การยืดอายุการใช้งานของเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการเพิ่มความหนาของอิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็ก

Extension of ladle service life by increasing the thickness of refractory bricks in direct impact with the molten steel during tapping

รักเกียรติ วารินศิริรักษ์[1] , กิจติศักดิ์ รำไพรุจิพงศ์ ชัชวัสส์ วุฒิศิริศาสตร์ และ พงษ์ธร จรัญญากรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
* ติดต่อ: โทรศัพท์: 022 186 610 โทรสาร: 022 522 889
E-mail: rwarinsirirux@hotmail.com

บทคัดย่อ

เบ้ารับน้ำเหล็กถือเป็นอุปกรณ์หลักตัวหนึ่งในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ในระหว่างการใช้งาน อิฐทนไฟของเบ้ารับน้ำเหล็กจะเกิดการสึกกร่อน และกัดกร่อน โดยทั่วไปผนังอิฐทนไฟชั้น working lining ด้านที่รับการเทน้ำเหล็กจะเกิดการสูญเสียเนื้ออิฐมากกว่าด้านอื่น จึงใช้อิฐที่มีความหนามากกว่าด้านอื่น การศึกษาวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการหาความหนาที่เหมาะสมของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กด้านที่รับการเทน้ำเหล็กเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการก่อผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ จากการเก็บข้อมูลการทำงานในโรงงานตัวอย่าง เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการรับน้ำเหล็ก 34 ฮีต(heat) อิฐทนไฟชั้นด้านที่รับการเทน้ำเหล็กซึ่งใช้อิฐที่มีความหนา180 มิลลิเมตร จะเหลือความหนาต่ำสุดประมาณ 40 mm ในขณะที่ด้านอื่นมีความหนาเหลือประมาณ 70 mm นั่นคือในแต่ละฮีต เนื้ออิฐจะหายไปเฉลี่ยเท่ากับ 4.118 mm ดังนั้น หากเพิ่มความหนาของอิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็กเป็น 210 mm จะสามารถยืดการใช้งานของเบ้ารับน้ำเหล็กเพิ่มขึ้น 7 ฮีตก่อนที่จะทำการก่อผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการก่ออิฐทนไฟที่สามารถลดลงได้ประมาณ 20 บาทต่อตันน้ำเหล็ก หรือ 3.745 ล้านบาทต่อปี

คำหลัก: เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า, เบ้ารับน้ำเหล็ก, อิฐทนไฟ, การก่ออิฐทนไฟ

Abstract

A ladle is a main component in steelmaking process with Electric Arc Furnace. During operation, ladle wall is subjected to corrosion and erosion. The refractory bricks of working lining in the location that receive direct impact from molten steel during tapping become thinner more quickly than other location. Therefore, the brick in this location is normally thicker than other location. The objective of this study is to optimize the thickness of refractory bricks in impact location in order to extend the service life of the ladle, therefore, to reduce the relining cost. From the study in case-study factory it was found that, after 34 heats, the remaining thickness of the brick in direct impact location was about 40 mm while the thickness in other location was about 70 mm. That is the average erosion rate was about 4.118 mm per heat. It is proposed to increase the brick thickness to 210 mm which increase the service life of the ladle to 41 heats. Consequently, the saving of brick relining costs of about 20 baht per ton steel or 3.745million baht per year can be realized.

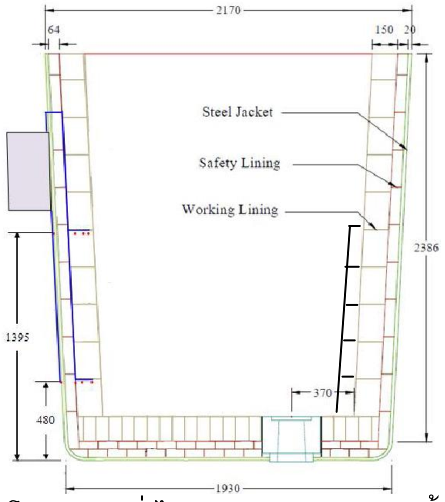
Keywords: Electric Arc Furnace, Ladle, Refractory Brick, Ladle wall lining

1. บทนำ

เบ้ารับน้ำเหล็ก(Ladle) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญตัวหนึ่งในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมเหล็กอาร์คไฟฟ้า ซึ่งจะน้ำเหล็กจากเตาหลอมไปยังสถานีการหล่อแบบต่อเนื่อง โดยทั่วไปมีขนาดความจุตั้งแต่ 25-300 ตัน การบุผนังอิฐทนไฟเบ้ารับน้ำเหล็กประกอบด้วย 3 ชั้น ด้านในของผนังที่สัมผัสกับน้ำเหล็กโดยตรงเรียกว่า ชั้นทำงาน (Working Lining) ถัดออกมาคือชั้นความปลอดภัย (Safety Lining) และชั้นผนังเหล็ก (Steel shell) สิ่งสำคัญที่สุดสำหรับเบ้ารับน้ำเหล็กคือ ก้อนอิฐทนไฟ และ วัสดุทนไฟในแต่ชั้นจะต้องทำหน้าที่ลดการสูญเสียความร้อนเพื่อไม่ให้อุณหภูมิของน้ำเหล็กเปลี่ยนแปลงเร็วมากเกินไป อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นตัวสะสมความร้อนไว้ภายในอิฐทนไฟ

สำหรับเบ้ารับน้ำเหล็กของโรงงานที่ทำการศึกษามีลักษณะทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 1 ขนาดของเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าดังต่อไปนี้[1] เส้นผ่านศูนย์กลางจากขอบนอกด้านปากขนาด 2.17 เมตร และด้านก้นขนาด 1.93 เมตร ความสูงแนวตั้งฉากจากก้นถึงปากถังสูง 2.5 เมตร อิฐทนไฟในชั้นทำงานทางด้านข้างของเบ้าหนา 150 มิลลิเมตร ด้านนอกทั้งด้านก้นเบ้าหนา 180 มิลลิเมตร และด้านรับการเทน้ำเหล็กหนา 180 มิลลิเมตรเฉพาะชั้นที่ 1-5 ส่วนชั้นที่ 6-9 หน้าแค่ 150 มิลลิเมตร ด้านอิฐทนไฟชั้นทำงานอีกอีกสองด้านที่เหลือหนา 150 มิลลิเมตร ถัดออกมาเป็นชั้นปลอดภัยก่อด้วยอิฐทนไฟชนิดด้วยกันกับชั้นทำงานด้านข้างของเบ้าหนา 64 มิลลิเมตร ทางด้านก้นเบ้าหนา 152 มิลลิเมตร ส่วนผนังเหล็กด้านนอกสุดเป็นเหล็กหนา 20 มิลลิเมตร ที่ก้นเบ้าหน้า 25 มิลลิเมตร น้ำหนักเบ้าเปล่าประมาณ 15 ตัน รับน้ำเหล็กได้ประมาณ 20 – 25 ตัน ต่อ 1 ครั้ง

งานศึกษาวิจัยครั้งนี้ เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ซึ่งเป็นการศึกษาวิจัยหลักโดยมีการตรวจวัด



รูปที่ 1 โครงสร้างทั่วไปและขนาดของเบ้ารับน้ำเหล็กของโรงงาน [2]

และบันทึกข้อมูลการทำงานภายใต้การทำงานจริงประกอบกับการออกแบบระบบควบคุมการทำงานให้สอดคล้องกัน[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] การศึกษาครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์การสูญเสียเนื้ออิฐทนไฟด้านสัมผัสกับน้ำเหล็ก จากภาพถ่ายของก้อนอิฐทนไฟที่ผ่านการใช้งานแล้ว พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางในการยืดอายุการใช้งานของเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการเพิ่มความหนาของอิฐทนไฟด้านรับที่รับการเทน้ำเหล็กเพื่อให้เบ้ารับน้ำเหล็กมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในส่วนที่เกี่ยวกับการก่อผนังอิฐทนไฟของเบ้ารับน้ำเหล็ก

2. สภาพของอิฐทนไฟที่ผ่านการใช้งานแล้ว

จากการตรวจวัดสภาพของอิฐทนไฟด้านสัมผัสน้ำเหล็กในระดับความสูงต่างๆกัน พบว่าเมื่อเตาหลอมเหล็กอาร์คไฟฟ้าเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็กแล้ว อิฐทนไฟด้านนี้จะรับแรงกระแทกโดยตรงจากน้ำเหล็กส่งผลให้อิฐทนไฟบริเวณนั้นสึกกร่อนและสูญหายไปในแต่ละครั้ง แต่เนื่องจากว่ากระบวนการหลอมเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์อิฐทนไฟด้านสัมผัสน้ำเหล็กจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อหยุดการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กแล้วเท่านั้น ลักษณะการเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็กจะเทสลับสองด้าน ในที่นี้คือ ด้าน A และ ด้าน B ซึ่งอยู่ด้านตรงข้ามกัน

(a) (b) (c)

รูปที่ 2 สภาพของอิฐทนไฟที่ถูกกัดกร่อนโดยน้ำเหล็กเมื่อผ่านการใช้งาน 34 ฮีต, (a) ภาพถ่ายจากการทดลองครั้งที่ 1, (b) ภาพถ่ายจากการทดลองครั้งที่ 2, (c) ภาพถ่ายจากการทดลองครั้งที่ 3

ไปในแต่ละครั้ง แต่เนื่องจากว่ากระบวนการหลอมเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์อิฐทนไฟด้านสัมผัสน้ำเหล็กจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อหยุดการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กแล้วเท่านั้น ลักษณะการเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็กจะเทสลับสองด้าน ในที่นี้คือ ด้าน A และ ด้าน B ซึ่งอยู่ด้านตรงข้ามกัน

สำหรับอิฐทนไฟด้านสัมผัสน้ำเหล็กรูปที่ 2 มีความหนาตามแนวรัศมีของเบ้ารับน้ำเหล็กเท่ากับ 180 มิลลิเมตร เมื่อผ่านขั้นตอนการเทน้ำเหล็ก น้ำเหล็กจะถูกกระแทกและกัดเซาะจากด้านนี้

เบ้ารับน้ำเหล็กจะทำงานเพื่อรับน้ำเหล็กได้ 34 ฮีต หลังจากนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกรื้อเพื่อก่อผนังอิฐใหม่ผนังอิฐทนไฟเมื่อทำงานครบ 34 ฮีต ได้รับความเสียหายจากความร้อนที่เกิดจากน้ำเหล็กอุณหภูมิสูงดังรูปที่ 2 และ 3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นได้จากการสึกกร่อนเนื่องจากการกระทำทางกล และ การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของน้ำเหล็ก เมื่อพิจารณารูปที่ 2a จะเห็นได้ว่าอิฐทนไฟที่เกิดความเสียหายเห็นได้อย่างชัดเจน ได้แก่อิฐชั้นที่ 7-8 และ เกิดความเสียมากที่สุดที่ชั้นที่ 2-3 เมื่อพิจารณาดังรูปที่ 2b พบว่าความเสียหายเห็นได้ชัดที่ตำแหน่ง 7-8 และ เกิดความเสียมากที่สุดที่ 1-2 และเมื่อพิจารณาดังรูปที่ 2c พบว่าความเสียหายชัดเจนที่ตำแหน่ง 6-7 และ เกิดความเสียมากที่สุดที่ 2

การที่ความเสียหายของผนังอิฐทนไฟเกิดขึ้นในตำแหน่งที่ไม่ซ้ำกัน เกิดจากความไม่แน่นอนในการตำแหน่งเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นหลัก นอกจากนี้ ปริมาณการหลอมในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 มากกว่าครั้งที่ 2 ทำให้ตำแหน่งของ slag line ไม่เหมือนกัน โดยที่ผลของการกัดกร่อนของ Slag ถือว่ามีมากพอสมควร ค่าความเสียหายในแต่ละชั้นของอิฐทนไฟด้านสัมผัสน้ำเหล็กที่เหลือจะแสดงในตารางที่ 1

รูปถ่ายเปรียบเทียบของอิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็ก จากผลการเก็บข้อมูล พิจารณาที่ตำแหน่งอิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็กชั้นที่ 1, 7 และ 8 ดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของอิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็กชั้นที่ 7A และ 8A มีความโค้งเว้าเกิดขึ้นเนื่องจากว่าน้ำเหล็กที่เทลงเบ้ารับน้ำเหล็กกระแทกกับชั้นที่ 7A และ 8A พอดี อีกทั้งที่ระดับความสูงที่ช่วงชั้นนี้จะเต็มไปด้วย Slag lining ซึ่งจะกัดกร่อนอิฐทนไฟเข้าไปด้วย ทำให้ส่วนนี้มีความโค้งเว้าอย่างเห็นได้ชัด ส่วนชั้นด่านล่างมีความเสียหายเยอะเนื่องจากสัมผัสกับน้ำเหล็กนานกว่าชั้นด้านบน ในส่วนนี้จะพิจารณาชั้น 1A และ 3B เพราะเหลืออิฐทนไฟน้อยที่สุด

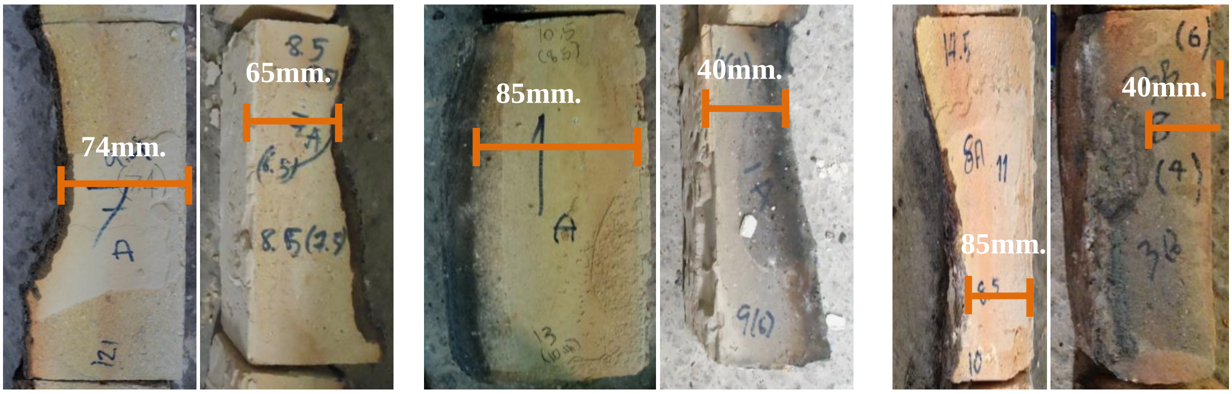
<u>การทดลอง</u>

ครั้งที่ 1 7A (74mm, 150mm), 1A (85mm, 180mm)
ครั้งที่ 2 7A (65mm, 150mm), 1A (40mm, 180mm)
ครั้งที่ 3 8A (85mm, 150mm), 3B (40mm, 180mm)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3a, 3b และ 3c พบว่าชั้นอิฐทนไฟด้านสัมผัสน้ำเหล็ก 1A และ 3A ของรูป 3a และ 3c ตามลำดับ เหลือเนื้ออิฐทนไฟที่ใช้ได้อีกเพียงแค่ 40 มิลลิเมตรเท่านั้น หมายความว่า ในการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กส่วนนี้ใช้อิฐทนไฟไปมากที่สุด คือ 140 มิลลิเมตร จากการเทน้ำเหล็กทั้งหมด 34 ฮีต (รอบการทำงาน) สรุปได้ก็คือ เนื้อของอิฐทนไฟด้านนี้จะสูญหายไปในแต่ละฮีตโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4.118 มิลลิเมตร

การศึกษาครั้งนี้ เบ้ารับน้ำเหล็กมีความจุน้ำเหล็กที่ประมาณ 20 ตัน การเพิ่มระยะความหนาของอิฐทนไฟด้านสัมผัสน้ำเหล็กอีก 30 มิลลิเมตร (เดิมหนา 180 มิลลิเมตร เปลี่ยนเป็น 210 มิลลิเมตร) เพิ่มเฉพาะชั้นการทำงานของอิฐทนไฟด้านการเทน้ำเหล็กเท่านั้น ส่วนอีกสองด้านของชั้นการทำงานที่เหลือยังคงใช้อิฐทนไฟขนาด 150 มิลลิเมตรเหมือนเดิม

ในการเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็กระดับความสูงของน้ำเหล็กและ Slag จะอยู่ที่ตำแหน่งรอยต่อของอิฐทนไฟชั้นที่ 7 และ 8 แน่นอนว่ายังคงเหลือความสูงอีกประมาณ 600 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อคำนวณปริมาตรในส่วนนี้ออกมาจะมีค่ามากเกินพอสำหรับปริมาตรของอิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็กที่ถูกเพิ่มความหนา ถ้านำค่าเฉลี่ยของการสูญหายของอิฐทนไฟมาพิจารณาร่วมกับการเพิ่มระยะความหนา



(a) (b) (c)

รูปที่ 5 อิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็ก (a) ภาพถ่ายจากการทดลองครั้งที่ 1, (b) ภาพถ่ายจากการทดลองครั้งที่ 2, (c) ภาพถ่ายจากการทดลองครั้งที่ 3

ของอิฐทนไฟแล้ว สามารถเพิ่มการเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็กได้อีก 7 ฮีต รวมเป็น 41 ฮีต

3. การวิเคราะห์และแนวทางในการปรับปรุง

ใช้ตารางที่ 2 เป็นข้อมูลในการคำนวณทั้งหมด

การคำนวณปริมาณน้ำเหล็กที่ผลิตได้ หน่วยตันน้ำเหล็ก หาได้จากสมการ

$$m_{st} = aN \quad (1)$$

เมื่อ

C คือ ปริมาณน้ำเหล็กที่ผลิตได้ต่อกาซ่อมเบ้ารับน้ำเหล็ก 1 ครั้ง

a คือ ปริมาณการเทน้ำเหล็กในแต่ละรอบการทำงาน

N คือ จำนวนครั้งของการเทน้ำเหล็ก

การคำนวณต้นทุนการซ่อมเบ้ารับน้ำเหล็ก หน่วยบาท หาได้จากสมการ

$$C_{ladle} = C_{brick_{A-B}} + C_{all} \quad (2)$$

เมื่อ

C_{ladle} คือ ต้นทุนการซ่อมเบ้ารับน้ำเหล็ก

$C_{brick_{A-B}}$ คือ ต้นทุนอิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็ก

C_{all}คือ ต้นทุนค่าอิฐ, วัสดุทนไฟ และ ค่าแรงงาน

การคำนวณค่าใช้จ่ายต้นทุนทั้งหมดในการซ่อมเบ้ารับน้ำเหล็กต่อตันน้ำเหล็กหน่วยบาทต่อตันน้ำเหล็ก

ตารางที่ 1 ความหนาของอิฐทนไฟหลังจากใช้งานแล้ว 34 ฮีต ทั้งหมด 3 การทดลอง, หน่วยมิลลิเมตร

ชั้น	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	ด้าน A	ด้าน B	ด้าน A	ด้าน B	ด้าน A	ด้าน B
9	92	115	115	115	100	-
8	102	130	125	80	85	-
7	74	117	80	65	110	-
6	93	110	105	60	85	90
5	74	110	90	55	85	100
4	70	87	90	55	75	70
3	49	62	70	40	70	40
2	66	55	60	40	70	40
1	85	86	60	40	70	60

$$C_{total} = \frac{C_{ladle}}{m_{st}} \quad (3)$$

เมื่อ C_{total} คือ ค่าใช้จ่ายต้นทุนทั้งหมดต่อตันน้ำเหล็ก

ในการวิเคราะห์ผลการคำนวณจะพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ ความหนาของอิฐทนไฟด้านสัมผัสน้ำเหล็ก เท่ากับ 180 และ 210 มิลลิเมตร

ที่ความหนาเท่ากับ 180 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำเหล็กที่ผลิตจากเตาหลอมได้ เท่ากับ 680 ตัน ต้นทุนการซ่อมเบ้ารับน้ำเหล็กทั้งหมด เท่ากับ

ตารางที่ 2 ตัวแปรต่างๆที่อ้างอิงในการคำนวณ

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
a (ตันเหล็ก/รอบการทำงาน)	20
$N_{180mm.}$ (จำนวนฮีต).	34
$N_{210mm.}$ (จำนวนฮีต).	41
$C_{brick,A\text{-}B,180mm}$(*บาท*)	14,696.50
$C_{brick,A\text{-}B,210mm}$(*บาท*)	27,300.00
C_{all} (*บาท*)	125,744.50

140,441.00 บาท เทียบค่าใช้จ่ายต้นทุนทั้งหมดต่อตันน้ำเหล็ก เท่ากับ 206.53 บาท ต่อตันน้ำเหล็ก

ที่ความหนาเท่ากับ 210 มิลลิเมตร

ปริมาณน้ำเหล็กที่ผลิตจากเตาหลอมได้ เท่ากับ 820 ตัน ต้นทุนการซ่อมเบ้ารับน้ำเหล็กทั้งหมด เท่ากับ 153,044.50 บาท เทียบค่าใช้จ่ายต้นทุนทั้งหมดต่อตันน้ำเหล็ก เท่ากับ 186.64 บาท ต่อตันน้ำเหล็ก

เมื่อวิเคราะห์ผลของการศึกษาพบว่าการใช้อิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็ก ที่ความหนา 210 มิลลิเมตร ประหยัดกว่า ที่ความหนา 180 มิลลิเมตร อยู่เท่ากับ 19.89 บาทต่อตันน้ำเหล็ก เมื่อพิจารณากำลังผลิตเหล็กกล้ารายปีของโรงงานแล้วสามมารถประหยัดงบประมาณได้ถึง 3.745 ล้านบาท

4. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่าความหนาตามแนวรัศมีของอิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นสูญหายไปทุกครั้งจากการเทน้ำเหล็กของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จึงพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มความหนาของอิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็กให้เพิ่มสูงขึ้นเพื่อที่จะสามารถรองรับจำนวนครั้งของการเทน้ำเหล็กให้มากยิ่งขึ้น

โดยความหนาที่เพิ่มขึ้นของอิฐทนไฟที่สนใจอยู่ที่ 210 มิลลิเมตร ได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

1. เมื่อเพิ่มความหนาของอิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็ก สามารถรองรับปริมาณการเทน้ำเหล็กได้ 41 ฮีต ต่อการซ่อมบำรุงเบ้ารับน้ำเหล็กหนึ่งครั้ง

2. ต้นทุนค่าใช้จ่ายงานซ่อมบำรุงเบ้ารับน้ำเหล็กรวมรายปี คิดเป็น 35,200,235.00 บาท

3.ส่วนต่างที่สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายรายปีที่กำลังผลิต 186,600 ตัน คิดเป็นเงิน 3.745 ล้านบาท

หากมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของการประหยัดพลังงานด้วยการเก็บข้อมูล และ สร้างความเป็นระเบียบแบบแผนถึงวิธีปฏิบัติในการทำงานจริงมากขึ้น จะทำให้ได้ข้อมูลของอิฐทนไฟแม่นยำขึ้น และสามารถประมาณความสามารถในการประหยัดค่าใช้จ่ายของการทำงานได้แม่นยำมากยิ่งขึ้นเช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ศึกษางานวิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บริษัท สยามสติล ซินดิเกต จำกัด (มหาชน) และคุณศักดิ์สิริ พุ่มพฤกษ์ บริษัท พี พี ซิสเต็ม จำกัดที่ได้สนับสนุนการทดลอง และให้คำปรึกษาอันมีค่าในการศึกษาครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น. <u>การจำลองเชิงความร้อนของการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า</u>. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

[2] กิจติศักด์ รำไพรุจิพงศ์, ชัชวัสส์ วุฒิศิริศาสตร์, สัณหพศ จันทรานุวัฒน์ และ พงษ์ธร จรัญญากรณ์ (2555). การลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าโดยการปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างรอการเทน้ำเหล็ก, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, 19 – 21 ตุลาคม 2554, อ่าวนางวิลล่ารีสอร์ท จังหวัดกระบี่

[3] จักราวุธ จรุญศารทูล. <u>การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ</u>. วิทยานิพนธ์ปริญญา, สาขาวิชามหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

[4] ชัชวัสส์ วุฒิศิริศาสตร์. การควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กร่วมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญา, สาขาวิชามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554

[5] กิจติศักดิ์ ราไพรุจิพงศ์, สัณหพศ จันทรานุวัฒน์ และ พงษ์ธร จรัญญากรณ์(2556). การประมาณการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้าเบ้ารับน้ำเหล็กโดยใช้ตัวประมาณค่าเพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็กของกระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9, 8-10 พฤษภาคม 2556, จังหวัดนครนายก

[6] ชัชวัสส์ วุฒิศิริศาสตร์, กิจติศักดิ์ ราไพรุจิพงศ์ และ พงษ์ธร จรัญญากรณ์(2555). การควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กร่วมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงาน: ผลการตรวจวัดในวัฏจักรทำงานจริง, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2555, จังหวัดมหาสารคาม

[7] ชัชวัสส์ วุฒิศิริศาสตร์, พงษ์ธร จรัญญากรณ์ และ สัณหพศ จันทรานุวัฒน์ (2554). การลดการใช้พลังงานในการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในกรณีที่อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, จังหวัดกระบี่.