

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์ลักษณะการตกของฝนที่มีผลกระทบต่อสัญญาณ ไมโครเวฟ

ANALYSIS OF RAINFALL CHARACTERISTICS EFFECT TO MICROWAVE SIGNAL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2539

ISBN 974-621-539-6

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**26172**
วัน, เดือน, ปี.....**10 ต.ค. 2539**

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS OF RAINFALL CHARACTERISTICS EFFECT TO MICROWAVE SIGNAL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1996

ISBN 974-621-539-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Analysis of Rainfall Characteristics Effect to Microwave Signal
Student Mr.Pichase Sanorlum
Thesis Advisor Assoc. Prof.Dr.Tawil Paungma
Level of Study Master of Engineering in Electrical Engineering
Department Telecommunication Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Year 1996



ABSTRACT

The characteristic of rainfall in tropical zone especially in Thailand has shown significant problem to microwave communication system. At present, the analysis of microwave signal effected by rainfall are almost used the relation between rainrate and microwave signal attenuation. This method does not cover some characteristics of rainfall. Because the electrical data of the rainfalls cause many factors for eg. frequency of rainfall in every rainrate occurence in a year. This thesis proposes a new idea to solve this problem by using the Fast Fourier Transform (FFT) to analyse heavy occassionally rainfall characteristics for more acculate in microwave system design such as for adaptive control the power transmitter properly.

กิติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจากท่านรองศาสตราจารย์ คร.ถวิล พึ่งมา ที่ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ มณูญ สุขเกษม รองศาสตราจารย์ ฌรงค์ เหมกรณ์ และ อาจารย์ อธิรัชชัย อรุณศรีแสงไชย ที่กรุณาแนะนำแนวทางและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบพระคุณ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดน้ำฝนและอุปกรณ์รับส่งสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่กรมอุตุนิยมวิทยาที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับข้อมูลและเอกสารเกี่ยวกับสภาพทางอุตุนิยมวิทยา

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย และ ส.ว.ท.ช. ที่ได้มอบทุนอุดหนุนการทำวิจัยจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนพี่น้องและเพื่อนๆผู้ให้กำลังใจทางด้านการศึกษามาโดยตลอด

พิเชษ เสนาะล้ำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่	
1. บทนำ.....	1
วิวัฒนาการทางการติดต่อสื่อสาร.....	1
ที่มาของงานวิจัย.....	2
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
ปัญหาของการสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟในบริเวณเขตเส้นศูนย์สูตร.....	3
ลักษณะสภาพภูมิอากาศ และการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	8
การกำหนดค่าทางความถี่ไมโครเวฟสำหรับการติดต่อสื่อสารดาวเทียม.....	14
สรุป.....	22
2. ทฤษฎีการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟอันเนื่องจากฝน	24
สภาพการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟในปัจจุบัน.....	24
การแพร่กระจายคลื่นไมโครเวฟและคลื่นมิลลิเมตร.....	25
การลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟอันเนื่องจากฝน.....	26
สรุป.....	33

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3. ทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วและการนำมาใช้วิเคราะห์คุณลักษณะการตกของฝน ...34	
ประวัติของการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว.....34	
การวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว.....35	
การใช้ Fast Fourier Transform (FFT) มาวิเคราะห์คุณลักษณะการตกของฝน.....45	
สรุป.....54	
4. เครื่องมือวัดน้ำฝนเพื่อคุณลักษณะของฝนในพื้นที่เขตร้อน55	
ลักษณะการตกของฝนในประเทศไทย.....55	
เครื่องมือวัดน้ำฝนที่ใช้ในปัจจุบัน.....56	
เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบใหม่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับคุณลักษณะการตกของฝน ในพื้นที่เขตร้อนชื้น.....67	
สรุป79	
5. การทดลอง80	
การกำหนดรูปแบบการทดลอง.....80	
การจัดเตรียมระบบบันทึกข้อมูล.....80	
การออกแบบสร้างชุดเครื่องส่ง-รับสัญญาณ ไมโครเวฟ.....82	
การทดลองและวิธีการทดลอง.....85	
สรุป.....96	

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
6. ผลการทดลองและการวิเคราะห์	97
ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	97
ข้อมูลการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝน.....	97
ความสัมพันธ์ของอัตราการตกของฝนและความบ่อยครั้ง.....	98
ความสัมพันธ์ของการลดทอนของสัญญาณและอัตราการตกของฝน.....	100
สรุป.....	101
7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	102
บรรณานุกรม.....	104
ภาคผนวก ก.....	108
ภาคผนวก ข.....	112
ประวัติผู้เขียน.....	153

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

1. แสดงข้อกำหนดของการบริการด้านดาวเทียมโดย International Telecommunication Union (ITU).....	19
2. แสดงรายการของดาวเทียมที่ใช้ในการให้บริการด้านโทรคมนาคม ในพื้นที่ย่านที่ 3 ซึ่งได้กำหนดขึ้นโดย ITU	21
3. การแบ่งช่วงความถี่ในย่านไมโครเวฟ.....	22
4. การเปรียบเทียบขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาค่า DFT ระหว่างข้อมูลแบบ N จุด และแบบแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม.....	41
5. แสดงลักษณะของ bit-reversed order ของเลขฐานสอง.....	44
6. แสดงลักษณะของตารางข้อมูลนำฝนที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์.....	92
7. แสดงจำนวนครั้งที่เกิดขึ้น (Occurrence Number) ของอัตราตกของฝนค่าต่างๆ.....	95
8. แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ข้อมูลนำฝนในช่วงระยะ 1 ปี.....	96

สารบัญภาพ

หน้า

1. แสดงตำแหน่งของประเทศไทย.....	5
2. แสดงตัวอย่างอัตราการตกของฝนในแต่ละเดือนในปี พ.ศ.2534 ในพื้นที่ทุกภาคของประเทศไทย.....	5
3. แสดงย่านของสภาพภูมิประเทศที่เกิดฝนตก.....	7
4. แสดงการตกของฝนโดยเฉลี่ยในแต่ละเดือนในปี พ.ศ.2533-2535ที่พื้นที่กรุงเทพฯ.....	9
5. แสดงงานสายอากาศขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เมตรที่ติดตั้งบนหลังคาตึก โทรคมนาคม ที่ KMITL สำหรับใช้รับสัญญาณดาวเทียม.....	12
6. แสดงชุดรับน้ำฝนของเครื่องวัดน้ำฝนแบบใหม่ ที่ได้ติดตั้งไว้บนหลังคาตึกโทรคมนาคม.....	12
7. แสดงข้อมูลน้ำฝนประจำปี ที่บันทึกเป็นระยะเวลา 30 ปี ในประเทศไทย.....	13
8. แสดงสภาพการตกของฝนโดยเฉลี่ยในแต่ละเดือนในช่วงฤดูฝน.....	15
9. แสดงผลรวมของอัตราการตกของฝนในประเทศไทย พ.ศ. 2534.....	16
10. แสดงจำนวนของดาวเทียมแบบอยู่กับที่และแถบความถี่ของการทำงาน.....	18
11. แสดงย่านการบริการค่าน โทรคมนาคมที่กำหนดขึ้นโดย ITU.....	20
12. แสดงกราฟของการลดทอนที่คำนวณขึ้นตามฟังก์ชันของอัตราฝนตกและความถี่.....	25
13. แสดงคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ผ่านหยดน้ำรูปทรงกลม.....	26
14. แสดงการลดทอนอันเนื่องมาจากฝนที่ความถี่ 10,30 และ 100 GHz ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอัตราการตกของฝน.....	32
15. แสดงการแบ่งข้อมูลออกเป็นตำแหน่งเลขคู่และเลขคี่.....	38
16. กราฟแสดงการไหลของสมการ (3.16) และ (3.17).....	40
17. แสดงการไหลของสัญญาณสำหรับ FFT ของ 4 จุด.....	41
18. แสดงการไหลของสัญญาณในกลุ่มย่อยที่สุด.....	43
19. แสดงการไหลของสัญญาณสำหรับ FFT ของ 8 จุด.....	43

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

20. แสดงข้อมูลของน้ำฝนที่ได้จากการวัดทั้ง 3 รูปแบบ.....	46
21. แสดงตัวอย่างของข้อมูลฝนตกที่วัด ได้ด้วยเครื่องบันทึกแบบวัดค่าต่อเนื่องตามเวลา.....	47
22. แสดงตัวอย่างการตกของฝน 3 Event.....	49
23. แสดงตัวอย่างกราฟน้ำฝนที่มีการสวิงของ Rain rate ที่มาก.....	50
24. แสดงตัวอย่างข้อมูลน้ำฝน.....	51
25. แสดงการไหลของสัญญาณ ในกลุ่มย่อยที่สุด.....	53
26. แสดงการไหลของสัญญาณเมื่อ N = 1024.....	53
27. แสดงเครื่องวัดน้ำฝนแบบ Totalizing type.....	57
28. แสดงมาตรฐานของชุดนับน้ำฝน.....	57
29. แสดงโครงสร้างของเครื่องรับน้ำฝนแบบ Tipping bucket.....	59
30. แสดงภาพถ่ายของเครื่องรับน้ำฝนแบบ Tipping bucket.....	60
31. แสดงคุณลักษณะของเครื่องรับน้ำฝนแบบ Tipping bucket.....	60
32. แสดงภาพของเครื่องวัดน้ำฝนแบบที่มีการตอบสนองรวดเร็ว.....	61
33. แสดงการตอบสนองของเครื่องวัดน้ำฝนแบบที่มีการตอบสนองรวดเร็ว.....	61
34. แสดงรูปแบบของเครื่องวัดน้ำฝนชนิดผสม.....	64
35. แสดงเครื่องวัดน้ำฝนแบบ Continuous response type (Jardi type).....	66
36. แสดงเครื่องวัดน้ำฝนแบบ Capacitive flow-type.....	67
37. แสดงลักษณะ โครงสร้างของเครื่องวัดน้ำฝนแบบใหม่ที่ทำกรวัด ได้อย่างต่อเนื่อง.....	68
38. แสดงโครงสร้างภายในของอุปกรณ์ flow sensor ที่ภายในเป็นเพียงรูวงรี.....	70
39. แสดงวงจร F to V Converter แบบอนาล็อก.....	72
40. แสดงกราฟความสัมพันธ์ของความถี่ทางด้านอินพุทและศักดาไฟฟ้าทางค่าน เข้าท์พุท เปรียบเทียบจากการทดลองและทฤษฎี.....	72

สารบัญภาพ(ต่อ)

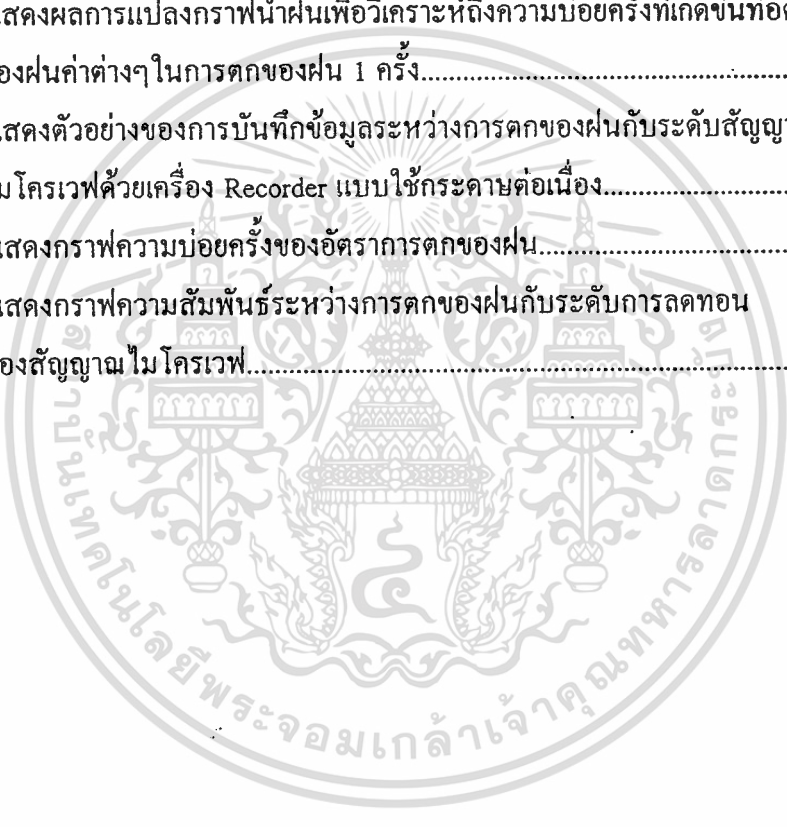
หน้า

41. แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจร F to V แบบดิจิทัลที่สามารถทำงาน ได้จนถึงความถี่ทางเข้าเป็นมิลลิวินาที.....	74
42. แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอินพุทและเอาต์พุทของวงจร F to V แบบดิจิทัล.....	75
43. แสดงต้นแบบวงจร F to V แบบอนาล็อก.....	76
44. แสดงต้นแบบวงจร F to V แบบดิจิทัล.....	76
45. แสดงการทดลองและปรับเครื่องมือวัดให้ได้ค่าที่เที่ยงตรง.....	77
46. แสดงภาพถ่ายของเครื่องวัดน้ำฝนชนิดใหม่และเครื่องวัดน้ำฝนแบบ Tipping bucket ที่ทำการติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม.....	78
47. แสดงตัวอย่างของฝนที่ตกในกรุงเทพฯ โดยใช้เครื่องบันทึกการตกของฝนแบบใหม่.....	78
48. แสดงระบบการบันทึกข้อมูลสัญญาณไมโครเวฟและการตกของฝน.....	81
49. แสดงวงจรชุดเครื่องส่งสัญญาณไมโครเวฟ.....	82
50. แสดงภาพถ่ายการติดตั้งชุดเครื่องส่งสัญญาณไมโครเวฟ.....	83
51. แสดงภาพถ่ายการติดตั้งชุดแหล่งจ่ายไฟสำรองของเครื่องส่งสัญญาณไมโครเวฟ.....	84
52. แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบชุดเครื่องรับสัญญาณไมโครเวฟ.....	84
53. แสดงภาพถ่ายเครื่องมือวัดที่ได้ติดตั้งไว้เพื่อใช้วัดระดับสัญญาณไมโครเวฟ.....	85
54. แสดงเครื่อง Recorder ที่ใช้บันทึกข้อมูลระดับสัญญาณไมโครเวฟ.....	86
55. แสดงฟังก์ชันหลักของเครื่อง Data Logger.....	88
56. แสดงโหมดการวัดที่จอภาพของเครื่อง Data Logger.....	88
57. แสดงการต่อเชื่อมส่วนต่างๆของระบบเข้าด้วยกัน.....	89
58. แสดงไฟล์ชาร์ตขั้นตอนการบันทึกข้อมูลสู่เครื่องคอมพิวเตอร์.....	90
59. แสดงไฟล์ชาร์ตขั้นตอนการส่งข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์ สู่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์.....	91
60. แสดงลักษณะของข้อมูลน้ำฝนที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์.....	92

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

61. แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำฝนด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์....	93
62. แสดงผลการแปลงกราฟน้ำฝนเพื่อวิเคราะห์ถึงความบ่อยครั้งที่เกิดขึ้นที่อัตราการตก ของฝนค่าต่างๆในการตกของฝน 1 ครั้ง.....	94
63. แสดงตัวอย่างของการบันทึกข้อมูลระหว่างการตกของฝนกับระดับสัญญาณ ไมโครเวฟด้วยเครื่อง Recorder แบบใช้กระดาษต่อเนื่อง.....	98
64. แสดงกราฟความบ่อยครั้งของอัตราการตกของฝน.....	99
65. แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตกของฝนกับระดับการลดทอน ของสัญญาณ ไมโครเวฟ.....	100



บทที่ 1

บทนำ

วิวัฒนาการทางการติดต่อสื่อสาร

ในปัจจุบันการใช้บริการทางการติดต่อสื่อสารด้วยระบบคลื่นความถี่วิทยุได้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการติดต่อสื่อสารในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้น มีแนวโน้มว่าจะมีความต้องการสูงมากขึ้นเพราะสามารถที่จะส่งข้อมูลข่าวสารไปได้ในระยะไกลๆ โดยปราศจากสายส่งสัญญาณ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการต่างๆ ที่จะตอบสนองความต้องการการสื่อสารที่เพิ่มขึ้นเช่นการนำเอาความถี่มาใช้งานใหม่ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูล่าการนำเอาระบบมัลติเพล็กซ์แบบต่างๆ มาใช้เพื่อเพิ่มช่องของสัญญาณ การนำเอาระบบโพลาริเซชันแบบคู่ มาใช้ในระบบการกระจายคลื่นหรือการ นำเอาระบบมัลติเพล็กซ์มาใช้ในระบบช่องสัญญาณในดาวเทียมด้วยงาน ดังจะเห็นได้จากเริ่มมีผู้ใช้ระบบการสื่อสารที่มีความถี่สูงกว่า 10GHz แล้ว และกำลังได้รับความนิยมเพิ่มทุก ๆ ปี แต่ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งก็คือการเกิดการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟ อันเนื่องมาจากฝนโดยขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่าง ๆ ของตัวกลางในเส้นทางการสื่อสารเช่นอัตราการตกของฝนที่ตกตามระยะทางของการสื่อสารนั้นความเร็วและทิศทางของลม ซึ่งมีผลต่อ มุมเอียงของเม็ดฝนรูปร่างของเม็ดฝนอุณหภูมิของน้ำฝนหรืออาจพูดได้ว่าการลดทอนกำลังของคลื่นไมโครเวฟของระบบการสื่อสารใดๆ เป็นสัดส่วนกับองค์ประกอบต่างๆ ของสภาพแวดล้อมและภูมิอากาศในเส้นทางการสื่อสารวิทยุต่างๆ ถึงแม้ว่าการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟจะเกิดจากหลายสาเหตุด้วยกันอันเกี่ยวเนื่องมาจากฝนแต่ปริมาณฝนที่ตกมากหรือตกน้อยในระยะเวลาต่างๆ กันที่เราเรียกว่าอัตราการตกของฝนนั้นก็ป็นสาเหตุสำคัญที่จะมีผลต่อการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟ ดังนั้นในการออกแบบการใช้งานที่ความถี่ย่านสูงกว่า 10 GHz นี้จึงต้องชดเชยกำลังเครื่องส่งสำหรับปรับค่ากำลังการส่งตามสภาพการตกของฝนแต่อย่างไรก็ตามปัญหานี้ไม่สามารถแก้ไขได้ร้อยเปอร์เซ็นต์ เนื่องจากบางครั้งฝนไม่ได้ตกที่สถานีขนส่งหรือรับ แต่ฝนอาจจะตกระหว่างเส้นทางผ่านของ สัญญาณทำให้การสื่อสารขาดช่วงอยู่บ่อยๆ และการออกแบบให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ผลดีขึ้นจึงจำเป็นต้องอาศัยการเผื่อค่า ของกำลังส่งให้มีช่วงการปรับค่ากำลังส่งได้กว้างขึ้นโดยอาศัยข้อมูลทางสถิติของการตกของฝนใน เขตนั้นๆ มาทำการคำนวณ แต่ปัญหาต่างๆ เหล่านี้ก็มีได้จบลงเพราะค่าที่ได้จากข้อมูลทางสถิตินั้น เป็นข้อมูลแบบคิค่าเฉลี่ยอย่างหยาบๆ ซึ่งเป็นผลมาจากเครื่องมือวัดซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้ในการพยากรณ์อากาศ แต่ถ้าจะนำมาใช้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกับสัญญาณไมโครเวฟนั้นจะต้องใช้เครื่องมือวัดที่ละเอียดพอสามารถอ่านค่าอัตราการตกของฝนได้ตลอดเวลา ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาเครื่องมือวัดน้ำฝนชนิดต่อเนื่องตามเวลาขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับการนำข้อมูลนี้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการตกของฝน กับการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟ

ที่มาของงานวิจัย

การตกของฝนในประเทศไทยจะมีลักษณะการตกของฝนเป็นช่วงสั้นๆและมีการตกที่หนักถึงหนักมากอันจะมีผลกระทบต่อสื่อสารในย่านความถี่ไมโครเวฟและจะทำให้เกิดการลดทอนหรือการจางหายของสัญญาณอยู่บ่อยๆ ในบางครั้งอาจทำให้การสื่อสารขาดช่วงไป สำหรับการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ ในปัจจุบันจะใช้วิธีปรับกำลังส่งเพื่อเอาไว้วางหน้าเมื่อคาดการณ์ว่าจะเกิดการลดทอนขึ้น อันเนื่องมาจากฝนโดยอาศัยข้อมูลน้ำฝนที่เก็บในลักษณะเป็นรายคาบเช่นทุก 1 ชั่วโมง 3 ชั่วโมงหรือทุกๆ 24 ชั่วโมง มาใช้คาดการณ์การลดทอนของสัญญาณที่น่าจะเกิดขึ้นซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถหาได้จากกรมอุตุนิยมวิทยา การชดเชยกำลังส่งด้วยวิธีการนี้ยังมีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่ควรเพราะในบางครั้งอาจชดเชยค่ากำลังส่งมากหรือน้อยเกินไปเนื่องจากข้อมูลการตกของฝนที่นำมาใช้วิเคราะห์เพื่อคาดการณ์นั้นมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นค่าเฉลี่ย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องสร้างเครื่องมือวัดน้ำฝนชนิดความเที่ยงตรงสูงขึ้นไปโดยสามารถวัดปริมาณน้ำฝนได้อย่างต่อเนื่องตามเวลาเพื่อนำข้อมูลน้ำฝนนี้มาทำการวิเคราะห์หาผลกระทบระหว่างลักษณะการตกของฝนกับสัญญาณไมโครเวฟและการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของฝนต่อสัญญาณไมโครเวฟที่พบในปัจจุบันจะเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพเช่นเปรียบเทียบระหว่างอัตราการตกของฝนกับระดับสัญญาณไมโครเวฟตามเวลาที่เกิดขึ้นซึ่งวิธีการนี้ยังไม่ครอบคลุมลักษณะการตกของฝนเท่าที่ควรเพราะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้กับเวลาเท่านั้นแต่สำหรับแนวความคิดใหม่ที่ได้เสนอขึ้นนี้จะเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของลักษณะการตกของฝน ที่บอกถึงความถี่ของการเกิดฝนในแต่ละ

อัตราการตกของฝนเพื่อที่จะได้นำผลเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบสื่อสารไมโครเวฟ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

การติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟในปัจจุบันนี้ เป็นสิ่งที่อำนวยความสะดวกอย่างยิ่ง เพราะสามารถส่งข้อมูลข่าวสารไปได้เป็นจำนวนมากในเวลาเดียวกันโดยปราศจากสายนำสัญญาณระหว่างด้านส่งกับด้านรับเช่นใช้ติดต่อกันระหว่างชุมสายโทรศัพท์หรือใช้ติดต่อสื่อสารกันระหว่างสถานีควบคุมการบิน เป็นต้น ดังนั้นถ้าการสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟนี้เกิดการจางหายหรือขาดช่วงของสัญญาณอันเนื่องจากสาเหตุใดก็ตามก็ย่อมส่งผลให้สัญญาณข่าวสารจำนวนมากที่ถูกส่งมากับคลื่นไมโครเวฟนั้นเกิดการจางหายหรือขาดช่วงของสัญญาณ อันจะทำให้ไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ และเราพบว่าในขณะที่ฝนตกนั้นจะมีผลกระทบต่อการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ถึงลักษณะการตกของฝนกับการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟที่เกิดขึ้นเพื่อที่จะได้หาคะแนนกำลังส่ง/รับของการสื่อสารไมโครเวฟ หรือใช้ร่วมกับการออกแบบระบบโทรคมนาคมให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น อันจะยังผลให้การติดต่อสื่อสารเป็นไปได้ อย่างราบรื่น

ปัญหาของการสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟในบริเวณเขตเส้นศูนย์สูตร

ในปัจจุบันแถบความถี่ทางการสื่อสารมีความต้องการสูงมากขึ้นเรื่อยๆ โดยได้มุ่งเน้นในการใช้แถบความถี่คลื่นวิทยุให้ได้ประโยชน์สูงสุดเช่นการใช้วิธีการดูอัลโพลาไรเซชัน การมัลติเพล็กซ์ทั้งแบบเวลาและความถี่ การใช้โคดดิวิชั่นมัลติเพล็กซ์ การมัลติเพล็กซ์แอสซิงโครนัสของควมเทียมและรวมไปถึงการใช้งานคลื่นไมโครเวฟ ในช่วงความยาวคลื่น centimeter และ millimeter นั้น ฝนเป็นปัญหาหลักที่ทำให้สัญญาณเกิดการลดทอนอันทำให้เกิดการจางหายของสัญญาณและมักจะเป็นตัวกำหนดการแพร่กระจายคลื่นของอัตราส่วนสัญญาณ carrier ต่อสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

noise เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบการสื่อสารไมโครเวฟ¹ ลักษณะการตกของฝนที่หนักจะ ทำให้การทำงานของ การติดต่อสื่อสารระหว่างดาวเทียมกับสถานีภาคพื้นดินที่ความถี่เกิน 10GHz ขึ้นไปนั้นจะมีประสิทธิภาพลดลง สถิติการแพร่กระจายการลดทอนของฝนนั้นมีความสำคัญต่อการวางแผนอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อนำมาใช้สำหรับการ link แต่จะประสบความยุ่งยากในการรวบรวม สถิติการลดทอนของฝนซึ่งต้องใช้เครื่องมือที่มีความซับซ้อนทำการบันทึกเป็นระยะเวลานานหลายปี² และผลที่ได้รับนี้สามารถนำไปใช้ได้ ในสถานที่จำนวนจำกัด อย่างไรก็ตามการวัด อัตราการตกของฝนก็ได้กระทำกันมาหลายปีในหลายประเทศ ดังนั้นสถิติอัตราการตกของฝนจึงสามารถนำไปใช้ได้ ในหลาย ๆ พื้นที่³ สำหรับประเทศไทยนั้นได้ตั้งอยู่ใกล้เขตศูนย์สูตรของโลก ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งเป็นผลให้อุณหภูมิของบรรยากาศมีค่าสูงตลอดปี ลักษณะการตกของฝนในช่วงฤดูฝน ดังแสดงได้ในภาพที่ 2 ซึ่งจะพบว่าค่าของน้ำฝนเฉลี่ยในแต่ละเดือนในช่วงปี พ.ศ. 2534 ในพื้นที่ทุกภาคของประเทศไทยนั้นมีค่าปริมาณการตกของฝนที่ค่อนข้างแตกต่างกันโดยจะมีลักษณะของการตกที่หนักในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ดังนั้นในแต่ละภูมิภาคจึงจะต้องมีการปรับ เภยกำลังส่งเพื่อชดเชยการลดทอนที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากฝนที่แตกต่างกัน⁴ ปัจจุบันการลดทอน

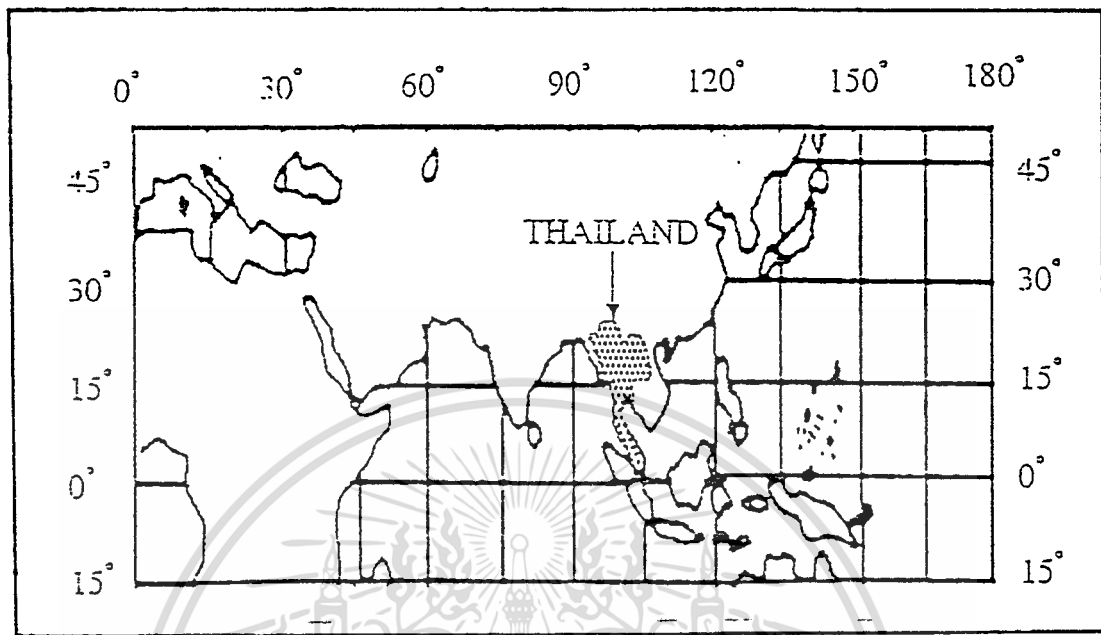
¹R.G. Loyons, " A Statistic Analysis of Transmit Power Control to Compensate Up and Down -link Fading in an FDMA Satellite Communication System",*IEEE Trans. Commun.*, Vol.COM-24,(1976):622-636.

²A. Burgueno, E. Vilar and M. Puigcerver",Spectral Analysis of 49 Years of Rainfall Rate and Relation Fade Dynamics", *IEEE Trans. Commun.*, Vol.38, No.9, (Sep. 1990) :1359-1366.

³E. Vilar, A. Burgueno, M. Puigcerver and J. Austin, "Analysis of Joint Rainfall Rate and Duration Statistics: Microwave System Design Implications", *IEEE Trans. Commun.*, Vol.36, No.6, (June 1988):650-661.

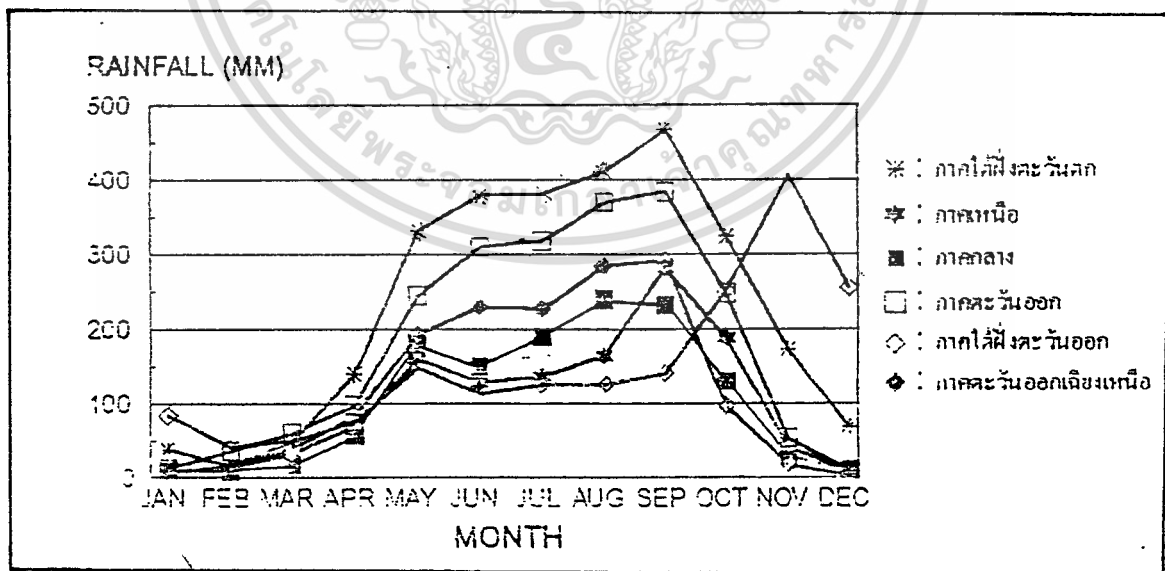
⁴Y. Moriya, ถวิล พึ่งมา และ มนูญ สุขเกษม, "เครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝนชนิดความถี่ตรงสูง สำหรับสภาพฝนตกหนักในประเทศไทย",*เทคโนโลยีใหม่ในงานวิศวกรรม, เอกสารประกอบการประชุมใหญ่ทางวิชาการ ประจำปี 2532, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, (26-28 ต.ค. 2532): หน้า 281-293*

ภาพที่ 1



แสดงตำแหน่งของประเทศไทย

ภาพที่ 2



แสดงตัวอย่างอัตราการตกของฝนในแต่ละเดือนในปี พ.ศ.2534

ในพื้นที่ทุกภาคของประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

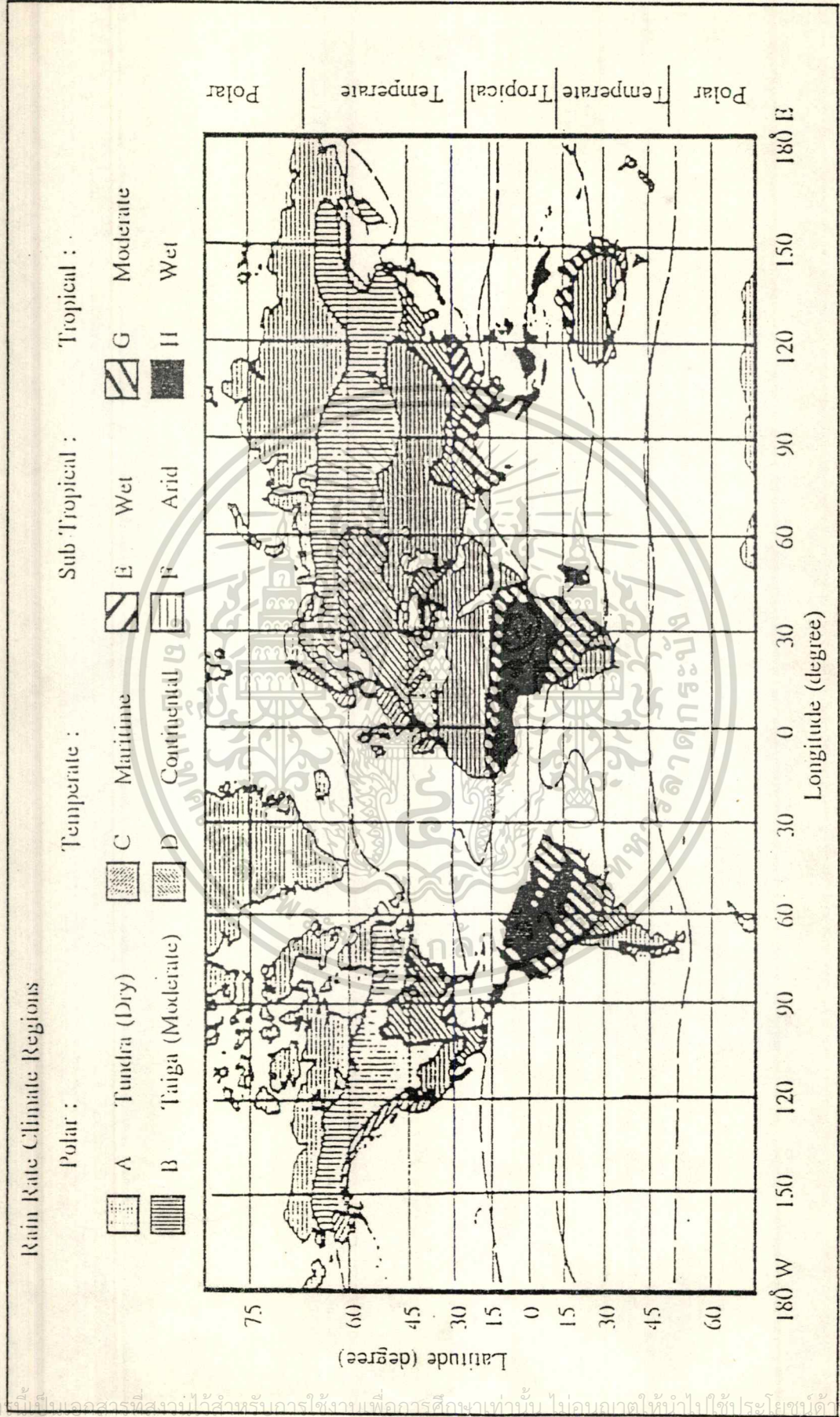
ของสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนมักจะเกิดขึ้นบ่อยในความถี่คลื่นไมโครเวฟย่าน C-band⁵ รวมทั้งปัญหาการรบกวนของคลื่นในชั้นบรรยากาศ ionospheric จากการวัดการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียมที่เรียกว่าการเกิด scintillation ในบริเวณแถบนี้⁶

สำหรับระบบการสื่อสารไมโครเวฟด้วยการใช้ดาวเทียมทำหน้าที่เป็นตัวทวนสัญญาณนั้นดังเช่นระบบดาวเทียม THAICOM ซึ่งเป็นดาวเทียมดวงแรกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่มีการบรรจุเอา KU-band transponders เข้าไปไว้ด้วยซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อการตกของฝน⁷ คุณลักษณะของการตกของฝนที่หนักในพื้นที่เขตร้อนชื้นซึ่งรวมถึงประเทศไทย ดังแสดงในภาพที่ 3 จะ มีผลกระทบอย่างมากต่อระบบการสื่อสารดาวเทียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในย่าน KU-band ซึ่งดาวเทียม THAICOM ได้นำมาใช้สำหรับการสื่อสารในประเทศไทยในเดือนธันวาคม ปีพ.ศ.2536 สำหรับปัญหาการเกิดการจางหายของสัญญาณซึ่งปัจจุบันได้ใช้การวัดการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากฝนตกด้วยเครื่องมือวัด Radio signal-temperature ซึ่งจะเกิดการจางหายขึ้นเมื่อการลดทอนของสัญญาณมีค่าสูงมากกว่า 7 dB แต่ก็ยังพบว่ามีความผิดพลาดที่สูงอยู่ ดังนั้นแนวทางแก้ไขจึงจำเป็นที่จะต้องทำการวัดทั้ง สภาพอากาศควบคู่ไปกับการวัดด้วยเครื่องมือวัด Radio signal-temperature เพื่อให้เกิดความเที่ยงตรงสูงมากยิ่งขึ้น แต่สำหรับในกรณีที่การลดทอนของสัญญาณมีค่าต่ำกว่า 0.5 dB อาจมีสาเหตุเกิดจากการรบกวนของ noise รอบ ๆ จุดที่ทำการวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัดที่มุมเงยต่ำๆควรจะต้องระมัดระวังให้มากสำหรับในย่านการวัดแบบแคบๆเครื่องมือวัด radiometer จะเป็นเครื่องมือวัดแบบค่าประมาณของอัตราการตกของฝนแบบสะสมซึ่งเครื่องที่ทำการวัดการตกของฝนแบบสะสมนี้ ได้ทำการติดตั้งไว้ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

⁵พิเชษ เสนาะล้ำ, ณรงค์ เหมกรณ์, มนูญ สุขเกษม และถวิล พึ่งมา, "การวิเคราะห์ลักษณะการตกของฝนเพื่อประโยชน์ในการออกแบบระบบสื่อสารไมโครเวฟสำหรับประเทศไทย", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16, ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, (25-26 พ.ย. 2536):หน้า 178-181

⁶T. Paungma, N. Hemmakorn, Y. Moriya and M. Teramoto, " Scintillation Characteristics as Seen in Ku-band Observed Observed in Bangkok", Proceeding of 13th International Telecommunication Symposium, (1992):305-310.

⁷P. Sanorlum, T. paungma, M. Sukkasem, I. Arungsrisangchai and Y. Moriya, " THAICOM Satellite Plans and Rainfall Intensity Characteristics of Thailand ", 1993 Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technology (ASPITT'93), 11-12 November 1993.



ภาพที่ 3 แสดงย่านของสภาพภูมิประเทศที่เกิดฝนตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเราใช้เฉพาะในวงจำกัดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะทำการวัดการตกของฝนที่หนักในช่วงระยะเวลาอันสั้น ดังได้แสดงข้อมูลน้ำฝนเฉลี่ยในแต่ละเดือนที่วัดได้ในช่วงปี พ.ศ. 2533-2535 ดังภาพที่ 4 ซึ่งทำให้ทราบว่าข้อมูลน้ำฝนแต่ละเดือนของแต่ละปีนั้นยังไม่มีความสัมพันธ์กันดังนั้นการศึกษาเฉพาะค่าเฉลี่ยของน้ำฝนในแต่ละเดือนจึงยังไม่เพียงพอรวมทั้งทำให้เราทราบได้ว่านอกจากการตกของฝนในแต่ละภูมิภาคมีความแตกต่างกันแล้วการตกของฝนในพื้นที่เดียวกันในแต่ละปีก็ยังคงมีความแตกต่างกันด้วย สำหรับข้อดีของเครื่องมือวัดชนิด inversion type ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานง่ายสำหรับการวัดค่าการตกของฝนแบบสะสมซึ่งประสิทธิภาพของเครื่องมือที่วัดอาจมีค่าเท่ากับ 0.2, 0.5 หรือ 1.0 มิลลิเมตรต่อพัลส์ การวัดการตกของฝนเป็นช่วงๆสามารถที่จะนำไปใช้งานได้ดีกว่าเพราะว่าปริมาณน้ำฝนถึงแม้จะมีค่าน้อยแต่การตกของฝนนั้นอาจตกหนักมากกว่า 100 มิลลิเมตร/ชั่วโมง ซึ่งความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้ถ้าใช้เครื่องมือวัดที่วัดค่าได้ไม่ละเอียดพอในปัจจุบันยังขาดแคลนสถิติการตกของฝนแบบสะสมในหลายพื้นที่ของประเทศไทยจากค่าที่วัดได้ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เราวัดค่าได้มากกว่า 400 มิลลิเมตร⁸ ในการวัดการลทอนของสัญญาณในขณะที่เกิดฝนตกนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีการตอบสนองอย่างมีประสิทธิภาพสูง

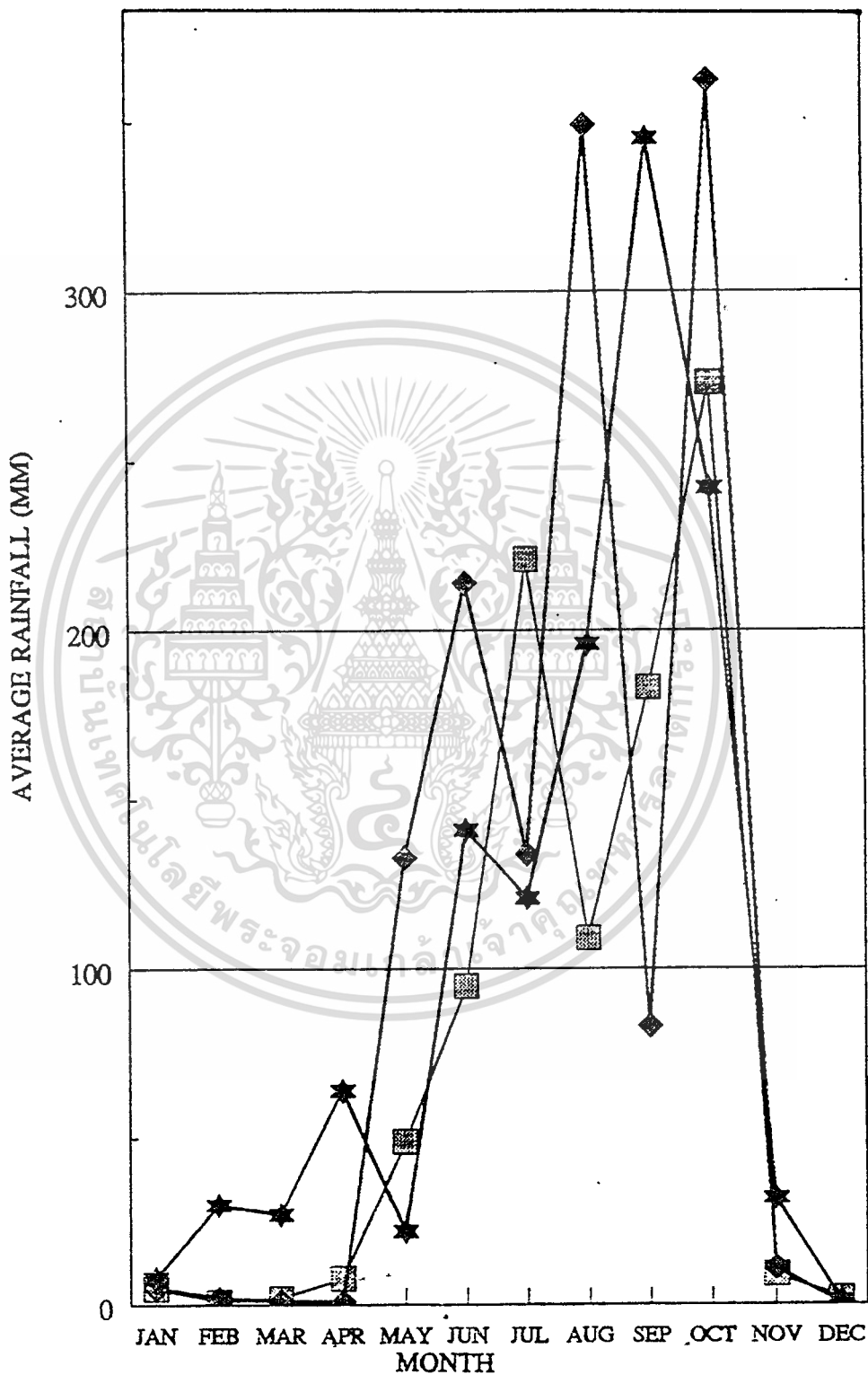
การตกของฝนนั้นเป็นปัญหาต่อการออกแบบการติดต่อสื่อสารด้วยดาวเทียมและการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในประเทศไทย การใช้งานย่านความถี่ KU-band ในพื้นที่ย่านเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ดูเหมือนว่าจะมีผลกระทบเกี่ยวกับปัญหาการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างานนี้การนำเอาดาวเทียมมาใช้ในการสื่อสารรูปแบบใหม่เราจึงควรศึกษาให้เข้าใจถึงลักษณะเฉพาะของการลทอนของสัญญาณคลื่นวิทยุในขณะที่เกิดฝนตก ที่ค่าอัตราการตกของฝนต่างๆ และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับคุณลักษณะเฉพาะของการส่งคลื่นไมโครเวฟ นั้นจึงควรต้องเร่งกระทำการศึกษาวิจัยให้บรรลุผลอย่างเร่งด่วน

ลักษณะสภาพภูมิอากาศ และการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟในประเทศไทย

สำหรับในประเทศไทยนั้นพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงได้ตั้งชื่อสถานที่ทำการเกี่ยวกับ

⁸ T. Paungma, Y. Moriya and H. Samoto, " Rainfall Intensity Recorder Used Flow Sensor", Technical Digest of the 8th Sensor Symposium, (1989):173-176.

ภาพที่ 4



แสดงการตกของฝนโดยเฉลี่ยในแต่ละเดือนในปี พ.ศ.2533-2535 ที่พื้นที่กรุงเทพฯ

★ :2533 ◆ :2534 ◻ :2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารดาวเทียมว่า “ THAICOM “ ซึ่งประกอบด้วยแถบความถี่ไมโครเวฟย่าน C-band จำนวน 10 transponder และแถบความถี่ย่าน Ku-band จำนวน 2 transponder ซึ่งได้ถูกติดตั้งในเดือน ธันวาคม ปี พ.ศ.2536 สำหรับดาวเทียม THAICOM ดวงที่ 2 ที่ทำหน้าที่สำรองไว้ นั้นตามหมายกำหนดการจะถูกติดตั้งในปี พ.ศ.2537 ดาวเทียม THAICOM นี้ ทางหน่วยงานรัฐบาลของไทยได้ร่วมมือกับบริษัทชินวัตรเมื่อปี พ.ศ.2530 เป็นระยะเวลา 30 ปี โดยสั่งทำดาว เทียมจากบริษัท Hughes Aircraft โดยเสียค่าใช้จ่ายในการสร้างและการติดตั้งเป็นจำนวนเงิน 1,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งเป็นดาวเทียมในรุ่น HS-376 โดยมีการหมุนตัวแบบเสถียรมีรูปร่างลักษณะ tabular shape ความกว้าง 2.16 เมตร สูง 6.6 เมตร น้ำหนัก 1,080 กิโลกรัม และมีอายุการทำงานเป็นเวลา 15 ปี วงโคจรของสถานีประจำที่ ถูกกำหนดอยู่ที่ตำแหน่ง 78.5 องศาตะวันออก สำหรับดาวเทียม THAICOM 1 และสำหรับดาวเทียม THAICOM 2 นั้นจะมีค่ามุม เหยของจานสายอากาศเท่ากับ 59.9 องศา สำหรับสถานีภาคพื้นดินในกรุงเทพฯ

ในปัจจุบันนี้ ดาวเทียมได้ถูกใช้งานเพื่อการติดต่อกันระหว่างประเทศต่างๆ ในโลกแนวทางข้างหน้าคาดการณ์ว่าจะมีการใช้ความถี่ที่สูงมากกว่า 10 GHz เพิ่มมากขึ้นประเทศในแถบ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้จึงได้ออกแบบในการใช้ ความถี่ในย่าน KU-band จากการนำความถี่ที่สูงขึ้นนี้มาใช้ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องทำการวัดค่าระดับสัญญาณเพื่อป้องกันหรือหลีกเลี่ยงการลดทอนของคลื่นวิทยุ

สำหรับขณะนี้ประเทศไทยได้ใช้โครงข่ายการแพร่ภาพและเสียงของโทรทัศน์ ในย่าน C-band โดยการเชื่อมโยงผ่านดาวเทียม ซึ่งระดับความเข้มของคลื่นมีส่วนสำคัญมากในพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งมีค่าระดับความแรงของสัญญาณที่ทำการส่งที่สูงมาก แต่เราทราบข้อมูลเพียงเล็กน้อยเกี่ยวกับคุณลักษณะของการลดทอนอันเนื่องมาจากการตกของฝนในพื้นที่บริเวณนี้ ดังนั้นเราจึงได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการลดทอนของคลื่นอันเนื่องมาจากการตกของสัญญาณดาวเทียม Palapa B2P ที่กรุงเทพฯ (ดูได้ดังภาพที่ 5)

องค์ประกอบที่สำคัญอย่างมากของคุณลักษณะการตกของฝนคือ อัตราการตกของฝน ในพื้นที่แถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ นั้นมักจะมีการตกของฝนที่หนักในช่วงฤดูฝน อัตราการตกของฝนส่วนใหญ่แล้วจะเกิน 200 mm/h คุณลักษณะความแรงของฝนที่ตกจะมีระดับ การตกของฝนที่แรงเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ เราได้มีการศึกษา ถึงการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากฝน ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการวัดระดับการตกของฝนในแต่ละช่วงระยะเวลาในปัจจุบันเราไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบ rain gauge ทำการวัดการตกของฝนที่หนักในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้ ซึ่งเครื่องมือวัดน้ำฝนแบบ Conventional tipping bucket rain gauges และแบบ water dropping computation rain gauges ได้ถูกนำมาใช้สำหรับศึกษาถึงการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเครื่องต้นแบบสามารถวัดค่าอัตราการตกของฝนสูงสุดได้ 100 mm/h และ 200 mm/h ตามลำดับ ซึ่งเป็นย่านการวัดน้ำฝนที่ยังไม่กว้างนัก เราจึงได้พัฒนาเครื่องบันทึกอัตราการตกของฝนในขณะเวลานั้นๆ ซึ่งไม่เหมือนกับเครื่องมือวัดการตกของฝนแบบเดิม คือสามารถทำการวัดการตกของฝนตั้งแต่ค่าประมาณ 1 mm/h ไปจนถึงค่า 500 mm/h หรือมากกว่าในย่านวัดเดียว เราได้ทำการบันทึกอัตราการตกของฝนในกรุงเทพ โดยใช้เครื่อง recorder ในภาพที่ 6 แสดงเครื่องวัดน้ำฝนชนิดใหม่ที่ได้คิดตั้งไว้บนหลังคาตึกภาควิชาโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

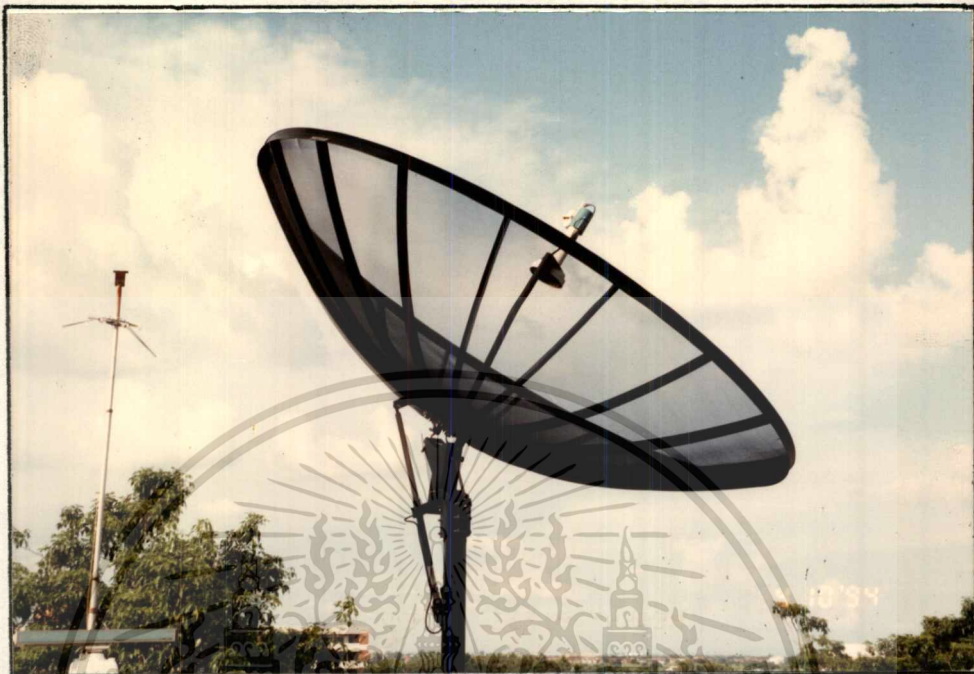
สภาพภูมิอากาศของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้นั้นสามารถแบ่งออกหลักๆ ได้คือ ฤดูฝน และฤดูแล้ง ส่วนใหญ่แล้วการตกของฝนประจำปีจะถูกบันทึกได้ในช่วงฤดูฝน ประเทศไทยอยู่ในพื้นที่เขตร้อนชื้น นั้นหมายความว่าประเทศจะอยู่ภายใต้ผลกระทบของลมมรสุม อุดมภูมิโดยส่วนใหญ่แล้วมักจะมีค่าคงที่ตลอดปี ลมมรสุมจะพัดผ่านอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน ซึ่งทำให้เกิดเป็น 2 ฤดู ในเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะนำฝนมาตกในประเทศไทยโดยนำความชื้นของอากาศจากทะเลจีนใต้ในเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะพัดผ่าน ซึ่งนำความแห้งและอากาศเย็นมาจากประเทศจีนในช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคมจะเป็นช่วงฤดูร้อน จะเป็นช่วงของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือโดยที่ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้นั้นยังไม่แรงพอ ซึ่งจะเป็นฤดูร้อน

เราได้ทำการศึกษาข้อมูลที่ได้รวบรวมไว้โดยกรมอุตุนิยมวิทยาของประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2504 ถึงปี พ.ศ.2533 เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะการตกของฝนในประเทศ การตกของฝนในพื้นที่เขตร้อนชื้นสามารถจัดแบ่งตาม 2 ลักษณะซึ่งทำให้เกิด 2 ฤดู ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว เราจะกำหนดได้ว่า ฤดูแล้งจะเป็นช่วงเวลาที่ผลรวมของการตกของฝนในแต่ละเดือนมีค่าน้อยกว่า 1 ใน 3 ของระดับการตกก่อนหน้านี้ และเหมือนกับเดือนต่อมา หรือไม่มากกว่า 100 mm/h.

ฤดูฝนเริ่มจากเดือนพฤษภาคม ถึงเดือนตุลาคมทางพื้นที่ตอนเหนือของอำเภอหัวหินจากเดือนพฤษภาคมถึงเดือนมกราคมหน้า พื้นที่จะถูกผลกระทบจากอ่าวไทย และจากเดือนพฤษภาคม ถึงเดือนพฤศจิกายน พื้นที่จะถูกผลกระทบจากทะเลอันดามัน ภาพที่ 7 แสดงรายงานการตกของฝนประจำปีในช่วงระยะเวลา 30 ปีในประเทศไทย ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่มีฝนตกชุกจะอยู่บริเวณ

⁹พิเชษ เสนาะล้ำ, พิษณุ บุญตรา และ ถวิล พึ่งมา "การบันทึกข้อมูลของปริมาณน้ำฝนชนิดความเที่ยงตรงสูงอย่างต่อเนื่องตามเวลาด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์", วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, เอกสารการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ประจำปี 2534, (23-26 พ.ค. 2534): หน้า 107-116

ภาพที่ 5



แสดงงานสายอากาศขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เมตร ที่ติดตั้งบนหลังคาตึก
โทรคมนาคม ที่ KMITL สำหรับใช้รับสัญญาณจากดาวเทียม Palapa B2P

ภาพที่ 6



แสดงชุดรับน้ำฝนของเครื่องวัดน้ำฝนแบบใหม่ที่ได้ติดตั้ง

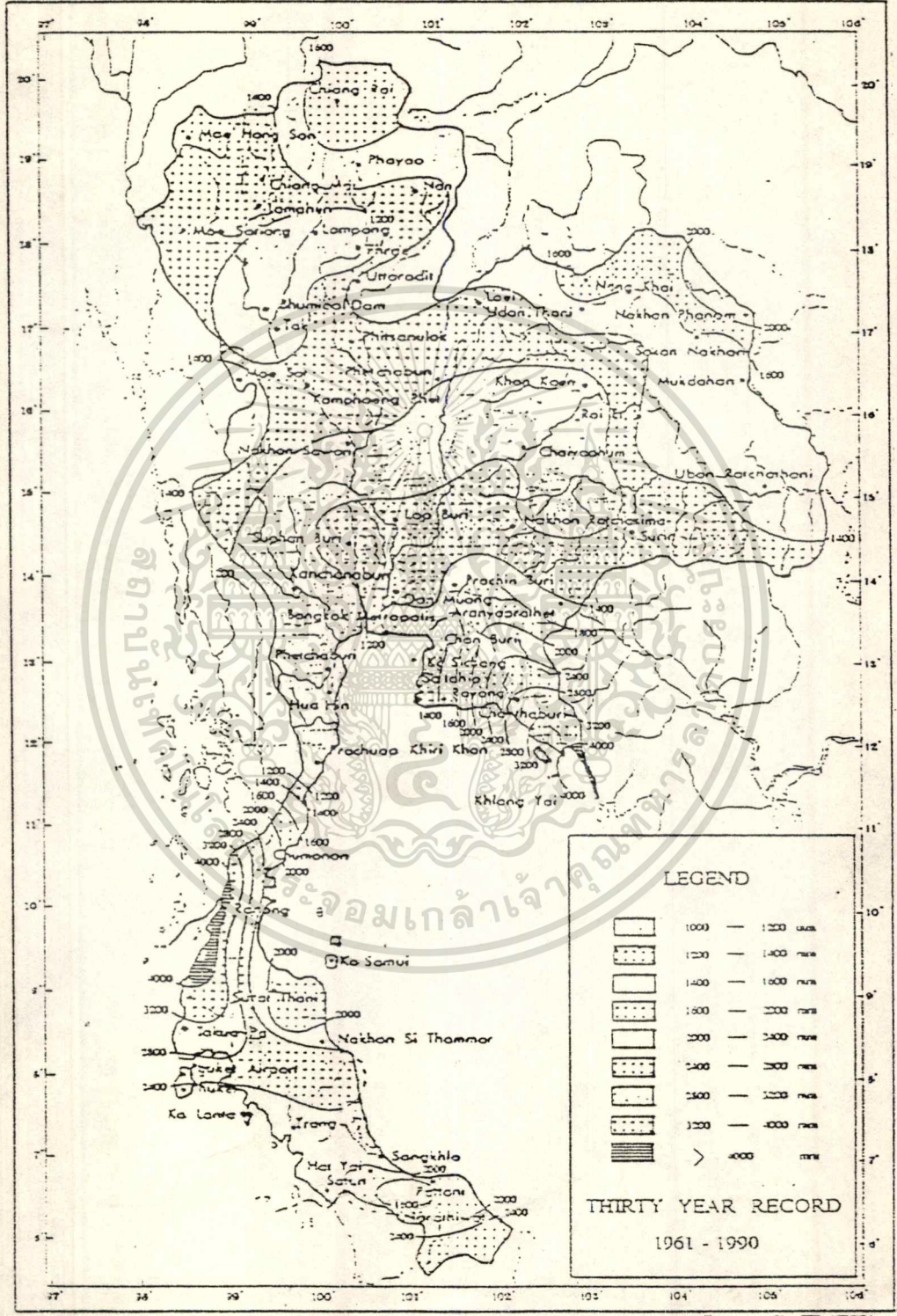
ไว้บนหลังคาตึกโทรคมนาคม ที่ KMITL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะที่ขอเสนอ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 7

ANNUAL RAINFALL



แสดงข้อมูลน้ำฝนประจำปี ที่บันทึกเป็นระยะเวลา 30 ปี ในประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชายฝั่งด้านตะวันออกของไทยที่อำเภอคลองใหญ่ โดยมีค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยในช่วงระยะเวลา 30 ปีเท่ากับ 4,000 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับกับบริเวณพื้นที่ชายฝั่งภาคใต้ด้านตะวันตกที่จังหวัดระนองซึ่งสืบเนื่องจากเป็นพื้นที่ที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้มากเป็นพิเศษ

ภาพที่ 8 แสดงค่าเฉลี่ยแต่ละเดือนที่เกิดฝนตกของพื้นที่เหล่านั้นในช่วงฤดูฝน โดยมีค่า 130 mm/h ในอำเภอหัวหิน 627 mm/h ในอำเภอคลองใหญ่ และ 571 mm/h ในจังหวัดระนอง ซึ่งจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงมากในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 200-600 มิลลิเมตร และในภาพที่ 9 แสดงถึงผลรวมของอัตราการตกของฝนในปี พ.ศ.2534 ของประเทศไทย ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำฝนประจำปีในช่วง 30 ปี ในภาพที่ 7 แล้วจะพบว่าค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนักในแต่ละภูมิภาคซึ่งแสดงถึงว่าการเก็บข้อมูลน้ำฝนเป็นเวลานานๆยังสามารถนำมาในพยากรณ์ได้เป็นอย่างดี

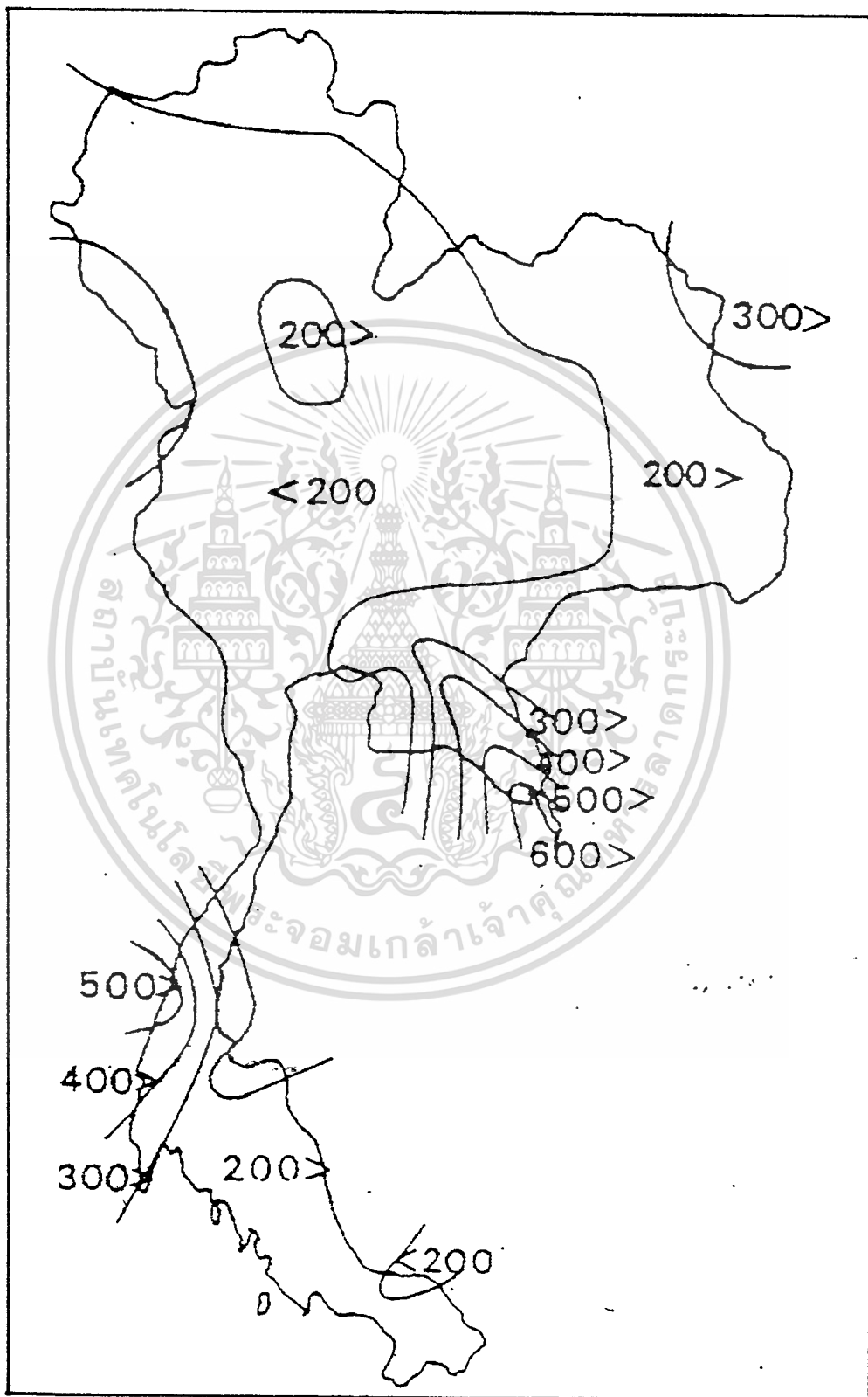
การกำหนดค่าทางความถี่ไมโครเวฟสำหรับการติดต่อสื่อสารดาวเทียม

เกี่ยวกับแถบความถี่และการแบ่งเพื่อใช้งานสำหรับการสื่อสารดาวเทียม มีแนวทางหลักอยู่ 3 ประการในการพัฒนาทางด้านการสื่อสารดาวเทียมซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบถึงรายละเอียดและมีความเข้าใจถึงองค์ประกอบของการแพร่กระจายคลื่นที่เกี่ยวข้องประการแรก การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในการใช้ประโยชน์ในแถบความถี่ที่ต่ำกว่า 6 GHz ซึ่งเป็นตำแหน่งของการบริการทางดาวเทียมซึ่งเป็นผลให้เกิดสถานะของ spectrum crowding และ sharing ซึ่งทำให้ผู้ออกแบบระบบจำเป็นต้องพิจารณาถึงการใช้งานในแถบความถี่ที่สูงขึ้นเพื่อแก้ปัญหาความแออัดทางด้านความถี่นี้แถบความถี่ได้ถูกกำหนดไว้ให้กับดาวเทียมแบบคงที่ ให้มีการบริการที่แถบความถี่ 12/14 GHz และ 20/30 GHz และดาวเทียมแบบออกอากาศจะให้บริการในแถบความถี่ 11.7 - 12.2 GHz ไว้เรียบร้อยแล้ว แถบความถี่ที่ได้กำหนดไว้แล้วนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษเกี่ยวกับดาวเทียมในปัจจุบัน และได้ถูกออกแบบระบบการทำงานไว้ล่วงหน้าเป็นระยะเวลาหลายปี การกำหนดแถบความถี่นี้ได้กำหนดให้กับการให้บริการทางอวกาศอื่นๆ มากมาย โดยรวมถึงการวิจัยทางด้านอวกาศ การตรวจสภาพของโลก ด้านอุตุนิยมวิทยา การสื่อสารด้านโทรศัพท์เคลื่อนที่ และวิทยุทางการเดินเรือ โดยสามารถกำหนดได้ตั้งแต่ค่าความถี่ 10 GHz ไปจนถึง 100 GHz การกำหนดค่าความถี่เหล่านี้ทั้งหมดจะคงที่ไว้นั้นคือไม่สามารถแบ่งส่วนที่ว่างอื่นๆ ให้กับการบริการบนพื้นโลกได้และนี่จึงทำให้เกิดแรงกระตุ้นในขณะที่เกิดปัญหาความไม่เพียงพอ ในการแบ่งค่าความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

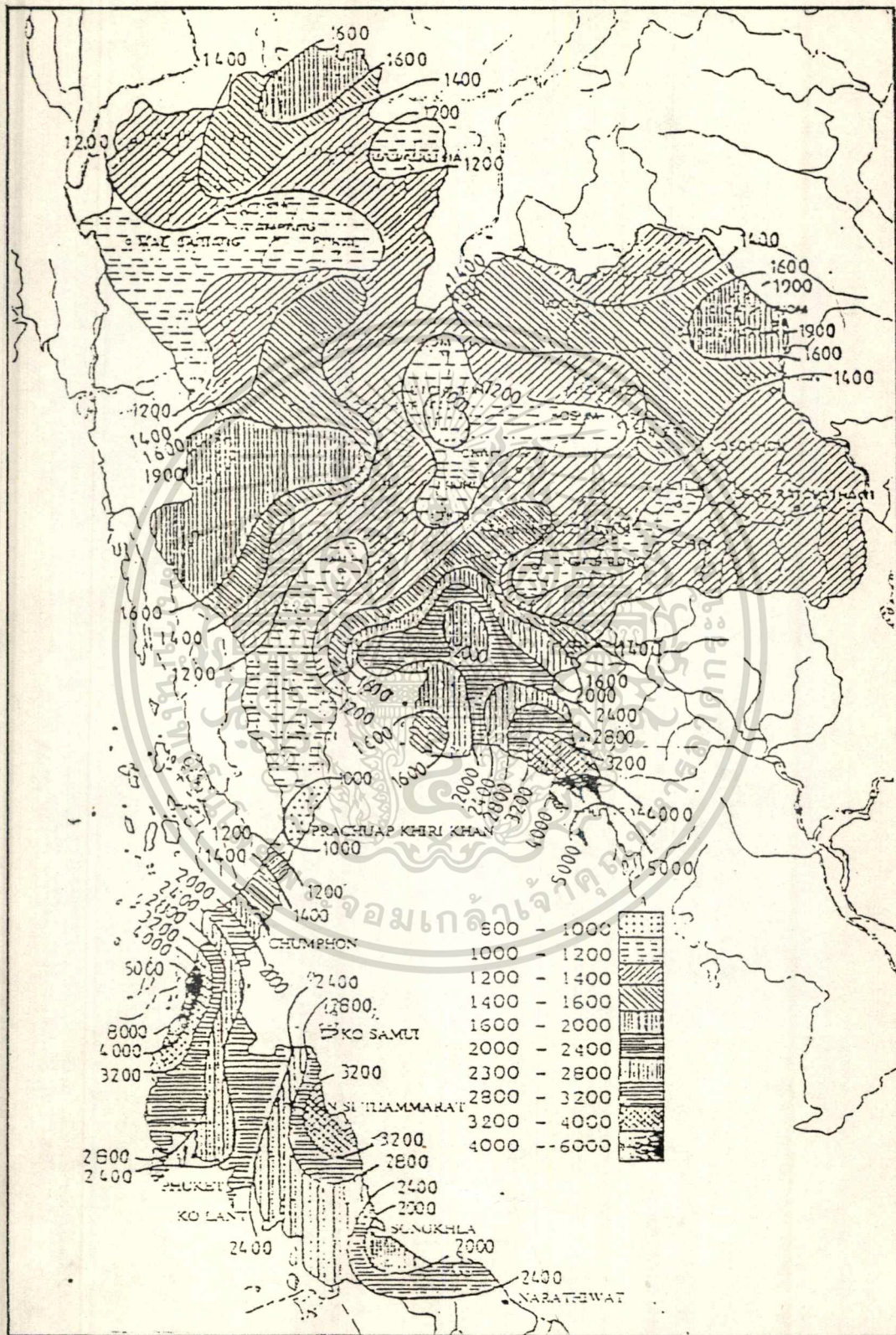
ภาพที่ 8



แสดงสภาพการตกของฝน โดยเฉลี่ยในแต่ละเดือนในช่วงฤดูฝน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 9



แสดงผลรวมของอัตราการตกของฝนในประเทศไทย พ.ศ. 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และปัญหาการใช้งานความถี่ร่วมกัน ซึ่งจะได้กล่าวถึงเฉพาะในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 10 GHz แนวทางข้างหน้าจะนำความถี่ที่สูงขึ้นมาใช้ และความถี่ของการทำงานที่สูงขึ้นนี้ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 10 ซึ่งแสดงจำนวนดาวเทียมแบบ geosynchronous ในแต่ละรุ่น โดยจะมีแถบความถี่ที่สูงมากขึ้นในการติดตั้งที่วงโคจร โดยได้ถูกออกแบบไว้ในช่วงเวลา 15 ปี จากช่วงปี พ.ศ.2508 ถึงกลางปี พ.ศ. 2523 ดาวเทียมได้เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมาก ในช่วงย่านความถี่ 11 -17 GHz เมื่อดาวเทียมได้มีการทำงานอยู่หลายดวงแล้วในช่วงความถี่ 12/14GHz จึงได้ออกแบบแถบความถี่การให้บริการทางดาวเทียมเสริมเพิ่มขึ้น

สำหรับย่านที่เกิน 20GHz นั้นยังคงเป็นดาวเทียมที่ใช้เพื่อการทดลองวิจัย ในย่านความถี่ 20/30 GHz สำหรับเป็นแนวทางสำหรับการแพร่ขยาย ความถี่ไปจนถึง 34.8 GHz

สำหรับการเจริญเติบโตด้านการติดต่อสื่อสารดาวเทียม เป็นแนวทางหลักอันดับที่ 2 ของการสื่อสารดาวเทียม โดยได้มุ่งไปยังการพัฒนาระบบดาวเทียมให้มีความถี่ในการทำงานที่สูงขึ้นเพื่อขยายความต้องการทางด้านการใช้ bandwidth ที่มีจำนวนมากขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวกให้ มีการกระจายข้อมูลข่าวสาร ไปสู่ชุมชนที่ต้องการเทคโนโลยีในปัจจุบันการบริการดาวเทียมแบบคงที่ได้ใช้แถบความถี่อยู่ที่ 4/6 GHz และ 7/8 GHz ซึ่งรองรับบริการเหมือนกันทั้งหมด เช่น ใช้ภายในบ้าน ติดต่อกับนานาชาติ และปฏิบัติการของการติดต่อสื่อสารทางการทหารในปัจจุบัน โดยมีผลรวมที่ 500 MHz ในแต่ละ bands ของทั้ง 2 band สำหรับในความถี่ที่เกิน 10 GHz นั้นยังสามารถขยาย band width ได้อีกมาก การกำหนดแถบความถี่ปัจจุบันได้ถูกพัฒนาเมื่อปีพ.ศ. 2522 โดย World Administrative Radio Conference (WARC) โดยได้กำหนดแถบความถี่ไว้ที่ 500 MHz สำหรับย่านความถี่ 12/14 GHz 3.5 GHz สำหรับย่านความถี่ 20/30 GHz และ 3 GHz ในย่านความถี่ 40/43 GHz โดยแถบความถี่ทั้งหมดนี้ได้นำมาใช้กับการบริการด้วยดาวเทียมแบบคงที่ได้ ซึ่งได้กำหนดแถบความถี่ไว้ที่ค่ามากกว่า 10 GHz จนถึง 40 GHz และขยายต่อไปถึงขีดจำกัดสูงสุดที่ระบุคือที่ความถี่ 275 GHz

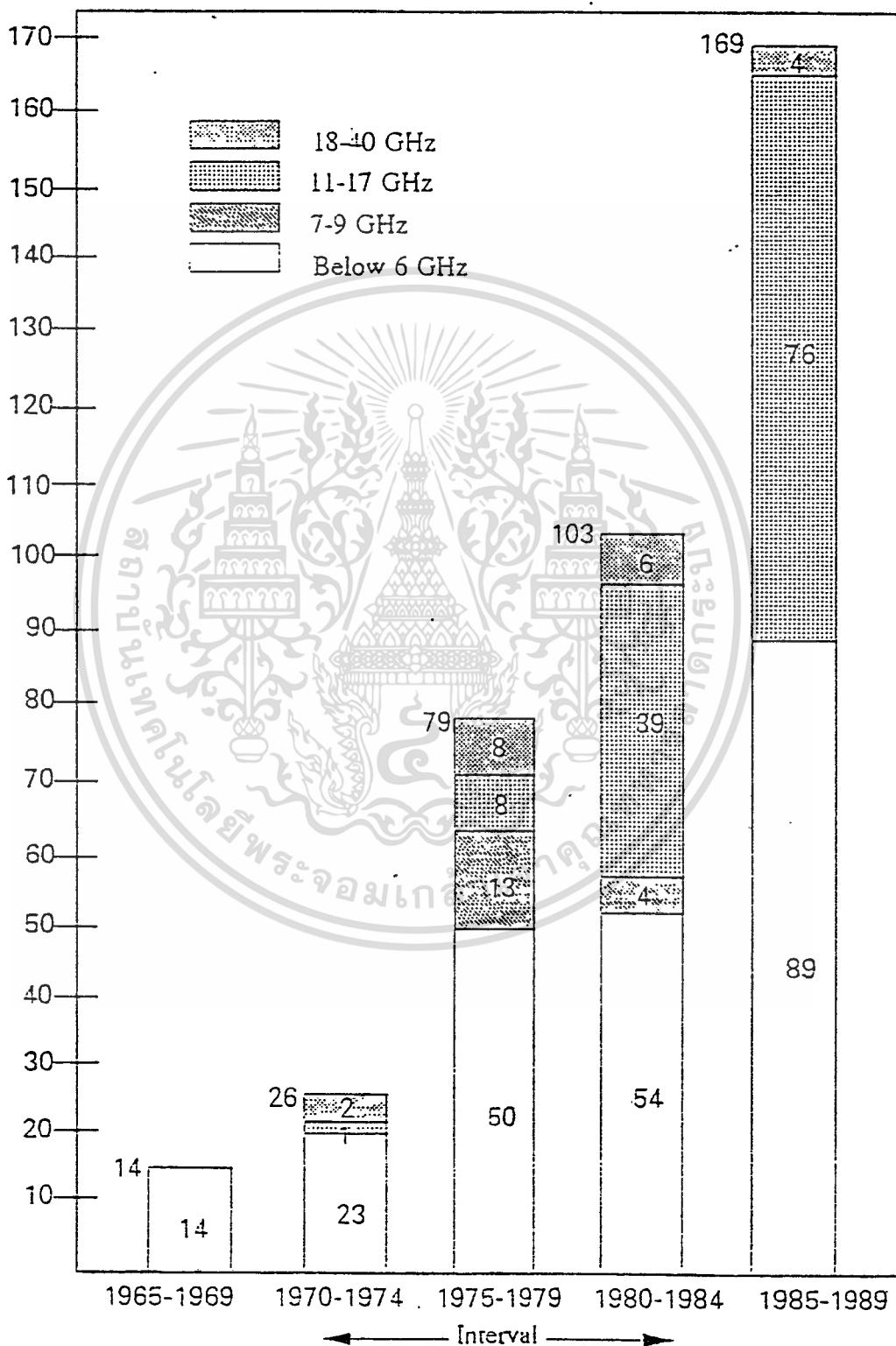
การกำหนดความถี่สำหรับการสื่อสารดาวเทียมกำหนดความถี่ระหว่างชาติได้ถูกกำหนดขึ้นโดย ITU (International Telecommunications Union) ซึ่งเป็นพื้นฐานของชนิดการ ให้บริการโดยระบบการติดต่อสื่อสารโทรคมนาคม การกำหนดความถี่ได้รวมทั้งทางด้านภาคพื้นดิน ดาวเทียม และการบริการส่งมอบระหว่างความถี่ ตารางที่ 1 แสดงการให้บริการทางดาวเทียมโดยถูกกำหนดจาก ITU เพื่อใช้ประโยชน์ในการกำหนดความถี่ การระบุชื่อมีอยู่หลายชนิด และมีหลายส่วนที่ให้บริการเสริม

สำหรับตัวอย่างการบริการดาวเทียมแบบเคลื่อนที่ก็เป็นการระบุรายชื่อของการบริการอันหนึ่ง เช่นเป็นการเคลื่อนที่ของการบินทางอวกาศ การเคลื่อนที่ภาคพื้นดิน และการเคลื่อนที่ในทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 10

Number of satellites



แสดงจำนวนของดาวเทียมแบบอยู่กับที่ และแถบความถี่ของการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การให้บริการของดาวเทียมแบบประจำที่จะเป็นการเชื่อมโยงการสื่อสารแบบจุดถึงจุดโดยสถานีภาคพื้นดินยังคงอยู่กับที่ในสถานทีนั้น ๆ การให้บริการของดาวเทียมแบบเคลื่อนที่จะครอบคลุมการเชื่อมโยงติดต่อสื่อสารแบบจุดถึงจุด โดยปลายทางด้านใดด้านหนึ่งหรือทั้งสองที่ติดต่อกันอยู่มีการเคลื่อนที่ระหว่างการรับส่ง การให้บริการดาวเทียมแบบออกอากาศนั้นจะเป็นการเชื่อมโยงแบบจุดเดียวหรือหลายจุดโดยกำหนดให้มีการแพร่ไปทั่วพื้นที่ให้บริการมากมายหรือเฉพาะภูมิภาค

ITU ได้กำหนดพื้นที่ผิวโลกไว้ 3 ย่าน สำหรับการกำหนดค่าความถี่ ทั้ง 3 ย่าน ได้แสดงไว้ดังภาพที่ 11 การกำหนดค่าความถี่นั้นจะถูกกำหนดอย่างอิสระในแต่ละย่าน โดยมีเป้าหมายตรงตามข้อตกลงในแต่ละย่านนั้น แม้ว่าจะมีการกำหนดความถี่ที่ใช้กันมากและเหมือนกันทั้ง 3 ย่าน การเกิด Interference criteria ระหว่างย่านสามารถเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการ กำหนดความถี่ โดยเฉพาะส่วนที่อยู่ใกล้ชิดกันกับย่านที่แบ่งเขต

ตารางที่ 1

แสดงข้อกำหนดของการบริการด้านดาวเทียมโดย
International Telecommunications Union (ITU)

Aeronautical mobile satellite

Aeronautical radionavigation satellite

Amateur satellite

Broadcasting satellite

Earth-exploration satellite

Fixed satellite

Inter-satellite

Maritime mobile satellite

Maritime radionavigation satellite

Meteorological satellite

Mobile satellite

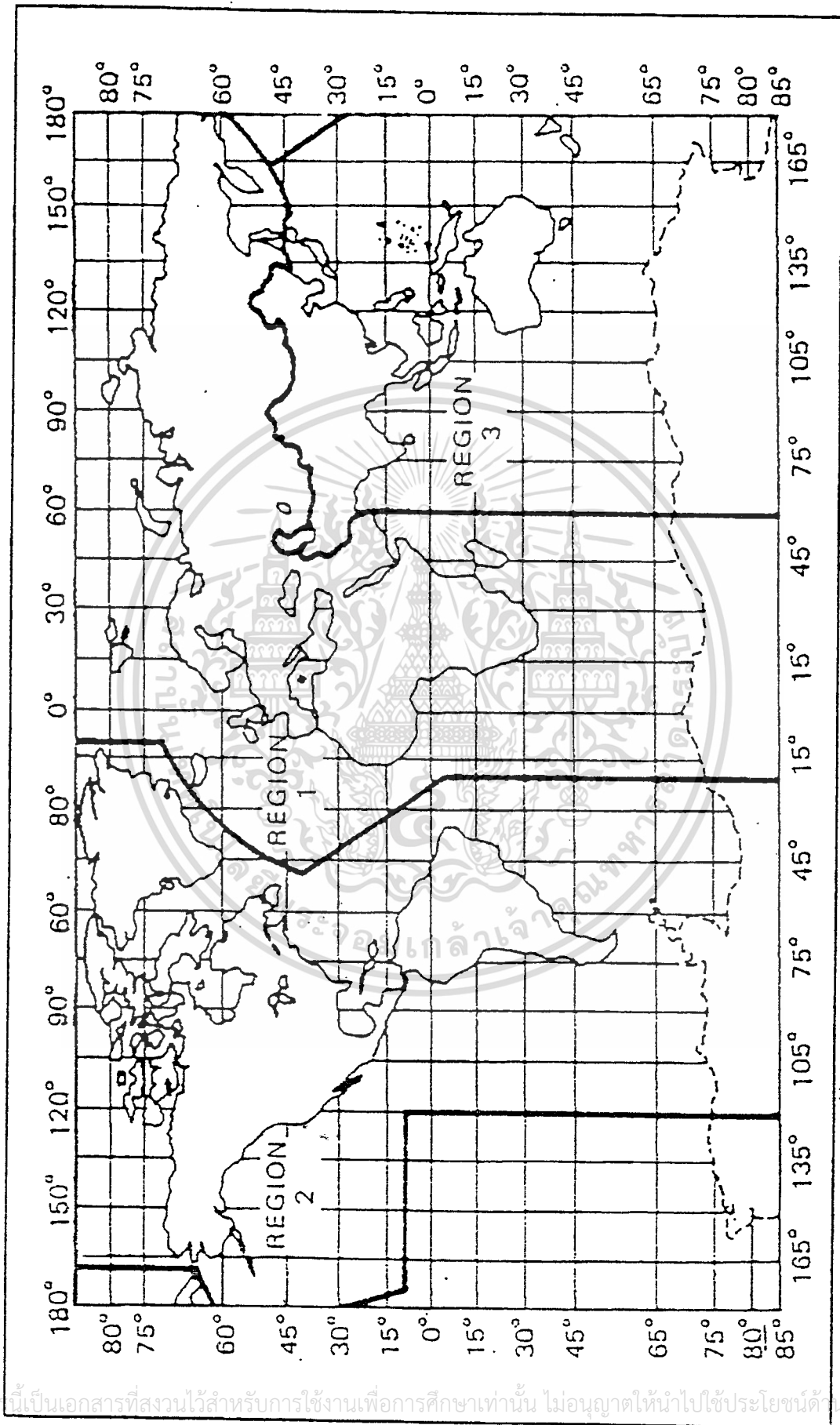
Radionavigation satellite

Space operations

Space research

Standard frequency satellite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น และอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 11 แสดงย่านการบริการด้านโทรคมนาคมที่กำหนดขึ้นโดย ITU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2

Coord	Inc.	Satellite Name	Operator/Country	Start	Bands	Poi.	TV	Standard
155 W	-	Stationar 26	U.S.S.R	Unknown	C3orC4	RH	-	-
170 W	"	stat. 10/Raduga 18	U.S.S.R	1986	C3	RH	0	-
170.7 W	"	TDRS-F1	NASA [U.S.]	1983	C1/K	HP	0	-
174.5 W	-	TDRS-C	Columbia [U.S.]	1988	C1/K	HP	0	-
175 W	-	Pacstar 2	Taiwan/PNG	1994	C1/K2	-	-	-
177 W	"	INTELSAT V F1	INTELSAT	1981	C1/K3	CP/LP	0	-
180 E	"	INTELSAT V F8	INTELSAT	1984	C1/K3	CP/LP	9	PAL/NTS/CB-MAC
177 E	"	INTELSAT V F3	INTELSAT	1981	C1/K3	CP/LP	1	PAL/NTSC
174 E	±0.7	INTELSAT V F10	INTELSAT	1985	C1/K3	CP/LP	2	PAL/NTSC
167.5 E	-	Pacstar 1	Taiwan/PNG	1994	C1/K2	-	-	-
164 E	±0.1	Aussat A3	Aussat [Australia]	1987	K2	LP	7	PAL/B-MAC
160 E	±0.1	Aussat A1	Aussat [Australia]	1985	K2	LP	12	PAL/B-MAC
158 E	-	Superbird C	SCC [Japan]	1991	K2/Ka	LP	-	-
156 E	±0.1	Aussat A2	Aussat [Australia]	1985	K2	LP	9	PAL/B-MAC
154 E	±0.1	JCSat 2	Japan Sat Com	1990	K2	LP	12	NTSC/B-MAC
150 E	±0.1	JCSat 1	Japan Sat Com	1989	K2	LP	19	NTSC/B-MAC
145 E	-	Stationar 16	U.S.S.R	Unknown	C3orC4	RH	-	-
140 E	±1.1	Stat. 7/Gorizont 18	U.S.S.R	1989	C3/K5	RH	2	SECAM
136 E	±0.4	CS-3B	Japan	1988	C1/Ka	CP	0	-
131.5 E	±0.1	CS-3A	Japan	1988	C1/Ka	CP	0	-
128.5 E	"	CS-2A	Japan	1983	C1/Ka	CP	0	-
128 E	"	Stat. 15/Raduga 21	U.S.S.R	1987	C4	RK	0	-
125.5 E	-	CS-2B	Japan	1983	C1/Ka	CP	0	-
122 E	-	Asiasat 3	Hong Kong	Unknown	-	-	-	-
118 E	±0.1	Palapa B1	Perumtel [Indonesia]	1983	C1	LP	0	-
116 E	"	Asiasat 2	Hong Kong	Unknown	-	-	-	-
115 E	±0.2	Palapa B2P	Perumtel [Indonesia]	1987	C1	LP	8	PAL/NTSC
110 E	-	BS-2H & BS-3B	Japan	1992	K1	RH	-	-
110 E	±0.1	BS-2B & BS-3A	Japan	1986/91	K1	RH	3	NTSC
108 E	±0.1	Palapa B2R	Perumtel [Indonesia]	1990	C1	LP	2	PAL
105.5 E	±0.1	Asiasat 1	Hong Kong	1989	C1	LP	2	PAL
101.5 E	-	Thaicom A1	SCC [Thailand]	1994	C1/K	CP/LP	4	PAL
096.5 E	"	Stat. 14/Gorizont 19	U.S.S.R	1989	C3/K5	RH	1	SECAM
093.5 E	-	Insat II-A	ISRO [India]	1992	C1/S	LP	-	-
090 E	"	Stat. 5/Gorizont 20	U.S.S.R	1990	C3/K5	RH	2	SECAM
087.5 E	±0.1	Chinasat 1	China	1988	C1	LP	4	PAL
085 E	"	Stat. 3/Raduga 20	U.S.S.R	1987	C4	RH	2	SECAM
085 E	-	Palapa C	Perumtel [Indonesia]	1995	C1/K	LP	-	-
083 E	-	Insat II-A	ISRO [India]	1992	C1/S	LP	-	-
083 E	±0.1	Insat I-D	ISRO [India]	1990	C1/S	LP	2	PAL
080 E	"	Stat. 13/Gorizont 16	U.S.S.R/Intersputnik	1988	C3/K5	RH	2	SECAM
073.5 E	-	Thaicom A2	SCC [Thailand]	1995	C1/K	CP/LP	4	PAL
072 E	-	Insat II-C	ISRO [India]	1994	C1/S	LP	-	-
070 E	"	Stat. 10/Gorizont 25	U.S.S.R	1990	C4	RH	0	-

แสดงรายการของดาวเทียมที่ใช้ในการให้บริการด้านโทรคมนาคม

ในพื้นที่ย่านที่ 3 ซึ่งได้กำหนดขึ้นโดย ITU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงการกำหนดความถี่ระหว่างชาติของการให้บริการด้านความถี่แบบประจำที่ในพื้นที่เขตที่ 3 ซึ่งได้กำหนดไว้ในปีพ.ศ. 2522 โดย World Administrative Radio Conference (WARC-79) และได้แสดงการกำหนดความกว้างของแถบคลื่นของแต่ละแถบความถี่ไว้ในตารางนี้ด้วย สำหรับในตารางที่ 3 ได้แสดงการแบ่งช่วงความถี่ในย่านไมโครเวฟ

ตารางที่ 3

ช่วงความถี่	ชื่อเรียกเก่า	ชื่อเรียกใหม่
1-2 GHz	L	D
2-3 GHz	S	E
3-4 GHz	S	F
4-6 GHz	C	G
6-8 GHz	C	H
8-10 GHz	X	I
10-12.4 GHz	X	J
12.4-18 GHz	Ku	J
18-20 GHz	K	J
20-26.5 GHz	K	K
26.5-40 GHz	Ka	K

การแบ่งช่วงความถี่ในย่านไมโครเวฟ

สรุป

ในปัจจุบันได้มีเทคนิควิธีการต่างๆมาใช้จัดระบบกับค่าความถี่ที่มีจำนวนจำกัดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นแล้วแต่ก็ยังไม่เพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้ที่เพิ่มมากขึ้นจนต้องนำเอาความถี่ที่สูงขึ้นมาใช้งาน เช่นความถี่ในย่านไมโครเวฟ และเนื่องจากประเทศไทยได้มีที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เขตร้อนชื้น ซึ่งมีลักษณะการตกของฝนที่หนักมากเป็นช่วงๆ ทำให้ประสบปัญหาเกี่ยวกับการลดทอนของสัญญาณขณะที่ฝนตก ซึ่งจะมีผลกระทบต่อระบบการสื่อสารของประเทศไทย โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานวิจัยและพัฒนาของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะอย่างยิ่งในย่าน Ku-band ซึ่งดาวเทียม THAICOM ได้นำมาใช้สำหรับการสื่อสารในประเทศไทย ซึ่งจะมีผลกระทบอย่างมากจากการตกของฝน และในการแก้ไขปัญหานี้ในปัจจุบัน จะใช้วิธีการชดเชยกำลังเครื่องส่งโดยอาศัยข้อมูลทางสถิติของการตกของฝนในพื้นที่เขตนั้นๆ มาใช้ประกอบในการตัดสินใจ ซึ่งข้อมูลฝนตกที่ใช้ในปัจจุบันนี้เป็นข้อมูลแบบคิดค่าเฉลี่ยอย่างหยาบๆ อันเป็นผลให้ประสิทธิภาพของการชดเชยกำลังส่งยังไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาสร้างเครื่องมือวัดน้ำฝนที่สามารถอ่านค่าได้อย่างต่อเนื่องตามเวลา เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของลักษณะการตกของฝนที่บอกถึงความบ่อยครั้งของการเกิดฝนในแต่ละอัตราการตกของฝน ด้วยการใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ (FFT : Fast Fourier Transform) เพื่อนำผลเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบสื่อสารไมโครเวฟ



บทที่ 2

ทฤษฎีการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟอันเนื่องจากฝน

สภาพการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นไมโครเวฟในปัจจุบัน

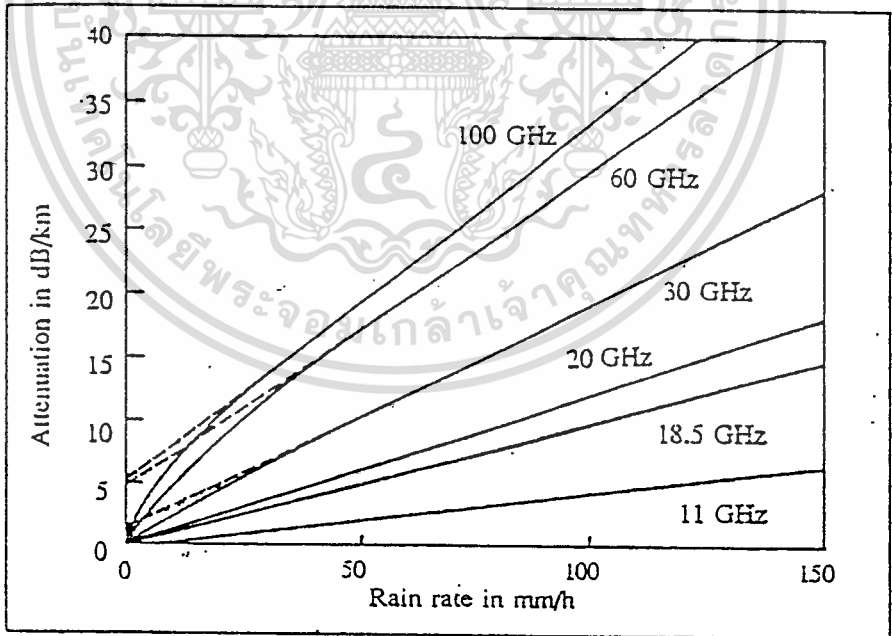
การลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟที่มีค่ามากกว่าการเกิด free space loss ในช่วงความถี่ 10-100 GHz ส่วนมากแล้วจะเกิดขึ้นขณะฝนตก เมื่ออัตราการตกของฝนเพิ่มขึ้น การลดทอนของสัญญาณก็จะเพิ่มขึ้นด้วย (ดังแสดงได้ดังภาพที่ 12) ซึ่งบางครั้งจะทำให้จุดนั้นเกิดการล้มเหลวในการเชื่อมโยงการสื่อสารเมื่อมีการตกของฝนที่หนัก ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในการออกแบบระบบการสื่อสารดาวเทียมที่ความถี่เกิน 10 GHz ก็คือการลดทอนอันเนื่องจากฝน กำลังงานของคลื่นไมโครเวฟจะถูกแพร่กระจายไปตามสถานีภาคพื้นดิน โดยจะถูกจำกัดจากองค์ประกอบเช่น กำลังส่งหลักที่ใช้และขนาดของจานสายอากาศบนดาวเทียมด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันยังคงประสบปัญหาเรื่องการลดทอนอย่างมาก จากผลที่เกิดขึ้นจากความหนาแน่นของเม็ดฝน ระหว่างเส้นทางการติดต่อสื่อสาร จากผลของการสูญเสียของสัญญาณนี้จะทำให้ระบบการรับส่งไม่มีเสถียรภาพ จากเหตุการณ์ดังกล่าววิธีการวัดการลดทอนของสัญญาณนี้ ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นเทคนิคที่เรียกว่าการ "diversity" ที่จะช่วยปรับปรุงให้มีการทำงานอย่างมีเสถียรภาพและได้ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากฝนเช่น การเกิด Depolarization, Absorption, Scattering หรือการเพิ่มขึ้นของ noise บนสถานีภาคพื้นดินและสภาพที่เลวลงของสายอากาศและอื่น¹⁰ วิธีการวัดการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องจากฝนที่สถานีภาคพื้นดินปลายทางโดยตรงเป็นระยะเวลาานซึ่งเป็นสถานีโครงข่ายการปฏิบัติการนั้นไม่ควรกระทำ ดังนั้นวิธีการจำลองและทำการพยากรณ์ จึงถูกนำมาใช้ประเมินให้เหมาะสมที่สุดตามการลดทอนของสัญญาณที่คาดการณ์ไว้ในแต่ละพื้นที่

¹⁰R. K. Crene, "Prediction of Attenuation by Rain", IEEE Transactions on Communications,

การแพร่กระจายคลื่นไมโครเวฟและคลื่นมิลลิเมตร

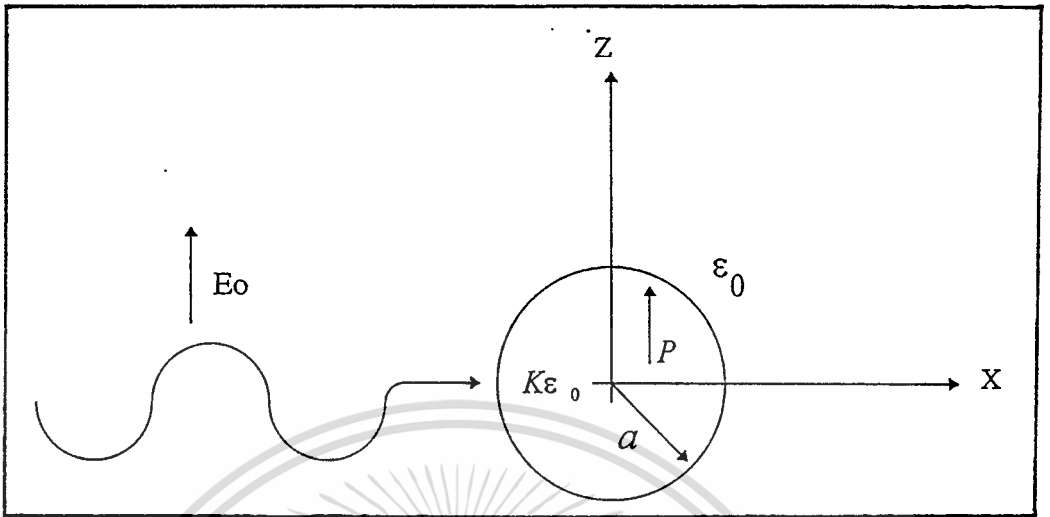
คลื่นไมโครเวฟและคลื่นมิลลิเมตรมีย่านความถี่จาก 1 GHz ($\lambda_0=30$ cm) ไปจนถึง 30GHz ($\lambda_0 = 1$ mm) โดยที่ ω ต้องมีค่ามากกว่าความถี่ plasma (ω_p) และความถี่ Cyclotron (ω_c) การแพร่กระจายของคลื่นในย่านความถี่นี้ ส่วนใหญ่จะเป็นแบบ line-of-sight propagation โดยจะเกิดปรากฏการณ์ Interference จากคลื่นที่สะท้อนจากพื้นดิน (ground reflected wave) แต่ไม่มากเท่ากับที่ความถี่ต่ำทั้งนี้เพราะว่าลักษณะความขรุขระของพื้นดินมีความสัมพันธ์กันอย่างมากระหว่างความยาวของคลื่น ดังนั้นการสะท้อนของคลื่นจากพื้นดินจึงมีการแพร่กระจายมากจากองค์ประกอบย่อยๆ ที่คาดว่าจะเกิดการสะท้อนในขณะที่ความสัมพันธ์ของพื้นผิวดินหรือพื้นผิวน้ำที่เรียบนั้นจะแสดงจุดของการสะท้อน เพื่อที่เป็นประโยชน์ในการศึกษาถึงปรากฏการณ์ Interference

ภาพที่ 12



กราฟเส้นทึบเป็นการลดทอนที่คำนวณขึ้นตามฟังก์ชันของอัตราฝนตกและความถี่

ภาพที่ 13



แสดงคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ผ่านหยดน้ำรูปทรงกลม

โดยรูปแบบของการเกิด Interference จะมีลักษณะเป็นลอน (lobe) ด้วยระยะของ lobe ต่างๆ ที่ใกล้เคียงกัน องค์ประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้พิจารณาที่ความยาวคลื่น 2-3 เซนติเมตร หรือสั้นกว่านั้น ที่ทำให้เกิดการลดทอนและเกิดการ Scattering ก็คือ ฝนและหิมะ และสำหรับการลดทอนของคลื่นในย่าน millimeter wave ซึ่งจะเกิดขึ้นสูงมากอันเนื่องจากหมอก ไอน้ำ และก๊าซต่างๆ ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งในส่วนนี้เราจะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้คาดการณ์การลดทอนและการ Scattering อันเนื่องมาจากฝนและเป็นข้อมูลที่คล้ายกันกับการลดทอนที่เกิดขึ้นจากก๊าซในชั้นบรรยากาศ ปรากฏการณ์อื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อ การแพร่กระจายของคลื่นไมโครเวฟและมิลลิเมตรเวฟ ได้แก่ การเกิด Scattering อันมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีการหักเหในชั้นบรรยากาศ Troposphere และการเกิด Ducting อันมีสาเหตุจากการเกิดตรงข้ามกันใน index-of-refraction profiles.

การลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟอันเนื่องมาจากฝน

คลื่น ไมโครเวฟที่แพร่กระจายออกไปนั้นเมื่อผ่านฝนจะถูกลดทอนเพราะว่าเกิดการดูดกลืนของกำลังที่สูญเสียไปในตัวกลางที่เป็นฉนวนที่แสดงตัวโดยน้ำ ซึ่งเสมือนมีการสูญเสียไปบางส่วนในขณะที่ทำการส่งคลื่นในทางตรงเพราะว่าเกิดการ Scattering ของพลังงานบางส่วนที่ออกนอกบีมไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเกิดจากหยดน้ำฝนเล็กๆ โดยที่การเกิด Scattering loss มักจะมีความสัมพันธ์ที่น้อยกว่าการเกิด Absorption loss ทฤษฎีของ Rain attenuation และ Scattering จะเป็นพื้นฐานที่นำมาใช้คำนวณหา ค่าการดูดกลืนและการ Scattering อันเนื่องมาจากหยดน้ำฝน โดยการคำนวณนี้จะพิจารณาถึงในกรณี ที่หยดน้ำฝนมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีรัศมีที่ไม่มากกว่า $\lambda/10$ เพื่อความเหมาะสมที่ค่าความถี่ค่า สามารถนำทฤษฎีของ Rayleigh scattering มาใช้ได้ เมื่อขนาดของหยดน้ำฝนมีค่าต่างๆตั้งแต่ 1 มิลลิเมตร ไปจนถึงหลายมิลลิเมตรโดยทฤษฎี Rayleigh scattering สามารถนำมาใช้ได้ในช่วง ความยาวคลื่นตั้งแต่ 3 cm หรือค่อนข้างน้อยกว่านี้ สมมุติฐานของหยดน้ำฝนทรงกลมไม่นำมาใช้เนื่อง จากหยดน้ำฝนมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมมน หรือมีลักษณะรูปร่างที่แบนภายใต้ผลกระทบอัน เนื่องจากแรงลมและแรงดันในขณะที่ยันตกลงมา แต่อย่างไรก็ตามที่ค่าความยาวคลื่นมากกว่านี้ การใช้สมมุติฐานว่ารัศมีของหยดน้ำฝนเป็นทรงกลมก็ยังสามารถใช้ได้ ที่ความยาวคลื่น millimeter การพิจารณาถึงรูปร่างของหยดน้ำฝนเป็นสิ่งสำคัญ และการหาตัวแทนนั้นเป็นสิ่งที่ยากลำบากมาก แต่อย่างไรก็ตามด้วยการใช้คอมพิวเตอร์สมัยใหม่ทำให้สะดวกและรวดเร็ว โดยข้อจำกัดไม่ได้อยู่ที่ ปัญหาการคำนวณทำให้ทราบถึงรูปร่างของหยดน้ำฝนซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของหยดน้ำฝนและค่า ความเร็วที่ตกลงมาเราจะพิจารณาเฉพาะการใช้ทฤษฎี Rayleigh scattering

พิจารณาหยดน้ำฝนทรงกลม ที่มีรัศมี a ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความยาวคลื่นของคลื่นระนาบ ที่ตก กระทบ (incident plane wave) ดังแสดงในภาพที่ 13 หยดน้ำจะมีคุณลักษณะเป็นฉนวนทรงกลม ด้วยค่าคงที่ของฉนวนเชิงซ้อนคือ $K = K' - jK''$ โดยได้เลือกค่าของสนามไฟฟ้าตกกระทบมีค่า เป็น

$$E_i = E_0 a_z e^{-jk_0 x} \tag{2.1}$$

ภายใต้ขอบเขตของหยดน้ำฝนนั้น ค่าของสนามที่ตกกระทบจะต้องเป็นเหมือนกันคือมีค่า เท่ากับ $E_0 a_z$ การ polarization ที่เกิดขึ้นในหยดน้ำนั้นเสมือนเป็นผลที่เกิดขึ้นกับฉนวนทรงกลม ภายใต้ การกระทำของสนามไฟฟ้าสถิตย์แบบเดียวกันและได้แสดง dipole polarization P ต่อ หน่วยปริมาตรในหยดน้ำไว้ดังนี้

$$P = 3 \frac{K-1}{K+2} \epsilon_0 E_0 a_z \tag{2.2}$$

ผลรวมของ dipole moment ของหยดน้ำฝนทรงกลม ได้รับความจากการคูณด้วยปริมาตร ดังนี้

$$P_0 = \frac{4}{3} \pi a^3 P = 4\pi a^3 \frac{K-1}{K+2} \epsilon_0 E_0 a_z \tag{2.3}$$

เมื่อ $a \ll \lambda_0$ สนามที่ถูก scattered ในบริเวณใกล้ๆอันเนื่องมาจากหยดน้ำฝนทรงกลมจะมีลักษณะ เหมือนถูกแพร่กระจายโดย electric dipole ขนาดเล็กของค่าความเข้มรวม P_0

Current element $I dl$ เป็นเสมือนจังหวะเวลาที่แยก dipole moment ดังนั้นค่า $j\omega P_0$ อาจจะใช้แทน $I dl$ สำหรับสนามที่แพร่กระจายในบริเวณไกล ดังนั้น

$$E_s = -\omega Z_0 K_0 P_0 \sin \theta \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi a} \text{-----(2.4)}$$

รูปแบบของการ scattering ของฉนวนทรงกลมขนาดเล็กก็มีลักษณะเหมือนรูปแบบการแพร่กระจายของ electric dipole ขนาดเล็ก ผลรวมของกำลังที่เกิด scattered (total scattered power) กำหนดโดย

$$P_s = \frac{1}{2} Y_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |E_s|^2 r^2 \sin \theta d\theta d\phi = \frac{\omega^2 K_0^2 Z_0}{12\pi} |P_0|^2$$

เมื่อเราแทนค่า จากสมการ (2.3) เราจะได้ว่า

$$P_s = \frac{4}{3} \pi a^2 (K_0 a)^4 Y_0 |E_0|^2 \left| \frac{K-1}{K+2} \right|^2 \text{-----(2.5)}$$

สำหรับผลรวมของกำลังที่เกิด scattered และนี่เป็นการหา scattered power ที่ใช้กับ low frequency หรือใช้ Rayleigh formula

ค่าของ Scattering cross section หาได้จากการนำค่า total scattered power มาหารด้วยค่า incident power ต่อหน่วยพื้นที่ ดังนั้นเราสามารถหา ได้ว่า

$$\sigma_s = \frac{P_s}{\frac{1}{2} Y_0 |E_0|^2} = \frac{8}{3} \pi a^2 (K_0 a)^4 \left| \frac{K-1}{K+2} \right|^2 \text{-----(2.6)}$$

ค่าของ backscatter cross section ถูกกำหนดขึ้นถ้าเกิดการ scattering ใน ลักษณะที่เหมือนกันกับผลของ backscattered power จากสมการ (2.4) เราสามารถหาค่า backscattered power ต่อหน่วยพื้นที่ คือ

$$P_{BS} = \frac{1}{2} Y_0 |E_s|^2 \Big|_{\theta=\pi/2} = \frac{\omega^2 K_0^2 |P_0|^2 Z_0}{32\pi^2 r^2} = P_{inc} \frac{\sigma_{BS}}{4\pi r^2}$$

เมื่อ P_{inc} คือ incident power ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งการกำหนดนี้แสดงความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\sigma_{BS} = 4\pi a^2 (K_0 a)^4 \left| \frac{K-1}{K+2} \right|^2 = \frac{2}{3} \sigma_s \text{-----(2.7)}$$

ค่าของ absorption cross section อาจหาได้โดยวิธีแรกทำการประเมินกำลัง (P_a) ที่ถูก absorbed โดยทรงกลม ค่าของ polarization current density ในทรงกลมคือ $J_p = j\omega P$ และเป็น Uniform ค่าของ total electric field (E) ในทรงกลมมีความสัมพันธ์กับค่าของ P โดยเป็นดังสมการ $P = (K-1) \epsilon_0 E$ ค่าเฉลี่ยของ absorbed power กำหนดได้โดย

$$\begin{aligned}
 Pa &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} E \cdot Jp^* r^2 \sin \theta \, d\theta \, d\phi \, dr \\
 &= \frac{2}{3} \pi a^3 R_e \, E \cdot Jp^* \\
 &= 6\pi a^3 K_0 Y_0 \left| \frac{K-1}{K+2} \right|^2 \frac{K'' |E_0|^2}{(K'-1)^2 + (K'')^2}
 \end{aligned}$$

ด้วยการหารสมการนี้ด้วยค่า incident power density เราจะได้รับ absorption across section σ_a ดังนี้

$$\sigma_a = 12\pi a^2 (K_0 a) \left| \frac{K-1}{K+2} \right|^2 \frac{K''}{(K'-1)^2 + (K'')^2} \quad \text{-----(2.8)}$$

อัตราส่วนระหว่าง absorption cross section ต่อค่า scattering cross section คือ

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_s} = \frac{4.5}{(K_0 a)^3} \frac{K''}{(K'-1)^2 + (K'')^2} \quad \text{-----(2.9)}$$

ยกตัวอย่างเช่น $\lambda_0 = 3 \text{ cm}$, $a = 0.1 \text{ cm}$, $K' = 65.3$ และ $K'' = 31.5$ ซึ่งเราหาค่าได้ว่า $\sigma_a = 3\sigma_s$ ซึ่งแสดงว่าค่าของ absorption cross section มีค่ามากกว่าค่าของ scattering cross section สำหรับหยดน้ำที่เล็กกว่าค่าอัตราส่วนก็จะมีค่ามากกว่าเสมอเพราะว่าค่าองค์ประกอบของ $(K_0 a)^3$ เป็นตัวหาร

ค่าของ extinction cross section σ_e เป็นผลรวมของ scattering และ absorption cross sections โดยมีค่าดังนี้

$$\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a = \left[\frac{8}{3} \pi a^2 (K_0 a)^4 + 12\pi a^2 (K_0 a) \frac{K''}{(K'-1)^2 + (K'')^2} \right] \frac{|K-1|^2}{K+2} \quad \text{--(2.10)}$$

อัตราส่วน $\frac{\sigma_s}{\sigma_e}$ เรียกว่า albedo ของหยดน้ำฝน ค่าของ total power ที่ถูกกำจัดออกโดย incident wave อันเนื่องจากการเกิด scattered และ absorbed power จะกำหนดได้โดยค่าของ incident power density ต่อหน่วยพื้นที่ และค่าของ extinction cross section σ_e

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายผ่านฝน มันจะปะทะกับเม็ดฝนที่มีขนาดของรัศมีที่ค่าแตกต่างกันเป็นจำนวนมาก ดังนั้น σ_e จึงเป็นฟังก์ชันที่สนับสนุนในการหารัศมี a ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องนำมาใช้พิจารณาหาการแพร่กระจายของขนาดหยดน้ำฝน ให้ $N(a)da$ เป็นจำนวนของเม็ดฝนต่อหน่วยปริมาตร ด้วยค่ารัศมีในช่วง a ถึง $a+da$ ค่าของ total power ที่ถูกกำจัด

ออกด้วยคลื่นที่มีค่า power density $P = \frac{1}{2} Y_0 |E|^2$ ต่อหยดน้ำที่มีปริมาตรเล็กกว่าต่อหน่วยพื้นที่ตัด

ขวาง และมีความหนา dz ตามแกน z เป็นดังนี้ (เราสมมุติให้การแพร่กระจายอยู่ในทิศทางแนวแกน z)

$$\begin{aligned}\frac{dP}{dz} &= -\frac{1}{2} Y_0 |E|^2 \int_0^{\infty} \sigma_e(a) N_{(a)} da \\ &= -P \int_0^{\infty} \sigma_e(a) N(a) da\end{aligned}\quad \text{-----(2.11)}$$

จากผลของกำลังที่สูญเสียไปนี้จะลดลงด้วยอัตราเท่ากับ 2α เมื่อ

$$A = 2\alpha = \int_0^{\infty} \sigma_e(a) N_{(a)} da \quad \text{-----(2.12)}$$

สมการนี้กำหนดให้ A เป็นการลดทอนแบบค่าเฉพาะต่อหน่วยความยาวตามเส้นทางการแพร่กระจายของคลื่น จากสมการ (2.11) และ (2.12) เราจะได้ว่า

$$\frac{dP}{dz} = -A(z) P$$

ซึ่งเราจะได้ผลลัพธ์ว่า

$$P(z) = P(0) e^{-\int_0^z A(z) dz} \quad \text{-----(2.13)}$$

ขนาดของหยดน้ำที่แพร่กระจายออกไปนั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเส้นทางการแพร่กระจายของคลื่นเพราะว่าการตกของฝนจะไม่มีรูปแบบเฉพาะและเมื่อ A เป็นฟังก์ชันของ Z ซึ่งนำมาใช้สำหรับการอินทิเกรตในสมการข้างบน

ทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นนี้เป็นที่พบเห็นโดยทั่วไปซึ่งพอเพียงที่จะนำมาพิจารณาถึงการลดทอนอันเนื่องจากฝน แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ยังต้องการทราบขนาดของ Cross section ของหยดน้ำทั้งหมดการแพร่กระจายของขนาดของหยดน้ำและฟังก์ชันการแพร่กระจายของหยดน้ำ $N(a)$ ที่อัตราการตกของฝน R ซึ่งมักจะใช้ค่าอัตราการตกของฝน R ที่มีลิเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งสามารถทำการวัดได้ง่ายๆ ถ้าฝนตกปรอยๆ จะมี $R = 0.25$ mm/h ฝนตกเบาจะมี $R = 1$ mm/h ฝนตกปานกลางมีค่า $R = 4$ mm/h ฝนตกหนักมีค่า $R = 16$ mm/h และอาจพบว่ามีขนาดหลายเซนติ เมตรต่อชั่วโมง การแพร่กระจายของขนาดของหยดน้ำจะเป็นฟังก์ชันกับค่าของ rain rate ซึ่งจะเกิดการรวมตัวกันให้มีขนาดของหยดน้ำที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งจะเกิดในกรณีที่ฝนตกหนัก โดย Marshal และ Palmer ได้ให้หลักการไว้ซึ่งได้จากการสังเกต เป็นสูตรของการแพร่กระจาย (distribution formula) ไว้ดังนี้

$$N(a) = N_0 e^{-\Lambda a} \quad \text{-----(2.14)}$$

เมื่อ $N_0 = 1.6 \times 10^4 \text{ mm}^{-1}/\text{m}^3$

$$\Lambda = 8.2 R^{-0.21}/\text{mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง R เป็น rain rate ที่หน่วย mm/h โดยรูปแบบนี้ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางสำหรับเป็นทฤษฎีเพื่อประเมินการลดทอน มันเป็นเหมือนกับการแพร่กระจายที่ทำการวัดได้โดยวิธีของ Laws และ Parsons¹¹

จากสภาพทางด้านวิศวกรรมการสื่อสารเราต้องการหาความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนต่ออัตราการตกของฝน ความถี่ และอุณหภูมิโดยใช้สูตรง่ายๆดังนี้

$$A = aR^b \quad \text{dB / km} \quad \text{-----}(2.15)$$

เมื่อ R เป็น rain rate ในหน่วย mm/h และ a กับ b เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และอุณหภูมิของฝน โดยอุณหภูมิขึ้นอยู่กับขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า dielectric constant ของน้ำกับอุณหภูมิ ลักษณะโดยละเอียดของทฤษฎีและข้อมูลที่ทดลองได้นำมารวบรวมไว้ในค่าของตัวคงที่ทั้งสองคือ a และ b โดย Olsen, Rodgers, และ Hodge¹² โดยผู้คิดหลักการนี้ได้กำหนดขึ้นไว้โดยอาศัยการสังเกต สำหรับตัวคงที่ a และ b ที่อุณหภูมิ 0 C :

$$a = G_a f^{E_a} \quad \text{โดย } f \text{ มีหน่วยเป็น GHz} \quad \text{-----}(2.16a)$$

เมื่อ	$G_a = 6.39 \times 10^{-5}$	$E_a = 2.03$	$f < 2.9 \text{ GHz}$
	$G_a = 4.21 \times 10^{-5}$	$E_a = 2.42$	$2.9 \text{ GHz} \leq f \leq 54 \text{ GHz}$
	$G_a = 4.09 \times 10^{-2}$	$E_a = 0.699$	$54 \text{ GHz} \leq f < 180 \text{ GHz}$
	$G_a = 3.38$	$E_a = -0.151$	$180 \text{ GHz} < f$

และ

$$b = G_b f^{E_b} \quad \text{โดย } f \text{ มีหน่วยเป็น GHz} \quad \text{-----}(2.16b)$$

เมื่อ	$G_b = 0.851$	$E_b = 0.158$	$f < 8.5 \text{ GHz}$
	$G_b = 1.41$	$E_b = -0.0779$	$8.5 \text{ GHz} \leq f < 25 \text{ GHz}$
	$G_b = 2.63$	$E_b = -0.272$	$25 \text{ GHz} \leq f < 164 \text{ GHz}$
	$G_b = 0.616$	$E_b = 0.0126$	$164 \text{ GHz} \leq f$

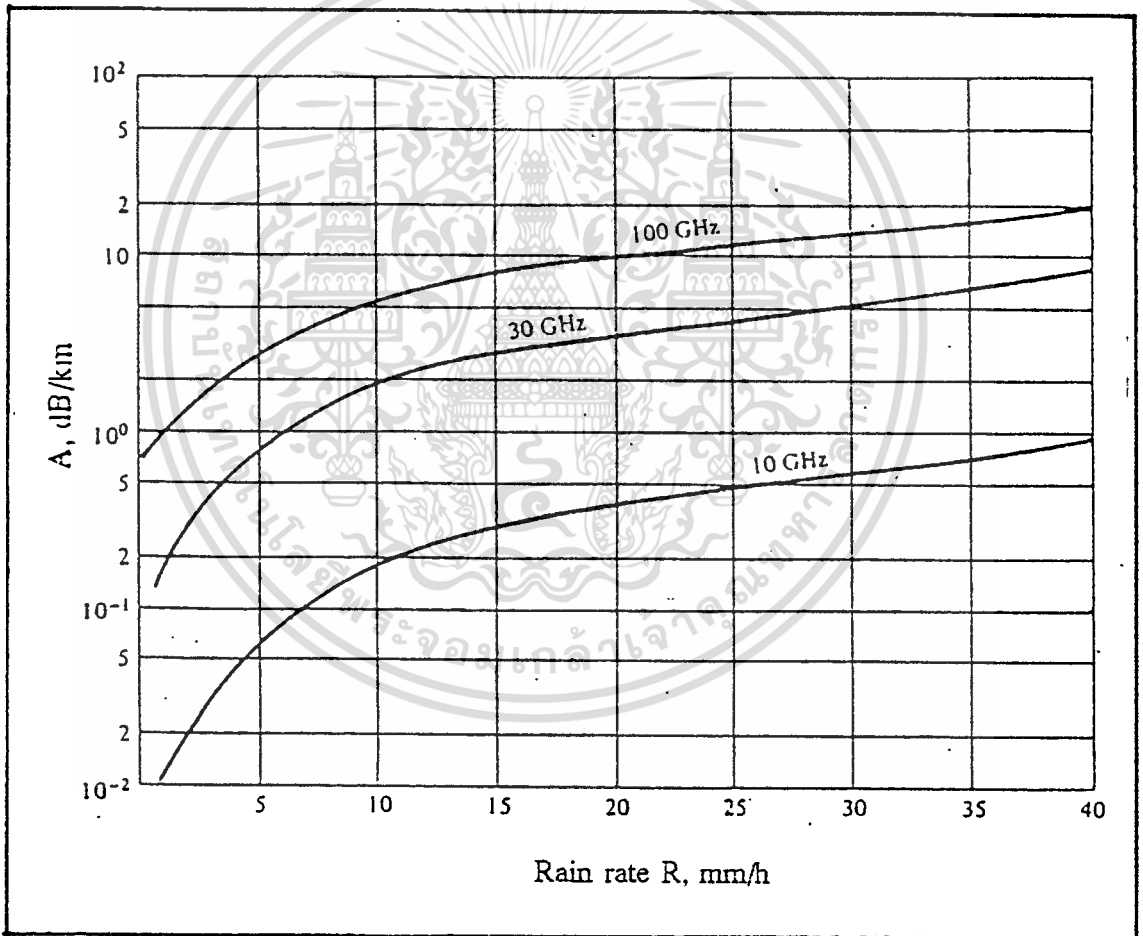
จากกราฟแสดงตัวอย่างการลดทอนในหน่วย dB/km ที่ความถี่ค่า 10GHz, 30GHz และ 100GHz ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับค่า rain rate ซึ่งทำการคำนวณโดยใช้สมการ (2.15) และ (2.16) และได้แสดงไว้ดังภาพที่ 14 ที่ความถี่ 10 GHz และค่าต่ำกว่าค่าของการลดทอนขณะเกิดฝนตกจะมีความสัมพันธ์ที่

¹¹T. Oguchi, "Electromagnetic Wave Propagation and Scattering in Rain and Other Hydro meteors," Proc. IEEE, Vol.71, (Sept..1983):1029-1078.

¹²R. L. Olsen, D. V. Rodgers and D. B. Hodge, "The Relation in the Calculation of Rain Attenuation," IEEE Trans., Vol. AP-26, (March 1978):318-329.

น้อย สำหรับการตกของฝนขนาดปานกลาง (5 mm/h) จะมีค่าเพียง 0.074 dB/km ที่ค่าความถี่ 10 GHz ในขณะที่การลดทอนที่ค่าความถี่ 30 GHz มีค่าเท่ากับ 0.85 dB/km และที่ความถี่ 100 GHz มีค่า 3.42 dB/km เมื่อเส้นทางการส่ง/รับคลื่นเป็นแบบ line-of-sight มีระยะเป็น 20-30 กิโลเมตร อัตราการลดทอนที่ 1 dB หรือมากกว่าต่อกิโลเมตร สามารถ ทำให้ความเข้มของสัญญาณลดลงไปมาก การลดทอนที่เกิดขึ้นนี้ต้องมีการชดเชยโดยการเพิ่มเกนซ์ ของสายอากาศหรือเพิ่มกำลังส่งซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าใช้จ่ายที่สิ้นเปลืองไป

ภาพที่ 14



แสดงการลดทอนอันเนื่องจากฝน ที่ความถี่ 10, 30 และ 100 GHz
ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับค่าอัตราการตกของฝน

สรุป

การตกของฝนมีผลกระทบต่อการลดทอนของสัญญาณในย่านความถี่ไมโครเวฟ เนื่องจากเกิดการดูดกลืนพลังงานเนื่องจากฝน ทั้งนี้เพราะว่าหยดน้ำฝนแต่ละหยดเหมือนกับตัวนำที่ไม่สมบูรณ์ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านจะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสเคลื่อนที่ขึ้น ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับค่าไดอิเล็กตริก ซึ่งกระแสเคลื่อนที่นี้เองที่มีผลต่อการดูดกลืนพลังงาน ทั้งนี้เพราะการเกิดกระแสเคลื่อนที่นี้ต้องใช้พลังงาน ซึ่งนามมาจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านนั่นเอง ดังนั้นที่ความถี่ของสัญญาณไมโครเวฟยิ่งสูง ก็จะทำให้เกิดกระแสเคลื่อนที่มากขึ้น ทำให้สัญญาณถูกดูดกลืนพลังงานมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ฝนยังทำให้เกิดการลดทอนกำลังเนื่องจากการกระจายออกของคลื่น กล่าวคือแทนที่คลื่นจะเดินทางไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมด แต่จะมีคลื่นบางส่วนที่กระจายออกทุกทิศทาง โดยการแพร่กระจายของขนาดของหยดน้ำจะมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการตกของฝน ซึ่งเราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนของคลื่น กับค่าอัตราการตกของฝน ณ.ที่ความถี่และอุณหภูมิได้โดยใช้สูตร $A = aR^b$ dB/km ทั้งนี้เพื่อจะได้ทำการชดเชยสัญญาณที่ถูกลดทอนด้วยการเพิ่มเกณฑ์การส่ง เพื่อให้การติดต่อสื่อสาร สามารถดำเนินต่อไปได้

บทที่ 3

ทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็วและการนำมาใช้วิเคราะห์คุณลักษณะการตกของฝน

ประวัติของการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

เมื่อ Cooley และ Tukey ได้คิดวิธีการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของฟูเรียร์ (Fourier coefficients) ขึ้นเมื่อปี 1965 โดยเสียเวลาในการคำนวณน้อย ซึ่งวิธีนี้รู้จักกันในปัจจุบันในชื่อว่า การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (Fast Fourier Transform) ด้วยวิธีการนี้เองได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในด้านเทคนิคการคำนวณที่ใช้กันใน digital spectral analysis, filter simulation และสาขาอื่นๆอีกมากที่เกี่ยวข้องกัน

การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) เป็นวิธีการอันหนึ่งที่ใช้สำหรับคำนวณค่าของการแปลงฟูเรียร์แบบเต็มหน่วย (Discrete Fourier Transform :DFT) ของอนุกรมเวลา (time series) ชุดหนึ่ง วิธีการนี้สามารถช่วยให้การแก้ปัญหาได้รวดเร็วและสะดวกกว่าแต่ก่อน ด้วยเหตุนี้เองที่ทำให้ FFT เป็นเรื่องที่น่าสนใจอย่างมาก DFT นี้มีคุณสมบัติทางคณิตศาสตร์เหมือนกับการแปลงอินทิกรัลของฟูเรียร์ทุกประการ ที่สำคัญ DFT สามารถหา spectrum ของอนุกรมเวลาได้

การใช้เทคนิค digital analysis เพื่อหาค่าของคลื่นต่อเนื่อง (continuous waveform) นั้นจะต้องมีการสุ่มตัวอย่าง (โดยปกติมักใช้ช่วงเวลาห่างเท่ากัน) เพื่อจะหาค่าของอนุกรมเวลาของตัวอย่างแบบเต็มหน่วย (discrete samples) ซึ่งจะต้องป้อนเข้า digital computer เราทราบว่า¹³ อนุกรมเวลานั้นเป็นคลื่นแบบต่อเนื่อง (continuous waveform) จึงให้คลื่นที่มีแถบความถี่แบบจำกัด (frequency band limited) และตัวอย่าง (samples) ที่ได้นี้มีอัตรา (rate) อย่างน้อยสุดเป็นสองเท่าของความถี่ที่

¹³W.T. Cochran, J. W. Cooley, D.L. Favin, H. D. Halm, R.A. Kaenel, W.W. Lang, G. C. Mailing, D. E. Nelson, C.M. Rader and P. D. Welch, "What is The Fast Fourier Transform?," *IEEE Trans. Audio Electroaccoust.*, Vol. AU-15, (June 1967):45-55.

สูงที่สุดที่เกิดขึ้นในคลื่นนั้น เมื่อตัวอย่างต่างๆเหล่านี้ถูกจัดให้มีช่วงเท่าๆกันเราจะเรียกว่า Nyquist samples ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่า DFT ของอนุกรมเวลานี้จะมีความสัมพันธ์กับการแปลงฟูเรียร์ของคลื่นแบบต่อเนื่องของตัวอย่างที่มาสร้างเป็นอนุกรมเวลา ด้วยวิธีการนี้เองที่ทำให้ DFT ใช้ประโยชน์ได้อย่างมากใน spectrum analysis และใน filter simulation โดยใช้ digital computers

FFT เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อนำมาใช้หาค่าของ DFT ของอนุกรมเวลา โดยอาศัยข้อเท็จจริงที่ว่า การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของ DFT นั้นสามารถหาได้ด้วยวิธีการทำซ้ำๆกัน (Iteration) ซึ่งจะทำให้ทุ่นเวลาในการคำนวณไปได้มาก

สัมประสิทธิ์ของ DFT เมื่อเทียบกับจำนวนครั้งของการคำนวณด้วยวิธีปกติ (N) แล้ว จำนวนครั้งของการคำนวณที่ได้นี้นับว่าน้อยมาก เมื่อ N ใหญ่ขึ้นจะทำให้การคำนวณแบบธรรมดาหรือแบบปกติเกิดปัญหาขึ้นมากมาย ตัวอย่างเช่น $N = 8192$ เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของ DFT ทั้ง 8192 ตัว จะใช้เวลาเพียง 5 วินาที เมื่อใช้เครื่อง IBM 7094 แต่ถ้าใช้วิธีคำนวณธรรมดาจะใช้เวลาถึงครึ่งชั่วโมง

การใช้ FFT เพื่อลดเวลาในการคำนวณลงนี้ ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในสาขาต่างๆหลายสาขา เช่น

- การหา power spectra และ autocorrelation function ของตัวอย่างข้อมูล¹⁴
- การ simulation ของ filter¹⁵
- pattern recognition โดยใช้ DFT ที่เป็นแบบ 2 มิติ

การวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว

เนื่องจาก FFT เป็นวิธีการที่สำคัญใช้ในการคำนวณหาค่าของ DFT เราจึงต้องกล่าวถึงคุณสมบัติของ DFT ซึ่งจะใช้ในการแปลงก่อน DFT นิยามไว้ดังนี้คือ

¹⁴ C. Bingham, M.D. Gogfrey and J.W. Tukey, "Modern Technique of power Spectrum Estimation," *IEEE Trans. Audio Electroacoust.*, (June 1967):56-66.

¹⁵ T.G. Stockham, "High Speed Convolution and Convolution," *Spring Joint Computer Conf., AFIPS Proc.*, Vol.28, 1966, Washington, D.C.:Spartan, (1966):229-233.

$$Ar = \sum_{k=0}^{N-1} Xk e^{(-2\pi jr k/N)} \quad (3.1)$$

โดย $r = 0, \dots, N-1$ และเมื่อ

Ar คือ สัมประสิทธิ์เทอมที่ r ของ DFT

Xk คือ ตัวอย่าง (sample) ตัวที่ k ของอนุกรมเวลาที่มี N เทอม

$$j = \sqrt{-1}$$

สำหรับค่า X นั้นอาจจะเป็นจำนวนเชิงซ้อน (complex numbers) ก็ได้ แต่ A มักจะเป็นจำนวนเชิงซ้อนทั้งหมด เพื่อความสะดวกเราอาจเขียนสมการ (3.1) ใหม่เป็น

$$Ar = \sum_{k=0}^{N-1} (Xk) W^{rk} \quad (3.2)$$

เมื่อ $r = 0, \dots, N-1$

$$W = e^{(-2\pi j/N)} \quad (3.3)$$

เพราะว่าโดยปกติแล้ว X_k จะเป็นค่าของฟังก์ชัน ณ. discrete time points ดังนั้นในบางครั้งกรณี r จึงมักจะเรียกว่าความถี่ (frequency) ของ DFT (DFT นี้อาจจะเรียกว่า discrete fourier transform หรือ discrete time, finite range fourier transform)

โดยปกติแล้วจะมีตัวผกผัน (inverse) ของ DFT ซึ่งมีรูปร่างคล้ายๆกับ DFT ซึ่งเราก็สามารถนำเอา FFT มาใช้ในการคำนวณค่าได้เช่นกัน ตัวผกผันของสมการ (3.2) มีรูปแบบดังนี้คือ

$$X_l = (1/N) \sum_{r=0}^{N-1} Ar W^{-rl} \quad (3.4)$$

เมื่อ $l = 0, \dots, N-1$ ความสัมพันธ์อันนี้เรียกว่าการแปลงฟูเรียร์เต็มหน่วยแบบผกผัน (Inverse Discrete Fourier Transform : IDFT) เราอาจแสดงได้ว่าการผกผันนี้ สมเหตุสมผล (Valid) ได้โดยการแทนสมการ (3.2) ลงในสมการ (3.4)

$$X_l = (1/N) \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (Xk) W^{rk} W^{-rl}$$

เมื่อ $r = 0, \dots, N-1$ และ $l = 0, \dots, N-1$

$$X_l = \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (Xk / N) W^{r(k-l)}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าทางขวามือที่ได้ก็คือ Xk นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณของวิธี DFT ยังคงประสบกับปัญหาคือเราต้องสิ้นเปลืองเวลาในการคำนวณมากแม้ว่าจะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยก็ตาม ดังนั้นจึงมีผู้พยายามคิดค้นหาเทคนิคหรือขั้นตอนวิธีต่างๆขึ้นมาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น จนกระทั่งได้วิธีที่ดีที่สุดในปัจจุบันซึ่งเรียกว่าวิธี "การแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว" (Fast Fourier Transform) หรือ FFT

เพื่อให้เข้าใจวิธี FFT มากขึ้น เราจะแสดงขั้นตอนต่างๆจาก DFT โดยใช้คุณสมบัติที่สำคัญของ W_N หรือ W ดังนี้

กำหนดให้ $\tilde{f}(x)$ เป็นชุดของค่าสุ่มตัวอย่างจำนวนจำกัด N ค่า ของ $f(x)$ (ถ้าเป็นฟังก์ชันคาบ เราจะทำการสุ่มตัวอย่างเพียงคาบ (period) เดียว

โดย

$$F_{(k)} = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) W_N^{kn} \quad \text{-----}(3.5)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

และค่าสุ่มตัวอย่างที่ n ของ $\tilde{f}(x)$ จาก IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) คือ

$$f_{(n)} = (1/N) \sum_{k=0}^{N-1} F_{(k)} W_N^{-kn} \quad \text{-----}(3.6)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1$$

ทั้งค่า $f_{(n)}$ และ $F_{(k)}$ นี้เป็นได้ทั้งจำนวนจริงและจำนวนเชิงซ้อน แต่ในที่นี้เราจะทำการแปลงฟูเรียร์จากโดเมนของเวลา (time domain) ไปเป็นโดเมนของความถี่ (frequency domain) ซึ่งเราจะให้ค่า $f_{(n)}$ เป็นจำนวนจริงเท่านั้น ส่วน $F_{(k)}$ สามารถเป็นจำนวนเชิงซ้อนได้ จากสมการ (3.5) และ (3.6) ค่า W_N^{kn} เป็นค่าสำคัญค่าหนึ่งที่ต้องคำนวณทุกครั้งของการคำนวณ และเป็นตัวการที่สำคัญอันหนึ่งที่ทำให้สิ้นเปลืองเวลามากถ้าเราเลี่ยงไปโดยใช้วิธีอื่นโดยการคำนวณค่าของ W_N^{kn} สำหรับทุกค่าของ k และ n แล้วนำไปเก็บไว้ในหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ไว้ก่อนเมื่อจะใช้ก็เรียกออกมาใช้ได้เลยแต่มีปัญหาที่ตามมาก็คือ จะต้องใช้หน่วยความจำเป็นจำนวนมหาศาล เมื่อ N มีค่าใหญ่มากขึ้น ทั้งยังต้องสำรองที่ของหน่วยความจำไว้สำหรับค่าของข้อมูล $\tilde{f}(x)$ อีกจำนวนหนึ่งด้วย

การลดปริมาณการคูณและการบวกลงจะทำให้ปัญหาดังกล่าวลดลงด้วย ถ้าพิจารณาถึงคุณสมบัติของ W_N^{kn} แล้วจะได้ว่า

$$W_N^{k(N-n)} = W_N^{-kn} \quad \text{-----}(3.7)$$

$$W_N^{kn} = W_N^{(k+N)n} \quad \text{-----}(3.8)$$

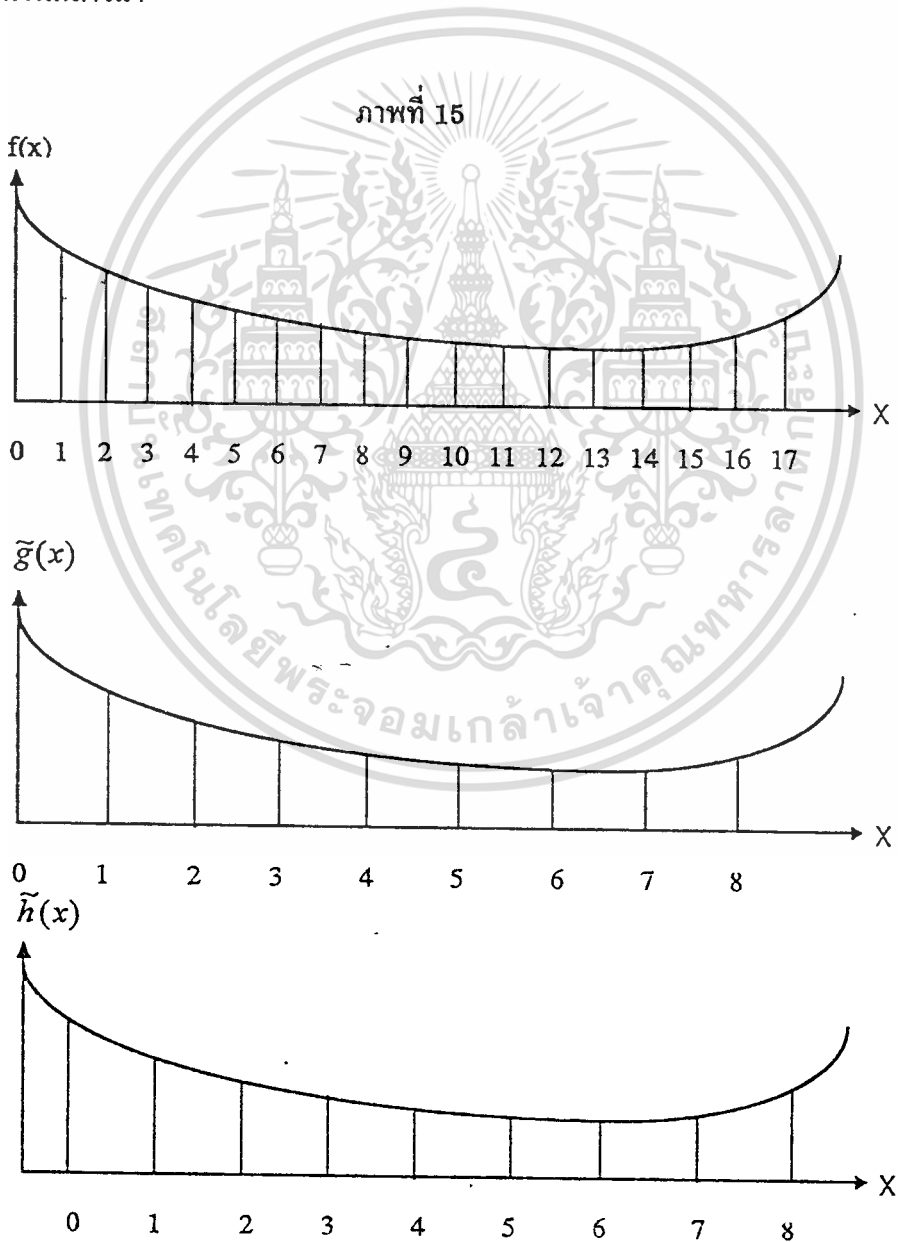
โดยที่ $k, n = 0, 1, \dots, N-1$

จากคุณสมบัติของ W_N ตามสมการ (3.7) และ (3.8) ทำให้ค่า W_N บางคู่สามารถใช้แทนกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะที่สำคัญของ FFT คือ N จะต้องไม่เป็นจำนวนเฉพาะ (prime number) ดังนั้นถ้า N แยกตัวประกอบได้เป็นจำนวนเล็กๆหลายจำนวนคูณกัน(จะดีที่สุดเมื่อ N มีตัวประกอบเป็น 2 ทั้งหมด) ซึ่งทำให้สามารถแบ่งจุดของค่าสุ่มตัวอย่างออกเป็นกลุ่มย่อยๆ โดยแต่ละกลุ่มย่อยจะมีจำนวนของค่าสุ่มตัวอย่างเท่ากับค่าของเลขที่เป็นตัวประกอบของ N นั้น หลังจากนั้นจะเป็นการคำนวณ DFT ของทั้งหมดต่อไป ซึ่งเรามีขั้นตอนของการคำนวณดังต่อไปนี้

สมมติว่า $\tilde{f}(x)$ เป็นจุดค่าสุ่มตัวอย่างของ $f(x)$ ค่าสุ่มตัวอย่างนี้เป็นค่าทางเวลาซึ่งเราเรียกว่า Decimation in time ที่มีอยู่ N ค่า โดยที่ N จะต้องไม่เป็นจำนวนเฉพาะและต้องหารด้วย 2 ลงตัวดังที่กล่าวมา



แสดงการแบ่งข้อมูลออกเป็นตำแหน่งเลขคู่และเลขคี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก $\tilde{f}(x)$ จำนวน N ค่านี้ เรายังสามารถแยกออกเป็น 2 กลุ่มๆละ $N/2$ ค่าเท่าๆกันได้ สมมุติ เป็น $\tilde{g}(x)$ และ $\tilde{h}(x)$ ดังภาพที่ 15 โดยที่

$\tilde{g}(x)$ เป็นค่าที่เลือกออกมาจาก $f(x)$ ในตำแหน่งเลขคู่

$\tilde{h}(x)$ เป็นค่าที่เลือกออกมาจาก $f(x)$ ในตำแหน่งเลขคี่

กล่าวคือ $\tilde{g}(x) = \{f(0), f(2), f(4), \dots\} = \{g(0), g(1), g(2), \dots\}$

$\tilde{h}(x) = \{f(1), f(3), f(5), \dots\} = \{h(0), h(1), h(2), \dots\}$

หรือ $\tilde{g}(r) = f(2r) \quad , r = 0, 1, 2, \dots, N/2 - 1$ -----(3.9)

$\tilde{h}(r) = f(2r+1) \quad , r = 0, 1, 2, \dots, N/2 - 1$ -----(3.10)

เมื่อแบ่ง $\tilde{f}(x)$ ออกเป็น 2 ชุดเรียบร้อยแล้ว เราก็จะสามารถทำการคำนวณ DFT ของ $N/2$ จุด ของ $\tilde{g}(x)$ และ $\tilde{h}(x)$ แต่ละชุดได้จากสมการ (3.5)

$$\begin{aligned} F(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} f(n)W_N^{kn} \quad \text{เมื่อ } k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ &= \sum_{n \text{ even.}} f(n)W_N^{kn} + \sum_{n \text{ odd}} f(n)W_N^{kn} \\ &= \sum_{r=0}^{N/2-1} f(2r) W_N^{2rk} + \sum_{r=0}^{N/2-1} f(2r+1) W_N^{(2r+1)k} \\ &= \sum_{r=0}^{N/2-1} f(2r)(W_N)^{2rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} f(2r+1) (W_N)^{2rk} \quad \text{-----(3.11)} \end{aligned}$$

เพราะว่า $W_N^2 = W_{N/2}$ และจากสมการที่ (3.11)

$$F(k) = \sum_r f(2r)W_{N/2}^{rk} + W_N^k \sum_r f(2r+1) W_{N/2}^{rk} \quad \text{-----(3.12)}$$

$$= \sum g(r)W + W \sum h(r)W \quad \text{-----(3.13)}$$

สมการ (3.13) ได้จากการแทนค่าสมการ (3.9) และ(3.10) ลงในสมการ (3.12) จาก สมการ (3.13)

ถ้าพิจารณาโดยละเอียดตามคุณสมบัติของการเป็นฟังก์ชันคาบของ $W_{N/2}$ จะได้

$$W_{N/2}^{rk} = W_{N/2}^{r(k+N/2)} \quad \text{-----(3.14)}$$

$$W_N^k = -W_N^{(k+N/2)} \quad \text{-----(3.15)}$$

เมื่อ k เปลี่ยนค่าตั้งแต่ 0 ถึง $N-1$ จะทำให้ $\sum_r g(r)W_{N/2}^{rk}$ และ $\sum_r h(r)W_{N/2}^{rk}$

มีลักษณะการกระจายเหมือนกัน กล่าวคือสามารถใช้ค่า $W_{N/2}^{rk}$ ร่วมกันได้แทนที่เราจะต้องคำนวณทุกค่าดังสมการ (3.5) ลักษณะเช่นนี้เราจึงเรียกสมการ (3.13) ว่าเป็นการคำนวณ DFT ของ $N/2$ จุด ของ $\tilde{g}(x)$ และ $\tilde{h}(x)$

ถ้ากำหนดให้ $G(k)$ และ $H(k)$ เป็นค่าสัมพัทธ์อย่างที k ของ $\tilde{G}(s)$ และ $\tilde{H}(s)$ ตามลำดับแล้ว

สมการที่ (3.13) จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F(k) = G(k) + W_N^k H(k) \text{ -----(3.16)}$$

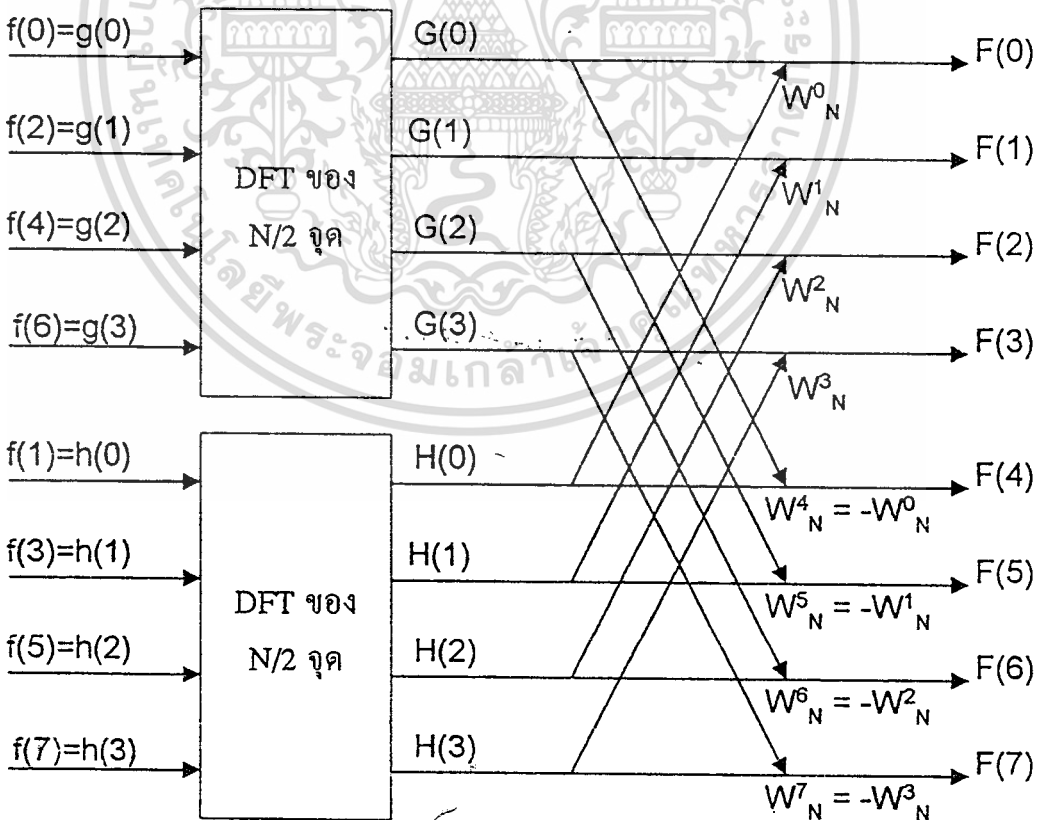
และ $F(k + N/2) = G(k + N/2) + W_N^{k+N/2} H(k + N/2)$
 $= G(k) - W_N^k H(k) \text{ -----(3.17)}$

เพราะว่า $G(k + N/2) = \sum_r g(r) W_{N/2}^{r(k+N/2)}$
 $= \sum_r g(r) W_{N/2}^{rk}$
 $= G(k)$

ทำนองเดียวกัน $H(k + N/2) = H(k)$ และ $W_N^{k+N/2} = -W_N^k$

สมการ(3.16) และ (3.17) ถ้าให้ค่า k มีค่าเป็น 0,1,2,...,N/2 - 1 ก็จะสามารถให้ค่า k ชุดเดียวกันกับสมการ(3.5) ในขณะที่สมการ(3.5) ต้องใช้ค่า k = 0,1,2,...,N-1

ภาพที่ 18



กราฟแสดงการไหลของสมการ (3.16) และ (3.17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 16 ค่า เป็นตัวประกอบที่ต้องนำไปคูณกับสัญญาณที่มาจาก $H(k)$ เสมอ เช่น

$$F(0) = G(0) + W_N^0 \quad H(0) = G(0) + H(0)$$

$$F(4) = G(0) - W_N^0 \quad H(0) = G(0) - H(0)$$

$$F(1) = G(1) + W_N^1 \quad H(1)$$

$$F(5) = G(1) - W_N^1 \quad H(1)$$

$$\text{จากสมการ(3.5)} \quad F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)W_N^{kn}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

จะเห็นว่าค่า $F(k)$ หนึ่งค่าจะมีการคูณเกิดขึ้น N ครั้ง และการบวก $N-1$ ครั้ง ระหว่าง $f(n)$ และ W_N^{kn} เพราะฉะนั้นสำหรับ $F(k)$ ทั้งหมด N ค่า จะมีการคูณเกิดขึ้น N^2 ครั้ง และการบวก N^2-N ครั้ง ระหว่าง $f(n)$ และ W_N^{kn} นั่นคือ DFT ของ N จุด จะมีการคูณ N^2 ครั้ง และมีการบวก N^2-N ครั้ง

ในภาพที่ 16 เป็นเทคนิคที่เกิดจากการแบ่งกลุ่มออกเป็น 2 กลุ่มดังกล่าวซึ่งจะมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

DFT ของ $N/2$ จุด 1 ชุด จะมีการคูณ $(N/2)^2$ ครั้ง และมีการบวก $(N/2)^2 - (N/2)$ ครั้ง

DFT ของ $N/2$ จุด 2 ชุด จะมีการคูณ $2(N/2)^2$ ครั้งและมีการบวก $2[(N/2)^2 - (N/2)]$ ครั้ง

การคูณกันระหว่าง W_N^k และ $H(k)$ อีก N ครั้ง การบวกและลบกันของ $G(k) \pm W_N^k H(k)$ อีก N ครั้ง นั่นคือมีการคูณ $2(N/2)^2 + N$ ครั้ง และมีการบวก $2[(N/2)^2 - (N/2)] + N = 2(N/2)^2$ ครั้ง

ตารางที่ 4

การเปรียบเทียบขั้นตอนการคำนวณหาค่า DFT แบบ N จุดและแบบแบ่งเป็น 2 กลุ่ม

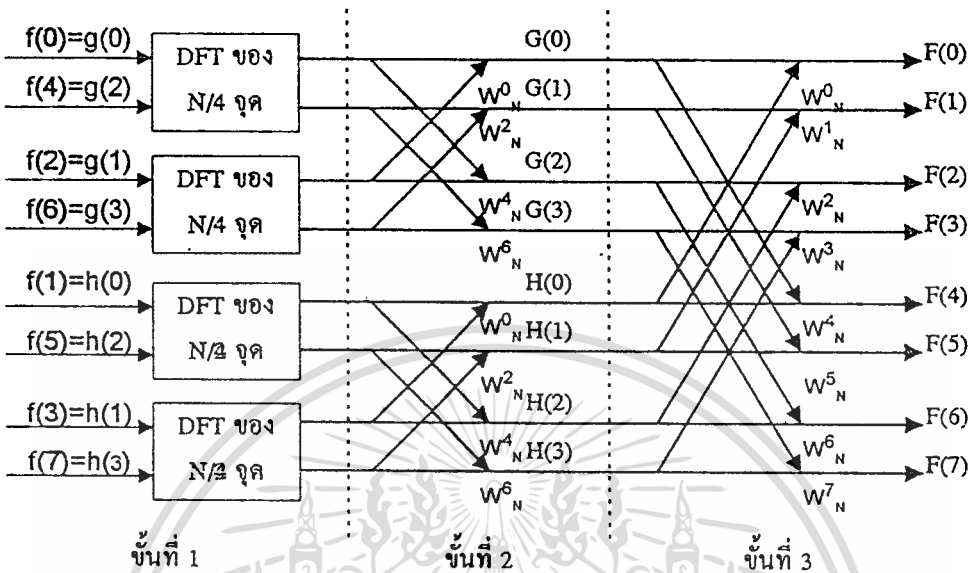
DFT วิธีเดิมขนาด N จุด	แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม	มากกว่าเมื่อ
คูณ N^2	$2(N/2)^2 + N$	$N^2 > 2(N/2)^2 + N, \quad N > 2$
บวก $N^2 - N$	$2(N/2)^2$	$N^2 - N > 2(N/2)^2, \quad N > 2$

จากตารางที่ 4 จะเห็นว่าเราสามารถลดการคำนวณลงไปได้มาก เมื่อ $N > 2$ ในทำนองเดียวกันจากภาพที่ 16 ภายในกรอบสี่เหลี่ยมของ DFT ของ $N/2$ จุด ถ้า $N/2$ จุดนี้ยังหารด้วย 2 ได้ลงตัวอีก

เอกสารนี้เราก็จะสามารถดำเนินขั้นตอนได้เช่นเดียวกันคือแยกออกเป็น 2 กลุ่มย่อยๆลงไปอีกเช่นภาพที่ 17

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 17



แสดงการไหลของสัญญาณสำหรับ FFT ของ 4 จุด

$$\begin{aligned}
 G(k) &= \sum_r g(r)W_{N/2}^{rk} \quad \text{เมื่อ } r, k = 0, 1, \dots, N/2 - 1 \\
 &= \sum_{r \text{ even}} g(r)W_{N/2}^{rk} + \sum_{r \text{ odd}} g(r)W_{N/2}^{rk} \\
 &= \sum_L g(2L)W_{N/2}^{2LK} + \sum_L g(2L+1)W_{N/2}^{(2L+1)k}
 \end{aligned}$$

เมื่อ $L = 0, 1, \dots, N/4 - 1$

$W_{N/4}$ มีคุณสมบัติเป็นคาบเช่นเดียวกับ $W_{N/2}$

นอกจากนี้แล้ว $F(k)$ ทั้งหมด เมื่อ $k = 0, 1, \dots, N-1$ จะสามารถคำนวณได้จาก DFT ของ $N/4$ จุด โดยใช้ค่า k ภายในช่วง $0 \leq k \leq N/4 - 1$ เท่านั้น

ในการทำงานเดียวกัน ถ้า $N/4$ ยังคงเป็นเลขคู่อยู่ วิธีการแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มนี้ก็ยังสามารถนำมาใช้ได้อีก จึงทำให้เปลี่ยนมาเป็นการคำนวณ DFT ของ $N/8$ จุด ทำให้ประสิทธิภาพของการแปลงฟูเรียร์เพิ่มขึ้นไปอีก ตราบเท่าที่ N ยังคงหารด้วย 2^a ได้ลงตัว (a เป็นเลขจำนวนเต็ม) นั่นก็หมายความว่าเราทำการแบ่งกลุ่มย่อยลงมาทั้งหมด a ชั้น ซึ่งต้องใช้จำนวนครั้งของการคูณเป็น

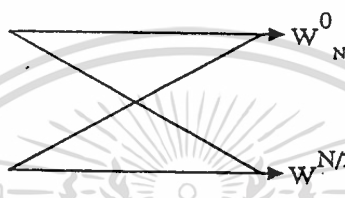
$$2^a(N/2^a)^2 + aN = N^2/2^a + aN$$

นั่นคือ ในกรณีที่ N เป็นค่าของ 2 ยกกำลัง b หรือ $N = 2^b$ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราก็จะสามารถทอนการคำนวณ DFT ของข้อมูล N จุดลงไปเหลือเพียง DFT ของ 2 จุด ทั้งหมด 2^{b-1} ชุด และมีการคูณ (ของจำนวนเชิงซ้อน)

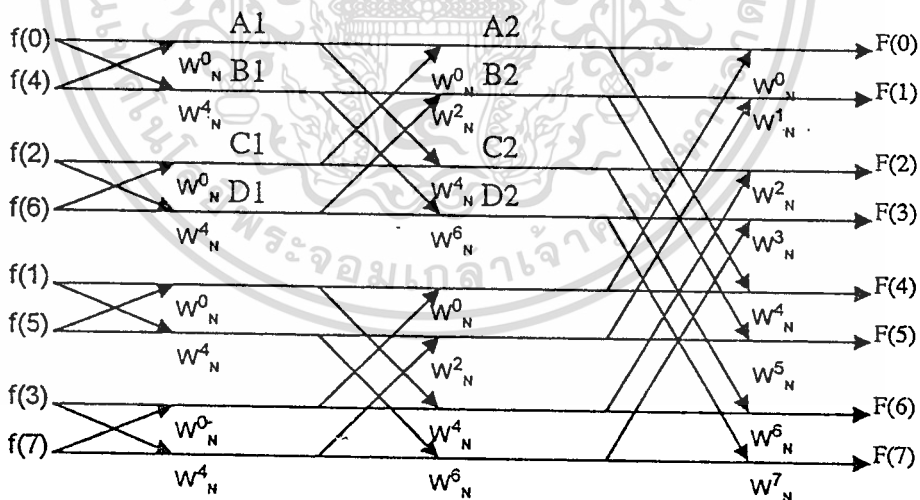
$$2^b(N/2b)^2 + (b-1)2^b = b2^b \text{ หรือ } N \log_2 N \text{ ครั้ง ดังภาพที่ 18 และภาพที่ 19}$$

ภาพที่ 18



แสดงการไหลของสัญญาณในกลุ่มย่อยที่สุด

ภาพที่ 19



แสดงการไหลของสัญญาณสำหรับ FFT ของ 8 จุด

จากภาพที่ 19 จัดว่าเป็นวิธีการคำนวณที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดวิธีหนึ่ง และหากเราแทนค่า W_N^k บางค่าที่เป็น 1 และ -1 ก็จะสามารถทำให้ลดการคูณลงไปได้อีกมากและมีข้อสังเกตอย่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งที่สำคัญก็คือข้อมูล $f(0), f(1), f(2), \dots$ ทางซ้ายมือและค่า $F(0), F(1), F(2), \dots$ ทางขวามือไม่ได้อยู่ตรงกันเลข กล่าวก็จะอยู่ในลักษณะของ bit reversed order ของเลขฐานสอง

$f(0) \dots \dots \dots F(0)$

$f(4) \dots \dots \dots F(1)$

$f(2) \dots \dots \dots F(2)$

$f(6) \dots \dots \dots F(3)$

$f(1) \dots \dots \dots F(4)$

$f(5) \dots \dots \dots F(5)$

$f(3) \dots \dots \dots F(6)$

$f(7) \dots \dots \dots F(7)$

เพื่อให้เข้าใจได้ดีขึ้นสามารถดูได้จากตารางที่ 5

ตารางที่ 5

แสดงลักษณะของ bit-reversed order ของเลขฐานสอง

เลขฐานสิบ	เลขฐานสอง	เลขฐานสิบ	เลขฐานสอง
f(0)	f(000)	F(0)	F(000)
f(4)	f(100)	F(1)	F(001)
f(2)	f(010)	F(2)	F(010)
f(6)	f(110)	F(3)	F(011)
f(1)	f(001)	F(4)	F(100)
f(5)	f(101)	F(5)	F(101)
f(3)	f(011)	F(6)	F(110)
f(7)	f(111)	F(7)	F(111)

จะเห็นได้ว่าจากตาราง 5 นั้น เลขฐานสองของ f และเลขฐานสองของ F จะกลับกันเสมอ เนื่องมาจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคั้งนี้คือ สมมติว่าเรามีข้อมูล $2^3 = 8$ ดังต่อไปนี้

$$f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8$$

ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มเลขคู่ และกลุ่มเลขคี่ ตามวิธีการที่ได้กล่าวมาแล้ว

$$f_0, f_2, f_4, f_6 \text{ และ } f_1, f_3, f_5, f_7$$

แล้วเราให้ g_0, g_1, g_2, g_3 แทน f_0, f_2, f_4, f_6 ตามลำดับ

$$h_0, h_1, h_2, h_3 \text{ แทน } f_1, f_3, f_5, f_7 \text{ ตามลำดับ}$$

โดยวิธีการแบ่งกลุ่มของ g และ h ออกเป็นกลุ่มเลขคู่ และกลุ่มเลขคี่ ซึ่งจะได้กลุ่ม g สองกลุ่ม และกลุ่ม h สองกลุ่มคั้งนี้คือ

$$g_0, g_2 \text{ และ } g_1, g_3$$

$$h_0, h_2 \text{ และ } h_1, h_3$$

จะเห็นว่าขณะนี้เราได้กลุ่มย่อยเล็กสุด 4 กลุ่มซึ่งไม่สามารถแบ่งให้เล็กลงไปกว่านี้ได้อีกแล้ว ซึ่งค่า

$$g_0 \text{ จริงๆแล้วก็คือค่า } f_0 \text{ และค่า } h_0 \text{ จริงๆแล้วก็คือค่า } f_1$$

$$g_2 \text{ " " } f_4 \text{ " " } h_2 \text{ " " } f_5$$

$$g_1 \text{ " " } f_2 \text{ " " } h_1 \text{ " " } f_3$$

$$g_3 \text{ " " } f_6 \text{ " " } h_3 \text{ " " } f_7$$

นั่นคือ ถ้าเราเริ่มต้นที่กลุ่มย่อย ด้วยค่า f เรียงลำดับดังต่อไปนี้

$$f_0, f_4, f_2, f_6, f_1, f_5, f_3, f_7$$

โดยการคำนวณการไหลของกราฟตามรูปแบบสี่เหลี่ยมจะทำให้เราได้ค่า

$$F_0, F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7$$

ซึ่งจะเรียงลำดับกันนั่นเอง

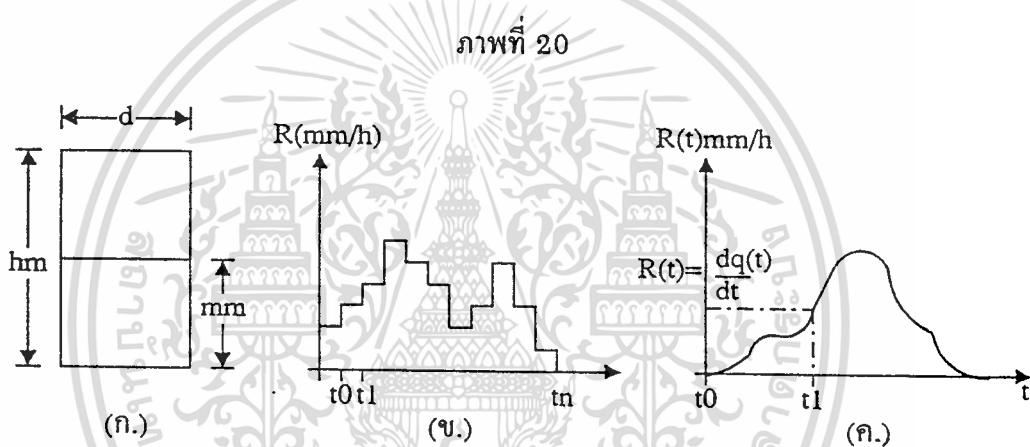
การใช้ Fast Fourier Transform (FFT) มาวิเคราะห์คุณลักษณะการตกของฝน

เนื่องจากประเทศไทยจัดอยู่ในภูมิภาคเขตร้อนชื้นซึ่งมีคุณลักษณะการตกของฝนในช่วงฤดูฝนที่หนักถึงหนักมากในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อระบบการติดต่อสื่อสารย่านความถี่ไมโครเวฟมาก สำหรับลักษณะของข้อมูลน้ำฝนสามารถแบ่งออกตามคุณสมบัติของเครื่องมือวัดที่ใช้ได้เป็น 3 ประเภทคือ แบบแรกเป็นลักษณะของข้อมูลน้ำฝนเป็นค่าเฉลี่ยต่อวัน (ใช้เครื่องวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ต่อสังคม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ dropping calculation¹⁶⁾ ค่าการวัดแบบนี้ใช้กับการพยากรณ์เท่านั้น ไม่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้กับการออกแบบทางด้านการสื่อสารได้ แบบที่สอง เป็นข้อมูลที่อ่านได้จากเครื่องวัดแบบนับพัลส์ทางไฟฟ้าที่ได้จากการตวงน้ำฝนอัตโนมัติ (ใช้เครื่องวัด tipping bucket¹⁷⁾) ซึ่งค่าที่ได้นี้เป็นค่าเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาซึ่งมีตั้งแต่ก่อนที่ไปจนถึงต่อชั่วโมง ค่าที่ได้จากการวัดแบบนี้นิยมนำมาใช้ในการคำนวณ การลดทอนของสัญญาณเนื่องจากน้ำฝน เนื่องจากข้อมูลเหล่านี้สามารถ หาได้จากกรมอุตุนิยมวิทยาได้ทันที ส่วนแบบที่สาม เป็นการวัดข้อมูลแบบอ่านค่าต่อเนื่องทุกๆค่าของเวลา (เป็นแบบ continuous peak rainrate) ที่พัฒนาออกแบบสร้างขึ้น¹⁸⁾ โดยข้อมูลน้ำฝนทั้งสามแบบนี้แสดงได้ดังภาพที่ 20



แสดงข้อมูลของน้ำฝนที่ได้จากการวัดทั้ง 3 รูปแบบคือ

ก.) แบบวัดค่าเฉลี่ยตลอดวัน ข.) แบบวัดค่าเฉลี่ยในหน่วยเวลา ค.) แบบวัดค่าต่อเนื่องทุกๆค่าเวลา

¹⁶⁾ Y. Moliya, มนูญ สุขเกษม และ ถวิล พึ่งมา, “เครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝนชนิดความเที่ยงตรงสูงสำหรับสภาพฝนตกหนักในประเทศไทย”, เทคโนโลยีใหม่ในงานวิศวกรรม จัดโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, (26-28 ตุลาคม 2532):หน้า 281-293

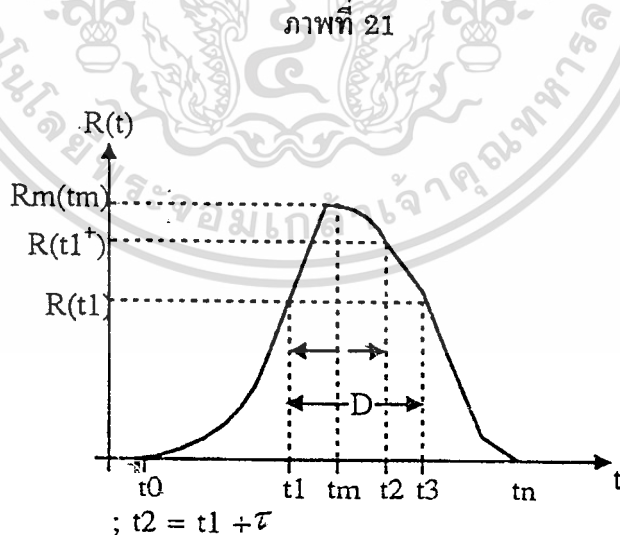
¹⁷⁾ ถวิล พึ่งมา และ พิชญ์ บุญตรา, “การพัฒนาเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน สำหรับประเทศไทย”, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ปีที่ 43 เล่มที่ 2, (2533):หน้า 73-76

¹⁸⁾ T. Paungma and Y. Moriya, “Rain Attenuation Along Earth-to-Space Paths in Thailand and Development of Momentrainfall Intensity Recorder”, Proceeding of 11th International Telecommunication Symposium, (1990):383-386.

จากการศึกษาถึงผลกระทบของฝนที่มีต่อคลื่นไมโครเวฟนั้น ทำให้ทราบว่าค่าอัตราการตกของฝน (rain rate) นั้นมีความสัมพันธ์กันกับการลดทอนของคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นเราจึงได้ทำการพัฒนาสร้างเครื่องมือวัดน้ำฝน ที่สามารถอ่านค่าอัตราการตกของฝนได้อย่างต่อเนื่องทุกๆค่าของเวลาเพื่อนำข้อมูลเหล่านี้มาหาความสัมพันธ์ที่มีต่อการลดทอนของคลื่นไมโครเวฟ รวมทั้งทำการวิเคราะห์ลักษณะการตกของฝนเพื่อประโยชน์ในการคาดการณ์หรือประเมินการตกของฝนในโอกาสข้างหน้า สิ่งหนึ่งที่สำคัญมากก็คือการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าต่างๆของฝน ซึ่งหลักการเบื้องต้น จะนำมาคิดเพียง 4 ค่าเท่านั้นคือ

- ปริมาณน้ำฝน (Q) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรหรือลูกบาศก์ลิตร
 - อัตราการตกของฝน (R) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อชั่วโมง
 - ระยะการตกของฝน (D) มีหน่วยเป็นนาทียหรือชั่วโมง
 - ความน่าจะเป็นของการเกิดฝนตก (P) ไม่มีหน่วย หรือบางครั้งแปลงเป็นเปอร์เซ็นต์
- การหาความสัมพันธ์ของค่าทั้ง 4 นี้ ทำได้โดยสมมุติข้อมูลของน้ำฝนขึ้นมาค่าหนึ่ง (1 Event)

ดังภาพที่ 21 โดยให้มีช่วงฝนตก (D) ระหว่าง t_0 ถึง t_n และมีอัตราการตกของฝนสูงสุดเป็น R_m ค่าต่างๆและสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ



แสดงตัวอย่างของข้อมูลฝนตกที่วัดได้ด้วยเครื่องบันทึกแบบวัดค่าต่อเนื่องตามเวลา

จากภาพที่ 21 ถ้าฝนตกช่วง t_0 ถึง t_n แต่ค่าที่มีผลต่อการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟอยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง t_1 ถึง t_2 ซึ่งเป็นช่วงเวลา ดังนั้นค่าปริมาณน้ำฝนในช่วงนี้สามารถหาได้จาก

$$Q(t_1, t_1 + \tau) = \int_{t_1}^{t_1 + \tau} R(t) dt \quad \text{-----} (3.18)$$

หรือค่าปริมาณน้ำฝนทั้งหมดจะเป็น

$$Q(t_0, t_n) = \int_{t_0}^{t_n} R(t) dt \quad \text{-----} (3.19)$$

ในทางกลับกันถ้าเราทราบค่าของปริมาณน้ำฝนก็จะหาค่าของอัตราการตกของฝนได้จาก

$$R(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad \text{-----} (3.20)$$

หรือหาค่าของอัตราการตกสูงสุดของฝนได้จาก

$$Rm(tm) = \frac{dq(tm)}{dtm} \quad \text{-----} (3.21)$$

ส่วนค่าของระยะเวลาในการตกของฝน D จะหาได้จาก

$$D[R(t_1)] = t_3 - t_1 \quad \text{-----} (3.22)$$

หรือเขียนได้ว่า

$$D[R(t)] = t_b - t_a \quad \left| \begin{array}{l} t_0 < t_a < t_m \\ t_m < t_b < t_n \end{array} \right. \quad \text{-----} (3.23)$$

และโอกาสที่จะมีฝนตกในรอบปีตามเงื่อนไขของ D และ R เป็น

$$P[R(t) > R(t_1)] = \frac{\sum \tau_i}{8760} \quad \text{-----} (\text{ใน 1 ปี}) \quad \text{-----} (3.24)$$

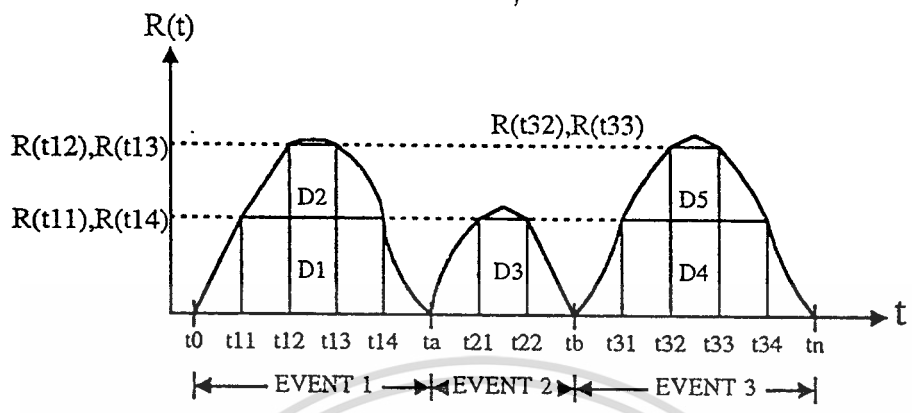
เมื่อ τ เป็นจำนวน Event ที่มีฝนตกเกิน $R(t_1)$

8760 เป็นจำนวนชั่วโมงใน 1 ปี

จากสมการทั้งหมดนี้จะทราบความสัมพันธ์ของทุกๆค่าของฝนแต่อย่างไรก็ตาม ค่าจากสมการคณิตศาสตร์เหล่านี้ต้องใช้คอมพิวเตอร์มาแก้ไขสมการจึงจะได้ผลดีเนื่องจากกราฟของน้ำฝนนั้นมีค่าไม่แน่นอน รูปลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าต่างๆของฝนโดยการใช้รูปแบบกราฟนี้ เริ่มแรกจะต้องนำข้อมูลดิบที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดน้ำฝนมาแยกแต่ละ Event ดังภาพที่ 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 22



แสดงตัวอย่างการตกของฝน 3 Event

จากภาพที่ 22 สมมุติตัวอย่างของการตกของฝนว่ามีระยะเวลาระหว่าง t_0 ถึง t_n แต่มีช่วงที่ฝนหยุดลงมาที่ $R(t) = 0$ จำนวน 2 ครั้ง ที่ t_a และ t_b ดังนั้นข้อมูลของฝนนี้ เราจะแบ่งออกเป็นการตก 3 ครั้งเรียกว่า Event 1, Event 2 และ Event 3 ค่าระยะเวลาการตกของฝน D ที่ค่าอัตราการตกของฝน $R(t)$ จะหาได้จากระยะเวลาในสมการที่ (3.23) ซึ่งเป็นค่า D ของแต่ละ Event ซึ่งได้ค่า D รวมเท่ากับผลรวมของ D ตามสมการที่ (3.25)

$$D[R(t)] = \sum_{E=1}^n t_E [R(t)] \text{-----(3.25)}$$

ตัวอย่างเช่นค่า D ที่ $R(t_{12})$ จะเท่ากับ

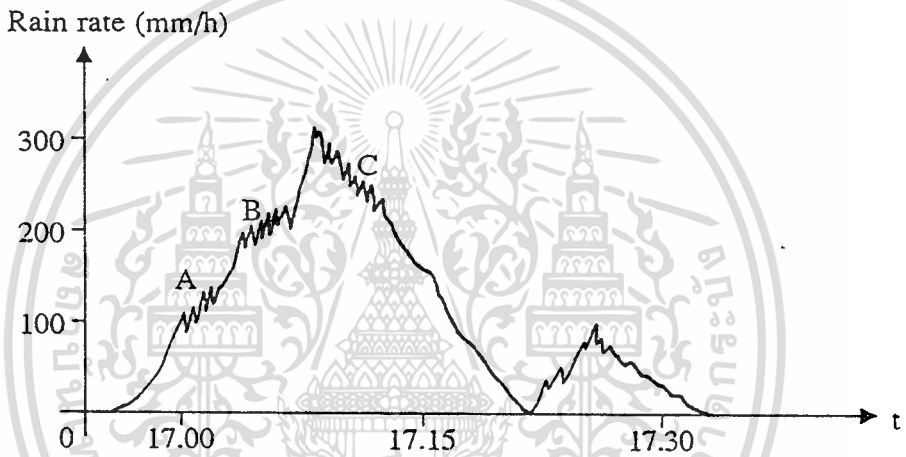
$$\begin{aligned} D[R(t_{12})] &= t_1(t_{13} - t_{12}) + t_2(0) + t_3(t_{33} - t_{32}) \\ &= D_2 + 0 + D_5 \end{aligned}$$

จากตัวอย่างข้างต้นนี้ถ้าจำนวนข้อมูลในเวลา 1 ปี (8760 ชม.) มีระยะเวลาการตกของฝน D ที่อัตราการตกของฝน R เราก็คงจะหาค่า D รวมได้ทั้งหมดเมื่อทราบค่าข้อมูลทุกๆ Event ทำให้ทราบค่าของโอกาสที่จะเกิดฝนตก P ที่ค่าของ D และ R ที่กำหนดได้ดังสมการที่(3.24) ซึ่งจากวิธีการดังที่ได้อธิบายมานี้ จะเห็นว่าเป็นการวิเคราะห์ถึงลักษณะข้อมูลการตกของฝนที่มีการเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้ตีพิมพ์ตามเวลา ซึ่งสำหรับในกรณีการตกของฝนในประเทศไทยนั้นจะมีตั้งแต่การตกของฝนแบบปรอยๆ ไม่ว่าจะถี่แค่ไหน อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปจนถึงการตกของฝนแบบตกหนักในช่วงระยะเวลาสั้นๆซึ่งย่อหมายถึงว่าอัตราการตกของฝนนั้นมีค่าที่มาก และมีการเปลี่ยนแปลงมากในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เป็นผลให้การอ่านข้อมูลจากกราฟน้ำฝนที่ถูغبันทึกไว้ในกระดาษบันทึกแบบต่อเนื่อง กระทำได้ไม่สะดวกเท่าที่ควรและมีโอกาสเกิดความคาดเคลื่อนของข้อมูลที่อ่านได้ในกรณีที่ลักษณะของเส้นกราฟน้ำฝนมีอัตราการตกของฝนที่เปลี่ยนแปลงไปมากดังตัวอย่างภาพที่ 23

ภาพที่ 23



แสดงตัวอย่างกราฟน้ำฝนที่มีการเปลี่ยนแปลงของ Rain rate ที่มาก

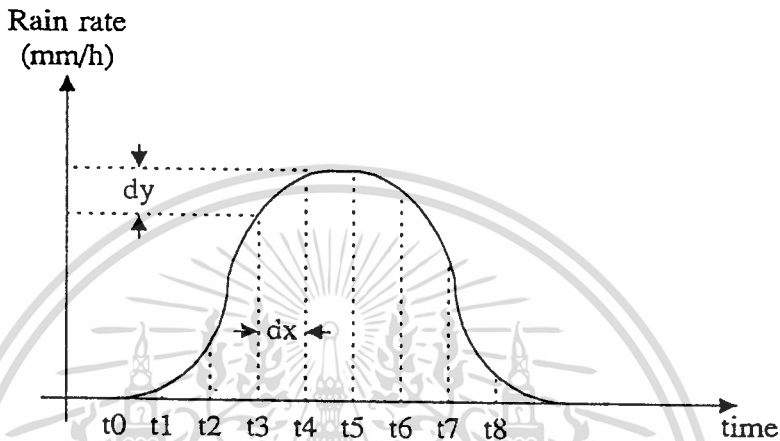
ซึ่งจะสังเกตเห็นได้จากเส้นกราฟในบริเวณตำแหน่ง A, B, และ C ซึ่งเกิดขึ้นจากฝนที่ตกอยู่ นั้นมีอัตราการตกที่เปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆในช่วงระยะเวลาสั้นๆ และจากทฤษฎีเราทราบว่าอัตราการตกของฝนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการลดทอนของสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ ตามสูตร $A = aR^b$ ทำให้เราตั้งข้อสมมุติฐานว่าในตำแหน่ง A, B, และ C อาจจะประกอบขึ้นด้วยค่าของอัตราการตกของฝนค่าสูงๆในหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งก็ให้เกิดปัญหาเรื่องการรับคลื่นไมโครเวฟเกิดสัญญาณขาดช่วงไปก็เป็นได้ และในการที่จะศึกษาวิเคราะห์ถึงลักษณะการตกของฝนที่มีลักษณะดังภาพที่ 23 ในแนวแกนเวลา (time domain) จึงเป็นสิ่งที่ยุ่งยากและอาจมีความคลาดเคลื่อนได้มากที่จะทำการหาค่าองค์ประกอบของอัตราการตกของฝนในหนึ่งหน่วยเวลาของการตกของฝนแต่ละครั้ง ดังนั้นแนวทางแก้ปัญหาก็เกิดขึ้นนี้จึงได้ใช้วิธีการวิเคราะห์กราฟข้อมูลน้ำฝนในแนวแกนความถี่ (frequency domain) แทนวิธีการเดิม ซึ่งมีแนวความคิดคือ จากกราฟน้ำฝนที่ทำการบันทึกได้นั้นจะสังเกตเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าในการตกของฝนแต่ละครั้งนั้นจะประกอบด้วยส่วนย่อยๆของอัตราการตกของฝนค่าต่างๆ ดังแสดงตัวอย่างดังภาพที่ 24

ภาพที่ 24



แสดงตัวอย่างข้อมูลน้ำฝน

จากภาพที่ 24 นั้นเมื่อเราต้องการหาค่าอัตราการตกของฝน (rain rate) หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการหาค่าความชัน (Slop) ของกราฟน้ำฝนซึ่งหาได้จากสูตรพื้นฐานดังนี้

$$\text{ค่าอัตราการตกของฝนต่อหนึ่งหน่วยเวลา} = \text{ค่าความชัน (slop)} = \frac{dy}{dx}$$

และเนื่องจากเราต้องการวิเคราะห์ลักษณะการตกของฝน ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว(Fast Fourier Transform : FFT) โดยการนำเอากระบวนการของ FFT มาใช้คำนวณหาค่าของ DFT ของข้อมูลน้ำฝนซึ่งมีสูตรดังนี้คือ

$$Ar = \sum_{k=0}^{N-1} Xk e^{(-2\pi jrk/N)} \quad \text{-----}(3.26)$$

เมื่อ $r = 0,1,2,\dots,N-1$; เป็นลำดับความถี่หรือความบ่อยครั้งของอัตราการตกของฝน

Ar = ปริมาณอัตราการตกของฝนเทอมที่ r (โดยใช้วิธีการ scaling)

$k = 0,1,2,\dots,N-1$; เป็นลำดับข้อมูลน้ำฝนในอนุกรมเวลา

Xk = ตัวอย่าง (sample) ข้อมูลน้ำฝนตัวที่ k ของอนุกรมเวลาที่มี N เทอม

(โดยใช้ทฤษฎีของ Nyquist theory)

จากสมการ(3.26) ซึ่งเป็นสมการของ DFT จะใช้เวลาในการคำนวณมากดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ดังนั้นในการแปลงข้อมูลนำฝนที่มีรูปแบบค่าอัตราการตกของฝนเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องตามเวลา (อยู่ใน time domain) ให้มีรูปแบบเป็นค่าอัตราการตกของฝนเปลี่ยนแปลงตามความถี่หรือความบ่อยครั้งของการตกของฝน (อยู่ใน frequency domain) โดยใช้กรรมวิธีของ FFT ซึ่งจะใช้คุณสมบัติที่สำคัญของ W_N หรือ W เพื่อให้การคำนวณเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีความถูกต้องสูงเพราะจำนวนครั้งของการคูณและการบวกลดลงอย่างมากนั่นเอง

ยกตัวอย่างเช่นถ้าข้อมูลนำฝนที่ได้รับจากการถูกสุ่มตัวอย่าง (sampling) เป็น จำนวน 1024 ข้อมูล นั่นคือ ($N = 1024$) เพื่อให้การแปลงด้วย FFT มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยใช้จำนวนครั้งของการคูณซึ่งหาได้จากสมการ(3.27)

$$\text{จำนวนครั้งของการคูณ} = N^2/2^a + aN \text{ -----(3.27)}$$

(เมื่อ $N = 1024$),

$$N = 2^a$$

ดังนั้น

$$a = 10$$

แทนค่า N และ a ในสมการ (3.27)

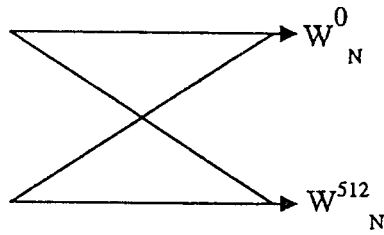
$$\begin{aligned} \text{จำนวนครั้งของการคูณ} &= (1024)^2/2^{10} + 10(1024) \\ &= 11,264 \text{ ครั้ง} \end{aligned}$$

ส่วนจำนวนครั้งของการคูณด้วยวิธีปกติที่มีจำนวนข้อมูล 1024 จุด จะมีจำนวนครั้งของการคูณเท่ากับ N^2 ครั้ง หรือมีค่าเท่ากับ 1,048,576 ครั้ง ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณนานมากกว่าวิธีการ FFT ซึ่งใช้การคูณเพียง 11,264 ครั้งเท่านั้น และเมื่อได้ค่า $a = 10$ นั่นก็หมายความว่าเราทำการแบ่งกลุ่มย่อยลงมาได้ทั้งหมด 10 ชั้น และในกรณีที่ N เป็นค่าของ 2 ยกกำลัง b

$$N = 2^b$$

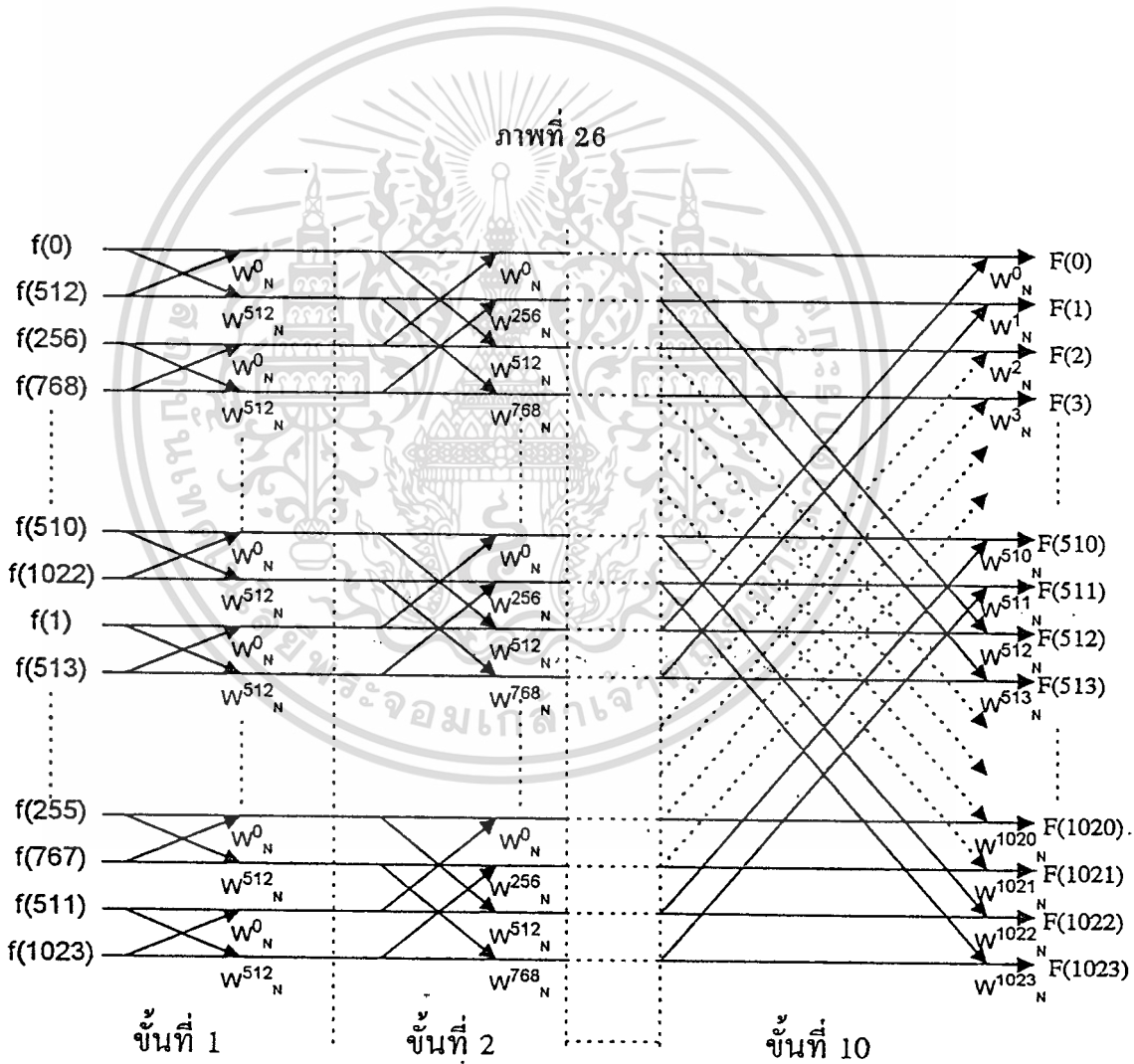
เราก็จะสามารถหอนการคำนวณ DFT ของข้อมูล N จุดลงไปเหลือเพียง DFT ของ 2 จุด ทั้งหมด 2^{b-1} จุด (ซึ่งก็คือ $2^9 = 512$ จุด) และมีการคูณของจำนวนเชิงซ้อนมีค่าเป็น $b2^b$ หรือ $N \log_2 N$ ครั้ง (ซึ่งก็คือ $(10)(2)^{10} = 10,240$ ครั้ง) ดังภาพที่ 25 และภาพที่ 26

ภาพที่ 25



แสดงการไหลของสัญญาณในกลุ่มย่อยที่สุด

ภาพที่ 26



แสดงการไหลของสัญญาณ เมื่อ $N = 1024$

จากภาพที่ 26 ได้แสดงการไหลของสัญญาณ (ข้อมูลน้ำฝนจำนวน 1024 ข้อมูล) เพื่อทำการแปลงให้อยู่ในรูปของความถี่หรือความบ่อยครั้งที่เกิดขึ้น ณ ที่อัตราการตกต่างๆ และเมื่อเราทำการแปลงข้อมูลน้ำฝนได้ครบ 1 ปีหรือมากกว่าก็จะสามารถนำไปใช้คาดการณ์ถึงลักษณะการตกของฝนในปีข้างหน้าได้ดียิ่งขึ้น เพื่อวางแผนชดเชยกำลังการสูญเสียที่เกิดขึ้นให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

สรุป

การวิเคราะห์ข้อมูลการตกของฝนที่มีค่าอัตราการตกเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องตามเวลานั้นซึ่งจะบอกถึงว่า ณ. ที่อัตราการตกของฝนค่าต่างๆเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณ ไมโครเวฟที่วัดได้นั้นเกิดการลดทอนไปมากน้อยเท่าใด แต่ถ้าจะถามถึงว่า ณ. ที่อัตราการตกของฝนค่าต่างๆเหล่านี้ได้เกิดขึ้นบ่อยครั้งหรือไม่ในการตกของฝนหนึ่งครั้งหรือในช่วง 1 ปี ทั้งนี้เพื่อจะได้นำข้อมูลความบ่อยครั้งหรือความถี่ของการตก ณ. ที่อัตราการตกต่างๆเหล่านี้ มาใช้ประกอบในการตัดสินใจเพิ่มหรือลดเกณฑ์กำลังส่งต่อไปซึ่งในการตอบคำถามนี้โดยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลน้ำฝนที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (time domain) นั้นจะใช้เวลามากและมีโอกาสผิดพลาดได้ง่าย ดังนั้นการแก้ปัญหานี้จึงได้ทำการแปลงข้อมูลน้ำฝนจากเดิมที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาให้เป็นข้อมูลน้ำฝนที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่หรือความบ่อยครั้ง โดยใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ (FFT) ช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วและมีความถูกต้องแม่นยำสูง

บทที่ 4

เครื่องมือวัดนำฝนแบบใหม่เพื่อคุณลักษณะของฝนในพื้นที่เขตร้อน

ลักษณะการตกของฝนในประเทศไทย

ในหลายปีที่ผ่านมาย่านความถี่ 10 GHz หรือสูงกว่าได้ถูกนำมาใช้สำหรับการสื่อสารดาวเทียมและแขนแนลวิทยุประจำบ้านได้มีจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นในประเทศต่าง ๆ ซึ่งได้คาดหวังว่าจะมีการใช้ความถี่สูงเพิ่มมากขึ้น ในประเทศไทยนั้นคลื่นวิทยุในย่าน C-band จะมีการลดทอนเป็นพักๆที่เกิดขึ้นจากฝนที่เรียกว่า ฝนไล่ช้าง ฝนตกหนักจะเกิดขึ้นช่วงเวลาอันสั้นและ ไม่ค่อยจะตกนานๆเป็นชั่วโมง¹⁹ ประเทศในเขตร้อนเขตร้อน จะมีการไล่ช้างในช่วงฤดูฝน ฝนไล่ช้างจะเริ่มต้นอย่างรวดเร็วทันทีทันใด ด้วยลักษณะของฝนที่หนักและต่อเนื่องเป็นระยะเวลาเวลานานมากในช่วง 30-40 นาที²⁰ ในพื้นที่ที่เป็นสถานที่ทางวิทยุอุตุนิยมวิทยา การตกของฝนอาจทำให้เกิดการลดทอนของคลื่นวิทยุช่วงขณะขึ้นได้ จากที่กล่าวมานี้เราจึงทำการเลือกที่จะทำการวัดอัตรา การตกของฝนอย่างต่อเนื่องตามเวลา ซึ่งในปัจจุบันเครื่องมือวัดนำฝนแบบต่างๆ ได้ถูกนำมาใช้แต่วัดการตกของฝน ได้ดีพอใช้²¹ เพื่อแก้ปัญหา นี้ เราจึงได้พัฒนาเครื่องบันทึกอัตราการตกของฝนที่เกิดขึ้นแบบต่อ

¹⁹ ถวิล พึ่งมา, อิทธิชัย อรุณศรีแสงไชย และ Y. moriya, "การวิเคราะห์ผลกระทบของฝนต่อสัญญาณไมโครเวฟย่านความถี่ 20 GHz ในประเทศไทย", วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, (31-ค.ค.- 3 พ.ย. 2534):หน้า 633-642

²⁰ Y. Moriya, ถวิล พึ่งมา และ มนูญ สุขเกษม, "เครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝนชนิดความถี่ตรงสูงสำหรับสภาพฝนตกหนักในประเทศไทย", วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, (26-28 ค.ค. 2532):หน้า 281-293

²¹ ถวิล พึ่งมา และพิชญ์ บุญตรา, "การพัฒนาเครื่องบันทึกความเข้มของฝนตกสำหรับประเทศไทย", วิศวกรรมสารแห่งประเทศไทย ,เล่มที่ 2, (2532):หน้า 73-76

เนื่องตามเวลาขึ้นโดยการใช้ตัวตรวจจับของไหล (flow sensor)²² ซึ่งมันสามารถที่จะใช้วัดการตกของฝนแบบชั่วขณะได้ในขั้นที่น่าพอใจ สำหรับการนำไปใช้ในการคาดการณ์ ย่านการวัดการตกของฝนมีตั้งแต่ 1 mm ถึง 360 mm ใน 1 ชั่วโมง ความเป็นเชิงเส้นในการอ่านมีผลเป็นที่น่าพอใจจากการตกของฝนที่เบาหรือตกหนัก²³

เครื่องมือวัดน้ำฝนที่ใช้ในปัจจุบัน

สำหรับเครื่องมือวัดน้ำฝนที่มีใช้กันในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด โดยมีหลักการทำงานคุณสมบัติเฉพาะของเครื่อง ข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไปเช่นเครื่องมือวัดน้ำฝนชนิดต่างๆดังนี้

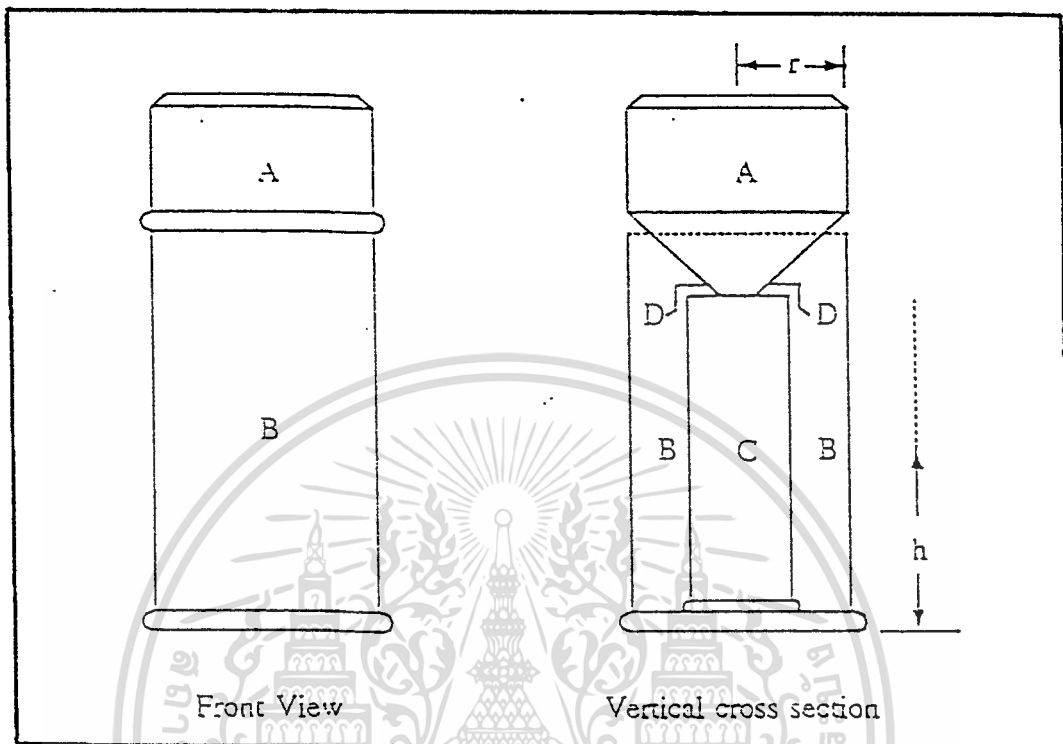
เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบสะสม (Totalizing rain gauge) เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบนี้จะเป็นชนิด common type ซึ่งมีไว้สำหรับใช้วัดปริมาณการตกของฝนดังได้แสดงในภาพที่ 27 และภาพที่ 28 ส่วน "A" เป็นชุดรับ "B" เป็นส่วนที่เก็บ "C" เป็นกระบอกวัด "D" เป็นปลอกของชุดรับรูปกรวย "A" และปิดพอดีกับกระบอกวัดน้ำ "C" เครื่องมือวัดแบบ common type นั้นจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 เซนติเมตรที่ส่วนบน ปริมาณของการตกของฝนจะอ่านได้จากค่าของสเกลที่กระบอกวัด ปริมาณของน้ำฝน $Q = \pi r^2 h$ เมื่อ r คือรัศมีของทรงกระบอกที่ชุดรับซึ่งมีค่าคงที่เสมอ ซึ่งทำให้ค่า r^2 นั้นเหมือนเป็นค่าคงที่ด้วย ความลึกของน้ำภายในกระบอกที่วัดเท่ากับ h ซึ่งเป็นความสูงของน้ำฝนที่เป็นสัดส่วนกับปริมาณการตกของฝน²⁴ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงสเกลได้

²² T. Paungma, Y. Moriya and H. Samoto, "Rainfall Intensity Recorder Used Flow Sensor", IEE of Japan Technical Digest of 8th Sensor Symposium, (1989):173-176.

²³ พิเศษ เสนาะล้ำ, ถวิล พึ่งมา และ อิทธิชัย อรุณศรีแสงไชย, "การออกแบบวงจรแปลงความถี่เป็นศักดาไฟฟ้าสำหรับเครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝนแบบเที่ยงตรงสูง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, (7-8 พ.ย. 2534): หน้า 107-110

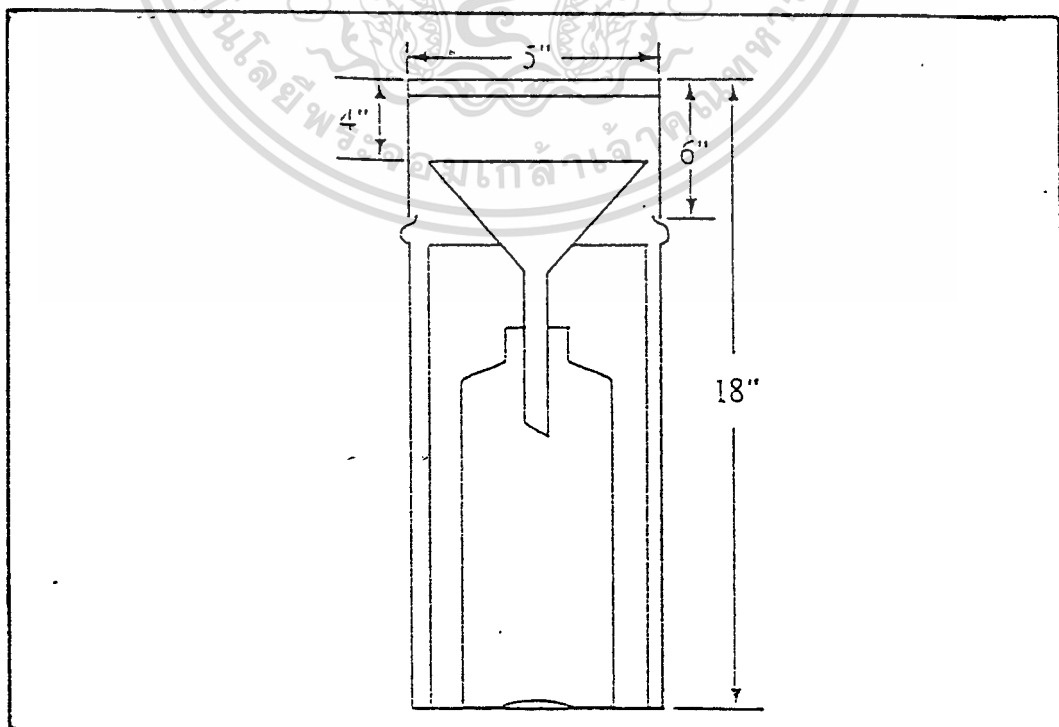
²⁴ T. Paungma, Y. Moriya and M. Teramoto, "Fabrication of a Continuously Measuring Rain Gauge for Tropical Area", Proceeding of the Faculty of Engineering of Tokai University, (Mar. 1993):13-22.

ภาพที่ 27



แสดงเครื่องวัดน้ำฝนแบบ Totalizing type

ภาพที่ 28



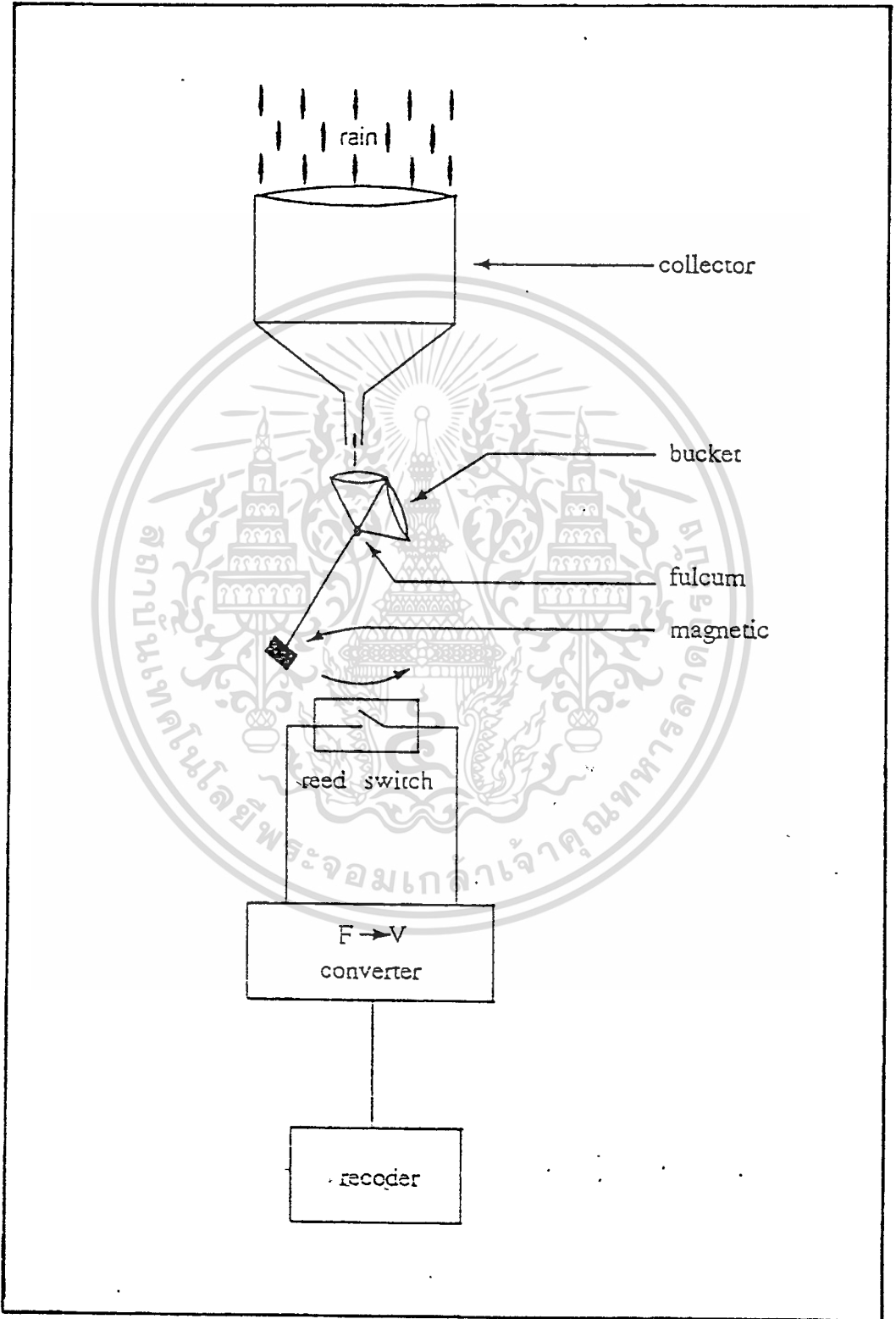
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานมาตรฐานของชุดรับน้ำฝน กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของกระบอกวัดน้ำ "C"

เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบ Tipping bucket เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบ tipping bucket มีหลักการทำงานดังภาพที่ 29 กล่าวคือเมื่อมีฝนตก น้ำฝนจะตกลงสู่กรวยรับน้ำฝน (collector) ซึ่งมีรัศมีของกรวยที่คงที่อยู่ที่ค่าหนึ่งจากนั้นน้ำฝนจะไหลลงสู่กระบอกเล็ก ๆ ที่ติดกันอยู่ 2 อัน โดยมีปากของกระบอกที่ตรงข้ามกันเพื่อสลับกันใส่น้ำและเทน้ำเมื่อข้างหนึ่งข้างใดเต็มซึ่งจำนวนการตกของฝนจากเครื่องมือวัดน้ำฝนชนิดนี้เท่ากับ nV เมื่อค่า V เป็นปริมาณของกระบอก และ n คือจำนวนครั้งที่น้ำฝนถูกเทออก (จำนวนพัลส์) และเมื่อค่า V เป็นค่าคงที่ ทำให้ค่า n เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ V โดยจำนวนของการตกของฝน n จะไปกระตุ้นการทำงานของหน้าสัมผัสทางไฟฟ้า (reed switch) ที่เกิดจากแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านในขณะที่กระบอกกำลังกระดกเทน้ำ โดยการสวิทช์ของหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าจะนำไปแปลงเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยชุด F to V converter เพื่อทำการบันทึกด้วยเครื่อง Recorder ซึ่งจะทำให้ทราบถึงปริมาณการตกของฝนที่วัดได้ ซึ่งเครื่องชนิดนี้มักจะตอบสนองต่อฝนถึงที่ระดับ 0.1 มิลลิเมตร สำหรับภาพที่ 30 แสดงเครื่องมือวัดแบบ Tipping bucket ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าบริเวณขอบของกรวยรับน้ำฝนจะออกแบบให้มีความบางมาก ๆ เพื่อให้มีการวัดค่าได้เที่ยงตรงยิ่งขึ้น ส่วนในภาพที่ 31 ได้แสดงคุณลักษณะของเครื่องรับน้ำฝนแบบ Tipping bucket โดยจะทำการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าอัตราการตกของฝน (rain rate) กับค่าความผิดพลาด (error) เมื่อใช้กระบอกรับน้ำที่ค่าปริมาณ 0.5 และ 1 CC/pluse โดยจากการทดลองจะพบว่าค่าความผิดพลาดจะมีมากขึ้นถ้าใช้กระบอกรับน้ำที่ใหญ่ขึ้น สาเหตุสำคัญก็คือเกิดการกระฉอกของน้ำในขณะที่กระบอกกระดกเทน้ำและสำหรับย่านการวัดที่พอใช้งานได้ของเครื่องมือวัดแบบ tipping bucket นี้จะอยู่ในช่วง rain rate 0-200 mm/h

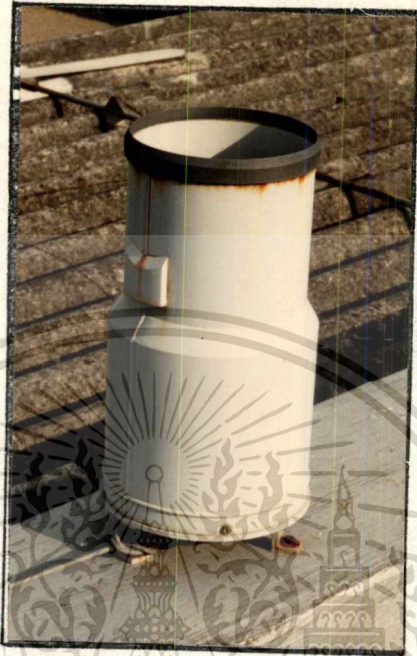
เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบการตอบสนองที่เร็ว (Quick response type) เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบการตอบสนองเร็ว ได้แสดงโครงสร้างไว้ดังภาพที่ 32 กล่าวคือน้ำฝนจะถูกรวบรวมไว้โดยกรวยซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ซึ่งน้ำจะไหลไปยังภาชนะแก้วที่มีน้ำและน้ำมันบรรจุอยู่และจะถูกทำให้เป็นหยดน้ำด้วยปริมาณที่เท่ากันออกจากปลายท่อ สำหรับเครื่องมือวัดน้ำฝนชนิดนี้ที่มีขายในปัจจุบัน จะมีปริมาตรของหยดน้ำเท่ากับ 0.0083 cm^3 โดยหยดน้ำจะถูกตรวจจับโดยอุปกรณ์ทางแสงที่ช่วงเวลา 1 นาที หรือในเวลาสั้นมากเพื่อนำสัญญาณที่ตรวจจับได้ส่งต่อไปยังเครื่องนับ (counter) แล้วจึงนำไปบันทึกด้วยเครื่อง Recorder เพื่อทราบถึงอัตราการตกของฝนใน 1 นาทีหรือในหนึ่งเวลาใดๆ

ภาพที่ 29



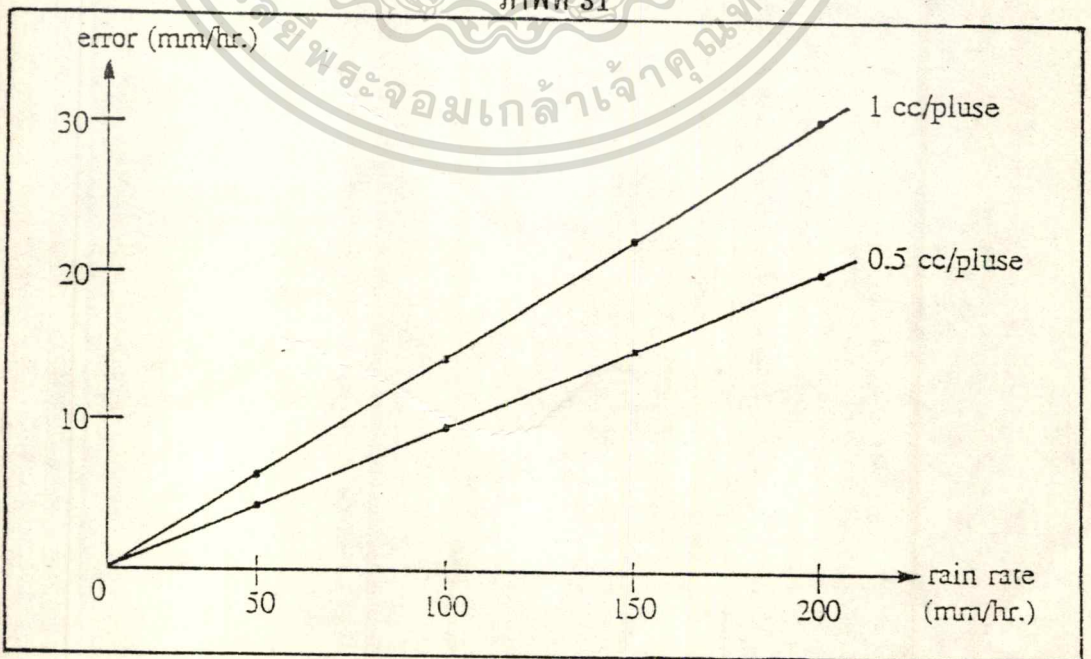
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้: แสดงโครงสร้างของเครื่องรับน้ำฝนแบบ Tipping bucket ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 30



แสดงภาพถ่ายของเครื่องรับน้ำฝนแบบ Tipping bucket

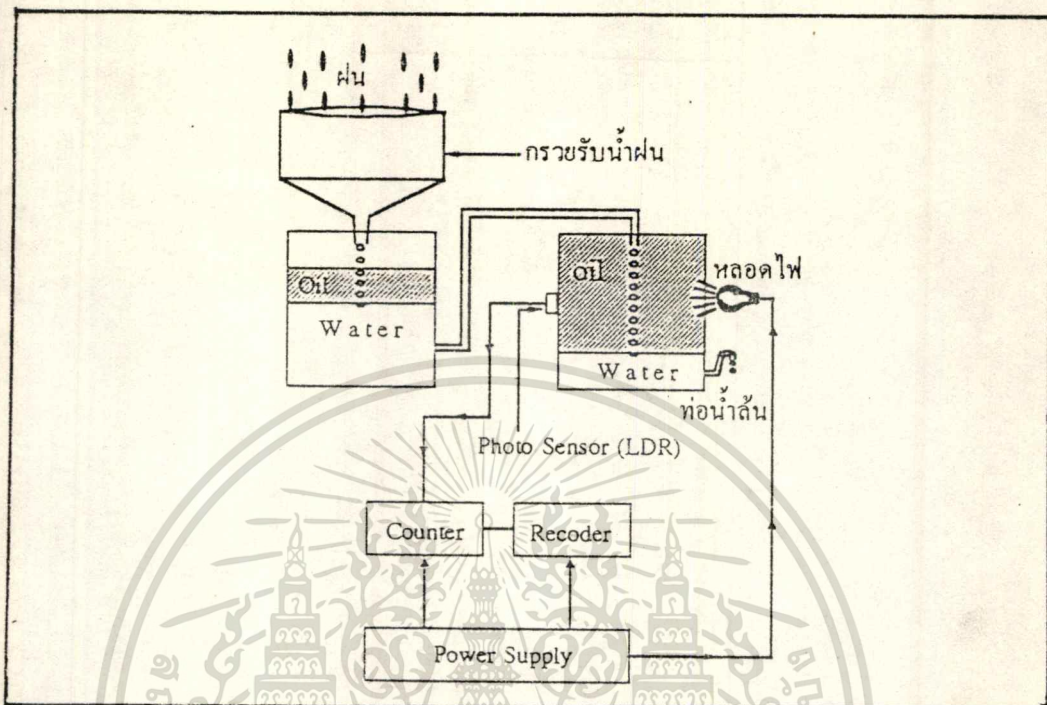
ภาพที่ 31



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้แสดงคุณลักษณะของเครื่องรับน้ำฝนแบบ Tipping bucket

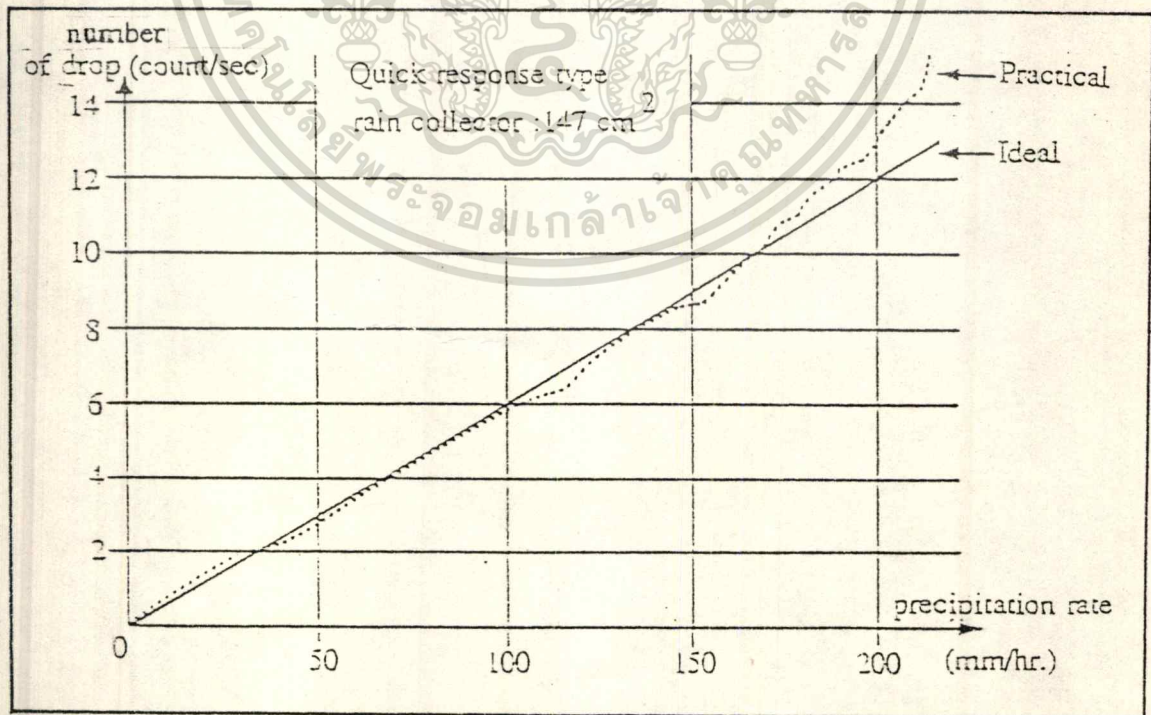
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 32



แสดงภาพของเครื่องวัดน้ำฝนแบบที่มีการตอบสนองรวดเร็ว

ภาพที่ 33



แสดงการตอบสนองของเครื่องวัดน้ำฝนแบบที่มีการตอบสนองรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้ในเชิงพาณิชย์โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

จำนวนของการตกของฝน $V = Qn$ เมื่อ Q เป็นปริมาตรของหยดน้ำโดยมีค่าเท่ากับ $(4/3)\pi r^3$ เมื่อ r คือรัศมีของหยดน้ำ โดย Q จะมีค่าคงที่ ดังนั้นจำนวนของหยดน้ำ n จะเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนของจำนวนการตกของฝน จากภาพที่ 33 ซึ่งแสดงกราฟการตอบสนองของเครื่องวัดน้ำฝนแบบที่มีการตอบสนองเร็ว ซึ่งมีความเป็นเชิงเส้นของการตอบสนองค่อนข้างดี ในช่วงอัตราการตกของฝนประมาณ 0-200 mm/h ซึ่งเส้นทฤษฎีและเส้นปฏิบัตินั้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อทำการวัดค่าอัตราการตกของฝนที่ค่ามากกว่า 200 mm/h ขึ้นไปจะพบว่าเส้นกราฟทั้งสองแตกต่างกันมากซึ่งแสดงว่าเกิดความผิดพลาดสูงมากขึ้น ซึ่งมีสาเหตุจากในขณะที่ฝนตกเกิน 200 mm/h นั้น ลักษณะของหยดน้ำที่ออกจากปลายท่อจะมีลักษณะที่ติดต่อกันเป็นสายน้ำ ทำให้ชุด counter ไม่สามารถนับได้อย่างถูกต้องแต่จะสามารถวัดค่า ปริมาณการตกของฝนในค่าน้อยๆ ได้ดี ซึ่งเครื่องมือวัดชนิดนี้เหมาะสำหรับนำไปวัดน้ำฝนในประเทศที่มีผลตกเบาบาง เช่นประเทศทางแถบสแกนดิเนเวีย²⁵⁻²⁷

เครื่องมือวัดน้ำฝนที่มีการตอบสนองอย่างต่อเนื่อง

1.1 เครื่องมือวัดน้ำฝนชนิดผสม (Mix type) มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการวัดอัตราการตกของฝนอย่างต่อเนื่อง สำหรับใช้ศึกษาถึงผลกระทบของการลดทอนหรือการ depolarization ที่มีสาเหตุจากฝนของคลื่น millimeter หรือคลื่นไมโครเวฟ

ในอนาคตเครื่องมือวัดน้ำฝนบางชนิดจากที่กล่าวมาจะถูกนำมาพัฒนาเครื่องมือวัดแบบ tipping bucket ให้มีขนาดของกรวยที่ใหญ่ขึ้น มีระบบการไหลของน้ำดีขึ้น²⁸⁻²⁹ และมีอุปกรณ์นับ

²⁵ K. Ozeki, "An Improvement of the Waterdrop Counting Type Rain Gauge", Meteorological Instruments News, (4, April 1968):232.

²⁶ R.A.Semplek, "Gauge for Continuously Measuring Rate of Rainfall", The Review of Scientific Instruments, (Nov. 1966):1554.

²⁷ S. Okamura, Y. Okabe and A. Sonohara, "A Rapid Response Rain Gauge", Trans.on IECE of Japan, J59-B, (Sep. 1976):473.

²⁸ Recommendation and Report of the CCIR XVIth, "Plenary Assembly", Dubrovnik, Vol. V., Report 563-2, 1986.

²⁹ R.A.Semplek, "Gauge for Continuously Measuring Rate of Rainfall", Rev. Sci. Instrum., (1966):1554-1558.

หยดน้ำ^{30,31} เครื่องมือวัดน้ำฝนชนิดวัดหยดน้ำสามารถวัดอัตราการตกของฝนแบบต่อเนื่องได้อย่าง มีความเที่ยงตรงสูง แต่สามารถวัดอัตราการตกของฝนได้ประมาณ 230 mm/h³¹ จากสภาพเช่นนี้ เครื่องวัดน้ำฝนแบบใหม่ซึ่งสามารถวัดอัตราการตกของฝนได้เที่ยงตรงดีกว่า 10% ในย่านวัด 0.7-300 mm/h ซึ่งถูกพัฒนาโดยใช้ข้อดีของเครื่องวัดน้ำฝนแบบนับหยดน้ำ³²⁻³³ และข้อดีของเครื่องวัดน้ำฝนแบบ Tipping bucket นำมาใช้ร่วมกัน ดังแสดงโครงสร้างของเครื่องวัดน้ำฝนชนิดผสมไว้ ดังภาพที่ 34 กล่าวคือน้ำฝนจะตกลงในกรวยรับน้ำที่มีขนาดพื้นที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 20 cm เพื่อไหล ลงสู่ภาชนะแก้วและหยดน้ำได้ไหลออกจากปลายท่อ a ด้วยปริมาตรที่เท่ากัน ปริมาตรของหยด น้ำมีค่าประมาณ 0.4 cc ในกรณีของเครื่องวัดแบบนี้ จำนวนของหยดน้ำจะถูกตรวจนับได้โดยตัว ตรวจนับทางแสงในช่วงเวลา 1 นาที ด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการตกของฝนต่อมาที่ น้ำที่ไหลออกจาก อุปกรณ์ นับหยดน้ำจะถูกป้อนเข้าสู่ชุด tipping bucket (0.5 mm ต่อการกระดก 1 ครั้ง) และค่าน้ำ ฝนทั้งหมดจะถูกวัดอีกครั้ง

แรงดันไฮดรอลิกจะถูกบังคับไว้ที่ส่วนปลายของท่อซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความไวและอัตรา การไหลสูงสุดของน้ำฝนที่วัดได้ของเครื่องวัดน้ำฝนและจะถูกกำหนดโดยความสูงชั้นของขอบเขต ระบาย b และความแตกต่างของค่าความตึงจำเพาะระหว่างน้ำและน้ำมันตะเกียง (lamp oil) ไว้ อย่างเหมาะสม ถ้าภาชนะแก้วมีรูปร่างยาวรีจะมีผลให้ระนาบขอบเขตนั้นสูงขึ้นทำให้น้ำฝนไหล ออกจากปลายท่ออย่างต่อเนื่องทำให้ไม่สามารถแบ่งแยกปริมาณการตกของฝนที่หนักได้

อีกแง่มุมหนึ่งถ้าระนาบขอบเขตนั้นกว้างก็จะเป็น ไปในลักษณะเดียวกันซึ่งเป็นผลจากความไว ที่ไม่เพียงพอของเครื่องวัดน้ำฝน ที่เกิดขึ้นโดยน้ำฝนที่มากกว่าหนึ่งหยดจะมาสะสมกันและเมื่อรวม รวมได้ถึง 2 หรือ 3 หยด ในการเกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฮดรอลิกและแรงดึงที่พื้นผิว หลังจากนั้นน้ำฝนก็จะไหลออกมาจากปลายท่อในลักษณะไหลเป็นพั๊ๆและก็จะถูกสะสมอีกครั้ง

เมื่อพิจารณาคูณลักษณะในการตกของฝนที่ตกเบาที่สุดและหนักที่สุดเพื่อเป็นรูปแบบของ เครื่องวัดน้ำฝนที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ จากการทดลองเครื่องวัดน้ำฝนชนิดใหม่ที่ได้ถูกพัฒนา ขึ้นนี้จะมีย่านการวัดที่กว้างจาก 0.7 ถึง 300 mm/h

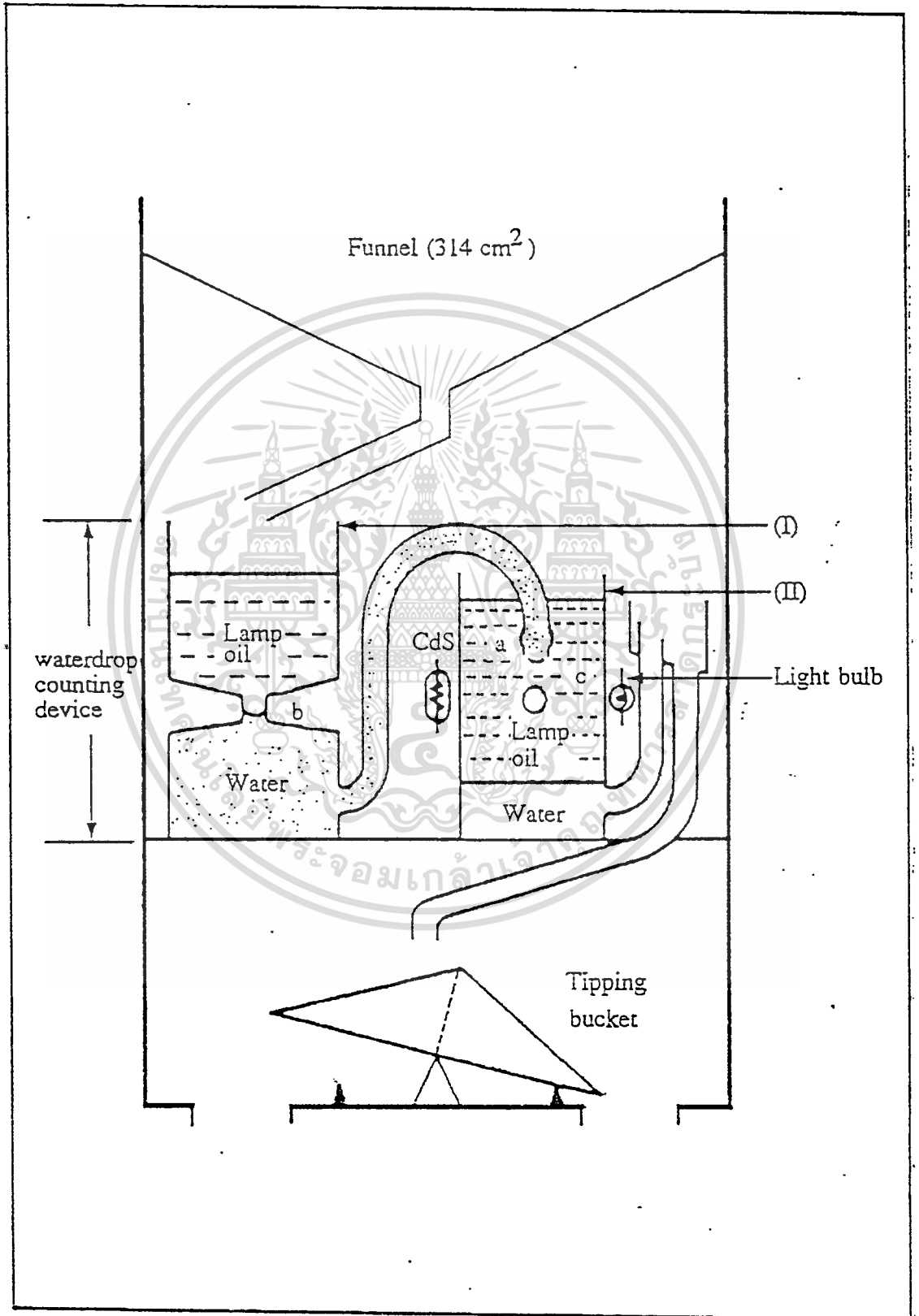
³⁰D. William L, "Meteorology", McGraw-Hill Inc., 1975.

³¹K.L. Frederrick and T.J. Edward, "The atmosphere", Prentice-Hall Inc, 1986.

³²H. Yokai and A. Ogawa, "A New Quick Response Rain Gauge", Trans.on IECE of Japan, Vol. E61, No. 7, (1978):534-535.

³³S.Okamura, Y.Okabe and A.Sonohara, "A Apid Response Rain Gauge", Trans.on IECE of Japan, Vol. J59-B, No. 9, (1976):473-475.

ภาพที่ 34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเผยแพร่เพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้ที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

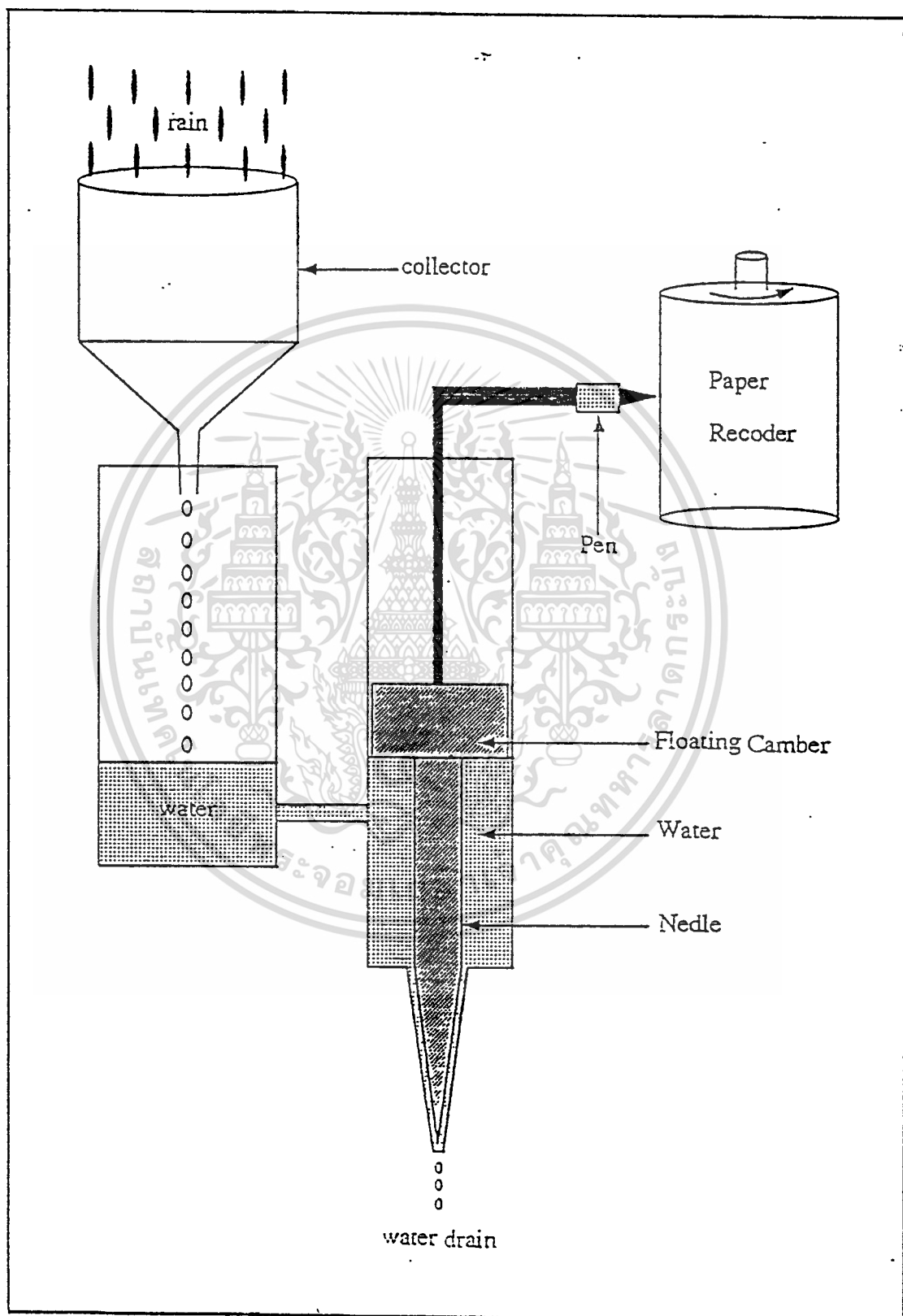
ในระยะเวลาต่างๆ ปัญหาเรื่องการหน่วงเวลาจะไม่เกิดขึ้นใน lamp oil ที่บริสุทธิ์ที่ทำหน้าที่ป้องกันน้ำในภาชนะเกิดการระเหย อีกนัยหนึ่งถ้าน้ำเกิดการระเหย เครื่องวัดน้ำฝนจะต้องใช้เวลาในการสะสมน้ำให้ได้ปริมาณที่เท่ากับน้ำที่เคยระเหยไป ก่อนจะเริ่มทำการวัดอัตราการตกของฝน

1.2 เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบ Jardi type เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบ Jardi type มีคุณสมบัติในการวัดค่าอัตราการตกของฝน อย่างต่อเนื่องตามเวลาดังแสดงโครงสร้างของเครื่องไว้ดังภาพที่ 35 กล่าวคือเมื่อฝนตกลงสู่กรวยรับน้ำฝน ปริมาณน้ำที่ได้รับจากกรวยจะไหลลงภาชนะทรงกระบอกเพื่อรองรับน้ำฝนโดยบริเวณด้านล่างของภาชนะนี้ได้ต่อท่อทะเลถึงกันกับภาชนะทรงกระบอกอีกอันหนึ่งโดยภายในมีลิ้นควบคุมน้ำแบบเข็ม (needle valve) ซึ่งยึดติดอยู่กับหุ่นลอย (Floating Camber) ที่ด้านล่าง ส่วนบริเวณด้านบนของหุ่นลอยได้ยึดติดอยู่กับก้านของปากกาบันทึกเมื่อมีน้ำไหลจากภาชนะทรงกระบอกผ่านท่อเข้าสู่ภาชนะทรงกระบอกที่มี needle valve อยู่ภายในโดยเมื่อระดับของน้ำสูงขึ้นก็จะทำให้หุ่นลอยสูงขึ้นตามเป็นผลให้ระดับของก้านปากกาบันทึกที่มีปากกายึดติดอยู่ทำการบันทึกบนกระดาษต่อเนื่องในระดับที่สูงขึ้น และในขณะเดียวกันบริเวณด้านปลายของ needle valve ก็จะมีระดับที่สูงขึ้นเช่นกัน เป็นผลให้รูระบายน้ำของภาชนะทรงกระบอกนี้ถูกเปิดออกให้น้ำไหลออกมา โดยปริมาณน้ำที่ไหลออกและระดับความสูงของปากกาที่ทำการบันทึกก็จะมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการตกของฝน สำหรับข้อเสียของเครื่องวัดน้ำฝนแบบนี้คือในกรณีที่ไม่มีฝนตกนานๆ อาจมีเศษวัสดุเล็กๆ มาอุดรูระบายน้ำหรือเกิดความฝืดขึ้นระหว่างหุ่นลอยกับทรงกระบอก อันจะเป็นผลให้การวัดอัตราการตกของฝนเกิดความผิดพลาดขึ้นได้

1.3 เครื่องมือวัดน้ำฝนชนิด Capacitive flow type โครงสร้างของเครื่องมือวัดชนิด Capacitive flow type³⁴ แสดงไว้ดังภาพที่ 36 โดยมีหลักการทำงานดังนี้คือ เมื่อมีฝนตกน้ำจะไหลออกจากปลายของกรวยรับน้ำ เพื่อไหลลงสู่รางน้ำ ที่สร้างจากแผ่นตัวนำสองแผ่นหันหน้าเข้าหากัน โดยเหลือช่องว่างเล็กๆ เอาไว้ให้น้ำไหลผ่านทั้งนี้ก็เพื่อต้องการให้รางน้ำนั้นมีคุณสมบัติเสมือนเป็นตัวเก็บประจุตัวหนึ่ง โดยใช้น้ำทำหน้าที่เป็นเหมือน ฉนวน ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณน้ำที่ไหลเข้ามาสู่รางน้ำ โดยที่แผ่นตัวนำทั้งสองได้ต่ออยู่กับชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อทำหน้าที่แปลงค่าความจุไฟฟ้าที่ได้รับให้เป็นค่าของอัตราการตกของฝนที่มีค่าต่อเนื่องตามเวลา สำหรับข้อเสียของเครื่องมือวัดชนิดนี้ก็คือ ในขณะที่เกิดฝนตกเพียงเล็กน้อยแล้วก็หยุดตกก็จะเป็น

³⁴ R. R. Seibel, "A Capacitor-type Rain Gauge With de Output and Improved Flow Characteristics", *The Review of Scientific Instruments*, 43, 8, (Aug 1972):1081.

ภาพที่ 85



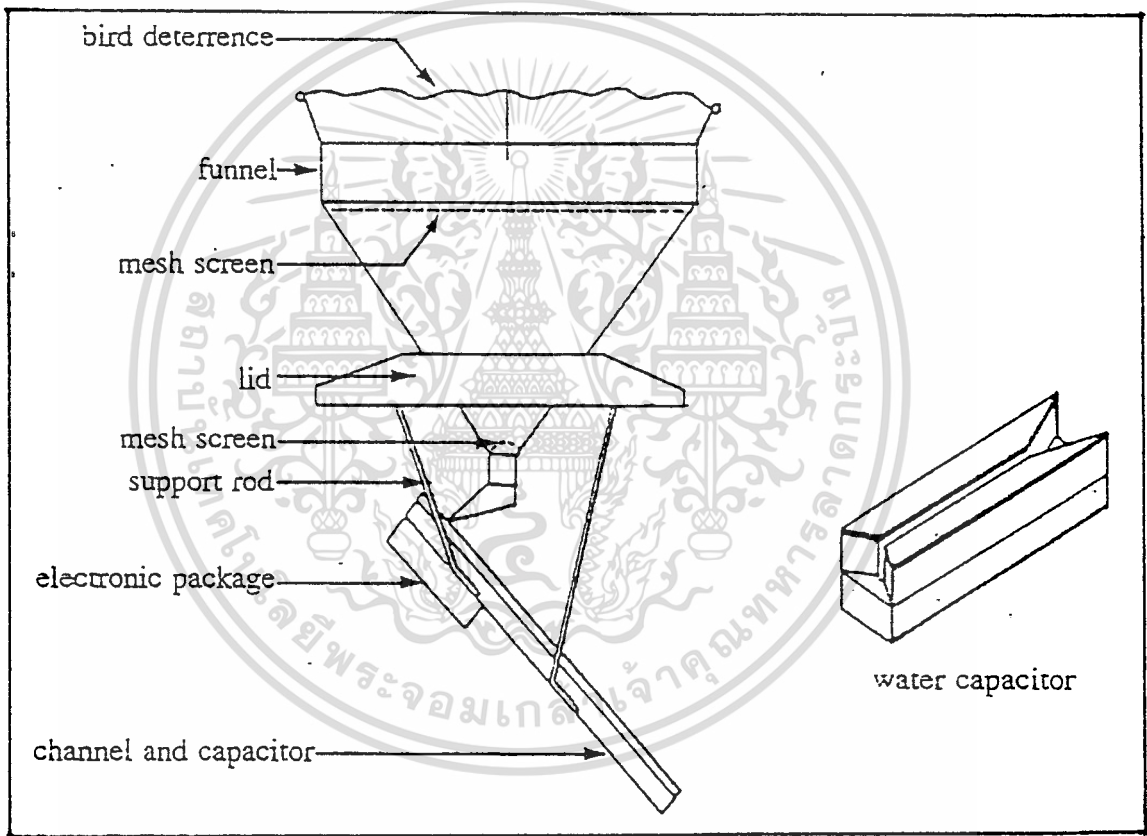
แสดงเครื่องวัดน้ำฝนแบบ Continuous response type (Jardi type)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการแจ้งในหอสมุดแห่งชาติหรือหอสมุดอื่นใดโดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลให้เกิดหยดน้ำมาเกาะติดอยู่ในบริเวณรางน้ำ ทำให้รางน้ำแสดงตัวเป็นตัวเก็บประจุค่าน้อยๆคงที่
 ค่าหนึ่งทำให้ชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์แสดงผลที่ผิดพลาดไปจากสภาพของฝนที่เกิดขึ้นจริง และอีก
 กรณีหนึ่งคือเมื่อมีฝนตกในปริมาณที่มากจนทำให้รางน้ำนั้นได้เต็มหรือล้น ในกรณีเช่นนี้ก็จะเป็น
 ผลให้เกิดค่าความจุไฟฟ้าที่สูงคงที่อยู่ค่าเดียวซึ่งจะทำให้ชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์แสดงผลที่ผิดพลาด
 ไปจากสภาพของฝนที่เกิดขึ้นจริงเช่นกัน

รูปที่ 36



แสดงเครื่องวัดน้ำฝนแบบ Capacitive flow-type

เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบใหม่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับคุณลักษณะการตกของฝนในพื้นที่เขตร้อนชื้น

คุณสมบัติของเครื่องมือวัดน้ำฝนแบบใหม่ ในประเทศไทยบ่อยครั้งที่มีการตกของฝนที่

เอกสารนี้เกินค่า 200 mm/h สำหรับการวัดการตกของฝนอย่างเที่ยงตรงนั้นๆ เครื่องมือวัดน้ำฝนชนิดใหม่ที่ถูก
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสร้างเครื่องมือวัดน้ำฝนแบบใหม่ สำหรับการออกแบบเครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝนชนิดใหม่นี้ เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างของเครื่องสามารถแบ่งการออกแบบเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ

1.1 ส่วนของการออกแบบกรวยรับปริมาณน้ำฝน การออกแบบกรวยรับปริมาณน้ำฝนนั้น จะต้องกำหนดค่าสูงสุดของปริมาณน้ำฝนและค่าการไหลสูงสุดของเซนเซอร์ว่าเป็นเท่าใด แล้วจึงนำมาคำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกรวยรับน้ำฝน ทั้งนี้ทั้งนั้น การกำหนดค่าควรดูจากสถิติสูงสุดของปริมาณน้ำฝนในประเทศนั้นๆเป็นหลักเช่นประเทศไทยมีฝนตกสูงสุดประมาณ 300 กว่ามิลลิเมตร การกำหนดก็ควรให้มีค่าสูงสุดมากกว่าประมาณหนึ่งในสาม ในที่นี้กำหนดค่าสูงสุดเป็น 500 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ส่วนค่าสูงสุดของเซนเซอร์วัดการไหลเป็น 45 ลิตรต่อชั่วโมง ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{จากพื้นที่รับน้ำฝน} &= \pi r^2 \\ &= (22/7) \times r^2 \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\text{และปริมาณน้ำฝน} = \text{พื้นที่รับน้ำฝน} \times \text{สูง} \tag{4.2}$$

แทนค่าสมการ (4.1) และ (4.2)

$$\text{ปริมาณน้ำฝน} = (22/7) \times r^2 \times 50 \text{ cm}$$

$$\text{แทนค่าสูงสุด 45000 cc} = (22/7) \times r^2 \times 50 \text{ cm}$$

$$r^2 = (45000 \times 7)/(22 \times 50)$$

$$r = 16.9 \text{ cm}$$

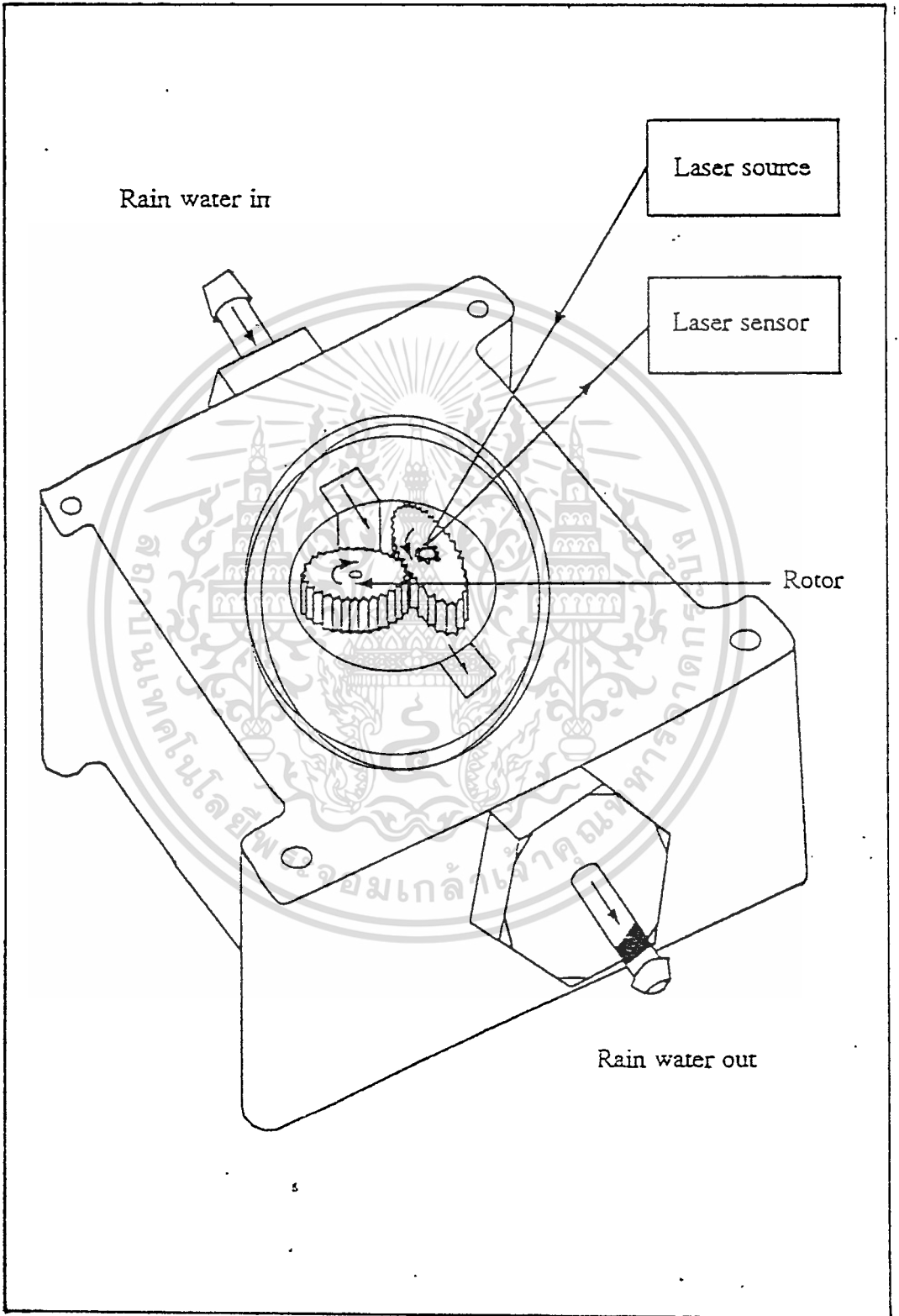
เพราะฉะนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางของกรวยรับน้ำฝนจะมีค่า = $16.9 \times 2 = 33.8 \text{ cm}$

1.2 ส่วนของการออกแบบเลือกเซนเซอร์วัดปริมาณการไหลของน้ำฝน เราได้พิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาเครื่องมือวัดน้ำฝน ด้วยการนำเอากลไกในการวัดมาใช้ ซึ่งเราต้องการอุปกรณ์ที่มีย่านการวัดทาง dynamic ที่กว้างจากผลอันนี้ เราได้พิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ Capacity type flow sensor³⁵ (รุ่น XSF-1204 สร้างโดย Mitsubu Electric) มาทำหน้าที่บันทึกการตกของฝนชั่วขณะเวลาของเรา³⁶ ดังแสดงโครงสร้างของตัวตรวจจับไว้ดังภาพที่ 38

³⁵ Mitsuba Electric MFG Co., Ltd., "Flow Sensor and Flow Meter Data Sheet."

³⁶ T.Paungma, Y.Moriya and H.Samoto, "Rainfall Intensity Recorder. Used Flow Sensor"

ภาพที่ 38



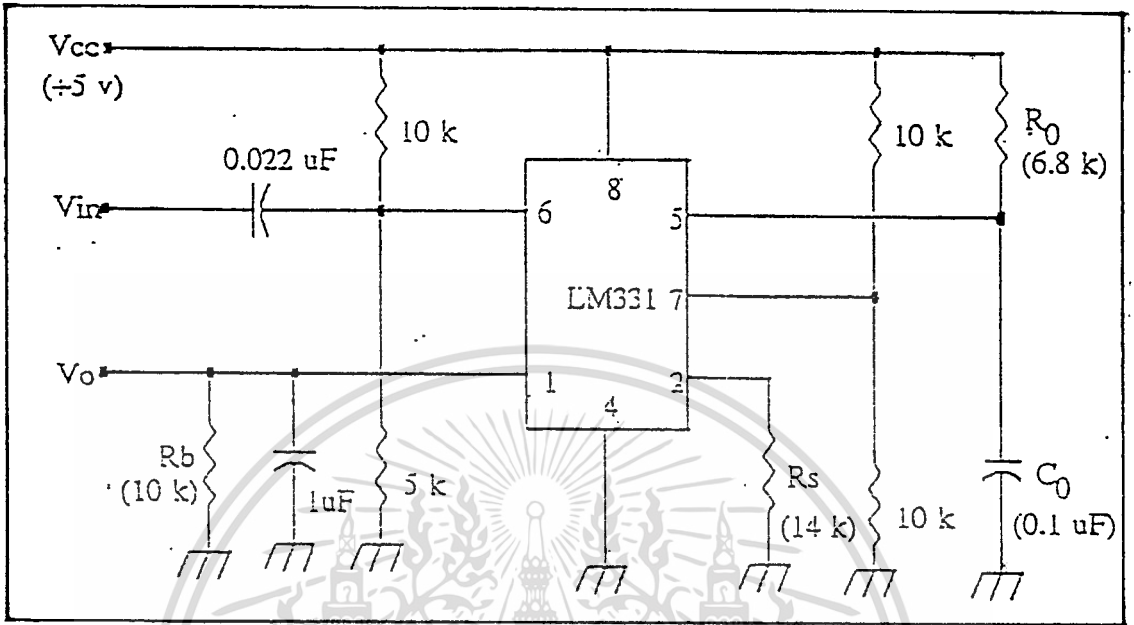
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แสดงโครงสร้างภายในของอุปกรณ์ flow sensor ที่ภายในเป็นเพียงรูปวงรี
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำฝนนั่นให้แรงไปผลักดันกังหันน้ำ (rotor) ของชุดตรวจจับแรงจะถูกแปลงไปเป็นจำนวนของการหมุน ในกรณีนี้จำนวนของการหมุนจะถูกวัดโดยตัวตรวจจับการหมุนโดยใช้อุปกรณ์เชื่อมโยงทางแสง เมื่อชุดตรวจจับการไหลที่ใช้มีลักษณะเป็นเฟืองวงรี ซึ่งมีข้อดีคือสูญเสียแรงดันน้อยมากจากการวัดพบว่าแม้ว่าฝนนจะตกเบาๆก็จะมีความสัมพันธ์กันในระดับที่สูง ซึ่งเหมือนว่ามีความไวในการตอบสนองที่สูงและย่านของการตอบสนองที่สูง

อัตราของการตกของฝนนจะถูกแทนโดยอัตราส่วนชั่วขณะ (จำนวนการตกของฝนนต่อพื้นที่) ในการวัดอัตราของฝนนตกชั่วขณะทำได้ง่ายๆ โดยวัดจำนวนของการไหล จำนวนของการไหลคือปริมาตรหรือมวลของของเหลวที่ไหลผ่านพื้นที่ที่ได้ออกแบบไว้ ในหนึ่งหน่วยเวลาให้มวล Q มีค่าเท่ากับผลคูณของความเร็วยของการไหล V , พื้นที่ S และความเข้มของของเหลว P , เมื่อสูตรคือ $Q = SPV$ ถ้า S และ P เป็นค่าคงที่, Q ขึ้นอยู่กับค่าของ V , V สามารถได้รับโดยการวัดความเร็วของการหมุนของชุดตรวจจับ จากโครงสร้างพื้นฐานมีความเป็นไปได้ที่จะทำการวัดจำนวนการตกของฝนนค่าน้อยๆแต่ความเป็นเชิงเส้นระหว่างจำนวนของการไหลและจำนวนของพัลส์ได้ผลพอใช้ในพื้นที่ยของการไหลน้อยๆเนื่องจากมีแรงดันสูญเสียที่เกิดขึ้นกับตัวตรวจจับ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องวัดแบบนี้ก็น่าจะนำมาใช้งาน เพราะว่าเรานั่นถึงการวัดในสถานที่ที่มีการตกของฝนนที่หนัก โดยไม่ได้พิจารณาถึงการตกของฝนนเพียงเล็กน้อย โดยต้องแน่ใจว่าอุปกรณ์ Flow Sensor นั้นมีน้ำบรรจุอยู่เสมอ ในบางครั้งความผิดพลาดก็เกิดขึ้นได้เมื่อฝนนเริ่มตก ถ้าเป็นไปได้ก็ควรใช้โครงสร้างที่ไม่ต้องการการเติมน้ำในส่วนของการ Rotating และเนื่องจากโครงสร้างของอุปกรณ์ Flow Sensor นั้นไม่ละเอียดเพียงพอบางอาจจะยอมให้สิ่งต่างๆเข้าไปได้ดังนั้นเราจึงใช้การกรอง 2 ชั้น ซึ่งอาจจะป้องกันตัวตรวจจับจากการทำงานที่เวลาการตกของฝนนน้อยๆ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้เราจึงได้ทำการติดตั้งท่อผ่านทางแนวตั้งความยาว 1.5 เมตร ระหว่างกรวยและตัวตรวจจับ

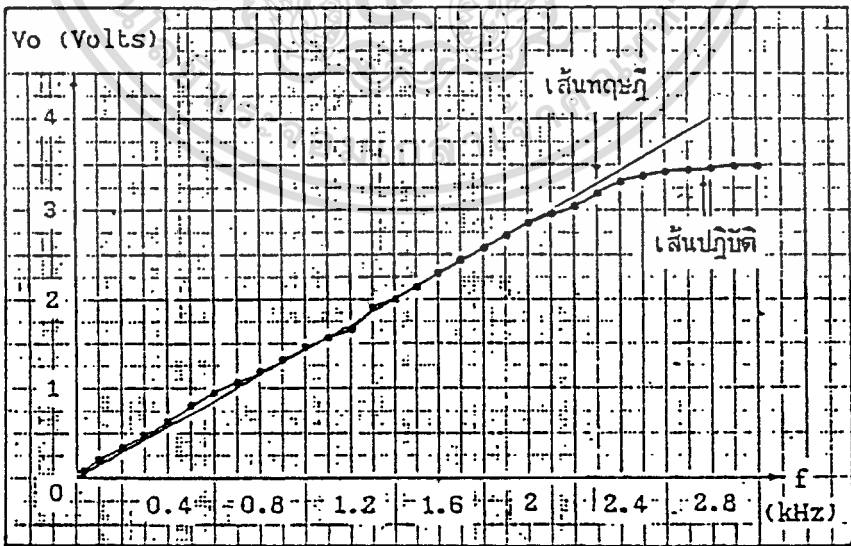
1.3 ส่วนของการออกแบบวงจรแปลงความถี่เป็นศักดาไฟฟ้า สำหรับการออกแบบวงจรแปลงสัญญาณความถี่เป็นศักดาไฟฟ้าสามารถกระทำได้หลายวิธีเช่น การใช้หลักการของวงจรอินทิเกรเตอร์ หลักการของฟิลเตอร์และหลักการของวงจรดิจิตอล เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบวงจร F to V ไว้ 2 ชนิดคือวงจร F to V แบบอนาล็อก และ F to V แบบดิจิตอล ที่ให้ผลดีเมื่อนำไปใช้กับเครื่องวัดน้ำฝนนทุกชนิดที่ให้เอาท์พุทออกมาในรูปพัลส์ความถี่ วงจรแรกเป็นวงจรแบบอนาล็อก ที่ใช้ IC พิเศษที่มีการทำงานภายในด้วยวงจรหลักและวงจรชดเชยจนได้เอาท์พุทที่มีความเที่ยงตรงมาก ซึ่งได้แสดงไว้ดังภาพที่ 39

ภาพที่ 39



แสดงวงจร F to V converter แบบอนาล็อก

ภาพที่ 40



แสดงกราฟความสัมพันธ์ของความถี่ทางด้านอินพุตและศักดาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับทางด้านเข้าที่ทุกเปรียบเทียบกับจากที่ทดลองและทฤษฎี ซึ่งประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าของ V_o สามารถทำได้จากการคำนวณตามสมการที่(4.1)

$$V_o = \left[0.486 / \left(\frac{R_s}{R_b \cdot R_o \cdot C_o} \right) \right] \times Fin \text{ -----(4.1)}$$

ซึ่งค่าของ V_o มีหน่วยเป็น V/Hz เมื่อเราทราบค่าช่วงความถี่เราก็จะหาค่า V_o ได้โดยค่าของ V_o จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อมี $0.1 < V_o < 3.5$, $V_{cc} = 5$ V จากวงจรภาพที่ 39 และสมการที่ (4.1) สามารถพล็อตความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุต ของการปฏิบัติและทฤษฎีได้ในกราฟภาพที่ 40 ซึ่งจะเห็นว่าในช่วงเอาต์พุต 0 ถึง 3 โวลท์ วงจรตามภาพที่ 39 จะให้ค่าที่ถูกต้องและมีความเป็นเชิงเส้นมาก เหมาะที่จะนำไปใช้งานกับเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนที่มีพัลส์เอาต์พุตในช่วง 6 - 3,000 พัลส์ต่อนาที (0.1-50 pps)

จากการนำมาใช้ทดลองกับการวัดปริมาณน้ำฝนจริงในแบบ Tipping bucket ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 cm และกระบอกวัดน้ำมีปริมาตร 10 cc ฉะนั้นเราจะได้ว่า

$$1 \text{ พัลส์มีค่าน้ำฝน} = (\text{ปริมาณน้ำในกระบอก}) / (\text{ปริมาณน้ำในกรวยรับน้ำสูง 1 มม.}) \text{---(4.2)}$$

$$1 \text{ พัลส์ (จากตัวอย่างมีค่า 10 cc)} = \frac{10CC}{\pi(r^2 h)}$$

$$= \frac{(7)100 \text{ CC}}{22(10)^2(1)}$$

$$= 0.0318 \text{ มิลลิเมตร}$$

จากการปฏิบัติวงจร F to V สามารถให้ค่าการวัดต่ำสุดได้ 6 พัลส์ต่อนาที นั่นคือ 360 พัลส์ต่อชั่วโมง ดังนั้นจะหาค่าของน้ำฝนเป็นมิลลิเมตรต่อชั่วโมงได้ดังนี้คือ

$$\text{ค่าน้ำฝนเป็นมิลลิเมตรต่อชั่วโมง} = \text{ค่าน้ำฝนต่อพัลส์} \times \text{จำนวนพัลส์ใน 1 ชม.}$$

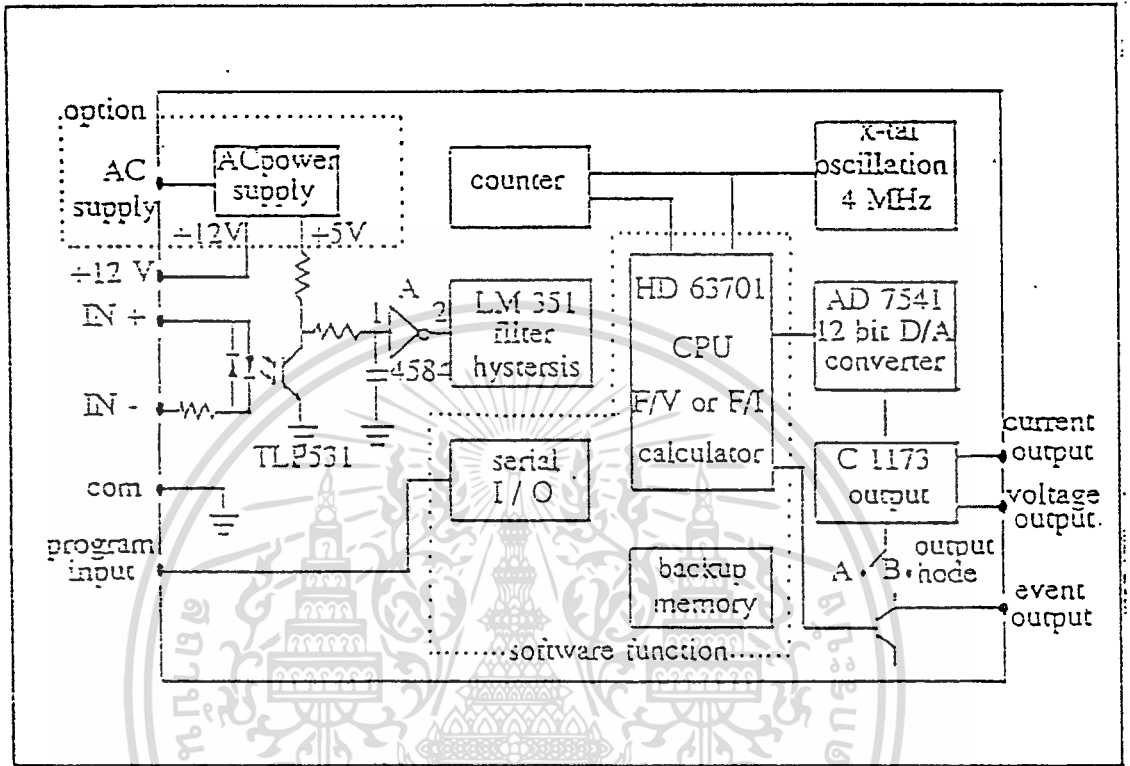
$$= 0.318 \times 360$$

$$= 11.45 \text{ มิลลิเมตร/ชั่วโมง}$$

จากตัวอย่างข้างต้นจะเห็นว่า ค่าของอัตราการตกของฝน 11.45 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงนั้นเป็นค่าที่หยาบพอสมควร ไม่สามารถให้ค่าที่ละเอียดกว่านี้ได้ จึงออกแบบวงจร F to V ที่เป็นแบบดิจิทัลเพื่อที่จะให้ค่าการวัดที่ละเอียดกว่านี้ได้ดังวงจรภาพที่ 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 41

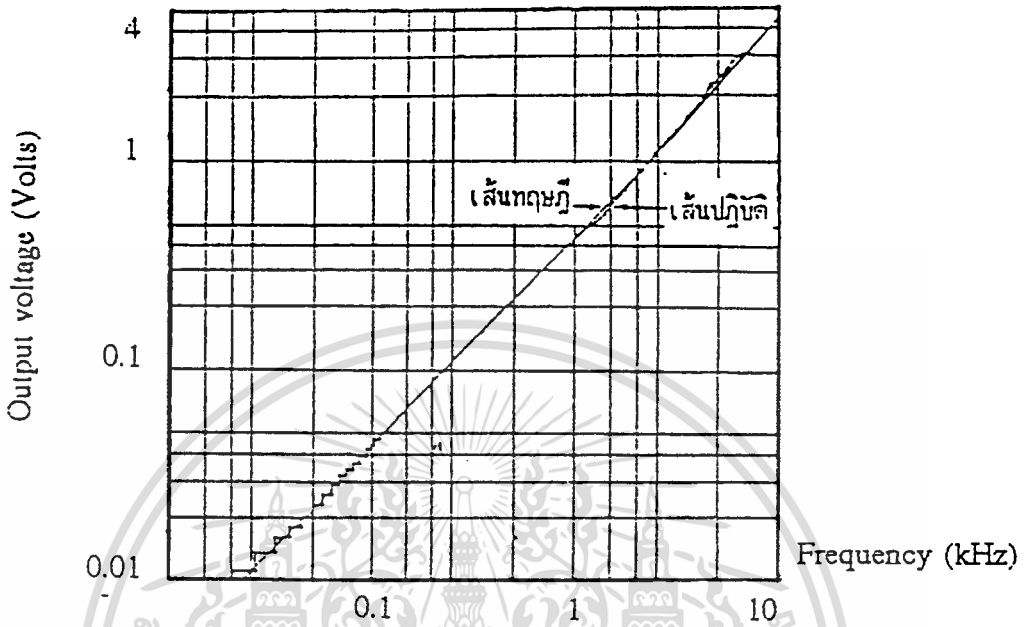


แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจร F to V แบบดิจิทัล
 ที่สามารถทำงานได้จนถึงความถี่ทางเข้าเป็นมิลลิวินาที

การทำงานของวงจรตามภาพที่ 41 เมื่อมีสัญญาณเข้ามาทางอินพุตที่สามารถเลือกได้ทั้งแบบพัลส์บวกและพัลส์ลบ จะผ่านวงจรคลัปปลิงด้วยแสงเพื่อแยกวงจรภายนอกออกจากการทำงานภายในเพื่อความเที่ยงตรง จากนั้นจะผ่านเข้าวงจรอิมพีแดนซ์แมตชิ่งเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน และประเมินความเร็วของพัลส์ขาเข้าด้วยวงจรมับสัญญาณ ซึ่งควบคุมด้วย CPU ของฮิตาชิ เบอร์ HD 63701 ที่ทำหน้าที่คาดการณ์การเกิดพัลส์ลุดต่อไปและจะส่งเอาท์พุทผ่านวงจร D to A ขนาด 12 บิต เพื่อให้ได้เอาท์พุทที่เที่ยงตรงซึ่งแสดงได้ดังกราฟภาพที่ 42 โดยจะให้ output voltage ก่อนข้างจะเป็นเชิงเส้นมากใกล้เคียงกับกราฟทางทฤษฎี สำหรับในกรณีที่พิจารณาที่ค่าความถี่ที่เข้ามามีค่าต่ำมาก ๆ จะทำให้กราฟเอาท์พุทมีการทำงานเป็นขั้นบันไดบ้าง แต่อย่างไรก็ดีค่าที่ได้จะมีการผิดพลาดที่น้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

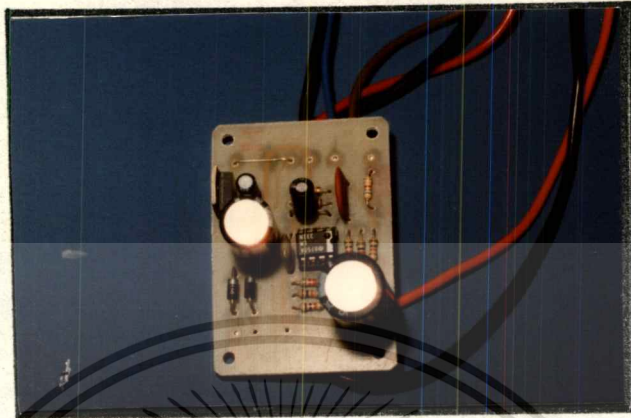
ภาพที่ 42



แสดงกราฟความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตของวงจร F to V แบบดิจิทัล

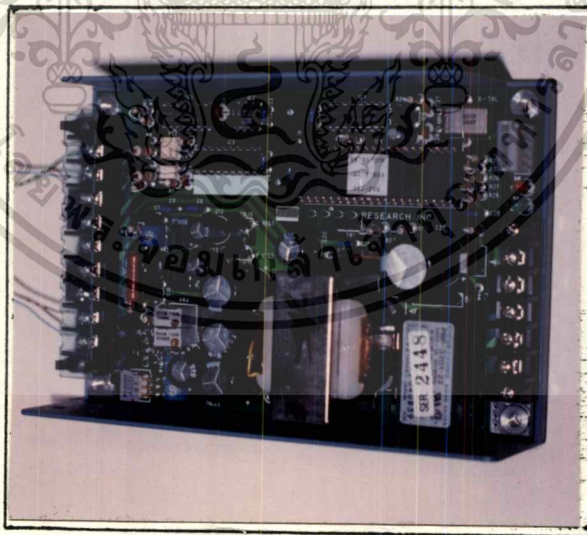
จากการออกแบบวงจร F to V ทั้งแบบอนาล็อก และแบบดิจิทัล จนได้ต้นแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้ซึ่งจะให้ output voltage เป็นสัดส่วนกับจำนวนของการตกของฟัน ดังแสดงต้นแบบวงจร F to V ไว้ดังภาพที่ 43 และ 44 โดยในภาพที่ 43 เป็นแบบอนาล็อกเหมาะสมกับเครื่องวัดน้ำฝนแบบ Tipping Bucket และในภาพที่ 44 นั้นเป็นแบบดิจิทัลซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับวงจรเซนเซอร์แบบใหม่ๆที่เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จากผลการทดลองสามารถให้การวัดที่ถูกต้องเที่ยงตรง นอกเหนือจาก input pulse และ output ที่ตอบสนองจะสามารถโปรแกรมได้แล้วนั้น วงจรนี้ยังสามารถเชื่อมโยงกับเครื่องบันทึกทางดิจิทัล หรือดาต้าล็อกเกอร์ชนิดอื่นๆได้ด้วย สัญญาณ TTL ใช้เป็นอินพุตให้กับตัวนับ (แสดงจำนวนการไหล) เพื่อที่จะทำการวัดอัตราการตกของฝนในแต่ละชั่วโมงหรือแต่ละนาที

ภาพที่ 43



แสดงต้นแบบวงจร F to V แบบอนาล็อก

ภาพที่ 44

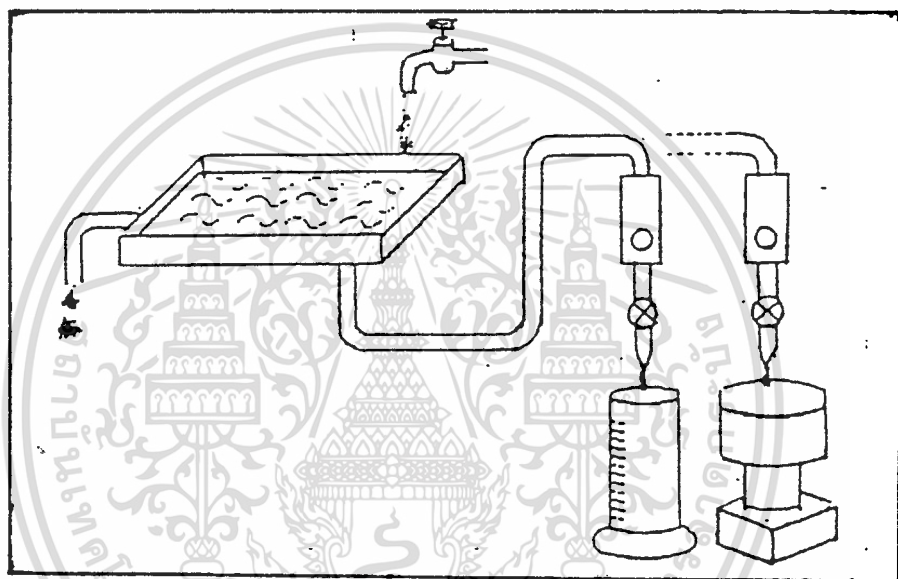


แสดงต้นแบบวงจร F to V แบบดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับแต่งเครื่องวัดน้ำฝนแบบใหม่ ภาพที่ 45 ได้แสดง diagram ของวิธีการปรับแต่งที่ใช้กับเครื่องมือวัดน้ำฝน ดันแบบแท็งก์น้ำเป็นวัสดุไวนิลเคลือบไม้มีขนาดความจุ $50 \times 100 \times 3.5 \text{ cm}^3$ จะได้รับการไหลของน้ำที่คงที่น้ำมีการจ่ายที่ต่อเนื่องจากถังน้ำฝน น้ำที่อยู่ในถังจะมีความดันคงที่สำหรับในส่วนของการ calibration ปริมาณน้ำที่ได้บรรจุไว้จะถูกจ่ายไปยังภาชนะทรงกระบอกที่

ภาพที่ 45



แสดงการทดลองและปรับเครื่องมือวัดให้ได้ค่าที่เที่ยงตรง

ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลซึ่งถูกควบคุมโดย horse valve และ needle valve เราได้ทำการปรับแต่งโดยการปล่อยน้ำลงสู่เครื่องมือวัดน้ำฝนในเวลา 1 นาที เพื่อบันทึกระดับน้ำที่วัดได้ด้วยเครื่อง Recorder หลังจากนั้นก็ทำการรองรับปริมาตรของน้ำที่สะสมอยู่นั้นการปรับแต่งเหมือนกระทำโดยการต่ออุปกรณ์ flow meter เข้าไประหว่างถังน้ำ และ needle valve แต่เราไม่ใช้วิธีการอันหลังนี้เพราะว่าใช้เวลานาน สำหรับตำแหน่งของกรวยรับน้ำฝนชนิดใหม่และเครื่องวัดน้ำฝนแบบ Tipping bucket ที่ทำการติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสมโดยอยู่ที่โล่งบนดาดฟ้าตึกโทรคมนาคมดังภาพที่ 46 ส่วนในภาพที่ 47 แสดงตัวอย่างข้อมูลน้ำฝนที่วัดได้โดยใช้เครื่องบันทึกการตกของฝนแบบใหม่ ซึ่งสามารถวัดค่าอัตราการตกของฝนได้อย่างต่อเนื่องตามเวลา

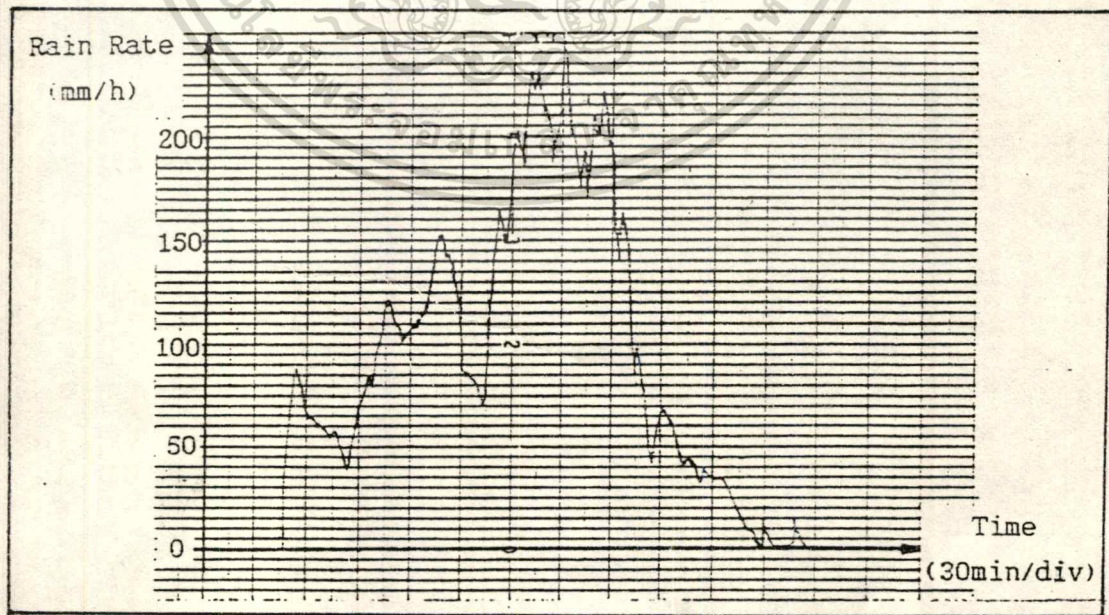
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 46



แสดงภาพถ่ายของเครื่องวัดน้ำฝนชนิดใหม่และเครื่องวัดน้ำฝนแบบ Tipping bucket ที่ทำการติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม

ภาพที่ 47



แสดงตัวอย่างของฝนที่ตกในกรุงเทพฯ โดยการใช่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ เครื่องบันทึกการตกของฝนแบบใหม่ของเราไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุป

สืบเนื่องจากลักษณะการตกของฝนในประเทศไทยนั้นมีการตกที่หนักและมักเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ อันจะเป็นผลให้สัญญาณถูกลดทอนลงอันเนื่องจากอัตราการตกของฝนสำหรับในปัจจุบัน ได้มีเครื่องมือวัดน้ำฝนแบบต่างๆ ได้ถูกนำมาใช้วัดการตกของฝนซึ่งได้ผลพอใช้โดยจะเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในพื้นที่ที่มีการตกของฝนเบาบาง ทั้งนี้เพราะว่าเครื่องวัดน้ำฝนโดยทั่วไปจะมีย่านการวัดที่แคบๆ เช่นวัดค่าอัตราการตกของฝนสูงสุดได้ที่ 230 mm/h ซึ่งยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับสภาพภูมิประเทศที่มีฝนตกหนักอย่างเช่นประเทศไทย โดยการตกของฝนในบางครั้งอาจมีค่าสูงถึง 500 mm/h ดังนั้นเราจึงได้พัฒนาเครื่องวัดอัตราการตกของฝนแบบใหม่ขึ้นซึ่งสามารถทำการวัดการตกของฝนได้ที่ 320 mm/h หรือมากกว่าในช่วงค่าความผิดพลาดที่ $\pm 1\%$ และสามารถใช้อัตราการตกของฝนที่มีการตกที่แรงชั่วขณะได้เช่นที่ 550 mm/h ผลของความเป็นเชิงเส้นเป็นที่น่าพอใจโดยใช้เวลาในการปรับแต่งที่สั้น ซึ่งเหมาะสมสำหรับทำการวัดการตกของฝนที่หนัก ในพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งจะช่วยในการวิเคราะห์การลดทอนที่มากเกินไปของการแพร่กระจายคลื่นขณะเกิดฝนตก

บทที่ 5

การทดลอง

การกำหนดรูปแบบการทดลอง

สำหรับในการศึกษาวิจัยถึงลักษณะการตกของฝนกับ ผลการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟที่เกิดขึ้นนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้การเก็บรวบรวมข้อมูลของอัตราการตกของฝนและการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 ปี เพราะว่าในช่วง 1 ปี ของประเทศไทย จะเกิดฤดูต่างๆ ครบทั้ง 3 ฤดู ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลที่ได้รวบรวมไว้นี้มาผ่านขบวนการ วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะตกของฝนกับการลดทอนที่เกิดขึ้นรวมทั้งหาความถี่หรือความบ่อยครั้งที่เกิดการลดทอนที่อัตราการตกของฝนค่าต่างๆเพื่อใช้เป็นแนวทางในการประกอบการตัดสินใจในการปรับกำลังส่งหรือรับเพื่อชดเชยกับการลดทอนของสัญญาณ ไมโครเวฟที่เกิดขึ้นเนื่องจากฝนในอนาคค

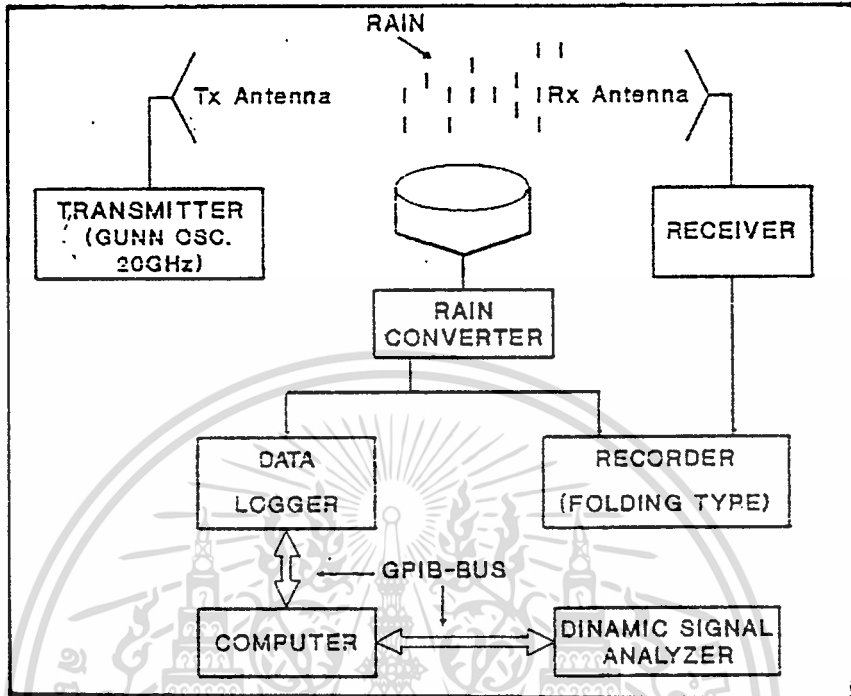
การเตรียมระบบบันทึกข้อมูล

ในส่วนของระบบการบันทึกข้อมูลนั้นการที่จะทำการบันทึกข้อมูลลักษณะการตกของฝนกับการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟได้อย่างดีและถูกต้องนั้นเราจำเป็นจะต้องมีระบบของการบันทึกข้อมูลที่ดีด้วยและจากการทดลองวิจัยนี้ได้แสดงระบบของการบันทึกข้อมูลของระดับสัญญาณไมโครเวฟและข้อมูลการตกของฝนไว้ดังภาพที่ 48

จากภาพที่ 48 สามารถอธิบายหลักการทำงานของระบบได้ดังนี้ สัญญาณไมโครเวฟที่ความถี่ 20 GHz ที่ผลิตจาก Gunn oscillator จะถูกส่งออกจากชุดสายอากาศส่ง ไปยังชุดสายอากาศรับในระดับสายคา เพื่อนำสัญญาณที่รับได้นี้มาทำการเปลี่ยนให้อยู่ในลักษณะของสัญญาณทางไฟฟ้าโดย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 48



แสดงระบบการบันทึกข้อมูลสัญญาณ ไมโครเวฟและการตกของฝน

ใช้อุปกรณ์ Power Sensor และ Power meter เพื่อนำระดับสัญญาณทางไฟฟ้าที่รับได้นี้ส่งเข้าไปเก็บบันทึกไว้ยังเครื่องบันทึกข้อมูลแบบต่อเนื่องตามเวลา โดยระบบของทางด้านส่งและรับสัญญาณไมโครเวฟนี้จะมีการทำงานตลอด 24 ชั่วโมง โดยเราจะมีระบบแหล่งจ่ายไฟสำรองไว้ด้วย เพื่อประโยชน์ในกรณีที่เกิดไฟฟ้าดับระบบก็ยังสามารถทำงานต่อไปได้อย่างปกติและในขณะที่เราทำการวัดระดับของสัญญาณไมโครเวฟอยู่นั้นเราก็จะทำการวัดข้อมูลการตกของฝน ณ.ที่อัตราการตกต่าง ๆ ในการตกของฝนแต่ละครั้ง โดยข้อมูลการตกของฝนจะถูกแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยชุดเครื่องวัดน้ำฝนชนิดความถี่เชิงตรงสูงทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าเกี่ยวกับอัตราการตกของฝนนี้ไปบันทึกไว้ยังเครื่อง Recorder ที่ Channel B พร้อมกับนำไปเก็บบันทึกไว้ยังเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ด้วย โดยผ่านทางเครื่อง Data Logger ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูลการตกของฝนนี้มาทำการวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ FFT (Fast Fourier Transform) จากเครื่องไดนามิกส์จิกเนลนาไลเซอร์ เพื่อนำผลที่ได้นี้มาหาความสัมพันธ์กับการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟที่เกิดขึ้นอีกทีหนึ่ง เพื่อเก็บผลอันนี้ไว้เป็นฐานข้อมูลในการที่จะใช้ในการคาดการณ์หรือการพยากรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

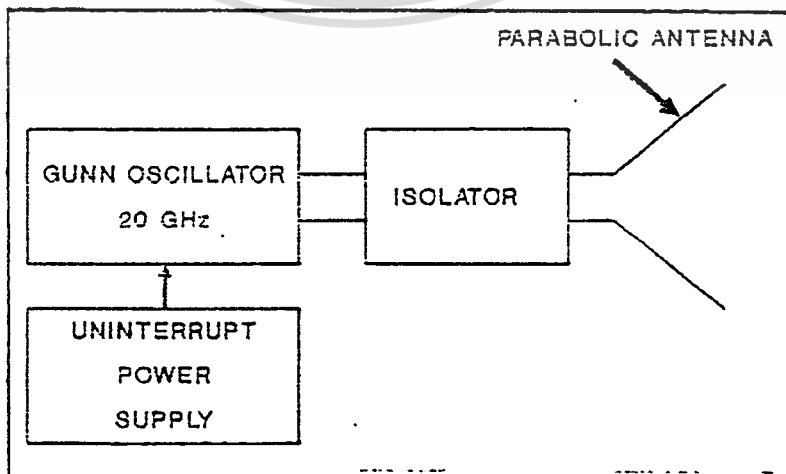
เกี่ยวกับการลดทอนของสัญญาณที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เพื่อให้การชดเชยกำลังส่ง/รับสัญญาณเป็นไปได้อย่างรวดเร็วมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

การออกแบบสร้างชุดเครื่องส่ง-รับ สัญญาณไมโครเวฟ

ในการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการตกของฝนกับการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟนั้น เพื่อให้การทดลองดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพเราจึงได้สร้างเครื่องส่งกับเครื่องรับสัญญาณไมโครเวฟขึ้น โดยใช้ความถี่ที่ส่ง 20 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่คาดว่าจะถูกนำมาใช้ในอนาคต ซึ่งชุดเครื่องส่งสัญญาณไมโครเวฟนี้ได้สร้างและติดตั้งไว้ที่ศาลฟ้าของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า โดยทำการส่งสัญญาณแคเรียร์ที่ความถี่ 20 GHz อย่างต่อเนื่องโดยสัญญาณไมโครเวฟที่ผลิตจาก Gunn oscillator จะถูกส่งเข้ามายังงานสายอากาศแบบพาราโบลา เพื่อบังคับบีมของสัญญาณไมโครเวฟไปยังชุดเครื่องรับสัญญาณไมโครเวฟ ซึ่งได้ทำการติดตั้งไว้ที่ตึกภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม เพื่อนำข้อมูลระดับสัญญาณไมโครเวฟนี้ไปบันทึกไว้ในเครื่อง Recorder เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำฝนต่อไป

สำหรับวงจรชุดเครื่องส่งสัญญาณไมโครเวฟ ที่ได้ติดตั้งที่ศาลฟ้าตึกวิศวกรรมไฟฟ้านั้น แสดงได้ดังภาพที่ 49 ซึ่งชุดเครื่องส่งนี้จะนำแหล่งจ่ายไฟ 220 Vac มาใช้ในสภาวะปกติและถ้าเกิด

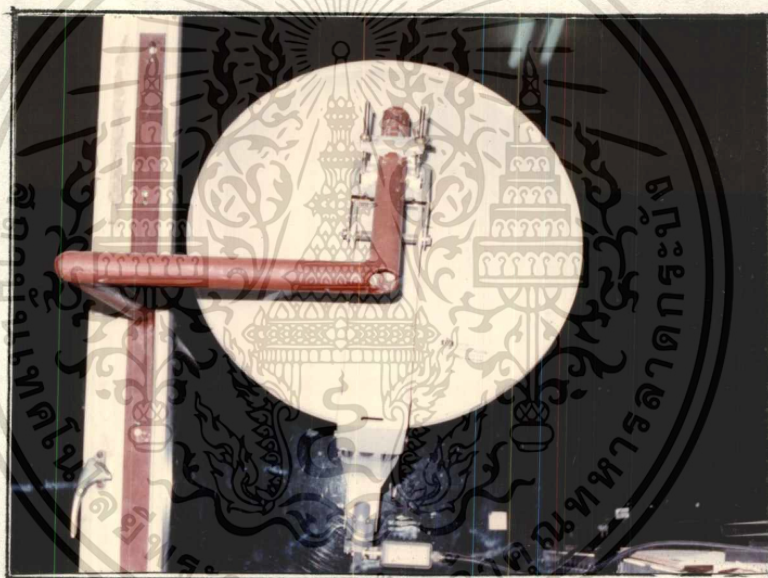
ภาพที่ 49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุการณ์ไฟฟ้าดับก็จะใช้แหล่งจ่ายไฟสำรองจากแบตเตอรี่แทน เพื่อให้การส่งสัญญาณไมโครเวฟเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง โดยชุดอุปกรณ์ Gunn osc. ต้องการแหล่งจ่ายไฟขนาด 7.5 Vdc ในการกำเนิดความถี่ 20 GHz ในย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งคลื่นไมโครเวฟนี้จะถูกส่งผ่านท่อนำคลื่น (wave guide) มาเข้าไอโซเลเตอร์เพื่อบังคับทิศทางของคลื่นให้ไปในทิศทางเดียว ซึ่งในที่นี้ได้บังคับให้คลื่นเดินทางไปยังจานสายอากาศแบบพาราโบลาเพื่อส่งออกอากาศต่อไปดังแสดงรูปถ่ายของชุดเครื่องส่งสัญญาณไมโครเวฟและชุดแหล่งจ่ายไฟสำรองของเครื่องส่งสัญญาณไมโครเวฟ ที่ได้ติดตั้งไว้ที่ศาลฟ้าตึกภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าดังในภาพที่ 50 และ 51 ตามลำดับ

ภาพที่ 50



แสดงภาพถ่ายการติดตั้งชุดเครื่องส่งสัญญาณไมโครเวฟ

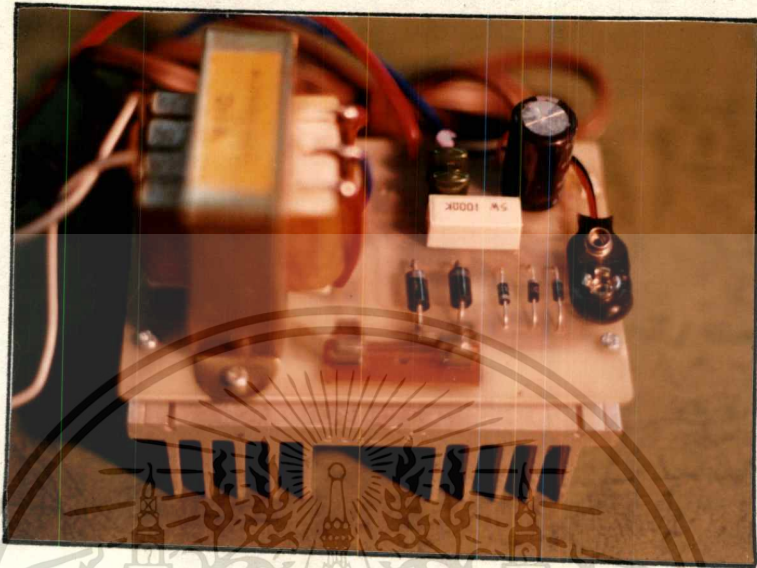
จากนั้นสัญญาณไมโครเวฟย่านความถี่ 20 GHz ก็จะถูกส่งตรงมายังชุดเครื่องรับสัญญาณไมโครเวฟ ซึ่งได้ออกแบบติดตั้งไว้ที่บริเวณชั้น 2 ของตึกภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมโดยได้แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในชุดเครื่องรับสัญญาณไมโครเวฟไว้ดังภาพที่ 52

สัญญาณไมโครเวฟย่านความถี่ 20 GHz จะถูกส่งผ่านอากาศมาเข้าจานสายอากาศแบบพาราโบลา เพื่อส่งเข้าไปยังอุปกรณ์ Power Sensor เพื่อปรับเปลี่ยนระดับความแรงของสัญญาณไมโครเวฟให้เป็นระดับความแรงของสัญญาณไฟฟ้า เพื่อนำไปเป็นอินพุทของเครื่องมือวัด Power meter และนำระดับความแรงของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากทาง output ของเครื่อง power meter นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้

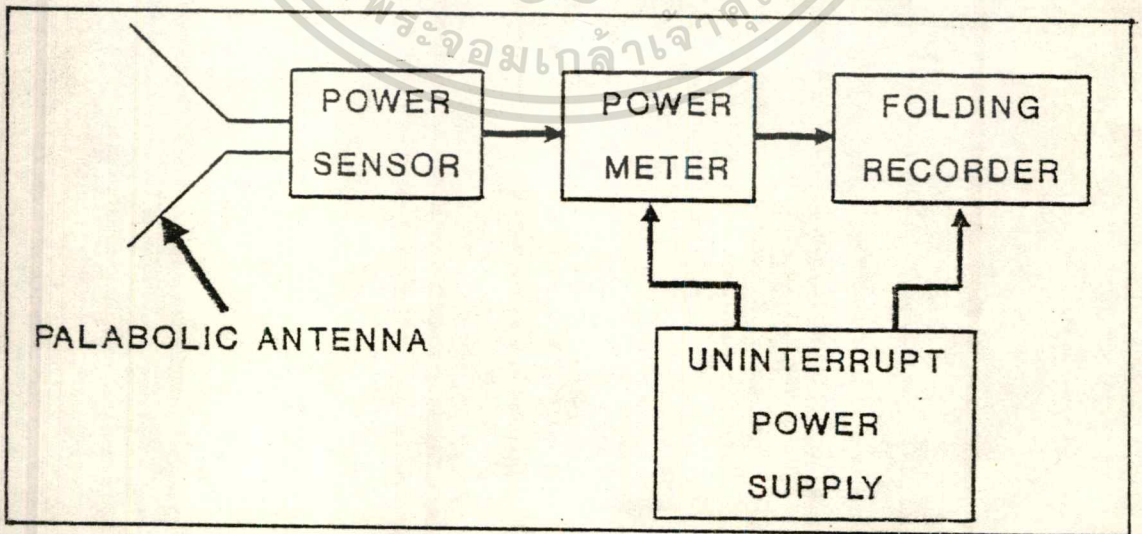
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 51



แสดงภาพถ่ายการติดตั้งชุดแหล่งจ่ายไฟสำรองของเครื่องส่งสัญญาณไมโครเวฟ

ภาพที่ 52

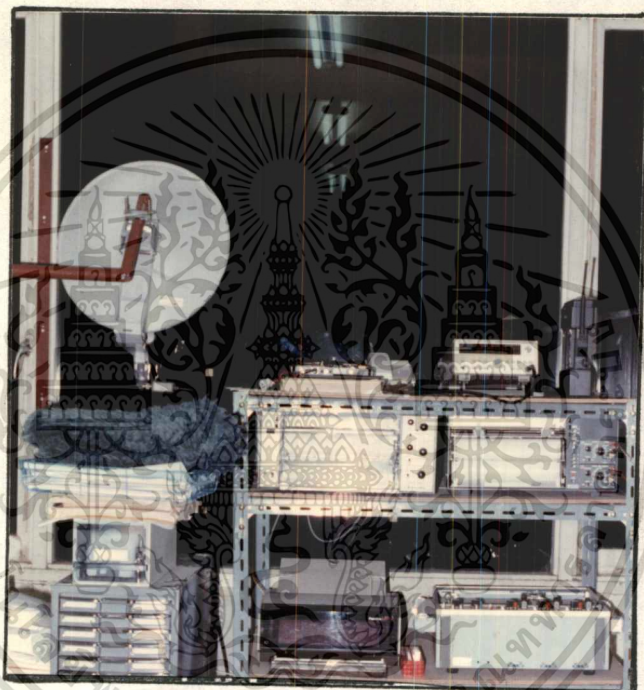


แสดงบล็อกโคอะแกรมของระบบชุดเครื่องรับสัญญาณไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปบันทึกระดับความแรงของสัญญาณด้วยเครื่อง Recorder แบบต่อเนื่องตามเวลาเพื่อนำผลที่ได้ลัพท์นี้มาใช้วิเคราะห์ร่วมกับลักษณะการตกของฝนต่อไป นอกจากนี้ระบบชุดเครื่องรับสัญญาณไมโครเวฟนี้ ยังมีระบบแหล่งจ่ายไฟอย่างต่อเนื่องจ่ายให้ด้วยเพื่อให้ระบบยังสามารถดำเนินต่อไปได้แม้ว่าไฟฟ้าจะดับก็ตาม ซึ่งภาพการติดตั้งของระบบชุดเครื่องรับสัญญาณไมโครเวฟได้แสดงไว้ดังภาพที่ 53

ภาพที่ 53



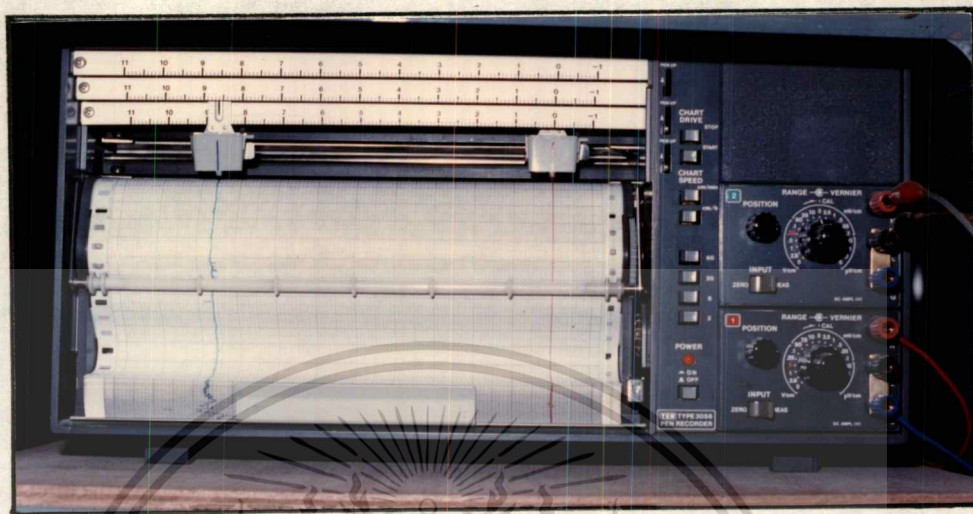
แสดงภาพถ่ายเครื่องมือวัดที่ได้ติดตั้งไว้ เพื่อใช้วัดระดับสัญญาณ ไมโครเวฟ

การทดลองและวิธีการทดลอง

จากการทดลองวัดระดับของการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟ ที่เกิดขึ้นในขณะที่ฝนตกนั้น เราได้เก็บบันทึกข้อมูลของระดับสัญญาณไมโครเวฟไว้ยังเครื่อง Recorder แบบต่อเนื่องตามเวลา ดังแสดงในภาพที่ 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 54



แสดงเครื่อง Recorder ที่ใช้บันทึกข้อมูลระดับสัญญาณไมโครเวฟ

จากภาพที่ 54 นั้น เราใช้เครื่อง Recorder ของบริษัท Yokogawa Type 3046 ทำการบันทึกข้อมูลของระดับสัญญาณไมโครเวฟในแชนแนลที่ 1 ส่วนในแชนแนลที่ 2 จะถูกนำมาใช้ในการบันทึกข้อมูลลักษณะการตกของฝน เพื่อนำข้อมูลทั้งสองนี้มาสร้างกราฟหาความสัมพันธ์กันระหว่างค่าอัตราการตกของฝนกับค่าระดับการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟพร้อมก็นำมาเปรียบเทียบกับกราฟที่สร้างขึ้นจากสูตร $A = aR^b$ ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้หาค่าการลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากอัตราการตกของฝน และในการทดลองการส่งคลื่นไมโครเวฟเราได้ใช้ที่ย่านความถี่ 20 GHz ดังนั้นจากสูตรที่ใช้จึงมีค่าคงที่ a และ b (ที่อุณหภูมิ $0^{\circ}C$) ดังนี้

จากสูตร $A = aR^b$ dB/km -----(5.1)

เมื่อ A = การลดทอนของสัญญาณ มีหน่วยเป็น dB/km

R = อัตราการตกของฝน มีหน่วยเป็น mm/h

a, b = ค่าคงที่

โดยที่

$a = Ga f^{Ea}$ (f มีหน่วยเป็น GHz) -----(5.2)

จากเงื่อนไข

$Ga = 4.21 \times 10^{-5}$, $Ea = 2.42$ $2.9GHz \leq f \leq 54GHz$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a = (4.21 \times 10^{-5}) \times (20)^{2.42}$$

$$a = 0.06$$

และ $b = Gb f^{Eb}$ (f มีหน่วยเป็น GHz)----- (5.3)

จากเงื่อนไข

$$Gb = 141, \quad Eb = -0.0779 \quad 8.5 \text{GHz} \leq f \leq 25 \text{GHz}$$

แทนค่า Gb และ Eb ในสมการ (5.3)

$$b = (1.41) \times (20)^{-0.0779}$$

$$b = 1.1165$$

จากนั้นจึงนำค่าคงที่ a และ b ที่หาได้นำไปแทนค่าในสมการ (5.1) เพื่อหาค่าการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟในย่านความถี่ 20 GHz ที่อัตราการตกของฝนค่าต่างๆ

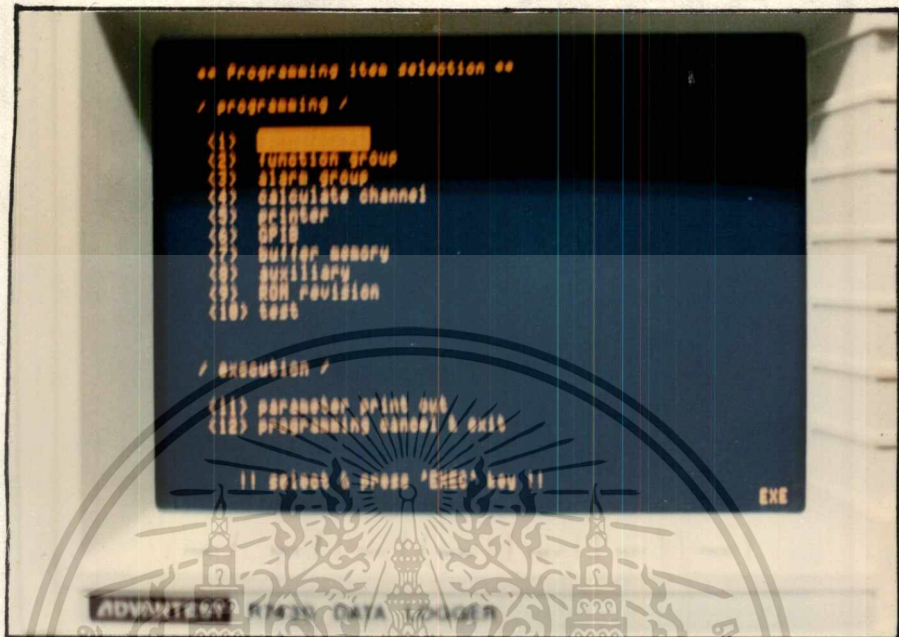
ดังนั้น $A = 0.06 R^{1.1165} \quad \text{dB / km}$ ----- (5.4)

จากสมการ(5.4) นั้นค่าการลดทอนของสัญญาณจะมีหน่วยเป็นเดซิเบลต่อระยะทาง 1 กิโลเมตร และเนื่องจากชุดเครื่องส่งและเครื่องรับของสัญญาณไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองนี้มีระยะห่างกันประมาณ 250 เมตร ซึ่งมีหน่วยเป็น (dB/0.25km) ดังนั้นต้องทำการแปลงให้เป็นหน่วยเดียวกันก่อน(dB/km)ก่อนที่จะนำข้อมูลไปพล็อตกราฟ ซึ่งเมื่อถึงขั้นตอนนี้เราก็จะได้กราฟแสดงการลดทอน (dB/Km) ของสัญญาณไมโครเวฟในย่านความถี่ 20 GHz ที่มีผลกระทบอันเนื่องจากการตกของฝน ณ.ที่อัตราการตกต่างๆ นอกจากนี้แล้วเรายังต้องการทราบว่าการตกของฝนแต่ละครั้ง แต่ละเดือนหรือใน 1ปี ว่ามันประกอบด้วยอัตราการตกของฝนค่าต่างๆโดยเกิดขึ้นกี่ครั้ง หรือมีเปอร์เซ็นต์เท่าใดของอัตราการตกของฝนแต่ละครั้ง หรือในช่วง 1 เดือน หรือ 1ปี ด้วยการนำข้อมูลนำฝนแบบต่อเนื่องตามเวลา ซึ่งอยู่ในมิติของเวลา (Time domain) มาแปลงให้อยู่ในมิติของความถี่ (frequency domain) ด้วยการใชฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ (Fast Fourier Transform : FFT)ช่วยในการวิเคราะห์

วิธีการทดลองนำข้อมูลอัตราการตกของฝนแบบต่อเนื่องมาทำการวิเคราะห์ตามแนวคิดใหม่ที่ได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆดังนี้

1.1 หลักการบันทึกข้อมูลปริมาณน้ำฝนสู่เครื่อง Data Logger ข้อมูลน้ำฝนแบบต่อเนื่องตามเวลา ที่ได้จากเครื่องวัดน้ำฝนชนิดความเที่ยงตรงสูง จะถูกส่งเข้ามายังเครื่อง Data Logger ซึ่งเราสามารถทำการโปรแกรมเพื่อกำหนดรูปแบบการวัด ข้อมูลได้โดยตรงที่จอภาพของเครื่อง Data Logger โดยมีฟังก์ชันหลักดังภาพที่ 55

ภาพที่ 55



แสดงฟังก์ชันหลักของเครื่อง Data Logger

ภาพที่ 56

*** 57430 DATA LOGGER ***

	[00011]	.01533 V
'93/08/04	CH]	
	CH]	
21:48:34	CH]	
	CH]	
	CH]	
	CH]	
[00026]	CH]	
[01025]	CH]	
0 00053 06	CH]	

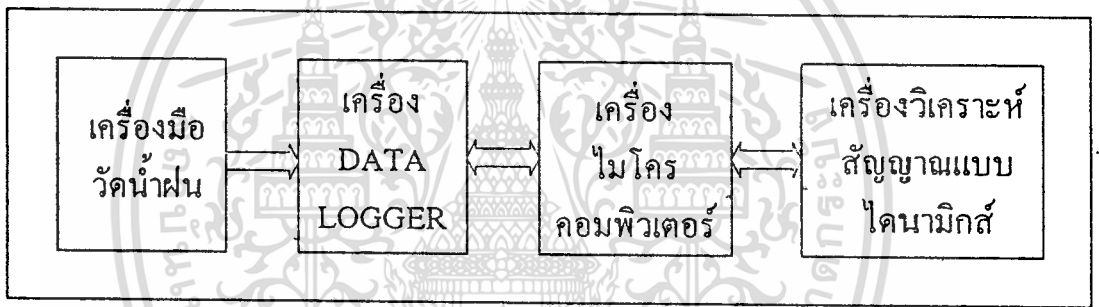
แสดงโหมดการวัดที่จอภาพของเครื่อง Data Logger

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อเราทำการกำหนดรูปแบบการวัดเสร็จแล้ว ก็สามารถที่จะปฏิบัติการวัดข้อมูลได้เลย โดยเข้าสู่โหมดการวัดมีรูปแบบที่จอภาพดังภาพที่ 56 ซึ่งข้อมูลที่ทำการวัดถูกส่งเข้ามาเก็บไว้ยัง Data Buffer Memory โดยสามารถเรียกข้อมูลเก่าออกมาแสดงผลในรูปแบบของค่าตัวเลข หรือแบบกราฟได้และเนื่องจากขนาดหน่วยความจำของ Data Buffer Memory มีไม่มากนัก (ขนาด 22790 ข้อมูลที่การสแกน/แซนแนล)

ดังนั้น เราจึงได้นำข้อมูลที่ได้จากเครื่อง Data Logger นี้เข้าไปเก็บไว้ยังหน่วยความจำ Hard Disk ของเครื่องคอมพิวเตอร์โดยผ่าน HP-IB bus (ตรงตามมาตรฐาน IEEE 488.8) ซึ่งแสดงรูปแบบของการต่อเชื่อมของระบบทั้งหมดไว้ ดังภาพที่ 57

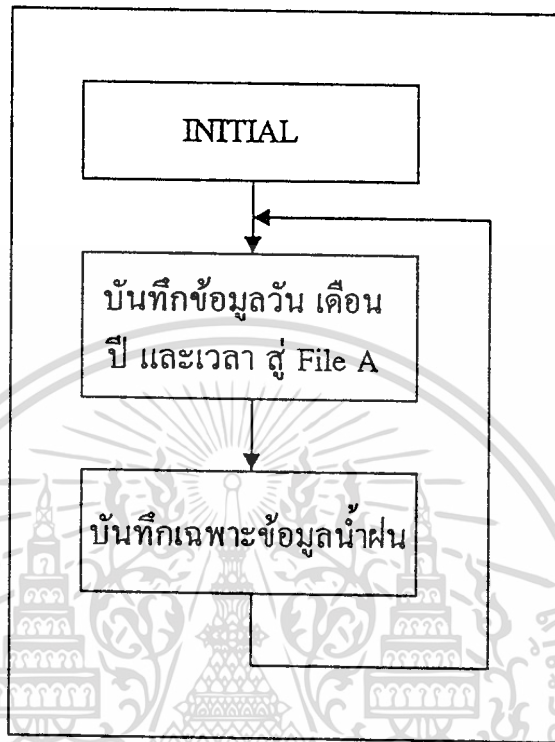
ภาพที่ 57



แสดงการต่อเชื่อมส่วนต่าง ๆ ของระบบเข้าด้วยกัน

การที่จะนำข้อมูลที่อยู่ในเครื่อง Data Logger ออกมาเก็บไว้ใน Hard Disk ของเครื่องคอมพิวเตอร์นั้นจะมีส่วนเชื่อมต่อระหว่างเครื่อง Data Logger กับเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้ HP-IB Interface Card ทำหน้าที่เป็นส่วนเชื่อมต่อสำหรับลำดับขั้นตอนการบันทึกข้อมูลจากเครื่อง Data Logger ลงสู่ Hard Disk ของคอมพิวเตอร์นั้นแสดงไว้ดังโพล์ชาร์ต ภาพที่ 58

ภาพที่ 58



แสดงโฟลว์ชาร์ตขั้นตอนการบันทึกข้อมูลสู่เครื่องคอมพิวเตอร์

สำหรับภาพที่ 58 สามารถอธิบายลำดับขั้นการทำงานได้ดังนี้เริ่มต้นด้วยการ Initial อุปกรณ์ที่ต่ออยู่จากนั้นทำการอ้างแอดเดรสของเครื่อง Data Logger เพื่อรับข้อมูลเข้า สู่ Hard Disk ไว้ใน File A และ File B ตามลำดับ โดยใน File A จะบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับข้อมูลน้ำฝน วัน เดือนปี และเวลา เพื่อจุดประสงค์สำหรับดูวันเวลาของการเกิดฝนตก ส่วน File B จะบันทึกเฉพาะข้อมูลน้ำฝนเพียงอย่างเดียว เพื่อจุดประสงค์ในการนำข้อมูลที่ต้องการออกไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์ต่อไป

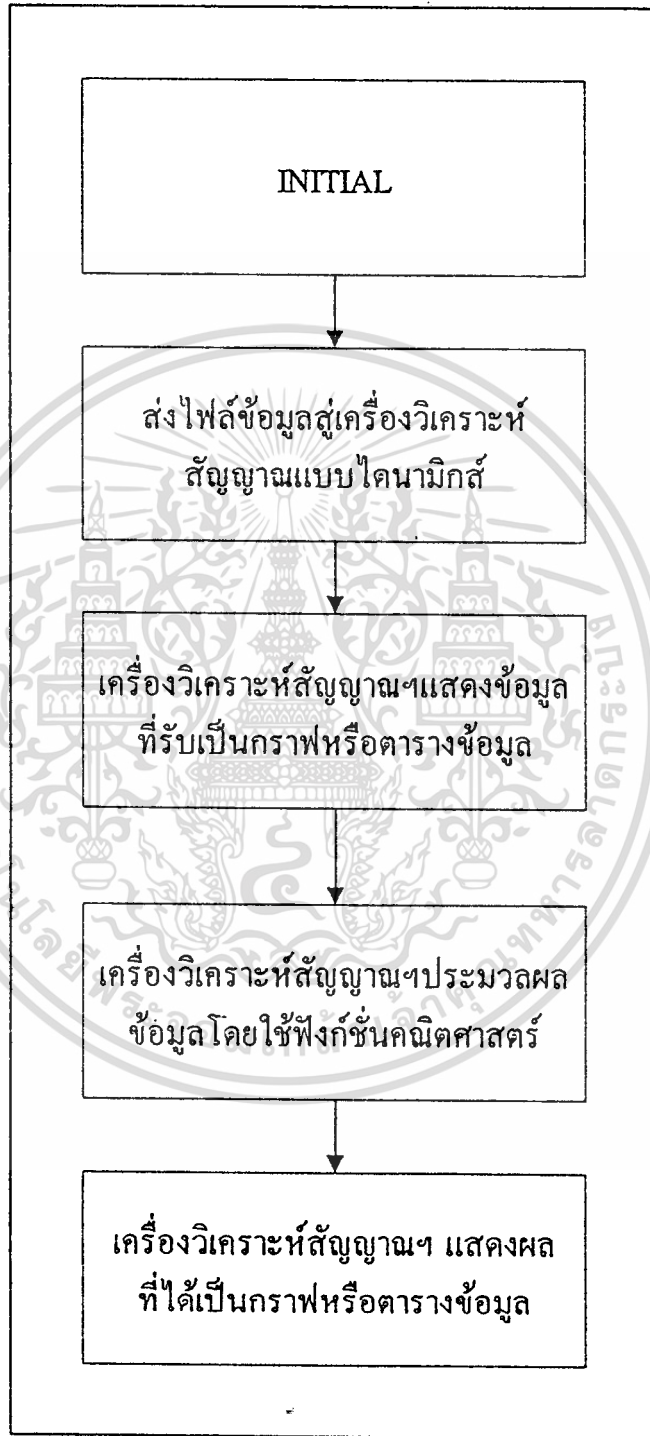
1.2 หลักการนำข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์สู่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์

สำหรับการติดต่อกันระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ กับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์นั้นจะใช้ HP-IB Interface Card เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อ (โดยผ่านทาง Hp-IB bus) โดยมีลำดับขั้นตอนการส่งผ่านข้อมูล ซึ่งแสดงได้ดังโฟลว์ชาร์ตในภาพที่ 59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 59



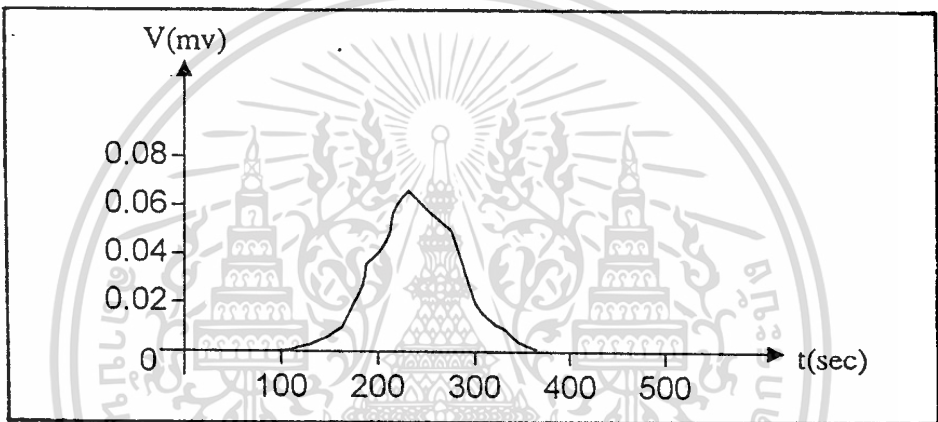
แสดงไฟล์ชาร์ตขั้นตอนการส่งข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์

สู่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโฟลว์ชาร์ตในภาพที่ 59 อธิบายลำดับขั้นการทำงานได้ดังนี้ เริ่มต้นด้วยการ Initial อุปกรณ์ที่ต่ออยู่จากนั้นจึงทำการส่งไฟล์ข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบรหัส ASCII เข้าสู่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์ซึ่งข้อมูลที่ปรากฏที่บนจอเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์สามารถแสดงออกมาในรูปแบบของกราฟข้อมูลน้ำฝนที่ต่อเนื่องตามเวลาหรือแสดงเป็นตารางข้อมูลซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 60 และ 61 ตามลำดับ

ภาพที่ 60



แสดงลักษณะของข้อมูลน้ำฝนที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์

ตารางที่ 8

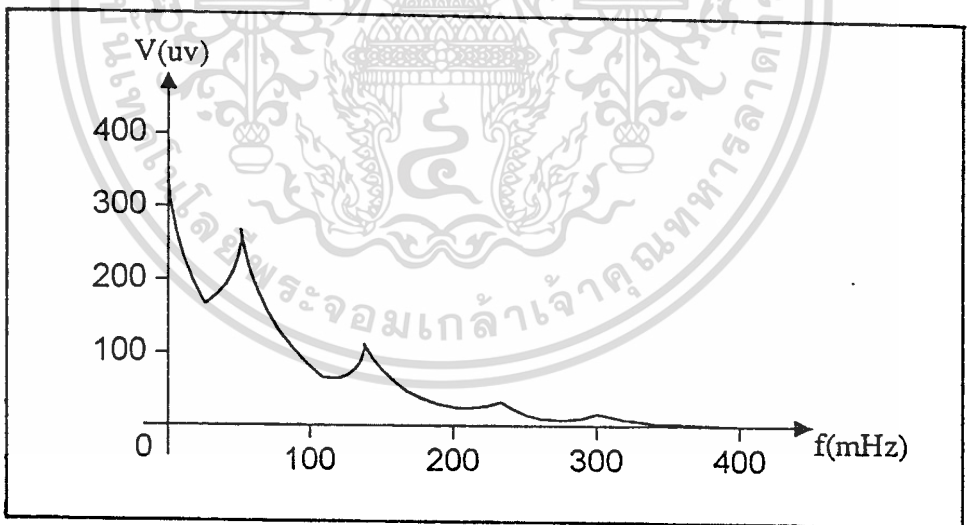
แสดงลักษณะของตารางข้อมูลน้ำฝนที่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์

SEG	X	Y
1	80	0.0000
2	81	0.0010
3	82	0.0015
4	83	0.0020
5	84	0.0025
⋮	⋮	⋮

สำหรับภาพที่ 60 นั้นแสดงข้อมูลน้ำฝนที่นำข้อมูลออกมาจากหน่วยเก็บความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งได้ทำการบันทึกข้อมูลการตกของฝนเอาไว้ด้วยค่าการสุ่มตัวอย่างทุกๆช่วงเวลา 0.5 วินาที ($f_s=2\text{Hz}$) เป็นจำนวน 1024 ข้อมูล โดยแกนแนวดิ่ง (Amplitude) ที่บอกอัตราการตกของฝนจะมีอัตราส่วน 50 :1จากระดับความสูงที่เครื่อง Recorder ทำการบันทึกได้โดยที่ระดับสูงสุดของสเกลแกนตั้งที่ 0.08 mV จะแทนค่าอัตราการตกของฝนที่ 400 mm/h ซึ่งเราสามารถเลือกดูระดับของอัตราการตกของฝนที่เวลาใดๆได้ดังตารางที่ 6 ตั้งแต่เวลา t_0 ถึง $t_{11.5}$

จากนั้น จึงเข้าสู่ขบวนการในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยนำข้อมูลที่ได้นี้มาผ่านฟังก์ชัน FFT (Fast Fourier Transform) เพื่อทำการแปลงข้อมูลของน้ำฝนที่มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาให้เป็นข้อมูลน้ำฝนที่ทราบถึงความถี่หรือความบ่อยครั้งของการเกิดฝนที่อัตราการตกต่างๆดังเช่น ภาพที่ 61 ซึ่งจะเห็นว่าในแนวแกนตั้งและแกนนอน ยังคงเป็นค่าระดับแรงดันไฟฟ้าและค่าของความถี่ ตามลำดับ ดังนั้นเพื่อให้สะดวก

ภาพที่ 61



แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำฝนด้วยเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์

ในการวิเคราะห์จึงทำการแปลงค่าของแนวแกนตั้งให้เป็นค่าอัตราการตกของของฝนและแปลงค่าของแนวแกนนอนให้เป็นค่าของจำนวนครั้งที่เกิดขึ้นดังแสดงการแปลงค่าในแนวตั้งด้วย

(398.625 Hz) มาหาจำนวนครั้งที่เกิดขึ้นค่าสูงสุดในช่วงระยะเวลา 512 วินาที ดังนี้

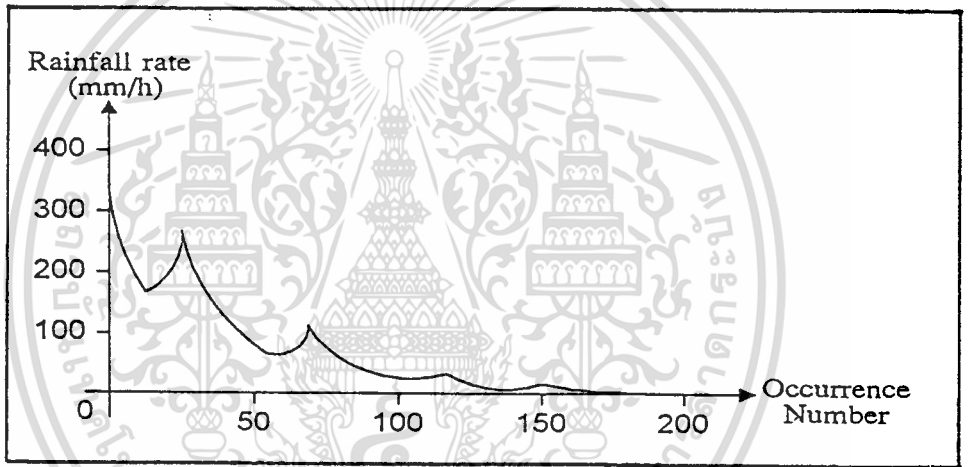
$$390.625 \times 10^3 \text{ Hz} = 0.390625 \text{ ครั้ง/วินาที}$$

$$\text{ดังนั้นที่ระยะเวลา 512 วินาที} = 0.390625 \times 512 \text{ ครั้ง/วินาที}$$

$$= 200 \text{ ครั้งในช่วงระยะเวลา 512 วินาที}$$

และเมื่อทำการแปลงเสร็จเราสามารถทำการเขียน scale เสียใหม่ได้ดังภาพที่ 62

ภาพที่ 62



แสดงผลการแปลงกราฟน้ำฝนเพื่อวิเคราะห์ถึงความบ่อยครั้งที่เกิดขึ้น
ที่อัตราการตกของฝนค่าต่างๆ ในการตกของฝน 1 ครั้ง

จากภาพที่ 62 เป็นลักษณะกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้หลักการแปลงข้อมูลน้ำฝนที่มีค่าของอัตราการตกของฝนที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาให้เป็นค่าอัตราการตกของฝนที่เราสามารถทราบได้ว่าได้เกิดขึ้นบ่อยครั้งเพียงใดในการตกของฝนครั้งนั้นๆ นอกจากนี้ยังแปลงให้เป็นลักษณะตารางข้อมูลดังเช่นในตารางที่ 7

ตารางที่ 7

แสดงจำนวนครั้งที่เกิดขึ้น (Occurrence Number) ของอัตราการตกของฝนค่าต่าง

Rainfall rate (mm/h)	Occurrence Number
1	175
2	170
3	170
⋮	⋮
400	0

จากตารางที่ 7 ได้แสดงตารางข้อมูลของอัตราการเกิดฝนตก ที่อัตราการตกต่างๆว่ามีจำนวนครั้งที่เกิดการเกิดมากน้อยเท่าใดในการเกิดฝนตกหนึ่งครั้ง และสำหรับแนวทางในการวิเคราะห์ถึงลักษณะการเกิดฝนตก เช่นในช่วงระยะเวลา 1 เดือน 1 ปี หรือหลายปี ว่าได้เกิดการตกของฝนที่อัตราการตกต่างๆมีความบ่อยครั้งเท่าใดบ้าง ซึ่งเราสามารถกระทำได้ด้วย การนำข้อมูลจำนวนครั้งที่เกิด (Occurrence Number) ที่อัตราการตกของฝนค่านั้นมารวมกันเช่น ในช่วงระยะเวลา 1 ปี ได้เกิดฝนตกทั้งสิ้นทั้งหมด 60 ครั้ง และเมื่อทำการแปลงข้อมูลน้ำฝนเพื่อหาค่า Occurrence Number ซึ่งจะได้ตารางข้อมูลจำนวน 60 ตาราง จากนั้นจึงทำการรวมค่าที่ค่า Rain rate เดียวกันเข้าด้วยกัน ซึ่งเราจะได้ค่า Occurrence Number ในช่วงระยะเวลา 1ปี ณ.ที่ Rain rate ต่างๆและเพื่อให้ง่ายในการพิจารณา เราจึงใส่ข้อมูลของการลดทอนของการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟที่ค่า Rain rate ต่างๆดังตัวอย่างตารางที่ 8

ตารางที่ 8

แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำฝนในช่วงระยะเวลา 1 ปี

Rainfall rate (mm/h)	Attenuation (dB/km)	Occurrence Number
1	0.06	1500
200	22.24	600
400	48.23	30

จากตารางที่ 8 แสดงตัวอย่างค่าของอัตราการตกของฝนค่าต่างๆที่เกิดจากการลดทอนขึ้นและความบ่อยครั้งที่เกิดขึ้นในช่วง 1 ปี เช่นที่อัตราการตกของฝน 400 mm/h ได้เกิดการลดทอนของสัญญาณไป 48 dB/km และเกิดการลดทอนของสัญญาณไปทั้งสิ้น 30 ครั้งหรือ ช่วงระยะเวลา 1.28 นาทีใน 1 ปี เป็นต้น ดังนั้นเมื่อเราทราบระยะห่างของสถานีรับส่ง ซึ่งจะทำให้สามารถคาดการณ์ได้ว่า จะเกิดการลดทอนไปเท่าใดเพื่อที่จะดำเนินการชดเชยกำลังเพื่อไว้อย่างเหมาะสม

สรุป

ในการออกแบบระบบการบันทึกระดับสัญญาณไมโครเวฟกับลักษณะการตกของที่มีผลกระทบต่ออาร์ส่วงคลื่นนั้น ผลที่ได้รับอยู่ในเกณฑ์ดี เพราะสามารถนำข้อมูลของอัตราการตกของฝน และระดับการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟ มาหาความสัมพันธ์กันได้รวมทั้งการนำข้อมูลน้ำฝนมาวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน FFT ที่บอกถึงรายละเอียด ว่าได้เกิดค่าอัตราการตกต่างๆมากน้อยเท่าใด ในแต่ละครั้งสำหรับอุปสรรคที่พบคือปัญหาการรับข้อมูลที่จำกัดของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบไดนามิกส์ โดยจะรับข้อมูลสูงสุดในแต่ละครั้งเท่ากับ 1024 ข้อมูลซึ่งจะทำให้เสียเวลาในการนำข้อมูลน้ำฝนทั้งหมดมาวิเคราะห์ครั้งละ 1024 ข้อมูล แล้วจึงนำข้อมูลแต่ละชุดมารวมกันอีกครั้งและถ้าได้รวบรวมข้อมูลไว้ทั้งหมด 1 ปี หรือ 2 ปี ก็จะสามารถใช้ทำการพยากรณ์ได้ว่าในเดือนหน้าหรือปีหน้าจะเกิดการลดทอนมากขึ้นหรือน้อยลงกว่าในปัจจุบันเพื่อจะได้หาทางชดเชยต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

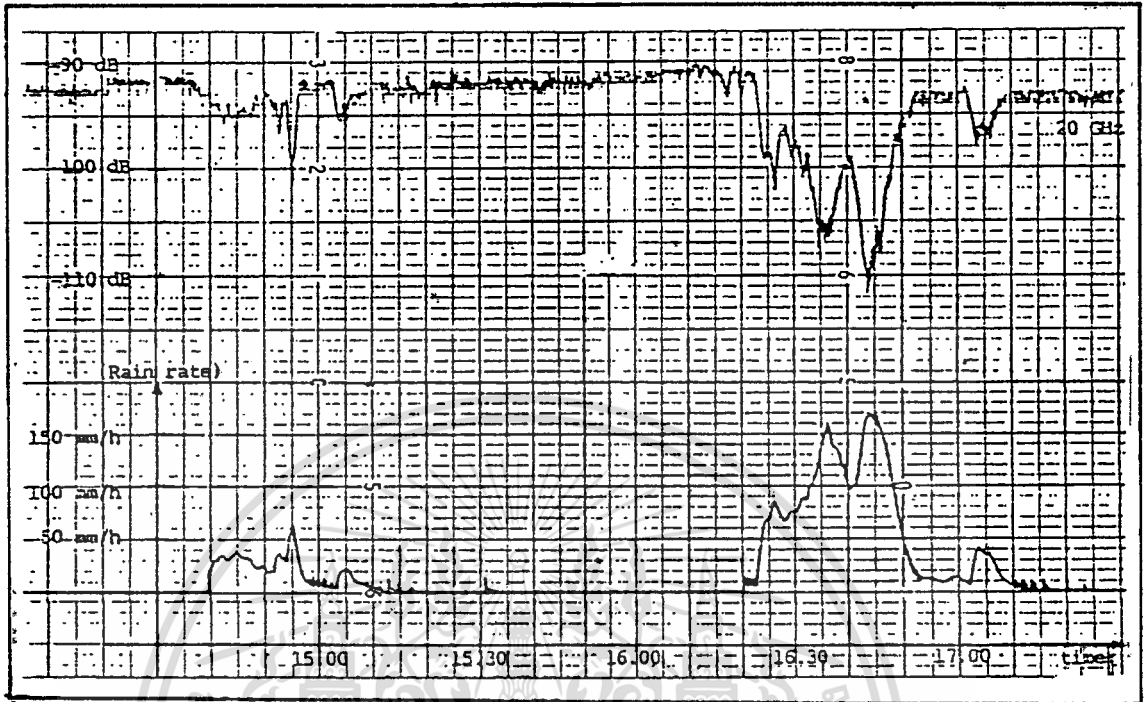
ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

จากการนำเอาระบบการบันทึกข้อมูลระดับสัญญาณไมโครเวฟและค่าอัตราการตกของฝนที่ได้ ออกแบบสร้างขึ้นนี้มาใช้เก็บรวบรวมข้อมูล และนำข้อมูลเหล่านี้มาทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาถึง ผลกระทบของอัตราการตกของฝนต่อการรบกวนของสัญญาณ ไมโครเวฟและความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการตกของฝนกับความบ่อยครั้งที่เกิดขึ้น อันจะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการแก้ปัญหาเรื่องการขาดช่วงหรือการจางหายของสัญญาณเพื่อให้โครงข่ายการติดต่อสื่อสารสามารถ ดำเนินไปได้ด้วยความราบรื่น

ข้อมูลการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝน

สำหรับในการบันทึกข้อมูลของอัตราการตกของฝน ณ.ที่เวลาใดๆนี้จะถูกนำมาบันทึกไว้ยัง เครื่อง Recorder ในแซนแนลที่ 2 เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบกับแกนเวลากับระดับของสัญญาณ ไมโครเวฟ ที่ได้บันทึกไว้ในแซนแนลที่ 1 ดังแสดงตัวอย่างผลการทดลองของข้อมูลที่บันทึกได้ดัง ภาพที่ 63

ภาพที่ 63



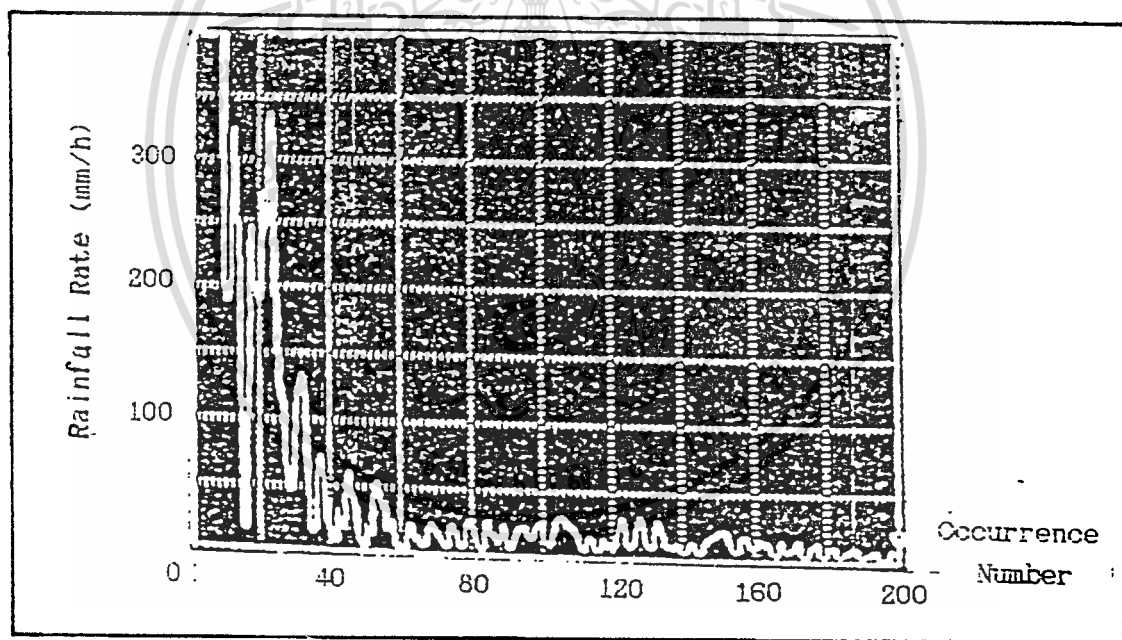
แสดงตัวอย่างของการบันทึกข้อมูลระหว่างการตกของฝนกับระดับสัญญาณ
ไมโครเวฟด้วยเครื่อง Recorder แบบใช้กระดาษต่อเนื่อง

ซึ่งกราฟเส้นบนจะเป็นผลการทดลองของระดับสัญญาณ ไมโครเวฟ ในย่านความถี่ 20 GHz ที่
รับได้ ส่วนกราฟเส้นล่างจะเป็นผลการทดลองของการวัดค่าอัตราการตกของฝนในเวลา 14.40 น
โดยมีอัตราการตกสูงสุดที่ 60 mm/h อันเป็นผลให้ระดับของสัญญาณถูกลดทอนลงไปประมาณ
1.5 dB และฝนตกครั้งที่ 2 ซึ่งเริ่มที่เวลาประมาณ 16.22 น. โดยมีระดับอัตราการตกสูงสุดที่ค่า
170 mm/h อันเป็นผลให้ระดับของสัญญาณถูกลดทอนลง ไปประมาณ 4 dB ที่ระยะห่างของจานรับ
ส่งเท่ากับ 250 เมตร ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าระดับการลดทอนของสัญญาณ ไมโครเวฟนั้นจะสัมพันธ์
กันกับค่าอัตราการตกของฝนที่บันทึกได้อย่างต่อเนื่อง

ความสัมพันธ์ของอัตราการตกของฝนและความบ่อยครั้ง

เมื่อเราต้องการทราบว่าในการตกของฝนนั้นมียอดประกอบของค่าอัตราการตกของฝนค่าต่างๆเกิดขึ้นบ่อยครั้งเพียงใดนั้นเราสามารถหาได้ด้วยการใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ (Fast Fourier Transform : FFT). ช่วยในการแปลงข้อมูล และสำหรับผลการทดลองในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของอัตราการตกของฝนและความบ่อยครั้ง (Occurrence Number) ที่เกิดขึ้นดังได้แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำฝนในการตกของฝนเพียงครั้งเดียวดังภาพที่ 64 เพื่อใช้เป็นแนวทางในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์ข้อมูลน้ำฝนจากการตกของฝนในช่วงระยะเวลา 1 ปี หรือ 2 ปี เป็นต้น ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่าที่อัตราการตกของฝนค่าสูงๆ เช่น 330 mm/h จะมีค่าความบ่อยครั้งของการเกิดที่ไม่มากนักโดยมีค่าเท่ากับ 22 ครั้ง ในขณะที่ค่าอัตราการตกของฝนค่าต่ำๆ เช่น 50 mm/h จะมีความบ่อยครั้งของการเกิดที่มากกว่าคือ 52 ครั้ง

ภาพที่ 64



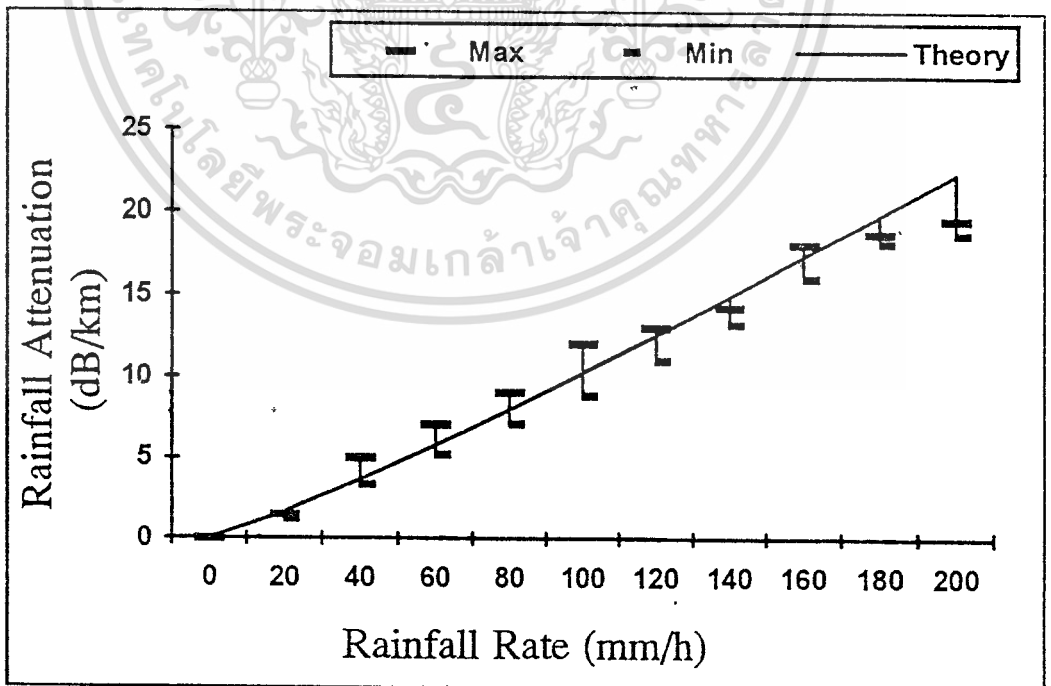
แสดงกราฟความบ่อยครั้งของอัตราการตกของฝน

แต่ในทางกลับกันที่ค่าอัตราการตกของฝนที่สูงๆ จะเกิดการลดทอนของสัญญาณที่มากกว่าค่าอัตราการตกของฝนที่ต่ำๆ และในกรณีที่ต้องการพิจารณาถึงความบ่อยครั้งของการเกิดฝนตกในแต่ละเดือนซึ่งสามารถกระทำได้ด้วยการรวบรวมจำนวนครั้งที่เกิดขึ้นของค่าอัตราการตกของฝนเดียว

กันในช่วงเดือนนั้น ๆ เข้าด้วยกันในช่วงระยะเวลา 1 ปีเพื่อหาค่าอัตราการตกของฝนที่สูงกว่าเกิดขึ้นในเดือนใดบ้างเพื่อที่จะเตรียมการชดเชยได้อย่างเหมาะสมและทันกาล

ความสัมพันธ์ของการลดทอนของสัญญาณและอัตราการตกของฝน

จากการศึกษาลักษณะการตกของฝน ที่มีผลกระทบต่อคลื่นไมโครเวฟโดยกระทำการทดลองส่งและรับคลื่นไมโครเวฟพร้อมกับทำการบันทึกข้อมูลของน้ำฝนควบคู่ไปด้วย ซึ่งจากการเก็บรวบรวมข้อมูลในระยะเวลา 1 ปี ทำให้สามารถสร้างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกของฝนกับระดับการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟได้ดังภาพที่ 65 ซึ่งจะประกอบด้วยเส้น



แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตกของฝน

กับระดับการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟทางทฤษฎีซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟ ในย่านความถี่ 20 GHz และค่าอัตราการตกของฝนเป็นไปตามสูตรดังนี้คือ

$$A = 0.06R^{1.1165} \quad \text{dB / km}$$

ส่วนเส้นกราฟอีกเส้นได้จากผลการทดลองโดยจะสังเกตเห็นว่าขณะที่เกิดฝนตกที่อัตราการตกต่างๆ จะเกิดการลดทอนที่มีความสัมพันธ์ไปในแนวทางเดียวกันกับเส้นกราฟทางทฤษฎี ทั้งนี้เพื่อสามารถนำไปเป็นแนวทางในการพิจารณาถึงการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟในย่านความถี่อื่นๆ ที่มีผลกระทบจากค่าอัตราการตกของฝน เพื่อใช้พิจารณาร่วมกันกับความบ่อยครั้งที่คาดการณ์ว่าน่าจะเกิดขึ้นที่อัตราการตกต่างๆ เพื่อให้สามารถควบคุมเกณฑ์การส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

สรุป

จากการศึกษาถึงคุณลักษณะการตกของฝนที่มีผลกระทบต่อ การลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟ ด้วยวิธีการทดลองทำให้เราทราบตัวแปรที่สำคัญทั้งสามคือ อัตราการตกของฝน (Rain rate) การลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟขณะเกิดฝนตก (Attenuation) และความบ่อยครั้งของอัตราการตกของฝน (Occurrence Number) โดยการนำตัวแปรเหล่านี้มาประกอบการพิจารณาในการตัดสินใจขอเชงการสูญเสียที่คาดการณ์ว่าน่าจะเกิดขึ้น

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เมื่อได้ทำการศึกษาถึงปัญหาของการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่ไมโครเวฟนั้นจะพบว่า ปัญหาส่วนใหญ่ของระบบการรับส่งคลื่นไมโครเวฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่บริเวณแถบเส้นศูนย์สูตรนั้น ซึ่งรวมถึงประเทศไทยด้วยจะเกิดการลดทอนหรือการจางหายของสัญญาณไมโครเวฟที่รับได้อยู่บ่อยๆอันมีสาเหตุเนื่องจากคุณลักษณะการตกของฝนที่หนักและเกิดขึ้นบ่อยในภูมิภาคแถบนี้ สำหรับปริมาณการตกของฝนโดยเฉลี่ยตลอดปีของประเทศไทยนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 1000-4000 มม. ซึ่งฝนนั้นมีอิทธิพลต่อคลื่นวิทยุความถี่ย่านไมโครเวฟหลายประการด้วยกันเช่นทำให้เกิดการดูดกลืน สัญญาณเกิดการเปลี่ยนชั่วคราวการกระจายของสัญญาณการเพิ่มสัญญาณรบกวนในบรรยากาศ เป็นต้น ผลของการดูดกลืนสัญญาณและการกระจายของสัญญาณ ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ ทำให้ระดับสัญญาณไมโครเวฟที่รับได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ควรจะได้รับได้ที่สถานีปลายทาง ทำให้ความแน่นอนของระบบสื่อสารโทรคมนาคมลดต่ำลง ในข่ายการสื่อสารสำหรับความถี่หนึ่ง ๆ นั้นมีความต้องการ ให้มีการส่งข่าวสารได้จำนวนช่องสัญญาณมากที่สุด ตามขนาดความกว้างของแถบคลื่น เมื่อความถี่ เพิ่มสูงขึ้นจำนวนความกว้างของแถบคลื่นก็เพิ่มขึ้น แต่ขณะเดียวกันการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากฝนก็เพิ่มขึ้นไปด้วย โดยที่ประเทศไทยมีความต้องการใช้ข่ายสื่อสารในประเทศผ่านดาวเทียมและข่ายสื่อสารภาคพื้นดิน โดยใช้คลื่นวิทยุไมโครเวฟไปยังส่วนต่าง ๆ ของประเทศ ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจที่ข่ายการสื่อสารของประเทศ จะต้องได้รับผลกระทบกระเทือนจากปริมาณฝนตกจำนวนมากเช่นนี้ โดยข้อเท็จจริงแล้วปริมาณฝนตกมิได้มีผลกระทบโดยตรงต่อการลดทอนสัญญาณไมโครเวฟ แต่สิ่งที่มีผลกระทบโดยตรงคือ อัตราฝนตก และในปัจจุบันข้อมูลฝนตกที่พบส่วนมากจะเป็นการวัดค่าของปริมาณน้ำฝนโดยเฉลี่ยประกอบด้วยเครื่องมือวัดน้ำฝนเท่าที่พบเห็นในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิดให้เลือก แต่เหมาะสมสำหรับใช้ในการวัดการตกของฝนแบบค่าชั่วขณะมีเพียงไม่กี่ชนิด เพื่อแก้ปัญหานี้เราจึงได้พัฒนาเครื่องบันทึกค่าความหนาแน่นการตกของฝนแบบค่าชั่วขณะขึ้น โดยการใช้อุปกรณ์ Sensor ซึ่งสามารถวัดการตกของฝนแบบชั่วขณะได้ในระดับที่เหมาะสม สำหรับนำไปใช้ในการคาดการณ์ โดยย่านของการวัดการ

ตกของฝนมีค่าอยู่ระหว่าง 1 mm ถึง 500 mm ในระยะเวลา 1 ชั่วโมง และมีค่าความเป็นเชิงเส้นที่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้รับเหมาะสมจากสภาพฝนที่ตกเบาๆจนถึงฝนที่ตกหนักมากและเนื่องจากเครื่องมือวัดน้ำฝนที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ สามารถวัดอัตราการตกของฝนได้ ณ ที่เวลาใด ๆ ทำให้เราสามารถนำข้อมูลการตกของฝนนี้ ซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้ามาผ่านกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณด้วย การใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ (FFT : Fast Fourier Transform) ช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งผลที่ได้รับทำให้เราทราบถึงความบ่อยครั้งของการเกิดฝนตก ที่อัตราการตกต่างๆและเมื่อเรารวบรวมข้อมูลเหล่านี้ได้เป็นจำนวนมากๆเช่นในระยะเวลา 1-5 ปี แล้วนำมาหาค่าตัวแทนของข้อมูลการเกิดฝนตก ณ ที่อัตราการตกค่าต่างๆ ว่ามีจำนวนครั้งที่เกิดขึ้นมากน้อยเท่าใด ซึ่งจะทำให้สามารถคาดการณ์ลักษณะการตกของฝนในเดือนหน้าหรือในปีหน้าได้ใกล้เคียงความเป็นจริงยิ่งขึ้น จากนั้นนำข้อมูลอัตราการตกของฝนที่ได้คาดการณ์ไว้นั้นไปเปรียบเทียบกับกราฟการลดทอนของสัญญาณไมโครเวฟอันเนื่องมาจากฝนตกเพื่อเตรียมการต่างๆเช่นเพิ่มกำลังส่งของสัญญาณไมโครเวฟเพื่อชดเชยกับการสูญเสียที่จะเกิดขึ้น เพิ่มกำลังวิทยุกำลังของสายอากาศ หรือใช้ระบบ Diversity ซึ่งจะช่วยให้โครงข่ายของการติดต่อสื่อสารในเส้นทางที่ฝนตกนั้นมีความเชื่อถือได้สูงยิ่งขึ้นดังได้กล่าวถึงรายละเอียดทั้งหมด ที่ได้นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์นี้เพื่อเป็นแนวทางนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้อย่างเหมาะสม

บรรณานุกรม

- ถวิล พึ่งมา และ พิชญ์ บุญตรา, "การพัฒนาเครื่องวัดปริมาณน้ำฝน สำหรับประเทศไทย"
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, ปีที่ 43, เล่มที่ 2 (2533):73-76
- ถวิล พึ่งมา, อธิรัชย์ อรุณศรีแสงไชย และ Y. moriya. "การวิเคราะห์ผลกระทบของฝนต่อ
สัญญาณไมโครเวฟย่านความถี่ 20 GHz ในประเทศไทย", วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
ในพระบรมราชูปถัมภ์, (31 ต.ค.- 3 พ.ย. 2534):633-642
- ถวิล พึ่งมา และพิชญ์ บุญตรา, "การพัฒนาเครื่องบันทึกความเข้มของฝนตกสำหรับประเทศไทย",
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, เล่มที่ 2 (2532):หน้า 73-76
- พิเชย เสนาะล้ำ, ณรงค์ เหมกรณ์, มนูญ สุขเกษม และถวิล พึ่งมา, "การวิเคราะห์ลักษณะการตก
ของฝนเพื่อประโยชน์ในการออกแบบระบบสื่อสาร ไมโครเวฟสำหรับประเทศไทย", การ
ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, (25-26 พ.ย. 2536):178-181
- พิเชย เสนาะล้ำ, พิชญ์ บุญตรา และ ถวิล พึ่งมา "การบันทึกข้อมูลของปริมาณน้ำฝนชนิดความ
เที่ยงตรงสูงอย่างต่อเนื่องตามเวลาด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์", วิศวกรรมสถานแห่ง
ประเทศไทย, เอกสารการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ประจำปี 2534 , (23-26 พ.ค.
2534):หน้า 107-116
- พิเชย เสนาะล้ำ, ถวิล พึ่งมา และ อธิรัชย์ อรุณศรีแสงไชย, "การออกแบบวงจรแปลงความถี่เป็น
สีกคาไฟฟ้าสำหรับเครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝนแบบเที่ยงตรงสูง" การประชุมวิชาการทาง
วิศวกรรมไฟฟ้า; ครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, (7-8 พ.ย. 2534): หน้า 107-110
- A. Burgueno, E. Vilar and M. Puigcerver, "Spectral Analysis of 49 Years of Rainfall Rate and
Relation Fade Dynamics", IEEE Trans. Commun., Vol.38, No.9, (Sep. 1990) :1359-1366.
- C. Bingham, M.D. Gogfrey and J.W. Tukey, "Modern Technique of power Spectrum
Estimation," IEEE Trans. Audio Electroacoust., (June 1967):56-66.
- D. William L, "Meteorology", McGraw-Hill Inc., 1975.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- E. Vilar, A. Burgueno, M. Puigcerver and J. Austin, "Analysis of Joint Rainfall Rate and Duration Statistics: Microwave System Design Implications", IEEE Trans. Commun., Vol.36, No.6, (June 1988):650-661.
- H. Yokai and A. Ogawa, "A New Quick Response Rain Gauge", Trans.on IECE of Japan, Vol. E61, No. 7, (1978):534-535.
- K.L. Frederrick and T.J. Edward, "The atmosphere", Prentice-Hall Inc, 1986.
- K. Ozeki, "An Improvement of the Waterdrop Counting Type Rain Gauge", Meteorological Instruments News, (4, April 1968):232.
- Mitsuba Electric MFG Co., Ltd., "Flow Sensor and Flow Meter Data Sheet."
- P. Sanorlum, T. paungma, M. Sukkasem, I. Arungsrisangchai and Y. Moriya, " THAICOM Satellite Plans and Rainfall Intensity Characteristics of Thailand ", 1993 Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technology (ASPITT'93), 11-12 November 1993.
- R.A.Semplek, "Gauge for Countinously Measuring Rate of Rainfall", The Review of Scientific Instruments, (Nov. 1966):1554.
- R.A.Semplak, "Gauge for Continuously Measuring Rate of Rainfall", Rev. Sci. Instrum., (1966):1554-1558.
- Recommendation and Report of the CCIR XVIth, "Plenary Assembly", Dubrovnik, Vol. V., Report 563-2, 1986.
- R.G. Loyons, " A Statistic Analysis of Transmit Power Control to Compensate Up and Down -link Fading in an FDMA Satellite Communication System",IEEE Trans.Commun., Vol.COM-24,(1976):622-636.
- R. K. Crene, "Prediction of Attenuation by Rain", IEEE Transactions on Communications, Vol.COM-28, No.9, (Sep.1980):1308-1331.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- R. L. Olsen, D. V. Rodgers and D. B. Hodge, "The Relation in the Calculation of Rain Attenuation," IEEE Trans., Vol. AP-26, (March 1978):318-329.
- R. R. Seibel, "A Capacitor - type Rain Gauge With de Output and Improved Flow Characteristics", The Review of Scintific Instruments, 43, 8, (Aug 1972):1081.
- S. Okamura, Y. Okabe and A. Sonohara, "A Rapid Response Rain Gauge", Trans.on IECE of Japan, Vol. J59-B, (Sep. 1976):473.
- S.Okamura, Y.Okabe and A.Sonohara, "A Apid Response Rain Gauge", Trans.on IECE of Japan, Vol. J59-B, No. 9, (1976):473-475.
- T.G. Stockham, "High Speed Convolution and Convolution," Spring Joint Computer Conf.,AFIPS Proc.,Vol.28, 1966, Washington, D.C.:Spartan, (1966):229-233.
- T. Oguchi, "Electromagnetic Wave Propagation and Scattering in Rain and Other Hydro meteors," Proc. IEEE, Vol.71, (Sept. 1983):1029-1078.
- T. Paungma, N. Hemmakorn, Y. Moriya and M. Teramoto, " Scintillation Characteristics as Seen in Ku-band Observed Observed in Bangkok", Proceeding of 13th International Telecommunication Symposium, (1992):305-310.
- T. Paungma, Y. Moriya and H. Samoto, " Rainfall Intensity Recorder Used Flow Sensor", Technical Didest of the 8th Sensor Symposium, (1989):173-176.
- T. Paungma and Y. Moriya, "Rain Attenuation Along Earth-to-Space Paths in Thailand and Development of Momentrainfall Intensity Recorder", Proceeding of 11th International Telecommunication Symposium, (1990):383-386.
- T. Paungma, Y. Moriya and H. Samoto, "Rainfall Intensity Recorder Used Flow Sensor", IEE of Japan Technical Digest of 8th Sensor Symposium, (1989):173-176.
- T. Paungma, Y. Moriya and M. Teramoto, "Fabrication of a Continuously Measuring Rain Gauge for Tropical Area", Proceeding of the Faculty of Engineering of Tokai University, (Mar. 1993):13-22.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- T.Pungma, Y.Moriya and H.Samoto, "Rainfall Intensity Recorder Used Flow Sensor"
Technical Digest of the 8th Sensor Symposium, (1990):173-176.
- W.T. Cochran, J. W. Cooley, D.L. Favon, H. D' Halm, R.A. Kaenel, W.W. Lang, G. C. Mailing, D. E. Nelson, C.M. Rader and P. D. Welch, "What is The Fast Fourier Transform?," IEEE Trans. Audio Electroacoust., Vol. AU-15, (June 1967):45-55.
- Y. Moriya, ถวิล พึ่งมา และ มนูญ สุขเกษม, "เครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝนชนิดความถี่เชิงตรงสูงสำหรับสภาพฝนตกหนักในประเทศไทย", เทคโนโลยีใหม่ในงานวิศวกรรม, เอกสารประกอบการประชุมใหญ่ทางวิชาการ ประจำปี 2532, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, (26-28 ต.ค. 2532):หน้า 281-293
- Y. Moliya, มนูญ สุขเกษม และ ถวิล พึ่งมา, "เครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝนชนิดความถี่เชิงตรงสูงสำหรับสภาพฝนตกหนักในประเทศไทย", เทคโนโลยีใหม่ในงานวิศวกรรม จัดโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, (26-28 ตุลาคม 2532):หน้า 281-293
- Y. Moriya, ถวิล พึ่งมา และ มนูญ สุขเกษม, "เครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝนชนิดความถี่เชิงตรงสูงสำหรับสภาพฝนตกหนักในประเทศไทย", วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, (26-28 ต.ค. 2532):หน้า 281-293



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

10: ! Create Dir
20: 1024 Pt array for w
30: Define I is Real
40: I = 0
50: Define "Mass Storage is"
60: Display "Now Saving IN DRIVE ----A----"
70: Attrib = File_5
80: Attrib = File_6
90: ! Create BDAT File_5
100: ! Create BDAT File_6
110: Define IO Path (file5)
120: Define IO Path (file6)
130: Define HPIB = 7
140: TRIGGER 700 (Data Logger)
150: Device Select (Data Logger) to Variable
160: Read (Data Logger) to Variable
170: ! Display Data to screen
180: Receive Data to IO Path
190: Enter D$ to W(1)
200: Get W(1) to IO Path
210: Display "TIME", "DATA", "NUMBER"
220: ON KEY 1
230: ON KEY 2
240: I = I +1
250: IF I = 26000 THEN "MSI"
260: GOTO 160
270: Define "MSI"
280: Display "Now Saving in DRIVE----C----"
290: GOTO 70
300: END

```

```

10: Scode = 7
20: Dsa 100*Scode + 11
30: DIM Window (1023)
40: !
50: ASSIGN @Dsa_off TO Dsa;FORMAT OFF
60: !
70: OUTPUT Dsa; "USER:EXPR F1,(TIME1/TIME1)"
80: OUTPUT Dsa, "TRAC:A:RES F1"
90: OUTPUT Dsa; "TRAC:HEAD:XOR?"
100: ENTER Dsa; Xor
110: OUTPUT Dsa; "TRAC:HEAD:XINC?"
120: ENTER Dsa;Xinc
130: OUTPUT Dsa; "TRAC:HEAD:YPO?"
140: ENTER Dsa; Ypo
150: !
160: Gen_window(Window(*),Ypo)
170: !
180: DISP "Writing window to trace A..."
190: OUTPUT Dsa; "TRAC:HEAD:XOR";Xor
200: OUTPUT Dsa; "TRAC:HEAD:XINC";Xinc
210: OUTPUT Dsa; "TRAC:HEAD:YPO";Ypo
220: OUTPUT Dsa; "TRAC:DATA "
230: OUTPUT Dsa DSING "#,A,D,4D"; "#",4,1024*8
240: OUTPUT @DSA_off;Window(*),CHR$(10)
250: !
260: OUTPUT Dsa; "DISP:A:AXIS REAL"
270: OUTPUT Dsa; "DISP:A:SCAL:AUTO:SING"
280: DISP "Saving the window in 'RAM:HANNING' ..."
290: OUTPUT Dsa; "MMEM:STOR:TRAC:A 'RAM:HANNING';*OPC?"
300: ENTER Dsa;Opc

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

310: !
320: ! Use the window to do a spectrum measurement.
330: ! the math expression for correct x-axis start/stop values.
340: OUTPUT Dsa; "USER:EXPR F1,(FFT(TIME1* 'RAM:HANNING'))"
350: OUTPUT Dsa; "TRAC:A:RES F1"
360: DISP "Starting the measurement..."
370: OUTPUT Dsa; "TRAC:A:RES F1"
380: DISP "Starting the measurement..."
390: OUTPUT Dsa; "INIT:STAT STAR"
400: OUTPUT Dsa; "DISP:A:AXIS LOGM;*WAI::DISP:A:SCAL:AUTO:SING"
410: !
420: LOCAL Dsa
430: DISP "Program finished"
440: END
450: !
460: SUB Gen_window(Wind(*),Ypo)
470: RAD
480: DISP "Generating data for HANNING window..."
490: Const=2*PI/1023
500: IF Ypo=1 THEN
510:   For I = 0 TO 1023
520:     Wind(I) = 1.0+COS(I*Const+PI)
530:   NEXT I
540: ELSE
550:   FOR I = 0 TO 1023 STEP 2
560:     Wind(I) = 1.0+COS(I*Const+PI)
570:     Wind(I+1) = 0.0
580:   NEXT I
590: END IF
600: SUBEND

```

ภาคผนวก ข.

แสดงข้อมูลน้ำฝนที่ทำการบันทึกได้ (เส้นล่าง) ในขณะที่ทำการทดลองส่งสัญญาณ ไมโครเวฟ (เส้นบน) โดยมีรายละเอียดดังนี้:

1.) ข้อมูลน้ำฝนประจำปี 2534 (หน้า 113 - 137) จำนวนทั้งสิ้น 59 ข้อมูล

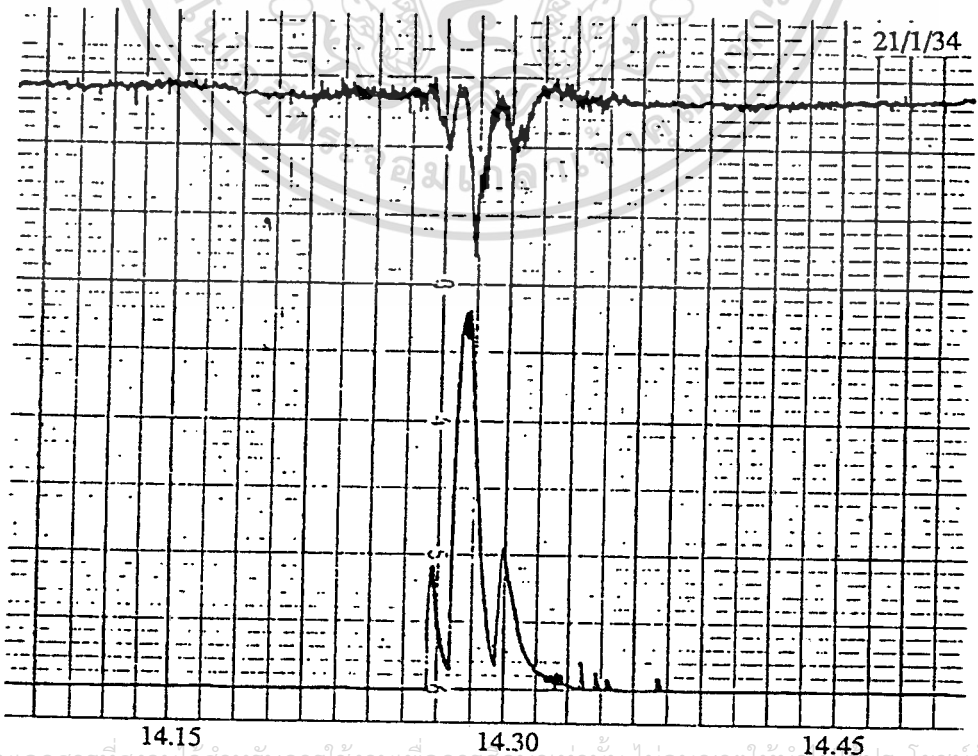
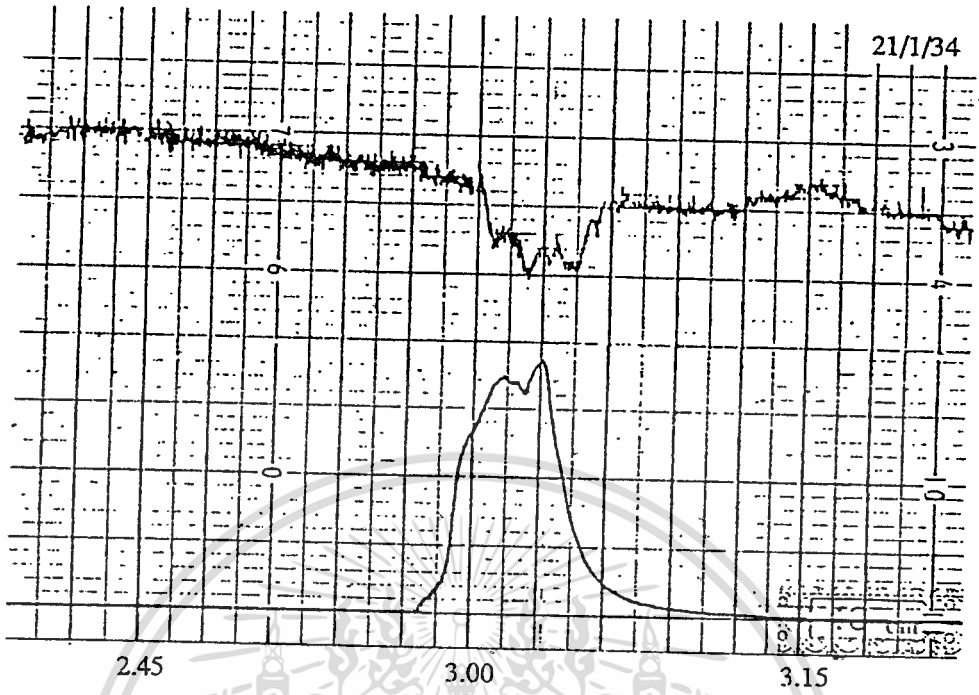
Scale : Microwave signal levels = 0.3 dB/div

Rainfall rate = 5 (mm/h)/div

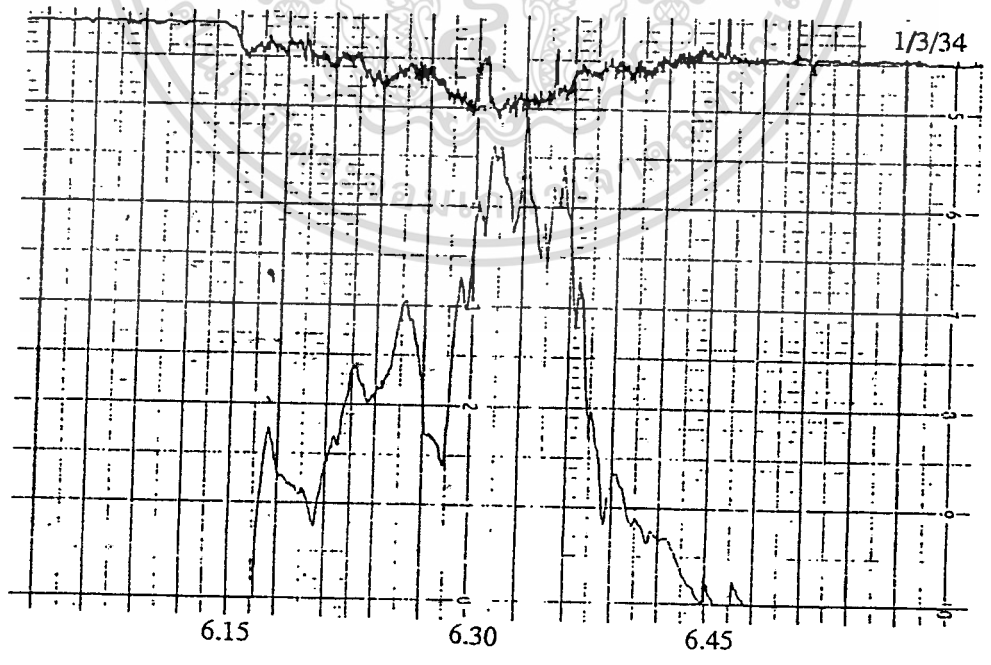
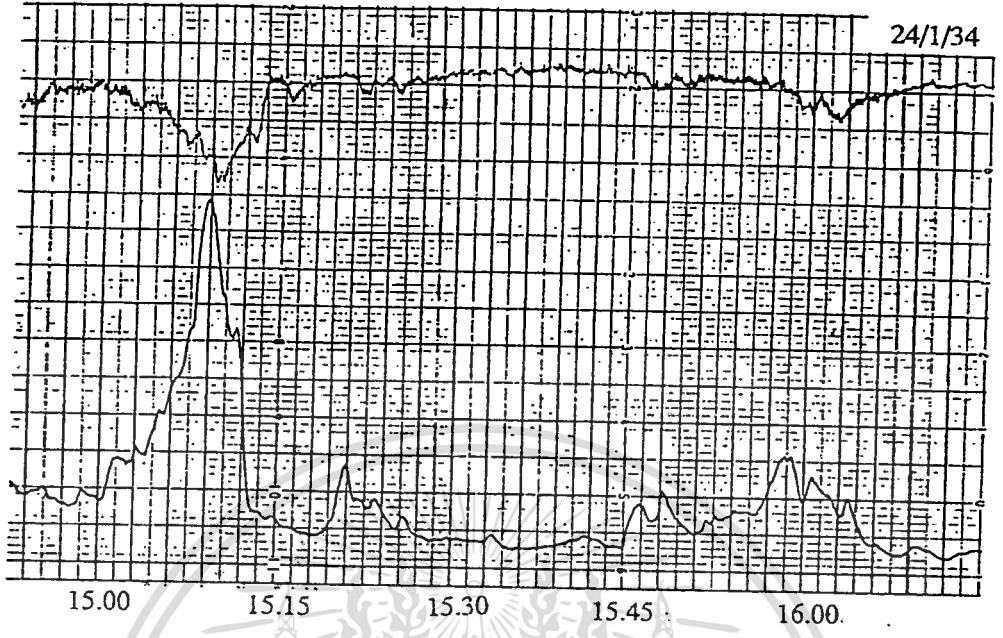
2.) ข้อมูลน้ำฝนประจำปี 2535 (หน้า 138 - 151) จำนวนทั้งสิ้น 46 ข้อมูล

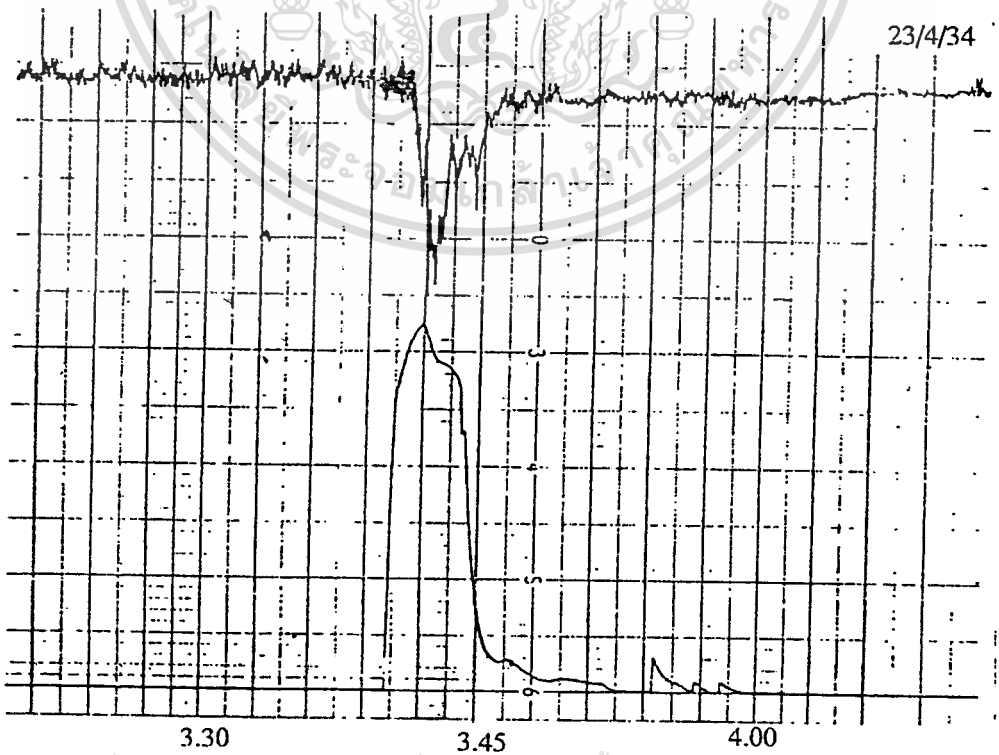
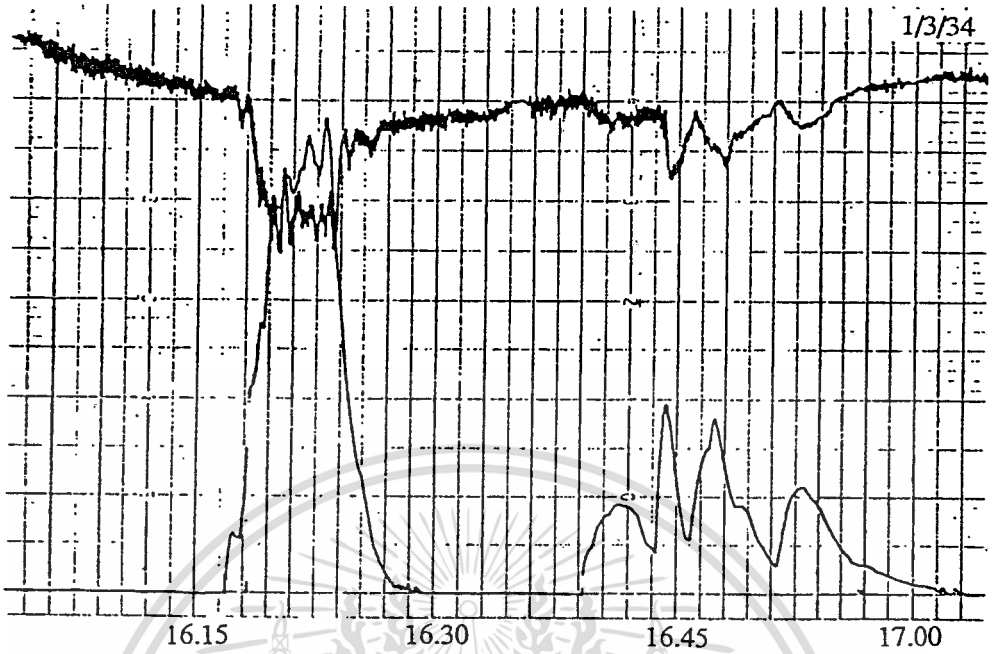
Scale : Microwave signal levels = 0.2 dB/div

Rainfall rate = 5 (mm/h)/div

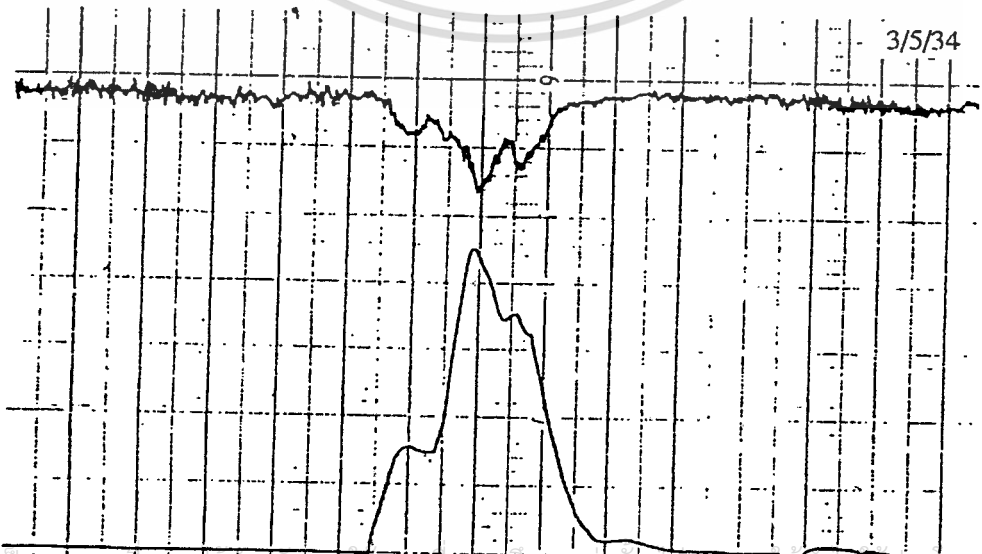
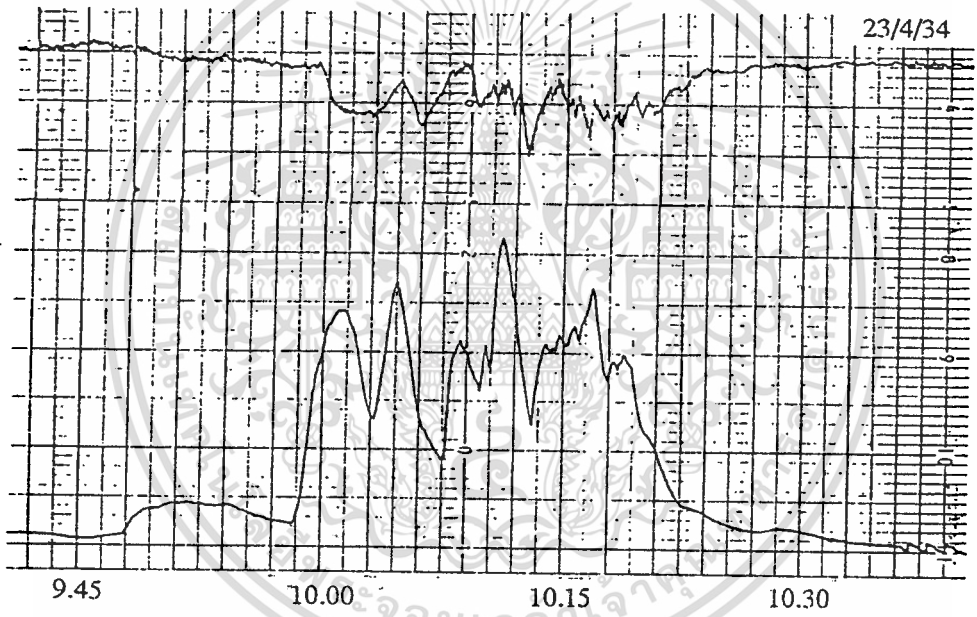
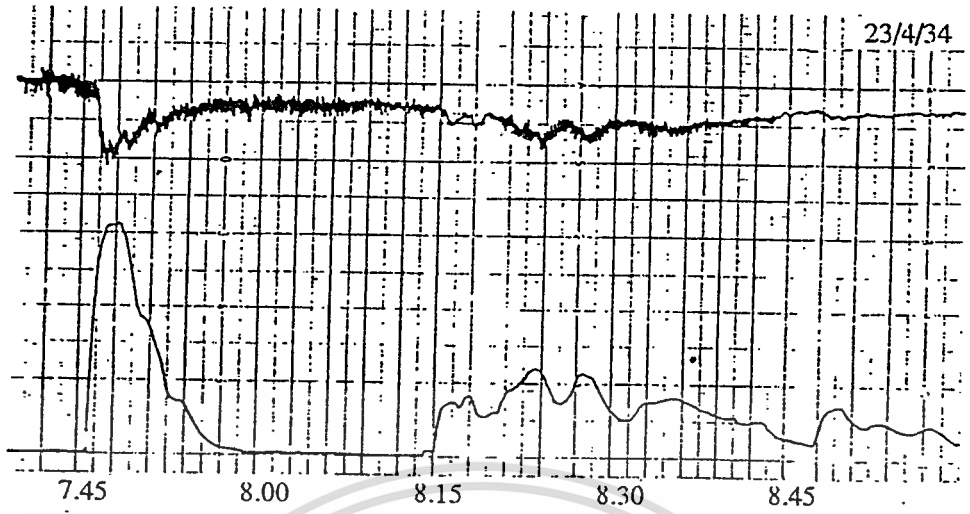


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

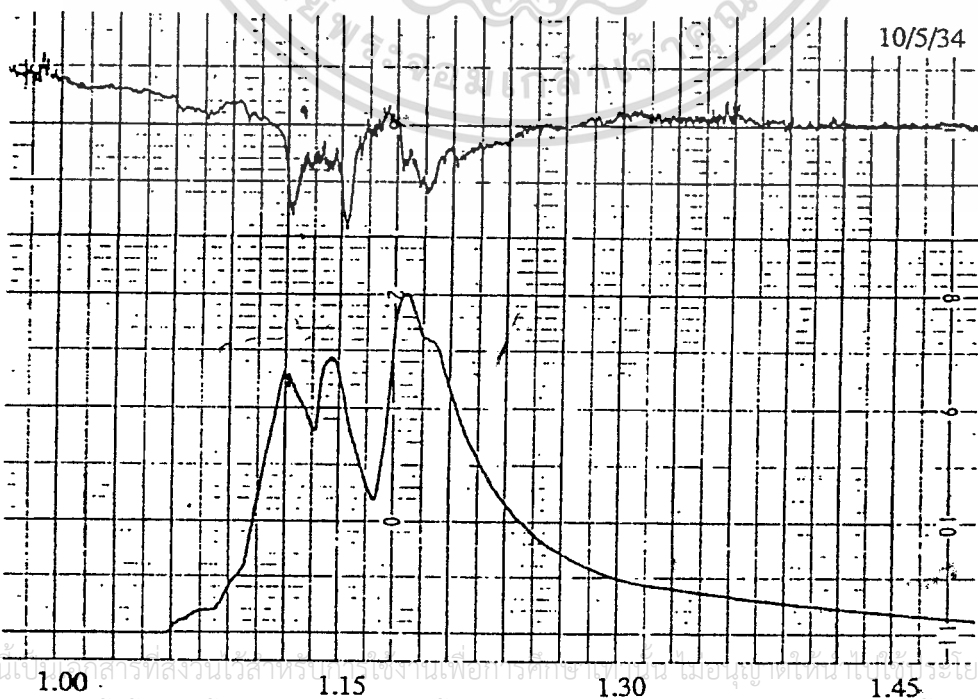
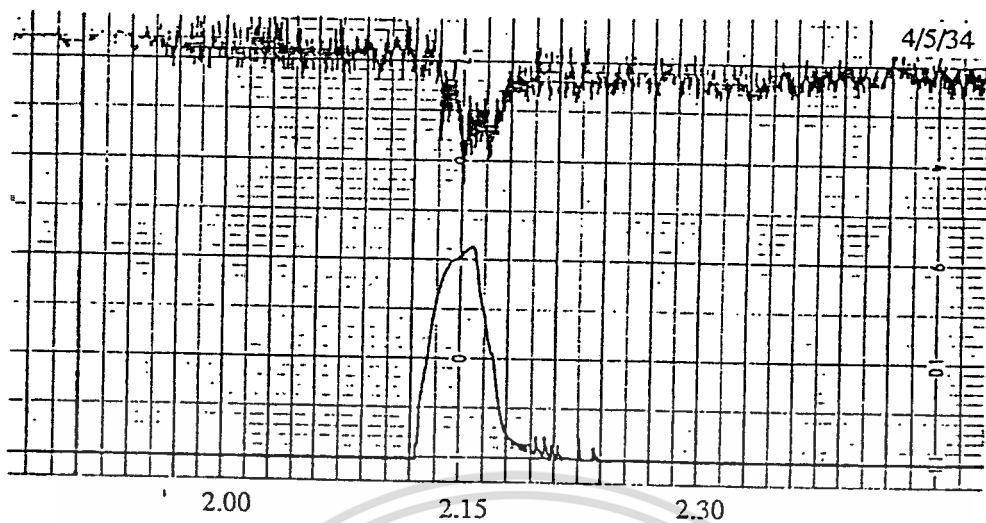




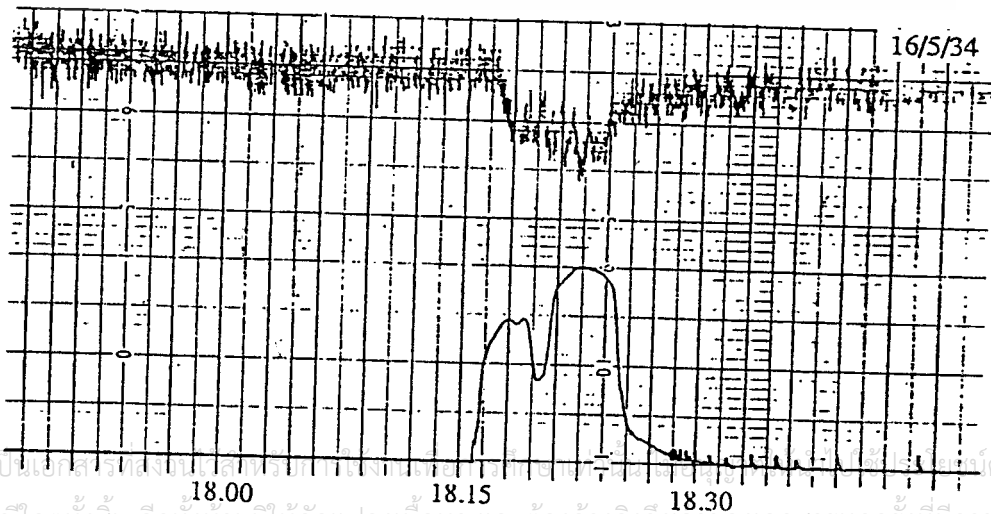
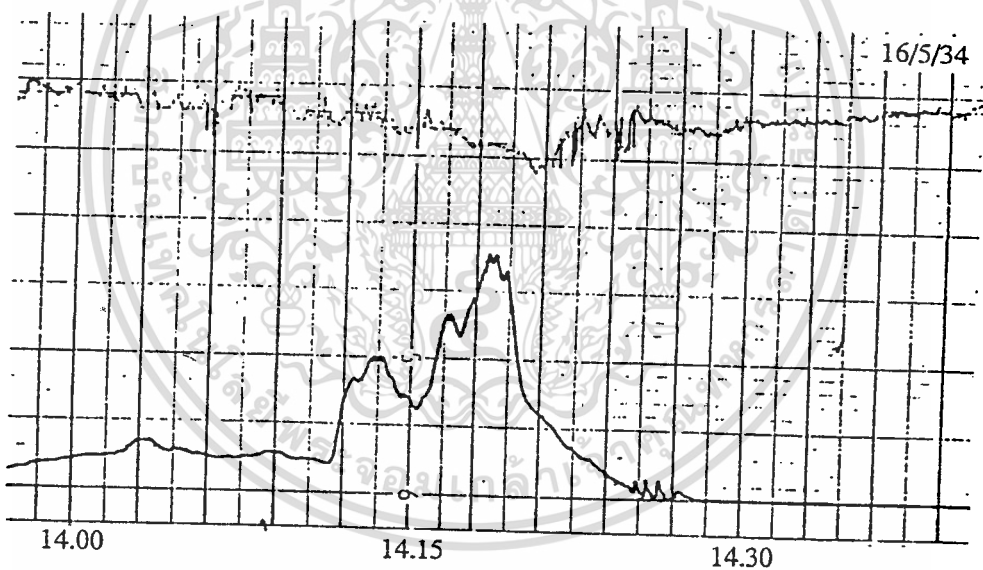
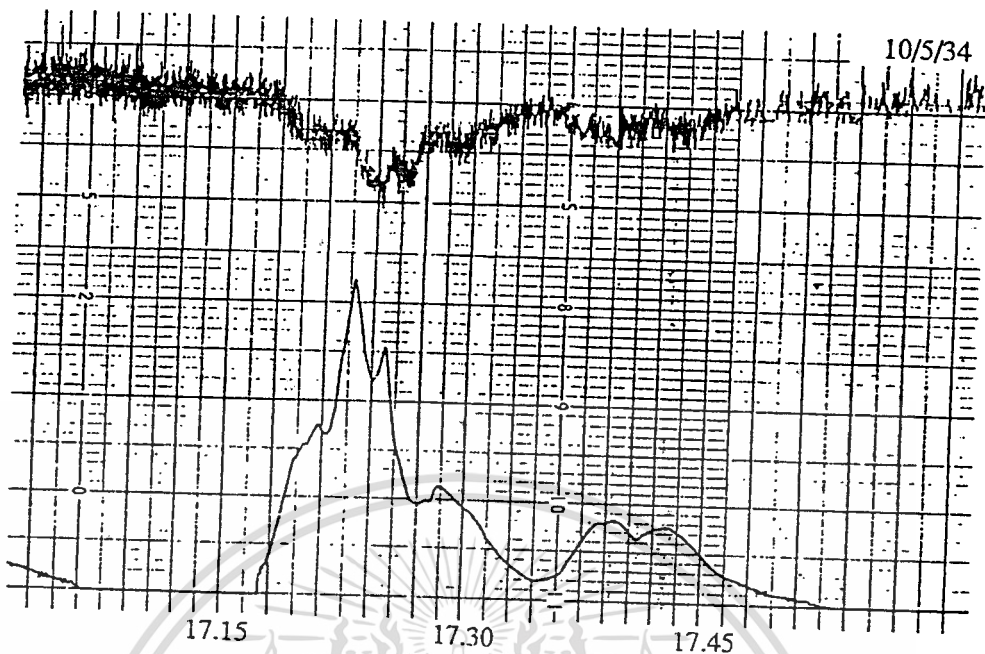
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



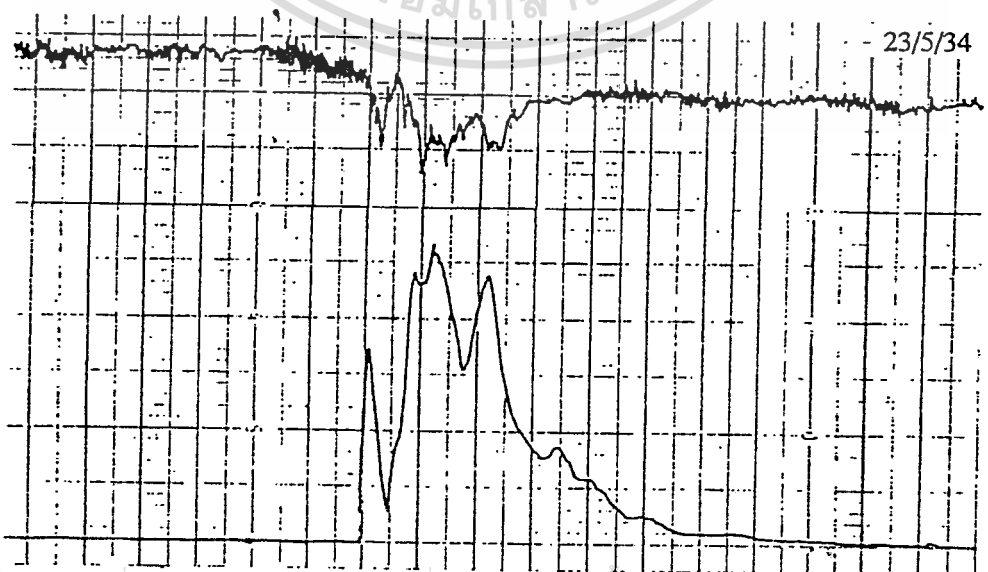
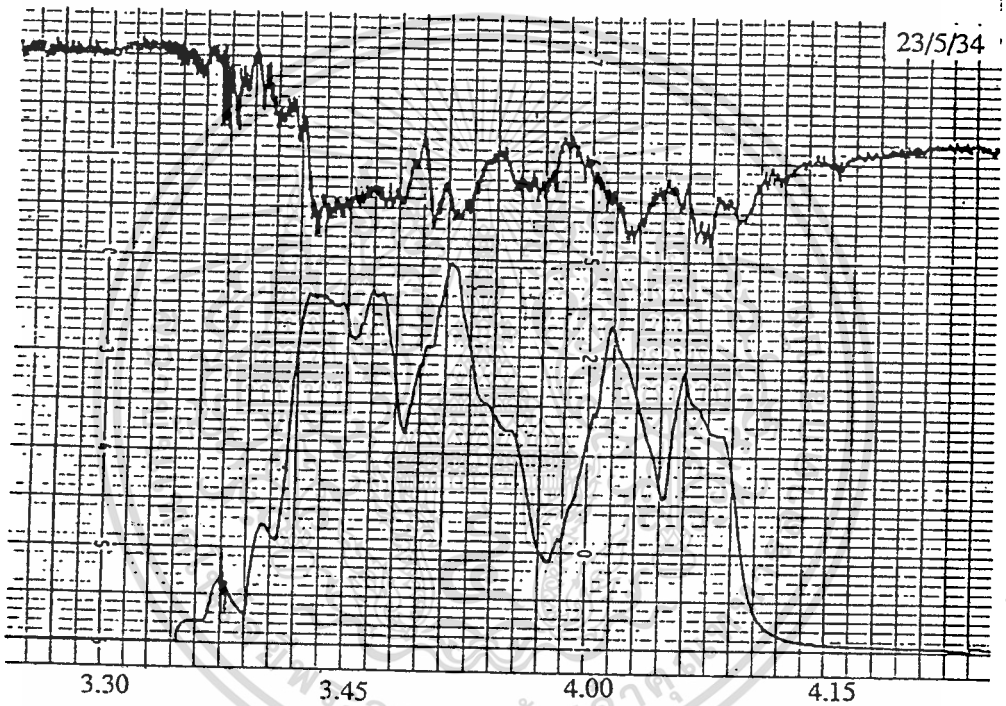
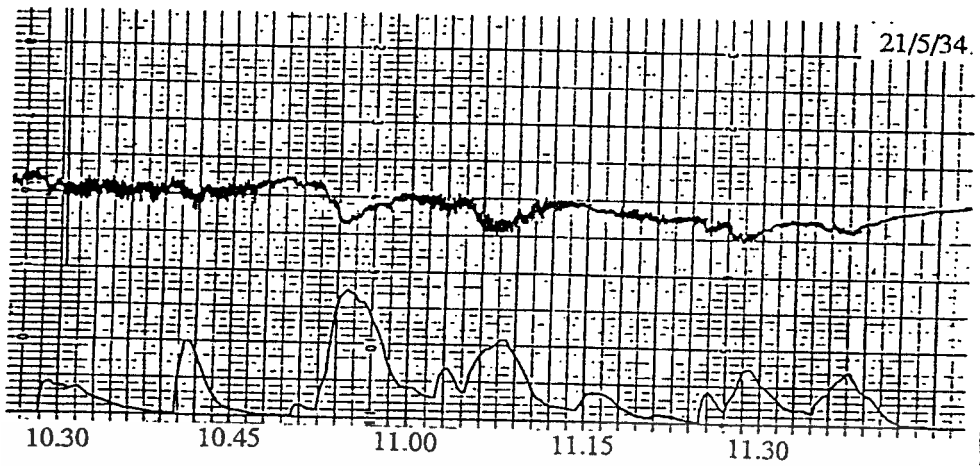
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงพยาบาลศิริราช อนุญาตให้นำไปใช้
 3.00 3.15



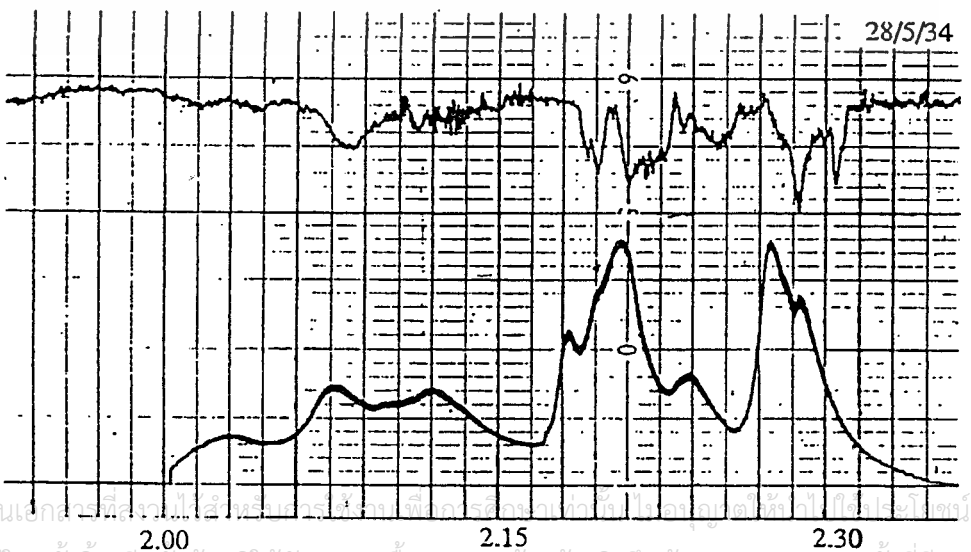
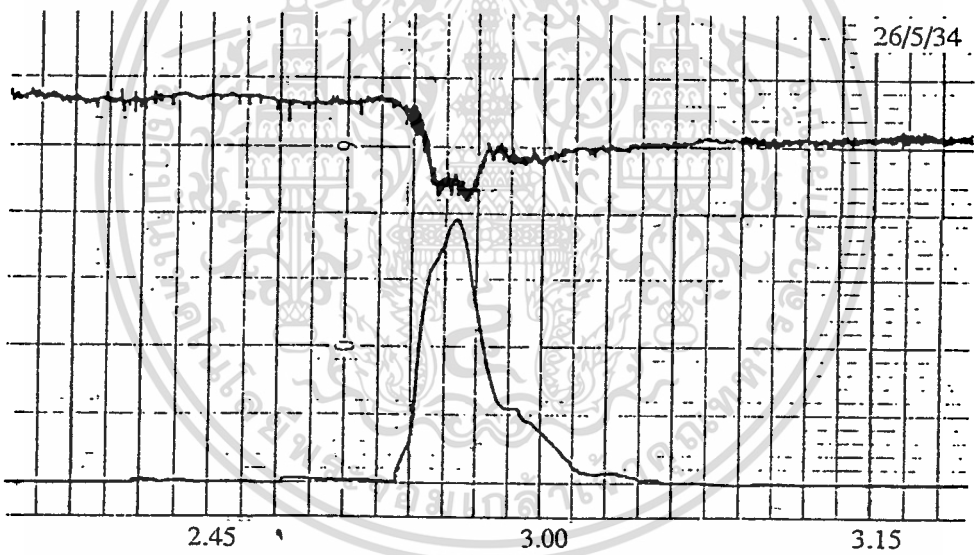
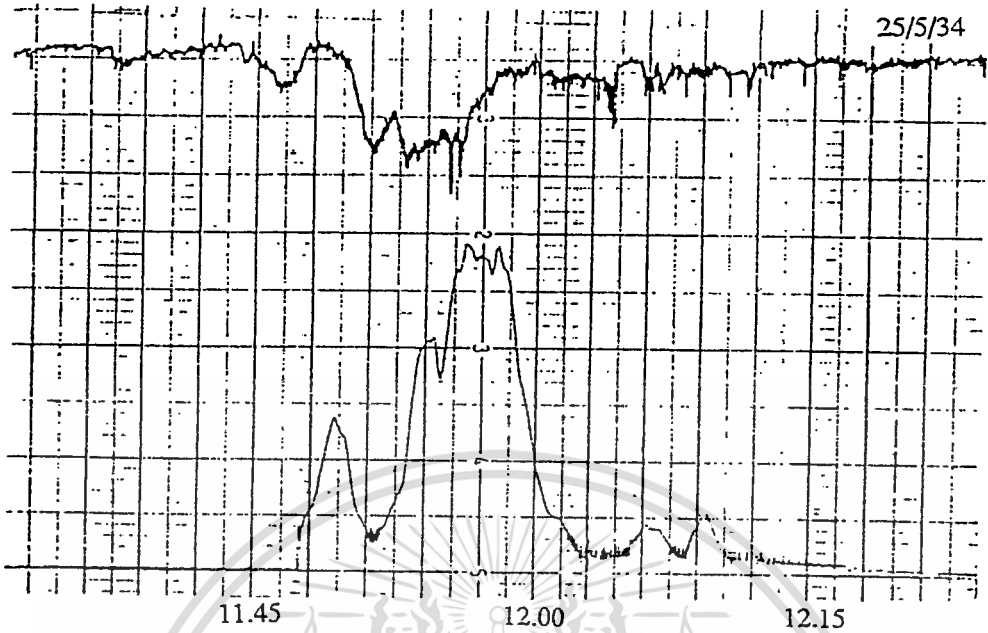
เอกสารนี้เป็นสารทสงวนไว้สำหรับใช้ในกรณีฉุกเฉินเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ในวงกว้าง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



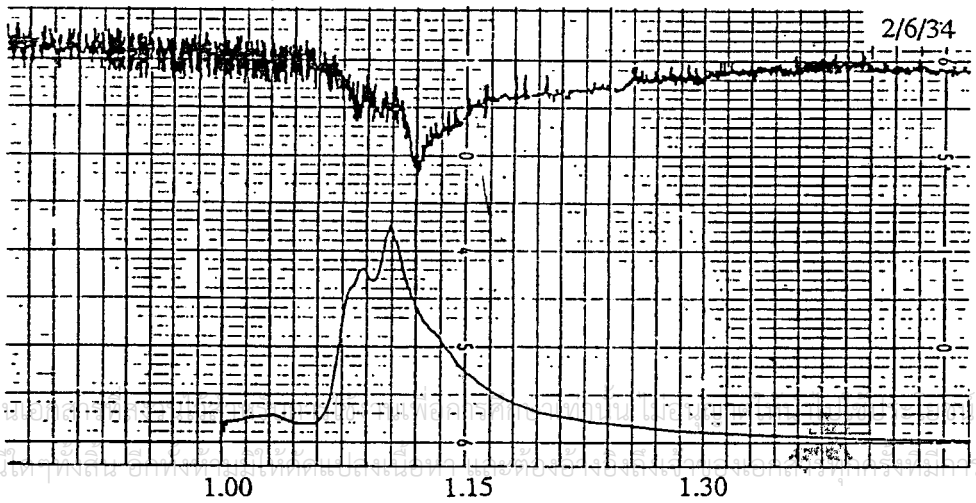
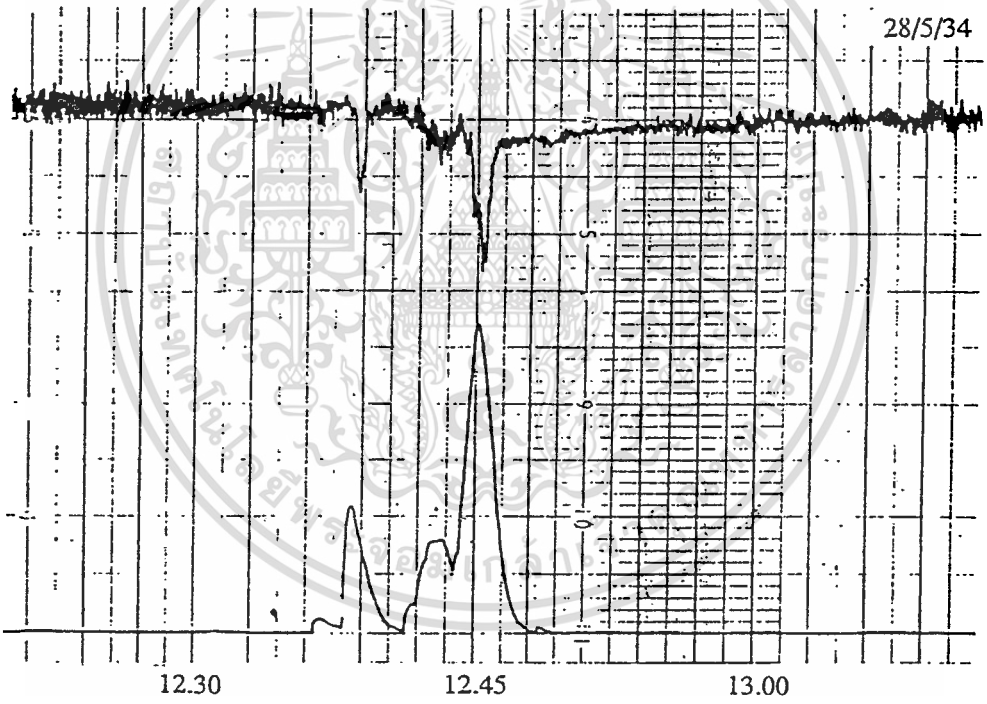
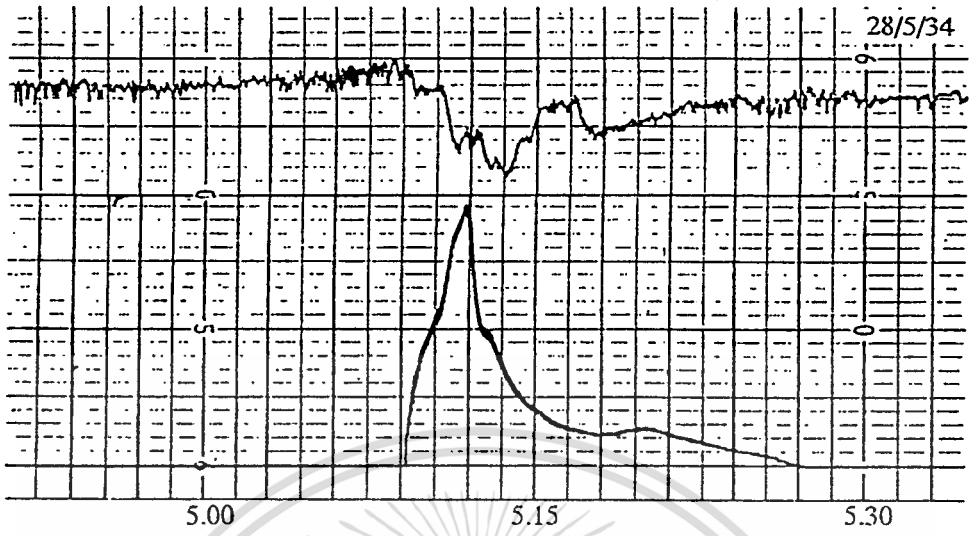
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของโรงพยาบาลศิริราช อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

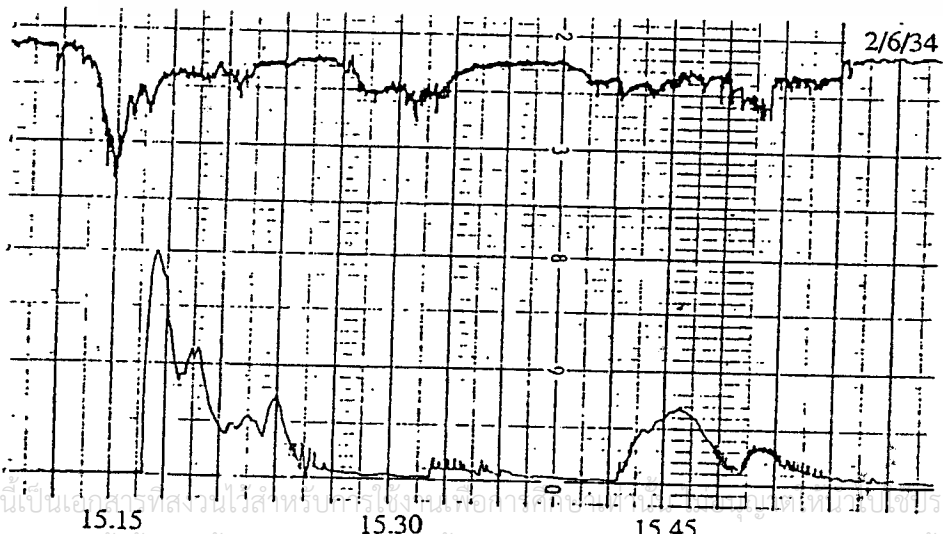
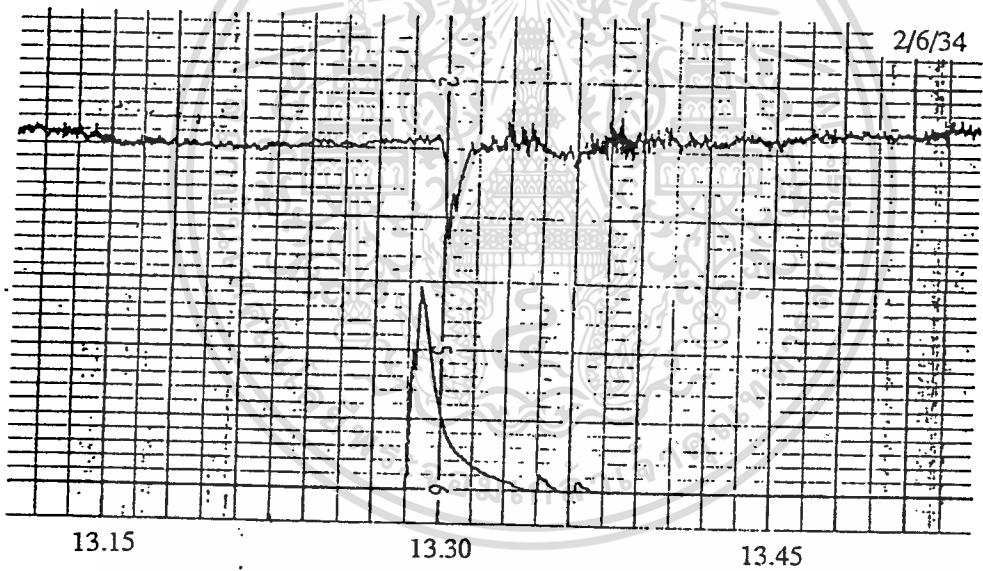
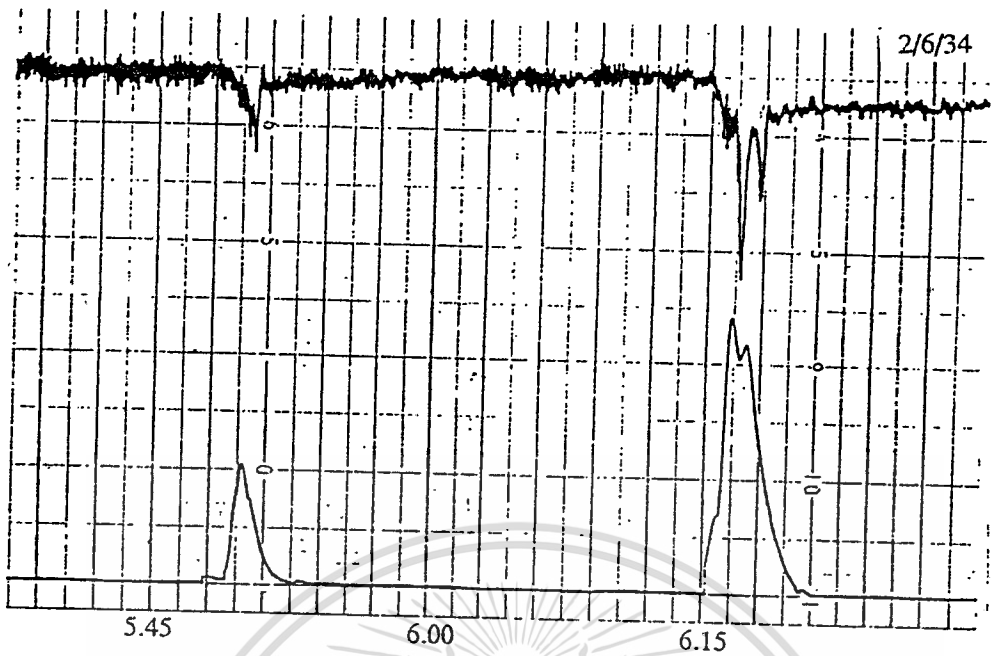


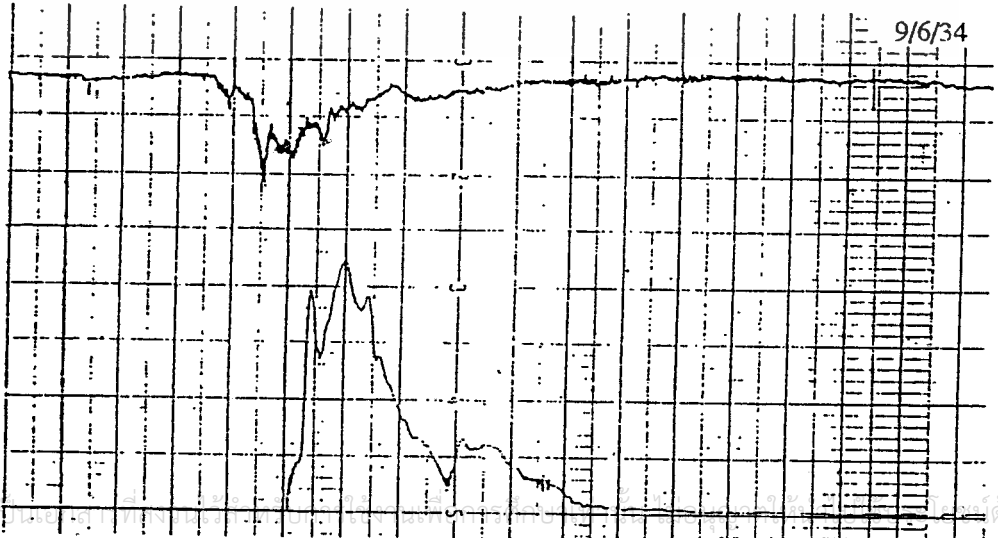
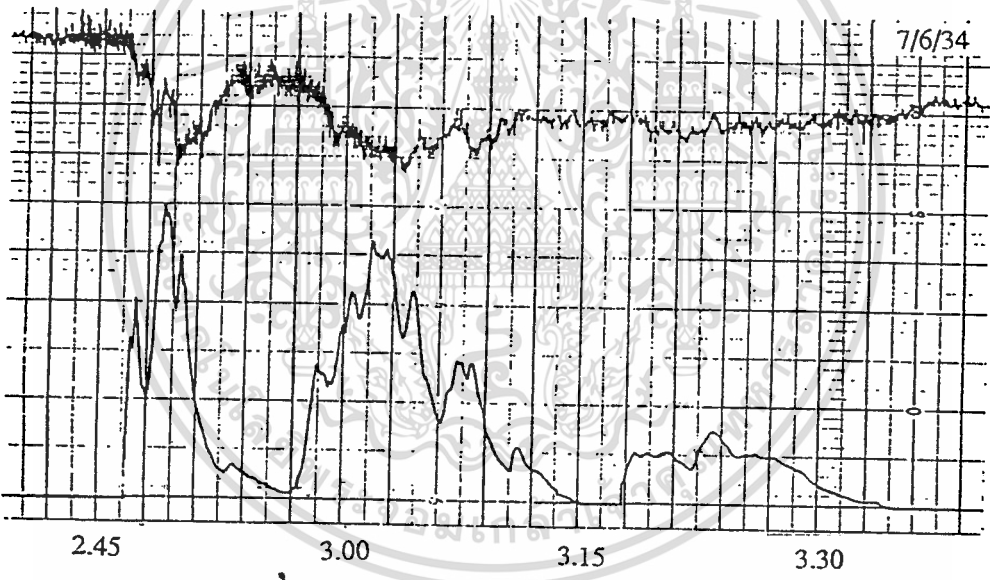
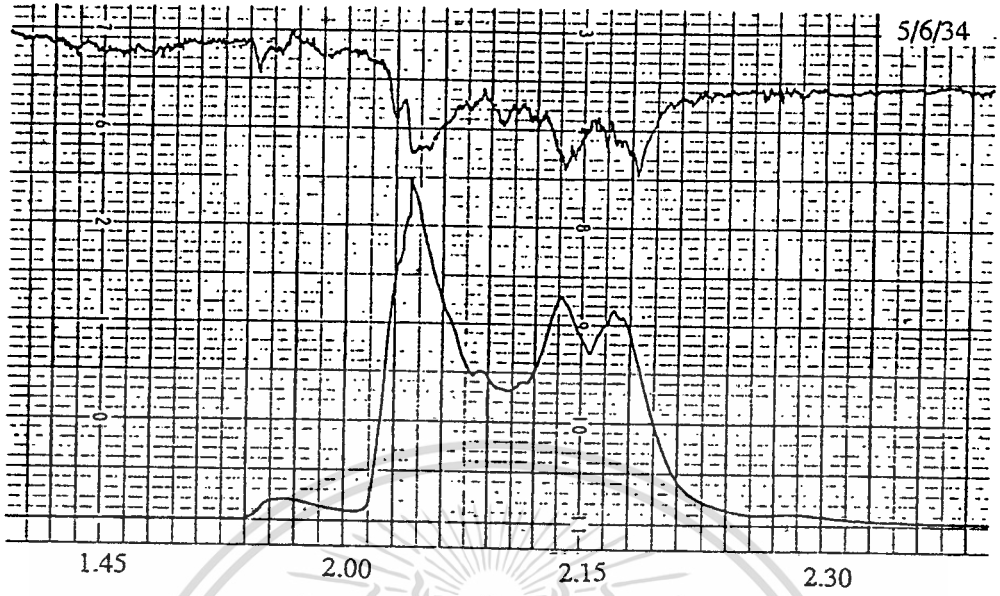
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 15.00 กษาเท่านั้น ไม่นาน 15.15 นาทีไปไซเบอร์เขตนด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้สำหรับราชการที่ทาง พื้กการคลังของหน่วยงานนี้ ไม่อาจเผยแพร่ให้บุคคลภายนอกได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

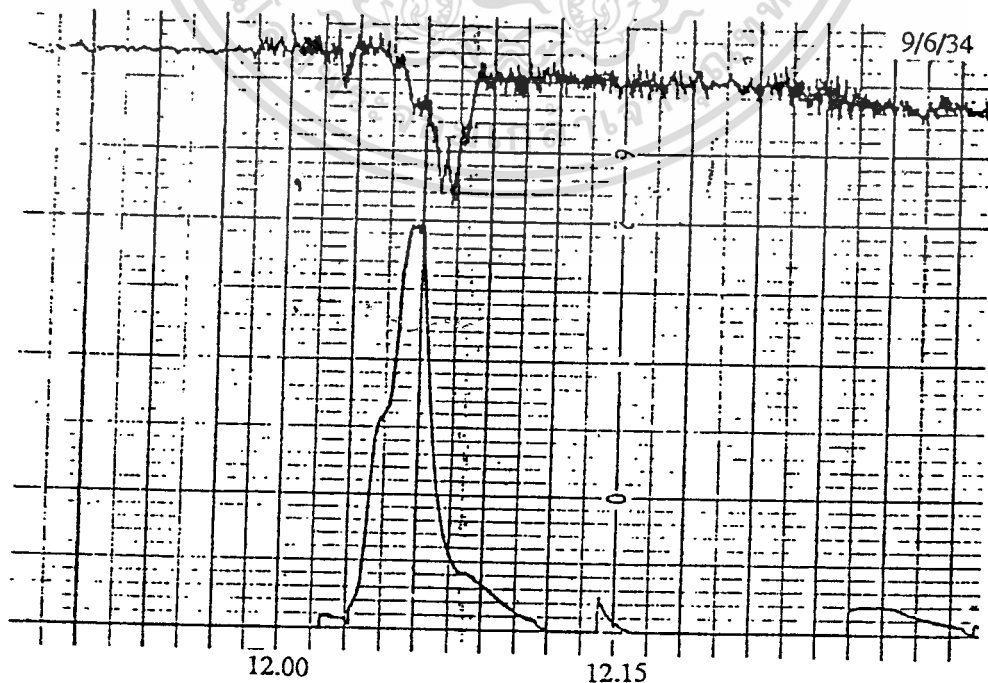
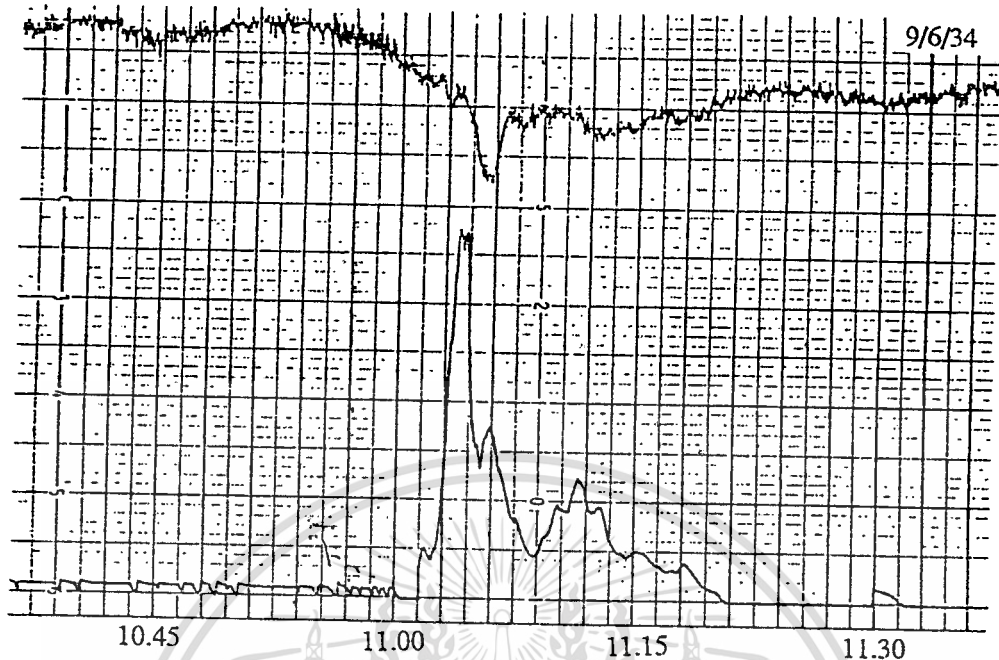




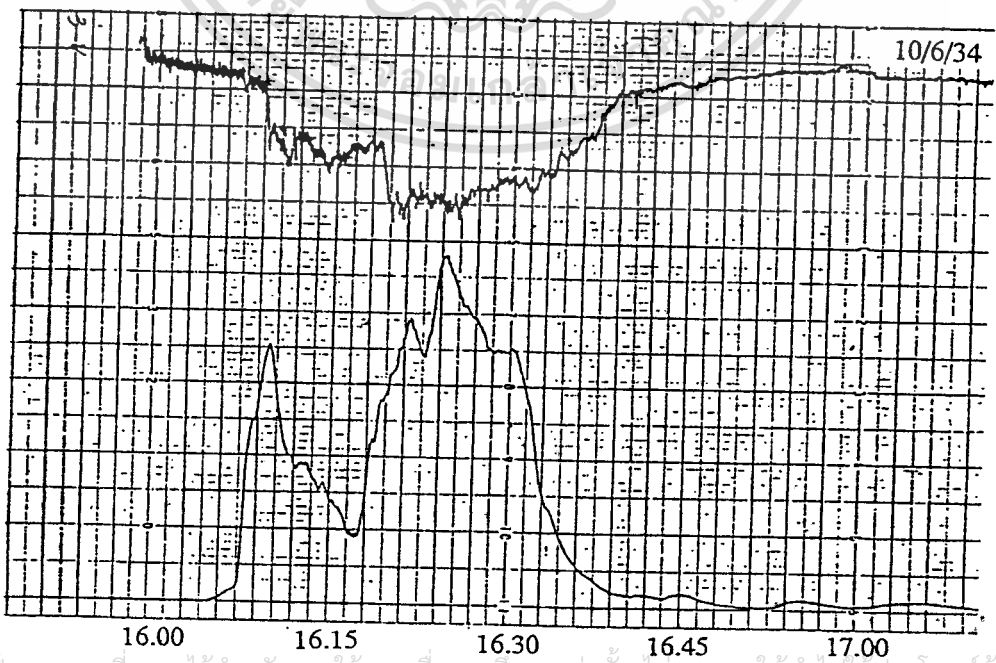
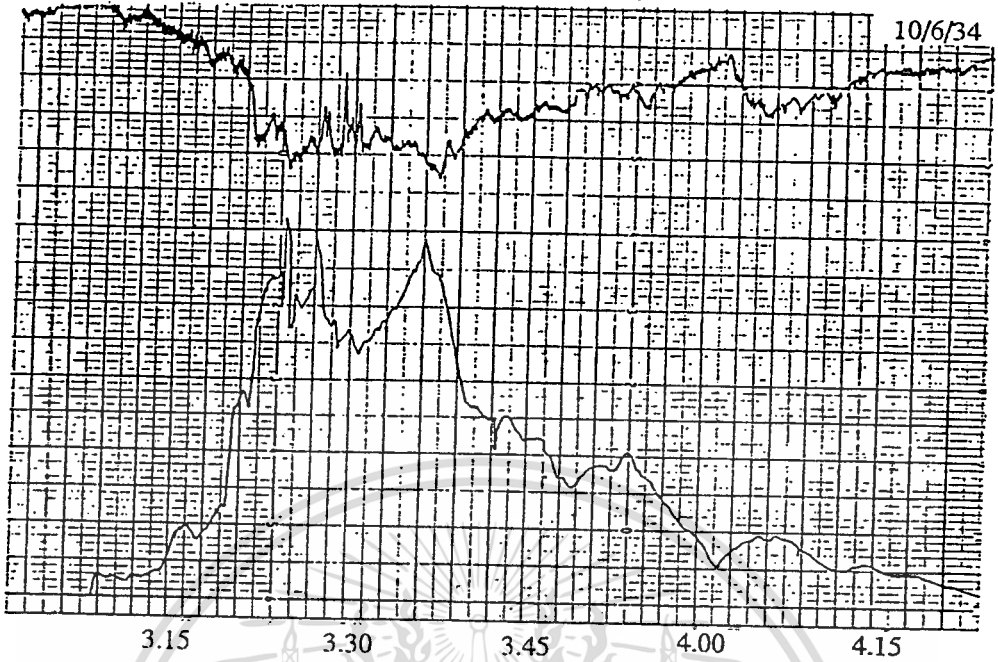


เอกสารนี้เป็นของ... ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุก 1.45 ที่มีการนำไปใช้

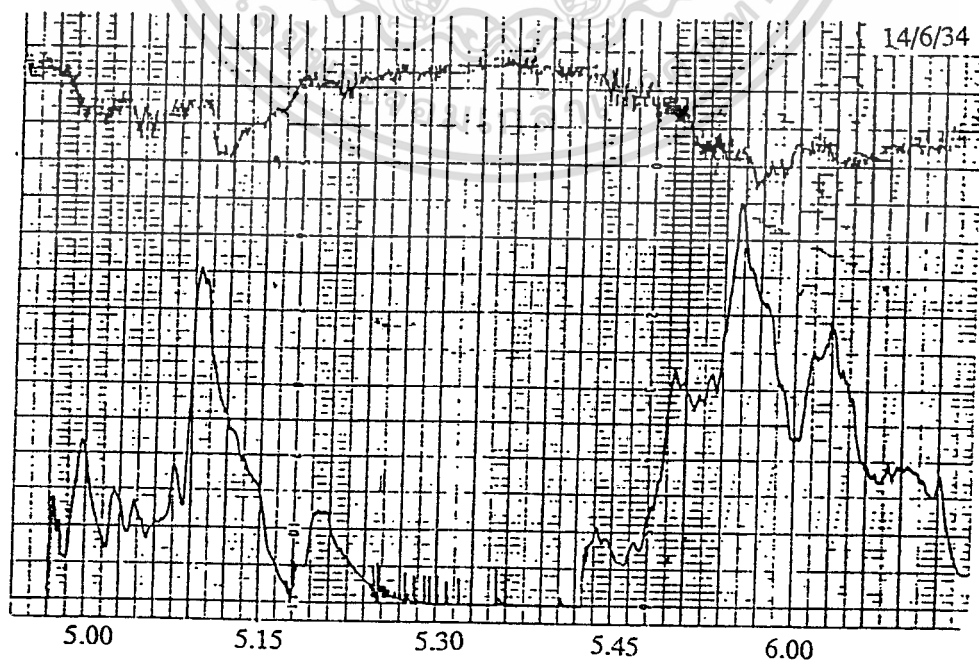
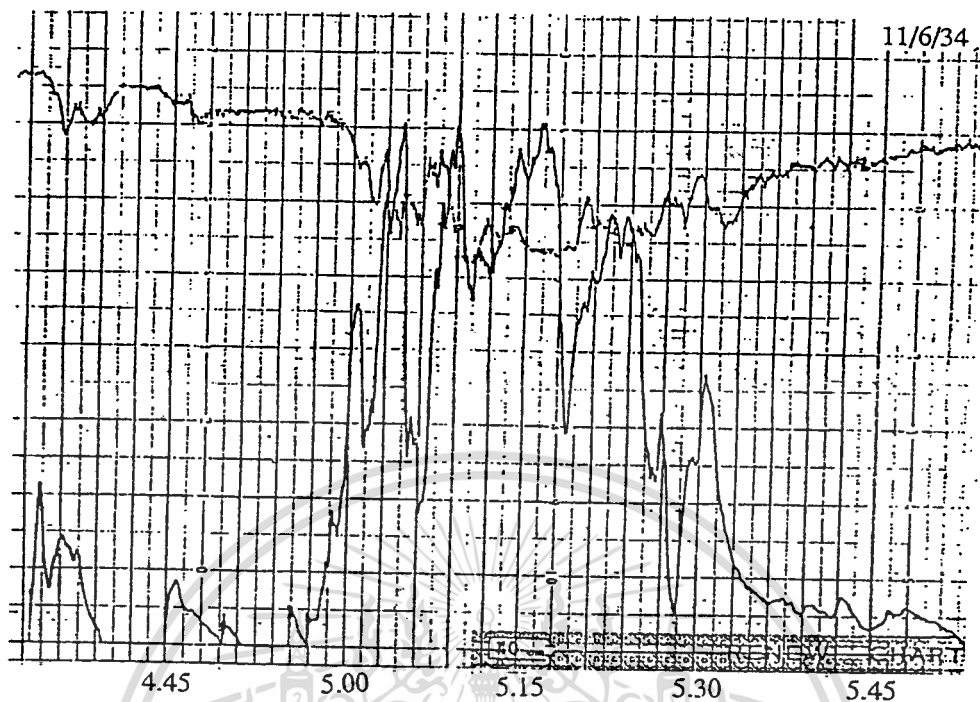
๒๐๙๖ ๕๖๖ ๖



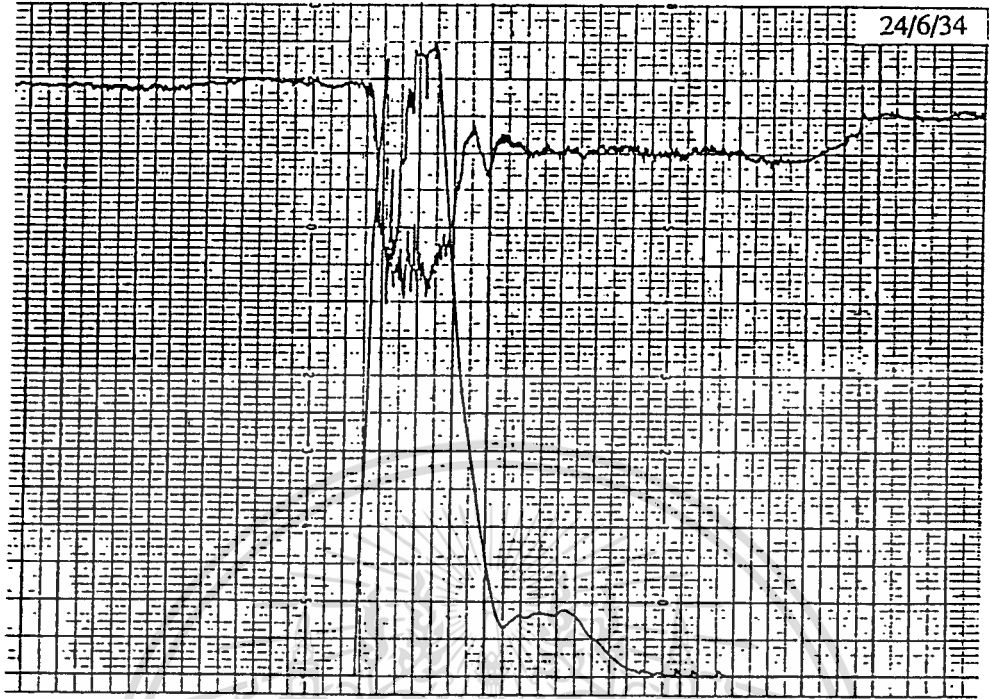
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



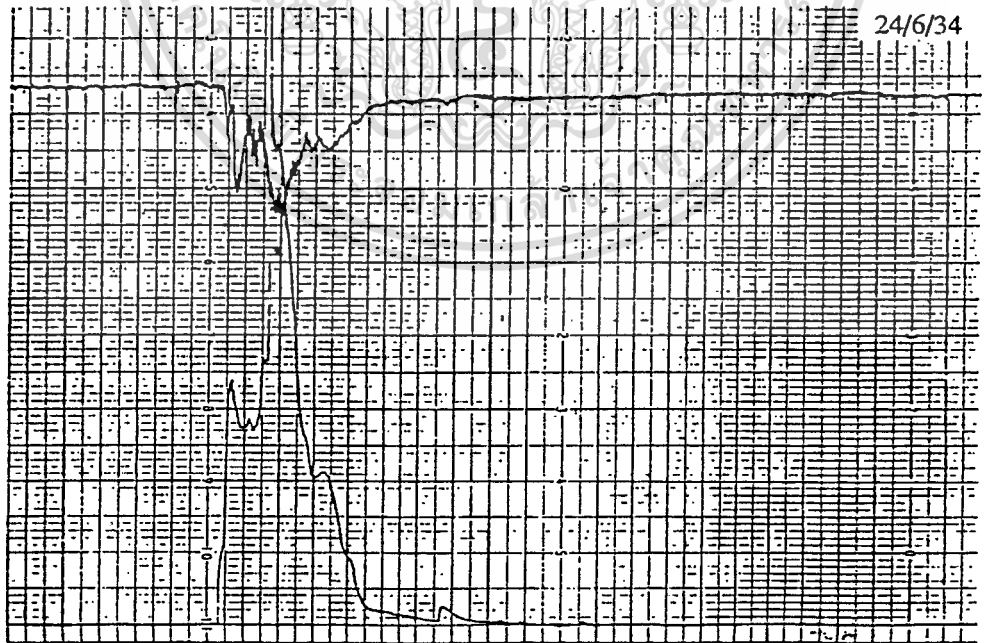
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

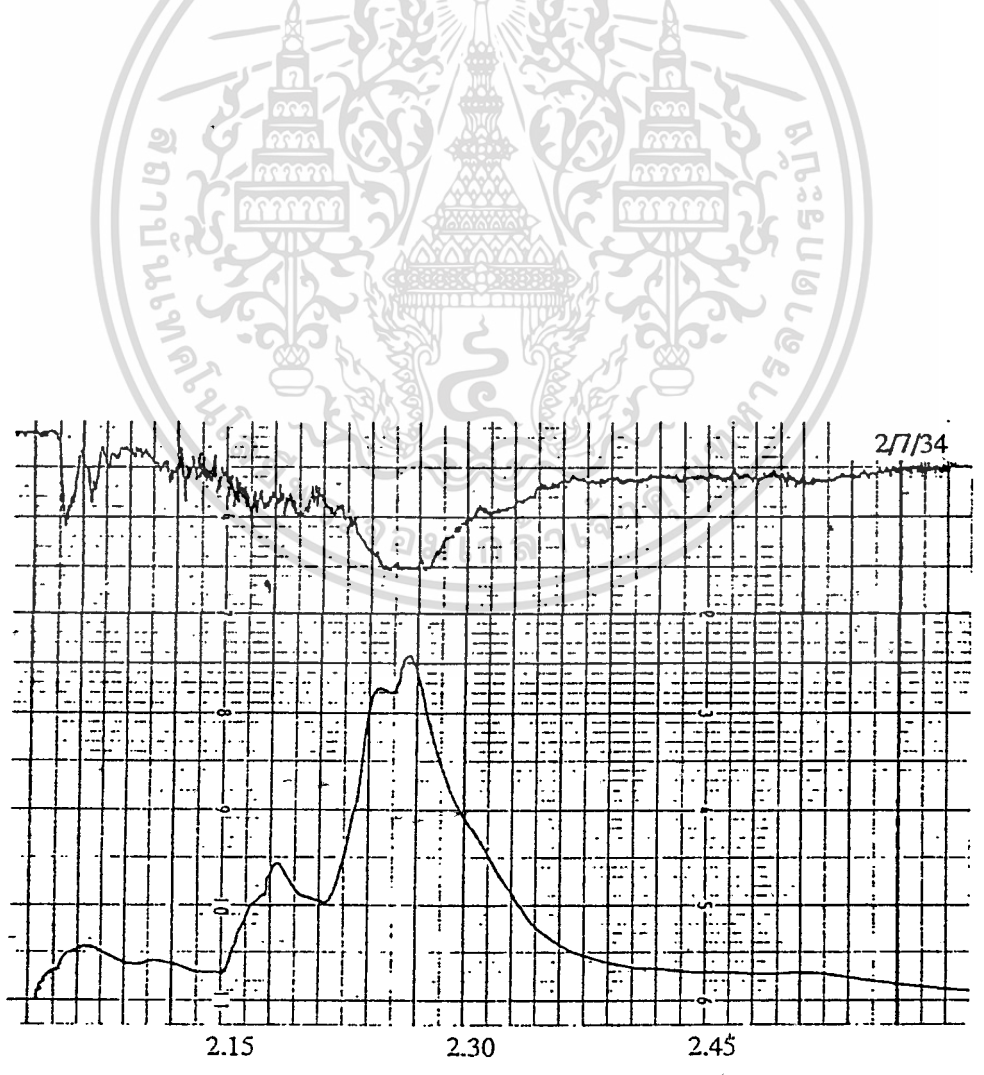
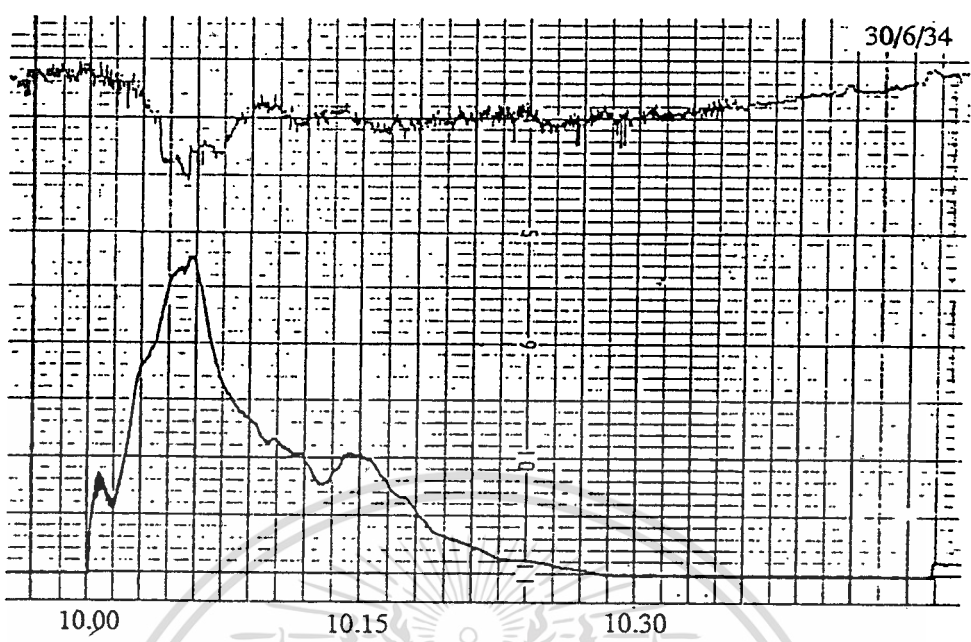


1.30 1.45 2.00

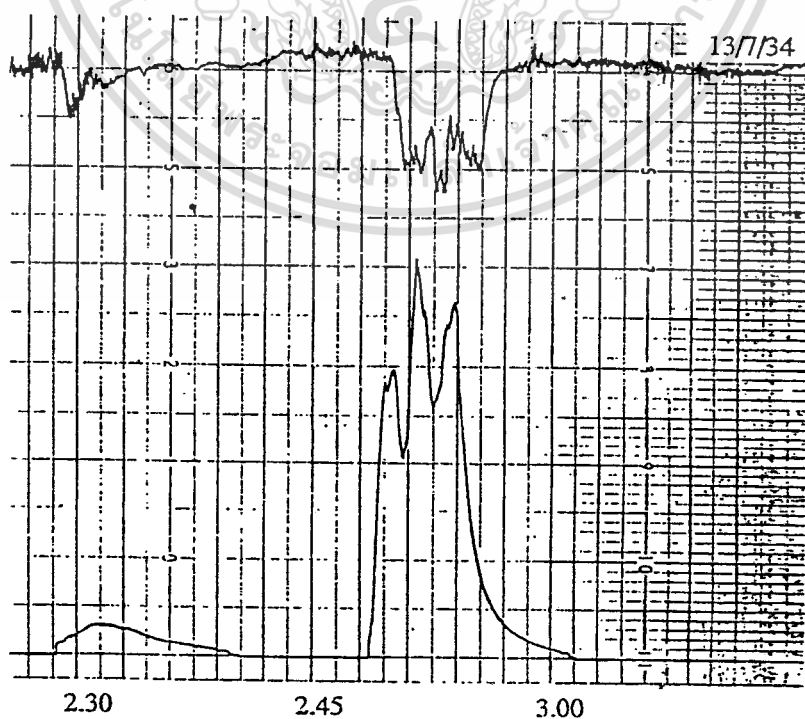
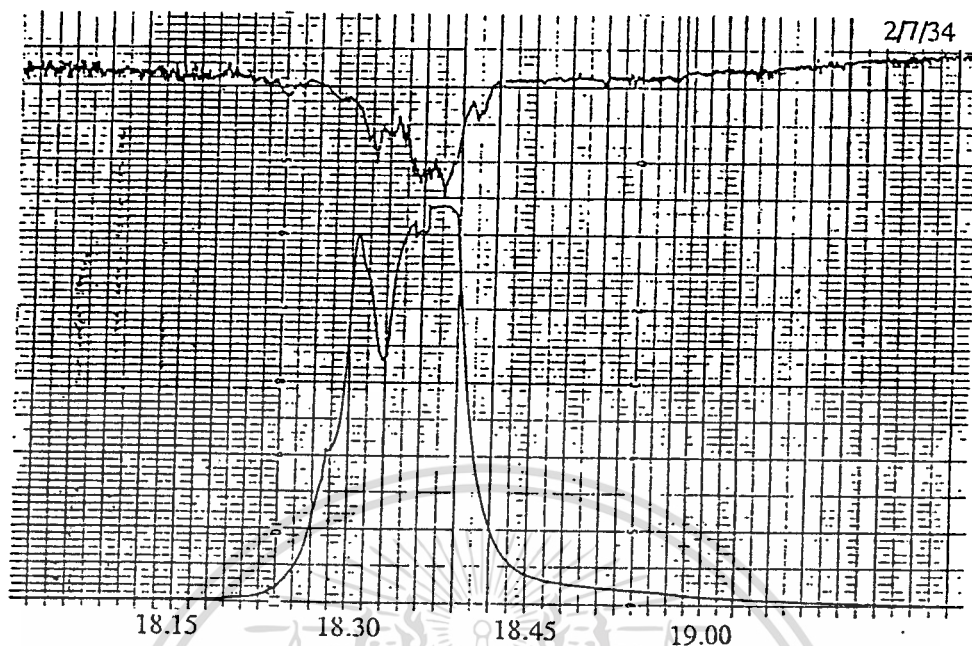


17.15 17.30 17.45 18.00

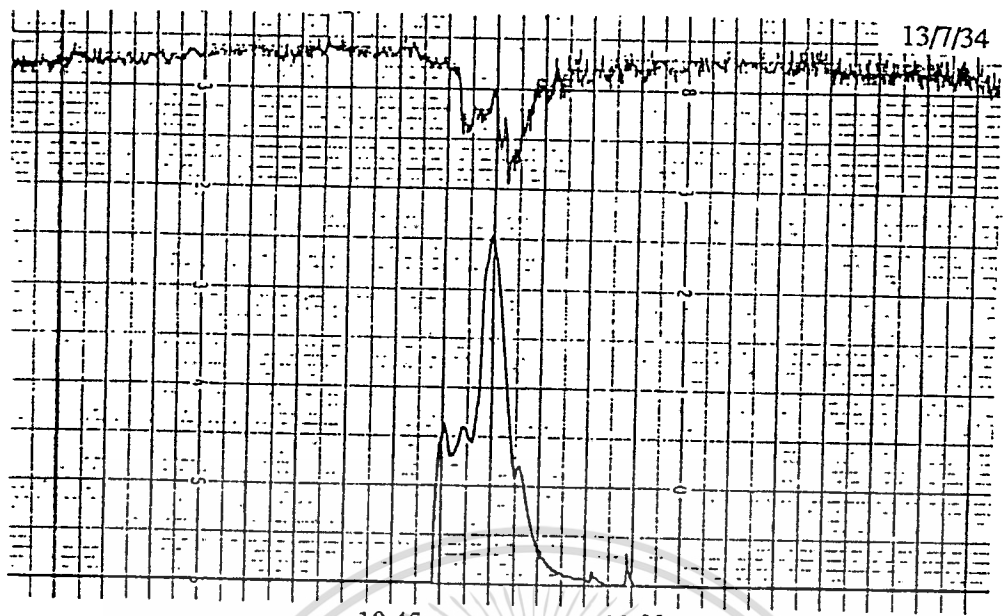
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

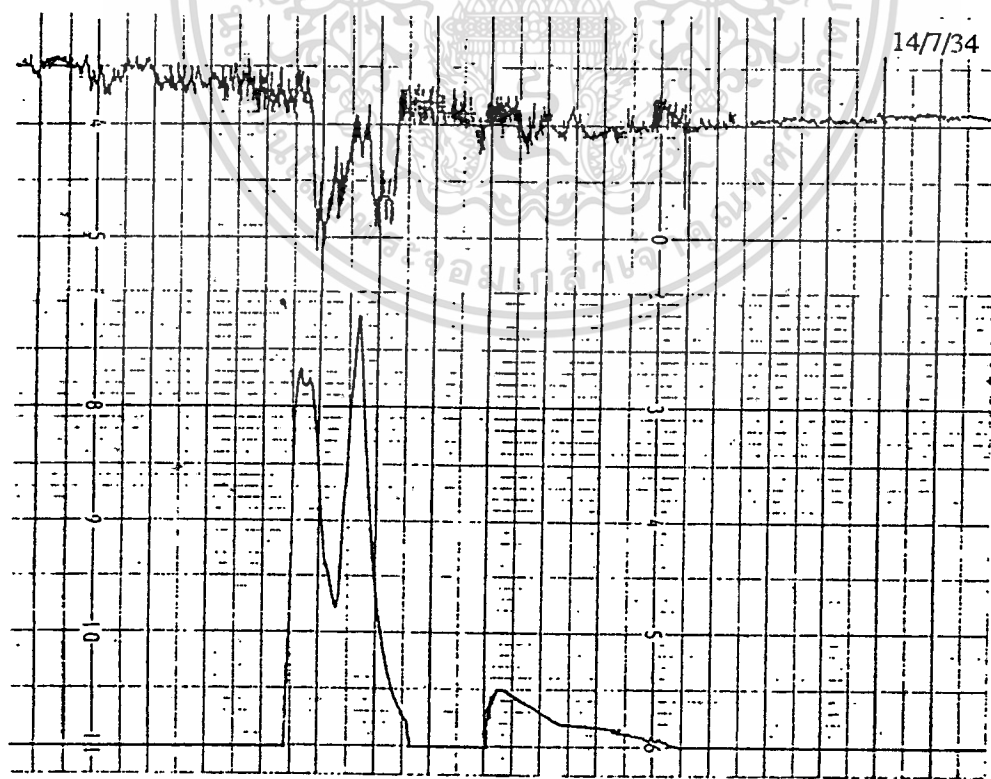


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



10.45

11.00

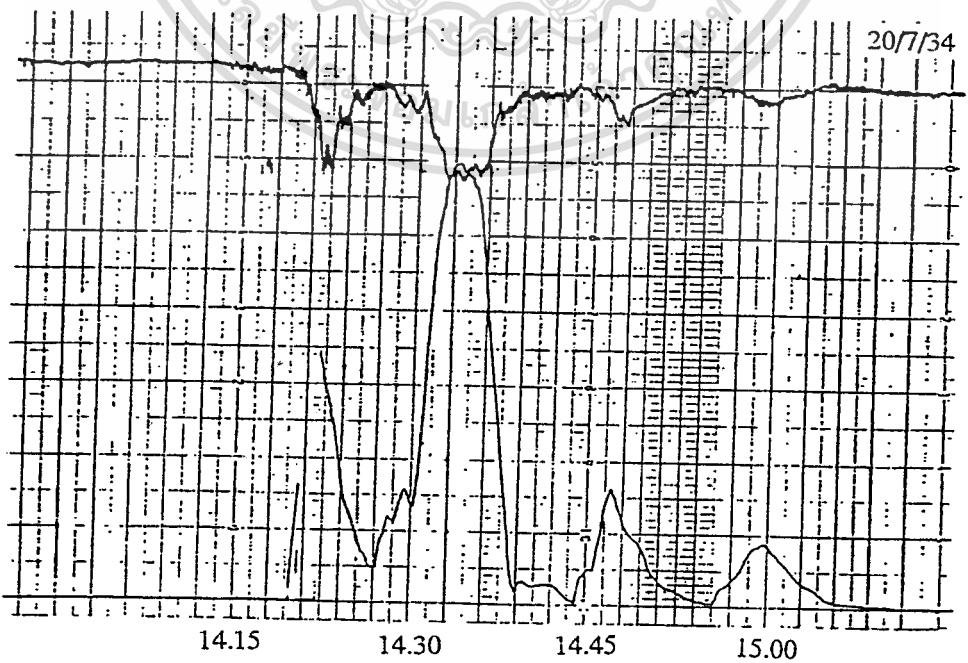
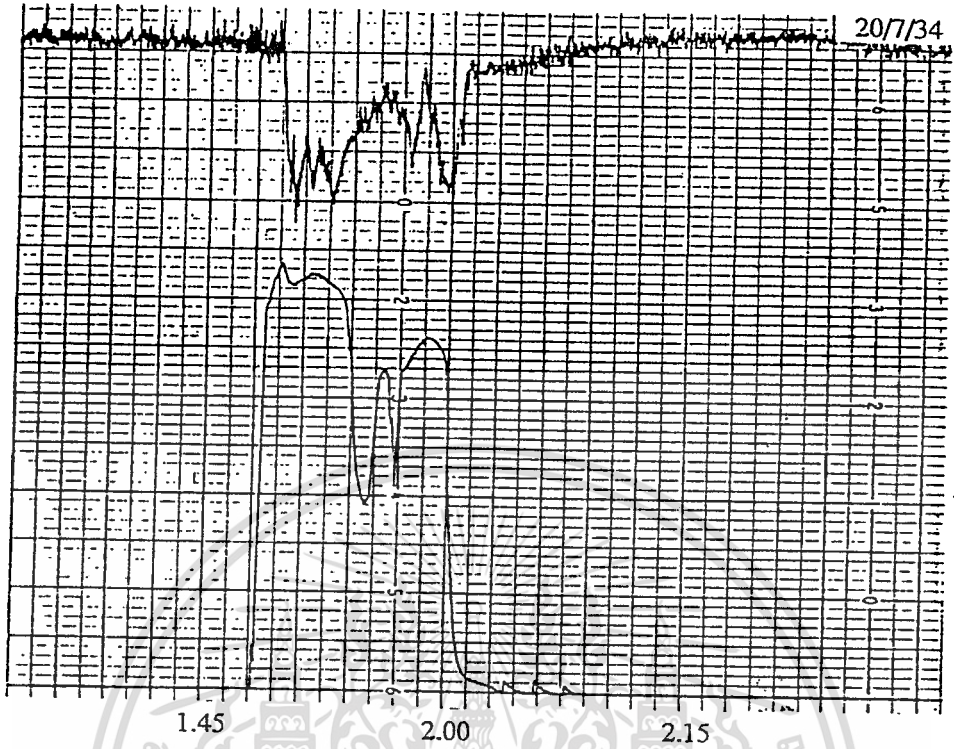


12.30

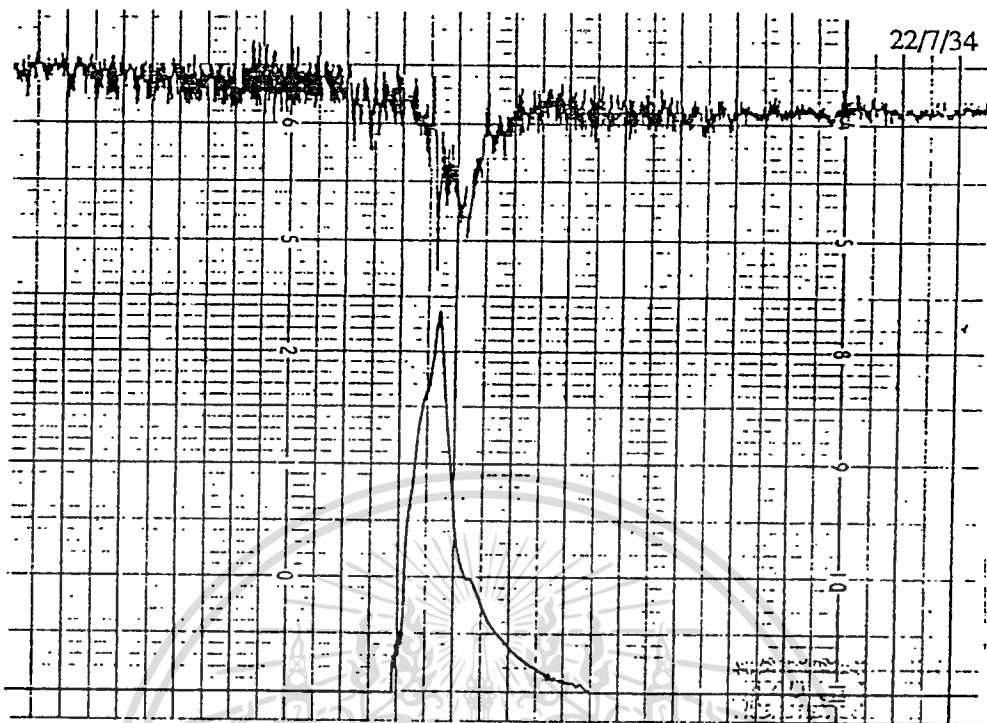
12.45

13.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

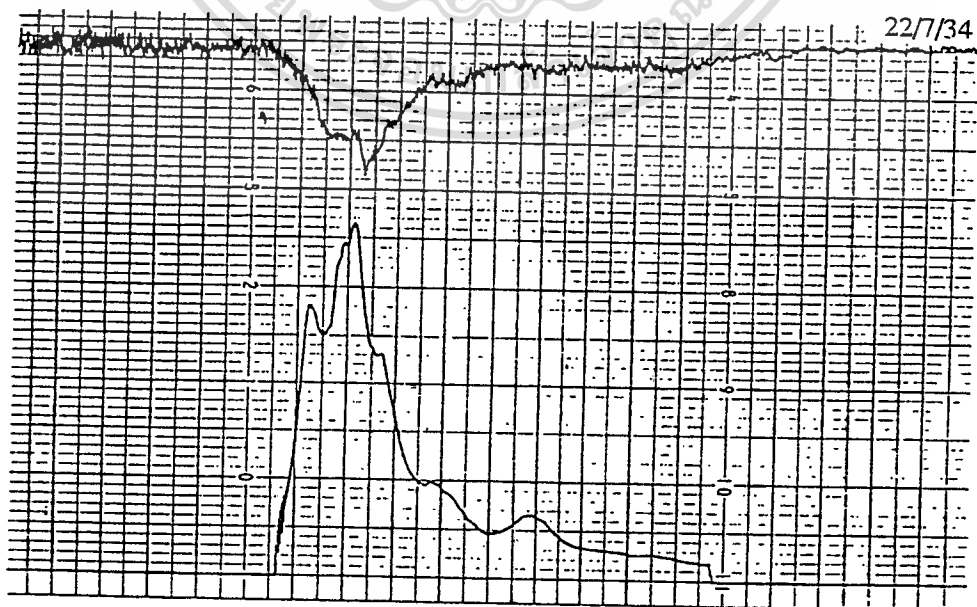


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



11.15

11.30

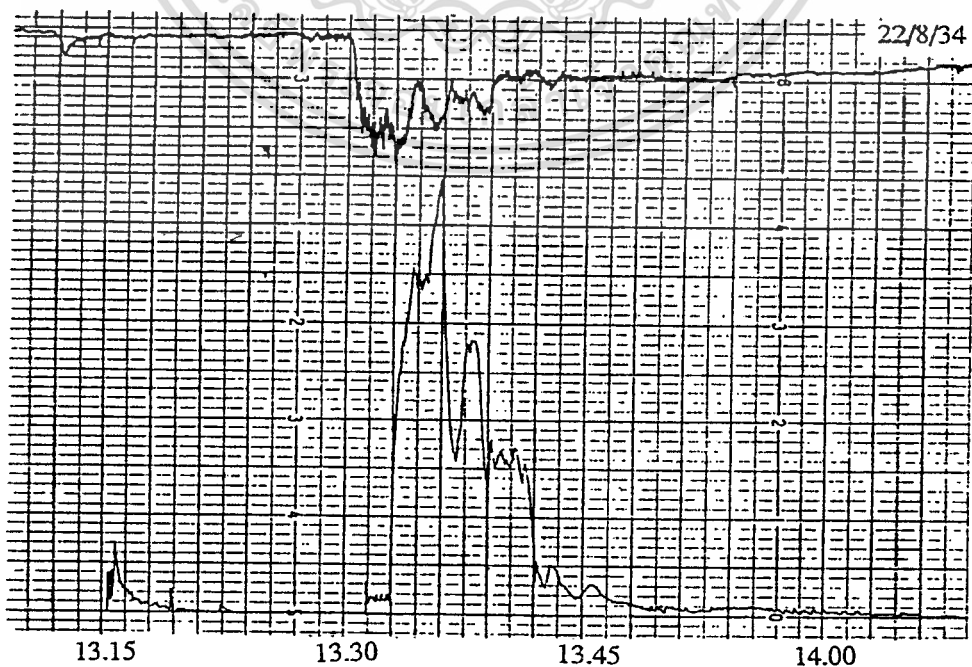
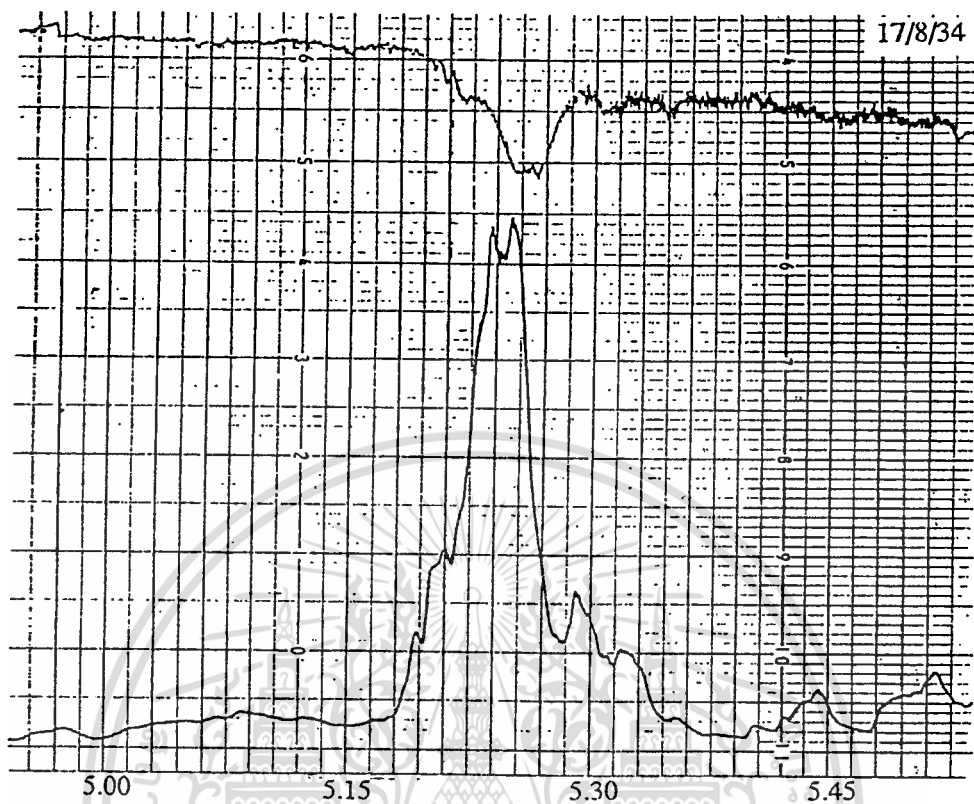


15.30

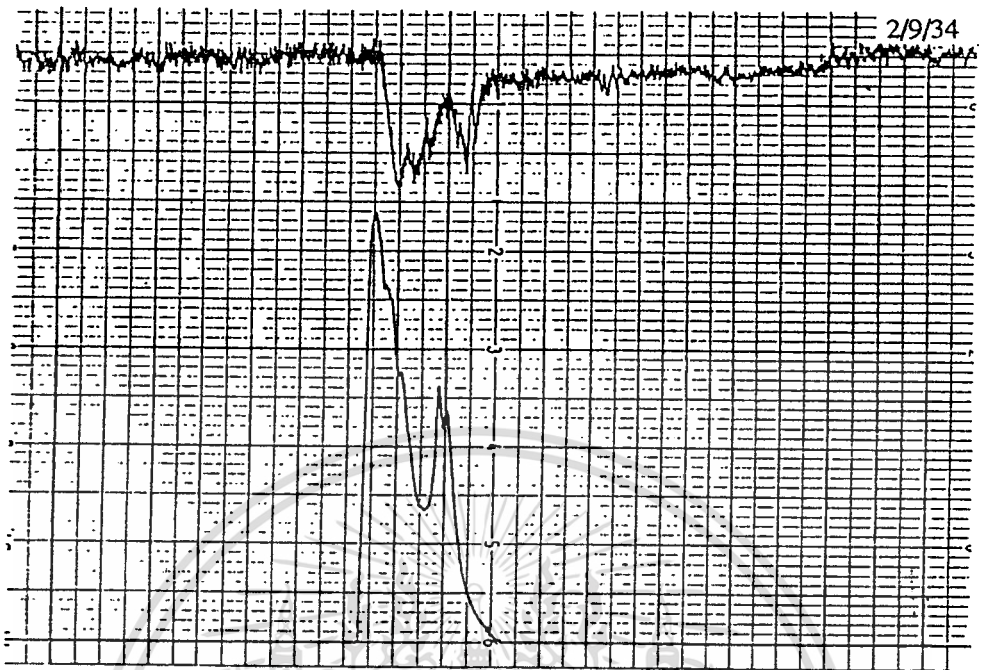
15.45

16.00

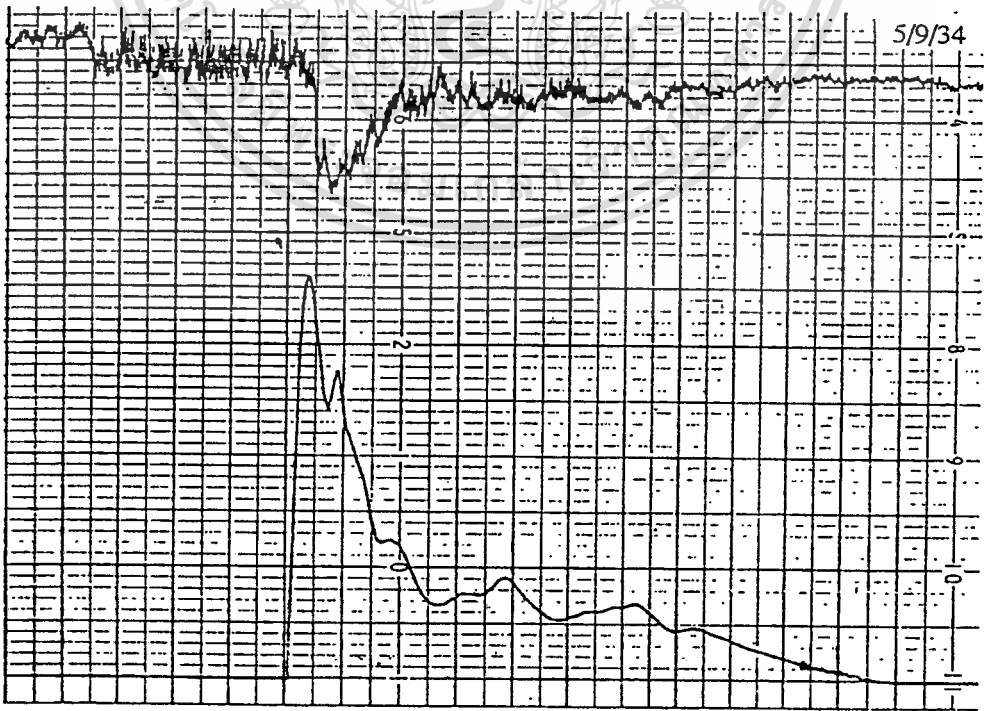
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

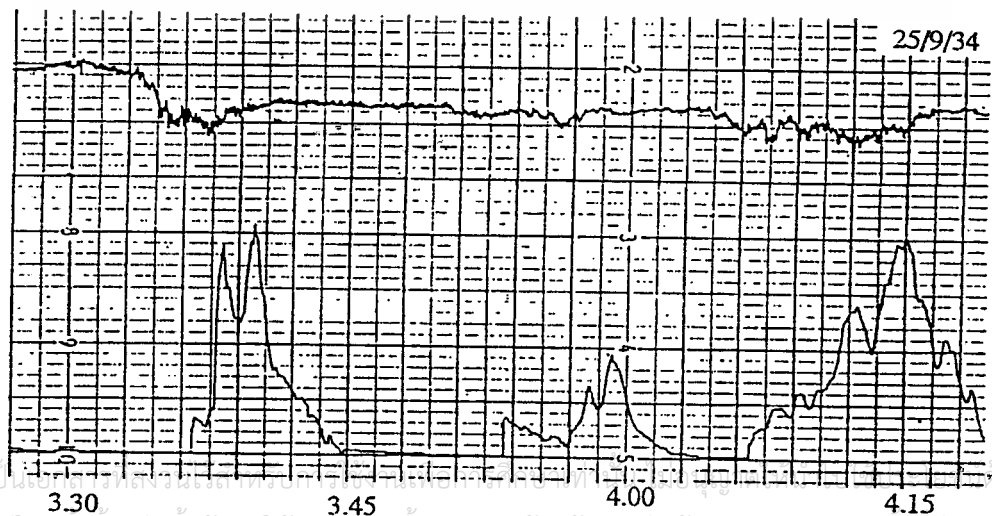
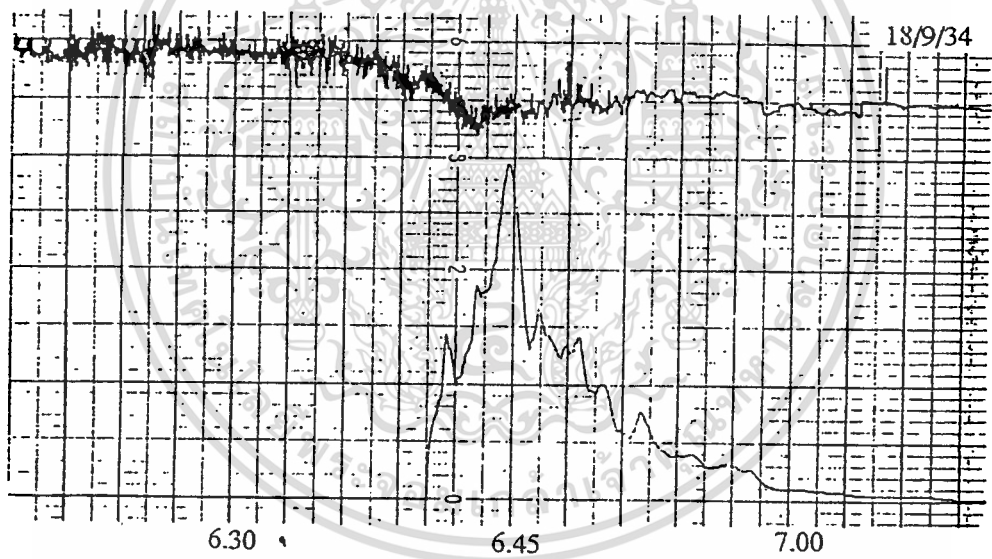
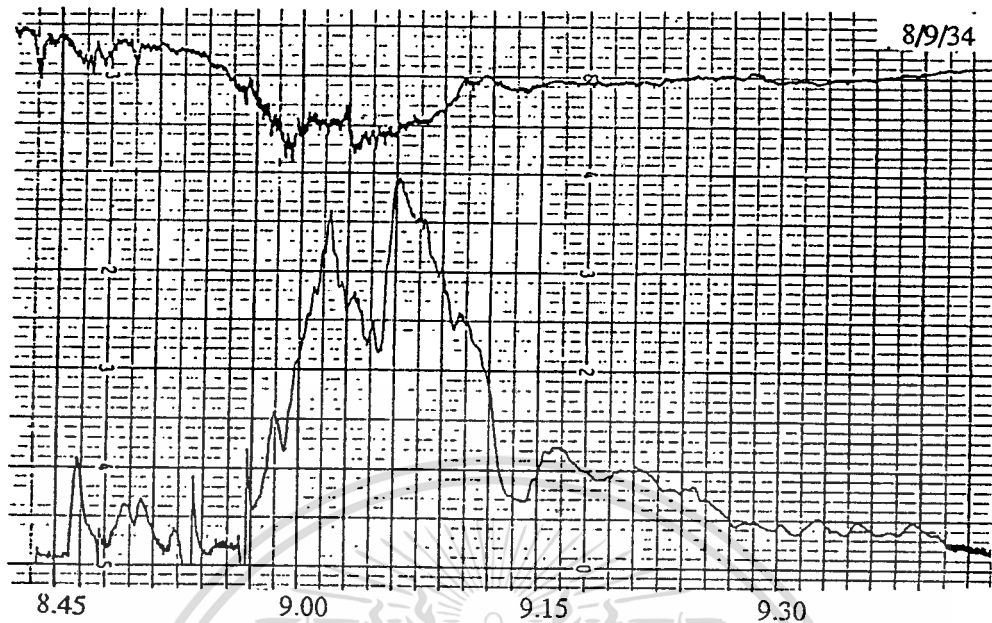


1.00 1.15 1.30

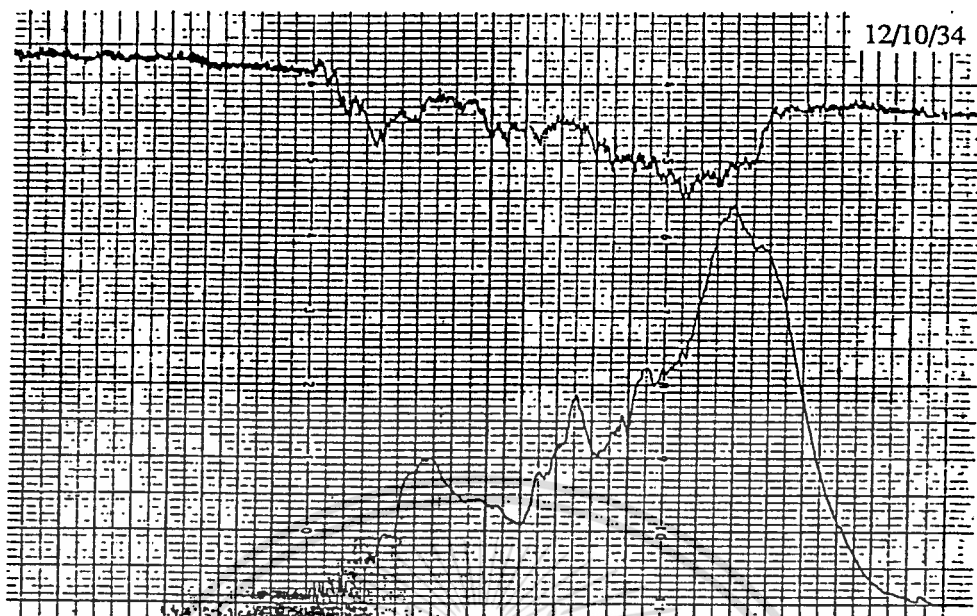


11.45 12.00 12.15

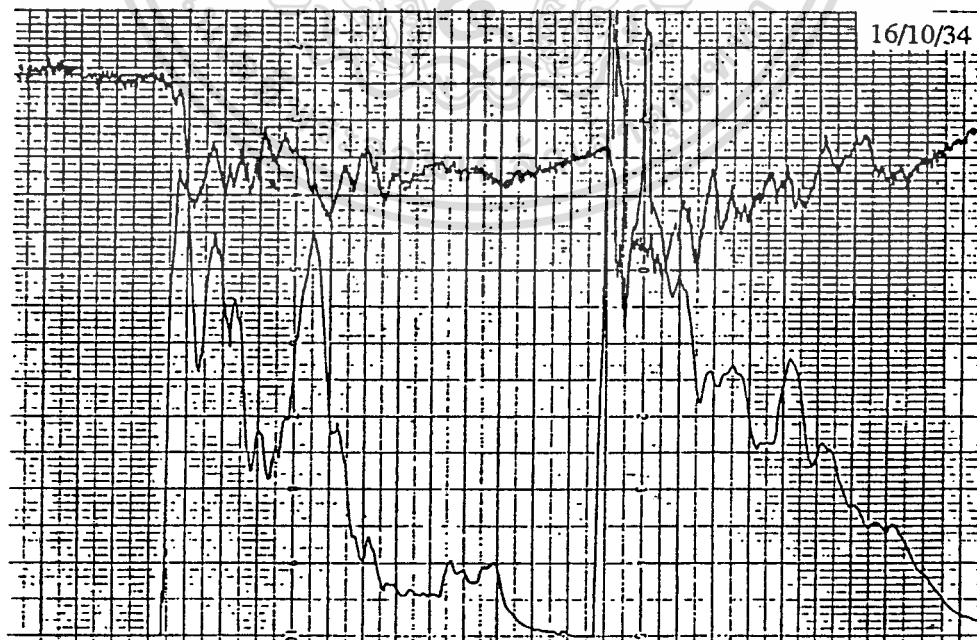
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

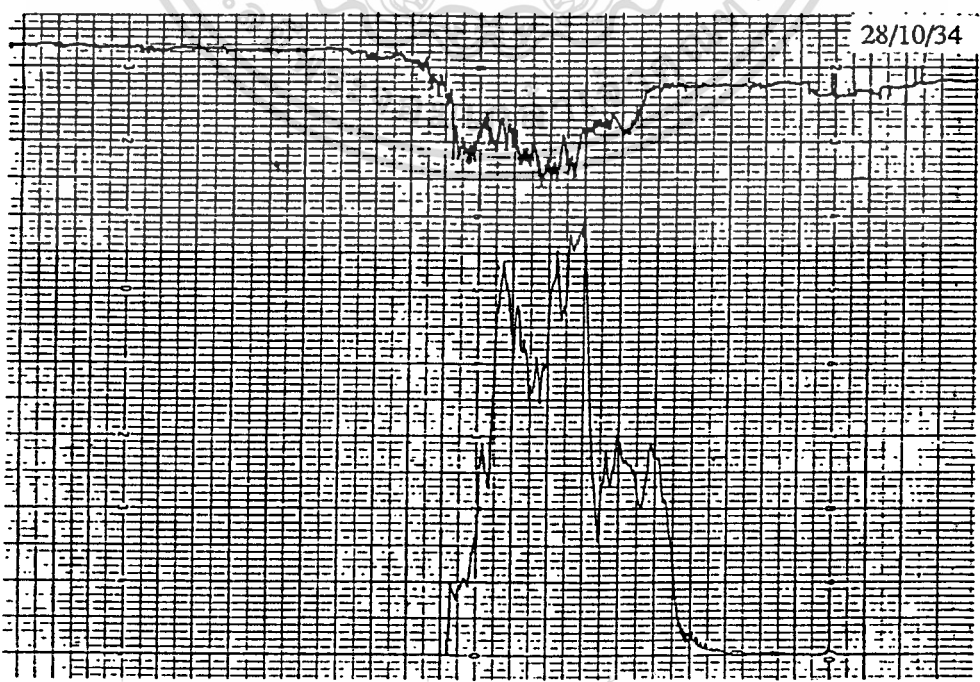
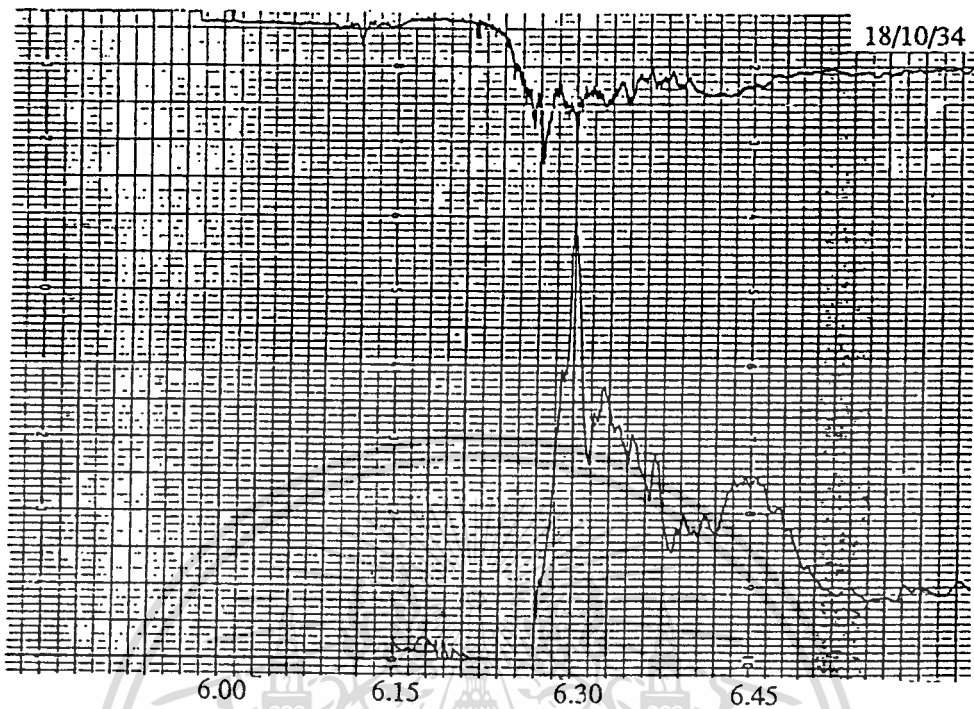


8.45 9.00 9.15 9.30

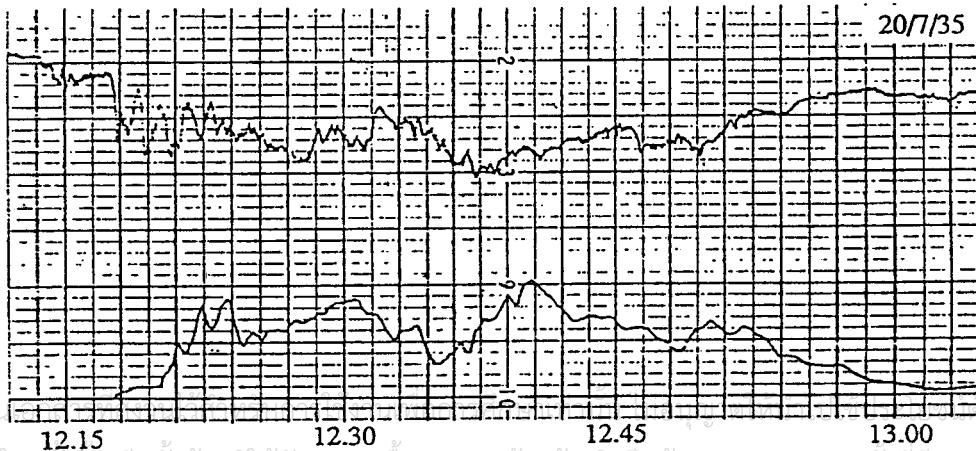
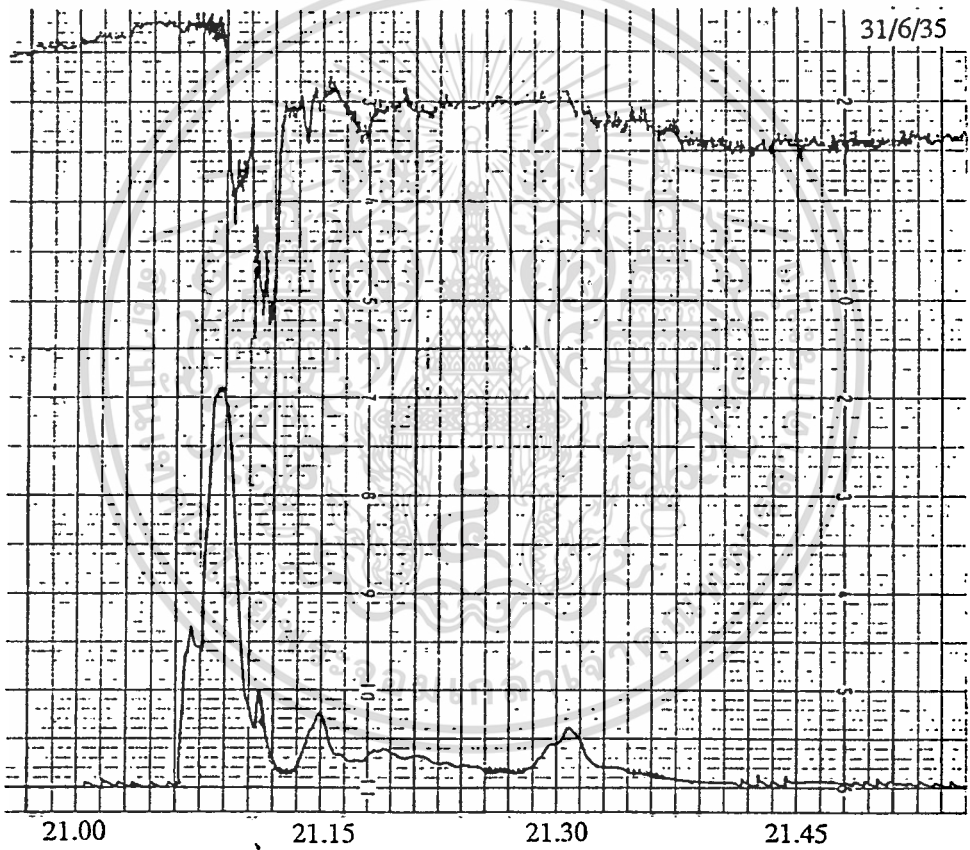
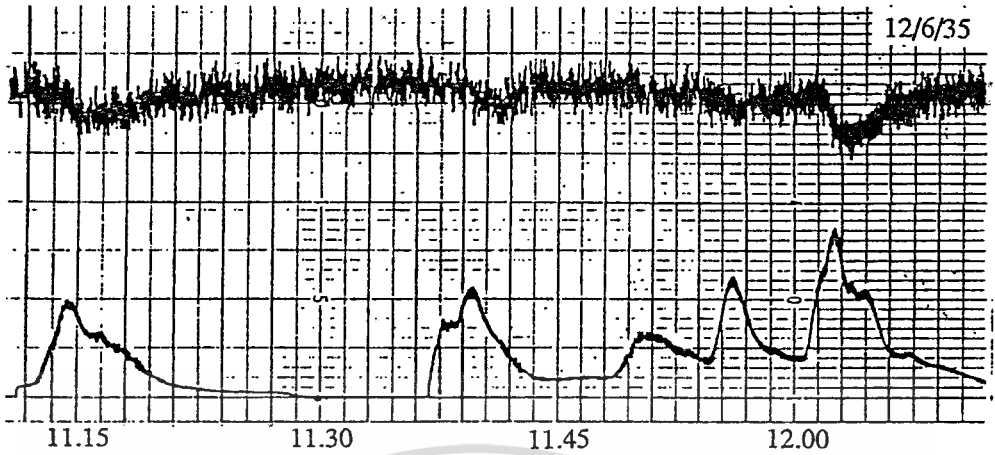


23.00 23.15 23.30 23.45 24.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

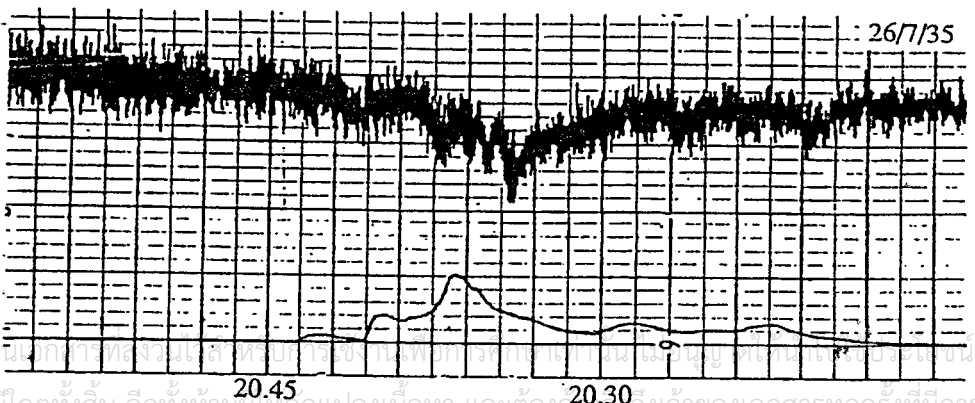
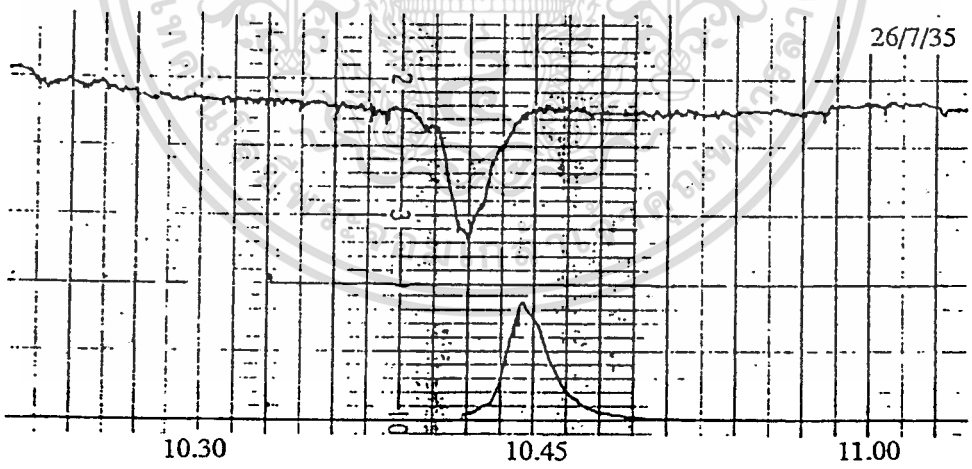
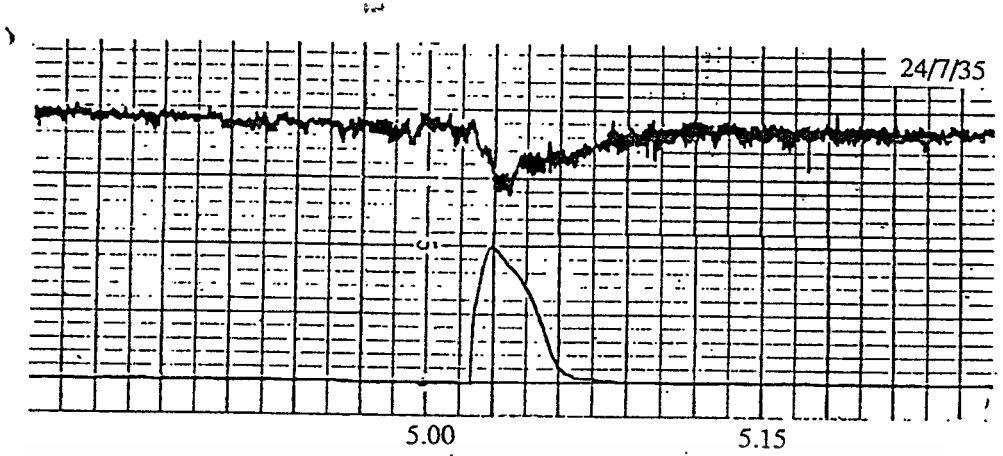


เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนไวสา 7.45 การใช้งาน 8.00 รัชศึกษาเท 8.15 มอนูญาตไ 8.30 ปไซประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

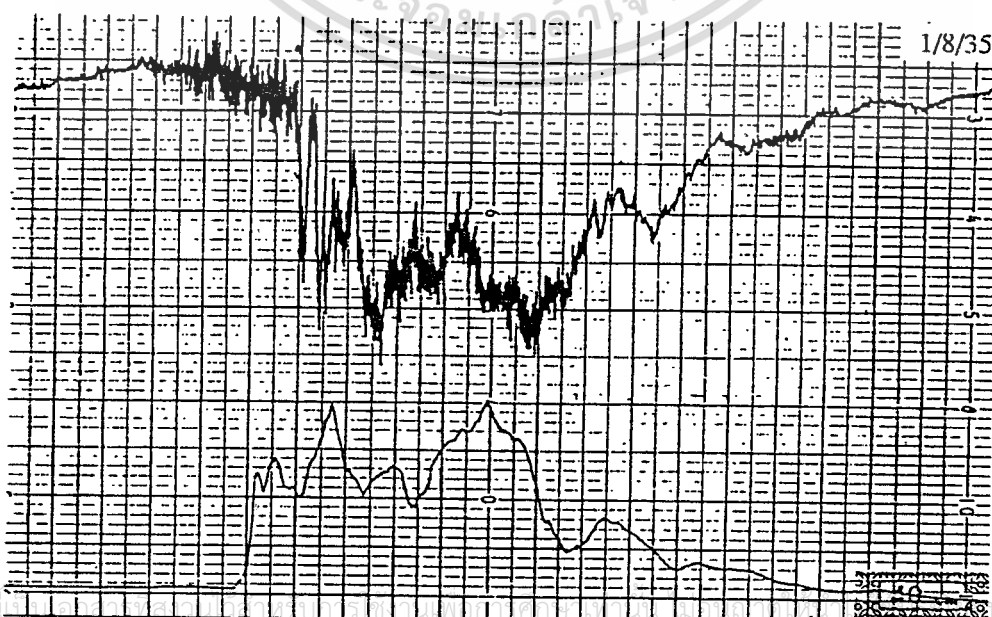
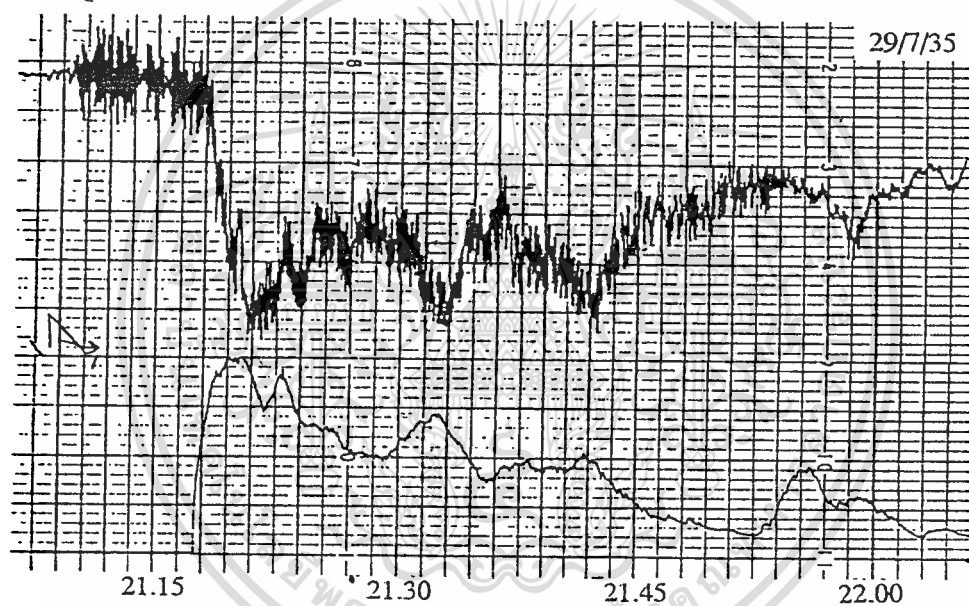
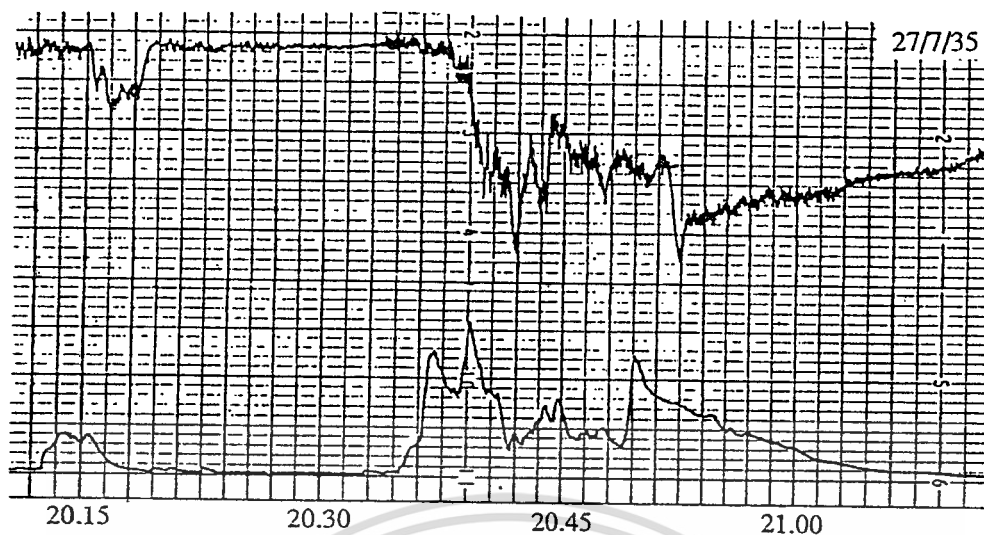


เอกสารนี้เป็นเอกสารทางการแพทย์ การคัดลอกโดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

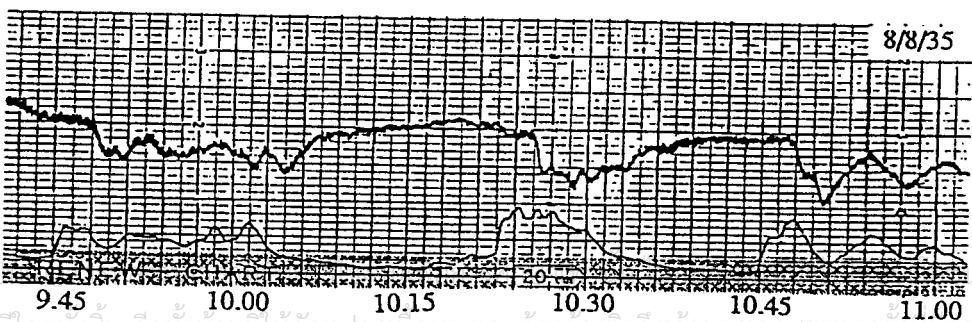
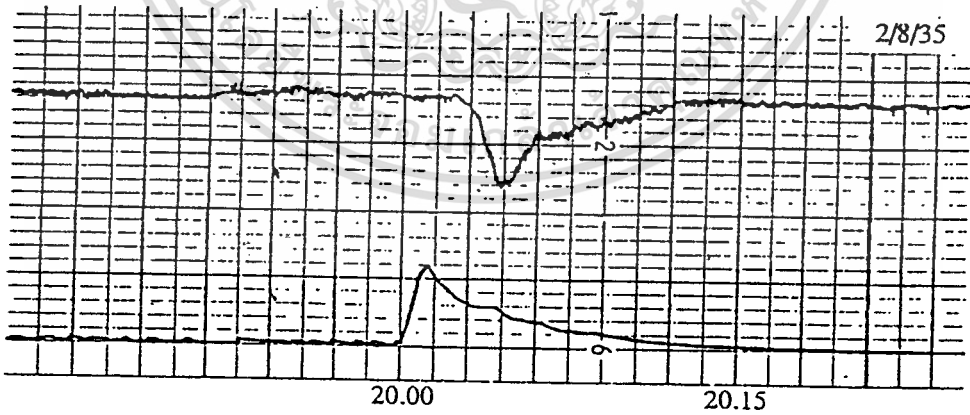
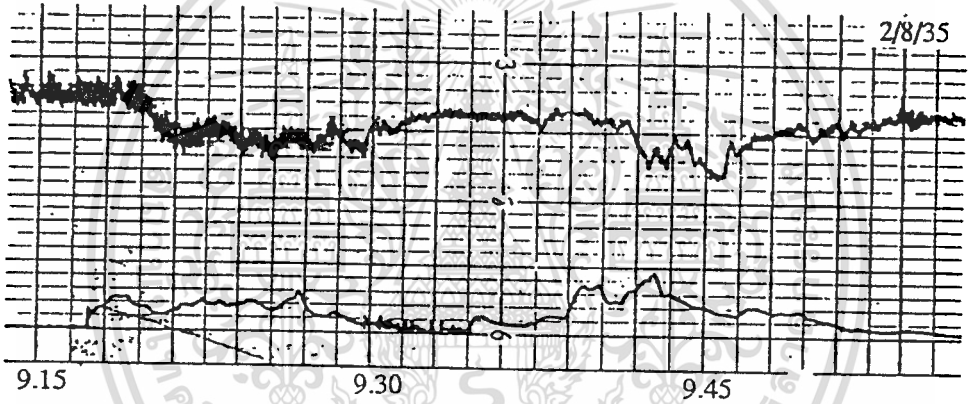
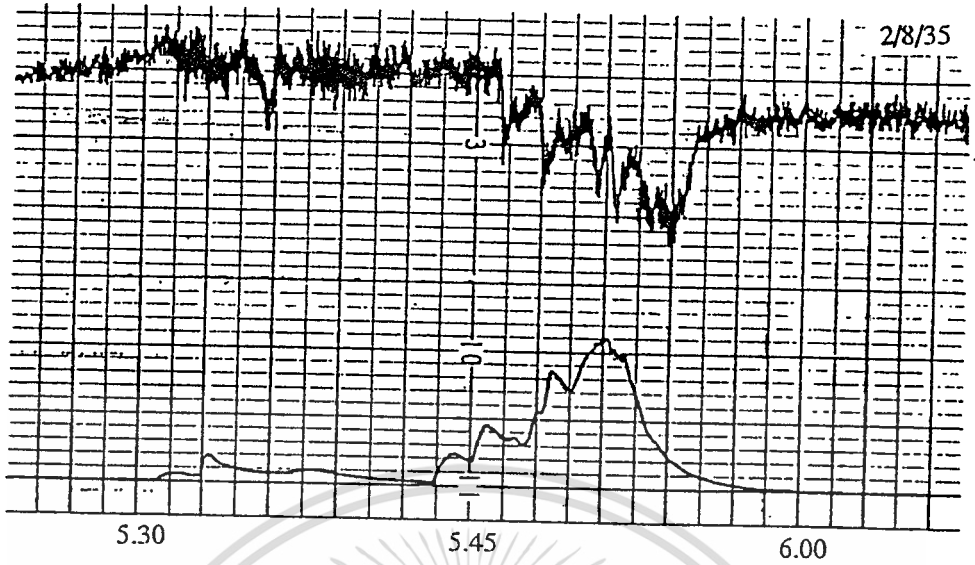


เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของโรงพยาบาลขอนแก่น อนุญาตให้นำไปใช้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

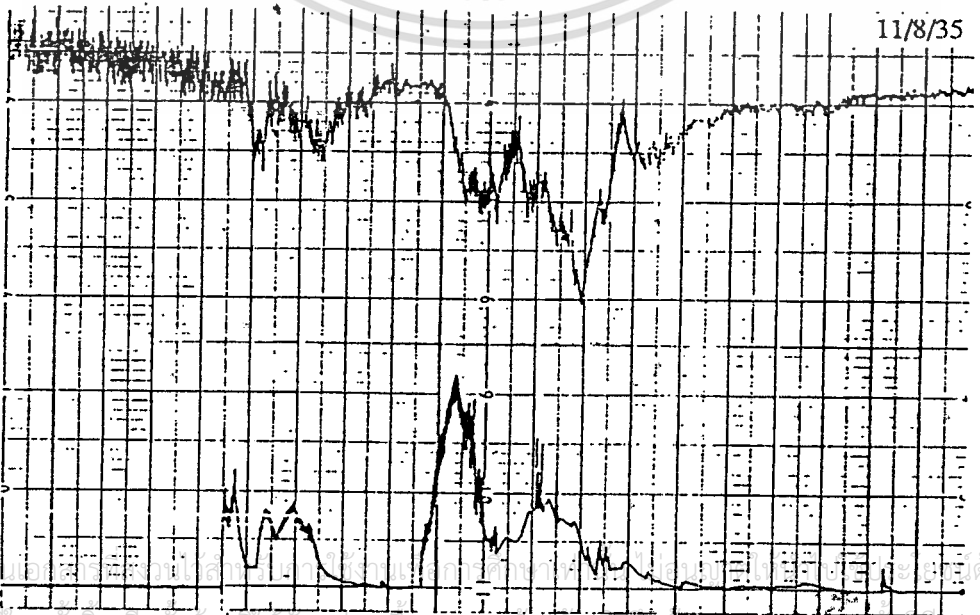
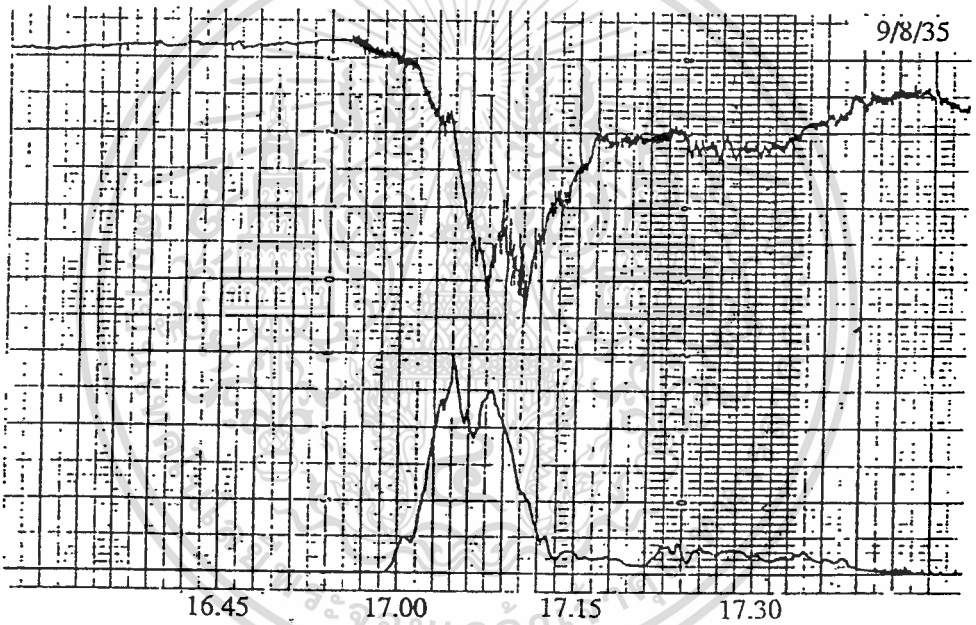
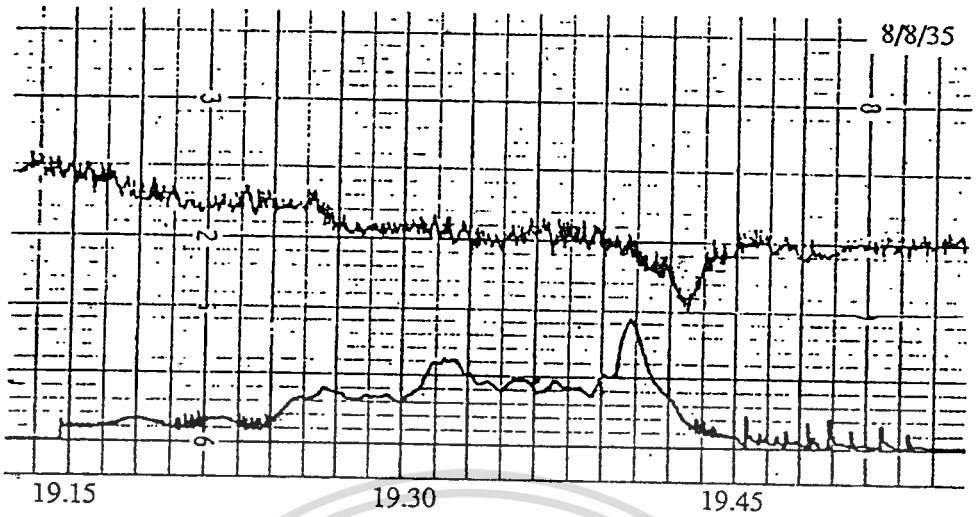


เอกสารนี้เป็นเอกสารทางการแพทย์ที่บันทึกโดยเครื่องบันทึกการเต้นของหัวใจ (ECG) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

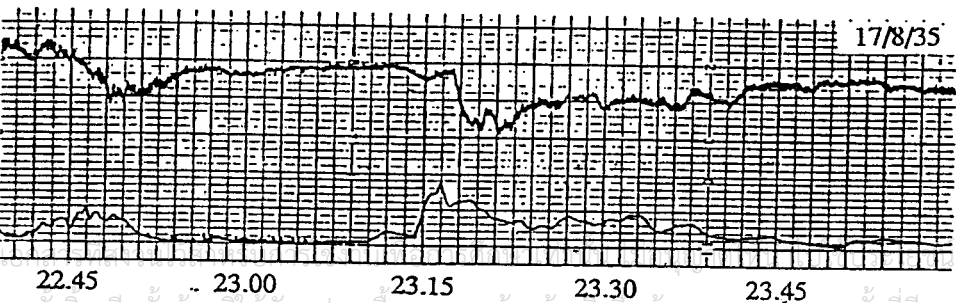
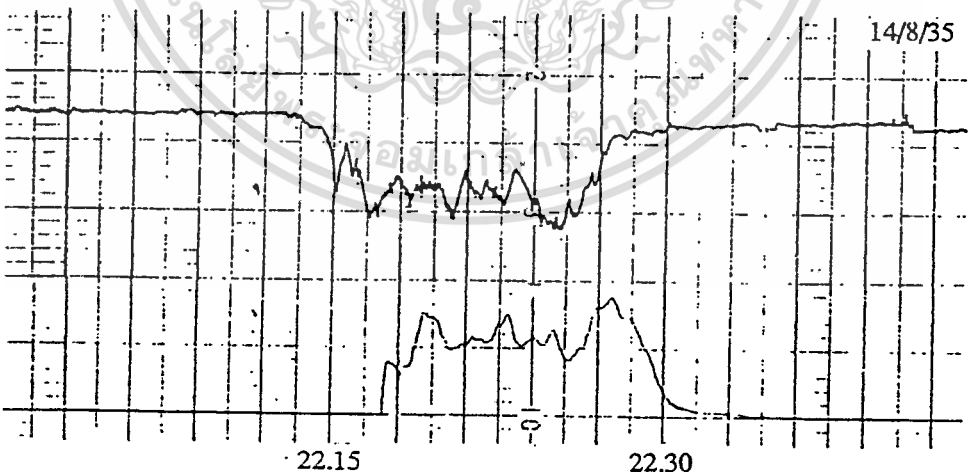
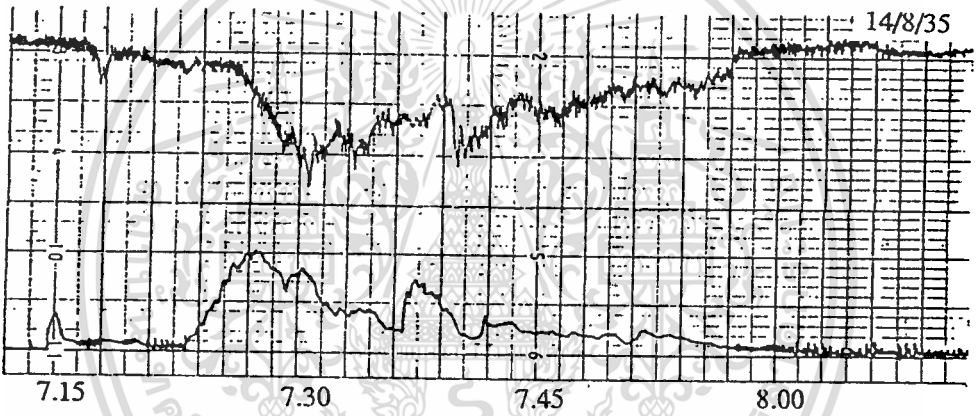
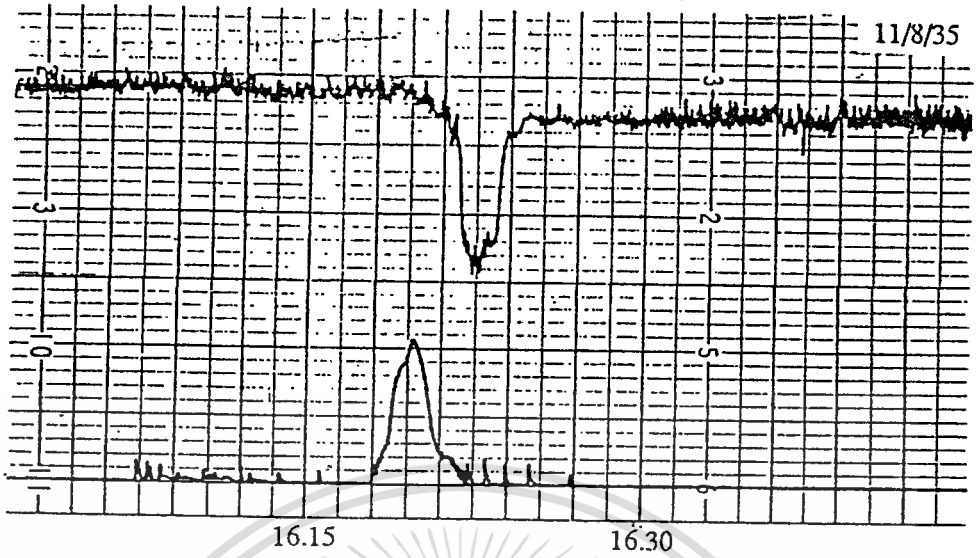
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



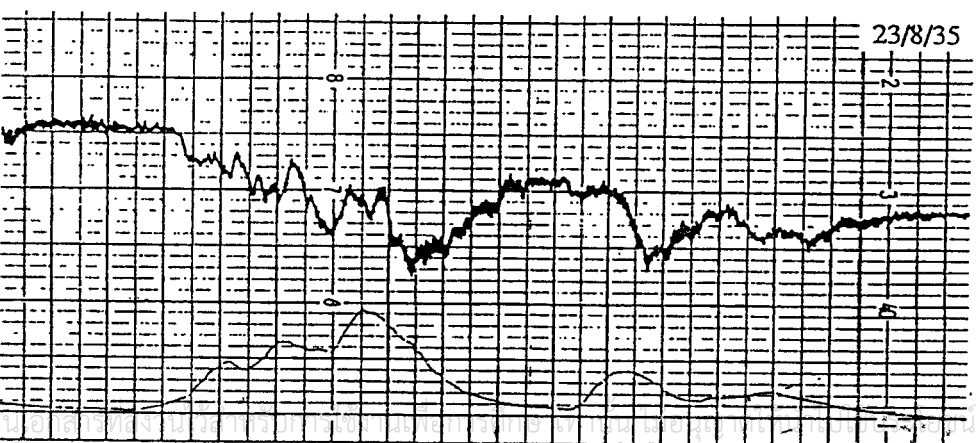
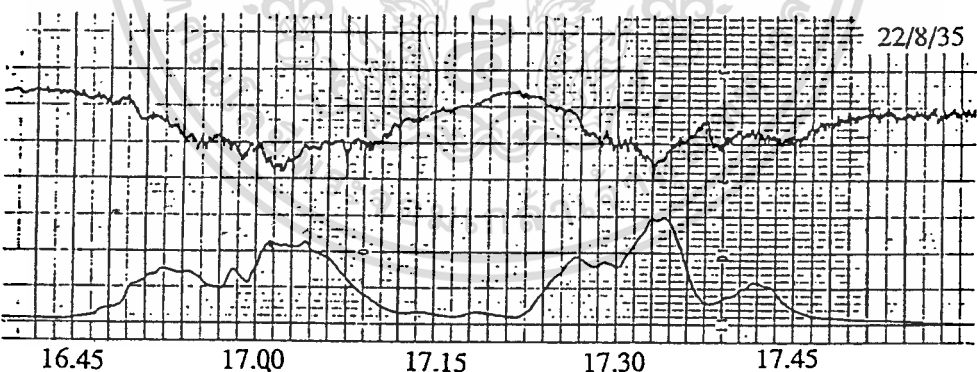
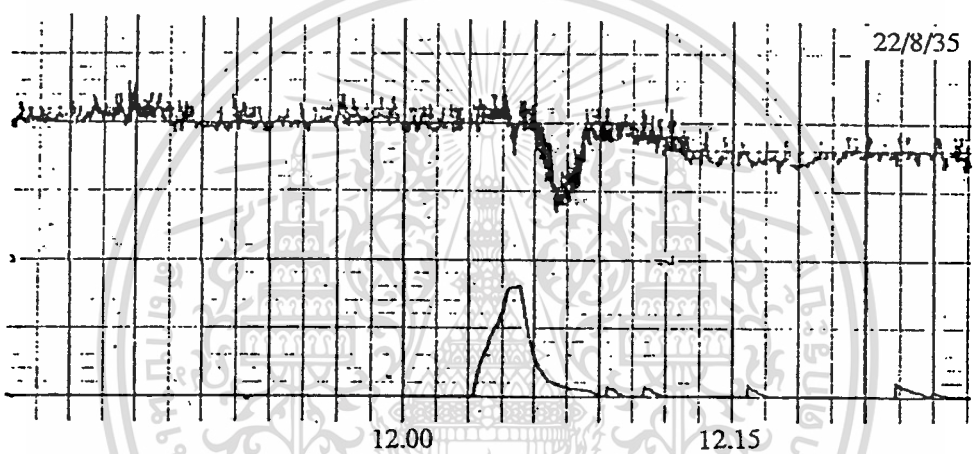
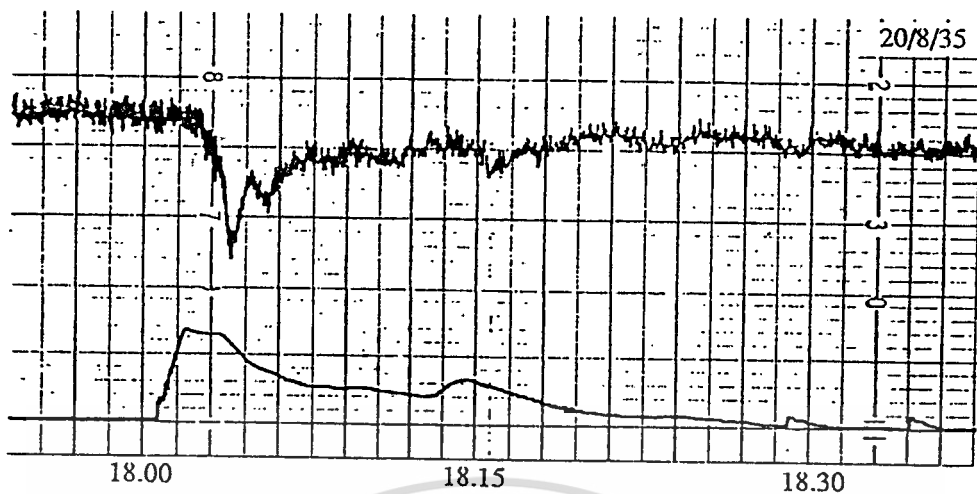
เอกสารนี้เป็นการคัดลอกจากบันทึกทางการแพทย์ที่จัดทำขึ้นโดยบุคลากรทางการแพทย์ในโรงพยาบาลศิริราช กรุงเทพมหานคร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารของโรงพยาบาล...
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ออกท 9.00 มีเหตุดแปลงเนอ 9.15 และตองอ้างอิงถึง 9.30

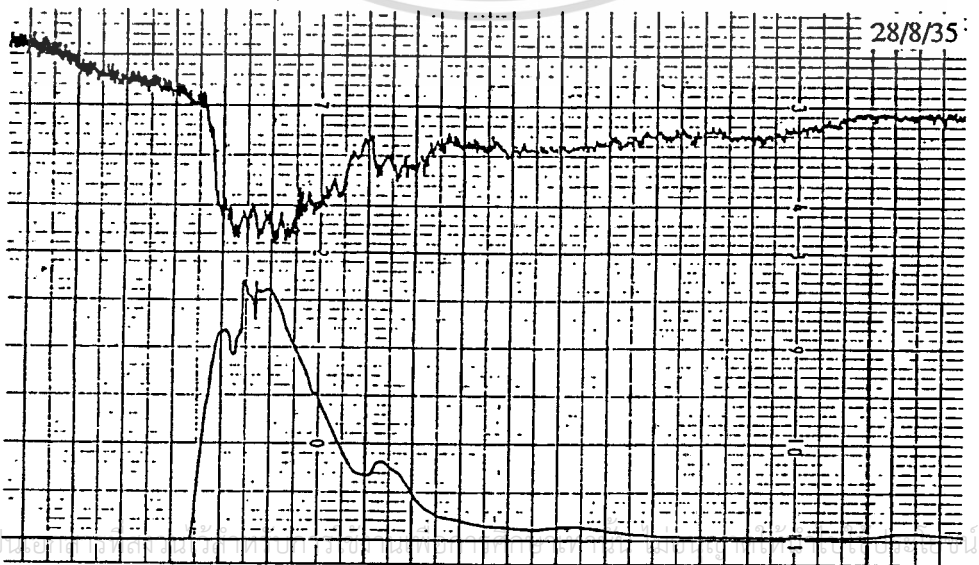
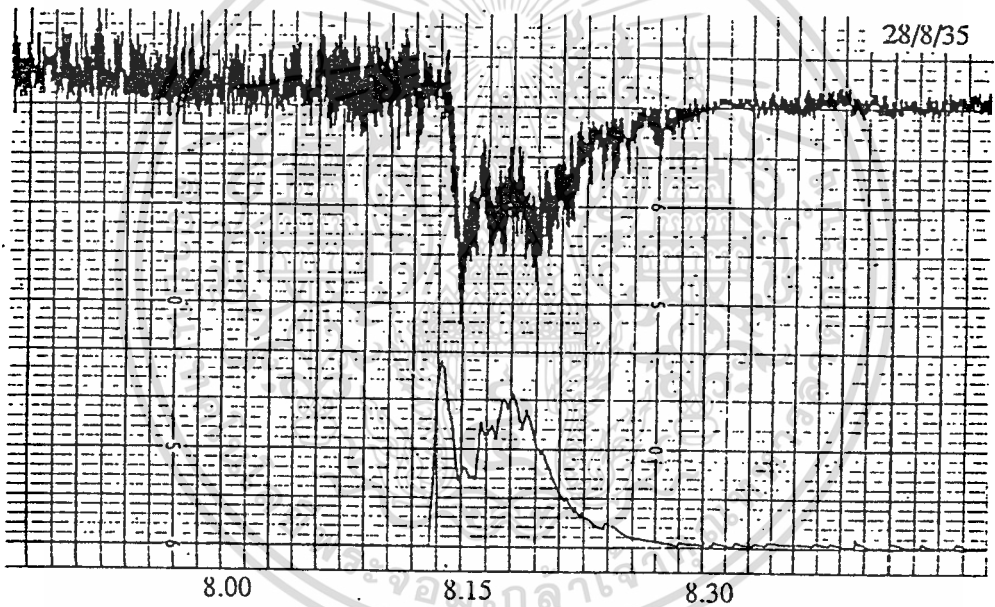
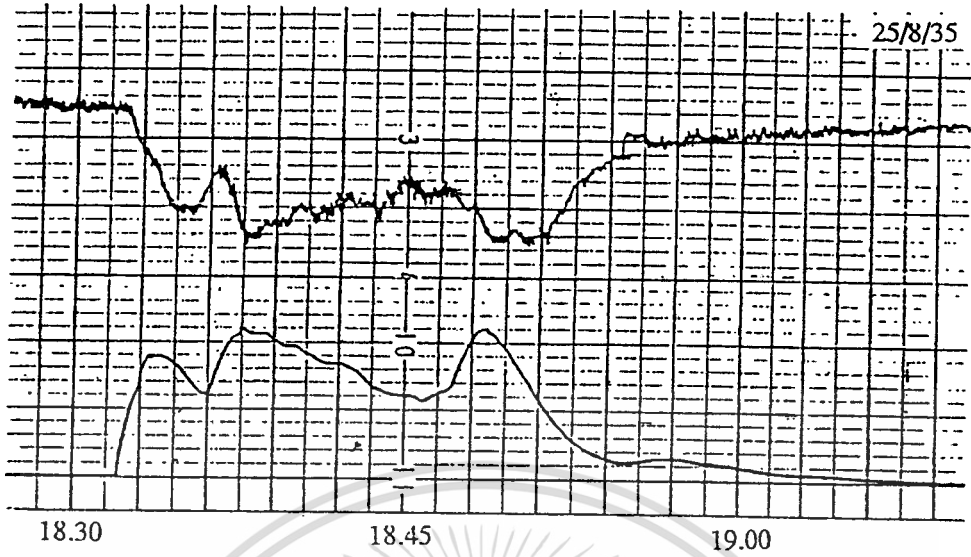


เอกสารนี้เป็น... ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



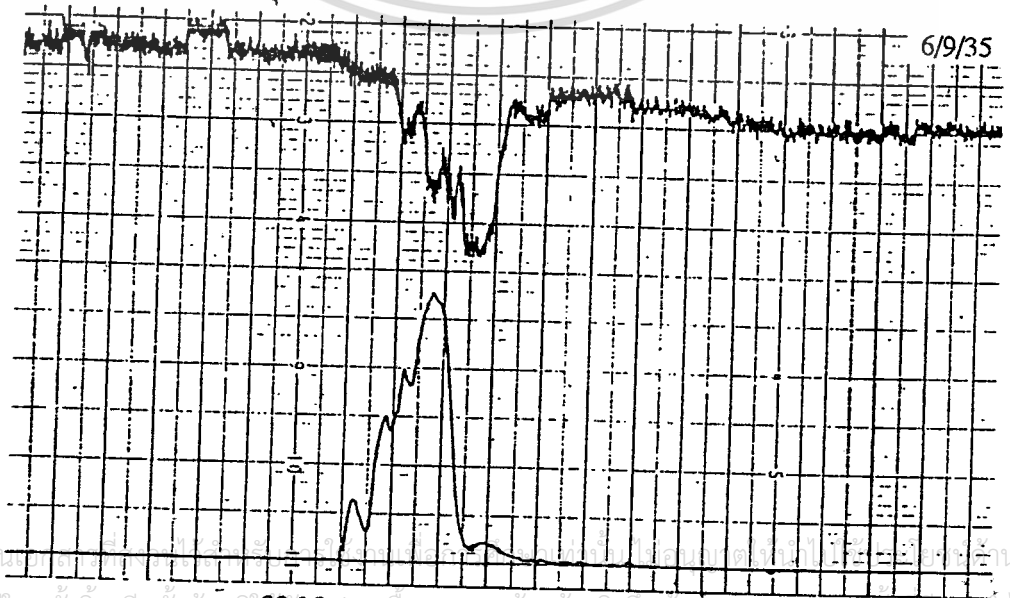
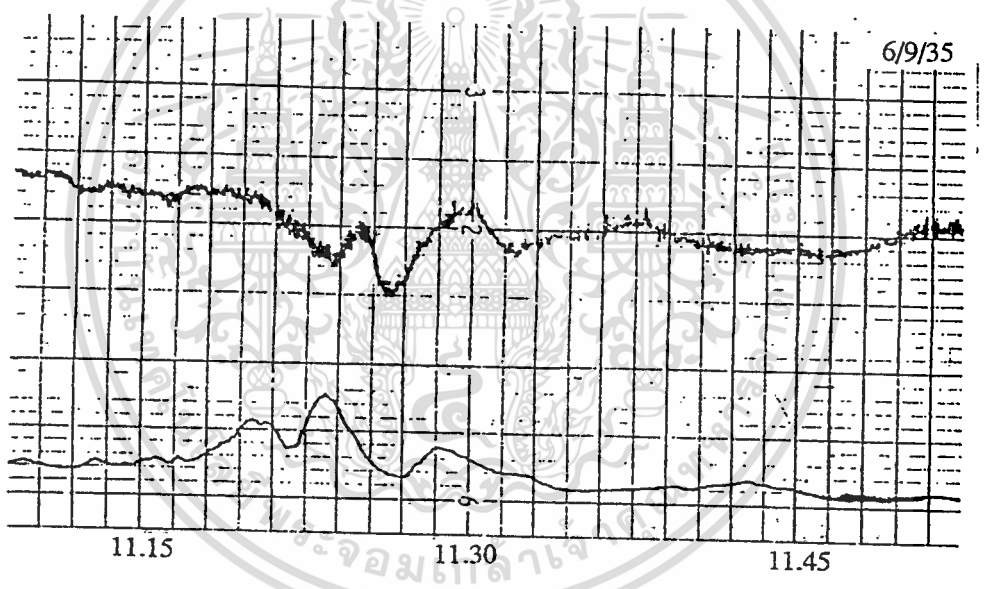
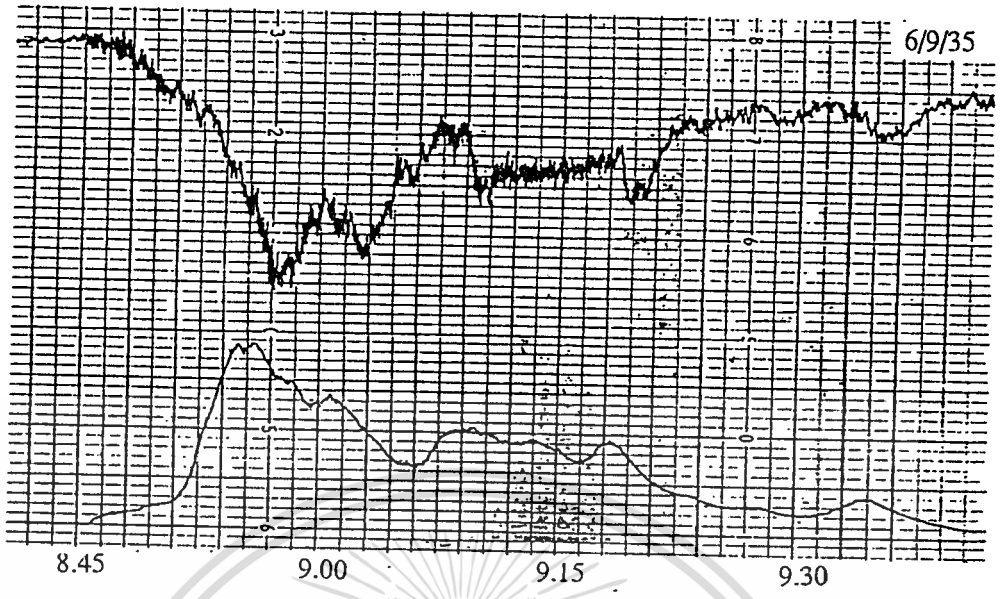
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

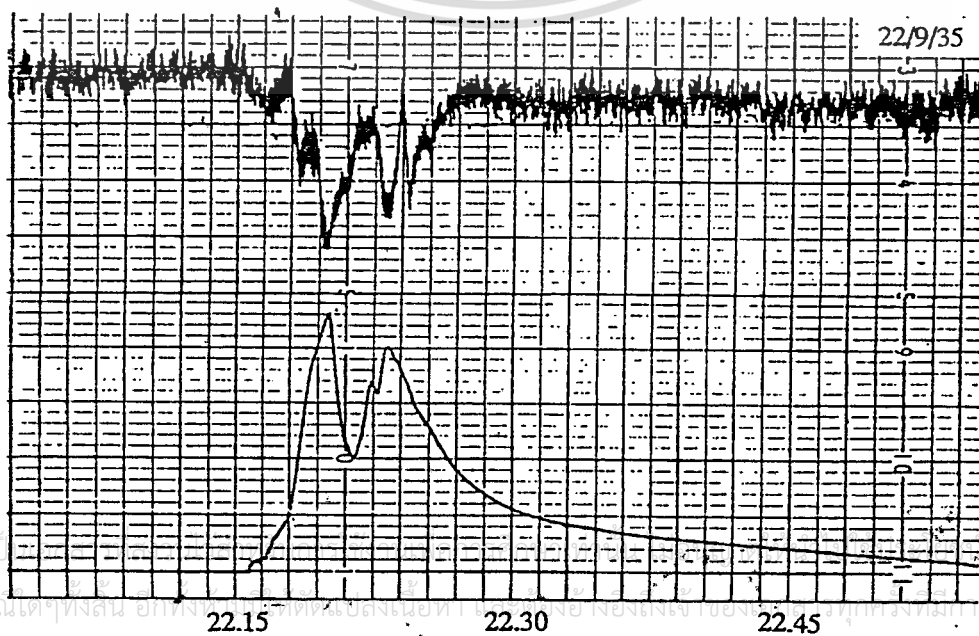
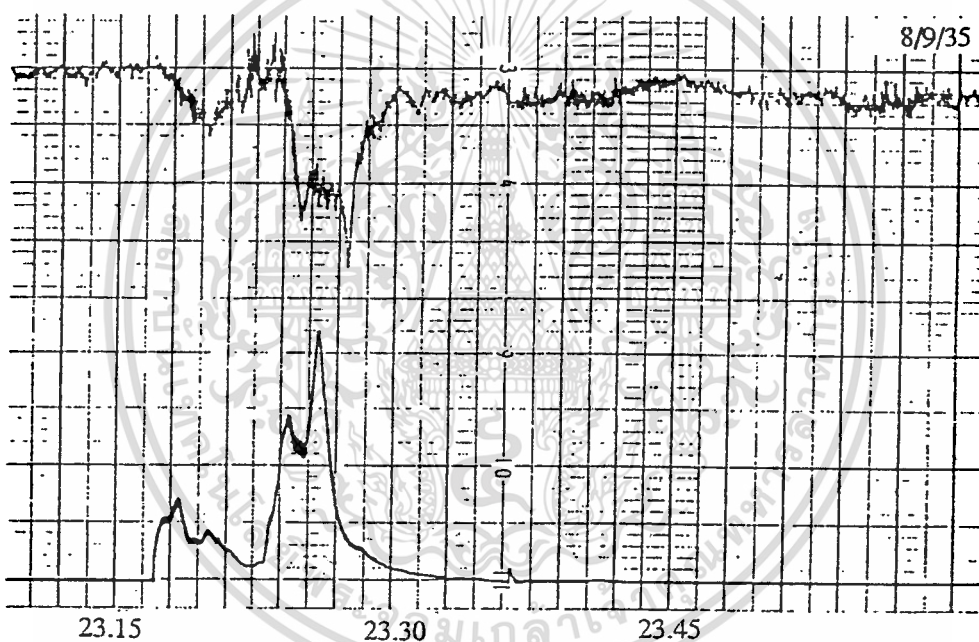
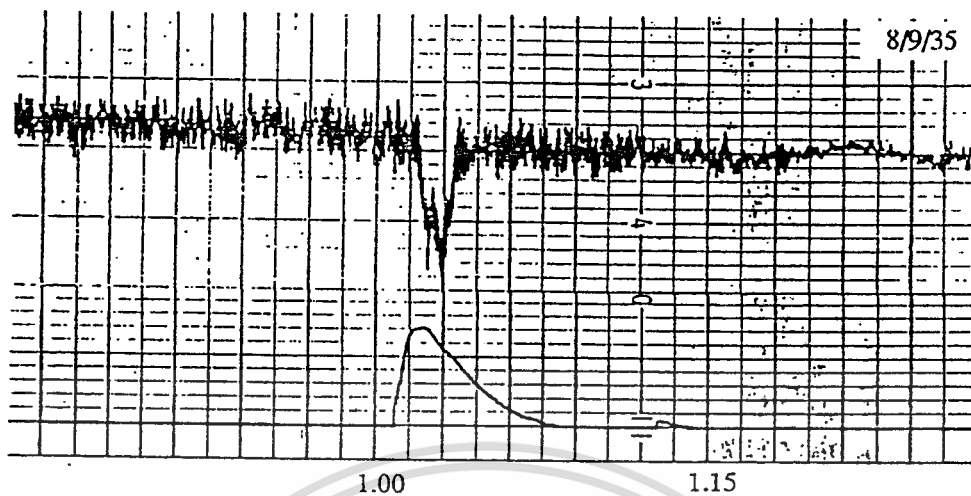


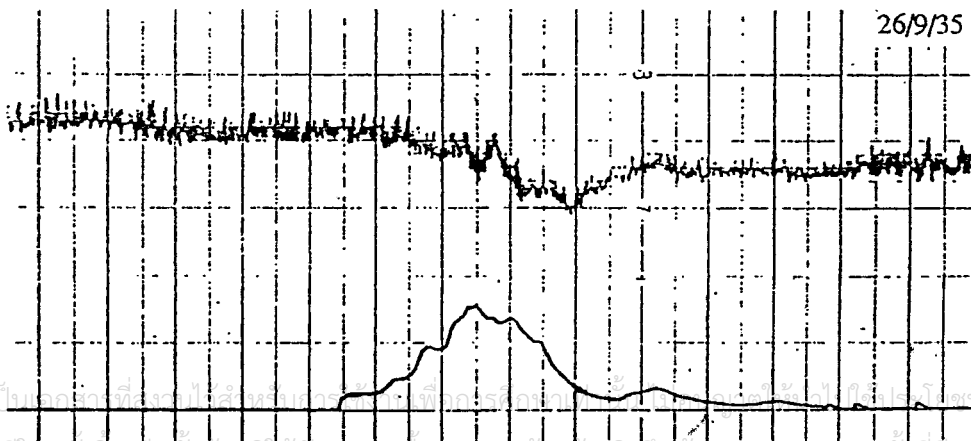
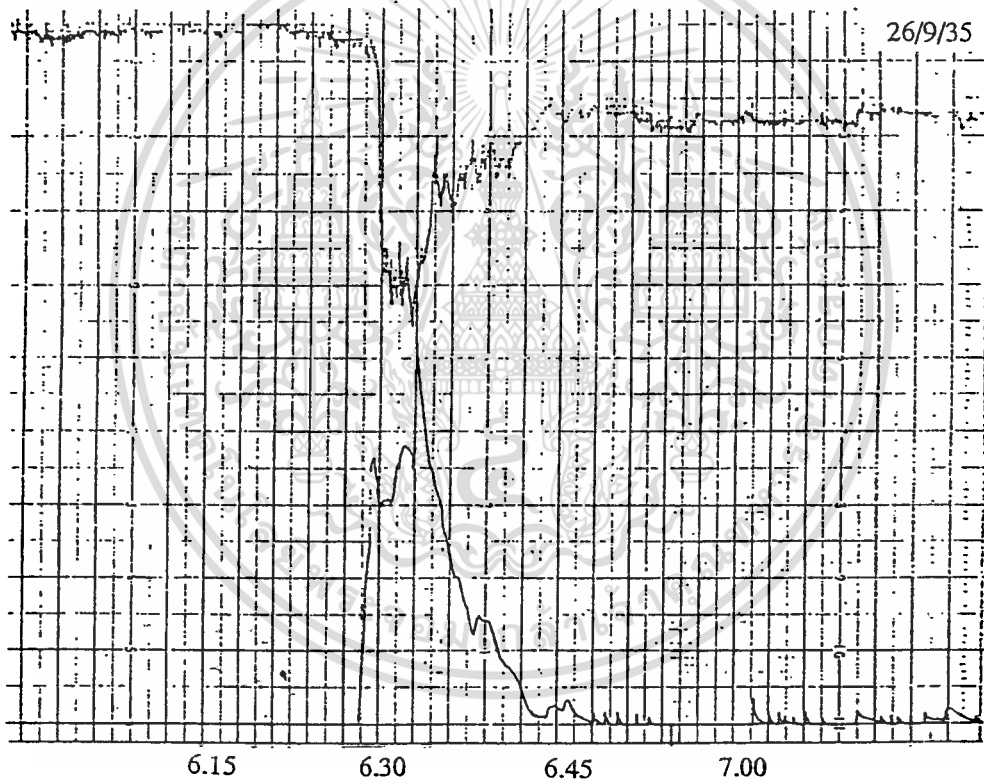
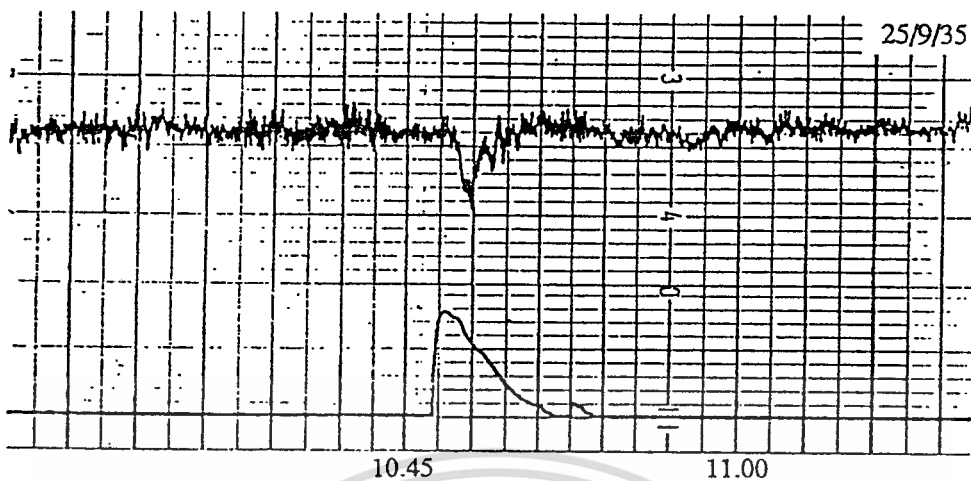
เอกสารนี้เป็นเอกสารทางการแพทย์ที่จัดทำขึ้นเพื่อการดูแลสุขภาพเท่านั้น ไม่ควรนำมาใช้เพื่อการวินิจฉัยโรคหรือการตัดสินใจทางการแพทย์ใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

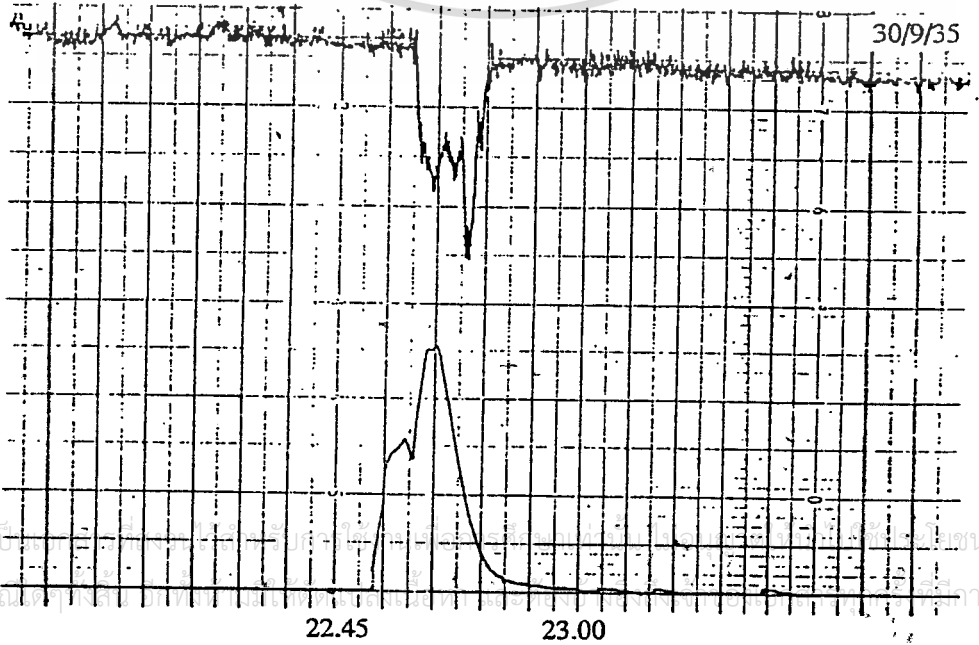
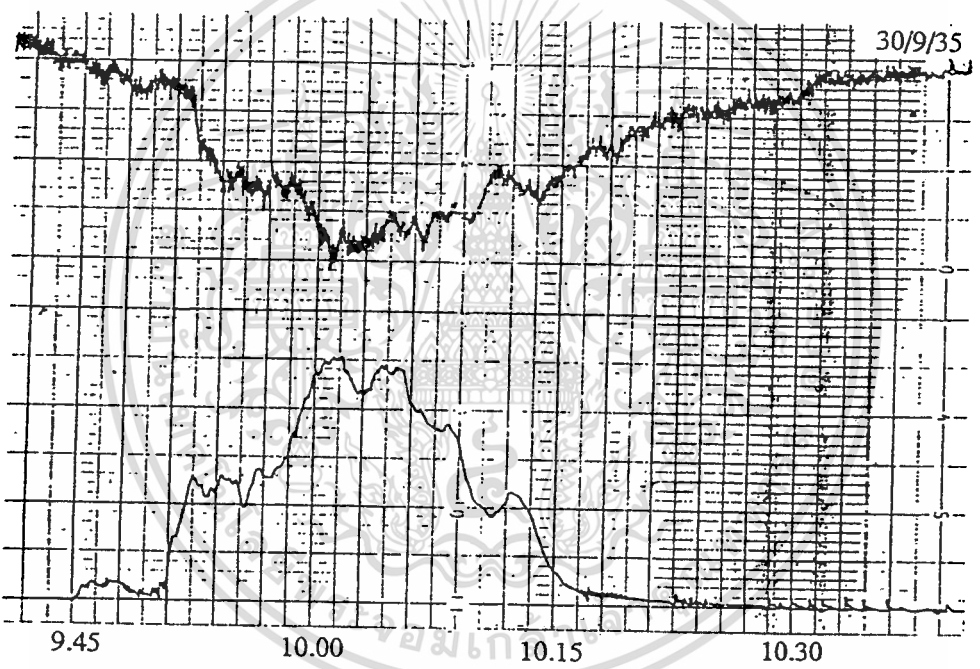
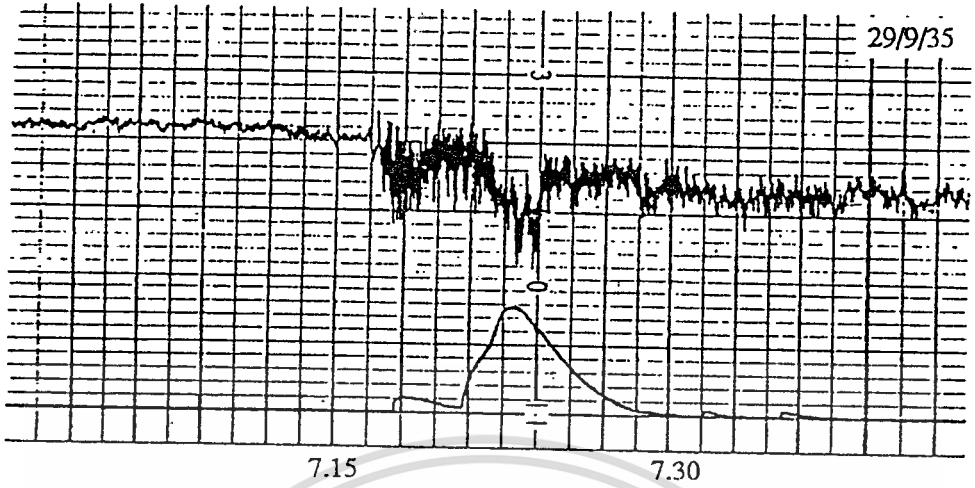


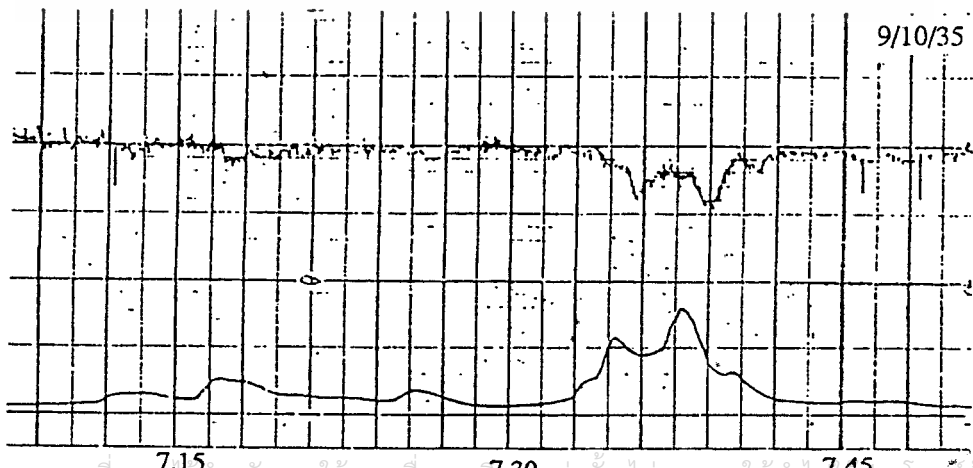
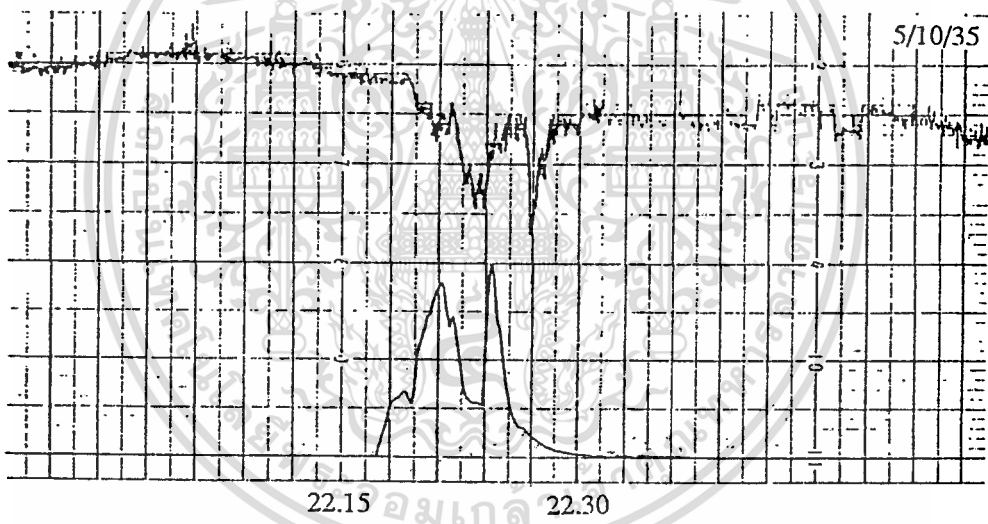
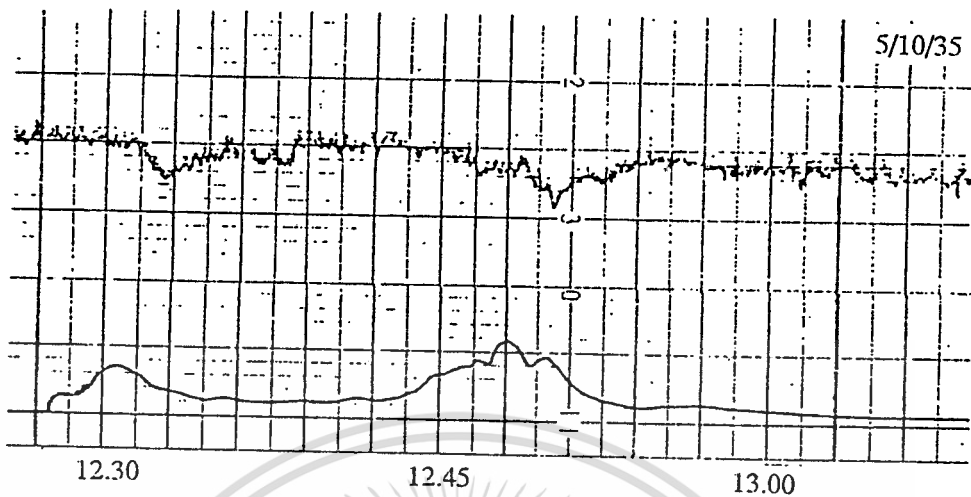
เอกสารนี้เป็นเอกสารทางการแพทย์...
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมี 23.15 ปลงเนื้อหา และ 23.30 ไปถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งทบทวนไปใช้



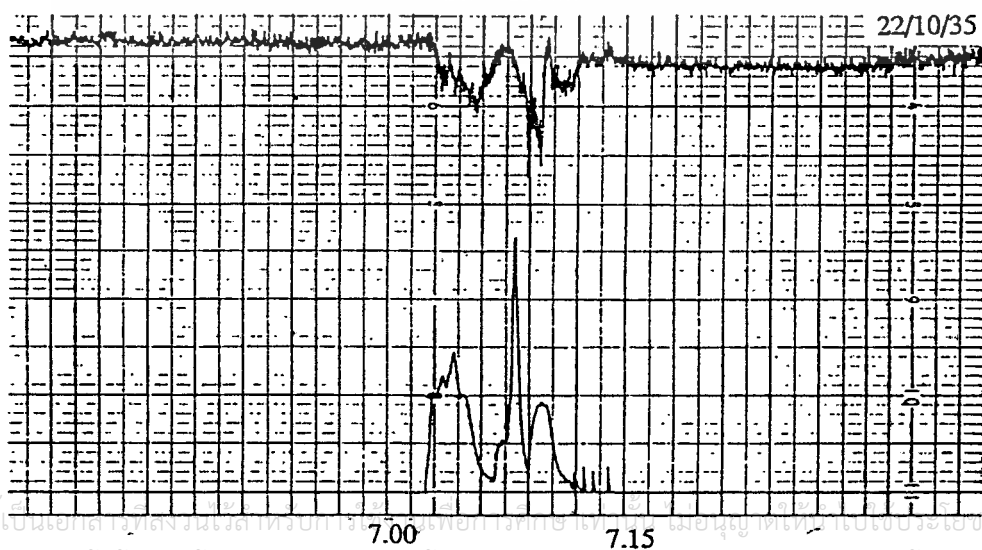
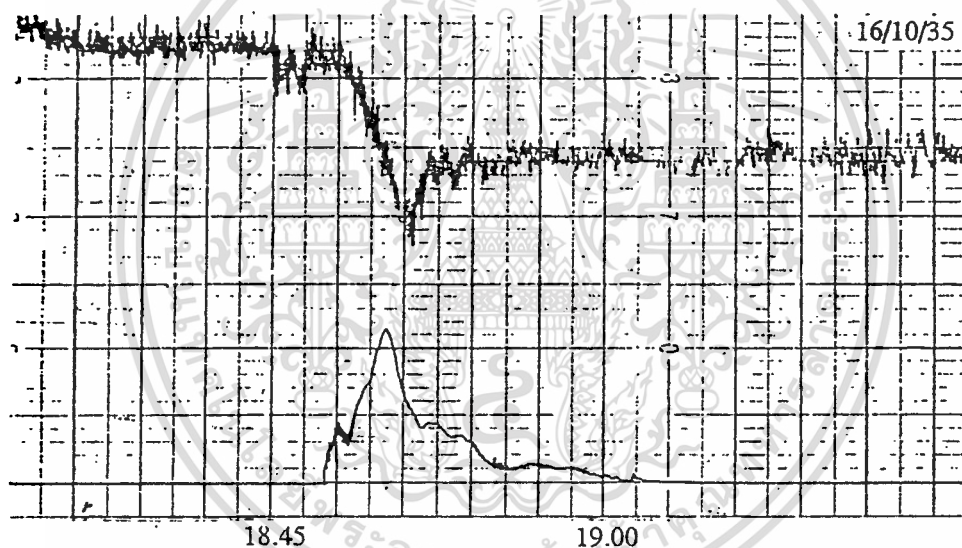
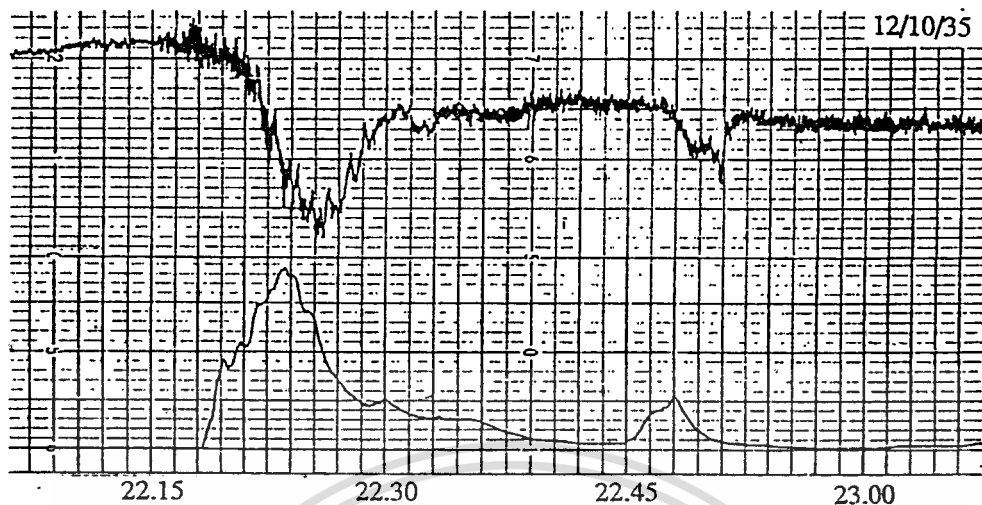


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรมการที่ปรึกษากรรมการบริหารของโรงเรียนไปโรงเรียนในด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ บลังเนื้อหา และต้องอ้างชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การแพทย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายพิเชษ เสนาะล้ำ
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ.2510
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	ศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2532
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ :	

- (1) เรื่อง "เครื่องส่งงานทางโทรศัพท์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13, ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 205-215, 8-9 พ.ย. 2533
- (2) เรื่อง "การสร้างวงจรกำเนิดความถี่ปรับค่าได้", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13, ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 21-30, 8-9 พ.ย. 2533
- (3) เรื่อง "การศึกษาเส้นทางแสงสำหรับขุมสายโทรศัพท์สาขาอัตโนมัติ", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 13, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, หน้า 541-550, 8-9 พ.ย. 2533
- (4) เรื่อง "ระบบส่ง-รับสัญญาณตรวจร่างกายผ่านโครงข่ายโทรศัพท์" เอกสารการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ประจำปี 2534, จัดโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์และสมาคมสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้า และ อิเล็กทรอนิกส์แห่งประเทศไทย, หน้า 264-273, 23-26 พ.ค. 2534
- (5) เรื่อง "การบันทึกข้อมูลของปริมาณน้ำฝนชนิดความถี่ตรงสูงอย่างต่อเนื่องตามเวลาด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์", เอกสารการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ประจำปี 2534, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และสมาคมสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์แห่งประเทศไทย, หน้า 107-116, 23-26 พ.ค.2534
- (6) เรื่อง "การออกแบบวงจรแปลงความถี่เป็นศักดาไฟฟ้าสำหรับเครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝนแบบเที่ยงตรงสูง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่14,คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่, หน้า 107-110, 7-8 พ.ย. 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ และสมาคมสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์แห่งประเทศไทย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ (ต่อ) :

- (7) เรื่อง "เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมตรวจสอบสภาพอากาศที่ลาดกระบัง" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15, ณ.คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 210-211, 3-4 ธ.ค. 2535
- (8) เรื่อง "การวิเคราะห์ลักษณะการตกของฝน เพื่อประโยชน์ในการออกแบบระบบสื่อสารไมโครเวฟสำหรับประเทศไทย", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16, ณ.คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 178-181, 25-26 พ.ย. 2536
- (9) เรื่อง "THAICOM Satellite Plans and Rainfall Intensity Characteristics of Thailand", 1993 Asia - Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technology (ASPIIT'93), 11-12 November 1993, Bangkok Thailand.

รางวัลหรือทุนที่เคยได้รับ

- ทุนสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

- ทุนบัณฑิตวิทยาลัย

ประสบการณ์การทำงาน

เคยเป็นผู้ช่วยนักวิจัย