

การปรับปรุงสมบัติแบบหล่อทรายในอุตสาหกรรมเหล็กหล่อ โดยใช้การทดลองแบบส่วนผสม

Improving the Properties of Sand Molds in the Iron Casting Industry Using Mixture Experiments

ชาญณรงค์ สายแก้ว (Charnnarong Saikaew)¹ *

เสริมศักดิ์ เวียงวิเศษ (Serm Sak Wiengwiset)²

อภัย ศรีบุญเรือง (Apai Sriboonruang)³

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อ ทรายที่ใช้ทำแบบหล่อสามารถนำมาใช้ใหม่ได้หลายๆ ครั้ง อย่างไรก็ตาม การใช้ทรายรีไซเคิลมีผลทำให้สมบัติของแบบหล่อทรายเป็นลบและเกิดผลเสียต่อชิ้นงาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติแบบหล่อทราย โดยการหาส่วนผสมระหว่างทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วกับสารเติมแต่งอื่นๆ ให้มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด การศึกษานี้ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ส่วนผสมของแบบหล่อทราย โดยที่ส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่ทำการศึกษาประกอบด้วยทรายที่ผ่านการใช้งานแล้ว ครั้งที่ 1 เบนโทไนต์และน้ำ สมบัติที่ใช้ทดสอบแบบหล่อทรายคือ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ วิธีพื้นผิวผลตอบสนองถูกนำมาใช้หาอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดยังสามารถหาได้จากการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนร่วมกับฟังก์ชันความพึงพอใจ ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองและการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนร่วมกับฟังก์ชันความพึงพอใจให้ผลใกล้เคียงกัน

Abstract

In the iron casting industry, molding sands are recycled multiple times. Eventually, recycled sand degrades the properties of the sand mold that can cause product defects. Hence this research aims to improve the properties of sand molds by determining the optimal mixture components of recycled sand and other additive materials. This study uses mixture experiments for data collection and sand mold mixture component analysis. The components of a mixture for making a sand mold consist of the first time recycled sand, bentonite, and water. The mechanical property test of the sand mold includes green compressive strength and permeability. Response surface methodology is employed to determine the optimal proportions of mixture components. In addition, propagation of error with the use of the desirability function approach has been employed for the purpose of optimizing sand mold mixtures. The studies have found that the

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

³ ครูปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

optimal proportions of mixture components of the sand mold are slightly different according to the analyses performed by response surface approach and propagation of error with the use of desirability function approach.

คำสำคัญ: แบบหล่อทราย การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม พื้นผิวผลตอบสนอง

Keywords: Sand mold, Mixture experiment, Response surface methodology

บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อ คุณภาพของชิ้นงานถือว่ามีความสำคัญมาก เนื่องจากการผลิตตามความต้องการของลูกค้าเป็นหลัก ดังนั้น การสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าจึงเป็นสิ่งสำคัญ อย่างไรก็ตาม การทำให้คุณภาพของชิ้นงานมีคุณภาพและปราศจากข้อบกพร่องเป็นเรื่องที่ยาก เพื่อหลีกเลี่ยงข้อบกพร่องในชิ้นงานหล่อและทำให้ได้ชิ้นงานหล่อที่สมบูรณ์ ถูกต้องแม่นยำ และตรงตามความต้องการของลูกค้า การควบคุมกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพ จะต้องให้ความสำคัญกับตัวแปรในทุกขั้นตอนของการผลิต ซึ่งจะช่วยลดข้อบกพร่องให้ลดน้อยลงได้ (Pearce et al., 2544)

กระบวนการผลิตชิ้นงานหล่อโดยทั่วไปจะใช้แบบหล่อ (mold) เป็นแบบสำหรับหล่อโลหะให้ได้ผลิตภัณฑ์หล่อตามต้องการ แบบหล่อที่นิยมใช้ในโรงงานผลิตเหล็กหล่อมากที่สุดคือแบบหล่อทราย เนื่องจากการหล่อโดยใช้แบบหล่อทรายมีข้อดีคือ ต้นทุนในการผลิตต่ำ สามารถออกแบบชิ้นงานตามความต้องการของลูกค้าได้ และที่สำคัญสามารถนำทรายหล่อกลับมาใช้ใหม่ได้ (สุนิมนต์, 2549) อย่างไรก็ตาม ปัญหาของแบบหล่อทรายในการนำทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่ มีผลทำให้สมบัติของแบบหล่อทรายในด้านความแข็งแรงและการปล่อยซีมอากาศลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดจุดเสียในชิ้นงาน เช่น เกิดทรายแทรกเข้าไปในเนื้อโลหะและเกิดรูพรุนที่ผิวของชิ้นงาน เป็นต้น (หริสและจิตติวิธา, 2543)

โรงงานกรณีศึกษาเป็นหนึ่งในโรงงานที่ผลิตเหล็กหล่อจากแบบหล่อทรายและมีการนำทรายกลับมาใช้ใหม่ เป็นผลให้ชิ้นงานที่เกิดความเสียหายและคุณภาพชิ้นงานไม่เป็นไปตามความต้องการ ดังนั้น การที่จะนำทรายกลับมาใช้ใหม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการฟื้นฟูคุณภาพของทรายก่อน เพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการเติมตัวประสานอื่นๆ เข้าไปในปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้สมบัติทางด้านกายภาพและด้านเคมีของทรายหล่อแบบเหมาะสมสำหรับสร้างเป็นแบบหล่อทรายและการหล่อชิ้นงาน (Lucarz, 2006)

จากการศึกษางานวิจัย พบว่าการหาค่าความเหมาะสมของส่วนผสมแบบหล่อทรายมีหลากหลายวิธี อาทิเช่น การจำลองสถานการณ์โดยใช้คอมพิวเตอร์ (computer simulation) (Hiroyasu et al., 2003) วิธี artificial neural network และวิธี genetic algorithm (Karunakar and Datta, 2007) เป็นต้น วิธีหาค่าความเหมาะสมที่กล่าวมาเป็นวิธีการที่ยุ่งยาก ซับซ้อนและต้องอาศัยข้อมูลเป็นปริมาณมาก การหาค่าความเหมาะสมของส่วนผสมแบบหล่อทรายสามารถใช้วิธีการออกแบบการทดลอง ซึ่งเป็นวิธีการที่เข้าใจง่ายและสามารถนำมาปฏิบัติได้จริง Guharaja et al. (2006) ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธี Taguchi's method ในการหาค่าความเหมาะสมของแบบหล่อทรายเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เหล็กหล่อที่มีคุณภาพที่สุด ตัวชี้วัดหรือสมบัติที่นำมาศึกษาคุณภาพของแบบหล่อทรายที่ใช้ในการทดลองคือ ความแข็งแรงขณะเปิกขึ้น การปล่อยซีมอากาศและความแข็งแรงของแบบหล่อ Kundu and

Lahiri, (2008) ศึกษาหาค่าความเหมาะสมของแบบหล่อทรายโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ central composite rotatable design (CCRD) สมบัติที่ถูกนำมาประเมินหาค่าความเหมาะสมได้แก่ ความหนาแน่นรวม ความสามารถในการกดอัด การปล่อยซิมอากาศและแรงอัด จากการศึกษาดังกล่าว จะเห็นได้ว่าวิธีการออกแบบการทดลองสามารถนำมาควบคุมและหาค่าความเหมาะสมของสมบัติแบบหล่อทรายได้ อย่างไรก็ตาม เทคนิคการออกแบบการทดลองดังกล่าวเป็นเพียงการศึกษาค่าความเหมาะสมของแบบหล่อทรายของแต่ละปัจจัยที่กำหนดในแต่ละกระบวนการ

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (mixture experiments) เป็นวิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าสัดส่วนที่เหมาะสมของระดับของปัจจัย ซึ่งเป็นวิธีการที่ช่วยในการปรับปรุงและพัฒนาส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพตรงตามความต้องการของลูกค้าในปัจจุบัน นักวิจัยหลายท่านนำวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัสดุวิศวกรรม และเพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพ Duée et al. (2009) ศึกษาการหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแก้วทางชีวภาพ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมแบบ D-optimal สมบัติที่ใช้ในการทดสอบแก้วที่นำมาใช้ในการพิจารณา คือ การทำปฏิกิริยาทางชีวภาพและความหนาแน่นของไฮดรอกซีแอปาทิต Marcia et al. (1997) ทำการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมโดยใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมแบบมีเงื่อนไข เพื่อวิเคราะห์หาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีต โดยสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบได้แก่ การยุบตัวของคอนกรีต ความแข็งแรงกดอัด การแทรกซึมของสารคลอไรด์ และต้นทุนที่ต่ำที่สุด ผลจากการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมทำให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีและมีต้นทุนต่ำที่สุด ซึ่งดีกว่าวิธีการทั่วไปที่ใช้วิธีการลองผิดลองถูก ในขณะที่ Menezes et al. (2008) ทำการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมแบบ centroid simplex-lattice และหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมโดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนองใน

การหาส่วนผสมที่เป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเหมืองแร่มาใช้ผลิตกระเบื้องเซรามิกส์ ชาญณรงค์และพินิตา (2552) ประยุกต์การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม วิธีพื้นผิวผลตอบสนองรวมถึงการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน โดยหาอัตราส่วนผสมของชิ้นส่วนพลาสติกกระหว่างส่วนผสมพลาสติกโพลีคาร์บอเนตริโซเคิลและพลาสติกโพลีคาร์บอเนตใหม่ เพื่อให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและอุณหภูมิการบดอัดดีที่สุด จะเห็นได้ว่า วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุวิศวกรรมได้

อย่างไรก็ตาม จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบว่ามีงานนำวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมมาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราส่วนผสมแบบหล่อทราย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมและวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง รวมถึงการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนร่วมกับฟังก์ชันความพึงพอใจมาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทราย ซึ่งเป็นการนำทรายหล่อที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยที่สมบัติเชิงกลคือ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก และความสามารถในการปล่อยซิมอากาศมีค่าที่เหมาะสมที่สุด

วิธีการวิจัย

1. วัตถุประสงค์และอุปกรณ์เครื่องมือ

ส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่ใช้ในงานวิจัยคือ ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 เบนโทไนต์และน้ำ ซึ่งได้มาจากโรงงานการศึกษา ทรายที่นำมาใช้เป็นทรายจากจังหวัดระยอง ในขณะที่ตัวประสานที่ใช้คือโซเดียมเบนโทไนต์ (Na-bentonite) ซึ่งเมื่อผสมกับน้ำจะทำให้เกิดแรงดึงดูดและสามารถยึดเกาะแบบหล่อซึ่งทำให้แบบหล่อมีความแข็งแรง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกคือ เครื่อง Universal sand strength ซึ่งมีหน่วยเป็น lb/in² ในขณะที่เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความสามารถในการปล่อยซึมอากาศคือ เครื่อง electric permeability meter ซึ่งมีหน่วยเป็นตัวเลขของการปล่อยซึม

2. การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมแบบ D-optimal ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมแบบมีข้อจำกัด สำหรับส่วนผสมที่ทำการศึกษามี 3 ส่วนผสม ซึ่งประกอบด้วย ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 (A) เบนโทไนต์ (B) และน้ำ (C) โดยมีการกำหนดข้อจำกัดของแต่ละส่วนผสมที่ทำการศึกษาในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 1 (Toussaint et al., 2000) ตารางที่ 2 แสดงตารางการทดลองพร้อมข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยแต่ละตัวอย่างการทดสอบจะทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3. การทดสอบสมบัติเชิงกลและความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลคือ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ โดยอาศัยหลักการทดสอบตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S. (American Foundry' men Society) ขึ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึมอากาศมีลักษณะและรูปร่างเหมือนกัน โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว และสูง 2 นิ้ว

ผลการวิจัย

ผลการทดลองในตารางที่ 2 สามารถนำมาวิเคราะห์เลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึมอากาศโดยใช้โปรแกรม Design-Expert® version 7.0

ตารางที่ 1. ส่วนผสมและข้อจำกัดของส่วนผสม
ที่นำไปใช้ในการออกแบบการทดลอง

ส่วนผสม	สัญลักษณ์	ข้อจำกัด	
		ค่าต่ำ	ค่าสูง
ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1	A	90.00	99.9
เบนโทไนต์	B	0.05	5.0
น้ำ	C	0.05	5.0

ตารางที่ 2. อัตราส่วนผสมและข้อมูลจากการทดลอง

ส่วนผสม	A	B	C	GCS (lb/in ²)	Perm
1	94.95	0.05	5.00	2.96	55.3
2	92.48	5.00	2.50	7.60	32.3
3	92.47	2.52	5.00	4.53	51.3
4	99.90	0.05	0.05	5.80	63.0
5	94.95	5.00	0.05	7.00	19.3
6	97.42	0.05	2.52	3.00	61.6
7	97.42	2.52	0.05	6.53	38.3
8	94.95	2.52	2.52	5.30	48.0
9	96.18	2.52	1.28	7.03	47.3
10	94.95	3.76	1.28	8.90	33.3
11	90.00	5.00	5.00	4.70	49.6
12*	90.00	5.00	5.00	6.80	55.0
13*	94.95	0.05	5.00	2.20	64.0
14*	97.42	0.05	2.52	2.70	68.0

หมายเหตุ : ส่วนผสมที่ 12, 13, 14 เป็นส่วนผสมซ้ำเพื่อทดสอบหาค่า lack of fit
GCS คือ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก
Perm คือ ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ

(StatEase, Inc., 2005) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ รูปแบบทางสถิติของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึมอากาศมีความเหมาะสมในรูปแบบเชิงเส้นตรง (linear model) และรูปแบบ

เชิงเส้นโค้ง (quadratic model) ตามลำดับ โดยพิจารณาจากค่า p -value ของแต่ละรูปแบบมีค่าน้อยกว่า 0.05 (p -value เท่ากับ 0.0002, 0.0022) และค่า p -value ของการทดสอบ lack of fit มีค่ามากกว่า 0.05 (p -value เท่ากับ 0.44, 0.85) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า รูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลและสามารถยอมรับรูปแบบการถดถอยนั้นได้ใน

ตารางที่ 3. ผลการวิเคราะห์รูปแบบทางสถิติ
ของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

model	R^2	$R^2_{pred.}$	p -value lack of fit	p -value model
Linear	0.8	0.6	0.44	0.0002

ตารางที่ 4. ผลการวิเคราะห์รูปแบบทางสถิติ
ของความสามารถในการปล่อยซีเมนต์อากาศ

model	R^2	$R^2_{pred.}$	p -value lack of fit	p -value model
Quadratic	0.95	0.85	0.85	0.0022

ตารางที่ 5. สมการถดถอยของสมบัติแบบหล่อทราย

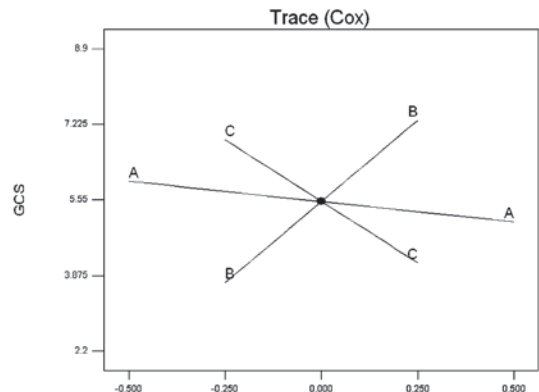
properties	regression*	$R^2_{Adj.}$
GCS	$5.07A + 12.13B - 0.19C$	75
Perm.	$64.7A - 11.95B + 42.25C - 34.9AB + 25.48AC + 143.48BC$	92

หมายเหตุ : regression ที่ใช้คือ สมการถดถอยอยู่ในรูปของส่วนประกอบเทียม

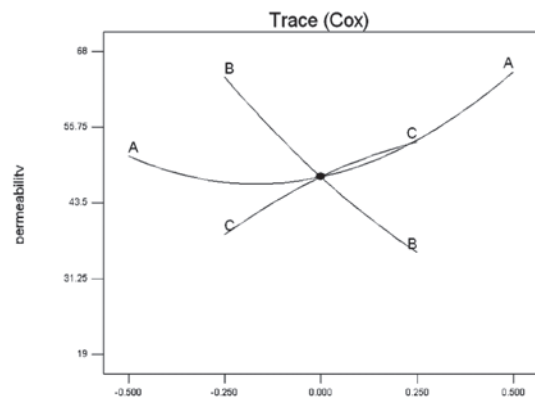
ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) และค่า predicted R^2 ของแต่ละรูปแบบมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม

รูปแบบสมการถดถอยเป็นรูปแบบสมการพหุนามอันดับสอง (second-order polynomial) ซึ่งนำเสนอโดย Scheffé (1958) รูปแบบสมการนี้ไม่มีจุดตัดหรือค่าคงที่และส่วนกำลังสอง เนื่องจากผลรวมของส่วนผสมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 100% รูปแบบจำลอง

การถดถอยของสมบัติแบบหล่อทรายคือ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) และความสามารถในการปล่อยซีเมนต์อากาศ (Perm.) แสดงดังตารางที่ 5 โดยแต่ละสมการมีค่า



รูปที่ 1. กราฟ trace ของความแข็งแรงอัด
ในสภาพเปียก



รูปที่ 2. กราฟ trace ของความสามารถ
ในการปล่อยซีเมนต์อากาศ

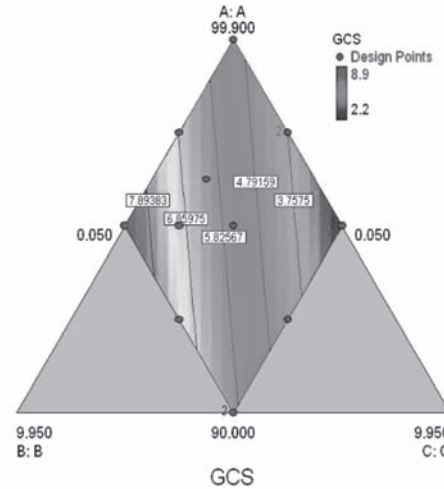
สัมประสิทธิ์ตัวกำหนดปรับแล้ว ($R^2_{Adj.}$) มีค่าที่สูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณส่วนผสมและสมบัติของแบบหล่อทรายได้อย่างเหมาะสม

รูปที่ 1 และรูปที่ 2 เป็นกราฟ trace ของผลตอบสนอง ซึ่งใช้วิเคราะห์แต่ละส่วนผสมว่ามีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองหรือไม่ โดยพิจารณาจากแนวโน้มของเส้นกราฟ ถ้าเส้นกราฟของส่วนผสมใดมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง ซึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง แสดงว่า

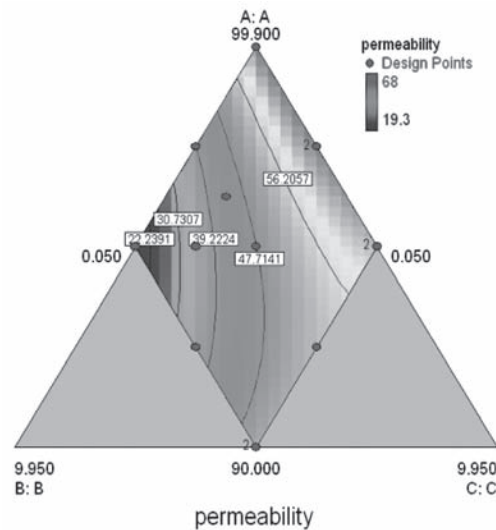
ส่วนผสมนั้นมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าผลตอบสนอง รูปที่ 1 พบว่าส่วนผสม B และ C มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก เนื่องจากเส้นกราฟเป็นเส้นตรงที่เพิ่มขึ้นและลดลง แต่ส่วนผสม A ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก เนื่องจากเส้นกราฟมีลักษณะเกือบเป็นแนวราบ รูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าส่วนผสม A, B และ C มีอิทธิพลต่อค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ เนื่องจากกราฟมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างชัดเจน

เมื่อนำสมการถดถอยในตารางที่ 5 มาทำการสร้างกราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (contour plot) ของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อส่วนผสมเบนโทไนต์ (B) อยู่ในระดับที่สูงและส่วนผสมน้ำ (C) อยู่ในระดับที่ต่ำจะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อส่วนผสมเบนโทไนต์ (B) อยู่ในระดับที่ต่ำและส่วนผสมน้ำ (C) อยู่ในระดับที่สูงจะทำให้ค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศมีค่าที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎีและงานวิจัยของ (Paluszkiwicz et al., 2008)

การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยให้ผลตอบสนองของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึมอากาศมีค่าผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดร่วมกัน โดยใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน (overlay plot) โดยกำหนดเงื่อนไขของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกต้องมีค่ามากที่สุดที่อยู่ในช่วงประมาณ 7–8 lb/in² (คมสัน, 2548) และค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศอยู่ในช่วง 30–68 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของแบบหล่อทรายที่ใช้สำหรับขึ้นงานหล่อทั่วไป จากการวิเคราะห์พบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ระดับของส่วนผสม A ร้อยละ 93.2 ส่วนผสม B ร้อยละ 5 และส่วนผสม C ร้อยละ 1.8 ซึ่งทำให้ได้ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) ประมาณ 7.6 lb/in² และค่าความสามารถในการปล่อยซึมอากาศประมาณ 31.3 แสดงดังรูปที่ 5

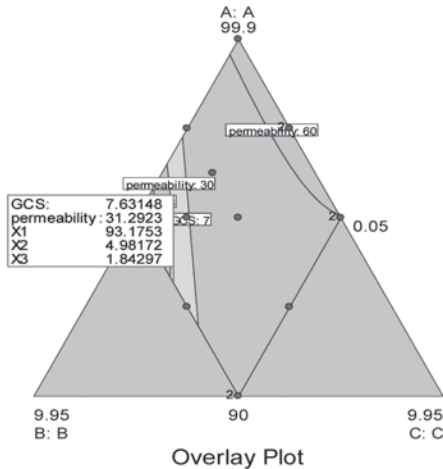


รูปที่ 3. เส้นโครงร่างของค่าความแข็งแรงอัด
ในสภาพ เปียก



รูปที่ 4. เส้นโครงร่างของค่าความสามารถ
ในการปล่อยซึมอากาศ

การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองบางครั้งอาจจะไม่ใช่จุดที่ดีที่สุด โดยเฉพาะในการกระบวนการผลิตที่มีผลตอบสนองมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับของปัจจัยหรือตัวแปร (ส่วนผสม) เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อความผันแปรในผลตอบสนองและความคลาดเคลื่อนของข้อมูลน้อยที่สุด การวิเคราะห์หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในลักษณะนี้สามารถดำเนินการได้โดยการวิเคราะห์การแพร่



รูปที่ 5. โครงร่างพื้นผิวผลตอบแทนวางซ้อนทับกัน

กระจายความคลาดเคลื่อน (propagation of error, POE) ร่วมกับการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ (ชาญณรงค์, 2553; Anderson and Whitcomb, 2005)

การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสามารถวิเคราะห์ได้จากความผันแปรของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสมและค่าผลตอบแทนต่างๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 6 โดยกำหนดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสม A, B และ C เป็น 1, 0.25, 0.2 ตามลำดับ (Anderson and Whitcomb, 2005)

การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนร่วมกับการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจต้องการให้มีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด โดยการกำหนดให้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซีเมนต์ค่าน้อยที่สุดในโปรแกรม แสดงดังตารางที่ 7 ผลจากการกำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละส่วนผสมทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกอยู่ในช่วง 1.05-1.06 และความสามารถในการปล่อยซีเมนต์อยู่ในช่วง 3.85-4.74

จากการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนร่วมกับการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดประกอบด้วย ส่วนผสมของ

ตารางที่ 6. ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสมและค่าผลตอบแทนต่างๆ

	unit	std. dev.	low	high
A	%	1.00	90.00	99.9
B	%	0.25	0.05	5.0
C	%	0.20	0.05	5.0
GCS	lb/in ²	1.04	2.20	8.9
perm.	number	3.81	19.30	68.0

ตารางที่ 7. การกำหนดค่าฟังก์ชันความพึงพอใจของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน

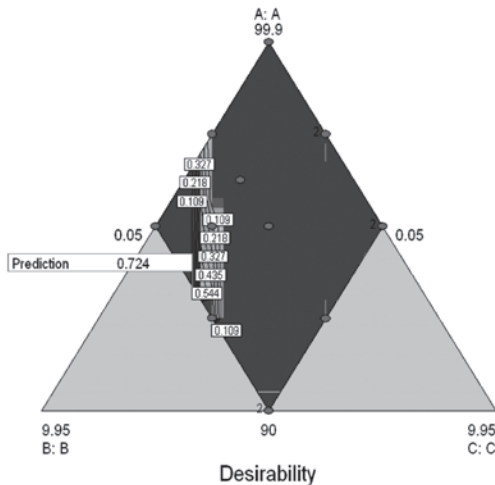
	goal	lower limit	upper limit
GCS	max	7.00	8.00
perm.	range	30.00	68.00
POE (GCS)	minimize	1.05	1.06
POE (perm.)	minimize	3.85	4.74

ตารางที่ 8. ผลของโปรแกรมในการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนร่วมกับฟังก์ชันความพึงพอใจ

solutions					
A	B	C	(POE) GCS	(POE) Perm.	desirability
93.3	5.0	1.7	1.058	4.28	0.724
94.2	4.5	1.3	1.058	4.32	0.646
96.0	3.7	1.3	1.058	4.5	0.525

A ร้อยละ 93.3 ส่วนผสมของ B ร้อยละ 5 และส่วนผสมของ C ร้อยละ 1.7 โดยให้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซีเมนต์ค่าน้อยที่สุดที่ทำนายได้เท่ากับ 1.058 และ 4.28 ตามลำดับ โดยให้ค่าความพึง

พอใจสูงสุดเท่ากับ 0.724 หรือ 72.4% ซึ่งแสดงดังตารางที่ 8 เมื่อนำมาสร้างกราฟเส้นโครงร่างของฟังก์ชันความพึงพอใจพบว่าบริเวณที่มีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่ทำนายได้เป็นบริเวณเดียวกันกับที่ได้ทำการประมวลผลโดยใช้โปรแกรม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6. เส้นโครงร่างของฟังก์ชันความพึงพอใจรวมกับการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้พื้นที่ทับซ้อนของผลตอบสนองและอัตราส่วนผสมที่ได้จากการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด (POE) มีอัตราส่วนผสมที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า บริเวณอัตราส่วนผสมที่ได้นี้เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดและมีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมมีสมบัติความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมาอากาศตรงตามการวิเคราะห์จริงหรือไม่ จำเป็นต้องทำการยืนยันผลการทดลอง (confirmation experiments) พร้อมคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ของผลตอบสนอง ผลจากการทดสอบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดประกอบด้วยส่วนผสม A ร้อยละ 93.3 ส่วนผสมของ B ร้อยละ 5 และส่วนผสม C ร้อยละ 1.7 โดยทำการทดสอบเป็นจำนวน 10 ซ้ำ ผลจากการทดสอบยืนยันผล

การทดลองแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9. ผลการยืนยันผลการทดลองและช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ของแต่ละผลตอบสนอง

ผลตอบสนอง	ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95%		ค่าเฉลี่ย
	ค่าต่ำ	ค่าสูง	
ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก	7.68	7.92	7.8
ความสามารถในการปล่อยซิมาอากาศ	29.76	31.44	30.6

เมื่อนำอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดและมีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมาแปลงเป็นค่าของส่วนผสมเทียม (pseudo components) จะได้ส่วนผสมของ A, B และ C เป็น 0.34, 0.5 และ 0.164 ตามลำดับ เมื่อแทนค่าในสมการถดถอยของส่วนประกอบเทียม ในตารางที่ 5 พบว่าค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกที่ทำนายได้มีค่าเท่ากับ 7.75 และค่าความสามารถในการปล่อยซิมาอากาศที่ทำนายได้มีค่าเท่ากับ 30.2 จะเห็นว่าค่าผลตอบสนองความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมาอากาศที่ทำนายได้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยผลการทดสอบจริงและมีค่าอยู่ในช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมแบบ D-optimal เพื่อนำมาใช้ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ส่วนผสมของแบบหล่อทราย วิธีพื้นผิวผลตอบสนองนำมาใช้ในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาสมบัติของแบบหล่อทรายคือ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมาอากาศ ให้มีสมบัติตรงตามความต้องการที่กำหนด นอกจากนี้ การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนโดยใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจ ใช้หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมีค่าน้อยที่สุดและมีความพึงพอใจสูงสุด ส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่ใช้ในการทดลองคือ ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 (A) เบนโทไนต์ (B) และน้ำ (C) โดยมีเงื่อนไขข้อจำกัดคือ $90 \leq A \leq 99.9$, $0.05 \leq B \leq 5$ และ $0.05 \leq C \leq 5$ ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการใช้เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนองมาวางซ้อนทับกันคือ ส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 ร้อยละ 93.2 ส่วนผสมของเบนโทไนต์ร้อยละ 5 และส่วนผสมของน้ำร้อยละ 1.8 ซึ่งทำให้ได้ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) ประมาณ 7.6 lb/in^2 และความสามารถในการปล่อยซิมอากาศประมาณ 31.3 ผลการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนร่วมกับการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจพบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่ทำให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดประกอบด้วย ส่วนผสม A ร้อยละ 93.3 ส่วนผสม B ร้อยละ 5 และส่วนผสม C ร้อยละ 1.7 โดยให้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมอากาศที่น้อยที่สุดที่ทำนายได้เท่ากับ 1.058 และ 4.28 ตามลำดับ โดยให้ค่าความพึงพอใจสูงสุดเท่ากับ 72.4% จากการทดลองยืนยันผลของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่ทำให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดพบว่า ค่าผลตอบสนองความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมอากาศที่ทำนายได้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยจากผลการทดสอบจริง และมีค่าอยู่ในช่วงระดับความเชื่อมั่นที่ 95% จากการทดลองยืนยันผลเป็นการยืนยันได้เป็นอย่างดีว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทรายที่ได้จากการทำนายสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กหล่อได้จริง

ข้อเสนอแนะ

1. การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทรายควรศึกษาต้นเหตุวัตถุดิบมาประกอบการตัดสินใจเพื่อที่จะเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมโดยมีต้นทุนต่ำที่สุด

2. งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์กับแบบหล่อทรายที่มีส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด โดยให้มีสมบัติตรงต่อความต้องการของลูกค้า

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย (ทุนสกว.-อุตสาหกรรม หรือ MAG-Window I) ประจำปี 2552

เอกสารอ้างอิง

- คมสัน จิระภัทรศิลป์. 2548. การวิเคราะห์และปรับปรุงความสามารถกระบวนการการทำแบบหล่อทรายขึ้นเพื่อพัฒนาคุณภาพงานหล่อโลหะ. งานวิจัยภาควิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.
- ชาญณรงค์ สายแก้ว และพินิตา ศรีประยา. 2552. การปรับปรุงคุณภาพชิ้นส่วนพลาสติกในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 19(3): 394-406.
- ชาญณรงค์ สายแก้ว. 2553. สถิติและการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.
- Pearce, J.T.H. บัญชา ชาญบุญสมบัติ, ธนาภรณ์ โกรษภูมย์, วิลลิสัน วุฒิธิรสกล, อภิชาติ เหล็กงาม และ อธิพงษ์ หาญวิโรจน์กุล 2544. ข้อบกพร่องในงานหล่อโลหะสาเหตุและวิธีการแก้ไข ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.

- สุนิมนต์ ตั้งสกุล. 2549. รายงานสภาวะอุตสาหกรรมเหล็กหล่อ. สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับ
สนุน กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวง
อุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.
- หริส สุตะบุตร และเคนยิ จิยิวิวา. 2543. **หล่อโลหะ**.
สำนักพิมพ์ดวงกมล. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ.
- Anderson, M.J. and Whitcomb, P.J. 2005. **RSM Simplified: Optimizing Process Using Response Surface Methods for Design of Experiments**, Productivity Press, New York.
- Duèe, C., Dèsanglois, F., Lebecq, I., Moreau, G., Leriche, A. and Follet-Houttemane, C. 2009. Mixture designs applied to glass bioactivity evaluation in the Si-Ca-Na system. **Journal of Non-Crystalline Solids** 355(16-17): 943-950.
- Guharaja, S., Noorul, A. and Karuppannan, K.M. 2006. Optimization of green sand casting process parameters by using Taguchi's method. **Journal of Advanced Manufacturing Technology** 30(11-12): 1040-1048.
- Hiroyasu M. Minoru H. and Yutaka H. 2003. Computer simulation and optimization of sand filling using the distinct element method. **WFO Technical Forum**.
- Karunakar, D.B. and Datta, G.L. 2007. Controlling green sand mould properties using artificial neural networks and genetic algorithms-A comparison. **Applied Clay Science** 37(1-2): 58-66.
- Kundu, R.R. and Lahiri, B.N. 2008. Study and statistical modelling of green sand mould properties using RSM. **Journal of Materials and Product Technology** 31(2/3/4): 143-158.
- Lucarz, M. 2006. The condition of silica sand grains surface subjected to reclamation treatment. **Metalurgija** 45(1): 37-40.
- Marcia, J., Eric, S. and Kenneth, A. 1997. Concrete mixture optimization using statistical mixture design methods. **International Symposium on High Performance Concrete**. New Orleans, Louisiana, October 20-22.
- Menezes, R.R., Malzac, Neto, H.G., Santana, L.N.L., Lira, H.L., Ferreira, H.S. and Neves, G.A. 2008. Optimization of wastes content in ceramic tiles using statistical design of mixture experiments. **Journal of the European Ceramics Society** 28(16): 3027-3039.
- Paluszkiewicz, C., Holtzer, M. and Bobrowski, A. 2008. FTIR analysis of bentonite in moulding sands. **Journal of Molecular Structure** 880 (1-3): 109-114.
- 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.
- Toussaint, P.M., Queval, P.R., Geraedts, J.J. and Caumont, J.A. 2000. Method of improving the properties of reclaimed sand used for the production of foundry moulds and cores. **United States Patent** 6015846.