

การประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Life Cycle Assessment of 3D printed products from 3D printer technology



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science
Inter-Department of Environmental Science
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ
โดย	น.ส.นภัสรณันท์ ตติย์ธานกุล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิโชค พวงทองทับ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันทพงษ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธรรมนุญ หนูจักร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.อรรถัย ขวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิโชค พวงทองทับ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันทพงษ์)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พรทิพย์ วงศ์สุโขโต)

นภัสร์นันท์ ตติย์ธานุกุล : การประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ . (Life Cycle Assessment of 3D printed products from 3D printer technology) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.สิทธิโชค พวงทองทับ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.วราพจน์ กนกกันทพงษ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมในกระบวนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงาน ของการผลิตโมเดลที่วางโทรศัพท์ 1 ชิ้น โดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด เอฟดีเอ็ม (การพิมพ์แบบใช้หัวฉีด) จำนวน 2 รุ่น คือ รุ่นที่ผลิตในประเทศไทย และรุ่นที่นำเข้ามาจากประเทศจีน ซึ่งขึ้นรูปด้วยพลาสติก 3 ชนิด คือ พีแอลเอ เอบีเอส และไนลอน โดยผลิตโมเดลขนาดเล็กและใหญ่ ซึ่งใช้ระยะเวลาการผลิตที่แตกต่างกัน คือ 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง โดยทำการลงพื้นที่เก็บข้อมูลมลพิษทางอากาศ และพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงขณะใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิตด้วยโปรแกรม Simapro 8.3 ด้วยวิธี IMPACT 2002+ รุ่น 2.13 ผลการศึกษาพบว่า การใช้งานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดในขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานเนื่องจากการใช้พลังงานและการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย รองลงมาคือ การจัดการผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน และการได้มาของวัตถุดิบ ตามลำดับ ซึ่งระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้น (6 ชม.) ทำให้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมีแนวโน้มสูง โดยพลาสติกไนลอนผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำ (Aquatic ecotoxicity) ด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป (Non-renewable energy) และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก (Terrestrial ecotoxicity) นอกจากนี้ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ พบว่า วัสดุ PLA การใช้วัสดุส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงกว่าการใช้ไฟฟ้า วัสดุ ABS และ Nylon การใช้ไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงกว่าการใช้วัสดุ และการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 2 รุ่น ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไม่ต่างกัน

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6087155720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Life Cycle Assessment FDM PLA ABS Nylon

Naphatsanan Tatithanukul : Life Cycle Assessment of 3D printed products from 3D printer technology. Advisor: Asst. Prof. SITTHICHOK PUANGTHNGTHUB, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. VORAPOT KANOKKANTAPONG, Ph.D.

This study aimed to compare the environmental impacts of one piece of a phone holder model produced by Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printer technology. Two 3D printers studied are products of Thailand and China. The steps of material acquisition, use and disposal processes were analyzed. Three plastic types i.e., Polylactic-acid (PLA), Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) and Nylon were used as materials to generate testing models in small and large sizes consuming different production time (3 and 6 hours). Primary data of air pollution and electricity consumption were measured and life cycle assessment (LCA) result was analyzed via Simapro 8.3 software with IMPACT 2002+ version 2.13 methods. The results found that the main environmental impacts were occurred in production process because of electricity consumption and volatile organic compounds (VOCs) emission following by disposal and material acquisition processes respectively. Longer production time (6 hours) tended to increase environmental impacts. Nylon contributed higher environmental impact than PLA for impacts of Aquatic ecotoxicity, Non-renewable energy and Terrestrial ecotoxicity. Furthermore, in PLA printing the environmental impacts were observed higher than electricity consumption whereas in ABS and Nylon printing the electricity consumption was found higher than environmental impacts. Overall results showed that environmental impacts between these two 3D printers were

Field of Study: Environmental Science Student's Signature

Academic Year: 2019 Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน โดยผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์ทุกท่าน ดังนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิโชค พวงทองทับ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรพจน์ กนกกันตพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำต่าง ๆ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งให้แนวคิดต่าง ๆ ในการทำงาน และเป็นแบบอย่างที่ดีให้ยึดถือปฏิบัติตามอันเป็นประโยชน์ต่อศิษย์

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ประธานกรรมการ ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ กรรมการ และ ดร. พรทิพย์ วงศ์สุโขโต กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาใช้เวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ และตรวจสอบเพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากที่สุด

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณบริษัทการผลิต การจัดทำหน่วย และการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 11 แห่ง ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และให้ข้อมูลที่มีส่วนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ที่ให้การสนับสนุน และกำลังใจที่ตลอดการศึกษาโดยตลอด

นภัสรนันท์ ตติย์ธำนุกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	4
2.1.1 เครื่องพิมพ์ 3 มิติและการแนวโน้มตลาด.....	4
2.1.2 การทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	5
2.1.3 เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	5
2.1.4 วัสดุที่ใช้พิมพ์เครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	10
2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment).....	12
2.2.1 ความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต.....	12
2.2.2 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต.....	14

2.3	มลพิษหลักจากการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ	25
2.3.1	ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate Matter: PM).....	25
2.3.2	สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs)	26
2.4	การกำจัดขยะพลาสติกหลังการใช้งานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ	29
2.4.1	การกำจัดขยะมูลฝอยด้วยวิธีรีไซเคิล (Recycle).....	30
2.4.2	การกำจัดขยะมูลฝอยด้วยวิธีการฝังกลบ (Landfill).....	32
2.4.3	การแปรรูปขยะมูลฝอยไปเป็นพลังงานความร้อนโดยใช้เตาเผา (Incineration).....	34
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
2.5.1	การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์	37
2.5.2	มลพิษอากาศ.....	39
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	43
3.1	พื้นที่ศึกษาวิจัย.....	43
3.2	ขั้นตอนการศึกษาระดับปริญญาโท	43
3.2.1	ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	44
3.2.2	คัดเลือกชนิดและรุ่นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่จะทำการศึกษา.....	45
3.2.3	ออกแบบตารางเก็บรวบรวมข้อมูล.....	45
3.2.4	การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment).....	48
3.2.5	การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมในกระบวนการใช้งานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B โดยเปรียบเทียบระยะเวลาการใช้งาน และวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน	57
บทที่ 4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	58
4.1	ผลการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ	58
4.1.1	บริษัท สยามเรปเรป จำกัด.....	58
4.1.2	สถาบันพลาสติก ตึกต้นกล้า.....	59
4.1.5	บริษัท Alpha 3D Printer.....	65

4.1.6 บริษัท Winner Prototype.....	66
4.1.7 บริษัท Print 3DD.....	67
4.1.8 บริษัท Sync Innovation.....	69
4.1.9 บริษัท Septillion	71
4.1.10 บริษัท GessweinSiam.....	74
4.1.11 บริษัท AppliCAD.....	75
4.2 ผลการรวบรวมข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการ	77
4.3 การวิเคราะห์และประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม	83
4.3.1 ผลการประเมินผลกระทบชั้นกลาง (Midpoint Categories).....	83
4.3.2 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมชั้นปลาย (Endpoint categories)	89
4.3.3 การคัดเลือกปริมาณผลกระทบที่โดดเด่นจากผลกระทบสิ่งแวดล้อม 15 ด้าน ของ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B.....	91
4.3.4 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ทั้ง 3 ด้าน	92
4.3.5 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งาน เครื่องพิมพ์ 3 มิติ	100
4.3.6 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B.....	104
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	108
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	108
5.2 ข้อเสนอแนะ	109
บรรณานุกรม.....	110
ประวัติผู้เขียน.....	117

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1 แนวโน้มการเติบโตของตลาดเครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	4
รูปที่ 2-2 กระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3d printing Process).....	5
รูปที่ 2-3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด SLA หรือ Stereolithography.....	6
รูปที่ 2-4 เครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด Material Jetting (Polyjet).....	6
รูปที่ 2-5 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด Binder Jetting	7
รูปที่ 2-6 เครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM.....	8
รูปที่ 2-7 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด SLS หรือ Selective Laser Sintering.....	8
รูปที่ 2-8 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด selective deposition lamination (SDL).....	9
รูปที่ 2-9 วัสดุเส้นใยสังเคราะห์.....	10
รูปที่ 2-10 กรอบการดำเนินงานการประเมินวัฏจักรชีวิต.....	14
รูปที่ 2-11 การจำแนกสารตามประเภทของผลกระทบ.....	18
รูปที่ 2-12 วิธีฝังกลบแบบพื้นราบ (Area method).....	32
รูปที่ 2-13 วิธีฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench method).....	32
รูปที่ 2-14 วิธีฝังกลบแบบหุบเขา (Canyon Method).....	33
รูปที่ 2-15 เตาเผาแบบตระกรับแบบเคลื่อนที่.....	34
รูปที่ 2-16 ภาพถ่ายแสดงให้เห็นตะกรับที่อยู่ด้านในของเตาเผามูลฝอย.....	34
รูปที่ 2-17 ระบบเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln).....	35
รูปที่ 2-18 ระบบเตาเผาแบบหมุนที่ติดตั้งใช้งานจริง.....	35
รูปที่ 3-1 แผนผังการดำเนินการประเมินวัฏจักรชีวิตของเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ.....	42
รูปที่ 3-2 โมเดลที่ตั้งโทรศัพท์.....	47
รูปที่ 3-3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A.....	47
รูปที่ 3-4 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B.....	47
รูปที่ 3-5 ขอบเขตของการศึกษา.....	48

รูปที่ 3-6 กรอบการตรวจวัดมลพิษอากาศ.....	49
รูปที่ 3-7 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power meter).....	52
รูปที่ 4-1 เครื่องพิมพ์ ชนิด FDM.....	56
รูปที่ 4-2 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงาน.....	56
รูปที่ 4-3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด SLM.....	57
รูปที่ 4-4 ตัวอย่างชิ้นงานจากเครื่อง SLM.....	57
รูปที่ 4-5 เครื่องเคาะผง.....	58
รูปที่ 4-6 เครื่องขัดผิว.....	58
รูปที่ 4-7 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM.....	59
รูปที่ 4-8 ฐานรองชิ้นงานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM.....	59
รูปที่ 4-9 ของเสียที่เหลือจากการพิมพ์ชิ้นงาน.....	59
รูปที่ 4-10 เครื่อง Polyjet.....	59
รูปที่ 4-11 เรซินที่ใช้สำหรับพิมพ์ชิ้นงาน.....	59
รูปที่ 4-12 ตัวอย่างชิ้นที่พิมพ์จากเครื่อง Polyjet.....	60
รูปที่ 4-13 เครื่องพิมพ์ ชนิดFDM.....	60
รูปที่ 4-14 ฐานรองชิ้นงานเครื่องพิมพ์ ชนิด FDM.....	60
รูปที่ 4-15 เครื่อง FDM.....	62
รูปที่ 4-16 ฐานรองชิ้นงานของเครื่อง FDM.....	62
รูปที่ 4-17 ตัวอย่างชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยเครื่อง FDM.....	62
รูปที่ 4-18 เครื่อง SLA.....	63
รูปที่ 4-19 ถาดบรรจุเรซิน.....	63
รูปที่ 4-20 ขั้นตอนการใช้ IPA ล้างเรซินออกจากชิ้นงาน.....	63
รูปที่ 4-21 ขั้นตอนการอบชิ้นงาน.....	63
รูปที่ 4-22 การตัดตัว support และขัดด้วยกระดาษทราย.....	64
รูปที่ 4-23 เครื่องพิมพ์ FDM.....	64
รูปที่ 4-24 เครื่องพิมพ์ FDM สำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่.....	64
รูปที่ 4-25 ตัวอะไหล่ของหัวฉีดที่ใช้งานกับเครื่องพิมพ์ FDM.....	64

รูปที่ 4-26 ตัวอย่างชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยวัสดุต่างชนิดกัน.....	64
รูปที่ 4-27 เครื่องพิมพ์ FDM.....	65
รูปที่ 4-28 ฐานรองชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ FDM.....	65
รูปที่ 4-29 เครื่องพิมพ์ FDM มัลติคัลเลอร์.....	65
รูปที่ 4-30 เครื่องพิมพ์ชนิด DLP.....	66
รูปที่ 4-31 ตัวอย่างของชิ้นงาน.....	66
รูปที่ 4-32 เครื่องสำหรับสแกนชิ้นงาน.....	67
รูปที่ 4-33 เครื่องพิมพ์ชนิด FDM มีกระจกปิดกันฝุ่น.....	68
รูปที่ 4-34 เครื่องพิมพ์ชนิด FDM ขนาดกลาง.....	68
รูปที่ 4-35 เครื่องพิมพ์ชนิด FDM ยี่ห้อ Wanhao.....	68
รูปที่ 4-36 เครื่องพิมพ์ชนิด FDM ขนาดใหญ่.....	68
รูปที่ 4-37 เครื่องพิมพ์ชนิด DLP.....	68
รูปที่ 4-38 ตัวอย่างระบบฉายแสงของเครื่องพิมพ์ชนิด DLP.....	68
รูปที่ 4-39 ตัวอย่างชิ้นงาน.....	69
รูปที่ 4-40 ตัวอย่างชิ้นงานจากเครื่องพิมพ์ชนิด DLP.....	69
รูปที่ 4-41 เครื่องพิมพ์ FDM รุ่น Ultimaker.....	70
รูปที่ 4-42 เครื่องพิมพ์ FDM ยี่ห้อ EXYZ printing.....	70
รูปที่ 4-43 เครื่องพิมพ์ FDM ยี่ห้อ Markforged X7.....	70
รูปที่ 4-44 เครื่องพิมพ์ FDM ยี่ห้อ Markforged.....	71
รูปที่ 4-45 เครื่องพิมพ์ FDM ยี่ห้อ Zortrax.....	71
รูปที่ 4-46 ชุดกรองอากาศของเครื่องพิมพ์ FDM.....	71
รูปที่ 4-47 ตัวอย่างวัสดุที่ใช้สำหรับพิมพ์งาน.....	71
รูปที่ 4-48 เครื่องพิมพ์ชนิด SLA.....	72
รูปที่ 4-49 เครื่องพิมพ์ชนิด DLP.....	72
รูปที่ 4-50 เครื่องอบให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน.....	72
รูปที่ 4-51 ตัวอย่างชิ้นงาน.....	72
รูปที่ 4-52 ตัวอย่างชิ้นงานที่พิมพ์ได้ตามขนาดของเครื่องพิมพ์.....	73

รูปที่ 4-53 เครื่องพิมพ์ชนิด FDM.....	73
รูปที่ 4-54 เครื่องพิมพ์ชนิด PolyJet.....	73
รูปที่ 4-55 ตัวอย่างชิ้นงาน.....	74
รูปที่ 4-56 ม้วนเส้นใยพลาสติก.....	74
รูปที่ 4-55 ตัวอย่างชิ้นงาน.....	74
รูปที่ 4-56 ม้วนเส้นใยพลาสติก.....	74
รูปที่ 4-57 ตัวอย่างเรซินที่ใช้กับเครื่องพิมพ์ ชนิด PolyJet.....	74
รูปที่ 4-58 ตัวอย่างหัวฉีดที่ใช้กับเครื่อง FDM	74
รูปที่ 4-59 ขั้นตอนการละลายตัว support ออก.....	74
รูปที่ 4-60 ขั้นตอนการล้างทำความสะอาดชิ้นงาน.....	74
รูปที่ 4-61 ตัวอย่างชิ้นงานสามมิติของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A วัสดุ PLA (1); ชิ้นงานสามมิติ ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ PLA (2)	77
รูปที่ 4-62 ตัวอย่างชิ้นงานสามมิติของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ ABS (3).....	77
รูปที่ 4-63 ตัวอย่างชิ้นงานสามมิติของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A วัสดุ Nylon (4); ชิ้นงานสามมิติ ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ Nylon (5)	78
รูปที่ 4-64 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A โดยใช้พลาสติก PLA ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	82
รูปที่ 4-65 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A โดยใช้พลาสติก PLA ระยะเวลา 6 ชั่วโมง.....	82
รูปที่ 4-66 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A โดยใช้พลาสติก Nylon ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	83
รูปที่ 4-67 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A โดยใช้พลาสติก Nylon ระยะเวลา 6 ชั่วโมง.....	83
รูปที่ 4-68 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ PLA ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	84
รูปที่ 4-69 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ PLA ระยะเวลา 6 ชั่วโมง.....	84

รูปที่ 4-70 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ ABS ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	85
รูปที่ 4-71 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ ABS ระยะเวลา 6 ชั่วโมง.....	85
รูปที่ 4-72 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ Nylon ระยะเวลา 3 ชั่วโมง.....	86
รูปที่ 4-73 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ Nylon ระยะเวลา 6 ชั่วโมง.....	86
รูปที่ 4-74 ผลกระทบสิ่งแวดล้อม 15 ด้าน ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A ด้วยวัสดุ PLA และ Nylon ที่ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง.....	89
รูปที่ 4-75 ผลกระทบสิ่งแวดล้อม 15 ด้าน ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B ด้วยวัสดุ PLA, ABS และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง.....	89
รูปที่ 4-76 แสดงสัดส่วนและผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ ของพลาสติก PLA และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่นA.....	90
รูปที่ 4-77 แสดงสัดส่วนและผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ ของพลาสติก PLA, ABS และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B....	91
รูปที่ 4-78 แสดงสัดส่วนและผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ของพลาสติก PLA และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A	93
รูปที่ 4-79 แสดงสัดส่วนและผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ของพลาสติก PLA, ABS และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง รุ่น B.....	93
รูปที่ 4-80 แสดงสัดส่วนและผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก ของพลาสติก PLA และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง รุ่น A.....	95
รูปที่ 4-81 แสดงสัดส่วนและผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก ของพลาสติก PLA, ABS และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง รุ่น B.....	96

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 บัญชีรายชื่อ VOCs ในงานด้านมลพิษทางอากาศในอาคาร.....	27
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของการขึ้นรูปชิ้นงานผลิตภัณฑ์โมเดลที่วางโทรศัพท์.....	43
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างรูปแบบตารางการเก็บรวบรวมข้อมูล.....	44
ตารางที่ 3.3 กำหนดขอบเขตของการศึกษา.....	46
ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างการคำนวณจากสูตร.....	54
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบวัสดุ PLA และ ABS.....	58
ตารางที่ 4.2 ชนิดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่มีความนิยมในการผลิตและจัดจำหน่าย.....	75
ตารางที่ 4.3 แสดงน้ำหนักชิ้นงานและน้ำหนักขยะที่นำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ.....	76
ตารางที่ 4.4 บัญชีรายการมวลสารของการผลิตชิ้นงานโดยการใช้เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A ต่อหน่วยการทำงาน 1 ชิ้นงาน ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ด้วยพลาสติก PLA ABS และ Nylon.....	79
ตารางที่ 4.5 บัญชีรายการมวลสารของการผลิตชิ้นงานโดยการใช้เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B ต่อหน่วยการทำงาน 1 ชิ้นงาน ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ด้วยพลาสติก PLA ABS และ Nylon.....	79
ตารางที่ 4.6 ผลการจัดกลุ่มความเสียหาย (Damage categories) ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A วัสดุ PLA และ Nylon.....	87
ตารางที่ 4.7 ผลการจัดกลุ่มความเสียหาย (Damage categories) ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ PLA, ABS และ Nylon.....	88

ตารางที่ 4.8 บัญชีรายการมวลสารของขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ต่อหน่วย
 การทำงาน 1 ชิ้นงาน ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ด้วยพลาสติก PLA, ABS และ
 Nylon.....98

ตาราง 4.9 แสดงค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อม 15 ด้าน ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ด้วยวัสดุที่
 แตกต่างกัน ระยะเวลาต่างกัน.....100



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3dprinter) เป็นนวัตกรรมใหม่ที่นิยมอย่างแพร่หลายบริษัทวิจัย Gartner แสดงแนวโน้มการเติบโตของตลาดเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2557 จนถึงปัจจุบันพบว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติประเภท home 3D printer ที่มีราคาต่ำมียอดจัดส่งสินค้ามากกว่าปี พ.ศ. 2556 ถึง ร้อยละ 49 และเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าตัว ในปี พ.ศ. 2558 และ Wohlers (2018) รายงานว่า ปัจจุบันมีการผลิตเครื่องพิมพ์ 3 มิติประมาณ 530,000 เครื่องทั่วโลกและมีอัตราการผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 21 ต่อปีเนื่องจากเทคโนโลยีนี้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการออกแบบหรือพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ เพราะนอกจากจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการในระยะเวลาอันสั้นแล้ว ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายการจ้างแรงงานอีกด้วย มีการนำเครื่องพิมพ์ 3 มิติไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากขึ้น เช่น อุตสาหกรรมการออกแบบ อุตสาหกรรมยานยนต์ งานด้านวิศวกรรม การบิน สถาปัตยกรรม การแพทย์ ทันตกรรม การออกแบบ แพชั่นและเครื่องประดับ และอาหาร เป็นต้น อาทิเช่น กลุ่มบริษัท Unilever ที่นำเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติมาใช้ในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ต้นแบบ ซึ่งนอกจากจะลดระยะเวลาการผลิตได้ถึง ร้อยละ 40 แล้ว ยังสามารถช่วยให้บริษัทออกแบบบรรจุภัณฑ์ใหม่ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้รวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเชิงมูลค่าการใช้งานพบว่า ธุรกิจโมเดลย่อยส่วนมีมูลค่าการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ สูงที่สุดเป็นอันดับที่ 1 (ประมาณร้อยละ 27) รองลงมาเป็นธุรกิจสร้างสินค้าพวก prototype เช่น การออกแบบขวดพลาสติก ออกแบบชิ้นส่วนในเครื่องจักร เป็นต้น (Diaz et al., 2015) จะเห็นได้ว่าการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติก่อให้เกิดผลกระทบด้านบวกทั้งในมิติเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ อย่างไรก็ตามผลกระทบในมิติด้านสิ่งแวดล้อมยังคงมีการศึกษากันไม่มากนัก

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle assessment, LCA) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ โดยพิจารณาตลอดทั้งวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่ขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบ การผลิต การขนส่ง การใช้งานและการกำจัดซากทำให้ทราบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ในด้านต่าง ๆ เช่น ผลกระทบด้านการทำให้โลกร้อน ผลกระทบด้านการทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ ผลกระทบด้านการใช้พลังงานใช้แล้วหมดไป เป็นต้น และทำให้ทราบว่าขั้นตอนใดในวัฏจักรผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ซึ่งทำให้ได้แนวทางในการปรับปรุงแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ครบทุกด้าน เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาอย่างยั่งยืน สามารถนำผลที่ได้ไปใช้เปรียบเทียบระหว่างผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการผลิต และนำไปใช้ในการ

ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมตัวอย่างเช่นการประเมินวัฏจักรชีวิตของการบริการงานพิมพ์แบบออฟเซ็ท และดิจิทัลกรณศึกษาโรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ทำให้ทราบว่าบริการงานพิมพ์เกิดผลกระทบที่ขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบเป็นหลัก และส่งผลกระทบด้านการทำให้โลกร้อน 7.8593 kgCO₂eq. ผลกระทบด้านการเกิดความเป็นกรด 0.1477 m²eq. เกิดผลกระทบจากการได้มาซึ่งพลังงานไฟฟ้า ความเป็นอันตรายต่อมนุษย์ในน้ำ 29.4272 m³ ผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำเรื้อรัง 451.2660 m³ ผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศในน้ำเฉียบพลัน 116.3633 m³ เป็นต้น (สิริบุญญา, 2560)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมโดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM (Fused deposition modeling) ซึ่งใช้วิธีรีดเส้นพลาสติกซ้อนกันทีละชั้นจนเป็นชิ้นงาน เนื่องจากเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะทำให้สามารถหาแนวทางการป้องกันและบริหารจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมในกระบวนการได้มาของของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงานของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM โดยใช้แนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต

1.3 สมมติฐานการวิจัย

ผลกระทบสิ่งแวดล้อม และการใช้พลังงานของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM เกิดจากกระบวนการใช้งานมากกว่ากระบวนการได้มาของของวัตถุดิบ และการกำจัดซากชิ้นงาน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM 2 รุ่น ได้แก่ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่นที่ผลิตในประเทศไทย และเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่นที่นำเข้าจากประเทศจีน โดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิต

1.4.2 พิจารณาวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

1.4.3 ศึกษาวัสดุขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด ได้แก่ PLA (Polylactic-acid), ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) และ Nylon

1.4.4 ศึกษาการเกิดมลพิษทางอากาศ ได้แก่ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5), ฝุ่นละอองขนาดใหญ่ไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10) และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds) และการใช้พลังงานไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

1.4.5 ศึกษาการกำจัดซากชิ้นงาน โดยวิธีการรีไซเคิล (Recycle) การฝังกลบ (Landfill) และการใช้เตาเผา (Incineration)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และการใช้พลังงาน ในกระบวนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติและการกำจัดซากชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

1.5.2 ทราบแนวทางแก้ไขเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติและการกำจัดซากชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

1.5.3 ผู้บริโภคได้ทราบข้อมูลประกอบการตัดสินใจซื้อใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ และสามารถเลือกใช้วัตถุดิบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งเป็นการป้องกันและลดความเสี่ยงในการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ส่งผลเสียต่อสุขภาพ

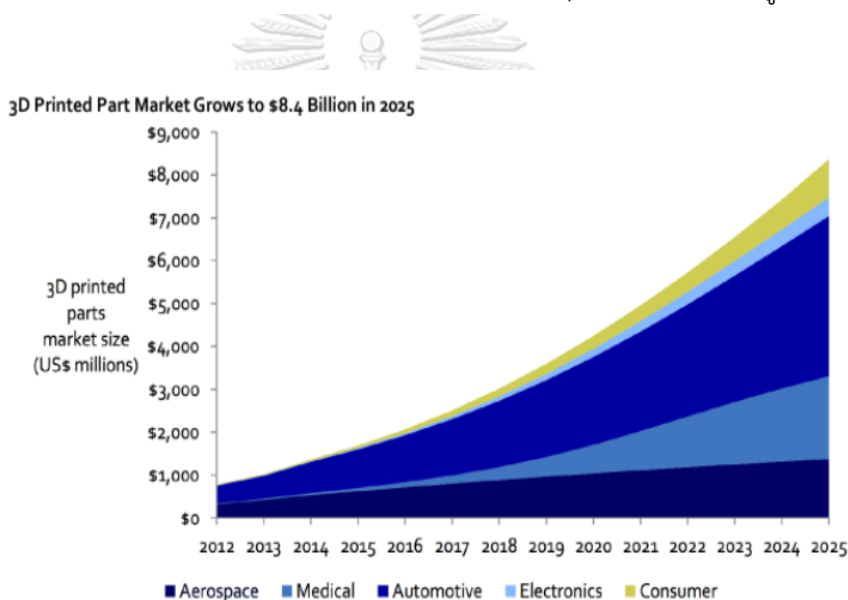
บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

2.1.1 เครื่องพิมพ์ 3 มิติและการแนวโน้มตลาด

เครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3d printer) คือ เครื่องจักรที่ใช้กระบวนการใช้วิธีเติมเนื้อวัสดุ เพื่อทำให้เกิดเป็นรูปร่างที่สามารถจับต้องได้ตามที่ต้องการ โดยอาศัยข้อมูลในรูปแบบดิจิทัล ซึ่งการเติมเนื้อหรือพิมพ์วัสดุลงไปนั้น เรียกว่า Additive Process ซึ่งการพิมพ์นั้นจะค่อยเป็นไปทีละชั้น (layer) โดยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังกราฟแสดงในรูป 2-1



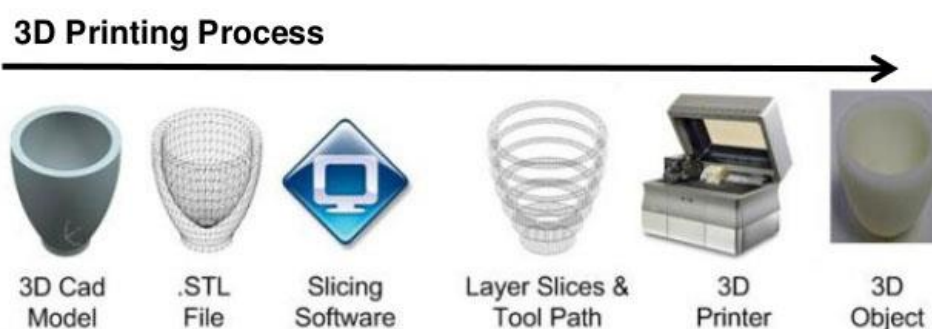
รูปที่ 2-1 แนวโน้มการเติบโตของตลาดเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในปี 2025

(Lux Research, 2018)

จากรูป 2-1 แสดงให้เห็นว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ โดยอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มากที่สุด คือ อุตสาหกรรมรถยนต์ รองลงมา คือ ด้านการแพทย์ การบิน ผู้ใช้งานด้านอื่น ๆ และเครื่องใช้ไฟฟ้า ตามลำดับ โดยพบว่าด้านการตลาดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีแนวโน้มตั้งแต่ปี 2012 จนถึง 2025 สูงขึ้นเรื่อย ๆ (Boerger, 2015)

2.1.2 การทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

เครื่องพิมพ์ 3 มิตินั้นก่อนที่จะพิมพ์งานจะต้องมีข้อมูลในรูปแบบของไฟล์ดิจิทัล (Digital file) ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำพวก CAD (Computer Aided Design) ในการออกแบบ นอกจากจะใช้คอมพิวเตอร์ในการออกแบบแล้ว ยังสามารถใช้สแกนเนอร์ 3 มิติ ในการเปลี่ยนวัตถุในโลกความจริงไปเป็นไฟล์ดิจิทัล ที่สามารถนำไปใช้งานกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เมื่อได้โมเดลหรือชิ้นงานในรูปแบบของไฟล์ดิจิทัลแล้วก็จะนำไฟล์นั้นไปทำการตัดเลเยอร์งานออกมาให้เป็นแผ่นบาง ๆ เพื่อที่จะให้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ พิมพ์เป็นแผ่นหรือชิ้นบาง ๆ นั้นทับต่อกันขึ้นเป็นชั้น ๆ จนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ 3 มิติ ขึ้นมา (สยามเรปเรป, 2561) ดังแสดงรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 กระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3d printing Process)

(สยามเรปเรป, 2561)

2.1.3 เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

เทคโนโลยีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ นั้นจะใช้หลักการเดียวกัน คือ การตัดชิ้นงาน หรือฉีดชิ้นงานเป็นแผ่นบาง ๆ แล้วพิมพ์แผ่นนั้นซ้อนทับกันไปเรื่อย ๆ จนได้เป็นผลิตภัณฑ์สามมิติออกมา ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างเทคโนโลยีแต่ละแบบนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้พิมพ์ และกระบวนการในการพิมพ์สามารถแบ่งได้ 7 ชนิด ดังนี้

1) Vat Photopolymerisation

เทคโนโลยีนี้ใช้วัสดุเรซินซึ่งเป็นวัสดุที่มีความไวต่อแสง UV (ultraviolet) แหล่งของแสง UV มาจากเลเซอร์หรือหลอดไฟ UV เทคโนโลยีนี้ถูกคิดค้นโดย Charles Hull ในปี 1986 ซึ่งถือว่าเป็นบิดาแห่งวงการของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ การทำงานของเทคโนโลยีนี้เรียกว่า SLA หรือ Stereolithography มีหลักการคือการฉายภาพวัตถุที่ถูกตัดเป็นแผ่นบาง ๆ ลงไปในเรซินที่มีความไวต่อแสง UV เรซินจะแข็งตัวเป็นภาพที่ถูกฉายเมื่อแข็งตัว ถาดจะยกขึ้นตามค่าความละเอียดที่กำหนด

แล้วเริ่มทำการฉายภาพในชั้นต่อไป ซึ่งตัวเรซินจะเชื่อมต่อกันไปเรื่อย ๆ จนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ 3 มิติขึ้น ดังแสดงรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด SLA หรือ Stereolithography
(Formlab, 2018)

2) Material Jetting

เป็นวิธีการพิมพ์คล้ายกับการพิมพ์เอกสาร โดยน้ำหมึกที่ใช้ในการพิมพ์นั้นมีส่วนผสมของพลาสติก ซึ่งหัวพิมพ์จะคล้ายกับหัวพิมพ์ของเครื่องพิมพ์กระดาษ ตัวน้ำหมึกนั้นจะถูกทำให้แข็งตัวโดยหลอดไฟ UV ก่อนที่จะพิมพ์ในชั้นต่อไปจะมีหลอด UV วิ่งผ่านเพื่อให้น้ำหมึกแข็งตัวก่อนที่จะพิมพ์ชั้นต่อไป ดังแสดงรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 เครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด Material Jetting (Polyjet)
(New Electronics, 2016)

3) Binder Jetting

เทคโนโลยีแบบนี้จะใช้วัสดุ 2 ชนิด คือ วัสดุที่เป็นผง และวัสดุเป็นตัวเชื่อมผงที่เป็นของเหลว โดยหลักการทำงานคือ มีตัวเกลี่ยผงแบ่งให้เป็นแผ่นบาง ๆ หลังจากนั้นจะมีหัวพ่นที่จะพ่นกาวลงไปบนผงแบ่งเพื่อให้แบ่งเชื่อมติดกัน จากนั้นตัวถาดก็จะเลื่อนลงตามค่าความละเอียดที่ถูกกำหนดไว้ โดยตัวเกลี่ยแบ่งจะทำหน้าที่เข้ามาเพิ่มเนื้อแบ่งแล้วเกลี่ยให้ผงแบ่งเรียบเสมอกันเพื่อเริ่มพิมพ์ในชั้นถัดไป ข้อดีของเทคโนโลยีนี้ คือ ไม่จำเป็นต้องสร้างตัวรองรับ เนื่องจากผงแบ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรองรับชิ้นงานเอง เทคโนโลยีนี้ได้ถูกนำไปใช้ในการพิมพ์ทราย ซึ่งสามารถพิมพ์เป็นบล็อกทรายสำหรับเทโลหะลงในแบบทรายได้เลยโดยไม่ต้องทำต้นแบบก่อน ดังแสดงรูปที่ 2-5

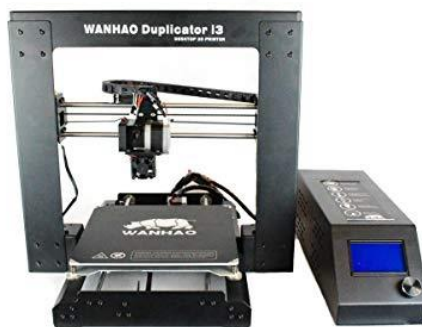


รูปที่ 2-5 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด Binder Jetting

(White Clouds, 2017)

4) Material Extrusion

เทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีที่นิยมมากที่สุดเพราะราคาที่ไม่แพง เรียกเทคโนโลยีนี้เรียกว่า FDM (Fused deposition material) เป็นเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่รู้จักมากที่สุด เพราะเป็น Open Source ที่เหล่านักสร้างสามารถนำไปสร้างเครื่องโดยไม่ติดลิขสิทธิ์ โดยเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ FDM รุ่นที่เป็นที่นิยมในตลาด คือ Wanhao เนื่องจากราคาไม่แพง และมีคุณภาพดีกว่ารุ่นอื่น ๆ หลักการทำงานคือ การฉีดเส้นวัสดุที่มีความหนืดออกมาจากหัวฉีดที่มีขนาดเล็ก ทับซ้อนกันไปเรื่อย ๆ จนเกิดเป็นรูปผลิตภัณฑ์ 3 มิติขึ้นมา วัสดุที่นิยมใช้กับเทคโนโลยีนี้คือ พลาสติกจำพวก Thermal Plastic เช่น ABS Nylon PLA PET เป็นต้น ซึ่งพลาสติกแต่ละชนิดจะให้คุณสมบัติของชิ้นงานที่พิมพ์แตกต่างกัน เทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีที่ทำให้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ดังแสดงรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 เครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM
(White Clouds, 2017)

5) Power Bed Fusion

หลักการของเทคโนโลยีนี้คือ การใช้วัสดุที่เป็นผงแล้วใช้เลเซอร์ที่มีกำลังสูงยิงลงไปบนวัสดุที่เป็นผงให้เกิดการเชื่อมติดกันอย่างหลวมๆ ที่เรียกว่า Sinter ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีอีกชื่อ SLS หรือ Selective Laser Sintering วิธีการนี้สามารถนำมาใช้ในการพิมพ์วัสดุที่เป็นโลหะหรือพลาสติกได้ ซึ่งพลาสติกที่นิยมใช้จะเป็นจำพวก Nylon ที่มีความเหนียว ทนทาน และแข็งแรง การพิมพ์วิธีนี้จะคล้ายกับเทคโนโลยี Binding Jetting ซึ่งไม่จำเป็นต้องสร้างตัวรองรับงานหรือ Support เหมือนกับเทคโนโลยีอื่น ๆ เนื่องจากตัวผงวัสดุจะทำหน้าที่เป็นตัวรองรับชิ้นงานเอง เมื่อพิมพ์เสร็จแล้วจะต้องนำชิ้นงานเข้าไปใส่ในตู้อบความร้อน เพื่อให้ชั้นต่าง ๆ ที่พิมพ์นั้นเชื่อมติดกันได้ ดังแสดงรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด SLS หรือ Selective Laser Sintering
(Prodways, 2017)

6) Sheet Lamination

เทคโนโลยีนี้เป็นการขึ้นรูปโดยใช้วัสดุที่เป็นแผ่นวางซ้อนกันไปเรื่อย ๆ จนเกิดเป็นชิ้นงาน 3 มิติ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้เทคโนโลยีนี้ ได้แก่ Mcor ซึ่งวัสดุที่ใช้เป็นแผ่นหรือ Sheet นั้นเป็นกระดาษธรรมดา ผู้ใช้สามารถที่จะพิมพ์งานออกมาเป็นสีได้โดยการเอากระดาษไปพิมพ์สีออกมา ก่อน ซึ่ง Software จะคำนวณว่าพิมพ์สีตรงไหน หลังจากนั้นให้นำกระดาษที่พิมพ์เสร็จใส่เข้าเครื่องพิมพ์ เครื่องก็จะเริ่มดึงกระดาษเข้ามาทีละแผ่น แล้วใช้มีดตัดให้เป็นรูปร่างตามชิ้นงานที่ Slice แล้ว หลังจากนั้นตัวเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จะเริ่มดึงกระดาษแผ่นต่อไปผ่านระบบการทากาวของเครื่อง แล้วนำมาแปะบนกระดาษที่ได้ตัดเอาไว้ก่อนหน้านี้กระบวนการก็จะวนแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้ชิ้นงาน 3 มิติออกมา ดังแสดงรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด selective deposition lamination (SDL)

(Mcor Technologies, 2016)

7) Direct Energy Deposition

เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบนี้ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเทคโนโลยีที่มีความซับซ้อน หลักการคือ การพ่นผงโลหะลงไปพร้อมกับใช้พลาสมาในการหลอมละลายโลหะ โดยที่หัวพ่นจะเคลื่อนที่ไปตามรูปแบบงานที่ผ่านการสไลด์ (slice) ซึ่งผงโลหะที่ใช้สามารถเป็นโลหะที่มีความพิเศษ เช่น ไททาเนียม เป็นต้น เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบนี้ได้มีการนำไปรวมกับเทคโนโลยีการขึ้นรูปแบบ Subtractive หรือการกัดเอาเนื้องานออกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของงานที่ได้ออกมา โดยที่หัวพิมพ์จะทำการพ่นวัสดุลงเป็นรูปร่างแล้วเครื่องพิมพ์จะเปลี่ยนเป็นหัวกัด เพื่อนำมากัดงานให้มีขนาดตามที่ต้องการแล้วจึงกลับไปใช้หัวพ่นพิมพ์งานในขั้นตอนต่อไป (สยามเรปเรป, 2561)

2.1.4 วัสดุที่ใช้พิมพ์เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

2.1.4.1 กลุ่มวัสดุสังเคราะห์

วัสดุกลุ่มนี้ส่วนมากพบเห็นได้ในการผลิตชิ้นส่วนของผลิตภัณฑ์และส่วนประกอบของยานพาหนะรวมถึงชิ้นส่วนอื่น ๆ ที่ใช้การออกแบบพลาสติกตามลักษณะเฉพาะเจาะจง ดังแสดงรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 วัสดุเส้นใยสังเคราะห์
(สยามเรปเรป, 2561)

1) ABS

Acrylonitrile Butadiene Styrene เป็นพลาสติกแบบเดียวกับที่ใช้ใน Lego ซึ่งมีความแข็งแรงและปราศจากสารพิษ มีความแข็งแรงน้อยกว่า PLA เล็กน้อย มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 220 องศาเซลเซียส สามารถอ่อนตัวได้ไวและคืนสภาพได้อย่างรวดเร็วเหมาะกับการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้เป็นอย่างดี

2) PLA

Polylactic Acid ผลิตจากวัสดุชีวภาพโพลีเมอร์มีจุดเดือดต่ำอยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นวัสดุมีความเหนียวมากกว่า ABS เนื่องจากวัสดุตั้งต้นเป็นวัสดุชีวภาพ เช่น กากข้าวโพด อ้อย ทำให้สามารถสะสมแบคทีเรียได้ สามารถเพิ่มเติมสารเคมีเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านการทนทานความร้อนและลักษณะของพื้นผิววัสดุได้อีกด้วย

3) PVA

Polyvinyl Alcohol เป็นวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์จุดหลอมละลายอยู่ที่ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งหากใช้ความร้อนสูงกว่านี้จะสามารถปล่อยสารพิษออกมาได้ โดยทั่วไปใช้ในการ

สนับสนุนการสร้างชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อนของ PLA และ ABS หลังจากสนับสนุนการวางโครงแล้วสามารถนำไปสัมผัสกับน้ำเพื่อให้ละลายและคงไว้แต่ชิ้นส่วนหลักจาก PLA และ ABS ได้

4) Nylon

ไนลอนเป็นชิ้นส่วนที่มีความแข็งแรงสูง รองรับน้ำหนักได้มากโดยไม่เกิดความเสียหาย จุดหลอมเหลวอยู่ที่ 250 องศาเซลเซียส ไนลอนจะมีราคาถูกแข็งแรงและทนทานต่อความเสียหาย แต่การใช้ความร้อนที่สูงมากทำให้เป็นสิ่งที่ควรระมัดระวัง

5) HDPE

High Density Polyethylene นิยมใช้กับวัสดุที่มีการรีไซเคิล มีน้ำหนักที่เบาและคุณสมบัติวัสดุที่สามารถยึดติดกับวัสดุอื่นและตัวเองได้ดี มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 230 องศาเซลเซียสสามารถใช้ในการสนับสนุนการผลิตด้วยวัสดุชนิดอื่น และมีความต้านทานต่อสารเคมี

6) T-glase/PETT

Polyethylene Terephthalate มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับโพลีเอสเตอร์ จุดเดือดอยู่ที่ 230 องศาเซลเซียส ซึ่งเวลาเย็นตัวลงมีคุณสมบัติที่คล้ายแก้วสามารถยอมสีได้

7) Wood Filament

วัสดุชนิดนี้เป็นอนุภาคไม้แบบละเอียดผสมกับ PLA และพอลิเมอร์ เมื่อผลิตชิ้นงานออกมาจะมีลักษณะคล้ายไม้ มีลวดลายและลักษณะที่หลากหลาย ใช้วิธีผลิตเดียวกับการใช้ PLA แต่ชิ้นงานที่สำเร็จนั้นจำเป็นต้องได้รับการดูแลเพื่อให้มีลักษณะภายนอกที่สวยงามเหมาะสม

8) Metal Filament

วัสดุนี้ คือ ผงโลหะผสมกับ PLA แต่เมื่อผลิตเสร็จแล้วจะมีลักษณะคล้ายกับโลหะ สามารถใช้โลหะผสมได้หลากหลายแบบ เช่น เหล็กกล้า ทองแดงทองเหลือง ซึ่งจำเป็นต้องมีการตกแต่งผิววัสดุหลังทำการผลิตเสร็จสิ้น

9) Carbon Fiber Mix

ความแข็งแรงของคาร์บอนไฟเบอร์ เมื่อนำมาผสมผสานกับวัสดุชนิดอื่นสามารถเพิ่มคุณสมบัติของชิ้นส่วนได้อีกด้วย จุดเด่นนอกเหนือจากความแข็งแรง คือ การมีน้ำหนักเบาซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญ อีกทั้งคาร์บอนไฟเบอร์นั้นสามารถสีกร่อนได้ง่ายจึงควรระมัดระวังการเลือกใช้งานวัสดุชนิดนี้

10) Conductive Filament

วัสดุนี้เป็นการผสมผสานกันระหว่าง PLA และกราฟีน ก่อให้เกิดวัสดุคาร์บอนที่สามารถเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องลากสายไฟฟ้าเหมาะสำหรับใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น อุปกรณ์สวมใส่อิเล็กทรอนิกส์ ในการผลิตควรระมัดระวังเนื้อวัสดุแต่ละชิ้นอาจไม่

ประสานกันได้สมบูรณ์แตกต่างจาก PLA ทั่วไป และการทำให้วัสดุบดงอได้ ซึ่งหลังการผลิตอาจทำให้ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้

2.1.4.2 กลุ่มวัสดุโลหะ

ชิ้นส่วนสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ กลุ่มวัสดุโลหะต้องการความแข็งแรง ทนทานต่อความร้อน และการใช้งานที่ทนทาน เช่น ชิ้นส่วนอากาศยานที่มีความซับซ้อนได้แก่ ผงโลหะ

1) Stainless Steel

สแตนเลสสตีล (stainless steel) เป็นโลหะที่มีการใช้งานอยู่บ่อยครั้งในอุตสาหกรรมมีคุณสมบัติที่ทนต่อการกัดกร่อนและสารเคมีได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถใช้งานในอุตสาหกรรมอาหารได้

2) Aluminum Alloy

อะลูมิเนียมอัลลอยนิยมใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภทโดยเฉพาะด้านอากาศยาน ด้วยความแข็งแรงและน้ำหนักที่เบาจึงเป็นจุดเด่นของวัสดุชนิดนี้

3) Cobalt Chrome Alloy

จุดเด่นของโคบอลท์โครมอัลลอย คือ สามารถต้านทานอุณหภูมิได้อย่างดีทนต่อการกัดกร่อนและการสึกกร่อน เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นส่วนเครื่องมือแพทย์ สามารถใช้ร่วมกับสิ่งมีชีวิต

4) Titanium Alloy

คุณสมบัติของไทเทเนียมนั้นมีหลากหลายและมีคุณภาพสูง สามารถระบายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ทำให้มักใช้ในการผลิตชิ้นส่วนเครื่องยนต์สมรรถนะสูงสำหรับแข่งขัน หรือเครื่องยนต์สำหรับอากาศยาน

5) Nickel-Based Alloy

คุณสมบัติของโลหะที่ผสมนิกเกิล คือ ทนต่อแรงกดดัน อุณหภูมิ และสารเคมีได้เป็นอย่างดี นิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนกังหันแก๊ส เครื่องยนต์เจ็ท หรือเครื่องมือสำหรับงานปิโตรเคมี

2.2 การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment)

2.2.1 ความหมายของการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) คือ กระบวนการวิเคราะห์และประเมินค่าผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมตลอดช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การสกัดหรือการได้มาซึ่งวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การขนส่งและการแจกจ่าย การใช้งานผลิตภัณฑ์ และการกำจัดเศษซากของผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน อาจกล่าวได้ว่าพิจารณาผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เกิดจนตาย (Cradle to Grave) โดยมีการระบุถึงปริมาณพลังงานและวัตถุดิบที่ใช้รวมถึงของเสียที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมและการประเมินผลกระทบที่จะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพของชุมชน

เพื่อที่จะหาวิธีการในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด (กัมมณี แสงสุข , 2559)

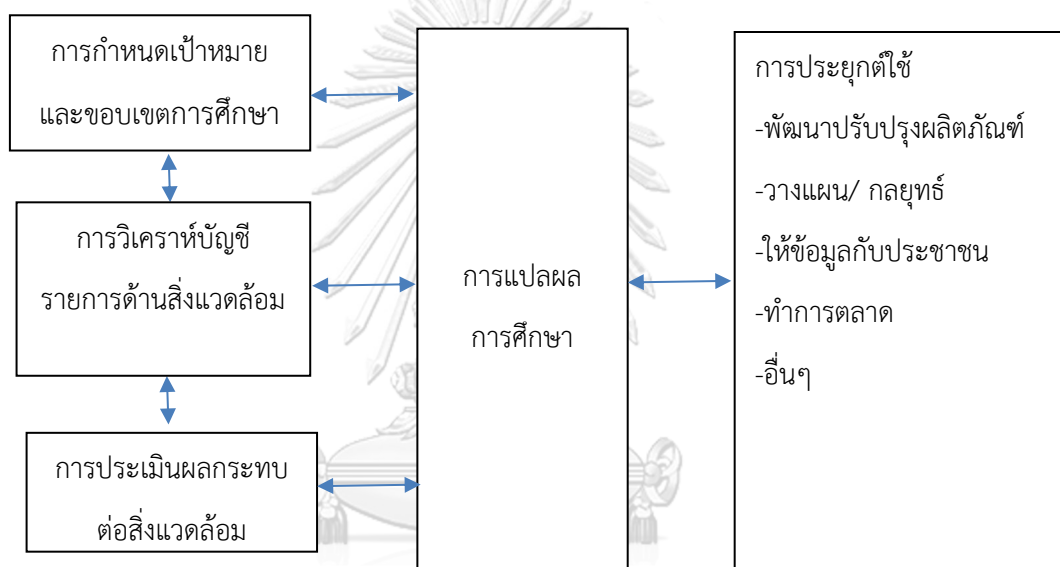
การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ เป็นการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากผลิตภัณฑ์หรือหน้าที่การใช้งานของผลิตภัณฑ์ซึ่งทำให้ทราบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม โดยเน้นผลเชิงปริมาณที่ชัดเจนการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิต จึงมีความซับซ้อน เพราะต้องทำการวิเคราะห์ตั้งแต่แหล่งกำเนิดของทรัพยากรที่นำมาใช้ไปจนถึงการกำจัดซากผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้ายในประเด็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทุกด้าน ทั้งจากการใช้ทรัพยากรและสารมลพิษที่ถูกปล่อยออกมาโดยมองผลกระทบในภาพรวมที่เกิดต่อโลกและสิ่งแวดล้อม เช่น การเกิดฝนกรด การทำให้โลกร้อนขึ้น เป็นต้น นับเป็นเครื่องมือในการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมอีกหนึ่งประเภทที่อยู่ในอนุกรมมาตรฐาน ISO14000 ทั้งนี้ มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการประเมินวัฏจักรชีวิต(Life Cycle Assessment: LCA) มีทั้งหมด 7 ฉบับ ได้แก่

- ISO 14040 – Life cycle assessment – Principles and framework เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึง หลักการ นิยามศัพท์ และกรอบการดำเนินงานการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
- ISO 14041 – Life cycle assessment – Goal and scope definition and Life Cycle Inventory analysis เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึง การกำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขต การวิเคราะห์และจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ (LCI)
- ISO 14042 - Life cycle assessment – Life Cycle Impact Assessment (LCIA) เป็นมาตรฐานที่กล่าวถึง การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
- ISO 14043 - Life Cycle Assessment – Life Cycle Interpretation เป็นมาตรฐานกล่าวถึงการแปลผลข้อมูลที่ได้จากการทำ LCI และ LCIA
- ISO/TR 14047 - Life Cycle Assessment – Illustrative examples on how to apply ISO 14042 – Life cycle impact assessment เป็นรายงานวิชาการแสดงตัวอย่างของการประยุกต์ใช้อนุกรมมาตรฐาน ISO 14042 สำหรับวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์
- ISO/TR 14048 - Life Cycle Assessment – LCA Data Documentation Format เป็นรายงานวิชาการแสดงตัวอย่างรูปแบบเอกสารของข้อมูลด้าน LCA
- ISO/TR 14049 - Life Cycle Assessment – Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis เป็นรายงานวิชาการแสดงตัวอย่างของการประยุกต์ใช้อนุกรมมาตรฐาน ISO 14041 สำหรับจัดทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์

2.2.2 ขั้นตอนการประเมินวัฏจักรชีวิต

การประเมินวัฏจักรชีวิตสามารถประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากทุกกิจกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยมีกรอบการดำเนินงาน 4 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา (Goal and scope definition)
- 2) การวิเคราะห์เพื่อจัดทำบัญชีรายการสารขาเข้าและสารขาออก (Inventory analysis)
- 3) การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Life cycle impact assessment)
- 4) การแปลผลการศึกษา (Life cycle interpretation) โดยขั้นตอนการดำเนินงานการประเมินวัฏจักรชีวิต สรุปลงไว้ดังรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-10 กรอบการดำเนินงานการประเมินวัฏจักรชีวิต

ที่มา: ดัดแปลงจาก International organization for standardization (2006)

ในการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้การประเมินวัฏจักรชีวิตจะต้องใช้ข้อมูลและตัวเลขอ้างอิงจำนวนมาก จึงมีการพัฒนาโปรแกรมฐานข้อมูลสำเร็จรูปในหลากหลายโปรแกรม เช่น SimaPro™ Gabi™ เป็นต้น โปรแกรมเหล่านี้จะช่วยจัดการข้อมูลต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยฐานข้อมูลส่วนใหญ่อ้างอิงจากประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรป สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น เป็นต้น ในส่วนของประเทศไทยยังไม่มีฐานข้อมูลเฉพาะที่ใช้งานได้จริง ดังนั้นจึงต้องอ้างอิงข้อมูลจากต่างประเทศและเทียบเคียงข้อมูลกับกระบวนการที่มีลักษณะคล้ายกัน

2.2.2.1 การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา

การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากเพื่อให้วัตถุประสงค์การศึกษามีความชัดเจนและมีขอบเขตของระบบตรงตามความต้องการ ซึ่งจะมีอิทธิพลโดยตรงต่อทิศทางและความละเอียดในการศึกษา หากกำหนดเป้าหมายและขอบเขตไม่ดีพอก็จะส่งผลต่อความถูกต้องและความแม่นยำของผลการประเมิน ดังนั้นจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญและส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องแม่นยำของผลการวิเคราะห์

ขั้นตอนการกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา ประกอบด้วย การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตหน้าที่ของผลิตภัณฑ์ (Product function) หน่วยการทำงาน (Functional unit) ขอบเขตของระบบ (System boundary) และระบบผลิตภัณฑ์ (Product system)

1) การกำหนดเป้าหมาย

ขั้นตอนแรกของการประเมินวัฏจักรชีวิต คือ การกำหนดเป้าหมายซึ่งจะต้องมีความชัดเจนไม่คลุมเครือ โดยควรกำหนดเหตุผลในการศึกษาและจุดมุ่งหมายในการนำผลการศึกษาไปใช้งานต่อเพื่อให้ข้อมูลและการสรุปผลมีความน่าเชื่อถือ อีกทั้งการกำหนดเป้าหมายการศึกษาจะต้องมีความสัมพันธ์กับขอบเขตของการศึกษา ซึ่งถ้าการศึกษานั้นมีเป้าหมายที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูงหรือต้องมีการเผยแพร่ต่อสาธารณะ จะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการศึกษาสูงไปด้วย

2) การกำหนดขอบเขตการศึกษา

การกำหนดขอบเขตของการศึกษาเป็นการกำหนดสิ่งที่ต้องการประเมินเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลให้ถูกต้องตามต้องการและตรงกับเป้าหมายที่กำหนดไว้ โดยการกำหนดขอบเขตการศึกษา ควรประกอบไปด้วย การกำหนดหน่วยการทำงาน หน้าที่ของผลิตภัณฑ์ ขอบเขตของระบบที่พิจารณาระบบผลิตภัณฑ์ เกณฑ์การตัดออก ข้อกำหนดคุณภาพของข้อมูล

3) หน่วยการทำงาน (Functional unit)

หน่วยการทำงานถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการเก็บข้อมูลปริมาณสารเข้าและขาออกจากระบบที่ต้องพิจารณาให้อยู่ภายใต้หน่วยพื้นฐานเดียวกัน เช่น 1 กิโลกรัมของวัสดุดิบ หรือ 1 เมกะจูลของพลังงาน เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบผลการประเมินผลกระทบระหว่างกระบวนการต่าง ๆ หรือระหว่างผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นซึ่งมีหน้าที่อย่างเดียวกับผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษาโดยหน่วยการทำงานจะต้องให้รายละเอียดผลิตภัณฑ์ทั้ง หน้าที่ ปริมาณ คุณสมบัติและความคงทนในการใช้งานตามหน้าที่ที่พิจารณา

4) ขอบเขตของระบบ (System boundary)

ขอบเขตของระบบคือขอบเขตการศึกษาาระบบผลิตภัณฑ์ และกระบวนการย่อยต่าง ๆ (Unit process) โดยต้องกำหนดว่ากระบวนการย่อยใดบ้างที่ต้องทำการประเมินอย่างละเอียด เนื่องจากมีผลต่อการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์และกระบวนการย่อยใดที่ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาเนื่องจากไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ขอบเขตของระบบจะมีรูปแบบดังนี้

- Gate to gate คือ การพิจารณาเฉพาะกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งจากทั้งวัฏจักรจึงเป็นเพียงบางส่วนของกระบวนการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

- Cradle to gate คือ การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์มา แต่ไม่รวมขั้นตอนการใช้งานและการจัดการผลิตภัณฑ์หลังการใช้

- Cradle to grave คือ การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การนำไปใช้งาน ตลอดจนการจัดการผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน ดังนั้นรูปแบบนี้จึงเป็นการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตเต็มรูปแบบ

- Cradle to cradle คือ รูปแบบพิเศษของ Cradle to grave ในกรณีที่ขั้นตอนการจัดการผลิตภัณฑ์หลังการใช้งานเป็นกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เดิมออกมา

2.2.2.2 การจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม

การจัดทำบัญชีรายการสิ่งแวดล้อม คือ การวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตและเป้าหมายของการศึกษาโดยข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมควรครอบคลุมถึงรายละเอียดของกระบวนการผลิตและผังการไหล (Flow chart) ของกระบวนการผลิตและปริมาณสารขาเข้าสารขาออกของระบบทั้งหมด

2.2.2.3 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Impact Assessment)

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ เป็นการคำนวณเพื่อแปลงข้อมูลบัญชีรายการที่ได้จากการรวบรวมปริมาณสารขาเข้า และสารขาออกของระบบผลิตภัณฑ์และจากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในรูปของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่ออธิบายค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมชั้นกลางหรือปลายทางที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงชีวิตโดยตลอดวัฏจักรของผลิตภัณฑ์ แหล่งที่มาของข้อมูล (Source of

Data) ข้อมูลสถิติอาจจำแนกตามแหล่งที่มาได้ 2 ทาง คือ ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) เป็นข้อมูลที่ใช้หรือหน่วยงานที่ใช้เป็นผู้ทำการเก็บข้อมูลด้วยตนเอง ซึ่งวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลอาจใช้วิธีการสัมภาษณ์ การทดลอง หรือการสังเกตการณ์ ข้อมูลปฐมภูมิเป็นข้อมูลที่มีรายละเอียดตรงตามที่ใช้ต้องการ แต่มักจะเสียเวลาในการจัดหาและมีค่าใช้จ่ายสูง และข้อมูลทุติภูมิ (Secondary Data) เป็นข้อมูลที่ใช้ไม่ได้เก็บรวบรวมเอง แต่มีผู้อื่นหรือหน่วยงานอื่น ๆ ทำการเก็บรวบรวมไว้แล้ว เช่น จากรายงาน ที่พิมพ์แล้ว หรือยังไม่ได้พิมพ์ของหน่วยงานของรัฐบาล สมาคม บริษัท สำนักงานวิจัย นักวิจัย วารสาร หนังสือพิมพ์ เป็นต้น การนำเอาข้อมูลเหล่านี้มาใช้เป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย แต่ในบางครั้งข้อมูลอาจจะไม่ตรงกับความต้องการของผู้ใช้ หรือมีรายละเอียดไม่เพียงพอที่จะนำไปวิเคราะห์ นอกจากนี้ในบางครั้ง ข้อมูลนั้นอาจมีความผิดพลาดและผู้ใช้มักจะไม่ทราบข้อผิดพลาดดังกล่าว ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อการใช้ข้อมูล ดังนั้นผู้ที่นำข้อมูลทุติภูมิมาใช้ควรระมัดระวังและตรวจสอบคุณภาพข้อมูลก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ชีวิตของผลิตภัณฑ์สามารถจำแนกออกได้ เป็นขั้นตอนต่าง ๆ หลายขั้นตอน ในที่นี้จะกล่าวถึงขั้นตอนหลักดังนี้ (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2547)

1) การจำแนกประเภทข้อมูลเป็นกลุ่มของผลกระทบ (Classification)

เป็นขั้นตอนการจำแนกผลกระทบข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกที่มีต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่าง ๆ เช่น ก๊าซมีเทน (CH_4) ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของสารที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน เป็นต้น นอกจากนี้สารเคมีบางตัวก็จัดให้อยู่ในกลุ่มของสารที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้มากกว่า 1 ประเภท ได้แก่ การจัดให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นสารที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในลักษณะของการก่อให้เกิดความเป็นกรด ทั้งนี้ตัวอย่างผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมของสารชนิดต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-11

2) การกำหนดบทบาท (Characterization)

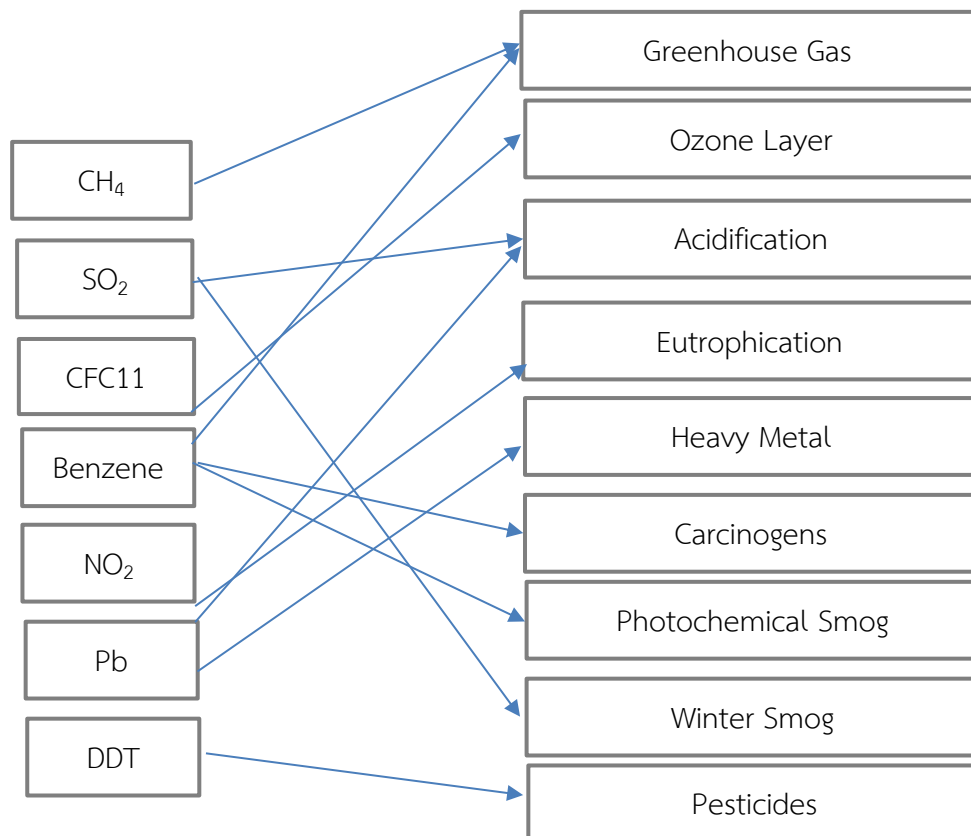
เป็นขั้นตอนการแสดงผลกระทบให้อยู่ในรูปแบบของตัวบ่งชี้ (Indicator) โดยใช้ค่าแฟคเตอร์ (Characterization Factor) ในการคูณเพื่อปรับค่าจากปริมาณของมลสารที่ปล่อยออกมาให้เป็นค่าบ่งชี้ของผลกระทบ หลังจากนั้นจะทำการรวมค่าทั้งหมดของผลกระทบแต่ละตัวเพื่อให้ได้ค่าผลกระทบรวม โดยใช้ Characterization factor ในการคูณเพื่อเปลี่ยนจากน้ำหนักของแต่ละข้อมูลเป็นค่าบ่งชี้ผลกระทบและรวมค่าทั้งหมดของแต่ละผลกระทบ ดังสมการที่ 2.1

$$EP_j = Q_j \times EF_{ij} \quad (2.1)$$

โดยที่ EP_j (Environment impact potential) คือ ศักยภาพของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภท j (kg substance equivalent)

Q_j (Quantity of substance) คือ ปริมาณมลสาร j ที่ปล่อยออกมา (kg substance j)

EF_{ij} (Equivalency factor) หรือ Characterization factor คือ ค่าเทียบเท่าของสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภท j (kg substance equivalent/ kg substance j)



รูปที่ 2-11 การจำแนกสารตามประเภทของผลกระทบ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Goedkoop (1996)

จากการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ แสดงผลกระทบสิ่งแวดล้อม 15 ด้านดังต่อไปนี้

- ด้านการลดลงของโอโซนในชั้นบรรยากาศ (Ozone layer depletion)

จำนวนของก๊าซที่ปลดปล่อยในอากาศ สารคาร์โบฟลูออโรคาร์บอน (chlorofluorocarbon, CFC) และสารกลุ่มอื่น ๆ ที่ไปเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซคลอรีน (chlorine) และโบรมีน (bromine) ในชั้นสตราโตสเฟีย (stratosphere) ที่เป็นสาเหตุของการทำลายชั้นโอโซน (ozone-depleting substances, ODS) ที่เป็นชั้นที่ช่วยป้องกันรังสียูวีบี (UVB) ซึ่งก๊าซโอโซน จะ

กระจายอยู่ไม่เท่ากันในชั้นสตราโตสเฟียร์ทั่วโลก เมื่อความเข้มข้นของก๊าซโอโซนลดลง ทำให้เกิดหลุมโอโซนจะมีความแตกต่างกันไปแต่ละพื้นที่ โดยพื้นแถบขั้วโลกพบว่าการถูกทำลายของชั้นโอโซนมากที่สุดและแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ของค่าละติจูดพื้นที่เส้นศูนย์สูตรจะมีความสำคัญน้อยกว่าพื้นที่ขั้วโลก และละติจูดกลาง โดยรังสี UVB จากดวงอาทิตย์ที่ทะลุผ่านมายังโลกจะส่งผลต่อความหลากหลายทางชีวภาพบนโลก การเกิดโรคมะเร็งผิวหนัง ต้อกระจก และการลดลงของจำนวนแพลงก์ตอนพืชในเขต photic ของมหาสมุทร (Life Cycle Initiative, 2018)

- ด้านการเกิดภาวะโลกร้อน (Global warming)

การเกิดภาวะโลกร้อนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลก ซึ่งมีสาเหตุมาจากก๊าซเรือนกระจก ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbondioxide, CO₂) ที่ออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม รถยนต์ การเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้ระดับปริมาณ CO₂ ขึ้น ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ เป็นตัวการกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์ไว้ไม่ให้คายออกไปสู่บรรยากาศ โดยนักวิทยาศาสตร์ได้กล่าวไว้ในปัจจุบันการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก มีผลต่อสภาพอากาศ และการเพิ่มอุณหภูมิของโลกอย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลต่อสภาพภูมิอากาศที่แปรปรวน เช่น น้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น พื้นที่ทะเลทรายเพิ่มขึ้น และการกระจายของโรค สาเหตุการเกิดภาวะโลกร้อนเกี่ยวข้องกับกิจกรรมทางเศรษฐกิจของมนุษย์เป็นหลัก จึงทำให้ยากที่สุดต่อการควบคุม เพราะมีขอบเขตทางเศรษฐกิจทั่วโลก

- ด้านการเกิดความเป็นกรดในดิน (Terrestrial acidification/ nitrification)

และการเกิดความเป็นกรดในแหล่งน้ำ (Aquatic acidification)

ก๊าซที่ทำให้เกิดฝนกรด ได้แก่ ก๊าซแอมโมเนีย (ammonia, NH₃) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (nitrogen oxide, NO_x) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide, SO₂) จะทำปฏิกิริยากับน้ำในบรรยากาศ เกิดเป็นฝนกรด เช่น เหตุการณ์ฝนกรดที่เกิดจากอุตสาหกรรมปล่อยก๊าซพิษในประเทศอังกฤษ อีกทั้งยังส่งผลเสียต่อประเทศสวีเดนที่อยู่ข้างเคียง ฝนกรดส่งผลให้ระบบนิเวศเสื่อมโทรม คือ ส่งผลให้พื้นดิน และแหล่งน้ำมีความเป็นกรด และฝนกรดจะทำให้เกิดการผุกร่อนโดยตรงต่อโครงร่างแข็ง (Skeleton) ในส่วนที่แข็งแรงที่สุดของสิ่งมีชีวิตที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบ ทั้งพืช และสัตว์ที่อยู่ในน้ำ เช่น สาหร่าย กุ้ง หอย ปู ปลา เป็นต้น และสิ่งมีชีวิตที่อยู่บนบก เช่น ไล่เตียน แมลง สัตว์มีกระดูกสันหลัง เป็นต้น

- ด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ (Aquatic Ecotoxicity) และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก (Terrestrial Ecotoxicity)

ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศ (Ecotoxicity) เป็นการผสมคำระหว่างนิเวศวิทยา (Ecology) และพิษวิทยา (Toxicology) โดยนิยามหลัก คือ การประเมินความเป็นพิษและความเสี่ยงทางนิเวศวิทยาที่เกิดจากสารพิษตามธรรมชาติหรือสารสังเคราะห์ ที่เป็นส่วนประกอบของระบบนิเวศสัตว์รวมถึงมนุษย์ พืช และจุลินทรีย์ ตัวอย่างเช่น การทดสอบความเป็นพิษ และการประเมินความเสี่ยงของปริมาณสารเคมีที่อยู่ในสิ่งแวดล้อม การสัมผัสของสิ่งมีชีวิต และความเป็นพิษของสารเคมีตามธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมวัดจากผลกระทบ 3 ด้าน คือ แหล่งน้ำจืด แหล่งน้ำเค็ม และพื้นดินบนบก ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมเกิดจากการปลดปล่อยของสาร ได้แก่ โลหะหนัก สารอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งมีผลต่อระบบนิเวศ โดยการประเมินความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมขึ้นอยู่กับความเข้มข้นสูงสุดในน้ำของระบบนิเวศ

- ด้านการเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหารในแหล่งน้ำ (Aquatic eutrophication)

การเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหารในแหล่งน้ำเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำที่มีปริมาณธาตุอาหารจำพวก สารอินทรีย์ แอมโมเนียสารประกอบฟอสฟอรัส และไนโตรเจนมากเกินไป ซึ่งธาตุอาหารเหล่านี้จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแพลงตอนพืช และสาหร่าย ซึ่งเป็นแหล่งอาหารขั้นต้นของห่วงโซ่อาหาร ทำให้พืชสีเขียวมีการสังเคราะห์แสงมากขึ้น และเจริญเติบโตแพร่พันธุ์อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อมีธาตุอาหารมากเกินไป ในเวลากลางวันพืชจะทำการสังเคราะห์แสงโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคายก๊าซออกซิเจนออกมา ทำให้แหล่งน้ำในเวลากลางวันมีก๊าซออกซิเจนละลายสูงเกินกว่าความเข้มข้นสูงสุด และในเวลากลางคืนระดับออกซิเจนจะลดลงต่ำจนถึงระดับศูนย์ ส่งผลให้สัตว์น้ำตายภายในข้ามคืน ทำให้ประชากรของสัตว์น้ำลดลงอย่างรวดเร็ว

- ด้านการแผ่รังสีไอออน (Ionizing Radiation)

การแผ่รังสีไอออนเป็นประเภทผลกระทบที่อยู่ในการประเมิน LCA ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขั้นความเสียหายต่อสุขภาพมนุษย์ และระบบนิเวศ ที่เชื่อมโยงกับการปล่อยรังสีนิวเคลียร์ โดยรังสีที่มีพลังงานสูง ที่สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางที่รังสีนั้นวิ่งผ่าน เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ทั้งโดยทางตรงหรือทางอ้อม เช่น รังสีแอลฟา (alpha rays) รังสีบีตา (beta rays) รังสีเอกซ์ (x-rays) รังสีแกมมา (Gamma ray) รังสีนิวตรอน (neutron) รังสีชนิดก่อก่อไอออนนี้ เป็นรังสีที่สามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต และทำให้เกิดอันตรายได้ (Greendelta, 2015)

- ด้านการใช้ที่ดิน (Land occupation)

การประเมินผลกระทบการใช้ประโยชน์ที่ดิน ได้แก่ พื้นที่ใช้งาน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการจัดการและการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมที่ดินในสภาพธรรมชาติเป็นสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง เช่น นิคม และแหล่งที่อยู่กึ่งธรรมชาติ เช่น พื้นดินเพาะปลูกได้ พุ่มหญ้าเลี้ยงสัตว์ ที่ป่าเชิงพาณิชย์ มีการนิยามการใช้ที่ดินว่าเป็น ผลลัพธ์ของการเตรียมการ การทำกิจกรรม และปัจจัยนำเข้าที่ผู้คนยอมรับในฐานะสิ่งปกคลุมดินประเภทหนึ่ง

- ด้านการถลุงแร่ (Mineral extraction)

การถลุงแร่เป็นการนำแร่ธาตุในหินไปผ่านกรรมวิธีต่าง ๆ เพื่อให้ได้แร่ที่บริสุทธิ์ หรือเกือบบริสุทธิ์ตามต้องการ เพื่อนำแร่ที่ได้ มาใช้กระตุ้นเศรษฐกิจ เช่น ทองแดง (copper) เหล็ก (iron) ทองคำ (gold) ตะกั่ว (lead) และแมงกานีส (manganese) เป็นต้น ซึ่งการถลุงแร่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศมากมายที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม กรรมวิธีถลุงโลหะมีหลายขั้นตอน การถลุงแร่สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมแร่ การถลุงแร่ และการทำโลหะที่ได้จากการถลุงให้บริสุทธิ์ หรือมีคุณสมบัติตามต้องการ

- ด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป (Non-renewable Energy)

พลังงานที่ใช้แล้วหมดไป คือ แหล่งพลังงานจากใต้พื้นดิน เมื่อใช้หมดแล้วไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือหามาทดแทนโดยธรรมชาติได้ทันความต้องการในเวลาอันรวดเร็ว ต้องใช้เวลานานกว่าร้อยล้านปีที่จะสร้างขึ้นม่อีกได้และมีปริมาณจำกัด นั่นคือพลังงานฟอสซิล และพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ตัวอย่างของพลังงาน ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และพลังงานนิวเคลียร์

- ด้านสารก่อมะเร็ง (Carcinogens)

สารก่อมะเร็ง คือ สารใด ๆ ก็ตามที่เป็นสาเหตุหรือกระตุ้นทำให้เกิดมะเร็งชนิดต่าง ๆ ได้ ซึ่งสารเหล่านี้จะไปทำให้ดีเอ็นเอของเซลล์ในร่างกายเปลี่ยนแปลงและผิดปกติไป สารก่อมะเร็งที่พบส่วนใหญ่เป็นสารเคมี ได้แก่ สารเคมีในโรงงานอุตสาหกรรม จากควันไอเสียของรถหรือในควันบุหรี่ หรือรังสีต่าง ๆ ในแสงแดด สารโพรทามีนที่เกิดจากสารไนโตรด (ดินประสิว) ในอาหารประเภทไส้กรอกและเนื้อสัตว์ที่เก็บรักษาโดยใช้เกลือหมักหรือสารเคมีที่พบในเนื้อสัตว์ที่ย่างจนไหม้เกรียม ก็เป็นสาเหตุให้เกิดมะเร็ง

- ด้านสารไม่ก่อมะเร็ง (Non-carcinogens)

สารไม่ก่อมะเร็ง (non-carcinogen) รวมถึงสารก่อมะเร็งที่ไม่มีผลต่อยีน (nongenetic carcinogen) และความเป็นพิษอย่างอื่นที่ไม่ใช่การเกิดมะเร็ง (non-carcinogenic effects) จากสารก่อมะเร็ง แนวความคิดเกี่ยวกับสารไม่ก่อมะเร็ง คือ ปริมาณสารเคมีที่มากที่สุด เมื่อได้รับเข้าไปทุกวันแล้วจะไม่ทำให้เกิดความผิดปกติใด ๆ

- ด้านการเกิดสารอนินทรีย์ที่มีผลต่อการหายใจ (Respiratory inorganics) และด้านการเกิดสารอินทรีย์ที่มีผลต่อการหายใจ (Respiratory organics)

สารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดปัญหาด้านระบบหายใจ ที่พบปกคลุมทั่วไปในอากาศ เช่น การเกิดปฏิกิริยา photochemical oxidation ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ในขณะที่สารอนินทรีย์ก่อให้เกิดปัญหาระบบทางเดินหายใจ ได้แก่ ฝุ่น อาจเกิดจากการเผาไหม้ของฟอสซิล มีการปลดปล่อยซัลเฟต ไนเตรต และฝุ่นละออง มลพิษเหล่านี้ทำให้หายใจลำบากขึ้น

3) การหาขนาดของผลกระทบ (Normalization)

คือ การแสดงขนาดของผลกระทบของผลิตภัณฑ์การบริการที่ศึกษา กับขนาดของผลกระทบสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ ในระดับประเทศ ภูมิภาค ระดับโลกหรือกับผลิตภัณฑ์หรือการบริการที่ต้องอ้างอิง ดังสมการที่ (2.2)

$$NP_j = EP_j / (T \times ER_j) \quad (2.2)$$

โดยที่ NP_j (Normalized environment impact potential) คือ ค่าปกติทางศักยภาพของผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมประเภท j ของผลิตภัณฑ์ (person)

T (Lifetime of product) คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ (year)

ER_j (Equivalency factor) คือ ค่าอ้างอิงปกติของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่ j ใดๆเกิดจากการกระทำของคนหนึ่งคนต่อปี (kg substance equivalent/person/year)

4) การให้น้ำหนัก (Weighting)

คือ ขั้นตอนในการให้น้ำหนักความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น โดยค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมแต่ละชนิดจะต่างกันไป เป็นการให้ความสำคัญลักษณะของผลกระทบทั้ง 3 ประเภท คือ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ และการใช้ทรัพยากร ขึ้นกับมุมมองของผู้ประเมินว่าจะกำหนดค่ามลภาวะ (Weighting Factor) ว่าเป็นเท่าใด จากนั้นรวมค่าของดัชนีบ่งชี้ทั้ง 3 ประเภท ให้เป็นคะแนนเดียว ดังสมการที่ (2.3)

$$WP_j = WF_j \times NP_j \quad (2.3)$$

โดยที่ WPj (Weighted environment impact potential) คือ ค่าศักยภาพของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภท j ไต ๆ หลังการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญ (person for target year; Pt.)

WFj (Weighted factor) คือ ค่าสัดส่วนน้ำหนักความสำคัญของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม j ไต ๆ ในปีที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้

5) การจัดกลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Grouping)

เป็นการจัดกลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมออกเป็นหมวดหมู่โดยรวมกลุ่มผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยมนุษย์ผลกระทบต่อระบบนิเวศ และการลดลงของทรัพยากรธรรมชาติและแหล่งพลังงาน ซึ่งสามารถแบ่งระดับของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้หลายระดับ เช่น ระดับท้องถิ่น ระดับโลก เป็นต้น

6) การวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูล (Data Quality Analysis)

เป็นการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูลที่ใช้เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมก่อนที่จะแปลผลและนำผลดังกล่าวไปใช้ต่อไป ปัจจัยที่นำมาพิจารณาเกี่ยวกับคุณภาพของข้อมูล ได้แก่ ความเหมาะสมและสอดคล้องของข้อมูลที่ใช้และข้อมูลที่ต้องการตามที่กำหนดไว้ในเป้าหมายการศึกษา โดยดูจากแหล่งที่มาของข้อมูล ช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล ความถูกต้องของวิธีการวัดและการคำนวณข้อมูล การเป็นตัวแทนที่เหมาะสมของข้อมูลที่ขาดหายไป ตัวอย่างเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูล เช่น การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของข้อมูล (Sensitivity analysis) เพื่อจำแนกข้อมูล วิธีการปันส่วน วิธีคำนวณผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มีความอ่อนไหวต่อผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของข้อมูล (Uncertainty Analysis) เพื่อประเมินระดับความไม่แน่นอนของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

2.2.2.4 การตีความและการวิเคราะห์เพื่อการปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อม (Interpretation and Improvement Analysis)

การตีความและการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ ทำให้ทราบว่าช่วงชีวิตใดของผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ความรุนแรงของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีนัยสำคัญสูงสุด รวมทั้งแหล่งที่มาของประเด็นปัญหาและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ การวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นระบบจะนำไปสู่การวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงด้านสิ่งแวดล้อมที่มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุด ทั้งนี้การตีความและการแปรผลควรทำด้วยความระมัดระวังและอยู่บนพื้นฐานของขอบเขตการศึกษา เป้าหมาย วัตถุประสงค์การศึกษาของการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ผู้ที่จะนำข้อมูลที่ได้

ประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และการจัดการสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างดี จึงสามารถเลือกแนวทางการจัดการเพื่อปรับปรุงประเด็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมของแต่ละผลิตภัณฑ์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นการนำผลการศึกษาที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อสรุปผล พิจารณาข้อจำกัด การให้ข้อเสนอแนะจากผลการทำการประเมินวัฏจักรชีวิต หรือจากการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม และทำรายงานสรุปการแปลผลการศึกษา ให้มีความสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตของการศึกษา เพื่อให้ได้ข้อสรุปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ต่อไป เช่น ขั้นตอนใดในวัฏจักรชีวิตก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุด เป็นต้น ในการวิเคราะห์ผลนั้นจะต้องมีข้อมูลและตัวเลขจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรมสำเร็จรูปช่วยในการทำงาน ซึ่งจะทำให้สามารถจัดการกับข้อมูลของกระบวนการผลิตที่มีจำนวนขั้นตอนมาก ๆ ได้อย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพ และเสียค่าใช้จ่ายที่ต่ำ รวมทั้งสามารถเชื่อมโยงข้อมูลกับฐานข้อมูลด้านการประเมินวัฏจักรชีวิตที่ทำไว้ทั่วโลกได้ ปัจจุบันหลายประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรป และญี่ปุ่นได้ผลิตโปรแกรมสำเร็จรูปขึ้นมาใช้ เช่น โปรแกรม JEMAI-LCA Pro, GaBi และ SimaPro เป็นต้น ข้อมูลที่ได้จากการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ออกแบบผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิต หรือบริการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco Design) ซึ่งปัจจุบันหลายประเทศต่าง ได้นำหลักการ LCA มาใช้ปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการพิจารณาจัดทำข้อกำหนดมาตรฐานสินค้าและบริการ เช่น สินค้าฉลากเขียว โดยฉลากเขียวที่ติดอยู่กับผลิตภัณฑ์ เป็นข้อมูลให้ผู้บริโภคทราบว่าผลิตภัณฑ์นั้น เน้นการรักษาสิ่งแวดล้อม หากมีการบริโภคสินค้าฉลากเขียวมากขึ้น จะทำให้ผู้ผลิตปรับปรุงสินค้า หรือบริการเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ในงานวิจัยนี้มีการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้โปรแกรม SimaPro 8.3 ตามวิธีแบบ IMPACT 2002+ version 2.13 โดยมีหลักการสำคัญ คือ การคำนึงถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากการปลดปล่อยมลสารสู่สิ่งแวดล้อม (Problem-oriented approach) ซึ่งเป็นการประเมินผลกระทบขั้นกลาง (Midpoint) ที่คำนวณจากการมีส่วนร่วมทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของมลสารต่าง ๆ แล้วนำมารวมกันเป็นผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรวมของผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยจำแนกกลุ่มผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้น และการเตรียมเก็บข้อมูลที่ถูกต้อง โดยงานวิจัยนี้ได้ประเมินกลุ่มผลกระทบ 3 ด้าน ได้แก่ ด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ (Aquatic Ecotoxicity) ด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก (Terrestrial Ecotoxicity) ด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป (Non-renewable Energy)

2.3 มลพิษหลักจากการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

เนื่องจากในกระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM มีการใช้วัสดุที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์ชิ้นงานเป็นวัสดุที่เป็นของแข็งที่ผ่าน ความร้อนขณะพิมพ์ ดังนั้นมลพิษที่ปล่อยออกมาจึงเป็นมลพิษทางอากาศส่วนใหญ่มี 2 ชนิด ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate Matter) และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds)

2.3.1 ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate Matter: PM)

PM_{2.5} คือ ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน อาจเทียบได้ว่ามีขนาดประมาณ 1 ใน 25 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นผมมนุษย์ มีขนาดเล็กจนจมูกของมนุษย์นั้นไม่สามารถกรองได้ ทำให้ฝุ่นละอองชนิดนี้สามารถแพร่กระจายเข้าสู่ทางเดินหายใจ กระแสเลือด และแทรกซึมสู่กระบวนการทำงานในอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกาย เพิ่มความเสี่ยงเป็นโรคเรื้อรัง (จินตนา ประชุมพันธ์, 2561)

PM₁₀ คือ ฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน (ขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นผม 5 เท่า) เมื่อหายใจเข้า อากาศที่หายใจจะมีฝุ่นปนมาด้วยหลายขนาด ฝุ่นที่ขนาดเล็ก 10 ไมครอน จะโดนขนจมูกดักไว้ไม่ให้ผ่านเข้าสู่ร่างกายซึ่งฝุ่นขนาดเล็กลงมาอาจเข้าไปสู่หลอดลมได้ ถ้ามีฝุ่นเข้ามามาก ๆ ก็จะมีรู้สึกระคายเคืองเสบคอ ร่างกายก็จะไอจามเพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นเข้าสู่ร่างกายหากฝุ่นที่มีขนาดเล็กมาก ๆ เช่น PM_{2.5} จะสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ลึกมาก จนถึงหลอดลมแขนงถุงลมในปอด เกิดการสะสมฝุ่นในปอด และสามารถสร้างแผลในหลอดเลือดกับหัวใจได้ด้วย ทำให้ในระยะยาวมีโอกาสเกิดเป็นโรคปอดติดเชื้อ หอบหืด และมะเร็งปอดโดยที่ PM_{2.5} เกิดขึ้นได้จาก 2 ปัจจัยหลัก คือ

2.3.1.1 แหล่งกำเนิดโดยตรง ได้แก่

1) การเผาในที่โล่งมีการปล่อย PM_{2.5} มากที่สุดถึง 209,937 ตันต่อปี ซึ่งมาจากการเผาในพื้นที่เพาะปลูกพืชเชิงเดี่ยวเพื่อเข้าสู่ห่วงโซ่อุปทานการผลิตอาหารของบริษัทอุตสาหกรรมเกษตรขนาดใหญ่ในภาคเหนือตอนบนของไทยและภูมิภาคลุ่มน้ำโขงรวมถึงหมอกควันพิษข้ามพรมแดนอีกด้วย

2) การคมนาคมขนส่ง มีการปล่อย PM_{2.5} ประมาณ 50,240 ตันต่อปี โดยมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทั้งดีเซลและแก๊สโซฮอล์เป็นหลัก อีกทั้งยังเป็นแหล่งกำเนิดของออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) อีกด้วย

3) การผลิตไฟฟ้า มีการปล่อย PM_{2.5} ประมาณ 31,793 ตันต่อปี ถึงแม้จะมีค่า PM_{2.5} น้อยกว่าการเผาในที่โล่งและการคมนาคมขนส่ง แต่กลับมีส่วนในการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) สู่ชั้นบรรยากาศมากที่สุด

4) อุตสาหกรรมการผลิต มีการปล่อย PM_{2.5} ประมาณ 65,140 ตันต่อปี โดยพบมากที่สุดในพื้นที่เขตควบคุมมลพิษมาตาพุด จังหวัดระยอง ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากสารเคมีและอุตสาหกรรม (จินตนา ประชุมพันธ์, 2561)

2.3.1.2 การรวมตัวของก๊าซอื่น ๆ ในบรรยากาศ

ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) สารปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) อาร์เซนิก (As) และโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) เป็นสารพิษที่ส่งผลกระทบต่อร่างกายของมนุษย์ด้วยองค์ประกอบของสารพิษเหล่านี้ทำให้องค์การอนามัยโลก (World Health Organization:WHO) กำหนดให้ PM จัดอยู่ในกลุ่มที่ 1 ของสารก่อมะเร็ง ตั้งแต่ปี 2556 และยังเป็นสาเหตุให้ 1 ใน 8 ของประชากรโลกเสียชีวิตก่อนวัยอันควรสอดคล้องกับรายงานของธนาคารโลก (World Bank) ที่ระบุว่าประเทศไทยมีผู้เสียชีวิตจากมลพิษในอากาศเป็นสาเหตุหลักของการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรมากถึง 50,000 ราย ซึ่งการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรนี้ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจรวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่รัฐจะต้องสูญเสียเกี่ยวกับการรักษาพยาบาลผู้ป่วยจากมลภาวะทางอากาศนี้อีกด้วย (จินตนา ประชุมพันธ์, 2561)

2.3.2 สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs)

สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายมักใช้เป็นสารประกอบและสารตัวทำละลายในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของเหลวที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนอินทรีย์สามารถระเหยเป็นไอได้ง่ายในอุณหภูมิห้องและความดันปกติ เนื่องจากมีจุดเดือดต่ำและไวไฟ เมื่อระเหยสู่บรรยากาศจะสามารถคงตัวอยู่ในอากาศได้เป็นระยะเวลานาน และสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมรอบตัว ทั้งในอากาศ ดิน และน้ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศและสิ่งมีชีวิต ยกตัวอย่างสารที่มีส่วนผสมของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย เช่น เบนซีน โทลูอิน ไซลีน บิวทาไดอิน ไวนิลคลอไรด์ โนเมอร์คลอโรฟอร์ม แอลกอฮอล์ อะซีโตน และฟอร์มัลดีไฮด์ เป็นต้น สามารถพบสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ในชีวิตประจำวันจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ปิโตรเคมี โรงกลั่นน้ำมัน สีและกาว เครื่องหนัง ยากำจัด ศัตรูพืช เครื่องสำอางสเปรย์ดับกลิ่น น้ำหอมยาและเวชภัณฑ์ สีทาบ้านเคมีภัณฑ์ ก่อสร้างควันทันน้ำยาฟอกสีสารตัวทำละลายในการพิมพ์จากอุปกรณ์สีรถยนต์โรงงานอุตสาหกรรมน้ำยาซักแห้งสีและน้ำยาดัดผมสารฆ่าแมลงสารที่เกิดจากเผาไหม้ และจากควันทันไอเสียรถยนต์อีกด้วย ซึ่งหากสัมผัสหรือรับสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าสู่ร่างกายจะทำให้ระบบภูมิคุ้มกันบกพร่อง ระบบประสาทถูกทำลาย เกิดอาการวิงเวียนศีรษะหน้ามืด แสบตา หายใจลำบาก และหากได้รับในปริมาณมากอาจทำให้หมดสติสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายนี้สามารถเข้าสู่ร่างกายได้จากทางการหายใจทางผิวหนัง จากการสัมผัสและการสูดดมเข้าไป หากได้รับสารเป็นประจำอาจทำให้เป็นอันตรายต่อ

สุขภาพสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสารที่ไม่มีพิษเฉียบพลันแต่มีพิษเรื้อรัง ซึ่งจะก่อให้เกิดโรคเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ วิงเวียน ปวดศีรษะ ซึมเศร้าหรือหมดสติได้ เกิดการอักเสบของเยื่อเมือก และทำให้เกิดการระคายเคืองที่ผิวหนังและตา หากได้รับสารเป็นระยะเวลาสั้น ๆ ติดต่อกัน อาจก่อโรคมะเร็ง อวัยวะภายในถูกทำลาย ในหญิงที่ตั้งครรภ์อาจทำให้เกิดการพิการของเด็กแรกเกิด โดยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายแบ่งกลุ่มตามลักษณะของโมเลกุล หรือโครงสร้างดังต่อไปนี้

ประเภทของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายแบ่งออกตามลักษณะของโมเลกุล เป็น 2 กลุ่มคือ

1) Non-chlorinated VOCs หรือ Non-halogenated Hydrocarbons คือ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล ได้แก่ Aliphatic Hydrocarbons ยกตัวอย่างเช่น ก๊าซโซลีน, Hexane, Fuel Oils, Industrial Solvents, ในอุตสาหกรรม Alcohols, aldehydes, ketone, hexane และกลุ่มสาร Aromatic hydrocarbons ยกตัวอย่าง Toluene, Benzene, Xylenes, Styrene, Ethylbenzene, Phenol เป็นต้น ซึ่งสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายมาจากการเผาไหม้ของขยะ พลาสติก สีทาบ้าน ฯลฯ

2) Chlorinated VOCs หรือ Halogenated Hydrocarbons คือ ไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีธาตุคลอรีนในโมเลกุล ได้แก่ สารเคมีที่สังเคราะห์ในอุตสาหกรรมสาร Chlorinated VOCs ซึ่งมีความเป็นพิษ และมีความเสถียรในสิ่งแวดล้อม ยากต่อการสลายตัวในธรรมชาติ เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีพันธะระหว่างคาร์บอนและธาตุกลุ่มฮาโลเจนที่ทนทาน

การแบ่งประเภทตามลักษณะของโครงสร้าง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1) กลุ่มอะลิฟาติก ไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbons) คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีคาร์บอนอะตอมต่อกันเป็นสายโซ่เปิดโซ่ตรง หรือ โซ่กิ่ง

2) กลุ่มอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Aromatic Hydrocarbons) คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป เช่น สารเบนซีน (Benzene) สารโทลูอีน (Toluene) และสารไซลีน (Xylenes)

3) กลุ่มออกซิเจน (Oxygenated) คือ สารที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น สารอะซิโตน (Acetone) และสารคีโตน (Ketones) มาจากอุตสาหกรรมประเภทอู่ซ่อมรถยนต์ อุตสาหกรรมประเภทสิ่งพิมพ์ อุตสาหกรรมประเภทเฟอร์นิเจอร์ไม้ อุตสาหกรรมประเภทพลาสติก อุตสาหกรรมประเภทเบญจรงค์ อุตสาหกรรมประเภทฟอกย้อมและฟอกสีและสิ่งทอ (สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ, กระจกวางสารธรรมชาติ)

นอกจากการจำแนกประเภทสารอินทรีย์ระเหยง่ายข้างต้นแล้ว ในประเทศไทยได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศ และค่าเฝ้าระวังค่าระดับความเป็นพิษสารอินทรีย์ระเหยง่ายจำนวน 19 ชนิด ได้แก่ อะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) อะครอลีน (Acrolein) อะครีโลไน

ไตร (Acrylonitrile) เบนซีน (Benzene) เบนซิลคลอไรด์ (Benzyl Chloride) 1,3 – บิวทาไดอีน (1,3 – Butadiene) โบรโมมีเทน (Bromomethane) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride) คลอโรฟอร์ม (Chloroform) 1,2 – ไดโบรโมอีเทน (1,2 – Dibromoethane) 1,4 – ไดคลอโรเบนซีน (1,4 – Dichlorobenzene) 1,2 – ไดคลอโรอีเทน (1,2 – Dichloroethane) ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) 1,2 – ไดคลอโรโพรเพน (1,2 – Dichloropropane) 1,4 – ไดออกเซน (1,4 - Dioxane) เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene) 1,1,2,2 – เตตระคลอโรอีเทน (1,1,2,2 - Tetrachloroethane) ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene) และไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride) ซึ่งสารอินทรีย์ระเหยง่ายนอกจากจะพบในชั้นบรรยากาศทั่วไป ยังมีสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่พบในอาคารดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 บัญชีรายชื่อ VOCs ในงานด้านมลพิษทางอากาศในอาคาร

อาซีติก แอซิด (Acetic Acid)	เอทิล อาซีเตต (Ethyl Acetate)	ไนโตรอีเทน (Nitroethane)
อาซีโตน (Acetone)	เอทิล แอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol)	ไนโตรมีเทน (Nitromethane)
อาเซทิลีน (Acetylene)	เอทิล คลอไรด์ (Ethyl Chloride)	เพนทิลลามีน (Pentylamine)
เอมิลแอลกอฮอล์ (Amyl Alcohol)	เอทิล ไซยาไนด์ (Ethyl Cyanide)	เพนทิลีน (Pentylene)
เบนซีน (Benzene)	เอทิล ฟอร์มेट (Ethyl Formate)	โพรเพน (Propane)
บิวเทน (Butane)	เอทิล โพรปิโนเอต (Ethyl Propionate)	โพรพินาลดีไฮด์ (Propionaldehyde)
บิวทิล แอลกอฮอล์ (Butyl Alcohol)	เอทิลีน (Ethylene)	โพรพิลแอลกอฮอล์ (Propyl Alcohol)
บิวทิล ฟอร์มेट (Butyl Formate)	เอทิลีน ออกไซด์ (Ethylene Oxide)	ไอโซโพรพิลคลอไรด์ (I-Propyl Chloride)
บิวทิลลามีน (Butylamine)	ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	โพรพิลไซยาไนด์ (Propyl Cyanide)

บิวทิลีน (Butylene)	ฟอร์มิก แอซิด (Formic Acid)	โพรพิลฟอร์มเมต (Propyl Formate)
คาร์บอน เตตราคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride)	เฮปเทน (Heptane)	โพรพิลลามีน (Propylamine)
คลอโร เบนซีน (Chloro Benzene)	ไอโซ บิวเทน (Iso-Butane)	โพรพิลีน (Propylene)
คลอโร ไซโคร เฮกเซน (Chloro Cyclo Hexane)	เฮกซิลแอลกอฮอล์ (Hexyl Alcohol)	เตอเชียรี บิวทิล แอลกอฮอล์ (Tertiary Butyl Alcohol)
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	เมทิล โพรพิล คีโตน (Methyl Propyl Ketone)	เตตราคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)
คลอโรเฮกเซน (Cyclohexane)	เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene Chloride)	โทลูอีน (Toluene)
1-ไดคลอโรอีเทน (1Dichloroethane)	มีเทน (Methane)	1,1,2- ไตรคลอโรอีเทน (1,1,2- Trichloroethane)
1,2-ไดคลอโรอีเทน (1,2Dichloroethane)	เมทิล แอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol)	ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)
ไดเอทิล คีโตน (Diethyl Ketone)	เมทิล คลอไรด์ (Methyl Chloride)	ไตรเอทิลลามีน (Triethylamine)
ไดเอทิลลามีน (Diethylamine)	เมทิล คลอโรฟอร์ม (Methyl Chloroform)	ไซลีน (Xylene)
อีเทน (Ethane)	เมทิลไซยาไนด์ (Methyl Cyanide)	ไอโซโพรพิล อาซิเตต (Isopropyl Acetate)
เมทิล เอทิล คีโตน (Methyl Ethyl Ketone)		

ที่มา : ดัดแปลงจากหนังสือแนวทางการจัดการสารอินทรีย์ระเหย VOCs (2555)

2.4 การกำจัดขยะพลาสติกหลังการใช้งานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

พลาสติกที่เหลืออยู่จากกระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จำเป็นจะต้องมีการจัดจำแนกและกำจัดพลาสติกเหล่านี้ ซึ่งการจัดการขยะพลาสติกมี 3 แนวทาง ได้แก่ การฝังกลบ (Landfill) การเผาด้วยเตาเผาขยะ (Incineration) และการรีไซเคิล (Recycle) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 การกำจัดขยะมูลฝอยด้วยวิธีรีไซเคิล (Recycle)

2.4.1.1 การรีไซเคิลแบบปฐมภูมิ

เป็นการนำวัสดุพลาสติกที่เป็นประเภทเดียวกัน ที่เกิดในกระบวนการผลิตขึ้นรูป เพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำภายในโรงงาน โดยสามารถนำมาใช้ซ้ำทั้งหมดหรือเติมผสมกับเม็ดใหม่ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, 2561)

2.4.1.2 การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิ

การรีไซเคิลแบบทุติยภูมิหรือกระบวนการหลอมขึ้นรูปใหม่ โดยเป็นการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำความสะอาด บด หลอมและขึ้นรูปกลับไปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกอีกครั้ง การรีไซเคิลแบบทุติยภูมินี้แบ่งได้เป็นหลายเทคนิคดังนี้

1) การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical recycling)

เป็นเทคนิคที่ง่ายและนิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน โดยการเก็บพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วนำมาคัดแยกตามประเภทและสี นำมาล้างทำความสะอาด ก่อนบดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และหลอมเป็นเม็ดพลาสติกรีไซเคิลเพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือนำมาผสมกับเม็ดใหม่ก่อนนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยคุณภาพของเม็ดพลาสติกรีไซเคิลนี้ จะเป็นตัวกำหนดการนำไปใช้งานและปริมาณการผสมที่ต้องการ ปัญหาในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติก คือ หลังจากผ่านกระบวนการรีไซเคิลในแต่ละครั้งพลาสติกจะมีคุณภาพต่ำลง จึงไม่สามารถนำไปใช้ในเกิดประโยชน์สูงสุด และมีราคาถูกลง จนบางครั้งไม่คุ้มต่อการลงทุน สาเหตุที่สำคัญอาจมาจากการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก ฉลากเล็ก ๆ หรือ เศษแก้ว จึงทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีสีเข้มขึ้น นอกจากนี้ ความชื้นในพลาสติก และความร้อนที่ใช้ในการหลอมพลาสติกยังเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการสลายตัว หรือเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของโพลิเมอร์ที่ใช้ทำพลาสติก ทำให้เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีสีเหลือง และมีสมบัติเชิงกลลดลง

2) การปรับปรุงโดยวิธีทางเคมี (Chemical modification)

เม็ดพลาสติกรีไซเคิลมีข้อจำกัดในด้านสมบัติ การขึ้นรูปและการใช้งาน ดังนั้น การปรับปรุงโดยวิธีการทางเคมีจะช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าว และอาจทำให้เม็ดรีไซเคิลมีลักษณะใกล้เคียงกับเม็ดใหม่ได้ การปรับปรุงนี้สามารถใช้ได้กับทั้งพลาสติกชนิดเดียวหรือพลาสติกผสมได้ ถ้าเป็นพลาสติกชนิดเดียวก็จะใช้การเติมสารเคมีหรือใช้วิธีการผ่านด้วยรังสี หากเป็นพลาสติกผสมมักใช้สารช่วยในการผสมให้เข้ากัน

3) การหลอมอัดรีดร่วมและการฉีดร่วม (Coextrusion and Coinjection moulding)

เป็นเทคนิคการรีไซเคิลซึ่งเหมาะสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้น ๆ โดยที่ผิวหน้าเป็นชั้นที่ผลิตจากพลาสติกใหม่ซึ่งมีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ป้องกันการขีดข่วนได้ดีและมีสีสดใส ส่วนชั้นกลางเป็นชั้นของพลาสติกรีไซเคิล

2.4.1.3 การรีไซเคิลแบบตติยภูมิแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การรีไซเคิลทางเคมีและทางความร้อน

1) การรีไซเคิลทางเคมี (chemical recycling)

เป็นกระบวนการที่ทำให้โครงสร้างสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดการขาดหรือแตกออก (Depolymerization) ได้มอนอเมอร์ (Monomer) หรือโอลิโกเมอร์ (Oligomer) เป็นผลิตภัณฑ์ เมื่อนำมาทำให้บริสุทธิ์ โดยการกลั่นและตกผลึกได้เป็นสารตั้งต้นที่มีคุณภาพสูง และสามารถนำไปใช้ผลิตพลาสติกใหม่

2) การรีไซเคิลทางความร้อน (Thermolysis)

โครงสร้างสามารถเกิดการแตกหรือขาดได้โดยใช้ความร้อน แบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) แบบใช้ออกซิเจน (Gasification) และ การเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation)

- Pyrolysis เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการควบแน่นเป็นของเหลว เรียกว่า น้ำมันดิบสังเคราะห์ (Synthetic crude oil) สามารถนำกลับไปใช้ในโรงกลั่น และส่วนที่ไม่เกิดการควบแน่นจะถูกนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนภายในกระบวนการ

- Gasification เป็นกระบวนการที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกออกโดยใช้ความร้อนแบบใช้ออกซิเจน กระบวนการนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า Pyrolysis ผลลัพธ์ที่ได้คือ Syngas ซึ่งประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง หากทำการแยกก่อนนำมาใช้ในรูปของสารเคมีจะมีมูลค่าสูงขึ้น 2 – 3 เท่า

- Hydrogenation เป็นเทคนิคที่ปรับปรุงมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสายโซ่พอลิเมอร์จะถูกทำให้แตกหรือขาดออกจากกันด้วยความร้อนและสัมผัสกับไฮโดรเจนที่มากเกินไปที่ความดันสูงกว่า 100 บรรยากาศ จนเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (Cracking) และเกิดการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) อย่างสมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นเชื้อเพลิงเหลว เช่น น้ำมันแก๊สโซลีนหรือดีเซล

กระบวนการรีไซเคิลทางความร้อนเป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์และคุ้มค่ากว่าการรีไซเคิลทางเคมีเพราะสามารถจัดการขยะที่เป็นพลาสติกผสมที่มีสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ ที่ไม่ใช่

พลาสติกได้ ในขณะที่การรีไซเคิลทางเคมีต้องใช้พลาสติกที่มีความสะอาดค่อนข้างสูงและมีการผสมหรือปนเปื้อนได้เพียงเล็กน้อย ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการเตรียมวัตถุดิบสูง โดยพลาสติกที่จะนำมารีไซเคิลทางความร้อนควรมีการคัดขนาดหรือกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกไปบ้าง

3) การรีไซเคิลแบบจตุภูมิ

พลาสติกสามารถนำมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ โดยการเผาไหม้ของพลาสติกให้ค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหิน (23 MJ/kg) ซึ่งช่วยในการเผาไหม้ส่วนที่เป็นขยะเปียก ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในการเผาขยะ (ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, 2561)

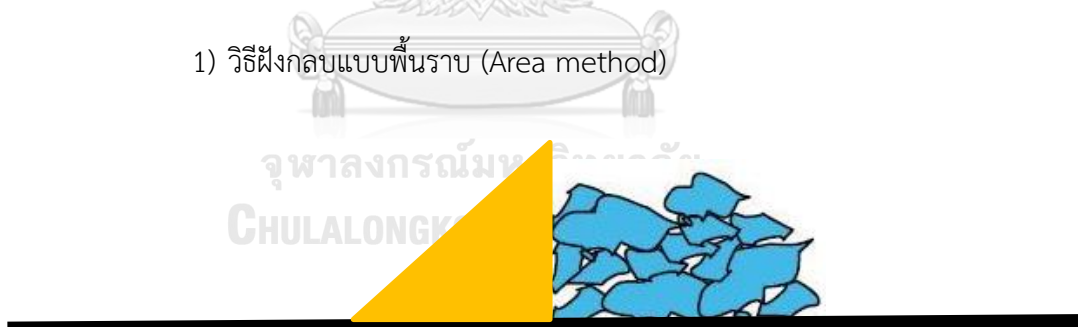
2.4.2 การกำจัดขยะมูลฝอยด้วยวิธีการฝังกลบ (Landfill)

หมายถึง การกำจัดขยะมูลฝอย โดยนำไปฝังกลบในพื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการรองรับของเสีย โดยมีการวางมาตรการป้องกันผลกระทบในด้านต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง (Urplanetx, 2018)

2.4.2.1 การฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary landfill)

วิธีและรูปแบบของการฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาล มี 3 แบบ คือ Area method, Trent method และ Canyon Method ดังแสดงรูปที่ 2-12

1) วิธีฝังกลบแบบพื้นราบ (Area method)



รูปที่ 2-12 วิธีฝังกลบแบบพื้นราบ (Area method)

ที่มา: ดัดแปลงจาก พิทักษ์ฉัตร เทพรราชา (2555)

เป็นวิธีฝังกลบที่เริ่มจากระดับดินเดิม โดยไม่มีการขุดดิน ซึ่งจะทำการบดอัดขยะมูลฝอยตามแนวราบก่อน แล้วจึงค่อยบดอัดทับในชั้นถัดขึ้นไปสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนได้ระดับตามที่กำหนดการฝังกลบขยะมูลฝอยโดยใช้วิธีนี้จำเป็นต้องทำคันดินตามแนวขอบพื้นที่ เพื่อทำหน้าที่เป็นผนังยันการบดอัดขยะมูลฝอย และทำหน้าที่ป้องกันน้ำเสียที่เกิดจากการย่อยสลายของขยะไม่ให้ซึมออกด้านนอกลักษณะของพื้นที่สำหรับใช้วิธีนี้ คือ ที่ราบลุ่มหรือที่มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวดิน

เล็กน้อย (ไม่เกิน 1 เมตร) ซึ่งไม่สามารถขุดดินเพื่อกำจัดด้วยวิธีแบบขุดร่องได้ เพราะจะทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำเสียจากขยะมูลฝอยลงสู่ น้ำใต้ดินได้ ดังนั้นการกำจัดด้วยวิธีนี้ต้องจัดหาที่ดินมาจากที่อื่นเพื่อนำมาทำคันดิน ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเพิ่มขึ้น

2) วิธีฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench method)



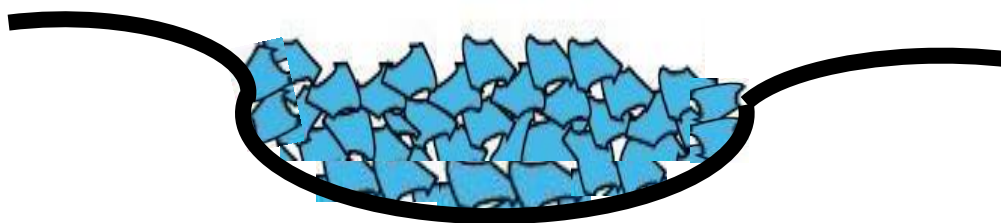
รูปที่ 2-13 วิธีฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench method)

ที่มา: ดัดแปลงจาก พิทักษ์ฉัตร เทพรราชา (2555)

เป็นวิธีฝังกลบที่เริ่มจากระดับที่ต่ำกว่าระดับดินเดิม โดยทำการขุดดินลงไปให้ได้ระดับตามที่กำหนด แล้วจึงเริ่มบดอัดมูลฝอยให้เป็นชั้นบาง ๆ ทับกันหนาขึ้นเรื่อย ๆ จนได้ระดับตามที่กำหนดของขยะมูลฝอยบดอัดแต่ละชั้น และปิดทับด้วย daily cover ซึ่งความลึกของการขุดร่องจะถูกกำหนดด้วยระดับน้ำใต้ดิน อย่างน้อยระดับกันร่องหรือพื้นล่างควรอยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินไม่น้อยกว่า 1 เมตร โดยยึดระดับน้ำในฤดูฝนเป็นเกณฑ์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปนเปื้อนต่อน้ำใต้ดิน อีกทั้งการฝังกลบแบบขุดร่องไม่จำเป็นต้องทำคันดิน เพราะสามารถใช้ผนังร่องเป็นกำแพงยังขยะมูลฝอยที่จะบดอัดได้ ทำให้ไม่ต้องขนดินจากข้างนอก และยังสามารถใช้ดินที่ขุดออกแล้วนั้นกลับมาใช้กลบขยะมูลฝอยได้อีกด้วย

3) วิธีฝังกลบแบบหุบเขา (Canyon Method)

เป็นวิธีฝังกลบบนพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นแอ่งขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติ หรือเกิดจากการขุด เช่น หุบเขา ห้วย บ่อ เหมือง ฯลฯ ซึ่งวิธีการในการฝังกลบและอัดมูลฝอยในบ่อแต่ละแห่งอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศของพื้นที่นั้นๆ เช่น ถ้าพื้นที่ของบ่อมีสภาพค่อนข้างราบอาจใช้วิธีการฝังกลบแบบขุดร่องหรือแบบที่ราบแล้วแต่กรณีในการฝังกลบนั้นจะต้องมีการปรับพื้นที่ให้เสมอกัน เพื่อให้สามารถปูชั้นกันซึมได้สะดวก การฝังกลบขยะมูลฝอยโดยวิธีนี้จะต้องจัดหาวัสดุกลบทับมาเตรียมไว้ เนื่องจากเป็นบ่อโล่งไม่มีวัสดุใช้กลบทับ ดังแสดงรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-14 วิธีฝังกลบแบบหุบเขา(Canyon Method)
ที่มา: ดัดแปลงจาก พิทักษ์ฉัตร เทพรักษา (2555)

2.4.3 การแปรรูปขยะมูลฝอยไปเป็นพลังงานความร้อนโดยใช้เตาเผา (Incineration)

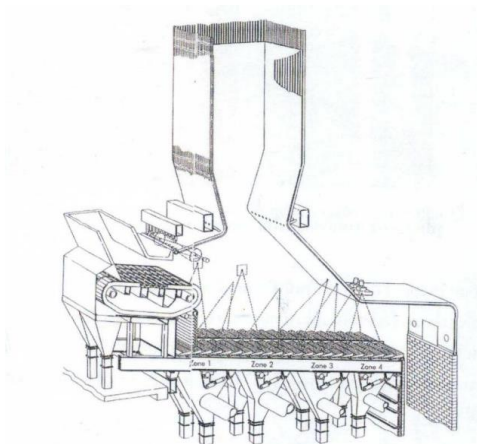
Incineration คือ การเผาขยะในเตาที่ได้มีการออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อให้เข้ากับลักษณะสมบัติของขยะที่มีอัตราความชื้นสูง และมีค่าความร้อนที่แปรผันได้ การเผาไหม้จะต้องมีการควบคุมที่ดีเพื่อจะป้องกันไม่ให้เกิดมลพิษและการรบกวนต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ก๊าซพิษ เขม่า กลิ่น เป็นต้น โดยก๊าซซึ่งเกิดจากการเผาไหม้จะได้รับการกำจัดเขม่าและอนุภาคตามที่กฎหมายควบคุม ก่อนที่จะปล่อยออกสู่บรรยากาศ ซี้เถ้าซึ่งเหลือจากการเผาไหม้ มีปริมาณประมาณ 10% และน้ำหนักประมาณ 25 ถึง 30% ของขยะที่ส่งเข้าเตาเผา จะถูกนำไปฝังกลบหรือใช้เป็นวัสดุปูพื้น สำหรับการสร้างถนน อีกทั้งในบางพื้นที่ที่มีปริมาณขยะอยู่มาก สามารถที่จะนำพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาขยะนี้มาใช้ในการผลิตไอน้ำ ทำน้ำร้อน หรือผลิตกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย

โรงเผาขยะคือระบบการเผาไหม้ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ระบบการเผาไหม้มวล (Mass Burn System) หมายถึงการเผาทำลายขยะมูลฝอยในสภาพที่รับเข้ามาโดยไม่ต้องมีกระบวนการ จัดการเบื้องต้นก่อน และอีกประเภทหนึ่งคือ ระบบที่มีการจัดการเบื้องต้น (Burning of Preheated and Homogenized Waste) ระบบการเผาไหม้มวลเป็นการเผาไหม้ขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบที่หลากหลายโดยไม่ต้องมีการจัดการเบื้องต้นก่อน เทคโนโลยีนี้เป็นการเผาไหม้ในเตาเผาแบบตะแกรงที่เคลื่อนที่ได้ (moving grate) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ยอมรับได้และรองรับการเผาทำลายขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบและค่าความร้อนที่หลากหลาย ระบบที่ได้รับความนิยมรองลงมาคือระบบเตาเผาแบบหมุน (rotary kiln) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน, 2561)

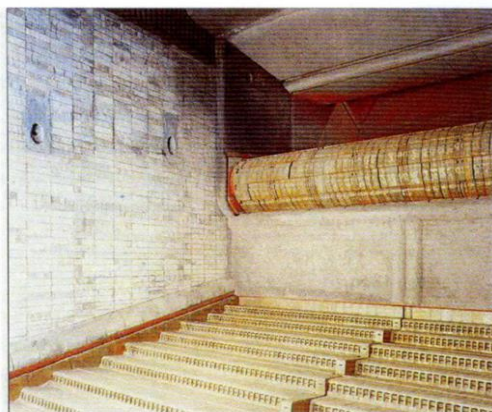
2.4.3.1 เตาเผาแบบการเผาไหม้มวล (Moving Grate)

เตาเผาขยะแบบการเผาไหม้มวลเป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งประกอบด้วยตะแกรง โดยขณะเผาไหม้ตะแกรงจะเคลื่อนที่และลำเลียงขยะจากจุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายก้ามปูของ overhead crane ซึ่งทำหน้าที่จับขยะเพื่อป้อนลงไปในช่วงป้อนก่อนที่จะหล่นเข้าไปในห้องเผาไหม้ของเตาเผาด้วยแรงโน้มถ่วง เมื่อขยะมูลฝอยตกลงไปบนตะแกรงแล้ว ความร้อน

ในเตาเผาจะทำให้ขยะแห้งก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ด้วยอุณหภูมิที่สูงกับอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ อีกทั้งซีเมนต์ที่เหลือจากการเผาไหม้ รวมทั้งส่วนประกอบของขยะส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ จะหลุดออกจากตะกรับในลักษณะของ slag/bottom ash ผ่านหลุมถ่ายซีเมนต์ ดังแสดงรูปที่ 2-15 และ 2-16



รูปที่ 2-15 เตาเผาแบบตะกรับแบบเคลื่อนที่
(กระทรวงพลังงาน, 2561)

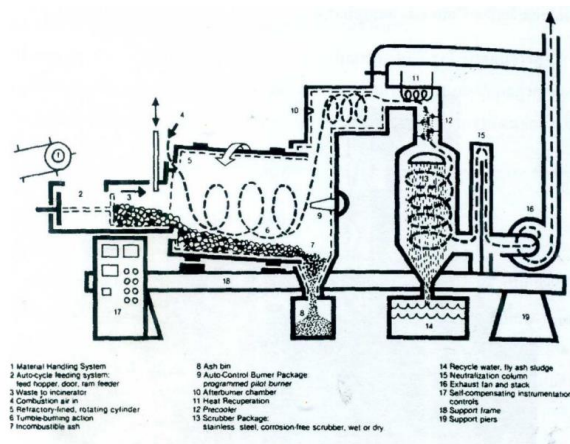


รูปที่ 2-16 ภาพถ่ายแสดงให้เห็นตะกรับที่อยู่ด้านในของเตาเผามูลฝอย
(กระทรวงพลังงาน, 2561)

2.4.3.2 ระบบเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln)

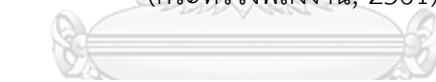
เป็นการเผาไหม้มวลของขยะมูลฝอยโดยใช้ห้องเผาไหม้ทรงกระบอกซึ่งสามารถหมุนได้รอบแกนขยะจะเคลื่อนตัวไปตามผนังของเตาเผาทรงกระบอกตามการหมุนของเตาเผาซึ่งทำมุมเอียงกับแนวระดับ เตาเผาแบบหมุน ส่วนใหญ่จะเป็นแบบผนังอิฐทนไฟ มีบางวัสดุที่เป็นแบบ

ผนังน้ำทรงกระบอกอาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ถึง 5 เมตร และยาวตั้งแต่ 8 ถึง 20 เมตร มีความสามารถในการเผาทำลายขยะมูลฝอยมีตั้งแต่ 2.4 ตันต่อวัน (0.1 ตันต่อชั่วโมง) จนถึง ประมาณ 480 ตันต่อวัน (20 ตันต่อชั่วโมง)เนื่องจากว่าเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ (retention time) ของก๊าซไอเสียค่อนข้างสั้นสำหรับการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเตาเผาแบบหมุน ดังนั้นเตาทรงกระบอกจึงเป็นส่วนต่อที่ทำเป็นห้องเผาไหม้หลัง (after-burning chamber) และอยู่ในส่วนของหม้อน้ำด้วย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน, 2561) ดังแสดงรูปที่ 2-17 และ 2-18



รูปที่ 2-17 ระบบเตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln)

(กระทรวงพลังงาน, 2561)



รูปที่ 2-18 ระบบเตาเผาแบบหมุนที่ติดตั้งใช้งานจริง

(กระทรวงพลังงาน, 2561)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์

Shahrubudin และคณะ (2019) ศึกษาเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ หลายชนิดในด้านเทคโนโลยีการพิมพ์ วัสดุที่ใช้ และการประยุกต์ใช้งาน พบว่าเทคโนโลยีการขึ้นรูปชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ สามารถสร้างชิ้นงานได้รวดเร็ว ซึ่งปัจจุบันเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย โดยมีการใช้เทคโนโลยีแบบ open source คือ การซื้ออุปกรณ์มาประกอบเครื่องใช้งานเอง ซึ่งเป็นที่นิยมทั้งด้านการเกษตร การแพทย์ อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมการบิน โดยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่นิยมใช้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวัสดุที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีด และเรียงตัวเป็นชั้น ๆ ตามการออกแบบโมเดลของคอมพิวเตอร์

Yan และคณะ (2018) ได้ทบทวนการศึกษาการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เมื่อเร็ว ๆ นี้ เกี่ยวกับการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อผลิตอวัยวะทางการแพทย์ ได้แก่ เซลล์ อวัยวะ และเนื้อเยื่อ โดยศึกษาวัสดุที่ใช้ทางการแพทย์ที่ใช้ในปัจจุบัน ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และการเติบโตของเนื้อเยื่อที่ได้จากการพิมพ์

Peng (2016) ศึกษาการวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้มีแนวทางการวิเคราะห์ขั้นต้นมาจาก Munoz และ Sheng (1995) ซึ่งแสดงในรูปแบบ 3D ที่มีขอบเขตทางด้านพลังงาน วัสดุ และเวลา โดยพลังงานที่ให้เข้าไป (energy intake) เกี่ยวข้องกับพลังงานไฟฟ้า และพลังงานสะสมในวัสดุ (material-embedded energy) ในกระบวนการพิมพ์ พลังงานที่ได้รับจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน พลังงานกล และส่วนใหญ่ปลดปล่อยออกมาเป็นความร้อน นอกจากนั้นของเสียที่เกิดขึ้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่และผลิตใหม่ด้านการใช้พลังงานทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็นพลังงานขั้นปฐมภูมิ (primary energy) และพลังงานขั้นทุติยภูมิ (secondary energy) โดยพลังงานขั้นปฐมภูมิ ในกรณี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM (fused deposition modeling) จะใช้พลังงานที่จำเป็นเพื่อให้ความร้อนแก่ thermoplastics เพื่อที่จะละลายวัสดุ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับพลังงานที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุ ส่วนพลังงานขั้นทุติยภูมิเป็นพลังงานที่ใช้กับองค์ประกอบเสริมอื่น ๆ เช่น การขับมอเตอร์หรือการอุ่นเครื่อง ซึ่งพลังงานเหล่านี้จะถูกพิจารณาเป็นพลังงานการพิมพ์ทางอ้อม กิจกรรมตามขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ประกอบไปด้วย 4 กิจกรรมหลัก คือ setup, pre-heating, printing และ cooling โดยกระบวนการ printing สามารถแบ่งย่อยออกเป็น drive axis, heating and melting, material supply และอื่น ๆ มีการนำเสนอแบบจำลองพลังงานเพื่อประมาณและเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน โดยการค้นพบรายงานวิจัยนี้จากชิ้นส่วนความรู้ที่สำคัญซึ่งช่วยส่งเสริมการประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

Kreiger และคณะ (2013) ศึกษาการวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ทั่วไป พบว่าการพัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ราคาถูกเป็นรูปแบบการผลิตแบบกระจายของผลิตภัณฑ์ที่ใช้พอลิเมอร์เป็นส่วนประกอบ โดยประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อมโดยรวมของการผลิตแบบการกระจายยังไม่ค่อยชัดเจนเนื่องจากการลดขนาดของเครื่องพิมพ์และศักยภาพในการเพิ่มพลังงาน เพื่อที่จะศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตโดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งใช้ การประเมินวัฏจักรชีวิตของสิ่งแวดล้อม (Life Cycle assessment, LCA) ในการตรวจสอบการผลิตผลิตภัณฑ์จากพลาสติก 3 ชั้น พบว่าพลังงานที่ใช้ในการผลิตสามารถลดลงได้ถึง 41-64 % และลดการปลดปล่อยที่เกิดขึ้น

Cerdas และคณะ (2017) ได้ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตเปรียบเทียบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และการพิมพ์ขึ้นรูปแบบดั้งเดิม ในการผลิตแว่นตาพลาสติก พบว่าในกระบวนการใช้งานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่ากระบวนการพิมพ์ขึ้นรูปแบบดั้งเดิม เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้้น้อยกว่า ระยะเวลาในการใช้งานน้อยกว่า มีการปลดปล่อยของเสียน้อยกว่า ซึ่งในกระบวนการใช้งานมีการใช้ไฟฟ้าประมาณ 70 % ของกระบวนการทั้งหมดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ แต่เมื่อคำนึงถึงผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่มาจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จะมีแข็งแรงน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่มาจากกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูปแบบดั้งเดิม เพราะกระบวนการทำงานที่แตกต่างกันนั่นเอง

Barros และคณะ (2016) ได้ทำงานวิจัยศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ที่มาจากการใช้งานของผู้ใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยเปรียบเทียบระหว่างผู้ที่ชำนาญการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ กับผู้เริ่มต้นใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ตั้งแต่การใช้คอมพิวเตอร์ในการสั่งพิมพ์ จนถึงการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งพบว่าผู้ที่มีความชำนาญในการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ใช้ระยะเวลาในการพิมพ์งานน้อยกว่าผู้เริ่มต้นใช้งาน ส่งผลให้ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าผู้เริ่มต้นใช้งาน ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า

ปัทมาพร ตรีเนตร (2559) ทำการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จำนวน 2 ผลิตภัณฑ์ คือ แกลลอนบรรจุน้ำมันหล่อลื่น และถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร เพื่อดูผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้ง 15 ด้าน และพิจารณาการประเมินผลกระทบต่อวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การนำไปใช้งาน ตลอดจนการจัดการผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน (Cradle to grave) โดยใช้โปรแกรม Simapro 8.2 ด้วยวิธี IMPACT 2002+ version 2.12 จากการศึกษาพบว่า ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด คือ ผลกระทบด้านการใช้พลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ในกระบวนการผลิต ซึ่งสาเหตุมาจากวัตถุดิบ คือ ก๊าซเอทิลีนที่ใช้ผลิตเม็ดพลาสติกนั่นเอง นอกจากนี้ในขั้นตอนการจัดการผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน พบว่าการรีไซเคิลส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า การฝังกลบ และการเผา

ชณิภรณ์ เรื่องฤทธิ์ (2559) ทำการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น กรณีศึกษาถุงพลาสติกสำหรับอาหาร จำนวน 2 ผลิตภัณฑ์ คือ ผลิตภัณฑ์ถุงซิปล็อคสำหรับอาหาร และถุงบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารแช่แข็ง เพื่อดูผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้ง 5 ด้าน และพิจารณาการประเมินผลกระทบต่อวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ตั้งแต่การได้มาของวัตถุดิบ กระบวนการผลิต การนำไปใช้งาน ตลอดจนการจัดการผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน (Cradle to grave) โดยใช้โปรแกรม Simapro 8.2 ด้วยวิธี IMPACT 2002+ จากการศึกษาพบว่า ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด เกิดจากวัตถุดิบ คือ เอทิลีน ก่อให้เกิดผลกระทบสูงสุดในทุกด้าน ซึ่งในกระบวนการจัดการผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน ด้วยวิธีการเผาทำลายก่อให้เกิดโลกร้อนมากกว่าการฝังกลบ ดังนั้นการเลือกใช้วัตถุดิบที่มีผลกระทบต่ำ หรือการใช้วัตถุดิบที่มาจากทรัพยากรทดแทน และเลือกวิธีการกำจัดซากผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้

จันจิรา หะยียามา (2547) ทำการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของสายไฟชนิดพีวีซี และสายไฟชนิดที่ใช้วัสดุทดแทนพีวีซี โดยศึกษาการประเมินผลกระทบต่อวัฏจักรชีวิตในขั้นตอนการผลิต การขนส่ง และการจัดการผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน โดยใช้โปรแกรม Simapro 5.1 ด้วยวิธี Ecoindicator 99 จากการศึกษาพบว่า ขั้นตอนการผลิตส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด คิดเป็น 43.6 คะแนน รองลงมาคือการขนส่ง 0.0576 คะแนน และ การจัดการผลิตภัณฑ์หลังการใช้งาน ด้วยวิธีการรีไซเคิล เผา และฝังกลบคิดเป็น -8.7381 และ 0.427 คะแนน ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลง พีอีแทนพีวีซี ทำให้ลดผลกระทบลง 6.7% 42.2% และ 4.43% เมื่อกำจัดด้วยวิธีการ รีไซเคิล เผาและฝังกลบตามลำดับ ผลการทดลองสามารถนำไปพัฒนาและกระบวนการผลิต ให้มีความปลอดภัย และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

2.5.2 มลพิษอากาศ

Davis และคณะ (2019) ศึกษาการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย และฝุ่นละอองภายในอาคารของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ พบสาร VOCs จำนวน 216 ชนิด ซึ่งส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้งาน จากงานวิจัยพบสารอินทรีย์ระเหยง่าย (total organic compounds, TVOCs) ที่ $147 \mu\text{g h}^{-1}$ ของเส้นใย polyvinyl alcohol ถึง $1,660 \mu\text{g h}^{-1}$ ของเส้นใย Nylon ทั้งนี้ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับการใช้อุณหภูมิที่หัวฉีด วัสดุที่ใช้ ยี่ห้อของเส้นใยพลาสติก ยี่ห้อของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และสีของเส้นใย Gu พลาสติกที่ใช้ด้วย

Gu และคณะ (2019) ศึกษาการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ ได้แก่ ฝุ่นละออง และก๊าซพิษ จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งมลพิษที่เกิดขึ้นมีทั้งทางกายภาพ และทางเคมี มีความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้ใช้งาน นอกจากนี้การศึกษานี้ได้ศึกษาสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้น โดยศึกษารูปแบบวัสดุที่ใช้

งาน เส้นใยพลาสติก ได้แก่ ABS (acrylonitrile butadiene styrene), ASA (acrylonitrile styrene acrylate), HIPS (high impact polystyrene), PETG (polyethylene terephthalate glycol) และ PCABS (polycarbonate & ABS) พบว่าฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงขนาด 5.6 ถึง 560 nm อุณหภูมิที่ทำให้มีการระเหยของฝุ่นละอองอยู่ที่ 150 ถึง 300 องศาเซลเซียส มีเพียง 25% ของฝุ่นที่ยังคงเหลืออยู่ จากงานวิจัยพบว่ามีฝุ่นละออง และสารอินทรีย์ระเหยง่ายเกิดขึ้นในกระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

Stabile และคณะ (2017) ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยอนุภาคขนาดเล็กในอากาศ (airborne particle emission) จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยพบว่าเทคนิคการขึ้นรูปแบบ FDM ที่ใช้ Thermoplastic เป็นเส้นใย มีการปลดปล่อยอนุภาคทางอากาศ โดยเฉพาะในสภาวะที่ไม่ได้ควบคุมสภาพแวดล้อมในที่ทำงาน วัสดุที่เกี่ยวข้องในการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เช่น polylactic acid (PLA), copper (copper powdered-filled PLA), bamboo (PLA 20%), flex PLA (soft and bendable polylactic acid), CP (co-polyester (styrene-free)), CP-carbon (co-polyester (styrene-free) containing 20% of milled carbon fiber) และ nylon จะปลดปล่อยอนุภาคในช่วง 10-30 nm และการปลดปล่อยได้รับอิทธิพลเป็นอย่างมากจากอุณหภูมิที่ใช้ นอกจากนี้งานวิจัยของ Stephens et al. (2013) ได้ศึกษาการปลดปล่อยอนุภาคและสารประกอบอินทรีย์ชนิดระเหยง่าย จาก commercially available desktop three-dimensional printers พบว่า desktop 3D printers สามารถปลดปล่อยอนุภาคจำนวนมากที่มีขนาดน้อยกว่า 100 nm รวมทั้งสารอินทรีย์ชนิดระเหยง่ายในระหว่างการพิมพ์

Deng และคณะ (2016) ได้ทำการศึกษาอนุภาคที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุที่ใช้ในกระบวนการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM โดยวัสดุที่ใช้ในกระบวนการใช้งาน ได้แก่ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) และ polylactic acid (PLA) ซึ่งมีกระบวนการทั้งหมด 4 คือ ขั้นตอน ได้แก่ loading, heating, printing และ unloading จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวัสดุ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) ปลดปล่อยอนุภาคมากกว่า วัสดุ polylactic acid (PLA) เนื่องจาก การใช้วัสดุ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene(ABS) ต้องปรับอุณหภูมิหัวฉีดถึง 240 °C ซึ่งสูงกว่า จึงปลดปล่อยอนุภาคสูงกว่าการใช้วัสดุ polylactic acid (PLA) อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่สูงกว่า จะทำให้มีการปลดปล่อยอนุภาคที่มากกว่า นอกจากนี้ในขั้นตอน Pre-heating มีการลดอนุภาคการปลดปล่อยอนุภาค ABS ถึง 75% ดังนั้นการศึกษานี้ ในการใช้วัสดุ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงกว่าการใช้วัสดุ polylactic acid (PLA)

Azimi และคณะ (2016) ในการศึกษาก่อนหน้านี้ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM มีการปลดปล่อยอนุภาคขนาดเล็ก (Ultrafine particles, UFP) ขนาดเล็กกว่า 100 nm จำนวนมาก และสารอินทรีย์ชนิดระเหยง่าย (VOCs) จากการประเมินพบว่าการปลดปล่อยอนุภาคขนาดเล็ก

ประมาณ 10^8 ถึง 10^{11} min^{-1} ซึ่งขนาดของอนุภาคขึ้นอยู่กับวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ (filament material), lesser extent และ อุณหภูมิที่ฐานรองผลิตภัณฑ์ (bed temperature) ซึ่งสารอินทรีย์ชนิดระเหยง่าย (VOCs) มีการปลดปล่อยปริมาณมากที่สุด ประกอบด้วย สารอินทรีย์ชนิดระเหยง่าย caprolactum จาก ไนลอน (Nylon), ไม้ และอิฐ (brick filament) อยู่ในช่วงขนาดประมาณ 2 ถึง $180 \mu\text{g}/\text{min}$ นอกจากนี้ยังเกิดการปลดปล่อยสารอินทรีย์ชนิดระเหยง่าย styrene จาก Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) และ high-impact polystyrene (HIPS) อยู่ในช่วงขนาดประมาณ 10 ถึง $110 \mu\text{g}/\text{min}$, สารอินทรีย์ชนิดระเหยง่าย lactide จาก polylactic acid (PLA) อยู่ในช่วงขนาดประมาณ 4 ถึง $5 \mu\text{g}/\text{min}$ ดังนั้นจึงให้ระมัดระวังการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในออฟฟิศทำงานที่มีการระบายอากาศน้อย หรือไม่มีการระบายอากาศ

Kim และคณะ (2015) การศึกษานี้เป็นการประเมินการปลดปล่อยอนุภาคขนาดเล็ก และ ก๊าซที่ถูกวัดก่อนการพิมพ์ ระหว่างการพิมพ์ และหลังการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM โดยวัสดุที่ใช้ ได้แก่ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) และ polylactic acid (PLA) ซึ่งจะทำกรวัดแบบออนไลน์ แสกนขนาดอนุภาคที่เคลื่อนที่ การกระจายของฝุ่น และดูสารประกอบอินทรีย์ชนิดระเหยง่าย ทั้งหมด ซึ่งพบว่ามี การปลดปล่อยอนุภาคส่วนใหญ่เป็นอนุภาคขนาดเล็ก ขนาดเล็กกว่า 100 nm โดยการใช้วัสดุ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) มีอัตราการปลดปล่อยอนุภาคที่มากกว่าวัสดุ polylactic acid (PLA) นอกจากนี้ยังพบว่ามีสารประกอบอินทรีย์ชนิดระเหยง่าย ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างการใช้งานด้วย ดังนั้นจึงควรระมัดระวังการเลือกใช้วัสดุที่มีอันตราย ควรเลือกวัสดุที่อันตรายน้อย มีการป้องกันการปลดปล่อยสารปนเปื้อนในระหว่างการใช้งาน

Zhou และคณะ (2015) ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยอนุภาคขนาดเล็กจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM แบบตั้งโต๊ะ จำนวน 3 เครื่อง โดยวัสดุที่ใช้ คือ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) โดยความเข้มข้นของอนุภาคที่ถูกวัดที่จุด 3 จุดในห้องปลอดฝุ่น (clean room) ซึ่งจากการทดลองพบว่าขนาดอนุภาคที่ใหญ่ที่สุดที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จะยังมีขนาดเล็กกว่า $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) โดยอนุภาคที่เล็กที่สุดมีขนาด $0.25 \mu\text{m}$ ถึง $0.28 \mu\text{m}$ จะมีความเข้มข้นของอนุภาคที่มากที่สุด ปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคที่มากที่สุดอยู่ที่ประมาณ $2.5 \times 10^{10} /\text{L}$ สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จำนวน 1 เครื่อง และ ความเข้มข้นของอนุภาค $4 \times 10^{10} /\text{L}$ สำหรับเครื่องพิมพ์ 2 เครื่อง

Stephen และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาการวัดขนาดของอนุภาค (size-resolved) ขนาด 11.5 nm ถึง 116 nm และ อนุภาคขนาดเล็ก (ultrafine particle, UFP) ขนาดเล็กกว่า 100 nm และเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยอนุภาคขนาดเล็ก จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM โดยใช้วัสดุ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) และ polylactic acid (PLA) ซึ่งจากการ

ทดลองพบการปลดปล่อยอนุภาคขนาดเล็ก (Ultrafine particles, UFP) จำนวนมากในกระบวนการใช้งาน โดยเฉพาะ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) มีการปลดปล่อยอนุภาคขนาดเล็กมากกว่าวัสดุ polylactic acid (PLA) เนื่องจาก Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) ใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า polylactic acid (PLA) จากผลการศึกษานี้ จึงมีการแนะนำให้ระมัดระวังในการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในพื้นที่ที่มีการระบายอากาศไม่เพียงพอ หรือไม่มีที่กรองอากาศอยู่ในห้อง



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

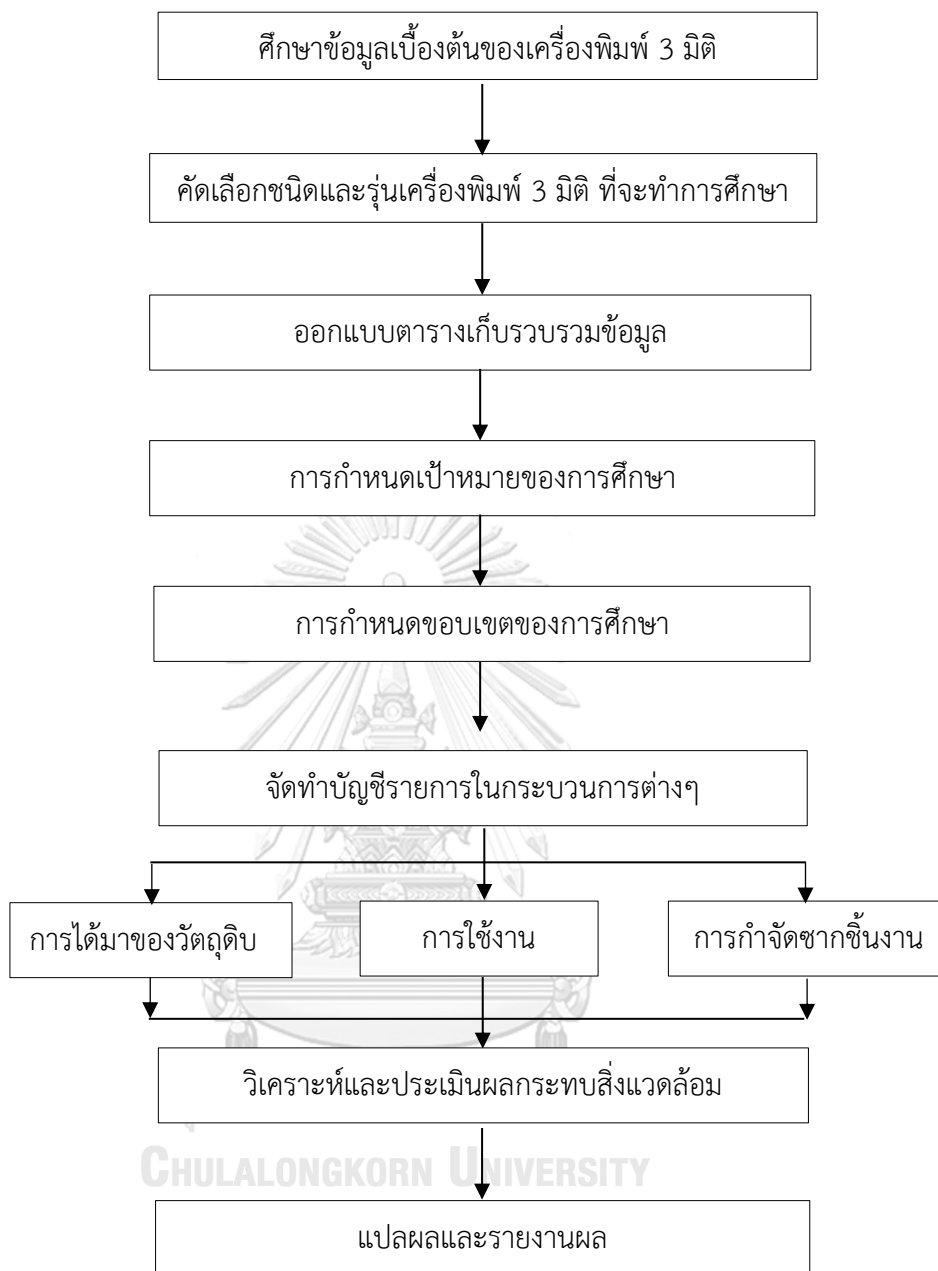
3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

- 3.1.1 บริษัทตัวแทนจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และบริษัทรับจ้างพิมพ์ชิ้นงาน 11 แห่ง
- 3.1.2 ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

ศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM (Fused deposition modeling) ในขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงาน โดยมีวิธีดำเนินการดังรูปที่ 3-1





รูปที่ 3-1 แผนผังการดำเนินการประเมินวัฏจักรชีวิตของเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

3.2.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ลงสำรวจพื้นที่บริษัทตัวแทนจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และบริษัทรับจ้างพิมพ์ชิ้นงาน 11 แห่ง เพื่อศึกษาข้อมูลของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ประกอบด้วยขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงาน และศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ การใช้กระแสไฟฟ้าในกระบวนการใช้งานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

3.2.2 คัดเลือกชนิดและรุ่นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่จะทำการศึกษา

หลังจากลงพื้นที่สำรวจบริษัทแล้วจะทำการคัดเลือกชนิดและรุ่นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM โดยศึกษาเครื่องพิมพ์ 2 รุ่น คือ รุ่นที่ผลิตเองในประเทศ และรุ่นที่นำเข้าจากต่างประเทศจีน โดยทำการสอบถามข้อมูลความนิยมของการซื้อ และการใช้งานผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลเบื้องต้นได้เลือกเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ผลิตเองในประเทศไทย และรุ่นที่นำเข้าจากประเทศจีน ซึ่งจะทำการขึ้นรูปชิ้นงานจำนวน 2 ขนาด คือ ขนาดเล็ก (ใช้ระยะเวลาการพิมพ์ 3 ชั่วโมง) และขนาดใหญ่ (ใช้ระยะเวลาการพิมพ์ 6 ชั่วโมง) โดยแต่ละขนาดจะทำการพิมพ์ออกมา 3 ผลิตภัณฑ์ คือ ผลิตภัณฑ์ที่พิมพ์จาก PLA 1 ชิ้น ผลิตภัณฑ์ที่พิมพ์จาก ABS 1 ชิ้น และผลิตภัณฑ์ที่พิมพ์จาก Nylon 1 ชิ้น รวมผลิตภัณฑ์ทั้งสิ้น 6 ชิ้น ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของการขึ้นรูปชิ้นงานผลิตภัณฑ์โมเดลที่วางโทรศัพท์

ลำดับที่	ชื่อผลิตภัณฑ์	ระยะเวลาการพิมพ์ (ชั่วโมง)	วัสดุที่ใช้ในการพิมพ์	จำนวนผลิตภัณฑ์ (ชิ้น)
1	PLA _{3 hrs.}	3	PLA	1
2	PLA _{6 hrs.}	6	PLA	1
3	ABS _{3 hrs.}	3	ABS	1
4	ABS _{6 hrs.}	6	ABS	1
5	Nylon _{3 hrs.}	3	Nylon	1
6	Nylon _{6 hrs.}	6	Nylon	1

3.2.3 ออกแบบตารางเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการออกแบบตารางการเก็บข้อมูล สำหรับการเก็บข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) และข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) จากโรงงานผลิตและจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงานของผลิตภัณฑ์ โดยข้อมูลปฐมภูมิที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ ข้อมูลทั่วไปของผลิตภัณฑ์ กระบวนการใช้งาน ข้อมูลสารขาเข้า เช่น วัตถุดิบพลังงานที่ใช้ เป็นต้น ข้อมูลสารขาออก เช่น มลพิษทางอากาศ กากของเสีย เป็นต้น และข้อมูลทุติยภูมิที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ การได้มาของวัตถุดิบ การกำจัดซากชิ้นงานหลังการใช้งาน การเก็บข้อมูลแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างรูปแบบตารางการเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับโรงงานผลิตและจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

กระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ			
มวลสารขาเข้า	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
วัตถุดิบ			
1. พลาสติก PLA		กิโลกรัม	
2. พลาสติก ABS		กิโลกรัม	
3. พลาสติก Nylon		กิโลกรัม	
พลังงานขาเข้า			
ไฟฟ้า		กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง	
มวลสารขาออก	ปริมาณ	หน่วย	หมายเหตุ
ผลิตภัณฑ์			
ชิ้นงานจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ		กิโลกรัม	
มลพิษอากาศ			
1. PM _{2.5}		กรัม	
2. PM ₁₀		กรัม	
3. TVOC		ไมโครกรัม	
4. VOCs จากพลาสติก PLA		ไมโครกรัม	
- Lactide		ไมโครกรัม	
- Methyl methacrylate		ไมโครกรัม	
- 1-Butanol		ไมโครกรัม	
- Decanal		ไมโครกรัม	
- Nonanal		ไมโครกรัม	
- Pentanal		ไมโครกรัม	
- Benzaldehyde		ไมโครกรัม	
- 2,6-Di-tertbutyl 4 methylphenol		ไมโครกรัม	
- tetrahydro-2H-Pyran-2-one		ไมโครกรัม	

- Diethylhexyl phthalate	ไมโครกรัม
5. VOCs จากพลาสติก ABS	ไมโครกรัม
- Styrene	ไมโครกรัม
- Ethylbenzene	ไมโครกรัม
- Benzaldehyde	ไมโครกรัม
- Acetophenone	ไมโครกรัม
- Phensuximide	ไมโครกรัม
- 4-vinyl cyclohexene	ไมโครกรัม
- Acetaldehyde	ไมโครกรัม
- Formaldehyde	ไมโครกรัม
- 1-methylethyl benzene	ไมโครกรัม
- Propylbenzene	ไมโครกรัม
6. VOCs จากพลาสติก Nylon	ไมโครกรัม
- Caprolactam	ไมโครกรัม
- Acetaldehyde	ไมโครกรัม
- Formaldehyde	ไมโครกรัม
- Decanal	ไมโครกรัม
- Nonanal	ไมโครกรัม
- Pentanal	ไมโครกรัม
- Benzaldehyde	ไมโครกรัม
- 2,6-Di-tertbutyl-4methylphenol	ไมโครกรัม
- tetrahydro-2HPyran-2-one	ไมโครกรัม
- Diethylhexyl phthalate	ไมโครกรัม
กากของเสีย	
เศษพลาสติก	กิโลกรัม
อื่นๆ (โปรดระบุ)	

3.2.4 การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment)

ขั้นตอนการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ จะดำเนินการตามการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment; LCA) มีการดำเนินงานแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังนี้

3.2.4.1 การกำหนดเป้าหมายของการศึกษา

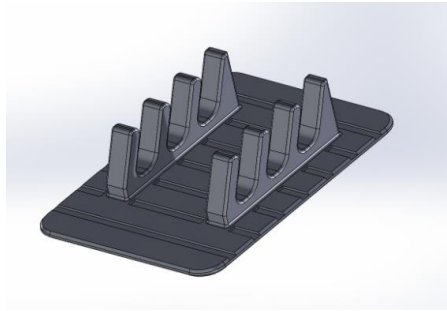
การกำหนดเป้าหมายของการศึกษาเป็นขั้นตอนแรกของการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ เพื่อให้วัตถุประสงค์ วิธีการวิจัย และผลการวิจัยมีความเหมาะสมเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งเป้าหมายของการศึกษางานวิจัยนี้ คือ การประเมินวัฏจักรชีวิตของการขึ้นรูปชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM เพื่อศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบ กระบวนการใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงานโดยเครื่องพิมพ์ที่ทำการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม มาจากการคัดเลือกรุ่นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่มีความนิยม จำนวน 2 รุ่น คือ กำหนดรุ่นที่ผลิตเองในประเทศไทย คือ รุ่น A และรุ่นที่นำเข้าจากประเทศจีน คือ รุ่น B โดยใช้วัสดุขึ้นรูปในการศึกษา 3 ชนิด คือ พลาสติก PLA (Polylactic-acid), พลาสติก ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) และพลาสติก Nylon

3.2.4.2 การกำหนดขอบเขตของการศึกษา

การกำหนดขอบเขตในการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษาจะต้องเป็นไปในทิศทางเดียวกับเป้าหมายที่กำหนด ซึ่งประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์ หน้าที่ผลิตภัณฑ์ หน่วยการทำงาน และขอบเขตของระบบ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตของการศึกษาดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 กำหนดขอบเขตของการศึกษา

ผลิตภัณฑ์	หน้าที่ของผลิตภัณฑ์	หน่วยการทำงาน	ขอบเขตการศึกษา
ชิ้นงานขึ้นรูปของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A	โมเดล	1 ผลิตภัณฑ์	Gate to gate
ชิ้นงานขึ้นรูปของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B	โมเดล	1 ผลิตภัณฑ์	Gate to gate



รูปที่ 3-2 โมเดลที่ตั้งโทรศัพท์

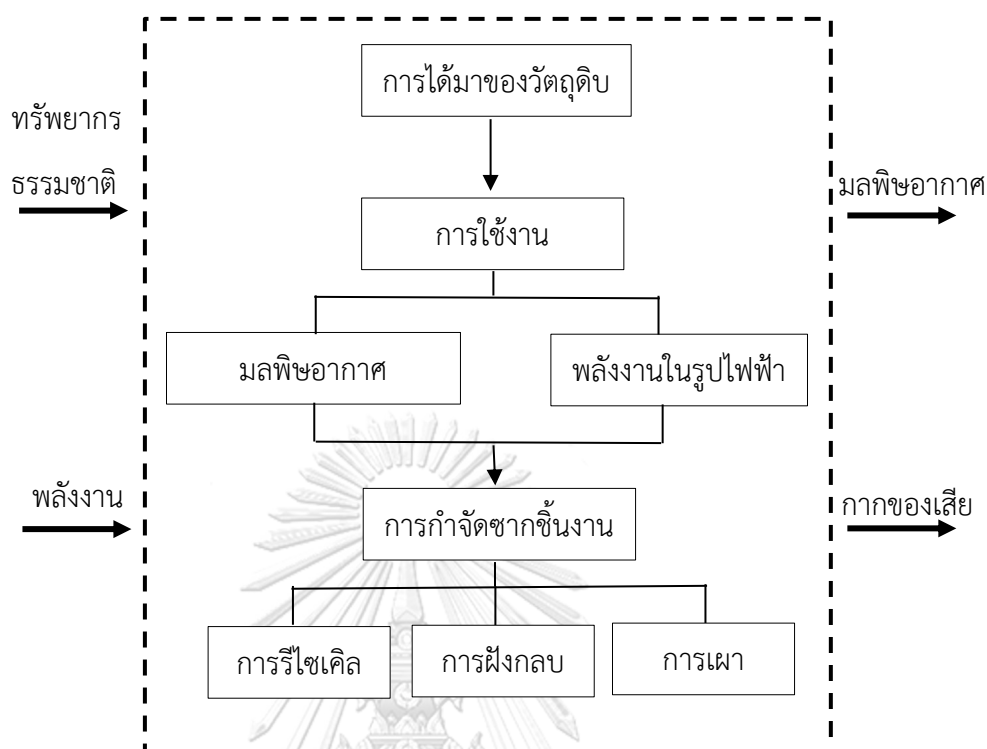


รูปที่ 3-3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A



รูปที่ 3-4 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B

โดยการศึกษาเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในงานวิจัยนี้มีขอบเขตแบบ Gate to gate คือ พิจารณาวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ การศึกษานี้จะไม่รวมถึงการศึกษาขั้นการขนส่ง โดยมีแผนภาพแสดงขอบเขตดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 ขอบเขตของการศึกษา

3.2.4.3 การทำบัญชีรายการของสารขาเข้า และสารขาออก

การจัดทำรายการสารขาเข้าและขาออก เป็นการรวบรวมสารขาเข้า และขาออกของกระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังที่ได้แสดงในขั้นตอนการกำหนดเป้าหมาย ขอบเขตของงานวิจัยเก็บรวบรวมข้อมูล และจัดทำบัญชีรายการของสารขาเข้า และขาออกโดยข้อมูลที่ใช้ในการทำบัญชีรายการมีทั้งข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) และข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ซึ่งทำการลงพื้นที่บริษัทเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และบริษัทรับจ้างพิมพ์ชิ้นงาน 11 แห่ง ในการสัมภาษณ์ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องซึ่งข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) เป็นข้อมูลที่ผู้ทำงานวิจัยไม่ได้เก็บรวบรวมเอง แต่มีผู้อื่นหรือหน่วยงานอื่น ๆ ทำการเก็บรวบรวมไว้แล้ว โดยมีการเก็บข้อมูลสารขาเข้า และสารขาออก ในขั้นตอนการได้มาของวัตถุุดิบ และขั้นตอนการกำจัดซากชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และทำการเก็บข้อมูลในกระบวนการใช้งานด้วยวิธีการทดลองตรวจวัดอากาศ ($PM_{2.5}$, PM_{10} , TVOC และ VOCs) และวัดกระแสไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) เป็นข้อมูลที่ผู้ทำงานวิจัยทำการเก็บข้อมูลจากการทดลอง และการสังเกตการณ์ด้วยตนเอง ในการศึกษาครั้งนี้ศึกษาผลิตภัณฑ์ 2 ขนาด

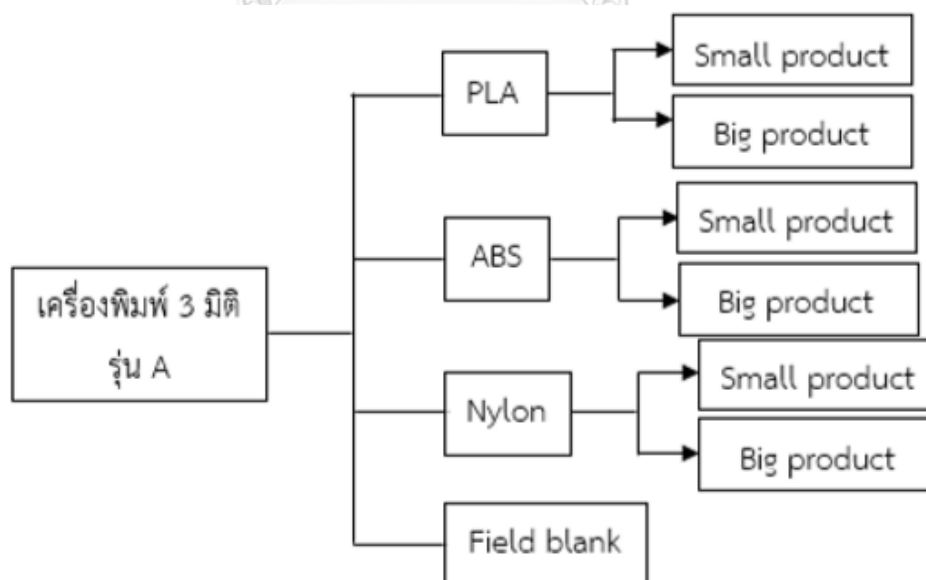
1) การได้มาของวัตถุดิบ

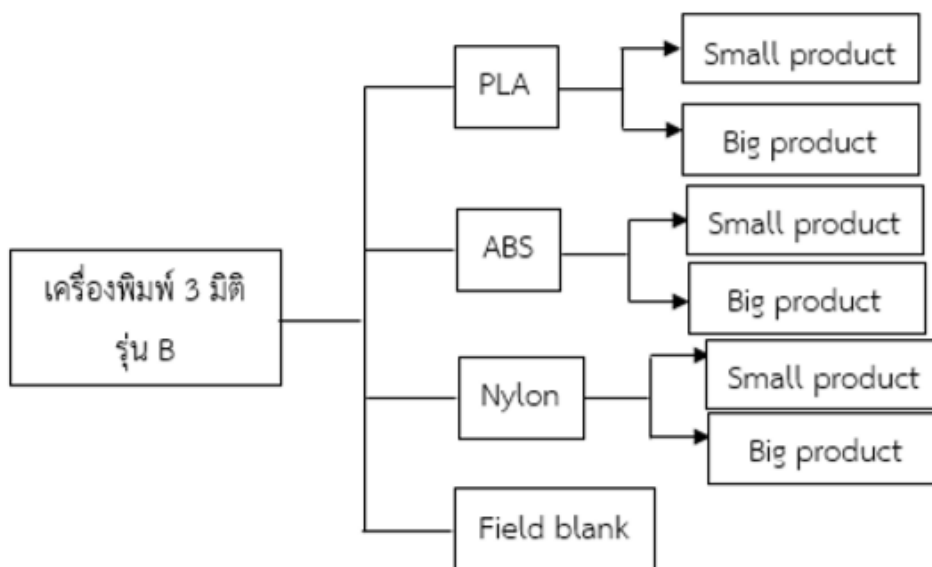
ทำการศึกษารวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการผลิตพลาสติกทั้ง 3 ชนิด คือ พลาสติก PLA, พลาสติก ABS และพลาสติก Nylon เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ในงานวิจัยชิ้นนี้

2) การใช้งาน

ในกระบวนการใช้งานแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง คือ การตรวจวัดมลพิษอากาศ และการวัดไฟฟ้า ดังนี้

2.1) การตรวจวัดมลพิษอากาศ วิเคราะห์ค่าฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมครอน (PM_{10}), ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) โดยใช้กระดาษกรอง (Filter paper) ในการวิเคราะห์ขณะใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ และเก็บตัวอย่างรวมสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (TVOC) และตัวอย่างสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) โดยใช้ถุงเก็บตัวอย่างอากาศ (Tedlar bag) และส่งตัวอย่างอากาศไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการผ่านเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph-Mass Spectrometer) โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ จำนวนทั้งหมด 2 เครื่อง ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อการกำหนดเป้าหมายของการศึกษา และการกำหนดขอบเขตของการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3-6 กรอบการตรวจวัดมลพิษอากาศ





รูปที่ 3-6 กรอบการตรวจวัดมลพิษอากาศ

2.1.1) ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างอากาศ PM 2.5 และ PM 10

อุปกรณ์

1. บั๊มเก็บตัวอย่างชนิดพกพา (Personal pump)
2. ฟิลเตอร์กระดาษกรอง (Filter paper)
3. หัวไซโคลน (Cyclone dust)
4. สายเก็บตัวอย่าง
5. ขาดังกล้อง
6. เครื่องวัดอุณหภูมิไฮโกรมิเตอร์ (Hygrometer)

วิธีการเก็บตัวอย่าง PM 2.5 และ PM 10

- 1) ดำเนินการเปิดพัดลมเพื่อระบายอากาศระยะเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อให้ห้องปลอดฝุ่น
- 2) นำฟิลเตอร์ที่เก็บ PM_{2.5} และ PM₁₀ ต่อกับสายเก็บ PM_{2.5} และ PM₁₀ ซึ่งต่อกับบั๊มเก็บตัวอย่างชนิดพกพา แล้วนำไปติดตั้งบนขาดังกล้อง วางไว้ด้านหน้าใกล้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และวัดค่าอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิไฮโกรมิเตอร์
- 3) ปรับบั๊มเก็บตัวอย่างชนิดพกพาของ PM_{2.5} ด้วยอัตราเร็ว 2 L/min และ PM₁₀ ด้วยอัตราเร็ว 1.7 L/min และตั้งเวลาตามที่กำหนด จากนั้นกดสวิทช์เปิดเพื่อให้เครื่องทำงาน เริ่มตรวจวัดอากาศ
- 4) เมื่อครบเวลาที่กำหนด เครื่องปั๊มเก็บตัวอย่างชนิดพกพาจะหยุดทำงาน และทำการเก็บตัวอย่างอากาศที่ได้
- 5) หลังจากใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ เสร็จแล้ว ใช้พัดลมเป่าระบายอากาศออกนอกห้อง

- 6) ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 2 ถึง 5 โดยเปลี่ยนวัสดุในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ได้แก่ PLA, ABS และ Nylon ตามลำดับ
- 7) ทำการชั่งกระดาษกรองเพื่อหาค่าฝุ่น

2.1.2) ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างอากาศ TVOC (Total Volatile Organic Compounds) และ VOCs (Volatile Organic Compounds)

อุปกรณ์

1. ถุงเก็บตัวอย่างอากาศ (Tedlar bag) 2. ปัมป์เก็บตัวอย่างชนิดพกพา (Personal pump)
3. สายเก็บตัวอย่าง 4. ขาดึงกลิ้ง 5. เครื่องวัดอุณหภูมิไฮโกรมิเตอร์ (Hygrometer) 6. ถังเก็บตัวอย่างอากาศ (Canister)

วิธีการเก็บตัวอย่าง อากาศ TVOC และ VOCs

- 1) ดำเนินการเปิดพัดลมเพื่อระบายอากาศระยะเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อให้ห้องปลอดฝุ่น
- 2) นำถุงเก็บตัวอย่างอากาศต่อกับปั๊มเก็บตัวอย่างชนิดพกพา แล้วนำไปติดตั้งบนขาตั้งกลิ้ง วางไว้ด้านหน้าใกล้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และปั๊มเก็บตัวอย่างชนิดพกพา
- 3) ปรับปั๊มเก็บตัวอย่างชนิดพกพาของ TVOC และ VOCs ในการเก็บตัวอย่าง 3 ซม. ด้วยอัตราเร็ว 0.2 L/min และในการเก็บตัวอย่าง 6 ซม. ด้วยอัตราเร็ว 0.1 L/min และตั้งเวลาของเครื่องปั๊มเก็บตัวอย่างชนิดพกพาตามที่กำหนด จากนั้นกดสวิตช์เปิดเพื่อให้เครื่องทำงานเริ่มตรวจวัดอากาศ
- 4) เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปั๊มเก็บตัวอย่างชนิดพกพา และทำการเก็บตัวอย่างอากาศที่ได้
- 5) หลังจากใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ เสร็จแล้ว ใช้พัดลมเป่าระบายอากาศออกนอกห้อง
- 6) ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 2 ถึง 5 โดยเปลี่ยนวัสดุในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ได้แก่ PLA, ABS และ Nylon ตามลำดับ
- 7) นำถุงเก็บตัวอย่างอากาศ ถ่ายอากาศใส่ถังเก็บตัวอย่างอากาศ (Canister)
- 8) จากถังเก็บตัวอย่างอากาศ จะนำตัวอย่างอากาศฉีดเข้าเครื่อง Gas Chromatography/ Mass Spectrometer โดยผ่าน Transfer line ซึ่ง VOCs จะถูกแยกใน Column ของเครื่อง Chromatography จากนั้น Mass Spectrometer จะทำการตรวจวัดชนิดไอออนต่าง ๆ ตามขนาดมวลต่อประจุของสารอินทรีย์ระเหยแต่ละชนิด เพื่อได้ปริมาณสาร VOCs ที่ตรวจวัด

2.2) การตรวจวัดกระแสไฟฟ้ามีขั้นตอนดังนี้

วัดกำลังไฟฟ้ารวมที่ใช้ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (หน่วยวัดต่อชั่วโมง) ด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power meter) ในช่วงขณะการใช้งาน ทำการวัดกำลังไฟฟ้าไปพร้อมกับการทดลองตรวจวัดอากาศ โดยใช้เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 3-7



รูปที่ 3-7 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power meter)

3) การกำจัดซากชิ้นงาน

ซึ่งปริมาณน้ำหนักระยะที่ต้องการกำจัด ประกอบไปด้วย เส้นใยวัสดุที่ปล่อยออกมาขณะใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่ใช้งาน โดยวิเคราะห์วิธีการกำจัดขยะด้วยวิธีการฝังกลบ (Landfill) เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.4.4 การวิเคราะห์และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนหน่วยของปริมาณที่ได้จากการทำบัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในหน่วยของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับกระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 8.3 ประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยวิธี IMPACT 2002+ Version 2.13 ในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมชั้นกลาง (Midpoint Category) และการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมชั้นปลาย (Endpoint categories) ในรูปแบบของการประเมินความเสียหาย (Damage categories) ผลกระทบทั้ง 15 ด้าน

ทำการแปลงข้อมูลบัญชีรายการที่ได้จากการรวบรวมสารขาเข้า สารขาออก และการปล่อยของเสียของระบบผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในรูปตัวชี้วัดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อบ่งชี้ค่าความสามารถในการก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งประกอบด้วย

การประเมินผลกระทบชั้นปลาย (Endpoint categories) เป็นการแปลงค่าผลกระทบชั้นกลางด้านต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบของกลุ่มความเสียหาย (Damage categories) 4 กลุ่มหลัก ได้แก่

- ด้านสุขภาพมนุษย์ (human health) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดปีสุขภาวะที่สูญเสียไปจากโรคและการบาดเจ็บของประชากร (disability-adjusted life year: DALY)
- ด้านคุณภาพระบบนิเวศ (ecosystem quality) ซึ่งจะบ่งชี้ศักยภาพการสูญหายของสายพันธุ์บนพื้นที่ 1 ตารางเมตร ในช่วงระยะเวลา 1 ปี ($\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$)
- ด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) ซึ่งจะแสดงผลในหน่วยกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($\text{kg CO}_2\text{eq.}$)
- ด้านการใช้ทรัพยากร (resource) ซึ่งจะแสดงผลในรูปของพลังงานขั้นต้น หน่วยเมกะจูล (Megajoule; Mj)

1) การจำแนกประเภทข้อมูล (Classification)

เป็นการจำแนกข้อมูลสารขาเข้า สารขาออก ไปยังกลุ่มผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในรูปกลุ่มผลกระทบต่าง ๆ ได้แก่ ด้านทำให้เกิดภาวะโลกร้อน การทำให้เกิดฝนกรด การทำให้อิออนในชั้นบรรยากาศลดลง การเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุอาหารในน้ำ และการก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ อย่างเช่น CO_2 จัดอยู่ในกลุ่มผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน SO_2 อยู่ในกลุ่มผลกระทบการทำให้เกิดฝนกรด และยังอยู่ในกลุ่มก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ เป็นต้น ซึ่งการจำแนกประเภทข้อมูลนั้น ส่วนใหญ่จะใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูล SimaPro 8.3 จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณ และแสดงค่าที่แสดงผลผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในกลุ่มต่าง ๆ

2) การกำหนดบทบาท (Characterization)

แสดงประเภทค่าความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในรูปดัชนีบ่งชี้ (Indicator) โดยใช้ Characterization factor ในการคูณเพื่อเปลี่ยนจากน้ำหนักของแต่ละข้อมูลเป็นค่าบ่งชี้ผลกระทบประเภทต่าง ๆ ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้มีการใช้ค่า Characterization factor จากฐานข้อมูลโปรแกรม SimaPro 8.3 จากนั้นรวมค่าทั้งหมดของแต่ละผลกระทบ ดังสมการที่ (3.1) และตารางที่ 3.1

$$EP_j = Q_j \times EF_{ij} \quad (3.1)$$

โดยที่ EP_j (Environment impact potential) คือ ศักยภาพของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภท j ($\text{kg substance equivalent}$)

Q_j (Quantity of substance) คือ ปริมาณมลสาร j ที่ปล่อยออกมา ($\text{kg substance } j$)

EF_{ij} (Equivalency factor) หรือ Characterization factor คือ ค่าเทียบเท่าของสาร i ที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภท j (kg substance equivalent/kg substance j)

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างการคำนวณจากสูตร

Inventory	Characterization factors (GWP ₁₀₀)	Global Warming Potential (kg CO ₂ -eq.)
CO ₂ 0.0050 kg.	1	0.0050 × 1 = 0.0050
CH ₄ 0.0025 kg.	25	0.0025 × 25 = 0.0625
N ₂ O 0.0015 kg.	298	0.0015 × 298 = 0.447
The total global warming potential of products		0.5145

ที่มา: ดัดแปลงจาก ศิริธร ใจแก้ว (2555)

3) การหาขนาดของผลกระทบ (Normalization)

แสดงการเทียบหน่วยว่าแต่ละกลุ่มผลกระทบมีความสัมพันธ์กับภาพรวมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.2)

$$NP_j = EP_j / (T \times ER_j) \quad (3.2)$$

โดยที่ NP_j (Normalized environment impact potential) คือ ค่าปกติทางศักยภาพของผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมประเภท j ของผลิตภัณฑ์ (person)

T (Lifetime of product) คือ อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ (year)

ER_j (Equivalency factor) คือ ค่าอ้างอิงปกติของผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่ j ใดๆเกิดจากการ กระทำของคนหนึ่งคนต่อปี (kg substance equivalent/person/year)

3.2.4.5 การแปลผล (Life Cycle Interpretation)

การแปลผลจากการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมผลิตภัณฑ์ เป็นการวิเคราะห์ผล การศึกษา การประเมินค่า และสรุปผลของการศึกษาให้ครบถ้วนซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของ การประเมินวัฏจักรชีวิต คือ นำผลที่ได้จากการประเมินผลกระทบมาแปลผล เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบ ทางสิ่งแวดล้อม ในขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งการแปลผลและการประเมินผลจะต้องมีความสอดคล้องกับเป้าหมาย และขอบเขตที่กำหนดไว้

3.2.5 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมในกระบวนการใช้งานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B โดยเปรียบเทียบระยะเวลาการใช้งาน และวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน

ทำการเปรียบเทียบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ที่วางโทรศัพท์ 2 ขนาด จากวัสดุชนิดต่างกัน ได้แก่ PLA ABS และ Nylon ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 2 รุ่น เพื่อดูผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น และเป็นแนวทางการเลือกใช้งานวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์ผลิตภัณฑ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ และเป็นแนวทางสำหรับการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการพิมพ์ผลิตภัณฑ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ ให้น้อยที่สุด



บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

การศึกษาศึกษาประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จึงได้ทำการลงสำรวจพื้นที่บริษัทที่มีการผลิต การจัดทำหน่วย และการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในประเทศไทย 11 แห่ง ดังนี้

4.1.1 บริษัท สยามเรปเรป จำกัด

จากการลงพื้นที่และสอบถามเจ้าหน้าที่ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ พบว่าบริษัทมีการจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM (Fused Deposition Modeling) และมีการให้บริการรับจ้างขึ้นรูปชิ้นงาน โดยวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เช่น ABS PLA PET Nylon เป็นต้น ซึ่งพลาสติกที่นำมาใช้จะอยู่ในรูปของเส้นใยพลาสติกขดเป็นม้วนพลาสติก โดยหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์ คือ ที่หัวฉีดชิ้นงานจะมีตัวให้ความร้อน (Heater) สำหรับหลอมวัสดุจากขดม้วนพลาสติก เมื่อพลาสติกเริ่มละลาย พลาสติกจะถูกฉีดออกมาจากหัวฉีด และเรียงตัวออกมาเป็นชั้น ๆ โดยเคลื่อนที่ตามคำสั่งของโปรแกรม จนขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสามมิติ ดังแสดงรูป 4-1 และ 4-2 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ



รูปที่ 4-1 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM



รูปที่ 4-2 ตัวอย่างชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงาน

4.1.2 สถาบันพลาสติก ตึกต้นกล้า

หลักการทั่วไปของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เริ่มจากการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ต้องการขึ้นรูปขึ้นงาน โดยใช้โปรแกรมที่ชื่อว่า Solidwork และจะต้องบันทึกเป็นไฟล์ .STL จึงจะสามารถส่งพิมพ์กับเครื่องพิมพ์ได้ ซึ่งที่สถาบันพลาสติกมีเครื่องพิมพ์ทั้งหมด 4 ชนิด ดังนี้

เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด SLM (Selective Laser Melting) เครื่องพิมพ์ชนิดนี้ใช้วัสดุในการขึ้นรูปขึ้นงานที่อยู่ในรูปผง เช่น ผงโลหะ พลาสติก เซรามิก เป็นต้น เนื่องจากทางสถาบันได้กำหนดการใช้งานของเครื่องพิมพ์ให้ใช้กับอุตสาหกรรมทางการแพทย์เป็นหลัก ดังนั้นวัสดุที่ใช้พิมพ์จึงเป็นพวกผงโลหะ ได้แก่ ผงโคบอลต์ ผงสแตนเลส โดยหลักการทำงานของเครื่อง SLM คือ เครื่องจะยิงลำแสงเลเซอร์ไปยังผงวัสดุที่อยู่บน Stage ที่อยู่ภายในเครื่อง ซึ่งการยิงเลเซอร์จะทำตามคำสั่งของโปรแกรม เมื่อพิมพ์เสร็จหนึ่งชั้น เครื่องก็จะเคลื่อนผงวัสดุมาทับบาง ๆ เป็นชั้นต่อไป และจะเริ่มกระบวนการยิงเลเซอร์อีกครั้ง ทำอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้ชิ้นงานที่ต้องการ โดยเครื่องจะมีการเติมก๊าซอาร์กอน และก๊าซไนโตรเจน เพื่อใช้ในการเป่าผงโลหะส่วนเกินออก ซึ่งเป็นลมก๊าซเบาๆ ในขณะที่เครื่องพิมพ์ทำงาน จะมีการปล่อยของเสียออกมา ได้แก่ ผงโลหะส่วนเกิน ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และฝุ่นโลหะที่เหลือจากการเป่าด้วยก๊าซ โดยชิ้นงานที่ได้จะไม่สามารถใช้งานได้ทันที จะต้องส่งชิ้นงานต่อไปยังเครื่องเคาะผง เพื่อกำจัดผงวัสดุที่ไม่ต้องการออก และส่งต่อไปยังเครื่องขัดผิว เพื่อขัดผิวของชิ้นงานให้เรียบเนียนตามต้องการ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้คนงานในการขัดผิวของชิ้นงาน ดังแสดงรูป 4-3, 4-4, 4-5 และ 4-6 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ



รูปที่ 4-3 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด SLM



รูปที่ 4-4 ตัวอย่างชิ้นงานจากเครื่อง SLM



รูปที่ 4-5 เครื่องเคาะผง



รูปที่ 4-6 เครื่องขัดผิว

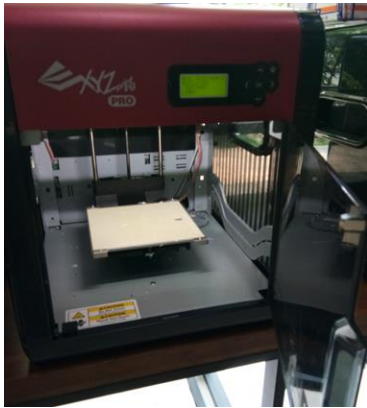
เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM (Fused Deposition Modeling) เครื่องพิมพ์ชนิดนี้ใช้วัสดุเทอร์โมพลาสติก ได้แก่ PLA, ABS, Nylon, PET, Wood (พลาสติกผสมไม้), Bronze (พลาสติกผสมทองเหลือง) ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้งานมากที่สุดคือ PLA และ ABS เมื่อเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้พิมพ์ทั้ง 2 ชนิดพบว่า PLA มีอันตรายน้อยกว่า ABS ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบวัสดุ PLA และ ABS

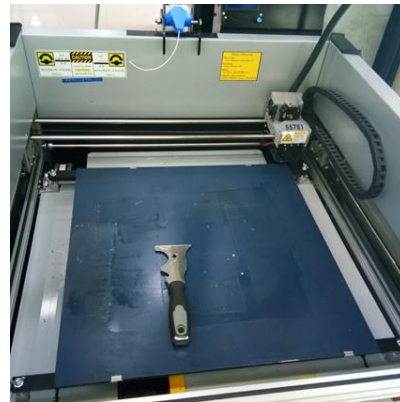
วัสดุ	ประเภท	อุณหภูมิที่ใช้ (องศาเซลเซียส)	ชิ้นงาน	อันตราย
PLA	วัสดุชีวภาพ (ทำจากซังข้าว)	190-220	หดตัวได้น้อย	น้อย (ไม่มีกลิ่น)
ABS	วัสดุปิโตรเลียม	120-230	แข็งแรงและยืดหยุ่นกว่า	มาก (กลิ่นและฝุ่น)

โดยหลักการทำงานใช้วิธีการหลอมเหลววัสดุที่หัวฉีด เพื่อฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน พลาสติกจะถูกฉีดออกมาจากหัวฉีด และเรียงตัวเป็นชั้น ๆ ซึ่งเส้นพลาสติกที่เหลือจากการพิมพ์ อาจมีการเก็บรวบรวมและนำไปรีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ ดังแสดงรูป 4-7, 4-8 และ 4-9 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ

1)



2)



รูปที่ 4-7 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM รูปที่ 4-8 ฐานรองชิ้นงานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM



รูปที่ 4-9 ของเสี้ยวที่เหลือจากการพิมพ์ชิ้นงาน

เครื่อง PolyJet เครื่องพิมพ์ชนิดนี้ใช้วัสดุในการขึ้นรูปชิ้นงานในรูปของสารกึ่งเหลว เช่น เรซิน โดยหลักการทำงาน คือ เครื่องจะพ่นเรซินผ่านหัวจ่าย จากนั้นเครื่องจะยิงลำแสง UV ออกมา เพื่อให้เรซินเกิดการแข็งตัวเป็นรูปร่างตามชิ้นงานที่สั่งพิมพ์ ซึ่งในขั้นตอนการพิมพ์ของเสี้ยวจะเกิดจากการล้างหัวจ่าย ด้วยน้ำยาล้างหัวจ่าย PolyJet ใช้หลักการพ่นวัสดุเรซินเหลวออกมาเป็นชิ้นงาน และสามารถพิมพ์วัสดุได้หลายสีในครั้งเดียวกัน ซึ่งมีข้อจำกัด เช่น ใช้วัสดุได้แค่ 3 สี เท่านั้น ดังแสดงรูป 4-10, 4-11 และ 4-12 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ



รูปที่ 4-10 เครื่อง Polyjet



รูปที่ 4-11 เรซินที่ใช้สำหรับพิมพ์ชิ้นงาน



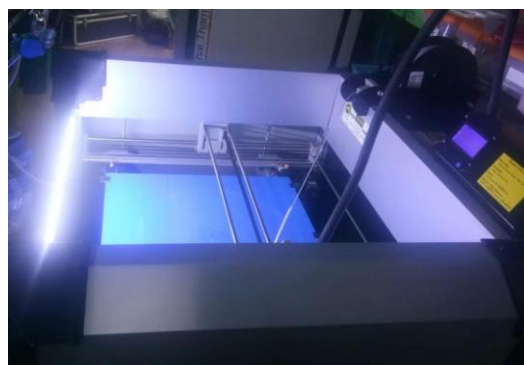
รูปที่ 4-12 ตัวอย่างชิ้นที่พิมพ์จากเครื่อง Polyjet

4.1.3 บริษัท NTT pro

จากการลงสำรวจพื้นที่ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยการสอบถามเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์ พบว่าทางบริษัทมีการผลิตและจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM ชนิดเดียวเท่านั้น รวมทั้งมีการให้บริการการพิมพ์สามมิติแก่ลูกค้า ข้อดีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM คือ เป็นเทคนิคการพิมพ์ที่เรียบง่าย สะดวกต่อการใช้งาน และมีราคาถูกกว่าการพิมพ์ด้วยเทคนิคอื่น ๆ วัสดุการพิมพ์มีให้เลือกหลากหลาย และมีราคาถูก เช่น ABS, PLA, Nylon และ PETG เป็นต้น ข้อเสียของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM คือ ใช้เวลาการพิมพ์ค่อนข้างนาน และความละเอียดต่ำกว่าเครื่องพิมพ์ชนิดอื่น ๆ จำเป็นต้องนำผลิตภัณฑ์มาขัดเพื่อให้ผิวมีความเรียบเนียน ดังแสดงรูป 4-13 และ 4-14 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ



รูปที่ 4-13 เครื่องพิมพ์ ชนิด FDM

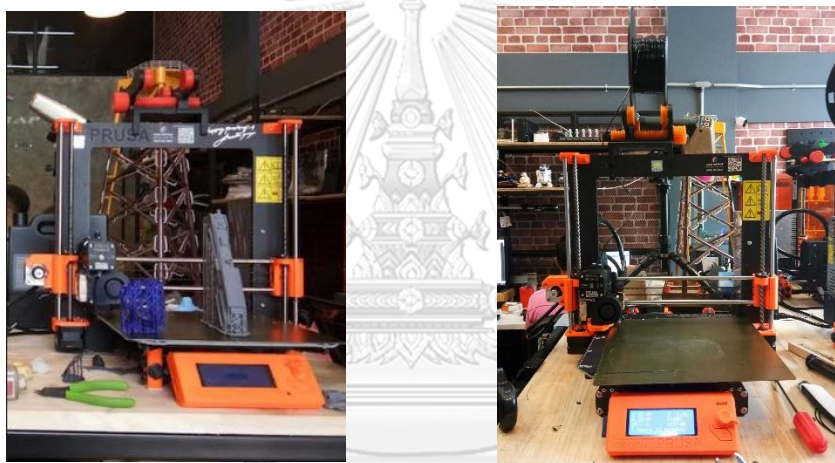


รูปที่ 4-14 ฐานรองชิ้นงานเครื่องพิมพ์ ชนิด FDM

4.1.4 บริษัท The Fast 3D Print

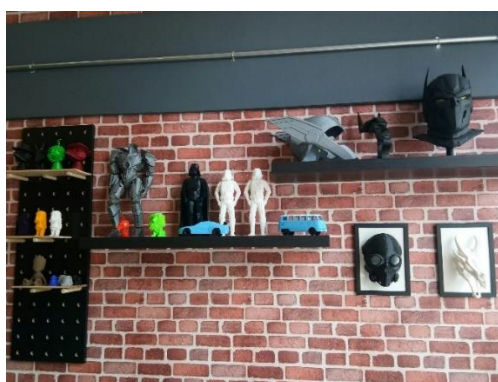
จากการลงสำรวจพื้นที่ พบว่าทางบริษัทมีการผลิตและจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM และให้บริการรับจ้างขึ้นรูปชิ้นงาน เครื่องพิมพ์ FDM ใช้กับงานหลากหลาย เช่น ทำโมเดล ฟิกเกอร์ ออกแบบพื้นรองเท้า ตลอดจนการสร้างบ้าน หรืออาคารต่าง ๆ โดยประเทศไทยบริษัท SCG เริ่มมีการนำปูนมาเป็นวัสดุพิมพ์เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานเป็นบ้าน หรืออาคารต่าง ๆ แล้ว วัสดุที่ใช้พิมพ์ คือ อยู่ในรูปของเส้นใยพลาสติก ซึ่งเป็นวัสดุผสม ได้แก่ ผงไม้ผสม ผงไม้ผสมทองแดง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความยืดหยุ่น โดยวัสดุที่นิยมใช้งานมากที่สุดคือ PLA และ ABS เมื่อเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้พิมพ์ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ PLA และ ABS พบว่าวัสดุที่อันตรายน้อยที่สุดคือ PLA เนื่องจากไม่มีกลิ่นขณะใช้งาน ชิ้นงานที่พิมพ์จากวัสดุชนิดนี้จะหดตัวน้อย ใช้อุณหภูมิในช่วง 190-220 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการพิมพ์น้อยกว่า เนื่องจากการขึ้นรูปชิ้นงานรวดเร็ว ส่วนวัสดุ ABS มีอันตรายมากกว่า เนื่องจากมีกลิ่น และอนุภาคฝุ่นเกิดขึ้นขณะใช้งาน ใช้อุณหภูมิในช่วง 120-230 องศาเซลเซียส และใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ ใช้ระยะเวลาในการพิมพ์นานกว่า ไม่สามารถพิมพ์เร็วได้ เพราะจะทำให้วัสดุไม่เรียงตัว และชิ้นงานที่พิมพ์ได้มีความแข็งแรง ยืดหยุ่น ตีกว่า โดย ABS เป็นวัสดุปิโตรเลียมที่มีความอันตรายมากกว่า PLA เนื่องจากมีกลิ่นที่แรงกว่า แต่ขณะเดียวกันก็มีความแข็งแรง และเหนียวกว่า PLA ส่วน PLA เป็นวัสดุชีวภาพ ทำจากซังข้าวโพด ซึ่งจะมีความแข็งแรง และมีความเปราะ ซึ่งวัสดุที่ใช้พิมพ์ 1 ม้วน มีน้ำหนักประมาณ 1 กิโลกรัม สามารถสั่งได้จากประเทศสหรัฐอเมริกา จีน และไทย (บริษัท PIKA) โดยรายละเอียดทั่วไปของเครื่องพิมพ์ FDM เป็นเครื่องพิมพ์ที่นิยมใช้งานมากที่สุดในประเทศไทย หัวฉีดของเครื่องพิมพ์ โดยทั่วไปมีขนาด 0.4 mm ทั้งนี้สามารถเปลี่ยนได้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของชิ้นงานที่ต้องการ หากจำแนกประเภทของเครื่องพิมพ์ตามจำนวนหัวฉีด สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทหลักๆ คือ เครื่องพิมพ์ที่มีหัวฉีดเดียว และเครื่องพิมพ์หลายหัวฉีด โดยเครื่องพิมพ์ที่ใช้ทั่วไปจะเป็นแบบหัวฉีดเดียว ส่วนเครื่องพิมพ์หลายหัวฉีดนิยมใช้กับชิ้นงานที่ต้องการสีมาก 1 สี หรือบางกรณีอาจใช้กับชิ้นงานที่ตัว Support กับวัสดุที่ใช้พิมพ์ไม่ใช่วัสดุชนิดเดียวกัน โดยวัสดุที่ใช้เป็นตัว Support อาจเป็นวัสดุที่ละลายน้ำได้ หรือละลายในแอลกอฮอล์ หรือสารละลายอื่น ๆ ซึ่งวัสดุเหล่านั้นจะมีความจำเพาะกับตัววัสดุหลักที่ใช้ทำชิ้นงาน เช่น วัสดุพิมพ์คือ PLA วัสดุที่ทำตัว Support จะต้องเป็น PVA ซึ่งสามารถละลายในน้ำได้ หรือ วัสดุพิมพ์คือ ABS วัสดุที่ทำตัว Support จะต้องเป็น HIPS ซึ่งสามารถละลายในแอลกอฮอล์ ดังนั้นในกรณีนี้เมื่อพิมพ์ชิ้นได้ตามต้องการแล้ว ในขั้นตอนการกำจัดตัว Support จึงไม่ต้องใช้การตัดออก แต่ให้นำชิ้นงานที่ได้ไปแช่ในสารละลายที่ตัว

Support สามารถละลายได้ แล้วจะเหลือแค่ตัวชิ้นงานที่ต้องการ โดยระยะเวลาในการพิมพ์จะขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานที่สั่งพิมพ์ และวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ อายุการใช้งานของเครื่องพิมพ์ขึ้นอยู่กับอายุของหัวฉีด แผ่นรองพิมพ์ และท่อเทปρον ที่ติดอยู่กับหัวฉีดใช้เป็นทางให้วัสดุที่ใช้พิมพ์ไหลเข้าสู่หัวฉีด ซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสความร้อนอยู่ตลอดเวลา โดยหัวฉีดและแผ่นรองพิมพ์มีอายุการใช้งานประมาณ 1 ปี ส่วนท่อเทปρονมีอายุการใช้งานประมาณ 3-6 เดือน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้งาน หากอุณหภูมิสูงอายุการใช้งานจะยิ่งลดลง ซึ่งเมื่อครบกำหนดอายุการใช้งานจึงต้องเปลี่ยนส่วนประกอบเหล่านี้ใหม่ นอกจากนี้ลักษณะผิวชิ้นงานที่ได้จะไม่เรียบเนียน ทำให้ต้องมีการนำไปขัดต่อ ดังแสดงรูป 4-15, 4-16 และ 4-17 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ



รูปที่ 4-15 เครื่อง FDM 3D printer รูปที่ 4-16 ฐานรองชิ้นงานของเครื่อง FDM

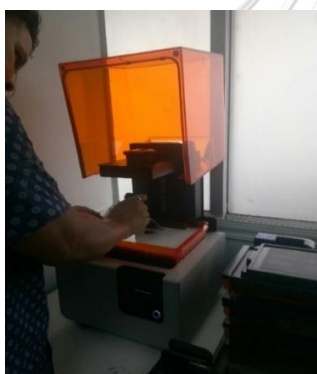
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4-17 ตัวอย่างชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยเครื่อง FDM

4.1.5 บริษัท Alpha 3D Printer

จากการลงสำรวจพื้นที่ ทางบริษัทรับจ้างการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด SLA (Stereolithography) ซึ่งวัสดุที่ใช้อยู่ในรูปของเรซิน ซึ่งเป็นพลาสติกแบบ เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting plastic) เป็นพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษ คือ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี โดยเรซินบรรจุในถัง ถังละ 1 ลิตร ส่วนของราคาของเรซินจะขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิน ซึ่งหลักการทำงาน คือ การยิงเลเซอร์ไปบนของเหลวที่บรรจุในถาดเรซิน ซึ่งเป็นของเหลวที่ไวแสง (Photo Resin / Photopolymer) เรซินที่ได้รับแสงจะแข็งตัวเฉพาะจุดที่โดนแสง และจะแข็งตัวเป็นรูปร่างเป็นชั้น ๆ ไปเรื่อย ๆ จนกลายเป็นชิ้นงานที่ต้องการ จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการพิมพ์ไปจุ่มในตัวน้ำยา (IPA) เพื่อล้างเรซินที่เกาะติดผิวชิ้นงาน และนำชิ้นงานไปอบ ให้ความร้อนด้วยแสง UV เพื่อให้ชิ้นงานแห้งจนถึงขั้นใน เมื่อชิ้นงานแห้งแล้วนำชิ้นงานไปตัดตัว support ออก เพื่อให้เหลือเฉพาะชิ้นส่วนที่ต้องการ นำชิ้นงานไปขัดด้วยกระดาษทราย เพื่อเก็บรายละเอียดของชิ้นงาน และเพื่อให้ผิวของชิ้นงานมีความเรียบเนียนมากขึ้น ดังแสดงรูป 4-18, 4-19, 4-20, 4-21 และ 4-22 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ



รูปที่ 4-18 เครื่อง SLA

รูปที่ 4-19 ถาดบรรจุเรซิน



รูปที่ 4-20 ขั้นตอนการใช้ IPA

ล้างเรซินออกจากชิ้นงาน



รูปที่ 4-21 ขั้นตอนการอบชิ้นงาน



รูปที่ 4-22 การตัดตัว support และขัดด้วยกระดาษทราย

4.1.6 บริษัท Winner Prototype

จากการลงสำรวจพื้นที่ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยการสอบถามเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์ พบว่าทางบริษัทมีการผลิตและจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติชนิด FDM ชนิดเดียวเท่านั้น รวมทั้งมีการให้บริการการพิมพ์สามมิติแก่ลูกค้า ดังแสดงรูป 4-23, 4-24, 4-25 และ 4-26 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ

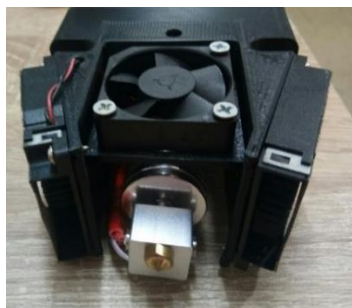


รูปที่ 4-23 เครื่องพิมพ์ FDM



รูปที่ 4-24 เครื่องพิมพ์ FDM สำหรับชิ้นงาน

ขนาดใหญ่



รูปที่ 4-25 ตัวอะไหล่ของหัวฉีดที่ใช้งาน
กับเครื่องพิมพ์ FDM



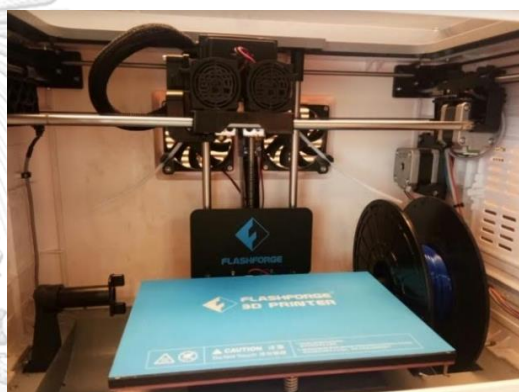
รูปที่ 4-26 ตัวอย่างชิ้นงานที่พิมพ์ด้วยวัสดุ
ต่างชนิดกัน

4.1.7 บริษัท Print 3DD

บริษัทจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และรับพิมพ์งาน 3 มิติ โดยมีการใช้งานเครื่องพิมพ์หลักๆ 2 ชนิด คือ เครื่องพิมพ์ชนิด FDM และเครื่องพิมพ์ชนิด DLP ในส่วนของ Software ที่ใช้ในการดำเนินงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติแต่ละยี่ห้อมีความแตกต่างกัน โดยไฟล์ที่ใช้ในการพิมพ์ก็จะมีหลายประเภทตามลักษณะของงานที่พิมพ์ ได้แก่ ไฟล์ที่ใช้กับงานที่ไม่มีสี เช่น .stl, .slc ไฟล์ที่ใช้กับงานที่มีสี เช่น .obj, .3mf นอกจากนี้ในการออกแบบหรือแก้ไขชิ้นงานสามารถใช้เครื่องสแกนชิ้นงานต้นแบบ เข้าสู่โปรแกรม เพื่อแปลงไฟล์เป็นงานสามมิติ เพื่อสั่งพิมพ์งานดังกล่าว หรือปรับแก้ชิ้นงานตัวอย่างนั้นให้ได้แบบตามต้องการก่อนสั่งพิมพ์ ดังแสดงรูป 4-27, 4-28 และ 4-29 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ



รูปที่ 4-27 เครื่องพิมพ์ FDM



รูปที่ 4-28 ฐานรองชิ้นงานเครื่องพิมพ์ FDM



รูปที่ 4-29 เครื่องพิมพ์ FDM มัลติคัลเลอร์

เครื่องพิมพ์ DLP (Digital Light Processing) จะฉายแสงไปที่ภาคใ้เรซินความไวแสง เมื่อเรซินถูกแสงจะแข็งตัวและขึ้นรูปร่าง 3 มิติขึ้นมา วัสดุที่ใช้พิมพ์ คือ เรซินซึ่งค่อนข้างอันตราย เนื่องจากมีกลิ่นค่อนข้างแรง ทำให้เวลาใช้งานจะต้องมีการสวมหน้ากากป้องกัน โดยรายละเอียดทั่วไปของเครื่องเป็นเครื่องพิมพ์ที่นิยมใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดมาก ๆ เช่น งานจิ๋วเวอร์รี่ งานหล่อพระ เป็นต้นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 230 วัตต์ และมีอายุการใช้งานของเครื่องพิมพ์ประมาณ 20,000 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจะต้องเปลี่ยนจอฉายแสงใหม่ หลักการทำงานของเครื่องพิมพ์ชนิดนี้ คือ ใช้โปรเจคเตอร์ฉายภาพครอบคลุมทั้งเลเยอร์ไปบนของเหลวที่บรรจุอยู่ในภาคนเรซิน ซึ่งเป็นของเหลวที่ไวแสง (Photo Resin หรือ Photopolymer) เรซินจะเกิดการแข็งตัวเฉพาะบริเวณที่ได้รับแสง โดยจะแข็งตัวเป็นรูปร่างในลักษณะเป็นชั้น ๆ ไปเรื่อย ๆ จนกลายเป็นชิ้นงานที่ต้องการ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาดึงตัว Support ออก และนำไปขัดแต่งผิวให้เรียบเนียน และลงสีตามต้องการ ซึ่งของเสียที่เกิดจากการทำงาน ได้แก่ ตัว Support ของชิ้นงาน และแผ่นฟิล์ม(ที่ช่วยให้ขึ้นเกาะติด) ที่มีการชำรุดหรือฉีกขาด ซึ่งมีการเก็บรวบรวมและนำไปทิ้ง โดยทั้งนี้ปริมาณตัว Support ของชิ้นงาน อาจมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานในการวางรูปแบบการพิมพ์ โดยขึ้นอยู่กับประสบการณ์ ความเชี่ยวชาญ และความชำนาญของผู้ใช้งานในกระบวนการพิมพ์ 3 มิติด้วย ดังแสดงรูป 4-30, 4-31 และ 4-32 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ



รูปที่ 4-30 เครื่องพิมพ์ชนิด DLP



รูปที่ 4-31 ตัวอย่างของชิ้นงาน



รูปที่ 4-32 เครื่องสำหรับสแกนชิ้นงาน

4.1.8 บริษัท Sync Innovation

บริษัทจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และรับพิมพ์งาน 3 มิติ โดยมีการใช้งานเครื่องพิมพ์หลักๆ 3 ชนิดคือเครื่องพิมพ์ชนิด FDM เครื่องพิมพ์ชนิด DLP และเครื่องพิมพ์ชนิด SLA โดยการทำงานโดยทั่วไปของเครื่องพิมพ์ จะเริ่มจากการออกแบบตัวผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจะสั่งพิมพ์ โดยใช้โปรแกรมที่ชื่อว่า Solidwork และบันทึกไฟล์งานเป็นไฟล์ .stl เพื่อสั่งพิมพ์กับเครื่องพิมพ์ได้เลย

เครื่องพิมพ์ SLA (Stereo Lithography) หลักการทำงานเหมือนกับเครื่องพิมพ์ DLP ต่างกันที่ ต้นกำเนิดของแสง และความเร็วในการทำชิ้นงาน เครื่องพิมพ์ SLA ใช้แหล่งกำเนิดแสงด้วยแสงเลเซอร์ โดยเครื่องจะทำการยิงเลเซอร์ไปที่เรซินและวาดเส้นเลเซอร์ไปเรื่อย ๆ วัสดุที่ใช้พิมพ์ อยู่ในรูปของเรซิน รายละเอียดทั่วไปของเครื่อง เป็นเครื่องที่นิยมใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น งานจำพวกการออกแบบเครื่องประดับ พระเครื่อง งานโมเดลของเล่นและโมเดลตัวอย่างชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดมาก ๆ เป็นต้น โดยอุณหภูมิของเครื่องโดยทั่วไปอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการพิมพ์ชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับความสูงของชิ้นงานที่สั่งพิมพ์ เช่น การสั่งพิมพ์แหวน 1 วง (ใช้เรซินประมาณ 3 มิลลิเมตร) ใช้เวลาในการพิมพ์ 3 ชั่วโมง พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ประมาณ 150 วัตต์ และอายุการใช้งานของเครื่องพิมพ์อยู่ที่ระยะเวลาการใช้งานอย่างน้อยประมาณ 5,000 ชั่วโมง ซึ่งเมื่อครบกำหนดอายุการใช้งาน จะต้องมีการเปลี่ยนหลอดไฟใหม่ และเมื่อใช้เรซินประมาณ 3 ลิตร ต้องเปลี่ยนถาดบรรจุเรซิน ในระหว่างการพิมพ์งานอาจมีอนุภาคฝุ่นเกิดขึ้น โดยทั้งนี้ก็มีผลกระทบต่อผู้ใช้งานค่อนข้างน้อย เนื่องจากตัวเครื่องมีหน้ากครอบอยู่จึงลดการฟุ้งกระจายของอนุภาคฝุ่นในบริเวณพื้นที่การทำงานได้ นอกจากนี้ผู้ใช้งานอาจได้รับสัมผัสอนุภาคฝุ่นในขั้นตอนการตัดตัว support และการขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย อีกทั้งในขั้นตอนการล้างตัวชิ้นงานด้วยน้ำยา IPA

เพื่อให้เรซินเหลวที่เกาะอยู่กับชิ้นงานหลุดออก จะมีกลิ่นของน้ำยา IPA เกิดขึ้นในบริเวณที่ทำงาน ดังแสดงรูป 4-33, 4-34, 4-35, 4-36, 4-37, 4-38, 4-39 และ 4-40 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ



รูปที่ 4-33 เครื่องพิมพ์ชนิด FDM มีกระจกปิดกันฝุ่น



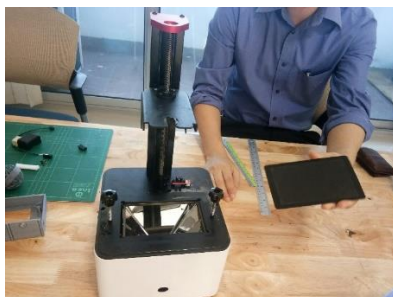
รูปที่ 4-34 เครื่องพิมพ์ชนิด FDM ขนาดกลาง



รูปที่ 4-35 เครื่องพิมพ์ชนิด FDM ยี่ห้อ Wanhao



รูปที่ 4-36 เครื่องพิมพ์ชนิด FDM ขนาดใหญ่



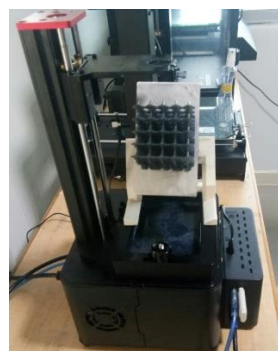
รูปที่ 4-37 เครื่องพิมพ์ชนิด DLP



รูปที่ 4-38 ตัวอย่างระบบฉายแสงของเครื่องพิมพ์ชนิด DLP



รูปที่ 4-39 ตัวอย่างชิ้นงาน

รูปที่ 4-40 ตัวอย่างชิ้นงานจากเครื่องพิมพ์
ชนิด DLP

4.1.9 บริษัท Septillion

บริษัทจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และรับพิมพ์งาน 3 มิติ โดยมีการใช้งานเครื่องพิมพ์หลักๆ 3 ชนิด คือ เครื่องพิมพ์ชนิด FDM เครื่องพิมพ์ชนิด SLA และเครื่องพิมพ์ชนิด SLS โดยการทำงานโดยทั่วไปของเครื่องพิมพ์ จะเริ่มจากการออกแบบตัวผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจะสั่งพิมพ์

เครื่องพิมพ์ชนิด FDM รายละเอียดทั่วไปของเครื่อง คือ ระบบที่ใช้งานมี 2 ระบบคือ Close Source และ Open Source โดยระบบ Close Source จะถูกปิดกั้นในการพิมพ์มากกว่าเหมาะสำหรับการใช้งานที่เจาะจงกับวัสดุที่ใช้พิมพ์ ส่วนระบบ Open Source จะใช้งานกับวัสดุที่ใช้พิมพ์ที่หลากหลายกว่า และใช้เวลาในการพิมพ์น้อยกว่าถึงแม้จะใช้วัสดุในการพิมพ์ชนิดเดียวกัน ลักษณะหัวฉีดของเครื่องพิมพ์ โดยทั่วไปมีขนาด 0.4 mm ทั้งนี้สามารถเปลี่ยนได้ขึ้นอยู่กับความละเอียดของชิ้นงานที่ต้องการ หากจำแนกประเภทของเครื่องพิมพ์ตามจำนวนหัวฉีด สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทหลักๆ คือ เครื่องพิมพ์ที่มีหัวฉีดเดียว และเครื่องพิมพ์หลายหัวฉีด โดยเครื่องพิมพ์ที่ใช้ทั่วไปจะเป็นแบบหัวฉีดเดียว ส่วนเครื่องพิมพ์หลายหัวฉีดนิยมใช้กับชิ้นงานที่ต้องการสีมาก 1 สี หรือบางกรณีอาจใช้กับชิ้นงานที่ตัว Support กับวัสดุที่ใช้พิมพ์ไม่ใช่วัสดุชนิดเดียวกัน โดยวัสดุที่ใช้เป็นตัว Support อาจเป็นวัสดุที่ละลายน้ำได้ หรือละลายในแอลกอฮอล์ หรือสารละลายอื่น ๆ ซึ่งวัสดุเหล่านั้นจะมีความจำเพาะกับตัววัสดุหลักที่ใช้ทำชิ้นงาน ดังนั้นในกรณีนี้เมื่อพิมพ์ชิ้นได้ตามต้องการแล้ว ในขั้นตอนการกำจัดตัว Support จึงไม่ต้องใช้การตัดออก แต่ให้นำชิ้นงานที่ได้ไปแช่ในสารละลายที่ตัว Support สามารถละลายได้ แล้วจะเหลือแค่ตัวชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งระยะเวลาในการพิมพ์จะขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานที่สั่งพิมพ์ และวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส และอายุการใช้งานของเครื่องพิมพ์ ขึ้นอยู่กับอายุของหัวฉีด แผ่นรองพิมพ์ และท่อเทปρον ที่ติดอยู่กับหัวฉีดใช้เป็นทางให้วัสดุที่ใช้พิมพ์ไหลเข้าสู่หัวฉีด ซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสความร้อนอยู่ตลอดเวลา โดยหัวฉีดและแผ่นรองพิมพ์มีอายุการใช้งานประมาณ 1 ปี ส่วนท่อเทปρονมีอายุการใช้งานประมาณ 3-6 เดือน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้งาน หากอุณหภูมิสูงอายุการใช้งานจะยิ่งลดลง ซึ่ง

เมื่อครบกำหนดอายุการใช้งานจึงต้องเปลี่ยนส่วนประกอบเหล่านี้ใหม่ โดยผิวชิ้นงานที่ได้จะไม่เรียบเนียน ทำให้ต้องมีการนำไปขัดต่อ ดังแสดงรูป 4-41, 4-42, 4-43, 4-44, 4-45, 4-46 และ 4-47 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ



รูปที่ 4-41 เครื่องพิมพ์ FDM รุ่น Ultimaker



รูปที่ 4-42 เครื่องพิมพ์ FDM ยี่ห้อ XYZ printing



รูปที่ 4-43 เครื่องพิมพ์ FDM ยี่ห้อ Markforged X7



รูปที่ 4-44 เครื่องพิมพ์ FDM ยี่ห้อ Markforged



รูปที่ 4-45 เครื่องพิมพ์ FDM ยี่ห้อ Zortrax



รูปที่ 4-46 ชุดกรองอากาศของเครื่องพิมพ์ FDM



รูปที่ 4-47 ตัวอย่างวัสดุที่ใช้สำหรับพิมพ์งาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

เครื่องพิมพ์ชนิด SLS (Selective Laser Sintering) วัสดุที่ใช้พิมพ์อยู่ในรูปของผง ได้แก่ ผงโลหะ พลาสติก เซรามิก ไนลอน สแตนเลส และไทเทเนียม รายละเอียดทั่วไปของเครื่องพิมพ์ชนิด SLS นิยมใช้ในอุตสาหกรรม มีระยะเวลาการพิมพ์งาน 4-5 ชม.ต่องานชิ้นเล็ก ๆ การเคาะและขัดผิว ประมาณ 2 ชม. หลักการทำงาน คือ เครื่องจะยิงลำแสงเลเซอร์ไปยังผงวัสดุที่อยู่บน Stage ตามที่ได้ออกแบบในโปรแกรม เมื่อพิมพ์เสร็จหนึ่งชั้น เครื่องก็จะเกลี่ยผงวัสดุมาทับบาง ๆ เป็นชั้นต่อไป หลังจากนั้นจะเริ่มกระบวนการยิงเลเซอร์อีกครั้ง ทำอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้ชิ้นงานที่ต้องการ จากนั้นจะต้องส่งชิ้นงานต่อไปยังเครื่องเคาะผง เพื่อกำจัดผงวัสดุที่ไม่ต้องการออก และส่งต่อไปยังเครื่องขัดผิว เพื่อขัดผิวของชิ้นงานให้เรียบเนียนตามต้องการ ซึ่งในขั้นนี้จะใช้คนงานในการขัดผิวของชิ้นงานของเสียที่เกิดจากการทำงาน คือ ผงวัสดุ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

4.1.10 บริษัท GessweinSiam

บริษัทจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และรับพิมพ์งาน 3 มิติ โดยมีการใช้งานเครื่องพิมพ์ 2 ชนิด คือ เครื่องพิมพ์ชนิด SLA และเครื่องพิมพ์ชนิด DLP ซึ่งมีหลักการทำงานเหมือนกันกับบริษัทที่ได้ลงพื้นที่สำรวจอื่น ๆ ดังแสดงรูป 4-48, 4-49, 4-50, 4-51 และ 4-52 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ



รูปที่ 4-48 เครื่องพิมพ์ชนิด SLA



รูปที่ 4-49 เครื่องพิมพ์ชนิด DLP



รูปที่ 4-50 เครื่องอบให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน



รูปที่ 4-51 ตัวอย่างชิ้นงาน



รูปที่ 4-52 ตัวอย่างชิ้นงานที่พิมพ์ได้ตามขนาดของเครื่องพิมพ์

4.1.11 บริษัท AppliCAD

บริษัทจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และรับพิมพ์งาน 3 มิติ โดยมีการใช้งานเครื่องพิมพ์ 2 ชนิด คือ เครื่องพิมพ์ชนิด FDM และเครื่องพิมพ์ชนิด PolyJet โดยการทำงานโดยทั่วไปของเครื่องพิมพ์

เครื่องพิมพ์ชนิด PolyJet วัสดุที่ใช้พิมพ์อยู่ในรูปของสารกึ่งเหลว เช่น เรซิน โดยรายละเอียดทั่วไปของเครื่องพิมพ์ การพิมพ์ 1 ครั้ง สามารถใช้วัสดุพิมพ์ได้ 3 ชนิด และตัว support 1 ชนิด ทำให้สามารถผสมสีได้ และเลือกความอ่อนความแข็งของชิ้นงาน (มีหลายระดับ) ซึ่งสามารถสั่งพิมพ์ให้มีหลายระดับความอ่อน-ความแข็งในชิ้นงานหนึ่งชิ้น โดยขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินที่เลือกใช้ ดังนั้นผิวของชิ้นงานจะมีความเงาสวย เพราะสามารถสังเคราะห์ได้ ถ้าเป็นชิ้นงานขนาดใหญ่ จะต้องสั่งพิมพ์แยกเป็นชิ้นๆแล้วค่อยนำมาประกอบกัน หลักการทำงาน คือ เครื่องจะพ่นเรซินผ่านหัวจ่าย จากนั้นจะยิงลำแสง UV ออกมา เพื่อให้เรซินเกิดการแข็งตัวเป็นรูปร่างตามชิ้นงานที่สั่งพิมพ์ ดังแสดงรูป 4-53, 4-54, 4-55, 4-56, 4-57, 4-58, 4-59 และ 4-60 รวบรวมรูปจากการลงพื้นที่สำรวจ



รูปที่ 4-53 เครื่องพิมพ์ชนิด FDM



รูปที่ 4-54 เครื่องพิมพ์ชนิด PolyJet



รูปที่ 4-55 ตัวอย่างชิ้นงาน



รูปที่ 4-56 ม้วนเส้นใยพลาสติก

รูปที่ 4-57 ตัวอย่างเรซินที่ใช้กับเครื่องพิมพ์
ชนิด PolyJetรูปที่ 4-58 ตัวอย่างหัวฉีดที่ใช้กับเครื่อง
FDMรูปที่ 4-59 ขั้นตอนการละลายตัว
support ออกรูปที่ 4-60 ขั้นตอนการล้างทำความสะอาด
ชิ้นงาน

สรุปผลจากการลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติจากบริษัทที่มีการผลิตและจำหน่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รวมทั้งให้บริการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติเป็นจำนวนทั้งสิ้น 11 บริษัท สรุปชนิดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่มีความนิยมในการผลิตและจัดจำหน่ายได้แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ชนิดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่มีความนิยมในการผลิตและจัดจำหน่าย

ชื่อบริษัท	ชนิดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ผลิตและจัดจำหน่าย
บริษัท สยามเรปเรป จำกัด	FDM
สถาบันพลาสติก ดิกตันกล้า	FDM, SLM, PolyJet
บริษัท NTT pro	FDM
บริษัท The Fast 3D Print	FDM
บริษัท Alpha 3D Printer	SLA
บริษัท Winner Prototype	FDM
บริษัท Print 3DD	FDM, DLP
บริษัท Sync Innovation	FDM, DLP, SLA
บริษัท Septillion	FDM, SLA, SLS
บริษัท GessweinSiam	SLA, DLP
บริษัท AppliCAD	FDM, PolyJet

หมายเหตุ: ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลเบื้องต้นจากการสอบถามเจ้าหน้าที่ ข้อมูลอาจมีการเปลี่ยนแปลงภายหลัง

จากตารางทำให้ทราบว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM เป็นที่นิยมในการผลิตและจำหน่ายมากที่สุด 11 บริษัทที่ทำการลงพื้นที่สำรวจในประเทศไทย ดังนั้นจึงได้นำเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM โดยศึกษาเครื่องพิมพ์ 2 รุ่น คือ รุ่นที่ผลิตเองในประเทศไทย และรุ่นที่นำเข้ามาจากประเทศจีนนี้ มาทำการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงาน โดยใช้วัสดุในการขึ้นรูปชิ้นงาน คือ PLA, ABS และ Nylon

4.2 ผลการรวบรวมข้อมูลการจัดทำบัญชีรายการ

การจัดทำบัญชีรายการมวลสารขาเข้าและมวลสารขาออกเป็นการรวบรวมข้อมูลสารขาเข้าและสารขาออกของกระบวนการต่าง ๆ ของระบบผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม ซึ่งจากงานวิจัยกำหนดให้เครื่องพิมพ์ 3 มิติรุ่นที่ผลิตในประเทศไทย คือ รุ่น A

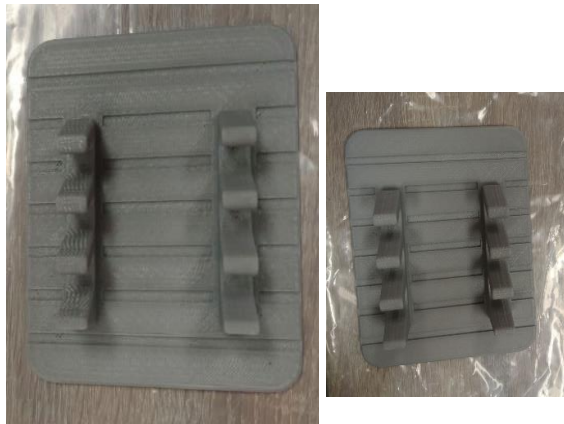
และเครื่องพิมพ์ 3 มิติรุ่นที่นำเข้ามาจากประเทศจีน คือ รุ่น B ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ใช้วัสดุ PLA, ABS และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง แสดงอักษรย่อ คือ PLA_{3hr} ABS_{3hr} และ Nylon_{3hr} การใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมง แสดงอักษรย่อ คือ PLA_{6hr} ABS_{6hr} และ Nylon_{6hr} โดยทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานที่ได้ และชั่งเส้นใยพลาสติกที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 4.3 แสดงน้ำหนักชิ้นงานและน้ำหนักขยะที่นำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ

ตารางที่ 4.3 แสดงน้ำหนักชิ้นงานและน้ำหนักขยะที่นำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ

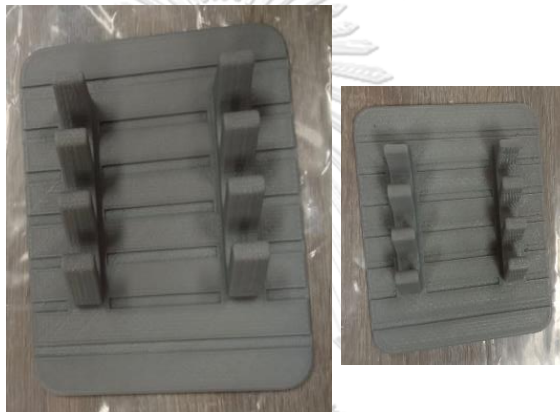
ชิ้นงาน	รุ่น A		รุ่น B	
	น้ำหนักชิ้นงาน (กรัม)	น้ำหนักขยะ (กรัม)	น้ำหนักชิ้นงาน (กรัม)	น้ำหนักขยะ (กรัม)
PLA _{3hr}	32.19	0.47	33.10	0.53
PLA _{6hr}	64.50	0.83	66.60	0.91
ABS _{3hr}	14.35	0.71	37.91	0.26
ABS _{6hr}	15.85	0.74	66.65	0.32
Nylon _{3hr}	31.27	0.81	32.84	0.98
Nylon _{6hr}	65.42	0.96	67.05	0.97

จากตารางพบว่า น้ำหนักชิ้นงานของวัสดุ PLA และ Nylon ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B มีน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นน้ำหนักชิ้นงานของวัสดุ ABS ที่มีน้ำหนักที่แตกต่างกัน เนื่องจากการใช้วัสดุ ABS ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้น้ำหนักชิ้นงานน้อยกว่าชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B อย่างชัดเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงไม่ได้ทำการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการใช้วัสดุ ABS ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และในการกำจัดเส้นใยพลาสติกที่ไม่ใช่แล้ว จะนำไปกำจัดขยะด้วยวิธีการฝังกลบ ดังรูปตัวอย่างชิ้นงาน 3 มิติของวัสดุ PLA, ABS และ Nylon แสดงดังรูปที่ 4-61, 4-62 และ 4-63

1)



2)



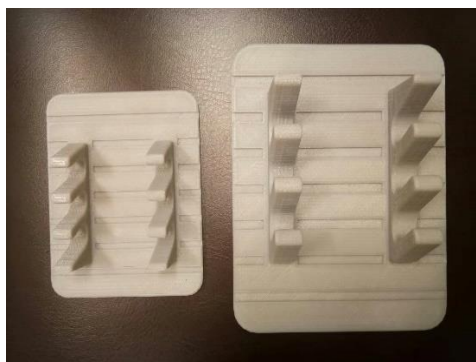
รูปที่ 4-61 ตัวอย่างชิ้นงานสามมิติของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A วัสดุ PLA (1); ชิ้นงานสามมิติของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ PLA (2)

3)

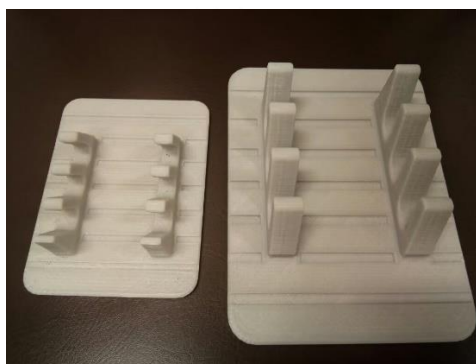


รูปที่ 4-62 ตัวอย่างชิ้นงานสามมิติของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ ABS (3)

4)



5)



รูปที่ 4-63 ตัวอย่างชิ้นงานสามมิติของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A วัสดุ Nylon (4); ชิ้นงานสามมิติของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ Nylon (5)

จากรูปแสดงชิ้นงานจากการขึ้นรูปชิ้นงานสามมิติ คือ ที่วางโทรศัพท์ ด้วยวัสดุ PLA, ABS และ Nylon ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะของชิ้นงานแทบจะไม่แตกต่างกัน ซึ่งการเลือกใช้วัสดุในการขึ้นรูปชิ้นงานขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้บริโภค โดยเลือกตามความแข็งแรง คงทน ความสะดวกในการพิมพ์ และการเก็บรักษา เช่น PLA เป็นไบโอพลาสติกที่ผลิตมาจากธรรมชาติ ย่อยสลายได้เร็ว จึงสามารถพิมพ์ชิ้นงานง่าย ABS เป็นพลาสติกที่มีแข็งแรง และคงทน ใช้งานได้ทั่วไป ซึ่งทนความร้อนได้มากกว่า PLA แต่มีการหดตัวสูงกว่า ดังนั้นชิ้นงานที่ได้เหมาะสำหรับการพิมพ์โมเดลหรืออุปกรณ์ในงานอุตสาหกรรม และ Nylon เป็นพลาสติกที่มีความแข็งแรง ยืดหยุ่น และทนทาน ใช้พิมพ์อุปกรณ์ทางวิศวกรรมได้ ข้อเสีย คือ ดูดความชื้นได้ง่าย จึงต้องเก็บรักษาในพื้นที่ ๆ ไม่อับชื้น เป็นต้น

ผลการเก็บข้อมูลจัดทำบัญชีรายการมวลสารในขั้นตอนการใช้งานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และ รุ่น B โดยลงพื้นที่ทำการทดลองตรวจวัดมลพิษทางอากาศ และการใช้ไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 บัญชีรายการมวลสารของการผลิตชิ้นงานโดยการใช้เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A ต่อหน่วยการทำงาน 1 ชิ้นงาน ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ด้วยพลาสติก PLA, ABS และ Nylon

	ปริมาณ						หน่วย
	PLA 3hr	PLA 6hr	ABS 3hr	ABS 6hr	Nylon 3hr	Nylon 6hr	
มวลสารขาเข้า							
พลาสติก	32.66	65.33	15.06	16.59	32.08	66.38	g
ไฟฟ้า	180	360	594	1,188	594	1,188	Wh
มวลสารขาออก							
PM _{2.5}	2.15E-4	4.70E-4	-	1.40E-4	-	1.80E-4	mg
PM ₁₀	-	8.30E-4	-	-	3.72E-3	9.00E-3	mg
VOCs							
- Acetone	-	3.42E-4	2.42E-4	7.70E-4	-	5.44E-4	mg
- Dichloromethane	-	1.25E-4	-	1.63E-3	-	-	mg
- Ethanol	2.35E-4	1.12E-3	0.59E-3	1.54E-3	-	-	mg
- Ethylbenzene	-	-	-	-	1.39E-3	2.77E-3	mg
- m-xylene	-	3.13E-4	-	-	0.92E-3	1.82E-3	mg
- o-xylene	-	-	-	-	1.28E-4	2.56E-4	mg
เส้นใยพลาสติก	0.47	0.83	0.71	0.74	0.81	0.96	g

ตารางที่ 4.5 บัญชีรายการมวลสารของการผลิตชิ้นงานโดยการใช้เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B ต่อหน่วยการทำงาน 1 ชิ้นงาน ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ด้วยพลาสติก PLA, ABS และ Nylon

	ปริมาณ						หน่วย
	PLA 3hr	PLA 6hr	ABS 3hr	ABS 6hr	Nylon 3hr	Nylon 6hr	
มวลสารขาเข้า							
พลาสติก	33.63	67.51	38.17	66.97	33.82	68.02	g
ไฟฟ้า	171	342	600	1,200	600	1,200	Wh
มวลสารขาออก							
PM _{2.5}	0.56E-4	3.60E-4	-	-	-	1.80E-4	mg
PM ₁₀	-	8.28E-4	-	-	2.72E-3	9.00E-3	mg
VOCs							
- Acetone	0.54E-3	1.11E-3	0.86E-3	1.03E-3	-	6.85E-3	mg
- Ethanol	0.88E-3	5.79E-2	-	-	-	-	mg
- Ethylbenzene	-	-	0.89E-3	3.16E-3	2.10E-2	7.91E-2	mg
- m-Xylene	-	-	2.35E-4	5.38E-4	3.58E-3	7.56E-3	mg
- o-Xylene	-	-	0.78E-4	3.13E-4	-	-	mg
- Hexane	-	2.54E-4	-	5.08E-4	-	-	mg
- Isopropyl Alcohol	1.04E-3	2.34E-3	1.45E-3	3.19E-3	1.08E-2	3.93E-2	mg
- Pentane	0.53E-4	1.16E-4	-	-	-	-	mg
เส้นใยพลาสติก	0.53	0.91	0.26	0.32	0.98	0.97	g

จากการทดลองการตรวจวัดอากาศ ได้ทำการประเมินสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic Compounds, VOCs) จำนวน 78 สาร พบสาร VOCs ที่มีปริมาณมากกว่าขีดจำกัดในการวัดเชิงปริมาณ (Limit of Quantitation ; LOQ) ของเครื่อง GC ที่ใช้ (0.01 ppm) จำนวน 9 สาร เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และ รุ่น B พบว่าการใช้งานวัสดุ Nylon มีการปลดปล่อยสารเอทิลเบนซีน (ethylbenzene) และเมตา-ไซลีน (m-xylene) ในปริมาณสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับสาร VOCs ตัวอื่น ๆ เนื่องจากวัสดุ Nylon หรือ พอลิเอไมด์ (polyamide) มีส่วนประกอบหลัก คือ เอมีน (amine, NH) และกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid, CO) ทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ และทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี มีความแข็งแรงทนทานกว่าวัสดุ PLA เมื่อนำวัสดุทั้ง 2 ชนิด

เปรียบเทียบกับวัสดุ PLA พบว่าวัสดุ PLA เป็นไบโอพลาสติกที่ผลิตมาจากธรรมชาติ เช่น ข้าวโพด อ้อย มันฝรั่ง เป็นต้น และมีแนวโน้มสูงในการนำมาใช้ในงานประเภทอายุการใช้งานสั้น เพราะสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย เห็ด และรา เป็นต้น และไม่มีพิษต่อมนุษย์ เป็นพลาสติกที่ใช้งานกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด นอกจากนี้ในด้านการใช้ไฟฟ้า วัสดุ Nylon มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่า PLA เนื่องจากมีการใช้อุณหภูมิในการหลอมเหลวที่หัวฉีดสูงกว่า โดยวัสดุ PLA ใช้อุณหภูมิประมาณ 180-230 องศาเซลเซียส ในขณะที่วัสดุ Nylon ใช้อุณหภูมิประมาณ 210-260 องศาเซลเซียส และที่ฐานรองชิ้นงานของพลาสติก Nylon จะต้องมีอุณหภูมิสูงอยู่เสมอ เพื่อป้องกันการหดตัวของชิ้นงาน โดยใช้อุณหภูมิที่ฐานรองอยู่ที่ 50-100 องศาเซลเซียส ในขณะที่วัสดุ PLA ไม่ต้องให้อุณหภูมิที่ฐานรอง เนื่องจากไม่มีการหดตัวของชิ้นงาน ดังนั้นการใช้อุณหภูมิสูง ทำให้มีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

4.3 การวิเคราะห์และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

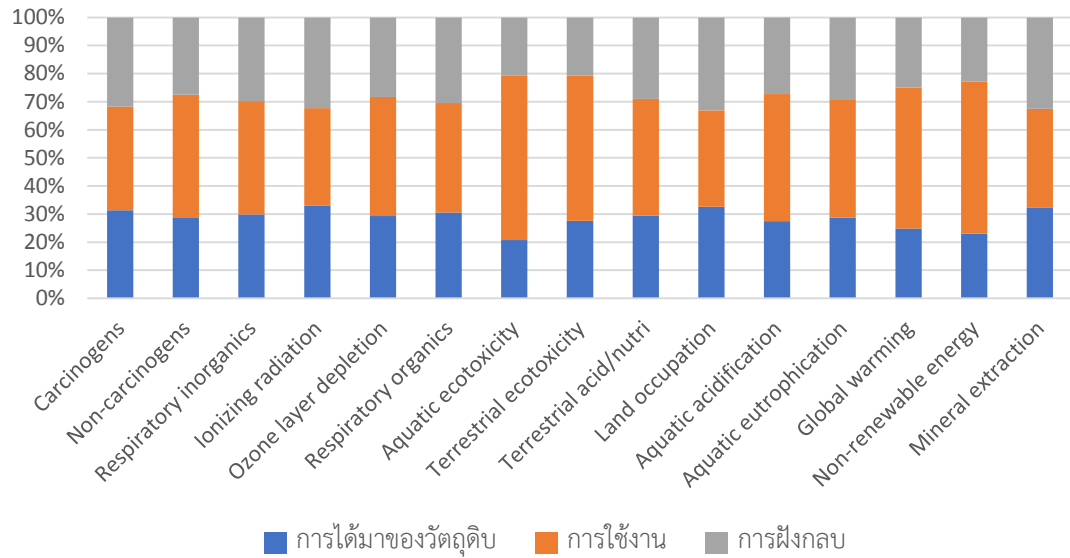
การวิเคราะห์และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ เป็นการคำนวณเพื่อแปลงข้อมูลบัญชีรายการที่ได้จากการรวบรวมปริมาณสารขาเข้าและสารขาออกของระบบผลิตภัณฑ์ และการวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในรูปของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่ออธิบายความสามารถในการก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมขั้นกลางหรือขั้นปลายที่เกิดขึ้น ในแต่ละช่วงชีวิต ตลอดวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์

4.3.1 ผลการประเมินผลกระทบขั้นกลาง (Midpoint Categories)

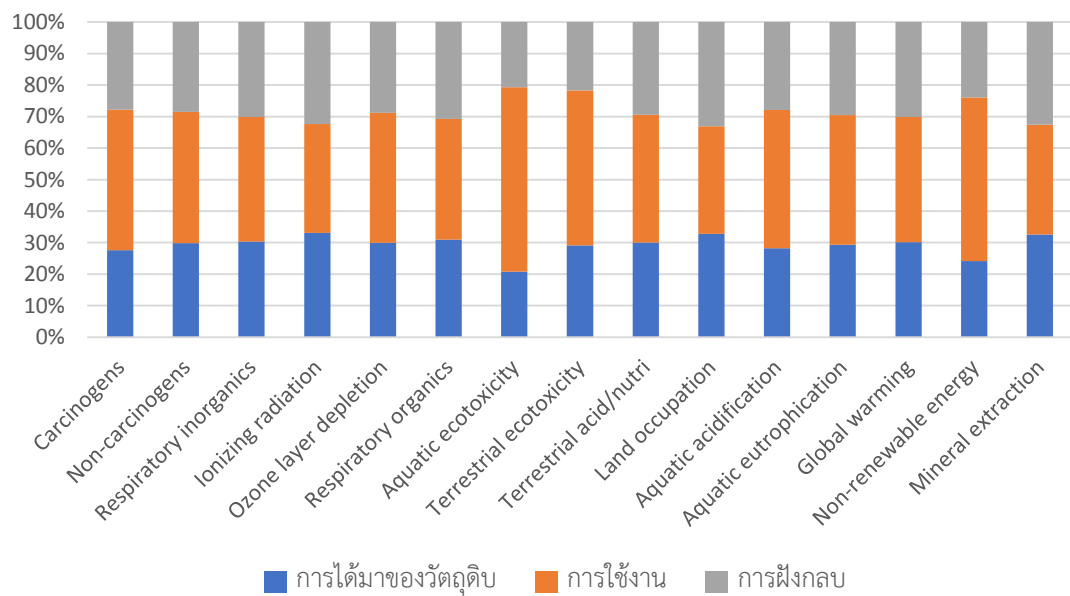
ผลกระทบขั้นกลางเป็นผลกระทบในด้านที่แสดงถึงปัญหาที่เกิดกับสิ่งแวดล้อม เช่น การเกิดรูรั่ว โอโซนในชั้นบรรยากาศ การที่สาหร่ายและพืชน้ำเติบโตมากเกินไป เกิดภาวะโลกร้อน แร่ธาตุลดลง ระบบนิเวศถูกทำลาย เกิดภาวะฝนกรด เป็นต้น ซึ่งแสดงผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังนี้

1) การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A วัสดุ PLA และ Nylon ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ ระยะเวลา 6 ชั่วโมง

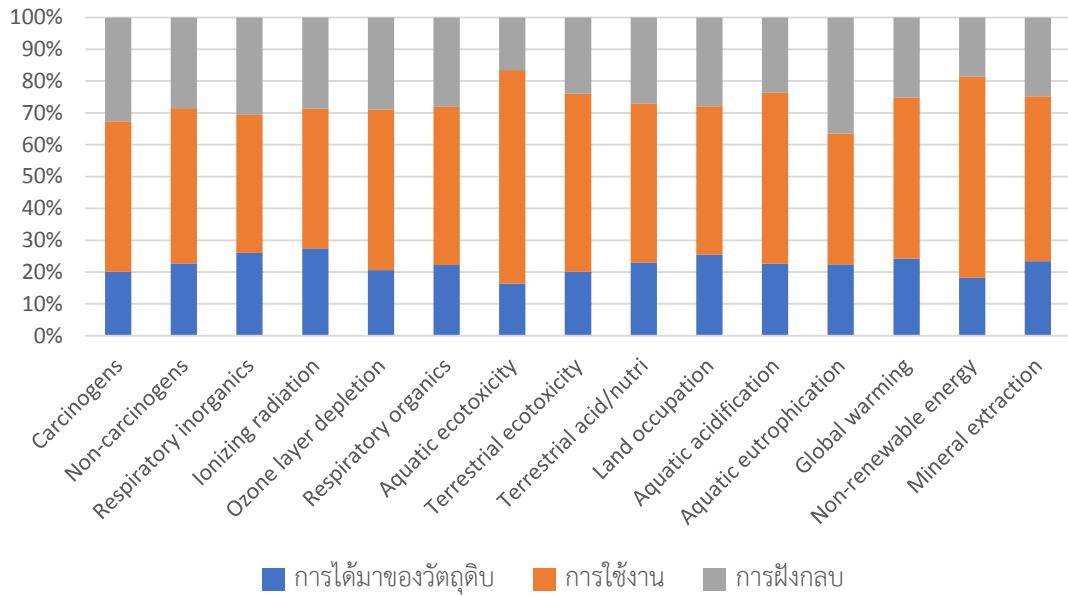
การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A วัสดุ PLA และ Nylon ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง แสดงผลในรูปที่ 4-64 , 4-65 , 4-66 และ 4-67 พบว่ากระบวนการใช้งานมีค่าสูงสุดในทุกด้านผลกระทบ โดยเป็นผลกระทบตั้งแต่การฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน จนถึงการผลิตชิ้นงานเสร็จสมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับ Barros (2017) ได้กล่าวว่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงสุดมาจากการปลดปล่อยสาร VOCs และการใช้ไฟฟ้า ในกระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ



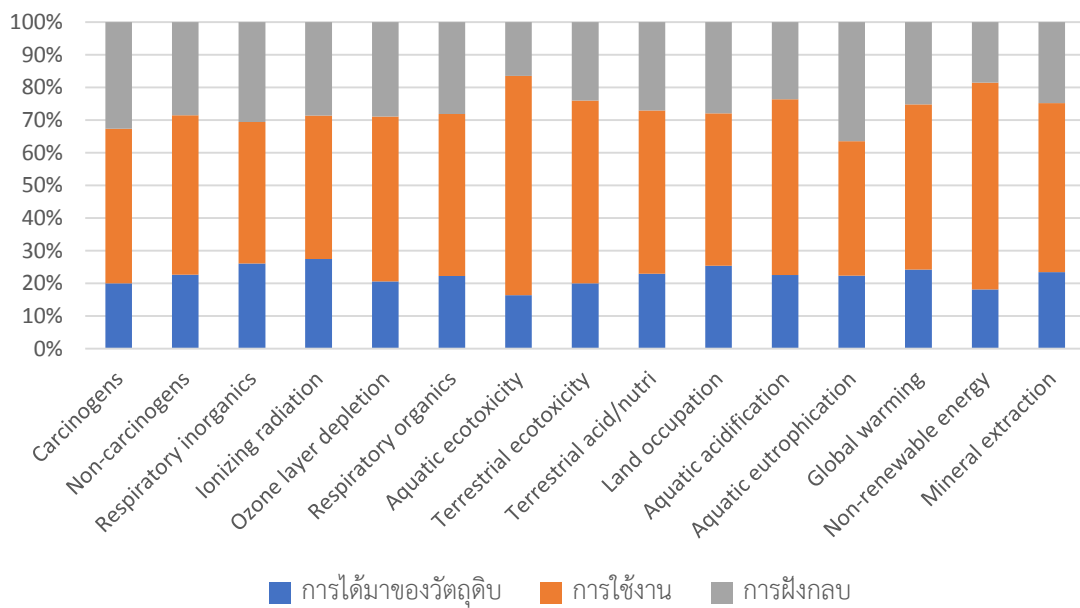
รูปที่ 4-64 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A โดยใช้พลาสติก PLA ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4-65 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A โดยใช้พลาสติก PLA ระยะเวลา 6 ชั่วโมง



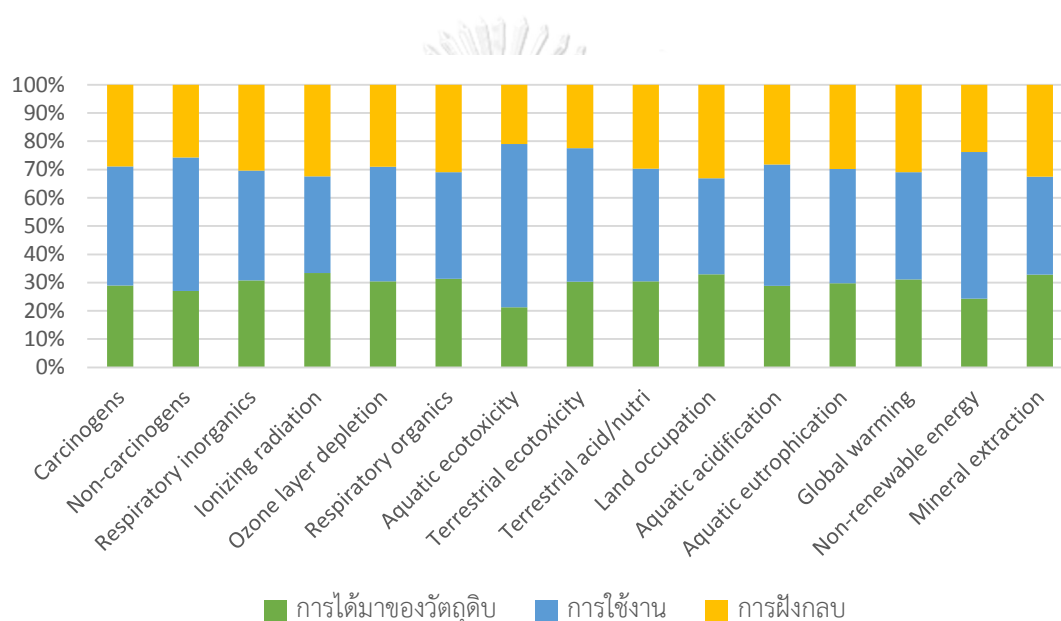
รูปที่ 4-66 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A โดยใช้พลาสติก Nylon ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



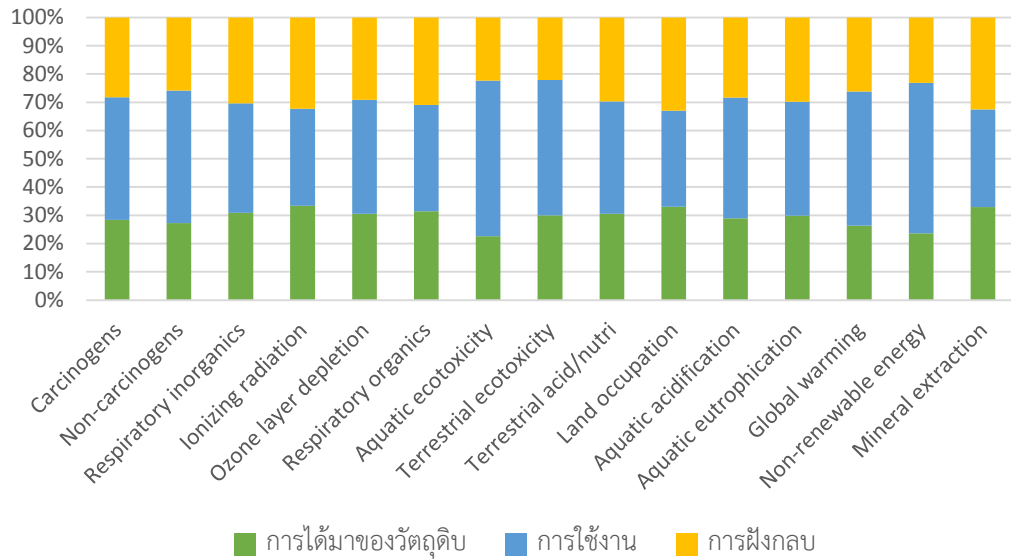
รูปที่ 4-67 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A โดยใช้พลาสติก Nylon ระยะเวลา 6 ชั่วโมง

2) การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ PLA, ABS และ Nylon ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ ระยะเวลา 6 ชั่วโมง

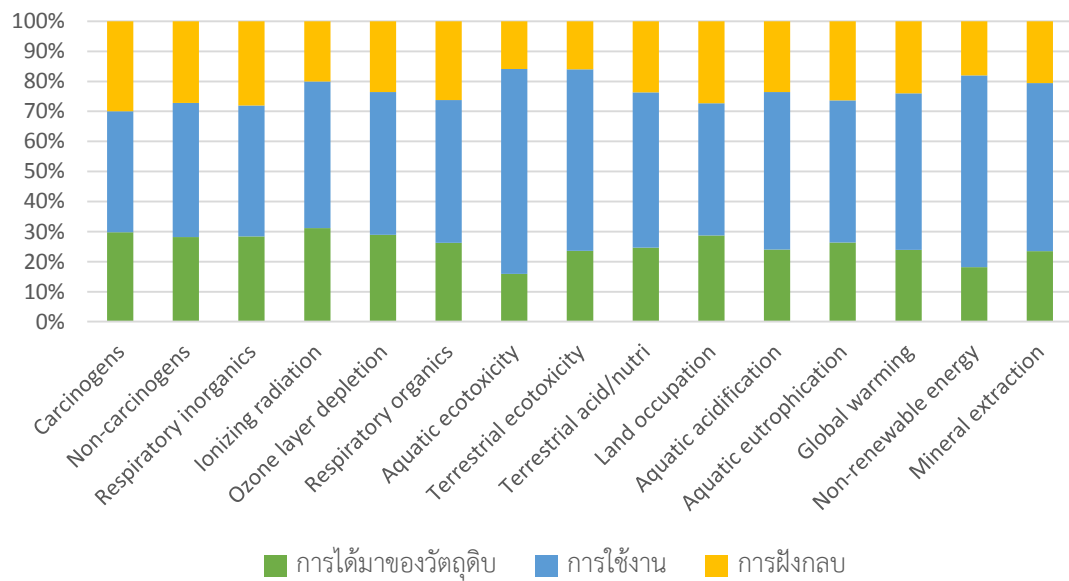
การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ PLA, ABS และ Nylon ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ดังแสดงผลในรูปที่ 4-68, 4-69, 4-70, 4-71, 4-72 และ 4-73 พบว่าผลกระทบสูงสุดเกิดจากกระบวนการใช้งานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ มีผลกระทบสูงสุดรองลงมา คือ ด้านพลังงานที่ไม่หมุนเวียน และ ความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก ซึ่งกระบวนการใช้งานมีค่าสูงสุดในทุกด้านผลกระทบ



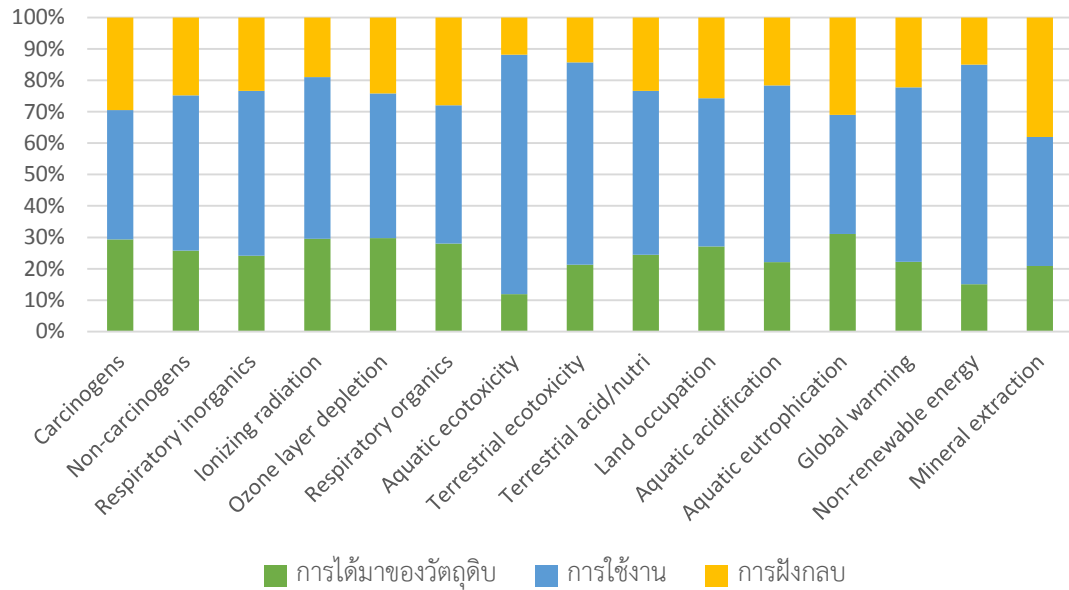
รูปที่ 4-68 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ PLA ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



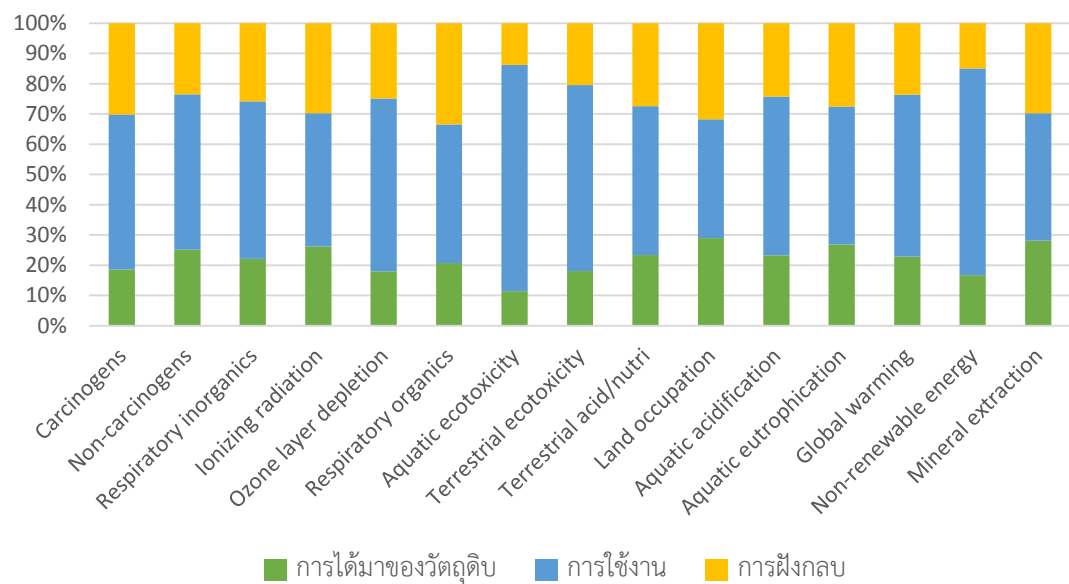
รูปที่ 4-69 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ PLA ระยะเวลา 6 ชั่วโมง



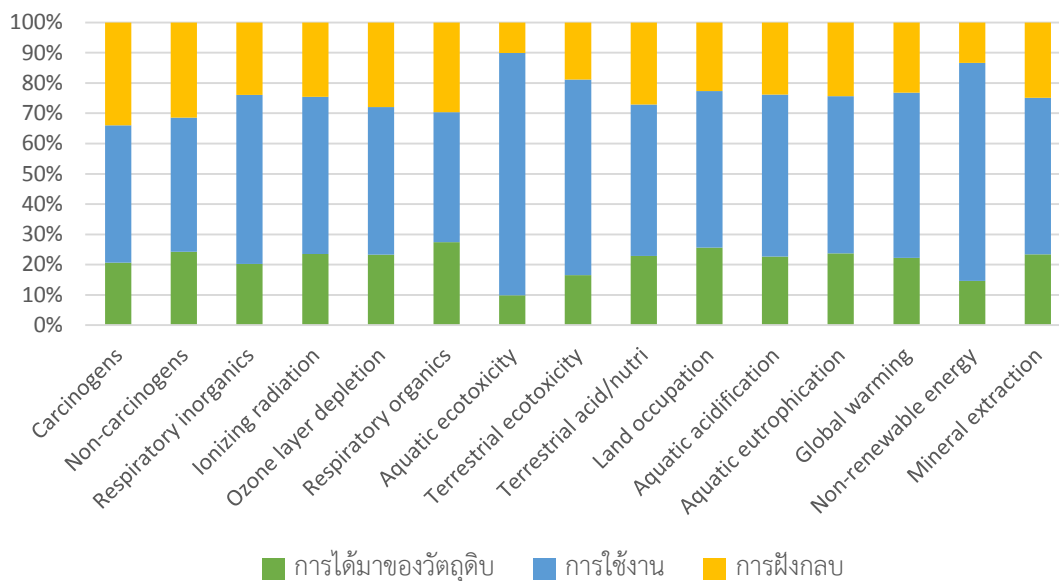
รูปที่ 4-70 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ ABS ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4-71 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ ABS ระยะเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4-72 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยี เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ Nylon ระยะเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4-73 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ Nylon ระยะเวลา 6 ชั่วโมง

4.3.2 ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นปลาย (Endpoint categories)

ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นปลายเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากผลกระทบชั้นกลาง ซึ่งแสดงในด้านความเสียหาย เช่น ความเสียหายต่อสุขอนามัย ความเสียหายต่อระบบนิเวศ ความเสียหายต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ความเสียหายต่อทรัพยากร เป็นต้น จากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ด้วยวัสดุ PLA, ABS และ Nylon สามารถนำมาคำนวณเป็นผลกระทบสิ่งแวดล้อมขั้นปลาย (Endpoint categories) โดยใช้ ค่าแฟคเตอร์ (Damage factor) ที่อ้างอิงตามวิธีการ IMPACT 2002+ version 2.13 และการวิเคราะห์ความเสียหาย (Damage assessment) 4 กลุ่มผลกระทบ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.6 ผลการจัดกลุ่มความเสียหาย (Damage categories) ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A วัสดุ PLA และ Nylon

กลุ่มผลกระทบ	หน่วย	ผลกระทบรวมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ					
		PLA 3hr	PLA 6hr	ABS 3hr	ABS 6hr	Nylon 3hr	Nylon 6hr
Human human	DALY	4.86E-07	9.70E-07	-	-	5.45E-07	1.13E-06
Ecosystem quality	PDF*m ² *yr	1.56E-01	3.12E-01	-	-	4.78E-02	8.11E-02
Climate change	kg CO ₂ eq	4.04E-01	8.07E-01	-	-	1.09	2.18E
Resources	MJ primary	5.72E	1.14E+01	-	-	1.83E+01	3.56E+01

หมายเหตุ: ไม่ได้ทำการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมการใช้วัสดุ ABS ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A เนื่องจากการขึ้นรูปชิ้นงานไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 4.7 ผลการจัดกลุ่มความเสียหาย (Damage categories) ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ PLA, ABS และ Nylon

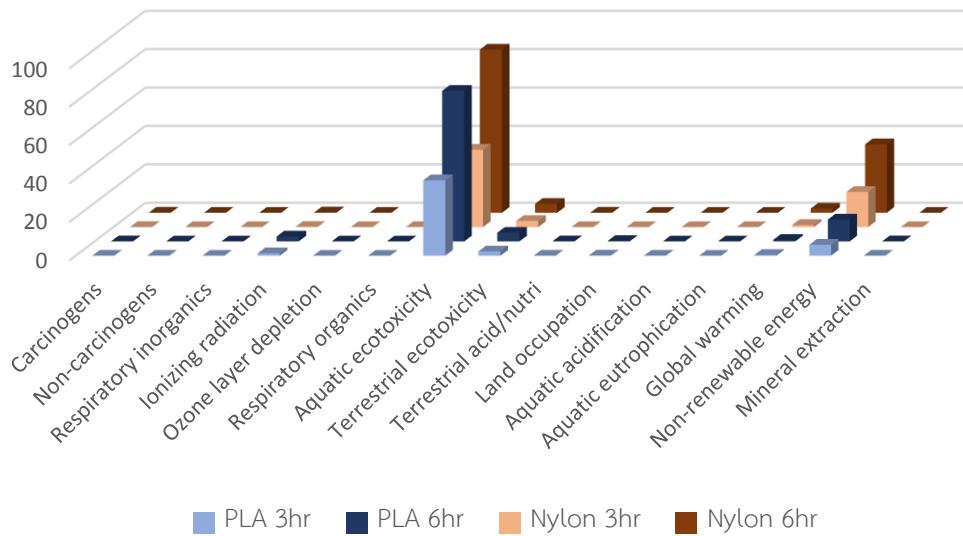
กลุ่มผลกระทบ	หน่วย	ผลกระทบรวมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ					
		PLA 3hr	PLA 6hr	ABS 3hr	ABS 6hr	Nylon 3hr	Nylon 6hr
Human human	DALY	4.95E-07	9.92E-07	8.80E-07	1.60E-06	5.99E-07	1.17E-06
Ecosystem quality	PDF*m ² *yr	1.60E-01	3.21E-01	4.86E-02	9.32E-02	5.00E-02	9.72E-02
Climate change	kg CO ₂ eq	4.07E-01	8.15E-01	8.38E-01	1.56	1.14	2.23
Resources	MJ primary	5.76	1.15E+01	1.67E+01	3.06E+01	1.86E+01	3.63E+01

จากตารางการจัดกลุ่มความเสียหายของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B พบว่าพลาสติกทั้ง 3 ชนิด ส่งผลค่าทรัพยากรที่ลดลง (Resources) มากที่สุด รองลงมา คือ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate change) ความเสียหายต่อคุณภาพระบบนิเวศ (Ecosystem quality) และสุขภาพมนุษย์ (Human health) ตามลำดับ

4.3.3 การคัดเลือกปริมาณผลกระทบที่โดดเด่นจากผลกระทบสิ่งแวดล้อม 15 ด้าน ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B

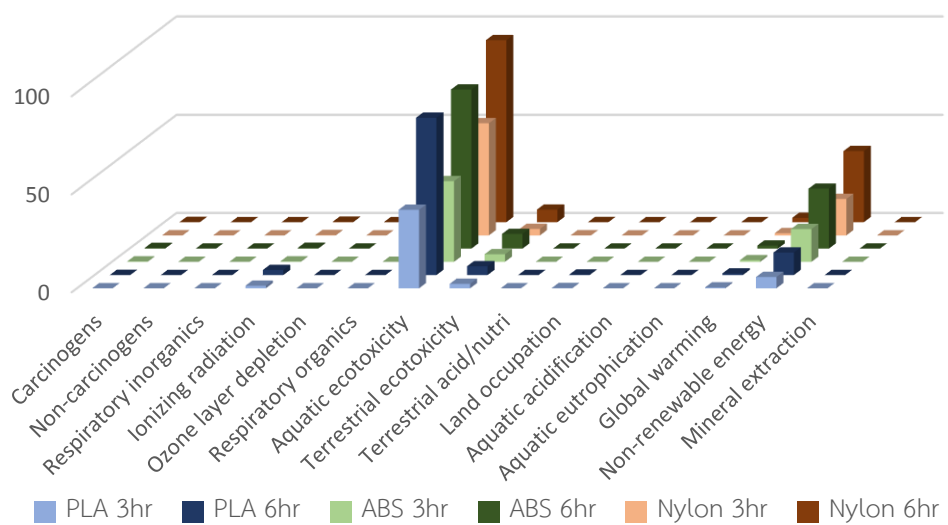
ผลกระทบสิ่งแวดล้อม 15 ด้าน ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ด้วยวัสดุ PLA, ABS และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4-74 และ 4-75

ค่าผลกระทบ



รูปที่ 4-74 ผลกระทบสิ่งแวดล้อม 15 ด้าน ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A ด้วยวัสดุ PLA และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง

ค่าผลกระทบ



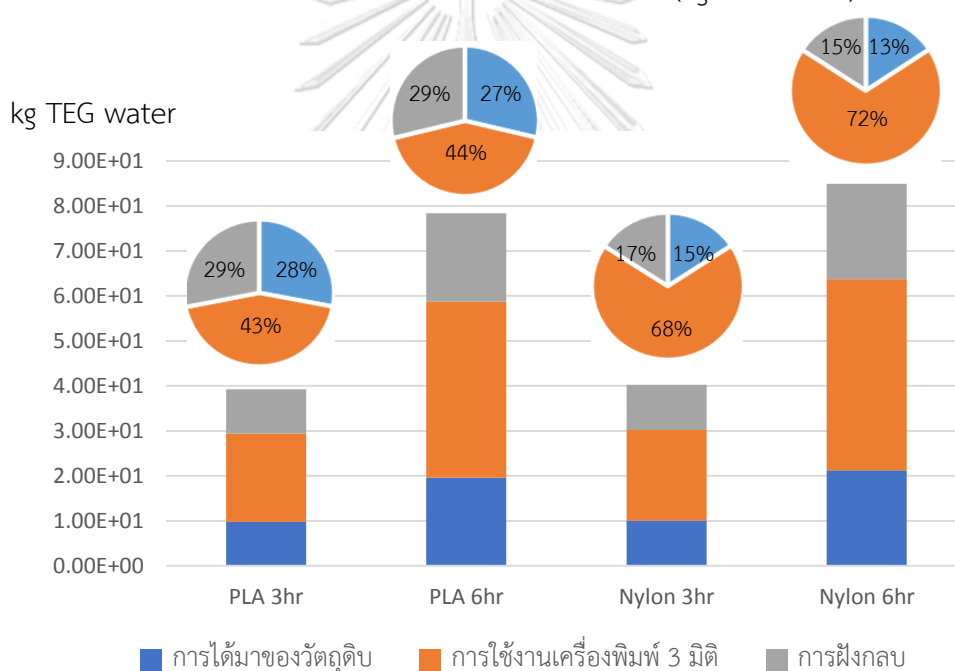
รูปที่ 4-75 ผลกระทบสิ่งแวดล้อม 15 ด้าน ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B ด้วยวัสดุ PLA, ABS และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง

จากรูปข้างต้นแสดงผลกระทบสิ่งแวดล้อมทั้ง 15 ด้าน ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และ รุ่น B ด้วยวัสดุ PLA, ABS และ Nylon พบว่าผลกระทบ 3 ด้าน ที่มีปริมาณค่าผลกระทบโดดเด่น คือ ผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ ผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป และ ผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก ตามลำดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกศึกษาผลกระทบ ทั้ง 3 ด้านนี้

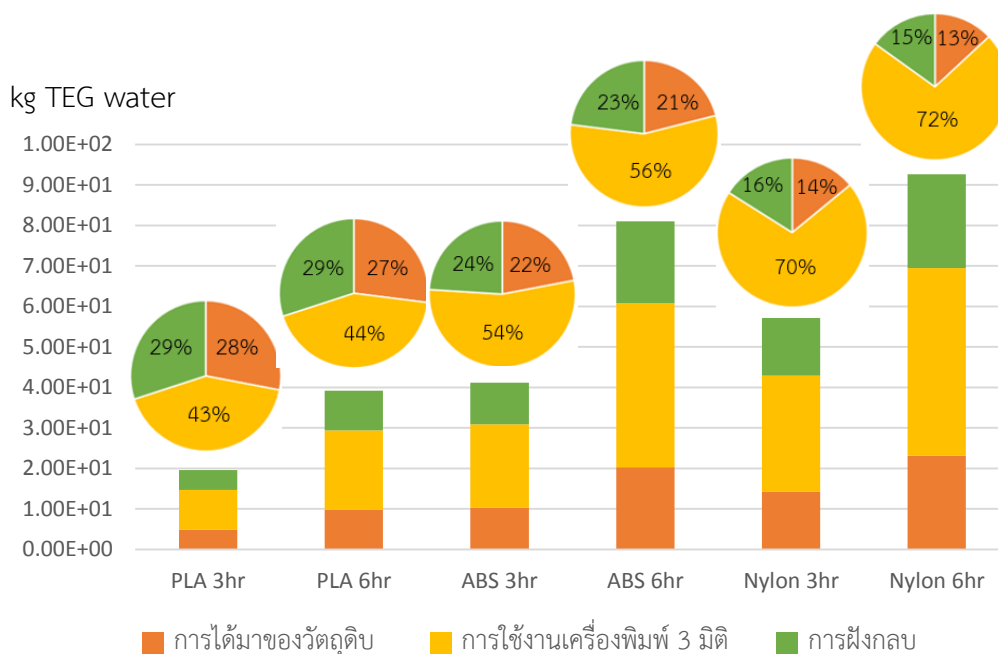
4.3.4 ผลกระทบสิ่งแวดล้อมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ทั้ง 3 ด้าน

(1) ผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ (Aquatic ecotoxicity)

การประเมินผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ (Aquatic ecotoxicity) แสดงดังรูปที่ 4-76 และ 4-77 โดยแยกตามกระบวนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัด ซากชิ้นงาน แสดงผลในหน่วยกิโลกรัมไตรเอทิลีนไกลคอลในน้ำ (kg TEG water)



รูปที่ 4-76 แสดงสัดส่วนและผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ ของพลาสติก PLA และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A



รูปที่ 4-77 แสดงสัดส่วนและผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ ของพลาสติก PLA, ABS และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B

จากแผนภาพข้างต้น พิจารณาผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ดังนี้ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A ในขั้นตอนการใช้งานวัสดุ Nylon มีผลกระทบสูงสุด ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $4.02E+01$ kg TEG water/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ $8.50E+01$ kg TEG water/ 1 ชิ้นงาน รองลงมาคือ วัสดุ PLA ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $3.92E+01$ kg TEG water/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ $7.84E+01$ kg TEG water/ 1 ชิ้นงาน และสัดส่วนผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ ในขั้นตอนการใช้งาน ด้วยวัสดุ Nylon มากที่สุด รองลงมา คือ PLA ซึ่งวัสดุ Nylon ส่งผลกระทบสูงสุดที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ในขั้นตอนการใช้งานร้อยละ 68 การฝังกลบร้อยละ 17 และการได้มาของวัตถุดิบร้อยละ 15 ในระยะเวลา 6 ชั่วโมง ในขั้นตอนการใช้งานร้อยละ 72 การฝังกลบร้อยละ 15 และการได้มาของวัตถุดิบร้อยละ 13

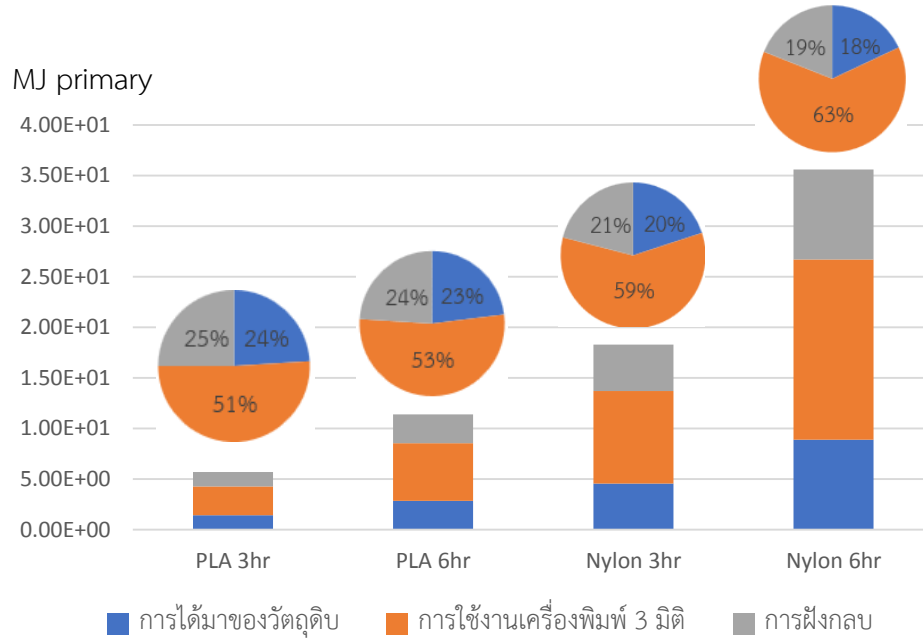
เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B ในขั้นตอนการใช้งานวัสดุ Nylon มีผลกระทบสูงสุด ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $5.72E+01$ kg TEG water/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ

9.27E+01 kg TEG water/ 1 ชิ้นงาน รองลงมาคือ วัสดุ ABS ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ 4.12E+01 kg TEG water/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ 8.11E+01 kg TEG water/ 1 ชิ้นงาน และ PLA ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ 4.00E+01 kg TEG water/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ 8.02E+01 kg TEG water/ 1 ชิ้นงาน ตามลำดับ และสัดส่วนผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ ในขั้นตอนการใช้งาน ด้วยวัสดุ Nylon มากที่สุด รองลงมา คือ ABS และ PLA ตามลำดับ ซึ่งวัสดุ Nylon ส่งผลกระทบสูงสุดที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ในขั้นตอนการใช้งานร้อยละ 70 การฝังกลบร้อยละ 16 และการได้มาของวัตถุดิบร้อยละ 14 ในระยะเวลา 6 ชั่วโมง ในขั้นตอนการใช้งานร้อยละ 72 การฝังกลบร้อยละ 15 และการได้มาของวัตถุดิบร้อยละ 13

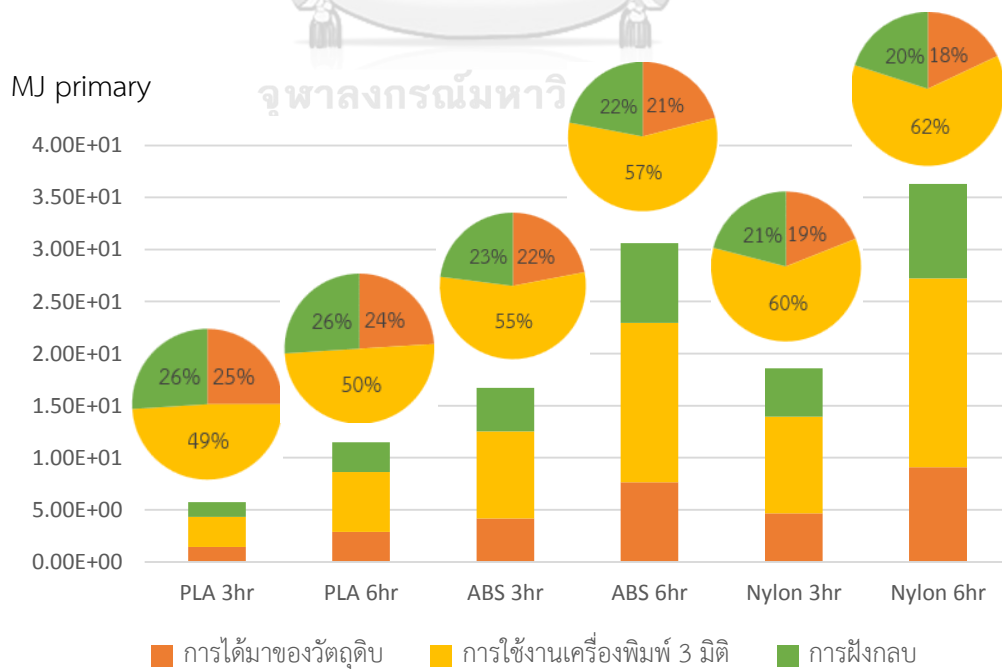
จากการประเมินผลกระทบข้างต้นพบว่า Nylon เป็นวัสดุหลัก ที่ส่งผลกระทบสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ โดย Nylon จะปลดปล่อยสาร VOCs ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ได้แก่ สารเอทิลเบนซีน และสารเมตา-ไซลีน เป็นหลัก ซึ่งส่งผลกระทบในด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ และผลกระทบในด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก โดยสาร VOCs เหล่านี้ จะแผ่กระจายอยู่ในอากาศ ดิน และแหล่งน้ำ และสามารถส่งต่อไปยังระบบนิเวศได้ โดยเฉพาะสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ที่พบในระบบนิเวศทางน้ำ และระบบนิเวศทางบก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้เมื่อพบสาร VOCs ในปริมาณมาก แต่จากการทดลองนี้พบสาร VOCs ในปริมาณน้อยมาก

(2) ผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป (Non-renewable energy)

ผลการประเมินผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป แสดงดังรูปที่ 4-78 และ 4-79 โดยแยกตามกระบวนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงาน แสดงผลในหน่วยพลังงานในรูปเมกะจูล (Megajoule; MJ)



รูปที่ 4-78 แสดงสัดส่วนและผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ของพลาสติก PLA และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A



รูปที่ 4-79 แสดงสัดส่วนและผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ของพลาสติก PLA, ABS และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง รุ่น B

จากแผนภาพข้างต้น พิจารณาผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ดังนี้ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A ในขั้นตอนการใช้งานวัสดุ Nylon มีผลกระทบสูงสุด ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $1.83E+01$ MJ primary/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ $3.56E+01$ MJ primary/ 1 ชิ้นงาน รองลงมาคือ วัสดุ PLA ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $5.71E+00$ MJ primary /1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ $1.14E+01$ MJ primary/ 1 ชิ้นงาน ตามลำดับ และสัดส่วนผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ในขั้นตอนการใช้งาน ด้วยวัสดุ Nylon มากที่สุด รองลงมา คือ PLA ซึ่งวัสดุ Nylon ส่งผลกระทบสูงสุดที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ร้อยละ 59 รองลงมา คือ การฝังกลบ ร้อยละ 21 และการได้มาของวัตถุดิบ ร้อยละ 20 ตามลำดับ ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระยะเวลา 6 ชั่วโมง ร้อยละ 63 รองลงมา คือ การฝังกลบ ร้อยละ 19 และการได้มาของวัตถุดิบ ร้อยละ 18 ตามลำดับ ในขณะที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

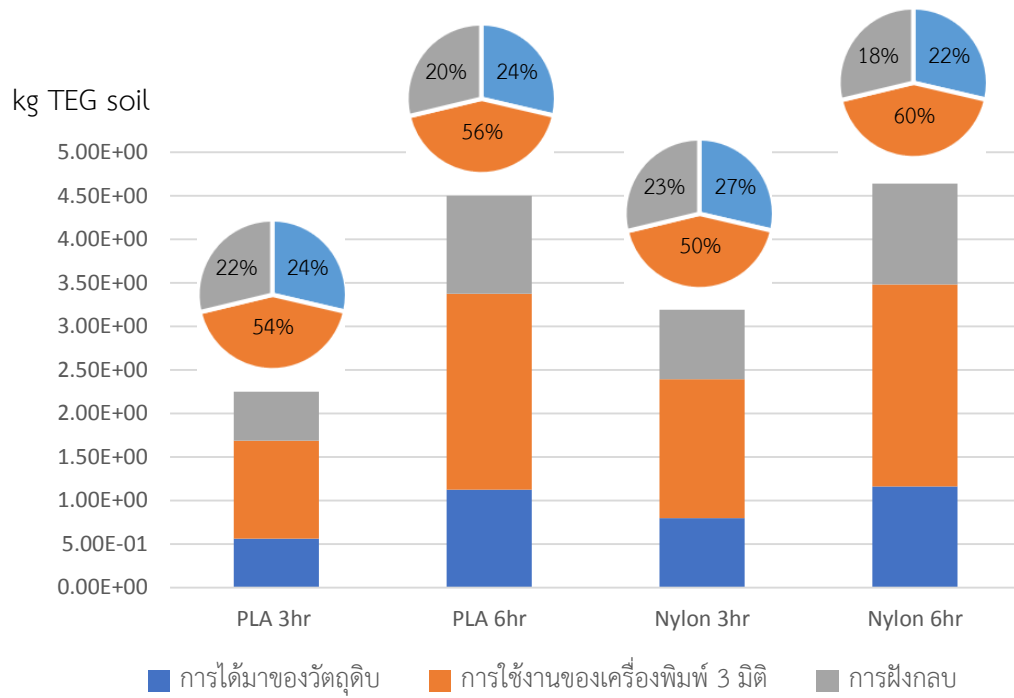
เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B ในขั้นตอนการใช้งานวัสดุ Nylon มีผลกระทบสูงสุด ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $1.86E+01$ MJ primary/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ $3.63E+01$ MJ primary/ 1 ชิ้นงาน รองลงมาคือ วัสดุ ABS ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $1.67E+01$ MJ primary/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ $3.06E+01$ MJ primary/ 1 ชิ้นงาน และ PLA ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $5.75E+00$ MJ primary/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ $1.15E+01$ MJ primary/1 ชิ้นงาน ตามลำดับ และ สัดส่วนผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ในขั้นตอนการใช้งาน ด้วยวัสดุ Nylon มากที่สุด รองลงมา คือ ABS และ PLA ซึ่งวัสดุ Nylon ส่งผลกระทบสูงสุดที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ร้อยละ 60 รองลงมา คือ การฝังกลบ ร้อยละ 21 และการได้มาของวัตถุดิบ ร้อยละ 19 ตามลำดับ ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระยะเวลา 6 ชั่วโมง ร้อยละ 62 รองลงมา คือ การฝังกลบ ร้อยละ 20 และการได้มาของวัตถุดิบ ร้อยละ 18 ตามลำดับ

พลังงานที่ใช้แล้วหมดไป คือ แหล่งพลังงานจากใต้พื้นดิน เมื่อใช้หมดแล้วจะไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่ในเวลารวดเร็ว ต้องใช้เวลาหลายร้อยล้านปีที่จะสร้างขึ้นได้อีก และมีปริมาณจำกัด ได้แก่ ฟอสซิล ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ จากการประเมินผลกระทบข้างต้นพบว่า Nylon เป็นวัสดุหลัก ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาลึกลงไป วัสดุ Nylon จะใช้พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B สูงกว่าวัสดุอื่น ๆ ส่งผลให้ค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปสูงขึ้น สาเหตุมาจากในขั้นตอนการผลิตพลังงาน

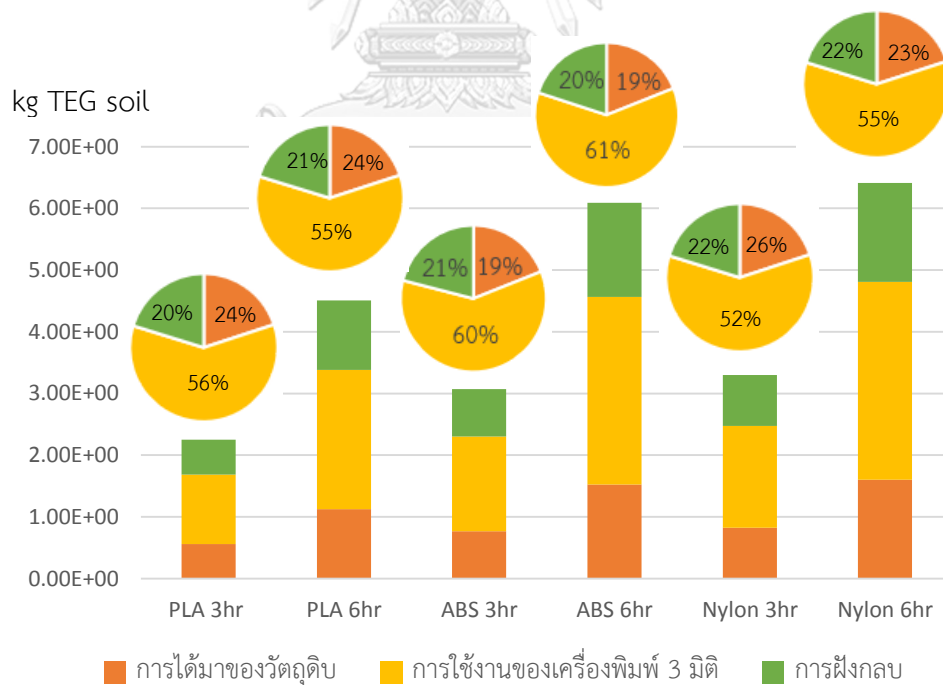
ไฟฟ้านั้น เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล (nonrenewable fossil fuel) และพืชพลังงาน (power plants) โดยใช้ก๊าซธรรมชาติ (natural gas) ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งก๊าซธรรมชาติได้มาจากการสกัดจากแผ่นหิน (shale) ด้วยเทคโนโลยี hydraulic fracturing ก่อให้เกิดการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ ได้แก่ เอทิลเบนซีน ไซลีน และอะซิโตน ซึ่งเป็นสาร VOCs เป็นสาเหตุที่ทำให้ผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิง และพืชพลังงาน จะเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide) และไนโตรสออกไซด์ (nitrous oxide) ในปริมาณมากในชั้นบรรยากาศอีกด้วย ซึ่งการผลิตไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกาปี 2009 มีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 2,160 ล้านเมตริกตัน (Matthews, 2019) และงานวิจัยของ Faludi (2015) กล่าวว่าการใช้ไฟฟ้ามีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมในกระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และการใช้ไฟฟ้าที่แตกต่างกันด้วย นอกจากนี้การคำนวณความแตกต่างผลกระทบสิ่งแวดล้อมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และ รุ่น B ยกตัวอย่าง วัสดุ PLA รุ่น A ส่งผลกระทบ 5.71 MJ primary/ 1 ชิ้นงาน และรุ่น B ส่งผลกระทบ 5.75 MJ primary/ 1 ชิ้นงาน วิธีการคำนวณ $\frac{5.75-5.71}{5.71} \times 100 = 0.70\%$ จะเห็นได้ว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B ค่าผลกระทบเพิ่มขึ้น 0.70% ดังนั้นผลกระทบสิ่งแวดล้อมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 2 รุ่น ไม่ต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

(3) ผลกระทบความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก (Terrestrial ecotoxicity)

ผลการประเมินผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก แสดงดังรูปที่ 4-80 และ 4-81 โดยแยกตามกระบวนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงาน โดยแสดงผลในหน่วยกิโลกรัมไตรเอทิลีนไกลคอลในดิน (kg TEG soil)



รูปที่ 4-80 แสดงสัดส่วนและผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก ของพลาสติก PLA และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง รุ่น A



รูปที่ 4-81 แสดงสัดส่วนและผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก ของพลาสติก PLA, ABS และ Nylon ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง รุ่น B

จากแผนภาพข้างต้น พิจารณาผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ดังนี้

เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A ในขั้นตอนการใช้งานวัสดุ Nylon มีผลกระทบสูงสุด ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $3.19E+00$ kg TEG soil/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ $4.64E+00$ kg TEG soil/ 1 ชิ้นงาน รองลงมาคือ วัสดุ PLA ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $2.25E+00$ kg TEG soil/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ $4.50E+00$ kg TEG soil/ 1 ชิ้นงาน ตามลำดับ และสัดส่วนผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก ในขั้นตอนการใช้งาน ด้วยวัสดุ Nylon มากที่สุด รองลงมา คือ PLA ซึ่งวัสดุ Nylon ส่งผลกระทบสูงสุด ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ขั้นตอนการใช้งานร้อยละ 50 การฝังกลบร้อยละ 27 และการได้มาของวัตถุดิบ ร้อยละ 23 ในระยะเวลา 6 ชั่วโมง ขั้นตอนการใช้งานร้อยละ 60 การฝังกลบร้อยละ 22 และการได้มาของวัตถุดิบ ร้อยละ 18

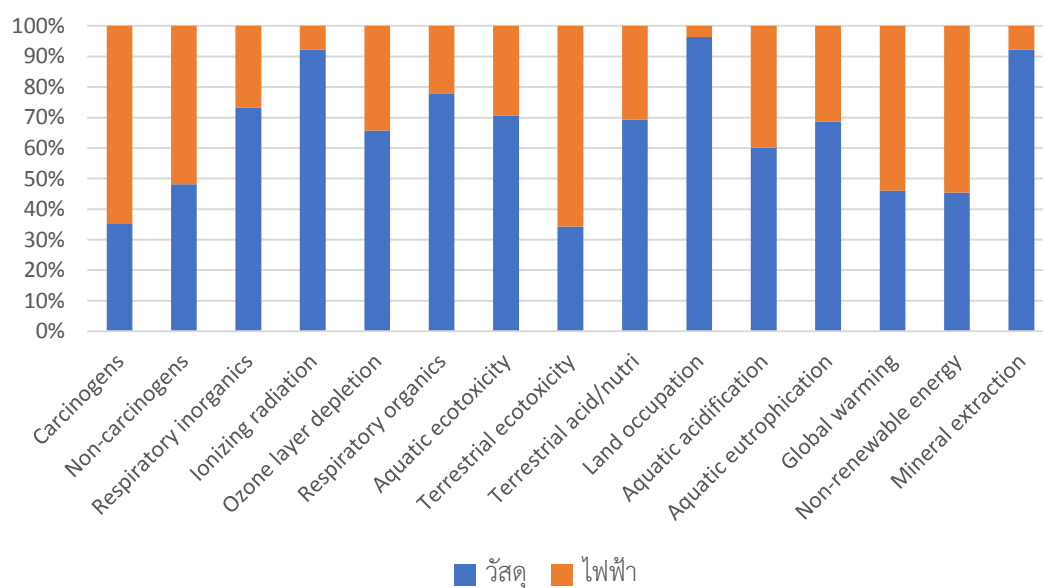
เครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B ในขั้นตอนการใช้งานวัสดุ Nylon มีผลกระทบสูงสุด ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $3.30E+00$ kg TEG soil/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ $6.41E+00$ kg TEG soil/ 1 ชิ้นงาน รองลงมาคือ วัสดุ ABS ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $3.07E+00$ kg TEG soil/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ $6.09E+00$ kg TEG soil/ 1 ชิ้นงาน และ PLA ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีผลกระทบ $2.25E+00$ kg TEG soil/ 1 ชิ้นงาน และระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีผลกระทบ $4.51E+00$ kg TEG soil/ 1 ชิ้นงาน ตามลำดับ และสัดส่วนผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบกในขั้นตอนการใช้งาน ด้วยวัสดุ Nylon มากที่สุด รองลงมา คือ ABS และ PLA ตามลำดับ ซึ่งวัสดุ Nylon ส่งผลกระทบสูงสุดในที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ขั้นตอนการใช้งานร้อยละ 52 การฝังกลบ ร้อยละ 26 และการได้มาของวัตถุดิบ ร้อยละ 22 ในระยะเวลา 6 ชั่วโมง ขั้นตอนการใช้งานร้อยละ 55 การฝังกลบร้อยละ 23 และการได้มาของวัตถุดิบ ร้อยละ 22

ดังที่กล่าวข้างต้นว่า Nylon จะปลดปล่อยสาร VOCs ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ได้แก่ สารเอทิลเบนซีน และสารเมตา-ไซลีน เป็นหลัก ซึ่งส่งผลกระทบในด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ และผลกระทบในด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก จากการทดลองพบสาร VOCs ในปริมาณน้อยมาก หากพบในปริมาณมากจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Payet (2004) ได้กล่าวว่า ในการประเมินวัฏจักรชีวิตของสารเคมีจากเกษตรกรรมพบว่า สาร VOCs ที่อยู่ในยาฆ่าแมลง หากมีความเข้มข้นสูง พิษและสิ่งมีชีวิตจะดูดซับสารพิษได้มาก ทำให้ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ และมีหลายชนิดที่สูญพันธุ์

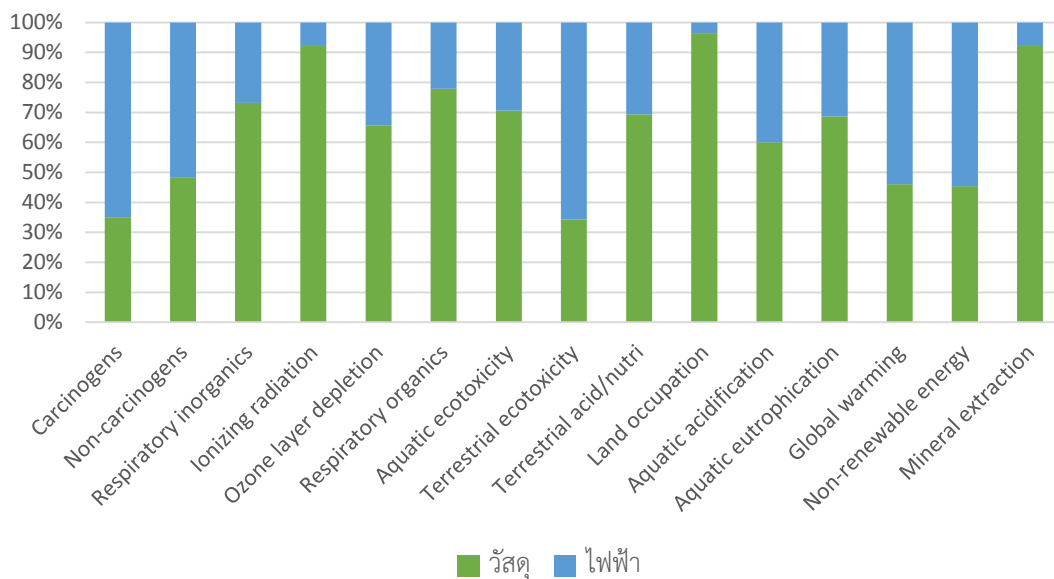
4.3.5 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

1) การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ด้วยวัสดุ PLA

กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A วัสดุ PLA ดังรูป 4-82 และกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ PLA ดังรูป 4-83



รูปที่ 4-82 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A วัสดุ PLA

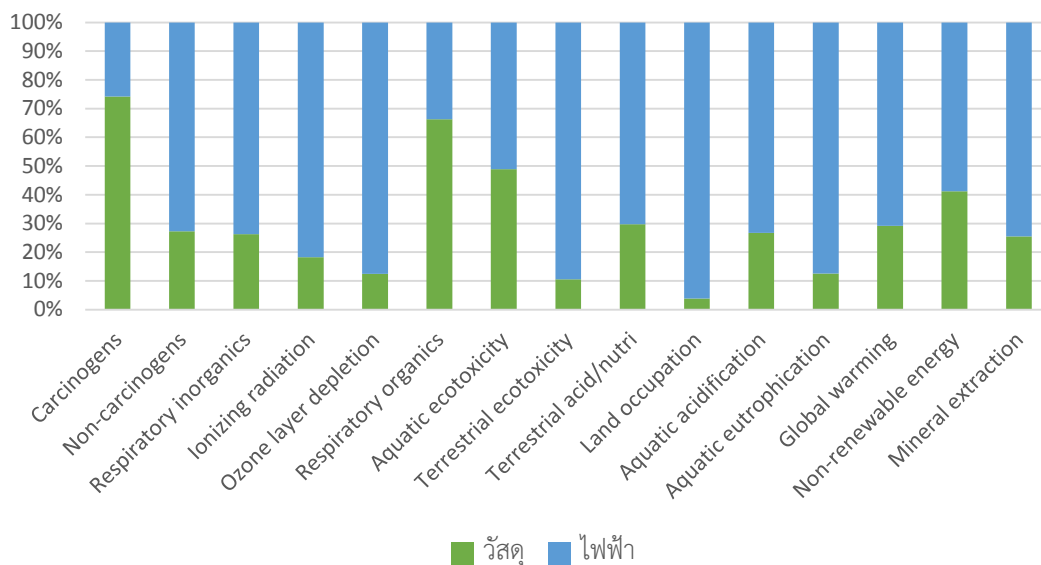


รูปที่ 4-83 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ PLA

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B วัสดุ PLA พบว่าวัสดุส่งผลกระทบสิ่งแวดล้อมสูงกว่าไฟฟ้า เกือบทุกด้านผลกระทบ เนื่องจากมลพิษทางอากาศจากวัสดุ PLA ส่งผลกระทบสูงกว่าไฟฟ้า ยกเว้นด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป (Non-renewable energy) ซึ่งไฟฟ้าส่งผลกระทบสูงกว่าวัสดุ แต่ไม่ได้มีค่าแตกต่างกันมากนัก

2) การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ด้วยวัสดุ ABS

กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ ABS ดังรูป 4-84

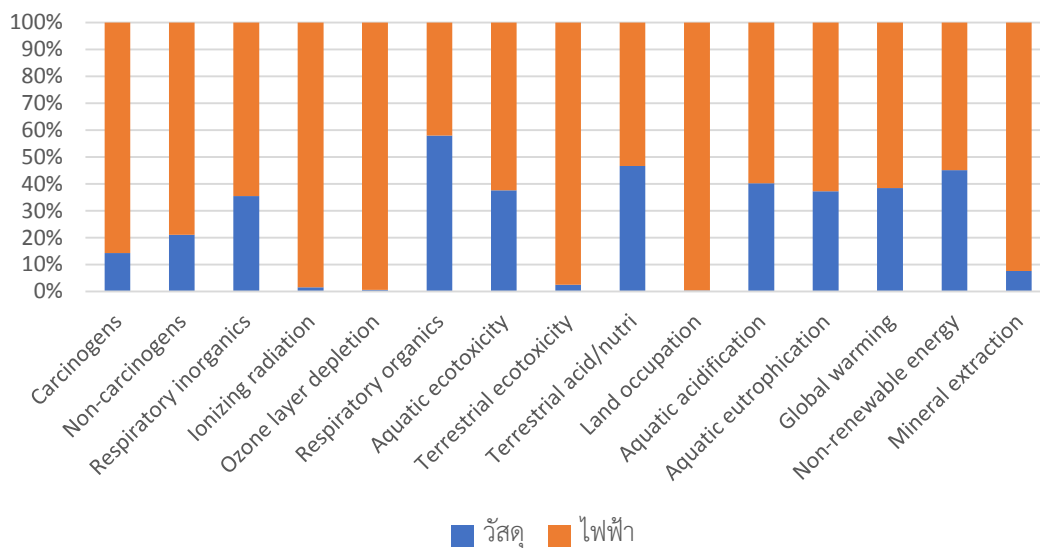


รูปที่ 4-84 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ ABS

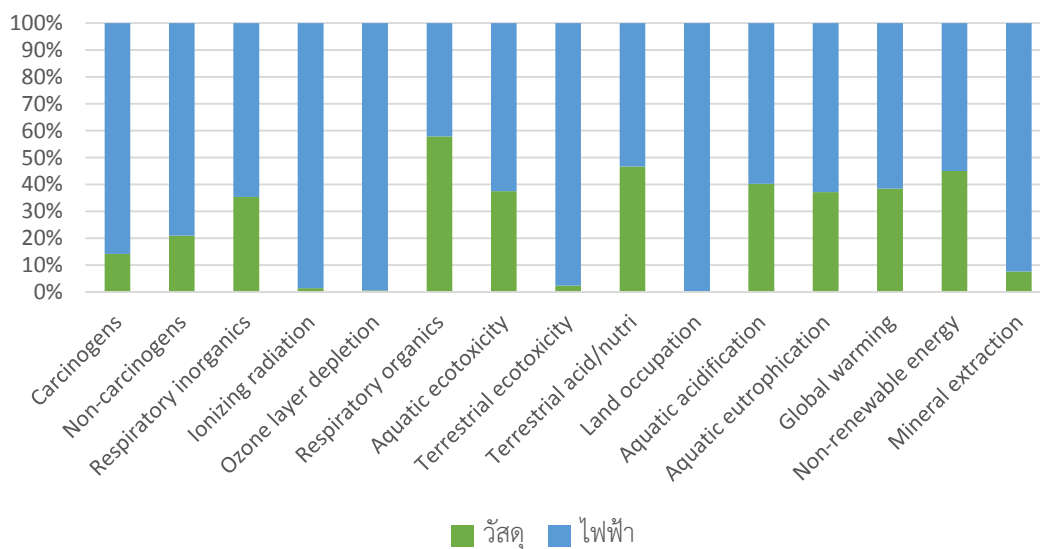
จากกราฟแสดงให้เห็นว่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B วัสดุ ABS พบว่าไฟฟ้าส่งผลกระทบสิ่งแวดล้อมสูงกว่าวัสดุ ในทุกด้านผลกระทบ เนื่องจากในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีการใช้ไฟฟ้าสูง ที่บริเวณหัวฉีด และฐานรองของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Faludi et al. (2018) กล่าวว่าในขั้นตอนการใช้งานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM ด้วยวัสดุ ABS พบว่าการใช้ไฟฟ้าส่งผลกระทบสิ่งแวดล้อมมากกว่าวัสดุดิบ ในผลกระทบทางด้านระบบนิเวศ

3) การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ด้วยวัสดุ Nylon

กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A วัสดุ Nylon ดังรูปที่ 4-85 และกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ Nylon ดังรูปที่ 4-86



รูปที่ 4-85 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A วัสดุ Nylon



รูปที่ 4-86 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B วัสดุ Nylon

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B วัสดุ Nylon พบว่าไฟฟ้าส่งผลกระทบสิ่งแวดล้อมสูงกว่าวัสดุ ในทุกด้านผลกระทบ เนื่องจากในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีการใช้ไฟฟ้าสูง ที่บริเวณหัวฉีด และฐานรองของเครื่องพิมพ์

4.3.6 การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B

ผลการประเมินการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B แสดงดังตารางที่ ตารางที่ 4.8 บัญชีรายการมวลสารของขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ต่อหน่วยการทำงาน 1 ชิ้นงาน ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ด้วยพลาสติก PLA, ABS และ Nylon และตารางที่ 4.9 แสดงค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อม 15 ด้าน ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน ระยะเวลาต่างกัน



ตารางที่ 4.8 บัญชีรายการมวลสารของขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ต่อหน่วยการทำงาน 1 ชิ้นงาน ระยะเวลา 3 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง ด้วยพลาสติก PLA, ABS และ Nylon

	หน่วย	ปริมาณ													
		รุ่น A			รุ่น B			รุ่น A			รุ่น B				
		PLA 3hr	PLA 6hr	PLA 3hr	PLA 6hr	PLA 3hr	PLA 6hr	ABS 3hr	ABS 6hr	ABS 3hr	ABS 6hr	Nylon 3hr	Nylon 6hr	Nylon 3hr	Nylon 6hr
มวลสารขาเข้า															
พลาสติก	g	32.66	65.33	33.63	67.51	-	-	-	-	38.17	66.97	32.08	66.38	33.82	68.02
ไฟฟ้า	Wh	180	360	171	342	-	-	-	-	600	1,200	594	1,188	600	1,200
มวลสารขาออก															
PM _{2.5}	mg	2.15E-4	4.70E-4	0.56E-4	3.60E-4	-	-	-	-	-	-	-	1.80E-4	-	1.80E-4
PM ₁₀	mg	-	8.30E-4	-	8.28E-4	-	-	-	-	-	-	3.72E-3	9.00E-3	2.72E-3	9.00E-3
VOCs															
Acetone	mg	-	3.42E-4	0.54E-3	1.11E-3	-	-	-	-	0.86E-3	1.03E-3	-	5.44E-4	-	6.85E-3
Dichloromethane	mg	-	1.25E-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethanol	mg	2.35E-4	1.12E-3	0.88E-3	5.79E-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m-xylene	mg	-	3.13E-4	-	-	-	-	-	-	2.35E-4	5.38E-4	0.92E-3	1.82E-3	3.58E-3	7.56E-2
O-xylene	mg	-	-	-	-	-	-	-	-	0.78E-4	3.13E-4	1.28E-4	2.56E-4	-	-
Hexane	mg	-	-	-	2.54E-4	-	-	-	-	-	5.08E-4	-	-	-	-
Isopropyl Alcohol	mg	-	-	1.04E-3	2.34E-3	-	-	-	-	1.45E-3	3.19E-3	-	-	1.08E-2	3.93E-2
Pentane	mg	-	-	0.53E-4	1.16E-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ethylbenzene	mg	-	-	-	-	-	-	-	-	0.89E-3	3.16E-3	1.39E-3	2.77E-3	2.10E-2	7.91E-2
เส้นใยพลาสติก	g	0.47	0.83	0.53	0.91	-	-	-	-	0.26	0.32	0.81	0.96	0.98	0.97

หมายเหตุ: ไม่ได้ทำการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมการใช้งานวัสดุ ABS ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A เนื่องจากการใช้งานไม่สมบูรณ์

จากตารางข้างต้นทำการเปรียบเทียบขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ด้วยวัสดุ Nylon พบว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B มีการปลดปล่อยสารเอทิลเบนซีน และเมตา-ไซลีน สูงกว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ด้วยวัสดุ PLA พบว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B มีการปลดปล่อยสารอะซิโตน (acetone) และเอทานอล (ethanol) สูงกว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A ในขณะที่ค่าฝุ่นและการใช้ไฟฟ้าของเครื่องพิมพ์ทั้ง 2 รุ่นแทบจะมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงลงไป การใช้วัสดุ PLA และ Nylon ในการขึ้นรูปชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 2 รุ่น พบว่ามีการปลดปล่อยสาร VOCs บางชนิดที่แตกต่างกัน เช่น ในการใช้วัสดุ Nylon ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B พบการปลดปล่อยสารไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol) แต่ไม่พบในการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A หรือเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A พบสารออโร-ไซลีน (o-xylene) แต่ไม่พบในการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B และในการใช้วัสดุ PLA ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B พบการปลดปล่อยสารเฮกเซน (hexane), สารไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และเพนเทน (pentane) แต่ไม่พบในการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A หรือเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A พบสารไดคลอโรมีเทน (dichloromethane) และเมตา-ไซลีน แต่ไม่พบในการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B เป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้สาเหตุมาจากวัสดุที่ใช้ของเครื่องพิมพ์ทั้ง 2 รุ่น ใยห่อและคุณสมบัติของเส้นใยพลาสติกที่แตกต่างกัน แม้ว่าจะใช้วัสดุชนิดเดียวกัน แต่วัสดุจะแบ่งออกเป็นหลายเกรดขึ้นอยู่กับการเลือกใช้งานของรุ่นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ค่าใช้จ่าย และวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งานว่าต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงระดับใด โดยใยห่อของเส้นใยพลาสติกที่แตกต่างกัน จะใช้อุณหภูมิที่หัวฉีดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ต่างกันด้วย ซึ่งอุณหภูมิในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ส่งผลให้สาร VOCs ที่ปลดปล่อยและผลกระทบสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน แม้ว่าจะใช้วัสดุเดียวกันก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Davis (2019) ที่กล่าวว่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยสาร VOCs ในกระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ขึ้นอยู่กับการใช้อุณหภูมิที่หัวฉีด วัสดุที่ใช้ ใยห่อของเส้นใยพลาสติก ใยห่อของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และสีของเส้นใยพลาสติกที่ใช้ด้วย นอกจากนี้ระยะเวลาการพิมพ์ชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมง จะปลดปล่อยสาร VOCs สูงกว่าที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง

ตาราง 4.9 แสดงค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อม 15 ด้าน ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ด้วยวัสดุที่แตกต่างกัน ระยะเวลาต่างกัน

กลุ่มผลกระทบ	หน่วย	ผลกระทบรวม 3 ขั้นตอนของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ													
		รุ่น A			รุ่น B			รุ่น A			รุ่น B				
		PLA 3 hr	PLA 6 hr	PLA 3 hr	PLA 6 hr	PLA 3 hr	PLA 6 hr	ABS 3 hr	ABS 6 hr	ABS 3 hr	ABS 6 hr	Nylon 3hr	Nylon 6hr	Nylon 3hr	Nylon 6hr
Carcinogens	kg C ₂ H ₅ Cl eq	1.60E-02	3.19E-02	1.60E-02	3.20E-02	-	-	1.94E-01	3.45E-01	3.58E-02	8.07E-02	4.26E-02	8.27E-02	4.26E-02	8.27E-02
Non-carcinogens	kg C ₂ H ₅ Cl eq	2.89E-03	5.78E-03	2.92E-03	5.85E-03	-	-	5.37E-03	1.00E-02	4.57E-03	8.56E-03	4.70E-03	9.15E-03	4.70E-03	9.15E-03
Respiratory inorganics	kg PM _{2.5} eq	6.17E-04	1.23E-03	6.31E-04	1.26E-03	-	-	4.59E-04	8.58E-04	6.16E-04	1.26E-03	6.66E-04	1.30E-03	6.66E-04	1.30E-03
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	1.27E+00	2.53E+00	1.30E+00	2.61E+00	-	-	1.99E-01	3.77E-01	1.27E-01	2.07E-01	1.31E-01	2.54E-01	1.31E-01	2.54E-01
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2.45E-08	4.90E-08	2.50E-08	5.01E-08	-	-	1.73E-08	3.32E-08	1.26E-08	2.04E-08	1.29E-08	2.50E-08	1.29E-08	2.50E-08
Respiratory organics	kg C ₂ H ₅ eq	2.30E-04	4.60E-04	2.36E-04	4.72E-04	-	-	4.54E-04	8.12E-04	3.96E-04	9.09E-04	4.76E-04	9.26E-04	4.76E-04	9.26E-04
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	3.92E+01	7.84E+01	4.00E+01	8.02E+01	-	-	4.12E+01	8.11E+01	4.02E+01	8.50E+01	5.72E+01	9.27E+01	5.72E+01	9.27E+01
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	2.25E+00	4.50E+00	2.25E+00	4.51E+00	-	-	3.07E+00	6.09E+00	3.19E+00	4.64E+00	3.30E+00	6.41E+00	3.30E+00	6.41E+00
Terrestrial acidification/nutrication	kg SO ₂ eq	8.99E-03	1.80E-02	9.18E-03	1.84E-02	-	-	8.68E-03	1.61E-02	1.46E-02	3.03E-02	1.59E-02	3.10E-02	1.59E-02	3.10E-02
Land occupation	m ²	1.17E-01	2.33E-01	1.20E-01	2.40E-01	-	-	5.40E-03	1.06E-02	4.97E-03	8.81E-03	5.06E-03	9.82E-03	5.06E-03	9.82E-03
Aquatic acidification	kg SO ₂ eq	2.33E-03	4.65E-03	2.37E-03	4.74E-03	-	-	2.93E-03	5.47E-03	4.29E-03	8.62E-03	4.52E-03	8.82E-03	4.52E-03	8.82E-03
Aquatic eutrophication	kg PO ₄ -P Jim	1.74E-04	3.47E-04	1.77E-04	3.55E-04	-	-	1.09E-04	2.09E-04	1.80E-04	2.89E-04	1.54E-04	3.01E-04	1.54E-04	3.01E-04
Global warming	kg CO ₂ eq	4.04E-01	8.07E-01	4.07E-01	8.15E-01	-	-	8.38E-01	1.56E+00	1.09E+00	2.18E+00	1.14E+00	2.23E+00	1.14E+00	2.23E+00
Non-renewable energy	MJ primary	5.71E+00	1.14E+01	5.75E+00	1.15E+01	-	-	1.67E+01	3.06E+01	1.83E+01	3.56E+01	1.86E+01	3.63E+01	1.86E+01	3.63E+01
Mineral extraction	MJ surplus	1.10E-02	2.21E-02	1.14E-02	2.28E-02	-	-	2.05E-03	3.83E-03	1.22E-03	3.94E-04	1.20E-03	2.34E-03	1.20E-03	2.34E-03

หมายเหตุ: ไม่ได้ทำการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมการใช้วัสดุ ABS ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A เนื่องจากการใช้วัสดุชิ้นงานไม่สมบูรณ์ (Ecoinvent 3.0)

จากตารางแสดงค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อม 15 ด้าน ของการประเมินวัฏจักรชีวิตของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B พบว่าเมื่อคำนวณความแตกต่างผลกระทบสิ่งแวดล้อมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 2 รุ่น ในทุกด้านผลกระทบ ยกตัวอย่าง ผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ วัสดุ PLA รุ่น A ส่งผลกระทบ 39.2 kg TEG water/ 1 ชิ้นงาน และรุ่น B ส่งผลกระทบ 40.0 kg TEG water/ 1 ชิ้นงาน วิธีการคำนวณ $\frac{40.0-39.2}{39.2} \times 100 = 2.04\%$ จะเห็นได้ว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น B ค่าผลกระทบเพิ่มขึ้น 2.04% ดังนั้นผลกระทบผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ วัสดุ PLA ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 2 รุ่น ไม่ต่างกันอย่างไร้มีนัยสำคัญ เป็นต้น ซึ่งเมื่อคำนวณความแตกต่างผลกระทบสิ่งแวดล้อมทุกด้านของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 2 รุ่น พบว่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 2 รุ่น ไม่ต่างกันอย่างไร้มีนัยสำคัญ และการประเมินวัฏจักรชีวิตของการขึ้นรูปชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้วยวัสดุ Nylon ส่งผลกระทบสูงกว่าวัสดุ PLA ตั้งแต่ขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซาก ใน 3 ด้านผลกระทบ คือ ผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ ผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป และผลกระทบด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก ตามลำดับ สาเหตุมาจากการใช้ไฟฟ้าและการปลดปล่อยสาร VOCs ที่สูงกว่า นอกจากนี้ระยะเวลาการพิมพ์ชิ้นงานที่เพิ่มขึ้น การปลดปล่อยสาร VOCs เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลกระทบสูงขึ้นด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM รุ่น A (ผลิตในประเทศไทย) และรุ่น B (นำเข้าจากประเทศจีน) ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมงและ 6 ชั่วโมง ด้วยวัสดุ PLA, ABS และ Nylon จำนวน 6 ผลิตภัณฑ์ ได้แก่

ผลิตภัณฑ์ที่ 1 : โมเดลที่วางโทรศัพท์ที่พิมพ์จาก PLA เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (PLA_{3hrs.})

ผลิตภัณฑ์ที่ 2 : โมเดลที่วางโทรศัพท์ที่พิมพ์จาก PLA เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (PLA_{6hrs.})

ผลิตภัณฑ์ที่ 3 : โมเดลที่วางโทรศัพท์ที่พิมพ์จาก ABS เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ABS_{3hrs.})

ผลิตภัณฑ์ที่ 4 : โมเดลที่วางโทรศัพท์ที่พิมพ์จาก ABS เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ABS_{6hrs.})

ผลิตภัณฑ์ที่ 5 : โมเดลที่วางโทรศัพท์ที่พิมพ์จาก Nylon เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (Nylon_{3hrs.})

ผลิตภัณฑ์ที่ 6 : โมเดลที่วางโทรศัพท์ที่พิมพ์จาก Nylon เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (Nylon_{6hrs.})

โดยพิจารณาวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการได้มาของวัตถุดิบ การใช้งาน และการกำจัดซากชิ้นงาน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลมลพิษอากาศและการใช้ไฟฟ้าโดยตรง สอบถามผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง และจากฐานข้อมูลที่ได้รับคำแนะนำเชื่อถือในระดับสากล คือ Ecoinvent 3.0 โดยผลการศึกษารูปได้ดังนี้

1. ผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ชนิด FDM เกิดจากกระบวนการใช้งานมากกว่ากระบวนการได้มาของวัตถุดิบ และการกำจัดซากชิ้นงาน

2. ผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในกระบวนการใช้งานพบว่า ผลกระทบสูงสุด คือ ด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ (Aquatic ecotoxicity) รองลงมา คือ ด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป (Non-renewable energy) และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก (Terrestrial ecotoxicity) ตามลำดับ

3. ระยะเวลาการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่เพิ่มขึ้น จาก 3 ชั่วโมง เป็น 6 ชั่วโมง ส่งผลให้มลพิษที่ปลดปล่อยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

4. ผลการเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้วัสดุ และไฟฟ้า ในขั้นตอนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B พบว่า วัสดุ PLA การใช้วัสดุส่งผลกระทบสูงกว่าการใช้ไฟฟ้า และวัสดุ ABS และ Nylon การใช้ไฟฟ้าส่งผลกระทบสูงกว่าการใช้วัสดุในเกือบทุกด้านผลกระทบ

5. ผลการเปรียบเทียบการใช้งานพลาสติกทั้ง 3 ชนิด ของการประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B พบว่าวัสดุ Nylon ส่งผลกระทบต่อมากกว่าวัสดุ PLA ในด้านความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางน้ำ (Aquatic ecotoxicity) ด้านพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป (Non-renewable energy) และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศทางบก (Terrestrial ecotoxicity)

6. การประเมินวัฏจักรชีวิตของการผลิตชิ้นงานโดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รุ่น A และรุ่น B ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมไม่ต่างกัน อย่างไม่มีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรนำผลของงานวิจัยไปใช้ประโยชน์แก่ผู้ผลิตและผู้บริโภค เช่น การปรับการเลือกใช้วัสดุในกระบวนการใช้งานเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จากผลของงานวิจัยพลาสติก PLA เป็นวัสดุที่เหมาะสมในการใช้งาน เนื่องจากสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติก ABS และ Nylon อีกทั้งช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากใช้อุณหภูมิที่หัวฉีดน้อยกว่าพลาสติกชนิดอื่น และไม่ต้องใช้อุณหภูมิที่ฐานรอง เพราะไม่มีการหดตัวของชิ้นงาน พลาสติก PLA สามารถใช้งานได้ง่าย สะดวก ราคาใกล้เคียงกับพลาสติกชนิดอื่น ๆ และใช้งานเฉพาะกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังนั้นผู้ผลิตและผู้บริโภคควรหันมาใช้วัสดุ PLA ในการขึ้นรูปชิ้นงาน เพื่อเป็นแนวทางในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และให้ผู้บริโภคได้ทราบข้อมูลเพื่อประกอบการตัดสินใจเลือกซื้อวัสดุ และผลิตภัณฑ์เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Azimi, P., Zhao, D., Pouzet, C., Crain, N. and Stephens, B. Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. Environ Sci Technol 50 (2016):1260-8.

Barros, K. D. S. and Zwolinski, P. Influence of the Use/User Profile in the LCA of 3d Printed Products. Procedia CIRP 50 (2016): 318-323.

Barros, K. D. S., Zwolinski P. and Mansur A. I. Where do the environmental impacts of Additive Manufacturing come from? Case study of the use of 3d-printing to print orthotic insoles. 12ème Congrès International de Génie Industriel (2017).

Boerger Manufacturing. Oil And Gas Equipment Manufacturers In Europe. [ออนไลน์]. 2015. แหล่งที่มา: www.nwzr.praxis-ilga-bauknecht.de > oil-and-gas-equipment-manufacturers [20 June 2019]

Cerdas, F., Juraschek, M., Thiede, S. and Herrmann, C. Life Cycle Assessment of 3D Printed Products in a Distributed Manufacturing System. Journal of Industrial Ecology 21 (2017): S80-S93.

Davis, A. Y., Zhang, Q., Wong, J. P. S., Weber, R. J. and Black, M. S. Characterization of volatile organic compound emissions from consumer level material extrusion 3D printers. Building and Environment 160 (2019). 106-209.

Deng, Y., Cao, S., Chen, A. and Guo, Y. The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction. Building and Environment 104 (2016): 311-319. 106-209.

Diaz, J. V., Noort, M., and Van, B. Method for the production of an Edible Object by Power Bed (3d) Printing and Food Products Obtainable Therewith. Google Patents (2015).

Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S. and Iribarne, M. Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. Rapid Prototyping Journal 21 (2015): 14-33.

Forbes. Wohlers Report 2018: 3D Printer Industry Tops \$7 Billion. [ออนไลน์]. 2018. แหล่งที่มา: <https://www.forbes.com/sites/tjmccue/2018/06/04/wohlers-report-2018-3d-printer-industry-rises-21-percent-to-over-7-billion/> [25 June 2018]

Formlabs. Professional 3D printer. [ออนไลน์]. 2018. แหล่งที่มา: <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/> [19 June 2018]

Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M. and Visser, C. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy* 74 (2014): 158-167.

Goedkoop. [ออนไลน์]. 1996. แหล่งที่มา: https://www.researchgate.net/figure/General-framework-for-Eco-Indicator-95-Goedkoop-et-al-1996_fig6_286162515 [25 June 2018]

Greendelta. LCIA method Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. [ออนไลน์]. 2015. แหล่งที่มา: <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCIA-METHODS-v.1.5.4.pdf> [15 June 2019]

Gu, J., Wensing, M., Uhde, E. and Salthammer, T. Characterization of particulate and gaseous pollutants emitted during operation of a desktop 3D printer. *Environ Int* 123 (2019): 476-485.

International organization for standardization. [ออนไลน์]. 2006. แหล่งที่มา: <https://www.iso.org/home.html> [19 June 2018]

Kim, Y., Yoon, C., Ham, S., Park, J., Kim, S., Kwon, O. and Tsai, P. Emissions of Nanoparticles and Gaseous Material from 3D Printer Operation. *Environ Sci Technol*. 20 (2015): 12044-53.

Kreiger, M. and Pearce, J. M. Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 1 (2013): 1511-1519.

Life Cycle Initiative. Life Cycle Impact Assessment definition study: Background document III. [ออนไลน์]. 2018. แหล่งที่มา: https://lca-net.com/files/LCIA_Background_III_Midpointcategories_final3a.pdf [11 May 2019]

Lux Research. 3D printing market poised to reach \$12B in 2025. [ออนไลน์]. 2018. แหล่งที่มา: <https://www.industrial-lasers.com/home/article/16488317/3d-printing-market-poised-to-reach-12b-in-2025-says-lux-research> [15 June 2018]

Munoz, A. A. and Sheng, P. An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes. Journal of Materials Processing Technology 53 (1995): 736-758

Mcor Technologies. Mcor Technologies SDL paper-based 3D printers breathe new life into a traditional reprographics firm. [ออนไลน์]. 2016. แหล่งที่มา: https://www.mcor technologies.com/mcor-technologies-sdl-paper-based-3d-printers-breathe-new-life-traditional-reprographics-firm__trashed/ [22 June 2018]

New Electronics. What is the difference between FDM and Polyjet 3D printing technology. [ออนไลน์]. 2017. แหล่งที่มา: <http://www.newelectronics.co.uk/electronics-technology/what-is-the-difference-between-fdm-and-polyjet-3d-printing-technology/145848/> [21 June 2018]

Palawat Automation Co., L. เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มีอะไรบ้าง. [ออนไลน์]. 2559. แหล่งที่มา: <https://x3dtechnology.com/blogs/knowledge/3d-printing-technologies> [21 มิถุนายน 2560]

Paul Braren. Close look at the Floureon LCD Display Power Meter. [ออนไลน์]. 2015. แหล่งที่มา: <https://tinkertry.com/floureon-power-meter> [20 June 2018]

Peng, T. Analysis of Energy Utilization in 3D Printing Processes. Procedia CIRP 40 (2016): 62-67.

Prodways. ProMaker P1000. [ออนไลน์]. 2017. แหล่งที่มา: <https://www.prodways.com/en/industrial-3D-printers/promaker-p1000/> [22 June 2018]

Shahrubudin, N., Lee, T.C. and Ramlan, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. Procedia Manufacturing 35 (2019): 1286–1296.

Stabile, L., Scungio, M., Buonanno, G., Arpino, F. and Ficco, G. Airborne particle emission of a commercial 3D printer: the effect of filament material and printing temperature. Indoor Air 27 (2017): 398-408.

Stephens, B., Azimi, P., Orch, Z. E. and Ramos, T. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. Atmospheric Environment 79 (2013): 334-339.

White Clouds. Binder Jetting in 3D Printing. [ออนไลน์]. 2017. แหล่งที่มา: <https://3dprinterchat.com/2017/03/wanhao-duplicator-review/> [21 June 2018]

Yan, Q. et al. A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications. Engineering 4 (2018): 729-742.

Zhoua, Y., Konga, X., Chenb, A. and Cao, S. Investigation of Ultrafine Particle Emissions of Desktop 3D Printers in the Clean Room. Procedia Engineering 121 (2015): 506 – 512

กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน. การแปรรูปขยะมูลฝอยไปเป็นพลังงาน ความร้อน โดย ใช้ เต า เผ า . [ออนไลน์]. 256 1 . แหล่งที่มา : http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=509&filename=index [20 มิถุนายน 2562]

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. LCA : เครื่องมือสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์สีเขียว : กรณีศึกษา อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ไม้ อุตสาหกรรมโลหะที่มีใช้เหล็ก / เจ้าของโครงการ กรมโรงงานอุตสาหกรรม 1, มุลนิธิสิ่งแวดล้อมไทย กรุงเทพมหานคร: กองบรรณาธิการ สดกกล้า บุญญนันท์, 2551.

กระทรวงพลังงาน. คู่มือการถ่ายทอดเทคโนโลยี การผลิตเตาเผาขยะชีวมวลไร้ควันและเตาเผาถ่านมลพิษต่ำ. [ออนไลน์]. 256 1 . แหล่งที่มา : http://www.thai-explore.net/file_upload/submitter/file_doc/b194c62de2f63fb6fef3d8c711720d57.pdf [22 มิถุนายน 2562]

กัณมณี แสงสุข. การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเศษเยื่อไม้ ขี้เลื่อย และด้าย. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.

จันจิรา หะยียามา. การประเมินวัฏจักรชีวิตของสายไฟชนิดพีวีซี และสายไฟชนิดที่ใช้วัสดุทดแทนพีวีซี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547.

จินตนา ประชุมพันธ์. การพัฒนาเครื่องบริหารปอดเพื่อแก้ปัญหาสุขภาพระบองของระบบทางเดินหายใจ. [ออนไลน์]. 256 1 . แหล่งที่มา : <https://www.tci-thaijo.org/index.php/cmruresearch/article/view/185127> [10 มิถุนายน 2560]

ฉันทวัฒน์ บุญหยาด. การกำจัดขยะมูลฝอยด้วยวิธีการฝังกลบ. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <https://urplanetx.wordpress.com> [16 มิถุนายน 2560]

ชณิภรณ์ เรืองฤทธิ์. การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น กรณีศึกษาถุงพลาสติกสำหรับอาหาร. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.

นงคันุช พงษ์ชัยวิบูลย์. การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของคอมเพรสเซอร์แบบหมุน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547.

นรรัตน์ รอดประเสริฐ. การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของหลอดฟลูออเรสเซนต์โดยหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2548.

บริษัท กรีนเวิลด์ พับลิเคชั่น จำกัด. รู้จักกับวัตถุดิบสำหรับ 3D Printing. [ออนไลน์]. 2560. แหล่งที่มา: https://www.mmthailand.com/news_3d-printing_material [16 มิถุนายน 2561]

บริษัท สยามเรปเรป จำกัด. เครื่องพิมพ์ 3 มิติ. [ออนไลน์]. 2560. แหล่งที่มา: <https://www.siamregrap.com/> [19 มิถุนายน 2560]

บริษัท อินโน-คอนส์ (ประเทศไทย) จำกัด. สาร VOCs คืออะไร. [ออนไลน์]. 2560. แหล่งที่มา: <http://www.profastasia.com/สาร-vocs-คืออะไร/> [11 มิถุนายน 2560]

ปัทมาพร ตรีเนตร. การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต,, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.

พงษ์วิภา หล่อสมบูรณ์. คู่มือการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์. 1, กรุงเทพมหานคร: 2546.

พิทักษ์ ฉัตร เทพราชา. พลังงานทดแทน. 2555. แหล่งที่มา: <https://www.slideshare.net/pitakchatr/2012-16506079> [16 มิถุนายน 2560]

มณฑลี ศาสนนันท์. การออกแบบผลิตภัณฑ์ เพื่อการสร้างสรรค์นวัตกรรมและวิศวกรรมยั่งยืน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2550.

วรารุท เสือดี. แนวทางการจัดการสารอินทรีย์ระเหย. 1, กลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเคมี สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย. ระยอง: มาบตาพุดการพิมพ์, 2555.

ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ. สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds). [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/chemical-hazards/item/> [15 มิถุนายน 2560]

ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ.พลาสติกกรีไซเคิล. [ออนไลน์]. 2561. แหล่งที่มา: <https://www.mtec.or.th/bio-plastic/what-is-plastic/recycle-plastic.html> [16 มิถุนายน 2560]

สิริญา สิ้นค้า. การประเมินวัฏจักรชีวิตของการบริการงานพิมพ์แบบออฟเซตและดิจิทัล : กรณีศึกษาโรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2560.

สำนักงานอนามัยสิ่งแวดล้อม. คู่มือวิชาการ เรื่องสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ. 1, สำนักงานอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกิจการโรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึกในพระบรมราชูปถัมภ์, 2555.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นภัสรนันท์ ตติย์ชานุกุล
วัน เดือน ปี เกิด	17 กรกฎาคม 2533
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	226 ถนนเสือป่า ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี

