

## **Effect of Sand Properties and Pouring Temperature on Casting Defect**

**Thanaporn KORAT<sup>1</sup>, Paritud BHANDHUBANYONG<sup>2</sup>, and John T. H. PEARCE<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Graduated Student, Department of Metallurgical Engineering, Chulalongkorn University

<sup>2</sup>Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

<sup>3</sup>National Metal and Materials Technology Center

### **Abstract**

Blow hole. Pin hole and shrinkage cavities are most common defect found in cast steel factories in Thailand. Various factors contributed to these defects in CrMo+OL low alloy steel were investigated. Sand properties and pouring temperatures were considered to be two major factors. Sand properties and pouring temperature data recorded during actual casting operation in a factory were analyzed with respect to the defects found in cast products. Experimental design was applied to determine the number of experiments to simulate actual casting condition. Appropriate levels of sand mixing were chosen to vary permeability compressive strength and % loss on ignition. The levels of sand mixing were controlled by clay content as 4.5 and 6.5% moisture as 2.5 and 4% starch content as 0.5 and 1%. AFS grain finess number of sand as 46 and 49 and pouring temperature of 1550 °C and 1620 °C. The cavities occurrence was measured by stereological measurement. The result of measurement led to comparisons of each factor on the cavities occurrence using statistical analysis. The best condition that minimizes gas cavity is grain finess number of 46, clay content of 4.5%, starch of 0.5%, moisture of 2.5% and pouring temperature of 1620 °C. This same sand formula can also be used in accompanied with pouring temperature of 1550 °C. In order to save cost. However the low pouring temperature is not recommended for pouring to a lot of molds by single ladle because of the effect of temperature drop and the greater chance of blowhole.

## **ผลกระทบของคุณสมบัติทราย และอุณหภูมิเท ต่อการเกิดรอยตำหนิ ในงานหล่อ**

**ธนาภรณ์ โกรษภูรี<sup>1</sup>, ปรีทรศน์ พันธบุรุษย์<sup>2</sup>, และจอห์น ที เอช เพียร์ซ<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## *Sand Properties and Pouring Temperature on Casting Defect.*

### บทคัดย่อ

รอยตำหนิประเภทรูเข็ม (Pinhole) เป็นหนึ่งในรอยตำหนิที่เกิดจากก๊าซ ซึ่งถูกพบปริมาณสูงที่สุดในบรรดารอยตำหนิทั้งหลายซึ่งมีสาเหตุมาจากขั้นตอนการผลิตหลายจุดด้วยกัน จากกรณีศึกษาในโรงงานแห่งหนึ่งซึ่งผลิตชิ้นส่วนเหล็กกล้าหล่อ CrMo40L ช่วยให้กำหนดการทดลอง เพื่อหาสาเหตุหลักของรอยตำหนินี้จากการแปรค่าปัจจัยในการผลิต ได้แก่ ขนาดเม็ดทราย (มาตรฐาน AFS) เบอร์ 46 และ 49 ปริมาณดินเหนียว (Clay) 4.5 และ 6.5% แป้งมัน 0.5 และ 1% ความชื้นทราย 2.5 และ 4% และอุณหภูมิเท 1550 และ 1620 °C ทดสอบคุณสมบัติทรายพร้อมกับประเมินผลการทดลอง เพื่อหาปริมาณรอยตำหนิที่เกิดอ้างอิงกับทฤษฎีร่วมกับกระบวนการวิเคราะห์เชิงสถิติ ผลการวิเคราะห์สรุปว่า สภาวะที่เกิดรอยตำหนิน้อยที่สุดคือ ขนาดเม็ดทราย เบอร์ 46 ปริมาณดินเหนียว 4.5% ปริมาณแป้งมัน 0.5% ปริมาณความชื้น 2.5% และอุณหภูมิเท 1620 °C อย่างไรก็ตามสภาวะดังกล่าวหากเป็นการผลิตที่จำนวนชิ้นงานต่อแบบหล่อน้อย สามารถใช้อุณหภูมิเท 1550 °C เพื่อการประหยัดพลังงานได้

### คำนำ

#### ก๊าซในโลหะ

ในขั้นตอนการผลิตงานหล่อโลหะมีหลายจุดบกพร่องที่ทำให้เกิดก๊าซและนำไปสู่ปัญหาและโพรงก๊าซได้ (มนัส สติรจินดา, 2538; และ หริส สุตบุตร, 2517) เริ่มจากการใช้เศษเหล็ก (Scrap) ที่มีความสกปรกในการหลอมสนิม และฝุ่นจะเปลี่ยนเป็นก๊าซเมื่อโลหะถูกหลอมเหลว (Homung, 1990) จุดที่สองคือในระหว่างขั้นตอนการหลอม (Sweeting, et al. 1992) ต้องมีการเติมโลหะบางตัวเพื่อลดก๊าซ (Deoxidizer) ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้อลูมิเนียม (Aluminum) ปริมาณอลูมิเนียมที่เพียงพอจะช่วยลดก๊าซได้ อีกจุดหนึ่งคือการควบคุมการเท (Sweeting, et al. 1992) การเทโลหะหลอมเหลวจากเตา (Furnace) ลงสู่เบ้า (Ladle) และจากเบ้าลงสู่แบบ (Mold) การมีระยะเทที่สูงและเวลาที่นานเหล่านี้ทำให้ก๊าซในอากาศมีโอกาสแทรกซึมเข้าสู่โลหะหลอมเหลวได้มากขึ้น ปัจจัยสุดท้ายคือส่วนผสมในแบบทราย ซึ่งถูกทำให้กลายเป็นก๊าซเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงระหว่างการเทโลหะหลอมเหลวลงแบบ สิ่งเหล่านี้คือปัจจัยในขั้นตอนงานหล่อที่มีส่วนนำไปสู่การเกิดรูเข็ม (Pinhole) การออกแบบระบบการระบายก๊าซที่ดีสามารถช่วยลดยุทธศาสตร์ได้

#### ทรายแบบ

ทรายแบบในงานหล่อเหล็กกล้าจำเป็นต้องประกอบด้วยทรายหน้าแบบและทรายหลังแบบ ทรายหน้า

แบบจะมีการควบคุมคุณภาพอย่างดีเนื่องจากต้องสัมผัสกับโลหะหลอมเหลวโดยตรง มีความทนทานต่อความร้อนสูง การขยายตัวต่ำ และความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมกับชนิดของโลหะที่ถูกเท คุณสมบัติที่ดีของทรายแบบ ได้แก่ ความโปร่งอากาศ (Permeability) เพื่อการระบายก๊าซได้ดี ความแข็งแรงต่อการรับน้ำหนักของงานหล่อ (Compressive strength) เพื่อแบบไม่พังง่าย และปริมาณก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายของส่วนผสมในทรายแบบ (Loss on ignition) ควรจะมีปริมาณต่ำ

#### ตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติของทรายแบบ

- ความชื้น ความชื้นในทรายแบบมาจากน้ำที่ผสมเพื่อทำให้ดินเหนียวสร้างแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดทรายได้ (Davis, 1950) มีประโยชน์ที่เพิ่มความแกร่งต่อแรงอัดของทรายขณะแห้ง (Dry compressive strength)
- ดินเหนียว (Effective clay) ทำหน้าที่เป็นตัวประสานและสร้างแรงยึดเกาะระหว่างเม็ดทราย ถ้าปริมาณดินเหนียวมากเกินไปจะทำให้ความโปร่งอากาศลดลงดินเหนียวที่ใช้โดยทั่วไปคือเบนโทไนท์ (Bentonite) ปริมาณผสมที่ใช้โดยทั่วไปในงานหล่อเหล็กกล้าคือ 4-5% (Middleton, 1970)
- ธัญพืช (Cereal) ธัญพืชที่ใช้กันในงานหล่อคือ แป้งข้าวโพดและแป้งมัน (Starch) บางกรณีใช้เด็กซ์ตริน (Dextrin) ซึ่งเมื่อละลายน้ำจะมีความเหนียว ช่วยเพิ่มความ

เหนียวของทรายแบบระหว่างการถอดกระสวน (Pattern) และทนต่อการขยายตัวจากความร้อน แต่หากเติมมากจะเกิดข้อเสียเนื่องจากธัญพืชจะถูกเผาและกลายเป็นก๊าซได้ โดยทั่วไปจะผสมธัญพืช 0.5-1% ในทรายแบบ (Davies, 1950)

#### การทำแบบหล่อ

การทำแบบหล่อทรายที่ดีควรมีคุณสมบัติ ความแกร่งต่อแรงอัด (Compressive strength) ดีจากการผสมดินเหนียวและน้ำ ซึ่งต้องพอเหมาะและไม่ทำให้ความโปร่งอากาศต่ำเกินไป (Sweeting, et al. 1993) ความโปร่งอากาศควรมีค่ามากเพื่อระบายก๊าซ (Batson, et al. 1992) ซึ่งมาจากขนาดเฉลี่ยของเม็ดทราย (Finess number) ใหญ่เป็นหลักการเกิดรูและโพรงก๊าซจะมากขึ้นด้วยสาเหตุหลักคือความโปร่งอากาศต่ำเกินไป ฟองก๊าซที่เกิดในโลหะหลอมเหลวลอยออกได้ยาก (Beech, 1974; and Shin, et al. 1991) รวมถึงอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปจนช่วงเวลาการแข็งตัวของโลหะขึ้นก๊าซระบายออกได้ไม่หมด (Isamu, 1998)

#### ข้อมูลเบื้องต้น และการออกแบบการทดลอง

จากการศึกษาชิ้นงานตัวอย่างในโรงงานพบว่า ปริมาณของรอยตำหนิชนิดโพรงก๊าซเกิดมากที่สุดทั้งในโรงงานหล่อเหล็กเหนียว (Steel) ซึ่งเกิดมากที่สุด 30% รองลงมาคือ ใส้แบบ (Core) เคลื่อน 17% และโรงงานเหล็กหล่อ (Iron) ซึ่งเกิดโพรงก๊าซมากที่สุด 34% รองลงมาคือ ทรายตก 19% ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่เลือกปัญหาของโพรงก๊าซมาศึกษาการแก้รอยตำหนิชนิดนี้

ในงานวิจัยนี้เลือกการศึกษาแนวทางแก้ปัญหาจากทรายแบบ ซึ่งในความเป็นจริงทฤษฎีการเกิดโพรงก๊าซมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยดังแผนภูมิแกงปลา (Komatsu Career Creation Ltd., 1993) ในภาพที่ 1

จากการทำกรณีศึกษาภายในโรงงานแห่งหนึ่ง ด้วยการเก็บข้อมูลการผลิตของชิ้นงานชนิดหนึ่งซึ่งผลิตด้วยเหล็กกล้าโลหะผสมต่ำ CrMo40L และการเกิดโพรงก๊าซประเภทรูเข็มในส่วนที่บางของชิ้นงานในปริมาณที่ค่อนข้างถี่ ทำให้การออกแบบการทดลองจากกรณีศึกษาเป็นการแปรค่าทดสอบทรายแบบให้อยู่ในขอบเขตเดียวกันกับการผลิตจริงที่

เกิดปัญหา โดยชิ้นงานที่ทำการหล่อเพื่อการทดลองได้มีการออกแบบให้เป็นแผ่นบางขนาด  $10 \times 15 \times 1 \text{ cm}^3$  เพื่ออ้างอิงถึงปัญหารอยตำหนิจากก๊าซในส่วนที่บางของชิ้นงาน ในการทดลอง ปัจจัยของทรายแบบและระดับค่าของปัจจัยซึ่งกำหนดอยู่ในช่วงที่ใช้ผลิจจริง และความเป็นไปได้ทางทฤษฎี แสดงในตารางที่ 1

#### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองผสมทรายตามสูตรด้วยปัจจัย A ถึง D ทำให้ได้ทรายแบบซึ่งใช้เป็นทรายหน้าแบบทั้งสิ้น 16 สูตร และเมื่อทำการเทลงแบบด้วยอุณหภูมิที่ต่างกันสูตรละ 2 ค่า ในที่สุดจะได้รับการทดลองทั้งสิ้น 32 สภาวะต่างๆ กันดังตารางที่ 2

โดยใน 16 สูตรของทรายจะผ่านการทดสอบค่าความโปร่งอากาศ (Permeability) ความแข็งแรง (Compressive strength) และปริมาณก๊าซจากทราย (Loss on ignition) โดยทดสอบอย่างละ 3 ครั้งและบันทึกค่าเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 3

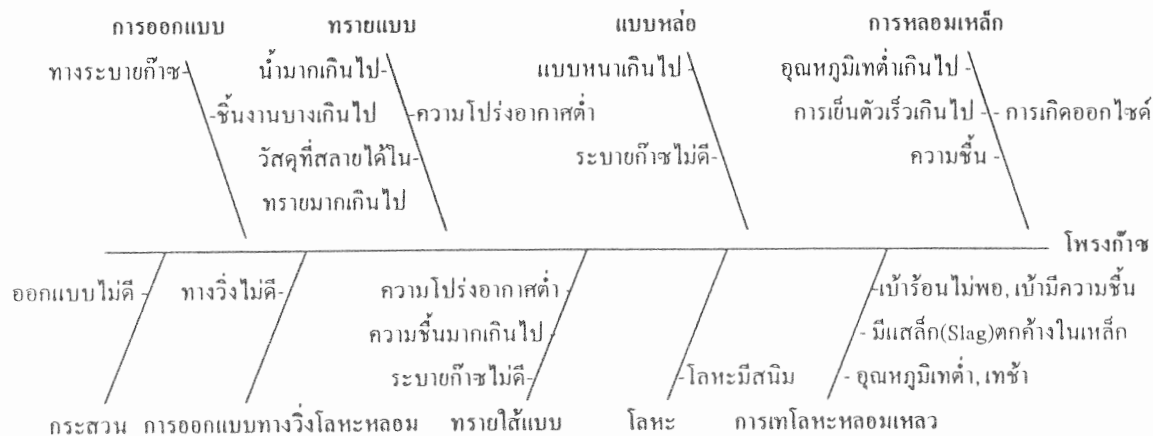
จากการทำการหล่อโดยควบคุมอุณหภูมิ 1550 และ 1620 °C โดยในแต่ละสภาวะทำการหล่อชิ้นงาน 5 ชิ้น แต่ละชิ้นนำมาตัดขวางที่กึ่งกลางชิ้นงานเพื่อวัดปริมาณโพรงก๊าซที่ปรากฏบนผิวรอยตัดด้วยวิธีทาง Stereology โดยขีดเส้นทแยงบนผิวรอยตัดและวัดความยาวเส้นทแยงนั้นที่ลากทับบนส่วนที่เป็นโพรงก๊าซ และเทียบสัดส่วนต่อความยาวเส้นทั้งสิ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ แสดงในภาพที่ 2 และผลการทดสอบ Stereology แสดงในตารางที่ 4

จากตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ค่าความโปร่งอากาศและปริมาณก๊าซในทรายมีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงก๊าซ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 3 จากการทดสอบด้วยวิธีการวิเคราะห์ค่าตัวแปร (Analysis of Variance; ANOVA) โดยใช้ปัจจัย 4 ตัวแรกคือขนาดเม็ดทราย ปริมาณดินเหนียว แป้งมันน้ำ ต่อคุณสมบัติทราย 3 ประการ ส่วนปัจจัยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นมาในการดำเนินการคำนวณรวมกับการเกิดโพรงก๊าซ ผลการคำนวณ แสดงดังตารางที่ 5

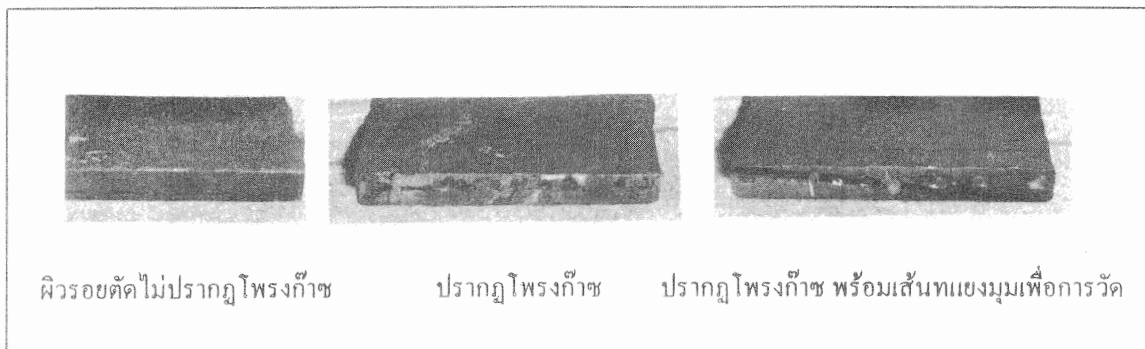
Sand Properties and Pouring Temperature on Casting Defect.

ตารางที่ 1 ปัจจัยและการแปรค่าของปัจจัย

ปัจจัย \ ระดับค่า	1	2
A) ค่าความระเหิดของทราย (AFS)	49	46
B) ปริมาณดินเหนียว (%)	4.5	6.5
C) ปริมาณแป้งมัน (%)	0.5	1.0
D) ปริมาณความชื้น (%)	2.5	4.0
E) อุณหภูมิเท (°C)	1550	1620



ภาพที่ 1 แผนภูมิแก๊งปลาของการเกิดโฟรงก๊าซ



ภาพที่ 2 ผิวรอยตัดสำหรับการวัดด้วยวิธี Stereology

ตารางที่ 2 สภาวะต่างๆ กัน 32 สภาวะในการทดลอง

	ปัจจัย (ABCDE)		ปัจจัย (ABCDE)		ปัจจัย (ABCDE)		ปัจจัย (ABCDE)
1	1 1 1 1 1	9	1 2 1 1 1	17	2 1 1 1 1	25	2 2 1 1 1
2	1 1 1 1 2	10	1 2 1 1 2	18	2 1 1 1 2	26	2 2 1 1 2
3	1 1 1 2 1	11	1 2 1 2 1	19	2 1 1 2 1	27	2 2 1 2 1
4	1 1 1 2 2	12	1 2 1 2 2	20	2 1 1 2 2	28	2 2 1 2 2
5	1 1 2 1 1	13	1 2 2 1 1	21	2 1 2 1 1	29	2 2 2 1 1
6	1 1 2 1 2	14	1 2 2 1 2	22	2 1 2 1 2	30	2 2 2 1 2
7	1 1 2 2 1	15	1 2 2 2 1	23	2 1 2 2 1	31	2 2 2 2 1
8	1 1 2 2 2	16	1 2 2 2 2	24	2 1 2 2 2	32	2 2 2 2 2

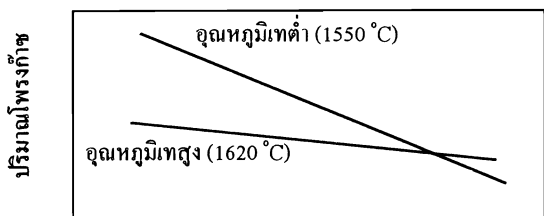
ตารางที่ 3 ค่าทดสอบทรายแบบ

	Permeability	Comp Str (g/cm <sup>2</sup> )	%Ignition loss		Permeability	Comp Str (g/cm <sup>3</sup> )	%Ignition loss
1111	82.33	607.00	1.43	2111	125.33	580.00	2.63
1112	68.33	640.00	3.07	2112	83.33	627.00	4.17
1121	79.33	690.00	1.68	2121	124.67	727.00	3.57
1122	62.33	627.00	3.12	2122	74.67	637.00	5.88
1211	82.00	1240.00	2.57	2211	121.67	1087.00	2.77
1212	68.00	693.00	3.77	2212	74.67	790.00	3.55
1221	78.00	760.00	4.83	2221	111.67	963.00	2.92
1222	53.67	850.00	4.33	2222	62.33	823.00	4.33

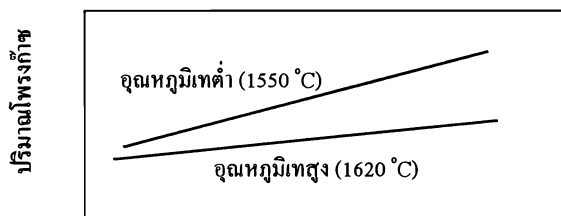
*Sand Properties and Pouring Temperature on Casting Defect.*

ตารางที่ 4 ผลการวัดการเกิดโพรงก๊าซด้วยวิธีเปรียบเทียบสัดส่วนบนเส้นทแยงมุมบนผิวหน้ารอยตัด

	A B C D E	%ค่าปริมาณการเกิดโพรงก๊าซบนรอยตัด				
1	1 1 1 1 1	12	13	13	4	0
2	1 1 1 1 2	0	0	0	0	0
3	1 1 1 2 1	6	4	0	0	0
4	1 1 1 2 2	0	0	0	0	0
5	1 1 2 1 1	10	3	0	0	0
6	1 1 2 1 2	0	0	0	0	0
7	1 1 2 2 1	10	12	0	0	0
8	1 1 2 2 2	0	0	0	0	0
9	1 2 1 1 1	0	0	0	0	0
10	1 2 1 1 2	0	0	0	0	0
11	1 2 1 2 1	10	11	6	6	0
12	1 2 1 2 2	4	0	0	0	0
13	1 2 2 1 1	13	22	24	16	14
14	1 2 2 1 2	10	4	0	0	0
15	1 2 2 2 1	38	40	35	30	25
16	1 2 2 2 2	10	11	9	0	0
17	2 1 1 1 1	0	0	0	0	0
18	2 1 1 1 2	0	0	0	0	0
19	2 1 1 2 1	10	9	0	0	0
20	2 1 1 2 2	0	0	0	0	0
21	2 1 2 1 1	5	0	0	0	0
22	2 1 2 1 2	0	0	0	0	0
23	2 1 2 2 1	12	10	0	0	0
24	2 1 2 2 2	0	0	0	0	0
25	2 2 1 1 1	0	0	0	0	0
26	2 2 1 1 2	0	0	0	0	0
27	2 2 1 2 1	0	0	0	0	0
28	2 2 1 2 2	0	0	0	0	0
29	2 2 2 1 1	6	11	0	0	0
30	2 2 2 1 2	5	0	0	0	0
31	2 2 2 2 1	17	10	12	9	0
32	2 2 2 2 2	4	3	0	0	0



ความโปร่งอากาศของทราย (Permeability)



ปริมาณก๊าซจากทราย (Loss on ignition)

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของการเกิดโพรงก๊าซต่อคุณสมบัติของทราย

จากตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ค่าความโปร่งอากาศ และปริมาณก๊าซในทราย มีอิทธิพลต่อการเกิดโพรงก๊าซซึ่ง แสดงความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 3 จากการทดสอบด้วยวิธีการ วิเคราะห์ค่าตัวแปร (Analysis of Variance; ANOVA) โดยใช้ปัจจัย 4 ตัวแรกคือ ขนาดเม็ดทราย ปริมาณดินเหนียว แป้งมัน น้ำ ต่อคุณสมบัติทราย 3 ประการ ส่วนปัจจัย อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นมาในการคำนวณรวมกับการเกิด โพรงก๊าซ ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 5

จากตารางที่ 4 จะเห็นว่า การเกิดโพรงก๊าซในการเท ด้วยอุณหภูมิที่สูงน้อยมากเมื่อเทียบกับการเทด้วยอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากระยะเวลาการแข็งตัวของอุณหภูมิที่ต่ำทำให้ การระบายก๊าซได้น้อย ส่วนภาพที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ที่ ชัดเจน ของความโปร่งอากาศทำให้การเกิดโพรงก๊าซ มากขึ้น และปริมาณก๊าซมากขึ้นทำให้การเกิดโพรงก๊าซ มากขึ้นด้วย ส่วนการวิเคราะห์ด้วย ANOVA ปัจจัยที่มี อิทธิพลมากที่สุดต่อความโปร่งอากาศคือ ขนาดเม็ดทราย และความชื้น สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงคือปริมาณ ดินเหนียวและความชื้น ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดโพรงจาก การเผาไหม้ในทรายคือปริมาณแป้งมันและความชื้น สำหรับการ เกิดรอยตำหนิโพรงก๊าซนั้นทุกปัจจัยจะมีผลกระทบ ยกเว้นความชื้น ในการวิเคราะห์ผลสามารถทราบถึงความผิด พลาดส่วนหนึ่งในการทำการทดลองได้ โดยความชื้นมีความ สำคัญมากต่อสมบัติ 3 ประการของทรายแบบซึ่งมีผลชัดเจน ต่อการเพิ่มหรือลดลงของโพรงก๊าซ แต่ความชื้นกลับไม่มี อิทธิพลต่อการเกิดโพรงก๊าซ ทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสีย ความชื้น ของทรายแบบที่ต้องทำรอข้ามคืนก่อนการ ปฏิบัติการหล่อ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการควบคุมช่วงเวลา การปฏิบัติการ ภาพที่ 4 แสดงผิวเรียบของโพรงก๊าซซึ่ง

แตกต่างจากโพรงจากการหดตัวของโลหะ ส่วนภาพที่ 5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะจากการทดลองซึ่งหล่อ แผ่นโลหะบาง การเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้โครงสร้างซึ่งมี ปริมาณคาร์บอน 3.8% เกิดเป็นเบนไนท์

### สรุปผลการทดลอง

จากการทำการทดสอบสมบัติทรายก่อนนำทรายมา ปฏิบัติการหล่อ ผลการทดสอบทรายสามารถอ้างอิงได้ตาม ทฤษฎี คือ ความโปร่งอากาศแปรค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเม็ด ทรายหยาบและปริมาณการผสมค่า ความแข็งแรงจะแปรค่า เพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเหนียว การเกิดโพรงจากการเผาไหม้ใน ทรายแปรค่าเพิ่มตามขนาดเม็ดทรายหยาบซึ่งทำให้การ ระบายก๊าซง่ายและปริมาณแป้งมันและน้ำซึ่งสามารถย่อย สลายได้จากการเผาไหม้ ส่วนดินเหนียวจะมีหน้าที่เพียงซึม ชับน้ำเพื่อการเกาะเม็ดทรายแต่สามารถทนต่อความร้อนและ ไม่ถูกเผาไหม้

ส่วนค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการป้องกันการเกิดโพรง ก๊าซคือ ขนาดเม็ดทรายหยาบ (AFS 46) ปริมาณดินเหนียวค่า (4.5%) ซึ่งแม้ไม่มีผลโดยตรงต่อการเพิ่มก๊าซ แต่ดินเหนียว ปริมาณต่ำสามารถสร้างความแข็งแรงเพียงพอต่อค่าควบคุม ซึ่งกำหนดในโรงงาน ปริมาณแป้งมันต่ำ (0.5%) ปริมาณน้ำ ต่ำ (2.5%)ซึ่งทั้งแป้งมันและน้ำล้วนมีผลอย่างมากต่อการ เพิ่มก๊าซ โดยทั้ง 3 ปัจจัยที่เลือกส่วนผสมค่าต่ำล้วนช่วยให้ ความโปร่งอากาศดีขึ้น และอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ใน ระดับสูง (1620°C) แต่ในแง่ของการประหยัดพลังงานและ การซ่อมบำรุงเตาสามารถเลือกใช้อุณหภูมิต่ำได้โดยที่ส่วน ผสมในทรายยังเป็นค่าต่ำ สภาวะที่ดีที่สุดคือ 11111 และ 11112 และสภาวะอุณหภูมิที่ต่ำซึ่งไม่เกิดโพรงก๊าซอีก 4 สภาวะคือ 12111 21111 22111 และ 22121

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณด้วย ANOVA

	การทดสอบ 4 ชนิด	ค่าความสำคัญของแต่ละตัวแปรการทดสอบ (Significance level)				
		A	B	C	D	E
1	Permeability	> 99 %	< 90 %	> 95 %	> 99 %	-
2	Compressive strength	< 90 %	> 99 %	< 90 %	> 99 %	-
3	Loss on ignition	> 95 %	> 90 %	> 99 %	> 99 %	-
4	การเกิดโพรงก๊าซ	> 99 %	> 99 %	> 99 %	< 90 %	> 99 %

*Sand Properties and Pouring Temperature on Casting Defect.*

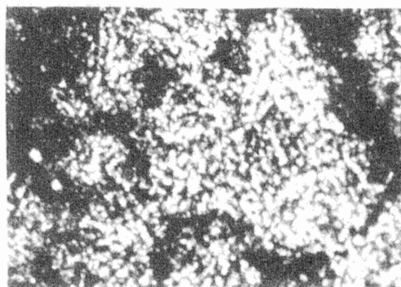
**กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยฉบับนี้คงไม่มีทางสำเร็จลุล่วงลงได้หากขาดความอนุเคราะห์อันดีจาก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ

แห่งชาติ บริษัทสยามนวลโลหะไทย จำกัด และภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4 ภาพถ่าย SEM โครงสร้างจากการทดลองบนผิวหน้ารอยตัด



ภาพที่ 5 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค กำลังขยาย 200 เท่า โครงสร้างเบนไนท์ของ CrMo40L

**เอกสารอ้างอิง**

- Batson, Robert G., Phillips, J. Fred, 1992. Parameter design experiments in foundry processes. *Annual Quality Congress Transactions*. **46** : 30 - 36.
- Beech, J. 1974. A new look at blow hole formation. *The Metallurgist & Materials Technologist* : 129-232.
- Davies, W. 1950. *Foundry sand control, Testing research and development. Research and development*. Sheffield, The United Steel Companies Ltd.
- Hornung, Mary Jane. 1990. Systematic approach to cast iron defect analysis. *Modern Casting*. **80 (4)** : 33-36.
- Isamu, Taki. 1998. Basic casting lecture, Held at Department of Metallurgical Engineering. Chulalongkorn University Bangkok. 16 March.
- Komatsu Career Creation Ltd. 1993. *Experimental Design*. First English Edition. Komatsu Career Creation Ltd.
- Middleton, J. M. 1970. Steel foundry molding materials. *British Foundryman*. **64** : 207-223.
- Shin, Teng-Shin, Hsieh, Chang-Swing. 1991. Study on the vapor-transport in sand molds and its effect on the quality of casting. *Chung-Kuo Chi Hsueh Kung Ch'eng Hsueh Pao/Journal of Chinese Society of Mechanical Engineers*. **12 (4)** : 435-446.



Sweeting, F.B.J., Thorpe, W.R., Peittit, A.N. 1992.

Fault and cause diagnosis of casting defects. A Case study. *Quality and Reliability Engineering International*. 8 (2) : 79-91.

Sweeting, F.B.J., Thorpe, W.R., Peittit, A.N. 1993.

Fault and cause diagnosis of casting defects. Case study No. 2. *Quality and Reliability Engineering International* 9 (1) :15-27.

มนัส สติรจินดา. 2538. วิศวกรรมงานหล่อเหล็ก *Iron-Steel Foundry Engineering*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หริส สุตบุตร., จิยิวิวา เคนยิ 2517. หล่อโลหะ, The Association for International Technical Promotion.