



การประเมินค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง

Economic Evaluation of Semi-Solid Die Casting Process

วรุณพร เชียรวิชัย¹, เจษฎา วรรณสินธุ์², รัญชนา สินชวาลัย¹ และ นภิสพร มีมงคล^{1*}

Waroonporn Chienwichai¹, Jessada Wannasin², Runchana Sinthavalai¹ and Napisphon Meemongkol^{1*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

² ภาควิชาวิศวกรรมหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* Correspondent author: napisphon.m@psu.ac.th

บทคัดย่อ

กระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์และลดต้นทุนการผลิตจากกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบของเหลว สำหรับงานวิจัยนี้ใช้กรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สขณะแข็งตัว ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงเปอร์เซ็นต์ของต้นทุนต่อหน่วยที่ลดลงเมื่อเปลี่ยนจากกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบของเหลวเป็นกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง ทำการประเมินต้นทุนโดยการสร้างแบบจำลองต้นทุนตามหลักการของแบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ โดยหลักการของแบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ ประกอบด้วย 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่ แบบจำลองกระบวนการ แบบจำลองดำเนินงาน และแบบจำลองต้นทุน และผลจากการวิจัยพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดลงของต้นทุนต่อหน่วยมี 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ รอบเวลาการผลิตต่อหน่วย อัตราการเกิดของเสีย และอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ เมื่อเปลี่ยนกระบวนการผลิตต้นทุนต่อหน่วยลดลงประมาณ 13.49%

Abstract

Semi-solid die casting process (SSDC) is a newly developed technology to improve the products quality to reduce the process cost of liquid die casting. In the research, we used a gas induced semi-solid process (GISS) to generate the semi-solid metal. The objective of this research is to show the reduction of product cost per unit when change the process from liquid die casting process to the semi-solid die casting process. The method of process-based costing model (PBCM) is applied to analyze costs of product. The principle of PBCM consists of three sub-models: process model, operation model and financial model. The result of this study is found that there are three main factors affected the reduction of cost per unit. Those factors include cycle time, rate of waste, and die life. The product cost was decreased by approximately 13.49% after change the process to semi-solid die casting process.

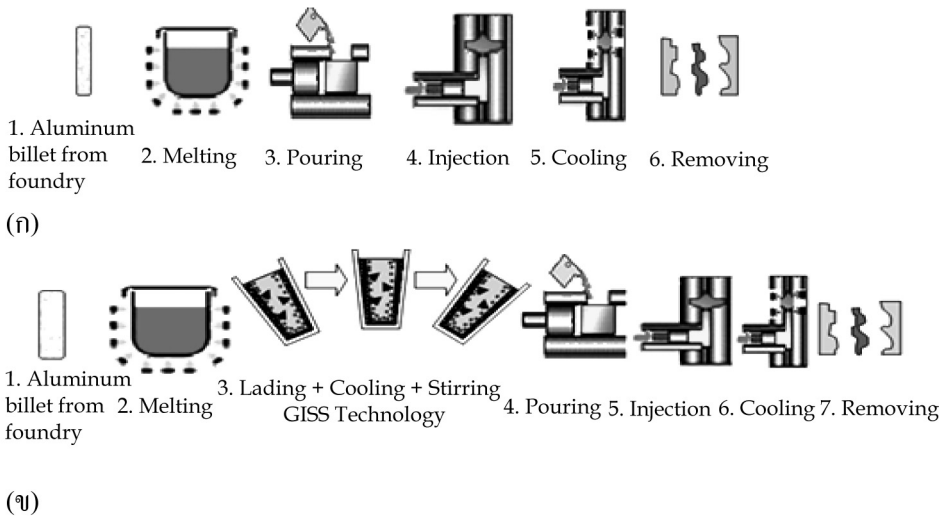
คำสำคัญ: โลหะเหลว โลหะกึ่งของแข็งของเหลว การหล่อฉีด แบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ

Keywords: Liquid metal, Semi-Solid metal, Die Casting, Process-Based Cost model

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการของชิ้นส่วนอุตสาหกรรมที่ผลิตจากกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง มีสูงมากจากการใช้ชิ้นส่วนหล่อฉีดอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาจึงสามารถลดน้ำหนักของรถและประหยัดการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงได้ (1) ด้วยภาวะการแข่งขันในอุตสาหกรรมหล่อฉีดโลหะมีเพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการแข่งขัน ระหว่างคู่แข่งภายในประเทศหรือแม้กระทั่งคู่แข่งจากต่างประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเปิดการค้าเสรีทำให้ผู้ประกอบการต้องแข่งขันกันลดต้นทุนการผลิตลง ในขณะที่เดียวกันก็ต้องเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์และประสิทธิภาพการผลิตให้สูงขึ้นด้วย (2) สมาชิกสมาคมอุตสาหกรรมยานยนต์

มองเห็นความสำคัญของกระบวนการหรือกรรมวิธีการผลิตใหม่ ๆ เพื่อใช้เพิ่มขีดความสามารถด้านการผลิตกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง จึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่ดีจึงดูความสนใจของผู้ผลิตชิ้นส่วนในปัจจุบันเป็นอย่างมากเพราะสามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้ (3) งานวิจัยนี้ใช้กรรมวิธีการปล่อยฟองแก๊สขณะแข็งตัว โดยกลไกของกระบวนการใช้หลักการดูระยะบายความร้อนเฉพาะจุดออกจากน้ำโลหะอย่างรวดเร็วเกิดขึ้นที่ผิวของแท่งกราไฟต์ในขณะที่แท่งกราไฟต์ถูกจุ่มอยู่ในน้ำโลหะ และในเวลาเดียวกันก็จะมีการปล่อยฟองแก๊สเฉื่อยให้ไหลผ่านแท่งกราไฟต์ในปริมาณที่น้อยมากเพื่อเป็นตัวกลางในการกวน (4) กรรมวิธีการหล่อฉีดโลหะของกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบของเหลวและแบบกึ่งของแข็ง แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. กระบวนการหล่อฉีดโลหะ (ก) แบบโลหะเหลว และ (ข) แบบโลหะกึ่งของแข็ง (2)

เนื่องจากกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งยังไม่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายมากนัก เพื่อนำเสนอให้กระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งเป็นที่รู้จักในอุตสาหกรรม จึงทำการประเมินมูลค่าของต้นทุนการผลิตเพื่อแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง (5) โดยงานวิจัยนี้จะยกตัวอย่างกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งโดยใช้กรรมวิธี GISS สำหรับผลิตโลหะ

กึ่งของแข็ง ในการประเมินค่าต้นทุนได้สร้างแบบจำลองต้นทุนภายใต้หลักการของแบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ วิเคราะห์ต้นทุนเปรียบเทียบระหว่าง 2 กระบวนการ คือ กระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบเดิม (โลหะเหลว) กับกรรมวิธีแบบใหม่ (โลหะกึ่งของแข็ง) ซึ่งจะแสดงให้เห็นปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อต้นทุนต่อหน่วยลดลงเมื่อมีการเปลี่ยนกระบวนการผลิต

2. กระบวนการหล่อฉีดโลหะ

กระบวนการหล่อฉีดโลหะเป็นการขึ้นรูปโลหะโดยนำโลหะมาหลอมเหลวเทหรือฉีดเข้าสู่แบบหล่อ (mould) หรือแม่พิมพ์ (die) เมื่อโลหะแข็งตัวก็จะได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างตามต้องการ ประกอบด้วย การนำโลหะลงในแบบที่ทำไว้เป็นรูปร่างต่างๆ แล้วปล่อยให้ น้ำโลหะแข็งตัว จากนั้นจึงเอาชิ้นงานมาตกแต่ง หรือนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน จึงจะได้ชิ้นงานสำเร็จที่จะนำไปใช้งานต่อไป (6) ชิ้นงานจะมีขนาดตั้งแต่ น้ำหนักน้อยไปจนถึงขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักมาก คุณสมบัติของชิ้นงานหล่อจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโลหะที่จะนำมาหล่อ ชนิดแบบหล่อ ขนาด รูปร่างของชิ้นงานหล่อ และอัตราการเย็นตัว

การคำนวณเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะแสดงดังสมการที่ 1 (สมมติให้ชิ้นงานมีการถ่ายเทความร้อนแบบการเย็นตัวจากรอบนอกเข้าสู่แกนกลางของชิ้นงาน (interface controlled) และค่าของตัวแปรต่างๆ เป็นค่าของอะลูมิเนียม เกรด ADC 12 ซึ่งใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ตัวอย่างในงานวิจัยนี้) (3)

$$T_f = \frac{\rho(H_f + C_p\Delta T)r}{H(T_m - T_0)} \tag{1}$$

- โดย T_f แทน เวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะ (วินาที)
 ρ แทน ความหนาแน่นของอะลูมิเนียม (2.823 g/cm³)
 H_f แทน ความร้อนแฝงในการแข็งตัว (389 J/g)
 C_p แทน ความร้อนจำเพาะ (0.963 J/g°C)
 ΔT แทน ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำโลหะเหนือจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิหลอมเหลว (150 °C)
 H แทน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (92 W/m²°C)
 T_m แทน อุณหภูมิหลอมเหลว (700 °C)
 T_0 แทน อุณหภูมิแม่พิมพ์ (250 °C)
 r แทน ความยาวครึ่งหนึ่งของความหนาของชิ้นงาน (ซม.)

ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการผลิตทั้งสองกระบวนการ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1. ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการหล่อฉีดโลหะทั้งสองกระบวนการ

แบบของเหลว	แบบกึ่งของแข็ง
1. เกิดการหดตัวของชิ้นงานจากการลดลงของอุณหภูมิ น้ำโลหะภายในแม่พิมพ์อย่างรวดเร็ว	1. โลหะกึ่งของแข็งมีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำโลหะ ผลต่างของอุณหภูมิแม่พิมพ์และโลหะกึ่งของแข็งมีน้อย ส่งผลให้เกิดการหดตัวของชิ้นงานลดลง
2. เกิดโพรงอากาศ จากการไหลของน้ำโลหะเข้าสู่แม่พิมพ์แบบปั่นป่วนเนื่องจากชิ้นงานหล่อมีความหนาไม่เท่ากัน	2. โลหะกึ่งของแข็งมีลักษณะคล้ายยางเหนียว การไหลจึงไม่เป็นแบบปั่นป่วนและไม่เกิดโพรงอากาศในชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของทั้งสองกระบวนการ การหล่อฉีดโลหะด้วยโลหะกึ่งของแข็งเป็นเทคนิคที่ช่วยลดปัญหาการหดตัวและโพรงอากาศภายในชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานหล่อมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการหล่อฉีดโลหะแบบธรรมดาและลดอัตราการเกิดของเสียลงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการผลิต

3. แบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ

แบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ (Process-Based Cost Model; PBCM) จะแสดงให้เห็นถึงปริมาณการใช้วัตถุดิบในแต่ละขั้นตอนและคำนวณต้นทุนของวัตถุดิบที่เกิดขึ้น แล้วนำค่าใช้จ่ายทั้งหมดมาเป็นผลรวมของกระบวนการ (7) PBCM จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการประเมินค่าทางเลือกกระบวนการผลิตที่แตก

ต่างกัน สร้างจากกระบวนการทำงานไปสู่ต้นทุนการผลิต (8) โดย PBCM จะเกี่ยวข้องกับ

(1) แบบจำลองกระบวนการ ผลกระทบของตัวแปรต้นทุนซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิต เช่น รอบเวลาการผลิต ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ เป็นต้น

(2) แบบจำลองดำเนินงาน เงื่อนไขการทำงานที่ส่งผลต่อปริมาณการใช้ของทรัพยากร เช่น จำนวนกิโลกรัมของวัตถุดิบ จำนวนชั่วโมงทำงาน และจำนวนเครื่องมือเครื่องจักร

(3) แบบจำลองทางการเงิน การเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตไปเป็นต้นทุนโดยดูจากความสัมพันธ์จากตัวแปรและลักษณะกระบวนการ ซึ่งตัดสินใจผ่านการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (9)

ข้อมูลป้อนเข้าของ PBCM แบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่ วัตถุดิบ กระบวนการผลิต การดำเนินงาน และการเงิน (10) การประเมินต้นทุนด้วยวิธี PBCM สามารถแบ่งประเภทของต้นทุนออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่

1) ต้นทุนทางตรง (direct cost) หมายถึง ต้นทุนของสิ่งที่นำมาใช้ในการผลิตสินค้าหรือบริการโดยตรง ประกอบด้วยต้นทุนต่างๆ ดังนี้

1.1 ต้นทุนวัตถุดิบทางตรง เป็นค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่ใช้ในการผลิตนำมาใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญโดยตรง

1.2 ต้นทุนแรงงานทางตรงเป็นค่าแรงงานที่จ่ายให้แก่คนงานที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการผลิตโดยตรง เช่น พนักงานทำงานควบคุมและดูแลเครื่องจักร เป็นต้น

2) ต้นทุนทางอ้อม (indirect costs) หมายถึง ต้นทุนส่วนอื่นๆ ที่มีความจำเป็นต่อการประกอบธุรกิจ ประกอบด้วยต้นทุนต่างๆ ดังนี้

2.1 ต้นทุนวัตถุดิบทางอ้อม เป็นค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบที่เกี่ยวข้องทางอ้อมกับการผลิต

2.2 ต้นทุนแรงงานทางอ้อมเป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากหน่วยงานสนับสนุน เช่น เงินเดือนผู้ควบคุมโรงงาน เงินเดือนพนักงาน ตลอดจนต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับคนงาน เช่น สวัสดิการต่างๆ เป็นต้น

2.3 ต้นทุนพลังงาน เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการใช้พลังงานเพื่อให้สิ่งใดสิ่งหนึ่งสามารถทำงานได้ เช่น แก๊สในโตรเจน แก๊สเชื้อเพลิง เป็นต้น

2.4 ค่าใช้จ่ายโรงงาน เป็นผลรวมของค่าใช้จ่าย ค่าวัสดุทางอ้อม และค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การดำเนินงานในกิจกรรมสนับสนุนที่ไม่สามารถจัดสรรได้ เช่น อุปกรณ์สิ้นเปลืองต่างๆ ในสำนักงาน

2.5 ค่าเสื่อมราคา เป็นค่าใช้จ่ายที่ตัดจากมูลค่าของสินทรัพย์ที่กิจการใช้ประโยชน์เพราะสินทรัพย์ประเภทอาคาร อุปกรณ์ เครื่องจักร ยานพาหนะ เป็นสินทรัพย์ที่มีไว้ใช้งานเป็นระยะเวลานานและมูลค่าสูง จึงประมาณประโยชน์จากสินทรัพย์เฉลี่ยเป็นค่าใช้จ่ายแต่ละงวด (11)

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตต่อปี สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2-4 และคำนวณต้นทุนต่อหน่วยได้จากผลหารของต้นทุนการผลิตต่อปีและปริมาณการผลิตต่อปีของผลิตภัณฑ์ (12) ดังสมการที่ 5

$$C_T = C_D + C_{IN} \quad (2)$$

$$C_D = (C_{DM} + C_{DL}) \times PV \quad (3)$$

$$C_{IN} = (C_{INM} + C_{INL} + C_E + C_{OH} + C_{DPT}) \times PV \quad (4)$$

$$U = \frac{C_T}{PV} \quad (5)$$

โดย C_T แทน ผลรวมของต้นทุนทั้งหมด (บาท/ปี)

C_D แทน ผลรวมของต้นทุนทางตรง (บาท/ปี)

C_{IN} แทน ผลรวมของต้นทุนทางอ้อม (บาท/ปี)

C_{DM} แทน ต้นทุนวัตถุดิบทางตรงต่อหน่วย (บาท/หน่วย)

C_{DL} แทน ต้นทุนแรงงานทางตรงต่อหน่วย (บาท/หน่วย)

C_{INM} แทน ต้นทุนวัตถุดิบทางอ้อมต่อหน่วย (บาท/หน่วย)

C_{INL} แทน ต้นทุนแรงงานทางอ้อมต่อหน่วย (บาท/หน่วย)

C_E แทน ต้นทุนพลังงานต่อหน่วย (บาท/หน่วย)

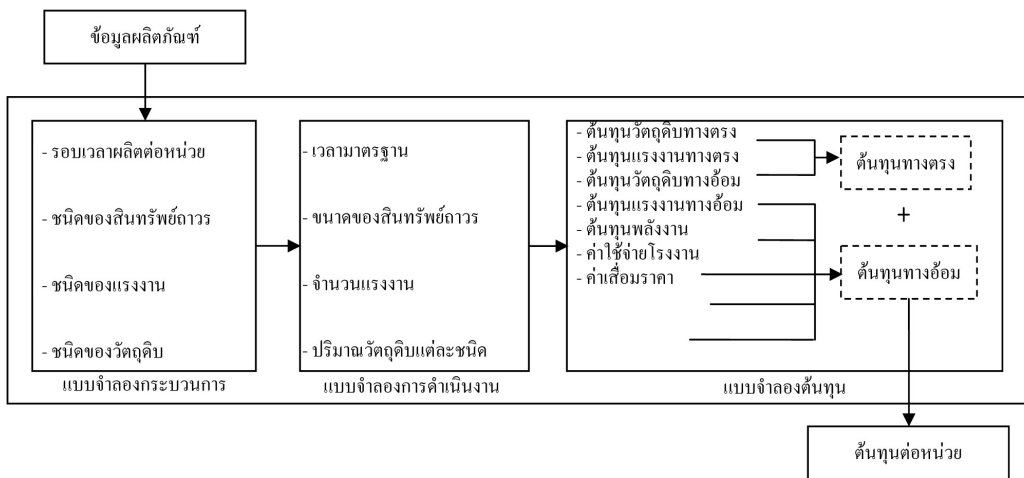
C_{OH} แทน ค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่จัดสรรไม่ได้ (บาท/หน่วย)

C_{DPT} แทน ค่าเสื่อมราคาของสินทรัพย์ถาวร (บาท/หน่วย)

PV แทน ปริมาณการผลิตผลิตภัณฑ์ (บาท/หน่วย)

U แทน ต้นทุนต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ (บาท/หน่วย)

จากต้นทุนทั้งหมด นำมาเขียนเป็นภาพรวมของ PBCM เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ต้นทุน แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2. โครงสร้างแบบจำลองตามกระบวนการของกระบวนการหล่อฉีดโลหะ

PBCM เป็นการวิเคราะห์ต้นทุนที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการย่อยก่อนทำการผลิตจริง เพื่อให้ทรัพยากรที่ถูกจัดสรรมีความสอดคล้องกับโครงสร้างของระบบเงินทุน การวิเคราะห์ต้นทุนจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นต่อการดำเนินงาน เนื่องจากข้อมูลต้นทุนจะนำมาใช้ในการกำหนดกลยุทธ์ การตั้งราคาขาย การวางแผนกำไร และการตัดสินใจของผู้บริหารเพื่อความเป็นเลิศของธุรกิจ ดังนั้น การวิเคราะห์ต้นทุนให้ถูกต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในสภาพการแข่งขันทางธุรกิจในปัจจุบัน (13)

4. การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เป็นกระบวนการประเมินความเหมาะสมของระบบเพื่อตรวจสอบแบบจำลองที่จะสร้างขึ้นให้เป็นที่ไปตามที่ต้องการ โดยการตั้งสมมติฐานทดสอบทางสถิติ ใช้การทดสอบแบบจับคู่ประชากร มีการแจกแจงแบบปกติ และไม่ทราบค่าแปรปรวนประชากร จึงใช้สถิติทดสอบ t ดังสมการที่ 6 (14)

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d / \sqrt{n}} \tag{6}$$

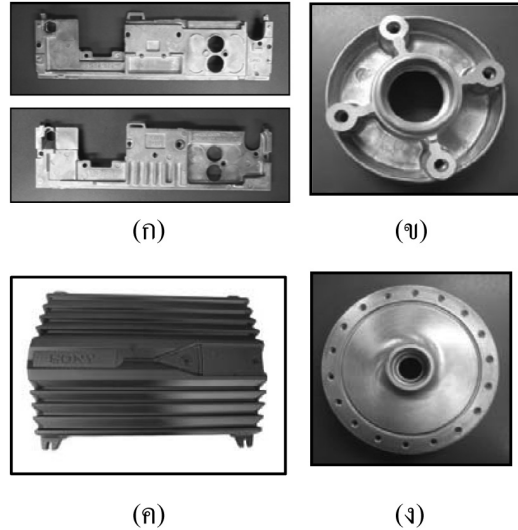
- โดย t แทน การแจกแจงแบบ t
- \bar{d} แทน ค่าเฉลี่ยของผลต่างต้นทุนต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ตัวอย่างระหว่างแบบจำลองและโรงงานกรณีศึกษา
- s_d แทน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- n แทน จำนวนผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง

หากค่าสถิติจากการวิเคราะห์ ห้อยู่ในเกณฑ์ยอมรับที่ระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด จะสามารถสรุปผลการทดสอบได้ว่าต้นทุนต่อหน่วยจากโรงงานกรณีศึกษาและแบบจำลองไม่แตกต่างกันสามารถใช้ทดแทนกันได้ (15)

5. กรณีศึกษา: การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ระหว่างกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบของเหลวและกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง

5.1) ข้อมูลและสมมติฐาน

กระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยกรรมวิธี GISS ได้ถูกพัฒนาและนำไปใช้กับงานหล่อฉีดอะลูมิเนียมผสมเกรดต่างๆ ในระดับห้องปฏิบัติการ จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าชิ้นงานจากการหล่อฉีดโลหะด้วยวิธีโลหะกึ่งของแข็งนั้นมีศักยภาพสูงกว่าชิ้นงานจากการหล่อฉีดที่ใช้งานอยู่ทั่วไป ต้นทุนก็เป็นองค์ประกอบหนึ่งสำหรับการตัดสินใจ งานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างสองกระบวนการ โดยใช้ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างของอุตสาหกรรมยานยนต์สี่ชนิด ดังรูปที่ 3 และข้อมูลทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ซึ่งผลิตด้วยกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบของเหลว ได้จากการเก็บข้อมูลของโรงงานกรณีศึกษา ดังตารางที่ 2



รูปที่ 3. ผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง

(ก) Heat sink 510 (ข) Flange final driven (ค) Heat sink (main) และ (ง) Hub front

ตารางที่ 2. ข้อมูลผลิตภัณฑ์ตัวอย่างของโรงงานกรณีศึกษา

รายละเอียด	ผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง			
	Heat sink 510	Flange final driven	Heat sink (Main)	Hub front
1. ขนาดผลิตภัณฑ์ กว้าง (มม.)	50	140	250	160
ยาว	160	140	300	160
สูง	35	70	70	60
2. น้ำหนักผลิตภัณฑ์ (กรัม)	120	538	843	944
3. อัตราของเสีย (%)	10	10	10	15
4. ขนาดเครื่องจักร (ตัน)	500	250	630	500
5. อัตราการฉีด (cavity/shot)	6	1	1	1
6. ปริมาณการผลิต(หน่วย/ปี)	500,000	20,000	80,000	25,000

การวิเคราะห์ต้นทุนผ่านแบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการต้องมีปัจจัยการผลิตและสมมติฐานทางการ

เงิน ดังตารางที่ 3 ใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าในแบบจำลองเพื่อให้การวิเคราะห์ต้นทุนเสร็จสมบูรณ์

ตารางที่ 3. ข้อมูลป้อนเข้าแบบจำลอง

ปัจจัยการผลิตและสมมติฐานทางการเงิน	
จำนวนวันที่ผลิตต่อปี	300 วัน/ปี
ชั่วโมงทำงานต่อวัน	24 ชม./วัน
จำนวนกะทำงานต่อวัน	3 กะ/วัน
จำนวนแรงงานทางตรง	2 คน/เครื่องจักร/กะ
จำนวนแรงงานทางอ้อม	2 คน/วัน
ราคาอะลูมิเนียม (ADC12)	80 บาท/กก.
อัตรากำลังแรงงานทางตรง	215 บาท/วัน
เวลาสูญเสีย	
เวลาพัก	1 ชม./วัน
เวลาสูญเสียอื่นๆ	2.6 ชม./วัน

5.2) ผลการทดลอง

จากการใช้PBCMในการคำนวณผลผลิตขั้นต้นต่อหน่วยทั้งสองกระบวนการของผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง โดยต้นทุนต่อหน่วย ประกอบด้วย ต้นทุนทางวัตถุดิบตรง ต้นทุนแรงงานทางตรง ต้นทุนวัตถุดิบทางอ้อม ต้นทุนพลังงาน ต้นทุนแรงงานทางอ้อม ค่าใช้จ่ายโรงงาน และค่าเสื่อมราคา แสดงดังตารางที่ 4 จากนั้นใช้จุดคุ้มทุนเพื่อหาระดับของยอดขายของกิจการที่ให้ค่าต้นทุนเท่ากันทั้งสองกระบวนการ นั่นคือ ปริมาณการผลิตที่ให้ค่าต้นทุนของกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบของเหลว และกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งเท่ากัน

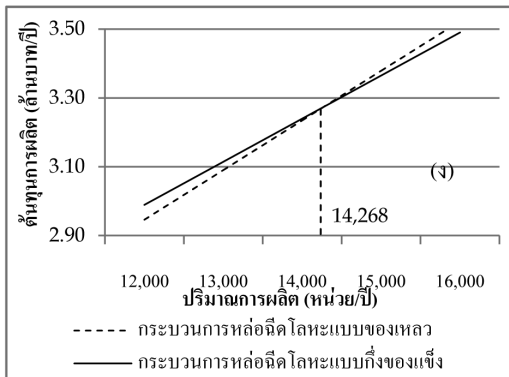
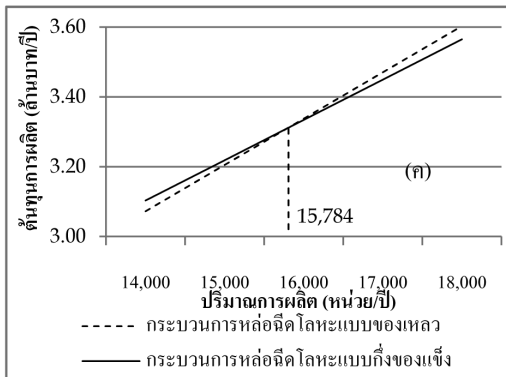
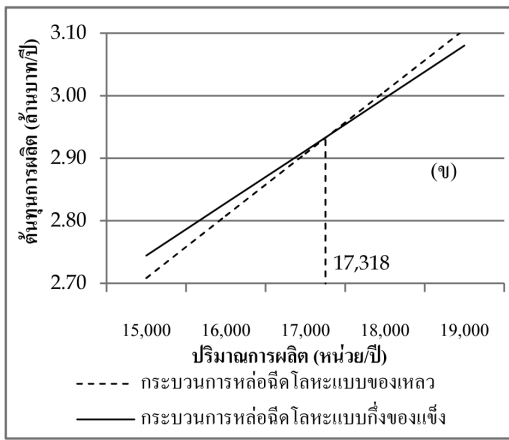
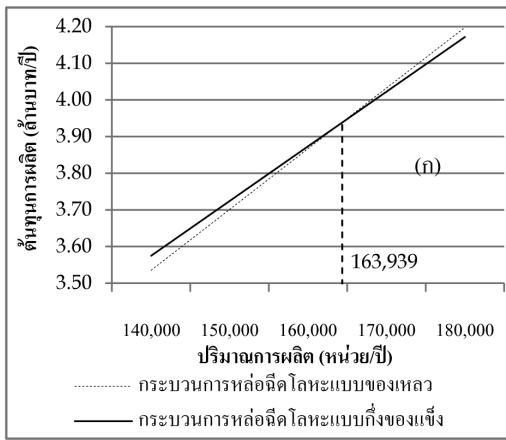
โดยต้นทุนคงที่เป็นจำนวนเงินที่ไม่ผันแปรตามปริมาณผลผลิต สำหรับกระบวนการหล่อฉีดโลหะ ประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคาของสิ่งก่อสร้าง เครื่องจักร อุปกรณ์ ต้นทุนแรงงานทางอ้อม ต้นทุนบำรุงรักษาเครื่องจักร แสดงดังตารางที่ 5 นอกจากนี้ สามารถแสดงกราฟจุดคุ้มทุนของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างทั้งสองชนิด ได้แก่ Heat sink 510, Flange final driven, Heat sink (main) และ Hub front เพื่อหาปริมาณการผลิตที่เหมาะสมในการตัดสินใจเลือกระหว่างกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบของเหลวและกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 4. ต้นทุนต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างจากการใช้แบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ (บาท/หน่วย)

ประเภทต้นทุน	Heat sink 510		Flange final driven		Heat sink (main)		Hub front	
	ของเหลว	กึ่งของแข็ง	ของเหลว	กึ่งของแข็ง	ของเหลว	กึ่งของแข็ง	ของเหลว	กึ่งของแข็ง
1. ต้นทุนวัตถุดิบทางตรง	11.83	11.29	53.03	50.62	83.09	79.31	97.27	90.92
2. ต้นทุนแรงงานทางตรง	0.30	0.20	3.48	2.32	3.47	2.32	3.10	2.17
3. ต้นทุนวัตถุดิบทางอ้อม	0.25	0.25	2.85	2.80	2.88	2.84	2.61	2.66
4. ต้นทุนพลังงาน	2.72	1.93	31.55	21.80	31.53	21.79	28.39	19.58
5. ต้นทุนแรงงานทางอ้อม	0.36	0.24	4.20	2.80	4.18	2.80	3.73	2.61
6. ค่าใช้จ่ายโรงงาน	1.55	1.39	9.51	8.03	12.51	10.91	13.51	11.79
7. ค่าเสื่อมราคา	0.42	0.34	4.83	3.94	4.81	3.94	4.30	3.68
ต้นทุนต่อหน่วย	17.42	15.64	109.42	92.25	142.45	123.84	152.92	133.25

ตารางที่ 5. ต้นทุนคงที่

รายละเอียด	จำนวนเงิน (บาท/ปี)	
	แบบของเหลว	แบบกึ่งของแข็ง
1. ค่าเสื่อมราคา	536,959	656,959
2. ต้นทุนแรงงานทางอ้อม	466,200	466,200
3. ต้นทุนบำรุงรักษาเครื่องจักร	212,439	362,439
รวม ต้นทุนคงที่	1,215,598	1,485,598



รูปที่ 4. กราฟแสดงจุดคุ้มทุนของผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง

(ก) Heat sink 510 (ข) Flange final driven (ค) Heat sink (main) และ (ง) Hub front

ตารางที่ 6 เป็นค่าจุดคุ้มทุนของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างแต่ละชนิดจากจุดตัดของกราฟในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงถึงปริมาณการผลิตที่ส่งผลให้มีมูลค่าต้นทุนเท่ากันทั้งสองกระบวนการผลิต โดยสามารถเลือกกระบวนการผลิตได้จากจุดคุ้มทุน เช่น ผลิตภัณฑ์ Hub front มีจุดคุ้มทุน 14,268 หน่วย/ปี มีปริมาณการผลิต 25,000 หน่วย/ปี ซึ่งมากกว่าจุดคุ้มทุน ดังนั้น ควรเลือกผลิตด้วย

กระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง และจากปริมาณการผลิตต่อปี ของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างทั้งสี่ชนิด (อ้างอิงข้อมูลตามตารางที่ 2) ทุกชนิดมากกว่าจุดคุ้มทุน ดังนั้น ทุกผลิตภัณฑ์ควรเปลี่ยนเป็นกระบวนการผลิตเป็นกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง ปริมาณการผลิตที่คุ้มทุนของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างแต่ละชนิด

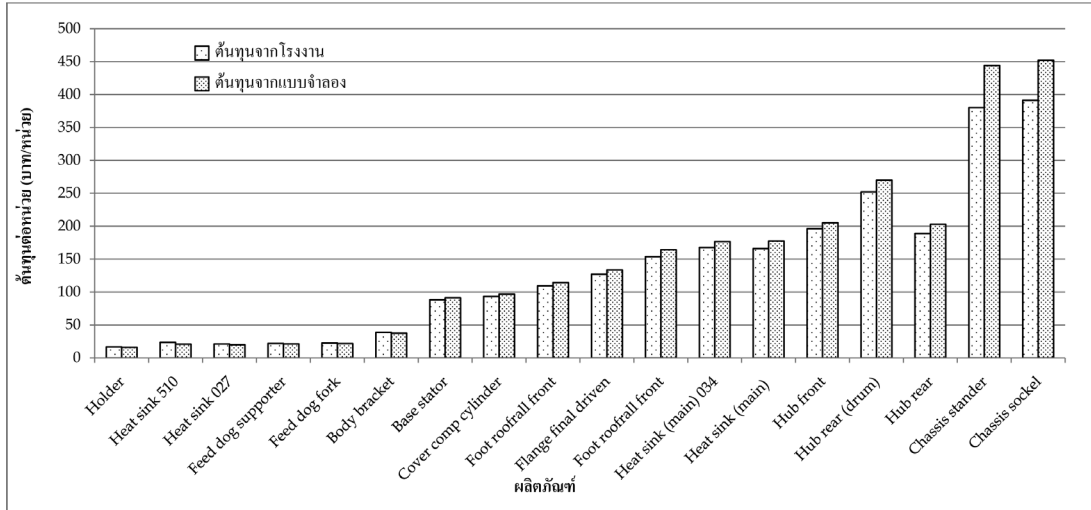
ตารางที่ 6. จุดคูกุ่มทุนของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างแต่ละชนิด

ผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง	ปริมาณการผลิต(หน่วย/ปี)	จุดคูกุ่มทุน (หน่วย/ปี)
Heat sink 510	500,000	163,939
Flange final driven	20,000	17,318
Heat sink (main)	80,000	15,784
Hub front	25,000	14,268

5.3) ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองเป็นการตรวจสอบผลจากการออกแบบแบบจำลองว่าเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ตอนเริ่มต้นหรือไม่ โดยทำการเก็บข้อมูลต้นทุนต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจากโรงงานกรณีศึกษามาเปรียบเทียบกับต้นทุนต่อหน่วยที่ได้จากแบบจำลองและด้วยข้อจำกัดบางประการของโรงงานกรณีศึกษาจึงสามารถเก็บข้อมูลต้นทุนต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ได้จำนวน 18 ผลิตภัณฑ์ พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ (1) ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการฉีดหนึ่งครั้งได้ผลิตภัณฑ์หนึ่งชิ้น (1 cavity/shot) จำนวน 12 ผลิตภัณฑ์ ต้นทุนต่อหน่วยที่ได้จากแบบจำลองมากกว่าต้นทุนต่อหน่วยที่ได้จากโรงงานกรณีศึกษา ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 5 ซม. มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 4% และผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 ซม. มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากกว่า 4% เนื่องจากรอบเวลาที่ใช้ในการผลิตขึ้นอยู่กับความหนาของผลิตภัณฑ์ หากผลิตภัณฑ์มีความหนาในรอบเวลาการผลิตก็จะเพิ่มมากขึ้น การควบคุมตัวแปรต่างในระหว่างการหล่อฉีดโลหะทำได้ยากขึ้น

จึงส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น และทำการทดสอบทางสถิติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ 0.01 เขตปฏิเสธสมมติฐาน H_0 คือ $-t > -t_{1-\alpha; n-1}$ พบว่า ผลการทดสอบอยู่ในช่วงยอมรับ H_0 ดังนั้น ต้นทุนต่อหน่วยจากโรงงานกรณีศึกษาและแบบจำลอง (1 cavity/shot) ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (2) ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการฉีดหนึ่งครั้งได้ผลิตภัณฑ์มากกว่าหนึ่งชิ้น (มากกว่า 1 cavity/shot) จำนวน 6 ผลิตภัณฑ์ ต้นทุนต่อหน่วยที่ได้จากแบบจำลองน้อยกว่าต้นทุนต่อหน่วยที่ได้จากโรงงานกรณีศึกษา มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 3% ถึง 8% เนื่องจากในแบบจำลองเป็นการรับข้อมูลปริมาณการผลิต แล้วหารด้วยจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อการฉีดหนึ่งครั้ง เพื่อหาจำนวนครั้งในการฉีดต่อปี จึงส่งผลให้ต้นทุนจากแบบจำลองน้อยกว่าต้นทุนจากโรงงานกรณีศึกษา ดังนั้น หากจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ได้ต่อการฉีดหนึ่งครั้งมีจำนวนมากขึ้น เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนก็จะเพิ่มมากขึ้น และทำการทดสอบทางสถิติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ 0.01 เขตปฏิเสธ สมมติฐาน H_0 คือ $-t > -t_{1-\alpha; n-1}$ พบว่า ผลการทดสอบอยู่ในช่วงยอมรับ H_0 ดังนั้น ต้นทุนต่อหน่วยที่ได้จากโรงงานกรณีศึกษาและแบบจำลอง (มากกว่า 1 cavity/shot) ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01



รูปที่ 5. เปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยระหว่างต้นทุนจากโรงงานกรณีศึกษาและต้นทุนจากแบบจำลอง

จากการทดสอบความน่าเชื่อถือทางสถิติของแบบจำลองจากผลิตภัณฑ์ตัวอย่างทั้ง 18 ชนิด พบว่าผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยของโรงงานกรณีศึกษาและแบบจำลองไม่แตกต่างกันทั้งสองกลุ่มสามารถใช้ทดแทนกันได้ โดยมีความน่าเชื่อถือที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

5.4) อภิปรายผล

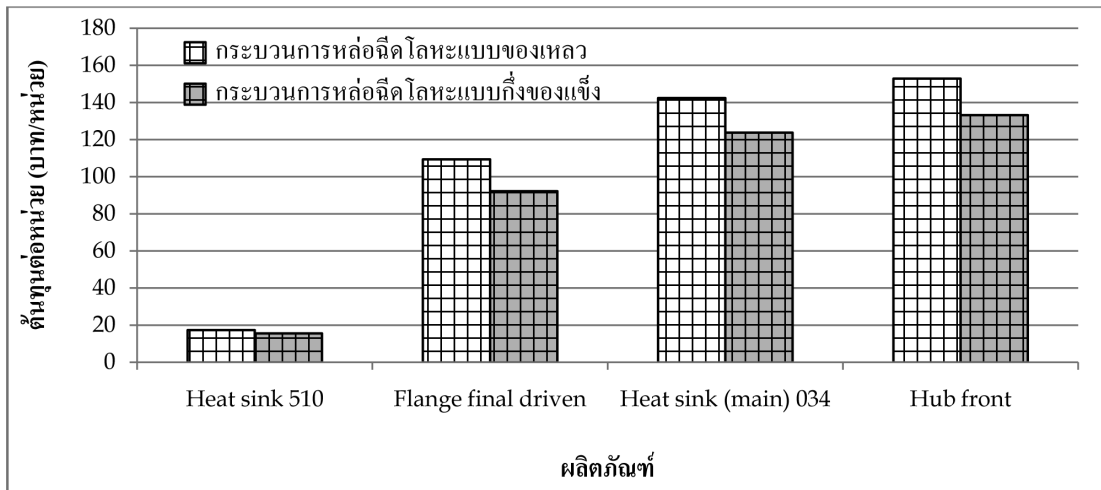
จากการศึกษางานวิจัยนี้พบว่าในกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง มี 3 ปัจจัยที่ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลง นั่นคือ (1) รอบเวลาการผลิตต่อหน่วยลดลง เนื่องจากน้ำโลหะเริ่มมีการแข็งตัวเป็นบางส่วนขณะเทเข้าแม่พิมพ์ การปรับอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้กลับสู่อุณหภูมิปกติสำหรับฉีดครั้งต่อไปจึงไม่มีความจำเป็นมากนักเนื่องจากกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งต้องการการหล่อฉีดที่อุณหภูมิแม่พิมพ์สูง เพื่อป้องกันการเย็นตัวของชิ้นงานสมบูรณ์ก่อนที่โลหะกึ่งของแข็งไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์ และด้วยสาเหตุนี้จึงส่งผลให้ระยะเวลาในการแข็งตัวของน้ำโลหะลดลง โดยการลดลงของรอบเวลาการผลิตต่อหน่วย ประกอบด้วย การลดลงของเวลาเท เวลาการแข็งตัวของน้ำโลหะ เวลาในการสเปรย์น้ำยาหล่อลื่นและระบายความร้อน (2) อัตราการเกิดของเสียลดลง เนื่องจากขณะเทโลหะกึ่งของแข็งการไหลเป็น

แบบราบเรียบ (Laminar flow) ทำให้ไม่เกิดโพรงอากาศและโลหะที่มีการแข็งตัวบางส่วนขณะไหลเต็มเข้าในแม่พิมพ์ ผลต่างการหดตัวที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งจะน้อยกว่ากระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบของเหลว จึงส่งผลให้การเกิดโพรงหดตัวจะลดลง (3) อายุการใช้งานของแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากโลหะกึ่งของแข็งหล่อฉีดที่อุณหภูมิสูงกว่าโลหะเหลวทั่วไปเพื่อป้องกันการเย็นตัวอย่างสมบูรณ์ของโลหะกึ่งของแข็งก่อนไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์ เพราะฉะนั้นไม่มีความจำเป็นต้องทำการปรับอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจึงสามารถยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ได้ยาวนานขึ้น ทั้งนี้ ความเร็วในการฉีดต่ำกว่าเพราะขณะอัดฉีดโลหะจะมีลักษณะคล้ายยางเหนียว มีความยืดหยุ่น การสึกกร่อนของอุปกรณ์จึงน้อยกว่า การยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์จึงเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตได้อีกทางหนึ่ง

จากทั้ง 3 ปัจจัยนี้ ส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ต้นทุนต่อหน่วยโดยรวมจากกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งจึงต่ำกว่าต้นทุนต่อหน่วยจากกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบของเหลว รายละเอียดดังตารางที่ 7 และในรูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ต้นทุนต่อหน่วยของทั้งสองกระบวนการของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างผ่านการใช้งานแบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการ

ตารางที่ 7. เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบของเหลวและแบบกึ่งของแข็ง

ผลิตภัณฑ์	ต้นทุน (บาท/หน่วย)		ความแตกต่าง	
	แบบของเหลว	แบบกึ่งของแข็ง	(บาท)	(%)
Heat sink 510	17.42	15.64	1.78	10.22
Flange final driven	109.42	92.25	17.17	15.69
Heat sink (main)	142.45	123.84	18.61	13.06
Hub front	152.92	133.25	19.67	12.86



รูปที่ 6. แผนภูมิเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยระหว่างสองกระบวนการ

ต้นทุนต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ Flange final driven ลดลงมากที่สุด คือ 15.69% เนื่องจากมีปริมาณการผลิตต่อปีน้อย การคิดต้นทุนโซ่หุ้ยในแบบจำลองคิดจากการประเมินเปอร์เซ็นต์ของต้นทุนทั้งหมด ซึ่งในกระบวนการผลิตจริงอาจจะมีข้อผิดพลาด จึงส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อน ผลิตภัณฑ์ Heat sink (main) และ Hub front ต้นทุนต่อหน่วยลดลงใกล้เคียงกัน เนื่องจากผลิตภัณฑ์ Heat sink (main) มีความหนามากที่สุด เมื่อเปลี่ยนกระบวนการผลิตรอบเวลาการผลิตต่อหน่วยก็จะลดลง และส่งผลต่อต้นทุนต่อหน่วยชัดเจนที่สุด และผลิตภัณฑ์ Hub front มีการใส่สลักลูกปืน (bearing) ไว้เป็นแกนกลางของผลิตภัณฑ์ตามการใช้งาน จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงต้นทุนส่วนนี้ได้ ส่วนผลิตภัณฑ์ Heat sink 510 ในการผลิตผลิตภัณฑ์การฉีดหนึ่งครั้งได้ผลิตภัณฑ์มากกว่าหนึ่งชิ้นการควบคุมปัจจัยการเกิดต้นทุนจึงทำได้

ยากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ฉีดหนึ่งครั้งได้ผลิตภัณฑ์หนึ่งชิ้น เมื่อเปลี่ยนจากกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบของเหลวเป็นกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งส่งผลให้ต้นทุนต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างโดยรวมเฉลี่ยลดลง 12.96% และจากการศึกษาที่ผ่านมาขนาดของผลิตภัณฑ์ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ อัตราการเกิดของเสีย และอื่นๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น จะส่งผลต่อต้นทุนต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์แล้ว ขนาดของเครื่องจักรก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับต้นทุนต่อหน่วย ดังนั้น จึงสร้างกราฟมาตรฐานให้สามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ได้อย่างกว้างขวาง เพื่อให้ทราบเปอร์เซ็นต์ของต้นทุนต่อหน่วยที่ลดลงจากขนาดของเครื่องจักร โดยจะเห็นว่าเครื่องจักรขนาดใหญ่สามารถลดต้นทุนต่อหน่วยได้มากกว่าต้นทุนขนาดเล็ก เนื่องจากเครื่องจักรขนาดใหญ่มีการใช้ทรัพยากรในการผลิต

โดยทั่วไปแล้วการตั้งราคาขายใช้ต้นทุนเป็น ตัวชี้วัด ผู้ผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมยานยนต์ก็จะได้ รับผลกำไรจากการดำเนินงานอยู่แล้ว ดังนั้น หากเปลี่ยนมา เป็นกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งก็จะทำให้ ผู้ผลิตชิ้นส่วนอุตสาหกรรมยานยนต์สามารถเพิ่มผลกำไร ได้มากขึ้น จากต้นทุนต่อหน่วยที่ลดลงและผลกำไรที่เพิ่ม มากขึ้นเมื่อราคาขายเท่าเดิม

6. สรุปผลการวิจัย

กระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง นอกจากเพิ่มคุณภาพและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานหล่อ ยังสามารถช่วยผู้ประกอบการลดต้นทุนในการผลิตได้ ซึ่งมาจาก 3 ปัจจัย คือ (1) รอบเวลาการผลิตต่อหน่วย ลดลง ส่งผลต่อต้นทุนแรงงานทางตรง ต้นทุนน้ำยาพ่น แม่พิมพ์ ต้นทุนน้ำผสมน้ำยาพ่นแม่พิมพ์ ต้นทุนน้ำมัน ไฮดรอลิก ต้นทุนบำรุงรักษา ต้นทุนไฟฟ้า และต้นทุน แก๊สเชื้อเพลิง เนื่องจากระยะเวลาดำเนินการผลิตเท่ากัน กระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็งให้ผลผลิต มากกว่าแบบของเหลว (2) อัตราการเกิดของเสียลดลง ส่งผลต่อต้นทุนวัตถุดิบทางตรง ต้นทุนฟลักซ์ และ ต้นทุนน้ำประปา เนื่องจากโลหะกึ่งของแข็งมีการแข็งตัว บางส่วน สามารถควบคุมการไหลของน้ำโลหะเข้าสู่ แม่พิมพ์ได้ดีกว่าโลหะเหลวและไม่เกิดการไหลแบบปั่น ป่วน ส่งผลให้เกิดโพรงอากาศและโพรงหดตัวของชิ้น งานลดน้อยลง (3) อายุการใช้งานของแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น ส่งผล ต่อค่าเสื่อมราคา เนื่องจากโลหะกึ่งของแข็งต้องการ อุณหภูมิในแม่พิมพ์สูงกว่าการหล่อฉีดแบบธรรมดา จึง สามารถช่วยลดการสึกกร่อนของแม่พิมพ์ในการหล่อ ฉีดแต่ละครั้งได้ นอกจากนี้ การใช้แบบจำลองต้นทุน ตามกระบวนการสามารถช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเข้าใจในกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อการ เกิดต้นทุน ทำให้เกิดการตัดสินใจอย่างมีประสิทธิภาพ ในการเลือกเทคโนโลยีที่เป็นปัจจัยสำคัญในการลดต้นทุน แบบจำลองต้นทุนตามกระบวนการที่ใช้ในการวิจัยนี้จึงมี ความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งที่จะตอบคำถามกระบวนการ ทางเลือก และจากการผลลัพธ์แบบจำลองต้นทุนเมื่อ

เปลี่ยนจากกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบของเหลว เป็นกระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง ต้นทุน ต่อหน่วยลดลงเฉลี่ย 13.49% และจากการวิเคราะห์จุด คุ่มทุนพบว่าปริมาณการผลิตต่อปีของผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง ทั้งสี่ชนิดมากกว่าจุดคุ้มทุน ดังนั้น ควรตัดสินใจเลือก กระบวนการหล่อฉีดโลหะแบบกึ่งของแข็ง เนื่องจากให้ มูลค่าต้นทุนต่อหน่วยต่ำกว่ากระบวนการหล่อฉีดโลหะ แบบของเหลว และเป็นกระบวนการหล่อฉีดโลหะที่มี ประสิทธิภาพมากกว่ากระบวนการหล่อฉีดทั่วไปรวมทั้ง สามารถลดต้นทุนต่างๆ ของกระบวนการผลิตได้อีกด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณโครงการมหาวิทยาลัย วิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- (1) Burapa R, Janudom S, Chucheep T, Canyook R, Wannasin J. Effects of primary phase morphology on mechanical properties of Al-Si-Mg-Fe alloy in semi-solid slurry casting process. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2010;20: s857-61.
- (2) Wannasin J, Janudom S, Rattanochaikul T, Canyook R, Burapa R, Chucheep T, Thanabumrunikul S. Research and development of gas induced semi-solid process for industrial applications. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2010;20: s1010-5.
- (3) Wannasin J, Thanabumrunikul S. Development of a semi-solid metal processing technique for aluminium casting applications. Songklanakarin J. Sci. Technol. 2010;30: 215-20.
- (4) Wannasin J, Martinez RA, Flemings MC. A Novel Technique to Produce Metal Slurries for Semi-Solid Metal Processing. Solid State

- Phenomena. 2006;116-117: 366-9.
- (5) Bai Y, Zhao H. Tensile properties and fracture behavior of partial squeeze added slow shot die-cast A356 aluminum alloy. *Materials & Design*. 2010;31: 4237-43.
- (6) Flemings MC. *Solidification Processing*. New York: McGraw-Hill Inc. 1974.
- (7) Johnson MD, Kirchain RE. Quantifying the effects of product family decisions on material selection: A process-based costing approach. *International Journal of Production Economics*. 2009;120: 653-68.
- (8) Fuchs ERH, Field FR, Roth R, and Kirchain RE. Strategic materials selection in the automobile body: Economic opportunities for polymer composite design. *Composites Science and Technology*. 2008;68: 1989-2002.
- (9) Johnson M, Kirchain R. Quantifying the effects of parts consolidation and development costs on material selection decisions: A process-based costing approach. *International Journal of Production Economics*. 2009;119: 174-86.
- (10) Johnson MD. *A Methodology for Determining Engineering Costs Their Effects on the development of Product Families*. Massachusetts Institute of Technology. 2004.
- (11) Gregory J, Atlee J, Kirchain R. A Process-Based Model of End-of-Life Electronics Recycling Driving Eco-Efficiency-Informed Decisions. in *Electronics and the Environment. Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on*, 2006: 138-43.
- (12) Fuchs ERH, Bruce EJ, Ram RJ, Kirchain RE. Process-Based Cost Modeling of Photonics Manufacture: The Cost Competitiveness of Monolithic Integration of a 1550-nm DFB Laser and an Electroabsorptive Modulator on an InP Platform. *J. Lightwave Technol*. 2006;24: 3175.
- (13) Field F, Kirchain R, Roth R. Process cost modeling: Strategic engineering and economic evaluation of materials technologies. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 2007;59: 21-32.
- (14) Carlsson BT. Selecting material for the exterior panel of a private car back door by adopting a total cost accounting approach. *Materials & Design*. 2009;30: 826-32.
- (15) MortezaNia S, Othman F. Cost analysis of pipes for application in sewage systems. *Materials & Design*. 2012;33: 356-61.