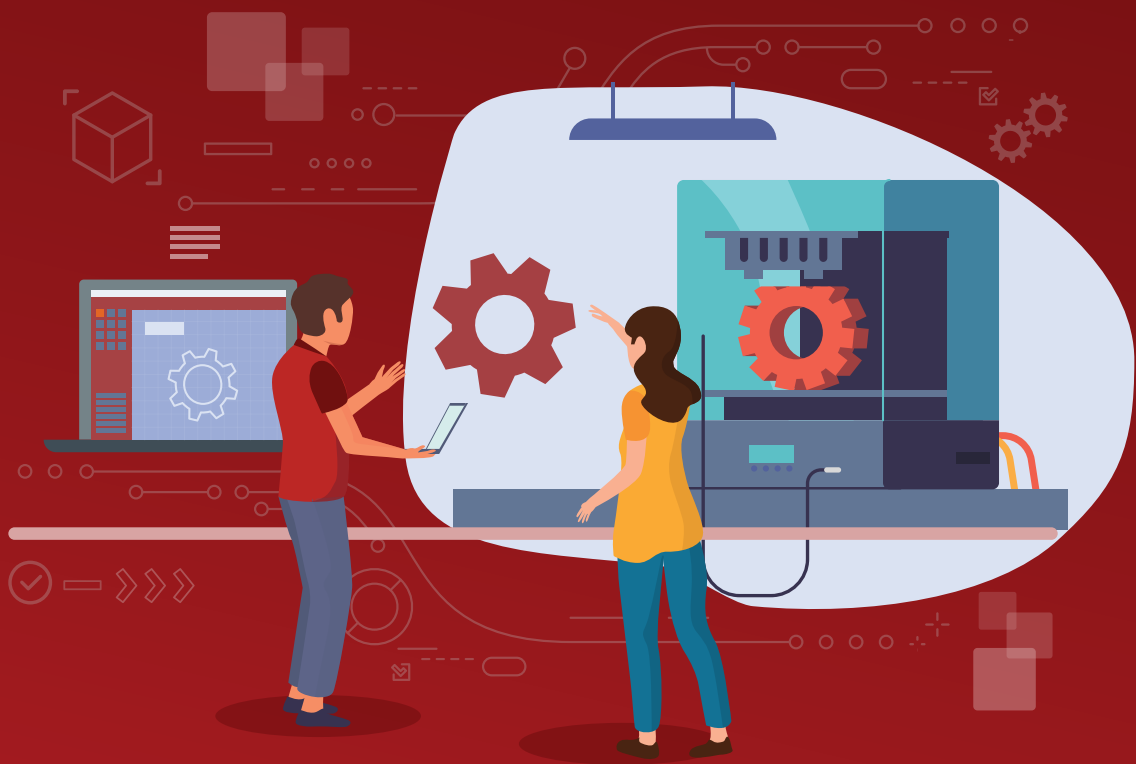




การศึกษาความเป็นไปได้
ในการสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟ
แบบพาสซีฟด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ :
กรณีศึกษาสายอากาศแบบแพตช์

FEASIBILITY STUDY ON FABRICATING
MILLIMETER-WAVE PASSIVE CIRCUITS
USING 3D PRINTING TECHNIQUE:
PATCH ANTENNA CASE STUDY

มิตรชัย จงเชื้อวชำนาญ

Mitchai Chongcheawchamnan

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

Prince of Songkla University, Songkhla 90110 Thailand

Corresponding E-mail : mitchai.c@psu.ac.th

Received Date March 7, 2024
Revised Date July 30, 2024
Accepted Date August 7, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มาสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟ ศึกษาด้วยวิธีวิจัยเอกสาร โดยรวบรวมข้อมูลเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และจัดเป็นกลุ่มตามเทคนิคการพิมพ์ สามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ เทคนิคฉีดเส้นวัสดุ พิมพ์ด้วยเรซิน และการใช้ความร้อนจากแสงเลเซอร์ แล้วนำมาวิเคราะห์ข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของแต่ละเทคนิค โดยพิจารณาสมรรถนะของเทคนิค คุณภาพของชิ้นงาน และต้นทุนค่าใช้จ่าย จากนั้น นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟ โดยกำหนดกรณีศึกษาเป็นสายอากาศแพตช์ซึ่งมีตัวบ่อนแบบสายส่งไมโครสตริปที่มีความถี่ 40 GHz และสมมติให้สร้างด้วยเทคนิคการพิมพ์ทั้ง 3 เทคนิค รวมทั้งวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของมิติสายอากาศและผลกระทบของผิวที่ไม่ราบเรียบจากเทคนิคการพิมพ์แต่ละเทคนิคที่จะทำให้เกิดการสูญเสียในวงจรมากขึ้น ผลการศึกษาพบว่าเทคนิคการพิมพ์แบบฉีดเส้นวัสดุ และพิมพ์ด้วยเรซิน เป็นเทคนิคที่เหมาะสมกว่าเทคนิคการใช้ความร้อนจากแสงเลเซอร์ในการสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟ เนื่องจากให้ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ให้ผิวรูปทรงที่ราบเรียบกว่า และได้วงจรที่ให้สมรรถนะการทำงานตรงกับที่ออกแบบไว้

คำสำคัญ: มิลลิเมตรเวฟ วงจรพาสซีฟ เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ สายอากาศ

Abstract

This article studies the feasibility of utilizing 3D printers to fabricate millimeter-wave passive circuits. In this research, 3D printers were studied and categorized into 3 groups of techniques; Fused Deposition Modeling/ Fused Filament Fabrication (FDM/ FFF), Stereolithography (SLA), and Selective Laser Sintering (SLS). The advantages, disadvantages, and limitations of each technique were analyzed, taking into account their technical competency, workpiece quality, and cost. Subsequently, the potential of creating millimeter-wave circuits using the aforementioned 3D printing techniques was evaluated. The case study involved fabricating a microstrip-fed patch antenna at 40 GHz using each of the three printing techniques. The dimensional variations of the microstrip line and the impact of surface roughness resulting from each 3D printing technique, which could lead to increased losses in the circuit, were also assessed. The study found that FDM/ FFF and SLA techniques were more suitable for fabricating millimeter-wave circuits compared to the SLS technique due to lower dimensional variations and smoother surface finishes, and the performance of the millimeter-wave circuits created met the design.

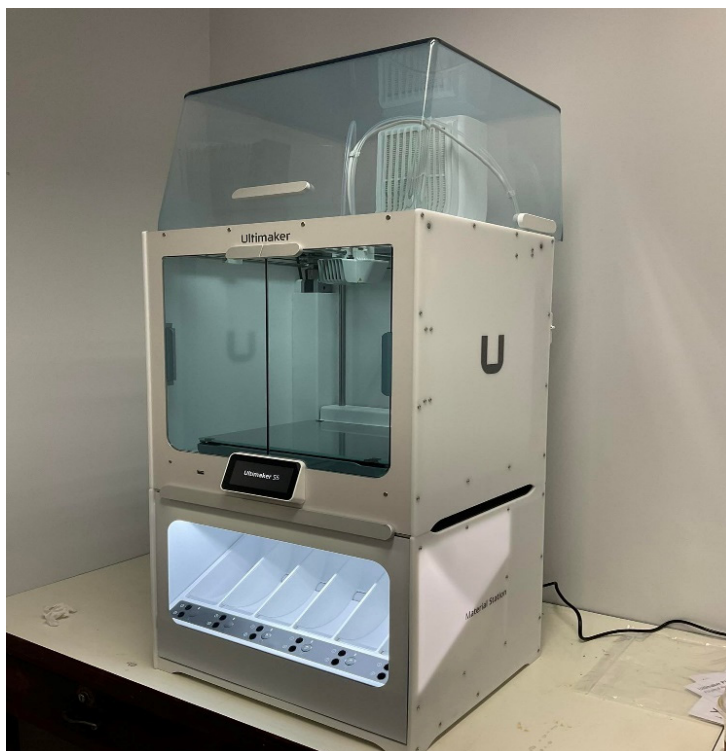
Keywords: millimeter-wave, passive circuit, 3D printing technique, antenna

1. บทนำ

เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing technique) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถขึ้นรูปทรงที่อิสระและหลากหลายกว่าเทคนิคการขึ้นรูปแบบกัดเซาะแบบเดิม เทคนิคเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ออกมาใหม่มีความละเอียดสูงและรวดเร็ว ทำให้มีการใช้งานมากขึ้นทั่วโลกทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคบริการ มีการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติในการสร้างชิ้นส่วนต้นแบบ (prototype) เพื่อเป็นตัวอย่างให้กับลูกค้า ตลอดจนการทดสอบก่อนการผลิต (preprocessing testing) ก่อนผลิต การสร้างชิ้นส่วนเพื่อการทดสอบในระหว่างการผลิต (in situ monitoring) ชิ้นงานที่ผลิตมีตั้งแต่ชิ้นเล็กในระดับชิ้นส่วนนาฬิกาข้อมือ ไปจนถึงการพิมพ์บ้านสำหรับอยู่อาศัย

ในอดีต การผลิตวงจรพาสซีฟทำงานที่แถบความถี่ไมโครเวฟและมิลลิเมตรเวฟ ต้องใช้เทคโนโลยีที่มีความละเอียดสูง โดยโครงสร้างของวงจรเหล่านี้จะขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวัสดุโลหะ แต่เดิมผู้ผลิตอุปกรณ์ให้ภาคอุตสาหกรรมจะใช้เทคโนโลยีการผลิต 3 มิติ แบบ Computer Numerical Control (CNC) โดยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เป็นการฉีดหมึกพิมพ์ (inkjet printing) เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานทีละชั้น (layer by layer) และมีจุดเด่นมากกว่าเทคโนโลยี CNC คือ สามารถขึ้นรูปทรงได้อย่างอิสระและเลือกวัสดุฉนวนไดอิเล็กทริก (dielectric) ในรูปแบบต่าง ๆ ได้ ซึ่งแตกต่างจากเทคโนโลยี CNC ที่เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว วัสดุฉนวนตัวกลางจะต้องเป็นอากาศ ดังนั้น วงจรหรืออุปกรณ์ที่ขึ้นรูปจากเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ จะมีขนาดเล็กกว่า โดยผู้ออกแบบสามารถเลือกวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์มากกว่า 1 แต่สมรรถนะเทียบเคียงได้กับวงจรหรืออุปกรณ์ที่ผลิตจาก

เทคโนโลยี CNC จากข้อมูล Stratasys Ltd. (2023) และ Kruchkin (2016) พบว่า ราคาการผลิตของวงจรต่อชิ้นถูกกว่าและราคาเครื่องพิมพ์ถูกลงต่อเนื่อง ใน ค.ศ. 2008 (พ.ศ. 2551) เครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีราคาเฉลี่ย 12,000 ดอลลาร์สหรัฐต่อเครื่อง ปัจจุบันเครื่องพิมพ์มีราคาเริ่มต้นที่ 200 ดอลลาร์สหรัฐเท่านั้น แต่เครื่องพิมพ์คุณภาพสูงที่ผลิตชิ้นงานละเอียดในระดับไมโครเมตรได้ ดังภาพที่ 1 อาจมีราคาสูงถึง 20,000 ดอลลาร์สหรัฐ



ภาพที่ 1 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ แบบฉีดเส้นวัสดุของบริษัท Ultimaker

บทความนี้ ผู้วิจัยรวบรวมและประมวลเอกสารต่าง ๆ บทความหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ ที่นำเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ มาสร้างเป็นวงจรที่ทำงานในแถบความถี่มิลลิเมตรเวฟ โดยประมวลข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ ในแต่ละเทคนิคเมื่อนำมาสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟ วิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ สร้างวงจรพาสซีฟที่ทำงานในความถี่มิลลิเมตรเวฟ

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ ในการสร้างวงจรพาสซีฟแถบความถี่ มิลลิเมตรเวฟ

2.2 เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ สร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟ

3. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ใช้วิธีวิจัยเอกสาร (documentary research) โดยผู้วิจัยรวบรวมเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ ที่นิยมและนำมาใช้ในงานผลิตวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของเทคนิคการพิมพ์ ยกตัวอย่างกรณีสายอากาศแพตช์ความถี่ 40 GHz มาวิเคราะห์โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.1 รวบรวมและจัดกลุ่มเทคนิคการพิมพ์

3.2 การเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของการพิมพ์ 3 มิติ

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยกำหนดประเด็นเปรียบเทียบ 3 ประเด็น ได้แก่ สมรรถนะเครื่องพิมพ์ คุณสมบัติของชิ้นงานที่แล้วเสร็จ และต้นทุน ดังนี้

3.2.1 สมรรถนะเครื่องพิมพ์ ได้แก่ ความสามารถในการพิมพ์ชิ้นงานที่ซับซ้อนและความเร็วในการพิมพ์

3.2.2 คุณภาพชิ้นงาน ได้แก่ ลักษณะการใช้งาน ความละเอียดของชิ้นงาน และขนาดรูปทรงที่ใหญ่ที่สุดที่เครื่องพิมพ์สามารถสร้างได้

3.2.3 ต้นทุน ได้แก่ ต้นทุนคงที่จากราคาเครื่องพิมพ์ และต้นทุนผันแปรซึ่งคิดจากค่าใช้จ่ายหมึกพิมพ์และค่าไฟฟ้า สำหรับการคิดต้นทุนผันแปรในการศึกษาครั้งนี้จะคิดเฉพาะค่าหมึกพิมพ์

3.3 การศึกษาหมึกพิมพ์สำหรับสร้างวงจรพาสซีฟมิลลิเมตรเวฟ

3.4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของเทคนิคการพิมพ์ในการสร้างวงจร

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคเครื่องพิมพ์เพื่อสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟ จะพิจารณาความแม่นยำของเทคนิคการพิมพ์ เพราะขนาดของวงจรจะแปรผันกับความถี่ ดังนั้น เทคโนโลยีการผลิตจะต้องแม่นยำ เทียงตรงสูง และคลาดเคลื่อนน้อย วงจรที่ผลิตจะต้องมีมิติตรงตามที่ต้องการออกแบบ และส่วนสำคัญอีกประการ คือ ความขรุขระที่ผิว (surface roughness) เพราะความขรุขระบนผิวดำนำจะเพิ่มการสูญเสียภายในวงจร ดังนั้น เทคโนโลยีการพิมพ์ที่เหมาะสมจะต้องให้ผิวแผ่นตัวนำเรียบ

ค่าความขรุขระของผิวดำนำที่เหมาะสมคำนวณจากความลึกเชิงผิว (skin depth : δ)

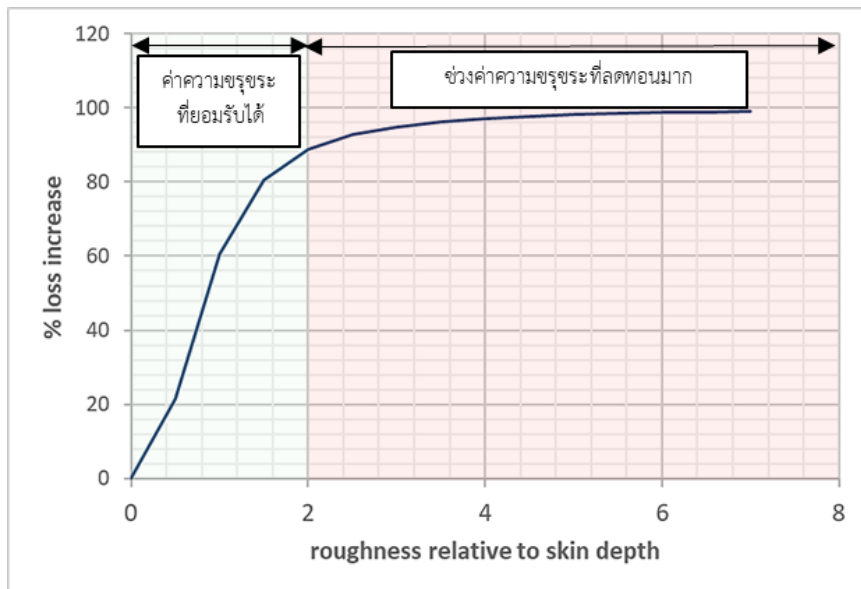
$$(1) \quad \delta = \sqrt{\frac{p}{\pi f \mu}}$$

เมื่อ p แทนความต้านทาน และ μ แทนความซึมซาบแม่เหล็กของหมึกพิมพ์ ความลึกเชิงผิวส่งผลต่อการสูญเสียทางไฟฟ้า สามารถอธิบายได้ในพจน์ของค่าคงตัว (α) ที่เป็นส่วนเพิ่มของการลดทอนที่เกิดจากการแพร่กระจายคลื่น ดังสมการ

$$(2) \quad \alpha = 1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(1.4 \left[\frac{\Delta}{\delta} \right]^2 \right)$$

เมื่อ Δ แทนค่าเฉลี่ยกำลังสองของความขรุขระผิวดำนำ จากสมการ (2) พบว่า $\left[\frac{\Delta}{\delta} \right]$ อยู่ในช่วง $(0, \infty)$ ทำให้ค่า $\tan^{-1} \left(1.4 \left[\frac{\Delta}{\delta} \right]^2 \right)$ มีค่าอยู่ในช่วง $(0, +\frac{\pi}{2})$ α จะมีค่าตกอยู่ในช่วง $(1, 2)$ ดังนั้น ค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความขรุขระบนพื้นผิวของตัวนำจะมากที่สุดไม่เกิน 2 เท่าของค่าการสูญเสียของกรณีที่มีพื้นผิวดำนำราบเรียบ หรือคิดเป็นสองเท่าของค่าการสูญเสียเดิมในกรณีที่ผิวดำนำราบเรียบ

ผลของสมการ (1) และ (2) ทำให้เราสามารถคำนวณความสัมพันธ์ของอัตราเพิ่มของการลดทอน (คิดเป็นร้อยละ) กับอัตราส่วนความขรุขระของผิวดำนำกับค่าความลึกเชิงผิว $\left[\frac{\Delta}{\delta} \right]$ ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์นี้ ซึ่งพบว่า หากผิวของรูปทรงไม่ขรุขระเลย หรือ $\left[\frac{\Delta}{\delta} \right] = 0$ ค่าคงตัวการลดทอนจะไม่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความขรุขระเพิ่มขึ้น ค่าการลดทอนจะเพิ่มขึ้น กรณีความขรุขระของผิวดำนำรูปทรงเพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่าความลึกผิว หรือ $\left[\frac{\Delta}{\delta} \right] = 1$ สัญญาณจะลดทอนหรือหายไปร้อยละ 61 จากเดิม และหากความขรุขระของผิวดำนำรูปทรงเพิ่มขึ้นจนเป็น 2 เท่าของความลึกผิวแล้ว หรือ $\left[\frac{\Delta}{\delta} \right] = 2$ สัญญาณจะลดทอนไปร้อยละ 89 จากเดิม ซึ่งในทางปฏิบัติจะยอมรับค่าการลดทอนสูงสุดที่ร้อยละ 89 ซึ่งจากกราฟดังภาพที่ 2 ความขรุขระไม่ควรเกิน 2 เท่าของค่าความลึกผิว



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ของอัตราเพิ่มการลดทอน กับ $\left[\frac{d}{\delta}\right]$

4. การทบทวนวรรณกรรม

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หรือเทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing: AM) กำลังก้าวเข้ามาเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญ ปัจจุบันเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีราคาถูกลงและสามารถออกแบบชิ้นงานบนโปรแกรมช่วยออกแบบบนคอมพิวเตอร์ (Computer-Assisted Design: CAD) จากนั้น บันทึกข้อมูลในรูปของไฟล์ดิจิทัลและส่งดิจิทัลไฟล์ที่บันทึกระยะไกลไปที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ได้ โดยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ มีดังนี้

4.1 Selective Laser Sintering

เครื่องพิมพ์ Selective Laser Sintering (SLS) ถูกคิดค้นขึ้นใน ค.ศ. 1987 (พ.ศ. 2530) และใน ค.ศ. 1992 (พ.ศ. 2535) ได้ออกเครื่องพิมพ์ SLS เครื่องแรกของโลก เทคนิคการใช้ความร้อนจากแสงเลเซอร์ใช้เครื่องยิงแสงเลเซอร์กำลังสูงบนวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปทรง ซึ่งอาจเป็นพลาสติก โลหะ เซรามิก หรือแก้ว ความร้อนจากลำแสงเลเซอร์จะทำให้วัสดุหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวกันและก่อเป็นรูปทรง 3 มิติ ตามต้องการ

ข้อดีและข้อเสียของเครื่องพิมพ์นี้ คือ ชิ้นงานที่ผลิตออกมาจากเครื่องพิมพ์จะแข็งแรง คงทน แต่ราคาค่อนข้างสูง วัสดุพิมพ์มีค่อนข้างจำกัด เครื่องพิมพ์มีขนาดใหญ่จึงต้องการพื้นที่ติดตั้งมากกว่าเครื่องพิมพ์แบบอื่น อีกทั้งใช้กำลังไฟฟ้ามากเพราะต้องยิงลำแสงเลเซอร์กำลังสูงและใช้ความร้อนสูง จึงค่อนข้างอันตราย

4.2 Fuse Deposition Modeling/ Fuse Filament Fabrication

เครื่องพิมพ์ Fuse Deposition Modeling/ Fuse Filament Fabrication (FDM/ FFF) ถูกออกแบบขึ้นใน ค.ศ. 1989 (พ.ศ. 2532) โดย S. Scott Crump ต่อมา บริษัท Stratasys ได้ผลิตเครื่องพิมพ์ 3 มิติเครื่องแรกของโลกเพื่อจำหน่ายในชื่อผลิตภัณฑ์ 3D Modeler เทคนิคนี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แปลงข้อมูลภาพ 3 มิติ ของรูปทรงเป็นชุดข้อมูล 2 มิติ ชุดข้อมูล 2 มิติ ประกอบด้วยภาพตัดขวางที่จัดเรียงจากชั้นบนสุดไปจนถึงชั้นล่างสุดที่เป็นฐานของรูปทรง การสร้างรูปทรงจะสร้างจากข้อมูลภาพตัดขวางที่ละชั้น ในแต่ละชั้นมอเตอร์และเฟืองจะดึงเส้นวัสดุออกจากม้วนเส้นวัสดุ (filament spool) และหลอมเส้นวัสดุให้เป็นหมึก ส่งเข้าหัวฉีดเพื่อฉีดหมึกบนแท่นพิมพ์ที่ละชั้น จากชั้นล่างสุดไปจนถึงบนสุด เมื่อวัสดุเย็นลงก็จะแข็งตัวและขึ้นเป็นรูปทรงที่ต้องการ

ข้อดีและข้อเสียของเครื่องพิมพ์นี้ คือ ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย เพราะเป็นเครื่องพิมพ์ที่มีจำหน่ายมากที่สุด ฟังก์ชันในการใช้งานง่ายและสามารถสร้างจากวัสดุพิมพ์ที่หลากหลาย แต่ความละเอียดในการพิมพ์และระยะเวลาที่ยังด้อยกว่าเครื่องพิมพ์แบบอื่น

4.3 Stereolithography

Stereolithography (SLA) เป็นเครื่องพิมพ์ที่ใช้งานเชิงพาณิชย์ ถูกคิดค้นขึ้นใน ค.ศ. 1984 (พ.ศ. 2527) โดยบริษัท 3D Systems และตั้งชื่อเครื่องพิมพ์นี้ว่า SLA-1 เทคนิคการพิมพ์ใช้แสงเลเซอร์ทำงานร่วมกับวัสดุโฟโตพอลิเมอร์ (photopolymer) ซึ่งเป็นวัสดุประเภทเรซินที่จะแข็งตัวเมื่อฉายลำแสงผ่านเครื่องพิมพ์ จะยิงลำแสงเลเซอร์ที่มีขนาดเล็กมากไปตามแนวเป็นชั้น ๆ เพื่อขึ้นรูป รูปทรงที่ได้จึงมีความละเอียดสูง

ข้อดีของเครื่องพิมพ์นี้ คือ จะให้ชิ้นงานที่มีความละเอียดสูง ผิวเรียบ ความเร็วในการพิมพ์ไม่ลดลงแม้พิมพ์งานครั้งละหลายชิ้น อย่างไรก็ตาม เครื่องพิมพ์นี้มีข้อเสีย คือ หมึกเรซินเหลวที่ใช้จะเลอะง่าย มีกลิ่นเหม็น และหากสูดดมในปริมาณมากจะเป็นอันตรายได้ แม้ว่าเครื่องพิมพ์ SLA นี้ จะได้รับการยอมรับว่าสร้างรูปทรงออกมาได้ละเอียด แต่ก็มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น เครื่องพิมพ์และวัสดุที่ใช้มีราคาสูง ทำให้ชิ้นงานที่ผลิตมีต้นทุนต่อชิ้นสูง หมึกที่ใช้ต้องเป็นเรซินที่ไวต่อแสงเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ขนาดชิ้นงานที่ผลิตได้ไม่ใหญ่มาก อีกทั้งชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้วต้องนำไปตากแดดหรืออบด้วยแสงอีกครั้งหากต้องการเพิ่มความแข็งแรง

4.4 Multi Jet Fusion

เครื่องพิมพ์ Multi Jet Fusion Process (MJF) เป็นเครื่องพิมพ์ที่ผลิตและจำหน่ายใน ค.ศ. 2016 (พ.ศ. 2559) ดัดแปลงจากเครื่องพิมพ์แบบฉีดหมึก (inkjet printer) เครื่องพิมพ์นี้จะขึ้นรูปทีละชั้นด้วยหัวฉีดหมึกเล็ก ๆ จำนวนมาก หยดหมึกจิ๋วขนาด 21 ไมครอน จะถูกยิงจากหัวฉีดด้วยความเร็วสูงถึง 350 ล้านหยดต่อวินาที

ข้อดีของเครื่องพิมพ์นี้ คือ ความเร็วในการสร้างชิ้นงาน ซึ่งเร็วกว่าเครื่องพิมพ์เทคนิค FDM ถึง 27 เท่า

4.5 Digital Light Processing/ Liquid Crystal Display

เครื่องพิมพ์ดีแอลพี (Digital Light Processing: DLP/ Liquid Crystal Display: LCD) ถูกคิดขึ้นใน ค.ศ. 1987 (พ.ศ. 2530) เป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้การฉายลำแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet: UV) ด้วยโปรเจกเตอร์ (projector) ลำแสงจะยิงไปที่วัสดุเหลวใสที่มีคุณสมบัติพิเศษที่จะแข็งตัวเมื่อมีแสงมาตกกระทบ ซึ่งควบคุมด้วยโปรเจกเตอร์และชุดกระจก Digital Mirror Device (DMD) ที่บรรจุอยู่ในเลนส์โปรเจกเตอร์ เครื่องพิมพ์นี้ใช้เทคนิคคล้ายกับเครื่องพิมพ์ SLA มาก แตกต่างกันเฉพาะอุปกรณ์โปรเจกเตอร์แทนที่จะใช้เครื่องยิงเลเซอร์ที่เทคนิค SLA ใช้ เครื่องพิมพ์ DLP ได้รับการพัฒนาต่อยอดเป็น DLP/ LCD เพื่อขึ้นรูปทรงละเอียดและประณีตมากขึ้น โดยเปลี่ยนจากโปรเจกเตอร์มาใช้ชุดหลอดเปล่งแสง LED (Light Emitting Diode) กำลังสูง และเลนส์ครอบ fresnel lens และ condenser lens เพื่อบีบให้ลำแสงจากหลอดมีขนาดเล็กจิ๋ว

ข้อดีและข้อเสียของเครื่องพิมพ์ DLP/ LCD พบว่า มีความละเอียดสูงและปลอดภัยกว่า SLA แต่ราคาแพงกว่าเนื่องจากเทคโนโลยีใหม่กว่า

4.6 โพลีเจต (polyjet)

เครื่องพิมพ์โพลีเจตถูกคิดค้นและออกสู่ตลาดใน ค.ศ. 2000 (พ.ศ. 2543) ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อให้ยิงหยดหมึกไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ มีหมึกพิมพ์หลากหลายกว่าเครื่องพิมพ์แบบอื่น ๆ ทำให้สามารถสร้างชิ้นผิวแต่ละชั้นของรูปทรงที่มีสีและความอ่อนแข็งได้แตกต่างกัน ผิวของชิ้นงานมีลวดลายตามที่ต้องการได้ ทำให้มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับชิ้นงานที่ต้องการความละเอียด ซับซ้อน และประณีต เทคนิคการพิมพ์แบบนี้จึงมีผู้นำมาใช้ในการสร้างสรรค์ศิลปะหรืองานที่ต้องการความประณีตโดยเฉพาะ

4.7 Direct Metal Laser Sintering

เครื่องพิมพ์ Direct Metal Laser Sintering (DMLS) สามารถพิมพ์โลหะทั้งอะลูมิเนียม เหล็กอัลลอย เหล็กสแตนเลส เงิน โคบอลต์-โครม และไทเทเนียม การผลิตให้เป็นรูปทรง 3 มิติ เครื่องพิมพ์จะหลอมผงโลหะ ขนาด 20 ไมครอนด้วยแสงเลเซอร์กำลังสูง เพื่อให้ผงโลหะหลอมเหลวและเชื่อมติดกันเป็นรูปทรง เทคนิค DMLS ไม่ต้องใช้วัสดุพอลิเมอร์ประสาน (polymer binder) ดังนั้น รูปทรงที่ผลิตจากเทคนิคนี้จึงมีส่วนผสมของโลหะสูงถึงร้อยละ 95 ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากเทคนิคการใช้ความร้อนจากเลเซอร์ ที่มีส่วนของโลหะเพียงร้อยละ 70 และเครื่องพิมพ์ DMLS สร้างชิ้นงานที่ละเอียดกว่าเครื่องพิมพ์ SLS เพราะชั้นเนื้อวัสดุที่บางกว่า ซึ่งมาจากขนาดของผงโลหะที่เล็กเพียง 20 ไมครอน

เครื่องพิมพ์นี้สามารถสร้างชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและใช้งานได้จริง เหมาะสำหรับรังสรรค์รูปทรงที่ละเอียดซับซ้อน ข้อเสีย คือ พิมพ์ได้เฉพาะโลหะ และไม่เหมาะกับสร้างชิ้นงานจำนวนมาก

4.8 Binder Jetting

เครื่องพิมพ์ Binder Jetting (BJ) ขึ้นรูปด้วยการพ่นกาวเพื่อผสมผสานผงหมึกพิมพ์เข้าด้วยกัน ข้อดีของเครื่องพิมพ์นี้ คือ สามารถทำงานที่อุณหภูมิห้องได้ เนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อมไม่ส่งผลต่อความแม่นยำของรูปทรงที่สร้างขึ้น เครื่องพิมพ์นี้มีแท่นพิมพ์ขนาดใหญ่ สามารถสร้างรูปทรงขนาดใหญ่ได้ หรือสร้างชิ้นงานหลายชิ้นได้พร้อมกัน ข้อดีอีกประการ คือ เครื่องพิมพ์นี้ไม่ต้องการโครงสร้างรองรับชิ้นงานระหว่างพิมพ์ ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนในการจัดการรูปทรงหลังพิมพ์เสร็จ เมื่อเทียบกับเครื่องพิมพ์ DMLS/ SLM และเครื่องพิมพ์ BJ จะพิมพ์ได้เร็วกว่าและมีราคาต้นทุนการผลิตต่อชิ้นที่ต่ำกว่า (TWI Ltd, n.d.)

4.9 Digital Light Synthesis

เครื่องพิมพ์ Digital Light Synthesis (DLS) ใช้หลักการเดียวกันกับเครื่องพิมพ์ SLA คือ ใช้แสง UV ให้ความร้อนเพื่อให้หมึกแข็งตัว แต่แตกต่างกันตรงที่พิมพ์ได้เร็วกว่าด้วยเทคนิคการใช้แสง UV ที่ทำให้หมึกแข็งตัวเร็ว ไม่ต้องรอให้หมึกแข็งตัวเหมือนเครื่องพิมพ์ SLA

5. นิยามศัพท์เฉพาะ

- 5.1 แถบความถี่มิลลิเมตรเวฟ ช่วงความถี่ที่ความยาวคลื่นยาวในระดับมิลลิเมตร
- 5.2 วงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟ วงจรไฟฟ้าที่ไม่มีอัตราขยายกำลังและออกแบบมาให้ทำงานในแถบความถี่มิลลิเมตรเวฟ
- 5.3 สายอากาศแบบแพตช์ สายอากาศแบบแผ่นและสร้างบนแผ่นวงจรพิมพ์
- 5.4 วัสดุฉนวน วัสดุที่ไม่มีสมบัตินำไฟฟ้า
- 5.5 ไดอิเล็กทริก วัสดุที่มีสมบัติที่กักเก็บสนามไฟฟ้าได้แต่ไม่นำไฟฟ้า
- 5.6 สภาพยอมสัมพัทธ์ สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่บ่งชี้ถึงความสามารถกักเก็บสนามไฟฟ้าของวัสดุนั้นเมื่อเทียบกับอากาศ

6. ผลการศึกษา

6.1 ผลการจัดกลุ่มเทคนิคการพิมพ์

จากประเภทเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 9 ประเภท ผู้วิจัยได้ประมวลและจัดกลุ่มเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ เป็น 3 กลุ่มหลัก ดังต่อไปนี้

6.1.1 เทคนิควัสดุไวแสง

โดยหลักแล้ว เทคนิคนี้จะใช้หมึกโฟโตพอลิเมอร์ซึ่งเป็นเรซินไวแสง ในเครื่องพิมพ์จะติดตั้งอุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสง เช่น เลเซอร์ อุปกรณ์ควบคุมลำแสง ซึ่งอาจเป็นเลนส์โปรเจกเตอร์ จอ LCD กระบอกเลนส์ มีอุปกรณ์ควบคุมลำแสง เพื่อบังคับลำแสงที่ยังมาจากอุปกรณ์กำเนิดแสงไปยังตำแหน่งที่หมึกโฟโตพอลิเมอร์ถูกหยดเพื่อขึ้นรูปทรง เมื่อลำแสงที่ยิงไปตกกระทบกับหมึกที่ตำแหน่งดังกล่าว จะทำให้หมึกแข็ง และก่อตัวเป็นชั้นของรูปทรง เครื่องพิมพ์ที่ใช้เทคนิคนี้ ได้แก่ เครื่องพิมพ์ SLA และ MJF

6.1.2 เทคนิคการหลอม

เทคนิคนี้จะหลอมผงอนุภาคที่ก่อเป็นรูปทรงที่ต้องการด้วยความร้อน ผงหมึกที่ขึ้นรูปอยู่ในกลุ่มสารเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ซึ่งทนแรงดึงได้สูง หลอมเหลวด้วยความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นลง ในบางเครื่องพิมพ์จะใช้สารที่ทำหน้าที่เหมือนกาวประสานเพื่อให้เป็นรูปทรงที่ต้องการ สารเทอร์โมพลาสติกนี้เมื่อขึ้นรูปแข็งตัวแล้ว สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง โดยนำรูปทรงที่ไม่ต้องการมาบดให้ละเอียดและหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปใหม่ได้

6.1.3 เทคนิคซินเทอร์ (sintering)

เทคนิคซินเทอร์จะใช้ปืนเลเซอร์แรงสูงหรือเครื่องยิงลำอิเล็กตรอน (electron beams) ไปยังวัสดุที่ต้องการสร้างรูปทรงโดยตรง ความร้อนจากลำแสงเลเซอร์หรือจากเครื่องยิงลำอิเล็กตรอนและจะหลอมผงวัสดุนั้นให้ละลายโดยสมบูรณ์และจะได้รูปทรงในแต่ละชั้นตามต้องการ เช่น เทคนิคการใช้ความร้อนจากแสงเลเซอร์

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปเทคนิคของเครื่องพิมพ์ทั้ง 9 ประเภท ได้ดังตารางที่ 1 และพบว่า มีเครื่องพิมพ์ที่ใช้หมึกไวแสงจำนวน 4 ประเภท ได้แก่ เครื่องพิมพ์ SLA, โพลีเจต, DLP/ LCD และ DLS ส่วนเทคนิคการหลอม ได้แก่ เครื่องพิมพ์ FDM/ FFF, MJF และ BJ และเทคนิคซินเทอร์ ได้แก่ เครื่องพิมพ์ SLS และ DMLS

ตารางที่ 1 ผลการจัดกลุ่มเทคนิคการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

เทคนิคการพิมพ์	เครื่องพิมพ์
วัสดุไวแสง	SLA, โพลีเจต, DLP/ LCD, DLS
การหลอม	FDM/ FFF, MJF, BJ
ซินเทอร์	SLS, DMLS

6.2 ผลวิเคราะห์ข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัด

ในการเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัด ผู้วิจัยเลือกเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ที่เป็นตัวแทนของแต่ละเทคนิคการพิมพ์ ได้แก่ SLS สำหรับเทคนิคซินเทอร์ FDM/ FFF สำหรับเทคนิคการหลอม และ SLA สำหรับเทคนิควัสดุไวแสง โดยสรุปผลเปรียบเทียบข้อมูลของแต่ละเทคนิคโดยผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ที่เผยแพร่บนเว็บไซต์และจากรายงานเอกสารของต่างประเทศ ดังตารางที่ 2

6.2.1 ด้านสมรรถนะของเครื่องพิมพ์

เครื่องพิมพ์ FDM/ FFF และ SLA เป็นเครื่องพิมพ์ที่แม่นยำเท่ากันและดีกว่าเครื่องพิมพ์ SLS สำหรับความเร็วการพิมพ์ พบว่า เครื่องพิมพ์ SLA มีความเร็วสูงกว่าเครื่องพิมพ์ FDM/ FFF และเครื่องพิมพ์ SLS หลายเท่า แต่เครื่องพิมพ์ SLS เป็นเครื่องพิมพ์ที่สามารถรองรับวัสดุพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ได้หลายชนิดกว่าเครื่องพิมพ์ SLA ซึ่งจะพิมพ์ได้เฉพาะวัสดุที่เป็นฉนวน และ FDM/ FFF ซึ่งพิมพ์ฉนวนและฉนวนที่ฉาบตัวนำได้

6.2.2 ด้านคุณภาพชิ้นงาน

เครื่องพิมพ์ FDM/ FFF เหมาะสำหรับสร้างชิ้นงานต้นแบบเนื่องจากวัสดุพิมพ์ที่เป็นเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ทำให้พลาสติกละลายได้ ส่วนชิ้นงานที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์ SLA และ SLS สามารถนำมาใช้งานได้จริง เนื่องจากวัสดุพิมพ์มีความแข็งแรงและทนความร้อนได้สูง ในด้านความละเอียดของชิ้นงาน เครื่องพิมพ์ SLA มีความละเอียดเท่ากับ 10 ไมครอน จึงสามารถผลิตชิ้นงานที่มีความประณีต ผิวเรียบเหมือนต้นแบบจริง ส่วนเครื่องพิมพ์ SLS และ FDM/ FFF เป็นเครื่องพิมพ์ที่ผลิตชิ้นงานที่มีความละเอียดใกล้เคียงกัน และความสามารถของเครื่องพิมพ์ที่สำคัญอีกประการ คือ ความสามารถในการสร้างชิ้นงานขนาดใหญ่หรือผลิตชิ้นงานได้ครั้งละหลายชิ้น โดยเครื่องพิมพ์ FDM/ FFF มีขนาดแท่นพิมพ์ที่ใหญ่ที่สุด รองลงมาคือ เครื่องพิมพ์ SLA และ SLS ตามลำดับ

6.2.3 ต้นทุนการลงทุนเครื่องพิมพ์

ผลการศึกษาพบว่า ราคาเครื่องพิมพ์ FDM/ FFF มีราคาถูกที่สุด ส่วนเครื่องพิมพ์ SLS มีราคาแพงที่สุด ส่วนวัสดุพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ FDM/ FFF มีราคาถูกที่สุด รองลงมาจะเป็นวัสดุพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ SLS และวัสดุพิมพ์ที่มีราคาแพงที่สุดคือวัสดุพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ SLA

ตารางที่ 2 ผลเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของเครื่องพิมพ์ 3 เทคโนโลยี

เทคนิค		พิมพ์ด้วยเรซิน	ฉีดเส้นวัสดุ	การใช้ความร้อนจากแสงเลเซอร์
สมรรถนะของเครื่องพิมพ์	ความแม่นยำ ^a	±0.15%	±0.15%	±0.3%
	ความเร็ว (มม./ชม.)	700 ^a	150 ^b	48 ^b
	ความหลากหลายของวัสดุพิมพ์	ฉนวน	ฉนวน/ ตัวนำ	ตัวนำ/ สารกึ่งตัวนำ/ ฉนวน
ชิ้นงาน	การใช้งาน	ใช้งานจริง	ต้นแบบ	ใช้งานจริง
	ความละเอียด (มม.) ^c	±0.01	±0.2	±0.3
	ขนาดใหญ่ที่สุด (ลบ.ซม.)	30.0x33.5x20.0	30.0x30.0x60.0	16.5x16.5x30.0
ต้นทุนในการลงทุน	เครื่องพิมพ์ (USD)	3,750 (ในบ้าน/ ที่ทำงาน)	200 (ในบ้าน/ ที่ทำงาน)	18,500 (ในบ้าน/ ที่ทำงาน)
		80,000 (ในอุตสาหกรรม)	15,000 (ในอุตสาหกรรม)	100,000 (ในอุตสาหกรรม)
	วัสดุพิมพ์ (USD)	149-200/ลิตร	50-150/กก.	100/กก.

^a ที่มา: Chen (2019)

^b ที่มา: Monroe Engineering, LLC, Inc. (2020)

^c ที่มา: Nutma (2019)

6.3 ผลการศึกษาหมึกพิมพ์สำหรับสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟ

วงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟ ประกอบด้วยตัวนำและไดโอดเล็กทรอนิกส์ โดยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบการใช้ความร้อนจากแสงเลเซอร์ เป็นเทคนิคเดียวที่สามารถพิมพ์โลหะได้ทันที ส่วนเทคนิคพิมพ์แบบการฉีดเส้นวัสดุ และการพิมพ์ด้วยเรซิน ต้องมีกระบวนการอื่นเพิ่มเติม ได้แก่ การขัดผิว (surface polishing) การเคลือบหรือชุบโลหะ (metal plating) และการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้น (curing)

6.3.1 ไดโอดเล็กทรอนิกส์

กลุ่มหมึกพิมพ์ Methacrylate Photopolymer Resin PLA หรือเทอร์โมพลาสติก เช่น ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) นิยมใช้กันทั่วไปในเครื่องพิมพ์ FDM/ FFF และ SLA หมึกพิมพ์กลุ่มนี้แข็งแรงและเหนียวพอที่จะทำฐานรอง (substrate) ของแผ่นพิมพ์วงจรและขึ้นรูปวงจร 3 มิติ ได้ อย่างไรก็ตามหากต้องการออกแบบวงจรความถี่สูงที่ใช้สายส่ง (transmission line) ซึ่งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแพร่กระจายอยู่ในวัสดุไดโอดเล็กทรอนิกส์ที่เป็นฐานรองแล้ว หมึกพิมพ์ควรมีค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (loss tangent) ต่ำ ซึ่งทำให้ PLA หรือ ABS ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานนี้ ตารางที่ 3 รายงานสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ') และค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ($\tan \delta$) ของหมึกพิมพ์ จากตารางที่ 3 พบว่า หมึกพิมพ์ที่เหมาะสมกว่า คือ

พอลิเมอร์พลาสติกชื่อ Rexolite ที่มีการสูญเสียแทนเจนต์ต่ำมากและมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ค่อนข้างคงที่ ตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึง 500 GHz ทำให้หมึกพิมพ์นี้เหมาะสำหรับสร้างวงจรในช่วงความถี่ไมโครเวฟไปจนถึง เทราเฮิร์ตซ์ นอกจากหมึกพิมพ์ Rexolite แล้ว ยังมีหมึกพิมพ์อื่นที่เหมาะสมสำหรับความถี่มิลลิเมตรเวฟ (Lis et al., 2016) ได้แก่

- 1) polystyrene-block-polybutadiene-block-polystyrene (SBS)
- 2) polystyrene-block-poly(ethylene-ran-butylene)-block-polystyrene (SEBS)
- 3) polystyrene-block-polyisoprene-block-polystyrene (SIS)

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สำหรับ FDM/ FFF และ SLA ที่ 300 MHz

วัสดุพิมพ์	ϵ'	$\tan \delta$
ABS	3.11	0.014
PLA	2.95	0.014
MPR	4.10	0.027
Rexolite	2.53	0.00019
SEBs	2.52	0.00016

ที่มา: Behzadnezhad et al., 2018; Polymer Plastics Company, LC., n.d.

6.3.2 ตัวนำ

โครงสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟต้องมีตัวนำ หมึกพิมพ์ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำสำหรับ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีทั้งโลหะ คาร์บอน หรือหมึกพอลิเมอร์ผสม (polymer composites) ที่นำไฟฟ้าได้ ด้วยการโดปคาร์บอน (carbon doping) ในโครงสร้างโพลิเมอร์ (polymer matrices) การทำให้นำไฟฟ้า ได้มากขึ้นจะขึ้นกับระดับการโดปคาร์บอนในโครงสร้างโพลิเมอร์

หมึกพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่เป็นโลหะสามารถนำไฟฟ้าได้ดี แต่มีราคาสูง และเกิดสนิม ได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพิมพ์คาร์บอนที่นำไฟฟ้าได้ดีและคุณสมบัติทางไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงจากปัจจัย ภายนอกมากนัก ด้วยรูปแบบการจัดเรียงอะตอมของคาร์บอนทำให้คาร์บอนเป็นวัสดุที่แข็งแรง นำไฟฟ้าได้ดี มีเสถียรภาพทางเคมีสูง และมีความหนาแน่นต่ำทำให้น้ำหนักเบา เนื่องจากมีคุณสมบัติที่นำไฟฟ้าได้ดีนี้ จึงมีการนำคาร์บอนบริสุทธิ์มาใช้เป็นหมึกพิมพ์และผสมในพอลิเมอร์ผสมสำหรับพิมพ์รูปทรง 3 มิติ โดยวัสดุ คาร์บอนที่ใช้ในการขึ้นรูปทรง 3 มิติ โดยตรง ได้แก่

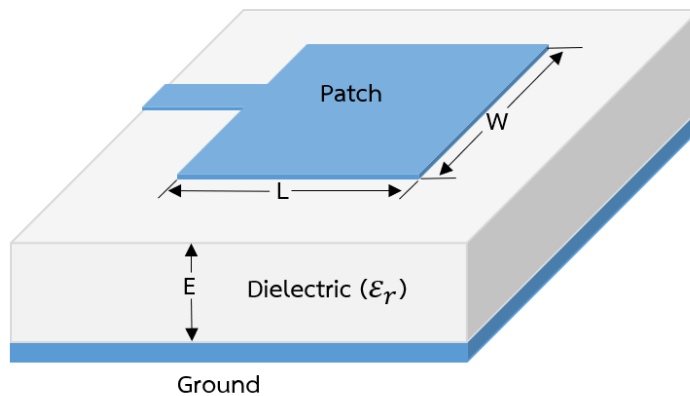
- 1) Carbon Black (CB) เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ราคาถูก และนำไฟฟ้าได้ดี
- 2) Carbon Fiber (CF) เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยหน่วยคาร์บอนเล็ก ๆ โครงสร้างโมเลกุลอยู่ระหว่างแกรไฟต์และเพชร มีน้ำหนักเบา นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี แข็งแรง ทนต่อแรงดึงสูง และนิยมนำมาผสมกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้า
- 3) Carbon Nanotubes (CN) เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกกลวง โดยผนังของทรงกระบอกเป็นโครงสร้างตาข่ายที่ถักทอด้วยโมเลกุลคาร์บอน
- 4) กราฟีน (graphene) เป็นวัสดุที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานของแกรไฟต์ชนิดอื่น ๆ กราฟีนมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เยี่ยมยอด แข็งกว่าเหล็กกล้า 100 เท่า และนำประจุไฟฟ้าดีกว่าสารกึ่งตัวนำ 10 เท่า นอกจากนี้ ยังมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กที่อ่อนนุ่มยิ่งยวด และสามารถแสดงคุณสมบัติของ quantum hall effect ที่อุณหภูมิห้องได้อีกด้วย

ดังนั้น แนวทางหนึ่งในการสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟ อาจใช้หมึกพิมพ์กลุ่มธาตุคาร์บอนที่ราคาถูกกว่าและนำไฟฟ้าได้เพื่อขึ้นรูปทรง จากนั้นจึงใช้กระบวนการชุบหรือเคลือบด้วยโลหะนำไฟฟ้าบาง ๆ บริเวณชั้นนอก อย่างไรก็ตาม ควรคำนึงถึงความเรียบของผิวชั้นนอกด้วย มิฉะนั้นอาจเกิดการสูญเสียจากความขรุขระของผิวดำเนินได้

6.4 ผลวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของเทคนิคการพิมพ์ในการสร้างวงจร

จากหัวข้อ 3.4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการนำเทคนิคการพิมพ์มาสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟ จำเป็นต้องพิจารณาความละเอียดในการสร้างรูปทรงและความราบเรียบของผิวยุติรูปทรง การวิเคราะห์นี้จะใช้มิติของรูปทรงที่ความถี่ต่าง ๆ ซึ่งขึ้นกับความยาวคลื่นของความถี่นั้น ๆ ในการคำนวณ เพื่อให้การวิเคราะห์และเปรียบเทียบเทคนิคแต่ละเทคนิคทำได้ง่าย บทความนี้จะเลือกกรณีสายอากาศแพตช์ (patch antenna) ดังภาพที่ 2 มาใช้เป็นกรณีศึกษา ในการคำนวณมิติสายอากาศ (Electromagnetics and Microwave Engineering: n.d.) เนื่องจากสายอากาศแพตช์มีความยาวน้อยกว่าความกว้าง สำหรับวงจรป้อนสัญญาณ (feed) ให้กับสายอากาศแพตช์ จะเป็นสายส่งที่มีความกว้างซึ่งคำนวณจาก Pasternack (n.d.) โดยในการศึกษานี้ จะเลือกสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์ลักษณะ (impedance) 70.7 โอห์ม

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณทั้งสายอากาศแพตช์และสายส่ง มีความแม่นยำในช่วงความถี่ที่อยู่ในช่วงความถี่มิลลิเมตรเวฟ ดังนั้น ในการวิเคราะห์ครั้งนี้จึงเลือกใช้ความถี่ที่ 40 GHz โดยสมมติให้ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุ (dielectric constant) เท่ากับ 2.5 และกำหนดให้ฐานรองวัสดุสูง 0.5 มิลลิเมตร กำหนดความถี่ที่สนใจ 2 ค่า คือ 4 GHz และ 40 GHz ผลลัพธ์ของการคำนวณความยาวของสายอากาศแพตช์และความกว้างของสายส่ง 70.7 โอห์ม แสดงในตารางที่ 4 จากข้อมูลในตารางพบว่า มิติที่เล็กที่สุดที่สามารถพิมพ์ขึ้นงานได้ คือ 0.80 มิลลิเมตร หรือ 800 ไมโครเมตร สำหรับการกำหนดความขรุขระของผิวตัวนำจะต้องคำนวณค่าความลึกเชิงผิว ซึ่งพบว่า ที่ความถี่ 4 และ 40 GHz ค่าความลึกเชิงผิวเท่ากับ 1.03 และ 0.33 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังนั้น ค่าความขรุขระสูงสุดของชิ้นงานที่สามารถยอมรับได้ มีค่าเท่ากับ 2 เท่าของค่าความลึกเชิงผิว หรือเท่ากับ 2.06 และ 0.66 ไมโครเมตร ที่ความถี่ 4 และ 40 GHz ตามลำดับ ดังตารางที่ 4



ภาพที่ 3 สายอากาศแพตช์และมิววงจรป้อนไมโครสตริปเพื่อเชื่อมต่อเป็นอินพุต

ตารางที่ 4 มิติของวงจรสำหรับการศึกษาความเป็นไปได้

ความถี่	วงจร	มิติ	ขนาด (มม.)	ความขรุขระสูงสุดที่ยอมรับได้ (ไมครอน)
4 GHz	สายอากาศแพตช์	ความยาว	23.52	2.06
	วงจรป้อนไมโครสตริป	ความกว้าง	0.80	
40 GHz	สายอากาศแพตช์	ความยาว	2.05	0.66
	วงจรป้อนไมโครสตริป	ความกว้าง	0.80	

7. การอภิปรายผล

ข้อจำกัดของเทคนิคการพิมพ์ทั้ง 3 เทคนิค ซึ่งประกอบด้วยความแม่นยำและความราบเรียบของผิวชิ้นงานสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4 เมื่อนำข้อมูลความแม่นยำของเทคนิคการพิมพ์ที่สรุปได้ในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงความละเอียดในการพิมพ์ชิ้นงานและค่าความคลาดเคลื่อนของการพิมพ์ชิ้นงานมาวิเคราะห์ประกอบพบว่า ในการศึกษาออกแบบสายอากาศที่ป้อนด้วยสายส่งกว้าง 800 ไมโครเมตร (0.80 มิลลิเมตร) หากใช้เครื่องพิมพ์ SLA จะได้สายส่งที่มีความกว้างคลาดเคลื่อน 1.60 ไมโครเมตร เครื่องพิมพ์ FDM/FFF จะได้สายส่งที่มีความกว้างคลาดเคลื่อน 1.20 ไมโครเมตร และเครื่องพิมพ์ SLS จะได้สายส่งที่กว้างคลาดเคลื่อน 0.8 ไมโครเมตร ซึ่งเครื่องพิมพ์ SLA มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด ขณะที่เครื่องพิมพ์ SLS มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม ขนาดความกว้างที่คลาดเคลื่อนด้วยเทคนิคการพิมพ์ทั้ง 3 ประเภทนี้น้อยมากจนไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศ

สำหรับความขรุขระของผิวรูปทรงที่ผลิตด้วยเทคนิคการพิมพ์ต่าง ๆ มีความแตกต่างกันด้วยปัจจัยหลายประการ เช่น เกิดจากเทคโนโลยีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต ทั้งสมรรถนะของหัวฉีด เทคนิคการหลอมวัสดุพิมพ์ เลนส์กระจก อุปกรณ์เคลื่อนหัวฉีด หรือควบคุมเลนส์ เทคนิคการฉายแสง รวมไปถึงวัสดุพิมพ์ที่ใช้ ล้วนส่งผลให้ผิวรูปทรงที่สร้างเสร็จแล้วขรุขระ ไม่ราบเรียบ ความขรุขระของผิวรูปทรงย่อมส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของวงจรจากค่าคงตัวการลดทอนที่เพิ่มขึ้น เช่น การสูญเสียการย้อนกลับของวงจรรองแถบผ่านเพิ่มขึ้น (return loss) การสูญเสียกำลังงานที่ส่งผ่านในวงจรบรานช์ไลน์คัปเปิลอร์เพิ่มขึ้น (transmission loss) ซึ่งมีการนำเสนอเทคนิคต่าง ๆ เพื่อแก้ไขปัญหาค่าความขรุขระของผิวรูปทรงหลังจากพิมพ์ชิ้นงาน (post processing) เช่น การใช้สารเคมี การชุบ การขัด

ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบความขรุขระของผิวชิ้นงานก่อนและหลังกระบวนการ post processing ของเครื่องพิมพ์ทั้ง 3 เทคนิค พบว่า รูปทรงที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์ SLA มีความขรุขระน้อยที่สุด รองลงมาคือ เครื่องพิมพ์ FDM/FFF และ SLS ตามลำดับ หลังจากผ่านกระบวนการ post processing แล้ว ความขรุขระของรูปทรงลดลง ซึ่งเครื่องพิมพ์ที่ดีที่สุดให้ความขรุขระน้อยที่สุดเพียง 37 นาโนเมตร คือ เครื่องพิมพ์ SLA รองลงมาเป็นเครื่องพิมพ์ FDM/FFF ที่มีความขรุขระน้อยกว่า 350 นาโนเมตร และลำดับสุดท้าย คือ เครื่องพิมพ์ SLS ที่ให้ความขรุขระลดลงเหลือน้อยกว่า 2.4 ไมโครเมตร ซึ่งวงจรความถี่ 40 GHz ต้องการเทคนิคการผลิตที่ขรุขระน้อยกว่า 0.66 ไมโครเมตร ซึ่งจะมีเพียง 2 เทคนิคที่เหมาะสมในการนำไปสร้างสายอากาศ ได้แก่ เครื่องพิมพ์ SLA และ FFF/ FDM แต่ต้องมีกระบวนการขัดเพื่อลดความขรุขระของผิวและทำให้ผิวเรียบขึ้น ดังนั้น ทั้งสองเครื่องพิมพ์นี้ จึงเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในการสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟ ส่วนเครื่องพิมพ์ SLS ไม่เหมาะสม เนื่องจากแม้จะผ่านกระบวนการขัดแล้วผิวที่ได้ยังขรุขระเกินกว่า 2 เท่าของค่าความลึกเชิงผิว

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของเครื่องพิมพ์ที่สำคัญสำหรับการผลิตวงจรความถี่สูง

ประเภทเครื่องพิมพ์	ความแม่นยำ (ไมครอน)	ความทึบ (ไมครอน)	
		ก่อนปรับแก้	หลังปรับแก้
SLS	300±0.3	< 20	< 2.4
SLA	10±0.02	< 1	< 0.037
FDM/ FFF	200±0.3	< 9	< 0.35

8. ข้อสรุป

ผลการศึกษาพบว่า เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ ทั้ง 3 กลุ่ม เหมาะสมสำหรับนำมาสร้างวงจรมัลติเมเตอร์เวฟแบบพาสซีฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องพิมพ์ FDM/ FFF และ SLA ซึ่งใช้เทคนิคที่ให้ความละเอียดในการสร้างรูปทรงทั้งแกน x, y และ z อย่างไรก็ดี เครื่องพิมพ์ SLA สามารถพิมพ์โลหะได้โดยตรง ไม่ต้องพึ่งกระบวนการจัดการหลังจากพิมพ์ชิ้นงานเสร็จเหมือนเครื่องพิมพ์ FDM/ FFF ที่ไม่สามารถพิมพ์โลหะได้ แต่ราคาเครื่องพิมพ์ SLA มีราคาสูงกว่า สำหรับการสร้างชิ้นงานที่เป็นต้นแบบ และสำหรับห้องปฏิบัติการวิจัย การใช้เครื่องพิมพ์ FDM/ FFF จะเหมาะสมกว่า เนื่องจากกระบวนการขั้นตอนขัดผิวชิ้นงาน การเคลือบหรือชุบโลหะสามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตาม หากต้องการสร้างชิ้นงานที่มีความแข็งแรงและนำไปใช้งานจริง ควรใช้เครื่องพิมพ์ SLA

9. ข้อเสนอแนะ

9.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต

วงจรมัลติเมเตอร์เวฟแบบพาสซีฟมีหลายประเภท ไม่ได้มีเฉพาะสายอากาศแพตช์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในบทความ ยังมีวงจรสำคัญอีกมากมาย เช่น วงจรกรองผ่านแถบ วงจรรวมกำลังงาน ดังนั้น ในการนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เพื่อไปใช้ในขั้นตอนการผลิตเพื่อเป็นตัวอย่างหรือนำไปใช้งานจริง ยังต้องดำเนินการศึกษาค้นคว้าเจาะจงเฉพาะวงจร เพื่อยืนยันคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรที่ผลิตได้ รวมไปถึงคุณสมบัติทางกลและคุณสมบัติการทนทานต่อสภาพแวดล้อมภายนอกที่กำหนดเป็นมาตรฐานอุตสาหกรรม

9.2 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายสำหรับกิจการสื่อสารดิจิทัล

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยต้นทุนของเครื่องพิมพ์และหมึกพิมพ์มีแนวโน้มที่จะลดลง สามารถจัดซื้อเพื่อนำไปใช้ในธุรกิจขนาดเล็กได้ ดังนั้น กลุ่มธุรกิจที่ผลิตชิ้นส่วนวงจรมัลติมีเตอร์เวฟที่เป็นต้นน้ำในห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมโทรคมนาคม และอุตสาหกรรมดาวเทียมจะได้รับประโยชน์จากการใช้เทคโนโลยีนี้อย่างมาก ธุรกิจกลุ่มนี้ควรแสวงหาความร่วมมือกับภาคการศึกษาในการวิจัยด้านนี้ เพื่อเร่งสร้างประโยชน์จากการใช้เทคโนโลยีถึงขั้นสามารถสร้างชิ้นส่วนใช้งานจริง ลดต้นทุนการผลิต และส่งเสริมความเชี่ยวชาญของบุคลากรในองค์กรให้เพิ่มมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (กทปส.)

รายการเอกสารอ้างอิง

- Behzadnezhad, B., Collick, B. D., Behdad, N., & McMillan, A. B. (2018). Dielectric Properties of 3D-Printed Materials for Anatomy Specific 3D-Printed MRI coils. *Journal of magnetic resonance (San Diego, Calif. : 1997)*, 289, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2018.02.013>
- Chen, A. (2019). *Detail comparison of 3D printing methods: SLS vs FDM & SLA vs DLP*. C-Mac Industries Pty Ltd. <https://www.cmac.com.au/blog/3d-printing-methods-side-by-side-comparison-sls-vs-fdm-sla-vs-dlp>
- Electromagnetics and Microwave Engineering. (n.d.). *Microstrip Line Calculator*. <https://www.emtalk.com/mscalc.php>
- Kruchkin, A. (2016). *Innovation in Creation: Demand Rises While Prices Drop for 3D Printing Machines*. Manufacturing Tomorrow. <https://www.manufacturingtomorrow.com/article/2016/02/innovation-in-creation-demand-rises-while-prices-drop-for-3d-printing-machines/7631/>
- Lis, M., Plaut, M., Zai, A., Cipolle, D., Russo, J., Lewis, J., & Fedynyshyn, T. (2016). Polymer Dielectrics for 3D-Printed RF Devices in the K_a Band. *Advanced Materials Technologies*, 1(2), 1-6. <https://doi.org/10.1002/admt.201600027>
- Monroe Engineering, LLC, Inc. (2020). *3D Printing Speed: How It Affects Build Time*. <https://monroeengineering.com/blog/3d-printing-speed-how-it-affects-build-time/>
- Nutma, M. (2019). *A quick guide to dimensional accuracy for 3D printing*. VoxelMatters. <https://www.3dprintingmedia.network/quick-guide-dimensional-accuracy-3d-printing/>
- Pasternack. (n.d.). *Microstrip Patch Antenna Calculator*. <https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip-ant.aspx>
- Polymer Plastics Company, LC. (n.d.). *Rexolite*. <https://www.polymerplastics.com/rexolite-high-performance-plastic.shtml>
- Stratasys Ltd. (2023). *F120 3D Printer Support*. <https://support.stratasys.com/en/Printers/FDM-Legacy/F120>
- TWI Ltd. (n.d.). *What is Binder Jetting? (Definition, Pros, Cons and Uses)*. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-binder-jetting#Advantages>