



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง เทคโนโลยีการพิมพ์ที่จัดหาได้สำหรับการใช้งานด้านการสื่อสารระยะใกล้ที่แพร่หลาย
Affordable Printing Technology for Ubiquitous Short-range Communication
Applications

นามผู้วิจัย นางสาวปาริชาติ ศรีธนาวุฒิ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์สุนทร พรานนทีสถิตย์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เด่นชัย วรเสวต, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สืบสินธุ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

เทคโนโลยีการพิมพ์ที่จัดหาได้สำหรับการใช้งานด้านการสื่อสารระยะใกล้ที่แพร่หลาย

Affordable Printing Technology for Ubiquitous Short-range Communication Applications

โดย

นางสาวปาริชาติ ศรีชนาวุฒิ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปาริชาติ ศรีธนาวุฒิ 2553: เทคโนโลยีการพิมพ์ที่จัดทำได้สำหรับการใช้งานด้านการสื่อสารระยะใกล้
ที่แพร่หลาย ปรินตูปริวรรคศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์สุเนตร พรานนทีสถิตย์, Ph.D. 82 หน้า

เนื่องจากการสร้างลายวงจรในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและ
สิ้นเปลืองเวลา จึงทำให้เกิดความสนใจในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตลายวงจรที่ไม่ยุ่งยาก เป็นมิตรต่อ
สิ่งแวดล้อม และสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ หนึ่งในเทคโนโลยีนั้นคือการพิมพ์ด้วยระบบอิงค์เจ็ท (inkjet)
ซึ่งเป็นวิธีการสร้างลายวงจรด้วยขั้นตอนเดียว คือการพิมพ์ลายของวัสดุสารตัวนำไฟฟ้าลงบนซับสเตรตโดยตรง
ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทที่ใช้ในสำนักงานเพื่อพิมพ์ชิ้นส่วนของอุปกรณ์
อิเล็กทรอนิกส์ โดยเน้นไปที่การผลิตสายอากาศของวงจรป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง
(UHF RFID tag) วัตถุประสงค์หลักคือการนำเสนอและตรวจสอบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการพิมพ์ผ่าน
ชิ้นงานที่ได้ผลิตขึ้น

ทั้งนี้ได้พิจารณาเลือกใช้หมึกนำไฟฟ้าโลหะเงินที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตรเป็นสารตัวนำ และใช้
กระดาษเป็นซับสเตรต แบบจำลองความถี่สูงถูกใช้เพื่อออกแบบให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่สั่งพิมพ์จาก
เครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทมีความเหมาะสมกับชิปอาร์เอฟไอดีที่ความถี่กลางในช่วงความถี่ที่อนุญาตให้ใช้ใน
ประเทศไทยซึ่งคือ 922.5 MHz โดยได้ศึกษาสายอากาศรูปแบบต่างๆ ซึ่งทั้งหมดถูกสั่งพิมพ์ซ้ำจำนวน 5 ครั้ง และ
อบในเตาอบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นป้ายระบุลักษณะจะถูกผลิตขึ้นด้วยการติดตั้ง
สายอากาศเข้ากับชิป โดยชี้วัดประสิทธิภาพของชิ้นงานจากค่าระยะที่อ่านได้ของป้าย ซึ่งแปลงจากกำลังงานของ
วิธีคงระยะทาง (fixed distance) ในช่วงความถี่ 840-950 MHz จากการทดสอบพบว่า จำนวนครั้งที่สั่งพิมพ์,
อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศที่ได้ผลิตขึ้น

ทั้งนี้สายอากาศแบบขด Meandered และไดโพลที่มีสตัปปรับแต่ง (Dipole with tuning stub) มีค่าระยะ
อ่านได้สูงสุดประมาณ 13 เมตรที่ความถี่ 922.5 MHz และมีความใกล้เคียงกับผลของแบบจำลองที่ความถี่อื่นๆ
ในขณะที่สายอากาศแบบไดโพล (Dipole) และแบบแผ่น (Patch) เหมาะสมสำหรับใช้งานในช่วงความถี่สากล
และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับป้ายระบุลักษณะที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่างานวิจัยนี้
ประสบความสำเร็จในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตด้วยการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท โดยนำเสนอผ่านประสิทธิภาพของ
ชิ้นงานป้ายระบุลักษณะที่ผลิตขึ้น ซึ่งสามารถส่งเสริมการขยายตัวด้านการใช้งานของอุปกรณ์สื่อสารระยะใกล้ให้
กว้างขวางได้ และเทคโนโลยีนี้ยังเป็นประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัยและหน่วยงานวิจัย เพราะสามารถนำไปใช้ในการ
ประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบขึ้นได้โดยง่ายและหลากหลาย

Parichart Sritanavut 2010: Affordable Printing Technology for Ubiquitous Short-range Communication Applications. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Ms. Suneat Pranonsatit, Ph.D. 82 pages.

The conventional industrial fabrication process of electronic circuits is considered complicated and time-consuming. Therefore, there are interests in developing alternative technologies with simplicity, environmental friendliness and cost effectiveness. One of promising technologies is the adaptation of the ordinary inkjet printing. This technology employs a direct-write method, in which the circuits are made on substrates in a single step. This research project is focused on the adaptation of commercially available inkjet printers for electronic device fabrication. In particular, the technology is demonstrated through UHF Radio Frequency Identification (RFID) tags. The proposed technology is verified through the performance of the fabricated devices.

Nano-particle silver ink and paper were chosen as conductive material and substrate, respectively. The high frequency model simulator was employed in designing several types of printed antennas. Specifically, the impedances of the antennas and RFID chip should be matched, at the allocated frequency in Thailand, i.e. at 922.5 MHz center frequency. All antennas were printed 5 times and cured at 150°C for 30 minutes in a vacuum oven. Then, the RFID tags were produced by attaching antennas to RFID chips. The tag's reading distance is the indicated performance and was translated from measured power in the fixed distance method between 840-950 MHz. It is shown that number of prints, curing time and temperature had effects on the tag performances.

The measured reading distances of meander and dipole with tuning stub antennas are maximum at almost 13 m at 922.5 MHz. At other frequencies, the reading ranges are comparable to simulation results. It is also found that dipole and patch antennas are suitable for international frequency ranges. And their performances are similar to commercially available UHF RFID tags. In conclusions, this research project has been successfully developed an alternative inkjet printing technique and demonstrated through antennas of RFID tags. More importantly, the technology will help expand the applications of ubiquitous short-range communications. In addition, universities and research institutions can be benefited from this research project as the developed process can be simply employed in fabricating various designed electronic devices.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อ. ดร. สุเนตร พรานนท์สถิตย์ และ ผศ. ดร. เด่นชัย วรเสวต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนและมอบความรู้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ข้าพเจ้าขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม (สพท.) สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เป็นอย่างสูงสำหรับการสนับสนุนเงินทุนในการดำเนินงานวิจัย (สัญญารับทุนเลขที่ 2551/008) ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) และห้องวิจัยร่วมทางโทรคมนาคมอิเล็กทรอนิกส์และระบบสมองกลฝังตัว ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (NTC Telecommunication Research Laboratory) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวัดประสิทธิภาพของสายอากาศ อีกทั้งขอขอบคุณบริษัท NXP Semiconductors (Thailand) Ltd. ที่เอื้อเฟื้อชิปอาร์เอฟไอดีเพื่อใช้ในการผลิตป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ รวมทั้งขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC), ฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับความอนุเคราะห์ในการตรวจวัดคุณสมบัติของชิ้นงานที่จัดทำขึ้นในการวิจัยในครั้งนี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ ตลอดจนเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ายินดีรับข้อเสนอแนะ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ปาริชาติ ศรีธนาวุฒิ

มีนาคม 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	25
อุปกรณ์	25
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์	54
ผล	54
วิจารณ์	65
สรุปและข้อเสนอแนะ	69
สรุป	69
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	74
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลยี Auto-ID ประเภทต่างๆ	12
2 ตารางแสดงย่านความถี่ในการใช้งานสำหรับเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี	17
3 ตารางคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้ารุ่น silverjet DGP-40LT-15C	28
4 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของ XRAG2 และ UCODE G2XL	30
5 ตารางผลของความหนาและความต้านทานเชิงผิวของลายพิมพ์ เปรียบเทียบกับจำนวนครั้งที่พิมพ์	38
6 ตารางเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงผิวของลายพิมพ์ที่อบและไม่ได้อบ	43
7 ตารางผลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและระยะอ่านได้สูงสุดจากแบบจำลอง ของสายอากาศทั้ง 3 แบบ	44
8 ตารางผลของความต้านทานเชิงผิวที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาที่ใช้ในการอบ ในเตาสูญญากาศ	49
9 ตารางความคลาดเคลื่อนของขนาดลายพิมพ์ที่เกิดจากการสั่งพิมพ์ 1 ครั้ง ด้วยเครื่องพิมพ์และโปรแกรมต่างๆ	51
10 ตารางผลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าระยะอ่านได้ของสายอากาศ ที่ได้จากการออกแบบ	54
11 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์สายอากาศ ด้วยกระบวนการต่างกัน	63
12 สรุปค่าระยะอ่านได้จากโปรแกรมจำลองและการทดลองของปายระบุลักษณะ ที่ผลิตขึ้นด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท	64

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท	7
2 เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทแบบ Continuous	7
3 เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทแบบ Drop-on-Demand	8
4 เทคนิคการพิมพ์แบบ Thermal	9
5 เทคนิคการพิมพ์แบบ Piezoelectric	10
6 เทคโนโลยี Auto-ID ที่มีใช้ในปัจจุบัน	11
7 องค์ประกอบของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี	14
8 (ก) โครงสร้างภายในของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (ข) ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุรูปแบบต่างๆ	15
9 หลักการทำงานของป้ายระบุลักษณะในย่านความถี่ต่างๆ	18
10 (ก) องค์ประกอบภายในของเครื่องอ่าน (ข) เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีรูปแบบต่างๆ	20
11 (ก) เครื่องพิมพ์รุ่น T11 (ข) เทคนิคการพิมพ์ระบบ piezoelectric	26
12 หมึกนำไฟฟ้ารุ่น Silverjet DGP-40LT-15C	27
13 โครงสร้างภายในของชิปอาร์เอฟไอดี	29
14 ลักษณะของชิป UCODE G2XL ตามมาตรฐาน TSSOPS	31
15 (ก) โครงสร้างสายอากาศแบบไดโพล (ข) รูปแบบการแผ่กระจายสัญญาณของสายอากาศแบบไดโพล	34
16 โครงสร้างของสายอากาศ (ก) Meandered dipole (ข) Dipole (ค) Dipole with tuning stub (ง) Patch antenna	35
17 ลายพิมพ์ของสายอากาศจากการสั่งพิมพ์ 1 ครั้ง	38
18 สายอากาศแบบ Meandered dipole ที่ได้ออกแบบ	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	เนื้อหา	หน้า
19	กราฟแสดงผลการออกแบบสายอากาศแบบ meandered dipole ที่ความถี่ต่างๆ (ก) ระยะที่สามารถอ่านค่าได้ (ข) สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของกำลังงาน	39
20	(ก) ชี้นงานสายอากาศแบบ meandered dipole ที่สั่งพิมพ์ลงบน กระดาษและประกอบเข้ากับชิป (ข) เครื่องอ่าน ที่ใช้ในการตรวจวัดค่าระยะอ่านได้	40
21	กราฟแสดงค่าระยะที่สามารถอ่านได้เทียบกับความถี่	40
22	กราฟแสดงค่าความขรุขระและความหนาที่เปลี่ยนแปลง ต่อจำนวนครั้งในการสั่งพิมพ์	41
23	รายละเอียดคุณลักษณะของลายพิมพ์ที่ตรวจวัดจากเครื่อง step profiler	42
24	ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID tag) ที่ได้จากการสั่งพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท	44
25	วิธีการวัดระยะที่อ่านได้ของสายอากาศ (ก) และ (ข) วิธีการวัดแบบ fixed distance (ค) ตัวลดทอนสัญญาณ (attenuator)	46
26	กราฟเปรียบเทียบผลของค่าระยะอ่านได้จากการทดลองกับโปรแกรมจำลอง ของวงจรป้ายระบุลักษณะทั้ง 3 แบบ (ก) Dipole (ข) Dipole with tuning stub (ค) Meandered dipole	47
27	(ก) เตาอบลมร้อน (convection oven) (ข) เตาอบสุญญากาศ (vacuum oven)	48
28	เครื่องพิมพ์รุ่น R230	50
29	กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดลายพิมพ์ที่เปลี่ยนแปลง ต่อจำนวนครั้งที่สั่งพิมพ์ ระหว่างเครื่องพิมพ์รุ่น T11 และ R230 ที่มีวิธีการป้อนกระดาษต่างกัน	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	ไดเรกทิวิตีและอัตรากาขยที่ได้จากการออกแบบเทียบกับการกระจายคลื่นเชิงมุมของสายอากาศทั้ง 4 แบบ	55
31	รายละเอียดสายอากาศที่ออกแบบและชิ้นงานป้าระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ได้จากการสังพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท (หน่วย: มิลลิเมตร)	
	(ก) Dipole	
	(ข) Dipole with tuning stub	
	(ค) Meandered dipole	
	(ง) Patch antenna	57
32	กราฟเปรียบเทียบผลของค่าระยะอ่านได้จากผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองของป้าระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Dipole	58
33	กราฟเปรียบเทียบผลของค่าระยะอ่านได้จากผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองของป้าระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Dipole with tuning stub	
	(ก) สายอากาศที่สังพิมพ์ขนาดปกติ	
	(ข) สายอากาศที่สังพิมพ์แบบปรับขนาด	59
34	กราฟเปรียบเทียบผลของค่าระยะอ่านได้จากผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองของป้าระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ meandered dipole	
	(ก) ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 900 MHz	
	(ข) ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 922.5 MHz	60
35	กราฟเปรียบเทียบผลของค่าระยะอ่านได้จากผลการทดลองกับโปรแกรมจำลองของป้าระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ patch antenna	
	(ก) ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 922.5 MHz	
	(ข) ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 950 MHz	61
36	กราฟเปรียบเทียบผลของค่าระยะอ่านได้จากการทดลองในห้องที่มีสัญญาณเข้ามาได้และใน anechoic chamber ที่ PTEC ของป้าระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Meandered dipole ร่วมกับผลที่ได้จากโปรแกรมจำลอง	62

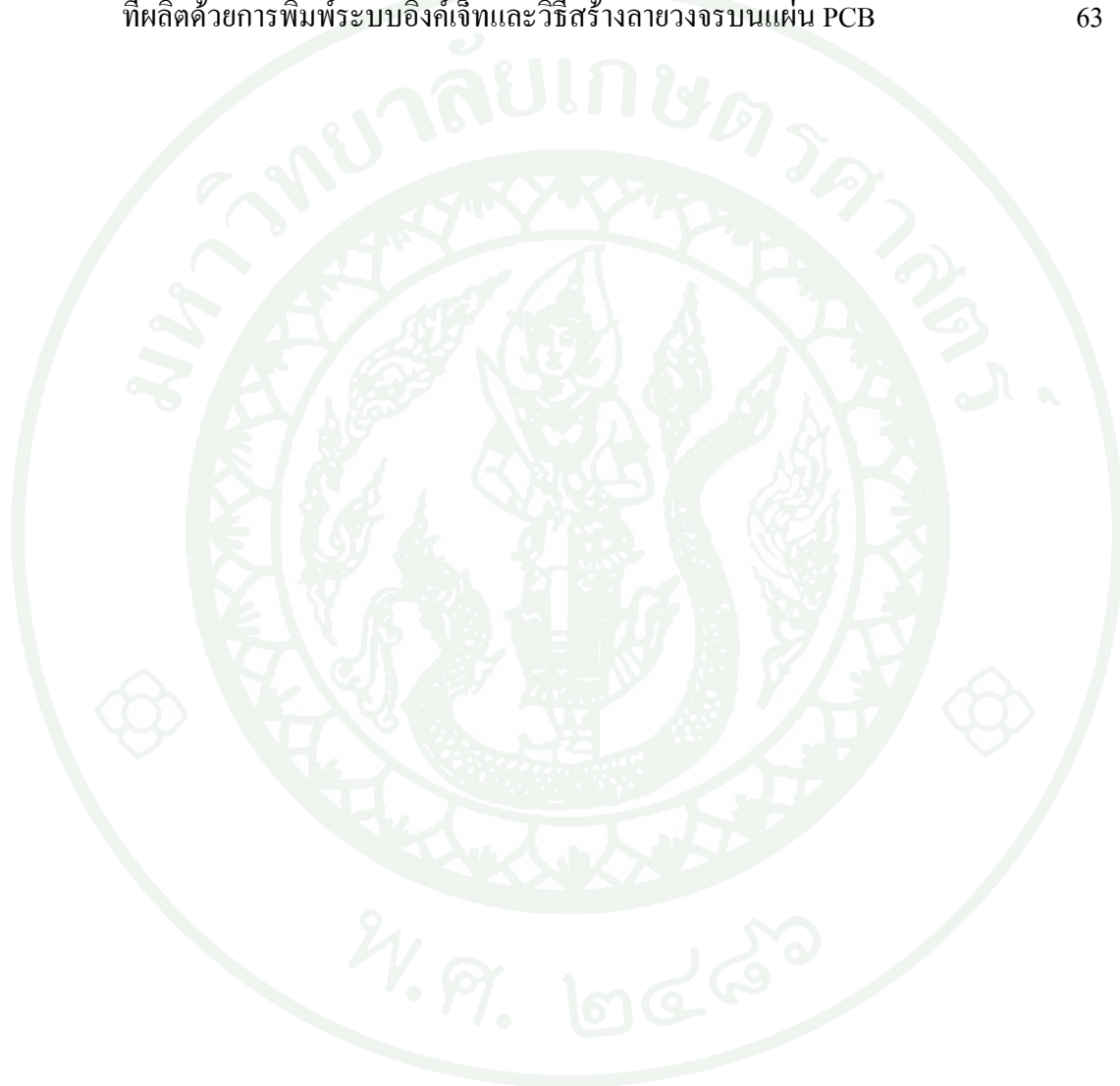
สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 37 กราฟเปรียบเทียบผลค่าระยะอ่านได้ของสายอากาศแบบ Meandered dipole
ที่ผลิตด้วยการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทและวิธีสร้างลายวงจรบนแผ่น PCB

63



เทคโนโลยีการพิมพ์ที่จัดหาได้สำหรับการใช้งาน ด้านการสื่อสารระยะใกล้ที่แพร่หลาย

Affordable Printing Technology for Ubiquitous Short-range Communication Applications

คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารระยะใกล้ได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวันมากขึ้น ตัวอย่างที่สำคัญคือเทคโนโลยีการระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency Identification) หรืออาร์เอฟไอดี (RFID) ที่ได้มีการนำเอาเทคโนโลยีนี้มาเพิ่มความสามารถ ความสะดวกสบาย ความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ ดังเห็นได้จากการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้นี้ร่วมกับเทคโนโลยีตัวรับรู้ในการใช้งานต่างๆ เช่น ด้านการขนส่ง ด้านความปลอดภัยในอุตสาหกรรมรถยนต์ ได้แก่ การควบคุมการเคลื่อนที่อย่างช้าๆ (cruise control) การส่งสัญญาณเมื่อมีอุบัติเหตุ หรือภาวะฉุกเฉิน รวมไปถึงการรักษาคุณภาพอาหาร ได้แก่ ผลผลิตทางการเกษตร การปศุสัตว์ การประมง เป็นต้น ทั้งนี้เทคโนโลยีการผลิตอุปกรณ์สื่อสารของเทคโนโลยีการระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุถือเป็นปัจจัยสำคัญที่จะช่วยพัฒนาและส่งเสริมการขยายการใช้งานของอาร์เอฟไอดี เพราะเป็นขั้นตอนที่จะส่งผลต่อต้นทุน ทั้งจากส่วนของเครื่องมือ รวมไปถึงวัสดุ ดังนั้นหากพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตสิ่งประดิษฐ์และอุปกรณ์ของการสื่อสารระยะใกล้ให้มีขั้นตอนการผลิตที่สะดวกรวดเร็ว ขั้นตอนไม่ซับซ้อน และเชื่อถือได้ จะถือเป็นการเพิ่มศักยภาพของการวิจัยพัฒนาและส่งเสริมการใช้งานได้

แนวคิดหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้กับการผลิตวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนประกอบวงจรเพื่อการสื่อสารระยะใกล้คือการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท (inkjet) กับวัสดุที่มีความนำทางไฟฟ้า ซึ่งเทคโนโลยีนี้สามารถใช้กับการพิมพ์เพื่อสร้างลายวงจรไฟฟ้าลงบนซับสเตรตได้หลากหลาย นอกจากนี้เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท ยังสามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว เหมาะแก่การงานวิจัยและพัฒนาที่ต้องตรวจสอบการออกแบบ และการผลิตสิ่งประดิษฐ์ต้นแบบที่ได้จากแบบจำลองอีกด้วย เมื่อพิจารณาการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตร่วมกับการขยายตัวของการใช้งานด้านการสื่อสารไร้สายของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี จึงพบว่ามี ความเหมาะสมที่จะนำเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต

อุปกรณ์สื่อสารไร้สาย เพราะสามารถลดขั้นตอนในกระบวนการผลิต ลดวัตถุดิบและต้นทุนในการผลิต รวมไปถึงลดปริมาณกากของเสียที่เกิดจากการใช้สารเคมีอีกด้วย

จากเหตุผลข้อได้เปรียบในเรื่องราคา ความรวดเร็ว และการปรับใช้ได้กับความต้องการอันหลากหลายของเทคโนโลยีการผลิตด้วยการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่มุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตวงจรและส่วนประกอบคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการใช้ในงานศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์สื่อสารระยะใกล้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งเมื่อประสบความสำเร็จจะสามารถเป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายได้



วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค้นคว้า วิจัยเทคโนโลยีการพิมพ์สารตัวนำด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท สำหรับใช้ในงานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าเพื่อการประดิษฐ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของวงจรในการสื่อสารแบบไร้สาย ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยสามารถแจกแจงวัตถุประสงค์หลักได้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท สำหรับพิมพ์สารตัวนำไฟฟ้า
2. เพื่อค้นคว้าวัสดุและอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสม กับเทคโนโลยีการผลิตด้วยการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท โดยคุณสมบัติของวัสดุและอุปกรณ์ที่เลือกใช้ คือ จัดหาได้ง่าย ราคาถูก ต้นทุนในการผลิตต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
3. เพื่อประดิษฐ์ส่วนประกอบวงจรของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อสาธิตประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการผลิตที่ได้ศึกษาและวิจัย
4. เพื่อนำเสนอเทคโนโลยีการผลิตลายวงจรและชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน สามารถลดเวลาที่ใช้ในการผลิต และราคาต้นทุนต่ำ เหมาะสมสำหรับมหาวิทยาลัยหรือหน่วยงานวิจัยที่มีข้อจำกัดเรื่องงบประมาณสนับสนุนงานวิจัย

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีและแนวความคิด

1. เทคโนโลยีการผลิตในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการสร้างลายวงจรไฟฟ้าบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board, PCB) โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนด้วยกันคือการปลูก (deposit) การขึ้นลวดลาย (photolithography) และการกัด (etching) โดยวิธีการเหล่านี้จะใช้อุปกรณ์อันประกอบไปด้วย เครื่องมือสำหรับการปลูก, หน้ากาก (mask), น้ำยาไวแสง (photoresist), เครื่องมือฉายแสง และสารเคมีหรือเครื่องมือที่ใช้ในการกัดอื่นๆ ซึ่งในระหว่างการผลิตด้วยวิธีการเหล่านี้ สารตัวนำไฟฟ้าบนชั้นสเตรต จะถูกปลูกและกัดให้เป็นลวดลายวงจรตามรูปแบบของหน้ากากที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นชั้นสเตรตที่ใช้จึงต้องมีคุณสมบัติทนต่อการกัดของสารเคมีได้ ทำให้มีข้อจำกัดในแง่ของชนิดชั้นสเตรตที่จะนำมาใช้ผลิตลายวงจรไฟฟ้าด้วยวิธีการนี้ (Bjorninen *et al.*, 2009) ยิ่งไปกว่านั้น เทคโนโลยีการผลิตนี้ถูกจัดอยู่ในกลุ่ม subtractive technique ซึ่งเป็นวิธีการที่มีขั้นตอนการผลิตซับซ้อนและสิ้นเปลือง เนื่องจากต้องดำเนินการหลายขั้นตอนเพื่อที่จะสร้างลวดลายวงจรบนชั้นสารตัวนำไฟฟ้าแต่ละชั้น นอกจากนั้นกระบวนการ deposit, lithography และ etching ยังอาจก่อให้เกิดมลพิษและขยะสารเคมีอีกด้วย จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้เกิดความสนใจในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตลายวงจรไฟฟ้า ที่เป็นเทคนิคการผลิตแบบ additive technique ซึ่งมีลักษณะเป็นกระบวนการผลิตที่สะดวกและรวดเร็ว ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

หนึ่งในเทคโนโลยีทางเลือกสำหรับ additive technique ที่น่าสนใจที่สุดทางเลือกหนึ่งคือ เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท (inkjet) เนื่องจากในเทคโนโลยีนี้กระบวนการพิมพ์สารตัวนำลงบนชั้นสเตรตจะทำเพียงขั้นตอนเดียว (direct-write methodologies) (Lee *et al.*, 2005) ซึ่งจะทำให้กระบวนการผลิตลายวงจรไฟฟ้าสะดวกและรวดเร็วขึ้น การนำเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท มาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “Printable Electronics” (Nishi, 2007) สำหรับข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าเทคโนโลยีการผลิตในกลุ่มการผลิตแบบ subtractive technique นอกเหนือจากที่กล่าวมาข้างต้นในเชิงต้นทุนและวิธีการ เทคโนโลยีการผลิตด้วยการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท ถือได้ว่าเป็นกระบวนการผลิตไร้แม่พิมพ์ (maskless production) ที่สามารถตอบสนองการผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้หลากหลาย และสามารถ

ปรับใช้กับกระบวนการผลิตที่ต้องการชิ้นงานจำนวนน้อยได้ มากไปกว่านั้นยังเป็นกระบวนการผลิตแบบ real-time ที่สามารถตรวจสอบได้ระหว่างกระบวนการ และสั่งพิมพ์ลายวงจรไฟฟ้าที่ต้องการจากไฟล์ร่างของภาพจากโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ (เช่น CAD file) ได้โดยตรงโดยไม่ต้องการอุปกรณ์พิเศษใดๆเพิ่มเติม (Mei *et al.*, 2005)

2. ปัจจัยสำคัญสำหรับการผลิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท

จากข้อได้เปรียบของกระบวนการผลิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทเหล่านี้ จึงทำให้เกิดแนวคิดในการนำเทคโนโลยีนี้ มาประยุกต์ใช้กับกระบวนการในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนของอุปกรณ์การสื่อสารไร้สาย นั่นคือ ป้ายระบุสัญลักษณ์ด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID tag) ในส่วนของการผลิตสายอากาศของวงจรป้ายระบุสัญลักษณ์ เนื่องจากขั้นตอนของการผลิตสายอากาศด้วยการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทนี้ มีวิธีการที่ง่ายและสามารถลดขั้นตอนในการผลิตลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตสายอากาศของป้ายด้วยเทคโนโลยีอื่นๆ สำหรับปัจจัยสำคัญของกระบวนการผลิตอุปกรณ์สื่อสารคลื่นความถี่วิทยุด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท คือ หมึกนำไฟฟ้า และซับสเตรต

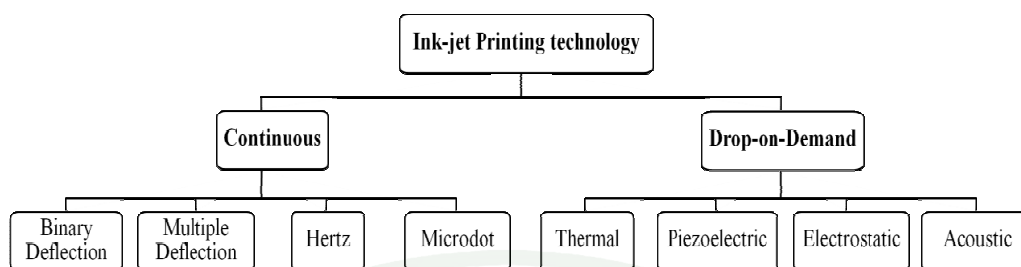
ในส่วนของหมึกนำไฟฟ้าที่นิยมใช้และสามารถหาได้ทั่วไปมีอยู่ 2-3 ชนิด ส่วนมากจะเป็นหมึกนำไฟฟ้าที่มีอนุภาคโลหะเป็นเงินหรือทองแดง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างเงินและทองแดงแล้ว ทองแดงจะมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าสูงกว่า แต่ราคาค่อนข้างสูง และสำหรับเงิน ถึงแม้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าไม่มาก แต่ราคาไม่แพงและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการพิมพ์ที่สามารถจัดหาได้บนซับสเตรตแบบบางได้ (Nikitin *et al.*, 2005) เมื่อพิจารณาในส่วนของหมึกนำไฟฟ้าที่มีคุณลักษณะเป็นอนุภาคโลหะกระจายตัวในสารทำละลาย หมึกนำไฟฟ้าโลหะเงินมีข้อได้เปรียบในแง่ของ เสถียรภาพของหมึก และมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์โดยเฉพาะ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับเทคนิคการพิมพ์หลากหลายรูปแบบ เช่น อิงค์เจ็ท, กราฟัวร์ออฟเซต (gravure-offset) และนาโนอิมพริ้นท์ติ้ง (nano-imprinting) เป็นต้น ปัจจัยสำคัญบางประการของ “Printable Electronics” ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการอบ (curing temperature) ถือเป็นปัจจัยสำคัญในการขยายตัวของเทคโนโลยีนี้ เนื่องจากวัสดุและซับสเตรตที่ผลิตจากธรรมชาติ ไม่สามารถใช้ในกระบวนการผลิตที่ใช้อุณหภูมิสูงเกิน 150°C ได้ แต่สำหรับหมึกนำไฟฟ้าโลหะเงินนั้นมีระดับของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบต่ำหรือสามารถใช้เวลาในการอบสั้นๆ ได้ ซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับกระบวนการผลิต (Suganuma *et al.*, 2007) เป็น

ผลให้หมึกนำไฟฟ้าที่มีอนุภาคของโลหะเงินเป็นส่วนประกอบ เป็นที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท

สำหรับซับสเตรตที่นิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนของอุปกรณ์วงจรคลื่นความถี่วิทยุ ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ (polyester, PET), FR4, กระดาษ, และ วัสดุไดอิเล็กทริกที่มีค่า permittivity สูงอื่นๆ (Nikitin *et al.*, 2005) ซึ่งขึ้นอยู่กับเทคนิคการพิมพ์ กระดาษถือเป็นตัวเลือกหนึ่งที่ดีที่สุดสำหรับซับสเตรตชนิดชีวภาพ (organic substrate) เพราะข้อดีของกระดาษเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุซับสเตรตชนิดอื่นๆ คือ กระดาษเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้โดยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งใช้เวลาย่อยสลายไม่นานเมื่อเปรียบเทียบกับซับสเตรตชนิดเซรามิก ที่ต้องใช้ระยะเวลาหลายเดือนในการย่อยสลาย อีกทั้งกระดาษเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถใช้ในกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องที่มีขนาดใหญ่ได้อีกด้วย (Reel to reel processing) (Vyas *et al.*, 2009) นอกจากนี้กระดาษสามารถทำให้มีลักษณะเป็นแผ่นบางและเคลือบสารที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงานตามต้องการลงบนผิวหน้าของกระดาษได้อีกด้วย และเนื่องจากกระดาษเป็นวัสดุที่มีความต้องการในท้องตลาดสูง เพราะเป็นวัสดุพื้นฐานที่นำไปประยุกต์ใช้ได้กับงานที่หลากหลาย จึงทำให้มีการผลิตเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้กระดาษเป็นวัสดุราคาถูกที่สุดที่สามารถผลิตได้ (Rida *et al.*, 2009) เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนของอุปกรณ์คลื่นความถี่วิทยุในอุตสาหกรรมการผลิตปริมาณมาก (mass production) ด้วยเหตุนี้ การนำกระดาษมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท จึงมีความเป็นไปได้ที่จะช่วยส่งผลให้การพัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายด้วยคลื่นความถี่วิทยุเป็นไปอย่างแพร่หลาย

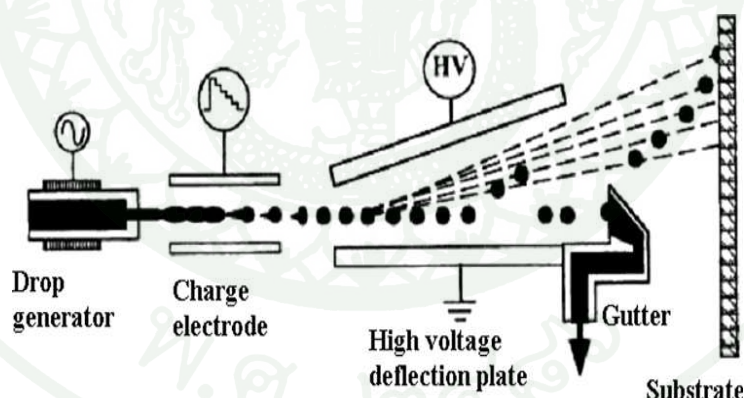
3. พื้นฐานของเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท

เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม (Le, 1998) คือเทคนิคการพิมพ์แบบ Continuous และแบบ Drop-on-Demand ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งแต่ละเทคนิคมีลักษณะการทำงานที่แตกต่างกัน (Mei *et al.*, 2005) ดังนี้



ภาพที่ 1 เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท

1) เทคนิคการพิมพ์แบบ Continuous Inkjet (CIJ): มีกลไกการสั่งพิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 2 ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดหยดหมึก (drop generator), แผ่นสร้างประจุให้กับหยดหมึก (charge electrode), แผ่นควบคุมทิศทางของหยดหมึกด้วยศักย์ไฟฟ้า (High voltage deflection plate) และช่องส่งหยดหมึกที่ไม่ได้ใช้ (gutter) สำหรับกระบวนการสั่งพิมพ์ในเทคโนโลยีนี้มีขั้นตอนคือ หมึกพิมพ์จะถูกพ่นตลอดเวลา โดยที่ละอองของหมึกพิมพ์จะถูกชาร์จให้มีประจุด้วย charge electrode หลังจากนั้นหมึกพิมพ์จะถูกบังคับทิศทางให้เคลื่อนที่เบี่ยงเบนด้วย High voltage deflection plate และไปตกลงบนบริเวณที่ต้องการบนซับสเตรต

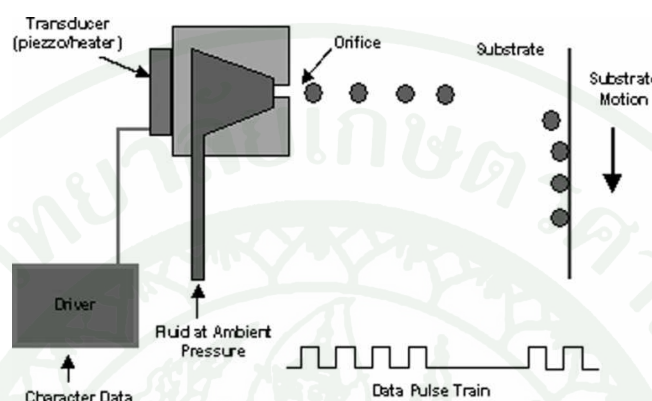


ภาพที่ 2 เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทแบบ Continuous

ที่มา: Mei *et al.* (2005)

2) เทคนิคการพิมพ์แบบ Drop-on-demand (DoD) : มีกลไกการสั่งพิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 3 ประกอบด้วย อุปกรณ์รับสัญญาณและควบคุมการสั่งพิมพ์, อุปกรณ์แปลงสัญญาณควบคุม (transducer) ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้เป็น piezoelectric หรือ heater และหัวฉีดแรงดันสูง โดยที่

หลักการทำงานของเทคโนโลยีนี้ คือ ละอองหมึกจะถูกพ่นออกมาเมื่อ transducer ได้รับคำสั่งจาก สัญญาณควบคุม โดยละอองหมึกจะถูกพ่นออกมาที่ละหยด ผ่านหัวฉีดแรงดันสูง ลงบนซับสเตรต ที่เลื่อนตำแหน่งทำให้หมึกถูกหยดลงตรงบริเวณที่ต้องการ ดังนั้นหมึกทุกหยดจะถูกใช้จนหมดใน การพิมพ์



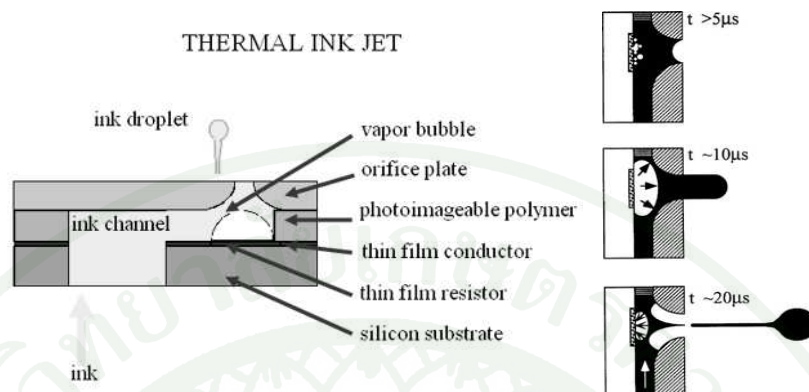
ภาพที่ 3 เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทแบบ Drop-on-Demand (DOD)

ที่มา: Mei *et al.* (2005)

สำหรับเครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทขนาดเล็กที่ใช้งานในที่อยู่อาศัยหรือสำนักงาน หรือที่เรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า “desktop printer” จะมีเทคนิคการพิมพ์แบบ Drop-on-Demand (DoD) ซึ่งสามารถจำแนกระบบการพิมพ์ได้เป็น 4 ระบบ ได้แก่ ระบบ thermal, piezoelectric, electrostatic และ acoustic แต่ที่นิยมใช้และมีจำหน่ายในท้องตลาดในปัจจุบัน มี 2 ระบบด้วยกันคือ ระบบ thermal และ piezoelectric (Hanson, n.d.) ซึ่งขั้นตอนการสั่งพิมพ์ของแต่ละระบบมีรายละเอียดดังนี้

(ก) Thermal หรือเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า “Bubble jet” เป็นเทคนิคการพิมพ์ที่ใช้ใน เครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทที่ผลิตโดยบริษัท Canon และ Hewlett Packard ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว เครื่องพิมพ์ที่ใช้ระบบนี้ จะมีหัวพิมพ์ทั้งหมดประมาณ 300-600 หัว และในแต่ละหัวพิมพ์จะ ประกอบด้วยท่อขนาดเล็ก (orifice) ซึ่งในแต่ละท่อจะมีตัวต้านทานผลิตความร้อน (resistive heater) ที่มีความถี่ในการสร้างความร้อนเพื่อขับหมึกอยู่ที่ 3,000 ครั้งต่อวินาที ดังแสดงในภาพที่ 4 โดย ขั้นตอนการสั่งพิมพ์ของระบบนี้ คือเมื่อมีกระแสไฟฟ้าเข้าไปยัง resistive heater กระแสไฟฟ้าจะ กระตุ้นทำให้เกิดความร้อนประมาณ 300-400 °C และความร้อนนี้จะส่งผลทำให้อุณหภูมิของน้ำ หมึกสูงขึ้นและเดือดเป็นฟองหมึก หรือเรียกว่า “bubble” และเมื่อฟองหมึกขยายตัว จะเกิดแรงดัน

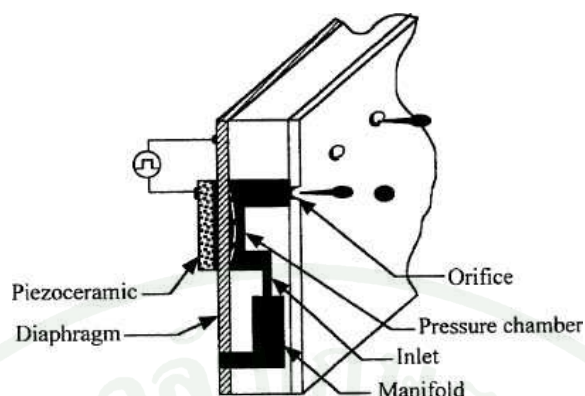
ทำให้หมึกบางส่วนถูกพ่นออกจากหัวพิมพ์ลงบนกระดาษ และหลังจากฟองหมึกแตกตัว จะเกิดสุญญากาศที่มีแรงมากพอที่จะดึงหมึกกลับจากหัวพิมพ์ไปสู่ตัวหมึก



ภาพที่ 4 เทคนิคการพิมพ์แบบ Thermal

ที่มา: Le (1998), Hanson (n.d.)

(ข) Piezoelectric เป็นเทคนิคการพิมพ์ที่พบในเครื่องพิมพ์ที่ผลิตจากบริษัท Epson ซึ่งระบบนี้จะมีหัวฉีดแรงดันสูงและใช้วัสดุที่เป็นเซรามิกหรือคริสตัลที่เรียกว่า “piezoelectric ceramic/crystals” ติดอยู่หลังหัวพิมพ์ของแต่ละตัวหมึกเพื่อควบคุมการไหลของน้ำหมึก สำหรับขั้นตอนการส่งพิมพ์ของเทคนิคนี้แสดงในภาพที่ 5 มีลักษณะคล้ายการทำงานของระบบปั๊มที่ใช้แรงดันในการควบคุมการไหลของน้ำหมึก นั่นคือ เมื่อคริสตัลได้รับการกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าจากสัญญาณควบคุมจะทำให้เกิดการสั่น น้ำหมึกจะถูกส่งจากตัวหมึกไปยัง pressure chamber ซึ่งส่งผลให้มีแรงดันเพิ่มขึ้นใน pressure chamber และเมื่อมีแรงดันมากพอจะทำให้ น้ำหมึกถูกผลักออกจากหัวพิมพ์ โดยเมื่อคริสตัลสั่นในทิศทางเข้าหาตัวหมึก จะเกิดแรงดันผลักน้ำหมึกให้หยดออกจากหัวพิมพ์ผ่านท่อขนาดเล็ก (orifice) ลงสู่ซับสเตรต ในทางกลับกัน เมื่อคริสตัลสั่นในทิศทางออกจากตัวหมึก จะเป็นการดึงน้ำหมึกกลับสู่ตัวหมึก



ภาพที่ 5 เทคนิคการพิมพ์แบบ Piezoelectric

ที่มา: Le (1998)

4. เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ

เทคโนโลยีการแสดงตัวตนอัตโนมัติ หรือที่เรียกว่า Automatic IDentification (Auto-ID) เป็นเทคโนโลยีที่มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้แสดงตัวตนของมนุษย์ สัตว์ สินค้า วัสดุและวัตถุดิบต่างๆ ซึ่งเทคโนโลยี Auto-ID ประกอบด้วยส่วนรับและส่วนอ่านข้อมูลแบบอัตโนมัติ จากนั้นจะประมวลผลข้อมูลและส่งผ่านไปสู่คอมพิวเตอร์ในทันที (สุมาลัย, 2550) ซึ่งเทคโนโลยี Auto-ID ที่พบเห็นในปัจจุบัน ดังแสดงในภาพที่ 6 ได้แก่ ระบบรหัสแท่ง (bar code), เทคโนโลยีบัตรประจำตัวอัจฉริยะ (smart card), เทคโนโลยีไบโอเมตริกซ์ เช่น ระบบรู้จำเสียงพูด (voice recognition), ระบบพิมพ์ลายนิ้วมือ (finger print scan), ระบบสแกนม่านตา (iris scan), ระบบรู้จำตัวอักษร (OCR, Optical Character Recognition) และเทคโนโลยีการระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency IDentification) หรืออาร์เอฟไอดี (RFID) เป็นต้น

จากตัวอย่างระบบต่างๆ ในเทคโนโลยี Auto-ID ที่กล่าวถึงข้างต้น สามารถจำแนกตามลักษณะการใช้งานได้เป็น 2 ประเภท นั่นคือ ประเภทที่ต้องสัมผัสกับเครื่องอ่าน (contacted Auto-ID) และประเภทที่ไม่ต้องสัมผัสกับเครื่องอ่าน สำหรับเทคโนโลยีการระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ หรืออาร์เอฟไอดี (RFID) จัดเป็นเทคโนโลยี Auto-ID ที่ทำงานแบบไร้การสัมผัส ซึ่งจะช่วยลดการสึกหรอของหน้าสัมผัสของอุปกรณ์และมีความสะดวกในการทำงาน นอกจากนี้ยังเพิ่มศักยภาพในการส่งข้อมูล รวมถึงลดปัญหาความไม่เที่ยงตรงและความคลาดเคลื่อนในการอ่าน-เขียน

ข้อมูล เมื่อเทียบกับการใช้งานของเทคโนโลยีอื่นๆที่ใช้อุปกรณ์แบบแบบสัมผัสได้ จึงส่งผลให้เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้งานในปัจจุบัน



ภาพที่ 6 เทคโนโลยี Auto-ID ที่มีใช้ในปัจจุบัน

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

เทคโนโลยีการระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RFID) เป็นการระบุลักษณะที่แสดงเอกลักษณ์ของวัตถุหรือบุคคลด้วยคลื่นความถี่วิทยุซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ.1970 (ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, 2549) โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการพัฒนา คือ นำไปใช้ในการบ่งชี้วัตถุระยะไกลได้ ซึ่งข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีที่มีเหนือกว่าระบบอื่นๆ ในเทคโนโลยี Auto-ID ได้ถูกแสดงในตารางที่ 1 ได้แก่ ความสามารถในการอ่านข้อมูลจากป้ายระบุลักษณะ (tag) ได้พร้อมกันหลายๆป้ายแบบไร้การสัมผัส และสามารถอ่านข้อมูลของวัตถุซึ่งอยู่ไกลจากเครื่องอ่านได้ รวมไปถึงการสามารถทำงานได้แม้ในอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แรงสั่นสะเทือน การกระทบกระแทก และส่งผ่านข้อมูลด้วยความเร็วสูง เป็นต้น

ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ นอกเหนือจากนำมาใช้ทดแทนระบบรหัสแท่ง (barcode) แบบเดิม เช่น นำไปใช้งานในบัตรชนิดต่างๆ เช่น บัตรประจำตัวพนักงาน (ID Card), บัตรโดยสาร, บัตรสำหรับผ่านเข้าออกหอพัก, บัตรที่จอดรถ, ป้ายสำหรับติดกระเป๋าสตางค์, ป้ายสำหรับติดสินค้า หนังสือหรือฉลากยา รวมถึงป้ายขนาดเล็กที่สามารถแทรกลงระหว่างชั้นของเนื้อกระดาษได้ หรือมีลักษณะเป็นแคปซูลขนาดเล็กฝังเอาไว้ในร่างกายคนหรือสัตว์ เป็นต้น จึงส่งผลให้เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีมีบทบาทและความสำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อีกทั้งเทคโนโลยีนี้ยังสามารถเพิ่มความสะดวกและประสิทธิภาพการระบุลักษณะได้ดี ทำให้เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทางธุรกิจได้ ส่งผลให้เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีมีแนวโน้มการตอบรับของภาคธุรกิจและภาคอุตสาหกรรมทวีเพิ่มมากขึ้น (บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลยี Auto-ID ประเภทต่างๆ

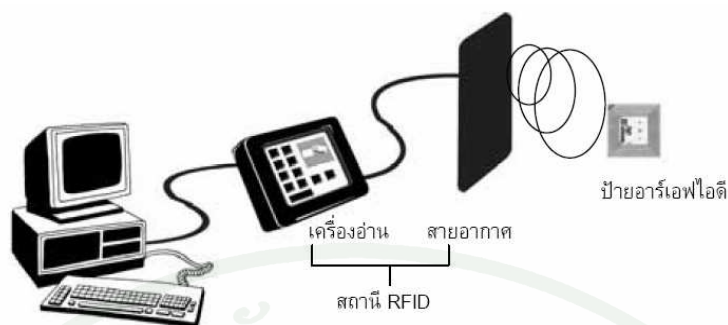
System parameter	Barcode	OCR	Voice recog.	Biometry	Smart card	RFID systems
Typical data quantity (byte)	1-100	1-100	-	-	16-64k	16-64k
Data density	Low	Low	High	High	Very high	Very high
Machine readability	Good	Good	Expensive	Expensive	Good	Good
Readability by people	Limited	Simple	Simple	Difficult	Impossible	Impossible
Influence of dirt/damp	Very high	Very high	-	-	Possible	No influence
Influence of (opt.) covering	Total failure	Total failure	-	Possible	-	No influence
Influence of direction and position	Low	Low	-	-	Unidirectional	No influence
Degradation/wear	Limited	Limited	-	-	Contacts	No influence
Purchase cost/reading electronics	Very low	Medium	Very high	Very high	Low	Medium

ตารางที่ 1 (ต่อ)

System parameter	Barcode	OCR	Voice recog.	Biometry	Smart card	RFID systems
Operating costs (e.g.) printer	Low	Low	None	None	Medium	None
Unauthorized copying/modification	Slight	Slight	Possible	Impossible	Impossible	Impossible
Reading speed (including handling of data carrier)	Low (~4s)	Low (~3s)	Very low (>5s)	Very low (>5s-10s)	Low (~4s)	Very fast (~0.5s)
Maximum distance between data carrier and reader	0-50cm	<1cm Scanner	0-50cm	Direct contact	Direct contact	0-5m, microwave

ที่มา: Finkenzeller (2003)

องค์ประกอบหลักสำหรับเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนดังแสดงในภาพที่ 7 ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือป้ายระบุลักษณะ (transponder หรือ tag) ที่ใช้ติดกับวัตถุต่างๆ ที่ต้องการ โดยภายในป้ายระบุลักษณะจะประกอบไปด้วยสายอากาศและชิปขนาดเล็กซึ่งบันทึกหมายเลขหรือข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้นๆ ส่วนที่สองคือส่วนอ่านข้อมูลซึ่งประกอบด้วย เครื่องสำหรับอ่านหรือเขียนข้อมูลภายในป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (interrogator หรือ reader) และเสาอากาศของเครื่องอ่าน ซึ่งมีหน้าที่ถอดรหัสจากสัญญาณที่ส่งกลับมาจากป้ายระบุลักษณะ และส่งข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์หรือระบบฐานข้อมูลต่อไป โดยองค์ประกอบแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

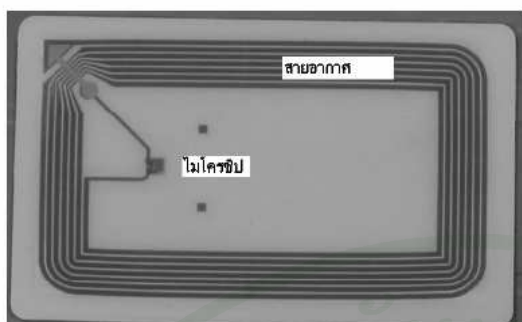


ภาพที่ 7 องค์ประกอบของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

1) ป้ายระบุลักษณะ (Transponder หรือ Tag)

โครงสร้างภายในของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุโดยทั่วไป ดังแสดงในภาพที่ 8(ก) ประกอบด้วยชิป ที่มีหน้าที่เก็บข้อมูลต่างๆ เช่น รหัสสินค้าของวัสดุที่นำไปติด และสายอากาศ (antenna) ที่มีหน้าที่รับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่ส่งมาจากเครื่องอ่านเข้าสู่ชิป และส่งข้อมูลกลับสู่เครื่องอ่านเพื่อประมวลผลต่อไป (Katz *et al.*, 2006) โดยทั่วไปตัวป้ายระบุลักษณะจะอยู่ในรูปแบบของกระดาษ แผ่นฟิล์ม พลาสติก ซึ่งมีขนาดและรูปร่างต่างๆ กันไป ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำไปติด และมีหลายรูปแบบ เช่น บัตร เหรียญ กระดุม ฉลากสินค้า แคปซูล ดังแสดงในภาพที่ 8(ข) เป็นต้น (สุมัลย์, 2550) ค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะ ซึ่งหมายถึง ระยะห่างสูงสุดระหว่างป้ายระบุลักษณะกับเครื่องอ่านที่เครื่องอ่านยังสามารถรับข้อมูลที่ส่งกลับมาได้ เป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญในการนำเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะจะขึ้นอยู่กับชนิดของป้าย ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่



(ก)



(ข)

ภาพที่ 8 (ก) โครงสร้างภายในของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ⁽¹⁾ และ (ข) ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุรูปแบบต่างๆ⁽²⁾

ที่มา: ⁽¹⁾ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549),

⁽²⁾ Wara.com (2010)

(ก) ป้ายระบุลักษณะชนิดเพสซีฟ (Passive tag)

ป้ายระบุลักษณะชนิดนี้สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอก โดยมีหลักการทำงานคือใช้การแปลงสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่ได้รับจากเครื่องอ่านด้วยวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายในชิปเป็นพลังงานให้กับวงจรภายใน จึงทำให้ป้ายระบุลักษณะชนิดนี้มีค่าระยะอ่านได้ไม่ไกลมากนัก มีค่าประมาณ 1-12 เมตร (Acentech (Thailand) co. Ltd, n.d.) ซึ่งค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับกำลังงานของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ (Katz *et al.*, 2006) โดยปกติป้ายชนิดนี้มักมีหน่วยความจำขนาดเล็ก ประมาณ 16-1,024 ไบต์ เป็นป้ายชนิดที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และราคาต่อหน่วยต่ำ

(ข) ป้ายระบุลักษณะชนิดแอคทีฟ (Active tag)

ป้ายระบุลักษณะชนิดนี้มีแหล่งจ่ายพลังงานให้กับวงจรภายในป้ายจากแบตเตอรี่ที่ติดตั้งภายนอก ส่งผลให้ป้ายระบุลักษณะชนิดนี้มีค่าระยะอ่านได้ที่ไกลกว่าป้ายระบุลักษณะแบบเพสซีฟ คือประมาณ 100 เมตร (Katz *et al.*, 2006) รวมถึงมีประสิทธิภาพในการ

ประมวลผลและส่งข้อมูลจากป้ายระบุลักษณะกลับสู่เครื่องอ่านได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนั้น ป้ายระบุลักษณะชนิดนี้มีหน่วยความจำขนาดใหญ่ถึง 1 เมกะไบต์ แต่ข้อเสียของป้ายระบุลักษณะชนิดนี้คือ มีราคาต่อหน่วยสูง ขนาดค่อนข้างใหญ่ และมีอายุการใช้งานจำกัดประมาณ 3-7 ปี ตามอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ (สุมาลัย, 2550)

(ก) ป้ายระบุลักษณะชนิดกึ่งแพสซีฟ/แอคทีฟ (Semi-Passive/Semi-Active tag)

ป้ายระบุลักษณะชนิดนี้เป็นป้ายที่รวมลักษณะการทำงานของป้ายชนิดแพสซีฟและชนิดแอคทีฟเข้าด้วยกัน กล่าวคือ ภายในป้ายระบุลักษณะจะประกอบด้วยแบตเตอรี่เช่นเดียวกับป้ายชนิดแอคทีฟและมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเช่นเดียวกับป้ายชนิดแพสซีฟ โดยที่ป้ายระบุลักษณะชนิดนี้จะใช้กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพียงเล็กน้อยเพื่อให้วงจรของชิปทำงานได้ แต่เมื่อถึงเวลาที่รับส่งสัญญาณจะมีการนำพลังงานจากเครื่องอ่านมาใช้เช่นเดียวกับป้ายระบุลักษณะชนิดแพสซีฟ ส่งผลให้ป้ายระบุลักษณะชนิดนี้มีค่าระยะอ่านได้ไกลกว่าป้ายระบุลักษณะชนิดแพสซีฟ (Acentech (Thailand) Co., Ltd., n.d.) และมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าป้ายระบุลักษณะชนิดแอคทีฟ ป้ายระบุลักษณะชนิดกึ่งแพสซีฟ/แอคทีฟมีความเหมาะสมในการนำไปใช้สำหรับงานที่ต้องการติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์ไว้ภายในป้ายระบุลักษณะ เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดความชื้น เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ฯลฯ เนื่องจากระบบการจ่ายพลังงานของป้ายระบุลักษณะชนิดนี้ทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ได้

นอกจากนี้ ยังสามารถแบ่งชนิดของป้ายระบุลักษณะตามช่วงความถี่ของการใช้งานได้อีกด้วย ช่วงคลื่นความถี่สำหรับการใช้งานของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี อยู่ในย่านความถี่พลเรือน ISM (Industrial-Scientific-Medical) (สุมาลัย, 2550) ซึ่งเป็นย่านความถี่สากลที่กำหนดการใช้งานในเชิงการแพทย์ วิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารทั่วไป จำแนกได้เป็น 4 ย่านความถี่ ได้แก่ ย่านความถี่ต่ำ (LF), ย่านความถี่สูง (HF), ย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) และย่านความถี่ไมโครเวฟ (microwave) ซึ่งในแต่ละย่านความถี่มีคุณสมบัติในการใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 2

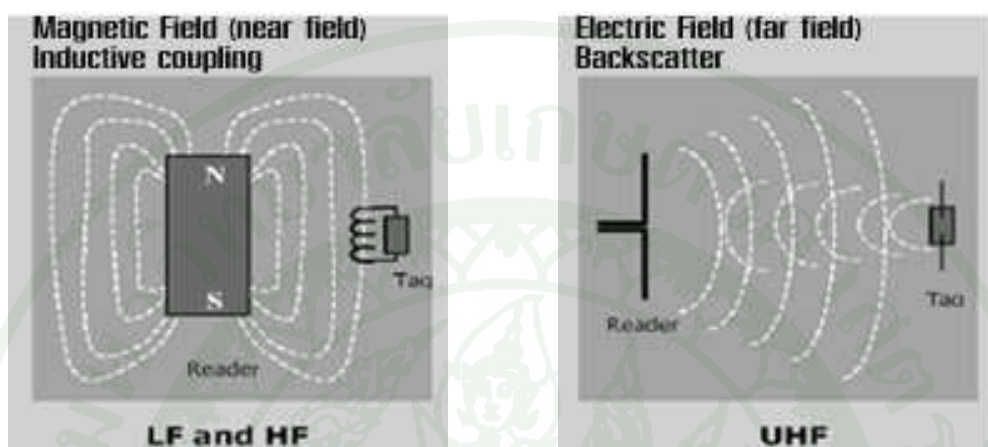
ตารางที่ 2 ย่านความถี่และการใช้งานสำหรับเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี

ย่านความถี่ของคลื่นพาหะ		ค่าระยะอ่านได้	การประยุกต์ใช้งาน
ย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF)	ต่ำกว่า 150 kHz	18 นิ้ว	ปศุสัตว์, ป้ายสินค้า กันขโมย, ระบบกัน ขโมยในรถยนต์
ย่านความถี่สูง (High Frequency: HF)	13.56/27.125 MHz	3 ฟุต อ่านได้เร็ว (10-100 ป้ายต่อ วินาที)	ห้องสมุด, ระบบ ติดตามหนังสือ, บัตร ประจำตัวอัจฉริยะ (smart card), ระบบ รักษาความปลอดภัย ของอาคาร
ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency: UHF)	433/868/915 MHz	10-30 ฟุต อ่านได้เร็วมาก (100-1000 ป้าย ต่อวินาที)	ตู้สินค้า, รถบรรทุก, แท่นยกสินค้า (pallet)
ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave Frequency)	2.45/5.8 GHz	มากกว่า 30 ฟุต	อุปกรณ์สื่อสารไร้สาย

ที่มา: ทวีศักดิ์ (2548)

โดยทั่วไปการทำงานของป้ายระบุลักษณะในย่านความถี่ต่ำ (LF) และย่านความถี่สูง (HF) ใช้หลักการเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (inductive coupling) ซึ่งเกิดจากการที่เสาอากาศของเครื่องอ่านที่กำลังทำงานและสายอากาศของป้ายระบุลักษณะอยู่ใกล้กัน ดังแสดงในภาพที่ 9(ก) โดยเมื่อเครื่องอ่านพบว่ามีป้ายระบุลักษณะอยู่ในระยะรัศมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเสาอากาศ เครื่องอ่านจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุเพื่อส่งพลังงานผ่านสายอากาศไปสู่ชิปของป้ายระบุลักษณะทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีคุณสมบัติแทรกซึมทะลุผ่านได้ดีจึงสามารถส่งผ่านพลังงานไปสู่ป้ายระบุลักษณะได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Sarma, 2008.) อย่างไรก็ตามเนื่องจากขอบเขตการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีขนาดไม่กว้างนัก จึงทำให้รัศมีการทำงานของเครื่องอ่านค่อนข้างแคบ และขีดจำกัดเรื่องขนาดสายอากาศของป้ายระบุลักษณะ ส่งผลให้ระยะค่าที่อ่านได้ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่สูงและความถี่ต่ำไม่ไกลมากนัก

โดยทั่วไปจะมีระยะอ่านไกลสุดประมาณ 1 เมตร (สุมาลัย, 2550) ขึ้นอยู่กับกำลังงานของเครื่องส่ง และคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ ซึ่งเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงนั้น มีความเหมาะสมกับงานบางประเภท เช่น ระบบควบคุมการเข้าออก (access control system) ระบบติดตาม ปศุสัตว์ เป็นต้น



(ก) ย่านความถี่ต่ำและย่านความถี่สูง

(ข) ย่านความถี่สูงยิ่งและไมโครเวฟ

ภาพที่ 9 หลักการทำงานของป้ายระบุลักษณะในย่านความถี่ต่างๆ

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

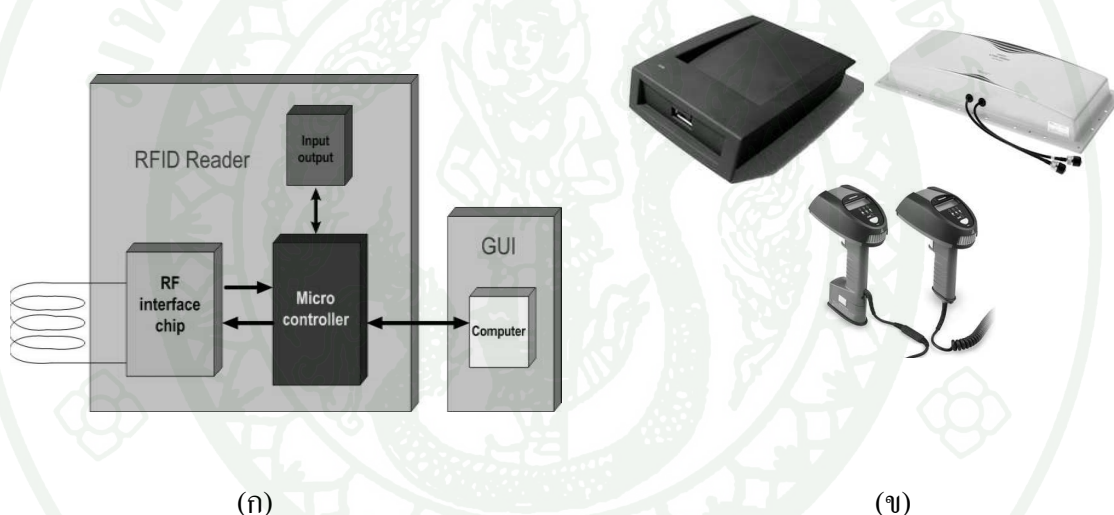
สำหรับการทำงานของป้ายระบุลักษณะในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) และไมโครเวฟ ใช้หลักการควบคู่แบบแผ่กระจาย (propagation coupling) (ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, 2549) โดยเสาสัญญาณของเครื่องอ่านจะส่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของคลื่นความถี่วิทยุออกมา ซึ่งเมื่อป้ายระบุลักษณะได้รับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุผ่านสายอากาศ ป้ายจะทำงานโดยการสะท้อนกลับ (backscattering) คลื่นความถี่วิทยุที่ได้รับจึงถูกปรับค่าตามรหัสประจำตัว (ID) ของป้ายไปยังเครื่องอ่าน ดังแสดงในภาพที่ 9(ข) ทั้งนี้การทำงานในย่านความถี่ต่างกันจะทำให้คุณสมบัติการส่งผ่านต่างกัน ซึ่งป้ายระบุลักษณะในย่านความถี่สูงยิ่งและไมโครเวฟจะมีประสิทธิภาพการส่งผ่านที่ดีกว่าป้ายในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูง ทำให้มีรัศมีการทำงานที่กว้างกว่า และมีค่าระยะอ่านได้ไกล แต่ข้อเสียสำหรับป้ายระบุลักษณะในย่านความถี่ไมโครเวฟคือจะด้อยประสิทธิภาพลงอย่างรวดเร็วเมื่อนำไปใช้งานกับวัสดุที่เป็นโลหะหรือน้ำ (เผ่าภักและคณะ, 2551) ส่งผลให้ในปัจจุบันไม่นิยมนำป้ายระบุลักษณะในย่านความถี่ไมโครเวฟมาใช้งานมากนัก

ทั้งนี้ประสิทธิภาพโดยรวมของป้ายระบุลักษณะจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขอื่นๆอีกด้วย เช่น ขนาดของสายอากาศ หรือสัญญาณรบกวน เป็นต้น

เมื่อกล่าวถึงความสำคัญของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีสำหรับภาคอุตสาหกรรมของไทย พบว่ามีแนวโน้มในการนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้ในการจัดการคลังสินค้าและสินค้าคงคลัง (warehouse and inventory management) เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของระบบการจัดการโลจิสติกส์ให้ดียิ่งขึ้น (ธนิต, 2552) และเมื่อพิจารณาความเหมาะสมทั้งด้านเทคโนโลยีและแนวโน้มของตลาดต่างประเทศ พบว่าเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีที่เหมาะสมสำหรับการจัดการสินค้าคงคลัง คือเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) ตามมาตรฐาน Electronic Product Code (EPC) ที่พัฒนามาจากมาตรฐาน Auto-ID (เผ่าถักและคณะ, 2551) ซึ่งข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งที่เหนือกว่าในย่านความถี่อื่นๆ คือสถานะแวดล้อมการใช้งานและความสามารถในการบูรณาการข้อมูลของสินค้าเข้าด้วยกันในระดับสากล อีกทั้งสามารถตรวจสอบย้อนกลับที่มาของสินค้าได้ (traceability) เนื่องจากมีการเชื่อมโยงข้อมูลจากทุกองค์ประกอบในโซ่อุปทาน อันได้แก่ แหล่งวัตถุดิบ ผู้ผลิต คลังสินค้า ผู้ขนส่งรวมถึงแหล่งจำหน่ายสินค้าเข้าด้วยกัน ซึ่งแตกต่างจากเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีที่ย่านความถี่ต่ำและความถี่สูง ที่การทำงานของทั้งสองระบบมีค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะห่างจากเครื่องอ่านไม่เกิน 30 เซนติเมตร และมีลักษณะการทำงานเป็นเอกเทศ (stand alone) ขาดต่อการเชื่อมโยงข้อมูลสินค้าต่างๆเข้าด้วยกัน จึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านการจัดการลอจิสติกส์ มากไปกว่านั้น เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งตามมาตรฐาน EPC จะไม่มีการเก็บข้อมูลของวัตถุหรือสินค้าไว้บนป้ายชื่อ แต่จะเก็บไว้เพียงรหัสของวัตถุหรือสินค้านั้น ส่งผลให้สามารถผลิตป้ายระบุลักษณะที่มีความซับซ้อนทางวงจรต่ำ ราคาถูก และเพิ่มประสิทธิภาพของการรับและส่งข้อมูล รวมถึงระบบที่เกี่ยวข้องถึงความปลอดภัยในการขนส่งสินค้าอีกด้วย และเนื่องด้วยความสำคัญของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งต่อภาคอุตสาหกรรมไทยดังที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้มีความสนใจในการค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตอุปกรณ์การสื่อสารในเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่ง เพื่อตอบสนองต่อความต้องการและเพิ่มขีดความสามารถในการส่งออกของภาคอุตสาหกรรมไทยให้ดียิ่งขึ้น

2) เครื่องสำหรับอ่าน-เขียน ข้อมูลภายในป้าย (Interrogator หรือ Reader)

เครื่องสำหรับอ่าน-เขียนข้อมูลในเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี มีหน้าที่เชื่อมต่อกับป้ายระบุลักษณะด้วยสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุเพื่ออ่านหรือเขียนข้อมูลลงในป้าย ซึ่งองค์ประกอบหลักภายในเครื่องอ่าน แสดงในภาพที่ 10(ก) ประกอบด้วย เสาอากาศที่ใช้ในการรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุเพื่อส่งต่อให้กับภาครับและภาคส่งสัญญาณวิทยุ (RF interface chip) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุจากสัญญาณอะนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อส่งข้อมูลเข้าสู่ภาคควบคุม (controller) ซึ่ง ณ จุดนี้จะมีการประมวลผลและถอดรหัสจากสัญญาณที่ส่งกลับมาจากป้ายระบุลักษณะ และส่งข้อมูลเข้าสู่ภาคคอมพิวเตอร์(GUI- Graphic User Interface) ที่ใช้แสดงผลของข้อมูลในรูปแบบที่ผู้ใช้งานสามารถเข้าใจได้ง่ายและสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องอ่านได้



ภาพที่ 10 (ก) องค์ประกอบภายในของเครื่องอ่าน⁽³⁾ และ (ข) เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีรูปแบบต่างๆ⁽⁴⁾

ที่มา: ⁽³⁾วัชรกรและคณะ (2547), ⁽⁴⁾ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (2549)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี หรือ ความสามารถในการอ่านข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านและป้ายระบุลักษณะมีอยู่ด้วยกันหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น กำลังงานที่ส่งออกจากเครื่องอ่าน ความสามารถในการนำสัญญาณของป้ายระบุลักษณะ สภาพแวดล้อมการใช้งานที่ส่งผลต่อคลื่นความถี่วิทยุ (น้ำ, โลหะ หรือคาร์บอนไฟเบอร์) การถูกแทรกสอดและรบกวนสัญญาณ และหนึ่งในปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่ง คือ ประสิทธิภาพของเสาอากาศของเครื่องอ่าน (พิชญา, 2552) ซึ่งประสิทธิภาพของการอ่านข้อมูลจากป้ายระบุลักษณะจะ

ขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางเสาอากาศ กำลังงานและอัตราการขยายของเสาอากาศ รวมถึงรูปแบบการโพลาไรเซชัน (polarization) ของเสาอากาศซึ่งเป็นการอธิบายทิศทางการแพร่กำลังงานของคลื่นความถี่วิทยุออกจากเสาอากาศ โดยมีการแบ่งการโพลาไรเซชันได้ 3 ลักษณะคือ โพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น (linear polarization), โพลาไรเซชันแบบวงรี (elliptical polarization) และโพลาไรเซชันแบบวงกลม (circular polarization) (สุรพล, 2545)

สำหรับหลักการติดต่อสื่อสารระหว่างป้ายระบุลักษณะและเครื่องอ่านในเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(ก) เครื่องอ่านจะปล่อยคลื่นความถี่วิทยุออกมาตลอดเวลา และคอยตรวจจับว่ามีป้ายระบุลักษณะเข้ามาอยู่ในบริเวณรัศมีการแพร่สัญญาณของเสาอากาศหรือไม่ หรืออีกนัยหนึ่งคือการคอยตรวจจับว่ามีกรรมวัตถุสัญญาณเกิดขึ้นหรือไม่

(ข) เมื่อมีป้ายระบุลักษณะเข้ามาอยู่ในบริเวณรัศมีการแพร่สัญญาณ ป้ายระบุลักษณะจะได้รับพลังงานจากสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่ส่งผ่านสายอากาศเข้าสู่ชิปอาร์เอฟไอดีของป้ายเพื่อกระตุ้นให้ป้ายทำงาน

(ค) ป้ายระบุลักษณะจะส่งข้อมูลในหน่วยความจำของชิปออกมาในรูปของคลื่นความถี่วิทยุที่ผ่านการมอดูเลตซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางแอมพลิจูด ความถี่ หรือเฟส (ขึ้นอยู่กับวิธีการมอดูเลต) ผ่านทางสายอากาศของป้ายระบุลักษณะ กลับสู่เสาอากาศของเครื่องอ่าน

(ง) เมื่อเครื่องอ่านได้รับสัญญาณที่ส่งกลับมา เครื่องอ่านจะตรวจจับความเปลี่ยนแปลงของคลื่นความถี่วิทยุและแปลงออกมาเป็นข้อมูล หลังจากนั้นจะถอดรหัสเพื่อนำข้อมูลส่งต่อไปสู่ระบบฐานข้อมูลเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

จากการศึกษาทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้องต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด ทำให้ได้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตชิ้นส่วนวงจรของอุปกรณ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RFID tag) โดยพิจารณาเลือกใช้เครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทที่มีเทคนิคการพิมพ์แบบ piezoelectric มาปรับปรุงให้มีความเหมาะสมกับการพิมพ์วัสดุตัวนำไฟฟ้า ร่วมกับการพิจารณารูปแบบการพิมพ์หรือการผลิตที่เหมาะสมกับหมึกนำไฟฟ้าโลหะเงิน เพื่อสร้างลายพิมพ์สายอากาศของวงจรอาร์เอฟไอดี ลงบนฉัสดูดซับที่เป็นกระดาษ โดยวัตถุประสงค์ในการวิจัยคือต้องการประดิษฐ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ และกระบวนการที่ใช้ในการผลิตเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งหมายถึงการส่งผลให้การผลิตและการใช้งานอุปกรณ์สื่อสารไร้สายเป็นที่นิยมและแพร่หลายมากขึ้น มากไปกว่านั้นจะ

สามารถส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีเพื่อตอบสนองต่อความต้องการและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอีกด้วย

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบัน ได้มีความต้องการที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย สำหรับการสื่อสารระยะใกล้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ราคาถูก, ประหยัดพลังงาน, ปรับแก้ได้ง่าย และทนทาน ดังนั้นจึงเกิดความสนใจในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตและวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์ชิ้นส่วนของอุปกรณ์สื่อสารเหล่านี้ เพื่อให้ทำให้อุปกรณ์ที่ผลิตขึ้นมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพที่ดี อีกทั้งสามารถปรับใช้ได้กับงานที่หลากหลาย ซึ่งที่ผ่านมาขั้นตอนในการสร้างลายวงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์สื่อสารเหล่านี้ มีวิธีการที่ซับซ้อน และใช้เวลาในการผลิตค่อนข้างมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงมีบทความวิชาการหลายฉบับนำเสนอเทคโนโลยีการผลิตอุปกรณ์สื่อสารไร้สายรูปแบบอื่นๆ เพื่อปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิต ที่สามารถลดขั้นตอนและปริมาณวัสดุที่ใช้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าวได้

หนึ่งในแนวคิดที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้กับการผลิตวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนประกอบของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายระยะใกล้ที่สอดคล้องกับความต้องการข้างต้น คือ เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท ซึ่งบทความของ Santa Clara (2008) ได้กล่าวว่า นอกเหนือจากการพิมพ์ภาพกราฟฟิก, การสั่งพิมพ์ลายเพื่อตกแต่งผลิตภัณฑ์ หรือการทำป้ายหรือสัญลักษณ์แล้ว เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทแบบ Drop-on-Demand (DoD) ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมที่ต้องการความละเอียดของชิ้นงานในระดับไมโครสเกลได้เป็นอย่างดี และเนื่องจากความสามารถในการประยุกต์ใช้กับหมึกพิมพ์และซับสเตรตที่หลากหลาย จึงทำให้เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทสามารถผลิตชิ้นงานได้หลากหลายรูปแบบ

Yang *et al.* (2007), Rida *et al.* (2007) และ Tentzeris *et al.* (2007) ได้นำเสนอกระบวนการผลิตที่นำเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทมาดัดแปลงให้สามารถใช้ได้กับวัสดุที่มีความนำทางไฟฟ้า เพื่อใช้สั่งพิมพ์ลายวงจรของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในบทความดังกล่าวได้ข้อสรุปซึ่งสอดคล้องกันว่า เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทไม่เพียงแต่จะช่วยลดขั้นตอนในการผลิตลายวงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ยังสามารถผลิตชิ้นงานได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณาการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตร่วมกับการขยายตัวของการใช้งานด้านการสื่อสารไร้สายด้วยเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี พบว่ามีความเหมาะสมที่จะนำเทคโนโลยีการผลิตด้วยการพิมพ์ระบบ

อิงค์เจ็ทมาประยุกต์ใช้ในการผลิตอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย โดย Chrusciel (2008) ได้กล่าวเสริมถึงข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีการผลิตด้วยการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท เมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีในการผลิตแบบอื่นๆ ที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย พบว่าเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทสามารถลดขั้นตอนในกระบวนการผลิต, ลดวัตถุดิบและต้นทุนในการผลิต รวมไปถึงลดปริมาณกากของเสียที่เกิดจากการใช้สารเคมีอีกด้วย มากไปกว่านั้นในบทความของ Berggren *et al.* (2001) ได้กล่าวว่าเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทยังสามารถใช้กับการสังเคราะห์บนซับสเตรตได้หลากหลาย เช่น ซับสเตรตที่งอได้ เพื่อนำวงจรไปติดประกอบกับวงจรอื่น หรือบนพื้นผิวไม่เรียบตรง และยังเป็นการลดพื้นที่ของวงจรรวมได้อีกด้วย

Nishi (2007) ได้นำเสนอเทคโนโลยีการพิมพ์ด้วยระบบอิงค์เจ็ทว่าเป็นเทคโนโลยีทางเลือกหนึ่งในกระบวนการสร้างลายวงจรไฟฟ้าที่ไม่ต้องการแม่พิมพ์ (mask-less production) สำหรับการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลากหลายชนิด ที่สามารถลดขั้นตอนและวัสดุที่ใช้ในการผลิต ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการที่กล่าวถึงในข้างต้น และทำให้มีแนวคิดในการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุนำไฟฟ้าที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท ดังเช่นในบทความของ Lee *et al.* (2005) ซึ่งได้ค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท โดยในงานวิจัยเลือกใช้เครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทขนาดเล็กสำหรับใช้ในบ้านหรือสำนักงานในการสังเคราะห์วัสดุนำไฟฟ้า ซึ่งสารนำไฟฟ้าที่เลือกใช้ในการวิจัยคือ หมึกนำไฟฟ้าโลหะเงิน ซึ่งจากผลของการวิจัยสรุปได้ว่าคุณลักษณะที่สำคัญของหมึกนำไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมคือ อนุภาคโลหะภายในหมึกนำไฟฟ้าควรมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร

Liu *et al.* (2005) ได้นำเสนอผลของการศึกษาคุณลักษณะของการพิมพ์หมึกนำไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทแบบ DoD โดยในการวิจัยได้ใช้เครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทที่ใช้สังเคราะห์วัสดุนำไฟฟ้าโดยเฉพาะ และได้สังเคราะห์ลายพิมพ์ด้วยหมึกนำไฟฟ้าโลหะเงินชนิดซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) ซึ่งจากผลของการศึกษา Liu ได้สรุปไว้ว่า เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทสามารถสร้างลายพิมพ์ที่มีรูปร่างที่ตรงตามแบบที่ต้องการได้ นอกจากนั้น ได้มีศึกษาคุณสมบัติสภาพต้านทานไฟฟ้า (bulk resistivity) ของลายพิมพ์หมึกนำไฟฟ้าโลหะเงิน พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของลายพิมพ์มีค่าสูงกว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของโลหะเงินโดยทั่วไป โดยสาเหตุอาจเกิดเนื่องจากความพรุน (porosity) ของลายพิมพ์ ซึ่งเปรียบเสมือนสิ่งปนเปื้อนในโลหะเงินที่ทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงกว่าปกติ

และจากข้อได้เปรียบของกระบวนการผลิตที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีอื่นๆ ดังที่กล่าวมาตอนต้น จึงมีแนวคิดในการนำเทคโนโลยีนี้ มาประยุกต์ใช้ในการสร้างลายวงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย ดังเห็นได้จากบทความของ Vyas *et al.* (2007) ที่ได้นำเสนอเทคนิคการออกแบบและพัฒนาการผลิตอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (RFID-enabled UHF sensor node) ด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท ในการสร้างลายวงจรในส่วนของการสื่อสารไร้สายของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ ซึ่ง Vyas ได้กล่าวสรุปไว้ในบทความฉบับนี้ว่า เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทเป็นวิธีการที่เป็นประโยชน์และเหมาะสมสำหรับการสร้างลายวงจรที่มีขนาดกระทัดรัดของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ นอกจากนี้ Tentzeris *et al.* (2007) ได้นำเสนอบทความที่ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทในการประดิษฐ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID tag) และเลือกใช้กระดาษเป็นวัสดุซับสเตรต โดย Tentzeris ได้กล่าวสรุปไว้ว่า กระดาษถือได้ว่าเป็นตัวเลือกที่ดีในกลุ่มวัสดุซับสเตรตชีวภาพ (organic substrate) เพราะเป็นวัสดุราคาถูก เหมาะกับการนำไปใช้ผลิตอุปกรณ์ที่ต้องการต้นทุนต่ำ นอกจากนั้นกระดาษมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตที่รวดเร็ว เช่น เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทอีกด้วย

จากข้อสรุปของ Vyas และ Tentzeris ที่กล่าวถึงในข้างต้น ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท สำหรับการผลิตสายอากาศของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายด้วยคลื่นความถี่วิทยุในงานวิจัยดังกล่าว เครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทที่ใช้ในการผลิตสำหรับงานวิจัยทั้งสอง เป็นเครื่องพิมพ์ที่ถูกผลิตขึ้นเพื่อการสั่งพิมพ์วัสดุนำไฟฟ้าโดยเฉพาะ และเนื่องจากเป็นเครื่องพิมพ์ที่มีคุณสมบัติพิเศษ จึงมีราคาสูง ทำให้ไม่สะดวกในการจัดซื้อมาเพื่อใช้ในการประดิษฐ์อุปกรณ์สื่อสารหรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในมหาวิทยาลัยหรือหน่วยงานวิจัยที่มีข้อจำกัดเรื่องงบประมาณสนับสนุนงานวิจัย และยังไม่ปรากฏงานวิจัยใดที่นำเครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทขนาดเล็กในการสั่งพิมพ์สารตัวนำเพื่อสร้างลายวงจรอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นส่วนของอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้มีแนวคิดในการนำเครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทที่ใช้ในที่อยู่อาศัยหรือสำนักงานที่สามารถหาได้ในปัจจุบัน มาดัดแปลงให้สามารถใช้ได้กับวัสดุนำไฟฟ้า เพื่อสร้างลายวงจรหรือลายพิมพ์สายอากาศของวงจรอุปกรณ์สื่อสารไร้สายด้วยคลื่นความถี่วิทยุ โดยวัตถุประสงค์ของการทำวิจัยในครั้งนี้ มุ่งหวังให้การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตส่วนประกอบของวงจรคลื่นความถี่วิทยุมีความสะดวกรวดเร็วมากขึ้น มีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน และดูแลบำรุงรักษาเครื่องมือได้ง่าย รวมไปถึงมีราคาต้นทุนสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไม่แพง จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในหน่วยงานต่างๆ เพื่อเพิ่มความสามารถของหน่วยงานในการออกแบบและพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์สื่อสารไร้สายต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการประดิษฐ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RFID tag)

- 1.1 เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท
- 1.2 หมึกพิมพ์สารตัวนำ
- 1.3 ซับสเตรต เช่น กระดาษ แผ่นใส สติกเกอร์
- 1.4 ชิพอาร์เอฟไอดี
- 1.5 Epoxy และอุปกรณ์ประกอบชิพกับสายอากาศ
- 1.6 คอมพิวเตอร์ และโปรแกรมออกแบบประมวลผล
- 1.7 เตาอบสุญญากาศ

2. อุปกรณ์ในการตรวจวัดคุณสมบัติและประสิทธิภาพของชิ้นงาน

- 2.1 Surface profiler
- 2.2 Four-point probe
- 2.3 ไมโครสโคป
- 2.4 เครื่องอ่าน (reader)
- 2.5 เสาอากาศ (antenna)
- 2.6 ตัวลดทอนสัญญาณ (attenuator)

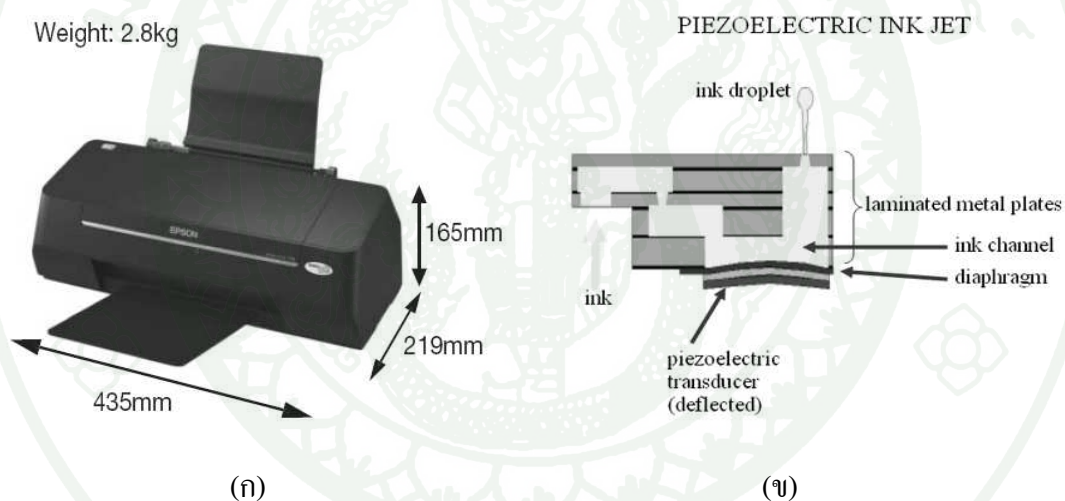
วิธีการ

1. การศึกษาและเลือกวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ

ในการดำเนินงานโครงการวิจัยจำเป็นต้องมีวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ เครื่องพิมพ์ หมึกนำไฟฟ้า วัสดุฐานรองและชิพ ซึ่งรายละเอียดของวัสดุอุปกรณ์เหล่านี้ มีดังนี้

1) เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท

เครื่องพิมพ์ที่ใช้ส่งพิมพ์ลายวงจรไฟฟ้าหรือสายอากาศในการวิจัยครั้งนี้ ได้พิจารณาเลือกใช้เครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทแบบ piezoelectric เนื่องจากลักษณะของวิธีการจ่ายน้ำหมึกมีลักษณะเป็นระบบปั๊มจ่ายน้ำหมึก ที่ภายในตลับหมึกจะไม่มีฟองน้ำซับหมึก ซึ่งแตกต่างกับเครื่องพิมพ์แบบ thermal ที่ภายในตลับหมึกมีฟองน้ำซับหมึก เนื่องจากหมึกนำไฟฟ้ามีลักษณะเป็นอนุภาคโลหะผสมอยู่ในตัวทำละลาย จึงควรเลือกใช้เครื่องพิมพ์ที่ไม่มีฟองน้ำซับหมึกในตลับหมึกเพื่อหลีกเลี่ยงการติดค้างของอนุภาคโลหะที่อาจเกิดขึ้นได้เมื่อส่งพิมพ์ ดังนั้นจึงเลือกศึกษาเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทรุ่น T11 ดังแสดงในภาพที่ 11(ก) มีความละเอียด 5670×1440 dpi และสามารถสร้างปริมาตรหยดหมึกที่เล็กที่สุดคือ 4 พิโคลิตร โดยเครื่องพิมพ์นี้มีเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ piezoelectric ซึ่งมีกลไกและขั้นตอนการส่งพิมพ์ดังได้กล่าวมาข้างต้น ดังแสดงในภาพที่ 11(ข)



ภาพที่ 11 (ก) เครื่องพิมพ์ รุ่น T11⁽⁵⁾ และ (ข) เทคนิคการพิมพ์แบบ piezoelectric⁽⁶⁾

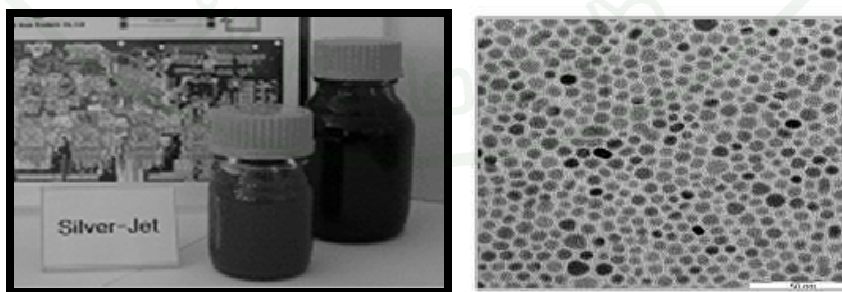
ที่มา: ⁽⁵⁾ Epson (Thailand) co. Ltd. (2008), ⁽⁶⁾ Le (1998)

สำหรับประเด็นเรื่องการยกเลิกสายการผลิตเครื่องพิมพ์ ถือเป็นประเด็นหนึ่งที่ต้องพิจารณาหาแนวทางรองรับ ซึ่งพบว่า จากที่ผ่านมาถึงแม้ว่าเครื่องพิมพ์บางรุ่นจะถูกยกเลิกสายการผลิต แต่พบว่าเครื่องพิมพ์รุ่นใหม่ยังใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบเดิม (Epson (Thailand) co. Ltd., n.d.) อีกทั้งโครงสร้างของหัวพิมพ์ยังมีลักษณะใกล้เคียงกับรุ่นเดิมอยู่ นอกจากนี้ตลับหมึกของ

เครื่องพิมพ์บางรุ่นสามารถใช้ร่วมกันได้ ดังนั้นจึงสามารถนำเครื่องพิมพ์รุ่นใหม่มาดัดแปลงให้สามารถใช้กับหมึกนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการงานวิจัยนี้ได้เช่นกัน

2) หมึกนำไฟฟ้าและซับสเตรต

ในการเลือกใช้หมึกพิมพ์สารตัวนำ ได้มุ่งเน้นไปที่หมึกนำไฟฟ้าที่มีสารตัวนำเป็นอนุภาคโลหะเงิน เนื่องจากคุณสมบัติของโลหะเงินมีความต้านทานไฟฟ้าไม่สูงนัก และราคาไม่แพง อีกทั้งไม่มีปัญหาเรื่องการออกซิเดชัน และเนื่องจากมีผลิตภัณฑ์ให้เลือกหลากหลาย จึงพิจารณาเลือกใช้หมึกนำไฟฟ้าจากคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่ง นั่นคือ ค่าความหนืด (viscosity) ซึ่งควรมีค่าเหมาะสมกับเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทคือ ไม่เกิน 50 cP (Suganuma *et al.*, 2007) และควรคงสภาพและคุณสมบัติต่างๆ ไว้ได้ในช่วงการผลิต นอกจากนี้ ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งสำหรับการเลือกใช้หมึกนำไฟฟ้าคือขนาดของอนุภาคโลหะนำไฟฟ้าของหมึกพิมพ์ โดยในขั้นต้นได้ทดลองหมึกพิมพ์รุ่น 118-29 พบว่า หมึกอุดตันในตลับพิมพ์และหัวพิมพ์เพราะอนุภาคโลหะเงินมีขนาดใหญ่เกินไป ดังเห็นได้จากการที่อนุภาคโลหะตกตะกอนแยกชั้นกับน้ำหมึก จึงทำให้เกิดการอุดตันในตลับหมึก จึงเปลี่ยนเป็นหมึกนำไฟฟ้ารุ่น EXP 2621-30 ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับหมึกนำไฟฟ้ารุ่น 118-29 แต่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมครอน (Creative Materials Inc., n.d.) อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาทดลองพบว่าไม่สามารถสั่งพิมพ์ได้เพราะอนุภาคของโลหะเงินยังคงตกตะกอนอุดตัน จึงได้ค้นคว้าหาข้อมูลและได้เลือกใช้หมึกนำไฟฟ้ารุ่น Silverjet DGP-40LT-15C ที่มีลักษณะเป็นหมึกนำไฟฟ้าที่ขนาดของอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 12 และมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3 และเมื่อนำมาทดลองพิมพ์กับเครื่องพิมพ์รุ่น T11 พบว่าสามารถสั่งพิมพ์ได้และไม่พบปัญหาหมึกอุดตัน



ภาพที่ 12 หมึกนำไฟฟ้ารุ่น Silverjet DGP-40LT-15C

ที่มา: Advanced Nano Products. (2009)

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้ารุ่น Silverjet DGP-40LT-15C

Solid content	40~45%
Viscosity (cP)	14~18
Surface Tension	35~37
Curing Temperature (°C)	100 ~ 250
Specific Resistivity ($\mu\Omega\text{-cm}$)	2.5~10

ที่มา: Advanced Nano Products. (2009)

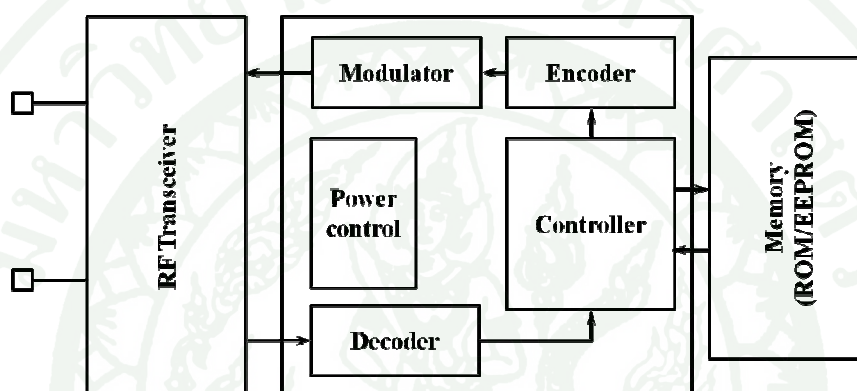
เมื่อประสบผล จึงทดลองสั่งพิมพ์บนกระดาษ สำหรับกระดาษที่เลือกเป็นซับสเตรตของสายอากาศในวงจรคลื่นความถี่วิทยุ เป็นกระดาษสำหรับพิมพ์รูปภาพที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานกับเครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท มีลักษณะเป็นกระดาษแบบกึ่งมันกึ่งด้าน (Photo Quality Silky Inkjet Paper) ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถกันน้ำได้ดี มีน้ำหนัก 235 กรัมต่อตารางเมตร และมีความเหมาะสมกับการสั่งพิมพ์ซ้ำเพื่อเพิ่มความหนาของลายพิมพ์ โดยรายละเอียดคุณสมบัติของกระดาษซึ่งเป็นตัวแปรในการออกแบบสายอากาศในโปรแกรมจำลองคือ ความหนา และค่าแทนเจนต์ความสูญเสีย (Loss tangent, $\tan \delta$) หรือหมายถึงสัดส่วนค่าความสูญเสียไดอิเล็กตริกของกระดาษ โดยมีค่าเท่ากับ 0.31 มิลลิเมตรและ 1.5 ตามลำดับ

3) ชิปอาร์เอฟไอดี

ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID tag) มีส่วนประกอบสำคัญอยู่ 2 ส่วนคือ ชิปอาร์เอฟไอดี (RFID chip) และสายอากาศ (antenna) (Rao *et al.*, 2005) ชิปเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งใช้เก็บข้อมูลเพื่อระบุตัวตน เช่น รหัสต่างๆ รวมไปถึงข้อมูลรายละเอียดของสิ่งนั้นๆ โดยชิปจะเชื่อมต่อกับสายอากาศที่มีหน้าที่รับและส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุระหว่างชิปและเครื่องอ่าน (reader)

ทั้งนี้ส่วนประกอบหลักของชิปอาร์เอฟไอดีดังแสดงในภาพที่ 13 ประกอบด้วย ส่วนควบคุมการทำงานของภาครับ-ส่งสัญญาณวิทยุ (Radio Frequency Transceiver) ซึ่งเป็นส่วนสร้างพลังงานหรือไฟเลี้ยงจากสัญญาณที่รับได้จากเครื่องอ่าน เพื่อจ่ายให้วงจรสร้างสัญญาณ (modulator)

ที่อยู่ในส่วนถัดมา นั่นคือ ส่วนควบคุม (controller unit) ต่อไป ถ้าพลังงานของสัญญาณที่ได้รับได้จากเครื่องอ่าน มีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานทำงานต่ำสุด (minimum operating power) ของชิป วงจรสร้างสัญญาณจะไม่ทำงาน ซึ่งวงจรนี้มีหน้าที่เปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (input impedance) ของชิปตามข้อมูลดิจิทัลที่ต้องการส่งกลับไปให้เครื่องอ่าน และส่วนสุดท้ายของชิปคือ ส่วนหน่วยความจำ (memory) ซึ่งอาจเป็นแบบ ROM หรือ EEPROM ที่มีหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุ หรือเก็บข้อมูลการสื่อสารระหว่างป้ายระบุลักษณะกับเครื่องอ่าน ทั้งนี้คุณลักษณะต่างๆของชิปจะเป็นตัวแปรที่ต้องใช้ในการออกแบบสายอากาศที่จะได้รับการพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นต่อไป



ภาพที่ 13 โครงสร้างภายในของชิปอาร์เอฟไอดี

สำหรับชิปอาร์เอฟไอดีที่ใช้ประกอบกับลายพิมพ์ของสายอากาศ ในการประดิษฐ์ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ ได้ศึกษาจากชิปของ 2 บริษัท คือ ชิปของบริษัท STMicroelectronics รุ่น XRAG2 (STMicroelectronics, n.d.) และชิปของบริษัท NXP Semiconductors รุ่น UCODE G2XL (NXP Semiconductors, n.d.) ซึ่งมีคุณสมบัติเปรียบเทียบกันตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ XRAG2⁽⁷⁾ และ UCODE G2XL⁽⁸⁾

	XRAG2	UCODE G2XL
Standards	EPCglobal C1G2 1.0.9	EPCglobal C1G2 1.0.9 certified EPCglobal C1G2 1.1.0 compliant
Frequency Band	860 – 960MHz	840 – 960 MHz
Temperature Range	-20 – 55 °C	-40 – 85°C
Input Chip Capacitance	0.71 pF	0.9 pF
Chip Impedance at 922.5MHz	11 – j245	11 – j190
Minimum operating power (P_{th})	ไม่ระบุ	-15 dBm

ที่มา: ⁽⁷⁾ STMicroelectronics (2009), ⁽⁸⁾ NXP Semiconductors (2009)

สำหรับความถี่ที่ใช้รับ-ส่งสัญญาณในระบบของคลื่นความถี่วิทยุในช่วงความถี่สูงยิ่ง (UHF) อยู่ในช่วง 860-960 MHz ซึ่งในแต่ละประเทศจะมีการบังคับใช้ช่วงความถี่สูงยิ่งกับอาร์เอฟ ไอดี (UHF RFID band) เป็นของตัวเอง เช่น ทวีปยุโรปใช้ความถี่ช่วง 866-869 MHz ทวีปอเมริกาเหนือและใต้ใช้ความถี่ช่วง 902-928 MHz ญี่ปุ่นและบางประเทศในทวีปเอเชียใช้ความถี่ช่วง 950-956 MHz (Rao *et al.*, 2005) สำหรับประเทศไทย คณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กทช.) ได้ประกาศให้ใช้งานเครื่องอ่านที่ทำงานในย่านความถี่ 920-925 MHz (สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, 2548) และเมื่อพิจารณาช่วงความถี่ในย่านการใช้งานของชิปจากทั้ง 2 บริษัท พบว่ามีความเหมาะสมสำหรับใช้ผลิตป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุเพื่อการใช้งานในประเทศไทย

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4 สำหรับชิป UCODE G2XL ได้มีการระบุค่าพลังงานจิดเริ่มต้นต่ำสุด (minimum operating power) เท่ากับ -15 dBm ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบสายอากาศ อีกทั้งรูปลักษณะภายนอกของ UCODE G2XL (แสดงในภาพที่ 14) มีความเหมาะสมกับการติดบนสายอากาศที่จะผลิตขึ้นในโครงการวิจัยนี้ เพราะสามารถใช้เทคนิคการติดด้วยวิธี surface mount ได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าชิปที่มีความเหมาะสมคือชิป UCODE G2XL ของบริษัท NXP Semiconductors



ภาพที่ 14 ลักษณะของชิป UCODE G2XL ตามมาตรฐาน TSSOP8

ที่มา: NXP Semiconductors. (2009)

ค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ของชิปคือ $Z_c = R - jX_c$ ซึ่งจะถูกระบุในรูปของค่าความเก็บประจุอนุกรม (series capacitance) และค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพ (quality factor) ซึ่งชิป UCODE G2XL มีค่าความเก็บประจุอนุกรมเท่ากับ $0.9 \mu\text{F}$ และค่าสัมประสิทธิ์คุณภาพเท่ากับ 9 ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 922.5 MHz ได้โดย (Pozar, 2005)

$$Q = \omega \frac{W_{\text{stored}}}{P_{\text{loss}}} \Big|_{\omega=\omega_c} = Q = \omega \frac{W_m + W_e}{P_{\text{loss}}} \quad (1)$$

โดย P_{loss} คือกำลังงานสูญเสียของตัวต้านทาน R สามารถคำนวณได้โดย

$$P_{\text{loss}} = \frac{1}{2} |I|^2 R \quad (2)$$

สำหรับ W_m คือกำลังงานสะสมเฉลี่ยของตัวเหนี่ยวนำ L สามารถคำนวณได้จาก

$$W_m = \frac{1}{4} |I|^2 L \quad (3)$$

และ W_e คือกำลังงานสะสมเฉลี่ยของตัวเก็บประจุ C สามารถคำนวณได้จาก

$$W_e = \frac{1}{4} |I|^2 \frac{1}{\omega^2 C} \quad (4)$$

นำสมการ (2)–(4) ไปแทนค่าใน(1)และเนื่องจากชิปไม่มีค่าตัวเหนี่ยวนำ L ดังนั้น

$$Q = \frac{1}{2\omega RC}$$

แทนค่า Q และ C จาก datasheet ของชิป UCODE สามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของชิป ($Z_c = R - jX_c$) ได้ดังนี้

$$R = \frac{1}{2Q\omega C} = \frac{1}{2(9)(2\pi \times 922.5 \times 10^6)(0.9 \times 10^{-12})} = 10.65 \Omega$$

และค่ารีแอคแตนซ์ (reactance) X_c คำนวณได้จาก

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi(922.5 \times 10^6)(0.9 \times 10^{-12})} = 191.70 \Omega$$

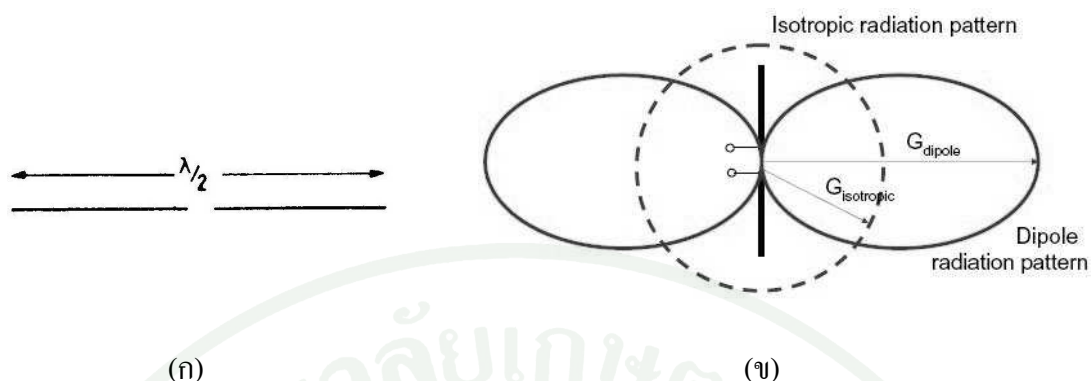
ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์โดยประมาณของชิป UCODE G2XL คือ $11 - j190 \Omega$. ซึ่งจะนำค่านี้ไปใช้ในการออกแบบสายอากาศในโปรแกรมจำลองต่อไป

2. การออกแบบส่วนประกอบของวงจรคลื่นความถี่วิทยุ

ในปัจจุบันป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID tag) ที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดในประเทศไทย มีหลากหลายชนิด ตามมาตรฐาน Electronic Product Code (EPC) ซึ่งนิยมใช้ในการบริหารคลังสินค้าและการจัดการโลจิสติกส์ โดยเฉพาะการใช้งานรหัสสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ EPC ตามมาตรฐาน EPC Global Class 1 Generation 2 (C1G2) โดยกำหนดกำลังของเครื่องส่งไม่เกิน 0.5 วัตต์ และรูปแบบของการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและป้ายระบุลักษณะ จะใช้รูปแบบของ Backscattering ซึ่งเป็นการสื่อสารของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่สูงยิ่ง ที่จัดอยู่ในกลุ่มการสื่อสารระยะไกล (far field) มากกว่า 1 เมตร (วิสุกร และคณะ, 2551)

สายอากาศสำหรับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ต่างจากสายอากาศทั่วไปคือ แหล่งพลังงานหรือชิปมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเป็นค่าเชิงซ้อน ดังแสดงในการคำนวณข้างต้น ซึ่งค่าความต้านทานหรือส่วนจริงจะมีค่าน้อยกว่าค่ารีแอ็กแตนซ์มาก และเพื่อให้เกิดการส่งผ่านพลังงานสูงสุดออกจากสายอากาศ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Z_a) จะต้องมามีค่าเท่ากับค่าคอนจูเกต (conjugate) ของค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของชิป (Z_c) หรือ $Z_a = Z_c^*$ เรียกวิธีการนี้ว่า “impedance matching” โดยในเบื้องต้นของงานวิจัยนี้ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ถูกออกแบบให้มีค่าเท่ากับค่าคอนจูเกตของค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของชิปตามข้อมูลที่คำนวณได้จาก datasheet ($11 - j190 \Omega$) อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองอาจเกิดความคลาดเคลื่อน เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้เป็นค่าซึ่งวัดที่ระดับพลังงานขีดเริ่ม (threshold power level) ของชิป เป็นค่าที่ได้จากการวัดเพียงที่ความถี่เดียวเท่านั้น ต่อมาภายหลังได้มีบทความทางวิชาการ (Nikitin *et al.*, 2009) ตีพิมพ์เมื่อไม่นานมานี้ แสดงขั้นตอนการตรวจวัดค่า sensitivity และค่าอิมพีแดนซ์ของชิป UHF RFID UCODE G2XL ที่ตรงกับชิปที่เลือกใช้ในโครงการวิจัยนี้ ซึ่งบทความทางวิชาการฉบับนี้ได้รายงานค่าอิมพีแดนซ์ ($Z_c = R - jX_c$) และค่าพลังงานขีดเริ่มต่ำสุด (minimum operating power, P_{th}) ของชิปที่เหมาะสมคือ $26 - j150 \Omega$ และ -12.6 dBm ตามลำดับ จึงเลือกใช้ข้อมูลของค่าอิมพีแดนซ์จากบทความฉบับนี้ในการออกแบบสายอากาศในโปรแกรมจำลองต่อไป

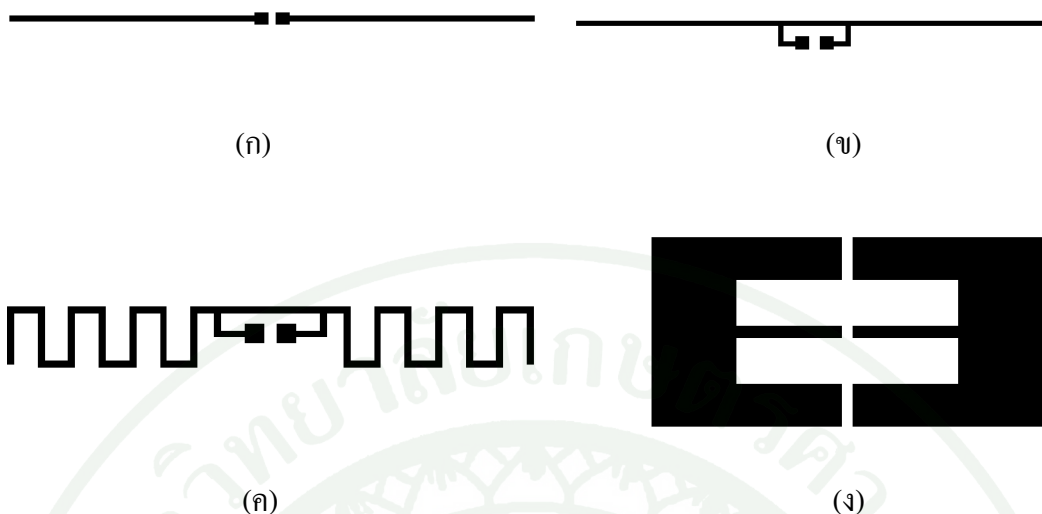
สำหรับรูปแบบของสายอากาศที่นิยมใช้ร่วมกับป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุอันความถี่สูงยิ่งมากที่สุดก็คือ สายอากาศไดโพล (Rao *et al.*, 2005) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานเป็นเส้นลวด 2 เส้นที่มีความยาวแต่ละด้านเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นวางในแนวเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 15(ก) และมีความยาวรวมของสายอากาศ (l) เป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($l = \frac{\lambda_0}{2}$) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีรูปแบบการแผ่รังสี (radiation pattern) สัญญาณคลื่นความถี่วิทยุไปทุกทิศทางในระนาบเดียว (omnidirectional pattern) ดังแสดงในภาพที่ 15(ข) และโดยทั่วไปสายอากาศแบบไดโพลจะมีอัตราขยาย (gain) ของสายอากาศเท่ากับ 1.64 หรือ 2.15 dB (Finkenzeller, 2003)



ภาพที่ 15 (ก) โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบไดโพล⁽⁹⁾ และ (ข) รูปแบบการแผ่รังสี
สัญญาณคลื่นความถี่วิทยุของสายอากาศแบบไดโพล⁽¹⁰⁾

ที่มา: ⁽⁹⁾ ชมรมนักวิทยุอาสาสมัครจังหวัดนนทบุรี (2006), ⁽¹⁰⁾ Acentech (Thailand) co. Ltd. (2009)

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ สายอากาศของป้าระยะบุลลักษณะที่จะถูกออกแบบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท ประกอบด้วย สายอากาศแบบ Dipole, Dipole with tuning stub, Meandered dipole และ Patch antenna ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 16(ก), 16(ข), 16(ค) และ 16(ง) ตามลำดับ โดยการออกแบบสายอากาศของวงจรป้าระยะบุลลักษณะทุกรูปแบบ จะใช้การสร้างแบบจำลองสายอากาศในโปรแกรมจำลองสำเร็จรูป 2.5 มิติ โดยใช้หลักในการออกแบบคือ สายอากาศจะถูกปรับเปลี่ยนขนาดเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Z_a) มีค่าเท่ากับคอนจูเกตของค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของชิป ($Z_c = 26-j150\Omega$) เพื่อให้สายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานสูงสุด (maximum transmission coefficient, τ_{max}) ที่ความถี่ 922.5MHz ซึ่งจะส่งผลให้สายอากาศมีค่าระยะอ่านได้สูงสุดที่ความถี่ 922.5MHz เช่นเดียวกัน โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดการปรับแต่งขนาดสายอากาศแต่ละแบบต่อไป



ภาพที่ 16 โครงสร้างของสายอากาศ (ก) Dipole (ข) Dipole with tuning stub (ค) Meandered dipole และ (ง) Patch antenna

สายอากาศแบบ Dipole และ Dipole with tuning stub ถูกออกแบบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพซึ่งกันและกัน โดยที่ลักษณะเฉพาะของสายอากาศแบบ Dipole คือ มีอัตราขยายค่อนข้างสูงแต่มีลักษณะโครงสร้างในการปรับแต่งขนาดให้เกิดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสูงสุด (τ_{max}) ได้ยาก ในขณะที่สายอากาศแบบ Dipole with tuning stub จะมีขาเชื่อมต่อ (stub) ระหว่างสายอากาศทั้ง 2 ข้าง ซึ่งเป็นตัวแปรที่ทำให้สามารถปรับแต่งสายอากาศแบบ Dipole with tuning stub ได้ดีกว่าสายอากาศแบบ Dipole แต่มีข้อเสียคือ จะเกิดความสูญเสีย (loss) บริเวณขาเชื่อมต่อนี้ค่อนข้างมาก จึงทำให้มีอัตราขยายน้อยและค่าระยะอ่านได้ของสายอากาศจะไม่ไกลมากนัก

ในส่วนของสายอากาศแบบ Meandered dipole ถือเป็นรูปแบบสายอากาศที่นิยมใช้ในอุปกรณ์สื่อสารไร้สายในปัจจุบัน เนื่องจากการออกแบบสายอากาศรูปแบบนี้สามารถลดพื้นที่ของวงจรรวมภายในอุปกรณ์ได้ โดยมีตัวแปรสำหรับการปรับแต่งที่หลากหลายเพื่อให้ประสิทธิภาพของสายอากาศไม่ด้อยลงไป (Fan, 2009)

ต่อมา ได้ออกแบบสายอากาศแบบ Patch antenna ได้ถูกรวมอยู่ในโครงการวิจัยด้วย โดยความมุ่งหวังของการออกแบบสายอากาศแบบ Patch antenna คือ ต้องการลดความสูญเสียที่เกิดกับการออกแบบสายอากาศ Dipole with tuning stub และ Meandered dipole และมีค่าอัตราขยายสูงเช่นเดียวกันกับสายอากาศแบบ Dipole นอกจากนี้ สายอากาศแบบ Patch antenna จะมีตัวแปรที่

สามารถปรับแต่งได้มากกว่าสายอากาศแบบ Dipole ซึ่งจะทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสูงสุดสูงกว่า และมีประสิทธิภาพดีกว่าสายอากาศแบบ Dipole อีกด้วย แต่ข้อด้อยของสายอากาศแบบ Patch antenna คือมีขนาดใหญ่ซึ่งจะสิ้นเปลืองหมึกที่ใช้ในการส่งพิมพ์สายอากาศ Patch antenna มากกว่าสายอากาศรูปแบบอื่นๆ

สำหรับโปรแกรมจำลองที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ เลือกใช้โปรแกรมจำลอง ซึ่งมีการประมวลผลด้วยหลักการ Method of Moments (MoM) โดยสามารถคำนวณระยะไกลสุดที่ป้ายระบุลักษณะยังอ่านค่าได้ (r_s) จากสมการของ Friis (Pozar, 1998) นั่นคือ

$$r_s = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{th}}} \quad (5)$$

ซึ่ง	λ	คือ ความยาวคลื่นที่ 922.5 MHz
	P_t	คือ กำลังงานที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณไปยังเครื่องอ่าน
	G_t	คือ อัตราการขยาย (gain) ของเสาอากาศของเครื่องอ่าน
	G_r	คือ อัตราการขยายที่ได้รับของสายอากาศ
	P_{th}	คือ กำลังงานต่ำสุดที่ต้องการของชิปอาร์เอฟไอดีเพื่อให้ชิปทำงาน

สำหรับประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังงานจะพิจารณาจากค่า τ หรือสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านกำลังงานจากเครื่องอ่านไปยังสายอากาศซึ่งคำนวณได้จาก (Rao, 2005)

$$\tau = \frac{4R_c R_a}{|Z_c + Z_a|^2} \quad (6)$$

โดยที่ ค่าอิมพีแดนซ์ของชิป (Z_c) และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศของป้ายระบุลักษณะ (Z_a) คำนวณจาก $Z_c = R_c + jX_c$ และ $Z_a = R_a + jX_a$ ตามลำดับ

ในการออกแบบสายอากาศ ปัจจัยซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญบางประการที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศที่ต้องคำนึงถึง ประกอบด้วย ค่าไดเรกทิวิตี (directivity) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใช้อ้างอิง และอัตราการขยายของสายอากาศ (gain) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์

ระหว่างค่าไครเรติวิตีและประสิทธิภาพของสายอากาศ ดังคำนวณได้จากสมการ (Agilent Technology, 2008)

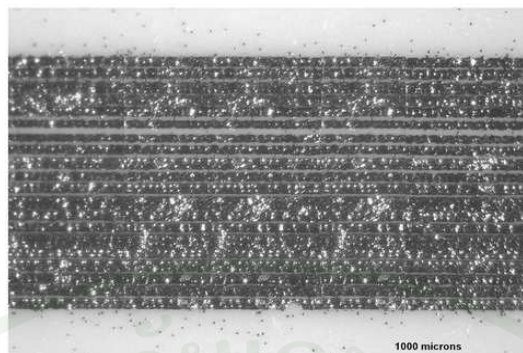
$$G = \eta D \quad (7)$$

ซึ่ง G คือ อัตราการขยายของสายอากาศ
 η คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศ
 D คือ ไครเรติวิตี

ตัวแปรสำคัญอีกประการหนึ่งที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพของสายอากาศคือ ค่าความสูญเสีย (loss) โดยพิจารณาทั้งความสูญเสียที่ขั้วและภายในโครงสร้างของสายอากาศด้วย (สุรพล, 2545) ความสูญเสียที่เกิดขึ้นอาจเกิดจาก การสะท้อนกลับของสัญญาณอันเนื่องมาจากความไม่เหมาะสมกัน (mismatch) ระหว่างอิมพีแดนซ์ของสายอากาศกับชิป ซึ่งการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับทำให้อัตราการขยายของสายอากาศมีค่าไม่คงที่เนื่องจากสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และถ้าเกิดการสะท้อนกลับมากจะส่งผลให้อัตราการขยายของสายอากาศมีค่าน้อย ทำให้สายอากาศด้อยประสิทธิภาพลง นอกจากนั้นยังมีการสูญเสียภายในชั้นสเตรต และการสูญเสียจากความต้านทานในสายอากาศอีกด้วย

3. การพัฒนาขั้นตอนการสังพิมพ์

จากการทดลองสังพิมพ์ในเบื้องต้น พบว่า ลายพิมพ์ของตัวอย่างที่สังพิมพ์ 1 ครั้งมีความบางมาก และลายเส้นไม่ต่อเนื่องกัน ดังแสดงในภาพที่ 17 ซึ่งทำให้มีค่าความต้านทานเชิงผิวสูง และไม่สามารถนำสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุให้กับวงจรของป้ายระบุลักษณะได้ จึงมีความจำเป็นต้องสังพิมพ์ซ้ำเพื่อเพิ่มความหนาของลายพิมพ์ และเนื่องด้วยความหนาของลายพิมพ์เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้า และการส่งผ่านสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุของวงจรป้ายระบุลักษณะ จึงทำตัวอย่างของลายพิมพ์ที่สังพิมพ์ซ้ำ 1-3 ครั้ง และนำลายพิมพ์ที่ได้ไปตรวจวัดความหนาและความขรุขระด้วยเครื่อง Step Profiler ที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) และตรวจวัดค่าความต้านทานเชิงผิว (Sheet Resistivity) ของลายพิมพ์ด้วยเครื่อง Four-point probe ที่ศูนย์วิจัยและทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ (TMEC) ได้ผลของการตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งสำหรับลายพิมพ์สายอากาศที่สังพิมพ์ 1 ครั้ง ไม่สามารถหาค่าความต้านทานเชิงผิวได้ เนื่องจากลายพิมพ์ของสายอากาศบางเกินไป

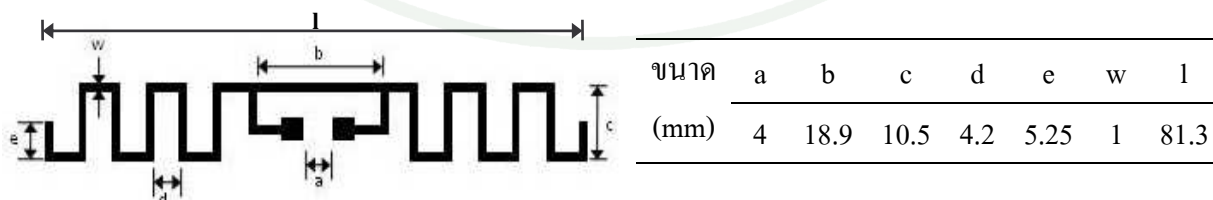


ภาพที่ 17 ลายพิมพ์ของสายอากาศจากการสังพิมพ์ 1 ครั้ง

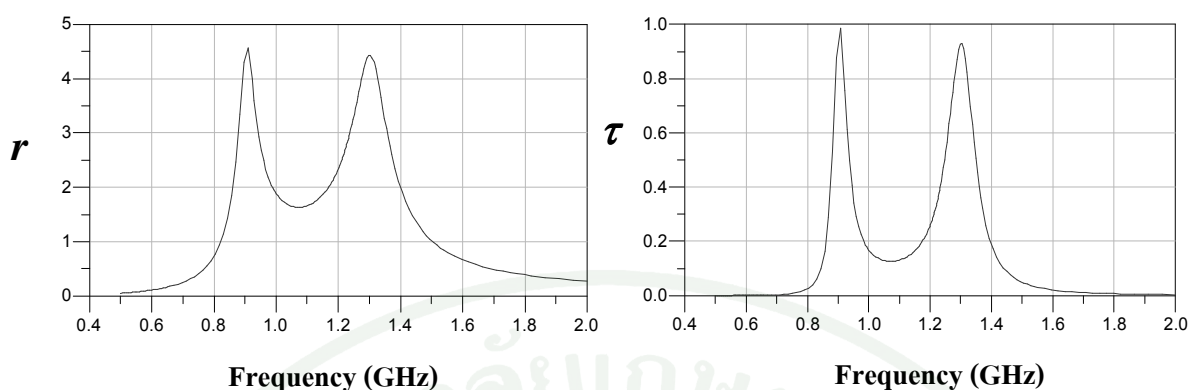
ตารางที่ 5 ผลของความหนาและความต้านทานของลายพิมพ์เปรียบเทียบกับจำนวนครั้งที่พิมพ์

จำนวนครั้งที่พิมพ์	ความหนาเฉลี่ย (μm)	ความต้านทานไฟฟ้า ($\mu\Omega\text{-cm}$)	ค่าเฉลี่ยความขรุขระ (μm)
1 (uncured)	1.92	-	0.76
2 (uncured)	2.83	1.56×10^3	0.90
3 (uncured)	3.78	188	0.94

หลังจากนั้นจึงทดสอบออกแบบสายอากาศแบบ Meandered dipole โดยใช้ข้อมูลค่าความต้านทานเชิงผิวของลายพิมพ์ที่สังพิมพ์จำนวน 3 ครั้ง ($0.499 \Omega/\text{sq}$) และให้มีค่าระยะอ่านได้สูงสุดที่ความถี่ 922.5MHz ซึ่งลักษณะและขนาดของสายอากาศที่ออกแบบดังแสดงในรูปที่ 18 และผลที่ได้จากโปรแกรมจำลอง พบว่า สายอากาศที่ออกแบบมีค่าระยะอ่านได้ประมาณ 4.5 เมตร และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสูงสุดประมาณ 0.99 ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 18 สายอากาศแบบ Meandered dipole ที่ออกแบบ

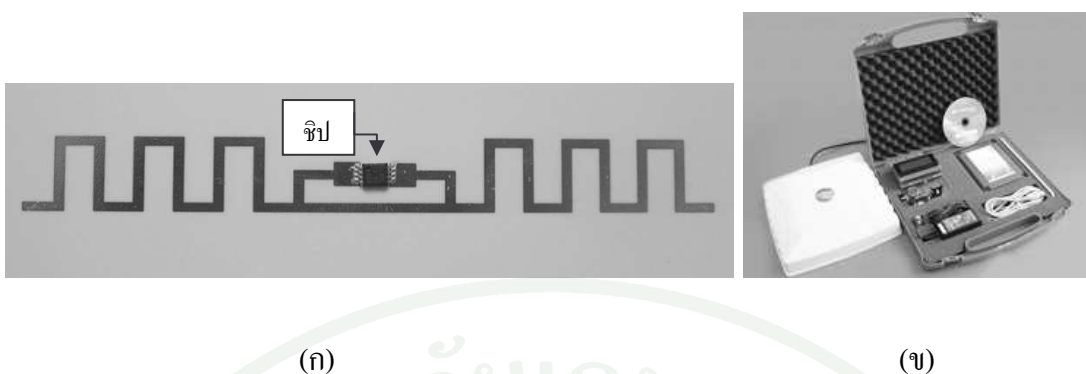


(ก) ระยะที่สามารถอ่านได้

(ข) สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของกำลังงาน

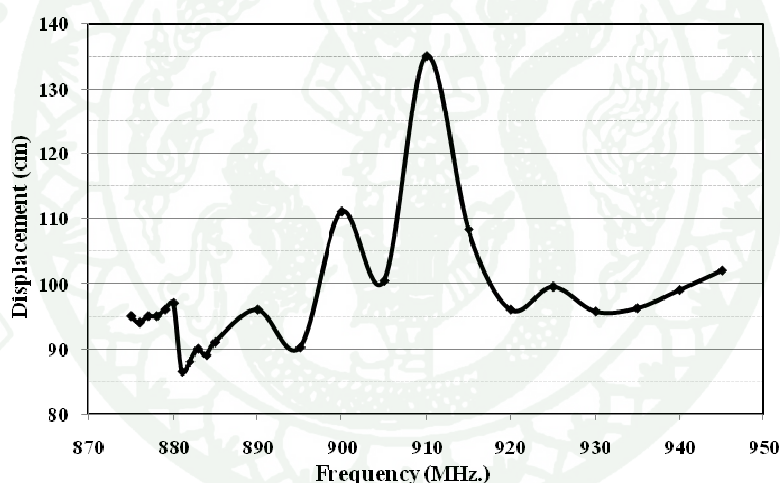
ภาพที่ 19 กราฟแสดงผลการออกแบบสายอากาศแบบ Meandered dipole ที่ความถี่ต่างๆ

จากนั้นจึงสั่งพิมพ์สายอากาศที่ได้ออกแบบทางคลื่นความถี่สูงตามภาพที่ 18 ลงบนกระดาษเข้าทับกัน 3 ครั้ง แล้วนำลายพิมพ์ของสายอากาศไปประกอบเข้ากับชิป UCODE G2XL ด้วย conductive epoxy ซึ่งชิ้นงานที่ได้ แสดงในภาพที่ 20(ก) จากนั้นนำป้ายระบุลักษณะที่จัดทำขึ้นไปทดสอบหาค่าระยะอ่านได้ ด้วยเครื่องอ่าน UHF RFID single chip reader EPC Class1 Gen2 compatible รุ่น AS3990 จากบริษัท Austriamicrosystems Corporation และเสาอากาศรุ่น PATCH A-0025 ที่มีโพลาไรเซชันแบบวงกลม (circular polarization) และมีอัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 7 ± 1 dBi (Poynting Antennas (Pty) Ltd., n.d.) ดังแสดงในภาพที่ 20(ข) ณ ศูนย์เทคโนโลยีและอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ (NECTEC) โดยกระบวนการตรวจวัดคือการปรับค่าความถี่ของคลื่นวิทยุ แล้วเคลื่อนตำแหน่งของป้ายระบุลักษณะออกจากเสาอากาศทีละน้อยเพื่อหาค่าระยะทางที่ป้ายห่างจากเสาอากาศ แล้วเครื่องอ่านยังสามารถอ่านค่าข้อมูลของป้ายระบุลักษณะได้ ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 21 นั่นคือ มีค่าระยะอ่านได้สูงสุด 1.35 เมตรที่ความถี่ 910 MHz



ภาพที่ 20 (ก) ชิ้นงานสายอากาศแบบ Meandered dipole ที่สั่งพิมพ์ลงบนกระดาษและประกอบเข้ากับชิป (ข) เครื่องอ่านและเสาอากาศที่ใช้ในการตรวจวัดค่าระยะอ่านได้⁽¹¹⁾

ที่มา: ⁽¹¹⁾ Electronics Source (2009)

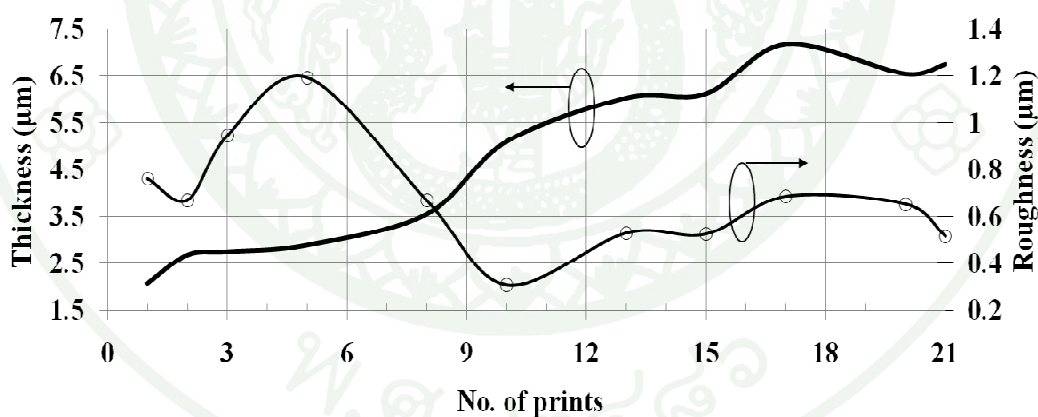


ภาพที่ 21 กราฟแสดงค่าระยะที่สามารถอ่านได้เทียบกับความถี่

ซึ่งเมื่อนำผลการวัดที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจากการประมวลผลแบบจำลอง ปรากฏว่าผลที่ได้ในทางปฏิบัติมีความคลาดเคลื่อนไปค่อนข้างมาก คาดว่าส่วนหนึ่งเกิดจากสาเหตุ 2 ประการหลัก คือ ประการที่ 1 ขนาดของลายพิมพ์ตัวนำบนชิ้นงานที่คลาดเคลื่อนไปจากที่ออกแบบ เนื่องจากในการเพิ่มความหนาของลายพิมพ์ได้ใช้วิธีการป้อนกระดาษเข้าไปในเครื่องพิมพ์ใหม่เพื่อพิมพ์ซ้ำ ซึ่งตำแหน่งพิมพ์อาจเคลื่อนไปได้ และประการที่ 2 อาจเกิดจากวิธีการวัดค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะ ที่อาจเกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณรบกวน เพราะห้องที่ใช้ในการวัดมีลักษณะเป็นห้องที่เปิด ซึ่งอาจมีสัญญาณจากภายนอกเข้ามาได้ เช่น สัญญาณของคลื่นโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่ง

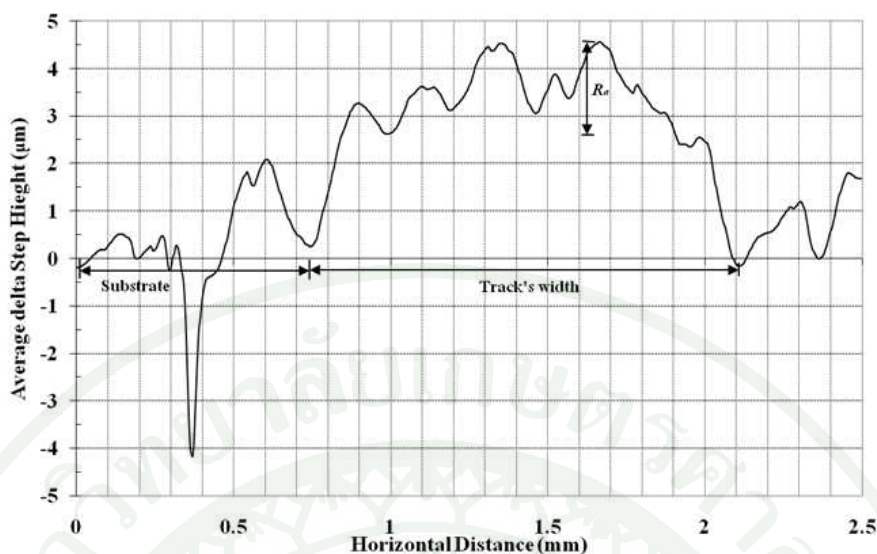
อยู่ในช่วงความถี่ที่ใช้วัด (840-960 MHz) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงแก้ไขกระบวนการพิมพ์สายอากาศและการวัดต่อไป

จากผลของการศึกษาในขั้นต้นพบว่าลายพิมพ์มีความบางมากเกินไป ทำให้มีค่าความต้านทานเชิงผิวสูง ส่งผลให้ระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะอยู่ในเกณฑ์ต่ำ จึงได้มีแนวคิดในการปรับปรุงการสั่งพิมพ์ลายวงจร ด้วยการสั่งพิมพ์ซ้ำเพื่อเพิ่มความหนาของลายพิมพ์และเพื่อลดค่าความต้านทานเชิงผิวให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าคุณสมบัติที่กำหนดมาจาก datasheet ของหมึกนำไฟฟ้าที่เลือกใช้ตามตารางที่ 3 โดยได้ตรวจวัดค่าความขรุขระ (roughness) และความหนาของลายพิมพ์ด้วยเครื่อง step profiler เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองกับจำนวนครั้งของการสั่งพิมพ์ตั้งแต่ 1-21 ครั้ง ดังแสดงผลในภาพที่ 22 ซึ่งพบว่า การสั่งพิมพ์มากกว่า 10 ครั้งไม่ช่วยเพิ่มความหนาอีกอาจเป็นเพราะการกระจายออก (spreading) ของหมึกพิมพ์เนื่องมาจากหมึกพิมพ์ยังมีความเป็นของเหลวอยู่มาก และที่การสั่งพิมพ์ 10 ครั้งนี้ให้ค่าความขรุขระเฉลี่ยประมาณ 0.3 ไมโครเมตร หรือคิดเป็น 5% ของความหนา แต่เมื่อจำนวนครั้งการสั่งพิมพ์มากขึ้นอาจก่อให้เกิดปัญหาการผิดพลาดของขนาดของลายวงจรได้ (misalignment) ดังนั้นจึงพิจารณาใช้การสั่งพิมพ์ 10 ครั้งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศต่อไป



ภาพที่ 22 กราฟแสดงค่าความขรุขระและความหนาที่เปลี่ยนแปลงต่อจำนวนครั้งในการสั่งพิมพ์

สำหรับรายละเอียดคุณลักษณะของลายพิมพ์จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง step profiler ดังแสดงในภาพที่ 23 โดยค่าเฉลี่ยความขรุขระ (R_a) ของลายพิมพ์เกิดขึ้นจากผิวหน้าของกระดาษซับสเตรตที่ไม่เรียบและการระเหยของหมึกพิมพ์ที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งความขรุขระที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อความสูญเสียที่เกิดจากการกระเจิงของสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุในขณะที่สายอากาศนำสัญญาณด้วย



ภาพที่ 23 รายละเอียดคุณลักษณะของลายพิมพ์ที่ตรวจวัดจากเครื่อง step profiler

ปัจจัยที่ทำให้เกิดความสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของสายอากาศอีกประการหนึ่ง คือ ปรากฏการณ์ที่ผิว (skin effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เมื่อความถี่สูงขึ้น ค่าความต้านทานประสิทธิผลของตัวนำจะสูงขึ้นในขณะที่ความเหนี่ยวนำภายในจะลดลง (Sen *et al.*, 1998) ส่งผลให้ความหนาแน่นของกระแส (current density) บริเวณผิวมีค่าสูงกว่าภายในตัวนำ ซึ่งความหนาแน่นของกระแส รวมไปถึงกำลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการนำสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุของสายอากาศจะมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทางที่ลึกลงไปจากผิวตัวนำ โดยค่าระยะความลึกเชิงผิว (Skin Depth, δ) คือระยะทางจากผิวตัวนำที่ปริมาณการนำกระแสไฟฟ้าหรือสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุลดลงเท่ากับ $1/e$ หรือประมาณ 37% ของปริมาณที่เกิดขึ้นบริเวณผิวตัวนำ ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำและความถี่ในการใช้งาน โดยเมื่อความถี่สูงขึ้น ค่าระยะความลึกเชิงผิวจะลดลง และค่าระยะความลึกเชิงผิวของตัวนำ สามารถคำนวณได้จากสมการ (Liao, 1990)

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (8)$$

โดย	σ	คือ	สภาพความนำไฟฟ้าจำเพาะของลายพิมพ์ (Ω/m)
	f	คือ	ความถี่ของสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ (Hz)
	μ_0	คือ	ค่าการซึมผ่านในที่ว่าง ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)
	μ_r	คือ	ค่าการซึมผ่านสัมพัทธ์ (~ 1)

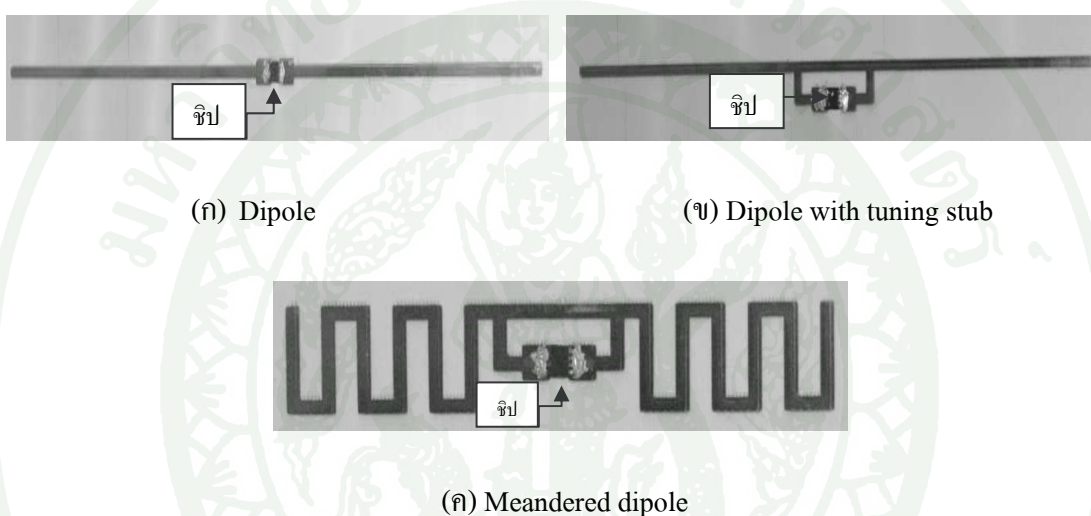
โดยการคำนวณค่าระยะความลึกเชิงผิวตามสมการที่ (8) จะถูกต้องเฉพาะวัสดุตัวนำที่ได้รับคลื่นระนาบ และมีความหนามากกว่าค่าระยะความลึกเชิงผิวหลายๆเท่า (Metaxas, 1996) แต่สำหรับกรณีของงานวิจัยในครั้งนี้ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของลายพิมพ์ที่สั่งพิมพ์ 10 ครั้งและอบที่อุณหภูมิ 150°C นาน 15 นาที ซึ่งมีค่าระยะความลึกเชิงผิวเท่ากับ 15.99 ไมโครเมตร และมีความหนาของชั้นสารตัวนำเท่ากับ 6.21 ไมโครเมตร เนื่องจากความหนาของลายพิมพ์มีค่าน้อยกว่าค่าระยะความลึกเชิงผิว อิทธิพลของเรโซแนนท์ (resonant) หรือการสั่นพ้องจะเกิดขึ้นภายในวัสดุ เป็นผลให้การกระจายตัวของสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุจากพื้นผิวไม่ลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล แต่ในขณะเดียวกันจะเกิดการสอดแทรก (interference) ของคลื่นความถี่วิทยุที่สะท้อนกลับจากบริเวณด้านล่างของสายอากาศอีกด้วย ทำให้ความสูญเสียจากความต้านทานเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ที่ผิวไม่ส่งผลอย่างชัดเจนต่อประสิทธิภาพของชิ้นงานสายอากาศที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิจัย

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของการอบ (curing) ที่มีต่อค่าความต้านทานเชิงผิว (Sheet Resistivity) ของตัวอย่างลายพิมพ์ที่สั่งพิมพ์ซ้ำจำนวน 5 และ 10 ครั้งเปรียบเทียบกับระหว่างลายพิมพ์ที่ไม่ได้นำไปอบ และลายพิมพ์ที่นำไปอบในเตาอบลมร้อน (convection oven) ซึ่งอากาศภายนอกสามารถเข้าไปข้างในเตาระหว่างอบได้ที่อุณหภูมิ 150°C, 15 นาที ซึ่งพบว่าลายพิมพ์ที่นำไปอบมีค่าความต้านทานเชิงผิวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับลายพิมพ์ที่ไม่ได้อบ ดังแสดงในตารางที่ 6 ซึ่งค่าความต้านทานเชิงผิวที่ลดลงประมาณ 4 เท่านี้มีผลต่อการลดความสูญเสียที่เกิดจากการนำสัญญาณคลื่นวิทยุความถี่สูงในสายอากาศของวงจรป้ายระบุสัญลักษณ์ ซึ่งจะทำให้ค่าระยะอ่านได้ของป้ายมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่าความต้านทานเชิงผิวที่นำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศคือ 0.15 Ω/sq . จากการพิมพ์ 10 ครั้ง อย่างไรก็ตามการอบที่อุณหภูมิ 150°C นาน 15 นาที ก่อให้เกิดปัญหาการบิดงอและเกิดรอยไหม้ที่กระดาษซับสเตรต ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าความต้านทานของลายพิมพ์ที่อบและไม่ได้อบ

จำนวนครั้งที่พิมพ์	ความต้านทานเชิงผิว (Ω/sq)	
	ไม่ได้อบ	อบ (150°C, 15 min)
5	0.47	0.16
10	0.62	0.15

หลังจากนั้นได้ทดลองออกแบบสายอากาศ 3 รูปแบบด้วยกันคือ สายอากาศแบบ Dipole, Dipole with tuning stub และ Meandered dipole โดยใช้การสั่งพิมพ์จำนวน 10 ครั้ง และอบที่อุณหภูมิ 150°C, 15 นาที จากนั้นนำมาประกอบกับชิปอาร์เอฟไอดี ซึ่งขึ้นงานป้ายระบุลักษณะที่ประกอบเรียบร้อยแสดงในภาพที่ 24 ทั้งนี้ในระหว่างการออกแบบจะปรับเปลี่ยนขนาดความกว้างและความยาวของสายอากาศเพื่อให้มีระยะอ่านและสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่านกำลังงานจากเครื่องอ่านมากที่สุด ($\tau_{\max}$) ดังได้กล่าวมาแล้วในการอธิบายสมการ (5) และ (6) ซึ่งผลของการออกแบบสายอากาศทั้ง 3 แบบแสดงในตารางที่ 7



ภาพที่ 24 ป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID tag) ที่ได้จากการสั่งพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท

ตารางที่ 7 ผลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและระยะอ่านได้จากแบบจำลองของสายอากาศทั้ง 3 แบบ

รูปแบบสายอากาศ	ความถี่ 922.5MHz	
	τ	r_s (m)
Meandered dipole	1	4.75
Dipole with tuning stub	1	5.90
Dipole	0.49	5.99

สำหรับวิธีการตรวจวัดค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ นั้น จากเดิมประสบปัญหาเนื่องจากการมีสัญญาณแวดล้อมมารบกวนขณะตรวจวัด ซึ่งอาจทำให้ผลที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อน จึงปรับเปลี่ยนวิธีการวัดระยะค่าที่อ่านได้เป็นวิธี fixed distance (Rao *et al.*, 2005) ซึ่งการวัดค่าระยะอ่านได้ด้วยวิธีนี้ สามารถลดการรบกวนสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่เกิดจากผู้วัดได้ โดยเป็นวิธีการที่กำหนดระยะห่างของป้ายระบุลักษณะกับเสาอากาศของเครื่องอ่าน (reader antenna) ไว้คงที่ ดังแสดงในภาพที่ 25(ก) , 25(ข) และใช้ตัวลดทอนสัญญาณ (attenuator) แสดงในภาพที่ 25(ค) เพื่อปรับลดทอนกำลังของเสาอากาศของเครื่องอ่าน จากที่มากที่สุดคือ 24-25 dB (ขึ้นกับความถี่) ลงครั้งละ 1 dB จนเครื่องอ่านไม่สามารถตรวจจับสัญญาณของป้ายได้ โดยทดสอบในช่วงความถี่ตั้งแต่ 840-960 MHz และเริ่มจากที่ความถี่ 840 MHz และปรับเพิ่มขึ้นทีละ 1 MHz จากนั้นจึงนำค่าของกำลังงานที่น้อยที่สุดของแต่ละความถี่ที่ส่งผ่านตัวลดทอนสัญญาณที่บันทึกไว้มาคำนวณหาค่าระยะอ่านได้ (r_m) ของป้ายจากสมการ (Rao *et al.*, 2005)

$$r_m = d \sqrt{\frac{EIRP}{P_{\min_eff} G_t}} \quad (9)$$

ซึ่ง	d	ระยะห่างของป้ายระบุลักษณะและเสาอากาศของเครื่องอ่านที่กำหนดขึ้น
	$EIRP$	คือกำลังส่งออกอากาศสมมูลแบบไอโซโทรปิก (Equivalent Isotropically Radiated Power) ในทิศทางของอัตราการขยายสูงสุดของเครื่องอ่านและเสาอากาศของเครื่องอ่านมีค่าเท่ากับ 4 วัตต์ (สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ, 2549)
	$P_{\min_eff}$	คือ กำลังของสัญญาณจากเครื่องอ่านที่ส่งออกมาที่ความถี่ค่าต่างๆ
	G_t	คือ อัตราการขยายของเสาอากาศของเครื่องอ่าน

โดยที่ค่าอัตราการขยายที่มาจาก datasheet ของเสาอากาศของเครื่องอ่านมีค่าเท่ากับ 6 dB (Poynting Antenna Ltd., 2010) หรือเท่ากับ 4 เมื่อนำมาใช้ในการคำนวณ แต่เนื่องจากเสาอากาศของเครื่องอ่านมีการโพลาไรเซชันแบบวงกลม ในขณะที่สายอากาศของป้ายระบุลักษณะที่ได้ออกแบบและผลิตขึ้นมีการโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น ส่งผลให้สายอากาศของป้ายระบุลักษณะสามารถรับกำลังงานที่ส่งจากเสาอากาศของเครื่องอ่านได้เพียงครึ่งหนึ่งของกำลังงานสูงสุดที่เสาอากาศส่งออกมา (3 dB) ดังนั้นในการคำนวณจึงกำหนดให้อัตราการขยายของเสาอากาศของเครื่องอ่าน (G_t) มีค่าเท่ากับ 2



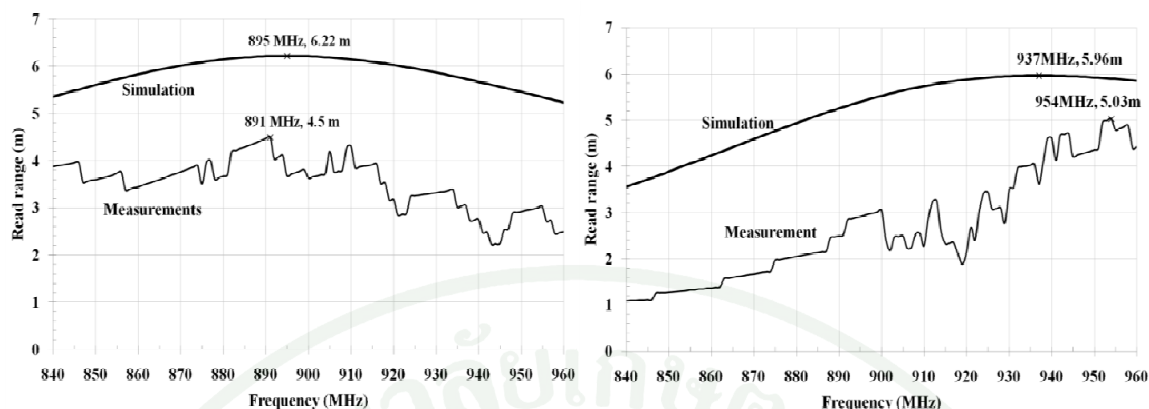
(ก)

(ข)

(ค)

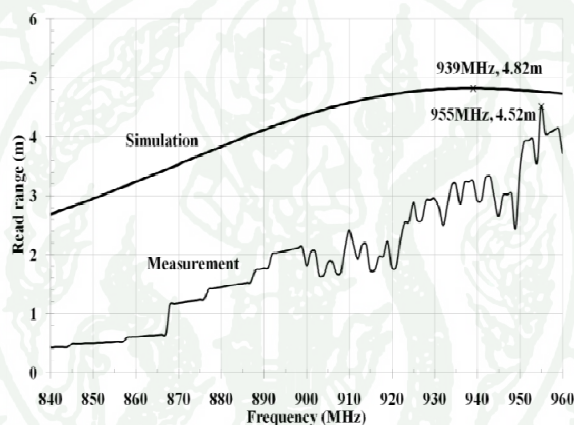
ภาพที่ 25 วิธีการวัดระยะที่อ่านได้ของป้ายระบุลักษณะ; (ก) และ (ข) วิธีการวัดแบบ fixed distance และ (ค) ตัวลดทอนสัญญาณ (attenuator)

เพื่อเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพของสายอากาศที่ได้จากการวัดและการใช้แบบจำลองได้อย่างถูกต้องจึงได้มีการวัดขนาดจริงของสายอากาศที่สั่งพิมพ์เพื่อนำกลับไปปรับขนาดในแบบจำลองอีกครั้ง ทั้งนี้พบว่าขนาดของสายอากาศที่สั่งพิมพ์มีความคลาดเคลื่อนไปจากขนาดที่ออกแบบในแบบจำลอง ทำให้ผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองเปลี่ยนไป ทั้งนี้ ผลของการวัดค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นทั้ง 3 แบบ เปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองที่ได้จากการวัดขนาดของชิ้นงานสายอากาศที่สั่งพิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 26 ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยระยะที่อ่านได้จากโปรแกรมจำลองของสายอากาศทั้ง 3 แบบมีค่าประมาณ 5-6 เมตร แต่ระยะสูงสุดจากการวัดคือ 4.5-5 เมตร โดยความถี่ที่ให้ระยะอ่านได้สูงสุดของป้ายระบุลักษณะ ที่ได้จากการวัดจะมากกว่าความถี่ของที่ได้จากโปรแกรมจำลองอยู่ประมาณ 20 MHz และค่าระยะอ่านสูงสุดของป้ายระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Dipole with tuning stub และ Meandered dipole มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากโปรแกรมจำลอง มากกว่าผลของป้ายระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Dipole เนื่องจากในการออกแบบสายอากาศของป้ายระบุลักษณะแบบ Dipole with tuning stub และ Meandered dipole จะมีการปรับแต่งขนาดให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้มีความเหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ของชิปได้มากกว่าแบบ Dipole ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสูงกว่า ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งของความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้ อาจเกิดจากขนาดของสายอากาศที่สั่งพิมพ์มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของสายอากาศในโปรแกรมจำลองเนื่องมาจากการสั่งพิมพ์ซ้ำ รวมถึงผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ที่วัดด้วย



(ก) Dipole

(ข) Dipole with tuning stub



(ค) Meandered dipole

ภาพที่ 26 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าระยะอ่านได้จากการทดลองกับโปรแกรมจำลองของวงจร
ปียาระบุลักษณะทั้ง 3 แบบ

จากผลการดำเนินการวิจัยข้างต้น ค่าระยะอ่านได้ของปียาระบุลักษณะทั้ง 3 แบบมีค่าไม่
เทียบเท่ากับประสิทธิภาพของปียาระบุลักษณะที่จัดอยู่ในประเภท far field ที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน
ซึ่งมีค่าระยะอ่านได้ประมาณ 5-7 เมตร (อนุจิต, 2550) ซึ่งหนึ่งในสาเหตุนี้เกิดจากค่าความ
ต้านทานของสายอากาศที่สั่งพิมพ์ 10 ครั้ง ที่นำไปอบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งมี
ค่าประมาณ 25.66 $\mu\Omega\text{-cm}$ ยังสูงอยู่มากเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลของค่าความต้านทานจาก
datasheet ของหมึกพิมพ์ ที่มีค่าประมาณ 2.5-10 $\mu\Omega\text{-cm}$ ซึ่งปัญหาที่พบอาจเกิดจาก การที่สารตัวทำ
ละลายในหมึกพิมพ์อาจเป็นตัวกลางในการสร้างพันธะระหว่างอนุภาคสารตัวนำ อาจทำให้มีค่า
ความต้านทานตามที่ระบุใน datasheet แต่การพิมพ์ลงบนซับสเตรตที่เป็นกระดาษ พบว่ามีการซึม

ของสารตัวทำละลายในกระดวย จึงอาจเป็นการลดการสร้างพันธะของอนุภาคสารตัวนำ เป็นผลให้ค่าความต้านทานของชิ้นงานตัวอย่างมีค่ามากกว่าที่ควรเป็นได้ ดังนั้นจึงศึกษาค้นคว้าแนวทางเพิ่มเติมในการปรับปรุงค่าความต้านทานเชิงผิวของลายพิมพ์โดยใช้ปัจจัยทางด้านอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบลายพิมพ์ของสายอากาศ ซึ่งการอบลายพิมพ์ถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการสร้างพันธะเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคโลหะภายในหมึกพิมพ์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของลายพิมพ์ (Greer *et al.*, 2007)

จากปัญหาที่พบสำหรับการอบในครั้งแรกที่ใช้เตาอบลมร้อน (convection oven) ที่อากาศสามารถเข้าไปได้ ดังแสดงในภาพที่ 27(ก) พบว่ากระดวยที่เป็นขั้วสเตรตเกิดรอยไหม้และบิดงอ ทำให้สามารถใช้เวลาในการอบได้เพียง 15 นาที ต่อมาจึงปรับปรุงวิธีการอบโดยเปลี่ยนมาใช้เตาอบแบบสุญญากาศ (vacuum oven) ดังแสดงในภาพ 27 (ข) โดยใช้เวลาการอบที่นานขึ้น และพบว่าไม่เกิดรอยไหม้และการบิดงอของกระดวย ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการอบที่มีต่อค่าความต้านทานของลายพิมพ์ จึงทดลองทำตัวอย่างลายพิมพ์และนำไปอบที่อุณหภูมิ 150°C ในเวลาที่ต่างกัน ซึ่งผลจากการทดลองแสดงในตารางที่ 8



(ก)



(ข)

ภาพที่ 27 (ก) เตาอบลมร้อน⁽¹²⁾ (convection oven) และ (ข) เตาอบสุญญากาศ⁽¹³⁾ (vacuum oven)

ที่มา: ⁽¹²⁾ Dvorson's Food Service Equipment, Inc. (2010), ⁽¹³⁾ A-VAC Industries (2010)

ตารางที่ 8 ผลของความต้านทานเชิงผิวที่เปลี่ยนแปลงต่อเวลาที่ใช้ในการอบในเตาอบสูญญากาศ

จำนวนครั้งที่สั่งพิมพ์	ความต้านทานเชิงผิว (Ω/sq)			
	ไม่ได้อบ	อบที่อุณหภูมิ 150°C ในเตาอบสูญญากาศ		
		15 นาที	30 นาที	60 นาที
5	0.47	0.16	0.056	0.064
10	0.62	0.15	0.047	0.145

จากการทดลอง พบว่าค่าความต้านทานเชิงผิวของลายพิมพ์มีค่าลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการอบนาน 15-30 นาที แต่สำหรับลายพิมพ์ที่ใช้เวลาในการอบมากกว่า 30 นาทีมีค่าความต้านทานเชิงผิวสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการที่ตัวทำละลายของหมึกพิมพ์ระเหยไปหมดและอนุภาคโลหะไม่สามารถสร้างพันธะต่อกันได้ และจากผลในตารางที่ 8 ค่าความต้านทานเชิงผิวของลายพิมพ์ที่สั่งพิมพ์จำนวน 5 ครั้ง และ 10 ครั้ง ที่ใช้เวลาในการอบนาน 30 นาที มีค่าต่างกันไม่มาก เพื่อเป็นการประหยัดหมึกพิมพ์และลดต้นทุนการผลิตของสายอากาศ รวมถึงลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากการสั่งพิมพ์ซ้ำ จึงพิจารณาเปลี่ยนเป็นการใช้ค่าความต้านทานเชิงผิวเท่ากับ $0.056 \Omega/\text{sq}$ ของลายพิมพ์ที่สั่งพิมพ์ 5 ครั้งและอบอุณหภูมิ 150°C นาน 30 นาที ซึ่งมีค่าความขรุขระเฉลี่ยประมาณ 0.7 ไมโครเมตรหรือคิดเป็น 12%ของความหนา เป็นมาตรฐานในการออกแบบสายอากาศในครั้งต่อไป

และเนื่องจากความจำเป็นในการสั่งพิมพ์ซ้ำเพื่อเพิ่มความหนาของลายพิมพ์ ซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของขนาดสายอากาศ จึงได้มีการศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ขึ้น ปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากวิธีการป้อนกระดาษเข้าเครื่องพิมพ์ ซึ่งตำแหน่งของกระดาษอาจผิดไปจากตำแหน่งเดิมเมื่อสั่งพิมพ์ซ้ำ และทำให้เกิดรอยเปรอะเปื้อนรอบๆลายพิมพ์ของสายอากาศอีกด้วย ดังนั้น จึงปรับปรุงวิธีการพิมพ์ โดยเปลี่ยนเครื่องพิมพ์เป็นรุ่น R230 ดังแสดงในภาพที่ 28 ที่มีความละเอียดเท่ากับเครื่องพิมพ์รุ่น T11 (Epson (Thailand) co. Ltd., n.d.) และสามารถสร้างหยดหมึกขนาดเล็กที่สุดได้ 3 พิโคลิตร ที่มีฟังก์ชันการสั่งพิมพ์แบบที่สามารถพิมพ์ลงบนแผ่นซีดีได้ ซึ่งหมายความว่า ไม่จำเป็นที่จะต้องป้อนกระดาษจากถาดด้านบนเข้าเครื่องพิมพ์ในลักษณะที่กระดาษจากด้านบนของเครื่องพิมพ์สู่ถาดรับกระดาษด้านล่าง ดังเช่นการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์ลงบนกระดาษโดยทั่วไป จึงเลือกใช้ฟังก์ชันนี้ในการสั่งพิมพ์สายอากาศเพื่อลดความคลาดเคลื่อนและรอยเปื้อนที่เกิดจากการป้อนกระดาษของเครื่องพิมพ์แบบเดิมต่อไป



ภาพที่ 28 เครื่องพิมพ์รุ่น R230

ที่มา: Epson (Thailand) co. Ltd. (2009)

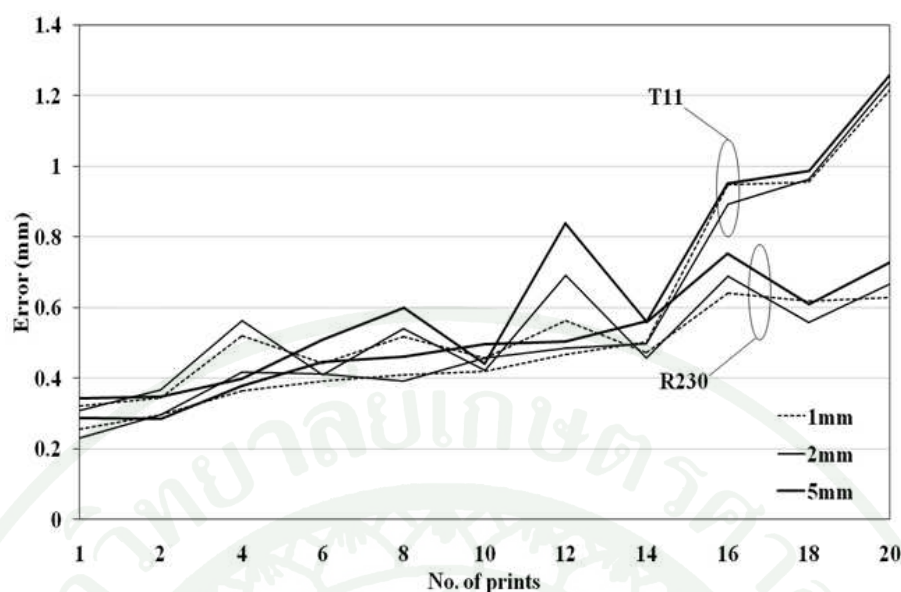
ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่น่าจะก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของลายพิมพ์ นั่นคือ โปรแกรมที่ใช้ในการสั่งพิมพ์ จึงได้จัดทำตัวอย่างการพิมพ์จากหลายๆ โปรแกรม เป็นการเปรียบเทียบผลจากเครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทและเลเซอร์ ที่มีความคมชัดของภาพที่ได้จากการสั่งพิมพ์สูง และเพื่อเป็นการประหยัดหมึกนำไฟฟ้าที่มีราคาสูงจึงได้ใช้หมึกธรรมดาในการสั่งพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทรุ่น C90 ที่มีความละเอียดเท่ากับรุ่น T11 และรุ่น R230 ที่ใช้ในการพิมพ์หมึกนำไฟฟ้ามาเป็นตัวแทนในการศึกษาความคลาดเคลื่อนครั้งนี้ ซึ่งผลจากการศึกษาลายพิมพ์ที่สั่งพิมพ์จำนวน 1-4 ครั้ง ของลายพิมพ์หมึกธรรมดา และลายพิมพ์หมึกนำไฟฟ้า พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของลายพิมพ์ขนาดใกล้เคียงกัน จึงสามารถใช้หมึกพิมพ์ธรรมดาในการศึกษาความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากปัจจัยอื่นๆ ได้

สำหรับโปรแกรมที่เลือกศึกษา คือโปรแกรม AutoCAD ที่ใช้ในการสั่งพิมพ์สายอากาศที่ผ่านมา เนื่องจากโปรแกรม AutoCAD เป็นโปรแกรมพื้นฐานที่นิยมใช้ในการเขียนแบบที่มีความแม่นยำสูง และมีความสะดวกในการแปลงไฟล์ร่างของภาพสายอากาศที่ออกแบบ เป็นไฟล์ที่สามารถใช้ในโปรแกรม AutoCAD อีกด้วย แต่เนื่องจากการสั่งพิมพ์ซ้ำของลายพิมพ์สายอากาศจากโปรแกรม AutoCAD จำเป็นต้องตั้งค่าคุณสมบัติการพิมพ์ต่างๆ เช่น ระยะห่างจากขอบกระดาษ, โหมดคุณภาพของค่าที่สั่งพิมพ์, ขนาดกระดาษ, ชนิดของกระดาษ เป็นต้น ทุกครั้งที่สั่งพิมพ์ จึงมีแนวคิดในการหาโปรแกรมทางเลือกอื่นๆ ที่สะดวกในการสั่งพิมพ์ซ้ำ โดยกำหนดค่าคุณสมบัติการพิมพ์ต่างๆ ในการสั่งพิมพ์ครั้งแรก และเมื่อสั่งพิมพ์ครั้งต่อไปก็จะให้ผลเช่นเดิมถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งโปรแกรมที่เลือกมาศึกษาคือ โปรแกรม Microsoft Word ที่ใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน โดยผลของการศึกษาเบื้องต้นของลายพิมพ์ขนาดความกว้าง 1, 2 และ 5 มิลลิเมตรที่สั่งพิมพ์ 1 ครั้ง แสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ความคลาดเคลื่อนของขนาดลายพิมพ์ที่เกิดจากการสั่งพิมพ์ 1 ครั้ง ด้วยเครื่องพิมพ์และโปรแกรมต่างๆ

เครื่องพิมพ์	หมึก	ความคลาดเคลื่อนจากขนาดที่สั่งพิมพ์ (mm)					
		1 mm		2 mm		5 mm	
		AutoCAD	MS Word	AutoCAD	MS Word	AutoCAD	MS Word
Laser	<i>normal</i>	0.10	0.02	0.16	-0.08	0.14	-0.10
C90	<i>normal</i>	0.27	0.24	0.31	0.21	0.31	0.23
R230	<i>conductive</i>	0.32	0.14	0.31	0.13	0.34	0.20

ผลจากการวัดความคลาดเคลื่อนเบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 9 ทำให้ได้ข้อสรุปว่าการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าการพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบเลเซอร์ค่อนข้างมาก โดยความคลาดเคลื่อนนี้มีขนาดเท่าเดิมไม่ว่าจะสั่งพิมพ์เท่าใดก็ตาม นั่นคือมีค่า 0.32 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนลดลงเมื่อขนาดของลายพิมพ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ขนาดของลายพิมพ์ที่สั่งพิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word มีค่าใกล้เคียงกับขนาดที่ต้องการมากกว่าโปรแกรม AutoCAD ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง อาจมีความเหมาะสมที่จะใช้โปรแกรม Microsoft Word ในการสั่งพิมพ์สายอากาศมากกว่าโปรแกรม AutoCAD แต่เมื่อพิจารณาในทางปฏิบัติ โปรแกรมจำลองที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศ ไม่สามารถแปลงไฟล์ภาพร่างของสายอากาศที่ออกแบบ ให้ใช้ได้กับโปรแกรม Microsoft Word ได้ และการวาดภาพของสายอากาศด้วยโปรแกรม Microsoft Word กำหนดขนาดของรูวาดได้ละเอียดเพียงทศนิยม 2 ตำแหน่ง ซึ่งไม่เพียงพอต่อการออกแบบสายอากาศที่ต้องการความละเอียดสูงเพื่อการปรับขนาดของสายอากาศให้มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสม จึงพิจารณาเลือกใช้โปรแกรม AutoCAD ในการสั่งพิมพ์สายอากาศเช่นเดิม อีกทั้งเมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของลายพิมพ์ที่สั่งพิมพ์หนึ่งครั้งจากเครื่องพิมพ์รุ่น C90 และ R230 ที่มีความละเอียดเท่ากันแต่วิธีการป้อนกระดาษต่างกัน พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันมากนัก จึงได้จัดทำตัวอย่างลายพิมพ์หมึกนำไฟฟ้าที่สั่งพิมพ์จำนวน 1-20 ครั้ง ด้วยโปรแกรม AutoCAD จากเครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทรุ่น T11 ที่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับเครื่องพิมพ์รุ่น C90 และเครื่องพิมพ์รุ่น R230 เพื่อศึกษาผลของความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากวิธีการป้อนกระดาษของเครื่องพิมพ์เพิ่มเติม ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษา ดังแสดงในภาพที่ 29



ภาพที่ 29 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดลายพิมพ์ที่เปลี่ยนแปลงต่อจำนวนครั้งที่สั่งพิมพ์ ระหว่างเครื่องพิมพ์รุ่น T11 และ R230 ที่มีวิธีการป้อนกระดาษต่างกัน

จากกราฟในภาพที่ 29 พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดลายพิมพ์จากเครื่องพิมพ์ทั้ง 2 รุ่นมีความแตกต่างกัน สำหรับเครื่องพิมพ์รุ่น R230 ค่าความคลาดเคลื่อนของลายพิมพ์มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อจำนวนครั้งในการพิมพ์เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบกับผลจากเครื่องพิมพ์รุ่น T11 ซึ่งอาจเกิดจากวิธีการป้อนกระดาษของเครื่องพิมพ์รุ่น R230 ที่ใช้ฟังก์ชันการพิมพ์ลงบนแผ่นซีดีในการสั่งพิมพ์ลายพิมพ์ตัวอย่างที่ดีกว่ากลไกการป้อนกระดาษของเครื่องพิมพ์รุ่น T11 ที่ต้องงอกระดาษจากถาดหนึ่งสู่ถาดหนึ่งเมื่อสั่งพิมพ์ ดังนั้นจึงมีสรุปได้ว่า เครื่องพิมพ์รุ่น R230 มีความเหมาะสมที่จะใช้สั่งพิมพ์สายอากาศสำหรับงานวิจัยนี้

และจากผลของการศึกษาความคลาดเคลื่อนของลายพิมพ์ที่เกิดจากการสั่งพิมพ์ซ้ำ พบว่า ในจำนวนครั้งการพิมพ์ที่เท่ากัน ขนาดของความคลาดเคลื่อนมีค่าคงที่สำหรับขนาดลายพิมพ์ที่ต่างกัน จึงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลงเมื่อขนาดของลายพิมพ์เพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงเป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศในครั้งต่อไป คือ เพิ่มความกว้างลายพิมพ์ของสายอากาศเพื่อลดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของขนาดสายอากาศที่ได้จากการสั่งพิมพ์ กับสายอากาศที่ออกแบบในโปรแกรมจำลอง

อีกหนึ่งแนวคิดในการลดความคลาดเคลื่อนของขนาดสายอากาศที่สั่งพิมพ์ กับขนาดที่ได้ออกแบบในโปรแกรมจำลอง นั่นคือการปรับขนาดของสายอากาศก่อนการสั่งพิมพ์ จากข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนของลายพิมพ์ที่สั่งพิมพ์ 1 ครั้งของเครื่องพิมพ์รุ่น R230 ซึ่งพบว่า ลายพิมพ์มี

ขนาดใหญ่กว่าขนาดที่กำหนดในโปรแกรมประมาณ 0.32 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงได้ข้อสรุปว่า จะทดลองปรับขนาดความกว้างของสายอากาศในโปรแกรมให้มีขนาดเล็กลงกว่าขนาดที่ต้องการ 0.32 มิลลิเมตร โดยมุ่งหวังให้สายอากาศที่ส่งพิมพ์จะมีขนาดและประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสายอากาศที่ได้ออกแบบในโปรแกรมจำลอง โดยจะทดลองออกแบบปรับขนาดเทียบกับสายอากาศแบบ Dipole with tuning stub และนำมาตรวจวัดประสิทธิภาพต่อไป



ผลและวิจารณ์

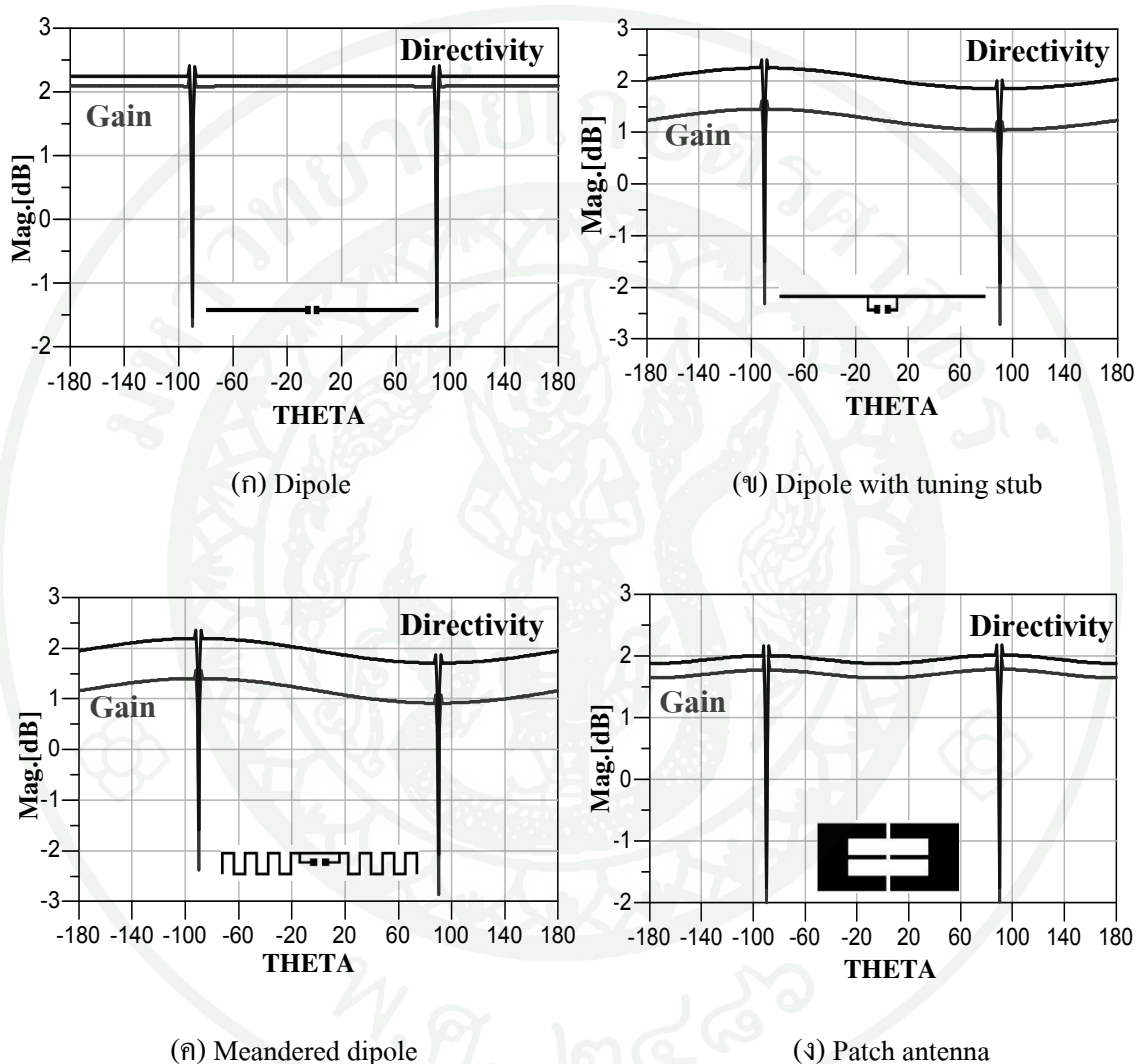
ผล

จากผลการวัดค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งที่มีสายอากาศแบบ Dipole ดังแสดงในภาพที่ 16(ก), Dipole with tuning stub ดังแสดงในภาพที่ 16(ข) และ Meandered dipole ดังแสดงในภาพที่ 16(ค) ที่กล่าวถึงในข้างต้น พบว่าความถี่ที่ให้ระยะอ่านสูงสุดที่ได้จากการวัดของป้ายระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Meandered dipole และ Dipole with tuning stub มีค่ามากกว่าความถี่ที่ต้องการในการออกแบบ (922.5 MHz) ดังนั้น จึงออกแบบปรับให้สายอากาศทั้งสองมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสูงสุดที่ความถี่ที่ลดลงมาต่ำกว่าความถี่ที่ต้องการ (900 MHz) เพื่อให้ผลของความถี่ที่ได้จากการวัดค่าระยะอ่านได้สูงสุดตรงกับความถี่ที่ต้องการ ทั้งนี้ได้ออกแบบสายอากาศแบบ Dipole with tuning stub ที่ปรับขนาดความกว้างของสายอากาศมีขนาดเล็กกว่าที่ต้องการ 0.32 มิลลิเมตรอีกด้วย และสำหรับสายอากาศแบบ Dipole จากผลการวัดพบว่าความถี่ที่ให้ค่าระยะอ่านสูงสุดใกล้เคียงกับความถี่ที่กำหนดในการออกแบบ ดังนั้น จึงออกแบบสายอากาศแบบ Dipole และ Patch antenna Dipole ดังแสดงในภาพที่ 16(ง) ให้มีค่าสัมประสิทธิ์สูงสุดตรงกับความถี่ที่ต้องการ (922.5 MHz) อีกทั้งได้ออกแบบปรับปรุงลักษณะของสายอากาศแบบ Dipole ให้มีลักษณะแคบลงที่โคน (taper) เพื่อเพิ่มตัวแปรในการปรับแต่งให้สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมกับชิปที่ใช้มากขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสายอากาศสูงขึ้น ส่งผลให้ป้ายระบุลักษณะมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอีกด้วย ซึ่งผลของการออกแบบสายอากาศแสดงในตารางที่ 10 และสำหรับค่าความต้านทานเชิงผิวที่ใช้ในการออกแบบในครั้งนี้คือ $0.056 \Omega/\text{sq}$ ซึ่งเป็นค่าความต้านทานเชิงผิวของลายพิมพ์ที่สังพิมพ์ 5 ครั้งและอบในเตาอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 150°C นาน 30 นาที

ตารางที่ 10 ผลค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าระยะอ่านได้ของสายอากาศที่ได้จากการออกแบบ

Antenna Configurations	ความถี่	τ	ค่าระยะอ่านได้ (m)
Meandered dipole	892 MHz	1	8.60
Dipole with tuning stub	913 MHz	1	8.22
Dipole	923 MHz	0.59	6.80
Patch antenna	930 MHz	0.97	8.57

สำหรับค่าไดเรกตีวิตี้และอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการออกแบบ จากสมการที่ (7) แสดงให้เห็นว่า เพื่อให้ประสิทธิภาพของสายอากาศมีค่าสูงสุด ($\eta=1$) จึงควรออกแบบสายอากาศให้มีค่าไดเรกตีวิตี้และค่าอัตราขยายมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งผลของค่าไดเรกตีวิตี้และอัตราขยายที่ได้จากการออกแบบของสายอากาศทั้ง 4 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 30



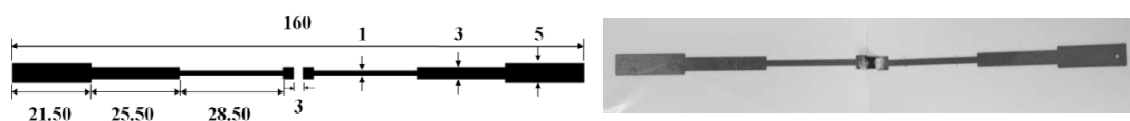
ภาพที่ 30 ไคเรกตีวิตี้และอัตราขยายที่ได้จากการออกแบบเทียบกับการกระจายคลื่นเชิงมุมของสายอากาศทั้ง 4 แบบ

เมื่อพิจารณาผลของค่าไดเรกตีวิตี้และอัตราขยายที่ได้จากโปรแกรมจำลองดังแสดงในภาพที่ 30 พบว่าสายอากาศที่มีอัตราขยายสูงสุดคือสายอากาศแบบ Dipole และเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 30(ก) ค่าไดเรกตีวิตี้และอัตราขยายของสายอากาศแบบ Dipole มีค่าค่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกัน (ดังแสดงในภาพที่ 30(ก)) หมายถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในสายอากาศแบบ

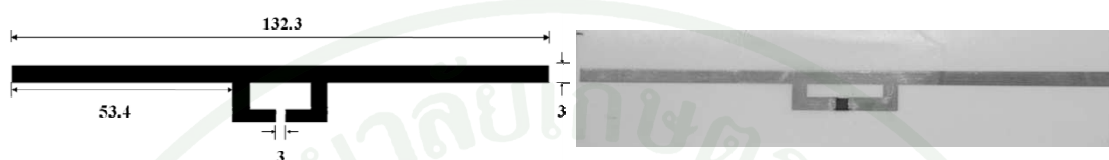
Dipole มีค่าน้อย ซึ่งแตกต่างจากสายอากาศรูปแบบอื่นที่กราฟของค่าโคเรคทีฟและอัตราขยายมีค่าต่างกันและเปลี่ยนแปลงตามความถี่ (ดังรูปที่ 30(ข), 30(ค) และ 30(ง)) เนื่องจากสายอากาศแบบ Dipole with tuning stub และ Mendered dipole มีโครงสร้างที่เป็นขาเชื่อมต่อ (stub) จึงทำให้เกิดความสูญเสียในบริเวณนี้ค่อนข้างมาก ส่งผลให้ระหว่างระหว่างค่าโคเรคทีฟและอัตราขยายมากกว่ารูปแบบอื่นๆ เป็นต้น

จากนั้นจึงสั่งพิมพ์สายอากาศที่ออกแบบลงบนกระดาษจำนวน 5 ครั้งด้วยหมึกนำไฟฟ้า โลหะเงิน และนำสายอากาศไปอบในเตาอบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 150°C นาน 30 นาที ภาพของสายอากาศที่ออกแบบและชิ้นงานป้ายระบุลักษณะของสายอากาศที่ติดฉลากเรียบร้อย แสดงในภาพที่

31



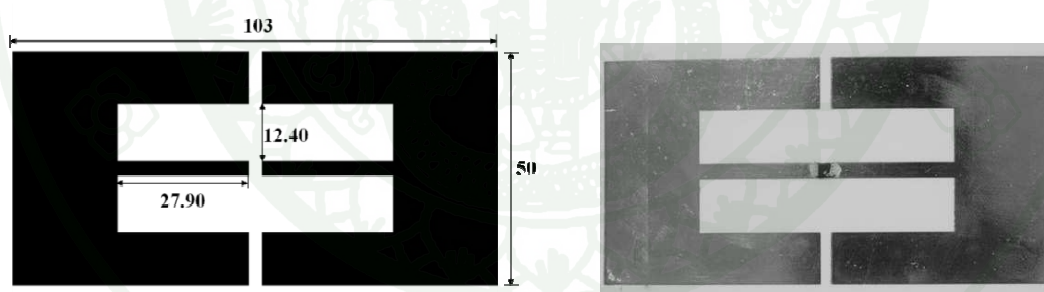
(ก) Dipole



(ข) Dipole with tuning stub



(ค) Meandered dipole



(ง) Patch antenna

ภาพที่ 31 รายละเอียดสายอากาศที่ออกแบบ และชิ้นงานป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ได้จากการสั่งพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท (หน่วย: มิลลิเมตร)

(ก) Dipole

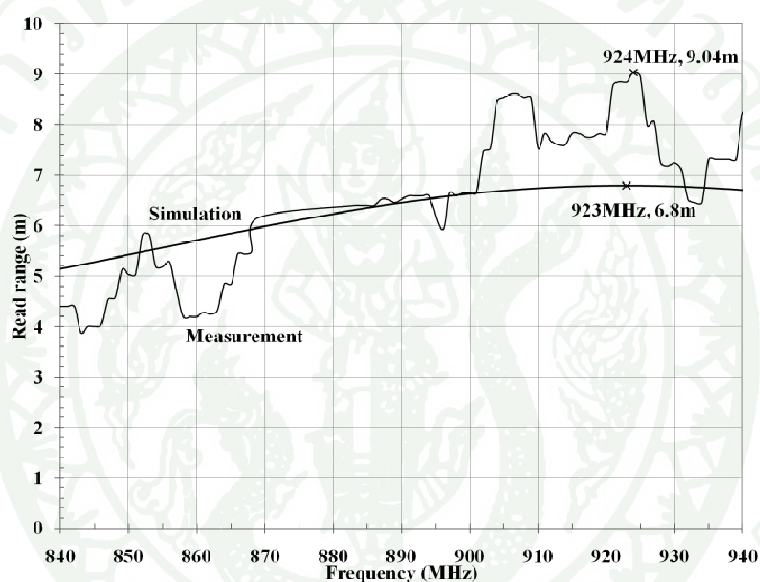
(ข) Dipole with tuning stub

(ค) Meandered dipole

(ง) Patch antenna

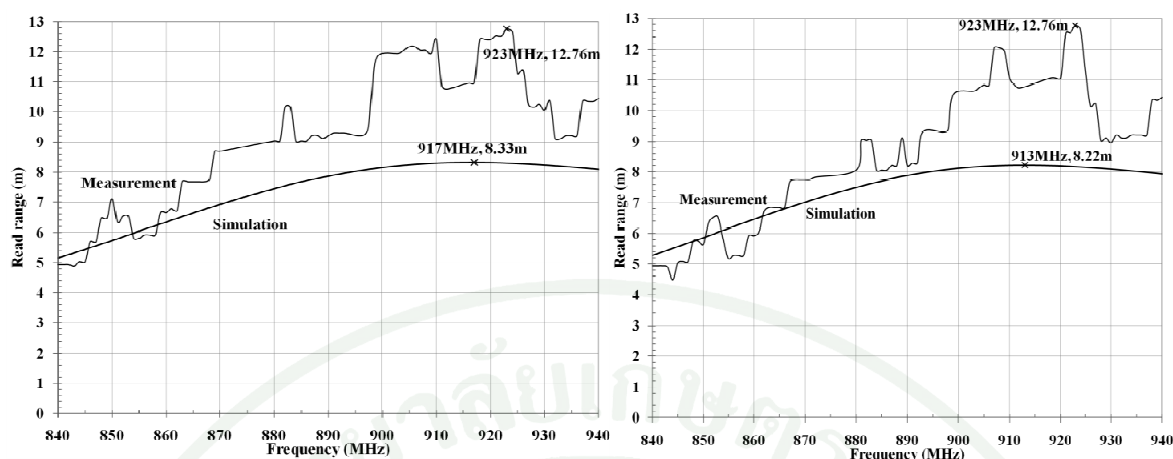
หลังจากนั้น นำป้าระยะบุลักษณะที่สังพิมพ์ มาตรวจวัดค่าระยะอ่านได้ด้วยวิธี fixed distance ซึ่งผลที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองของป้าระยะบุลักษณะแต่ละแบบ แสดงในภาพที่ 32-35

สำหรับป้าระยะบุลักษณะของสายอากาศแบบ Dipole ที่กำหนดให้จำลองของสายอากาศมี สัมประสิทธิ์การส่งผ่านสูงสุดที่ความถี่ 922.5 MHz และมีค่าระยะอ่านได้สูงสุดเท่ากับ 6.8 เมตร ซึ่งผลที่ได้จากการวัดค่าระยะอ่านได้สำหรับป้าระยะบุลักษณะของสายอากาศแบบ Dipole พบว่ามีค่า ระยะอ่านได้สูงสุดเท่ากับ 9.04 เมตร ที่ความถี่ 924 MHz ดังแสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 32 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าระยะอ่านได้จากการทดลองกับโปรแกรมจำลองของป้าระยะบุ ลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Dipole

ในส่วนของป้าระยะบุลักษณะของสายอากาศแบบ Dipole with tuning stub ทั้งแบบสังพิมพ์ ขนาดปกติและแบบปรับชดเชยให้มีขนาดเล็กกว่าที่ต้องการ 0.32 มิลลิเมตร ซึ่งในโปรแกรมจำลอง ได้กำหนดให้สายอากาศทั้ง 2 แบบมีสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสูงสุดที่ความถี่ 900 MHz และมีค่า ระยะอ่านได้สูงสุดในแบบจำลองเท่ากับ 8.33 เมตรที่ความถี่ 917 MHz สำหรับสายอากาศที่สังพิมพ์ ขนาดปกติ และ 8.22 เมตรที่ความถี่ 913 MHz สำหรับสายอากาศแบบปรับชดเชยขนาด ซึ่งค่าระยะ อ่านได้สูงสุดที่ได้จากการวัดของสายอากาศทั้งสองแบบมีค่าเท่ากันคือ 12.76 เมตร ที่ความถี่ 923 MHz ดังแสดงในภาพที่ 33(ก) และ 33(ข) ตามลำดับ



(ก) สายอากาศที่สังพิมพ์ขนาดปกติ

(ข) สายอากาศที่สังพิมพ์แบบปรับขนาดเซ

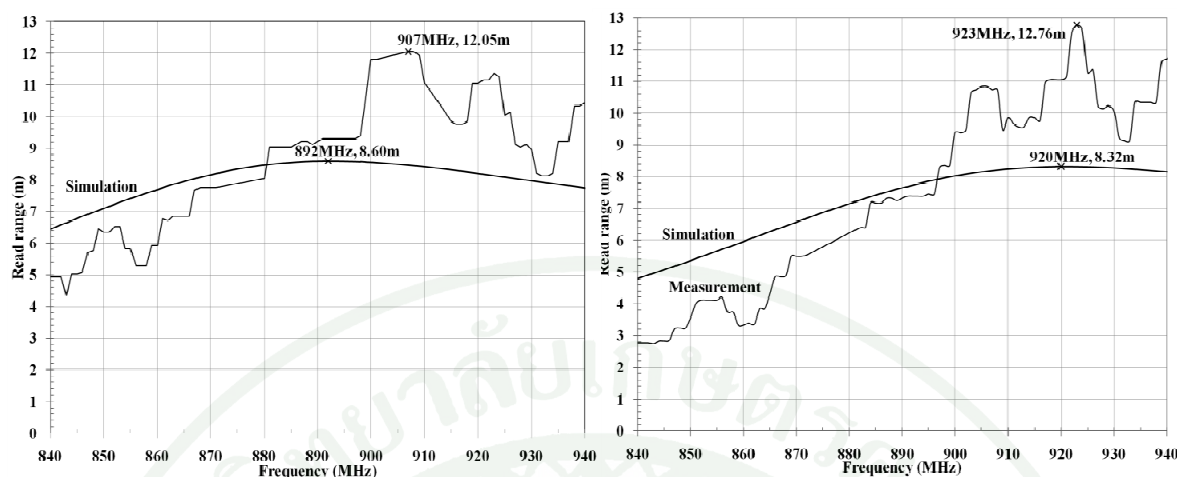
ขนาดลง 0.32 มิลลิเมตร

ภาพที่ 33 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าระยะอ่านได้จากการทดลองกับโปรแกรมจำลองของปาย ระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Dipole with tuning stub

(ก) สายอากาศที่สังพิมพ์ขนาดปกติ

(ข) สายอากาศที่สังพิมพ์แบบปรับขนาดเซขนาดลง 0.32 mm

สำหรับปายระบุลักษณะของสายอากาศแบบ Meandered dipole จากผลของการวัดดังแสดง ในภาพที่ 34(ก) ค่าระยะอ่านได้สูงสุดมีค่าคือ 12.05 เมตร ที่ความถี่ 907 MHz ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับที่กำหนดในการออกแบบในโปรแกรมจำลอง (900 MHz) ดังนั้นจึงได้ออกแบบสายอากาศแบบ Meandered dipole อีกครั้งโดยออกแบบให้สายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าระยะอ่านได้สูงสุดอยู่ที่ความถี่ 922.5 MHz และเมื่อนำสายอากาศที่ออกแบบใหม่มาตรวจวัดค่าระยะอ่านได้พบว่าค่าระยะอ่านได้สูงสุดของปายระบุลักษณะของสายอากาศแบบ Meandered dipole ในครั้งนี้มีค่า 12.76 เมตร ที่ความถี่ 923 MHz ดังแสดงในภาพ 34(ข)



(ก) ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 900 MHz

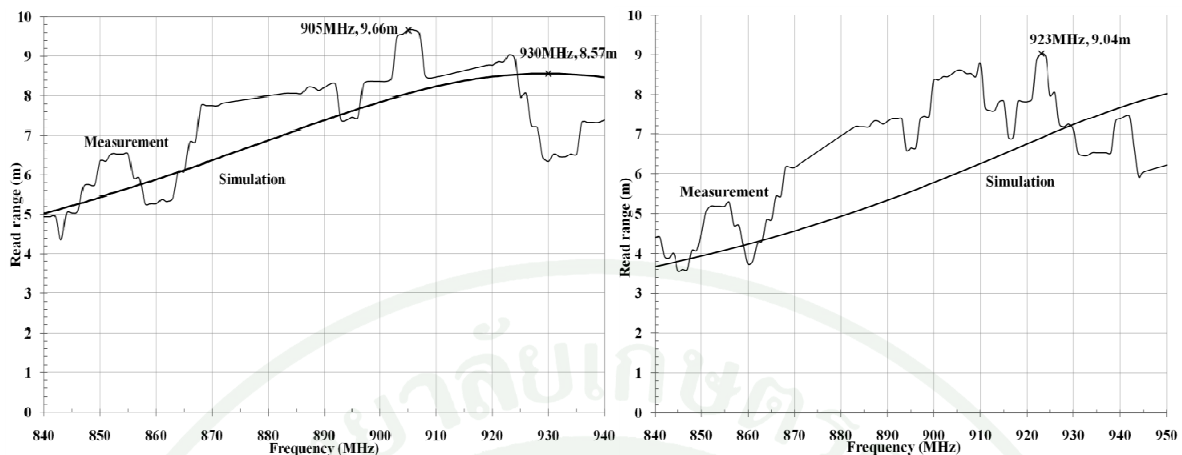
(ข) ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 922.5 MHz

ภาพที่ 34 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าระยะอ่านได้จากการทดลองกับโปรแกรมจำลองของป้าระบบ ลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Meandered dipole

(ก) ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 900 MHz

(ข) ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 922.5 MHz

สำหรับผลการวัดค่าระยะอ่านได้ของป้าระบบลักษณะของสายอากาศแบบ Patch antenna มีค่าระยะอ่านได้สูงสุด คือ 9.66 เมตร ที่ความถี่ 905 MHz ดังแสดงในภาพที่ 35(ก) ซึ่งความถี่ที่มีระยะอ่านได้สูงสุดของสายอากาศเลื่อนลงมาต่ำกว่าความถี่ที่ออกแบบประมาณ 20 MHz ดังนั้นจึงได้ออกแบบให้สายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าระยะอ่านได้สูงสุดของสายอากาศอยู่ที่ความถี่ 950 MHz ซึ่งสูงกว่าความถี่ที่ต้องการ (922.5 MHz) เพื่อมุ่งหวังให้ผลที่ได้จากการวัดของสายอากาศที่ออกแบบใหม่นี้ มีค่าระยะอ่านได้สูงสุดเลื่อนสูงขึ้นมาที่ความถี่ที่ต้องการ และผลที่ได้จากการวัดสายอากาศที่ออกแบบใหม่นั้น พบว่ามีค่าระยะอ่านได้สูงสุดคือ 9.04 เมตรที่ความถี่ 923 MHz ดังแสดงในภาพที่ 35(ข)



(ก) ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 922.5 MHz

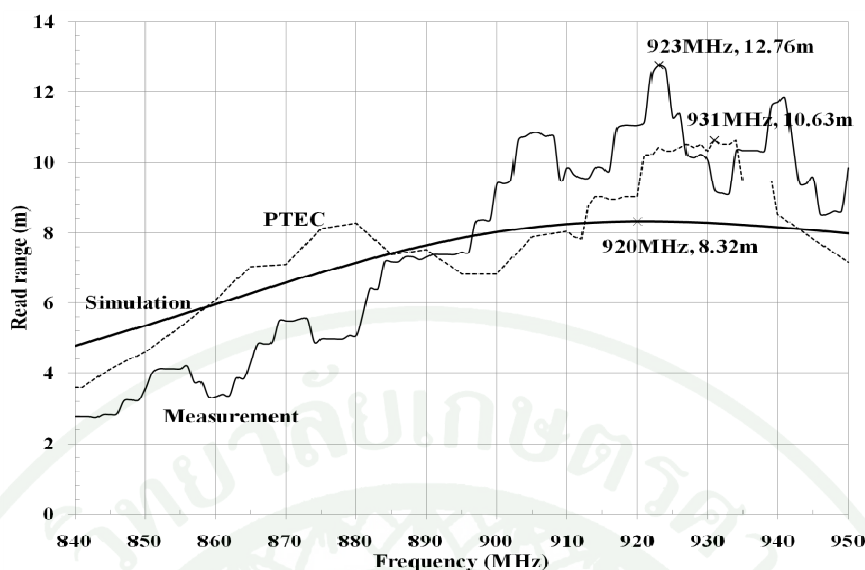
(ข) ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 950 MHz

ภาพที่ 35 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าระยะอ่านได้จากการทดลองกับโปรแกรมจำลองของปายระบ
ลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Patch antenna

(ก) ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 922.5 MHz

(ข) ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 950 MHz

นอกจากนั้น ได้นำปายระบุนลักษณะที่ผลิตขึ้นไปทดลองวัดค่าระยะอ่านได้ในห้องที่สามารถตัดสัญญาณรบกวนต่างๆ ได้ทั้งหมด (anechoic chamber) ที่ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) เพื่อหาประสิทธิภาพที่แท้จริงของปายระบุนลักษณะ ซึ่งตัวอย่างของผลการวัดค่าระยะอ่านได้ของปายระบุนลักษณะสายอากาศแบบ Meandered dipole ออกแบบให้มีค่า $\tau_{\max}$ ที่ความถี่ 922.5 MHz ซึ่งวัดใน anechoic chamber เปรียบเทียบกับผลการวัดค่าระยะอ่านได้ในครั้งแรก (ดังแสดงผลในภาพที่ 34(ข)) แสดงในภาพที่ 36



ภาพที่ 36 กราฟเปรียบเทียบผลของค่าระยะอ่านได้จากการทดลองในห้องที่มีสัญญาณเข้ามาได้และใน anechoic chamber ที่ PTEC ของป้ายระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Meandered dipole ร่วมกับผลที่ได้จากโปรแกรมจำลอง

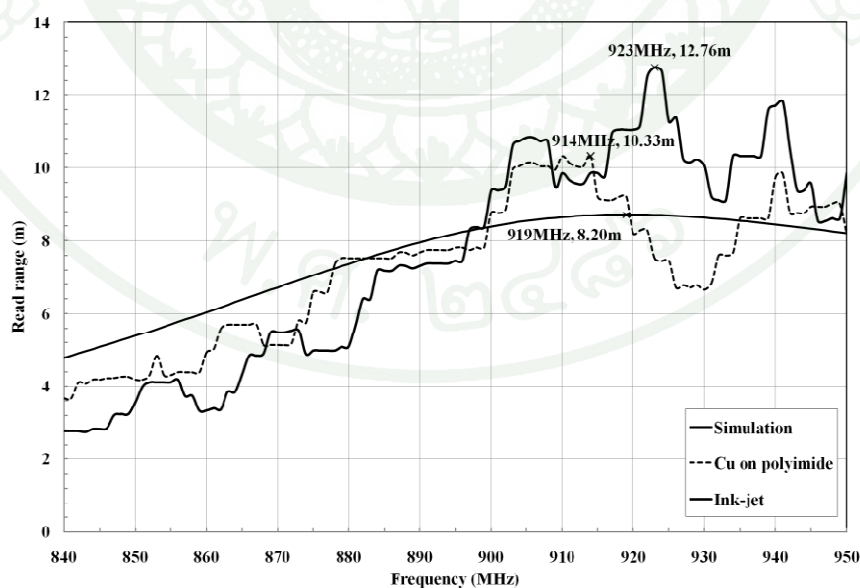
เพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทที่ได้ศึกษาวิจัย กับสายอากาศที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีที่ใช้ในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน คือการทำลายวงจรบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board, PCB) จึงได้จัดทำสายอากาศแบบ Meandered dipole ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันแต่ผลิตด้วยวิธีการต่างกันโดยออกแบบสายอากาศที่จะผลิตด้วยวิธีการที่ต่างกันทั้ง 2 แบบให้มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสูงสุดที่ความถี่ 922.5 MHz และสั่งพิมพ์สายอากาศจากเครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทด้วยเงื่อนไขที่ใช้ในการทำวิจัย (ขับเคลื่อนเป็นกระดาษ, สั่งพิมพ์ 5 ครั้งและอบที่อุณหภูมิ 150°C นาน 30 นาที) และด้วยวิธีสร้างลายวงจรด้วยแสง (photolithography) และการกัดลายพิมพ์ (etching) โดยเลือกใช้แผ่นบอร์ดชนิดอ่อน (Flexible Printed Circuit, FPC) ชนิด Flexible Copper Clad Laminated (FCCL) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นพลาสติกที่เคลือบสารตัวนำทองแดงไว้ด้านหนึ่งเป็นวัสดุขับเคลื่อนสำหรับการประดิษฐ์สายอากาศด้วยกระบวนการสร้างลายวงจรด้วยแสงและการกัด โดยรายละเอียดการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิตสายอากาศด้วยกระบวนการผลิตทั้ง 2 แบบแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์สายอากาศด้วยกระบวนการต่างกัน

คุณสมบัติ	เทคนิคในการสร้างลายวงจร	
	การสร้างลายวงจรบนแผ่น PCB ⁽¹⁴⁾	พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท
ชั้นสเตรต	polyimide	กระดาษ
ความหนาของชั้นสเตรต (μm)	25.4	309.2
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r)	4	1.5
ชนิดของสารตัวนำ	ทองแดง	เงิน
ความหนาของชั้นสารตัวนำ (μm)	35	5.43
ความนำไฟฟ้า (S/m)	5.96×10^7	32.29×10^7

ที่มา: ⁽¹⁴⁾ บริษัทวิศวกรแอนคัวร์จำกัด (2551)

สำหรับผลเปรียบเทียบค่าระยะอ่านได้ที่ได้จากการวัดด้วยวิธี fixed distance จากโปรแกรมจำลองและการทดลองของสายอากาศแบบ Meandered dipole ที่ประดิษฐ์ด้วยการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทและวิธีสร้างลายวงจรด้วยวิธีการผลิตแผ่น PCB ดังแสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 37 กราฟเปรียบเทียบผลค่าระยะอ่านได้ของสายอากาศแบบ Meandered dipole ที่ผลิตด้วยการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทและวิธีสร้างลายวงจรบนแผ่น PCB

โดยผลการวัดค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุสัญลักษณ์ของสายอากาศทั้ง 4 แบบ จากโปรแกรมจำลองและการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 12 ซึ่งประสิทธิภาพของป้ายระบุสัญลักษณ์ที่จัดทำขึ้นในงานวิจัยครั้งนี้จะถูกนำเสนอในหัวข้อของบทวิจารณ์ต่อไป

ตารางที่ 12 สรุปค่าระยะอ่านได้จากโปรแกรมจำลองและการทดลองของป้ายระบุสัญลักษณ์ที่ผลิตขึ้นด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท

รูปแบบสายอากาศของป้าย		ค่าระยะอ่านได้สูงสุด			
		โปรแกรมจำลอง		การทดลอง	
Dipole	τ_{max} ที่ 922.5 MHz	923 MHz	6.90 m	923 MHz	9.04 m
Dipole with tuning stub	ขนาดปกติ	917 MHz	8.33 m	923 MHz	12.76 m
τ_{max} ที่ 900 MHz	ปรับขนาดเซขขนาด	913 MHz	8.22 m	923 MHz	12.76 m
Meandered dipole	τ_{max} ที่ 900 MHz	892 MHz	8.60 m	907 MHz	12.05 m
	τ_{max} ที่ 922.5 MHz	920 MHz	8.32 m	923 MHz	12.76 m
Patch antenna	τ_{max} ที่ 922.5 MHz	930 MHz	8.57 m	905 MHz	9.66 m
	τ_{max} ที่ 950 MHz	960 MHz	8.23 m	923 MHz	9.04 m

วิจารณ์

จากสรุปผลค่าระยะอ่านได้สำหรับป้ายระบุลักษณะของสายอากาศทั้ง 4 รูปแบบ คือ สายอากาศแบบ Dipole, Dipole with tuning stub, Meandered dipole และ Patch antenna ที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยครั้งนี้ดังแสดงในตารางที่ 12 ซึ่งนำเสนอไปในข้างต้น พบว่า ผลของค่าระยะอ่านได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าผลจากโปรแกรมจำลอง สาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของค่าความต้านทานเชิงผิว (sheet resistivity) ระหว่างค่าที่ใช้ในการออกแบบและค่าจริงของสายอากาศ เนื่องจากค่าความต้านทานเชิงผิวที่ใช้ในการออกแบบ เป็นค่าที่ได้จากการประมาณค่าผลการวัดตัวอย่างลายพิมพ์ที่จัดทำขึ้นที่มีขนาดเหมาะสมกับเครื่องมือวัด (ขนาด 1×1 ตารางเซนติเมตร) ซึ่งแตกต่างจากขนาดจริงของสายอากาศที่สั่งพิมพ์ จึงทำให้ผลของค่าระยะอ่านได้ของสายอากาศที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากการคำนวณในโปรแกรมจำลองแตกต่างกัน นอกจากนี้ เนื่องจากค่าระดับกำลังงานขีดเริ่ม (P_{th}) และค่าอิมพีแดนซ์ของชิปอาร์เอฟไอดีที่ใช้ในการออกแบบเป็นค่าที่อ้างอิงจากบทความวิชาการที่นำเสนอผลของการตรวจวัดค่า sensitivity และค่าอิมพีแดนซ์ของชิปรุ่นเดียวกับที่ใช้ในการวิจัย ไม่ใช่ผลที่ได้จากการวัดชิปที่ใช้จริง ซึ่งชิปแต่ละตัวอาจมีค่ากำลังงานขีดเริ่มและค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากัน รวมถึงค่าแทนเจนต์ความสูญเสีย (Loss tangent, $\tan \delta$) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของกระดาษที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศในโปรแกรมจำลอง ได้เลือกใช้ค่าประมาณจากบทความทางวิชาการที่ได้ศึกษาและทดสอบกระดาษที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวัสดุที่เลือกใช้ในงานวิจัย และด้วยสาเหตุดังที่กล่าวมาข้างต้น จึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองและผลจากการวัดค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะได้ แต่เนื่องจากปัจจัยของความคลาดเคลื่อนไม่ส่งผลมากนัก จึงทำให้ผลการวัดค่าระยะอ่านได้ยังมีค่าสอดคล้องกับผลที่ได้จากโปรแกรมจำลอง

จากผลการทดลองสำหรับป้ายระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Dipole ซึ่งแสดงในภาพที่ 34 มีค่าระยะอ่านได้สูงสุดคือ 9.04 เมตรที่ความถี่ 924 MHz ดังแสดงในภาพที่ 32 และสำหรับป้ายระบุลักษณะของสายอากาศแบบ Dipole with tuning stub ทั้งแบบที่ไม่ได้ปรับขนาดและปรับขนาด พบว่ามีค่าระยะอ่านได้สูงสุดเท่ากันคือ 12.76 เมตรที่ความถี่ 923 MHz ดังแสดงในภาพที่ 33 ซึ่งผลการวัดสายอากาศทั้ง 2 รูปแบบ จำนวน 3 ชิ้นงาน ความถี่ที่ให้ค่าระยะอ่านได้สูงสุดใกล้เคียงกับความถี่ที่กำหนดในการออกแบบ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของสายอากาศแบบ Dipole with tuning stub ที่ออกแบบปรับขนาดเทียบกับไม่ได้ปรับขนาด พบว่าค่าระยะอ่านได้ของสายอากาศทั้งคู่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 33(ก) และ 33(ข) อาจเนื่องจากได้พิจารณาปรับการออกแบบสายอากาศให้มีความกว้างของลายพิมพ์เพิ่มขึ้น จากเดิม 1 มิลลิเมตร

เป็น 3 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถลดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของขนาดสายอากาศที่สังพิมพ์ได้ ดังนั้นการปรับขนาดเซกขนาดก่อนการสังพิมพ์จึงไม่มีผลกระทบต่อค่าระยะอ่านได้ของสายอากาศมากนัก

สำหรับป้าะระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Meandered dipole จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 34 เมื่อพบว่าความถี่ที่กำหนดให้มีความถี่อ่านได้สูงสุดในการออกแบบในโปรแกรมจำลอง มีค่าตรงกับความถี่ที่วัดได้จากชิ้นงานจริง จึงได้ออกแบบปรับแก้ไข จากเดิมที่กำหนดในโปรแกรมจำลองให้สายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (τ) และค่าระยะอ่านได้สูงสุดที่ความถี่ 900 MHz ซึ่งให้ผลการวัดค่าระยะอ่านได้สูงสุดมีค่า 12.05 เมตรที่ความถี่ 907 MHz ดังแสดงในภาพที่ 34(ก) เปลี่ยนเป็นกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าระยะอ่านได้สูงสุดในการออกแบบจำลองอยู่ที่ความถี่ 922.5 MHz ซึ่งผลของการวัดค่าระยะอ่านได้สูงสุดในครั้งนี้มีค่า 12.76 เมตร ที่ความถี่ 923 MHz ดังแสดงในภาพที่ 34(ข) ซึ่งตรงกับความต้องการในการออกแบบ

ในส่วนของผลการวัดค่าระยะอ่านได้สำหรับป้าะระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Patch จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 35 พบว่า ความถี่ที่ให้ค่าระยะอ่านได้สูงสุดในการออกแบบจำลอง มีค่าสูงกว่าความถี่ที่วัดได้จากชิ้นงานจริง จึงออกแบบปรับแก้ จากเดิมที่กำหนดในการออกแบบจำลองให้สายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าระยะอ่านได้สูงสุดที่ความถี่ 922.5 MHz ซึ่งให้ผลการวัดค่าระยะอ่านได้สูงสุด คือ 9.66 เมตร ที่ความถี่ 905 MHz ดังแสดงในภาพที่ 35(ก) เปลี่ยนเป็นออกแบบให้สายอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าระยะอ่านได้สูงสุดของสายอากาศอยู่ที่ความถี่ 950 MHz และผลที่ได้จากการวัด พบว่ามีค่าระยะอ่านได้สูงสุดคือ 9.04 เมตรที่ความถี่ 923 MHz ดังแสดงในภาพที่ 35(ข) ซึ่งตรงกับความต้องการออกแบบ

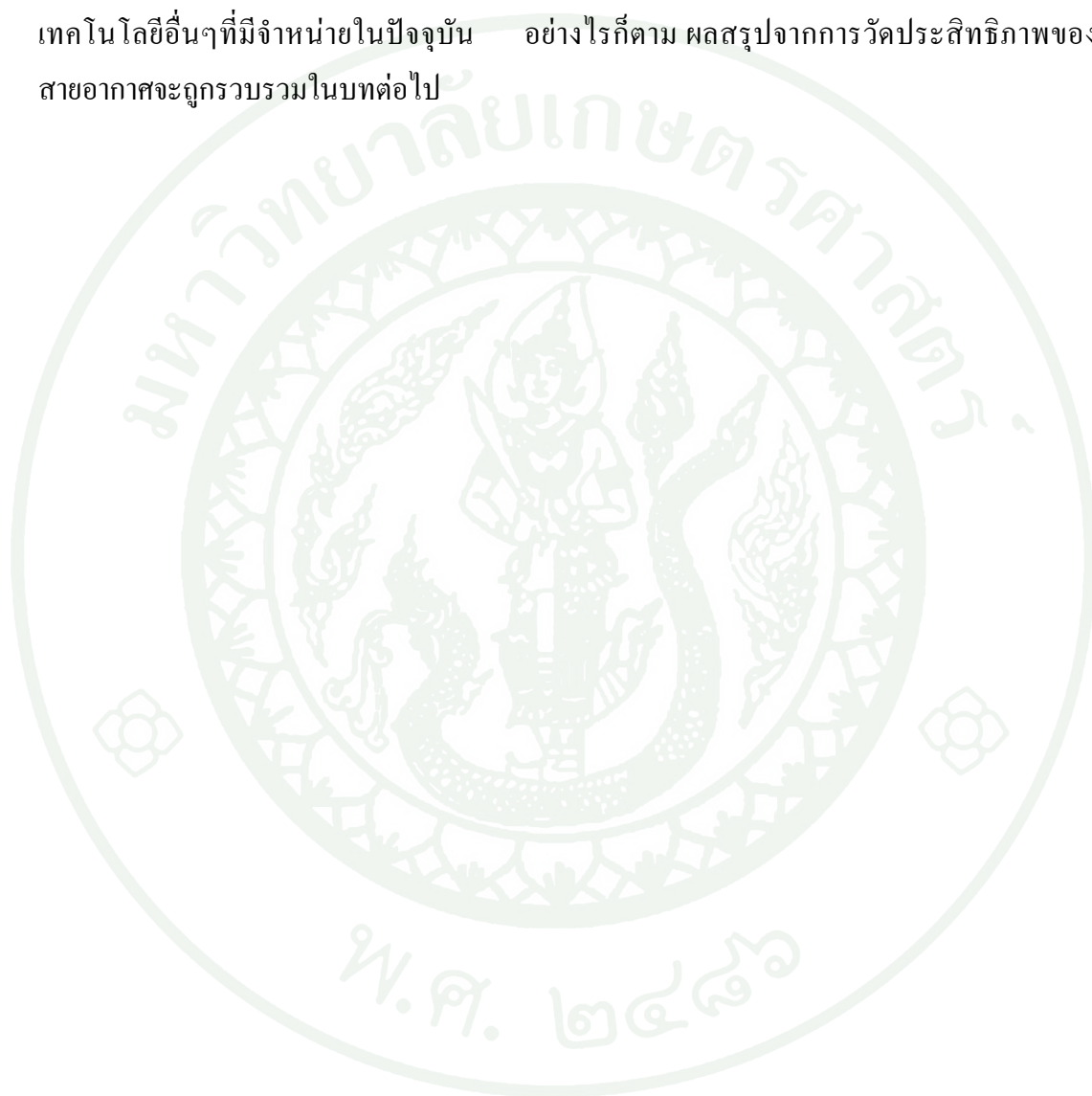
สำหรับผลการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพที่แท้จริงของป้าะระบุลักษณะที่มีสายอากาศแบบ Meandered dipole ที่นำไปวัดใน anechoic chamber เมื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดค่าระยะอ่านได้จริงในสถานการณ์ใช้งานปกติที่มีสัญญาณรบกวน ซึ่งผลของการเปรียบเทียบดังแสดงในภาพที่ 36 พบว่า ค่าระยะอ่านได้ที่วัดในห้อง anechoic chamber กับผลของค่าระยะอ่านได้จากการวัดด้วยวิธี fixed distance ที่ผ่านมามีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายถึง ผลของค่าระยะอ่านได้ของสายอากาศที่ผ่านมาสามารถเชื่อถือได้ นอกจากนี้ ได้ทดลองวัดค่าระยะอ่านได้ของป้าะระบุลักษณะทั้งหมดที่ความถี่ 922.5 MHz ด้วยวิธีปรับระยะห่างระหว่างป้าะกับเสาอากาศของเครื่องอ่านเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของป้าะระบุลักษณะเมื่อนำมาใช้งานจริงในสถานะที่มีสัญญาณรบกวน พบว่าค่าระยะอ่านได้ที่ความถี่ 922.5 MHz ของป้าะระบุลักษณะที่ประดิษฐ์ขึ้น มีค่าประมาณ 4.4-4.6 เมตร และใน

ภายหลัง ได้ตรวจวัดค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะทั้งหมดด้วยวิธีปรับระยะอีกครั้ง พบว่าค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น นั่นคือประมาณ 4.6-5.1 เมตร ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะทั้งหมดสูงขึ้นอาจเกิดเนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่ทำการทดลองทั้ง 2 ครั้งต่างกัน จากในครั้งแรกที่ทำการทดลองในห้อง และในครั้งต่อมาได้เปลี่ยนไปทำการทดลองในที่โล่ง ส่งผลให้ปัจจัยเรื่องสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองของการตรวจวัดทั้ง 2 ครั้งต่างกัน ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าสภาวะแวดล้อมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศเมื่อนำมาใช้งาน และการใช้เทคนิคการวัดด้วยวิธี fixed distance จะได้ผลที่น่าเชื่อถือได้มากกว่าการวัดด้วยวิธีปรับระยะเพราะสัญญาณรบกวนเป็นไม่อยู่ในกลุ่มตัวแปรควบคุม

ในส่วนของการพิจารณาผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของป้ายระบุลักษณะที่สายอากาศถูกผลิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท กับที่ผลิตขึ้นจากวิธีการสร้างลายวงจรบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ (PCB) โดยใช้วิธีการสร้างลายวงจรด้วยแสง (photolithography) และการกัด (etching) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน จากภาพที่ 37 พบว่า ผลการวัดค่าระยะอ่านได้ที่จากโปรแกรมจำลองและการทดลองของสายอากาศแบบ Meandered dipole ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นจากวิธีการสร้างลายวงจรบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ มีค่าใกล้เคียงกับผลของสายอากาศที่ประดิษฐ์จากการสังพิมพ์ โดยค่าระยะอ่านได้สูงสุดที่ได้จากการทดลองของสายอากาศทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงกว่าค่าระยะอ่านได้สูงสุดจากโปรแกรมจำลองเช่นเดียวกัน โดยค่าระยะอ่านได้สูงสุดของสายอากาศที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วยวิธีสร้างลายวงจรบนแผ่นลายวงจรพิมพ์มีค่า 10.33 เมตร ที่ความถี่ 914 MHz ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนไปเล็กน้อยจากผลที่ได้จากโปรแกรมจำลอง ที่มีค่าระยะอ่านได้สูงสุดที่ความถี่ 919 MHz เท่ากับ 8.2 เมตร

สำหรับผลการออกแบบและตรวจวัดค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID tag) ที่สังพิมพ์ทั้งหมด พบว่า ในการออกแบบให้สายอากาศของป้ายระบุลักษณะมีค่าระยะอ่านได้สูงสุดที่ความถี่ที่ต้องการนั้น สายอากาศแต่ละแบบจะมีเทคนิคในการออกแบบที่ต่างกัน ดังเช่น ถ้าต้องการให้ค่าระยะอ่านได้สูงสุดของสายอากาศอยู่ที่ความถี่ 922.5 MHz สำหรับสายอากาศ Dipole และ Meandered dipole ต้องออกแบบสายอากาศในโปรแกรมจำลองให้มีค่าระยะอ่านได้สูงสุดตรงกับความถี่ที่ต้องการ แต่สำหรับสายอากาศแบบ Dipole with tuning stub ต้องออกแบบให้สายอากาศมีค่าระยะอ่านได้สูงสุดที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่ต้องการ รวมไปถึงสายอากาศแบบ Patch antenna ที่ต้องออกแบบให้มีค่าระยะอ่านได้สูงสุดอยู่ที่ความถี่สูง

กว่าความถี่ที่ต้องการเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของค่าความต้านทานเชิงผิว (sheet resistivity) ที่เลือกใช้ในการออกแบบด้วย ซึ่งค่าระยะอ่านได้โดยรวมของป้ายระบุลักษณะที่สังพิมพ์ในช่วงความถี่ 840-960 MHz มีค่าประมาณ 2.8-12.76 เมตร เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับป้ายระบุลักษณะที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน ซึ่งมีค่าระยะอ่านได้ประมาณ 1-12 เมตร (Acentech (Thailand) co. Ltd.) จะเห็นได้ว่าป้ายระบุลักษณะที่ผลิตขึ้นมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับป้ายระบุลักษณะที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีอื่นๆที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ผลสรุปจากการวัดประสิทธิภาพของสายอากาศจะถูกรวบรวมในบทต่อไป



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้มีที่มาจากความต้องการเทคโนโลยีการผลิตชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสะดวกรวดเร็ว ราคาประหยัด เพื่อใช้สำหรับการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับห้องปฏิบัติการวิจัยหรือมหาวิทยาลัย และเพื่อให้ได้รับการพัฒนาสำหรับเป็นเทคโนโลยีการผลิตในอุตสาหกรรม ทั้งนี้เทคโนโลยีการผลิตที่นำเสนอในงานวิจัยในครั้งนี้คือการประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทขนาดเล็กที่มีจำหน่ายในท้องตลาดให้สามารถใช้ได้กับการพิมพ์สารตัวนำไฟฟ้า เพื่อทดแทนการใช้เครื่องพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทที่พัฒนาสำหรับการพิมพ์สารตัวนำโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมซึ่งมีราคาหลักล้านบาท ที่ทำให้เป็นการไม่สะดวกต่อหน่วยงานวิจัยหรือมหาวิทยาลัยที่มีข้อจำกัดเรื่องงบประมาณสนับสนุนงานวิจัย โดยงานวิจัยในครั้งนี้ได้นำเสนอการประดิษฐ์และทดสอบชิ้นส่วนของอุปกรณ์การสื่อสารระยะใกล้เพื่อทดสอบการใช้งานได้ของเทคโนโลยีการผลิตที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มุ่งศึกษาเทคโนโลยีการผลิตสายอากาศสำหรับวงจรป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง ที่มีการขยายตัวทางความต้องการการใช้งานอย่างรวดเร็วและแพร่หลาย

และจากผลการวัดประสิทธิภาพของป้ายระบุลักษณะที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่า งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จในการค้นคว้าเทคโนโลยีการผลิตสายวงจรอิเล็กทรอนิกส์และชิ้นส่วนของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายในเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ท โดยสามารถนำเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทขนาดเล็กที่ใช้งานในที่อยู่อาศัยหรือสำนักงานมาประยุกต์ใช้กับการสังพิมพ์สารตัวนำไฟฟ้า และประสบผลเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งข้อสรุปสำหรับวัสดุและอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมในการวิจัยในครั้งนี้ ในส่วนของเครื่องพิมพ์พบว่า เครื่องพิมพ์ที่มีความเหมาะสมคือ เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทรุ่น R230 ที่มีเทคนิคการพิมพ์แบบ piezoelectric และมีฟังก์ชันการสังพิมพ์ลงบนแผ่นซีดี ที่สามารถลดความคลาดเคลื่อนและการเปื้อนของลายพิมพ์สายอากาศที่เกิดขึ้นจากการสังพิมพ์ซ้ำได้ ในส่วนของวัสดุนำไฟฟ้าที่เลือกใช้ พบว่า หมึกนำไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมกับเทคนิคการพิมพ์ที่วิจัย คือหมึกนำไฟฟ้าโลหะเงินที่มีขนาดอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตร รุ่น Silverjet DGP-40LT-15C ที่มีเสถียรภาพที่ดี สามารถคงสภาพและคุณสมบัติต่างๆของหมึกไว้ได้ในระหว่างดำเนินการผลิต และสำหรับวัสดุซับสเตรตที่มีความเหมาะสมที่จะพิจารณาเลือกใช้ในการผลิตป้ายระบุลักษณะในการวิจัยในครั้งนี้ คือ กระดาษสำหรับพิมพ์ภาพถ่ายแบบกึ่งมันกึ่งด้าน ที่มีคุณสมบัติสามารถกันน้ำได้เป็นอย่างดี และมีน้ำหนัก 235 กรัมต่อตารางเมตร

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้ออกแบบสายอากาศของป้ายระบุลักษณะทั้งหมด 4 รูปแบบ ได้แก่ Dipole, Dipole with tuning stub, Meandered dipole และ Patch antenna และเนื่องจากความหนาของการพิมพ์ชั้นสารตัวนำเมื่อสั่งพิมพ์เพียงหนึ่งครั้งมีความหนาไม่เพียงพอ ส่งผลให้สายอากาศมีค่าความต้านทานสูง จึงมีความจะเป็นในการสั่งพิมพ์ชั้นสารตัวนำซ้ำกันหลายๆครั้งเพื่อเพิ่มความหนาของลายพิมพ์สายอากาศ ซึ่งในงานวิจัยในครั้งนี้ ใช้วิธีการสั่งพิมพ์ลายพิมพ์ของสายอากาศจำนวน 5 ครั้ง และนำไปอบในเตาอบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 150°C นาน 30 นาที โดยวิธีนี้จะทำให้ลายพิมพ์มีค่าความต้านทานเชิงผิวเท่ากับ $0.056 \ \Omega/\text{sq}$ ซึ่งจะต้องใช้ค่านี้ในการออกแบบสายอากาศต่อไป และเนื่องด้วยการสั่งพิมพ์ซ้ำในการประดิษฐ์สายอากาศ ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของขนาดสายอากาศที่จะกว้างกว่าที่ออกแบบไว้ในโปรแกรมจำลอง จึงได้มีการศึกษาเรื่องขนาดของความคลาดเคลื่อนนี้ พบว่าความคลาดเคลื่อนมีขนาดคงที่คือประมาณ 0.32 มิลลิเมตร แม้ว่าจำนวนครั้งของการสั่งพิมพ์จะเพิ่มขึ้นและความกว้างของขนาดลายพิมพ์จะแตกต่างกันออกไป และได้มีการทดลองออกแบบสายอากาศแบบที่สั่งพิมพ์ตามขนาดที่ออกแบบไว้และแบบที่ปรับลดเซกความคลาดเคลื่อนทางความกว้างของสายอากาศเพื่อให้ได้ขนาดของชิ้นงานสายอากาศตรงตามขนาดที่ออกแบบไว้ สายอากาศที่สั่งพิมพ์จะถูกนำมาประกอบกับชิป UCODE G2XL เพื่อประดิษฐ์ป้ายระบุลักษณะและนำไปตรวจวัดประสิทธิภาพค่าระยะอ่านได้ในช่วงความถี่ 840-950 MHz ด้วยวิธี fixed distance ซึ่งเป็นวิธีการวัดที่กำหนดระยะห่างระหว่างป้ายระบุลักษณะกับเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีคิงที่ และใช้การวัดกำลังงานที่น้อยที่สุดหลังจากถูกลดทอนด้วยตัวลดทอนสัญญาณ (attenuator) ของการส่งสัญญาณระหว่างป้ายและเครื่องอ่าน แล้วจึงแปลงค่ากำลังงานกลับเป็นค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะ และด้วยการวัดประสิทธิภาพวิธีนี้ จะช่วยลดผลกระทบจากการรบกวนสัญญาณจากสิ่งแวดล้อมได้

จากผลการทดลองวัดชิ้นงานป้ายระบุลักษณะที่ประดิษฐ์ขึ้น ถึงแม้จะมีความคลาดเคลื่อนของขนาดสายอากาศเนื่องจากการสั่งพิมพ์ซ้ำหลายครั้ง แต่จากผลการวัดระยะอ่านได้ พบว่าความคลาดเคลื่อนนี้ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศมากนัก ทั้งนี้ขึ้นกับขนาดของสายอากาศ โดยถ้าสายอากาศมีขนาดกว้าง เปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าน้อยกว่าสายอากาศขนาดแคบ และจากผลโดยรวมของค่าระยะอ่านได้ที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับผลจากโปรแกรมจำลองของป้ายระบุลักษณะที่ผลิตขึ้นมาทั้งหมด พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าระยะอ่านได้สูงสุดที่ความถี่ตรงกับที่ต้องการ ถึงแม้ว่าผลของค่าระยะอ่านได้จากการวัดมีค่าสูงกว่าผลของโปรแกรมจำลอง ซึ่งอาจมีสาเหตุเกิดจากค่าความต้านทานเชิงผิวที่ใช้ในการออกแบบเป็นค่าที่ได้จากการวัดตัวอย่างลายพิมพ์ซึ่งมีขนาดแตกต่างกับขนาดของสายอากาศที่สั่งพิมพ์ ดังนั้นสายอากาศที่สั่งพิมพ์จึงมีค่าความต้านทานเชิงผิวน้อยกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบ ส่งผลให้ค่าระยะ

อ่านได้จากการวัดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากโปรแกรมจำลอง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถเทียบเท่ากับประสิทธิภาพของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง ที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน เช่น ช่วงความถี่ในการใช้งาน 860-960 MHz, วัสดุส่วนประกอบของสายอากาศได้แก่ เงินและทองแดง, มาตรฐาน EPC Gen2 เป็นต้น และมีค่าระยะอ่านได้อยู่ในช่วงเดียวกัน (ประมาณ 1-12 เมตร)

นอกจากนั้น สายอากาศของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถนำไปปรับใช้ได้หลายย่านความถี่ โดยที่สายอากาศแบบ Meandered dipole และ Dipole with tuning stub มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในประเทศไทย เพราะค่าระยะอ่านได้ของสายอากาศทั้งสองแบบมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงคลื่นความถี่วิทยุ (bandwidth) ที่แคบและอยู่ในช่วงที่อนุญาตให้มีการใช้งานในประเทศไทย (920-925 MHz) ซึ่งจะมีค่าระยะอ่านได้ประมาณ 12 เมตร แต่สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในย่านความถี่อื่นในต่างประเทศ (840-960 MHz) สายอากาศที่มีความเหมาะสมคือ สายอากาศแบบ Dipole และ Patch antenna เพราะในช่วงความถี่สากล (840-960 MHz) ค่าระยะอ่านได้ของสายอากาศทั้งสองแบบมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน และมีช่วงความถี่ที่ให้ค่าระยะอ่านได้สูงสุดค่อนข้างกว้าง จึงทำให้สายอากาศทั้งสองรูปแบบนี้สามารถนำไปใช้ได้หลายย่านความถี่ โดยมีค่าระยะอ่านได้ประมาณ 4-9 เมตร

ในแง่ของราคาค่าต้นทุนในการผลิตป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุในการวิจัยในครั้งนี้ ได้คำนวณจากปริมาตรของหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้ในการสังพิมพ์สายอากาศแต่ละแบบ พบว่า ราคาค่าต้นทุนเมื่อเทียบเป็นเหรียญสหรัฐของ ป้ายระบุลักษณะที่ผลิตขึ้นมีราคาประมาณ 7-20 เซนต์ ขึ้นอยู่กับรูปแบบของสายอากาศ ยกตัวอย่างเช่น ต้นทุนของสายอากาศแบบ Dipole มีราคาประมาณ 8.6 เซนต์ ส่วนต้นทุนของสายอากาศแบบ Patch antenna ราคาประมาณ 19 เซนต์ เป็นต้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับราคาของป้ายระบุลักษณะในปัจจุบัน ที่มีค่าประมาณ 10-20 เซนต์ ถือได้ว่ามีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นเทคนิคการผลิตป้ายระบุลักษณะที่วิจัยในครั้งนี้ จึงมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับความต้องการในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่ต้องการเทคโนโลยีการผลิตอุปกรณ์ที่มีต้นทุนต่ำ

ทั้งนี้ เทคโนโลยีการผลิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในหน่วยงานหรือมหาวิทยาลัยที่ศึกษาค้นคว้าเรื่องป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อใช้ประดิษฐ์ตัวอย่างชิ้นงานต้นแบบ ที่อยู่ระหว่างการทำวิจัย เพื่อ

นำมาทดสอบประสิทธิภาพ ทำให้ลดขั้นตอน ประหยัดเวลาและลดต้นทุนในการผลิต ซึ่งส่งผลทำให้การศึกษาวิจัยเรื่องของเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีมีความสะดวกมากขึ้น

ข้อเสนอแนะ

จากข้อมูลที่ได้ศึกษาระหว่างการดำเนินงานวิจัย และจากผลของการดำเนินงาน ทางผู้วิจัยขอเสนอแนะแนวทางอันคาดว่าจะจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. แนวทางของงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการพิมพ์ระบบอิงค์เจ็ทรูปแบบอื่นๆได้ เช่น เทคโนโลยีการพิมพ์ระบบ thermal, electrostatic หรือ acoustic ได้ และสามารถนำไปปรับใช้กับเทคโนโลยีการพิมพ์อื่นๆได้

2. จากกราฟการเปรียบเทียบผลค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะที่ผลิตขึ้น พบว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองและผลที่ได้จากการวัด สาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากค่าแทนเจนต์ความสูญเสีย (Loss tangent, $\tan \delta$) หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของกระดาษ, ค่าอิมพีแดนซ์ของชิปอาร์เอฟไอดี (Z_c) และระดับกำลังงานขีดเริ่มของชิป (P_{th}) ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศในโปรแกรมจำลอง ได้เลือกใช้ค่าที่อ้างอิงจากบทความทางวิชาการ ซึ่งอาจมีค่าแตกต่างกับค่าจริงของวัสดุที่เลือกใช้ในการทดลอง ดังนั้นถ้ากระดาษและชิปอาร์เอฟไอดีที่ใช้ในการทดลองไปวัดค่าที่แท้จริงของตัวแปรต่างๆดังกล่าวข้างต้น อาจเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถลดความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากโปรแกรมจำลองและผลที่ได้จากการวัดได้

3. ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างผลค่าระยะอ่านได้ที่ได้จากโปรแกรมจำลองและผลจากการวัดของป้ายระบุลักษณะที่ผลิตขึ้น ก็คือค่าความต้านทานเชิงผิว (sheet resistivity) ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศของป้ายระบุลักษณะ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการวัดตัวอย่างลายพิมพ์ที่สั่งพิมพ์ให้มีขนาดเหมาะสมกับเครื่องมือวัด ไม่ใช่ผลการวัดจากลายพิมพ์ของสายอากาศที่ผลิตขึ้นจริง ดังนั้น ถ้าออกแบบปรับเพิ่มความกว้างลายพิมพ์ของสายอากาศให้มีขนาดเหมาะสมที่จะสามารถนำไปวัดค่าความต้านทานด้วยเครื่องมือวัดได้ (ไม่น้อยกว่า 1 เซนติเมตร) จะทำให้ได้ค่าความต้านทานเชิงผิวที่แท้จริง และอาจเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถลดความคลาดเคลื่อนของผลค่าระยะอ่านได้ของป้ายระบุลักษณะได้

4. เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องขนาดของสายอากาศที่สามารถส่งพิมพ์ได้ไม่เกิน 13×12 ตารางเซนติเมตร เพื่อเป็นการลดต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการผลิตชิ้นงาน จึงควรส่งพิมพ์สายอากาศครั้งละหลายๆชิ้น และนำมาตัดแบ่งเป็นแต่ละชิ้นภายหลัง หรืออาจต้องมีการปรับแก้หรือเพิ่มเติมอุปกรณ์ของเครื่องพิมพ์ให้มีพื้นที่ในการส่งพิมพ์กว้างขึ้น

5. ราคาต้นทุนของป้ายระบุลักษณะด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ผลิตขึ้นอาจเพิ่มสูงขึ้น เมื่อคิดค่า ต้นทุนของเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต (Hardware cost) แต่ราคาต้นทุนโดยหลักแล้วของเทคโนโลยีการผลิตนี้ คือ หมึกนำไฟฟ้า ที่มีราคาค่อนข้างสูง เพราะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นถ้าสามารถจัดหาวัสดุต่างๆ ได้ภายในประเทศหรือจากแหล่งผลิตที่มีราคาถูกลง จะเป็นการช่วยลดต้นทุนของชิ้นงานที่ประดิษฐ์ขึ้นจากเทคโนโลยีนี้ได้ อีกแนวทางหนึ่งซึ่งอาจเป็นการช่วยลดต้นทุนการผลิตต่อชิ้นงานคือการลดการใช้ปริมาตรของหมึก ซึ่งหมายถึงการลดขนาดหรือความหนาของสายอากาศ ทั้งนี้ราคาต้นทุนที่ต่ำลงอาจต้องชดเชยด้วยประสิทธิภาพของสายอากาศ ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยในรายละเอียดต่อไป

6. จากการศึกษาผลของความคลาดเคลื่อนของสายอากาศ ซึ่งสาเหตุหนึ่งเกิดจากการคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกระดาศจากตำแหน่งเดิมเมื่อส่งพิมพ์ซ้ำ ซึ่งปัญหาที่พบนี้สามารถแก้ไขได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมกับเครื่องพิมพ์ เช่น ระบบเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของซิปสเตรต เพื่อเพิ่มความแม่นยำของเครื่องพิมพ์ให้ดีขึ้นได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ชมรมนักวิทยาศาสตร์เล่นจังหวัดนนทบุรี ในความควบคุมของคณะกรรมการกิจการ
โทรคมนาคมแห่งชาติ. 2549. สายอากาศและการแพร่กระจายคลื่น (2). สารานุกรมทาง
เทคนิค. แหล่งที่มา: http://www.hs1an.org/index.php?option=com_content&task=view&id=239&Itemid=29, 17 มกราคม 2553.
- ณชนารถ สิริพรพาณิชย์. 2551. **RFID**. RFID (Radio Frequency Identification). แหล่งที่มา:
<http://rfid-datacom.blogspot.com>, 10 ธันวาคม 2552.
- ทวีศักดิ์ กอนันต์กุล. 2548. เทคโนโลยี RFID กับผลกระทบต่อประเทศไทย. ศูนย์เทคโนโลยี
อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. แหล่งที่มา: www.ttc.most.go.th/stvolunteer/UploadClinic/RFID/A_ReflexRFID.pdf, 29 ธันวาคม 2552.
- ธนิต ไสรัตน์. 2552. **RFID** เทคโนโลยีแห่งโลกอนาคตในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันโล
จิสติกส์. แหล่งที่มา: <http://www.tanitsorat.com>, 2 กุมภาพันธ์ 2553.
- บริษัท วิคเตอร์แอนด์อาร์ จำกัด. 2551. **DataSheet**. FPC แผ่นบอร์ดชนิดอ่อน. แหล่งที่มา:
www.victorandr.com, 14 มกราคม 2553.
- พิชญา วัชรโรทัย. 2552. **EPC/RFID** เทคโนโลยีประโยชน์มหาศาล. สมาคมผู้ประกอบการกิจ
อันตรา. แหล่งที่มา: http://www.hasla.or.th/Portals/4/Download/EPC_RFID%20เทคโนโลยีประโยชน์มหาศาล.pdf, 14 มกราคม 2553.
- เผ่าศักดิ์ ศิริสุข, อภิศักดิ์ วรพิเชฐ และ ศาวิสดี บุญยะเวศ. 2551. โครงการวิจัยและพัฒนาตัวอ่าน
RFID ย่าน UHF. ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. แหล่งที่มา:
<http://service.nectec.or.th/project0/pgShowPrj.php?chrFlg01=1&chvCodPrj=RD5108&color=brown>, 14 มกราคม 2553.

วิษกร ชูเพชรพงษ์ และ เผ่าศักดิ์ ศิริสุข. 2551. การศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติป้ายชื่อ RFID ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในย่าน UHF เพื่อการจัดการโลจิสติกส์, น. 56-67. ใน การประชุมเชิงวิชาการประจำปีด้านการจัดการห่วงโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ ครั้งที่ 8. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, กรุงเทพฯ

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. 2549. รู้จักกับเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัทซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน). กรุงเทพฯ.

สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ. 2548. สรุปมติที่ประชุม กทช. ครั้งที่ 57/2548. วาระ/มติการประชุม กทช. แหล่งที่มา: http://house.ntc.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=200&Itemid=42, 26 มกราคม 2552.

_____. 2549. ประกาศคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่อง การใช้เครื่องวิทยุคมนาคมประเภท Radio Frequency Identification : RFID. กฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง. แหล่งที่มา: http://www.ntc.or.th/uploadfiles/1189657350_RFID.pdf, 26 มกราคม 2552.

สุรพล จันท. 2545. เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมสายอากาศ. มหาวิทยาลัยศรีปทุม. แหล่งที่มา: <http://elearning.spu.ac.th/homepage/een424/Antenna%20Web.htm>, 16 กุมภาพันธ์ 2553.

อนุชิต. 2550. **Radio Frequency (RF) Basics**. RFID Reference. แหล่งที่มา: <http://www.rfidthailand.com/?q=taxonomy/term/2>, 6 ตุลาคม 2552.

A-VAC Industries. 2010. **VACUUM OVEN 11-1/8x9-3/4x9-3/4 30Hg STD ECONOMY 120V 50/60HZ 1000W 8.4A**. Economy Vacuum Ovens. Available Source: <http://www.avac.com/ovens.php>, 20 February 2010.

Acentech (Thailand) co. Ltd. n.d. **Basic characteristics**. RFID Ultra High Frequency Tag. Available Source: http://www.acentech.net/cms/index.php?option=com_content&task=category§ionid=15&id=88&Itemid=172, 20 December 2009.

Advanced Nano Products co. Ltd. n.d. **Product index.** Materials for Electronics/ Display: Nano silverjet for ink-jet printing. Available Source: http://anapro.com/english/product/nano_silver.asp, 3 August 2009.

Agilent Technologies, Inc. 2008. **Radiation Patterns and Antenna Characteristics for Momentum.** Advanced Design System 2008 update 1 Documentation. Available Source: C:\ADS2008U1\doc\search.html, 16 March 2010.

Berggren, M., T. Kugler, T. Remonen, D. Nilsson, C. Miaoxiang and P. Norberg. 2001. Paper Electronics and Electronic Paper, pp. 300 – 303. *In* **First International IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics 2001.** Potsdam, Germany.

Bjorninen, T., S. Merilampi, L. Ukkonen, L. Syndanheim and P. Ruuskanen. 2009. The Effect of Fabrication Method on Passive UHF RFID Tag Performance. **International Journal of Antennas and Propagation** 2009:8.

Chrusciel, E. 2008. High-Tech Materials Deposition for Piezoelectric Drop-on-Demand Ink-jet. **ECNasiamag.com.** Available Source: <http://www.ecnasiamag.com/article-21720-hightechmaterialsdepositionforpiezoelectricdropdemandink-jet-Asia.html>, 19 January 2009.

Creative Materials Incorporated. n.d. **Data Sheet.** Available Source: <http://www.creativematerials.com/datasheets.html>, 23 August 2008.

Dobkin, D. M. 2004. **Antenna: Radiation Pattern.** Introduction to Wireless Links for Digital Communication. Available Source: http://www.enigmatic-consulting.com/Communications_articles/Radio_links_part2/Radios2_antennas.html, 2 August 2009.

Dvorson's Food Service Equipment, Inc. 2010. **Farberware T490C**. Commercial Convection Oven. Available Source: <http://www.dvorsons.com/Farberware/FarberwareConvecOven.html>, 20 February 2010.

Electronics Source. 2009. **Evaluation Board**, UHF RFID Receiver. Available Source: <http://www.es.co.th/detail.asp?Prod=AS3990DB>, 23 May 2009.

Epson (Thailand) co. Ltd. n.d. **Epson Stylus T11**. Inkjet Printers. Available Source: http://www.epson.co.th/products/printers/inkjet/EPSON_Stylus_T11.shtml, 7 Oct. 2008.

_____. n.d. **Epson Stylus C90**. Inkjet Printers. Available Source: http://www.epson.co.th/products/downloads/C90_specs.pdf, 7 Oct. 2008.

_____. n.d. **Epson Stylus Photo R230**. Inkjet Printers. Available Source: http://www.epson.co.th/products/downloads/R230_specs.pdf, 14 Jul. 2009.

Fan, A. 2009. **A Compact Meander Microstripe Antenna for Bluetooth Headset**. Department of Research and Development, Namtai Electronic (ShenZhen) Co. Ltd. Available Source: www.tm.agilent.com.cn, 20 December 2009.

Finkenzeller, K. 2003. **RFID Handbook: Fundamentals and Applications in contactless Smart Cards and Identifications**. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.

Greer, J. R. and R. A. Street. 2007. Thermal Cure Effects on Electrical Performance of Nanoparticle Silver Inks. **Acta Materialia** 55(18): 6345 – 6349.

Hanson, E. n.d. **How an ink jet printer works**. Society for Imaging Science and Technology. Available Source: http://www.imaging.org/ist/resources/tutorials/inkjet_printer.cfm, 8 Jan. 2009.

Katz, D., G. Ouellette, R. Gentile and G. Olivadoti. 2006. **Fast, Versatile Blackfin® Processor Handle Advanced RFID Reader Applications**. Analog Dialogue 40-09. Available

Source: www.analog.com/analogdialogue, 16 February 2010.

Le, H. P. 1998. Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology. **The Journal of Imaging Science and Technology** 42(1): 49-62.

Lee, H-H., K-S. Chou, K-C. Huang. 2005. Ink-jet Printing of Nanosized Silver Colloids. **Nanotechnology** 16(10): 2436-2441.

Liao, S. Y. 1990. **Microwave Devices and Circuits**. 3rd Edition, Prentice-Hall, Inc. N.J., USA.

Liu, Z., Yi Su, K. Varahramyan. 2005. Inkjet-printed silver conductors using silver nitrate ink and their electrical contacts with conducting polymers. **Thin Solid Films** 478(1-2): 275-279.

Ludwig, R. and P. Betchko. 2000. **RF Circuit Design Theory and Applications**. 2nd Edition, Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA.

Mei, J., M. R. Lovell and M. H. Mickle. 2005. Formulation and Processing of Novel Conductive Solution Inks in Continuous Ink-jet Printing of 3-D Electric Circuit. **IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing** 28(3): 265-273.

Metaxas, A.C. 1996. **Foundations of Electro Heat**. A Unified Approach. John Wiley and Sons. Ltd., UK.

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.
- Nishi, S. 2007. Direct Metal Patterning by Ink-jet Technology, pp. 297-300. *In 6th International Conference on Polymer and Adhesives in Microelectronics and Photonics 2007*. Tokyo, Japan.
- NXP Semiconductors. 2009. **Datasheet**. Ultra high frequency smart label ICs. Available Source: http://www.nxp.com/acrobat_download/literature/9397/75016225.pdf, 26 January 2009.
- P-N Designs, Inc. 2009. **Skin depth**. Microwaves101.com. Available Source: <http://www.microwaves101.com/encyclopedia/skindepth.cfm>, 3 March 2010.
- Pongpaibool, P. 2008. A Study on Performance of UHF RFID Tags in a Package for Animal Traceability Application, pp. 741-744. *In 5th ECTI-CON 2008*. Krabi, Thailand.
- Poynting Antenna (Pty) Ltd. n.d. **Datasheet**. Circular Patch Antenna: PATCH-A0025. Available Source: www.poynting.co.za, 16 February 2010.
- Pozar, D. M. 2005. **Microwave Engineering**. 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- 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.
- Rida, A., L. Yang and M. M. Tentzeris. 2007. Design and Characterization of Novel Paper-Based Ink-jet-Printed UHF Antennas for RFID and Sensing Applications, pp. 2749 – 2752. *In IEEE AP-S International Symposium 2007*. Hawaii, USA.

- Rida, A., L. Yang and M. M. Tentzeris. 2009. Conductive Inkjet-Printed Antennas on Flexible Low-Cost Paper-Based Substrates for RFID and WSN Applications. **Antennas and Propagation Magazine** 51(3): 13-23.
- Santa Clara, C. 2008. **High-Tech Materials Deposition: The New Frontier for Piezoelectric Drop-on-Demand Inkjet Technology**. FUJIFILM Dimatix Materials Deposition. Available Source: http://www.dimatix.com/files/Materials_Deposition_Backgrounder_PR_5_13_08.pdf, 20 March 2009.
- Sarma, S. 2008. RFID Technology and Its Applications, pp. 16-39. In Stephen B. Miles, Sanjay E. Sarma and John R. Williams. **RFID Technology and Applications**. The Cambridge University Press, United Kingdom
- Sen, B. K. and R. L. Wheeler. 1998. Skin Effects models for Transmission Line Structures using Generic SPICE Circuit Simulators, pp. 128-131. In 7th **IEEE topical meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging**. West point, New York.
- STMicroelectronics. 2009. **DataSheet. XRAG2**. Available Source: <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/12950.pdf>, 26 January 2009.
- Suganuma, K., D. Wakuda, M. Hatamura and K-S. Kim. 2007. Ink-jet Printing of Nano Materials and Processes for Electronics Applications, pp. 1-4. In **International Symposium on High Density packaging and Microsystem Intergration 2007**. Shanghai, China.
- Tentzeris, M. M., L. Yang, A. Rida, A. Traille, R. Vyas and T. Wu. 2007. RFID's on Paper using Ink-jet-Printing Technology: Is it the first step for UHF Ubiquitous "Cognitive Intelligence" and "Global Tracking"?, pp. 1-4. In **1st Annual RFID Eurasia 2007**. Istanbul, Turkey.

- Vyas, R., A. Rida, L. Yang and M. M. Tentzeris. 2007. Design and Development of a Novel Paper-based Ink-jet-Printed RFID-Enabled UHF (433.9 MHz) Sensor Node, pp. 1–4. *In APMC 2007*. Bangkok, Thailand.
- Vyas, R., V. Lakafosis, A. Rida, N. Chaisilwattana, S. Travis, J. Pan and M.M. Tentzeris. 2009. Paper-Based RFID-Enabled Wireless Platforms for Sensing Applications. **IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques** 57(5, part 2): 1370-1382.
- Wara.com. 2006. **RF Communication**. Radio Frequency Identification (RFID). Available Source: <http://wara.com/article-291.html>, 9 March 2010.
- Yang, L., A. Rida, R. Vyas, and M. M. Tentzeris. 2007. RFID Tag and Structures on a Paper Substrate Using Ink-jet-Printing Technology. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques** 55(12, part 2): 2894 – 2901.
- Yang, L. and M. M. Tentzeris. 2007. Design and Characterization of Novel Paper-based Ink-jet-Printed RFID and Microwave Structures for Telecommunication and Sensing Applications, pp. 1633 – 1636. *In IEEE/MTT-S International Microwave Symposium 2007*. Hawaii, USA.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวปาริชาติ ศรีธนาวุฒิ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดร้อยเอ็ด
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-