

## การปรับปรุงคุณภาพเหล็กหล่อด้วยการหาส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทราย

### Quality Improvement of Cast Iron by Determining the Optimal Sand Mold Mixture Components

เสริมศักดิ์ เวียงวิเศษ (Sermsak Wiangwiset)\* ชาญณรงค์ สายแก้ว (Charnnarong Saikaew)\*\*

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายที่เหมาะสมที่สุดในการนำทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วและวัสดุประสานอื่นๆ มาเป็นส่วนผสม แล้วทำให้สมบัติของแบบหล่อทรายตรงตามความต้องการที่กำหนด โดยที่ทำให้สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อตรงต่อความต้องการของลูกค้า ส่วนผสมของแบบหล่อทรายมี 3 ส่วนผสม คือ ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 เบนโทไนต์ และน้ำ ผลตอบสนองที่ใช้ชี้วัดคุณภาพของแบบหล่อทรายคือความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก ความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศ และต้นทุนวัตถุดิบ การศึกษานี้ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมและวิธีพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อนำมาใช้ในการหาส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่เหมาะสมที่สุด อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของแบบหล่อทรายทำให้ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศตรงตามความต้องการที่กำหนดในราคาต้นทุนวัตถุดิบต่ำที่สุด นอกจากนี้ ผู้ประกอบการสามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจเกี่ยวกับความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เป็นเหล็กหล่อ

#### ABSTRACT

This research aims to determine the optimal mixture components of recycled sand and other adhesive materials in order to meet the desired properties of sand mold leading to customers' satisfaction on the mechanical properties of the iron casting products. The components of a mixture for making a sand mold consist of the first time recycled sand, bentonite, and water. The responses for quality characteristics of sand mold include green compressive strength and permeability. This study uses mixture experiments and response surface methodology to determine the optimal sand mold mixture components. The optimal sand mold mixture components meet the desired properties of green compressive strength and permeability of sand mold at the lowest cost. Furthermore, the manufacturer can use this study to make decisions regarding customers' satisfaction on the quality iron casting products.

**คำสำคัญ:** อุตสาหกรรมเหล็กหล่อ แบบหล่อทราย การออกแบบการทดลองส่วนผสม ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก ความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศ

**Key Words:** Iron casting industry, Sand mold, Mixture Experiments, Green compressive strength, Permeability

\* มหบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*\* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## บทนำ

อุตสาหกรรมเหล็กหล่อจัดเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สนับสนุนหรือเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการผลิตอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกล เป็นต้น และเป็นอุตสาหกรรมการผลิตที่ถือได้ว่ามีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากข้อมูลการส่งออกในปี พ.ศ.2538 ถึงปี พ.ศ. 2541 มีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับคือ 1,137 ล้านบาท 1,232 ล้านบาท 1,598 ล้านบาท และ 1,682 ล้านบาท (สมาคมอุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย, 2549) ซึ่งถือได้ว่าอุตสาหกรรมเหล็กหล่อเป็นอุตสาหกรรมที่มีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ

ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กหล่อ คุณภาพของชิ้นงานถือว่ามีค่าสำคัญมาก เนื่องจากการผลิตโดยส่วนใหญ่เป็นการผลิตตามความต้องการของลูกค้าเป็นหลัก ดังนั้น การสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าจึงเป็นสิ่งสำคัญ การผลิตชิ้นงานให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพและตรงตามความต้องการของลูกค้า ต้องมีการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพโดยจะต้องให้ความสำคัญกับตัวแปรในทุกขั้นตอนของการผลิต

กระบวนการผลิตงานหล่อโดยทั่วไปจะใช้แบบหล่อเป็นแบบสำหรับหล่อโลหะให้ได้ผลิตภัณฑ์หล่อตามต้องการ กรรมวิธีการผลิตงานหล่อโดยใช้แบบหล่อทรายเป็นที่นิยมกันมากที่สุด ในปัจจุบันมีโรงงานผลิตเหล็กหล่อจากแบบหล่อทรายเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการหล่อโดยใช้แบบหล่อทรายมีข้อดีคือต้นทุนในการผลิตต่ำ และสามารถนำทรายหล่อกลับมาใช้ซ้ำได้หลายรอบ อย่างไรก็ตาม การนำทรายหล่อกลับมาใช้ซ้ำจะต้องมีการเติมตัวประสานเพิ่มเข้าไปเนื่องจากแรงประสานของดินเหนียวในแบบหล่อทรายจะมีค่าลดลง ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงและการปล่อยซิมของแบบหล่อทรายมีค่าลดลงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดจุดเสียในชิ้นงาน เช่น เกิดทรายแทรกเข้าไปในเนื้อโลหะ และเกิดรูพรุนที่ผิวของ

ชิ้นงาน เป็นต้น (หริส, 2543) ดังนั้น การที่จะทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่เป็นเหล็กหล่อจะต้องมีการปรับปรุงสมบัติต่างๆ และเตรียมส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทรายใหม่ก่อน

โรงงานกรณีศึกษาเป็นหนึ่งในโรงงานที่ผลิตเหล็กหล่อจากแบบหล่อทรายและมีการนำทรายกลับมาใช้ซ้ำซึ่งมีปัญหาที่สำคัญคือไม่สามารถกำหนดปริมาณของส่วนผสมที่เหมาะสมของทรายที่นำกลับมาใช้ซ้ำและตัวประสานอื่นๆ ได้ จึงทำให้แบบหล่อทรายที่ได้มีสมบัติเชิงกลลดลง ส่งผลให้คุณภาพของชิ้นงานไม่เป็นไปตามความต้องการ

จากการศึกษางานวิจัยพบว่าวิธีการที่ใช้ในการหาสัดส่วนที่เหมาะสมของส่วนผสมแบบหล่อทรายมีหลากหลายวิธี อาทิเช่น Makino et al. (2003) ใช้การจำลองสถานการณ์โดยใช้คอมพิวเตอร์และพัฒนา รูปแบบทางคณิตศาสตร์ในการหาค่าความเหมาะสมของทรายที่เติมเข้าไปในแบบหล่อ ในขณะที่ Karunakar and Datta (2007) ศึกษาหาส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทรายโดยใช้วิธี artificial neural network และวิธี genetic algorithm วิธีการหาค่าความเหมาะสมที่กล่าวมานี้เป็นวิธีการที่ยุ่งยากซับซ้อนและต้องอาศัยข้อมูลที่ถูกต้องเพื่อใช้ในการประมวลผล การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเป็นวิธีการที่เข้าใจง่ายและไม่สลับซับซ้อนและสามารถนำมาใช้ปฏิบัติได้จริง Guharaja et al. (2006) ได้ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธี Taguchi's method ในการหาค่าความเหมาะสมของตัวแปรของแบบหล่อทรายเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จากการหล่อเหล็กหล่อเกรดไฟต์ก่อนกลมที่เหมาะสมที่สุด ตัวแปรที่นำมาใช้ในการทดลองคือความแข็งแรงขณะเป็ยกขึ้น ปริมาณความชื้น การปล่อยซิมอากาศ และความแข็งแรงของแบบหล่อ Kundu and Lahiri (2008) ได้ศึกษาหาค่าความเหมาะสมของแบบหล่อทรายโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ central composite rotatable design (CCRD) สมบัติที่ถูกนำมาประเมินหาค่าความเหมาะสมได้แก่ ความหนาแน่นรวม ความสามารถในการกดอัด การปล่อยซิม

อากาศและแรงอัด จากการศึกษาดังกล่าว จะเห็นว่าวิธีการออกแบบการทดลองสามารถนำมาควบคุมและหาค่าความเหมาะสมของสมบัติแบบหล่อทรายได้อย่างไรก็ตาม เทคนิคการออกแบบการทดลองดังกล่าวเป็นเพียงการศึกษาหาค่าความเหมาะสมของแบบหล่อทรายของแต่ละปัจจัยที่กำหนดในแต่ละกระบวนการ

ปัจจุบันมีการนำวิธีการออกแบบการทดลองส่วนผสมมาใช้ประโยชน์ในการหาอัตราส่วนผสมของวัสดุวิศวกรรมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตรงตามความต้องการ Duée et al. (2009) ศึกษาการหาส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแก้วทางชีวภาพ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมแบบ D-optimal สมบัติที่ใช้ในการทดสอบแก้วที่นำมาใช้ในการพิจารณา คือ การทำปฏิกิริยาทางชีวภาพ (bioactivity) และความหนาแน่นของไฮดรอกซีเอปาทิต (Hydroxyapatite) ในขณะที่ Marcia et al. (1997) ทำการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมโดยใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมแบบมีเงื่อนไข เพื่อวิเคราะห์หาสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีต โดยสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ทดสอบได้แก่ การยุบตัวของคอนกรีต ความแข็งแรงกดอัด การแทรกซึมของสารคลอไรด์ และต้นทุนที่ต่ำที่สุด ชาญณรงค์และพินิตา (2552) ประยุกต์การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม วิธีพื้นผิวผลตอบสนองรวมถึงการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน โดยหาอัตราส่วนผสมของชิ้นส่วนพลาสติกระหว่างส่วนผสมพลาสติกโพลีคาร์บอเนตรีไซเคิลและพลาสติกโพลีคาร์บอเนตใหม่ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และอุณหภูมิการบิดงอที่ดีที่สุด

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุทางวิศวกรรมได้ อย่างไรก็ตามจากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมา ยังไม่พบว่ามีการนำวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมมาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราส่วนผสมแบบหล่อทราย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ

ส่วนผสมและวิธีพื้นผิวผลตอบสนองมาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทราย ซึ่งเป็นการนำทรายหล่อที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ โดยที่สมบัติเชิงกลคือ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก และความสามารถในการปล่อยซิมอากาศมีค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยที่ทำให้สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อตรงต่อความต้องการของลูกค้า

## อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### วัตถุดิบ

ส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่ใช้ในงานวิจัยคือ ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 เบนโทไนต์และน้ำ ซึ่งได้มาจากโรงงานกรณีศึกษา ทรายที่นำมาใช้เป็นทรายจากจังหวัดระยองหรือเรียกว่าทรายระยอง ตัวประสานที่ใช้คือโซเดียมเบนโทไนต์ (Na-bentonite) เป็นตัวประสานที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการสร้างแบบหล่อ ซึ่งเมื่อผสมเข้ากับน้ำจะทำให้เกิดแรงดึงดูดสามารถที่จะยึดเกาะแบบหล่อและทำให้แบบหล่อมีความแข็งแรง

### ขั้นตอนการเตรียมส่วนผสมของแบบหล่อทราย

นำทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 ที่ผ่านกระบวนการทำให้ทรายเย็น (sand cooling) ที่มีการควบคุมความชื้นของทรายที่ 3% ใสลงในภาชนะสำหรับเตรียมผสม ต่อจากนั้นนำส่วนผสมของเบนโทไนต์และน้ำเดิมเข้าไปในปริมาณสัดส่วนตามแผนการทดลองส่วนผสม แล้วคลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันเป็นเวลานาน 5 นาที จากนั้นนำทรายที่ผสมแล้วนำมาเตรียมเป็นตัวอย่างชิ้นงานทดสอบและทำการทดสอบสมบัติเชิงกลและความสามารถในการปล่อยซิมอากาศทันที การทดสอบสมบัติเชิงกลคือความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะและรูปร่างเหมือนกัน โดยมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตามมาตรฐานของสมาคม A.F.S. (American Foundry' men Society) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว และสูง 2 นิ้ว

### การทดสอบความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบนี้คือ เครื่อง Universal sand strength ซึ่งเป็นการทดสอบการรับแรงอัดของชิ้นงานตัวอย่าง โดยการเพิ่มแรงกระทำไปยังชิ้นตัวอย่างด้วยอัตราความเร็วสม่ำเสมอ (อัตราความเร็วของแรงกดอัดประมาณ  $7.5 \text{ lb/in}^2$  ในระยะเวลา 15 วินาที) จนกระทั่งชิ้นงานตัวอย่างเกิดการแตก แล้วทำการบันทึกค่าความแข็งแรงอัดในหน่วยปอนด์ต่อตารางนิ้ว ( $\text{lb/in}^2$ )

### การทดสอบความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ

การทดสอบความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคือเครื่อง Electric permeability meter การทดสอบนี้เป็นดัชนีชี้วัดแสดงให้เห็นถึงปริมาณอากาศภายใต้ความดันอากาศคงที่สามารถไหลผ่านชิ้นงานตัวอย่างมาตรฐาน ซึ่งค่าตัวเลขของการปล่อยซิมอากาศสามารถอ่านค่าจากหน้าปัดเครื่องมือทดสอบได้เลย โดยมีหน่วยวัดเป็นตัวเลขของการปล่อยซิม

### การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม

ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบมีข้อจำกัด (constrained mixture designs) ส่วนผสมของแบบหล่อทรายมี 3 ส่วนผสมประกอบไปด้วย ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 แทนด้วยสัญลักษณ์ A เบนโทไนต์ แทนด้วยสัญลักษณ์ B และน้ำ แทนด้วยสัญลักษณ์ C โดยมีการกำหนดข้อจำกัดของแต่ละส่วนผสมที่ทำการศึกษาในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักอยู่ในช่วงของการผลิตจริงของโรงงานกรณีศึกษา ตามงานวิจัยของ Toussaint et al. (2000) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 ตารางที่ 2 แสดงตารางการทดลองพร้อมข้อมูลที่ได้ออกจากการทดลอง โดยแต่ละตัวอย่างการทดสอบจะทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 1 ส่วนผสมและข้อจำกัดของส่วนผสมที่นำไปใช้ในออกแบบการทดลอง

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

run	A	B	C	GCS	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 คือความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก มีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
Perm. คือความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ มีหน่วยเป็นตัวเลขของการปล่อยซิม

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ผลการทดลองในตารางที่ 2 สามารถนำมาวิเคราะห์ได้เลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมอากาศโดยใช้โปรแกรม Design-Expert version 7.0 (Statease, 2005) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 จากการวิเคราะห์ พบว่ารูปแบบเชิงลำดับเส้นของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ มีรูปแบบเชิงเส้นตรง และรูปแบบเชิงเส้นโค้ง ตามลำดับ โดยพิจารณาจากค่า *p*-value ของแต่ละรูปแบบซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 และค่า *p*-value ของการทดสอบ lack of fit มีค่ามากกว่า 0.05 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า รูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลและสามารถยอมรับรูปแบบการถดถอยนั้นได้นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด ( $R^2$ ) และค่า predicted  $R^2$  ของแต่ละรูปแบบมีค่าค่อนข้างสูงใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบทางสถิติของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก

model	$R^2$	$R^2$ pred.	<i>p</i> -value lack of fit	<i>p</i> -value model
Linear	0.8	0.6	0.44	0.0002

ตารางที่ 4 ผลทางสถิติแบบจำลองของความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ

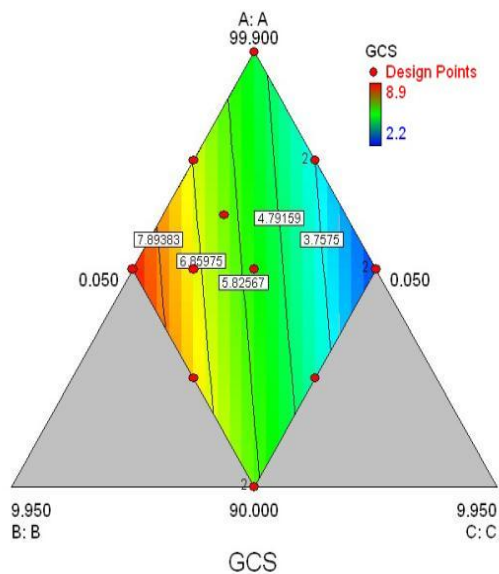
model	$R^2$	$R^2$ pred.	<i>p</i> -value lack of fit	<i>p</i> -value model
Quadratic	0.95	0.85	0.85	0.0022

รูปแบบสมการถดถอยเป็นรูปแบบสมการโพลิโนเมียลอันดับสอง (second-order polynomial) ซึ่งนำเสนอโดย Scheffe (Scheffé, 1958) รูปแบบสมการนี้ไม่มีจุดตัดหรือค่าคงที่และส่วนกำลังสอง เนื่องจากผลรวมของส่วนผสมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 100% รูปแบบจำลองการถดถอยของผลตอบสนองในตัวแปรส่วนประกอบเทียม (pseudo components) คือความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) และความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ (Perm.) แสดงดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

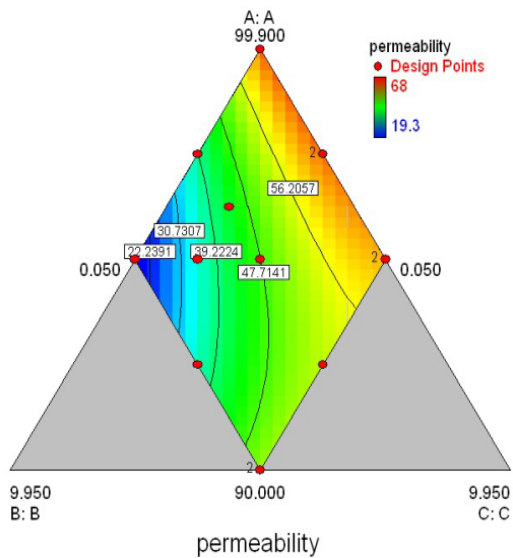
$$GCS = 5.07A + 12.13B - 0.19C \quad (1)$$

$$Perm. = 64.70A - 11.95B + 42.25C - 34.92AB + 25.48AC + 143.48BC \quad (2)$$

จากสมการถดถอยที่ (1) และ (2) ถูกนำมาทำการสร้างกราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (contour plot) ของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อส่วนผสมเบนโทไนด์ (B) อยู่ในระดับที่สูงและส่วนผสมน้ำ (C) อยู่ในระดับที่ต่ำ จะทำให้ได้ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ เมื่อส่วนผสมเบนโทไนด์ (B) อยู่ในระดับที่ต่ำและส่วนผสมน้ำ (C) อยู่ในระดับที่สูงจะทำให้ค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศมีค่าที่สูงขึ้น



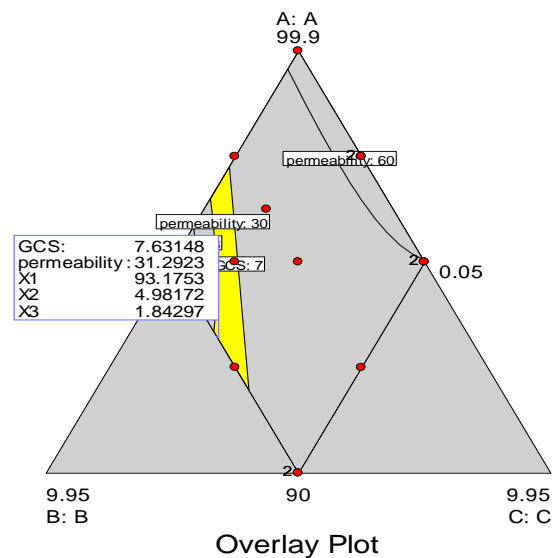
รูปที่ 1 เส้นโครงร่างของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก



รูปที่ 2 เส้นโครงร่างของค่าความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศ

การหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยให้ผลตอบสนองของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศมีค่าผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดร่วมกัน โดยการใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน (overlay plot) โดยกำหนดเงื่อนไข

ของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกอยู่ในช่วงประมาณ 7-8 lb/in<sup>2</sup> (คมตัน, 2548) และค่าความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศอยู่ในช่วงระหว่าง 30-68 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของแบบหล่อทรายที่ใช้สำหรับงานหล่อของโรงงานกรณีศึกษา จากการวิเคราะห์พบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ระดับของส่วนผสม A คือ  $X_1$  ร้อยละ 93.2 ส่วนผสม B คือ  $X_2$  ร้อยละ 5 และส่วนผสม C คือ  $X_3$  ร้อยละ 1.8 ซึ่งทำให้ได้ค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (GCS) ประมาณ 7.6 lb/in<sup>2</sup> ค่าและความสามารถในการปล่อยซึ่มอากาศประมาณ 31.3 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงร่างพื้นผิวผลตอบสนองทั้ง 2 ผลตอบสนองมาวางซ้อนทับกัน

อย่างไรก็ตาม ในการดำเนินกระบวนการผลิตหรือกระบวนการทดลองใดๆ อาจเกิดค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเนื่องจากการทดลองซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลนี้ควรที่จะมีค่าน้อยที่สุด การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของข้อมูล (propagation of error: POE) สามารถหาค่าส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลตอบสนองมีค่าน้อยที่สุด (Anderson and Whitcomb, 2005; ชาญณรงค์, 2553) การวิเคราะห์การแพร่กระจาย

ความคลาดเคลื่อนสามารถวิเคราะห์ได้จากความผันแปรของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสมและค่าผลตอบแทนต่างๆ โดยกำหนดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสม  $A$ ,  $B$  และ  $C$  เป็น 1, 0.25, 0.20 ตามลำดับ (Anderson and Whitcomb, 2005) แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละส่วนผสม

component	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

การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนให้มียุทธศาสตร์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด โดยการกำหนดให้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก และความสามารถในการปล่อยซิมอากาศมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งแสดงดังตารางที่ 6 ผลจากการกำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละส่วนผสมทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกอยู่ในช่วง 1.05-1.06 และความสามารถในการปล่อยซิมอากาศอยู่ในช่วง 3.85-4.74

ตารางที่ 6 การกำหนดค่าเป้าหมายของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนทั้ง 2 ผลตอบสนอง

	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

จากการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (Myers and Montgomery, 2002; Anderson and Whitcomb, 2005; StatEase, Inc., 2005) ผลของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 4 การวิเคราะห์ พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดประกอบด้วย ส่วนผสมของ  $A$  ร้อยละ 93.3 ส่วนผสมของ  $B$  ร้อยละ 5 และส่วนผสมของ  $C$  ร้อยละ 1.7 ซึ่งทำให้ได้ค่าของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมอากาศที่ทำนายได้เท่ากับ 7.7 และ 30 ตามลำดับ

Number	A	B	C	GCS	POE(GCS)	permeability	POE(permeability)	Desirability	Selected
1	93.325	5.000	1.675	7.73397	1.05886	30	4.2798	0.724	Selected
2	93.137	5.000	1.863	7.6341	1.05885	31.3407	4.25128	0.690	
3	96.432	3.511	0.057	7.53237	1.05885	30	4.53713	0.502	
4	96.600	3.350	0.050	7.42128	1.05884	31.387	4.53906	0.451	

Solutions found

รูปที่ 4 ผลของโปรแกรมในการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน

อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนาย สมบัติของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศตรงตามการทดลองจริงหรือไม่ จำเป็นต้องทำการยืนยันผลการทดลอง พร้อมคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นที่ระดับ 95 เปอร์เซ็นต์ของผลตอบสนอง จากการทดลองอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ประกอบไปด้วยส่วนผสมทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 เบนโทไนต์ และน้ำร้อยละ 93.3, 5.0 และ 1.7 ตามลำดับ โดยทำการทดลองซ้ำเป็นจำนวน 10 ซ้ำ ผลจากการทดลองยืนยันผลและผลการคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการยืนยันผลการทดลองและหาช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 % ของแต่ละผลตอบสนอง

ผลตอบสนอง	ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95%		ค่าเฉลี่ย
	ค่าต่ำ	ค่าสูง	
ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก (Ib/n <sup>2</sup> )	7.68	7.92	7.80
ความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ	29.76	31.44	30.6

เมื่อนำอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดและมีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมาแปลงเป็นค่าของส่วนผสมเทียม (pseudo components) จะได้ส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 เบนโทไนต์ และน้ำ เท่ากับ 0.34, 0.50 และ 0.16 ตามลำดับ เมื่อแทนค่าในสมการถดถอยของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศของส่วนประกอบเทียมในสมการที่ (1) และ (2) พบว่าค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกที่ทำนายได้มีค่าเท่ากับ 7.75 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และค่าความสามารถใน

การปล่อยซิมอากาศมีค่าเท่ากับ 30.2 ซึ่งเมื่อนำมาเทียบในตารางที่ 7 พบว่าค่าที่ทำนายได้ของค่าความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกอยู่ในช่วงความเชื่อมั่น และค่าความสามารถในการปล่อยซิมอากาศที่ทำนายมีค่าอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์

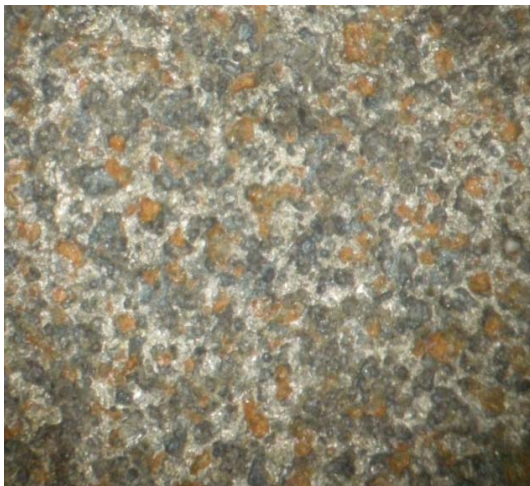
#### การวิเคราะห์ลักษณะสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานหล่อ

ในส่วนของการตรวจสอบสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานหล่อที่ได้จากการหล่อในแบบหล่อทรายที่มีอัตราส่วนผสมของแบบหล่อทราย 2 ประเภทอัตราส่วนผสมคือ อัตราส่วนผสมแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษา และอัตราส่วนผสมของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนอง การตรวจสอบลักษณะสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานหล่อสามารถกระทำภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายต่ำแบบ กล้องจุลทรรศน์ สเตอริโอซูม (zoom stereomicroscope) รุ่น SZX 9 กำลังขยายที่เลนส์วัตถุ 10 เท่า จากการพิจารณาถึงสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานที่ได้จากอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานมีลักษณะผิวที่ไม่ราบเรียบและผิวของชิ้นงานมีลักษณะรอยนูนหรือเรียกว่าการเกิดสะเก็ดแผล (scabbing) ซึ่งมีสาเหตุมาจากแบบหล่อทรายมีความแข็งแรงต่ำเมื่อถูกความร้อนของน้ำเหล็กที่เต็มลงไปแบบหล่อเป็นผลทำให้ผิวทรายเกิดการขยายตัวทำให้น้ำเหล็กไหลซึมไปตามรอยนั้นๆ (บัญชา และคณะ, 2544) จากการตรวจสอบสภาพผิวภายนอกเป็นการยืนยันให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษามีค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด เมื่อพิจารณาถึงสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานที่ได้จากอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนอง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6 พบว่าสภาพผิวภายนอกของชิ้นงาน มีลักษณะผิวที่ราบเรียบกว่าชิ้นงานที่ได้จากอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายแบบเดิมของโรงงาน





รูปที่ 5 ลักษณะผิวภายนอกชิ้นงานหล่อของอัตราส่วนผสมของแบบหล่อทรายแบบเดิมของโรงงานการศึกษา



รูปที่ 6 ลักษณะผิวภายนอกชิ้นงานหล่อของอัตราส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

### การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของชิ้นงานหล่อ

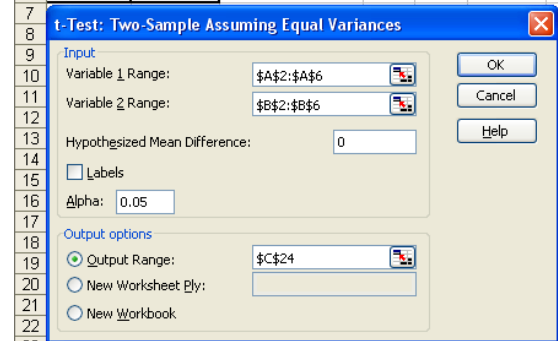
ตารางที่ 8 แสดงความแข็งแรงของชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทราย 2 ประเภทของส่วนผสม (ประเภทที่ 1: อัตราส่วนผสมของแบบหล่อทรายแบบเดิมของ

โรงงานการศึกษา และประเภทที่ 2: อัตราส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด)

ตารางที่ 8 ความแข็งแรงของชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทราย 2 ประเภทของส่วนผสม

ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2
16.57	18.53
17.00	18.70
17.57	17.57
17.80	18.90
16.63	18.30

	A	B	C	D	E	F
1	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2				
2	16.57	18.53				
3	17	18.7				
4	17.57	17.57				
5	17.8	18.9				
6	16.63	18.3				



t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	Variable 1	Variable 2
Mean	17.11	18.4
Variance	0.305	0.264
Observations	5	5
Pooled Variance	0.285	
Hypothesized Mean	0	
df	8	
t Stat	-3.81	
P(T<=t) one-tail	0.003	
t Critical one-tail	1.86	
P(T<=t) two-tail	0.005	
t Critical two-tail	2.306	

รูปที่ 7 การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงของชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทราย 2 ประเภทของส่วนผสมโดยใช้ Microsoft® Excel

การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งใน 2 ประเภทของส่วนผสมสามารถกระทำได้โดยการทดสอบสมมติฐานแบบ  $t$ -test โดยมีสมมติฐานในการทดสอบคือ

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \text{ or } \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \text{ or } \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

โดยที่  $\mu_1$  แทนค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทรายแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษา และ  $\mu_2$  แทนค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทรายที่มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด การวิเคราะห์สามารถแสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความแข็งของชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทราย 2 ประเภทของส่วนผสมโดยใช้ Microsoft<sup>®</sup> Excel ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า ความแข็งของชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทรายทั้ง 2 ประเภทมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 นั่นคือความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทรายที่มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมีค่าสูงกว่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทรายแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษา

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมและการวิเคราะห์ผลทางสถิติมาประยุกต์ใช้ในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทราย แล้วทำให้สมบัติของแบบหล่อทรายตรงตามความต้องการที่กำหนด โดยที่ทำให้สมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อตรงต่อความต้องการของลูกค้า ส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่ทำการทดลองคือ ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 เบนโทไนต์ และน้ำ โดยมีเงื่อนไขข้อจำกัดอยู่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักคือ  $90 \leq A \leq 99.9$ ,  $0.05 \leq B \leq 5$  และ  $0.05 \leq C \leq 5$  โดยที่  $A$ ,  $B$  และ  $C$  คือ ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่

1 เบนโทไนต์ และน้ำ ตามลำดับ ผลตอบสนองที่ถูกนำมาประเมินหาส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทรายได้แก่ ความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก และความสามารถในการปล่อยซิมอากาศ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ลักษณะสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานหล่อและการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความแข็งของชิ้นงานหล่อยังถูกนำมาพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทรายที่มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดและชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทรายแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษา

ผลการวิเคราะห์พบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดประกอบด้วย ส่วนผสมของทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 ร้อยละ 93.3 เบนโทไนต์ร้อยละ 5 และน้ำร้อยละ 1.7 ซึ่งทำให้ได้ค่าของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซิมอากาศที่ทำนายได้เท่ากับ 7.7 และ 30 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงสภาพผิวภายนอกของชิ้นงานที่ได้จากอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดของ 2 ผลตอบสนอง พบว่าสภาพผิวภายนอกของชิ้นงาน มีลักษณะผิวที่ราบเรียบกว่าชิ้นงานที่ได้จากอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายแบบเดิมของโรงงาน นอกจากนี้ ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทรายที่มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมีค่าสูงกว่าความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานเหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทรายแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษา ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจของผู้ประกอบการได้

### ข้อเสนอแนะ

สำหรับแนวทางในการทำงานวิจัยต่อไปคือหล่อชิ้นงานในแบบหล่อทรายที่มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำมาพิจารณาต้นทุนการผลิตระหว่างการผลิต

เหล็กหล่อที่หล่อจากแบบหล่อทรายที่มีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดและจากแบบหล่อทรายแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษา

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยทุนวิจัยมหัศจรรย์ สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย (ทุน สกว.-อุตสาหกรรม หรือ MAG-Window I) ประจำปี 2552

### เอกสารอ้างอิง

- คมสัน จิระภัทรศิลป์. 2548. การวิเคราะห์และปรับปรุงความสามารถกระบวนการทำแบบหล่อทรายขึ้นเพื่อพัฒนาคุณภาพงานหล่อโลหะ. งานวิจัยภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชาญณรงค์ สายแก้ว. 2553. สถิติและการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม. ขอนแก่น: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ชาญณรงค์ สายแก้ว และพนิดา ศรีประยา. 2552. การปรับปรุงคุณภาพชิ้นส่วนพลาสติกในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 19(3): 394-406.
- บัญชา ธนบุญสมบัติ, ธนาภรณ์ โกรธาภรณ์, วิลาสินี วุฒิธรสกล, อภิชาติ เหล็กงาม, ชีรพงษ์ หาญวิโรจน์กุล. 2544. ข้อบกพร่องในงานหล่อโลหะสาเหตุและวิธีการแก้ไข. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- สมาคมอุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย. 2549. รายงานการศึกษารวบรวมข้อมูลจากโรงงานเหล็กทั่วทุกภาคของประเทศไทย. กรุงเทพฯ.

หริส สุตะบุตร และเคนยิ จิยิอิวา. 2543. หล่อโลหะ. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ดวงกมล.

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

Duè, 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: 943-950.

Guharaja, S., Noorul Haq, A., and Karuppannan, K.M. 2006. Optimization of green sand casting process parameters by using Taguchi's method. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 30: 1040-1048.

Karunakar, D. and Datta, G.L. 2007. Controlling green sand mould properties using artificial neural networks and genetic algorithms-A comparison. Applied Clay Science. 37: 58-66.

Kundu, R.R., and Lahiri, B.N. 2008. Study and statistical modelling of Green Sand Mould properties using RSM. International Journal of Materials and Product Technology. 31(2/3/4): 143-158.

Makino, H., Hirata M., and Hadano Y. 2003. Computer simulation and optimization of sand filling using the distinct element method. WFO Technical Forum 2003.

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.

Myers, R.H. and Montgomery, D.C. 2002. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. 2<sup>nd</sup> 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, P.M., Boscherville, S.M., and Queval, P.R. 2000. Method of improving the properties of reclaimed sand used for the production of foundry moulds and cores. United States Patent.