

Determining mixture components of sand mold by using design of experiment

A case study: Iron fitting industry

การหาส่วนผสมแบบหล่อทราย โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง

กรณีศึกษา : อุตสาหกรรมข้อต่อเหล็ก

Chernkwan Rujthinnakit (เชษฐขวัญ รุจทินกฤต)* Chowana Chaisang (ชาวนะ ฉายแสง)**

Dr.Worapoj Meethom (ดร.วรพจน์ มีถม)***

ABSTRACT

This research aims to determine the optimal of mold sand mixture's ratio by using recycle sand, bentonite, water and new sand component. Then, The properties of mixture accorded to the standards of AFS (American Foundry men's Society), The responses for quality characteristics of sand mold include the ability of compact ,moisture, permeability and green compressive strength. This study used mixture experiments and response surface methodology to determine the optimal sand mold mixture components at the lowest cost. Furthermore, the operators brought this mold sand mixture research for using as the most effectively and efficiently

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายที่เหมาะสมที่สุดในการนำทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว เบนโทไนต์ น้ำและทรายใหม่มาเป็นส่วนผสม แล้วทำให้สมบัติของแบบหล่อทรายเป็นไปตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S. (American Foundry men's Society) มากที่สุด โดยผลตอบสนองที่ใช้วัดคุณภาพของแบบหล่อทราย คือ ความสามารถในการกดอัดของทราย ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศของแบบหล่อทราย ความชื้นของทราย และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก การศึกษานี้ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมและวิธีพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อนำมาใช้ในการหาส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่เหมาะสมที่สุดในราคาค้นทุนวัตถุดิบต่ำ นอกจากนี้ผู้ประกอบการสามารถนำทรายไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลต่อไป

Key Words: Sand mold, Mixture Experiments,A.F.S. (American Foundry men's Society)

คำสำคัญ: แบบหล่อทราย การออกแบบการทดลองส่วนผสม มาตรฐานของสมาคม A.F.S

* Student Master of Industrial Engineer, Department of engineer, Faculty of Engineer, King Mongkut technology of North Bangkok

** Quality Manager, Departmet of Quaility, Siam fitting Co.,Ltd.

*** Lecturer, Department of engineer, Faculty of Engineer, King Mongkut technology of North Bangkok

บทนำ

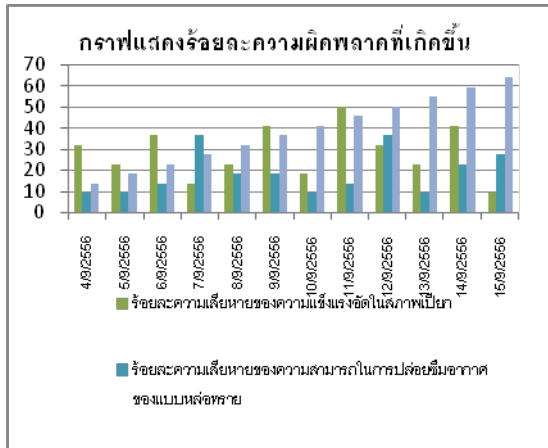
อุตสาหกรรมเหล็กหล่อจัดเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สนับสนุนหรือเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการผลิตอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกล เป็นต้น และเป็นอุตสาหกรรมการผลิตที่ถือว่ามีความสำคัญอย่างมากต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากข้อมูลการส่งออกในปี พ.ศ.2538 ถึงปี พ.ศ.2541 มีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับคือ 1,137 ล้านบาท 1,232 ล้านบาท 1,598 ล้านบาท 1,682 ล้านบาท ประเทศไทยมีโรงงานเหล็กหล่อทั่วประเทศประมาณ 284 โรงงาน ซึ่งกระจายตัวตามภูมิภาคต่างๆ ได้แก่ ภาคเหนือ 12 โรงงาน ภาคใต้ 20 โรงงาน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 26 โรงงาน และภาคกลาง 226 โรงงาน โดยมีปริมาณการผลิตโดยรวมประมาณ 500,000 ตันต่อปี(สมาคมอุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย, 2543) ซึ่งถือว่าอุตสาหกรรมเหล็กหล่อเป็นอุตสาหกรรมที่มีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมเหล็กหล่ออาจได้รับผลกระทบจากปัจจัยหลาย ๆ ด้าน ได้แก่ ราคาวัตถุดิบที่มีแนวโน้มสูงขึ้น ขาดแคลนช่างฝีมือและคนงานที่ชำนาญการ ระดับของเทคโนโลยี คุณภาพมาตรฐานสินค้า เป็นต้น ดังนั้นการรักษาระดับและคุณภาพของสินค้าก็จะสามารถช่วยพัฒนาศักยภาพการแข่งขันของประเทศได้

โรงงานการศึกษาเป็นโรงงานหนึ่งที่ผลิตข้อต่อเหล็กจากแบบหล่อทรายที่เป็นชนิดแบบหล่อทรายขึ้นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของโรงงาน คือ ข้อต่อเหล็กและข้อต่อทองเหลือง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเป็นประจำ มีกำลังการผลิตเดือนละ 1,050 ตัน แบ่งตามผลิตภัณฑ์ คือ ข้อต่อเหล็ก 900 ตันต่อเดือน และข้อต่อทองเหลือง 150 ตันต่อเดือน การผลิตผลิตภัณฑ์จะเป็นการรับคำสั่งจากลูกค้าโดยตรง ส่งออกภายนอกประเทศร้อยละ 90 และผลิตเพื่อใช้ภายในประเทศร้อยละ 10 จากการสอบถามข้อมูลปัญหาของโรงงานพบว่า มีของเสียหรือชิ้นงานเสีย ร้อยละ 10 (3,000 กิโลกรัมต่อวัน) ซึ่งปัญหาที่พบ

ส่วนใหญ่เกิดจากสภาพแวดล้อมภายนอก ร้อยละ 2 การออกแบบที่ผิดพลาด ร้อยละ 2-3 และเกิดจากแม่แบบหล่อทรายคิดเป็น ร้อยละ 5-6 (1,800 กิโลกรัมต่อวัน)

ตารางที่ 1 อัตราการไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของคุณสมบัติเชิงกล 3 เกณฑ์

วันที่	ร้อยละความเสียหายของความแข็งแรงอัดในสภาพเปื่อย	ร้อยละความเสียหายของความสามารถในการปล่อยซึมอากาศของแบบหล่อทราย	ร้อยละความเสียหายของความชื้นของทราย
4/9/2556	31.82	9.09	13.64
5/9/2556	22.73	9.09	18.18
6/9/2556	36.36	13.64	22.73
7/9/2556	13.64	36.36	27.27
8/9/2556	22.73	18.18	31.82
9/9/2556	40.91	18.18	36.36
10/9/2556	18.18	9.09	40.91
11/9/2556	50.00	13.64	45.45
12/9/2556	31.82	36.36	50.00
13/9/2556	22.73	9.09	54.55
14/9/2556	40.91	22.73	59.09
15/9/2556	9.09	27.27	63.64
เฉลี่ย	28.41	18.56	38.64



ภาพที่ 1 อัตราการไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของคุณสมบัติเชิงกล 4 เกณฑ์

จากข้อมูลย้อนหลังของโรงงานกรณีศึกษาพบว่า ร้อยละความเสียหายของความแข็งแรงอัดในสภาพเปื่อยเฉลี่ย คือ 28.41 ร้อยละความเสียหายของความสามารถในการปล่อยซึมอากาศของแบบหล่อทรายเฉลี่ย คือ 18.56 และร้อยละความเสียหายของความชื้นของทราย คือ 38.64 ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และภาพที่ 1.1

โรงงานกรณีศึกษาจึงต้องการควบคุม คุณสมบัติเชิงกลของทรายแบบ มีการตรวจสอบคุณภาพของแบบทรายโดยจะเก็บทรายตัวอย่างชั่วโมงละ 1 ตัวอย่าง เพื่อทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงอัดในสภาพเปื่อยความสามารถในการปล่อยซึมอากาศของแบบหล่อทราย และความชื้นของทรายทั้งหมดวันละ 22 ครั้งคุณภาพของทรายต้องผ่านเกณฑ์ที่กำหนดทั้ง 3 เกณฑ์จึงสามารถใช้งานได้

ซึ่งปัญหาแม่แบบหล่อทรายทำให้เกิดของเสียมากที่สุด และพบว่าการผสมแบบหล่อทรายที่ไม่เหมาะสม ทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก บริเวณผิวและรอยต่อมีรอยขรุขระ และชิ้นงานมีรูพรุนหรือโพรงอากาศ โรงงานกรณีศึกษาใช้ทรายที่ถูกใช้งานแล้วนำกลับมาใช้งานใหม่เพื่อเป็นส่วนผสมของแบบหล่อทรายเป็นผลให้กระบวนการผลิตมีปริมาณของเสียหรือชิ้นงานมีความเสียหายเกิดขึ้นก่อให้เกิดต้นทุนในกระบวนการผลิตสูงขึ้น และคุณภาพชิ้นงานไม่เป็นไป

ตามความต้องการ ผลกระทบที่สำคัญ คือ การทำให้ความเชื่อมั่นของโรงงานและโอกาสทางการตลาดลดลง ดังนั้น การที่จะทำให้ทรายที่นำกลับมาใช้งานใหม่จำเป็นต้องคำนึงถึงคุณภาพของทรายเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล

ส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่ประกอบไปด้วยทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว เบนโทไนต์ และน้ำ จำเป็นต้องศึกษาส่วนผสมที่เหมาะสม ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกล ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศของแบบหล่อทราย และความชื้นของทรายมีสมบัติที่พอเหมาะสมควร และการหาส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทรายสามารถกระทำได้โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Experiment) วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (response surface methodology) ซึ่งเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างตัวแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาที่แสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลตอบสนองนั้นๆ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาหาส่วนผสมของแบบหล่อทรายในอุตสาหกรรมข้อต่อเหล็ก โดยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง และวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง ซึ่งในการหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของแบบหล่อทรายในการนำทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยคำนึงถึงสมบัติเชิงกลของแบบหล่อทรายที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ความสามารถในการกดอัดของทราย ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศของแบบหล่อทราย ความชื้นของทราย และ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปื่อย ให้มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S. (American Foundrymen's Society) ที่เหมาะสมที่สุด

วัสดุและอุปกรณ์

ส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่ใช้ในงานวิจัยคือ ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว เบนโทไนต์ น้ำ และทรายใหม่ ซึ่งได้มาจากโรงงานกรณีศึกษา ทรายที่นำมาใช้เป็นทรายจากจังหวัดระยอง ตัวประสานที่ใช้คือโซเดียมเบนโทไนต์ (Na-bentonite) เป็นตัวประสานที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการสร้างแบบหล่อ ซึ่งเมื่อผสมเข้ากับน้ำ จะทำให้เกิดแรงดึงดูดที่สามารถที่จะยึดเกาะแบบหล่อ และทำให้แบบหล่อมีความแข็งแรง

ขั้นตอนการเตรียมส่วนผสมของแบบหล่อทราย

นำทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วที่ผ่านกระบวนการทำให้ทรายเย็น (sand cooling) ที่มีการควบคุมความชื้นของทรายที่ร้อยละ 3 ใส่ลงในภาชนะสำหรับเตรียมผสม ต่อจากนั้นนำส่วนผสมของเบนโทไนต์ น้ำ และทรายใหม่เติมเข้าไปในปริมาณสัดส่วนตามแผนการทดลองของส่วนผสม แล้วคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันเป็นเวลานาน 5 นาที จากนั้นนำทรายที่ผสมแล้วนำมาเตรียมเป็นตัวอย่างชิ้นงานทดสอบและซึ่งทำการทดสอบค่าความสามารถในการกดอัดของทราย ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ ค่าความชื้นของทราย และค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกทันที การทดสอบสมบัติเชิงกลคือค่าความสามารถในการกดอัดของทราย ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ ความชื้นของทราย และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะและรูปร่างเหมือนกัน โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S. (American Foundry' men Society) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว และสูง 2 นิ้ว

การทดสอบค่าความสามารถในการกดอัดของทราย

การทดสอบความสามารถในการกดอัดของทราย เป็นการทดสอบสมบัติของทรายแบบ เพื่อเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการกดอัดของทรายโดยไม่ทำให้แบบหล่อมีการพังหรือยุบตัว โดยใช้ชุดเครื่องมือในการทดสอบวัดแบบอัดทราย โดยใช้เครื่อง Sand rammer

และ compactability kits ทำการทดสอบโดย เตรียมชิ้นงาน โดยอัดทรายแบบในกระบอกมาตรฐานด้วยเครื่องมืออัด โดยกดลูกเบียร์ที่มีน้ำหนัก 14 ปอนด์สูงจากระดับ 2 นิ้ว ปล่อยให้ตกกระทบบนพื้นทรายตัวอย่างจำนวน 3 ครั้ง ทรายแบบตัวอย่างในกระบอกจะถูกอัดตัวกันจนแน่น และมีความสูงประมาณ $2 \pm \frac{1}{32}$ นิ้ว โดยวัดจากไม้บรรทัด

การทดสอบความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ

การทดสอบความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคือเครื่อง Electric permeability meter การทดสอบนี้เป็นดัชนีชี้วัดแสดงให้เห็นถึงปริมาณอากาศภายใต้ความดันอากาศสูงที่สามารถไหลผ่านชิ้นงานตัวอย่างมาตรฐานซึ่งค่าตัวเลขของการปล่อยซึมอากาศสามารถอ่านค่าจากหน้าปัดเครื่องมือทดสอบได้เลย โดยมีหน่วยวัดเป็นปาสคาล

ค่าความชื้นของทราย

ปริมาณความชื้นในแบบทรายเป็นดัชนีชี้วัดแสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ความชื้นทรายที่มีผลต่อความแข็งแรงแบบ โดยใช้เตาอบ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ซึ่งภาชนะใส่ทรายแบบด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 3 ตำแหน่ง จดบันทึกค่าแล้วกด Tare ให้ค่าที่อ่านจากเครื่องชั่งเป็นศูนย์ จากนั้น ตักทรายแบบขนาด 50 กรัม ใส่ภาชนะใส่ทรายแบบซึ่งน้ำหนักและจดบันทึกค่า และนำทรายเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที สุดท้ายก็นำทรายออกจากเตาอบแล้วชั่งด้วยเครื่องชั่ง จดบันทึกค่าที่ได้และคำนวณปริมาณความชื้น

การทดสอบความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบนี้คือ เครื่อง Universal sand strength ซึ่งเป็นการทดสอบการรับแรงอัดของชิ้นงานตัวอย่าง โดยการเพิ่มแรงกระทำไปยังชิ้นตัวอย่างด้วยอัตราความเร็วสม่ำเสมอ (อัตราความเร็วของแรงกดอัดประมาณ 1.896 Kg/cm^2 ในระยะเวลา 15 วินาที) จนกระทั่งชิ้นงานตัวอย่างเกิดการแตกแล้วทำ

การบันทึกค่าความแข็งแรงอัดในหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Kg/cm^2)

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบมีข้อจำกัด (constrained mixture designs) ส่วนผสมของแบบหล่อทรายมี 4 ส่วนผสมประกอบไปด้วย ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว แทนด้วยสัญลักษณ์ A เบนโทไนต์ แทนด้วยสัญลักษณ์ B น้ำ แทนด้วยสัญลักษณ์ C และ ทรายใหม่ แทนด้วยสัญลักษณ์ D โดยมีการกำหนดข้อจำกัดของแต่ละส่วนผสมที่ทำการศึกษาในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักอยู่ในช่วงของการผลิตจริงของโรงงานการศึกษา ตามงานวิจัยของ Toussaint et al. (2000) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2 ตารางที่ 3 แสดงตารางการทดลองพร้อมข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยแต่ละตัวอย่างการทดสอบจะทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 2 ส่วนผสมและข้อจำกัดของส่วนผสมที่นำไปใช้ในออกแบบการทดลอง

ส่วนผสมของแบบหล่อทราย	สัญลักษณ์	ช่วง	
		ต่ำ (%)	สูง (%)
ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว	A	90	99.9
เบนโทไนต์	B	0.05	4.5
น้ำ	C	0.05	4.5
ทรายใหม่	D	0	1

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมและข้อมูลจากการทดลอง

Design Point	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)
1	97.86	1.85	0.05	0.24
2	99.00	0.17	0.37	0.46
3	93.84	0.67	4.49	1.00

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมและข้อมูลจากการทดลอง (ต่อ)

4	94.33	2.85	2.49	0.33
5	90.00	4.50	4.50	1.00
6	94.27	3.91	0.83	1.00
7	91.00	4.50	4.50	0.00
8	96.17	2.78	0.05	1.00
9	92.43	2.55	4.50	0.52
10	97.29	0.49	1.31	0.92
11	95.43	4.50	0.07	0.00
12	96.23	1.81	1.96	0.00
13	94.90	0.48	4.50	0.12
14	95.43	4.50	0.07	0.00
15	91.00	4.50	4.50	0.00
16	92.97	4.50	1.89	0.64
17	91.54	4.44	3.02	1.00
18	94.90	0.48	4.50	0.12

ตารางที่ 4 ข้อมูลจากการทดลอง

Design Point	Compact (%)	Perm (Pa)	H ₂ O (%)	GCS (Kg/cm^2)
1	50.33	76.33	3.4	0.53
2	50	75	4.9	0.51
3	63	71.33	8.43	0.52
4	65.33	72.67	8.07	0.53
5	65	72.33	7.9	0.66
6	57	77.33	6.07	0.7
7	65	72.33	7.9	0.66
8	57	76	4.87	0.54
9	62.67	70.67	9.53	0.59
10	59	74.33	5.03	0.46
11	57	77.33	6.07	0.7
12	63.67	75.33	6.6	0.6
13	58.67	72.67	7.8	0.44
14	53	76.67	4.8	0.65
15	65	72.33	7.9	0.66
16	63	74.67	6.33	0.78
17	55.33	73.67	6.07	0.7
18	58.67	72.67	7.8	0.44

หมายเหตุ Compact คือความสามารถในการกดอัดของทราย, Perm. คือความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ H_2O คือความชื้นของทราย, GCS คือความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ผลการทดลองในตารางที่ 4 นำมาวิเคราะห์เลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติของความสามารถในการกักตัวของทรายความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ ความชื้นของทราย และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก โดยใช้โปรแกรม Design-Expert version 7.0 (Statease, 2005) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 จากการวิเคราะห์ พบว่ารูปแบบเชิงลำดับเส้นของความสามารถในการกักตัวของทราย 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 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า รูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลและสามารถยอมรับรูปแบบการถดถอยนั้นได้นอกจากนี้ค่าค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) และค่า Adj. R^2 ของแต่ละรูปแบบมีค่าค่อนข้างสูงใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์รูปแบบทางสถิติของความสามารถในการกักตัวของทราย ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ ค่าความชื้นของทราย และค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

ผลการทดลอง	model	R^2	Adj. R^2	p-value lack of fit	p-value model
การกักตัวของทราย	Linear	0.548	0.452	0.083	0.009
ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ	Quadratic	0.969	0.934	0.086	< 0.0001
ค่าความชื้นของทราย	Linear	0.784	0.737	0.198	< 0.0001
ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก	Linear	0.825	0.787	0.077	< 0.0001

รูปแบบสมการถดถอยเป็นรูปแบบสมการโพลิโนเมียลอันดับสอง (second-order polynomial) ซึ่งนำเสนอโดย Scheffé (Scheffé, 1958) รูปแบบสมการนี้ไม่มีจุดตัดหรือค่าคงที่และส่วนกำลังสอง เนื่องจากผลรวมของส่วนผสมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 100% รูปแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนองในตัวแปรส่วนประกอบเทียม (pseudo components) คือความสามารถในการกักตัวของทราย (Compact) ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ (Perm) ความชื้นของทราย (H_2O) และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) แสดงดังสมการที่ (1), (2), (3) และ (4) ตามลำดับ

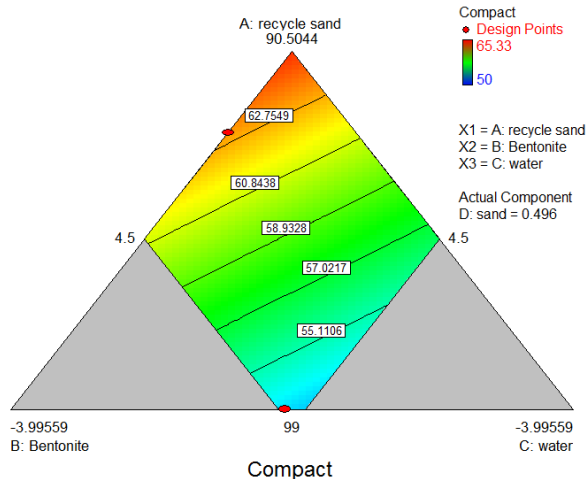
$$\text{Compact} = 64.79A + 57.47B + 48.04C + 62.66D \quad (1)$$

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

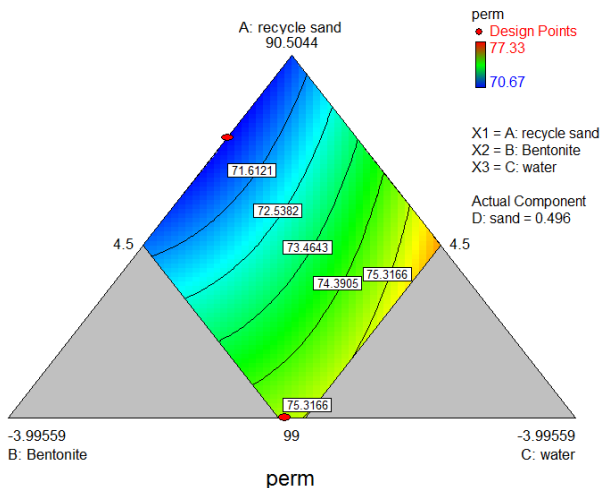
$$H_2O = 8.26A + 7.56B + 1.47C + 9.58D \quad (3)$$

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

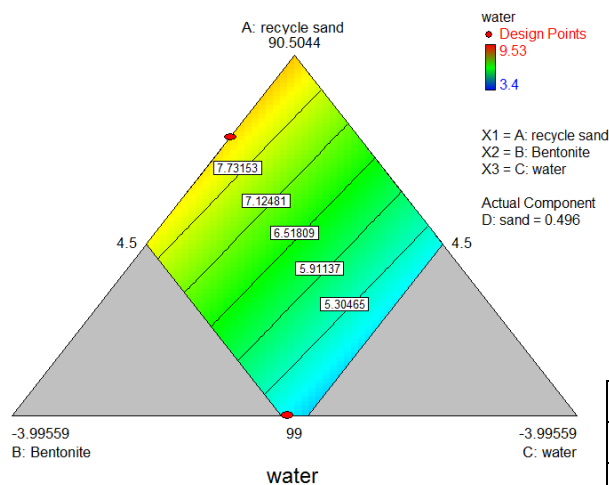
จากสมการถดถอยที่ (1), (2), (3) และ (4) ถูกลำมาทำการสร้างกราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (contour plot) ของความสามารถในการกักตัวของทราย ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ ความชื้นของทราย และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1, 2, 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อส่วนผสมเบนโทไนต์ (B) อยู่ในระดับที่สูงและส่วนผสมน้ำ (C) อยู่ในระดับที่ต่ำ จะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่เมื่อส่วนผสมเบนโทไนต์ (B) อยู่ในระดับที่ต่ำและส่วนผสมน้ำ (C) อยู่ในระดับที่สูงจะทำให้ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศมีค่าที่สูงขึ้น



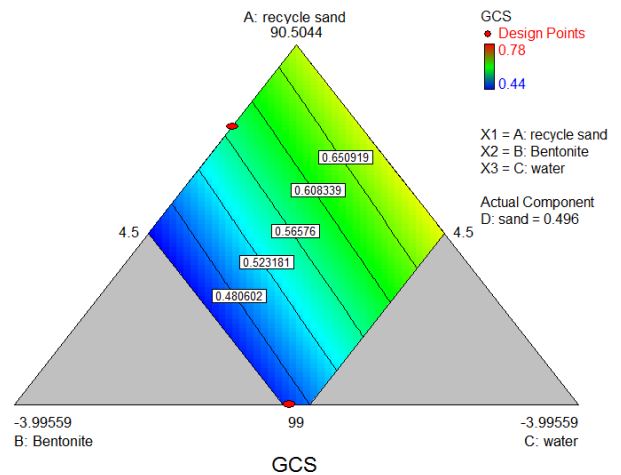
ภาพที่ 2 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของ
ค่าความสามารถในการกักตัวของทราย



ภาพที่ 3 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของ
ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ



ภาพที่ 4 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของค่า
ความชื้นของทราย



ภาพที่ 5 เส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองของ
ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

อย่างไรก็ตาม ในการดำเนินการกระบวนการผลิต หรือกระบวนการทดลองใดๆ อาจเกิดค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากการทดลองซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลนี้ควรที่จะมีค่าน้อยที่สุด การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของข้อมูล (propagation of error: POE) สามารถหาค่าส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลตอบสนองมีค่าน้อยที่สุด (Anderson and Whitcomb, 2005; ชาญณรงค์, 2553) การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสามารถวิเคราะห์ได้จากความผันแปรของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสมและค่าผลตอบสนองต่างๆ โดยกำหนดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสม A, B และ C เป็น 1, 0.25, 0.20 ตามลำดับ (Anderson and Whitcomb, 2005) แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 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 7 ผลจากการกำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละส่วนผสมทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนของความสามารถในการกดอัดของทรายอยู่ในช่วง 3.84-3.86 ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศอยู่ในช่วง 0.88-3.09 ความชื้นของทรายอยู่ในช่วง 1.05-1.06 และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกอยู่ในช่วง 1.05-1.06

ตารางที่ 7 การกำหนดค่าฟังก์ชันความพึงพอใจของการแพร่กระจาย ความคลาดเคลื่อนทั้ง 4

ผลตอบสนอง						
Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Compact	is in range	55	65	1	1	3
POE(Compact)	minimize	3.84	3.86	1	1	3
perm	maximize	70	77.33	1	1	3
POE(perm)	minimize	0.88	3.09	1	1	3
water	is in range	4.5	6.5	1	1	3
POE(water)	minimize	0.9129	0.9161	1	1	3
GCS	maximize	0.53	0.78	1	1	3
POE(GCS)	minimize	0.0539	0.05445	1	1	3

จากการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (Myers and Montgomery, 2002; Anderson and Whitcomb, 2005; StatEase, Inc., 2005) ผลของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนแสดงดังตารางที่ 8 การวิเคราะห์ พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดประกอบด้วย ส่วนผสมของ A 92.94 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผสมของ B ร้อยละ 4.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนผสมของ C 2.065 เปอร์เซ็นต์ และส่วนผสมของ D 0.496 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้ได้ความสามารถในการกดอัดของทรายได้เท่ากับ 60.13545 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศได้

เท่ากับ 74.01803 ปาสคาล ความชื้นของทรายได้เท่ากับ 6.499995 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกที่ทำนายได้เท่ากับ 0.687056 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 8 ผลของโปรแกรมในการวิเคราะห์การแพร่กระจาย ความคลาดเคลื่อนร่วมกับฟังก์ชันความพึงพอใจทั้ง 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	

อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนาย มีสมบัติของค่าความสามารถในการกดอัดของทราย ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ ค่าความชื้นของทราย และค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกตรงตามการทดลองจริงหรือไม่ จำเป็นต้องต้องทำการยืนยันผลการทดลอง พร้อมคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ 95 เปอร์เซ็นต์ของผลตอบสนอง จากการทดลองอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ประกอบไปด้วยส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว เบนโทไนต์ น้ำ และทรายใหม่ มีค่า 92.94, 4.5, 2.065 และ 0.496 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 10 ซ้ำ

เมื่อนำอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดและมีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมาแปลงเป็นค่าของส่วนผสมเทียม (pseudo components) จะได้ส่วนผสมของของ A เท่ากับ 0.46 B เท่ากับ 0.24 C เท่ากับ 0.24 และ

D เท่ากับ 0.05 ตามลำดับ เมื่อแทนค่าในสมการถดถอยของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศของส่วนประกอบเทียมในสมการที่(1), (2), (3) และ(4) พบว่าค่าความสามารถในการกดอัดของทรายที่ทำนายได้มีค่าเท่ากับ 58.25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความสามารถในการปล่อยซิมอากาศที่ทำนายได้มีค่าเท่ากับ 72.47 ปาสคาล ความชื้นของทรายที่ทำนายได้มีค่าเท่ากับ 6.44 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกที่ทำนายได้มีค่าเท่ากับ 0.56 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อนำมาเทียบในตารางที่ 9 พบว่าค่าที่ทำนายได้ของค่าความสามารถในการกดอัดของทราย ความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ ความชื้นของทราย และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกที่ทำนายมีค่าอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมและการวิเคราะห์ผลทางสถิติมาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทราย แล้วทำให้สมบัติของแบบหล่อทรายตรงตามความต้องการที่กำหนด โดยที่ทำให้สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อทำให้สมบัติของแบบหล่อทรายเป็นไปตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S. (American Foundrymen's Society)ตรงต่อความต้องการของลูกค้า ส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่ทำการทดลองคือ ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว เบนโทไนต์ น้ำและทรายใหม่ โดยมีเงื่อนไขข้อจำกัดอยู่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังนี้ คือ $90 \leq A \leq 99.9$, $0.05 \leq B \leq 4.5$, $0.05 \leq C \leq 4.5$ และ $0 \leq D \leq 1$ โดยที่ A คือทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว B คือเบนโทไนต์ C คือน้ำ และ D คือ ทรายใหม่ และผลตอบสนองที่ถูกนำมาประเมินหาส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทรายได้แก่ ค่าความสามารถในการกดอัดของทราย ความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ ความชื้นของทราย และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก และผลการวิเคราะห์พบว่า

อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดประกอบด้วย ส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว 92.94 เปอร์เซ็นต์ เบนโทไนต์ 4.5 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ 2.065 เปอร์เซ็นต์ และทรายใหม่ 0.496 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้ได้ค่าความสามารถในการกดอัดของทรายได้เท่ากับ 60.135 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการปล่อยซิมอากาศได้เท่ากับ 74.018 ปาสคาล ความชื้นของทรายได้เท่ากับ 6.499 เปอร์เซ็นต์ และความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกที่ทำนายได้เท่ากับ 0.687 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองนี้เป็นไปตามสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อทำให้สมบัติของแบบหล่อทรายเป็นไปตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S. (American Foundrymen's Society) ตรงต่อความต้องการของลูกค้า สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจของผู้ประกอบการได้

เอกสารอ้างอิง

- ชาญณรงค์ สายแก้ว. 2553. สถิติและการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม. ขอนแก่น: คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สมาคมอุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย. 2549. รายงานการศึกษารวบรวมข้อมูลจากโรงงานเหล็กทั่วทุกภาคของประเทศไทย. กรุงเทพฯ.
- Anderson, MJ., and Whitcomb, PJ. 2005. RSM Simplified: Optimizing Process Using Response Surface Methods for Design of Experiments. Productivity Press, New York.
- Myers, RH., and Montgomery, DC. 2002. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York.
- Scheffé, H. 1958. Experiments with mixtures. Journal of the Royal Statistical Society. Series B. 20: 344-366.

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

Minneapolis, USA: StatEase.

Toussaint, PM., Boscherville, SM., and Queval, PR.

2000. Method of improving the properties of reclaimed sand used for the production of foundry moulds and cores. United StatesPatent.