



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง เทคโนโลยีเติมจนเต็มเพื่อการประดิษฐ์ส่วนประกอบในระบบระบุลักษณะ  
ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

Fill until Full Technology for Fabricating Components in Radio Frequency Identification  
System

นามผู้วิจัย นางสาวพิมพ์ศิริพร นาคเจริญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนทร พรานนทีสถิตย์, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์เด่นชัย วรเสวต, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, M.Eng. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

เทคโนโลยีเต็มจนเต็มเพื่อการประดิษฐ์ส่วนประกอบในระบบระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

Fill until Full Technology for Fabricating Components in Radio Frequency Identification System

โดย

นางสาวพิมพ์ศิริพร นาคเจริญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิมพ์ศิริพร นาคเจริญ 2554: เทคโนโลยีเติมจนเต็มเพื่อการประดิษฐ์ส่วนประกอบในระบบระบุ  
ลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ปรียญภาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขา  
วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุเนตร พรานนทส์ถิตย์, Ph.D. 78 หน้า

งานวิจัยนี้แสดงวิธีการประดิษฐ์ลวดลายชั้นสารตัวนำที่เรียกว่า เทคนิคเติมจนเต็ม (Fill until Full, FuF) เทคนิคนี้เป็นเทคนิคการเติมสารตัวนำลงในหน้ากักด้วยการควบคุมปริมาตรและความหนาโดยใช้หมึกนำไฟฟ้าโลหะเงิน เทคนิคถูกประยุกต์ใช้กับการประดิษฐ์ส่วนประกอบในป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ 2 ชนิดได้แก่ สายอากาศสำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID tag) และมัลติเรโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิป (Multiresonator Chipless RFID Transponder) สายอากาศ 2 รูปแบบได้แก่ สายอากาศชนิดไดโพล (Dipole) และสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสตัปปรับแต่ง (Dipole with tuning stub) ถูกออกแบบด้วยโปรแกรมจำลองให้ใช้งานในช่วงความถี่ 840-940 MHz ประสิทธิภาพของสายอากาศถูกทดสอบโดยการวัดระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าที่ความถี่ 922.5 MHz มีระยะอ่านเท่ากับ 7.77 เมตร สำหรับสายอากาศชนิดไดโพล และ 9.01 เมตร สำหรับสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสตัปปรับแต่ง

สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิป รีโซเนเตอร์รูปก้นหอยถูกติดตั้งอยู่กับสายนำสัญญาณบนชั้นสเตรตที่ทำด้วยแผ่นเทฟลอน แต่ละรีโซเนเตอร์จะกรองสัญญาณความถี่ที่ความถี่ที่ออกแบบออก ความถี่ที่ออกแบบได้แก่ 1.94, 2.58 และ 2.49 GHz สำหรับบิตที่ 2, 1 และ 0 ตามลำดับ โดยค่า  $|S_{21}|^2$  ที่วัดในช่วงความถี่  $\pm 100$  MHz แสดงขีดแบ่ง (Threshold) สำหรับแยกตรรกะ '0' และ '1' คือ -2.77 dB และ -0.92 dB ตามลำดับทำให้มีขอบว่าง (Margin) เท่ากับ 1.85 dB สำหรับบอกความแตกต่างของข้อมูล

โดยสรุป เทคนิคเติมจนเต็มเหมาะสมกับการประดิษฐ์ส่วนประกอบในการระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เป็นเทคนิคที่ง่าย สะดวก รวดเร็วและมีราคาถูก เทคนิคที่นำเสนอพร้อมกับการประดิษฐ์ส่วนประกอบในระบบระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุนี้ สามารถช่วยส่งเสริมให้เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีได้รับการขยายตัวต่อไป

Pimsiriporn Narkcharoen 2011: Fill until Full Technology for Fabricating Components in Radio Frequency Identification System. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Suneat Pranonsatit, Ph.D. 78 pages.

The fabrication technique of conductive layers called 'Fill until Full (FuF)' is demonstrated in this thesis. In this technique, the conductive ink is filled inside a mask with controlled volume and, hence, thickness. Silver conductive ink was employed. The technique was applied to the fabrication of 2 RFID components; antennas for UHF RFID tags and 3-bit multiresonators for chipless RFID transponders. Two antenna configurations, dipole and dipole with tuning stub, were designed from a modeling tool to be operated at 840-940 MHz. The antenna performance was verified by measuring the reading range of the RFID tags. It was found that at 922.5 MHz the measured reading ranges are 7.77 m for dipole and 9.01 m for dipole with tuning stub.

For chipless RFID transponders, spiral resonators were located along microstrip on Teflon substrates. Each resonator operates as a stop-band filter at a designed frequency. The designed frequencies were 1.94, 2.58 and 2.49 GHz, for bit 2, 1 and 0, respectively. Measured values of  $|S_{21}|^2$  within  $\pm 100$  MHz frequency band show that the threshold for distinguishing logic '0' and '1' are -2.77 dB and -0.92 dB, resulting in 1.85 dB margin for different logic information.

In conclusions, FuF is verified to be suitable for the fabrication of RFID component application. The technique is simple, convenient, fast and cost effective. The proposed technique along with the fabricated RFID components are capable of contributing further expansion in RFID technology.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ ผศ.ดร.สุเนตร พรานนทีสถิตย์ และ ผศ.ดร.เด่นชัย วรเสวต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำในการทำวิจัย และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือและกำลังใจ ทำให้วิทยานิพนธ์ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนและมอบความรู้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่อดีต จนถึงปัจจุบัน

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นอย่างสูง สำหรับเงินทุนสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC), ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC), ฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ห้องวิจัยร่วมทางโทรคมนาคม อิเล็กทรอนิกส์และระบบสมองกลฝังตัว ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์ในการตรวจวัด คุณสมบัติของชิ้นงาน ขอขอบคุณบริษัท NXP Semiconductors (Thailand) Ltd. ที่เอื้อเพื่อชิปอาร์ เอฟไอดีเพื่อใช้ในการประดิษฐ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ รวมทั้งขอขอบคุณบริษัท บางกอกอินดัสเทรียล ลามิเนท จำกัดที่เอื้อเพื่อแผ่นสติกเกอร์ทองแดงสำหรับใช้ประดิษฐ์มัลติรี โซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิป

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคุณแม่และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในการเรียนและเป็นกำลังใจที่สำคัญในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มี ข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ายินดีรับข้อเสนอแนะและขออภัยมา ณ ที่นี้

พิมพ์ศิริพร นาคเจริญ

เมษายน 2554

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	22
อุปกรณ์	22
วิธีการ	23
ผลและวิจารณ์	52
ผล	52
วิจารณ์	64
สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุป	68
ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	74
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	78

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ตารางเปรียบเทียบเทคโนโลยีแสดงตัวตนอัตโนมัติแต่ละระบบ	11
2 ตารางคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้ารุ่น 118-29 บริษัท Creative materials	26
3 ตารางชิปอาร์เอฟไอดีจากบริษัท NXP Semiconductors รุ่น UCODE G2XL	27
4 สมบัติของแผ่นใสและแผ่นเทฟลอนที่ใช้เป็นซับสเตรต	31
5 ตารางผลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและระยะอ่าน ( $r_r$ ) ของสายอากาศจากโปรแกรมจำลอง	39
6 ตารางความยาวและความถี่ที่ตอบสนองของมัลติรีโซเนเตอร์จากโปรแกรมจำลอง	43
7 ตารางรูปแบบและผลการจำลองมัลติรีโซเนเตอร์ที่แสดงลักษณะเฉพาะตั้งแต่ '000' ถึง '111'	48
8 ตารางมัลติรีโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่ชนิดไร้ชีพที่ประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเติมจนเต็ม	55
9 ตารางสรุปผลการวัดค่า $ S_{21} ^2$ ที่ใช้ในการกำหนดลักษณะเฉพาะ '0' และ '1' โดยการพิจารณาที่ความถี่ $\pm 100$ MHz ของความถี่ทำการที่ออกแบบ	61

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ขั้นตอนการสร้างลายวงจบบนแผ่นวงจรมิโครด้วยกรรมวิธีการถ่ายแบบ (Photolithography)	5
2	กลไกการทำงานของเทคโนโลยีการพิมพ์แบบลำละอองลอย (Aerosol jet)	6
3	กลไกการทำงานของเทคนิคฟิลาเมนต์เบสไดเรกไทร์ (Filament based direct writing) จากบริษัท MicroPen	7
4	กลไกการทำงานของเทคโนโลยีไดเรกไทร์ด้วยปลายเข็ม (Dip pen nanolithography, DPN)	7
5	เทคโนโลยี Laser based direct writing	8
6	ระบบของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี	10
7	แสดงตัวอย่างเทคโนโลยี Auto ID	10
8	แสดงโครงสร้างภายในเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี	12
9	ส่วนประกอบภายในของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ	13
10	ป้ายระบุลักษณะรูปแบบต่างๆ	13
11	ประเภทของป้ายระบุลักษณะที่มีในปัจจุบัน	14
12	ป้ายระบุลักษณะชนิดแอ็กทิฟ	15
13	สถาปัตยกรรมภายในของชิปที่ใช้ในป้ายระบุลักษณะชนิดแพสซีฟ	16
14	ระบบการทำงานของป้ายระบุลักษณะชนิดไร้ชิป	16
15	เครื่องดูดจ่ายสารละลาย (Micropipette)	24
16	หมึกนำไฟฟ้ารุ่น 118-29	25
17	(ก) โครงสร้างสายอากาศชนิดไดโพล (Dipole) (ข) รูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศชนิดไดโพล	29
18	โครงสร้างสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสตัปปรับแต่ง (Dipole with tuning stub)	29
19	ระบบการส่งผ่านกำลังของสัญญาณจำนวน 2 พอร์ต	32
20	การเติมหมึกนำไฟฟ้าลงบนซับสเตรตด้วยเครื่องดูดจ่ายสารละลาย	34
21	สรุปขั้นตอนการสร้างสายอากาศด้วยเทคนิคเติมจนเต็ม	34

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	ผลของความหนาของชั้นหมึกและระยะอ่านสัญญาณที่ได้จากโปรแกรมจำลอง	36
23	ชิ้นงานตัวอย่างแสดงชั้นสารตัวนำที่ประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็ม ขนาด $3 \times 10 \text{ mm}^2$	37
24	ภาคตัดขวางแสดงความหนาของชั้นสารตัวนำที่วัดด้วยเครื่อง Surface profiler (ก) ชิ้นงานที่ประดิษฐ์ด้วยหน้ากาหนา $720 \text{ }\mu\text{m}$ (8x) (ข) ชิ้นงานที่ประดิษฐ์ด้วยหน้ากาหนา $270 \text{ }\mu\text{m}$ (3x)	38
25	รูปแบบของสายอากาศชนิดไดโพล	38
26	รูปแบบของสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสลับปรับแต่ง	39
27	ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID Tag) ที่ประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็ม (ก) ไดโพล (ข) ไดโพลที่มีสลับปรับแต่ง	40
28	(ก) และ (ข) แสดงการจัดเรียงอุปกรณ์เพื่อวัดค่าระยะอ่านของสายอากาศที่ประดิษฐ์	41
29	ผลการจำลองค่าความสูญเสียของสายนำสัญญาณที่ประดิษฐ์ด้วยแผ่นเพลลอน ที่ความยาวของชิ้นงาน $90 \text{ mm}$	43
30	รูปแบบของรีโซเนเตอร์จำนวน 1 บิตที่ใช้ทดสอบระดับสัญญาณ โดยการปรับระยะห่าง $g$ ระหว่างสายนำสัญญาณและรีโซเนเตอร์	44
31	ผลการประมวลค่าสูญเสียเนื่องจากการสอดใส่ของรีโซเนเตอร์ (ก) ระยะห่าง $g = 3 \text{ mm}$ (ข) ระยะห่าง $g = 1 \text{ mm}$	45
32	รูปร่างของรีโซเนเตอร์ที่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 2 ชุด	45
33	ผลของจำนวนรีโซเนเตอร์ที่มีต่อค่าการสูญเสียจากการสอดใส่ (ก) 1 ชุด (ข) 2 ชุด	46
34	ลักษณะของมัลติรีโซเนเตอร์จำนวน 3 บิต	47
35	ผลการออกแบบค่าการสูญเสียจากการสอดใส่ของลักษณะเฉพาะ “000”	47

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	ผลการออกแบบค่าการสูญเสียจากการสอดใส่ของลักษณะเฉพาะ “111”	47
37	อุปกรณ์วิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer, VNA)	51
38	ระยะอ่านจากโปรแกรมจำลอง ( $r_s$ ) เปรียบเทียบกับผลจากการวัดทั้ง 2 วิธี ( $r_{m\_fixed}$ และ $r_{m\_varied}$ ) ของปฏิกิริยาของตัวนำคลื่นวิทยุที่มีสายอากาศชนิดไดโพล	53
39	ระยะอ่านจากโปรแกรมจำลอง ( $r_s$ ) เปรียบเทียบกับผลจากการวัดทั้ง 2 วิธี ( $r_{m\_fixed}$ และ $r_{m\_varied}$ ) ของปฏิกิริยาของตัวนำคลื่นวิทยุที่มีสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสลับปรับแต่ง	54
40	ผลการวัดค่า $ S_{21} ^2$ ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘000’	56
41	ผลการวัดค่า $ S_{21} ^2$ ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘001’	57
42	ผลการวัดค่า $ S_{21} ^2$ ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘010’	57
43	ผลการวัดค่า $ S_{21} ^2$ ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘011’	58
44	ผลการวัดค่า $ S_{21} ^2$ ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘100’	58
45	ผลการวัดค่า $ S_{21} ^2$ ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘101’	59
46	ผลการวัดค่า $ S_{21} ^2$ ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘110’	59
47	ผลการวัดค่า $ S_{21} ^2$ ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘111’	60
48	ผลของค่า $ S_{21} ^2$ ที่วัดได้จากมัลติรีโซเนเตอร์ที่ถูกประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเต็มจนเต็ม โดยการใช้การพิจารณาในช่วงความถี่ $\pm 100$ MHz จากความถี่ที่ทำการออกแบบ (ก) มัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘000’ และ ‘111’ (ข) มัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘001’ และ ‘110’ (ค) มัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘010’ และ ‘101’ (ง) มัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘011’ และ ‘100’	63
49	แนวทางการปรับปรุงระบบของเทคโนโลยีเต็มจนเต็ม โดยการใช้แรงลมดูดอากาศ	72

# เทคโนโลยีเติมจนเต็มเพื่อการประดิษฐ์ส่วนประกอบใน ระบบระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

## Fill until Full Technology for Fabricating Components in Radio Frequency Identification System

### คำนำ

เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการประดิษฐ์ลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันแบ่งออกเป็นสองกรรมวิธีหลักได้แก่กรรมวิธีการหักออก (Subtractive Process) และกรรมวิธีการเพิ่มเข้า (Additive Process) กรรมวิธีการหักออก ประกอบด้วยสองขั้นตอนหลักคือ การวางวัสดุตัวนำลงบนฐานรอง และนำส่วนของวัสดุตัวนำที่ไม่ต้องการออก ซึ่งกรรมวิธีการหักออกนี้เป็นกรรมวิธีที่มีมานาน ใช้ทั่วไปแต่มีความยุ่งยากในการประดิษฐ์ลายวงจร จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงและมีค่าบำรุงรักษาสูง จึงไม่เป็นการสะดวกสำหรับนักวิจัยในมหาวิทยาลัยหรือหน่วยงานที่มีความต้องการสร้างวงจรต้นแบบ กรรมวิธีการเพิ่มเข้าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเพราะประหยัดสารตัวนำได้มากกว่าโดยในปัจจุบันได้มีการนำกรรมวิธีการนี้มาใช้ในเทคนิคการประดิษฐ์ลายวงจรอย่างแพร่หลาย แบ่งเป็นหลายกลุ่มหลักได้แก่เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท (ink-jet printing) ซึ่งมีขีดจำกัดในเรื่องความหนาของชั้นวัสดุตัวนำ และถัดมาคือกรรมวิธีการใช้เทคนิคการพิมพ์ฉลุลาย (screen printing) ซึ่งจัดเป็นกรรมวิธีที่ได้รับความนิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นวงจร แต่เนื่องจากมีความยุ่งยากในการสร้างแบบพิมพ์ และเหมาะสมเฉพาะกับอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตในปริมาณมาก จึงไม่มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสำหรับนักวิจัยที่ต้องการสร้างลายวงจรต้นแบบ

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประดิษฐ์ลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคเติมจนเต็ม (Fill until Full) ซึ่งเป็นกรรมวิธีการเพิ่มเข้า โดยการหยดสารตัวนำลงบนชั้นสเตรต โดยใช้หน้ากาก (Mask) กำหนดขนาดของชิ้นส่วนที่ต้องการประดิษฐ์และปริมาณของสารตัวนำที่ใช้ ซึ่งมีข้อดีคือสามารถควบคุมปริมาณสารตัวนำที่ใช้ได้อย่างแม่นยำ เพื่อลดการสิ้นเปลืองของสารตัวนำ จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้ในการประดิษฐ์ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สารตัวนำราคาสูง โดยวัสดุอุปกรณ์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุที่หาง่ายและมีราคาถูก



## วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือศึกษาค้นคว้า วิจัย และนำเสนอเทคโนโลยีเติมจนเต็ม (Fill until Full) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ นั่นคือการประดิษฐ์ชิ้นส่วนตัวนำในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

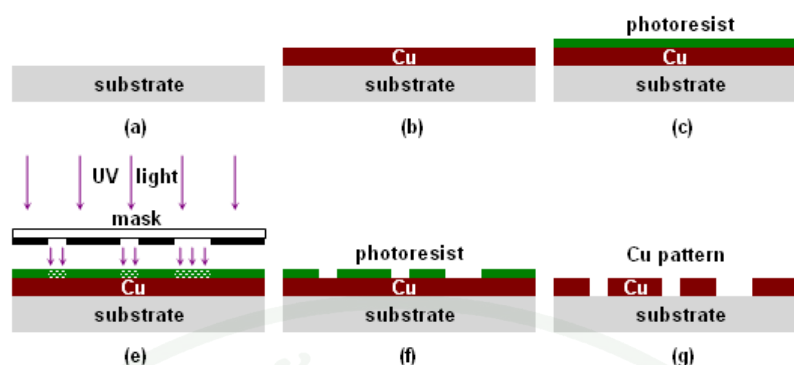
1. เพื่อศึกษารายละเอียดและออกแบบกระบวนการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคเติมจนเต็ม (Fill until Full)
2. เพื่อค้นคว้าพัฒนาและจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมในกระบวนการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคนิคเติมจนเต็ม โดยคำนึงถึงความสะดวกในการประดิษฐ์ ความสามารถประดิษฐ์ได้ด้วยอุปกรณ์ที่สามารถจัดหาง่ายและมีราคาถูก
3. เพื่อให้ได้เทคโนโลยีการเติมจนเต็ม ที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
4. เพื่อให้สามารถประดิษฐ์ส่วนประกอบของวงจรคลื่นความถี่วิทยุด้วยเทคโนโลยีการเติมจนเต็มและศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งและป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นวิทยุชนิดไร้ชีพ

## การตรวจเอกสาร

### ทฤษฎีและแนวความคิด

#### 1. เทคโนโลยีการผลิตในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ แผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board, PCB) นับเป็นส่วนประกอบสำคัญของแผงวงจรไฟฟ้าที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และมีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การสร้างลายวงจรไฟฟ้าบนแผ่นวงจรพิมพ์ถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตส่วนประกอบของแผงวงจร โดยการประดิษฐ์ลายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยกรรมวิธีการถ่ายแบบ (Photolithography) เป็นกรรมวิธีที่ใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปในปัจจุบัน ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยกรรมวิธีนี้เป็นการสร้างลายวงจรด้วยเทคนิคการหักออก (Subtractive technique) เริ่มจากขั้นตอนการเตรียมชั้นสเตรต จากนั้นปลูกลงชั้นสารตัวนำลงบนชั้นสเตรต ซึ่งในภาพที่ 1 ใช้ทองแดงเป็นสารตัวนำ ทั้งนี้กรรมวิธีการปลูกลงชั้นสาร (Deposition) มีหลายวิธี เช่นการปลูกลงด้วยไอระเหยเคมี (Chemical-vapor deposition, CVD) การปลูกลงด้วยไอระเหยเคมีแรงดันต่ำด้วยพลาสมา (Plasma-assisted CVD, PECVD) และกรรมวิธีการปลูกลงสเปตเตอร์ (Sputter Deposition) เป็นต้น ขั้นตอนถัดมาคือการปลูกลงชั้นน้ำยาไวแสง (Photoresist) ลงบนชั้นสารตัวนำ โดยทั่วไปน้ำยาไวแสงคือวัสดุโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถูกแสง จากนั้นนำลวดลายของชั้นสารตัวนำที่ต้องการวางบนชั้นสารไวแสง แล้วเริ่มกระบวนการฉายแสงผ่านหน้ากาก (Photomask) เพื่อให้แสงทำปฏิกิริยากับชั้นสารไวแสง จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการกัด (Etching) น้ำยาไวแสงและชั้นสารตัวนำออก ให้คงเหลือเพียงชั้นสารตัวนำตามลวดลายที่ต้องการ และจากกรรมวิธีทั้งหมดข้างต้นจะเห็นได้ว่า การประดิษฐ์ลายวงจรด้วยกรรมวิธีการหักออก หรือ Subtractive process นี้มีขั้นตอนยุ่งยาก ซับซ้อน และเกิดของเสียจากกรรมวิธีจำนวนมาก ดังนั้นกรรมวิธีการผลิตลายวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคการเพิ่มเข้า (Additive technique) จึงเป็นกรรมวิธีที่น่าสนใจ เพราะมีขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน ดังเช่นเทคโนโลยีการเติมจนเต็ม (Fill until Full, FuF) ที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการสร้างลายวงจรบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยกรรมวิธีการถ่ายภาพ (Photolithography)

ที่มา: Zhang (2009)

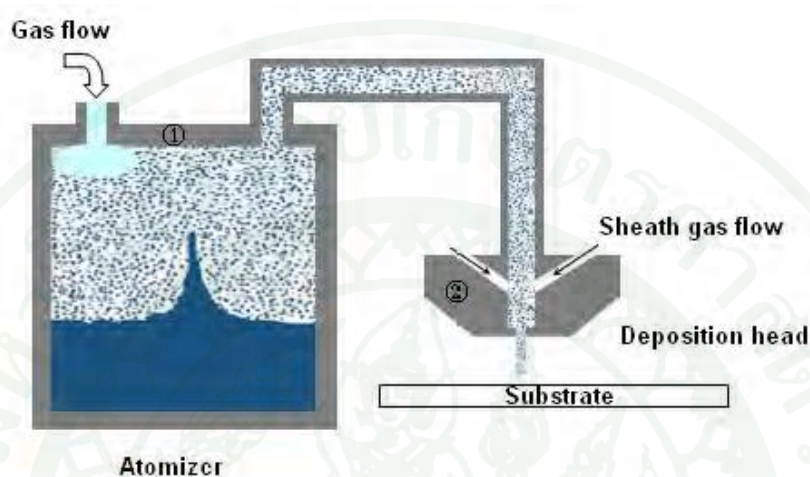
หนึ่งในเทคโนโลยีการพิมพ์ที่น่าสนใจทางเลือกหนึ่งคือ กรรมวิธีการนำสารตัวนำลงบนชั้นสเตรตเพียงชั้นตอนเดียวหรือ ไดรเรก ไรต์ (Direct write technique) ซึ่งทำให้การประดิษฐ์ลายวงจรไฟฟ้ามีความสะดวก รวดเร็วขึ้น สามารถจำแนกได้ 4 ประเภทดังนี้ (Zhang, 2009)

1) เทคโนโลยีไดเรก ไรต์ด้วยละออง (Droplet based direct writing) เป็นกรรมวิธีที่ใช้การขับละอองของเหลวออกจากหัวฉีดซึ่งหัวฉีดอาจประกอบด้วยหัวฉีดเดี่ยว หรือหลายหัวฉีด และสามารถจำแนกกลุ่มย่อยของกรรมวิธีนี้ได้ 2 ประเภทคือ

(ก) เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท (Ink jet printing) ซึ่งได้รับความนิยมในกลุ่มผู้ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและกำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ สามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มได้แก่ เทคโนโลยีการพิมพ์แบบต่อเนื่อง (Continuous Inkjet) และเทคนิคการพิมพ์แบบดรอปออนดีมานด์ (Drop on Demand, DoD) โดยประสิทธิภาพความละเอียด (Resolution) ของเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของหมึก และระยะเวลาในการแข็งตัวของหมึกหลังจากการพิมพ์

(ข) เทคโนโลยีการพิมพ์แบบลำละอองลอย (Aerosol Jet) ดังแสดงในภาพที่ 2 มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือ เครื่องทำละออง (Atomizer) และหัวปลูก (Deposition head) โดยกลไกการทำงานเริ่มจากบรรจุก๊าซอัดในรูปของของเหลวในเครื่องทำละอองซึ่งอาจเป็นแบบอัลตราโซนิค หรือ Pneumatic atomizer เพื่อสร้างละอองของสารขนาด 1-5  $\mu\text{m}$  จากนั้นส่งละอองไปยังหัว

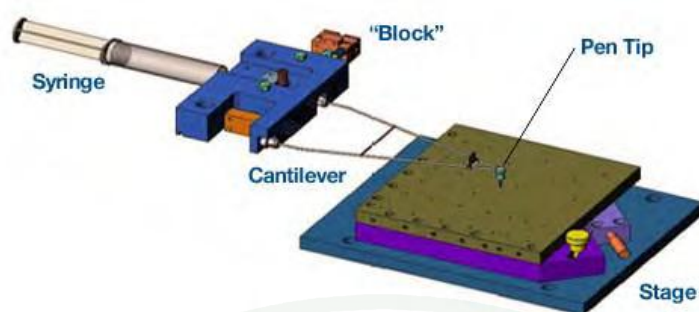
ปลุก เพื่อพ่นละอองไปบนซับสเตรต โดยใช้การขับเคลื่อนของก๊าซจากท่อนำก๊าซทั้ง 2 ด้าน (Sheath gas flow) ในการกำหนดทิศทางการพ่นของละอองลงบน ซับสเตรต โดยกรรมวิธีนี้มีข้อได้เปรียบมากกว่าเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทเนื่องจากสามารถปรับระยะห่างระหว่างหัวฉีดและซับสเตรตได้ในช่วง 1-5 mm (Zhang, 2009)



ภาพที่ 2 กลไกการทำงานของเทคโนโลยีการพิมพ์แบบลำละอองลอย (Aerosol jet)

ที่มา: Zhang (2009)

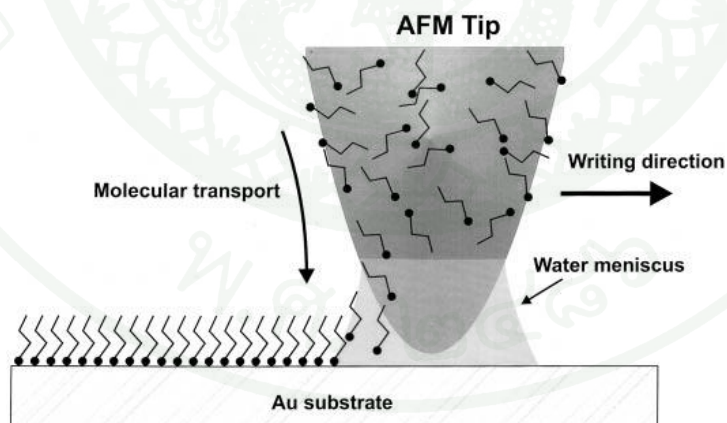
2) เทคโนโลยีฟิลาเมนต์เบสไดเรกไรต์ (Filament based direct writing, FBDW) เป็นกรรมวิธีที่ใช้ของเหลวในการฉีดพ่นเช่นเดียวกับระบบการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท และระบบการพิมพ์แบบลำละอองลอย แต่ต่างกันในส่วนของการเคลื่อนที่ของของเหลวมีลักษณะการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง ไม่เป็นละออง และสามารถใช้งานกับของเหลวที่มีค่าความหนืด (Viscosity) แตกต่างกันในช่วงกว้างได้ โดยสามารถอธิบายตัวอย่างเทคโนโลยีฟิลาเมนต์เบสไดเรกไรต์ดังภาพที่ 3 กลไกการทำงานประกอบด้วยหลอดฉีดป้อนหมึก (Syringe), หัวเขียน หรือบล็อก (Block), ฐานวางซับสเตรต (Stage) และส่วนปลายสำหรับปล่อยหมึก (Pen tip) โดยการทำงานเริ่มจากของเหลวถูกป้อนเข้าสู่หลอดฉีดที่ติดอยู่กับหัวเขียนด้วยแรงลม (Pneumatic ram) จากนั้นหมึกจะถูกบีบอัดจนมีความดัน 14 MPa และไหลออกทางปลายหัวเขียน (Writing tip) เพื่อฉีดไปบนซับสเตรต โดยกรรมวิธีนี้สามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดตั้งแต่ 0.005-500 Pa·s (Zhang, 2009)



ภาพที่ 3 กลไกการทำงานของเทคนิคฟิลาเมนต์เบสไดเรกไทร์ (Filament based direct writing) จากบริษัท MicroPen

ที่มา: Zhang (2009)

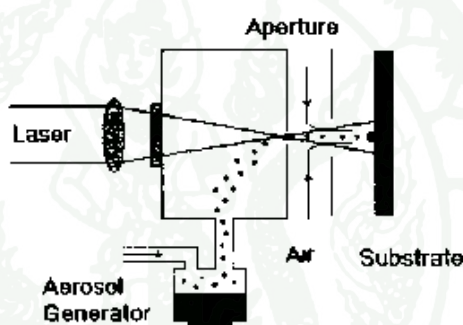
3) เทคโนโลยีไดเรกไทร์ด้วยปลายเข็ม (Tip based direct writing) หรือดิพเพนาโนลิโธกราฟี (Dip Pen Nanolithography, DPN) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ส่วนปลายของกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope, AFM) ในการนำโมเลกุลของสารที่ต้องการส่งผ่านไปยึดเกาะบนซับสเตรตผ่านทางส่วนปลายของเครื่องเอเอฟเอ็ม ด้วยอิทธิพลของแรงดึงตามรูเล็ก (Capillary force) โดยกรรมวิธีนี้เหมาะสมกับการใช้งานในระดับนาโน แสดงกลไกการทำงานดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กลไกการทำงานของเทคโนโลยีไดเรกไทร์ด้วยปลายเข็ม (Dip pen nanolithography, DPN)

ที่มา: Zhang (2009)

4) เทคโนโลยีไคเรกไรต์ด้วยเลเซอร์ (Laser based direct writing) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้เลเซอร์ช่วยในการปลูกชั้นสารลงบนซับสเตรต จัดเป็นกรรมวิธีเพิ่มเข้า (Additive process) ที่ได้รับความนิยมมากประเภทหนึ่ง และในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่ใช้เลเซอร์ช่วยในการปลูกชั้นสารลงบนซับสเตรตด้วยกันหลายกรรมวิธี ยกตัวอย่างเช่นเทคโนโลยีไคเรกไรต์ด้วยการไหล (Flow guide direct write, FGDW) ดังแสดงกลไกในภาพที่ 5 ประกอบด้วยอุปกรณ์ทำละอองด้วยอัลตราโซนิค (Ultrasonic atomization) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนของเหลวภายในให้กลายเป็นละอองขนาดเล็ก และละอองที่แตกตัวขนาดเล็กละเอียดนี้จะถูกเหนี่ยวนำไปยังซับสเตรตโดยใช้เทคนิคการถ่ายเทพลังงานด้วยการปะทะกับพลังงานของเลเซอร์ ทำให้เคลื่อนที่ไปยังช่องลำแสงและตกลงบนซับสเตรต โดยความเร็วของการปลูกประมาณ 1-10,000 อนุภาคต่อวินาที



ภาพที่ 5 เทคโนโลยี Laser based direct writing

ที่มา: Zhang (2009)

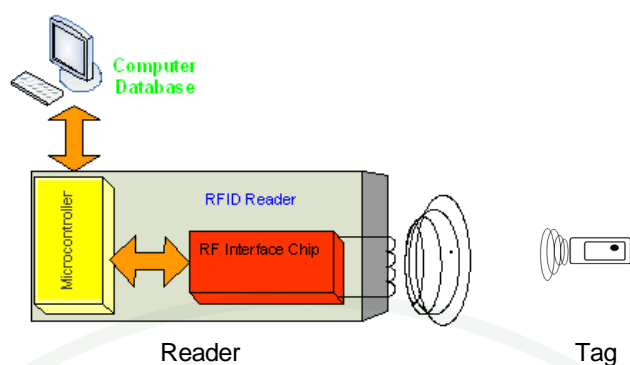
จากเทคโนโลยีไคเรกไรต์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ปัจจุบัน ดังที่กล่าวมาข้างต้น เห็นได้ว่าจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีกลไกการทำงานซับซ้อน ใช้พลังงานสูง และมีค่าใช้จ่ายในการดูแลบำรุงรักษามาก ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอเทคโนโลยีทางเลือกในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยกระบวนการเพิ่มเข้า (Additive process) โดยการใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่าเติมจนเต็ม (Fill until Full, FuF) ซึ่งมีข้อได้เปรียบในเรื่องต้นทุนการผลิต สามารถจัดหาอุปกรณ์ในการผลิตได้ทั่วไป นอกจากนี้ยังมีความสะดวกรวดเร็ว และมีความยืดหยุ่นในการปรับแก้และตรวจสอบชิ้นงานต้นแบบได้ในระหว่างการผลิต ทั้งยังประหยัดพลังงาน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

## 2. ปัจจัยสำคัญในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคโนโลยีเต็มจนเต็ม

จากข้อได้เปรียบต่างๆของเทคโนโลยีเต็มจนเต็ม ทำให้เกิดแนวความคิดนำมาประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์สายอากาศของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID Tag) และส่วนมัลติเรโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นวิทยุชนิดไร้ชิป (Multiresonator Chipless RFID Tag) โดยปัจจัยในการออกแบบและผลิตมีส่วนประกอบที่ต้องคำนึงถึงในงานวิจัย 3 ส่วนคือหมึกนำไฟฟ้า วิธีการเติมสารลงบนซับสเตรต และ ซับสเตรต โดยหมึกนำไฟฟ้าที่สามารถจัดหาได้ทั่วไปคือหมึกนำไฟฟ้าที่มีอนุภาคโลหะเงินและทองแดง โดยหมึกนำไฟฟ้ามีความหลากหลายในผลิตภัณฑ์และจัดหาได้ง่าย ในปัจจุบันหมึกนำไฟฟ้าที่ผลิตมาเพื่อรองรับความต้องการในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์มีหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น หมึกนำไฟฟ้าที่ความหนืดสูงเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานเคลือบหรือป้ายบนชิ้นงาน หมึกนำไฟฟ้าที่มีความหนืดต่ำเหมาะสำหรับการนำไปหยดหรือเติมลงบนวงจรไฟฟ้าตามลักษณะงานที่ต้องการ (Creative Materials Incorporated. n.d.) องค์ประกอบถัดมาคือวิธีการและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการเติมหมึกนำไฟฟ้าในเทคโนโลยีเต็มจนเต็ม และองค์ประกอบสุดท้ายคือซับสเตรตซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นใสชนิดถ่ายเอกสารได้ (Transparency sheet) และแผ่นเทฟลอน (Teflon sheet) ซึ่งมีสมบัติทนความร้อนและความชื้นได้ดี ราคาถูก โดยซับสเตรตที่มีเทฟลอนเป็นองค์ประกอบหลักได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมอาร์เอฟไอดีเนื่องจากมีค่าความสูญเสีย (loss tangent) ต่ำ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เช่น ความสม่ำเสมอของลวดลายหน้ากากที่ใช้เป็นแบบ ระยะเวลาในการเติมหมึกแต่ละครั้ง และความราบเรียบของพื้นผิวที่ใช้ประดิษฐ์ชิ้นงาน

## 3. เทคโนโลยีการระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

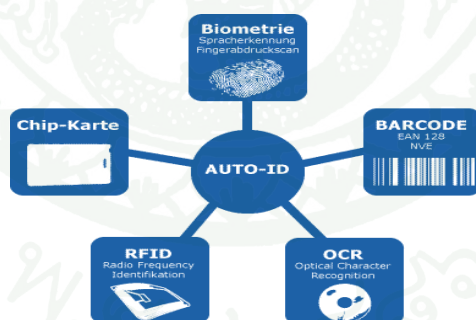
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิจัยสายอากาศของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง และมัลติเรโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิป ซึ่งป้ายระบุลักษณะทั้ง 2 ชนิดดังกล่าวจัดอยู่ในเทคโนโลยีระบบการชี้เฉพาะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency Identification, RFID) โดยระบบอาร์เอฟไอดีเป็นระบบที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุมาเป็นคลื่นพาหะเพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์สองชนิดที่เรียกว่าป้ายระบุลักษณะ (Tag, Transponder) และตัวอ่านข้อมูล (RFID Reader) ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย โดยการนำข้อมูลที่ต้องการส่งมาทำการกล้ำสัญญาณ (Modulation) กับคลื่นวิทยุแล้วส่งออกผ่านทางสายอากาศ แสดงระบบอาร์เอฟไอดีได้ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ระบบของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี

ที่มา: สถาบันส่งเสริมความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีแห่งประเทศไทย (2554)

อาร์เอฟไอดีถือเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีแสดงตัวตนอัตโนมัติ (Automatic Identification, Auto ID) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างระบบแสดงตัวตนอัตโนมัติประเภทอื่นๆ ได้แก่ระบบรหัสแท่ง (Barcode) เทคโนโลยีไบโอเมตริกซ์ เช่น ระบบรู้จำเสียงพูด (Voice recognition), ระบบรู้จำตัวอักษร (Optical Character Recognition, OCR) ดังภาพที่ 7 และตารางที่ 1 แสดงข้อแตกต่างและข้อเปรียบเทียบเทคโนโลยีแต่ละระบบ



ภาพที่ 7 ตัวอย่างเทคโนโลยีแสดงตัวตนอัตโนมัติ

ที่มา: วัชรกร (2553)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบเทคโนโลยีแสดงตัวตนอัตโนมัติแต่ละระบบ

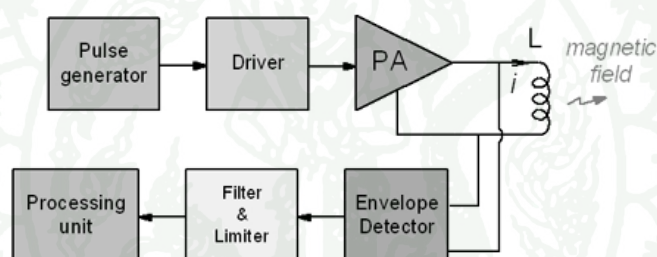
รายการ	รหัสแท่ง	การรู้จำอักษร	การรู้จำเสียงพูด	ไบโอเมตริกซ์	คลื่นวิทยุ
ความจุข้อมูล (bytes)	1-100	1-100	-	-	16-64 kb
การอ่านข้อมูลโดยคน	จำกัด	ง่าย	ง่าย	ยาก	อ่านไม่ได้
ปัญหาความชื้น	กระทบ	กระทบ	-	-	ไม่มีผล
เมื่อโดนปิดบัง	อ่านไม่ได้	อ่านไม่ได้	-	อ่านได้	ไม่มีผล
ทิศทางการอ่าน	น้อย	น้อย	-	-	ไม่มีผล
การสึกหรอ	ควบคุมได้	ควบคุมได้	-	-	ไม่มีผล
ราคาอุปกรณ์	ต่ำมาก	ปานกลาง	แพงมาก	แพงมาก	ปานกลาง
การปลอมแปลง	ง่าย	ง่าย	อาจทำได้	ยาก	ยากมาก
อัตราเร็วในการอ่านข้อมูล	4 วินาที	3 วินาที	5 วินาที	5-10 วินาที	0.5 วินาที
ระยะอ่าน	0-50 ซม.	< 1 ซม.	0-50 ซม.	สัมผัสโดยตรง	มากกว่า0-5 เมตร

ที่มา: วัชรกร (2553)

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีมีข้อได้เปรียบมากกว่าเทคโนโลยีอื่นหลายด้าน ได้แก่ ความสามารถในการอ่าน เขียนข้อมูลได้โดยไม่ต้องสัมผัส (Contactless) จึงไม่เกิดการสึกหรอดังเช่นในการ์ดแถบแม่เหล็ก ทำให้มีค่าบำรุงรักษาต่ำ มีอายุการใช้งานนาน สะดวก รวดเร็วและสามารถสื่อสารได้ในระยะไกล นอกจากนี้ยังทนต่อสภาพแวดล้อมและสิ่งสกปรก จึงถือเป็นอุปกรณ์ระบุลักษณะอัตโนมัติที่เหมาะสมที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548) ทั้งนี้ยังสามารถอ่านข้อมูลได้ขณะถูกบังหรือขณะวัตถุกำลังเคลื่อนที่ เนื่องจากใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการรับส่งข้อมูล แตกต่างจากระบบบาร์โค้ดที่ใช้แสงเลเซอร์ในการรับส่งข้อมูล ทั้งยังสามารถนำป้ายที่ใช้แล้วกลับมาเขียนอ่านข้อมูลใหม่ได้ ซึ่งถือเป็นข้อได้เปรียบอย่างหนึ่งของระบบอาร์เอฟไอดี โดยสามารถจำแนกรายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ของระบบอาร์เอฟไอดีได้ดังนี้

### 1) เครื่องอ่าน (Reader)

มีหน้าที่ในการติดต่อเพื่ออ่าน หรือเขียนข้อมูลลงในป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่สูงโดยแสดงโครงสร้างภายในเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีดังภาพที่ 8 กลไกการทำงานเริ่มต้นจากสัญญาณถูกสร้างจากส่วนกำเนิดสัญญาณ (Pulse generator) แล้วสัญญาณความถี่จะถูกส่งไปยังภาคขับ (Driver) เพื่อขยายกำลัง (Power Amplifier, PA) จากนั้นขับสัญญาณไปยังขดลวดเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และในขณะเดียวกันขดลวดนี้จะทำหน้าที่เป็นสายอากาศสำหรับการส่งสัญญาณและรับสัญญาณความถี่ที่ถูกกล้ำสัญญาณ (Modulate) จากข้อมูลในป้าย จากนั้นส่งสัญญาณที่ได้รับไปยังส่วน Envelop detector และส่วนกรองและจำกัดสัญญาณ (Filter and limiter) ที่ทำหน้าที่ตรวจจับและคัดแยกสัญญาณข้อมูลออกจากคลื่นพาหะและสร้างสัญญาณให้เป็นตามตรรกะ (logic) จากนั้นจึงส่งสัญญาณไปยังส่วนประมวลผล (Processing unit) ต่อไป



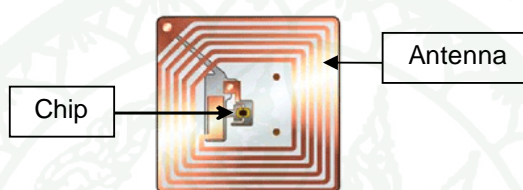
ภาพที่ 8 โครงสร้างภายในเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี

ที่มา: วัชรกร (2553)

หลักการติดต่อสื่อสารระหว่างป้ายระบุลักษณะและเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีมีขั้นตอนเริ่มจากเครื่องอ่านส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุตลอดเวลา เพื่อตรวจจับการกล้ำสัญญาณ หรือตรวจจับป้ายระบุลักษณะในบริเวณรัศมีการแพร่สัญญาณของเสาอากาศ และเมื่อมีป้ายระบุลักษณะในบริเวณรัศมีการแพร่สัญญาณ ป้ายระบุลักษณะจะได้รับพลังงานจากสัญญาณคลื่นความถี่ที่ส่งผ่านสายอากาศและเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานจ่ายให้ชิปอาร์เอฟไอดีของป้าย เพื่อให้ป้ายทำงาน จากนั้นป้ายจะส่งข้อมูลในหน่วยความจำของชิปออกมาในรูปของคลื่นความถี่วิทยุที่ผ่านการกล้ำสัญญาณ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดความถี่หรือเฟสผ่านทางสายอากาศของป้ายระบุลักษณะและส่งสัญญาณกลับไปยังเครื่องอ่าน จากนั้นเครื่องอ่านแปลงสัญญาณออกมาเป็นข้อมูล และถอดรหัสให้เป็นตรรกะ (logic) เพื่อนำข้อมูลไปใช้งานต่อไป (ปาริชาติ, 2553)

## 2) ป้าย (Tag หรือ Transponder)

โครงสร้างภายในของป้ายประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ไมโครชิป (Microchip) ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุ และสายอากาศ (Antenna) สำหรับทำหน้าที่รับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสร้างพลังงานป้อนให้ส่วนของไมโครชิป ดังแสดงส่วนประกอบในภาพที่ 9 โดยสายอากาศและชิปภายในป้ายระบุลักษณะอาจรวมอยู่ในรูปแบบที่เป็นกระดาษ แผ่นฟิล์ม พลาสติก มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำไปติด ดังแสดงในภาพที่ 10 และจำแนกประเภทของป้ายระบุลักษณะที่มีในปัจจุบันได้ดังภาพที่ 11



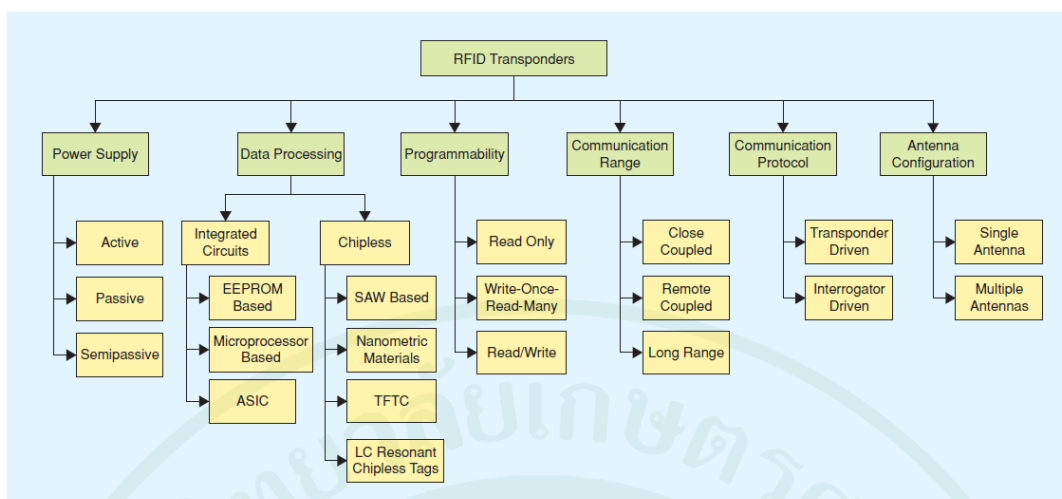
ภาพที่ 9 ส่วนประกอบภายในของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

ที่มา: ธวัชชัย (2553)



ภาพที่ 10 ป้ายระบุลักษณะรูปแบบต่างๆ

ที่มา: วัชรกร (2553)



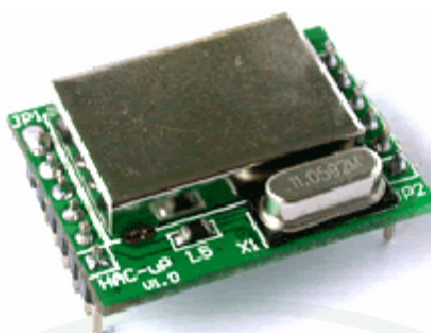
ภาพที่ 11 ประเภทของป้ายระบุลักษณะที่มีในปัจจุบัน

ที่มา: Preradovic (2008)

ทั้งนี้สามารถจำแนกป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุตามเงื่อนไขของการใช้พลังงานเป็น 3 ชนิดดังนี้

ก) ป้ายระบุลักษณะชนิดแอ็กทีฟ (Active tag)

ป้ายชนิดนี้ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ภายนอก เพื่อให้วงจรภายในทำงาน โดยมีหน่วยความจำภายในขนาดใหญ่ และสามารถอ่านได้ในระยะไกล ข้อเสียของป้ายแบบนี้คือมีราคาต่อหน่วยสูง มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และมีอายุการใช้งานที่จำกัดตามอายุของแบตเตอรี่ซึ่งจะมีอายุการใช้งานประมาณ 3-7 ปีโดยแสดงตัวอย่างป้ายระบุลักษณะชนิดแอ็กทีฟได้ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ป้ายระบุลักษณะชนิดแอ็กทีฟ

ที่มา: วัชรกร (2553)

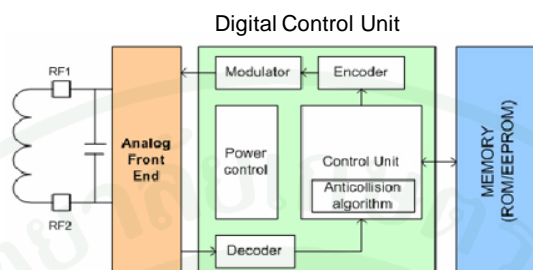
ข) ป้ายระบุลักษณะชนิดกึ่งแพสซีฟ/แอ็กทีฟ (Semi Passive/Active tag)

ป้ายชนิดนี้จะรวมลักษณะการทำงานของป้ายชนิดแอ็กทีฟและแพสซีฟเข้าด้วยกัน โดยมีวงจรถูกกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเช่นเดียวกับป้ายชนิดแพสซีฟแต่จะใช้กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เล็กน้อยเพื่อให้วงจรของชิปทำงานได้ และในขณะที่รับส่งสัญญาณจะมีการนำพลังงานจากเครื่องอ่านมาใช้เช่นเดียวกับป้ายระบุลักษณะชนิดแพสซีฟ ทำให้สามารถส่งข้อมูลได้ระยะไกลกว่าป้ายแบบแพสซีฟ แต่ป้ายไม่สามารถเริ่มต้นส่งสัญญาณการสื่อสารดังเช่นป้ายระบุลักษณะชนิดแอ็กทีฟต้องรอรับสัญญาณกระตุ้นให้ทำงานจากเครื่องอ่านเท่านั้น

ค) ป้ายระบุลักษณะชนิดแพสซีฟ (Passive tag)

เป็นป้ายระบุลักษณะที่เลือกศึกษาวิจัยในงานวิจัยนี้ ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากมีวงจรถูกเหนี่ยวนำไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟภายในตัวจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Inductive Coupling) โดยการเหนี่ยวนำจะถ่ายเทพลังงานให้แก่ชิปภายในป้ายระบุลักษณะ ซึ่งทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก ขึ้นอยู่กับกำลังงานของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ โดยปกติป้ายชนิดนี้มักมีหน่วยความจำขนาดเล็ก และสามารถผลิตให้มีขนาดเล็กเพื่อใช้กับสัตว์ได้ นำหนักเบา ราคาถูก (วัชรกร, 2553) โดยโครงสร้างภายในทั่วไปของชิปที่ใช้ในป้ายระบุลักษณะชนิดแพสซีฟสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 13 ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ส่วนแอนะล็อกฟรอนต์เอนด์ (Analog Front-End) ส่วน

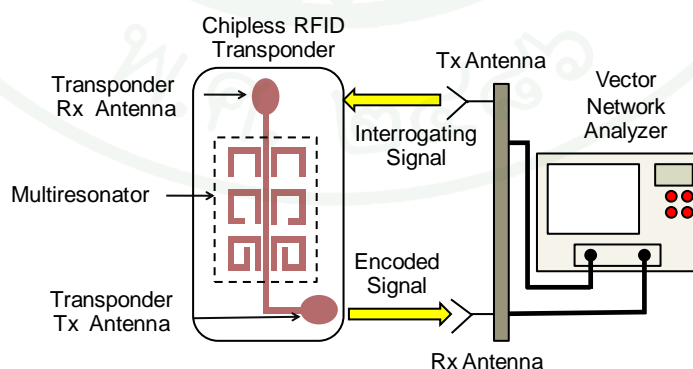
ควบคุมภาคตรรกะ (Digital Control Unit) และหน่วยความจำ (Memory) ซึ่งอาจจะเป็นแบบหน่วยความจำอ่านอย่างเดียว (Read only memory, ROM) หรือหน่วยความจำที่สามารถลบหรือโปรแกรมข้อมูลใหม่ได้ด้วยไฟฟ้า (Electrical Erasable Programmable ROM, EEPROM)



ภาพที่ 13 สถาปัตยกรรมภายในของชิปที่ใช้ในป้ายระบุสัญลักษณ์ชนิดแพสซีฟ

ที่มา: วัชรกร (2553)

นอกจากนี้ยังมีป้ายระบุสัญลักษณ์ชนิดแพสซีฟอีกชนิดหนึ่งที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้ คือ ป้ายระบุสัญลักษณ์ไร้ชิป (Chipless RFID Tag) ซึ่งเป็นป้ายระบุสัญลักษณ์ที่ไม่ต้องการพลังงาน มีการจัดเก็บข้อมูลเฉพาะตัวโดยไม่ต้องการชิป และสามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมหลากหลาย มีความคงทนแข็งแรง (Reichardt, 2009) โดยในการศึกษาวิจัยนี้ได้ศึกษาและพัฒนาเทคนิคการประดิษฐ์มัลติเรโซเนเตอร์ของป้ายระบุสัญลักษณ์ไร้ชิป (Multiresonator Chipless RFID) ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็ม โดยมีส่วนประกอบหลักของระบบดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ระบบการทำงานของป้ายระบุสัญลักษณ์ไร้ชิป

ระบบการรับส่งสัญญาณป้ายระบุลักษณะชนิดไร้ชิปมี 2 องค์ประกอบหลักได้แก่ สายอากาศสำหรับรับและส่งของเครื่องอ่านและสายอากาศของป้ายระบุลักษณะดังรายละเอียดดังนี้

(ก) เครื่องอ่านประกอบด้วยสายอากาศสำหรับส่ง (Transmission reader antenna, Tx reader antenna) และรับ (Receive reader antenna, Rx reader antenna) คลื่นความถี่จากป้ายระบุลักษณะชนิดไร้ชิป โดยมีขั้นตอนการทำงานคือรับสัญญาณความถี่จากเครื่องมือวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer, VNA) แล้วส่งสัญญาณไปยังป้ายระบุลักษณะชนิดไร้ชิปผ่านทางสายอากาศสำหรับส่งสัญญาณ จากนั้นนำสัญญาณกลับไปยังเครื่องมือวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ด้วยสายอากาศสำหรับรับสัญญาณ

(ข) ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิป (Chipless RFID Tag หรือ Transponder) มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือ ส่วนรีโซเนเตอร์ที่ใช้สำหรับการเก็บข้อมูลลักษณะเฉพาะ ซึ่งการออกแบบรีโซเนเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงต้องออกแบบให้สัญญาณขาออกชัดเจนเพียงพอเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สำหรับการระบุลักษณะ (Reichardt, 2009) และส่วนถัดมาคือ ส่วนของสายอากาศ 2 อันที่ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณจากป้าย โดยสายอากาศส่วนที่ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณเรียกว่า Receive tag antenna (Rx tag antenna) และ Transmission tag antenna (Tx tag antenna) ตามลำดับ โดยมีลักษณะการวางในทิศทางตั้งฉากกันเพื่อลดสัญญาณแทรกข้าม (Cross talk) ระหว่างสายอากาศทั้ง 2 อัน (Preradovic, 2010)

การเข้ารหัสข้อมูลของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิป ใช้หลักการตัดแยกความถี่ด้วยส่วนประกอบที่เรียกว่ารีโซเนเตอร์โดยชุดของรีโซเนเตอร์จำนวนหลายชุดที่ประกอบเข้าด้วยกันเรียกว่ามัลติรีโซเนเตอร์ (Multiresonator) เพื่อให้สามารถรองรับสัญญาณได้หลายความถี่ ทั้งนี้รีโซเนเตอร์แต่ละตัวจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดและมุมเฟสของสัญญาณแต่ละความถี่ที่กำหนด จากนั้นสัญญาณที่ผ่านการกล้ำสัญญาณด้วยมัลติรีโซเนเตอร์จะถูกส่งผ่านไปยังสายอากาศภาครับของเครื่องอ่านเพื่อนำสัญญาณกลับไปยังเครื่องมือวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์แล้วนำข้อมูลไปยังส่วนประมวลผลต่อไป โดยแอมพลิจูดที่แตกต่างของสัญญาณที่วัดได้สามารถจำแนกให้เป็นตรรกะ 0 หรือ 1 ได้

งานวิจัยนี้ได้นำแนวคิดและทฤษฎีทั้งหมดมาเป็นแนวทางในการสร้างเทคโนโลยีการผลิตสายอากาศของอุปกรณ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RFID tag) และมัลติรีโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะชนิดไร้ชิป (Multiresonator Chipless RFID) ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็ม โดยมี

วัตถุประสงค์เพื่อประดิษฐ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ และมีกระบวนการไม่ซับซ้อน และสร้างเทคโนโลยีทางเลือกเพื่อการผลิตป้ายระบุลักษณะในเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีให้เพิ่มขึ้นเนื่องจากเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีเป็นเทคโนโลยีไร้สายที่ได้รับความนิยมอย่างสูงที่ต้องการกระบวนการผลิตที่มีราคาถูกลงเพื่อลดต้นทุนในการผลิต

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารผ่านอุปกรณ์ไร้สายถือเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยการระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุถือเป็นแขนงหนึ่งของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีข้อได้เปรียบในเรื่องต้นทุนการผลิต ความสะดวกรวดเร็วในการสื่อสาร รวมถึงความสามารถในการประหยัดพลังงาน จึงสนับสนุนให้เกิดแนวคิดศึกษาพัฒนาเทคโนโลยีการประดิษฐ์ชิ้นส่วนอุปกรณ์สื่อสารที่รองรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเหล่านี้ โดยมุ่งเน้นในการศึกษาเทคโนโลยีที่ประดิษฐ์ด้วยอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่ายราคาถูก มีประสิทธิภาพ และเนื่องจากเทคโนโลยีการประดิษฐ์ลายวงจรในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน มีขั้นตอนยุ่งยากซับซ้อน ทั้งยังมีค่าบำรุงรักษาสูง และก่อให้เกิดมลพิษและของเสียจากกระบวนการผลิตมากมายดังแสดงในบทความของ Zhang (2009) ซึ่งแสดงกรรมวิธีการผลิตลายวงจรของแผงวงจรไฟฟ้าด้วยกรรมวิธีการถ่ายภาพ (Photolithography) ซึ่งจัดเป็นกรรมวิธีการผลิตลายวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคการหักออก (Subtractive technique) ที่มีขั้นตอนยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้นกรรมวิธีการผลิตลายวงจรไฟฟ้าด้วยเทคนิคการเพิ่มเข้า (Additive technique) จึงเป็นกรรมวิธีที่น่าสนใจ

โดยกรรมวิธีการผลิตลายวงจรด้วยเทคนิคการเพิ่มเข้าในปัจจุบัน มีหลายวิธียกตัวอย่างเช่น กรรมวิธีการฉีดพ่นเพื่อสร้างอุปกรณ์ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ นำเสนอโดย Steirer (2009) ซึ่งกล่าวว่าวิธีฉีดพ่นมี 3 วิธีการ ลำดับที่หนึ่งคือ Evaporative spray deposition from ultradilute solution (ESDUS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่จำเป็นต้องให้ความร้อนกับสารที่ต้องการนำมาฉีดพ่น และลำดับที่สองคือการฉีดพ่นด้วยแปรงพ่นสี (Air brush) เป็นวิธีการที่ไม่แพงและให้ผลผลิตสูงแต่ควบคุมความแม่นยำในการฉีดได้ยาก ลำดับสุดท้ายคือวิธีการฉีดพ่นแบบอัลตราโซนิค (Ultrasonic spray) เป็นวิธีที่ไม่ต้องการความร้อนและสามารถฉีดพ่นด้วยความแม่นยำ ทั้งยังสามารถควบคุมได้ง่ายและมีขนาดหยดเท่ากับหรือเล็กกว่าการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท

นอกจากนี้ Liu (2003) ได้เสนอเทคนิคการพ่นอีกวิธีหนึ่งคือ เทคนิคการพ่นแบบ อัลตราโซนิค โดยกล่าวว่า เป็นเทคนิคที่มีความเที่ยงตรงสูง ทั้งยังมีอัตราการปลุกสูงและที่สำคัญมีราคาถูกรวมทั้งไม่จำเป็นต้องใช้ระบบสุญญากาศในการทำงาน และ Polanco (2005) ได้กล่าวว่า กรรมวิธีการฉีดพ่นด้วยแปรงพ่นสี (Air brush) เป็นวิธีที่เนกประสงค์ เพราะสามารถฉีดพ่นสารลงบนชั้นสเตรตที่มีรูปร่างหลากหลาย และสามารถควบคุมความหนาได้ตามต้องการ ในช่วงตั้งแต่ 50 - 200 ไมโครเมตร นอกจากนี้สามารถเพิ่มอัตราการไหลของหมึกได้ด้วยการใช้สารละลายที่มีส่วนผสมของแอลกอฮอล์ Polanco ยังได้กล่าวเสริมอีกว่า การใช้เทคนิคการฉีดพ่นด้วยแปรงพ่นสีให้ได้คุณภาพดีนั้นต้องการองค์ประกอบ 2 ส่วน ได้แก่ สารที่นำมาพ่นต้องมีความหนืดต่ำหรือมีความเข้มข้นของของแข็งน้อย และประการที่สองคือสารที่นำมาทำการพ่นต้องสามารถระเหยได้ง่าย

จากเทคโนโลยีการฉีดพ่นดังกล่าวข้างต้นพบว่า การฉีดพ่นมีข้อเสียเปรียบมากกว่าเทคโนโลยีใดเทคโนโลยีหนึ่งเนื่องจากไม่สามารถกำหนดบริเวณที่ต้องการสร้างลายวงจรได้ในกระบวนการผลิต ดังนั้น Zhang (2009) จึงนำเสนอกรรมวิธีใดเทคโนโลยีใดเทคโนโลยีหนึ่งด้วยตัวเอง เป็นกรรมวิธีที่ใช้การจับละอองของของเหลวออกจากหัวฉีดซึ่งหัวฉีดอาจประกอบด้วยหัวฉีดเดียวหรือหลายหัวฉีด จำนวนได้เป็น 2 ประเภทคือเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทและเทคโนโลยีการพิมพ์แบบลำละอองลอยซึ่งมีข้อได้เปรียบมากกว่าเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทเนื่องจากสามารถปรับระยะห่างระหว่างหัวฉีดและชั้นสเตรตได้ในช่วง 1-5 mm

นอกจากนี้ Zhang (2009) ยังนำเสนอเทคโนโลยีฟิลาเมนต์เบสใดเรกไรต์ โดยใช้ของเหลวในการฉีดพ่นเช่นเดียวกับระบบการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท และระบบการพิมพ์แบบลำละอองลอย แต่ต่างกันในส่วนของการเคลื่อนที่ของของเหลว ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง ไม่เป็นละออง และสามารถใช้งานกับของเหลวที่มีค่าความหนืด (Viscosity) ที่แตกต่างกันมากได้

จากการประเมินข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของเทคโนโลยีใดเรกไรต์อื่นๆ พบว่า กระบวนการนี้ต้องมีการใช้อุปกรณ์ราคาแพงในกระบวนการผลิต และมีต้นทุนการบำรุงรักษาสูง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการคิดค้นเทคโนโลยีเดิมจนเต็ม ซึ่งเป็นทางเลือกที่ถูกพัฒนาให้มีความเหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการประดิษฐ์ส่วนประกอบของป้ายระบุสัญลักษณ์ด้วยคลื่นความถี่วิทยุด้วยกรรมวิธีเดิมจนเต็ม

นอกจากนี้ Nikitin (2005) ได้นำเสนอการประดิษฐ์สายอากาศของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์หมึกนำไฟฟ้าสองชนิดคือหมึกนำไฟฟ้าชนิดโลหะเงินและทองแดง โดยเสนอว่า หมึกนำไฟฟ้าชนิดโลหะทองแดงมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าสูงกว่า แต่ราคาค่อนข้างสูง และหมึกนำไฟฟ้าโลหะเงินแม้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าไม่มาก แต่ราคาไม่แพงและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการพิมพ์ที่สามารถจัดหาได้บนชั้นสเตรตแบบบางได้ หลังจากนั้น Nikitin (2009) ได้นำเสนอการตรวจวัดค่าพลังงานจลน์เริ่มต้นต่ำสุดและค่าอิมพีแดนซ์ของชิป UHF RFID UCODE G2XL ซึ่งใช้สำหรับการประกอบเข้ากับสายอากาศเพื่อประดิษฐ์เป็นป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งชนิดแพสซีฟโดยรายงานค่าอิมพีแดนซ์ของชิปที่ความถี่ 900 MHz

ทั้งนี้ Pranonsatit (2009) ได้นำเสนอเทคโนโลยีการพิมพ์ที่จัดหาได้สำหรับการใช้งานด้านการสื่อสารระยะใกล้ที่แพร่หลาย โดยได้นำเสนอการประดิษฐ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งชนิดแพสซีฟด้วยกรรมวิธีการพิมพ์หมึกสารตัวนำซึ่งเป็นอนุภาคโลหะเงินลงบนกระดาษซึ่งใช้เป็นชั้นสเตรตโดยออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายระบุลักษณะทั้งสิ้น 3 ชนิดคือสายอากาศชนิดไดโพล (Dipole) สายอากาศชนิดไดโพลที่มีสตัปปรับแต่ง (Dipole with tuning stub) และสายอากาศแบบขด (Meandered) โดยออกแบบให้สายอากาศทุกชนิดมีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านพลังงานสูงสุดที่ความถี่ 922.5 MHz และจากการทดสอบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีโดยการวัดระยะอ่านของป้ายระบุลักษณะ พบว่ารูปแบบของสายอากาศ จำนวนครั้งที่สั่งพิมพ์ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการอบเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศที่ผลิตขึ้น

โดย Preradovic (2008) กล่าวว่า การประดิษฐ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปที่มีในปัจจุบันมีหลายวิธีการดังเช่น การประดิษฐ์โดยใช้หลักตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของคลื่นที่กระทบพื้นผิว (Surface Acoustic Wave, SAW) การประดิษฐ์โดยใช้วัสดุนาโนเมทริกซ์ (Nanometrix materials) ซึ่งเป็นอนุภาคของสารเคมีขนาดเล็กที่มีการตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการประดิษฐ์ด้วยวงจรถานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง (Thin-Film Transistor Circuits, TFTCs) ซึ่งวิธีทั้งหมดข้างต้นช่วยลดต้นทุนของป้ายระบุลักษณะได้เนื่องจากไม่ต้องการชิป

ทั้งนี้ Preradovic (2009) และ Balbin (2009) ได้นำเสนอการประดิษฐ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่ชนิดไร้ชิป (Passive Chipless RFID Tag) โดยใช้หลักการสร้างมัลติเรโซเนเตอร์เป็นส่วนประกอบหลักในการเข้ารหัสข้อมูลและคัดแยกความถี่ โดยรีโซเนเตอร์แต่ละตัวจะเหนี่ยวนำให้

เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดและมุมเฟสของแต่ละความถี่ การตรวจจับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงซึ่งมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวนี้ ทำโดยการวิเคราะห์หขนาดของค่าสูญเสียจากการสอดใส่ (insertion loss,  $S_{21}$ ) แล้วนำมาจำแนกเป็นตรรกะ 0 หรือ 1 โดยการศึกษาวิจัยได้เลือกใช้ซัพสเตรตที่ถูกผลิตมาเพื่อใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับระบบอาร์เอฟไอดีซึ่งมีเพร็ล่อนเป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีค่าความสูญเสีย (loss tangent) ต่ำ ทนความร้อนได้ดีและมีความทนทาน โดยวัสดุที่มีค่าความสูญเสียต่ำ จะยิ่งทำให้ชิ้นงานมีประสิทธิภาพมากขึ้นดังที่ Bancroft (2009) กล่าวไว้

ในการออกแบบมัลติรีโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะชนิดไร้ชิปให้มีประสิทธิภาพนั้น Reichardt (2009) กล่าวไว้ว่าต้องสามารถปลอมแปลงได้ยาก มีสัญญาณที่อ่านได้ชัดเจนเพียงพอสำหรับการนำไประบุลักษณะข้อมูล มีความคงทนแข็งแรง และรีโซเนเตอร์แต่ละตัวต้องมีค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพ (Quality factor) สูง โดยนำเสนอว่ารีโซเนเตอร์รูปขดกันหอย (Spiral) มีค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับมัลติรีโซเนเตอร์รูปทรงอื่น

# อุปกรณ์และวิธีการ

## อุปกรณ์

อุปกรณ์สำหรับการประดิษฐ์และตรวจวัดคุณสมบัติรวมทั้งทดสอบประสิทธิภาพของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RFID tag) และมัลติเรโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุไร้ชิป (Multiresonator Chipless RFID Tag) ประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 ส่วนดังนี้

### 1. อุปกรณ์สำหรับประดิษฐ์ชิ้นงาน

- 1.1 เครื่องดูดจ่ายสารละลาย (Micropipette)
- 1.2 แผ่นโลหะจลุลายสำหรับใช้เป็นแบบตัดหน้ากากสติกเกอร์
- 1.3 หน้ากากสติกเกอร์และอุปกรณ์สำหรับตัดหน้ากาก
- 1.4 หมึกนำไฟฟ้า
- 1.5 ชับสเตรต เช่นแผ่นใส แผ่นเทฟลอน
- 1.6 ชิปอาร์เอฟไอดี
- 1.7 กาวอีพ็อกซีและอุปกรณ์สำหรับบัดกรี
- 1.8 แผ่นทองแดง
- 1.9 คอนเนคเตอร์เอสเอ็มเอ (SubMiniature version A)
- 1.10 คอมพิวเตอร์และโปรแกรมออกแบบประมวลผล
- 1.10 เตอบลุ่มร้อน
- 1.11 โต้ะระดับ

### 2. อุปกรณ์ในการตรวจวัดคุณสมบัติและทดสอบประสิทธิภาพของชิ้นงาน

- 2.1 Surface profiler
- 2.2 Four-point probe
- 2.3 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)
- 2.4 เครื่องอ่าน RFID (RFID Reader)
- 2.5 เสาอากาศ (Antenna)

2.6 ตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator)

2.7 อุปกรณ์วิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer)

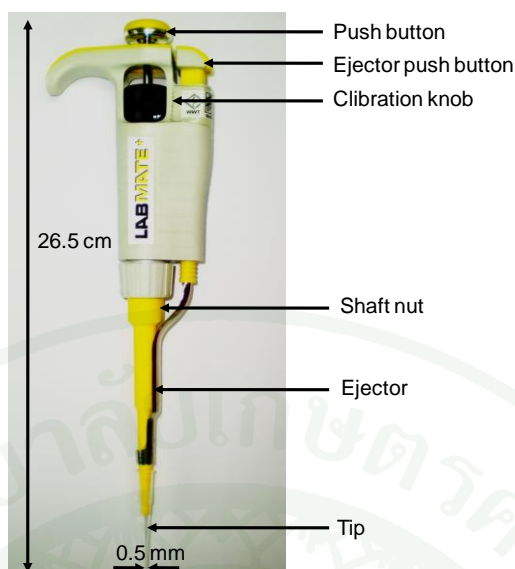
## วิธีการ

### 1. รายละเอียดการพิจารณาเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์

การเลือกสรรวัสดุอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมในงานวิจัยนับเป็นขั้นตอนสำคัญในโครงการวิจัยนี้ วัสดุอุปกรณ์หลักที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้แก่ เครื่องดูดจ่ายสารละลาย (Micropipette) หมึกนำไฟฟ้า (Conductive ink) หน้ากาก (Mask) ชั้บสเตรต (Substrate) และชิป RFID โดยแสดงรายละเอียดของวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ได้ดังนี้

#### 1) เครื่องดูดจ่ายสารละลาย (Micropipette)

อุปกรณ์การเติมสารตัวนำลงบนแผ่นฐานรองเพื่อการประดิษฐ์เป็นลวดลายของสายอากาศในงานวิจัยครั้งนี้พิจารณาเลือกใช้เครื่องดูดจ่ายสารละลาย (Micropipette) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตวงปริมาตรสารละลายที่มีความละเอียดสูง สามารถกำหนดปริมาณของของเหลวที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ เครื่องดูดจ่ายสารละลายโดยทั่วไปใช้หลักการคลายและอัดแรงดันอากาศภายในเพื่อดูดและจ่ายสารละลายลงบนบริเวณที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องดูดจ่ายสารละลายชนิดไม่ต้องการพลังงานไฟฟ้า รุ่น LM20 ดังแสดงในภาพที่ 15 ที่สามารถใช้ดูดจ่ายสารละลายในปริมาณ 2-20  $\mu\text{l}$  มีน้ำหนักเบา โดยมีขั้นตอนการใช้งานเริ่มจากหมุนหัวปรับ (Calibration knob) เพื่อกำหนดปริมาณหมึกนำไฟฟ้าที่ต้องการใช้ในการประดิษฐ์ จากนั้นดูดหมึกนำไฟฟ้าโดยกดบริเวณหัวกด (Push button) เพื่อให้หมึกถูกดูดเข้ามาในบริเวณส่วนปลาย (Tip) จากนั้นจ่ายหมึกนำไฟฟ้าลงบนชั้บสเตรตโดยการกดบริเวณหัวกดอีกครั้งหนึ่ง เมื่อดูดและจ่ายหมึกนำไฟฟ้าเรียบร้อยแล้วกดปุ่มปล่อยทิว (Ejector push button) เพื่อนำทิวออกจากเครื่องดูดจ่ายสารละลาย ทั้งนี้เครื่องดูดจ่ายสารละลายชนิดนี้สามารถปรับเปลี่ยนปริมาตรสารละลายที่ต้องการได้ง่าย จึงสะดวกในการใช้งานด้านการวิจัยพัฒนาเพื่อกำหนดปริมาณสารตัวนำที่เหมาะสมในการประดิษฐ์ลวดลายชั้นสารตัวนำบนชั้บสเตรต



ภาพที่ 15 เครื่องดูดจ่ายสารละลาย (Micropipette)

นอกจากนี้ประเด็นเรื่องการเลือกใช้ทิป (Tip) สำหรับสวมบริเวณปลายของเครื่องดูดจ่ายสารละลายนับเป็นประเด็นหนึ่งที่ต้องมีการพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสม โดยทิปที่เลือกใช้ควรมีปริมาตรเพียงพอสำหรับการบรรจุสารละลายที่ใช้งานและทิปต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนปลายที่ใช้ปล่อยหมึกไม่เกินความกว้างของหน้ากากที่ใช้กำหนดความละเอียดของชั้นสารตัวนำ ทั้งนี้ทิปที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ทิปที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5 mm

## 2) หมึกนำไฟฟ้า (Conductive ink)

ปัจจุบันมีการใช้หมึกนำไฟฟ้ามาเป็นส่วนประกอบในขั้นตอนการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้แก่ การฉีดพ่น (Spraying) การเคลือบ (Coating) การพิมพ์จลุลาย (Screen printing) การประดิษฐ์โดยใช้กระบอกฉีด (Syringe dispensing) หรือแม้แต่การเติมเพื่อซ่อมแซมหรือเชื่อมต่อแผงอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจากการศึกษาพบว่าหมึกนำไฟฟ้าที่มีในปัจจุบันมีการใช้อนุภาคสารตัวนำที่แตกต่างกันเช่น เงิน ทองแดง นิกเกิลและคาร์บอน ทำให้มีความหลากหลายในการนำไปใช้งานและปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้หมึกนำไฟฟ้าในโครงการวิจัยครั้งนี้คือความหนืด (Viscosity) ของหมึกนำไฟฟ้าโดยได้ทดลองศึกษาหาค่าความหนืดที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีเดิมจนเต็มโดยหาค่าความหนืดด้วยเทคนิค Cylinder Rotation Viscosity ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ลักษณะของผง ฝ่ายหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ พบว่าที่อุณหภูมิ

20°C น้ำผึ้งมีความหนืดเท่ากับ 13,028 cP และน้ำเปล่ามีความหนืดเท่ากับ 1 cP จากนั้นนำสารละลายทั้ง 2 ชนิดมาหยดด้วยเครื่องดูดจ่ายสารละลาย พบว่าเมื่อนำน้ำผึ้งซึ่งมีความหนืดสูงมาหยดลงในหน้ากากจะมีการกระจายตัวน้อยและเกาะกันเป็นก้อน ส่งผลให้บริเวณผิวหน้าของชั้นสารมีความขรุขระมากไม่เป็นผลดีต่อการประดิษฐ์สายอากาศ และพบว่าความหนืดของสารละลายมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดจ่ายสารละลายเนื่องจากสารละลายที่มีความหนาแน่นสูง จะได้รับอิทธิพลจากแรงดึงดูดภายนอกสูงทำให้เครื่องดูดจ่ายไม่สามารถจ่ายสารบริเวณปลายทิวปได้หมด ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการกำหนดปริมาณสาร ดังนั้นสารที่มีความหนืดต่ำมีความเหมาะสมมากกว่าความหนืดสูง ในการศึกษาวิจัยจึงเลือกหมึกนำไฟฟ้าที่มีความหนืดต่ำกว่า 100 cP ซึ่งสามารถคงสภาพและคุณสมบัติต่างๆ ไว้ได้ในระหว่างการผลิต โดยเลือกใช้หมึกนำไฟฟ้ารุ่น 118-29 ซึ่งมีอนุภาคเงินเป็นสารตัวนำ มีความนำไฟฟ้าสูง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเนื่องจากใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (Creative Materials Inc., n.d.) แสดงดังภาพที่ 16 และแสดงรายละเอียดของหมึกดังตารางที่ 2



ภาพที่ 16 หมึกนำไฟฟ้ารุ่น 118-29

## ตารางที่ 2 คุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้ารุ่น 118-29 บริษัท Creative materials

Filler	Silver
Viscosity (cP)	<100
Useful Temperature Range (°C)	-55 - 140
Curing Temperature (°C)	50-150
Volume Resistivity ( $\Omega$ -cm)	0.001

ที่มา: Creative Materials (n.d.)

### 3) สติ๊กเกอร์สำหรับใช้เป็นหน้ากาก (Mask) และซับสเตรต (Substrate)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการจัดหาวัสดุอุปกรณ์สำหรับใช้เป็นหน้ากากและซับสเตรตที่มีราคาถูกและสามารถจัดหาได้ง่าย โดยเลือกใช้สติ๊กเกอร์พีวีซีใสเป็นหน้ากากสำหรับกำหนดลวดลายของชั้นสารตัวนำ โดยสติ๊กเกอร์สามารถทนความร้อนและความชื้นได้ดี มีความหนาคงที่เท่ากับ 90  $\mu$ m และซับสเตรตที่เลือกใช้แบ่งเป็น 2 ชนิดเพื่อใช้ประกอบเข้ากับป้ายระบุลักษณะ ชนิดแรกได้แก่ ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยังเลือกใช้ซับสเตรตที่เป็นแผ่นใสชนิดถ่ายเอกสาร (Transparency sheet) ซึ่งทนความชื้นได้ดี สามารถใช้ในกระบวนการผลิตที่ใช้สารตัวนำเป็นของเหลวและทนความร้อนจากการอบที่อุณหภูมิสูงได้ โดยรายละเอียดของแผ่นใสชนิดถ่ายเอกสาร มีตัวแปรสำคัญสำหรับการออกแบบสายอากาศในโปรแกรมจำลองคือความหนาและค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) ซึ่งเป็นค่าที่บอกความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของประจุไฟฟ้าที่ถูกเก็บไว้ในชั้นสารตัวนำที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ สนามไฟฟ้า ความถี่ และการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งคือค่าแทนเจนต์ความสูญเสีย (loss tangent,  $\tan \delta$ ) หมายถึงการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปในรูปของความร้อนซึ่งเป็นการสูญเสียที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุในวัสดุนั้นๆ (เบญญา, 2550) โดยค่าความหนา ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าแทนเจนต์ความสูญเสียของแผ่นใส มีค่าเท่ากับ 0.3 mm, 2 และ 0.077 ตามลำดับ และซับสเตรตชนิดที่สองสำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปได้เลือกใช้แผ่นเทฟลอน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ซึ่งทนความร้อนได้ดี มีความหนา ค่าไดอิเล็กตริกและค่าแทนเจนต์ความสูญเสียเท่ากับ 1 mm, 2.2 และ 0.0003 ตามลำดับ ทั้งนี้ซับสเตรตทั้ง 2 ชนิดที่เลือกใช้เป็นวัสดุที่มีราคาถูก จัดหาได้ง่ายและสามารถปรับรูปร่างได้ซึ่งเราสามารถนำไปติดในพื้นที่ผิวที่มีลักษณะโค้งหรือไม่เรียบได้

#### 4) ชิพอาร์เอฟไอดี (RFID Chip)

ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID tag) มีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ ชิพอาร์เอฟไอดี (RFID chip) และสายอากาศ (antenna) ชิพเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำที่ใช้เก็บข้อมูลเพื่อระบุตัวตนหรือลักษณะเฉพาะ รวมไปถึงข้อมูลรายละเอียดของสิ่งของนั้นๆที่ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุติดตั้งอยู่ โดยชิพจะเชื่อมต่อกับสายอากาศที่มีหน้าที่รับและส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุระหว่างชิพและเครื่องอ่าน (reader)

ชิพอาร์เอฟไอดีที่ใช้ประกอบกับสายอากาศที่ประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็มในงานวิจัยนี้เป็นชนิดแพสซีฟของบริษัท NXP Semiconductors รุ่น UCODE G2XL (NXP Semiconductors, n.d.) แสดงคุณสมบัติดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ชิพอาร์เอฟไอดีจากบริษัท NXP Semiconductors รุ่น UCODE G2XL

Frequency Band	840 – 960 MHz
Temperature Range	-40 – 85°C
Input Chip Capacitance	0.9 pF
Minimum operating power ( $P_{th}$ )	-15 dBm
Quality factor ( $Q$ )	9
Chip Impedance ( $Z_c$ ) at a frequency 915 MHz	22 - j195 $\Omega$

ที่มา: NXP Semiconductors (n.d.)

ชิพ UCODE G2XL มีขนาดเหมาะสมกับการติดตั้งบนสายอากาศที่จะประดิษฐ์ในโครงการวิจัยนี้ และจากตารางที่ 3 ระบุช่วงความถี่ทำงานของชิพในย่านความถี่ระหว่าง 860-960 MHz โดยเป็นช่วงความถี่ที่ครอบคลุมย่านความถี่ 922-925 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กทช.) อนุญาตให้ใช้กับระบบอาร์เอฟไอดีในประเทศไทย (ราชกิจจานุเบกษา, 2551) ทั้งนี้ในงานวิจัยได้ออกแบบสายอากาศให้สายอากาศมีค่าระยะอ่าน

ได้สูงสุดที่ความถี่กลางที่ 922.5 MHz และระบุค่าพลังงานขีดเริ่มต่ำสุด (minimum operating power) เท่ากับ -15 dBm

ค่าอิมพีแดนซ์ของชิป (chip impedance,  $Z_c$ ) สามารถเขียนในรูปความต้านทาน (Resistance,  $R$ ) และรีแอคแตนซ์ (Reactance,  $X_c$ ) ได้ว่า  $Z_c = R_c - jX_c$  ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าความเก็บประจุอนุกรม (series capacitance) และค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพ (quality factor) ซึ่งจากข้อมูลของชิป UCODE G2XL มีค่าเท่ากับ 0.9 pF และ 9 ตามลำดับ โดยบทความทางวิชาการ (Nikitin *et al.*, 2009) แสดงขั้นตอนการตรวจวัดค่าอิมพีแดนซ์ของชิป UHF RFID UCODE G2XL ที่ตรงกับชิปที่เลือกใช้ในโครงการวิจัยนี้ซึ่งรายงานค่าอิมพีแดนซ์และค่าพลังงานขีดเริ่มต่ำสุดของชิปที่ความถี่ 900 MHz คือ  $26 - j150 \Omega$  และ -12.6 dBm ตามลำดับ จึงเลือกใช้ข้อมูลของค่าอิมพีแดนซ์จากบทความฉบับนี้ในการออกแบบสายอากาศในโปรแกรมแบบจำลองต่อไป

## 2. การออกแบบส่วนประกอบของวงจรคลื่นความถี่วิทยุ

ส่วนประกอบของป้ายระบุลักษณะที่ถูกออกแบบเพื่อสาธิตกระบวนการเดิมจนเต็มในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้

### 1) สายอากาศสำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง

สายอากาศถูกออกแบบโดยใช้หลักการปรับเปลี่ยนขนาดและรูปร่างเพื่อให้มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ( $Z_a$ ) มีค่าเท่ากับคอนจูเกตของค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของชิป  $Z_a = Z_c^*$  หรือ  $Z_a = R_a + jX_a = 26 + j150 \Omega$  ซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่าอิมพีแดนซ์แมทซิ่ง (impedance matching) โดยจะส่งผลให้สายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานสูงสุด (maximum transmission coefficient,  $\tau_{\max}$ ) ที่ความถี่ 922.5MHz ทั้งนี้สายอากาศสำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ย่านความถี่สูงยิ่งที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสายอากาศ 2 รูปแบบคือสายอากาศแบบไดโพล (dipole) และสายอากาศแบบไดโพลที่มีสตัปปรับแต่ง (dipole with tuning stub)

สายอากาศชนิดไดโพลประกอบด้วยส่วนแพร่กระจายคลื่นที่เป็นลวดตัวนำ 2 ส่วน โดยแต่ละส่วนจะมีความยาว 1 ใน 4 ของความยาวคลื่นและมีความยาวรวมของสายอากาศเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ( $l = 0.5\lambda_0$ ) เรียกว่า Half wavelength dipole แสดงดังภาพที่ 17(ก) โดยทั่วไปสายอากาศไดโพลจะมีอัตราขยาย (gain) เท่ากับ 2.15 dB (Finkenzeller, 2003) และมี

รูปแบบการแผ่สัญญาณคลื่นวิทยุ (radiation pattern) ของสายอากาศแต่ละด้านเป็นแบบทุกทางในระนาบเดียว (omnidirectional pattern) ดังแสดงในภาพที่ 17(ข)



ภาพที่ 17 (ก) โครงสร้างสายอากาศชนิดไดโพล (Dipole) (ข) รูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศชนิดไดโพล

ที่มา: Hirano (2003)

สายอากาศแบบไดโพลที่มีสตั๊ปปรับแต่งเป็นสายอากาศที่มีสตั๊ประหว่างลวดตัวนำทั้ง 2 ด้านซึ่งทำให้สามารถปรับแต่งขนาดเพื่อให้มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสูงที่ความถี่ที่ต้องการได้ง่าย แสดงโครงสร้างดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 โครงสร้างสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสตั๊ปปรับแต่ง (Dipole with tuning stub)

สำหรับโปรแกรมจำลองที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศได้เลือกใช้โปรแกรมจำลองที่มีการประมวลผลด้วยหลักการ Method of Moments (MoM) โดยสามารถคำนวณระยะไกลสุดที่ป้ายระบุลักษณะสามารถอ่านค่าได้ ( $r_s$ ) จากสมการของ Friis (Pozar, 2005) นั่นคือ

$$r_s = \frac{\lambda_0}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{th}}} \quad (1)$$

ซึ่ง	$\lambda_0$	คือ ความยาวคลื่นที่ความถี่ 922.5 MHz
	$P_t$	คือ กำลังงานที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณไปยังเครื่องอ่าน
	$G_t$	คือ อัตราการขยาย (gain) ของเสาอากาศของเครื่องอ่าน
	$G_r$	คือ อัตราการขยาย (gain) ของสายอากาศที่ออกแบบ
	$\tau$	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังสูงสุดของสายอากาศที่ออกแบบ
	$P_{th}$	คือ กำลังงานต่ำสุดที่ทำให้ชิปอาร์เอฟไอดีทำงาน (~12.6 dBm)

โดยที่ผลคูณของ  $P_t$  และ  $G_t$  เท่ากับ  $EIRP$  (Equivalent Isotropically Radiated Power) หมายถึงกำลังส่งออกอากาศสมมูลแบบไอโซโทรปิกในทิศทางของอัตราการขยายสูงสุดมีค่าเท่ากับ 4 วัตต์ (ราชกิจจานุเบกษา, 2551) และประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านกำลัง งานจากเครื่องอ่านไปยังสายอากาศ ( $\tau$ ) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\tau = \frac{4R_c R_a}{|Z_c + Z_a|^2} \quad (2)$$

โดยค่าอิมพีแดนซ์ของชิป ( $Z_c$ ) และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศของป้ายระบุลักษณะ ( $Z_a$ ) ประกอบด้วยค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์ซึ่งเขียนในรูปจำนวนเชิงซ้อน โดยที่ส่วนจริงคือค่าความต้านทานและส่วนจินตภาพคือค่ารีแอกแตนซ์ ทั้งนี้เขียนสมการคำนวณอิมพีแดนซ์ของชิปและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ว่า  $Z_c = R_c + jX_c$  และ  $Z_a = R_a + jX_a$  ตามลำดับ

## 2) รีโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร่ชิป

หลักการออกแบบมัลติรีโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร่ชิปในการศึกษาวิจัยนี้ใช้หลักการสร้างชุดของรีโซเนเตอร์จำนวนหลายชุดประกอบเข้าด้วยกัน เมื่อสัญญาณคลื่นความถี่เคลื่อนที่ผ่านสายนำสัญญาณบริเวณที่มีชุดของรีโซเนเตอร์ติดตั้งอยู่ รีโซเนเตอร์แต่ละชุดจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณคลื่นความถี่หรืออาจกล่าวได้ว่าสัญญาณความถี่ที่ตรงกับความถี่รีโซแนนซ์ของรีโซเนเตอร์ที่ออกแบบจะถูกกรองออกไป ทั้งนี้งานวิจัยได้ใช้หลักการกรองสัญญาณความถี่ของรีโซเนเตอร์มาประยุกต์ใช้เพื่อ

กำหนดลักษณะเฉพาะของปายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปโดยที่รีโซเนเตอร์ 1 ชุดสามารถกำหนดลักษณะเฉพาะได้จำนวน 1 บิต โดยมัลติรีโซเนเตอร์ของปายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นเพลลอนเป็นชั้นสเตรต เนื่องจากชั้นสเตรตที่มีค่าแทนเจนต์ความสูญเสียต่ำจะส่งผลให้มัลติรีโซเนเตอร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยแสดงตารางรวบรวมค่าตัวแปรที่สำคัญของแผ่นใสซึ่งเป็นชั้นสเตรตที่ใช้สำหรับการประดิษฐ์สายอากาศของปายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุอันความถี่สูงยิ่งและแผ่นเพลลอนได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติของแผ่นใสและแผ่นเพลลอนที่ใช้เป็นชั้นสเตรต

ตัวแปรของชั้นสเตรต	ชั้นสเตรต	
	แผ่นใส	แผ่นเพลลอน
ความหนา	0.3 mm	1 mm
ไดอิเล็กตริก	2	2.2
แทนเจนต์ความสูญเสีย	0.077	0.0003

งานวิจัยนี้เลือกศึกษาและออกแบบรีโซเนเตอร์รูปก้นหอย (Spiral resonator) เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับรีโซเนเตอร์รูปทรงอื่น (Reichardt, 2009) และหลักการออกแบบรีโซเนเตอร์แต่ละชุดเพื่อให้กรองสัญญาณความถี่ที่แตกต่างกัน ( $f_r$ ) จะใช้หลักการปรับความยาวของรีโซเนเตอร์ ( $l_r$ ) คำนวณได้จากสมการที่ (3) (Reichardt, 2009)

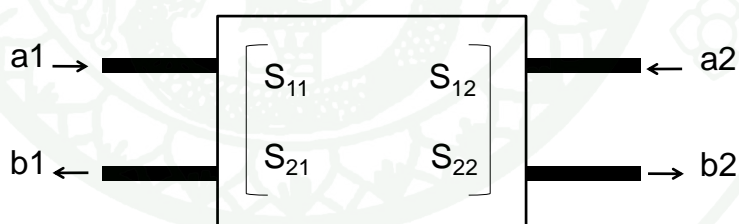
$$l_r = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{r,eff}}} \quad (3)$$

โดยที่  $\epsilon_{r,eff}$  คือค่าไดอิเล็กตริกยังผลของชั้นสเตรต

โดยปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบสายนำสัญญาณเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดต้องออกแบบให้มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับอุปกรณ์การทดสอบคือ 50  $\Omega$  ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม TXLine 2003 ในการคำนวณเพื่อหาขนาดรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบสายนำสัญญาณ โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้แก่ ความกว้างของสายนำสัญญาณ ความหนาของชั้นสเตรตและความหนาของชั้นสารตัวนำ จากการศึกษาพบว่าขนาดความกว้างที่เหมาะสมของ

สายนำสัญญาณและระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณและรีโซเนเตอร์มีค่าเท่ากับ 3 mm และ 1 mm ตามลำดับ โดยออกแบบให้รีโซเนเตอร์กรองสัญญาณความถี่ที่ความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz เนื่องจากความถี่ดังกล่าวเป็นความถี่ที่ทำให้สามารถออกแบบรีโซเนเตอร์ให้มีรูปร่างที่สามารถประดิษฐ์ได้ง่ายและมีความเหมาะสมกับกรรมวิธีการประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็มที่ยกเว้นความถี่ของชั้นสารตัวนำได้ขนาดเล็กที่สุด 1 mm นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถคำนวณค่าไดอิเล็กทริกยังผลของซัพสเตรต (Effective dielectric constant,  $\epsilon_{r,eff}$ ) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณและค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของซัพสเตรตเพื่อใช้ในการคำนวณ  $l_r$  โดยค่าไดอิเล็กทริกยังผลของเทพล่อนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 1.9

ในการตรวจวัดประสิทธิภาพการระบุลักษณะเฉพาะของปฏิกิริยาของสัญญาณด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิด ไรซ์ปีใช้หลักการตรวจจับการส่งผ่านกำลังของสัญญาณความถี่โดยใช้การพิจารณาค่าตัวแปรการกระเจิง (scattering parameter, *S-parameter*) ที่เหมาะสมสำหรับการพิจารณาระบบที่ใช้ในงานในย่านความถี่สูงโดยใช้หลักการพิจารณาพลังงานศักย์ไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ในลักษณะของคลื่นที่อธิบายด้วยฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้า แสดงระบบการส่งผ่านสัญญาณความถี่จำนวน 2 พอร์ตดังภาพที่ 19 โดยตัวแปร  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  และ  $b_2$  โดยที่  $a_1$  และ  $a_2$  คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกป้อนเข้าทางพอร์ต 1 และพอร์ต 2 ในขณะที่  $b_1$  และ  $b_2$  คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกทางพอร์ต 1 และ พอร์ต 2 (Burnikell, 2009)



ภาพที่ 19 ระบบการส่งผ่านกำลังของสัญญาณจำนวน 2 พอร์ต

ที่มา: Burnikell (2009)

สามารถแสดงฟังก์ชันของค่าตัวแปรการกระเจิงของระบบที่ประกอบด้วยพอร์ตจำนวน 2 พอร์ต ได้ด้วยเมตริกซ์ขนาด 2x2 ดังสมการที่ (4) และค่าตัวแปรการกระเจิงสามารถแสดงในหน่วยเดซิเบล (dB) ได้ดังสมการที่ (5) (Burnikell, 2009)

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

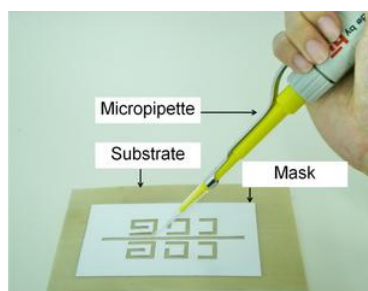
$$S_{ij} = 20 \log(S_{ij}(\text{magnitude})) \quad (5)$$

ทั้งนี้ค่าตัวแปรการกระเจิงของระบบการส่งผ่านกำลังของสัญญาณที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อกำหนดระบุลักษณะเฉพาะในงานวิจัยนี้เลือกใช้การพิจารณาจากขนาดความสูญเสียจากการสะท้อนกลับ (return loss,  $|S_{11}|$ ) และขนาดความสูญเสียจากการสอดใส่ (insertion loss,  $|S_{21}|$ )

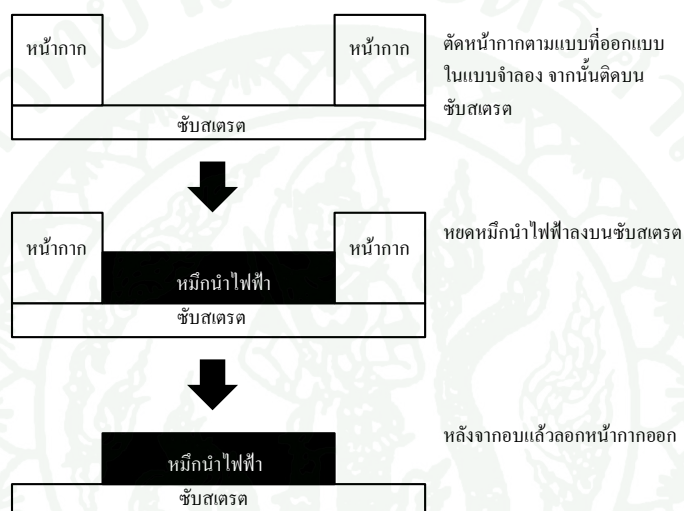
โดยในการพิจารณาการเข้ารหัสสามารถกระทำได้โดยการตรวจวัดค่าสูญเสียของสัญญาณจากการสอดใส่ของมัลติรีโซเนเตอร์ หากสายนำสัญญาณถูกติดตั้งด้วยรีโซเนเตอร์ที่ถูกออกแบบให้กรองสัญญาณที่ความถี่ใด ความถี่นั้นจะไม่สามารถผ่านได้ ส่งผลให้ค่า  $|S_{21}|^2$  ที่ความถี่นั้นมีค่าน้อย โดยกำหนดให้การส่งผ่านกำลังของความถี่ที่ถูกรองนี้เป็นตรรกะ “0” แต่ในทางกลับกันหากสายนำสัญญาณไม่ถูกติดตั้งด้วยรีโซเนเตอร์หมายถึงสัญญาณความถี่ใดๆ ไม่ถูกรองออกไปการส่งผ่านกำลังของสัญญาณความถี่ที่ไม่ถูกรองนี้ถูกกำหนดเป็นตรรกะ “1”

### 3. การพัฒนาเทคโนโลยีเติมจนเต็ม

เทคโนโลยีเติมจนเต็มเป็นเทคนิคการสร้างลวดลายชั้นสารตัวนำที่ใช้หลักการเติมสารตัวนำลงบนชั้นสเตรตตามแบบที่ต้องการด้วยอุปกรณ์และกรรมวิธีเฉพาะดังนี้ ขั้นตอนแรกตัดสติ๊กเกอร์ที่ใช้เป็นหน้ากากเพื่อกำหนดลวดลายของสายอากาศให้ได้รูปทรงตามแบบของสายอากาศที่ออกแบบไว้จากโปรแกรมจำลอง จากนั้นตัดหน้ากากสติ๊กเกอร์ลงบนชั้นสเตรตซึ่งได้แก่ แผ่นใสและแผ่นเทฟลอนขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาของวัสดุด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่กำลังประดิษฐ์ ขั้นตอนที่สองหยดหมึกนำไฟฟ้าลงบนชั้นสเตรตด้วยเครื่องฉีดจ่ายสารละลายดังแสดงในภาพที่ 20 จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาทีเพื่อเพิ่มความนำไฟฟ้าและเป็นการทำให้สารละลายระเหยออกไป และขั้นตอนสุดท้ายลอกหน้ากากออก โดยสรุปขั้นตอนทั้งหมดได้ตามภาพที่ 21



ภาพที่ 20 การเติมหมึกนำไฟฟ้าลงบนชั้นสเตรตด้วยเครื่องดูดจ่ายสารละลาย



ภาพที่ 21 สรุปรูปขั้นตอนการสร้างสายอากาศด้วยเทคนิคเติมจนเต็ม

ในการคำนวณปริมาณหมึกที่ใช้สำหรับการประดิษฐ์จำเป็นต้องทราบความหนาของชั้นหมึกที่ต้องการและการพิจารณาเลือกความหนาของลวดลายสายอากาศที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานจำเพาะของหมึกดังสมการที่ (6) (เบญญา, 2550)

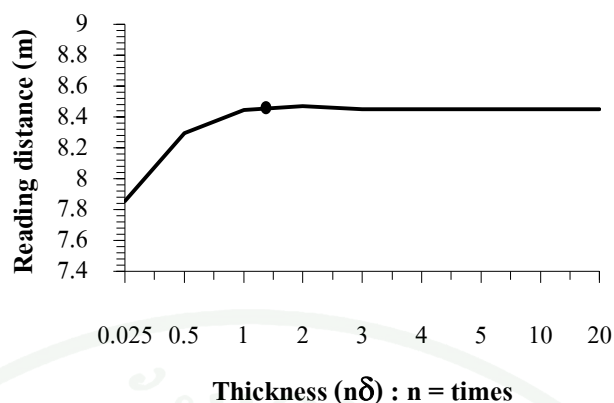
$$\rho = \rho_s t \quad (6)$$

โดย	$\rho$	คือ	สภาพความต้านทานจำเพาะของชั้นหมึก ( $\Omega\text{-m}$ )
	$\rho_s$	คือ	สภาพความต้านทางเชิงผิว ( $\Omega/\square$ )
	$t$	คือ	ความหนาของชั้นหมึก (m)

สภาพต้านทานเชิงผิว (sheet resistivity,  $\rho_s$ ) ของชั้นหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกวัดด้วยเครื่องมือ Four Point Probe ณ ศูนย์วิจัยและทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ (TMEC) มีค่าเท่ากับ  $5.037 \times 10^{-3} \Omega/\square$  ที่ความหนาเท่ากับ  $45 \mu\text{m}$  จึงสามารถคำนวณสภาพความต้านทานจำเพาะของสายอากาศได้เท่ากับ  $0.227 \times 10^{-6} \Omega\text{-m}$  ซึ่งใช้สำหรับคำนวณหาค่าความหนาที่ต้องการได้โดยพิจารณาจากค่าระยะความลึกเชิงผิว (Skin Depth,  $\delta$ ) โดยค่านี้เป็นปัจจัยสำคัญในการนำสัญญาณของสายอากาศ เพราะเป็นค่าที่บอกถึงระยะที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือกำลังงานของสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุสามารถแทรกผ่านเข้าภายในวัสดุตัวนำ นิยามในรูปความลึกซึ่งขนาดของสนามไฟฟ้ามีค่าลดลงเหลือเท่ากับ  $1/e$  หรือ  $0.37$  เท่าของสนามไฟฟ้าที่ผิววัสดุ นั้น โดยกำลังงานของคลื่นความถี่วิทยุจะมีค่าลดลงตามระยะทางและมีค่าแปรผันตามความถี่ของสัญญาณคลื่นวิทยุ เมื่อความถี่สูงขึ้นค่าระยะความลึกเชิงผิวจะลดลง ทำให้สายอากาศนำสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุเฉพาะบริเวณผิวของชั้นสารทำให้มีความสูญเสียมากขึ้น โดยที่ค่าระยะความลึกเชิงผิว ( $\delta$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) (Machado, 1996) เมื่อกำหนดค่าความซึมได้ของสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ  $\mu_0$  คือ  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0}} \quad (7)$$

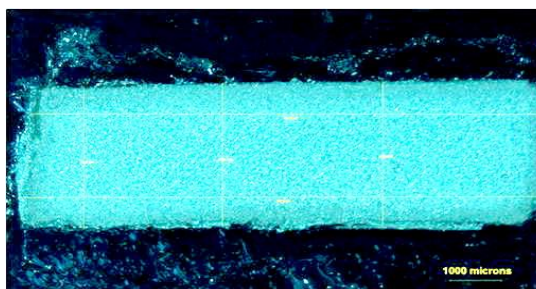
ค่าความลึกเชิงผิวของชั้นหมึกตัวนำที่ใช้ในการประดิษฐ์สายอากาศของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ  $7.85 \mu\text{m}$  ที่ความถี่เท่ากับ  $922.5 \text{ MHz}$  แต่เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนของความหนาชั้นหมึกที่ต้องการและที่ประดิษฐ์ได้จริง จึงได้มีการศึกษาผลของความหนาที่มีผลต่อความสามารถในการรับสัญญาณของสายอากาศในโปรแกรมจำลองโดยให้ค่าความต้านทานจำเพาะของชั้นหมึกเท่ากับ  $0.227 \times 10^{-6} \Omega\text{-m}$  ตลอดทั้งการทดสอบ ปรากฏผลการประมวลดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ผลของความหนาของชั้นหมึกและระยะอ่านสัญญาณที่ได้จากโปรแกรมจำลอง

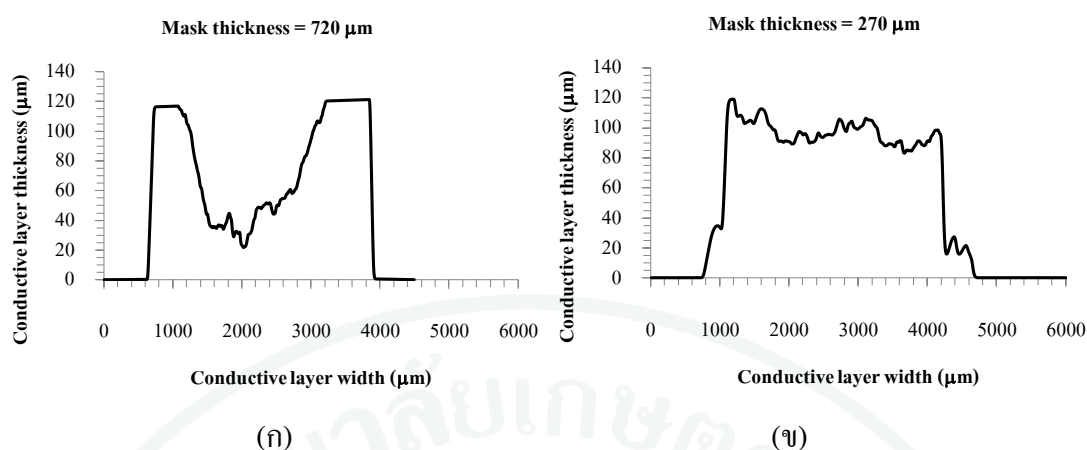
จากภาพที่ 22 พบว่าระยะสูงสุดที่อ่านได้ของสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นหมึกมีความหนามากขึ้น โดยแสดงเป็นจำนวนเท่าของค่าระยะความลึกเชิงผิว (nD) และมีระยะอ่านสัญญาณสูงสุดเท่ากับ 8.47 m ที่ความหนาของชั้นหมึก 1.4 เท่าของระยะลึกเชิงผิวและไม่เพิ่มขึ้นแม้ความหนาเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าระยะอ่านได้ของสายอากาศไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความหนาของสายอากาศมีค่าประมาณเกิน 2 เท่าของระยะลึกเชิงผิวและเพื่อให้สายอากาศนำสัญญาณมีประสิทธิภาพสูงสุด จึงได้ชดเชยความลึกเชิงผิว 5 เท่าของระยะความลึกเชิงผิวจริง (Hall, 2009) ดังนั้นความหนาของชั้นหมึกนำไฟฟ้าที่ต้องการบนชั้นสเตรตจึงมีค่าเท่ากับ  $39.25 \mu\text{m}$  และพบว่าต้องมีการชดเชยความหนาของหมึกก่อนอบ 5.88 เท่า ดังนั้นจึงต้องการความหนาก่อนการอบเท่ากับ  $231 \mu\text{m}$  เนื่องจากชั้นหมึกจะมีการยุบตัวลงภายหลังจากนำชิ้นงานผ่านการอบสารตัวนำด้วยความร้อนเพราะการระเหยของสารละลายในหมึก

นอกจากนี้ได้ทดสอบมิติความยาวตามแนวตั้งและแนวนอนของชั้นหมึกที่ประดิษฐ์เทียบกับขนาดของชิ้นงานที่ออกแบบ โดยได้ประดิษฐ์ชิ้นงานตัวอย่างให้มีขนาด  $3 \times 10 \text{ mm}^2$  แล้ววัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ ณ ฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดังแสดงชิ้นงานในภาพที่ 23 จากผลการทดสอบพบว่ามีความยาว  $3.2 \times 10.2 \text{ mm}^2$  โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.2 mm เท่ากันทั้งมิติความยาวตามแนวตั้งและแนวนอนโดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้คงที่และไม่ขึ้นกับความกว้างที่กำหนด ซึ่งพบว่าหากทำการประดิษฐ์ชิ้นงานให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนลดลง



ภาพที่ 23 ชิ้นงานตัวอย่างแสดงชั้นสารตัวนำที่ประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็มขนาด  $3 \times 10 \text{ mm}^2$

งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของความหนาของหน้ากอกที่มีต่อความหนาของชั้นสารตัวนำ โดยการสร้างชั้นสารตัวนำขนาด  $3 \times 10 \text{ mm}^2$  ด้วยหน้ากอกที่มีความหนาแตกต่างกันซึ่งชิ้นงานแรกและชิ้นงานที่สองประดิษฐ์ด้วยหน้ากอกขนาด  $8x$  และ  $3x$  ตามลำดับ โดยที่  $x$  คือความหนาของหน้ากอกสติกเกอร์ 1 ชั้น มีค่าเท่ากับ  $90 \mu\text{m}$  ภาพตัดขวางเพื่อแสดงความหนาของชั้นสารแสดงดังภาพที่ 24(ก) และ 24(ข) ซึ่งวัดด้วยเครื่อง Surface profiler ณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ชิ้นงานที่ประดิษฐ์ด้วยหน้ากอกที่มีความหนา  $720 \mu\text{m}$  ( $8x$ ) มีการยุบตัวของชั้นสารตัวนำบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานและมีความสูงที่ขอบสูงเกินกว่าความหนาสูงสุดของเครื่องวัด ( $120 \mu\text{m}$ ) ในขณะที่ชิ้นงานที่ประดิษฐ์ด้วยหน้ากอกที่มีความหนาขนาด  $270 \mu\text{m}$  ( $3x$ ) มีความสม่ำเสมอบริเวณผิวชั้นสารตัวนำมากกว่า และไม่พบการยุบตัวบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าสาเหตุของการยุบตัวของชั้นสารเกิดจากแรงดึงผิวของหมึกนำไฟฟ้า ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในระหว่างการแข็งตัวของหมึก แรงระหว่างโมเลกุลที่กระทำต่อกันของหมึกนำไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของหมึกนำไฟฟ้ากับผิวของหน้ากอก ทำให้หมึกนำไฟฟ้ามีพฤติกรรมยกตัวขึ้นเกาะบริเวณขอบข้างของหน้ากอก ส่งผลให้หมึกบริเวณส่วนกลางยุบตัวลง ดังนั้นเพื่อลดปัญหาการยุบตัวบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานจึงเลือกใช้หน้ากอกที่มีความหนา  $270 \mu\text{m}$  ตลอดทั้งงานวิจัย

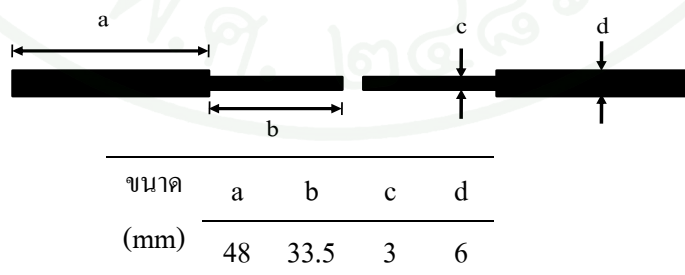


ภาพที่ 24 ภาคตัดขวางแสดงความหนาของชั้นสารตัวนำที่วัดด้วยเครื่อง Surface profiler

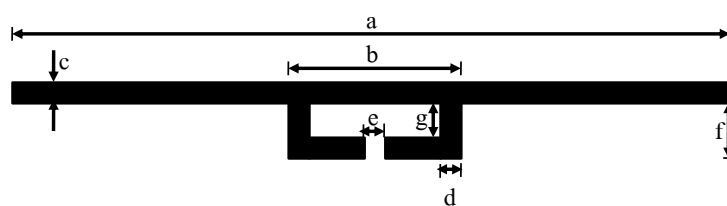
(ก) ชิ้นงานที่ประดิษฐ์ด้วยหน้ากากหนา 720  $\mu\text{m}$  (8x) (ข) ชิ้นงานที่ประดิษฐ์ด้วยหน้ากากหนา 270  $\mu\text{m}$  (3x)

นอกจากนี้เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากความไม่สม่ำเสมอและความราบเรียบของพื้นผิวที่ใช้สำหรับเติมหมึกนำไฟฟ้าลงบนซับสเตรตซึ่งถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โต๊ะระดับขนาด 30 x 30  $\text{cm}^2$  ที่มีความขรุขระเฉลี่ยน้อยกว่า 5  $\mu\text{m}$  เป็นพื้นที่สำหรับใช้ในขั้นตอนการประดิษฐ์

เมื่อประสบความสำเร็จในการปรับปรุงพัฒนาคุณภาพของเทคโนโลยีการเติมจนเต็มเพื่อประดิษฐ์ชั้นสารตัวนำแล้ว จึงได้ออกแบบสายอากาศชนิดไดโพลและไดโพลที่มีสลับปรับแต่งด้วยโปรแกรมจำลองจากค่าคงที่ต่างๆของวัสดุ ทั้งนี้แสดงรายละเอียดของสายอากาศทั้ง 2 ชนิดได้ดังภาพที่ 25 และภาพที่ 26 และแสดงผลการจำลองในตารางที่ 5



ภาพที่ 25 รูปแบบของสายอากาศชนิดไดโพล



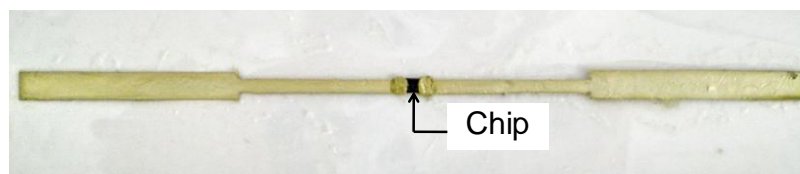
ขนาด	a	b	c	d	e	f	g
(mm)	129	24	3	3	3	7	4

ภาพที่ 26 รูปแบบของสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสตั๊ปปรับแต่ง

ตารางที่ 5 ผลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ( $\tau$ ) และระยะอ่าน ( $r_s$ ) ของสายอากาศจากการออกแบบ

รูปแบบสายอากาศ	ความถี่ 922.5 MHz	
	$\tau$	$r_s$ (m)
Dipole	0.55	6.75
Dipole with tuning stub	0.99	8.51

จากภาพที่ 25 และ 26 สายอากาศชนิดไดโพลและสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสตั๊ปปรับแต่ง มีพื้นที่เท่ากับ  $789 \text{ mm}^2$  และ  $477 \text{ mm}^2$  ตามลำดับ และเนื่องจากมีความหนาของชั้นสารตัวนำที่ต้องการมีค่าเท่ากับ  $39.25 \text{ }\mu\text{m}$  เมื่อนำมาคำนวณพร้อมขนาดเฉลี่ยปริมาณหมึกก่อนอบ  $5.88$  เท่า พบว่าสายอากาศชนิดไดโพลและสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสตั๊ปปรับแต่งใช้หมึกปริมาตร  $182.2 \text{ }\mu\text{l}$  และ  $110 \text{ }\mu\text{l}$  ตามลำดับ และเมื่อทำการประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็มดังที่ได้อธิบายขั้นตอนแล้วในภาพที่ 21 ประกอบสายอากาศเข้ากับชิปอาร์เอฟไอดีด้วยกาวอีพ็อกซี ภาพที่ 27(ก) และภาพที่ 27(ข) แสดงป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุทั้ง 2 ชนิด



(ก)



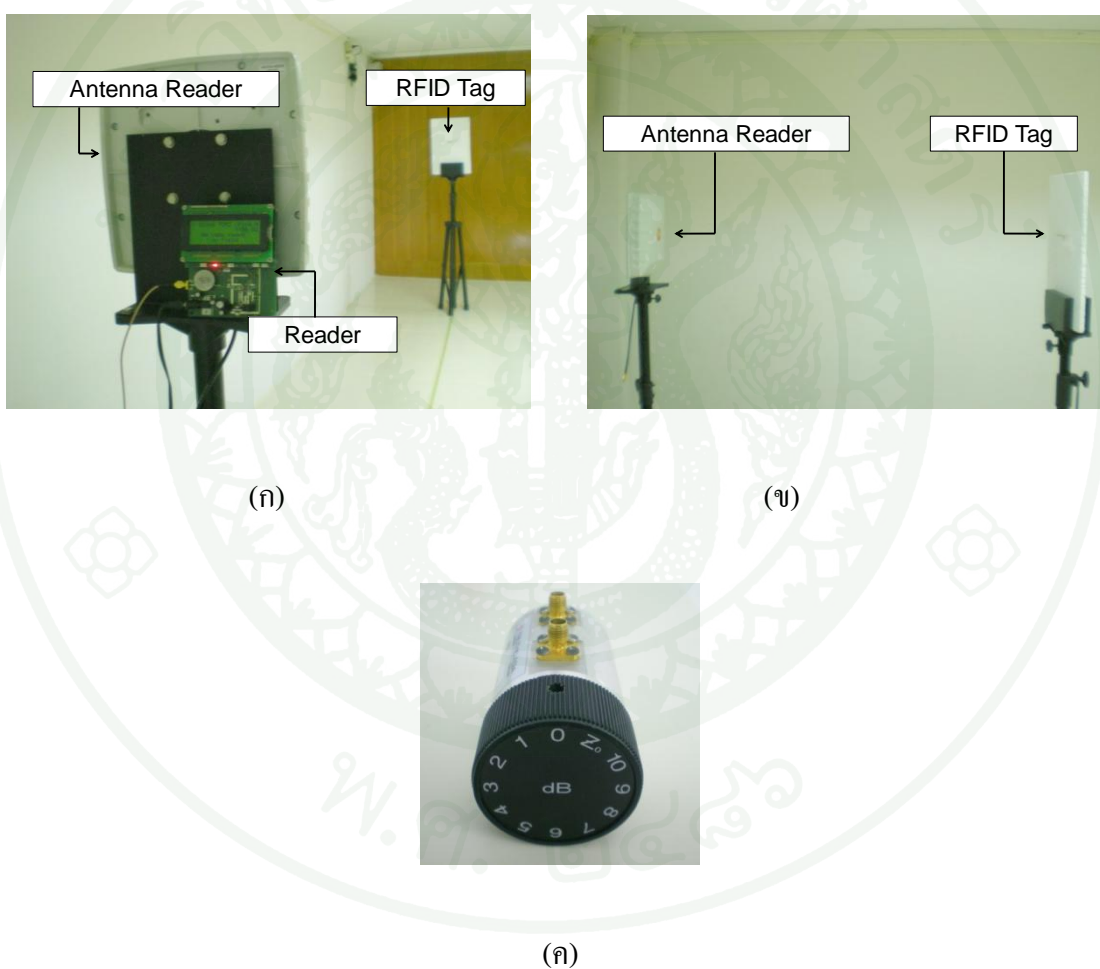
(ข)

ภาพที่ 27 ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID Tag) ที่ประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็ม (ก) ไดโพล (ข) ไดโพลที่มีสลับปรับแต่ง

สำหรับวิธีการตรวจวัดค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ได้ทดสอบระยะอ่านสัญญาณของป้ายระบุลักษณะโดยใช้เครื่องอ่าน UHF RFID Reader จากบริษัท Austriamicrosystem รุ่น AS3990 และเสาอากาศรุ่น PATCH A-0025 ที่มีอัตราขยายเท่ากับ  $7 \pm 1$  dBi และได้เลือกใช้ค่าเท่ากับ 6dBi (Poynting Antennas (Pty) Ltd., n.d.) โดยทำการทดสอบระยะอ่าน 2 วิธีคือวิธีคงระยะขณะปรับระดับสัญญาณ (Fixed distance) และวิธีปรับระยะ (Varied distance) โดยวิธีคงระยะขณะปรับระดับสัญญาณสามารถลดการรบกวนสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมได้ โดยทำการกำหนดระยะห่างของป้ายระบุลักษณะกับเสาอากาศของเครื่องอ่าน (reader antenna) ไว้คงที่และใช้ตัวลดทอน (attenuator) เพื่อลดทอนสัญญาณลงครั้งละ 1 dB จนเครื่องอ่านไม่สามารถตรวจจับสัญญาณของป้ายได้ งานวิจัยนี้ทดสอบที่ช่วงความถี่ตั้งแต่ 840 - 940 MHz จากนั้นจึงนำค่าของกำลังงานที่น้อยที่สุดของแต่ละความถี่ที่ส่งผ่านตัวลดทอนสัญญาณที่บันทึกไว้เพื่อมาคำนวณหาค่าระยะอ่าน ( $r_{m\_fixed}$ ) ของป้ายจากสมการที่ (8) (Rao *et al.*, 2005) ทั้งนี้แสดงอุปกรณ์การทดสอบระยะอ่านดังภาพที่ 28

$$r_{m\_fixed} = d \sqrt{\frac{EIRP}{P_{min\_eff} G_t}} \quad (8)$$

- โดยที่  $d$  คือระยะคงที่ระหว่างป้ายระบุลักษณะและเสาอากาศของเครื่องอ่าน
- $EIRP$  คือกำลังส่งออกอากาศสมมูลแบบไอโซโทรปิก (มีค่าเท่ากับ 4 วัตต์)
- $P_{min\_eff}$  คือกำลังต่ำสุดของสัญญาณจากเครื่องอ่านที่ส่งออกมาที่ความถี่ค่าต่างๆ ที่ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุยังคงอ่านได้
- $G_t$  คืออัตราขยายของเสาอากาศของเครื่องอ่าน



ภาพที่ 28 การทดสอบระยะอ่านของป้ายระบุลักษณะที่ประดิษฐ์ (ก) เครื่องอ่านและป้ายระบุลักษณะ (ข) การจัดเรียงอุปกรณ์เพื่อวัดค่าระยะอ่าน (ค) เครื่องลดทอนสัญญาณ (attenuator)

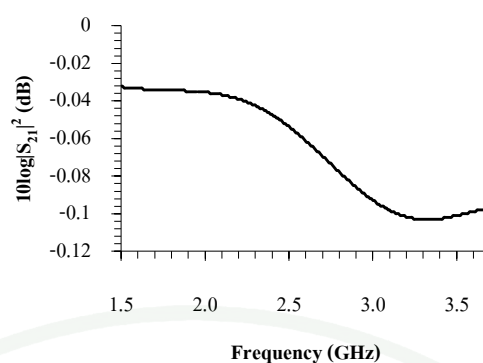
โดยที่ค่าอัตราขยาย ( $G$ ) มีค่าเท่ากับ 6 dB (Poynting Antenna Ltd., 2010) หรือมีอัตราขยายเท่ากับ 4 เท่า แต่เนื่องจากเสาอากาศของเครื่องอ่านมีการโพลาไรเซชันแบบวงกลม ในขณะที่สายอากาศของป้ายระบุลักษณะที่ได้ออกแบบและผลิตขึ้นมีการโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น ส่งผลให้สายอากาศของป้ายระบุลักษณะสามารถรับกำลังงานที่ส่งจากเสาอากาศของเครื่องอ่านได้เพียงครึ่งหนึ่งของกำลังงานสูงสุดที่เสาอากาศส่งออกมาหรือเท่ากับ 3 dB ดังนั้นในการคำนวณจึงกำหนดให้อัตราการขยายของเสาอากาศของเครื่องอ่าน ( $G_r$ ) มีค่าลดลงครึ่งหนึ่งหรือเท่ากับ 2 เท่า

วิธีทดสอบอีกวิธีหนึ่งคือวิธีปรับระยะ ซึ่งทำโดยการเลื่อนตำแหน่งของป้ายระบุลักษณะจนได้ระยะอ่านไกลสุดที่ป้ายยังสามารถรับสัญญาณจากเครื่องอ่านได้ ( $r_{test}$ ) โดยไม่มีการลดทอนสัญญาณจากเครื่องอ่านซึ่งในการวัดนี้กำลังส่งของเสาอากาศของเครื่องอ่านที่ใช้มีกำลังส่งน้อยกว่ามาตรฐาน  $EIRP$  เท่ากับ 4 วัตต์ ทำให้ระยะที่อ่านได้มีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็น จึงต้องคำนวณระยะเปรียบเทียบกับกำลังส่งของเครื่องอ่านสัญญาณ 4 วัตต์หรือ  $r_{m\_varied}$  ดังสมการที่ (9)

$$r_{m\_varied} = r_{test} \sqrt{\frac{EIRP}{P_{(n)} G_t}} \quad (9)$$

โดย	$r_{test}$	คือ	ระยะจากเครื่องอ่านมายังป้ายที่วัดได้
	$P_{(n)}$	คือ	กำลังของสัญญาณจากเครื่องอ่านที่ไม่ถูกลดทอน
	$G_t$	คือ	อัตราขยายของเสาอากาศของเครื่องอ่าน

สำหรับส่วนของการพัฒนาเทคโนโลยีการประดิษฐ์มัลติรีโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะ ด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิด ไร้ชิปด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็มได้เลือกใช้แผ่นเพลลอนเป็นซับสเตรต และจากผลการจำลองพบว่าที่ความยาว 90 mm มีค่าความสูญเสียของสายนำสัญญาณ ( $S_{21}$ ) เท่ากับ -0.035 dB หรือเท่ากับ 0.38 dB/m ที่ความถี่ 1.94 GHz แสดงผลการจำลองดังภาพที่ 29



**ภาพที่ 29** ผลการจำลองค่าความสูญเสียของสายนำสัญญาณที่ประดิษฐ์ด้วยแผ่นเพลลอนที่ความยาวของชิ้นงาน 90 mm

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปด้วยหลักการกรองสัญญาณความถี่ด้วยมัลติรีโซเนเตอร์ โดยใช้เทคนิคการตรวจวัดสัญญาณความถี่ที่เปลี่ยนแปลงด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์เครื่องข่ายเวกเตอร์ และนำสัญญาณที่ตรวจวัดได้มากำหนดรูปแบบการเข้ารหัส ทั้งนี้ตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์สำหรับการเข้ารหัสคือ ค่าการสูญเสียจากการสอดใส่ ซึ่งในกรณีที่มัลติรีโซเนเตอร์ติดตั้งอยู่ขนาดการสูญเสียจากการสอดใส่จะมีค่ามาก จึงถูกนำมาเข้ารหัสเป็นตรรกะ “0” และในทางกลับกันหากไม่มีรีโซเนเตอร์ติดตั้งอยู่ขนาดการสูญเสียจากการสอดใส่จะมีค่าน้อยและสัญญาณจะถูกนำมาเข้ารหัสเป็นตรรกะ “1”

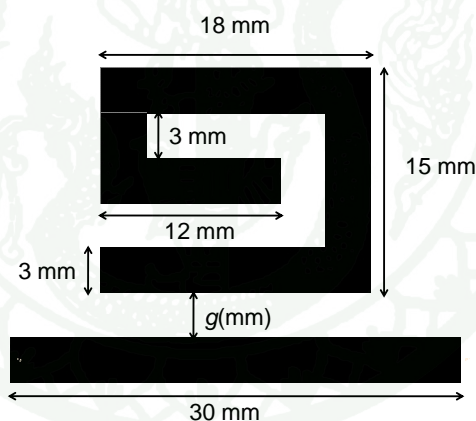
การออกแบบรีโซเนเตอร์ให้มีการกรองสัญญาณความถี่ที่ความถี่ต่างๆ ใช้การคำนวณความยาวของรีโซเนเตอร์แต่ละชุดตามสมการที่ (3) โดยรีโซเนเตอร์ 1 ชุดสามารถนำมาเข้ารหัสข้อมูลได้ 1 บิต โดยในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้สามารถระบุลักษณะเฉพาะจำนวน 3 บิต ที่ความถี่ 1.94, 2.58 และ 3.49 GHz ซึ่งแทนบิต 2, 1 และ 0 ตามลำดับและแสดงความยาวของรีโซเนเตอร์แต่ละชุดแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 6

**ตารางที่ 6** ความยาวและความถี่ที่ตอบสนองของมัลติรีโซเนเตอร์จากการคำนวณและแบบจำลอง

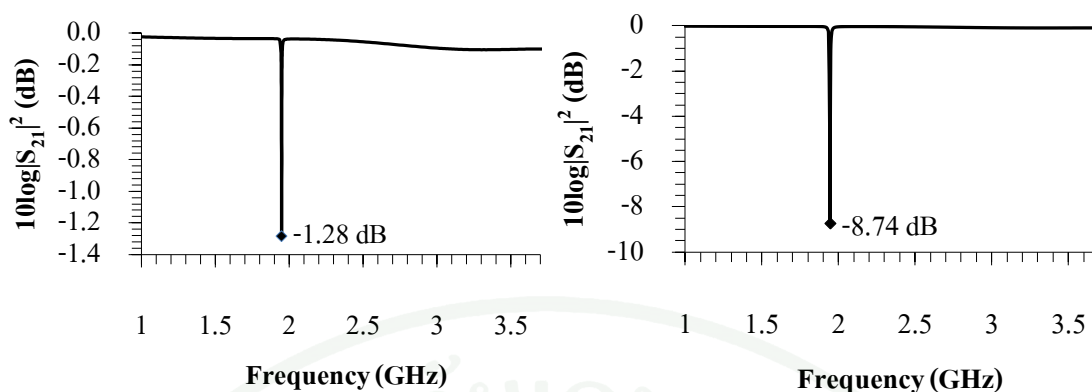
Bit	$l_r$ (mm)	Calculated Frequency (GHz)	Simulated Frequency (GHz)
0	33	3.31	3.49
1	45	2.43	2.58
2	60	1.82	1.94

ทั้งนี้การออกแบบมัลติรีโซเนเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงนั้น ควรออกแบบให้มีความแตกต่างของระดับสัญญาณขณะติดตั้งด้วยรีโซเนเตอร์และไม่ถูกติดตั้งด้วยรีโซเนเตอร์ให้มีความสูง กล่าวคือ ควรออกแบบให้ความสูญเสียจากการสอดใส่ในกรณีติดตั้งรีโซเนเตอร์มีค่ามากหรือ  $|S_{21}|^2$  เข้าใกล้  $-\infty$  dB และควรออกแบบให้ความสูญเสียจากการสอดใส่ในกรณีที่ไม่มรีโซเนเตอร์มีค่าน้อยหรือ  $|S_{21}|^2$  ใกล้เคียง 0 dB จากการศึกษาจาก โปรแกรมแบบจำลองพบปัจจัยที่มีผลต่อระดับสัญญาณซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของมัลติรีโซเนเตอร์ 2 ประการดังนี้

(ก) ระยะระหว่างสายนำสัญญาณและรีโซเนเตอร์ส่งผลต่อค่าการสูญเสียจากการสอดใส่ กล่าวคือขนาดสูญเสียจากการสอดใส่จะมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะห่าง  $g$  ระหว่างสายนำสัญญาณและรีโซเนเตอร์มีค่าน้อยซึ่งเป็นผลดีต่อประสิทธิภาพของรีโซเนเตอร์ โดยทำการออกแบบรีโซเนเตอร์ขนาด 1 บิต ให้กรองสัญญาณที่ความถี่ 1.94 GHz ที่มีระยะห่าง  $g$  ระหว่างสายนำสัญญาณและรีโซเนเตอร์เท่ากับ 3 mm และ 1 mm ตามลำดับ ดังแสดงรูปแบบในภาพที่ 30 พบว่ามีขนาดความสูญเสียจากการสอดใส่ ( $|S_{21}|^2$ ) ลดลงจาก -1.28 dB เป็น -8.78 dB ดังแสดงในภาพที่ 31(ก) และ 31(ข)



ภาพที่ 30 รูปแบบของรีโซเนเตอร์จำนวน 1 บิตที่ใช้ทดสอบระดับสัญญาณ โดยการปรับระยะห่าง  $g$  ระหว่างสายนำสัญญาณและรีโซเนเตอร์

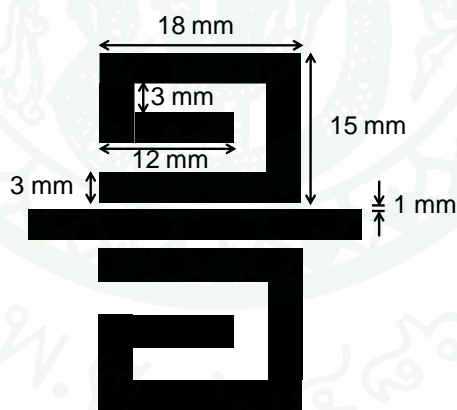


(ก)

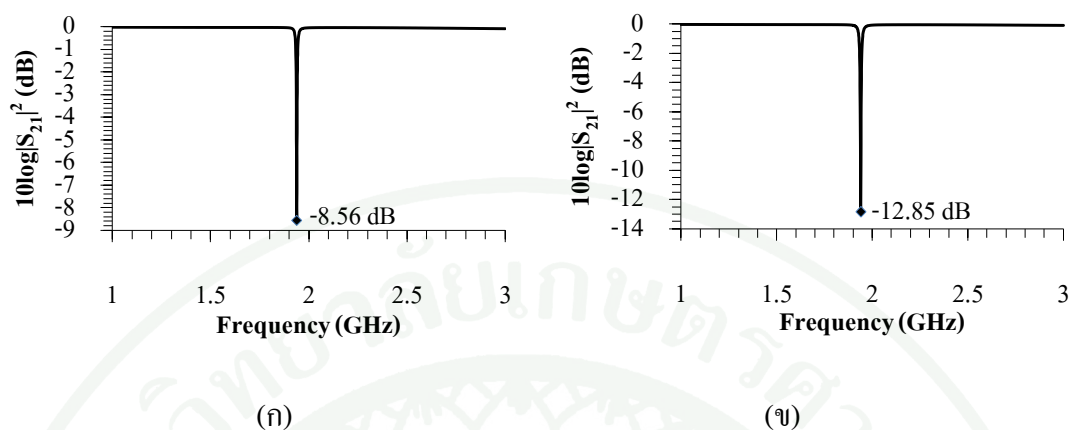
(ข)

ภาพที่ 31 ผลการประมวลค่าสูญเสียเนื่องจากการสอดใส่ของรีโซเนเตอร์ (ก) ระยะห่าง  $g = 3$  mm  
(ข) ระยะห่าง  $g = 1$  mm

(ข) การเพิ่มชุดของรีโซเนเตอร์ที่ความถี่เดียวกันส่งผลให้ค่า  $|S_{21}|^2$  มีค่าลดลงซึ่งเป็นผลให้มัลติรีโซเนเตอร์มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยได้ออกแบบรีโซเนเตอร์จากเดิม 1 ชุดเป็น 2 ชุด ดังแสดงในภาพที่ 32 พบว่าค่าการสูญเสียจากการสอดใส่ลดลงจาก  $-8.56$  dB เป็น  $-12.85$  dB ที่ความถี่  $1.94$  GHz แสดงผลจาก โปรแกรมจำลองดังภาพที่ 33

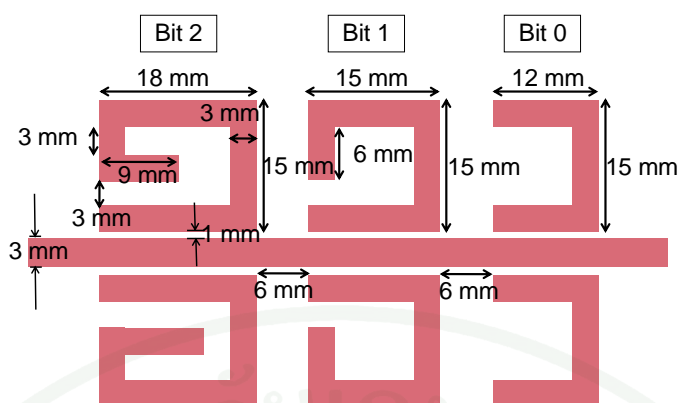


ภาพที่ 32 รูปร่างของรีโซเนเตอร์ที่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 2 ชุด

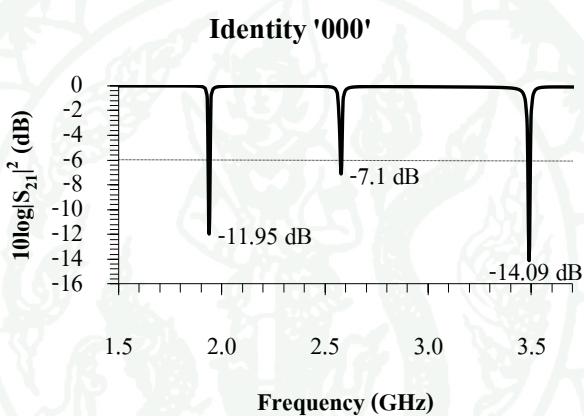


ภาพที่ 33 ผลของจำนวนรีโซเนเตอร์ที่มีต่อค่าการสูญเสียจากการสอดใส่ (ก) 1 ชุด (ข) 2 ชุด

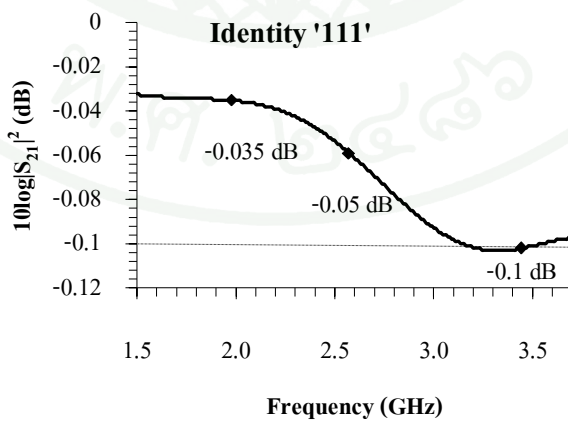
นอกจากนี้ได้ทำการออกแบบรีโซเนเตอร์เพิ่มเติมเป็นจำนวน 3 บิต ซึ่งประกอบด้วยชุดของรีโซเนเตอร์ที่มีความยาวแตกต่างกันจำนวน 3 ชุด ให้กรองความถี่ที่ 1.94, 2.58 และ 3.49 GHz โดยการออกแบบมัลติรีโซเนเตอร์ใช้การคำนวณความยาวดังแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 6 และแสดงรูปแบบของมัลติรีโซเนเตอร์จำนวน 3 บิตได้ดังภาพที่ 34 และแสดงผลการจำลองดังภาพที่ 35 ซึ่งพบว่ามัลติรีโซเนเตอร์ให้ค่า  $|S_{21}|^2$  เท่ากับ -11.9 dB, -7.1 dB และ -14.1 dB ที่ความถี่เท่ากับ 1.94, 2.58 และ 3.49 GHz ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองพบว่ามัลติรีโซเนเตอร์ให้ค่า  $|S_{21}|^2$  ลดลงตรงตามความถี่ที่ต้องการ จากนั้นจึงนำค่าระดับสัญญาณที่ได้มาประยุกต์สำหรับกำหนดการเข้ารหัส โดยกำหนดให้เป็นตรรกะ “0” เมื่อค่า  $|S_{21}|^2$  มีค่าน้อยกว่า -6 dB ดังนั้นมัลติรีโซเนเตอร์ชุดนี้จึงสามารถแสดงลักษณะเฉพาะ “000” นอกจากนี้ยังได้ออกแบบสายนำสัญญาณที่ไม่ติดตั้งด้วยมัลติรีโซเนเตอร์ โดยแสดงผลการจำลองดังภาพที่ 36 พบว่าไม่ปรากฏการกรองสัญญาณความถี่ใดๆและพบว่าค่า  $|S_{21}|^2$  มีค่าเท่ากับ -0.03 dB, -0.05 dB และ -0.10 dB ที่ความถี่ 1.94, 2.58 และ 3.49 GHz ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์สำหรับการเข้ารหัสโดยกำหนดให้เป็นตรรกะ “1” เมื่อค่า  $|S_{21}|^2$  มีค่ามากกว่า -0.1 dB ดังนั้นสายนำสัญญาณที่ไม่ถูกติดตั้งด้วยรีโซเนเตอร์จึงแสดงลักษณะเฉพาะ “111”



ภาพที่ 34 ลักษณะของมัลติรีโซเนเตอร์จำนวน 3 บิต



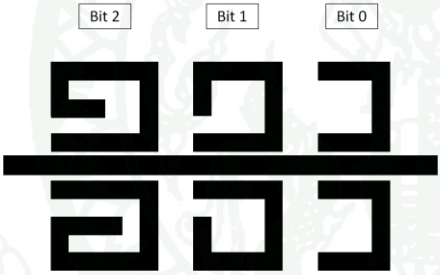
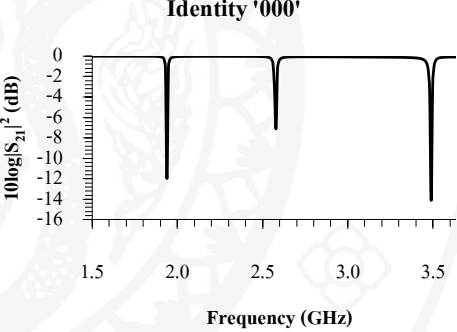
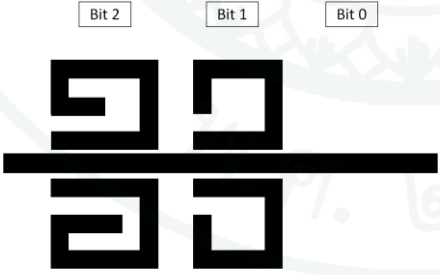
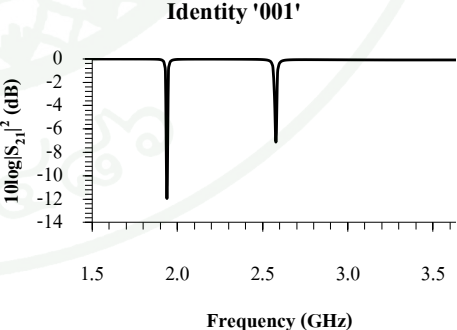
ภาพที่ 35 ผลการออกแบบค่าการสูญเสียจากการสอดใส่ของลักษณะเฉพาะ “000”



ภาพที่ 36 ผลการออกแบบค่าการสูญเสียจากการสอดใส่ของลักษณะเฉพาะ “111”

เมื่อผลการออกแบบมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ “000” และ “111” ให้ผลตามต้องการจึงได้ออกแบบมัลติรีโซเนเตอร์ให้ครบทั้ง 8 ลักษณะเฉพาะ ตั้งแต่ลักษณะเฉพาะ ‘000’ ถึง ‘111’ และกำหนดให้ที่ความถี่ 1.94, 2.58 และ 3.49 GHz แสดงข้อมูลลักษณะเฉพาะบิตที่ 2, 1 และ 0 ตามลำดับ โดยกำหนดให้บิตที่มีค่า  $|S_{21}|^2$  น้อยกว่า -6 dB แสดงลักษณะเฉพาะเป็นตรรกะ “0” และบิตที่มีค่า  $|S_{21}|^2$  มากกว่า -0.1 dB แสดงลักษณะเฉพาะเป็นตรรกะ “1” ทั้งนี้ผลการจำลองค่าการสูญเสียจากการสอดใส่ของมัลติรีโซเนเตอร์และรูปแบบของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ ‘000’ ถึง ‘111’ ได้ดังตารางที่ 7

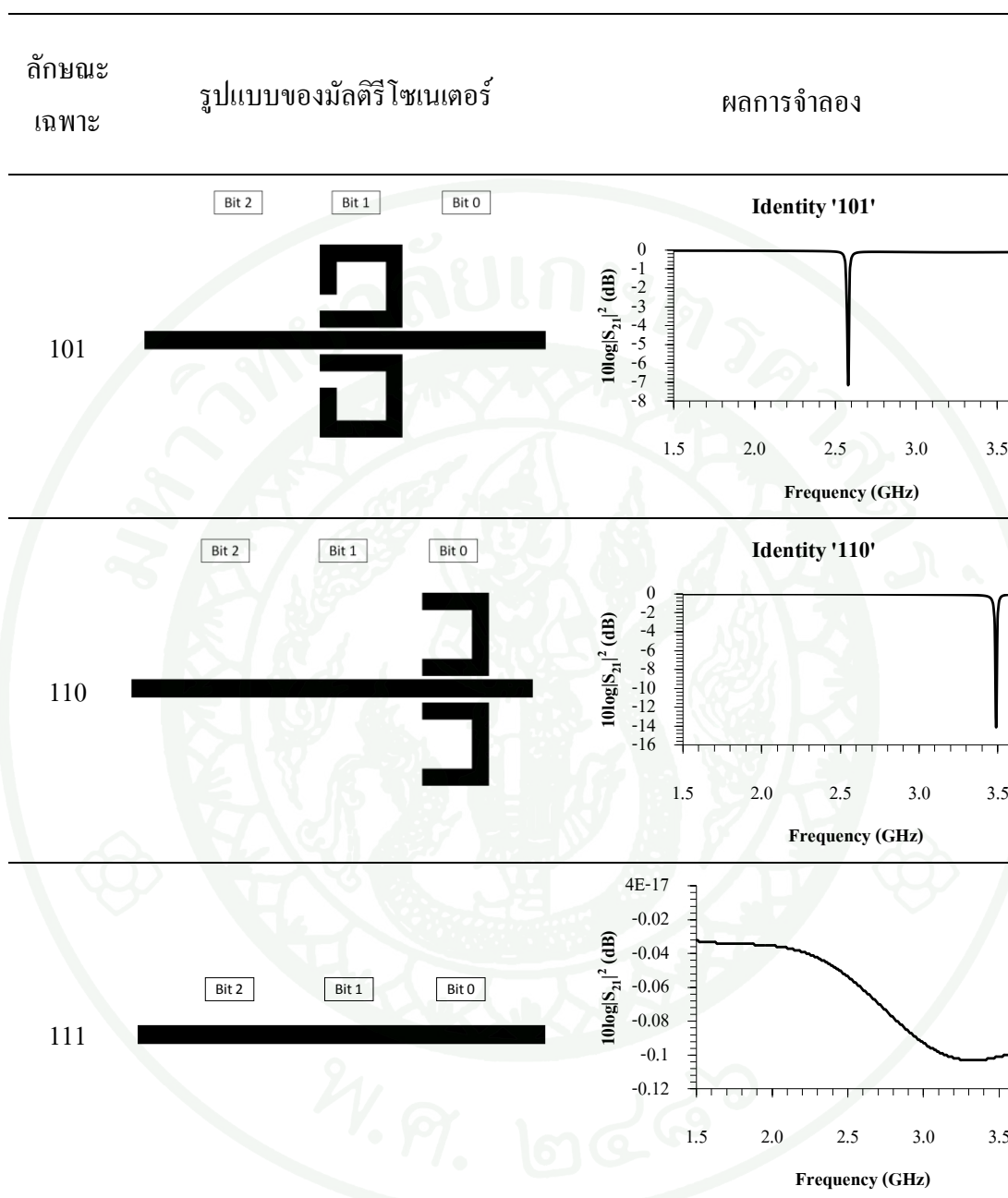
ตารางที่ 7 รูปแบบและผลการจำลองมัลติรีโซเนเตอร์ที่แสดงลักษณะเฉพาะตั้งแต่ ‘000’ ถึง ‘111’

ลักษณะเฉพาะ	รูปแบบของมัลติรีโซเนเตอร์	ผลการจำลอง
000		
001		

## ตารางที่ 7 (ต่อ)

ลักษณะเฉพาะ	รูปแบบของมัลติรีโซเนเตอร์	ผลการจำลอง
010		<p data-bbox="1078 551 1219 577">Identity '010'</p>
011		<p data-bbox="1078 954 1219 981">Identity '011'</p>
100		<p data-bbox="1078 1357 1219 1384">Identity '100'</p>

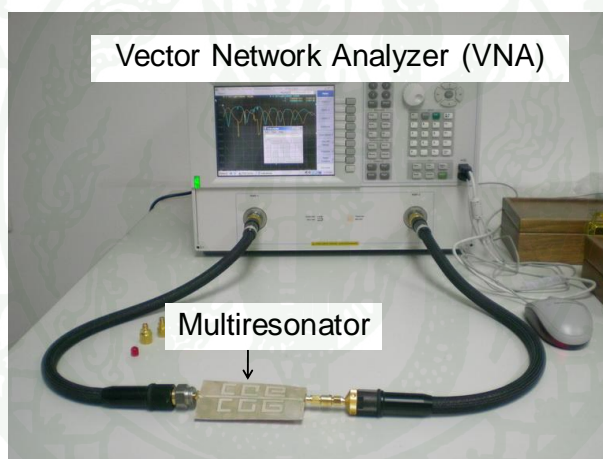
## ตารางที่ 7 (ต่อ)



หลังจากออกแบบมัลติรีโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปแล้ว ได้ประดิษฐ์มัลติรีโซเนเตอร์ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็มซึ่งมีกระบวนการขั้นตอนเช่นเดียวกับการประดิษฐ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง ทั้งนี้ในการกำหนดปริมาณของหมึกตัวนำที่ใช้สำหรับการประดิษฐ์ลวดลายของมัลติรีโซเนเตอร์ต้องการให้มีความหนา ก่อนอบ 137.4  $\mu\text{m}$  และเมื่อนำมาคำนวณพื้นที่ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่แสดงลักษณะเฉพาะ '000', '001', '010', '011', '100', '101', '110' และ '111' พบว่าใช้ปริมาณหมึกทั้งสิ้น 284  $\mu\text{l}$ , 234  $\mu\text{l}$ , 216  $\mu\text{l}$ ,

164  $\mu\text{l}$ , 192  $\mu\text{l}$ , 140  $\mu\text{l}$ , 122  $\mu\text{l}$  และ 70  $\mu\text{l}$  ตามลำดับ นอกจากนี้มีการปรับเปลี่ยนชั้นสเตรตเป็นแผ่นเพลต่อนและหลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการอบสารตัวนำด้วยร้อนจะใช้แผ่นทองแดงติดบริเวณด้านล่างของมัลติรีโซเนเตอร์เพื่อใช้เป็นกราวด์ของชิ้นงาน จากนั้นทำการบัดกรีเพื่อเชื่อมต่อคอนเนคเตอร์เอสเอ็มเอ (SubMiniature version A, SMA) บริเวณส่วนปลายทั้ง 2 ด้านของสายนำสัญญาณ เพื่อใช้เป็นพอร์ต 1 และ 2 ในการทดสอบประสิทธิภาพของชิ้นงานต่อไป

ในการวัดประสิทธิภาพของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็มใช้เครื่องมือวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer, VNA) รุ่น N5230C วิเคราะห์ค่าตัวแปรการกระเจิงในช่วงความถี่ 0.5 – 9.5 GHz โดยกำหนดค่าการวิเคราะห์ขั้นละ 9 MHz แสดงการจัดเรียงอุปกรณ์ดังภาพที่ 37 ทั้งนี้ผลการทดสอบประสิทธิภาพของชิ้นงานจะแสดงในเนื้อหาบทถัดไป



ภาพที่ 37 อุปกรณ์วิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ (Vector Network Analyzer, VNA)

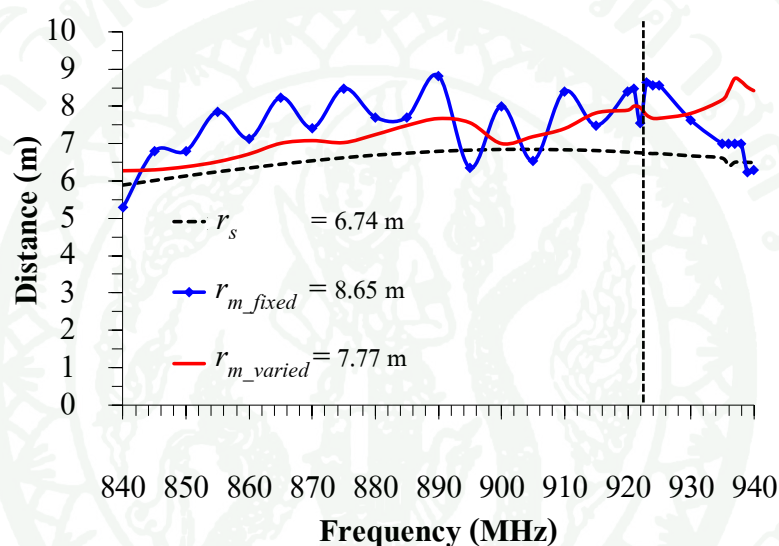
## ผลและวิจารณ์

### ผล

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเติมจนเต็ม (Fill until Full, FuF) สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 2 ประเภท ได้แก่สายอากาศของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (RFID Tag) และมัลติเรโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิป (Multiresonator Chipless RFID Tag) จึงแสดงผลการวิจัยของอุปกรณ์ 2 ประเภทได้ดังต่อไปนี้

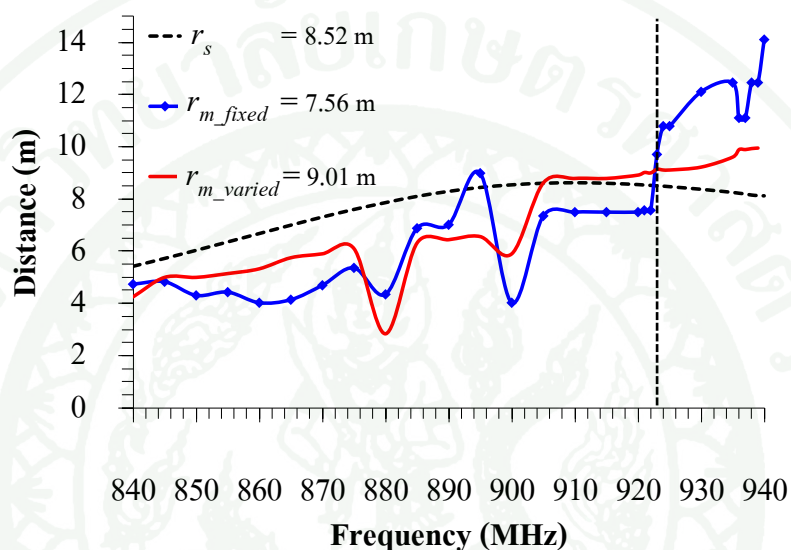
ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งใช้การทดสอบประสิทธิภาพโดยการวัดค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะที่ประดิษฐ์ด้วยสายอากาศ 2 รูปแบบ ได้แก่ สายอากาศชนิดไดโพล (Dipole) และสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสตัปปรับแต่ง (Dipole with tuning stub) ดังในภาพที่ 27(ก) และภาพที่ 27(ข) ตามลำดับ และเนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการวัดระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะ 2 วิธี ได้แก่ วิธีคงระยะขณะปรับสัญญาณ (Fixed distance) และวิธีปรับระยะ (Varied distance) โดยในขั้นตอนการวัดด้วยวิธีคงระยะขณะปรับระดับสัญญาณจะทำการกำหนดระยะห่าง (d) ของป้ายระบุลักษณะกับเสาอากาศของเครื่องอ่าน (reader antenna) ไว้คงที่คือ 2.3 m และใช้ตัวลดทอนเพื่อลดทอนสัญญาณ (attenuator) ลดทอนสัญญาณลงครั้งละ 1 dB จนเครื่องอ่านไม่สามารถตรวจจับสัญญาณของป้ายได้ โดยแบ่งความถี่ในการวัดเป็น 2 ช่วง คือในช่วงความถี่ตั้งแต่ 840-940 MHz วัดโดยปรับสัญญาณความถี่ที่เครื่องอ่านเพิ่มขึ้นทีละ 5 MHz และในช่วงความถี่ 920-925 MHz ปรับเพิ่มขึ้นทีละ 1 MHz เพื่อเพิ่มความละเอียดในการวัด จากนั้นจึงนำค่าของกำลังงานที่น้อยที่สุดของแต่ละความถี่ที่ส่งผ่านตัวลดทอนสัญญาณที่บันทึกไว้มาคำนวณหาค่าระยะอ่าน ( $r_m$ ) ดังแสดงในสมการที่ (8) นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการวัดระยะอ่านของป้ายระบุลักษณะอีกวิธีหนึ่งคือ วิธีปรับระยะ โดยในขั้นตอนการวัดจะใช้การปรับเลื่อนระยะระหว่างป้ายระบุลักษณะที่ประดิษฐ์และเสาอากาศของเครื่องอ่านซึ่งทำโดยการเลื่อนตำแหน่งของป้ายระบุลักษณะ จากนั้นนำระยะอ่านไกลสุดที่ป้ายระบุลักษณะสามารถรับสัญญาณจากเครื่องอ่านได้มาคำนวณระยะเปรียบเทียบกับกำลังส่งของเครื่องอ่านสัญญาณที่มีค่าเท่ากับ 4 วัตต์ ดังถูกแสดงไว้ในสมการที่ (9)

เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการออกแบบสายอากาศให้มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านพลังงานสูงสุดที่ความถี่ 922.5 MHz โดยทำการวัดระยะอ่านที่ย่านความถี่ 840 – 940 MHz และผลของระยะอ่านจากโปรแกรมจำลองของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งที่มีสายอากาศชนิดไดโพลเปรียบเทียบกับผลจากวิธีการวัดระยะอ่านทั้ง 2 วิธีแสดงดังแสดงในภาพที่ 38 พบว่าที่ความถี่ 922.5 MHz ระยะอ่านจากโปรแกรมจำลอง ( $r_s$ ) มีค่าเท่ากับ 6.74 m ระยะอ่านด้วยวิธีคงระยะขณะปรับระดับสัญญาณ ( $r_{m\_fixed}$ ) มีค่าเท่ากับ 8.65 m และระยะอ่านด้วยวิธีปรับระยะ ( $r_{m\_varied}$ ) มีค่าเท่ากับ 7.77 m



ภาพที่ 38 ระยะอ่านจาก โปรแกรมจำลอง ( $r_s$ ) เปรียบเทียบกับผลจากการวัดทั้ง 2 วิธี ( $r_{m\_fixed}$  และ  $r_{m\_varied}$ ) ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นวิทยุที่มีสายอากาศชนิดไดโพล

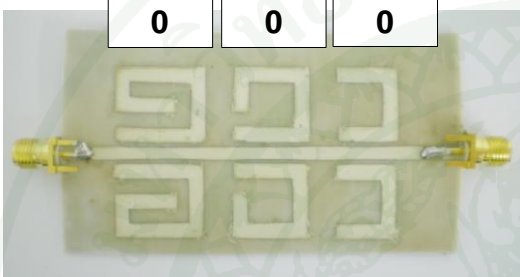
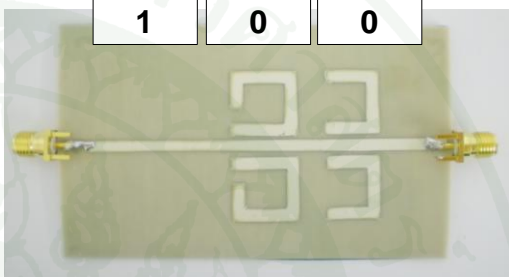
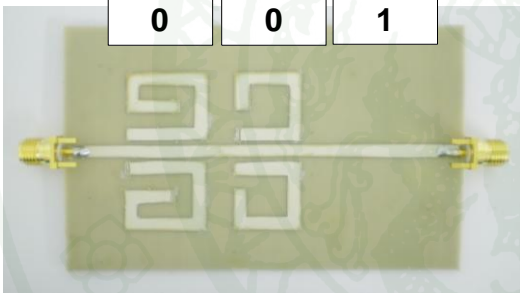
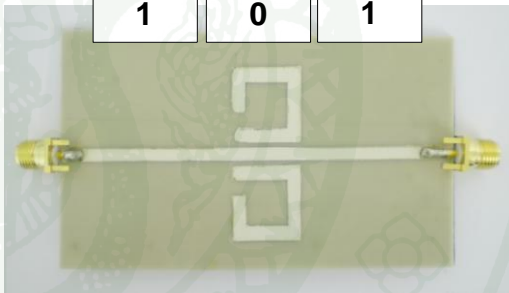
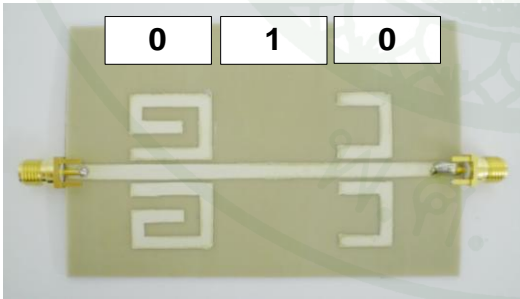
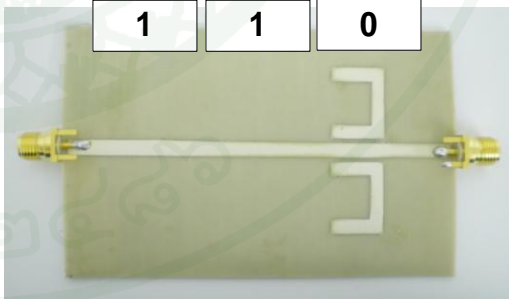
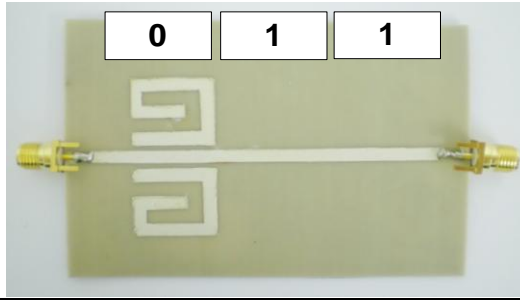

ผลของระยะอ่านจากโปรแกรมจำลองของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งของป้ายที่ประกอบด้วยสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสลับปรับแต่งเปรียบเทียบกับผลจากการวัดระยะอ่านทั้ง 2 วิธีแสดงในภาพที่ 39 ซึ่งพบว่าที่ความถี่ 922.5 MHz ระยะอ่านจากโปรแกรมจำลอง ( $r_s$ ) มีค่าเท่ากับ 8.52 m ระยะอ่านด้วยวิธีคงระยะขณะปรับระดับสัญญาณ ( $r_{m\_fixed}$ ) มีค่าเท่ากับ 7.56 m และระยะอ่านด้วยวิธีปรับระยะ ( $r_{m\_varied}$ ) มีค่าเท่ากับ 9.01 m



ภาพที่ 39 ระยะอ่านจากโปรแกรมจำลอง ( $r_s$ ) เปรียบเทียบกับผลจากการวัดทั้ง 2 วิธี ( $r_{m\_fixed}$  และ  $r_{m\_varied}$ ) ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นวิทยุที่มีสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสลับปรับแต่ง

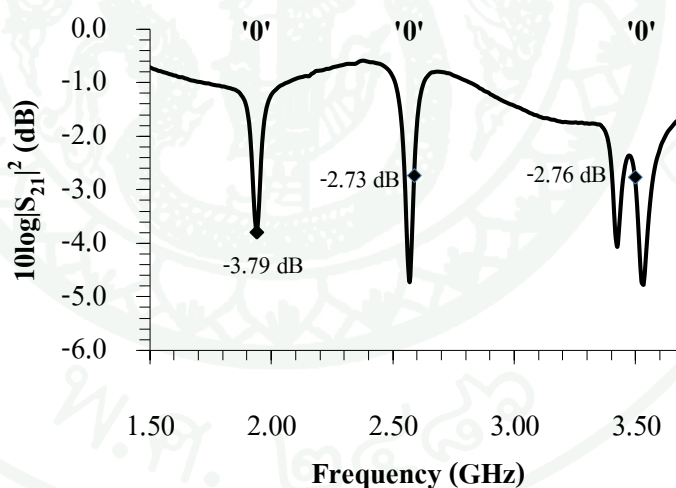
นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ประดิษฐ์มัลติรีโชนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปให้แสดงลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันทั้งสิ้น 8 ลักษณะเฉพาะคือตั้งแต่ '000' ถึง '111' แสดงชิ้นงานในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 มัลติรีโชนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปที่ประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเติมจนเต็ม

มัลติรีโชนเตอร์ลักษณะเฉพาะ '000'-'011'	มัลติรีโชนเตอร์ลักษณะเฉพาะ '100'-'111'
<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> <span>0</span> <span>0</span> <span>0</span> </div> 	<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> <span>1</span> <span>0</span> <span>0</span> </div> 
<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> <span>0</span> <span>0</span> <span>1</span> </div> 	<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> <span>1</span> <span>0</span> <span>1</span> </div> 
<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> <span>0</span> <span>1</span> <span>0</span> </div> 	<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> <span>1</span> <span>1</span> <span>0</span> </div> 
<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> <span>0</span> <span>1</span> <span>1</span> </div> 	<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 5px;"> <span>1</span> <span>1</span> <span>1</span> </div> 

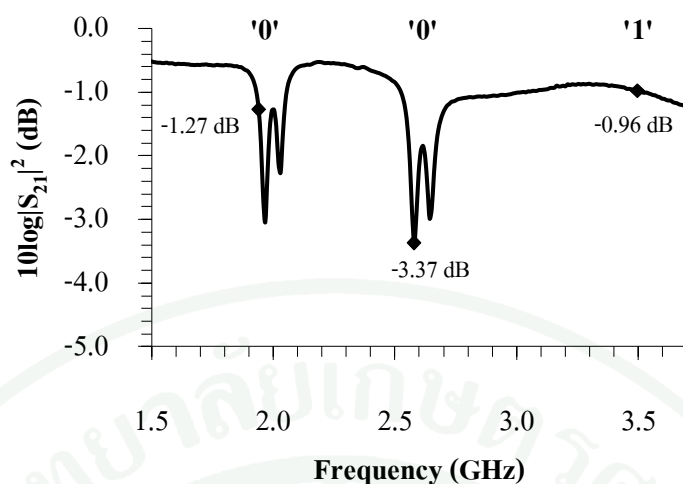
การวัดประสิทธิภาพของมัลติรีโชนเตอร์ของป่าระยะบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ในการตรวจวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ที่แสดงในหน่วย dB ของชิ้นงานทั้ง 8 ชิ้น โดยที่ความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz ถูกกำหนดให้แทนลักษณะเฉพาะบิตที่ 2, 1 และ 0 ตามลำดับ ทั้งนี้วิธีการวิเคราะห์ผลการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ของมัลติรีโชนเตอร์ จะกำหนดให้บิตที่ถูกติดตั้งด้วยรีโชนเตอร์ซึ่งมีค่า  $|S_{21}|^2$  ต่ำอันเนื่องมาจากสัญญาณความถี่ที่บิตนั้นไม่สามารถผ่านออกทางพอร์ต 2 แสดงตรรกะ '0' และในทางกลับกันหากบิตนั้นไม่ถูกติดตั้งด้วยรีโชนเตอร์ซึ่งส่งผลให้ค่า  $|S_{21}|^2$  มีค่ามากอันเนื่องมาจากสัญญาณความถี่ที่บิตนั้นไม่ถูกกรองออกไป จะกำหนดให้บิตนั้นแสดงตรรกะ '1' และแสดงผลของค่า  $|S_{21}|^2$  ที่ถูกนำมากำหนดเป็นมัลติรีโชนเตอร์ที่แสดงลักษณะเฉพาะ '000' ถึง '111' ได้ดังภาพที่ 40 ถึงภาพที่ 47

ทั้งนี้ผลการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ของป่าระยะบุลักษณะที่แสดงลักษณะเฉพาะ '000' แสดงในภาพที่ 40 พบว่าที่ความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz มีค่า  $|S_{21}|^2$  เท่ากับ -3.79 dB, -2.73 dB และ -2.76 dB ตามลำดับ โดยมีค่า  $|S_{21}|^2$  ต่ำที่สุดคลาดเคลื่อนไปจากที่ออกแบบไว้กล่าวคือที่ 1.94 GHz, 2.57 GHz และ 3.53 GHz โดยมีค่าเท่ากับ -3.78 dB, -4.72 dB และ -4.77 dB ตามลำดับ



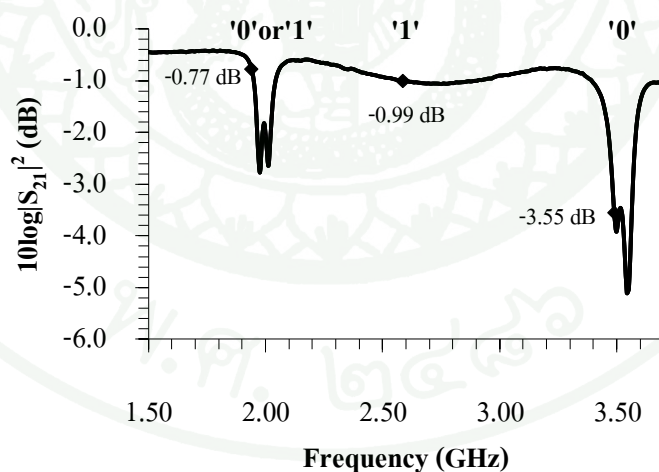
ภาพที่ 40 ผลการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ของมัลติรีโชนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ '000'

ผลการวัดมัลติรีโชนเตอร์ของป่าระยะบุลักษณะที่แสดงลักษณะเฉพาะ '001' แสดงในภาพที่ 41 พบว่าความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz มีค่า  $|S_{21}|^2$  เท่ากับ -1.27 dB, -3.37 dB และ -0.96 dB ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าค่า  $|S_{21}|^2$  มีค่าต่ำที่สุดที่ความถี่ 1.96 GHz และ 2.57 GHz โดยมีค่าเท่ากับ -3.04 dB และ -3.37 dB ตามลำดับ



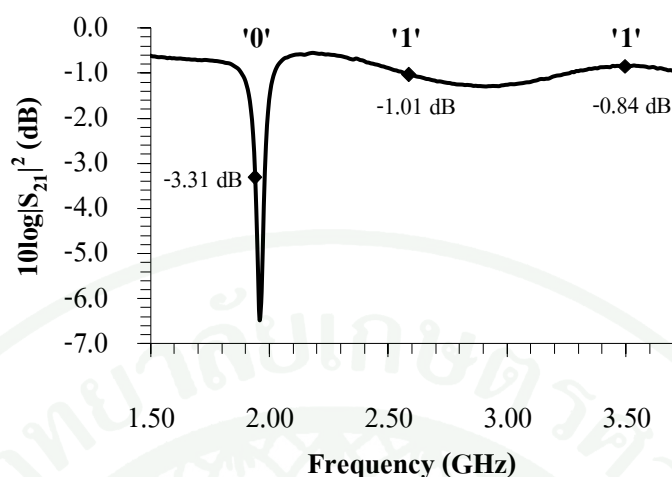
ภาพที่ 41 ผลการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ '001'

ผลการวัดมัลติรีโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะที่แสดงลักษณะเฉพาะ '010' แสดงในภาพที่ 42 พบว่าความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz มีค่า  $|S_{21}|^2$  เท่ากับ -0.77 dB, -0.99 dB และ -3.55 dB ตามลำดับ โดยพบค่า  $|S_{21}|^2$  ต่ำที่สุดที่ความถี่ 1.98 GHz และ 3.54 GHz มีค่าเท่ากับ -2.77 dB และ -5.11 dB ตามลำดับ



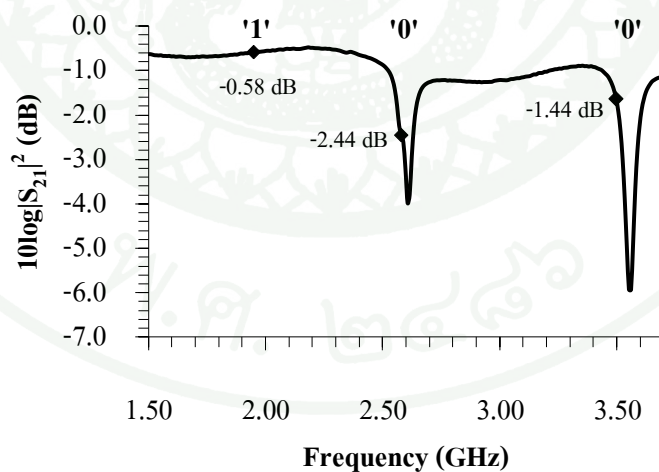
ภาพที่ 42 ผลการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ '010'

ผลการวัดมัลติรีโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะที่แสดงลักษณะเฉพาะ '011' แสดงในภาพที่ 43 พบว่าความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz มีค่า  $|S_{21}|^2$  เท่ากับ -3.31 dB, -1.01 dB และ -0.84 dB ตามลำดับ และพบค่า  $|S_{21}|^2$  ต่ำที่สุดที่ความถี่ 1.96 GHz โดยค่าเท่ากับ -6.46 dB



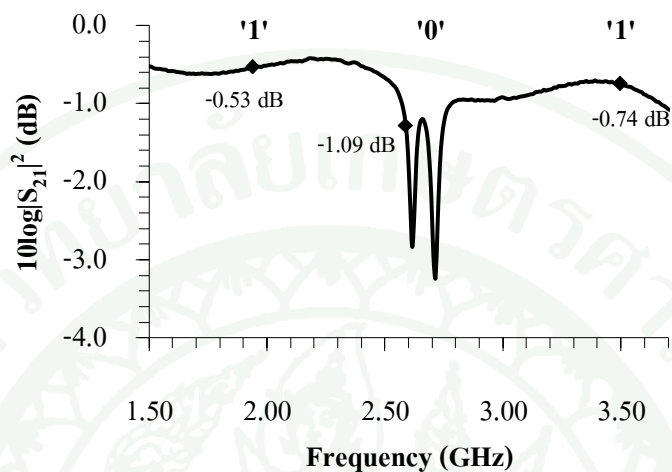
ภาพที่ 43 ผลการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ '011'

ผลการวัดมัลติรีโซเนเตอร์ของปายระบุลักษณะที่แสดงลักษณะเฉพาะ '100' แสดงในภาพที่ 44 พบว่าความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz มีค่า  $|S_{21}|^2$  เท่ากับ -0.58 dB, -2.44 dB และ -1.44 dB ตามลำดับ โดยมีค่า  $|S_{21}|^2$  ต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.61 GHz และ 3.56 GHz มีค่าเท่ากับ -3.97 dB และ -5.91 dB ตามลำดับ



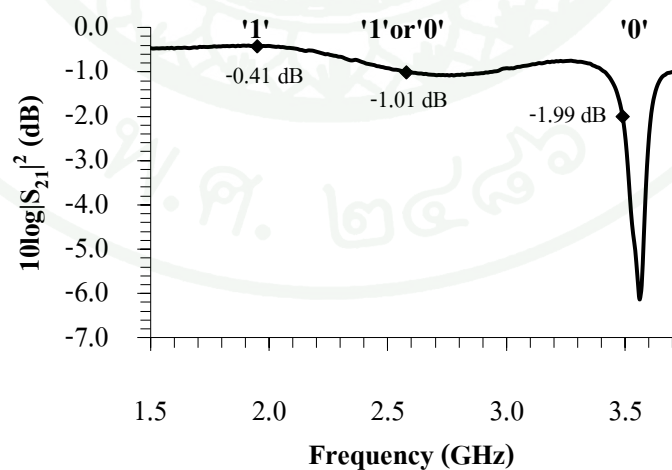
ภาพที่ 44 ผลการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ '100'

ผลการวัดมัลติรีโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะที่แสดงลักษณะเฉพาะ '101' แสดงในภาพที่ 45 พบว่าความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz มีค่า  $|S_{21}|^2$  เท่ากับ -0.53 dB, -1.09 dB และ -0.74 dB ตามลำดับและพบค่า  $|S_{21}|^2$  ต่ำที่สุดที่ความถี่ 2.62 GHz โดยมีค่าเท่ากับ -2.83 dB



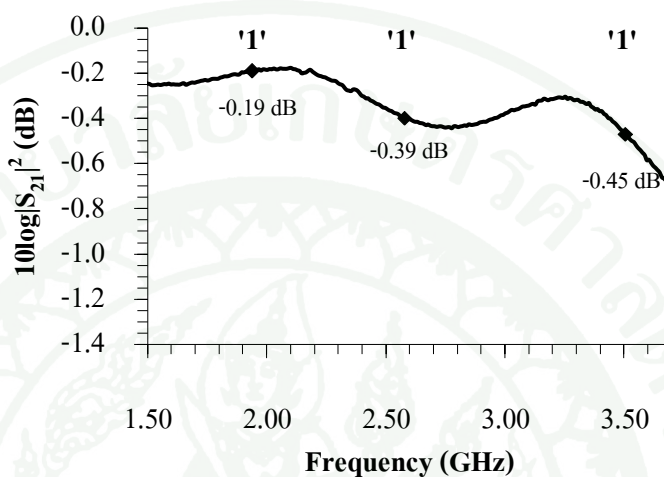
ภาพที่ 45 ผลการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ '101'

ผลการวัดมัลติรีโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะที่แสดงลักษณะเฉพาะ '110' แสดงในภาพที่ 46 พบว่าความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz มีค่า  $|S_{21}|^2$  เท่ากับ -0.41 dB, -1.01 dB และ -1.99 dB ตามลำดับ โดยมีค่า  $|S_{21}|^2$  ต่ำที่สุดที่ความถี่ 3.56 GHz เท่ากับ -6.13 dB



ภาพที่ 46 ผลการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ '110'

ผลการวัดมัลติรีโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะที่แสดงลักษณะเฉพาะ '111' แสดงในภาพที่ 47 พบว่าความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz มีค่า  $|S_{21}|^2$  เท่ากับ -0.19 dB, -0.39 dB และ -0.45 dB ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าที่ความยาว 90 mm มีค่าความสูญเสียของสายนำสัญญาณ เท่ากับ -0.19 dB หรือ 2.11 dB/m ที่ความถี่ 1.94 GHz



ภาพที่ 47 ผลการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ '111'

ทั้งนี้ขีดแบ่ง (Threshold) ถูกกำหนดมาเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการกำหนดลักษณะเฉพาะของสัญญาณซึ่งควรมีความแตกต่างกันระหว่างตรรกะ '0' และ '1' มาก และควรออกแบบให้มีค่าขอบว่าง (margin) สูง สำหรับการกำหนดตรรกะซึ่งได้จากการวิเคราะห์ค่า  $|S_{21}|^2$  เปรียบเทียบกันจากทั้งหมด 8 มัลติรีโซเนเตอร์ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งจะพิจารณาจากบิตที่มีค่า  $|S_{21}|^2$  มากที่สุดในบรรดาชิ้นงานทั้ง 8 ชิ้นเป็นขีดแบ่ง ของตรรกะ '0' และในทางกลับกันบิตที่มีค่า  $|S_{21}|^2$  น้อยที่สุดจะถูกกำหนดเป็นขีดแบ่งของตรรกะ '1' และจากผลการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ของมัลติรีโซเนเตอร์ทั้ง 24 บิตในชิ้นงานทั้ง 8 ชิ้นที่ความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz พบว่าขีดแบ่งของตรรกะ '0' มีค่าเท่ากับ -0.77 dB และขีดแบ่งของตรรกะ '1' มีค่าเท่ากับ -1.01 dB ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการแปรรหัสข้อมูลเนื่องจากค่าขีดแบ่งของตรรกะ '0' และ '1' มีค่าซ้อนทับกันซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการนำมากำหนดรหัสสัญญาณ ยกตัวอย่างชิ้นงานที่กำหนดให้แสดงลักษณะเฉพาะ '010' และ '110' โดยชิ้นงาน '010' อาจแปรรหัสข้อมูลลักษณะเฉพาะผิดพลาดเป็น '110' ได้ โดยพบว่าในบิต 2 ได้ ที่ความถี่ 1.94 GHz ซึ่งควรแสดงลักษณะเฉพาะเป็นตรรกะ '0' อาจถูกแปรรหัสเป็นตรรกะ '1' ได้ เพราะค่า  $|S_{21}|^2$  ที่วัดได้มีค่ามากกว่าขีดแบ่งของตรรกะ '1' ในทำนองเดียวกันกับชิ้นงาน '110' ในบิตที่ 1 ที่ความถี่ 2.58 GHz ซึ่งควรเป็นตรรกะ '1' อาจมีการแปรรหัสข้อมูลผิดพลาดเป็นตรรกะ '0' ได้ เนื่องจากค่า  $|S_{21}|^2$  มีค่าน้อยกว่าขีดแบ่งตรรกะ '0' อาจถูกแปรรหัสผิดพลาดเป็น '100' ได้

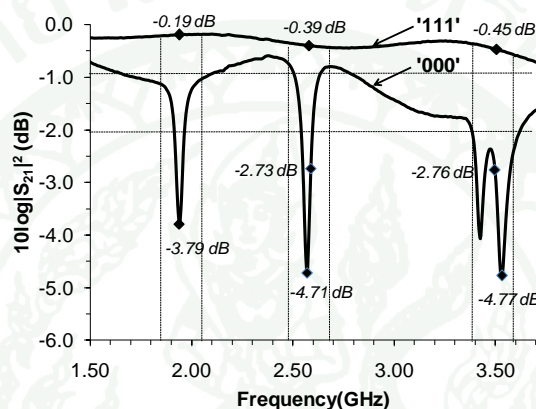
ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาการแปรข้อมูลผิดพลาด จึงได้กำหนดลักษณะเฉพาะโดยพิจารณาค่า  $|S_{21}|^2$  ภายในแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในช่วงความถี่  $\pm 100$  MHz แทนการพิจารณาค่า  $|S_{21}|^2$  เฉพาะที่ความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz โดยตรง เพื่อให้ค่าขอบว่างมีค่ามากขึ้นและแก้ปัญหาการแปรข้อมูลผิดพลาด ดังนั้นช่วงความถี่ที่ใช้เพื่อกำหนดลักษณะเฉพาะสำหรับตรรกะ '0' หรือ '1' ที่บิต 2, 1 และ 0 จึงอยู่ในช่วงความถี่ 1.84 - 2.04 GHz, 2.48 - 2.68 GHz และ 3.39 - 3.59 GHz ตามลำดับ โดยผลสรุปของค่า  $|S_{21}|^2$  ที่วัดในช่วงความถี่ต่างๆถูกแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งพบว่าในช่วงแบนด์วิดท์  $\pm 100$  MHz ค่า  $|S_{21}|^2$  มากสุดที่กำหนดเป็นขีดแบ่งของตรรกะ '0' มีค่าเท่ากับ -2.77 dB และค่า  $|S_{21}|^2$  ต่ำสุดที่กำหนดเป็นขีดแบ่งของตรรกะ '1' มีค่าเท่ากับ -0.92 dB โดยมีขอบว่าง (margin) เท่ากับ 1.85 dB

ตารางที่ 9 สรุปผลการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ที่ใช้ในการกำหนดลักษณะเฉพาะ '0' และ '1' โดยการพิจารณาที่ความถี่  $\pm 100$  MHz ของความถี่ทำการที่ออกแบบ

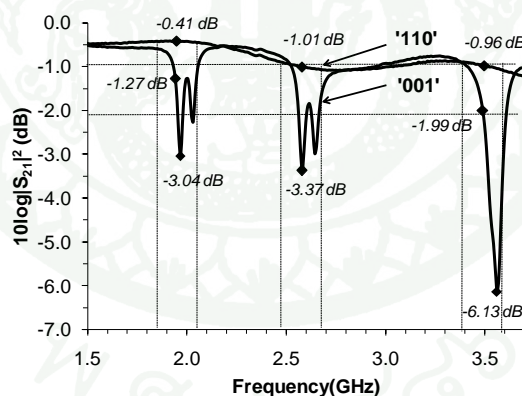
Identity	Bit 2		Bit 1		Bit 0	
	$ S_{21} ^2$ (dB)	Frequency (GHz)	$ S_{21} ^2$ (dB)	Frequency (GHz)	$ S_{21} ^2$ (dB)	Frequency (GHz)
000	-3.78	1.94	-4.72	2.57	-4.77	3.53
001	-3.04	1.96	-3.37	2.58	-0.89	3.39
010	-2.77	1.98	-0.92	2.49	-5.11	3.54
011	-6.46	1.96	-0.87	2.49	-0.83	3.54
100	-0.53	2.03	-3.97	2.61	-5.93	3.56
101	-0.49	2.02	-2.83	2.62	-0.70	3.39
110	-0.41	1.91	-0.90	2.48	-6.13	3.56
111	-0.17	2.03	-0.34	2.49	-0.35	3.39

ทั้งนี้สามารถแสดงค่า  $|S_{21}|^2$  ของมัลติรีโซเนเตอร์ที่แสดงลักษณะเฉพาะ '000' ถึง '111' ที่พิจารณาในช่วงความถี่  $\pm 100$  MHz ดังแสดงในภาพที่ 48(ก) ถึง ภาพที่ 48(ง) พบว่าค่า  $|S_{21}|^2$  ที่ต่ำที่สุดของมัลติรีโซเนเตอร์ซึ่งถูกกำหนดให้แสดงตรรกะ '0' มีค่า  $|S_{21}|^2$  ต่ำสุดคลาดเคลื่อนไปจากที่ออกแบบไว้ที่ความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz แต่เมื่อพิจารณาค่า  $|S_{21}|^2$  ที่วัดได้ต่ำสุด พบว่ายังคงอยู่ในช่วงความถี่  $\pm 100$  MHz ในทุกมัลติรีโซเนเตอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น ถึงแม้ว่าการกำหนด

ลักษณะเฉพาะเพื่อให้มัลติรีโซเนเตอร์สามารถแสดงลักษณะเฉพาะได้ถูกต้องต้องใช้การพิจารณาในช่วงความถี่  $\pm 100$  MHz จากความถี่ที่ทำการออกแบบซึ่งอาจเป็นข้อด้อย แต่วิธีนี้สามารถเพิ่มขอบข่ายของระดับสัญญาณค่า  $|S_{21}|^2$  ที่แสดงตรรกะ '0' หรือ '1' เพื่อใช้กำหนดลักษณะเฉพาะให้มีโอกาสผิดพลาดน้อยลงได้ ซึ่งความถูกต้องของข้อมูลถือเป็นสิ่งสำคัญในการเข้ารหัสข้อมูล ดังนั้นการพิจารณาค่าความถี่ในช่วง  $\pm 100$  MHz จึงเป็นวิธีที่สามารถแก้ปัญหาความผิดพลาดในการแสดงลักษณะเฉพาะของมัลติรีโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปที่ถูกประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเต็มจนเต็มในงานวิจัยนี้ได้เป็นอย่างดี



(ก)



(ข)

ภาพที่ 48 ผลของค่า  $|S_{21}|^2$  ที่วัดได้จากมัลติรีโซเนเตอร์ที่ถูกประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเต็มจนเต็มโดย

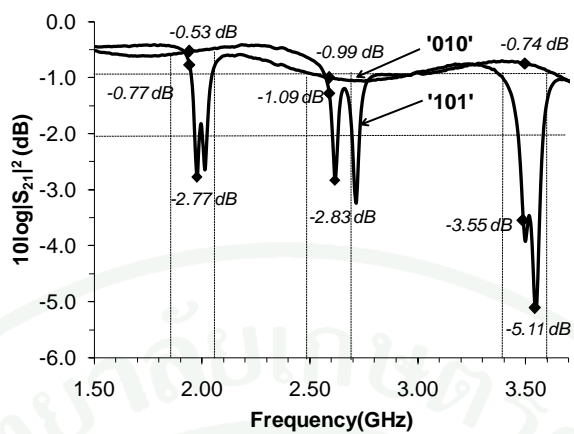
ใช้การพิจารณาในช่วงความถี่  $\pm 100$  MHz จากความถี่ที่ทำการออกแบบ

(ก) มัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ '000' และ '111'

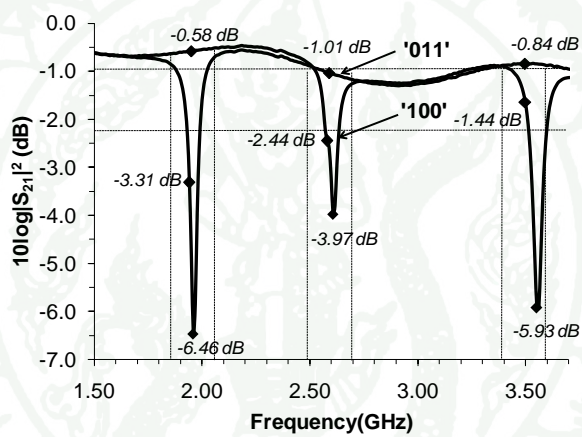
(ข) มัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ '001' และ '110'

(ค) มัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ '010' และ '101'

(ง) มัลติรีโซเนเตอร์ที่ระบุลักษณะเฉพาะ '011' และ '100'



(ก)



(ง)

ภาพที่ 48 (ต่อ)

## วิจารณ์

เนื่องจากการวิจัยนี้ได้วัดประสิทธิภาพของสายอากาศของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID Tag) และมัลติรีโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิป (Chipless RFID Tag) โดยอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดถูกประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็ม แต่เนื่องจากมีวิธีการทดสอบประสิทธิภาพแตกต่างกันดังนั้นจึงสามารถแบ่งการพิจารณาผลการวัดได้ดังต่อไปนี้

สำหรับการพิจารณาค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งที่ได้ประดิษฐ์ด้วยสายอากาศชนิดไดโพล (Dipole) และสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสตัปปรับแต่ง (Dipole with tuning stub) โดยทำการเปรียบเทียบผลการวัดค่าระยะอ่านได้สูงสุดจากแบบจำลองกับผลการวัดค่าระยะอ่านของชิ้นงานจริงด้วยเทคนิคการวัด 2 วิธี ได้แก่ วิธีคงระยะขณะปรับระดับสัญญาณ (Fixed distance) และวิธีปรับระยะ (Varied distance) ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการวัดค่าระยะอ่านของป้ายระบุลักษณะที่มีสายอากาศชนิดไดโพลดังแสดงในภาพที่ 39 พบว่าที่ความถี่ 922.5 MHz ซึ่งใช้กำลังส่งออกสมมูลแบบไอโซโทรปิกของเครื่องอ่าน (EIRP) เท่ากับ 4 วัตต์ ค่าระยะอ่านได้จากการวัดของป้ายระบุลักษณะทั้ง 2 วิธีมีค่าแตกต่างจากค่าระยะอ่านได้จากการออกแบบ โดยค่าระยะอ่านได้จากแบบจำลอง ( $r_s$ ) มีค่าเท่ากับ 6.74 m ระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะที่วัดด้วยวิธีคงระยะขณะปรับสัญญาณ ( $r_{m\_fixed}$ ) และวิธีปรับระยะ ( $r_{m\_varied}$ ) มีค่าเท่ากับ 8.65 m และ 7.77 m ตามลำดับ เช่นเดียวกับป้ายระบุลักษณะที่ประดิษฐ์ด้วยสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสตัปปรับแต่งมีค่าระยะอ่านได้จากแบบจำลอง ( $r_s$ ) เท่ากับ 8.53 m ระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะที่วัดด้วยวิธีคงระยะขณะปรับระดับสัญญาณ ( $r_{m\_fixed}$ ) และวิธีปรับระยะ ( $r_{m\_varied}$ ) มีค่าเท่ากับ 7.56 m และ 9.01m ตามลำดับ แต่เนื่องจากค่าระยะอ่านได้จากการวัดชิ้นงานจริงมีค่ามากกว่าค่าระยะอ่านที่ออกแบบดังนั้นจึงถือว่าความคลาดเคลื่อนของระยะอ่านที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของป้ายระบุลักษณะ ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากขั้นตอนการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลอง เนื่องจากค่าตัวแปรที่สำคัญที่ใช้กำหนดในโปรแกรมจำลอง ได้แก่ค่าแทนเจนต์ความสูญเสีย (Loss tangent,  $\tan\delta$ ) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon$ ) ของฉนวนซึ่งเป็นค่าที่ได้จากบทความทางวิชาการ โดยได้วัดค่าจากวัสดุที่ใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ความคลาดเคลื่อนของตัวแปรเหล่านี้ อาจส่งผลให้การออกแบบคลาดเคลื่อนจากความจริง นอกจากนี้สาเหตุของความคลาดเคลื่อนอีกประการหนึ่งอาจเกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ของชิปที่กำหนดในโปรแกรมจำลองมีค่าแตกต่างจากค่าจริง เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ค่าอิมพีแดนซ์และพลังงานขีดเริ่มต่ำสุดของชิปจากบทความทางวิชาการที่รายงานการวัดค่าอิมพีแดนซ์และพลังงาน

ขีดเริ่มต่ำสุดของชิปรุ่นเดียวกับที่ใช้ในการวิจัยที่วัดที่ความถี่ 900 MHz ไม่ใช่ผลที่ได้จากการวัดชิปที่ใช้จริง ซึ่งชิปแต่ละตัวอาจมีค่าอิมพีแดนซ์และพลังงานขีดเริ่มต่ำสุดคลาดเคลื่อนกันไปเล็กน้อยได้

นอกจากนี้ค่าสภาพต้านทานเชิงผิว (sheet resistivity,  $\rho_s$ ) ของหมึกตัวนำ ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศด้วยแบบจำลองอาจมีค่าแตกต่างจากค่าจริง เนื่องจากค่าสภาพต้านทานเชิงผิวที่ใช้ในการออกแบบด้วยโปรแกรมจำลองในงานวิจัยนี้วัดด้วยเครื่องมือ Four-point probe โดยชิ้นงานมีขนาดเท่ากับ  $1 \times 1$  ตารางเซนติเมตร เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับเครื่องมือวัดซึ่งแตกต่างจากขนาดของสายอากาศที่ออกแบบจริง ทำให้ค่าเฉลี่ยของสภาพต้านทานเชิงผิวที่จุดต่างๆของชิ้นงานอาจแตกต่างจากค่าจริงของสายอากาศ นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนของค่าสภาพต้านทานเชิงผิวอาจเกิดจากคุณสมบัติทางกายภาพของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ เนื่องจากหมึกนำไฟฟ้าที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้มีน้ำเป็นตัวทำละลาย การระเหยของตัวทำละลายอาจทำให้ความเข้มข้นของหมึกเปลี่ยนแปลงไปได้เล็กน้อย

เมื่อพิจารณาผลการวัดค่าระยะอ่านของป้ายระบุลักษณะที่มีสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสลับปรับแต่ง ดังแสดงในภาพที่ 40 พบว่าที่ความถี่ 922.5 MHz ค่าระยะอ่านได้จากการวัดของป้ายระบุลักษณะทั้ง 2 วิธีมีค่าแตกต่างจากค่าระยะอ่านได้จากการออกแบบ โดยค่าระยะที่อ่านได้ของป้ายระบุลักษณะที่วัดด้วยวิธีคงระยะขณะปรับระดับสัญญาณ ( $r_{m\_fixed}$ ) มีค่าเท่ากับ 7.56 m ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าระยะอ่านจากโปรแกรมจำลอง ( $r_c$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.52 m ซึ่งอาจเกิดจากกำลังส่งของเครื่องอ่านมีค่าลดลงเนื่องจากการสูญเสียทางความร้อนของอุปกรณ์ นอกจากนี้ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการวัดค่าระยะอ่านอีกประการหนึ่งที่ส่งผลต่อระยะอ่านของป้ายระบุลักษณะได้แก่สภาพแวดล้อมขณะทำการวัดเนื่องจากไม่ได้ทำการวัดในโพรงไร้เสียงสะท้อนกลับ (anechoic chamber) จึงอาจเกิดสัญญาณรบกวนขณะทำการวัดได้

จากผลการทดลองพบว่าค่าระยะอ่านได้ของการวัดทั้ง 2 วิธีคือวิธีคงระยะขณะปรับระดับสัญญาณ ( $r_{m\_fixed}$ ) และวิธีปรับระยะ ( $r_{m\_varied}$ ) มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งระยะอ่านที่ได้จากป้ายระบุลักษณะที่มีสายอากาศชนิดไดโพล มีระยะอ่านเมื่อวัดด้วยวิธีคงระยะขณะปรับระดับสัญญาณมากกว่าระยะอ่านที่วัดด้วยวิธีปรับระยะประมาณ 0.88 m แต่ในขณะที่สายอากาศชนิดไดโพลที่มีสลับปรับแต่งมีค่าระยะอ่านที่วัดด้วยวิธีปรับระยะมากกว่าวิธีคงระยะขณะปรับระดับสัญญาณ 1.45 m ซึ่งจากภาพที่ 40 พบว่าเส้นแสดงระยะอ่านที่วัดได้ด้วยวิธีปรับระยะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อวัดที่ความถี่มากกว่า 922.5 MHz ซึ่งสาเหตุความผิดปกตินี้อาจเป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสภาพแวดล้อมที่ไม่ได้ทำการวัดในโพรงไร้เสียงสะท้อนกลับอีกประการหนึ่ง

เมื่อพิจารณาผลการจำลองค่า  $|S_{21}|^2$  ของมัลติรีโซเนเตอร์ของปายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปที่แสดงลักษณะเฉพาะ ‘000’ ถึง ‘111’ ด้วยโปรแกรมจำลองดังแสดงในตารางที่ 7 เปรียบเทียบกับผลการทดสอบประสิทธิภาพของมัลติรีโซเนเตอร์ด้วยการวัดค่า  $|S_{21}|^2$  ของชิ้นงานจริงดังแสดงผลดังภาพที่ 41 ถึงภาพที่ 48 โดยพบว่ามัลติรีโซเนเตอร์สำหรับปายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปมีค่า  $|S_{21}|^2$  สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ความถี่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากค่าตัวแปรแทนเจตต์ความสูญเสียของซัสเตรต (แผ่นเทฟลอน) ที่กำหนดในแบบจำลองกับค่าตัวแปรแทนเจตต์ความสูญเสียของซัสเตรตที่ใช้จริงมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากแผ่นเทฟลอนที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นเทฟลอนที่เคลือบสารพิเศษบนผิวเพื่อให้มีกนำไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างลวดลายสามารถยึดติดบนผิวซัสเตรตได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าจากบทความทางวิชาการที่มีการรายงานค่าแทนเจตต์ความสูญเสียของแผ่นเทฟลอนชนิดที่ใกล้เคียงกับแผ่นเทฟลอนที่เลือกใช้ในงานวิจัย ซึ่งอาจคลาดเคลื่อนจากค่าแทนเจตต์ความสูญเสียจริงของซัสเตรตที่เลือกใช้

ปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของมัลติรีโซเนเตอร์ของปายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปคือความคลาดเคลื่อนของระยะห่าง  $g$  ระหว่างสายนำสัญญาณและรีโซเนเตอร์แต่ละชุด ซึ่งจากโปรแกรมจำลองพบว่าระยะห่างระหว่างรีโซเนเตอร์และสายนำสัญญาณยิ่งน้อยยิ่งทำให้มัลติรีโซเนเตอร์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่เนื่องจากขีดความละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้และสมบัติทางกายภาพของหน้ากาสตึกเกอร์ พบว่าหากออกแบบให้มีระยะห่าง  $g$  น้อยกว่า 1 mm จะทำให้ความคลาดเคลื่อนของผลการวัดจริงและโปรแกรมจำลองมีค่ามากขึ้น ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจึงได้ทำการออกแบบให้มีระยะห่างที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีเดิมจนเต็ม ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกออกแบบขนาดเท่ากับ 1 mm และเพื่อคำนึงถึงความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากแบบของมัลติรีโซเนเตอร์มีขนาดเล็ก ได้สร้างแผ่นโลหะลวดลายตามที่ออกแบบในโปรแกรมแบบจำลองเพื่อใช้เป็นแบบในการกำหนดลวดลายของสติกเกอร์ นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนของขนาดความกว้างของสายนำสัญญาณอาจส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าคลาดเคลื่อนจากที่ออกแบบคือ  $50 \Omega$  ซึ่งจะส่งผลให้การวัดประสิทธิภาพของมัลติรีโซเนเตอร์มีค่าลดลง ทั้งนี้สาเหตุความคลาดเคลื่อนอีกประการหนึ่งที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของความกว้างของสายนำสัญญาณอาจเกิดจากขั้นตอนการบัดกรีเชื่อมต่อกอนเนคเตอร์เอสเอ็มเอ (SubMiniature version A, SMA) บริเวณส่วนปลายทั้ง 2 ด้านของสายนำสัญญาณ เนื่องจากหมึกนำไฟฟ้ามีการหลอมละลายบางส่วนในขณะที่เชื่อมต่อกอนเนคเตอร์เอสเอ็มเอเพราะหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ไม่สามารถทนความร้อนโดยตรงจากอุปกรณ์สำหรับบัดกรีได้ โดยในอนาคตอาจปรับปรุงวิธีการเชื่อมต่อกอนเนคเตอร์เอสเอ็มเอด้วยกาวอีพ็อกซีชนิดทนความร้อนสูงเท่ากับความร้อนที่ใช้ในการอบได้

เมื่อพิจารณาผลของค่าของมัลติรีโชนเตอร์ที่แสดงลักษณะเฉพาะ '000' ดังแสดงในภาพที่ 41 พบว่าความถี่ของ  $|S_{21}|^2$  ที่ถูกกรองออกด้วยรีโชนเตอร์ชุดต่างๆมีค่าคลาดเคลื่อนจากที่ออกแบบ โดยงานวิจัยนี้ออกแบบให้มัลติรีโชนเตอร์กรองสัญญาณความถี่ที่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz ตามลำดับ แต่จากภาพที่ 41 พบการกรองสัญญาณบิตที่ 2 และ 1 ที่ความถี่ 1.94 GHz และ 2.57 GHz ตามลำดับ เมื่อพิจารณาบิตที่ 0 พบว่ามีการกรองสัญญาณความถี่ 2 ความถี่ด้วยกันคือ 3.43 GHz และ 3.58 GHz ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนของความยาวของมัลติรีโชนเตอร์ที่ออกแบบ จำนวน 2 ชุดที่ขนานอยู่ทั้งสองด้านของสายนำสัญญาณมีความยาวไม่เท่ากัน

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าความสูญเสียของสายนำสัญญาณในแบบจำลองและมัลติรีโชนเตอร์ที่ถูกประดิษฐ์พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.38 dB/m และ 2.11 dB/m ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอันเป็นมาจากค่าตัวแปรที่กำหนดในแบบจำลองและวัสดุจริงมีค่าแตกต่างกันดังเช่นค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของหมึก ( $\rho$ ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของฉาบสเตรต ( $\epsilon$ ) ค่าแทนเจนต์ความสูญเสียของฉาบสเตรต ( $\tan \delta$ ) นอกจากนี้ความสูญเสียที่บริเวณขั้วของคอนเนคเตอร์เอสเอ็มเออาจส่งผลให้ค่าความสูญเสียของสายนำสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นจากแบบจำลอง

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

งานวิจัยที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการเทคโนโลยีการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยมุ่งเน้นให้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานน้อย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถประดิษฐ์ด้วยวัสดุที่หาได้ง่าย มีกระบวนการขั้นตอนไม่ยุ่งยากซับซ้อน และใช้อุปกรณ์ที่มีราคาต่ำบำรุงรักษาต่ำ เพื่อให้สามารถนำไปปรับปรุงพัฒนาสำหรับเป็นเทคโนโลยีทางเลือกหนึ่งในการประดิษฐ์ลวดลายวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับประดิษฐ์ลวดลายวงจรในปัจจุบันมีราคาแพงและไม่เป็นการสะดวกสำหรับหน่วยงานหรือมหาวิทยาลัยที่มีข้อจำกัดเรื่องงบประมาณสนับสนุนงานวิจัย ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอเทคโนโลยีการประดิษฐ์ลวดลายชั้นสารตัวนำของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเทคโนโลยีเติมจนเต็ม (Fill until Full, FuF) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีจุดเด่นในการกำหนดความหนาของชั้นสารตัวนำได้ตามต้องการโดยการกำหนดปริมาณสารตัวนำและความสูงของหน้ากาก ซึ่งความสามารถในการกำหนดปริมาณสารตัวนำที่ใช้ในเทคโนโลยีนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมที่ใช้สารตัวนำราคาแพงในการประดิษฐ์และช่วยลดของเสียที่เกิดจากการบวนการผลิต ทั้งนี้งานวิจัยนี้ทดสอบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีด้วยการประดิษฐ์ขึ้นส่วนอุปกรณ์การสื่อสารระยะใกล้โดยมุ่งเน้นศึกษาการประดิษฐ์สายอากาศสำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID Tag) และมัลติรีโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิป (Multiresonator Chipless RFID Tag) ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย

จากการศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุและมัลติรีโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปที่ประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเติมจนเต็ม พบว่างานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการค้นคว้าเทคโนโลยีการผลิตลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์และขึ้นส่วนอุปกรณ์สื่อสารไร้สายในเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีด้วยเทคโนโลยีเติมจนเต็ม โดยวัสดุอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมในการศึกษาพัฒนาเทคโนโลยีเติมจนเต็มเพื่อการประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย เครื่องดูดจ่ายสารละลาย (micropipette) สำหรับกำหนดปริมาณสารตัวนำและหยดสารตัวนำลงบนซับสเตรตที่มีความละเอียดสูง ไม่ต้องการพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องดูดจ่ายสารละลายที่เลือกใช้งานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำขนาด 2-20  $\mu\text{l}$  รุ่น LM20 สารตัวนำที่เลือกใช้งานวิจัยนี้คือ หมึกนำไฟฟ้าที่มีสารตัวนำคืออนุภาคโลหะเงิน รุ่น 118-29 มีค่าความหนืดต่ำกว่า 100 cP สามารถคงสภาพและคุณสมบัติต่างๆ ไว้ได้ในระหว่างการผลิต มีความนำไฟฟ้าสูง

โดยวัสดุสำหรับใช้เป็นหน้ากากเพื่อกำหนดความหนาของชั้นสารตัวนำเลือกใช้สติกเกอร์พีวีซีใส เนื่องจากสามารถทนความร้อนและความชื้นได้ดีมีความหนาคงที่

ทั้งนี้ชั้นสเตรตที่เลือกใช้สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง คือ แผ่นใส เนื่องจากใช้ในการบวนการผลิตที่ใช้สารตัวนำเป็นของเหลวจึงต้องการชั้นสเตรตที่มีคุณสมบัติทนความร้อนได้ดีและสามารถทนความร้อนจากการอบที่อุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ชั้นสเตรตที่เลือกใช้สำหรับการประดิษฐ์มัลติรีโซเนเตอร์ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุคือ แผ่นเพฟลอน เพราะนอกจากมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็มแล้วยังมีค่าแทนเจนต์ความสูญเสียต่ำเป็นผลให้มัลติรีโซเนเตอร์ที่ประดิษฐ์มีประสิทธิภาพดีขึ้น

กระบวนการประดิษฐ์ลวดลายชั้นสารตัวนำด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็มเริ่มต้นจากการตัดสติกเกอร์ให้ตรงตามทีออกแบบด้วยโปรแกรมจำลองเพื่อใช้เป็นหน้ากาก จากนั้นติดสติกเกอร์บนชั้นสเตรตแล้วเติมหมึกนำไฟฟ้าที่มีการกำหนดปริมาณจากขนาดและความหนาของชั้นสารตัวนำที่ต้องการ โดยความหนาที่เหมาะสมของชั้นสารตัวนำถูกกำหนดด้วยค่าระยะลึกเชิงผิว ซึ่งควรมีความหนาเท่ากับ 5 เท่าของระยะลึกเชิงผิว และเนื่องจากตัวทำละลายของหมึกจะระเหยหลังจากผ่านการอบสารตัวนำด้วยความร้อน ทำให้หมึกมีความหนาลดลงจากเดิม งานวิจัยนี้จึงชดเชยปริมาณหมึกภายหลังการอบในปริมาณ 5.88 เท่า และพบว่าความหนาของหมึกภายหลังการอบมีค่าประมาณ 80  $\mu\text{m}$  ซึ่งมากกว่าความหนาของหมึกที่ต้องการ แต่ทั้งนี้จากการศึกษาในโปรแกรมจำลองพบว่าความหนาที่เกินจากการออกแบบไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของป้ายระบุลักษณะ และการอบสารตัวนำด้วยความร้อนภายหลังการหยดหมึกลงในหน้ากากถือเป็นขั้นตอนสำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของหมึกนำไฟฟ้าให้มีสภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้น โดยใช้เตาอบลมร้อนอบที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที

ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุโดยทั่วไป ประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วนได้แก่ ชิปและสายอากาศ โดยชิปทำหน้าที่เก็บข้อมูลเพื่อใช้ระบุลักษณะเฉพาะ ทั้งนี้ในงานวิจัยเลือกใช้ชิปรุ่น UCODE G2XL โดยมีช่วงความถี่ทำงานที่ครอบคลุมย่านความถี่ 922-925 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ประกาศสำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กทช.) อนุญาตให้ใช้กับระบบอาร์เอฟไอดีในประเทศไทย โดยสายอากาศสำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้มี 2 ประเภท ได้แก่สายอากาศชนิดไดโพลและสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสลับปรับแต่ง และการตรวจวัดประสิทธิภาพของป้ายระบุลักษณะทำได้โดยการวัดค่าระยะอ่านได้ของป้ายโดยใช้วิธีการวัด 2 วิธีได้แก่ วิธีคงระยะขณะปรับระดับสัญญาณ (Fixed distance) และวิธี

ปรับระยะ (Varied distance) โดยจากผลการทดสอบพบว่าป้ายระบุลักษณะที่ออกแบบด้วยสายอากาศทั้ง 2 ชนิดมีค่าระยะอ่านได้ใกล้เคียงกับที่ออกแบบด้วยโปรแกรมจำลอง โดยประสิทธิภาพของป้ายระบุลักษณะที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถเทียบเท่ากับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านสูงซึ่งที่มีจำหน่ายในทั่วไปที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ประดิษฐ์มัลติรีโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิป ออกแบบโดยใช้มัลติรีโซเนเตอร์รูปทรงก้นหอย และกำหนดความถี่ที่ต้องการกรองด้วยความยาวของรีโซเนเตอร์ โดยออกแบบมัลติรีโซเนเตอร์จำนวน 3 บิต ให้มีการกรองสัญญาณความถี่ที่ 1.94 GHz, 2.58 GHz และ 3.49 GHz และกำหนดลักษณะเฉพาะจากค่า  $|S_{21}|^2$  ซึ่งทำการวัดด้วยเครื่องมือวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ และผลการทดสอบพบว่ามัลติรีโซเนเตอร์สามารถระบุลักษณะเฉพาะตรงตามที่ออกแบบในช่วงความถี่  $\pm 100$  MHz โดยมีขีดแบ่งตรรกะ '0' เท่ากับ -2.77 dB และขีดแบ่งของตรรกะ '1' เท่ากับ -0.92 dB โดยมีขอบว่าง (margin) เท่ากับ 1.85 dB โดยสามารถแสดงลักษณะเฉพาะได้ทั้งสิ้น 8 ลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน ได้แก่ '000', '001', '010', '011', '100', '101', '110' และ '111' ซึ่งถือว่าประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์มัลติรีโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็ม

สำหรับราคาต้นทุนที่ใช้ในการประดิษฐ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุและมัลติรีโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้คำนวณจากปริมาณของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ในการประดิษฐ์ด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็มและราคาของวัสดุตรงพบว่าราคาต้นทุนในการประดิษฐ์สายอากาศของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุมีราคาเมื่อเทียบกับเงินตราสหรัฐประมาณ \$0.35-0.48 ขึ้นอยู่กับรูปแบบของสายอากาศ โดยต้นทุนของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นวิทยุที่มีสายอากาศชนิดไดโพลมีราคาต้นทุนประมาณ \$0.35 และป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นวิทยุที่มีสายอากาศชนิดไดโพลที่มีสลับปรับแต่งมีราคาต้นทุนประมาณ \$0.48 นอกจากนี้ราคาต้นทุนของมัลติรีโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปมีราคาเฉลี่ย \$0.8 ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของมัลติรีโซเนเตอร์ ยกตัวอย่างเช่นมัลติรีโซเนเตอร์ที่แสดงลักษณะเฉพาะ '111' มีราคาต้นทุนเท่ากับ \$0.46 และมัลติรีโซเนเตอร์ที่แสดงลักษณะเฉพาะ '000' มีราคาต้นทุนเท่ากับ \$1.28 ทั้งนี้ราคาต้นทุนการผลิตต่อชิ้นของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปในอุตสาหกรรมปัจจุบันเท่ากับ \$0.1 ซึ่งมีราคาถูกกว่าเนื่องมาจากในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มีการผลิตในปริมาณมาก อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีเดิมจนเต็มสามารถปรับปรุงเทคโนโลยีให้มีราคาถูกลงได้เมื่อซื้อวัสดุในปริมาณมาก

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเทคโนโลยีเดิมจนเต็มเพื่อการประดิษฐ์ชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำการศึกษาวิจัยครั้งนี้มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในหน่วยงานที่ทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยเรื่องป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อใช้ในการประยุกต์สร้างชิ้นงานต้นแบบในงานวิจัยที่สามารถปรับปรุงแก้ไขได้ในระหว่างการผลิต เนื่องจากเทคโนโลยีเดิมจนเต็มเป็นเทคโนโลยีที่มีความยืดหยุ่นสูงและสามารถช่วยลดขั้นตอนการผลิตรวมทั้งใช้อุปกรณ์ราคาถูกลง ซึ่งส่งผลให้การศึกษาวิจัยในเรื่องเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีได้รับความสะดวกยิ่งขึ้น

### ข้อเสนอแนะ

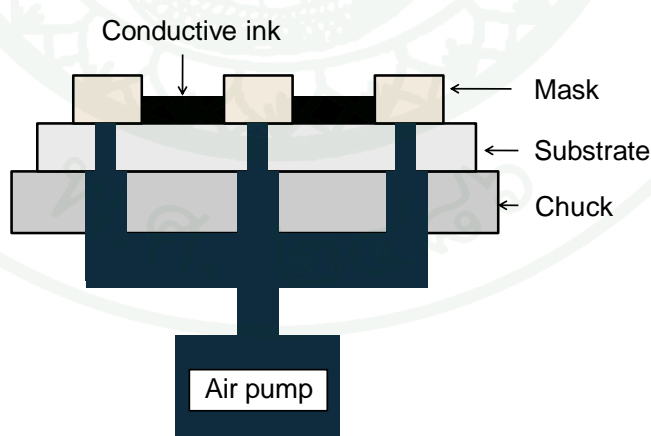
จากผลการศึกษาพัฒนาและประเมินผลงานวิจัย ผู้วิจัยขอเสนอแนะแนวทางที่คาดว่าจะเป็นที่ประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุและมัลติรีโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้ พบว่ามีความแตกต่างจากผลการจำลองในโปรแกรมจำลอง สาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากค่าตัวแปรของซัพสเตรตและชิปอาร์เอฟไอดีที่กำหนดในโปรแกรมจำลองและค่าตัวแปรที่ใช้จริงมีความแตกต่างกัน โดยค่าตัวแปรที่กำหนดในโปรแกรมจำลองในงานวิจัยนี้ได้แก่ ค่าแทนเจนต์ความสูญเสีย ( $\text{loss, tangent, } \tan \delta$ ) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\text{dielectric constant, } \epsilon_r$ ) ค่าอิมพีแดนซ์ของชิป ( $\text{chip impedance, } Z_c$ ) ค่าพลังงานขีดเริ่มต่ำสุดของชิปอาร์เอฟไอดี ( $\text{minimum operating power, } P_{in}$ ) เลือกใช้ค่าอ้างอิงจากบทความทางวิชาการ ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากตัวแปรเหล่านี้ควรวัดค่าที่แท้จริงของซัพสเตรตและชิปอาร์เอฟไอดีเพื่อกำหนดใช้ในงานวิจัยต่อไป

2. เทคโนโลยีเดิมจนเต็มที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยฉบับนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างลวดลายของชั้นสารตัวนำสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการขั้นตอนกระบวนการไม่ซับซ้อน มีค่าบำรุงรักษาต่ำ สามารถจัดทำด้วยอุปกรณ์และวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายและเหมาะสมสำหรับงานประดิษฐ์ลวดลายชั้นสารตัวนำที่ไม่ต้องการความละเอียดสูง และสามารถเพิ่มความเร็วในกระบวนการผลิตโดยการเลือกใช้อุปกรณ์ชุดจ่ายสารละลายที่ใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากสามารถกำหนดปริมาณของสารที่ใช้ในการประดิษฐ์ได้ล่วงหน้าจึงสามารถช่วยลดระยะเวลาในการเตรียมสารซึ่งจะส่งผลให้สามารถประดิษฐ์ชิ้นงานได้อย่างสะดวกรวดเร็วมากขึ้น

3. จากขั้นตอนการสร้างลวดลายชั้นสารตัวนำด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็มพบว่าขั้นตอนการเติมหมึกลงบนชั้นสเตรตด้วยอุปกรณ์ฉีดจ่ายสารละลายซึ่งใช้การดูดหมึกจากตลับหมึกซึ่งมีความถี่ในการดูดหมึกจำนวนมาก และเนื่องจากหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้มีตัวทำละลายที่ระเหยและแยกชั้นได้ง่าย ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของหมึกนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้สภาพต้านทานเชิงผิว (sheet resistance,  $\rho_s$ ) ของสายอากาศที่ประดิษฐ์ขึ้นแตกต่างจากในแบบจำลอง ดังนั้นเพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้จึงควรเลือกใช้หมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ตัวทำละลายที่ระเหยและแยกชั้นได้ยากเพื่อคงคุณสมบัติทางไฟฟ้าให้คงที่ทั้งยังเป็นการลดปริมาณการใช้หมึกนำไฟฟ้าลง เนื่องจากไม่จำเป็นต้องชดเชยปริมาณหมึกที่ลดลงภายหลังจากผ่านการอบสารตัวนำด้วยความร้อน

4. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุและมัลติรีโซเนเตอร์สำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปด้วยเทคโนโลยีเดิมจนเต็มแสดงให้เห็นว่ามีปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบจริงและผลจากโปรแกรมจำลองคือขนาดมิติของชั้นสารตัวนำที่คลาดเคลื่อนไปจากที่ออกแบบ ซึ่งเกิดจากขีดจำกัดของการสร้างหน้ากากของลวดลายชั้นสารตัวนำในเทคโนโลยีเดิมเต็ม เนื่องจากเทคโนโลยีเดิมเต็มที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นใช้วัสดุที่มีราคาถูกลงและสามารถจัดหาได้ง่ายเพื่อใช้ในการประดิษฐ์ ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากหน้ากากที่ใช้ในเทคโนโลยีเดิมเต็ม ควรปรับปรุงกลไกการกำหนดลวดลายของชั้นสาร ดังเช่น การใช้แรงลมดูดอากาศเพื่อสร้างแรงยึดติดระหว่างหน้ากากและชั้นสเตรตแทนการใช้สติกเกอร์ใส ดังแสดงในภาพที่ 49



ภาพที่ 49 แนวทางการปรับปรุงระบบของเทคโนโลยีเดิมเต็มโดยการใช้แรงลมดูดอากาศ

5. เพื่อให้สามารถนำมัลติโรโซนเตอร์ที่ออกแบบสำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุชนิดไร้ชิปสามารถใช้งานได้จริงควรนำไปประยุกต์ใช้โดยการติดตั้งกับสายอากาศซึ่งยังไม่ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัยนี้เพื่อให้สามารถรับและส่งสัญญาณของมัลติโรโซนเตอร์ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้น โดยสายอากาศที่ออกแบบควรสามารถรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุในช่วงที่ครอบคลุมคลื่นความถี่ที่ใช้กำหนดลักษณะเฉพาะของมัลติโรโซนเตอร์ ทั้งนี้ในอนาคตยังสามารถพัฒนาวงจรสำหรับใช้ในการตรวจวัดลักษณะเฉพาะของป้ายระบุลักษณะ เพื่อให้สามารถใช้งานได้สะดวก รวดเร็วมากยิ่งขึ้น และนอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการระบุลักษณะเฉพาะให้สามารถระบุข้อมูลได้จำนวนหลายบิตโดยการเพิ่มชุดของมัลติโรโซนเตอร์ให้มากขึ้น และนอกจากนี้ยังสามารถลดขนาดของมัลติโรโซนเตอร์ให้มีขนาดเล็กลงได้โดยใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon$ ) สูงขึ้น

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

รัชชัย บุญช่วยชีพ. 2553. **RFID**. ส่วนประกอบของ RFID. แหล่งที่มา :

<http://www.xsense.co.th/gps/ส่วนประกอบของ-rfid>, 25 ธันวาคม 2553

เบญญา เขิดหิรัญกร. 2550. เอกสารประกอบการบรรยายวิชา **Smart materials**.

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2550

ราชกิจจานุเบกษา. 2551. ประกาศคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เล่ม 125 ตอนพิเศษ

11 ง. หน้า 1

ปาริชาติ ศรีธนาวุฒิ. 2553. เทคโนโลยีการพิมพ์ที่จัดหาได้สำหรับการใช้งานด้านการสื่อสาร  
ระยะใกล้ที่แพร่หลาย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2548. เทคโนโลยี**RFID**. RFID Simulation. แหล่งที่มา

: <http://cpe.kmutt.ac.th/previousproject/2005/13/RFIDTechno.html>, 3 มกราคม 2554

วัชรกร หนูทอง และ อนุกุล น้อยไม้. 2553. **RFID** เทคโนโลยีอัจฉริยะ (ตอนที่ 1). แหล่งที่มา :

<http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=11946&section=9&rcount=Y>, 8

มกราคม 2554

สถาบันส่งเสริมความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีแห่งประเทศไทย. 2554. องค์ประกอบของ

ระบบ **RFID**. มาตรฐาน RFID. แหล่งที่มา: [http://www.rfid.or.th/th/technology/component.](http://www.rfid.or.th/th/technology/component.asp)

asp, 11 มกราคม 2554.

Balbin, I. and N. Karmakar. 2009. Novel chipless RFID tag for conveyor belt tracking using multi-resonant dipole antenna, pp. 1109 – 1112. *In European Microwave Conference*

**2009**. Rome, Italy.

Bancroft, R. 2009. **Microstrip and printed antenna design**. 2<sup>nd</sup> ed, Scitech publishing, Inc. USA.

Burnikell, J. 2009. **S-parameter an introduction**. Available Source: [www.polarinstruments.com](http://www.polarinstruments.com), 5 January 2011.

Creative Materials Inc. n.d. **Data Sheets**. Available Source: <http://www.creativematerials.com/datasheets.html>, 11 Jan 2010.

Finkenzeller, K. 2003. **Fundamentals and Application in Contactless Smart Cards and Identification**. RFID Handbook John Wiley & Sons, Inc., USA.

Hall, S.H., H.L. Heck. 2009. **Advance Signal Integrity for High-Speed Digital Design**. John Wiley & Son, Inc.

Hirano, T. 2003. **Radiation Pattern of a Dipole Antenna As a Function of Dipole Length**. Available Source: <http://www-antenna.ee.titech.ac.jp/~hira/hobby/edu/em/dipole/index.html>, 5 February 2011

Liu, M., M.L. Zhou, L.H. Zhai, D.M. Liu, X. Gao and W. Liu. 2003. A newly designed ultrasonic spray pyrolysis device to fabricate YBCO tapes. **Physica C** 386(2003): 366–369.

Machado, G.A.S. 1996. **Low-power HF microelectronics a unified approach**. Circuits and system series 8.

Nikitin, P. V., K. V. S. Rao, R. Martinez and S. F. Lam. 2009. Sensitivity and Impedance Measurements of UHF RFID chips. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques** 57(5, part 2): 1297 – 1302.

- Nikitin, P. V., S. Lam and K. V. S. Rao. 2005. Low Cost Silver Ink RFID Tag Antennas, pp. 353-356. *In Antennas and Propagation Society International Symposium 2005*. Washington, D.C., USA.
- NXP Semiconductors. **Datasheet**. Ultra high frequency smart label ICs. Available Source:[http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/SL3ICS1002\\_1202\\_139036.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/SL3ICS1002_1202_139036.pdf). 11 January 2011.
- Polanco, R., P. Miranzo and M.I. Osendi. 2006. Fabrication and microstructure of a ZrO<sub>2</sub>-Ni functionally graded bonding interlayer using the airbrush spraying method. **Acta Materialia** 54(2006): 2215–2222.
- Poynting Antenna (Pty) Ltd. n.d. **Datasheet**. Circular Patch Antenna: PATCH-A0025. Available Source: [www.poynting.co.za](http://www.poynting.co.za), 16 February 2010.
- Pozar, D. M. 2005. **Microwave Engineering**. 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Pranonsatit, S., P. Sritanavut and D. Worasawate. 2009. RFID tag antenna utilizing ink-jet printing technology, pp. 883-6. *In The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation*. Bangkok, Thailand.
- Preradovic, S., I. Balbin, N. C. Karmakar and G. F. Swiegers. 2009. Multiresonator-based chipless RFID system for low-cost item tracking. **IEEE Microwave Theory and Techniques**. vol. 57.
- Preradovic, S. and N.C. Karmakar. 2010. Design of chipless RFID tag for operation on flexible laminates. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett.** pp. 207 – 210.
- Preradovic, S., N.C. Karmakar and I. Balbin. 2008. RFID transponders. **IEEE Microw. Mag.**, vol. 9. no. 5. pp. 90–103.

Rao, K.V.S., P.V. Nikitin and S. F. Lam. 2005. Antenna Design for UHF RFID Tags : a Review and a Practical Application. **IEEE Transactions on Antennas Propagation** 53(12): 3870–3876.

Reichardt, L., G. Adamiuk, G. Jereczek and T. Zwick. 2009. Chipless RFID systems for car-to-infrastructure communication, pp. 1-5. *In* **IEEE Communications Workshops**. Capetown, South Africa.

Steirer, K.X., J.J. Berry, M.O. Reese, M.F.A.M. van Hest, A. Miedaner, M.W. Liberatore, R.T. Collins and D.S. Ginley. 2009. Ultrasonically sprayed and inkjet printed thin film electrodes for organic solar cells. **Thin Solid Films** 517(2009): 2781–2786.

Zhang, Y., C. Liu and D. Whalley. 2009. Direct-write techniques for maskless production of microelectronics: a review of current state-of-the-art technologies, pp. 497 503. *In* **Electronic Packaging Technology & High Density Packaging**. Beijing, China.

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวพิมพ์ศิริพร นาคเจริญ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	18 มิถุนายน พ.ศ. 2529
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์อิเล็กทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-