การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสีแก้วโซดาไลม์

นายทศพล สุเริงฤทธิ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The Study of Factors Affecting Color of Soda-Lime Glass

Mr. Thodsapol Suroengrit

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 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสีแก้วโซดาไลม์
โดย	นายทศพล สุเริงฤทธิ์
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
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พิชญ์รัตน์ อินทร์เอื้อ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ทศพล สุเริงฤทธิ์ : การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสีแก้วโซดาไลม์. (The Study of Factors Affecting Color of Soda-Lime Glass) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์

ในการผลิตแก้วโซดาไลม์ ค่าสีของผลิตภัณฑ์ถือว่าเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ต้องควบคุม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีและปัจจัยในกระบวนการผลิตแก้วโซดาไลม์ ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัย คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี a (สีเขียว-สีแดง) และค่าสี b (สีน้ำเงิน-สีเหลือง) กับปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบและเตาหลอมทั้งหมด 10 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต ปริมาณโคบอลต์ อัตราการดึงน้ำแก้ว อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สอง อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สาม อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สอง อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สาม ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน และค่าพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบขั้นตอน จากข้อมูลสายการผลิตจำนวน 770 ค่า จึงได้แบบจำลองถดถอยของค่าสี a ที่สามารถนำไปใช้งานได้ โดยมีเทอมปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าสี a ทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม (X_1), ปริมาณโคบอลต์ (X_3) และค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน (X_9) ซึ่งมีรูปแบบสมการ คือ $a = -21.07 - 5.202X_1 + 5187X_3 + 2.151X_9 + 117185X_3^2 - 601X_3X_9$ และมีความสัมพันธ์ดังนี้ เมื่อปริมาณเหล็กออกไซด์รวมเพิ่มขึ้น ค่าสี a จะลดลง ทำให้แก้วมีสีเขียวเข้มขึ้น แต่ถ้าปริมาณโคบอลต์และค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น ค่าสี a จะเพิ่มขึ้น ทำให้แก้วมีสีเขียวอ่อนลง เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษามีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์แก้วโซดาไลม์สีเขียวอมฟ้าเล็กน้อย จึงกำหนดค่าเป้าหมายให้ค่าสี a เท่ากับ -1.22 และค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดมีค่าต่ำที่สุด จากการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่สามารถทำให้เกิดค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบของตัวแปรตอบสนองทั้งสองมีค่าสูงที่สุด เป็น 0.82 ด้วยการปรับตั้งค่าปัจจัย ดังนี้ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวมเป็น ร้อยละ 0.0618 ปริมาณโซเดียมซัลเฟตเป็น 10.8 กิโลกรัม ปริมาณโคบอลต์ 0.003911 กิโลกรัม และค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนเป็น 9.60202 ทำให้ได้ค่าสี a เท่ากับ -1.22346 และค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด เท่ากับ 804 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2565 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

CHULALONGKORN UNIVERSITY

6370110321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORD: Soda-lime glass, Color, Stepwise regression, Regression model

Product color is an important property to be controlled in the production of Soda-lime glass. Thus, it is essential to understand the relationship between the color and the factors in Soda-lime glass processing. This research aims to study the relationship between Color-a (green-red) & Color-b (blue-yellow) and 10 factors relating to raw materials and the furnace. Stepwise regression analysis was employed to study this relationship. Regression model of Color-a and Color-b was analyzed using 770 data points from 3 production lines and it had 3 significant factors, which were the mixed iron oxide volume(X_1), the cobalt volume(X_3), the ratio of fuel gas to oxygen gas(X_9). The analysis revealed that the regression model of Color-a could be obtained as follows: "$a = - 21.07 - 5.202X_1 + 5187X_3 + 2.151X_9 + 117185X_3^2 - 601X_3X_9$". It was found that increasing the mixed iron oxide volume decreased Color-a value and made the glass more dark green. Moreover, increasing the cobalt volume and the ratio of fuel gas to oxygen gas increased Color-a value and made that glass more light green. Because the factory wanted Soda-lime glass products to have a slightly blue-green. Therefore, the target value of Color a was equal to -1.22 and the targeted total cost of 3 raw materials was the lowest. With the use of Response Optimization technique, the highest composite desirability could be obtained at the value of 0.82. The optimal setting for each factor was as follows: percentage of the mixed iron oxide of 0.0618, the sodium sulfate volume of 10.8 kilogram per ton of glass sand, the cobalt volume of 0.003911 kilogram per ton of glass sand, and the ratio of fuel gas to oxygen gas of 9.60202. Therefore, the value of Color a was equal to -1.22346 and the total cost of 3 raw materials was 804 baht/ton of sand.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study:	Industrial Engineering	Student's Signature .....
Academic Year:	2022	Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี เพราะผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากบุคคลหลาย ๆ ท่าน ณ โอกาสนี้ผู้วิจัยจึงขอกล่าว “คำขอบคุณ” ให้แก่บุคคลเหล่านั้น ดังนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์ (อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์) ผู้คอยอบรมสั่งสอนหลักการ แนวคิด ทฤษฎี ตลอดจนให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งคอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พินาศ (ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์) รองศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์ (กรรมการสอบวิทยานิพนธ์) และดร.พิชญ์รัตน์ อินทร์เอื้อ (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ผู้กรุณาตอบรับเข้าฟังการนำเสนอวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ และช่วยตรวจแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร.พิชญ์รัตน์ อินทร์เอื้อ (อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์) ผู้ประสานงานให้ผู้วิจัยได้เข้าไปทำการศึกษาวิจัยในโรงงานกรณีศึกษา จัดหาข้อมูล อธิบายวิธีการทำงานของโรงงานกรณีศึกษา พร้อมทั้งอบรมสั่งสอนหลักการ แนวคิด ทฤษฎี ตลอดจนให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ โรงงานกรณีศึกษาที่ได้ให้โอกาสผู้วิจัยเข้าไปทำการศึกษาวิจัย และให้ความร่วมมือในการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดี ตลอดจนบุคลากรของโรงงานกรณีศึกษาทุกท่าน ที่ได้อธิบายกระบวนการทำงานต่าง ๆ ภายในโรงงานกรณีศึกษา และจัดหาข้อมูลให้แก่ผู้วิจัยได้นำไปศึกษา

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรรมอุตสาหการทุก ๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ หลักการ แนวคิด ทฤษฎีต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการนำมาปรับใช้กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนบุคคลากรและเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรรมอุตสาหการทุก ๆ ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลืองานด้านเอกสารของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และน้องชาย ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจเป็นอย่างมาก รวมทั้งขอบคุณสำหรับกำลังใจจากผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในงานวิจัยทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงมา ณ ที่นี้ด้วย

ทศพล สุเริงฤทธิ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วโซดาไลม์ 1

1.3 กระบวนการผลิตแก้ว 2

1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีแก้วโซดาไลม์ 5

1.5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 8

1.6 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย 8

1.7 ผลที่ได้รับ 8

1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ 8

1.9 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 9

1.10 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย 10

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 11

2.1 แก้วและนิยามของแก้ว 11

2.2 แก้วโซดาไลม์ 12

2.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วโซดาไลม์ 12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.4 กระบวนการผลิตแก้ว 13
2.5 การเกิดสีในแก้ว 15
2.6 การฟอกสีแก้วด้วยวิธีทางกายภาพ 16
2.7 ปัจจัยที่เลือกศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17
2.8 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ 25
2.9 แบบจำลองการถดถอย 33
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ 34
3.1 แหล่งที่มาของข้อมูล 34
3.2 การกำหนดตัวแปรตอบสนองและปัจจัย 34
3.3 การเตรียมข้อมูล 35
3.4 การหาแบบจำลองถดถอย 35
3.5 การหาค่าที่เหมาะสม 36
บทที่ 4 ผลการดำเนินการ 37
4.1 การหาแบบจำลองถดถอย 37
4.2 การหาค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด 43
4.3.การหาค่าที่เหมาะสม 45
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 51
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย 51
5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย 52
5.3 ข้อเสนอแนะ 53
บรรณานุกรม 55
ประวัติผู้เขียน 58

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย 10

ตารางที่ 2.1 ช่วงความเข้มข้นของเหล็กออกไซด์รวมในทรายและส่วนผสมอื่น ๆ สำหรับการฟอกสีในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว 18

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของปัจจัยที่ถูกกำหนดด้วยค่าการออกแบบมิติ 29

ตารางที่ 3.1 ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของข้อมูลตัวแปรตอบสนองและปัจจัยทั้งหมด 770 ค่า 34

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยที่ต้องการศึกษาของแต่ละตัวแปรสนอง 35

ตารางที่ 4.1 ตัวชี้วัดของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b ครั้งที่ 14 16 และ 26 38

ตารางที่ 4.2 ราคาทรายแก้วตามช่วงค่าปริมาณเหล็กออกไซด์รวม 43

ตารางที่ 4.3 ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเฉลี่ยของข้อมูลตัวแปรสนองจากแบบจำลองถดถอยขอ ค่าสี a ครั้งที่ 16 46

ตารางที่ 4.4 ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าที่เหมาะสมของปัจจัยของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย 48

ตารางที่ 4.5 ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าที่ได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ตัวแปรตอบสนอง 48

ตารางที่ 4.6 ประเภทของค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด 49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 กระบวนการผลิตแก้ว (ณัฐพล เลาห์รอดพันธุ์, 2558)..... 3

รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดสีในแก้ว..... 15

รูปที่ 2.2 วงล้อสี..... 16

รูปที่ 2.3 แผนภูมิคู่สีสมบูรณ์ของกระกวนการฟอกสีด้วยวิธีทางกายภาพ..... 16

รูปที่ 2.4 ปริภูมิสี..... 17

รูปที่ 2.5 กราฟแสดงปริมาณของซีลีเนียมและซีลีไนด์ที่พบในน้ำแก้วต่อปริมาณซัลเฟอร์ โดยใช้ความเข้มข้นของซัลเฟอร์ที่แตกต่างกัน..... 20

รูปที่ 2.6 ความเข้มข้นการดูดซับสีของซีลีเนียมและเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ที่ปริมาณเหล็กแตกต่างกัน . 21

รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของปริมาณซัลเฟอร์ที่สูญหายไปและปริมาณซีลีเนียมที่สูญหายไป 22

รูปที่ 2.8 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยา (A) และการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีอันตรกิริยา (B)..... 27

รูปที่ 4.1 กราฟส่วนตกค้างของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16..... 40

รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 40

รูปที่ 4.3 กราฟผลกระทบหลักปริมาณเหล็กออกไซด์รวม..... 41

รูปที่ 4.4 กราฟพื้นผิวผลตอบของเทอมปริมาณโคบอลต์กับค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน 42

รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันการหาค่าที่เหมาะสม 47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

แก้วโซดาไลม์ (Soda lime glass) จัดว่าเป็นแก้วชนิดที่ถูกนำไปใช้งานมากที่สุด เนื่องจากมีลักษณะเป็นแก้วใส มีความทนทานอยู่ในระดับกลาง ต้นทุนการผลิตไม่สูงมาก และสามารถทำให้มีสีสันต่าง ๆ ได้ด้วยการเติมสารโลหะออกไซด์ที่ให้สีลงไป จึงนิยมนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้แก่ กลุ่มขวดแก้ว เครื่องแก้ว หลอดไฟ กลุ่มบล็อกแก้วก่อสร้าง และกลุ่มกระจกแปรรูป เป็นต้น ทำให้ในการผลิตแก้วโซดาไลม์ ค่าสีของผลิตภัณฑ์ถือว่าเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ต้องควบคุม จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีและปัจจัยในกระบวนการผลิตแก้วโซดาไลม์ เพื่อที่จะสามารถพยากรณ์ค่าสีได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยได้อย่างถูกต้องก่อนกระบวนการผลิตจะเริ่มต้นขึ้น ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยคือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีกับปัจจัยในกระบวนการผลิตแก้วโซดาไลม์ ผ่านวิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) เพื่อหาแบบจำลองถดถอยของค่าสี โดยใช้ข้อมูลค่าสีและข้อมูลปัจจัยเฉพาะในส่วนของวัตถุดิบและเตาหลอมของสายการผลิตแก้วโซดาไลม์ในโรงงานกรณีศึกษา พร้อมทั้งหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าสีเป็นไปตามความต้องการของโรงงานกรณีศึกษา โดยที่ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบมีค่าต่ำที่สุด

1.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วโซดาไลม์

1.2.1 วัตถุดิบหลัก (Main ingredient)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ทรายแก้ว (Silica sand: SiO_2) คือ ทรายชนิดหนึ่งที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบมากกว่า 99.5% ขนาดที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก้ว 0.1 - 0.6 มิลลิเมตร เมื่อหลอมเหลวแล้วจะกลายสภาพเป็นโครงสร้างหลักของเนื้อแก้ว (Glass former materials) และทรายแก้วที่ถูกนำมาใช้งานแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ทรายแก้วขาว จะมีปริมาณเหล็กออกไซด์รวม (Mixed iron oxide: FeO & Fe_2O_3) น้อย เหมาะสำหรับนำไปใช้ผลิตแก้วใส โดยมีปริมาณเหล็กออกไซด์รวมได้ไม่เกินร้อยละ 0.02 - 0.04 โดยน้ำหนัก และทรายดำหรือสีชา จะมีปริมาณเหล็กออกไซด์รวมสูงกว่าทรายขาว จึงถูกนำไปใช้ผลิตแก้ว สีต่าง ๆ

โซดาแอช (Soda ash) หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate: Na_2CO_3) เป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมเหลว ส่งผลให้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แก้วได้ง่ายขึ้น โดยขนาดที่เหมาะสมสำหรับนำมาผลิตแก้วอยู่ในช่วง 0.1 - 1 มิลลิเมตร

หินปูน (Limestone) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate: $CaCO_3$) เป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อสารเคมีของเนื้อแก้ว โดยขนาดที่เหมาะสมสำหรับนำมาผลิตแก้วอยู่ในช่วง 0.1 - 0.6 มิลลิเมตร

โดโลไมท์ (Dolomite: $CaMg(CO_3)_2$) เป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมเหลว เกิดขึ้นจากการผสมกันระหว่างหินปูนกับแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Magnesium carbonate: $MgCO_3$) โดยขนาดที่เหมาะสมสำหรับนำมาผลิตแก้วอยู่ในช่วง 0.1 - 3 มิลลิเมตร และต้องมีการควบคุมปริมาณเหล็กออกไซด์ที่ปะปนมาด้วย

เศษแก้ว (Cullet) เป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติช่วยเร่งปฏิกิริยาในการหลอมละลายของวัตถุดิบตัวอื่น ๆ จนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สามารถประหยัดพลังงานความร้อนในการหลอมแก้ว โดยส่วนใหญ่เศษแก้วจะถูกใช้ในปริมาณร้อยละ 40 - 70 โดยน้ำหนัก

1.2.2 วัตถุดิบรอง (Minor ingredient)

วัตถุดิบรองเป็นวัตถุดิบประเภทสารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของแก้วให้เหมาะสมต่อการขึ้นรูปและการนำไปใช้งานเช่น สารที่ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมแก้ว (Fluxing agent) สารฟอกสี (Decolorizing agent) และสารกำจัดฟองก๊าซ (Oxidizing agent) เป็นต้น สำหรับในการผลิตแก้วโซดาไลม์จะมีการใช้วัตถุดิบรอง ดังนี้

- โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate: Na_2SO_4) เป็นสารกำจัดฟองก๊าซ ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมเหลวของแก้ว และปรับปรุงจลนศาสตร์การหลอม (Melting kinetics)

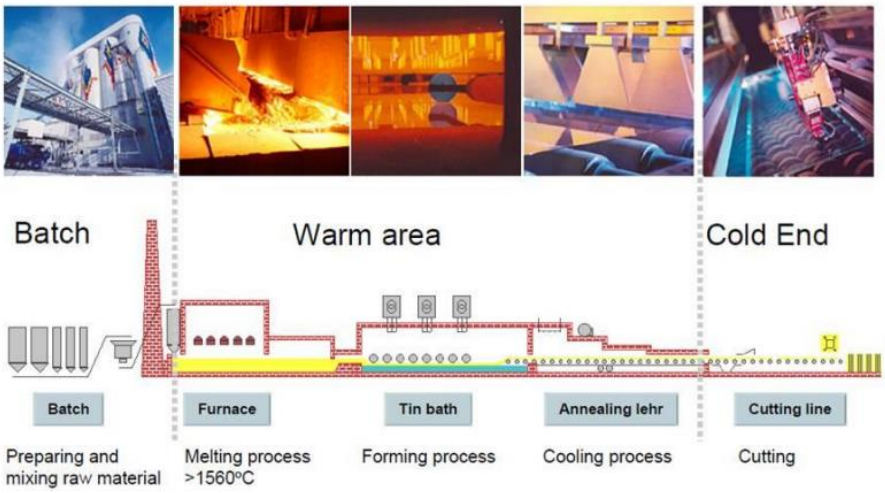
- ซีลีเนียม (Selenium: Se**)** เป็นสารให้สีชมพู

- โคบอลต์ (Cobalt: Co) เป็นสารให้สีฟ้า

1.3 กระบวนการผลิตแก้ว

กระบวนการผลิตแก้ว (Glass production process) เชิงอุตสาหกรรมถือว่าเป็นกระบวนการผลิตที่ค่อนข้างซับซ้อน และแตกต่างกันตามชนิด รูปแบบ ลักษณะการนำไปใช้งาน ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งในภาพรวมของกระบวนการผลิตแก้วเชิงอุตสาหกรรมนั้น จะประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมและการผสมวัตถุดิบ (Preparing and Mixing of raw material) ขั้นตอนการหลอมแก้ว (Melting process) ขั้นตอนการขึ้นรูป (Forming process) ขั้นตอนการอบอ่อน (Annealing process) และขั้นตอนการตรวจสอบและตกแต่ง (Inspection and finishing process) ดังรูปที่ 1.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 1.1 กระบวนการผลิตแก้ว (ณัฐพล เลาห์รอดพันธุ์, 2558)

1.3.1 ขั้นตอนการเตรียมและการผสมวัตถุดิบ (Preparing and Mixing of raw material)

ในกระบวนการผลิตแก้วจำเป็นต้องมีการควบคุมสัดส่วนและองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบให้ได้ตามสูตรการผลิตที่ได้คำนวณไว้ ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในขั้นตอนนี้ หากวัตถุดิบที่นำเข้าสู่กระบวนการผลิตมีองค์ประกอบไม่คงที่หรืออาจมีสิ่งเจือปนเปื้อนปะปนมาจะส่งผลต่อการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์แก้ว และในขั้นตอนนี้ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบก็เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่ง เนื่องจากวัตถุดิบที่มีขนาดอนุภาคเล็ก จะส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาทั้งทางเคมีและทางกายภาพในระหว่างขั้นตอนการหลอมแก้วเกิดได้ดีขึ้นหรือรวดเร็วขึ้น ดังนั้นผู้รับวัตถุดิบและผู้จัดจำหน่ายวัตถุดิบจึงควรให้ความสำคัญต่อการควบคุมปัจจัยทั้งสามนี้ ได้แก่ ความคงที่ความบริสุทธิ์ และขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดในระหว่างกระบวนการผลิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.3.2 ขั้นตอนการหลอมแก้ว (Melting process)

การหลอมแก้วจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง มีดังนี้

ช่วงที่ 1 การหลอมแก้ว (Melting) การหลอมแก้วมีจุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปลักษณะผลึกของแข็งให้กลายเป็นของเหลว ผ่านความร้อนและปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างวัตถุดิบ จนได้ของเหลวที่มีเนื้อแก้วสม่ำเสมอ นั่นคือ น้ำแก้ว (Glass melt) โดยอุณหภูมิที่ใช้หลอมแก้วจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทและองค์ประกอบของแก้ว เช่น แก้วซิลิกาหลอมเหลว 1,700 – 1,800 องศาเซลเซียส แก้วโซดาไลม์หลอมเหลว 1,500 องศาเซลเซียส แก้วเลดซิลิเกต (Lead silicate glass) หลอมเหลว 1,450 องศาเซลเซียส แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminium silicate glass) หลอมเหลว 1,600 องศาเซลเซียส เป็นต้น

ช่วงที่ 2 การกำจัดฟองก๊าซ (Finning) เมื่อวัตถุดิบได้รับความร้อนในระหว่างการหลอม จนเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกัน ทำให้เกิดการระเหยหรือการสลายตัวทางความร้อนออกมาในรูปของฟองก๊าซต่าง ๆ เช่น ก๊าซออกซิเจน (Oxygen: O_2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide: CO_2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide: SO_2) ไอน้ำ (Vapor: H_2O) เป็นต้น ส่งผลต่อคุณลักษณะของแก้วที่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางเคมีโดยการเติมสารกำจัดฟองก๊าซ (Finning agents) ลงไป เช่น โซเดียมซัลเฟต อาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide: As_2O_3) แอนติโมนีไตรออกไซด์ (Antimony trioxide: Sb_2O_3) เป็นต้น

ช่วงที่ 3 กวนส่วนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว (Homogenization) ทำให้แก้วมีคุณสมบัติทางกายและเคมีสม่ำเสมอทั่วทั้งผลิตภัณฑ์ เช่น การพ่นก๊าซจากก้นเตาหลอม การออกแบบเตาหลอมในเกิดการไหลวนของน้ำแก้ว เป็นต้น

1.3.3 ขั้นตอนการขึ้นรูป (Forming process)

การขึ้นรูปจะขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของผลิตภัณฑ์แก้ว ที่มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำแก้ว เช่น ความหนืด (Viscosity) ความยืดหยุ่น (Elasticity) ระยะเวลาที่ใช้ในการปลดปล่อยความเครียด (Relaxation time) เป็นต้น ที่นำไปสู่การเลือกวิธีการขึ้นรูปในหลายวิธี เช่น การเป่า (Blowing) การรีด (Rolling) การดึง (Drawing) การกดอัด (Pressing) เป็นต้น สามารถยกตัวอย่างความสำคัญในขั้นตอนการขึ้นรูปได้ดังนี้ เมื่อเนื้อแก้วจะได้รับแรงจากภายนอก เช่น แรงเป่า แรงกด เป็นต้น จนกระบวนการเสร็จสมบูรณ์ หากแก้วไม่สามารถปลอดปล่อยความเครียด (Strain) ได้ทัน แก้วจะมีความเครียดคงค้าง (Residual strain) สูง ทำให้แก้วแตกในระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูปได้ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการลดความเครียดของแก้วก็คือความหนืดของแก้ว ดังนั้นในขั้นตอนนี้ผู้ผลิตจึงต้องมีทักษะและความเข้าใจคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำแก้ว ให้สามารถเลือกใช้วิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสมตามชนิด และลักษณะของผลิตภัณฑ์แก้วเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดในระหว่างกระบวนการผลิต

1.3.4 ขั้นตอนการอบอ่อน (Annealing process)

เมื่อแก้วเย็นตัวลงในระหว่างการขึ้นรูป ผิวภายนอกจะเย็นตัวเร็วกว่าผิวภายใน ส่งผลให้ผิวแก้วด้านนอกหดตัวเร็วกว่าด้านในจนแข็งตัว (Rigid) ส่วนผิวแก้วด้านในจะยังคงอยู่ในสถานะของเหลวหนืด (Viscous liquid) เพราะสูญเสียความร้อนน้อยกว่าและมีความเค้น (Stress) นำไปสู่การเกิดความเครียดที่คงค้างในแก้ว ซึ่งสามารถกำจัดหรือทำให้ลดลงเหลือไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ได้ด้วยการอบอ่อน ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะเป็นการลดความเครียดที่คงค้างในแก้วจากขั้นตอนการขึ้นรูป เพื่อให้โครงสร้างแก้วมีความเสถียร และได้ผลิตภัณฑ์แก้วมีคุณสมบัติต่าง ๆ คงที่ ณ อุณหภูมิห้อง

1.3.5 ขั้นตอนการตรวจสอบและตกแต่ง (Inspection and finishing process)

ผลิตภัณฑ์แก้วที่ผ่านการอบอ่อนแล้ว จะต้องได้รับการตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ ให้ตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งานของผู้ซื้อ การตรวจสอบคุณภาพจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ คุณภาพทางกายภาพ เช่น ขนาด รอยตำหนิ เป็นต้น และคุณภาพทางคุณสมบัติ เช่น ความสามารถในการรับแรงอัดแรงกระแทก การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแก้วบางประเภทที่ต้องผ่านการตกแต่งขั้นสุดท้ายก่อน เช่น การขัดมัน การทำความสะอาด การตัด เป็นต้น ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบและคัดเลือกผลิตภัณฑ์แก้วที่ไม่ได้คุณภาพออกไป ก่อนนำส่งไปใส่ในบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสีแก้วโซดาไลม์

เมื่อศึกษากระบวนการผลิตแก้วโซดาไลม์ ผู้วิจัยพบว่าปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อค่าสีมาจาก 3 แหล่ง คือ วัตถุดิบ เตาหลอม และกระบวนการทำงาน โดยปัจจัยทั้งหมดเป็นดังนี้

1.4.1 ปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบ

1) ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม

เหล็กออกไซด์เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะที่มีอยู่ในทรายแก้วมี 2 สถานะ ได้แก่ ไอออนเหล็กเฟอรัส (Ferrous ions: Fe^{2+}) จะให้สีน้ำเงินอมเขียว และไอออนเหล็กเฟอริก (Ferric ions: Fe^{3+}) จะให้สีเหลือง

2) ปริมาณโซเดียมซัลเฟต

โซเดียมซัลเฟตเป็นสารกำจัดฟองก๊าซ เมื่ออุณหภูมิเตาหลอมเพิ่มขึ้น โซเดียมซัลเฟตจะเกิดการแตกตัวออกเป็นสารอนุพันธ์ประเภทต่าง ๆ เช่น ไอออนซัลเฟอร์ (Sulfur ions: S^{2-}) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide: SO_2) และก๊าซออกซิเจน โดยไอออนซัลเฟอร์สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนเหล็กเฟอริก เกิดเป็นโครโมฟอร์ (Chromophore) ที่ให้สีเหลือง ส่วนก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยากับโซเดียมซีลีไนต์ (Sodium selenite: Na_2SeO_3) เกิดเป็นก๊าซซีลีเนียมไดออกไซด์ (Selenium dioxide: SeO_2) ระเหยออกไป ส่งผลให้เกิดการสูญเสียซีลีเนียมที่เป็นสารให้สีแก้ว

3) ปริมาณซีลีเนียม

ซีลีเนียมเป็นสารให้สีที่มี 5 สถานะ แต่มีเพียง 2 สถานะเท่านั้นที่ทำให้เกิดสีขึ้น คือ ซีลีเนียม (Se^0) และซีลีไนด์ (Se^{2-}) โดยซีลีเนียมจะให้สีชมพูใช้กลบสีเขียวจากเหล็กออกไซด์รวม ส่งผลให้แก้วมีความใสมากขึ้น แต่ซีลีเนียมที่อยู่ในสถานะนี้จะมีข้อจำกัดในการใช้งาน เพราะมีการระเหยตัวสูงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป ทำให้ปริมาณซีลีเนียมที่เหลืออยู่มีเพียงร้อยละ 10 - 20 ของปริมาณทั้งหมด และซีลีไนด์สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนเหล็กเฟอรัส เกิดเป็นเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ (Iron selenide: FeSe) ที่ให้สีเหลืองน้ำตาล

จากข้อมูลสายการผลิตพบว่าไม่มีการปรับปริมาณซีลีเนียมในทุกรุ่นผลิต (Batch) ดังนั้นผู้วิจัยจะไม่นำปัจจัยปริมาณซีลีเนียมไปหาความสัมพันธ์กับค่าสี

4) ปริมาณโคบอลต์

โคบอลต์เป็นสารให้สีฟ้า ใช้กลบสีเหลืองน้ำตาลจากเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ ทำให้แก้วมีความใสมากขึ้น

5) เศษแก้ว

เศษแก้วเติมลงไปเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาในการหลอมแก้ว ซึ่งในเศษแก้วจะมีพวกสารโลหะออกไซด์ (Metal oxide) ที่ให้สีแก่แก้ว เช่น เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ให้สีเขียว แมงกานีสออกไซด์ (MnO) ให้สีม่วง เป็นต้น

6) ความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบ

ในวัตถุดิบที่มีสิ่งเจือปนต่าง ๆ เช่น ใบไม้ แร่ดิน เป็นต้น เมื่อนำวัตถุดิบมาผลิตแก้วอาจจะทำให้แก้วมีสีเพี้ยน และเกิดข้อบกพร่อง (Defects) ต่าง ๆ ได้ เช่น รอย ตำหนิ ก้อนแข็ง เป็นต้น เพื่อให้วัตถุดิบมีความบริสุทธิ์มากที่สุดนั้นจำเป็นล้างและกรองวัตถุดิบก่อนนำไปผลิตแก้ว

7) ความชื้น

ถ้าวัตถุดิบมีไอน้ำเกาะอยู่บนผิว เมื่อบรรยากาศในเตาหลอมอยู่สภาวะรีดักชัน ไอน้ำจะแตกตัวให้ไอออนออกซิเจน (Oxygen ions: O^-) เข้าทำปฏิกิริยากับไอออนเหล็กเฟอริก เกิดเป็นไอออนเหล็กเฟอรัส ทำให้แก้วมีสีน้ำเงินอมเขียว

8) ปริมาณสารโลหะออกไซด์

ปริมาณสารโลหะออกไซด์ ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ในวัตถุดิบมีค่าไม่คงที่ เมื่อสัดส่วนของวัตถุดิบบางชนิดเปลี่ยนแปลงไป อาจจะทำให้แก้วมีสีเพี้ยน

1.4.2 ปัจจัยที่มาจากเตาหลอมแก้ว

1) อุณหภูมิหลอมเหลว

อุณหภูมิหลอมเหลวเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะของเหล็กออกไซด์รวม เมื่ออุณหภูมิหลอมเหลวเพิ่มขึ้น จะทำให้ไอออนเหล็กเฟอริกเปลี่ยนไปเป็นไอออนเหล็กเฟอรัสมากขึ้น ส่งผลให้แก้วมีสีน้ำเงินอมเขียว ซึ่งในส่วนของเตาหลอม สามารถปรับค่าอุณหภูมิได้ 4 จุด ดังนี้ อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สอง อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สาม อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สอง และอุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สาม

2) ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน (Gas/Air ratio)

ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนของโรงงานกรณีศึกษา คำนวณจากค่าปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงหารด้วยค่าปริมาณก๊าซออกซิเจน ซึ่งค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน

จะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะของเหล็กออกไซด์รวม โดยเมื่อค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนมีค่าลดลง เพราะก๊าซออกซิเจน มีปริมาณมากขึ้น จะเกิดสภาวะออกซิเดชัน (Oxidation state) ทำให้ไอออนเหล็กเฟอรัสเปลี่ยนไปเป็นไอออนเหล็กเฟอริกมากขึ้น แก้วจะมีสีเหลือง แต่ถ้าค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะก๊าซเชื้อเพลิงมีปริมาณมากขึ้น จะเกิดสภาวะรีดักชัน (Reduction state) ไอออนเหล็กเฟอริกจะเปลี่ยนไปเป็นไอออนเหล็กเฟอรัสแทน แก้วจะมีสีน้ำเงินอมเขียว

3) ค่าพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง

ค่าพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะของเหล็กออกไซด์รวม โดยเมื่อค่าความจุความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงไม่คงที่ ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเตาหลอมไม่คงที่ตามไปด้วย

4) ระยะเวลาในการหลอม

ระยะเวลาในการหลอมของวัตถุดิบให้ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน หรือระยะเวลาที่น้ำแก้วเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) ในแต่ละรุ่นผลิตอาจจะแตกต่างกัน เนื่องจากน้ำหนักรวมของวัตถุดิบในแต่ละรุ่นผลิตไม่เท่ากัน หรืออาจจะมีการปะปนของวัตถุดิบต่างรุ่นผลิตกันเกิดขึ้น เพราะเตาหลอมใช้ระบบกระแสหมุนเวียน จึงทำให้แก้วมีสีเพี้ยน

1.4.3. ปัจจัยที่มาจากกระบวนการทำงาน

1) การชั่ง ตวง และวัดวัตถุดิบ

ในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบนั้นจะมีสารบางชนิดที่ใช้ในปริมาณน้อยมาก ๆ โดยเฉพาะสารให้สีแก้ว ถ้าพนักงานเกิดความผิดพลาดในการชั่ง ตวง และวัดปริมาณสารเหล่านั้น อาจจะมีผลต่อค่าสีแก้วได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) การตัดตัวอย่างชิ้นงานแก้ว

ตัวอย่างชิ้นงานแก้วที่ได้จากการตัดของพนักงานมีขนาดไม่เท่ากัน เมื่อนำเอาชิ้นงานไปวางที่ตำแหน่งวัดค่าสีของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ทำให้ลำแสงที่ยิงไม่ตรงจุดตรงกลางของชิ้นงาน อาจจะเป็นผลให้ค่าสีที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อน

เมื่อพิจารณาปัจจัยทั้งหมดในข้างต้นแล้ว งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาผลของปัจจัยที่ต่อค่าสี ในส่วนของปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบและเตาหลอมทั้งหมด 10 ปัจจัย แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบ ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์ ส่วนที่ 2 ปัจจัยที่มาจากเตาหลอม ได้แก่ อัตราการดึงน้ำแก้ว อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สอง อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สาม อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สอง อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สาม ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน และค่าพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง

สำหรับค่าสีที่เป็นตัวแปรตอบสนองจะแบ่งออกเป็น 2 ค่า ได้แก่ ค่าสี a และค่าสี b ซึ่งอยู่ในรูปของคู่อันดับ (a,b) บนกราฟ 2 แกน โดยแกนนอน แทน “ค่าสี a” เมื่อค่าลบเป็นทิศทางสีเขียว ส่วนค่าบวกเป็นทิศทางสีแดง และแกนตั้ง แทน “ค่าสี b” เมื่อค่าลบเป็นทิศทางสีน้ำเงิน ส่วนค่าบวกเป็นทิศทางสีเหลือง ซึ่ง ณ จุดกำเนิด (0,0) ไม่มีสีหรือแก้วจะใส

1.5 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี a (สีเขียว-สีแดง) และค่าสี b (สีน้ำเงิน-สีเหลือง) กับปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบและเตาหลอมทั้งหมด 10 ปัจจัย ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบ ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์ ส่วนที่ 2 ปัจจัยที่มาจากเตาหลอม ได้แก่ อัตราการดึงน้ำแก้ว อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สอง อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สาม อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สอง อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สาม ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน และค่าพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง

2. หาค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ซึ่งคำนวณได้จากปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์

3. หาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าสี a และค่าสี b เป็นไปตามความต้องการของโรงงานกรณีศึกษา โดยที่ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดมีค่าต่ำที่สุด

1.6 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการผลิตแก้วโซดาไลม์

2. ศึกษาผลของปัจจัยปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปัจจัยปริมาณโซเดียมซัลเฟต ปัจจัยปริมาณโคบอลต์ ปัจจัยอัตราการดึงน้ำแก้ว ปัจจัยอุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สอง ปัจจัยอุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สาม ปัจจัยอุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สอง ปัจจัยอุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สาม ปัจจัยค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน และปัจจัยค่าพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่มีต่อผลของค่าสี a และค่าสี b

1.7 ผลที่ได้รับ

1. แบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b

2. ค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าสี a และค่าสี b เป็นไปตามความต้องการของโรงงานกรณีศึกษา โดยที่ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดมีค่าต่ำที่สุด

1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้เกิดองค์ความรู้เกี่ยวกับความสัมพันธ์ของปัจจัยปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปัจจัยปริมาณโซเดียมซัลเฟต ปัจจัยปริมาณโคบอลต์ ปัจจัยอัตราการดึงน้ำแก้ว ปัจจัยอุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สอง ปัจจัยอุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สาม ปัจจัยอุณหภูมิใต้เตาหลอม

จุดที่สอง ปัจจัยอุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สาม ปัจจัยค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน และปัจจัยค่าพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง ที่มีผลต่อค่าสี a และค่าสี b

2. แบบจำลองถดถอยแสดงความสัมพันธ์ของค่าสี a และค่าสี b กับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถนำไปใช้หาค่าปัจจัยที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ที่ทำให้ได้ค่าสี a และค่าสี b เป็นไปตามความต้องการของโรงงานกรณีศึกษา โดยที่ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดมีค่าต่ำที่สุด

1.9 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการผลิตและสภาพปัญหา

ก) ศึกษากระบวนการผลิตและการวัดค่าสีในอุตสาหกรรมแก้วโซดาไลม์ พร้อมทั้งพิจารณารวบรวมข้อมูลจากกระบวนการผลิต วัตถุดิบ และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เพื่อกำหนดปัจจัยที่อาจส่งผลต่อค่าสี

ข) กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์ เป้าหมาย ขอบเขต ตัวชี้วัด และระยะเวลาในการทำงานวิจัย

2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต วัตถุดิบ และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตแก้วโซดาไลม์ การวัดค่าสี และการวิเคราะห์การถดถอย

ข) ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสี

3. กำหนดปัจจัยและตัวแปรตอบสนองที่ต้องการศึกษา

กำหนดตัวแปรตอบสนอง 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่าสี a ค่าสี b และค่าต้นทุนวัตถุดิบรวม จากนั้นพิจารณาปัจจัยทั้งหมด 10 ปัจจัย แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบ ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์ ส่วนที่ 2 ปัจจัยที่มาจากเตาหลอม ได้แก่ อัตราการดึงน้ำแก้ว อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่ 2 อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่ 3 อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่ 2 อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่ 3 สัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน และพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง

4. การเตรียมข้อมูล

ผู้วิจัยนาข้อมูลทั้งหมด 770 ค่า มาแบ่งออกเป็นชุดข้อมูล จานวน 2 ชุด ด้วยวิธีการสุ่ม (Randomization) ได้แก่ ชุดข้อมูลเรียนรู้ (Training set) ร้อยละ 70 มีจานวนข้อมูล 539 ค่า เพื่อนำไปหาแบบจาลองถดถอย และชุดข้อมูลทดสอบ (Test set) ร้อยละ 30 มีจานวนข้อมูล 231 ค่า เพื่อใช้ทดสอบความแม่นของแบบจาลองถดถอยที่ได้จากชุดข้อมูลเรียนรู้

5. การหาแบบจำลองถดถอย

ก) นำค่าสี a ค่าสี b และค่าปัจจัยของชุดข้อมูลเรียนรู้มาวิเคราะห์การถดถอยด้วยโปรแกรม Minitab 21

ข.) นำค่าปัจจัยของข้อมูลชุดทดสอบมาแทนค่าลงไปในแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b จะได้ค่าพยากรณ์ของค่าสี a และค่าสี b เพื่อนำมาทดสอบความแม่นกับค่าจริงของค่าสี a และค่าสี b จากข้อมูลชุดทดสอบด้วยการคำนวณค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error: MAPE)

ค) พิจารณาเลือกแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b ที่จะนำไปใช้งาน จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adjusted R square: R^2_{adj}) จำนวนข้อมูลที่เหลือหลังจากลบข้อมูลผิดปกติประเภท R ออกแล้ว (n) และค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์

6. วิเคราะห์ผลการทดลอง

ก) อธิบายกราฟพื้นผิวผลตอบ (Surface Plot) เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง ผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าสี a และค่าสี b ในแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b

ข) นำค่าปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบ ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์ของข้อมูลจากแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b กับราคาวัตถุดิบแต่ละชนิด มาหาค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด

ค) ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization technique) เพื่อหาค่าปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าสี a ค่าสี b และค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด มีค่าเป็นไปตามค่าเป้าหมาย

7. สรุปผลการทดลองและให้ข้อเสนอแนะงานวิจัย

8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.10 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอน	ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย พ.ศ. 2566 (เดือน)						
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
1. ศึกษากระบวนการผลิตและสภาพปัญหา	■	■					
2. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง		■	■				
3. กำหนดปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองที่ต้องการศึกษา		■	■				
4. การเตรียมข้อมูล			■	■			
5. การหาแบบจำลองถดถอย					■	■	
6. วิเคราะห์ผลการทดลอง					■	■	
7. สรุปผลการทดลองและให้ข้อเสนอแนะงานวิจัย					■	■	■
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์				■	■	■	■

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แก้วจัดว่าเป็นวัสดุเซรามิกประเภทหนึ่งที่ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมหรือทางการแพทย์ เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ความแข็งแกร่งและทนต่อแรงดัน ความโปร่งใส ความทนทานต่อสารเคมีกรดเบส และความมันวาว จึงทำให้แก้วถูกนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ เช่น กลุ่มขวดแก้ว กลุ่มบล็อกแก้วก่อสร้าง เครื่องแก้ว หลอดไฟ และกลุ่มกระจกแปรรูป โดยชนิดแก้วที่นิยมนำไปใช้งานมากที่สุด คือ แก้วโซดาไลม์ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักได้แก่ ทราย, โซดาแอช และหินปูน พบว่ามีสัดส่วนการนำไปใช้งาน ร้อยละ 65 ของแก้วทั้งหมด เนื่องจากมีราคาถูก และสามารถนำเศษแก้วมาใช้หลอมขึ้นรูปใหม่ เพื่อลดต้นทุนการผลิต สำหรับอุตสาหกรรมแก้ว ค่าสีถือว่าเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ทำให้ในกระบวนการผลิตแก้วนั้นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตที่อาจจะมีผลกระทบต่อค่าสี เช่น วัตถุดิบ, วิธีการผลิต, การทำงานของเครื่องจักร และสภาพแวดล้อม เป็นต้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องเรียนรู้ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจจะมีผลต่อค่าสี ด้วยการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้งานวิจัยที่มีความถูกต้องและสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ได้ตามที่กำหนดไว้

2.1 แก้วและนิยามของแก้ว

แก้ว (Glass) เป็นวัสดุที่ได้จากการหลอมสารอนินทรีย์ ได้แก่ ซิลิกา (Silica) และสารโลหะออกไซด์ (Metal oxide) ให้เป็นน้ำแก้ว (Molten glass) แล้วถูกนำไปขึ้นรูปด้วยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Supercooled) จนโครงสร้างของแก้วไม่มีเวลาพอที่จะสามารถเรียงตัวให้เป็นระเบียบหรือตกผลึก (Crystallization) ทำให้แก้วเป็นวัสดุไม่มีผลึก (Non-crystalline materials) และพบว่าคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแก้วจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณสารประกอบต่าง ๆ ในเนื้อแก้วนั้น ซึ่งคุณสมบัติของแก้วในเบื้องต้นมีดังต่อไปนี้

1. แก้วมีโครงสร้างทางเคมีไม่แน่นอน แต่มีสารประกอบหลักที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกัน ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide: SiO_2) และโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate: Na_2CO_3)
2. มีความแข็งแต่เปราะ สามารถทำให้แตกได้ง่าย
3. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดีที่อุณหภูมิห้อง แต่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น
4. มีความโปร่งใส (Transparency)
5. สามารถทำให้หลอมเหลวได้ด้วยความร้อน

6. มีจุดหลอมเหลว (Melting point) ไม่แน่นอน

7. เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีสามารถเปลี่ยนแปลงได้

2.2 แก้วโซดาไลม์

แก้วโซดาไลม์ (Soda-lime glass) ที่ผลิตมาจากวัตุดิบหลัก ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide: SiO_2) หรือซิลิกา ร้อยละ 70 - 74 โดยน้ำหนัก โซเดียมออกไซด์ หรือโซดา (Sodium oxide: Na_2O) ร้อยละ 13 - 16 โดยน้ำหนัก และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate: $CaCO_3$) หรือหินปูน หรือไลม์ (Lime) ร้อยละ 6 - 10 โดยน้ำหนัก การเติมโซดาลงไปในซิลิกาจะช่วยทำให้จุดอ่อนตัวของซิลิกาลดลงเหลือประมาณ 800 - 900 องศาเซลเซียส ข้อเสียของแก้วชนิดนี้จะไม่ทนทานต่อสารเคมี จึงต้องเติมไลม์ที่จะช่วยให้แก้วมีความทนทานต่อสารเคมีได้ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้แก้วมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทนทานต่อการขีดขูด และแก้วชนิดนี้สามารถทำให้เกิดสีต่าง ๆ ได้ด้วยการเติมสารโลหะออกไซด์ที่มีสีลงไป แก้วโซดาไลม์สามารถพบเห็นได้ทั่วไป เช่น แผ่นกระจก ขวด ถ้วยแก้ว และหลอดไฟ เป็นต้น (ประสิทธิ์ ปุระชาติ, 2549)

2.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วโซดาไลม์

2.3.1 วัตถุดิบหลัก (Main ingredient)

ทรายแก้ว (Silica sand: SiO_2) คือ ทรายชนิดหนึ่งที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบมากกว่า ร้อยละ 99.5 ขนาดที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก้ว 0.1 - 0.6 มิลลิเมตร เมื่อหลอมเหลวแล้วจะกลายสภาพเป็นโครงสร้างหลักของเนื้อแก้ว (Glass former materials) และทรายแก้วที่ถูกนำมาใช้งานแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ทรายแก้วขาว จะมีปริมาณเหล็กออกไซด์รวมน้อย เหมาะสำหรับนำไปใช้ผลิตแก้วใส โดยมีปริมาณเหล็กออกไซด์รวมได้ไม่เกินร้อยละ 0.02 - 0.04 โดยน้ำหนัก และทรายดำหรือสีชา จะมีปริมาณเหล็กออกไซด์รวมสูงกว่าทรายขาว จึงถูกนำไปใช้ผลิตแก้วสีต่าง ๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โซดาแอช (Soda ash) หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate: Na_2CO_3) เป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมเหลว ส่งผลให้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แก้วได้ง่ายขึ้น โดยขนาดที่เหมาะสม สำหรับนำมาผลิตแก้วอยู่ในช่วง 0.1 - 1 มิลลิเมตร

หินปูน (Limestone) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate: $CaCO_3$) เป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อสารเคมีของเนื้อแก้ว โดยขนาดที่เหมาะสมสำหรับนำมาผลิตแก้วอยู่ในช่วง 0.1 - 0.6 มิลลิเมตร

โดโลไมท์ (Dolomite: $CaMg(CO_3)_2$) เป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมเหลว เกิดขึ้นจากการผสมกันระหว่างหินปูนกับแมกนีเซียมคาร์บอนเนต (Magnesium carbonate: $MgCO_3$) โดยขนาดที่เหมาะสมสำหรับนำมาผลิตแก้วอยู่ในช่วง 0.1 - 3 มิลลิเมตร และต้องมีการควบคุมปริมาณเหล็กเหล็กออกไซด์ที่ปะปนมาด้วย

เศษแก้ว (Cullet) เป็นวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติช่วยเร่งปฏิกิริยาในการหลอมละลายของวัตถุดิบตัวอื่น ๆ จนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สามารถประหยัดพลังงานความร้อนในการหลอมแก้ว โดยส่วนใหญ่เศษแก้วจะถูกใช้ในปริมาณร้อยละ 40 - 70 โดยน้ำหนัก

2.3.2 วัตถุดิบรอง (Minor ingredient)

เป็นวัตถุดิบประเภทสารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่างๆ ของแก้วให้เหมาะสมต่อการขึ้นรูปและการนำไปใช้งาน เช่น สารที่ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมแก้ว (Fluxing agent), สารฟอกสี (Decolorizing agent) และสารกำจัดฟองก๊าซ (Oxidizing agent) เป็นต้น สำหรับในการผลิตแก้วโซดาไลม์จะมีการใช้วัตถุดิบรองดังนี้

- โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate: Na_2SO_4) เป็นสารกำจัดฟองก๊าซ ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมเหลวของแก้ว และปรับปรุงจลนศาสตร์การหลอม (Melting kinetics)

- ซีลีเนียม (Selenium: Se**)** เป็นสารให้สีชมพู

- โคบอลต์ (Cobalt: Co) เป็นสารให้สีฟ้า

2.4 กระบวนการผลิตแก้ว

กระบวนการผลิตแก้ว (Glass Production Process) สามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ (ณัฐพล เลาห์รอดพันธุ์, 2558)

1. ขั้นตอนการเตรียมและการผสมวัตถุดิบ (Preparing and mixing of raw material)

ในกระบวนการผลิตแก้วจำเป็นต้องมีการควบคุมสัดส่วนและองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบให้ได้ตามสูตรการผลิตที่ได้คำนวณไว้ ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในขั้นตอนนี้ หากวัตถุดิบที่นำเข้าสู่กระบวนการผลิตมีองค์ประกอบไม่คงที่ หรืออาจมีสิ่งเจือปนเปื้อนปะปนมาจะส่งผลต่อการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์แก้ว และในขั้นตอนนี้ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบก็เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่ง เนื่องจากวัตถุดิบที่มีขนาดอนุภาคเล็ก จะส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาทั้งทางเคมีและทางกายภาพในระหว่างขั้นตอนการหลอมแก้วเกิดได้ดีขึ้นหรือรวดเร็วขึ้น ดังนั้นผู้รับวัตถุดิบ และผู้จัดจำหน่ายวัตถุดิบจึงควรให้ความสำคัญต่อการควบคุมปัจจัยทั้งสามนี้ ได้แก่ ความคงที่ ความบริสุทธิ์ และขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดในระหว่างกระบวนการผลิต

2. ขั้นตอนการหลอมแก้ว (Melting process)

การหลอมแก้วจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง มีดังนี้

ช่วงที่ 1. การหลอมแก้ว (Melting) การหลอมแก้วมีจุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปลักษณะผลึกของแข็งให้กลายเป็นของเหลว ผ่านความร้อนและปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างวัตถุดิบ จนได้ของเหลวที่มีเนื้อแก้วสม่ำเสมอ นั่นคือ น้ำแก้ว (Glass melt) โดยอุณหภูมิที่ใช้หลอมแก้วจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทและองค์ประกอบของแก้ว เช่น

แก้วซิลิกาหลอมเหลว 1,700 - 1,800 องศาเซลเซียส แก้วโซดาไลม์หลอมเหลว 1,500 องศาเซลเซียส แก้วเลดซิลิเกต (Lead silicate glass) หลอมเหลว 1,450 องศาเซลเซียส แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminium silicate glass) หลอมเหลว 1,600 องศาเซลเซียส เป็นต้น

ช่วงที่ 2 การกำจัดฟองก๊าซ (Finning) เมื่อวัตถุดิบได้รับความร้อนในระหว่างการหลอม จนเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกัน ทำให้เกิดการระเหยหรือการสลายตัวทางความร้อนออกมาในรูปของฟองก๊าซต่างๆ เช่น ก๊าซออกซิเจน (Oxygen: O_2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide: CO_2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide: SO_2) ไอน้ำ (Vapor: H_2O) เป็นต้น ส่งผลต่อคุณลักษณะของแก้วที่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางเคมีโดยการเติมสารกำจัดฟองก๊าซ (Finning agents) ลงไป เช่น โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate: Na_2SO_4) อาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide: As_2O_3) แอนติโมนีไตรออกไซด์ (Antimony trioxide: Sb_2O_3) เป็นต้น

ช่วงที่ 3 กวนส่วนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว (Homogenization) ทำให้แก้วมีคุณสมบัติทางกายและเคมีสม่ำเสมอทั่วทั้งผลิตภัณฑ์ เช่น การพ่นก๊าซจากก้นเตาหลอม การออกแบบเตาหลอมในเกิดการไหลวนของน้ำแก้ว เป็นต้น

3. ขั้นตอนการขึ้นรูป (Forming process)

การขึ้นรูปจะขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของผลิตภัณฑ์แก้ว ที่มีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำแก้ว เช่นความหนืด (Viscosity) ความยืดหยุ่น (Elasticity) ระยะเวลาที่ใช้ในการปลดปล่อยความเครียด (Relaxation time) เป็นต้น ที่นำไปสู่การเลือกวิธีการขึ้นรูปในหลายวิธี เช่น การเป่า (Blowing) การรีด (Rolling) การดึง (Drawing) การกดอัด (Pressing) เป็นต้น สามารถยกตัวอย่างความสำคัญในขั้นตอนการขึ้นรูปได้ดังนี้ เมื่อเนื้อแก้วจะได้รับแรงจากภายนอก เช่น แรงเป่า แรงกด เป็นต้น จนกระบวนการเสร็จสมบูรณ์ หากแก้วไม่สามารถปลดปล่อยความเครียด (Strain) ได้ทัน แก้วจะมีความเครียดคงค้าง (Residual strain) สูง ทำให้แก้วแตกในระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูปได้ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการลดความเครียดของแก้วก็คือความหนืดของแก้ว ดังนั้นในขั้นตอนนี้ผู้ผลิตจึงต้องมีทักษะและความเข้าใจคุณสมบัติต่าง ๆ ของน้ำแก้ว ให้สามารถเลือกใช้วิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสม ตามชนิดและลักษณะของผลิตภัณฑ์แก้วเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดในระหว่างกระบวนการผลิต

4. ขั้นตอนการอบอ่อน (Annealing process)

เมื่อแก้วเย็นตัวลงในระหว่างการขึ้นรูป ผิวภายนอกจะเย็นตัวเร็วกว่าผิวภายในส่งผลให้ผิวแก้วด้านนอกหดตัวเร็วกว่าด้านในจนแข็งตัว (Rigid) ส่วนผิวแก้วด้านในจะยังคงอยู่ในสถานะของเหลวหนืด (Viscous liquid) เพราะสูญเสียความร้อนน้อยกว่าและมีความเค้น (Stress) นำไปสู่การเกิดความเครียดที่คงค้างในแก้ว ซึ่งสามารถกำจัดหรือทำให้ลดลงเหลือไม่เกินค่ามาตรฐาน

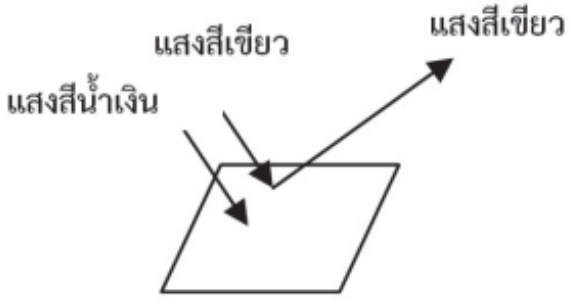
ที่กำหนดไว้ได้ด้วยการอบอ่อน ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะเป็นการลดความเครียดที่คงค้างในแก้วจากขั้นตอนการขึ้นรูป เพื่อให้โครงสร้างแก้วมีความเสถียรและได้ผลิตภัณฑ์แก้วมีคุณสมบัติต่าง ๆ คงที่ ณ อุณหภูมิห้อง

5. ขั้นตอนการตรวจสอบและตกแต่ง (Inspection and finishing process)

ผลิตภัณฑ์แก้วที่ผ่านการอบอ่อนแล้ว จะต้องได้รับการตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐานที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ เพื่อให้ตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน การตรวจสอบคุณภาพจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ คุณภาพทางกายภาพ เช่น ขนาด หรือรอยตำหนิ เป็นต้น และคุณภาพทางคุณสมบัติ เช่น ความสามารถในการรับแรงอัดแรงกระแทก การทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแก้วบางประเภทที่ต้องผ่านการตกแต่งขั้นสุดท้ายก่อน เช่น การขัดมัน การทำความสะอาด การตัด เป็นต้น ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบและคัดเลือกผลิตภัณฑ์แก้วที่ไม่ได้คุณภาพออกไป ก่อนนำส่งไปบรรจุในบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

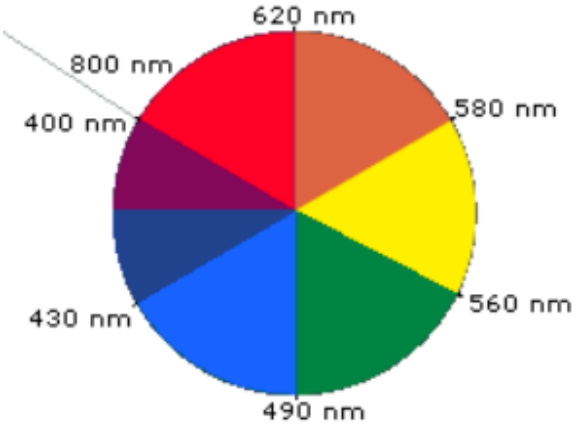
2.5 การเกิดสีในแก้ว

สีที่ปรากฏขึ้นในแก้วมาจากความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นบางช่วงเอาไว้และยอมให้แสงที่ความยาวคลื่นที่เหลือผ่านออกไป ซึ่งสีที่ปรากฏในแก้วนั้นจะเป็นสีของแสงที่ความยาวคลื่นที่ผ่านออกมาได้ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดสีในแก้ว

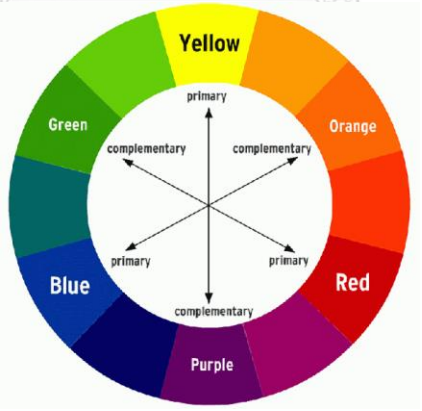
ในทางกลับกันถ้าแก้วดูดกลืนแสงในทุก ๆ ความยาวคลื่นที่ตกเข้ามากระทบทั้งหมด จะทำให้สีที่ปรากฏในแก้วเป็นสีทึบ โดยคลื่นแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้จะอยู่ในช่วงประมาณ 400 - 800 นาโนเมตร จะเห็นเป็นสีผสม (Complementary) หรือสีที่อยู่ตรงข้ามของสีที่ถูกดูดกลืนตามวงล้อสี (Color wheel) ดังรูปที่ 2.2 ยกตัวอย่างเช่น แก้วสีเขียว จะดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 600 - 800 นาโนเมตร เอาไว้ จากนั้นปล่อยให้แสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 400 - 600 นาโนเมตร ผ่านออกไป นอกจากนี้ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดกลืนแสงและส่องผ่านแสงของแก้วนั้น คือ สารฟอกสีแก้ว



รูปที่ 2.2 วงล้อสี

2.6 การฟอกสีแก้วด้วยวิธีทางกายภาพ

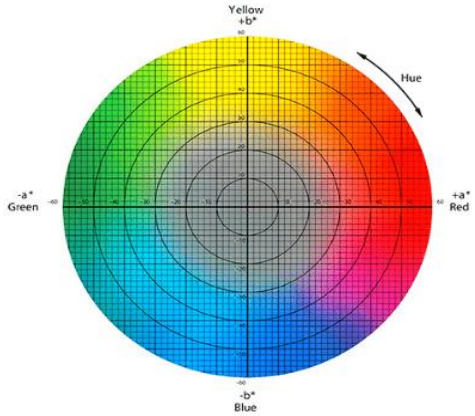
การฟอกสีแก้วด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical decolorization) เป็นการกลบสีโดยใช้หลักการผสมคู่สีของสารฟอกสีแก้ว เพื่อให้เกิดสีสมบูรณ์ (Complementary color) หรือสีขาวใส ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเกิดจากแสงสามารถส่องผ่านแก้วได้ทุกความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็น (Visible light) มีค่าความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 380 - 780 นาโนเมตร ตัวอย่างเช่น แก้วที่มีสีเขียวอมน้ำเงินจะใช้สารฟอกสีแก้วที่ให้สีแดงอมชมพูเติมลงไป เพื่อให้ได้แก้วสีขาวใส



รูปที่ 2.3 แผนภูมิคู่สีสมบูรณ์ของกระกวนการฟอกสีด้วยวิธีทางกายภาพ

การวัดค่าสีแก้วจะใช้หน่วยสีระบบ L* a* b* color space หรือเรียกว่า CIE Lab scale (CIELAB) ซึ่งเป็นระบบวัดค่าสีที่สามารถบอกความแตกต่างของสีได้อย่างสม่ำเสมอ และใกล้เคียงกับความแตกต่างของสีที่ตามองเห็น ด้วยการพิจารณาองค์ประกอบในปริภูมิสี (Color space diagram) ได้แก่ ค่า L* จะหมายถึง ความสว่าง ส่วนค่า a* และ b* จะเป็น ค่าสัมประสิทธิ์สี สามารถแบ่ง

4 ทิศทางของสี ได้แก่ +a* หมายถึง อยู่ในทิศของสีแดง -a* หมายถึง อยู่ในทิศของสีเขียว +b* หมายถึง อยู่ในทิศของสีเหลือง และ -b* หมายถึง อยู่ในทิศของสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปริภูมิสี

2.7 ปัจจัยที่เลือกศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. เหล็กออกไซด์รวม (Mixed iron oxide: FeO & Fe_2O_3)

เหล็กออกไซด์รวมเป็นสารให้สีที่พบอยู่ในทรายแก้ว ส่งผลต่อคุณภาพ และสมบัติทางแสงของแก้ว ทำให้แก้วมีสีเขียว ซึ่งเกิดจากการจะดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นได้ (Visible light) โดยเหล็กออกไซด์จะมี 2 สถานะ คือ ไอออนเหล็กเฟอรัส (Ferrous iron: Fe^{2+}) และไอออนเหล็กเฟอริก (Ferric iron: Fe^{3+}) แต่ละสถานะให้ค่าสีที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox state) ในกระบวนการหลอมแก้ว ดังนี้

1.1 ไอออนเหล็กเฟอรัสจะดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 1,050 นาโนเมตร ทำให้แก้วมีสีน้ำเงินอมเขียว เกิดขึ้นที่สภาวะรีดักชัน (Reduction state) โดยการเติมสารกลุ่มรีดิวซ์ซิ่ง (Reducing agents) เช่น คาร์บอน (C) จะดูดซับก๊าซออกซิเจน (O_2) ในน้ำแก้ว ทำให้ไอออนเหล็กเฟอริกเปลี่ยนเป็นไอออนเหล็กเฟอรัส ดังสมการที่ 2.1

$$4Fe^{3+} + 2O^{2-} \longleftrightarrow 4Fe^{2+} + O_2 \qquad (2.1)$$

1.2 ไอออนเหล็กเฟอริกจะดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 380 นาโนเมตร ทำให้แก้วมีสีเหลือง เกิดขึ้นที่สภาวะออกซิเดชัน (Oxidation state) โดยการเติมสารกลุ่มออกซิไดซ์ซิ่ง (Oxidizing agents) เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และโซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$) หรือการใช้เตาเผาในสภาวะบรรยากาศปกติ (Furnace atmosphere) ที่จะปล่อยก๊าซออกซิเจน (O_2) ลงไปในน้ำแก้ว เกิดปฏิกิริยาผันกลับ ทำให้ไอออนเหล็กเฟอรัสเปลี่ยนเป็นไอออนเหล็กเฟอริก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ดังนั้นในกระบวนการผลิตแก้วใสจึงต้องมีการควบคุมปริมาณเหล็กออกไซด์รวมในวัตถุดิบ สภาวะปฏิกิริยารีดอกซ์ และใช้สารฟอกสีแก้วให้เหมาะสม เพื่อการลดสีเขียวจากเหล็กออกไซด์รวม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Katkova et al., 1989) ได้ศึกษาการเพิ่มปริมาณเหล็กออกไซด์รวมในทรายแก้วจาก 0.05 - 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะส่งผลต่อการฟอกสีในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว (Container glasses) ของโรงงาน โดยทดลองปรับช่วงปริมาณเหล็กออกไซด์รวมในทรายแก้วและส่วนผสมอื่น ๆ เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$) ซีลีเนียม (Se) และโคบอลต์ (Co) ให้แตกต่างกันจำนวน 11 โรงงาน พบว่าจะมีโรงงาน 2 โรงงานที่สามารถลดค่าใช้จ่ายต่อปีลงได้ ซึ่งโรงงานทั้งสองได้ใช้ช่วงปริมาณเหล็กออกไซด์รวมในทรายแก้วและส่วนผสมอื่น ๆ สำหรับการฟอกสีในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้วได้ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ช่วงความเข้มข้นของเหล็กออกไซด์รวมในทรายและส่วนผสมอื่น ๆ สำหรับการฟอกสีในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว

ช่วงปริมาณเหล็กออกไซด์รวมในทรายแก้ว	วัตถุดิบหลัก (กิโลกรัม/ตัน)		สารฟอกสี (กรัม/ตัน)	
	โซเดียมซัลเฟต	โซเดียมไนเตรท	ซีลีเนียม	โคบอลต์
0.05 - 0.1	14.0	11.2	2.5	0.2
0.1 - 0.13	9.9	24.8	13.5	1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการศึกษางานความวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ทำให้ผู้วิจัยสรุปได้ว่าปัจจัยปริมาณเหล็กออกไซด์รวมปริมาณซีลีเนียม และปริมาณโคบอลต์ มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อเลือกใช้ทรายแก้วที่มีปริมาณเหล็กออกไซด์รวมสูง ก็ต้องใช้ปริมาณสารฟอกสีมากขึ้น

2. ซีลีเนียม (Selenium: Se)

ซีลีเนียมเป็นธาตุอโลหะที่นำมาใช้สำหรับฟอกสีแก้วในอุตสาหกรรมการผลิตแก้วโซดาไลม์ โดยเมื่อเติมซีลีเนียมลงไปในน้ำแก้ว (Glass melt) จะให้สีชมพูกลบสีเขียวจากเหล็กออกไซด์รวม ทำให้แก้วมีความใสเพิ่มขึ้น แต่ซีลีเนียมก็มีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ ซีลีเนียมที่เติมลงไปในน้ำแก้วมีปริมาณเหลืออยู่เพียงร้อยละ 10 - 20 ของปริมาณทั้งหมด เนื่องจากมีการระเหยตัวสูงที่อุณหภูมิตั้งแต่ 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป และปฏิกิริยาการเกิดสีของซีลีเนียมจะขึ้นอยู่กับสภาวะออกซิเดชัน 5 สถานะ ซึ่งแต่ละสภาวะจะให้สีที่แตกต่างกัน (Wolfgang, 1934) ดังสมการที่ 2.2

$$Se^{2-} \longleftrightarrow Se_x^{2-} \longleftrightarrow Se^{0} \longleftrightarrow Se^{4+} \longleftrightarrow Se^{6+} \quad (2.2)$$

Se^{2-} คือ ซีลีไนด์ (Selenide) ไม่ให้สี เกิดขึ้นภายใต้สภาวะรีดักชันมาก ๆ

Se_x^{2-} คือ พอลิซีลีไนด์ (Polyselenide) ให้สีหลืองหรือสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้นภายใต้สภาวะรีดักชันอ่อนๆ

Se^{0} คือ ซีลีเนียม (Selenium) ให้สีชมพู เกิดขึ้นภายใต้สภาวะออกซิเดชันอ่อนๆ หรือเป็นกลาง

Se^{4+} คือ ซีลีไนต์ (Selenite) ไม่ให้สี เกิดขึ้นภายใต้สภาวะออกซิเดชัน โดยการเติมสารกลุ่มออกซิไดซ์ซิ่ง เช่น ไนเตรท (NaO_3^-)

Se^{6+} คือ ซีลีเนต (Selenate) ไม่ให้สี เกิดขึ้นภายใต้สภาวะออกซิเดชันมาก ๆ

เมื่ออุณหภูมิสูงเตาหลอมสูงขึ้น ภายใต้สภาวะออกซิเดชันอ่อน ๆ จะไม่ปรากฏซีลีเนียมขึ้น เพราะซีลีเนียมจะทำปฏิกิริยากับโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ดังสมการที่ 2.3 เกิดเป็นโซเดียมซีลีไนด์ (Se^{2-}) และโซเดียมซีลีไนต์ (Se^{4+})

$$3Se + 3Na_2O \longleftrightarrow 2Na_2Se + Na_2SeO_3 \quad (2.3)$$

2.1 กระบวนการเกิดเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ (Ferrous selenide: FeSe) (Andreas Dietzel, 1937)

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส จะไม่พบโซเดียมซีลีไนด์ (Se^{2-}) และโซเดียมซีลีไนต์ (Se^{4+}) ในน้ำแก้ว เพราะโซเดียมซีลีไนด์ (Se^{2-}) จะไปทำปฏิกิริยากับเหล็กเฟอรัสออกไซด์ (FeO) เกิดเป็นเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ (FeSe) ให้สีเหลืองน้ำตาล ดังสมการที่ 2.4

$$FeO + Na_2Se \longleftrightarrow FeSe + Na_2O \ (T<1100\ ^\circ C) \quad (2.4)$$

ถ้าเติมโซเดียมไนเตรท ($NaNO_3$) มากเกินไป มีแนวโน้มจะไปทำให้โซเดียมซีลีไนด์ (Se^{2-}) ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นโซเดียมซีลีไนต์ (Se^{4+}) มากขึ้น ดังสมการที่ 2.5

$$4Na_2SeO_3 \longleftrightarrow 4Na_2Se + 3O_2 \quad (2.5)$$

ถ้าเหล็กเฟอรัสออกไซด์ (FeO) มีปริมาณมากกว่าปริมาณของโซเดียมซีลีไนด์ (Se^{2-}) จะทำให้สีแก้วที่ได้เป็นสีเขียวเข้ม (Sage green) ซึ่งเกิดการรวมสีกันของสีฟ้าจากไอออนเหล็กเฟอรัส สีเหลืองจากไอออนเหล็กเฟอริก และสีเหลืองน้ำตาลจากเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์

2.2 กระบวนการเกิดก๊าซซีลีเนียมไดออกไซด์ (Selenium dioxide: SeO_2) (Volf, 1984)

โซเดียมซีลีไนต์ (Se^{4+}) จะระเหยกลายเป็นก๊าซซีลีเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมี 2 รูปแบบ ดังนี้

1. โซเดียมซีลีไนต์ (Se^{4+}) แตกตัวที่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยากับทรายแก้ว เกิดเป็นโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และไอก๊าซซีลีเนียมไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.6

$$Na_2SeO_3 + SiO_2 \longleftrightarrow Na_2SiO_3 + SeO_2\ (gas) \quad (2.6)$$

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. โซเดียมซีลีไนต์ (Se^{4+}) ทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนจำนวนมากเพียงพอที่อุณหภูมิต่ำ เกิดเป็นโซเดียมซีลีเนต (Na_2SeO_4) หรือซีลีเนต (Se^{6+}) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 715 องศาเซลเซียส ทำให้โซเดียมซีลีเนตแตกตัวเกิดเป็นโซเดียมออกไซด์ ก๊าซซีลีเนียมไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจน ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8

$$Na_2SeO_3 + 0.5O_2 \longleftrightarrow Na_2SeO_4 \quad (2.7)$$

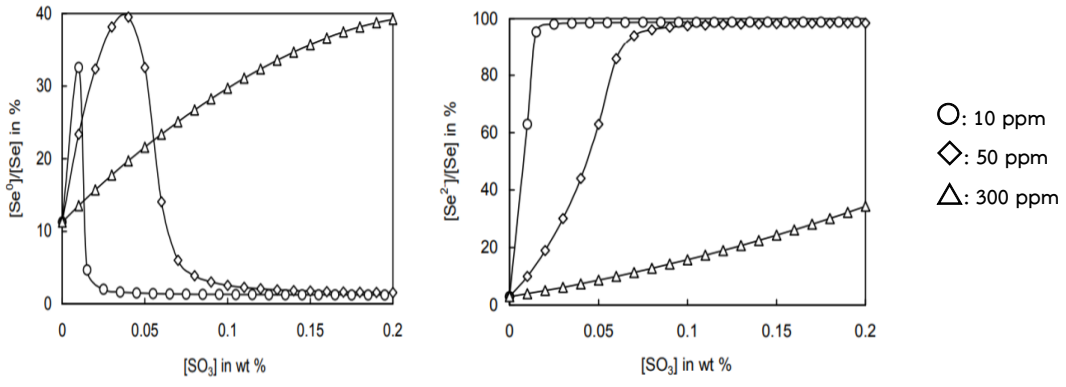
$$Na_2SeO_4 \longleftrightarrow Na_2O + SeO_2\ (gas) + 0.5O_2\ (T>715\ ^\circ C) \quad (2.8)$$

สรุปว่าซีลีเนียมที่ใส่ลงไปผสมกับวัตถุดิบ เมื่อผ่านกระบวนการหลอมแก้วแล้ว จะพบซีลีเนียม (Se^0) ที่มีปริมาณไม่มากนัก โดยให้สีชมพูกลบสีเขียวจากเหล็กออกไซด์ และซีลีเนียมที่อยู่ในรูปของซีลีไนด์ (Se^{2-}) จะเป็นเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ (FeSe) ให้สีเหลืองน้ำตาล ซึ่งการกลบสีเหลืองน้ำตาลของเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์นี้ จะใช้โคบอลต์ (Co) ที่ให้สีฟ้ากลบสีทำให้แก้วใสขึ้น

<u>งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</u>

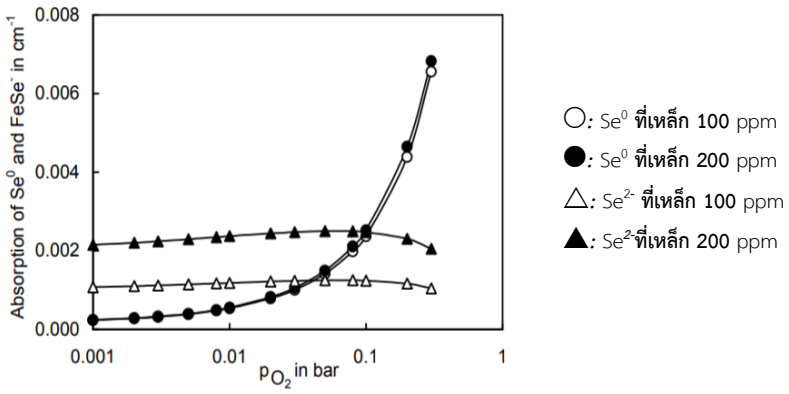
(Müller-Simon) ได้ศึกษาการฟอกสีแก้วด้วยซีลีเนียมในอุตสาหกรรมผลิตแก้วใส (Flint glass) โดยทำการทดลอง 2 ส่วน คือ 1. ปรับปริมาณและความเข้มข้นของซัลเฟอร์ (Sulfur: S) ที่เติมลงไปในน้ำแก้วในสภาวะรีดักชัน จากนั้นวัดค่าสัดส่วนปริมาณซีลีเนียมต่อปริมาณซัลเฟอร์ และค่าสัดส่วนปริมาณซีลีไนด์ (Se^{2-}) ต่อปริมาณซัลเฟอร์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณและความเข้มข้นของซัลเฟอร์ ทำให้ค่าสัดส่วนปริมาณซีลีเนียม (Se^0) ต่อปริมาณซัลเฟอร์ลดลง แต่ค่าสัดส่วนปริมาณซีลีไนด์ (Se^{2-}) ต่อปริมาณซัลเฟอร์นั้นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.5 จึงสรุปได้ว่าปริมาณและความเข้มข้นของซัลเฟอร์ มีผลต่อการที่ซีลีเนียมถูกรีดิวซ์ไปเป็นซีลีไนด์ ซึ่งซีลีไนท์จะทำปฏิกิริยากับไอออนเหล็กเฟอรัส เกิดเป็นเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ให้สีเหลืองน้ำตาล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงปริมาณของซีลีเนียมและซีลีไนด์ที่พบในน้ำแก้วต่อปริมาณซัลเฟอร์ โดยใช้ความเข้มข้นของซัลเฟอร์ที่แตกต่างกัน

2. ปรับความดันของก๊าซออกซิเจน (Oxygen partial pressure) ในเตาหลอมแก้วให้เพิ่มขึ้น จากนั้นวัดค่าปริมาณการดูดซับสีของซีลีเนียมและเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ พบว่าถ้าเพิ่มความดันของก๊าซออกซิเจนมากกว่า 0.1 บาร์ ส่งผลให้ค่าปริมาณการดูดซับสีของซีลีเนียมมากกว่าปริมาณเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ แต่ในทางอุตสาหกรรมการผลิตแก้วใสจะใช้ความความดันของก๊าซออกซิเจนประมาณ 0.01 บาร์ ซึ่งจะพบแต่ปริมาณการดูดซับสีของเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ ดังรูปที่ 2.6 นั่นคือสีที่ได้จากการเติมซีลีเนียมลงไปในน้ำแก้ว จะเกิดเป็นสีเหลืองน้ำตาลของเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์แทนที่สีชมพูของซีลีเนียม

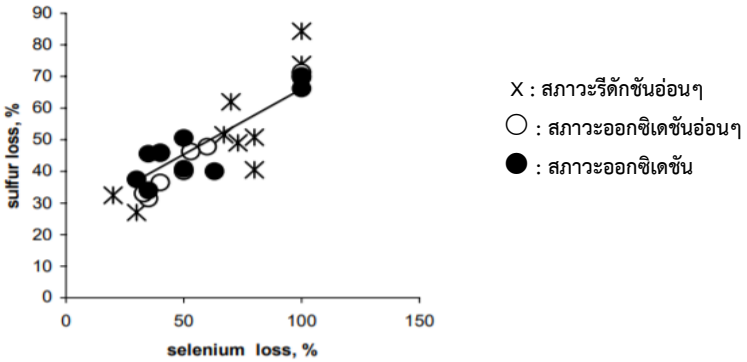


รูปที่ 2.6 ความเข้มข้นการดูดซับสีของซีลีเนียมและเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ที่ปริมาณเหล็กแตกต่างกัน

(Tepiwan Jitwatcharakomol, 2005) ได้ศึกษาการหาจุดที่เหมาะสมและควบคุมคุณสมบัติทางเคมีและสีของซีลีเนียมในอุตสาหกรรมผลิตแก้วใส ทำการทดลองปรับค่าปริมาณโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) 0.2 0.4 และ 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%wt) และค่าปริมาณซีลีเนียม 10 20 และ 30 ppm โดยกำหนดให้ค่าปริมาณสารอื่น ๆ คงที่ คือเหล็กออกไซด์ 0.05 เปอร์เซ็นต์ และโคบอลต์ (Co) 1 ppm จากนั้นวัดค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียซัลเฟอร์และการสูญเสียซีลีเนียม พบว่าเมื่อเติมปริมาณโซเดียมซัลเฟต 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และซีลีเนียม 20 ppm จะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียซีลีเนียม 100 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 2.7 เนื่องจากซีลีเนียมเกิดการระเหยกลายเป็นไอก๊าซซีลีเนียมไดออกไซด์ (SeO_2) ดังสมการที่ 2.9

$$Na_2SeO_3 + SO_2 + 0.5O_2 \longleftrightarrow Na_2SO_4 + SeO_2\ (gas) \qquad (2.9)$$

แต่เมื่อเติมปริมาณโซเดียมซัลเฟต 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และซีลีเนียม 30 ppm จะไม่เกิดเหตุการณ์เช่นนั้น ดังนั้นผู้ทดลองจึงสรุปว่าถ้าไม่ต้องการให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียซีลีเนียมถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ควรเติมปริมาณโซเดียมซัลเฟต 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของปริมาณซัลเฟอร์ที่สูญหายไปและปริมาณซีลีเนียมที่สูญหายไป

จากการศึกษาบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องเหล่านี้ทำให้ผู้วิจัยพบว่าการเติมโซเดียมซัลเฟตลงไปในน้ำแก้วมากขึ้น เปรียบเสมือนการเพิ่มปริมาณโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซออกซิเจน (O_2) ด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการแตกตัวทางความร้อนของโซเดียมซัลเฟตที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ดังสมการที่ 2.10 จากนั้นโซเดียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับซีลีเนียม (Se^0) เกิดเป็นโซเดียมซีลีไนด์ (Se^{2-}) ในสภาวะรีดักชัน และโซเดียมซีลีไนต์ (Se^{4+}) ในสภาวะออกซิเดชัน ดังสมการที่ 2.3 โดยการเปลี่ยนสถานะของซีลีเนียมในทั้ง 2 สภาวะ จะส่งผลกระทบต่อค่าสีแก้ว ดังนี้

$$Na_2SO_4 \rightarrow Na_2O + SO_2 + O_2 \qquad (2.10)$$

$$3Se + 3Na_2O \longleftrightarrow 2Na_2Se + Na_2SeO_3 \qquad (2.3)$$

1. การเพิ่มปริมาณโซเดียมซัลเฟตมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนในน้ำแก้วมีมากขึ้นตามไปด้วย จากนั้นสารประกอบ 2 ชนิดนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันได้ ทำให้เกิดซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ขึ้นในน้ำแก้ว ดังสมการที่ 2.11 ต่อมาซัลเฟอร์ไตรออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) ได้เป็นสารอนุพันธ์ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ดังสมการที่ 2.12 ซึ่งสารอนุพันธ์ซัลเฟตนี้จะเป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ทำให้เกิดสภาวะรีดักชัน ซีลีเนียม (Se^0) จะเปลี่ยนเป็นซีลีไนด์ (Se^{2-}) จากนั้นซีลีไนด์สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนเหล็กเฟอรัส (Fe^{2+}) ได้เป็นเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ (FeSe) ที่ให้สีเหลืองน้ำตาล และถูกกลบด้วยสีน้ำเงินของโคบอลต์ ส่งผลให้แก้วใสขึ้น

$$SO_2 + 1/2O_2 \rightarrow SO_3 \qquad (2.11)$$

$$H_2O + SO_3 \rightarrow H_2SO_4 \qquad (2.12)$$

2. การเพิ่มปริมาณโซเดียมซัลเฟตมากขึ้น อาจจะทำให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนในน้ำแก้วมีมากเกินไป นำไปสู่การเกิดสภาวะออกซิเดชัน ส่งผลให้อัตราการเกิดเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ลดลงตามไปด้วย เพราะซีลีไนด์ (Se^{2-}) จะเปลี่ยนเป็นซีลีไนต์ (Se^{4+}) มากขึ้น ดังสมการที่ 2.5 จากนั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โซเดียมซีลีไนต์จะสามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซออกซิเจน (O_2) ดังสมการ เกิดเป็นไอก๊าซซีลีเนียมไดออกไซด์ระเหยออกไป ดังสมการที่ 2.9

$$4Na_2Se + 3O_2 \longleftrightarrow Na_2SeO_3 \quad (2.5)$$

$$Na_2SeO_3 + SO_2 + 0.5O_2 \longleftrightarrow Na_2SO_4 + SeO_2\ (gas) \quad (2.9)$$

สรุปได้ว่าปริมาณซีลีเนียมที่คงเหลือในน้ำแก้วนั้น จะถูกกำหนดจากปริมาณโซเดียมซัลเฟตที่เติมลงไปในน้ำแก้วด้วยเช่นกัน

3. โคบอลต์ (Cobalt: Co)

โคบอลต์เป็นธาตุโลหะที่นำมาใช้เป็นสารฟอกสีแก้ว จะให้สีฟ้ากลบสีเหลืองน้ำตาลจากเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ (FeSe) ทำให้แก้วมีความใสเพิ่มขึ้น โดยการใช้ปริมาณโคบอลต์เพียง 0.02 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก็สามารถให้แก้วมีสีฟ้าทั้งหมด และการให้สีฟ้าของโคบอลต์จะไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบของแก้วหรือกระบวนการหลอม โคบอลต์ในน้ำแก้วจะอยู่ในรูปของโคบอลต์ออกไซด์ (Cobalt oxide: CoO) ที่สภาวะออกซิเดชันเท่านั้น

4. โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate: Na_2SO_4)

ก๊าซที่อยู่ในน้ำแก้วหรือในฟองอากาศ เป็นผลิตผลโดยตรงทางเคมี (Product) หรือผลิตผลพลอยได้ทางเคมี (By-product) ที่ได้จากการนำวัตถุดิบต่าง ๆ มาหลอมผสมกันเป็นน้ำแก้ว ผ่านการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งที่วัตถุดิบจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างกัน หรือจนถึงจุดระเหย (Evaporating point) กลายเป็นไอก๊าซของวัตถุดิบบางชนิด เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ได้จากการแตกตัวของสารกลุ่มคาร์บอเนต (CO_3^-) ก๊าซออกซิเจน (O_2) ที่มาจากบรรยากาศ ไอน้ำ (H_2O) ที่มาจากความชื้นของวัตถุดิบ เป็นต้น

สารกำจัดฟองก๊าซ (Finning agents) มีหน้าที่สร้างฟองก๊าซขึ้นที่อุณหภูมิหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้หลอมสูงขึ้น ก๊าซจะจับตัวกันและเติบโตมีขนาดฟองใหญ่ พร้อมทั้งแตกตัวมากขึ้น จากนั้นก็จะลอยตัวขึ้นมายังผิวของน้ำแก้วระเหยกลายเป็นไอก๊าซออกไป และก๊าซบางส่วนจะไปจับกับอนุภาคทรายที่ยังไม่หลอมละลายให้ลอยขึ้นมายังผิวของน้ำแก้วส่งผลให้น้ำแก้วมีความหนืดลดลงด้วย

โซเดียมซัลเฟต เป็นสารกำจัดฟองก๊าซที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว พบในร้อยละ 90 โดยมวลของผลิตภัณฑ์แก้วทั่วโลก จะมีโซเดียมซัลเฟตเป็นวัตุดิบตั้งต้นในส่วนผสมของแก้ว นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น เป็นแหล่งที่มาของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมเหลวของแก้ว ปรับปรุงจลนศาสตร์การหลอม (Melting kinetics) โดยการลดความตึงผิว (Surface tension) ให้กับส่วนผสม เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizer) ที่จะปล่อยก๊าซออกซิเจนออกมาในกระบวนการแตกตัว เป็นต้น

การสร้างฟองก๊าซของโซเดียมซัลเฟตจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox state) ในกระบวนการหลอมแก้ว 2 สภาวะ คือ

1. การหลอมในสภาวะออกซิไดซ์ (Oxidized melts) เกิดปฏิกิริยา 2 ช่วงอุณหภูมิ ดังนี้

1.1 ช่วงอุณหภูมิมากกว่า 1,100 องศาเซลเซียส โซเดียมซัลเฟตเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคทราย ผลที่ได้คือโซเดียมซิลิเกต ($Na_2O{\cdot}nSiO_2$) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซออกซิเจน (O_2)

1.2 ช่วงอุณหภูมิที่ 1,430 – 1,480 องศาเซลเซียส โซเดียมซัลเฟตเกิดการแตกตัวทางความร้อน ผลที่ได้คือโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซออกซิเจน (O_2)

2. การหลอมในสภาวะรีดิวซ์ (Reduce melts) เกิดปฏิกิริยา 3 ช่วงอุณหภูมิ ดังนี้

2.1 ช่วงอุณหภูมิ 700 - 800 องศาเซลเซียส โซเดียมซัลเฟตเกิดปฏิกิริยากับสารกลุ่มรีดิวซ์ซิ่ง (Reducing agents) นั่นคือ คาร์บอน (C) ผลที่ได้คือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO)

2.2 ช่วงอุณหภูมิ 900 - 1,100 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาของโซเดียมซัลเฟต สารกลุ่มรีดิวซ์ซิ่ง และอนุภาคทราย ผลที่ได้คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และโซเดียมซิลิเกต ($Na_2O{\cdot}nSiO_2$)

2.3 ช่วงอุณหภูมิ 1,140 - 1,350 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาของโซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมซัลเฟต และอนุภาคทราย ผลที่ได้คือ โซเดียมซิลิเกต ($Na_2O{\cdot}nSiO_2$)

จากที่กล่าวมาข้างต้นการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในกระบวนการหลอมแก้วของโซเดียมซัลเฟตมีค่อนข้างจะหลากหลาย ดังนั้นการนำโซเดียมซัลเฟตมาใช้เป็นสารกำจัดฟองก๊าซจึงต้องควบคุมการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แก้วนั้น เนื่องจากสารกลุ่มซัลเฟอร์ (S) จะมีผลกระทบต่อค่าสีของแก้ว

<u>งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</u>

(Hujova, 2017) ได้ศึกษาอิทธิพลของสารกำจัดฟองก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการหลอมแก้ว ผ่านการรวบรวมและตีความข้อมูลจากวรรณกรรรม (Literature review) ที่ถูกนำมาเผยแพร่แล้ว จะได้ว่าในอดีตการเติมสารกลุ่มคาร์บอน (C) ลงไป ซึ่งเป็นสารกลุ่มรีดิวซ์ซิ่ง (Reducing agents) ลงไปในน้ำแก้ว จะทำให้ไอออนเหล็กเฟอริก (Fe^{3+}) เปลี่ยนเป็นไอออนเหล็กเฟอรัส (Fe^{2+}) และนำไปสู่การเกิดเหล็กเฟอรัสซีลีไนด์ (FeSe) ที่ให้สีเหลืองน้ำตาลนั้นไม่ถูกต้องมากนัก ปัจจุบันพบว่าสีเหลืองของแก้วนั้นมาจากโครโมฟอร์ (Chromophore) ของไอออนเหล็กเฟอริก (Fe^{3+}) และไอออนซัลเฟอร์ (S^{2-}) ดังสมการที่ 2.13

$$2Fe^{3+} - 3S^{2-} + 6SO_3 + 3/2O_2 \longleftrightarrow Fe_2O_3 + 9SO_2 \qquad (2.13)$$

แต่ถ้าหากปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ลดลง และมีการหลอมในสภาวะรีดิวซ์ (Reduce melts) ก็จะส่งผลให้สีเหลืองจากโครโมฟอร์นี้จางลงได้

จากการศึกษางานความวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ทำให้ผู้วิจัยสรุปได้ว่าโซเดียมซัลเฟต มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีแก้ว เนื่องจากไอออนซัลเฟอร์ที่เกิดจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่เป็นสารอนุพันธ์จากการแตกตัวของโซเดียมซัลเฟตนั้น สามารถทำปฏิกิริยากับเหล็กออกไซด์ เกิดเป็นโครโมฟอร์ระหว่างไอออนเหล็กเฟอริก (Fe^{3+}) และไอออนซัลเฟอร์ (S^{2-}) ทำให้แก้วมีสีเหลืองมากขึ้น

5. อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature)

ขั้นตอนการหลอมแก้วจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การหลอมแก้ว (Melting) การหลอมแก้วมีจุดประสงค์เพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบต่าง ๆ ที่อยู่ในรูปลักษณะผลึกของแข็งให้กลายเป็นของเหลว ผ่านความร้อนและปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างวัตถุดิบ จนได้ของเหลวที่มีเนื้อแก้วสม่ำเสมอ คือ “น้ำแก้ว (Glass melt)” โดยอุณหภูมิที่ใช้หลอมแก้วจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทและองค์ประกอบของแก้ว เช่น แก้วซิลิกาหลอมเหลว 1,700 - 1,800 องศาเซลเซียส, แก้วโซดาไลม์หลอมเหลว 1,500 องศาเซลเซียส, แก้วเลดซิลิเกตหลอมเหลว 1,450 องศาเซลเซียส แก้วอะลูมิโนซิลิเกตหลอมเหลว 1,600 องศาเซลเซียส เป็นต้น

2. การกำจัดฟองก๊าซ (Finning) เมื่อวัตถุดิบได้รับความร้อนในระหว่างการหลอม จนเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกัน ทำให้เกิดการระเหยหรือการสลายตัวทางความร้อนออกมาในรูปของฟองก๊าซต่าง ๆ เช่น ก๊าซออกซิเจน (O_2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไอน้ำ (H_2O) เป็นต้น ส่งผลต่อคุณลักษณะของแก้วที่ได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางเคมีโดยการเติมสารกำจัดฟองก๊าซ (Finning agents) ลงไป เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) อาร์เซนิกไตรออกไซด์ (As_2O_3) แอนติโมนีไตรออกไซด์ (Sb_2O_3) เป็นต้น

3. กวนส่วนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว (Homogenization) ทำให้แก้วมีคุณสมบัติทางกายและเคมีสม่ำเสมอทั่วทั้งผลิตภัณฑ์ เช่น การพ่นก๊าซจากก้นเตาหลอม การออกแบบเตาหลอมในเกิดการไหลวนของน้ำแก้ว เป็นต้น

2.8 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ

(ปารเมศ ชุติมา, 2545) การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Design of Experiment: DOE) คือ กระบวนการสำหรับการวางแผนการทดลองสำหรับใช้ในการเก็บข้อมูล และนำข้อมูลไปวิเคราะห์โดยใช้วิธีการทางสถิติ เพื่อหาข้อสรุปว่าตัวแปรนำเข้าหรือปัจจัย (Factors) ที่สามารถควบคุมและกำหนดค่าได้ จะมีผลกระทบต่อค่าตัวแปรตอบสนอง (Responses) ที่เป็นผลลัพธ์หรือตัวชี้วัดที่สนใจปรับปรุง

หลักการพื้นฐานของการออกออกแบบการทดลอง 3 ประการ ดังนี้

2.8.1 เรพลิเคชัน (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ เพื่อหาค่าประมาณความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และหาตัวประมาณที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น ถ้า σ^2 คือความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละตัว และมี n เรพลิเคต จะได้ค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ย ($\bar{y}$) จะเท่ากับ $\sigma_{\bar{y}}^2 = \frac{\sigma^2}{n}$ ซึ่งถ้าทำการทดลองด้วยเรพลิเคชันจำนวนน้อย ก็จะส่งผลให้ความแม่นยำในการทดลองต่ำ แต่ถ้าทำการทดลองด้วยเรพลิเคชันจำนวนมาก ความแม่นยำในการทดลองก็จะมาก แต่จำเป็นต้องแลกมาด้วยค่าใช้จ่ายและเวลาที่มากขึ้น ดังนั้นเรพลิเคชันที่แนะนำคือ จำนวน 2 ครั้ง

2.8.2 แรนดอมไมเซชัน (Randomization) หมายถึง การทดลองที่ใช้วัสดุสำหรับการทดลองและลำดับการทดลองแต่ละครั้งแบบสุ่ม (Random) เพื่อเป็นการลดผลของตัวแปรรบกวนหรือปัจจัยภายนอก (Noise variable) ที่อาจจะปรากฏในการทดลองซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ และลดผลการเรียนรู้ (Learning curve) ที่อาจจะทำให้เกิดความเอนเอียง (Bias) จากการทำการทดลองแบบเดิมซ้ำกันหลายครั้ง

2.8.3 บล็อกกิ่ง (Blocking) เป็นวิธีการที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง และลดความแตกต่างในสิ่งที่ไม่สามารถอธิบายได้ โดยบล็อกหนึ่ง ๆ หมายถึงจำนวนของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่มีความเหมือนกันหรือเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าจำนวนทั้งหมดของวัสดุ

<u>ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง</u>

1. การทำความเข้าใจถึงสภาพปัญหา เป็นการศึกษาตัวชี้วัดของกระบวนการผ่านข้อมูลของแผนกต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะนำไปสู่การระบุวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต ผู้ทดลองจำเป็นต้องศึกษาขั้นตอนของกระบวนการอย่างละเอียด จนสามารถนำความรู้ทางทฤษฎีและประสบการณ์มาใช้สำหรับเลือกปัจจัยที่จะนำมาปรับหรือเปลี่ยนแปลงค่าในการทดลอง โดยการกำหนดระดับ (Level) ของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะต้องอยู่ภายใต้ขอบเขตที่ปัจจัยสามารถเปลี่ยนแปลงได้ และต้องการทำการทดลองที่ระดับของปัจจัยแบบใด สามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ

2.1 แบบตายตัว (Fixed factors) หมายถึง ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยจะอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้เท่านั้น ซึ่งทำให้ข้อสรุปทางสถิติจะถูกจำกัดอยู่ที่ระดับของปัจจัยที่เลือกมาเท่านั้น

2.2 แบบสุ่ม (Random factors) หมายถึง ระดับของปัจจัยจะถูกเลือกมาอย่างสุ่ม จากระดับที่เป็นไปได้ทั้งหมดของประชากร จึงทำให้ข้อสรุปทางสถิติจะเกี่ยวข้องกับระดับของประชากร ไม่ใช่เพียงแค่ระดับที่ใช้สำหรับทำการทดลองเท่านั้น

2.3 แบบผสม (Mixed model) การพิจารณาทำการทดลองร่วมระหว่างระดับของปัจจัยแบบตายตัว และระดับของปัจจัยแบบสุ่ม

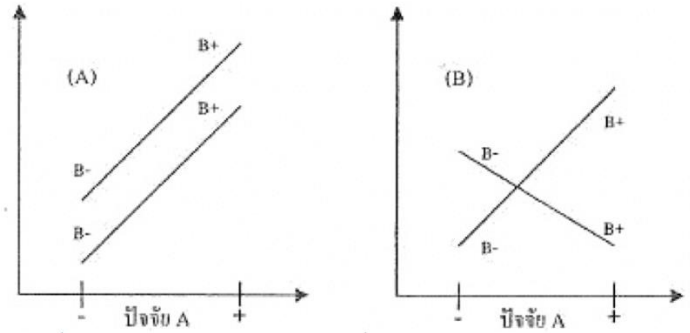
3.การเลือกตัวแปรตอบสนอง เป็นการกำหนดตัวแปรตอบสนองที่ต้องการจะทดลองและเกี่ยวข้องกับกระบวนการ เช่น อัตราการผลิตดี (Yield) สัดส่วนของเสีย ความหนาของชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งในหนึ่งการทดลองอาจมีหลายตัวแปรตอบสนองได้ และวิธีการวัดค่าตัวแปรตอบสนองเหล่านั้นจะต้องถูกต้องและแม่นยำ

4. การเลือกแบบการทดลอง เป็นการกำหนดรูปแบบการทดลอง โดยพิจารณาตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาว่าจะทำการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัย หรือจะหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย จากนั้นจึงพิจารณาขนาดตัวอย่าง (จำนวนเรพลิเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองว่าควรจะใช้วิธีบล็อกหรือการแรนดอมไมเซชัน ทั้งนี้การกำหนดรูปแบบการทดลองจำเป็นต้องคำนึงถึงต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง เวลาที่เสียไป และความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้นในกระบวนการ ต่อมาจะกล่าวถึงแบบทดลองที่เป็นที่นิยมใช้เพราะมีประสิทธิภาพสูง ได้แก่

4.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial design)

เป็นการศึกษาผลที่เกิดจากการการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เรียกว่า ปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันละกัน ตัวอย่างเช่น ถ้าปัจจัย A มี a ระดับ และปัจจัย B มี b ระดับ สำหรับการทดลอง 1 เรพลิเคต จะมีจำนวนการทดลองทั้งหมด (Treatment combination) ab การทดลอง

ผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยใด ๆ ที่ส่งผลให้ค่าผลตอบ (Response) เกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยนั้น จะเรียกว่า ผลหลัก (Main effect) และในบางการทดลองนั้นจะพบว่าผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่น ๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น เรียกเหตุการณ์แบบนี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction effect) ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยา (A) และการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีอันตรกิริยา (B)

จากรูปที่ 2.8 พบว่าเป็นการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัย A และ B แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ A^- กับ B^- และระดับสูง A^+ กับ B^+ มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 4 การทดลอง ได้แก่ (A^-, B^-) (A^-, B^+) (A^+, B^-) และ (A^+, B^+) และมีค่าผลตอบ 4 ค่าด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 2.8 (A) เส้นของ B^- และ B^+ จะขนานกัน ซึ่งลักษณะกราฟเช่นนี้จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ต่อมาในรูปที่ 2.8 (B) เส้นของ B^- และ B^+ ไม่จะขนานกัน กล่าวคือ ปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาซึ่งต่อกันเกิดขึ้น กราฟลักษณะนี้จะใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญ (Significant) ของอันตรกิริยา

โดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลสามารถแบ่งย่อยออกให้เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดั้งนี้

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k (2^k Factorial design) เป็นการทดลองที่มีปัจจัย k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ แทนด้วย -1 หรือ (-) และระดับสูง แทนด้วย +1 หรือ (-) :ซึ่งจำนวนการทดลองจะขึ้นอยู่กับ n เรพลิเคต เพราะฉะนั้นจำนวนการทดลองทั้งหมด 2^kn การทดลอง การออกแบบการทดลองนี้เป็นการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัย k ปัจจัย ได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้นจึงนำการออกแบบการทดลองนี้ไปใช้เพื่อกรองปัจจัยที่มีจำนวนมากให้เหลือน้อยลง

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 3^k (3^k Factorial design) เป็นการทดลองที่มีปัจจัย k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ แทนด้วย -1 หรือ (-) ระดับปานกลาง แทนด้วย 0 และระดับสูง แทนด้วย +1 หรือ (-) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและปัจจัยที่ศึกษาจะอยู่ในลักษณะควอดราติก (Quadratic) หรือสมการกำลังสอง ดังนั้นการออกแบบการทดลองนี้เหมาะสำหรับผลตอบที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design)

เป็นการออกแบบการทดลองด้วยการลดรูปจากการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k เนื่องจากจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษามีจำนวนมากหรือตั้งแต่ 5 ปัจจัยขึ้นไป ทำให้ทรัพยากรที่อยู่ เช่น เวลา ค่าใช้จ่าย คน เป็นต้น ไม่สามารถรองรับการดำเนินการทดลองได้ โดยจะเลือกใช้การทดลองแบบ 2^{k-p} โดยที่ k คือ จำนวนปัจจัย และ p คือ ปัจจัยใด ๆ ที่เป็นคู่แฝดแฝง (Alias) กัน แทนด้วย 1,2,3,... ตัวอย่างเช่น การทดลองที่ 5 ปัจจัย 2 ระดับ และ p = 1 จะได้ว่า จำนวนการทดลองทั้งหมด 2^{5-1} = 16 การทดลอง ซึ่งแบบการทดลองนี้จะสามารถศึกษาผลกระทบหลักและอันตรกิริยาได้ แต่จะไม่ทั้งหมดเพราะเกิดโครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias structure) ของผลกระทบขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกการออกแบบมิติ (Resolution)

ให้เหมาะสม เพื่อคุณภาพของผลสรุปที่ได้จากการทดลองและการกำหนดค่าการออกแบบมิติจะแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบของปัจจัยที่ถูกกำหนดด้วยค่าการออกแบบมิติ

การออกแบบมิติ	รายละเอียดผลกระทบของปัจจัย
III (2^{3-1})	ไม่มีผลกระทบหลักของปัจจัยใด ๆ ที่เป็นคู่แฝดแฝงกับผลกระทบหลักของปัจจัยอื่น ๆ แต่ผลกะทบหลักจะเป็นคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยาสองปัจจัย
IV (2^{4-1})	ไม่มีผลกระทบหลักของปัจจัยใด ๆ ที่เป็นคู่แฝดแฝงกับผลกระทบหลักของปัจจัยอื่น ๆ หรืออันตรกิริยาสองปัจจัย แต่อันตรกิริยาสองปัจจัยจะเป็นคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกัน
V (2^{5-1})	ไม่มีผลกระทบหลักของปัจจัยหรืออันตรกิริยาสองปัจจัยใด ๆ ที่จะเป็นคู่แฝดแฝงกับผลหลักหรืออันตรกิริยาสองปัจจัยอื่น ๆ แต่อันตรกิริยาสองปัจจัยจะเป็นคู่แฝดแฝงกับอันตรกิริยา 3 ปัจจัย

4.3 การออกแบบการทดลองแบบพื้นที่ผิวผลตอบ (Response surface methodology: RSM)

เป็นการรวบรวมเทคนิคทางคณิตศาสตร์และสถิติมาประยุกต์ใช้สร้างแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ปัญหาที่ผลตอบจะขึ้นอยู่ปัจจัยหลายตัว และวัตถุประสงค์คือการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ ทำให้ปัจจัยแต่ละตัวต้องถูกทดสอบที่มากกว่า 2 ระดับ แบบการทดลองในประเภทนี้ ได้แก่ แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design: CCD) และแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เป็นการทดลองที่ระดับของปัจจัย 5 ระดับ จึงทำให้แบบการทดลองนี้มีคุณภาพภาพของการพยากรณ์ผลตอบสูง โดยการทดลองจะสร้างสมการพยากรณ์ผลตอบที่มีลักษณะของปัจจัยเป็นโพลิโนเมียลกำลังสอง แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k หรือ การทดลองเชิงแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{k-p} ที่จะทดลองระดับของปัจจัย ±1 หน่วย ส่วนการทดลองที่จุดศูนย์กลาง (Center point) จะมีระดับของปัจจัย 0 หน่วย และส่วนการทดลองที่ส่วนของจุดแกน (Axial point) จะใช้ระดับของปัจจัย $\pm\alpha$ หน่วย โดย $\alpha = (2^{k-p})^{1/4}$

แบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เป็นการทดลองที่ต้องการจะหลีกเลี่ยงจุดสูงสุด (Extreme point) ในการปรับค่าระดับของเครื่องจักร ถ้าปัจจัยที่ต้องการ

ทดลองมี 3 หรือ 4 ปัจจัย แบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนจะให้จำนวนการทดลองที่น้อยกว่าแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง แต่คุณภาพของการพยากรณ์ผลตอบจะต่ำกว่าแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง โดยการทดลองจะสร้างสมการพยากรณ์ผลตอบที่มีลักษณะของปัจจัยเป็นโพลิโนเมียลกำลังสอง แบบการทดลองนี้จะนำเอาการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k มาเพิ่มจุดกึ่งกลาง (Midpoint) เข้าไป

5. ทำการทดลอง เป็นการเฝ้าติดตามดูแลขั้นตอนการดำเนินงานในกระบวนการที่ศึกษาด้วยความระมัดระวัง เพื่อให้สามารถมั่นใจได้ว่าการดำเนินงานในทุกขั้นตอนเป็นไปอย่างถูกต้องสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้ ถ้าหากมีสิ่งผิดพลาดเกิดขึ้นทำให้ไม่สามารถนำผลลัพธ์จากการทดลองนั้นไปใช้ได้ ควรจะต้องมีแผนการรับมือกับสถานการณ์อย่างไร ดังนั้นจึงควรที่จะปรึกษาและทำความเข้าใจกับทีมก่อนทำการทดลองเสมอ

6. การวิเคราะห์ข้อมูล เป็นการนำเอาหลักทางสถิติและหลักทางวิศวกรรมหรือเทคโนโลยีเฉพาะด้านมาประยุกต์ใช้ร่วมกัน เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลจากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง และสามารถสรุปผลว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่

ในการวิเคราะห์การทดลองเชิงแฟคทอเรียลนอกจากการจะวิเคราะห์ความถดถอย (Analysis of variance: ANOVA) สำหรับทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัย และพิจารณาผลกระทบหลักและอันตรกิริยาของปัจจัยแล้ว ยังจำเป็นต้องมีการตรวจสอบสมมติฐานของค่าความผิดพลาด (Error) ที่ได้จากการทดลองทุกครั้ง ซึ่งค่าความผิดพลาด คือความแตกต่างระหว่างค่าที่สังเกตได้กับค่าฟิตหรือค่าประมาณที่ได้จากสมการความสัมพันธ์ โดยมีสมมติฐานที่จะต้องตรวจสอบดังนี้

6.1 สมมติฐานที่ 1 ค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) ทดสอบด้วยกราฟความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติ ซึ่งเส้นกราฟจะต้องมีลักษณะหรือแนวโน้มเป็นเส้นตรง

6.2 สมมติฐานที่ 2 ค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน ทดสอบด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดและลำดับการทดลอง ซึ่งต้องข้อมูลต้องไม่มีแนวโน้มเกิดขึ้น

6.3 สมมติฐานที่ 3 ค่าความผิดพลาดมีค่าความแปรปรวนคงที่ ทดสอบด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดและค่าฟิต ซึ่งต้องข้อมูลต้องมีการกระจายตัวแบบสุ่ม

7. สรุปผลและข้อมูลเสนอแนะ เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จสิ้นแล้ว ควรจะต้องนำข้อมูลจากผลการสรุปที่ได้ไปทดลองปรับใช้ในทางปฏิบัติเพื่อยืนยันผล แล้วจึงสรุปผลอีกครั้งหนึ่งพร้อมทั้งแนะนำแนวทางการดำเนินการปรับปรุงกระบวนการต่อในอนาคต

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Kong et al., 2009) ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เพื่อสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผลิตผลดีของก๊าซเอทิลีน (Ethylene yield) กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องภายในกระบวนสังเคราะห์ก๊าซเอทิลีนจากเอทานอลโดยวิธีการขจัดน้ำ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic dehydration of ethanol) ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา (X_1) อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (X_2) ปริมาณอัตราการไหลของน้ำเสียต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (X_3) และหาค่าที่เหมาะสมของอัตราผลิตผลดีของก๊าซเอทิลีน (Y) ซึ่งการคำนวณอัตราผลิตผลดีของก๊าซเอทิลีนจะอาศัยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน แบบแรนดอมไมเซชัน ได้ดังนี้ ส่วนที่ 1 ใช้การทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^3 จำนวน 8 การทดลอง ส่วนที่ 2 ใช้การทดลองที่จุดศูนย์กลาง จำนวน 6 การทดลอง และส่วนที่ 3 ใช้การทดลองที่จุดแกน จำนวน 6 การทดลอง จากนั้นตรวจสอบสมมติฐานในการทดสอบค่าผิดพลาดของผลการทดลองทั้ง 3 สมมติฐานปรากฏว่าผ่านทั้งหมด จึงนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 14 ที่ α เท่ากับ 0.05 พบว่าผลกระทบหลักของทุกปัจจัย และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย X_1 กับ X_2 มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยเหล่านี้มีนัยสำคัญ จากนั้นวิเคราะห์ความถดถอยจะได้สมการถดถอยแบบโพลิโนเมียลกำลังสอง ดังนี้ $Y = 90.7 + 10.8x_1 - 2.3x_2 - 1.5x_3 - 11.6x_1^2 - 0.9x_2^2 - 5.4x_3^2 + 5.4x_1x_2$ และค่า R-Sq เท่ากับ ร้อยละ 99.9 และ R-Sq (adj) เท่ากับ ร้อยละ 99.8 แสดงว่าปัจจัยทั้งสามสามารถอธิบายผลของอัตราผลิตผลดีของก๊าซเอทิลีนได้ค่อนข้างดี ต่อมาวิเคราะห์การทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ พบว่าการปรับอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 328 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 85 และปริมาณอัตราการไหลของน้ำเสียต่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3.8 h^{-1} ทำให้ค่าอัตราผลิตผลดีของก๊าซเอทิลีน ร้อยละ 93.5 ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดในสภาวะการทดลองทั้งหมด

(Srinivasan et al., 2014) ได้ใช้วิธีซิกซ์ ซิกมาในการปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการพ่นสีโช้คอัพของรถยนต์ เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น และสร้างความเชื่อมั่นในคุณภาพให้แก่ลูกค้า มีขั้นตอนดำเนินงานวิจัย 5 ขั้นตอน คือ 1. การกำหนดปัญหา ศึกษาสภาพปัญหาโดยใช้แผนภูมิพาเรโต พบว่าปริมาณของเสียส่วนใหญ่เกิดจากปัญหาสีหลุดลอก (Peel off) และสีพอง (Blister) และจัดทำข้อเสนอโครงการ (Project charter) 2. การวัดสาเหตุเบื้องต้นของปัญหาประเมินความสามารถของกระบวนการ (Process capability analysis) พบว่าระดับซิกมาอยู่ที่ 3.31 3. การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา เป็นการระดมสมองจากพนักงานแต่ละฝ่ายงานและลูกค้า เพื่อหาสาเหตุรากเง้าของปัญหา โดยใช้แผนผังแสดงเหตุและผลและมาตรวัดลิเคิร์ท (Likert Scale) ในการระบุจำนวนสาเหตุหรือปัจจัยที่มีความสำคัญต่อปัญหา พบว่ามี 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิของการทำความสะอาด (Cleaning temperature) ค่าพีเอชฟอสเฟต (Phosphate pH) และอุณหภูมิฟอสเฟต (Phosphate temperature) 4. การปรับปรุงกระบวนการ ใช้การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

(Taguchi Design) จำนวน 27 การทดลอง จาก 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ เพื่อหาระดับที่เหมาะสมที่สุดของ 3 ปัจจัย จากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) พบว่าการปรับอุณหภูมิของการทำความสะอาด 60 องศาเซลเซียส ค่าพีเอชฟอสเฟต 3.5 และอุณหภูมิฟอสเฟต 60 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนปัจจัยรบกวน (Signal to noise ratio) ที่เหมาะสมที่สุดทั้งปัญหาสีหลุดออกและสีพอง 5. การควบคุมกระบวนการ นำระดับของ 3 ปัจจัยไปปรับใช้ในกระบวนการและประเมินความสามารถของกระบวนการ พบว่าระดับซิกมาเพิ่มขึ้นเป็น 4.5 จากการนำเอาวิธีซิกซ์ ซิกมามาใช้ภายในองค์จะสามารถทำให้เห็นถึงความผันแปรต่าง ๆ ของกระบวนการ และสามารถกำหนดแผนควบคุมความผันแปรให้อยู่ภายในระดับที่ยอมรับได้

(Paintsil et al., 2017) ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จำนวนเรพลิเคชัน 2 ครั้ง และมีการแรนดอมไมเซชันการทดลอง เพื่อสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระว่างอัตราผลิตผลดีของก๊าซไบโอดีเซล (Biodiesel yield) กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องภายในกระบวนทรานเอสเทอริฟิเคชั่น (Transesterification process) ได้แก่ ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fat acid: A) ความเร็วในการกวน (Stirring speed: B) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst amount: C) และหาค่าที่เหมาะสมของอัตราผลิตผลดีของก๊าซไบโอดีเซล (Y) ซึ่งการคำนวณอัตราผลิตผลดีของก๊าซเอทิลีนจะอาศัยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี และสาเหตุที่คณะผู้วิจัยทำการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เนื่องจากกว่าปัจจัยปริมาณกรดไขมันอิสระไม่สามารถปรับค่าไปได้ถึง ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของน้ำมัน ซึ่งเป็นค่าที่จุดแกนในการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เพราะว่าถ้าปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่า ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของน้ำมัน จะไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชั่น โดยการออกแบบการทดลองนี้จะใช้จำนวนการทดลองทั้งหมด 28 การทดลอง จากนั้นตรวจสอบสมมติฐานในการทดสอบค่าผิดพลาดของผลการทดลอง พบว่าค่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติ ต่อมาวิเคราะห์ความถดถอย จึงนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab ที่ α เท่ากับ 0.05 พบว่าผลกระทบหลักของทุกปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย AกับC BกับC และCกับC มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยเหล่านี้ มีนัยสำคัญ จากนั้นวิเคราะห์ความถดถอยจะได้สมการถดถอยแบบโพลิโนเมียลกำลังสอง ดังนี้ $Y = 88.37 - 12.11A + 9.55B + 28.12C - 22.66C^2 + 19.49AC - 17.39BC$ และค่า R-Sq เท่ากับ ร้อยละ 90.91 และ R-Sq (adj) เท่ากับ ร้อยละ 86.37 แสดงว่าปัจจัยทั้งสามสามารถอธิบายผลของอัตราผลิตผลดีของก๊าซไบโอดีเซลได้ค่อนข้างดี ต่อมาวิเคราะห์การทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ พบว่าการใช้ปริมาณกรดไขมันอิสระ ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำมัน ความเร็วในการกวน 400 รอบ/นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของน้ำมัน ทำให้ค่าอัตราผลิตผลดีของก๊าซไบโอดีเซลมากกว่า ร้อยละ 98 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในสภาวะการทดลองทั้งหมด

2.9 แบบจำลองการถดถอย

แบบจำลองการถดถอย (Regression model) เป็นการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรตั้งแต่สองตัวขึ้นไป เพื่อใช้พยากรณ์หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรตาม (Dependent variable) หรือผลตอบ (Response) แทนด้วย y ที่มีอยู่เพียงตัวเดียว โดยมีค่าขึ้นกับค่าของตัวแปรอิสระ (Independent variable) หรือตัวแปรถดถอย (Regressor) หรือตัวแปรทำนาย (Predictor variable) แทนด้วย x จำนวน k ตัว เช่น x_1, x_2, ...x_k ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร y และ x_k มักจะอยู่ในรูปแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณที่มีตัวแปรถอย k ตัว (Multiple linear regression model with k regressor variable) ดังสมการที่ 2.14

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon \qquad (2.14)$$

โดยที่ β_0 ค่าคงที่ (Constant) เป็นตัวกำหนดจุดตัดระนาบแกน y ของแบบจำลองการถดถอย

β_j คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ของตัวแปรอิสระ x_k เมื่อ j = 0, 1, ..., k ดังนั้นพารามิเตอร์ β_j จะแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ y ต่อหนึ่งหน่วยของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ x_j เมื่อตัวแปรอิสระที่เหลือทั้งหมด x_k ($k \neq j$) มีค่าคงตัว

ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Error or residual) ระหว่างค่า y และ $\hat{y}$ (ค่าผลตอบจากแบบจำลองการถดถอย)

แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณสามารถนำมาใช้กับแบบจำลองอื่น ๆ ที่มีความซับซ้อนมากกว่าสมการที่ 2.14 โดยไม่ต้องพิจารณาถึงรูปร่างของผิวผลตอบที่ถูกสร้างขึ้นมา เช่น การเติมพจน์ของอันตรกิริยาลงไปในแบบจำลองอันดับที่หนึ่งซึ่งมี 2 ตัวแปร ดังสมการที่ 2.15

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon$$

โดยให้ $x_3 = x_1 x_2$ และ $\beta_3 = \beta_{12}$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \qquad (2.15)$$

การยอมรับแบบจำลองการถดถอยที่ได้มานั้นมีความน่าเชื่อมากน้อยเพียงใด จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination) แทนด้วย R^2 ซึ่งมีค่า 0 – 1 โดยปกติแล้วแบบจำลองการถดถอยใด ๆ ที่มีค่า R^2 ยิ่งมาก แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยนี้มีความน่าเชื่อถือมาก แต่เนื่องจากค่า R^2 จะขึ้นกับจำนวนตัวแปรอิสระที่อยู่ในแบบจำลองการถดถอยด้วย ทำให้เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระที่อาจจะไม่มีนัยสำคัญทางสถิติลงไปในแบบจำลองการถดถอยก็สามารถทำให้ค่า R^2 เพิ่มขึ้นได้ จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงได้ใช้ค่า R^2 แบบปรับแล้ว แทนด้วย R^2_{adj} ในการตัดสินใจยอมรับแบบจำลองการถดถอย เพราะเมื่อเพิ่มตัวแปรอิสระลงที่ไม่จำเป็นลงในแบบจำลอง จะทำให้ค่า R^2_{adj} ลดลงเสมอ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการ

3.1 แหล่งที่มาของข้อมูล

ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลสายการผลิตในส่วนของวัตถุดิบและเตาหลอมแก้วทั้งหมด 3 สาย ตั้งแต่ มกราคม พ.ศ. 2563 ถึง สิงหาคม พ.ศ. 2564 ซึ่งมีจำนวนข้อมูลตัวแปรตอบสนองและปัจจัยทั้งหมด 770 ค่า

3.2 การกำหนดตัวแปรตอบสนองและปัจจัย

ผู้วิจัยศึกษาตัวแปรตอบสนอง 3 ตัวแปร ได้แก่ ค่าสี a ค่าสี b และค่าต้นทุนวัตถุดิบรวม ด้วยการพิจารณาปัจจัยทั้งหมด 10 ปัจจัย แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบ ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์ ส่วนที่ 2 ปัจจัยที่มาจากเตาหลอม ได้แก่ อัตราการดึงน้ำแก้ว อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สอง อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สาม อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สอง อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สาม ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน และค่าพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งข้อมูลตัวแปรตอบสนองและปัจจัยทั้งหมด 770 ค่า จะมีค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของข้อมูลตัวแปรตอบสนองและปัจจัยทั้งหมด 770 ค่า

ประเภท	ข้อมูล	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
ตัวแปรตอบสนอง	ค่าสี a	-0.8930	-1.6083
	ค่าสี b	-0.0001	-0.5701
ปัจจัย (วัตถุดิบ)	ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม (ร้อยละ)	0.458	0.0628
	ปริมาณโซเดียมซัลเฟต (กิโลกรัม)	10.8	13
	ปริมาณโคบอลต์ (กิโลกรัม)	0.0032	0.00395
ปัจจัย (เตาหลอม)	อัตราการดึงน้ำแก้ว (ตัน/วัน)	29.879	43.817
	อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่ 2 (องศาเซลเซียส)	1,229	2,517
	อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่ 3 (องศาเซลเซียส)	1,534	1,604
	อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่ 2 (องศาเซลเซียส)	1,250	1,274
	อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่ 3 (องศาเซลเซียส)	1,167	1,189
	สัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน	9.6	9.8
	พลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง (ล้านบีทียู/ตัน)	3.973	6.022

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หมายเหตุ: ค่าปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบ ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์ จะเป็นค่าปริมาณของวัตถุดิบแต่ละชนิดต่อ 1 รุ่นผลิต

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี a และค่าสี b กับปัจจัย จะใช้การวิเคราะห์การถดถอยด้วยจำนวนปัจจัยทั้งหมด 10 ปัจจัย และการหาค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด จะเป็นผลรวมจากค่าต้นทุนของปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบทั้งหมด 3 ปัจจัย เท่านั้น ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยที่ต้องการศึกษาของแต่ละตัวแปรสนอง

ปัจจัย		ค่าสี a	ค่าสี b	ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด
วัตถุดิบ	ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม (X_1)	✓	✓	✓
	ปริมาณโซเดียมซัลเฟต (X_2)	✓	✓	✓
	ปริมาณโคบอลต์ (X_3)	✓	✓	✓
เตาหลอม	อัตราการดึงน้ำแก้ว (X_4)	✓	✓	✗
	อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่ 2 (X_5)	✓	✓	✗
	อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่ 3 (X_6)	✓	✓	✗
	อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่ 2 (X_7)	✓	✓	✗
	อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่ 3 (X_8)	✓	✓	✗
	สัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน (X_9)	✓	✓	✗
	พลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง (X_{10})	✓	✓	✗

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3 การเตรียมข้อมูล

ผู้วิจัยนำข้อมูลทั้งหมด 770 ค่า มาแบ่งออกเป็นชุดข้อมูล จำนวน 2 ชุด ด้วยวิธีการสุ่ม ได้แก่ ชุดข้อมูลเรียนรู้ (Training set) ร้อยละ 70 มีจำนวนข้อมูล 539 ค่า เพื่อนำไปหาแบบจำลองถดถอย และชุดข้อมูลทดสอบ (Test set) ร้อยละ 30 มีจำนวนข้อมูล 231 ค่า เพื่อใช้ทดสอบความแม่นของแบบจำลองถดถอยที่ได้จากชุดข้อมูลเรียนรู้

3.4 การหาแบบจำลองถดถอย

ผู้วิจัยนำชุดข้อมูลเรียนรู้ของค่าสี a ค่าสี b และค่าปัจจัยมาวิเคราะห์การถดถอยด้วยโปรแกรม Minitab 21 ในรูปแบบสมการควอดราติก (Quadratic) เพื่อทดสอบผลกระทบหลักของปัจจัย ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย และความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของปัจจัย จากนั้นใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบขั้นตอน (Stepwise regression) เพื่อหาแบบจำลองถดถอยที่มีเฉพาะเทอมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญเท่านั้น

ในการหาแบบจำลองถดถอยแต่ละครั้ง โปรแกรมจะรายงานข้อมูลผิดปกติ (Unusual observations) ประเภท R ของค่าสีออกมา ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีค่าสัมบูรณ์ของค่าส่วนตกค้างมาตรฐาน (Standardized residual) มากกว่า 2 จึงจัดว่าเป็นข้อมูลผิดปกติ หรือข้อมูลที่มีค่าส่วนตกค้างมากเมื่อเทียบกับค่าส่วนเหลือของข้อมูลตัวอื่น ๆ ฉะนั้นการนำข้อมูลผิดปกติประเภทนี้มาสร้างแบบจำลองถดถอย จะทำให้แบบจำลองถดถอยที่ได้นั้นมีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลส่วนใหญ่ และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้วของแบบจำลองถดถอยจะมีค่าลดลง ดังนั้นในแต่ละครั้งของการสร้างแบบจำลองการถดถอย ผู้วิจัยจะตัดข้อมูลผิดปกติประเภท R ของค่าสี a และค่าสี b ไปพร้อมกัน เมื่อข้อมูลค่าสีทั้งคู่เป็นข้อมูลผิดปกติประเภท R หรือข้อมูลค่าสี a หรือค่าสี b ค่าใดค่าหนึ่งเป็นข้อมูลผิดปกติประเภท R ก่อนจะทำการหาแบบจำลองถดถอยครั้งถัดไปเสมอ และเสร็จสิ้นการหาแบบจำลองถดถอยเมื่อไม่พบข้อมูลผิดปกติประเภท R เกิดขึ้น เนื่องจากการจะใช้ฟังก์ชันการหาค่าตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด (Response Optimizer) ของโปรแกรม Minitab 21 สำหรับหาค่าที่เหมาะสมของค่าสี a และค่าสี b จำเป็นต้องมีจำนวนข้อมูลของค่าสีทั้งสองที่เท่ากัน

การเลือกแบบจำลองถดถอยเพื่อใช้พยากรณ์ค่าสี a และค่าสี b ที่จะนำไปใช้งานนั้น จะพิจารณาด้วยค่าตัวชี้วัดทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว จำนวนข้อมูลที่เหลือหลังจากลบข้อมูลผิดปกติประเภท R ออกแล้ว และค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์

ในการคำนวณค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์นั้น จะเป็นการทดสอบความแม่นของแบบจำลองถดถอยระหว่างค่าพยากรณ์ของค่าสี a และค่าสี b ที่ได้จากการนำค่าปัจจัยของข้อมูลชุดทดสอบมาแทนค่าลงไปในแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b มาเปรียบเทียบกับค่าจริงของค่าสี a และค่าสี b ของข้อมูลชุดทดสอบ เพื่อเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.5 การหาค่าที่เหมาะสม

ผู้วิจัยวิเคราะห์กราฟพื้นผิวผลตอบ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้ง ผลกระทบหลัก และผลกระทบร่วมของปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อค่าสี a และค่าสี b ในแบบจำลองถดถอยที่จะนำไปใช้งาน จากนั้นใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าสี a ค่าสี b และค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด มีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมาย โดยที่มีค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability) สูงที่สุด พร้อมทั้งสรุปผลทดลอง

สำหรับการคำนวณค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ต่อ 1 รุ่นผลิต จะนำค่าปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบของแบบจำลองถดถอยที่จะนำไปใช้งาน ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์ มาคูณกับราคาต่อหน่วยของวัตถุดิบแต่ละชนิด เมื่อนำมารวมกันจะได้ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ต่อ 1 รุ่นผลิต

บทที่ 4

ผลการดำเนินการ

4.1 การหาแบบจำลองถดถอย

ผู้วิจัยได้แบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b จากการตัดข้อมูลผิดปกติประเภท R ออกไปทั้งหมด 26 ครั้ง จะได้แบบจำลองถดถอยของค่าสีอยู่ในรูปสมการควอดราติกที่แตกต่างกัน แบ่งเป็นค่าสี a 26 แบบ และค่าสี b 26 แบบ พบว่าแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b ครั้งที่ 26 ที่ไม่พบข้อมูลผิดปกติประเภท R เกิดขึ้นแล้วนั้น จะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้วของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b ร้อยละ 74.44 และ 78.01 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาจำนวนข้อมูลที่เหลือหลังจากลบข้อมูลผิดปกติประเภท R ออกแล้ว มีจำนวน 191 ค่า ซึ่งเป็นจำนวนข้อมูลที่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนข้อมูลทั้งหมด 539 ค่า ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้พิจารณาแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b ครั้งอื่น ๆ เพิ่มเติม โดยจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้วมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b ครั้งที่ 26 และจำนวนข้อมูลที่เหลือหลังจากลบข้อมูลผิดปกติประเภท R ออกแล้วต้องมีจำนวนมากกว่าแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b ครั้งที่ 26 อยู่พอสมควร พบว่ามีแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b ครั้งที่ 14 และ 16 เท่านั้น ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้วและจำนวนข้อมูลที่เหลือหลังจากลบข้อมูลผิดปกติประเภท R ออกแล้วอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ ซึ่งมีค่าตัวชี้วัดทั้ง 2 ค่า ดังตารางที่ 4.1

ต่อมานำแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b ครั้งที่ 14 16 และ 26 จำนวน 6 สมการไปทดสอบความแม่นด้วยการหาค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ พบว่าแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 14 16 และ 26 มีค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ 5.32 5.05 และ 5.20 ตามลำดับ ในส่วนของแบบจำลองถดถอยของค่าสี b ครั้งที่ 14 16 และ 26 มีค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ 809.22 538.38 และ 808.15 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูงมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงจะไม่นำแบบจำลองถดถอยของค่าสี b ครั้งที่ 14 16 และ 26 หรือแบบจำลองถดถอยของค่าสี b ที่หาได้ทั้งหมดไปใช้งาน

สาเหตุที่แบบจำลองถดถอยของค่าสี b ทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ที่สูงมากนั้น อาจจะเป็นผลจากค่าความจุความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่โรงงานกรณีศึกษารับมากจากผู้ผลิตมีค่าไม่คงที่ ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิเตาหลอมแก้วมีค่าไม่คงที่ตามไปด้วย เมื่อทำการปรับเพิ่มหรือลด

ปริมาณก๊าซเชื้อเพลิง จะมีผลต่อการเปลี่ยนสถานะของไอออนเหล็กออกไซด์ที่เป็นสารให้สีแก้วในช่วงสีน้ำเงินไปถึงสีเหลือง ทำให้ช่วงสีในแนวแกนตั้งหรือค่าสี b มีค่าไม่คงที่ จากเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้เสนอให้โรงงานกรณีศึกษาหาแบบจำลองถดถอยของค่าสีใหม่อีกครั้งในอนาคต เมื่อโรงงานกรณีศึกษาได้มีการจัดทำระบบควบคุมค่าความจุความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้รับมาจากผู้ผลิตให้คงที่มากขึ้นก่อน

ตารางที่ 4.1 ตัวชี้วัดของแบบจำลองถดถอยของค่าสี **a** และค่าสี **b** ครั้งที่ 14 16 และ 26

ครั้งที่	แบบจำลองการถดถอย	เทอมที่มีนัยสำคัญ	R^2_{adj} (%)	MAPE (%)	n
14	ค่าสี a = -15.91 - 42.1X_1 + 3778X_3 + 1.834X_9 + 124561X_3^2 + 9587X_1X_3 - 515X_3X_9	X_3^2, X_1X_3, X_3X_9	61.75	5.32	262
	ค่าสี b = 3932 + 4.38X_2 + 28820X_3 + 0.1588X_6 + 0.01117X_7 - 5.118X_8 - 232.6X_9 - 0.0389X_2^2 - 0.000143X_6^2 + 0.00157 X_8^2 - 0.002258X_2X_6 - 24.81X_3X_8 + 0.03237X_6X_9 + 0.1548X_8X_9	X_7, X_2^2, X_6^2, X_8^2, X_2X_6, X_3X_8, X_6X_9, X_8X_9	72.27	809.22	
16	ค่าสี a = -21.07 - 5.202X_1 + 5187X_3 + 2.151X_9 + 117185X_3^2 - 601X_3X_9	X_1, X_3^2, X_3X_9	62.45	5.05	244
	ค่าสี b = 3341 + 17.97X_2 + 35893X_3 + 0.000994X_4 + 0.1532X_6 + 0.01106X_7 - 4.668X_8 - 182.3X_9 - 1038191X_3^2 - 0.000133X_6^2 + 0.00149X_8^2 - 0.002995X_2X_6 - 1.36X_2X_9 - 24.07X_3X_8 + 0.0304X_6X_9 + 0.1272X_8X_9	X_4, X_3^2, X_6^2, X_8^2, X_2X_6, X_2X_9, X_3X_8, X_6X_9, X_8X_9	74.82	538.38	
26	ค่าสี a = -47.84 - 6.175X_1 + 12563X_3 + 4.751X_9 - 1272X_3X_9	X_1, X_3X_9	74.44	5.20	191
	ค่าสี b = 850 - 13.51X_2 + 63506X_3 + 0.2501X_6 + 1.113X_7 - 3.038X_8 - 0.000063X_6^2 - 0.000436X_7^2 + 0.001281X_8^2 - 88.5X_2X_3 - 0.001972X_2X_6 + 0.01438X_2X_8 - 8.5X_3X_6 + 42.1X_3X_8	X_6^2, X_7^2, X_8^2, X_2X_3, X_2X_6, X_2X_8, X_3X_6, X_3X_8	78.01	808.15	

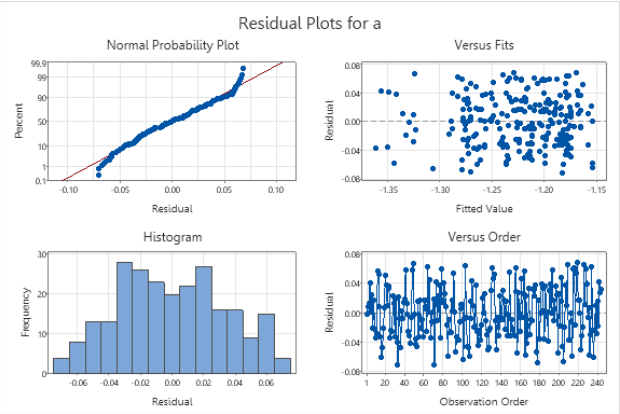
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผู้วิจัยได้นำค่าตัวชี้วัดทั้งหมด 3 ค่าของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 14, 16 และ 26 มาเปรียบเทียบกันแล้ว พบว่าแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 26 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้วมากที่สุด และมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยเป็นลำดับที่สอง แต่มีจำนวนข้อมูลที่เหลือหลังจากลบข้อมูลผิดปกติประเภท R ออกแล้วเหลือค่อนข้างน้อยเพียง 191 ค่า จึงไม่เลือกแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 26 ไปใช้งาน ต่อมาผู้วิจัยจะเปรียบเทียบค่าตัวชี้วัดทั้ง 3 ค่าของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 14 และ 16 พบว่าแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 มีความน่าสนใจมากกว่าแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 14 เพราะแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้วมากกว่าแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 14 และมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยกว่าแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 14 อีกทั้งยังมีจำนวนข้อมูลที่เหลือหลังจากลบข้อมูลผิดปกติประเภท R ออกแล้วน้อยกว่าแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 14 เพียงเล็กน้อย จำนวน 18 ค่า ซึ่งถือว่าเป็นจำนวนที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกนำแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 ไปใช้งาน ดังสมการที่ 4.1

$$a = -21.07 - 5.202X_1 + 5187X_3 + 2.151X_9 + 117185X_3^2 - 601X_3X_9 \quad (4.1)$$

ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบสมมติฐานความเหมาะสมของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 ว่ามีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ด้วยการพิจารณากราฟส่วนตกค้าง (Residual plot) ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งมีสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่ สมมติฐานที่ 1 ส่วนตกค้างมีการแจกแจงปกติ พบว่ากราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติจะมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง โดยเฉพาะที่ปลายกราฟจะมีลักษณะเป็นเฮฟวี่เทล (Heavy-tailed) ซึ่งสอดคล้องกับกราฟฮีสโตแกรม (Histogram) เป็นผลให้ค่าความน่าจะเป็น (p-value) น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพราะการลบข้อมูลผิดปกติประเภท R ออกไปจำนวนมากขึ้น ทำให้จำนวนข้อมูลที่นำมาสร้างแบบจำลองถดถอยน้อยลง และส่งผลให้ข้อมูลที่มีค่าส่วนตกค้างน้อยกว่าข้อมูลผิดปกติประเภท R เพียงเล็กน้อย จะมีสัดส่วนมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนข้อมูลทั้งหมด สมมติฐานที่ 2 ส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน พบว่ากราฟระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง (Observation order) ของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 มีการกระจายตัวอย่างสุ่ม และสมมติฐานที่ 3 ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ พบว่ากราฟระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) ของแบบจำลองการถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 มีลักษณะการกระจายตัวโดยความผันแปรคงที่ไม่เป็นแนวโน้ม ดังนั้นแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 จึงสามารถยอมรับได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.1 กราฟส่วนตกค้างของแบบจำลองถดถอยของค่าสี **a** ครั้งที่ 16

ต่อมาเป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) ของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ดังรูปที่ 4.2 จะได้เทอมที่มีนัยสำคัญ นั่นคือ เทอมที่มีค่าความน่าจะเป็นน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จำนวน 5 เทอม ได้แก่ เทอมผลกระทบหลักปริมาณเหล็กออกไซด์รวม เทอมผลกระทบหลักปริมาณโคบอลต์ เทอมผลกระทบหลักค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน เทอมกำลังสองปริมาณโคบอลต์ และเทอมผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณโคบอลต์และค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน

Regression Equation

a = -21.07 - 5.202 Fe2O3 (%) + 5187 Co + 2.151 Gas ratio + 117185 Co*Co - 601 Co*Gas ratio

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-21.07	7.70	(-36.25, -5.89)	-2.73	0.007	
Fe2O3 (%)	-5.202	0.823	(-6.823, -3.581)	-6.32	0.000	1.18
Co	5187	1997	(1253, 9121)	2.60	0.010	29226.85
Gas ratio	2.151	0.802	(0.572, 3.730)	2.68	0.008	1185.34
Co*Co	117185	44359	(29799, 204571)	2.64	0.009	768.45
Co*Gas ratio	-601	208	(-1010, -192)	-2.89	0.004	29440.44

Model Summary

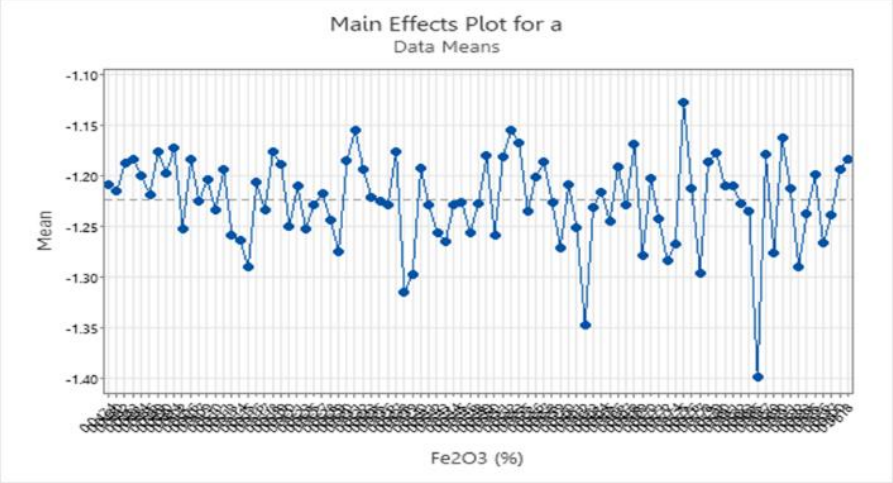
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
0.0346084	63.22%	62.45%	0.300758	61.20%	-940.62	-916.62

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	0.489992	63.22%	0.489992	0.097998	81.82	0.000
Fe2O3 (%)	1	0.002904	0.37%	0.047893	0.047893	39.99	0.000
Co	1	0.406216	52.41%	0.008080	0.008080	6.75	0.010
Gas ratio	1	0.064716	8.35%	0.008624	0.008624	7.20	0.008
Co*Co	1	0.006132	0.79%	0.008359	0.008359	6.98	0.009
Co*Gas ratio	1	0.010024	1.29%	0.010024	0.010024	8.37	0.004
Error	238	0.285062	36.78%	0.285062	0.001198		
Total	243	0.775054	100.00%				

รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองถดถอยของค่าสี **a** ครั้งที่ 16

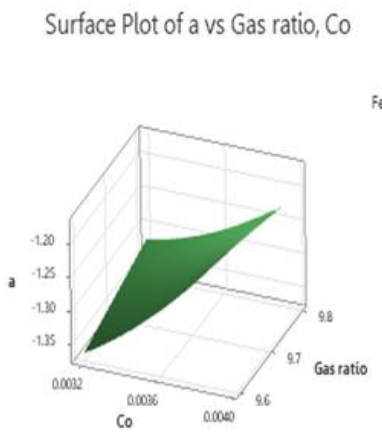
จากการพิจารณาเทอมผลกระทบหลักปริมาณเหล็กออกไซด์รวมด้วยกราฟผลกระทบหลัก ดังรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อปริมาณเหล็กออกไซด์รวมเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยของค่าสี a มีการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน แต่ค่าสัมประสิทธิ์ของเทอมปริมาณเหล็กออกไซด์รวมในแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 จะมีค่าเป็นลบ แสดงว่า เมื่อปริมาณเหล็กออกไซด์รวมเพิ่มขึ้น ค่าสี a จะลดลง ทำให้แก้วมีสีเขียวเข้มขึ้น เพราะเหล็กออกไซด์รวมมีไอออนเหล็กอยู่ร่วมกัน 2 สถานะ คือ ไอออนเหล็กเฟอรัสที่ให้สีน้ำเงินอมเขียว และไอออนเหล็กเฟอริก ที่ให้สีเหลือง เมื่อสีทั้งสองเกิดการผสมกันจะได้เป็นสีเขียว ดังนั้นเหล็กออกไซด์รวมจึงเป็นสารที่ทำให้แก้วมีสีเขียว นอกจากนี้เหล็กออกไซด์รวมยังมีผลต่อค่าสี b ด้วยเช่นกัน โดยเมื่ออัตราส่วนไอออนเหล็กเฟอรัสต่อไอออนเหล็กเฟอริกมีการเปลี่ยนแปลงไป เช่น กรณีไอออนเหล็กเฟอรัสเพิ่มขึ้น แก้วจะมีสีเขียวอมน้ำเงิน ทำให้ค่าสี b ลดลง แต่ถ้าไอออนเหล็กเฟอรัสลดลง แก้วจะมีสีเขียวอมเหลือง ทำให้ค่าสี b เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 กราฟผลกระทบหลักปริมาณเหล็กออกไซด์รวม

นอกจากนี้เทอมผลกระทบหลักปริมาณโคบอลต์ เทอมผลกระทบหลักค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน เทอมกำลังสองปริมาณโคบอลต์ จะถูกนำมาพิจารณาไปพร้อมกับเทอมผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณโคบอลต์และค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนด้วยกราฟพื้นผิวผลตอบ ดังรูปที่ 4.4 พบว่าการใช้ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนที่ระดับต่ำ (9.6) เมื่อเพิ่มปริมาณโคบอลต์จากระดับต่ำ (0.0032) ไปสู่ระดับกลาง (0.0036) ค่าสี a เพิ่มขึ้นจาก -1.37 เป็น -1.29 ต่อมาเพิ่มปริมาณโคบอลต์จากระดับกลางไปสู่ระดับสูง (0.0040) ค่าสี a เพิ่มขึ้นจาก -1.29 เป็น -1.16 ทำให้แก้วเปลี่ยนจากสีเขียวเข้มเป็นสีเขียวอ่อน ซึ่งกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงายจากผลเทอมกำลังสองของปริมาณโคบอลต์ และการใช้ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนที่ระดับสูง (9.8)

เมื่อเพิ่มปริมาณโคบอลต์จากระดับต่ำ (0.0032) ไปสู่ระดับกลาง (0.0036) ค่าสี a เพิ่มขึ้นจาก -1.33 เป็น -1.29 ต่อมาเพิ่มปริมาณโคบอลต์จากระดับกลางไปสู่ระดับสูง (0.0040) ค่าสี a เพิ่มขึ้นจาก -1.29 เป็น -1.21 ทำให้แก้วเปลี่ยนจากสีเขียวเข้มเป็นสีเขียวอ่อน กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงายจากผลเทอมกำลังสองของปริมาณโคบอลต์เช่นกัน



รูปที่ 4.4 กราฟพื้นผิวผลตอบของเทอมปริมาณโคบอลต์กับค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน

สำหรับการใช้ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนที่ระดับต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณโคบอลต์จากระดับต่ำไปสู่ระดับสูง ค่าสี a จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนที่ระดับสูง อาจจะเป็นเพราะการใช้ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนที่ระดับต่ำก๊าซออกซิเจนจะมีปริมาณมาก จึงเกิดสภาวะออกซิเดชัน (Oxidation state) ไอออนเหล็กเฟอรัสเปลี่ยนเป็นไอออนเหล็กเฟอริก ดังสมการที่ 4.2 ซึ่งไอออนเหล็กเฟอริกจะมีสีเหลือง เมื่อเพิ่มปริมาณโคบอลต์ที่เป็นสารให้ สีน้ำเงินให้มากขึ้น อาจจะเกิดการผสมสีระหว่างสีเหลืองและสีน้ำเงิน ทำให้แก้วมีสีเขียวอ่อนลง ค่าสี a จึงมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนที่ระดับสูง ซึ่งก๊าซเชื้อเพลิง หรือคาร์บอนจะมีปริมาณมาก เกิดสภาวะรีดักชัน (Reduction state) ไอออนเหล็กเฟอริกเปลี่ยน เป็นไอออนเหล็กเฟอรัส โดยไอออนเหล็กเฟอรัสจะมีสีน้ำเงินอมเขียว เมื่อเพิ่มปริมาณโคบอลต์ให้มากขึ้น อาจจะเกิดการผสมสีระหว่างสีน้ำเงินเขียวและสีน้ำเงิน ทำให้แก้วมีสีเขียวอ่อนลงไม่มากนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$4Fe^{3+} + 2O^{2-} \leftrightarrow 4Fe^{2+} + O_2 \quad (4.2)$$

4.2 การหาค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด

ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด จะเป็นผลรวมจากค่าต้นทุนของปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์ เนื่องจากข้อมูลที่ผู้วิจัยได้รับมามีเฉพาะราคาวัตถุดิบของปัจจัย 3 ปัจจัยนี้เท่านั้น ซึ่งค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด จะเป็น “ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ต่อ 1 รุ่นผลิต” มีจำนวน 244 ค่า ตามจำนวนข้อมูลที่นำมาหาแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 โดยค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดจะใช้เป็นตัวแปรตอบสนองร่วมกับค่าสี a เพื่อใช้ในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมในลำดับถัดไป

เนื่องจากเหล็กออกไซด์รวมเป็นสารองค์ประกอบในทรายแก้ว จึงต้องนำปริมาณทรายแก้วมาใช้คำนวณหาค่าต้นทุนของวัตถุดิบแทนปริมาณเหล็กออกไซด์รวม นอกจากนี้ราคาทรายแก้วจะสูงหรือต่ำนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กออกไซด์รวมที่อยู่ในทรายแก้ว ต่อมาผู้วิจัยได้หาค่าปริมาณเหล็กออกไซด์รวมต่ำสุดและสูงสุดที่ใช้จากข้อมูลปริมาณเหล็กออกไซด์รวมของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 จำนวน 244 ค่า พบว่าค่าปริมาณเหล็กออกไซด์รวมต่ำสุดเป็น ร้อยละ 0.047 และค่าปริมาณเหล็กออกไซด์รวมที่ใช้สูงสุดเป็น ร้อยละ 0.062 จากนั้นนำค่าปริมาณเหล็กออกไซด์รวมทั้งสองไปเปรียบเทียบกับช่วงค่าปริมาณเหล็กออกไซด์รวมของตลาดซื้อและขายทรายแก้ว เพื่อหาราคาทรายแก้ว ดังตารางที่ 4.2 สำหรับราคาโซเดียมซัลเฟตและโคบอลต์จะมีราคา 5.6 บาทต่อกิโลกรัม และ 1,500 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ราคาทรายแก้วตามช่วงค่าปริมาณเหล็กออกไซด์รวม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ช่วงค่าปริมาณเหล็กออกไซด์รวม (ร้อยละ)	ราคาทรายแก้ว (บาท/ตัน)
0.04 - 0.049	780
0.05 - 0.059	720
0.06 - 0.079	650

เมื่อผู้วิจัยพิจารณาสัดส่วนปริมาณวัตถุดิบ 3 ชนิดที่ใช้ต่อ 1 รุ่นผลิต พบว่าสัดส่วนปริมาณวัตถุดิบ 3 ชนิดที่ใช้ในบางรุ่นผลิตจะไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องปรับน้ำหนักวัตถุดิบ 3 ชนิดนี้ให้อยู่ในฐานเดียวกัน แล้วจึงนำค่าปริมาณวัตถุดิบแต่ละชนิดไปคำนวณหาค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดฐานให้เป็นค่า “ปริมาณวัตถุดิบแต่ละชนิดต่อปริมาณทรายแก้ว 1 ตัน” ดังสมการที่ 4.3 และ 4.5 เพราะทรายแก้วเป็นวัตถุดิบที่มีสัดส่วนน้ำหนักมากถึง ร้อยละ 90 ของน้ำหนักรวมจากวัตถุดิบ 3 ชนิดนี้

ขั้นตอนที่ 2: หาค่าต้นทุนวัตถุดิบแต่ละชนิด โดยค่าต้นทุนโซเดียมซัลเฟตและโคบอลต์ จะนำค่าปริมาณโซเดียมซัลเฟตและปริมาณโคบอลต์ต่อปริมาณทรายแก้ว 1 ตันมาคูณกับราคาวัตถุดิบ ดังสมการที่ 4.4 และ 4.6

$$\text{ปริมาณโซเดียมซัลเฟต } \left(\text{กิโลกรัม}/\text{ตัน}_{\text{ทรายแก้ว}}\right) = \frac{1{,}000X_2}{Y} \quad (4.3)$$

$$\text{ค่าต้นทุนโซเดียมซัลเฟต } \left(\text{บาท}/\text{ตัน}_{\text{ทรายแก้ว}}\right) = \frac{5{,}600X_2}{Y} \quad (4.4)$$

$$\text{ปริมาณโคบอลต์ } \left(\text{กิโลกรัม}/\text{ตัน}_{\text{ทรายแก้ว}}\right) = \frac{1{,}000X_3}{Y} \quad (4.5)$$

$$\text{ค่าต้นทุนโคบอลต์ } \left(\text{บาท}/\text{ตัน}_{\text{ทรายแก้ว}}\right) = \frac{1{,}500{,}000X_3}{Y} \quad (4.6)$$

เมื่อ X_2 คือ ปริมาณโซเดียมซัลเฟตที่ใช้ต่อ 1 รุ่นผลิต (กิโลกรัม)

X_3 คือ ปริมาณโคบอลต์ที่ใช้ต่อ 1 รุ่นผลิต (กิโลกรัม)

Y คือ ปริมาณทรายแก้วที่ใช้ต่อ 1 รุ่นผลิต (กิโลกรัม)

Chulalongkorn University

สำหรับค่าต้นทุนทรายแก้ว 1 ตัน ที่เป็นไปได้มี 3 ค่า ขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กออกไซด์รวม (X_1) ได้แก่

1.) ค่าต้นทุนทรายแก้ว เท่ากับ 780 (บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$) เมื่อ $0.04 \leq X_1 \leq 0.049$

2.) ค่าต้นทุนทรายแก้ว เท่ากับ 720 (บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$) เมื่อ $0.05 \leq X_1 \leq 0.059$

3.) ค่าต้นทุนทรายแก้ว เท่ากับ 650 (บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$) เมื่อ $0.06 \leq X_1 \leq 0.079$

ขั้นตอนที่ 3: นำค่าต้นทุนทรายแก้ว ค่าต้นทุนโซเดียมซัลเฟต และค่าต้นทุนโคบอลต์มารวมกัน จะได้เป็นค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด (บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$) ดังสมการที่ 4.7 4.8 และ 4.9

$$\text{ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ } 3 \text{ ชนิด } (\text{บาท}/\text{ตัน}_{\text{ทรายแก้ว}}) = 780 + \frac{5{,}600X_2}{Y} + \frac{1{,}500{,}000X_3}{Y} \quad (4.7)$$

เมื่อ $0.04 \leq X_1 \leq 0.049$

$$\text{ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ } 3 \text{ ชนิด } (\text{บาท}/\text{ตัน}_{\text{ทรายแก้ว}}) = 720 + \frac{5{,}600X_2}{Y} + \frac{1{,}500{,}000X_3}{Y} \quad (4.8)$$

เมื่อ $0.05 \leq X_1 \leq 0.059$

$$\text{ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ } 3 \text{ ชนิด } (\text{บาท}/\text{ตัน}_{\text{ทรายแก้ว}}) = 650 + \frac{5{,}600X_2}{Y} + \frac{1{,}500{,}000X_3}{Y} \quad (4.9)$$

เมื่อ $0.06 \leq X_1 \leq 0.069$

4.3.การหาค่าที่เหมาะสม

เนื่องด้วยโรงงานกรณีศึกษามีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์แก้วโซดาไลม์สีเขียวอมฟ้าเล็กน้อยตามคำแนะนำจากลูกค้า โดยมีค่าสี a เท่ากับ -1.22 และต้องการให้ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด มีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังต้องการทดสอบแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 ด้วย ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำการค่าที่เหมาะสมมาใช้หาค่าปรับตั้งของปัจจัยที่ทำให้ค่าตัวแปรตอบสนอง นั่นคือ ค่าสี a และค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ให้มีค่าเป็นไปตามค่าเป้าหมายที่โรงงานกรณีศึกษาต้องการ

ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้นำเอาข้อมูลปัจจัยที่เป็นเทอมที่มีนัยสำคัญในแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 ทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโคบอลต์ และสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมี 244 ค่า มาแทนค่าลงไปในแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 จะได้ค่าสี a พยากรณ์ออกมาเป็นค่าตัวแปรตอบสนองตัวที่ 1 จำนวน 244 ค่า ต่อมานำข้อมูลปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์ ของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมี 244 ค่า ไปคำนวณหาค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด เป็นค่าตัวแปรตอบสนองตัวที่ 2 จำนวน 244 ค่า ดังนั้นปัจจัยที่จะนำไปหาค่าที่เหมาะสม มีจำนวน 4 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต ปริมาณโคบอลต์ และสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน

ต่อมาผู้วิจัยได้หาค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเฉลี่ยของข้อมูลตัวแปรตอบสนองจากแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 เพื่อพิจารณาขอบเขตของค่าตัวแปรตอบสนองที่เป็นไปได้ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าเฉลี่ยของข้อมูลตัวแปรสนองจากแบบจำลองถดถอยขอ ค่าสี a ครั้งที่ 16

ตัวแปรตอบสนอง	ข้อมูลจากแบบจำลองค่าสี a ครั้งที่ 16		
	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
ค่าสี a	-1.40	-1.10	-1.20
ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด	757 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$	902 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$	834 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของค่าสี a มีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายของค่าสี a เท่ากับ-1.22 เป็นอย่างมาก และช่วงค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของค่าสี a มีค่าครอบคลุมค่าเป้าหมาย นอกจากนี้ค่าต่ำสุดของค่าต้นทุนวัตถุดิบรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ที่เป็นค่าเป้าหมาย จะเท่ากับ 757 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$ ซึ่งรุ่นผลิตที่มีค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดต่ำที่สุดนั้น จะใช้ปริมาณวัตถุดิบ 3 ชนิด ดังนี้ ค่าปริมาณเหล็กออกไซด์รวมเป็น ร้อยละ 0.06 ค่าปริมาณโซเดียมซัลเฟตเป็น 10.8 กิโลกรัม ค่าปริมาณโคบอลต์เป็น 0.00395 กิโลกรัม และค่าปริมาณทรายแก้วเป็น 621 กิโลกรัม จากการพิจารณาค่าปริมาณเหล็กออกไซด์รวมเป็น ร้อยละ 0.06 ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สมการที่ 4.9 ในการคำนวณค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด พร้อมทั้งได้แทนค่าปริมาณวัตถุดิบแต่ละชนิดลงไปในสมการที่ 4.10 ได้ดังนี้

$$\text{ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ } 3 \text{ ชนิด } \left(\text{บาท}/\text{ตัน}_{\text{ทรายแก้ว}}\right) = 650 + \frac{5{,}600(10.8)}{621} + \frac{1{,}500{,}000(0.00395)}{621} \quad (4.10)$$

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จะได้ว่าค่าต้นทุนทรายแก้ว 650 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$ ค่าต้นทุนโซเดียมซัลเฟต 97 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$ และค่าต้นทุนโคบอลต์ 10 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$ เมื่อนำมารวมกันจะได้ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด เท่ากับ 757 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$ ซึ่งค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ที่ได้มาจากกาคำนวณนี้ ถือว่ามีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด ที่มีค่าเท่ากับ 757 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$ มากำหนดเป็นค่าเป้าหมายของค่าต้นทุนรวมวัตถุดิบ 3 ชนิด

สุดท้ายผู้วิจัยใช้ฟังก์ชันการหาค่าที่เหมาะสม (Response Optimizer) ในโปรแกรม Minitab 21 เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่จะทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าเป็นไปตามค่าเป้าหมาย ซึ่งจะกำหนดค่าความสำคัญ (Importance) ของตัวแปรตอบสนองทั้งสองให้เท่ากัน จากนั้นพิจารณาเลือกผลลัพธ์ที่ทำให้ค่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite

Desirability: D) มีค่าสูงที่สุด ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.11 โดยค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบจะเป็นฟังก์ชันของค่าความพึงพอใจ (Desirability: d) ของตัวแปรตอบสนองแต่ละตัว ซึ่งค่าความพึงพอใจของตัวแปรตอบสนองแต่ละตัวจะแสดงถึงความสามารถในการหาค่าปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองตัวนั้นมีค่าเป็นไปตามเป้าหมายได้ โดยมีระดับความใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายตั้งแต่ 0 ถึง 1

$$D = (d_1 \times d_2 \times \ldots \times d_i)^{\frac{1}{n}} \qquad (4.11)$$

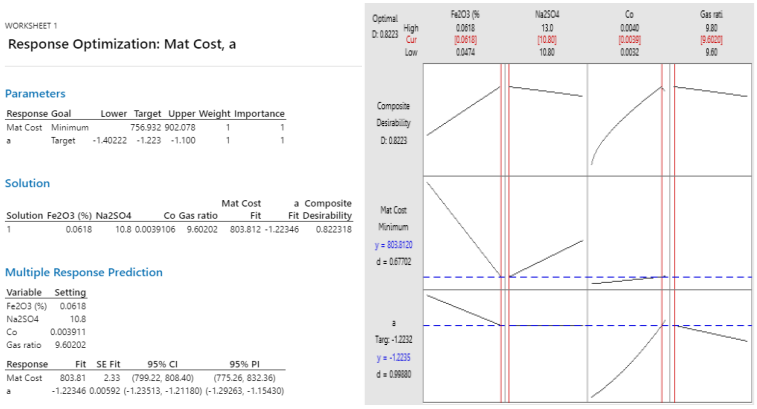
โดยที่ D คือ ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ

d_i คือ ค่าความพึงพอใจของตัวแปรตอบสนองลำดับที่ i

n คือ จำนวนตัวแปรตอบสนอง

จากการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันการหาที่เหมาะสม ดังรูปที่ 4.5 พบว่าค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่สามารถทำให้เกิดค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบของตัวแปรตอบสนองทั้งสองมีค่าสูงที่สุดเป็น 0.82 ด้วยการปรับตั้งค่าปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ดังนี้ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวมเป็น ร้อยละ 0.0618 ปริมาณโซเดียมซัลเฟตเป็น 10.8 กิโลกรัม ปริมาณโคบอลต์ 0.003911 กิโลกรัม และค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนเป็น 9.60202 ทำให้ได้ค่าสี a เท่ากับ -1.22346 และมีค่าความพึงพอใจ 0.99 เพราะค่าสี a มีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมายเป็นอย่างมาก ส่วนค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด เท่ากับ 804 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$ และค่าความพึงพอใจ 0.68 เพราะค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ที่ได้มีค่ามากกว่าค่าเป้าหมาย 757 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$ อยู่พอสมควร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



WORKSHEET 1

Response Optimization: Mat Cost, a

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Mat Cost	Minimum		756.932	902.078	1	1
a	Target	-1.40222	-1.223	-1.100	1	1

Solution

Solution	Fe2O3 (%)	Na2SO4	Co	Gas ratio	Mat Cost Fit	a Fit	Composite Desirability
1	0.0618	10.8	0.0039106	9.60202	803.812	-1.22346	0.822318

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
Fe2O3 (%)	0.0618
Na2SO4	10.8
Co	0.003911
Gas ratio	9.60202

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Mat Cost	803.81	2.33	(799.22, 808.40)	(775.26, 832.36)
a	-1.22346	0.00592	(-1.23513, -1.21180)	(-1.29263, -1.15430)

รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันการหาค่าที่เหมาะสม

การพิจารณาค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย เพื่อตรวจสอบว่าค่าที่เหมาะสมของปัจจัยสามารถนำไปปรับตั้งค่าในกระบวนการผลิตแก้วโซดาไลม์ของโรงงานกรณีศึกษาได้หรือไม่ ซึ่งค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดจะเป็นข้อมูลปัจจัยของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 จำนวน 244 ค่า แสดงค่าได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าที่เหมาะสมของปัจจัยของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย

ปัจจัย	ค่าที่เหมาะสม	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
ปริมาณเหล็กออกไซด์	ร้อยละ 0.0618	ร้อยละ 0.0618	ร้อยละ 0.0474
ปริมาณโซเดียมซัลเฟต	10.8 กิโลกรัม	13 กิโลกรัม	10.8 กิโลกรัม
ปริมาณโคบอลต์	0.003911 กิโลกรัม	0.00395 กิโลกรัม	0.0032 กิโลกรัม
ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน	9.60202	9.8	9.6

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย มีค่าอยู่ในช่วงค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ซึ่งโรงงานกรณีศึกษาสามารถนำค่าที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยนี้ไปปรับตั้งค่าได้จริง โดยมีการปรับตั้งค่าปัจจัย ดังนี้ ปริมาณเหล็กออกไซด์ใช้ค่าสูงสุด ร้อยละ 0.00618 ปริมาณโซเดียมซัลเฟตใช้ค่าต่ำสุด 10.8 กิโลกรัม ปริมาณโคบอลต์ใช้ค่าสูงสุด 0.00395 กิโลกรัม และค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนใช้ค่าต่ำสุด 9.6

การพิจารณาค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าที่ได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ตัวแปรตอบสนอง เพื่อตรวจสอบผลของค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้มานั้นสามารถเกิดขึ้นได้หรือไม่ และนำค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้ไปใช้ประโยชน์อย่างไร ซึ่งค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดจะเป็นข้อมูลตัวแปรตอบสนองของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 จำนวน 244 ค่า แสดงค่าได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด และค่าที่ได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนอง	ค่าที่ได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสม	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
ค่าสี a	-1.22346	-1.10	-1.40
ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด	804 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$	902 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$	757 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ตัวแปรตอบสนอง มีค่าอยู่ในช่วงค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ตัวแปรตอบสนอง ซึ่งค่าที่ได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมของตัวแปรตอบสนองทั้ง 2 ตัวแปรตอบสนองนี้สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของค่าสี a จะเป็นค่าสี a พยากรณ์ที่ได้จากแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 ดังนั้นแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 จึงสามารถนำมาใช้พยากรณ์ค่าสี a ในช่วงค่าสี a เท่ากับ -1.40 ถึง -1.10 ได้

สำหรับค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ที่ได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมนั้น ผู้วิจัยจะนำค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ที่ได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมมาเปรียบเทียบกับค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดที่เป็นค่าเป้าหมายและค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดที่เป็นค่าเฉลี่ยจากข้อมูลแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 โดยค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดแต่ละประเภทจะแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ประเภทของค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด

ประเภท	**ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด (บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$)**
ค่าเป้าหมาย	757
ค่าที่ได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสม	804
ค่าเฉลี่ยจากข้อมูลแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16	834

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ที่ได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมจะมีค่ามากกว่าค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดที่เป็นค่าเป้าหมาย เท่ากับ 47 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$ แต่เมื่อนำค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ที่ได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมมาเปรียบเทียบกับค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดที่เป็นค่าเฉลี่ยจากข้อมูลแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 ซึ่งเป็นค่าต้นทุนก่อนปรับปรุง พบว่าค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ที่ได้จากการปรับตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมมีค่าน้อยกว่าค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดที่เป็นค่าเฉลี่ยจากข้อมูลแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 เท่ากับ 30 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$ นั่นคือ เมื่อปรับตั้งค่าปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยตามค่าที่เหมาะสม จะทำให้ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ลดลงประมาณ 30 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$

การคำนวณหาค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ที่ลดลงต่อปีโดยประมาณให้แก่โรงงานกรณีศึกษา จากข้อมูลโรงงานกรณีศึกษามีกำลังการผลิต 100 ตัน$_{\text{วัตถุดิบทั้งหมด}}$ต่อวัน และในการผลิตแก้ว

โซดาไลม์ 1 รุ่นผลิต “ทรายแก้วจะเป็นวัตถุดิบที่มีสัดส่วนน้ำหนักประมาณ ร้อยละ 50 ของน้ำหนักรวมจากวัตถุดิบทั้งหมด” จะสามารถคำนวณค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ที่ลดลงต่อปีได้ ดังสมการที่ 4.12

$$\text{ค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ที่ลดลง} = 30\frac{\text{บาท}}{\text{ต้น}_{\text{ทรายแก้ว}}} \times 0.5\frac{\text{ต้น}_{\text{ทรายแก้ว}}}{\text{ต้น}_{\text{วัตถุดิบทั้งหมด}}} \times 100\frac{\text{ต้น}_{\text{วัตถุดิบทั้งหมด}}}{\text{วัน}} \times 365\frac{\text{วัน}}{\text{ปี}} \quad (4.12)$$

จะได้ว่าค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ที่ลดลงต่อปีโดยประมาณ มีค่า 547,500 บาท ดังนั้นถ้าโรงงานกรณีศึกษานำแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 มาใช้งานร่วมกับเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม ก็จะช่วยให้โรงงานกรณีศึกษาสามารถหาค่าปรับตั้งปัจจัยที่ทำให้ค่าสี a มีค่าเป็นไปตามค่าเป้าหมายได้ และทำให้ค่าาต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด ลดลงไปได้ 547,500 บาทต่อปี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดโดยสรุปของการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสีแก้วโซดาไลม์ ตลอดจนข้อเสนอแนะและข้อจำกัดของงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสี a และค่าสี b กับปัจจัยทั้งหมด 10 ปัจจัย แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบ ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์ ส่วนที่ 2 ปัจจัยที่มาจากเตาหลอม ได้แก่ อัตราการดึงน้ำแก้ว อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สอง อุณหภูมิหลังคาเตาหลอมจุดที่สาม อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สอง อุณหภูมิใต้เตาหลอมจุดที่สาม ค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน และค่าพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยแบบขั้นตอน เพื่อหาแบบแบบจำลองถดถอยของค่าสีที่จะนำไปใช้งาน พร้อมทั้งหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าสีตามเป้าหมาย โดยมีค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดต่ำที่สุด ซึ่งค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด จะเป็นผลรวมจากค่าต้นทุนของปัจจัยที่มาจากวัตถุดิบทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์ เท่านั้น ซึ่งจะใช้ข้อมูลค่าสีและข้อมูลปัจจัยเฉพาะในส่วนของวัตถุดิบและเตาหลอมของสายการผลิตแก้วโซดาไลม์ในโรงงานกรณีศึกษาทั้งหมด 3 สาย ที่มีจำนวนข้อมูลตัวแปรตอบสนองและปัจจัยทั้งหมด 770 ค่า มาแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดข้อมูลเรียนรู้ ร้อยละ 70 มีจำนวนข้อมูล 539 ค่า เพื่อนำไปหาแบบจำลองถดถอย และชุดข้อมูลทดสอบ ร้อยละ 30 มีจำนวนข้อมูล 231 ค่า เพื่อใช้ทดสอบความแม่นของแบบจำลองถดถอยที่ได้จากชุดข้อมูลเรียนรู้

จากการหาแบบจำลองถดถอยแบบขั้นตอนด้วยชุดข้อมูลเรียนรู้ทั้งหมด 26 ครั้ง จึงจะได้แบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b ที่ไม่พบข้อมูลผิดปกติประเภท R เกิดขึ้น และเมื่อนำแบบจำลองถดถอยของค่าสี a และค่าสี b มาพิจารณาด้วยค่าตัวชี้วัดทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว จำนวนข้อมูลที่เหลือหลังจากลบข้อมูลผิดปกติประเภท R ออกแล้ว และค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ ทำให้ได้เฉพาะแบบจำลองถดถอยของค่าสี a เท่านั้นที่สามารถนำไปใช้งานได้ ในขณะที่แบบจำลองถดถอยของค่าสี b ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ เพราะมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ที่สูงมาก

แบบจำลองถดถอยของค่าสี a ที่สามารถนำไปใช้งานได้ จะเป็นแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว ร้อยละ 62.45 จำนวนข้อมูลที่เหลือหลังจากลบข้อมูลผิดปกติประเภท R ออกแล้ว 244 ค่า และค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ 5.05 ซึ่งค่าตัวชี้วัดทั้ง 3 ค่า ถือว่าเป็นค่าที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ในครั้งอื่นๆ ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้ $a = -21.07 - 5.202X_1 + 5{,}187X_3 + 2.151X_9 + 117{,}185X_3^2 - 601X_3X_9$ เมื่อ X_1 คือ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม X_3 คือ ปริมาณโคบอลต์ และ X_9 คือ สัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน โดยเทอมที่มีนัยสำคัญของแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ครั้งที่ 16 มีความสัมพันธ์ดังนี้ เมื่อปริมาณเหล็กออกไซด์รวมเพิ่มขึ้น ค่าสี a จะลดลง ทำให้แก้วมีสีเขียวเข้มขึ้น แต่ถ้าปริมาณโคบอลต์และค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซเพิ่มขึ้น ค่าสี a จะเพิ่มขึ้น ทำให้แก้วมีสีเขียวอ่อนลง

เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษามีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์แก้วโซดาไลม์สีเขียวอมฟ้าเล็กน้อย จึงกำหนดค่าเป้าหมายให้ค่าสี a เท่ากับ -1.22 และค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิดมีค่าต่ำที่สุด ฉะนั้นผู้วิจัยจึงนำการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยมาใช้หาค่าเป้าหมายของค่าสี a และค่าต้นทุนวัตถุดิบรวม ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าสี a มีทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโคบอลต์ และสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด มีทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต และปริมาณโคบอลต์ ดังนั้นปัจจัยที่จะนำไปหาค่าที่เหมาะสม มีจำนวน 4 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต ปริมาณโคบอลต์ และสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนมีปัจจัยนำทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโซเดียมซัลเฟต ปริมาณโคบอลต์ และค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจน จากการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่สามารถทำให้เกิดค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบของตัวแปรตอบสนองทั้งสองมีค่าสูงที่สุด เป็น 0.82 ด้วยการปรับตั้งค่าปัจจัย ดังนี้ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวมเป็น ร้อยละ 0.0618 ปริมาณโซเดียมซัลเฟตเป็น 10.8 กิโลกรัม ปริมาณโคบอลต์ 0.003911 กิโลกรัม และค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซออกซิเจนเป็น 9.60202 ทำให้ได้ค่าสี a เท่ากับ -1.22346 และค่าต้นทุนรวมของวัตถุดิบ 3 ชนิด เท่ากับ 804 บาท/ตัน$_{\text{ทรายแก้ว}}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. แบบจำลองถดถอยของค่าสี a ที่จะนำไปใช้งานนั้น จะเป็นแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ที่ได้มาจากการใช้ข้อมูล จำนวน 244 ค่า ในการหาแบบจำลองถดถอย ซึ่งมีค่าสี a สูงที่สุด

เป็น -1.10 และต่ำที่สุด เป็น -1.40 ทำให้แบบจำลองถดถอยของค่าสี a ที่จะนำไปใช้งาน จะสามารถนำไปพยากรณ์ค่าสี a ได้ดี เฉพาะช่วงค่าสี a -1.40 ถึง -1.10 เท่านั้น

2. โรงงานผลิตแก้วโซดาไลม์ที่จะนำแบบจำลองถดถอยของค่าสี a ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้งาน จะใช้ต้องเตาหลอมระบบกระแสหมุนเวียน และต้องสามารถปรับค่าปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์รวม ปริมาณโคบอลต์ และค่าสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อก๊าซได้ด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะการปรับค่าปริมาณเหล็กออกไซด์รวม เพราะจะต้องมีการจัดหาทรายแก้วที่มีค่าปริมาณเหล็กออกไซด์รวมตามค่าที่เหมาะสมที่ได้ระบุไว้ในงานวิจัย

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ค่าปรับตั้งปัจจัยต่าง ๆ ของงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้กับเตาหลอมระบบกระแสหมุนเวียนของกระบวนการผลิตแก้วโซดาไลม์เท่านั้น หากโรงงานที่ใช้เตาหลอมประเภทอื่น ๆ ที่มีปัจจัยที่แตกต่างจากงานวิจัยนี้ ต้องการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านั้นกับค่าสี พร้อมทั้งหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย ก็สามารถนำขั้นตอนการหาแบบจำลองถดถอยของค่าสีและการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยของงานวิจัยนี้ไปใช้ได้

2. งานวิจัยนี้ยังไม่ได้ศึกษาปัจจัยที่คาดว่าน่าจะมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อค่าสีแก้วโซดาไลม์ เช่น ปริมาณซิลีเนียม เศษแก้ว ความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบ ความชื้น ปริมาณสารโลหะออกไซด์ ระยะเวลาในการหลอม และขนาดตัวอย่างชิ้นงานแก้ว ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอให้ในอนาคตโรงงานกรณีศึกษาอาจจะนำปัจจัยเหล่านี้ไปศึกษาเพิ่มเติมได้ว่ามีผลกระทบต่อค่าสีมากน้อยอย่างไร

3. ในขั้นตอนการหาแบบจำลองถดถอยของค่าสีของงานวิจัยนี้ ได้พบข้อมูลผิดปกติประเภท R ของค่าสีเป็นจำนวนมาก ซึ่งในแต่ละครั้งของการหาแบบจำลองการถดถอยของค่าสี ผู้วิจัยได้ตัดข้อมูลผิดปกติประเภท R ของค่าสีออกก่อน ทำให้จำนวนข้อมูลที่นำมาหาแบบจำลองถดถอยของค่าสีจะมีจำนวนน้อยลงในทุกครั้งของหาแบบจำลองถดถอยของค่าสี สาเหตุที่พบข้อมูลผิดปกติเป็นจำนวนมาก อาจจะมาจากตัวอย่างชิ้นงานแก้วที่ได้จากการตัดของพนักงานมีขนาด ไม่เท่ากัน เมื่อนำเอาชิ้นงานไปวางที่ตำแหน่งวัดค่าสีของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำให้ลำแสงที่ยิงไม่ตรงจุดตรงกลางของชิ้นงาน เป็นผลให้ค่าสีที่อ่านได้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอให้มีการกำหนดขนาด รูปร่าง และสัดส่วนของตัวอย่างชิ้นงานแก้วที่จะนำไปวัดค่าสีให้มีค่าเป็นมาตรฐานเดียวกัน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการหาแบบจำลองถดถอยของค่าสีในอนาคต เพราะพบจำนวนข้อมูลผิดปกติน้อยลง ทำให้แบบจำลองถดถอยของค่าสีที่ได้นั้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

Andreas Dietzel. (1937). The theory of decolorizing with selenium. *Journal of the Society Glass Technology 1937*, *21*, 87.

Hujova, M. (2017). Influence of Fining Agents on Glass Melting: A Review, Part 1. *Ceramics - Silikaty*, 119-126. https://doi.org/10.13168/cs.2017.0006

Katkova, K. S., Balandina, T. I., & Seregina, E. P. (1989). Efficient use of decolorizing agent in production of colorless container glass. *Science for the glass industry*, *2*, 6-7. (Plenum Publishing Corporation)

Kong, H., Qi, E., Li, G., He, S., & Zhang, X. (2009). Modeling and optimization of catalytic dehydration of ethanol to ethylene using central composite design. *Transactions of Tianjin University*, *15*(5), 366-370. https://doi.org/10.1007/s12209-009-0064-8

Müller-Simon, H. Investigation on selenium decolorization of in dustrially melted flint glasses. *Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie (HVG)*, 75-77.

Paintsil, A., Armah, F. A., & Yanful, E. K. (2017). Assessment of the Transesterification Stage of Biodiesel Production II: Optimisation of Process Variables Using a Box-Behnken Design. *Waste and Biomass Valorization*, *9*(8), 1399-1405. https://doi.org/10.1007/s12649-017-9860-x

Srinivasan, K., Muthu, S., Prasad, N. K., & Satheesh, G. (2014). Reduction of Paint line Defects in Shock Absorber Through Six Sigma DMAIC Phases. *Procedia Engineering*, *97*, 1755-1764. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.327

Tepiwan Jitwatcharakomol. (2005). Optimization and Control of Selenium Chemistry and Color in Flint Glass Melts.

Volf, M. B. (1984). *Chemistry approach to glass*. Elsevier.

Wolfgang, H. (1934). *About the behavior of selenium in glass.* (Vol. 12). Berichte.

ณัฐพล เลาห์รอดพันธุ์. (2558). อุตสาหกรรมการผลิตแก้ว. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ประสิทธิ์ ปุระชาติ. (2549). การเป่าแก้วเบื้องต้น. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี.

ปารเมศ ชุติมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ทศพล สุเริงฤทธิ์
วัน เดือน ปี เกิด	26 ธันวาคม 2535
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลเจ้าพระยาอภัยภูเบศร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วศ.บ.) ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	571 ม.8 ต.เมืองเก่า อ.กบินทร์บุรี จ.ปราจีนบุรี 25240
ผลงานตีพิมพ์	การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2566
รางวัลที่ได้รับ	บทความวิจัยชมเชย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University