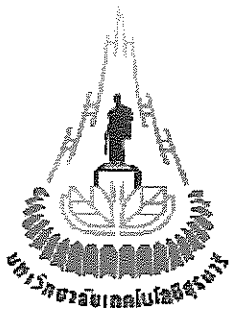


เครื่องวัดกำลังงานของคลื่นความถี่ 300 MHz – 7GHz

โดย

นางสาวพจมาลย์ ไหลหาโคตร รหัสนักศึกษา B5005864

นางสาวพรทิพย์ จันทะสุข รหัสนักศึกษา B5015955

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม และ

วิชา 427494 โครงงานศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม

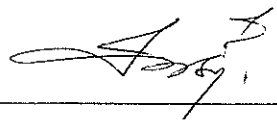
ประจำภาคการศึกษาที่ 1 และ 2 ปีการศึกษา 2553

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2545

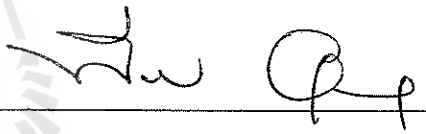
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เครื่องวัดกำลังของคลื่นความถี่ย่าน 300 MHz – 7GHz

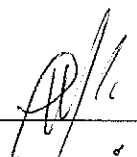
คณะกรรมการสอบโครงงาน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล)
กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี หัตถกรรม)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับรายงานโครงงานฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม วิชา 427499 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม และวิชา 427494 โครงงานศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2553

แบบเสนอโครงงานวิชา 427494 โครงงานศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ประจำภาคการศึกษาที่ 2/2553

เรื่อง เครื่องวัดกำลังงานของคลื่นความถี่ 300 MHz – 7GHz

ผู้เสนอโครงการ	1. นางสาวพจมาลย์ ไหลหาโคตร	รหัสประจำตัว	B5005864
	2. นางสาวพรทิพย์ จันทะสุข	รหัสประจำตัว	B5015955
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล		

บทคัดย่อ

เนื่องจากอุปกรณ์ความถี่สูงเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้มากในสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม และในปัจจุบันเครื่องมือวัดกำลังงานต่างๆที่มีอยู่จะเป็นเครื่องมือชนิดความถี่ต่ำ โครงงานนี้จึงได้นำเสนอการสร้างเครื่องมือวัดกำลังงานความถี่สูงยิ่งมาประยุกต์ใช้งาน เครื่องต้นแบบของเครื่องวัดกำลังงานความถี่สูงยิ่งที่จะสร้างขึ้นประกอบด้วยตัววัดกำลังงาน และตัวแสดงผล ซึ่งการสร้างเครื่องวัดกำลังงานในโครงงานนี้ออกแบบไว้ที่ความถี่ 300 MHz – 7 GHz

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ที่เป็นเจ้าของแนวคิดเริ่มแรกของการคิดค้นเครื่องวัดกำลังงานของคลื่นความถี่ 300 MHz – 7GHz จนได้มาเป็นโครงงานนี้ และที่ได้ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับแนวคิดการดูแลเอาใจใส่ติดตามงาน ชี้แนะข้อบกพร่อง ตลอดจนช่วยฝึกฝนและให้การสนับสนุนคณะผู้จัดทำให้มีความสามารถในการทำโครงงานตลอดจนเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและยอมรับได้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด พี่นักศึกษาปริญญาโทและเอกวิศวกรรมโทรคมนาคม และเพื่อนนักศึกษาสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่เป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด สำหรับส่วนดีของโครงงานชิ้นนี้ ขออุทิศให้แก่อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำ

นางสาวพจมาลย์ ไหลหาโตตร

นางสาวพรทิพย์ จันทะสุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

เรื่อง **หน้า**

บทคัดย่อ.....ก
กิตติกรรมประกาศ.....ข
สารบัญ.....ค-ฉ
สารบัญรูปภาพ.....ช-ฌ
สารบัญตาราง.....ญ
บทที่1 บทนำ.....1
บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาของโครงงาน.....1
1.2 วัตถุประสงค์.....1
1.3 ขอบเขตงาน.....1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....2
บทที่ 2 Power detector.....3
2.1 บทนำ.....3
2.2 หลักการวัดทางวิศวกรรม.....3
2.2.1 ระบบการวัดทางวิศวกรรม.....3
2.2.2 เครื่องมือวัด(Instrument).....4
2.3 ความสำคัญของการวัด.....4
2.4 หน่วยของการวัด.....5
2.4.1 หน่วยมูลฐาน.....5
2.4.2 หน่วยเสริม.....5
2.4.3 หน่วยอนุพันธ์.....5-6
2.4.4 คำอุปสรรค หรือตัวนำหน้า.....7
2.5 โครงสร้างของระบบการวัด.....7
2.5.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการวัด.....8

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

2.5.1.1 ส่วนจับสัญญาณ (Sensor-transducer element)……..……8

2.5.1.2 ส่วนปรับปรุงสัญญาณ (Signal conditioning element)……8

2.5.1.3 ส่วนแสดงผล (Display or Data presentation element)……8

2.5.2 ส่วนประกอบพิเศษ(Auxiliary element)……....9-10

2.6 กำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าต้องการใช้……10-11

2.7 วัตต์ และวีเอ คืออะไร……...12-14

2.8 POWER METER……..14-16

2.9 การวัดกำลังส่ง โดยใช้ SWR & POWER METER SX-400……16-18

บทที่ 3 อุปกรณ์ต้นแบบของเครื่องวัดกำลังงานความถี่.....19

3.1 บทนำ……...19

3.2 วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit)……19

3.2.1 วงจรกรองความถี่มีด้วยกัน 2 แบบ……19

3.2.1.1 แบบ Passive ……19

3.2.1.2 แบบ Active ……19

3.2.2 วงจรกรองความถี่แบ่งได้ 4 ประเภทคือ……...19

3.2.2.1 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter: LPF)……..…19-21

3.2.2.2 วงจรกรองสัญญาณความถี่สูง (High Pass Filter: HPF)……..…21-23

3.2.2.3 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter: BPF……...23-25

3.2.2.4 วงจรกรองความถี่ผ่านในช่วงกว้าง……...25

3.2.3 วงจรกรองความถี่ผ่านในช่วงกว้าง……25-26

3.2.4 วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter: BRF)……..…27-33

3.3 ออกแบบ filter ด้วยโปรแกรม CST……34-49

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

3.4 โปรแกรมควบคุม.....49
3.4.1 ผังลำดับการทำงานของโปรแกรม 50
3.4.2 โค้ดโปรแกรม.....50-66
3.5 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega 128.....66-69
3.6 การทำงานของบอร์ด LTC5532.....69-72
บทที่ 4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ.....73
4.1 บทนำ.....73
4.2 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบ.....73
1. ขั้นตอนการทดสอบชุด Hardware.....73
1.1 ทำการทดสอบ Filter ย่านความถี่ 935MHz-960MHz 73
1.2 ทำการทดสอบ Filter ย่านความถี่ 1805MHz-1880MHz 74
1.3 เชื่อมต่อ อุปกรณ์ สำเร็จรูปแล้ว เข้ากับ SIGNAL GENERATOR 75
4.3 ผลของการทดลอง.....76
4.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ Filter ย่านความถี่935MHz ถึง 960MHz.....76
4.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ Filter ย่านความถี่ 935MHz ถึง 960MHz.....76
4.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ Filter ย่านความถี่ 1085MHz ถึง 1880MHz.....77
4.3.4 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ Filter ย่านความถี่ 1085MHz ถึง 1880MHz.....78
4.3.5 ค่าของกำลังส่งในย่านความถี่ 940MHz.....79
4.3.6 ค่าของกำลังส่งในย่านความถี่ 1845MHz.....80
4.4 สรุปผล.....81
บทที่ 5 สรุปผลของโครงงาน.....82
5.1 บทนำ.....82

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไขปัญหา.....82-83
5.3 ข้อเสนอแนะ.....84
5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป.....84
5.5 บทสรุป.....84-85
ประวัติผู้เขียน.....86
บรรณานุกรม.....87

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

เรื่อง **หน้า**

รูปที่ 2.1 ระบบการทำงานเครื่องวัด.....3
รูปที่ 2.2 หลักการทำการวัด.....4
รูปที่2.3 ส่วนประกอบพื้นฐานของการวัด.....8
รูปที่2.4 กราฟของแหล่งจ่ายกระแสตรง.....9
รูปที่2.5 กราฟของแหล่งจ่ายกระแสสลับ.....10
รูปที่2.6(ก).....11
รูปที่2.6(ข).....11
รูปที่ 2.7 แสดงการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของคอมพิวเตอร์ จอ 17" โดยใช้ Power meter.....12
รูปที่ 2.8 แสดงการวัดกำลังไฟฟ้า โดยวัดแรงดันกับกระแส แล้วนำมาคูณกัน.....13
รูปที่ 2.9 รูปองค์ประกอบของ POWER METER.....14
รูปที่2.10 รูปการต่ออุปกรณ์ในการวัดโดยใช้ SWR & POWER METER SX-400.....16
รูปที่2.11 รูปการอ่านค่าจากเข็มมิเตอร์.....17
รูปที่2.12 วงจร DC Power detector.....17
รูปที่2.13 ตัวอย่างชิพ ของ Power detector.....18
รูปที่2.14 ตัวอย่าง ของ Power detector.....18
รูปที่ 3.1 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำอันดับต่างๆ และกราฟแสดง
อัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ (dB).....20
รูปที่ 3.2 วงจรกรองสัญญาณความถี่สูงอันดับต่างๆ และกราฟแสดงผลการ
ตอบสนองต่ออัตราขยายเชิงความถี่.....22
รูปที่ 3.3 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ และกราฟแสดง
ผลตอบสนองอัตราขยายเชิงความถี่.....23
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงการตอบสนองความถี่ ของวงจรผสมที่เกิดจากการเอาวงจรกรอง
ความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ทที่ให้ค่า –60 เดซิเบลต่อดีเคด กับวงจรกรองความถี่สูงผ่าน
แบบให้ค่า 60 เดซิ เบลต่อดีเคด มาต่อรวมกัน.....26

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

รูปที่ 3.5 แสดงวงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่และผลตอบสนองต่อความถี่.....28
รูปที่ 3.6 โปรแกรม CST ที่ใช้ในการออกแบบ filter.....34
รูปที่3.7 หน้าต่าง ที่เริ่มเข้าโปรแกรม CST.....35
รูปที่3.8 รูปหน้าต่างของ Create a New Project.....35
รูปที่3.9 รูปหน้าต่างเมื่อกด Toggle local coordinates on/off
แล้วแสดงแกน W , V และ U.....36
ที่3.10 รุปหน้าต่าง ของ Brick ที่ไว้ใส่ค่าต่างๆของ U , V และ W.....36
รูปที่3.11 รูปหน้าต่างแสดงรูปที่สร้าง Material เป็น PEC.....37
รูปที่3.12 รูปที่แสดงหน้าต่างของ New Material Parameter.....38
รูปที่3.13 รูปหน้าต่างแสดงรูปที่สร้าง Material เป็น sub.....38
รูปที่3.14 รูปหน้าต่างที่สร้างลายวงจรขั้นแรก.....39
รูปที่3.15 รูปที่แสดงหน้าต่างของ Extrude Profile
เพื่อที่จะการตัดลายวงจร.....39
รูปที่3.16 รูปหน้าต่างแสดงลักษณะรอยตัดที่ใส่ค่าไปแล้ว.....40
รูปที่3.17 รูปหน้าต่างแสดงลายวงจรที่ตัดออกมาแล้ว.....40
รูปที่3.18 รูปหน้าต่างแสดงลายวงจรขั้นที่สอง.....41
รูปที่3.19 รูปที่แสดงหน้าต่าง Extrude Profile
เพื่อที่จะการรวมลายวงจร.....41
รูปที่3.20 รูปหน้าต่างแสดงลายวงจรที่รวมกันแล้ว.....42
รูปที่3.21 รูปหน้าต่างแสดงลายวงจรทั้งหมดที่ออกแบบมา.....43
รูปที่3.22 รูปที่แสดงหน้าต่าง Waveguide ports
ที่จะสร้าง Port ที่ 1.....44

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

เรื่อง **หน้า**

รูปที่3.23 รูปที่แสดงหน้าต่าง Waveguide ports
ที่จะสร้าง Port ที่ 2.....45
รูปที่3.24 รูปหน้าต่างแสดง Port ที่ 1 และ Port ที่ 2 ที่สร้างเรียบร้อยแล้ว.....46
รูปที่3.25 รูปที่แสดงหน้าต่าง boundary conditions.....47
รูปที่3.26 รูปที่แสดงหน้าต่าง Frequency Range Settings
เพื่อกำหนดช่วงความถี่.....47
รูปที่3.27 รูปที่แสดงหน้าต่าง Transient Solver Parameters เพื่อทำการรัน.....48
รูปที่3.28 รูปกราฟที่ทำการรันแล้ว ในย่านความถี่ 1.805-1.880 GHz.....48
รูปที่3.29 รูปกราฟที่ทำการรันแล้ว ในย่านความถี่ 0.935 - 0.960 GHz.....49
รูปที่3.30 บอร์ด Atmega 128.....67
รูปที่3.31 วงจรบอร์ด Atmega128.....68
รูปที่3.32 วงจรโปรแกรมชิพ ของ Atmega128.....68
รูปที่3.33 วงจรของLTC 5532.....69
รูปที่3.34 วงจรLTC5532.....70
รูปที่3.35 DC656A Demo Board Connection Diagram.....71
รูปที่3.36 Board LTC 5532.....72
รูปที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ S11ของ Filter ย่าน935MHz - 960MHz.....73
รูปที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ S21ของ Filter ย่าน935MHz - 960MHz.....74
รูปที่ 4.3 แสดงพารามิเตอร์ S11ของ Filter ย่านความถี่ 1805MHz-1880MHz.....74
รูปที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ S21ของ Filter ย่านความถี่ 1805MHz-1880MHz.....75
รูปที่ 4.5 แสดงการเชื่อมต่อเครื่องวัดกำลังของคลื่นความถี่300MHz-7GHz
กับเครื่องSIGNAL GENERATOR.....75

สารบัญตาราง

เรื่อง **หน้า**

ตารางที่ 2.1 ค่าและสัญลักษณ์ของหน่วยต่างๆ.....6
ตารางที่ 2.2 คำอุปสรรค หรือตัวนำหน้าของการวัด.....7
ตารางที่ 3.1 ค่าที่ได้จากคำนวณ.....31
ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ Filter ย่านความถี่935MHz ถึง 960MHz.....76
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ Filter ย่านความถี่ 935MHz ถึง 960MHz.....77
ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ Filter ย่านความถี่ 1805MHz ถึง 1880MHz.....77
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ Filter ย่านความถี่ 1805MHz ถึง 1880MHz.....78
ตารางที่ 4.5 ค่าของกำลังส่งในย่านความถี่ 940MHz.....79
ตารางที่ 4.6 ค่าของกำลังส่งในย่านความถี่ 1845MHz.....81
ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข.....82

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงาน

เนื่องจากปัจจุบันยังไม่มีเครื่องมือที่ใช้วัดกำลังงานของคลื่นความถี่สูง และในการวัดกำลังงานที่ความถี่สูงนั้นเป็นเรื่องที่มีขั้นตอนซับซ้อนต้องแปลงให้เป็นความถี่ต่ำก่อนถึงจะสามารถวัดค่าได้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีบางบริษัทเสนอขายอุปกรณ์ที่ใช้วัดกำลังงานของคลื่นที่มีความถี่สูงอยู่บ้าง แต่ก็ยังมีขนาดใหญ่ โครงงานนี้จึงสนใจที่จะสร้างเครื่องมือวัดกำลังงานของคลื่นความถี่สูงที่มีขนาดเล็ก สามารถวัดคลื่นที่มีความถี่ 300 MHz ไปจนถึงความถี่ 7GHz ขึ้นมา และอำนวยความสะดวกในการวัดกำลังงานความถี่สูงโดยไม่ต้องแปลงให้เป็นความถี่ต่ำก็สามารถวัดค่าออกมาได้เลย และยังแสดงผลออกมาในหน่วยวัดที่เป็นวัตต์ในรูปแบบของตัวเลขดิจิตอล ซึ่งง่ายต่อการอ่านค่าของกำลังงานความถี่สูงที่วัดค่าออกมา

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างอุปกรณ์ที่ใช้วัดกำลังงานของสัญญาณที่มีความถี่สูง

1.3 ขอบเขตงาน

1. ศึกษาการทำงานของวงจร และลายวงจร

2.ศึกษาการทำงานของ DC656A BOARD

3.ศึกษาโปรแกรม CST DESIGN ENVIRONMENT เพื่อใช้ในการออกแบบFilter

4.ออกแบบวงจรแบบBandpass Filter ในโปรแกรม CST DESIGN ENVIRONMENT

5.สร้างFilter แบบBandpassและทดสอบการทำงานของFilter

6.ออกแบบวงจรเชื่อมต่อระหว่างตัวประมวลผลกับชุดอุปกรณ์วัดความถี่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7.เขียนโปรแกรมควบคุมส่วนแสดงผล

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาการทำงานของวงจร และลายวงจร

2.ศึกษาการทำงานของ DC656A BOARD

3.ศึกษาโปรแกรม CST DESIGN ENVIRONMENT เพื่อใช้ในการออกแบบFilter

4.ออกแบบวงจรแบบBandpass Filter ในโปรแกรม CST DESIGN ENVIRONMENT

5.สร้างFilter แบบBandpassและทดสอบการทำงานของFilter

6.ออกแบบวงจรเชื่อมต่อระหว่างตัวประมวลผลกับชุดอุปกรณ์วัดความถี่

7.เขียนโปรแกรมควบคุมส่วนแสดงผล

8.นำอุปกรณ์ทั้งหมดมาประกอบกันรวมกัน และทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

9. สรุปผลการทดลอง เขียนรายงาน และนำเสนอผลงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2

Power detector

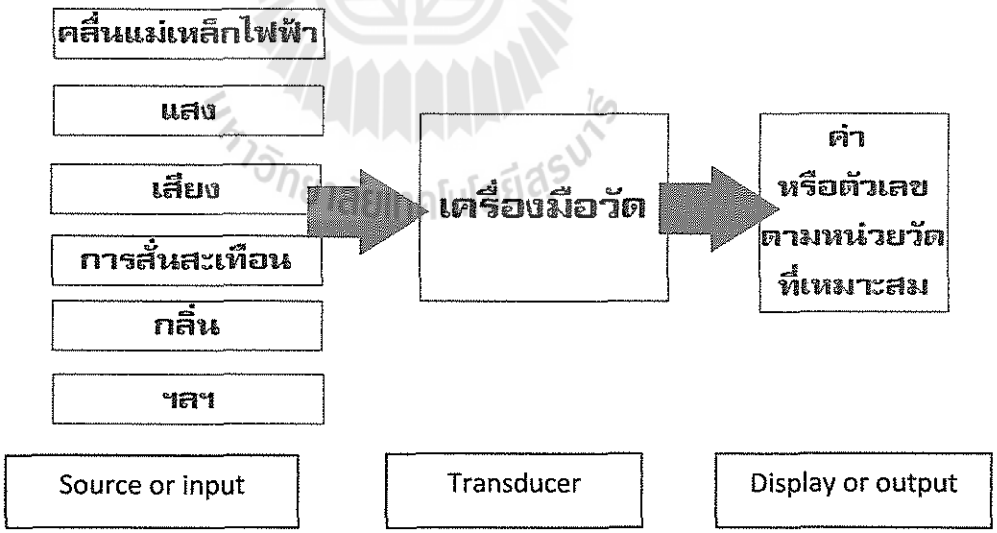
2.1 บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้สัญญาณกันมากมาย ทั้งในรูปของสัญญาณแอนะล็อก และสัญญาณดิจิตอล ซึ่งสัญญาณ ทั้ง 2 ประเภทสามารถจำแนกออกเป็นสัญญาณ ย่อยๆ ในรูปแบบต่างๆ อาทิ เช่น สัญญาณดาวเทียม สัญญาณwifi สัญญาณรบกวน สัญญาณข้อมูล และยังสัญญาณอื่นๆ อีกมากมายที่ยังไม่ได้กล่าวถึง ในบทนี้เราจะกล่าวถึงสัญญาณที่เป็นแอนะล็อก ที่เป็นสัญญาณของ Power ซึ่งจะมีหลักการของการวัดสัญญาณดังนี้

2.2 หลักการวัดทางวิศวกรรม

ระบบการวัดทางวิศวกรรม คืออะไร มีความสำคัญอย่างไร ทำไมต้องมีระบบการวัด

2.2.1 ระบบการวัดทางวิศวกรรม หมายถึง เครื่องมือ (tool) ที่ใช้สำหรับวัดปริมาณของตัวแปรทางกายภาพในทางวิศวกรรม



รูปที่ 2.1 ระบบการทำงานเครื่องวัด

จากรูปที่ 2.1 แสดงการทำงานของเครื่องมือวัดโดยนำค่าที่ได้จากตัวแปรต่างๆเช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสง เสียง การสั่นสะเทือน ฯลฯ ผ่านที่ตัวเครื่องวัดแล้วแสดงผลออกมาที่ตัวแสดงผล

2.2.2 เครื่องมือวัด(Instrument) คืออะไร

Instrument (equipment) หมายถึงอุปกรณ์(Device)ที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่รับและส่งหรือสื่อ(Sense)ตัวแปรทางกายภาพ(Physical parameter)เช่น T , P , velocity , acceleration, etc. เพื่อนำผ่านไปยังชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยน (Transducer) ตัวแปรเหล่านี้ไปแสดงอยู่(Display)ในรูปแบบที่ซึ่งผู้ใช้งาน (User)สามารถสังเกตเห็น บันทึกข้อมูลและเข้าใจความหมายที่ชัดเจนได้

2.3 ความสำคัญของการวัด

1. สามารถระบุค่าที่ชัดเจนได้มากกว่าการใช้ความรู้สึกของผู้วัดเป็นตัวชี้บอก
2. สามารถวัดค่าได้มีความละเอียดแม่นยำ และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นเมื่อมีมาตรฐานมารองรับ
3. ในงานทางวิศวกรรม เช่น การหาอัตราการไหลของน้ำในท่อ การหาค่าความเครียดของชิ้นงาน ต้องการค่าของตัวแปรที่ละเอียด+แม่นยำ เทคนิคการวัดและวิธีการเลือกเครื่องมือวัด จะมีความสำคัญอย่างมาก

รูปที่ 2.2 หลักการทำการวัด

จากรูปที่ 2.2 แสดงหลักการของการวัดซึ่งจำเป็นต้องใช้ข้อมูลมาช่วยในการเลือกวิธีการวัดที่เหมาะสมเพื่อการประมวลผลและตัดสินใจแล้วจะทำให้บรรลุสู่เป้าหมายได้

2.4 หน่วยของการวัด

เนื่องจากการวัดปริมาณทางกายภาพทั้งในทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ หน่วยของปริมาณแต่ละชนิดมีมากมาย และหน่วยของการวัดก็มีหลายระบบดังนั้นในปีค.ศ.1960 จึงได้มีการประชุมและกำหนดหน่วยสากลขึ้นที่เรียกว่า หน่วย SI (The System International Unit) และระบบของหน่วยนี้ยังประกอบด้วยหน่วย3แบบ คือ หน่วยมูลฐาน หน่วยเสริม และหน่วยอนุพันธ์

2.4.1 หน่วยมูลฐาน ระบบ SI ได้กำหนดหน่วยมูลฐานไว้ 7 หน่วย คือ

1. ความยาวหรือระยะทาง	เป็น	เมตร(m)
2. มวล	เป็น	กิโลกรัม(kg)
3. เวลา	เป็น	วินาที(s)
4. กระแสไฟฟ้า	เป็น	แอมแปร์(A)
5. อุณหภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์	เป็น	เคลวิน(K)
6. ความเข้มของแสงสว่าง	เป็น	แคนเดลา(cd)
7. ปริมาณของสาร	เป็น	โมล(mol)

2.4.2 หน่วยเสริม หน่วยเสริมของระบบ SI มี2หน่วยคือ

1. เรเดียน (Radian : rad) เป็นหน่วยวัดมุมระนาบ (Plane Angle) ใช้สัญลักษณ์ rad

2. สเตอร์เรเดียน (Steradian : sr) เป็นหน่วยวัดมุมตัน (Solid Angle) ใช้สัญลักษณ์ sr

เรเดียน เป็นหน่วยของมุมระนาบ มุม 1 เรเดียน คือมุมระหว่างรัศมีสองเส้นของวงกลมวงหนึ่งซึ่งตัดเส้นรอบวงออกเป็นส่วนโค้งยาวเท่ากับรัศมีของวงกลมนั้น

สเตอร์เรเดียน เป็นหน่วยของมุมตัน (สามมิติ) มุม 1 สเตอร์เรเดียน คือ มุมตันซึ่งจุดยอดของกรวยกลมอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมไปตัดพื้นที่ผิวของทรงกลมเท่ากับพื้นที่สี่เหลี่ยมจตุรัสซึ่งมีด้านยาวเท่ากับรัศมีของทรงกลม

2.4.3 หน่วยอนุพันธ์

หน่วยอนุพันธ์ เป็นหน่วยซึ่งมีหน่วยหลักหลายหน่วยมาเกี่ยวเนื่องกัน เช่น หน่วยของความเร็วเป็น เมตร/วินาที ซึ่งมีเมตรและวินาทีเป็นหน่วยหลัก มีอยู่หลายหน่วยซึ่งมีชื่อและสัญลักษณ์ตั้งขึ้นเป็นพิเศษ สำหรับหน่วยอนุพันธ์ซึ่งควรทราบมีดังนี้

ปริมาณ Quantity	ชื่อหน่วยอนุพันธ์ Unit	สัญลักษณ์ของหน่วย Symbols of Unit	เทียบเป็นหน่วยหลักมูล หน่วยเสริมหรือหน่วยอนุพันธ์อื่น ๆ
ความถี่	เฮิรตซ์ (Hertz)	Hz	$1\ Hz = \frac{1}{s}$
แรง	นิวตัน	N	$1\ N = 1\ kgm/s^2$
ความดันและความเค้น	พาสคาล	Pa	$1\ Pa = 1\ N/m^2$
งาน, พลังงาน, ปริมาณความร้อน	จูล	J	$1\ J = 1\ Nm$
กำลังงาน	วัตต์	W	$1\ \Omega = 1\ J/s$
ปริมาณไฟฟ้า	คูลอมบ์	C	$1\ C = 1\ A \cdot s$
แรงเคลื่อนไฟฟ้า, ความต่างศักย์	โวลต์	V	$1\ V = 1\ W/A$
ประจุไฟฟ้า	ฟารัด	F	$1\ F = 1\ As/V$
ความต้านทานทางไฟฟ้า	โอห์ม	Ω	$1\ \Omega = 1\ V/A$
ความนำไฟฟ้า	ซีเมนส์	S	$1\ S = 1/\Omega$
ฟลักซ์แม่เหล็ก	เวเบอร์	Wb	$1\ Wb = 1\ Vs$
ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	เทสลา	T	$1\ T = 1\ Wb/m^2$
อินดักแตนซ์	เฮนรี่	H	$1\ H = 1\ Vs/A$
ฟลักซ์แสง	ลูเมน	lm	$1\ lm = 1\ cd\ sr$
ความสว่าง	ลักซ์	lx	$1\ lx = 1\ lx/m^2$

ตารางที่ 2.1 ค่าและสัญลักษณ์ของหน่วยต่างๆ

จากตารางที่ 2.1 แสดงค่า และ สัญลักษณ์ ต่างๆ ของหน่วยที่ใช้ในการวัด ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันตามหน่วยในการวัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4.4 คำอุปสรรค หรือตัวนำหน้า

ปริมาณ	ชื่อ	ตัวย่อ	ปริมาณ	ชื่อ	ตัวย่อ
1.00E+24	yotta	Y	1.00E-01	deci	d
1.00E+21	zetta	Z	1.00E-02	centi	c
1.00E+18	exa	E	1.00E-03	milli	m
1.00E+15	peta	P	1.00E-06	micro	μ
1.00E+12	tera	T	1.00E-09	nano	n
1.00E+09	giga	G	1.00E-12	pico	p
1.00E+06	mega	M	1.00E-15	femto	f
1.00E+03	kilo	k	1.00E-18	atto	a
1.00E+02	hecto	h	1.00E-21	zepto	z
1.00E+01	deca	da	1.00E-24	yocto	y

ตารางที่ 2.2 คำอุปสรรค หรือตัวนำหน้าของการวัด

จากตารางที่ 2.2 แสดงค่าคำอุปสรรค ต่างๆ ที่ใช้ในการวัดซึ่งใช้นำหน้าหน่วย เพื่อทำให้หน่วยที่ใช้เล็กลงหรือใหญ่ขึ้น และแนะนำให้ใช้เป็นขั้นละ 1,000 เท่า

2.5 โครงสร้างของระบบการวัด

โครงสร้างของระบบการวัดทั่วๆไป จะประกอบด้วย 2ส่วนใหญ่ๆ คือ

1. ส่วนประกอบพื้นฐาน(Basic Function element)

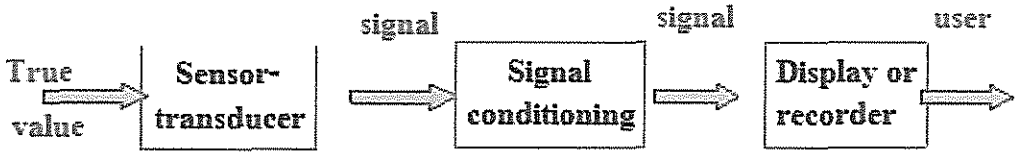
เป็นส่วนประกอบที่อย่างน้อยที่สุดแล้วจำเป็นต้องมีในเครื่องวัด

2. ส่วนประกอบพิเศษ(Auxiliary element)

เป็นส่วนประกอบเสริมพิเศษเพื่อเป็นจุดเด่นของเครื่องมือนั้นๆหรือเพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้มากขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.5.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบการวัดประกอบด้วย 3 ส่วนดังรูป



รูปที่2.3 ส่วนประกอบพื้นฐานของการวัด

จากรูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานในระบบการวัดซึ่งประกอบไปด้วยค่าจริง , ตัวเซนเซอร์,การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning), และค่า Display or recorder(เครื่องบันทึกค่าที่จะแสดงผล)

2.5.1.1 ส่วนจับสัญญาณ (Sensor transducer element)

Sensor : ทำหน้าที่จับสัญญาณของตัวแปรที่จะวัด

Transducer : ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งที่สามารถเข้าใจได้ วัดได้ นิยมเรียกรวมกันว่า "**Sensor-Transducer**"

2.5.1.2 ส่วนปรับปรุงสัญญาณ (Signal conditioning element)

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลง (convert) สัญญาณจาก transducer ไปอยู่ในรูปแบบที่พร้อมหรือเหมาะสมที่จะแสดงผลเช่น A/D converter, D/A converter

2.5.1.3 ส่วนแสดงผล (Display or Data presentation element)

ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้จากส่วน signal conditioning มาเป็นสิ่งที่จะสื่อความเข้าใจถึงมนุษย์ ได้หรือผู้ใช้งานได้ เช่น

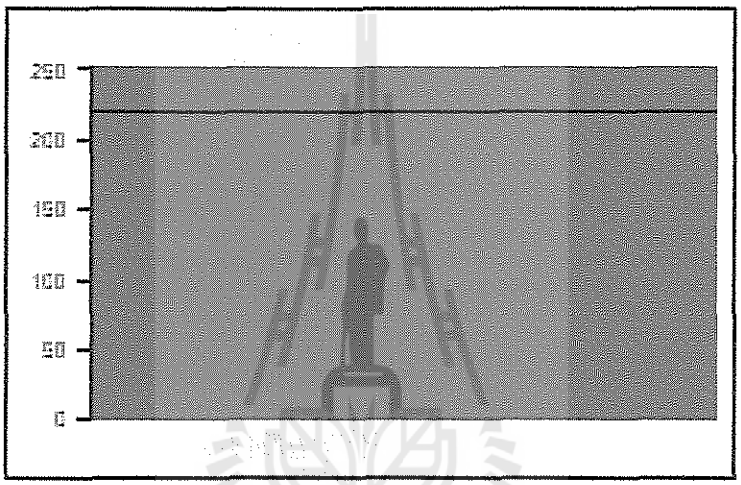
- การพิมพ์อักขระบนกระดาษ
- เข็มชี้บนหน้าปัด (analog indicator)
- สัญญาณไฟติด-ดับ
- รูปกราฟ
- ตัวเลขดิจิตอล (digital display)
- tape recorders
- chart recorders

2.5.2 ส่วนประกอบพิเศษ(Auxiliary element)

เป็นส่วนพิเศษที่สร้างขึ้นเพื่อช่วยเสริมให้เครื่องมือวัดนั้นๆทำงานได้แม่นยำถูกต้องขึ้น หรือได้รับความสะดวกมากขึ้น ประกอบด้วย

1. Calibration element
2. External power element
3. Feedback element

<u>แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง</u>

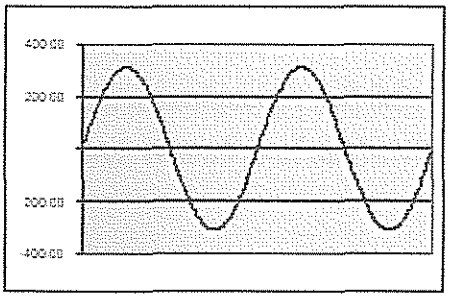


รูปที่2.4 กราฟของแหล่งจ่ายกระแสตรง

จากรูปที่ 2.4 แสดงกราฟของแหล่งจ่ายการแสตรง ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูปกราฟเป็นเส้นตรงตลอดแหล่งจ่ายที่ป้อนเข้ามา

คือ แหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ไม่มีการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสในช่วงการจ่าย ตัวอย่าง เช่น แบตเตอรี่และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ฯลฯ

<u>แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ</u>



รูปที่2.5 กราฟของแหล่งจ่ายกระแสสลับ

จากรูปที่2.5 แสดงกราฟของแหล่งจ่ายกระแสสลับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูปกราฟเป็นลักษณะรูปคลื่นSine wave จะเป็นเช่นนี้ตลอดแหล่งจ่ายที่ป้อน

คือ แหล่งพลังงานไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสในช่วงการจ่ายเป็นระยะๆ กระแสสลับที่แท้จริงมีลักษณะเป็นรูปคลื่นที่ความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz ตัวอย่างเช่น ไฟฟ้าจากระบบสายส่งการไฟฟ้า

2.6 กำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ไฟฟ้าต้องการใช้

กำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรงใช้ คำนวณได้จาก ความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ไป

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ = แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) x กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (แอมแปร์) = วัต

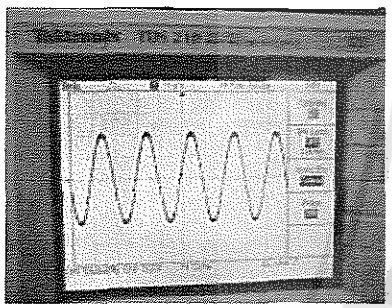
กำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับจะมีความซับซ้อนมากกว่าอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง เพราะทิศทางการไหลของกระแสจะเปลี่ยนไปเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น การหาค่าความต่างศักย์หรือแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแส จึงต้องคิดในรูปของรากของกำลังสองเฉลี่ย (RMS) เพื่อกำจัดการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแส

<u>อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กำลังไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ</u>

1. Linear load ตัวอย่างเช่น หลอดไส้ (Incandescent lamp)

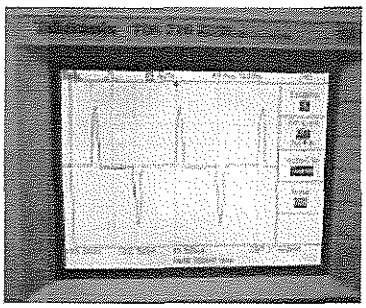
2.Non-linear load ตัวอย่างเช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์, อิเล็กทรอนิกส์บัลลาสต์, คอมพิวเตอร์, จอคอมพิวเตอร์ และโทรทัศน์ เป็นต้น

อุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละประเภทจะมีลักษณะของการใช้กระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ภาพต่อไปนี้แสดงคุณสมบัติของการใช้กระแสไฟฟ้าของ Linear load และ Non-linear load



ลักษณะการใช้กระแสไฟฟ้าของหลอดไส้ (Incandescent lamp) Power factor = 1

รูปที่2.6(ก)



ลักษณะการใช้กระแสไฟฟ้าของชุดคอมพิวเตอร์Powerfactor=0.52

รูปที่2.6(ข)

จากรูปที่ 2.6(ก) แสดงกราฟการใช้งานของกระแสไฟฟ้าที่ใช้หลอดไส้ซึ่งจะได้กราฟเป็นคลื่น sine wave

จากรูปที่ 2.6(ข) แสดงกราฟการใช้งาน ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ชุดคอมพิวเตอร์ซึ่ง จะได้กราฟเป็นคลื่น sine wave

2.7 วัตต์ และวีเอ คืออะไร

วัตต์ (Watt) คือ หน่วยของกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ

วีเอ (VA) คือ หน่วยของกำลังไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับ Non-linear load

ตัวอย่างเช่น **คอมพิวเตอร์** เป็น Non-linear load หน่วยในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจึงเป็น วีเอ (VA) **UPS** เป็นอุปกรณ์ที่จ่ายไฟฟ้าให้กับคอมพิวเตอร์ในขณะที่ไฟฟ้ามีปัญหา ดังนั้น จึงควรใช้หน่วยในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจึงควรใช้หน่วยเดียวกัน คือ วีเอ (VA)

การวัดค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับหน่วยเป็นวัตต์

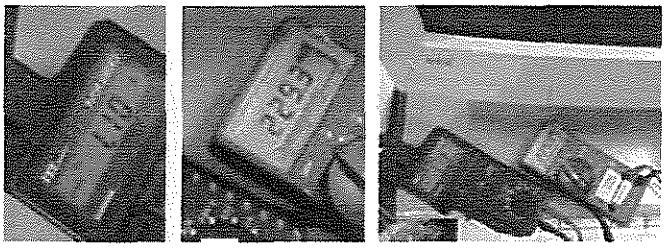
ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับของอุปกรณ์ไฟฟ้า จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า **Power meter**

รูปที่ 2.7 แสดงการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของคอมพิวเตอร์ จอ 17" โดยใช้ Power meter

จากรูปที่ 2.7 แสดงการวัดกำลังไฟฟ้า โดยผลที่แสดงออกมาเป็นจะคำนวณมาจากการวัดกระแส และแรงดัน ที่ใช้วัดในเวลาเดียวกัน ซึ่งค่าที่วัดออกมามีหน่วยเป็น(Watt)

การวัดค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับหน่วยเป็นวีเอ

สามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับของคอมพิวเตอร์ จอ 17" ได้โดยวัดค่าแรงดัน (RMS) และค่ากระแส (RMS) แล้วนำมาคูณกัน และคำนวณกำลังไฟฟ้าเป็นหน่วยวีเอ



รูปที่ 2.8 แสดงการวัดกำลังไฟฟ้า โดยวัดแรงดันกับกระแส แล้วนำมาคูณกัน

จากรูปที่ 2.8 แสดงการวัดกำลังไฟฟ้า โดยผลที่แสดงออกมาเป็นจะคำนวณมาจากผลการคูณของการวัดกระแส และแรงดันที่มีหน่วยเป็น(RMS) ซึ่งค่าที่วัดออกมามีหน่วยเป็น(VA)

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ = แรงดัน (RMS) x กระแส (RMS) = วีเอ

= 229.3 x 1.10 = 252.23 วีเอ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากระแสสลับหน่วยเป็นวัตต์และวีเอ

กำลังไฟฟ้าหน่วยเป็นวัตต์ = กำลังไฟฟ้าหน่วยเป็นวีเอ

Power factor คือ ตัวเลขที่บ่งบอกถึงความเบี่ยงเบนระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันของอุปกรณ์ไฟฟ้า มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

Power factor ของ Linear load = 1

Power factor ของ Non-linear load < 1

ตัวอย่างการคำนวณค่า Power factor ของคอมพิวเตอร์จอ 17" เป็นดังนี้

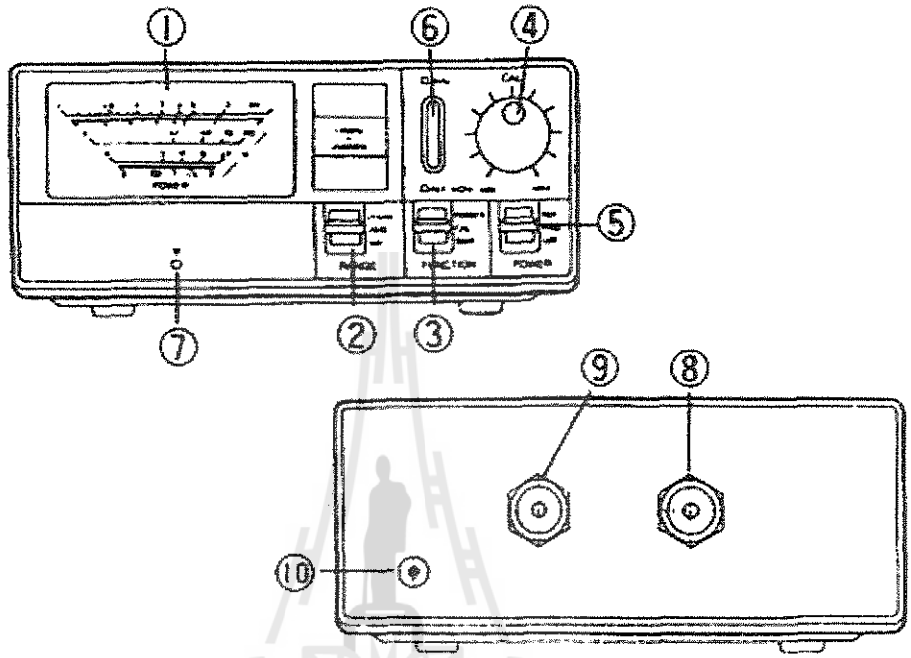
วัตต์ = วีเอ X Power factor

132 = 252.23 X Power factor

Power factor = 132 / 252.23

Power factor = 0.523

2.8 POWER METER



รูปที่ 2.9 รูปองค์ประกอบของ POWER METER

จากรูปที่ 2.9 แสดงองค์ประกอบต่างๆ ของ POWER METER ซึ่งมีหมายเลขกำกับไว้และอธิบายไว้ข้างล่างนี้

1. METER เป็นสเกลที่แสดง ค่าต่าง ๆ ในการวัด

2. METE ADJUST เป็นจุดปรับเข็นมิเตอร์ให้ชี้อยู่ที่ตำแหน่ง 0

3. RANGE SWITCH เป็น SWITCH ใช้ในการ เลือกวัดกำลังส่ง ของเครื่อง รับ-ส่ง โดยใช้ร่วมกับ FUNCTION SWITCH และ POWER SWITCH มีอยู่ด้วยกัน 3 ระดับ คือ

3.1 5W (5 วัตต์) ใช้ในการวัดกำลังส่งของเครื่องวิทยุรับ-ส่ง ที่มีกำลังส่งไม่เกิน 5 วัตต์ ส่วนมากจะเป็นวิทยุประเภทมือถือทั่วไป

3.2 10W (10 วัตต์) ใช้ในการวัดกำลังส่งของเครื่องวิทยุรับ-ส่ง ที่มีกำลังส่งไม่เกิน 10วัต ส่วนมากจะเป็นวิทยุประเภท MOBLIE

3.3 200W (200 วัตต์) ใช้ในการวัดกำลังส่งของเครื่องวิทยุรับ-ส่ง ที่มีกำลังส่งไม่เกิน 200 วัตต์ ส่วนมากจะเป็นวิทยุประเภท MOBLIE , BASE STATION

4. FUNCTION SWITCH เป็น SWITCH เลือกการใช้งานของ VSWR. มี3 อย่าง คือ

4.1 SWR. ใช้ในการวัดค่าของ VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ของสายอากาศชนิดต่าง ๆ

4.2 CAL ใช้ในการ ปรับเข็มมิเตอร์ให้ชี้อยู่ในตำแหน่ง CAL บนสเกลของมิเตอร์ โดยใช้ร่วมกับปุ่ม CAL ก่อนที่ไปทำการวัดค่า SWR

4.3 POWER ใช้ในการวัดกำส่ง (Power output) ของเครื่องวิทยุรับ-ส่งโดยใช้ร่วมกับ RANGE SWITCH

5. POWER SWITCH เป็น SWITCH ที่ใช้ในการวัดกำลังส่ง ของเครื่องรับ-ส่งวิทยุ โดยใช้ร่วมกับ RANGE SWITCH และ FUNCTION SWITCH มี 3 อย่าง คือ

5.1 OFF คือการปิดเข็มมิเตอร์ ๆ จะไม่ขึ้น

5.2 FWD (FOR WORD) ใช้ในการวัดกำลังส่ง ของเครื่องส่งในการส่งออกอากาศ (PF)

5.3 REF (REFLECT) ใช้ในการวัดก้าลังส่งสะท้อนกลับของเครื่องส่ง (PR)

6. AVG SWITCH เป็น SWITCH ใช้ในการหน่วงเข็มมิเตอร์ไม่ให้ขึ้นและลงเร็วเกินไป และใช้กับเครื่อง SSB. โดยกด AVG SWITCH ให้อยู่ในตำแหน่งต่ำ (PEP MONI)

7. CAL (CALIBRATED) เป็นปุ่มปรับเข็มมิเตอร์ให้ขึ้นเต็มสเกล โดยให้ชี้อยู่ในตำแหน่ง CAL ก่อนที่จะทำการ วัดค่า SWR. ปกติจุดสีแดงของปุ่ม CAL จะอยู่ที่ตำแหน่ง MIN. เสมอ ปุ่มนี้ใช้งานร่วมกับ FUNCTION SWITCH CAL

8. ANT (ANTENNA) เป็นขั้วที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อสายนำสัญญาณไปยังสายอากาศ หรือ DAMMY LOAD (อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แทนสายอากาศ)

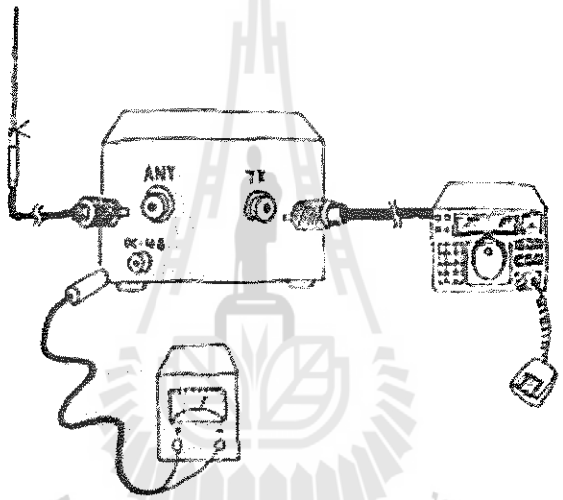
9. TX (TRANSMITT) เป็นขั้วที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อสายนำสัญญาณไปยังเครื่องวิทยุ รับ-ส่ง

10. DC-IN เป็นจุดต่อไฟ DC 11-15 VOLT สำหรับส่องหน้าปัดมิเตอร์ เมื่อใช้งานในที่มืด

2.9 การวัดกำลังส่ง โดยใช้ SWR & POWER METER SX-400

1. ต่อสายนำสัญญาณจากสายอากาศของเครื่องรับ-ส่ง ไปยังขั้ว TX ของตัว SWR & POWER METER

2. ต่อ DAMMY LOAD ที่มีขนาดมากกว่ากำลังส่งของเครื่องที่จะมาทำการวัด เข้าที่ขั้ว ANT และหากต้องการวัดกำลังส่งที่สายอากาศ ก็ให้นำสายอากาศมาใส่แทน DAMMY LOAD



รูปที่2.10 รูปการต่ออุปกรณ์ในการวัดโดยใช้ SWR & POWER METER SX-400

จากรูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ โดยใช้เครื่อง SWR & POWER METER SX-400 ซึ่งการต่อจะไปตามรูปข้างบน

3. ที่ RANGE SWITCH เลือกตำแหน่งของระดับกำลังส่ง (5W, 20W, 200W) ให้สูงกว่ากำลังส่งของเครื่องวิทยุรับ-ส่งที่จะทำการวัด แล้วจึงทำการปรับเปลี่ยนลดระดับลงมาเพื่อทำการอ่านค่าของกำลังส่ง

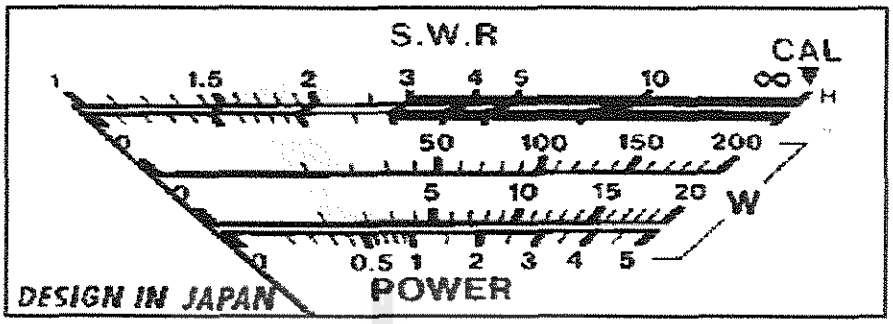
4. ที่ FUNCTION SWITCH เลือกใช้ตำแหน่ง POWER

5. ที่ POWER SWITCH เลือกใช้ตำแหน่ง FWD หรือ REF

6. เลือกความถี่ที่ต้องการ กดปุ่ม PTT ที่ตัวเครื่องวิทยุรับ-ส่ง ค้างไว้แล้วอ่านค่ากำลังส่งตามสเกลของ RANGE SWITCH ที่ตั้งไว้ (ไม่ควรกด PTT นานเกินควรเพราะจะไปรบกวนผู้ที่ใช้

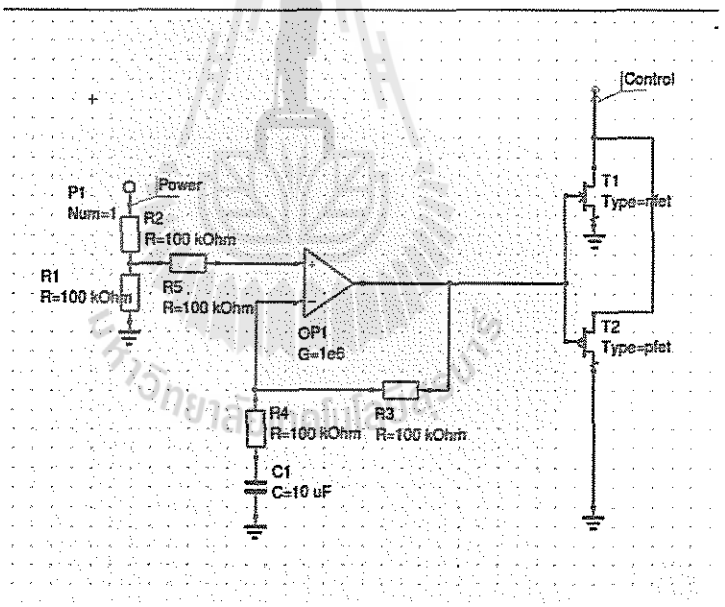
ความถี่เดียวกัน)

7. หากวัดค่ากำลังส่งของเครื่องวิทยุรับ-ส่งประเภท SSB ให้กดปุ่ม AVG SWITCH ลง ที่ตำแหน่งต่ำ (PEP MONI) เพื่อหน่วงไม่ให้เข็มมิเตอร์เกิดการ เปลี่ยนแปลงขึ้นและลงเร็วเกินไป ในขณะกดและปล่อย PTT เพราะจะทำให้เข็มมิเตอร์งอได้



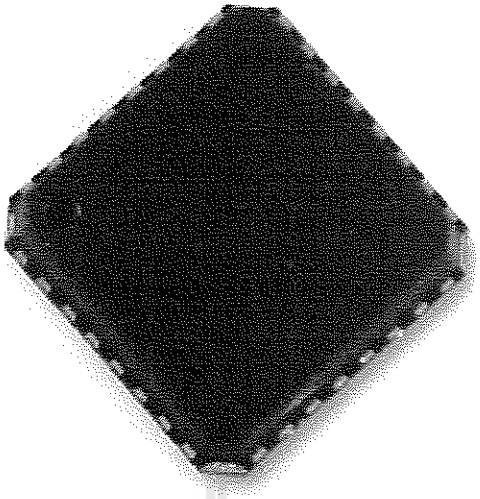
รูปที่2.11 รูปการอ่านค่าจากเข็มมิเตอร์

จากรูปที่ 2.13 แสดงวิธีการค่าจากเข็มมิเตอร์เพื่อหน่วงไม่ให้เข็มมิเตอร์เกิดการ เปลี่ยนแปลงขึ้น



รูปที่2.12 วงจร DC Power detector

จากรูปที่2.12 แสดงรูปวงจรของ DC Power detector ซึ่งมีค่า Input และ ค่า Output ซึ่งเป็นค่า Power ที่ต้องป้อนเข้าไป



รูปที่2.13 ตัวอย่างชิพ ของ Power detector

จากรูปที่2.13 แสดงรูปของชิพ ในเครื่อง Power detedtor ที่ใช้งานในย่านความถี่ที่ต่ำ (Lowpass filter) จนถึง 2.7 GHz

รูปที่2.14 ตัวอย่าง ของ Power detector

จากรูปที่ 2.14 แสดงรูปของเครื่อง Power detector ที่ใช้ในย่านความถี่ตั้งแต่ 1MHz-26.5GHz

บทที่ 3

อุปกรณ์ต้นแบบของเครื่องวัดกำลังงานความถี่

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของวงจรกรองความถี่ในแบบต่าง การออกแบบวงจรกรองช่วงความถี่ในโปรแกรม CST STUDIO SUITE 2009 และแผนผังโปรแกรม

3.2 วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit)

วงจรกรองความถี่หรือฟิลเตอร์ (Filter) คือวงจรไฟฟ้าที่ยอมให้สัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ใด ๆ ความถี่หนึ่งหรือช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้นผ่านไปได้ ส่วนความถี่อื่นหรือช่วงความถี่อื่น ๆ นอกเหนือจากที่กำหนดจะถูกลดทอนไปซึ่งจะเป็นช่วงความถี่ใดนั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบวงจร

3.2.1วงจรกรองความถี่มีด้วยกัน 2 แบบ คือ

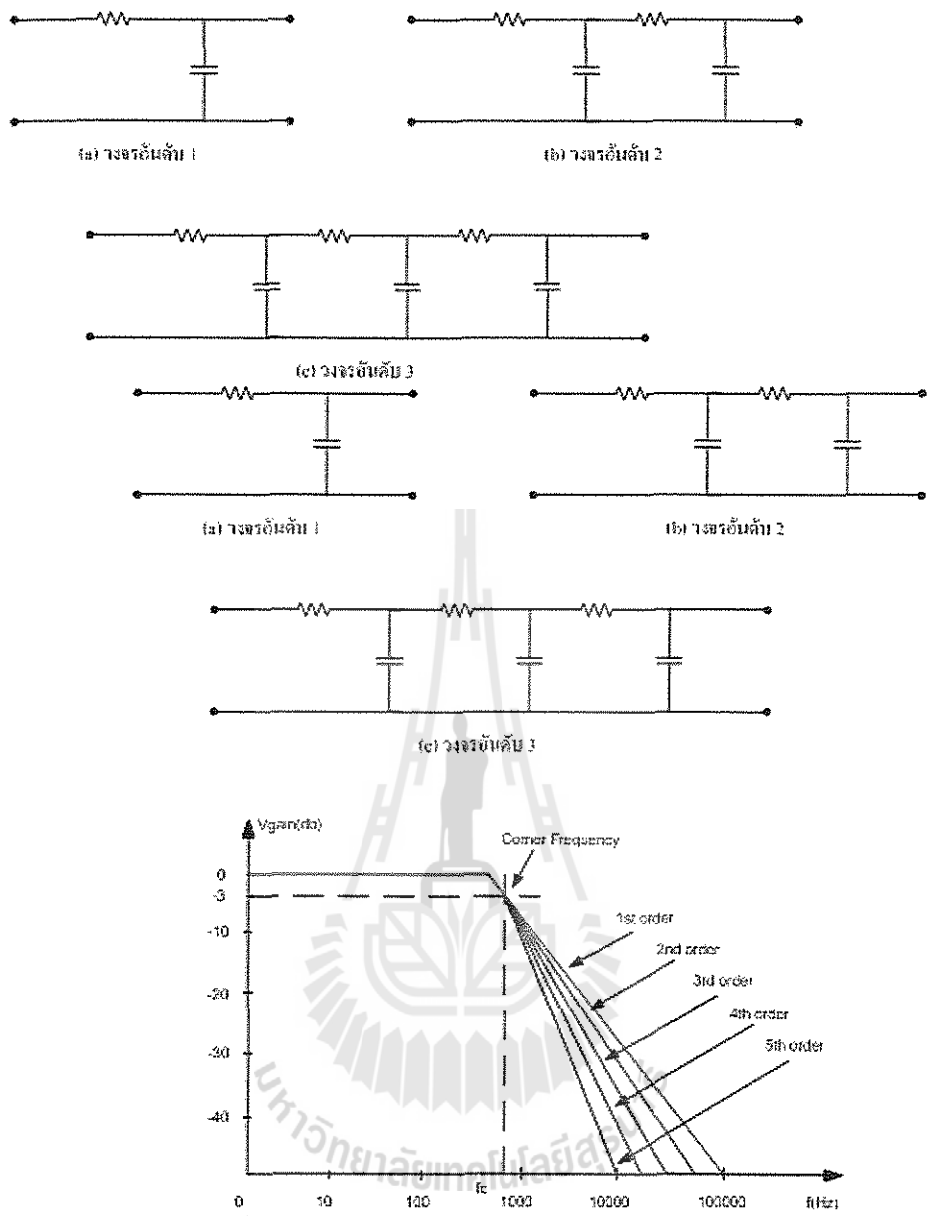
3.2.1.1 แบบ Passive คือวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์แบบพาสซีฟ ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าเพื่อให้ทำงาน ซึ่งได้แก่อุปกรณ์ประเภท ตัวต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C) และ ขดลวดเหนี่ยวนำ (L)

3.2.1.2 แบบ Active คือ วงจรที่ประกอบขึ้นด้วยอุปกรณ์ที่ต้องการไฟฟ้า เพื่อกระตุ้นการทำงานของตัวอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่อุปกรณ์ประเภท ทรานซิสเตอร์ หรือ ไอซี

3.2.2 วงจรกรองความถี่แบ่งได้ 4 ประเภทคือ

3.2.2.1 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter: LPF)

หมายถึง วงจรที่จะยอมให้สัญญาณความถี่ตั้งแต่ 0 Hz ถึงความถี่ที่กำหนดผ่านไปได้ ส่วนความถี่ตั้งแต่ที่กำหนดสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ จะลดทอนไปตามลำดับ ลักษณะของวงจรมีตั้งแต่อันดับหนึ่งขึ้นไป ดังรูป



รูปที่ 3.1 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำอันดับต่างๆ และกราฟแสดงอัตราขยายแรงดันเชิงความถี่ (dB)

จากรูปวงจรเมื่อทำการป้อนความถี่ต่ำเข้าวงจร ที่ C จะมีค่า XC สูง ทำให้ความถี่ต่ำไหลผ่าน R ที่มีค่าความต้านทานน้อยกว่า XC ได้สะดวก ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้มาก แต่เมื่อความถี่สูงกว่าจุดที่กำหนด ค่า XC จะลดลง ทำให้ความถี่ ผ่านขดลวดได้ลดลง บางส่วนที่ผ่านไปได้ก็จะถูก C ดึงลงกราวด์ ระดับสัญญาณ Output จึงผ่านได้น้อยมาก

ในทางทฤษฎีวงจรกรองความถี่ต่ำจะยอมให้สัญญาณใดๆ ที่มีความถี่ตั้งแต่ 0 Hz จนถึงความถี่ที่กำหนดซึ่งเรียกว่า ความถี่คัทออฟ หรือ ความถี่ขอบเขต (Cutoff Frequency) ผ่านไปได้โดยไม่มีการลดทอนของสัญญาณ และถ้าความถี่ของสัญญาณเข้ามีค่าเกินที่กำหนดไว้ สัญญาณออกควรจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถจะทำเช่นนั้นได้ เนื่องจากการตอบสนองสัญญาณที่ความถี่ต่างๆ ของอุปกรณ์ประเภทพาสซีฟ จะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไปไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ดังนั้นผลที่ได้จึงเป็นดังรูปที่ 1 คือเมื่อสัญญาณมีความถี่สูงขึ้นวงจรจะลดสัญญาณลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งจะลดลงในอัตราคงที่ค่าหนึ่ง

<u>ขั้นตอนการคำนวณวงจรกรองความถี่ต่ำ</u>

สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นพิเศษสำหรับการออกแบบวงจรฟิลเตอร์ชนิดกรองความถี่ต่ำผ่านก็คือ ค่าความถี่คัตออฟ ω_c ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งความถี่คัตออฟหาได้จากสมการ

$$\omega_C = \frac{1}{RC} = 2\pi f_C$$

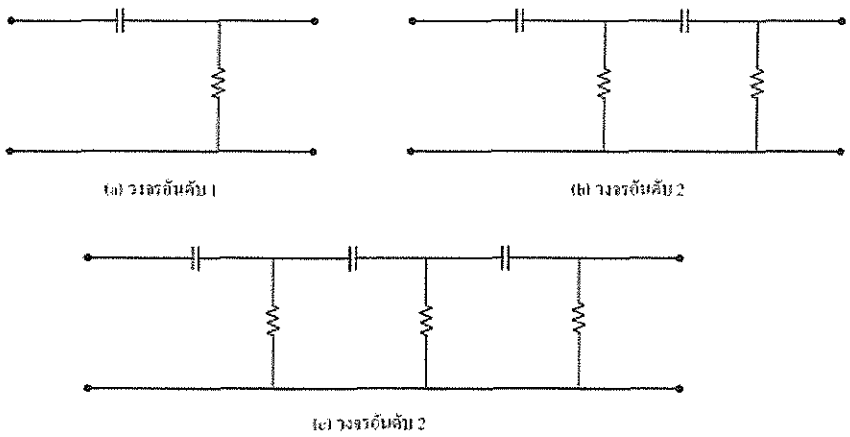
โดยที่ ω_c มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที (rad/s)
fc มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)
R มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)
C มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

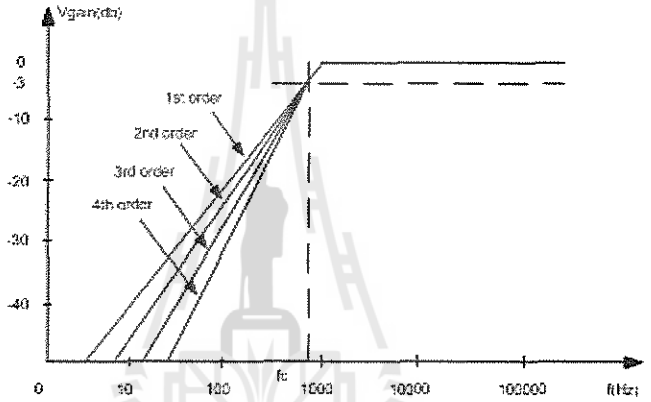
ในทำนองเดียวกันเมื่อกำหนด ω_c ไว้แล้ว ต้องการจะหาค่า R ก็จะได้เป็น

$$R = \frac{1}{\omega_c C} = \frac{1}{2\pi f_c C}$$

3.2.2.2 วงจรกรองสัญญาณความถี่สูง (High Pass Filter: HPF)

มีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ คือการตอบสนองต่อสัญญาณของวงจรจะยอมให้สัญญาณความถี่สูงผ่านและลดทอนสัญญาณความถี่ต่ำ ซึ่งแสดงวงจรและกราฟตอบสนองอัตราขยายแรงดันความถี่ได้ ดังแสดงในรูป ที่ 2





รูปที่ 3.2 วงจรกรองสัญญาณความถี่สูงอันดับต่างๆ และกราฟแสดงผลการตอบสนองต่ออัตราขยายเชิงความถี่

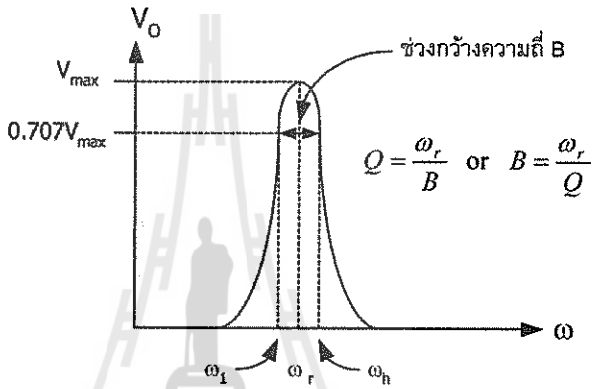
จากรูปจะเห็นว่า C ต่ออนุกรมกับวงจร ส่วน R ต่อขนานกับวงจร เมื่อป้อนความถี่ต่ำกว่าเข้ามา C จะมีค่า XC สูง ทำให้สัญญาณผ่านไปได้น้อย ทำให้สัญญาณที่ผ่านมาจาก C ลงกราวด์ได้หมด แต่เมื่อความถี่สูงขึ้น C จะมีค่า XC ลดลง สัญญาณจะผ่านได้มากขึ้น สัญญาณก็จะลงกราวด์น้อยลงเพราะมี R กันไว้ สัญญาณที่ออกไปยัง Output จะมีมากขึ้น จนถึงระดับความแรงของสัญญาณประมาณ 70.7 % ของความแรงสูงสุด ระดับนี้เองที่เราเรียกว่า ช่วงความถี่ Cut off เมื่อความถี่สูงกว่า ความถี่ นี้ C จะยอมให้สัญญาณผ่านได้สะดวกและค่า R จะต้านสัญญาณไม่ให้ลงกราวด์ ความถี่จึงผ่านไปที่จุด Output ได้ทั้งหมด

ขั้นตอนการคำนวณวงจรกรองความถี่สูง

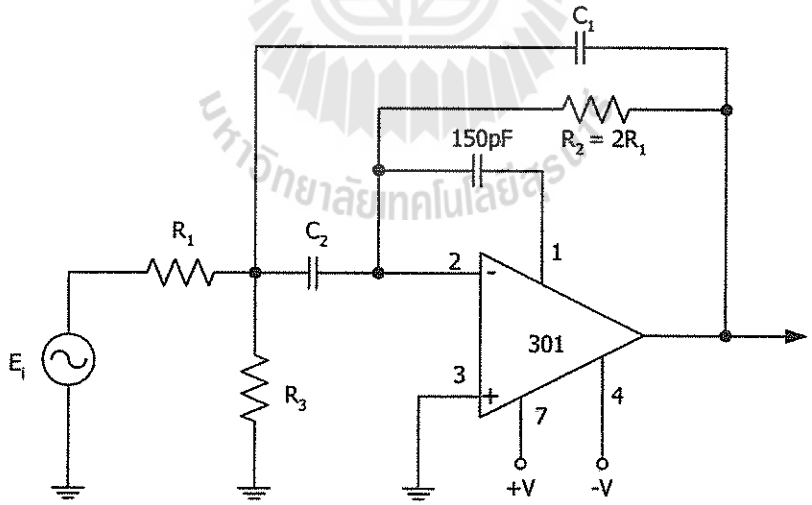
ขั้นตอนการคำนวณของวงจรกรองความถี่สูงจะมีหลักการคำนวณเช่นเดียวกับวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

3.2.2.3 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter: BPF)

เนื่องจากเป็นวงจรที่มีสักษณะคล้ายกับการนำเอาวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ และความถี่สูง มาต่อร่วมกัน (Cascade) ดังนั้น วงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วง จะยอมให้สัญญาณผ่านไปได้เฉพาะช่วงที่กำหนดเท่านั้น ความถี่ที่นอกเหนือจากที่กำหนดจะถูกจำกัดโดยการลดทอนให้หมดไป



(ก) กราฟการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วง



(ข) ลักษณะการต่อวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วง

รูปที่ 3.3 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ และกราฟแสดงผลตอบสนองอัตราขยายเชิงความถี่

รูปที่ 3.3 แสดงถึงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรแบบนี้ ค่าแรงดันเอาท์พุทสูงสุด V_{max} จะปรากฏขึ้นเฉพาะบางช่วงของความถี่เท่านั้น เรียกความถี่นั้นว่า ความถี่เรโซแนนต์ (resonant frequency) แทนได้ด้วย ω_r ตำแหน่งของความถี่ที่มีค่าแรงดันลดลงเป็น $0.707\ V_{max}$ จะมีอยู่ 2 ความถี่คือ ความถี่ที่สูงกว่า ω_r ค่าหนึ่ง และที่ต่ำกว่าω_r อีกค่าหนึ่งเรียกความถี่ที่ $V_0 = 0.707\ V_{max}$ ที่สูงกว่า ωr นี้ว่า ความถี่คัตออฟช่วงสูง (high cutoff frequency) แทนด้วย ω_r และความถี่ที่ต่ำกว่า ω_r ว่า ความถี่คัตออฟช่วงต่ำ (low cutoff frequency) แทนได้ด้วย ω_1 จากความถี่ทั้งสอง เราจะได้ช่วงกว้างความถี่ B เป็น

$$B = \omega h - \omega_1 \qquad \text{.....(1)}$$

วงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงนี้แบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิดที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงแคบ (narrow Band) และชนิดที่ยอมให้ผ่านได้ในช่วงกว้าง (wide band) สำหรับวิธีการกำหนดว่าวงจรชนิดใดเป็นชนิดที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงแคบหรือช่วงกว้างนั้น กำหนดได้ดังนี้ถ้ามีช่วงกว้างความถี่น้อยกว่าหนึ่งในสิบของความถี่เรโซแนนต์ ($B < 0.1\ \omega r$) เราจะเรียกว่าวงจรชนิดที่ยอมให้ผ่านได้ในช่วงแคบ ถ้ามีช่วงกว้างความถี่มากกว่าหนึ่งในสิบของความถี่เรโซแนนต์ ($B > 0.1\omega_r$) เราจะเรียกว่า วงจรชนิดที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงกว้าง

ในวงจรแบบเลือกความถี่ผ่านนี้จะมีอัตราส่วนระหว่างความถี่เรโซแนนต์และช่วงกว้างความถี่เรียกว่า ควอลิตี้แฟกเตอร์ (quality factor) แทนได้ด้วย Q ค่า Q นี้เป็นค่าที่มีความสำคัญมาก เพราะเป็นตัวชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการเลือกความถี่ใช้งาน ยิ่งค่า Q มีค่าสูงมากขึ้นเท่าใด วงจรก็ยิ่งมีความสามารถในการเลือกความถี่ได้ดีมากขึ้นเท่านั้น ค่า Q แสดงได้ดังในสมการ

$$Q = \frac{\omega_r}{B} \qquad \text{.....(2)}$$

หรือ

$$B = \frac{\omega_r}{Q}\ rad/s \qquad \text{.....(3)}$$

โดยที่ B มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที สำหรับวงจรในแบบที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงแคบ ๆ นั้นจะมีค่า Q ที่สูงมากกว่า 10 และ ในวงจรผ่านแบบช่วงกว้างจะมีค่า Q น้อยกว่า 10

สรุป ช่วงความถี่แคบคือ มีค่า $B < 0.01 \quad ; Q > 10$

ช่วงความถี่กว้างคือ มีค่า $B > 0.01 \quad ; Q < 10$

3.2.2.4 วงจรกรองความถี่เฉพาะ ช่วงแคบผ่าน

ขั้นแรกในการออกแบบวงจรต้องกำหนดค่าของช่วงกว้างความถี่ B ที่จะใช้งาน และคำนวณค่า Q ของวงจรเสีย ก่อน โดยคำนวณ ได้จากสมการที่ (2) (หรืออาจกำหนดค่า Q และคำนวณค่า B ก็ได้) หลังจากนั้นจึงจะเป็นการเลือกและคำนวณค่าของอุปกรณ์เพิ่มเติมอื่น ๆ ขั้นตอนในการพิจารณาต่อไป เพื่อให้ง่ายแก่การพิจารณาจะกำหนดให้ $A_r = 1$ เลือก $C_1 = C_2 = C$ ให้มีค่าที่เหมาะสม ต่อจากนั้นก็คำนวณค่า R_1 , R_2 และ R_3 โดยได้จากสมการ

$$R_2 = \frac{2}{BC} \qquad \text{.....(4)}$$

$$R_1 = \frac{R_2}{2} \qquad \text{.....(5)}$$

$$R_3 = \frac{R_2}{\left(4Q^2 - 2\right)} = \frac{R_2}{4Q^2} \qquad \text{.....(6)}$$

B ในสมการที่ (3) มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที

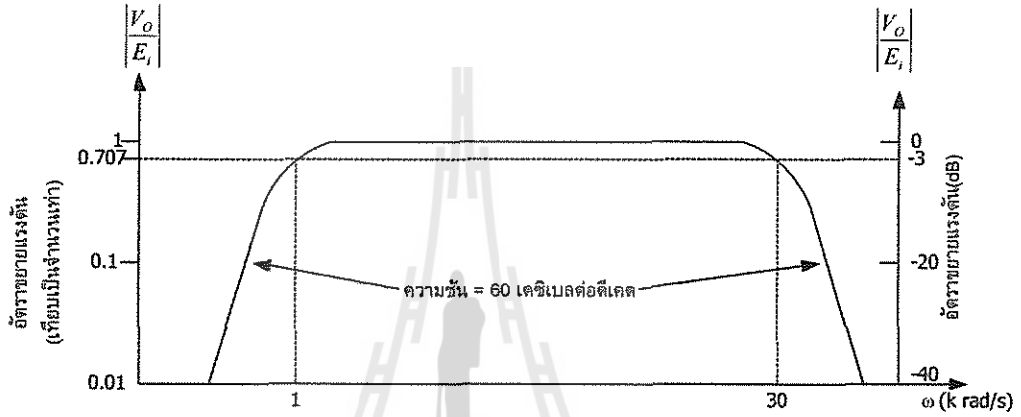
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2.3 วงจรกรองความถี่ผ่านในช่วงกว้าง

วงจรใช้งานสามารถใช้เป็นวงจรเดียวกับ วงกรองความถี่แบบผ่านในช่วงแคบได้ ดังในรูปที่ 1(ข) โดยเลือกให้ Q มีค่าน้อยกว่า 10 (Q<10) การคำนวณค่าของอุปกรณ์จะเหมือนกับในหัวข้อที่แล้ว คือใช้สมการที่ (4) ถึงสมการที่ (6) ได้ (เฉพาะในกรณีที่ $4Q^2 > 2$ เท่านั้น)

มีแนวความคิดบางอย่างเกี่ยวกับวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงนี้ว่า วงจรชนิดนี้น่าจะสามารถสร้างได้จากการนำเอาวงจรกรองความถี่ต่ำ มาต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่สูง ตัวอย่างเช่น

นำวงจรกรองความถี่ต่ำ แบบบัตเตอร์เวิร์ทที่ให้ค่า –60 เดซิเบลต่อดีเคด มาต่อร่วมกับวงจรกรองความถี่สูงดังรูปที่ 1 ซึ่งจะให้ผลตอบสนองทางความถี่ดังในรูปที่ 2 ถึงแม้ว่าวงจรใหม่ที่สร้างนี้จะต้องใช้ออปแอมป์ถึง 4 ตัวก็ตาม แต่ก็มีข้อดีอยู่คือว่า จะให้อัตราความชันสูงถึง 60 เดซิเบลต่อดีเคดเลยที่เดียวทั้งในคัตออฟช่วงความถี่ต่ำ ช่วงความถี่สูง และมีอัตราขยายเป็น 1 ตลอดในความถี่ช่วงผ่าน



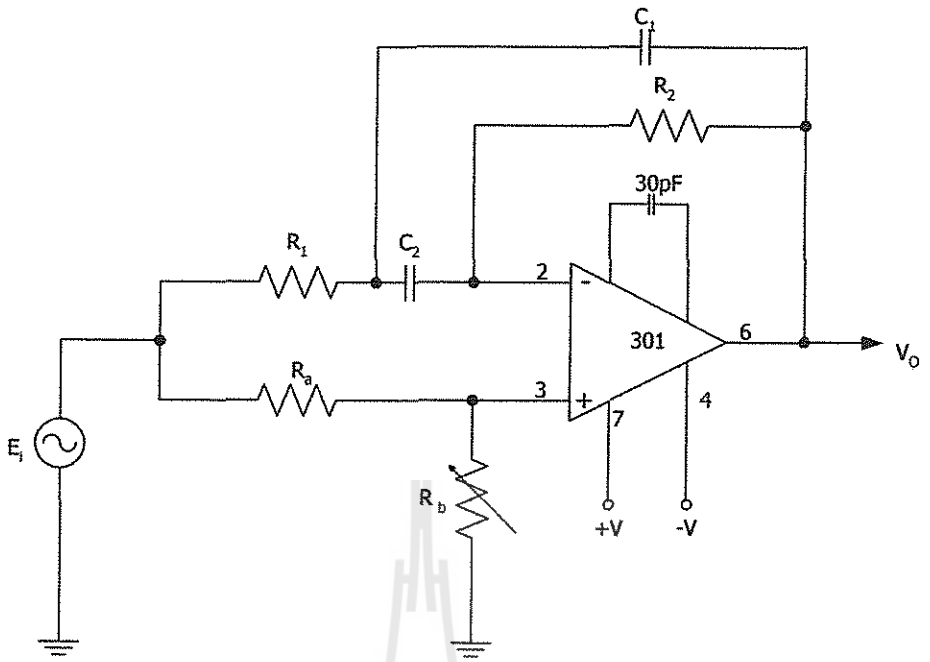
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงการตอบสนองความถี่ ของวงจรผสมที่เกิดจากการเอาวงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัตเตอร์เวิร์ทที่ให้ค่า –60 เดซิเบลต่อดีเคด กับวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบให้ค่า 60 เดซิ เบลต่อดีเคด มาต่อรวมกัน

การนำเอาวงจรกรองความถี่ต่ำและความถี่สูงมาต่อรวมกัน เพื่อให้ได้วงจรกรองความถี่เฉพาะช่วง แบบนี้มีข้อน่าสังเกตว่า ในการนำมาต่อรวมกันนั้น สามารถสลับตำแหน่งกันระหว่างวงจรทั้งสองได้ ซึ่งได้ผลการทำงานเหมือนกัน ข้อสำคัญคือว่า ต้องเลือกความถี่คัตออฟให้ถูกต้องตามที่ต้องการเท่านั้น

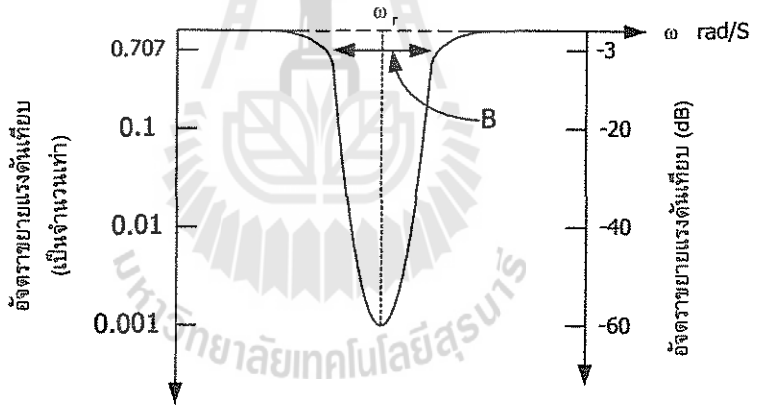
3.2.4 วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter: BRF)

เป็นวงจรที่กำจัดความถี่บางช่วงออกไป บางครั้งเราเรียกว่า นอตช์ฟิลเตอร์ (notch filter) ตัวอย่างของวงจรแสดงได้ในรูปที่ 4 ซึ่งจะให้ผลตอบสนองทางความถี่ดังในรูปที่ 4 จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีความถี่ช่วงผ่านอยู่สองช่วงทั้งซ้ายและขวา และมีความถี่ที่อยู่ตรงกลางถูกกำจัดหายไปความถี่นี้เราจะเรียกว่า ความถี่เรโซแนนต์ (ω_r) เช่นเดียวกันวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเฉพาะช่วงตัวอย่าง ของวงจรประเภทนี้ได้แก่ การกำจัดความถี่ 50 เฮิรตซ์ หรือ 400 เฮิรตซ์ในการใช้งานมอเตอร์เจเนอเรเตอร์ เพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น เป็นต้นการคำนวณและออกแบบวงจรก็เช่นเดียวกับวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงคือ ต้องนำเอาช่วงกว้างความถี่ B และค่าควอลิตี้แฟกเตอร์ Q มาคิดร่วมกับ ω_r ด้วย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ก) วงจรนอตช์ฟิลเตอร์



(ข) การตอบสนองความถี่ของวงจรนี้

รูปที่ 3.5 แสดงวงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่และผลตอบสนองต่อความถี่

ขั้นตอนการออกแบบ

1. กำหนดให้ $C_1 = C_2 = C$ และเลือกค่าที่จะใช้ โดยควรมีค่าอยู่ระหว่าง 100 พิโกฟารัด ถึง 0.1 ไมโครฟารัด

2. คำนวณ R_2 จากสมการ

$$R_2 = \frac{2}{BC} \qquad \text{.....(7)}$$

เมื่อ B มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที

3. คำนวณ R_1 จากสมการ

$$R_1 = \frac{R_2}{4Q^2} \qquad \text{.....(8)}$$

4. เลือก Ra ให้มีค่าเหมาะสม ควรมีค่าประมาณ 1 กิโลโอห์ม

5. คำนวณ Rb จากสมการ

$$R_b = 2Q^2 Ra \qquad \text{.....(9)}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มีข้อน่าสังเกตบางอย่างสำหรับวงจรในรูปที่ 5(ก) ถ้าต่อกราวด์ที่ขาอินพุทบวกของออปแอมป์ เราจะสามารถเปลี่ยนวงจรให้เป็นวงจรกรองความถี่แบบผ่านเฉพาะช่วงเหมือนกับในรูปที่ 1(ข) โดยมีข้อแตกต่างกันตรงที่ไม่มี R_3 เท่านั้น วงจรทั้งสองนี้มีค่าของอัตราขยายที่ความถี่เรโซแนนต์ ωr เป็น $2Q^2$ การปรับค่าของ ωr และ B ก็ทำได้โดยง่าย เพียงการปรับค่าความต้านทาน R_1 และ R_2 เท่านั้น

ซึ่งข้อมูลข้างต้นเราจะได้รู้ถึงส่วนต่างๆของ filter แต่ส่วนที่เราใช้คือ วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter: BPF) เราจะใช้ในสองย่านความถี่ คือ ในย่าน 0.935-0.960 GHz และ 1.805-1.880 GHz

เราจะออกแบบโดยใช้โปรแกรม CST มีขั้นตอนการทำดังนี้

กำหนดให้

ความถี่ใช้งาน (f) =1.805-1.880 GHz

ความถี่กลาง(fo)คือ 1.865 GHz

$$FBW = \frac{(W2-W1)}{Wo} = \frac{2\pi(1.835x\,10^9) - 2\pi(1.805x\,10^9)}{1.1435\,x10^{10}} = 0.016484 \approx 1.6484\%$$

$$Wo = \sqrt{W1W2} = \sqrt{2\pi(1.805x\,10^9)x\,2\pi(1.805x\,10^9)} = 1.1435\,x10^{10}$$

$$\frac{W}{Wc} = \frac{2}{W}x\frac{f4-fo}{f0} = \frac{2}{0.016484}x\frac{(1.925-1.865)}{1.865} = 3.90 \approx 4$$

0.1 dB ripple , att= 25 dB

$\left|\frac{W}{Wc}\right|$ -1 = 4-1 = 3

ได้ 3 elemant

go=1

g1=1.0315

g2=1.1474

g3=1.0315

g4=1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับการสร้างวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน นั้นจะใช้การออกแบบการเชื่อมรวม(Couple line) โดยพิจารณาพารามิเตอร์ s,w และ d เพื่อหา Zoo และ Zoe ดังนี้

ลำดับที่ 1; $\frac{Jo1}{Yo}=\sqrt{\frac{\pi}{2}\mathrm{X}\frac{FBW}{g_{\circ}}}=\sqrt{\frac{\pi}{2}\mathrm{X}\frac{(0.016484)}{(1)(1.0315)}}$=0.1584

ลำดับที่2 ; $\frac{J12}{Yo}=\frac{\pi FBW}{2}\mathrm{x}\frac{1}{\sqrt{g1g2}}=\frac{\pi}{2}\mathrm{x}(0.016484)\mathrm{x}\frac{1}{\sqrt{(1.0315)(1.1474)}}$= 0.02380

ลำดับที่3 ; $\frac{J23}{Yo}=\frac{\pi}{2}\mathrm{x}(0.016484)\mathrm{x}\frac{1}{\sqrt{(1.0315)(1.1474)}}$=0.02380

ลำดับที่ 4 ; $\frac{J34}{Yo}=\frac{\pi}{2}\mathrm{x}(0.016484)\mathrm{x}\frac{1}{\sqrt{(1.0315)(1)}}$= 0.1584

จากสูตร Zoe =Zo(1+JZo+$(JZo)^2$)

Zoo =Zo(1-JZo+$(JZo)^2$)

จะได้ตารางดังนี้

J	Zoe	Zoo	W	S
0	59.17	43.33	0.668	0.501
1	51.22	48.84	0.7014	1.503
2	51.22	48.84	0.7014	1.503
3	59.17	43.33	0.668	0.501

ตารางที่ 3.1 ค่าที่ได้จากคำนวณ

และ $\lambda=\frac{c}{fo}=\frac{3x10^8}{1.865x10^9}$ *=0.161*

$\lambda=\frac{(3x10^8)}{\sqrt{(4.8)}(1.865x10^9)}$= *0.073421*เมตร ≈*73.421 mm*

$L=\frac{\lambda}{4}=\frac{73.421}{4}$ *=18.355*

ที่*Zo = 50* Ω ที่ความถี่ *2.5 GHz*

ε_r =4.8 , d= 1.67 mm ,c=$3x10^8$

$$A=\frac{Z_o}{60}\sqrt{\frac{\varepsilon_r+1}{2}}+\frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+1}\left(0.23+\frac{0.11}{\varepsilon_r}\right)$$

$$A=\frac{50}{60}4.8\sqrt{\frac{4.8+1}{2}}+\frac{4.8-1}{4.8+1}\left(0.23+\frac{0.11}{4.8}\right)$$

A=1.584

จาก $\frac{w}{d}=\frac{8e^A}{e^{2A}-2}$

$$\frac{w}{d}=\frac{8e^{(1.584)}}{e^{2(1.584)}-2}=1.792$$

ดังนั้น $\frac{w}{d}\leq 2$ แสดงว่าใช้ได้

W=1.792x(1.67mm)=2.99 mm ≈ 3mm

จาก $\varepsilon_{eff}=\frac{\varepsilon_r+1}{2}+\frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r}\left[1+\frac{12h}{w}\right]^{-1/2}$

$$\varepsilon_{eff}=\frac{4.8+1}{2}+\frac{4.8-1}{4.8}\left[1+\frac{12(1.67)}{3}\right]^{-1/2}$$

=3.585

ทำการเปรียบเทียบจาก $\varepsilon_e \neq \varepsilon_r$ และ $1<\varepsilon_e<\varepsilon_r$ แสดงว่าค่าที่ได้เป็นจริง

เพราะฉะนั้นจาก $\lambda = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}(fo)}$

$$= \frac{(3x10^8)}{\sqrt{3.585}(1.865x10^9)}$$

$$\lambda = 84.957 \text{ mm}$$

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{84.957}{4} = 21.239 \text{ mm}$$

$$Ko = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi(1.865x10^9)}{(3x10^8)} = 39.060$$

$$L = \frac{90^\circ(\pi/180^\circ)}{\sqrt{\varepsilon_e}Ko} = \frac{90^\circ(\pi/180^\circ)}{\sqrt{3.585(39.060)}} = 21.239 \text{ mm}$$

สรุป มีความกว้าง *3 mm*

มีความยาว *21.239 mm*

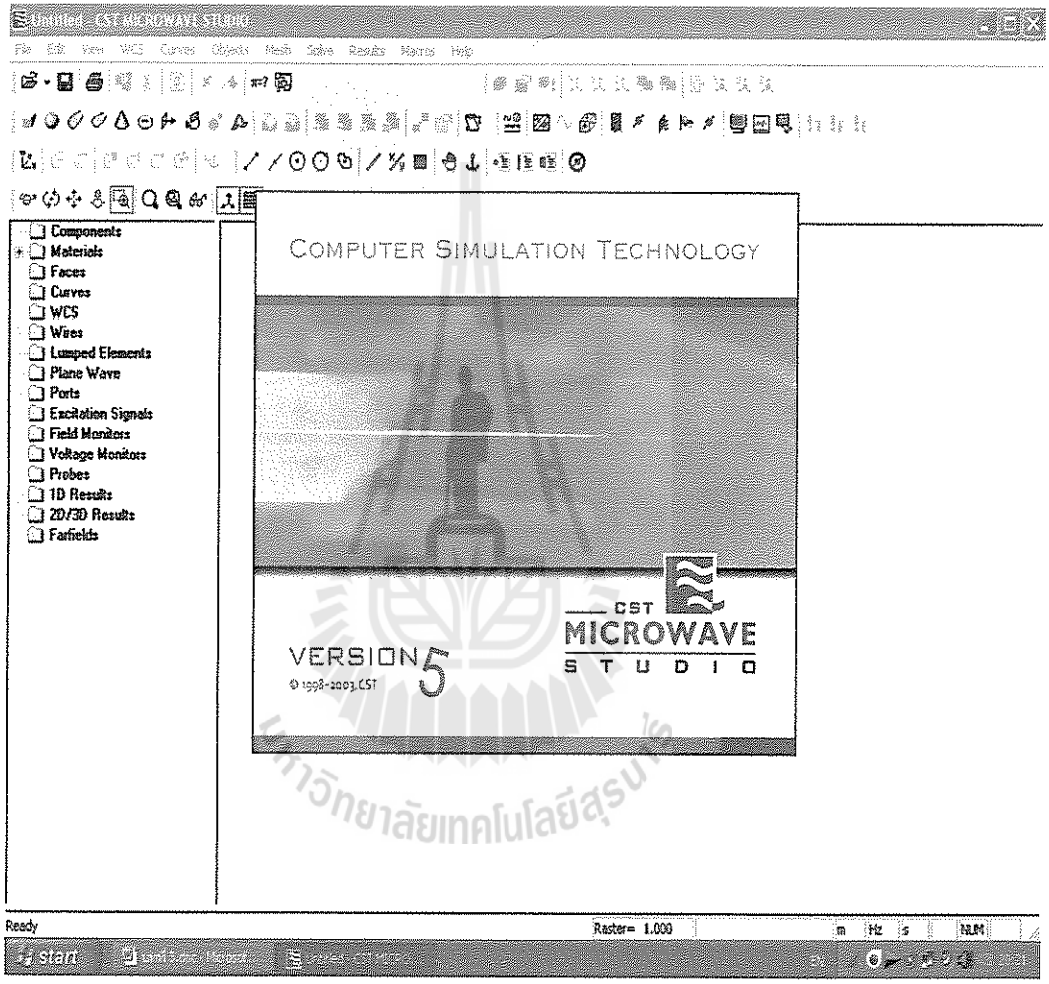
แล้วนำค่าต่างๆที่คำนวณได้ไปออกแบบในโปรแกรม ***CST***

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3 ออกแบบ filter ด้วยโปรแกรม CST

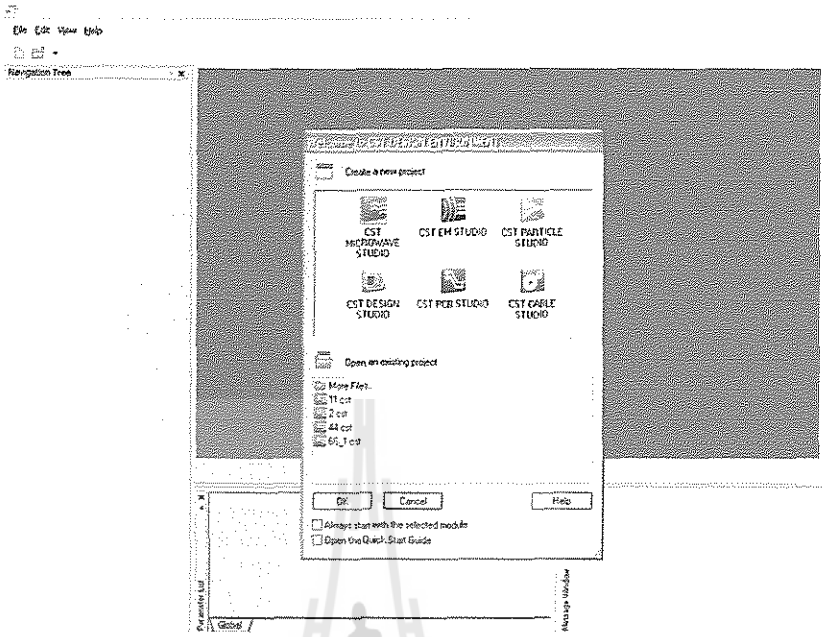
เมื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จึงนำค่าที่คำนวณได้มาออกแบบในโปรแกรม CST เพื่อพิจารณาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบ ดังนี้

1. เริ่มเปิดโปรแกรม CST ขึ้นมา



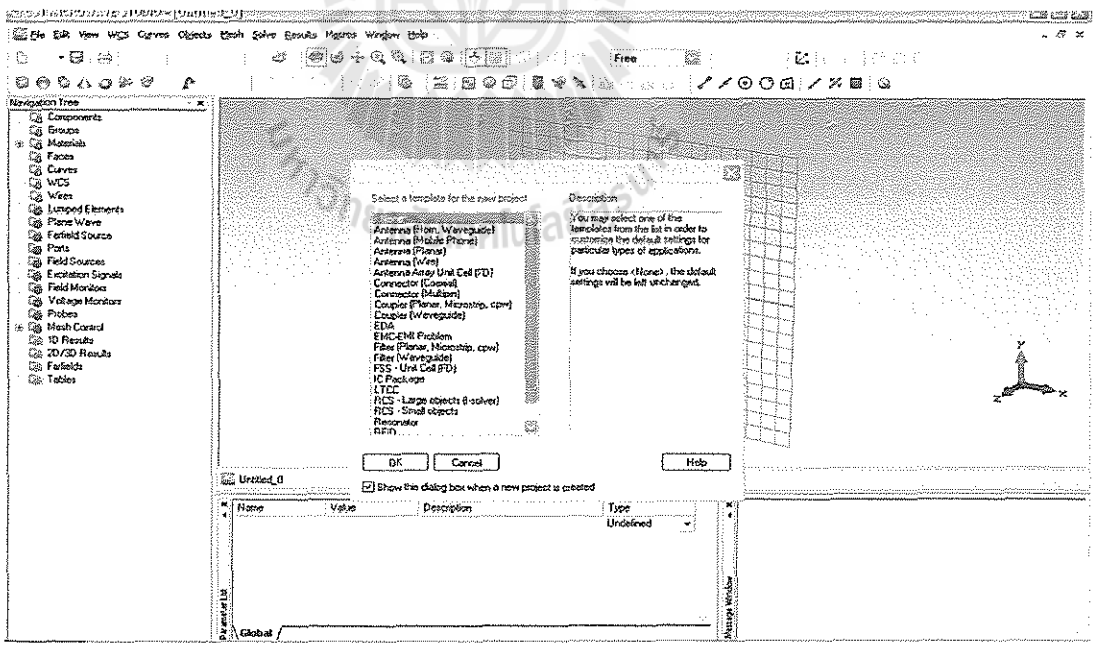
รูปที่ 3.6 โปรแกรม CST ที่ใช้ในการออกแบบ filter

2.คลิกที่ไอคอน CST MICROWAVE STUDIO แล้วคลิก OK



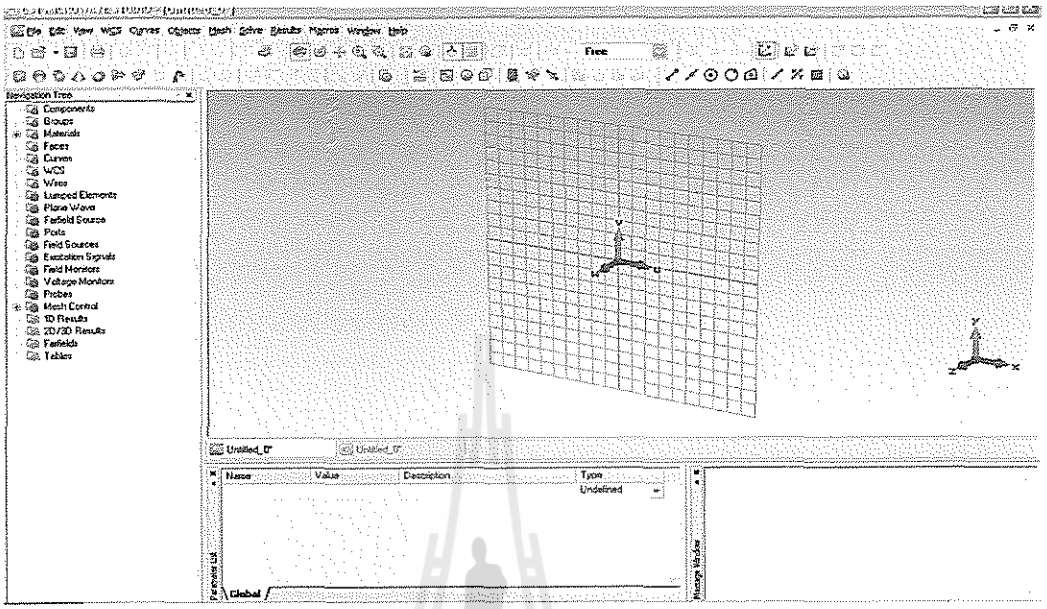
รูปที่3.7 หน้าต่าง ที่เริ่มเข้าโปรแกรม CST

3.เลือกที่ None แล้วกด OK



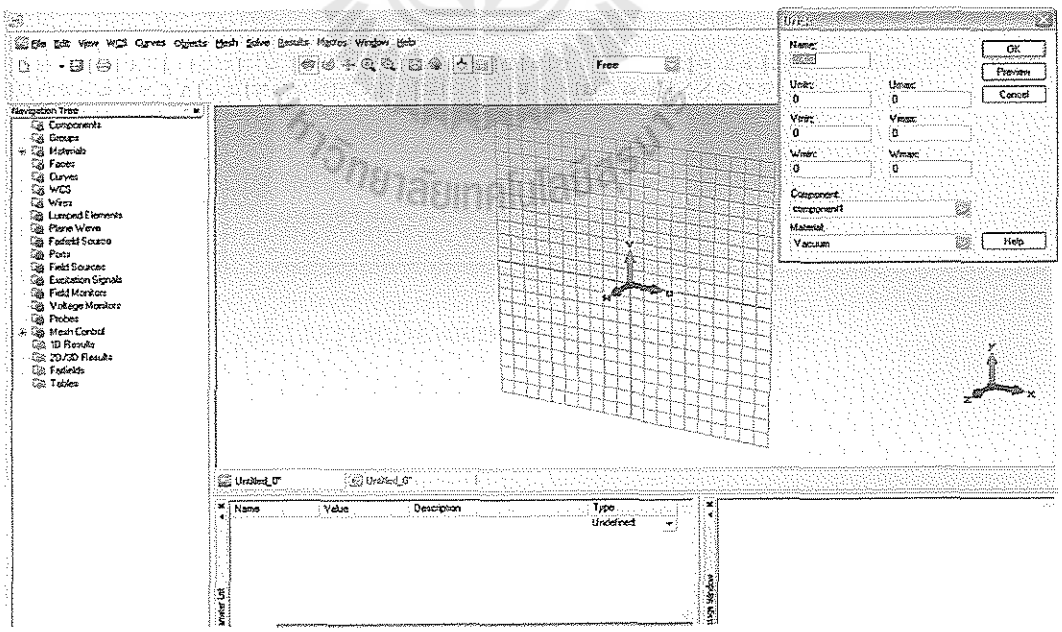
รูปที่3.8 รูปหน้าต่างของ Create a New Project

4. กดที่ Toggle local coordinates on/off เพื่อเป็นการเลือกแกน W , V และ U เพื่อให้สะดวกในการมอง



รูปที่3.9 รูปหน้าต่างเมื่อกด Toggle local coordinates on/off แล้วแสดงแกน W , V และ U

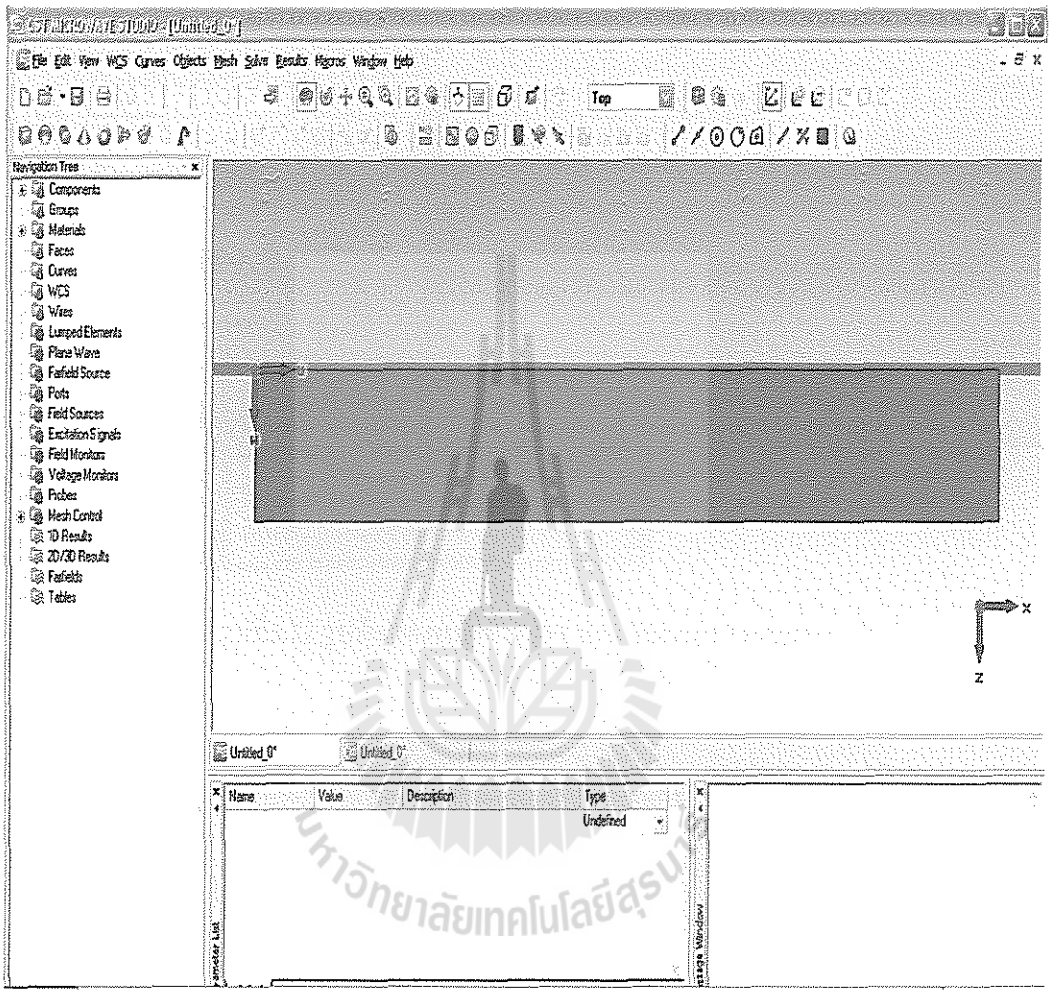
5.คลิกที่ Create brick แล้วกด ESC



รูปที่3.10 รูปหน้าต่าง ของ Brick ที่ไว้ใส่ค่าต่างๆของ U , V และ W

6.แล้วใส่ค่าต่างๆจากที่เราคำนวณไว้ ลงในช่องตาราง โดยที่ค่า Umin =0 ,Umax =141.014 ,Vmin= 0, Vmax= -0.035 ,Wmin= 0, Wmax= 19.4856

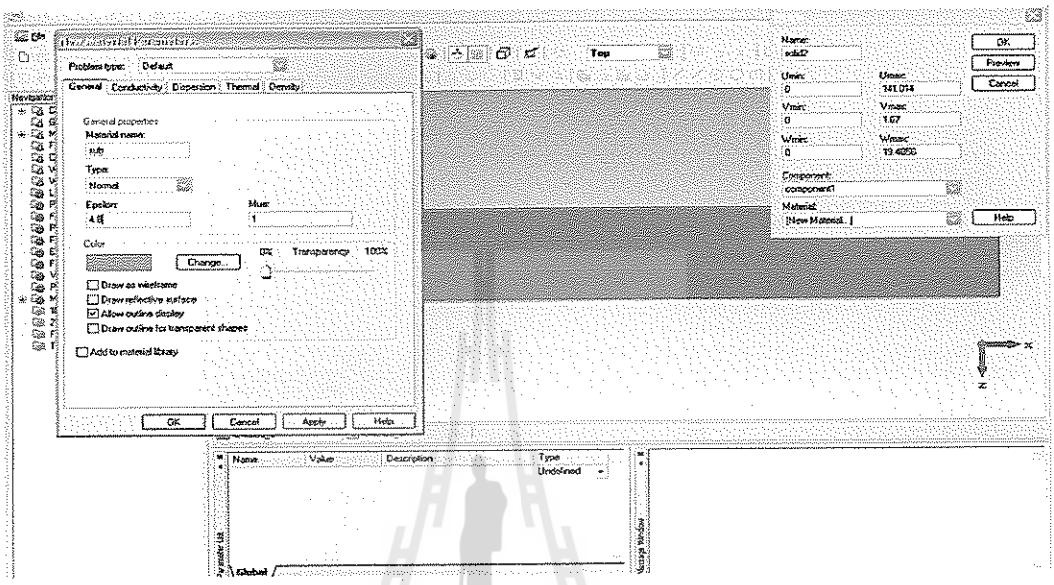
แล้วเลือกที่ Material เป็น PEC แล้วกด OK และเลือกมุมมอง เป็น TOP



รูปที่3.11 รูปหน้าต่างแสดงรูปที่สร้าง Material เป็น PEC

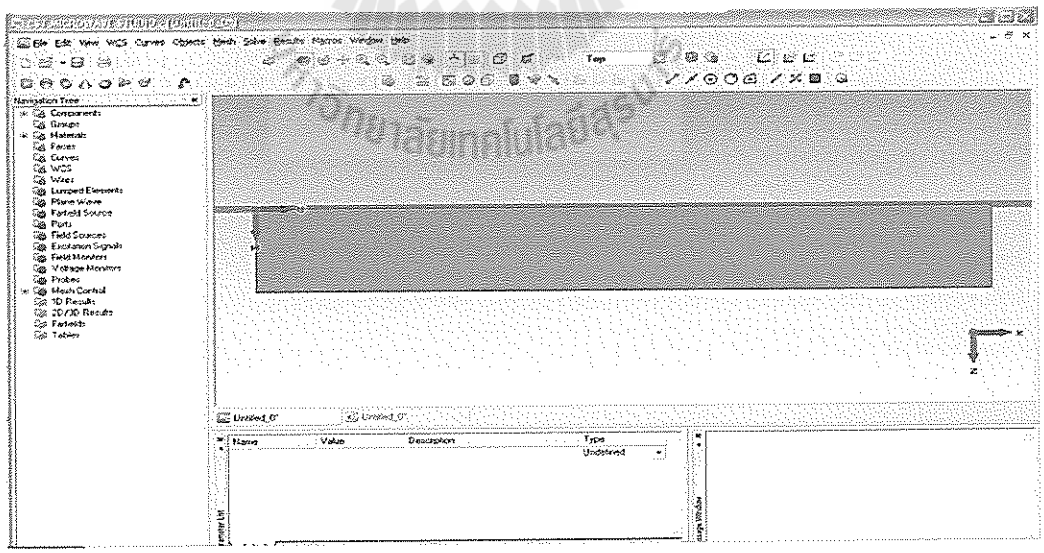
7.ทำเหมือนข้อ6 แต่เปลี่ยนตรงที่ Material เป็น New Material…

แล้วจะขึ้น New Material แล้วเปลี่ยนชื่อ ที่ Material name เป็น Sub และที่ Epssilon = 4.8 แล้วกด OK และ กด OK ที่ Brick อีกรอบ



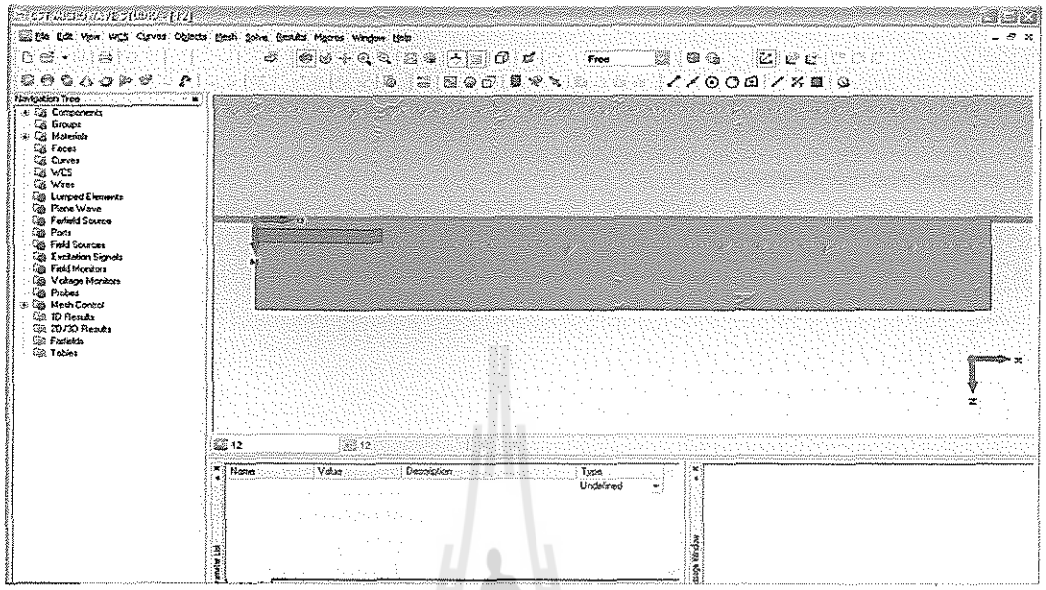
รูปที่3.12 รูปที่แสดงหน้าต่างของ New Material Parameter

จะได้ดังรูปด้านล่าง



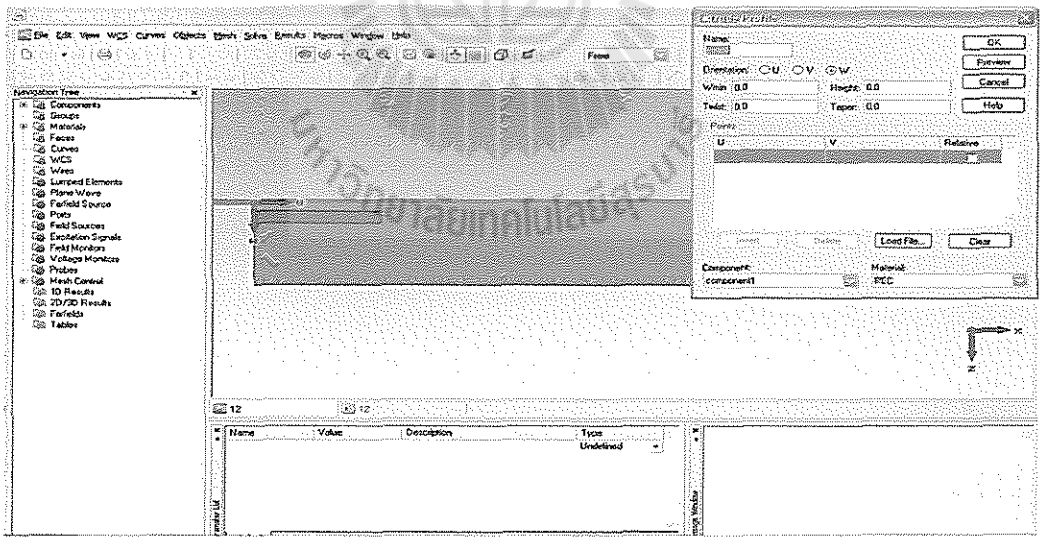
รูปที่3.13 รูปหน้าต่างแสดงรูปที่สร้าง Material เป็น sub

8.แล้วกด Create brick และกด ESC เพื่อที่จะสร้างลายวงจร เป็น solid3 แต่ตอนนี้เลือก Material เป็น PEC แล้วกด OK และใส่ค่าต่างๆตามที่เราออกแบบไว้ด้วย แล้วจะได้ดังรูปด้านล่าง



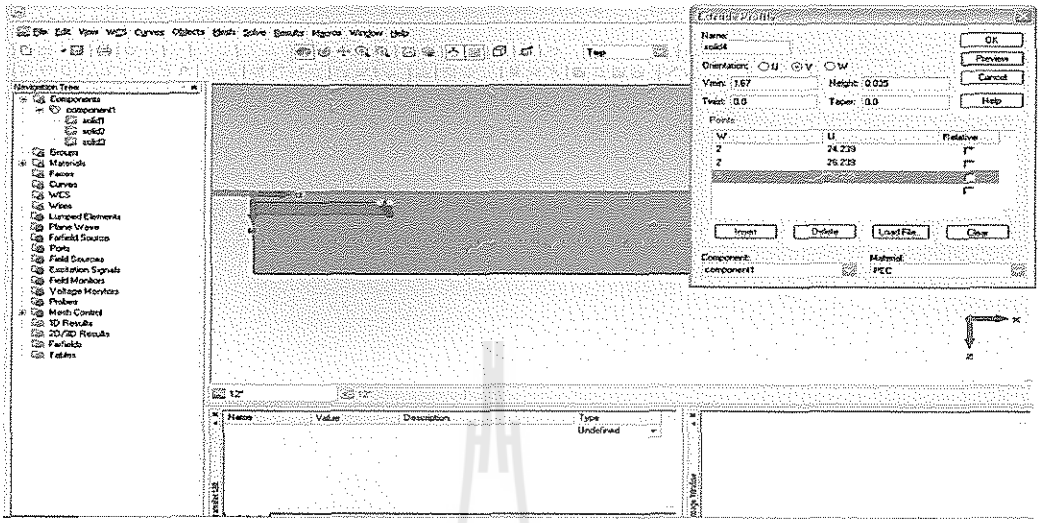
รูปที่3.14 รูปหน้าต่างที่สร้างลายวงจรขั้นแรก

9. แล้วกด Extrude และกด ESC จะขึ้น Extrude Profile แล้วทำการใส่ค่า



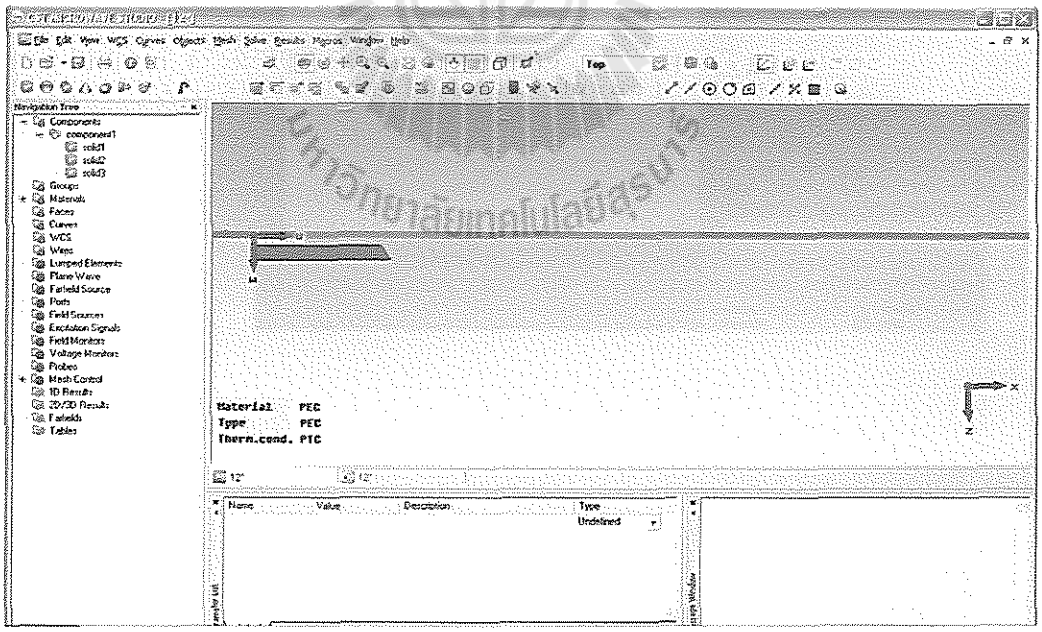
รูปที่3.15 รูปที่แสดงหน้าต่างของ Extrude Profile เพื่อที่จะการตัดลายวงจร

โดยคลิกที่ V ให้ Vmin= 1.67, Height= 0.035 แล้วคลิกที่ Points ป้อนค่า W และ U ลงไป แล้ว OK จะเห็นรอยที่เราจะตัดขึ้น



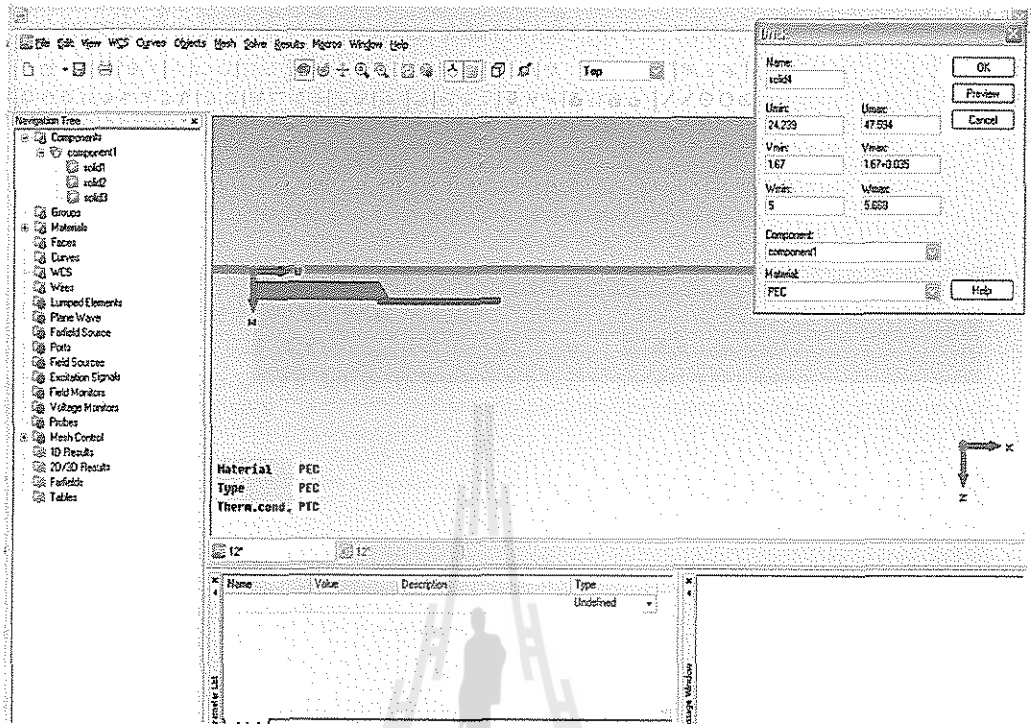
รูปที่3.16 รูปหน้าต่างแสดงลักษณะรอยตัดที่ใส่ค่าไปแล้ว

10.คลิกที่ component1 เลือก solid3 และคลิกที่ Boolean subtract (-) กด Ctrl พร้อมกับ เลือกที่ solid4 แล้วก็ Enter เพื่อทำการตัดทิ้ง จะได้ดังรูปด้านล่าง

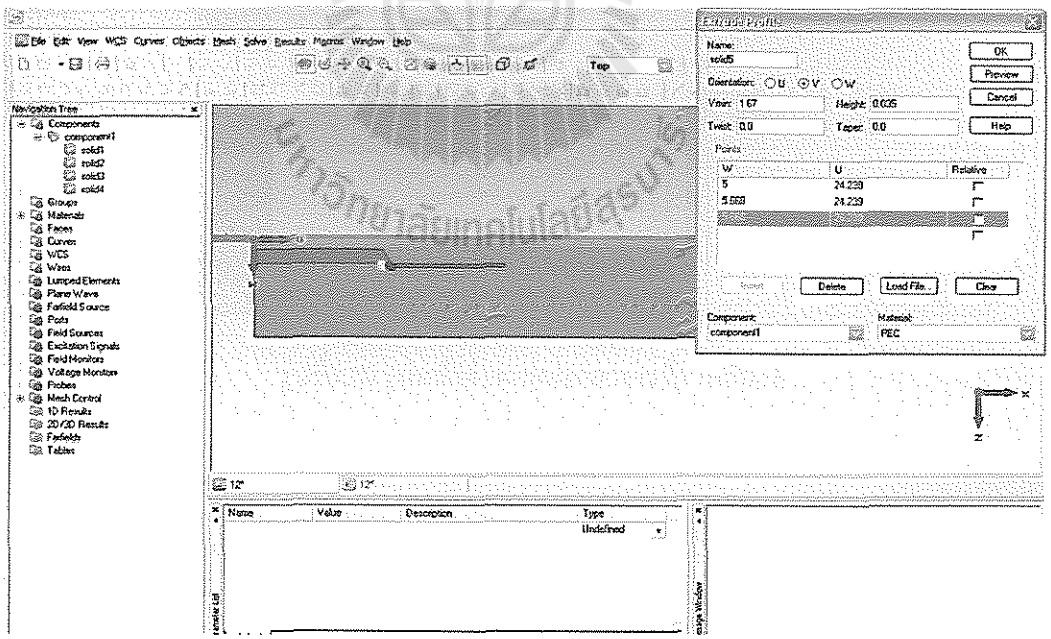


รูปที่3.17 รูปหน้าต่างแสดงลายวงจรที่ตัดออกมาแล้ว

11.แล้วกด Create brick และ ESC เพื่อทำการสร้างวงจรอีก



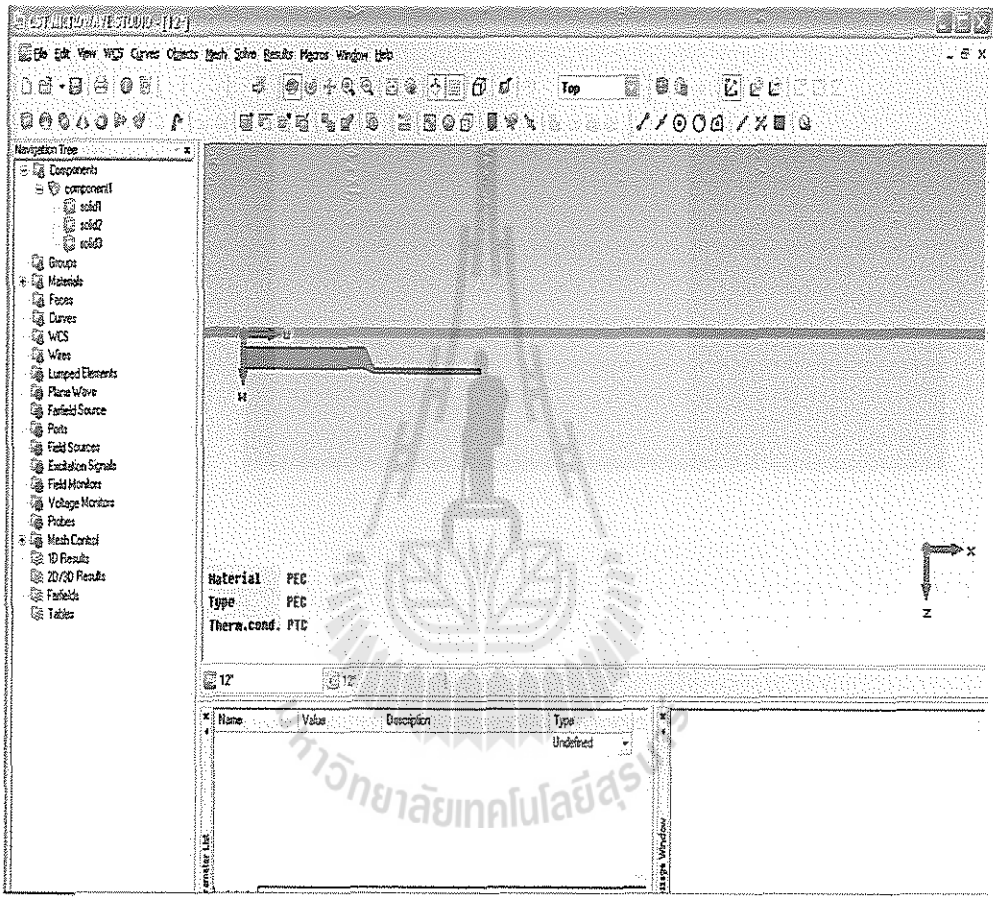
รูปที่3.18 รูปหน้าต่างแสดงลายวงจรขั้นที่สอง



รูปที่3.19 รูปที่แสดงหน้าต่าง Extrude Profile เพื่อที่จะการรวมลายวงจร

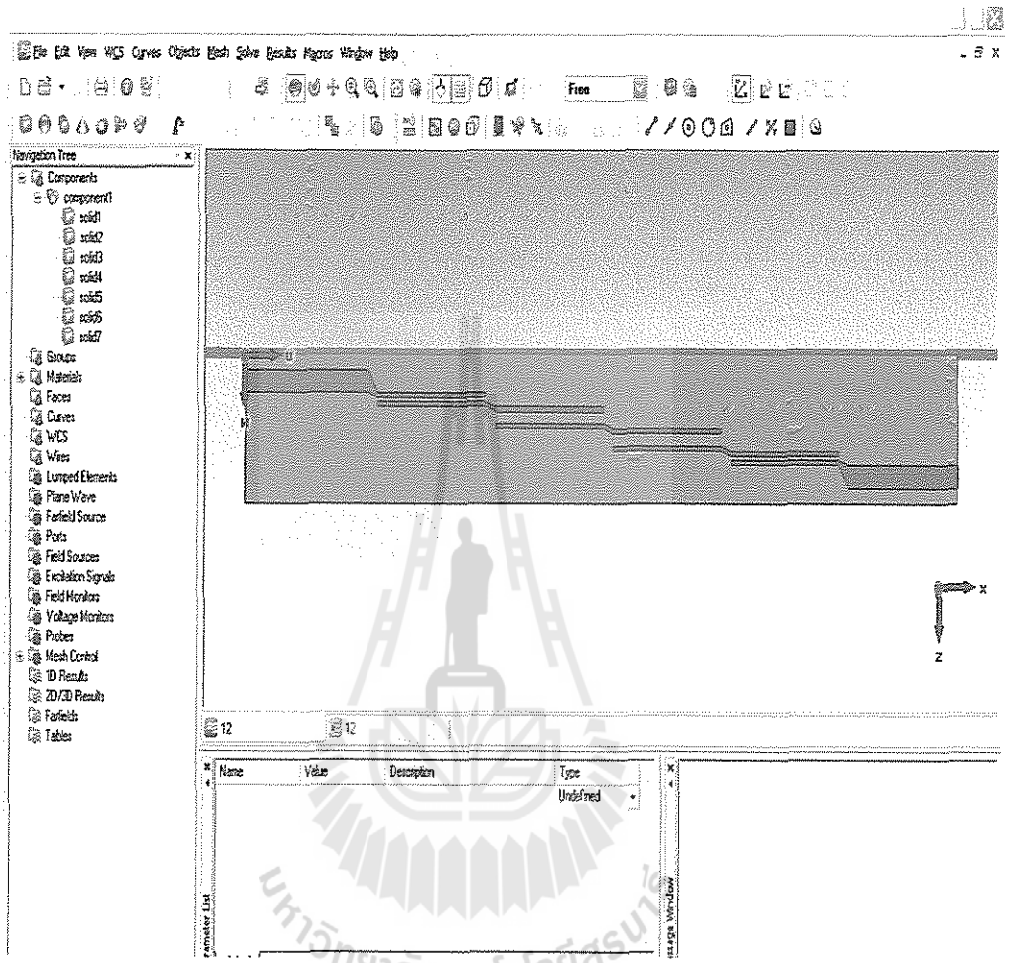
12.วิธีการรวมลายวงจร

โดยคลิกที่ solid3 แล้วคลิก Boolean Add (+) แล้ว กด Ctrl พร้อมกับเลือก solid4 และกด Enter เพื่อทำการรวมลายวงจร จะได้ดังรูปข้างล่าง



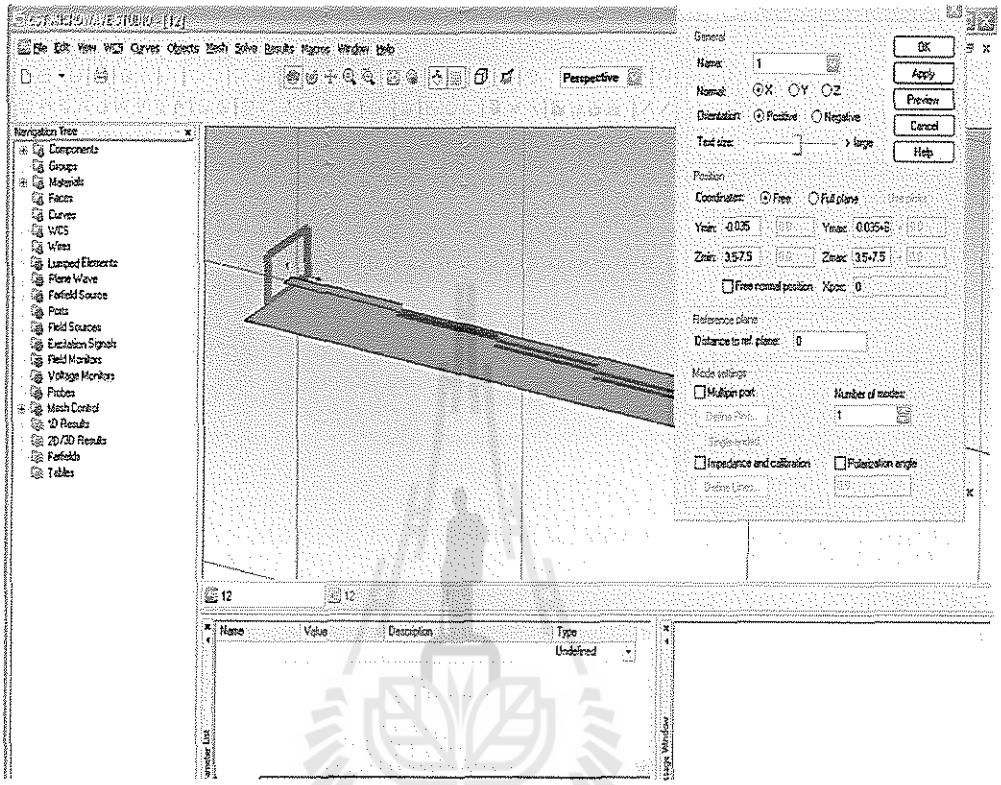
รูปที่3.20 รูปหน้าต่างแสดงลายวงจรที่รวมกันแล้ว

แล้วก็ทำซ้ำจากข้อ 8 ถึง ข้อ 12 จนเสร็จแล้วจะได้ดังรูปด้าล่าง



รูปที่3.21 รูปหน้าต่างแสดงลายวงจรทั้งหมดที่ออกแบบมา

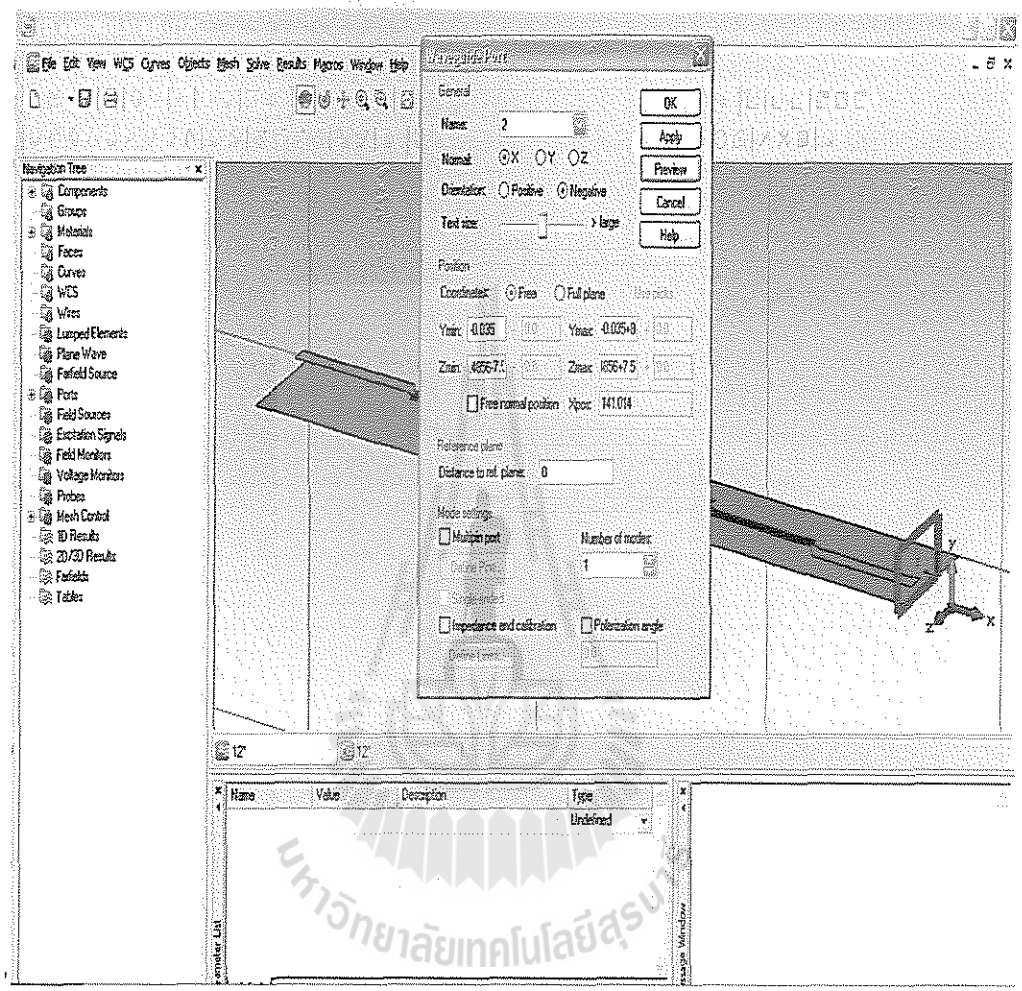
13.ทำการสร้าง Port โดยเลือกมุมมองเป็น Left แล้วคลิกที่รูป และกด Waveguide ports โดยเลือก Normail = x ,เลือก Orientation เป็น Positive ,เลือก Coordinates เป็น Free แล้วใส่ค่า Ymin= -0.035 ,Ymax= -0.035+8, Zmin= 3.5-7.5, Zmax=3.5+7.5 แล้วกด O



รูปที่3.22 รูปที่แสดงหน้าต่าง Waveguide ports ที่จะสร้าง Port ที่ 1

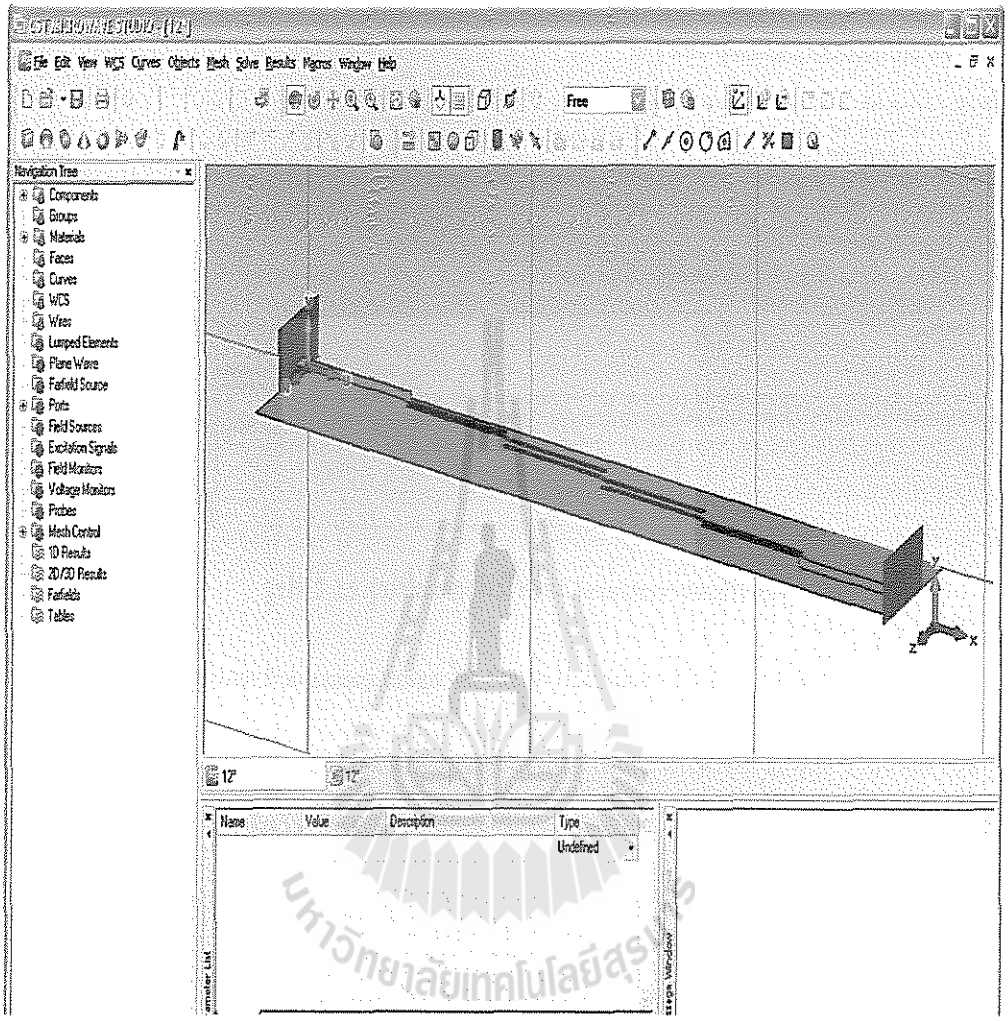
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

และทำอีกด้านหนึ่งโดยเลือกมุมมอง Right และ เลือก Normail= x ,Orientation เป็น Negative, Coordinates เป็น Free และใส่ค่า Ymin= -0.035, Ymax= -0.035+8, Zmin=15.4856-7.5 ,Zmax= 15.4856+7.5และกด OK



รูปที่3.23 รูปที่แสดงหน้าต่าง Waveguide ports ที่จะสร้าง Port ที่ 2

แล้วจะได้ทั้งสอง Ports ดังรูปด้านล่าง

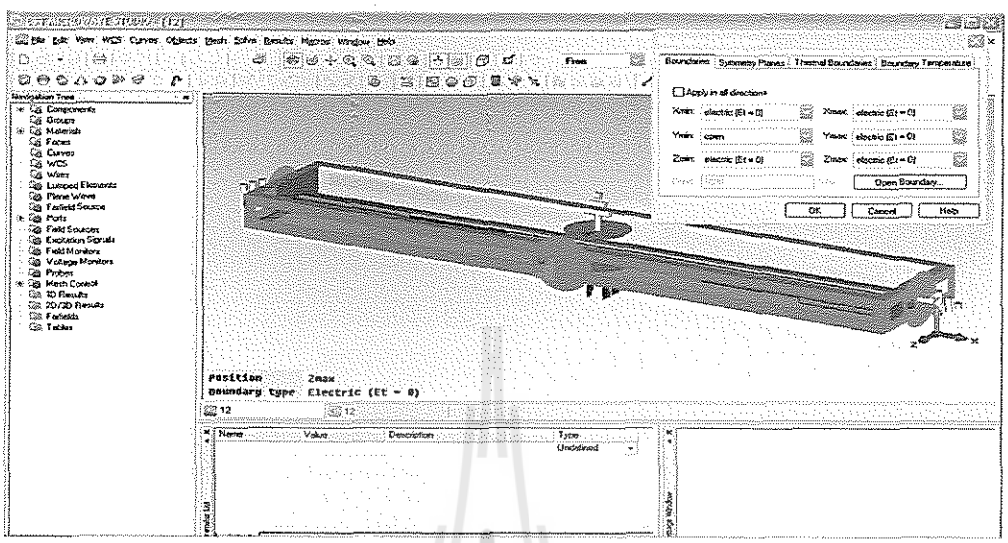


รูปที่3.24 รูปหน้าต่างแสดง Port ที่ 1 และ Port ที่ 2 ที่สร้างเรียบร้อยแล้ว

(หมายเหตุ:การเลือก Normail ว่าจะเป็น x,y,z ต้องดูด้วยว่าอยู่ในด้านที่ทำport หรือไม่ และการ ใส่ค่า A-7.5 และ A+7.5 ต้องดูด้วยว่าควบคุมด้านที่เราจะทำportหรือไม่ โดยที่ค่า A คือค่าที่เราจะใส่เข้าไป)

14. ต่อไปจะทำการรัน แต่ต้องทำการตั้งค่าก่อน โดยคลิกที่ Specify boundary conditions

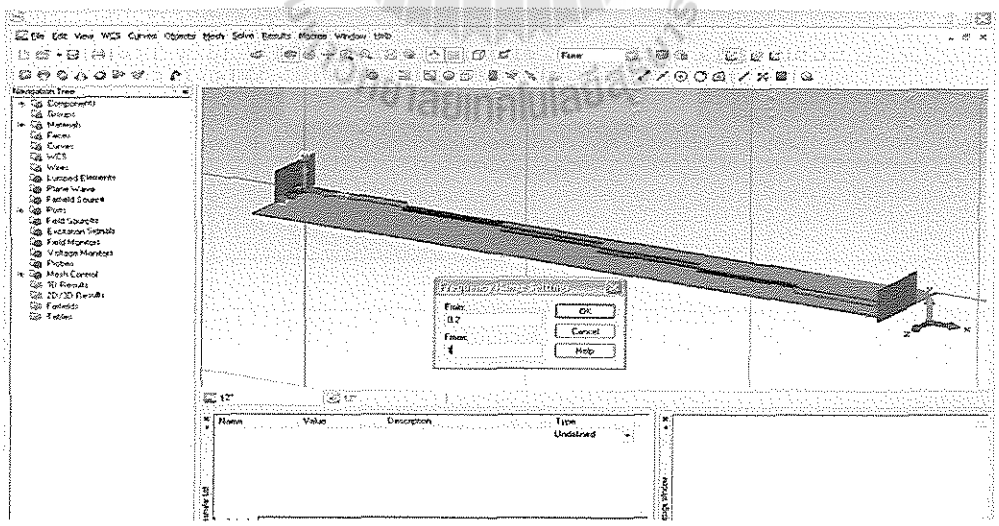
แล้วเลือกที่ Ymin =Open ส่วนที่ค่าอื่นๆเลือกเป็น electric(Et=0)ทั้งหมด แล้วกด OKจะได้ดังรูป



รูปที่3.25 รูปที่แสดงหน้าต่าง boundary conditions

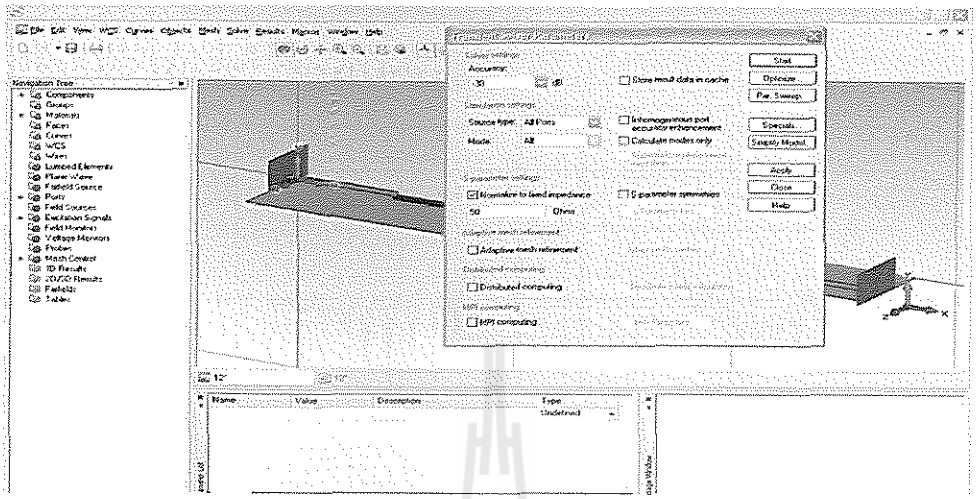
15. ตั้งค่าความถี่ โดยกด Frequency range ให้ fmin= 0.2 ,fmax=1 และกด OK

(หมายเหตุ : ค่า fmin ,fmax แล้วแต่เราจะกำหนด โดยกำหนดให้ควบคุมความถี่ที่เราออกแบบ เพื่อที่จะได้ดูรูปกราฟให้กว้างขึ้น)



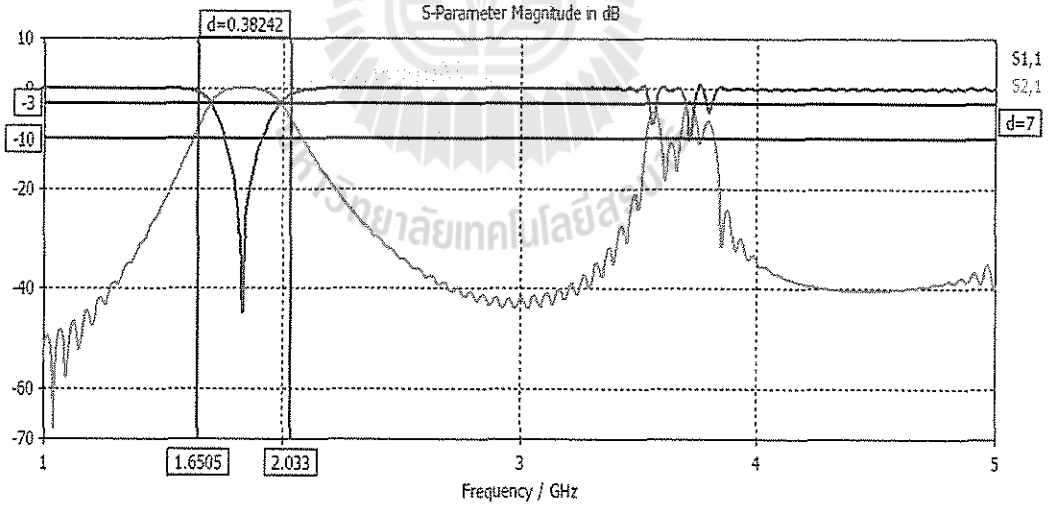
รูปที่3.26 รูปที่แสดงหน้าต่าง Frequency Range Settings เพื่อกำหนดช่วงความถี่

16.เมื่อตั้งค่าต่างๆไว้เรียบร้อยเราจะทำการรันโดยกด Transient solver และกด start โปรแกรมก็จะทำการรันทันที (หรือ อาจจะคลิกที่ Nomalize to fixed impedance เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น)



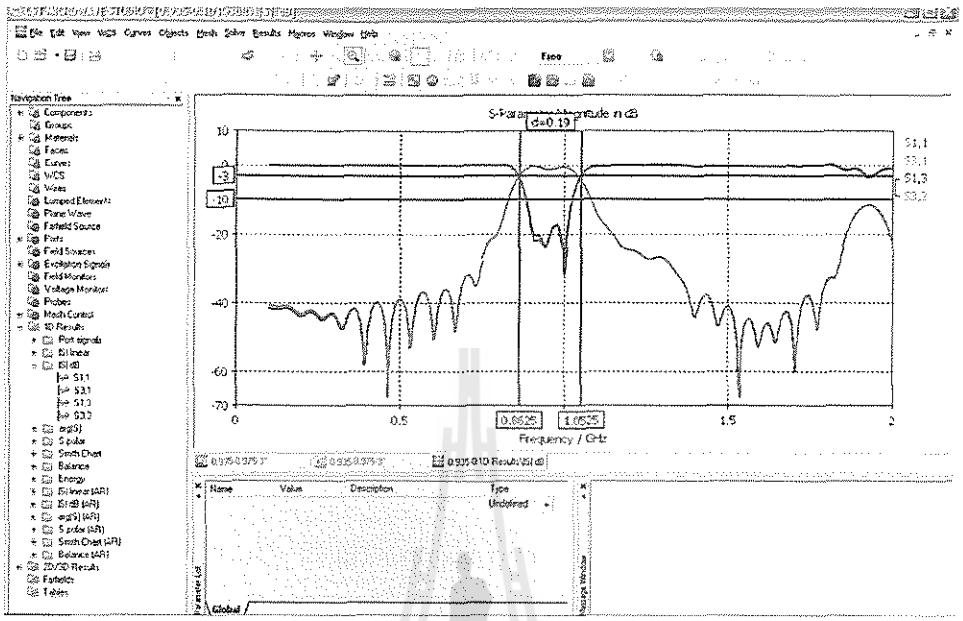
รูปที่3.27 รูปที่แสดงหน้าต่าง Transient Solver Parameters เพื่อทำการรัน

เมื่อเราทำการรันเรียบร้อยแล้วจะได้กราฟดังรูปด้านล่าง จะเห็นได้ว่ารูปกราฟเป็นตามทฤษฎีที่เราออกแบบจึงสามารถนำไปทำการสร้าง วงจร filter ได้



รูปที่3.28 รูปกราฟที่ทำการรันแล้ว ในย่านความถี่ 1.805-1.880 GHz

ที่เรายกตัวอย่างการออกแบบคือที่ย่านความถี่ 1.805-1.880GHz ส่วนที่ย่านความถี่ 0.935-0.960 GHz ก็จะใช้วิธีการเดียวกันกับที่ยกตัวอย่างจะได้รูปกราฟดังนี้



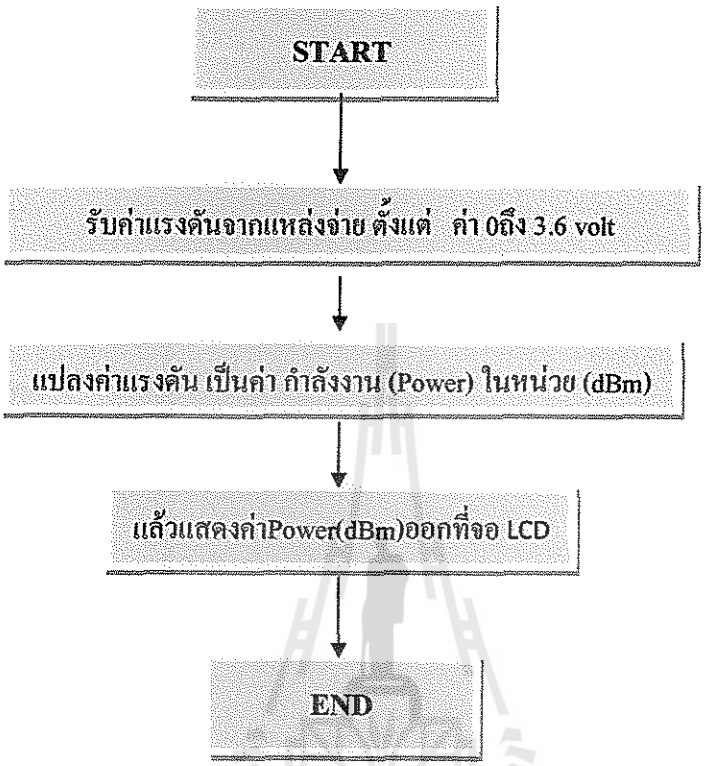
รูปที่3.29 รูปกราฟที่ทำการรันแล้ว ในย่านความถี่ 0.935 - 0.960 GHz

ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟของย่านความถี่ที่ 0.935 - 0.960 GHz มีลักษณะคล้ายกับรูปกราฟของย่านความถี่ที่ 1.805 - 1.880 GHz จึงสรุปได้ว่าในย่านความถี่ที่ 0.935-0.960 GHz เป็นไปตามทฤษฎีที่เราออกแบบ สามารถนำไปสร้างวงจร filter ได้เช่นกัน

3.4 โปรแกรมควบคุม

เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน โดยใช้ภาษา C ใช้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega 128 ในส่วนของโปรแกรม โปรแกรมจะทำการรับค่า แรงดันจากแหล่งจ่ายแล้วแปลงค่าเป็นค่า กำลังงาน (Power) ในหน่วย (dBm) ซึ่งจะรับค่าตั้งแต่ 0 ถึง 3.6 Volt ของค่าแรงดัน และ ค่าตั้งแต่ -32 ถึง 8 dBm ของค่ากำลังงาน แล้วจะแสดงผลออกมาทางจอ LCD display

3.4.1 ผังลำดับการทำงานของโปรแกรม



3.4.2 โค้ดโปรแกรม

```
/*****************************************************
This program was produced by the
CodeWizardAVR V2.04.4a Advanced
Automatic Program Generator
© Copyright 1998-2009 Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.
http://www.hpinfotech.com
Project :
```

```
Version :
Date    : 23/3/2011
Author  : NeVaDa
Company : Mazzbox
Comments:
Chip type           : ATmega128
Program type        : Application
AVR Core Clock frequency: 16.000000 MHz
Memory model        : Small
External RAM size   : 0
Data Stack size     : 1024
*****************************************************/
#include <mega128.h>
#include <stdio.h>
#include <delay.h>
#define ADC_VREF_TYPE 0x00
char lcdbuf[16+1];          // LCD Display Buffer
/* pototype  section */
void init_lcd(void);        // Initial Character LCD(4-Bit Interface)
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
void gotolcd(unsigned char);     // Set Cursor LCD

void write_ins(unsigned char);     // Write Instruction LCD

void write_data(unsigned char);    // Write Data LCD

void printlcd(void);   // Display Message LCD

float table_call (float n);

// Read the AD conversion result

unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)

{

ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);      // Delay needed for the stabilization of
the ADC input voltage

delay_us(10);                  // Start the AD conversion

ADCSRA|=0x40;                  // Wait for the AD conversion to complete

while ((ADCSRA & 0x10)==0);

ADCSRA|=0x10;

return ADCW;

}

// Declare your global variables here

void main(void)

{
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
unsigned int adc_val;

float output;

// Declare your local variables here

// Input/Output Ports initialization

// Port A initialization

// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In

// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T

PORTA=0x00;

DDRA=0x00;

// Port B initialization

// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In

// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T

PORTB=0x00;

DDRB=0x00;

// Port C initialization

// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In

// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T

PORTC=0x00;

DDRC=0x00;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
// Port D initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T
PORTD=0x00;
DDRD=0xFF;
// Port E initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T
PORTE=0x00;
DDRE=0x00;
// Port F initialization
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T
PORTF=0x00;
DDRF=0x00;
// Port G initialization
// Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In Func0=In
// State4=T State3=T State2=T State1=T State0=T
PORTG=0x00;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
DDRG=0xFF;

// Timer/Counter 0 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer 0 Stopped

// Mode: Normal top=FFh

// OC0 output: Disconnected

ASSR=0x00;

TCCR0=0x00;

TCNT0=0x00;

OCR0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer1 Stopped

// Mode: Normal top=FFFFh

// OC1A output: Discon.

// OC1B output: Discon.

// OC1C output: Discon.

// Noise Canceler: Off

// Input Capture on Falling Edge
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
// Timer1 Overflow Interrupt: Off
// Input Capture Interrupt: Off
// Compare A Match Interrupt: Off
// Compare B Match Interrupt: Off
// Compare C Match Interrupt: Off
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=0x00;
TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0x00;
ICR1H=0x00;
ICR1L=0x00;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x00;
OCR1BH=0x00;
OCR1BL=0x00;
OCR1CH=0x00;
OCR1CL=0x00;
// Timer/Counter 2 initialization
// Clock source: System Clock
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
// Clock value: Timer2 Stopped

// Mode: Normal top=FFh

// OC2 output: Disconnected

TCCR2=0x00;

TCNT2=0x00;

OCR2=0x00;

// Timer/Counter 3 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: Timer3 Stopped

// Mode: Normal top=FFFFh

// OC3A output: Discon.

// OC3B output: Discon.

// OC3C output: Discon.

// Noise Canceler: Off

// Input Capture on Falling Edge

// Timer3 Overflow Interrupt: Off

// Input Capture Interrupt: Off

// Compare A Match Interrupt: Off

// Compare B Match Interrupt: Off
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
// Compare C Match Interrupt: Off
TCCR3A=0x00;
TCCR3B=0x00;
TCNT3H=0x00;
TCNT3L=0x00;
ICR3H=0x00;
ICR3L=0x00;
OCR3AH=0x00;
OCR3AL=0x00;
OCR3BH=0x00;
OCR3BL=0x00;
OCR3CH=0x00;
OCR3CL=0x00;
// External Interrupt(s) initialization
// INT0: Off
// INT1: Off
// INT2: Off
// INT3: Off
// INT4: Off
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
// INT5: Off
// INT6: Off
// INT7: Off
EICRA=0x00;
EICRB=0x00;
EIMSK=0x00;
// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
TIMSK=0x00;
ETIMSK=0x00;
// Analog Comparator initialization
// Analog Comparator: Off
// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off
ACSR=0x80;
SFIOR=0x00;
// ADC initialization
// ADC Clock frequency: 1000.000 kHz
// ADC Voltage Reference: AREF pin
ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;
ADCSRA=0x84;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
delay_ms(30);          // Power-on Delay
init_lcd();            // Initial LCD
gotolcd(0);            // Set Cursor Line-1
sprintf(lcdbuf,"RF Power Detector");     // Display Line-1
printlcd();
while (1)
 {
  adc_val = read_adc(0);
  output = (5.0/1024.0)*(float)adc_val;
  gotolcd(0x40);
  sprintf(lcdbuf,"%0.2f dbm",table_call(output));
  printlcd();
  delay_ms(500);
 };
}
/*******************************/
/* Initial LCD 4-Bit Interface */
/*******************************/
void init_lcd(void)
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
{
 PORTD &= 0b01111111;   // Start LCD Control   EN=0  (PD7)
delay_ms(1);         // Wait LCD Ready
write_ins(0x33);       // Initial (Set DL=1 3 Time, Reset DL=0 1 Time)
 write_ins(0x32);
 write_ins(0x28);       // Function Set (DL=0 4-Bit,N=1 2 Line,F=0 5X7)
 write_ins(0x0C);       // Display on/off Control (Entry Display,Cursor off,Cursor not Blink)
 write_ins(0x06);       // Entry Mode Set (I/D=1 Increment,S=0 Cursor Shift)
 write_ins(0x01);      // Clear Display  (Clear Display,Set DD RAM Address=0)
 delay_ms(1);// Wait Initial Complete
 return;
}
/******************/
/* Set LCD Cursor */
/******************/
void gotolcd(unsigned char i)
{
 i |= 0x80;                  // Set DD-RAM Address Command
 write_ins(i);
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
 return;
}
/*****************************/
/* Write Instruction to LCD */
/*****************************/
void write_ins(unsigned char i)
{
PORTG  &= 0b11101111;     // Instruction Select RS=0(PG4)
PORTG &= 0xF0;          // Clear old LCD Data (Bit[3..0])
 PORTG |= (i>>4) & 0x0F;      // Strobe High Nibble Command
 PORTD |= 0b10000000;   // Enable ON   EN=1(PD7)
 delay_ms(1);
 PORTD &= 0b01111111;    // Enable OFF   EN=0(PD7)
PORTG &= 0xF0;          // Clear old LCD Data (Bit[3..0])
 PORTG |= i & 0x0F;      // Strobe Low Nibble Command
 PORTD |= 0b10000000;     // Enable ON    EN=1(PD7)
 delay_ms(1);
 PORTD &= 0b01111111;   // Enable OFF   EN=0(PD7)
 delay_ms(1);    // Wait LCD Busy
```

```
 return;
}
/*****************************/
/* Write Data(ASCII) to LCD */
/*****************************/
void write_data(unsigned char i)
{
 PORTG |= 0b00010000;    // Instruction Select  RS=1(PG4)

 PORTG &= 0xF0;          // Clear old LCD Data (Bit[3..0])
 PORTG |= (i>>4) & 0x0F;      // Strobe High Nibble Command
 PORTD |= 0b10000000;   // Enable ON    EN=1(PD7)
 delay_ms(1);
 PORTD &= 0b01111111;   // Enable OFF   EN=0(PD7)
PORTG &= 0xF0;          // Clear old LCD Data (Bit[3..0])
 PORTG |= i & 0x0F;  // Strobe Low Nibble Command
 PORTD |= 0b10000000;   // Enable ON    EN=1(PD7)
 delay_ms(1);
 PORTD &= 0b01111111;   // Enable OFF   EN=0(PD7)
```

```
 delay_ms(1);  // Wait LCD Busy
 return;
}
/*****************************/
/* Print Data(ASCII) to LCD */
/*****************************/
void printlcd(void)
{
char *p;
 p = lcdbuf;
 do                              // Get ASCII & Write to LCD Until null
{
   write_data(*p);              // Write ASCII to LCD
         p++;                   // Next ASCII
 }
 while(*p != '\0');     // End of ASCII (null)
return;
}
float table_call (float n)
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
{
 float value = -32.0;
 if(n>=2.28)
   value = ((n-2.28)*(8.0-4.0)/(3.6-2.28))+4.0;
 else if(n>=1.39)
   value = ((n-1.39)*(4.0-0.0)/(2.28-1.39))+0.0;
 else if(n>=0.85)
   value = ((n-0.85)*(0.0+4.0)/(1.39-0.85))-4.0;
 else if(n>=0.54)
   value = ((n-0.54)*(-4.0+8.0)/(0.85-0.54))-8.0;
 else if(n>=0.33)
   value = ((n-0.33)*(-8.0+12.0)/(0.54-0.33))-12.0;
 else if(n>=0.20)
   value = ((n-0.20)*(-12.0+16.0)/(0.33-0.20))-16.0;
 else if(n>=0.14)
   value = ((n-0.14)*(-16.0+20.0)/(0.20-0.14))-20.0;
 else if(n>=0.12)
   value = ((n-0.12)*(-20.0+24.0)/(0.14-0.12))-24.0;
 else
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
value = -28;

 return value;

};
```

3.5 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega 128

<u>คุณสมบัติทางเทคนิค</u>

- ติดตั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega128 ตัวถัง LQFP 64 ขา มีหน่วยความจำโปรแกรม 128 กิโลไบต์ แรม 4 กิโลไบต์ และอีอีพรอม 4 กิโลไบต์
- มีคอนเน็กเตอร์ ISP เพื่อต่อกับเครื่องโปรแกรมแบบ In-System ภายนอก เพื่อโปรแกรมข้อมูลลงในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์
- ความถี่สัญญาณนาฬิกา 16MHz จากคริสตอล
  คริสตอล 32.768kHz สำหรับโมดูลฐานเวลานาฬิกาจริงภายใน ATmega128
- ในหน่วยความจำโปรแกรมของ ATmega128 ได้รับการโปรแกรมเฟิร์มแวร์บูตโหลดเดอร์จากผู้ผลิต เพื่อรองรับการใช้งานกับซอฟต์แวร์ในโครงการ Wiring (www.wiring.org.co) ซึ่งพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา C/C++
- ผู้ใช้งานสามารถดาวน์โหลดโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองได้ผ่านทางพอร์ต USB ของบอร์ด บูตโหลดเดอร์ยังสามารถทำงานกับซอฟต์แวร์โปรแกรม STK500 V2 ที่ติดตั้งมาในชุดซอฟต์แวร์ AVR STUDIO 4.13 ขึ้นไป ถ้าหากผู้ใช้งานทำการดาวน์โหลดโปรแกรมผ่านทางคอนเน็กเตอร์ ISP จะทำให้บูตโหลดเดอร์หายไป แต่ถ้าหากมีความต้องการกลับมาใช้บูตโหลดเดอร์ ก็สามารถโปรแกรมใหม่ได้ เนื่องจากได้เตรียมไฟล์ .hex ไว้ให้ในซีดีรอม แต่จะต้องโปรแกรมผ่านทาง ISP ก่อน จากนั้นจึงสามารถกลับมาโปรแกรมผ่านพอร์ต USB ได้
- มีจุดต่อพอร์ตสำหรับใช้งาน ดังนี้
  พอร์ต A จำนวน 8 ช่อง (PA0 ถึง PA7)
  พอร์ต B จำนวน 8 ช่อง (PB0 ถึง PB7)
  พอร์ต C จำนวน 8 ช่อง (PC0 ถึง PC7)
  พอร์ต D จำนวน 8 ช่อง (PD0 ถึง PD7)

พอร์ต E จำนวน 5 ช่อง (PE3 ถึง PE7)

พอร์ต F จำนวน 8 ช่อง (PF0 ถึง PF7 และใช้เป็นพอร์ตอินพุตอะนาลอกด้วย)

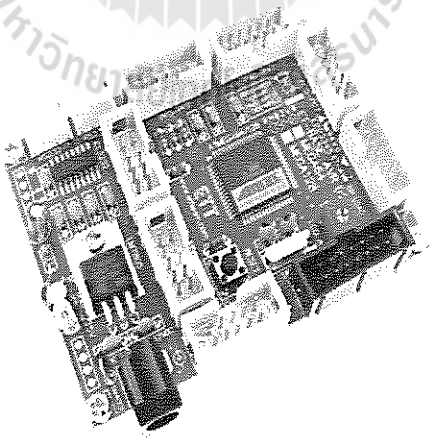
- จุดต่อขา PWM จำนวน 6 ช่อง โดยต่อออกมาจากขาพอร์ต B และ E ที่เป็นขาเอาต์พุตของ PWM ที่จุดต่อพอร์ตทั้งหมด มีการกำหนดชื่อ 2 แบบคือ

  (1) ตรงตามการจัดขาของฮาร์ดแวร์ในโครงการ Wiring ซึ่งจะกำหนดชื่อขาเป็นขาพอร์ต 1 ถึง 50

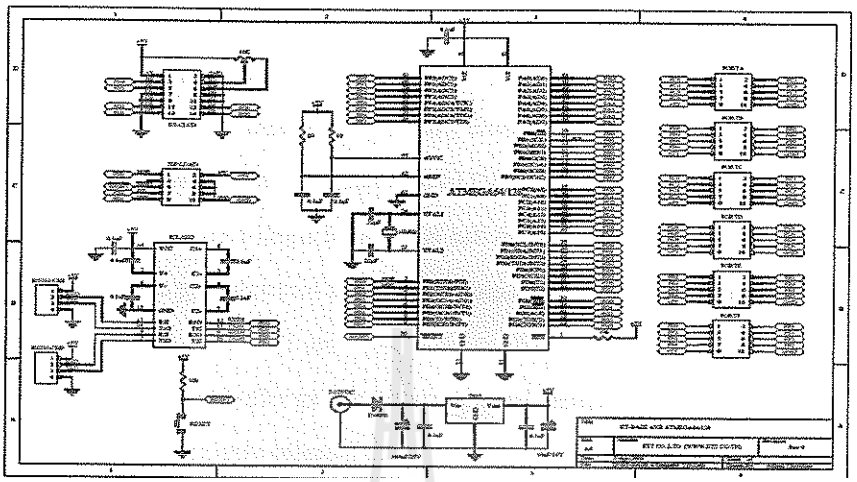
  (2) กำหนดชื่อตามขามาตรฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega128
- สามารถเลือกใช้ไฟเลี้ยงจากพอร์ต USB หรือจากภายนอกผ่านทางแจ็กอะแดปเตอร์/เทอร์มินอลบล็อก ผ่านทางสวิตช์จั๊มเปอร์ 2 ทาง

  กรณีใช้ไฟเลี้ยงจากภายนอกสามารถใช้แรงดันในย่าน +6 ถึง +9V บนบอร์ดมีวงจรควบคุมไฟเลี้ยงคงที่ที่ +5V ด้วยไอซีเรกูเลเตอร์แบบ LDO พร้อมไฟแสดงสถานะการทำงาน
- มีวงจรจัดขั้วไฟเลี้ยง ทำให้สามารถใช้กับอะแดปเตอร์ที่มีการจัดขั้วแบบใดก็ได้
- มีวงจรเชื่อมต่อพอร์ต USB สำหรับรองรับการสื่อสารข้อมูลอนุกรมกับคอมพิวเตอร์ และใช้ในการดาวน์โหลดโปรแกรมผ่านกระบวนการบูตโหลดเดอร์
- เชื่อมต่อ LED กับขา PG0 และสวิตช์กดติดปล่อยดับที่ขา PE2 เพื่อใช้ในการเข้าสู่โหมดโปรแกรมด้วยบูตโหลดเดอร์ผ่านพอร์ต USB และใช้ในการทดสอบการทำงานของพอร์ตอินพุตเอาต์พุตเบื้องต้นเมื่อทำงานในโหมดรัน
- มีโมดูล LCD 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด สำหรับแสดงการทำงาน

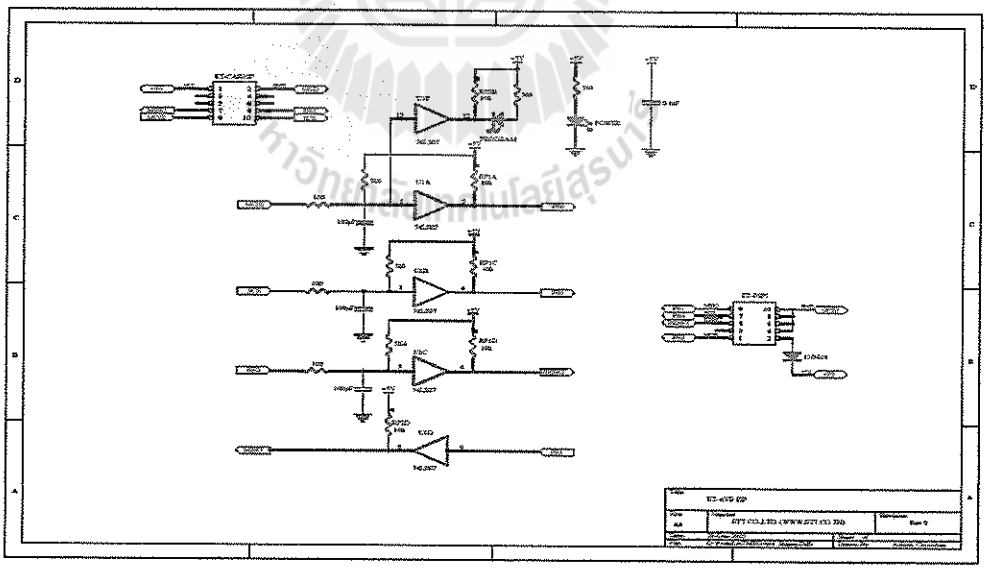
  ขนาด 6.5 x 10 เซนติเมตร



รูปที่3.30 บอร์ด Atmega 128



รูปที่3.31 วงจรบอร์ด Atmega128



รูปที่3.32 วงจรโปรแกรมชิพ ของ Atmega128

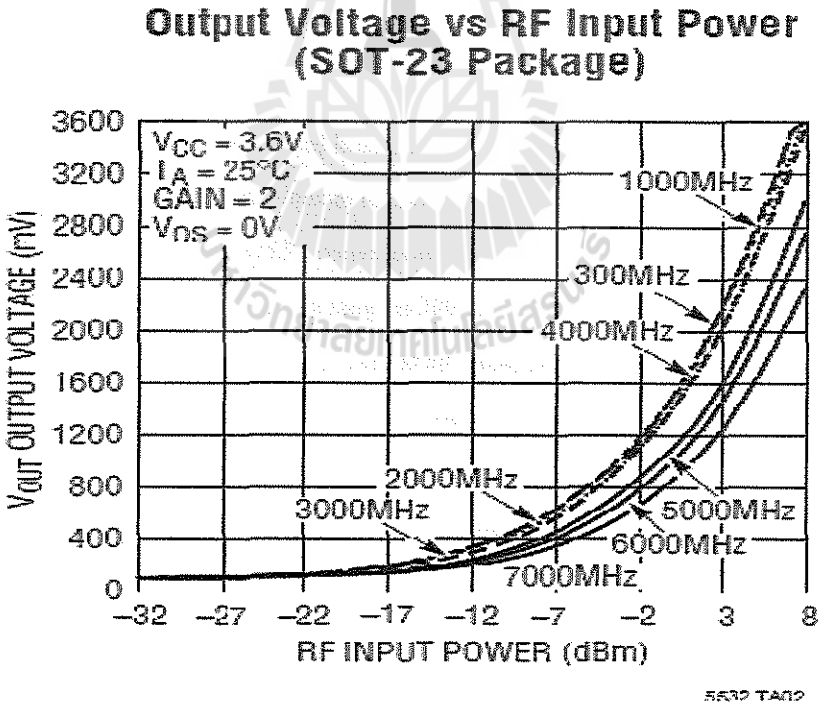
3.6 การทำงานของบอร์ด LTC5532

Precision 300MHz to 7GHz RF Detector with Gain and Offset Adjustment

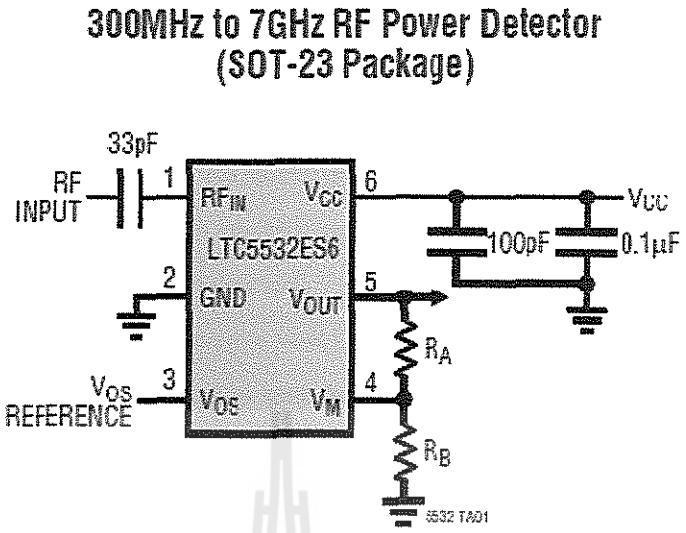
The LTC®5532 is an RF power detector for RF applications operating in the 300MHz to 7GHz range. A temperature compensated Schottky diode peak detector and buffer amplifier are combined in a small ThinSOTTM or (2mm x2mm) DFN package. The supply voltage range is optimized for operation from a single lithium-ion cell or 3xNiMH.

The RF input voltage is peak detected using an on-chip Schottky diode. The detected voltage is buffered and supplied to the VOUT pin.

The LTC5532 output buffer gain is set via external resistors.The initial starting voltage of 120mV ±35mV can be precisely adjusted using the VOS pin.The LTC5532 operates with RF input power levels from –32dBm to 10dBm.



รูปที่3.33 วงจรของLTC 5532



รูปที่3.34 วงจรLTC5532

DC656A DEMO BOARD QUICK START GUIDE

INTRODUCTION

The DC656A demo board is used to evaluate the LTC5532ES6, RF power detector withintegrated output buffer and voltage reference. The LTC5532 has provisions for offset and gain adjustments. The LTC5532ES6 converts an RF input signal at pin 6 (RF) to a DC voltage at pin 2 (Vout). The RF input frequency range is 300 MHz to 7000 MHz. Maximum input power is 8 dBm. The output voltage at Vout will start at an initial DC value of typically 120 mV +/- 10 mV. When the RF signal is applied, the output voltage will increase.

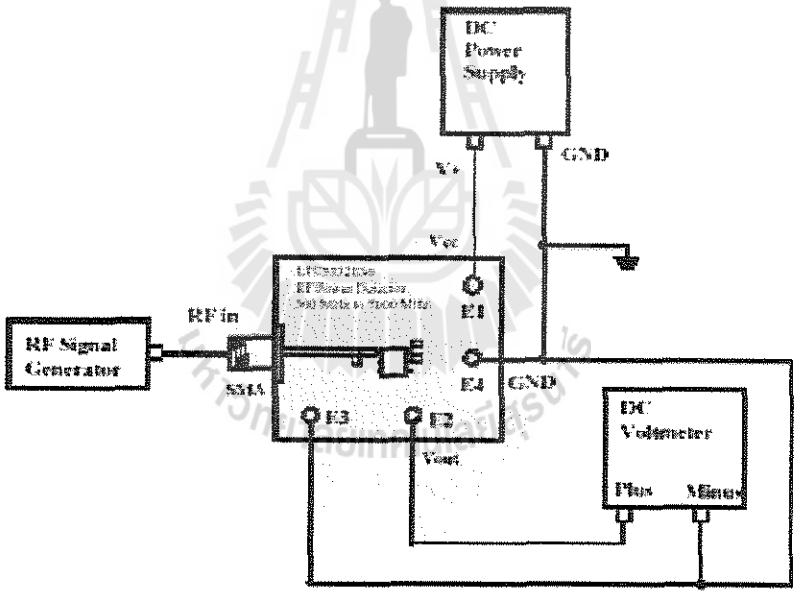
The optional R1 termination resistor and C3 output shunt capacitor are not placed on PCB. R2 and R3 are 10 kohm resistors. This reflects the gain setting = 2. E3 is an offset adjustment pin. It should beconnected to ground for initial tests and measurements.

The DC656A demo board is easily set up for evaluating the LTC5532ES6 RF power detector performance. Follow the procedures outlined below and connections on the attached diagram for proper operation.

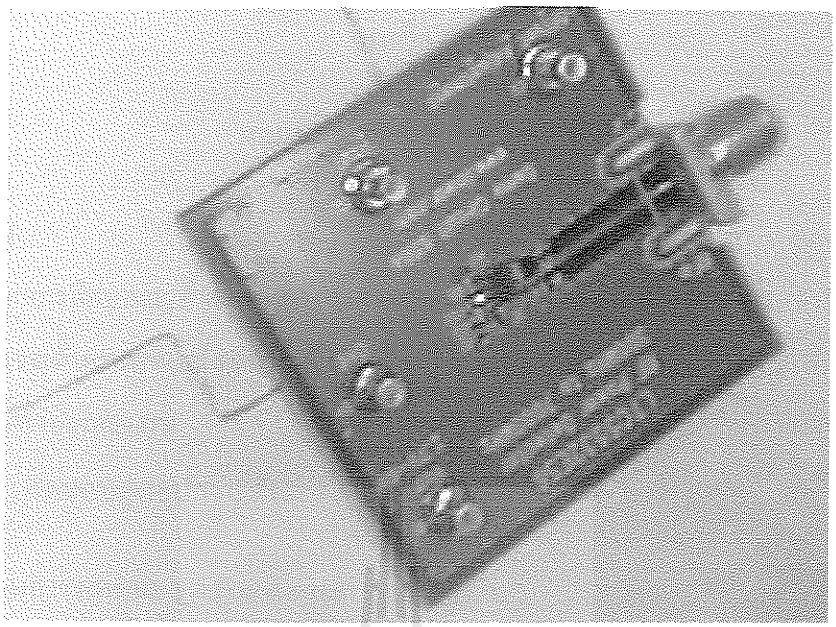
1. Connect the input DC power supply (2.7V to 6V) to E1. Connect the power supply ground to. Connect J1 to the RF signal generator via coaxial cable with an SMA connector. It is common practice to include a 2dB or 3dB pad to minimize reflections back into the signal generator.
2. Connect E3 (offset adjustment pin) to ground.
3. Apply an RF input signal and measure the Vout DC voltage at E2.

Optional measurements can be done by changing the R2 resistor from 10 kohm to higher value to increase the gain of the part, if desired.

Additionally the offset voltage can be set to any voltage above 120 mV and the output (Vout) will track.



รูปที่3.35 DC656A Demo Board Connection Diagram



รูปที่3.36 Board LTC 5532

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่4

ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

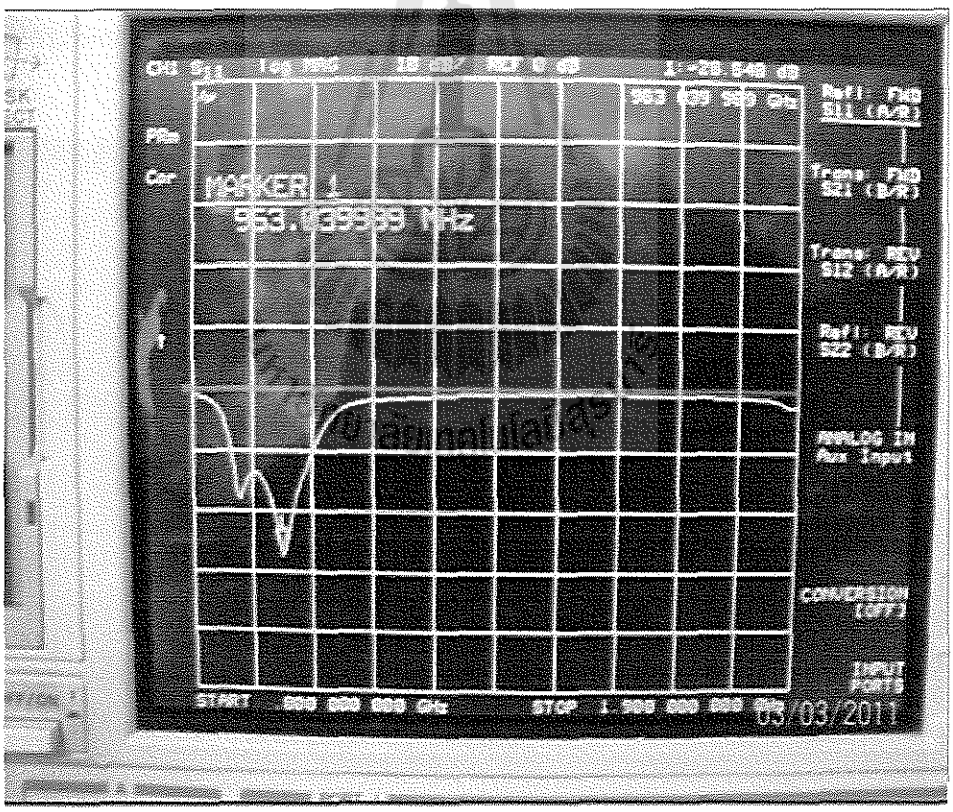
4.1 บทนำ

จากการศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานในบทที่ 2 และ 3 นั้น ทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่เสร็จสมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปทดสอบการใช้งานจริง เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงงาน

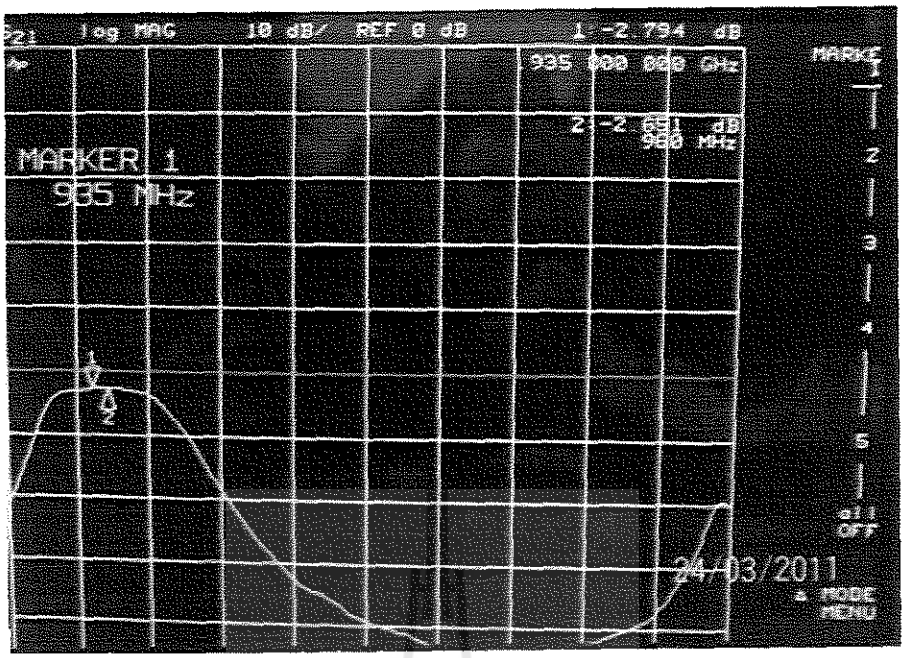
4.2 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบ

1. ขั้นตอนการทดสอบชุด Hardware

1.1 ทำการทดสอบ Filter ย่านความถี่ 935MHz-960MHz

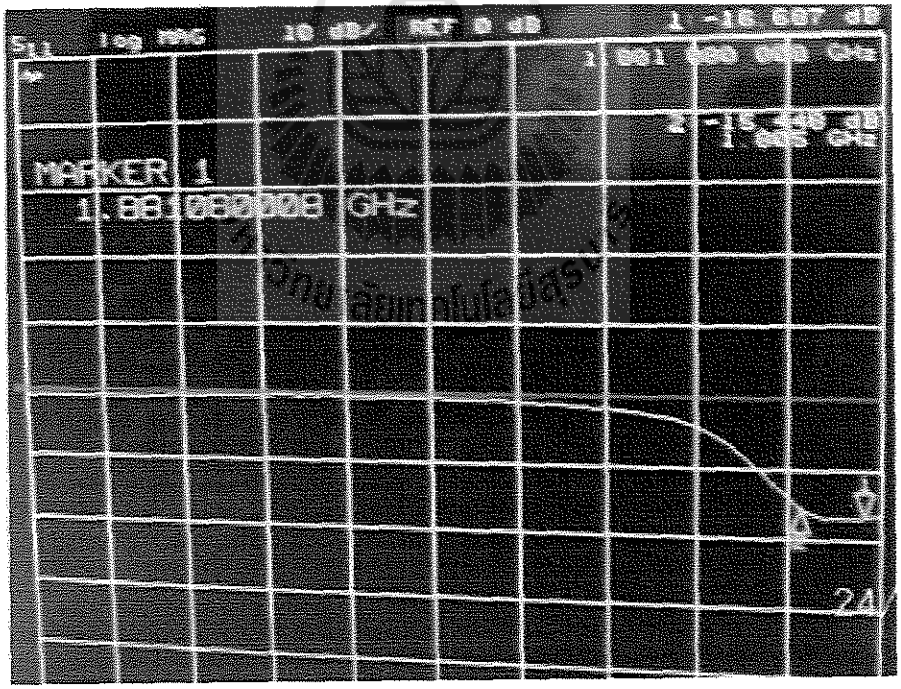


รูปที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ S11ของ Filter ย่าน935MHz - 960MHz

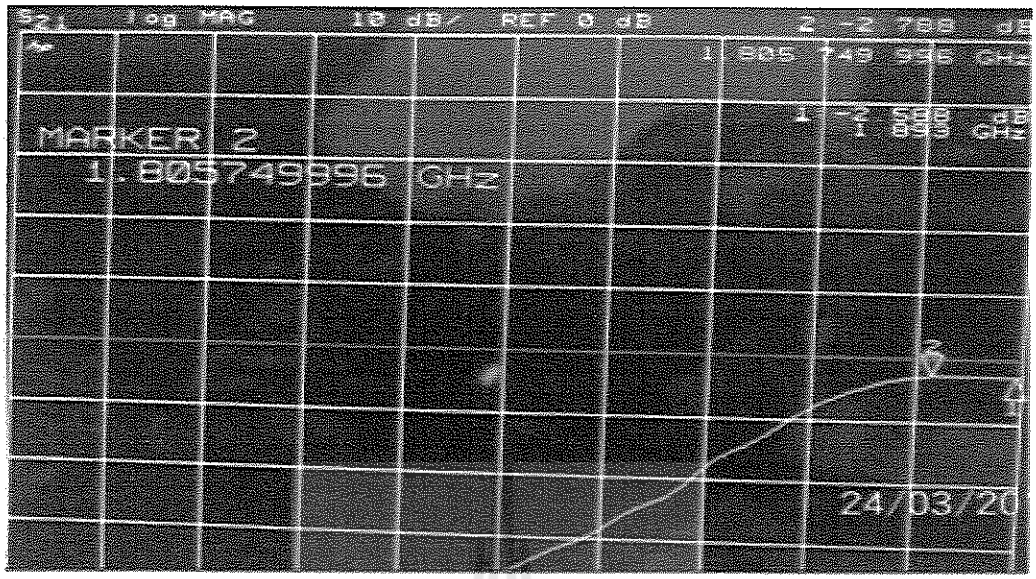


รูปที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ S21ของ Filter ย่าน935MHz - 960MHz

1.2 ทำการทดสอบ Filter ย่านความถี่ 1805MHz-1880MHz

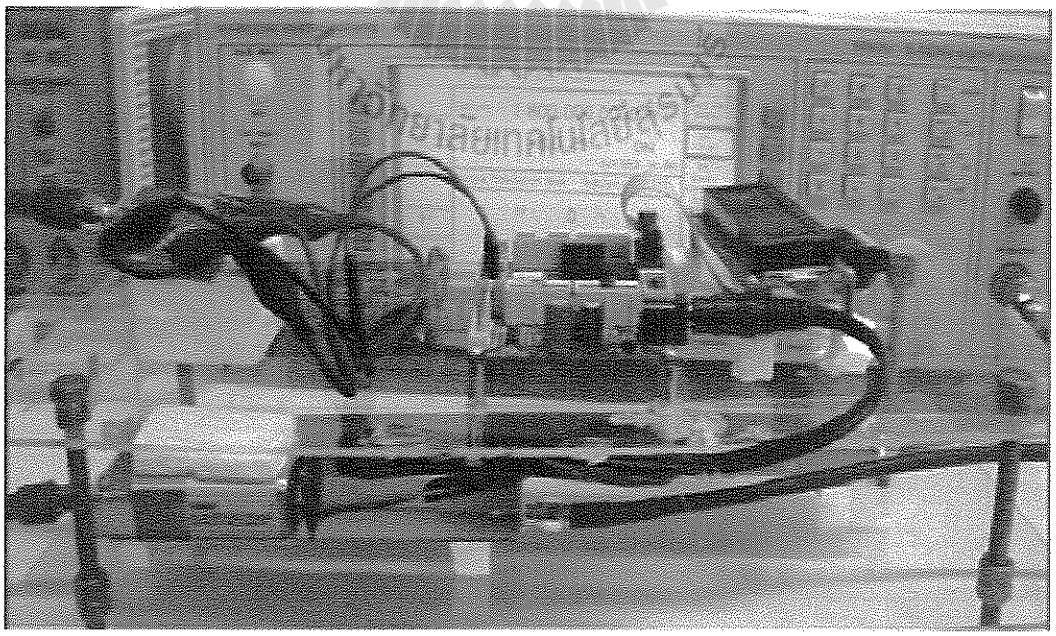


รูปที่ 4.3 แสดงพารามิเตอร์ S11ของ Filter ย่านความถี่ 1805MHz-1880MHz



รูปที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ S21ของ Filter ย่านความถี่ 1805MHz-1880MHz

1.3 เชื่อมต่อ อุปกรณ์ สำเร็จรูปแล้ว เข้ากับ SIGNAL GENERATOR และทำการส่งสัญญาณในย่าน-ความถี่945MHzและ1845MHz โดยผ่านสายCoxial เข้าที่เครื่องวัดกำลังของคลื่นความถี่ และที่เครื่องวัดกำลังของคลื่นจะทำการอ่านค่ากำลังส่งที่ส่งเข้ามา ว่ากำลังส่งที่เข้ามาภายในเครื่องวัดกำลังของคลื่นความถี่มีค่ากี่ dBm และทำการแสดงผลของกำลังส่งออกที่จอLCD



รูปที่ 4.5 แสดงการเชื่อมต่อเครื่องวัดกำลังของคลื่นความถี่300MHz-7GHzกับเครื่องSIGNAL-GENERATOR

4.3 ผลของการทดลอง

4.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ Filter ย่านความถี่935MHz ถึง 960MHz

ความถี่(MHz)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน(dB)
824.31	-2.007
855.77	-5.889
873.37	-13.516
899.68	-18.174
894.32	-16.951
906.26	-14.483
931.23	-14.067
935.52	-14.915
950.92	-15.467
962.03	-20.467
973.47	-21.704
988.32	-21.112
997.12	-19.416
1030.5	-10.018
1080.9	-3.457
1124.3	-2.123

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ Filter ย่านความถี่935MHz ถึง 960MHz

4.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ Filter ย่านความถี่ 935MHz ถึง 960MHz

ความถี่(MHz)	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน(dB)
843.84	-10.036
866.83	-5.201
880.36	-3.702
891.36	-3.338
902.47	-3.183
909.95	-3.108
918.97	-2.977

929.86	-2.819
934.04	-2.764
944.49	-2.705
956.96	-2.640
958.13	-2.730
960.00	-2.838
982.00	-2.942
911.13	-3.159
1004.00	-4.014

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ Filter ย่านความถี่ 935MHz ถึง 960MHz

4.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ Filter ย่านความถี่ 1805MHz ถึง 1880MHz

ความถี่(MHz)	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน(dB)
1438.2	-1.08
1503.8	-1.346
1547.0	-1.654
1609.0	-2.357
1660.0	-3.831
1704.0	-5.598
1732.0	-7.848
1764.0	-11.307
1797.0	-15.044
1803.0	-15.292
1804.7	-15.405
1814.0	-15.992
1824.8	-16.467
1833.5	-16.915
1854.0	-16.863
1887.0	-16.643

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของ Filter ย่านความถี่ 1805MHz ถึง 1880MHz

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.3.4 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ Filter ย่านความถี่ 1805MHz ถึง 1880MHz

ความถี่(MHz)	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน(dB)
1744.5	-4.307
1763.8	-3.575
1778.0	-3.163
1787.0	-2.996
1799.0	-2.833
1804.0	-2.773
1809.0	-2.712
1828.0	-2.602
1840.0	2.565
1851.0	-2.544
1858.0	-2.548
1865.0	-2.558
1878.0	-2.560
1880.0	-2.566
1892.0	-2.570
1898.0	-2.573

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ Filter ย่านความถี่ 1805MHz ถึง 1880MHz

4.3.5 ค่าของกำลังส่งในย่านความถี่ 940MHz

ค่ากำลังส่งจาก SIGNAL GENERATOR(dBm)	ค่ากำลังส่งที่แสดงออกจากเครื่องวัดกำลังของคลื่นความถี่(dBm)
-23	-21.29
-22	-20.61
-21	-19.63
-20	-18.66
-19	-17.57
-18	-17.24

-17	-16.92
-16	-15.94
-15	-14.96
-14	-14.31
-13	-13.54
-12	-12.79
-11	-11.89
-10	-10.84
-9	-9.96
-8	-9.03
-7	-8.10
-6	-7.08
-5	-5.91
-4	-5.23
-3	-4.02
-2	-2.81
-1	-1.71
0	-0.85
1	0.90
2	1.51
3	2.49
4	3.39
5	4.38
6	5.50
7	6.52
8	7.50

ตารางที่ 4.5 ค่าของกำลังส่งในย่านความถี่ 940MHz

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.3.6 ค่าของกำลังส่งในย่านความถี่ 1845MHz

ค่ากำลังส่งจาก SIGNAL GENERATOR(dBm)	ค่ากำลังส่งที่แสดงออกจากเครื่องวัดกำลังของคลื่นความถี่(dBm)
-23	-26
-22	-21.59
-21	-21.59
-20	-19.63
-19	-18.66
-18	-18.65
-17	-17.57
-16	-17.24
-15	-16.27
-14	-15.61
-13	-14.64
-12	-13.54
-11	-12.94
-10	-12.04
-9	-11.14
-8	-10.09
-7	-9.22
-6	-8.19
-5	-7.26
-4	-6.24
-3	-5.16
-2	-4.18
-1	-3.01
0	-1.28
1	-0.92
2	0.72

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3	1.22
4	2.79
5	3.28
6	4.39
7	5.23
8	6.36

ตารางที่ 4.6 ค่าของกำลังส่งในย่านความถี่ 1845MHz

4.4 สรุปผล

หลังจากที่ได้ทำการประกอบอุปกรณ์ต้นแบบ พร้อมทั้งทำการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ พบว่าเนื่องจากมีการลดทอนสัญญาณจาก Filter และ สายส่งสัญญาณเล็กน้อยแต่ไม่เกิน3dB ซึ่งเป็นค่าการลดทอนของสัญญาณที่อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ ทำให้เครื่องวัดกำลังงานของคลื่นความถี่ 300 MHz – 7GHz สามารถวัดค่ากำลังงานได้ใกล้เคียงค่าที่ส่งมาจากเครื่อง SIGNAL GENERATOR และยังสามารถพัฒนาให้อุปกรณ์มีความสมบูรณ์ได้มากกว่าเดิม โดยทำให้ชุดอุปกรณ์ต้นแบบมีขนาดเล็กลง และสามารถทนรับและส่งสัญญาณผ่านAntennaได้

บทที่5

สรุปผลของโครงงาน

5.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวถึงบทสรุปของโครงงานเครื่องวัดกำลังงานของคลื่นความถี่ 300 MHz – 7GHz ซึ่งประกอบไปด้วยปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน วิธีการแก้ไข ข้อเสนอแนะ และ วิธีการพัฒนาโครงงานต่อไป

5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไขปัญหา

ในการทำโครงงานเครื่องวัดกำลังงานของคลื่นความถี่300 MHz – 7GHz ปรากฏปัญหาที่พบได้บ่อยๆดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วยตัวปัญหาที่พบ สาเหตุของปัญหารวมทั้งวิธีการแก้ไขปัญหา

ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข

ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน	สาเหตุและวิธีการแก้ไข
1.เมื่อทำการออกแบบ Filter แบบ Bandpass ด้วยโปรแกรม CST DESIGN ENVIRONMENT ได้ความถี่ที่คลอบคลุมย่านที่ต้องการใช้ แต่เมื่อนำลายวงจรมาทำFilter แลเมื่อนำFiletrไปวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน(S11) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน(S21)กับเครื่อง NETWORK ANALYSZER ปรากฏว่าความถี่ไม่ได้อยู่ในย่านที่ต้องการ	สาเหตุ เนื่องจากลายวงจรที่นำมาทำแผ่นปริ้นไม่ได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้ในโปรแกรม CST **วิธีการแก้ไข** ต้องแก้ไขลายวงจรให้ได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้ในโปรแกรม CST โดยใช้โปรแกรมโปรเทลช่วยในการวาดลายวงจร จึงได้วงจรตามขนาดที่ได้ออกแบบไว้

2.โปรแกรมที่ใช้เขียนควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA128	**สาเหตุ** เนื่องจากกลุ่มนักศึกษาไม่มีประสบการณ์ด้านการเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA128จึงทำให้เกิดปัญหาในการเขียนโปรแกรม **วิธีการแก้ไข** หาความรู้จากแหล่งความรู้ต่างๆ และขอความช่วยเหลือจากผู้ที่มีประสบการณ์ด้านการเขียนโปรแกรมให้ช่วยเหลือในกรณีที่มีปัญหาในบางที่
3.เมื่อนำบอร์ด DC656A ต่อเข้ากับ Antennaที่มีความสามารถรับและส่งสัญญาณที่ความถี่ 940MHzและ1845MHzได้ เพื่อที่จะดูค่ากำลังส่งสัญญาณจากเครื่อง SIGNAL GENERATOR ปรากฏว่าบอร์ด DC656Aไม่สามารถรับสัญญาณจาก Antennaได้	**วิธีการแก้ไข** ให้บอร์ดDC656A รับสัญญาณที่ส่งจากเครื่อง SIGNAL GENERATOR โดยผ่านสายโคแอ็กเชียลแทนAntenna

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การใช้งานอุปกรณ์ DC656A BOARD ควรระมัดระวังการจ่ายแรงดันให้กับบอร์ด ไม่ควรจ่ายแรงดันเกินที่กำหนดไว้ จะรับได้ซึ่งศึกษาได้จาก datasheet จะแนะนำการใช้งานอย่างละเอียด

5.3.2 ในการเลือกใช้บอร์ดที่ทำการประมวลผลค่าแรงดันที่รับได้จากบอร์ด DC656Aและแสดงค่า Power(dBm) ออกที่จอ LCD เราสามารถเลือกใช้บอร์ดที่มีขนาดเล็กกว่าบออร์ด ATMEGA128 เพื่อให้เครื่องวัดกำลังของคลื่นความถี่มีความเล็กกระทัดและสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกมากกว่านี้ยิ่งขึ้น

5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

เนื่องจากโครงงานเครื่องวัดกำลังงานของคลื่นความถี่ 300 MHz – 7GHzนี้ยังไม่สามารถรับส่งสัญญาณผ่าน Antennaได้และมีขนาดอุปกรณ์ต้นแบบขนาดที่ใหญ่ หากสามารถทำให้มีการรับส่งสัญญาณผ่านAntennaได้และทำให้ขนาดของอุปกรณ์ต้นแบบมีขนาดเล็กลง และให้ง่ายต่อการใช้งาน และลดต้นทุนของอุปกรณ์ลงได้ จะส่งผลให้โครงงานนี้มีความน่าสนใจ และมีประสิทธิภาพในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

5.5 บทสรุป

โครงงานเครื่องวัดกำลังงานของคลื่นความถี่ 300 MHz – 7GHz มีส่วนประกอบหลักดังนี้

1) DC656A BOARD

2) ไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-BASE AVR ATMEGA128

3) LCD 16x2 Line

4) ชุดแบตเตอรี่

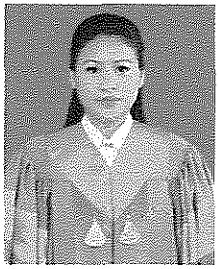
5) Filter

โดยอุปกรณ์เหล่านี้มีหลักการทำงานคือ เมื่อต่อไฟDC 4.5V เข้าที่ขา E1 ต่อกราวด์เข้าที่ขา E3และE4 และต่อขา E2 ซึ่งเป็นขาOutput ของDC656A BOARD ซึ่งส่งสัญญาณออกมาเป็นค่าVdc เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA 128ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลแสดงค่ากำลังงานออกที่จอ LCD

ซึ่งจากผลการทดสอบจริงพบว่า เครื่องวัดกำลังของคลื่นความถี่300MHz-7GHz สามารถวัดกำลังงานในย่านความถี่ที่ส่งมาได้จริงและได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ส่งมาจากเครื่องส่งสัญญาณ และมีประสิทธิภาพในการวัดกำลังงานในระดับที่สามารถนำมาใช้งานได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน



นางสาวพจมาลย์ ไหลหาโคตร เกิดวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2531 ภูมิลำเนา ตำบลสาหร่าย อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนสาหร่ายวิทยาคม อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2549 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นางสาวพรทิพย์ จันทะสุข เกิดวันที่ 17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2531 ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลสะแกราบ อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนโคกสำโรงวิทยา อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2549 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

[1] โปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO 5 (http://www.cst.com/)

[2] http://www.kmitl.ac.th/~kpteeraw/data_com/datacom_52/Filter.htm

[3] http://www.micro4you.com/files/atmega128/BASEAVRATmega128Schematic.pdf

[4] http://www.micro4you.com/store/atmega128-development-board/prod_118.html

[5] http://www.olimex.com/dev/avr-mt128.html

[6] http://cds.linear.com/docs/Datasheet/5532f.pdf

[7] http://circuits.datasheetdir.com/326/LTC5532-circuits.jpg

[8] http://www.linear.com/demo/DC656A

[9] http://host.psu.ac.th/~s4810709/c1.htm

[10] http://www.tccom.co.th/site/admin/manual/SWR_SX-400.pdf

[11] http://www.ioremap.net/gallery/dc_power_detector.png

[12]http://www.945168.com/iframe-03/03-101.htm

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี