จากการพิมพ์ 3 มิติ สู่การพิมพ์ 4 มิติ และการใช้ประโยชน์ของเทคโนโลยีดิจิทัล: วรรณกรรมปริทัศน์ฉบับย่อ

จุฬพงษ์ พานิชเกรียงไกร[1]
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
ปิยะรัตน์ ศิลปศุภกรวงศ์[2]
Kanagawa Institute of Technology, Kanagawa, Japan
และ สุดา เกียรติกำจรวงศ์[3*]
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท วังใหม่ ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสภา ถนนศรีอยุธยา ดุสิต กรุงเทพฯ 10300

** Corresponding Author: ksuda@chula.ac.th*
[1] อาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์
[2] นักวิจัย, Human Media Research Center, KAIT
[3] ศาสตราจารย์ สำนักบริหารวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ราชบัณฑิต ประเภทวิชาเทคโนโลยี ราชบัณฑิตยสภา

ข้อมูลบทความ

ประวัติบทความ :
รับเพื่อพิจารณา : 17 เมษายน 2563
แก้ไข : 28 สิงหาคม 2563
ตอบรับ : 7 ธันวาคม 2563

คำสำคัญ :
การพิมพ์ 3 มิติ / การพิมพ์ 4 มิติ / ยุค 5G / RFIC / อินเตอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง

บทคัดย่อ

การพิมพ์ 3 มิติ หรือการผลิตแบบเติมทีละชั้น เป็นเทคโนโลยีโลกเปลี่ยนยุคที่มีผลต่อกรรมวิธีการผลิตของอุตสาหกรรม การสร้างวัตถุ 3 มิติ จากไฟล์ดิจิทัลด้วยวัสดุพิมพ์แบบเดิมไม่ว่าเป็นพอลิเมอร์ พอลิเมอร์คอมพอสิต หรือวัสดุอื่น ๆ ได้เป็นวัตถุพร้อมใช้งาน ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้เกือบทุกวงการการผลิตและวงวิชาชีพ ข้อเด่นหลักของการพิมพ์ 3 มิติ คือ สามารถสร้างงานหลากหลายลักษณะที่มีรายละเอียดได้ดีมากและเป็นการพิมพ์ตามความต้องการของแต่ละบุคคล ลดขั้นตอนซ้ำซากที่น่าเบื่อหน่ายของการลองผลิต ลดวัสดุสิ้นเปลือง และต้องขจัดของเสียจำนวนมากจากการผลิต การพิมพ์ 3 มิติทำให้ประหยัดและให้ผู้ออกแบบมีความอิสระและความยืดหยุ่นในการสร้างสรรค์งานเทคโนโลยีและงานศิลป์ ได้ผลิตผลงานที่มีความงดงามและตรงกับความต้องการของแต่ละงานได้ดียิ่งขึ้น บทความปริทัศน์ฉบับย่อนี้ได้บรรยายหลักการเกิดไฟล์ดิจิทัลแยกชั้นภาพ 3 มิติ การผลิตแบบการพิมพ์ 3 มิติ การจำแนกชนิดของเครื่องพิมพ์ การพิจารณาลักษณ์การทำงานของเครื่องพิมพ์ที่ต้องสอดคล้องกับสมบัติของวัสดุที่ใช้พิมพ์ ด้วยวิวัฒนาการด้านสมบัติของวัสดุและเทคโนโลยีของเครื่องพิมพ์ที่ล้ำหน้า ทำให้สามารถพัฒนาและต่อยอดจากการพิมพ์ 3 มิติ สู่การพิมพ์ 4 มิติ โดยมีเวลาเป็นตัวแปรสำคัญของการควบคุม ทำให้วัตถุพิมพ์ที่มีลักษณะพิเศษที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติที่แสดงออกได้ตั้งแต่หลังการพิมพ์เสร็จและระหว่างการใช้งาน โดยไม่ทำให้เสียความสามารถหลักของวัตถุนั้น อีกเทคโนโลยีหนึ่งที่เป็นเทคโนโลยีประจำยุค 5G ที่น่าจับตามองเป็นอย่างมากคือ RFIC (Radio Frequency Integrated Circuits) ซึ่งเป็นชุดชิปขนาดเล็กที่ติดตั้งในแต่ละอุปกรณ์ และเป็นกุญแจสำคัญที่ทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นสามารถส่งสัญญาณและข้อมูลไปประมวลผลยัง cloud ได้ด้วยตัวเองโดยตรง ดังนั้น เทคโนโลยีเหล่านี้จะนำโลกก้าวไปสู่วิถีชีวิตแนวใหม่อย่างเต็มรูปแบบ เราจึงสามารถเชื่อมโลกให้เป็นหนึ่งเดียวด้วยอุปกรณ์อัจฉริยะเหล่านี้ที่ได้รับการพัฒนาให้ขนาดเล็กลงอย่างต่อเนื่อง พกพาง่าย ติดตัวอย่างปลอดภัย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโลก ซึ่งมีการคาดการณ์ว่า มูลค่าหมุนเวียนในตลาดบริการของเหล่าอุปกรณ์อัจฉริยะนี้ใน ค.ศ. 2030 มีมูลค่ามากถึง 720,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ สุดท้าย เราควรมีความรู้และความตระหนักรู้เท่าทันเทคโนโลยีเหล่านี้ เพื่อสามารถควบคุมการใช้ประโยชน์แบบเต็มประสิทธิภาพ หลีกเลี่ยง และป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากเทคโนโลยีได้ทันท่วงที และดำรงชีวิตอย่างมีความสุขสบาย

From 3D Printing to 4D Printing and Applications of the Digital Technologies: A Brief Literature Review

Chulapong Panichkriangkrai[1],
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Wangmai, Patumwan, Bangkok 10330
Piyarat Silapasuphakornwong[2]
Kanagawa Institute of Technology, Kanagawa, Japan
and Suda Kiatkamjornwong[3*]
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Wangmai, Patumwan, Bangkok 10330
The Academy of Science, Royal Society of Thailand, Sanam Sueapa, Dusit, Bangkok 10300

** Corresponding Author: ksuda@chula.ac.th*
[1] Lecturer, Department of Imaging and Printing Technology, Faculty of Science.
[2] Researcher, Human Media Research Center, KAIT.
[3] Professor, Office of Research Affairs, Chulalongkorn University; Fellow of the Royal Society, Technology Discipline, The Royal Society of Thailand.

Article Info

Article History:
Received: April 17, 2020
Revised: August 28, 2020
Accepted: December 7, 2020

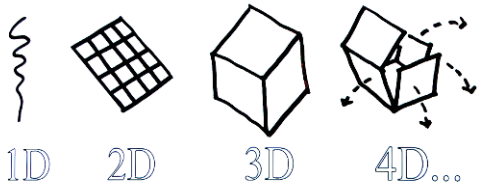
Keywords:
3D Printing / 4D Printing / 5G era / RFIC / Internet of Things

Abstract

The 3D printing or additive manufacturing is one of the world disruptive technologies for transitions of industrial manufacturing methods. Digital files of a 3D object can be used to produce a printed product either using pure polymer or polymer composites via the 3D printing technology. Nowadays, this printing technology can be applied in almost every production sector and every career. Many outstanding points of the 3D printing allow numerous creations of magnificent fine objects as desired. It reduces the repeatedly tedious steps to consume excessive starting ingredients, reduced undesirable wastes from the production lines. This 3D printing allows designers to have creative freedoms for producing facet arts or sophisticated projects. In this brief review, a concise description of digital file separations of 3D images, the 3D printing of each digital image layer, and classification of the printer and their working mechanism shall conform to the inherent properties of the materials used for the manufacturing and its final service functions. With wide varieties of printing systems and printing materials, the 3D printing has already been developed and progressed to a premium 4D printing. Under the sole controlling parameter of time, the 4D printing technique starts with the same 3D printing process on a suitable material to produce the 4D printed product exhibiting various responses by influences of inherent physical, chemical or electrical impulses without damaging the printed products. Integration of various communication techniques needs a new 5G technology to accelerate wireless connection and rapid transformation to access/process big data freely at any time and any place for speedy communications via signals and data processing in Cloud so as to connect with Iot equipment or devices. Another eye catching technology in this era is the Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) which is a small chip-set equipped in each portion of the device to transmit signals and data to be processed in Cloud. This is the key success of the technologies that leads to our new normal life styles. With the restrictions of physical communications, we still can connect the world with these smart devices which have been continuously developed to be smarter, more compact, safer and environmentally friendly for us and the world. It is estimated that the 5G service market by A.D. 2030 could reach at about 720,000 million US dollars. Lastly, we should be prepared to acquire the new knowledges and be aware of them so that we can master them, to utilize their utmost benefits and efficiencies, to be save from any disturbances arisen and to live happily and comfortably.

การพิมพ์ 3 มิติ

การพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) หรือที่เรารู้จักกันในอีกชื่อว่า การผลิตแบบเติมทีละชั้น (additive manufacturing) เป็นการสร้างวัตถุของแข็ง ๓ มิติ จากไฟล์ดิจิทัลด้วยวัสดุพิมพ์พอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์คอมพอสิตหรือสารชีวภาพอื่น ๆ ได้เป็นวัตถุพร้อมใช้งานที่มาจากเครื่องพิมพ์ กล่าวคือ เราสามารถสร้างวัตถุต่าง ๆ จากวัสดุพิมพ์พอลิเมอร์โดยพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์ในระนาบกว้าง, ยาว, และสูง ได้แบบง่าย ๆ รูปที่ 1 แสดงการพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์ การพิมพ์ 1 มิติ คือ เส้นและจุด เช่น รหัสมอร์ส (Morse code) การพิมพ์ 2 มิติ คือการพิมพ์ระนาบ 2 แกน คือ ด้านยาวหรือแกน X และด้านกว้างหรือแกน Y แม้มีความหนาแต่น้อยมากเมื่อเทียบกับมิติอีก 2 มิติ เช่น การพิมพ์บนกระดาษ พลาสติก ผ้า ฯลฯ ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน การพิมพ์ 3 มิติ คือ การพิมพ์ขึ้นรูปทั้ง 3 แกน คือ แกน X, Y, Z ซึ่งแกน Z คือ ความหนา หรือความสูงที่ตั้งอยู่บนพื้นของพื้นที่ X, Y เช่น การพิมพ์โมเดล กล่อง ฯลฯ และการพิมพ์ 4 มิติ คือ ผลิตภัณฑ์ 3 มิติ (X, Y, Z) ที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติของมิติบางอย่างได้เมื่อเวลาเปลี่ยนไปหรือตัวแปรอื่นที่มีอิทธิพลของวัสดุต่อสมบัติโดยรวมของวัสดุพิมพ์ กล่าวคือ เวลาหลังพิมพ์เสร็จแล้ว ซึ่งในตัวอย่างดังภาพนี้ เป็นการเปลี่ยนรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น [1]

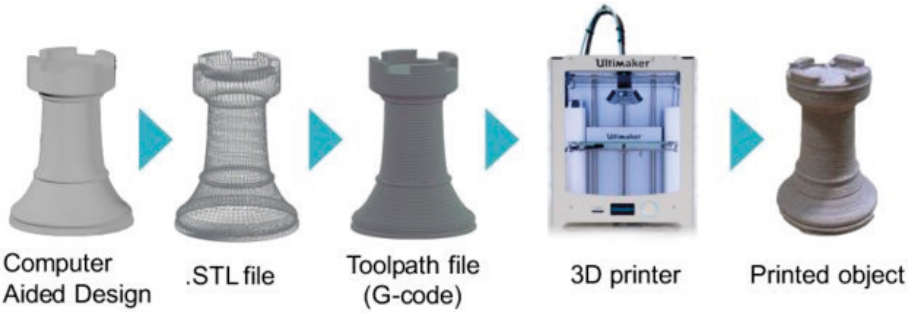


รูปที่ 1 การพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์ [1]

การพิมพ์ 3 มิติ คือ การผลิตแบบการเติม เป็นการเพิ่ม/เติมวัสดุทีละชั้นขึ้นไปเรื่อย ๆ เพื่อให้เกิดความสูงหรือความลึกขึ้น ตัวอย่างง่าย ๆ หากใช้กระดาษโน้ตมาทำเป็นรูปทรงต่าง ๆ เช่น พระราชวัง สัตว์ ผลไม้ ความสูงของโมเดลเกิดจากการซ้อนกระดาษขึ้นทีละแผ่นอย่างต่อเนื่อง กระดาษแต่ละแผ่นไม่ได้ติดกัน อาจมีการตัดไม่เท่ากันระหว่างชั้นบนกับชั้นล่าง ทำให้ได้รูปร่างเป็นพอลิกอนที่เป็นวัตถุ 3 มิติขึ้นมา การได้รูปทรงในลักษณะนี้ เราไม่ถือว่าเป็นการพิมพ์ 3 มิติ ทีเดียว เพราะการพิมพ์ 3 มิติ นั้น ตรงกับศัพท์คำว่า การประดิษฐ์ (fabrication) มากกว่า ซึ่งหมายถึงการผลิตแบบอุตสาหกรรม โดยไม่ต้องสนใจว่าเป็นการเชื่อมติดกันหรือตัดออกจากวัสดุทั้งก้อนก็ทำได้ ขอให้ขึ้นรูปสุดท้ายเป็นวัตถุ 3 มิติ และสามารถทำซ้ำมาก ๆ ได้ในเวลาที่แน่นอนเท่านั้นก็เพียงพอ และกระดาษที่ตัดไม่เท่ากันในแต่ละชั้นเรียงซ้อนขึ้นมาเป็นรูปร่าง รูปซ้ายมือในรูปที่ 2 เป็นวัดที่มีชื่อเสียงแห่งหนึ่งในนครเกียวโต ประเทศญี่ปุ่น และรูปที่ 2 ขวาเป็นผลไม้ชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นความคิดเริ่มต้นที่มาของกระบวนการพิมพ์และการขึ้นรูปของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่พิมพ์ทีละชั้นเรียงซ้อนกันขึ้นไป [2]

รูปที่ 2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเป็นวัตถุ 3 มิติ จากกระดาษจดบันทึก [2]

กระบวนการพิมพ์ 3 มิติ เริ่มตั้งแต่การสร้างต้นแบบของวัตถุ 3 มิติ (รูปที่ 3) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นไฟล์ดิจิทัล 3 มิติ ซึ่งโปรแกรมเหล่านี้มีจำนวนมากในปัจจุบันที่เป็นไฟล์โอเพนซอร์ซ (open source) เช่น Fusion 360, Maya, Metasequoia, Blender, AutoCAD เมื่อได้โมเดลวัตถุ 3 มิติเป็นไฟล์ดิจิทัลแล้ว เวลาเริ่มพิมพ์ต้องเซฟไฟล์ในนามสกุล .stl ซึ่งไฟล์ตระกูลนี้สื่อสารกับเครื่องพิมพ์ได้ ไฟล์นี้ถูกตัดแบ่งวัตถุออกเป็นชั้น ๆ (slicing) ซึ่งเป็นหน้าที่ของ slicing software ที่มาพร้อมกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติแต่ละรุ่นและแต่ละยี่ห้อ เมื่อได้ไฟล์ที่ตัดแบ่งชั้นทีละชั้นของวัตถุเรียบร้อยแล้ว ผู้พิมพ์ต้องกำหนดและเตรียมพิมพ์บนแท่นพิมพ์ว่าจะพิมพ์วัตถุกี่ชิ้น (การทำซ้ำ) และพิมพ์ในแนวใด (layout) เช่น แนวตั้ง แนวนอน ซึ่งมีผลต่อการสร้างชั้นพยุงและความเรียบของผิววัตถุในการพิมพ์ ส่วนขั้นตอนเข้าสู่กระบวนการพิมพ์โดยเครื่องพิมพ์ 3 มิตินั้น เครื่องพิมพ์ตัดชิ้นงานเป็นชั้น ๆ และบังคับให้หัวพิมพ์ของเครื่องพิมพ์พิมพ์ตามโปรแกรมโดยซอฟต์แวร์ เมื่อส่งไฟล์นี้ไปยังเครื่องพิมพ์เครื่องพิมพ์จะพิมพ์ผลิตภัณฑ์ 3 มิติ ตามคำสั่งในโปรแกรมจนได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปออกมา [3] กล่าวคือ เครื่องพิมพ์จะสร้างเนื้อวัตถุขึ้นทีละชั้นตั้งแต่ชั้นแรกใน แนวแกน X และ Y บนพื้นราบทีละชั้นทับกันตามลำดับจนชั้นสุดท้ายของวัตถุ จึงได้วัตถุ 3 มิติ ในการผลิตวัตถุบางชิ้นมักมีความซับซ้อนด้วยเหตุมีการผสมวัสดุหลายชนิด บางครั้งต้องมีการต่อวงจรไฟฟ้าร่วมด้วย ผู้ผลิตต้องสร้างไฟล์ในแต่ละชิ้นเป็นส่วนที่แยกออกจากกันและนำมาประกอบกันเป็นชิ้นสำเร็จอีกครั้งในขั้นตอนหลังพิมพ์ สำหรับขั้นตอนหลังพิมพ์นั้น หากมีส่วนของชั้นพยุง (support) ที่เครื่องพิมพ์สร้างขึ้นมาระหว่างพิมพ์เพื่อการค้ำยันโครงสร้างของวัตถุนั้น จะต้องตัดส่วนนี้ออกไปจากวัตถุที่พิมพ์ได้เพื่อให้เป็นชิ้นวัตถุที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ มักมีการตกแต่งผิวของวัตถุเพิ่มเติมเพื่อให้มีความเรียบและมีสีสันงดงาม และอาจรวมถึงการประกอบวัตถุแต่ละชิ้นเข้าด้วยกัน เพื่อพร้อมใช้งานจริงต่อไป



รูปที่ 3 กระบวนการการพิมพ์ 3 มิติ [3]

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

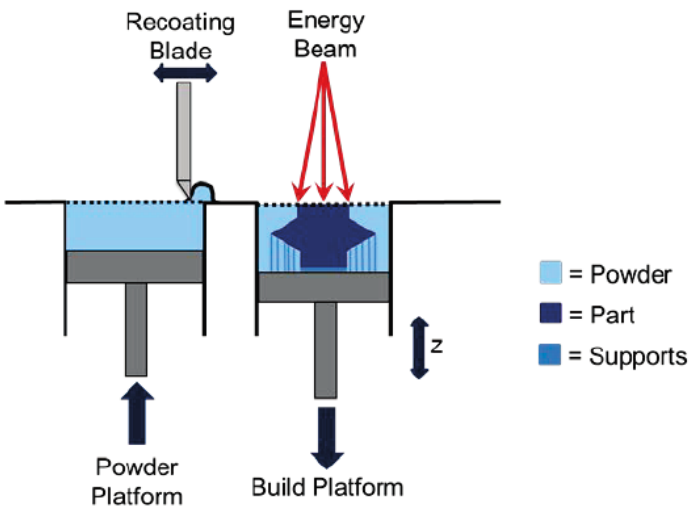
ในปัจจุบัน ระบบการพิมพ์ 3 มิติ มีเทคโนโลยีอยู่หลายระบบด้วยกัน ทั้งแบบที่ใช้ในครัวเรือนไปจนถึงการผลิตทดแทนการผลิตในอุตสาหกรรมใหญ่ ๆ เนื้อหาต่อไปนี้สามารถสรุปเป็น 5 ระบบ ดังนี้

1. **Powder Bed Fusion (การหลอมเหลวของระนาบผง) / Electron Beam Melting (EBM) (การหลอมเหลวด้วยพลังงานลำอิเล็กตรอน) /Selective Laser Sintering (SLS) (การหลอมติดเฉพาะที่ด้วยแสงเลเซอร์เฉพาะ)**

หลักการ : ใช้ลำแสงเลเซอร์ หรือลำอิเล็กตรอนในการหลอมละลายผงวัสดุพิมพ์ เช่น โลหะ ให้เกิดการหลอมเหลวและผสมผสานเข้าด้วยกันในแต่ละชั้นพิมพ์ ตามรูปที่ 4 สำหรับระบบการหลอมเหลวด้วยพลังงานลำอิเล็กตรอน ปัจจุบันมีการพัฒนาเป็นระบบย่อยที่มีความหลากหลายหลายระบบ เช่น Selective laser melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Direct Energy Deposition (DED) ในเครื่องพิมพ์เหล่านี้มีถาดสำหรับใส่ผงวัสดุพิมพ์ เมื่อเครื่องพิมพ์เริ่มทำงานในส่วนที่เป็นวัตถุ 3 มิติ เครื่องพิมพ์จะปล่อยแสงเลเซอร์เพื่อให้วัสดุใช้พิมพ์นั้นหลอมเหลว (รูปที่ 4) เมื่อเครื่องพิมพ์ยิงลำแสงเลเซอร์จนครบ

ทั้งวัตถุในชั้นนี้เรียบร้อยแล้ว ถาดวัสดุพิมพ์จะเคลื่อนต่ำลง 1 ชั้น หรือหัวเลเซอร์จะขยับขึ้นสูง 1 ชั้น ทั้งนี้แล้วแต่กลไกของเครื่องพิมพ์แต่ละชนิดและแต่ละรุ่น มีใบมีดปาดชนิดพลาสติกและลูกกลิ้งกลิ้งผงวัสดุพิมพ์ส่วนที่ไม่รับการฉายแสงออกจากบริเวณพิมพ์ การปาดของใบมีดทำให้ผงวัสดุพิมพ์กลบส่วนที่รับการฉายแสงและหลอมเหลวจากชั้นที่แล้วด้วย ส่วนที่หลอมเหลวนั้นมีสมบัติคล้ายกาว จึงสามารถยึดผงวัสดุในชั้นที่ใบมีดปาดมากลบใหม่ได้ ทำให้เกิดการซ้อนทับวัสดุพิมพ์เดิมขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึงชั้นบนสุดซึ่งเป็นชั้นสุดท้าย เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการพิมพ์ได้เป็นชิ้นงานออกมาที่วัสดุพิมพ์ถูกเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกันเรียบร้อยและสมบูรณ์ เมื่อต้องการนำส่วนของชิ้นงานออกจากเครื่องพิมพ์อาจต้องมีเครื่องดูดผงวัสดุพิมพ์ที่เหลือจากการพิมพ์ออกจากตัวเครื่องพิมพ์และชิ้นงานสำเร็จให้หมดก่อน จึงสามารถนำชิ้นงานออกจากเครื่องพิมพ์ไปได้ สำหรับชิ้นงานที่มีความซับซ้อนมักมีการฉายแสงเพิ่มนอกเหนือจากส่วนวัตถุชิ้นงาน ซึ่งเป็นส่วนของโครงสร้างค้ำยัน (support) เพื่อให้วัตถุตั้งตรงตามไฟล์ดิจิทัล 3 มิติขึ้นได้ ซึ่งการฉายแสงในส่วนนี้ใช้พลังงานที่น้อยกว่าเพียงเพื่อให้เป็นแค่โครงสร้างค้ำจุนชิ้นงานหลักเท่านั้น เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการพิมพ์และผู้ใช้นำชิ้นงานออกไปจากเครื่องพิมพ์แล้ว ก่อนใช้งานจริงต้องมีขั้นตอนหลังพิมพ์คือ การเจียรส่วนที่เป็นตัวค้ำยันออกจากชิ้นงานออกด้วย เพื่อได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ที่สุด [4–6]

วัสดุพิมพ์ : โลหะ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) โลหะไทเทเนียม (titanium) โลหะอะลูมิเนียม (aluminum) เหล็กที่มีองค์ประกอบของโคบอลต์-โครม (cobalt chrome) เหล็กกล้า(steel) โลหะทองแดง (copper) ส่วนสารประเภทเซรามิก เช่น อะลูมินา (Al_2O_3) ซีเมนต์/เอชเอ็ม(cement/HM) อัลลอย (alloy) พอลิเมอร์ เช่น ไนลอน (nylon)



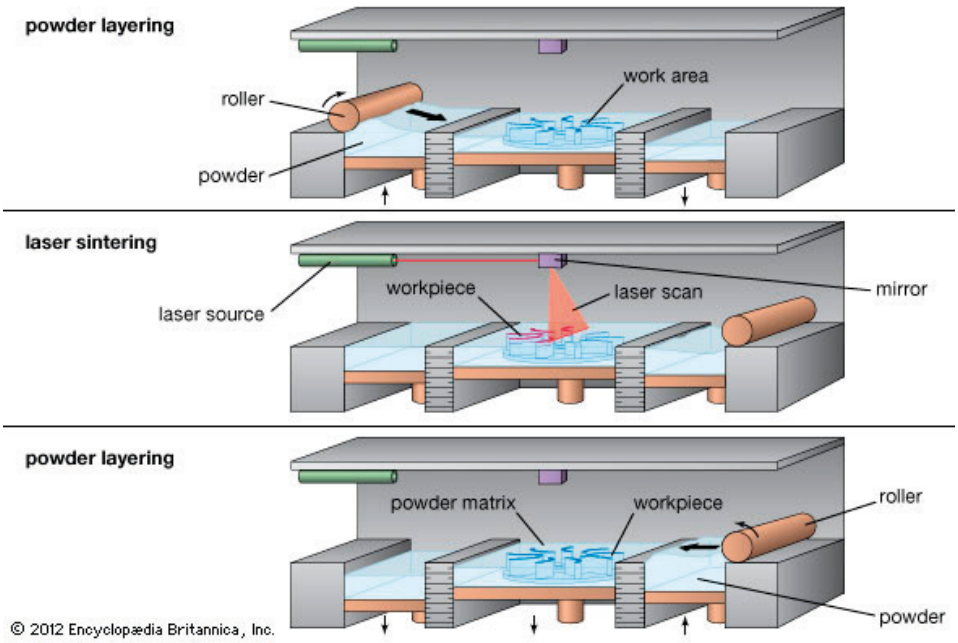
รูปที่ 4 ระบบการพิมพ์ 3 มิติ แบบ powder bed fusion [4, 5]

ข้อดีของระบบ : หลักการที่สำคัญคือ ใช้พิมพ์โลหะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีมาก มีความละเอียดได้ถึง 20 ไมโครเมตร เพราะใช้เลเซอร์ในการควบคุมการพิมพ์ สามารถสร้างชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้สูงมาก แต่เครื่องพิมพ์ประเภทนี้มีขนาดใหญ่และราคาการลงทุนค่อนข้างสูงทั้งในส่วนของเครื่องพิมพ์และวัสดุพิมพ์ ดังนั้น จึงใช้ในอุตสาหกรรมหนักและมีขนาดใหญ่ ๆ แต่ถ้าเทียบต้นทุนระหว่างการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ประเภทนี้กับการทำแม่พิมพ์และเบ้าหลอมโลหะแบบเดิม พบว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติใช้เวลาที่น้อยกว่า ต้นทุนถูกกว่า สะดวก และปลอดภัยมากกว่าด้วย

ข้อเสีย หรือสิ่งที่ควรระวัง : สำหรับการพิมพ์ประเภทนี้คือเนื่องจากเป็นเครื่องพิมพ์ที่ใช้ลำแสงเลเซอร์ที่มีความถี่ค่อนข้างสูงมาก เพื่อสามารถทำให้ผงโลหะหลอมละลายได้ ดังนั้นอันตรายจากลำแสงเลเซอร์ พลังงานความร้อน และผงโลหะ

จึงเป็นสิ่งที่พึงระมัดระวังในเวลาพิมพ์ หลักการการทำงานของเครื่องพิมพ์นี้อยู่ในขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับผงโลหะ ผู้ใช้ต้องสวมชุดป้องกันเป็นอย่างดี เนื่องจากผงโลหะมีขนาดเล็กมาก และเสี่ยงต่อการสูดหายใจเข้าไปในร่างกาย ซึ่งเป็นอันตรายอย่างรุนแรงต่อร่างกายได้ ดังนั้น ผู้ใช้ควรตระหนักถึงภัยนี้ ไม่ควรประมาทและต้องป้องกันตัวเองในระดับสูงและดีมาก เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยในระยะยาวและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง

การใช้งาน : เป็นระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมใหญ่ ๆ หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมอะไหล่ รถยนต์ เครื่องบิน เครื่องจักร ฯลฯ เป็นระบบที่ใช้ในการพิมพ์ 3 มิติของวัสดุประเภทโลหะเป็นหลัก นอกจากนี้ ระบบพิมพ์ Selective Laser Sintering (SLS) [7–9] ได้รับการพัฒนาให้สามารถพิมพ์วัสดุได้หลากหลายมากขึ้น ได้แก่ เซรามิก, แก้ว, และพลาสติก ซึ่งเป็นประเภทโฟโตพอลิเมอร์ ซึ่งใช้ความร้อน แสง หรือเลเซอร์ ในการทำให้หลอมเหลว และ/หรือเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้วเชื่อมติดกันระหว่างวัสดุขึ้นได้ และลดการใช้ support ซึ่งมีการทำงานคล้ายคลึงกับระบบที่กล่าวมาข้างต้นและมีโครงสร้างของเครื่องพิมพ์ค่อนข้างต่างกัน (ดูรูปที่ 5) ดังนี้



รูปที่ 5 ระบบพิมพ์ 3 มิติ แบบ selective laser sintering (SLS) [7]

หลักการ : เครื่องพิมพ์จะพิมพ์จากชั้นล่างของวัตถุสู่ชั้นบน (bottom up) คือ เริ่มจากการโรยผงวัสดุพิมพ์ซึ่งมีสมบัติเป็นโฟโตพอลิเมอร์ให้ทั่วบริเวณพื้นที่จะพิมพ์ทั้งหมดแล้ว จึงฉายรังสีอัลตราไวโอเลตหรือแสงเลเซอร์ความร้อนสูงให้กราดไปแต่ละแถว (คล้ายการพิมพ์ระนาบ 2 มิติธรรมดา) ในส่วนที่รับแสงหรือรังสีแล้ว วัสดุที่พิมพ์ก็เกิดปฏิกิริยาโฟโตพอลิเมอไรเซชันด้วยสารเคมีที่อยู่ในสารเคลือบ เกิดการแข็งตัวและยึดเกาะกับชั้นก่อนหน้านั้นด้วย เมื่อฉายแสงหรือรังสีจนครบทั้งชั้นแล้ว ชั้นรองรับวัตถุบนแท่นพิมพ์ก็จะขยับลง และใบมีดหรือลูกกลิ้งจะปาดวัสดุพิมพ์มาทับชั้นเดิมทั้งหมดอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 5 [7–9]

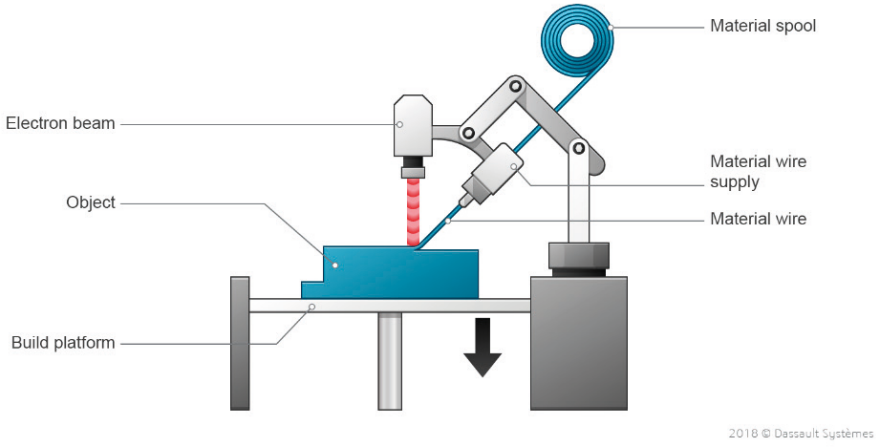
วัสดุพิมพ์ : พอลิเมอร์กลุ่มเซ็ตตัวแบบถาวร หรือพอลิเมอร์เทอร์โมเซ็ต (thermoset polymer) เช่น ยางเอบีเอส หรือยางอะคริโลไนทริล-บิวตะไดอีน-สไตรีน (ABS, acrylonitrile-

butadiene-styrene rubber), พลาสติกพอลิโพรพีลีน, พีพี (plastic polypropylene, PP), พอลิคาร์บอเนต, พีซี (polycarbonate, PC), พอลิเอทีลีน, พีอี (polyethylene, PE), เรซินยืดหยุ่นคล้ายยาง (rubber-like resin), เรซินเสริมแรงด้วยเซรามิก (ceramic reinforce resin)

ข้อดี หรือจุดแข็งของระบบ : เป็นระบบพิมพ์ที่ถือว่า พิมพ์ชิ้นงานได้ค่อนข้างรวดเร็ว และชิ้นงานมีความคงทน ทนทาน แข็งแรงดีมาก ซึ่งสามารถใช้ในอุตสาหกรรมอะไหล่ได้ดี

ข้อเสีย หรือสิ่งที่ต้องระวัง : ต้นทุนการผลิตชิ้นงานต่อชิ้นยังถือว่าสูงอยู่ และมีความเป็นพิษที่เกิดจากผงวัสดุพิมพ์ชนิดโฟโตพอลิเมอร์ แม้มีความเหนียว แต่ยังเป็นฝุ่นและล้างออกไม่ง่าย ซึ่งต้องระมัดระวังมากในการใช้งานและมีระบบจัดการบริเวณทำงานพิมพ์ที่ดี

ความแตกต่างของระบบ SLS และระบบ EBM คือ SLS ใช้วัสดุพิมพ์ได้หลายชนิด เช่น พลาสติก แก้ว เซรามิก แต่วัสดุพิมพ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันและรู้จักกันดีอย่างแพร่หลายคือ โลหะ ซึ่งระบบ SLS นี้ต้องได้รับพลังงานความร้อน จนผงวัสดุสามารถหลอมเหลวจนเชื่อมติดกันได้ แต่ EBM สามารถให้พลังงานจนวัสดุพิมพ์หลอมเหลวเป็นหนึ่งเนื้อเดียวกัน ซึ่งทำให้การขึ้นรูปของชิ้นงานทำได้ละเอียดและแนบเนียนกว่า และมีผลกับสมบัติของชิ้นงานในการใช้งานด้วย เช่น ความแข็งแกร่ง ความคงทนเพิ่มขึ้น เสมือนการทำชิ้นงานจากการหลอมใส่แม่พิมพ์ (ระบบเก่าที่เคยทำกันมา) อีกด้วย นอกจากนี้ วัสดุพิมพ์ของ SLS อยู่ในรูปผงโลหะ แต่ EBM มีหลากหลายรูปแบบ เช่น ผง (ในระบบพิมพ์แบบ SLM หรือ DMLS) หรือ เส้น-ม้วน (ในระบบพิมพ์แบบ DED, LENS, EBAM ดังรูปที่ 6) ทั้งนี้ การอัดผงให้เป็นรูปแบบต่าง ๆ เพื่อง่ายต่อการขนส่งและเก็บรักษา ซึ่งเรียกรวมว่า Metal Material แต่เมื่อเวลาใช้งานต้องทำวัสดุเหล่านี้ต้องทำกลับให้เป็นผงก่อนแล้ว จนถึงขั้นตอนการหลอมเหลวและขึ้นรูปต่อไป ซึ่งอาจกล่าวโดยรวมได้ว่า ระบบ EBM จึงเป็นขั้นพัฒนาของระบบ SLS ไปอีกขั้น [10]



รูปที่ 6 ระบบการพิมพ์ 3 มิติ แบบ direct energy deposition (DED) [10]

อนึ่ง พึงทำความเข้าใจกับเทคโนโลยีที่มีความคล้ายคลึงกันของการผลิตด้วยวิธีนี้ คือ บริษัทที่มีศักยภาพจะสร้างสรรค์เครื่องมือที่ทำงานคล้ายคลึงกัน แต่มีความโดดเด่นของกลไกการพิมพ์ไม่ซ้ำกัน จึงเกิดเทคโนโลยีของเครื่องพิมพ์หลายชนิดที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้ดีเท่า ๆ กัน

2. สเตียริโอลิโทกราฟี (เอสแอลเอ) (stereolithography (SLA))

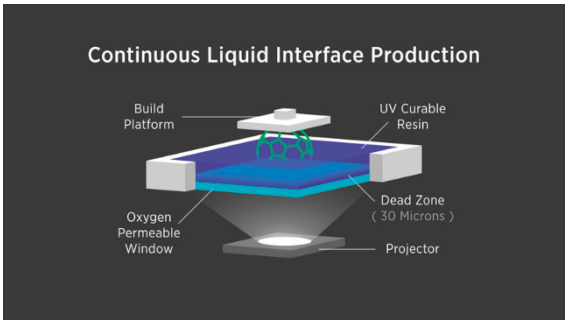
หลักการ : ลักษณะของเครื่องพิมพ์ดังรูปที่ 7 คือ มีอ่างใส่วัสดุพิมพ์ที่หลอมเหลวอยู่ และที่อ่างก็มีบริเวณที่เป็นบริเวณเปิด (window area) คือ เป็นส่วนสำหรับการพิมพ์และสร้างชิ้นงาน

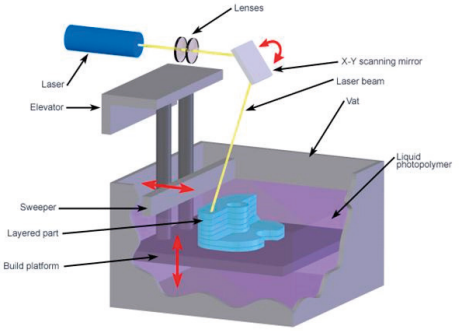
วัตถุ 3 มิติตรงบริเวณนี้ได้ เมื่อเครื่องพิมพ์เริ่มทำงาน วัตถุในชั้นนั้น ๆ จะไม่ถูกฉากกั้นและได้รับการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตหรือยูวีจากด้านล่าง รังสีตกกระทบกับวัสดุพิมพ์ ทำให้วัสดุพิมพ์เกิดปฏิกิริยาโฟโตพอลิเมอไรเซชัน (photopolymerization) จึงเกิดการเซ็ตตัวหรือแข็งตัวขึ้นของวัสดุพิมพ์บริเวณนั้น แท่นวัสดุจะขยับขึ้นในชั้นต่อไป เมื่อวัสดุบริเวณที่ได้รับการฉายรังสีที่อยู่ในอ่างนั้นจะแข็งตัวในชั้นถัดไป วัสดุชั้นใหม่ก็จะเชื่อมติดกับวัสดุชั้นเดิมด้วย การเกิดชั้นวัสดุพิมพ์ดำเนินเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนเป็นรูปร่างผลิตภัณฑ์ สำหรับวัสดุส่วนที่ไม่ได้รับการฉายรังสีจะไม่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน หรือเคียวริง (curing) คือส่วนที่ไม่แข็งตัวนั้นจะยังอยู่ในอ่างที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เรียกบริเวณนี้ว่า “เดดโซน (dead zone)” หมายถึงบริเวณที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเชิงแสง ซึ่งเป็นเอกลักษณ์เด่นของระบบนี้ ทำให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบเนียนและสวยมากกว่าระบบพิมพ์อื่น ๆ เป็นระบบที่สร้างชิ้นงานจากผิวชั้นบนสุดไปยังผิวชั้นล่างสุด (ซึ่งตรงข้ามกับระบบการพิมพ์ 3 มิติอื่น ๆ ที่มักสร้างจากผิวชั้นล่างแล้วขึ้นผิวชั้นบน) ลักษณะนี้คล้ายคลึงกับการดึงชิ้นงานที่สำเร็จขึ้นจากบ่อเรซิน [11–15]

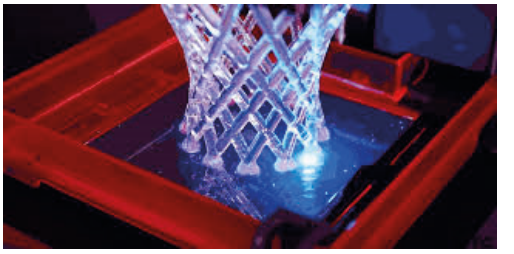
วัสดุพิมพ์ : พอลิเมอร์ต่าง ๆ เช่น พอลิยูรีเทนชนิดแข็ง (rigid polyurethane-RPU) หรือ พอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น (flexible polyurethane-FPU), พอลิยูรีเทนอิลาสติก (elastomeric polyurethane-EPU) ตัวอย่าง ไซยาเนตเอสเตอร์ (cyanate ester, CE), ยูรีเทนเมทาคริเลต (urethane methacrylate, UMA), ซิลิโคน (silicone, SIL)

ข้อดีหรือจุดแข็งของระบบ : เป็นระบบที่มีความเร็วในการสร้างชิ้นงานสูงมากและสูงกว่าระบบการพิมพ์ 3 มิติอื่น ๆ ถึง 100 เท่า และให้ชิ้นงานที่มีผิวสัมพันธ์เรียบเนียนมาก ใช้ผลิตชิ้นงานที่ทนความร้อนสูง มีความยืดหยุ่นสูงด้วย

ข้อเสียหรือสิ่งที่ต้องระวัง : เนื่องจากระบบนี้เป็นระบบอ่างเรซินที่หลอมละลายพร้อมใช้งาน และมีสารเคมีที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพมากในระดับหนึ่ง เวลาผลิตต้องมีความระมัดระวังอย่างมาก ต้องหลีกเลี่ยงการสัมผัส หรือการสูดดมไอระเหยจากสารเคมีวัสดุพิมพ์เหล่านี้ด้วย จึงต้องมีสถานที่ปิดมิดชิดสำหรับตั้งเครื่องพิมพ์ การทำงานพิมพ์ และการเก็บสารเคมีที่ใช้ในการผลิตวัสดุพิมพ์







รูปที่ 7 ระบบการพิมพ์แบบสเตียริโอลิโทกราฟี (เอสแอลเอ) [12–14]

การใช้งาน : เป็นระบบที่ได้รับความนิยมสูงและใช้แพร่หลายกันมากในงานหลายสาขาทั้งในระดับอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก หรือใช้ในงานทางการแพทย์ เป็นอาทิ โดยหลักการคล้ายกับการพิมพ์ลิโทกราฟีหรือออฟเซต หรือการพิมพ์ผิวแบบระนาบเรียบ

3. Jet Printing (การผลิตด้วยการพ่น)

ระบบนี้เท่าที่พบมีหลายเทคนิคด้วยกัน สำหรับเทคนิคที่นิยมใช้มีดังนี้ Jet Photopolymeri zation/PolyJet (โฟโตพอลิเมอไรเซชันแบบเจ็ต/พอลิเจ็ต), Material Jetting/ Multi-Jet FusionTM Printing (MJP) (การพ่นวัสดุพิมพ์), Binder Jetting/Polymer Jetting (การพ่นสารยึด/การพ่นพอลิเมอร์)

หลักการ : ใช้เทคโนโลยีของหัวพิมพ์ที่พัฒนามาจากระบบอิงก์เจ็ตในการพิมพ์ระบบ 2 มิติ ซึ่งเปลี่ยนจากการฉีดหมึกพิมพ์เป็นวัสดุพิมพ์ประเภทต่าง ๆ หัวพิมพ์สามารถเคลื่อนที่ได้ตามระนาบ X, Y และมีการฉายแสงตามหลังการฉีดวัสดุพิมพ์เพื่อให้วัสดุที่พิมพ์ก็เกิดปฏิกิริยาโฟโตพอลิเมอไรเซชันด้วยสารเคมีที่อยู่ในสารเคลือบ เกิดการแข็งตัวและยึดเกาะกับชั้นพิมพ์ก่อนหน้านั้นได้ ทั้งนี้ เทคโนโลยีนี้ มีชื่อเรียกของเทคโนโลยีแตกต่างกันออกไปตามบริษัทผู้คิดค้นพัฒนา แต่มีหลักการคล้ายคลึงกัน จะกล่าวดังต่อไปนี้

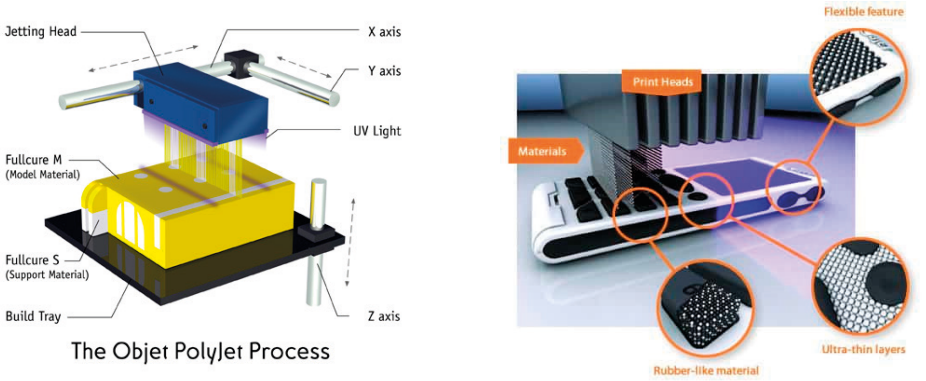
3.1 Jet Photopolymerization/PolyJet (โฟโตพอลิเมอไรเซชันแบบเจ็ต/พอลิเจ็ต)

หลักการ : เป็นเทคโนโลยีของ บริษัท Stratasys [16] เครื่องพิมพ์พิมพ์จากชั้นล่างของวัตถุสู่ชั้นบน (bottom up) คือ เริ่มจากการเอาวัสดุพิมพ์ในรูปของเหลวซึ่งมีสมบัติเป็นโฟโตพอลิเมอร์ ฉีดหรือพ่นผ่านหัวพิมพ์ขนาดเล็ก ๆ จำนวนมาก ให้ทั่วบริเวณพื้นที่จะพิมพ์ทั้งหมดแล้ว จึงฉายรังสีอัลตราไว โอเลตหรือแสงเลเซอร์ความร้อนสูงโดยกราดไปแต่ละแถว (คล้ายการพิมพ์ระนาบ 2 มิติธรรมดา) เมื่อฉายแสงหรือรังสีจนครบทั้งชั้นแล้ว ชั้นรองรับวัตถุบนแท่นพิมพ์ก็จะขยับลง เพื่อให้หัวพิมพ์พ่นวัสดุพิมพ์ชั้นต่อไป และฉายแสงอีก ซ้ำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนเสร็จทั้งชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 8 [16–17]

วัสดุพิมพ์ : พอลิเมอร์กลุ่มเซ็ตตัวถาวร หรือพอลิเมอร์เทอร์โมเซ็ต (thermoset polymer) เช่น ยางเอบีเอส หรือยางอะคริโลไนทริล-บิวตะไดอีน-สไตรีน (ABS, acrylonitrile-butadiene-styrene rubber), พลาสติกพอลิโพรพีลีน, พีพี (plastic polypropylene, PP), พอลิคาร์บอเนต, พีซี (polycar bonate, PC), พอลิเอทีลีน, พีอี (polyethylene, PE), เรซินยืดหยุ่นคล้ายยาง (rubber-like resin), เรซินเสริมแรงด้วยเซรามิก (ceramic reinforce resin)

ข้อดี หรือจุดแข็งของระบบ : เป็นระบบพิมพ์ที่ถือว่าพิมพ์ชิ้นงานได้ค่อนข้างรวดเร็ว และชิ้นงานมีความคงทน ทนทาน แข็งแรงดีมาก ซึ่งสามารถใช้ในอุตสาหกรรมอะไหล่ได้ดี ปัจจุบันได้มีการพัฒนาทำให้ความหนาระหว่างชั้นพิมพ์ได้ 14 μm (0.014 มิลลิเมตร) ทำให้ชิ้นงานมีความเรียบเนียนมาก สามารถทำรายละเอียดในชิ้นงานขนาดเล็กได้ดี เหมาะกับชิ้นงานที่มีความซับซ้อน มีรายละเอียดมากภายในชิ้นงาน ดังรูปที่ 9 เป็นภาพของชิ้นงานจำลองระบบเส้นเลือดในตับของมนุษย์ สามารถเก็บรายละเอียดได้อย่างดีมาก ใช้ประกอบการเรียนการสอน หรือการวางแผนการผ่าตัดของแพทย์ เทคโนโลยีการพิมพ์ polyJet นี้มีระบบสีพิมพ์ 3 มิติด้วยที่ก้าวหน้ามากในปัจจุบัน

ข้อเสีย หรือสิ่งที่ต้องระวัง : ต้นทุนการผลิตชิ้นงานต่อชิ้นยังถือว่าสูงอยู่ และมีความเป็นพิษที่เกิดจากวัสดุพิมพ์ชนิดโฟโตพอลิเมอร์ มีความเหนียว ล้างออกไม่ง่าย ซึ่งจะต้องระมัดระวังในการใช้งานและมีระบบจัดการบริเวณทำงานพิมพ์ที่ดี นอกจากนี้ ตัวพยุงของระบบมักใช้เป็นพวก propylene, acrylic monomer, polyethylene, and glycerin ซึ่งมีขั้นตอนการนำออกทั้งจากแท่นพิมพ์ และนำออกจากชิ้นงานเองที่ยุ่งยาก เช่น ต้องเข้าเครื่องพ่นน้ำเฉพาะภายใต้ความดันสูง และยังต้องเข้าเครื่องชุบสารเคมีเฉพาะอีกชั้น เพื่อให้พื้นผิวเรียบเนียนใส มัน ตามต้องการ ดังนั้น จึงไม่เหมาะกับการทำงานชิ้นใหญ่

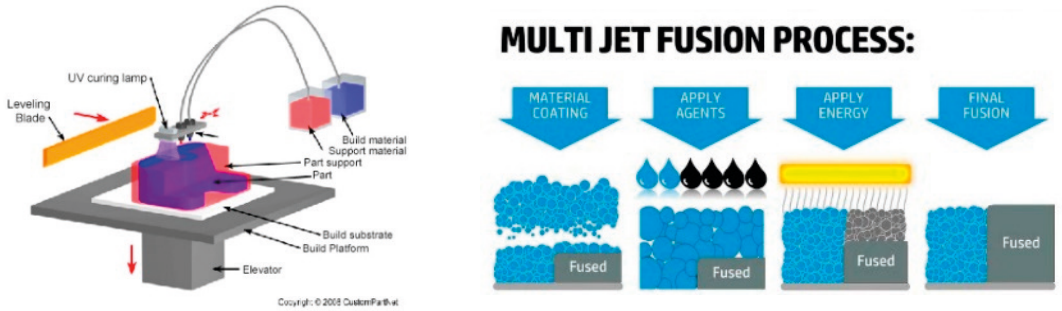


รูปที่ 8 ระบบการพิมพ์ 3 มิติ แบบ polyJet [16, 17]

รูปที่ 9 ชิ้นส่วนจำลอง 3 มิติ ของตับมนุษย์ซึ่งแสดงเส้นเลือดในตับที่พิมพ์ด้วย polyJet [16]

3.2 Material Jetting / MultiJet FusionTM Printing (MJP) (การพ่นวัสดุพิมพ์)

หลักการ : เป็นเทคโนโลยีของ บริษัท Hewlett packard (HP) [18] ใช้เทคโนโลยีของหัวพิมพ์ที่คล้ายกับระบบอิงก์เจ็ตเครื่องพิมพ์มีแท็งก์สำหรับบรรจุวัสดุพิมพ์แต่ละชนิด หรือแต่ละสี ซึ่งหลอมเหลวที่ 30–60 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 10 ขวา [19] เมื่อเริ่มพิมพ์ หัวพิมพ์จะฉีดวัสดุพิมพ์ออกมาพร้อมกับการเคลื่อนที่ไปทั่วบริเวณพิมพ์ด้วยในแต่ละชั้น เพื่อให้เกิดรูปร่างของวัตถุพิมพ์ในชั้นนั้น ๆ ขึ้น เมื่อพิมพ์เสร็จ 1 ชั้น แท่นพิมพ์จะขยับลง 1 ชั้น เพื่อให้หัวพิมพ์เริ่มทำการพิมพ์ชั้นถัดไปเรื่อย ๆ จนครบทั่วชิ้นงาน ทั้งนี้ ระหว่างการพิมพ์นั้น มีการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตไปที่ชิ้นงานด้วย เพื่อให้ชิ้นงานเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ แต่ในส่วนที่เป็นรายละเอียดเล็ก ๆ ที่ต้องเกิดระหว่างชิ้นงาน เช่น หูจับที่ไม่สามารถทรงตัว หรือคงตัวอยู่ได้อย่างอิสระด้วยตนเอง ในระหว่างการรอทำปฏิกิริยาเพื่อแข็งตัว จึงจำเป็นต้องมีวัสดุพิมพ์อีกชนิดหนึ่ง สำหรับพยุงโครงสร้างของชิ้นส่วนบอบบางเหล่านี้ให้ทรงตัวอยู่ได้ เมื่อทำปฏิกิริยาหลังจากฉายแสงหลักแล้ว วัสดุพยุงเหล่านี้จะมีความเปราะและแตกหักง่ายกว่าวัสดุพิมพ์จริงที่เป็นส่วนของวัตถุหลัก จึงเปิดโอกาสให้สามารถนำสารพยุงออกจากชิ้นงานได้ง่ายและสะดวกมากขึ้นในขั้นตอนหลังพิมพ์ และไม่ทิ้งรอยกับชิ้นงานหลัก อนึ่ง การผลิตระบบนี้ในเครื่องพิมพ์บางยี่ห้อและบางรุ่น ใช้วัสดุพยุงกับวัสดุพิมพ์เป็นวัสดุแบบเดียวกัน แต่ความหนาแน่นในการพิมพ์ชั้นสารพยุงน้อยกว่า ทำให้เกิดการแตกเปราะง่ายได้เช่นเดียวกันในระหว่างพิมพ์ (ดูรูปที่ 10 ซ้าย) [19]



รูปที่ 10 ระบบพิมพ์ 3 มิติ แบบการพ่นวัสดุพิมพ์ (material jetting) และขั้นตอนการสร้างโครงสร้างแต่ละชั้น [19]

วัสดุพิมพ์ : เอบีเอส หรือยางอะคริโลไนทริล-บิวตะไดอีน-สไตรีน (ABS, acrylonitrile-butadiene-styrene rubber, ABS) พลาสติกพอลิโพรพีลีน, พีพี (plastic polypropylene, PP) พลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง, เอชดีพีอี (high density polyethylene, HDPE) พอลิสไตรีน, พีเอส (polystyrene, PS) พอลิเมทิลเมทาคริเลต, พีเอ็มเอ็มเอ (poly (methyl methacrylate), PMMA) พอลิคาร์บอเนต, พีซี (polycarbonate, PC) พอลิสไตรีนทนแรงกระแทกสูง, เอชไอพีเอส หรือ ฮีปส์ (high-impact polystyrene, HIPS)

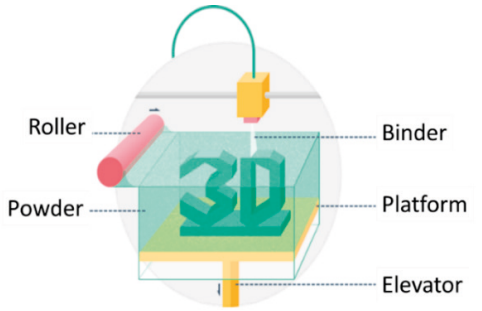
ข้อดี หรือจุดแข็งของระบบ : ใช้งานง่าย เครื่องมือและวัสดุพิมพ์หาได้ง่าย ราคาไม่แพงนัก สามารถพิมพ์ได้หลายสี พิมพ์วัสดุได้หลายชนิดในชิ้นงานเดียวได้ กระบวนการพิมพ์ค่อนข้างปลอดภัย สามารถนับเป็นเครื่องพิมพ์ประจำบ้านได้

ข้อเสีย หรือสิ่งที่ต้องระวัง : เครื่องพิมพ์พิมพ์งานพิมพ์ค่อนข้างช้า อาจต้องเสียเวลารอนาน

การใช้งาน : เป็นระบบที่ได้รับความนิยมพอสมควร ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม สามารถผลิตชิ้นงานได้หลายสีหลายวัสดุในชิ้นงานเดียวกัน

3.3 Binder Jetting/Polymer Jetting (การพ่นสารยึด/การพ่นพอลิเมอร์)

หลักการ : เป็นระบบที่พ่น “สารยึดหรือกาว” (binding agents) แทนหมึกพิมพ์ ขนาดของหยดกาวที่พ่นออกมามีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 80 ไมโครเมตร (รูปที่ 11) ในส่วนที่เป็นวัตถุในระนาบชั้นนั้น ๆ หัวพิมพ์จะพ่นกาวที่เตรียมไว้ จากนั้นใบมีดปาด หรือลูกกลิ้งจึงปาดและเกลี่ยผงวัสดุพิมพ์มาทับ ซึ่งทำให้บริเวณที่พิมพ์กาวไว้รับผงวัสดุพิมพ์ได้และทำให้ชั้นนี้ติดกันกับชั้นพิมพ์ก่อนหน้านี้ ส่วนบริเวณที่ไม่ได้พิมพ์กาวนั้น ผงวัสดุพิมพ์ก็สามารถหลุดออกได้ ไม่ได้ยึดขึ้นเป็นชั้น ๆ ต่อกัน เมื่อพิมพ์ชั้นหนึ่งเสร็จ หัวพิมพ์จะเลื่อนสูงขึ้น หรือถาดรองรับส่วนการพิมพ์จะลดระดับลง 1 ชั้น และทำชั้นใหม่ด้วยวิธีเดิมเช่นนี้ต่อไปเรื่อย ๆ คือ การฉีดกาวในชั้นถัดไปเป็นการเพิ่มความสูงให้วัตถุนั้นจนเสร็จสิ้นกระบวนการพิมพ์และได้เป็นวัตถุ 3 มิติ ขั้นตอนหลังการพิมพ์นั้น จะต้องนำเอาวัตถุที่พิมพ์เสร็จแล้วออกจากถาดผงวัสดุพิมพ์ และต้องมีการใช้แปรงปัด เป่า หรือดูดผงส่วนเกินจากวัตถุพิมพ์ออกไป วัตถุพิมพ์บางชนิดอาจต้องมีการฉายแสงหรือเข้าเตาอบเพิ่มเติม เพื่อให้เกิดการบ่ม (curing) ด้วยรังสี หรือความร้อนเข้ามาช่วยเพื่อให้วัตถุมีความคงทนแข็งแรงสมบูรณ์มากขึ้น สังเกตได้ว่า วิธีการพิมพ์นี้ไม่ได้หลอมเหลววัสดุพิมพ์เลยในระบบพิมพ์ หากจะใช้ความร้อนนั้นหมายถึงการตรึงในส่วนของกาวเน้นให้ผงที่อยู่ในเงาคงตัว [20–22]



รูปที่ 11 ระบบพิมพ์ 3 มิติ แบบ binder jetting/polymer jetting [20]

วัสดุพิมพ์ : ทราย/ซิลิกา (silica/sand) เหล็กไร้สนิม (stainless steel) หินทราย (sandstone) อัลลอย (alloy) ทังสเตน (tungsten) โลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำหรือปานกลาง เซรามิก

ข้อดี หรือ จุดแข็งของระบบ : ระบบนี้ไม่ได้หลอมวัสดุพิมพ์ ดังนั้น จึงมีวัสดุที่จะใช้พิมพ์ให้เลือกหลากหลายชนิด เป็นระบบที่ใช้งานง่าย หลักการเหมือนระบบเครื่องพิมพ์อิงก์เจ็ตที่คุ้นเคยกัน โดยส่วนใหญ่เป็นระบบที่ปลอดภัยและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ ย่อมขึ้นกับวัสดุพิมพ์ว่า มีความปลอดภัยมากน้อยเพียงใดและอย่างไร การพิมพ์พิมพ์ได้อย่างรวดเร็ว มีต้นทุนค่อนข้างต่ำ และสามารถพิมพ์ชิ้นงานได้ซับซ้อน หลากสี หลายวัสดุพิมพ์ ในชิ้นงานเดียวกัน (คล้ายกับพิมพ์หลากสีในระบบการพิมพ์อิงก์เจ็ต)

ข้อเสีย หรือสิ่งที่ต้องระวัง : ชิ้นงานไม่ค่อยคงทน ถาวร แข็งแรงนัก ไม่เหมาะกับการผลิตชิ้นงานเพื่อการใช้งานแบบหนักหน่วงจริง ๆ หรือไม่สามารถรับน้ำหนักมาก เพราะเนื่องจากชิ้นงานเกิดจากการเชื่อมวัสดุกันด้วยกาว ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านนานไป หรือชิ้นงานอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ทำให้กาวมีการเสื่อมสภาพ เช่น อุณหภูมิ ความกดดัน หรือรับแรงกด-แรงกระแทกสูงเกินไป อาจทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ง่าย ดังนั้น จึงเหมาะแก่งานต้นแบบหรือวัตถุที่ใช้เพื่อการตกแต่งเพื่อความสวยงามชั่วคราวมากกว่า

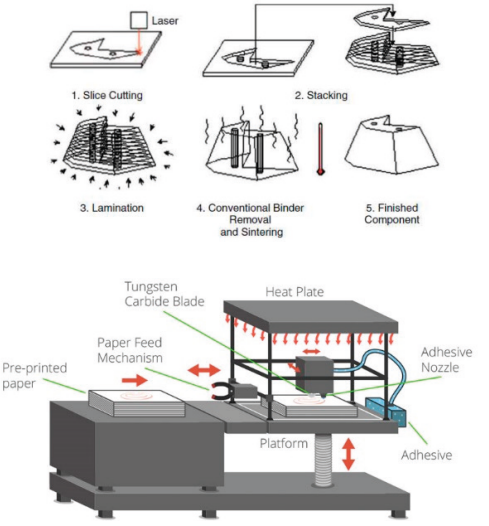
การใช้งาน : เป็นระบบที่ความเร็วในการสร้างชิ้นงานสูงกว่าระบบการพิมพ์ 3 มิติอื่น ๆ ถึง 100 เท่า และให้ชิ้นงานที่มีผิวสัมพันธ์เรียบเนียนมาก ยังเป็นระบบที่ใช้ได้กับงานหลากหลายประเภท มีวัสดุพิมพ์หลากหลาย และค่อนข้างปลอดภัยกับสิ่งแวดล้อม เหมาะกับการทำชิ้นงานต้นแบบ วัสดุตกแต่งที่ต้องการความหลากหลายของวัสดุและงานประเภทอัญมณี

4. Sheet Lamination/Laminated Object Manufacturing (LOM) (การผลิตแผ่นลามิเนต/การผลิตวัตถุลามิเนต หรือ แอลโอเอ็ม)

หลักการ : เป็นระบบที่ใช้ “กาว” หรือ “เคลือบด้วยกาว” (adhesive-coated) เชื่อมวัสดุพิมพ์แต่ละชั้นให้ติดกัน ได้แก่ กระดาษ พลาสติก หรือโลหะ เข้าด้วยกัน วางเรียงวัสดุพิมพ์ขึ้นไปเพื่อเพิ่มความหนาหรือมิติที่ 3 ขึ้น ทั้งนี้ ใช้มีดหรือเลเซอร์ตัด ทำให้แต่ละชั้นมีรูปร่างตามโมเดลที่สร้างไว้ในไฟล์วัตถุ 3 มิติ และอาจใช้ความร้อนช่วยในการเชื่อมแต่ละชั้นที่พิมพ์ลงมา (laminate) ให้มีความมั่นคง แข็งแรง และวัสดุแต่ละชั้นแนบสนิทกันมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ อาจมีขั้นตอนหลังการพิมพ์คือ ให้ความร้อนเพื่อระเหยเอากาวออกและให้วัสดุพิมพ์แต่ละชั้นแนบสนิทเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นด้วยตัววัสดุเอง และสุดท้ายก็ได้ชิ้นงานคุณภาพดีเยี่ยมพร้อมใช้งาน [23–25]

วัสดุพิมพ์ : กระดาษ พลาสติก โลหะ และวัสดุที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber-reinforced materials) ทั้งนี้ วัสดุพิมพ์อยู่ในรูปเป็นแผ่น ซึ่งอาจมาเป็นม้วนได้ เมื่อพิมพ์เสร็จแล้ว จะมีม้วนของวัสดุพิมพ์ที่เหลือจากกระบวนการพิมพ์ด้วย (take-up roll) ดังรูปที่ 12

ข้อดี/จุดแข็งของระบบ : ระบบนี้เป็นระบบที่ใช้ต้นทุนต่ำมาก พิมพ์ได้รวดเร็ว ปลอดภัยทั้งต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม รวมทั้งงานหลังพิมพ์ไม่ค่อยยุ่งยาก เนื่องจากการพิมพ์ระบบนี้มีพื้นฐานมาจากธุรกิจกระดาษและการพิมพ์แบบดั้งเดิม จึงง่ายต่อการควบคุมและเรียนรู้เทคโนโลยี นอกจากนี้ยังมีความแม่นยำเรื่องมิติสูงกว่าระบบการพิมพ์ 3 มิติอื่น ๆ มาก ดังนั้น จึงเหมาะกับผู้ที่ต้องการงานที่มีความละเอียดและเรียบร้อยมาก ให้ตรงกับโมเดลชิ้นงานในไฟล์วัตถุ 3 มิติจริง ๆ และยังสามารถทำชิ้นงานในขนาดใหญ่ได้ดีมากอีกด้วย



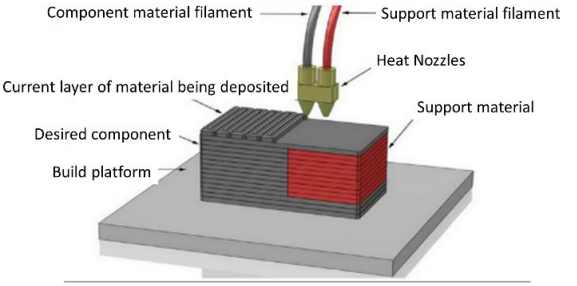
รูปที่ 12 (ซ้าย) ขั้นตอนการสร้างชั้นวัสดุพิมพ์แต่ละชั้นให้ก่อขึ้นเป็นโครงสร้าง 3 มิติ (ภาพขวา) เครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบ sheet lamination/laminated object manufacturing (LOM) [23]

ข้อเสีย/สิ่งที่ต้องระวัง : ระบบนี้ยังต้องอาศัยแรงงานคนช่วยควบคุมมากระหว่างการเตรียมพิมพ์ ระหว่างการพิมพ์ และหลังการพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์ นอกจากนี้ เนื่องจากเป็นระบบที่ใช้กาวและวัสดุพิมพ์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัตถุไวไฟ และทำงานภายใต้ความร้อนสูงในขั้นการลามิเนต จึงต้องทำงานอย่างระมัดระวังเกี่ยวกับเรื่องเพลิงไหม้ที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากวัสดุพิมพ์ถูกเชื่อมกันไว้ด้วยกาว ดังนั้น อายุการใช้งานสำหรับชิ้นงานที่ได้จากการพิมพ์ประเภทนี้มีน้อยกว่าชิ้นงานจากระบบพิมพ์ 3 มิติ แบบอื่น ๆ

การใช้งาน : เป็นระบบที่พัฒนามาจากเครื่องพิมพ์ในธุรกิจกระดาษและการพิมพ์ดั้งเดิม จึงมีความแม่นยำเรื่องขนาดวัตถุสูงมาก ต้นทุนต่ำ และมีการนำไปใช้กับอุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการการเจือปนของวัสดุ เคมีภัณฑ์ใด ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์

5. Material Extrusion/Fused Deposition Modeling (FDM) (การอัดรีดเส้นวัสดุ/การหลอมวัสดุและก่อเป็นรูปร่าง)

หลักการ : เทคนิคการพิมพ์ด้วยวิธีการหลอมเส้นวัสดุโดยรวมคล้ายคลึงกับระบบการพ่นวัสดุพิมพ์ (material jetting) ต่างกันที่วัสดุพิมพ์ที่ระบบนี้ใช้ เป็นเส้นพอลิเมอร์ที่อัดรีดเป็นเส้นแทนของเหลว วิธีการทำงาน (รูปที่ 13) คือ ใส่เส้นวัสดุพิมพ์หรือฟิลาเมนต์ (filament) ลงที่หัวพิมพ์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่หัวพิมพ์ ก็คือ การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เส้นใยพอลิเมอร์ที่อัดรีดเป็นเส้นหรือฟิลาเมนต์ เพื่อให้เส้นวัสดุเหล่านี้หลอมละลาย เช่น พอลิแลกติกแอซิด (PLA) ซึ่งมีอุณหภูมิหลอม 173–178 องศาเซลเซียส, Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ซึ่งมีอุณหภูมิหลอม 235 องศาเซลเซียส เมื่อวัสดุพิมพ์หลอมเหลวจนไหลได้แล้ว พอลิเมอร์ก็จะไหลผ่านหัวพิมพ์ที่กำลังเคลื่อนที่ทำให้เกิดการวางตัวของเส้นวัสดุพิมพ์ที่ไหลออกจากหัวพิมพ์ไปบนแท่นพิมพ์และวัสดุรองรับการพิมพ์ด้วย ก่อนพิมพ์ต้องเพิ่มอุณหภูมิให้แก่วัสดุก่อนบนแท่นพิมพ์ ดังนั้น วัตถุที่พิมพ์แล้วบนแท่นในชั้นก่อนหน้านั้นยังไม่เย็นตัวลง เมื่อมีวัสดุพิมพ์ชั้นใหม่พิมพ์ทับลงมา เกิดการเชื่อมระหว่างชั้นวัตถุพิมพ์เข้าด้วยกันไปด้วย [26–27]



รูปที่ 13 ระบบพิมพ์ 3 มิติ แบบ material extrusion/fused deposition modeling (FDM) [27]

วัสดุพิมพ์ : พอลิแลกติกแอซิด [poly(lactic acid), PLA], อะคริโลไนทริล-บิวทะไดอิน-สไตรีน, เอบีเอส (acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง, เอชดีพีอี (high-density polyethylene, HDPE) พอลิฟีนิล-ซัลโฟน, พีพีเอสเอฟ (polyphenylsulfone, PPSF) พอลิคาร์-บอเนต, พีซี (polycarbonate, PC) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต-ไกลคอล, พีอีทีจี (poly(ethylene terephthalate glycol), PETG)) พอลิเททระฟลูออโรเอทิลีน, พีทีเอฟอี (polytetrafluoroethylene, PTFE) พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโทน, พีอีอีเค หรือ พีก [poly(ether ketone), PEEK], พอลิอีเทอร์อีไมด์, (พีอีไอ) อัลเทม 9085, [Poly(ether Imide) (PEI) Ultem 9085], พลาสติกรีไซเคิล, เซรามิก, เหล็กกล้าไร้สนิม, โลหะไทเทเนียม, ไบโออิงก์ (bioink) [26]

ข้อดี หรือจุดแข็งของระบบ : เป็นระบบที่เครื่องพิมพ์และวัสดุหาซื้อง่าย ใช้กันอย่างแพร่หลายมาก และราคาถูก ค่อนข้างปลอดภัย สามารถใช้เป็นเครื่องพิมพ์ประจำบ้านได้

ข้อเสีย หรือสิ่งที่ต้องระวัง : ต้องระวังในเวลาพิมพ์ เนื่องจากหัวพิมพ์มีความร้อนมาก และหัวพิมพ์มักตันบ่อยเหตุจากการเย็นตัวของวัสดุพิมพ์เมื่อเลิกใช้ รวมถึงเส้นวัสดุจำนวนหนึ่งค่อนข้างไวต่อความชื้น ทำให้เปราะและหักง่าย จึงทำให้พิมพ์ไม่ได้ผลดี ต้องมีวิธีการเก็บรักษาวัสดุให้ดี

การใช้งาน : เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในระดับครัวเรือน พบเห็นได้ทั่วไป และใช้ในอุตสาหกรรมขนาดย่อมหลายสาขาอาชีพด้วยกัน เช่น อาหาร การแพทย์ อุปกรณ์การแพทย์

การใช้ประโยชน์ของการพิมพ์ 3 มิติกับภาคธุรกิจ หรือภาคอุตสาหกรรม

1. อุตสาหกรรมอาหารและธุรกิจอาหาร

บริษัท Barilla [28–29] เป็นผู้ผลิตขนาดใหญ่ที่สุดรายหนึ่งของประเทศสหรัฐอเมริกาและของโลกในด้านการผลิตเส้นพาสตาโดยใช้เทคโนโลยีทางการพิมพ์ 3 มิติ มาผลิตเส้นพาสตาแบบอุตสาหกรรมซึ่งสามารถควบคุมความหนาของเส้นพาสตาหรือแม้แต่รูปทรงและรูปร่างตามที่ต้องการได้ นอกจากนี้ มีการประยุกต์กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในร้านระดับเล็ก ๆ อีกหลายร้านเช่นกัน [30] ตัวอย่างร้านเบเกอรี (รูปที่14) หรือ ร้านกาแฟที่สามารถพิมพ์ขนม หรือหน้าเค้ก หรือตกแต่งเครื่องดื่มกาแฟ แก้วโปรดเป็นรูปร่าง (Ripper Maker) ตามที่ลูกค้าต้องการได้ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ [31]

รูปที่ 14 ตัวอย่างหนึ่งของอุตสาหกรรมอาหารรายใหญ่ที่ผลิตเส้นพาสตาด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ [31, 28]

2. ธุรกิจอสังหาริมทรัพย์

เป็นเวลานานกว่า 5 ปีแล้ว ที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ไม่ได้จำกัดเฉพาะการผลิตแต่สิ่งของขนาดเล็กที่สามารถบรรจุอยู่ในเครื่องพิมพ์ได้เท่านั้น ยังได้มีการนำการพิมพ์ 3 มิติ มาประยุกต์ในงานก่อสร้างอาคารที่อยู่อาศัยต่าง ๆ [32–33] ได้มีการทดลองสร้างบ้านทั้งหลังด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในสหรัฐอเมริกา เครื่องพิมพ์จะก่อซีเมนต์ขึ้นทีละชั้นจนเป็นบ้านจริงที่สามารถเข้าอยู่อาศัยได้จริง โดยใช้เวลาแค่เพียง 1–2 วัน เท่านั้น [34-35] จุดประสงค์ในการสร้างบ้านด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิตินี้ มีวัตถุประสงค์ที่จะช่วยผู้ยากไร้ที่อยู่ในสลัมให้มีบ้านที่เรียบง่ายและถาวร เช่น สลัมที่เมืองเคปทาวน์ ประเทศแอฟริกาใต้ หรือ ไนโรบี ประเทศเคนยา หรือ มุมไบ สาธารณรัฐอินเดีย นอกจากนี้ ในราชอาณาจักรสเปนได้มีการทดลองสร้างสะพานจริง [36] ที่ใช้สัญจรข้ามลำธารได้จริงดังรูปที่ 15 (ภาพซ้าย) และให้คนขึ้นไปยืนบนสะพานเพื่อทดสอบความแข็งแรง ซึ่งพบว่า รองรับน้ำหนักคนได้ถึง 20 คน ซึ่งประเทศสเปนได้คาดหวังว่า จะสามารถพัฒนาการพิมพ์ 3 มิติสำหรับสิ่งก่อสร้างสาธารณะอื่น ๆ ได้อีกจำนวนมากในอนาคต ซึ่งความแข็งแรงของสิ่งปลูกสร้างที่สร้างขึ้นนั้นได้ผ่านทดสอบโดยการทดลองของประเทศสเปนที่พิมพ์สะพานข้ามลำธารด้วยปูนซีเมนต์และให้คนขึ้นไปยืนบนสะพานเพื่อทดสอบ ความแข็งแรงของสะพาน ซึ่งพบว่า สะพานรองรับน้ำหนักคนได้ถึง 20 คน ส่วนการทดลองพิมพ์บ้านนั้น ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุพิมพ์เพื่อสร้างชั้นของบ้านขึ้นทีละชั้น จนสำเร็จเป็นบ้าน 1 หลัง ใช้เวลาแค่เพียง 1 วันเท่านั้น โดยไม่รวมเวลาการตกแต่งบ้านดังที่ได้แสดงในรูปที่ 15 ขวา

รูปที่ 15 สะพานคนเดินข้ามลำธารที่พิมพ์ด้วยการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้วัสดุพิมพ์ที่ใช้ในการก่อสร้างจริง (ภาพซ้าย) [36] และหัวพิมพ์ขนาดใหญ่ (ภาพขวาบน) ส่วนภาพขวาล่างเป็นตัวอย่างบ้านพิมพ์ 3 มิติเช่นกัน ใช้เวลาในการสร้างเพียง 1 วันเท่านั้น (ไม่รวมการตกแต่ง) [35]

3. อุตสาหกรรมและธุรกิจการผลิตอะไหล่สำหรับเครื่องยนต์ รถยนต์ และเครื่องบิน

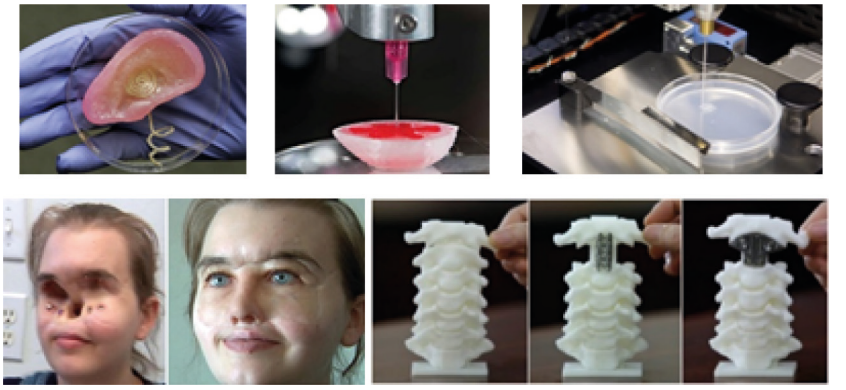
ในอุตสาหกรรมอะไหล่ เครื่องจักร และเครื่องยนต์ โดยเฉพาะรถยนต์นั้น มีการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ เข้ามาช่วยในการผลิตมาเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้ เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตลงและยังช่วยในเรื่องสิ่งแวดล้อมด้วย [37] คงปฏิเสธไม่ได้ว่า สุดยอดของการผลิตในด้านนี้คือ การผลิตชิ้นส่วนเครื่องยนต์ของเครื่องบิน [38–39] ซึ่งต้องใช้ความประณีต ละเอียด และชิ้นงานใหญ่มากด้วยเช่นกัน เป็นที่น่ายินดีว่า เครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีความก้าวหน้าไปถึงระดับที่สามารถพิมพ์ชิ้นส่วนของเครื่องบินได้แล้วโดยไม่เป็นปัญหาในการใช้งาน ซึ่งนั่นเป็นอีกนัยว่า หากสามารถผลิตชิ้นส่วนเครื่องบินได้ในระดับอุตสาหกรรมด้วยวิธีนี้ ต้นทุนการผลิตและซ่อมบำรุงมีราคาลดลงอย่างมาก และอาจทำให้ราคาค่าโดยสารจะถูกลงด้วยในอนาคต

การผลิตอะไหลในอุตสาหกรรมยานยนต์ด้วยการพิมพ์ 3 มิติ มีข้อดีที่เห็นได้ชัดคือ ใช้เวลาที่สั้นกว่า ต้นทุนถูกกว่า ปลอดภัยกว่า และตรงกับความต้องการของลูกค้าได้อย่างสูงสุด เพราะระบบการผลิตที่ทั่ว ไปที่ดำเนินการ ณ ปัจจุบัน จำเป็นต้องมีการหล่อแม่พิมพ์โลหะและระบบการผลิตที่ยุ่งยาก ยังมีของเสียที่เกิดจากการผลิตค่อนข้างมากที่ต้องกำจัด จึงมีต้นทุนการผลิตสูงมาก นอกจากนี้ การแก้ไขรายละเอียดของชิ้นส่วนเป็นไปอย่างชักช้าและมีราคามากกว่า ด้วยการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียดังกล่าว การพิมพ์ 3 มิติจะเป็นปัจจัยหลักอย่างหนึ่งที่สามารถลดต้นทุนให้สายการบินพาณิชย์ในอนาคตได้เป็นอย่างรูปธรรมมากขึ้นดังรูปที่ 16

รูปที่ 16 ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ของเครื่องบินที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ [37]

4. เทคโนโลยีและความก้าวหน้าทางการแพทย์

วงการสาธารณสุขและการแพทย์ได้นำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ มาปรับใช้อย่างกว้างขวางและได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายมากขึ้น [40] ด้วยความหวังที่ว่ามนุษย์จะสามารถสร้าง “อะไหล่ของมนุษย์” เช่น หัวใจ ไต ขาเทียม จมูก โหนกแก้มเทียม ใบหูเทียม กระดูกข้อไขสันหลัง อวัยวะทั้งหมดมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้นได้ และยังมีการประยุกต์งานกับเทคโนโลยีในห้องปฏิบัติการ เช่น การทดสอบยากับเชื้อ การเพาะเนื้อเยื่อและเทคโนโลยีสเต็มเซลล์ที่ใช้ในห้องทดลองจำนวนมากขึ้นและรวดเร็วได้อีกด้วย การประยุกต์กับงานเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติควบคู่ใช้กับวัสดุพิมพ์ทั้งโลหะและประเภทวัสดุไบโอ (biomaterials) แล้วให้ผลดีมาก เช่น ด้านทันตกรรม [41] ศัลยกรรมกระดูกและด้านออร์โธปิดิกส์ [42–43] หรือศัลยกรรมตกแต่งหลากหลาย [44] (รูปที่ 17)



รูปที่ 17 การใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในทางการแพทย์หลายด้าน [42–46]

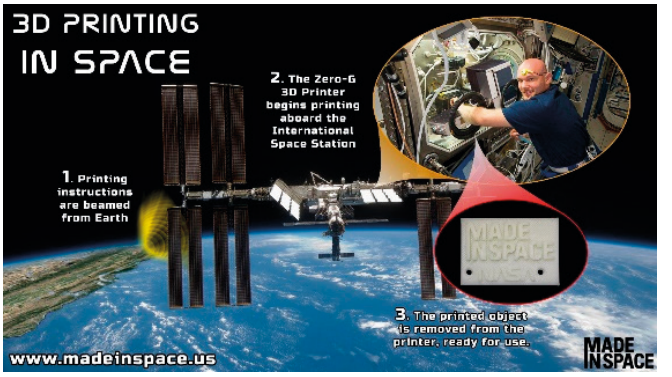
อย่างไรก็ตาม ณ สถานภาพปัจจุบัน อะไหล่ของมนุษย์หลาย ๆ อวัยวะยังไม่สามารถสร้างขึ้นด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ แม้ผลิตได้แล้วแต่มีอายุการใช้งานไม่นานนัก แต่การพิมพ์ 3 มิติได้เข้ามาช่วยเรื่องการสร้างต้นแบบเพื่อทดลองความเหมาะสมกับผู้ป่วยก่อนไปสร้างด้วยวัสดุทางการแพทย์จริง ใช้ในการเรียนการสอนและการวิจัยของสาขาวิทยาศาสตร์การแพทย์ด้วย ซึ่งทำให้เห็นภาพการเชื่อมโยงของอวัยวะต่าง ๆ ได้อย่างดีเยี่ยม ทำให้เกิดความเข้าใจทางสรีระวิทยาหรือกายวิภาคได้ดีขึ้น

นอกจากในสายวิจัยทางการแพทย์และชีววิทยา มีการใช้การพิมพ์ 3 มิติ เป็นเทคนิคหนึ่งในการวิจัยเพาะเชื้อต่าง ๆ เพื่อทดลองกับยาต่าง ๆ ในห้องทดลองอีกด้วย ซึ่งความก้าวหน้าด้านการแพทย์กับเทคโนโลยีทางการพิมพ์ 3 มิติ ได้รับการพัฒนาไปอย่างไม่หยุดยั้ง เชื่อได้ว่า มนุษย์น่าจะได้มี “อะไหล่อวัยวะมนุษย์” และร่างมนุษย์เทียม (อาจารย์ใหญ่) เพื่อการศึกษาด้านกายวิภาคซึ่งสำคัญมากในสายแพทยศาสตร์ อะไหล่มนุษย์ที่พิมพ์ได้ใกล้เคียงกับอวัยวะของมนุษย์ที่ใช้ได้จริง เช่น หู [45] จมูก [46] ไตเทียม [47] เส้นเลือดในหัวใจ หรือลิ้นหัวใจ [48] ในอนาคตอันใกล้นี้ ณ ปัจจุบัน ได้มีการใช้การพิมพ์ 3 มิติในการผ่าตัดศัลยกรรมตบแต่งใบหน้าให้ผู้ป่วยที่มีความบกพร่องอวัยวะบางส่วนบนใบหน้า (ดังรูปที่ 17) ใบหน้าเว้าแหว่งขาดไป เช่น จมูก เพดานปาก หรือโหนกแก้ม ซึ่งทำให้ผู้ป่วยมีชีวิตใหม่ที่ดีขึ้น สามารถเข้าสังคมของคนทั่วไปได้ จึงเป็นที่พึ่งพอใจอย่างกว้างขวางทั้งผู้ป่วยและแพทย์ผู้รักษา เพราะการทำงานของอวัยวะเทียมนั้นได้ผลดีและผู้ป่วยมีรูปลักษณ์ที่ดูดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อีกส่วนหนึ่งที่มีความพยายามทางด้านการแพทย์เช่นกัน คือ ด้านเภสัชศาสตร์ได้ประยุกต์การพิมพ์ 3 มิติ เพื่อผลิตยาที่เฉพาะเจาะจงสำหรับผู้ป่วย แต่ละราย ผู้ป่วยหวังว่า สามารถใช้ระบบการ “พิมพ์ยาตามคำสั่งหมอได้ด้วยตัวเอง” (pharmacy for self-medication) [49–50] โดยผ่านเภสัชกรใกล้บ้านได้ จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของแผนการรักษาในอนาคต ซึ่งแผนการรักษานี้จะสอดคล้องกับระบบการรักษาแพทยศาสตร์ทางไกล (remote medication) ภายใต้ภาวะที่ผู้ป่วยไม่จำเป็นต้องเดินทางหรือไม่สามารถเดินทางไปพบแพทย์ หรือ อยู่ใกล้แพทย์ตลอดเวลา แพทย์สามารถเฝ้าดูอาการ หรือแม้กระทั่งการวินิจฉัยโรคผ่านทางระบบอินเตอร์เน็ต ถึงผู้ป่วยในระยะทางไกลได้ เป็นนโยบายของอินเตอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง (internet

of things, IoT) เพื่อส่วนของสุขภาพด้วยเทคนิคดิจิทัล (digital health) ซึ่งเป็นการลดปัญหาการมีแพทย์ไม่เพียงพอกับจำนวนประชากรได้ทางหนึ่ง

5. เทคโนโลยีอวกาศ

สุดยอดของการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีของการพิมพ์ 3 มิติ คือ การพัฒนาเทคโนโลยีนี้ไปให้ถึงการพิมพ์ในระดับอวกาศ การพิมพ์ 3 มิตินี้ได้รับการพัฒนาจนสามารถพิมพ์ในอวกาศหรือสภาวะไร้น้ำหนัก [51] ซึ่ง NASA ได้ทดลองนำเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ขึ้นไปพิมพ์วัตถุในสถานีอวกาศได้เป็นผลสำเร็จ (รูปที่ 18) ซึ่งมีความหวังในอนาคตว่า มนุษย์ไม่จำเป็นต้องขนสัมภาระมากมายนักขึ้นไปให้เปลืองพื้นที่และปริมาตรในยานอวกาศ ให้ขนแค่วัสดุพิมพ์และเครื่องพิมพ์เท่านั้น และเมื่อต้องการใช้สิ่งใดก็พิมพ์จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ [52] การที่ NASA ได้ประสบความสำเร็จในการพิมพ์ชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ซึ่งเป้าหมายต่อไปในอนาคต คือ เพื่อสามารถการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติในอวกาศได้เป็นอย่างดีเทียบเท่ากับการอยู่ที่พื้นโลก เพื่อเป้าหมายสูงสุดในอนาคตที่จะสามารถรองรับอุตสาหกรรมการขนส่งทางอวกาศ ตลอดรวมไปถึงอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวในอวกาศที่จะคลอบคลุมการผลิต การขนส่งสินค้าที่สามารถประหยัดต้นทุนการขนส่งในอวกาศได้อย่างมหาศาล [52]

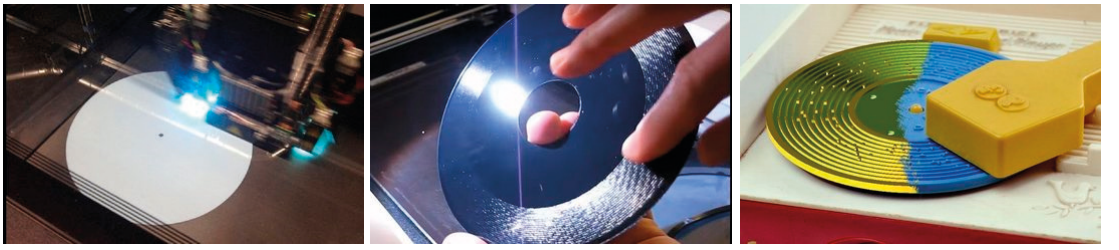


รูปที่ 18 การพิมพ์ 3 มิติในอวกาศโดยนาซา [51]

การใช้ประโยชน์ของการพิมพ์ 3 มิติกับงานในชีวิตประจำวัน

การพิมพ์ 3 มิติ ช่วยการผลิตของใช้ต้นแบบได้อย่างง่าย ๆ ภายในครัวเรือนทุกบ้านได้เอง เป็นการพิมพ์เมื่อต้องการ (print on demand) ซึ่งไม่จำเป็นต้องสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบอีกต่อไป สามารถทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำสำหรับการผลิตจำนวนน้อยได้ และสามารถแก้ไขผลงานได้จนกว่าจะพอใจ ทำให้ผู้สร้างงานสามารถสร้างผลงานขึ้นใช้เองได้ง่าย หรือทดสอบระบบอุปกรณ์พิเศษ เช่น smart device, smart system ง่าย ๆ ดั่งเช่น IoT ได้

ซอฟต์แวร์ประเภท CAD เป็นสิ่งจำเป็นที่สุดในการพิมพ์ 3 มิติ ปัจจุบันเราเห็นได้ว่า เครื่องคอมพิวเตอร์รุ่นใหม่ ๆ หรือแทปเล็ต หรือ โทรศัพท์มือถือ มักมี “แอปป์” หรือ ซอฟต์แวร์แจกฟรีให้ใช้กันอย่างแพร่หลายและมาพร้อมกับเครื่องเหล่านี้ [53] ขณะนี้ โปรแกรม CAD เป็นโปรแกรมพื้นฐานคล้ายกับโปรแกรม word, excel, power point กันไปแล้วที่ทุกระบบปฏิบัติการ (OS) ต้องติดไว้กับอุปกรณ์ทุกเครื่อง เช่น Fusion 360 ของ Autodesk, 3D Builder ของ Microsoft หรือ FreeCAD [53] เป็นแบบ open source ก็มี โปรแกรมได้รับการออกแบบให้ใช้งานได้ง่าย สะดวกรวดเร็วมากขึ้น ซึ่งรองรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติทุกรุ่น สิ่งที่น่าสนใจล่าสุดอีกประเด็นคือ การประสบความสำเร็จในการสร้างแผ่นเสียงเบื้องต้นด้วยเครื่องพิมพ์นี้บนวัสดุไวนิล (รูปที่19) จึงนับเป็นก้าวแรกในการพัฒนาอีกก้าวหนึ่งที่ทุกคนสามารถผลิตเครื่องบันทึกความจำ หรือเครื่องอ่านแถบสียงได้ด้วยตนเอง และอาจนำไปสู่การพัฒนาแถบแม่เหล็ก เป็นต้น พร้อม ๆ กับการพัฒนาให้มีความจุได้มากขึ้นเรื่อย ๆ ต่อไป [54]



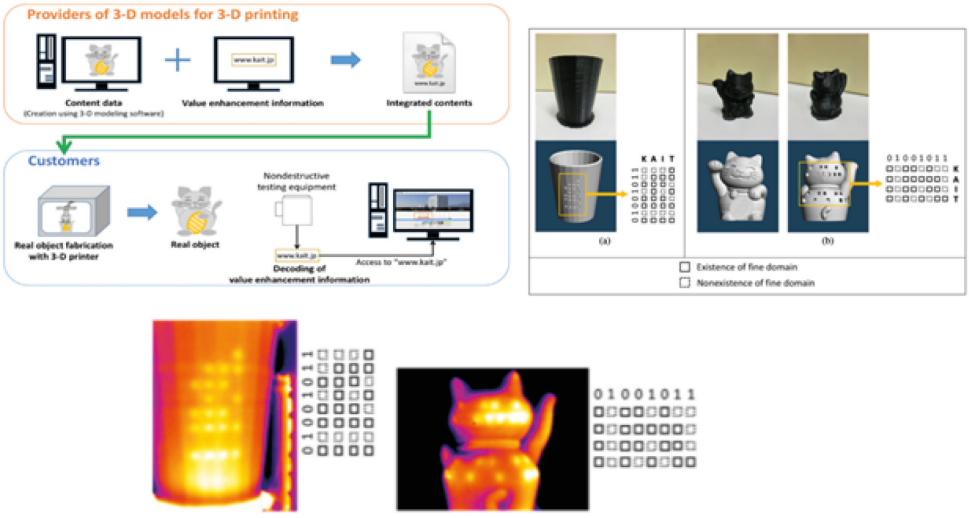
รูปที่ 19 การพิมพ์แผ่นเสียง (45-RPM) ที่สามารถบันทึกเสียง (เพลง) ได้ครั้งแรกของโลก จากวัสดุ PVC สามารถเล่นเพลงได้จริง

ในวิกฤติการณ์ที่โรคโคโรนาไวรัส-2019 หรือ โควิด-19 (Covid-19) กำลังระบาดหนักทั่วโลกและมีผู้ป่วยมากกว่า 17 ล้านคน และผู้ป่วยเสียชีวิตมากกว่า “หกแสนคน” และน่าเป็นห่วงมาก จึงเป็นภาวะที่บุคลากรทางการแพทย์ขาดแคลนวัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่จำเป็นอย่างมากต่อการรักษาผู้ป่วยและป้องกันตนเองจากติดเชื้อจากผู้ป่วย เช่น หน้ากากอนามัย ชุดป้องกันการติดเชื้อของแพทย์และพยาบาลหรือชุด PPE และอุปกรณ์การคัดกรองและรักษาที่จำเป็นอื่น ๆ ที่โรงงานผลิตเฉพาะทางยังไม่สามารถสนองความต้องการของบุคลากรทางการแพทย์ทั่วโลกและประชากรทั่วโลกจำนวน 7,800 ล้านคน (ณ มกราคม ค.ศ. 2020) เทคโนโลยีหนึ่งที่สำคัญมากชนิดหนึ่งได้เข้ามามีบทบาทและช่วยแก้ปัญหาเฉพาะหน้าได้อย่างดีและเป็นการช่วยเหลือที่จำเป็นมาก คือ การพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งได้มีส่วนเข้ามาช่วยผลิตเครื่องมือแพทย์ได้ดีระดับหนึ่งและเหมาะสมกับการใช้ในโรงพยาบาลได้เอง และมีประสิทธิภาพการใช้งานได้จริงและรวดเร็วอีกด้วยดังแสดงไว้ในรูปที่ 20 เช่น ประเทศอิตาลี [55] (รูปที่ 20 บน) ประเทศไทย (รูปที่ 20 ล่าง) บุคลากรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีร่วมกับบริษัทแห่งหนึ่งที่มีอุปกรณ์และเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดาวน์โหลดไฟล์ผลิตหน้ากากทางการแพทย์ ชุด PPE แผ่นป้องกันหน้า (face shield) และอุปกรณ์อื่น ๆ ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ส่งมอบแก่โรงพยาบาลใกล้บ้าน ยังช่วยเหลือบุคลากรทางการแพทย์ให้ปลอดภัยจากการติดเชื้อโรคโควิด-19 (Covid-19) ในเวลารักษาผู้ป่วยโรคร้ายแรงนี้ ในขณะเดียวกัน โรงพยาบาลศิครินทร์ได้พิมพ์หน้ากากบุคลากรทางการแพทย์ด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ไว้ใช้งานในโรงพยาบาลเพื่อปกป้องบุคลากรทางการแพทย์ที่กำลังรักษาประชาชนที่ติดเชื้อโรคโควิด-19 และป่วยหนักอยู่ พร้อมกับให้เจ้าหน้าที่หน่วยทำความสะอาดในโรงพยาบาลสวมใส่ป้องกันตนเองให้ปลอดภัยจากการติดเชื้อโรคโควิด-19 และได้ใช้กันแพร่หลายในทุกระดับของประชาชนแล้ว

รูปที่ 20 การมีส่วนร่วมของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อผลิตอุปกรณ์การแพทย์เสมือนทดแทนอุปกรณ์ทางการแพทย์ในยามขาดแคลนอุปกรณ์และเครื่องมือเพื่อช่วยชีวิต [55]

เทคโนโลยีการฝังข้อมูลในสิ่งพิมพ์หรือผลิตภัณฑ์จากการพิมพ์ 3 มิติ

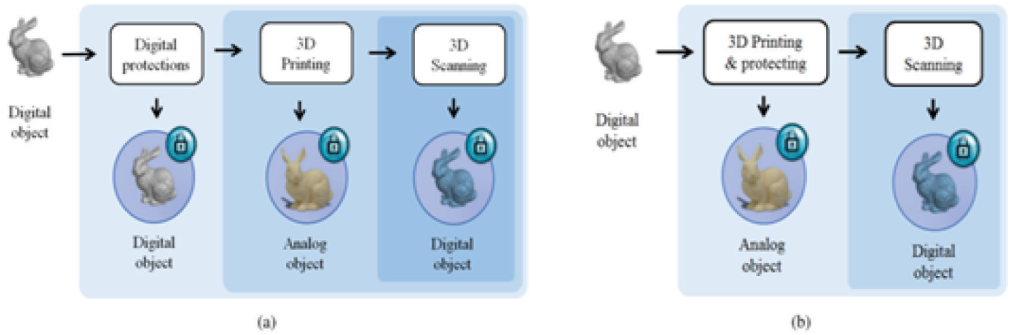
สิ่งหนึ่งที่นักวิจัยมีความพยายามในการพัฒนากันอยู่ในขณะนี้คือ ความพยายามในการฝัง/ซ่อน/แนบข้อมูลไปกับวัตถุที่พิมพ์โดยการพิมพ์ 3 มิติ ดังรูปที่ 21 สาเหตุเบื้องต้นของการฝังข้อมูลหรือรหัสเฉพาะเพื่อต้องการแสดงสถานะหรือตัวตนของผลิตภัณฑ์และผู้ผลิต เพื่อป้องกันการปลอมแปลง หรือเพื่อให้รอดพ้นจากการลอกเลียนแบบหรือละเมิดลิขสิทธิ์ในการผลิตสินค้าด้วยการพิมพ์ 3 มิติ (copyright protection) [56] ข้อความหรือรหัสที่ฝังไว้เป็นรหัสเฉพาะที่ไม่สามารถมองเห็นได้จากภายนอกและรหัสเหล่านี้ไม่รบกวนกระบวนการผลิต คุณภาพ และการใช้งานของวัสดุ เช่น ความแข็งแรง หรือฟังก์ชันการใช้งานของวัตถุ เวลาตรวจสอบรหัสต้องผ่านกระบวนการเฉพาะเท่านั้นจึงจะสามารถมองเห็นรหัสที่ฝังไว้ภายในชิ้นงานได้ มีข้อดีคือ สามารถผลิตในขั้นตอนเดียว คือ ด้วยการพิมพ์ด้วยระบบ 3 มิติ เพียงครั้งเดียว ก็ได้ชิ้นงานที่สำเร็จใช้งานได้ [57–60] ทั้งนี้ การพิมพ์ 3 มิติเริ่มต้นจากการสร้างหรือส่งต่อไฟล์วัตถุ 3 มิติ เพื่อพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังนั้น หากผู้ประสงค์ร้ายในการขโมยงานจะต้องขโมยไฟล์จากระบบอินเตอร์เน็ต หรือ ซื้อไฟล์เพียงครั้งเดียวแต่เพื่อนำมาผลิตแบบอุตสาหกรรม หรือทำการค้าก็ย่อมทำได้อย่างง่ายดาย จึงมีความไม่เป็นธรรมต่อผู้คิดผลิตงานนั้น ๆ ดังนั้น การต่อต้านหรือป้องกันลิขสิทธิ์ในการลอกเลียนแบบ จึงจำเป็นสำหรับการพิสูจน์ตัวตนผู้เป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ตัวจริง ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นหลักฐานในการดำเนินการทางกฎหมายได้ต่อไป



รูปที่ 21 การฝังข้อมูลลงในชิ้นงานวัตถุ 3 มิติ ที่ผลิตด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ [57–60]

ขั้นตอนการฝังข้อมูล เริ่มต้นจากการผลิตไฟล์ดิจิทัลของวัตถุ 3 มิติแล้ว ฝัง/แนบ/บันทึกข้อมูลบางอย่างที่ต้องการลงไปอยู่ภายในตัววัตถุ เช่น ช่องว่าง หรือใส่ QR code หรือใช้วัสดุพิเศษให้ซ่อนอยู่ในตัวหรือเนื้อวัตถุ ซึ่งทำให้มองจากภายนอกไม่เห็น เป็นการไม่รบกวนต่อการออกแบบสินค้า หรือแม้กระทั่งฟังก์ชันการใช้งานของวัตถุนั้น ๆ เมื่อสำเร็จเป็นไฟล์วัตถุ 3 มิติพร้อมพิมพ์ เมื่อพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติแล้วเสร็จเป็นชิ้นงาน ข้อมูลที่ได้ใส่เข้าไปจะถูกซ่อนในวัตถุนั้นเรียบร้อยแล้วเช่นเดียวกัน เมื่อต้องการพิสูจน์ทราบข้อมูลในวัตถุนั้น จึงนำวัตถุนั้นมาผ่านกระบวนการเฉพาะตามกรรมวิธีที่ฝัง หรือวิธีการพิเศษเฉพาะเพื่ออ่านข้อมูลนั้น ๆ ออกมา เช่น การให้ความร้อนแก่วัตถุ [58] หรือการส่องด้วยกล้องชนิดพิเศษ [59, 60] หรือวิธีอื่น ๆ ที่สอดคล้องกับวิธีที่ต้องใช้อ่านข้อมูลที่ฝังหรือซ้อนในวัตถุ ซึ่งจะทำให้สามารถอ่านข้อมูลที่ซ่อนไว้กับวัตถุได้โดยวัตถุนั้นไม่ได้รับความเสียหายแต่อย่างใด อนึ่ง สิ่งที่น่าสนใจสำ หรับเทคนิคนี้คือ สามารถฝังข้อมูลในสเกลขนาดเล็กได้ในระดับ 1 มิลลิเมตร

ซึ่งหมายความว่า เจ้าของงานจะสามารถซ่อนข้อมูลได้อย่างแนบเนียน ไม่กินพื้นที่และไม่รบกวนวัตถุหลักที่ผลิตได้ จึงเป็นประโยชน์มากในการนำไปใช้งานตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ รูปที่ 22 แสดงกระบวนการ 2 วิธีป้องกันลิขสิทธิ์ของชิ้นงานพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 22 กระบวนการ 2 วิธีป้องกันลิขสิทธิ์ของชิ้นงานพิมพ์ 3 มิติ
ภาพ (ก) การปกป้องข้อมูลในการพิมพ์ครั้งแรกประการหนึ่ง (ข) การปกป้องข้อมูลในการพิมพ์ซ้ำ [56]

เทคนิคการป้องกันข้อมูลเป็นเรื่องจริยธรรมและผลประโยชน์ มีหลายแบบและหลายชั้น ดังนี้ คือ

1. ป้องการการทำซ้ำหรือผลิตซ้ำจากการแปลงเนื้อหาในไฟล์ดิจิทัล เพื่อพิสูจน์ความเป็นต้นฉบับของผู้สร้างผลงานต้นทางโดยตรง การป้องกันแบบนี้มักเป็นการฝังข้อมูลบางอย่างลงในชิ้นงาน โดยตรงและมักซ่อนไว้ภายในหรือในตำแหน่งที่จะไม่รบกวนคุณภาพของชิ้นงาน

2. ป้องกันการทำซ้ำจากการสแกนชิ้นงานต้นฉบับ ทั้งนี้เพื่อการพิสูจน์และป้องกันการทำซ้ำจากการลอกเลียนแบบโดยใช้สแกนเนอร์ 3 มิติ มาสแกนชิ้นงานอีกรอบ ซึ่งรหัสลับแบบ ข้อ 1 ไม่ถูกถ่ายทอดมาด้วย เพราะสแกนเก็บข้อมูลจากพื้นผิววัตถุด้านนอกเท่านั้น ดังนั้น วิธีนี้จะสร้างรอยแผลเป็นหรือรอยขรุขระ อันเป็นเอกลักษณ์เฉพาะบ่งบอกการลงรหัสลับไว้ใต้ผิววัตถุ [57]รายละเอียดและเทคนิคการทำของแต่ละวิธีมีดังนี้ คือ การฝังข้อมูลเพื่อป้องกันการปลอมแปลงนั้นมีได้หลายชั้น [57–60] กล่าวคือ แบ่งเป็นการปกป้องข้อมูลในการพิมพ์ครั้งแรกประการหนึ่ง และการปกป้องข้อมูลในการพิมพ์ซ้ำอีกประการหนึ่ง

จากรูปที่ 22 จะเห็นว่า ขั้นตอนการผลิตวัตถุด้วยการพิมพ์ 3 มิตินั้น จะเริ่มตั้งแต่การสร้างไฟล์วัตถุ 3 มิติด้วยซอร์ฟแวร์ต่าง ๆ เป็นไฟล์ดิจิทัล จึงสั่งพิมพ์ได้ด้วยเครื่องพิมพ์จากไฟล์ดิจิทัลเท่านั้น ซึ่งแน่นอนว่า สามารถสั่งพิมพ์กี่ครั้งกี่สำเนาได้หรือตามจำนวนเท่าที่ต้องการ ซึ่งขั้นนี้เรียกว่า การสั่งพิมพ์วัตถุจากไฟล์แรกเริ่มโดยตรง การฝังข้อมูลในขั้นนี้จะฝังตั้งแต่ตอนเป็นไฟล์วัตถุ ทำให้ข้อมูลนี้ติดไปกับวัตถุจนกระทั่งพิมพ์ออกมา เมื่อพิสูจน์เอกลักษณ์จากภายนอกกับวัตถุพิมพ์นั้น จะสามารถอ่าน/ดึงข้อมูลที่ฝังไว้ตั้งแต่เป็นไฟล์ออกมาได้ด้วย แต่เมื่อนำวัตถุนั้นหรือวัตถุใด ๆ มาสแกนด้วยเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติ (3D-scanner) จะได้มาเป็นไฟล์ดิจิทัลอีกครั้ง หากจะพิมพ์วัตถุจากไฟล์ที่เกิดจากการสแกนมาครั้งนี้ (ครั้งที่ 2) บางเทคนิคจะไม่สามารถรักษาข้อมูลเดิมที่ฝังมาตั้งแต่เริ่มต้นได้ แต่บางเทคนิคก็สามารถรักษาข้อมูลเดิมได้ดีจนกระทั่งอ่านด้วยวิธีเฉพาะอีกครั้งหนึ่งหลังการพิมพ์ซ้ำอีกครั้ง ซึ่งทำให้มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ข้อเสียคือ ไม่สามารถเก็บรักษาข้อมูลหรือส่งต่อข้อมูลหลังสแกนและพิมพ์ใหม่อีกครั้ง แต่ข้อดีคือ หากผู้ผลิตต้องการแสดงหลักฐานว่า เป็นของแท้ต้นฉบับ ข้อมูลที่บันทึกไว้ในวัตถุนั้นต้องปรากฏตัวตนของวัตถุนั้นด้วยเท่านั้น เพราะเป็นการพิมพ์จากไฟล์ต้นฉบับเท่านั้น ทั้งนี้ ก็ขึ้นอยู่กับการเลือกวิธีใช้งานว่าผู้ผลิตและผู้บริโภคต้องการพิสูจน์ทราบตัวตน ณ ตำแหน่งใดของกระบวนการผลิตเป็นสำคัญ แต่ประโยชน์จากการที่เจ้าของงานสามารถแนบ/ซ่อนข้อมูลไว้ที่ตัววัตถุพิมพ์ 3 มิตินี้ได้ ไม่ใช่แค่การยืนยันตัวตนผู้สร้างชิ้นงานเท่านั้น ภายหลังได้มีการ

ประยุกต์ด้วยการแนบข้อมูลสำคัญบางอย่างเพิ่มเติมไว้กับวัตถุ อีก เช่น ข้อบ่งใช้ หรือข้อมูลสำคัญในการผลิต ประวัติสินค้า หรือแม้กระทั่งการโฆษณา โดยลิงค์ไปที่เว็บไซต์ หรือแสดงเป็น QR code ซึ่งเท่ากับเป็น “ฉลากลับ” ให้สินค้านั้น ๆ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าอีกทางหนึ่งด้วย

การเปลี่ยนแปลงการครองชีพและการทำงาน เมื่อโลกก้าวสู่ยุคการพิมพ์ 3 มิติ

ดังที่ได้กล่าวไปในข้างต้นว่า การพิมพ์ 3 มิติได้เข้ามามีบทบาทประมาณ ค.ศ. 2004 และนำไปประยุกต์ในงานหลายประเภท และเมื่อเข้าสู่ยุคที่มีการใช้การพิมพ์ 3 มิติกันอย่างแพร่หลายและได้ผลดี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหลายสิ่งหลายอย่างจากที่เคยปฏิบัติกัน จึงขอวิเคราะห์พอสังเขป ดังนี้

ก. สถานที่ที่ทำงาน ขั้นตอนกระบวนการพิมพ์ 3 มิตินี้ไม่ยุ่งยากมาก ส่วนใหญ่เป็นงานเขียนซอฟต์แวร์ ส่วนเครื่องพิมพ์สร้างมาจากโรงงานหรือสร้างเองได้ด้วยนักประดิษฐ์เอง เครื่องพิมพ์จะผลิตผลงานตามสั่งที่เขียนไว้ในซอฟต์แวร์ ดังนั้น การใช้แบบครัวเรือนนั้น ผู้บริโภคสามารถสร้างงานได้หลากหลาย สามารถผสมผสานวัสดุหลาย ๆ ประเภทและหลาย ๆ ชนิดในชิ้นงานเดียวกันได้ หรือสร้างความซับซ้อนในชิ้นงานได้ตามใจปรารถนา จึงสร้างความพึงพอใจมากแก่ผู้สร้างงานศิลปะและนักออกแบบเป็นอย่างมากเช่นกัน เพราะเป็นวิธีการผลิตงานที่ไม่ปิดกั้นความคิดและมีข้อจำกัดน้อยกว่าการผลิตแบบดั้งเดิมอย่างมาก ในทำนองเดียวกัน การผลิตในระดับอุตสาหกรรมก็เช่นกัน ด้วยระบบเครือข่ายอินเตอร์เน็ตที่เชื่อมโลกปัจจุบันเข้าด้วยกัน ทำให้เสมือนว่าโลกนี้เล็กลง จึงสามารถผลิตไฟล์ต้นแบบ 3 มิติ ณ ที่ใด ๆ ในโลก หรือแม้กระทั่งในอวกาศ จึงไม่ขึ้นกับสถานที่และกาลเวลา เพราะสามารถสร้างไฟล์วัตถุ 3 มิติ และส่งไฟล์นั้นไปพิมพ์ออกที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติในอีกซีกโลกหนึ่งได้อย่างรวดเร็ว สะดวกสบาย โดยใช้เวลาภายในไม่กี่นาที และเมื่อพิมพ์เสร็จก็สามารถใช้งานได้ทันทีอีกด้วย จึงทำให้เรื่องของสถานที่ผลิตและเวลาระหว่างโซนไม่เป็นข้อจำกัดหรือปัญหาอีกต่อไป

ข. ไม่มีปัญหาการปรับปรุงหรือปรุงแต่งซอฟต์แวร์ การพิมพ์ 3 มิตินั้น เริ่มต้นด้วยการสร้างไฟล์วัตถุ 3 มิติในคอมพิวเตอร์และทำสำเร็จได้งานที่เครื่องพิมพ์ที่มีไฟล์สำหรับวัตถุนั้นอยู่ ซึ่งสามารถพิมพ์วัตถุสำเร็จออกมาด้วยวัสดุพิมพ์หลากหลายชนิด ดังนั้น หากลูกค้าไม่พอใจส่วนไหนของชิ้นงานที่สร้างออกมา มีความประสงค์จะปรับแต่งส่วนใดหรือแม้กระทั่งเปลี่ยนวัสดุพิมพ์ หรืออาจผสมผสานวัสดุพิมพ์หลาย ๆ ชนิดในวัตถุเดียวกันก็ยังทำได้ง่าย เพราะสามารถเปลี่ยนที่ไฟล์ต้นทางและสั่งพิมพ์ใหม่ด้วยวัสดุอันใหม่ได้ในเวลาที่ต้องการ ทำให้ได้วัตถุที่ปรับแต่งแล้วเรียบร้อย ลดขั้นตอนยุ่งยากจากการผลิตแบบดั้งเดิม ๆ ไปอย่างหมดสิ้น เนื่องจากการแก้ไข หรือการเขียนไฟล์โปรแกรมง่ายขึ้น

ค. ไม่จำเป็นต้องสร้างแม่พิมพ์ก่อนการผลิต ในการผลิตวัสดุแบบวิธีดั้งเดิมที่มีต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูงถึงสูงมาก ส่วนหนึ่งมาจากเหตุที่ต้องสร้างแม่พิมพ์ก่อนการผลิตจริง หากแม่พิมพ์นั้นมีปัญหาจากการออกแบบก็ต้องแก้ไขจนใช้งานได้ จึงเป็นเรื่องที่ต้องลงทุนมาก เพราะจำเป็นต้องสร้างแม่พิมพ์ที่ปรับปรุงแก้ไขใหม่ตลอดเวลาแม้จะแก้ไขเพียงเล็กน้อยก็ตาม จึงทำให้ต้นทุนการผลิตนั้นสูงมากจนอาจจะไม่สามารถผลิตแข่งขันในตลาดได้ ดังนั้น ข้อดีเด่นที่เห็นชัดเจนของการพิมพ์ 3 มิติ คือ ไม่จำเป็นต้องสร้างแม่พิมพ์จริง (mold) แต่ก็ต้องทำแม่พิมพ์เสมือนจริงในงานออกแบบ ตรวจสอบและทดลองพิมพ์ด้วยโปรแกรมและเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ออกมาเป็นชิ้นงานได้ง่ายกว่า จึงสามารถตัดต้นทุนในส่วนการผลิตแม่พิมพ์ออกไปได้มากทีเดียว นอกจากนี้ การผลิตด้วยการพิมพ์ 3 มิติ เป็นการผลิตตามความต้องการ (print on demand) ของลูกค้าได้อย่างสมเหตุผลและสมราคา ทำให้ต้นทุนของสินค้าต่อชิ้นลดลง เมื่อมีความต้องการชิ้นงานเพิ่มเติมก็สั่งงานได้ทันที ช่วยประหยัดสถานที่เก็บสินค้าด้วย และยังสามารถเพิ่มมูลค่าสินค้าได้จากการแก้แบบและเสริมรายละเอียดหรือวัตถุประสงค์ของสินค้าได้ทุกครั้งที่ต้องการสินค้านั้น

ง. ระบบและกรรมวิธีการขนส่งสินค้า ต้นทุนการผลิตอีกส่วนที่จะหายไปจากการเปลี่ยนแปลงการผลิตเข้าสู่การพิมพ์ 3 มิติคือ การขนส่งสินค้า เนื่องจากกรรมวิธีในการผลิตดังที่กล่าวไปเบื้องต้น ผู้ผลิตสามารถส่งไฟล์วัตถุ 3 มิติไปพิมพ์ที่ใดก็ได้บนโลกนี้แม้แต่พิมพ์ในยานอวกาศดังเช่นโครงการอวกาศนาซา [51–52] ดังนั้น การขนส่งสินค้าตัวจริงจึงไม่จำเป็นอีกต่อไป แต่เป็นเพียงการส่งไฟล์ผ่านระบบอินเตอร์เน็ตแล้วปลายทางสามารถใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ พิมพ์สินค้า หรือ อะไหล่นั้นออกมาได้เอง และยังสามารถเลือกและกำหนดขนาด สี วัสดุ ตามที่ต้องการได้เองอีกด้วย ดังนั้น จะส่ง

ผลให้การเก็บตัวสินค้าจริงนั้นลดลงอย่างมาก จึงเปลี่ยนเป็นการเก็บวัสดุพิมพ์แทนเพื่อพร้อมสำหรับการพิมพ์ครั้งต่อไป

จ. ระบบการซื้อขายสินค้าและการบริการ

เป็นการแน่นอนว่า เมื่อเราสามารถพิมพ์วัตถุที่ใดก็ได้ในโลกใบนี้ ธุรกิจใหม่ ๆ ย่อมเกิดขึ้นได้ง่าย คือ การซื้อขายไฟล์วัตถุ 3 มิติ ซึ่งอาจมาแทนที่การซื้อสินค้าตัวจริงหลาย ๆ ชนิด แต่ในสินค้าบางกลุ่มก็มีความจำเป็นในการซื้อสินค้าตัวจริงอยู่ เช่น สินค้าอุปโภคบริโภค นอกจากนี้ ในธุรกิจการบำรุงรักษาหรือการซ่อมแซม การขายอะไหล่ อาจเปลี่ยนแปลงไปโดยค่าบริการอาจถูกลง เนื่องจากไม่มีค่าขนส่งแล้ว แต่เป็นค่าบริการการให้คำปรึกษาและค่าไฟล์อะไหล่ 3 มิติแทน เพราะบริษัทหรือศูนย์ซ่อมบำรุงเป็นแค่ผู้ให้คำแนะนำ หรือผู้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับอาการของเครื่องมือที่มีปัญหาเท่านั้น และเป็นผู้ส่งไฟล์อะไหล่ต้นฉบับนั้นให้รับบริการแทน เป็นการส่งไฟล์ไปให้ผู้บริโภคโดยตรงและให้ผู้บริโภคเป็นผู้ผลิตอะไหล่นั้นจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และประกอบชิ้นส่วนใหม่เข้ากับเครื่องแทนส่วนประกอบเดิม แต่ในกรณีของเครื่องจักรขนาดใหญ่ ๆ เช่น เครื่องจักรสำหรับรถยนต์ เจ้าของรถยังต้องนำรถยนต์เข้าไปซ่อมที่ศูนย์โดยตรงอยู่ เพียงแต่ระยะเวลาในการรออะไหล่นั้นมักสั้นลง เพราะไม่ต้องรอการขนส่งและรอชิ้นส่วนของรถยนต์อีกต่อไป เนื่องจากศูนย์บริการมีไฟล์อะไหล่พร้อมพิมพ์อยู่แล้ว เป็นต้น

แม้ว่าการผลิตแบบการพิมพ์ 3 มิติ คือ การผลิตแบบพิมพ์ทับชั้นแผ่นพิมพ์วัสดุทีละชั้นจนได้รูปร่างที่ต้องการก็ตาม สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ การนำวัสดุที่ใช้ผลิตวัสดุจากการพิมพ์ 3 มิติ จากระดับต้นแบบ (prototype) ไปสู่การผลิตระดับอุตสาหกรรม (production) ด้วยเครื่องผลิตที่มีขนาดใกล้เคียงกับการผลิตทางอุตสาหกรรม นั่นคือ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีขนาดใหญ่ พิมพ์ด้วยความเร็วสูงมาก และมีค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น วัสดุเคมีและส่วนประกอบอื่น ๆ จึงเป็นต้นทุนที่สำคัญ การทดสอบและพัฒนาวัสดุดั้งเดิมให้มีความยืดหยุ่นและเหมาะสมในการผลิตจึงจำเป็นต้องสอดคล้องกับมาตรฐานสากล หรือมาตรฐานโลก เช่น ASTM หรือ ISO ในด้านวัสดุและกรรมวิธีการผลิตที่ปลอดภัย การผลิตระดับต้นแบบทุกวันยังมีปัญหาเรื่องวัสดุที่เหมาะสมกับการผลิตระบบใหม่ ความละเอียดของผลิตภัณฑ์พิมพ์และการจัดการสีของผลิตภัณฑ์ ยังไม่เข้ามาตรฐานการผลิตเมื่อเทียบกับการผลิตแบบอุตสาหกรรมดั้งเดิม เป็นอาทิ ตัวอย่างการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ที่ต้องมีโลหะผสมกับสารสีที่เติมลงไปยังให้ค่าของสีที่วัดได้และคุณภาพสีที่ปรากฏไม่เหมือนคุณลักษณะที่ได้จากการผลิตดั้งเดิม ดังนั้น วัสดุเริ่มต้นที่ใช้เป็นสารหลัก สารรองและสารเติมแต่งของวัสดุสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ทั้งสมบัติพื้นฐานทางเคมี กายภาพ วิศวกรรมศาสตร์ รวมทั้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารเคมีกับวัสดุที่ใช้งาน หรือวัสดุที่ใช้ผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถแทนที่ชิ้นงานที่ผลิตได้ด้วยวิธีดั้งเดิม ต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดด้านสุขภาพ สิ่งแวดล้อมการผลิต และการใช้งานที่ปลอดภัย รวมทั้งผลิตภัณฑ์แต่ละชิ้นมีต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงกว่าและผลิตได้รวดเร็วกว่าการผลิตแบบดั้งเดิม

การพิมพ์ 4 มิติ และการเปลี่ยนแปลงของโลกจากยุคการพิมพ์ 3 มิติ และ 4 มิติ

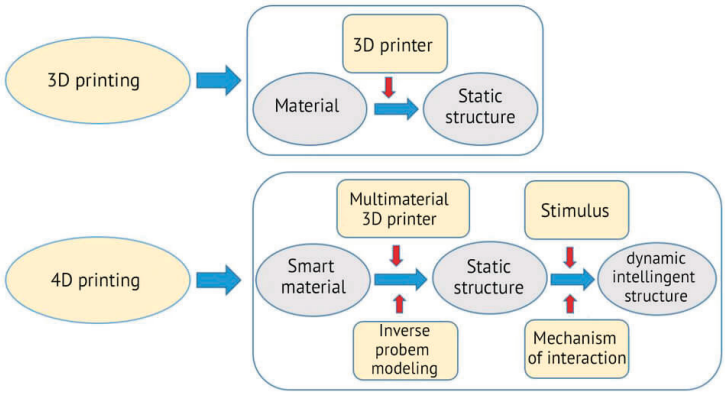
จากเนื้อหาดังกล่าวข้างต้น ได้เกิดงานวิจัยขั้นสูงจำนวนมาก และพบว่า กระบวนการผลิตในการพิมพ์ 3 มิตินั้น มีวิวัฒนาการและได้พัฒนาสู่การพิมพ์ 4 มิติ เมื่อวัตถุสำเร็จออกจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติแล้ว เราจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลักทางกายภาพใด ๆ ของวัตถุนั้นได้อีก จากการประ ยุกต์การพิมพ์ 3 มิติในงานการผลิตหลาย ๆ ด้าน ทำให้ทีมนักวิจัยหลายประเทศเริ่มมีความคิดที่จะพัฒ นาให้วัตถุที่ได้จากการพิมพ์แล้วนั้น สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติบางสิ่งบางอย่างได้ด้วยเพื่อเพิ่มคุณลักษณะในการใช้งาน หรือ เพิ่มมูลค่าสินค้าได้มากขึ้นไปอีก จึงทำให้เกิดการพิมพ์ 4 มิติ ขึ้น [61]

จากรูปที่ 23 (ก) พบว่า จุดหักเหของการพิมพ์ 4 มิติ อยู่ที่วัสดุพิมพ์ที่ใช้มีความสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงหรือ วัสดุปราดเปรื่อง (smart materials) [62] ที่สามารถทำให้ชิ้นงานหลังพิมพ์แล้ว สามารถเปลี่ยนสมบัติได้ในเวลาต่อมาด้วยสิ่งเร้าบางประการ เมื่อได้รับการกระตุ้นหรือสิ่งเร้าบางชนิดจากภายนอก ดังนั้น วัสดุที่พิมพ์ด้วยการพิมพ์ 4 มิติจะมีรูปที่เปลี่ยนจากโครงสร้างนิ่ง (static) กลายเป็นโครงสร้างที่เคลื่อนไหว หรือพลวัต (dynamic) และมีความสามารถมากขึ้นหรืออาจฉลาดในการรับรู้ขึ้นเป็นวัสดุชนิดฉลาด (active/smart material) ได้ในเวลาต่อมาอีกด้วย [62, 63]

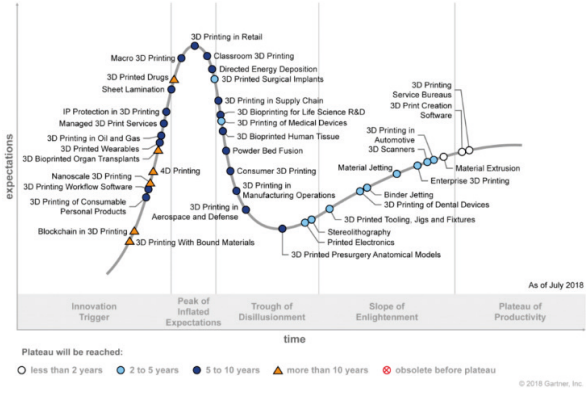
ดังนั้น หากเมื่อพิจารณาการพิมพ์ 4 มิติอย่างละเอียดแล้วจะพบความจริงว่า เทคนิคการพิมพ์ 4 มิตินั้นที่แท้จริงก็มาจากการพิมพ์ 3 มิติทั้งหมดแต่การเลือกใช้วัสดุต่างหากที่ไม่เหมือนกัน กล่าวคือ เลือกวัสดุที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการ

กระตุ้นจากกรรมวิธีบางอย่าง หลังการพิมพ์เสร็จแล้ว เป็นสิ่งกำหนดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของวัตถุพิมพ์ที่ได้ ทั้งนี้การออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน ยังมีส่วนร่วมทำให้ผลิตภัณฑ์จากการพิมพ์มีความสามารถ เช่น เพิ่มฟังก์ชันการใช้งานได้มากขึ้นเพื่อการเปลี่ยนแปลงอีกทางหนึ่ง

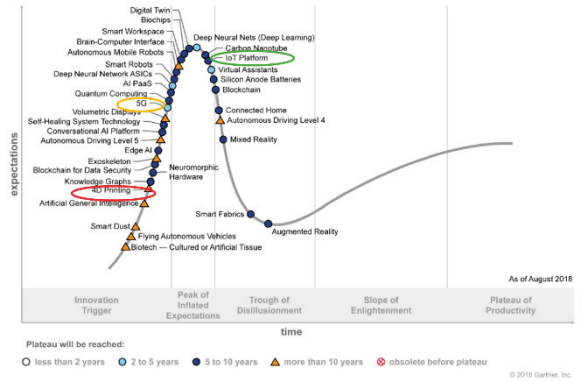
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 23 แนวโน้มของการพัฒนาเทคโนโลยีในอนาคต (ก) แสดงการเปรียบเทียบความเหมือนและความแตกต่างระหว่างการพิมพ์ 3 มิติกับการพิมพ์ 4 มิติ [64] (ข) และ (ค) แสดงพัฒนาการของการพิมพ์ 3 มิติ และ 4 มิติในเดือนกรกฎาคม และสิงหาคม ค.ศ. 2018 [65]

หากมองการพัฒนาและการใช้งานตามเส้นโค้งของการพิมพ์ 3 มิติในรูปที่ 23 (ข) จะพบว่า มีเทคโนโลยีที่พัฒนาแล้วจำนวนหนึ่งและมีเทคโนโลยีอีกจำนวนมากที่ยังต้องพัฒนาต่อไป การพิมพ์ 4 มิติอยู่ในตำแหน่งที่จะต้องพัฒนาต่อไปอีกมาก ส่วนรูปที่ 23 (ค) มีการแสดงตัวตนของการพิมพ์ 4 มิติ และ 5G ที่กำลังเติบโตและใช้เวลาอีกประมาณ 2–5 ปี ณ สิงหาคม 2018 นั่นแสดงว่า 5G ในปี 2020 เราจะได้เริ่มเห็นการใช้งานบ้างแล้ว ส่วน IoT นั้น ได้รับการพัฒนาที่เลยจุดสูงสุดของเส้นโค้งและมีแนวโน้มขาลง นั่นคือ เทคโนโลยี IoT ได้รับการพัฒนาผ่านจุดสูงสุดไปแล้ว แสดงว่า ระบบนี้โดยรวมพร้อมที่จะให้บริการสู่ภาคประชาชนระดับครัวเรือนทั่วไปแล้ว ซึ่งเราจะได้เห็นการสร้างงานในด้านนี้อย่างต่อเนื่องในเวลาต่อมาอย่างแน่นอน ส่วนโครงข่ายอินเตอร์เน็ต 5G จะได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งคาดว่าจะพัฒนาถึงขั้นสุดในระยะ 1-2 ปีข้างหน้า และพร้อมที่จะมี 6G คู่ขนานกับงานพัฒนาด้านอื่น แต่ในขณะที่เทคโนโลยีทางการพิมพ์ 4 มิติ นั้น ได้เปิดใช้ตั้งแต่ ปี 2013 และงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีด้านวัสดุซึ่งเป็นต้นตอของการพัฒนาด้านนี้จะมีมากขึ้นในระยะมากกว่า 10 ปีข้างหน้า ทั้งนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการคิดค้นพัฒนา และวิจัยต่อยอดนั้น ก็เพื่อให้เข้าใจในธรรมชาติของวัสดุเกิดใหม่และหาประโยชน์ใช้งานได้ด้วยวัสดุนั้นอย่างเต็มประสิทธิภาพ จึงนับได้ว่า เทคโนโลยีการพิมพ์ 4 มิติ เป็นเทคโนโลยีประเภทหนึ่งแห่งอนาคตอันใกล้ แต่เป็นที่น่าสังเกตว่า ในเส้นกราฟในรูปที่ 21 ไม่มีเส้นโค้งของการพัฒนาการพิมพ์ 3 มิติแล้ว เนื่องจากระบบของการพิมพ์ 3 มิติ ได้พัฒนามาถึงจุดสูงสุดของการพัฒนาเทคโนโลยีพื้นฐานไปแล้ว แต่นั่นไม่ได้หมายความว่า ระบบการพิมพ์ 3 มิตินั้นจะหยุดหายไปหรือไม่น่าลงทุนอีกต่อไป สิ่งที่จะสื่อสารอาจไม่มีการพัฒนาระบบการพิมพ์ต่อไปมากกว่านี้สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ อาจหมายความว่า วิธีการพิมพ์ 3 มิติที่สมบูรณ์แบบได้เกิดขึ้นแล้ว พร้อมที่จะใช้งานในระดับอุตสาหกรรมและระดับประชาชนทั่วไป ดังเช่น ระบบโทรศัพท์มือถือ, เทคโนโลยี VR, AR แต่ยังสามารถมีการพัฒนาต่อไปเป็นการพิมพ์ 4 มิติ ซึ่งมีรากฐานของการผลิตชิ้นงานมาจากการพิมพ์ 3 มิติทั้งสิ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือ การพิมพ์ 3 มิติ ได้แฝงตัวรวมอยู่ในการพิมพ์ 4 มิติไปเรียบร้อยแล้ว ซึ่งสามารถตีความได้ว่า แนวทางการพัฒนานั้นยังยั่งยืนและสดใสไปอีกนาน

ประมาณ ค.ศ. 2013 ได้เริ่มมีการนำการพิมพ์ 4 มิติมาประยุกต์กับงานด้านการพิมพ์อวัยวะทางชีวภาพด้วยการพิมพ์ 4 มิติ (4D bio-printing) [66] ต้องอาศัยหลากหลายฟังก์ชันมากขึ้น การพิมพ์ 4 มิติ เป็นศาสตร์ที่ผสมผสานทางวิศวกรรมชีวิภาพ (bioengineering) วิทยาการวัสดุ (material sciences) วิทยาศาสตร์พื้นฐาน (basic sciences) เช่น เคมี ชีวเคมี ฟิสิกส์ คณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ (computer sciences) ดังนั้น การพิมพ์ 4 มิติ ก็คือ การพิมพ์ 3 มิติที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปลักษณ์ หรือสมบัติบางชนิดของวัสดุพิมพ์เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งต้องมีตัวกระตุ้นที่แฝงมากับสมบัติของวัสดุที่เลือกใช้ จึงเสมือนหนึ่งว่า ได้มีการตั้งเงื่อนไขบางอย่างกับชิ้นงานได้ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการพิมพ์เรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานจะถูกกระตุ้นด้วยตัวแปรในสภาพแวดล้อมบางอย่าง เช่น ความชื้น อุณหภูมิ แรงดัน ทำให้ชิ้นงานสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบของตัวสารเองไปได้ในอีกรูปแบบหนึ่งโดยอัตโนมัติตามเวลาที่กำหนด ความสามารถของชิ้นงานที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบของตัวสารเองขึ้นได้ตามเวลานี้ เกิดขึ้นได้จากการกำหนดความสามารถ หรือเงื่อนไขบางอย่างให้กับวัสดุที่มีความละเอียดระดับไมโครเมตรในตอนใกล้เสร็จสิ้นกระบวนการพิมพ์ [67] นอกจากมิติที่ 4 คือ มิติของ “เวลา” แล้ว ยังมีตัวแปรอื่นร่วมด้วย เช่น อุณหภูมิ น้ำ พลังงานแสง หรือ กระแสไฟฟ้า ซึ่งสมบัติของตัวแปรเหล่านี้ ย่อมก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและแสดงออกได้สมบัติหรือปรากฏการณ์ของวัสดุนั้น ๆ เช่น เปลี่ยนรูปร่างไป เมื่อมีการดูดซึมน้ำได้เมื่อเวลานานขึ้น การให้วัสดุนั้นได้รับอุณหภูมิมากขึ้น การให้กระแสไฟฟ้าแก่วัสดุนั้น จึงทำให้คุณลักษณะบางชนิดของวัตถุนั้นเปลี่ยนแปลงไป เช่น รูปร่างและขนาด สี ความยืดหยุ่น ความอ่อนนุ่ม หรือแม้กระทั่งข้อมูลบางชนิดก็ตาม เช่น ในด้านเทคโนโลยีข้อมูล (information technology) ชิ้นงานสามารถเก็บและเปลี่ยนแปลงข้อมูลได้อย่างไม่จำกัดจำนวนครั้งและได้รูปร่างเสมอ แต่เป็นสิ่งที่เปลี่ยนแปลงได้ตามกาลเวลา ซึ่งสมบัติเหล่านี้จะแตกต่างจากตอนที่พิมพ์เสร็จใหม่ ๆ [60]

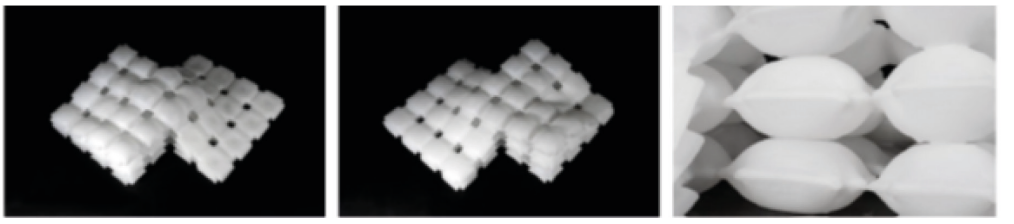
ประโยชน์การใช้งานของเทคโนโลยีการพิมพ์ 4 มิติ มีหลากหลายสาขาวิชาชีพ เช่น งานออกแบบเครื่องแต่งกาย 4 มิติ [68] ดีไซน์เนอร์ชื่อดังชาวญี่ปุ่น Issey Miyake ได้ออกแบบชุดเดรส 4 มิติ และเป็นจุดเด่นที่นำเสนอในงาน Paris Fashion Week (August 2019) ส่วนอุตสาหกรรมการพิมพ์อาหารโดยการพิมพ์อาหารสำเร็จรูปและเพิ่มฟังก์ชันการตกแต่งอาหารด้วยการใช้

อาหารที่เป็นเจลแปรรูปได้ตามเวลา [69] ในวงการสถาปัตยกรรมใช้หลักการนี้ออกแบบผนังและกำแพงให้มีความยืดหยุ่นที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อสภาพอากาศหรือสภาพแสงสว่างภายนอกอาคารเปลี่ยนแปลงไป [70] หรือออกแบบกำแพงให้ปลูกต้นไม้ให้ออกดอกตามฤดูกาลหรือนอกฤดูกาล ก็ย่อมทำได้จากการกำหนดตัวแปรที่ส่งเสริมภารกิจเหล่านั้นให้สำเร็จ [71]

แม้ว่าในปัจจุบัน การพิมพ์ 4 มิติได้ใช้ประโยชน์กับงานสถาปัตยกรรมและทางชีวะการแพทย์ค่อนข้างมากจากการมองหาประโยชน์การใช้งานของวัสดุกับการพิมพ์ 4 มิติ สถาบันที่เป็นผู้นำในงานวิจัยด้านการพิมพ์ 4 มิติ นอกจากสถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology, MIT) มีห้องปฏิบัติการด้าน self-assembly lab ยังมี Wyss institute (biologically inspired engineering) ศึกษาด้านนวัตกรรมวิศวกรรมศาสตร์ทางชีววิทยา University of Wollongong และ Singapore University of Technology and Design ล้วนเป็นผู้นำในด้านการพิมพ์ 4 มิติ

ค.ศ. 2013 ได้มีการนำเสนอการพิมพ์ 4 มิติและแสดงผลลัพท์ของการพิมพ์ 4 มิติ ชนิดนี้ขึ้นครั้งแรกในงานประชุมวิชาการระดับโลก โดยทีมนักวิจัยของศูนย์วิจัย Self-Assembly Lab [61, 72] ของสถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ได้สาธิตชิ้นวัตถุพิมพ์ 3 มิติชิ้นหนึ่งที่รูปร่างเป็นกล่องที่ยังไม่ได้พับ เมื่อทีมวิจัยนำชิ้นงานนี้ไปแช่ในของเหลวใส ชิ้นงานนี้สามารถพองและยุบได้เองและกลายเป็นกล่องสี่ เหลี่ยมลูกบาศก์ในที่สุด นั่นคือการเปลี่ยนแปลงของวัตถุ 3 มิติได้หลังการพิมพ์เสร็จแล้ว (รูปที่ 24) วัสดุที่บรรจุอยู่ข้างในกล่องมักเป็นสารตระกูลไฮโดรเจลที่ไวต่อน้ำและสามารถขยายตัวด้วยน้ำ สารไฮ โดรเจลที่ใช้มักเป็นสารธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส นอกจากนี้ หากสารที่ใช้เป็นพอลิเมอร์ที่ไวต่อความร้อน เช่น พอลิ (เอ็น-ไอโซโพรพิล-อะคริลาไมด์) [poly(N-isopropylacrylamide) หรือ Nipam] สามารถเปลี่ยนจากสภาพใสเป็นสภาพขุ่นของชิ้นงานเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน กล่าวคือ หากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมต่ำกว่า 32 องศาเซลเซียส สารนี้มีสภาพใสและบวมตัวเต็มที่ เราเรียกอุณหภูมินี้ว่า low critical solution temperature (LCST) หากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมหรือในน้ำสูงกว่า 32 องศาเซลเซียส สารนี้จะขุ่นและหดตัว การหดตัวในลักษณะเช่นนี้คือ การเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีกายภาพของพอลิเมอร์ ชนิดนี้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและทำให้สารนี้มีสีขุ่นขาว นอกจากนี้ ยังมีสารพอลิเมอร์อีกจำนวนมากที่มีการจำโครงสร้างเชิงดิจิทัล เช่น พอลิเมอร์ที่มีความจำด้านรูปร่างดิจิทัล (digital shape-memory polymers) เกิดการผ่อนคลายจากความเค้น (stress relaxation) ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นของพอลิเมอร์บางชนิด [73-74]

สำหรับการใช้ประโยชน์ที่เป็นไปได้นั้น ส่วนใหญ่ยังอยู่ในขั้นตอนการวิจัยในห้องวิจัย เช่น แรงที่ทำให้เซลล์หดตัวกลับมาสู่รูปร่างเดิม (cell traction force) ได้ใช้ประโยชน์ได้ในด้านชีวะการแพทย์ งานอีกจำนวนหนึ่งยังอยู่ในขั้นตอนวิจัย เช่น วัสดุฉลาดที่ตอบสนองต่อกระแสฟ้าและแม่เหล็ก ในด้านการขนส่ง เช่น การตอบสนองด้วยเสียงในการโดยสารรถไฟฟ้า การขนส่งสินค้า เป็นอาทิ



รูปที่ 24 งานวิจัยรวมของ BMW-MIT ที่แสดงชิ้นงานที่พิมพ์ที่ออกแบบครั้งแรกด้วยการพิมพ์ 3 มิติที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างให้พอง-ยุบได้ (printed inflatable material) ได้หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการพิมพ์ [74]

อนาคตของเทคโนโลยีการพิมพ์ที่สัมพันธ์กับโลกดิจิทัลในยุค 5G, IoT, และ RFIC

ยุคการสื่อสารแบบไร้สายยุคต่อไป ได้แก่ ยุค 5G เทคโนโลยีการพิมพ์จะเข้ามามีบทบาทในการเปลี่ยนรูปแบบการผลิตอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะอุปกรณ์เกี่ยวกับ IoT ที่ในปัจจุบันเราสั่งซื้ออุปกรณ์เหล่านี้ได้ในราคาที่เหมาะสมโดยผ่านวิธีออนไลน์ แต่ในอนาคตเราสามารถเขียนโปรแกรมและพิมพ์อุปกรณ์เหล่านี้ขึ้นได้ที่บ้าน ซึ่งทำให้อุปกรณ์ IoT มีความหลากหลายและพัฒนาไปอย่างไร้พรมแดน เพราะแต่ละคนสามารถใช้ความรู้ ความคิด และการออกแบบของตนเองสร้างสรรค์ผลงานได้อย่างเต็มที่และตรงกับความต้องการในการทำงานของตนเองได้มากขึ้น

ด้วยเหตุอุตสาหกรรมการผลิตวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีการประยุกต์การพิมพ์ 3 มิติ เพื่อให้เกิดความรวดเร็วและสามารถผลิตอุปกรณ์ได้จำนวนมาก แต่ยังเป็นขั้นตอนที่มีความยุ่งยากซับ ซ้อน ซึ่งต้องเป็นระดับโรงงานอุตสาหกรรมเท่านั้นที่จะผลิตได้ แต่ในอนาคตนักวิจัยคาดหวังว่า จะสามารถลดขั้นตอนและความซับซ้อนของการผลิตวงจรเหล่านี้ได้ด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งเป็นการพิมพ์โลหะบนวัสดุ เช่น พลาสติก นักวิจัยจึงพิมพ์อุปกรณ์พร้อมวงจรได้รวดเร็วด้วยจากความสามารถของวัสดุพิมพ์ 4 มิติ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้ล้ำเลิศได้มากขึ้นไปอีก เช่น การพับ งอ ได้หลังพิมพ์เสร็จ หรือแม้กระทั่งการเก็บข้อมูลดิจิทัลได้ด้วย จึงเป็นเหตุให้คาดคะเนว่า มีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาและนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 4 มิติ มาต่อยอดในการผลิตวงจร RFIC ได้ในอนาคต ซึ่งอาจทำให้ทุกครัวเรือนในอนาคตสามารถผลิตอุปกรณ์อัจฉริยะที่สื่อสารแบบไร้สายใช้ได้เอง โดยผ่านโครงข่าย 5G ชาวชุมชนจึงมีความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัวมากขึ้นได้ดังใจปรารถนา ดังนั้น เยาวชนรุ่นใหม่ทุกคนควรมีความรู้ในภาษาคอมพิวเตอร์ สามารถเขียนโปรแกรม และการจัดพิมพ์ระบบดิจิทัลได้ด้วยตนเอง

เทคโนโลยี 5G คือ เทคโนโลยีของการสื่อสารแบบไร้สายรุ่นใหม่ ซึ่งเรียกเทคโนโลยีนี้ว่า new radio (NR) ในประเทศญี่ปุ่น [77] เทคโนโลยีนี้ได้มีการพัฒนาต่อยอดมากจากเทคโนโลยี 4G ที่ได้ใช้กันในปัจจุบันอย่างแพร่หลายมาหลายปีแล้ว คลื่นที่ใช้ในการสื่อสารแบบ 5G นี้ มีความยาวคลื่นในระดับมิลลิเมตร (100 –1 มิลลิเมตร) มีช่วงย่านความถี่อยู่ที่ 30 – 300 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ใหม่ที่ไม่เคยใช้มาก่อน จึงส่งผลให้ความกว้างของแถบการรับส่งข้อมูล (bandwidth) ได้มากขึ้น และให้ผลการรับส่งข้อมูลรวดเร็วมากยิ่งขึ้น เช่น เวลา 1 วินาที สามารถรับส่งข้อมูลได้สูงสุดในระดับหนึ่งพันล้านบิต หรือกิกะบิต (100 เท่าของการส่งข้อมูลแบบ 4G [77]) เมื่อมองการพัฒนาระบบเครือข่ายการสื่อสารไร้สายด้วยการพัฒนาในแต่ละรุ่น หรือรุ่นการพัฒนาระบบการสื่อสารแบบไร้สายมาเป็นลำดับจากอดีตสู่ปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อได้ดังรูปที่ 25 ดังนี้

รูปที่ 25 การพัฒนาระบบเครือข่ายการสื่อสารไร้สาย [76]

จากรูปที่ 25 แบ่งวิวัฒนาการของรุ่นการสื่อสารของข้อมูลได้ 4 รุ่น ดังนี้

วิวัฒนาการรุ่นที่ 1 (1G) เป็นการสื่อสารแบบอนาล็อกคือสามารถสื่อสารกันได้ผ่านระบบเสียงและอักษรเป็นข้อความเท่านั้น

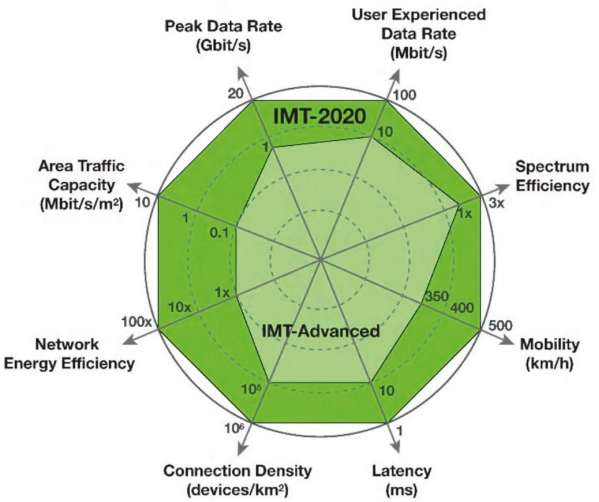
วิวัฒนาการรุ่นที่ 2 (2G) เป็นการสื่อสารรับส่ง Multimedia Messaging Service (MMS) ซึ่งเป็นข้อมูลภาพนิ่งได้

วิวัฒนาการรุ่นที่ 3 (3G) เป็นการสื่อสารรับส่งเริ่มต้นด้วยโทรศัพท์อัจฉริยะ (smart phone) ซึ่งสามารถใช้การสื่อสารผ่านอินเตอร์เน็ตได้ แต่ความเร็วอินเตอร์เน็ตยังไม่ได้สูงนัก คือความเร็วสูงสุดมีค่าประมาณ 42.2 Mbp เท่านั้น ทำให้เรายังโหลดภาพวิดีโอได้ แต่อาจต้องรอนานในการโหลดไฟล์

วิวัฒนาการรุ่นที่ 4 (4G) เป็นยุคของการสื่อสารรับส่งด้วยโทรศัพท์อัจฉริยะเต็มที่และเต็มประสิทธิภาพ ณ เวลานั้นอย่าง

แท้จริง เพราะเราใช้โทรศัพท์อัจฉริยะทำทุกอย่างในชีวิตประจำวันของเราได้จริง ๆ เราใช้อินเตอร์เน็ตกันได้ทุกกิจกรรม เราสามารถดูภาพยนตร์ออนไลน์กันอย่างไม่สะดุด แต่ความเร็วสูงสุดก็แค่ 1 Gbps (LTE Advanced) ส่วนความเร็วแบบปกติทั่วไปอยู่ที่ 100 Mbps (= 4G LTE)

โลกได้เข้าสู่การใช้เทคโนโลยี 5G ในกลางปี 2019 แล้ว ด้วยประเทศสาธารณารัฐประชาชนจีนได้พัฒนาและใช้ 5G กันอย่างแพร่หลายเรียบร้อยแล้ว เนื่องจากเทคโนโลยี 5G ทำให้อัตราการส่งข้อมูลแบบไร้สายนั้น เทียบเท่ากับการเชื่อมต่อแบบไฟเบอร์ออปติก เทคโนโลยี 5G จึงมีบทบาทสำคัญในด้านต่าง ๆ จำนวนมาก ไม่ว่าด้านเกษตรกรรม ยานยนต์ การขนส่ง สิ่งก่อสร้าง พลังงาน การเงิน สุขภาพ อุตสาหกรรมการผลิต การบันเทิง ความมั่นคง ความปลอดภัย และพฤติกรรมผู้บริโภค ทั้งนี้ สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union, ITU) [78] ได้กำหนดมาตรฐาน IMT for 2020 and beyond ซึ่งเพิ่มขีดความสามารถในด้านต่าง ๆ มากขึ้นจากมาตรฐาน IMT-Advanced ของระบบ 4G โดยมีรายละเอียดที่สำคัญตามแผนภาพใยแมงมุมในรูปที่ 26

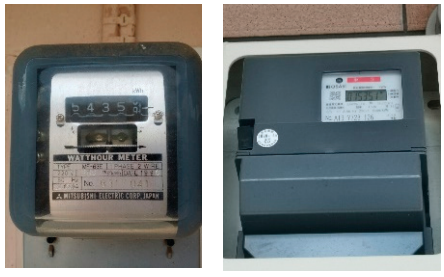


รูปที่ 26 มาตรฐานสำหรับระบบ 5G ตาม ITU-R M.2083-0 [79]

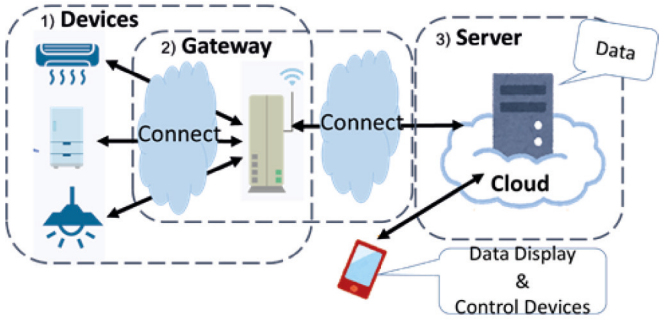
วิวัฒนาการรุ่นที่ 5 (5G) นั้น เป็นยุคที่ความเร็วในการรับส่งข้อมูลขั้นต้นยิ่งทวีความเร็วไปถึง 20 กิกะไบต์ต่อวินาที (Gbit/s) [78] ซึ่งกล่าวได้ว่า เป็นความเร็วที่อุปกรณ์ดิจิทัลต่างๆ สามารถรับส่งข้อมูลหรือสื่อสารกันอย่างแบบปัจจุบันกาล เราสามารถดูจากภาพยนตร์แบบเทคโนโลยี 3 มิติ ผ่านaugmented reality (AR) และ virtual reality (VR) ได้ความละเอียดคมชัดของภาพแบบเต็มประสิทธิภาพ (8K) ได้อย่างไม่สะดุด ซึ่งหมายความว่าได้นำเทคโนโลยี AR และ VR มาใช้กันอย่างแพร่หลาย เสมือนการสตรีมวีดิโอสด หรือการออกรายการสดกันในปัจจุบัน ทั้งนี้จุดเด่นของเทคโนโลยี 5G ที่ทำให้พลิกวิถีการใช้ชีวิตและรวมไปถึงเทคโนโลยีที่ตามมาอีกจำนวนมากคือ ความเร็วในการรับส่งข้อมูล ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ เสมือนตัวเครื่องเองเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงชนิดหนึ่งที่สามารถคิดและประมวลผลได้ดีมากและรวดเร็วสูง เบื้องหลังของความสามารถคือ การยืมพื้นที่ในการจัดเก็บและประมวลผลที่ยุ่งยากจำนวนมากและซับซ้อนระดับสูงได้จากระบบคลาวด์ (cloud) ซึ่งระบบเครือข่าย 5G จะมาเสริมกำลังในการรับส่งข้อมูลที่รวดเร็วมาก ทำให้เครื่องไม่มีความช้าจากความหน่วงในการประมวลผล หรือไม่ต้องรอนานในการดาวน์โหลดข้อมูลกันอีกต่อไป สิ่งที่น่าสนใจก็คือด้วยปัจจัยเหล่านี้ ประกอบกับเทคโนโลยีของการผลิตชิปหน่วยประมวลผล จึงจะเป็นเหตุให้การผลิตอุปกรณ์ดิจิทัลเหล่านี้สามารถทำการแผงวงจรมีขนาดเล็กลงอย่างมาก ต้นทุนต่ำ ลดความซับซ้อนของวงจรลงอย่างมาก แต่มีประสิทธิภาพในการประมวลผลสูงขึ้นหลายเท่าตัว มีขนาดกะทัดรัด และวิธีการ

ผลิตก็ไม่ซับซ้อนยุ่งยากอีกต่อไป ซึ่งอุปกรณ์ดิจิทัลเหล่านี้นี้เองเป็นส่วนสำคัญในการสร้างระบบอินเตอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง (Internet of Thing : IoT) ซึ่งในอนาคตจึงคาดการณ์ได้ว่าเราสามารถผลิตได้เองในครัวเรือนด้วยเครื่องพิมพ์ 3มิติได้ง่าย ๆ อินเตอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง (IoT) [75] เป็นระบบที่ประกอบขึ้นโดยมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เซนเซอร์ (sensor) คือ อุปกรณ์รับรู้สภาพต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงและตัดสินใจของระบบ ส่วนที่ 2 คลาวด์ (cloud) คือ ระบบทรัพยากรกลาง ทำหน้าที่ในการเป็นคลังเก็บข้อมูล รวมไปถึงการประมวลผลเพื่อส่งคำตอบจากการประมวลผลกลับไปยังอุปกรณ์ดิจิทัลต่าง ๆ ปลายทาง และ ส่วนที่ 3 ระบบควบคุมระยะไกล (remoted system) ทำหน้าที่เชื่อมและส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ที่มีเซนเซอร์ และรับคำตอบจากการประมวลผลให้ทำหน้าที่สั่งการและควบคุมดำเนินการต่าง ๆ ในระบบให้เป็นไปตามที่ควรจะเป็น ซึ่งในระบบการควบคุมนี้ ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพียงชิ้นเดียว อาจมีอุปกรณ์หลายอย่างในการช่วยกันควบคุมให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อขั้นสุดท้าย เมื่อเซนเซอร์วัดค่าใหม่ครั้งต่อ ๆ ไป และสภาพแวดล้อมอยู่ในสถานะที่เหมาะสมแล้ว ระบบควบคุมระยะไกลจะทำหน้าที่ในการเฝ้าดูเท่านั้น

แม้ว่า ปัจจุบันมีการเริ่มใช้ IoT กันบ้างแล้ว แต่ยังอยู่บนพื้นฐานของระบบ 4G และอาศัย WiFi เป็นหลัก ขอยกตัวอย่างการใช้งาน IoT อย่างเป็นรูปธรรมแล้วในปัจจุบันของบริษัท TEPCO ในประเทศญี่ปุ่น นั่นคือ Smart Meter ซึ่งระบบนี้ได้นำมาใช้เป็นที่เรียบร้อยแล้วทั่วประเทศญี่ปุ่นตั้งแต่กลางปี 2019 บริษัท TEPCO นั้น เป็นบริษัทผลิตและให้บริการไฟฟ้าแก่ประชาชนในประเทศญี่ปุ่น เมื่อประมาณกลางปีที่แล้ว บริษัทนี้มีการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่คือ การเปลี่ยนมาตรวัดไฟฟ้า จากระบบมาตรวัดดั้งเดิมแบบอนาล็อกที่เป็นมิเตอร์ไฟฟ้ารุ่นเก่าที่หมุน ๆ วิ่ง ๆ แบบที่ใช้ในประเทศไทย (รูปที่ 27 ซ้าย) ณ ปัจจุบันได้เปลี่ยนมาเป็นมาตรไฟฟ้าดิจิทัล (รูปที่ 27 ขวา) ทั้งหมดทั่วประเทศญี่ปุ่น ทั้งนี้ เพื่อรองรับการเปลี่ยนรูปแบบการให้บริการของบริษัทที่ใช้ระบบ IoT เข้ามาจัดการระบบอย่างเต็มรูปแบบ



รูปที่ 27 ภาพเปรียบเทียบชนิดของมาตรวัดไฟฟ้าของบ้านในประเทศญี่ปุ่น
ภาพซ้าย: มาตรวัดไฟฟ้าแบบอนาล็อก ภาพขวา: มาตรวัดไฟฟ้าแบบมาตรอัจฉริยะ (smart meter)

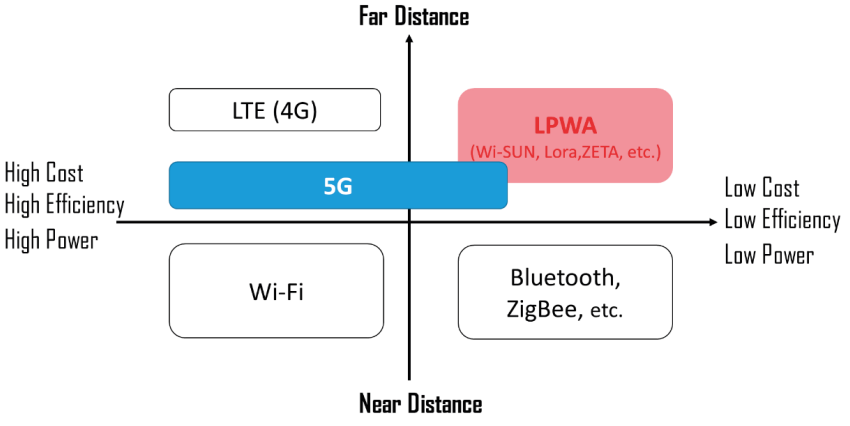


รูปที่ 28 การไหลของข้อมูลในระบบ IoT [80]

รูปที่ 28 แสดงภาพรวมของระบบ IoT กล่าวคือ การไหลของข้อมูลที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ IoT ต่าง ๆ เช่น เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น โคมไฟในห้อง แม้ว่าเราจะอยู่ห่างจากที่ตั้งของอุปกรณ์เหล่านี้ เราสามารถควบคุมอุปกรณ์เหล่านี้ให้ทำงาน โดยผ่านโทรศัพท์มือถือประเภทสมาร์ตโฟนที่ทำงานได้ด้วย ระบบอินเตอร์เน็ต เช่น การสั่งให้เครื่องปรับอากาศเปิดเตรียมพร้อมเพื่อปรับอุณหภูมิในบ้านได้ก่อนเจ้าบ้านจะกลับถึงบ้าน อนึ่ง เบื้องหลังความอัจฉริยะเหล่านี้คือ อุปกรณ์ IoT เก็บข้อมูลและวัดค่าจากสภาพแวดล้อมของบริเวณที่ได้รับการระบุในคำสั่งงาน ในเวลาเดียวกันอุปกรณ์เหล่านี้ก็มีความสามารถ ในการควบคุมการทำงานของตัวเองได้โดยอัตโนมัติด้วยเช่นกัน เช่น การปรับระดับความเย็นให้เข้ากับอุณหภูมิที่ควรเป็น แต่ข้อมูลที่เก็บได้จากงานเหล่านี้ในระยะยาวจะถูกส่งต่อขึ้นไปเก็บบนคลาวด์ หรือเครื่องเซิร์ฟเวอร์ผ่านระบบอินเตอร์เน็ต เพื่อนำไปประมวลผลสั่งการระยะไกลบางอย่างเพิ่มเติมได้เพื่อเพิ่มการบริการที่ดีขึ้นหลาย ๆ ด้าน

ในกรณีของบริษัท TEPCO มาตรวัดปริมาณไฟฟ้าแบบใหม่แบบดิจิทัลนี้ วัดและอัปเดตค่าใช้ไฟฟ้าได้ทุก 10 วินาที ให้แก่บริษัท TEPCO ได้โดยตรง ผ่านระบบอินเตอร์เน็ตของมาตรวัดได้ที่ ระบบ “Wi-Sun” นอกจากนี้ บริษัทนี้ยังสามารถรู้ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของแต่ละบ้านอีกด้วยว่า มีไฟฟ้ารั่วหรือไม่ และหากมีการรั่วของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะอยู่ตรงไหนของบ้าน หรืออุปกรณ์ไหนใดในบ้านใช้ไฟฟ้ามากเกินความจำเป็นและเป็นเวลานานเท่าใดในแต่ละวันซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์พฤติ กรรมการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าได้ เพื่อวางแผนโครงการสำหรับลูกค้าแต่ละบ้านให้ใช้พลังงานได้อย่างถูกต้อง รวมทั้งการผลิตพลังงานได้เองของแต่ละบ้าน เช่น ไฟฟ้าที่ได้มาจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้านของแต่ละบ้าน หรือจากพลังงานลม หรือพลังงานคลื่นทะเล ที่แต่ละบ้านมีการติดตั้งแผงวงจรการผลิตไฟฟ้าผลิตใช้เอง และยังขายคืนพลังงานไฟฟ้าให้แก่บริษัทไฟฟ้าได้ด้วยระบบนี้ทำให้บริษัท TEPCO ได้ค่าปริมาณประมาณการการจ่ายไฟฟ้าเข้าออกแต่ละบ้านได้อย่างค่อนข้างแม่นยำกว่าและประหยัดงบประมาณในการจ้างคนไปเดินเก็บข้อมูลปริมาณไฟฟ้าตามมาตรวัดและการซ่อมบำรุงอย่างมหาศาลอีกด้วย และยังสามารถยกระดับการซ่อมบำรุงได้อย่างทันท่วงที โดยเฉพาะในเขตที่เกิดภัยพิบัติ เช่น มีปัญหาเรื่องไม่สามารถเข้าถึงพื้นที่ได้สะดวก ระบบนี้สามารถจัดการการจ่ายไฟฟ้าได้อย่างทันท่วงทีมาก ๆ เพื่อความสะดวกและความปลอดภัยของผู้ใช้มากที่สุด ทั้งนี้ การใช้เทคโนโลยี IoT อุปกรณ์อาจสื่อสารซึ่งกันและกัน หรือการใช้อินเตอร์เน็ตได้จากหลายรูปแบบ เช่น รูปที่ 29 ในกรณีของบริษัทนี้ได้ใช้การสื่อสารแบบไร้สายที่เรียกว่า ระบบ “Wi-SUN” คือ ระบบ LPWA ที่ใช้พลังงานต่ำ สามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรีได้ในระยะยาว หากกรณีเกิดภัยพิบัติ และยังมีต้นทุนต่ำ รวมถึงสื่อสารได้ในระยะทางไกล ๆ จึงเหมาะกับบริษัทที่เกี่ยวกับสาธารณูปโภค ซึ่งมีการคาดการณ์ว่า ในอีกไม่เกิน 5 ปี บริษัทแก๊สและประปาของญี่ปุ่นจะเปลี่ยนมิเตอร์มาตรวัดเป็นแบบดิจิทัลเช่นกัน เพื่อให้จัดการในระบบ IoT ได้ และเพื่อประโยชน์ในการซ่อมบำรุง หรือตัดแก๊สและน้ำได้อย่างทันท่วงทีในที่ที่เกิดเหตุภัยพิบัติ เช่น เพื่อป้องกันไฟฟ้ารั่ว หรือไฟไหม้ ในระยะยาว นับจากเวลานี้ยังเป็นช่วงเวลาน่าจะนำ 5G มาพัฒนาและนำ 5G มาใช้อย่างเต็มที่ในไม่ช้าเช่นกัน ซึ่งจะเป็นเทคโนโลยี 5G แบบท้องถิ่น ซึ่งใช้ย่านความถี่ช่วง 28 GHz มีข้อเด่นคือ เข้าถึงชนบทได้ง่ายและทั่วถึงกว่า เพราะสามารถใช้ทรัพยากรเก่าของระบบ 4G ที่วางอยู่ก่อนแล้วได้ และยังควบรวมการใช้กับ WiFi ได้อีกด้วย ซึ่งเป็นผลดีในการพัฒนาอุปกรณ์ IoT ต่อเนื่องที่ไม่ต้องมีค่าใช้จ่าย SIMเพราะเป็นการใช้ WiFi ได้ในท้องถิ่น และมีผลดีเรื่องความปลอดภัยของบุคคลมากกว่าด้วย เพราะท้องถิ่นสามารถจัดการข้อมูลที่รับส่งได้ด้วยตัวเอง ด้วยเครือข่ายนี้จะแยกออกจากเครือข่ายหลักส่วนกลางได้ ซึ่งทำให้มีความปลอดภัยสูงกว่าและเพิ่มความเร็วในการรับส่งข้อมูลได้เร็วกว่าอีกด้วย ซึ่งเหมาะมากกับการจัดการดูแลของรัฐบาลท้องถิ่น อันเป็นการย้ำว่า ทักษะและแนวโน้มการผลิตอุปกรณ์ IoT ขึ้นใช้เองได้ในระดับครัวเรือน หรือชุมชนนั้นเป็นไปได้อย่างแน่นอนในอนาคตอันใกล้

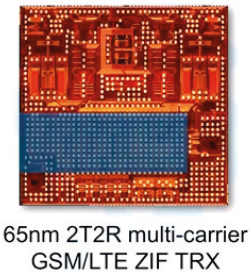
รูปที่ 29 ใบปลิวที่ส่งมาพร้อมจดหมายตามบ้านจากบริษัท TEPCO ที่แจ้งแก่เจ้าบ้านในประเทศญี่ปุ่น เรื่องการเปลี่ยนมาตรวัดไฟฟ้า ส่งมาทางไปรษณีย์และมาถึงที่เจ้าของบ้าน



รูปที่ 30 การสื่อสารแบบไร้สายที่ใช้ในปัจจุบัน [80]

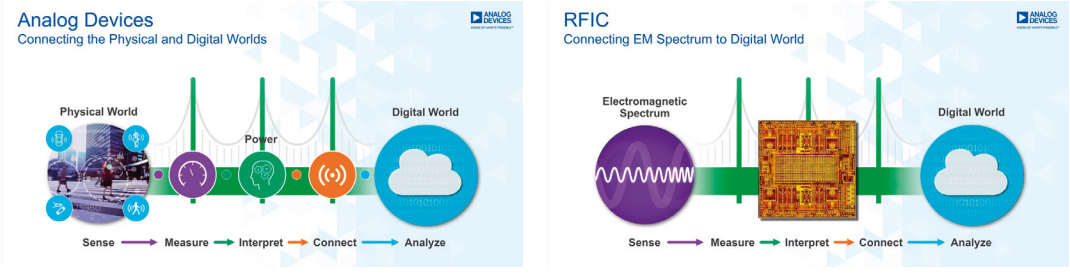
รูปที่ 30 แสดงการสื่อสารแบบไร้สายที่ใช้กันในปัจจุบัน ซึ่งแบ่งโซนตามการสื่อสารระยะไกล ดังภาพบนซ้ายซึ่งมีราคาแพง ประสิทธิภาพสูง และใช้พลังงานสูง ได้แก่ การใช้ LTE 4G และ 5G และมีราคาถูกลงเมื่อใช้ LPWA ส่วนการสื่อสารได้ในระยะใกล้ (ภาพล่าง) เริ่มจาก WI-Fi ที่มีราคาแพงไปสู่ Bluetooth ที่มีราคาถูก แต่ประสิทธิภาพต่ำและใช้พลังงานต่ำ นอกจากนี้ เทคโนโลยีอีกชนิดหนึ่งที่สนับสนุนระบบ 5G ว่า มีสำคัญมากระดับใด คือ เทคโนโลยี RFIC (Radio Frequency Integrated Circuits) เป็นเทคโนโลยีที่รองรับระบบการสื่อสารแบบไร้สาย (wireless communication) แบบสมบูรณ์จริง ๆ RFIC เป็นระบบที่พัฒนาเพิ่มขึ้นมาจาก Radio-Frequency Identification (RFID) วงจรที่รับส่งได้สัญญาณใน electromagnetic fields ในระยะใกล้ได้เท่านั้น มักใช้ประโยชน์ในการอ่าน เช่น อ่านฉลากสินค้าภายในร้านค้า เป็นต้น ทั้ง RFIC และ RFID เป็นสิ่งที่

มีการสื่อสารแบบไร้สายโดยใช้ระบบเรดาร์ หรือ คลื่นไมโครเวฟ แต่ RFID เป็นแผงวงจรเท่านั้น ไม่ซับซ้อนมาก เก็บข้อมูลไม่ได้ และใช้ได้เฉพาะระยะใกล้ RFIC เป็นการพัฒนาเพิ่มเติมอย่างมากจาก RFID ทั้งระบบของวงจร semiconductor chip sets และขนาดที่กะทัดรัดดีขึ้น ทำให้แผงวงจรที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นอย่างมาก มีการผนวก CMOS ซึ่งเป็นส่วนเด่นและสำคัญมากของเทคโนโลยีนี้ มีส่วนเก็บข้อมูลด้วย และสามารถสื่อสารได้ในระยะไกลมากขึ้น (รูปที่ 31) หมายความว่า ถ้าจินตนาการบนพื้นฐานเดิมของ RFID ที่มักนำมาใช้เป็น “ฉลาก” วงจร ข้อมูลของสินค้า RFIC สามารถทำหน้าที่เดียวกับ RFID ได้ แต่ยังสามารถติดต่อส่งสัญญาณได้ในระยะไกลดั่งเช่นแบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ รวมทั้งยังเก็บข้อมูล และจัดการระบบได้ดีอีกด้วย หรืออีกนัยหนึ่งคือ อุปกรณ์หรือฉลากนั้นมีซิมในตัวเอง ซึ่งแน่นอนว่าการประยุกต์ในงานของอุปกรณ์ IoT ด้วย RFIC นี้ต้องทำงานได้มากกว่าแค่การใช้อ่านฉลากสินค้าอย่างแน่นอน



รูปที่ 31 แผงวงจร RFIC ที่ผนวก CMOS ไว้ด้วย [81, 82]

อุปกรณ์ RFIC [81] เป็นแผงวงจรที่สามารถส่งและรับสัญญาณได้ทั้งในระบบ microwave (radar) บวก GSM communication หมายความว่า แผงวงจรนี้สามารถติดต่อทั้งเครือข่ายแบบโทรศัพท์พื้นฐานและอินเตอร์เน็ตได้พร้อมกัน ถ้าเปรียบเทียบเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น ปัจจุบันเราใช้ซิมโทรศัพท์ซึ่งมีแผงวงจรขนาดย่อมของ RFIC ติดตั้งอยู่ด้วย ในการทำให้อุปกรณ์ติดต่อกับอินเตอร์เน็ตได้ ถ้าวงจรเหล่านี้สามารถไปติดอยู่ที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ได้โดยตรง นั่นแสดงว่า สามารถส่งสัญญาณสื่อสารแบบไร้สายได้โดยตรงด้วยตนเอง จึงเป็น IoT แบบเต็มขั้น ซึ่งสามารถผลิตอุปกรณ์เหล่านี้ได้จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในอนาคตอันใกล้ได้ อันเป็นการบูรณการความรู้และเทคโนโลยีทางการพิมพ์เข้ากับศาสตร์ทาง IT ได้วิธีหนึ่ง



รูปที่ 32 การทำงานของแผงวงจรแบบ analog device และ RFIC [81]

รูปที่ 32 แสดงการทำงานของแผงวงจร RFIC ซึ่งสามารถยุบขั้นตอนการวัด การประมวลผล และการต่อจากระบบอนาล็อกไปอยู่ในขั้นตอนเดียวใน chip-sets และอาศัยการประมวลผลจาก cloud พร้อมรับส่วนผลจากการประมวลมาแสดงในอุปกรณ์ได้โดยตรง [81] แต่ในอนาคต แผงวงจร RFIC จะทำหน้าที่ในการยุบรวมส่วนการวัด (measure) การประเมินผล (interpret) และการติดต่อ (connect) จากระบบอนาล็อกปกติไปอยู่ในขั้นตอนเดียวที่แผงวงจรของ RFIC และ

ส่งข้อมูลได้โดยตรงสู่การประมวลผลบนคลาวด์ และคลาวด์สามารถส่งผลลัพธ์ของข้อมูลสู่ผู้ใช้ได้ทันที ซึ่งเทคโนโลยีนี้จะเกิดขึ้นไม่ได้เลยถ้าไม่มีอินเตอร์เน็ต หรือ มีอินเตอร์เน็ตความเร็วไม่เพียงพอ เพราะข้อมูลที่รับส่งนั้นเป็นปริมาณที่มากพอสมควร ไฟล์มีขนาดใหญ่ คือ และต้องทำงานให้ได้ในระดับวินาที เพราะเป็นการประมวลผลแบบเวลาปัจจุบัน (real time) ดังนั้น หนึ่งเทคโนโลยีที่มีอุปกรณ์ 5G หรือเทคโนโลยีที่มีอุปกรณ์การประมวลผลที่เร็วกว่าที่จะเกิดขึ้นในอนาคตเท่านั้นที่ทำให้ได้ผลเป็นแบบปัจจุบันกาลด้วยการประมวลผลแบบปัจจุบันเช่นกัน

RFIC ได้รับความสนใจอย่างมากต่อเนื่องจาก ปี 2018 เนื่องจากมีความสำคัญมากจนมีงานประชุมระดับโลกโดยเฉพาะจัดโดย IEEE คือ IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium ซึ่งแน่นอนว่า เทคโนโลยีนี้จะใช้ประโยชน์ได้หลายระดับและอาจทดแทน หรือเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ในชีวิตประจำวันอย่างแน่นอน โดยเฉพาะใช้ควบกับอุปกรณ์ IoT ทั้งนี้ เป้าหมายร่วมของนักวิจัยและนักพัฒนาทั่วโลกทางด้านนี้ คือ จะนำ chip-sets นี้ เผยแพร่การใช้ให้แพร่หลายในระบบและอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายใต้การสื่อสารไร้สาย 5G ได้ในปี 2023 เป็นอย่างช้า

จึงกล่าวได้ว่า ในอนาคตอันใกล้นี้ อุปกรณ์หรือของใช้ต่าง ๆ รอบตัวในชีวิตประจำวันทั่วไป อุปกรณ์เกือบทุกชิ้นสามารถนำมาประยุกต์ให้เป็นอุปกรณ์ IoT หลากหลายชนิดได้ไม่ยากนัก เช่น อุปกรณ์อัจฉริยะ นอกจากนี้ การผลิตอุปกรณ์อัจฉริยะเหล่านี้ไม่ได้มีความยุ่งยากซับซ้อนอย่างเมื่อ ก่อนแล้ว ณ ปัจจุบัน ผู้สนใจในเทคโนโลยีนี้สามารถผลิตและประกอบอุปกรณ์ที่สนใจได้ไม่ยากนักภายในครัวเรือนด้วยต้นทุนต่ำ นั่นคือ ผู้สนใจสามารถพิมพ์อุปกรณ์ที่สนใจได้จากระบบการพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีการคาดคะเนกันว่า ในอนาคตแผงวงจรและชิปขนาดเล็กมากก็ทำได้เองด้วยร่วมกับการพัฒนาของระบบเครือข่ายอินเตอร์เน็ตและปัญญาประดิษฐ์ (AI) ทำให้ระบบอัจฉริยะต่าง ๆ เหล่านี้ ยิ่งทรงพลังมากขึ้นและมีอิทธิพลมากขึ้นต่อชีวิตประจำวัน มนุษย์จะเห็นได้ว่า ในระยะอันใกล้นี้ มนุษย์จะเข้าสู่ยุคเมืองอัจฉริยะ (smart-city) รถยนต์ไร้คนขับ (driverless car) ด่านเก็บเงินทางผ่านอัจฉริยะ (smart toll way) แพทย์อัจฉริยะ (smart doctor) ระบบเงินอัจฉริยะชนิดใหม่ (smart-new-money system) ฯลฯ ซึ่งส่งผลให้ชีวิตประจำวันของมนุษย์มีความสะดวกและมีคุณภาพดีมากขึ้นอย่างแน่นอน มนุษย์จะได้ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเหล่านี้อย่างเต็มประสิทธิภาพและได้รับประโยชน์สูงสุดในการอำนวยความสะดวกสบายในการดำรงค์ชีพ นอกจากนี้ การเฝ้าดูการเปลี่ยนแปลงของวัตถุแบบเวลาจริงเช่นนี้ เอื้อต่อการพัฒนาระบบอีกหลายระบบเช่นกัน ซึ่งไม่เพียงแต่การใช้ IoT เพียงอย่างเดียว

การเตรียมตัวและปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีเปลี่ยนโลก

ความรู้และเทคโนโลยีที่จำเป็นสำหรับการก้าวเข้าสู่โลกยุคการพิมพ์ 4 มิติ คือ ระบบ AI, 5G, IoT และ smart materials ซึ่งมารองรับการพัฒนาของการพิมพ์ 4 มิติแล้ว เป็นสิ่งที่มนุษย์ในยุคศตวรรษที่ 21 หลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงเป็นสิ่งที่มนุษย์ต้องยอมรับวัฒนธรรมการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้หลายประการ อาทิ การเขียนโปรแกรมจะกลายเป็นทักษะที่จำเป็นประจำวันสำหรับมนุษย์ ซึ่งคล้าย ๆ กับ “ภาษาที่ 4” รองจากภาษาบ้านเกิด ภาษาอังกฤษ ภาษาจีน และภาษาสำหรับคอมพิวเตอร์และอินเตอร์เน็ต อันเป็นภาษาสากลว่า ผู้ใช้ IoT จำเป็นต้องเรียนรู้ศาสตร์ในหลาย ๆ ระบบในด้านเทคโนโลยีการสื่อสารและข้อมูล ทิศทางการเปลี่ยนแปลงการผลิตในอุตสาหกรรมจะไปในทิศทางที่ดีขึ้นและลดมลพิษต่อมนุษย์ด้วยกัน และสภาวะของโลกในภาพรวมนี้ เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย (5G) จะเข้ามาช่วยส่งเสริมให้ชีวิตของชนบทมีความสะดวกสบายและทันสมัยเหมือนกับชีวิตในเมืองใหญ่ เช่น การรักษาพยาบาลด้านสุขภาพของชาวชนบทผ่านระบบ digital health care มากขึ้น และให้สมจริงได้เต็มอัตราในเร็ววันนี้ คือ สามารถเชื่อมต่อทั้งประเทศด้วยระบบอินเตอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง เราสามารถสร้างระบบ IoT ของเราเองได้ตั้งแต่ระบบเล็ก ๆ เช่น ระบบการเฝ้าดูผู้ป่วย ผู้สูงอายุ หรือป้องกันอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นในบ้าน (smart home care) ระบบบ้านอัจฉริยะ (smart home system) ไปจนถึงระบบใหญ่อย่างเมืองอัจฉริยะ ซึ่งแต่ละท้องถิ่นสามารถควบคุมการผลิต ดูเลระบบเองได้อย่างอิสระ ซึ่งระบบ IoT จะมีความฉลาดและมีความเฉพาะเจาะจงกับงานมากขึ้นจากการใช้ AI เพื่อระบบสามารถตัดสินใจได้ถูกต้องแม่นยำ รวดเร็ว และอัตโนมัติ สามารถรองรับและทำงานร่วมกับมนุษย์ ด้วยความสามารถในทำงานได้ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง และการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมากเหนือมนุษย์ไปแล้วในขณะนี้ ผลพวงจากการเปลี่ยนแปลงนี้ อาจทำให้มนุษย์ตกงานจำนวนมากเช่นกัน และ

ล่าสุดปัจจุบันมีการพัฒนาระบบ AI ที่เรียกว่า deep learning (การเรียนรู้แบบลึกซึ้ง) ซึ่งมีความฉลาดเทียบเท่าเด็กน้อย ซึ่งแน่นอนว่า ในอนาคตอันใกล้ โลกน่าจะมีผู้ช่วยที่ชาญฉลาดมาทำงานอยู่ข้างกายทุกคน เปรียบเสมือนผู้ช่วยที่รู้ใจเราทุกอย่าง และสามารถให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่เก่งกาจไม่แพ้มนุษย์ในทุกเรื่องหรืออาจพัฒนาไป ถึงขั้นสามารถให้คำแนะนำที่น่าเชื่อถือมากแก่มนุษย์และอาจชี้นำมนุษย์ได้ด้วย

มีการคาดการณ์แนวโน้มการเติบโตของตลาดและผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวกับเทคโนโลยี 5G และ IoT นั้น ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ ค.ศ. 2020-2030 ว่า มูลค่าการบริการจะมีโอกาสเติบโตสูงถึง 720,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ในปี 2030 [82] และจากวิกฤต-การณ์โคโรน่าไวรัส-2019 ทำให้เกิดวิถีชีวิตแนวใหม่ (new normal) ซึ่งลดการสัมผัสและการเดินทางพบปะในชีวิตจริงลงอย่างมาก ดังนั้น การใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ เพื่อย่อและเชื่อมโลกไว้ด้วยกัน จึงมีความจำเป็นอย่างมีนัยสำคัญในการระงับการแพร่เชื้อ การติดเชื้อ และแน่นอนการติดต่อที่จำเป็นในการดำรงชีพ [83] ซึ่งหนึ่งในสิ่งประดิษฐ์ยุคใหม่ที่น่าจับตามองอย่างมากคือ แผ่นแปะผิวหนังอิเล็กทรอนิกส์ (electronic skin patches) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่รวมศาสตร์อนาคตไว้ทุกอย่าง ทั้งการพิมพ์ 3 มิติ, 4 มิติ, 5G, IoT, และ AI ทั้งนี้ อุปกรณ์นี้ไม่ได้ใช้เฉพาะทางการแพทย์เท่านั้น ยังสามารถประยุกต์มาใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น เป็นอุปกรณ์ติดตามตัวชนิดหนึ่งที่สามารถเฝ้าติดตาม หรือ อาจสั่งการเครื่องมือ IoT ต่าง ๆ ในอนาคต คล้ายดังเช่นนาฬิกาอัจฉริยะในปัจจุบันได้อีกด้วย ในปัจจุบันก็มีบริษัทผู้ผลิตและกำลังพัฒนาอุปกรณ์ชิ้นนี้อยู่ทั่วโลกถึง 120 บริษัท มีแอปพลิเคชันเปิดใช้งานแล้วอยู่ 28 แอปพลิเคชัน มีมูลค่าทางการตลาดในปี ค.ศ. 2019 สูงถึง 10,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งมีการคาดการณ์ว่า ใน ค.ศ. 2030 ตลาดนี้จะเติบโตอย่างมากและมีมูลค่าหมุนเวียนในตลาดได้ถึง 40,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ [84] ดังนั้น อนาคตของเทคโนโลยีทางการพิมพ์ 4 มิติ, 5G, IoT, และ AI นั้น ค่อนข้างสดใสและเป็นไปในทางของการบูรณาการศาสตร์ทุกแขนงไว้ด้วยกันเพื่อการใช้ประโยชน์อย่างสูงสุด

ดังนั้น ผู้ใช้มือสมัครเล่นจึงจำเป็นต้องปรับตัวอย่างยิ่งให้ทันการเปลี่ยนแปลงไปทางด้านเทคโนโลยีดังกล่าว มีข้อเสนอแนะว่า การเรียนรู้เทคโนโลยีใหม่และการผนวกเทคโนโลยีใหม่กับเทคโนโลยีเก่าอย่างลงตัวดังนี้เป็นสิ่งจำเป็น สิ่งที่เป็นทางรอดของมนุษยชาติอย่างหนึ่งคือ การปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงของกระแสโลก ประชาชนทั่วไปอาจเริ่มรู้สึกกังวลกับการเปลี่ยนแปลงมาก และมองไม่เห็นอนาคตที่ยังไม่ทันมา จึงต้องก่อตัวให้เกิดการเรียนรู้เพื่อพัฒนาตนเองให้ทันเทคโนโลยี ความรู้สึกกังวลว่า ตนเองอาจตามเทคโนโลยีไม่ทันและไม่ทราบว่าสิ่งเหล่านั้นเป็นเทคโนโลยีใหม่ มีวิธีใช้งานอย่างไร และมีอันตรายต่อผู้ใช้หรือไม่ ประชาชนทั่วไปจะสามารถอยู่กับเทคโนโลยีเหล่านั้นได้หรือไม่ ประชาชนจึงต้องเปิดใจและยอมรับที่จะเริ่มต้นรับและใช้เทคโนโลยีเหล่านั้น และในที่สุดประชาชนจะตามเทคโนโลยีทันและรู้เท่าทันได้แม้จะใช้เวลามากหน่อย สิ่งที่แน่นอนว่าเมื่อกระแสโลกมีการใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ หากประชาชนไม่เปลี่ยนแปลงตาม ก็อาจจะตกยุคไปได้ หรือคุยกับคนอื่นไม่รู้เรื่องและเสียโอกาสและเสียเปรียบ และในที่สุดประชาชนอาจพลาดบางสิ่งบางอย่างสำคัญมาก ๆ จากสังคมไปโดยปริยาย ความจริงแล้ว เทคโนโลยีที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่ได้มาเร็วระดับที่ปรับตัวไม่ทันหรือปรับตัวไม่ได้ อย่างไรก็ตาม การเรียนรู้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับประชาชนทุกคน และเมื่อได้มีโอกาสจึงควรฝึกฝนเมื่อมีการทดลองใช้เทคโนโลยีอย่างเข้าใจและทำบ่อย ๆ ผู้กระทำจะสามารถจดจำและเรียนรู้สิ่งที่จะใช้สิ่งเหล่านั้นได้อย่างมีสติและมีประสิทธิภาพสูงสุด คือ การปรับตัวในทิศทางที่ถูกต้องแล้ว และสิ่งที่สำคัญมากข้อหนึ่งคืออย่ากลัวความผิดพลาด เพราะความผิดพลาดเป็นบทเรียนที่ดีสำหรับผู้ที่สามารถถอดบทเรียนจากความผิดพลาด เมื่อทำไม่ได้และทำผิดพลาด ควรเริ่มใหม่ได้ด้วยความคิดวิเคราะห์ที่ดีขึ้นและใช้บทเรียนที่ได้ทำผิดพลาดไปแล้วมาแก้ไข ดังนั้น ควรใช้สติควบคู่กับปัญญาเสมอเวลาใช้เทคโนโลยีใหม่ เมื่อมีเทคโนโลยีใหม่มา เมื่อพินิจวิเคราะห์เทคโนโลยีใหม่นั้น ก็สามารถเห็นช่องทางใหม่ ๆ ของเทคโนโลยีใหม่และการยังคงรักษาวิถีเดิมไว้ด้วยอย่างสมดุล จะทำให้คนที่ไม่คุ้นเคยกับช่องทางใหม่นี้สามารถเชื่อต่อเข้าถึงช่องทางใหม่ได้ง่ายและสะดวกมากขึ้น สิ่งหนึ่งที่มนุษย์มีไว้ติดตัวเสมอคือ นอกจากความรู้ ยังมีความคิดหลากหลาย สติและปัญญา การพินิจวิเคราะห์รวมถึงความสามารถพื้นฐานของมนุษย์ที่คิดและตัดสินใจได้ในกรณีที่หลากหลายมีมากกว่าคอมพิวเตอร์ ระบบอัตโนมัติ และ AI เมื่อมนุษย์ตัดสินได้ด้วยความรู้สึก ความผูกพัน รวมทั้งมีหลักจริยธรรมและคุณธรรมด้วย

สรุป

บทความปริทัศน์ฉบับย่อนี้ได้นำเสนอการเปลี่ยนแปลงของโลกยุคเทคโนโลยีดิจิทัลด้านการผลิตผ่านเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งได้เริ่มมานานกว่า 15 ปี โดยอาศัยหลักการทางการพิมพ์ที่ได้ถือกำเนิดมานานกว่า 250 ปี มาพัฒนาให้เป็นเทคโนโลยีใหม่ขั้นสูงสำหรับการผลิตแบบใหม่ทางอุตสาหกรรม ซึ่งนับว่าเป็นส่วนหนึ่งของการปฏิวัติอุตสาหกรรมโลกระยะที่ 4 หรืออุตสาหกรรม 4.0 การพิมพ์ 3 มิติ ได้เปิดโอกาสทองให้แก่นักประดิษฐ์ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งศิลปินได้พัฒนางานออกแบบให้สร้างนวัตกรรมแบบใหม่ได้โดยใช้การผลิตทางดิจิทัล จากการพิมพ์วัสดุใช้ได้จริงในครัวเรือน จนถึงการพัฒนาการพิมพ์ทางการแพทย์และการสร้างอวัยวะที่มีชีวิตจริงในอนาคต เนื้อหาในบทความนี้ได้ให้รายละเอียดพอสังเขปของการผลิตแบบพิมพ์พิมพ์ทับทีละชั้นจนเป็นโครงสร้าง 3 มิติเป็นรูปร่างหลากหลายและใช้งานได้ วิวัฒนาการได้นำการพิมพ์ 3 มิติ ไปสู่การพิมพ์ 4 มิติ ซึ่งใช้องค์ความรู้เดิมของการพิมพ์ 3 มิติ มาเพิ่มมิติที่ 4 ที่เกิดขึ้นหลังการพิมพ์ด้วยวิธีพิเศษทางวิทยาการวัสดุและวิศวกรรมการตรวจวัด โดยอาศัยตัวแปรของเวลา ทำให้วัสดุนั้นสามารถตอบสนองภายใต้ตัวเร่งเร้าทางเคมี ทางกายภาพ และทางวิศวกรรมศาสตร์ ภายใต้เวลาเปลี่ยนไป เพื่อให้การผลิตแบบใหม่นี้สามารถเติบโตและใช้กันแพร่รอบโลกรวมทั้งในอวกาศด้วย ทั้งนี้ ความก้าวหน้าของเครือข่าย 5G ทำให้มีการพัฒนาอุปกรณ์อินเตอร์เน็ตประสานสรรพสิ่งที่มีความก้าวหน้าอย่างเต็มขั้นในอนาคตอันใกล้ วิถีการผลิตอุปกรณ์เหล่านี้ได้เปลี่ยนไปอย่างสิ้นเชิงจากผลของการพิมพ์ 3 มิติและ 4 มิติที่จะเข้ามาทดแทนการผลิตแบบเก่า ซึ่งทำให้เราทุกคนสามารถผลิตและจัดการอุปกรณ์อัจฉริยะได้ทั้งหมดด้วยตัวเอง การให้ความรู้ทางด้านการพิมพ์ระบบใหม่จะกลายเป็นความรู้พื้นฐานหนึ่งที่จำเป็นสำหรับคนรุ่นใหม่ ทั้งนี้ เชื่อแน่ว่า การพิมพ์ 3 มิติ และ 4 มิติ จะได้ก่อประโยชน์มหาศาลต่อชาวโลกอย่างแน่นอน แต่ข้อหนึ่งที่เราจำเป็นควรตระหนักไว้อย่างมากเช่นกัน คือ ทุกเทคโนโลยีย่อมมีด้านเสียของตนเอง ดังนั้น เราจึงต้องปรับตัวให้มีความรู้เกี่ยวกับสิ่งเหล่านี้ไว้ ทั้งยังควรใช้เทคโนโลยีควบคู่ไปบนพื้นฐานคุณธรรมและจริยธรรมเสมอ เพื่อเป้าหมายสูงสุดคือ เอื้อต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ให้มีความสุข สะดวกสบาย ปลอดภัย และช่วยรักษาโลกใบนี้ให้มีสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้นิพนธ์บทความนี้ขอขอบพระคุณโครงการความร่วมมือทางวิชาการภายใต้การแลกเปลี่ยน นักศึกษา-นิสิต ด้าน Information Technology ระหว่าง Kanagawa Institute of Technology, Japan กับ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย ในช่วงฤดูร้อน เพื่อทำงานวิจัยขนาดเล็กที่ประเทศญี่ปุ่นและประเทศไทยในด้าน information technology, artificial intelligence, driverless vehicles, etc. บทความนี้ได้บรรยายแก่บุคลากรหลายวิชาชีพเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2562 ณ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้การสนับสนุนการบรรยายของสำนักบริหารวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. Koning, J.-K., 2017, 4D Printing: A Technology Coming From The Future [Online], Available: https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/best-articles-about-3d-printing/4d-printing-technology/. [28 July 2020]

2. Twisted Shifter, 2018, Laser Cut Notepads That Slowly Reveal Artworks As They Get Used [Online], Available: https://twistedsifter.com/2018/01/notepads-that-slowly-reveal-artworks/. [28 July 2020]

3. Gao, Y., Li, B., Wang, W., Xu, W., Zhou, C. and Jin, Z., 2018, "Watching and Safeguarding Your 3D Printer: Online Process Monitoring Against Cyber-physical Attacks," *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2 (3), Article 108, pp. 1–27.

4. King, W.E., Anderson, A.T., Ferencz, R.M., Hodge, N.E., Kamath, C., Khairallah, S.A. and Rubenchik, A.M., 2015, "Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing of Metals; Physics, Computational, and Materials Challenges," *Applied Physics Reviews*, 2, 041304 (DOI: 10.1063/1.4937809).

5. Styles, G., 2018, What is Powder Bed Fusion for Metal 3D Printing? Everything You Need to Know

about Powder Bed Fusion [Online], Available: https://www.ien.com/product-development/blog/21004057/what-is-powder-bed-fusion-for-metal-3d-printing. [28 July 2020]

6. Gokuldoss, P.K., Kolla, S. and Eckert, J., 2017, "Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting-Selection Guidelines," *Materials*, 10 (6), pp.672–784. (DOI: 10.3390/ma10060672)

7. Langnau, L., 2013, Laser Sintering – What is it? [Online], Available: https://www.makepartsfast.com/laser-sintering/. [28 July 2020]

8. Pan, Y., Zhou, C. and Chen, Y., 2012, "A Fast Mask Projection Stereolithography Process for Fabricating Digital Models in Minutes," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134 (051011-1 to 051011-9). (DOI:10.1115/1.4007465)

9. AMFG, 2018, 3D Printing Support Structures: A Complete Guide [Online], Available: https://amfg.ai/2018/10/17/3d-printing-support-structures-guide/. [28 July 2020]

10. Dassault Systèmes, 2018, 3D PRINTING - ADDITIVE Directed energy deposition - DED, LENS, EBAM [Online], Available: https://make.3dexperience. 3ds.com/processes/ directed-energy-deposition. [28 July 2020]

11. All3DP, 2019, Stereolithography (SLA) 3D Printing – Simply Explained [Online], Available: https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/. [28 July, 2020]

12. The Technology House, 2015, Carbon DLS with CLIP Technology [Online], Available: https://www.tth.com/carbon-clip/. [28 July 2020]

13. Carbon Inc., 2015, Carbon CLIP Animation [Online], Available: https://youtu.be/8uD0d1IPsF4. [28 July, 2020]

14. Fasnacht, A., SLA vs. PolyJet: What You Need to Know [Online], Available: https://www.cadimensions.com/blog/sla-vs-polyjet-need-know/. [28 July 2020]

15. Tumbleston, J.R., Shirvanyants, D., Ermoshkin, N., Janusziewicz, R., Johnson, A. R., Kelly, D. and Ermoshkin, A., 2015, "Continuous Liquid Interface Production of 3D Objects," *Science*, 347 (6228), pp. 1349–1352. (DOI:10.1126/science.aaa2397)

16. Stratasys Ltd., Make It More Realistic and Accurate with PolyJet [Online], Available: https://www.stratasys.com/polyjet-technology. [28 July 2020]

17. FACFOX. Inc, 2019, PolyJet vs MultiJet Printing (MJP) [Online], Available: https:// facfox.com/docs/polyjet-mjp-comparison. [28 July 2020]

18. HP Development Company, HP 3D Printing with Multi Jet Fusion™ Technology [Online], Available: https://www8.hp.com/us/en/commercial-printers/floater/3dprinting.html. [28 July 2020]

19. Loughborough University, About Additive Manufacturing: Material Jetting [Online], Available: https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing /materialjetting/. [28 July 2020]

20. Varotsis, A.B., Introduction to Binder Jetting, 3D Printing [Online], Available: https://www.3dhubs.com/knowledge-base/. [28 July 2020]

21. Cameran, J., Advanced Printing Technology A Brief Explanation of Binder Jetting Additive Manufacturing [Online], Available: https://skillsfuturetv.com/a-brief-explanation-of-binder-jetting-additive-manufacturing/. [28 July 2020]

22. Bogue, R., 2013, "3D Printing: The Dawn of a New Era in Manufacturing?", *Assembly Automation*, 33 (4), pp. 307-311. (DOI: 10.1108/AA-06-2013-055)

23. Luminous Concepts, Sheet Lamination (SL) [Online], Available: http:// www.3d printing.lighting/3d-printing-technologies/sheet-lamination. [28 July, 2020]

24. Buy 3D Printer, 2013, Laminated Object Manufacturing – LOM [Online], Available: http://www.buy3dprinter.org/3dprintingtechnologies/laminated-object-manufacturing-lom/. [28 July 2020]

25. Obikawa, T., Yoshino, M. and Shinozuka, J., 1999, "Sheet Steel lamination for Rapid Manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology*, 89–90, pp. 171–176. (DOI:10.1016/S0924-0136(99)00027-8)

26. Hamzah, H.H., Shafiee, S.A., Abdalla, A. and Patel, B.A., 2018, "3D Printable Conductive Materials for the Fabrication of Electrochemical Sensors: A Mini Review," *Electrochemistry Communications*, 96, pp. 27–31.

27. Joel, C., Important Things To Know About Dual Extrusion In 3d Printers [Online], Available: https://www.3dprintersonlinestore.com/important-things-to-know-about-dual-extrusion-in-3d-printers. [28 July 2020]

28. Siniauer, P., 2017, 3D Printers Make Incredible Pastas Your Nonna Could Only Dream About [Online], Available: https://www.saveur.com/3d-printers-pasta-barilla/. [28 July 2020]

29. Saunders, S., 2017, Barilla and Desall Announce Winners of Second 3D Printed Pasta Competition [Online], Available: https://3dprint.com/196681/barilla-3d-print-pasta-winners/. [28 July 2020]

30. Rubio, E. and Hurtado, S., 2019, "3D Food Printing Technology at Home, Domestic Application," In Fundamentals of 3D Food Printing and Applications, pp. 289–329. [Online], Available: https://www.elsevier.com/books/fundamentals-of-3d-food-printing-and-applications/ go. (DOI/978-0-12-814564-7)

31. Parker, M.A., 2017, Ripple Maker 3D Prints Images and Messages Onto Coffee Foam, Now Optimized for Nitro Cold Brew Coffee [Online], Available: https://3dprint.com/ 172090/ripple-maker-nitro-cold-brew/. [28 July 2020]

32. Wu, P., Wang, J. and Wang, X., 2016, "A Critical Review of the Use of 3-D Printing in the Construction industry," *Automation in Construction*, 68, pp. 21–31. (DOI:10.1016/ j.autcon.2016.04.005)

33. Tay, Y.W.D., Panda, B., Paul, S.C., Noor Mohamed, N.A., Tan, M.J. and Leong, K.F., 2017, "3D Printing Trends in Building and Construction Industry: A Review," *Virtual and Physical Prototyping*, 12 (3), pp. 261–276. (DOI:10.1080/17452759. 2017.1326724)

34. Ball, J., 2019, World's largest 3D printer headed to Saudi Arabia [Online], Available: https://www.arabianbusiness.com/construction/415532-worlds-largest-3d-printer-headed-to-saudi-arabia? [28 July 2020]

35. Ramirez, V.B., 2018, This 3D Printed House Goes Up in a Day for Under $10,000 [Online], Available: https://singularityhub.com/2018/03/18/this-3d-printed-house-goes-up-in-a-day-for-under-10000/#sm.00000ok1gx2tuxcw1ycyhru 3q1sa1. [28 July 2020]

36. Valencia, N., 2017, World's First 3D Printed Bridge Opens in Spain [Online], Available: https://www.archdaily.com/804596/worlds-first-3d-printed-bridge-opens-in-spain. [28 July 2020]

37. Robinson, I., 2019, Hybrid 3D Printing in the Automotive Industry [Online], Available: https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=833. [28 July 2020]

38. Murr, L.E., 2016, "Frontiers of 3D Printing/additive Manufacturing: From Human Organs to Aircraft Fabrication," *Journal of Materials Science and Technology*, 32 (10), pp. 987–995. (DOI:doi.org/10.1016/j.jmst.2016.08.011)

39. Ahmed, R., 2019, KLM Goes Circular by 3D Printing Tools from PET Bottles [Online], Available: https://3dprinting.com/news/airlines-adopting-3d-printing-specifications-for-aircraft-parts-repair/. [28

July 2020]

40. Walrack, J., 2016, Mind-blowing Medical 3D Printing Applications [Online], Available: https://blog.zmorph3d.com/medical-3d-printing-applications/. [28 July 2020]

41. Dawood, A., Marti, B.M., Sauret-Jackson, V. and Darwood, A., 2015, "3D Printing in Dentistry," *British Dental Journal*, 219 (11), pp. 521-529. (DOI:10.1038/sj.bdj. 2015.914)

42. Eltorai, A.E., Nguyen, E. and Daniels, A.H., 2015, "Three-dimensional Printing in Orthopedic Surgery," *Orthopedics*, 38 (11), pp.684-687. (DOI:10.3928/01477447-20151016-05)

43. Christy, J., 2015, Researchers Developed a 3D Printed Spinal Implant [Online], Available: https://www.rtoz.org/2015/08/17/researchers-developed-a-3d-printed-spinal-implant/. [28 July 2020]

44. Mohammed, M., Tatineni, J., Cadd, B., Peart, P. and Gibson, I., 2016, "Applications of 3D Topography Scanning and Multi-material Additive Manufacturing for Facial Prosthesis Development and Production," *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1695–1707.

45. Rabbit Prototype Co., L., 2016, 3D Printing เครื่องพิมพ์เนื้อเยื่อต่างๆ ในร่างกาย พิมพ์หูที่สามารถฟังเสียงได้ดีกว่า [Online], Available: https://www.Rabbitprototype.com/article/3d-printing-เครื่องพิมพ์เนื้อเยื่อ. (In Thai) [28 July 2020]

46. 3D2GO Philippines, 2018, Prosthetic Face Masks Boost The Confidence Of People With Facial Deformities [Online], Available: https://3d2go.com.ph/blog/ prosthetic-face-masks/. [28 July 2020]

47. Sochol, R.D., Gupta, N.R. and Bonventre, J.V., 2016, "A Role for 3D Printing in Kidney-on-a-chip Platforms," *Current Transplantation Reports*, 3 (1), pp. 82–92. (DOI:10.1007/s40472-016-0085-x)

48. Elshazly, M.B. and Hoosien, M., 2018, The Future of 3D Printing in Cardiovascular Disease, in 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine, pp. 243–253.

49. The Medical Futurist, 2017, The Future of 3D Printing Drugs In Pharmacies Is Closer Than You Think [Online], Available: https://medicalfuturist. com/future-3d-printing-drugs-pharmacies-closer-think/. [28 July 2020]

50. Ameeduzzafar, Alruwaili, N.K., Rizwanullah, M., Abbas Bukhari, S.N., Amir, M., Ahmed, M.M. and Fazil, M., 2018, "3D Printing Technology in Design of Pharmaceutical Products," *Current Pharmaceutical Design*, 24 (42), pp. 5009–5018. (DOI:10.2174/1381612825666190116104620)

51. The Engineer, 2014, "NASA's 3D Printer In Space Creates It's First 3D Printed Object [Online], Available: https://wonderfulengineering.com/nasas-3d-printer-in-space-creates-its-first-3d-printed-object/. [28 July 2020]

52. Leach, N., 2014, "3D Printing in Space in Space architecture: The New Frontier for Design Research," in N. Leach (Ed.), John Wiley and Sons, pp. 108–113,

53. Übel, M.V., 2020, 2020 Best Free CAD Software (Spring Update [Online], Available: https://all3dp.com/1/best-free-cad-software-2d-3d-cad-programs-design/. [28 July 2020]

54. Burr, E., 2020, Incredible Prints: Can You 3D Print a Record? [Online], Available: https://all3dp.com/2/incredible-prints-can-you-3d-print-a-record/. [28 July 2020]

55. VOA Learning English, 2020, Volunteers Produce 3D Printed Valves for Italian Coronavirus Patients [Online], Available: https://learningenglish.voanews.com/a/volunteers-produce-3d-printed-valves-for-italian-coronavirus-patients/ 5334261.html. [28 July 2020]

56. Hou, J.-U., Kim, D., Ahn, W.-H. and Lee, H.-K.,

2018, “Copyright Protections of Digital Content in the Age of 3D Printer: Emerging Issues and Survey,” *IEEE Access*, 6, pp. 44082–44093. (DOI:10.1109/ACCESS. 2018.2864331)

57. Suzuki, M., Dechrueng, P., Techavichian, S., Silapasuphakornwong, P., Torii, H. and Uehira, K., 2017, “Embedding Information into Objects Fabricated with 3-D Printers by Forming Fine Cavities Inside Them,” *Electronic Imaging*, 2017 (7), pp. 6–9.

58. Silapasuphakornwong, P., Suzuki, M., Unno, H., Torii, H., Uehira, K. and Takashima, Y., 2015, “Nondestructive Readout of Copyright Information Embedded in Objects Fabricated with 3-D Printers,” *Proceedings of the International Workshop on Digital Watermarking*, pp. 232–238.

59. Suzuki, M., Silapasuphakornwong, P., Takashima, Y., Torii, H. and Uehira, K., 2017, “Number of Detectable Gradations in X-ray Photographs of Cavities Inside 3-D Printed Objects,” *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 100 (6), pp. 1364–1367.

60. Silapasuphakornwong, P., Torii, H., Suzuki, M. and Uehira, K., 2019, “3D Printing Technique That Can Record Information Inside An Object As Rewritable,” *Proceedings of the NIP and Digital Fabrication Conference*, pp. 158–161.

61. Tibbits, S., 2014, “4D Printing: Multi-material Shape Change,” *Architectural Design*, 84 (1), pp.116-121. (DOI:10.1002/ad.1710)

62. Ge, Q., Dunn, C.K., Qi, H.J. and Dunn, M.L., 2014, “Active Origami by 4D Printing,” *Smart Materials and Structures*, 23 (9), p. 094007. (DOI:10.1088/0964-1726/ 23/9/094007)

63. Ge, Q., Qi, H.J. and Dunn, M.L., 2013, “Active Materials by Four-dimension Printing,” Applied Physics Letters, 103 (13), p. 131901. (DOI:10.1063/1.4819837)

64. Sculpteo, 4D Printing: A Technology Coming from the Future [Online], Available: https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/best-articles-about-3d-printing/4d-printing technology/#:~:text=A%204D%20printed%20object%20isshapeand%20beha vior%20over%20time. [28 July 2020]

65. Mangles, C., 2018, Gartner Hype Cycle 2018 – Most emerging technologies are 5–10 years away [Online], Available: https://www.smartinsights.com/manag ing-digital-marketing/managing-marketing-technology/gartner-hype-cycle-2018-most- emerging-technologies-are-5-10-years-away/. [28 July 2020]

66. Li, Y.-C., Zhang, Y. S., Akpek, A., Shin, S.R. and Khademhosseini, A., 2016, “4D Bioprinting: The Next-generation Technology for Biofabrication Enabled by Stimuli-responsive Materials,” *Biofabrication*, 9 (1), p. 012001. (DOI:10.1088/1758-5090/9/1/012001)

67. Correa, D., Papadopoulou, A., Guberan, C., Jhaveri, N., Reichert, S., Menges, A. and Tibbits, S., 2015, “3D-Printed Wood: Programming Hygroscopic Material Trans Formations,” *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2 (3), pp. 106–116. (DOI:10.1089/3dp.2015.0022)

68. TenBuzz, 2019, Issey Miyake's Floating Dresses Wow at Paris Fashion Week [Online], Available: https://www.youtube.com/watch?v=y4ZYaqkIRJ0. [28 July 2020]

69. Ishigaki, R., Kodama, M., Kawakami, M. and Furukawa, H., 2018, “Development of Physical Property Measuring Device for 3D Food Printer Gel,” *ECS Transactions*, 88 (1), p. 33. (DOI:10.1149/ma2019-02/51/2262)

70. Kuboki, H., Tanaka, H., Ohno, S., Sugita, K., Takayanagi, N., Nakajima, N. and Nakatani, T., 2019. “A Proposal for "Reactive Wall Panel" using Auxetic Patterns,” *Proceedings of the Conference on 4D and Functional Fabrication 2019*, Tokyo, Japan, pp. 25–28 (In Japanese).

71. Nagura, Y. and Tanaka, H., 2019, “Growing Wall

with Large Scale 3D-printing and Vegetable," *Proceedings of the Conference on 4D and Functional Fabrication 2019*, Tokyo, Japan. (In Japanese).

72. Self-Assembly Lab, S.l.A.i., 4D Printing [Online], Available: https://self assemblylab. mit.edu/4d-printing. [28 July 2020]

73. Griffin, M., 2018, BMW AND MIT Create The World's First 3d Printed Inflatable Material [Online], Available: https://www.311institute.com/bmw-mit-create-first-3d-printed-inflatable-material/. [28 July 2020]

74. Press Release, B.G., 2018, Pushing material boundaries. BMW and Massachusetts Institute of Technology Self-Assembly Lab collaborate to design the first printed inflatable material [Online], Available: https://www.press.bmw group.com/ global/ article/ detail/ T0281110EN/pushing-material-boundaries-bmw-and-massachusetts-institute-of-technology-self-assembly-lab-collaborate-to-design-the-first-printed-inflatable-material?language=en. [28 July 2020]

75. Tracy, P., 2016, Understanding massive MIMO and what it means for 5G [Online], Available: https: //enterpriseiotinsights.com/20160805/5g/massive-mimo-5G-tag31-tag99. [28 July 2020]

76. ITU, Internet of Things Global Standards Initiative [Online], Available: https://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx. [28 July 2020]

77. National Instruments Corp., 5 Things to Know About 5G New Radio [Online], Available: https:// www.ni.com/en-th/innovations/wireless/5g/new-radio.html. [28 July 2020]

78. Office of The National Broadcasting and Telecommunications Commission, 2018, 5G: คลื่นและเทคโนโลยี [Online], Available: http://www.nbtc.go.th/ getattach ment/Services/ quarter2560/ปี-2561/33173/เอกสารแนบ.pdf.aspx. (In Thai) [28 July 2020]

79. International Telecommunication Union, 2015, M.2083 : IMT Vision - "Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond"

80. NTT Data, 5GとIoT（ときどきセキュリティ）～IoT における5Gと他の通信技術の使い分け～[Online], Available: http://www.intellilink.co.jp/article/column/5g-iot.html. (In Japanese) [28 July 2020]

81. Henderson, G., 2019, RFIC Plenary Keynote: The Future of Digital RFICs [Online], Available: https: //www.analog.com/en/education/education-library/videos/ 6050488148001. html#. [28 July 2020]

82. Jiang, L., Edmondson, J. and Ghaffarzadeh, K., 2020, 5G Technology, Market and Forecasts 2020-2030 [Online], Available: https://www.idtechex.com/en/research-report/5g-technology-market-and-forecasts-2020-2030/753. [28 July 2020]

83. Hayward, J., 2020, Wearable Technology Forecasts: 2020–2030 [Online], Available: https: //www.idtechex.com/en/research-report/wearable-technology-forecasts-2020-2030/747. [28 July 2020]

84. Hayward, J., 2020, Electronic Skin Patches 2020–2030[Online], Available: https://www.idtechex.com/en/research-report/electronic-skin-patches-2020-2030/ 743. [28 July 2020]