเทความร้อนให้แก่แก้วเหลวแล้วจะออกไปตามปล่องระบายซึ่งอยู่ด้านตรงข้าม การใช้หัวเตาจะใช้ครั้งละด้านในช่วงระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นสลับด้านหัวเตาสลับกันไปมาตามเวลาที่กำหนด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ส่วนผสมที่เกิดการหลอมจะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวให้ออกไซด์ และให้แก๊สซึ่งส่วนมากจะเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลอยขึ้นไปยังผิวหน้าของเนื้อแก้วเหลว (Melting glass) และออกจากเตาปนไปกับแก๊สที่เป็นผลการผลิตของการสันดาปของเชื้อเพลิง แก้วหลอมจะไหลเข้าไปในส่วนถัดไปเรียกว่า ห้องไล่ฟอง(Fining zone) ซึ่งแก๊สที่หลงเหลืออยู่ในแก้วเหลวจะถูกไล่ออกไปจากเนื้อแก้ว ทั้งนี้เนื่องจากห้องไล่ฟองจะมีอุณหภูมิสูงกว่าทำให้แก้วมีความหนืดต่ำกว่าและฟองแก๊สขยายตัวมากกว่าทำให้เบากว่าทำให้แยกตัวออกจากเนื้อแก้วได้มากขึ้น เนื้อแก้วเมื่อมีฟองแก๊สน้อยลงจะมีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น จึงจมลงสู่ส่วนล่างของเตาเรียกว่า ห้องแก้วใส (Refining zone) หรือ ห้องดึงแก้ว (Drawing chamber zone) แก้วเหลวจะถูกทำให้อุณหภูมิลดลง เพื่อให้มีความหนืดพอเหมาะสำหรับการขึ้นรูป (Shaping) ต่อไป ปลายของเตาหลอมมักจะมีช่องหรือรางหลายช่องเพื่อ

นำอุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปมาต่อเข้าและดึงแก้วเหลวไปทำผลิตภัณฑ์ต่อไป โดยทั่วไปแก๊สที่เป็นผลผลิตของการสันดาปเชื้อเพลิงนั้นแม้ว่าจะถ่ายเท ความร้อนให้แก่แก้วเหลวแล้วก็ตามแต่ยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ จึงมีการนำพลังงานความร้อนที่เหลือนั้นกลับมาใช้ใหม่โดยการนำไปอุ่นอากาศที่ใช้ในการสันดาปให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ซึ่งนอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานแล้ว ยังทำให้อุณหภูมิในเตาหลอมแก้วสูงกว่ากรณีที่ใช้อากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นตัวช่วยในการสันดาป วิธีที่ใช้ในการนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้ใหม่นี้มี 2 แบบ ทำให้เตาหลอมแก้วแบบแท้งค์นี้จำแนกย่อยได้เป็น 2 ประเภท คือ

1.) แบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative type)

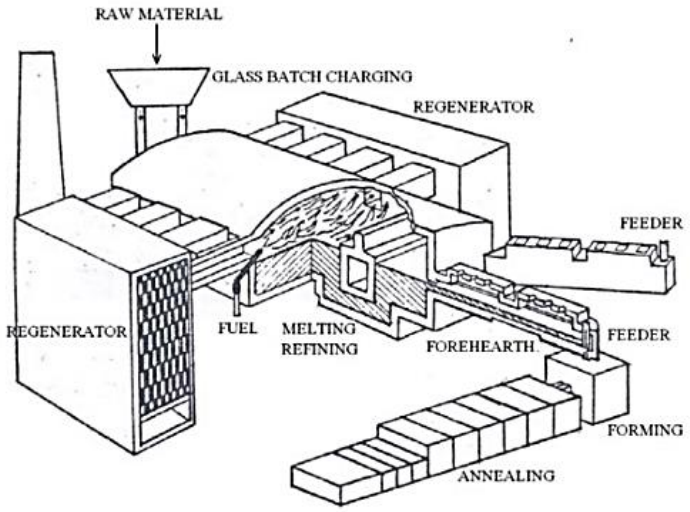
วิธีการนำพลังงานความร้อนกลับมาโดย ปล่องระบายแก๊สผลผลิตของการสันดาปจะต้องเข้ากับห้องซึ่งอยู่ด้านข้างของเตาหลอม ภายในวางเรียงซ้อนไว้ด้วยอิฐซึ่งอาจวางซ้อนสลับกันไปมา อิฐจะดูดความร้อนไว้ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นส่วนแก๊สจะเย็นตัวลงและปล่อยทิ้งไปทางปล่องระบายที่ตอนบนของห้อง หรือในบางกรณีอยู่ตอนล่างของห้อง เมื่ออุณหภูมิสูงพอจะมีการกลับด้านของหัวเตาเผาเชื้อเพลิง และกลับวาล์วควบคุมการเคลื่อนที่ ซึ่งใช้เป็นแก๊สช่วยสันดาปทันที ดังนั้นแก๊สร้อนจะออกไปทางปล่องระบายด้านตรงข้ามซึ่งต่อเข้ากับห้องลักษณะเดียวกันที่อยู่ด้านตรงข้ามของเตาหลอม และไปเผาอิฐที่บรรจุไว้ภายในให้ร้อนกลับเข้ามาใหม่ ห้องทั้งคู่นี้จึงทำงานเป็นรอบ แต่ละรอบจะประกอบด้วยระยะเวลาที่ดูดความร้อนและระยะเวลาที่ถ่ายเทความร้อนให้แก่อากาศ ซึ่งจะใช้เวลาการทำงานประมาณ 20 – 30 นาที ต่อรอบเราเรียกว่า Regenerative chamber และเรียกเตาหลอมแก้วแบบนี้ว่า เตาหลอมแบบรีเจนเนอเรทีฟ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.) แบบรีคิวเบอเรทีฟ (Recuperative type)

เตาหลอมแบบนี้จะมีหัวเตาเผาเชื้อเพลิงด้านเดียวเท่านั้น แก๊สร้อนที่เป็นผลผลิตของการสันดาปจะออกไปทางปล่องระบายด้านตรงข้าม ภายในเป็นท่อดินเหนียว (Tile) ซึ่งมีอากาศเย็นไหลผ่านแก๊สร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้แก่อากาศผ่านผนังท่อนี้และอากาศเมื่อถูกทำให้ร้อนขึ้นแล้วจะถูกส่งไปช่วยสันดาปต่อไป การแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เกิดอย่างต่อเนื่องจึงไม่ต้องทำการกลับทิศทางแบบรีเจนเนอเรทีฟ แต่เตาแบบนี้จะมีปัญหาเกี่ยวกับการรั่วซึม และการอุดตันทำให้เสื่อมความนิยมไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เตาหลอมมีขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากการหยุดเตาและการเริ่มติดเตาแต่ละครั้งทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ในการเริ่มติดเตาหลอมแก้วแต่ละครั้งจะใช้เวลาหลายวัน จะเผาเตาให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นช้า ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการขยายตัวของวัสดุที่ใช้สร้างเตา ระยะเวลาดังกล่าวนี้เองที่เป็นระยะเวลาการใช้เชื้อเพลิงที่ไม่มีผลิตภัณฑ์แต่อย่างใด เมื่ออุณหภูมิของ

เตาไปถึงช่วงระยะเวลาที่กำหนดซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของแก้วที่ต้องการผลิต ส่วนผสมของวัตถุดิบจึงจะเริ่มป้อนเข้าเตาหลอม โดยทั่วไปความร้อนส่วนน้อยเท่านั้นที่ใช้ในการหลอมวัตถุดิบ ความร้อนส่วนใหญ่จะสูญเสียไปยังบรรยากาศที่ล้อมรอบโดยการแผ่รังสีของผนังเตา และแม้ว่าจะมีการแผ่รังสีนี้ที่ทำให้ผนังเตาเย็นตัวลง อุณหภูมิของผนังเตายังมีค่าสูงจนกระทั่งแก้วเหลวสามารถละลายผนังเตาบางส่วน และกัดกร่อนผนังเตาได้อย่างรวดเร็วเพื่อลดผลของแก้วเหลวที่มีต่อผนังเตาหลอม และในมุมกลับลดผลของการปนเปื้อนเนื้อแก้วอันเนื่องมาจากการสึกกร่อนของของเตาเผานี้ จึงมักนิยมเดินท่อไว้ในผนังเตาหลอม เพื่อรักษาผนังเตาหลอมให้มีอุณหภูมิต่ำพอ ที่จะไม่ให้ถูกกัดกร่อนได้ง่ายด้วยแก้วเหลว



รูปที่ 2.2 เตาหลอมแบบแท้งค์ (Tank furnace)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แบ่งตามพลังงานที่ใช้ในการหลอมออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เตาหลอมแบบใช้ไฟฟ้า (Electrical melting)

จะอาศัยความร้อนจากไฟฟ้า เตาได้ถูกออกแบบมาโดยใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านให้มีไฟฟ้าวิ่งผ่านหม้อหลอมแก้ว เมื่อไฟฟ้าวิ่งผ่านหม้อจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น แต่ต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าจำนวนมากและแยกส่วนที่จะหลอมแก้วและขั้นตอนการกำจัดฟองก๊าซออกจากกัน เพื่อให้มีความยาวที่มากพอระหว่างขั้วไฟฟ้าสองด้าน เพื่อที่จะมีพลังงานไฟฟ้ามากพอที่จะทำให้มีความร้อนไว้หลอมแก้วได้ และข้อดีที่สำคัญของเตาไฟฟ้าคือการไม่มีก๊าซของเสียปลดปล่อยออกมาเพื่อลดปรากฏการณ์เรือนกระจกลงได้ แต่ก็มีปัญหาคือการปล่อยพลังงานความร้อนที่ออกมาได้ไม่สม่ำเสมอมากนัก และอีกทั้งยังมีราคาค่าใช้จ่ายในการใช้ไฟฟ้านี้มาก และจำเป็นต้องใช้พื้นที่จำนวนมากในการวางเตา

2. เตาหลอมแบบใช้อากาศและออกซิเจน (Oxy-fuel furnace)

เป็นเตาสมัยใหม่ที่มีการใช้อากาศมาร่วมกับเชื้อเพลิงโดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ 75-80% เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงและยังช่วยลดการปล่อยความร้อนออกสู่ชั้นบรรยากาศ แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงของสารไนโตรเจนทำให้เกิดการปล่อยไนโตรเจนออกซิไดซ์ออกสู่บรรยากาศมากขึ้น

โดยในงานวิจัยนี้เตาหลอมที่ใช้จะเป็นลักษณะแท้งค์แบบรีเจนเนอเรทีฟ ที่ใช้พลังงานในการหลอมจากเชื้อเพลิงแก๊สร่วมกับอากาศ

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องมือทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.3.1 แผนผังกระบวนการผลิต (Process Mapping)

เป็นผังกระบวนการที่แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนกระบวนการทำงานทั้งหมดว่าผ่านขั้นตอนใดบ้างและมีปัจจัยใดที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ทำความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งจะแสดงการไหลของกระบวนผลิตตั้งแต่ปัจจัยนำเข้า (Input) จนกระทั่งได้ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการผลิต (Output) โดยประโยชน์ของแผนผังกระบวนการผลิตจะช่วยให้สามารถมองเห็นภาพรวมของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับโครงการที่เลือกมาทำการปรับปรุง ทำให้ทราบถึงตำแหน่งที่ก่อให้เกิดความสูญเสีย จากนั้นจะนำเข้าไปสู่กระบวนการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา ทำให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาและวางแผนการเก็บรวบรวมข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

2.3.2 การระดมความคิด (Brainstorming)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เป็นเทคนิคหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ในการระดมความคิดเพื่อหาไอเดียสร้างสรรค์ใหม่ๆ หรือใช้ในการระดมความคิดเพื่อแก้ไขปัญหา โดยทุกคนสามารถแสดงความคิดเห็นได้อย่างอิสระ ในการระดมความคิดสามารถนำเครื่องมืออื่น ๆ เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อช่วยให้เห็นถึงสาเหตุรากเหง้าของปัญหาง่ายขึ้น 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. ไม่มีการตั้งกรอบหรือการประเมินถูกผิดในขณะทำการระดมความคิด

5. ในการระดมความคิดควรทำให้เกิดแนวความคิดที่สร้างสรรค์และสิ่งใหม่ๆ

2.3.3 แผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) (นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์, 2559)

แผนผังแสดงสาเหตุและผลเป็นแผนผังที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (Problem) กับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น (Possible Cause) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "แผนผังก้างปลา (Fish Bone Diagram)" เนื่องจากหน้าตาแผนภูมิมีลักษณะคล้ายปลาที่เหลือแต่ก้าง หรือหลายๆ คนอาจรู้จักในชื่อของแผนผังอิชิกาว่า (Ishikawa Diagram) ซึ่งได้รับการพัฒนาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1943 โดย ศาสตราจารย์คาโอรุ อิชิกาว่า แห่งมหาวิทยาลัยโตเกียว แผนผังนี้จะใช้ในการค้นหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหา แผนผังแสดงสาเหตุและผลจะช่วยให้การระดมความคิด(Brainstorming) เป็นระบบมากขึ้น เนื่องจากมีการแยกหมวดหมู่ของสาเหตุไว้อย่างชัดเจนตั้งแต่ก่อนที่จะเริ่มระดมความคิด โดยอาศัยหลักของ 4M1E เข้ามาช่วยในการแยกแยะกลุ่มของปัจจัย ได้แก่ คน (Man), เครื่องจักร (Machine), วัตถุดิบ (Material), วิธีการดำเนินงาน (Method), เครื่องมือวัด (Measurement) และสภาพแวดล้อม (Environment) ซึ่งแต่ละกลุ่มปัจจัยจะมีการกำหนดสาเหตุหลักของปัญหา และแยกออกมาเป็นสาเหตุย่อย ๆต่อไปดังรูปที่ 2.2 อีกทั้งยังช่วยให้การกำหนดสาเหตุมีความเป็นระบบและเป็นเหตุเป็นผลกัน

วิธีการสร้างแผนผังสาเหตุและผลหรือแผนผังก้างปลา

1. กำหนดประโยคปัญหาที่หัวปลา โดยหลักเลี่ยงคำเชื่อมต่าง ๆ ได้แก่ และ แล้ว ซึ่ง อันเนื่องจากหัวปลาหนึ่งหัวจะแทนหนึ่งสาเหตุของปัญหาเท่านั้น และควรกำหนดปัญหาให้ชัดเจนไม่กำกวม และควรกำหนดหัวข้อปัญหาในเชิงลบ

2. กำหนดหมวดหมู่ของสาเหตุไว้ที่ปลายก้างหลัก

3. ทำการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุในหมวดหมู่นั้น ๆ โดยใช้การวิเคราะห์ทำไม (Why-Why Analysis) แล้วแตกก้างปลาออกเป็นสาเหตุรองและสาเหตุย่อย ตามลำดับ

4. ให้หยุดก็ต่อเมื่อเห็นสาเหตุรากเหง้าของปัญหา นั่นคือเห็นแนวทางการแก้ไขปัญหาได้

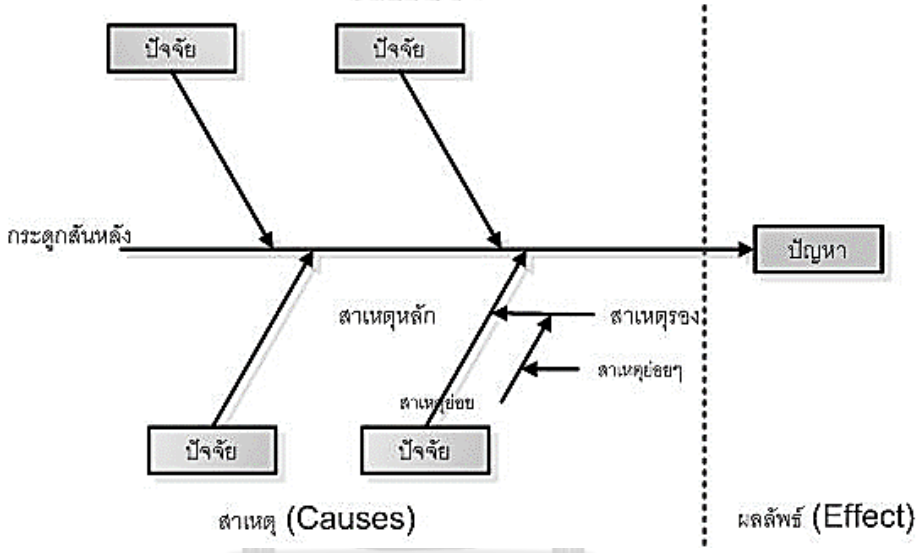
5. ให้ยืนยันความเป็นเหตุเป็นผลโดยอ่านจากปลายก้างปลาที่ย่อยที่สุด ผ่านก้างปลาในลำดับก่อนหน้าจนกระทั่งถึงหัวปลา

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

7. ทำการสำรวจที่หน้างานเพื่อพิสูจน์ว่าสาเหตุรากเหง้านั้นเกิดขึ้นจริงหรือไม่ หากไม่ได้เกิดแสดงว่าสาเหตุนั้นไม่ได้เป็นสาเหตุรากเหง้าของปัญหา ในทางกลับกันหากสาเหตุนั้นเป็นสาเหตุรากเหง้าของปัญหา ให้ทำการเก็บข้อมูลเพื่อพิสูจน์ความมีนัยสำคัญต่อไป

8. จัดลำดับความสำคัญของสาเหตุ

9. คัดเลือกสาเหตุรากเหง้าที่คิดว่าจะสามารถดำเนินการได้ขึ้นมา



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแผนผังแสดงเหตุและผล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.4 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

ตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลจะใช้แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยนำเข้าต่าง ๆ กับตัวแปรตอบสนองที่กำลังศึกษา ที่ได้จากการระดมความคิดโดยอาศัยแผนผังสาเหตุและผลเข้ามาช่วยให้การวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้ามีความเป็นระบบมากขึ้น โดยในขั้นแรกจะต้องทำการวิเคราะห์และศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อตัวแปรตอบสนองที่กำลังพิจารณา โดยอาศัยการระดมความคิดจากผู้ที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับส่วนของงานที่กำลังพิจารณา จากนั้นจะต้องทำการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ได้ โดยจะมีการกำหนดเกณฑ์การให้คะแนนตามความสำคัญตามความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นของปัจจัยนั้น ๆต่อตัวแปรตอบสนองที่ศึกษาแต่ในบางกรณีที่ตัวแปรตอบสนองมีหลายตัวและมีความสำคัญที่แตกต่างกัน จะต้องมีการให้คะแนนน้ำหนักความสำคัญเพิ่มเติมเข้าไปก่อนการให้คะแนน โดยรูปแบบของตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลจะ

แสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งวิธีการคิดผลคะแนนรวมจะต้องนำคะแนนที่ได้ไปคูณกับคะแนนน้ำหนักความสำคัญของตัวแปรตอบสนองแต่ละตัว แล้วจึงนำผลคูณที่ได้มารวมกัน ซึ่งผลคะแนนที่มากจะบ่งบอกความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นของปัจจัยนั้น ๆเช่นเดียวกัน จากนั้นจะนำผลคะแนนที่ได้ไปจัดลำดับความสำคัญโดยอาศัยกราฟแสดงคะแนนความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อเรียงลำดับปัจจัยตามผลกระทบที่มีต่อตัวแปรตอบสนองที่กำลังพิจารณา ทำให้สามารถพิจารณาเลือกปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีผลกระทบสูงในลำดับต้นๆมาทำการแก้ไขก่อน หรือนำผลที่ได้ไปใช้ในประเมินแผนการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิต

ตารางที่ 2.1 รูปแบบของเมทริกซ์ความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล

	ปัญหา/ตัวแปรตอบสนอง					
คะแนนน้ำหนักความสำคัญของปัญหา						
สาเหตุ/ปัจจัยนำเข้า	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	ผลรวมคะแนน
X_1						
X_2						
X_3						
X_4						
X_5						

2.3.5 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Design of Experiment, DOE) (นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์, 2559)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

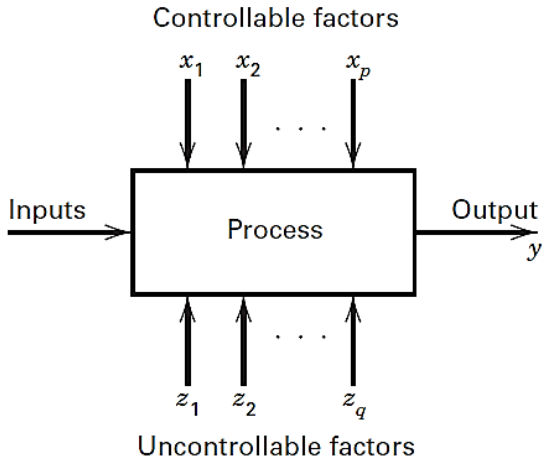
การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการออกแบบแผนการทดลองเพื่อใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลและใช้ในการตรวจสอบหาปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมต่อตัวแปรตอบสนองดังรูปที่ 2.3 โดยปัจจัยนำเข้าจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1.ปัจจัยนำเข้าที่สามาควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ ปัจจัยที่สามารถทำการกำหนดหรือปรับเปลี่ยนค่าได้ในขณะดำเนินการทดลอง

2. ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factors) คือ ปัจจัยที่ไม่สามารถทำการกำหนดหรือปรับเปลี่ยนค่าได้ ซึ่งอาจจะเกิดจากข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและต้นทุนการผลิต โดยปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมจะแบ่งออกเป็น

1.) ตัวแปรรบกวน (Noise Variable) จะเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่ไม่ใช่ปัจจัยที่จะนำเข้ามาศึกษา

2.) Nuisance Variable จะเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองที่ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งการสุ่มลำดับการทดลองจะช่วยให้ผลกระทบที่เกิดขึ้นในส่วนนี้ลดลงได้



รูปที่ 2.4 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการหรือระบบ (ปารเมศ ชุติมา, 2545)

ขั้นตอนการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ มีดังนี้

1. วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง (นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์, 2559)

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

2.) เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองเพื่อใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ตัวแปรตอบมีค่าตรงตามเป้าหมายที่ต้องการ

3.) เพื่อเป็นการสนับสนุนการปรับปรุงในเรื่องการออกแบบผลิตภัณฑ์ การออกแบบกระบวนการ และการดำเนินงานของกระบวนการ

4.) ช่วยให้จำนวนการทดลอง (Runs) มีเท่าที่จำเป็นในการให้ข้อมูลเพื่อสรุปผลของปัจจัยนำเข้าที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง

2. ขั้นตอนในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.) การออกแบบการทดลอง

- การกำหนดรูปแบบการทดลองที่ใช้ โดยพิจารณาความเหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาว่าต้องการทดสอบทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยหรือทดสอบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย ซึ่งจะใช้รูปแบบการทดลองที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ในการกำหนดรูปแบบการทดลองจะต้องพิจารณาจากจำนวนปัจจัย จำนวนการทดลองที่สามารถยอมรับได้ และคุณภาพของผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง

- การเขียนเมทริกซ์การออกแบบ

- การกำหนดค่าในแต่ละระดับของปัจจัยที่ทำการทดสอบจะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) และแบบหน่วยที่เป็นค่ารหัส (Coded Unit)

- การกำหนดตัวแปรอื่น ๆที่อาจจะส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อทำการควบคุมตัวแปรเหล่านั้น

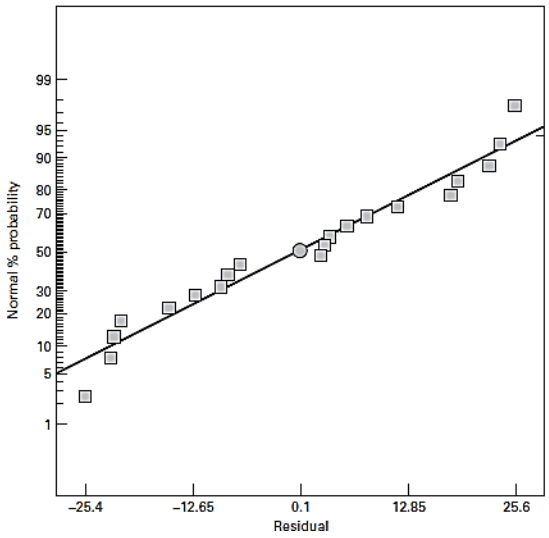
3.) ดำเนินการทดลองตามแผนที่วางไว้ โดยจัดให้ลำดับการทดลองเป็นไปอย่างสุ่ม เพื่อขจัดผลที่เกิดจากตัวแปรรบกวน

4.) การวิเคราะห์ผลการทดลอง

- ทำการตรวจสอบสมมติฐานของข้อมูลว่ามีลักษณะเหมาะสมที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอย (Analysis of Variance: ANOVA) ในการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยได้หรือไม่ ได้แก่

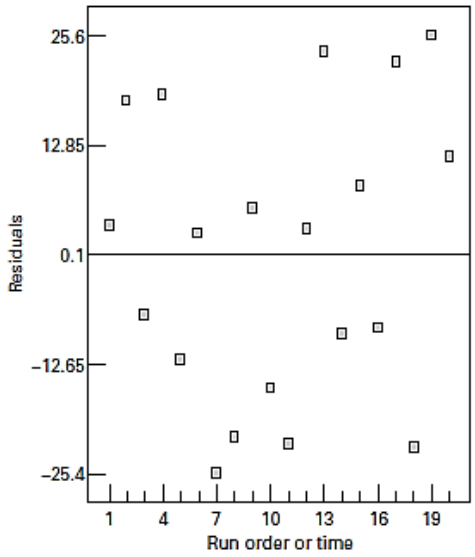
สมมติฐานข้อที่ 1 คือ ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ ดังรูปที่ 2.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



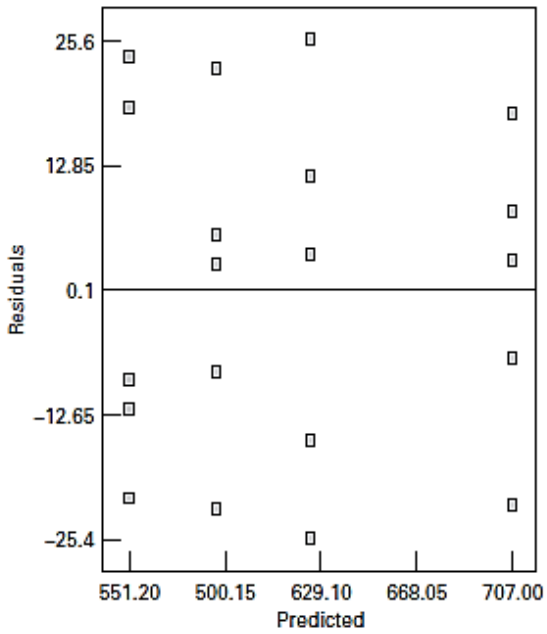
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างกราฟค่าความผิดพลาดที่มีการแจกแจงแบบปกติ (MONTGOMERY, 2009)

สมมติฐานข้อที่ 2 คือ ค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างกราฟค่าความผิดพลาดที่มีความเป็นอิสระต่อกัน (MONTGOMERY, 2009)

สมมติฐานข้อที่ 3 คือ ค่าความผิดพลาดมีความแปรปรวนคงที่ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างกราฟค่าความผิดพลาดที่มีความแปรปรวนคงที่ (MONTGOMERY, 2009)

- 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 (ปารเมศ ชุติมา, 2545) (นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์, 2559)

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

การออกแบบด้วยวิธีนี้จะเป็นการทดสอบทีละปัจจัย โดยในการทดสอบแต่ละครั้งจะมีการเปลี่ยนค่าปัจจัยใด ๆ เพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น และคงค่าของปัจจัยอื่น ๆที่สนใจจะศึกษาไปพร้อมกันเอาไว้ที่ค่าๆหนึ่ง ดังนั้นในการทดลองจะสามารถสรุปผลได้เพียงปัจจัยเดียวและไม่สามารถศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่นำมาทดสอบได้

2.) การออกแบบการทดลองแบบ Design of Experiment (DOE)

การออกแบบด้วยวิธีนี้จะเป็นการทดสอบให้เห็นถึงผลของปัจจัยหลายๆปัจจัยที่ระดับของปัจจัยอื่น ๆอย่างน้อยสองระดับ ทำให้สามารถศึกษาถึงผลกระท่วมร่วมระหว่างปัจจัยได้ โดยการออกแบบการทดลองแบบ DOE จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)

คือ การทดลองที่เกิดจากการนำปัจจัยนำเข้าทั้งหมดที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองมาทำการทดลอง โดยจะทำการศึกษาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการทดลอง ทำให้สามารถวิเคราะห์และสรุปผลปัจจัยในสภาวะต่าง ๆที่ทำการทดลองได้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่นิยมใช้กันทั่วไปจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

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

เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้ในกรณีที่มี k ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยจะประกอบด้วยระดับในการทดลอง 2 ระดับ คือ ระดับต่ำหรือ -1 และระดับสูงหรือ +1 ระดับในการทดลองอาจจะเกิดจากข้อมูลในเชิงปริมาณ (Quantitative) เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลา เป็นต้น

หรือข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative) เช่น เครื่องจักรสองเครื่อง คนสองคน เป็นต้น ในการออกแบบการทดลองเช่นนี้จะช่วยให้จำนวนการทดลองน้อยที่สุดเพื่อศึกษาผลของปัจจัย k ชนิด ซึ่งการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2k มักจะถูกนำมาใช้ในการคัดกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในช่วงของการเริ่มต้นโครงการ

(ข) การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design)

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

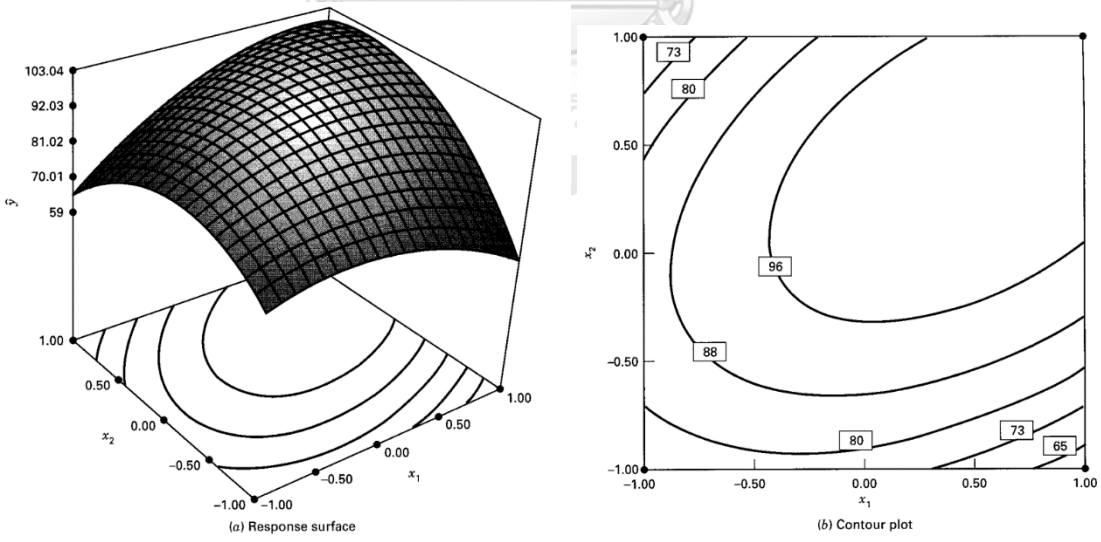
ตารางที่ 2.2 รายละเอียดความสัมพันธ์ของผลกระทบที่เกิดจากการเลือกใช้ค่า Resolution ต่าง ๆ

Resolution	**รายละเอียดความสัมพันธ์ของผลกระทบ**
III	ผลกระทบหลักจะไม่ปะปนกับผลกระทบหลักของปัจจัยอื่น ๆ แต่ผลกระทบหลักจะปะปนกับผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย เหมาะกับการนำไปใช้ในการคัดเลือกปัจจัยกรณีที่มีปัจจัยนำเข้าจำนวนมาก
IV	ผลกระทบหลักจะไม่ปะปนกับผลกระทบหลักของปัจจัยอื่น ๆ และไม่ปะปนกับผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย แต่ผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยจำปะปนกันเอง เหมาะกับการใช้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลักและสามารถนำผลที่ได้จากการ

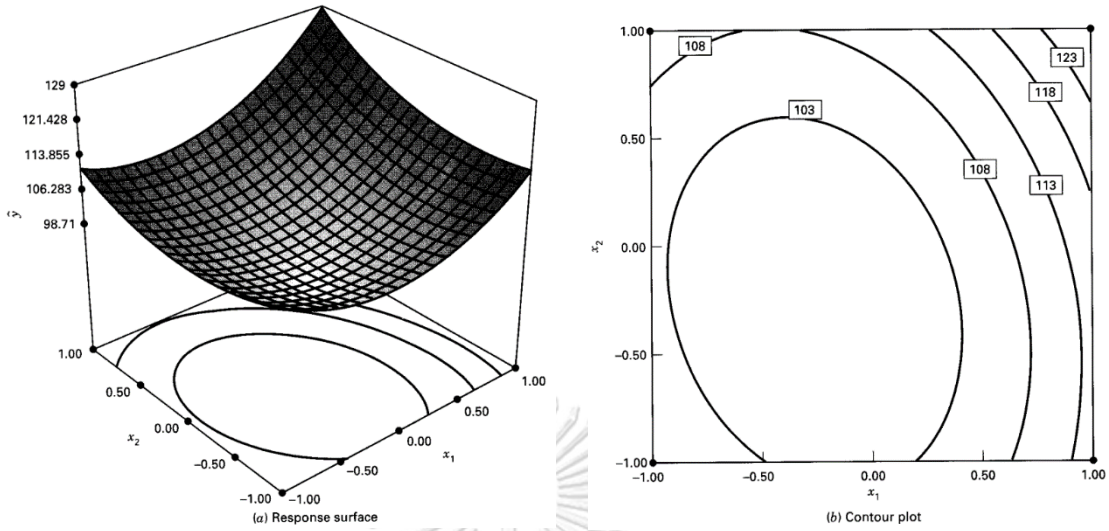
	วิเคราะห์ไปใช้ในการพยากรณ์หากไม่สามารถทำการทดลองที่มี Resolution V ได้
V	ผลกระทบหลักจะไม่ปะปนกับผลกระทบหลักของปัจจัยอื่น ๆ และไม่ปะปนกับผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยก็จะไม่ปะปนกันเอง แต่ผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยจะปะปนกับผลกระทบร่วมระหว่างสามปัจจัยซึ่งสามารถตัดทิ้งได้เนื่องจากมีค่าน้อยมาก ที่ Resolution V จึงเหมาะสมกับการใช้ศึกษาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยไปพร้อม ๆกัน

2. การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design)

เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคทางสถิติเข้ามาช่วยในการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ โดยผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ซึ่งแต่ละปัจจัยจะถูกทดสอบมากกว่า 2 ระดับ ทำให้สามารถเห็นจุดที่ตัวแปรตอบสนองมีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดดังรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 ตามลำดับ หรือได้ค่าตัวแปรตอบสนองที่ระดับที่ต้องการได้ โดยการออกแบบการทดลองประเภทจะมีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) และการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken



รูปที่ 2.8 กราฟพื้นผิวตอบและกราฟโครงร่างของตัวแปรตอบสนองที่มีค่ามากที่สุด

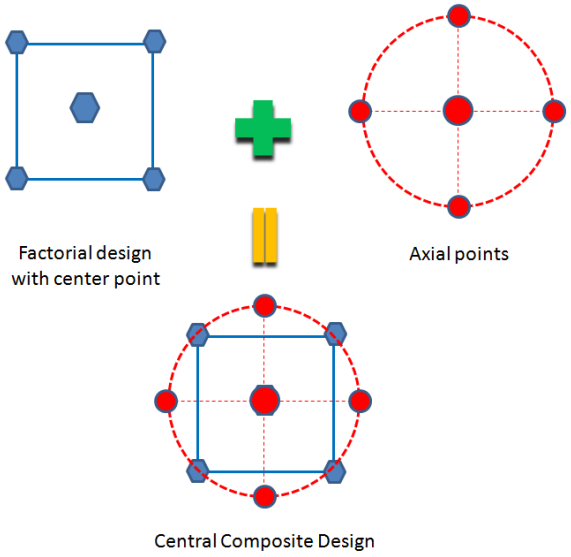


รูปที่ 2.9 กราฟพื้นผิวตอบและกราฟโครงร่างของตัวแปรตอบสนองที่มีค่าน้อยที่สุด

(ก) การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD)

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

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



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

การกำหนดระดับปัจจัยของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนของการทดลองแฟกทอเรียลจะทำการทดลองอยู่ที่ระดับ +1 และ -1 ในส่วนของจุดศูนย์กลางจะใช้ระดับของการทดลอง 0 และส่วนการทดลองที่ส่วนของจุดแกนจะอยู่ที่ระดับ $+\alpha$ และ $-\alpha$ โดยค่า α จะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนปัจจัยดังตารางที่ 2.3

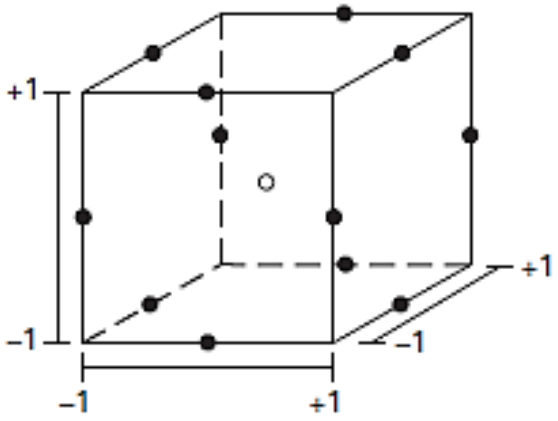
ตารางที่ 2.3 ค่า α ของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางตั้งแต่ 2-6 ปัจจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จำนวนปัจจัย	ส่วนการทดลองแฟคทอเรียล	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

การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์ – เบห์นเคน (Box-Behnken) เป็นแบบการทดลองที่นิยมใช้ในกรณีที่มีจำนวนปัจจัยตั้งแต่จำนวนปัจจัย 3 ปัจจัยขึ้นไป แต่ละปัจจัยถูกทดลองที่ 3 ระดับ มีการสร้างตัวแบบที่มีลักษณะเป็นโพลิโนเมียลกำลังสอง การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์- เบห์นเคนมีส่วนประกอบของส่วนการทดลองแฟกทอเรียล และส่วนการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์- เบห์นเคนจะไม่ได้รวมจุดใด ๆที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรไว้ ทำให้ไม่มีการทดลองในสภาวะที่รวมของปัจจัยระดับที่สูง



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken กรณีที่มี *3* ปัจจัย

ตารางที่ 2.4 สรุปข้อเด่น ข้อด้อยของแบบการทดลองต่าง ๆของการออกแบบพื้นผิวผลตอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แบบการทดลอง	**การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง แบบ CCD**	**การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง แบบ CCF**	**การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน**
ข้อเด่น	ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีความแม่นยำ และใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด	ในการทำการทดลองสามารถปรับระดับปัจจัยให้เท่ากับระดับแอลฟาได้เนื่องจากระดับแอลฟาถูกกำหนดให้เท่ากับ 1	ไม่ทำการทดลองในสภาวะที่รวมของปัจจัยระดับที่สูงเป็นการลดความเสี่ยงในการทำการทดลอง และเป็นการลดค่าใช้จ่าย

แบบการทดลอง	การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง แบบ CCD	การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง แบบ CCF	การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน
ข้อด้อย	ในการทดลองจริงอาจเกิดกรณีที่ไม่สามารถปรับระดับปัจจัยให้เท่ากับระดับแอลฟาที่คำนวณออกมาได้	ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีประสิทธิภาพความแม่นยำน้อยกว่าแบบส่วนประสมกลาง	ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีประสิทธิภาพความแม่นยำได้น้อยกว่าแบบส่วนประสมกลาง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดต้นทุนการผลิต

Tooley กล่าวว่าปริมาณความชื้นส่วนผสมส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพเตาหลอม โดยหากปริมาณความชื้นส่วนผสมน้อยกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลให้เมื่อวัตถุดิบเข้าไปภายในเตาแล้วจะมีการกระจายตัวเป็นระนาบมุมต่ำ ซึ่งส่งผลให้ความร้อนแพร่ผ่านเข้าไปในวัตถุดิบได้น้อย จึงต้องใช้ความร้อนที่มากในการหลอม และปริมาณความชื้นน้อยอาจส่งผลให้วัตถุดิบบางส่วนหายไป (loss) ก่อนที่จะเข้าเตาหลอม ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น แต่หากวัตถุดิบมีความชื้นส่วนผสมที่มากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลให้เมื่อวัตถุดิบเข้าไปภายในเตาแล้วจะมีการกระจายตัวเป็นระนาบมุมสูง ซึ่งส่งผลให้ความร้อนแพร่ผ่านเข้าไปในวัตถุดิบได้มาก จึงไม่ต้องใช้ความร้อนที่มากในการหลอม ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง แต่หากปริมาณความชื้นส่วนผสมมากเกินไปจะทำให้อุณหภูมิในการหลอมวัตถุดิบสูงตามไปด้วย (TOOLEY, 1984)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยในงานวิจัยนี้จะนำแนวทางการใช้ปริมาณความชื้นส่วนผสมที่เหมาะสมมาปรับใช้ในการลดต้นทุนการผลิต

Koroviakovskii ศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของเศษแก้ว เนื่องจากโรงงานผลิตแก้วเป็นแหล่งผลิตที่มีขนาดใหญ่ ต้องใช้พลังงานและวัตถุดิบเป็นจำนวนมาก อีกทั้งคนยังใช้วัตถุดิบแก้วเพิ่มมากขึ้นทุกวัน ซึ่งในปัจจุบันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มราคาเพิ่มมากขึ้น ฉะนั้นการเพิ่มการนำกลับมาใช้ของเศษแก้วจึงเป็นการลดต้นทุนการผลิตได้ ซึ่งการนำกลับมาใช้ใหม่เป็นการลดใช้พลังงานในส่วนการผลิตที่ใช้ได้กับทุกชนิดของเตาหลอม จะเห็นผลชัดเจนเมื่อใช้การกลับมาใช้ใหม่ของเศษแก้ว มีปริมาณ 10-25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานลงถึง 2.5-3.0 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเศษแก้วใช้พลังงานในการหลอมละลายน้อยกว่าตัววัตถุดิบ เป็นการลดทั้งต้นทุนและพลังงานการผลิต ซึ่งในยุโรปนั้นมี

การนำเศษแก้วกลับมาใช้ใหม่ตั้งแต่ 20-90 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณผู้ใช้ถึง 48 เปอร์เซ็นต์ แต่งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัด โดยถ้าต้องการผลิตภัณฑ์ที่คุณภาพสูงมาก อาจใช้ตรงนี้เข้ามาประยุกต์ใช้ไม่ได้ และการทดลองนี้ทำเฉพาะกับเตาแบบที่ใช้เชื้อเพลิงเท่านั้น (Koroviakovskii, 2016)

โดยในงานวิจัยนี้จะนำแนวทางการเพิ่มการนำกลับมาใช้ของเศษแก้วในการลดต้นทุนการผลิตมาปรับใช้

D'Antonio ศึกษาการลดการใช้พลังงานของเตาหลอม เนื่องจากพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่ในเตาหลอมนั้นอยู่ในกระบวนการหลอมเกือบ 70 เปอร์เซ็นต์ คือ 1 ตันนั้นใช้พลังงาน 2.2 ล้านบีทียู และพลังงานที่ใช้ทั้งหมดกว่า 60 เปอร์เซ็นต์นั้นสูญเสียไปกับความร้อน และ 40 เปอร์เซ็นต์นั้นกลับมาใช้ในการหลอม ถ้าเราสามารถนำความร้อนนั้นกลับมาใช้ใหม่ได้จะเป็นการประหยัดพลังงานเป็นอย่างมาก ปัจจุบันพลังงานนั้นมาจากก๊าซธรรมชาติ 80 เปอร์เซ็นต์ จากไฟฟ้า 17 เปอร์เซ็นต์ จากน้ำมันเชื้อเพลิง 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการลดการใช้พลังงานของเตาหลอมนั้นมีหลายวิธีคือ

1. การทำให้วัตถุดิบและเศษแก้วที่จะนำมาใช้ใหม่ให้มีความร้อนก่อน

การทำให้วัตถุดิบและเศษแก้วนั้นมาทำให้ร้อนก่อนที่จะนำเข้าเตาหลอมสามารถลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงและออกซิเจนลงได้ 25 เปอร์เซ็นต์ ในเตาหลอมแบบใช้อากาศและออกซิเจน และสามารถเพิ่มผลผลิตได้ 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถลดราคาต้นทุนการผลิตและเพิ่มระยะเวลาการใช้งานของเตาหลอมได้อีกด้วย

2. การใช้เตาหลอมแบบใช้อากาศและออกซิเจน (Oxy-fuel furnace)

การใช้ออกซิเจนลงไปในกระบวนการหลอมแก้ว สามารถลดปริมาณพลังงานเชื้อเพลิงได้และเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนได้ จากการวิจัยพบว่าการเพิ่มออกซิเจนเข้าไปในกระบวนการผลิต 21-23 เปอร์เซ็นต์ สามารถเพิ่มผลผลิตได้ 12 เปอร์เซ็นต์ แต่กระบวนการนี้ต้องระวังอาจเกิดการให้ออกซิเจนเกินความจำเป็นจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายได้และจะเพิ่มก๊าซไนโตรออกไซด์ (NOx) ประมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์ของแก้วที่ผลิต

3. การนำเศษแก้วหรือแก้วกลับมาใช้ใหม่

การนำแก้วกลับมาใช้ใหม่นั้นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของวัตถุดิบในการผลิตแก้ว โดยนำมาจากกระจกหรือแก้วจากบ้านเรือน สามารถลดพลังงานในการผลิตได้แก้วได้มากกว่าจะใช้วัตถุดิบใหม่ทั้งหมด ซึ่งส่งผลต่อการลดต้นทุนการผลิตได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สรุปได้ว่าในโรงงานผลิตแก้วมีการใช้พลังงานสูงมาก ซึ่งการลดการใช้พลังงานของเตาหลอมดังที่กล่าวมานั้น จะช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้และยังเป็นการยืดอายุการใช้งานของเตาหลอมได้อีกด้วย (D'ANTONIO et al., 2003)

โดยในงานวิจัยนี้จะนำแนวทางการใช้เตาหลอมแบบใช้อากาศและออกซิเจนและการนำเศษแก้วกลับมาใช้ใหม่เพื่อลดการใช้ปริมาณพลังงานเชื้อเพลิงในกระบวนการหลอม ส่วนการทำให้วัตถุดิบและเศษแก้วที่จะนำมาใช้ใหม่ให้มีความร้อนก่อนนั้นยังไม่สามารถนำมาปรับใช้ได้ เนื่องจากทางโรงงานยังไม่สะดวกในการจัดหาพื้นที่และติดตั้งเครื่องจักรที่ใช้ทำความร้อนให้กับวัตถุดิบและเศษแก้วที่จะนำมาใช้ใหม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3
ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า

ในขั้นตอนการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้าจะเริ่มต้นจากการจัดตั้งทีมงานที่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับกระบวนการผลิตบล็อกแก้ว ผู้วิจัยและทีมงานมีแนวความคิดที่จะลดต้นทุนการผลิตด้วยวิธีการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม ดังนั้นผู้วิจัยและทีมงานจึงเริ่มทำการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหาและคัดกรองปัจจัยนำเข้า โดยอาศัยการระดมความคิด (Brainstorming) และแผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ซึ่งมีรายละเอียดการดำเนินงานต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนในการจัดตั้งทีมงาน

การดำเนินงานวิจัยจะต้องอาศัยทีมงานที่มาความรู้ ความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับกระบวนการผลิตแก้วเข้ามาช่วยในการระดมความคิด เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา แนวทางในการแก้ปัญหา และการดำเนินการทดลองตามเป้าหมายที่วางไว้ให้สำเร็จลุล่วง โดยมีสมาชิกในทีมดังต่อไปนี้

1. ผู้ดำเนินงานวิจัย
2. ที่ปรึกษาโรงงาน (ผู้เชี่ยวชาญ)
3. หัวหน้าวิศวกร
4. วิศวกร

โดยผู้ดำเนินงานวิจัยจะมีหน้าที่ในการออกแบบการทดลองให้มีความเหมาะสมกับจำนวนปัจจัยและสามารถใช้ในการอธิบายผลกระทบระหว่างปัจจัยและผลตอบสนองได้อย่างครบถ้วน พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองที่ได้ ในส่วนของที่ปรึกษาโรงงาน หัวหน้าวิศวกร และวิศวกร จะมีหน้าที่ในการระดมความคิดและให้คะแนนเพื่อคัดกรองปัจจัยนำเข้า พร้อมทั้งช่วยสนับสนุนในเรื่องของการทดสอบตามที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบไว้ข้างต้น อีกทั้งยังช่วยสนับสนุนในเรื่องของข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ภายในงานวิจัยอีกด้วย นอกจากทีมงานที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วยังต้องอาศัยความร่วมมือจากทีมงานในแผนกอื่น ๆ เข้ามาช่วยในการนับจำนวนฟองอากาศ การแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และดำเนินการทดสอบตามแผนการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น ทั้งนี้ก็เพื่อให้การดำเนินการทดลองของงานวิจัยนั้นเกิดประสิทธิภาพที่สูงที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Root cause Analysis)

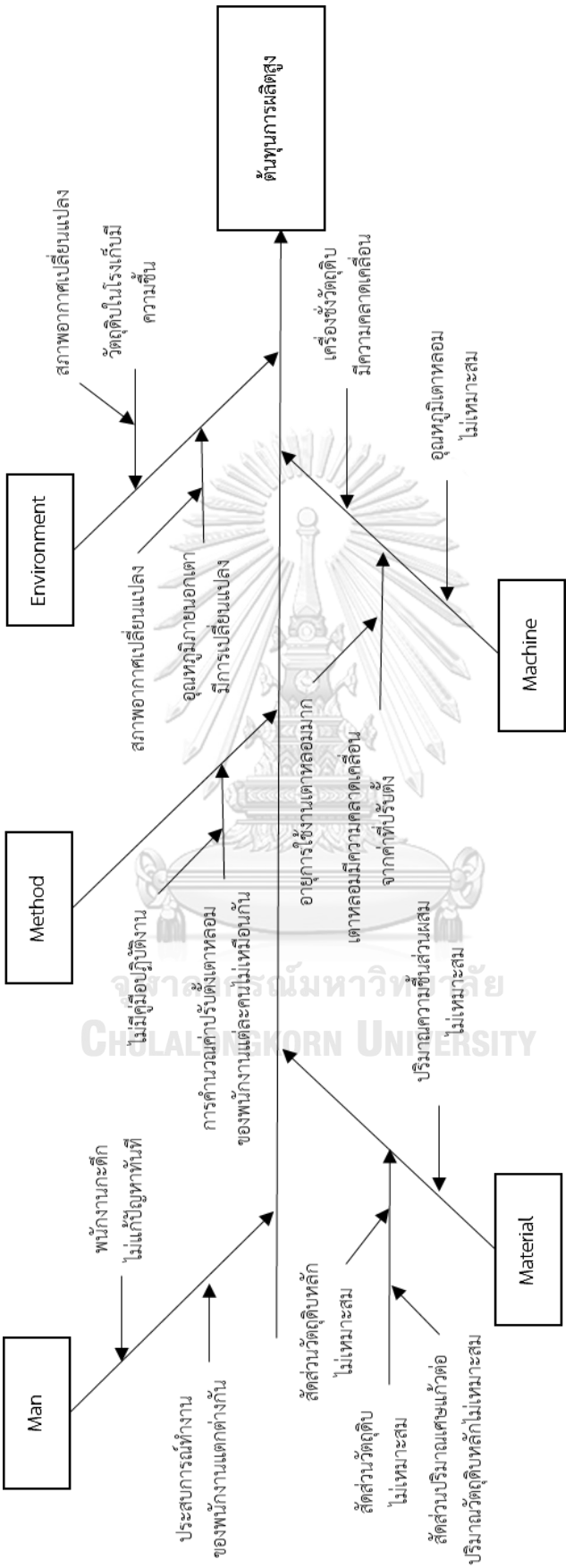
3.2.1 การระดมความคิด (Brainstorming) เพื่อหาปัจจัยนำเข้า

ขั้นตอนการดำเนินงานในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อหาสาเหตุที่เกิดขึ้นของปัญหาโดยเริ่มต้นจากการศึกษากระบวนการผลิตบล็อกแก้ว โดยมีกระบวนการที่สำคัญอยู่ 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอม และสอบถามจากทีมงานที่จัดตั้งขึ้นซึ่งประกอบไปด้วย 3 คน คือ ที่ปรึกษาโรงงาน (ผู้เชี่ยวชาญ) หัวหน้าวิศวกร และวิศวกร จากนั้นจึงทำการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุและปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิต โดยอาศัยแผนผังแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลซึ่งจะแบ่งแยกหมวดหมู่เอาไว้อย่างชัดเจนและทำการระดมความคิดตามหลักของ 4M1E ซึ่งประกอบไปด้วย คน (Man), เครื่องจักร (Machine), วัตถุดิบ (Material), วิธีการดำเนินงาน (Method) และสภาพแวดล้อม (Environment) เพื่อช่วยให้การระดมสมองมีความครอบคลุมในทุกประเภทของสาเหตุและช่วยในการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ได้รวบรวมมาเพื่อตัดปัจจัยที่คาดว่ามีผลน้อยต่อต้นทุนการผลิตออกจากการทดลอง

3.2.2 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

จากการระดมความคิดของทีมงานด้วยหลักการ 4M1E ทำให้ได้ปัจจัยและผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิต ซึ่งมีทั้งหมด 10 ปัจจัย ดังรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.1 แผนผังสาเหตุและผลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตสูง

ตารางที่ 3.1 ผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตสูง

ลำดับที่	หมวดหมู่	ปัจจัยนำเข้า	ผลกระทบของปัจจัย
1	Man	ประสบการณ์ทำงานของพนักงาน	ประสบการณ์การทำงานที่แตกต่างกัน ส่งผลให้พนักงานแต่ละคนปรับตั้งค่าเตาหลอมต่างกัน โดยพนักงานที่มีประสบการณ์ทำงานมากกว่าจะใช้ประสบการณ์ร่วมกับวิธีการคำนวณค่าปรับตั้งเตาหลอม แต่พนักงานที่มีประสบการณ์ทำงานน้อยกว่าจะใช้เพียงวิธีการคำนวณค่าปรับตั้ง ซึ่งพนักงานที่ไม่มีประสบการณ์อาจจะคำนวณปริมาณแก๊สที่เข้าไปในเตาหลอมมากเกินจำเป็น ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตสูง
2		พนักงานกะดึกไม่แก้ปัญหาทันที	เมื่อเตาหลอมหรือเครื่องชั่งวัตถุดิบมีความผิดพลาดจากค่าที่ปรับตั้งแล้วพนักงานกะดึกไม่แก้ปัญหาทันที เนื่องจากพนักงานกะดึกอยู่ในระดับปฏิบัติการ จึงมีความรู้ไม่เพียงพอ ทำให้ต้องรอพนักงานระดับเทคนิคมาแก้ปัญหาในเวลาทำงานปกติ ซึ่งหากเตาหลอมมีความผิดพลาดแล้วดึงปริมาณแก๊สมากเกินจำเป็น หรือเครื่องชั่งวัตถุดิบชั่งวัตถุดิบได้ปริมาณมากกว่าสัดส่วนวัตถุดิบมาตรฐาน จะส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตสูง
3	Machine	อายุการใช้งานเตาหลอม	เตาหลอมที่มีอายุการใช้งานมาก จะเกิดการสึกหรอของอิฐทนไฟภายในเตาหลอม ทำให้ความร้อนบางส่วนภายในเตาหลอมออกมาสู่ภายนอก เตาหลอมจึงสูญเสียความร้อน ทำให้ต้องดึงปริมาณแก๊สเข้าสู่เตาหลอมมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตสูง
4		เครื่องชั่งวัตถุดิบ	เครื่องชั่งวัตถุดิบจะใช้สปริงในการชั่ง เมื่อมีการชั่งวัตถุดิบในปริมาณมาก ทำให้สปริงเกิดความล้า ส่งผลให้วัตถุดิบมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่กำหนด ซึ่งหากชั่งวัตถุดิบได้ปริมาณมากกว่าสัดส่วนที่กำหนด จะทำให้ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตสูงได้
5		อุณหภูมิเตาหลอม	ในการหลอมวัตถุดิบจะใช้เชื้อเพลิงจากแก๊สทำให้เกิดความร้อนในเตาหลอมที่ส่งผลให้อุณหภูมิเตาหลอมสูงเพียงพอที่จะหลอมวัตถุดิบให้เป็นน้ำแก้ว โดยเมื่อปรับตั้งอุณหภูมิเตาหลอมจะทำให้เตาหลอมดึงปริมาณแก๊สออกมาเพื่อทำให้เตาหลอมมีอุณหภูมิสูง ซึ่งปริมาณแก๊สที่ใช้จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	หมวดหมู่	ปัจจัยนำเข้า	ผลกระทบของปัจจัย
6	Material	สัดส่วนวัตถุดิบหลัก	วัตถุดิบหลักเป็นองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการผลิตบล็อคแก้ว ซึ่งวัตถุดิบหลักบางชนิด เช่น ซีลีเนียม และโคบอลต์ เป็นต้น จะมีราคาที่สูง ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตสูง
7		สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก	จากงานวิจัย Koroviakovskii กล่าวว่าเศษแก้ว จะใช้ปริมาณความร้อนในการหลอมที่น้อยกว่าวัตถุดิบปกติ การใส่สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักเข้าไปในเตาหลอมเพิ่มขึ้นจึงช่วยให้ปริมาณความร้อนภายในเตาคงเหลือมากขึ้น และความร้อนภายในเตาคงเหลือที่มากขึ้นนี้จะทำให้มีการใช้ปริมาณแก๊สที่ลดลง ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง แต่หากใส่สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลต่อต้นทุนเศษแก้วที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตที่สูง (Koroviakovskii, 2016)
8		ปริมาณความชื้นส่วนผสม	Tooley กล่าวว่า ส่วนผสมที่มีความชื้นมากจะใช้ปริมาณความร้อนในการหลอมที่มาก เนื่องจากต้องใช้ความร้อนในการไล่ความชื้นออกจากส่วนผสมก่อนการหลอมส่วนผสมหรือวัตถุดิบ จึงทำให้ปริมาณความร้อนภายในเตาคงเหลือลดลง และความร้อนภายในเตาคงเหลือที่ลดลงนี้จะส่งผลให้เตาหลอมดึงปริมาณแก๊สออกมามากขึ้นเพื่อทำให้เตาหลอมมีความร้อนในการหลอมวัตถุดิบ ปริมาณแก๊สที่มากขึ้นจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น (TOOLEY, 1984)
9	Method	คู่มือปฏิบัติงาน	เมื่อไม่มีคู่มือปฏิบัติงาน ทำให้พนักงานแต่ละคนใช้วิธีการคำนวณค่าปรับตั้งเตาหลอมไม่เหมือนกัน ซึ่งพนักงานบางคนอาจจะคำนวณปริมาณแก๊สที่เข้าไปในเตาหลอมมากเกินจำเป็น ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตสูง
10	Evironment	สภาพอากาศ	สภาพอากาศภายนอกเตาที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล ส่งผลให้อุณหภูมิภายนอกเตาไม่คงที่ ซึ่งหากอุณหภูมิภายนอกเตาหลอมต่ำจะทำให้เตาหลอมต้องใช้ปริมาณแก๊สมากขึ้น เพื่อให้เตาหลอมมีความร้อนเพียงพอในการหลอมวัตถุดิบ ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนการผลิตสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.1 ได้อธิบายปัจจัยที่เป็นไปได้และผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมสูง จากนั้นได้ทำการระดมความคิดของทีมงาน ซึ่งมีเกณฑ์ให้คะแนนดังตารางที่ 3.2 ซึ่งเป็นเกณฑ์คะแนนที่เหมาะกับการแยกปัจจัยที่มีผลกระทบมากและน้อยออกจากกันอย่างชัดเจน และลงคะแนนในแต่ละคนดังตารางที่ 3.3 โดยให้สมาชิกแต่ละคนได้เสนอความคิด แนวทางในการแก้ไขปัญหา และร่วมกันตัดสินใจอย่างเป็นระบบ หลังจากนั้นจึงพล็อตกราฟแสดงคะแนนความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตดังรูปที่ 3.2 เพื่อเลือกปัญหาที่คาดว่ามีผลกระทบมากนำมาศึกษาต่อซึ่งสามารถสรุปได้ในตารางที่ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์การให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล

ระดับความสัมพันธ์	**ความหมายของระดับความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล**	**คะแนน**
มาก	ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์มากกับตัวแปรตอบสนอง	9
ปานกลาง	ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ปานกลางกับตัวแปรตอบสนอง	3
น้อย	ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์น้อยกับตัวแปรตอบสนอง	1
ไม่มี	ปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนอง	0

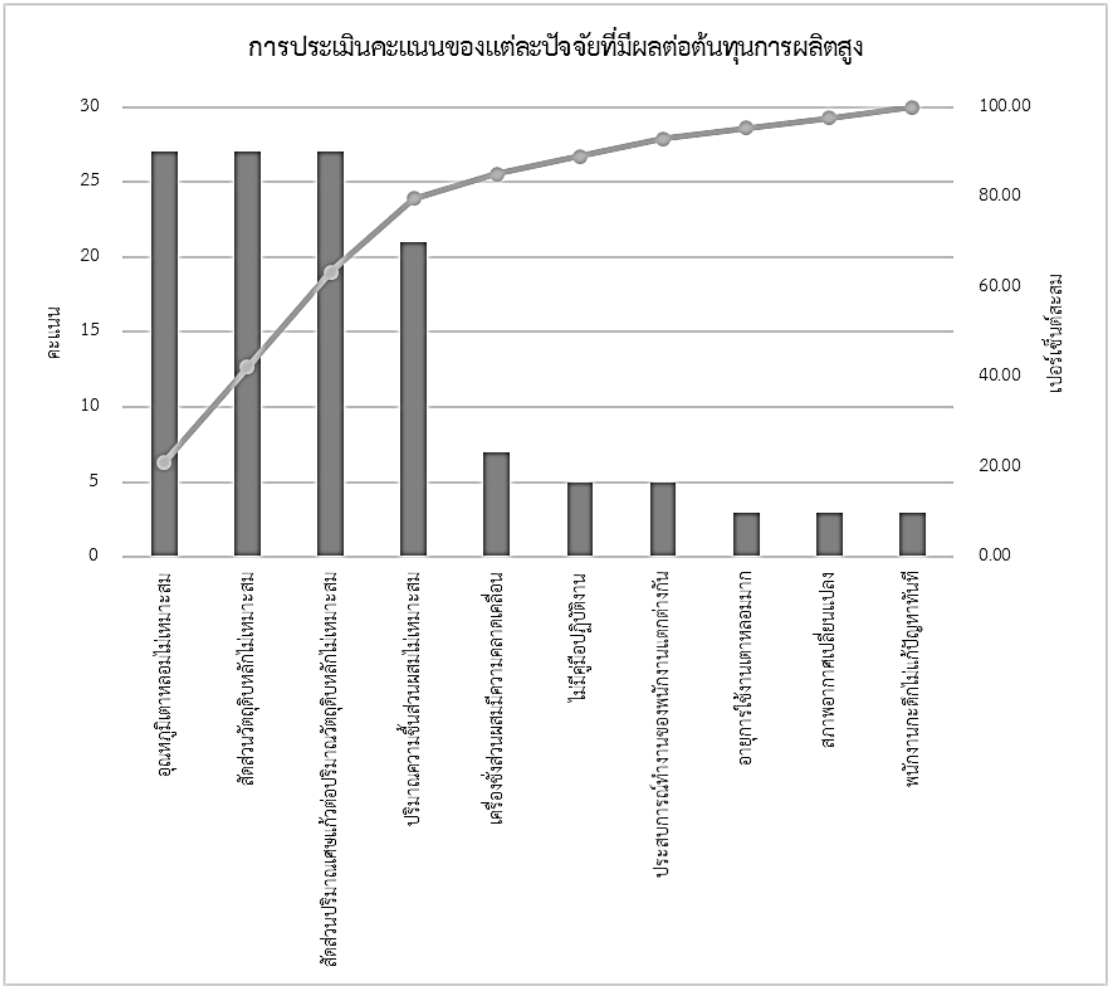
ตารางที่ 3.3 การประเมินคะแนนความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตสูง

ลำดับที่	**ปัจจัยนำเข้า**	**คนที่ 1**	**คนที่ 2**	**คนที่ 3**	**รวม**
		คะแนน	**คะแนน**	**คะแนน**	
1	อายุการใช้งานเตาหลอมมาก	1	1	1	3
2	เครื่องชั่งวัตถุดิบมีความคลาดเคลื่อน	3	1	3	5
3	อุณหภูมิเตาหลอมไม่เหมาะสม	9	9	9	27
4	สภาพอากาศเปลี่ยนแปลง	1	1	1	3
5	สัดส่วนวัตถุดิบหลักไม่เหมาะสม	9	9	9	27
6	สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักไม่เหมาะสม	9	9	9	27
7	ปริมาณความชื้นส่วนผสมไม่เหมาะสม	9	9	3	21
8	ประสบการณ์ทำงานของพนักงานแตกต่างกัน	3	3	1	5
9	พนักงานกะดึกไม่แก้ปัญหาทันที	0	3	0	3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับ	ปัจจัยนำเข้า	คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	รวม
10	ไม่มีคู่มือปฏิบัติงาน	1	3	1	7

จะเห็นได้ว่าคะแนนที่ทั้ง 3 ท่านให้มีความสอดคล้องกัน ในลำดับถัดมาจะอาศัยกราฟแสดงคะแนนความสัมพันธ์ดังรูปที่ 1.5 ในการจัดลำดับความสำคัญและคัดกรองปัจจัยที่คาดว่ามีผลกระทบสูงมาทำการศึกษาต่อ



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงคะแนนความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตสูง

จากกราฟแสดงคะแนนความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตสูง พบว่าปัจจัยที่มีคะแนนสูงอย่างชัดเจนมีทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิเตาหลอม สัดส่วนวัตถุดิบหลัก

สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก และปริมาณความชื้นส่วนผสม โดยแต่ละปัจจัยจะมีผลกระทบดังนี้

1.อุณหภูมิเตาหลอม

อุณหภูมิเตาหลอมจะมีผลต่อต้นทุนแก๊สและจำนวนฟองอากาศ เนื่องจากในการหลอมวัตถุดิบจะใช้พลังงานจากแก๊สทำให้เกิดความร้อนในเตาหลอมที่ส่งผลให้อุณหภูมิเตาหลอมสูงเพียงพอที่จะหลอมวัตถุดิบให้เป็นน้ำแก้ว โดยเมื่อปรับตั้งอุณหภูมิเตาหลอมสูงขึ้นจะทำให้เตาหลอมดึงปริมาณแก๊สออกมามากขึ้นเพื่อทำให้เตาหลอมมีอุณหภูมิสูง ปริมาณแก๊สที่มากขึ้นจะส่งผลให้ต้นทุนแก๊สมากขึ้น หากอุณหภูมิเตาหลอมต่ำลงจะส่งผลให้ต้นทุนแก๊สต่ำลง แต่จะทำให้เตาหลอมมีความร้อนไปใช้ในการไล่ฟองอากาศออกจากน้ำแก้วลดลง ส่งผลให้บล็อกแก้วมีจำนวนฟองอากาศมากขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเตาหลอมนี้จะไม่มีผลต่อคุณภาพของบล็อคแก้ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำปัจจัยอุณหภูมิเตาหลอมไปศึกษาต่อ

2.สัดส่วนวัตถุดิบหลัก

สัดส่วนวัตถุดิบหลัก ประกอบด้วย ทรายแก้ว โซดาแอช โดโลไมต์ โซเดียมซัลเฟต ซีลีเนียม และโคบอลต์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนวัตถุดิบหลักจะมีผลกระทบที่สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนวัตถุดิบหลักจะมีผลให้ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากวัตถุดิบหลักเป็นองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการผลิตบล็อคแก้ว ซึ่งวัตถุดิบหลักบางชนิด เช่น ซีลีเนียม และโคบอลต์ จะมีราคาที่สูง หากมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนวัตถุดิบหลัก เช่น ซีลีเนียม และโคบอลต์ จะส่งผลให้ต้นทุนวัตถุดิบหลักสูงตามไปด้วย และกรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนวัตถุดิบหลักจะมีผลคุณภาพของบล็อคแก้ว เช่น ความแข็งแรง การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และสีของบล็อคแก้ว เป็นต้น เนื่องจากวัตถุดิบแต่ละชนิดจะมีผลที่ทำให้เกิดคุณสมบัติบล็อคแก้ว เช่น ซีลีเนียม และโคบอลต์จะมีผลต่อสีของแก้ว หากมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนวัตถุดิบหลัก เช่น ซีลีเนียม และโคบอลต์จะส่งผลให้สีแก้วมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่โรงงานยอมรับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่นำปัจจัยสัดส่วนวัตถุดิบหลักไปศึกษาต่อ

3.สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก

สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อวัตถุดิบหลักจะมีผลต่อต้นทุนแก๊สและต้นทุนเศษแก้ว จากงานวิจัย Koroviakovskii กล่าวว่า เศษแก้วจะใช้ปริมาณความร้อนในการหลอมที่น้อยกว่าวัตถุดิบปกติ การใส่สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักเข้าไปในเตาหลอมเพิ่มขึ้นจึงช่วยให้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

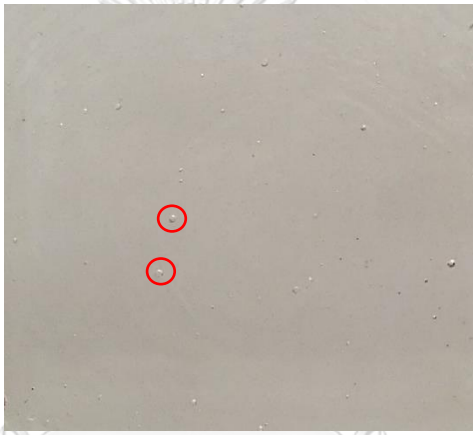
ปริมาณความร้อนภายในเตาคงเหลือมากขึ้น และความร้อนภายในเตาคงเหลือที่มากขึ้นนี้จะทำให้มีการใช้แก๊สที่ลดลง ส่งผลต่อต้นทุนเชื้อเพลิงที่ลดลง แต่หากใส่สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักในปริมาณมากจะส่งผลต่อต้นทุนเศษแก้วที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำปัจจัยสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อวัตถุดิบหลักไปศึกษาต่อ โดยที่การเพิ่มสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักคาดว่าจะไม่มีผลต่อคุณภาพของบล็อคแก้ว เช่น ฟองอากาศ ความแข็งแรง การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และสีของบล็อคแก้ว เป็นต้น เนื่องจากเศษแก้วที่นำมาใช้จะต้องเป็นเศษแก้วสะอาดที่ผ่านมาตรฐานสีและขนาดที่โรงงานกำหนดเท่านั้น เพื่อให้ไม่มีผลต่อคุณภาพของบล็อกแก้ว

4.ปริมาณความชื้นส่วนผสม

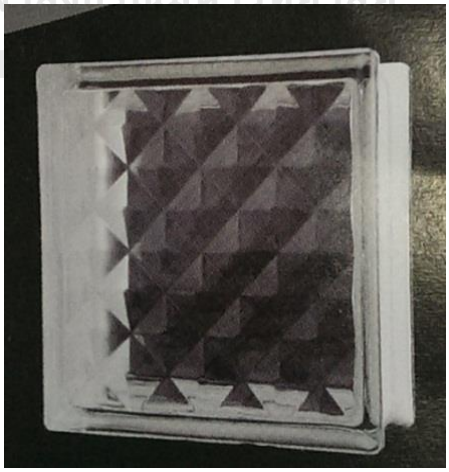
ปริมาณความชื้นส่วนผสมจะมีผลต่อต้นทุนแก๊สและจำนวนฟองอากาศ Tooley กล่าวว่าหากส่วนผสมมีปริมาณความชื้นมาก จะส่งผลให้เมื่อส่วนผสมเข้าไปภายในเตาแล้วจะมีการกระจายตัวเป็นระนาบมุมสูง ซึ่งส่งผลให้ความร้อนแพร่ผ่านเข้าไปในวัตถุดิบได้มาก จึงไม่ต้องใช้ความร้อนที่มากในการหลอม ส่งผลให้ต้นทุนแก๊สต่ำลง แต่หากส่วนผสมที่มีความชื้นมากเกินไปจะใช้ปริมาณความร้อนในการหลอมที่มาก เนื่องจากต้องใช้ความร้อนในการไล่ความชื้นออกจากส่วนผสมก่อนการหลอมส่วนผสมหรือวัตถุดิบ จึงทำให้ปริมาณความร้อนภายในเตาคงเหลือลดลง และความร้อนภายในเตาคงเหลือที่ลดลงนี้จะส่งผลให้เตาหลอมดึงปริมาณแก๊สออกมามากขึ้นเพื่อทำให้เตาหลอมมีความร้อนในการหลอมวัตถุดิบ ปริมาณแก๊สที่มากขึ้นจะส่งผลให้ต้นทุนแก๊สมากขึ้น และหากปริมาณความชื้นส่วนผสมมากในกระบวนการหลอมจะทำให้ความชื้นในวัตถุดิบกลายไปเป็นไอน้ำที่ลอยอยู่บนวัตถุดิบ ไอน้ำนี้จะไปกีดขวางการถ่ายเทความร้อนจากเตาหลอมไปสู่วัตถุดิบ ทำให้เตาหลอมมีความร้อนไปใช้ในการไล่ฟองอากาศออกจากน้ำแก้วลดลง ส่งผลให้บล็อกแก้วมีจำนวนฟองอากาศมากขึ้น หากปริมาณความชื้นส่วนผสมต่ำลงจะส่งผลให้ต้นทุนแก๊สและจำนวนฟองอากาศลดลง แต่จะทำให้วัตถุดิบหลักสูญหาย (loss) ในขณะลำเลียงเข้าไปในเตาหลอม ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนวัตถุดิบหลักที่สูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำปัจจัยปริมาณความชื้นวัตถุดิบไปศึกษาต่อ

จากปัจจัยที่มีคะแนนรวมมากอย่างชัดเจนที่นำมาศึกษามีทั้งหมด 3 ปัจจัย ซึ่งปัจจัยแต่ละปัจจัยนั้นนอกจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตแล้วยังส่งผลต่อจำนวนฟองอากาศดังรูปที่ 3.3 ซึ่งทางโรงงานกรณีศึกษาได้กำหนดมาตรฐานให้บล็อคแก้ว 1 ชิ้น มีจำนวนฟองอากาศที่ยอมรับได้ไม่เกิน 800 ฟอง โดยขั้นตอนการนับฟองอากาศจะนำชิ้นงานบล็อกแก้วที่ขึ้นรูปแล้วไปวางบนแท่นที่มีไฟเหมาะสำหรับการมองเห็นเม็ดฟองอากาศโดยเฉพาะส่องอยู่ด้านล่างเพื่อตัดปัจจัยเรื่องลายของบล็อกแก้วในแต่ละ

รุ่นออก จากนั้นจะนับเม็ดฟองอากาศตั้งแต่ขนาดที่ตาเริ่มมองเห็น โดยขนาดและการกระจายตัวของเม็ดฟองอากาศไม่มีผลต่อคุณภาพในการนับจำนวนฟองอากาศ เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาจะมีผู้ชำนาญในการนับจำนวนฟองอากาศที่ผ่านการอบรมและทดสอบการตรวจนับจำนวนฟองอากาศมาแล้ว ซึ่งทำให้การตรวจนับจำนวนฟองอากาศนี้มีความน่าเชื่อถือ โดยหากบล็อกแก้วชิ้นใดมีจำนวนฟองอากาศมากกว่าที่ยอมรับได้จะจัดเป็นชิ้นงานของเสีย ซึ่งมีต้นทุนของเสียต่อบล็อกแก้ว 1 ชิ้น เท่ากับ 40 บาท ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาจำนวนฟองอากาศในบล็อกแก้วลายที่ทำการศึกษา ดังรูปที่ 3.4 เท่านั้น เนื่องจากเป็นลายที่มีการผลิตมากที่สุด เพื่อตัดปัจจัยจำนวนฟองอากาศที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปบล็อกแก้วแต่ละลายไม่เท่ากัน



รูปที่ 3.3 ฟองอากาศในชิ้นงานบล็อกแก้ว



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานบล็อกแก้วลายที่ทำการศึกษา

งานวิจัยนี้จึงควรปรับปรุงเพื่อหาค่าปัจจัยในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมที่เหมาะสมที่ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดและมีจำนวนฟองอากาศอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยผลกระทบของแต่ละปัจจัยต่อตัวชี้วัดต่าง ๆ จะแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปัจจัยที่นำมาไปศึกษาต่อและผลกระทบของปัจจัยต่อตัวชี้วัดต่าง ๆ

ปัจจัยนำเข้า	**ผลกระทบ**	
	ต้นทุนการผลิต	**จำนวนฟองอากาศ**
อุณหภูมิเตาหลอม	✓	✓
สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก	✓	
ปริมาณความชื้นส่วนผสม	✓	✓

จากกราฟแสดงคะแนนความสัมพันธ์และการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่อตัวชี้วัดต่าง ๆ สามารถสรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและปัจจัยที่ไม่นำไปศึกษาต่อและแนวทางการปรับปรุงแก้ไขดังตารางที่ 3.5 จากนั้นจะสรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและเหตุผลจะแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 ปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและไม่นำไปศึกษาต่อและแนวทางการปรับปรุงแก้ไข

ลำดับที่	**ปัจจัยนำเข้า**	**ศึกษาต่อ**	**ไม่ศึกษา**	**แนวทางการปรับปรุงแก้ไข**
1	อุณหภูมิเตาหลอม	✓		จากกราฟ 1.4 ปัจจัยที่ 1-3 มีคะแนนสูงอย่างชัดเจน ซึ่งอาจหมายความว่าปัจจัยส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองมาก โดยจะกล่าวเหตุผลอย่างละเอียดในตาราง 1.5 และนำไปพิจารณาเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่จะนำมาทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม
2	สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก	✓		
3	ปริมาณความชื้นส่วนผสม	✓		
4	อายุการใช้งานเตาหลอม		✓	โดยปกติโรงงานจะมีฝ่ายซ่อมแซมและบำรุงรักษาที่จะตรวจดูเตาหลอมทุกวัน หากเกิดปัญหาขึ้นเกี่ยวกับอิฐทนไฟ จะทำการเปลี่ยนอิฐทนไฟใหม่ทันที โดยไม่หยุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ปัจจัยนำเข้า	ศึกษาต่อ	ไม่ศึกษา	แนวทางการปรับปรุงแก้ไข
				กระบวนการผลิต
5	เครื่องชั่งวัตถุดิบ		✓	โดยปกติโรงงานจะมีการสอบเทียบ (Calibration) เครื่องชั่งวัตถุดิบในทุกเดือน เพื่อตรวจสอบว่าเครื่องชั่งมีความเที่ยงตรงหรือไม่ หากเครื่องชั่งมีความคลาดเคลื่อน จะทำการซ่อมแซมทันที
6	สภาพอากาศ		✓	ในการปฏิบัติงานจริงอุณหภูมิภายนอกเตามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จึงไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิภายนอกเตาหลอม
7	คู่มือปฏิบัติงาน		✓	ทางโรงงานจะมีการจัดทำคู่มือปฏิบัติงาน เพื่อเป็นมาตรฐานในการปรับตั้งค่าเตาหลอม รวมทั้งพิจารณาใช้ค่าปรับตั้งที่ได้จากงานวิจัยนี้ด้วย
8	สัดส่วนวัตถุดิบหลัก		✓	โดยปกติโรงงานจะมีสัดส่วนวัตถุดิบที่เหมาะสมกำหนดเป็นมาตรฐานในการผลิตอยู่แล้ว และในอนาคตทางโรงงานจะดำเนินการวิจัยเพื่อหาสัดส่วนวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุด
9	ประสบการณ์ทำงานของพนักงาน		✓	ทางโรงงานจะมีการจัดประชุมเพื่อให้พนักงานที่มีประสบการณ์มากให้ความรู้แก่พนักงานที่มีประสบการณ์น้อย และจัดทำมาตรฐานในการปรับตั้งค่าเตาหลอม รวมทั้งพิจารณาใช้ค่าปรับตั้งที่ได้จากงานวิจัยนี้ด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ปัจจัยนำเข้า	ศึกษาต่อ	ไม่ศึกษา	แนวทางการปรับปรุงแก้ไข
10	พนักงานกะดึกไม่แก้ปัญหาทันที		✓	ทางโรงงานจะมีการจัดอมรบให้ความรู้แก่พนักงานระดับปฏิบัติการในการแก้ปัญหาเตาหลอมและเครื่องชั่งวัตถุดิบเบื้องต้น

ตารางที่ 3.6 สรุปปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อและเหตุผล

ลำดับที่	ปัจจัยนำเข้า	เหตุผลในการศึกษาต่อ
1	อุณหภูมิเตาหลอม	อุณหภูมิเตาหลอมจะมีผลต่อต้นทุนแก๊สและจำนวนฟองอากาศ โดยในการหลอมวัตถุดิบจะใช้พลังงานจากแก๊สทำให้เกิดความร้อนในเตาหลอมที่ส่งผลให้อุณหภูมิเตาหลอมสูงเพียงพอที่จะหลอมวัตถุดิบให้เป็นน้ำแก้ว โดยเมื่อปรับตั้งอุณหภูมิเตาหลอมสูงขึ้นจะทำให้เตาหลอมดึงปริมาณแก๊สออกมามากขึ้นเพื่อทำให้เตาหลอมมีอุณหภูมิสูง ปริมาณแก๊สที่มากขึ้นจะส่งผลให้ต้นทุนแก๊สมากขึ้น หากอุณหภูมิเตาหลอมต่ำลงจะส่งผลให้ต้นทุนแก๊สต่ำลง แต่จะทำให้เตาหลอมมีความร้อนไปใช้ในการไล่ฟองอากาศออกจากน้ำแก้วลดลง ส่งผลให้บล็อกแก้วมีจำนวนฟองอากาศมากขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาค่าอุณหภูมิเตาหลอมที่เหมาะสมเพื่อให้มีต้นทุนพลังงานเชื้อเพลิงต่ำที่สุดและมีจำนวนฟองอากาศอยู่ในระดับที่ยอมรับได้
2	สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก	สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักจะมีผลต่อต้นทุนแก๊สและต้นทุนเศษแก้ว จากงานวิจัยของ Koroviakovskii กล่าวว่าเศษแก้วจะใช้ปริมาณความร้อนในการหลอมที่น้อยกว่าวัตถุดิบปกติ การใส่สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักเข้าไปในเตาหลอมเพิ่มขึ้นจึงช่วยให้ปริมาณความร้อนภายในเตาคงเหลือมากขึ้น และความร้อนภายในเตาคงเหลือที่มากขึ้นนี้จะทำให้มีการใช้แก๊สที่ลดลง ส่งผลต่อต้นทุนเชื้อเพลิงที่ลดลง แต่หากใส่สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักในปริมาณมากจะส่งผลต่อต้นทุนเศษแก้วที่เพิ่มขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาสัดส่วนปริมาณเศษ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับที่	ปัจจัยนำเข้า	เหตุผลในการศึกษาต่อ
		แก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักที่เหมาะสมเพื่อให้มีต้นทุนการผลิตรวมต่ำที่สุดในขณะที่คาดว่าสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักไม่มีผลต่อฟองอากาศ
3	ปริมาณความชื้นส่วนผสม	ปริมาณความชื้นส่วนผสมจะมีผลต่อต้นทุนวัตถุดิบหลัก ต้นทุนแก๊สและจำนวนฟองอากาศ Tooley กล่าวว่า หากวัตถุดิบมีความชื้นของส่วนผสมมาก จะส่งผลให้เมื่อวัตถุดิบเข้าไปภายในเตาแล้วจะมีการกระจายตัวเป็นระนาบมุมสูง ซึ่งส่งผลให้ความร้อนแพร่ผ่านเข้าไปในวัตถุดิบได้มาก จึงไม่ต้องใช้ความร้อนที่มากในการหลอม ส่งผลให้ต้นทุนแก๊สต่ำลง แต่หากส่วนผสมที่มีความชื้นมากเกินไปจะใช้ปริมาณความร้อนในการหลอมที่มาก เนื่องจากต้องใช้ความร้อนในการไล่ความชื้นออกจากส่วนผสมก่อนการหลอมส่วนผสมหรือวัตถุดิบ จึงทำให้ปริมาณความร้อนภายในเตาคงเหลือลดลง และความร้อนภายในเตาคงเหลือที่ลดลงนี้จะส่งผลให้เตาหลอมดึงปริมาณแก๊สออกมามากขึ้นเพื่อทำให้เตาหลอมมีความร้อนในการหลอมวัตถุดิบ ปริมาณแก๊สที่มากขึ้นจะส่งผลให้ต้นทุนแก๊สมากขึ้น และหากปริมาณความชื้นส่วนผสมมากในกระบวนการหลอมจะทำให้ความชื้นในวัตถุดิบกลายไปเป็นไอน้ำที่ลอยอยู่บนวัตถุดิบ ไอน้ำนี้จะไปกีดขวางการถ่ายเทความร้อนจากเตาหลอมไปสู่วัตถุดิบ ทำให้เตาหลอมมีความร้อนไปใช้ในการไล่ฟองอากาศออกจากน้ำแก้วลดลง ส่งผลให้บล็อกแก้วมีจำนวนฟองอากาศมากขึ้น หากปริมาณความชื้นส่วนผสมต่ำลงจะส่งผลให้ต้นทุนแก๊สและจำนวนฟองอากาศลดลง แต่จะทำให้วัตถุดิบสูญหาย (loss) ในขณะลำเลียงเข้าไปในเตาหลอม ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนวัตถุดิบหลักที่สูงขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาปริมาณความชื้นส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อให้มีต้นทุนการผลิตรวมต่ำที่สุดและมีจำนวนฟองอากาศอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3 สรุปผลขั้นตอนการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้า

ในขั้นตอนการวิเคราะห์หาปัจจัยนำเข้าจะเริ่มต้นจากการจัดตั้งทีมงานที่เกี่ยวข้อง จากนั้นจะให้ทีมงานที่จัดตั้งขึ้นทำการระดมความคิดโดยอาศัยหลักการ 4M1E เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต ซึ่งจะได้ปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตประกอบไปด้วย 10 ปัจจัย หลังจากนั้นจึงทำการคัดกรองปัจจัยนำเข้าโดยให้ทีมงานทำการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลตามเกณฑ์การให้คะแนนที่ได้กำหนดไว้ พบว่าปัจจัยที่มีคะแนนรวมมากอย่างชัดเจนมี 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิเตาหลอม สัดส่วนวัตถุดิบหลัก สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก และปริมาณความชื้นส่วนผสม แต่ปัจจัยสัดส่วนวัตถุดิบหลักจะไม่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ เนื่องจากโดยปกติโรงงานจะมีสัดส่วนวัตถุดิบที่เหมาะสมกำหนดเป็นมาตรฐานในการผลิตอยู่แล้ว และในอนาคตทางโรงงานจะดำเนินการวิจัยเพื่อหาสัดส่วนวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นจากการศึกษาปัญหาต้นทุนในการผลิตสูง จะมีตัวชี้วัดในงานวิจัยนี้ 2 ตัว คือ ต้นทุนการผลิต และจำนวนฟองอากาศ โดยผลกระทบต่อปัจจัยต่อตัวชี้วัดต้นทุนการผลิตที่คำนวณจากต้นทุนวัตถุดิบและต้นทุนแก๊ส และตัวชี้วัดจำนวนฟองอากาศนี้ มีปัจจัยที่จะนำไปศึกษาต่อทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิเตาหลอม สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก และปริมาณความชื้นส่วนผสม จากนั้นจะนำปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย มาทดสอบสมมติฐานว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศอย่างไร และจะนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญไปทำการปรับปรุงเพื่อหาค่าปัจจัยในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมที่เหมาะสมที่ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดและมีจำนวนฟองอากาศอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยอาศัยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE)

Chulalongkorn University

บทที่ 4
ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ

ในขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการนี้จะเริ่มจากการนำตัวแปรตอบสนองทั้ง 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิเตาหลอม สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก และปริมาณความชื้นส่วนผสม มาทดสอบสมมติฐานว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศอย่างไร โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศด้วยวิธีการ Stepwise Regression และหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยเหล่านั้น

4.1 การออกแบบการทดลอง

4.1.1 การกำหนดปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง

ในขั้นตอนการออกแบบการทดลองจะประกอบไปด้วยปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิเตาหลอม สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก และปริมาณความชื้นส่วนผสม ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยจะอยู่ในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอม โดยปัจจัยดังกล่าวจะถูกนำไปทำการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งตัวแปรตอบสนองที่นำเข้ามาพิจารณามีทั้งหมด 2 ตัว ได้แก่ ต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.2 การเลือกแบบการทดลอง

จากการเลือกปัจจัยในขั้นตอนก่อนหน้านี้ จะได้ปัจจัยที่ถูกนำไปศึกษาต่อด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) จำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิเตาหลอม สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก และปริมาณความชื้นส่วนผสม โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เนื่องจากการออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จะมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 15 การทดลอง ซึ่งน้อยกว่าการออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) ที่มีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 20 การทดลอง และการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบที่ไม่ได้รวมเอาระดับของปัจจัยที่จุดยอด (Extreme Point) ของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากค่าที่สูงที่สุดหรือต่ำที่สุดของแต่ละตัวแปรเอาไว้ ซึ่งจะหลีกเลี่ยงการเกิดต้นทุน

หรือจำนวนฟองอากาศที่สูงมากผิดปกติ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแบบ บ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งมีการกำหนดระดับที่ใช้ในการทดลองของปัจจัยแต่ละตัวดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแต่ละปัจจัยจะถูกทดสอบที่ระดับสูง (+1) ระดับกลาง (0) และระดับต่ำ (-1) โดยแต่ละปัจจัยจะมีหลักในการกำหนดระดับที่ใช้ในการทดสอบ ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิเตาหลอม โดยปกติแล้วโรงงานกรณีศึกษาจะมีการปรับตั้งอุณหภูมิเตาหลอมอยู่ที่ 1530-1550 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิเตาหลอมที่น้อยกว่า 1530 องศาเซลเซียส อาจจะทำให้วัตถุดิบบางส่วนหลอมได้ไม่หมด และอุณหภูมิเตาหลอมที่มากกว่า 1550 องศาเซลเซียส อาจจะทำให้อิฐทนไฟภายในเตาเสื่อมสภาพเร็วขึ้น ส่งผลให้เตาหลอมมีอายุการใช้งานที่น้อยลง งานวิจัยนี้จึงเลือกทดลองอุณหภูมิเตาหลอมในช่วง 1530-1550 องศาเซลเซียส

2. ปริมาณความชื้นส่วนผสม โดยปกติแล้วทางโรงงานกรณีศึกษาจะมีการกำหนดให้ปริมาณความชื้นส่วนผสมมีค่าไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากปริมาณความชื้นส่วนผสมที่มากกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้วัตถุดิบมีความร้อนไปใช้ในการหลอมที่น้อย เนื่องจากต้องใช้ความร้อนในการไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบก่อน ส่งผลชิ้นงานบล็อกแก้วมีจำนวนฟองอากาศที่สูงกว่าเกณฑ์การยอมรับของโรงงาน และปริมาณความชื้นส่วนผสมที่น้อยกว่า 2.5 เปอร์เซ็นต์ จะไม่สามารถปรับตั้งได้ เนื่องจากโดยปกติวัตถุดิบหลัก เช่น ทราย จะมีความชื้นเฉลี่ยอยู่ที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์ จากขั้นตอนการล้างทราย ทำให้สามารถปรับตั้งปริมาณความชื้นส่วนผสมได้น้อยที่สุดที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์ งานวิจัยนี้จึงเลือกทดลองปริมาณความชื้นส่วนผสมในช่วง 2.5-3 เปอร์เซ็นต์

3. สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก โดยปกติแล้วโรงงานกรณีศึกษาจะมีการปรับตั้งสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักเฉลี่ยอยู่ที่ 27.5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักที่น้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้มีการใช้ปริมาณแก๊สในการหลอมวัตถุดิบหลักที่มาก เนื่องจากวัตถุดิบหลักจะใช้อุณหภูมิในการหลอมสูงกว่าเศษแก้ว ส่งผลให้ต้นทุนแก๊สมีค่าสูง ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงกว่าปกติ และสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักที่มากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ จะไม่สามารถปรับตั้งได้ เนื่องจากเศษแก้วเป็นวัตถุดิบที่ได้มากจากของเสียจากการผลิตภายในโรงงานกรณีศึกษาและจากการรับซื้อจากโรงงานแก้วอื่น ซึ่งมีปริมาณที่จำกัดในแต่ละโรงงาน จึงสามารถนำเศษแก้วมาใช้ได้สูงสุดไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน เพื่อให้มีเศษแก้วใช้เพียงพอในทุกวัน งานวิจัยนี้จึงเลือกทดลองสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักในช่วง 25-30 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.1 ปัจจัยนำเข้าและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

สัญลักษณ์	ปัจจัย	ระดับปัจจัย			หน่วย
		-1	0	1	
A	อุณหภูมิเตาหลอม	1530	1540	1550	องศาเซลเซียส
B	ปริมาณความชื้นส่วนผสม	2.50	2.75	3.00	เปอร์เซ็นต์
C	สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก	25	27.5	30	เปอร์เซ็นต์

ภายหลังจากการกำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแล้วจึงเริ่มทำการสร้างตารางออกแบบการทดลอง (Design Metrix) โดยในการออกแบบการทดลองจะมีปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 3 ปัจจัย โดยในการทดลองจะกำหนดให้มีลำดับการทดลองอย่างสุ่ม (Randomization) เพื่อให้ผลการทดลองเป็นอิสระต่อกัน อีกทั้งยังช่วยลดผลกระทบของปัจจัยรบกวนที่อาจเกิดขึ้นในการทดลองได้อีกด้วย ซึ่งการออกแบบการทดลองข้างต้นจะได้การทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางการออกแบบการทดลอง (Design Metrix)

Std Order	Run Order	Factor		
		A	B	C
1	4	1530	2.5	27.5
2	11	1550	2.5	27.5
3	7	1530	3	27.5
4	3	1550	3	27.5
5	6	1530	2.75	25
6	8	1550	2.75	25
7	2	1530	2.75	30
8	9	1550	2.75	30
9	13	1540	2.5	25
10	14	1540	3	25
11	15	1540	2.5	30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Std Order	Run Order	Factor		
		A	B	C
12	10	1540	3	30
13	12	1540	2.75	27.5
14	1	1540	2.75	27.5
15	5	1540	2.75	27.5

4.2 ขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง

ผู้วิจัยได้เริ่มทำการทดลองตามรางการออกแบบที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น ซึ่งก่อนการดำเนินการทดลองได้มีการจัดประชุมเพื่ออธิบายขั้นตอนการดำเนินงานให้กับสมาชิกภายในทีม ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานได้จัดเตรียมวัตถุดิบและทำการปรับตั้งค่าเครื่องจักรได้อย่างถูกต้องตามสภาวะการทดลองที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. จัดเตรียมวัตถุดิบที่ต้องใช้ในการดำเนินการทดลองให้พร้อม

2. ดำเนินการทดลองตามสภาวะการทดลองที่ได้กำหนดไว้ดังตารางที่ 4.2 โดยทำการปรับตั้งค่าเครื่องจักรผ่านทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม และมีการบันทึกผลอัตโนมัติโดยระบบคอมพิวเตอร์

3. ทำการเก็บตัวอย่างบล็อกแก้วที่จะนำไปใช้ในการนับจำนวนฟองอากาศ โดยเก็บบล็อกแก้วลายที่ทำการศึกษา

4. นำบล็อกแก้วตัวอย่างที่ได้เก็บมาไปทำการนับจำนวนฟองอากาศ โดยจะทำภายในห้องทดลองของโรงงาน

4.3 ผลการทดลอง

ภายหลังจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลองข้างต้น ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.3 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการทดลอง

Std Order	Run Order	ปัจจัย			ต้นทุนการผลิต (บาท)	จำนวนฟองอากาศ (ฟอง)
		A	B	C		
1	4	1530	2.5	27.5	500,012	241
2	11	1550	2.5	27.5	510,810	215
3	7	1530	3	27.5	502,587	312
4	3	1550	3	27.5	513,383	244
5	6	1530	2.75	25	502,583	260
6	8	1550	2.75	25	510,812	220
7	2	1530	2.75	30	502,583	259
8	9	1550	2.75	30	510,800	228
9	13	1540	2.5	25	505,166	224
10	14	1540	3	25	510,806	263
11	15	1540	2.5	30	510,802	223
12	10	1540	3	30	510,827	261
13	12	1540	2.75	27.5	502,904	242
14	1	1540	2.75	27.5	502,580	249
15	5	1540	2.75	27.5	502,907	246

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

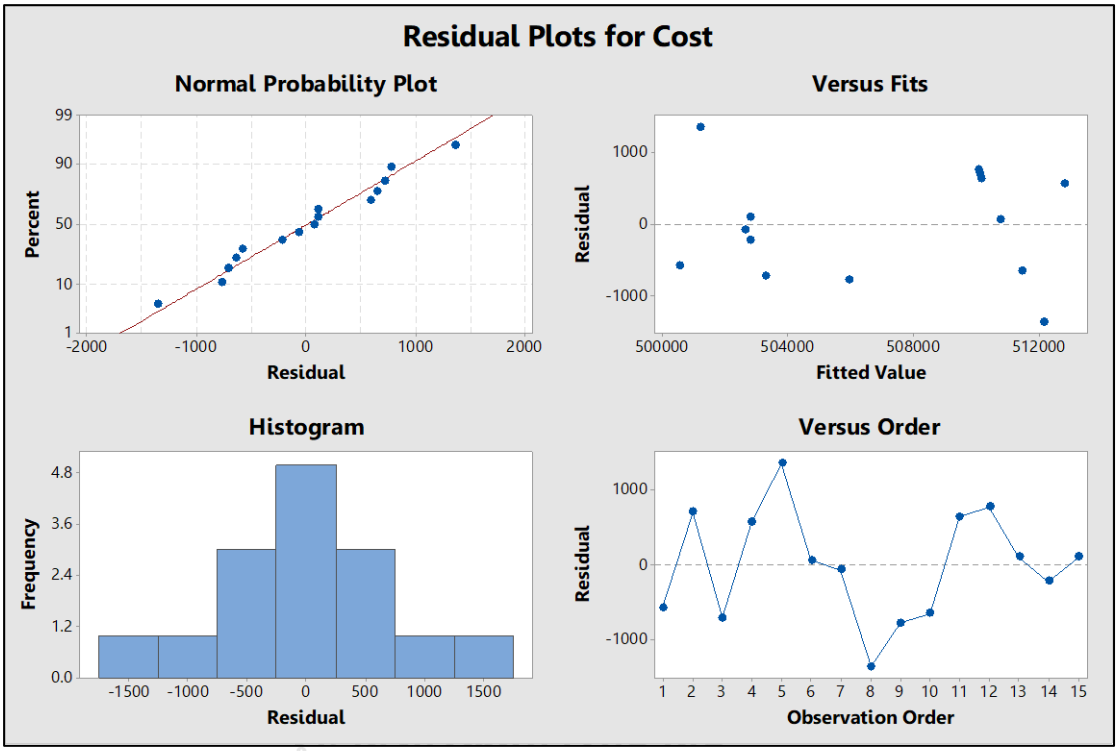
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากเก็บข้อมูลตามตารางการออกแบบการทดลองที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ข้างต้น ในขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะเริ่มจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ก่อน ว่าข้อมูลที่ได้มามีความเหมาะสมที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) ในการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะประกอบไปด้วย สมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่ สมมติฐานการแจกแจงปกติของค่าส่วนตกค้าง (Normality Assumption) สมมติฐานความคงที่ของค่าความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง (Variance Stability) และสมมติฐานของความเป็น

อิสระของค่าส่วนตกค้าง (Independence of Residual) จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ไปทำการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่มีต่อต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศโดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนและทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของต้นทุนการผลิต

4.4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)



Chulalongkorn University

รูปที่ 4.1 การกระจายตัวส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิต

จากรูปที่ 4.1 สามารถสรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของต้นทุนการผลิตได้ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Normality Assumption) จะสามารถดูได้จากกราฟ Normal Probability Plot ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่จัดเรียงตัวอยู่ตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติเท่ากับ 0.764 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ

2. การทดสอบสมมติฐานความคงที่ของความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง (Variance Stability) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Fitted Value ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจาย

ตัวของส่วนตกค้างรอบแนวแกนศูนย์ และข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม หรือรูปแบบที่คล้ายกรวยปากเปิด จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีค่าความแปรปรวนคงที่

3. กราฟอิสโตแกรมจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ

4. การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง (Independence of Residual) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Observation Order ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีการกระจายเป็นบวกและลบอย่างสุ่ม ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้ม หรือรูปร่างที่แน่นอน จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.4.1.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิต

ภายหลังจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลองข้างต้น จากนั้นจะอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต โดยจะทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากัน 0.05 ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Response Surface Regression: Cost versus A, B, C

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	282167775	31351975	21.09	0.002
Linear	3	199478574	66492858	44.72	0.000
A	1	180880200	180880200	121.66	0.000
B	1	14615121	14615121	9.83	0.026
C	1	3983253	3983253	2.68	0.163
Square	3	74807108	24935703	16.77	0.005
A*A	1	1318729	1318729	0.89	0.390
B*B	1	40291519	40291519	27.10	0.003
C*C	1	40206185	40206185	27.04	0.003
2-Way Interaction	3	7882093	2627364	1.77	0.269
A*B	1	1	1	0.00	0.999
A*C	1	36	36	0.00	0.996
B*C	1	7882056	7882056	5.30	0.070
Error	5	7433982	1486796		
Lack-of-Fit	3	7363344	2454448	69.49	0.014
Pure Error	2	70638	35319		
Total	14	289601758			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1219.34	97.43%	92.81%	59.26%

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	502797	704	714.21	0.000	
A	4755	431	11.03	0.000	1.00
B	1352	431	3.14	0.026	1.00
C	706	431	1.64	0.163	1.00
A*A	598	635	0.94	0.390	1.01
B*B	3303	635	5.21	0.003	1.01
C*C	3300	635	5.20	0.003	1.01
A*B	-1	610	-0.00	0.999	1.00
A*C	-3	610	-0.00	0.996	1.00
B*C	-1404	610	-2.30	0.070	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

Cost = 14544382 - 17928 A - 223217 B - 22395 C + 5.98 A*A + 52854 B*B + 528 C*C - 0 A*B - 0.1 A*C - 2246 B*C

รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิต

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิต จะเป็นการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 97.43 เปอร์เซ็นต์ และค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 92.81 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการเพิ่มตัวแปร (Forward Selection) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อต้นทุนการ

ผลิตไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduced Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.3

Response Surface Regression: Cost versus A, B, C

Forward Selection of Terms

α to enter = 0.05
The stepwise procedure added terms during the procedure in order to maintain a hierarchical model at each step.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	280849010	46808168	42.78	0.000
Linear	3	199478574	66492858	60.77	0.000
A	1	180880200	180880200	165.32	0.000
B	1	14615121	14615121	13.36	0.006
C	1	3983253	3983253	3.64	0.093
Square	2	73488379	36744190	33.58	0.000
B*B	1	39411096	39411096	36.02	0.000
C*C	1	39326449	39326449	35.94	0.000
2-Way Interaction	1	7882056	7882056	7.20	0.028
B*C	1	7882056	7882056	7.20	0.028
Error	8	8752748	1094093		
Lack-of-Fit	6	8682110	1447018	40.97	0.024
Pure Error	2	70638	35319		
Total	14	289601758			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1045.99	96.98%	94.71%	84.62%

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	503165	502	1001.37	0.000	
A	4755	370	12.86	0.000	1.00
B	1352	370	3.65	0.006	1.00
C	706	370	1.91	0.093	1.00
B*B	3257	543	6.00	0.000	1.01
C*C	3254	543	6.00	0.000	1.01
B*C	-1404	523	-2.68	0.028	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

Cost = 366279 + 475.5 A - 219480 B - 22176 C + 52118 B*B + 520.6 C*C - 2246 B*C

รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิต โดยวิธีการเพิ่มตัวแปร

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ดังรูปที่ 4.3 พบว่าเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อต้นทุนการผลิตที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 หรือของปัจจัยที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จะมีทั้งหมด 6 เทอม จากทั้งหมด 9 เทอม ซึ่งประกอบไปด้วยผลกระทบหลัก (Main Effect Term) ได้แก่ A, B และ C ส่วนเทอมกำลังสองของปัจจัย

(Second Order Term) ได้แก่ B*B และ C*C และเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Term) ได้แก่ B*C โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.1 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 96.98 เปอร์เซ็นต์ และค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 94.71 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่ามากกว่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

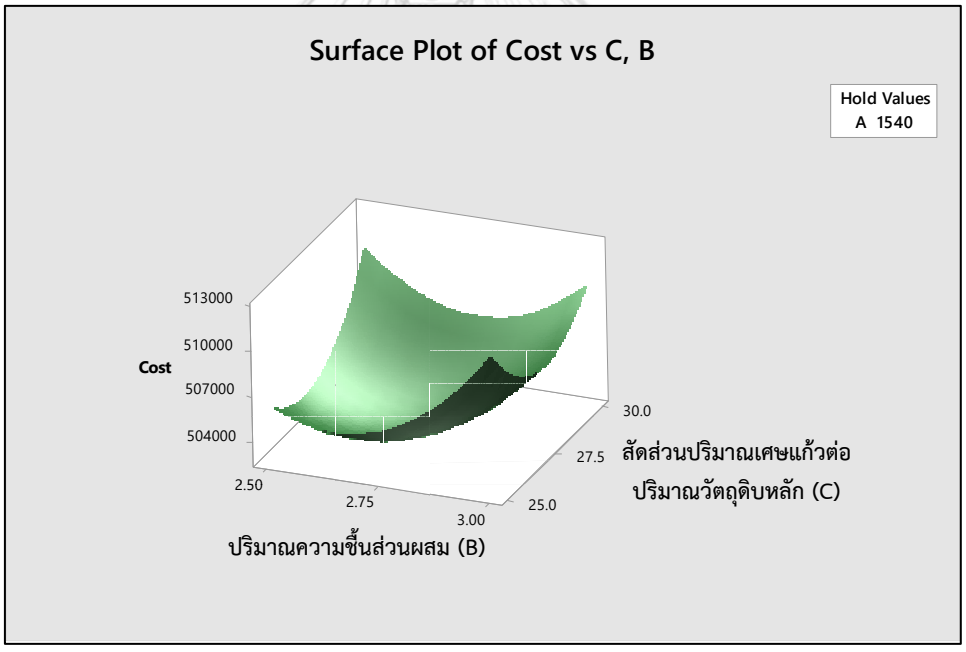
$$\text{Cost} = 366279 + 475.5\,A - 219480\,B - 22176\,C + 52118\,B^*B + 520.6\,C^*C - 2246\,B^*C \quad (4.1)$$

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นว่าปัจจัย B และ C มีเทอมของผลกระทบหลัก เทอมผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยและเทอมกำลังสองที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อต้นทุนการผลิต ผู้วิจัยจึงใช้กราฟพื้นผิวผลตอบ (Surface Plot) ระหว่าง B และ C ในการอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัย B และ C ที่มีต่อต้นทุนการผลิตไปพร้อมๆกันได้ ส่วนเทอมปัจจัย A จะใช้กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์ เนื่องจากผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของปัจจัย A ไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

โดยปัจจัยปริมาณความชื้นส่วนผสม (B) และสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก (C) มีผลกระทบร่วมระหว่างกันและมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งกับต้นทุนการผลิต จากกราฟพื้นผิวผลตอบดังรูปที่ 4.4 แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นส่วนผสม (B) จากระดับต่ำไปกลางจะทำให้ต้นทุนการผลิตมีค่าต่ำลงและจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นส่วนผสมจากระดับกลางไปสูง เนื่องจากปริมาณความชื้นส่วนผสมที่ต่ำจะทำให้ส่วนผสมวัตถุดิบสูญหาย (loss) ในขณะลำเลียงเข้าไปในเตาหลอม ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนวัตถุดิบหลักที่สูงขึ้น ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น แต่ปริมาณความชื้นส่วนผสมสูงจะใช้ปริมาณความร้อนในการหลอมที่มาก เนื่องจากต้องใช้ความร้อนในการไล่ความชื้นออกจากส่วนผสมก่อนการหลอม จึงทำให้ปริมาณความร้อนภายในเตาคงเหลือลดลง และความร้อนภายในเตาคงเหลือที่ลดลงนี้จะส่งผลให้เตาหลอมดึงปริมาณแก๊สออกมามากขึ้น เพื่อทำให้เตาหลอมมีความร้อนในการหลอมวัตถุดิบ ปริมาณแก๊สที่มากขึ้นจะส่งผลให้ต้นทุนแก๊สมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก (C) จากระดับต่ำไปกลางจะทำให้ต้นทุนการผลิตมีค่าต่ำลงและจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักจากระดับกลางไปสูง เนื่องจากเศษแก้วจะใช้ปริมาณความร้อนในการหลอมที่น้อยกว่าวัตถุดิบปกติ การใส่สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักเข้าไปในเตาหลอมเพิ่มขึ้นจึงช่วยให้ปริมาณความร้อนภายในเตาคงเหลือมากขึ้น และความร้อนภายใน

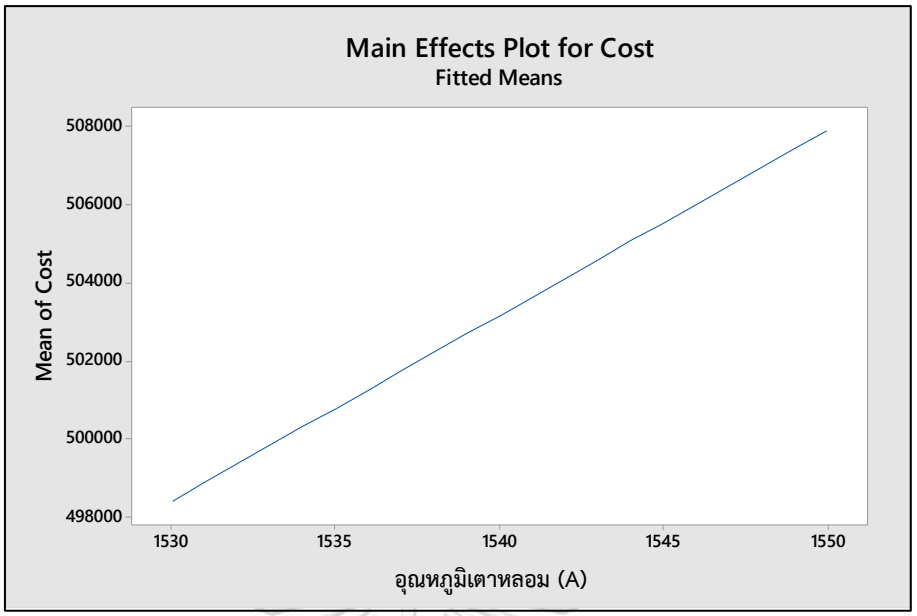
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เตาคงเหลือที่มากขึ้นนี้จะทำให้มีการใช้แก๊สลดลง ส่งผลให้ต้นทุนแก๊สลดลง ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลงไปด้วย แต่หากใส่สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักในปริมาณมากจะส่งผลต่อต้นทุนเศษแก้วที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต้นทุนเศษแก้วจะมีราคาสูงกว่าต้นทุนวัตถุดิบหลัก จึงทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น และปริมาณความชื้นส่วนผสมที่ระดับต่ำ เมื่อสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง จะทำให้ต้นทุนการผลิตเปลี่ยนแปลงมาก ในขณะที่ปริมาณความชื้นส่วนผสมที่ระดับสูง เมื่อสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูงจะทำให้ต้นทุนการผลิตเปลี่ยนแปลงน้อย เนื่องจากปริมาณความชื้นส่วนผสมที่ต่ำจะทำให้ส่วนผสมวัตถุดิบสูญหาย ในขณะลำเลียงเข้าไปในเตาหลอม ซึ่งส่วนประกอบของวัตถุดิบหลัก คือ โซดาแอชมีน้ำหนักมีน้ำหนักที่เบากว่าวัตถุดิบหลักอื่น เมื่อโซดาแอชสูญหายไปจะส่งผลให้มีอุณหภูมิในการหลอมแก้วสูง เมื่อใส่ปริมาณสัดส่วนเศษแก้วต่อวัตถุดิบหลักเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ส่วนผสมวัตถุดิบต้องหลอมที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ใช้ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับปริมาณความชื้นส่วนผสมที่ระดับสูง เนื่องจากไม่มีการสูญหายของโซดาแอชที่ระดับต่ำ



รูปที่ 4.4 กราฟพื้นผิวผลตอบแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยปริมาณความชื้นส่วนผสมและสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักที่มีผลต่อต้นทุนการผลิต

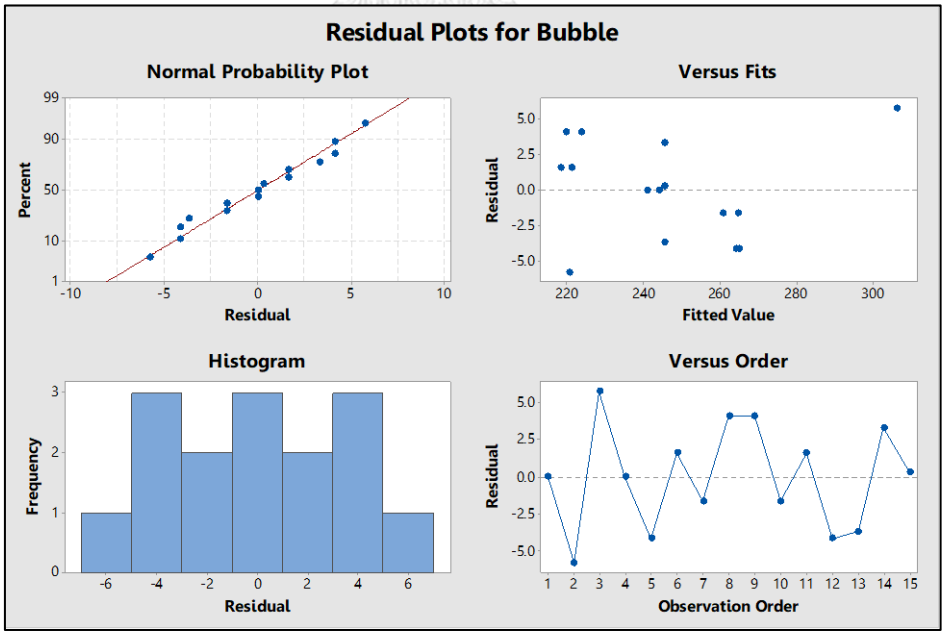
และจากกราฟผลกระทบหลักของปัจจัยอุณหภูมิเตาหลอม (A) ดังรูปที่ 4.5 แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิเตาหลอมเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง จะส่งผลกระทบให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อปรับตั้งอุณหภูมิเตาหลอมสูงขึ้นจะทำให้เตาหลอมดึงปริมาณแก๊สออกมามากขึ้นเพื่อทำให้เตาหลอมมีอุณหภูมิสูง ปริมาณแก๊สที่มากขึ้นจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตมากขึ้นด้วย



รูปที่ 4.5 กราฟผลกระทบหลักของปัจจัยอุณหภูมิเตาหลอมที่มีผลต่อต้นทุนรวม

4.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของจำนวนฟองอากาศ

4.4.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวส่วนตกค้างของจำนวนฟองอากาศ

จากรูปที่ 4.6 สามารถสรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของจำนวนฟองอากาศได้ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง (Normality Assumption) จะสามารถดูได้จากกราฟ Normal Probability Plot ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่จัดเรียงตัวอยู่ตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-value ของการทดสอบการแจกแจงแบบปกติเท่ากับ 0.730 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ

2. การทดสอบสมมติฐานความคงที่ของค่าความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง (Variance Stability) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Fitted Value ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้างรอบแนวแกนศูนย์ และข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม หรือรูปแบบที่คล้ายกรวยปากเปิด จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีค่าความแปรปรวนคงที่

3. กราฟอิสโตแกรมจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ

4. การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง (Independence of Residual) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Observation Order ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีการกระจายเป็นบวกและลบอย่างสุ่ม ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้ม หรือรูปร่างที่แน่นอน จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.4.1.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับจำนวนฟองอากาศ

ภายหลังจากที่ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองตามการออกแบบการทดลองข้างต้น จากนั้นจะอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่อจำนวนฟองอากาศ โดยจะทำการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากัน 0.05 ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.7

Response Surface Regression: Bubble versus A, B, C

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	8092.98	899.22	26.54	0.001
Linear	3	7321.25	2440.42	72.02	0.000
A	1	3403.12	3403.12	100.44	0.000
B	1	3916.13	3916.13	115.58	0.000
C	1	2.00	2.00	0.06	0.818
Square	3	310.23	103.41	3.05	0.130
A*A	1	37.03	37.03	1.09	0.344
B*B	1	64.10	64.10	1.89	0.227
C*C	1	185.26	185.26	5.47	0.067
2-Way Interaction	3	461.50	153.83	4.54	0.068
A*B	1	441.00	441.00	13.02	0.015
A*C	1	20.25	20.25	0.60	0.474
B*C	1	0.25	0.25	0.01	0.935
Error	5	169.42	33.88		
Lack-of-Fit	3	144.75	48.25	3.91	0.210
Pure Error	2	24.67	12.33		
Total	14	8262.40			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5.82094	97.95%	94.26%	71.30%

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	245.67	3.36	73.10	0.000	
A	-20.63	2.06	-10.02	0.000	1.00
B	22.13	2.06	10.75	0.000	1.00
C	0.50	2.06	0.24	0.818	1.00
A*A	3.17	3.03	1.05	0.344	1.01
B*B	4.17	3.03	1.38	0.227	1.01
C*C	-7.08	3.03	-2.34	0.067	1.01
A*B	-10.50	2.91	-3.61	0.015	1.00
A*C	2.25	2.91	0.77	0.474	1.00
B*C	-0.25	2.91	-0.09	0.935	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

Bubble = 63915 - 90.5 A + 6201 B - 75 C + 0.0317 A*A + 66.7 B*B - 1.133 C*C - 4.20 A*B
+ 0.090 A*C - 0.40 B*C

รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับจำนวนฟองอากาศ

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิต จะเป็นการวิเคราะห์หาสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป (Full Model) ซึ่งในสมการข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญรวมอยู่ด้วยซึ่งมีค่า R-Sq เท่ากับ 97.95 เปอร์เซ็นต์ และค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 94.26 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกวิธี Stepwise Regression แบบวิธีการเพิ่มตัวแปร (Forward Selection) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เข้ามาช่วยในการทดสอบเพื่อนำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อต้นทุนการ

ผลิตไปสร้างสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduced Model) ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.8

Response Surface Regression: Bubble versus A, B, C

Forward Selection of Terms

α to enter = 0.05
The stepwise procedure added terms during the procedure in order to maintain a hierarchical model at each step.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	7978.29	1595.66	50.55	0.000
Linear	3	7321.25	2440.42	77.31	0.000
A	1	3403.12	3403.12	107.80	0.000
B	1	3916.13	3916.13	124.06	0.000
C	1	2.00	2.00	0.06	0.807
Square	1	216.04	216.04	6.84	0.028
C*C	1	216.04	216.04	6.84	0.028
2-Way Interaction	1	441.00	441.00	13.97	0.005
A*B	1	441.00	441.00	13.97	0.005
Error	9	284.11	31.57		
Lack-of-Fit	7	259.44	37.06	3.01	0.272
Pure Error	2	24.67	12.33		
Total	14	8262.40			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5.61849	96.56%	94.65%	85.57%

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	249.86	2.12	117.66	0.000	
A	-20.63	1.99	-10.38	0.000	1.00
B	22.13	1.99	11.14	0.000	1.00
C	0.50	1.99	0.25	0.807	1.00
C*C	-7.61	2.91	-2.62	0.028	1.00
A*B	-10.50	2.81	-3.74	0.005	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

Bubble = -15530 + 9.49 A + 6556 B + 67.1 C - 1.217 C*C - 4.20 A*B

รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับจำนวนฟองอากาศ โดยวิธีการเพิ่มตัวแปร

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ดังรูปที่ 4.3 พบว่าเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อจำนวนฟองอากาศที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 หรือของปัจจัยที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จะมีทั้งหมด 5 เทอม จากทั้งหมด 9 เทอม ซึ่งประกอบไปด้วยผลกระทบหลัก (Main Effect Term) ได้แก่ A, B และ C ส่วนเทอมกำลังสองของปัจจัย

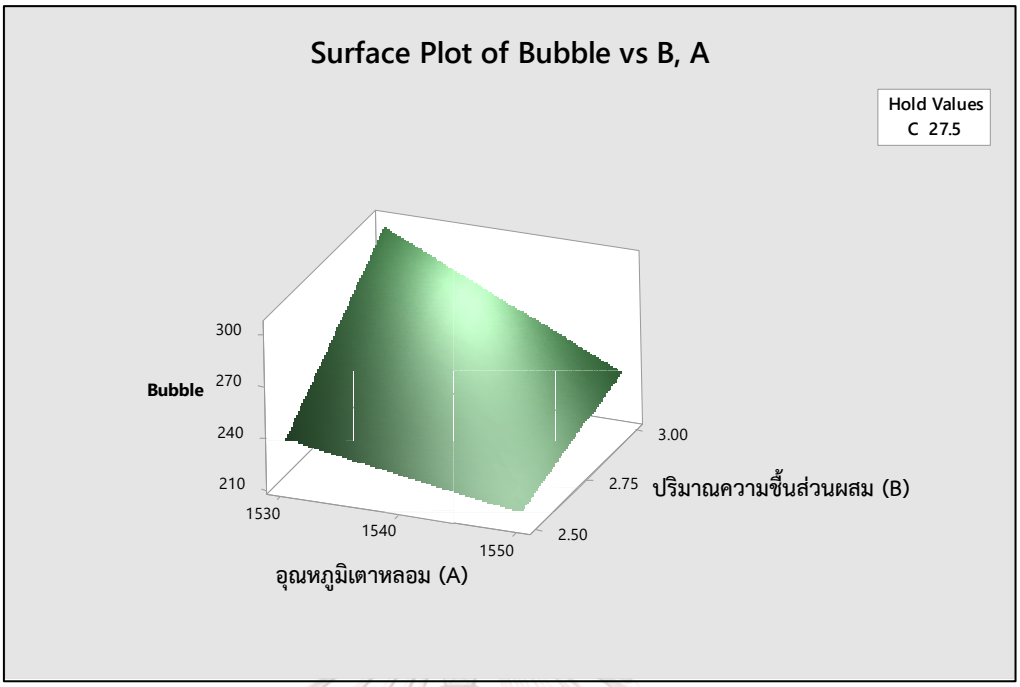
(Second Order Term) ได้แก่ C*C และเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย (Interaction Term) ได้แก่ A*B โดยเทอมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจะสามารถนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์แบบลดรูป (Reduce Model) ที่อยู่ในรูปแบบสมการที่เป็นหน่วยที่แท้จริง (Uncoded Unit) ได้ดังสมการที่ 4.2 และมีค่า R-Sq เท่ากับ 96.56 เปอร์เซ็นต์ และค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 94.65 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบลดรูปจะมีค่ามากกว่า R-Sq (adj) ของสมการความสัมพันธ์แบบเต็มรูป

Bubble = -15530 + 9.49 A + 6556 B + 67.1 C - 1.217 C*C - 4.20 A*B (4.2)

จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นว่าปัจจัย A และ B มีเทอมของผลกระทบหลักและเทอมผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อต้นทุนการผลิต ผู้วิจัยจึงใช้กราฟพื้นผิวผลตอบ (Surface Plot) ของ A และ B ในการอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัย A และ B ที่มีต่อจำนวนฟองอากาศไปพร้อมๆกันได้ ส่วนเทอมปัจจัย C และ C*C จะใช้กราฟผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์ เนื่องจากผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยของปัจจัย C ไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

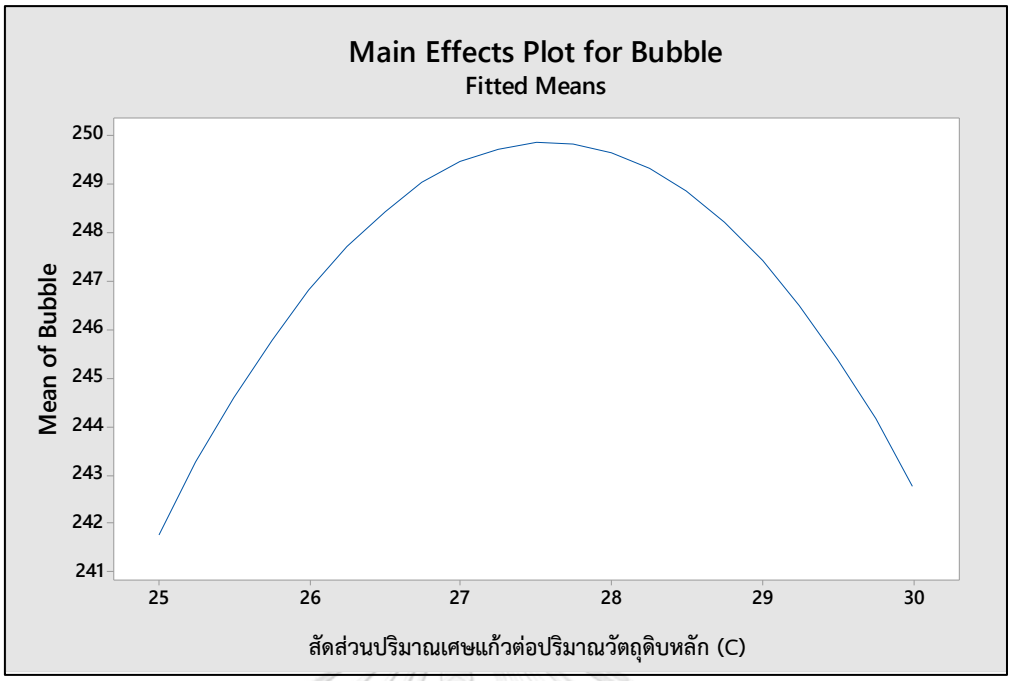
โดยปัจจัย A และ B มีผลกระทบร่วมระหว่างกัน จากกราฟพื้นผิวผลตอบดังรูปที่ 4.9 แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิเตาหลอม (A) อยู่ที่ระดับต่ำ เมื่อปริมาณความชื้นส่วนผสม (B) เปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง จะส่งผลกระทบให้จำนวนฟองอากาศสูงขึ้นมาก เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเตาหลอมอยู่ที่ระดับต่ำ จะทำให้เตาหลอมมีความร้อนในการไล่ความชื้นออกจากน้ำแก้วน้อย เมื่อปริมาณความชื้นส่วนผสมเพิ่มขึ้น ความชื้นหรือน้ำในวัตถุดิบที่ถูกความร้อนไล่ออกไปไม่หมดจะกลายเป็นฟองอากาศที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเตาหลอมอยู่ที่ระดับสูง เมื่อปริมาณความชื้นส่วนผสมเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง จะส่งผลกระทบให้จำนวนฟองอากาศสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเตาหลอมอยู่ที่ระดับสูง จะทำให้เตาหลอมมีความร้อนในการไล่ความชื้นออกจากน้ำแก้วมาก เมื่อปริมาณความชื้นส่วนผสมเพิ่มขึ้น ความชื้นหรือน้ำในวัตถุดิบก็จะโดนความร้อนสูงไปไล่ฟองอากาศได้มาก ส่งผลให้จำนวนของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.9 กราฟพื้นผิวผลตอบแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยระหว่างอุณหภูมิเตาหลอมและปริมาณความชื้นส่วนผสมที่มีผลต่อจำนวนฟองอากาศ

และจากกราฟผลกระทบหลักของสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก (C) ดังรูปที่ 4.10 แสดงว่าเมื่อสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปกลาง จะส่งผลกระทบให้จำนวนฟองอากาศสูงขึ้น เนื่องจากเศษแก้วที่นำมาใช้จะเป็นเศษแก้วที่เป็นของเสียจากการผลิตซึ่งจะมีจำนวนฟองอากาศที่ติดอยู่มาก เมื่อใส่สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้จำนวนฟองอากาศสูงขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักเปลี่ยนแปลงจากระดับกลางไปสูง จะส่งผลกระทบให้จำนวนฟองอากาศต่ำลง เนื่องจากเศษแก้วใช้อุณหภูมิในการหลอมต่ำจึงหลอมง่ายกว่าวัตถุดิบหลัก ทำให้ในเตาหลอมมีความร้อนเหลืออยู่มาก เมื่อสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักมากขึ้น จะทำให้เตาหลอมนำความร้อนที่เหลือภายในเตาไปใช้ไล่ฟองอากาศได้มากขึ้น จำนวนฟองอากาศจึงลดลง ซึ่งยังสูงกว่าสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักที่ระดับต่ำ เนื่องจากมีจำนวนฟองอากาศที่ติดอยู่ในเศษแก้วที่ระดับสูง



รูปที่ 4.10 กราฟผลกระทบของปัจจัยสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลักที่มีผลต่อจำนวนฟองอากาศ

4.5 การหาระดับที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนำเข้า

ภายหลังจากที่ได้สมการถดถอยที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ จากนั้นจึงทำการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย โดยอาศัยฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศมีค่าต่ำที่สุด โดยเริ่มจากการกำหนดเป้าหมาย (Goal) และคะแนนความสำคัญ (Importance) ของต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ ซึ่งทางทีมงานและผู้วิจัยได้ทำการกำหนดเป้าหมายและค่าระดับความสำคัญไว้ดังตารางที่ 4.4

โดยการกำหนดเป้าหมายในงานวิจัยนี้จะใช้หลักเกณฑ์ในการกำหนดเป้าหมายแบบค่าต่ำที่สุด (Minimize) ดังต่อไปนี้

- ค่าต่ำสุด (Lower) จะกำหนดตามค่าต่ำสุดที่ได้จากการทดลอง
- ค่าเป้าหมาย (Target) จะกำหนดตามค่าต่ำสุดที่ได้จากการทดลอง
- ค่าสูงสุด (Upper) จะกำหนดตามค่าสูงสุดที่ได้จากการทดลอง

ในส่วนของการกำหนดคะแนนความสำคัญของทางผู้วิจัยและทีมงานทำการกำหนดให้คะแนนความสำคัญของต้นทุนการผลิตมีค่าเท่ากับ 10 คะแนน และคะแนนความสำคัญของจำนวนฟองอากาศมีค่าเท่ากับ 1 คะแนน เนื่องจากปัจจุบันจำนวนฟองอากาศในอยู่ในระดับที่ยอมรับได้แล้ว

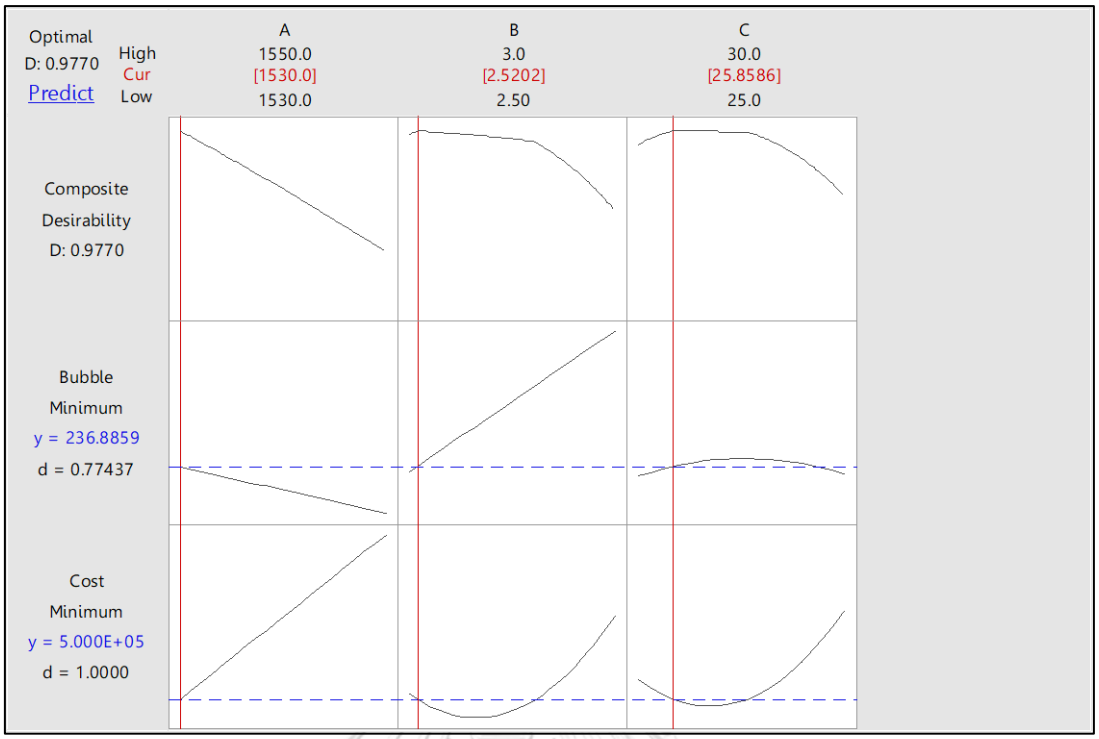
คือ ไม่เกิน 800 ฟอง จึงไม่จำเป็นต้องนำตัวแปรตอบสนองจำนวนฟองอากาศมาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม แต่ทางโรงงานกรณีศึกษายังคงต้องการให้จำนวนฟองอากาศอยู่ในระดับใกล้เคียงกับปัจจุบันหรือน้อยกว่าเดิม เพื่อรักษามาตรฐานคุณภาพเรื่องฟองอากาศของบล็อกแก้วให้ยังคงเดิม ผู้วิจัยจึงนำตัวแปรตอบสนองจำนวนฟองอากาศมาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมร่วมกับต้นทุนการผลิต แต่ให้คะแนนความสำคัญในระดับที่น้อย เนื่องจากทางโรงงานจึงให้ความสำคัญกับต้นทุนการผลิตมากกว่าจำนวนฟองอากาศ

ตารางที่ 4.4 การกำหนดเป้าหมายและคะแนนความสำคัญของต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ

คุณสมบัติ	**เป้าหมาย**		**คะแนนความสำคัญ**
ต้นทุนการผลิต	Minimize		10
	Lower	500,012	
	Target	500,012	
	Upper	513,383	
จำนวนฟองอากาศ	Minimize		1
	Lower	215	
	Target	215	
	Upper	312	

เมื่อทำการกำหนดเป้าหมายและคะแนนความสำคัญของต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะใช้คำสั่ง Response Optimizer ในโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เพื่อหาค่าปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทำ Response Optimizer จะเป็นดังรูปที่ 4.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.11 ผลจากการทำ Response Optimizer เพื่อหาค่าการปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย

ผลจากโปรแกรมมินิแทปดังรูปที่ 4.11 พบว่า ต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดที่คาดหมาย คือ 500,000 บาทต่อวัน และจำนวนฟองอากาศที่ต่ำที่สุดที่เป็นไปได้คือ 237 ฟองต่อหนึ่งชิ้นงานบล็อกแก้ว โดยที่ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลลัพธ์ (Composite Desirability) จะคำนวณจากฟังก์ชัน Desirability ของ Derringer & Suich (Aketeke-Ozturk B, 2010)

$$D = (d_1^{r_1} \times d_2^{r_2} \times \ldots \times d_m^{r_m})^{1/(r_1+r_2+\cdots+r_m)}$$

โดยที่ d_i คือ ค่า desirability ของตัวแปรตอบสนองแต่ละตัว และ r_i คือ น้ำหนักหรือค่าความสำคัญของตัวแปรตามแต่ละตัว

จะได้ $D = (0.77437^1 \times 1.0000^{10})^{1/(1+10)}$

$$D = 0.9770$$

จากการคำนวณจะได้ค่า Composite Desirability อยู่ที่ 0.9770 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 นั่นคือผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมมินิแทปมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่กำหนดไว้ แต่เนื่องจากเครื่องจักรของทางโรงงานกรณีศึกษาไม่สามารถปรับตั้งค่าระดับปัจจัยให้อยู่ในรูปจุดทศนิยม 4 ตำแหน่งได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยที่ได้จากการทำ Response Optimizer ให้เป็นจำนวนที่สามารถปรับตั้งได้จริง ซึ่งผลที่ได้จะเป็นไปดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศต่ำที่สุด

สัญลักษณ์	ปัจจัย	ค่าปรับตั้งที่ได้	ค่าปรับตั้งจริง	หน่วย
A	อุณหภูมิเตาหลอม	1530.0	1530	องศาเซลเซียส
B	ปริมาณความชื้นส่วนผสม	2.5202	2.5	เปอร์เซ็นต์
C	สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก	25.8586	26	เปอร์เซ็นต์

โดยค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.5 จะถูกนำไปปรับใช้ในโรงงานผลิตจริงเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

4.6 สรุปขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการ

ในขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการจะเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ โดยอาศัยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ซึ่งพบว่าปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ จากนั้นจึงทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ แล้วจึงทำการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้คำสั่ง Response Optimizer ในโปรแกรมมินิแทป พบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิเตาหลอม เท่ากับ 1530 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นส่วนผสม เท่ากับ 2.5 เปอร์เซ็นต์ และสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก เท่ากับ 26 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นผู้วิจัยจะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนนี้ไปปรับใช้ในโรงงานผลิตจริงเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้ ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
ขั้นตอนการติดตามและควบคุมผล

ในขั้นตอนการติดตามและควบคุมผลจะเป็นการนำค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนการปรับปรุงก่อนหน้านี้มาทดลองปรับใช้กับกระบวนการผลิตจริงเพื่อยืนยันผลการปรับปรุงที่ได้ พร้อมทั้งจัดทำแผนควบคุมและวิธีการปฏิบัติงานใหม่ในส่วนที่ได้มีการปรับปรุงเพื่อสร้างเป็นมาตรฐานในการทำงานใหม่ให้พนักงานมีความเข้าในในการทำงานที่ตรงกัน

5.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

ภายหลังจากที่ได้ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมจากขั้นตอนการปรับปรุงแล้ว จากนั้นจะเป็นการนำค่าการปรับตั้งดังกล่าวไปทำการยืนยันผลกับเครื่องจักรในกระบวนการผลิตจริงเพื่อให้มั่นใจว่าค่าการปรับตั้งที่ได้สามารถช่วยปรับปรุงต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศให้มีค่าต่ำลงได้จริง และนำผลการทดสอบที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับค่าก่อนปรับปรุง

5.1.1 ขั้นตอนในการทดลองเพื่อยืนยันผล

ในการทดลองเพื่อยืนยันผลจะเริ่มต้นจากการจัดประชุมเพื่ออธิบายขั้นตอนการดำเนินงานให้กับสมาชิกภายในทีมและผู้ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานได้จัดเตรียมวัตถุดิบและทำการปรับตั้งค่าเครื่องจักรได้อย่างถูกต้องตามค่าที่เหมาะสมจากขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการในบทที่ 4 โดยรายละเอียดของขั้นตอนในการทดลองเพื่อยืนยันผลจะประกอบไปด้วย

1. ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการจัดเตรียมวัตถุดิบ เช่น เศษแก้ว ให้พร้อมสำหรับการทดสอบ
2. ทำการปรับตั้งค่าปัจจัยนำเข้าที่อยู่ในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมที่ได้จากขั้นตอนการปรับปรุงในบทที่ 4 โดยทำการปรับตั้งค่าเครื่องจักรผ่านทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม และมีการบันทึกผลอัตโนมัติโดยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งระดับปัจจัยแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าระดับปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยของกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอม

ลำดับ	ปัจจัย	ค่าระดับปัจจัย	หน่วย
1	อุณหภูมิเตาหลอม	1530	องศาเซลเซียส
2	ปริมาณความชื้นส่วนผสม	2.5	เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับ	ปัจจัย	ค่าระดับปัจจัย	หน่วย
3	สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก	26	เปอร์เซ็นต์

3. ทำการเก็บตัวอย่างบล็อกแก้วที่จะนำไปใช้ในการนับจำนวนฟองอากาศ โดยเก็บบล็อกแก้วลายที่ทำการศึกษา
4. นำบล็อกแก้วตัวอย่างที่ได้เก็บมาไปทำการนับจำนวนฟองอากาศ โดยจะทำภายในห้องทดลองของโรงงาน
5. วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการยืนยันผลการทดลอง

5.1.2 ผลการทดลองการยืนยันผล

ผู้วิจัยได้ทำการทดลอง โดยเก็บข้อมูลจำนวน 30 วัน โดยผลการทดสอบยืนยันผลของต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศจะแสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบยืนยันผลของต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ

วันที่	ปริมาณแก๊ส (ลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน)	ต้นทุนแก๊ส (บาท)	ปริมาณเศษแก้ว (เปอร์เซ็นต์)	ต้นทุนวัตถุดิบ (บาท)	ต้นทุนการผลิตรวม (บาท)	จำนวนฟองอากาศ (ฟอง)
1	16,643	177,082	26	326,000	503,082	179
2	16,081	171,102	26	326,000	497,102	338
3	16,821	178,975	26	326,000	504,975	287
4	16,530	175,879	26	326,000	501,879	215
5	16,355	174,017	26	326,000	500,017	154
6	16,055	170,825	26	326,000	496,825	241
7	16,407	174,570	26	326,000	500,570	184
8	16,428	174,794	26	326,000	500,794	263
9	15,945	169,655	26	326,000	495,655	247
10	16,060	170,878	26	326,000	496,878	257
11	16,576	176,369	26	326,000	502,369	263
12	16,962	180,476	26	326,000	506,476	342

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วันที่	ปริมาณแก๊ส (ลูกบาศก์เมตรมาตรฐาน)	ต้นทุนแก๊ส (บาท)	ปริมาณเศษแก้ว (เปอร์เซ็นต์)	ต้นทุนวัตถุดิบ (บาท)	ต้นทุนการผลิตรวม (บาท)	จำนวนฟองอากาศ (ฟอง)
13	15,717	167,229	26	326,000	493,229	273
14	15,813	168,250	26	326,000	494,250	229
15	16,392	174,411	26	326,000	500,411	177
16	16,198	172,347	26	326,000	498,347	198
17	16,206	172,432	26	326,000	498,432	220
18	16,321	173,655	26	326,000	499,655	222
19	16,082	171,112	26	326,000	497,112	309
20	15,187	161,590	26	326,000	487,590	172
21	16,176	172,113	26	326,000	498,113	355
22	16,562	176,220	26	326,000	502,220	198
23	16,104	171,347	26	326,000	497,347	294
24	15,965	169,868	26	326,000	495,868	194
25	16,702	177,709	26	326,000	503,709	310
26	16,395	174,443	26	326,000	500,443	231
27	16,956	180,412	26	326,000	506,412	273
28	17,193	182,934	26	326,000	508,934	248
29	16,074	171,027	26	326,000	497,027	123
30	16,165	171,996	26	326,000	497,996	320
เฉลี่ย	16,302	173,457	26	326,000	499,457	244

ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลจากตารางที่ 5.2 ไปเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงดังตารางที่ 5.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบค่าตัวแปรตอบสนองต่อ 1 วัน ระหว่างก่อนปรับปรุงและหลังการปรับปรุงกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมแก้ว

ตัวแปรตอบสนอง	ค่าก่อนปรับปรุง	ค่าคาดหมายหลังปรับปรุง	ค่าจริงหลังปรับปรุง	ผลต่างระหว่างค่าคาดหมายและค่าจริงหลังการปรับปรุง	ผลต่างระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง
ต้นทุนการผลิตรวม (บาท)	513,760	500,000	499,457	ลดลง 0.11 เปอร์เซ็นต์	ลดลง 2.78 เปอร์เซ็นต์
จำนวนฟองอากาศ (ฟอง)	262	237	244	เพิ่มขึ้น 2.90 เปอร์เซ็นต์	ลดลง 6.38 เปอร์เซ็นต์

จากตารางที่ 5.2 และ 5.3 การทดลองเพื่อยืนยันผลเป็นเวลา 30 วัน พบว่าต้นทุนการผลิตที่คาดหมายหลังปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 500,000 บาทต่อวัน เปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิตจริงหลังปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 499,457 บาทต่อวัน ซึ่งลดลงไป 0.11 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการปรับตั้งค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ระดับเดียวตลอดการยืนยันผลการทดลอง ทำให้เตาหลอมไม่ต้องใช้แก๊สในการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิขึ้นลง ส่งผลให้ต้นทุนแก๊สลดต่ำลงกว่าค่าคาดหมาย เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเฉลี่ยก่อนปรับปรุงที่มีค่าเท่ากับ 513,760 บาทต่อวัน กับต้นทุนการผลิตเฉลี่ยหลังปรับปรุงที่มีค่าเท่ากับ 499,457 บาทต่อวัน จะลดลงไป 14,303 บาทต่อวัน หรือ 5,220,648 บาทต่อปี คิดเป็นต้นทุนการผลิตที่ลดลงไปได้ 2.78 เปอร์เซ็นต์ ส่วนจำนวนฟองอากาศที่คาดหมายหลังปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 237 ฟองต่อหนึ่งชิ้นงานบล็อกแก้ว เปรียบเทียบกับจำนวนฟองอากาศจริงหลังปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 244 ฟองต่อหนึ่งชิ้นงานบล็อกแก้ว ซึ่งเพิ่มขึ้น 2.90 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากช่วงการทดลองยืนยันผลจะใช้เศษแก้วส่วนใหญ่จากชิ้นงานของเสียภายในโรงงาน ซึ่งชิ้นงานของเสียจะมีจำนวนฟองอากาศอยู่มาก ส่งผลให้จำนวนฟองอากาศเพิ่มมากขึ้นกว่าค่าคาดหมาย เมื่อเปรียบเทียบจำนวนฟองอากาศเฉลี่ยหลังปรับปรุงเท่ากับ 244 ฟองต่อหนึ่งชิ้นงานบล็อกแก้ว กับจำนวนฟองอากาศเฉลี่ยก่อนปรับปรุงที่เป็น 262 ฟองต่อหนึ่งชิ้นงานบล็อกแก้ว จะคิดเป็นจำนวนฟองอากาศที่ลดลงไปได้ 6.83 เปอร์เซ็นต์

5.2 การติดตามและควบคุมผล

หลังการปรับปรุงกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมแล้ว และทำการทดลองเพื่อยืนยันผลแล้ว ทางผู้วิจัยจึงจัดทำวิธีการปฏิบัติงานใหม่ของการตั้งค่าเครื่องจักรและแผนควบคุมเพื่อสร้างเป็นมาตรฐานในการตั้งค่าเครื่องจักรให้แก่พนักงานควบคุมเครื่องจักรต่อไป ซึ่งวิธีการปฏิบัติงานใหม่ของกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมแก้วแสดงในตารางที่ 5.4 ส่วนแผนควบคุมการตั้งค่าเครื่องจักรแสดงในตารางที่ 5.5 ส่วนแผ่นตรวจสอบการตั้งค่าเครื่องจักร (Check Sheet) แสดงในตารางที่ 5.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.4 วิธีการปฏิบัติงานใหม่ของกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมแก้ว

วิธีการปฏิบัติงานในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมแก้ว		
ขั้นตอน	**รายละเอียดการปฏิบัติงาน**	**หมายเหตุ**
1	เตรียมความพร้อมก่อนการปฏิบัติงานโดยการสวมอุปกรณ์ป้องกันภัยในขณะปฏิบัติงาน	อุปกรณ์ป้องกันภัย ได้แก่ หมวกนิรภัย แว่นตานิรภัย รองเท้านิรภัย ถุงมือ หน้ากากอนามัย ที่อุดหู
2	ตรวจสอบสภาพเครื่องผสมและเตาหลอมว่ามีสิ่งผิดปกติหรือไม่	หากพบความผิดปกติให้แจ้งหัวหน้าวิศวกรเพื่อทำการแก้ไขการปรับตั้งค่าตามที่กำหนด
3	ตรวจสอบระบบคอมพิวเตอร์ของเครื่องผสมและเตาหลอม เพื่อดูความพร้อมก่อนการใช้งาน	หากพบความผิดปกติให้แจ้งหัวหน้าวิศวกรเพื่อทำการแก้ไขการปรับตั้งค่าตามที่กำหนด
4	จัดเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตบล็อกแก้ว	วัตถุดิบที่ใช้จะประกอบไปด้วย ทรายแก้ว โซดาแอช โดโลไมต์ โซเดียมซัลเฟต ซีลีเนียม โคบอลต์ และเศษแก้ว
5	ทำการปรับตั้งค่าระดับปัจจัยที่อยู่ในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมผ่านทางคอมพิวเตอร์ควบคุม ซึ่งประกอบไปด้วย - อุณหภูมิเตาหลอม 1530 องศาเซลเซียส - ปริมาณความชื้นส่วนผสม 2.5 เปอร์เซ็นต์ - สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก 26 เปอร์เซ็นต์	-
6	ตรวจสอบค่าระดับปัจจัยต่าง ๆว่าอยู่ในระดับตามแผนควบคุมหรือไม่	หากพบความผิดปกติให้แจ้งหัวหน้าวิศวกรเพื่อทำการแก้ไขการปรับตั้งค่าตามที่กำหนด
7	ดำเนินการผลิตบล็อกแก้ว	-

วิธีการปฏิบัติงานในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมแก้ว		
ขั้นตอน	**รายละเอียดการปฏิบัติงาน**	**หมายเหตุ**
8	เมื่อบล็อกแก้วออกจากกระบวนการขึ้นรูปและอบแล้ว จะต้องเก็บชิ้นงานบล็อกแก้วอย่างสุ่มมานับจำนวนฟองอากาศ	เพื่อตรวจสอบว่าตรงตามมาตรฐานของโรงงานหรือไม่
9	บรรจุผลิตภัณฑ์ลงสู่ลังเพื่อส่งเข้าสู่คลังเก็บสินค้าต่อไป	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

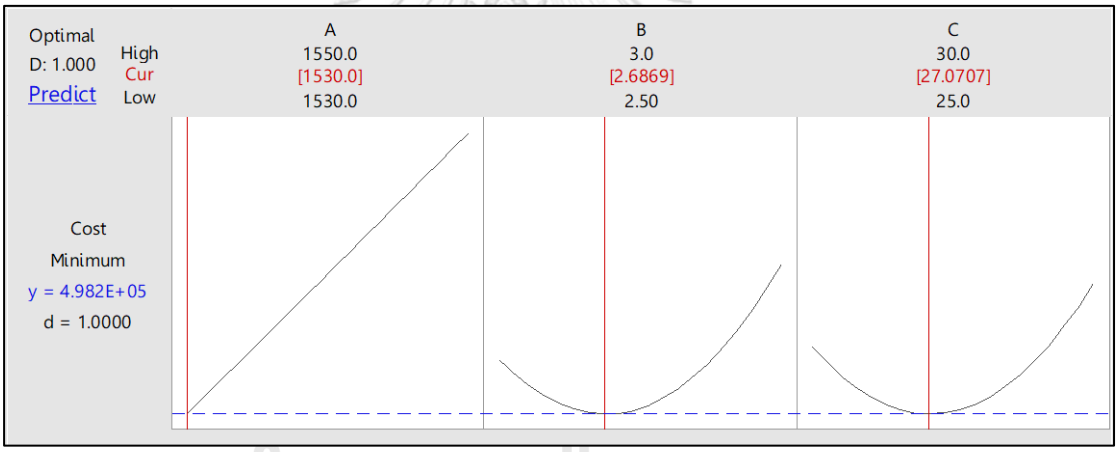
ตารางที่ 5.5 แผนควบคุมการตั้งค่าเครื่องจักร

ลำดับที่	จุดควบคุม	มาตรฐาน	หน่วย	การควบคุม		ผู้รับผิดชอบ	บันทึกคุณภาพ	แผนการแก้ไข
				เครื่องมือ	ความถี่			
1	อุณหภูมิเตาหลอม	อุณหภูมิเตาหลอม ต้องเท่ากับ 1530 องศาเซลเซียส	องศาเซลเซียส	คอมพิวเตอร์ควบคุม	ทุกครั้งก่อนการผลิต	พนักงานควบคุมเครื่องจักร	Check sheet	แจ้งหัวหน้าวิศวกรเพื่อทำการแก้ไขการปรับตั้งค่าตามที่กำหนด
2	ปริมาณความชื้นส่วนผสม	ปริมาณความชื้นส่วนผสม ต้องเท่ากับ 2.5 เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	เครื่องวัดความชื้น	ทุกครั้งก่อนการผลิต	พนักงานควบคุมเครื่องจักร	Check sheet	แจ้งหัวหน้าวิศวกรเพื่อทำการแก้ไขการปรับตั้งค่าตามที่กำหนด
3	สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก	สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก ต้องเท่ากับ 26 เปอร์เซ็นต์	เปอร์เซ็นต์	คอมพิวเตอร์ควบคุม	ทุกครั้งก่อนการผลิต	พนักงานควบคุมเครื่องจักร	Check sheet	แจ้งหัวหน้าวิศวกรเพื่อทำการแก้ไขการปรับตั้งค่าตามที่กำหนด

ตารางที่ 5.6 แผ่นตรวจสอบการตั้งค่าเครื่องจักร (Check Sheet)

โรงงานกรณีศึกษา																																				
เลขที่เอกสาร																																				
แผ่นตรวจสอบการตั้งค่าเครื่องบรรจุ																																				
			ประจำเดือน .....พ.ศ.																																		
จุดตรวจ	**วิธีการ**	**มาตรฐาน**	**วัน**																																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
อุณหภูมิเตาหลอม	Check	อุณหภูมิเตาหลอม ต้องเท่ากับ 1530 องศาเซลเซียส																																		
ปริมาณความชื้นส่วนผสม	Check	ปริมาณความชื้นส่วนผสม ต้องเท่ากับ 2.5 เปอร์เซ็นต์																																		
สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก	Check	สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก ต้องเท่ากับ 26 เปอร์เซ็นต์																																		

จากการนำค่าการปรับตั้งที่ได้จากการหาระดับที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศต่ำที่สุด โดยใช้คำสั่ง Response Optimizer ในโปรแกรมมินิแทป (Minitab) ไปทำการยืนยันผลกับเครื่องจักรในกระบวนการผลิตจริง จะสามารถลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลงได้ในระดับหนึ่ง โดยที่จำนวนฟองอากาศยังห่างจากเกณฑ์ที่ยอมรับได้อยู่มาก คือ เกณฑ์การยอมรับกำหนดให้มีจำนวนฟองอากาศไม่เกิน 800 ฟอง แต่หลังการปรับปรุงมีจำนวนฟองอากาศเฉลี่ยเพียง 244 ฟอง หากในอนาคตทางโรงงานกรณีศึกษาต้องการลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลงยิ่งขึ้น โดยที่ยอมให้จำนวนฟองอากาศเพิ่มสูงขึ้นจากปัจจุบัน ผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะในการหาค่าการปรับตั้งจากการหาระดับที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดเพียงอย่างเดียว โดยใช้ตัวแปรตอบสนองต้นทุนการผลิตเพียงตัวเดียวในการทำ Response Optimizer ซึ่งจะเริ่มจากกำหนดเป้าหมายของต้นทุนการผลิตให้เป็นค่าต่ำที่สุด (Minimize) จะได้ผลการวิเคราะห์จากการทำ Response Optimizer ดังรูปที่ 5.1



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 5.1 ผลจากการทำ Response Optimizer เพื่อหาค่าการปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด

ผลจากโปรแกรมมินิแทปดังรูปที่ 5.1 พบว่า ต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุดที่คาดหมาย คือ 498,200 บาทต่อวัน เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเฉลี่ยก่อนปรับปรุงที่มีค่าเท่ากับ 513,760 บาทต่อวัน จะลดลงไปได้ 15,560 บาทต่อวัน หรือ 5,679,400 บาทต่อปี คิดเป็นต้นทุนการผลิตที่ลดลงไปได้ 3.03 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแนวทางการใช้ตัวแปรตอบสนองต้นทุนการผลิตเพียงตัวเดียวนี้จะสามารถลดต้นทุนการผลิตได้มากกว่าแนวทางการใช้ตัวแปรตอบสนองต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศดังที่กล่าวในบทที่ 4.5 ได้ถึง 1,800 บาทต่อวัน หรือ 657,000 บาทต่อปี แต่เนื่องจากเครื่องจักรของทางโรงงานกรณีศึกษาไม่สามารถปรับตั้งค่าระดับปัจจัยให้อยู่ในรูปจุดทศนิยม 4 ตำแหน่งได้

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยที่ได้จากการทำ Response Optimizer ให้เป็นจำนวนที่สามารถปรับตั้งได้จริง ซึ่งผลที่ได้จะเป็นไปดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด

สัญลักษณ์	ปัจจัย	ค่าปรับตั้งที่ได้	ค่าปรับตั้งจริง	หน่วย
A	อุณหภูมิเตาหลอม	1530.0	1530	องศาเซลเซียส
B	ปริมาณความชื้นส่วนผสม	2.6869	2.7	เปอร์เซ็นต์
C	สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก	27.0707	27	เปอร์เซ็นต์

เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาไม่สามารถปรับตั้งค่าระดับปัจจัยให้อยู่ในรูปจุดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ตามผลการวิเคราะห์จากการทำ Response Optimizer ได้ ผู้วิจัยขอเสนอแนะให้ทางโรงงานนำค่าปรับตั้งที่ได้จากตารางที่ 5.7 ไปทดลองยืนยันผลเพื่อยืนยันว่าผลที่ได้เป็นได้ตามค่าคาดหมายหรือไม่ และให้ตรวจนับจำนวนฟองอากาศว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ หากผลที่ได้เป็นไปตามค่าคาดหมาย คือ มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดและมีจำนวนฟองอากาศอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ จากนั้นจึงนำค่าปรับตั้งที่ได้นี้ไปใช้เป็นมาตรฐานในการผลิตจริงต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดโดยสรุปของการลดต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศและผลการดำเนินการวิจัยที่ได้จากการออกแบบการทดลองและการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตจริงภายในโรงงานกรณีศึกษา ตลอดจนข้อเสนอแนะและข้อจำกัดของงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

การปรับปรุงกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมแก้วของโรงงานกรณีศึกษาเกิดจากมูลค่าต้นทุนการผลิตที่เกิดจากต้นทุนวัตถุดิบ โดยต้นทุนวัตถุดิบจะแบ่งออกเป็นต้นทุนวัตถุดิบหลักและต้นทุนเศษแก้ว และต้นทุนแก๊สมีมูลค่าสูง ซึ่งมูลค่าต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมต่อ 1 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 513,760 บาท ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมก่อนปรับปรุงต่อ 1 ปี จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 187,522,519 บาท ทางโรงงานกรณีศึกษาจึงต้องการลดต้นทุนการผลิตในในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมเพื่อเป็นการลดต้นทุนให้แก่โรงงานกรณีศึกษาและเพิ่มศักยภาพการแข่งขันทางการตลาดให้มากยิ่งขึ้น โดยแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมนั้นสามารถทำได้ 2 แนวทาง คือ การใส่แคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มเข้าไปในสัดส่วนวัตถุดิบ และการหาค่าปัจจัยในกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมที่เหมาะสม ซึ่งผู้วิจัยและทีมงานได้เลือกวิธีการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมเข้ามาใช้ในการลดต้นทุนการผลิต

จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่อาจจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต โดยการระดมความคิดตามหลักการ 4M1E กับสมาชิกภายในทีม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกศึกษาเฉพาะปัจจัยประเภทที่สามารถควบคุมและทำการปรับปรุงได้ คือ ปัจจัยที่มาจากคน เครื่องจักร วัตถุดิบ และวิธีการ ส่วนประเภทปัจจัยที่มีจากสิ่งแวดล้อม เป็นปัจจัยที่ทำการควบคุมได้ยาก จึงกำหนดให้อยู่นอกเหนือขอบเขตงานวิจัย จากนั้นจึงทำการคัดกรองปัจจัยนำเข้าโดยให้ทีมงานทำการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลตามเกณฑ์การให้คะแนนที่ได้กำหนดไว้แล้วจึงอาศัยกราฟพาเรโตเข้ามาช่วยในการจัดลำดับความสำคัญและคัดกรองปัจจัย ซึ่งปัจจัยแต่ละปัจจัยจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยปัจจัยในกลุ่มแรก จะเป็นปัจจัยที่สามารถทำการปรับปรุงได้โดยการสร้างข้อตกลงเกี่ยวกับ

วิธีการทำงานใหม่และจัดอบรมพนักงานเบื้องต้นเพื่อสร้างความเข้าใจในการทำงานให้ตรงกัน ส่วนปัจจัยในกลุ่มที่สองจะเป็นปัจจัยที่จะถูกนำไปศึกษาต่อด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญและหาค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม จะประกอบไปด้วย 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิเตาหลอม สัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก และปริมาณความชื้นส่วนผสม จากปัจจัยที่นำมาศึกษาทั้งหมด 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยนอกจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตแล้วยังส่งผลต่อจำนวนฟองอากาศ ซึ่งทางโรงงานกรณีศึกษาได้กำหนดมาตรฐานให้บล็อคแก้ว 1 ชิ้น มีจำนวนฟองอากาศที่ยอมรับได้ไม่เกิน 800 ฟอง ผู้วิจัยจึงได้นำจำนวนฟองอากาศเข้ามาเป็นตัวแปรตอบสนองเพิ่มอีกหนึ่งตัว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทดสอบความมีนัยสำคัญและหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุดและมีจำนวนฟองอากาศอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งในการทดสอบจะมีการนำมาตรฐานการปฏิบัติงานที่ได้จากการปรับปรุงปัจจัยในกลุ่มแรกมาปรับใช้จริงในขณะที่ทำการทดลองเพื่อลดความผันแปรที่อาจจะเกิดขึ้น

ต่อมาจึงเริ่มต้นดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ โดยอาศัยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ซึ่งพบว่าปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญและทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศ ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 แล้วจึงทำการหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมโดยอาศัยโปรแกรมมินิแทป โดยค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิเตาหลอม 1530 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นส่วนผสม 2.5 เปอร์เซ็นต์ และสัดส่วนปริมาณเศษแก้วต่อปริมาณวัตถุดิบหลัก 26 เปอร์เซ็นต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการนำค่าปัจจัยเหมาะสมไปทำการทดสอบในกระบวนการผลิตจริงอีกครั้งเพื่อยืนยันผลที่ได้ แล้วจึงจัดทำวิธีการปฏิบัติงานใหม่ของการตั้งค่าเครื่องจักรและแผนควบคุมเพื่อสร้างเป็นมาตรฐานในการตั้งค่าเครื่องจักรให้แก่พนักงานควบคุมเครื่องจักรต่อไป อีกทั้งยังต้องมีการจัดอบรมเพื่อให้พนักงานมีความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการปฏิบัติงานใหม่ที่ตรงกัน จากการทดลองเพื่อยืนยันผลเป็นจำนวน 30 วัน พบว่าต้นทุนการผลิตเฉลี่ยก่อนปรับปรุงที่มีค่าเท่ากับ 513,760 บาทต่อวัน เปรียบเทียบกับหลังปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 499,457 บาทต่อวัน ลดลงไปได้ 14,303 บาทต่อวัน หรือ 5,220,648 บาทต่อปี คิดเป็นต้นทุนการผลิตที่ลดลงไปได้ 2.78 เปอร์เซ็นต์ และจำนวนฟองอากาศเฉลี่ยหลังปรับปรุงเท่ากับ 244 ฟองต่อหนึ่งชิ้นงานบล็อกแก้ว เปรียบเทียบกับก่อน

ปรับปรุงที่เป็น 262 ฟองต่อหนึ่งชิ้นงานบล็อกแก้ว คิดเป็นจำนวนฟองอากาศที่ลดลงไปได้ 6.83 เปอร์เซ็นต์

6.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมที่ได้จากงานวิจัยสามารถใช้ได้กับการผลิตบล็อกแก้วลายที่ทำการศึกษาเท่านั้น
2. ศึกษาการลดต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศของกระบวนการผลิตบล็อกแก้ว โดยลดต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศที่เกิดจากกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมเท่านั้น
3. ค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมที่ได้จากงานวิจัยจะมาจากการกำหนดค่าระดับของปัจจัยอื่น ๆ ที่ระดับการใช้งานปัจจุบัน เช่น สัดส่วนวัตถุดิบหลัก และปัจจัยในกระบวนการอื่น ๆที่กล่าวไปดังตารางที่ 3.5

6.3 ข้อเสนอแนะ

1. ทางโรงงานกรณีศึกษาสามารถนำค่าการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมไปทดลองประยุกต์ใช้กับบล็อกแก้วลายอื่น ๆได้ เพื่อลดต้นทุนการผลิต แต่ต้องพิจารณาจำนวนฟองอากาศด้วยว่าอยู่ในเกณฑ์การยอมรับของโรงงานหรือไม่ ถ้าไม่อยู่ในเกณฑ์การยอมรับของโรงงานจะต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าปรับตั้งเครื่องจักรใหม่
2. ในอนาคตทางโรงงานกรณีศึกษาสามารถศึกษาเพิ่มเติมในปัจจัยอื่น เช่น สัดส่วนวัตถุดิบหลักชนิดต่าง ๆ เพื่อที่จะลดต้นทุนการผลิตและจำนวนฟองอากาศให้ต่ำลงได้ยิ่งขึ้น
3. แนวทางการปรับปรุงนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการเตรียมส่วนผสมและกระบวนการหลอมแก้วชนิดอื่น ๆได้ เช่น แก้วน้ำ ขวดแก้ว เป็นต้น
4. ในการตรวจนับจำนวนฟองอากาศอาจมีการปรับปรุงให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยการใช้เครื่องตรวจนับจำนวนฟองอากาศและทำการเปรียบเทียบ (Benchmarking) วิธีการตรวจนับจำนวนฟองอากาศกับโรงงานแก้วอื่น ๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

AKETEKE-OZTURK B. 2010. *New Approaches to Desirability Function by Nonsmooth and Nonlinear Optimization.* Ph.D dissertation, Middle East Technical University.

D'ANTONIO, M., HILDT, N., PATIL, Y., MORAY, S. & SHIELDS, T. Energy Efficiency Opportunities in the Glass Manufacturing Industry. 2003. Proceedings of the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry, 87-98.

KOROVIAKOVSKII, A. 2016. *Energy Efficiency of Glassmaking Production.* Master's Thesis, Faculty of Technology, Lappeenranta University of Technology.

MONTGOMERY, D. 2009. *Design and Analysis of Experiments,* North Carolina, SAS Institute Inc.

PFAENDER, H. 1996. *Schott Guide to Glass,* London, Chapman & Hall.

TOOLEY, F. 1984. *The Handbook of Glass Manufacture,* NewYork, Ashlee Publishing Co., Inc.

กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2561. ต้นทุนการผลิตและวิธีการลดต้นทุนการผลิต [Online]. Available: https://bsid.dip.go.th/th/category/sale-marketing/sm-productioncost [Accessed 30 เมษายน 2561].

จิรพัฒน์ เงาประเสริฐ 2549. การวิเคราะห์ต้นทุนอุตสาหกรรมและการจัดทำงบประมาณ, กรุงเทพมหานคร, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชาติชาย พานิชชีวะ. 2561. อุตสาหกรรมแก้วและกระจก [Online]. Available: http://www.greennetworkthailand.com/news_detail.php?n_id=267 [Accessed 20 เมษายน 2561].

นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์ 2559. เอกสารประกอบการเรียนวิชา *Quality Improvement,* กรุงเทพมหานคร, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปารเมศ ชุติมา 2545. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มนวิกา ผดุงสิทธิ์ 2556. การบัญชีต้นทุน, กรุงเทพมหานคร, ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.

ฤดี นิยมรัตน์. 2555. บทที่ *1* แก้ว [Online]. Available: http://www.teacher.ssru.ac.th/reudee_ni/file.php/1/CeramicTechnology/c1-glass.pdf [Accessed 2 พฤษภาคม 2561].

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาว อนุธิดา ทองอร่าม
วัน เดือน ปี เกิด	16 พฤศจิกายน 2536
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลโคกสำโรง จังหวัด ลพบุรี
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาตร์บัณฑิต สาขา วัสดุศาสตร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	430 หมู่ 2 ตำบล เขาท่าพระ อำเภอ เมือง จังหวัด ชัยนาท 17000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY