บทที่ 5
การออกแบบการทดลองส่วนผสม

การศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าสัดส่วนที่เหมาะสมของแบบหล่อทรายที่ใช้สำหรับงานหล่อผลิตภัณฑ์ของพูเล่ย์สายพานซึ่งเป็นงานผลิตเป็นประจำของโรงงานกรณีศึกษา โดยใช้หลักการของการออกแบบการทดลองส่วนผสม (Mixture Experiments) ส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่ทำการศึกษาประกอบไปด้วย ทรายผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 เบนโทไนต์ และน้ำ สมบัติที่ใช้ทดสอบในการวัดคุณภาพของแบบหล่อทรายคือ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก และความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ

1. การออกแบบการทดลองส่วนผสม

การศึกษานี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบมีข้อจำกัด (Constrained Mixture Designs) เนื่องจากผลิตภัณฑ์แบบหล่อทรายเป็นของผสมมีทั้งข้อจำกัดบนและข้อจำกัดล่าง สำหรับส่วนผสมของแบบหล่อทรายมี 3 ส่วนผสมประกอบไปด้วย ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 แทนด้วยสัญลักษณ์ A เบนโทไนต์แทนด้วยสัญลักษณ์ B และน้ำ แทนด้วยสัญลักษณ์ C โดยมีการกำหนดข้อจำกัดของแต่ละส่วนผสมที่ทำการศึกษาในหน่วยเปอร์เซนต์โดยน้ำหนักอยู่ในช่วงของการผลิตจริงของโรงงานกรณีศึกษา และจากงานวิจัยของ Toussaint et al. ในปี ค.ศ. 2000 แสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ส่วนผสมและข้อจำกัดของส่วนผสมที่นำไปใช้ในออกแบบการทดลอง

ส่วนผสมของ แบบหล่อทราย	สัญลักษณ์	ช่วง	
		ต่ำ (%)	สูง (%)
ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1	A	90.00	99.9
เบนโทไนต์	B	0.05	5.0
น้ำ	C	0.05	5.0

จากการกำหนดเงื่อนไขข้อจำกัดของส่วนผสมแบบหล่อทรายดังแสดงในตารางที่ 5.1 สามารถนำมาสร้างเป็นรูปแบบบสมการของการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมเป็นดังนี้

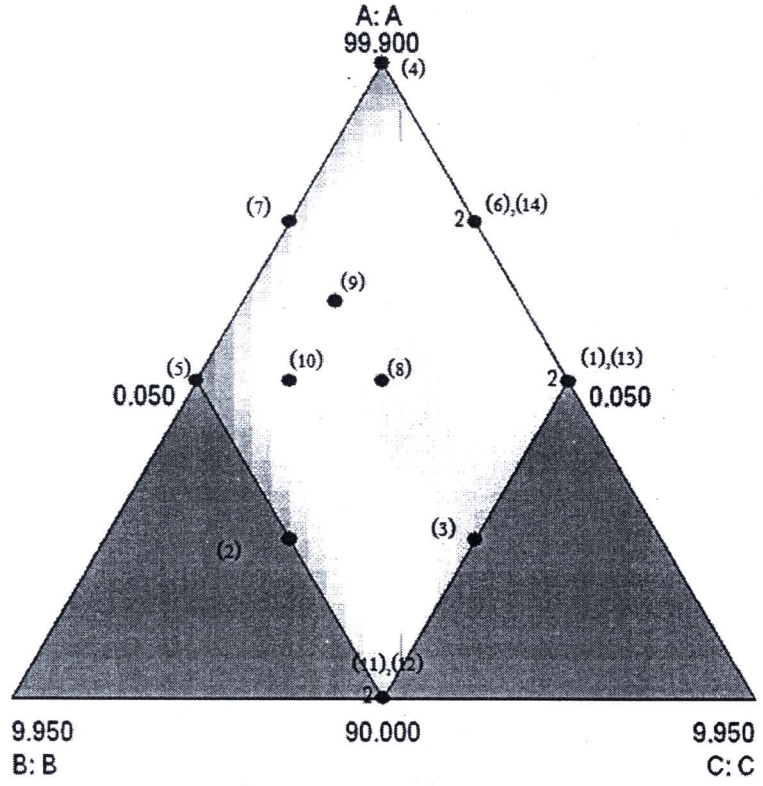
$$A + B + C = 100 \quad (31)$$

$$90.00 \leq A \leq 99.9 \quad (32)$$

$$0.05 \leq B \leq 5.0 \quad (33)$$

$$0.05 \leq C \leq 5.0 \quad (34)$$

สมการที่ 31 คือ ผลรวมของอัตราส่วนผสมของแบบหล่อทรายทั้งหมดเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สมการที่ 32 สมการที่ 33 และสมการที่ 34 เป็นอสมการข้อจำกัดของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 เบนโทไนต์ และน้ำ ตามลำดับ จากสมการข้างต้นสามารถนำมาสร้างจุดการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ของแบบหล่อทรายได้ดังภาพที่ 5.1 ตัวเลขในวงเล็บในภาพที่ 5.1 แสดงจุดออกแบบตามตารางการออกแบบการทดลองในตารางที่ 5.2



ภาพที่ 5.1 จุดการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบหล่อทราย

ตารางที่ 5.2 ตารางการออกแบบการทดลองของส่วนผสมแบบหล่อทราย

Design point	*A* (%)	*B* (%)	*C* (%)
1	94.95	0.05	5.00
2	92.48	5.00	2.53
3	92.48	2.53	5.00
4	99.90	0.05	0.05
5	94.95	5.00	0.05
6	97.43	0.05	2.53
7	97.43	2.53	0.05
8	94.95	2.53	2.53
9	96.18	2.53	1.28
10	94.95	3.76	1.28
11	90.00	5.00	5.00
12	90.00	5.00	5.00
13	94.95	0.05	5.00
14	97.43	0.05	2.53

2. การวิเคราะห์รูปแบบสมการการออกแบบส่วนผสม

2.1 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง

ทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง และเซตของตัวแปรที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยพิจารณาเลือกรูปแบบของสมการถดถอยที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากค่า p-value ระดับนัยสำคัญ (α) ตามที่กำหนดคือ 0.05 ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือค่า p-value น้อยกว่า α จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ที่ตั้งไว้ หมายความว่า มีตัวแปรถดถอยอย่างน้อยหนึ่งตัวมีความสัมพันธ์กับผลตอบสนอง แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณได้มีประโยชน์ต่อการทำนายค่าผลตอบสนอง แต่ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือค่า p-value มากกว่าหรือเท่ากับ α จะยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ที่ตั้งไว้ หมายความว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรถดถอยกับผลตอบสนองนั้น

2.2 ทดสอบ Lack of fit

การทดสอบ Lack of fit เป็นการทดสอบว่าฟังก์ชันถดถอยหรือแบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมมติฐานการทดสอบคือ

H_0: แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับชุดข้อมูล

H_1: แบบจำลองการถดถอยไม่เหมาะสมกับชุดข้อมูล

โดยพิจารณาจากค่า p-value โดยระดับนัยสำคัญ (α) คือ 0.05 ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญหรือค่า p-value น้อยกว่า α จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ที่ตั้งไว้ หมายความว่าแบบจำลองการถดถอยไม่มีความเหมาะสมกับชุดข้อมูล แต่ถ้าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือค่า p-value มากกว่าหรือเท่ากับ α จะยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ที่ตั้งไว้ หมายความว่าแบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับชุดข้อมูล

2.3 วิเคราะห์ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง

2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซนต์ของความแปรผันทั้งหมดใน Y อธิบายโดยความแปรผันใน X หรืออธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้นจึงเป็นค่าที่ใช้วัดสมการที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลเพียงไร ถ้า R^2 มีค่ามากขึ้น แสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้น

2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตัวกำหนดปรับแล้ว (Adj-R^2) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซนต์ที่ตัวแปร X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y โดยทั่วไปค่า R^2 จะสูงขึ้นเมื่อตัวแปรอิสระเพิ่มเข้ามาในสมการถดถอย ค่า SST ไม่เปลี่ยนแปลง แต่โดยทั่วไป SSR จะสูงและ SSE จะต่ำลง ดังนั้น R^2 จึงมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มตัวแปรอิสระในสมการถดถอย มักมีผลทำให้มีตัวแปรอิสระมากเกินไปในสมการถดถอยและอาจทำให้สมการถดถอยมีรูปแบบที่เลวลงแทนที่จะดีขึ้น ดังนั้นจึงนิยมเลือก Adj-R^2 มาใช้ในการวิเคราะห์มากกว่า ซึ่งค่า Adj-R^2 จะมีค่าที่ต่ำกว่า R^2 เล็กน้อย

2.3.3 Predicted R-Squared (Pred-R^2) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซนต์ที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ที่ได้จากการทำนาย

2.3.4 Predicted Residual Error Sum of Square (PRESS) คือ ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่ตัดออก เป็นการวัดว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับจุดที่ทำการออกแบบไว้หรือไม่ แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมจะเป็นแบบจำลองที่มีค่า PRESS ต่ำ

2.4 การตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบสมการ (Diagnostics)

2.4.1 การตรวจสอบส่วนเหลือ (Residual Analysis)

การตรวจสอบส่วนเหลือใช้วิธี Normal Probability Plots เป็นการทดสอบความเพียงพอของรูปแบบโดยการแสดงกราฟของค่าส่วนเหลือ ซึ่งถูกแปลงค่าให้อยู่ในรูปเปอร์เซนต์ความน่าจะเป็นสะสม ถ้าพล็อตได้รูปร่างใกล้เคียงกับเส้นตรง แสดงว่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ

2.4.2 การตรวจสอบความแปรปรวนของข้อมูลในแต่ละระดับ

การตรวจสอบความแปรปรวนของข้อมูลเป็นการแสดงกราฟระหว่างค่าส่วนเหลือและค่าที่ประมาณได้จากรูปแบบ ถ้าพล็อตได้รูปร่างการกระจายตัวอย่างคงที่และการกระจายของข้อมูลไม่มีลักษณะการเกิดแนวโน้มหรือเป็นเส้นโค้ง แสดงว่ารูปแบบสมการถดถอยที่สร้างขึ้นมานั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มา

2.4.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลเป็นการแสดงกราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนและลำดับที่ของการเก็บข้อมูล ถ้าพล็อตได้รูปร่างการกระจายของข้อมูลไม่เป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบ แสดงว่ารูปแบบของข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับที่ของการเก็บข้อมูล

2.5 วิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง

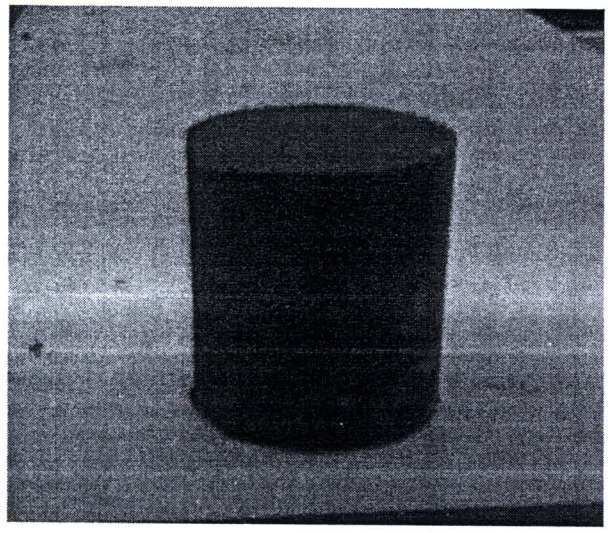
นำสมการถดถอยที่ใช้ทำนายค่าผลตอบสนองมาสร้างเป็นแบบจำลองพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อหาค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ภายใต้เงื่อนไขของผลตอบสนองให้อยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดไว้

3. ขั้นตอนการเตรียมส่วนผสมทรายหล่อที่ใช้ในการทดลอง

นำทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการทำให้ทรายเย็น (Sand Cooling) ที่มีสภาวะความชื้นของทรายที่ 3 % ใส่ลงในภาชนะสำหรับเตรียมผสม ต่อจากนั้นนำส่วนผสมของเบนโทไนต์และน้ำเติมเข้าไปในปริมาณสัดส่วนตามแผนการทดลองส่วนผสม แล้วคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันเป็นเวลานาน 5 นาที จากนั้นนำทรายที่ผสมแล้วนำมาเตรียมเป็นตัวอย่างชิ้นงานทดสอบสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลและความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ

การทดสอบสมบัติเชิงกลคือความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศมีลักษณะและรูปร่างเหมือนกัน โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S. (American Foundrymen's Society) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว และสูง 2 นิ้ว ดังแสดงในภาพที่ 5.2

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



ภาพที่ 5.2 ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลและ
ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ

4. การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลและความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ

การศึกษานี้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลคือ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ โดยอาศัยหลักการทดสอบตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S. (American Foundrymen's Society) การทดสอบความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกใช้เครื่องมือในการทดสอบคือ เครื่อง Universal sand strength และการทดสอบความสามารถในการปล่อยซึมอากาศใช้เครื่องมือในการทดสอบคือ เครื่อง Electric permeability meter โดยมีขั้นตอนในการทดสอบแสดงในบทที่ 2 ในหัวข้อที่ 1.7