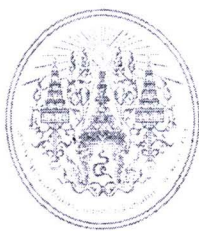




250488



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ระบบตู้เก็บของอัจฉริยะ

Intelligent Cabinet System

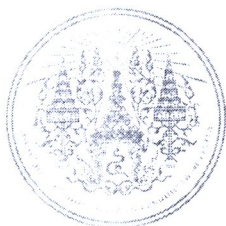
นายชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

นายสุภกิต แก้วดวงตา

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ระบบตู้เก็บของอัจฉริยะ

Intelligent Cabinet System



นายชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

นายสุภกิต แก้วดวงตา

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)/ระบบตู้เก็บของอัจฉริยะ.....

แหล่งเงิน// (ระบุแหล่งทุน) แหล่งเงินรายได้.....

ประจำปีงบประมาณ 2554..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 64,000..... บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1..... ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2553..... ถึง กันยายน 2554.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

นายชวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์.....

นายศุภกิต แก้วดวงตา.....

บทคัดย่อ

250488

โครงการวิจัยนำเสนอระบบตู้อัจฉริยะสำหรับตรวจสอบวัสดุโดยไม่ต้องสัมผัส ตู้เก็บของอัจฉริยะนี้ใช้หลักการของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุความถี่สูงเท่ากับ 13.56 MHz โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า โครงสร้างของระบบประกอบด้วยเครื่องอ่านข้อมูลสายอากาศที่ติดกับตู้เก็บของและแท็กที่ใช้สำหรับติดกับวัสดุภายในตู้ ซึ่งผลการทดสอบกับการคำนวณสอดคล้องกัน และยืนยันว่าระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุสำหรับตู้เก็บของอัจฉริยะสามารถใช้งานได้จริง

Research Title: Intelligent Cabinet System.....

Researcher: Mr. Chuwong Phongcharoenpanich and Mr. Supakit Kawdungta.....

Faculty: Engineering..... **Department:** Telecommunication Engineering.....

ABSTRACT

250488

This research presents the intelligent cabinet system for detecting the object with contactless technology. This intelligent cabinet system is utilized the Radio Frequency Identification (RFID) Technology with the high frequency (HF) at 13.56 MHz. The principle of inductive coupling is applied. The cabinet system consists of the reader that is located on the cabinet and the tag embedded at the identifying object. The measurement and calculation results are in good agreement. This can confirm that this RFID system for intelligent cabinet system can used in practical applications.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบคุณ คุณบัญชา เหลือแดง สำหรับความช่วยเหลือในการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบตู้เก็บของของอัจฉริยะ

นายชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

นายสุภกิต แก้วดวงตา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 ความสำคัญของงานวิจัย	5
1.3 วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์	6
1.4 เนื้อหาของรายงาน	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการของระบบระบุลักษณะ	8
2.1 บทนำ	8
2.2 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ	8
2.2.1 แท็ก	9
2.2.2 ประเภทของแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ	10
2.2.3 เครื่องอ่านข้อมูล (Reader)	14
2.3 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ	15
2.3.1 ลักษณะการทำงาน (Operation Type)	15
2.3.2 ขนาดข้อมูล (Data Quantity)	16
2.3.3 ความสามารถในการโปรแกรม (Programmable)	16
2.3.4 แหล่งพลังงาน (Power Supply)	17
2.3.5 ย่านความถี่ใช้งาน (Frequency Range)	17
2.4 ข้อพิจารณาการเลือกใช้อุปกรณ์ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ	18

สารบัญ

	หน้า
2.4.1 ความถี่ใช้งาน	18
2.4.2 ระยะทำการ	19
2.4.3 ข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัย	19
2.4.4 ขนาดของหน่วยความจำ	19
2.5 เทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ใช้การสื่อสารแบบ Inductive Coupling	20
2.5.1 การส่งพลังงานจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก	20
2.5.2 การส่งข้อมูลจากแท็กมายังเครื่องอ่านข้อมูล	21
2.6 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบสายอากาศขดลวดของเครื่องอ่านข้อมูล	22
2.6.1 การเหนี่ยวนำแรงดันในสายอากาศขดลวด	25
2.6.2 ชนิดและความต้านทานที่สูญเสียของลวด	30
2.6.3 ค่าความเหนี่ยวนำของสายอากาศขดลวด	33
2.7 รูปแบบของสายอากาศขดลวด	36
2.7.1 สายอากาศขดลวดของแท็ก	36
2.7.2 สายอากาศขดลวดของเครื่องอ่านข้อมูล	37
2.8 วงจรเรโซแนนซ์ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Q) และแบนด์วิดท์	38
2.8.1 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	38
2.8.2 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	40
2.8.3 ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพและแบนด์วิดท์	42
2.9 ระยะเวลาอ่านของอุปกรณ์ระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ	46
2.10 หลักการและตัวอย่างการออกแบบวงจรแมตซ์สำหรับสายอากาศบ่วงเกลียว [8]	47
2.10.1 การวัดค่าเพื่อหาคูสมบัตินของสายอากาศ	48
2.10.2 การปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยวงจรแมตซ์	49
2.11 บทสรุป	51

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศ	52
3.1 บทนำ	52
3.2 การออกแบบเครื่องอ่าน RFID ในย่านความถี่ HF	52
3.3 การออกแบบโครงสร้างสายอากาศ	57
3.4 การจำลองสายอากาศ	57
3.5 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ	63
3.6 ผลการจำลองค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศ	65
3.7 บทสรุป	66
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	68
4.1 บทนำ	68
4.2 เครื่องมืออุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบ	68
4.3 การทดสอบสายอากาศ	69
4.3.1 ผลการทดสอบสายอากาศกับแท็ก ISO15693	72
4.4 บทสรุป	74
บทที่ 5 การประเมินผลและตัวอย่างการประยุกต์ใช้กับตู้วางของอัจฉริยะ	75
5.1 บทนำ	75
5.2 เครื่องมืออุปกรณ์ ที่ใช้ในการประเมินผล	75
5.3 การประเมินผลสายอากาศ	75
5.3.1 ผลการประเมินสายอากาศ	78
5.4 สรุป	80
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	81
6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม	81
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา	82
6.2.1 ข้อเสนอแนะ	82
6.2.2 แนวทางในการพัฒนา	83

บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง	84
ประวัตินักวิจัย	85

VIII

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของลวด.....	31
ตารางที่ 3.1 ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศในแต่ละแบบ	65
ตารางที่ 3.2 ค่าเปอร์เซ็นต์เชิงพื้นที่ผิวของสายอากาศที่มี d เท่ากับ 5 cm ที่แนวแกน $y = 2$ ถึง 20 cm.	66
ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงการอ่านแท็กจำนวน 25 แท็กที่ระยะทางทดสอบตั้งแต่ 0-20 cm.....	80

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 1.1 ลักษณะการสื่อสารข้อมูลระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก [1].....	2
รูปที่ 1.2 สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	3
รูปที่ 1.3 สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	4
รูปที่ 1.4 สายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียว.....	5
รูปที่ 2.1 แท็กของระบบลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ.....	9
รูปที่ 2.2 แท็กของระบบลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ.....	10
รูปที่ 2.3 แท็กแบบจานและเหรียญ.....	10
รูปที่ 2.4 แท็กแบบกระเปาะแก้ว.....	11
รูปที่ 2.5 แท็กแบบพลาสติก.....	11
รูปที่ 2.6 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ.....	12
รูปที่ 2.7 แท็กแบบพวงกุญแจ.....	12
รูปที่ 2.8 แท็กแบบนาฬิกา.....	13
รูปที่ 2.9 แท็กมาตรฐาน ID-1 และ สมาร์ทการ์ดแบบไร้การสัมผัส.....	13
รูปที่ 2.10 แท็กแบบ Smart Label.....	14
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของเครื่องอ่าน [1].....	15
รูปที่ 2.12 ความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full Duplex และ Half Duplex [1].....	16
รูปที่ 2.13 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กเป็นการรับพลังงานไฟ.....	20
รูปที่ 2.14 การคำนวณของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อน.....	24
รูปที่ 2.15 การคำนวณความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแส (I).....	25
รูปที่ 2.16 การลดลงของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B กับระยะห่าง r [3].....	25
รูปที่ 2.17 พื้นฐานโครงสร้างของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [3].....	26
รูปที่ 2.18 การปรับทิศทางของสายอากาศของแท็กให้เหมาะสม [3].....	28
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-รอบกับระยะการอ่าน [3].....	29
รูปที่ 2.20 รูปของขดลวด 1 ชั้น [3].....	34
รูปที่ 2.21 สายอากาศขดลวดบ่วงวงกลมแกนอากาศจำนวนรอบใด ๆ [3].....	35

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 2.22 สายอากาศขดลวดแบบบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสหลายชั้น [3]	36
รูปที่ 2.23 รูปแบบต่าง ๆ ของสายอากาศขดลวดของแท็ก [3]	36
รูปที่ 2.24 สายอากาศบ่วงหม้อแปลงของเครื่องอ่านข้อมูล [3]	37
รูปที่ 2.25 แสดงวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน [3]	39
รูปที่ 2.26 แสดงวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม [3]	41
รูปที่ 2.27 ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ	43
รูปที่ 2.28 การหาค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพจากแบนด์วิดท์	43
รูปที่ 2.29 ค่าแรงดันกับค่าความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ [3]	43
รูปที่ 2.30 ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ [3]	45
รูปที่ 2.31 ระยะการอ่านกับขนาดของแท็กสำหรับการประยุกต์ที่ระยะใกล้ [3]	46
รูปที่ 2.32 ระยะการอ่านกับขนาดของแท็กสำหรับการประยุกต์ที่ระยะไกล [3]	47
รูปที่ 2.33 แสดงการนำวงจรแมตซ์มาต่อเข้ากับสายอากาศ	48
รูปที่ 2.34 แสดงคุณสมบัติและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย Smith Chart	49
รูปที่ 2.35 แสดงการจำลองการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย Smith Chart	51
รูปที่ 3.1 ลักษณะของชิพ IC เบอร์ TRF7690/91	53
รูปที่ 3.2 วงจรแบบสคีมเมติก (Schematic Diagram) ของเครื่องอ่านข้อมูล RFID	54
รูปที่ 3.3 วงจรส่วนสายอากาศแบบบ่วง	55
รูปที่ 3.4 ลักษณะการติดตั้งระบบ RFID เข้ากับตู้เก็บของ	56
รูปที่ 3.5 ส่วนการแสดงผลของระบบตู้เก็บของอัจฉริยะ	56
รูปที่ 3.6 โครงสร้างสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียว	57
รูปที่ 3.7 โครงสร้างการจำลองแบบรูปการกระจายความเข้มสนามแม่เหล็ก	58
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบบ่วงสี่เหลี่ยม	59
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่ ขดให้เกลียวทับกันจำนวน 3 ขด	59

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 0.5 cm.....	59
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 1 cm.....	60
รูปที่ 3.12 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 1.5 cm.....	60
รูปที่ 3.13 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 2 cm.....	60
รูปที่ 3.14 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 2.5 cm.....	61
รูปที่ 3.15 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 3 cm.....	61
รูปที่ 3.16 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 3.5 cm.....	61
รูปที่ 3.17 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 4 cm.....	62
รูปที่ 3.18 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 4.5 cm.....	62
รูปที่ 3.19 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 5 cm.....	62
รูปที่ 3.20 การแบ่งระยะตามแนว x และ z ออกเป็นส่วนย่อย.....	64
รูปที่ 3.21 การพิจารณาหาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร.....	64
รูปที่ 4.1 เครื่องอ่านข้อมูล RFID ความถี่ 13.56MHz.....	68
รูปที่ 4.2 สายนำสัญญาณ.....	69
รูปที่ 4.3 ชนิดของแท่งที่ใช้ในการทดสอบ (ISO15693).....	69

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 4.4 ลักษณะการวางตัวของแท่งชนิด ISO-Card ในทิศทาง x y และ z.....	70
รูปที่ 4.5 บล็อกไดอะแกรมในการทดสอบสายอากาศ.....	71
รูปที่ 4.6 สายอากาศต้นแบบ	71
รูปที่ 4.7 ค่า S11 ของสายอากาศที่มีค่าเท่ากับ -25.47 dB	72
รูปที่ 4.8 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 4 cm	72
รูปที่ 4.9 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 8 cm	73
รูปที่ 4.10 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 12 cm	73
รูปที่ 4.11 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 16 cm	73
รูปที่ 4.12 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 20 cm	74
รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมในการประเมินผลสายอากาศ.....	76
รูปที่ 5.2 รูปในการประเมินผลสายอากาศ	77
รูปที่ 5.3 รูปตัวอย่างการอ่านแท่งของสายอากาศเมื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์.....	77
รูปที่ 5.4 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งจำนวน 25 แท่ง ที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 0 cm	78
รูปที่ 5.5 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งจำนวน 25 แท่ง ที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 4 cm	78
รูปที่ 5.6 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งจำนวน 25 แท่ง ที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 8 cm	78
รูปที่ 5.7 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งจำนวน 25 แท่ง ที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 12 cm	79
รูปที่ 5.8 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งจำนวน 25 แท่ง ที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 16 cm	79
รูปที่ 5.9 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งจำนวน 25 แท่ง ที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 20 cm	79

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 1.1 ลักษณะการสื่อสารข้อมูลระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก [1].....	2
รูปที่ 1.2 สายอากาศบ่งชี้เหล็ยมผืนผ้า.....	3
รูปที่ 1.3 สายอากาศบ่งชี้เหล็ยมจัตุรัส.....	4
รูปที่ 1.4 สายอากาศบ่งชี้เหล็ยมจัตุรัสแบบขดเกลียว.....	5
รูปที่ 2.1 แท็กของระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ.....	9
รูปที่ 2.2 แท็กของระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบแอ็กทีฟ.....	10
รูปที่ 2.3 แท็กแบบจานและเหรียญ.....	10
รูปที่ 2.4 แท็กแบบกระเปาะแก้ว.....	11
รูปที่ 2.5 แท็กแบบพลาสติก.....	11
รูปที่ 2.6 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ.....	12
รูปที่ 2.7 แท็กแบบพวงกุญแจ.....	12
รูปที่ 2.8 แท็กแบบนาฬิกา.....	13
รูปที่ 2.9 แท็กมาตรฐาน ID-1 และ สมาร์ทการ์ดแบบไร้การสัมผัส.....	13
รูปที่ 2.10 แท็กแบบ Smart Label.....	14
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของเครื่องอ่าน [1].....	15
รูปที่ 2.12 ความแตกต่างของการสื่อสารแบบ Full Duplex และ Half Duplex [1].....	16
รูปที่ 2.13 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กเป็นการรับพลังงานไฟ.....	20
รูปที่ 2.14 การคำนวณของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อน.....	24
รูปที่ 2.15 การคำนวณความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B ที่จุดสังเกต P โดยการป้อนกระแส (I).....	25
รูปที่ 2.16 การลดลงของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B กับระยะห่าง r [3].....	25
รูปที่ 2.17 พื้นฐานโครงสร้างของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [3].....	26
รูปที่ 2.18 การปรับทิศทางของสายอากาศของแท็กให้เหมาะสม [3].....	28
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-รอบกับระยะการอ่าน [3].....	29
รูปที่ 2.20 รูปของขดลวด 1 ชั้น [3].....	34
รูปที่ 2.21 สายอากาศขดลวดบ่วงวงกลมแกนอากาศจำนวนรอบใด ๆ [3].....	35

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 2.22 สายอากาศขดลวดแบบบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสหลายชั้น [3]	36
รูปที่ 2.23 รูปแบบต่าง ๆ ของสายอากาศขดลวดของแท็ก [3].....	36
รูปที่ 2.24 สายอากาศบ่วงหม้อแปลงของเครื่องอ่านข้อมูล [3]	37
รูปที่ 2.25 แสดงวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน [3]	39
รูปที่ 2.26 แสดงวงจรเรโซแนนซ์อนุกรม [3]	41
รูปที่ 2.27 ค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพ	43
รูปที่ 2.28 การหาค่าตัวประกอบเชิงคุณภาพจากแบนด์วิดท์.....	43
รูปที่ 2.29 ค่าแรงดันกับค่าความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ [3].....	43
รูปที่ 2.30 ผลตอบสนองทางความถี่สำหรับวงจรเรโซแนนซ์ [3]	45
รูปที่ 2.31 ระยะการอ่านกับขนาดของแท็กสำหรับการประยุกต์ที่ระยะใกล้ [3]	46
รูปที่ 2.32 ระยะการอ่านกับขนาดของแท็กสำหรับการประยุกต์ที่ระยะไกล [3]	47
รูปที่ 2.33 แสดงการนำวงจรแมตชิ่งมาต่อเข้ากับสายอากาศ.....	48
รูปที่ 2.34 แสดงคุณสมบัติและค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย Smith Chart	49
รูปที่ 2.35 แสดงการจำลองการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย Smith Chart	51
รูปที่ 3.1 ลักษณะของชิพ IC เบอร์ TRF7690/91	53
รูปที่ 3.2 วงจรแบบสกีแมติก (Schematic Diagram) ของเครื่องอ่านข้อมูล RFID.....	54
รูปที่ 3. 3 วงจรส่วนสายอากาศแบบบ่วง.....	55
รูปที่ 3.4 ลักษณะการติดตั้งระบบ RFID เข้ากับตู้เก็บของ.....	56
รูปที่ 3.5 ส่วนการแสดงผลของระบบตู้เก็บของอัจฉริยะ	56
รูปที่ 3.6 โครงสร้างสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียว	57
รูปที่ 3.7 โครงสร้างการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบบ่วงสี่เหลี่ยม	58
รูปที่ 3.8 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศแบบบ่วงสี่เหลี่ยม	59
รูปที่ 3.9 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่ ขดให้เกลียวทับกันจำนวน 3 ขด	59

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 3.10 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 0.5 cm.....	59
รูปที่ 3.11 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 1 cm.....	60
รูปที่ 3.12 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 1.5 cm.....	60
รูปที่ 3.13 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 2 cm.....	60
รูปที่ 3.14 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 2.5 cm.....	61
รูปที่ 3.15 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 3 cm.....	61
รูปที่ 3.16 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 3.5 cm.....	61
รูปที่ 3.17 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 4 cm.....	62
รูปที่ 3.18 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 4.5 cm.....	62
รูปที่ 3.19 ผลการจำลองแบบรูปการกระจายสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ่วงสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบขดเกลียวที่มี d เท่ากับ 5 cm.....	62
รูปที่ 3.20 การแบ่งระยะตามแนว x และ z ออกเป็นส่วนย่อย	64
รูปที่ 3.21 การพิจารณาหาค่าเปอร์เซ็นต์เชิงปริมาตร.....	64
รูปที่ 4.1 เครื่องอ่านข้อมูล RFID ความถี่ 13.56MHz	68
รูปที่ 4.2 สายนำสัญญาณ	69
รูปที่ 4.3 ชนิดของแท่งที่ใช้ในการทดสอบ (ISO15693)	69

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
รูปที่ 4.4 ลักษณะการวางตัวของแท่งชนิด ISO-Card ในทิศทาง x y และ z.....	70
รูปที่ 4.5 บล็อกไดอะแกรมในการทดสอบสายอากาศ.....	71
รูปที่ 4.6 สายอากาศต้นแบบ	71
รูปที่ 4.7 ค่า S11 ของสายอากาศที่มีค่าเท่ากับ -25.47 dB	72
รูปที่ 4.8 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 4 cm	72
รูปที่ 4.9 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 8 cm	73
รูปที่ 4.10 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 12 cm	73
รูปที่ 4.11 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 16 cm	73
รูปที่ 4.12 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศเท่ากับ 20 cm	74
รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมในการประเมินผลสายอากาศ.....	76
รูปที่ 5.2 รูปในการประเมินผลสายอากาศ	77
รูปที่ 5.3 รูปตัวอย่างการอ่านแท่งของสายอากาศเมื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์	77
รูปที่ 5.4 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งจำนวน 25 แท่ง ที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศ เท่ากับ 0 cm	78
รูปที่ 5.5 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งจำนวน 25 แท่ง ที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศ เท่ากับ 4 cm	78
รูปที่ 5.6 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งจำนวน 25 แท่ง ที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศ เท่ากับ 8 cm	78
รูปที่ 5.7 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งจำนวน 25 แท่ง ที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศ เท่ากับ 12 cm	79
รูปที่ 5.8 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งจำนวน 25 แท่ง ที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศ เท่ากับ 16 cm	79
รูปที่ 5.9 ความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท่งจำนวน 25 แท่ง ที่ระนาบทดสอบห่างจากสายอากาศ เท่ากับ 20 cm	79