



## รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนา  
กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

### ประจำงวดที่ 4

โครงการวางจรรยาบรรณผ่านมิลลิเมตรเวฟสร้างด้วยเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติ  
สำหรับงาน 5G และด้านอวกาศ

ผู้รับผิดชอบโครงการ

ศ.ดร.มิตรชัย จงเขียวชำนาญ และคณะผู้ร่วมวิจัย

ได้รับทุนอุดหนุนจาก  
กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ  
(สำนักงาน กสทช.)

## สารบัญ

<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 วัตถุประสงค์ .....	1
1.2 กรอบแนวคิด .....	1
1.3 ขอบเขตและกิจกรรมการดำเนินงาน .....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	2
1.5 แผนการดำเนินงาน .....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
1.7 ตัวชี้วัดผลผลิต .....	4
1.8 ตัวชี้วัดผลลัพธ์ .....	5
<b>บทที่ 2 การสังเคราะห์เมทริกซ์เชื่อมต่อวงจรกรองแถบผ่านโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบเชื่อมต่อ .....</b>	<b>6</b>
2.1 ทฤษฎีการออกแบบวงจรกรองความถี่ .....	6
2.2 การออกแบบวงจรกรองแถบผ่านแบบแถบแคบย่านไมโครเวฟ .....	7
2.3 ทฤษฎีเมทริกซ์เชื่อมต่อ (Coupling matrix) .....	11
2.4 เทคนิคการสังเคราะห์เมทริกซ์เชื่อมต่อ .....	15
<b>บทที่ 3 การพัฒนาแอปพลิเคชันช่วยสังเคราะห์เมทริกซ์เชื่อมต่อจากข้อกำหนดของวงจรกรอง CRD .....</b>	<b>19</b>
3.1 การพัฒนาแอปพลิเคชัน .....	19
3.2 ตัวอย่างวิธีการใช้งาน (Tooltips) สำหรับผู้ใช้งาน .....	23
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบการทำงานแอปพลิเคชันโดยคำนวณผลตอบแทนความถี่ของวงจรกรอง .....</b>	<b>26</b>
<b>บทที่ 5 ผลการศึกษาด้านเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ และเปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย ข้อจำกัดของการสร้าง     รูปทรง และความเป็นไปได้ในการสร้างวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ .....</b>	<b>29</b>
5.1 เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ .....	29
5.2 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ .....	31
5.3 ข้อดีข้อเสียและข้อจำกัดของการพิมพ์ .....	43
5.4 ความเป็นไปได้ในการสร้างวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ .....	47
5.5 ปัจจัยสำคัญของเทคนิคต่อการพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง .....	51

5.6 ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้.....	53
5.7 อ้างอิง.....	55
<b>บทที่ 6 การศึกษาเทคนิคสำหรับส่งเคราะห์วงจรกรองแถบผ่านย่านมิลลิเมตรเวฟ 20 – 100 GHz .....</b>	<b>57</b>
6.1 เทคนิคส่งเคราะห์ด้วยสายส่ง (Transmission line).....	57
6.2 เทคนิคส่งเคราะห์ด้วยท่อนำคลื่น (Waveguide).....	58
6.3 อ้างอิง.....	61
<b>บทที่ 7 เทคนิคที่เหมาะสมสำหรับส่งเคราะห์วงจรกรองแถบผ่านย่านมิลลิเมตรเวฟ.....</b>	<b>62</b>
7.1 ราคาต้นทุน.....	62
7.2 ความยุ่งยากในการสร้างชิ้นงาน .....	63
7.3 เทคนิคการออกแบบ .....	64
7.4 สรุปการวิเคราะห์เทคนิคการส่งเคราะห์ .....	64
7.5 อ้างอิง.....	65
<b>บทที่ 8 ผลการคัดเลือกเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติและเลือกวัสดุสร้างเรโซเนเตอร์.....</b>	<b>66</b>
<b>บทที่ 9 รายงานผลการสั่งซื้อวัสดุสำหรับการสร้างวงจร และจัดซื้อเครื่องพิมพ์ 3 มิติ .....</b>	<b>69</b>
<b>บทที่ 10 แบบโครงสร้างของวงจรกรอง CRD ที่ส่งเคราะห์ได้และผลการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ....</b>	<b>73</b>
10.1 การออกแบบโครงสร้างวงจรกรอง .....	73
10.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต้นแบบในโครงสร้างท่อนำคลื่น .....	77
10.3 การส่งเคราะห์คอมพิวเตอร์.....	80
10.4 ผลการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	81
10.5 อ้างอิง.....	87
<b>บทที่ 11 การปรับค่าพารามิตีต่างๆ และการออกแบบวงจรกรองแถบผ่าน CRD</b>	
<b>ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ.....</b>	<b>88</b>
11.1 อ้างอิง.....	92
<b>บทที่ 12 ผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรกรอง CRD โดยวัดผลตอบสนองความถี่ .....</b>	<b>93</b>
12.1 การสร้างวงจรกรอง CRD โดยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ.....	93
12.2 การทดสอบสมรรถนะของวงจรกรอง CRD โดยวัดผลตอบสนองความถี่กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย อัตโนมัติในห้องปฏิบัติการชั้นสูงที่มหาวิทยาลัยลีดส์ .....	94

12.3 ผลการเปรียบเทียบผลตอบแทนความถี่.....	96
ภาคผนวก ก. เอกสารต่าง ๆ เกี่ยวกับการจัดซื้อครุภัณฑ์วิจัย .....	97
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการลงวารสาร กสทช. 1 ฉบับ .....	123

# บทที่ 1

## บทนำ

ชื่อโครงการ (ไทย) :	วงจรรองแถบผ่านมิลลิเมตรเวฟสร้างด้วยเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติสำหรับงาน 5G และด้านอวกาศ			
ชื่อโครงการ (อังกฤษ) :	Millimeter-wave Bandpass Filter Fabricating with 3D Printer Technology for 5G and Space Applications			
สัญญาารับทุนเลขที่ :	A64-1-(2)-016			
หน่วยงาน :	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์			
ชื่อ – นามสกุล (หัวหน้าโครงการ) :	รศ.ดร.มิตรชัย จงเชี่ยวชาญานัญ			
เบอร์ติดต่อ :		E-Mail:		
ระยะเวลาดำเนินการ (เริ่มต้น – สิ้นสุด) :	-	ปี	12	เดือน
งบประมาณรวม :	ประจำปี 2565	จำนวน	2,290,228	บาท

### 1.1 วัตถุประสงค์

(1) เพื่อออกแบบและสร้างวงจรรองแถบผ่านรองรับเทคโนโลยีมิลลิเมตรเวฟ 5G และกิจการอวกาศย่าน Ka ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

(2) เพื่อวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบวงจรที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติและเทคโนโลยี CNC ทั้งด้านสมรรถนะของวงจรและต้นทุนการผลิต

### 1.2 กรอบแนวคิด

ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 จะเป็นการศึกษาทบทวนเทคนิคต่าง ๆ ที่ออกแบบสังเคราะห์วงจรรองแถบผ่านมิลลิเมตรเวฟที่ครอบคลุมช่วงความถี่ 20-100 GHz อย่างน้อย 2 เทคนิค และจะเปรียบเทียบข้อมูลผลลัพธ์เชิงเทคนิคของวงจรที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคทั้ง 2 เทคนิค และส่วนที่ 2 จะทำการพิสูจน์ความเป็นไปได้ของการใช้เทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติในการผลิตวงจรรองความถี่พาสะซีฟที่เป็นวงจรที่สำคัญและออกแบบยากที่สุดในกลุ่มวงจรที่อยู่ในชุดวงจรรับส่งในระบบสื่อสาร โดยการพิสูจน์ความเป็นไปได้นี้จะเลือกออกแบบวงจรที่ใช้ในเทคโนโลยีที่ล้ำยุคในศตวรรษนี้คือ เทคโนโลยีมิลลิเมตรเวฟ 5G และเทคโนโลยีดาวเทียม ในการพิสูจน์เทคโนโลยีนี้ ผู้วิจัยจะเริ่มออกแบบวงจรรองแถบผ่านโครงสร้างเรโซเนเตอร์เชื่อมต่อซึ่งเป็นวงจรที่ธุรกิจทั่วโลก เช่น Huawei ใช้งานจริง ผู้วิจัยจะใช้ทฤษฎีการสังเคราะห์

วงจรรองแถบผ่านด้วยเมทริกซ์การเชื่อมต่อ (Coupling matrix theory) ควบคู่กับโปรแกรมการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบและจำลองการทำงาน คณะผู้วิจัยจะนำขีดจำกัดของการสร้าง (Fabrication tolerance) ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติที่มีอยู่ในปัจจุบันในกลุ่มราคาที่ต่ำกว่า 15,000 เหรียญสหรัฐมาคำนึงถึงในการออกแบบ เพื่อให้ได้ต้นแบบวงจรสำหรับสร้างจริงได้ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติที่ต้นทุนราคาไม่แพงและสามารถลงทุนได้ในกลุ่ม SME ขนาดย่อมและกลุ่มสตาร์ทอัพ

กรอบแนวคิดในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบ (Comparative study) ระหว่างเทคโนโลยี CNC และ เทคโนโลยีแผ่นพิมพ์ 3 มิติ โดยกรอบในการเปรียบเทียบจะศึกษาครอบคลุมประเด็นต่าง ๆ เหล่านี้

(1) มิติของวงจรที่ผลิตได้จริง

(2) สมรรถนะการทำงานของวงจรที่ผลิตจากเทคโนโลยีทั้ง 2 เทคโนโลยี เช่น ผลตอบสนองความถี่ และความคลาดเคลื่อนของผลตอบสนองความถี่เมื่อเทียบกับผลการจำลองวงจรด้วยวิธีการ EM

(3) ค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการสร้าง

### 1.3 ขอบเขตและกิจกรรมการดำเนินงาน

ขอบเขตการดำเนินงานมีดังนี้

(1) ศึกษา ทบทวน เปรียบเทียบ เทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติแต่ละเทคโนโลยีที่มีในปัจจุบันและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในเชิงเทคโนโลยีสำหรับใช้ในการผลิตวงจรพาสซีฟมิลลิเมตรเวฟ

(2) ศึกษา และพัฒนาแอปพลิเคชันการสังเคราะห์เมทริกซ์สัมประสิทธิ์เชื่อมต่อจากผลตอบสนองความถี่ ที่ต้องการของวงจรรองแถบผ่าน

(3) ออกแบบ จำลอง สร้าง ปรับแต่ง และทดสอบ วงจรรองแถบผ่านความถี่มิลลิเมตรเวฟ 2 วงจร สำหรับ 5G และ Uplink ของสถานีดาวเทียมในแถบความถี่ Ka ด้วยเทคโนโลยี CNC และการพิมพ์ 3 มิติ

(4) จัดทำรายงานเผยแพร่แบบอินโฟกราฟฟิก (Infographic) ในรูปสไลด์อิเล็กทรอนิกส์ จัดทำคลิปวิดีโอที่ค้นเผยแพร่ผลงาน 3 นาที และเขียนบทความวิชาการลงวารสาร กสทช. 1 ฉบับ

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

กิจกรรม 1 ศึกษาทบทวนการสังเคราะห์เมทริกซ์เชื่อมต่อวงจรรองแถบผ่านโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบเชื่อมต่อ (Coupled Resonator Design : CRD)

กิจกรรม 2 พัฒนาแอปพลิเคชันช่วยสังเคราะห์เมทริกซ์เชื่อมต่อจากข้อกำหนดของวงจรรองแถบผ่านที่ใช้เรโซเนเตอร์แบบเชื่อมต่อและทดสอบความถูกต้องของแอปพลิเคชัน

กิจกรรม 3 สังเคราะห์เมทริกซ์เชื่อมต่อของวงจรรองแถบผ่านเรโซเนเตอร์แบบเชื่อมต่อ 2 วงจร สำหรับเทคโนโลยีมิลลิเมตรเวฟ 5G และ สถานีดาวเทียมย่าน Ka ด้วยแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นในกิจกรรม 2

กิจกรรม 4 ทดสอบการทำงานแอปพลิเคชันโดยคำนวณผลตอบแทนของควมถี่ของวงจรองแถบผ่านแบบเรโซเนเตอร์เชื่อมต่อทั้ง 2 ตัวจากเมทริกซ์เชื่อมต่อที่สังเคราะห์ได้จากแอปพลิเคชันในกิจกรรม 3 ผลตอบแทนที่คำนวณจากเมทริกซ์ที่สังเคราะห์ได้จะต้องสอดคล้องกับผลตอบแทนความถี่ที่ต้องการ

กิจกรรม 5 ศึกษา ทบทวน เอกสาร ด้านเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ และเปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย ข้อจำกัดของการสร้างรูปทรง และวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ในการพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง

กิจกรรม 6 ศึกษาเทคนิคต่าง ๆ สำหรับสังเคราะห์วงจรองแถบผ่านย่านมิลลิเมตรเวฟ 20-100 GHz จำนวน 2 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคการสังเคราะห์ด้วย Substared Integrated Waveguide และแบบ Cavity waveguide วิเคราะห์เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของเทคนิคเหล่านี้ในหัวข้อ คุณสมบัติวงจรผลลัพธ์ที่ได้ ราคา ความยุ่งยากในการสร้างและออกแบบ และการใช้งานเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น ๆ โดยกำหนดกรอบการวิเคราะห์ในแถบความถี่มิลลิเมตร 2 แถบ คือ ช่วงแถบต่ำ (Low-band) และ ช่วงแถบสูง (High-band)

กิจกรรม 7 เลือกเทคนิคสำหรับสังเคราะห์วงจรองแถบผ่านย่านมิลลิเมตรเวฟโดยพิจารณาในประเด็นทางเทคนิค ราคา และ ความยุ่งยากในการสร้าง โดยแบ่งการวิเคราะห์

กิจกรรม 8 คัดเลือกเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติและเลือกวัสดุที่จะสร้างเรโซเนเตอร์

กิจกรรม 9 สั่งซื้อวัสดุสำหรับสร้างวงจรและจัดซื้อเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

กิจกรรม 10 เขียนแบบโครงสร้างของวงจรองแถบผ่าน ที่สังเคราะห์ได้บนโปรแกรม CAD

กิจกรรม 11 ส่งภาพเขียนแบบ CAD เข้าโปรแกรมคำนวณ EM กำหนดค่าขีดจำกัดในการสร้างของเครื่องพิมพ์ มิติที่เลือกกับเทคโนโลยี CNC ที่ใช้ในโปรแกรมจำลองผลตอบแทนความถี่

กิจกรรม 12 ปรับค่ามิติต่าง ๆ ของวงจรองแถบผ่านจากผลตอบแทนความถี่ที่คำนวณจากวิธี EM โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

กิจกรรม 13 สร้างวงจรองแถบผ่านจากภาพเขียนแบบ 3 มิติ (Drawing) ที่ได้ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติและเทคโนโลยี CNC

กิจกรรม 14 ทดสอบสมรรถนะของวงจรองทั้ง 4 ตัว โดยวัดผลตอบแทนความถี่กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายอัตโนมัติในห้องปฏิบัติการชั้นสูงที่มหาวิทยาลัยลีดส์

กิจกรรม 15 เปรียบเทียบผลตอบแทนความถี่ เขียนรายงาน จัดทำคัลลิปเผยแพร่ และเขียนบทความวิชาการ

กิจกรรม 16 จัดทำคัลลิปเผยแพร่ จัดประชุมกลุ่มเป้าหมาย และเขียนบทความวิชาการ

### 1.5 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ระยะเวลาการดำเนินงาน											
	ปีงบประมาณ 2565				ปีงบประมาณ 2566							
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
กิจกรรม 1												
กิจกรรม 2												
กิจกรรม 3												
กิจกรรม 4												
กิจกรรม 5												
กิจกรรม 6												
กิจกรรม 7												
กิจกรรม 8												
กิจกรรม 9												
กิจกรรม 10												
กิจกรรม 11												
กิจกรรม 12												
กิจกรรม 13												
กิจกรรม 14												
กิจกรรม 15												
กิจกรรม 16												

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

โครงการนี้จะให้แบบพิมพ์เขียวในรูปแบบของภาพเขียนแบบ CAD 3D ของวงจรรองผ่านแถบ 2 วงจรทำงาน (ความถี่มิลลิเมตรเวฟและความถี่ Ka band สำหรับกิจการดาวเทียม) ให้กับ สำนักงาน กสทช. เพื่อมาขอใช้สิทธิสำหรับนำไปผลิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ ซึ่ง SME หรือ Startup ที่สนใจจะสามารถนำแบบพิมพ์เขียวนี้ไปผลิตได้ซึ่งจะเป็นการช่วยให้เกิดธุรกิจประเภทนี้ สร้างธุรกิจหน้าใหม่ และลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

### 1.7 ตัวชี้วัดผลผลิต

(1) แบบพิมพ์เขียวสำหรับผลิตวงจรรองผ่านและสายอากาศความถี่มิลลิเมตรเวฟ 5G และกิจการดาวเทียมย่าน Ka รวม 2 แบบ

(2) ต้นแบบวงจรรองแถบผ่านความถี่มิลลิเมตรเวฟ 5G และสถานีดาวเทียมที่ผลิตจากเทคโนโลยี พิมพ์ 3 มิติอย่างละ 1 วงจร โดยวงจรรองแถบผ่านจะมีข้อกำหนดทางเทคนิคดังนี้

พารามิเตอร์ทางเทคนิค	5G	ดาวเทียม
ความถี่กลาง (GHz)	28	21
แบนด์วิดท์ (MHz)	850	300
การสูญเสียย้อนกลับในแถบผ่าน (dB)	> 20	> 20
อัตราการกีดสัญญาณนอกแถบผ่าน (dB)	> 30	> 25
อัตราการสูญเสียในแถบ (dB)	< 1	< 1

(3) รายงานความเป็นไปได้ “การใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติในการผลิตวงจรมิลลิเมตรเวฟ” โดย ศึกษาวเคราะห์เฉพาะประเด็นด้านเทคโนโลยี

(4) แอปพลิเคชันสำหรับการสังเคราะห์เมตริกซ์เชื่อมต่อจากผลตอบสนองความถี่วงจรรองแถบผ่าน ที่ต้องการ โดยแอปพลิเคชันจะพัฒนาเป็นเว็บแอปพลิเคชันที่จะสังเคราะห์วงจรรองที่มีผลตอบสนองแบบ ฟังก์ชันอิลิปติก แอปพลิเคชันจะมีการติดต่อรับข้อมูลจากผู้ใช้และประมวลผลผลลัพธ์ดังนี้

ส่วนรับข้อมูล ความถี่กลางที่ใช้งาน, ความถี่ซีโร่ (Zero frequency), แบนด์วิดท์วงจรรอง

ส่วนผลลัพธ์ เมตริกซ์เชื่อมต่อ (Coupling matrix) ซึ่งจะบอกถึงจำนวนเรโซเนเตอร์ที่ใช้และ ตำแหน่งการวางเรโซเนเตอร์และ มิติของท่อเรโซเนเตอร์

### 1.8 ตัวชี้วัดผลลัพธ์

สำหรับผลผลิตของโครงการสำคัญซึ่งได้แก่ รายงานความเป็นไปได้ของการใช้เทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติจะมีประโยชน์สำหรับ SME และ ผู้ประกอบการหน้าใหม่ ที่มีข้อมูลศึกษาข้างต้นในการลงทุนเครื่องจักร เพื่อดำเนินธุรกิจรับจ้างผลิตวงจรมิลลิเมตรสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะและ โทรคมนาคม ส่วนแบบพิมพ์เขียวของวงจรรองแถบผ่าน 2 วงจรและซอฟต์แวร์ที่พัฒนานี้หากมีการถ่ายทอด ก็จะเป็นเครื่องมือที่ธุรกิจกลุ่มนี้จะนำไปใช้เพื่อออกแบบและผลิตวงจรรองแถบผ่านใช้งานในระบบสื่อสาร 5G และ ดาวเทียมได้ทันที ดังนั้น ตัวชี้วัดผลลัพธ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจะมีดังนี้

(1) จำนวน SME ขนาดกลาง ขนาดย่อม หรือ Startup ที่รับจ้างผลิตวงจรมิลลิเมตรเวฟและมิลลิเมตรเวฟด้วยเทคโนโลยีแผ่นพิมพ์ 3 มิติเพิ่มขึ้น

(2) จำนวนวงจรรองที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติในประเทศเพิ่มขึ้นทุกปี

(3) ยอดขายจากการผลิตวงจรรองแถบผ่านที่เพิ่มขึ้นของ SME และ Startup

(4) ผู้เข้าชมคลิปวิดีโอที่เผยแพร่ในรูปแบบสื่ออิเล็กทรอนิกส์จำนวน 1,000 view

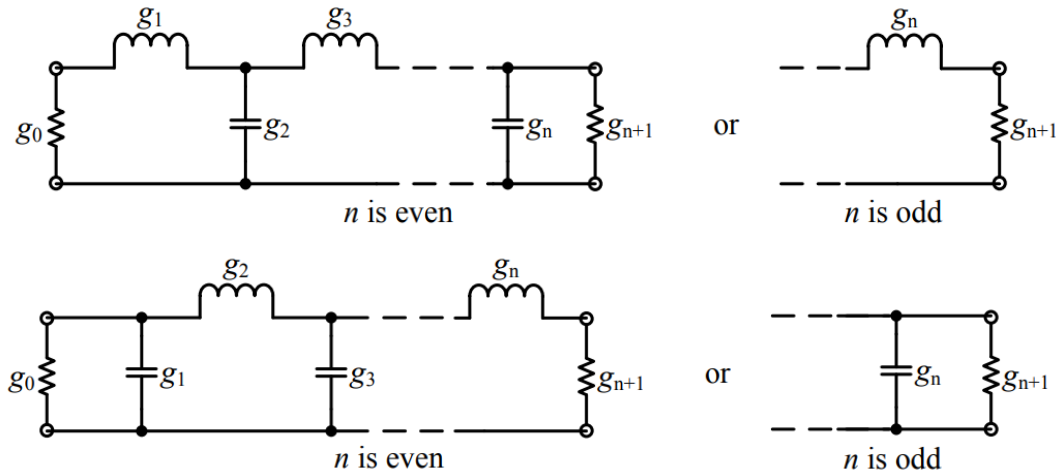
## บทที่ 2

### การสังเคราะห์เมทริกซ์เชื่อมต่อบางกรองแถบผ่านโครงสร้างเรโซเนเตอร์แบบเชื่อมต่อ

#### 2.1 ทฤษฎีการออกแบบบางกรองความถี่

บางกรองความถี่จะเป็นบางกรองสองพอร์ตที่จะลดทอนสัญญาณที่ความถี่ไม่ต้องการ และจะยอมให้สัญญาณในช่วงความถี่ที่ต้องการผ่านไปได้ บางกรองความถี่จะมีลักษณะของผลตอบสนองความถี่ 4 ลักษณะ ได้แก่ บางกรองต่ำผ่าน (Low pass) บางกรองสูงผ่าน (High pass) บางกรองแถบผ่าน (Bandpass) และบางกรองแถบหยุด (Band stop)

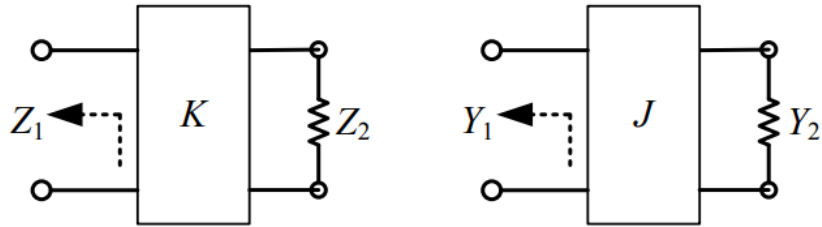
ทฤษฎีการออกแบบบางกรองความถี่จะเริ่มต้นด้วยการออกแบบบางกรองต้นแบบที่ใช้อุปกรณ์แบบกลุ่ม (Lump component) อุปกรณ์กลุ่มจะใช้เฉพาะอุปกรณ์รีแอคทีฟ (Reactive) ได้แก่ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ลักษณะบางกรองความถี่ที่นำมาใช้เพื่อเป็นบางกรองต้นแบบนี้จะมีผลตอบสนองความถี่แบบต่ำผ่าน และโครงสร้างบางกรองเป็นแบบแลดเดอร์ (Ladder) ดังรูปที่ 2.1 จำนวนอุปกรณ์รีแอคทีฟในบางกรองต้นแบบจะกำหนดอันดับ  $n$  ของบางกรอง ในรูปที่ 2.1 มีบางกรองต้นแบบสองลักษณะและสามารถนำมาออกแบบให้ได้ผลตอบสนองความถี่ตามต้องการได้ จากรูปค่า  $g_0$  และ  $g_{n+1}$  จะกำหนดความต้านทานหรือความนำไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดหรือโหลด ส่วนค่า  $g_i$  ( $i = 1$  ถึง  $n$ ) จะนำไปกำหนดค่าความเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.1 บางกรองต่ำผ่านต้นแบบโครงสร้างแบบแลดเดอร์และโครงสร้างควคู่ (Dual)

## 2.2 การออกแบบวงจรกรองแถบผ่านแบบแถบแคบย่านไมโครเวฟ

### 2.2.1 อิมิตแตนซ์อินเวอร์เตอร์ (Impedance inverter)



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์อิมิตแตนซ์อินเวอร์เตอร์แบบ K และ J อินเวอร์เตอร์

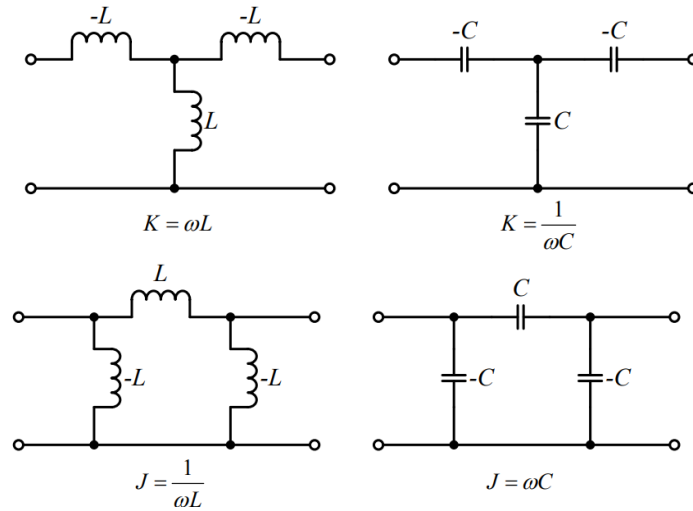
อิมิตแตนซ์อินเวอร์เตอร์มี 2 ประเภทได้แก่ อิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ (Impedance inverter) หรือ K-inverter และแอดมิตแตนซ์อินเวอร์เตอร์ (Admittance inverter) หรือ J-inverter เมื่อ K และ J แทนค่าพารามิเตอร์ของอิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์ของอินเวอร์เตอร์นั้น ในอุดมคติ อุปกรณ์อินเวอร์เตอร์นี้จะให้ผลตอบสนองคงที่ ไม่ขึ้นกับความถี่ จากรูปที่ 2.2 กำหนดให้พอร์ท 2 ของอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ทั้ง 2 ชนิดต่อด้วยอิมพีแดนซ์  $Z_2$  และแอดมิตแตนซ์  $Y_2$  ดังนั้น อิมพีแดนซ์ด้านเข้า  $Z_1$  และแอดมิตแตนซ์ด้านเข้า  $Y_1$  ของอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์จะสัมพันธ์กับค่า K และ J ดังสมการ

$$Z_1 = \frac{K^2}{Z_2}$$

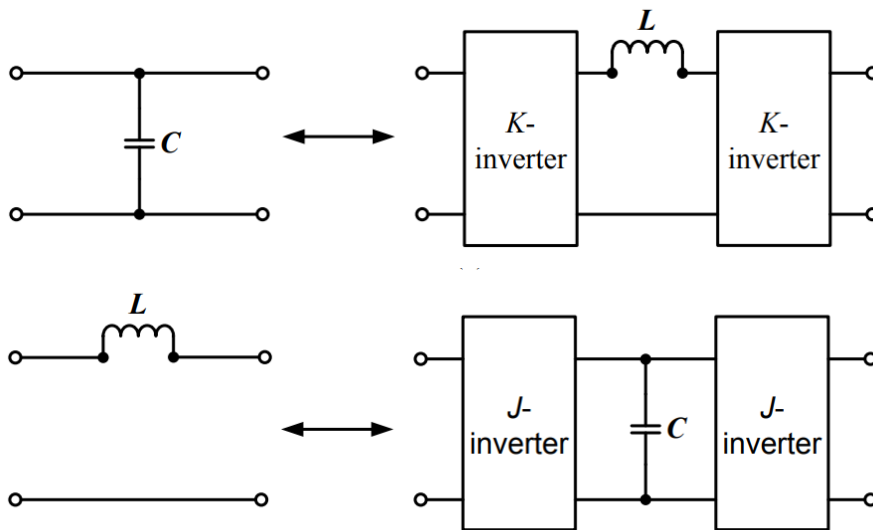
$$Y_1 = \frac{J^2}{Y_2}$$

โดยที่ K และ J แทนอิมพีแดนซ์และแอดมิตแตนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance and admittance) ของอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์และแอดมิตแตนซ์อินเวอร์เตอร์ตามลำดับ

ในการสร้างวงจรอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์หรือแอดมิตแตนซ์อินเวอร์เตอร์นั้น จะสามารถสร้างได้จากอุปกรณ์ทั้งแบบกลุ่มหรือจากอุปกรณ์แบบกระจาย (Distributed element) ก็ได้ สำหรับอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ทั้งแบบอิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแตนซ์ จะมีวงจรเทียบเท่าดังในรูปที่ 2.3



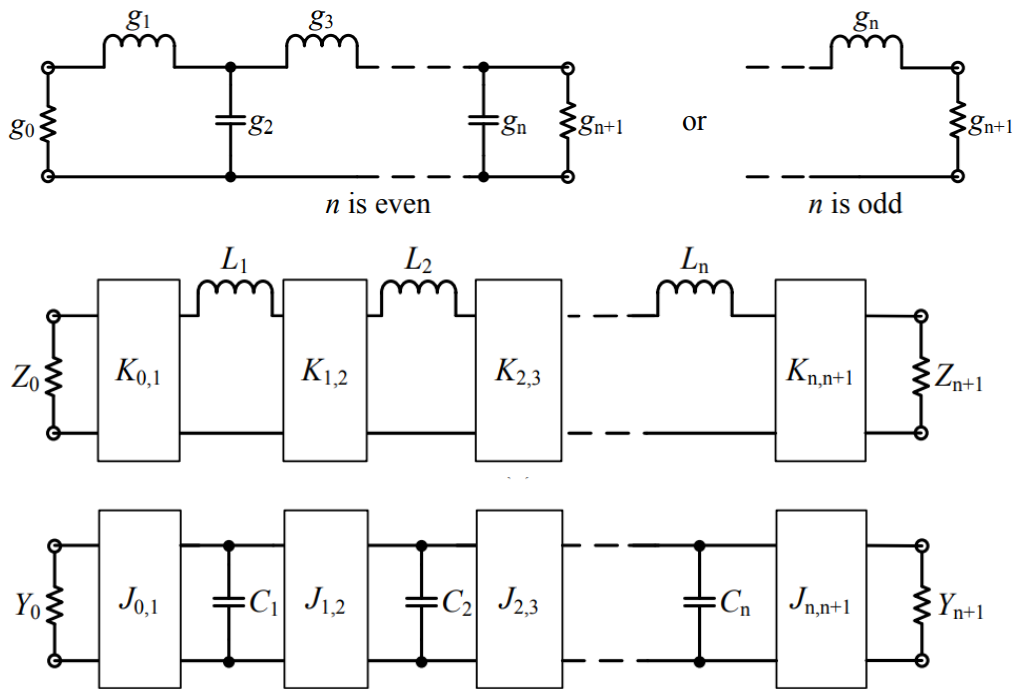
รูปที่ 2.3 อิมิตแดนซ์อินเวอร์เตอร์แบบกลุ่ม



รูปที่ 2.4 การใช้อิมิตแดนซ์อินเวอร์เตอร์ในการแปลงอุปกรณ์รีแอกทีฟแบบขนานไปเป็นอุปกรณ์รีแอกทีฟควมคู่ที่ต่ออนุกรม

ในรูปที่ 2.4 แสดงการใช้อิมิตแดนซ์ในการเปลี่ยนอุปกรณ์รีแอกทีฟที่ต่อแบบขนานไปเป็นอุปกรณ์รีแอกทีฟควมคู่ที่ต่อแบบอนุกรมโดยมีอิมิตแดนซ์ต่อประกบด้านเข้าและด้านออก ในกรณีมีตัวเก็บประจุต่อแบบขนาน เราสามารถทดแทนวงจรนี้ด้วยวงจรที่ประกอบด้วยอิมิตแดนซ์อินเวอร์เตอร์ K ประกบตัวเหนี่ยวนำที่ต่อแบบอนุกรม และหากมีอุปกรณ์ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรม สามารถทดแทนวงจรนี้ได้ด้วยวงจรที่ประกอบด้วยแอดมินแดนซ์อินเวอร์เตอร์ J ที่ประกบตัวเก็บประจุที่ต่อแบบขนาน การมีชุดวงจรที่ประกอบด้วยอิมิตแดนซ์ที่ทำงานเทียบเท่านี้ทำให้สามารถสังเคราะห์วงจรกรองความถี่แบบแลตเตอร์ที่มีอุปกรณ์รีแอกทีฟชนิดเดียวได้ ตัวอย่างเช่น วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านในรูปที่ 2.5 สามารถแปลงไปสู่วงจรกรองที่ประกอบด้วยอิมิตแดนซ์

อินเวอร์เตอร์คั่นด้วยตัวเหนี่ยวนำที่ต่อแบบอนุกรม หรือวงจรกรองที่ประกอบด้วยแอดมิตแตนซ์อินเวอร์เตอร์ที่คั่นด้วยตัวเก็บประจุที่ต่อแบบขนาน



รูปที่ 2.5 การใช้วงจรอิมิตแตนซ์เทียบเท่าปรับโครงสร้างวงจรกรองต่ำผ่านเป็นวงจรกรองต่ำผ่านที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำล้วนและตัวเก็บประจุล้วน

### 2.2.2 การแปลงผลตอบสนองแถบต่ำผ่านไปแถบผ่าน

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบในหัวข้อ 2.2.1 สามารถแปลงไปสู่วงจรกรองที่ให้ผลตอบสนองความถี่ต่าง ๆ ได้ ทั้งผลตอบสนองแบบสูงผ่าน แถบผ่าน หรือ ตัดผ่าน กรณีการแปลงผลตอบสนองจากต่ำผ่านไปสู่แถบผ่านที่มีแบนด์วิดท์กว้าง  $\omega_2 - \omega_1$  และความถี่ศูนย์กลาง  $\omega_0$  ดังนั้น จะแทนตัวแปรความถี่เดิม  $\omega$  ไปสู่ตัวแปรใหม่ด้วยความสัมพันธ์

$$\omega \rightarrow \frac{\omega_c}{FBW} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$$

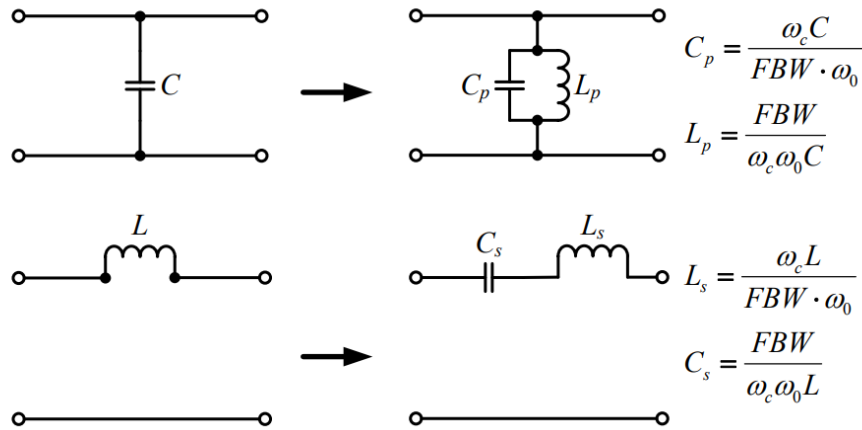
โดยที่

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2}$$

และ FBW คืออัตราส่วนระหว่างแบนด์วิดท์กับความถี่ศูนย์กลางดังสมการ

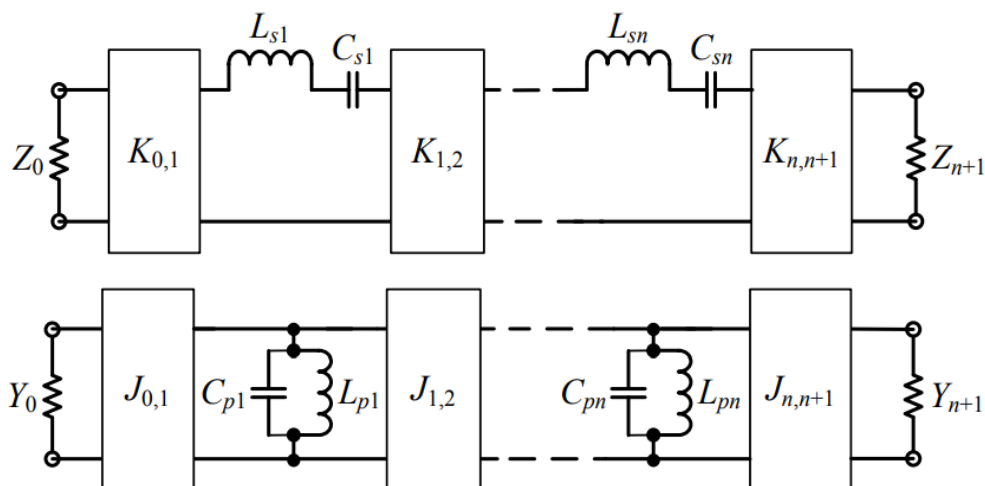
$$FBW = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0}$$

ดังนั้น จากอุปกรณ์  $C$  และ  $L$  ที่ปรากฏในวงจรกรองต่ำผ่านต้นแบบ เราจะแทนค่าอุปกรณ์ใหม่ด้วยความสัมพันธ์ตามสมการที่ปรากฏในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนอุปกรณ์และรายการอุปกรณ์ในวงจรต่ำผ่านต้นแบบไปสู่วงจรแถบผ่านความถี่ศูนย์กลาง  $\omega_0$  และแบนด์วิดท์กว้าง  $\omega_2 - \omega_1$

การเปลี่ยนอุปกรณ์ในรูปที่ 2.6 เป็นการเปลี่ยนตัวเก็บประจุที่เดิมอยู่ในวงจรกรองต่ำผ่านต้นแบบเป็นเรโซเนเตอร์แบบขนาน และเปลี่ยนตัวเหนี่ยวนำเป็นเรโซเนเตอร์แบบอนุกรม เมื่อปรับรูปวงจรและอุปกรณ์ด้วยความสัมพันธ์ตามรูปที่ 2.6 กับวงจรกรองต่ำผ่านต้นแบบในรูปที่ 2.7 แล้ว จะได้โครงสร้างวงจรกรองแถบผ่านดังรูป ซึ่งจะได้โครงสร้างวงจรกรองแถบผ่าน 2 โครงสร้าง โครงสร้างแรกจะสังเคราะห์ด้วยอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ ( $K_{i,j}$ ) ส่วนโครงสร้างที่ 2 ก็สังเคราะห์ด้วยแอดมิตแตนซ์แชนเวอร์เตอร์ ( $J_{i,j}$ )



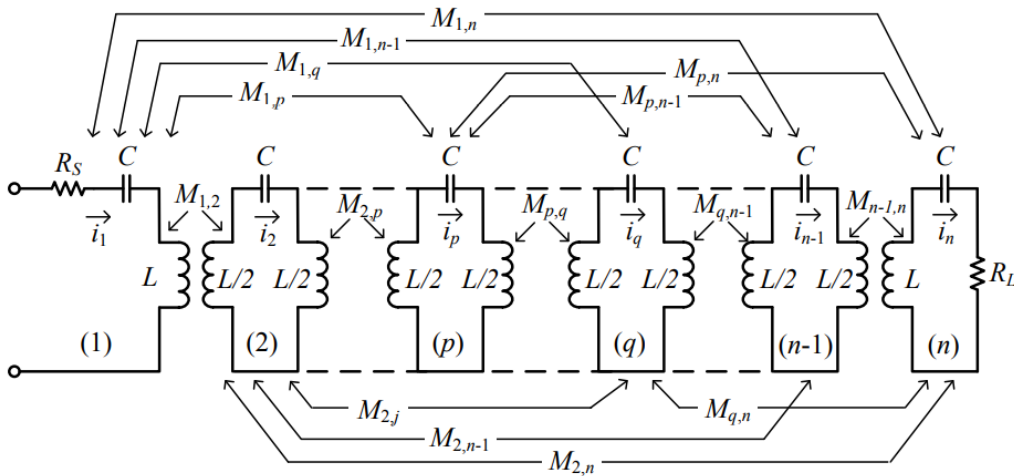
รูปที่ 2.7 วงจรกรองแถบผ่านสังเคราะห์ด้วยอิมพีแดนซ์อินเวอร์เตอร์ที่แปลงจากวงจรกรองต่ำผ่านต้นแบบ

## 2.3 ทฤษฎีเมทริกซ์เชื่อมต่อ (Coupling matrix)

การทำงานของวงจรกรองเรโซเนเตอร์แบบเชื่อมต่อจะสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีเมทริกซ์ได้ วงจรกรองเรโซเนเตอร์แบบเชื่อมต่อใด ๆ สามารถอธิบายได้อย่างสมบูรณ์ด้วยเมทริกซ์เชื่อมต่อหากวงจรกรองความถี่นั้นเป็นวงจรความถี่แถบผ่านแบบแถบแคบ (Narrowband bandpass filter) การอธิบายวงจรด้วยเมทริกซ์เชื่อมต่อจะมีข้อได้เปรียบกว่าการแสดงในรูปของฟังก์ชันส่งผ่านเพราะเราสามารถใช้ทฤษฎีเมทริกซ์มาจัดการลดรูปวงจรกรองนั้น ๆ ทำให้จำนวนอุปกรณ์ในวงจรกรองนั้นลดลง ค่าอุปกรณ์เปลี่ยนแปลงและสร้างได้ง่าย รวมทั้งทำให้โครงสร้างมีขนาดเล็กกลงได้ โอเพอเรเตอร์ที่นำมาใช้กับเมทริกซ์เชื่อมต่อได้แก่ การหมุนเมทริกซ์ (Rotation) และการแปลงกลับ (Inversion) ทำให้เกิดโครงสร้างและค่าอุปกรณ์วงจรใหม่ที่ยังให้ผลตอบสนองความถี่เดิม

รูปแบบเมทริกซ์เชื่อมต่อจะมี 2 รูป รูปแรกจะเป็นเมทริกซ์จัตุรัสขนาด  $n \times n$  เมื่อ  $n$  แทนจำนวนเรโซเนเตอร์ในวงจรกรอง ส่วนรูปแบบที่ 2 เป็นเมทริกซ์เชื่อมต่อที่เป็นเมทริกซ์จัตุรัสขนาด  $(n+X) \times (n+X)$  เมื่อ  $X$  แทนจำนวนพอร์ทของวงจร เมทริกซ์รูปแบบที่ 2 นี้จะมีจำนวนแถวและคอลัมน์มากกว่าเมทริกซ์แบบแรกอยู่  $X$  สำหรับวงจรกรองความถี่แถบผ่าน  $X$  จะเท่ากับ 2 ดังนั้น เมทริกซ์เชื่อมต่อสำหรับวงจรกรองความถี่จะมี 2 รูปแบบคือ เมทริกซ์ขนาด  $n \times n$  และขนาด  $(n+2) \times (n+2)$

### 2.3.1 เมทริกซ์แบบ $n \times n$



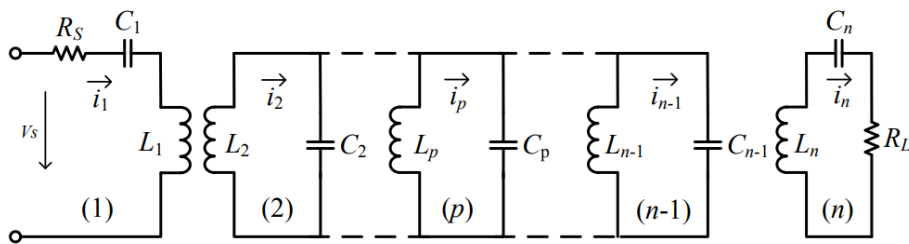
รูปที่ 2.8 วงจรกรองแถบผ่านสร้างจากอุปกรณ์แบบกลุ่มที่ประกอบด้วยชุดเรโซเนเตอร์ความถี่กำหนดเดียวกัน และแต่ละชุดมีการเหนี่ยวนำด้วยสนามแม่เหล็ก (Magnetically synchronous tuned resonators)

วงจรในรูปที่ 2.8 เป็นวงจรกรองแถบผ่านลำดับที่  $n$  โครงสร้างวงจรประกอบด้วยชุดอุปกรณ์เรโซเนเตอร์ต่อแบบเรียงกันโดยเรโซเนเตอร์แต่ละชุดตั้งแต่ชุดที่ 1, 2, 3, ...,  $n$  จะเชื่อมต่อกันด้วยสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นระหว่างขดของหม้อแปลง ค่า  $R_s$  และ  $R_L$  คือความต้านทานโหลดและแหล่งกำเนิดชุดเรโซเนเตอร์แต่ละชุดจะมีความถี่กำหนดเดียวกันและกำหนดด้วยค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  และ  $C$  ตามรูป วงจรกรองแถบผ่านในรูปนี้จะสามารถอธิบายด้วยเมทริกซ์เชื่อมต่อแบบ  $n \times n$  ได้ สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ

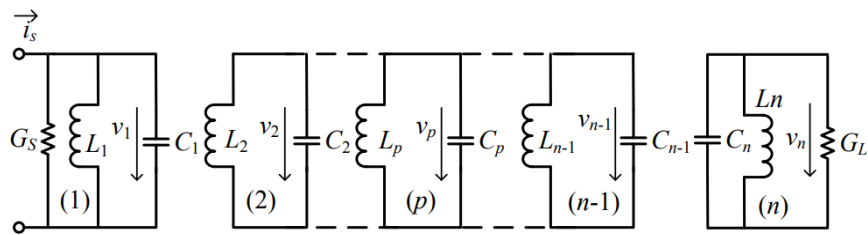
(Coupling coefficient) ระหว่างเรโซเนเตอร์  $p$  และ  $q$  จะกำหนดด้วย  $M_{p,q}$  ซึ่งค่านี้เป็นจำนวนจริงและเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความถี่ กรณีสมมติของ  $M_{p,q}$  ดังกล่าวทำให้แบบจำลองของวงจรแถบผ่านนี้เหมาะสำหรับการออกแบบวงจรกรองแบบแถบแคบ

กรณีวงจรกรองแถบผ่านที่เรโซเนเตอร์แต่ละชุดมีความถี่กำทอนต่างกัน (Asynchronous tuned resonators) โครงสร้างวงจรกลุ่มนี้มี 2 ลักษณะคือ กลุ่มแรกจะเป็นวงจรที่เรโซเนเตอร์แต่ละชุดจะเชื่อมต่อแบบสนามไฟฟ้า (Electrically coupled) และกลุ่มที่สองจะเชื่อมต่อแบบสนามแม่เหล็ก วงจรในรูปที่ 2.9 จะเชื่อมต่อแบบสนามแม่เหล็กซึ่งและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแบบสมการวนรอบ (Loop equation) ตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ ส่วนอีกวงจรในรูปที่ 2.9 จะเชื่อมต่อแบบสนามไฟฟ้าและวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแบบสมการโนด (Node equation) ตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์เช่นกัน และไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมแบบต่อแบบสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก จะเขียนสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์เชื่อมต่อและตัวประกอบคุณภาพภายนอก (External quality factor) ได้ดังนี้

$$\mathbf{A} = \mathbf{m}_q + p\mathbf{I} - j\mathbf{m} \quad (1)$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.9 วงจรกรองแถบผ่านสร้างจากอุปกรณ์แบบกลุ่มที่ประกอบด้วยชุดเรโซเนเตอร์ความถี่กำทอนต่างกัน และเรโซเนเตอร์แต่ละชุดเชื่อมกันแบบ (ก) สนามแม่เหล็ก (ข) สนามไฟฟ้า

โดยที่

$$\mathbf{m}_q = \begin{bmatrix} q_{e1}^{-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & & 0 \\ & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & q_{en}^{-1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$p = j \frac{1}{FBW} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (3)$$

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & \cdots & m_{1,n} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & \cdots & m_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n,1} & m_{n,2} & \cdots & m_{n,n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

และ

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

จากสมการ (2) ค่า  $q_{e1}$  และ  $q_{en}$  ตัวประกอบคุณภาพภายนอกแบบปรับฐานแล้ว (Normalized external quality factor) ของเรโซเนเตอร์ชุดที่  $i$  และ  $n$  ซึ่งนิยามจาก

$$q_{e1} = Q_{e1}FBW$$

$$q_{en} = Q_{en}FBW$$

สำหรับนิยามของ  $m_{i,j}$  ในสมการ (2) นี้คำนวณจากสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์ชุดที่  $i$  และ  $j$  และค่าอัตราส่วนแบนด์วิดท์ (Fractional bandwidth:  $FBW$ ) เป็นดังสมการ

$$m_{i,j} = \frac{M_{i,j}}{FBW}$$

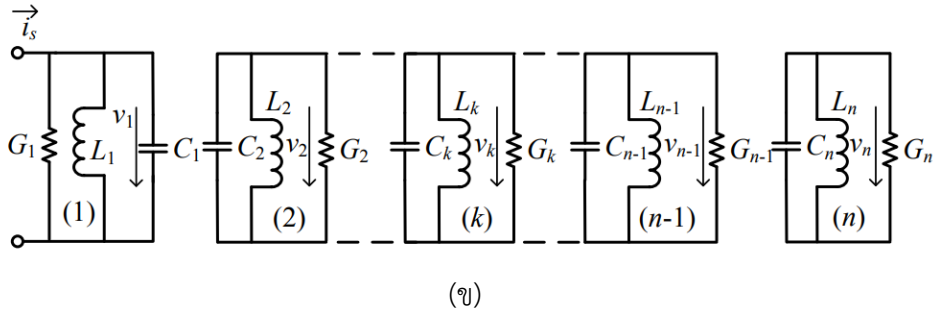
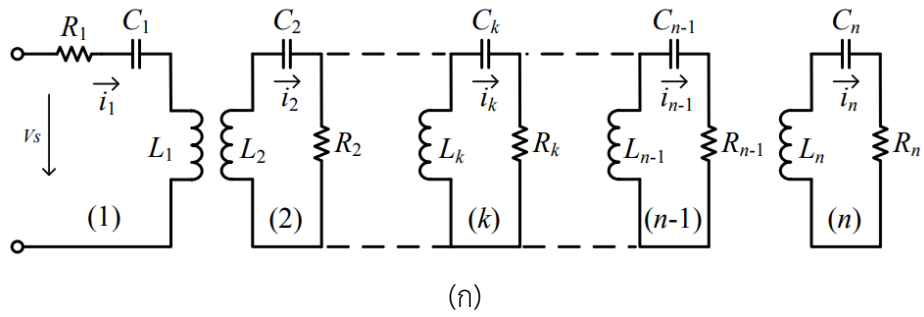
สำหรับกรณีวงจรกรองแถบผ่านที่ชุดเรโซเนเตอร์กำหนดที่ความถี่ต่างกัน ค่า  $m_{i,i}$  บางค่าจะไม่เป็นศูนย์

สัมประสิทธิ์การสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านพลังงาน (Transmission coefficient) ของวงจรกรองแถบผ่านจะคำนวณจาก

$$S_{11} = \pm \left( 1 - \frac{2}{q_{e1}} [\mathbf{A}]_{1,1}^{-1} \right)$$

$$S_{21} = 2 \frac{1}{\sqrt{q_{e1}q_{en}}} [\mathbf{A}]_{n,1}^{-1}$$

### 2.3.2 เมทริกซ์แบบ $(n+X) \times (n+X)$



รูปที่ 2.10 วงจรกรองแถบผ่านแบบ n พอร์ตสร้างจากอุปกรณ์แบบกลุ่มที่ประกอบด้วยชุดเรโซเนเตอร์ความถี่กำหนดต่างกัน n ชุด และเรโซเนเตอร์แต่ละชุดเชื่อมกันแบบ (ก) สนามแม่เหล็ก (ข) สนามไฟฟ้า

ในการออกแบบวงจรไมโครเวฟที่มีมากกว่า 2 พอร์ตซึ่งใช้โครงสร้างแบบเรโซเนเตอร์เชื่อมต่อกันนั้น จะต้องใช้ออกแบบโดยการสังเคราะห์เมทริกซ์เชื่อมต่อให้มีลักษณะแบบ  $(n+X) \times (n+X)$  โครงสร้างของวงจรกรองแบบ n พอร์ตที่มีเรโซเนเตอร์ n ตัวต่อเชื่อมกันแบบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นดังรูปที่ 2.10 วงจรมีค่าความต้านทานโหลดหรือแอดมิตแตนซ์โหลดที่พอร์ต i คือ  $R_i$  และ  $G_i$  ส่วนความต้านทานแหล่งจ่ายและแอดมิตแตนซ์แหล่งจ่ายแทนด้วย  $R_1$  และ  $G_1$  ตามลำดับ ดังนั้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ของเมทริกซ์ A กรณีสถิตของวงจรกรองแบบ n พอร์ตดังนี้

$$\mathbf{A}_n = \mathbf{m}_{qn} + p\mathbf{I} - j\mathbf{m}$$

โดยที่

$$\mathbf{m}_{qn} = \begin{bmatrix} q_{e1}^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & q_{e2}^{-1} & & 0 \\ & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & q_{en}^{-1} \end{bmatrix}$$

ค่า  $p$  และ  $\mathbf{m}$  นิยามจากสมการ (3) และ (4) ตามลำดับ ดังนั้น สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่พอร์ต 1 และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต n คือ

$$S_{11} = \pm \left( 1 - \frac{2}{q_{e1}} [\mathbf{A}]_{1,1}^{-1} \right)$$

$$S_{21} = 2 \frac{1}{\sqrt{q_{e1}q_{en}}} [A]_{n,1}^{-1}$$

โดยที่  $i = 2$  ถึง  $n$

สมการความสัมพันธ์เมทริกซ์  $A$  ที่แสดงใน (1) นี้ ยังคงนิยามและวิเคราะห์จากค่าเมทริกซ์เชื่อมต่อที่มีขนาด  $n \times n$  แต่สำหรับการวิเคราะห์วงจรกรองความถี่แบบ  $X$  พอร์ทใด ๆ เราสามารถนิยามเมทริกซ์เชื่อมต่อแบบเฉพาะ  $\mathbf{m}^*$  ที่มีมิติ  $(n+X) \times (n+X)$  กรณีวงจรกรองความถี่แบบสองพอร์ท กำหนดพอร์ทอินพุทใช้สัญลักษณ์  $s$  และพอร์ทเอาต์พุทใช้สัญลักษณ์  $l$  เมทริกซ์เชื่อมต่อมีมิติ  $(n+2) \times (n+2)$  ดังนี้

$$\mathbf{m}^* = \begin{bmatrix} m_{s,s} & m_{s,1} & \dots & m_{s,n-1} & m_{s,n} & m_{s,l} \\ m_{1,s} & m_{1,1} & \dots & m_{1,n-1} & m_{1,n} & m_{1,l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n-1,s} & m_{n-1,1} & \dots & m_{n-1,n-1} & m_{n-1,n} & m_{n-1,l} \\ m_{n,s} & m_{n,1} & \dots & m_{s,n-1} & m_{n,n} & m_{n,l} \\ m_{l,s} & m_{l,1} & \dots & m_{l,n-1} & m_{l,n} & m_{l,l} \end{bmatrix}$$

รูปที่ 2.11 เมทริกซ์เชื่อมต่อขนาด  $(n+2) \times (n+2)$

สังเกตว่า เมทริกซ์ที่นิยามสำหรับวงจรกรองแบบสองพอร์ทนี้จะมีจำนวนแถวและจำนวนคอลัมน์เพิ่มขึ้นอย่างละ 2 ล้อมรอบเมทริกซ์เชื่อมต่อขนาด  $n \times n$  โดยแถวและคอลัมน์ที่ 1 จะเป็นพอร์ท  $s$  และแถวและคอลัมน์ที่  $n+2$  จะเป็นพอร์ท  $l$  สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ  $m_{s,s}$  และ  $m_{l,l}$  แทนค่าการเชื่อมต่อที่เกิดขึ้นที่พอร์ท  $s$  และ  $l$  ตามลำดับ ส่วน  $m_{s,l}$  และ  $m_{l,s}$  แทนการเชื่อมต่อระหว่างพอร์ทอินพุทและเอาต์พุทของวงจรกรองความถี่สองพอร์ท เมทริกซ์เชื่อมต่อขนาด  $(n+2) \times (n+2)$  นี้จะมีข้อได้เปรียบคือสามารถสังเคราะห์วงจรกรองที่เชื่อมต่อเรโซเนเตอร์กับทุกพอร์ทได้อย่างอิสระ และเชื่อมต่อระหว่างพอร์ทอินพุทกับเอาต์พุทได้ด้วย

#### 2.4 เทคนิคการสังเคราะห์เมทริกซ์เชื่อมต่อ

การสังเคราะห์วงจรกรองความถี่ที่ให้ผลตอบสนองความถี่ตามแบบรูปฟังก์ชันคณิตศาสตร์เช่น เชปปีเชฟ อิลลิปติก บัตเตอร์เวิร์ท สามารถสังเคราะห์ค่าอุปกรณ์แบบก้อนหรือ ชุดค่า  $g$  จากสมการที่นิยามด้วยฟังก์ชันคณิตศาสตร์นั้น หรืออีกวิธีคือการอ่านค่าจากตารางกำหนดค่า  $g$  ของสมการคณิตศาสตร์นั้น ๆ ตัวอย่างเช่น กรณีที่ต้องการสังเคราะห์ค่าวงจรต่ำผ่านตันแบบที่มีลักษณะผลตอบสนองแบบเชปปีเชฟที่มีค่าความพลิว (Ripple)  $L_{Ar}$  เดซิเบล ค่า  $g$  ที่กำหนดค่าอุปกรณ์ในวงจรดังรูปที่ 2.1 จะคำนวณจาก

$$g_0 = 1$$

$$g_1 = \frac{2}{\gamma} \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right)$$

$$g_i = \frac{1}{g_{i-1}} \frac{4 \sin\left(\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right) \sin\left(\frac{(2i-3)\pi}{2n}\right)}{\gamma^2 + \left(\sin\frac{(i-1)\pi}{n}\right)^2}$$

$$g_{n+1} = \begin{cases} 1 & \text{for } n \text{ odd} \\ \coth^2 \frac{\beta}{4} & \text{for } n \text{ even} \end{cases}$$

โดยที่

$$\beta = \ln \left[ \coth \frac{L_{Ar}}{17.37} \right]$$

$$\gamma = \sinh \frac{\beta}{2n}$$

จากสูตรคำนวณค่า  $g$  ที่แสดงข้างต้น สามารถสังเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อและค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกที่เป็นอีลิเมนต์ของเมตริกซ์เชื่อมต่อได้ดังนี้

$$q_{e1} = g_0 g_1$$

$$q_{en} = g_n g_{n+1}$$

$$m_{i,i+1} = \frac{1}{\sqrt{g_i g_{i+1}}}$$

เมื่อ  $i=1$  ถึง  $n-1$

#### 2.4.1 การสังเคราะห์ด้วยการหมุนเมตริกซ์ (Matrix rotation)

เทคนิคการหมุนเมตริกซ์จะช่วยให้ได้โครงสร้างของวงจรที่มีขนาดเล็กและลดการเชื่อมต่อให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เทคนิคนี้มีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

- (1) สังเคราะห์สมการข้อมูลโพลีโนเมียลจากผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการ
- (2) สังเคราะห์เมตริกซ์เชื่อมต่อจากสมการโพลีโนเมียล
- (3) ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหรือการหมุนเมตริกซ์เพื่อปรับค่าอีลิเมนต์ของเมตริกซ์โดยที่ยังคงผลตอบสนองเดิมไว้

ขั้นตอนของวิธีนี้จะเริ่มต้นจากเมตริกซ์เชื่อมต่อจัตุรัสขนาด  $n \times n$  กำหนดให้ผลการหมุนเมตริกซ์ถูกจัดการด้วยเมตริกซ์  $R_s$  ดังนั้น สามารถเขียนสมการเมตริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์เมตริกซ์ที่ถูกหมุน  $\mathbf{m}_s$  กับเมตริกซ์เริ่มต้น  $\mathbf{m}_{s-1}$  ดังนี้

$$\mathbf{m}_s = \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{m}_{s-1} \cdot \mathbf{R}_s^T$$

ตัวโอเปอเรเตอร์เมทริกซ์  $[ ]^T$  คือการทำทรานสโพสเมทริกซ์ (transpose)  $s=1,2,3,\dots,r$  และ  $r$  คือจำนวนครั้งของการหมุนเมทริกซ์ซึ่งสัมพันธ์กับอันดับของวงจรรองซึ่งคำนวณจาก

$$r = \sum_{t=1}^{n-3} t$$

ในสมการความสัมพันธ์ของการหมุนเมทริกซ์จะพบว่า ค่าไอเกนท (eigenvalues) ของเมทริกซ์  $\mathbf{m}_s$  จะเท่ากับค่าไอเกนทของ  $\mathbf{m}_{s-1}$  ดังนั้น หากคำนวณผลตอบแทนจากความถี่จากเมทริกซ์ทั้งสองค่าจะเหมือนกัน

ในการสังเคราะห์เมทริกซ์  $\mathbf{R}$  ซึ่งถูกออกแบบเฉพาะเพื่อกำจัดอิลิเมนต์ในเมทริกซ์ให้มากที่สุดเพื่อให้ได้โครงสร้างวงจรรองแถบผ่านที่ซับซ้อนน้อยที่สุด ค่าอิลิเมนต์ของเมทริกซ์  $\mathbf{R}$  จะคำนวณได้จาก

$$\mathbf{R}[i, i] = \mathbf{R}[j, j] = \cos \theta_r$$

$$\mathbf{R}[i, j] = -\mathbf{R}[j, i] = -\sin \theta_r$$

$$\mathbf{R}[p, q] = 1; p, q \neq i, j$$

$$\mathbf{R}[u, v] = 0; u \neq i, v \neq j \text{ and } u \neq v$$

ดังนั้น เมื่อแทนค่าอิลิเมนต์ของเมทริกซ์  $\mathbf{R}$  ในสมการหมุนเมทริกซ์ ค่าอิลิเมนต์ของเมทริกซ์  $\mathbf{M}_s$  จะสัมพันธ์กับอิลิเมนต์ของเมทริกซ์เริ่มต้น  $\mathbf{M}_{s-1}$  และเมทริกซ์หมุน  $\mathbf{R}_s$  ดังสมการ

อิลิเมนต์ในแถว  $i$

$$\mathbf{M}_s[i, k] = \cos \theta_r \mathbf{M}_{s-1}[i, k] - \sin \theta_r \mathbf{M}_{s-1}[j, k];$$

อิลิเมนต์ในแถว  $j$

$$\mathbf{M}_s[j, k] = \sin \theta_r \mathbf{M}_{s-1}[i, k] + \cos \theta_r \mathbf{M}_{s-1}[j, k]$$

อิลิเมนต์ในคอลัมน์  $i$

$$\mathbf{M}_s[k, i] = \cos \theta_r \mathbf{M}_{s-1}[k, i] - \sin \theta_r \mathbf{M}_{s-1}[k, j]$$

อิลิเมนต์ในคอลัมน์  $j$

$$\mathbf{M}_s[k, j] = \sin \theta_r \mathbf{M}_{s-1}[k, i] + \cos \theta_r \mathbf{M}_{s-1}[k, j]$$

โดยที่  $k \neq i, j$ .

ชุดสมการข้างต้นต้องมีมุมในการหมุน  $\theta_r$  ในการหมุนสมการ 4 สมการ ซึ่งคำนวณจาก

อิลิเมนต์ในแถว  $i$

$$\tan \theta_r = \frac{\mathbf{M}_{s-1}[i, k]}{\mathbf{M}_{s-1}[j, k]}$$

อีลิเมนต์ในแถว j

$$\tan \theta_r = -\frac{\mathbf{M}_{s-1}[j, k]}{\mathbf{M}_{s-1}[i, k]}$$

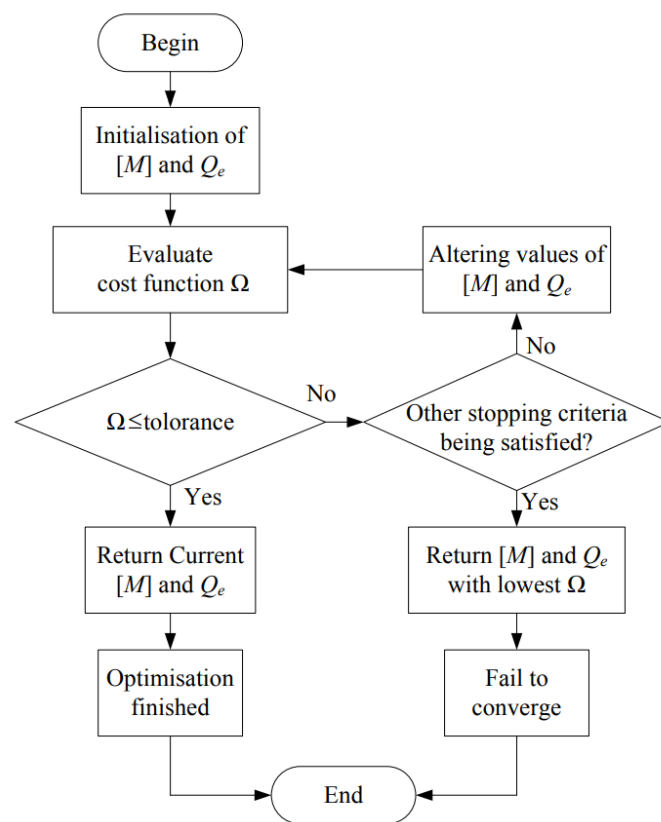
อีลิเมนต์ในคอลัมน์ i

$$\tan \theta_r = \frac{\mathbf{M}_{s-1}[k, j]}{\mathbf{M}_{s-1}[k, i]}$$

อีลิเมนต์ในคอลัมน์ j

$$\tan \theta_r = -\frac{\mathbf{M}_{s-1}[k, j]}{\mathbf{M}_{s-1}[k, i]}$$

#### 2.4.2 การสังเคราะห์ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization)



รูปที่ 2.12 ผังขั้นตอนการสังเคราะห์วงจรกรองด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

เทคนิคการสังเคราะห์วงจรกรองด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมีผังขั้นตอนดังแสดงในรูป เทคนิคนี้มีจุดเริ่มที่สำคัญคือการกำหนดฟังก์ชันต้นทุน (Cost function) และเป้าหมายในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ จะต้องหาอีลิเมนต์ของเมทริกซ์เชื่อมต่อที่จะให้ค่าฟังก์ชันต้นทุนต่ำที่สุด การกำหนดค่าฟังก์ชันต้นทุนจะคำนวณจากขนาดของพารามิเตอร์กระจัดกระจาย (Scattering parameter) ที่ต้องการกับพารามิเตอร์กระจัดกระจายที่ได้ การลู่ออกหาค่าตอบจะกำหนดเงื่อนไขของความแตกต่างระหว่างพารามิเตอร์กระจัดกระจายทั้งสองชุดที่ยอมรับได้

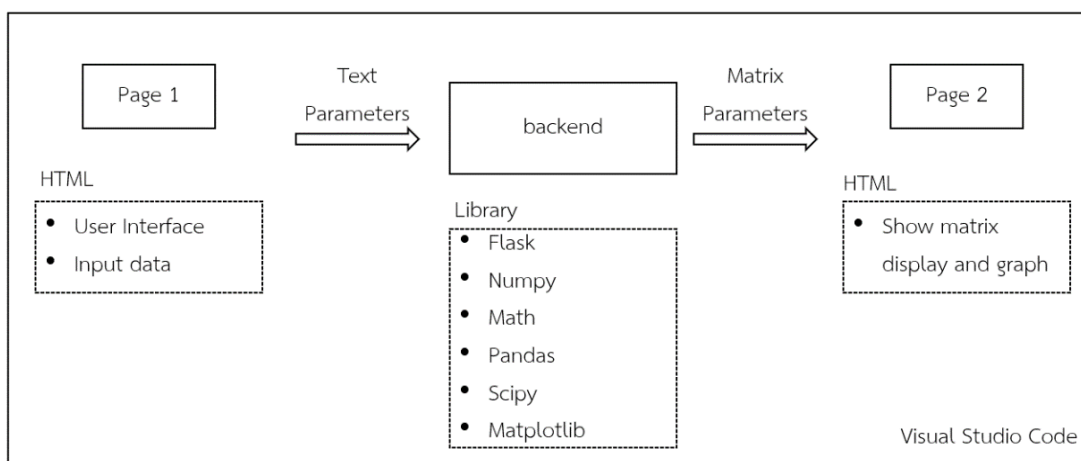
## บทที่ 3

### การพัฒนาแอปพลิเคชันช่วยสังเคราะห์เมตริกซ์เชื่อมต่อนอกจากข้อกำหนดของวงจรวง CRD

#### 3.1 การพัฒนาแอปพลิเคชัน

ในการพัฒนาแอปพลิเคชันนี้ ผู้วิจัยจะพัฒนาเป็นลักษณะเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) โดยจะแยกออกเป็นสองส่วนตามรูปที่ 3.1 คือ Frontend และ Backend ซึ่งทั้งสองส่วนจะใช้โปรแกรม Visual Studio Code ในการพัฒนาขึ้นซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับแก้ไขและพัฒนาซอร์สโค้ด (source code) ที่ใช้ขนาดของเนื้อที่ค่อนข้างเล็กแต่มีความสามารถในการพัฒนาโปรแกรมต่าง ๆ และรองรับระบบปฏิบัติการต่าง ๆ ดังนี้

- ส่วน Fronted เป็นส่วนแสดงผลและให้ผู้ใช้งาน ใส่ค่าพารามิเตอร์ของการสังเคราะห์เมตริกซ์ ส่วนนี้ประกอบไปด้วย Flask และใช้ภาษา HTML สำหรับระบบการแสดงผลเพื่อโต้ตอบกับผู้ใช้ GUI (Graph User Interface) Flask เป็น framework ที่เขียนขึ้นมาสำหรับภาษา python เพื่อใช้งานร่วมกับ webserver เช่น Apache และได้รับการยอมรับจาก community web pages ข้อดีของ Flask คือไม่จำเป็นต้องมีฐานข้อมูล (database) ส่วน HTML (Hyper Text Markup Language) เป็นภาษาคอมพิวเตอร์รูปแบบหนึ่งที่ใช้สำหรับสร้างหน้าเว็บ (web page) เพื่อแสดงผลข้อมูล เชื่อมโยงหน้าเว็บหนึ่งไปยังอีกเว็บอื่น และควบคุมการส่งค่าผ่านหน้าเว็บ ฟังก์ชันในส่วนของ Frontend จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลที่ผู้ใช้งานกรอกผ่านระบบ และส่งผ่านมายังระบบการคำนวณเพื่อแสดงผลการสังเคราะห์เมตริกซ์ต่อไป
- ส่วน Backend ในส่วนนี้ภาษาที่ใช้ในการดำเนินการคือ Python ซึ่งเป็นส่วนที่คำนวณตัวแปรที่ส่งมาจากผู้ใช้งานทั้งหมด และส่งค่ากลับไปยังส่วนแสดงผลของผู้ใช้งาน ในรูปแบบ POST Parameter



รูปที่ 3.1 โครงสร้างระบบแอปพลิเคชัน

ส่วน Frontend ที่ใช้ภาษา HTML นี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนรับส่งค่าจากผู้ใช้งาน (index.html) และส่วนการแสดงผลคำนวณ (calculation.html)

```

<body>
<form method="POST">
<h1> Coupling Matrix </h1>
<label> Enter the centre frequency of filter in MHz </label>
<input type="number" id="centreF" name="centreF" step="0.1" value="0"><br><br>

<label> Enter the minimum Return Loss (RL) in passband in dB </label>
<input type="number" id="miniRL" name="miniRL" step="0.1" value="0"><br><br>

<label> Enter the bandwidth in MHz </label>
<input type="number" id="bandw" name="bandw" step="0.1" value="0"><br><br>

<label> Enter the order of filter </label>
<input type="number" id="orderF" name="orderF" value="0"><br><br>

<label> Specify any finite Trans. </label><br><br>
<label> 0 No, 1 Symmetric, 2 Assymetric</label>
<input type="number" id="finitr" name="finitr" value="0"><br><br>

<label> Enter the frequency of finite Trans. Zero in MHz like only positive and both positive and negative</label><br><br>
<label> example 100 110 200 or -100 200 -250</label><br><br>
<input type="text" id="trans_zero_user" name="trans_zero_user" value=""><br><br>

<label> resonator @centre frequency (0 unknown) </label>
<input type="number" id="resonaQu" name="resonaQu" value="0"><br><br>

<label> Enter the frequency range for plotting in MHz </label><br><br>
<label> Frequency_L </label>
<input type="number" id="frequL" name="frequL" step="0.1" value="0"><br><br>

<label> Frequency_Res </label>
<input type="number" id="frequRes" name="frequRes" step="0.1" value="0"><br><br>

<label> Frequency_H </label>
<input type="number" id="frequH" name="frequH" step="0.1" value="0"><br><br>

<input type="submit" value="Submit">
</form>
</body>

```

รูปที่ 3.2 ส่วนการรับค่าจากผู้ใช้งาน (index.html)

ในรูปที่ 3.2 นี้จะเป็นการกำหนดลักษณะการกรอกข้อมูลจากผู้ใช้งานทั้งหมด และมีการสร้างปุ่มสำหรับการส่งค่า “submit” ไปยังส่วนการประมวลผลต่อไป ซึ่งส่วนการส่งค่าจะใช้เป็นรูปแบบ POST อยู่ในส่วนข้างบนใกล้กับ body “method = POST”

## Coupling Matrix

Enter the centre frequency of filter in MHz

Enter the minimum Return Loss (RL) in passband in dB

Enter the bandwidth in MHz

Enter the order of filter

Specify any finite Trans.

0 No, 1 Symmetric, 2 Assymetric

Enter the frequency of finite Trans. Zero in MHz like only positive and both positive and negative  
example 100 110 200 or -100 200 -250

resonator @centre frequency (0 unknown)

Enter the frequency range for plotting in MHz

Frequency\_L

Frequency\_Res

Frequency\_H

รูปที่ 3.3 GUI ในส่วนการรับค่าจากผู้ใช้งาน

ส่วนต่อมาเป็นส่วนของการแสดงผลที่ได้มาจากส่วนการคำนวณเรียบร้อยแล้ว ในส่วนนี้จะมีการรับค่ามาจากภาษา python โดยในส่วนนี้จะมีภาษาที่ทำงานร่วมกันคือ JavaScript ตัวภาษานี้จะมาทำหน้าที่ในการรับค่าจากส่วนการคำนวณที่เป็นรูปแบบของเมตริกซ์ขนาด  $n \times 1$  ให้อยู่ในรูปแบบตามที่ผู้ใช้งานกรอกในส่วนแรก คือ “Order of filter” และแปลงข้อมูลดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ที่แสดงผล ไล่ลงไปในส่วนของการแสดงผลที่เป็นภาษา HTML ดังรูปที่ 3.4

```
function generate(elem, rows, cols) {
  var matrix = getMatrix(rows, cols),
      elem = document.getElementById(elem),
      table;
  table = document.createElement('table');

  let counterRow = 1;
  let counter = 0;

  for (i=0; i < rows; i++) {
    var row = document.createElement('tr');
    counterRow = rows*i;
    for (j=0; j < cols; j++) {
      counter = counterRow + j;
      var col = document.createElement('td');

      col.textContent = matrix[counter];

      row.appendChild(col);
    }
    table.appendChild(row);
  }
  elem.appendChild(table);
}

function getMatrix(rows,cols) {
  var matrix = new Array(rows*cols),
      idx = rows*cols,
      args;
  let counterRow = 1;
  let counter = 0;
  for (i=0; i < rows; i++) {
    counterRow = rows*i;
    for (j=0;j<cols;j++) {
      counter = counterRow + j;
      matrix[counter] = outputCoupling[counter];
    }
  }
  return matrix;
}
```

รูปที่ 3.4 ฟังก์ชันการจัดเรียงเมตริกซ์

ส่วนการคำนวณข้อมูลที่ได้รับจากผู้ใช้งาน ส่วนนี้ใช้ชื่อว่า app.py ซึ่งเป็นการคำนวณข้อมูลที่ได้จากผู้ใช้งานมาตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อน ดังรูปที่ 3.5

```
f0_user = float(centreFr)
if(f0_user <= 0) :
    print('error M01b : centre frequency invalid, should be positive')
    exit

RL_user = float(miniRL)
if(RL_user<=0):
    print('error M02b : Return Loss invalid, should be positive')
    exit

fbw_user = float(bandw)
if(fbw_user <= 0) :
    print('error M03b : bandwidth Loss invalid, should be positive')
    exit

if((fbw_user/2) >= f0_user) :
    print('error M03c : bandwidth Loss invalid, should be less than centre frequenc')
    exit

filter_order = int(orderF)
if(filter_order <= 0):
    print('error M04a : Invalid Filter Order')
    exit

finite_trans_zero = 0
norm_TZ = 0
TZ_info = int(finiTr)
if(not(TZ_info == 0) and not(TZ_info == 1) and not(TZ_info==2) ):
    print('error M05a : Choice of TZ invalid')
    exit
```

รูปที่ 3.5 การตรวจสอบข้อมูลจากผู้ใช้งาน

หลังจากตรวจสอบการป้อนข้อมูลของผู้ใช้เสร็จเรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะเริ่มการทำงานประมวลผลเพื่อสร้างข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ และส่งผ่านข้อมูลในรูปแบบเมตริกซ์ขนาด  $n \times 1$  ตามตัวแปร ซึ่งจะอยู่ในส่วนของฟังก์ชันการทำงาน ดังรูปที่ 3.6

```
##### Plotting from CM with IL
freq_bp = np.arange(min_freq_plot,max_freq_plot,freq_res_plot)
CM_Np2_by_NP2 = FCM
f0_MHz = w0_cal / (2*np.pi)
BW_MHz = (wU_user - wL_user)/(2*np.pi)

sigma_k = 1 / (fbw*Qu)

G_mat = sigma_k * np.eye(len(CM_Np2_by_NP2))
G_mat[0,0] = 0
G_mat[-1,-1] = 0

CM = CM_Np2_by_NP2 - (1j * G_mat)

U_matrix = np.eye(len(CM))
U_matrix[0,0] = 0
U_matrix[-1,-1] = 0

R_matrix = np.zeros((len(CM),len(CM)))
R_matrix[0,0] = 1
R_matrix[-1,-1] = 1

lamb_da = []
S11 = []
S21 = []
for var_1 in range(len(freq_bp)):
    lamb_da = np.append(lamb_da,(f0_MHz/BW_MHz) * ((freq_bp[var_1]/f0_MHz) - (f0_MHz/freq_bp[var_1])))
    A_matrix = lamb_da[var_1] * U_matrix - 1j * R_matrix + CM
    A_inv = linalg.inv(A_matrix)

    S11 = np.append(S11,(1 + 2 * 1j * A_inv[0,0]))
    S21 = np.append(S21,(-2 * 1j * A_inv[-1,0]))

S11_val = S11
S21_val = S21

S11_dB = 20*np.log10(np.abs(S11))
S21_dB = 20*np.log10(np.abs(S21))

return FCM,S11_dB,S21_dB,np.around(freq_bp,2)
##### END Plotting from CM with IL
```

รูปที่ 3.6 การส่งค่าคำตอบให้กับหน่วยแสดงผล

ต่อมาจากกล่าวถึงการ deploy ตัวแอปพลิเคชันบน Server โดยใช้ระบบปฏิบัติการ Ubuntu สำหรับเป็นตัวแม่ข่ายของแอปพลิเคชันนี้ ซึ่งหลังจากทำการ deploy แอปพลิเคชันเรียบร้อยแล้ว โดยมีตัวโดเมนในการเข้าถึง <http://203.154.91.222:5000/> และสามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของแอปพลิเคชันโดยคำสั่ง pm2 list ซึ่งหลังจากพิมพ์คำสั่ง แสดงดังรูปที่ 3.7

```
f1@Ubuntu-1-1-20-sJmG-01:~$ pm2 list

id   name         mode     ↕   status    cpu    memory
0    app         fork     0    online    0%    126.8mb

f1@Ubuntu-1-1-20-sJmG-01:~$ _
```

รูปที่ 3.7 สถานการณ์ทำงานของแอปพลิเคชันบนเครื่องแม่ข่าย

### 3.2 ตัวอย่างวิธีการใช้งาน (Tooltips) สำหรับผู้ใช้งาน

วิธีการใช้งาน (Tooltips) สำหรับผู้ใช้งาน Tooltips เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้เริ่มต้นในการออกแบบวงจรกรอง CRD โดยแสดงในลักษณะของข้อความบนกล่องที่จะกรอกข้อมูลในแต่ละช่อง ซึ่งในการกรอกข้อมูลจะมีการยกตัวอย่างข้อมูลเป็นในลักษณะแบบใด เช่น

- การกรอกข้อมูลส่วนที่ 1 (Centre Frequency) จะแสดงข้อความ Tooltip แบบข้อความคือ “Center frequency floating number (eg : 1000 or 1000.1 MHz)” ดังรูปที่ 3.8 ในส่วนนี้จะบอกว่าข้อมูลสามารถกรอกข้อมูลที่เป็นจำนวนตัวเลขได้แบบจำนวนทศนิยมหรือจำนวนเต็มได้ และหน่วยของข้อมูลเป็นหน่วย MHz เท่านั้น จากตัวอย่างข้อมูลจะแสดง 1000 MHz เป็นชนิดข้อมูลจำนวนเต็ม และ 1000.1 MHz เป็นชนิดข้อมูลทศนิยม เป็นต้น

## Coupling Matrix

Enter the centre frequency of filter in MHz  **Center frequency floating number (eg : 1000 or 1000.1 MHz)**

Enter the minimum Return Loss (RL) in passband in dB

Enter the bandwidth in MHz

Enter the order of filter

Specify any finite Trans.  
0 No, 1 Symmetric, 2 Assymmetric

Enter the frequency of finite Trans. Zero in MHz like only positive and both positive and negative  
example 100 110 200 or -100 200 -250

resonator Qu @centre frequency (0 unknown)

Enter the frequency range for plotting in MHz

Frequency\_L

Frequency\_Res

Frequency\_H

รูปที่ 3.8 ตัวอย่าง Tooltips บนกล่องข้อความ Centre Frequency

- การกรอกข้อมูลในลำดับที่ 2 คือค่าการสูญเสียคืนกลับ (Return Loss) ส่วนนี้มีหน่วยเป็น เดซิเบล (dB) และหน่วยต้องเป็นติดลบ แต่ผู้ใช้สามารถกรอกข้อมูลเป็นจำนวนเต็มได้ โดยในข้อความตัว Tooltips แสดงว่าผู้ใช้งานต้องการค่า Return Loss เท่ากับ -20 dB ในกล่องข้อความนี้ทางผู้ใช้งานสามารถกรอกเป็นตัวเลขจำนวนเต็มบวกได้ แสดงในรูปที่ 3.9

## Coupling Matrix

Enter the centre frequency of filter in MHz

Enter the minimum Return Loss (RL) in passband in dB  RL (Return Loss = - S11\_dB) (eg : if required S11\_dB = -20 dB then enter RL = 20 in the code)

Enter the bandwidth in MHz

Enter the order of filter

Specify any finite Trans.

0 No, 1 Symmetric, 2 Assymmetric

Enter the frequency of finite Trans. Zero in MHz like only positive and both positive and negative  
example 100 110 200 or -100 200 -250

resonator Qu @centre frequency (0 unknown)

Enter the frequency range for plotting in MHz

Frequency\_L

Frequency\_Res

Frequency\_H

รูปที่ 3.9 ตัวอย่าง Tooltips บนกล่องข้อความ Return Loss

- การกรอกข้อมูลในลำดับที่ 3 คือค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ซึ่งใช้หน่วยเป็น MHz โดยเงื่อนไขในการกรอกข้อมูลส่วนนี้คือค่าต้องไม่มีค่ามากกว่าค่าสูญเสียคืนกลับ (Return Loss) การแสดงข้อความ Tooltips แสดงตัวอย่างว่า ถ้าค่า RL กรอกเท่ากับ 20 แล้วค่าของ Bandwidth ก็ไม่ควรเกิน 20 MHz ตามตัวอย่างจะกรอกเท่ากับ 10 MHz แสดงดังรูปที่ 3.10

# Coupling Matrix

Enter the centre frequency of filter in MHz

Enter the minimum Return Loss (RL) in passband in dB

Enter the bandwidth in MHz

**Bandwidth (RL > above specified)  
(eg: RL = 20 then Bandwidth < 20)**

Enter the order of filter

Specify any finite Trans.

0 No, 1 Symmetric, 2 Assymmetric

Enter the frequency of finite Trans. Zero in MHz like only positive and both positive and negative

example 100 110 200 or -100 200 -250

resonator Qu @centre frequency (0 unknown)

Enter the frequency range for plotting in MHz

Frequency\_L

Frequency\_Res

Frequency\_H

รูปที่ 3.10 ตัวอย่าง Tooltips บนกล่องข้อความ Bandwidth

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบการทำงานแอปพลิเคชันโดยคำนวณผลตอบแทนของความถี่ของวงจร

ผลการทดสอบการทำงานแอปพลิเคชันโดยคำนวณผลตอบแทนของความถี่ของวงจร CRD สามารถแบ่งได้ 2 กรณี

**กรณีที่ 1** การทดสอบออกแบบวงจรความถี่แถบผ่านสำหรับระบบสื่อสาร 5G ย่าน มิลลิเมตรเวฟของประเทศไทย กำหนดให้แบนด์วิดท์ของวงจรเท่ากับ 400 MHz ซึ่งเท่ากับแบนด์วิดท์ ที่มากที่สุดของช่องสื่อสาร 5G ย่านมิลลิเมตรเวฟ

รูปที่ 4.1 แสดงข้อมูลที่ป้อนเข้าระบบ GUI ของแอปพลิเคชัน โดยป้อนความถี่กลาง (Center frequency) 27,000 MHz และกำหนดให้วงจรกรองมีอัตราสูญเสียย้อนกลับในแถบผ่าน (Passband return loss) เท่ากับ 50 เดซิเบล แบนด์วิดท์ของวงจรกรอง 400 MHz และเลือกอันดับของวงจรกรองเท่ากับ 8 เพื่อให้ได้ความลาดชัน (Attenuation slope) เท่ากับ 80 เดซิเบล/10 เท่าความถี่ กำหนดให้วงจรกรองไม่มี ผลตอบแทนที่เป็นศูนย์ (Zero) ค่าตัวประกอบคุณภาพของเรโซเนเตอร์เท่ากับอนันต์ และให้แสดงผล ผลตอบแทนความถี่ของวงจรกรองที่ออกแบบนี้ตั้งแต่ความถี่ 26.2-27.8 GHz โดยมีความละเอียดในการพล็อต กราฟผลตอบแทนความถี่เท่ากับ 5 MHz

Flash Application x +

← → ↻ ไม่ปลอดภัย | 203.154.91.222:5000

### Coupling Matrix

Enter the centre frequency of filter in MHz

Enter the minimum Return Loss (RL) in passband in dB

Enter the bandwidth in MHz

Enter the order of filter

Specify any finite Trans.

0 No, 1 Symmetric, 2 Assymmetric

Enter the frequency of finite Trans. Zero in MHz like only positive and both positive and negative  
example 100 110 200 or -100 200 -250

resonator @centre frequency (0 unknown)

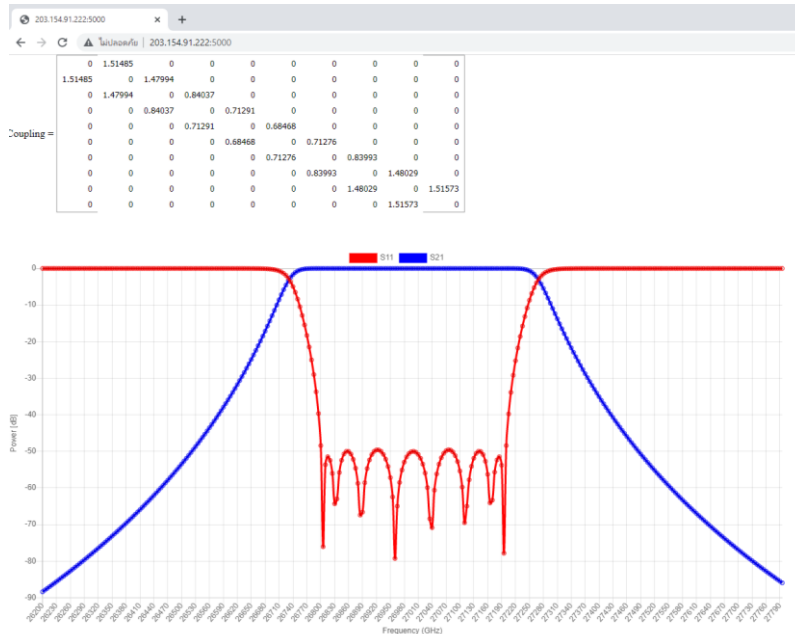
Enter the frequency range for plotting in MHz

Frequency\_L

Frequency\_Res

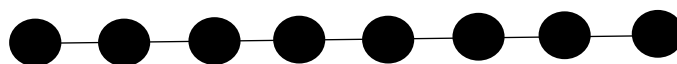
Frequency\_H

รูปที่ 4.1 การป้อนข้อมูลในแอปพลิเคชันสำหรับการทดสอบกรณีที่ 1



รูปที่ 4.2 ผลการออกแบบเมตริกซ์เชื่อมต่อและผลตอบสนองความถี่ของวงจรที่ต้องการ

ผลตอบสนองความถี่ที่แสดงสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิคของวงจรกรองแถบผ่านที่ต้องการ โดยอยู่ในช่วงความถี่ที่ 26.2 GHz ถึง 27.8 GHz และค่าการลดทอนในวงจรกรองความถี่แบบ CRD อยู่ต่ำกว่า -80 dB สังเกตจำนวนโพลในผลตอบสนองความถี่ในช่วงแถบผ่านพบว่าจะมีจำนวนโพลทั้งสิ้น 8 ตัว ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนอันดับของวงจรกรองที่กำหนดให้มีจำนวนอันดับเท่ากับ 8 สำหรับเมตริกซ์ที่สังเคราะห์วงจรกรองแบบ CRD ดังรูปที่ 4.2 โครงสร้างของวงจรกรอง CRD ที่มีจำนวนเรโซเนเตอร์ทั้งสิ้น 8 ตัว สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์จะมีค่าตามเมตริกซ์ที่สังเคราะห์ได้จะมีเฉพาะกับชุดเรโซเนเตอร์ที่อยู่ติดกันเช่น เรโซเนเตอร์ 2 ก็จะมีค่าการเชื่อมต่อของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับเรโซเนเตอร์ที่ 1 กับเรโซเนเตอร์ที่ 3 โครงสร้างของวงจรกรองที่เป็นผลจากการสังเคราะห์จะเป็นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างวงจรกรอง CRD สำหรับกรณีที่ 1

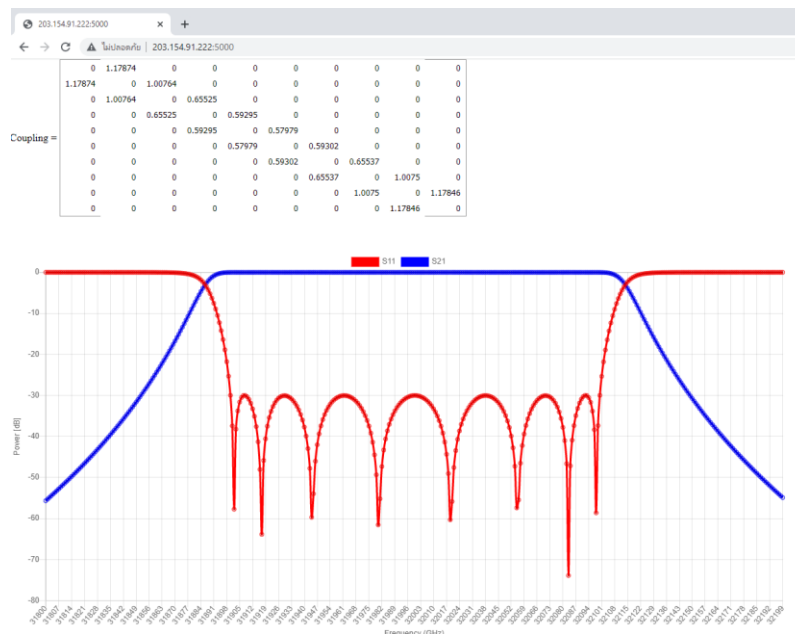
**กรณีที่ 2** การทดสอบออกแบบวงจรกรองความถี่แถบผ่านสำหรับระบบสื่อสารดาวเทียม ย่าน มิลลิเมตรเวฟที่ความถี่ 32 GHz กำหนดให้แบนด์วิดท์ของวงจรกรองเท่ากับ 200 MHz

รูปที่ 4.4 แสดงค่าที่ป้อนเข้าระบบ GUI ของแอปพลิเคชันออกแบบวงจรกรองความถี่แถบผ่าน กำหนดความถี่กลางที่ต้องการออกแบบ 32,000 MHz วงจรกรองมีอัตราสูญเสียย้อนกลับในแถบผ่าน (Passband return loss) เท่ากับ 30 เดซิเบล แบนด์วิดท์ของวงจรกรองนี้เท่ากับ 200 MHz และเลือกอันดับของวงจรกรองเท่ากับ 8 เพื่อให้ได้ความลาดชัน (Attenuation slope) เท่ากับ 80 เดซิเบล/10 เท่าความถี่ กำหนดให้วงจรกรองไม่มีผลตอบสนองที่เป็นศูนย์ (Zero transmission) ค่าตัวประกอบคุณภาพของเรโซเน

เตอร์เท่ากับอนันต์ และให้แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองที่ออกแบบนี้ตั้งแต่ความถี่ 31,800-32,200 GHz โดยมีความละเอียดในการพล็อตกราฟผลตอบสนองความถี่เท่ากับ 1 MHz

รูปที่ 4.4 การป้อนข้อมูลในแอปพลิเคชันสำหรับการทดสอบกรณีที่ 1

รูปที่ 4.5 แสดงเมตริกซ์เชื่อมต่อที่ออกแบบได้ของวงจรกรองแถบผ่านแบบ CRD ซึ่งประกอบด้วย เรโซเนเตอร์จำนวน 8 ตัวต่อแบบเรียงลำดับดังรูปที่ 4.3 ส่วนผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองที่ได้ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะให้ผลตอบสนองแบบเช็พเชฟและเกิดโพลจำนวน 8 โพลในช่วงแถบผ่านตามจำนวนอันดับของวงจรกรองเช็พเชฟ



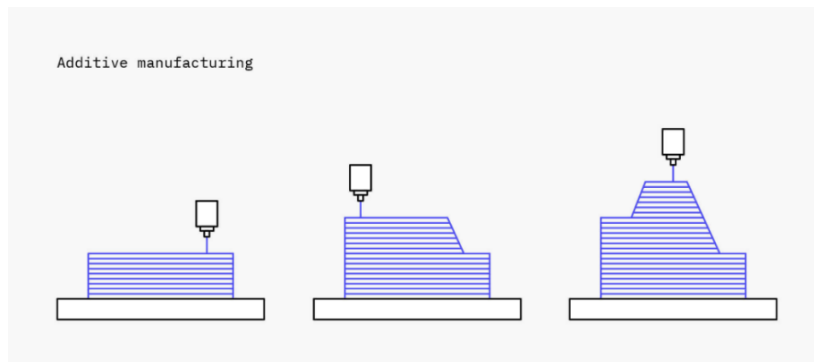
รูปที่ 4.5 เมตริกซ์เชื่อมต่อที่ออกแบบได้และผลตอบสนองความถี่ของวงจร

## บทที่ 5

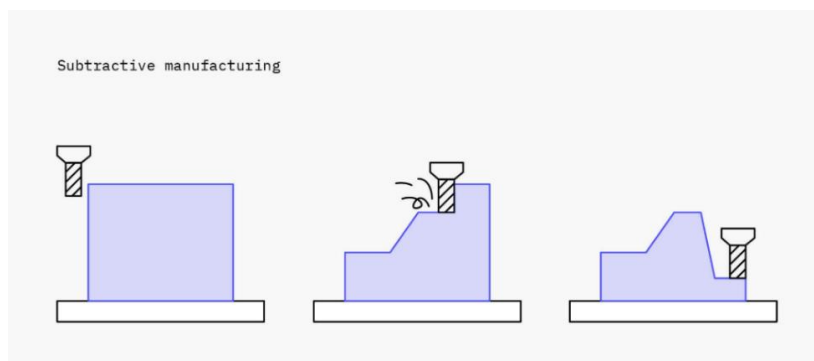
### ผลการศึกษาด้านเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ และเปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย ข้อจำกัดของการสร้างรูปทรง และความเป็นไปได้ในการสร้างวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ

#### 5.1 เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติหรือเทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ Additive Manufacturing (AM) กำลังก้าวเข้ามาเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญอย่างมากเทคโนโลยีหนึ่งต่อมวลมนุษยชาติ เนื่องจากวิวัฒนาการความก้าวหน้าหลายด้านทั้งการพัฒนาซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาใหม่ ๆ ด้านนวัตกรรมที่ใช้เทคโนโลยี Virtual Reality (VR) และ Augment Reality (AR) ซึ่งปัจจุบันเราสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้ในราคาที่ถูกลงและสามารถสร้างชิ้นงานโดยสเกตซ์แบบ 3 มิติที่ต้องการบนโปรแกรมช่วยออกแบบบนคอมพิวเตอร์ (Computer-Assisted Design : CAD) จากนั้นบันทึกข้อมูลของแบบจำลองชิ้นงานในรูปของไฟล์ดิจิทัล และส่งดิจิทัลไฟล์ที่บันทึกระยะไกลไปที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติได้ โดยในปัจจุบันเครื่องพิมพ์ 3 มิติมีราคาไม่แพงและสามารถซื้อมาใช้ได้ในครัวเรือนหรือในออฟฟิศเล็ก ๆ ได้



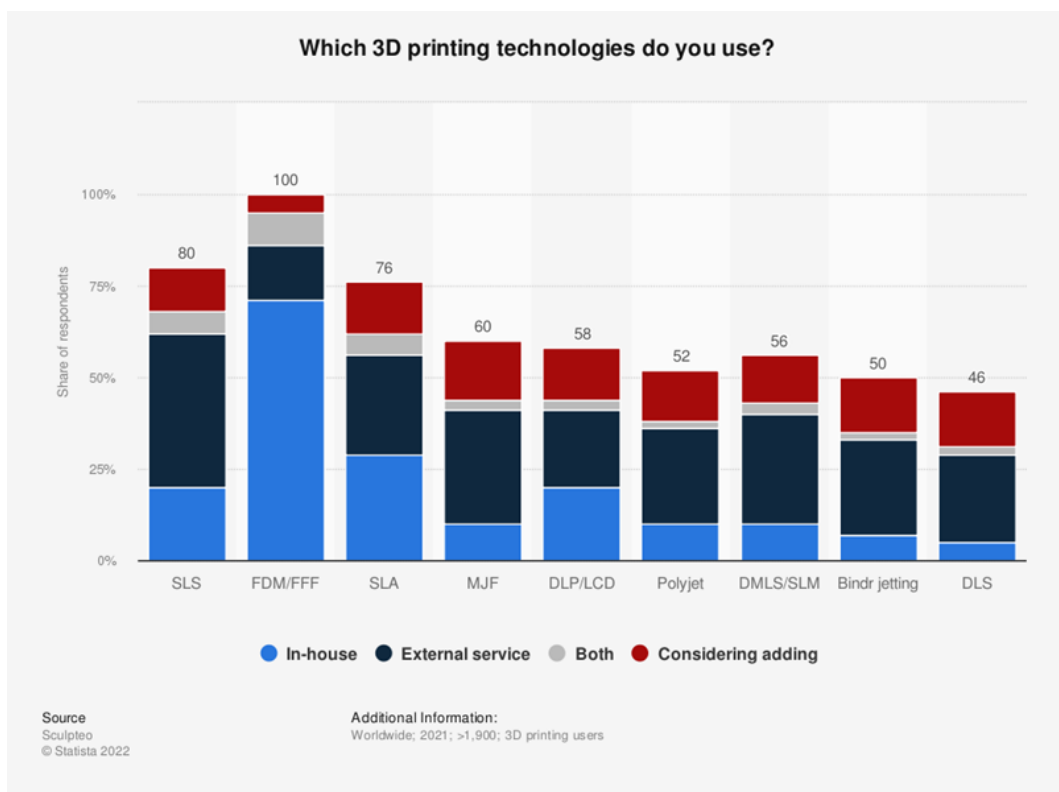
ก) AM (Additive Manufacturing)



ข) SM (Subtractive Manufacturing)

รูปที่ 5.1 แนวคิดของเทคโนโลยีการผลิตการพิมพ์แบบ  
(ที่มา <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>)

จุดเริ่มต้นของเทคโนโลยี 3D อยู่ในช่วงต้นทศวรรษที่ 2010 ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ขึ้นรูปชิ้นงานโดยการเพิ่มเนื้อวัสดุทีละชั้นจนครบรูปทรงทั้งหมดของชิ้นงานดังรูปที่ 5.1 ก) เทคโนโลยี 3D ต่างจากเทคโนโลยีการผลิตแบบกำจัดเนื้อวัสดุ (Subtractive Manufacturing : SM) ที่ใช้ในเครื่องจักรแบบ Computer Numerical Control (CNC) ซึ่งจะเซาะเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการออกจนเหลือรูปทรงที่ต้องการดังรูปที่ 5.1 ข) อุตสาหกรรมที่คาดว่าจะใช้เทคโนโลยี AM นี้ ได้แก่ อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตสินค้าสำหรับบริโภค อุตสาหกรรมการแพทย์ เฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่เกิดเหตุการณ์ระบาดใหญ่ของไวรัสโคโรนา-2019 (COVID-19) เราจะเห็นโอกาสในการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติในการผลิตผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เช่น แผ่นป้องกันใบหน้า (Face shield) หน้ากากอนามัย เครื่องช่วยหายใจ และชุดทดสอบ COVID-19 เป็นต้น เป็นที่คาดหมายว่า ตลาดของเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติจะเติบโตต่อเนื่องและมูลค่าตลาดคาดว่าจะแตะ 17.4 พันล้านเหรียญสหรัฐก่อนปี 2022 และ 37.2 พันล้านเหรียญสหรัฐก่อนปี 2026



รูปที่ 5.2 สถิติการใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติของทั่วโลก (ที่มา Statista 2022)

รูปที่ 5.2 แสดงการเก็บข้อมูลวิจัยตลาดเครื่องพิมพ์ 3 มิติของโลก ในกระบวนการวิจัยตลาดซึ่งดำเนินการในปี 2021 ข้อมูลที่ได้อ้างอิงจากบริษัท Sculpteo ซึ่งเป็นบริษัทที่ให้บริการพิมพ์ 3 มิติเทคโนโลยี AM กับลูกค้าทั่วโลกผ่านการเข้าถึงบริการผ่านระบบออนไลน์ บริษัทนี้ได้ออกแบบกระบวนการวิจัยโดยใช้วิธีการสำรวจข้อมูลจากผู้ที่ใช้บริการจำนวน 1900 ราย ในระหว่างปี 2021 ข้อมูลจากผลการวิจัยพบว่ามีประสบการณ์ในการใช้เทคนิคการพิมพ์แบบ AM เทคนิคใดบ้าง ซึ่งข้อมูลการสำรวจพบเทคนิคเครื่องพิมพ์ทั้งหมด 9 เทคนิค ได้แก่ (1) Selective Laser Sintering (SLS) (2) Fuse Deposition Modeling/Fuse

Filament Fabrication (FDM/FFF) (3) Stereolithography (SLA) (4) Multi Jet Fusion (MJF) (5) Digital light processing/liquid crystal display (DLP/LCD) (6) Polyjet (7) Direct metal laser sintering/selective laser melting (DMLS/SLM) (8) Binder Jetting และ (9) Direct Light Synthesis (DLS) โดยแยกประสบการณ์การใช้งานของผู้ตอบแบบสอบถามแยกเป็น 4 กรณี ได้แก่ เคยติดตั้งใช้งานเอง เคยขอใช้บริการจากภายนอก หรือเคยมีประสบการณ์ทั้งติดตั้งใช้งานเองและขอใช้บริการจากภายนอก และกรณีสุดท้ายคือ ยังไม่เคยใช้แต่อาจจะใช้ในอนาคต

ข้อมูลผลสำรวจพบว่า เครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ใช้เทคนิค FDM/FFF เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมสูงสุด (มีผู้ใช้และได้รับความสนใจสูงสุด) รองลงมาเป็นเทคนิคพิมพ์ SLS อันดับ 3 เป็นเทคนิค SLA ส่วนเทคนิคที่ได้รับความนิยมและใช้งานน้อยที่สุดได้แก่เทคนิค DLS สำหรับสถิติเครื่องพิมพ์ที่นิยมนำมาติดตั้งใช้เองส่วนตัวพบว่า อันดับ 1 เป็นเทคนิคพิมพ์ 3 มิติแบบ FDM/FFF อันดับ 2 คือ เทคนิค SLA และอันดับ 3 คือเทคนิค DLP/LCD เทคนิคที่ติดตั้งใช้งานเองที่บ้านน้อยที่สุดคือเทคนิค DLS สำหรับเครื่องพิมพ์ที่ผู้ใช้เคยขอรับบริการมากที่สุดได้แก่ เทคนิค SLS รองลงคือเทคนิค MJF และอันดับ 3 คือเทคนิค DMLS/SLM สำหรับเทคนิคพิมพ์ 3 มิติที่มีการขอใช้บริการน้อยที่สุดคือ เทคนิค FDM/FFF ซึ่งเป็นที่เข้าใจได้เนื่องจากเครื่องพิมพ์นี้ราคาถูกที่สุดในบรรดาเครื่องพิมพ์ 3 มิติทั้งหมด ส่วนเครื่องพิมพ์ที่ใช้เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติแบบ Multi jet fusion เป็นเครื่องพิมพ์ที่มีผู้สนใจที่จะนำมาใช้มากที่สุด รองลงมาเป็นเครื่องพิมพ์แบบ Binder jetting และ DLS ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 3 เทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีสมรรถนะสูงและราคาค่าใช้บริการที่ยุติธรรม

จากข้อมูลสามารถสรุปได้ว่า เครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ใช้เทคโนโลยี FDM/FFF เป็นเครื่องพิมพ์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดและมีการติดตั้งใช้เองที่บ้านกันมากที่สุด ซึ่งสาเหตุจะสามารถพิจารณาได้จากรายละเอียดเชิงเทคนิคและคุณสมบัติของเครื่องพิมพ์ 3 มิติเหล่านี้ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

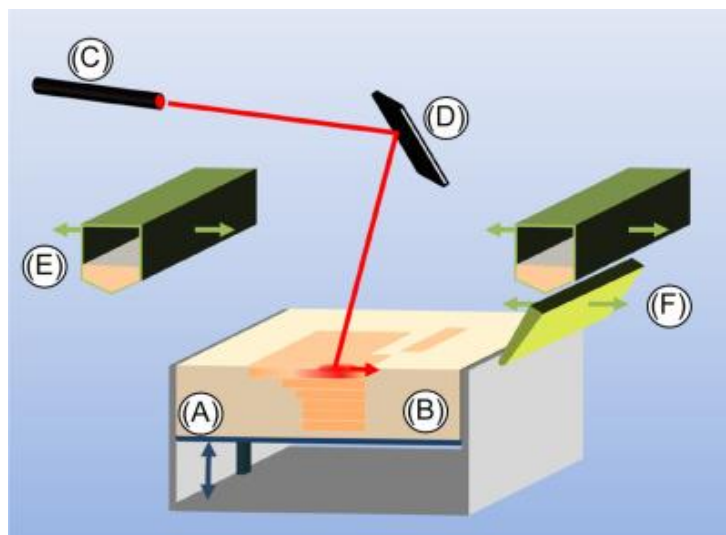
## 5.2 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

เครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ขายในท้องตลาดมีหลายประเภท และแต่ละประเภทมีรายละเอียดการทำงานที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแจกแจงได้ดังต่อไปนี้

### 5.2.1 Selective Laser Sintering (SLS)

เครื่องพิมพ์ประเภทนี้ถูกคิดค้นขึ้นและจดสิทธิบัตรโดย Carl Deckard ในปี ค.ศ. 1987 และได้ตั้งบริษัท Desktop Manufacturing Corp. (DTM) และในปี ค.ศ. 1992 บริษัทได้ออกเครื่องพิมพ์ SLS เครื่องแรกของโลกในชื่อ Sinterstation 2000 ภายหลังบริษัทนี้ได้ถูกซื้อกิจการโดยบริษัท 3D Systems เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้เครื่องยิงแสงเลเซอร์กำลังสูง เช่น ปืนเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ ยิงลงบนพื้นผิววัสดุที่จะขึ้นรูปทรง ผงวัสดุที่นำมาใช้ในเครื่องพิมพ์แบบ SLS ได้แก่ พลาสติก โลหะ เซรามิก หรือ แก้ว ความร้อนจากเลเซอร์จะทำให้ผงวัสดุหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวกันและก่อเป็นรูปทรง 3 มิติตามต้องการ เครื่องยิงเลเซอร์นี้จะเลือกยิงเฉพาะตำแหน่งที่ต้องการตามรูปแบบไฟล์ต้นแบบ 3 มิติของรูปทรงที่ต้องการสร้าง ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานจะเริ่มดังรูปที่ 5.3 ดังนี้

คอมพิวเตอรืในเครื่องพิมพ์ SLS นี้ จะแปลงไฟล์ดิจิทัลที่เก็บข้อมูลรูปทรงสามมิติให้เป็นข้อมูลภาพตัดขวางของรูปทรงตั้งแต่ภาพตัดขวาง 2 มิติในชั้นล่างสุดไปจนถึงภาพตัดขวาง 2 มิติที่อยู่ส่วนบนสุด การสร้างรูปทรงจะเริ่มจากภาพตัดขวางชั้นล่างสุดก่อน ทรายบรรจุ (E) จะเทผงวัสดุลงบนกระบะ (C) ที่ถูกรองด้วยแท่นพิมพ์ (A) และใบปาด (F) จะปาดให้ผงให้เป็นชั้นบาง จากนั้นคอมพิวเตอรืจะโปรแกรมให้แท่นพิมพ์ (A) ร้อนขึ้นเพื่อทำให้อุณหภูมิของผงวัสดุเพิ่มขึ้นจนถึงระดับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของผงวัสดุนั้นเล็กน้อย คอมพิวเตอรืจะควบคุมเครื่องยิงแสงเลเซอร์ (C) ไปยังกระจก (D) เพื่อสะท้อนไปที่ตำแหน่งที่จะเป็นภาพตัดขวาง 2 มิติของชั้นบางนั้น ทำให้อุณหภูมิผงวัสดุสูงขึ้นไปถึงจุดหลอมเหลวและทำให้ผงวัสดุละลายเป็นเนื้อเดียวกันตามภาพตัดขวาง 2 มิติของชั้นนั้น สำหรับผงวัสดุที่ไม่ถูกกล้าแสงเลเซอร์จะยังกระจายบนชั้นวัสดุเพื่อเป็นฐานรองในชั้นวัสดุที่อยู่ด้านบน การขึ้นรูปในชั้นถัดไปซึ่งอยู่ด้านบนก็จะเป็นกระบวนการเดิม กระบวนการทั้งหมดนี้ก็จะวนซ้ำจนไปถึงภาพตัดขวางชั้นบนสุดของรูปทรง เมื่อการหลอมละลายผงวัสดุเสร็จสิ้นจนถึงภาพตัดขวางชั้นบนสุดแล้ว เครื่องพิมพ์ก็จะปล่อยทิ้งให้รูปทรงให้เย็น จนกระทั่งวัสดุรูปทรงแข็งตัวดีพอแล้ว จึงค่อยนำรูปทรงชิ้นงานนั้นออกมาทำความสะอาดเพื่อจะนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 5.3 เครื่องพิมพ์แบบ SLS ประกอบด้วย (A) แท่นพิมพ์ที่เคลื่อนได้แนวตั้ง, (B) กระบะรอง (C) แหล่งกำเนิดเลเซอร์, (D) กระจก, (E) ทรายบรรจุผง และ (F) ใบปาดผงวัสดุ (ตัดแปลงจาก S.C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, R. Mülhaupt, Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing, Chem. Rev. 117 (15) (2017) 10212–10290.)

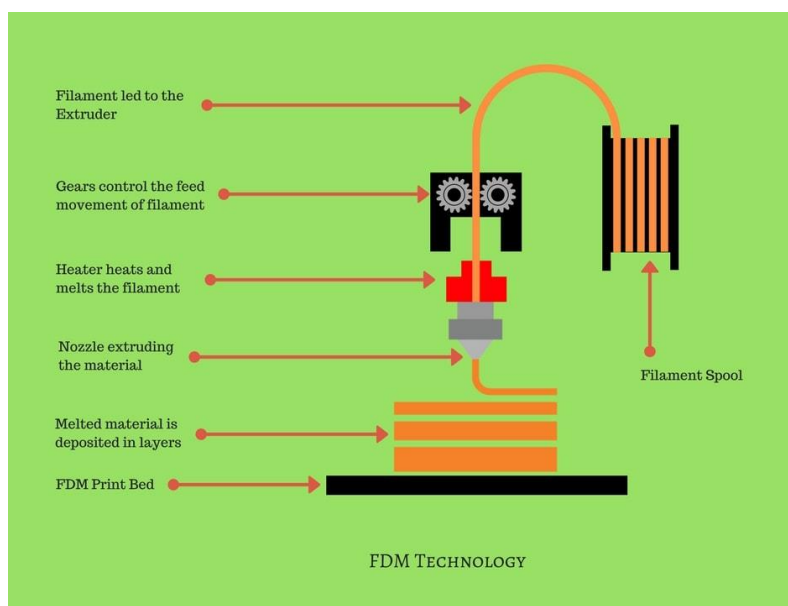
ข้อดีของเครื่องพิมพ์แบบนี้ คือ ชิ้นงานที่ผลิตออกมาจากเครื่องพิมพ์แบบนี้แข็งแรง คงทน แต่ราคาของเครื่องพิมพ์ค่อนข้างสูง วัสดุที่ใช้กับเครื่องพิมพ์แบบนี้ได้มีค่อนข้างจำกัดเมื่อเทียบกับเครื่องพิมพ์แบบอื่น ๆ ขนาดของเครื่องพิมพ์แบบนี้ต้องการพื้นที่มากกว่าเครื่องพิมพ์แบบอื่น และกำลังไฟฟ้าที่ต้องใช้จะสูงจากเครื่องยิงกล้าแสงเลเซอร์กำลังสูงและค่อนข้างอันตรายเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น

## 5.2.2 Fuse Deposition Modeling/Fuse Filament Fabrication (FDM/FFF)

เครื่องพิมพ์แบบ Fuse Deposition Modeling/Fuse Filament Fabrication (FDM/FFF) ถูกคิดค้นและขอจดสิทธิบัตรขึ้นในปี ค.ศ. 1989 โดย S. Scott Crump และในปีเดียวกัน S. Scott Crump ก็ก่อตั้งบริษัท Stratasys ในปี ค.ศ. 1992 สิทธิบัตรที่ยื่นจดได้รับการคุ้มครองให้จดทะเบียนโดยบริษัท Stratasys เป็นผู้ครอบครอง ต่อมาภายหลัง บริษัทนี้ได้ออกเครื่องพิมพ์ 3 มิติเครื่องแรกของโลกเพื่อจำหน่ายในชื่อผลิตภัณฑ์ 3D Modeler

เทคนิค FDM/FFF นี้เป็นการนำวัสดุที่จะใช้ขึ้นรูปมาหลอมละลาย แล้วฉีดออกมาเป็นชิ้นงานขึ้นรูปทีละชั้นโดยวางในแต่ละชั้น ตั้งแต่ชั้นล่างสุดไปจนถึงชั้นบนสุดของรูปทรง ขั้นตอนการทำงานของเครื่องพิมพ์นี้แสดงดังรูปที่ 5.4 โปรแกรมในคอมพิวเตอร์ของเครื่องพิมพ์จะอ่านไฟล์ข้อมูลรูปทรงซึ่งเป็นไฟล์ภาพ 3 มิติ จากนั้นโปรแกรมจะแปลงข้อมูลภาพ 3 มิติเป็นอะเรย์ข้อมูลภาพตัดขวาง 2 มิติในแต่ละชั้นของรูปทรงมาเก็บไว้ในหน่วยความจำ คอมพิวเตอร์จะอ่านข้อมูลภาพตัดขวางและสั่งคำสั่งเพื่อควบคุมมอเตอร์และชุดเฟือง (Gears) ให้ดึงเส้นวัสดุ (Filament) ออกจากหลอดม้วนเส้นวัสดุ (Filament spool) เส้นวัสดุจะถูกทำให้ร้อนขึ้นจนหลอมเหลวด้วยฮีตเตอร์ (Heater) และส่งเข้าหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งจะฉีดเส้นวัสดุเหลวไปบนแท่นพิมพ์ (Print bed) ทีละชั้น โดยจะเริ่มจากชั้นล่างสุดไปจนถึงชั้นบนสุด เมื่อวัสดุเย็นลงก็จะแข็งและขึ้นเป็นรูปทรงที่ต้องการ ความละเอียดของชิ้นงานที่ขึ้นรูปเสร็จจะขึ้นกับขนาดของเส้นวัสดุและรูของหัวฉีด

ข้อดีของเครื่องพิมพ์แบบนี้ คือ เครื่องพิมพ์แบบนี้จะมีราคาถูก สามารถหาซื้อได้ง่าย เพราะเป็นเครื่องพิมพ์ที่มีจำหน่ายมากที่สุดในบรรดาเครื่องพิมพ์แบบอื่น ฟังก์ชันในการใช้งานง่ายและสามารถสร้างให้เกิดวัสดุพิมพ์ที่หลากหลาย แต่ความละเอียดในการพิมพ์และระยะเวลาที่ใช้ยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการพิมพ์แบบอื่น

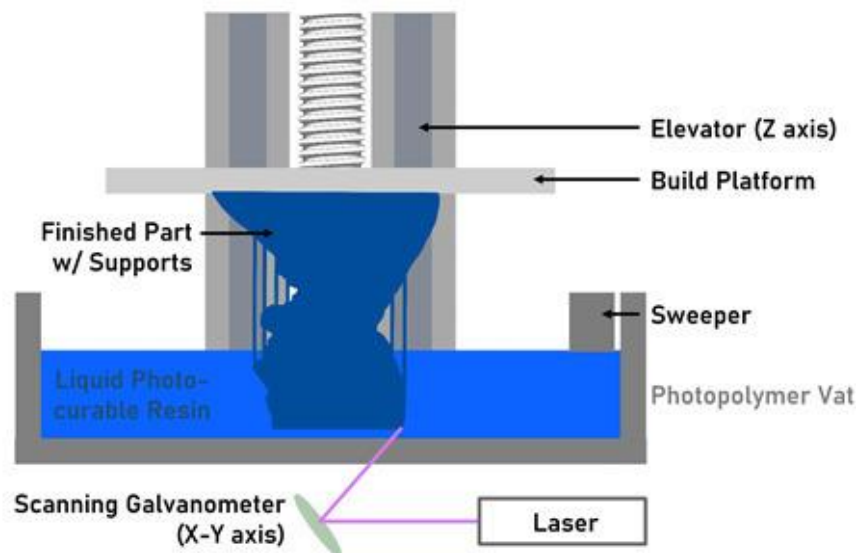


รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายแสดงองค์ประกอบของกลไกในการทำงานของเครื่องพิมพ์ 3D แบบ FDM (ที่มา <https://manufactur3dmag.com/working-fdm-3d-printing-technology/>)

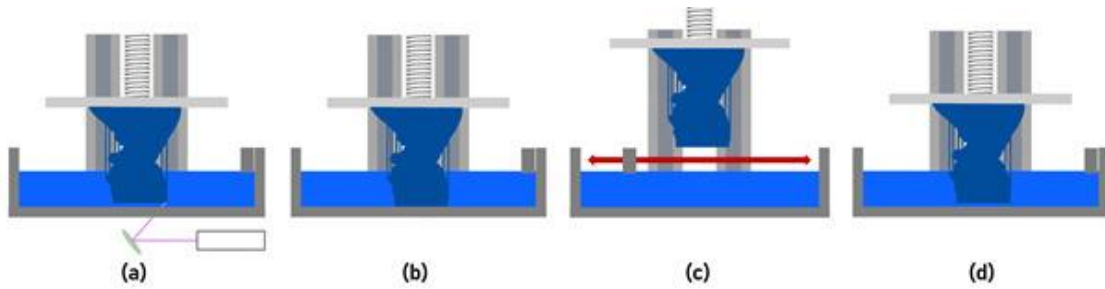
### 5.2.3 Stereolithography (SLA)

Stereolithography (SLA) เป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่มีการผลิตใช้งานในเชิงพาณิชย์ เครื่องพิมพ์แบบนี้ เป็นเครื่องพิมพ์รุ่นแรกของเครื่องพิมพ์ 3 มิติซึ่งถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1984 แต่ต่อมาบริษัท 3D Systems ได้ออกเครื่องพิมพ์ 3 มิติสำหรับจำหน่ายขึ้นโดยตั้งชื่อเครื่องพิมพ์รุ่นนี้ว่า SLA-1 ในปี ค.ศ. 1987 เทคนิคนี้มีหลักการการทำงานโดยใช้แสงเลเซอร์ทำงานร่วมกับวัสดุพิเศษซึ่งเป็นวัสดุโฟโตโพลิเมอร์ (Photopolymer) ซึ่งเป็นกลุ่มวัสดุประเภทเรซิน ซึ่งจะแข็งตัวเมื่อฉายลำแสงผ่าน เมื่อวัสดุเหล่านี้ถูกยิงด้วยลำแสงเลเซอร์ จะทำให้วัสดุส่วนนั้นแข็งตัวเป็นชั้นบาง ๆ โดยลำแสงเลเซอร์จะถูกควบคุมให้ฉายไปตามแนวเส้นตรงเรื่อย ๆ ต่อเนื่องทีละเส้นและแนวเส้นตรงจะต่อกันเป็นชั้น ๆ ซ้อนทับกันไปในแนวตั้งจนเป็นรูปทรงสามมิติที่ต้องการ การใช้ลำแสงเลเซอร์ช่วยในการขึ้นรูป เพราะการใช้แสงเลเซอร์จะสามารถกำหนดตำแหน่งได้แม่นยำ เนื่องจากลำแสงเลเซอร์มีขนาดลำเล็ก เทคโนโลยีนี้จึงเหมาะสำหรับการสร้างชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดสูง

จากรูปที่ 5.5 แสดงองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์แบบ SLA ประกอบด้วยเครื่องยิงเลเซอร์ซึ่งจะปล่อยแสงเลเซอร์ไปยังกระจกซึ่งควบคุมทิศจะฉายลำแสงในระนาบ x-y ด้วยอุปกรณ์ Scanning Galvanometer ลำแสงเลเซอร์จะไปตกกระทบกับวัสดุไวแสงที่เป็นของเหลวบรรจุในอ่าง (Vat) ซึ่งวัสดุของเหลวนี้เมื่อตกกระทบจะแข็งและขึ้นเป็นเป็นรูปทรงที่ยึดกับแท่นพิมพ์ซึ่งเลื่อนขึ้นลงตามแนวแกน z ได้ (Build platform) การฉายลำแสงนี้จะทำทีละชั้นจนครบเป็นรูปทรง ซึ่งลำแสงเลเซอร์และอุปกรณ์ Scanning Galvanometer จะกวาดไปตามภาพตัดขวางของรูปทรงที่ต้องการสร้างขึ้นในแต่ละชั้นพร้อม ๆ กับการควบคุมแท่นพิมพ์ที่เลื่อนขึ้นในแต่ละชั้นจนกระทั่งเสร็จสิ้นดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 5.5 ผังภาพด้านข้างแสดงองค์ประกอบการทำงานของเครื่องพิมพ์แบบ SLA (ที่มา <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/stereolithography-3d-printing/>)



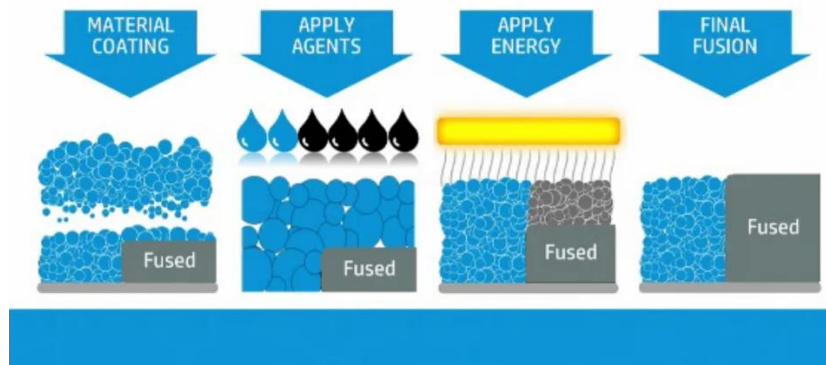
รูปที่ 5.6 ภาพจำลองแสดงลำดับการทำงานของเครื่องพิมพ์แบบ SLA (a,b) การขึ้นรูปในแต่ละชั้นให้ขึ้นเป็นรูปทรง (ที่มา <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/stereolithography-3d-printing/>)

ข้อดีเครื่องพิมพ์แบบนี้คือ จะให้ชิ้นงานที่ละเอียดสูง ผิวเรียบ ความเร็วในการพิมพ์ไม่ลดลงถ้าจะพิมพ์งานครั้งละหลายชิ้น อย่างไรก็ตาม เครื่องพิมพ์แบบนี้มีข้อเสียคือ วัสดุเรซินเหลวที่ใช้ในการพิมพ์ค่อนข้างเลอะเทอะ มีกลิ่นเหม็น และเป็นอันตรายได้หากสูดดมในปริมาณมาก ถึงแม้ว่าเครื่องพิมพ์แบบ SLA นี้ จะได้รับการยอมรับว่าจะให้รูปทรงที่ออกมาดี แต่เครื่องพิมพ์แบบนี้ยังมีข้อจำกัดด้วยกันหลายประการ เช่น เครื่องพิมพ์และวัสดุที่ใช้มีราคาสูงทำให้ชิ้นงานที่ผลิตมีต้นทุนต่อชิ้นที่สูง รวมถึงวัสดุที่ใช้ต้องเป็นเรซินที่ไวแสงเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และชิ้นงานที่ผลิตมักจะมีขนาดไม่ใหญ่มาก ชิ้นงานเมื่อแล้วเสร็จนำไปตากแดดหรืออบ (Curing) ด้วยแสงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน แต่ชิ้นงานเหล่านี้ก็อาจจะเปราะได้ตามกาลเวลาที่เปลี่ยนไป

#### 5.2.4 Multi Jet Fusion (MJF)

เครื่องพิมพ์แบบ Multi jet fusion process (MJF) เป็นเครื่องพิมพ์ที่ผลิตและจำหน่ายโดยบริษัท Hewlett Packard ที่ดัดแปลงมาจากเครื่องพิมพ์กระดาษแบบพ่นหมึกดั้งเดิม (Inkjet printer) เครื่องพิมพ์แบบ MJF นี้ออกสู่ตลาดในปี ค.ศ. 2016 รูปแบบการขึ้นรูปทรงของเทคนิคนี้จะขึ้นรูปทีละชั้นแสดงดังรูปที่ 4.7 โดยจะติดตั้งเครื่องสแกนเนอร์ (Scanner) และแท่นพ่นหมึกที่มีหัวฉีดหมึกมากกว่า 30,000 หัว เพื่อใช้ในการเคลือบชั้นวัสดุ เครื่องพิมพ์จะยิงหยดหมึกวัสดุด้วยความเร็วสูงถึง 350 ล้านหยดต่อวินาที โดยมีความแม่นยำในระดับ 21 ไมครอน ผู้ผลิตได้กล่าวอ้างว่าค่านี้จะแม่นยำกว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบอื่น ๆ และยังได้กล่าวอ้างว่าสามารถผลิตชิ้นงานที่ละเอียดกว่าเครื่องพิมพ์แบบ SLS ได้ด้วย ข้อดีอีกประการของเครื่องพิมพ์แบบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องพิมพ์แบบ FDM ก็คือ จะสามารถสร้างชิ้นงานได้เร็วกว่า จากข้อมูลของบริษัทผู้ผลิตอ้างว่าสามารถผลิตชุดเฟืองได้สูงถึง 1000 ชิ้นในเวลาเพียง 3 ชั่วโมง ซึ่งเร็วกว่าเทคนิค FDM ที่ต้องใช้เวลานานถึง 83 ชั่วโมงมากกว่า 27 เท่า

## MULTI JET FUSION PROCESS:



รูปที่ 5.7 ผังภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของเทคนิคการพิมพ์ Multi jet fusion

(ที่มา: <https://www.expertreviews.co.uk/printers/1401885/hp-debuts-multi-jet-fusion-3d-printing-technology>)

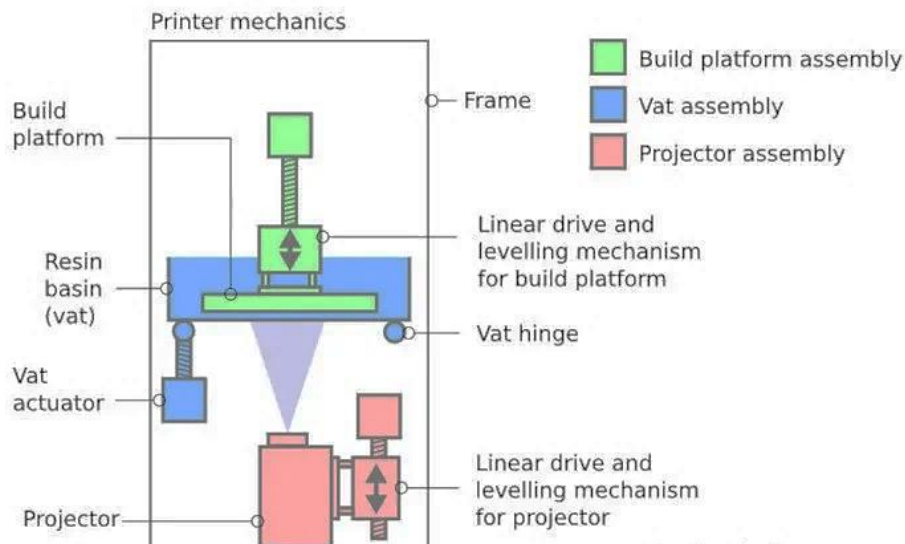
### 5.2.5 Digital light processing/liquid crystal display (DLP/LCD)

เครื่องพิมพ์แบบดีแอลพี (DLP) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1987 ซึ่งเป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ใช้การฉายลำแสง Ultra Violet (UV) ด้วยเครื่องฉายโปรเจกเตอร์ (Projector) ลำแสงนี้จะยิงไปที่วัสดุเหลวใสที่มีคุณสมบัติพิเศษที่จะแข็งตัวเมื่อมีแสงมาตกกระทบ โดยผู้ใช้สามารถเลือกบริเวณที่ต้องการให้แสงตกกระทบเพื่อให้วัสดุเหลวแข็งตัวได้จากการควบคุมตำแหน่งของโปรเจกเตอร์และอุปกรณ์ Digital Mirror Device (DMD) ที่ประกอบขึ้นจากกระจกจิ๋วหลายตัวดังรูปที่ 5.8 กระจก DMD เหล่านี้จะถูกบรรจุอยู่ในเลนส์ของโปรเจกเตอร์ หากพิจารณาแนวคิดของเครื่องพิมพ์เทคนิคนี้แล้วจะพบว่ามีความคล้ายคลึงกับเครื่องพิมพ์เทคนิค SLA มาก จะต่างกันตรงส่วนของอุปกรณ์โปรเจกเตอร์ ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้โปรเจกเตอร์ฉายแสงไปยังชั้นวัสดุที่ตำแหน่งที่ต้องการขึ้นงานแข็งตัว การควบคุมตำแหน่งของโปรเจกเตอร์จะใช้ลิเนียร์มอเตอร์ที่ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ หลอดโปรเจกเตอร์จะเคลื่อนที่ในแนวระนาบ x-y ซึ่งแตกต่างจากเทคนิค SLA ที่ใช้ปืนเลเซอร์ฉายไปยังกระจกที่เคลื่อนที่ได้ให้ไปตกกระทบตำแหน่งที่ต้องการให้วัสดุแข็งตัว

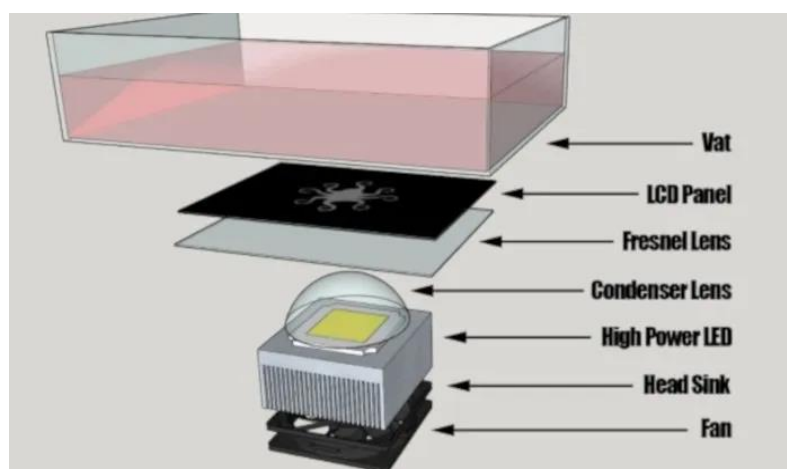
เครื่องพิมพ์แบบ DLP ดั้งเดิมได้รับการพัฒนาต่อมาเป็น DLP/LCD เพื่อให้รูปทรงที่สร้างขึ้นมีความละเอียดและประณีตมากขึ้น โดยต่อยอดจากการเปลี่ยนจากการฉายแสงจากโปรเจกเตอร์ มาเป็นแผง LCD ซึ่งภายใน LCD จะมีหลอด LED กำลังสูง การบีบและควบคุมลำแสงจะใช้เลนส์ครอบทั้ง Fresnel lens และ Condenser lens ลำแสงจะถูกทำให้เล็กลงเพื่อจะได้สร้างรูปทรงได้ละเอียดและแม่นยำ ดังรูปที่ 5.9 สำหรับวัสดุเหลวใสที่ไวต่อแสงยังมีอีกหลากหลายชนิด เช่น พลาสติกผสมไขหรือซีฟิ่ง วัสดุสำหรับงานทันตกรรม พลาสติกทางการแพทย์ พลาสติกทางอุตสาหกรรม และอื่น ๆ

เมื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของเครื่องพิมพ์แบบ DLP/LCD แล้วจะพบว่า ความละเอียดของเครื่องพิมพ์แบบนี้จะขึ้นกับขนาดของพิกเซลบนแผง LCD ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความกว้างของจอ LCD หารด้วยจำนวนพิกเซลในแนวนั้น สำหรับเครื่องพิมพ์แบบ DLP ซึ่งใช้แนวคิดแบบเดียวกันกับเทคนิค LCD ก็

จะคำนวณความละเอียดได้ในลักษณะเดียวกัน โดยคำนวณจากการนำไปหารความยาวชุดของกระจกเล็กด้วยจำนวนพิกเซลที่ปรากฏบน DMD ข้อดีของเครื่องพิมพ์แบบ LCD ที่ดีกว่า DLP คือ ความละเอียดของชิ้นงาน แต่มีข้อด้อยกว่าคือความเร็วในการพิมพ์



รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายแสดงเครื่องพิมพ์ DLP แบบดั้งเดิม (ที่มา <https://www.3dsourced.com/3d-printing-technologies/sla-vs-dlp-3d-printing/>)



รูปที่ 5.9 ภาพถ่ายแสดงเครื่องพิมพ์ DLP/LCD (ที่มา :<https://phrozen3d.com/blogs/guides/sla-vs-dlp-vs-lcd-which-resin-3d-printer-is-the-best-for-you>)

### 5.2.6 Polyjet

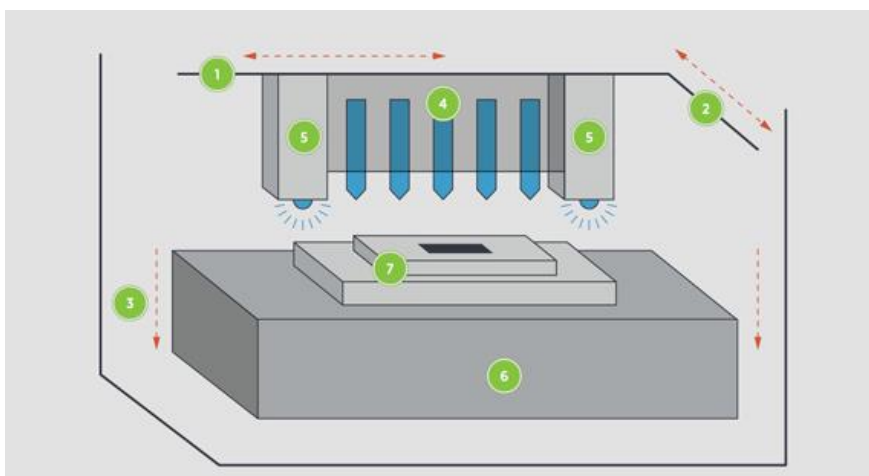
เครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ Polyjet ถูกคิดค้นขึ้นและออกสู่ตลาดเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 2000 โดยบริษัท Object-Geometries ซึ่งออกเครื่องพิมพ์ที่สามารถยิงหยดหมึกโฟโตโพลิเมอร์ (Photopolymer) และอบด้วยลำแสง UV หมึกโฟโตโพลิเมอร์ก็คือ วัสดุเรซินไวแสงที่ใช้ในเครื่องพิมพ์แบบ SLA ต่อมาบริษัท Stratasys ซึ่งเป็นผู้ผลิตผู้นำเครื่องพิมพ์ FDM ได้เข้าซื้อกิจการบริษัทนี้ และวางตำแหน่งตลาด (Market position) ของ

เครื่องพิมพ์ประเภทนี้ให้อยู่ในกลุ่มของเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ MJF แต่ยังคงชื่อ Polyjet เป็นชื่อทางการค้าไว้ เครื่องพิมพ์แบบ Polyjet สามารถยิงหยดหมึกไปที่ตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำมาก และที่สำคัญกว่า เครื่องพิมพ์เทคนิคอื่น ๆ คือ เครื่องพิมพ์แบบนี้สามารถปรับเปลี่ยนวัสดุพิมพ์ได้หลากหลายกว่า วัสดุพิมพ์จะมี คุณสมบัติทางกายภาพได้หลากหลาย ทั้งสีและระดับความแข็งอ่อน ทำให้เราสามารถสร้างชิ้นผิวแต่ละชั้นของ รูปทรงที่มีสีและความอ่อนแข็งได้แตกต่างกัน ผิวของชิ้นงานที่ถูกสร้างขึ้นมาจึงมีลวดลายตามต้องการได้ ทำให้เครื่องพิมพ์แบบนี้มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับชิ้นงานที่ต้องการความละเอียด ซับซ้อนและประณีต เทคโนโลยีการพิมพ์แบบนี้จึงมีผู้นามาใช้ในงานสร้างสรรค์ศิลปะ หรืองานที่ต้องการความประณีตเฉพาะ เช่น งานด้านเครื่องมือการแพทย์ เป็นต้น

ขั้นตอนการทำงานเครื่องพิมพ์แบบ Polyjet นี้ จะเริ่มจากหัวฉีดหยดหมึกสารโฟโตโพลิเมอร์จะพ่น หยดหมึกที่เรียกว่า Voxel โดยการจัดวางหัวฉีดของเครื่องพิมพ์ที่มีหลายหัวจะพ่นหมึกกระจายไปบนแท่น พิมพ์ เมื่อ Voxel ถูกวางในตำแหน่งที่ต้องการบนแท่นพิมพ์แล้ว ชั้นหมึกวัสดุโฟโตโพลิเมอร์นี้จะถูกอุ่นให้ร้อน ขึ้นจนเปลี่ยนจากสถานะจากของเหลว และความร้อนจากหยดหมึกจะถูกถ่ายเทออกจากหมึกไปสู่ สภาพแวดล้อมภายนอกทำให้หยก Voxel ค่อยๆ แข็งตัวจนเป็นยางยึด

ในรูปที่ 5.10 แสดงขั้นตอนการขึ้นเป็นรูปทรงของเครื่องพิมพ์แบบ Polyjet กระบวนการพิมพ์นี้จะ เริ่มต้นด้วยการฉีดหยดหมึก Voxel ที่เป็นวัสดุโฟโตโพลิเมอร์เป็นชั้น ๆ และแต่ละชั้นก็จะถูกอบด้วยแสง UV ตำแหน่งของหยดหมึก Voxel จะถูกวางเฉพาะตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้ตามตำแหน่งของภาพดิจิทัลตัดขวาง ของชั้นนั้น หยด Voxel นี้จะมีความสูงเท่ากับความหนาของแต่ละชั้น การที่เครื่องพิมพ์แบบนี้สามารถฉีด Voxel ที่มีหลายแบบแตกต่างกันตามเนื้อวัสดุและสีภายในชั้นเดียวกัน จะทำให้เราสามารถสร้างรูปทรงที่ ซับซ้อนตามต้องการได้

ข้อดีของเทคนิคเครื่องพิมพ์แบบ Polyjet นี้คือ มีความแม่นยำสูง สามารถสร้างรูปทรงที่ซับซ้อนที่ทำ ขึ้นจากวัสดุหลากหลายและสีที่แตกต่างกัน

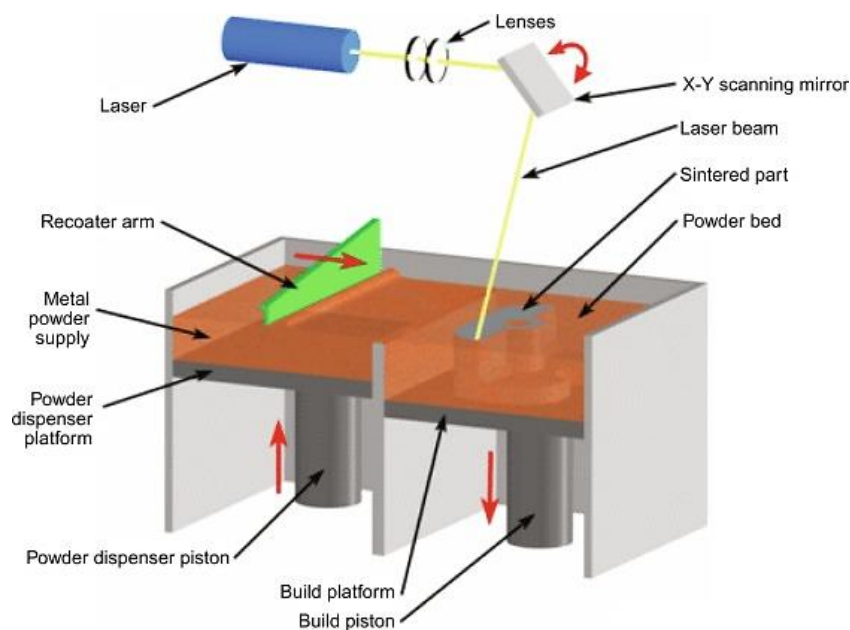


รูปที่ 5.10 ผังภาพเครื่องพิมพ์ Polyjet (ที่มา <https://www.protolabs.co.uk/services/3d-printing/polyjet-3d-printed-silicone-60-65/>)

### 5.2.7 Direct metal laser sintering/selective laser melting (DMLS/SLM)

เครื่องพิมพ์แบบ Direct Metal Laser Sintering (DMLS) เป็นเทคโนโลยีการผลิต AM แบบหนึ่งสำหรับรูปทรงที่เป็นโลหะ ในการผลิตให้เป็นรูปทรง 3 มิติ เครื่องพิมพ์จะหลอมผงโลหะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ไมครอนด้วยลำแสงเลเซอร์กำลังสูงทำให้ผงโลหะที่หลอมเหลวเชื่อมติดกันเป็นรูปทรงตามแบบที่ต้องการ เทคนิคการผลิต DMLS นี้ไม่ต้องการวัสดุโพลีเมอร์ประสาน (Polymer binder) ทำให้รูปทรงที่ผลิตจากเทคนิคนี้มีส่วนของโลหะที่สูงถึง 95% ซึ่งมากกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากเทคนิค SLS ที่มีส่วนของโลหะเพียง 70% เครื่องพิมพ์แบบ DMLS จะละเอียดกว่าเทคนิค SLS เพราะวาล์วชั้นเนื้อวัสดุที่บางกว่าซึ่งมาจากขนาดของผงโลหะที่บางเพียง 20 ไมครอน วัสดุที่สามารถใช้กับเครื่องพิมพ์แบบนี้ ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็กอัลลอยด์ เหล็กสแตนเลส เงิน โคบอลต์-โครม และไททาเนียม

ในรูปที่ 5.11 แสดงองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ DMLS ประกอบด้วยปืนเลเซอร์กำลังสูง เลนส์รวมแสง แผ่นกระจกที่จะควบคุมลำบีมให้กวาดไปตามแนวระนาบ x-y ลำแสงเลเซอร์จะยิงจากปืนเลเซอร์ผ่านเลนส์และไปตกกระทบกระจก ลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากกระจกจะยิงไปที่บริเวณผงโลหะในกระบะโลหะ เทคนิค DMLS สามารถที่จะขึ้นรูปชิ้นงานที่ละเอียดและบาง ทำให้รูปทรงที่สร้างเสร็จสิ้นมีมิติถูกต้องตรงตามไฟล์ต้นฉบับ มีความละเอียดสูง และมีคุณสมบัติทางกลและความแข็งแรงตามต้องการ อาจกล่าวได้ว่าเครื่องพิมพ์แบบ DMLS นี้ สามารถสร้างชิ้นงานที่สลับซับซ้อนและใช้งานได้จริง เหมาะสำหรับรังสรรค์ต้นแบบรูปทรงที่ละเอียดซับซ้อนแต่ไม่เหมาะกับการสร้างรูปทรงจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม รูปทรงที่สร้างขึ้นจากเครื่องพิมพ์แบบนี้ สามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากชิ้นส่วนนั้นมีรูปทรงเรขาคณิตที่ละเอียดซับซ้อนจนไม่สามารถสร้างได้ด้วยเครื่องพิมพ์ดั้งเดิมซึ่งข้อได้เปรียบของเครื่องพิมพ์เทคนิค DMLS นี้ถูกคิดขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว



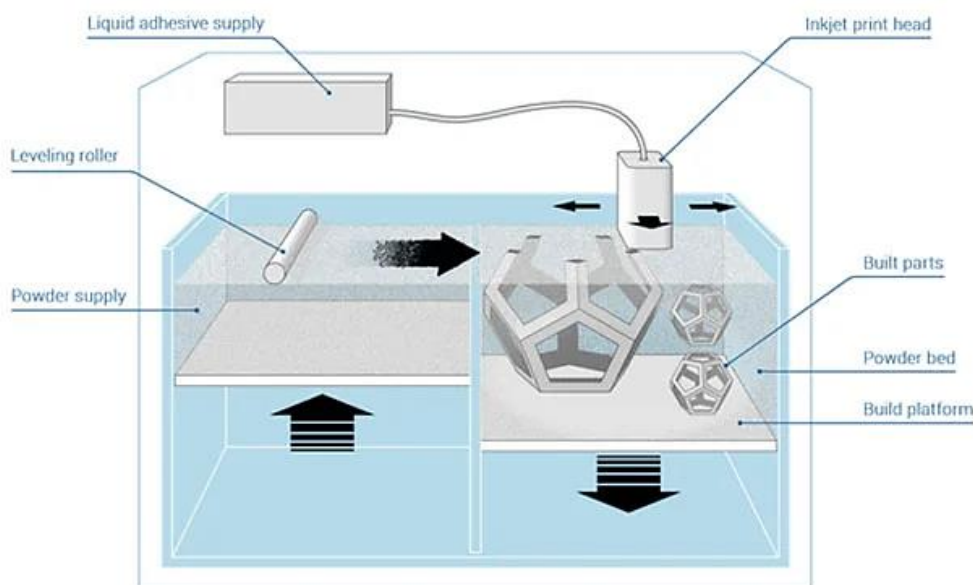
รูปที่ 5.11 ภาพถ่ายแสดงเทคนิคเครื่องพิมพ์แบบ DLMS

(ที่มา <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/direct-metal-laser-sintering>)

### 5.2.8 Binder Jetting (BJ)

ต้นแบบของเครื่องพิมพ์ระบบพ่นกาวบนวัสดุผง (Binder jetting : BJ) เกิดขึ้นจากนักวิจัยในห้องปฏิบัติการของสถาบัน MIT ประเทศอเมริกา ต่อมาบริษัท Z Cooperation นำไปพัฒนาจนเป็นผลิตภัณฑ์ขายได้ ภายหลังจากบริษัท Z Cooperation ได้ถูกซื้อกิจการโดยบริษัทยักษ์ใหญ่ 3D System และพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ขาย ต่อมาบริษัท Exone ได้ใช้รูปแบบแนวคิดของเครื่องพิมพ์แบบ BJ ไปพัฒนาเป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบโลหะ เครื่องพิมพ์แบบ BJ นี้ เป็นเทคโนโลยีกลุ่มที่ใช้กาวยัดวัสดุที่เป็นผงวัสดุเข้าหากัน

รูปที่ 5.12 แสดงองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ BJ คอมพิวเตอร์จะดึงภาพตัดขวางของรูปทรง 3 มิติที่ต้องการสร้างชั้นแรกส่งไปยังเครื่องพิมพ์ เครื่องพิมพ์จะมีถัง 2 ถังและแท่นพิมพ์ ถังแรกจะวางส่วนถังที่ 2 จะใส่ผงวัสดุพิมพ์ (Powder supply) ลูกกลิ้งปรับระดับ (Levelling roller) จะเกลี่ยผงวัสดุบนแท่นพิมพ์และฉีดกาว เครื่องพิมพ์ประกอบด้วยถังใส่กาว (Liquid adhesive supply) ที่จะบรรจุกาวเพื่อประสานผงวัสดุ ขั้นตอนของเครื่องพิมพ์แบบนี้จะเริ่มต้นจากถังใส่ผงวัสดุจะเลื่อนขึ้น จากนั้นลูกกลิ้งปรับระดับจะเกลี่ยผงวัสดุให้ลงไปบนแท่นพิมพ์ (Build platform) ดังรูปที่ 5.12 หัวฉีดหมึกพิมพ์ (Inkjet print head) จะเคลื่อนผ่านผิวหน้าผงไปและฉีดพ่นกาวบนผงวัสดุเฉพาะบริเวณที่ต้องการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตามภาพตัดขวางของรูปทรง กาวนี้จะจับยึดผงวัสดุให้เป็นรูปร่างที่ต้องการโดยเริ่มจากชั้นแรก หลังจากพิมพ์เสร็จในชั้นแรกแล้ว คอมพิวเตอร์ก็จะดึงภาพตัดขวางของชั้นถัดไปส่งเข้าเครื่องพิมพ์ และกระบวนการก็จะวนซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไปจนถึงชั้นสุดท้ายที่จะได้รูปทรง 3 มิติที่ต้องการ เมื่อพิมพ์เสร็จแล้ววัสดุผงที่ไม่ได้ติดกาวจะถูกดูดแยกออก รวมถึงส่วนที่อยู่รอบ ๆ ชิ้นงานก็สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกโดยระบบดูดสูญญากาศจะดูดผงวัสดุที่ไม่ได้พ่นกาวกลับเข้าถังที่เก็บผงวัสดุที่ใช้สร้างรูปทรง



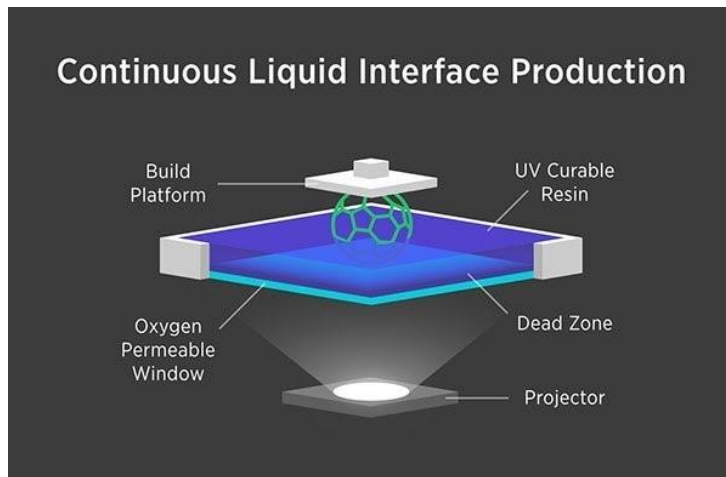
รูปที่ 5.12 ผังภาพแสดงองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์แบบ BJ  
(ที่มา <https://www.3dnatives.com/en/powder-binding100420174/>)

ข้อดีของเครื่องพิมพ์แบบ BJ (ที่มา <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-binder-jetting#Advantages>) คือ สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งหมายถึงความร้อนของบรรยากาศแวดล้อมไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของรูปทรงที่สร้างขึ้น ทำให้แทนพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ที่ใช้เทคนิคนี้จะสามารถสร้างรูปทรงที่มีปริมาตรใหญ่ที่สุด โดยเครื่องพิมพ์ที่ใหญ่ที่สุดของเทคนิคนี้สำหรับสร้างชิ้นงานที่ใช้ผงทรายจะมีขนาดแทนพิมพ์ที่ใหญ่ถึง  $2.20 \times 1.20 \times 0.6$  เมตร ส่วนเครื่องพิมพ์ที่ใช้วัสดุพิมพ์โลหะจะมีแทนพิมพ์ที่เล็กกว่า (ขนาด  $0.8 \times 0.5 \times 0.4$  เมตร) ซึ่งขนาดของเครื่องพิมพ์แบบนี้ก็ยังมีแทนพิมพ์ที่ใหญ่กว่าเทคนิค DMLS/SLM ทำให้เครื่องพิมพ์เทคนิคนี้สามารถพิมพ์รูปทรง 3 มิติหลายชิ้นได้พร้อมกัน เทคนิค BJ นี้ยังมีข้อได้เปรียบคือ ไม่ต้องการโครงสร้างที่มารองรับชิ้นงานระหว่างพิมพ์รูปทรงเพราะจะใช้ผงวัสดุเป็นโครงสร้างที่รองรับชิ้นงาน ทำให้ไม่ต้องการขั้นตอนจัดการหลังพิมพ์รูปทรงเสร็จ ไม่เสียเนื้อที่เพื่อสำรองสำหรับโครงสร้างที่จะรองรับ ซึ่งจะทำให้พื้นที่ของแทนพิมพ์ใหญ่ขึ้น ข้อดีอีกประการของเครื่องพิมพ์แบบ BJ คือ รูปทรงที่เป็นโลหะจะมีผิวของรูปทรงที่ขรุขระน้อยกว่า 4-5 เท่า เมื่อเทียบกับเทคนิค DMLS/SLM ซึ่งมีรัศมีราว 12-16 ไมครอน เครื่องพิมพ์แบบ BJ จะพิมพ์ชิ้นงานได้เร็วกว่าและราคาถูกกว่าเทคนิค AM แบบอื่น ๆ

### 5.2.9 Digital Light Synthesis (DLS)

เครื่องพิมพ์แบบ DLS นี้จะใช้หลักการเดียวกันกับเครื่องพิมพ์แบบ SLA กล่าวคือ จะเทคนิคใช้แสง UV ในการให้ความร้อนเพื่อให้วัสดุแข็งตัว เทคนิค DLS ต่างจาก SLA ตรงที่ในช่วงระหว่างการพิมพ์แต่ละชั้น เทคนิคนี้จะพิมพ์ต่อเนื่อง ไม่หยุดพิมพ์ หมึกเรซินจะไหลลงมาไม่หยุดผ่านชั้นรอยต่อที่เรียกว่า “dead zone” ซึ่งเป็นชั้นรอยต่อบาง ๆ ระหว่างหมึกเรซินที่ยังไม่อุ่นให้ร้อนกับส่วนที่พิมพ์เสร็จสิ้นแล้ว เมื่อลำแสง UV ฉายไปยังบริเวณรอยต่อนี้แล้ว หมึกเรซินส่วนนั้นก็จะร้อนและแข็งตัว ซึ่งในช่วงเวลาเดียวกัน เครื่องพิมพ์ก็ยังคงฉีดหมึกเรซินไปได้ส่วนที่อบด้วยแสง UV แล้ว ทำให้กระบวนการพิมพ์ในชั้นต่อไปต่อเนื่อง ไม่ต้องรอคอยเหมือนเทคนิคการพิมพ์แบบอื่น

กระบวนการพิมพ์จะเริ่มต้นจาก แบบ 3 มิติจะถูกส่งไปที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยในเครื่องพิมพ์จะมีแสง UV ที่ฉายผ่านโปรเจคเตอร์หรือหลอดแสง UV ผ่านเลนส์ชนิดที่ออกซิเจนสามารถซึมผ่านได้ (Oxygen permeable optics) ไปยังชั้นหมึกเรซินทำให้เรซินแข็งตัวเป็นรูปทรงที่ต้องการโดยทำทีละชั้น ชั้นตอนที่ 2 จะเป็นการอบแห้งเพื่อให้รูปทรงมีคุณสมบัติทางกลที่แข็งแรง ชั้นตอนนี้จะใช้กระบวนการ Continuous Liquid Interface Production : CLIP ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากขึ้นรูปทรงซึ่งใช้ปฏิกิริยาทางเคมีและทำให้อุณหภูมิของหมึกเรซินประสานกันดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 กระบวนการ CLIP ในเทคนิคเครื่องพิมพ์แบบ DLS

(ที่มา <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/continuous-liquid-interface-production-3d-printing/>)

### การจัดกลุ่มเทคนิคการพิมพ์

จากประเภทเครื่องพิมพ์ 3 มิติทั้ง 9 ประเภท ที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.2.1-5.2.9 เมื่อวิเคราะห์หลักการทำงานของแต่ละเครื่องพิมพ์ทุกประเภทแล้วจะพบว่า หลักการทำงานของเครื่องพิมพ์ที่ได้อธิบายมาข้างต้นมีลักษณะการทำงานที่ประยุกต์ใช้แนวคิดเทคนิคแบบเดียวกันได้ เช่น เครื่องพิมพ์แบบ SLA, DMLS และ LCD จะเป็นเครื่องพิมพ์ที่ใช้เทคนิคหมึกโพลีเมอร์ เป็นต้น ดังนั้น ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะจัดกลุ่มเทคนิคของเครื่องพิมพ์ทั้ง 9 ประเภท ซึ่งจากข้อมูล สามารถประมวลเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ ดังต่อไปนี้

1. เทคนิคการใช้วัสดุไวแสง เทคนิคนี้จะใช้วัสดุโพลีเมอร์ซึ่งเป็นสารกลุ่มเรซินไวแสงบรรจุในภาชนะ โดยสารโพลีเมอร์จะอยู่ในสภาพของเหลว ภายในเครื่องพิมพ์จะติดตั้งอุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสง เช่น เลเซอร์ อุปกรณ์ควบคุมลำแสง ซึ่งอาจจะเป็น เลนส์ โปรเจคเตอร์ จอ LCD กระจกเลนส์ อุปกรณ์ควบคุมลำแสงจะบังคับทิศทางของแสงที่ถูกยิงจากอุปกรณ์กำเนิดแสงไปยังตำแหน่งที่หมึกโพลีเมอร์ถูกวางในตำแหน่งที่จะเป็นรูปทรงของวัสดุ เมื่อลำแสงที่ยิงไปตกกระทบกับหมึกที่ตำแหน่งดังกล่าว จะทำให้หมึกโพลีเมอร์ที่ตำแหน่งนั้นแข็งและก่อตัวเป็นชั้นของรูปทรงนั้น ๆ เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้เทคนิคนี้ได้แก่ เครื่องพิมพ์แบบ SLA และ Multijet

2. เทคนิคการหลอม เทคนิคนี้จะเป็นการเปลี่ยนอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่จะก่อเป็นรูปทรง (preform) ด้วยความร้อนเพื่อหลอมให้เป็นรูปทรงเดียว ซึ่งเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้เทคนิคนี้จะมีผงวัสดุที่จะใช้ขึ้นรูปในกลุ่มสารเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถทนแรงดึงได้สูง สามารถหลอมเหลวได้ด้วยความร้อนและเมื่อเย็นลงก็จะแข็งตัว ในบางเครื่องพิมพ์จะใช้สารที่มีคุณสมบัติยึดทำหน้าที่เป็นกาวประสานกับวัสดุที่ขึ้นรูป สารเทอร์โมพลาสติกนี้เมื่อขึ้นรูปแข็งตัวแล้ว อาจะนำกลับมารีไซเคิลใหม่ได้หลายครั้ง โดยนำรูปทรงที่ไม่ต้องการ มาบดให้ละเอียดและหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้

3. **เทคนิคซินเทอร์ (Sintering)** เทคนิคนี้จะใช้ปืนเลเซอร์แรงสูงหรือเครื่องยิงลำอิเล็กตรอน (Electron beams) ไปยังวัสดุที่ต้องการสร้างรูปทรงโดยตรง ความร้อนจากลำแสงเลเซอร์หรือจากเครื่องยิงลำอิเล็กตรอนและจะหลอมผงวัสดุนั้นให้ละลายโดยสมบูรณ์และจะได้รูปทรงในแต่ละชั้นตามต้องการ เช่น เทคนิค SLS

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปเทคนิคของเครื่องพิมพ์ทั้ง 9 ประเภทได้ตามตารางที่ 5.1 จากตารางพบว่า มีเครื่องพิมพ์ที่ใช้วัสดุโพลีเมอร์หรือกลุ่มวัสดุไวแสงจำนวน 4 ประเภทได้แก่ เครื่องพิมพ์ SLA, Polyjet, DLP/LCD, และ DLS ส่วนเทคนิคการหลอมจะมีเครื่องพิมพ์ 3 ประเภทได้แก่ เครื่องพิมพ์ FDM/FFF Multi Jet Fusion และ Binder Jetting สำหรับเทคนิคซินเทอร์จะมีเครื่องพิมพ์ 2 ประเภทที่จำหน่ายในท้องตลาดได้แก่ เครื่องพิมพ์แบบ SLS และ DMLS/SLM

ตารางที่ 5.1 เครื่องพิมพ์ 3 มิติที่จำหน่ายในท้องตลาดแยกตามเทคนิค 3 กลุ่ม

เทคนิคการพิมพ์	เครื่องพิมพ์
วัสดุไวแสง	SLA, Polyjet, DLP/LCD, DLS
การหลอม	FDM/FFF, Multi Jet Fusion, Binder Jetting
ซินเทอร์	SLS, DMLS/SLM

### 5.3 ข้อดีข้อเสียและขีดจำกัดของการพิมพ์

การเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และขีดจำกัดของการพิมพ์ 3 มิติ จะเปรียบเทียบใน 3 ประเด็นดังนี้ ประเด็นสมรรถนะด้านเทคนิคของเครื่องพิมพ์ ประเด็นคุณสมบัติของชิ้นงานที่แล้วเสร็จ และประเด็นต้นทุน เครื่องพิมพ์ 3 มิติแต่ละเทคนิคจะมี**ขีดจำกัดในการพิมพ์**แตกต่างกัน ซึ่งคุณสมบัติของการพิมพ์ได้แก่ ความแม่นยำ (Accuracy) ความหลากหลายของรูปแบบพิมพ์ และความเร็วในการพิมพ์ (Speed) จะบ่งชี้ถึงขีดจำกัดของเครื่องพิมพ์นั้น ในการพิจารณาข้อดีและข้อเสีย ยังสามารถวิเคราะห์และประเมินจากคุณสมบัติชิ้นงานที่พิมพ์แล้วเสร็จได้แก่ ขนาดชิ้นงานที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถพิมพ์ได้ ความแข็งแรง และความละเอียดของชิ้นงาน ในประเด็นสุดท้ายคือเรื่องต้นทุนซึ่งจะประกอบด้วยต้นทุนเครื่องพิมพ์และต้นทุนวัสดุพิมพ์

**ความแม่นยำ** ข้อกำหนดของเครื่องพิมพ์ในแต่ละเทคนิคจะทำให้ผู้ใช้สามารถคาดคะเนคุณภาพของผลผลิตรูปทรงที่สร้างจากเครื่องพิมพ์ในเทคนิคนั้น เครื่องพิมพ์สามารถพิมพ์ได้แม่นยำ (Accuracy) และเที่ยงตรง (Precision) ขึ้นกับปัจจัยหลายปัจจัย เทคนิค AM จะเป็นการก่อรูปทรงขึ้นไปทีละชั้น ดังนั้น มีความเป็นไปได้ที่การก่อสร้างชั้นแต่ละชั้นอาจคลาดเคลื่อนจากค่าจริงที่ต้องการออกแบบ นอกจากนี้ ชั้นรูปทรงที่ถูกก่อขึ้นมาในแต่ละชั้นอาจไม่สม่ำเสมอได้ ปัจจัยที่อาจส่งผลต่อความถูกต้องแม่นยำของรูปทรงที่ถูกสร้างขึ้นมีดังนี้

1. กลไกในการก่อรูปทรง เครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF สามารถฉีดพลาสติกในแต่ละชั้นขึ้นไป จะไม่มีกลไกที่ควบคุมให้สามารถสร้างชิ้นงานที่ละเอียดซับซ้อน ซึ่งจะแตกต่างกับเครื่องพิมพ์เทคนิค

อื่น ๆ เช่น SLA หรือ SLS ที่ใช้ลำแสงเลเซอร์ที่ตรงสูงในการอุ่นหรืออบวัสดุพิมพ์ ณ ตำแหน่งที่ต้องการให้เหลว ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีมิติถูกต้องตามไฟล์ดิจิทัลต้นฉบับของรูปทรงที่ต้องการสร้าง

2. วัสดุพิมพ์ ความแม่นยำของเครื่องพิมพ์ขึ้นกับคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของวัสดุพิมพ์ที่ใช้ เช่น หากใช้วัสดุเรซิน ก็จะสามารถสร้างรูปทรง 3 มิติ ขึ้นบาง ๆ ได้

3. ขั้นตอนหลังพิมพ์ (Post processing) เฉพาะอย่างยิ่งเครื่องพิมพ์ที่ต้องอบชิ้นงานเพราะกระบวนการดังกล่าวจะทำให้ขนาดรูปทรงหดเล็กน้อยซึ่งจะเป็นปกติกับกรณีที่ใช้เครื่องพิมพ์แบบ SLA หรือ DLP โดยส่วนใหญ่โปรแกรม CAD จะคำนวณออกแบบของผู้ผลิตได้เผื่อไว้ เพื่อให้รูปทรงที่หลังจากอบแล้วมีมิติที่ถูกต้องแม่นยำตามไฟล์เขียนแบบต้นฉบับของรูปทรงนั้น

ความหลากหลายของรูปแบบพิมพ์ เป็นความสามารถของเครื่องพิมพ์ที่จะสร้างรูปทรงที่มีความซับซ้อนทั้งจากลักษณะรูปทรง ความหลากหลายเนื้อวัสดุที่ใช้พิมพ์และสีของวัสดุพิมพ์ ทำให้สามารถสร้างรูปทรงที่เสมือนจริงได้ ปัจจัยสำคัญคือ กลไกในการพิมพ์ซึ่งเครื่องพิมพ์แบบ SLS และ SLA ใช้แสงเลเซอร์ในการสร้างรูปทรงที่ถูกต้องและแม่นยำได้ดีกว่าเทคนิค FDM/FFF การเลือกใช้เครื่องพิมพ์จะต้องคำนึงถึงการใช้งาน เครื่องพิมพ์ FDM/FF อาจไม่เหมาะสำหรับสร้างรูปทรงสำหรับใช้งานที่นำไปใช้จริงหรืองานที่ต้องการความประณีตละเอียดอ่อน แต่เหมาะสำหรับการสร้างรูปทรงต้นแบบ ในกรณีเครื่องพิมพ์ที่ใช้สำหรับการสร้างวงจรไฟฟ้า ความหลากหลายของรูปแบบพิมพ์จะหมายถึงความหลากหลายของวัสดุพิมพ์ที่เป็นส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้าที่เครื่องพิมพ์นั้นสามารถรองรับได้ วงจรไฟฟ้าประกอบด้วยตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน ดังนั้น ถ้าเครื่องพิมพ์ชนิดใดที่รองรับวัสดุพิมพ์ทั้ง 3 ชนิดในเครื่องเดียวกันได้ เครื่องพิมพ์นั้นก็เหมาะสมมากกว่าเครื่องพิมพ์อื่นที่รองรับวัสดุพิมพ์ได้น้อยชนิดกว่า

ความเร็วในการพิมพ์ หมายถึง ระยะเวลาการพิมพ์ที่เครื่องพิมพ์จะพิมพ์ภายในเวลา 1 วินาที ความเร็วของเครื่องพิมพ์มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อวินาที เครื่องพิมพ์ที่มีความเร็วในการพิมพ์สูงจะพิมพ์มีค่าระยะเวลาการพิมพ์นี้สูงกว่า

ในการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียและขีดจำกัดนี้ ผู้วิจัยจะเลือกเครื่องพิมพ์ในข้อที่เป็นตัวแทนของเทคนิคการพิมพ์ได้แก่ FDM/FFF สำหรับเทคนิคซินเทอร์ SLS สำหรับเทคนิคการหลอม และ SLA สำหรับเทคนิควัสดุไวแสง ตารางที่ 5.2 ได้สรุปเปรียบเทียบข้อมูลของแต่ละเทคนิค ซึ่งมาจากการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ที่เผยแพร่บนเว็บไซต์และจากรายงานเอกสารของต่างประเทศ ข้อมูลสามารถประมวลได้ดังนี้

- ด้านสมรรถนะของเครื่องพิมพ์ทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ ความแม่นยำ ความเร็ว และความหลากหลาย เครื่องพิมพ์ FDM/FFF และ SLA เป็นเครื่องพิมพ์ที่มีระดับความแม่นยำเท่ากันและดีกว่าเครื่องพิมพ์แบบ SLS สำหรับความเร็วการพิมพ์ พบว่าเครื่องพิมพ์ SLA มีความเร็วสูงกว่าเครื่องพิมพ์ FDM/FFF และเครื่องพิมพ์ SLS หลายเท่า แต่เครื่องพิมพ์ SLS เป็นเครื่องพิมพ์ที่สามารถรองรับวัสดุพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ได้หลายชนิดกว่าเครื่องพิมพ์แบบ SLA ซึ่งจะพิมพ์ได้เฉพาะวัสดุที่เป็นฉนวน และ FDM/FFF ซึ่งพิมพ์ฉนวนและฉนวนที่ฉนวนตัวนำ

- ด้านคุณภาพชิ้นงาน ได้แก่ ลักษณะการใช้งาน ความละเอียดของชิ้นงาน และขนาดรูปทรงที่ใหญ่ที่สุดที่เครื่องพิมพ์สามารถสร้างได้ เครื่องพิมพ์ FDM/FFF มีความเหมาะสมสำหรับการทำชิ้นงานต้นแบบเนื่องจากวัสดุพิมพ์ที่เป็นเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ทำให้พลาสติกละลายได้ ส่วนรูปทรงที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์ SLA และ SLS สามารถนำมาใช้งานได้จริงเพราะวัสดุพิมพ์แข็งแรงและทนความร้อนได้สูง สำหรับความละเอียดของชิ้นงาน เครื่องพิมพ์แบบ SLA ให้ความละเอียดในระดับ 10 ไมครอน ดังนั้นจึงสามารถผลิตรูปทรงที่มีความประณีต ผิวเรียบ เสมือนต้นแบบจริง ส่วนเครื่องพิมพ์แบบ SLS และ FDM/FFF จะเป็นเครื่องพิมพ์ที่ผลิตรูปทรงที่ละเอียดได้ใกล้เคียงกัน ความสามารถของเครื่องพิมพ์ที่สำคัญอีกประการคือความสามารถในการสร้างรูปทรงขนาดใหญ่หรือผลิตรูปทรงได้ครั้งละหลายชิ้น เครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF มีขนาดแท่นพิมพ์ที่ใหญ่ที่สุด รองลงมาคือเครื่องพิมพ์แบบ SLA และ SLS ตามลำดับ

- ต้นทุนในการลงทุนเครื่องพิมพ์ซึ่งจะมีต้นทุนคงที่จากค่าเครื่องพิมพ์และต้นทุนผันแปร ซึ่งมีค่าใช้จ่ายจากวัสดุพิมพ์และค่าไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ค่าวัสดุพิมพ์จะเป็นต้นทุนผันแปรที่จะนำมาเปรียบเทียบในการศึกษาครั้งนี้ จากผลการศึกษาพบว่า เครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF ราคาจะถูกที่สุด ส่วนเครื่องพิมพ์แบบ SLS จะแพงที่สุด ส่วนวัสดุพิมพ์ของเครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF จะถูกที่สุด รองลงมาจะเป็นวัสดุพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ SLS และวัสดุพิมพ์ที่แพงที่สุดคือวัสดุพิมพ์ของเครื่องพิมพ์แบบ SLA

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และขีดจำกัดของเครื่องพิมพ์ใน 3 เทคนิค ได้แก่ SLA, FDM/FFF และ SLS

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

<sup>a</sup> ที่มา <https://www.cmac.com.au/blog/3d-printing-methods-side-by-side-comparison-sls-vs-fdm-sla-vs-dlp>

<sup>b</sup> ที่มา <https://monroeengineering.com/blog/3d-printing-speed-how-it-affects-build-time/>

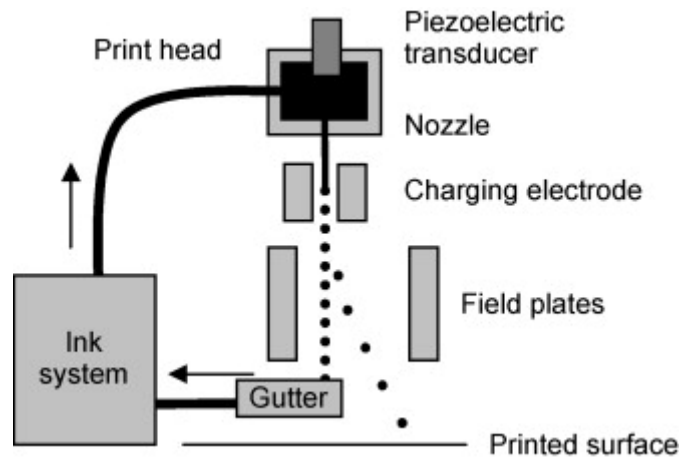
<sup>c</sup> ที่มา <https://www.3dprintingmedia.network/quick-guide-dimensional-accuracy-3d-printing/>

#### 5.4 ความเป็นไปได้ในการสร้างวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ

วงจรไฟฟ้าประกอบด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า 3 ประเภทได้แก่ ตัวนำ (Conductor) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และฉนวน (Insulator) ในทางปฏิบัติเทคนิคการพิมพ์ทั้ง 3 เทคนิคที่กล่าวมาสามารถนำมาสร้างวงจรไฟฟ้าได้ ซึ่งวัสดุพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติจะต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการ เช่น ตัวนำ สารกึ่งตัวนำ เป็นต้น ถ้าต้องการสร้างวงจรไฟฟ้าแบบพาสซีฟด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ วัสดุพิมพ์นั้นจะต้องมีสมบัติทางไฟฟ้าอย่างน้อยครบทั้ง 2 ประเภท คือ ตัวนำและฉนวน สำหรับการสร้างวงจรไฟฟ้าแบบแอคทีฟ เครื่องพิมพ์นั้นจะต้องสามารถพิมพ์รูปทรงให้มีสมบัติทางไฟฟ้า 3 ประเภท คือ ตัวนำ สารกึ่งตัวนำ และฉนวน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเครื่องพิมพ์บางประเภทที่ราคาไม่แพงจะไม่รองรับวัสดุพิมพ์ที่มีสมบัติทางไฟฟ้าเพียงประเภทเดียว เช่น เครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF ที่วัสดุพิมพ์ส่วนใหญ่เป็นเทอร์โมพลาสติก ดังนั้นเครื่องพิมพ์ 3 มิติประเภทนั้นจะไม่สามารถสร้างวงจรไฟฟ้าได้เลย เว้นแต่จะมีกระบวนการพิเศษหลังจากพิมพ์เสร็จแล้ว เช่น การชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ในส่วนที่ต้องการให้เกิดบริเวณที่เป็นตัวนำโลหะ

ในช่วงแรก การพิมพ์วงจรไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยี AM มีอุปสรรคในด้านวัสดุพิมพ์ที่มีคุณสมบัติไม่หลากหลายและมีเฉพาะสมบัติที่เป็นฉนวน ดังนั้น การใช้เทคโนโลยี AM ในช่วงแรกเป็นการทำเข้าแบบสำหรับผลิตและใช้การผลิตแบบ SM มาผลิตวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการ ต่อมาได้มีการพัฒนาเครื่องพิมพ์ที่ใช้เทคโนโลยี AM ประเภท SLA และ FDM/FFF ซึ่งจะทำงานร่วมกับแขนหุ่นยนต์และการถนอมตัวนำโลหะ ทำให้เราสามารถพิมพ์วัสดุไดอิเล็กทริกในรูปทรงที่ต้องการและฉีดยาโลหะตัวนำหรือเชื่อมต่อกับสายไฟเล็ก ๆ ด้วยการพิมพ์แถบตัวนำในส่วนที่ต้องการได้เพื่อเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ และเมื่อแทรกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์วงจรรวม เซนเซอร์ สายอากาศ และแบตเตอรี่ ก็จะได้วงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 มิติที่ทำงานได้จริง

ความพยายามแก้ปัญหาจากข้อจำกัดของเครื่องพิมพ์ที่ต้องใช้วัสดุพิมพ์เฉพาะที่มีในท้องตลาด ทำให้มีผู้คิดค้นวิธีในการแก้ปัญหาโดยออกแบบเทคโนโลยีการผลิตแบบ AM ที่มีอยู่เดิมให้มีความสามารถในการทำงานควบคู่กับเทคโนโลยีอื่น ๆ ที่เช่น การนำเครื่องพิมพ์เทคนิค SLA ที่แม่นยำสูงร่วมกับเทคนิค Direct Write (ตามรูปที่ 5.14 ) ซึ่งจะสามารถวาดเส้นโลหะหมึกที่ทำด้วยโลหะเงินได้ นอกจากนี้ ยังมีการนำเทคนิคการพิมพ์แบบ FDM มาทำงานควบคู่กับเทคนิค Laser Direct Write (LDW) ซึ่งจะใช้ลำแสงเลเซอร์ในการเซาะวัสดุออกรวมถึงการฉีดยาตัวนำไปบนฐานรองวัสดุ ซึ่งแนวทางการผสมเทคโนโลยี AM กับเทคโนโลยีอื่น ๆ เป็นแนวทางที่สามารถสร้างต้นแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 มิติได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ผู้ออกแบบต้องการโปรแกรมช่วยออกแบบ CAD ที่สามารถจำลองการทำงาน วาดลายพิมพ์วงจรแบบ 3 มิติ และสร้างไฟล์ดิจิทัลที่สามารถส่งไปเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้



รูปที่ 5.14 เทคโนโลยี Direct Write

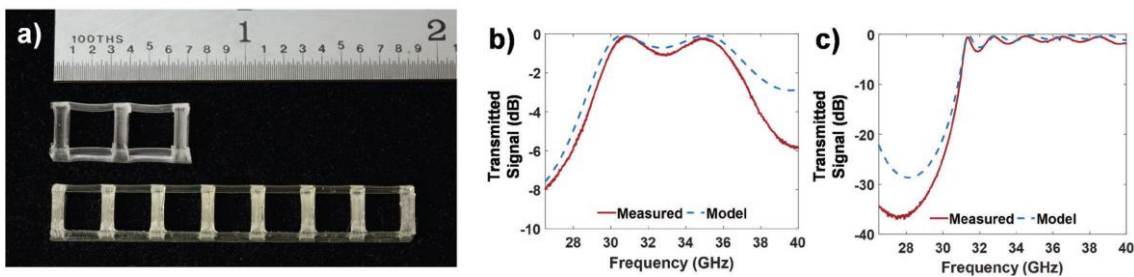
มีนักวิจัยหลายรายนำเครื่องพิมพ์ 3 มิติมาผลิตวงจรไฟฟ้าสื่อสารย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยส่วนใหญ่จะใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติมาสร้างวงจรแบบพาสซีฟเพราะต้องการหมึกพิมพ์ 2 ประเภท คือ ตัวนำและฉนวน ซึ่งความรุดหน้าของนาโนเทคโนโลยีทำให้สามารถผลิตหมึกตัวนำที่ราคาถูกลงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้ ซึ่งในช่วงเริ่มต้นนักวิจัยได้ประยุกต์เอาหมึกพิมพ์ตัวนำมาสร้างวงจรบนแผ่นพิมพ์ และต่อมาก็ได้ต่อยอดโดยเอาเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติที่เหมาะสมนำมาสร้างเป็นวงจรไฟฟ้าแบบพาสซีฟความถี่ไมโครเวฟที่มีรูปทรง 3 มิติ เช่น สายอากาศ ซึ่งบริษัทที่ผลิตหมึกพิมพ์ที่เป็นตัวนำจำหน่ายในช่วงแรกได้แก่บริษัท IIMAK ได้ผลิตหมึกออกมาหลายรุ่นซึ่งมีคุณลักษณะแตกต่างกัน ทั้งขนาดอนุภาค ความต้านทานไฟฟ้า และความหนืด ต่อมาเมื่อผู้นำเสนอการดัดแปลงเทคนิคเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ FDM/FFF ซึ่งมีราคาถูกให้สามารถพิมพ์หมึกตัวนำและชั้นฉนวนโพลีเมอร์ได้ มีการนำเสนอความเป็นไปได้ของการนำเทคนิคนี้มาสร้างสายอากาศไดโพลขนาดเล็กบนวัสดุฐานรอง PLA (PolyLactic Acid) ซึ่งจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 270 องศาเซลเซียส

### วัสดุพิมพ์สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์

#### (1) ฉนวน

กลุ่มวัสดุพิมพ์ Methacrylate Photopolymer Resin วัสดุ PLA หรือเทอร์โมพลาสติกพวก ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) ที่นิยมใช้กันทั่วไปในเครื่องพิมพ์ FDM/FFF และ SLA นี้ มีคุณสมบัติแข็งและเหนียวพอที่จะทำฐานรอง (Substrate) ในแผ่นพิมพ์วงจร (Printed Circuit Board : PCB) ได้อย่างไรก็ดี หากต้องการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูงที่ใช้โครงสร้างแบบสายส่ง (Transmission line) ซึ่งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแพร่กระจายอยู่ในฉนวนที่เป็นฐานรองต้องการฉนวนที่สูญเสียต่ำ เนื่องจากวัสดุพิมพ์เหล่านี้มีค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (loss tangent) ค่อนข้างสูง ตามข้อมูลรายงานค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon'$ ) และค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ( $\tan \delta$ ) ของวัสดุพิมพ์ 3D ในตารางที่ 5.3 วัสดุพิมพ์ 3D ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกว่าคือ วัสดุพิมพ์โพลีเมอร์พลาสติกชื่อ Rexolite ที่มีค่าการสูญเสียแทนเจนต์ต่ำมากดังตารางที่ 5.3 และมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เกือบจะคงที่ตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่ 500 GHz ทำให้วัสดุโพลีเมอร์พลาสติก Rexolite นี้เหมาะสมและเป็นไปได้สำหรับการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในช่วงความถี่

ไมโครเวฟไปจนถึงเทราเฮิร์ตซ์ และนอกจากวัสดุพิมพ์ชนิดนี้แล้ว ยังมีผู้นำเสนอวัสดุพิมพ์อื่น ๆ ที่มีความเหมาะสมและทำงานในย่านความถี่มิลลิเมตรเวฟซึ่งเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในเทคโนโลยี 5G โดยในปี 2016 มีการนำเสนอหมึกพิมพ์ที่ทำจากวัสดุโพลีเมอร์ที่นิยมใช้ในเทคโนโลยีพิมพ์ 3D ได้แก่ polystyrene-block-polybutadiene-block-polystyrene (SBS), polystyrene-block-polyethylene-ran-polybutaline-block-polystyrene (SEBS), และ polystyrene-block-polyisoprene-block-polystyrene (SIS) (Michel Lis, et. al., Polymer Dielectrics for 3D-Printed RF Devices in the Ka Band, Adv. Mater. Technol. 2016, 1600027, pp. 1-6) ซึ่งผลพบว่าวัสดุพิมพ์ที่ดัดแปลงมาจาก SEBS มีคุณสมบัติที่สามารถแทนวัสดุ Rexolite ได้โดยมีค่าการสูญเสียแทนเจนต์เท่ากับร้อยละ 86 ของค่าแทนเจนต์ของวัสดุ Rexolite ดังตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.15 ชิ้นส่วนวงจรกรองท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมย่าน Ka แบบ 3 และ 8 ส่วน พิมพ์ด้วยวัสดุพิมพ์ SEBs และ X-SBS a) ภาพถ่ายชิ้นส่วนวงจรกรอง 3 ส่วนและ 8 ส่วน b) ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรอง 3 ส่วน และ c) ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรอง 8 ส่วน

จากรายงานวิจัย พบว่าได้มีการออกแบบและสร้างวงจรกรองที่ใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หมึกพิมพ์ที่ใช้ในการสร้างวงจรจะมี 2 แบบซึ่งเป็นกลุ่มพวาทอโรโพลัสติกคือ SEBs และ cross-linked SBS (X-SBS) ในงานวิจัยได้ใช้เครื่องพิมพ์มาขึ้นรูปทรงที่จะบรรจุภายในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมสำหรับออกแบบวงจรกรองแถบผ่าน 2 ตัวแบบ 3 ส่วนและ 8 ส่วน ที่แถบความถี่ Ka ดังรูปที่ 4.15 ความถี่ตอบสนองความถี่ของวงจรกรองแถบผ่านที่ได้เป็นดังรูปที่ 5.15 วงจรกรอง 3 ส่วนออกแบบมาให้กรองสัญญาณช่วงแถบความถี่ 30-36 GHz ซึ่งสร้างจากวัสดุ SEBs ส่วนวงจรกรอง 8 ส่วนจะพิมพ์ด้วยวัสดุพิมพ์ X-SBS ซึ่งจะนำไปออกแบบวงจรกรองสูงผ่าน (High-pass filter) ซึ่งสามารถกำจัดแถบความถี่ต่ำที่ไม่ต้องการได้อย่างน้อย 36 เดซิเบล

นอกจากจะมีการนำเสนอการใช้หมึกพิมพ์กลุ่มนี้มาสร้างวงจรกรองความถี่ Ka แล้ว ยังมีการนำหมึกพิมพ์ X-SBS สร้างเป็นสายอากาศแบบเลนส์ (Lens antenna) ทำงานความถี่ 30 GHz โดยสร้างด้วยเครื่องพิมพ์แบบ SLA ของ Envisiontec Aureus ผลการวัดสายอากาศที่สร้างจากเทคนิคนี้จะให้อัตราขยายสูงเกือบ 9 dBi และมีความกว้างลำปริมประมาณ 30 องศา และมีนั้บเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง -41 องศาจากทิศที่ให้อัตราขยายสูงสุด ผลการวัดนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้หมึกพิมพ์ X-SBS มาสังเคราะห์เป็นสายอากาศที่ความถี่ 30 GHz ได้

ตารางที่ 5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุพิมพ์ 3D แบบ FDM/FFF และ SLA จากผลโปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ความถี่ 300 MHz (ที่มา : B. Behzadnezhad, et. al. Dielectric Properties of 3D-Printed Materials for Anatomy Specific 3D-Printed MRI coils, J Magn Reson. 2018 Apr; 289: 113–121, <https://www.polymerplastics.com/rexolite-high-performance-plastic.shtml>)

วัสดุพิมพ์	$\epsilon'$	$\tan \delta$
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

## (2) ตัวนำ

การผลิตวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซนเซอร์ อิเล็กทรอนิกส์ ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติจำเป็นต้องใช้วัสดุพิมพ์ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำ ซึ่งวัสดุพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่มีสมบัติเป็นตัวนำทางไฟฟ้ามีทั้งวัสดุที่เป็นโลหะคาร์บอน หรือวัสดุโพลิเมอร์ผสม (Polymer Composites) ในส่วนของวัสดุประเภทสุดท้ายนั้น จะใช้เทคนิคการทำให้โพลิเมอร์มีสมบัติเป็นตัวนำทางไฟฟ้าโดยการปลูกคาร์บอน (Doping) ที่มีค่าความนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันในชั้นโพลิเมอร์ (Polymer matrices) ทำให้วัสดุโพลิเมอร์ผสมนี้มีสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

วัสดุพิมพ์ 3 มิติที่เป็นโลหะมีค่าความนำไฟฟ้าที่ดี อย่างไรก็ตามมีราคาแพงและเป็นสนิมง่ายทำให้สมบัตินำไฟฟ้าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพิมพ์คาร์บอนที่นำไฟฟ้าได้ดีและสมบัติทางไฟฟ้าไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยภายนอก ด้วยรูปแบบการจัดเรียงอะตอมของคาร์บอนทำให้คาร์บอนเป็นวัสดุที่แข็งแรง นำไฟฟ้าได้ดี มีเสถียรภาพสูงในทางเคมี ความหนาแน่นต่ำทำให้น้ำหนักเบา และเพราะว่ามีสมบัติที่นำไฟฟ้าได้ดีเยี่ยมนี้เอง ทำให้มีการนำคาร์บอนบริสุทธิ์มาทำเป็นวัสดุพิมพ์และทำเป็นโพลิเมอร์ผสมที่ใช้พิมพ์รูปทรง 3 มิติ วัสดุคาร์บอนที่นำมาใช้ในการทำรูปทรง 3 มิติได้แก่

- Carbon Black (CB) มีน้ำหนักเบา ราคาถูก และนำไฟฟ้าได้ดี
- Carbon Fiber (CF) เป็นโครงสร้างเส้นใยที่ประกอบด้วยหน่วยคาร์บอนเล็ก ๆ โครงสร้างโมเลกุลของสาร CF จะก้ำกึ่งระหว่างกราไฟต์และเพชร CF มีน้ำหนักเบา นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี แข็งแรงทนต่อแรงดึงสูง และนิยมนำมาผสมกับโพลิเมอร์เพื่อทำให้โพลิเมอร์นำไฟฟ้าได้
- Carbon Nanotubes (CN) เป็นสสารที่มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกกึ่งกลางที่ผนังของทรงกระบอกเป็นโครงสร้างตาข่ายที่ถักทอด้วยโมเลกุลคาร์บอน

- กราฟีน (Graphene) เป็นโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุกราฟไฟต์อื่นๆ กราฟีนมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เยี่ยมยอด มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้า 100 เท่า และสามารถพาประจุไฟฟ้าได้ดีกว่าเวเฟอร์สารกึ่งตัวนำมากกว่า 10 เท่า นอกจากนี้ กราฟีนมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กที่อุณหภูมิห้อง และแสดงคุณสมบัติของ Quantum Hall effect ที่อุณหภูมิห้องได้อีกด้วย

### 5.5 ปัจจัยสำคัญของเทคนิคต่อการพิมพ์วงจรรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง

มีการนำเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติหรือ AM มาใช้ประยุกต์ในสาขาความถี่วิทยุไปจนถึงการพัฒนาอุปกรณ์ที่ทันสมัยที่ความถี่ไมโครเวฟและมิลลิเมตรเวฟ ซึ่งหลายๆ วงจรและระบบที่ออกแบบครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 2-3 GHz ไปจนถึงความถี่หลายร้อยกิกะเฮิรตซ์ อุปกรณ์ที่ออกแบบและถูกสร้างมาเหล่านี้ได้ถูกนำเสนอให้ใช้งานกับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายความเร็วสูงระดับกิกะบิตต่อวินาที (Gigabit wireless local network) เซนเซอร์แบบสวมใส่ (Wearable sensor) ระบบหลีกเลี่ยงการชนกันในรถยนต์ ระบบสร้างรูปภาพความละเอียดสูง (High-resolution imaging system) การสื่อสารดาวเทียม และอุปกรณ์ RF MEMs (Radio-Frequency Micro-Electromechanical System) จากข้อมูลพบว่า มีนักวิทยาศาสตร์นำเทคนิค AM ทั้ง 3 เทคนิคมาใช้ในการสร้างวงจรรความถี่สูง เฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานในระบบสื่อสารดาวเทียม ซึ่งมีการนำเทคโนโลยีการผลิต AM มาใช้สร้างอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมอวกาศหลายกรณี

ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการใช้เทคโนโลยีการผลิต AM เพื่อสร้างวงจรรไฟฟ้าที่ทำงานเฉพาะอย่างยิ่งจนถึงความถี่มิลลิเมตรเวฟ ข้อสำคัญที่ควรพิจารณาคือความแม่นยำของของเทคนิคการพิมพ์เพราะขนาดของวงจรรจะแปรผันกับความถี่หรือแปรผันตามความยาวคลื่น นั่นคือ ความถี่ยิ่งสูง วงจรรจะยิ่งมีขนาดเล็ก ดังนั้น เทคโนโลยีการผลิตจะต้องแม่นยำ เพียงตรงสูงและคลาดเคลื่อนน้อย วงจรรที่ผลิตจะต้องมีมิติตรงตามที่ต้องการออกแบบ ประเด็นอีกประเด็นในเทคโนโลยีการผลิตที่จะต้องคำนึงถึงคือความขรุขระของผิวรูปทรง (Surface roughness) หลังจากสร้างเสร็จแล้ว เพราะความขรุขระบนผิวดำนำย่อมส่งผลกระทบต่อการสูญเสียภายในวงจรรนั้น เฉพาะอย่างยิ่งวงจรรที่ทำงานความถี่สูงระดับไมโครเวฟ มิลลิเมตรเวฟ หรือเทราเฮิรตซ์ขึ้นไป จะยังต้องการเทคโนโลยีการผลิตที่ให้ผิวของรูปทรงที่ราบเรียบ หรือในกรณีที่เป็นวงจรรบนแผ่นพิมพ์ PCB เทคโนโลยีที่พิมพ์ตัวนำบนวงจรรจะต้องทำให้ผิวของแผ่นตัวนำราบเรียบเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียเนื่องจากการนำไฟฟ้า ทั้งนี้ ความขรุขระของผิวรูปทรงหากมีขนาดที่อยู่ในระดับเดียวกับความลึกเชิงผิว (Skin depth) แล้ว จะทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ ค่าความลึกเชิงผิว ( $\delta$ ) ที่ความถี่  $f$  คำนวณจาก

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}}$$

เมื่อ  $\rho$  แทนค่าความต้านทาน (resistivity) ของวัสดุพิมพ์ที่เป็นตัวนำ และ  $\mu$  แทนค่าความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุพิมพ์นั้น จะเห็นว่า ยิ่งความถี่สูงมากเท่าไร ค่าความลึกเชิงผิวจะยิ่งน้อย ๆ เช่น กรณีเครื่องพิมพ์ด้วยวัสดุพิมพ์ทองแดงซึ่งมีค่าความต้านทานเท่ากับ  $1.68 \times 10^{-8}$   $\Omega \cdot m$  ค่าความลึกเชิงผิวที่ความถี่ 1, 10 และ 100 GHz เท่ากับ 2.06, 0.65 และ 0.20 ไมโครเมตร ตามลำดับ แต่ถ้าใช้วัสดุพิมพ์ผสมเช่นทองแดง

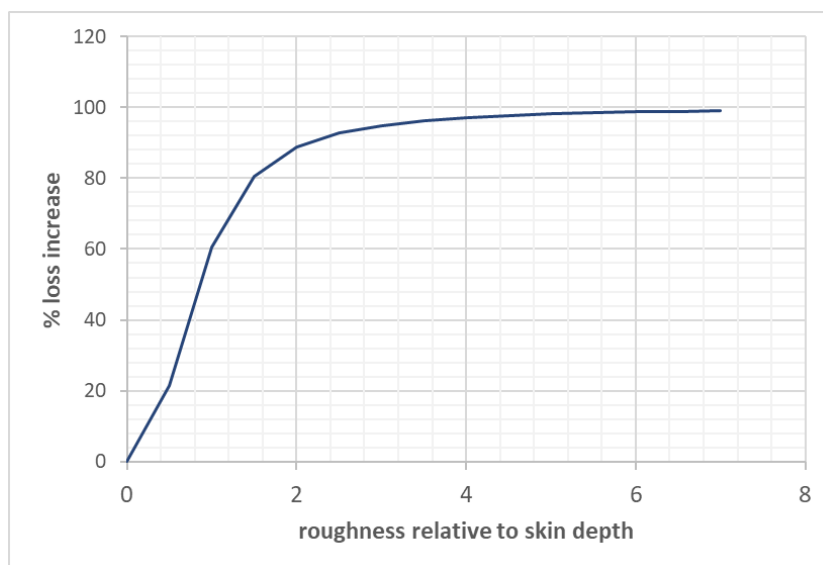
กับโพลีเมอร์โดยมีทองแดงประมาณร้อยละ 80 ค่าความลึกเชิงผิวที่ขีดความถี่เดียวกันจะเป็น 18.45, 5.83 และ 1.85 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบแล้วจะมีค่าน้อยกว่าวัสดุพิมพ์ที่เป็นทองแดงบริสุทธิ์

ความลึกเชิงผิวส่งผลต่อการสูญเสียทางไฟฟ้าซึ่งสามารถอธิบายได้ในพจน์ของค่าคงตัว ( $\alpha$ ) ที่เป็นส่วนเพิ่มของค่าการลดทอนที่เกิดจากการแพร่กระจายคลื่น ดังสมการ

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

เมื่อ  $\Delta$  แทนค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square) ของค่าความขรุขระผิวตัวนำโลหะ ซึ่งจากสมการข้างต้นพบว่า  $\left[ \frac{\Delta}{\delta} \right]$  อยู่ในช่วง  $(0, \infty)$  ทำให้ค่า  $\tan^{-1} \left( 1.4 \left[ \frac{\Delta}{\delta} \right]^2 \right)$  จะมีค่าอยู่ในช่วง  $(0, +\frac{\pi}{2})$  ดังนั้น  $\alpha$  จะมีค่าตกอยู่ในช่วง  $(1, 2)$  ดังนั้น ค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความขรุขระบนพื้นผิวของตัวนำจะมากที่สุดไม่เกิน 2 เท่าของค่าการสูญเสียของกรณีที่พื้นผิวตัวนำราบเรียบ หรือคิดเป็น 200% ของค่าการสูญเสียเดิมในกรณีที่ผิวตัวนำราบเรียบ

รูปที่ 4.16 แสดงค่าคงตัวการลดทอนที่เพิ่มขึ้น (คิดเป็นร้อยละ) ซึ่งพล็อตอยู่ในแนวแกนตั้ง กับค่าความขรุขระของผิวตัวนำซึ่งคิดในอัตราส่วนที่เป็นจำนวนเท่ากับค่าความลึกเชิงผิว  $\left[ \frac{\Delta}{\delta} \right]$  จากกราฟพบว่าหากผิวของรูปทรงไม่ขรุขระเลยหรือ  $\left[ \frac{\Delta}{\delta} \right] = 0$  ค่าคงตัวการลดทอนจะไม่เพิ่มขึ้น เมื่อความขรุขระเพิ่มขึ้น ค่าการลดทอนจะเริ่มเพิ่มขึ้น กรณีความขรุขระของผิวรูปทรงเพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่าความลึกผิว หรือ  $\left[ \frac{\Delta}{\delta} \right] = 1$  ค่าการลดทอนจะเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 61 และหากความขรุขระของผิวรูปทรงเพิ่มขึ้นจนเป็น 2 เท่าของความลึกผิวแล้ว หรือ  $\left[ \frac{\Delta}{\delta} \right] = 2$  ค่าการลดทอนจะเพิ่มขึ้นจากเดิมถึงร้อยละ 89 จากกราฟยังพบอีกว่า ค่าการลดทอนจะเพิ่มขึ้นไม่เกิน 1 เท่าของค่าการลดทอนเดิม

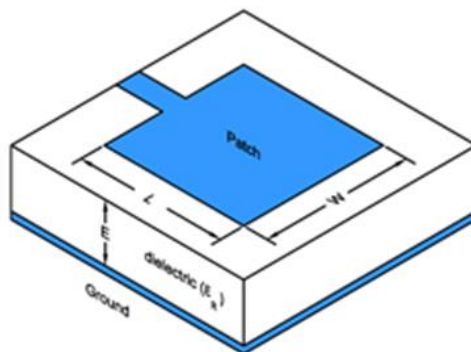


รูปที่ 5.16 กราฟแสดงร้อยละของการสูญเสียทางไฟฟ้าส่วนเพิ่มกับระดับความขรุขระที่เป็นจำนวนเท่าของค่าความลึกผิว

## 5.6 ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้

จากหัวข้อข้างต้น การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการนำเทคโนโลยีการผลิตแบบ AM มาใช้ในการผลิตวงจรความถี่สูง จึงต้องพิจารณาความละเอียดในการสร้างรูปทรงและความราบเรียบของผิวรูปทรงที่เทคนิคการพิมพ์ทั้ง 3 เทคนิคสามารถให้ได้ ในการวิเคราะห์จะนำมิติของรูปทรงที่ความถี่ต่าง ๆ ซึ่งจะขึ้นกับความยาวคลื่นของความถี่นั้น ๆ มาคำนวณ เพื่อให้ง่ายสำหรับวิเคราะห์และเปรียบเทียบเทคนิคแต่ละเทคนิค ในงานการศึกษาค้างนี้ จะเลือกมิติความยาวของสายอากาศแพทช์ (Microstrip patch antenna) ดังรูปที่ 5.17 และใช้สูตรคำนวณมิติของสายอากาศจากเว็บไซต์ <https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip-ant.aspx> เนื่องจากสายอากาศแพทช์จะมีความยาวที่น้อยกว่าความกว้าง ในส่วนของสายส่งที่เป็นวงจรป้อนสัญญาณ (Feed) ให้กับสายอากาศแพทช์ จะพิจารณาเฉพาะความกว้างของสายส่งซึ่งจะคำนวณจากเว็บไซต์ <https://www.emtalk.com/mscalc.php> ซึ่งในรายงานการศึกษานี้จะเลือกสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์ 70.7 โอห์มเพราะเป็นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic impedance) ของสายส่งที่ใช้ในการสร้างวงจรแบ่งกำลังงาน (Power divider)

เนื่องจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณทั้งสายอากาศแพทช์และสายส่งจะแม่นยำในช่วงความถี่ที่อยู่ในช่วงความถี่มิลลิเมตรเวฟ ดังนั้น ในการวิเคราะห์ค่าจะเลือกความถี่ที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ที่ 40 GHz สมมติใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Dielectric constant) เท่ากับ 2.5 และกำหนดให้ใช้ฐานรองวัสดุสูง 0.5 มิลลิเมตร ดังนั้น กำหนดความถี่ที่สนใจ 2 ค่า คือ ความถี่ 4 GHz และ 40 GHz ผลลัพธ์ของการคำนวณความยาวของสายอากาศแพทช์และความกว้างของสายส่ง 70.7 โอห์ม ปรากฏในตารางที่ 5.4 จากข้อมูลในตารางพบว่า มิติที่เล็กที่สุดที่จะพิมพ์ขึ้นงานได้คือ 0.80 มม. หรือ 800 ไมโครเมตร สำหรับการกำหนดความขรุขระของผิวตัวนำจะใช้กราฟในรูปที่ 5.15 เป็นเกณฑ์ในการกำหนด โดยจะยอมให้ค่าการลดทอนที่จะเพิ่มขึ้นจากเดิมไม่เกินร้อยละ 89 ดังนั้น ผิวรูปทรงควรมีความขรุขระที่น้อยกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของความลึกผิวที่ความถี่นั้นซึ่งที่ความถี่ 4 และ 40 GHz จะเท่ากับ 2.06 และ 0.66 ไมโครเมตร



รูปที่ 5.17 สายอากาศแพทช์และม้วงจรป้อนไมโครสตริปเพื่อเชื่อมต่อเป็นอินพุต

ตารางที่ 5.4 มิติของวงจรถ้าสำหรับการศึกษาความเป็นไปได้

ความถี่	วงจรถ้า	มิติ	ค่า (มม.)	ความขรุขระ (ไมครอน)
4 GHz	สายอากาศแพทช์	ความยาว	23.52	2.06
	วงจรถ้าไมโครสตริป	ความกว้าง	0.80	
40 GHz	สายอากาศแพทช์	ความยาว	2.05	0.66
	วงจรถ้าไมโครสตริป	ความกว้าง	0.80	

สำหรับข้อจำกัดของเทคนิคการพิมพ์ทั้ง 3 เทคนิคซึ่งประกอบด้วย ความแม่นยำและความราบเรียบของผิวชิ้นงานจะสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.5 ข้อมูลในคอลัมน์ความแม่นยำจะอ้างอิงข้อมูลที่ปรากฏในตารางที่ 5.5 ซึ่งจะคำนวณจากข้อมูลตั้งต้นที่เป็นความละเอียดของเทคนิคการพิมพ์และร้อยละความคลาดเคลื่อน จากตารางพบว่า เทคนิคการผลิตแบบ SLA จะสามารถสร้างวงจรถ้าที่มีมิติตามต้องการได้อย่างแม่นยำ กรณีศึกษาที่ใช้สายส่งขนาดความกว้าง 800 ไมโครเมตร (0.80 มิลลิเมตร) ซึ่งเป็นสายส่ง 70.7 โอห์ม เครื่องพิมพ์ที่ใช้เทคนิค SLA จะสามารถสร้างสายส่งที่มีความกว้างเท่ากับ  $800 \pm 1.60$  ไมโครเมตร แต่หากใช้เครื่องพิมพ์เทคนิค FDM/FFF แล้ว จะสามารถสร้างสายส่งกว้าง  $800 \pm 1.20$  ไมโครเมตร และเมื่อใช้เครื่องพิมพ์เทคนิค SLS จะได้สายส่งกว้าง  $800 \pm 0.8$  ไมโครเมตร พบว่าหากใช้เทคนิค SLA สร้างสายส่งนี้จะได้สายส่งที่มีมิติคลาดเคลื่อนมากที่สุด อย่างไรก็ตาม ขนาดอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยนี้แทบไม่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเลย

สำหรับความขรุขระของผิวรูปทรงที่ผลิตด้วยเครื่องพิมพ์ AM จากเทคนิคการพิมพ์ต่าง ๆ จะแตกต่างกัน มีปัจจัยหลายประการที่ทำให้ผิวรูปทรงที่สร้างเสร็จแล้วขรุขระ ไม่ราบเรียบ ซึ่งเกิดจากเทคโนโลยีอุปกรณ์ ในการผลิตตั้งแต่สมรรถนะหัวฉีด เทคนิคการหลอมวัสดุพิมพ์ เกล็ดกระจก อุปกรณ์เคลื่อนหัวฉีด หรือควบคุมเลนส์ เทคนิคการฉายแสง รวมไปถึงวัสดุพิมพ์ที่ใช้ ความขรุขระของผิวรูปทรงย่อมส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของวงจรถ้าจากค่าคงตัวการลดทอนที่เพิ่มขึ้น เช่น การสูญเสียการย้อนกลับของวงจรถ้ารองแถบผ่านเพิ่มขึ้น (Return loss) การสูญเสียของกำลังงานที่ส่งผ่านในวงจรถ้าเรโซแนนซ์ไลน์คัปเปิลเลอร์เพิ่มขึ้น (Transmission loss) เป็นต้น ทำให้มีผู้นำเสนอเทคนิคต่าง ๆ ที่ลดความขรุขระของผิวรูปทรงหลังจากพิมพ์ชิ้นงานเสร็จแล้ว (Postprocess) เช่น การใช้สารเคมี การชุบ การขัด เป็นต้น ในตารางที่ 4.5 ได้นำข้อมูลเทคนิคการพิมพ์แต่ละเทคนิคมาแสดงโดยเปรียบเทียบความขรุขระก่อนและหลังกระบวนการ Postprocess ซึ่งเทคนิค AM ทั้ง 3 เทคนิคมีขั้นตอน Postprocess ในตารางพบว่า รูปทรงที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์ที่ใช้เทคนิคการพิมพ์ SLA จะขรุขระน้อยที่สุด รองลงมาคือ เทคนิค FDM/FFF และ SLS ตามลำดับ และเมื่อใช้กระบวนการ Postprocess แล้ว ความขรุขระของรูปทรงลดลงซึ่งเทคนิคที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระน้อยที่สุดถึง 37 นาโนเมตร คือ เทคนิค

SLA รองลงมาเป็นเทคนิค FDM/FFF ที่มีความขรุขระน้อยกว่า 350 นาโนเมตร และลำดับสุดท้าย คือ เทคนิค SLS ที่ให้ความขรุขระลดลงเหลือน้อยกว่า 2.4 ไมโครเมตร ซึ่งวงจรมิติ 40 GHz ต้องการเทคนิคการผลิตที่มีขนาดผิวขรุขระน้อยกว่า 0.66 ไมโครเมตร เพื่อให้ค่าการลดทอนน้อยกว่า 1.89 เท่าของค่าการลดทอนเดิม ซึ่งจะมีเทคนิค AM เพียง 2 เทคนิคที่เหมาะสมที่จะสามารถสร้างได้คือ เทคนิค SLA และ FFF/FDM และอาจต้องมีกระบวนการ Postprocess เพื่อลดความขรุขระของผิวและทำให้ผิวเรียบขึ้น

ตารางที่ 5.5 คุณสมบัติของเทคนิคการพิมพ์ที่สำคัญสำหรับการผลิตวงจรมิติสูง

เทคนิค AM	ความแม่นยำ (ไมครอน)	ความขรุขระ (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

## 5.7 อ้างอิง

- [1] E. Mcdonald, R Salas, et. al, 3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics, IEEE Access, 2014, pp. 234-242
- [2] Yanling Zheng, et. al., A Review of Conductive Carbon Materials for 3D Printing: Materials, Technologies, Properties, and Applications, Materials 2021, 14, 3911
- [3] Calignano, Flaviana et al. “Overview on Additive Manufacturing Technologies.” Proceedings of the IEEE 105.4 (2017): 593–612. Web.
- [4] <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>
- [5] <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/surface-roughness>
- [6] M. Almeshehe, et. al, Surface roughness impact on the performance of the 3D metal printed waveguide coupler at millimeter wave band, Engineering Science and Technology, Volume 35, 2022, 101129, Surface Quality of 3D-Printed Models as a Function
- [7] C. Arnold, et. al., Surface Quality of 3D-Printed Models as a Function of Various Printing Parameters, Materials, 11, 2018, pp. 1-15.

- [8] M. Pérez, et. al., Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters, *Materials*, 12, 2019, pp. 1-15
- [9] R. H. Hambali et al, Analysis of the influence of chemical treatment to the strength and surface roughness of FDM, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017
- [10] J. Son and H. Lee, Preliminary Study on Polishing SLA 3D-Printed ABS-Like Resins for Surface Roughness and Glossiness Reduction, *micromachines*, 11, 2020, pp. 1-14.
- [11] S. Selgers et. al., Surface Roughness Reduction of AdditiveManufactured Products by applying a Functional Coating Using Ultrasonic Spray Coating, *coatings*, 7, 2017, pp. 1-12

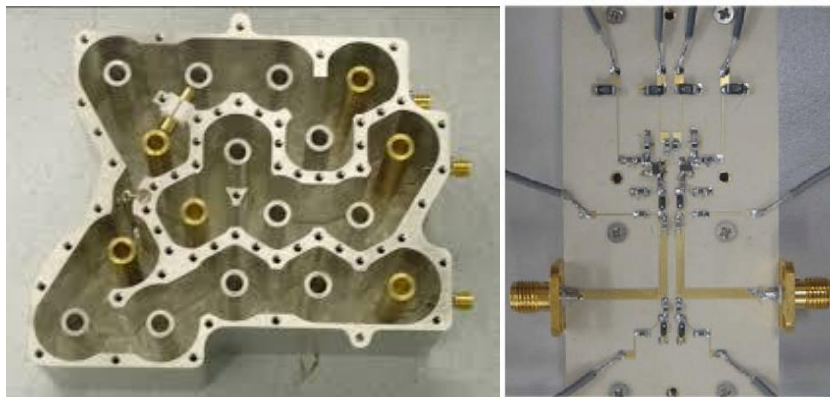
## บทที่ 6

### การศึกษาเทคนิคสำหรับสังเคราะห์วงจรกรองแถบผ่านย่านมิลลิเมตรเวฟ 20 – 100 GHz

การสังเคราะห์วงจรกรองแถบผ่านจากเมทริกซ์เชื่อมต่อ (Coupling matrix) ที่ให้ผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการมีหลายเทคนิค แต่สำหรับเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับวงจรกรองแถบผ่านที่ทำงานย่านความถี่มิลลิเมตรเวฟจนถึงความถี่ 100 GHz และสามารถที่จะนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่นิยมใช้จะมีเทคนิคที่น่าสนใจมี 2 เทคนิคและได้นำมาใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างกว้างขวาง ได้แก่ เทคนิคการสังเคราะห์วงจรกรองแถบผ่านจากเมทริกซ์เชื่อมต่อบนโครงสร้างควาวิตีที่เป็นแบบแกนร่วม (Coaxial Cavity) และเทคนิคการสังเคราะห์วงจรกรองแถบผ่านจากเมทริกซ์เชื่อมต่อบนโครงสร้างควาวิตีแบบท่อนำคลื่น (Waveguide filter) ดังนี้

#### 6.1 เทคนิคสังเคราะห์ด้วยสายส่ง (Transmission line)

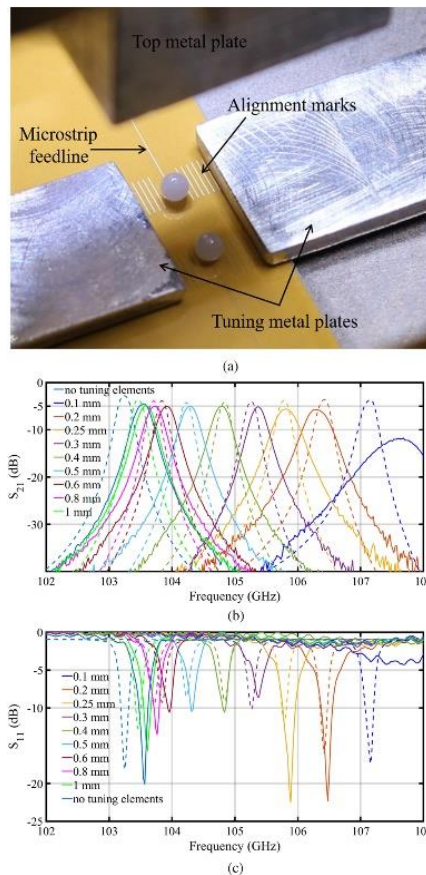
เทคนิคการสังเคราะห์วงจรกรองความถี่ด้วยการตัดแปลงจากวงจรต้นแบบที่เป็นอุปกรณ์ลัมพีให้อยู่ในรูปของวงจรสายส่ง เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมและพบการนำไปใช้จากทั้งกลุ่มนักวิจัยที่อยู่ในภาคการศึกษาและภาคอุตสาหกรรม จากการได้รับความนิยมนี้เอง ทำให้เราได้โครงสร้างวงจรกรองแถบผ่านที่สังเคราะห์ด้วยสายส่งหลายโครงสร้าง ทั้งจากโครงสร้างที่ขึ้นรูปแบบ 3 มิติ เช่น การใช้ท่อโลหะเป็นเรโซเนเตอร์ หรือจากโครงสร้างที่เป็นแบบระนาบซึ่งใช้สายส่งแบบไมโครสตริป (Microstrip) สตริปไลน์ (Stripline) เป็นต้น ลักษณะของวงจรกรองแถบผ่านที่ใช้สายส่งแบบนี้ ได้แก่ วงจรกรองแบบคอมบ์ไลน์ (Compline filter) วงจรกรองแบบอินเตอร์ดิจิทัล (Interdigital filter) วงจรกรองแบบแฮร์พิน (Hairpin filter) เป็นต้น



รูปที่ 6.1 วงจรกรองแถบผ่านสังเคราะห์ด้วยสายส่งแบบ 3 มิติ กับแบบระนาบ [1]

เทคนิคการสังเคราะห์ด้วยสายส่งนี้ มีการนำไปรวมออกแบบกับวัสดุไดอิเล็กตริกที่เป็นอลูมินาเซรามิก (Alumina ceramic) ซึ่งขึ้นรูปทรงเป็นทรงกลมจะทำให้ได้วงจรกรองแถบผ่านที่มีความถี่ศูนย์กลาง (Center frequency) ที่ 105 GHz และแบนด์วิดท์แคบราว 0.5% ของความถี่ศูนย์กลาง และสามารถปรับความถี่

ศูนย์กลางได้โดยสร้างแผ่นโลหะที่ขยับได้ล้อมรอบเรโซเนเตอร์ ผลดังกล่าวทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลงจากระยะระหว่างเรโซเนเตอร์กับผนังโลหะดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 วงจรกรองแถบผ่านใช้สายส่งและเรโซเนเตอร์แบบทรงกลมที่สังเคราะห์จากวัสดุไดอิเล็กตริก [2]

วงจรที่ออกแบบด้วยเทคนิคสายส่งแบบ 3 มิติจะเหมาะสมสำหรับการใช้งานไปจนถึงความถี่มิลลิเมตรเวฟ วงจรที่ได้มีสมรรถนะการทำงานดี การสูญเสียในแถบผ่านต่ำเพราะเรโซเนเตอร์เป็นรูปทรงแบบ 3 มิติซึ่งจะมีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) สูง แต่หากใช้เทคนิคการสังเคราะห์สายส่งแบบระนาบก็จะได้วงจรกรองที่มีขนาดเล็ก แต่สมรรถนะการทำงานด้อยกว่าโครงสร้างที่เป็นรูปทรง 3 มิติ

## 6.2 เทคนิคสังเคราะห์ด้วยท่อนำคลื่น (Waveguide)

การสังเคราะห์วงจรกรองให้ได้แถบผ่านและมีข้อกำหนดทางเทคนิคความถี่ที่ต้องการจะใช้วิธีการสังเคราะห์จากโครงสร้างวงจรกรองต้นแบบที่มีอุปกรณ์เรโซเนเตอร์เชื่อมต่อ การสังเคราะห์เรโซเนเตอร์สำหรับเรโซแนนซ์ที่ความถี่ไมโครเวฟและมิลลิเมตรเวฟจะใช้วงจรเรโซเนเตอร์ ซึ่งสร้างจากกล่องที่มีผนังที่ทำจากตัวนำไฟฟ้าล้อมรอบ และภายในกล่องจะเป็นควาวิตีหรือโพรง (Cavity) ซึ่งอาจเป็นอากาศว่างหรืออาจจะบรรจุสารไดอิเล็กตริกก็ได้ (Dielectric loaded cavity) ในกรณีหลัง เพื่อให้ได้ขนาดวงจรที่เล็กลงและมีสมรรถนะการทำงานที่ต้องการ ลักษณะที่เป็นควาวิตีปิดล้อมด้วยโลหะจะทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกกักเก็บอยู่ในควาวิตีนี้ โดยจะตกกระทบกับผนังและสะท้อนกลับจากผนังตัวนำที่ความถี่ค่าหนึ่ง ขนาดคลื่นที่ตกกระทบจะเสริมและหักล้างกันจนเกิดคลื่นนิ่งในโพรงซึ่งความถี่นั้นคือ ความถี่เรโซแนนซ์

อุปกรณ์ควิตีมีการทำงานเทียบเท่ากับวงจรเรโซแนนซ์แบบลัมป์ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะถูกกักอยู่ในควิตีซึ่งจะสามารถเขียนวงจรเทียบเท่าได้เท่ากับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำขนานกับตัวเก็บประจุ กลไกการสูญเสียที่เกิดในการเรโซแนนซ์ของควิตีนี้เกิดได้จากการสูญเสียเนื่องจากการนำไฟฟ้าของผนังโลหะและการสูญเสียจากไดอิเล็กตริกของวัสดุที่อยู่ในควิตี โดยปกติควิตีจะสามารถเรโซแนนซ์ได้หลายความถี่ขึ้นกับเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังของควิตีที่ต้องทำให้สนามในแนวสัมผัสกับผนังตัวนำเป็นศูนย์ ดังนั้น วิธีการออกแบบควิตีที่นิยมใช้กันคือ การกำหนดขนาดความยาวของควิตีให้เป็นจำนวนเต็มเท่าของครึ่งความยาวคลื่นเรโซแนนซ์

ลักษณะควิตีที่ใช้ในงานในวงจรไมโครเวฟและมิลลิเมตรเวฟเป็นรูปทรงเรขาคณิตง่าย ๆ เช่น รูปทรงกล่องสี่เหลี่ยม (Rectangular cavity) หรือรูปทรงกระบอก (Cylindrical cavity) โดยขนาดของรูปทรงจะเป็นตัวกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ดังนี้

(1) ควิตีรูปทรงกล่องสี่เหลี่ยม จะสามารถสนับสนุนให้เกิดการเรโซแนนซ์ของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโหมด  $TE_{mnl}$  และ  $TM_{mnl}$  โดยกำหนดให้ควิตีแบบกล่องสี่เหลี่ยมมีความกว้าง ยาว และ สูง เท่ากับ  $a$   $b$  และ  $d$  ตามรูปที่ 6.3 ดังนั้น ความถี่เรโซแนนซ์สำหรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโหมด  $mnl$  คือ

$$f_{mnl} = \frac{c}{2\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{d}\right)^2}$$

(2) ควิตีทรงกระบอก ในรูปที่ 6.3 แสดงมิติของควิตีทรงกระบอกยาว  $L$  และรัศมี  $R$  ควิตีนี้จะสนับสนุนให้เกิดการเรโซแนนซ์ของคลื่นโหมด  $TE$  และ  $TM$  ซึ่งมีสมการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ต่างกันดังนี้

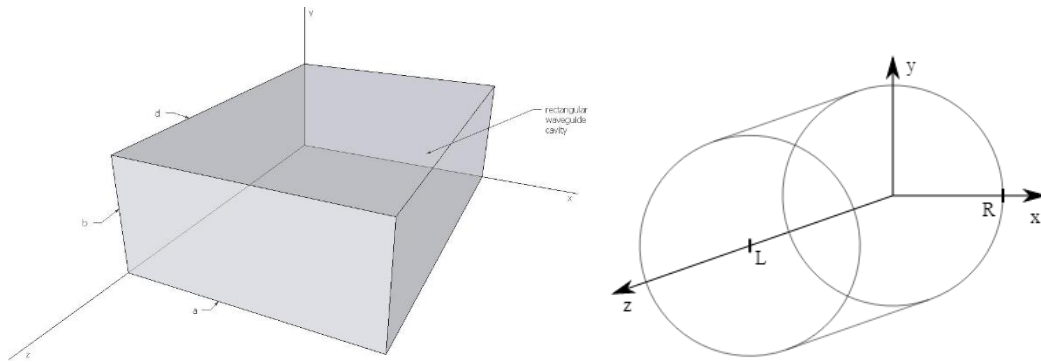
(2.1) โหมด  $TM$

$$f_{mnp} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{I_{mn}}{R}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L}\right)^2}$$

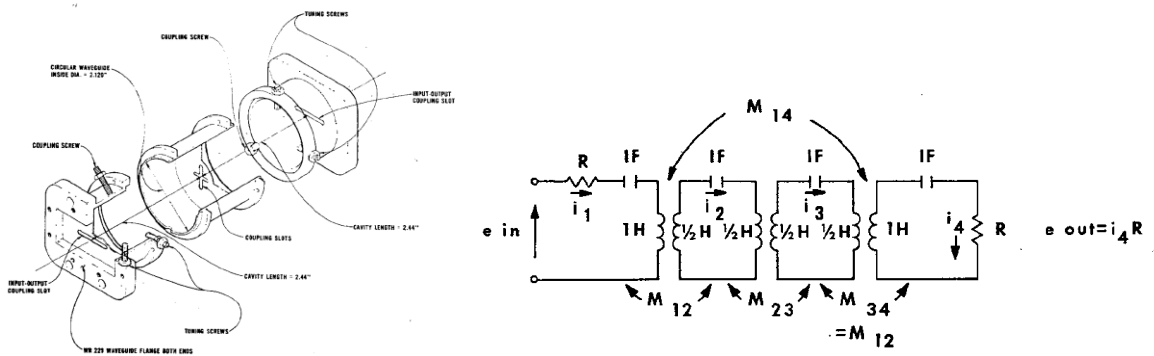
(2.2) โหมด  $TE$

$$f_{mnp} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{I'_{mn}}{R}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{L}\right)^2}$$

เมื่อ  $I_{mn}$  และ  $I'_{mn}$  แทนรากที่  $n$  ( $n^{\text{th}}$  root) ของฟังก์ชันเบสเซลอันดับที่  $m$  ( $m^{\text{th}}$  Bessel function) และรากที่  $n$  ของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเบสเซลอันดับที่  $m$  ( $m^{\text{th}}$  derivatives of Bessel function) ตามลำดับ



รูปที่ 6.3 คาวิตีรูปทรงสี่เหลี่ยมและทรงกระบอก



รูปที่ 6.4 วงจรกรองอิลลิปติกแบบท่อนำคลื่น (Elliptic filter waveguide structure) [4]

การใช้งานคาวิตีแบบสี่เหลี่ยมและทรงกระบอกจะใช้ในโครงสร้างวงจรกรองที่ใช้ท่อนำคลื่นเป็นคาวิตี ซึ่งท่อนำคลื่นที่นำมาใช้จะเป็นท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมและท่อนำคลื่นแบบวงกลม ในการสังเคราะห์วงจรกรองแบบคาวิตีสี่เหลี่ยมหรือทรงกระบอกนี้จะเริ่มต้นจากการกำหนดต้นแบบจากวงจรกรองต้นแบบในรูปที่ 6.3 แสดงวงจรกรองคาวิตีที่ใช้ท่อนำคลื่นแบบวงกลมเป็นคาวิตีแบบทรงกระบอก และสังเคราะห์เพื่อให้ได้ผลตอบสนองความถี่แบบอิลลิปติก 4 อันดับ (Fourth-order Elliptic filter) ซึ่งเมื่อเทียบเคียงจากรูปวงจรกรองต้นแบบซึ่งจะประกอบด้วยเรโซเนเตอร์ 4 ตัว และมีการเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์  $M_{12}$   $M_{23}$  และ  $M_{34}$  ซึ่งจะทำให้เกิดโพลส่งผ่าน (Transmission poles) จำนวน 4 โพล และเพิ่มซีโร่ (Zero) อีก 2 ตำแหน่งที่บริเวณความถี่ใกล้ ๆ กับแถบผ่าน การเพิ่มซีโร่เพื่อให้ผลตอบสนองตรงรอยต่อระหว่างแถบผ่านและแถบหยุดลาดชันขึ้นนี้สามารถทำได้โดยการใส่สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์ตัวที่ 1 กับ 4 ( $M_{14}$ ) ซึ่งจะต่างจากการสังเคราะห์ด้วยฟังก์ชันแบบบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth function) หรือแบบเชบิเชฟ (Chebyshev function) ที่จะมีเฉพาะสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์ จะไม่มีการเชื่อมต่อข้ามเรโซเนเตอร์ (Cross coupling)

จากรูปที่ 6.4 วงจรกรองอิลลิปติกแบบท่อนำคลื่นจะพบว่า การสังเคราะห์เรโซเนเตอร์จะใช้ท่อนำคลื่นแบบวงกลมจำนวน 4 ส่วน ผ่านช่องเชื่อมต่อตั้งรูป (Coupling slots) ซึ่งเป็นช่อง (slot) ที่ต่อระหว่างท่อนำคลื่นชั้นที่ 2 และ 3 และท่อนำคลื่นชั้นที่ 1 และ 4 จะทำหน้าที่ในการสังเคราะห์ค่า  $M_{23}$  และ  $M_{14}$  ตามลำดับดังในรูป ซึ่งหากสังเกตตามในรูปแล้ว เราจะเห็นตำแหน่งของช่องเชื่อมต่อที่อินพุตและเอาต์พุตของวงจรกรอง

จะอยู่ในแนวเดียวกันเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมต่อ  $M_{14}$  และ  $M_{41}$  ตามต้องการ สำหรับการสังเคราะห์ค่า  $M_{12}$  และ  $M_{34}$  ในโครงสร้างรูปที่ 6.4 จะใช้สกรูเจาะในแนวเฉียงทำมุม 45 องศาตามรูป ให้สังเกตตำแหน่งของสกรูตัวที่ 2 ซึ่งติดตั้งในคาวิตีตัวที่ 4 จะพบว่าตำแหน่งของสกรูตัวนี้ถูกวางในตำแหน่งที่มีระยะห่างจากตำแหน่งของสกรูตัวแรกเท่ากับ 90 องศา ส่งผลให้  $M_{14}$  กลับเฟสจากบวกเป็นลบตามค่าที่สังเคราะห์ได้จากการคำนวณ สำหรับตัวสกรูปรับแต่ง (Tuning screws) ที่เห็นในรูปเพื่อชดเชยความยาวของตัวเรโซเนเตอร์เนื่องจากผลของการเชื่อมต่อระหว่างเรโซเนเตอร์ที่ทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนแปลง วงจรกรองแถบผ่านที่ใช้ท่อนำคลื่นนี้สามารถออกแบบได้จนถึงความถี่หลายร้อย GHz

### 6.3 อ้างอิง

[1] <https://www.dgsboulder.com>

[2] Utpal Dey, Julio Gonzalez Marin and Jan Hesselbarth, Low-loss and tunable millimeter-wave filters using spherical dielectric resonators, International Journal of Microwave and Wireless Technologies , Volume 13 , Issue 8 , October 2021 , pp. 751 – 755

[3] Ian C. Hunter, Laurent Billonet, Bernard Jarry, and Pierre Guillon, Microwave Filters—Applications and Technology, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 50, NO. 3, MARCH 2002.

[4] ALBERT E. WILLIAMS, A Four-Cavity Elliptic Waveguide, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. MTT- 18, NO. 12, DECEMBER 1970.

## บทที่ 7

### เทคนิคที่เหมาะสมสำหรับสังเคราะห์วงจรรองแถบผ่านย่านมิลลิเมตรเวฟ

จากเทคนิคสองเทคนิคได้แก่ เทคนิคการสังเคราะห์ด้วยสายส่งและเทคนิคการสังเคราะห์ด้วยท่อนำคลื่น ที่อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมาจะพบว่า ทั้ง 2 เทคนิคต่างก็สามารถสังเคราะห์วงจรรองแถบผ่านความถี่มิลลิเมตรเวฟได้ และต่างก็เป็นเทคนิคที่นิยมในกลุ่มนักวิจัยและวิศวกรจากภาควิชาการและภาคอุตสาหกรรม ในกรอบการศึกษาครั้งนี้ จะวิเคราะห์และเปรียบเทียบเทคนิคทั้ง 2 เทคนิคนี้ โดยจะพิจารณาประเด็นความซับซ้อนของเทคนิคการออกแบบ ความยุ่งยากในการสร้างชิ้นงาน และราคาต้นทุนของการสร้างซึ่งจะสัมพันธ์กับขนาดของวงจรที่สร้างเสร็จแล้ว



รูปที่ 7.1 วงจรรองแบบคอมป์ไลน์

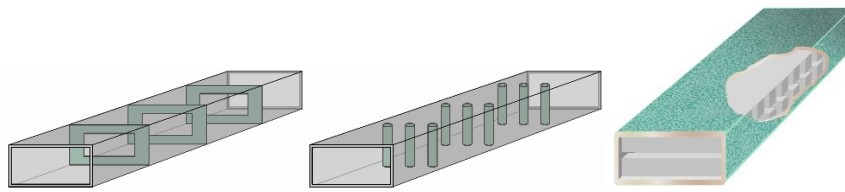
ผลการทบทวนงานวิจัย [1]-[4] พบว่า วงจรรองแถบผ่านที่นิยมใช้มากที่สุดในกลุ่มของวงจรรูปทรง 3 มิติที่สังเคราะห์จากสายส่ง คือ วงจรรองแบบคอมป์ไลน์ตามรูปที่ 7.1 โดยพบการใช้งานวงจรรูปนี้อย่างแพร่หลายในสถานีฐานของระบบสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ เนื่องจากวงจรรองแบบคอมป์ไลน์นี้ให้ผลตอบแทนของควมถี่ที่มีการสูญเสียต่ำและสามารถทนกำลังไฟฟ้าสูง วงจรที่สังเคราะห์ด้วยสายส่งอีกวงจรรูปที่นิยมคือ วงจรรองแบบอินเตอร์ดิจิทัล แต่วงจรรองแบบนี้มีขนาดเรโซเนเตอร์ยาว 1 ใน 4 ความยาวคลื่น ซึ่งจะยาวกว่าเรโซเนเตอร์ของวงจรรองแบบคอมป์ไลน์ ดังนั้น ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยจะเลือกเอาวงจรรองแบบคอมป์ไลน์เป็นวงจรรูปที่แทนที่ใช้เทคนิคการสังเคราะห์ด้วยสายส่ง

#### 7.1 ราคาต้นทุน

เมื่อพิจารณาวงจรรองโครงสร้างวงจรรองแบบคอมป์ไลน์ที่เป็นรูปทรง 3 มิติในรูปที่ 7.1 จะพบว่า วงจรรองแบบคอมป์ไลน์ในรูปประกอบด้วยควาวิตี 7 ควาวิตี แต่แต่ละควาวิตีจะเชื่อมต่อกันทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านช่องว่างระหว่างควาวิตี ภายในแต่ละควาวิตีจะมีแท่งเรโซเนเตอร์ที่เป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยโลหะ ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า โครงสร้างวงจรรองแบบคอมป์ไลน์แบบนี้คือ วงจรรองแถบผ่านที่สังเคราะห์ด้วยท่อนำคลื่นแต่เป็นลักษณะโครงสร้างท่อนำคลื่นแบบพิเศษที่ภายในควาวิตีจะบรรจุแท่งโลหะแทนที่จะเป็นควาวิตีที่เป็นโพรงเปล่า ๆ ดังนั้น หากเปรียบเทียบน้ำหนักของวงจรรองที่ใช้เทคนิคท่อนำคลื่นกับวงจรรองแบบคอมป์ไลน์แล้วจะพบว่า

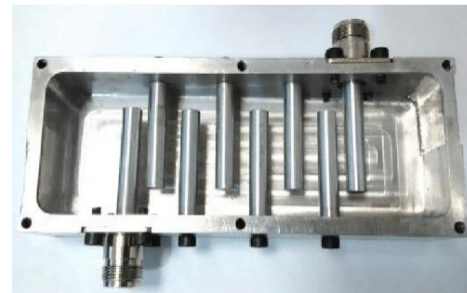
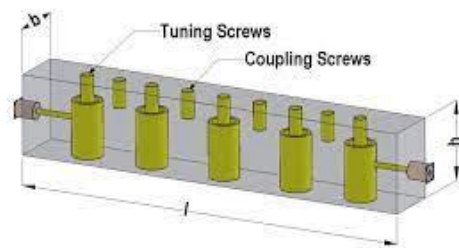
น้ำหนักร่องของวงจรร่องแบบท่อนำคลื่นจะเบากว่า ดังนั้น วงจรร่องแบบท่อนำคลื่นจึงเหมาะสมสำหรับการไปติดตั้งบนดาวเทียมที่ต้องการอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักเบาเกินกว่าวงจรร่องแบบคอมป์ไลน์ [4] จากส่วนต่างน้ำหนักของแท่งเรโซเนเตอร์ที่ต้องเพิ่มเข้ามา เนื่องจากวงจรร่องคอมป์ไลน์และวงจรร่องที่สังเคราะห์จากท่อนำคลื่นจะขึ้นรูปจากโลหะ (เว้นแต่กรณีที่มีการบรรจุวัสดุไดอิเล็กทริกเพื่อเพิ่มตัวประกอบคุณภาพ) ดังนั้น ต้นทุนในการสร้างจะขึ้นกับปริมาณหรือน้ำหนักของวงจรร่อง จากข้อสรุปเราได้ว่า น้ำหนักของวงจรร่องแบบคอมป์ไลน์จะมากกว่าน้ำหนักของวงจรร่องแบบท่อนำคลื่น ดังนั้น ต้นทุนวัสดุที่ใช้สร้างวงจรร่องแบบคอมป์ไลน์จึงแพงกว่าวงจรร่องแบบท่อนำคลื่น

## 7.2 ความยุ่งยากในการสร้างชิ้นงาน



รูปที่ 7.2 โครงสร้างวงจรร่องท่อนำคลื่นแบบ

ก) เชื่อมต่อด้วยไอริส (Iris-coupled) ข) เสา (Post) และ ค) ริดจ์ (Ridge)



รูปที่ 7.3 วงจรร่องแบบคอมป์ไลน์และอินเตอร์ดิจิตัล

รูปที่ 7.2 แสดงโครงสร้างของวงจรร่องที่สังเคราะห์จากท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมซึ่งภายในคาวิตีของท่อนำคลื่นมีโครงสร้างรูปแบบต่าง ๆ เพื่อควบคุมให้เกิดการเรโซแนนซ์ตามต้องการ ได้แก่ การบรรจุไอริสรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อสังเคราะห์วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน การวางท่อโลหะเรียงแถวเพื่อวางทิศทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และการทำพื้นผิวภายในคาวิตีให้ไม่ราบเรียบ จะพบว่าโครงสร้างวงจรร่องแบบท่อนำคลื่นใน 2 โครงสร้างแรกสร้างได้ง่ายไม่ยุ่งยาก ส่วนโครงสร้างแบบริดจ์หรือคอรูเกจจะมีรายละเอียดความสูงต่ำของพื้นผิวซึ่งค่อนข้างซับซ้อน สำหรับวงจรร่องแบบคอมป์ไลน์และอินเตอร์ดิจิตัลในรูปที่ 7.3 ซึ่งสร้างภายในกล่องโลหะสี่เหลี่ยม ในรูปจะพบว่าโครงสร้างวงจรร่องทั้ง 2 วงจรไม่ซับซ้อน สามารถสร้างได้ง่าย อย่างไรก็ตามหากต้องการค่าการสูญเสียที่น้อย ๆ ก็จะต้องมีการสร้างคาวิตีสำหรับแต่ละเรโซเนเตอร์เพื่อให้ได้ตัวประกอบคุณภาพสูงและลดการสูญเสียโดยลบบวมเหลี่ยมในโครงสร้างภายในคาวิตี

### 7.3 เทคนิคการออกแบบ

การออกแบบวงจรกรองทั้ง 2 เทคนิค มีขั้นตอนเริ่มต้นเหมือนกัน กล่าวคือ จะต้องเริ่มต้นจากวงจรกรองผ่านต่ำต้นแบบ และใช้การแปลงวงจรไปสู่แบบจำลองที่ใช้อุปกรณ์อิมมิตแตนซ์อินเวอร์เตอร์ (Immittance inverter) ในขั้นตอนถัดมาจะเชื่อมโยงพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์กับโครงสร้างทางกายภาพของวงจรกรองโดยใช้โปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Full-wave Electromagnetic simulation software) นั้น เช่น กรณีวงจรคอมป์โลนจ์จะใช้การคำนวณการเชื่อมต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างเรโซเนเตอร์ 2 ตัวที่ติดกันภายใต้กล่องโลหะปิดซึ่งสามารถใช้เทคนิคการสังเคราะห์เมตริกซ์เชื่อมต่อได้ ส่วนของวงจรกรองแบบท่อนำคลื่นที่แทรกท่อโลหะ ก็จะสามารถหาพารามิเตอร์ความยาวของท่อนำคลื่นที่เป็นเรโซเนเตอร์และขนาดของท่อโลหะเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ อย่างไรก็ตาม ในการออกแบบทั้ง 2 วงจร ค่าที่ได้จะเป็นค่าเริ่มต้นในการกำหนดมิติของวงจร มิติของวงจรที่ได้จากทั้งสองเทคนิคต่างต้องมีการปรับแต่งโดยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ด้วยโปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า เทคนิคการออกแบบวงจรทั้ง 2 เทคนิค มีแนวทางและขั้นตอนคล้ายกันทั้ง 2 เทคนิค ต้องมีโปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นและเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อปรับมิติของวงจรกรอง ความซับซ้อนของเทคนิคออกแบบของวงจรกรองทั้ง 2 ประเภทจึงเท่ากัน

### 7.4 สรุปการวิเคราะห์เทคนิคการสังเคราะห์

จากเทคนิคที่กำหนดในหัวข้อ 7.1-7.3 สามารถนำมาสรุปประเด็นข้อดีข้อด้อยของการสังเคราะห์วงจรกรองทั้ง 2 ประเภทได้ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 สรุปประเด็นข้อดีข้อด้อยของเทคนิคการสังเคราะห์วงจรกรอง

ประเด็น	ท่อนำคลื่น	สายส่ง
ต้นทุน	ราคาถูก	ต้นทุนสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากใช้วัสดุที่ทำโครงสร้างภายในมากกว่า
ความยุ่งยากในการสร้าง	ง่าย เฉพาะกรณีแบบไอริสและเสา	ง่าย
เทคนิคการออกแบบ	การออกแบบง่าย โดยสามารถสังเคราะห์ขนาดของวงจรจากเมตริกซ์เชื่อมต่อได้	การออกแบบง่าย โดยสามารถสังเคราะห์ขนาดของวงจรจากเมตริกซ์เชื่อมต่อได้

จากผลการเปรียบเทียบเทคนิคการออกแบบวงจรกรองแถบผ่านย่านมิลลิเมตรเวฟ พบว่าทั้ง 2 เทคนิค มีความเหมาะสมและเป็นไปได้สำหรับออกแบบวงจรกรองแถบผ่านสำหรับการศึกษาคั้งนี้

ซึ่งโครงสร้างของวงจรกรองแถบผ่านจะเป็นแบบเรโซเนเตอร์เชื่อมต่อ (Coupled resonator) ที่สามารถใช้เทคนิคการสังเคราะห์ด้วยท่อนำคลื่นหรือแบบสายส่ง (เช่น คอมป์ไลน์) ก็ได้ โดยการออกแบบส่วนที่เป็นเมตริกซ์การเชื่อมต่อ (Coupling matrix) จะสังเคราะห์ด้วยแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นในบทที่ 3 สำหรับการเลือกโครงสร้างของวงจรกรองในโครงการวิจัยนี้ เป็นการออกแบบเพื่อเป็นต้นแบบ (Prototype) เพื่อแสดงความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติ มีทางเลือกในการออกแบบที่จะใช้เทคนิคสังเคราะห์ด้วยท่อนำคลื่นหรือเทคนิคสังเคราะห์ด้วยสายส่งก็ได้ เพราะเหมาะสมในทุกประเด็นและสอดคล้องกับขอบเขตในการทำงานวิจัยนี้ ในโครงการนี้ ผู้วิจัยจะเลือกออกแบบด้วยโครงสร้างแบบสายส่งคอมป์ไลน์

## 7.5 อ้างอิง

- [1] J. B. Thomas, Cross-Coupling in Coaxial Cavity Filters—A Tutorial Overview, IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques., vol. 51, 4, 2003, pp. 1368-1377
- [2] J. L. Vazquez-Roy, et. al., Design and Realization of a Band Pass Filter at D-band Using Gap Waveguide Technology, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves volume 41, pages1469–1477 (2020).
- [3] <https://www.rfecho.com/product/rf-filter-bandpass-owbp-920010000-10/>
- [4] I. Hunter, et. al., Microwave Filters—Applications and Technology, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 50, 3, March, 2002, pp. 794-804

## บทที่ 8

### ผลการคัดเลือกเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติและเลือกวัสดุสร้างเรโซเนเตอร์

วงจรกรองความถี่แถบผ่านจัดเป็นวงจรพาสซีฟซึ่งไม่กินพลังงานไฟฟ้า จากผลการศึกษาทบทวนเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติสำหรับสร้างวงจรพาสซีฟความถี่มิลลิเมตรเวฟพบว่า เทคโนโลยีการพิมพ์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตวงจรกรองแถบผ่านมิลลิเมตรเวฟ ได้แก่ เทคโนโลยี FDM/FFF และ SLA อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากราคาเครื่องพิมพ์พบว่า เครื่องพิมพ์แบบ SLA จะมีราคาที่สูงกว่าเครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF ดังนั้น ในโครงการนี้จึงเลือกเครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF โดยใช้มิติของวงจรที่ความถี่ 40 GHz ในตารางที่ 4.4 มาเป็นตัวแปรตั้งต้น เพื่อนำไปสู่เครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF ที่เหมาะสม โดยเครื่องพิมพ์ที่เหมาะสมต้องสามารถพิมพ์ทั้งวัสดุได้หลากหลายที่เป็นกลุ่มเทอร์โมพลาสติกและโลหะได้ โดยจะเลือกเครื่องพิมพ์ PLA ที่เป็นเกรดอุตสาหกรรมแบบ 2 หัว เพื่อไว้พิมพ์วัสดุต่างชนิดกัน (โลหะและพลาสติก) โดยต้องสามารถพิมพ์ความละเอียดได้อย่างน้อยในแกน z น้อยกว่า 9 ไมครอน ส่วนความละเอียดในแกน x และ y ต้องน้อยกว่าร้อยละ 5 ของมิติที่เล็กที่สุดของวงจรกรองซึ่ง 1 ใน 4 ความยาวคลื่นที่ความถี่ 26 GHz เท่ากับ 2.88 มิลลิเมตร ซึ่งควรจะมีค่าความละเอียดในแนวแกน x-y 20 ไมครอนเพื่อไม่ให้คุณสมบัติวงจรเปลี่ยนไปมาก

เมื่อทบทวนจากเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมา [B Cai, et. al., 3D Printing Using a 60 GHz Millimeter Wave Segmented Parabolic Reflective Curved Antenna, Electronics, MDPI, 8(2019), pp. 1-9], [Patrick F. Flowers, et. al., 3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament, Additive Manufacturing, 18(2017), 156-163], [Raj Mittra, et. al., Wide-Angle Scanning Antennas for Millimeter-Wave 5G Applications, Engineering, 11, 2022, pp. 60-71] พบว่า วัสดุ PLA เป็นวัสดุที่ราคาถูกและสามารถขึ้นเป็นวงจรที่ใช้งานในความถี่สูงที่ต้องการความละเอียด เช่น สายอากาศแบบปรับลำคลื่น สายอากาศแบบพาราโบลาได้ แม้ว่า PLA จะมีจุดหลอมเหลวต่ำและติดไฟง่าย อย่างไรก็ตาม การขึ้นรูปวงจรกรองความถี่จะใช้วัสดุ PLA ก่อน และจากนั้นก็พิมพ์วัสดุที่เป็นตัวนำทับหรือใช้เทคนิคการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า กรณีที่มีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ควรเลือกโลหะที่นำไฟฟ้าได้ดี เช่น ทองแดง หรือ เงิน และควรชุบรูปทรงพลาสติกที่ขึ้นรูปจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบ FDM ให้ชั้นโลหะมีความหนาประมาณ 5 เท่าของค่าความลึกผิวเพื่อลดความสิ้นเปลืองของวัสดุโลหะและลดน้ำหนักของวงจรกรองความถี่แถบผ่าน ขณะเดียวกันที่ความถี่สูงๆ กระแสไฟฟ้าจะอยู่เฉพาะบริเวณผิวของโลหะจากแรงโมเมนต์สนามแม่เหล็กของอิเล็กตรอน ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องออกแบบให้ผิวโลหะที่ชุบ PLA มีความหนา

คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์ 3 มิติคุณภาพสูง จำนวน 1 ชุด มีคุณลักษณะดังนี้

1. ใช้วิธีขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติ แบบ Fuse Deposition Modeling (FDM) หรือ Fused filament fabrication (FFF)
2. มีหัวพิมพ์จำนวน 2 หัวพิมพ์ สามารถทำความร้อนได้ถึง 350 องศา

3. ใช้งานกับหัวพิมพ์ชนิด AA ขนาด 0.25 มิลลิเมตร, 0.40 มิลลิเมตร, 0.80 มิลลิเมตร และหัวพิมพ์ชนิด BB ขนาด 0.40 มิลลิเมตร, 0.80 มิลลิเมตร และหัวพิมพ์ชนิด CC Red ขนาด 0.60 มิลลิเมตร (Ruby-tipped for printing abrasive composites) ทนต่อวัสดุที่มีฤทธิ์กัดกร่อนด้วยหัวพิมพ์
4. หัวพิมพ์ปรับระดับสูง-ต่ำ อัตโนมัติ ระหว่างพิมพ์ชิ้นงาน
5. มีพื้นที่สำหรับพิมพ์ชิ้นงาน ไม่น้อยกว่า 330 x 240 x 300 มิลลิเมตร
6. ความละเอียดชิ้นงาน 150 – 60 ไมครอน ที่หัวพิมพ์ขนาด 0.25 มิลลิเมตร และมีความละเอียดชิ้นงาน 200 – 20 ไมครอน ที่หัวพิมพ์ขนาด 0.4 มิลลิเมตร, ความละเอียดชิ้นงาน 600 – 20 ไมครอน ที่หัวพิมพ์ขนาด 0.8 มิลลิเมตร
7. หน้าจอระบบทัชสกรีนขนาด 4.7 นิ้ว
8. รองรับไฟล์ STL, OBJ, X3D, 3MF, BMP, GIF, JPG, PNG และ UFP
9. รองรับวัสดุ PLA, PETG, Tough PLA, Nylon, ABS, CPE, CPE+, PC, TPU 95A, PP, PVA, Breakaway (Also Support third -party materials)
10. รองรับวัสดุพิมพ์ พลาสติกชนิดเส้นใย ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.85 มิลลิเมตร
11. ใช้ซีพอร์ทชนิดละลายน้ำได้ (PVA)
12. สามารถอ่านข้อมูลจาก USB Port, Wifi และ LAN
13. การปรับระดับฐานพิมพ์โดยอัตโนมัติ
14. มาพร้อมกับฐานพิมพ์กระจก สามารถทำความร้อนได้ 150 องศา
15. มีกล้องที่ตัวเครื่องเพื่อคุณภาพถ่ายระหว่างพิมพ์ผ่านทาง Desktop หรือ App
16. รองรับ MacOS, Windows และ Linux
17. มีเสียงขณะใช้งานเครื่องไม่เกิน ๕๐ เดซิเบล
18. มี Flow sensor ช่วยตรวจสอบเส้นวัสดุระหว่างการพิมพ์ และหยุดอัตโนมัติทันทีเมื่อเส้นวัสดุหมด
19. สามารถพิมพ์งานต่อเนื่อง 24 ชั่วโมงติดต่อกัน 7 วันได้
20. สามารถสั่งพิมพ์ และหยุดพิมพ์ชั่วคราว และยกเลิกการพิมพ์ ผ่าน Digital Factory ได้
21. หน้าจอมี User Interface ที่ใช้งานง่าย พร้อมแสดงคำแนะนำอย่างละเอียดทุกขั้นตอนการสั่งพิมพ์ และการบำรุงรักษา
22. มีคำแนะนำของแต่ละคำสั่งการตั้งค่าชิ้นงานก่อนพิมพ์แสดงบน Software
23. หน้าจอแสดง Error Code หากมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น พร้อม QR Code เพื่อนำไปสู่วิธีการแก้ปัญหา
24. มีไฟ LED สี เพื่อแสดงสถานะต่าง ๆ ของหัวพิมพ์
25. หัวพิมพ์ประกอบไปด้วย EEPROM chip เพื่อจดจำ size และ ประเภทของหัวพิมพ์ ลดความผิดพลาดในการพิมพ์
26. สามารถเปลี่ยนหัวพิมพ์อย่างง่ายดาย โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือ
27. มีไฟส่องสว่างภายในตัวเครื่อง พร้อมสามารถกระพริบเพื่อบอกสถานะการทำงาน
28. สามารถจัดเรียงคิวการพิมพ์งานผ่านระบบ Digital Factory ได้

29. สามารถเลือกค่าการพิมพ์ จากวัสดุต่างชนิดและยี่ห้อ สำหรับคุณสมบัติของชิ้นงานได้ตามที่ต้องการจาก Marketplace
30. มี Plug in เพื่อ Import ข้อมูลจาก Fusion ได้โดยตรง
31. สามารถตั้งค่าการ จัดวางโมเดล และ Slice อัตโนมัติผ่าน Software
32. มี NFC Technology เพื่อตรวจสอบวัสดุที่ใช้ในการพิมพ์ พร้อมการตั้งค่าการพิมพ์อัตโนมัติ ให้เหมาะสมกับวัสดุ และสามารถตรวจสอบวัสดุคงเหลือเพื่อใช้ในการพิมพ์ได้
33. วิศวกรที่ดำเนินการเทรนนิ่งการใช้งานต้องมีหนังสือผ่านการอบรมจากต้นแบบรุ่นดี
34. มีอุปกรณ์ที่ช่วยให้อากาศภายใน และภายนอกเครื่องพิมพ์ไหลเวียนได้ดีขึ้น ช่วยควบคุมอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมในการพิมพ์ ตลอดจนกระบวนการพิมพ์ให้มีความเสถียรมากขึ้น
35. มีความสามารถกรองอนุภาคขนาดเล็ก (UFPs) ที่เกิดขณะพิมพ์ได้ถึง 95%
36. สามารถติดตามการใช้งาน และแจ้งให้เปลี่ยนตัวกรองเมื่อครบกำหนดการใช้งานได้
37. มีการตั้งค่าสำหรับการควบคุมอุณหภูมิให้กับวัสดุที่แตกต่างกันได้อย่างน้อย 40 ชนิดขึ้นไป
38. มีที่เก็บวัสดุเพื่อที่จะให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถบรรจุวัสดุได้ 6 ม้วน
39. มีระบบควบคุมความชื้น ให้ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 40% และคุณสมบัติอัจฉริยะที่ดูแลทุกขั้นตอนในการทำงาน ไม่ว่าจะเป็น feeder wheel, filament sensor และระบบเปลี่ยนวัสดุอัตโนมัติ
40. มีความสามารถ จัดจำวัสดุอัตโนมัติ ด้วยระบบ NFC Technology และสามารถใช้กับวัสดุคอมโพสิตได้

## บทที่ 9

### รายงานผลการสั่งซื้อวัสดุสำหรับการสร้างวงจร และจัดซื้อเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

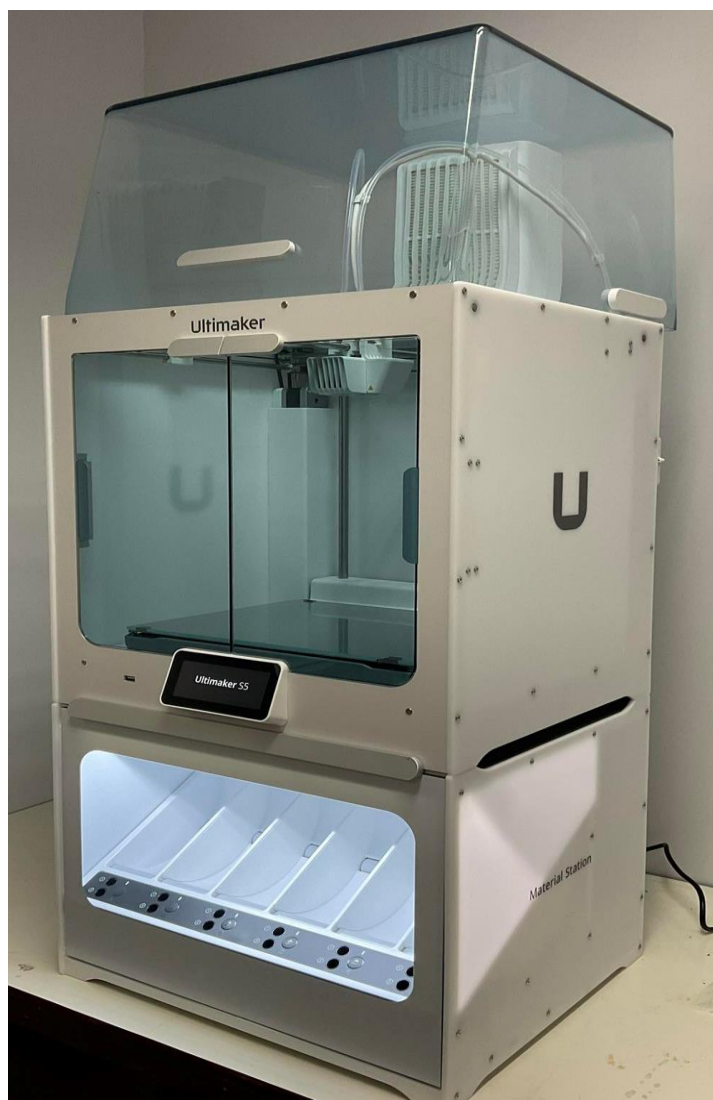
โครงการวิจัยนี้ได้ของบประมาณสำหรับจัดซื้อครุภัณฑ์วิจัย รายการ เครื่องพิมพ์ 3 มิติคุณภาพสูง จำนวน 1 เครื่อง ในวงเงิน 700,000 บาท ซึ่งผู้วิจัยได้ปฏิบัติตามหลักเกณฑ์การจัดซื้อ/จัดจ้างครุภัณฑ์งบโครงการวิจัย โดยจัดทำเอกสารต่าง ๆ เกี่ยวกับการจัดซื้อ/จัดจ้างทุกกระบวนการเสนอผ่านการพัสดุ กลุ่มงานการเงินและพัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ขั้นตอนกระบวนการจัดซื้อ/จัดจ้าง มีดังนี้

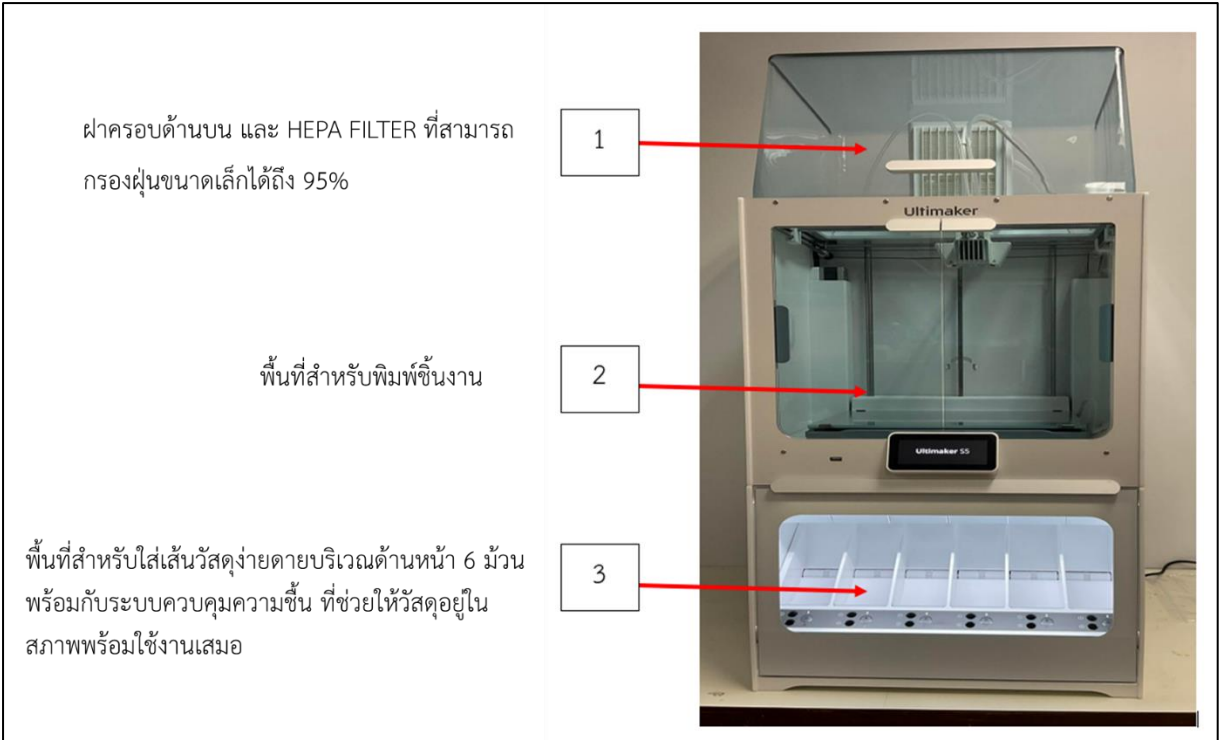
- 1) ขออนุมัติซื้อครุภัณฑ์วิจัย
  - รายการเครื่องพิมพ์ 3 มิติคุณภาพสูง จำนวน 1 เครื่อง ในวงเงิน 700,000 บาท
  - แต่งตั้งคณะกรรมการจัดซื้อ
  - แต่งตั้งคณะกรรมการตรวจรับครุภัณฑ์
  - กำหนดคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องพิมพ์ 3 มิติคุณภาพสูง
  - แบนใบเสนอราคา 3 ราย เนื่องจากวงเงินเกิน 500,000 บาทขึ้นไป
- 2) รายงานผลการจัดซื้อครุภัณฑ์
- 3) จัดทำสัญญาซื้อขาย
- 4) ส่งมอบครุภัณฑ์
- 5) ตรวจรับครุภัณฑ์
- 6) ขออนุมัติเบิกจ่ายค่าครุภัณฑ์

และเอกสารต่าง ๆ เกี่ยวกับการจัดซื้อ/จัดจ้าง แสดงภาคผนวก ก.

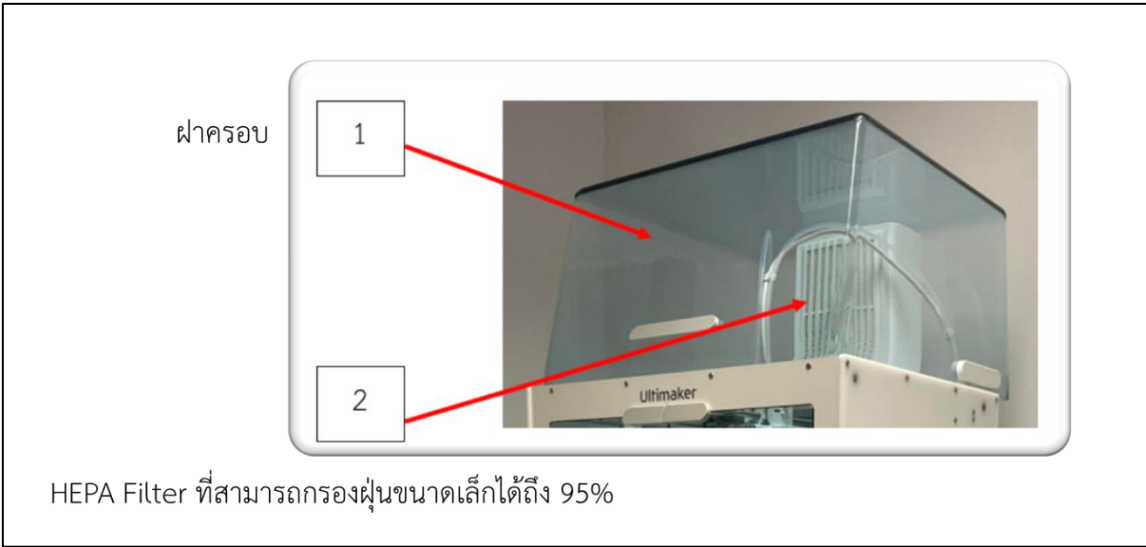
ผลการจัดซื้อครุภัณฑ์วิจัย คือ เครื่องพิมพ์ 3 มิติคุณภาพสูง รุ่น Ultimaker S5 Pro Bundle จำนวน 1 เครื่อง ซึ่งใช้งานร่วมกับโปรแกรม Draftsight software enterprise plus แสดงดังรูปที่ 9.1



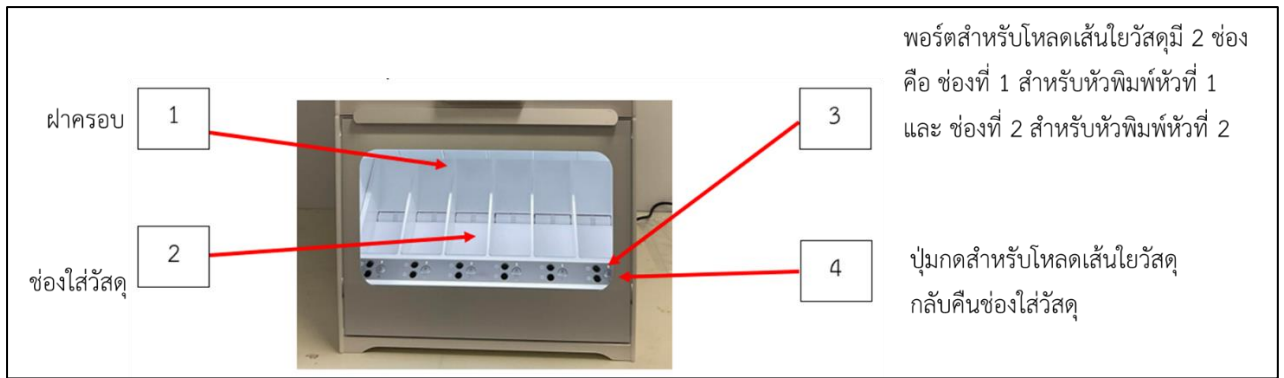
รูปที่ 9.1 เครื่องพิมพ์ 3 มิติคุณภาพสูง รุ่น Ultimaker S5 Pro Bundle



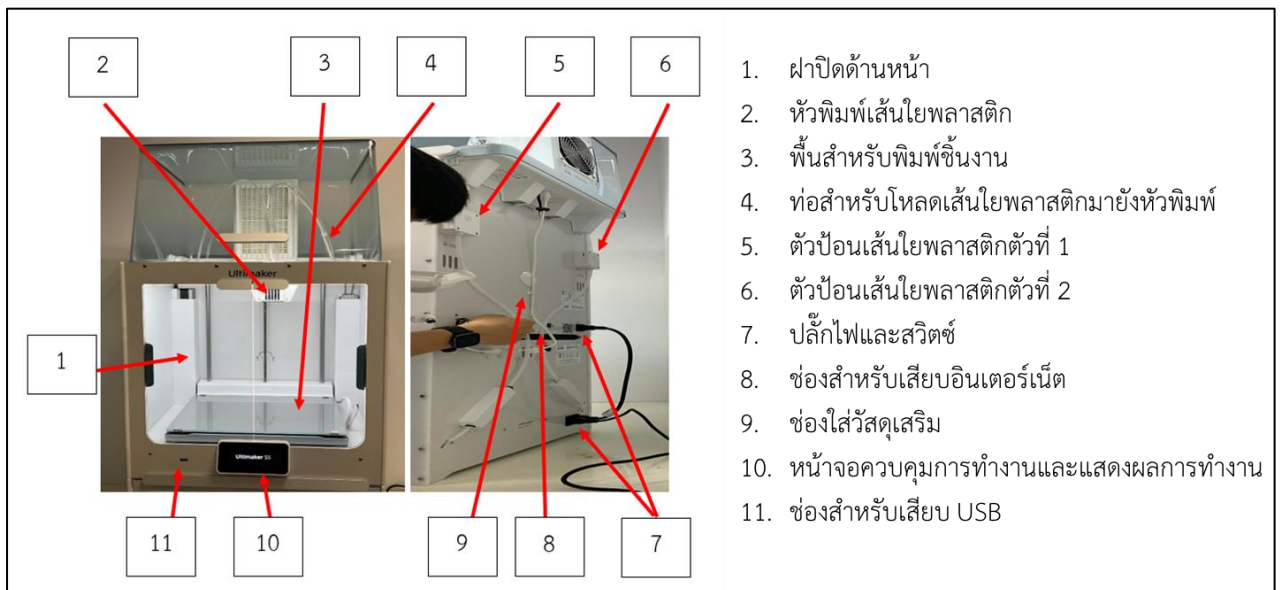
รูปที่ 9.2 ส่วนประกอบเครื่องพิมพ์ 3 มิติ



รูปที่ 9.3 ส่วนประกอบฝาครอบด้านบน



รูปที่ 9.4 ส่วนประกอบของพื้นที่สำหรับช่องใส่วัสดุพิมพ์ พลาสติกชนิดเส้นใย



รูปที่ 9.4 ส่วนประกอบของพื้นที่สำหรับพิมพ์ชิ้นงาน

## บทที่ 10

### แบบโครงสร้างของวงจรรอง CRD ที่สังเคราะห์ได้และผลการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

#### 10.1 การออกแบบโครงสร้างวงจรรอง

##### 10.1.1 ระบบสื่อสาร 5G

สเปกตรัมความถี่มิลลิเมตร 5G ของประเทศไทยได้กำหนดให้ใช้ 5G NR band n258 24.25-27.5 GHz ในช่วงคลื่นนี้ คณะทำงาน 3GPP ออกแบบให้ระบบเครื่องรับส่งสำหรับ 5G ในแถบความถี่นี้เป็นแบบ TDD mode ปัจจุบัน ช่วงแถบ n258 ได้จัดสรรให้กับผู้ประกอบการแล้ว พบว่า การครอบครองคลื่นแถบนี้เป็นดังนี้

< Based on 38.101-2 v17.6 Table 5.2-1, Table 5.4.2.2-1 and 38.104 - Table 5.4.3.1-1 >

NR Operating Band		Uplink (UL) operating band		Downlink (DL) operating band		Duplex Mode	
		BS receive		BS transmit			
		UE transmit		UE receive			
		F <sub>UL_low</sub> - F <sub>UL_high</sub>	total BW	F <sub>DL_low</sub> - F <sub>DL_high</sub>	total BW		
n257	Frequency	26500 MHz-29500 MHz		3,000		TDD	
	ARFCN	2054167 - <1> - 2104166		2054167 - <1> - 2104166			
	GSCN	120 Khz	[24306 - <1> - 24476]		[24306 - <1> - 24476]		
		240 Khz	[24308 - <2> - 24474]		[24308 - <2> - 24474]		
n258	Frequency	24250 MHz-27500 MHz		3,260		TDD	
	ARFCN	2016667 - <1> - 2070833		2016667 - <1> - 2070833			
	GSCN	120 Khz	[24175 - <1> - 24361]		[24175 - <1> - 24361]		
		240 Khz	[24176 - <2> - 24360]		[24176 - <2> - 24360]		

รูปที่ 10.1 แถบความถี่ 5G NR ย่านมิลลิเมตรเวฟ

- 1) บริษัท ทู คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) : 8 ชุด ย่านความถี่ 24.3 – 25.1 GHz แบนด์วิดท์ รวม 800 MHz
- 2) บริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน) : 12 ชุด ย่านความถี่ 25.2 – 26.4 GHz รวม 1200 MHz
- 3) บริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน) : 4 ชุด ย่านความถี่ 26.4 – 26.8 GHz รวม 400 MHz
- 4) บริษัท ทู คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) : 2 ชุด ย่านความถี่ 26.8 – 27.0 GHz รวม 200 MHz

ภาพจำลองการจับจองสเปกตรัมของผู้ประกอบการ 3 ราย 4 ช่วงความถี่เป็นดังรูปที่ 10.2



รูปที่ 10.2 การถือครองแถบคลื่น n258 ของผู้ประกอบการ 3 รายในประเทศไทย

ในโครงการนี้ จะสมมติว่าต้องการออกแบบวงจรกรองแถบผ่านสำหรับผู้ประกอบการ TRUE ซึ่งได้สเปคตรัมในช่วง 24.3 GHz และ 25. GHz กำหนดผลตอบแทนของความถี่ของวงจรกรองแถบผ่านเป็นดังตารางที่ 10.1

ตารางที่ 10.1 ข้อกำหนดไฟฟ้าวงจรกรองแถบผ่านสำหรับ 5G

พารามิเตอร์	ค่า
แถบความถี่ (Frequency band, GHz)	24.3-25.1
ความถี่กลาง (Center frequency : $f_0$ , GHz)	24.8
แบนด์วิดท์ (Bandwidth : BW, MHz)	1200
การสูญเสียย้อนกลับที่น้อยที่สุด (Minimum return loss : RL, dB)	20

จากตารางที่ 10.1 นำค่าไปป้อนในโปรแกรม ซึ่ง แขนง อยู่บนเว็บไซต์ <http://203.154.91.222:5000/index> เพื่อสังเคราะห์เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ส่งผ่าน โดยการป้อนค่าความถี่กลาง แบนด์วิดท์วงจร ค่าอัตราการสูญเสียย้อนกลับ และจำนวนอันดับวงจรกรอง สำหรับลักษณะผลตอบแทนจะกำหนดเป็นแบบสมมาตร ไม่กำหนดความถี่ซีโร และวาดกราฟผลตอบแทนของความถี่ของวงจรกรองที่สังเคราะห์ได้ตั้งแต่ความถี่ 22 GHz ถึง 27 GHz โดยกำหนดความละเอียดในการวาดกราฟ 50 MHz ลักษณะการป้อนค่าเว็บไซต์สำหรับออกแบบเป็นดังรูปที่ 10.3

Enter the centre frequency of filter in MHz

Enter the minimum Return Loss (RL) in passband in dB

Enter the bandwidth in MHz

Enter the order of filter

Specify any finite Trans.  
0 No, 1 Symmetric, 2 Assymmetric

Enter the frequency of finite Trans. Zero in MHz like only positive and both positive and negative  
example 100 110 200 or -100 200 -250

resonator Qu @centre frequency (0 unknown)

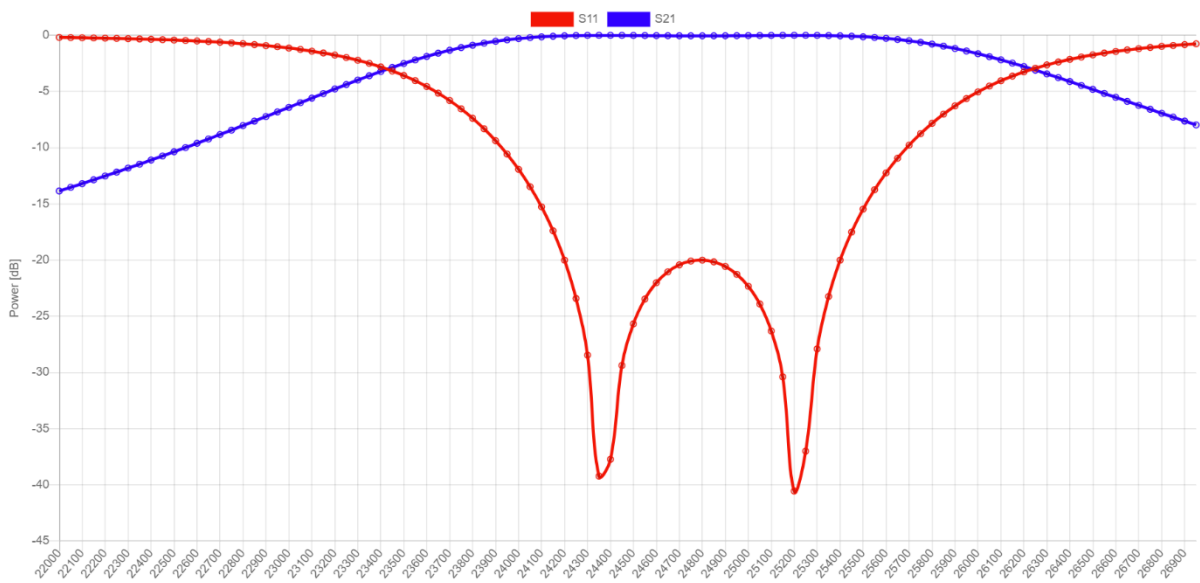
Enter the frequency range for plotting in MHz  
Frequency\_L   
Frequency\_Res   
Frequency\_H

รูปที่ 10.3 พารามิเตอร์สำหรับออกแบบที่ป้อนเข้าโปรแกรมสังเคราะห์เมตริกซ์

ผลการสังเคราะห์เมตริกซ์สัมประสิทธิ์การคัปปลิงเป็นดังสมการ (10.1)

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 1.22474 & 0 & 0 \\ 1.22474 & 0 & 1.65831 & 0 \\ 0 & 1.65831 & 0 & 1.22474 \\ 0 & 0 & 1.22474 & 0 \end{bmatrix} \quad (10.1)$$

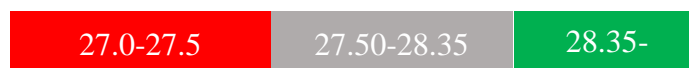
รูปที่ 10.4 แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองแถบผ่าน 2 อันดับที่ออกแบบได้ โดยกำหนดให้ Q ของเรโซเนเตอร์เท่ากับอนันต์



รูปที่ 9.4 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองแถบผ่าน 2 อันดับ สำหรับการสื่อสาร 5G มาตรฐาน n258

### 10.1.2 การใช้งานกิจการดาวเทียม Ka

สำหรับปัจจุบัน คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช) จัดสรร ช่วงความถี่ 2 ช่วงความถี่สำหรับกิจการสื่อสารดาวเทียมย่าน Ka ได้แก่ 27.0 - 27.5 GHz แบนด์วิดท์ 500 MHz และ 28.35 - 28.6 GHz แบนด์วิดท์ 250 MHz โดยมีช่องว่างกว้าง 850 MHz ในช่วง 27.50-28.35 GHz อย่างไรก็ตาม คลื่นความถี่ช่วง 27.0-27.5 GHz จะทับกับย่าน NR n258 ของมาตรฐานความถี่ 5G ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงเลือกออกแบบวงจรกรองความถี่ช่วง 28.35-28.60 GHz แบนด์วิดท์ 250 MHz และจากมาตรฐานที่กำหนดโดยสหภาพโทรคมนาคม (ITU) กำหนดใช้ความถี่นี้เป็นความถี่จากสถานีภาคพื้นดินขึ้นไปยังอวกาศ (Earth-to-Space)



รูปที่ 10.5 แถบคลื่น Ka สำหรับระบบสื่อสารดาวเทียม

ตารางที่ 10.2 ข้อกำหนดไฟฟ้าวงจรกรองแถบผ่านสำหรับการสื่อสารดาวเทียมย่าน Ka

พารามิเตอร์	ค่า
แถบความถี่ (Frequency band, GHz)	28.35-28.60
ความถี่กลาง (Center frequency : $f_0$ , GHz)	28.475
แบนด์วิดท์ (Bandwidth : BW, MHz)	250
การสูญเสียย้อนกลับที่น้อยที่สุด (Minimum return loss : RL, dB)	25

Enter the centre frequency of filter in MHz

Enter the minimum Return Loss (RL) in passband in dB

Enter the bandwidth in MHz

Enter the order of filter

Specify any finite Trans.

0 No, 1 Symmetric, 2 Assymmetric

Enter the frequency of finite Trans. Zero in MHz like only positive and both positive and negative

example 100 110 200 or -100 200 -250

resonator Qu @centre frequency (0 unknown)

Enter the frequency range for plotting in MHz

Frequency\_L

Frequency\_Res

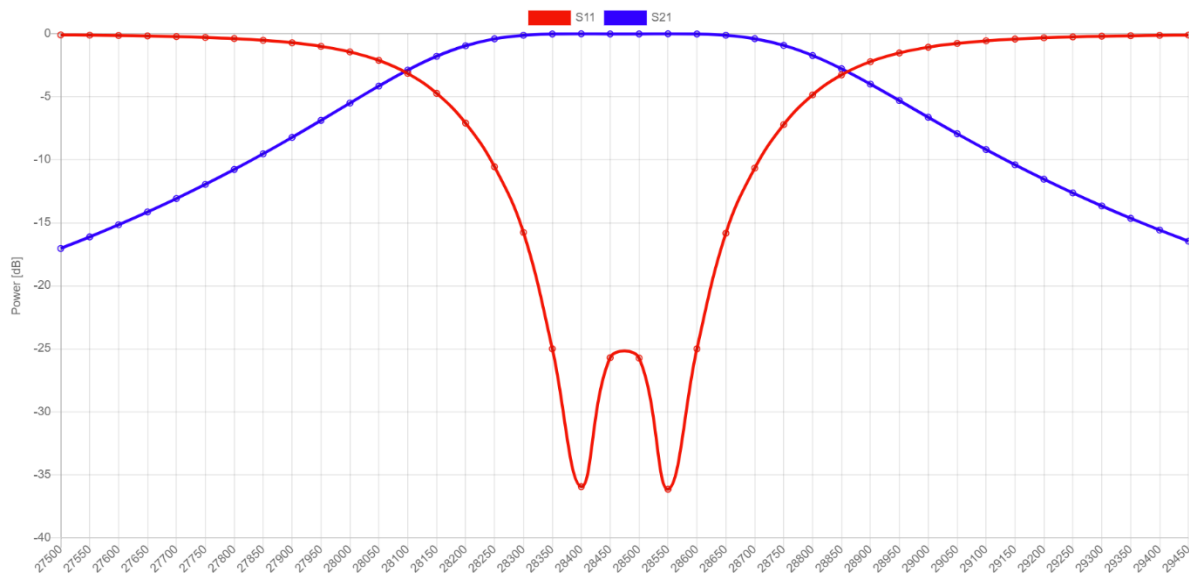
Frequency\_H

รูปที่ 10.6 พารามิเตอร์สำหรับออกแบบที่ป้อนเข้าโปรแกรมสังเคราะห์เมตริกซ์

ผลการสังเคราะห์เมตริกซ์สัมประสิทธิ์การคัปปลิงเป็นดังสมการ (10.2)

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 1.4312 & 0 & 0 \\ 1.4312 & 0 & 2.16996 & 0 \\ 0 & 2.16696 & 0 & 1.4312 \\ 0 & 0 & 1.4312 & 0 \end{bmatrix} \quad (10.2)$$

รูปที่ 10.7 แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองแถบผ่าน 2 อันดับที่ออกแบบได้ โดยกำหนดให้ Q ของเรโซเนเตอร์เท่ากับอนันต์

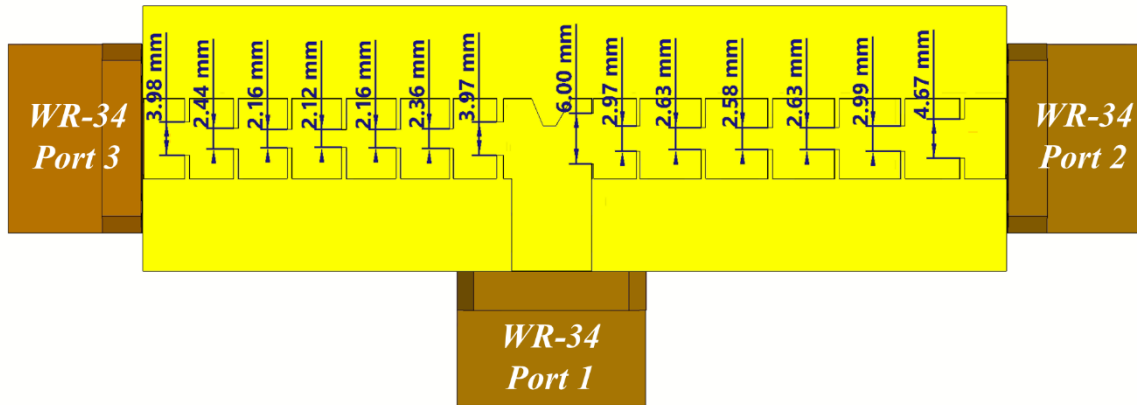


รูปที่ 10.7 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองแถบผ่าน 2 อันดับ สำหรับการสื่อสารดาวเทียมแถบ Ka

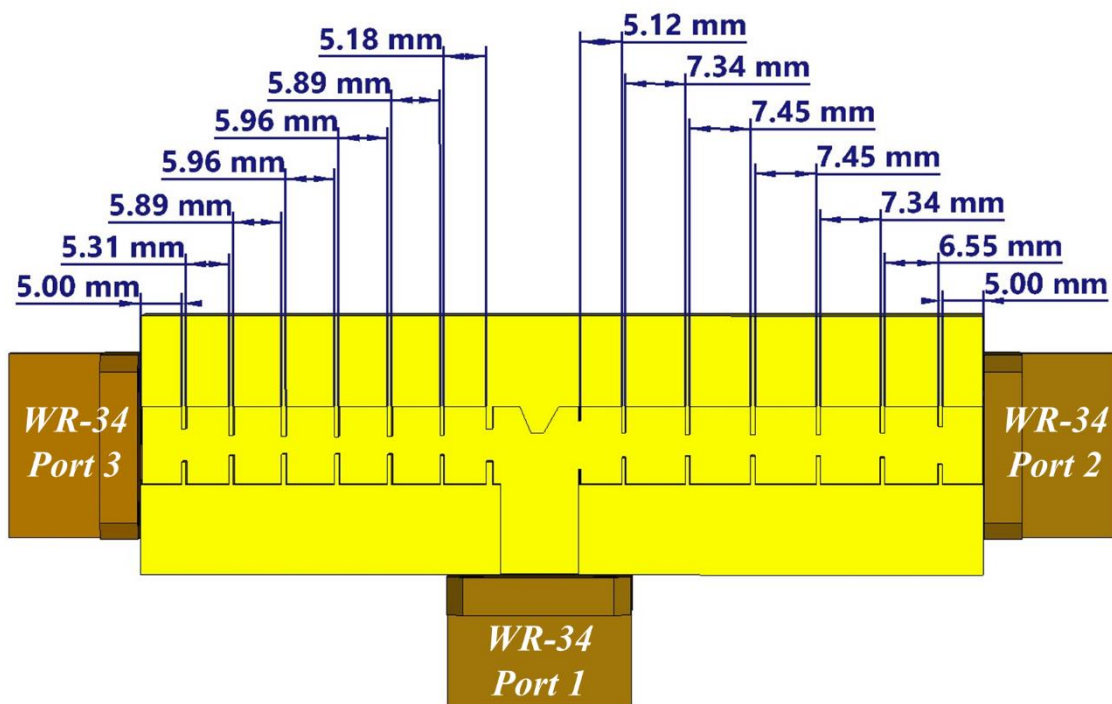
## 10.2 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต้นแบบในโครงสร้างท่อนำคลื่น

การออกแบบวงจรกรองความถี่ต้นแบบผ่านโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า CST Microwave Studio โดยแบ่งการคำนวณ ออกเป็นสองช่วงความถี่ ได้แก่ วงจรกรองสำหรับ 5G Narrow Band Filter และ วงจรกรองความถี่สำหรับการสื่อสารดาวเทียม โดยใช้หลักการออกแบบประเภท IRIS Filter Chebyshev 7<sup>th</sup> order โดยอาศัยการออกแบบผ่านโครงสร้างแบบท่อนำคลื่น (Waveguide) ในการออกแบบนั้นได้ใช้ขนาดของ ท่อนำคลื่น WR-34 โดยมีขนาดความกว้าง 8.636 มิลลิเมตร และสูง 4.318 มิลลิเมตรซึ่งขนาดที่ได้นั้นสามารถ ใช้งานความถี่ในช่วง 22 – 33 GHz โดยมี cut off frequency ที่ 17.357 GHz และใช้งานในโหมด TE<sub>10</sub> ได้ไม่เกิน 34.715 GHz จากรูปที่ 1 แสดงวงจร Diplexer ตามโครงสร้างของท่อนำคลื่นโดยมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน คือ 1) Bottom part waveguide 2) Top part waveguide และ 3) Waveguide flange ขนาด WR-34 จำนวน 3 ตัว เพื่อแปลงสัญญาณภายในท่อนำคลื่นสู่สายนำสัญญาณและต่อเข้าเครื่องวิเคราะห์ โครงข่าย (Vector Network Analyzer) ขนาดของชิ้นงานถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 10.8 โดยชิ้นงานถูกออกแบบ จากวัสดุทองแดงมีค่าความนำไฟฟ้า  $5.8 \times 10^7$  S/m





(ข)



(ค)

รูปที่ 10.9 แสดงภาคตัดขวาง (Cross-section) ของวงจร Diplexer ในโครงสร้างท่อนำคลื่น  
 (ก) ภาคตัดขวาง (Cross-section) ของวงจร Diplexer ในมิติของขนาดความหนาของ Iris wall  
 (ข) แสดงภาคตัดขวาง (Cross-section) ของวงจร Diplexer ในมิติของขนาดความกว้างของ IRIS wall และ  
 (ค) แสดงภาคตัดขวาง (Cross-section) ของวงจร Diplexer ในมิติของระยะที่คลื่นเดินทางในแต่ละช่วงของ  
 วงจรกรองความถี่ทั้งสองตัว

### 10.3 การสังเคราะห์คอมป์ไลน์

#### 10.3.1 การออกแบบเรโซเนเตอร์

การออกแบบเรโซเนเตอร์แบบแกนร่วมหน้าตัดวงกลมที่เป็นทรงกระบอก 2 ชั้นจะใช้ข้อมูลจากกราฟรูปที่ 10.10 พบว่า  $K$  ของเรโซเนเตอร์นี้สัมพันธ์กับพารามิเตอร์  $\sqrt{\epsilon_r} Z_0$  โดย

$$K = \frac{Q}{\sqrt{f(\text{GHz})} D(\text{in.})}$$

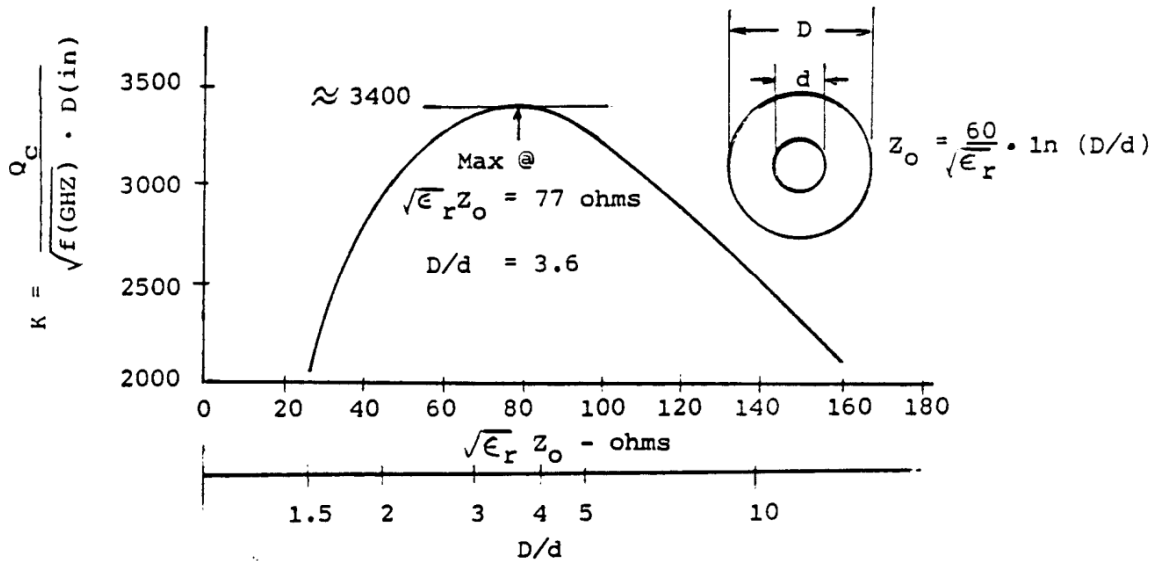
จากสมการพบว่า  $K$  ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $Q$  ของเรโซเนเตอร์นี้จะสูงสุดเท่ากับ 3400 ที่  $\sqrt{\epsilon_r} Z_0$  เท่ากับ 77 โอห์ม กรณีโพรงควิตีเป็นอวกาศว่าง ค่า  $\epsilon_r = 1$  ดังนั้นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของเรโซเนเตอร์  $Z_0$  จึงเท่ากับ 77 โอห์ม

จากความสัมพันธ์ของ  $Z_0$  กับเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของทรงกระบอกชั้นนอก  $D$  และชั้นใน  $d$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d}$$

จะได้ว่า อัตราส่วน  $D/d$  ที่เหมาะสมจะเป็น 3.6 ดังนั้น ในการออกแบบก็จะกำหนดค่า  $Q$  ที่ต้องการและคำนวณค่า  $D$  ที่เหมาะสมจาก

$$D(\text{in.}) = \frac{Q}{3400 \sqrt{f(\text{GHz})}}$$



รูปที่ 10.10 กราฟและสมการสำหรับออกแบบเรโซเนเตอร์แบบเคเบิลแกนร่วม

วงจรรอง กำหนด  $Q$  ที่ต้องการเท่ากับ 7000 สำหรับวงจรรอง 5G แถบ n258 และการสื่อสารดาวเทียมย่าน Ka ตามข้อกำหนดในตารางที่ 10.1 และ 10.2 จะได้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางชั้นนอกของเรโซเนเตอร์ทรงกระบอกสำหรับวงจรรอง 5G ( $D_1$ ) และดาวเทียม ( $D_2$ ) ที่ออกแบบเป็น

$$D_1 = \frac{7000}{3400 \sqrt{24.8}} = 0.413 \text{ นิ้ว (10.50 มิลลิเมตร)}$$

$$D_2 = \frac{7000}{3400 \sqrt{28.475}} = 0.386 \text{ นิ้ว (9.80 มิลลิเมตร)}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทรงกระบอกเรโซเนเตอร์สำหรับวงจร 5G ( $d_1$ ) และดาวเทียม ( $d_2$ ) ที่ออกแบบ  
เท่ากับ

$$d_1 = 0.115 \text{ นิ้ว (2.92 มิลลิเมตร)}$$

$$d_2 = 0.107 \text{ นิ้ว (2.72 มิลลิเมตร)}$$

การเลือกความยาวเรโซเนเตอร์จะเลือกความยาวในช่วง 30-60 องศา กรณีนี้ เลือกความยาว 60 องศา จะได้  
ความยาวเรโซเนเตอร์สำหรับวงจร 5G ( $L_1$ ) และดาวเทียม ( $L_2$ ) เท่ากับ

$$L_1 = 2.02 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$L_2 = 1.76 \text{ มิลลิเมตร}$$

### 10.3.2 การหาระยะระหว่างเรโซเนเตอร์

สำหรับการหาระยะระหว่างเรโซเนเตอร์ 2 ตัว จะสังเคราะห์จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านซึ่งมี  
ความสัมพันธ์กับความถี่เรโซเนเตอร์ 2 ตัวที่อยู่ติดกันโดยจะใช้โปรแกรม CST ช่วยในหาค่าระยะระหว่างเร  
โซเนเตอร์ 2 ตัวและค่า K โดยสังเกตจากกราฟและคำนวณค่า K จากสมการ

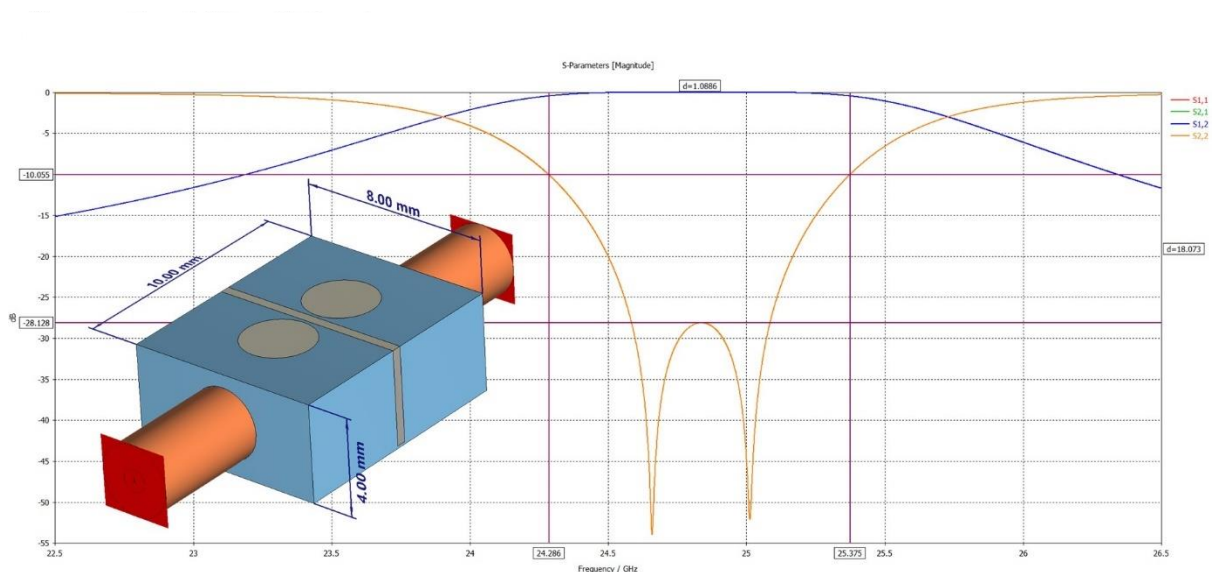
$$k = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 + f_2^2}$$

โดย  $f_1$  และ  $f_2$  คือความถี่กำหนดที่เกิดขึ้นที่ความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำ

### 10.4 ผลการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

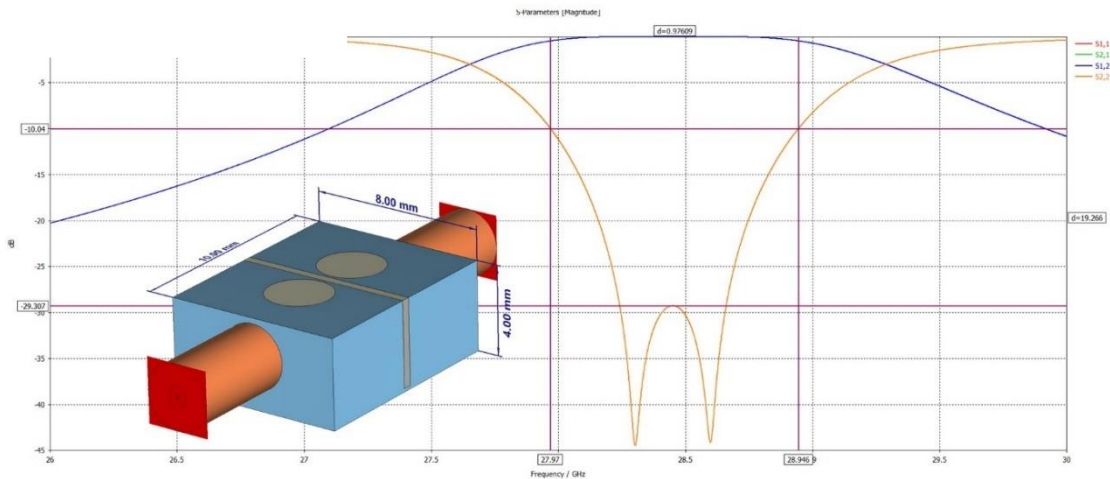
จากขั้นตอนในข้อ 10.3 จะได้มิติของวงจรแบบคอมป์ไลน์ ผลลัพธ์ที่ได้จะได้มิติของวงจรเป็นดังนี้

ผลการคำนวณวงจรกรองต้นแบบทั้งสองวงจรด้วยโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า CST ver  
2023 เป็นดังรูปที่ 10.11 และ 10.12 ตามลำดับ จากรูปผลตอบสนองจะพบว่าเกิดความโพลที่ 2 ตำแหน่งซึ่ง  
แสดงว่าวงจรกรองเป็นแบบแถบผ่าน 2 อันดับ และความถี่กลางที่ได้ตรงกับที่ต้องการ



รูปที่ 10.11 ผลตอบสนองความถี่จากการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรกรองสำหรับ 5G

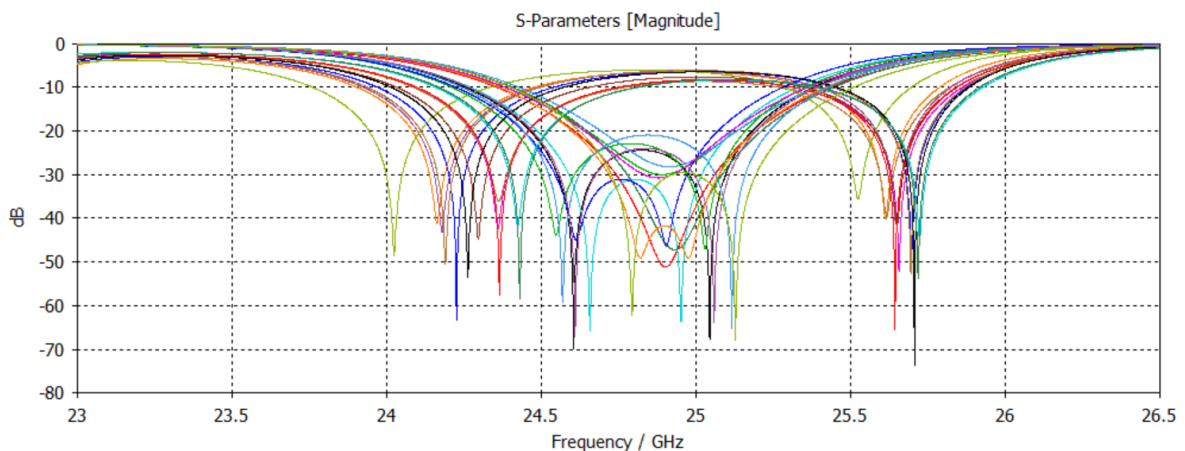
## Narrow Band Filter KaBand



รูปที่ 10.12 ผลตอบสนองความถี่จากการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจรกรองสำหรับการสื่อสารดาวเทียม

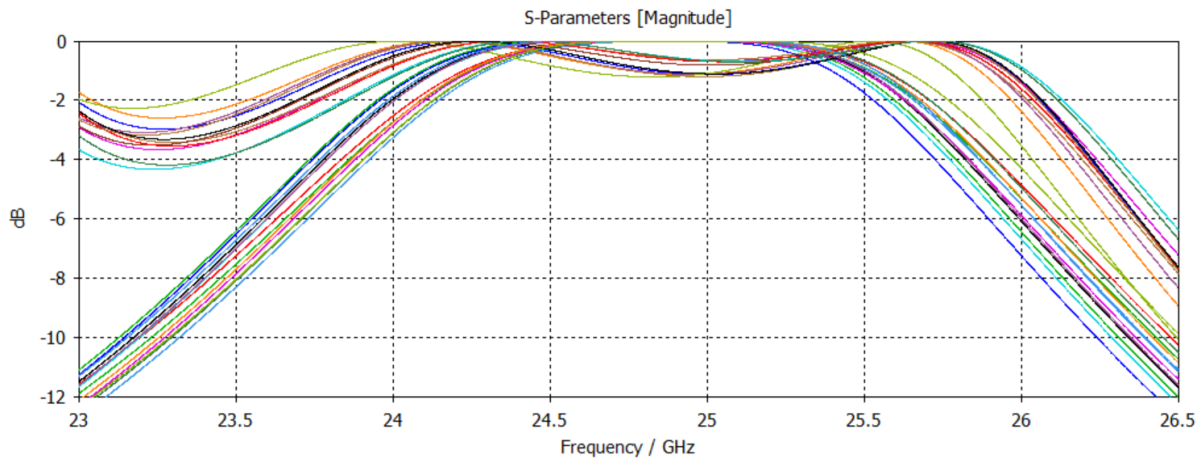
### 10.4.1 เครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ผลการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยกำหนดขีดจำกัดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยความละเอียดในแนวแกน XYZ ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติรุ่น Ultimaker S5 จากคุณสมบัติทางเทคนิคของเครื่องพิมพ์นี้กำหนดว่ามีขีดจำกัดเท่ากับ 6.9, 6.9 และ 2.5 ไมครอนตามแกน x y และ z โดยกำหนดมิติของวงจรกรองให้มีค่าคลาดคลาดเคลื่อนในแนวแกนทั้ง 3 แกน เป็น  $\pm 6.9$ ,  $\pm 6.9$  และ  $\pm 2.5$  ไมครอนตามลำดับ รูปที่ 10.13-10.16 แสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากขีดจำกัดของเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่จะสร้างขึ้นจากผลตอบสนองที่ได้จากการคำนวณพบว่า มีความผิดพลาดจากผลตอบสนองของวงจรกรองต้นแบบค่อนข้างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่เป็นช่องไอริสที่คั่นระหว่างเรโซเนเตอร์ ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นจากการผลิต ผู้วิจัยจะเพิ่มกลไกในการปรับแต่งซึ่งจะเป็นสกรูจูน (tuning screws) ที่ปลายเรโซเนเตอร์ทุกตัว



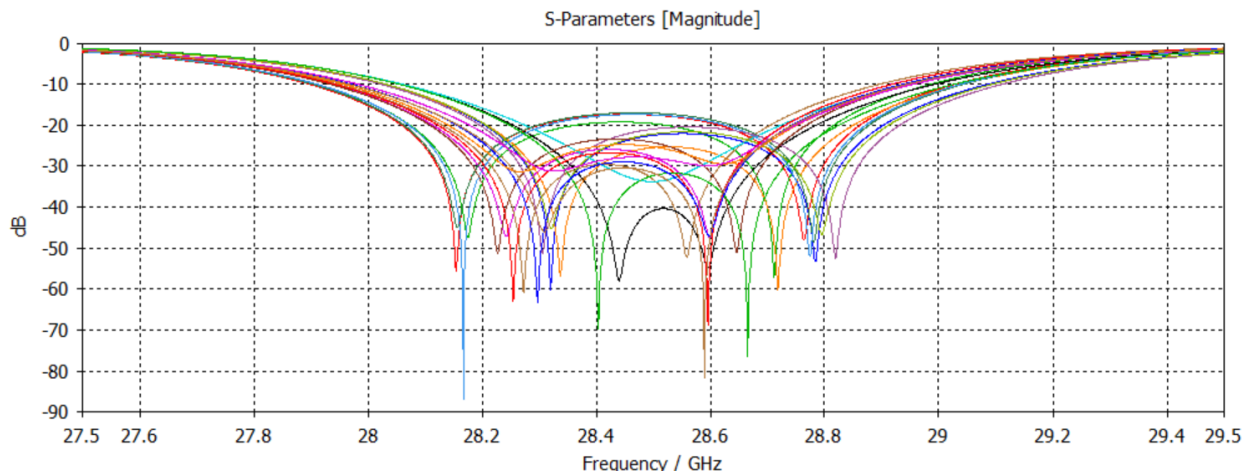
รูปที่ 10.13 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของวงจรกรอง 5G เมื่อมิติของวงจรคลาดเคลื่อนจากขีดจำกัดของเครื่องพิมพ์

(หมายเหตุ : สีของเส้นกราฟถูกกำหนดเองอัตโนมัติของโปรแกรม CST ซึ่งแต่ละสีแสดงค่าผลตอบสนองที่มาจากค่าการปรับค่ามิติของวงจรกรองต้นแบบในรูปแบบที่ 10.10 ทุกค่าให้มีความคลาดเคลื่อนจากเดิม)



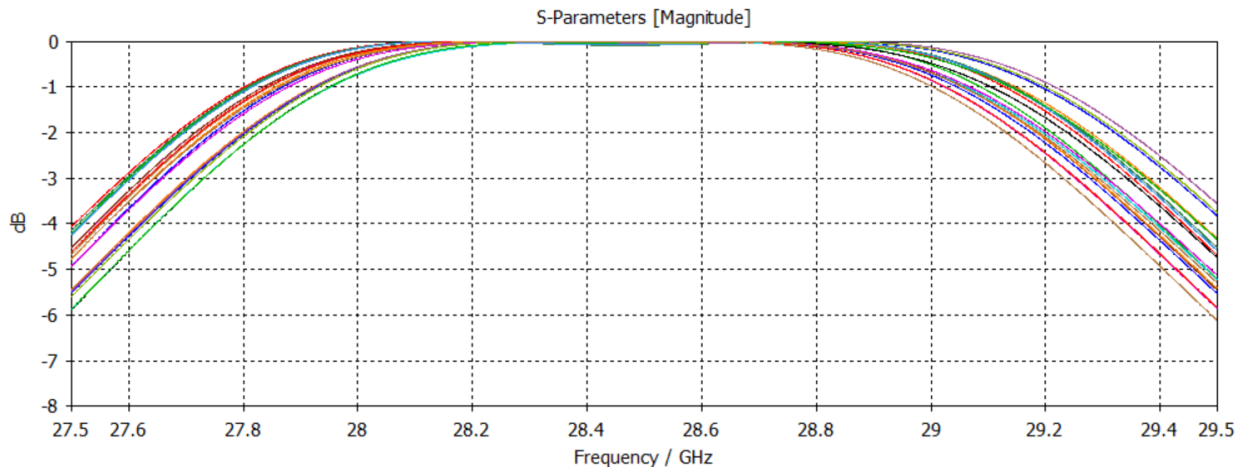
รูปที่ 10.14 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการแทรกของวงจรกรอง 5G เมื่อมิติของวงจรคลาดเคลื่อนจากขีดจำกัดของเครื่องพิมพ์

(หมายเหตุ : สีของเส้นกราฟถูกกำหนดเองอัตโนมัติของโปรแกรม CST ซึ่งแต่ละสีแสดงค่าผลตอบสนองที่มาจากค่าการปรับค่ามิติของวงจรกรองต้นแบบในรูปแบบที่ 10.10 ทุกค่าให้มีความคลาดเคลื่อนจากเดิม)



รูปที่ 10.15 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของวงจรกรองสำหรับระบบสื่อสารดาวเทียมเมื่อมิติของวงจรคลาดเคลื่อนจากขีดจำกัดของเครื่องพิมพ์

(หมายเหตุ : สีของเส้นกราฟถูกกำหนดเองอัตโนมัติของโปรแกรม CST ซึ่งแต่ละสีแสดงค่าผลตอบสนองที่มาจากค่าการปรับค่ามิติของวงจรกรองต้นแบบในรูปแบบที่ 10.10 ทุกค่าให้มีความคลาดเคลื่อนจากเดิม)

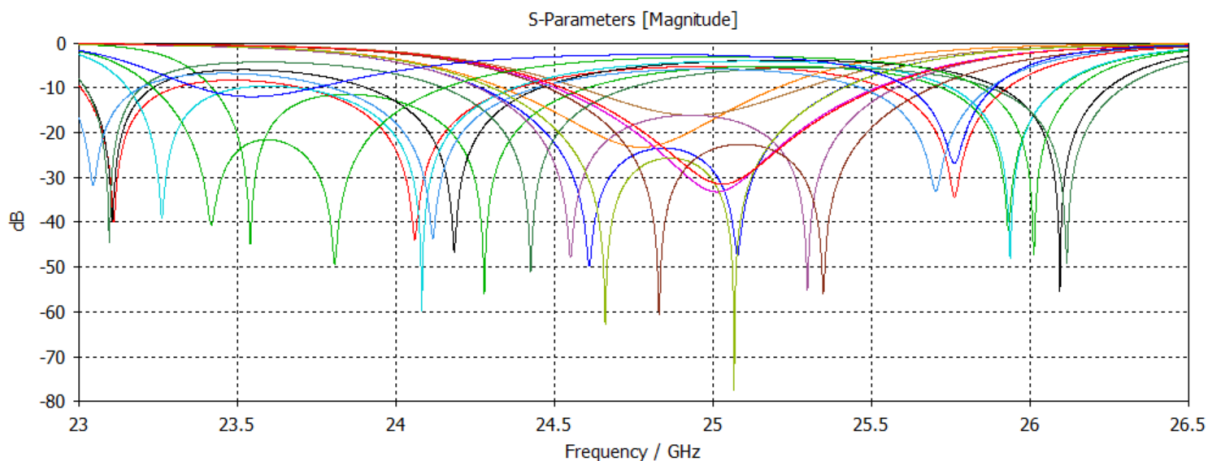


รูปที่ 10.16 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการแทรกของวงจรรองสำหรับระบบสื่อสารดาวเทียมเมื่อมิติของวงจรถัดเคลื่อนจากขีดจำกัดของเครื่องพิมพ์

(หมายเหตุ : สีของเส้นกราฟถูกกำหนดเองอัตโนมัติของโปรแกรม CST ซึ่งแต่ละสีแสดงค่าผลตอบสนองที่มาจากค่าการปรับค่ามิติของวงจรรองต้นแบบในรูปที่ 10.10 ทุกค่าให้มีความคลาดเคลื่อนจากเดิม)

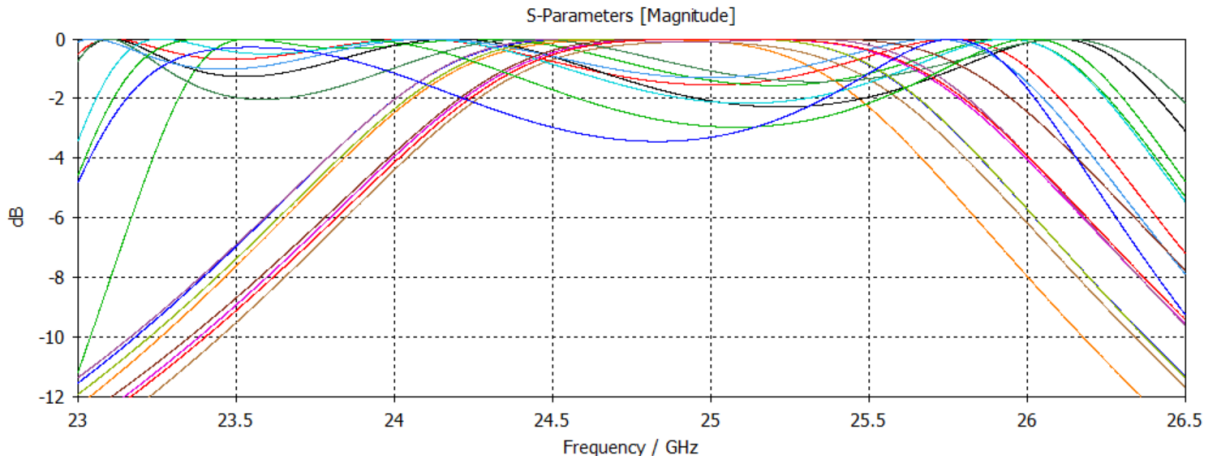
#### 10.4.2 เครื่องกัด CNC

สำหรับการผลิตด้วยเครื่องกัด CNC ผู้วิจัยคาดว่าจะใช้เครื่องกัดที่มีความแม่นยำสูงโดยมีความคลาดเคลื่อนทั้ง 3 แกนเท่ากับ 10 ไมครอน ดังนั้น ในการคำนวณด้วยโปรแกรมสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะกำหนดให้มีมิติวงจรถัดทั้ง 3 แกนคลาดเคลื่อน  $\pm 10$  ไมครอน ผลตอบสนองความถี่ของวงจรรอง 5G และระบบสื่อสารดาวเทียมจากการคำนวณด้วยโปรแกรม CST ที่ได้เป็นดังรูป 10.17-10.20



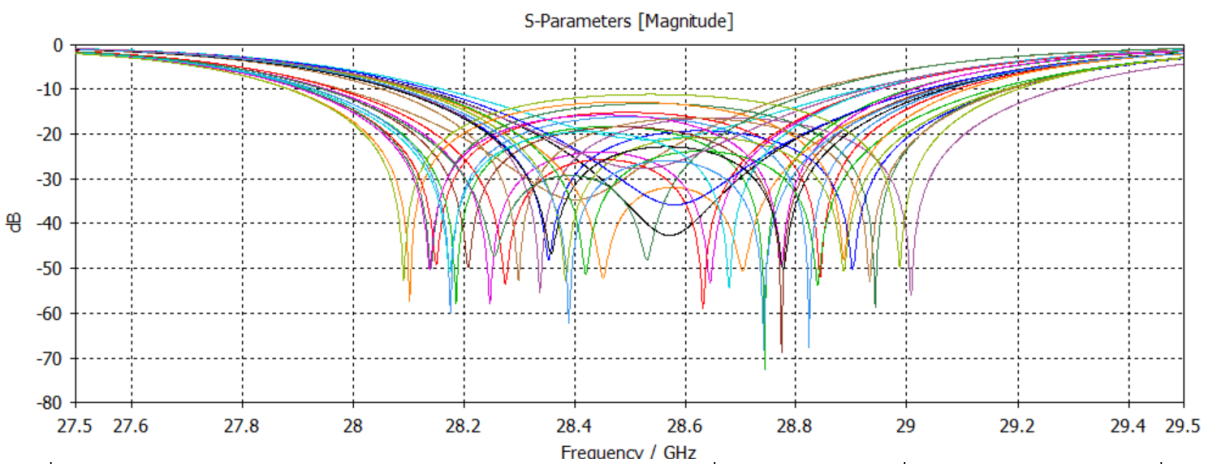
รูปที่ 10.17 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของวงจรรอง 5G เมื่อมิติของวงจรถัดเคลื่อนจากขีดจำกัดของเครื่องกัด CNC

(หมายเหตุ : สีของเส้นกราฟถูกกำหนดเองอัตโนมัติของโปรแกรม CST ซึ่งแต่ละสีแสดงค่าผลตอบสนองที่มาจากค่าการปรับค่ามิติของวงจรรองต้นแบบในรูปที่ 10.10 ทุกค่าให้มีความคลาดเคลื่อนจากเดิม)



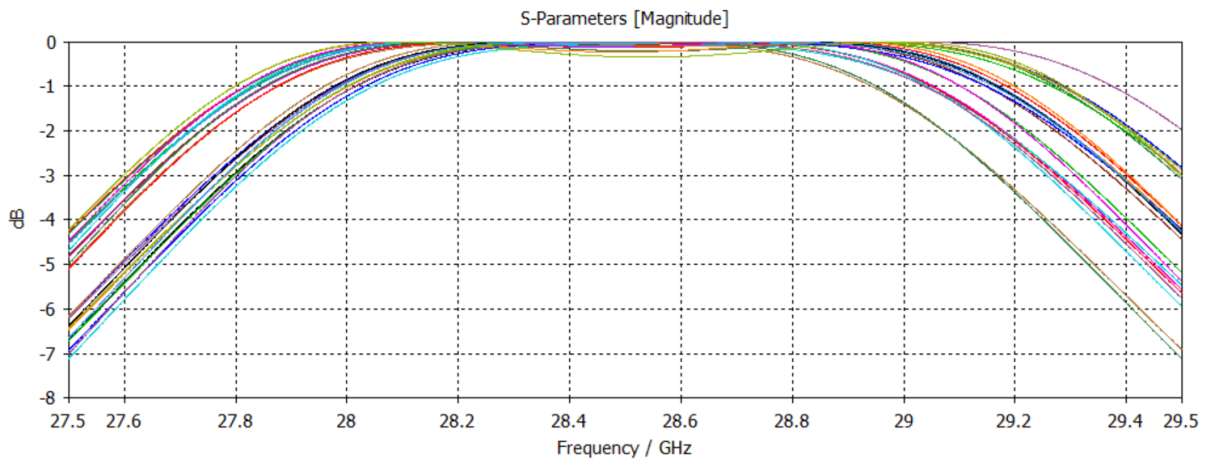
รูปที่ 10.18 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการแทรกของวงจรรอง 5G เมื่อมิติของวงจรถูกลดเคลื่อนจากขีดจำกัดของเครื่อง CNC

(หมายเหตุ : สีของเส้นกราฟถูกกำหนดเองอัตโนมัติของโปรแกรม CST ซึ่งแต่ละสีแสดงค่าผลตอบแทนที่มาจากการปรับค่ามิติของวงจรรองต้นแบบในรูปที่ 10.10 ทุกค่าให้มีความคลาดเคลื่อนจากเดิม)



รูปที่ 10.19 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของวงจรรองสำหรับระบบสื่อสารดาวเทียมเมื่อมิติของวงจรถูกลดเคลื่อนจากขีดจำกัดของเครื่อง CNC

(หมายเหตุ : สีของเส้นกราฟถูกกำหนดเองอัตโนมัติของโปรแกรม CST ซึ่งแต่ละสีแสดงค่าผลตอบแทนที่มาจากการปรับค่ามิติของวงจรรองต้นแบบในรูปที่ 10.10 ทุกค่าให้มีความคลาดเคลื่อนจากเดิม)

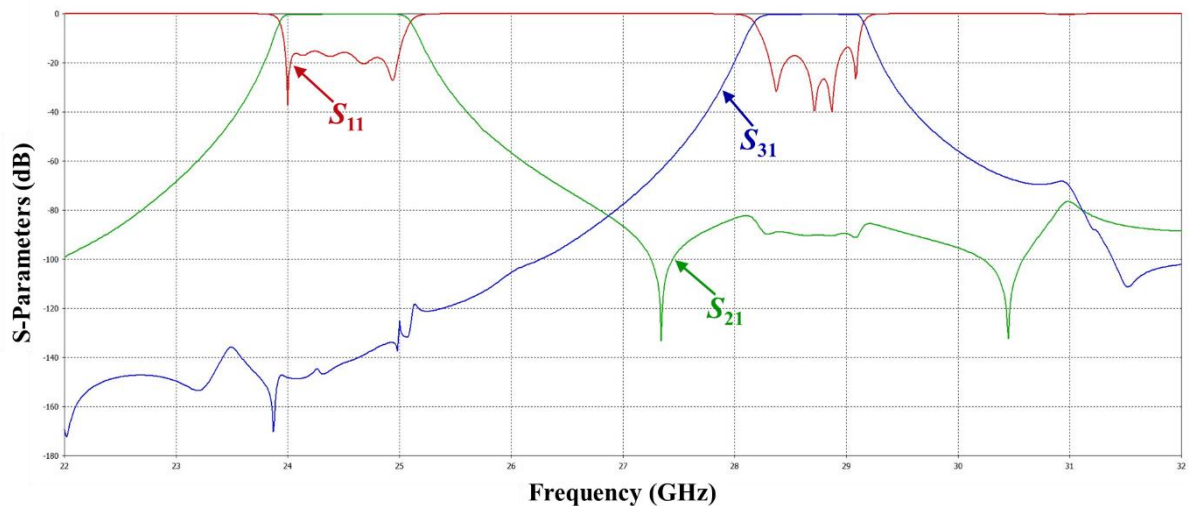


รูปที่ 10.20 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการแทรกของวงจรกรองสำหรับระบบสื่อสารดาวเทียมเมื่อมิติของวงจรคลาดเคลื่อนจากขีดจำกัดของเครื่อง CNC

(หมายเหตุ : สีของเส้นกราฟถูกกำหนดเองอัตโนมัติของโปรแกรม CST ซึ่งแต่ละสีแสดงค่าผลตอบสนองที่มาจากค่าปรับค่ามิติของวงจรกรองต้นแบบในรูปที่ 10.10 ทุกค่าให้มีความคลาดเคลื่อนจากเดิม)

### 10.4.3 วงจร Diplexer ในโครงสร้างแบบท่อนำคลื่น

โดยในการ Simulation ผ่านโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (CST Microwave Studio) จะได้ผลตอบสนองทางความถี่ ออกมาทั้งหมดสองช่วงความถี่ตามรูปที่ 10.21



รูปที่ 10.21 ผลตอบสนองทางความถี่จากการคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของวงจร Diplexer ในโครงสร้างแบบท่อนำคลื่น

จากผลการคำนวณที่เกิดขึ้นวงจร diplexer สามารถกรองความถี่ได้ในสองช่วงความถี่คือ กรองความถี่สำหรับ 5G Narrow Band Filter ในช่วง 23.93 GHz ถึง 25.11 GHz และ กรองความถี่สำหรับการสื่อสารดาวเทียม ในช่วง 28.18 GHz ถึง 29.158 GHz เมื่อคิดที่ -3 dB Bandwidth และผลการสะท้อนของคลื่นในพอร์ตที่ 1 (Reflection Coefficient,  $S_{11}$ ) มีค่ามากที่สุดที่ -13.87 dB ในช่วงวงกรองความถี่สำหรับการสื่อสาร

ดาวเทียมที่ความถี่ 29.013 GHz สำหรับผลของ Insertion loss ที่เกิดขึ้นในวงจรกรองความถี่นั้นมีค่าสูงสุดที่ -0.249 dB และ -0.28 dB ในวงจรกรองสำหรับ 5G Narrow Band Filter และ วงจรกรองความถี่สำหรับการสื่อสารดาวเทียม ตามลำดับ

## 10.5 อ้างอิง

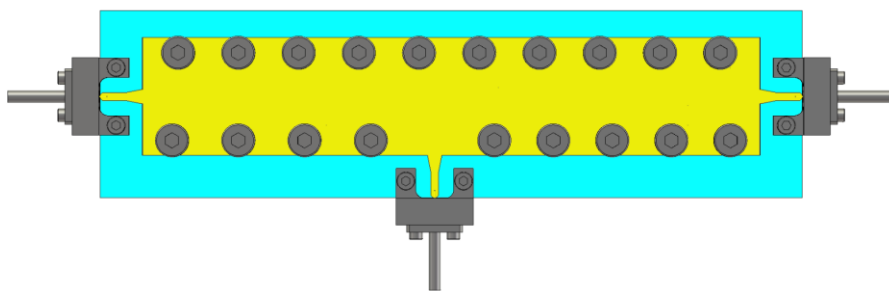
[1] [https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G\\_FR\\_Bandwidth.html](https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FR_Bandwidth.html)

[2] แผนการจัดสรรคลื่นความถี่สำหรับกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากลของประเทศไทยระยะ 5 ปี (พ.ศ. 2562 – 2566)

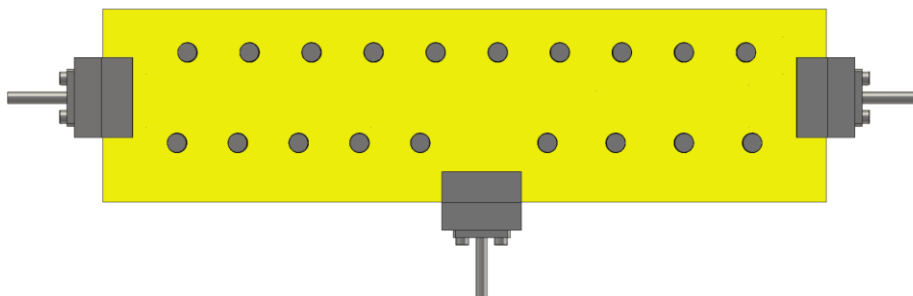
## บทที่ 11

### การปรับค่าพารามิตีต่างๆ และการออกแบบวงจรรองแถบผ่าน CRD ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

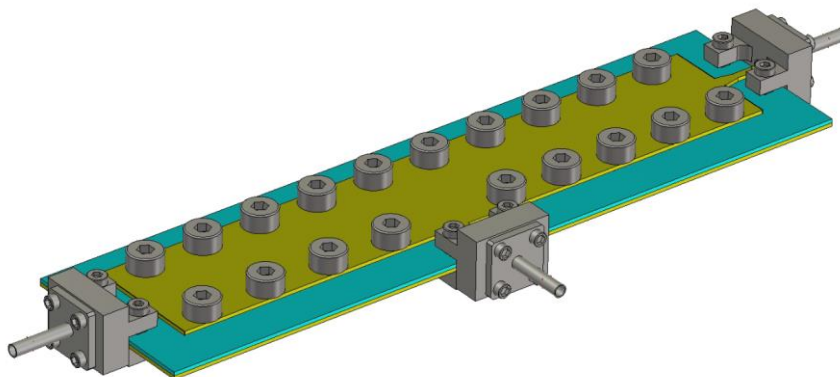
ในการออกแบบวงจรรองแถบผ่านแถบ CRD ผู้วิจัยใช้โครงสร้างแบบฐานรองท่อนำคลื่น (Substrate Integrated Waveguide: SIW) โดยวัสดุที่ใช้สำหรับการสร้างแบบฐานรองทำด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติผ่านเครื่องพิมพ์สามมิติเทคโนโลยีการขึ้นรูปจากของเหลวผ่านแสง (Digital Light Processing: DLP) จากรูปที่ 11.1 จะเป็นการแสดงแบบ 3 มิติของวงจรรองแถบผ่าน CRD ในด้านบน ด้านล่างและแบบภาพฉายตามลำดับ



(ก)



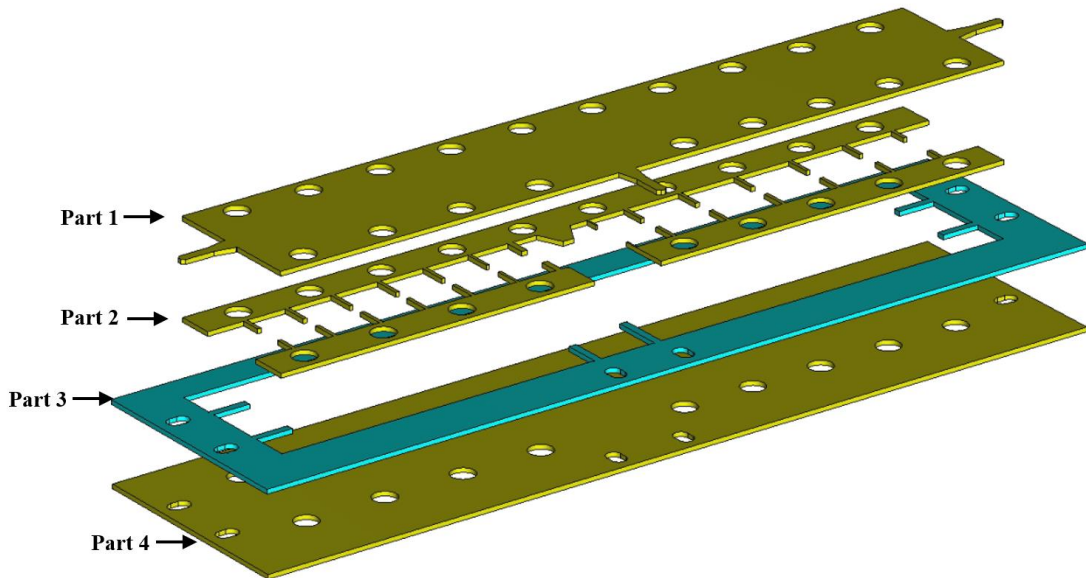
(ข)



(ค)

รูปที่ 11.1 แบบ 3 มิติของวงจรรองแถบผ่าน CRD (ก) ด้านบน (ข) ด้านล่าง และ (ค) แบบภาพฉาย

ทั้งนี้ในการออกแบบวงจรรองแถบผ่าน CRD ในแบบจำลองผ่านโปรแกรมวิเคราะห์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า CST ถูกแบบออกเป็น 4 องค์ประกอบหลักๆ ดังแสดงในภาพที่ 11.2

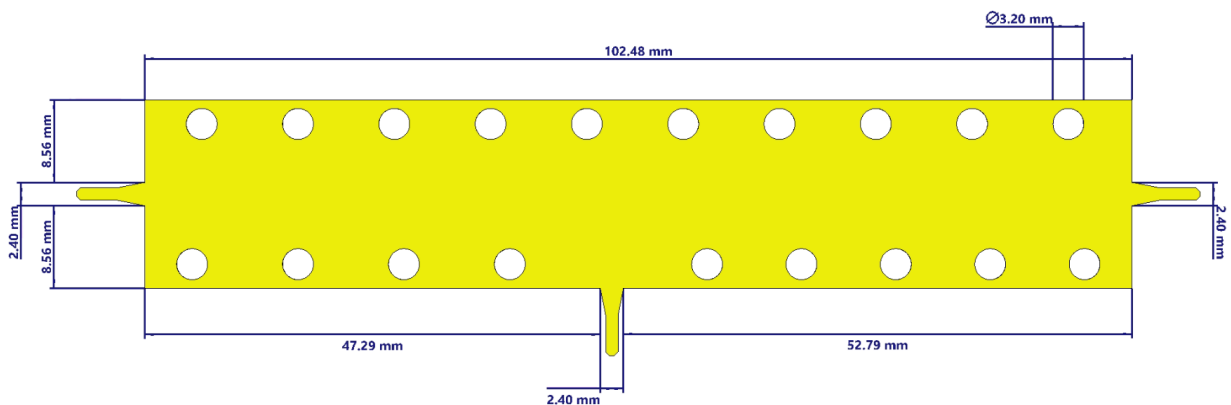


รูปที่ 11.2 โครงสร้าง 3 มิติภายในวงจรรองแถบผ่าน CRD ที่ได้ออกแบบขึ้นโดยมี 4 องค์ประกอบหลัก

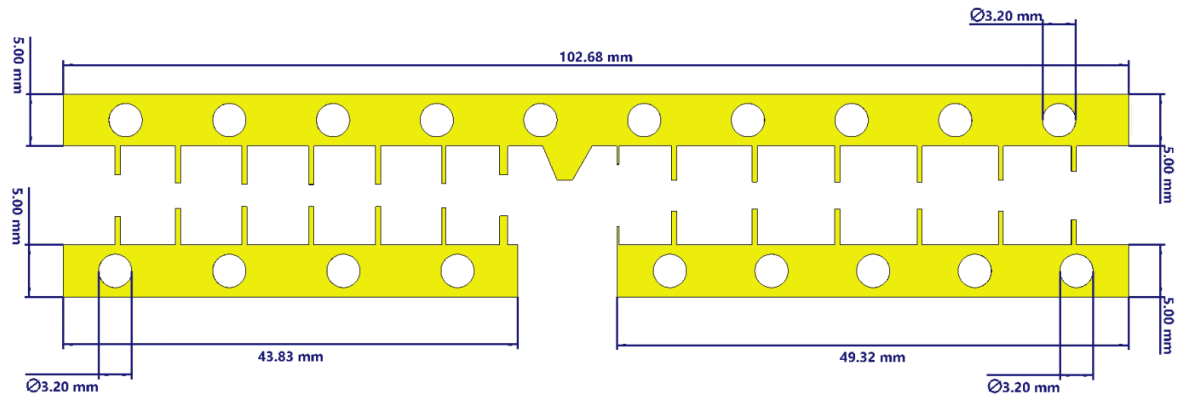
จากรูปที่ 11.2 องค์ประกอบหลักทั้ง 4 ประกอบด้วยชั้นส่วนดังนี้

- Part 1 ชั้นบนของวงจรรองแถบผ่าน CRD โดยเป็นส่วนของชุดนำสัญญาณทั้ง 3 พอร์ต
- Part 2 ส่วนกั้นคลื่นภายในท่อนำคลื่นของวงจรร 3 มิติประกอบด้วยชั้นส่วนย่อยจำนวน 3 ชั้น
- Part 3 ฐานรองโครงสร้างทำจากเรซินในงานพิมพ์สามมิติ
- Part 4 ชั้นล่างของวงจรรองแถบผ่าน CRD ทำหน้าที่เป็นกราวด์ให้กับวงจร

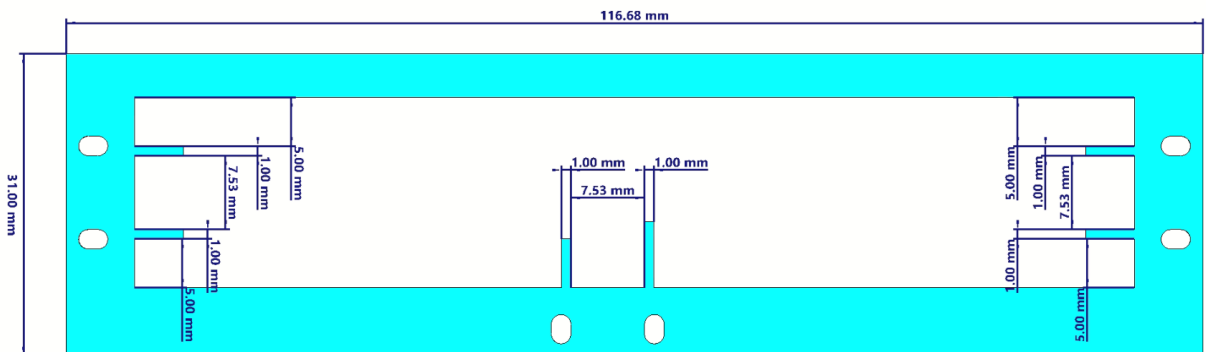
ในการออกแบบ 3 มิติของวงจรรองแถบผ่าน CRD ผ่านโปรแกรมวิเคราะห์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า CST พร้อมทั้งการปรับแต่งขนาดภายในโปรแกรมให้ได้ขนาดที่ได้ตอบสนองทางด้านความถี่ที่ดีที่สุด โดยขนาดขององค์ประกอบหลักทั้ง 4 ถูกแสดงต่อในภาพที่ 11.3, 11.4, 11.5 และ 11.6 ตามลำดับ



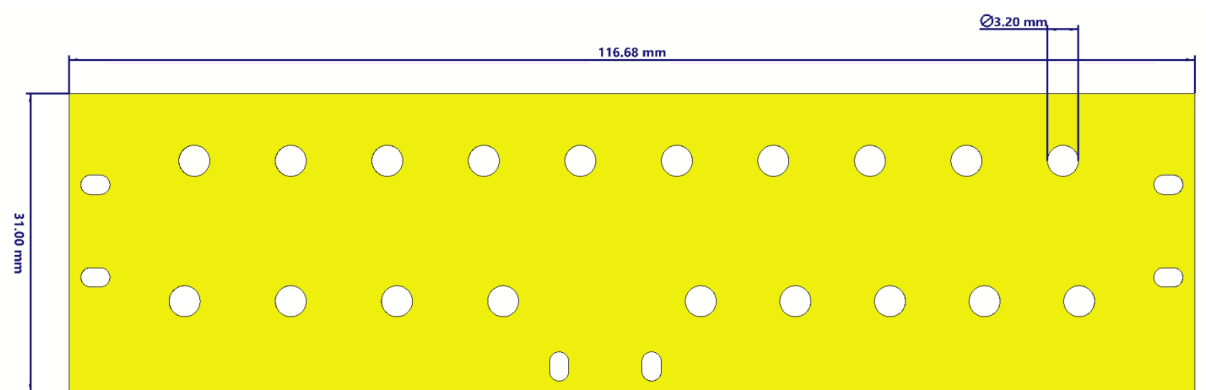
รูปที่ 11.3 ขนาดของแบบ 3 มิติชั้นบนสุดของวงจรรองแถบผ่าน CRD



รูปที่ 11.4 ขนาดของแบบ 3 มิติส่วนกันคลื่นภายในท่อนำคลื่นของวงจรรองแถบผ่าน CRD



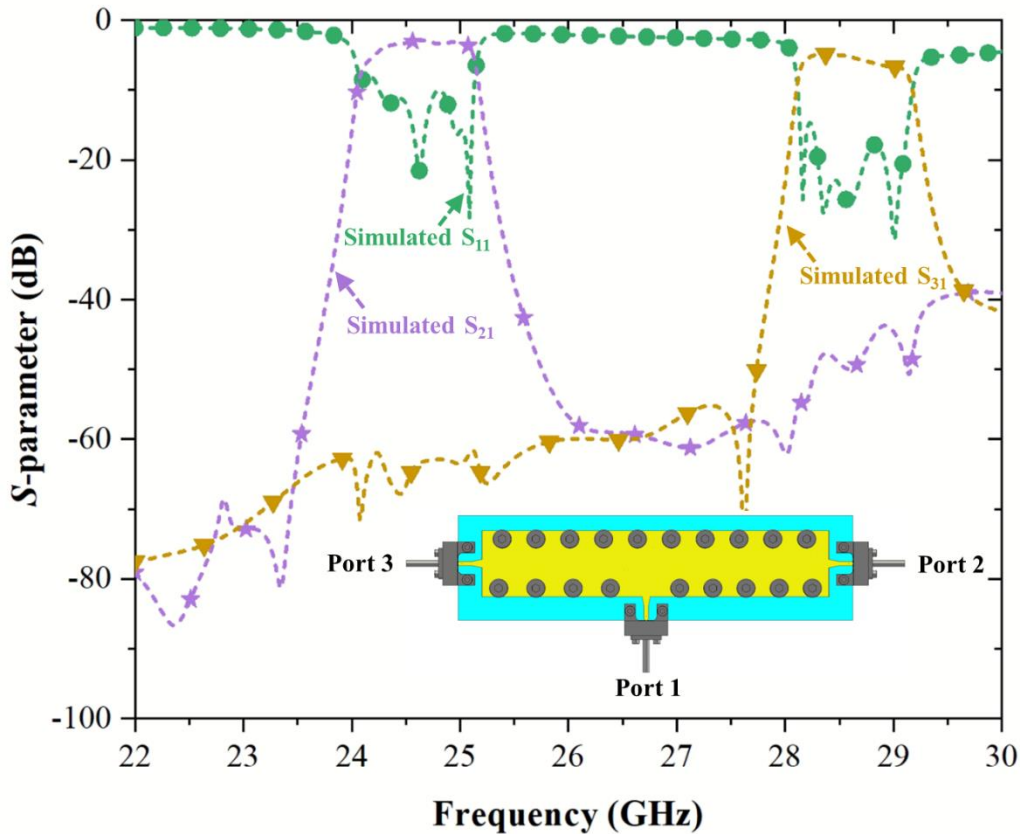
รูปที่ 11.5 ขนาดของแบบ 3 มิติส่วนฐานรองโครงสร้างทำจากเรซินในงานพิมพ์สามมิติ



รูปที่ 11.6 ขนาดของแบบ 3 มิติชิ้นล่างของวงจรรองแถบผ่าน CRD

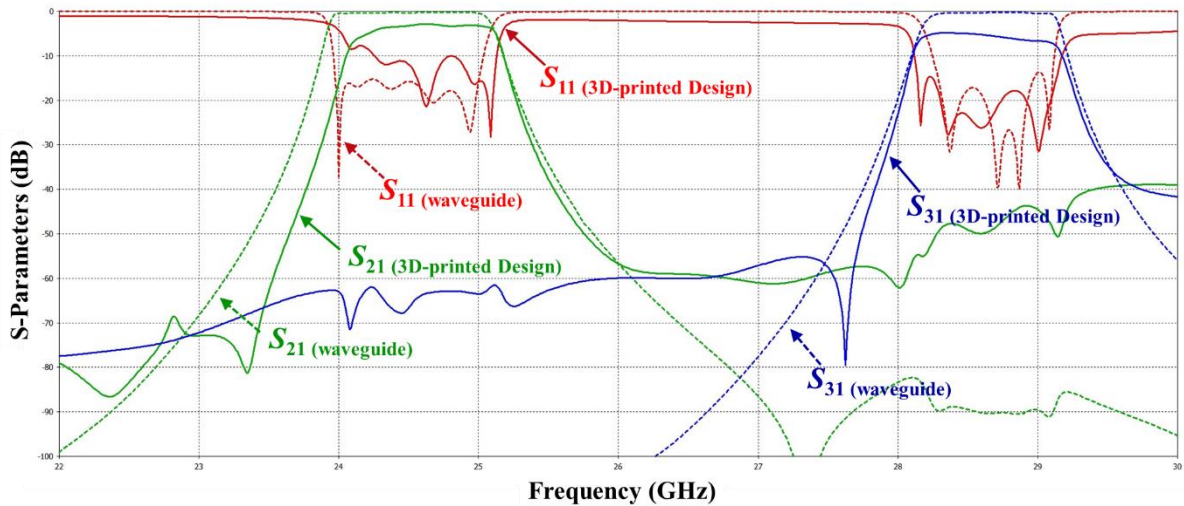
ทั้งนี้หลังจากที่ได้ขนาดทั้ง 4 องค์ประกอบครบเรียบร้อยแล้วจะทำการประกอบทั้ง 4 องค์ประกอบเข้าด้วยกันแล้วยึดด้วยน็อตขนาด M3 ตัวผู้และตัวเมียจำนวน 19 ตัว เพื่อประกอบให้เป็นวงจรรองแถบผ่าน CRD เมื่อประกอบชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการต่อพอร์ต สัญญาณเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อกับเครื่อง

วิเคราะห์โครงข่ายจำนวน 3 พอร์ต โดยพอร์ตนั้นจะมีขนาด 2.92 mm เพื่อให้สามารถใช้งานครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ DC – 40 GHz ได้ โดยรูปที่ 11.1 (ค) แสดงแบบภาพฉาย 3 มิติของวงจรรองแถบผ่าน CRD รูปที่ 11.7 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ผ่านโปรแกรมวิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า CST จากผลที่ได้จากแบบจำลองของวงจรรองแถบผ่าน CRD ได้จำนวนสองแถบผ่าน โดยแถบผ่านที่ 1 อยู่ในช่วงความถี่ 24.06 – 25.17 GHz และแถบผ่านที่ 2 อยู่ในช่วงความถี่ 28.09 – 29.19 GHz



รูปที่ 11.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองผ่านแถบจากโปรแกรมวิเคราะห์ทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า CST

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบวงจรรองความถี่ทั้งสองรูปแบบเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองผ่านแถบในโครงสร้างแบบท่อนำคลื่นและโครงสร้างเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติในรูปที่ 11.8



รูปที่ 11.8 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่ในโครงสร้างแบบท่อนำคลื่น และโครงสร้างเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ

จากผลการเปรียบเทียบนั้นแสดงให้เห็นว่าวงจรรองความถี่ในโครงสร้างของท่อนำคลื่นมีผลการตอบสนองทางความถี่ที่ดีกว่าวงจรรองความถี่ในโครงสร้างเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ อย่างไรก็ตามการสร้างวงจรรองความถี่โครงสร้างท่อนำคลื่นมีข้อจำกัดในการสร้างเนื่องจากเครื่อง CNC ที่ใช้งานต้องมีความแม่นยำสูงและมีกำลังในการกัดที่สูงอีกทั้งวัสดุที่ใช้ในชิ้นงานคือทองแดง ซึ่งจำเป็นต้องจัดหาทองแดงก้อนขนาดใหญ่ และไม่มีขายอยู่ในท้องตลาดโดยทั่วไป อีกทั้งการใช้งานวงจรรองความถี่ในรูปแบบโครงสร้างท่อนำคลื่นยังต้องอาศัยการเปลี่ยนแปลงสัญญาณจากท่อนำคลื่นมาเป็นสายนำสัญญาณผ่านทาง Waveguide Adapter WR-34 ซึ่งมีราคาสูงคิดเป็นค่าใช้จ่าย \$1,080 ต่อพอร์ต [1] เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลในด้านการใช้งานและราคาที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานแล้วนั้น ทางผู้วิจัยตัดสินใจเลือกทำการสร้างวงจรรองความถี่ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ เนื่องจากมีราคาที่ถูกว่าและเป็นประโยชน์ในการพัฒนาต่อยอดอุปกรณ์ทางด้านความถี่ต่างๆ ในอนาคต

### 11.1 อ้างอิง

- [1] <https://www.pasternack.com/wr-34-2.92mm-female-waveguide-coax-adapter-22-ghz-33-ghz-pe9827-p.aspx>

## บทที่ 12

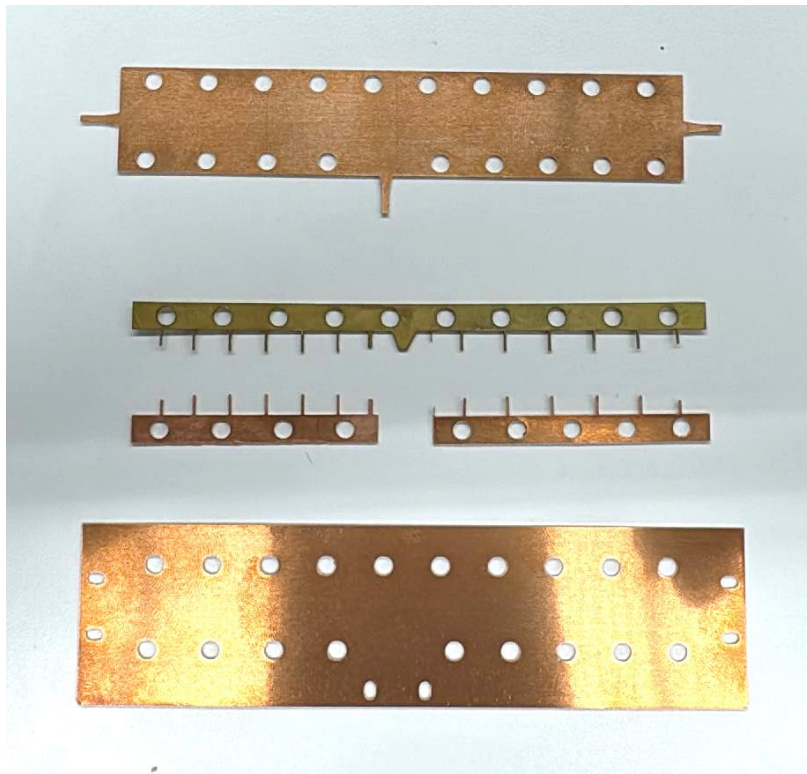
### ผลการทดสอบสมรรถนะของวงจรรอง CRD โดยวัดผลตอบสนองความถี่

#### 12.1 การสร้างวงจรรอง CRD โดยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบผ่านโปรแกรมเรียบร้อยแล้วทางทีมงานวิจัยได้นำเอาแบบ 3 มิติมาสร้างจริงโดยใช้เทคนิคการตัดด้วยไฟเบอร์เลเซอร์สำหรับงานโลหะซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนด้านบน ด้านล่าง และผนังกันคลื่นภายในวงจร อีกทั้งส่วนของฐานรอนนั้นถูกสร้างด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ Anycubic รุ่น Photon Ultra โดยในการขึ้นรูปชิ้นงานสามมิตินั้นใช้เรซินประเภท 3D Printing UV Sensitive Resin ซึ่งตอบสนองกับการขึ้นรูปชิ้นงาน UV wavelength 405 nm และมีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

- Layer Thickness : 0.05 mm
- Normal Exposure Time: 2 second
- Z Lift Distance: 6 mm
- Z Lift Speed: 5 mm/s

ชิ้นงานที่สร้างเสร็จถูกแสดงในรูปที่ 12.1 และรูปที่ 12.2 แสดงวงจรรองแถบผ่าน CRD เมื่อทำการประกอบเสร็จแล้ว



รูปที่ 12.1 ชิ้นส่วนองค์ประกอบที่ถูกสร้างเสร็จสำหรับวงจรรองแถบผ่าน CRD

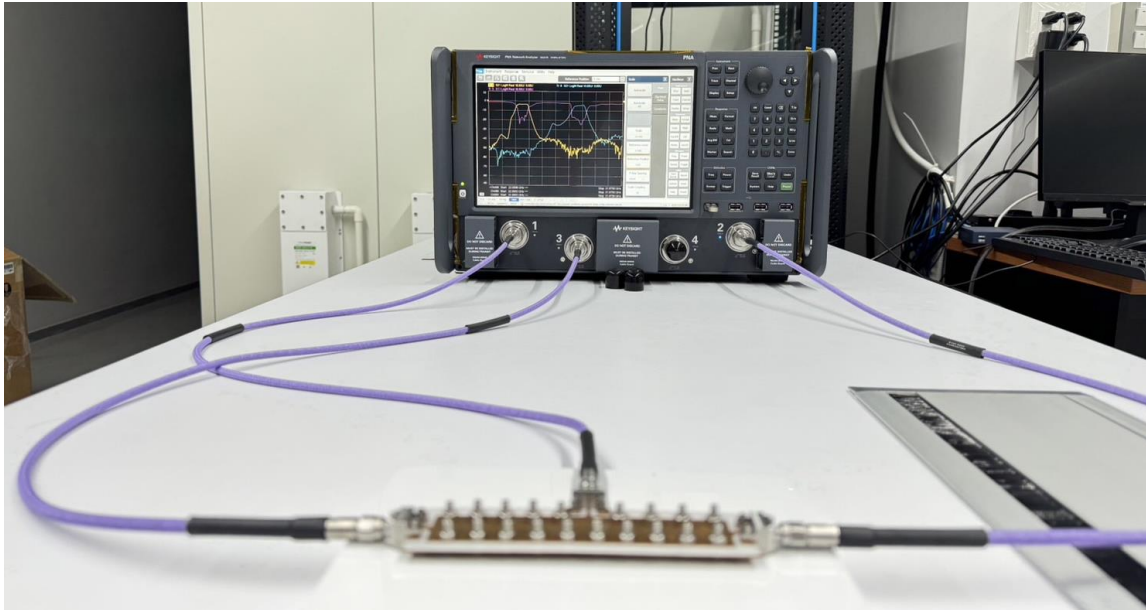


รูปที่ 12.2 วงจรกรรกรองแถบผ่าน CRD เมื่อทำการประกอบเสร็จแล้ว

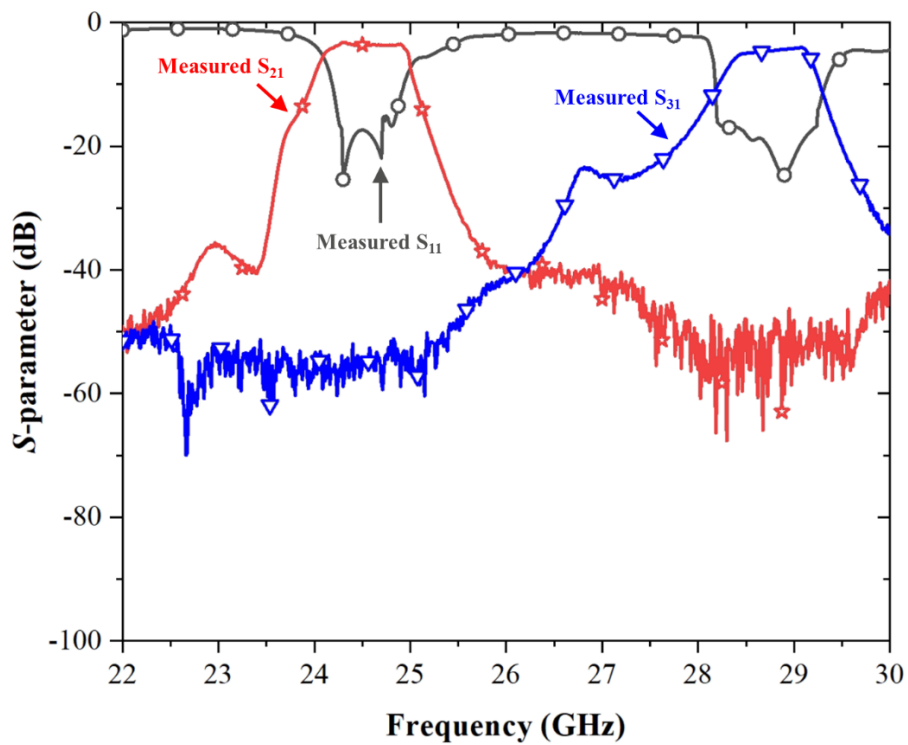
## 12.2 การทดสอบสมรรถนะของวงจรกรรกรอง CRD โดยวัดผลตอบสนองความถี่กับเครื่องวิเคราะห์โครข่ายอัตโนมัติในห้องปฏิบัติการชั้นสูงที่มหาวิทยาลัยลีดส์

สำหรับการวัดทดสอบวงจรกรรกรองแถบผ่าน CRD ได้ทำการวัดผลผ่านเครื่องวิเคราะห์โครข่ายอัตโนมัติ VNA รุ่น PNA-X Microwave Network Analyzer, 4 Ports, 67 GHz โดยทำการ Calibration ผ่าน Electronics Calibration ในขนาดพอร์ต 2.92 mm ซึ่งรองรับการทำงานถึงความถี่ 40 GHz โดยปรับตั้งย่านการวัดเป็นเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- Start Frequency : 22 GHz
- Stop Frequency : 32 GHz
- Frequency span : 10 GHz
- Number of points : 801
- Power port : 0 dB
- Measurement Bandwidth: 1 kHz



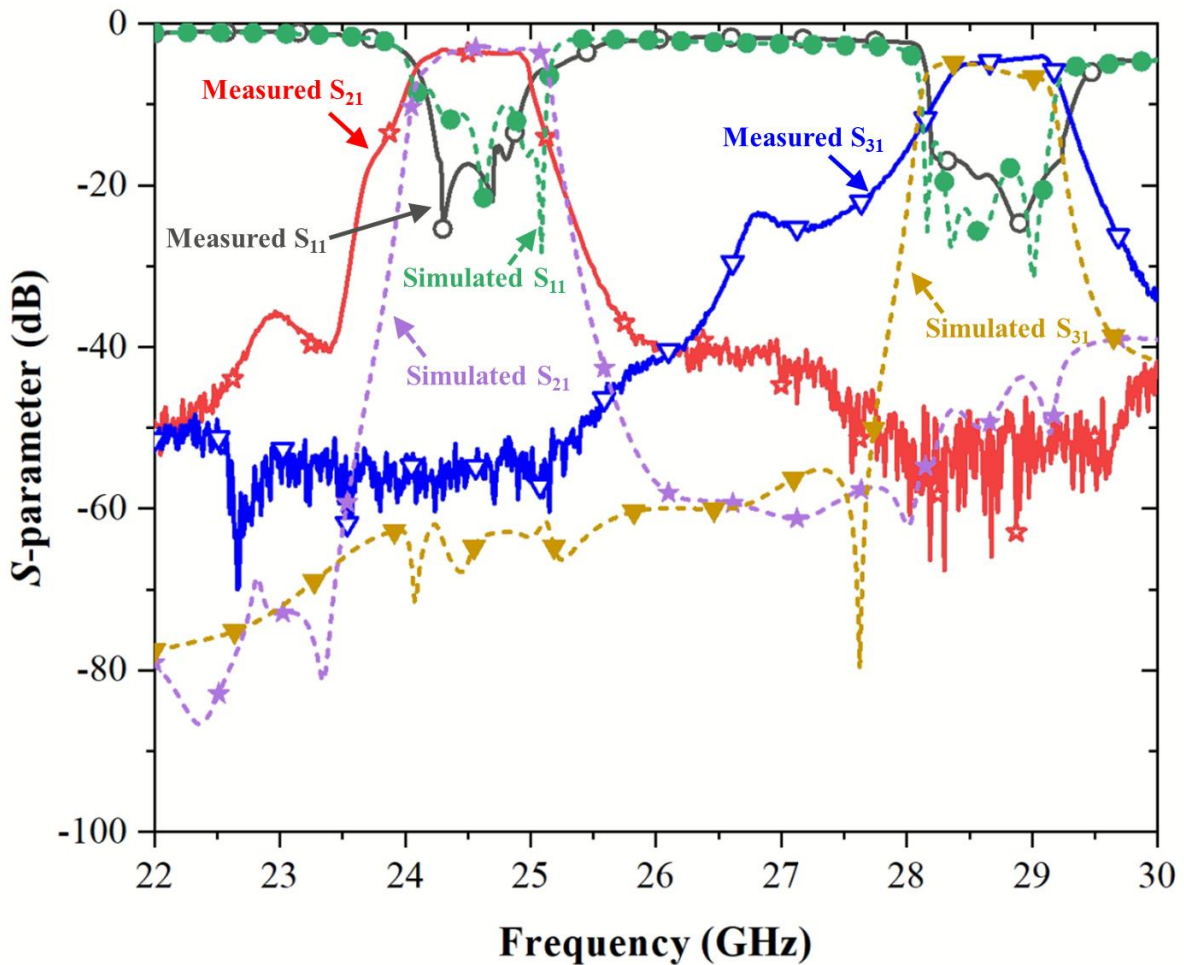
รูปที่ 12.3 แสดงผลการต่อวงจรกรองแถบผ่านเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่าย PNA-X Microwave Network Analyzer, 4 Ports, 67 GHz



รูปที่ 12.4 ผลการตอบสนองทางความถี่ S-parameter

จากผลการวัดที่ได้นั้นได้จำนวนสองแถบผ่าน โดยแถบผ่านที่ 1 อยู่ในช่วงความถี่ 24.075 – 24.98 GHz และ แถบผ่านที่ 2 อยู่ในช่วงความถี่ 28.32 – 29.2 GHz

### 12.3 ผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองความถี่



รูปที่ 12.5 ผลการตอบสนองทางความถี่เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองและผลการวัด

รูปที่ 12.5 แสดงผลการเปรียบเทียบแบบจำลองทางไฟฟ้าของวงจรกรองแถบผ่านเทียบกับผลการวัดจากเครื่องวิเคราะห์เครือข่าย PNA-X Microwave Network Analyzer, 4 Ports, 67 GHz โดยผลตอบสนองที่ได้ยังสามารถแสดงคุณสมบัติการเป็นวงจรกรองผ่านแถบชนิดสองแถบได้ โดยโดยแถบผ่านที่ 1 อยู่ในช่วงความถี่ 24.06 – 25.17 GHz และ แถบผ่านที่ 2 อยู่ในช่วงความถี่ 28.09 – 29.19 GHz สำหรับแบบจำลอง และ แถบผ่านที่ 1 อยู่ในช่วงความถี่ 24.075 – 24.98 GHz และ แถบผ่านที่ 2 อยู่ในช่วงความถี่ 28.32 – 29.2 GHz สำหรับการวัด

## ความเป็นไปได้ในการสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟด้วยเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ : กรณีศึกษา สายอากาศแบบแพทช์

มิตรชัย จงเชียวชำนาญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

### Feasibility Study of Millimetre-wave Passive Circuits using 3D Printing Techniques: Patch Antenna Case Study

Mitchai Chongcheawchamnan

Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเครื่องพิมพ์ 3 มิติมาสร้างเป็นวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟ ในการศึกษา จะรวบรวมเครื่องพิมพ์ 3 มิติมาจัดเป็นกลุ่ม ซึ่งผลการจัดกลุ่มเทคนิคการพิมพ์จะได้ 3 กลุ่มได้แก่ เทคนิค FDM/FFF SLA และ SLS จากนั้น จะวิเคราะห์ประเมินข้อดี ข้อเสีย และขีดจำกัด ของแต่ละเทคนิค โดยพิจารณาสมรรถนะของเทคนิค คุณภาพของชิ้นงาน และต้นทุนค่าใช้จ่าย ถัดมา ผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟโดยกำหนดกรณีศึกษาเป็นสายอากาศแพทช์ที่มีตัวป้อนแบบสายส่งไมโครสตริปที่ทำงานความถี่ 40 GHz และสมมติให้สร้างด้วยเทคนิคการพิมพ์ทั้ง 3 เทคนิคและวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของมิติสายอากาศและผลกระทบของผิวที่ไม่ราบเรียบจากเทคนิคการพิมพ์แต่ละเทคนิคที่จะทำให้เกิดการสูญเสียในวงจรมากขึ้น จากผลการวิเคราะห์พบว่า เทคนิคการพิมพ์แบบ FDM/FFF และ SLA เป็นเทคนิคที่เหมาะสมกว่าเทคนิค SLS ในการสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟเนื่องจากให้ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าและให้ผิวรูปทรงที่ราบเรียบกว่า ได้วงจรที่ให้สมรรถนะการทำงานตรงกับที่ออกแบบไว้

**คำสำคัญ:** มิลลิเมตรเวฟ, วงจรพาสซีฟ, เทคนิคพิมพ์ 3 มิติ, สายอากาศ

#### Abstract

This article investigates the feasibility of utilizing 3D printers to fabricate millimeter-wave passive circuits. In this study, several 3D printers are studied and categorized into 3 groups of techniques which are Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication (FDM/FFF), Stereolithography (SLA), and Selective Laser Sintering (SLS). The advantages, disadvantages, and limitations of each technique are analyzed, considering their technical capabilities, workpiece quality, and cost. Subsequently, the researchers analyze the potential of creating millimeter-wave circuits by applying the aforementioned 3D printing techniques.

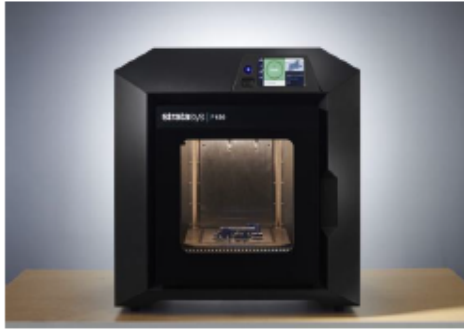
The case study is fabricating a microstrip-fed patch antenna at 40 GHz with three printing techniques. The analysis involves assessing dimensional variations of the microstrip line and the impact of surface roughness resulting from each 3D printing technique, which could lead to increased losses in the circuit. Based on the analysis results, it is found that FDM/FFF and SLA techniques are more suitable for fabricating microwave circuits compared to the SLS technique. This conclusion is drawn due to the lower dimensional variations and smoother surface finishes provided by FDM/FFF and SLA, resulting in millimeter-wave circuits that closely adhere to the designed specifications and exhibit better overall performance.

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

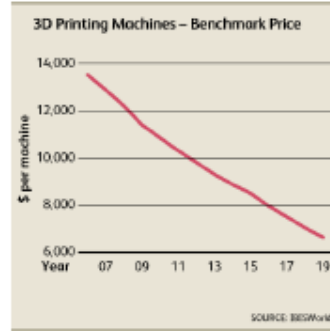
## 1. บทนำ

เทคนิคการพิมพ์สามมิติเป็นเทคโนโลยีที่สามารถขึ้นรูปทรงที่อิสระและหลากหลายกว่าเทคนิคการขึ้นรูปแบบกัดเจาะแบบเดิม เทคนิคเครื่องพิมพ์สามมิติที่ออกมาใหม่มีความละเอียดสูงและรวดเร็วกว่าเดิมทำให้มีการใช้งานกันมากขึ้นทั่วโลกทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคบริการ มีการใช้เครื่องพิมพ์ในขั้นของการสร้างชิ้นส่วนเพื่อพิสูจน์แนวคิด เพื่อเป็นตัวอย่างชิ้นงานให้ลูกค้าได้ประสบการณ์ การสร้างชิ้นงานเพื่อเป็นต้นแบบทดสอบก่อนนำไปผลิตจริง ไปจนถึงนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง ชิ้นงานที่ผลิตมีตั้งแต่ชิ้นเล็กในระดับชิ้นส่วนนาฬิกาข้อมือไปจนถึงการพิมพ์บ้านสำหรับอยู่อาศัย

ในอดีต การผลิตวงจรพาสซีฟทำงานในแถบความถี่ไมโครเวฟและมิลลิเมตรเวฟจะต้องใช้เทคโนโลยีที่มีความละเอียดสูง โครงสร้างของวงจรเหล่านี้จะต้องขึ้นรูปชิ้นงานด้วยวัสดุโลหะ แต่เดิมผู้ผลิตอุปกรณ์ที่ป้อนให้กับอุตสาหกรรมจะใช้เทคโนโลยีการผลิต 3 มิติแบบ CNC เทคโนโลยีการพิมพ์แบบสามมิติซึ่งเป็นเทคโนโลยีแบบฉีดหมึกพิมพ์ (ink jet printing) ซึ่งจะขึ้นรูปทีละชั้นได้นำมาสร้างชิ้นงาน ข้อสำคัญที่เหนือกว่าเทคโนโลยี CNC คือ สามารถขึ้นรูปทรงที่อิสระและเลือกวัสดุจนวนได้อิเล็กตริกแบบต่าง ๆ ได้ ซึ่งแตกต่างจากเทคโนโลยี CNC ที่เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว วัสดุจนวนตัวกลางนั้นจะต้องเป็นอากาศ ดังนั้น วงจรหรืออุปกรณ์ที่ขึ้นรูปจากเทคโนโลยีพิมพ์ 3 มิติจะมีขนาดที่เล็กกว่าโดยผู้ออกแบบสามารถเลือกวัสดุได้อิเล็กตริกที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์มากกว่า 1 แต่สมรรถนะเทียบเคียงได้กับวงจรหรืออุปกรณ์ที่ผลิตจากเทคโนโลยี CNC ที่สำคัญูราคาการผลิตของวงจรด้วยต่อชิ้นถูกกว่าและมีแนวโน้มถูกลงเรื่อย ๆ ดังภาพที่ 1 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 (ก) ภาพถ่ายเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และ (ข) กราฟแนวโน้มราคาเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

ในบทความนี้ ผู้วิจัยได้รวบรวมและประมวลเอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการพิมพ์สามมิติและบทความหรืองานวิจัยที่นำเทคนิคการพิมพ์สามมิติมาสร้างเป็นวงจรถ่ายงานในแถบความถี่มิลลิเมตรเวฟ โดยจะประมวลข้อดี ข้อเสีย ข้อจำกัดของเทคนิคการพิมพ์สามมิติในแต่ละเทคนิคหากนำมาสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟ และจากนั้นจะวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคการพิมพ์สามมิติมาสร้างเป็นวงจรถ่ายงานความถี่มิลลิเมตรเวฟ

## 2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของเทคนิคพิมพ์สามมิติในการสร้างวงจรถ่ายงานความถี่มิลลิเมตรเวฟ

2.2 เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคพิมพ์สามมิติในการสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟ

## 3. วิธีการศึกษา

ในการศึกษา ผู้วิจัยจะรวบรวมเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติที่นิยมและนำมาใช้ในงานผลิตวงจรรออิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูง ขั้นตอนถัดมาจะเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของเทคนิคการพิมพ์ และเปรียบเทียบข้อจำกัดของการพิมพ์ และในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการนำกรณีสายอากาศแพทช์ความถี่ 40 GHz มาวิเคราะห์รายละเอียดของวิธีการมีดังนี้

3.1 รวบรวมและจัดกลุ่มเทคนิคการพิมพ์

3.2 การเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดของการพิมพ์ 3 มิติ

ในการศึกษารั้งนี้ ผู้วิจัยจะกำหนดประเด็นเปรียบเทียบ 3 ประเด็น ได้แก่ สมรรถนะเครื่องพิมพ์ คุณสมบัติของชิ้นงานที่แล้วเสร็จ และต้นทุน ดังนี้

3.2.1 สมรรถนะเครื่องพิมพ์ ได้แก่ ความสามารถในการพิมพ์ชิ้นงานที่ซับซ้อน และ ความเร็วในการพิมพ์

3.2.2 คุณภาพชิ้นงาน ได้แก่ ลักษณะการใช้งาน ความละเอียดของชิ้นงาน และขนาดรูปทรงที่ใหญ่ที่สุดที่เครื่องพิมพ์สามารถสร้างได้

3.2.3 ต้นทุน ได้แก่ ต้นทุนคงที่จากราคาเครื่องพิมพ์ และต้นทุนผันแปรซึ่งคิดจากค่าใช้จ่ายจากหมึกพิมพ์และค่าไฟฟ้า สำหรับการคิดต้นทุนผันแปรในการศึกษาครั้งนี้ จะคิดเฉพาะค่าหมึกพิมพ์

3.3 การศึกษาหมึกพิมพ์สำหรับสร้างวงจรพาสซีฟมิลลิเมตรเวฟ

3.4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของเทคนิคการพิมพ์ในการสร้างวงจร

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคเครื่องพิมพ์เพื่อสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟจะพิจารณาความแม่นยำของของเทคนิคการพิมพ์เพราะขนาดของวงจรจะแปรผันกับความถี่ ดังนั้น เทคโนโลยีการผลิตจะต้องแม่นยำ ยิ่งตรงสูง และคลาดเคลื่อนน้อย วงจรที่ผลิตจะต้องมีมิติตรงตามที่ต้องการออกแบบ อีกประเด็นที่จะต้องคำนึงถึงคือความขรุขระที่ผิว (Surface roughness) เพราะความขรุขระบนผิวดำนำจะเพิ่มการสูญเสียภายในวงจร ดังนั้น เทคโนโลยีพิมพ์ที่เหมาะสมจะต้องให้ผิวดำนำเรียบ

ค่าความขรุขระของผิวดำนำที่เหมาะสมจะคำนวณจากความลึกเชิงผิว (Skin depth : $\delta$ ) ซึ่ง

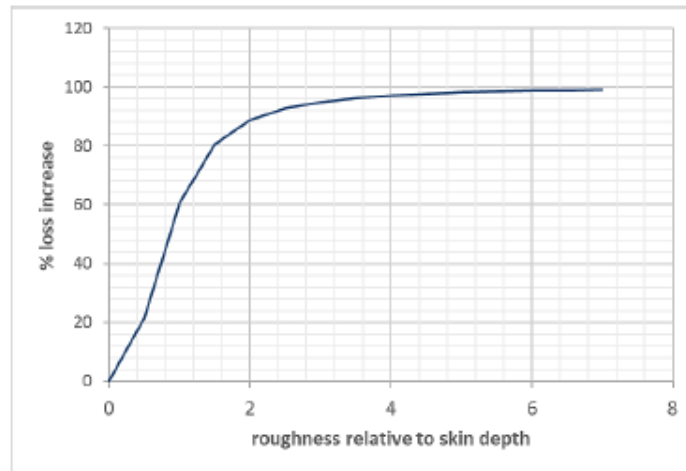
$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (1)$$

เมื่อ  $\rho$  แทนความต้านทาน และ  $\mu$  แทนความซึมซาบแม่เหล็กของหมึกพิมพ์นั้น ความลึกเชิงผิวส่งผลต่อการสูญเสียทางไฟฟ้าซึ่งสามารถอธิบายได้ในพจน์ของค่าคงตัว ( $\alpha$ ) ที่เป็นส่วนเพิ่มของค่าการลดทอนที่เกิดจากการแพร่กระจายคลื่น ดังสมการ

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

เมื่อ  $\Delta$  แทนค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความขรุขระผิวดำนำ จาก (2) พบว่า  $\left[ \frac{\Delta}{\delta} \right]$  อยู่ในช่วง  $(0, \infty)$  ทำให้ค่า  $\tan^{-1} \left( 1.4 \left[ \frac{\Delta}{\delta} \right]^2 \right)$  มีค่าอยู่ในช่วง  $(0, +\frac{\pi}{2})$   $\alpha$  จะมีค่าตกอยู่ในช่วง  $(1, 2)$  ดังนั้น ค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความขรุขระบนพื้นผิวของตัวนำจะมากที่สุดไม่เกิน 2 เท่าของค่าการสูญเสียของกรณีพื้นผิวดำนำราบเรียบ หรือคิดเป็นสองเท่าของค่าการสูญเสียเดิมในกรณีที่ผิวดำนำราบเรียบ

ผลของสมการ (1) และ (2) ทำให้เราสามารถคำนวณความสัมพันธ์ของอัตราเพิ่มของการลดทอน (คิดเป็นร้อยละ) กับอัตราส่วนความขรุขระของผิวดำนำกับค่าความลึกเชิงผิว  $\left[ \frac{\Delta}{\delta} \right]$  ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์นี้ซึ่งพบว่า หากผิวของรูปทรงไม่ขรุขระเลยหรือ  $\left[ \frac{\Delta}{\delta} \right] = 0$  ค่าคงตัวการลดทอนจะไม่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความขรุขระเพิ่มขึ้น ค่าการลดทอนจะเพิ่มขึ้น กรณีความขรุขระของผิวรูปทรงเพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่าความลึกผิว หรือ  $\left[ \frac{\Delta}{\delta} \right] = 1$  ค่าการลดทอนจะเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 61 และหากความขรุขระของผิวรูปทรงเพิ่มขึ้นจนเป็น 2 เท่าของความลึกผิวแล้ว หรือ  $\left[ \frac{\Delta}{\delta} \right] = 2$  ค่าการลดทอนจะเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 89 จากกราฟยังพบอีกว่า ค่าการลดทอนจะเพิ่มขึ้นไม่เกิน 1 เท่าของค่าการลดทอนเดิม



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์อัตราเพิ่มการลดทอน กับ  $\left[\frac{A}{\delta}\right]$

#### 4. การทบทวนวรรณกรรม

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติหรือเทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ Additive Manufacturing (AM) กำลังก้าวเข้ามาเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญ ปัจจุบันเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ 3 มิติราคาถูกลงและสามารถออกแบบชิ้นงานบนโปรแกรมช่วยออกแบบบนคอมพิวเตอร์ (Computer-Assisted Design : CAD) จากนั้นบันทึกข้อมูลของในรูปของไฟล์ดิจิทัล และส่งดิจิทัลไฟล์ที่บันทึกระยะไกลไปที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติได้ เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติมีดังนี้

##### 4.1 Selective Laser Sintering (SLS)

เครื่องพิมพ์ประเภทนี้ถูกคิดค้นขึ้นโดย Carl Deckard ในปี ค.ศ. 1987 และในปี ค.ศ. 1992 ได้ออกเครื่องพิมพ์ SLS เครื่องแรกของโลก เทคนิค SLS ใช้เครื่องยิงแสงเลเซอร์กำลังสูงยิงบนวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปทรงซึ่งอาจเป็น พลาสติก โลหะ เซรามิก หรือ แก้ว ความร้อนจากลำแสงเลเซอร์จะทำให้วัสดุหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวกันและก่อเป็นรูปทรง 3 มิติตามต้องการ ข้อดีของเครื่องพิมพ์แบบนี้ คือ ชิ้นงานที่ผลิตออกมาจากเครื่องพิมพ์แบบนี้จะแข็งแรง คงทน แต่ราคาของเครื่องพิมพ์ค่อนข้างสูง วัสดุที่ใช้กับเครื่องพิมพ์แบบนี้ได้มีค่อนข้างจำกัดเมื่อเทียบกับเครื่องพิมพ์แบบอื่น ๆ ขนาดของเครื่องพิมพ์แบบนี้ต้องการพื้นที่มากกว่าเครื่องพิมพ์แบบอื่น และกินกำลังไฟฟ้ามากเพราะต้องยิงลำแสงเลเซอร์กำลังสูงและค่อนข้างอันตรายเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น

##### 4.2 Fuse Deposition Modeling/Fuse Filament Fabrication (FDM/FFF)

เครื่องพิมพ์แบบ Fuse Deposition Modeling/Fuse Filament Fabrication (FDM/FFF) ถูกคิดค้นในปี ค.ศ. 1989 โดย S. Scott Crump ต่อมาภายหลัง บริษัท Stratasys ได้ออกเครื่องพิมพ์ 3 มิติเครื่องแรกของโลกเพื่อจำหน่ายในชื่อผลิตภัณฑ์ 3D Modeler

เทคนิคนี้จะอ่านไฟล์ข้อมูลภาพ 3 มิติของรูปทรงเป็นอะเรย์ข้อมูลภาพตัดขวาง 2 มิติหลายชั้น ในแต่ละชั้นของรูปทรงมาเก็บไว้ในหน่วยความจำ และคอมพิวเตอร์จะอ่านข้อมูลภาพตัดขวางเพื่อสร้างรูปขึ้นมาที

ละชั้น ในแต่ละชั้น มอเตอร์และเฟืองจะดึงเส้นวัสดุออกจากม้วนเส้นวัสดุ (Filament spool) และหลอมเส้นวัสดุให้เป็นหมึกและส่งเข้าหัวฉีดเพื่อฉีดหมึกบนแท่นพิมพ์ที่ละชั้นจากชั้นล่างสุดไปจนถึงชั้นบนสุด เมื่อวัสดุเย็นลงก็จะแข็งและขึ้นเป็นรูปทรงที่ต้องการ

ข้อดีของเครื่องพิมพ์แบบนี้ คือ ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย เพราะเป็นเครื่องพิมพ์ที่มีจำหน่ายมากที่สุดในบรรดาเครื่องพิมพ์แบบอื่น ฟังก์ชันในการใช้งานง่ายและสามารถสร้างให้เกิดวัสดุพิมพ์ที่หลากหลาย แต่ความละเอียดในการพิมพ์และระยะเวลาที่ใช้อยู่ยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการพิมพ์แบบอื่น

#### 4.3 Stereolithography (SLA)

Stereolithography (SLA) เป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ผลิตใช้งานในเชิงพาณิชย์ เครื่องพิมพ์นี้ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1984 ต่อมาบริษัท 3D Systems ได้ออกเครื่องพิมพ์ 3 มิติสำหรับจำหน่ายขึ้นโดยตั้งชื่อเครื่องพิมพ์รุ่นนี้ว่า SLA-1 เทคนิคนี้ใช้แสงเลเซอร์ทำงานร่วมกับวัสดุโฟโตโพลิเมอร์ (Photopolymer) ซึ่งเป็นกลุ่มวัสดุประเภทเรซินที่จะแข็งตัวเมื่อฉายลำแสงผ่าน ลำแสงเลเซอร์จะถูกควบคุมให้ฉายไปตามแนวเส้นตรงเรื่อย ๆ ต่อเนื่องเป็นชั้น ๆ เพื่อขึ้นรูป การใช้แสงเลเซอร์จะทำให้กำหนดตำแหน่งได้แม่นยำเทคโนโลยีนี้จึงเหมาะสำหรับการสร้างชิ้นงานที่ต้องการความละเอียดสูง

ข้อดีเครื่องพิมพ์แบบนี้คือ จะให้ชิ้นงานที่ละเอียดสูง ผิวเรียบ ความเร็วในการพิมพ์ไม่ลดลงถ้าจะพิมพ์งานครั้งละหลายชิ้น อย่างไรก็ตาม เครื่องพิมพ์แบบนี้มีข้อเสียคือ หมึกเรซินเหลวที่ใช้ในการพิมพ์ค่อนข้างเลอะเทอะ มีกลิ่นเหม็น และเป็นอันตรายได้หากสูดดมในปริมาณมาก แม้ว่าเครื่องพิมพ์แบบ SLA นี้ จะได้รับการยอมรับว่าจะให้รูปทรงที่ออกมาดี แต่ยังมีข้อจำกัดด้วยกันหลายประการ เช่น เครื่องพิมพ์และวัสดุที่ใช้มีราคาสูงทำให้ชิ้นงานที่ผลิตมีต้นทุนต่อชิ้นที่สูง รวมถึงหมึกที่ใช้ต้องเป็นเรซินที่ไวแสงเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และชิ้นงานที่ผลิตมักจะมีขนาดเล็กไม่ใหญ่มาก ชิ้นงานเมื่อแล้วเสร็จนำไปตากแดดหรืออบด้วยแสงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน แต่ชิ้นงานเหล่านี้ก็อาจจะเปราะได้ตามกาลเวลาที่เปลี่ยนไป

#### 4.4 Multi Jet Fusion (MJF)

เครื่องพิมพ์แบบ Multi jet fusion process (MJF) เป็นเครื่องพิมพ์ที่ผลิตและจำหน่ายโดยบริษัท Hewlett Packard ที่ดัดแปลงจากเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท (Inkjet printer) เครื่องพิมพ์แบบ MJF นี้ออกสู่ตลาดในปี ค.ศ. 2016 รูปแบบการขึ้นรูปทรงของเทคนิคนี้จะขึ้นรูปทีละชั้น โดยจะติดตั้งเครื่องสแกนเนอร์ (Scanner) และแท่นพิมพ์หมึกที่มีหัวฉีดหมึกมากกว่า 30,000 หัว เพื่อใช้เคลือบชั้นวัสดุ เครื่องพิมพ์จะยิงหยดหมึกวัสดุด้วยความเร็วสูงถึง 350 ล้านหยดต่อวินาที แม่นยำระดับ 21 ไมครอน ข้อดีอีกประการของเครื่องพิมพ์แบบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องพิมพ์แบบ FDM ก็คือ สามารถสร้างชิ้นงานเร็วกว่า สามารถผลิตชุดเฟืองได้สูงถึง 1000 ชิ้นกินเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งเร็วกว่าเทคนิค FDM กว่า 27 เท่า

#### 4.5 Digital light processing/liquid crystal display (DLP/LCD)

เครื่องพิมพ์แบบดีแอลพี (DLP) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1987 ซึ่งเป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่ใช้การฉายลำแสง Ultra Violet (UV) ด้วยเครื่องฉายโปรเจกเตอร์ ลำแสงนี้จะยิงไปที่วัสดุเหลวใสที่มีคุณสมบัติพิเศษที่จะแข็งตัวเมื่อมีแสงมาตกกระทบ ผู้ใช้สามารถเลือกบริเวณที่ต้องการให้แสงตกกระทบเพื่อให้วัสดุเหลวแข็งตัวได้จากการควบคุมตำแหน่งของโปรเจกเตอร์และอุปกรณ์ Digital Mirror Device (DMD) ที่ประกอบขึ้นจาก

กระจกฉนวนหลายตัว กระจก DMD เหล่านี้จะถูกบรรจุอยู่ในเลนส์ของโปรเจคเตอร์ หากพิจารณาแนวคิดของ เครื่องพิมพ์เทคนิคนี้แล้วจะพบว่ามีความคล้ายคลึงกับเครื่องพิมพ์เทคนิค SLA มาก จะต่างกันตรงส่วนของ อุปกรณ์โปรเจคเตอร์ ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้โปรเจคเตอร์ฉายแสงไปยังชั้นวัสดุที่ตำแหน่งที่ต้องการขึ้นงานแข็งตัว การควบคุมตำแหน่งของโปรเจคเตอร์จะใช้ลิเอร์มอเตอร์ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์

เครื่องพิมพ์แบบ DLP ได้รับการพัฒนาต่อยอดในเวลาต่อมาเป็น DLP/LCD เพื่อขึ้นรูปทรงละเอียด และประณีตมากขึ้น โดยเปลี่ยนจากการฉายแสงจากโปรเจคเตอร์ มาเป็นแผง LCD ซึ่งภายใน LCD จะมี หลอด LED กำลังสูง การบีบและควบคุมลำแสงจะใช้เลนส์ครอบทั้ง Fresnel lens และ Condenser lens ลำแสงจะถูกบีบให้ลำบีมเล็กจิ๋ว เมื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของเครื่องพิมพ์แบบ DLP/LCD แล้วพบว่า ความละเอียดของเครื่องพิมพ์แบบนี้จะขึ้นกับขนาดของพิกเซลบนแผง LCD ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความกว้าง ของจอ LCD หากด้วยจำนวนพิกเซลในแนวนั้น สำหรับเครื่องพิมพ์แบบ DLP ซึ่งใช้แนวคิดแบบเดียวกันกับ เทคนิค LCD ก็จะสามารถคำนวณความละเอียดได้ในลักษณะเดียวกัน

#### 4.6 Polyjet

เครื่องพิมพ์ Polyjet คิดค้นขึ้นและออกสู่ตลาดในปี ค.ศ. 2000 โดยบริษัท Object-Geometries เครื่องพิมพ์อิงยหดหมึกโฟโตโพลิเมอร์ (Photopolymer) ที่ใช้ในเครื่องพิมพ์ SLA และอบด้วยลำแสง UV เครื่องพิมพ์ Polyjet จะอิงยหดหมึกไปที่ตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำมาก และที่สำคัญกว่าเครื่องพิมพ์ เทคนิคอื่น ๆ คือ เครื่องพิมพ์แบบนี้สามารถปรับเปลี่ยนวัสดุพิมพ์ได้หลากหลายกว่า ทำให้สามารถสร้างชิ้นผิว แต่ละชั้นของรูปทรงที่มีสีและความอ่อนแข็งได้แตกต่างกัน ผิวของชิ้นงานมีลวดลายตามต้องการได้ ทำให้ เครื่องพิมพ์แบบนี้มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับชิ้นงานที่ต้องการความละเอียด ซับซ้อนและประณีต เทคนิค การพิมพ์แบบนี้จึงมีผู้นำมาใช้ในงานสร้างสรรค์ศิลปะ หรืองานที่ต้องการความประณีตเฉพาะ

#### 4.7 Direct metal laser sintering/selective laser melting (DMLS/SLM)

เครื่องพิมพ์ Direct Metal Laser Sintering (DMLS) สามารถพิมพ์โลหะทั้ง อลูมิเนียม เหล็กอัลลอยด์ เหล็กสแตนเลส เงิน โคบอลต์-โครม และไททานเนียม ได้ การผลิตให้เป็นรูปทรง 3 มิติ เครื่องพิมพ์จะหลอมผง โลหะขนาด 20 ไมครอนด้วยแสงเลเซอร์กำลังสูงเพื่อไหม้ผงโลหะเหลวและเชื่อมติดกันเป็นรูปทรง เทคนิค DMLS นี้ไม่ต้องการวัสดุโพลิเมอร์ประสาน (Polymer binder) ดังนั้น รูปทรงที่ผลิตจากเทคนิคนี้มีส่วนของ โลหะที่สูงถึงร้อยละ 95 มากกว่าชิ้นงานที่ผลิตจากเทคนิค SLS ที่มีส่วนของโลหะเพียงร้อยละ 70 เครื่องพิมพ์ แบบ DMLS สร้างชิ้นงานที่ละเอียดกว่า SLS เพราะว่ามีชั้นเนื้อวัสดุที่บางกว่าซึ่งมาจากขนาดของผงโลหะที่บาง เพียง 20 ไมครอน

เครื่องพิมพ์แบบ DMLS นี้ สามารถสร้างชิ้นงานที่สลับซับซ้อนและใช้งานได้จริง เหมาะสำหรับรังสรรค์ รูปทรงที่ละเอียดซับซ้อนแต่ไม่เหมาะกับสร้างรูปทรงจำนวนมาก รูปทรงที่สร้างขึ้นจากเครื่องพิมพ์แบบนี้ สามารถใช้งานได้จริง

#### 4.8 Binder Jetting (BJ)

เครื่องพิมพ์แบบ BJ นี้ เป็นเทคโนโลยีกลุ่มที่ใช้กาวยึดวัสดุที่เป็นผงวัสดุเข้าหากัน ต้นแบบของเครื่องพิมพ์ระบบพ่นกาวบนวัสดุผง (Binder jetting : BJ) เกิดขึ้นจากสถาบัน MIT ประเทศอเมริกา ต่อมาบริษัท Exone ได้ใช้รูปแบบแนวคิดของเครื่องพิมพ์แบบ BJ ไปพัฒนาเป็นเครื่องพิมพ์

ขั้นตอนของเครื่องพิมพ์แบบนี้จะเริ่มต้นจากถังใส่ผงวัสดุจะเลื่อนขึ้น จากนั้นลูกกลิ้งปรับระดับจะเกลี่ยผงวัสดุให้ลงไปบนแท่นพิมพ์ หัวฉีดจะเคลื่อนผ่านผิวหน้าผงไปและฉีดพ่นกาวบนผงวัสดุเฉพาะบริเวณที่ต้องการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตามภาพตัดขวางของรูปทรง กาวนี้จะจับยึดผงวัสดุให้เป็นรูปร่างที่ต้องการโดยเริ่มจากชั้นแรก หลังจากพิมพ์เสร็จในชั้นแรกแล้ว คอมพิวเตอร์ก็จะดึงภาพตัดขวางของชั้นถัดไปส่งเข้าเครื่องพิมพ์ กระบวนการจะวนซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งไปจนถึงชั้นสุดท้ายที่จะได้รูปทรงที่ต้องการ เมื่อพิมพ์เสร็จแล้ววัสดุผงที่ไม่ได้ติดกาวจะถูกดูดกลับเข้าถังที่เก็บผงหมึกเพื่อนำไปใช้ต่อ

ข้อดีของเครื่องพิมพ์แบบ BJ (The Welding Institute, 2022) คือ ใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้อง ความร้อนของบรรยากาศแวดล้อมไม่ได้ส่งผลต่อความถูกต้องของรูปทรงที่สร้างขึ้น ทำให้แท่นพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ที่ใช้เทคนิคนี้จะสามารถสร้างรูปทรงที่มีปริมาตรใหญ่ที่สุดหรือสามารถพิมพ์รูปทรงหลายชิ้นได้พร้อมกัน ข้อได้เปรียบอีกประการคือ ไม่ต้องการโครงสร้างที่มารองรับชิ้นงานระหว่างพิมพ์รูปทรงเพราะจะใช้ผงวัสดุเป็นโครงสร้างที่รองรับชิ้นงาน ทำให้ไม่ต้องการขั้นตอนจัดการหลังพิมพ์รูปทรงเสร็จ ไม่เสียเนื้อที่เพื่อสำรองสำหรับโครงสร้างที่จะรองรับ ซึ่งจะทำให้พื้นที่ของแท่นพิมพ์ใหญ่ขึ้น รูปทรงที่เป็นโลหะจะมีผิวขรุขระน้อยกว่า 4-5 เท่า เมื่อเทียบกับเทคนิค DMLS/SLM เครื่องพิมพ์แบบ BJ พิมพ์ชิ้นงานได้เร็วกว่าและราคาถูก

#### 4.9 Digital Light Synthesis (DLS)

เครื่องพิมพ์นี้ใช้หลักการเดียวกันกับเครื่องพิมพ์ SLA คือ จะใช้แสง UV ให้ความร้อนเพื่อให้หมึกแข็งตัว แต่จะต่างกันตรงที่ ในช่วงระหว่างการพิมพ์แต่ละชั้น เทคนิคนี้จะพิมพ์ต่อเนื่อง ไม่หยุดพิมพ์ หมึกจะไหลลงมาไม่หยุดผ่านชั้นรอยต่อที่เรียกว่า “dead zone” ซึ่งเป็นชั้นรอยต่อบาง ๆ ระหว่างหมึกเรซินที่ยังไม่อุ่นให้ร้อนกับส่วนที่พิมพ์เสร็จสิ้นแล้ว เมื่อลำแสง UV ฉายไปยังบริเวณรอยต่อนี้แล้ว หมึกเรซินส่วนนั้นก็จะร้อนและแข็งตัว ซึ่งในเวลาเดียวกัน เครื่องพิมพ์ก็ยังฉีดหมึกเรซินไปได้ส่วนที่อบด้วยแสง UV แล้ว ทำให้พิมพ์ในชั้นต่อไปต่อเนื่อง

### 5. ผลการศึกษา

#### 5.1 ผลการจัดกลุ่มเทคนิคการพิมพ์

จากประเภทเครื่องพิมพ์ 3 มิติทั้ง 9 ประเภท ผู้วิจัยจะประมวลและจัดกลุ่มเทคนิคการพิมพ์ 3 มิติได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ ดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 เทคนิควัสดุไวแสง

โดยหลักแล้ว เทคนิคนี้จะใช้หมึกโฟโตโพลิเมอร์ซึ่งเป็นเรซินไวแสง ในเครื่องพิมพ์จะติดตั้งอุปกรณ์แหล่งกำเนิดแสง เช่น เลเซอร์ อุปกรณ์ควบคุมลำแสง ซึ่งอาจเป็น เลนส์ โปรเจคเตอร์ จอ LCD กระจกเลนส์ มีอุปกรณ์ควบคุมลำแสงเพื่อบังคับลำแสงที่ยังมาจากอุปกรณ์กำเนิดแสงไปยังตำแหน่งที่หมึกโฟโตโพลิ

เมอร์ถูกหยุดเพื่อขึ้นรูปทรง เมื่อลำแสงที่ยังไปตกกระทบกับหมึกที่ตำแหน่งดังกล่าว จะทำให้หยดหมึกนั้นแข็ง และก่อตัวเป็นชั้นของรูปทรง เครื่องพิมพ์ที่ใช้เทคนิคนี้ได้แก่ เครื่องพิมพ์ SLA และ Multijet

### 5.1.2 เทคนิคการหลอม

เทคนิคนี้จะหลอมผงอนุภาคที่ก่อเป็นรูปทรงที่ต้องการด้วยความร้อน ผงหมึกที่ขึ้นรูปจะอยู่ในกลุ่มสารเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ซึ่งทนแรงดึงได้สูง หลอมเหลวด้วยความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นลง ในบางเครื่องพิมพ์จะใช้สารที่ทำหน้าที่เหมือนกาวประสานเพื่อให้เป็นรูปทรงที่ต้องการ สารเทอร์โมพลาสติกนี้เมื่อขึ้นรูปแข็งตัวแล้ว สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง โดยนำรูปทรงที่ไม่ต้องการมาบดให้ละเอียดและหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้

### 5.1.3 เทคนิคซินเทอร์ (Sintering)

เทคนิคนี้จะใช้ปืนเลเซอร์แรงสูงหรือเครื่องยิงลำอิเล็กตรอน (Electron beams) ไปยังวัสดุที่ต้องการสร้างรูปทรงโดยตรง ความร้อนจากลำแสงเลเซอร์หรือจากเครื่องยิงลำอิเล็กตรอนและจะหลอมผงวัสดุนั้นให้ละลายโดยสมบูรณ์และจะได้รูปทรงในแต่ละชั้นตามต้องการ เช่น เทคนิค SLS

จากข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปเทคนิคของเครื่องพิมพ์ทั้ง 9 ประเภท ได้ดังตารางที่ 1 และพบว่าเครื่องพิมพ์ที่ใช้หมึกไวแสงจำนวน 4 ประเภทได้แก่ เครื่องพิมพ์ SLA, Polyjet, DLP/LCD, และ DLS ส่วนเทคนิคการหลอมได้แก่ เครื่องพิมพ์ FDM/FFF Multi Jet Fusion และ Binder Jetting และเทคนิคซินเทอร์ได้แก่ เครื่องพิมพ์ SLS และ DMLS/SLM

ตารางที่ 1 ผลการจัดกลุ่มเทคนิคการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

เทคนิคการพิมพ์	เครื่องพิมพ์
วัสดุไวแสง	SLA, Polyjet, DLP/LCD, DLS
การหลอม	FDM/FFF, Multi Jet Fusion, Binder Jetting
ซินเทอร์	SLS, DMLS/SLM

## 5.2 ผลวิเคราะห์ข้อดี ข้อเสีย และขีดจำกัด

ในการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียและขีดจำกัดนี้ ผู้วิจัยจะเลือกเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์ที่เป็นตัวแทนของเทคนิคการพิมพ์ได้แก่ FDM/FFF สำหรับเทคนิคซินเทอร์ SLS สำหรับเทคนิคการหลอม และ SLA สำหรับเทคนิควัสดุไวแสง ตารางที่ 2 สรุปผลเปรียบเทียบข้อมูลของแต่ละเทคนิคโดยผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ที่เผยแพร่บนเว็บไซต์และจากรายงานเอกสารของต่างประเทศดังนี้

- ด้านสมรรถนะของเครื่องพิมพ์

เครื่องพิมพ์ FDM/FFF และ SLA เป็นเครื่องพิมพ์ที่แม่นยำเท่ากันและดีกว่าเครื่องพิมพ์แบบ SLS สำหรับความเร็วการพิมพ์ พบว่าเครื่องพิมพ์ SLA มีความเร็วสูงกว่าเครื่องพิมพ์ FDM/FFF และเครื่องพิมพ์ SLS หลายเท่า แต่เครื่องพิมพ์ SLS เป็นเครื่องพิมพ์ที่สามารถรองรับวัสดุพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ได้หลายชนิดกว่าเครื่องพิมพ์แบบ SLA ซึ่งจะพิมพ์ได้เฉพาะวัสดุที่เป็นฉนวน และ FDM/FFF ซึ่งพิมพ์ฉนวนและฉนวนที่ฉาบตัวนำ

- ด้านคุณภาพชิ้นงาน

เครื่องพิมพ์ FDM/FFF เหมาะสมสำหรับสร้างชิ้นงานต้นแบบเนื่องจากวัสดุพิมพ์ที่เป็นเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่ทำให้พลาสติกละลายได้ ส่วนรูปทรงที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์ SLA และ SLS สามารถนำมาใช้งานได้จริงเพราะวัสดุพิมพ์แข็งแรงและทนความร้อนได้สูง ความละเอียดของชิ้นงานเครื่องพิมพ์ SLA 10 ไมครอน ดังนั้น จึงสามารถผลิตรูปทรงที่มีความประณีต ผิวเรียบ เหมือนต้นแบบจริง ส่วนเครื่องพิมพ์แบบ SLS และ FDM/FFF จะเป็นเครื่องพิมพ์ที่ผลิตรูปทรงที่มีความละเอียดใกล้เคียงกัน ความสามารถของเครื่องพิมพ์ที่สำคัญอีกประการคือ ความสามารถในการสร้างรูปทรงขนาดใหญ่หรือผลิตรูปทรงได้ครั้งละหลายชิ้น เครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF มีขนาดแท่นพิมพ์ที่ใหญ่ที่สุด รองลงมาคือเครื่องพิมพ์แบบ SLA และ SLS ตามลำดับ

- ต้นทุนการลงทุนเครื่องพิมพ์

ผลการศึกษาพบว่า ราคาเครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF จะถูกที่สุด ส่วนเครื่องพิมพ์แบบ SLS จะแพงที่สุด ส่วนวัสดุพิมพ์ของเครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF จะถูกที่สุด รองลงมาจะเป็นวัสดุพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ SLS และวัสดุพิมพ์ที่แพงที่สุดคือวัสดุพิมพ์ของเครื่องพิมพ์แบบ SLA

ตารางที่ 2 ผลเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และขีดจำกัดของเทคนิคพิมพ์ 3 เทคนิค

	เทคนิค	SLA	FDM/FFF	SLS
สมรรถนะของเครื่องพิมพ์	ความแม่นยำ <sup>c</sup>	±0.15%	±0.15%	±0.3%
	ความเร็ว (มม./ชม.)	700 <sup>a</sup>	150 <sup>b</sup>	48 <sup>b</sup>
	ความหลากหลาย	ฉนวน	ฉนวน/ตัวนำ	ตัวนำ/สารกึ่งตัวนำ/ฉนวน
ชิ้นงาน	การใช้งาน	ใช้งานจริง	ต้นแบบ	ใช้งานจริง
	ความละเอียด (มม.) <sup>c</sup>	±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.

<sup>a</sup> ที่มา <https://www.cmac.com.au/blog/3d-printing-methods-side-by-side-comparison-sls-vs-fdm-sla-vs-dlp>

<sup>b</sup> ที่มา <https://monroeengineering.com/blog/3d-printing-speed-how-it-affects-build-time/>

<sup>c</sup> ที่มา <https://www.3dprintingmedia.network/quick-guide-dimensional-accuracy-3d-printing/>

### 5.3 ผลการศึกษาหมึกพิมพ์สำหรับสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟ

วงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟประกอบด้วยตัวนำและไดอิเล็กตริก จากหัวข้อ 5.2 พบว่า เทคนิคพิมพ์ 3 มิติแบบ SLS เป็นเทคนิคเดียวที่สามารถพิมพ์โลหะได้ทันที ส่วนเทคนิคพิมพ์แบบ FDM/FFF และ SLA จะต้องการกระบวนการเพิ่มเติมซึ่งได้แก่ การขัดผิว (Surface polishing) การเคลือบหรือชุบโลหะ (Metal plating) และการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้น (Curing)

#### (1) ไดอิเล็กตริก

กลุ่มหมึกพิมพ์ Methacrylate Photopolymer Resin PLA หรือเทอร์โมพลาสติกพวก ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) นิยมใช้กันทั่วไปในเครื่องพิมพ์ FDM/FFF และ SLA นี้ หมึกกลุ่มนี้แข็งและเหนียวพอที่จะทำฐานรอง (Substrate) ของแผ่นพิมพ์วงจรและขึ้นรูปวงจรสามมิติได้ อย่างไรก็ตาม หากต้องการออกแบบวงจรความถี่สูงที่ใช้สายส่ง (Transmission line) ซึ่งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแพร่กระจายอยู่ในวัสดุไดอิเล็กตริกที่เป็นฐานรองแล้ว หมึกนั้นจะต้องมีค่าการสูญเสียแทนเจนต์ (loss tangent) ต่ำซึ่ง PLA หรือ ABS จะไม่เหมาะสม ตารางที่ 3 รายงานสภาพยอมสัมพัทธ์ ( $\epsilon'$ ) และค่าการสูญเสียแทนเจนต์ ( $\tan \delta$ ) ของหมึกพิมพ์ จากตารางที่ 3 พบว่า หมึกพิมพ์ที่เหมาะสมกว่าคือ โพลีเมอร์พลาสติกชื่อ Rexolite ที่มีการสูญเสียแทนเจนต์ต่ำมากและมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ค่อนข้างคงที่ตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึง 500 GHz ทำให้หมึก Rexolite นี้เหมาะสมสำหรับสร้างวงจรในช่วงความถี่ไมโครเวฟไปจนถึงเทราเฮิร์ตซ์ นอกจากหมึกพิมพ์นี้แล้ว ยังมีหมึกพิมพ์อื่นที่เหมาะสมสำหรับความถี่มิลลิเมตรเวฟ ได้แก่ polystyrene-block-polybutadiene-block-polystyrene (SBS), polystyrene-block-polyethylene-ran-polybutaline-block-polystyrene (SEBS), และ polystyrene-block-polyisoprene-block-polystyrene (SIS) (Lis, M., et al., 2016)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหมึกพิมพ์สำหรับ FDM/FFF และ SLA ที่ 300 MHz ((Behzadnezhad, B., et al., 2018) และ (Polymer Plastics Company, LC., 2023))

วัสดุพิมพ์	$\epsilon'$	$\tan \delta$
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

#### (2) ตัวนำ

โครงสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟจะต้องมีตัวนำ หมึกพิมพ์ที่มีสมบัติเป็นตัวนำสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติทั้งโลหะ คาร์บอน หรือหมึกโพลีเมอร์ผสม (Polymer Composites) ที่นำไฟฟ้าได้ด้วยการโดปคาร์บอนในโครงสร้างโมเลกุล (Polymer matrices) ทำให้นำไฟฟ้าได้มากขึ้นกับระดับการโดป

หมึกพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่เป็นโลหะนำไฟฟ้าดี แต่ราคาแพง และเป็นสนิมง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุพิมพ์คาร์บอนที่นำไฟฟ้าได้ดีและสมบัติทางไฟฟ้าไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงจากปัจจัยภายนอก ด้วยรูปแบบการจัดเรียงอะตอมของคาร์บอนทำให้คาร์บอนเป็นวัสดุที่แข็งแรง นำไฟฟ้าได้ดี มีเสถียรภาพสูงในทางเคมี ความหนาแน่นต่ำทำให้น้ำหนักเบา และเพราะว่ามีสมบัติที่นำไฟฟ้าได้ดีนี้เองทำให้มีการนำคาร์บอนบริสุทธิ์มาทำเป็นหมึกพิมพ์และทำเป็นโพลิเมอร์ผสมที่ใช้พิมพ์รูปทรง 3 มิติ วัสดุคาร์บอนที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปทรง 3 มิติโดยตรงได้เลย ได้แก่

- Carbon Black (CB) เบบาราคาถูก และนำไฟฟ้าได้ดี
- Carbon Fiber (CF) เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยหน่วยคาร์บอนเล็ก ๆ โครงสร้างโมเลกุลของสาร CF จะก้ำกึ่งระหว่างกราฟไฟต์และเพชร CF จะเบา นำไฟฟ้า และนำความร้อนได้ดี แข็งแรง ทนต่อแรงดึงสูง และนิยมนำมาผสมกับโพลิเมอร์เพื่อทำให้โพลิเมอร์นำไฟฟ้าได้
- Carbon Nanotubes (CN) เป็นสสารที่มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกกลวงที่ผนังของทรงกระบอกเป็นโครงสร้างตาข่ายที่ถักทอด้วยโมเลกุลคาร์บอน
- กราฟีน (Graphene) เป็นโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุกราฟไฟต์อื่น ๆ กราฟีนมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เยี่ยมยอด กราฟีนแข็งแรงกว่าเหล็กกล้า 100 เท่า และพาประจุไฟฟ้าดีกว่าสารกึ่งตัวนำ 10 เท่า นอกจากนี้ กราฟีนมีสมบัติแม่เหล็กที่อ่อนหภูมิห้อง และแสดงคุณสมบัติของ Quantum Hall effect ที่อ่อนหภูมิห้องได้อีกด้วย

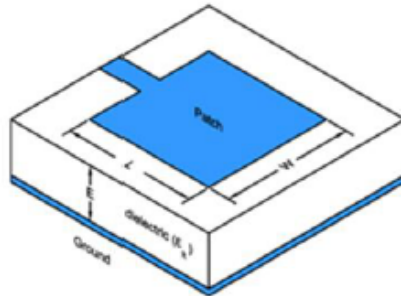
ดังนั้น แนวทางหนึ่งในการสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟอาจใช้หมึกกลุ่มธาตุคาร์บอนที่ราคาถูกกว่าและนำไฟฟ้าได้เพื่อขึ้นรูปทรง จากนั้นจึงค่อยใช้กระบวนการชุบหรือเคลือบด้วยโลหะที่นำไฟฟ้าได้บาง ๆ ตรงชั้นนอก อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ดี จะต้องคำนึงถึงความเรียบของผิวชั้นนอกมิฉะนั้นจะเกิดการสูญเสียจากความขรุขระที่ผิวของตัวนำ

#### 5.4 ผลวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของเทคนิคการพิมพ์ในการสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟ

จากหัวข้อ 3.4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการนำเทคนิคการพิมพ์มาสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟ จะต้องพิจารณาความละเอียดในการสร้างรูปทรงและความราบเรียบของผิวรูปทรง ในการวิเคราะห์จะนำมิติของรูปทรงที่ความถี่ต่าง ๆ ซึ่งจะขึ้นกับความยาวคลื่นของความถี่นั้น ๆ มาคำนวณ เพื่อให้การวิเคราะห์และเปรียบเทียบเทคนิคแต่ละเทคนิคทำได้ง่าย ในบทความนี้ จะเลือกกรณีสายอากาศแพทช์ (Patch antenna) ดังภาพที่ 2 มาใช้เป็นกรณีศึกษา การคำนวณมิติสายอากาศ [4] เนื่องจากสายอากาศแพทช์มีความยาวน้อยกว่าความกว้าง ส่วนของวงจรมิลลิเมตรเวฟ (Feed) ให้กับสายอากาศแพทช์ จะเป็นสายส่งโดยที่ความกว้างของสายส่งคำนวณจาก [6] ในการศึกษาครั้งนี้ จะเลือกสายส่งที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 70.7 โอห์ม

เนื่องจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณทั้งสายอากาศแพทช์และสายส่งจะแม่นยำในช่วงความถี่ที่อยู่ในช่วงความถี่มิลลิเมตรเวฟ ดังนั้น ในการวิเคราะห์ค่าจะเลือกความถี่ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ที่ 40 GHz สมมติใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Dielectric constant) เท่ากับ 2.5 และกำหนดให้ใช้ฐานรองวัสดุสูง 0.5 มิลลิเมตร กำหนดความถี่ที่สนใจ 2 ค่า คือ ความถี่ 4 GHz และ 40 GHz ผลลัพธ์ของการคำนวณความ

ยาวของสายอากาศแพทช์และความกว้างของสายส่ง 70.7 โอห์ม ปรากฏในตารางที่ 4 จากข้อมูลในตารางพบว่า มิติที่เล็กที่สุดที่จะพิมพ์ขึ้นงานได้คือ 0.80 มม. หรือ 800 ไมโครเมตร สำหรับการกำหนดความขรุขระของผิวตัวนำจะใช้กราฟในภาพที่ 2 เป็นเกณฑ์ในการกำหนด โดยจะยอมให้ค่าการลดทอนที่จะเพิ่มขึ้นจากเดิมไม่เกินร้อยละ 89 ดังนั้น ผนวรูปทรงควรมีความขรุขระที่น้อยกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของความลึกผิวที่ความถี่นั้น ซึ่งที่ความถี่ 4 และ 40 GHz จะเท่ากับ 2.06 และ 0.66 ไมโครเมตร



รูปที่ 3 สายอากาศแพทช์และมิ่วงจรป้อนไมโครสตริปเพื่อเชื่อมต่อเป็นอินพุต

ตารางที่ 4 มิติของวงจรถ้าหรับการศึกษาความเป็นไปได้

ความถี่	วงจรถ	มิติ	ค่า (มม.)	ความขรุขระ (ไมครอน)
4 GHz	สายอากาศแพทช์	ความยาว	23.52	2.06
	วงจรถป้อนไมโครสตริป	ความกว้าง	0.80	
40 GHz	สายอากาศแพทช์	ความยาว	2.05	0.66
	วงจรถป้อนไมโครสตริป	ความกว้าง	0.80	

## 6. การอภิปรายผล

ข้อจำกัดของเทคนิคการพิมพ์ทั้ง 3 เทคนิคซึ่งประกอบด้วย ความแม่นยำและความราบเรียบของผิวขึ้นงานจะสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4 เมื่อนำข้อมูลความแม่นยำของเทคนิคการพิมพ์ที่สรุปในตารางที่ 2 ที่แสดงความละเอียดของเทคนิคการพิมพ์และร้อยละความคลาดเคลื่อนพบว่า เทคนิคการผลิตแบบ SLA จะสามารถสร้างวงจรถที่มีมิติตามต้องการได้อย่างแม่นยำ กรณีศึกษาที่ใช้สายส่งขนาดความกว้าง 800 ไมโครเมตร (0.80 มิลลิเมตร) ซึ่งเป็นสายส่ง 70.7 โอห์ม เครื่องพิมพ์ที่ใช้เทคนิค SLA จะสามารถสร้างสายส่งกว้าง 800+1 60 ไมโครเมตร แต่หากใช้เครื่องพิมพ์เทคนิค FDM/FFF แล้ว จะสามารถสร้างสายส่งกว้าง 800+1 20 ไมโครเมตร และเมื่อใช้เครื่องพิมพ์เทคนิค SLS จะได้สายส่งกว้าง 800±0.8 ไมโครเมตร หากใช้เทคนิค SLA สร้างสายส่งนี้จะได้สายส่งที่มีมิติคลาดเคลื่อนมากที่สุด อย่างไรก็ตาม ขนาดอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยนี้แทบไม่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเลยหากคำนวณอิมพีแดนซ์ย้อนกลับจากมิติที่คลาดเคลื่อนแล้ว

สำหรับความขรุขระของผิวรูปทรงที่ผลิตด้วยเทคนิคการพิมพ์ต่าง ๆ จะแตกต่างกัน มีปัจจัยหลายประการที่ทำให้ผิวรูปทรงที่สร้างเสร็จแล้วขรุขระ ไม่ราบเรียบ ซึ่งเกิดจากเทคโนโลยี อุปกรณ์ ในการผลิตตั้งแต่

สมรรถนะหัวฉีด เทคนิคการหลอมวัสดุพิมพ์ เกล็ดกระจุก อุปกรณ์เคลื่อนหัวฉีด หรือควบคุมเลนส์ เทคนิคการฉายแสง รวมไปถึงวัสดุพิมพ์ที่ใช้ ความขรุขระของผิวรูปทรงย่อมส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของวงจรรจากค่าคงตัวการลดทอนที่เพิ่มขึ้น เช่น การสูญเสียการย้อนกลับของวงจรรองแฉกผ่านเพิ่มขึ้น (Return loss) การสูญเสียของกำลังงานที่ส่งผ่านในวงจรรานซ์ไลน์คัปเปิลอร์เพิ่มขึ้น (Transmission loss) เป็นต้น ซึ่งมีการนำเสนอเทคนิคต่าง ๆ ที่ลดความขรุขระของผิวรูปทรงหลังจากพิมพ์ชิ้นงานเสร็จแล้ว (Post processing) เช่น การใช้สารเคมี การชุบ การขัด เป็นต้น

ตารางที่ 5 ได้นำข้อมูลเทคนิคการพิมพ์แต่ละเทคนิคมาแสดงโดยเปรียบเทียบความขรุขระก่อนและหลังกระบวนการ Postprocess ซึ่งเทคนิค ทั้ง 3 เทคนิคมีขั้นตอน Postprocess พบว่า รูปทรงที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์ที่ใช้เทคนิคการพิมพ์ SLA จะขรุขระน้อยที่สุด รองลงมาคือ เทคนิค FDM/FFF และ SLS ตามลำดับ และเมื่อใช้กระบวนการ Postprocess แล้ว ความขรุขระของรูปทรงลดลงซึ่งเทคนิคที่ดีที่สุดที่ให้ความขรุขระน้อยที่สุดถึง 37 นาโนเมตร คือ เทคนิค SLA รองลงมาเป็นเทคนิค FDM/FFF ที่มีความขรุขระน้อยกว่า 350 นาโนเมตร และลำดับสุดท้าย คือ เทคนิค SLS ที่ให้ความขรุขระลดลงเหลือน้อยกว่า 2.4 ไมโครเมตร ซึ่งวงจรรความถี่ 40 GHz ต้องการเทคนิคการผลิตที่มีขนาดผิวขรุขระน้อยกว่า 0.66 ไมโครเมตร เพื่อให้ค่าการลดทอนน้อยกว่า 1.89 เท่าของค่าการลดทอนเดิม ซึ่งจะมีเทคนิค เพียง 2 เทคนิคที่เหมาะสมที่จะสามารถสร้างได้คือ เทคนิค SLA และ FFF/FDM แต่ต้องมีกระบวนการ Postprocess เพื่อลดความขรุขระของผิวและทำให้ผิวเรียบขึ้น ดังนั้น สองเทคนิคนี้มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้ในการสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟ

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของเทคนิคการพิมพ์ที่สำคัญสำหรับการผลิตวงจรรความถี่สูง

เทคนิค AM	ความแม่นยำ (ไมครอน)	ความขรุขระ (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

## 7. บทสรุป

ผลการศึกษาพบว่า เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติทั้ง 3 กลุ่มเหมาะสมสำหรับนำมาสร้างวงจรมิลลิเมตรเวฟแบบพาสซีฟ เฉพาะอย่างยิ่งเทคนิค FDM/FF และ SLA ซึ่งเป็นเทคนิคที่ให้ความละเอียดในการสร้างรูปทรงทั้งแกน x y และ z อย่างไรก็ดี สำหรับเครื่องพิมพ์ SLA สามารถพิมพ์โลหะได้โดยตรง ไม่ต้องพึ่งกระบวนการจัดการหลังจากพิมพ์ชิ้นงานเสร็จเหมือนเครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF ที่ไม่สามารถพิมพ์โลหะได้ แต่ราคาเครื่องพิมพ์ SLA จะแพงกว่าเครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF ในการสร้างชิ้นงานที่เป็นต้นแบบและสำหรับห้องปฏิบัติการวิจัย การใช้เครื่องพิมพ์แบบ FDM/FFF จะเหมาะสมกว่าเพราะกระบวนการขั้นตอนขัดผิวชิ้นงาน เคลือบหรือชุบโลหะสามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการ แต่หากต้องการสร้างชิ้นงานที่มีความแข็งแรงและนำไปใช้งานจริง ควรใช้เครื่องพิมพ์แบบ SLA

## 8. กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (สำนักงาน กสทช.)

## 9. รายการเอกสารอ้างอิง

The Welding Institute. (2022). **What is Binder Jetting? (Definition, Pros, Cons and Uses).**

สืบค้น กรกฎาคม 1, 2566 จาก <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-binder-jetting#Advantages>.

Lis, M., et al. (2016). Polymer Dielectrics for 3D-Printed RF Devices in the K<sub>a</sub> Band. **Journal of Adv. Mater. Technol**, 1(2), 1-6.

Behzadnezhad, B., et al. (2018). Dielectric Properties of 3D-Printed Materials for Anatomy Specific 3D-Printed MRI coils. **Journal of Magnetic Resonance**, 289, 113–121.

Polymer Plastics Company, LC. (2023). **Rexolite**. สืบค้น สิงหาคม 1, 2566 จาก <https://www.polymerplastics.com/rexolite-high-performance-plastic.shtml>.

Pasternack. **Microstrip Patch Antenna Calculator** สืบค้น กรกฎาคม 1, 2566 จาก <https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip-ant.aspx>.

Electromagnetics and Microwave Engineering. (2011). **Microstrip Line Calculator** สืบค้น กรกฎาคม 1, 2566 จาก <https://www.emtalk.com/mscalc.php>.