

การปรับปรุงการใช้พลังงานสำหรับเตาหลอมอะลูมิเนียม ชนิดให้ความร้อนโดยอุปกรณ์หัวพันไฟ ในกระบวนการหลอมอะลูมิเนียมของโรงงานผลิตลวดอะลูมิเนียม

ไผะจิต พุกะทรัพย์¹ และ วิทยา ยงเจริญ²

¹สหสาขาวิชา เทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Email: lastbogie@gmail.com

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมหลอมโลหะเป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่มีการใช้พลังงานอย่างสูงและมีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานสูงเช่นกัน ความร้อนสูญเสียในอุตสาหกรรมหลอมโลหะ ได้แก่ ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย, ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาหลอม, ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์, ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด เป็นต้น สำหรับ สารนิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาเพื่อปรับปรุงการใช้พลังงานสำหรับเตาหลอมอะลูมิเนียม โดยการลดความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาหลอมและลดความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด อันเกิดจากความเสื่อมสภาพของวัสดุทนความร้อนของตัวเตาหลอม ซึ่งผู้ใช้งานส่วนใหญ่ของข้ามนำถึงปัญหาด้านนี้ เนื่องจากใช้งบประมาณสูงในการเปลี่ยนวัสดุทนความร้อน

การศึกษาค้นคว้านี้ ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิด้านการผลิต อุณหภูมิจุดต่าง ๆ ของเตาหลอม และวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้น รวมถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหลอมในปัจจุบัน ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ที่ 39.61% และหากเปลี่ยนวัสดุทนความร้อนใหม่จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนปรับปรุงขึ้นเป็น 43.27% โดยสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ถึง 2 ล้านบาทต่อปี จากงบประมาณลงทุน 6.63 ล้านบาท อายุโครงการ 10 ปี ผลตอบแทนจากการลงทุนตลอดโครงการ คือ NPV ที่ อัตราส่วนลด 12% และ IRR เป็น 4.21 ล้านบาทและ 27.67% ตามลำดับ

คำสืบค้น

ความร้อนสูญเสีย, ปรับปรุงการใช้พลังงาน, เตาหลอมอะลูมิเนียม

Energy improvement of aluminum melting furnace employing bunker oil burner type

Kosit Pugasab^{1,} and Witthaya Yongcharoen²*

¹*Energy Technology and Management, Graduate School – Interdisciplinary Program.
Chulalongkorn University.*

²*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering.
Chulalongkorn University.*

**E-mail: lastbogie@gmail.com*

ABSTRACT

Metal industry is one of the most intensive energy consumption with highly potential to reduce the energy consumption. The objective of this study aims to improve energy consumption of Aluminum furnace using bunker oil type burner. Presently, there is abundant of heat loss from the furnace via the 700°C flue gas or through the walls with deteriorate refractory materials which is required high investment to improve.

This study included the collecting of process parameters and the recording of operating temperatures of related points such as wall temperatures and bath temperatures. These data were then calculated to determine the heat loss and the efficiency of the furnace. It was found that the efficiency of the existing furnace was 39.61%. If refractory materials were renewed, the efficiency of the furnace would be improved to 43.27%. 85,500 liters of bunker oil consumption would be reduced, hence the energy cost reduction of 2 million Baht per year. With 6.63 million Baht investment for renewing refractory materials, simplified NPV with discount rate of 12% and IRR will be 4.21 million Baht and 27.67%, respectively, through the project life 10 years.

KEYWORDS

Heat loss, Energy improvement, Aluminum furnace

1. บทนำ

เตาหลอมอะลูมิเนียมที่ศึกษาครั้งนี้ เป็นเตาหลอมขนาด 10 ตัน โดยรูปร่างเตามีลักษณะเป็นลูกบาศก์สี่เหลี่ยม ที่ด้านหน้าจะมีประตูน้ำ ซึ่งเป็นประตูหลัก สำหรับป้อนวัตถุดิบ และด้านข้างมีประตูเล็กสำหรับการ Clear Slag อะลูมิเนียม และด้านข้างอีกข้างหนึ่ง มีช่องทางออกของน้ำอะลูมิเนียม โดยเชื่อมต่อกับรางลำเลียงน้ำอะลูมิเนียม สำหรับด้านหลัง เป็นส่วนที่ติดตั้ง Burner

รอบการทำงานของเตาหลอม

รอบการทำงานของเตาหลอมที่ศึกษา ในแต่ละรอบการทำงาน จะประกอบไปด้วย 2 ช่วงด้วยกัน คือ

1. ช่วงเวลาหลอม คือ ช่วงเวลาที่หลอมอะลูมิเนียมจากของแข็ง จนกระทั่งกลายเป็นน้ำอะลูมิเนียม ตามอุณหภูมิที่ต้องการ ใช้เวลาเฉลี่ย 3.15 ชั่วโมง ซึ่งช่วงเวลานี้ หัวพ่นไฟใหญ่ และหัวพ่นไฟเล็ก จะทำงานพร้อมกันทั้ง 2 หัว
2. ช่วงเวลาเท คือ ช่วงเวลา ต่อจากช่วงเวลาหลอม เป็นเวลาที่รอเทน้ำอะลูมิเนียมและเทน้ำอะลูมิเนียมจนกระทั่งหมดเตา ซึ่งใช้เวลาเฉลี่ย 4.85 ชั่วโมง ช่วงเวลานี้ หัวพ่นไฟเล็ก จะทำงานเพียงหัวเดียว เพื่อรักษาอุณหภูมิของน้ำอะลูมิเนียมเท่านั้น

การวัดและการคำนวณจะพิจารณาแยกแต่ละช่วงเวลา และนำมารวมกับเป็นรอบการทำงานของเตาหลอม

การหลอมอะลูมิเนียมใช้น้ำมันเตาเกรด เอ เฉลี่ย 89 ลิตรต่อตันของอะลูมิเนียมที่หลอมได้ ซึ่งจากการลงพื้นที่แล้ว คาดการณ์ว่า สามารถลดปริมาณการใช้น้ำมันเตาที่ใช้ ไม่ต่ำกว่า 10% ทำให้สามารถลดปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้ในการผลิตได้ไม่น้อยกว่า 72,000 ลิตรต่อปี หรือไม่น้อยกว่า 1.7 ล้านบาทต่อปี

2. ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

งานศึกษาวิจัยฉบับนี้ เป็นงานศึกษาเกี่ยวกับการลดการใช้พลังงานในการหลอมอะลูมิเนียมของเตาหลอมอะลูมิเนียม ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย การถ่ายเทความร้อน การเผาไหม้ สมดุลมวล และสมดุลพลังงานในเตาหลอมอะลูมิเนียม

2.1 วัสดุทนความร้อนในเตาหลอมอะลูมิเนียม

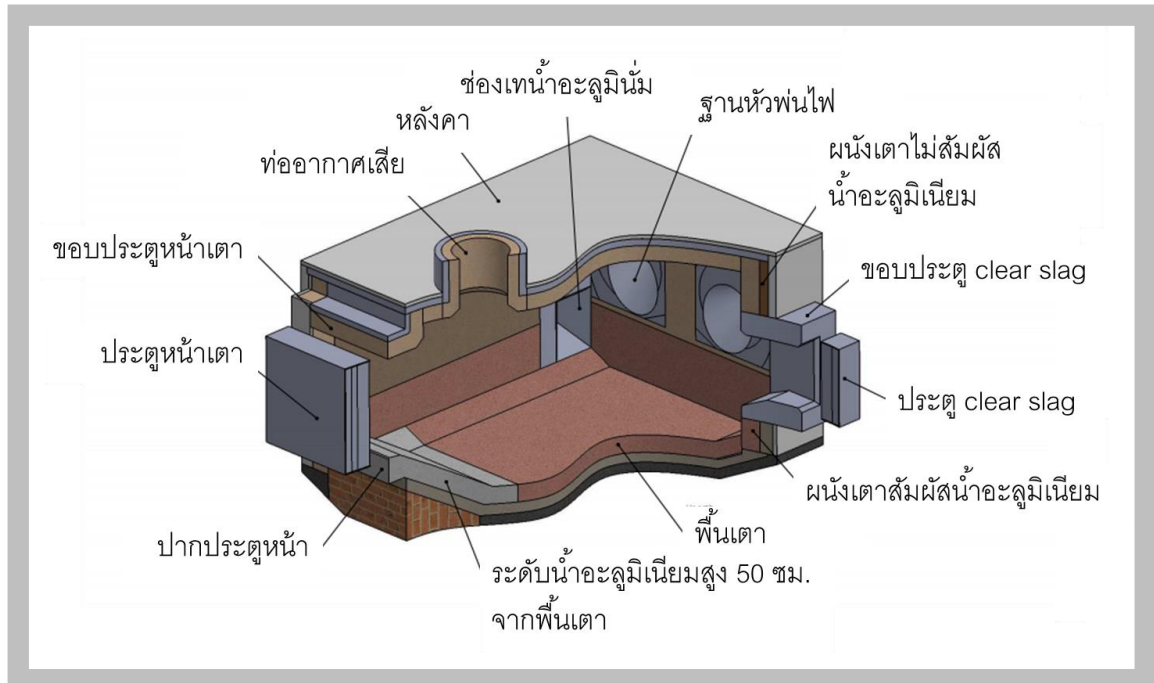
วัสดุทนความร้อนในเตาหลอมอะลูมิเนียม จะประกอบด้วยวัสดุทนความร้อน 2-4 ชั้นด้วยกัน โดยค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุทนความร้อนแต่ละชนิด รูปร่างลักษณะของเตาหลอม และการติดตั้งวัสดุทนความร้อนแต่ละด้านของเตาหลอม ดังแสดงในตารางที่ 1 รูปที่ 1 และรูปที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่าการนำความร้อนของวัสดุทนความร้อนที่ใช้ในเตาหลอมอะลูมิเนียม

ชนิดของวัสดุทนความร้อน	AK 85 MP	AK 45	CURAST 85 PD	Alucast 35	Curon 130	GI 26	GI 23	Golite 1.0.6	Supra	Golite 90.L	Rock wool HT 660	Calcon 1100	Calcon Board
Thermal conductivity (W/m.K)	4.1	1.46	1.21	0.9	0.6	0.34	0.24	0.23	0.18	0.15	0.0914	0.0935	0.109

ที่มา: GOUDA refractories. BV.

วัสดุทนความร้อนที่ใช้ติดตั้งในเตาหลอม มีการใช้วัสดุทนความร้อนที่แตกต่างกันในแต่ละด้าน สำหรับเตาหลอมที่ศึกษา มีรูปร่างลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 และการใช้วัสดุทนความร้อนด้านต่าง ๆ ตามรายละเอียดในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แสดงรูปร่างลักษณะของเตาหลอมอะลูมิเนียม

พื้นเตา	ผนังเตาสัมผัสน้ำอะลูมิเนียม
AK 85 MP, $k = 4.10 \text{ W/m.K}$, $L = 230 \text{ mm}$ Alu cast 35, $k = 0.90 \text{ W/m.K}$, $L = 145 \text{ mm}$ SUPRA, $k = 0.18 \text{ W/m.K}$, $L = 76 \text{ mm}$ Calcon 1100, $k = 0.0935 \text{ W/m.K}$, $L = 50 \text{ mm}$ Steel, $k = 50.2 \text{ W/m.K}$, $L = 10 \text{ mm}$ Thermal resistance $1.174 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$	AK 85 MP, $k = 4.10 \text{ W/m.K}$, $L = 230 \text{ mm}$ Alu cast 35, $k = 0.90 \text{ W/m.K}$, $L = 145 \text{ mm}$ SUPRA, $k = 0.18 \text{ W/m.K}$, $L = 76 \text{ mm}$ Calcon 1100, $k = 0.0935 \text{ W/m.K}$, $L = 50 \text{ mm}$ Steel, $k = 50.2 \text{ W/m.K}$, $L = 10 \text{ mm}$ Thermal resistance $1.174 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$

รูปที่ 2 แสดงวัสดุทนความร้อนที่ใช้ติดตั้งในเตาหลอมอะลูมิเนียม

ผนังเตาไม่สัมผัสน้ำอะลูมิเนียม	ผนังหลังเตา
AK 45, k = 1.46 W/m.K, L = 230 mm GI 23, k = 0.24 W/m.K, L = 114 mm CALCON BOARD, k = 0.109 W/m.K, L = 100 mm Steel, k = 50.2 W/m.K, L = 10 mm Thermal resistance 1.55 K. m²/W	AK 85 MP, k = 4.10 W/m.K, L = 230 mm GI 26, k = 0.34 W/m.K, L = 114 mm CALCON 1100, k = 0.0935 W/m.K, L = 100 mm Steel, k = 50.2 W/m.K, L = 10 mm Thermal resistance 1.461 K. m²/W
ฐานหัวพ่นไฟ	หลังคาเตา
CURAST 85 PD, k = 1.21 W/m.K, L = 320 mm GI 26, k = 0.34 W/m.K, L = 114 mm Steel, k = 50.2 W/m.K, L = 10 mm Thermal resistance 0.6 K. m²/W	CURON 130, k = 0.60 W/m.K, L = 200 mm Golite 1.0.6, k = 0.23 W/m.K, L = 90 mm Rock wool HT 660, k = 0.0914 W/m.K, L = 50 mm Steel, k = 50.2 W/m.K, L = 8 mm Thermal resistance 1.272 K. m²/W
ประตูหน้าเตา	ประตู clear slag
CURON 130, k = 0.60 W/m.K, L = 200 mm Golite 1.0.6, k = 0.23 W/m.K, L = 100 mm Golite 90 L, k = 0.15 W/m.K, L = 100 mm Steel, k = 50.2 W/m.K, L = 10 mm Thermal resistance 1.435 K. m²/W	CURON 130, k = 0.60 W/m.K, L = 175 mm Golite 1.0.6, k = 0.23 W/m.K, L = 125 mm Steel, k = 50.2 W/m.K, L = 8 mm Thermal resistance 0.835 K. m²/W

รูปที่ 2 แสดงวัสดุทนความร้อนที่ใช้ติดตั้งในเตาหลอมอะลูมิเนียม (ต่อ)

2.2 การถ่ายเทความร้อน

เมื่อใดก็ตามที่จุดสองจุดมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ก็จะมีพลังงานถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ พลังงานที่เคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้เรียกว่า ความร้อน

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่สมบูรณ์แบบนั้น จำเป็นจะต้องทราบถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ

2.2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Conduction heat transfer)

เราสามารถพิจารณาการนำความร้อนของผนังเตาหลอมอะลูมิเนียม ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$Q_{\text{cond}} = -kA_{\text{cond}} \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

เมื่อ	Q_{cond}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (W)
	k	คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) (W/m.K)
	A_{cond}	คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2)
	$\frac{dT}{dx}$	คือ ค่าเกรเดียนต์อุณหภูมิภายในผนังเตาหลอมอะลูมิเนียม (K/m)

2.2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection heat transfer)

ในขณะที่ทำการหลอมอะลูมิเนียม มีการพาความร้อนจากผนังของเตาหลอมด้านต่าง ๆ ไปสู่สิ่งแวดล้อม สามารถพิจารณาโดยใช้สมการการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) ดังนี้

$$Q_{\text{conv}} = h_m A_{\text{conv}} (T_s - T_{\text{amb}}) \quad (2)$$

เมื่อ	Q_{conv}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (W)
	h_m	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
	A_{conv}	คือ พื้นที่ของการพาความร้อนของผนังเตาหลอมอะลูมิเนียม (m^2)
	T_s	คือ อุณหภูมิที่ผิวหน้าของผนังเตาหลอมอะลูมิเนียม (K)
	T_{amb}	คือ อุณหภูมิห้อง (K)

2.2.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

การแผ่รังสีความร้อนในเตาหลอมอะลูมิเนียมนั้น ความร้อนจากการแผ่รังสี เป็นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาหลอม คำนวณได้จากสมการ

$$Q_{\text{rad}} = \epsilon_s \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (3)$$

เมื่อ	Q_{rad}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี (W)
	A_s	คือ พื้นที่ของการแผ่รังสีความร้อนที่พื้นผิวของเตาหลอม (m^2)
	T_s	คือ อุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของเตาหลอม (K)
	T_{amb}	คือ อุณหภูมิห้อง (K)
	ϵ_s	คือ ค่า Emissivity ผิวด้านนอกของเตาหลอมอะลูมิเนียม มีค่าประมาณ 0.81
	σ	คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ (W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

2.3 พลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาหลอมอะลูมิเนียม

2.3.1 ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Q_{fuel})

$$Q_{\text{fuel}} = V_{\text{fuel}} \times \text{LHV} \quad (4)$$

เมื่อ	Q_{fuel}	คือ ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (MJ)
	V_{fuel}	คือ การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของการหลอมอะลูมิเนียม แต่ละเตา (litre)
	LHV	คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/litre)

2.3.2 ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า ($Q_{\text{fuel,entrance}}$)

ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิง ก่อนจะถูกป้อนเข้าสู่หัว Burner ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q_{\text{fuel,entrance}} = \rho_{\text{fuel}} \times V_{\text{fuel}} \times C_{\text{fuel}} (T_{\text{fuel,in}} - T_{\text{amb}}) / 1000 \quad (5)$$

เมื่อ	$Q_{\text{fuel,entrance}}$	คือ ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า (MJ)
	V_{fuel}	คือ การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของการหลอมอะลูมิเนียม แต่ละเตา (litre)
	ρ_{fuel}	คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/litre) น้ำมันเตา มีค่าเท่ากับ 0.95 kg/litre
	C_{fuel}	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 1.884 kJ/kg-K
	$T_{\text{fuel,in}}$	คือ อุณหภูมิของเชื้อเพลิงหลังจากการอุ่นด้วย heater (K)
	T_{amb}	คือ อุณหภูมิห้อง (K)

2.4 พลังงานความร้อนที่ออกจากเตาหลอมอะลูมิเนียม

2.4.1 ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาหลอมอะลูมิเนียม ($Q_{\text{surface,furnace}}$)

$$Q_{\text{surface,furnace}} = h_m A_{\text{surface}} (T_{\text{surface}} - T_{\text{amb}}) + \varepsilon_{\text{surface}} \sigma A_{\text{surface}} (T_{\text{surface}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (6)$$

เมื่อ	$Q_{\text{surface,furnace}}$	คือ ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาหลอมอะลูมิเนียม (W)
	h_m	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
	A_{surface}	คือ พื้นที่ผิวด้านนอกของเตาหลอมอะลูมิเนียม (m^2)
	T_{surface}	คือ อุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของเตาหลอมอะลูมิเนียม (K)
	T_{amb}	คือ อุณหภูมิห้อง (K)
	$\varepsilon_{\text{surface}}$	คือ ค่า Emissivity ของผนังเตาหลอมอะลูมิเนียม มีค่า ประมาณ 0.81
	σ	คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$

2.4.2 ความร้อนสูญเสียของไอเสีย (Q_{flue})

$$Q_{\text{flue}} = m_{\text{CO}_2,\text{flue,fur}} \left(\int_{T_{\text{amb}}}^{t_{\text{flue}}} C_{p,\text{CO}_2} dT \right) + m_{\text{H}_2\text{O},\text{flue,fur}} \left(\int_{T_{\text{amb}}}^{t_{\text{flue}}} C_{p,\text{H}_2\text{O}} dT \right) + m_{\text{SO}_2,\text{flue,fur}} \left(\int_{T_{\text{amb}}}^{t_{\text{flue}}} C_{p,\text{SO}_2} dT \right) + m_{\text{O}_2,\text{flue,fur}} \left(\int_{T_{\text{amb}}}^{t_{\text{flue}}} C_{p,\text{O}_2} dT \right) + m_{\text{N}_2,\text{flue,fur}} \left(\int_{T_{\text{amb}}}^{t_{\text{flue}}} C_{p,\text{N}_2} dT \right) \quad (7)$$

เมื่อ	Q_{flue}	คือ ความร้อนสูญเสียของไอเสีย (kJ)
	$m_{\text{xxx,flue,furnace}}$	คือ มวลของก๊าซชนิด xxx ในไอเสีย (kg)
	$C_{p,\text{xxx}}$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซชนิด xxx (kJ/kg-K)
	t_{flue}	คือ อุณหภูมิของแก๊สเสีย (K)

2.4.3 ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดของเตาหลอมอะลูมิเนียม (Q_{opening})

ช่องเปิดของเตาหลอม หมายถึง ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุทนความร้อนกับขอบประตูเตา เนื่องจาก การสีกหรือของวัสดุทนความร้อนและขอบประตูเตา

$$Q_{\text{opening}} = C_t \varepsilon_{\text{opening}} \sigma A_{\text{opening}} (T_{\text{furnace}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (8)$$

เมื่อ Q_{opening} คือ ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด (W)

C_t คือ ตัวคูณการปรับแก้ไขในส่วนของสัดส่วนเวลาในการเปิดปิด ของช่องเปิด ใช้ตัวคูณปรับแก้เท่ากับ 1 เนื่องจากช่องเปิดมีการเปิดอยู่ตลอดเวลา

$\varepsilon_{\text{opening}}$ คือ ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด

A_{opening} คือ พื้นที่ช่องเปิด (m^2)

T_{furnace} คือ อุณหภูมิภายในเตาหลอมอะลูมิเนียม (K)

T_{amb} คือ อุณหภูมิห้อง (K)

σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$

2.4.4 ความร้อนสูญเสียจากการป้อนวัตถุดิบ (Q_{feed})

$$Q_{\text{feed}} = m_{\text{air,entr}} \times C_p \times (T_{\text{furnace}} - T_{\text{amb}}) + [3.6 \times C_t \varepsilon_{\text{opening}} \sigma A_{\text{opening}} (T_{\text{furnace}}^4 - T_{\text{amb}}^4)] \quad (9)$$

เมื่อ Q_{feed} คือ ความร้อนสูญเสียจากการป้อนวัตถุดิบ (kJ/hr)

$m_{\text{air,entr}}$ คือ ปริมาณอากาศภายนอกที่เข้ามาในเตาหลอม คิดเทียบเท่ากับ ปริมาตรช่องว่างของเตาหลอม (m^3)

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ ($\text{kJ/Nm}^3\text{C}$)

C_t คือ ตัวคูณการปรับแก้ไขในส่วนของสัดส่วนเวลาในการเปิดปิด ของช่องเปิดในช่วง ป้อนวัตถุดิบ ซึ่งใช้ตัวคูณปรับแก้ 0.0375 เนื่องจากใช้เวลาเปิดประตูหน้าเตาเฉลี่ย 135 วินาที ใน 1 ชั่วโมง

$\varepsilon_{\text{opening}}$ คือ ค่า Effective emissivity ของช่องเปิด

A_{opening} คือ พื้นที่ช่องเปิด (m^2)

T_{furnace} คือ อุณหภูมิภายในเตาหลอมอะลูมิเนียม (K)

T_{amb} คือ อุณหภูมิห้อง (K)

σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$

2.4.5 ความร้อนสูญเสียอื่น ๆ (Q_{other})

ความร้อนสูญเสียอื่น ๆ เป็นพลังงานความร้อนสูญเสียที่ไม่สามารถหาค่าได้ เช่น ความร้อนสูญเสียจากอากาศภายนอก จึงจำเป็นต้องอาศัยหลักการอนุรักษ์พลังงาน เพื่อ หาสมดุลพลังงานของเตาหลอมอะลูมิเนียม ดังสมการ

$$Q_{\text{other}} = Q_{\text{fuel}} + Q_{\text{fuel,entrance}} - Q_{\text{flue}} - Q_{\text{surface,furnace}} - Q_{\text{opening}} - Q_{\text{feed}} \quad (10)$$

2.5 ความร้อนนำกลับมาใช้ใหม่

เตาหลอมนี้ มีชุด Recuperator สำหรับอุ่นอากาศก่อนจะถูกป้อนเข้าสู่หัว Burner โดยแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอเสียก่อนที่จะปล่อยไอเสียสู่บรรยากาศ เราสามารถคำนวณหาความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{\text{air,entrance}} = m_{\text{air}} \times C_p \times (T_{\text{air}} - T_{\text{amb}}) \quad (11)$$

เมื่อ $Q_{\text{air,entrance}}$ คือ ความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ (kJ/hr)
 m_{air} คือ ปริมาณอากาศที่ถูกป้อนเข้าสู่หัว Burner (Nm³/hr)
 C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่ถูกอุ่น (kJ/Nm³°C)
 T_{air} คือ อุณหภูมิอากาศที่ถูกอุ่น (°C)
 T_{amb} คือ อุณหภูมิห้อง (°C)

2.6 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหลอม

ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์ให้ความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน = อัตราส่วนของความร้อนยังผลต่อความร้อนที่ป้อน

$$\eta_{\text{th,furnace}} = \frac{Q_{\text{useful}}}{Q_{\text{input}}} \times 100\% \quad (12)$$

เมื่อ $\eta_{\text{th,furnace}}$ คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอม
 Q_{useful} คือ ปริมาณความร้อนยังผล (MJ/hr)
 Q_{input} คือ ปริมาณความร้อนป้อนเข้า (MJ/hr)

2.7 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน ทำให้ทราบถึงความเหมาะสมและความคุ้มค่าในการลงทุน ซึ่งการศึกษานี้จะทำการวิเคราะห์ด้วยดัชนีชี้วัดความคุ้มค่า ดังนี้

2.7.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value หรือ NPV)

หมายถึง ผลต่างของมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายหรือเงินลงทุนและจำนวนเงินที่จะประหยัดได้จากการปรับปรุงในแต่ละปี ตลอดอายุโครงการ สมการของ NPV แสดงดังนี้

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+k)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+k)^t} \quad (13)$$

โดยที่ NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value)
 B_t คือ จำนวนเงินที่จะประหยัดได้จากการปรับปรุงแต่ละปี
 C_t คือ ค่าใช้จ่าย หรือเงินลงทุน แต่ละปี
 n คือ อายุโครงการ 10 ปี
 k คือ อัตราส่วนลด (discount rate) ใช้ 12% ตามนโยบายบริษัท

2.7.2 อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return: IRR)

คือ อัตราผลตอบแทนที่ได้รับจากโครงการลงทุน หรือ หมายถึง อัตราดอกเบี้ยได้ก็ตามที่ใช้เป็นอัตราคิดลด ซึ่งมีผลทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่าเป็นศูนย์ สมการของ IRR แสดงดังนี้

$$IRR = \sum_{t=0}^n \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} = 0 \quad (14)$$

โดยที่ IRR คือ อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return)

B_t คือ จำนวนเงินที่จะประหยัดได้จากการปรับปรุงแต่ละปี

C_t คือ ค่าใช้จ่าย หรือเงินลงทุน แต่ละปี

r คือ อัตราดอกเบี้ย

n คือ อายุโครงการ 10 ปี

t คือ ปีที่ลงทุน ของโครงการ

3. วิธีการศึกษาและผลการศึกษา

3.1 วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

3.1.1 คำนวณหาสมมูลพลังงานปัจจุบัน โดยเริ่มจากสำรวจสภาพเตาหลอมในปัจจุบัน ได้แก่สภาพวัสดุทนความร้อนที่ด้านต่าง ๆ สภาพช่องประตูด้านหน้า ประตู Clear Slag และในระหว่างการผลิตจริง ทำการศึกษาขอบการทำงานของเตาหลอม ซึ่งประกอบด้วยช่วงเวลาหลอมและช่วงเวลาเท ทำการจดบันทึกอุณหภูมิต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิผนังเตาหลอมด้าน ต่าง ๆ รวมทั้งอุณหภูมิประตูเตาหน้า และอุณหภูมิประตู
- อุณหภูมิด้านการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิน้ำอะลูมิเนียม อุณหภูมิน้ำมันเตาก่อนเข้าหัวพันไฟ อุณหภูมิอากาศร้อนในเตาหลอม อุณหภูมิอากาศดีและอากาศเสียก่อนเข้าและออกจากชุด Recuperator และอุณหภูมิน้ำมันเตาก่อนเข้าหัวพันไฟ
- อัตราการไหลของน้ำมันเตา อัตราการไหลของอากาศดี นำค่าที่บันทึกได้ มาคำนวณสมมูลพลังงานความร้อนสูญเสีย ประสิทธิภาพของการหลอมในปัจจุบัน

3.1.2 คำนวณหาสมมูลพลังงานจากการเปลี่ยนวัสดุทนความร้อน โดยทำการศึกษาคู่มือโครงสร้างของเตาหลอมอะลูมิเนียม การออกแบบวัสดุทนความร้อนที่ใช้ในเตาหลอมบริเวณต่าง ๆ ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุทนความร้อนที่นำมาใช้ และนำมาคำนวณหาความร้อนสูญเสียที่ผนังเตาหลอมและช่องประตูที่ปรับปรุงได้จากการเปลี่ยนวัสดุทนความร้อนใหม่ นำมาคำนวณหาสมมูลพลังงานใหม่จากการปรับปรุง และคำนวณหาปริมาณน้ำมันเตาที่ลดลงจากการปรับปรุง

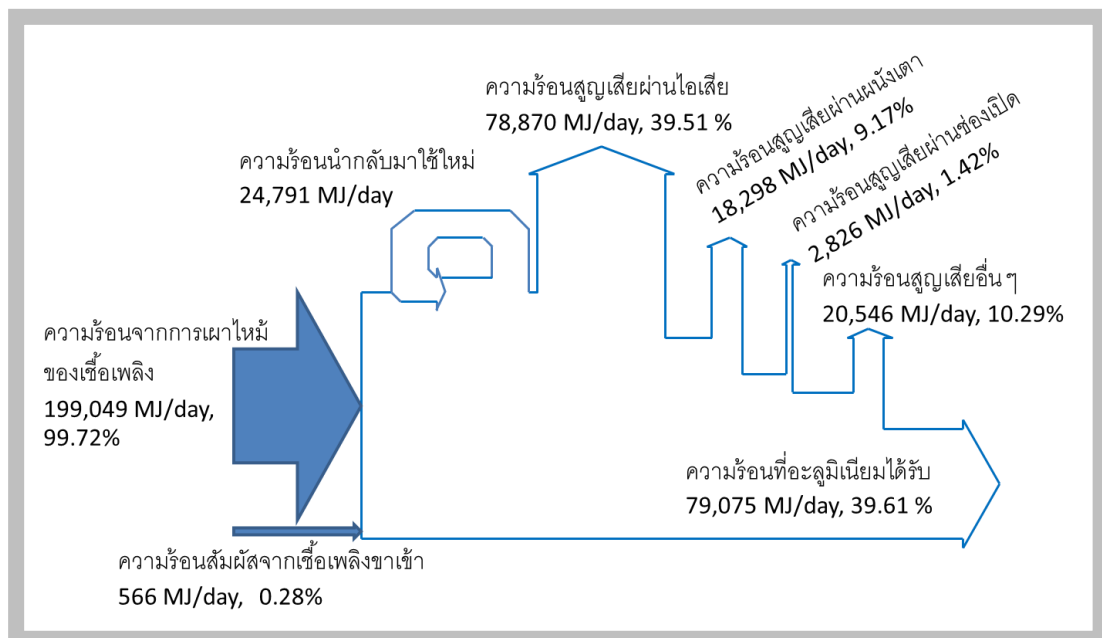
3.1.3 ความคุ้มค่าในการลงทุน ประเมินงบประมาณที่ใช้ในการเปลี่ยนวัสดุทนความร้อน และนำมาเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายน้ำมันเตาที่ลดลงจากการปรับปรุง นำมาวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน

3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในปัจจุบัน ก่อนการปรับปรุง

จากการตรวจวัดค่าที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริงและบันทึกอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของเตาหลอม สามารถคำนวณหาสมมูลพลังงาน ความร้อนสูญเสีย ประสิทธิภาพของการหลอมในปัจจุบัน (ก่อนปรับปรุง) ตามรายละเอียดในตารางที่ 2 และเขียนแผนกิโลอะแกรมได้ดังรูปที่ 3

ตารางที่ 2 สมดุลพลังงานรวมของการหลอมอะลูมิเนียมสำหรับเตา 1 และเตา 2 (ช่วงเวลาหลอมและช่วงเวลาเท)

ความร้อนขาเข้า	MJ/day	%	ความร้อนขาออก	MJ/day	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	199,049	99.72%	ความร้อนที่อะลูมิเนียมได้รับ	79,075	39.61%
ความร้อนสัมผัสจากเชื้อเพลิงขาเข้า	566	0.28%	ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	78,870	39.51%
-	-	-	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	18,298	9.17%
-	-	-	ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	2,826	1.42%
-	-	-	ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	20,546	10.29%
รวมความร้อนขาเข้า	199,615	100.0%	รวมความร้อนขาออก	199,615	100.0%



รูปที่ 3 แสงกีโคอะแกรม แสดงสมดุลพลังงานรวมของการหลอมอะลูมิเนียม สำหรับเตา 1 และเตา 2 ช่วงเวลาหลอมและช่วงเวลาเท ในปัจจุบัน ก่อนปรับปรุง

3.3 ผลการปรับปรุง

จากการเปลี่ยนวัสดุทนความร้อนของเตาหลอม ทำให้ค่า Thermal Resistance ของผนังเตาหลอมแต่ละด้านเปลี่ยนแปลงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่า Thermal Resistance ของผนังเตาหลอมก่อนและหลังเปลี่ยนวัสดุทนความร้อน

บริเวณ	พื้นที่ (sq.m.)	Thermal Resistance วัสดุทนความร้อน ($K \cdot m^2 / W$)		
		ก่อนปรับปรุง		หลังปรับปรุง
		เตา 1	เตา 2	เตา 1 และ เตา 2
พื้นเตา	18.43	0.217	0.223	1.174
ผนังเตาสัมผัสน้ำอะลูมิเนียม	11.21	0.266	0.249	1.174
ผนังเตาไม่สัมผัสน้ำอะลูมิเนียม	13.11	0.148	0.137	1.550
ผนังด้านหลังเตา	5.49	0.274	0.313	1.461
ผนังเตา ฐานหัวพันไฟ	2.03	0.121	0.082	0.60
หลังคาเตา	17.48	0.231	0.242	1.272
ประตูหน้าเตา	4.3	0.360	0.242	1.435
ประตู clear slag	1.3	0.245	0.176	0.835

อีกทั้งการปรับปรุงสามารถลดช่องเปิดจากพื้นที่รวม 0.047 m^2 เหลือ 0.033 m^2 หรือลดลง 29.8% ซึ่งคำนวณความร้อนสูญเสียใหม่ รวมถึง ความร้อนสูญเสียที่ลดลงได้ ในแต่ละช่วงเวลา ดังแสดงตามตารางที่ 4

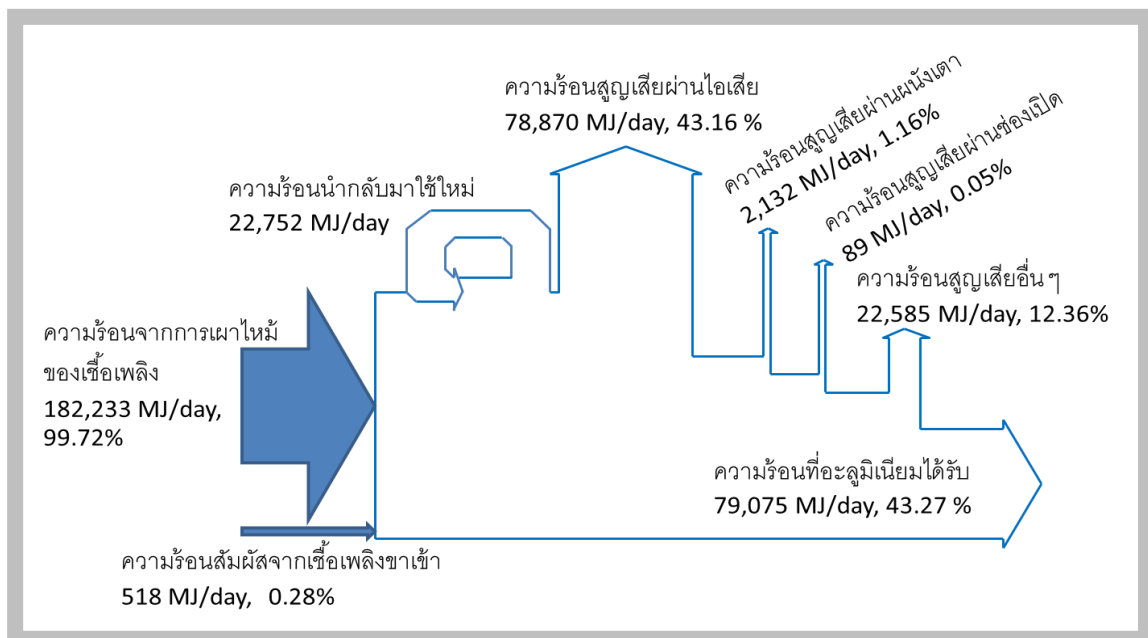
ตารางที่ 4 ความร้อนสูญเสียใหม่ จากการปรับปรุง และความร้อนสูญเสียที่ลดลงได้ สำหรับเตา 1 และเตา 2 (ช่วงเวลาหลอมและช่วงเวลาเท)

บริเวณ	ความร้อนสูญเสียก่อนปรับปรุง (MJ/day)	ความร้อนสูญเสียหลังปรับปรุงจากการคำนวณ (MJ/day)	ความร้อนสูญเสียที่ลดลงได้ (MJ/day)
ผนังเตาหลอม สำหรับเตา 1	8,790.1	1,066.0	7,724.1
ช่องเปิด สำหรับเตา 1	1,333.1	44.3	1,288.8
ผนังเตาหลอม สำหรับเตา 2	9,508.1	1,066.0	8,442.1
ช่องเปิด สำหรับเตา 2	1,492.4	44.3	1,448.1
	รวมความร้อนสูญเสียที่ลดลงได้ (MJ/day)		18,903.2

จากความร้อนสูญเสียที่ลดลงได้จากตารางที่ 4 จะได้สมมูลพลังงานรวมใหม่ ของการหลอมอะลูมิเนียม ดังแสดงในตารางที่ 5 และเขียนเชิงกิโลแอกรัม ได้ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 5 สมดุลพลังงานรวมใหม่ ของการหลอมอะลูมิเนียม สำหรับเตา 1 และเตา 2 (ช่วงเวลาหลอมและช่วงเวลาเท จากการปรับปรุง

ความร้อนขาเข้า	MJ/day	%	ความร้อนขาออก	MJ/day	%
ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	182,233	99.72%	ความร้อนที่อะลูมิเนียมได้รับ	79,075	43.27%
ความร้อนสัมผัสจากเชื้อเพลิงขาเข้า	518	0.28%	ความร้อนสูญเสียผ่านไอเสีย	78,870	43.16%
-	-	-	ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	2,132	1.16%
-	-	-	ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	89	0.05%
-	-	-	ความร้อนสูญเสียอื่น ๆ	22,585	12.36%
รวมความร้อนขาเข้า	182,751	100.0%	รวมความร้อนขาออก	182,751	100.0%



รูปที่ 4 แท่งกิโลแแกรม แสดงสมดุลพลังงานรวมใหม่ของการหลอมอะลูมิเนียม สำหรับเตา 1 และเตา 2 (ช่วงเวลาหลอมและช่วงเวลาเท) จากการปรับปรุง

3.4 ประสิทธิภาพของการหลอมอะลูมิเนียม

ประสิทธิภาพของการหลอมอะลูมิเนียมในปัจจุบัน และหลังจากการปรับปรุง โดยการเปลี่ยนวัสดุทนความร้อนของตัวเตา ดังแสดงตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงประสิทธิภาพของการหลอมอะลูมิเนียมในปัจจุบัน และจากการปรับปรุง

η	ปัจจุบัน	หลังปรับปรุง
ประสิทธิภาพรวม (%)	39.61%	43.27%

3.5 ความคุ้มค่าในการลงทุน

ความคุ้มค่าในการลงทุน ในเปลี่ยนวัสดุทนความร้อนใหม่ สามารถคำนวณได้จาก ค่าความร้อนสูญเสียที่ลดลงได้ 18,903.2 MJ/day นำไปคำนวณปริมาณน้ำมันเตาที่ลดลง โดยหารด้วยค่าความร้อนของน้ำมันเตา 39.77 MJ/liter

$$\text{ปริมาณน้ำมันเตาที่ลดลง} = \frac{18,903.2 \text{ MJ/day}}{39.77 \text{ MJ/litre}} = 475 \text{ liter/day}$$

ใน 1 เดือน มีการผลิต 15 วัน สามารถลดปริมาณน้ำมันเตาได้ 7,125 liter/month คิดเป็นจำนวนเงินเท่ากับ 167,437.5 บาท/เดือน หรือ เท่ากับ 2,009,250 บาท/ปี (Esso วันที่ 1 ตุลาคม 2556 น้ำมันเตา A ราคา 23.5 บาท/ลิตร ใช้ราคาน้ำมันเตา A คงที่ตลอดอายุโครงการ 10 ปี) และคิด NPV (discount rate 12%) และ IRR จากการลงทุน โดยใช้เงินลงทุนในการเปลี่ยนวัสดุทนความร้อน 6,630,000 บาท อายุโครงการ 10 ปี ได้ค่า NPV(i = 12%) = 4,216,706 บาท และ IRR 27.67%

4. สรุปผลการศึกษา

การหลอมอะลูมิเนียมในปัจจุบันมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ที่ 39.61% ซึ่งความร้อนสูญเสียส่วนใหญ่ สูญเสียไปกับไอเสียถึง 39.51% ขณะที่ความร้อนสูญเสียผ่านทางผนังเตาหลอม และช่องเปิด อยู่ที่ 9.17% และ 1.42% ตามลำดับ และยังมีความร้อนสูญเสียอื่นๆ อีก 10.29%

ในการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนวัสดุทนความร้อนของตัวเตาหลอม จะสามารถลดความร้อนสูญเสียลงได้ 18,903.2 MJ/day ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมเพิ่มขึ้นจาก 39.61% เป็น 43.27% (ปรับปรุงขึ้น 9.2%) ทำให้ค่าใช้จ่ายด้านการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงลดลง 85,500 ลิตร/ปี คิดเป็นเงิน 2,009,250 บาท/ปี

ในด้านการลงทุน อายุโครงการ 10 ปี ต้องใช้เงินลงทุน 6,630,000 บาท ซึ่งจากผลประโยชน์น้ำมันเชื้อเพลิง ได้ผลตอบแทนที่ดี คือ ระยะเวลาคืนทุน 3.3 ปี, NPV (i 12%) = 4,216,706 บาท และค่า IRR = 27.67% สมควรลงทุน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ รวมทั้งคณะอาจารย์หลักสูตรเทคโนโลยีและการจัดการพลังงานทุกท่าน ที่ให้โอกาสในการทำงานศึกษาฉบับนี้ รวมถึงให้ความรู้ คำแนะนำ ประสพการณ์ต่าง ๆ ที่มีคุณค่ายิ่ง ตั้งแต่เริ่มทำเค้าโครงเรื่อง จนกระทั่งจบสารนิพนธ์ฉบับนี้

บรรณานุกรม

- [1] “แนวทางปฏิบัติเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในภาคอุตสาหกรรมเอเชีย,” *เชื้อเพลิงและการเผาไหม้, เตาเผาและวัสดุทนความร้อน*, 2549.
- [2] จักราวุธ จรูญศรทูล, “การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็ก โดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ,” *วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2552.
- [3] พร้อมพันธ์ แสงแก้ว. “การศึกษาการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในเตาหลอมทองแดง,” *วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2547.
- [4] โสมิต พุกะทรัพย์. การปรับปรุงการใช้พลังงานสำหรับเตาหลอมอะลูมิเนียม ชนิดให้ความร้อนโดยอุปกรณ์หัวพันไฟ ในกระบวนการหลอมอะลูมิเนียมของโรงงานผลิตลวดอะลูมิเนียม. *วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิชา เทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2557.
- [5] YUNUS A. CENGEL. *Heat Transfer A Practical Approach*. 2nd Edition.
- [6] Subodh K. Das Secat Inc. *Improving Energy Efficiency in Aluminum Melting*. DE-FC07-01 ID14023, March 2007.