

การพัฒนาชุดทดลองเพื่อการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาริเซชัน
ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากฝน

นาย ธีรศักดิ์ อนันตกุล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-636-436-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

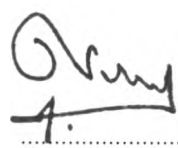
DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL SET FOR THE STUDY OF
ELECTROMAGNETIC WAVE DEPOLARIZATION DUE TO RAIN

Mr. Dheerasak Anantakul


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1996
ISBN 974-636-436-7

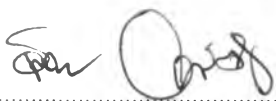
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาชุดทดลองเพื่อการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาริเซชัน ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากฝน
โดย	นาย ชีรศักดิ์ อนันทกุล
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร

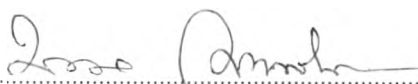
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

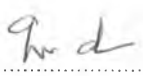

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว



ธีรศักดิ์ อนันตกุล : การพัฒนาชุดทดลองเพื่อการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากฝน (DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL SET FOR THE STUDY OF ELECTROMAGNETIC WAVE DEPOLARIZATION DUE TO RAIN)

อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. จัตรชัย ไวยาพัฒน์กร, 148 หน้า. ISBN 974-636-436-7.

การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านบริเวณที่มีฝนตกนอกจากได้รับผลกระทบในลักษณะของการลดทอนแล้ว ยังเกิดการเปลี่ยนโพลาไรเซชันอีกด้วย ปรากฏการณ์นี้ก่อให้เกิดปัญหาการรบกวนข้ามช่องสื่อสาร ซึ่งมีผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบสื่อสาร

การศึกษาปัญหาดังกล่าวในเชิงทดลองสามารถทำได้โดยตรวจวัดสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงเปรียบเทียบระหว่างขณะที่ไม่มีฝนตกและขณะที่มีฝนตก แต่การทำในลักษณะดังกล่าวต้องรอให้เกิดฝนตกจริง ทำให้เป็นการไม่สะดวกสำหรับการศึกษาเบื้องต้นเพื่อความเข้าใจกลไกการเปลี่ยนโพลาไรเซชันเนื่องจากฝน ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาชุดทดลองที่สามารถจำลองสภาพการแพร่กระจายคลื่นผ่านบริเวณที่มีฝนตกเพื่อการประโยชน์ทางการศึกษาในเบื้องต้นนี้ ชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้นสามารถปรับค่าปัจจัยบางประการที่มีผลต่อลักษณะสมบัติการแพร่กระจายคลื่นได้ในระดับหนึ่ง โดยค่าปัจจัยเหล่านี้ได้มาจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

ผลการตรวจวัดแสดงให้เห็นถึงการเกิดผลต่างของการลดทอนและผลต่างของการเลื่อนเฟสซึ่งเป็นกลไกในการเกิดการเปลี่ยนโพลาไรเซชัน แม้ปริมาณที่ตรวจวัดได้มีความแตกต่างจากผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเนื่องจากลักษณะของฝนจริงที่เป็นค่าปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์แตกต่างจากลักษณะฝนที่ได้จากชุดทดลอง ดังนั้นชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้นจึงสามารถใช้ศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับปัญหาการเปลี่ยนโพลาไรเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากฝนได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิติ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

พิมพ์ต้นฉบับบทความวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

C715511 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: DEPOLARIZATION / EFFECTIVE PERMITTIVITY / RAIN

DHEERASAK ANANTAKUL : DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL SET FOR THE STUDY OF ELECTROMAGNETIC WAVE DEPOLARIZATION DUE TO RAIN. THESIS ADVISOR : CHATCHAI WAIYAPATANAKORN, Ph.D. 148 pp. ISBN 974-636-436-7.

Propagation of electromagnetic waves through a rainfall region is affected by both attenuation and depolarization. The depolarization phenomenon causes cross-channel interference, which affects performance of a communications system.

The study of this problem can be done by measuring the signal in any links and comparing the measured results between the no-rain and raining periods. This is not convenient for the preliminary study in order to understand rain-induced depolarization mechanisms. The author has developed an experimental set which can model wave propagation through a rainfall region for the preliminary study. This experimental set can be adjusted to change some factors affecting propagation characteristics. These factors come from the theoretical analysis.

The measured results show the differential attenuation and differential phase shift which are responsible for the basic depolarization mechanisms. Although the results are different from the theoretical results, this is due to the differences in characteristics of the real rain and the rain which comes from the experimental set. Therefore it can be concluded that the experimental set can be used for the preliminary study of electromagnetic wave depolarization due to rain.

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ปีการศึกษา..... 2539.....

ลายมือชื่อนิสิต..... *Chatchai Waiyapatanakorn*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *C. Waiyap*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอบพระคุณคณะกรรมการสอบหัวข้อวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์ และอาจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำวิจัย ขอขอบคุณเอก ตี๋ หมี่ ห้วน และเพื่อนๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการพื้นฐานไฟฟ้าสื่อสารที่ช่วยเหลือในการทำการทดลอง และเนื่องจากทุนอุดหนุนการวิจัยนี้ได้รับจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
ขอบเขตของการวิจัย	4
ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	4
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2 การเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝน	6
การเปลี่ยนโพลาริเซชันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	6
1. ผลต่างของการลดทอน	7
2. ผลต่างของการเลื่อนเฟส	8
ลักษณะสมบัติทางกายภาพของฝน	11
1. ลักษณะสมบัติทางกายภาพเฉพาะของอนุภาคฝน 1 อนุภาค	12
2. การกระจายขนาดของอนุภาคฝนที่อัตราการตกใด ๆ	20
สภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศขณะที่มีฝนตก	26
1. สภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำ	26
2. สภาพยอมประสิทธิผลของตัวกลางไม่เอกพันธ์	28
3. การปรับค่าสภาพยอมประสิทธิผลสำหรับการวิเคราะห์ที่ความถี่สูง	33
4. สภาพยอมประสิทธิผลของบรรยากาศขณะที่มีฝนตก	36
ปริมาณการเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝน	37
1. สัมประสิทธิ์ผลต่างของการลดทอน และสัมประสิทธิ์ผลต่างของการเลื่อนเฟส	37
2. การตัดแยกโพลาริเซชันไขว้ และการแยกแยะโพลาริเซชันไขว้	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การวิเคราะห์ปริมาณการเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝน	42
ผลของการแปรค่าปัจจัยที่มีต่อลักษณะสมบัติการแพร่กระจาย	42
1. สภาพยอมประสิทธิผลสำหรับการวิเคราะห์ที่ความถี่สูง	44
2. อุณหภูมิของน้ำฝน	44
3. รูปแบบของการกระจายขนาด	45
แบบจำลองเชิงเรขาคณิตและสมการการส่งผ่าน	52
1. แบบจำลองเชิงเรขาคณิตแบบจำลองเชิงเรขาคณิตแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ทิศการแพร่กระจายคลื่นและแนวการวางตัวของอนุภาคฝน	52
2. สมการการส่งผ่าน	57
ปริมาณการเปลี่ยนโพลาริเซชัน	58
1. การแยกแยะโพลาริเซชันไขว้	58
2. ผลการวิเคราะห์หาปริมาณการแยกแยะโพลาริเซชันไขว้ในกรณีต่าง ๆ	61
บทที่ 4 ชุดทดลองและการทดลองเพื่อการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝน	65
แนวคิดในการออกแบบการทดลอง	65
1. ค่าปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อการเปลี่ยนโพลาริเซชัน	66
2. โครงสร้างของชุดทดลอง	68
ชุดทดลองเพื่อการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝน	69
1. อุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของชุดทดลอง	69
2. การทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	85
ผลการทดลองศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝนโดยอาศัยชุดทดลอง	104
1. การแพร่กระจายจำเพาะที่อัตราการตกต่าง ๆ	105
2. ผลต่างของการแพร่กระจาย	110
3. การแยกแยะโพลาริเซชันไขว้	111
บทที่ 5 บทสรุป	115
สรุปผลการวิจัย	115
ข้อเสนอแนะ	116

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง	118
ภาคผนวก ก. การคำนวณการกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons จากข้อมูล ร้อยละของปริมาตรของอนุภาคฝนที่มีขนาดในช่วงที่กำหนดต่อปริมาตรรวมของน้ำฝน	121
ภาคผนวก ข. ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความยาวของแต่ละแกนของอนุภาคฝน	125
และค่าปัจจัยการเปลี่ยนโพลาริเซชัน	
ภาคผนวก ค. ข้อมูลทางกายภาพของอนุภาคฝนที่อัตราการตกต่าง ๆ โดยอาศัยการกระจายขนาด	128
แบบ Laws และ Parsons และแบบ Marshall และ Palmer	
ประวัติผู้เขียน	148

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ความเร็วปลายในการตกของอนุภาคฝนหลายขนาด	17
2.2	ร้อยละของปริมาตรของอนุภาคฝนที่มีขนาดในช่วงที่กำหนดต่อปริมาตรทั้งหมด	22
	ที่อัตราการตกต่าง ๆ	
2.3	พารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการการกระจายขนาดของอนุภาคฝนสำหรับฝนแต่ละประเภท	23
	เสนอโดย Joss <i>et al</i>	
4.1	ข้อมูลทางกายภาพและรายละเอียดเกี่ยวกับวัสดุที่นำมาประกอบเป็นโครงทำฝนอย่างง่าย	71
4.2	รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการจ่ายน้ำให้โครงทำฝนอย่างง่าย	73
4.3	รายละเอียดของสายอากาศแบบปากแตรทรงพีระมิดที่ใช้ในการทดลอง	77
4.4	รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	83
4.5	อัตราการตกของฝนเมื่อปรับวาล์วที่ท่อส่งน้ำให้น้ำไหลผ่านท่อในระดับต่าง ๆ กัน	89
4.6	ค่าเฉลี่ยของระดับสัญญาณโพลาไรซ์ร่วมชั่วที่ตรวจวัดได้	108
4.7	ค่าเฉลี่ยของเฟสของสัญญาณโพลาไรซ์ร่วมชั่วที่ตรวจวัดได้	108
4.8	ปริมาณการลดทอนของสัญญาณที่มีโพลาไรเซชันแนวระดับและแนวตั้ง	110
	เปรียบเทียบผลการตรวจวัดและการคำนวณทางทฤษฎี	
4.9	ปริมาณการเลื่อนเฟสของสัญญาณที่มีโพลาไรเซชันแนวระดับและแนวตั้ง	111
	เปรียบเทียบผลการตรวจวัดและการคำนวณทางทฤษฎี	
4.10	ค่าเฉลี่ยของระดับสัญญาณโพลาไรซ์ข้ามชั่วเมื่อสายอากาศส่งคลื่นโพลาไรซ์แนวตั้ง	112
4.11	ค่าเฉลี่ยของระดับสัญญาณโพลาไรซ์ข้ามชั่วเมื่อสายอากาศส่งวางตัวทำมุม 45 องศา	114
	กับแนวระดับ	
ค.1	ข้อมูลทางกายภาพของอนุภาคฝน	129
ค.2	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons ที่อัตราการตก 0.254 mm/hr ...	130
ค.3	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons ที่อัตราการตก 1.270 mm/hr ...	131
ค.4	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons ที่อัตราการตก 2.540 mm/hr ...	132
ค.5	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons ที่อัตราการตก 5.080 mm/hr ...	133
ค.6	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons ที่อัตราการตก 12.700 mm/hr ..	134
ค.7	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons ที่อัตราการตก 25.400 mm/hr ..	135

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ค.8	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons ที่อัตราการตก 50.800 mm/hr .. 136
ค.9	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons ที่อัตราการตก 101.600 mm/hr .. 137
ค.10	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons ที่อัตราการตก 152.400 mm/hr .. 138
ค.11	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Marshall และ Palmer ที่อัตราการตก 0.254 mm/hr .. 139
ค.12	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Marshall และ Palmer ที่อัตราการตก 1.270 mm/hr .. 140
ค.13	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Marshall และ Palmer ที่อัตราการตก 2.540 mm/hr .. 141
ค.14	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Marshall และ Palmer ที่อัตราการตก 5.080 mm/hr .. 142
ค.15	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Marshall และ Palmer ที่อัตราการตก 12.700 mm/hr 143
ค.16	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Marshall และ Palmer ที่อัตราการตก 25.400 mm/hr 144
ค.17	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Marshall และ Palmer ที่อัตราการตก 50.800 mm/hr 145
ค.18	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Marshall และ Palmer ที่อัตราการตก 101.600 mm/hr 146
ค.19	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Marshall และ Palmer ที่อัตราการตก 152.400 mm/hr 147

สารบัญรูป

รูป		หน้า
1.1	สัญญาณที่ต้องการและสัญญาณไขว้แทรกของชายเชื่อมโยงภาคพื้นดินและชายเชื่อมโยง ระหว่างภาคพื้นดินและอวกาศ	1
2.1	คลื่นระนาบโพลาริซ์เชิงเส้นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเอกพันธ์ที่มีการสูญเสีย และแอนไอโซทรอปิก	7
2.2	การเปลี่ยนโพลาริเซชันของคลื่นระนาบเชิงเส้นเนื่องจากการเกิดผลต่างของการลดทอน	8
2.3	การเปลี่ยนโพลาริเซชันของคลื่นระนาบโพลาริซ์แบบวงกลมเนื่องจากการเกิดผลต่าง ของการลดทอน	9
2.4	การเปลี่ยนโพลาริเซชันของคลื่นโพลาริซ์เชิงเส้นเนื่องจากการเกิดผลต่างของการเลื่อนเฟส	10
2.5	การเปลี่ยนโพลาริเซชันของคลื่นโพลาริซ์แบบวงกลมเนื่องจากการเกิดผลต่าง ของการเลื่อนเฟส	10
2.6	ภาพถ่ายหยดน้ำขนาดต่าง ๆ กันที่ความเร็วปลายในการตกอย่างอิสระ	13
2.7	ภาพถ่ายหยดน้ำขนาดใหญ่ที่ตกอย่างอิสระในอากาศนิ่ง	13
2.8	รูปร่างของหยดน้ำที่คำนวณโดย Pruppacher และ Pitter	14
2.9	รูปหน้าตัดด้านข้างของหยดน้ำทรงกลมแบนหัว	14
2.10	หยดน้ำทรงกลมแบนหัวที่มีการยึดตัวตามแนวตั้ง (หยดที่มีลูกศรชี้)	15
2.11	ความเร็วในการตกของหยดน้ำขนาดต่าง ๆ กันที่ความสูงตั้งแต่ 0.5 ถึง 20 เมตร	16
2.12	กราฟระหว่างความเร็วปลายในการตกกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคฝน	18
2.13	แบบจำลองเชิงเรขาคณิตแสดงมุมเอียงเชิงกายภาพและแกนของอนุภาคฝน	19
2.14	แบบจำลองเชิงเรขาคณิตของอนุภาคฝน 1 อนุภาค	19
2.15	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons	24
2.16	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Marshall และ Palmer	25
2.17	การกระจายขนาดของอนุภาคฝนแบบ Laws และ Parsons เปรียบเทียบกับ แบบ Marshall และ Palmer ที่อัตราการตก 50.8 และ 101.6 mm/hr	25
2.18	สภาพยอมสัมพัทธ์ของน้ำที่อุณหภูมิตั้งที่ 20 องศาเซลเซียส	28
2.19	ส่วนจริงของค่าสภาพยอมประสิทธิผลสัมพัทธ์	36
2.20	ส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมประสิทธิผลสัมพัทธ์	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
2.21	แผนภาพแสดงองค์ประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้อธิบายการคัดแยกและการแยกแยะโพลาริเซชันไขว้ 40
3.1	การแพร่กระจายจำเพาะเปรียบเทียบการใช้ค่าสภาพยอมประสิทธิผลกับการวิเคราะห์โดย Kharadly และ Choi 46
3.2	สัมประสิทธิ์ผลต่างของการแพร่กระจายเปรียบเทียบการใช้ค่าสภาพยอมประสิทธิผลกับการวิเคราะห์โดย Kharadly และ Choi 47
3.3	การแพร่กระจายจำเพาะที่อุณหภูมิต่างกัน 48
3.4	สัมประสิทธิ์ผลต่างของการแพร่กระจายที่อุณหภูมิต่างกัน 49
3.5	การแพร่กระจายจำเพาะที่รูปแบบการกระจายขนาดต่างกัน 50
3.6	สัมประสิทธิ์ผลต่างของการแพร่กระจายที่รูปแบบการกระจายขนาดต่างกัน 51
3.7	แบบจำลองเชิงเรขาคณิตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทิศการแพร่กระจายคลื่นและแนวการวางตัวของอนุภาคฝน 53
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างแนวโพลาริเซชันเดิมและแนวโพลาริเซชันใหม่ 56
3.9	ปริมาณการแยกแยะโพลาริเซชันไขว้สำหรับคลื่นโพลาริเซชันเชิงเส้นที่อัตราตกต่างกัน 62
3.10	ปริมาณการแยกแยะโพลาริเซชันไขว้สำหรับคลื่นโพลาริเซชันวงกลมที่อัตราตกต่างกัน 62
3.11	ปริมาณการแยกแยะโพลาริเซชันไขว้เมื่อทิศการแพร่กระจายต่างกัน 63
3.12	ปริมาณการแยกแยะโพลาริเซชันไขว้เมื่อทิศการเคลื่อนที่ของลมต่างกัน 63
4.1	แบบจำลองเชิงเรขาคณิตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางกายภาพต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนโพลาริเซชัน โดยกำหนดให้แกนของอนุภาคฝนวางตัวบนแกน z 67
4.2	โครงสร้างชุดทดลองเพื่อการศึกษาปัญหาการเปลี่ยนโพลาริเซชันเนื่องจากฝน 68
4.3	แผนภาพการต่ออุปกรณ์ชุดทำฝนจำลอง 70
4.4	องค์ประกอบและมิติของโครงทำฝนอย่างง่าย 71
4.5	โครงทำฝนอย่างง่าย 72
4.6	อุปกรณ์ที่ใช้ในการจ่ายน้ำให้โครงทำฝนอย่างง่าย 72
4.7	สายอากาศแบบปากแตรทรงพีระมิด 75
4.8	สายอากาศแบบปากแตรย่านแอล-เอส 76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.9	สายอากาศแบบปากเตร่ายานซี 76
4.10	เครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรและชุดทดสอบพารามิเตอร์เอส 77
4.11	คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล 78
4.12	ขาตั้งสายอากาศ 79
4.13	แผ่นสะท้อนคลื่น 80
4.14	ลักษณะสมบัติการสะท้อนคลื่นของแถบอะลูมิเนียมเทียบกับแผ่นทองแดง 81
4.15	อุปกรณ์ที่ใช้ในการสูบน้ำกลับ 82
4.16	ลักษณะของฝนที่เกิดจากโครงทำฝนอย่างง่าย 86
4.17	อุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณน้ำฝน 87
4.18	ตำแหน่งที่ทำการวัดอัตราการตกของฝน 88
4.19	โครงทำฝนอย่างง่ายขณะเปิดให้ฝนตกในอัตราต่าง ๆ 88
4.20	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบปากเตร่ายานแอล-เอส 91
4.21	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบปากเตร่ายานซี 93
4.22	ระดับสัญญาณที่รับได้เมื่อจ่ายกำลังให้สายอากาศส่ง 0 dBm ในการทดลองย่านแอล-เอส 95
4.23	ระดับสัญญาณที่รับได้เมื่อจ่ายกำลังให้สายอากาศส่ง 0 dBm ในการทดลองย่านซี 96
4.24	ระดับสัญญาณที่รับได้เมื่อจ่ายกำลังให้สายอากาศส่ง 9 dBm ในการทดลองย่านซี 96
4.25	ระดับสัญญาณที่รับได้เมื่อจ่ายกำลังให้สายอากาศส่ง 15 dBm ในการทดลองย่านซี 97
4.26	ตำแหน่งสายอากาศรับในการทดสอบแผ่นสะท้อนคลื่น 98
4.27	ลักษณะสมบัติของแผ่นสะท้อนคลื่นในการทดสอบย่านแอล-เอส 98
4.28	ลักษณะสมบัติของแผ่นสะท้อนคลื่นในการทดสอบย่านซี 101
4.29	การจัดวางอุปกรณ์ในการตรวจวัด 105
4.30	ระดับสัญญาณและเฟสของสัญญาณโพลาไรซ์ร่วมชั่วสำหรับการตรวจวัดย่านแอล-เอส ที่อัตราการตกระดับที่ 1 (79.8 mm./min.)
4.31	ระดับสัญญาณและเฟสของสัญญาณโพลาไรซ์ร่วมชั่วสำหรับการตรวจวัดย่านซี ที่อัตราการตกระดับที่ 1 (79.8 mm./min.)

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
4.32	ระดับสัญญาณโพลาริไธรม์ร่วมชั่วที่อัตราการตกตะกอนที่ 1 (79.8 mm./min.)	113
ก.1	แบบจำลองการกระจายขนาดและตำแหน่งของอนุภาคฝน	122
ข.1	รูปร่างของอนุภาคฝน	125