การหาส่วนผสมแบบหล่อทราย โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา: อุตสาหกรรมข้อต่อเหล็ก
Determining Mixture Components of Sand Mold by Using Mixture Design of Experiment: Case Study in Iron Fitting Industry

วรพจน์ มีถม[1]* และ เชิญขวัญ รุจทินกฤต[2]

[1]อาจารย์ [2]นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายที่เหมาะสมที่สุดของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว เบนโทไนต์ น้ำ และทรายใหม่ โดยให้สมบัติของทรายแบบเป็นไปตามมาตรฐานของ American Foundrymen's Society ผลตอบสนองที่ใช้ชี้วัดคุณภาพของแบบหล่อทราย คือ ความสามารถในการกดอัดของทราย ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศของแบบหล่อทราย ความชื้นของทราย และ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก การศึกษานี้ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมและวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง เพื่อนำมาใช้ในการหาส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่เหมาะสมที่สุด และใช้การโปรแกรมเชิงเส้นคำนวณต้นทุนส่วนผสมที่ต่ำที่สุด พบว่า อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุด คือ ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว 95.5387% เบนโทไนต์ 1.130102% น้ำ 2.331196% และทรายใหม่ 1% ซึ่งความสามารถในการกดอัดของทรายร้อยละ 58.37923 ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ 73.80148 ปาสคาล ความชื้นของทรายร้อยละ 6.5 และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก 0.53 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ โดยต้นทุนวัตถุดิบต่ำสุดเท่ากับ 11.31579 บาทต่อกิโลกรัม

Abstract

This research aimed to determine the optimal sand mold mixture's ratio by using return sand, bentonite, water content and new sand component. Then, the properties of the mixture according to the standards of American Foundrymen's Society include the ability of compactability, moisture content, permeability and green compressive strength. This study applied mixture experiments and response surface methodology to determine an optimal sand mold mixture components condition. After the experiment and linear programming, it indicated that the condition was at return sand (95.5387 %), bentonite (1.130102 %), water content (2.331196 %) and new sand (1 %). The green sand mold has compactability (58.37923 %), permeability (73.80148 %), moisture 6.5 % and green compressive strength (0.53 Kg/cm^2). At this condition, the cost is 11.31579 baths per kilogram.

คำสำคัญ : แบบหล่อทราย การออกแบบการทดลองส่วนผสม มาตรฐานของสมาคม A.F.S
Keywords : Sand Mold, Mixture Experiments, A.F.S. (American Foundrymen's Society)

* *ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ warapoj.m@eng.kmutnb.ac.th โทร. 0 2587 4842 ต่อ 117*

1. บทนำ

ในงานวิจัยที่ได้ศึกษากระบวนการปรับสภาพของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว ส่วนผสมที่เติมเข้าไปในการปรับสภาพของทรายคือ เบนโทไนต์ น้ำ และทรายใหม่ ซึ่งจะช่วยให้ทรายมีสมบัติในด้านความแข็งแรงและการปล่อยซึมเพิ่มมากขึ้น และเหมาะที่จะนำมาสร้างเป็นแบบหล่อทราย โดยที่กระบวนการปรับสภาพไม่มีการเติมส่วนผสมของทรายใหม่เข้าไป เนื่องจากทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วยังมีสมบัติที่เกิดจากตัวประสานของเบนโทไนต์ที่เติมเข้าไปยังคงเหลืออยู่ เมื่อมีการเติมทรายใหม่เข้าไปจะทำให้สมบัติของตัวประสานลดลง ทำให้ต้องเติมตัวประสานเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม กระบวนการปรับสภาพทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วของโรงงาน

1.1 การทดสอบสมบัติของทรายแบบ

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบสมบัติของทรายแบบ อาศัยหลักการทดสอบตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S. (American Foundrymen's Society) โดยทำการทดสอบสมบัติของทรายประกอบไปด้วย ความสามารถในการกดอัดของทราย (Compactability, %) ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศของแบบหล่อทราย (Permeability, Pa) ความชื้นของทราย (Moisture, %) และ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (Green Compressive Strength, Kg/cm^2) โดยขั้นตอนการทดสอบ ดังนี้

1.2 ขั้นตอนการเตรียมส่วนผสมของแบบหล่อทราย

นำทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ผ่านกระบวนการทำให้ทรายเย็น (Sand Cooling) ที่มีการควบคุมความชื้นของทรายที่ร้อยละ 3 ใส่ลงในภาชนะสำหรับเตรียมผสม ต่อจากนั้นนำส่วนผสมของเบนโทไนต์ น้ำ และทรายใหม่เติมเข้าไปในปริมาณสัดส่วนตามแผนการทดลองของส่วนผสม แล้วคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันเป็นเวลานาน 5 นาที จากนั้นนำทรายที่ผสมแล้วนำมาเตรียมเป็นตัวอย่างชิ้นงานทดสอบและซึ่งทำกาทดสอบค่าความสามารถในการกดอัดของทราย ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ ค่าความชื้นของทราย และค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกทันที การทดสอบสมบัติเชิงกล คือ ค่าความสามารถในการกดอัดของทราย ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ ความชื้นของทราย และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะและรูปร่างเหมือนกัน โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตามมาตรฐานของ A.F.S. ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว และสูง 2 นิ้ว

2. วิธีการศึกษา

2.1 หลักการออกแบบการทดลองด้วยวิธี D-optimal

ในการออกแบบการทดลอง D-optimal การสุ่มของโปรแกรมจะไม่สามารถสุ่มเอาทุก ๆ จุดการทดลองทั้งหมดในการออกแบบที่ระบุไว้มาทดลองประเมินได้ มักจะใช้อัลกอริทึมในการแลกเปลี่ยน (Exchange Algorithm) เพื่อวิ่งไปบนจุดหลักต่าง ๆ ในการออกแบบที่ระบุไว้ เช่น จุดกึ่งกลางแกนของรูปแบบกำลังสาม (Center Edge) จุดมุม (Vertices) และจุดภายในของรูปแบบกำลังสาม (Interior) หรือจุดหลักอื่น ๆ เป็นต้น เพื่อดูว่าค่าดีเทอร์มิแนนท์ มีค่ามากที่สุดหรือไม่ หากพบแล้วหรือครบตามจำนวนรอบที่

กำหนด โปรแกรมจะหยุดการสุ่ม แล้วเอาจุดทดลอง (Candidate Point) ที่ได้มาสร้างเป็นรูปแบบการทดลอง จากนั้นหากต้องการปรับเปลี่ยนจุดหลักอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นการลดหรือเพิ่มในจุดทดลองก็สามารถทำได้ วิธีการเช่นนี้เรียกว่า การปรับปรุง (Modification) หลักการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม โดยใช้ Mixture Design เพราะเป็นการออกแบบส่วนผสม 4 ส่วน เมื่อส่วนผสมใด ส่วนผสมหนึ่งเปลี่ยนระดับไป ส่วนผสมอื่นในสูตรจะมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย เพราะผลรวมของส่วนผสมทั้งหมดจะต้องเท่ากับ 100%

2.2 การคำนวณหาต้นทุนส่วนผสมที่ต่ำที่สุด

หลังจากได้ส่วนผสมที่เหมาะสมแล้ว จะใช้การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) เพื่อคำนวณหาต้นทุนส่วนผสมที่เหมาะสมที่ต่ำที่สุด

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ผลการทดลองในตารางที่ 1 นำมาวิเคราะห์เลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติของความสามารถในการกดอัดของทรายความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ ความชื้นของทราย และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก จากการวิเคราะห์ พบว่ารูปแบบเชิงลำดับเส้นของความสามารถในการกดอัดของทราย ความชื้นของทราย ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก มีรูปแบบเชิงเส้นตรง และความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ มีรูปแบบเชิงเส้นโค้ง ตามลำดับ โดยพิจารณาจากค่า P-value ของแต่ละรูปแบบซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า P-value ของการทดสอบ lack of fit มีค่ามากกว่า 0.05 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์รูปแบบทางสถิติของความสามารถในการกดอัดของทราย ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศค่า ความชื้นของทราย และค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

ผลการทดลอง	model	R2	Adj. R^2	P-value lack of fit	P-value model
การกดอัดของทราย	Linear	0.801	0.7588	0.081	< 0.001
ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ	Quadratic	0.969	0.934	0.086	< 0.001
ค่าความชื้นของทราย	Linear	0.784	0.737	0.198	< 0.001
ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก	Linear	0.825	0.787	0.077	< 0.001

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า รูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลและสามารถยอมรับรูปแบบการถดถอยนั้นได้ นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) และค่า Adj. R^2 ของแต่ละรูปแบบมีค่าค่อนข้างสูงใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม

รูปแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนองในตัวแปรส่วนประกอบเทียม (Pseudo Components) คือ ความสามารถในการกดอัดของทราย (Compact) ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ (Perm) ความชื้นของทราย (H2O) และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) แสดงดังสมการที่ (1), (2), (3) และ (4) ตามลำดับ

$$Compact = 64.79A + 57.47B + 48.04C + 62.66D \quad (1)$$

$$Perm = 72.31A + 74.42B + 83.62C + 418.93D - 8.50AB + 0.54AC - 390.74AD - 13.14BC - 349.32BD - 404.60CD \quad (2)$$

$$H2O = 8.26A + 7.56B + 1.47C + 9.58D \quad (3)$$

$$GCS = 0.69A + 0.21B + 0.79C + 0.51D \quad (4)$$

เมื่อ

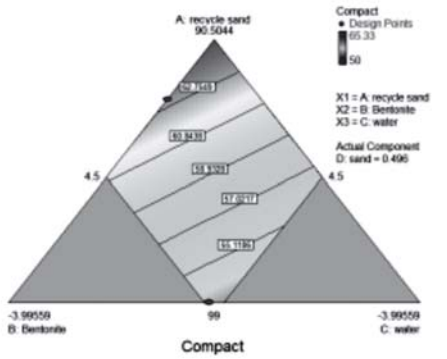
A คือ ร้อยละของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว

B คือ ร้อยละของเบนโทไนต์

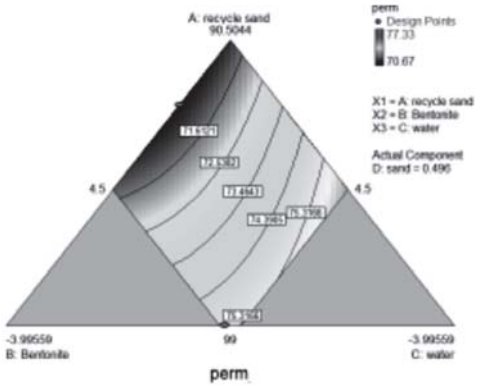
C คือ ร้อยละของน้ำ

D คือ ร้อยละของทรายใหม่

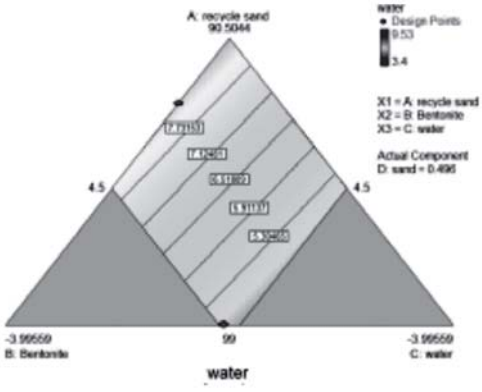
จากสมการถดถอยที่ (1), (2), (3) และ (4) ถูกนำมาทำการสร้างกราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour Plot) ของความสามารถในการกดอัดของทราย ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ ความชื้นของทราย และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2, 3, 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อส่วนผสมเบนโทไนต์ (B) อยู่ในระดับที่สูงและส่วนผสมน้ำ (C) อยู่ในระดับที่ต่ำ จะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ เมื่อส่วนผสมเบนโทไนต์ (B) อยู่ในระดับที่ต่ำและส่วนผสมน้ำ (C) อยู่ในระดับที่สูงจะทำให้ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศมีค่าที่สูงขึ้น



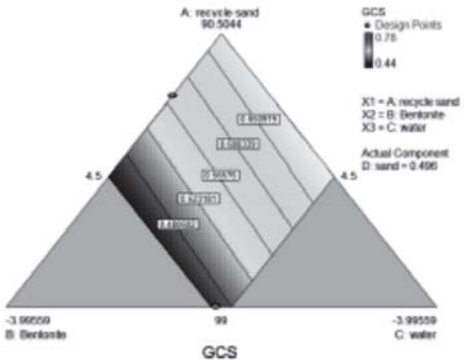
รูปที่ 2 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของค่าความสามารถในการกดอัดของทราย



รูปที่ 3 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ



รูปที่ 4 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของค่าความชื้นของทราย



รูปที่ 5 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

การดำเนินกระบวนการผลิตหรือกระบวนการทดลองนี้ โดยทดลองทั้งหมด 5 ครั้งต่อหนึ่งอัตราส่วนผสมทดสอบ และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของข้อมูล (Propagation of Error: POE) สามารถหาค่าส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลตอบสนองมีค่าน้อยที่สุด (Anderson and Whitcomb, 2005; ชาญณรงค์, 2553) การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสามารถวิเคราะห์ได้จากความผันแปรของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสมและค่าผลตอบสนองต่าง ๆ โดยกำหนดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสม A, B และ C เป็น 1, 0.25, 0.20 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสมที่กำหนด

Name	Unit	Type	Std.Dev	Low	High
A	%	Component	2.44	90	99
B	%	Component	1.68	0.5	4.5
C	%	Component	1.85	0.5	4.5
D	%	Component	0.41	0	1

การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนให้มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด โดยการกำหนดให้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก และความสามารถในการปล่อยซึมอากาศมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3 ผลจากการกำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละส่วนผสมทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนของความสามารถในการกดอัดของทรายอยู่ในช่วง 3.84-3.86 ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศอยู่ในช่วง 0.88-3.09 ความชื้นของทรายอยู่ในช่วง 0.912-0.916 และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกอยู่ในช่วง 0-0.05

ตารางที่ 3 การกำหนดคาฟังก์ชันความพึงพอใจของการแพร่กระจาย ความคลาดเคลื่อนทั้ง 4 ผลตอบสนอง

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit
Compact	is in range	55	65
POE(Compact)	minimize	3.84	3.86
Perm	maximize	70	77.33
POE (perm)	minimize	0.88	3.09
water	is in range	4.5	6.5
POE (water)	minimize	0.9129	0.9161
GCS	maximize	0.53	0.78
POE (GCS)	minimize	0	0.05445

จากการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (Myers and Montgomery, 2002; Anderson and Whitcomb, 2005; Stat Ease, Inc.,2005) ผลของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน แสดงดังตารางที่ 4 การวิเคราะห์ พบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดประกอบด้วย ส่วนผสมของ A 92.94 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผสมของ B 4.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผสมของ C 2.065 เปอร์เซ็นต์ และส่วนผสมของ D 0.496 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้ได้ความสามารถในการกดอัดของทรายได้เท่ากับ 60.13545 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศได้เท่ากับ 74.01803 ปาสคาล ความชื้นของทรายได้เท่ากับ 6.499995 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกที่ทำนายได้เท่ากับ 0.687056 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลของโปรแกรม Design Expert ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนร่วมกับฟังก์ชันความพึงพอใจทั้ง 4 ผลตอบสนอง

Solutions							
Number	recycle sand	Bentonite	water	sand	Compact	POE(Compact)	perm
1	92.94	4.5	2.065	0.496	60.13545	3.851017	74.01803
2	92.687	4.11	2.203	1	60.19433	3.850962	74.98553
3	95.187	3.394	1.169	0.251	57.51111	3.853933	74.83613
4	93.425	3.832	1.743	1	59.11347	3.852052	75.34877

Solutions							
Number	POE(perm)	water	POE(water)	GCS	POE(GCS)	Desirability	
1	0.884268	6.499995	0.91377	0.687056	0.053978	0.757799	Selected
2	2.675109	6.499999	0.91377	0.676176	0.053991	0.586462	
3	1.425351	5.772041	0.914581	0.626969	0.05406	0.583237	
4	2.627706	6.13116	0.914147	0.663168	0.054007	0.562407	

การหาอัตราส่วนผสมที่มีต้นทุนต่ำที่สุด

จากงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาหาส่วนผสมของแบบหล่อทรายในอุตสาหกรรมข้อต่อเหล็ก โดยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง และวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง นำมาหาต้นทุนต่ำสุดโดยการโปรแกรมเชิงเส้น กำหนดเงื่อนไข 3 ข้อ คือ เงื่อนไขปริมาณส่วนผสมแบบหล่อทราย เงื่อนไขตามคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ความสามารถในการกดอัดของทราย ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศของแบบหล่อทราย ความชื้นของทราย และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกที่ได้จากการทดลอง เงื่อนไขของสมการคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง เพื่อให้ได้ต้นทุนที่ต่ำที่สุด

สมการเป้าหมาย

$$Minimize\ Z = C_1X_1 + C_2X_2 + ...C_nX_n \quad (5)$$

ต้นทุนที่ต่ำที่สุดในส่วนผสม 1 กิโลกรัม (บาท/กิโลกรัม)

$$z = 0X_1 + 8X_2 + 0.0015X_3 + 2.24X_4 \quad (6)$$

สมการเงื่อนไขจำกัด

อัตราส่วนผสมรวม

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 100 \quad (7)$$

$$90 \le X_1 \le 99.9$$

ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว (8)

เบนโทไนต์ $0.05 \le X_2 \le 4.5$ (9)

น้ำ $0.05 \le X_3 \le 4.5$ (10)

ทรายใหม่ $0 \le X_4 \le 1$

มาตรฐานสมาคม A.F.S

ความสามารถในการกดอัดของทราย (%) $55 \le 0.53X_1 + 1.17X_2 + 2.42X_3\ 0.78X_4 \le 65$ (11)

ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศของแบบหล่อทราย (Pa)

$$0.77X_1 + 10.71X_2 - 0.70X_3 + 476.44X_4 - 0.10X_1X_2 + 0.00693X_1X_3 - 482X_1X_4 - 0.16X_2X_3 - 4.31X_2X_4 - 4.99X_3X_4 \ge 70 \quad (12)$$

ความชื้นของทราย (%)

$$4.5 \le 0.046X_1 + 0.125X_2 + 0.80X_3 + 0.099X_4 \le 6.5 \quad (13)$$

ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (Kg/cm^2)

$$0.0044X_1 + 0.057X_2 + 0.0091X_3 + 0.024X_4 \ge 6.5 \quad (14)$$

โดยกำหนดให้

C_1 แทน ราคาทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว (บาท/กิโลกรัม)

C_2 แทน ราคาเบนโทไนต์ (บาท/กิโลกรัม)

C_3 แทน ราคาน้ำ (บาท/กิโลกรัม)

C_4 แทน ราคาทรายใหม่ (บาท/กิโลกรัม)

X_1 แทน ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว

X_2 แทน ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของเบนโทไนต์

X_3 แทน ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของนำ

X_4 แทน ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของทรายใหม่

จากรูปที่ 6 ประมวลผลด้วย Excel Solver สรุปได้ว่า ต้นทุนวัตถุดิบต่ำสุดเท่ากับ 11.31579 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งจะต้องใช้ส่วนผสมที่มีทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว 95.5387 เปอร์เซ็นต์ เบนโทไนต์ 1.130102 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 2.331196 เปอร์เซ็นต์ ทรายใหม่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และคาดว่าส่วนผสมดังกล่าวจะให้ค่าความสามารถในการกดอัดของทรายร้อยละ 58.37923 ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ 73.80148 ปาสคาล ความชื้นร้อยละ 6.5 การทดสอบความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) 0.53 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

Target Cell (Min)

Cell	Name	Original Value	Final Value
$G$4	cost	11.31578584	11.31578584

Adjustable Cells

Cell	Name	Original Value	Final Value
$B$2	old sand Result	95.53870158	95.53870158
$B$3	bentonite Result	1.130102237	1.130102237
$B$4	water Result	2.331196187	2.331196187
$B$5	new sand Result	1	1

Constraints

Cell	Name	Cell Value	Formula	Status	Slack
$B$6	sum Result	100	$B$6<=100	Binding	0
$B$9	compact Result	58.37922623	$B$9>=$C$9	Not Binding	3.379226225
$B$10	permebility Result	73.80148402	$B$10>=$C$10	Not Binding	3.801484024
$B$11	water Result	6.500000002	$B$11>=$C$11	Not Binding	2.000000002
$B$12	GCS Result	0.53	$B$12>=$C$12	Binding	0

รูปที่ 6 การประมวลผลด้วย Excel Solver

3.2 อภิปรายผล

จากผลการศึกษาผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทรายที่ประกอบไปด้วย ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว เบนโทไนต์ น้ำ และทรายใหม่ เพื่อนำไปสร้างเป็นแบบหล่อทรายสำหรับหล่อชิ้นงานที่ผลิตเป็นประจำของโรงงานกรณีศึกษามีด้วยกัน 2 อัตราส่วนผสม คือ

ส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว 92.94 เปอร์เซ็นต์ เบนโทไนต์ 4.5 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 2.065 เปอร์เซ็นต์ และทรายใหม่ 0.49 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นอัตราส่วนที่ทำให้สภาพผิวภายนอกของชิ้นงานหล่อที่ได้มีลักษณะผิวที่ราบเรียบ คือ จากสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายผลตอบสนอง ความสามารถในการกดอัดของทราย = 0.53 Return sand + 1.17 Bentonite + 2.42 Water +0.78 New sand

พบว่า เมื่อเติมเบนโทไนต์และน้ำผสมกันในปริมาณมากขึ้น จะมีผลทำให้การกดอัดของทรายมีค่าผลตอบสนองที่สูงขึ้น จากสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายผลตอบสนอง ส่งผลให้ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศของแบบหล่อทราย =0.77 Return sand + 10.71 Bentonite - 0.70 Water + 476.44 New sand –(0.10 Return sand)x(Bentonite) +(0.00693 Return sand)x(water) – (4.82 Return sand)x(New sand) –(0.16 Bentonite) x(water) – (4.31 Bentonite)x(New sand) - (4.99 water)x(New sand)

พบว่า เมื่อเติมทรายใหม่ในปริมาณมากขึ้นและลดปริมาณน้ำลง จะมีผลทำให้การปล่อยซึมอากาศมีค่าผลตอบสนองที่สูงขึ้น จากสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายผลตอบสนองความชื้นของทราย =0.046 Return sand + 0.125 Bentonite + 0.80 Water + 0.099 New sand

พบว่า เมื่อเติมน้ำในปริมาณมากขึ้นจะมีผลทำให้ความชื้นของทรายมีค่าผลตอบสนองที่สูงขึ้น และ จากสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายผลตอบสนองความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก =0.0044 Return sand + 0.057 Bentonite + 0.0091 Water + 0.024 New sand

พบว่าเมื่อเมื่อเติมเบนโทไนต์ในปริมาณมากจะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกมีค่าผลตอบสนองที่สูงขึ้น

อัตราส่วนผสมที่ประกอบไปด้วยส่วนผสมทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว 95.5387 เปอร์เซ็นต์ เบนโทไนต์ 1.130102 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 2.331196 เปอร์เซ็นต์ และทรายใหม่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนผสมที่มีค่าต้นทุนการผลิตต่ำกว่าอัตราส่วนผสมแบบแรก และอัตราส่วนผสมนี้เป็นอัตราส่วนผสมที่ทำให้สภาพผิวภายนอกของชิ้นงานหล่อที่ได้มีลักษณะสภาพผิวของชิ้นงานหล่อที่ได้มีลักษณะที่ราบเรียบเหมือนกับอัตราส่วนผสมแบบแรกและคาดว่าส่วนผสมดังกล่าวจะให้ค่าความสามารถในการกดอัดของทรายร้อยละ 58.37923 ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ 73.80148 ปาสคาล ค่าความชื้นร้อยละ 6.5 ค่าการทดสอบความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) 0.53 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ถึงแม้จะให้ต้นทุนที่ถูกกว่า แต่อัตราส่วนผสมดังกล่าวให้ค่าความสามารถในการกดอัดของทราย, ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ และการทดสอบความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) มีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนผสมแรก

ฉะนั้น ในการเลือกใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมแบบใดมาใช้ในกระบวนการผลิตจริงต้องพิจารณาการชิ้นงานเป็นหลัก ถ้างานใดต้องการความแข็งแรงของชิ้นงานหล่อที่สูง ควรเลือกใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมแบบที่ 1 แต่สำหรับชิ้นงานหล่อที่ไม่ต้องการความแข็งแรงสูงมากนัก เพื่อให้ง่ายต่อการตกแต่งชิ้นงานด้วยเครื่องจักร ควรเลือกใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมแบบที่ 2

4. สรุป

ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่ดีที่สุดที่ได้จากการใช้เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนองมาวางซ้อนทับกันคือ ส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว 92.94 เปอร์เซ็นต์ เบนโทไนต์ 4.5 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 2.065 เปอร์เซ็นต์ และทรายใหม่ 0.49 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ได้ความสามารถการกดอัดของทรายได้เท่ากับ 60.13 เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศได้เท่ากับ 74.01 ปาสคาล ความชื้นของทรายได้เท่ากับ 6.49 เปอร์เซ็นต์และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกที่ทำนายได้เท่ากับ 0.68 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม Excel Solver เพื่อคำนวณหาราคาต้นทุนต่ำสุด โดยกำหนดราคาวัตถุดิบโดยเบนโทไนต์ราคา 8 บาทต่อกิโลกรัม น้ำราคา 0.015 บาทต่อกิโลกรัม และทรายใหม่ราคา 2.24 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ราคาวัตถุดิบรวมต่ำสุด เท่ากับ 11.31579 บาทต่อกิโลกรัมนั้น ผลเฉลยของส่วนผสมมีอัตราส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว 95.5387 เปอร์เซ็นต์ เบนโทไนต์ 1.130102 เปอร์เซ็นต์ น้ำ 2.331196 เปอร์เซ็นต์ และทรายใหม่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และคาดว่าส่วนผสมดังกล่าวจะให้ค่าความสามารถในการกดอัดของทรายร้อยละ 58.37923 ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ 73.80148 ปาสคาล น้ำร้อยละ 6.5 การทดสอบความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) 0.53 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรซึ่งทั้งส่วนผสมที่คำนึงถึงคุณภาพ และส่วนผสมที่คำนึงถึงราคานั้นมีผลการทดลองที่เป็นไปตามสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อทำให้สมบัติของแบบหล่อทรายเป็นไปตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S.

เมื่อนำส่วนผสมแบบแรก และส่วนผสมแบบสองมาเปรียบเทียบกันพบว่า แบบแรกมีต้นทุนวัตถุดิบ 37.2858 บาทต่อกิโลกรัม ส่วนแบบสองเป็น 11.31579 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งเมื่อผลตอบสนองของทั้ง 4 มาเปรียบเทียบกันพบว่ามีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยทั้งสองส่วนผสมเป็นไปตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S. เหมือนกัน ดังนั้นจึงควรเลือกส่วนผสมแบบที่สองเพราะทำให้ต้นทุนวัตถุดิบต่ำที่สุด

4.1 ข้อเสนอแนะ

ศึกษาผลชิ้นงานแบบหล่อในแบบหล่อทรายที่มีอัตราส่วนสมที่เหมาะสมที่สุดในการนำทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วมาเป็นส่วนผสม โดยละเอียดมากขึ้น เช่น โครงสร้างเชิงมหภาคและจุลภาค เป็นต้น และพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิของอากาศ และความชื้นของอากาศ พร้อมเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชิงกล

5. เอกสารอ้างอิง

สมาคมอุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย. 2543. **ทำเนียบโรงงานอุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย**. กรุงเทพฯ: มปท.

ชาญณรงค์ สายแก้ว. 2553. **สถิติและการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม.** ขอนแก่น: สำนักพิมพ์คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

Anderson M.J., and Whitcomb P.J. 2005. **RSM Simplified: Optimizing Process Using Response Surface Methods for Design of Experiments**. New York: Productivity Press.

Montgomery, D.C.. 1999(48). Experimental Design for Product and Process Design and Development. **Journal of Royal statistical Society.**

Myers and Montgomery. 2002. **Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments.** 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons.

StatEase, Inc. 2005. **Design Expert 7 User's Guide.** Minneapolis: StatEase.