ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247268

การวิเคราะห์ผลกระทบของคลื่นสัญญาณอาร์เอฟไอดีกับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟด้วยวิธีโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์

นางสาวอัญชลี แซงดาวี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

b00251908

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
247268

การวิเคราะห์ผลกระทบของคลื่นสัญญาณอาร์เอฟไอดีกับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์

นางสาวอัญชลี แสงดาววี ค.อ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รศ.ดร.ธเนศ ธนิตธีรพันธ์)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ.ดร.คมกฤตย์ ชมสุวรรณ)

..... กรรมการ
(นอ.ดร.วีระชัย เชาว์กำเนิด)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ผลกระทบของคลื่นสัญญาณอาร์เอฟไอดีกับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟด้วยวิธีโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นางสาวอัญชลี แสงดาววี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.คมกฤตย์ ชมสุวรรณ
หลักสูตร	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	ครุศาสตร์ไฟฟ้า
คณะ	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

247268

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของคลื่นสัญญาณอาร์เอฟไอดีกับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟด้วยวิธีโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ เพื่อทำการศึกษาการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของระบบอาร์เอฟไอดี ความถี่ 13.56MHz เพื่อนำไปวิเคราะห์หาผลกระทบที่ส่งผลต่อหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟและหาตำแหน่งที่จะทำการป้องกันสนามแม่เหล็กที่ไปรบกวนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟให้น้อยที่สุด ตัวอ่านข้อมูล(Reader)รัศมี 23.125mm พัน7 รอบ ตัวรับ-ส่งข้อมูล(Tag) รัศมี 11mm พัน 10 รอบ วางระยะห่างกัน 25mm และอาร์เอฟไอดีมีระยะห่างจากหัวอ่าน 75mm ตัวอ่านข้อมูลมีการแพร่กระจายแบบรอบทิศทาง ความเข้มสนามแม่เหล็กประมาณ 600nT(0.225μV) วัดจากจุดกึ่งกลางของสายอากาศ ตัวอ่านข้อมูล และความเข้มสนามแม่เหล็กจะลดลงตามระยะทางที่ห่างออกจากตัวอ่านข้อมูล คุณลักษณะของหัวอ่านชนิด TMR ที่นำมาทดสอบนี้ช่วงการทำงานที่ +22mT ถึง -22mT ค่าความไวสนามแม่เหล็กของหัวอ่าน 0.375mV/mT การป้องกันสนามแม่เหล็กที่หัวอ่านได้ใช้วัสดุมิวเมทัล (Mu-metal) ที่มีค่าซึมซาบสนามแม่เหล็ก(μ_r) เท่ากับ 100,000 โดยได้ทำการวางแผ่นป้องกัน 2 แบบ คือวางแผ่นเดียวและวางครอบปิดทั้งห้าด้านซึ่งกั้นระหว่างตัวรับ-ส่งข้อมูลกับหัวอ่าน ซึ่งแบบวางแผ่นเดียวหลังจากทำการป้องกันสนามแม่เหล็กที่ระยะ 28mm มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 5.052nT(1.89nV) อัตราการลดทอน 25.25dB ส่วนแบบวางครอบปิดห้าด้านหลังจากทำการป้องกันที่ระยะ 26mm มีความเข้มสนามแม่เหล็ก 4.958nT(1.859nV) อัตราการลดทอน 27.962 เป็นตำแหน่งที่ช่วยลดสนามแม่เหล็กได้มากที่สุด

คำสำคัญ : อาร์เอฟไอดี / สนามแม่เหล็ก / หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ / มิวเมทัล

Thesis Title	Analysis of RFID Impact to Magnetic Read Head of Hard Disk Drive with Finite Element Method
Thesis Credits	12
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Komkrit Chomsuwan
Program	Master of Science in Industrial Education
Field of Study	Electrical Engineering
Department	Electrical Technology Education
Faculty	Industrial Education and Technology
B.E.	2554

Abstract

247268

This research proposed the analysis of RFID impact to magnetic read head of hard disk drive with finite element method. The analysis result was used for studying magnetic field distribution of RFID(Radio Frequency Identification) at 13.56MHz and later used for finding the lowest position to protect magnetic field disturbing magnetic field of hard disk drive read head. The reader has a radius of 23.125mm and has 7 turns while the tag has a radius of 11mm and has 10 turns. The reader was placed 25mm from the tag and 75mm from RFID. The reader had omni direction pattern with 600nT (0.255 μ V) magnetic field on z-axis obtained from exactly equation. The magnetic field decreased with distance out of the reader. The TMR(Tunneling Magneto Resistance) used had range application of +22mT to -22mT while the sensitivity of read head was 0.375mV/mT. The magnetic field protection at read head was done using Mu-metal material with relative permeability(μ_r) of 100,000. Two types of protection were made : placing with a single sheet and covering the five sides separating the reader and the read head. For a single sheet with magnetic field protection at 28mm, The result obtained was 5.052nT(1.89nV) at 25.25dB field quantity. For five side protection, at 26mm distance, the result was 4.958nT(1.859) at 27.963dB field quantity which was the best position to help reducing the magnetic field.

Keywords : RFID / Magnetic fields / Read head / Mu-metal

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ก็เนื่องจากด้วยความกรุณาและการให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์อย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.คมกฤตย์ ชมสุวรรณ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ บริษัทฮิตาชิโกลโบล สตอเรจ เทคโนโลยีส์(ประเทศไทย) จำกัด และศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์(PTEC) ที่ได้ให้เข้าไปดำเนินการวิจัย เก็บผลการทดลอง และให้คำปรึกษาในการวิจัยครั้งนี้ จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์และถูกต้องที่สุด อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ลักษมี ชุติมา ที่ได้ให้คำแนะนำและการช่วยเหลือในการเขียนรายงานเป็นภาษาต่างประเทศและขอกราบขอบพระคุณทุกๆท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการตรวจสอบความสมบูรณ์และความถูกต้องของเนื้อหาเพื่อให้งานวิจัยมีความตรงเชิงคุณภาพมากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะส่งเสริมสนับสนุน การอบรมสั่งสอนดูแลและเกื้อหนุนในทุกๆด้าน จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันใดที่พึงจะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญุตาแก่บิดา มารดา ตลอดจนบูรพาจารย์ของผู้วิจัยและผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ซ
รายการรูปประกอบ	ฌ
รายการสัญลักษณ์	ฎ

บทที่

1.	**บทนำ**	**1**
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3	ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย	2
1.4	วิธีการดำเนินการวิจัย	2
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2.	**เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	**3**
2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2	ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.2.1	กระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	4
2.2.2	เส้นแรงแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก	4
2.2.3	กฎไบโอท ซาวาร์ท	5
2.2.4	กฎแอมแปร์ (Ampere's Circuital Law)	9
2.2.5	กฎของฟาราเดย์	11
2.2.6	สมการสนามไฟฟ้าสถิต	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.7 สมการสนามแม่เหล็กในสภาวะสนามแม่เหล็กสถิต	13
2.2.8 สมการสนามแม่เหล็กในสภาวะสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนตามเวลา	14
2.2.9 สมการสนามแม่เหล็กในสภาวะสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนตามความถี่	14
2.3 สมการเชิงอนุพันธ์ด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	15
2.3.1 สมการความถี่สนามแม่เหล็ก	15
2.3.2 สมการความศักย์สนามแม่เหล็กที่เป็นไปได้	17
2.4 การแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์	19
2.4.1 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์	19
2.4.2 ขั้นตอนของวิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์	21
2.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก	33
2.6 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณขดลวดวงกลม	34
2.7 ชนิดของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	35
2.7.1 Anisotropic Magneto- resistive (AMR)	35
2.7.2 Giant Magneto resistive (GMR)	36
2.7.3 Tunneling Magneto resistive (TMR)	37
2.8 ระบบอาร์เอฟไอดี (RFID)	38
2.8.1 วิวัฒนาการทางเทคโนโลยีในการติดตามและระบุชี้สิ่งของ	38
2.8.2 จุดเด่นของระบบ RFID (Radio Frequency Identification)	38
2.8.3 องค์ประกอบของระบบอาร์เอฟไอดี (RFID)	39
2.8.4 หลักการพื้นฐานและการทำงาน	42
2.8.5 การแพร่กระจายคลื่น	42
2.8.6 ย่านความถี่ที่ใช้งาน	43
2.8.7 อัตราการรับส่งข้อมูลและแบนด์วิดธ์	45
2.8.8 ระยะการรับส่งข้อมูลและกำลังส่ง	45
2.8.9 มาตรฐานการใช้งานอาร์เอฟไอดี	46

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
2.9	สนามแม่เหล็กที่เกิดกับวัสดุ	48
2.10	วัสดุป้องกันสนามแม่เหล็กมู-เมทัล (Mu-metal)	52
3.	**วิธีดำเนินการวิจัย**	**55**
3.1	ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบอาร์เอฟไอดี	55
3.2	รูปแบบการจำลองผลการทดลอง	55
3.3	คำนวณหากระแสที่จ่ายให้กับตัวอ่านข้อมูล (Reader)	57
3.4	การสร้างแบบจำลองระบบอาร์เอฟไอดีด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิลิเมนต์	58
3.5	การจำลองวิธีการป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากระบบอาร์เอฟไอดี	64
3.6	ทดสอบคุณสมบัติของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	67
3.7	การทดสอบการแพร่กระจายสัญญาณที่ออกมาจากตัวอ่านข้อมูล (Reader)	68
3.8	การทดสอบวัดปริมาณสนามแม่เหล็กที่ออกจากตัวอ่านข้อมูล (Reader)	69
4.	**ผลการวิจัย**	**71**
4.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติของหัวอ่าน	71
4.2	ผลคำนวณหากระแสที่จ่ายให้กับตัวอ่านข้อมูล (Reader)	75
4.3	ผลการจำลองระบบอาร์เอฟไอดี	77
4.4	ผลการจำลองป้องกันสนามแม่เหล็กของระบบอาร์เอฟไอดี	78
4.5	ผลการจำลองการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กที่ตัวอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี	82
4.6	ผลการวัดการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กที่ตัวอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี	83
4.7	ผลการวัดทิศทางการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กที่ตัวอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี	85
4.8	ผลการวัดปริมาณสนามแม่เหล็กที่ตัวอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี	87

สารบัญ(ต่อ)

		หน้า
5.	**สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ**	**88**
	5.1 สรุปผลการวิจัย	88
	5.2 ปัญหาในการดำเนินงาน	89
	5.3 แนวทางแก้ปัญหา	90
เอกสารอ้างอิง		**91**
ภาคผนวก		
	ก. ผลงานเผยแพร่ทางวิชาการ	93
ประวัติผู้วิจัย		**98**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ระยะและวิธีการสื่อสารข้อมูลของอาร์เอฟไอดี	43
2.2	ย่านความถี่ต่างๆ ของระบบ RFID และการใช้งาน	44
2.3	คุณลักษณะของโลหะชนิดต่างๆ	53
4.1	ปริมาณสนามแม่เหล็กก่อน Shield และหลัง Shield	79
4.2	ปริมาณสนามสนามแม่เหล็กก่อน Shield และหลัง Shield ที่ปิดครอบทั้งห้าด้าน	81
4.3	บันทึกค่าทดสอบตัวอ่านข้อมูล(Reader)	85

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	แสดงการหาความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าตรง I ตามกฎของไบโอท ซาวาร์ท ทิศทางของ $d\overline{H}_2$ จะพุ่งเข้าไปในกระดาษ และทำมุม 90 องศากับกระดาษอีกด้วย	6
2.2	กระแสไฟฟ้า I ไหลในเส้นลวดไฟฟ้าที่ยาวอนันต์ ต้องการหาสนามแม่เหล็ก $\overline{H}$ ณ จุด P (ρ,ϕ,z)	7
2.3	แสดงเส้นกราฟของสนามแม่เหล็ก $\overline{H}$ ซึ่งเกิดขึ้นรอบเส้นลวดไฟฟ้าที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน	9
2.4	เส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กรอบวัสดุสื่อนำไฟฟ้าคือวงจรหรือเส้นทาง a (หรือ b) นั้นเมื่อคูณกับค่าของสนามแม่เหล็ก $\overline{H}$ แล้วจะเท่ากับจำนวนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุสื่อนำไฟฟ้านั้น ส่วนเส้นทาง c คูณกับค่าของ $\overline{H}$ จะได้กระแสไฟฟ้า I_C มีค่าน้อยกว่ากระแสไฟฟ้า I ทั้งนี้เพราะว่าวงจร C ล้อมวัสดุสื่อนำไฟฟ้าดังกล่าวเพียงบางส่วนเท่านั้น	10
2.5	การกำหนดขอบเขตบริเวณใน 1 มิติ	20
2.6	การกำหนดขอบเขตบริเวณใน 2 มิติ	20
2.7	แสดงตัวอย่างการกำหนดขอบเขตบริเวณใน 2 มิติ	20
2.8	ตัวอย่างวัตถุสามเหลี่ยมที่หมุนไปตามตำแหน่งจุดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	22
2.9	ฟังชั่นของ α_1,α_2 และ α_3 สำหรับวัตถุสามเหลี่ยม	23
2.10	การแยกส่วนของการแก้ปัญหาบริเวณที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	25
2.11	การรวมสามองค์ประกอบ i, j, k มาจากจำนวนเฉพาะ (1-2-3) ขององค์ประกอบในรูปที่ 2.8	26
2.12	บริเวณดำเนินการแก้ปัญหาซึ่งสมมาตรตลอดแนวแกน Y	29
2.13	ภาพประกอบตัว (a) เมซสององค์ประกอบ (b) จำนวนค่าเฉพาะทั้งหมดที่องค์ประกอบ	30
2.14	(a) การแก้ปัญหาอิเล็คโตสเตตริกสองมิติ (b) การแบ่งพื้นที่ออกเป็นรูปสามเหลี่ยม 25 ชิ้น	32
2.15	สนามแม่เหล็กที่เกิดจากวงลวดที่กระแสไหลเป็นวงกลม	34
2.16	องค์ประกอบของตัวเอ็มอาร์เซนเซอร์	35
2.17	การกระเจิงของอิเล็กตรอนที่มีสปินแบบ AMR	36

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป		หน้า
2.18	การกระเจิงของอิเล็กตรอนที่มีสปินแบบ GMR	36
2.19	โครงสร้าง Spin-valves ประกอบขึ้นจากชั้นของฟิล์มบางต่างๆ	37
2.20	แสดงแผนผังโครงสร้างของหัวอ่าน TMR	37
2.21	ลักษณะการรับ-ส่งข้อมูลของอาร์เอฟไอดี	40
2.22	แสดง RFID Tags แบบ Passive และ Active	40
2.23	ระบบอาร์เอฟไอดี	41
2.24	แสดงตัวอย่างการใช้งานตัวอ่านข้อมูล (Reader)	41
2.25	องค์ประกอบของระบบอาร์เอฟไอดี	42
2.26	การแพร่กระจายคลื่นระหว่างแท็กส์ (Tag) กับตัวอ่านข้อมูล (Reader)	43
2.27	ย่านความถี่ที่ระบบอาร์เอฟไอดีถูกนำไปใช้งาน	44
2.28	แสดงประเภทต่างๆ ของมาตรฐานการใช้งานด้านบัตรสมาร์ตการ์ด	47
2.29	แบบจำลองอะตอม	48
2.30	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน	48
2.31	ลักษณะการกระทำสนามแม่เหล็กภายนอกกับวัสดุ	49
2.32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ H ของวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก	52
3.1	ตำแหน่งการวาง RFID และหัวอ่าน	56
3.2	ตำแหน่งของตัวรับ-ส่งข้อมูลและหัวอ่าน	56
3.3	ภาพจริงของตัวอ่านข้อมูล ตัวรับ-ส่งข้อมูล และหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	57
3.4	การทดสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟโดยเครื่องทดสอบ Quasi Tester	67
3.5	การวัดสัญญาณที่หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟเมื่อปรับความเร็วสปิน	68
3.6	โครงสร้างการทดสอบหาการแพร่คลื่นของระบบอาร์เอฟไอดี	68
3.7	โครงสร้างการทดสอบหาการปริมาณสนามแม่เหล็กที่ตัวส่งสัญญาณ (Reader)	69
4.1	กราฟคุณลักษณะของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ	71
4.2	สัญญาณเอาต์พุตที่ได้หัวอ่านที่ได้จากการปรับความเร็วของสปิน 5400rpm	72

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป **หน้า**

4.3 สัญญาณเอาต์พุตที่เป็นแบบ Eye Pattern ที่ 5400rpm 72

4.4 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้หัวอ่านที่ได้จากการปรับความเร็วของสปิน 5430rpm 73

4.5 สัญญาณเอาต์พุตที่เป็นแบบ Eye Pattern ที่ 5430rpm 73

4.6 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้หัวอ่านที่ได้จากการปรับความเร็วของสปิน 5370rpm 74

4.7 สัญญาณเอาต์พุตที่เป็นแบบ Eye Pattern ที่ 5370rpm 74

4.8 ข้อมูลการ์ทดสอบที่ได้จากเครื่อง Quasi Tester 75

4.9 ลักษณะการวางขดลวดเพื่อวัดสัญญาณ 76

4.10 สัญญาณที่ได้ออกมาจากตัวอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี 76

4.11 การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของตัวรับ-ส่งสัญญาณอาร์เอฟไอดี 77

4.12 ทิศทางสนามแม่เหล็กของตัวอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี 77

4.13 บริเวณการกระจายสนามแม่เหล็กของอาร์เอฟไอดีกับหัวอ่าน 78

4.14 การวางแผ่น Mu-metal ป้องกันสนามแม่เหล็ก 78

4.15 การป้องกันสนามแม่เหล็กที่ระยะต่างๆ 79

4.16 อัตราการลดทอนของสนามแม่เหล็ก 80

4.17 การวางแผ่น Mu-metal ป้องกันสนามแม่เหล็กที่ครอบปิดทั้งห้าด้าน 80

4.18 การป้องกันสนามแม่เหล็กที่ระยะต่างๆที่ครอบปิดทั้งห้าด้าน 81

4.19 อัตราการลดทอนของสนามแม่เหล็กที่ครอบปิดทั้งห้าด้าน 82

4.20 สนามแม่เหล็กในแนวแกนx (B_x) 82

4.21 สนามแม่เหล็กในแนวแกนy (B_y) 82

4.22 สนามแม่เหล็กในแนวแกนz (B_z) 83

4.23 เครื่องมือและวิธีการวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก 83

4.24 การวัดความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน x 84

4.25 การวัดความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน y 84

4.26 การวัดความเข้มสนามแม่เหล็กแนวแกน z 84

รายการรูปประกอบ(ต่อ)

รูป		หน้า
4.27	ตัวรับ-ส่งสัญญาณอาร์เอฟไอดีและตำแหน่งการวางทดสอบ	85
4.28	ลักษณะการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กของตัวอ่านข้อมูล (Reader)	86
4.29	เครื่องมือและวิธีการวัด	87
4.30	ปริมาณสนามแม่เหล็กที่วัดในแนวแกน z	87

รายการสัญลักษณ์

ω	=	ความเร็วเชิงมุม
ΔV	=	แรงดันที่เปลี่ยนแปลงในแบบจำลอง
ρ_v	=	ประจุเชิงปริมาตร
ε_0	=	ความซึมซาบสนามไฟฟ้าในอากาศ
ε_r	=	ความซึมซาบสนามไฟฟ้าของวัสดุ
$\nabla \cdot \overline{B}$	=	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในรูปทรงผิวปิด
$\nabla \times A$	=	ความต่างศักย์แม่เหล็กของเวคเตอร์พื้นผิว
$\nabla \times \overline{B}$	=	ความเข้มแม่เหล็กในรูปทรงปิด
$\nabla \times \overline{E}$	=	ความเข้มแม่เหล็กไฟฟ้า
$\nabla \times \overline{H}$	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
∇V	=	ศักย์แม่เหล็กไฟฟ้า
μ	=	ความซึมซาบแม่เหล็ก
μ_0	=	ความซึมซาบแม่เหล็กของอากาศ
μ_r	=	ความซึมซาบแม่เหล็กของวัสดุ
Φ	=	เส้นแรงหรือฟลักซ์แม่เหล็ก
W	=	พลังงานไฟฟ้า