

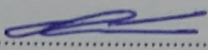
การประเมินเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของคาร์บอนฟุตพริ้นท์แม่พิมพ์ลายดอกยาง
แบบพลาสติกชิ้นใหญ่ และพลาสติกชิ้นเล็ก

มนสิศ กุลมาตย์

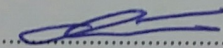
งานนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
สิงหาคม 2561
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

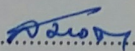
คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์และคณะกรรมการสอบงานนิพนธ์ ได้พิจารณา
งานนิพนธ์ของ มนคิด กุลมาดย์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม
ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

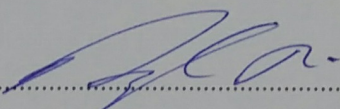
คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์

.....  อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาวิณี ศักดิ์สุนทรศิริ)


คณะกรรมการสอบงานนิพนธ์

.....  ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาวิณี ศักดิ์สุนทรศิริ)

.....  กรรมการ
(ดร. สมเจต สุภรังสรรค์)

.....  กรรมการ
(ดร. ภาณุวัฒน์ ดำนกลาง)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับงานนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ของ
มหาวิทยาลัยบูรพา

.....  คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ ๕ เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2561

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษางานนิพนธ์นี้ประสบผลสำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำ และข้อมูลจากบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจจะกล่าวได้ทั้งหมด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวิณี ศักดิ์สุนทรศิริ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นที่ปรึกษางานนิพนธ์ ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางการดำเนินงาน และสละเวลาช่วยแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ส่งผลให้งานนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.สมเจต สุภรังสรรค์ และ ดร.ภาณุวัฒน์ ด้านกลาง คณะกรรมการสอบปากเปล่างานนิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการคัดกรอง และแก้ไขงานนิพนธ์ ทำให้งานนิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณวสุรี จิตติวร ผู้ให้คำแนะนำเรื่องเอกสารต่างๆ และการประสานงาน ทำให้การดำเนินเรื่องเอกสารในการทำงานนิพนธ์ผ่านไปได้อย่างสะดวกรวดเร็ว และถูกต้อง และขอขอบคุณเพื่อนๆ ผู้ร่วมเรียนหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม ที่ได้แลกเปลี่ยนความรู้ในการทำงานนิพนธ์

คุณประ โยชน์จากงานนิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บุพการี บุรพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้ทั้งคำแนะนำ และกำลังใจ ทำให้ผู้วิจัยได้ศึกษาหาความรู้มากขึ้น และประสบความสำเร็จมาจนทุกวันนี้

จึงขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

มนสิศ กุลมาตย์

56920953: สาขาวิชา: การจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม; วศ.ม. (การจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม)

คำสำคัญ: การประเมินวัฏจักรชีวิต/ คาร์บอนฟุตพริ้นท์/ แก๊สเรือนกระจก/ แม่พิมพ์/ แม่พิมพ์ยาง/ พลาสติกเตอร์

มนสิศ กุลมาตย์: การประเมินเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของคาร์บอนฟุตพริ้นท์แม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกเตอร์ชิ้นใหญ่ และพลาสติกเตอร์ชิ้นเล็ก (COMPARATIVE ASSESSMENT OF CFP IN TIRE SCULPTURE MOLD: SECTOR TYPE AND ELEMENT TYPE) คณะกรรมการควบคุมงานนิพนธ์: ภาวิณี สักดิ์สุนทรศิริ, Ph.D., 52 หน้า. ปี พ.ศ. 2560.

แม่พิมพ์ยาง เป็นผลิตภัณฑ์ต้นน้ำในการผลิตยาง ซึ่งในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของยางแต่ละเส้น มักไม่นำแม่พิมพ์ยางมาใช้ในการคำนวณ และการเติบโตด้านการขนส่งที่เพิ่มขึ้นตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ทำให้มีการผลิตแม่พิมพ์ยางเพิ่มมากขึ้น ผู้ผลิตยางมักสั่งซื้อแม่พิมพ์ยางโดยใช้ความเคยชินจากการสั่งซื้อในอดีต และไม่ได้พิจารณาถึงคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ซึ่งเป็นปัจจัยด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้จึงประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP) ของแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุด ของแม่พิมพ์ 2 ชนิด ที่สามารถผลิตยางรูปแบบเดียวกัน ได้แก่ แบบพลาสติกเตอร์ชิ้นใหญ่ (sector) และแบบพลาสติกเตอร์ชิ้นเล็ก (element) โดยใช้วิธีวิเคราะห์ระบบพลังงาน (TES) ISO 13602-1 เพื่อศึกษากระบวนการผลิตแม่พิมพ์ ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ จนถึงการขายผลิตภัณฑ์ หรือแบบ B2B ดำเนินการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (LCA) ตาม ISO 14044 และประเมิน CFP ด้วย ISO/DIS 14067.2 การเก็บข้อมูลใช้การเก็บข้อมูลแบบผสมทั้งการเก็บข้อมูลทางตรง (PCA) และการใช้ข้อมูลอ้างอิง (IOA) แบ่งข้อมูลการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก (GHG) เป็นข้อมูลการปลดปล่อยจากวัตถุดิบ พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิต การขนส่ง และเครื่องจักรอุปกรณ์ ผลการประเมินพบว่า CFP ของแม่พิมพ์แบบ sector เป็น 3,851 kgCO₂e และแบบ element เป็น 6,115 kgCO₂e โดยปัจจัยหลักที่ทำให้แบบ element มี CFP มากกว่า คือวัตถุดิบอลูมิเนียม ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปเป็นปัจจัยหนึ่งในการสั่งซื้อแม่พิมพ์ของผู้ผลิตยาง รวมถึงการปรับปรุงกระบวนการเพื่อลด CFP ได้

56920953: MAJOR: ENERGY AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT: M.Eng.
KEYWORD: LIFE CYCLE ANALYSIS/ CARBON FOOTPRINT/ GREENHOUSE GAS/
MOLD/ TIRE MOLD/ PLASTER
MONSIT GULAMART: COMPARATIVE ASSESSMENT OF CFP IN TIRE
SCULPTURE MOLD: SECTOR TYPE AND ELEMENT TYPE. ADVISORY COMMITTEE:
PAWINEE SUKSUNTORN SIRI, Ph.D., 52 P. 2017.

Tire mold is a product used in upstream process of tire manufacturing but all carbon footprint of tire did not taken into account the greenhouse gas emission from mold manufacturing. The growth in transportation sector causes the increase in tire mold demand. The tire manufacturers usually buy the mold based on their experiences and do not consider the CFP which is the energy and environment impact. This study is to analyze and compare the CFP of 2 types of plaster mold which can be used to manufacture the same tire; sector and element type. The study follows Technical Energy System in ISO13602-1 to create the manufacturing flow of tire mold since the raw material supply process until the mold is ready to sell (B2B). Life Cycle Analysis in ISO 14044 and Carbon Footprint in ISO/DIS 14067.2 are used to collect data with the mixed method of Process Chain Analysis and Input-Output Analysis. The data input for GHG emission calculation is categorized as the emission from raw material, electrical energy in manufacturing process, transportation and machine and equipment (capital input). The result shows that CFP of sector-type mold is 3,851 kgCO₂e and element-type is 6,115 kgCO₂e. The major source of higher GHG content in the element-type is the high GHG embodied in the aluminum, its major input materials. The result is beneficial for the tire manufacturer to select the mold type and can be also used to improve the process to reduce the CFP.

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญภาพ..... | ญ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 3 |
| สมมุติฐานของการวิจัย..... | 3 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย..... | 3 |
| ขอบเขตของการวิจัย..... | 4 |
| วิชาในหลักสูตรที่นำความรู้มาใช้ในการศึกษาหัวข้อนี้..... | 4 |
| 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| วิธีการวิเคราะห์ระบบทางพลังงาน..... | 5 |
| การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์..... | 6 |
| แก๊สเรือนกระจก..... | 7 |
| การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์..... | 9 |
| กระบวนการผลิตยางรถยนต์..... | 11 |
| แม่พิมพ์ยาง..... | 13 |
| กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ส่วนลายดอกยาง..... | 14 |
| กรณีศึกษาจากวรรณกรรม..... | 16 |
| 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน..... | 19 |
| การกำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขต และผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา..... | 21 |
| การกำหนด Functional unit..... | 21 |
| การตั้งสมมุติฐาน..... | 21 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| การกำหนดวิธีการในการวิเคราะห์..... | 21 |
| กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ส่วนลายดอกยางแบบพลาสติก..... | 22 |
| แผนผังกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ยางส่วนลายดอกยาง..... | 27 |
| การเก็บรวบรวมข้อมูล..... | 30 |
| การเปรียบเทียบคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของ 2 ผลิตภัณฑ์..... | 37 |
| 4 ผลการศึกษา..... | 38 |
| ปริมาณการปล่อย GHG จากการได้มาซึ่งวัตถุดิบ..... | 38 |
| ปริมาณการปล่อย GHG จากการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิต..... | 42 |
| ปริมาณการปล่อย GHG จากการขนส่ง..... | 42 |
| ปริมาณการปล่อย GHG จากการใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์..... | 43 |
| คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์..... | 43 |
| 5 บทสรุป..... | 45 |
| ข้อเสนอแนะ..... | 47 |
| บรรณานุกรม..... | 49 |
| ประวัติย่อของผู้วิจัย..... | 52 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 2-1 | ค่า GWP จากรายงานครั้งที่ 5 ของ IPCC (AR5)..... 8 |
| 2-2 | ข้อมูลการปลดปล่อย CO ₂ ตามชนิดวัสดุ..... 17 |
| 2-3 | ข้อมูล Carbon footprint แยกตามวัสดุ..... 18 |
| 3-1 | ปริมาณและราคาวัตถุดิบ..... 33 |
| 3-2 | ข้อมูลกำลังไฟฟ้าเครื่องจักรและเวลาผลิต..... 34 |
| 3-3 | ข้อมูลการขนส่งวัตถุดิบ..... 34 |
| 3-4 | Emission factor (EF) ของแต่ละวัตถุดิบตามแหล่งอ้างอิง..... 35 |
| 3-5 | ข้อมูลเครื่องจักรและอุปกรณ์..... 36 |
| 4-1 | ปริมาณการปลดปล่อย GHG แยกตามชนิดวัตถุดิบของแม่พิมพ์ 2 ชนิด ในการผลิต แม่พิมพ์ 1 ชุด..... 41 |
| 4-2 | ปริมาณการปลดปล่อย GHG จากการใช้ไฟฟ้าด้วยเครื่องจักรแยกตามกระบวนการ ผลิตในการผลิตแม่พิมพ์ 1 ชุด..... 42 |
| 4-3 | คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์แม่พิมพ์ลายดอกยาง 2 ชนิด (kgCO ₂ e)..... 43 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 1-1 | แม่พิมพ์ส่วนลายดอกยาง..... | 3 |
| 2-1 | เส้นทางการไหลเข้าออกของระบบทางพลังงาน..... | 5 |
| 2-2 | LCA framework..... | 6 |
| 2-3 | กระบวนการผลิตยางรถยนต์..... | 11 |
| 2-4 | ภายในแม่พิมพ์ขณะอบยาง..... | 12 |
| 2-5 | แม่พิมพ์ยาง..... | 13 |
| 2-6 | มีดกัดประเภทต่าง ๆ..... | 14 |
| 2-7 | กระบวนการกัด..... | 15 |
| 2-8 | การหล่อในแบบหล่อถาวรที่ความดันต่ำ..... | 16 |
| 3-1 | ขั้นตอนการดำเนินงาน..... | 20 |
| 3-2 | ชิ้นงานในแต่ละกระบวนการ..... | 22 |
| 3-3 | แผ่นเหล็กแม่พิมพ์สำหรับร่องดอกยาง..... | 23 |
| 3-4 | แม่พิมพ์ต้นแบบจากโพลียูรีเทน..... | 24 |
| 3-5 | แม่พิมพ์ต้นแบบหลังประกอบกับแผ่นเหล็ก..... | 24 |
| 3-6 | ชิ้นงานซิลิโคนหล่อจากแม่พิมพ์ต้นแบบ..... | 25 |
| 3-7 | ชิ้นงานพลาสติกหลังถอดซิลิโคนออก..... | 26 |
| 3-8 | การเติมก๊าซไนโตรเจน เพื่อไล่ฟองอากาศไฮโดรเจน..... | 26 |
| 3-9 | ชิ้นงานแม่พิมพ์ออลูมิเนียม..... | 27 |
| 3-10 | กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ส่วนลายดอกยาง..... | 29 |
| 3-11 | CO ₂ ที่ปลดปล่อยตลอดวัฏจักร (B2B) ของการผลิตแม่พิมพ์ลายดอกยาง..... | 31 |
| 4-1 | กราฟเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อย GHG แยกตามชนิดวัตถุดิบ..... | 41 |
| 4-2 | กราฟเปรียบเทียบคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของแม่พิมพ์ลายดอกยาง 2 ชนิด..... | 44 |
| 5-1 | การเปรียบเทียบ CFP จาก 2 วิธีการ ของแม่พิมพ์พลาสติกชั้นใหญ่..... | 46 |
| 5-2 | การเปรียบเทียบ CFP จาก 2 วิธีการ ของแม่พิมพ์พลาสติกชั้นเล็ก..... | 46 |

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

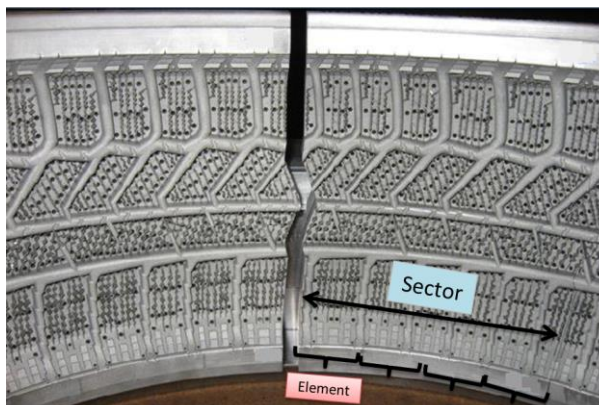
ในยุคปัจจุบันที่มีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจเพิ่มมากขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค ส่งผลต่อการขยายตัวของระบบขนส่ง และความต้องการการใช้นานพาหนะ ได้แก่ รถยนต์ส่วนบุคคลทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ รถโดยสาร รถบรรทุก รวมไปถึงรถไฟ และเครื่องบิน ซึ่งในปี 2560 มีการเพิ่มขึ้นของการผลิตรถยนต์และพาหนะสำหรับขนส่งทั่วโลก 2.36% จากปี 2559 หรือมากกว่า 97 ล้านคัน (Organization Internationale des Constructeurs d'Automobiles, 2014) รถแต่ละคัน ล้วนมีการผลิตที่ซับซ้อนต่างกัน ขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งาน และบริษัทผู้ผลิต ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนมากมาย รวมไปถึงยางรถ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ขาดไม่ได้ จากสถิติดังกล่าว หากพิจารณาว่ารถแต่ละคัน ประกอบด้วยยางรถ 5 เส้น รวมยางอะไหล่ปี 2560 จะมีการผลิตยางรถสำหรับรถยนต์ใหม่มากกว่า 485 ล้านเส้น ยังไม่รวมการผลิตยางทดแทนสำหรับเปลี่ยนในรถยนต์ที่มีอยู่แล้ว

การผลิตยางรถยนต์แต่ละเส้น มีกระบวนการที่ซับซ้อนเช่นกัน ต้องใช้ส่วนผสมที่หลากหลาย ในปริมาณต่าง ๆ กันตามคุณสมบัติที่ต้องการของยางแต่ละรุ่น กระบวนการผลิตหลักประกอบด้วย กระบวนการผสมเนื้อยาง กระบวนการผลิตส่วนประกอบชิ้นต่าง ๆ ของยาง กระบวนการสร้างยางก้อนอบ (การนำส่วนประกอบย่อยต่าง ๆ มาประกอบกันเป็นโครงสร้างล้อ) กระบวนการอบยาง และกระบวนการตรวจสอบคุณภาพ กระบวนการอบยาง เป็นกระบวนการสำคัญกระบวนการหนึ่ง ซึ่งทำใหยางก้อนอบ เปลี่ยนรูปเป็นยางรถสำหรับนำไปขาย การควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และเวลาอบยาง เป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการนี้ แต่ชิ้นส่วนหนึ่งที่ขาดไม่ได้คือแม่พิมพ์ยาง ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดรูปร่างยางสุดท้ายตามต้องการ

ด้วยการแข่งขันที่สูงขึ้นในธุรกิจยานยนต์ ทุกบริษัทมุ่งเน้นในการคิดค้นนวัตกรรมใหม่ ๆ และนำออกสู่ตลาดให้เร็วที่สุด เพื่อการเป็นผู้นำในตลาด และสร้างผลกำไรให้กับบริษัท นวัตกรรมใหม่ของยานยนต์ นำไปสู่นวัตกรรมของยางรถเช่นกัน เพราะประสิทธิภาพหลายอย่างของรถยนต์ เช่น การเบรก การยึดเกาะถนน การลดแรงกระแทกของห้องผู้โดยสาร หรือการประหยัดพลังงาน เป็นผลมาจากคุณสมบัติของยาง การนำยางรุ่นใหม่ออกสู่ตลาดเร็วขึ้น ซึ่งอาจส่งผลไม่ชัดเจนต่อปริมาณการผลิตยาง เพราะปริมาณการผลิตยางขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย แต่ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการผลิตแม่พิมพ์ยาง เพราะการออกแบบยางรุ่นใหม่ทุกรุ่น จำเป็นต้องผลิตแม่พิมพ์ยางใหม่

กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ยาง เป็นกระบวนการต้นน้ำของการผลิตยาง ประกอบด้วยวัสดุหลายประเภท ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่ต้องการแต่ละชิ้นส่วนของแม่พิมพ์ และความซับซ้อนของลายดอกยาง ชิ้นงานที่ไม่ซับซ้อนส่วนใหญ่ทำมาจากเหล็ก ส่วนชิ้นงานที่ซับซ้อนกว่า คือ ลายดอกยางไม่สามารถขึ้นรูปโดยตรงด้วยการกัด หรือการกลึงได้ จึงใช้การหล่อขึ้นรูปแทน ลายดอกยางที่มีความซับซ้อนมาก ส่งผลให้ต้องมีการสร้างแม่พิมพ์ของแม่พิมพ์หลายขั้นตอน ซึ่งหมายถึงต้องใช้วัตถุดิบ และพลังงานในการผลิตมากขึ้น พลังงานที่ใช้ในกระบวนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ ตั้งแต่การขุดเจาะ การผลิต และการขนส่ง รวมทั้งพลังงานที่ใช้กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ยาง ต้องใช้การเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งหากเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล จะก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจก และเป็นต้นเหตุของสภาวะโลกร้อน เกิดเป็นอุบัติเหตุต่าง ๆ ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ และมนุษย์ การลดผลกระทบของสภาวะโลกร้อน จึงทำได้โดยการลดการใช้พลังงาน หรือใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งข้อมูลที่สำคัญต้องมีอันดับแรก คือ ปริมาณการใช้พลังงานและการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกของแต่ละกระบวนการ

รูปแบบของการผลิตแม่พิมพ์ยางมีหลายรูปแบบ ถึงแม้ความซับซ้อนของยางเท่ากัน ก็อาจมีการเลือกรูปแบบแม่พิมพ์ยางต่างกัน เนื่องจากความรู้ ความชำนาญ และประสบการณ์ของบริษัทลูกค้าผู้ผลิตยางในแต่ละประเทศ เช่น แม่พิมพ์ชนิดหล่อเป็นพลาสติกชิ้นใหญ่ชิ้นเดียว (sector) ซึ่งจะนำมาประกอบต่อกันประมาณ 8-12 ชิ้นเป็นวงเพื่อใช้ในการอบยาง 1 เส้น และชนิดหล่อเป็นพลาสติกชิ้นเล็ก (element) นำมาเรียงต่อกันประมาณ 60-80 ชิ้นเป็นวง ดังภาพที่ 1-1 ซึ่งทั้งสองชนิดเมื่อประกอบเป็นวงแล้วจะมีลักษณะเหมือนกัน และผลิตยางที่มีรูปร่างเหมือนกันได้ หากผู้ผลิตแม่พิมพ์ยาง สามารถให้ข้อมูลของพลังงานที่ใช้ในการผลิตและการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกของแม่พิมพ์แต่ละรูปแบบ อาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ในการตัดสินใจเลือกรูปแบบแม่พิมพ์ยางของบริษัทผู้ผลิตยางได้



ภาพที่ 1-1 แม่พิมพ์ส่วนลายดอกยาง (Deshors Moulage Industrie, 2015)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อประเมินความแตกต่างคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ยาง ส่วนลายดอกยาง 2 รูปแบบ ซึ่งสามารถใช้ผลิตยางที่มีความซับซ้อนเท่ากัน คือ แม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกเทอร์ซันใหญ่ (sector) และแบบพลาสติกเทอร์ซันเล็ก (element)

สมมติฐานของการวิจัย

1. แม่พิมพ์ยางที่ใช้ในการศึกษา คือ แม่พิมพ์ใหม่สำหรับยางใช้ในฤดูหนาวที่มีหิมะตก ซึ่งสามารถผลิตได้ด้วยวิธีการผลิตแบบพลาสติกเทอร์ซันใหญ่ และซันเล็ก
2. ไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้มาจากโรงผลิตไฟฟ้าจากแก๊สธรรมชาติแบบพลังงานความร้อนร่วม
3. ของเสียจากการผลิต จะถูกนำไปกำจัดโดยบริษัทกำจัดขยะอุตสาหกรรม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทราบถึงข้อมูลเปรียบเทียบการใช้พลังงานและปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกในกระบวนการของแม่พิมพ์ยาง 2 แบบ ซึ่งใช้ผลิตยางรุ่นเดียวกัน
2. ทราบแนวทางในการปรับปรุงเพื่อลดการใช้พลังงานและการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก
3. สามารถนำข้อมูลของกระบวนการย่อย และชิ้นงานบางชิ้น ไปใช้ศึกษาการใช้พลังงานและการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์อื่นในโรงงาน

4. สามารถนำข้อมูลปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกต่อผลิตภัณฑ์ย่อยในแต่ละกระบวนการผลิต ไปใช้ในขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อประเมินการใช้พลังงาน และการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกสำหรับโครงการยั่งยืนใหม่ ๆ

ขอบเขตของการวิจัย

1. ประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ยาง เปรียบเทียบการผลิตแม่พิมพ์ส่วนลายดอกยาง 2 รูปแบบ คือ แม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกชิ้นใหญ่ (sector) และแบบพลาสติกชิ้นเล็ก (element)
2. ประเมินตั้งแต่ขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ จนเสร็จกระบวนการผลิตพร้อมส่งมอบให้กับลูกค้าผู้ผลิตยาง
3. ประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการขนส่งเฉพาะภายในประเทศ

วิชาในหลักสูตรที่นำความรู้มาใช้ในการศึกษาหัวข้อนี้

1. Full Energy Chains Analysis and Life Cycle Analysis
2. Energy, the Environment and Global Warming

บทที่ 2

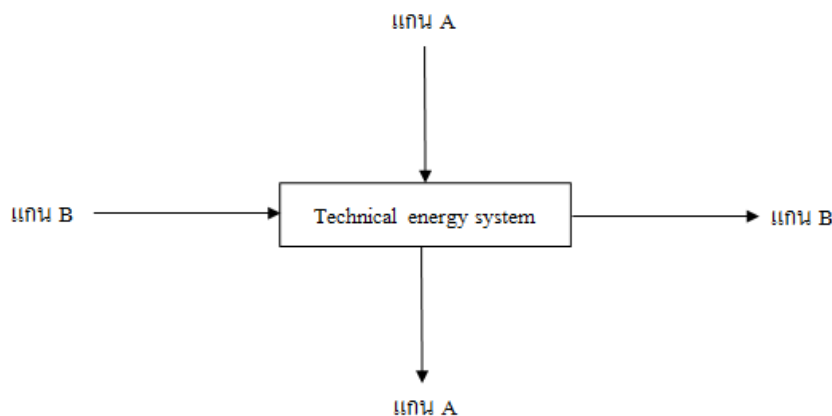
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการวิเคราะห์ระบบทางพลังงาน (Technical energy system: TES)

ISO 13602-1:(2002) อธิบายถึงวิธีการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบระบบพลังงานจากสิ่งที่ป้อนเข้า ผลผลิตที่ได้ และปัจจัยเสี่ยง แบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์สิ่งที่ป้อนเข้าและผลผลิต แบ่งเส้นทางการไหลเข้าออกเป็น 2 ประเภท ดังภาพที่ 2-1 คือ

1. แกนตั้ง หรือแกน A สิ่งที่ป้อนเข้าทางด้านบนสู่ระบบ คือวัสดุหรือบริการที่ใช้สำหรับการสร้างระบบทางพลังงานนั้น เช่น วัตถุดิบในการก่อสร้าง แรงงาน หรือพื้นที่ที่ใช้ เป็นต้น ผลผลิตที่ได้ คือ สิ่งที่เหลือจากการใช้งานสิ่งที่ป้อนเข้า เช่น ของเสียหรือวัสดุจากการก่อสร้าง จะเขียนออกมาทางด้านล่างของระบบ

2. แกนนอน หรือแกน B สิ่งที่ป้อนเข้าทางด้านซ้าย คือสิ่งที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ เช่น วัตถุดิบ แรงงาน ข้อมูล รวมไปถึงทรัพยากรพลังงาน ผลผลิตที่ได้ คือ ผลิตภัณฑ์หลัก ผลิตภัณฑ์รอง (By product) และของเสีย



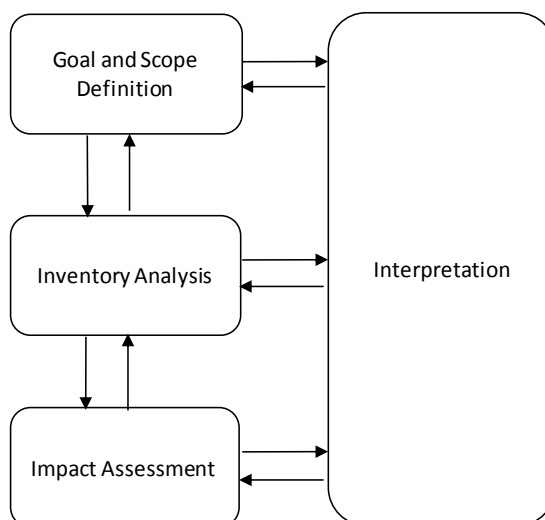
ภาพที่ 2-1 เส้นทางการไหลเข้าออกของระบบทางพลังงาน (International Organization for Standardization [ISO] 13602-1, 2002)

หน่วยการทำงาน (Functional unit) จะถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการคิดปริมาณของสิ่งที่ป้อนเข้าสู่ระบบและสิ่งที่ออกจากระบบ และใช้ในการเปรียบเทียบระบบ 2 ระบบขึ้นไป

การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life cycle assessment: LCA)

จาก ISO 14044:2006 การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life cycle assessment หรือ LCA) สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ในเชิงสิ่งแวดล้อม สื่อสารกับผู้มีส่วนได้เสียในองค์กร เลือกตัวชี้วัดทางสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม และประโยชน์ในเชิงการตลาด LCA ใช้วิเคราะห์มุมมองเชิงสิ่งแวดล้อม และผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การผลิต การใช้งาน จนถึงการกำจัดซาก (Cradle-To-Grave)

ขั้นตอนของ LCA แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 LCA framework (ISO14044, 2006)

1. กำหนดเป้าหมายและขอบเขต ซึ่งจะแตกต่างกันตามหัวข้อที่ศึกษา การนำไปใช้ ระบุกลุ่มเป้าหมายของการสื่อสารผล LCA ระบุถึงการนำข้อมูลไปใช้เปรียบเทียบกัน หรือการเผยแพร่ข้อมูลต่อสาธารณะ การกำหนดหน่วยฟังก์ชัน (Functional unit)

2. การวิเคราะห์ inventory (Life cycle inventory analysis: LCI) เป็นการขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลของสิ่งที่ไหลเข้าและออกของกระบวนการที่ศึกษา ด้วยการวาดแผนผังกระบวนการและความเกี่ยวข้องระหว่างกัน พร้อมคำอธิบายรายละเอียดของแต่ละกระบวนการ อธิบายถึงวิธีที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล และการคำนวณ

3. การประเมินผลกระทบ (Life cycle impact assessment: LCIA) หาข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อทำการประเมินผลข้อมูลที่ได้มาในขั้นตอน LCI ทั้งในเชิงปริมาณและความสำคัญ

4. การแปลผล คือ การสรุปผลจากขั้นตอนที่ผ่านมา เสนอแนวทาง และทำการตัดสินใจตามเป้าหมายและขอบเขตที่ตั้งไว้

แก๊สเรือนกระจก

จาก ISO/DIS 14067.2 (2012) แก๊สเรือนกระจก (Greenhouse gas: GHG) คือ แก๊สในบรรยากาศทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้น สามารถดูดกลืนหรือสะท้อนรังสีที่ช่วงความถี่คลื่นของรังสีอินฟราเรดที่สะท้อนจากผิวโลก ชั้นบรรยากาศ และเมฆ

1. การจำแนกประเภท

1.1 แก๊สเรือนกระจก สามารถจำแนกประเภทออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก คือ

1.1.1 แก๊สเรือนกระจกในธรรมชาติ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีเทน (CH₄) ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) และไอน้ำ

1.2.1 แก๊สเรือนกระจกที่ถูกควบคุมด้วยพิธีสารมอนทรีออล เป็นสารสังเคราะห์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น CFCs และ HCFCs เป็นต้น สารเหล่านี้จะทำลายชั้นโอโซน และมีค่าศักยภาพการดูดกลืนความร้อนสูง

1.3.1 แก๊สเรือนกระจกที่ไม่ทำลายชั้นโอโซนแต่ดูดกลืนความร้อนสูง เช่น PFCs, HFCs และ SF₆ เป็นต้น

1.2 IPCC (IPCC, 2006) ได้แบ่งกลุ่มแก๊สเรือนกระจกเป็น 2 กลุ่มสำหรับการจัดทำรายงาน

การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก คือ

1.2.1 แก๊สเรือนกระจกทางตรง ได้แก่ CO₂, CH₄, N₂O, PFCs, HFCs และ SF₆

1.2.2 แก๊สเรือนกระจกทางอ้อม ได้แก่ SO₂, NO_x, CO และสารอินทรีย์ระเหยได้ที่ไม่ใช่มีเทน (non methane volatile organic compounds: NMVOC)

2. ศักยภาพในการดูดกลืนความร้อน (Global warming potential: GWP)

ศักยภาพในการดูดกลืนความร้อน คือ ค่าอัตราส่วนที่ใช้เปรียบเทียบความสามารถในการดักจับความร้อนในบรรยากาศเทียบกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีมวลเท่ากัน ดังตารางที่ 2-1 ตารางข้อมูลจะประกอบด้วยเปรียบเทียบระยะเวลาต่าง ๆ ส่วนใหญ่จะคิดช่วงอายุ 100 ปี

ตารางที่ 2-1 ค่า GWP จากรายงานครั้งที่ 5 ของ IPCC (AR5)

| ชื่อแก๊ส | สูตรเคมี | GWP สำหรับ 100 ปี |
|------------------|------------------|-------------------|
| คาร์บอนไดออกไซด์ | CO ₂ | 1 |
| มีเทน | CH ₄ | 28 |
| ไนตรัสออกไซด์ | N ₂ O | 265 |

3. แฟกเตอร์การปลดปล่อย (Emission factor)

การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพ คาร์บอนที่อยู่ในเชื้อเพลิงจะถูกใช้หรือถูกออกซิไดซ์ (Carbon oxidation) ให้มากที่สุด ซึ่งจะทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดเช่นกัน แฟกเตอร์การปลดปล่อยจึงขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในเชื้อเพลิงเป็นหลัก ส่วนคาร์บอนที่เข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ แต่ไม่ถูกออกซิไดซ์ มีค่าน้อยมาก และสามารถประมาณได้ว่า คาร์บอนในเชื้อเพลิงถูกออกซิไดซ์ทั้งหมด (100% carbon oxidized) ค่าแฟกเตอร์การปลดปล่อยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ จะถูกคำนวณโดยยึดตามหลักการนี้ คือ คาร์บอนในเชื้อเพลิงถูกออกซิไดซ์ได้ทั้งหมด

4. การประเมินการปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล

2006 IPCC Guidelines for National GHG Inventories (IPCC, 2006) แบ่งการประเมินการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกออกเป็น 3 Tiers ดังนี้

4.1 Tier 1 เป็นวิธีประเมินจากชนิดของเชื้อเพลิง ซึ่งเกิดการเผาไหม้ และปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยตรง ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ดังนั้นการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถคำนวณได้จากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิงนั่นเอง ส่วนแก๊สเรือนกระจกอื่นที่ไม่ใช่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น เทคโนโลยีที่ใช้ และการบำรุงรักษาเครื่องยนต์ ซึ่งอาจทำให้การคำนวณมีความแปรปรวนสูง

4.2 Tier 2 การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกถูกคิดด้วยค่าแฟกเตอร์การปลดปล่อยของแต่ละประเทศ หากมีข้อมูลเฉพาะเจาะจงในระดับโรงงาน สามารถแยกการคำนวณ เพื่อให้การประเมินแม่นยำมากขึ้น

4.3 Tier 3 เป็นการประเมินด้วยข้อมูลของโรงงาน ซึ่งจะให้ค่าที่แม่นยำมากที่สุด ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูลมากเช่นกัน

ในการเลือกรูปแบบการประเมิน จะคำนึงถึงข้อมูลการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกที่มีอยู่ในปัจจุบันหากมีข้อมูลหรือแบบจำลองละเอียดในระดับโรงงาน จะใช้แบบ Tier 3 หากมีในระดับประเทศ ใช้ Tier 2 และหากไม่มีข้อมูลระดับประเทศ ใช้ Tier 1

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (Carbon footprint: CFP)

ISO/DIS 14067.2 (2012) อธิบายถึงหลักการสำหรับการหาปริมาณการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก และการสื่อสารถึงผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนของผลิตภัณฑ์หรือบริการหนึ่ง ในรูปของการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์หรือบริการนั้น หรือเรียกว่า การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ โดยมีหน่วยวัดเป็นปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂ equivalent: CO₂e) การใช้หลักการ LCA ร่วมกับการประเมิน CFP เพื่อประเมินผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ เป็นประโยชน์หลายด้าน เช่น ใช้ในการติดตามผลของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการ หรือการใช้ข้อมูล CFP กระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของผู้บริโภคเพื่อลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก เป็นต้น

หลักการของการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์

1. การเลือกใช้ข้อมูลและวิธีการ ต้องมีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์หรือระบบที่ศึกษา (Relevance)
2. ข้อมูลครบถ้วน (Completeness)
3. สมมติฐาน วิธีการ และข้อมูลต้องสอดคล้องกัน เพื่อให้ได้ข้อสรุปตามวัตถุประสงค์และขอบเขตที่ตั้งไว้ (Consistency)
4. เลือกใช้วิธีการ หรือมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับ (Coherence)
5. การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ และการสื่อสาร ต้องแม่นยำ ตรวจสอบที่มาได้ (Accuracy)
6. ข้อสรุปได้มาจากวิธีการและข้อมูลที่โปร่งใส (Transparency)
7. ระวังการนับซ้ำ (Avoidance of double-counting)

ขอบเขตของระบบ (System boundary)

การกำหนดขอบเขตของระบบแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของภาคศึกษา การใช้คาร์บอนฟุตพริ้นท์สำหรับการสื่อสารต่อสาธารณะ จะประเมินตลอดวัฏจักรผลิตภัณฑ์ (cradle-to-grave) สำหรับวัตถุประสงค์อื่นที่ใช้ในองค์กรสามารถประเมินแบบ Business-To-Business (B2B) ซึ่งเป็นการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์บางส่วน (partial CFP) หรือ Cradle-To-Gate

ในขั้นตอนการระบุขอบเขตการศึกษา มีหลักการในการกำหนดรายละเอียดของกระบวนการ คือ

1. กระบวนการที่ส่งผลมากต่อปริมาณการปล่อยแก๊สเรือนกระจก ต้องมีการประเมินอย่างละเอียด
2. สามารถใช้ข้อมูลทุติยภูมิ (secondary data) ได้ หากกระบวนการนั้นส่งผลน้อยต่อปริมาณการปล่อยแก๊สเรือนกระจก หรือกระบวนการนั้น ไม่สามารถเก็บข้อมูลปฐมภูมิได้ (Primary data)
3. รวมกระบวนการย่อยได้ เช่น การขนส่งทั้งหมดภายในโรงงาน การตัดออก (Cut-off) กระบวนการที่ส่งผลน้อยมากต่อวัตถุประสงค์ของการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ สามารถตัดออกจากการประเมินได้ ซึ่งจะถูกระบุไว้ในขั้นตอนการกำหนดวัตถุประสงค์ และขอบเขต

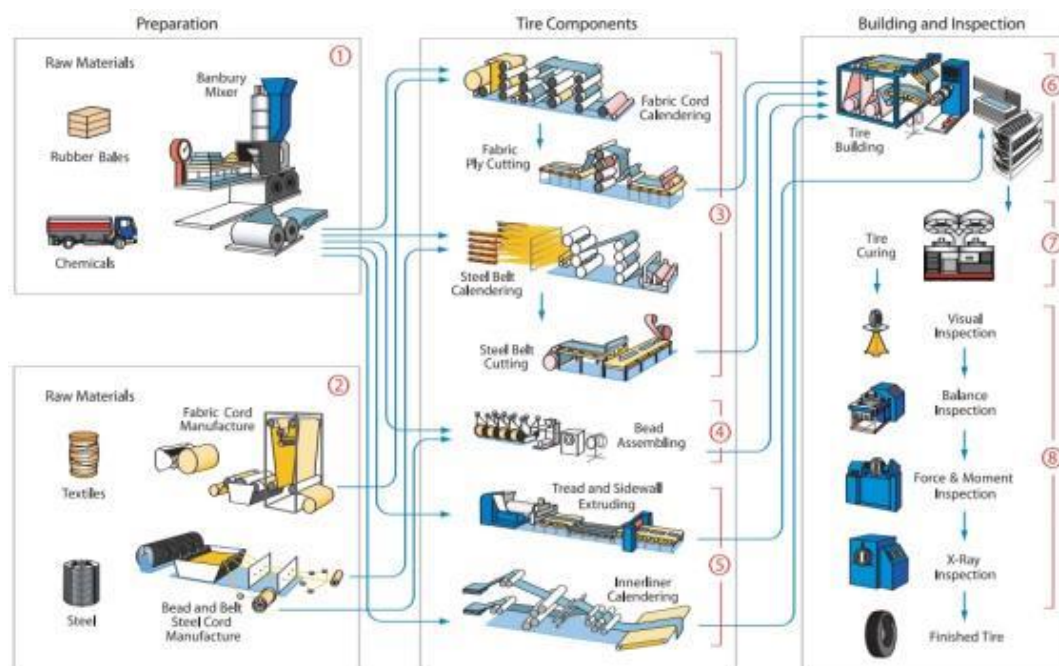
การปันส่วน (Allocation) จะมีขึ้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์หลายชนิด ซึ่งเมื่อมีการปันส่วนแล้ว ผลรวมของวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ที่ถูกปันส่วน จะต้องเท่ากับวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์ก่อนถูกปันส่วน

การเก็บข้อมูล แบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ แบบ Process Chain Analysis (PCA) และ Input-Output Analysis (IOA) โดยวิธี PCA เป็นการเก็บข้อมูลโดยตรงแต่ละกระบวนการ ส่วน IOA ใช้ข้อมูลจากแหล่งอ้างอิงอื่นซึ่งเป็นข้อมูลระดับประเทศ และแยกตามประเภทวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ (Pawinee, Suksuntornsiri & Bundit Limmeechokchai, 2005) แม้วิธี PCA จะให้ข้อมูลที่แม่นยำ แต่ต้องใช้เวลามากในการเก็บข้อมูลให้ครบทั้งหมด อีกทั้งกระบวนการที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลโดยตรงได้ จะถูกตัดออกจากการคำนวณ อาจส่งผลให้การวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์นั้นคลาดเคลื่อนไปมาก วิธีที่ดีที่สุดคือใช้ทั้งสองกระบวนการผสมกัน เพราะสามารถใช้วิธี IOA สำหรับกระบวนการที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลโดยตรง ทำให้ข้อมูลที่ได้อาจครอบคลุมกระบวนการมากกว่าวิธี PCA อย่างเดียว และให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำกว่า

นอกจากนี้ยังมีโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ CFP ได้ คือ Simapro ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จที่มีฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องในหลายประเทศ ใช้หลักการดำเนินงานเช่นเดียวกับ ISO/DIS 14067.2 ซึ่งมีข้อดี คือ มีข้อมูลวัตถุดิบหลายประเภท และจากหลายกลุ่มประเทศ และใช้เวลาคิด CFP น้อยกว่าวิธีเก็บข้อมูลตรง แต่มีข้อเสียคือ เป็นข้อมูลในระดับประเทศ ข้อมูลจึงอาจไม่แม่นยำเท่ากับการเก็บข้อมูลตรงจากโรงงานผู้ผลิต และวัตถุดิบบางประเภทอาจมีไม่ครบ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบเฉพาะในบางภูมิภาคเท่านั้น

กระบวนการผลิตยางรถยนต์

กระบวนการผลิตยางรถยนต์โดยทั่วไป (Bralla, 2007) สามารถแบ่งกระบวนการใหญ่ ๆ ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 กระบวนการผลิตยางรถยนต์ (Maxxis International, 2015)

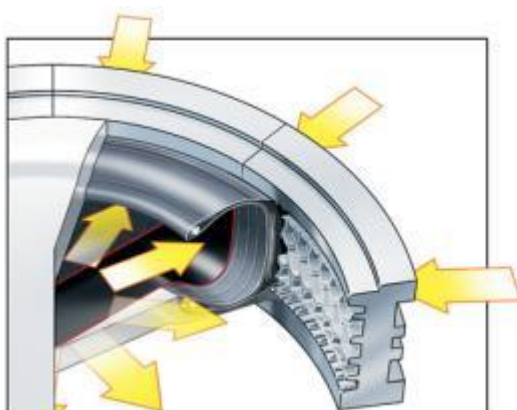
1. การผสมยาง ส่วนผสมหลัก คือ ส่วนที่เป็นยาง (ยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์) และส่วนเติมเต็ม (Filler) ดังภาพที่ 2-3 ขั้นตอนที่ 1 ซึ่งปริมาณส่วนผสมและชนิดของส่วนเติมเต็มจะแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของยางที่ต้องการ ส่วนผสมทั้งหมดจะถูกบดเข้าด้วยกัน ตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด ได้เป็นยางแผ่นสำหรับขั้นตอนต่อไป

2. การเตรียมส่วนประกอบยาง นอกจากส่วนที่เป็นยางผสมแล้ว ยาง 1 เส้นต้องมี ส่วนประกอบอื่นที่ช่วยให้ยางแข็งแรงและรับน้ำหนักได้ คือ โครงสร้างที่ทำด้วยลวดเหล็ก ดังภาพที่ 2-3 ขั้นตอนที่ 2 เช่นเดียวกับการผสมยาง โครงสร้างลวดเหล็กจะมีคุณภาพและขนาดต่างกันไปตามคุณสมบัติของยางที่ต้องการ

3. การประกอบยาง คือ การนำยางผสมแล้ว และโครงสร้างลวดเหล็กใน 2 ขั้นตอนแรก มาประกอบเข้าด้วยกัน เป็นชั้น ๆ ซึ่งยางในแต่ละส่วน ได้แก่ ส่วนหน้ายาง ส่วนแก้มยาง และส่วน ขอบกระทะล้อ ก็จะมียกประกอบแต่ละชั้นไม่เหมือนกัน ดังภาพที่ 2-3 ขั้นตอนที่ 3 – ขั้นตอนที่ 5

4. การสร้างยางก่อนอบ เป็นการนำแผ่นยางแต่ละส่วนมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นแผ่น เดียวกัน นำไปเข้าเครื่องสร้างยาง (Tire building machine) ได้เป็นรูปทรงยางเรียบ ๆ พร้อมสำหรับ นำไปอบยางในขั้นต่อไป ดังภาพที่ 2-3 ขั้นตอนที่ 6

5. การนำแม่พิมพ์มาใช้ในการอบยาง แม่พิมพ์ลายดอกยางนั้นจะถูกนำมาใช้ในการอบ ยางเท่านั้น โดยนำยางที่ได้จากเครื่องสร้างยาง มาเข้าเครื่องอบ ดังภาพที่ 2-3 ขั้นตอนที่ 7 ซึ่งติดตั้ง แม่พิมพ์ยางไว้รอบด้วยอุณหภูมิ ความดัน และเวลา ที่กำหนด จะได้เป็นยางสำเร็จมีลายหน้ายางและ แก้มยางตามแม่พิมพ์ที่ใช้ ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 ภายในแม่พิมพ์ขณะอบยาง (Bridgestone Americas Tire Operations, 2015)

6. การตรวจสอบ ยางสำเร็จที่ได้ จะถูกตรวจสอบเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการดัง ภาพที่ 2-3 ขั้นตอนที่ 8 เพื่อรับประกันคุณภาพของยางก่อนนำไปจัดเก็บในโกดัง หรือส่งขายร้าน ขายเป็นอีกต่อไป

แม่พิมพ์ยาง

แม่พิมพ์ เป็นส่วนที่สำคัญในกระบวนการอบยาง มีส่วนประกอบหลายส่วนประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อขึ้นรูปยาง ดังภาพที่ 2-5 สามารถจำแนกส่วนประกอบหลักออกได้ดังนี้



ภาพที่ 2-5 แม่พิมพ์ยาง (CantonFair Imp. & Exp. Co., Ltd., 2015)

1. แม่พิมพ์ส่วนหน้ายาง หรือลายดอกยาง (Tread) คือ ส่วนที่มีหน้าที่ขึ้นรูปหน้ายาง ซึ่งมีร่องยางจำนวนมาก ทำหน้าที่หลายอย่างขณะขับขี่ เช่น รีดน้ำบนพื้นถนนเปียก ยึดเกาะถนน ลดแรงกระแทก เป็นต้น โดยทั่วไป สามารถแบ่งความซับซ้อนของแม่พิมพ์ตามคุณสมบัติของยางที่ต้องการนำไปใช้ในภูมิประเทศที่ต่างกัน 2 ประเภท คือ ยางสำหรับฤดูร้อน (Summer tire) และยางสำหรับฤดูหนาว (Winter tire) โดยยางสำหรับฤดูร้อนอาจเน้นถึงสมรรถนะในการขับขี่ที่นุ่มสบาย และเกาะยึดถนนแห้งได้ดี ในขณะที่ยางสำหรับฤดูหนาวจำเป็นต้องมีคุณสมบัติในการยึดเกาะถนนที่มีหิมะ การรีดน้ำด้วยร่องดอกยาง และระยะเบรคที่ปลอดภัย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นสาเหตุให้ยางมีร่องดอกยางที่ซับซ้อนกว่ายางฤดูร้อนมาก และทำให้ความซับซ้อนของแม่พิมพ์มากขึ้นตามไปด้วย

2. แม่พิมพ์ส่วนแก้มยาง (Sidewall) ซึ่งมีหน้าที่ขึ้นรูปส่วนแก้มยางที่มีข้อมูลต่าง ๆ ของยาง ได้แก่ ชื่อยี่ห้อยาง ขนาดยาง รุ่นยาง เวลาที่ผลิต ข้อกำหนดทางกฎหมายและความปลอดภัย เป็นต้น

3. แม่พิมพ์ส่วนขอบยาง (Bead ring) เป็นส่วนที่ขึ้นรูปของยางบริเวณที่ติดกับกระทะล้อ มีหน้าที่หลักด้านความปลอดภัย คือ การเก็บลมยาง

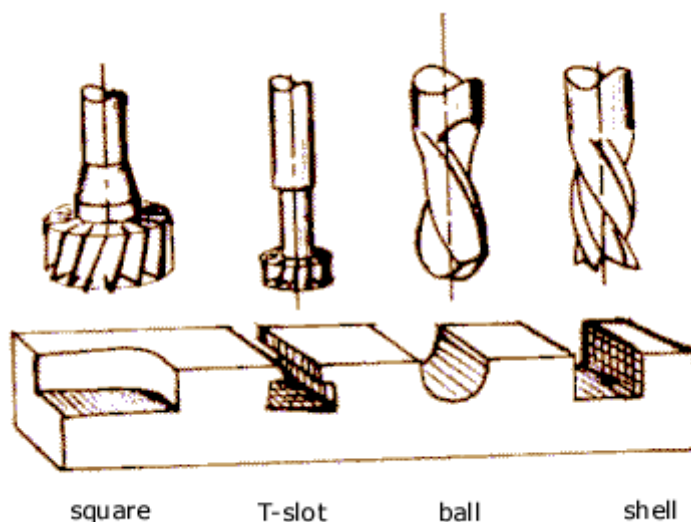
4. แม่พิมพ์สำหรับประกอบแม่พิมพ์หน้ายางเข้าด้วยกัน (Support) อยู่ที่ส่วนหลังของแม่พิมพ์หน้ายาง ใช้สำหรับประกอบแม่พิมพ์หน้ายางเข้าด้วยกันให้เป็นวง ลวดตัดดูดีในการหล่อ เพราะสามารถใช้กระบวนการกัดเหล็กได้ และเป็นส่วนที่ใช้เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องอบยาง

กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ส่วนลายดอกยาง

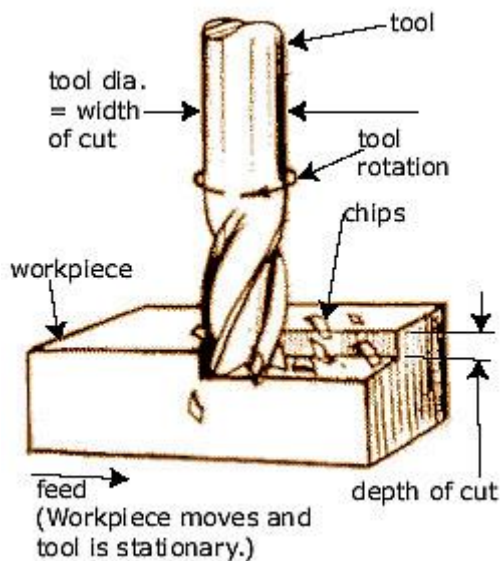
ประกอบไปด้วยกระบวนการผลิตหลักดังนี้

1. กระบวนการกัด

เป็นกระบวนการผลิตชิ้นงานด้วยวิธีการตัดแบบไม่ต่อเนื่อง โดยมีดกัด ซึ่งมีทั้งแบบฟันเดี่ยวและหลายฟัน ดังภาพที่ 2-6 มีดกัดจะหมุนโดยแกนหมุน ส่วนชิ้นงานจะถูกจับยึดอยู่บนโต๊ะเรียบ ดังภาพที่ 2-7 ด้วยแนวการเดินมีดกัด และหัวมีดกัดที่แตกต่างกัน สามารถผลิตชิ้นงานได้หลายรูปทรง (สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, 2555)



ภาพที่ 2-6 มีดกัดประเภทต่าง ๆ (eFunda Inc., 2015)



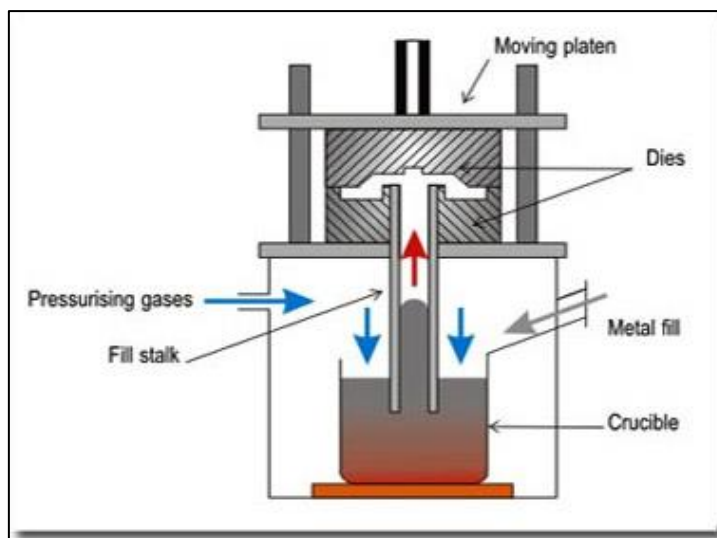
ภาพที่ 2-7 กระบวนการกัด (Sinotech Inc., 2015)

2. กระบวนการหล่อด้วยแบบหล่อพลาสติก

หลักการเหมือนกระบวนการหล่อทั่วไป แตกต่างกันที่แบบหล่อทำด้วยพลาสติก ซึ่งขณะหล่อใช้พลาสติกผงผสมน้ำให้อยู่ในรูปพลาสติกเหลว เทลงในแบบหล่อ อาจเข้าแบบหล่อเล็กน้อยเพื่อให้พลาสติกเหลวกระจายเต็มแบบหล่อ เมื่อพลาสติกคงตัว จะถอดแบบหล่อออกโดยอาจใช้เครื่องดูดสุญญากาศช่วย จากนั้นแม่พิมพ์พลาสติกต้องผ่านการอบเพื่อกำจัดความชื้น แม่พิมพ์แบบพลาสติกใช้สำหรับหล่อวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ (Non-Ferrous metal) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักมีผิวสำเร็จที่ดี เหมาะกับงานที่ต้องการรายละเอียดมาก และมีความแม่นยำสูง แต่หากเทียบกับแม่พิมพ์จากทราย แม่พิมพ์พลาสติกมีอัตราการผลิตต่ำกว่า และต้นทุนสูงกว่า (Bralla, 2007)

3. การหล่อในแบบถาวรที่ความดันต่ำ (Low pressure permanent mold casting)

ในขณะที่กระบวนการหล่อทั่วไปใช้แรงดึงดูดของโลกในการเทโลหะเหลว การหล่อที่ความดันต่ำจะใช้ก๊าซเพื่อดันโลหะเหลวซึ่งอยู่ด้านล่างของแม่พิมพ์ไหลผ่านท่อเข้าสู่แม่พิมพ์ซึ่งติดตั้งไว้ด้านบนดังภาพที่ 2-8 เป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมการหล่อได้ดี เพราะเป็นระบบปิด และควบคุมอัตราการเติมโลหะเหลวได้ เหมาะกับการผลิตที่ต้องการอัตราการผลิตและคุณภาพสูง (Bralla, 2007)



ภาพที่ 2-8 การหล่อในแบบหล่อถาวรที่ความดันต่ำ (TheMetalCasting.Com, 2015)

กรณีศึกษาจากวรรณกรรม

แม่พิมพ์ยาง เป็นผลิตภัณฑ์ที่ยังไม่มีการศึกษามากนัก ในการประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากมักถูกจัดเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องจักรในกระบวนการอบยาง Bras and Cobert (2011) ศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของยางตลอดวัฏจักร โดยเปรียบเทียบยางปกติกับยางรุ่นใหม่ ด้วยโปรแกรม SimaPro ซึ่งไม่นำแม่พิมพ์ยางมารวมในการวิเคราะห์คิดกระบวนการผลิตยางทั้งหมด ได้แก่ การผลิตส่วนประกอบย่อยของยาง การรีดขึ้นส่วนยาง การประกอบ โครงสร้างยางก่อนอบ และการอบยาง โดยใช้ข้อมูลส่วนผสมของยางโดยเฉลี่ย และพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต รวมไปถึงกระบวนการการใช้งาน (Use phase) และกระบวนการทำลายซาก (End of life) พบว่ามีการปลดปล่อย CO₂ 533.1 และ 520.4 กิโลกรัมต่อยาง 1 เส้น

แม่พิมพ์ 1 ชุด ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักที่เป็นแม่พิมพ์เหล็ก และแม่พิมพ์อลูมิเนียม ส่วนแม่พิมพ์ลายดอกยาง เป็นแม่พิมพ์อลูมิเนียมที่หล่อจากแม่พิมพ์พลาสติก ซึ่งใช้วัตถุดิบเป็นอลูมิเนียมแท่ง (Ingot) Das and Kandpal (1998) ได้ศึกษาการปลดปล่อย CO₂ จากการผลิตอลูมิเนียมในประเทศอินเดีย โดยใช้ข้อมูลการผลิตจากโรงงานผลิตอลูมิเนียมหลัก 4 แห่ง คือ Balco, Hindalco, Indal และ Nalco แบ่งการคำนวณเป็นกระบวนการจริง (Scenario 1) และสมมุติฐานของการปรับปรุงด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์พลังงาน (Scenario 2) พบว่ากระบวนการจริงมีการปลดปล่อย CO₂ เฉลี่ย 4 โรงงาน 21.37 ตันต่อ 1 ตันอลูมิเนียม และกระบวนการปรับปรุงมีการปลดปล่อย CO₂ 19.57 ตันต่อ 1 ตันอลูมิเนียม

Zhang et al. (2014) ได้ศึกษาการปลดปล่อย CO₂ ของอุตสาหกรรมการผลิตอลูมิเนียมในประเทศจีนด้วยแบบจำลอง โดยเลือกศึกษากระบวนการหลัก 2 กระบวนการ คือ กระบวนการผลิตแร่อลูมิเนียม (Alumina Refining) และกระบวนการถลุงแร่ (Smelting) แยกเป็นหลายสมมุติฐานด้วยแบบจำลองที่แตกต่างกัน เช่น คุณภาพของวัตถุดิบ เทคโนโลยีการผลิต หรือ นโยบายของรัฐบาล ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการผลิตแร่อลูมิเนียม และกระบวนการถลุงแร่ มีปริมาณการปลดปล่อย CO₂ 13.19 ตันต่อ 1 ตันแร่อลูมิเนียม (Al₂O₃) และ 10.99 ตันต่อ 1 ตันอลูมิเนียมตามลำดับ

Hammond and Jones (2008) ทำการศึกษาข้อมูลการปลดปล่อย CO₂ ของวัสดุหลายชนิดจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นฐานข้อมูลออนไลน์สำหรับกลุ่มประเทศสหราชอาณาจักร โดยข้อมูลถูกนำไปใช้อ้างอิงทั้งในภาครัฐ ภาคการศึกษา และภาคอุตสาหกรรม การอ้างอิงข้อมูลดังกล่าวจะมีผลตอบรับจากผู้นำไปใช้งาน เพื่อนำมาปรับปรุงข้อมูลให้ได้ค่าที่ดีที่สุด ได้ข้อมูลการปลดปล่อย CO₂ ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ข้อมูลการปลดปล่อย CO₂ ตามชนิดวัสดุ

| วัสดุ | ปริมาณการปลดปล่อย CO ₂ (kgCO ₂ /kg) |
|------------------|---|
| เหล็กกล้าไร้สนิม | 6.15 |
| พลาสติก | 0.12 |
| อลูมิเนียม | 8.24 |

Ruuska (2013) ได้ทำการศึกษาลักษณะคล้ายกัน คือการรวบรวมงานตีพิมพ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องสำหรับกลุ่มประเทศในทวีปยุโรป และใช้ฐานข้อมูลจากองค์กรต่าง ๆ ได้ข้อมูลการปลดปล่อย GHG ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ข้อมูล Carbon footprint แยกตามวัสดุ

| วัสดุ | Carbon footprint (kgCO ₂ e/kg) | Data source |
|--|--|--|
| Polyurethane (Rigid foam) | 4.2 | Plastics Europe: “Eco-profiles of the European Plastics Industry POLYURETHANE RIGID FOAM”. |
| Aluminium (Extrusion profile) | 2.264 | ELCD database 2.0, data set is by European aluminium association (EAA). |
| Gypsum Plaster (CaSO ₄) | 0.2432 | ELCD database 2.0, data set is by PE INTERNATIONAL. |

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

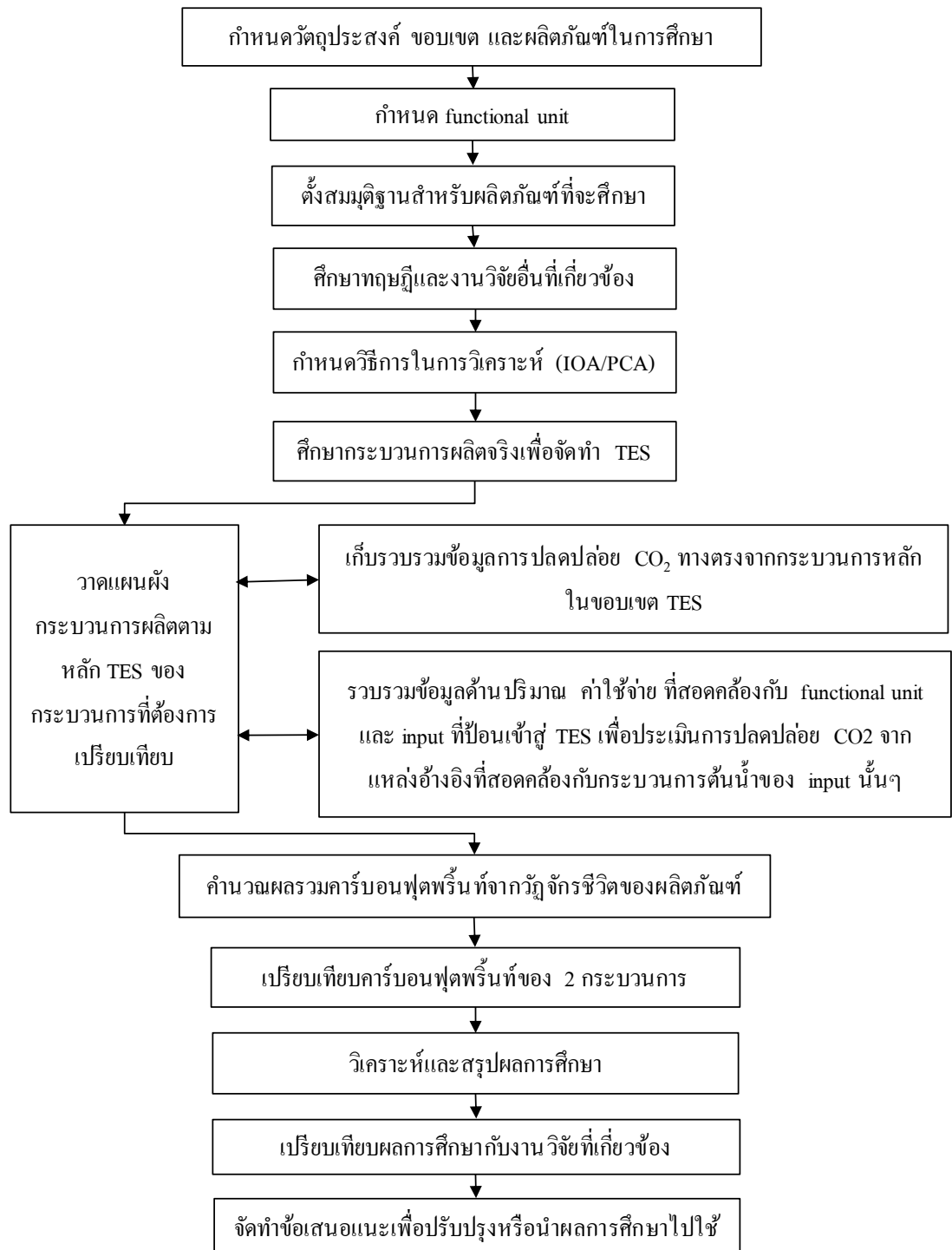
การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของแม่พิมพ์ส่วนลายดอกยาง ใช้หลักการประเมินตลอดวัฏจักรผลิตภัณฑ์ ซึ่งเริ่มด้วยการกำหนดวัตถุประสงค์ของการศึกษาให้ชัดเจน พร้อมกับขอบเขตและสมมติฐานของการศึกษา กำหนดหน่วยฟังก์ชัน (Functional unit) ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์และกระบวนการผลิต จากนั้นจึงทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งได้มาจาก 2 ทาง คือ ข้อมูลโดยตรงจากกระบวนการจริง และข้อมูลทฤษฎีจากแหล่งอ้างอิงอื่น เช่น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบนั้น หรือค่าตัวแปรการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากตาราง input-output สำหรับข้อมูลที่ไม่สามารถเก็บได้โดยตรง เมื่อได้ข้อมูลครบถ้วน จึงสามารถนำมาประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ได้

ขั้นตอนการดำเนินการ ดังภาพที่ 3-1 จากนั้นจึงเริ่มทำการเก็บรวบรวมข้อมูล ซึ่งได้มาจาก 2 ทาง คือ

1. ข้อมูลโดยตรงจากกระบวนการจริง ได้แก่ ข้อมูลวัตถุดิบเชิงปริมาณ เวลาการผลิตแต่ละกระบวนการและกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรสำหรับการคำนวณการปล่อย GHG จากการใช้พลังงานไฟฟ้า
2. ข้อมูลทฤษฎีจากแหล่งอ้างอิงอื่น เช่น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบนั้น ค่าใช้จ่ายสำหรับวัตถุดิบ และค่าตัวแปรการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากตาราง input-output สำหรับข้อมูลที่ไม่สามารถเก็บได้โดยตรง

เมื่อได้ข้อมูลครบถ้วน จึงสามารถนำมาคำนวณ CFP ของทั้งสองผลิตภัณฑ์ และวิเคราะห์ความแตกต่างแยกเป็นส่วนหลัก ๆ ได้แก่ การปล่อย GHG จากการได้มาซึ่งวัตถุดิบ จากการใช้พลังงานไฟฟ้า และจากการใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ หลังจากนั้น จึงทำการสรุปผลการศึกษาทั้งหมด พร้อมจัดทำข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงผลการศึกษาและการนำไปใช้

ขั้นตอนการดำเนินการ แยกเป็นหัวข้อ ดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การกำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขต และผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา

เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ยาง ซึ่งทำการเปรียบเทียบการผลิตแม่พิมพ์ส่วนลายดอกยางผลิตจากอูมิเนียม 2 รูปแบบ ซึ่งสามารถใช้ผลิตยางที่มีความซับซ้อนเท่ากัน คือ แม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกอร์ซี้นใหญ่ (Sector) และแบบพลาสติกอร์ซี้นเล็ก (Element) โดยพิจารณาขอบเขตการศึกษาตลอดวัฏจักรแบบ B2B เนื่องจากแม่พิมพ์ยางไม่ใช่ผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภคขั้นสุดท้าย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา ต้องการเปรียบเทียบ 2 ผลิตภัณฑ์ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันในการขนส่งไปสู่โรงงานผลิตยาง การใช้งานในการอบยาง และการทำลายซาก

การกำหนด Functional unit

หน่วยการศึกษาหรือ Functional unit กำหนดเป็นแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุด คือ ประกอบได้เป็น 1 วงสำหรับการผลิตยาง 1 เส้น

การตั้งสมมติฐาน

สมมติฐานที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่

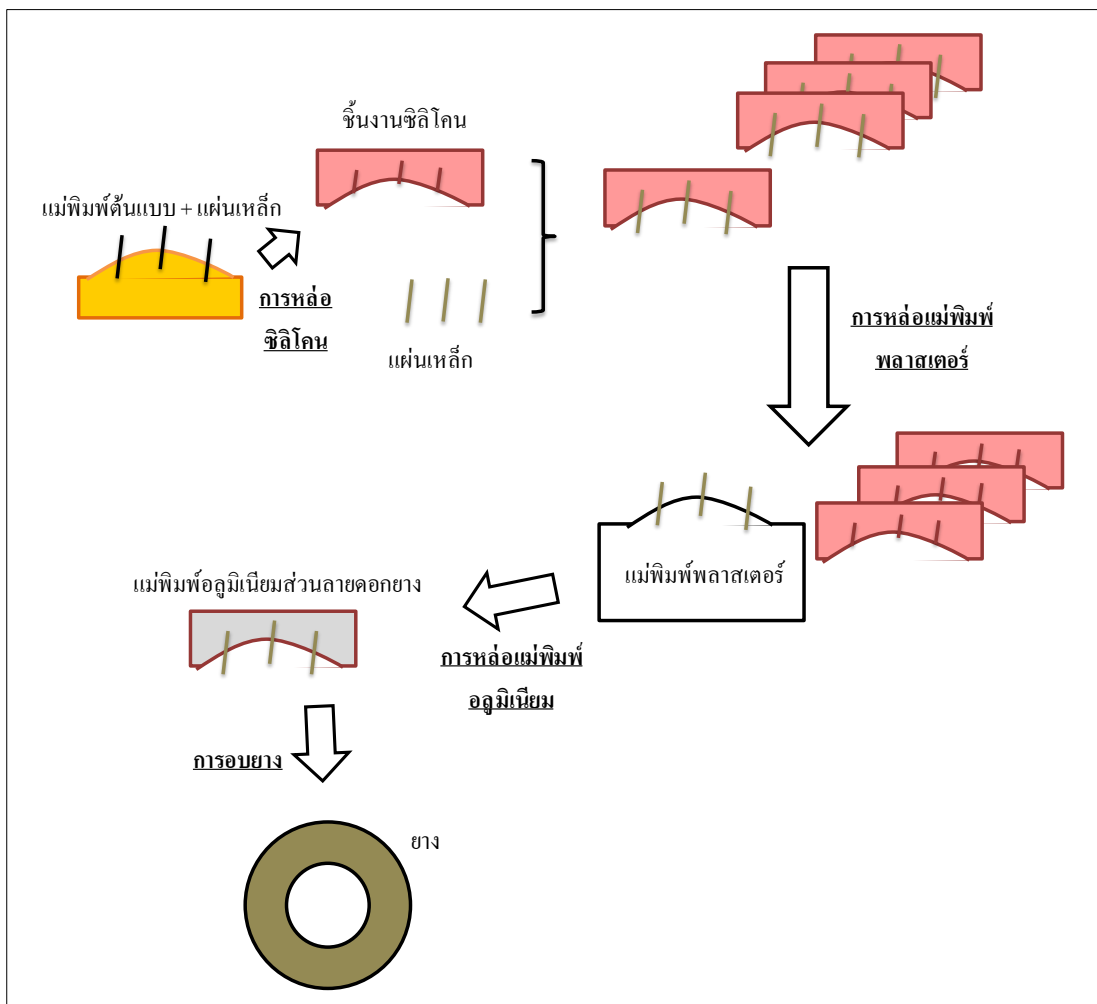
1. ลักษณะของแม่พิมพ์ที่เลือกเป็นต้นแบบในการศึกษา เลือกแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับผลิตยางรถยนต์ในฤดูหนาว (Winter tire) ซึ่งมีความซับซ้อนและผลิตด้วยกระบวนการที่ศึกษา กำหนดประเภทและขนาดของแม่พิมพ์ที่มีการผลิตอยู่มากในกระบวนการจริง
2. ไฟฟ้าที่ใช้การผลิตในโรงงาน ซื้อมาจากโรงไฟฟ้าในนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตด้วยกระแสธรรมชาติแบบพลังงานความร้อนร่วม มีผลต่อการคิดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการต้นน้ำ
3. ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตทั้งหมด ถูกนำไปกำจัดโดยบริษัทกำจัดขยะอุตสาหกรรม

การกำหนดวิธีการในการวิเคราะห์

วิธีการในการวิเคราะห์เป็นแบบใช้ทั้ง 2 แบบรวมกัน คือ PCA และ IOA ใช้วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยตรง หรือแบบ PCA สำหรับกระบวนการผลิตที่สามารถหาข้อมูลได้ และใช้การอ้างอิงจากข้อมูลค่าใช้จ่ายต่อหน่วยฟังก์ชัน หรือแบบ IOA สำหรับกระบวนการ และวัตถุดิบ ที่ไม่สามารถหาข้อมูลได้โดยตรง

กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ส่วนลายดอกยางแบบพลาสติก

ชิ้นงานแต่ละกระบวนการ ดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 ชิ้นงานในแต่ละกระบวนการ

1. การออกแบบ

เมื่อมีการสั่งแม่พิมพ์แบบใหญ่ สำหรับยางลายใหม่ จำเป็นต้องมีการออกแบบเป็นกระบวนการแรก ซึ่งออกแบบรูปร่างชิ้นงานทั้งหมดในกระบวนการผลิต และเขียน โปรแกรม สำหรับใช้ในเครื่องจักร ทรัพยากรหลักที่ใช้คือ คน คอมพิวเตอร์ และกระดาษสำหรับพิมพ์แบบเพื่อส่งให้แผนกการผลิต

2. การผลิตแผ่นเหล็กสำหรับแม่พิมพ์ส่วนร่องดอกยาง

การผลิตแผ่นเหล็กสำหรับแม่พิมพ์ส่วนร่องดอกยางเป็นการผลิตแผ่นเหล็กบาง ซึ่งใช้สำหรับขึ้นรูปแม่พิมพ์ส่วนที่เป็นร่องดอกยาง ซึ่งไม่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยการหล่อ เนื่องจากขนาดที่บางและเล็กเกินกว่าที่วัตถุดิบในการหล่อจะไหลเข้าไปได้ ใช้วัตถุดิบเป็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมยาวม้วนเป็นวง (Stainless steel coil) นำไปขึ้นรูปด้วยการปั๊ม (Punching) อาจสิ้นสุดด้วยการปั๊มเพียงอย่างเดียว หรืออาจต้องนำไปผ่านกระบวนการตัดด้วยลวดหรือเลเซอร์ ขึ้นอยู่กับการออกแบบแบ่งเป็นชิ้นงานสำหรับใช้ใน 2 กระบวนการ คือ

2.1 แผ่นเหล็กสำหรับใส่ในแม่พิมพ์ต้นแบบ ซึ่งจะยึดอยู่กับแม่พิมพ์ต้นแบบถาวร ช่วยให้เครื่องในชิ้นงานซิลิโคน

2.2 แผ่นเหล็กสำหรับใส่ในชิ้นงานซิลิโคน ซึ่งแผ่นเหล็กในกระบวนการนี้จะย้ายจากชิ้นงานซิลิโคนไปที่แม่พิมพ์พลาสติก จากนั้นจะย้ายไปสู่ผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ แม่พิมพ์ลายดอกยาง ดังภาพที่ 3-3 และทำให้เกิดร่องเล็ก บาง ในกระบวนการอบยาง

หลังจากการตัดเป็นแผ่นเหล็กตามที่ต้องการ เศษแผ่นเหล็กที่เหลือจะถูกนำไปทำลายซากต่อไป



ภาพที่ 3-3 แผ่นเหล็กแม่พิมพ์สำหรับร่องดอกยาง (Tien Sheng Molding Technology, 2018)

3. การผลิตแม่พิมพ์ต้นแบบ

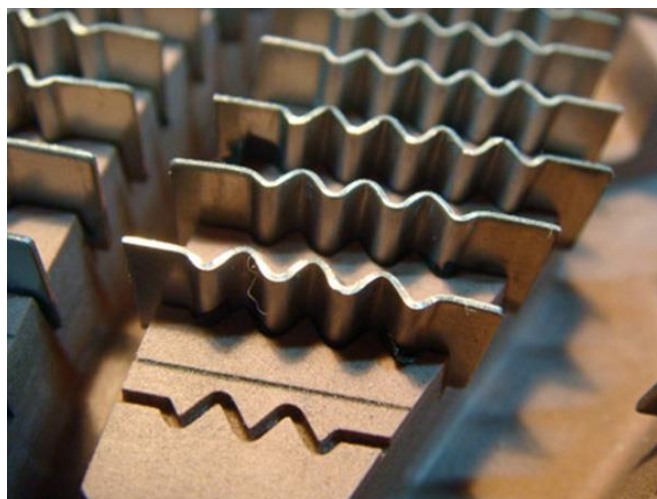
ใช้ชิ้นงานโพลียูรีเทนทรงสี่เหลี่ยมเป็นวัตถุดิบ ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการกัดด้วยเครื่องกัด ได้เป็นชิ้นงานสำเร็จดังภาพที่ 3-4 ซึ่งในการทำแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุดอาจต้องใช้ชิ้นงานโพลียูรีเทน 2-7 ชิ้นตามลายดอกยางที่ต้องการ กระบวนการนี้ใช้เครื่องกัดเครื่องเดียวในการผลิต เศษชิ้นงานโพลียูรีเทนที่ถูกกัดทิ้ง จะถูกนำไปทำลายซากต่อไป



ภาพที่ 3-4 แม่พิมพ์ต้นแบบจากโพลียูรีเทน (Tien Sheng Molding Technology, 2018)

4. การหล่อซิลิโคน

แผ่นเหล็กซึ่งได้จากกระบวนการที่ 2 จะนำมาประกอบเข้ากับชิ้นงานโพลียูรีเทนจากกระบวนการที่ 3 ดังภาพที่ 3-5 และนำมาประกอบเข้ากับอุปกรณ์หล่อ



ภาพที่ 3-5 แม่พิมพ์ต้นแบบหลังประกอบกับแผ่นเหล็ก (Tien Sheng Molding Technology, 2018)

จากนั้นจะทำการหล่อซิลิโคน โดยเทซิลิโคนเหลว ลงในแบบหล่อ นำเข้าเตาอบเพื่อให้ซิลิโคนแข็งตัว เมื่อซิลิโคนแข็งตัวแล้วจะสามารถดึงออกจากแบบหล่อได้ ดังภาพที่ 3-6 จำนวนซิลิโคนที่ต้องการแตกต่างกันไปตามรูปแบบของลายดอกยาง ซิลิโคนที่ผลิตได้จะถูกส่งต่อไปยัง

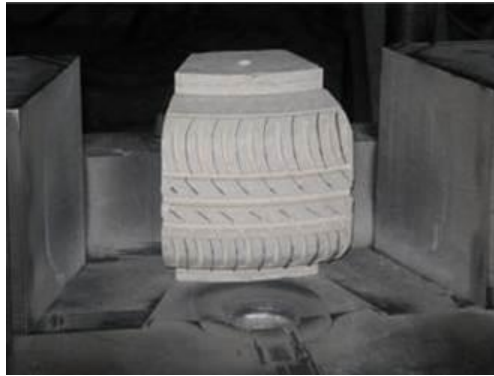
กระบวนการหล่อแม่พิมพ์พลาสติก ส่วนชิ้นงานโพลียูรีเทนจะถูกนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง และสามารถนำมาใช้ได้อีกหากจำเป็นต้องผลิตชิ้นงานซิลิโคนใหม่ในกรณีที่ซิลิโคนที่ใช้เสียหายหรือไม่เพียงพอในการหล่อพลาสติกปริมาณมาก



ภาพที่ 3-6 ชิ้นงานซิลิโคนหล่อจากแม่พิมพ์ต้นแบบ (Shen Zhen Hong Ye Jie Technology Co.,Ltd., 2018)

5. การหล่อแม่พิมพ์พลาสติก

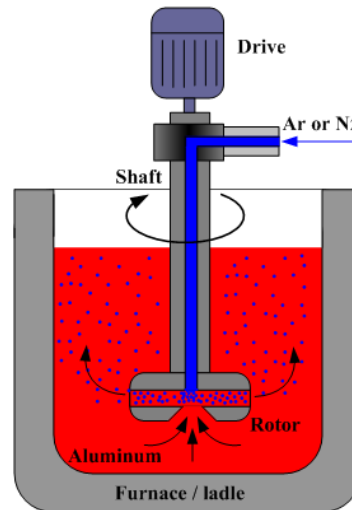
แผ่นเหล็กบางที่ได้จากกระบวนการที่ 2 จะถูกนำมาเสียบเข้ากับชิ้นงานซิลิโคนจากกระบวนการที่ 4 ชิ้นงานซิลิโคนหลายชิ้นจะถูกนำมาเรียงต่อกันตามการออกแบบและประกอบเข้ากับอุปกรณ์หล่อ จากนั้นเข้าสู่กระบวนการหล่อพลาสติก โดยใช้พลาสติกผงเป็นวัตถุดิบ ผสมผสมกับน้ำ และเทลงไปในแบบหล่อที่บรรจุชิ้นงานซิลิโคน เมื่อพลาสติกแข็งตัว จะถอดอุปกรณ์หล่อออกพร้อมกับดึงชิ้นงานซิลิโคนออกจากพลาสติก ดังภาพที่ 3-7 แม่พิมพ์พลาสติกจะถูกพักไว้ให้ให้แข็งตัวมากขึ้นก่อนถูกส่งเข้าเตาอบ และส่งไปหล่อลูมินียมในกระบวนการต่อไป ส่วนชิ้นงานซิลิโคนจะนำไปใช้หล่อพลาสติกต่อจนกว่าจะฉีกขาด



ภาพที่ 3-7 ชิ้นงานพลาสติกหล่อหลังถอดซิลิโคนออก (Kurtz Ersa Corporation, 2018)

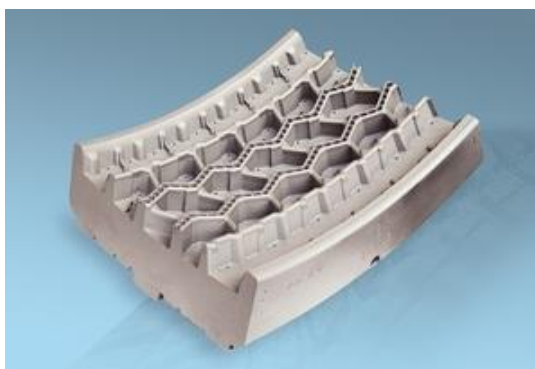
6. การหล่อแม่พิมพ์อลูมิเนียม

แม่พิมพ์พลาสติกจะถูกนำมาติดตั้งที่เครื่องหล่อด้วยความดันต่ำ อลูมิเนียมแท่ง (Ingot) จะถูกหลอมด้วยเตาหลอม ซึ่งจะมีการเติมก๊าซไนโตรเจนเพื่อไล่ฟองอากาศไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาของอลูมิเนียมกับไอน้ำ ($2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6H$) ดังภาพที่ 3-8



ภาพที่ 3-8 การเติมก๊าซไนโตรเจน เพื่อไล่ฟองอากาศไฮโดรเจน (Kopeliovich, 2015)

จากนั้นน้ำอลูมิเนียมจะถูกดันให้ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ด้วยเครื่องควบคุมความดัน เมื่ออลูมิเนียมแข็งตัวและเย็นตัวลง จะถอดแม่พิมพ์ออกด้วยการทาบพลาสติก เศษพลาสติกจะถูกส่งไปทำลายซาก เมื่อนำแม่พิมพ์อลูมิเนียมที่ได้ไปทำความสะอาดเศษพลาสติกออกแล้ว แม่พิมพ์อลูมิเนียมจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการกัดเพื่อกัดเป็นชิ้นงานสำเร็จ ตามกระบวนการออกแบบ ได้เป็นชิ้นงานแม่พิมพ์อลูมิเนียมส่วนลายดอกยางขั้นสุดท้าย ดังภาพที่ 3-9 ส่วนเศษอลูมิเนียมที่ถูกตัดทิ้งจะถูกนำไปทำลายซาก หลังจากผ่านการตรวจวัดคุณภาพแล้ว จะส่งมอบแม่พิมพ์ส่วนลายดอกยางให้กับลูกค้าโรงงานผลิตยาง หรือนำไปประกอบกับแม่พิมพ์บางส่วนอื่นตามคำสั่งซื้อก่อนส่งมอบให้กับลูกค้าต่อไป



ภาพที่ 3-9 ชิ้นงานแม่พิมพ์อลูมิเนียม (Herbert, 2006)

แผนผังกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ยางส่วนลายดอกยาง

จากข้อมูลกระบวนการผลิต แบ่งตามสิ่งที่ป้อนเข้ากระบวนการ (Input) และผลผลิตที่ได้ (Output) ดังนี้

1. Input

จำนวนการปล่อย GHG จากวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิต คือ วัตถุดิบหมายเลข 1-7 ดังภาพที่ 3-10 ซึ่งเป็น Variable input ของ TES รวมทั้งกระบวนการขนส่งวัตถุดิบเหล่านี้ที่เกิดขึ้นในประเทศจนกระทั่งถึงโรงงานผลิตยางไม้ไม่ใช้วัตถุดิบในการผลิตแม่พิมพ์ แต่ใช้สำหรับการบรรจุเพื่อขนส่ง จึงนำมาคำนวณด้วย

พลังงานไฟฟ้าใช้สำหรับทุกกระบวนการผลิต จึงนำมาคำนวณ โดยใช้เวลาผลิต และข้อมูลของเครื่องจักร

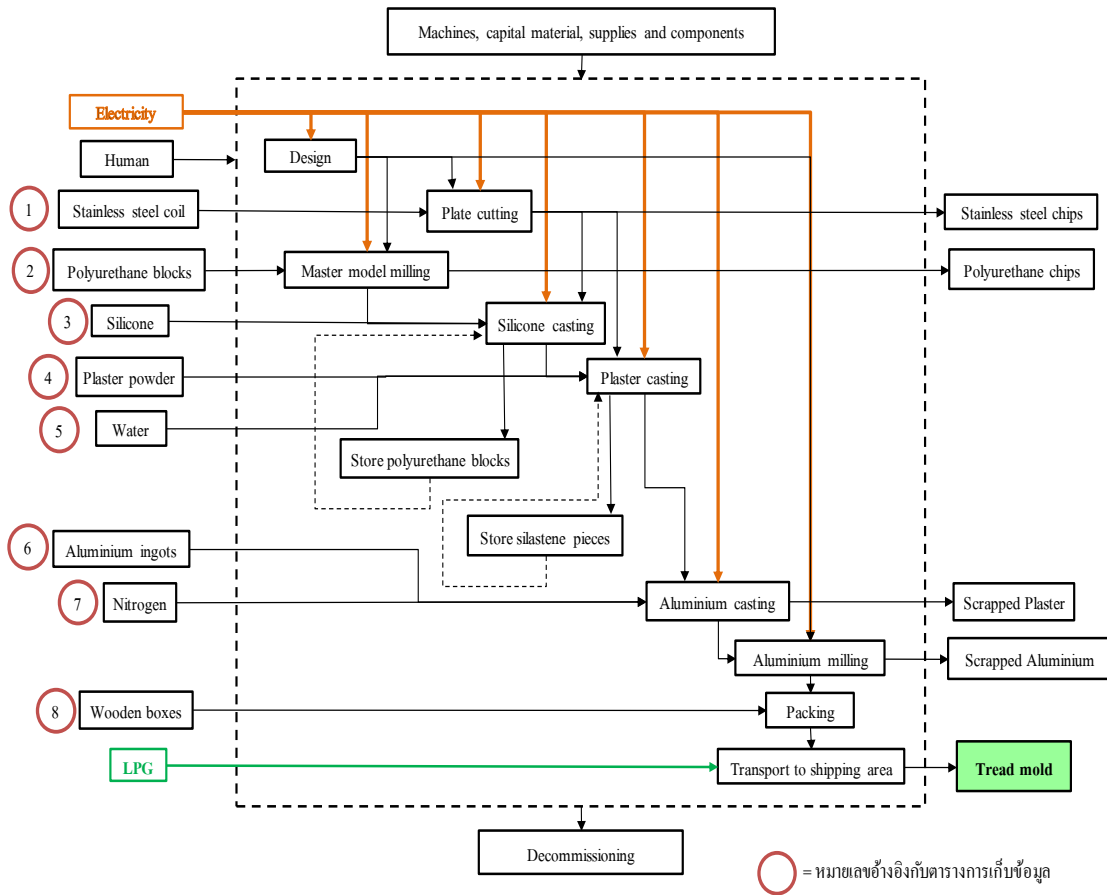
ก๊าซ LPG ถูกใช้สำหรับขั้นตอนการขนส่งภายในโรงงานขั้นสุดท้าย เพื่อขนส่งแม่พิมพ์จากแผนกบรรจุไปยังพื้นที่ที่รถมารับ ซึ่งทั้ง 2 บริเวณอยู่ติดกัน ใช้ระยะทางน้อยมากประมาณ 5-10 เมตร อีกทั้งมีการขนส่งที่เท่ากันสำหรับการขนส่งแม่พิมพ์ 2 ประเภท จึงไม่ถูกนำมาคิด ส่วนทรัพยากรบุคคล เป็นอีกข้อมูลซึ่งไม่มีความแตกต่างในการใช้ ของแม่พิมพ์ทั้ง 2 ประเภท จึงไม่นำมาคิดเช่นกัน

เครื่องจักรที่ใช้การผลิตแต่ละกระบวนการ เป็น Capital input ถูกนำมาคำนวณ โดยใช้ข้อมูลราคาเครื่องจักร และอายุการใช้งาน

2. Output

นอกจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ แม่พิมพ์ แล้ว ยังมีของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต แต่ไม่สามารถหาข้อมูลแยกตามแม่พิมพ์ได้ เนื่องจากของเสียในโรงงานจะถูกรวมกันหมด และขายให้โรงงานกำจัดขยะตามประเภทต่อไป จึงไม่คิดรวมการทำลายซากของเสียในการศึกษานี้ และไม่รวมการทำลายซากของ Capital input (Decommissioning) เช่นกัน

กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกขึ้นเล็กและขึ้นใหญ่ ผ่านกระบวนการผลิตหลักเหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่รายละเอียดของชิ้นงานแต่ละกระบวนการ การออกแบบรูปทรง และเวลาในการผลิต เขียนในรูปแบบระบบทางพลังงาน (TES) ดังภาพที่ 3-10



ภาพที่ 3-10 กระบวนการผลิตแม่พิมพ์ส่วนลายดอกยาง (Tread mold)

ข้อแตกต่างของกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ 2 ประเภท

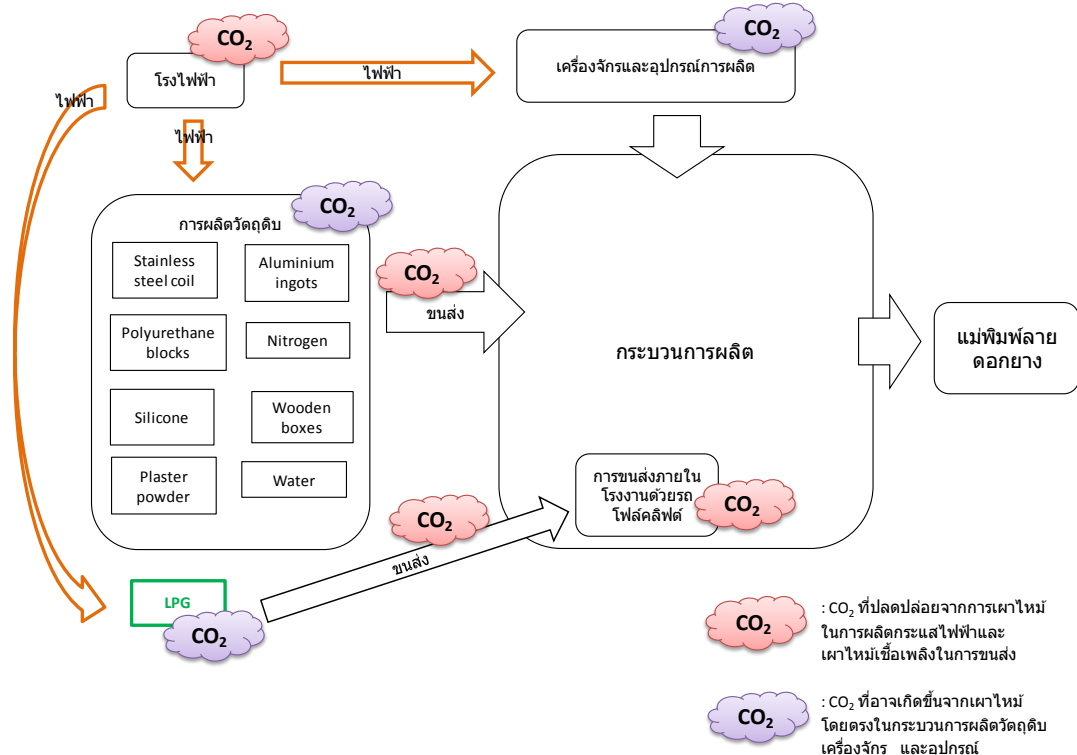
กระบวนการผลิตของทั้ง 2 ผลิตภัณฑ์ คือ แม่พิมพ์พลาสติกขึ้นใหญ่ และแม่พิมพ์พลาสติกขึ้นเล็กมีลักษณะคล้ายกัน แตกต่างกันที่ชนิดของวัสดุดิบ ปริมาณวัสดุดิบที่ใช้ และเวลาในการผลิต ข้อแตกต่างของ 2 ผลิตภัณฑ์ ได้แก่

1. ปริมาณโพลียูรีเทน ในกระบวนการกัดแม่พิมพ์ต้นแบบ (Master model milling)
2. ปริมาณซิลิโคน ในกระบวนการหล่อซิลิโคน (Silicone casting)
3. ปริมาณพลาสติก ในกระบวนการหล่อพลาสติก (Plaster casting)
4. ชนิดและปริมาณของแท่งอลูมิเนียม ที่ใช้ในกระบวนการหล่ออลูมิเนียม (Aluminum casting)
5. เวลาการผลิต โดยเฉพาะในกระบวนการกัดแม่พิมพ์ต้นแบบ (Master model milling) และกระบวนการกัดชิ้นงานอลูมิเนียม (Aluminum milling) ซึ่งส่งผลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้
6. ปริมาณการผลิตแม่พิมพ์พลาสติก และแม่พิมพ์อลูมิเนียมต่อการหล่อ 1 ครั้ง ในกระบวนการหล่อพลาสติก (Plaster casting) และกระบวนการหล่ออลูมิเนียม (Aluminum casting) การหล่อด้วยแม่พิมพ์ขึ้นใหญ่หล่อได้เป็นจำนวนน้อยกว่าต่อการหล่อ 1 ครั้ง แต่แม่พิมพ์ขึ้นเล็ก จะใช้จำนวนชิ้นงานมากกว่าสำหรับการประกอบให้ได้เป็นแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุด

การเก็บรวบรวมข้อมูล

เก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อย GHG ดังภาพที่ 3-11 ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ CO₂ เนื่องจากเป็น GHG หลักที่เกิดในกระบวนการผลิต โดยแบ่งเป็น GHG ที่เกิดจาก

1. การเผาไหม้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า และการเผาไหม้เชื้อเพลิงขณะขนส่ง
2. การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตวัตถุดิบ เครื่องจักร และอุปกรณ์



ภาพที่ 3-11 CO₂ ที่ปลดปล่อยตลอดวัฏจักร (B2B) ของการผลิตแม่พิมพ์ลายดอกยาง

การเก็บข้อมูลการปล่อย GHG แบ่งเป็นหมวด ดังนี้ 1) วัตถุดิบ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุด 2) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตแต่ละขั้นตอน 3) การขนส่งวัตถุดิบภายในประเทศจากแหล่งจัดหาวัตถุดิบ 4) เครื่องจักร ที่ใช้ในกระบวนการผลิต

วัตถุดิบ

ใช้ข้อมูลปริมาณวัตถุดิบจริงที่ใช้ต่อแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุด โดยกระบวนการเก็บข้อมูลในกระบวนการ ได้มาจากวิธีการดังนี้

1. ข้อมูลปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ และของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ใช้การตรวจวัดในการผลิตจริงและสอบถามจากพนักงานในสายการผลิต
2. ข้อมูลเชิงปริมาตรจากการออกแบบแม่พิมพ์ ได้จากฝ่ายออกแบบ และโปรแกรมในการออกแบบแม่พิมพ์
3. ข้อมูลปริมาณการผลิตและการสั่งซื้อวัตถุดิบย้อนหลัง เพื่อนำมาทำการปันส่วน ได้จากฝ่ายการเงิน และนำมาตรวจสอบอีกครั้ง เพื่อให้ตรงกับรายละเอียดที่ต้องการใช้
4. ข้อมูลราคาต่อหน่วยของวัตถุดิบแต่ละชนิด ได้จากฝ่ายจัดซื้อ

ข้อมูลปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ กับราคาต่อหน่วยวัตถุดิบ สามารถนำมาคิดเป็นราคาของ วัตถุดิบแต่ละชนิดต่อการผลิตแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุด จากนั้นจะนำไปคำนวณปริมาณ การปลดปล่อย CO₂ ได้จากตาราง I/O หรือแหล่งอ้างอิงที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบนั้น ๆ

การคำนวณวัตถุดิบแต่ละชนิด มีรายละเอียดดังนี้

1. ม้วนเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นส่วนที่ตัดเป็นแผ่นเล็กบาง ใช้สำหรับขึ้นรูปให้เกิดเป็นร่อง ดอกยางเล็ก สามารถคำนวณมวลของเหล็กกล้าไร้สนิม ได้ จากข้อมูลขนาดและจำนวนที่ใช้ในการ ผลิตแม่พิมพ์ ซึ่งได้มาจากการออกแบบ และตรวจสอบความถูกต้องกับการใช้ในกระบวนการผลิต จริง ดังสูตร

ความกว้าง x ความยาว x ความหนา x จำนวนที่ใช้ในแม่พิมพ์ 1 ชุด x ความหนาแน่น เมื่อได้เป็นปริมาณเชิงมวล (kg) สามารถนำไปคิดเป็นราคาที่ใช้ต่อแม่พิมพ์ 1 ชุด (บาท ต่อกิโลกรัม) จากนั้นนำมาหาปริมาณการปลดปล่อย GHG จากตาราง I/O (Pawinee Suksuntornsiri & Bundit Limmeechokchai, 2005) ซึ่งแม่พิมพ์ทั้ง 2 ชนิดใช้ปริมาณม้วนเหล็กกล้าไร้สนิมเท่ากัน เนื่องจากเป็นแม่พิมพ์ที่ใช้ผลิตยางรุ่นเดียวกัน ดอกยางจึงมีจำนวนและขนาดเท่ากัน

2. โพลียูรีเทน เป็นก้อนวัตถุดิบ นำไปขึ้นรูปโดยการกัด (milling) ใช้วิธีการคำนวณ เช่นเดียวกับม้วนเหล็กกล้าไร้สนิม นำปริมาณเชิงมวลมาใช้คิดการปลดปล่อย GHG ด้วยข้อมูลของ ประเทศแถบยุโรป (Ruuska, 2013) เนื่องจากเป็นวัตถุดิบนำเข้ามาจากแถบดังกล่าว โดยที่แม่พิมพ์ แบบ sector ใช้จำนวนโพลียูรีเทน 12 ชิ้น ส่วนแม่พิมพ์แบบ element ใช้เพียง 3 ชิ้น

3. ซิลิโคน ใช้การคำนวณวิธีเดียวกัน เพื่อหาปริมาณเชิงมวลของวัตถุดิบ โดยแม่พิมพ์ แบบ sector จำเป็นต้องหล่อซิลิโคนจำนวน 34 ชิ้น ส่วนแม่พิมพ์แบบ element ใช้ 13 ชิ้น ความกว้าง ของชิ้นงานซิลิโคนแต่ละชิ้นไม่เท่ากัน และเปลี่ยนไปตามขนาดยาง จึงใช้ค่าเฉลี่ยของขนาดชิ้นงาน ทั้งหมดสำหรับรุ่นยางฤดูหนาวที่เลือกมา

4. ผงพลาสติก ใช้ปริมาตรชิ้นงานพลาสติกที่วัดได้ คำนวณย้อนกลับเพื่อหาปริมาณ ของผงพลาสติก จากสูตรการผสมพลาสติกของโรงงานตามชนิดของแม่พิมพ์

5. น้ำ ได้จากการคำนวณเช่นเดียวกับการคำนวณผงพลาสติก

6. แท่งอลูมิเนียม ได้จากการคำนวณปริมาตรของชิ้นงานอลูมิเนียมแต่ละชิ้น และนำไป คูณกับความหนาแน่นของแท่งอลูมิเนียมที่ใช้ ได้เป็นน้ำหนักของอลูมิเนียมสำหรับแม่พิมพ์ 1 ชุด โดยที่แม่พิมพ์ พลาสติกชิ้นใหญ่มีจำนวนชิ้นงาน 8 ชิ้นสำหรับทุกขนาดแม่พิมพ์ และแม่พิมพ์ พลาสติกชิ้นเล็กมีจำนวน 68 ชิ้นโดยเฉลี่ย

7. ก๊าซไนโตรเจน ใช้ข้อมูลการผลิตรายปีย้อนหลัง และปริมาณการใช้ก๊าซไนโตรเจน แยกตามประเภทของแม่พิมพ์ จากนั้นนำมาเป็นส่วนใหญ่เพื่อหาปริมาณการใช้เฉลี่ยต่อแม่พิมพ์ 1 ชุด

8. ลังไม้ ใช้จำนวน 1 ลังขนาดเท่ากัน สำหรับแม่พิมพ์ทั้ง 2 ชนิด

สามารถสรุปปริมาณการใช้วัตถุดิบตามประเภทแม่พิมพ์ ดังตารางที่ 3-1 พร้อมกับข้อมูลราคาวัตถุดิบ สำหรับใช้ในการคิดปริมาณ GHG จากตาราง I/O หรือแหล่งอ้างอิงเฉพาะของวัตถุดิบนั้น ๆ

ตารางที่ 3-1 ปริมาณและราคาวัตถุดิบ

| หมายเลข | อ้างอิงจาก | ชนิดวัตถุดิบ | หน่วย | ปริมาณที่ใช้ของแม่พิมพ์ | ปริมาณที่ใช้ของแม่พิมพ์ | ราคา |
|-------------|-------------|----------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| ภาพที่ 3-10 | ภาพที่ 3-10 | | | sector | element | |
| 1 | | ม้วนเหล็กกล้าไร้สนิม | kg | 51.61 | 51.61 | 10.19 USD/ kg |
| 2 | | โพลียูรีเทน | kg | 0.88 | 0.51 | 7,060 EUR/ m ³ |
| 3 | | ซิลิโคน | kg | 4.03 | 9.67 | 26.5 EUR/ kg |
| 4 | | ผงพลาสติก | kg | 44.02 | 301.24 | 2.2 GBP/ kg |
| 5 | | น้ำ | m ³ | 0.019 | 0.133 | 26.75 THB/ m ³ |
| 6 | | แท่งอลูมิเนียม | kg | 55.3 | 283.4 | 81.58 THB/ kg |
| 7 | | ก๊าซไนโตรเจน | Baht | 147.5 | 340.4 | 114.29 THB/ m ³ * |
| 8 | | ลังไม้ | ลัง | 1 | 1 | 1,080 THB/ ลัง |

หมายเหตุ: * ที่ความหนาแน่น 1.17 kg/m³

พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิต

ใช้ข้อมูลเวลาการผลิตจริงเฉลี่ย และกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักรแต่ละเครื่อง เพื่อหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุด ดังตารางที่ 3-2 โดยเวลาเฉลี่ย ได้จากเวลาการผลิตจริงของแม่พิมพ์ winter ทั้งหมด ซึ่งนอกจากเวลาที่ใช้ในการเดินเครื่องจักรเพื่อผลิตชิ้นงานโดยตรงแล้ว ยังต้องรวมเวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องจักรด้วย หากเวลาที่ใช้ในการปรับตั้ง 1 ครั้ง สามารถผลิตแม่พิมพ์ลายดอกยางได้หลายชุด ต้องนำข้อมูลมาป้อนส่วนให้ได้เป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับแม่พิมพ์ 1 ชุด

ตารางที่ 3-2 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าเครื่องจักรและเวลาผลิต

| กระบวนการ | เครื่องจักร | กำลังไฟฟ้า (kW) | เวลาที่ใช้ของ แม่พิมพ์ sector (ชั่วโมง) | เวลาที่ใช้ของ แม่พิมพ์ element (ชั่วโมง) |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------|---|--|
| Design | Computer | 0.3 | 60 | 60 |
| Master model milling | Milling machine | 50 | 45.6 | 22.5 |
| Plate cutting | Laser cutting machine | 0.1 | 8.8 | 8.8 |
| Silicone casting | Mixing machine | 2 | 15.5 | 5.2 |
| Plaster casting | Mixing machine | 1.5 | 24 | 48 |
| Aluminium casting | Low pressure casting machine | 5.5 | 74.6 | 276.3 |
| Aluminium milling | Milling machine | 25 | 4.2 | 32.8 |

การขนส่ง

การขนส่งวัตถุดิบแต่ละประเภทจากแหล่งจำหน่าย ใช้ข้อมูลระยะทางจากแหล่งจำหน่าย ชนิดยานพาหนะ ชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ และปริมาณการขนส่งต่อรอบ ดังตารางที่ 3-3 ซึ่งปริมาณขนส่งต่อรอบ เป็นค่าประมาณ จากการสอบถามพนักงานขนส่งวัตถุดิบแต่ละประเภท และสุ่มตรวจสอบจริง ข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถขนส่งแต่ละวัตถุดิบ สามารถนำไปคำนวณเป็นปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อเที่ยว ด้วยค่าแฟกเตอร์การปลดปล่อย CO₂ ของน้ำมันดีเซล (74,100 kg/TJ) และป็นส่วนเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อแม่พิมพ์ 1 ชุด

ตารางที่ 3-3 ข้อมูลการขนส่งวัตถุดิบ

| หมายเลขอ้างอิง จากภาพที่ 3-10 | วัตถุดิบที่มีการขนส่ง | ระยะทาง (km) | ปริมาณขนส่งต่อรอบ |
|----------------------------------|-----------------------|--------------|-------------------|
| 1 | ม้วนเหล็กกล้าไร้สนิม | 4.7 | 5 ตัน |
| 2 | โพลียูรีเทน | 4.7 | 2 ตัน |
| 3 | ซิลิโคน | 4.7 | 10 ตัน |

ตารางที่ 3-3 (ต่อ)

| หมายเลขอ้างอิง จากภาพที่ 3-10 | วัตถุดิบที่มีการขนส่ง | ระยะทาง (km) | ปริมาณขนส่งต่อรอบ |
|----------------------------------|-----------------------|--------------|-------------------|
| 4 | ผงพลาสติก | 4.7 | 20 ตัน |
| 6 | แท่งอลูมิเนียม | 81.8 | 10 ตัน |
| 7 | ก๊าซไนโตรเจน | 97.8 | 20 ถัง |
| 8 | ลังไม้ | 106 | 50 ลัง |

ปริมาณการปลดปล่อย GHG ของแต่ละวัตถุดิบ

วัตถุดิบในแต่ละกระบวนการใช้ข้อมูลการปลดปล่อย GHG ตามแหล่งที่ได้มาของวัตถุดิบ ดังตารางที่ 3-4 โดยอ้างอิงจาก 2 แหล่งคือ Ruuska (2013) และ ตาราง I/O (Pawinee Suksuntornsiri, Paiboon Limpitpanich, Warunee Tia & Bundit Limmeechokchai, 2013) ใช้ข้อมูล Emission factor ของปี 2560

ตารางที่ 3-4 Emission factor (EF) ของแต่ละวัตถุดิบตามแหล่งอ้างอิง

| กระบวนการ | วัตถุดิบ | แหล่งอ้างอิง | I/O Code | EF | หน่วย |
|-------------------------|--------------------------|--------------|-------------|--------|------------------------------|
| Master model milling | โพลียูรีเทน | Ruuska | - | 4.2 | kgCO ₂ / kg |
| Plate cutting | ม้วนเหล็กกล้า ไร้สนิม | ตาราง I/O | 106 | 61.52 | tonCO ₂ / ล้วนบาท |
| Silicone casting | ซิลิโคน | ตาราง I/O | 86 | 70.32 | tonCO ₂ / ล้วนบาท |
| Plaster casting | ผงพลาสติก | Ruuska | - | 0.2432 | kgCO ₂ / kg |
| Plaster casting | น้ำ | ตาราง I/O | 137 | 25.09 | tonCO ₂ / ล้วนบาท |
| Aluminium casting | อลูมิเนียมแท่ง | ตาราง I/O | 104 | 65.52 | tonCO ₂ / ล้วนบาท |
| Aluminium casting | ไนโตรเจน | ตาราง I/O | 84 | 134.14 | tonCO ₂ / ล้วนบาท |
| Packing | ลังไม้ | ตาราง I/O | 79 | 19.21 | tonCO ₂ / ล้วนบาท |

ตารางที่ 3-4 (ต่อ)

| กระบวนการ | วัตถุดิบ | แหล่งอ้างอิง | I/O Code | EF | หน่วย |
|---------------------------|----------|--------------|-------------|-------|------------------------------|
| In-site transportation | LPG | ตาราง I/O | 93 | 28.49 | tonCO ₂ / ล้านบาท |

ปริมาณการปลดปล่อย GHG ของเครื่องจักรและอุปกรณ์ (Capital input)

เครื่องจักรและอุปกรณ์ (Capital input) ในแต่ละกระบวนการ สามารถใช้ข้อมูลจาก ตาราง Input-Output ในการคำนวณ โดยหาข้อมูลราคา อายุของเครื่องจักรและอุปกรณ์แต่ละชนิด จากนั้น นำไปทำการป้อนส่วนเพื่อคิดปริมาณการปลดปล่อย GHG ต่อแม่พิมพ์ 1 ชุด โดยใช้คำนวณกับปริมาณชิ้นงานที่ผลิตได้ตลอดอายุการใช้งาน จากข้อมูลการผลิตแม่พิมพ์ย้อนหลัง 10 ปี มีการผลิตแม่พิมพ์แบบ sector 30,009 ชุด และแม่พิมพ์แบบ element 17,843 ชุด จากนั้น นำไปทำการป้อนส่วนเพื่อคิดปริมาณการปลดปล่อย CO₂ ต่อแม่พิมพ์ 1 ชุด โดยใช้คำนวณกับปริมาณชิ้นงานที่ผลิตได้ตลอดอายุการใช้งาน จากข้อมูลการผลิตแม่พิมพ์ย้อนหลัง 10 ปี มีการผลิตแม่พิมพ์แบบ sector 30,009 ชุด และแม่พิมพ์แบบ element 17,843 ชุดดังตารางที่ 3-5 จากนั้น นำไปทำการป้อนส่วนเพื่อคิดปริมาณการปลดปล่อย CO₂ ต่อแม่พิมพ์ 1 ชุด โดยใช้คำนวณกับปริมาณชิ้นงานที่ผลิตได้ตลอดอายุการใช้งาน จากข้อมูลการผลิตแม่พิมพ์ย้อนหลัง 10 ปี มีการผลิตแม่พิมพ์แบบ sector 30,009 ชุด และแม่พิมพ์แบบ element 17,843 ชุด

ตารางที่ 3-5 ข้อมูลเครื่องจักรและอุปกรณ์ (Capital input)

| กระบวนการ | เครื่องจักร/ อุปกรณ์ | อายุ การใช้งาน (ปี) | ราคา (ล้านบาท) | จำนวน แม่พิมพ์ที่ ผลิตแบบ sector | จำนวน แม่พิมพ์ที่ ผลิตแบบ element |
|----------------------|----------------------|---------------------------|-------------------|---|--|
| Master model milling | Milling machine | 20 | 20 | 30,009 | 17,843 |

ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

| กระบวนการ | เครื่องจักร/ อุปกรณ์ | อายุการใช้งาน (ปี) | ราคา (ล้านบาท) | จำนวนแม่พิมพ์ที่ผลิตแบบ sector | จำนวนแม่พิมพ์ที่ผลิตแบบ element |
|------------------|------------------------------|--------------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Plate cutting | Laser cutting machine | | 6 | | |
| Silicone casting | Mixing machine | | 1.09 | | |
| Plaster casting | Mixing machine | 20 | 29 | 30,009 | 17,843 |
| Aluminum casting | Low pressure casting machine | | 15 | | |
| Aluminum milling | Milling machine | | 28 | | |

การเปรียบเทียบคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของ 2 ผลิตภัณฑ์

ทำการเปรียบเทียบโดยแบ่งเป็น

1. เปรียบเทียบคาร์บอนฟุตพริ้นท์รวมของผลิตภัณฑ์ คือ เปรียบเทียบคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของแม่พิมพ์พลาสติกชิ้นใหญ่ และพลาสติกชิ้นเล็ก

2. เปรียบเทียบโดยแบ่งเป็นกระบวนการย่อย เพื่อวิเคราะห์กระบวนการที่มีการปลดปล่อย GHG จากมากไปน้อยตามลำดับ และนำไปสรุปผลต่อไป

3. เปรียบเทียบโดยแบ่งเป็นประเภทวัตถุดิบ โดยเปรียบเทียบด้วยกราฟแท่งรูปแบบเดียวกับการเปรียบเทียบเป็นกระบวนการย่อย

4. เปรียบเทียบผลของการศึกษาด้วยวิธี ISO/DIS 14067.2 นี้กับการคำนวณด้วยโปรแกรม Simapro โดยใช้ข้อมูลปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละกระบวนการสำหรับการผลิตแม่พิมพ์

1 ชุด

บทที่ 4

ผลการศึกษา

ปริมาณการปล่อย CO₂ ได้จากการเก็บข้อมูลในส่วนต่าง ๆ ดังนี้

ปริมาณการปล่อย GHG จากการได้มาซึ่งวัตถุดิบ

1. เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ถูกสั่งซื้อเป็นวง (Strip coil) นำมาตัดเป็นชิ้นเล็ก เพื่อประกอบเข้ากับแม่พิมพ์ต้นแบบ โพลียูรีเทน และแม่พิมพ์ซิลิโคน เพื่อขึ้นรูปแม่พิมพ์พลาสติก ให้เป็นร่องเล็กบาง ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดร่องรีดน้ำเล็กบนลายดอกยาง จำนวนชิ้นงานของเหล็กกล้าไร้สนิมได้จากการนับจำนวนจริงที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์รวมถึงอัตราการสูญเสียในการผลิต เนื่องจากราคาวัตถุดิบคิดจากการสั่งซื้อเป็นน้ำหนัก จำนวนชิ้นงานที่ใช้จึงถูกคำนวณเพื่อเปลี่ยนเป็นปริมาตรและเปลี่ยนเป็นน้ำหนัก จากค่าความหนาแน่น 7.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร น้ำหนักที่ได้สามารถเปลี่ยนเป็นราคาของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ต่อแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุด โดยใช้ราคาสั่งซื้อจริงในปี 2558 และได้ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยคิดจากความเข้มข้นของการปลดปล่อยในปี 2558 หมวดที่ 106 คือ 62.22 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อล้านบาท (Pawinee Suksuntornsiri et al., 2013)

แม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกชิ้นใหญ่และแบบพลาสติกชิ้นเล็กในการศึกษานี้ เลือกแม่พิมพ์ที่สามารถใช้ในการผลิตยางแบบเดียวกันได้ จำนวนร่องดอกยางของแม่พิมพ์ทั้ง 2 ประเภท จึงมีจำนวนเท่ากัน ทำให้ปริมาณการปลดปล่อย GHG จากการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเท่ากัน เป็น 1,512.43 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

2. โพลียูรีเทน (Polyurethane) เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ต้นแบบด้วยกระบวนการกัด ได้จากขนาดที่ใช้จริง ซึ่งถูกกำหนดด้วยขั้นตอนการออกแบบ ปริมาตรของชิ้นงานโพลียูรีเทน ถูกเปลี่ยนเป็นน้ำหนักด้วยค่าความหนาแน่นของชนิดโพลียูรีเทนที่ใช้ เนื่องจากโพลียูรีเทนที่ใช้เป็นวัตถุดิบที่นำเข้าจากประเทศในทวีปยุโรป จึงใช้ค่าการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 4.2 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อวัตถุดิบ 1 กิโลกรัม (Ruuska, 2013)

แม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกชิ้นใหญ่ จำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ต้นแบบจำนวนมากเพื่อการหล่อพลาสติกชิ้นใหญ่ 1 ชิ้น ในขณะที่แม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกชิ้นเล็กสามารถหล่อขึ้นได้จากแม่พิมพ์ต้นแบบที่น้อยกว่า ได้ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์

เทียบเท่าของแม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกชั้นใหญ่ และพลาสติกชั้นเล็กเป็น 3.71 และ 2.13 กิโลกรัม ตามลำดับ

3. ซิลิโคน (Silicone) ใช้เทลงแม่พิมพ์ต้นแบบที่ผลิตด้วยโพลียูรีเทน คำนวณปริมาตรของชิ้นงานซิลิโคนจากขนาดชิ้นงานจริง เปลี่ยนเป็นน้ำหนักโดยใช้ค่าความหนาแน่นที่ระบุตามชนิดซิลิโคนที่ใช้ และสามารถคิดเป็นราคาวัตถุดิบที่ใช้ต่อชิ้นงานซิลิโคนทั้งหมดสำหรับแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุดได้ ราคาที่คำนวณได้นี้ นำมาเปลี่ยนเป็นปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยค่าความเข้มข้นการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ หมวดที่ 86 คือ 70.55 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อล้านบาท (Pawinee Suksuntornsiri et al., 2013)

จำนวนชิ้นงานซิลิโคนของแม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกชั้นใหญ่จะมีจำนวนมากกว่าแบบพลาสติกชั้นเล็ก เนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับชิ้นงานโพลียูรีเทน คือ ต้องใช้ชิ้นงานซิลิโคนจำนวนมากในการหล่อพลาสติกชั้นใหญ่ 1 ครั้ง ข้อแตกต่างคือชิ้นงานซิลิโคนแต่ละชิ้นของแม่พิมพ์แบบพลาสติกชั้นเล็ก มีขนาดใหญ่กว่ามาก ทำให้น้ำหนักรวมของซิลิโคนที่ใช้นั้นแม่พิมพ์แบบพลาสติกชั้นเล็กมีค่ามากกว่า และมีปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า 743.26 กิโลกรัม ส่วนแม่พิมพ์แบบพลาสติกชั้นใหญ่ มีปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าเป็น 309.65 กิโลกรัม

4. พลาสติก (Plaster) สั่งซื้อเป็นพลาสติกผงจากทวีปยุโรป นำมาผสมน้ำ และเทลงบนชิ้นงานซิลิโคนที่มีการเสียบแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมไว้ สามารถคำนวณหาน้ำหนักของชิ้นงานพลาสติกแต่ละแบบได้จากขนาดชิ้นงานตามการออกแบบ น้ำหนักชิ้นงานของพลาสติกเป็นน้ำหนักรวมของพลาสติกผสมกับน้ำ สามารถแยกเป็นน้ำหนักของพลาสติกเพียงอย่างเดียวจากอัตราส่วนผสมที่กำหนด ใช้ค่าความเข้มข้นการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าเป็น 0.2432 กิโลกรัมต่อพลาสติก 1 กิโลกรัม (Ruuska, 2013) ได้ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของแม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกชั้นใหญ่และชั้นเล็กเป็น 10.71 และ 73.26 กิโลกรัม ตามลำดับ

5. น้ำ ได้น้ำหนักการใช้ต่อแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุดจากการคำนวณพลาสติกผสม เมื่อเปลี่ยนน้ำหนักเป็นปริมาตร จะสามารถคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการใช้น้ำของแม่พิมพ์ 1 ชุดได้ ด้วยค่าความเข้มข้นการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า 25.76 ตันต่อล้านบาท (Pawinee Suksuntornsiri et al., 2013) คิดเป็นปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของแม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกชั้นใหญ่ และพลาสติกชั้นเล็ก 13 และ 88.96 กิโลกรัม ตามลำดับ

6. อลูมิเนียม (Aluminum) ได้จากการหลอมแท่งอลูมิเนียมเป็นอลูมิเนียมเหลวหล่อขึ้นรูปในชิ้นงานพลาสติก สามารถคิดปริมาตรได้จากขนาดของชิ้นงานในขั้นตอนการออกแบบ จากนั้นคำนวณเปลี่ยนเป็นน้ำหนักเพื่อคิดเป็นราคาของอลูมิเนียมที่ใช้ต่อแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุด ใช้ค่าความเข้มข้นการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า 65.86 กิโลกรัมต่อล้านบาท (Pawinee Suksuntornsiri et al., 2013) ได้ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของแม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกชิ้นใหญ่และชิ้นเล็กเป็น 297.15 และ 1,522.71 กิโลกรัมตามลำดับ

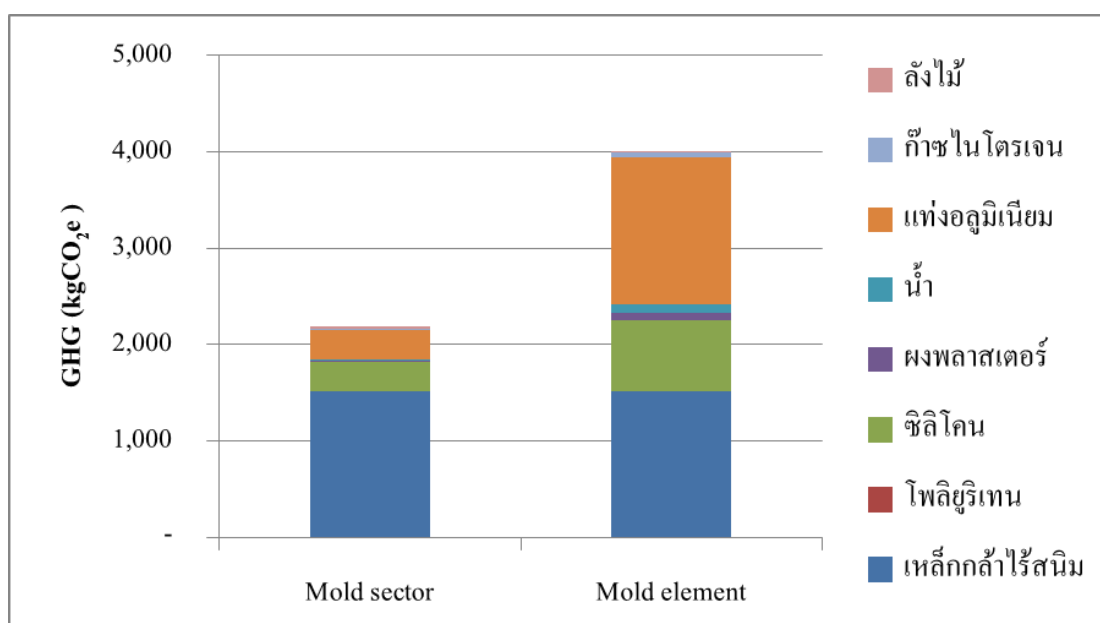
7. ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen) ซึ่งใช้ในกระบวนการหล่ออลูมิเนียม มีข้อมูลจากค่าใช้จ่ายรายปี เมื่อมีข้อมูลการผลิตแม่พิมพ์รวมรายปี สามารถคำนวณหาค่าใช้จ่ายของไนโตรเจนต่อแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุดได้จากค่าความเข้มข้นการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า 134.45 กิโลกรัมต่อล้านบาท (Pawinee Suksuntornsiri et al., 2013) ได้ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของแม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกชิ้นใหญ่และชิ้นเล็กเป็น 19.83 และ 45.76 กิโลกรัมตามลำดับ

8. ถังไม้ มีข้อมูลโดยตรงจากราคาถังไม้ที่ใช้จริงสำหรับแม่พิมพ์ลายดอกยาง 1 ชุด เมื่อคิดค่าความเข้มข้นการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า 19.43 กิโลกรัมต่อล้านบาท (Pawinee Suksuntornsiri et al., 2013) ได้ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของแม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกชิ้นใหญ่และชิ้นเล็กเท่ากันเป็น 20.98 กิโลกรัม

ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของแม่พิมพ์ลายดอกยางทั้ง 2 แบบ เปรียบเทียบ ดังตารางที่ 4-1 และภาพที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ปริมาณการปลดปล่อย GHG แยกตามชนิดวัตถุดิบของแม่พิมพ์ 2 ชนิด ในการผลิตแม่พิมพ์ 1 ชุด

| ลำดับที่ | ชนิดวัตถุดิบ | แม่พิมพ์พลาสติก | แม่พิมพ์พลาสติก |
|----------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | ชั้นใหญ่ (Sector) | ชั้นเล็ก |
| | | GHG (kgCO ₂ e) | GHG (kgCO ₂ e) |
| 1 | เหล็กกล้าไร้สนิม | 1,512.43 | 1,512.43 |
| 2 | โพลียูรีเทน | 3.71 | 2.13 |
| 3 | ซิลิโคน | 309.65 | 743.26 |
| 4 | ผงพลาสติก | 10.71 | 73.26 |
| 5 | น้ำ | 13.00 | 88.96 |
| 6 | แท่งอลูมิเนียม | 297.15 | 1,522.71 |
| 8 | ก๊าซไนโตรเจน | 19.83 | 45.76 |
| 9 | ถังไม้ | 20.98 | 20.98 |
| | รวม | 21.87.46 | 4,009.49 |



ภาพที่ 4-1 กราฟเปรียบเทียบปริมาณการปลดปล่อย GHG แยกตามชนิดวัตถุดิบ

ปริมาณการปล่อย GHG จากการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิต

สามารถหาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละเครื่องจักรได้จากข้อมูลกำลังไฟฟ้าของเครื่องจักร และเวลาที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ลายดอกยาง จากนั้นนำมาหาค่าการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากรายงานพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทย ปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้ไฟฟ้าด้วยเครื่องจักรแยกตามกระบวนการผลิต ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ปริมาณการปลดปล่อย GHG จากการใช้ไฟฟ้าด้วยเครื่องจักรแยกตามกระบวนการผลิตในการผลิตแม่พิมพ์ 1 ชุด

| กระบวนการ | แม่พิมพ์พลาสติก ชิ้นใหญ่ (Sector) | แม่พิมพ์พลาสติก ชิ้นเล็ก |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| | GHG (kgCO ₂ e) | GHG (kgCO ₂ e) |
| Design | 9.75 | 9.75 |
| Plate cutting | 0.48 | 0.48 |
| Master model milling | 1,234.79 | 609.27 |
| Silicone casting | 16.76 | 5.67 |
| Plaster casting | 19.50 | 38.99 |
| Aluminium casting | 222.33 | 823.03 |
| Aluminium milling | 56.46 | 443.96 |
| รวม | 1,560.06 | 1,931.14 |

ปริมาณการปล่อย GHG จากการขนส่ง

ปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งหาได้จากข้อมูลระยะทางการขนส่งวัตถุดิบภายในประเทศ ปริมาณการขนส่งต่อเที่ยว และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เมื่อทำการบิน ส่วนสำหรับปริมาณวัตถุดิบที่ใช้จริงของแม่พิมพ์แต่ละชนิด ได้ปริมาณการปลดปล่อย GHG ของแม่พิมพ์พลาสติกชิ้นใหญ่และชิ้นเล็กเป็น 3.061 และ 6.277 กิโลกรัม ตามลำดับ

ปริมาณการปล่อย GHG จากการใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์

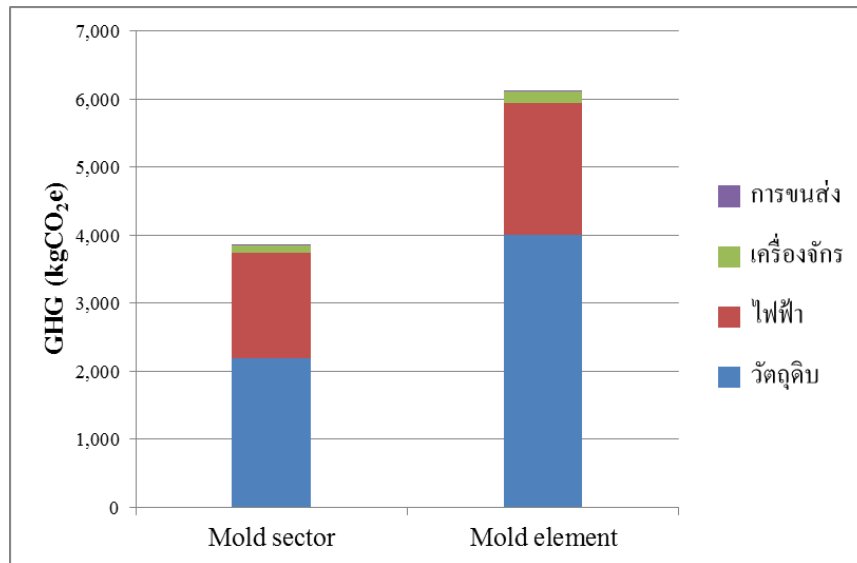
ปริมาณการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ (Capital input) ได้จากข้อมูลราคาเครื่องจักร อายุการใช้งาน และปริมาณการผลิต เมื่อทำการปรับส่วน สามารถคำนวณหาค่าการปลดปล่อย GHG ต่อแม่พิมพ์ 1 ชุดของแม่พิมพ์แบบพลาสติกชั้นใหญ่และชั้นเล็กเป็น 103.48 และ 174.04 กิโลกรัม ตามลำดับ

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ได้จากผลรวมของปริมาณการปลดปล่อย GHG ทั้งหมด ได้แก่ การใช้วัตถุดิบ การใช้พลังงานไฟฟ้า การใช้งานเครื่องจักร และการขนส่งวัตถุดิบ ดังตารางที่ 4-3 และภาพที่ 4-2

ตารางที่ 4-3 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์แม่พิมพ์ลายดอกยาง 2 ชนิด (kgCO₂e)

| ชนิดแม่พิมพ์ | ชนิดแม่พิมพ์ | คาร์บอนฟุตพริ้นท์ | วัตถุดิบ | ไฟฟ้า | เครื่องจักร | การขนส่ง |
|-----------------|--------------|-------------------|----------|-------|-------------|----------|
| พลาสติกชั้นใหญ่ | Sector mold | 3,851 | 2,187 | 1,560 | 103 | 3 |
| พลาสติกชั้นเล็ก | Element mold | 6,115 | 4,009 | 1,931 | 174 | 6 |



ภาพที่ 4-2 กราฟเปรียบเทียบคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของแม่พิมพ์ลายดอกยาง 2 ชนิด

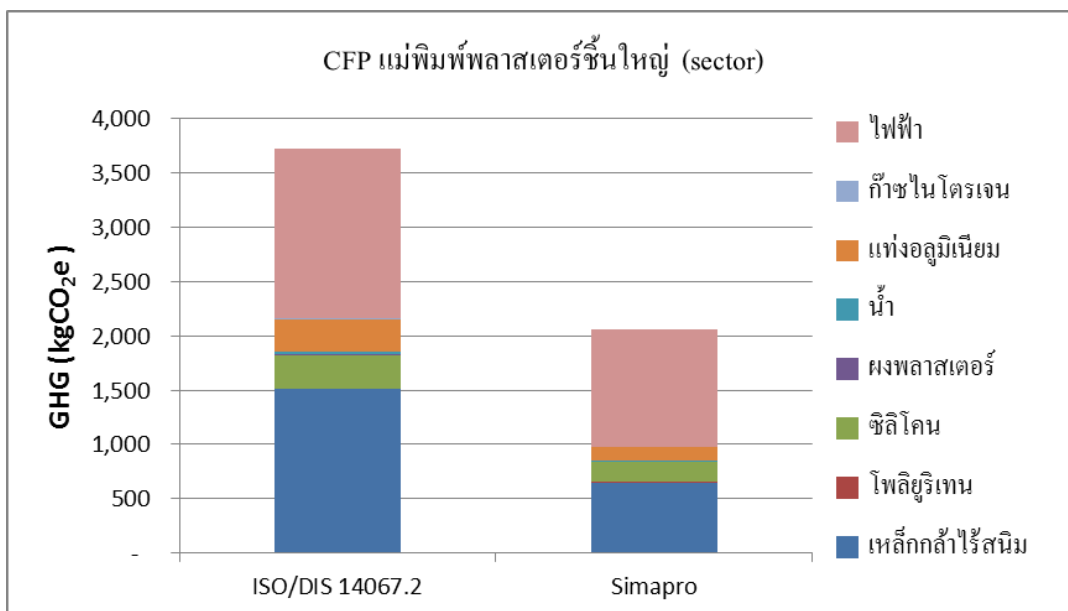
บทที่ 5

บทสรุป

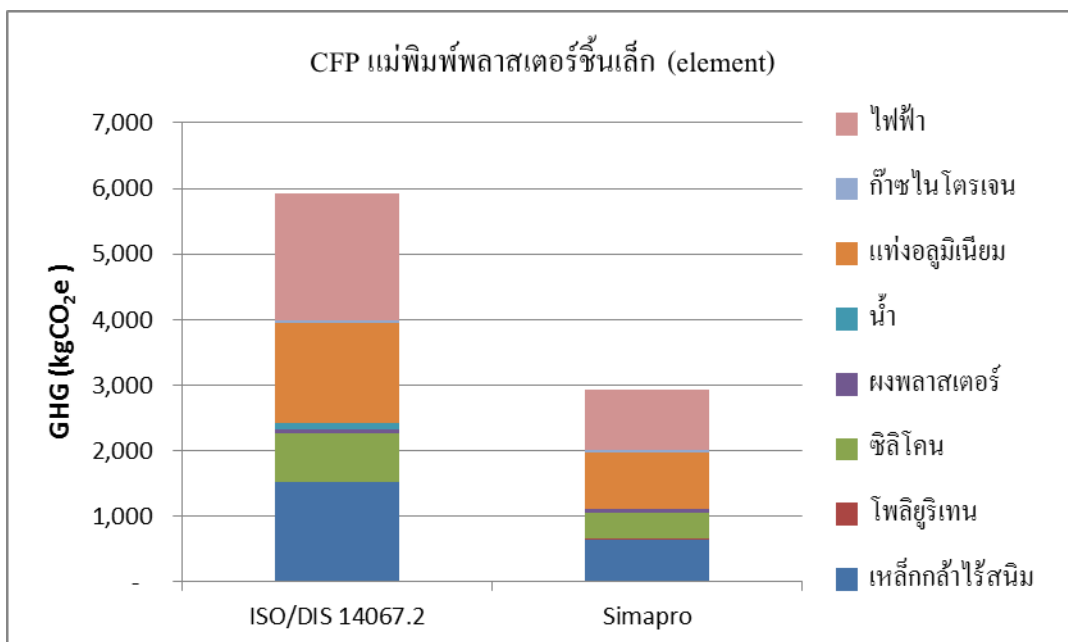
จากผลการศึกษาเพื่อประเมินความแตกต่างปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตแม่พิมพ์บางส่วนลายดอกยาง แบบพลาสติกอร์ซันใหญ่ และแบบพลาสติกอร์ซันเล็ก สรุปผลได้ดังนี้

1. ปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตแม่พิมพ์บางส่วนลายดอกยางแบบพลาสติกอร์ซันใหญ่ มีค่าเป็น 3,851 kgCO₂e และแบบพลาสติกอร์ซันเล็ก 6,115 kgCO₂e
 2. ปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตแม่พิมพ์พลาสติกอร์ซันเล็กมากกว่าแบบพลาสติกอร์ซันใหญ่ 2,264 kgCO₂e หรือคิดเป็น 159% ของคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของแม่พิมพ์พลาสติกอร์ซันใหญ่
 3. ปัจจัยหลักซึ่งส่งผลให้คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการผลิตแม่พิมพ์พลาสติกอร์ซันเล็กมากกว่า คือ ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ ทำให้เกิดความแตกต่างถึง 1,822 kgCO₂e คิดเป็น 80% ของปัจจัยทั้งหมด
 4. วัตถุดิบที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างมากที่สุด คือ อลูมิเนียม เมื่อเทียบกับวัตถุดิบทุกชนิดที่ใช้ อลูมิเนียมทำให้เกิดความแตกต่างของคาร์บอนฟุตพริ้นท์ 67% เนื่องจากแม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกอร์ซันเล็ก มีการหล่ออลูมิเนียม 68 ครั้ง เพื่อให้ได้แม่พิมพ์ 1 ชุด เทียบกับแบบพลาสติกอร์ซันใหญ่ ซึ่งหล่อเพียง 8 ครั้ง วัตถุดิบที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างเป็นอันดับ 2 คือ ซิลิโคน คิดเป็น 24% ของวัตถุดิบทั้งหมด
- ทั้งนี้ การปลดปล่อย GHG จากอลูมิเนียมจะเปลี่ยนแปลงไปตามประเทศผู้ผลิต เนื่องจากโครงสร้างการผลิตและใช้พลังงานต่างกัน เช่น หากเป็นอลูมิเนียมที่ผลิตจากประเทศญี่ปุ่น ซึ่งใช้ข้อมูลการศึกษาของ Nansai and Moriguchi (2005) จะทำให้การปลดปล่อย GHG ลดลง สำหรับแม่พิมพ์พลาสติกอร์ซันใหญ่เป็น 69.31 kgCO₂e และแม่พิมพ์พลาสติกอร์ซันเล็กเป็น 355.20 kgCO₂e
5. การลดปริมาณการใช้อลูมิเนียมในกระบวนการผลิตแม่พิมพ์พลาสติกอร์ซันเล็กสามารถลดปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ได้มากที่สุด
 6. การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์โดยวิธีของ ISO/DIS 14067.2 และวิธีการประเมินโดยใช้โปรแกรม Simapro ได้ปริมาณ CFP ที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 5-1 และภาพที่ 5-2 โดยวิธีการประเมินด้วย Simapro คำนวณได้น้อยกว่า เนื่องจากแหล่งวัตถุดิบของผลการศึกษานี้ได้จากการเก็บข้อมูลโดยตรงในโรงงานและงานวิจัยอ้างอิงที่เป็นข้อมูลของประเทศผู้ผลิตโดยตรง ในขณะที่

วัตถุดิบใน Simapro บางชนิดคิดจากการผลิตวัตถุดิบในกลุ่มประเทศใกล้เคียง และไม่ได้คำนวณการปลดปล่อย GHG จาก Capital input



ภาพที่ 5-1 การเปรียบเทียบ CFP จาก 2 วิธีการ ของแม่พิมพ์พลาสติกอร์ซันใหญ่



ภาพที่ 5-2 การเปรียบเทียบ CFP จาก 2 วิธีการ ของแม่พิมพ์พลาสติกอร์ซันเล็ก

ข้อเสนอแนะ

1. ผลการประเมินความแตกต่างของแม่พิมพ์ลายดอกยางทั้ง 2 แบบ ทำให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุดเหมือนกัน คือ ปริมาณการใช้วัตถุดิบหลักกล้าไร้สนิม สามารถลดปริมาณการใช้วัตถุดิบชนิดนี้ได้โดยการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในสายการผลิต ซึ่งต้องมีการวิเคราะห์ในรายละเอียดเพิ่มเติมว่าของเสียเกิดจากสาเหตุใด อีกวิธีการหนึ่งคือการลดปริมาณเนื้อเหล็กที่ถูกตัดทิ้ง โดยการพัฒนาวิธีการออกแบบให้มีการตัดชิ้นงานเหล็กที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด รวมไปถึงการพิจารณำของเสียในกระบวนการ ไปผลิตใหม่ (Recycle) จะช่วยส่งผลให้ CFP ของผลิตภัณฑ์น้อยลงได้เช่นกัน

วัตถุดิบอลูมิเนียม เป็นอีกวัตถุดิบหนึ่งที่เป็นปัจจัยหลักของคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของแม่พิมพ์แบบพลาสติกขึ้นเล็ก สามารถลดปริมาณการใช้โดยการพัฒนากระบวนการผลิตให้มีส่วนที่เป็นอลูมิเนียมที่น้อยลง และเพิ่มปริมาณการหล่ออลูมิเนียมต่อครั้งให้ได้จำนวนมากขึ้น การลดปริมาณอลูมิเนียมจะทำให้คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของแม่พิมพ์แบบพลาสติกขึ้นเล็กน้อยลง และใกล้เคียงกับแม่พิมพ์แบบพลาสติกขึ้นใหญ่มากขึ้น ส่งผลให้ลูกค้าผู้ผลิตยางที่จำเป็นต้องใช้แม่พิมพ์ชนิดนี้ ผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอนฟุตพริ้นท์น้อยลงด้วยเช่นกัน

2. ผลการประเมินความแตกต่างของคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของแม่พิมพ์แบบพลาสติก 2 ชนิด สามารถนำไปใช้เป็นปัจจัยหนึ่งในการเลือกสั่งซื้อแม่พิมพ์ของลูกค้าโรงงานผลิตยาง เนื่องจากแม่พิมพ์ทั้ง 2 ชนิด โดยส่วนใหญ่ใช้แทนกันได้ สามารถผลิตยางที่มีความซับซ้อนเท่ากัน และมีอายุการใช้งานเท่ากัน ยกเว้นข้อจำกัดสำหรับบางรุ่น เช่น ความกลมของยาง ปริมาณหนวดยาง และประสิทธิภาพการผลิตในส่วนการผลิตยาง

3. สามารถนำผลการศึกษาไปเก็บข้อมูลต่อ เช่น

3.1 หาปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของแม่พิมพ์บางส่วนอื่น ที่ไม่ใช่ลายดอกยาง ทำให้ได้คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของแม่พิมพ์ครบชุด ในกรณีที่ถูกคำสั่งซื้อแม่พิมพ์ใหม่ทั้งหมด

3.2 หาปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของแม่พิมพ์ลายดอกยางเป็นชิ้น อย่างไรก็ตาม การสั่งแม่พิมพ์เป็นชิ้นสำหรับทดแทนแม่พิมพ์ที่ใช้อยู่ มีโอกาสน้อยมาก มีการสั่งเฉพาะกรณีที่เกิดอุบัติเหตุทำให้แม่พิมพ์ชิ้นนั้น ๆ เสียหาย จากข้อมูลการสั่งซื้อย้อนหลัง ในสภาวะการใช้งานแม่พิมพ์ปกติ พบว่าไม่มีการสั่งแม่พิมพ์เป็นชิ้นมาทดแทนจนกว่าจะหมดอายุการใช้งานทั้งหมด

3.3 การเก็บข้อมูลการขนส่งระหว่างประเทศ เพื่อให้ครอบคลุมขอบเขตที่มากขึ้น

3.4 การหาข้อมูล EF ของวัตถุดิบจากประเทศ หรือ โรงงานผู้ผลิตโดยตรง จะได้ผลที่แม่นยำมากขึ้นมากกว่า EF จากกรณีศึกษาที่เป็นกลุ่มประเทศ

4. ปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากแม่พิมพ์ สามารถนำไปใช้คิดเป็นส่วนหนึ่งของ Capital input ของคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการผลิตยาง ซึ่งการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในการผลิตยาง ซึ่งเกิดจากแม่พิมพ์นั้น ขึ้นอยู่กับจำนวนยางที่ผลิตได้จากแม่พิมพ์ 1 ชุด จากการสอบถามบริษัทผู้ผลิตยางแห่งหนึ่ง แม่พิมพ์ยางมีอายุการใช้งานนานมาก และไม่มีอายุการใช้งานที่แน่นอน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยส่วนใหญ่หากแม่พิมพ์ยางไม่ถูกกระทบด้วยอุบัติเหตุ จะสามารถใช้ในการผลิตยางได้จนหมดรุ่นการผลิตยางนั้น ๆ โดยเฉลี่ยยางรุ่นหนึ่งอาจมีการผลิตได้ถึง 5 ปี และจะทยอยถูกทดแทนด้วยยางรุ่นใหม่ โดยทั่วไปแม่พิมพ์ 1 ชุดสามารถถูกใช้ผลิตยางได้ถึง 30,000 เส้น ดังนั้น หากนำ CFP ในการศึกษานี้ไปใช้คิดปริมาณการปลดปล่อย GHG ของยาง 1 เส้น จะมีค่าการปลดปล่อย GHG จากการผลิตแม่พิมพ์ลายดอกยางแบบพลาสติกอร์ซีนใหญ่ และซีนเล็ก เป็น 128.4 gCO₂e และ 203.8 gCO₂e ตามลำดับ

ปัจจัยหนึ่งที่สามารถทำให้ใช้แม่พิมพ์น้อยลง และผลิตยางได้มากขึ้น คือ การวางแผนล่วงหน้าในโครงการยางใหม่ เมื่อวางแผนให้มีเวลาผลิตยางเพียงพอสำหรับการเปิดขายยาง จึงไม่จำเป็นต้องสั่งแม่พิมพ์มากขึ้นอันเนื่องจากการผลิตยางไม่ทัน การจัดการสต็อกที่เหมาะสมของยางขนาดที่มีการสั่งซื้อมากและการคาดการณ์ความต้องการของตลาดที่แม่นยำ สามารถช่วยลดการสั่งซื้อแม่พิมพ์ใหม่ได้เช่นกัน

บรรณานุกรม

- สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ. (2555). *วิศวกรรมการผลิตขั้นสูง*, กรุงเทพฯ: บริษัทแอกทีฟ พรินท์ จำกัด.
- Bralla, J. G. (2007). *Handbook of Manufacturing Processes*. New York: Industrial Press Inc.
- Bras, B. & Cobert, A. (2011). Life-Cycle Environmental Impact of Michelin Tweel® Tire for Passenger Vehicles. *SAE International J. Passeng. Cars - Mech. Syst.*, 4 (1), 12.
- Bridgestone Americas Tire Operations. (2015). *If a tire's not sick, why must it be cured*. Retrieved from http://www.bridgestonetrucktires.com/us_eng/real/magazines/04v9iss2/ra7.asp.
- CantonFair Imp. & Exp. Co., Ltd. (2015). *Segmented Truck & Bus Tire Mold 003*. Retrieved from http://www.cantonfairtrading.com/product/segmented-truck-bus-tire-mold-003_146376_BGZSN.html.
- Das, A. & Kandpal, T. C. (1998). CO₂ emissions from aluminium manufacturing in India. *Energy*, 23(2), 145-152.
- Deshors Moulage Industrie. (2015). *Tire-mold*. Retrieved from <http://www.deshors-tiremold.com/fr/products/tire-mold/>
- eFunda Inc. (2015). *Milling - Cutters/Collets*. Retrieved from http://www.efunda.com/processes/machining/mill_cutters.cfm/
- Hammond, G. P. & Jones, C. I. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy*, 161, 87-98.
- Herbert. (2006). *Product*. Retrieved from <https://www.herbert.eu/produkte-maschinenbau/>
- International Organization for Standardization. (2002). *Technical Committee ISO/TC 203. ISO13602-1:2002 Technical energy systems-Methods for analysis*.
- International Organization for Standardization. (2006). *Technical Committee ISO/TC 207. ISO14044:2006-Enviralmnt management-Life cycle Assessment-requirement and guidelines*.
- International Organization for Standardization. (2012). *Technical Committee ISO/TC 207. ISO14067 Carbon footprint of products - Requirement and guidelines for quantification and communication*.
- IPCC. (2006). *IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Japan: the National Greenhouse Gas Inventories Programme.

- Kopeliovich, D. (2015). Degassing treatment of molten aluminum alloys. *Substances & Technologies*. Retrieved from http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=degassing_treatment_of_molten_aluminum_alloys.
- Kurtz Ersa Corporation. (2018). *Products*. Retrieved from <http://www.kurtzersa.com/>
- Maxxis International. (2015). *Maxxis Tire Production Flow Chart*. Retrieved from <http://www.maxxis.com/media/420097/flowchart.pdf>
- Nansai, K. & Moriguchi, Y. (2005). *Embodied energy and emission intensity data for Japan using input-output tables (3EID)*. National Institute for Environmental Studies, Tokyo University, Japan.
- Organization Internationale des Constructeurs d'Automobiles. (2014). *Production Statistics 2014*. Retrieved from <http://oica.net/category/production-statistics/>
- Pawinee Suksuntornsiri & Bundit Limmeechokchai. (2005). The PCA and IOA approaches for life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from Thai commodities and energy consumption, Songklanakarin J. *Sci. Technol.*, 27(1), 177-189.
- Pawinee Suksuntornsiri, Paiboon Limpitipanich, Warunee Tia & Bundit Limmeechokchai. (2013). Embodied Primary Energy and CO₂ Emission Intensity in Thai Commodities Based On PDP2010: An Input-Output Analysis. 6th *AUN/SEED-Net Regional Conference on Energy Engineering (RCEnE)*,
- Ruuska, A. (2013). *Carbon footprint for building products - ECO2 data for materials and products with the focus on wooden building products*. Finland: VTT Technical Research Centre of Finland.
- Shen Zhen Hong Ye Jie Technology Co,Ltd. (2018). *Tire Mold Silicone*. Retrieved from <http://www.szrl.net>
- Sinotech Inc. (2015). *Sinotech – Milling*. Retrieved from <http://www.sinotech.com/milling.html/>
- TheMetalCasting.Com. (2015). *Pressure Die Casting*. Retrieved from <http://www.themetalcasting.com/pressure-die-casting.html/>
- Tien Sheng Molding Technology. (2018). *TSM processes*. Retrieved from <http://www.tsm1975.com.tw/en/products.html>.

Zhang, W., Li, H., Chen, B., Li, Q., Hou, X., & Zhang, H. (2014). CO₂ emission and mitigation potential estimations of China's primary aluminum industry. *Journal of Cleaner Production*, 1-10.