



# ระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟสำหรับงานด้านการแพทย์

## Microwave Heating System For Medical Applications

โดย

นายนิทัศน์	วัฒนการุณ	34104179
น.ส.ปณยา	เสมดี	34104195
น.ส.ปัทมวรรณ	จิรฤกษ์	34104220
นายวทัณณ	เกิดศรี	34106301
นายวุฒิไกร	วรรณภิญโญชีพ	34106353
น.ส.อณุดรา	จันทมงคล	34109473

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ดร. ไมโนย ไกรฤกษ์

วัน เดือน ปี..... 14 มี.ค 2537 .....
เลขทะเบียน..... 034703 .....
เลขเรียกหนังสือ..... 137003 นบ.....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟสำหรับงานทางการแพทย์

นายนิทัศน์	วัฒนการุณ	34104179
น.ส.ปณยา	เสมคี	34104195
น.ส.ปัทมวรรณ	จิรหฤทัย	34104220
นายวทัณญ	เกศศรี	34106301
นายวุฒิไกร	วรรณภิญโญชีพ	34106353
น.ส.อณูตรา	จันทมงคล	34109473

อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์  
ปีการศึกษา 2537

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้รายงานการพัฒนาระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีการปรับปรุงให้เป็นระบบที่มีการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้ความถี่ 2450 MHz ส่วนประกอบสำคัญของระบบนี้ ได้แก่ หลอดแมกนีตรอนที่ทำหน้าที่จ่ายกำลังงานไมโครเวฟ สายอากาศปล่อยคลื่น ระบบวัดอุณหภูมิ และคอมพิวเตอร์ จากการทดลองพบว่าสามารถควบคุมกำลังงานของหลอดแมกนีตรอนได้ตามต้องการโดยการปรับศักดาไฟแรงสูงที่ป้อนให้แก่หลอดแมกนีตรอน ซึ่งมีค่าศักดาไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 145 โวลต์ และมีช่วงของการปรับศักดาไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 125-160 โวลต์ โดยการใช้เทอร์โมคัปเปิลขนาดเล็กที่สามารถวัดได้ 4 ตำแหน่ง ซึ่งจะควบคุมอุณหภูมิได้ถูกต้องโดยคอมพิวเตอร์

## Microwave Heating System for Medical Applications

Mr. Nitat	Wattanakaroon	34104179
Miss Panaya	Semdee	34104195
Miss Pattamawan	Jiraharuetai	34104220
Mr. Watanyoo	Kerdsri	34106301
Mr. Wutthikrai	Wannapinyosheep	34106353
Miss Anutra	Juntamonkol	34109473

Advisor

Assoc.Prof.Dr. Monai Krairiksh  
Academic's year 1994

### Abstract

Development of a microwave heating system is reported in this thesis which has been developed to be a computer controlling system. This system consists of a magnetron, which generates the microwave power at 2450 MHz, an applicator a temperature measurement system and computer. From experiments, it is found that an output power of a magnetron can be varied by varying the high voltage supplied to the magnetron which has beginning voltage at 145 Volt and the range of voltage is 125-160 Volt. A tiny four-point thermocouple is calibrated to yield the precise temperature control by computer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ	4
2.2 หลอดแมกนีตรอน	4
2.3 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล	12
2.4 สายอากาศปล่อยคลื่นและดูระบบทำความร้อน	22
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	23
3.1 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแบบที่ 1	23
3.2 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแบบที่ 2	24
3.3 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแบบที่ 3	24
3.4 โฟลว์ชาร์ท (Flow Chart) ของระบบให้ความร้อน	28
บทที่ 4 โคเรชันแนตคัปเปิลเตอร์และการออกแบบ	30
บทที่ 5 ระบบวัดการสะท้อนกลับ	46
บทที่ 6 ระบบน้ำไหลเวียน	55
บทที่ 7 ผลการทดลอง	59
บทที่ 8 หลักการเปรียบเทียบ	73
บทที่ 9 บทสรุปและวิจารณ์	75
บทแทรกที่ 1	76
บทแทรกที่ 2	78
เอกสารอ้างอิง	83
กิตติกรรมประกาศ	84

# บทที่ 1

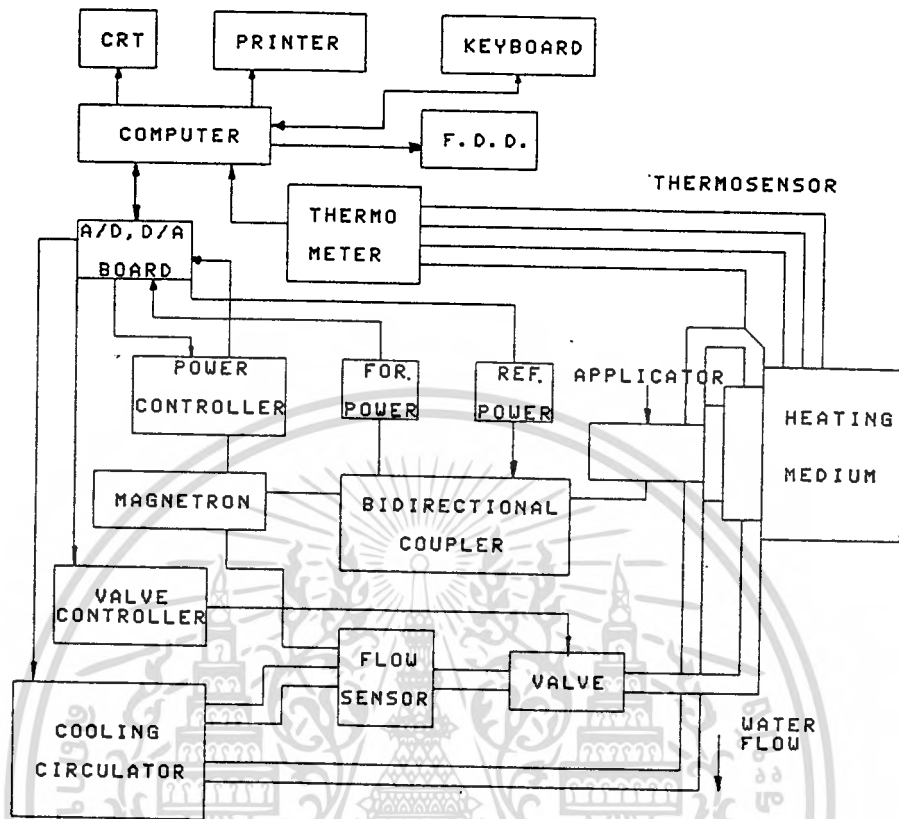
## บทนำ

การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อประโยชน์ทางการแพทย์มีมาเป็นเวลานานแล้ว ซึ่งได้แก่การรักษาอาการปวดเมื่อย ในปัจจุบันการใช้งานที่ได้รับความสนใจและตื่นตัวไปทั่วโลก ได้แก่การรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน ( Hyperthermia Cancer Therapy ) ซึ่งเป็นวิธีการรักษาโรคมะเร็ง โดยการป้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปในร่างกาย เพื่อทำให้อุณหภูมิของเซลล์มะเร็งสูงขึ้นอยู่ในระดับ  $41-46^{\circ}\text{C}$  แล้วรักษาอุณหภูมินี้ให้คงที่อยู่ตลอดเวลาที่เหมาะสม การทำเช่นนี้จะเป็นวิธีการรักษาโรคมะเร็งที่นำมาช่วยเสริมให้วิธีการอื่นที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งจากเดิม 25% จะสูงขึ้นไปถึง 60-70% ในการใช้งานมีความถี่ต่างๆตั้งแต่ความถี่เหนือเสียง (Ultrasound) ความถี่ 6 MHz 434 MHz 915 MHz ไปจนถึง 2450 MHz การเลือกใช้ความถี่ใดขึ้นอยู่กับลักษณะขนาด และตำแหน่งของเซลล์มะเร็ง ความถี่ต่ำสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในร่างกายได้ดี แต่ไม่สามารถโฟกัสสนามให้อยู่ในบริเวณแคบๆ ในขณะที่การเลือกใช้ความถี่สูงๆ เช่น 915 MHz หรือ 2450 MHz ด้วยเหตุผลที่มีประสิทธิภาพทางด้านนี้มาก่อน และที่สำคัญคือเป็นความถี่ที่สามารถหาตัวกำเนิดกำลังงานได้ง่าย ใช้งานได้ และมีราคาถูก

ในปฏิญานีพจนานุกรมฉบับนี้เป็นการรายงานผลการศึกษาและพัฒนาระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ตลอดจนแสดงข้อมูลการทดสอบที่ได้จัดทำขึ้น

### บล็อกไดอะแกรมของระบบ (System Block Diagram)

โครงสร้างระบบของโครงการนี้ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งจะอธิบายการทำงานของระบบได้ดังนี้ ขณะที่เราให้ความร้อนแก่สารละลายทดสอบโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเทอร์โมคัปเปิลซึ่งเป็นตัวตรวจจับความร้อน จะสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าซึ่งแปรตามค่าอุณหภูมิขึ้น จากนั้น สัญญาณที่แปรตามอุณหภูมินี้จะถูกส่งเข้าสู่วงจรขยาย เพื่อขยายสัญญาณที่ได้ให้มีระดับเหมาะสมที่จะป้อนเข้าวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล แล้วจึงผ่านส่วนอินเทอร์เฟซ ส่งค่าให้คอมพิวเตอร์ ค่าสัญญาณดิจิทัลจะปรากฏบนจอหลอดภาพ ค่าที่ได้ในแต่ละอุณหภูมิจะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อเปลี่ยนเป็นค่าอุณหภูมิ โดยจะนำค่าอุณหภูมิไปเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ต้องการที่ได้ตั้งเอาไว้ ซึ่งค่าอุณหภูมิจะถูกกำหนดโดยค่าที่ป้อนจากคีย์บอร์ด (Keyboard) ถ้าค่าไม่เท่ากัน จะทำการคำนวณเพื่อใช้ในการควบคุมการเพิ่มหรือลดของกำลังงานของหลอดแมกนีตรอน และควบคุมอัตราการไหลของน้ำ



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกำลังงานของหลอดแมกนีตรอนด้วยคอมพิวเตอร์  
(Block diagram of the computer-controlled heating system)

ส่วนควบคุมกำลังงาน (Power Controller) จะเป็นส่วนที่ให้กำลังงานแก่หลอดแมกนีตรอน โดยพิจารณาจากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิที่ตั้งเอาไว้ โดยคอมพิวเตอร์จะควบคุมการหมุนของสเตปปีง มอเตอร์ (Stepping Motor) เพื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดแมกนีตรอน

ส่วนของโคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ (Directional Coupler) จะใช้ในการแยกกำลังงานบางส่วนจากหลอดแมกนีตรอน ซึ่งเป็นตัวกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ เพื่อส่งผ่านเข้าเครื่องมือวัดการสะท้อนกลับ (Reflectometer) ซึ่งประกอบด้วย ไดโอดคีเทคเตอร์ (Diode Detector) และวงจรถยายสัญญาณ (Log Amplifier)

ในการระบายความร้อนที่ผิวหนัง ระบบหล่อเย็น (Cooling System) จะประกอบด้วย วาล์วน้ำ ซึ่งเป็นตัวควบคุมอัตราการไหลของน้ำในอุ้งน้ำ (Bolus) วาล์วน้ำจะทำงานตามคำสั่งที่ส่งมาจากคอมพิวเตอร์ ระบบหล่อเย็นจะเป็นระบบปิด น้ำที่ผ่านจากอุ้งน้ำแล้วจะถูกดูดกลับโดยเครื่องทำความเย็น

สำหรับโครงการในปีการศึกษานี้ ได้ศึกษาถึงส่วนประกอบของระบบให้ความร้อนในการรักษาโรคมะเร็งต่างๆ โดยเนื้อหาในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงหลักการการทำงานของระบบโดยย่อ บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของระบบโดยละเอียด บทที่ 3 เป็นการคำนวณและการออกแบบวงจรถยายแบบต่างๆ รวมทั้งโฟลว์ชาร์ทของระบบให้ความร้อน บทที่ 4 กล่าวถึงหลักการการทำงานและการออกแบบโคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ บทที่ 5 กล่าวถึงสายส่งไมโครสตริป บทที่ 6 กล่าวถึงระบบการระบายความร้อนด้วยน้ำที่ไหลเวียน ผลการทดลอง การทดสอบด้วยโคเรคชันนัลคัปเปิลเลอร์ รวมถึงการทดลองฉายคลื่นไมโครเวฟไปบนเนื้อเยื่อจำลอง (Phantom) และการใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) ซึ่งในการทดลองนี้ ใช้ในการวัดสัญญาณสะท้อนกลับ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

จากความต้องการของระบบที่จะต้องสามารถให้ความร้อนแก่เฉพาะบริเวณเซลมะเร็งให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก  $37^{\circ}\text{C}$  ไปเป็น  $41-46^{\circ}\text{C}$  ตัวเลขนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเวลาที่ให้ความร้อนแล้วรักษาอุณหภูมินี้ให้คงที่ตลอดช่วงเวลาของการให้ความร้อน. สำหรับในบทความนี้เลือกใช้ความถี่ 2450 MHz ทำให้คลื่นทะลุทะลวงเข้าไปในร่างกายได้ไม่เกิน 3 ซม. เราจะแสดงระบบที่พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ได้แก่ หลอดแมกนีตรอน (Magnetron) สายอากาศปล่อยคลื่น (Applicator) ระบบการวัดอุณหภูมิ โดยระบบนี้ได้เพิ่มส่วนของระบบหล่อเย็น (Cooling System) ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ โดยการหมุนของวาล์วในการรักษาอุณหภูมิที่ระดับผิวหนังไม่ให้ร้อนจนเกินไป และในส่วนของเครื่องวัดกำลังสะท้อนกลับ (Reflectometer Power) ซึ่งทำหน้าที่ในการวัดกำลังงานที่สะท้อนกลับ

#### 2.2 หลอดแมกนีตรอน

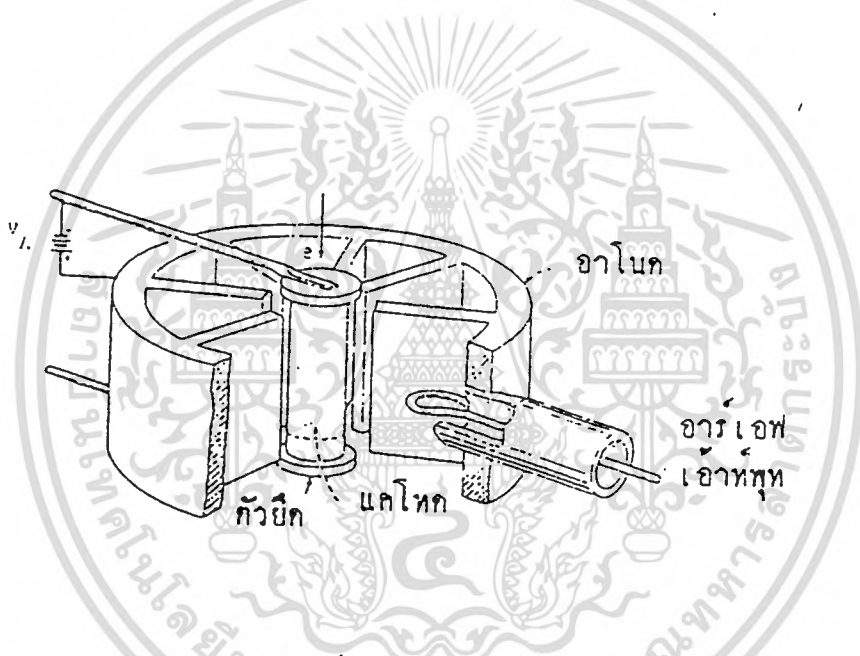
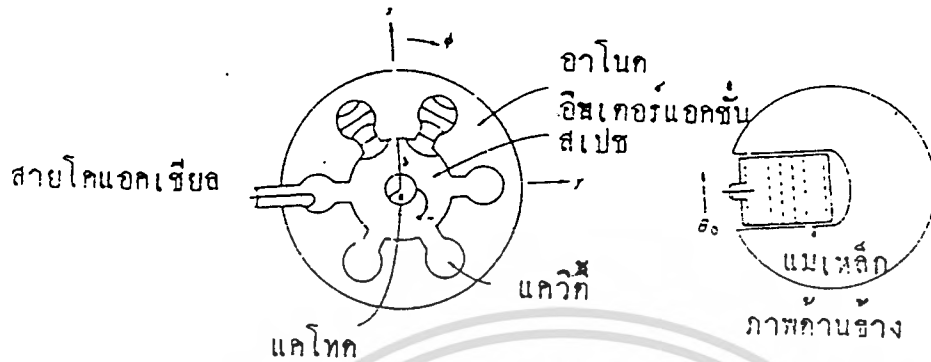
หลอดแมกนีตรอนเป็นหลอดสูญญากาศชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยส่วนอาโนด และคาโทด อาโนดเป็นบล็อกทองแดงทรงกระบอก ซึ่งภายในบรรจุรีโซแนนซ์ควิตี้ จำนวนหนึ่ง ส่วนคาโทดอยู่ตรงกลางของหลอด

สำหรับแมกนีตรอนที่นำมาใช้ในโครงการนี้มีลักษณะ และคุณสมบัติโดยสังเขปดังนี้

1. เป็นหลอดแบบเดียวกับที่ใช้ในเตาอบไมโครเวฟ
2. ให้ความถี่ไมโครเวฟเอาต์พุท (RF output) ได้สูงถึง 500 วัตต์
3. ความถี่ในการออสซิลเลตปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมา อยู่ในช่วงประมาณ 2450 เมกะเฮิรตซ์
4. สามารถปรับค่ากำลังงานเอาต์พุทได้ โดยการปรับค่าสนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้

หลอดแมกนีตรอนมีความสำคัญมาก เพราะเป็นตัวสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาให้แก่สายอากาศ การทำงานของหลอดแมกนีตรอนนั้นเป็นทฤษฎีในทางฟิสิกส์ ดังนั้นขอกล่าวถึงการทำงาน

หลอดแบบดังนี่คือ เป็นหลอดสูญญากาศชนิดหนึ่ง มีพื้นฐานการทำงานเหมือนหลอดไดโอด คือมีทั้ง คาโทด และ อานอด ซึ่งทั้งสองมีลักษณะเป็นทรงกระบอกและถูกจัดวางอยู่ดังรูปที่ 2.1



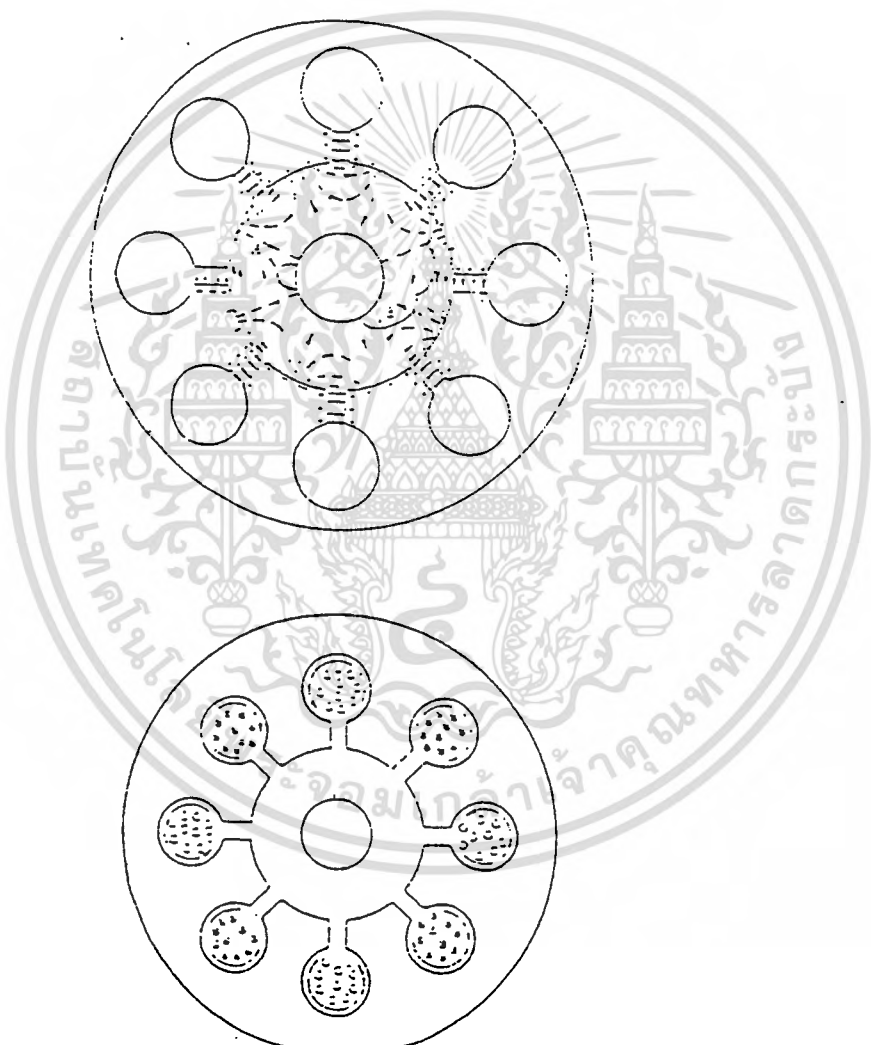
รูปที่ 2.1ก. แสดงหลอดแมกนีตรอน ข. แสดงหลอดแมกนีตรอนอีกแบบหนึ่ง

จากรูป จะเห็นได้ว่าทรงกระบอกคาโทดจะถูกล้อมรอบโดยอานอด ที่มีลักษณะเป็นควิวตี้ เรียกว่า เรโซแนนซ์ควิวตี้ ซึ่งควิวตี้หนึ่งมีคัปปลิงลูปต่ออยู่กับลวดตัวนำภายในสายโคแอคเซียล เพื่อนำคลื่น อาร์เอฟที่ผลิตขึ้นออกมาจากหลอด ทั้งนี้เพราะว่าการทำงานของหลอดแมกนีตรอน จะทำงานภายใต้ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สำหรับรูปที่ 2.2 จะเป็นรูปแสดงหลอดแมกนีตรอนที่ใช้ในเตาอบ ไมโครเวฟชนิดหนึ่ง

### 2.2.1 หลักการทำงานของหลอดแมกนีตรอน

การทำให้หลอดแมกนีตรอนทำงานได้นั้น จะต้องมีอินพุต(input)ป้อนให้หลอดแมกนีตรอน ก.ป้อนอินพุตความต่างศักย์สูง ขนาดประมาณ 4400 โวลท์ เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างอานอนและคาโทด จัดให้คาโทดเป็นขั้วลบ ส่วนอานอนต่อลงกราวด์

ข.ป้อนอินพุตสนามแม่เหล็ก เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กในแนวแกนที่ขนานกับแกนของอานอนและคาโทด เดิมในหลอดแมกนีตรอนทั่วไป จะใช้แท่งแม่เหล็กถาวรซึ่งคิดมาจากโรงงานของผู้ผลิต แต่เนื่องจากในโครงการนี้ต้องการจะปรับค่าสนามแม่เหล็กด้วย ดังนั้นเราจึงใช้ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าช่วย แสดงดัง ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างและลักษณะการทำงานของหลอดแมกนีตรอน

เนื่องจากว่า สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถูกจัดให้มีทิศทางตั้งฉากกัน ขณะที่หลอดทำงาน อิเล็กตรอนซึ่งจะถูกกระตุ่นจากคาโรดด้วย heater จะเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งไปตามแนวแรงลัพธ์ของสนามทั้งสอง ซึ่งเงื่อนไขการทำงานของหลอดแมกนีตรอน จะอธิบายได้ดังนี้

คำจำกัดความที่สำคัญ ก็คือค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต และค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต โดยจะนิยามค่าทั้งสอง ได้ดังนี้

1. ถ้าป้อนสนามไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง ให้กับหลอดแมกนีตรอนถ้าขณะนั้นสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยๆ อิเล็กตรอนที่ออกจากคาโรดทั้งหมดจะเดินทางไปยังอาโนด ดังนั้น กระแสอาโนดจะมีค่าคงที่ต่อไปถ้าเราเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กขึ้น กระแสอาโนดจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ จนถึงค่า สนามแม่เหล็กค่าหนึ่ง กระแสอาโนดจะเป็นศูนย์ เราเรียกค่าสนามแม่เหล็กนี้ว่า ค่าสนามแม่เหล็กวิกฤต

2. ถ้าเราจัดให้สนามแม่เหล็กคงที่ ให้กับหลอดแมกนีตรอน ที่ค่าสนามไฟฟ้าน้อยๆ อิเล็กตรอนที่ออกจากคาโรด จะวิ่งวกกลับไปทีคาโรด และเมื่อเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าไปจนมีค่ามากกว่าค่าวิกฤต ( $V_c$ ) อิเล็กตรอนจะเดินทางไปถึงอาโนดพอดีและเกิดกระแสอาโนดขึ้น

ในทางปฏิบัติ การที่จะให้หลอดแมกนีตรอนทำงานได้นั้น เรามักป้อนสนามไฟฟ้าต่ำกว่าค่าวิกฤต และให้สนามแม่เหล็กสูงกว่าค่าวิกฤต ตามเงื่อนไขนี้อิเล็กตรอนจะเดินทางรอบบริเวณช่องว่างระหว่างอาโนดกับคาโรด ซึ่งเรียกว่า อินเตอร์แอคชั่นสเปซ (interaction space) ส่วนที่มีความสำคัญมากก็คือ เรโซแนนซ์ควิตี้ที่อยู่ในบล็อคของอาโนด เป็นส่วนที่มีความสำคัญมากก็คือ เรโซแนนซ์ควิตี้ (cavity resonator) ที่อยู่ในบล็อคของอาโนด เป็นส่วนที่มีการสั่น (oscillation) เกิดขึ้นต่อเนื่อง ภายในอินเตอร์แอคชั่นสเปซ จะมีความถี่หลายความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency) ที่ความถี่นี้อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้ากระแสตรง (DC field) ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอาโนดกับคาโรด จะนำเอาพลังงานนี้มาถ่ายเท ให้แก่ สนามไฟฟ้ากระแสสลับ (AC field) ที่เกิดจากการออสซิลเลท จากนั้นเราจึงนำ (coupling) ความถี่และกำลังงานนี้ไปใช้งาน

### 2.2.2 สมการแสดงปรากฏการณ์ของหลอดแมกนีตรอนที่สำคัญ

ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะ บางสมการที่เกี่ยวข้องกับโครงงานนี้เท่านั้น สมการอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงตลอดจนรายละเอียดที่มาจากทฤษฎีแต่ละสมการนั้น จะหาเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง

เมื่อ  $V_c$  = แรงดันที่อาโนด (โวลต์)

$r_p, r_c$  = รัศมีอาโนดกับคาโรด ตามลำดับ

$e$  = ค่าประจุของอิเล็กตรอน

$N$  = จำนวนเรโซเนเตอร์

ตาราง แสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหลอดแมกนีตรอน

ความสัมพันธ์	สมการ
ค่าตัดดาวิกฤต	$V_c = (eB^2/8m)[(r_a^2 \cdot r_c^2)/r_a^2]^2$
สนามแม่เหล็ก วิกฤต	$B = 2 \cdot (2m/e)^{1/2} ((r_a)^{1/2} / (r_a^2 - r_c^2)) (1 - r_c^2/r_a^2)^{-1}$ เมื่อ $B^2/V_a = (Bm/e)(r_a/r_a^2 - r_c^2)^2$
ค่าสนามแม่เหล็กต่ำสุดที่ทำให้ ให้ออสซิลเลท	$\lambda_{B_{min}} = 2568 [(N+4)/N]^2 [1 - (1 - (16N/N+4)^2)^{1/2}]$
ประสิทธิภาพ ของอิเล็กตรอน	$\eta_e = 1 - (V_a \cdot 2m) / (B^2 \cdot e \cdot d^2)$ $= 1 - (V_a/V_c) \cdot (B_c/B)^2$

เมื่อ  $V_a$  = แรงดันที่อานอด (โวลต์)

$r_a, r_c$  = รัศมีอานอดกับคาโทด ตามลำดับ

$e$  = ค่าประจุของอิเล็กตรอน

$N$  = จำนวนเรโซเนเตอร์

$m$  = มวลของอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จะแปรตามค่ากระแสไฟตรง (Direct Current) ที่ป้อนให้ ดังนั้น เราสามารถเปลี่ยนค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ได้โดยเปลี่ยนค่ากระแสไฟที่จ่ายให้ขดลวดโซลินอยด์ จากคุณสมบัติของหลอดแมกนีตรอนซึ่ง จะให้กำลังงานเอทพุท แปรตามค่าสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กก็เท่ากับว่าเป็นการให้กำลังงานเอทพุทที่ออกมาจากหลอดแมกนีตรอน เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามไปด้วยเช่นกัน

**2.2.3 คุณสมบัติของหลอดแมกนีตรอนที่ใช้**

เป็นหลอดแมกนีตรอนชนิดที่ใช้ก๊าซเป็นตัวถ่ายเทความร้อน พร้อมด้วยแม่เหล็กถาวรที่มีประสิทธิภาพสูง ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในบ้าน หลอดแมกนีตรอนทำงานที่ความถี่ค่า 2455 เมกะเฮิรท์ และกำลังงานคลื่นอาร์เอฟที่เอทพุท 930 วัตต์ ด้วยประสิทธิภาพประมาณ 73% ทิศทางของการถ่ายเทความร้อนจะเป็นในลักษณะให้ลมเป่าผ่าน โครงสร้างจะอยู่ในมาตรฐานความปลอดภัย

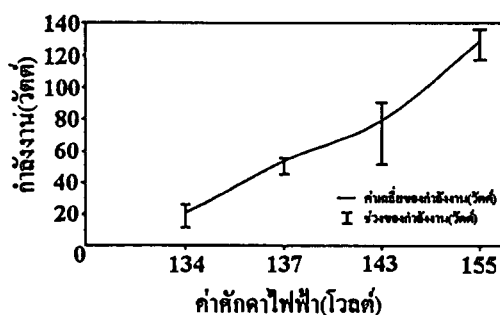
**2.2.4 การควบคุมกำลังงานเอทพุทของหลอดแมกนีตรอน**

ในหลอดแมกนีตรอนที่ใช้ทั่วไปมักมีกำลังงานสูง อยู่ในระดับ 700-1000 วัตต์ ซึ่งสูงเกินความต้องการของระบบซึ่งต้องการไม่เกิน 50 วัตต์ ดังนั้นเราจำเป็นต้องลดกำลังงานลงมาให้อยู่ในระดับที่ต้องการ เนื่องจากการทำงานของหลอดแมกนีตรอนต้องอาศัยแหล่งจ่ายกำลังงาน 2 ชุดคือ แหล่งจ่ายไฟต่ำเพื่อป้อนให้แก่คาโทด ปลัวยอิเล็กตรอนออกมาและแหล่งจ่ายไฟสูงเพื่อผลักดันให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร เพื่อให้เกิดการกระตุ้นควาวิตีที่อยู่รอบๆ คาโทด หากศักดาของแหล่งจ่ายไฟสูงนี้เปลี่ยนแปลงไปจะสามารถเปลี่ยนแปลงกำลังงานที่ออกจากหลอดแมกนีตรอนได้ ในที่นี้เราใช้หม้อแปลงปรับค่า (Variac) ต่อก่อนเข้าแหล่งจ่ายไฟ เพื่อปรับไฟแรงสูงซึ่งทำให้สามารถลดกำลังงานอยู่ในระดับที่ต้องการได้ ในการวัดกำลังงานที่ออกจากหลอดแมกนีตรอน ได้ทำการวัดกำลังงานที่นำดูดซับไว้โดยการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในน้ำ ซึ่งทำให้คำนวณกำลังงานได้โดยอาศัยสมการ

$$P = M_w \times C_p \times (T-T_0)/t$$

- เมื่อ P เป็นกำลังงาน (วัตต์)
- M<sub>w</sub> เป็นมวลของน้ำ (kg)
- C<sub>p</sub> เป็นความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.184 Kj/(kg•K)
- T-T<sub>0</sub> เป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (°K)
- t เป็นเวลา (วินาที)

ผลการควบคุมกำลังงาน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3



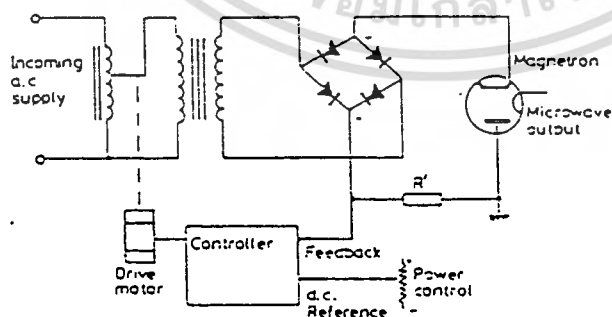
รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักดาไฟฟ้า ( $V_{in}$ ) กับกำลังงาน ( $P_o$ )

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่า เราสามารถควบคุมกำลังงาน ( $P_o$ ) ที่ออกจากหลอดแมกนีตรอนได้ โดยการควบคุมศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่แหล่งจ่ายไฟของหลอดแมกนีตรอน ( $V_{in}$ )

สำหรับการควบคุมกำลังงานเอาท์พุทของหลอดแมกนีตรอนมีหลายวิธี การให้พลังงานแรงดันสูง (high voltage) ที่เสถียร (stable) แก่หลอดแมกนีตรอน ผลที่ต้องการคือ กระแสไอออนที่คงที่อย่างแท้จริงไม่ขึ้นกับแรงดัน EHT ที่กระเพื่อม หรือการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของโหลด (workload impedance) สำหรับหลอดแมกนีตรอนที่คงสนามแม่เหล็กไว้ (เช่น ที่แม่เหล็กถาวร) หน่วยกำลังงานจะต้องมีการควบคุมการปรับค่า EHT เพื่อที่จะให้กระแสไอออนคงที่ วิธีการต่างๆ มีดังนี้

การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Transformer)

มอเตอร์ถูกควบคุมโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยค่าอินพุทของวงจรมานั้นมาจากกระแสไอออนแล้วเปรียบเทียบกับค่าที่เรากำหนดขึ้นมา ตามรูปที่ 2.4 ข้อเสียคือการตอบสนองจะช้า แต่ลักษณะทางกลศาสตร์ (mechanic) ก็จะทำให้เห็นลักษณะต่างๆ ได้ชัดเจน ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งก็คือ เป็นระบบควบคุมที่ราคาแพงและไม่ค่อยจะ ได้ใช้

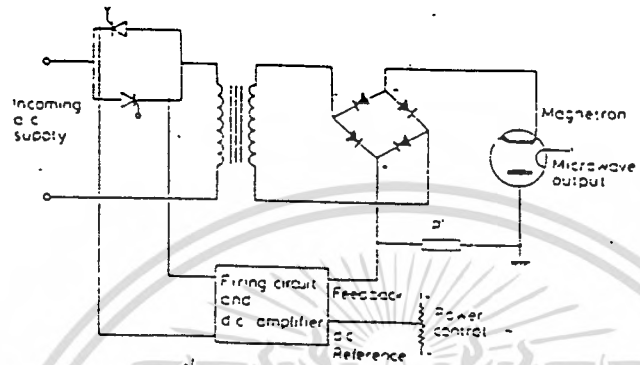


รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนอัตราส่วนของทรานส์ฟอร์มเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การควบคุมโดยใช้ไทรสเตอร์ (Thyristor)

ในระบบนี้ จะใช้ไทรสเตอร์ (thyristor) ที่สามารถถูกควบคุมโดยการชิฟเฟส เป็นตัวควบคุม การป้อนไฟกระแสสลับแก่ EHT ทรานฟอรม์เมอร์ในระบบเซอร์โว (servo) กระแสอาโนด จะถูกเซ็ทโดยกระแสไฟตรงอ้างอิง ซึ่งจะถูกรับเทียบกับกระแสไฟตรงแรงดัน กร่อม R' ค่าผลต่าง ของแรงดัน จะถูกขยายและนำไปทริกซ์ (trig) วงจร เพื่อควบคุมมุมเฟสของไทรสเตอร์

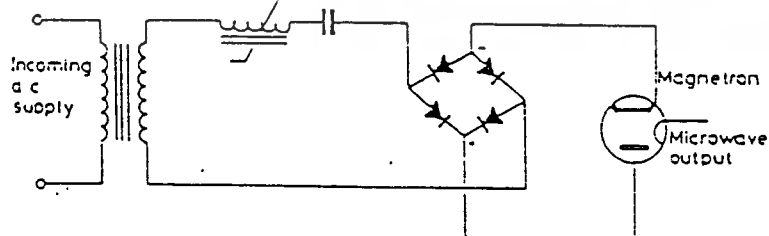


รูปที่ 2.5 การควบคุมมุมเฟสของกระแส

ระบบนี้จะมีเสถียรภาพดีและผลตอบสนองที่เร็วถึงจะถูกจำกัด ข้อเสียก็คือ ทำให้เกิดกระแส อาร์ค ของแมกนีตรอน และเพื่อที่จะลดผลที่เกิดขึ้น ก็ใช้ EHT ทรานฟอรม์เมอร์ที่มีการรั่วไหลสูง (30-40%)

### การควบคุมแบบการใช้ปฏิกิริยาด้านที่เสถียร (Saturable reactor control)

เป็นวิธีที่ใช้สำหรับแมกนีตรอนที่มีกำลังต่ำ ดังในรูปที่ 2.6 ขดลวดเหนี่ยวนำที่ไม่เป็นเชิงเส้นมา ต่อกับทรานฟอรม์เมอร์ศักดาสูง จะทำให้เกิดรีโซแนนซ์ โดยมาต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุที่มีความถี่ รั้งพลาซสูงกว่า 15% ในการเกิดรีโซแนนซ์ มีผลทำให้อิมพีแดนซ์มีค่าต่ำ ค่าอินดักแตนซ์จะลดลง พร้อมกับการเพิ่มของโวลเตจ เพื่อที่ว่าความถี่รีโซแนนซ์เพิ่มขึ้นด้วยวิธีการเพิ่มของอิมพีแดนซ์ของวง จร และการจำกัดการเพิ่มของกระแส ความเสถียรของกระแสอาโนดที่คืนนั้นสามารถถูกทำได้ จุดที่ดี ของมัน คือ การปรับกำลังงานที่เฉพาะลงไปตามการเท็ปของสวิตซ์ทรานฟอรม์เมอร์ และเอาท์พุทจะ ไรสำหรับการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่ป้อนเข้าไป



รูปที่ 2.6 ความถี่รีโซแนนซ์ของแหล่งจ่ายที่ป้อนให้แก่อโหลดแมกนีตรอน

### 2.2.3.1 การปรับค่าสนามไฟฟ้า

ค่าสนามไฟฟ้าระหว่างอาโนดกับคาโทด จะแปรตามค่าแรงดันไฟกระแสสลับ (Alternate Current) ที่ป้อนเข้าไป เช่น หลอดชนิดนี้ที่ใช้ในเตาอบ ซึ่งใช้ไฟ 220 โวลต์ เนื่องจากว่าในโรงงานนี้ เราต้องการนำไปใช้ในงานด้านการแพทย์ ซึ่งไม่ต้องการกำลังงาน (power) สูงนัก ดังนั้นเราจึงใช้ หม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับค่าได้ (variable voltage transformer) มาปรับค่าแรงดันอินพุท เพื่อให้ได้เอาต์พุทอยู่ในช่วงที่ต้องการ ประมาณ 100 วัตต์ หรือน้อยกว่า

### 2.2.3.2 การปรับค่าสนามแม่เหล็ก

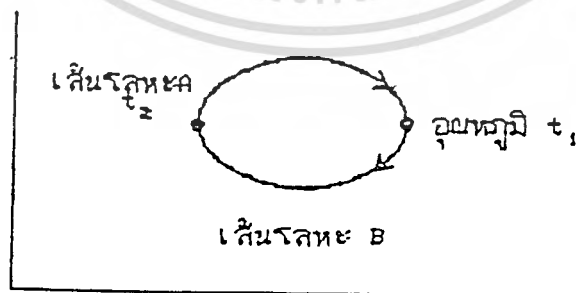
การที่เราลดค่าสนามไฟฟ้าดังกล่าวแล้วเพียงอย่างเดียว นั้น ยังไม่สามารถนำเครื่องนี้ไปใช้งานได้ ทั้งนี้เนื่องจาก การใช้งานนั้น ต้องการควบคุมกำลังงานเอาต์พุทให้คงที่ ทั้งนี้เนื่องจากต้องรักษาอุณหภูมิให้คงที่นั่นเอง ดังนั้นในที่นี้เราจะใช้การควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงค่าสนามแม่เหล็ก เพื่อปรับระบบให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการจริงๆ การปรับก็สามารถทำได้ โดยการเพิ่มหรือลดค่ากระแส ที่จ่ายให้ขดลวดโซลินอยด์ซึ่งเป็นตัวกำเนิดสนามแม่เหล็ก ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มได้ ความเข้มของสนามแม่เหล็กแปรผันตามค่ากระแสที่จ่าย

## 2.3 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้มากที่สุดในการอุตสาหกรรม. เทอร์โมคัปเปิลซึ่งเป็นส่วนวัดอุณหภูมินั้นถูกคิดค้น โดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ ที. เจ. ซีเบค (T.J. Seeback) ดังนั้นปรากฏการณ์ของเทอร์โมคัปเปิล เรียกว่า ซีเบค เอฟเฟกต์ (Seeback effect)

### 2.3.1 ซีเบคเอฟเฟกต์

ซีเบคเอฟเฟกต์ มีหลักการคือ ถ้านำโลหะสองชนิดมาประกบกันเป็นวงจรรปิด (เทอร์โมคัปเปิล) และถ้าทำให้อุณหภูมิที่จุดต่อทั้ง 2 ต่างกัน จะเกิดเทอร์มอลอิเลคโตรโมทีฟเฟอส์ (Thermal electromotive force) ซึ่งทำให้มีกระแสไหลในวงจรเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิต่างที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2. ซีเบคเอฟเฟกต์

อุณหภูมิจุดสัมผัสของโลหะ A,B เป็น  $t_1$  และ  $t_2$  โดย  $t_1 < t_2$  ถ้ากระแสไหลจาก A ไป B ตามถูกครในรูป กล่าวได้ว่าตัวนำ A เมื่อเทียบกับ B แล้วเป็นบวก แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับการจับคู่กันของโลหะทั้งสอง และอุณหภูมิต่างกันที่จุดต่อ ( $t_1 - t_2$ ) โดยจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$E = F(t_2) - F(t_1) \\ = a(t_2 - t_1) + (t_2 - t_1)^2$$

ในที่นี้ให้

$E$  = เทอร์มอล อี เอ็ม เอฟ (Thermal e.m.f.) ที่เกิดขึ้น ของเทอร์โมคัปเปิล

$t_1, t_2$  = อุณหภูมิที่จุดต่อ หน่วย องศาเซลเซียส (degree celcius)

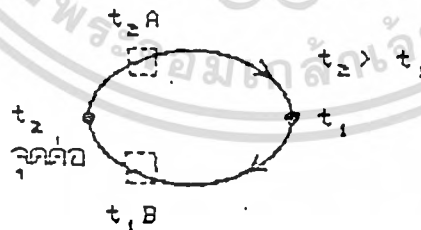
$a, b$  = ค่าคงที่แตกต่างไปตามวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิล

เมื่อเกิดความต่างของอุณหภูมิจะเกิดความร้อนไหลขึ้นในโลหะ อิเล็กตรอนจะไหลตามความร้อน กรณีที่วงจร เทอร์โมคัปเปิล เปิด ที่ปลายทั้งสองจะมีประจุไฟฟ้าสะสมอยู่ ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น จะทำให้ กระแสไฟฟ้า ที่เกิดจากความร้อนไหลจนเกิดสมดุลย์หรือ เทอร์มอล อี.เอ็ม.เอฟ  $V_{AB}$  ที่เกิดขึ้น จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิของจุดต่อทั้ง  $T_1$  และ  $T_2$  เท่านั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิมีกฎพื้นฐาน 3 ข้อดังกล่าวต่อไปนี้

### 1. กฎของวงจรเอกพันธ์ (Law of homogeneous circuit)

ในวงจรโลหะเอกพันธ์ที่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด ชนิดเดียวกัน แม้ว่ารูปร่างและการกระจายอุณหภูมิต่างกัน ไป ถึงจะเพิ่มความร้อนเข้าไปก็ไม่มีกระแสไหลนั่นคือตามรูปที่ 2.8 เทอร์มอล อีเอ็มเอฟ จะถูกกำหนด โดย  $t_1, t_2$  แต่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิระหว่างโลหะแต่ละชนิด  $t_3, t_4$



รูปที่ 2.8 กฎของวงจรเอกพันธ์

## 2. กฎของโลหะมัธยันต์ (Law of intermediate metal)

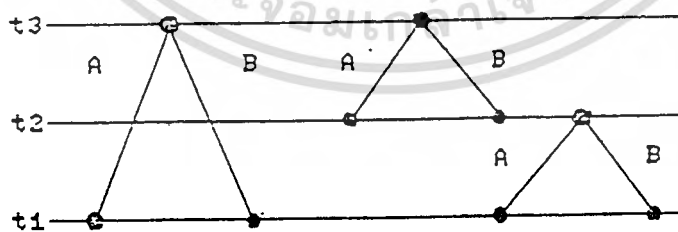
วงจรทั้งหมดที่ประกอบด้วยโลหะต่างกันหลายชนิดและมีอุณหภูมิเท่ากัน จะไม่มีเทอร์มอล อี. เอ็ม. เอฟ. เกิดขึ้นในวงจรนั้น ตามรูปที่ 2.9 แม้จะใส่โลหะ C ในแทรกอยู่ระหว่างกลาง ถ้าปลายทั้งสองข้างมีอุณหภูมิเท่ากันคือ  $t_3$  แล้วแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจะขึ้นกับโลหะ A, B และที่  $t_1, t_2$  เท่านั้น จะไม่เกี่ยวกับโลหะ C ที่ใส่ไว้ตรงกลางเลย นอกจากนี้ถ้าใส่โลหะมัธยันต์นี้ไว้ที่ส่วนหนึ่งของวงจรเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric) ถ้าปลายทั้งสองของโลหะมัธยันต์นี้มีอุณหภูมิเท่ากัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะไม่เปลี่ยนแปลงตามรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กฎของโลหะมัธยันต์

## 3. กฎของอุณหภูมิมัธยันต์ (Law of intermediate thermal)

เทอร์มอล อีเอ็มเอฟ. ขณะที่อุณหภูมิจุดต่อเทอร์โมคัปเปิลเป็น  $t_1, t_2$  นั้น จะเท่ากับผลบวกของเทอร์มอล อีเอ็มเอฟ. ขณะที่อุณหภูมิของจุดต่อเทอร์โมคัปเปิลเป็น  $t_3, t_2$  และ  $t_2, t_1$  ตามรูปที่ 2.10



แรงเคลื่อนไฟฟ้า  $(t_3 - t_1)$  เท่ากับ

$$E(t_3 - t_2) + E(t_2 - t_1)$$

รูปที่ 2.10 กฎของอุณหภูมิมัธยันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กฎ 3 ข้อ สามารถสรุปรวมได้ดังนี้ ผลบวกทางพีชคณิตของเทอร์มอล อีเอ็มเอฟ ที่เกิดขึ้นจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิของจุดต่อ ( $t_2$ ) ได้

### 2.3.2 ลักษณะเฉพาะของเทอร์โมคัปเปิล

กล่าวตามหลักการของเทอร์โมคัปเปิลแล้ว โลหะต่างชนิดกันแบบใดก็สามารถสร้างเป็นเทอร์โมคัปเปิลได้ แต่จะต้องพิจารณาถึงจุดที่ใช้งานต่อไปนี้

- 1.เทอร์มอลอีเอ็มเอฟ ที่เกิดขึ้นจะต้องมากพอที่จะวัดได้แม่นยำ
- 2.ในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน เทอร์มอลอีเอ็มเอฟ ที่เกิดขึ้นจะต้องเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง และถ้าเป็นไปได้ควรเป็นเชิงเส้น (linear)
- 3.ต้องมีเสถียรภาพทั้งทางเคมีและทางฟิสิกส์ต่อบรรยากาศที่วัด
- 4.ความสามารถทำซ้ำ (Reproducibility) ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแต่ละล็อต (Lot) ที่ผลิตต้องดี
- 5.ความต้านทานทางไฟฟ้า และสัมประสิทธิ์ความต้านทานทางอุณหภูมิจะต้องน้อยเพื่อที่จะไม่เกิดอุปสรรคในการใช้งาน
- 6.การสร้างสายเทอร์โมคัปเปิลง่ายและราคาไม่แพง

### 2.3.3 เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ทั่วไป

ในปัจจุบันนี้เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้มีอยู่หลายชนิด ซึ่งขึ้นอยู่กับโลหะที่ใช้ทำและเหมาะที่จะใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน สำหรับอุณหภูมิที่เราใช้อยู่ในช่วง 0-100 องศาเซลเซียส จึงเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบโครเมลอะลูเมล (C.A.)

#### 2.3.3.1 เทอร์โมคัปเปิลแบบ PR

มีความแม่นยำสูงสุดในบรรดาเทอร์โมคัปเปิลที่กำหนด โดยมาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น เนื่องจากโลหะมีค่าทนความร้อนสูงสุด ใช้งานในบรรยากาศได้ถึง 1400 องศาเซลเซียส ไม่มีปัญหา ถ้าใช้งานที่อุณหภูมิเกินกว่านี้เมล็ดผลึกของโลหะ จะค่อยๆใหญ่ขึ้น ทำให้เปราะต่อการสั่นหรือ กระแทก

โดยทั่วไปมีความทนทานต่อการออกซิเดชัน ส่วนบรรยากาศรีดักชัน โดยเฉพาะในกาซคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไฮโดรซัลไฟด์ ของอุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส และบรรยากาศของไอโลหะ จะไม่ค่อยทนทาน ดังนั้น ต้องใช้หลอดป้องกันที่ทำจากเซรามิกเสมอ

### 2.3.3.2 เทอร์โมคัปเปิลแบบโครเมลอะลูเมล

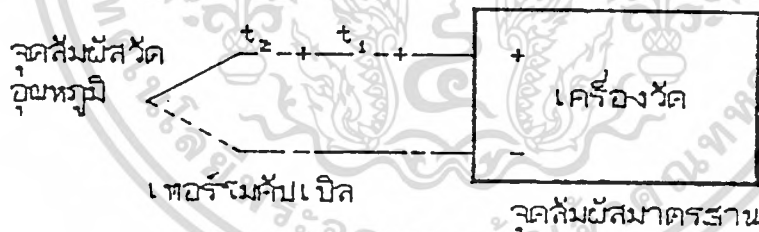
เทอร์โมคัปเปิลแบบนี้ ใช้งานกันกว้างมากในวงการอุตสาหกรรม J S (Japan Industrial Standard) จะกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางค่อนข้างแน่นอนหนา ทำให้เป็นฉนวนไฟฟ้าและต้องระวังปัญหา รอยสัมผัสด้วยเวลาต่อกับเส้นลวดอื่น

เทอร์โมคัปเปิลแบบโครเมลอะลูเมล จะมีเสถียรภาพในสภาวะออกซิเดชัน แต่ในสภาวะรีดักชันจะไม่ทน ถึงแม้จะเคลือบด้วยออกไซด์ก็สามารถป้องกันได้ชั่วขณะเท่านั้น สายอลูเมลจะเปราะกว่าสายโครเมล ถ้าหากโดนก๊าซสกปรกแล้ว จะทำให้เกิดผลึกที่บริเวณรอยต่อของหลอดป้องกัน ทำให้สายขาดได้ง่าย ถึงแม้จะไม่ได้รับแรงจากภายนอก

การทนความร้อน ความแม่นยำ ความสามารถทำซ้ำค่อนข้างดี ลักษณะคุณสมบัติของ อีเอ็มเอฟ ก็เกือบเป็นเส้นตรง

### 2.3.4 สายเอ็กซ์เทนชัน

รูปที่ 2.11 จะแสดงให้เห็นว่าการวัดอุณหภูมิตามปกตินั้น ระหว่างขั้วทั้งของเทอร์โมคัปเปิลกับขั้วของเครื่องมือวัดจะมีอุณหภูมิแตกต่างกันอยู่ อุณหภูมิที่ขั้วของเทอร์โมคัปเปิลนั้นขึ้นอยู่กับสายการ ใช้งาน บางทีอาจขึ้นถึง 100 องศาเซลเซียส หรือมากกว่านั้น เพื่อที่จะชดเชยอุณหภูมิที่ขั้วของเทอร์โมคัปเปิล ต้องใช้สายชดเชยที่ให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้า กับเทอร์โมคัปเปิล ถ้าต่ำกว่า 90 องศาเซลเซียส ก็จะใช้สายแบบธรรมดา ถ้าต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส ก็ใช้แบบทนความร้อน สายนี้ เรียกว่า สายเอ็กซ์เทนชัน

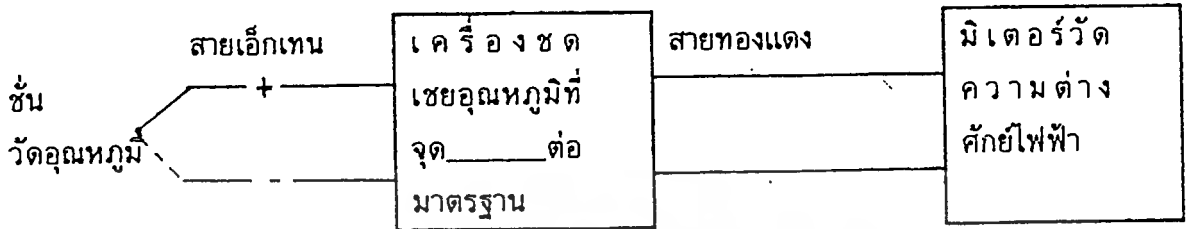


รูปที่ 2.11 สายเอ็กซ์เทนชัน

### 2.3.5 เครื่องชดเชยอุณหภูมิที่จุดต่อมาตรฐาน

ตามหลักการของเทอร์โมคัปเปิลที่ได้กล่าวมาแล้วจะพบว่าเครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลนี้ใช้วัด เทอร์มอล อีเอ็มเอฟ ที่เกิดจากผลต่างของอุณหภูมิที่จุดต่อสองจุด ดังนั้น จึงต้องรักษาอุณหภูมิที่จุดหนึ่งให้คงที่ (จุดต่อมาตรฐาน) หรือทำการชดเชยตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป เครื่อง

วัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลโดยทั่วไป จะติดตั้งวงจรชดเชยอุณหภูมิ โดยอัตโนมัติแบบใช้ไฟฟ้าตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของจุดต่อมาตรฐาน ใว้ภายในเครื่องดังนั้นจึงไม่ต้องใช้เครื่องชดเชยอุณหภูมิที่จุดต่ออีก แต่ในกรณีที่ใช้เครื่องวัดความต่างศักย์วัดอุณหภูมิโดยตรง ตามรูป 2.12 จะต้องใช้เครื่องชดเชยอุณหภูมิที่จุดต่อมาตรฐานตามชนิดของเทอร์โมคัปเปิล



**รูปที่ 2.12 การวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลโดยใช้เครื่องชดเชยอุณหภูมิที่จุดต่อมาตรฐาน**

จุดต่อวัดอุณหภูมิเป็นจุดต่อสายเทอร์โมคัปเปิลวางไว้ด้านที่รับอุณหภูมิ จุดต่อมาตรฐานเป็นจุดต่อระหว่างสายเทอร์โมคัปเปิลกับสายตัวนำหรือสายเอ็กซ์เทนชัน มักจะรักษาให้อุณหภูมิคงที่ เช่น อุณหภูมิที่จุดน้ำแข็ง เป็นต้น สายเอ็กซ์เทนชัน หมายถึง สายที่ใช้ประกอบกับเทอร์โมคัปเปิลซึ่งมีลักษณะสมบัติทางเทอร์มอลอิเลกทริก เกือบจะเหมือนกับสายเทอร์โมคัปเปิลที่ช่วงอุณหภูมิวัดรวมถึงอุณหภูมิปกติด้วย ทำด้วยลวดตัวนำที่มีจำนวนหุ้ม 1 คู่ ใช้ต่อระหว่างขั้วเทอร์โมคัปเปิลและจุดสัมผัสมาตรฐาน ซึ่งสำหรับชดเชยค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงที่ขั้วของเทอร์โมคัปเปิล

**1. แบบแช่ด้วยน้ำแข็ง**

ใช้น้ำแข็งที่บดจนละเอียดใส่ลงในขวดหรือกระป๋องแก้วคว่ำ (Dewar) เพื่อรักษาจุดต่อมาตรฐานให้เป็น 0 องศาเซลเซียส มีความจำเป็นมากสำหรับกรณีที่ใช้ในการกำหนดสเกล หรือใช้สำหรับเปรียบเทียบค่าของเครื่องมือวัดที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง

**2. แบบอิเล็กทรอนิกส์**

เนื่องจากเครื่องชดเชยแบบแช่ด้วยน้ำแข็ง ไม่สะดวกในการนำไปใช้งานจึงมีการใช้เครื่องมือที่จะรักษาให้อุณหภูมิเป็น 0 องศาเซลเซียส

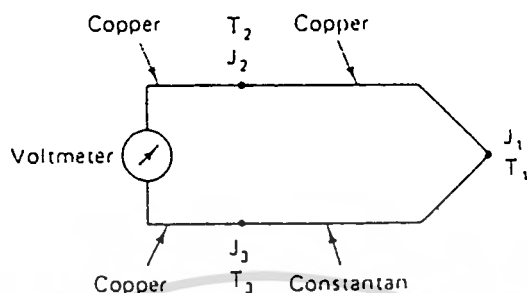
**3. แบบซีเนออร์**

เครื่องมือชดเชยอุณหภูมิสองแบบที่กล่าวมาจะต้องรักษาอุณหภูมิที่จุดต่อมาตรฐานให้เป็น 0 องศาเซลเซียสเสมอ แต่สำหรับเครื่องชดเชยแบบซีเนออร์นี้จะชดเชยอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของจุดต่อมาตรฐานด้วยค่าไฟฟ้า ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติเหมือนกับว่า อุณหภูมิที่จุดต่อมาตรฐานเป็น 0 องศาเซลเซียสอยู่ตลอดเวลา

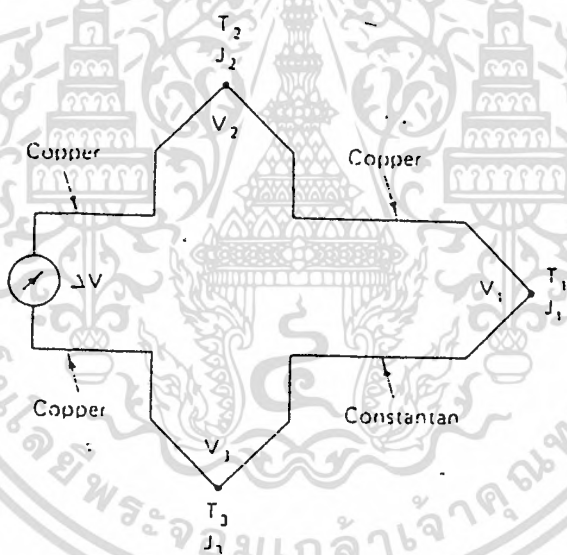
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.5.1 พิจารณาเทอร์โมโวลต์ที่แดง

ถ้าหากเราต่อโวลต์มิเตอร์โดยตรงเข้าเทอร์โมคัปเปิล ค่าที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์จะไม่ใช่ค่าเทอร์มอล อีเอ็มเอฟของความแตกต่างอุณหภูมิ  $T_1$  และ  $T_2$  ที่เราต้องการรู้เพราะว่าโวลต์มิเตอร์จะสร้างวงจรเทอร์มอลอิเล็กทริกขึ้นใหม่เอง ดังรูปที่ 2.13



ก. การต่อโวลต์มิเตอร์โดยตรงเข้าเทอร์โมคัปเปิล



ข. วงจรที่สมมาตรกับ ก.

รูปที่ 2.13 การวัดค่า อีเอ็มเอฟ ของเทอร์โมคัปเปิล

ที่รอยต่อ  $J_2$  ของทองแดงกับทองแดง จะไม่สร้างเทอร์มอล อีเอ็มเอฟ ( $v_2=0$ ) ใดๆก็ตาม รอยต่อตรง  $J_3$  เป็นทองแดงกับคอนสแตนแทน ซึ่งค่า อีเอ็มเอฟของ  $v_3$  จะเพิ่มขึ้น หักล้างกับค่า  $v_1$  ดังนั้นค่าที่อ่านได้ที่โวลต์มิเตอร์ จะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างระหว่าง  $v_1$  กับ  $v_3$  และความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง  $T_1$  และ  $T_3$  เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



$$T_1 = F(V_1 - V_3) = F(V)$$

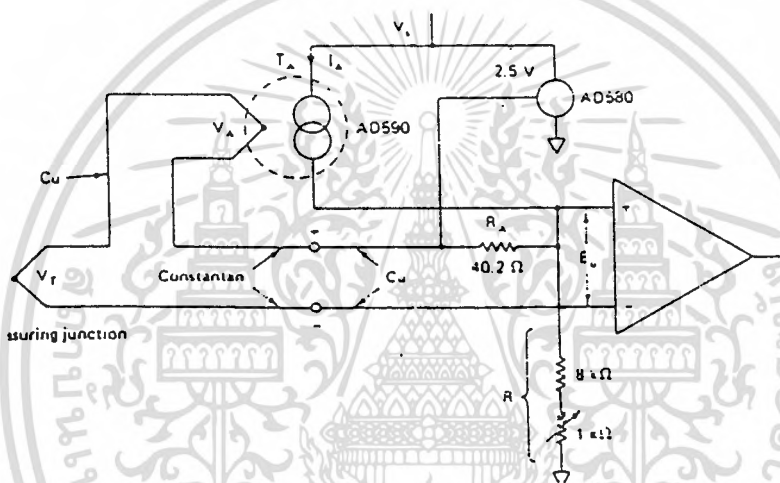
$$\Delta V = G(T_1 - T_3)$$

ถ้าเราใส่รอยต่อตรง  $J_3$  ในอ่างน้ำแข็ง สมการจะกลายเป็น

$$\Delta V = G(T_1)$$

จะเห็นว่า  $\Delta V$  เป็นสัดส่วนกับ  $T_1$  ที่รอยต่อ  $J_1$

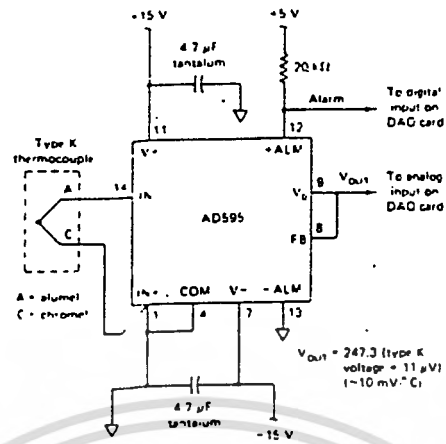
ในการใช้งานจริง จะไม่ใส่รอยต่อ  $J_3$  ในอ่างน้ำแข็ง แต่จะบวกค่าโวลต์แดงที่ตรงข้ามกับ  $V_2$  เข้าไปแทน ซึ่งจะทำให้  $V_2$  เป็น 0 ทำให้สามารถได้เอาต์พุตโวลต์แดงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $V_1$  และเทคนิคนี้เรียกว่า เทคนิคการชดเชยรอยต่อที่เย็น



รูปที่ 2.14 แสดงวงจรการชดเชยรอยต่อที่เย็นสำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด T

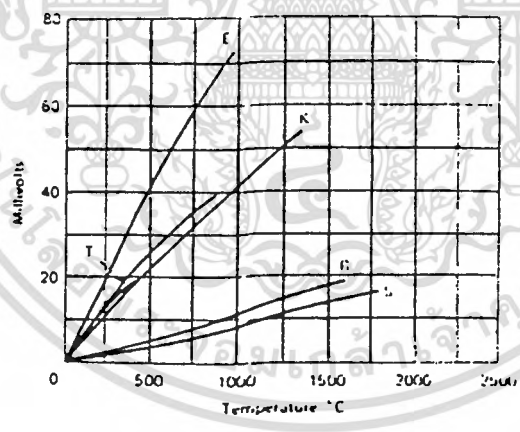
จากรูปเทอร์โมคัปเปิลชนิด ทองแดง-คอนสแตนแทน (แบบ T) จะถูกชดเชยแรงดันไฟฟ้า โดยกระแสเอาต์พุตของอุปกรณ์เซนเซอร์อุณหภูมิ AD590 ถ้าอุณหภูมิ  $T_A$  ของรอยต่อที่เย็นเพิ่มขึ้น แรงดัน  $V_A$  จะเพิ่มขึ้น  $\Delta V$  และเอาต์พุต  $I_A$  ของ AD590 จะเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับกระแส  $J_A$  ส่วนใหญ่จะไหลผ่านความต้านทาน  $R_A$  และสร้างแรงดัน  $\Delta V$  ที่ตรงข้ามที่ซึ่งจะหักล้างกับ  $\Delta V$  และแรงดัน  $E_0$  จะเท่ากับ  $V_T$  ตามที่ต้องการ โดยไม่ถูกผลกระทบจาก  $V_A$  และที่ AD590 จะมีแรงดัน 2.5V โวลต์ อ้างอิงอยู่ ดังสมการ

$$\begin{aligned} E_0 &= V_T - V_A + I_A(40.2 + 2.5V)/(1 + 40.2/R) - 2.5V \\ &= V_T \end{aligned}$$



รูปที่ 2.15 การชดเชยรอยต่อที่เย็นของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

จากรูปที่ 2.15 แสดงการใช้ AC590 ไอซีเบอร์นี้มีความสามารถในการชดเชยรอยต่อที่เย็น มีการขยาย และมีการป้องกันการผิดพลาด โดยการจับอุณหภูมิที่ไอซี และส่งเอาต์พุตโวลต์แดงที่ถูกต้องตามมา ซึ่งเอาต์พุตโวลต์แดงที่ได้จะมีขนาด 10 mV/°C ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล 6 ชนิด แสดงได้ดังรูปที่ 18



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตโวลต์แดงกับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล 6 ชนิด

- โดยที่ E คือชนิด โครเมิล-คอนสแตนแทน
- J คือชนิด เหล็ก-คอนสแตนแทน
- K คือชนิด โครเมิล-อะลูเมล
- R คือชนิด แพททินัม-แพททินัม 13% โรเดียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S คือชนิด แพททินัม-แพททินัม 10% โรเดียม

T-คือชนิด ทองแดง-คอนสแตนแทน

จากกราฟ จะเห็นว่า เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะให้เอาท์พุทเป็นเส้นตรงในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 1000 องศาเซลเซียส และเพื่อความแม่นยำในการใช้เทอร์โมคัปเปิล จะต้องมีการปรับช่วงอุณหภูมิให้เหมาะสม เลือกใช้ช่วงกราฟให้เหมาะสม

### 2.3.5.2 การปรับเทอร์โมมิเตอร์

เพื่อที่จะทำให้อุณหภูมิแม่นยำ จำเป็นที่จะต้องรักษาอุณหภูมิอ้างอิงมาตรฐานได้ รวมทั้งการที่จะมีการปรับอุปกรณ์ทำงาน ด้วยอุณหภูมิมาตรฐานเพื่อที่จะให้มีความผิดพลาดน้อยที่สุด และไม่ว่าการวัดจะแม่นยำเพียงไร ถ้าอุปกรณ์ไม่ได้มีการปรับอย่างถูกต้องผลลัพธ์ที่ได้ก็จะไม่ถูกต้องด้วย มีกฎที่สำคัญสำหรับใช้ในการปรับอยู่ 4 ข้อ คือ

1.ต้องแน่ใจว่าการติดตั้งอุปกรณ์จับสัญญาณต้องใกล้ชิดเท่าที่จะเป็นไปได้ ระดับของการจุ่มอุณหภูมิล้อมรอบ การป้องกันและการบรรจุ ล้วนมีผลต่อผลึกความร้อนรอบๆ อุปกรณ์จับสัญญาณทั้งสิ้น

2.ต้องแน่ใจว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับสภาพแวดล้อม ขบวนการต่างๆ ต้องมีความผิดพลาดน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

3.เทอร์โมมิเตอร์อ้างอิงหลัก จะต้องมีความแม่นยำ ระดับของความไม่แน่นอนจะยอมให้มีเพียงเล็กน้อยในการออกแบบ หมายความว่าในการปรับเทอร์โมมิเตอร์หรืออุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ อาจมีค่าความผิดพลาดได้มากที่สุด  $\pm 1$  องศาเซลเซียส โดยที่เทอร์โมมิเตอร์อ้างอิงจะมีค่าผิดพลาดได้มากที่สุดไม่มากไป

4.ต้องแน่ใจว่าอุปกรณ์อ้างอิงหลักจะต้องแม่นยำอย่างต่อเนื่องโดยตัวมันเอง สิ่งนี้อาจทำได้โดยอ้างอิงไปยังอุณหภูมิมาตรฐาน (เช่นจุดเยือกแข็ง) หรือโดยการปรับเครื่องมือใหม่อีกที่มาตรฐาน NBS (The National Bureau of Standard) หรือการทดสอบของห้องแล็บ

สัญญาณรบกวนในเทอร์โมคัปเปิล

เพราะว่าแรงดันเอาท์พุทของเทอร์โมคัปเปิลจะมีระดับน้อยมาก (เป็นระดับไมโครโวลต์) สามารถถูกรบกวนได้ง่าย ดังนั้น อาจป้องกันได้ โดยใช้ชื่อนาลี้อก แอ็กทีฟฟิวเตอร์ เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้

ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด คือ Copper และ Constantan ซึ่งหุ้มด้วย Teflon มีช่วงในการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่าง 20-60 °C มีตัววัดที่ใช้วัดอุณหภูมิอยู่ 4 จุด ซึ่งจุดแรกอยู่ห่างจากปลายสาย 2 มม. จุดต่อมาจะห่างกันช่วงละ 10±1 มม. ความยาวของสายที่ใช้วัดยาว 345±2 มม. มีเส้นผ่านศูนย์กลาง

ของสาย  $0.76 \pm 0.07$  มม. การกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าจะแปรผันตามอุณหภูมิ โดยสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์

#### 2.4 สายอากาศปล่อยคลื่นและอุณหภูมิระบายความร้อน

ในระบบนี้เลือกใช้สายอากาศปล่อยคลื่นแบบสล็อตอาร์เรย์บนผิวทรงกลม สายอากาศนี้เป็นแบบไม่ต้องสอดเข้าไปในร่างกาย (Non-invasive applicator) และมีความสามารถปล่อยคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2450 Mhz เข้าไปในร่างกายได้ลึกถึง 3 ซม. โดยขนาดและรูปร่างของพื้นที่ที่ใช้งานได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนสล็อตในอาร์เรย์นี้ แต่เนื่องจากบริเวณรูสล็อตสนามไฟฟ้าจะมีขนาดสูงกว่าที่อื่น ทำให้บริเวณนี้มีอุณหภูมิสูงกว่าที่อื่น ดังนั้นในการใช้งานจึงต้องมีอุณหภูมิระบายระหว่างสายอากาศปล่อยคลื่นกับผิวหนัง อุณหภูมิต่างนี้ทำหน้าที่ทั้งระบายความร้อนและเมทซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศปล่อยคลื่น ลักษณะการใช้สายอากาศปล่อยคลื่นและอุณหภูมิระบายความร้อนแสดงในรูป



รูปที่ 2.17 ลักษณะการใช้งานของสายอากาศปล่อยคลื่นและอุณหภูมิระบายความร้อน

## บทที่ 3

### การคำนวณและการสร้าง

#### 3.1 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแบบที่ 1

สามารถออกแบบและสร้างได้ดังรูปที่ 3.1

เทอร์โมคัปเปิลชนิด โครเมล-อะลูมิเนียม มีเอาต์พุตอินพุตที่แกนซ์ประมาณ 422 โอห์ม ให้สัญญาณไฟฟ้าขนาด 40.7 ไมโครโวลต์ต่อองศาเซลเซียส และจะใช้วงจรขยายสัญญาณให้ได้สัญญาณเอาต์พุต 10 มิลลิโวลต์ต่อองศาเซลเซียส สำหรับส่วนวงจรขยายสัญญาณประกอบด้วย ออปแอมป์ (Operational Amplifier) ต่อยังขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier)

การคำนวณหาอัตราขยายเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราขยาย} &= V_{\text{out}}/V_{\text{in}} = R_2/R_1 + 1 \\ &= 10/(40.7 \times 10^{-3}) \text{ (mv/}^\circ\text{C)} \text{ (mv/}^\circ\text{C)} \\ &= 245.7 \end{aligned}$$

จากการคำนวณเราได้อัตราขยายของวงจร (Amplifier Voltage Gain) เท่ากับ 245.7,  $R_1$  เท่ากับ 422 โอห์ม,  $R_2$  เท่ากับ 103.263 กิโลโอห์ม และเอาต์พุตอินพุตที่แกนซ์ของเทอร์โมคัปเปิล ( $R_t$ ) เท่ากับ 422 โอห์ม ในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิล เราจำเป็นต้องให้จุดต่อมาตรฐาน แต่แทนที่จะใช้น้ำแข็งก็จะเป็นการสะดวกกว่าถ้าเราใช้ที่รู้จักกันว่า “การชดเชยรอยต่อที่เย็น” ดังนั้นในโครงการนี้ เราจึงต้องมีวงจรชดเชยอุณหภูมิที่จุดต่อมาตรฐาน ในที่นี้ใช้การชดเชยอุณหภูมิที่จุดต่อมาตรฐานแบบซีเนอร์ โดยที่เมื่อชดเชยอุณหภูมิแล้วจะเสมือนว่าอุณหภูมิที่จุดต่อมาตรฐานเป็น 0 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจริงอยู่ที่ค่าอื่นก็ตาม เราใช้ตัวชดเชยอุณหภูมิซึ่งมีคุณสมบัติคือ จะมีแรงดันเอาต์พุตเปลี่ยน มีการเปลี่ยนแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ  $10 \text{ mV/}^\circ\text{C}$  จากค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ และมีการใช้งานได้ตั้งแต่  $0-100^\circ\text{C}$  สำหรับตัวชดเชยอุณหภูมิที่ใช้คือ LM335 เพื่อชดเชยอุณหภูมิห้อง

จากการคำนวณจะได้  $R_3$  เท่ากับ 103.263 กิโลโอห์ม และ  $R_4$  เท่ากับ 10 กิโลโอห์มที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส LM335 ให้แรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 2.98 โวลต์ ซึ่งเมื่อเทียบกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลที่ต้องการเอาต์พุตเพียง 250 มิลลิโวลต์ จะมีค่าเกินรวมอยู่ถึง 2.73 โวลต์ จะต้องกำจัดค่าเอาต์พุต 6.95 โวลต์ เป็นตัวรักษาระดับถึงแม้ว่าอุณหภูมิเปลี่ยนไปค่าเอาต์พุตให้ก็ยังคงที่

ในทางปฏิบัติแล้วออปแอมป์จะเกิดแรงดันออฟเซต (offset voltage) ภายในและจะขยายออกมาที่เอาต์พุตด้วย ในการกำจัดแรงดันออฟเซตจะต้องป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าเข้าที่ขั้วลบ (Inverting Input) เพื่อแก้ค่าออฟเซตที่เกินมา แต่สำหรับวงจรแอมพลิไฟเออร์ที่เราใช้จะพบว่าแรงดันเอาต์พุตมีค่ามากเมื่อเทียบกับแรงดันเอาต์พุตที่เกิดออฟเซตจึงไม่จำเป็นต้องชดเชยในวงจรนี้

### 3.2 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแบบที่ 2

สามารถออกแบบและสร้างได้ดังรูป 3.2

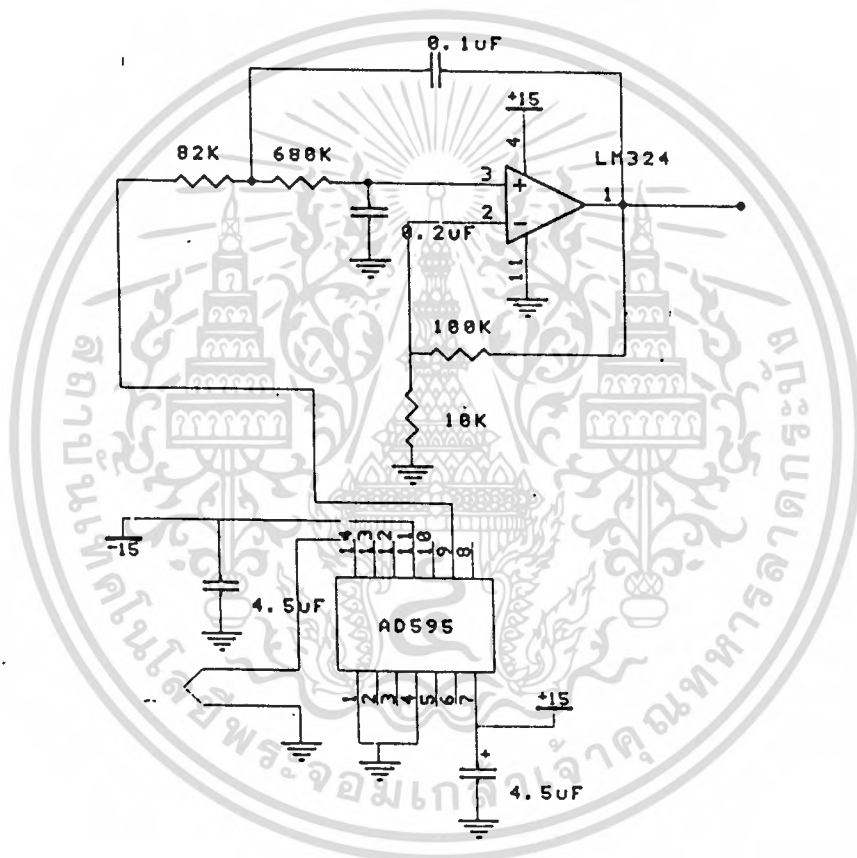
ซึ่งประกอบด้วยไอซีเบอร์ AD595 เป็นไอซีที่ใช้รับค่าสัญญาณไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการชดเชยรอยต่อที่เย็นของเทอร์โมคัปเปิล จากนั้นเมื่อได้รับสัญญาณไฟฟ้ามาก็จะผ่านวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าโดยใช้ไอซีเบอร์ LM324 เพื่อทำการขยายสัญญาณไฟฟ้าให้มีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นการแสดงวงจรในส่วนของระบบการวัดอุณหภูมิ โดยแสดงเพียงการวัด 1 จุด ซึ่งวงจรที่ใช้ในแต่ละจุดจะมีลักษณะของวงจรเหมือนกัน ดังนั้นในการวัดอุณหภูมิทั้ง 4 จุด ก็จะต้องมีวงจรนี้ 4 ชุด

### 3.3 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแบบที่ 3

สามารถออกแบบและสร้างได้ดังรูปที่ 3.3

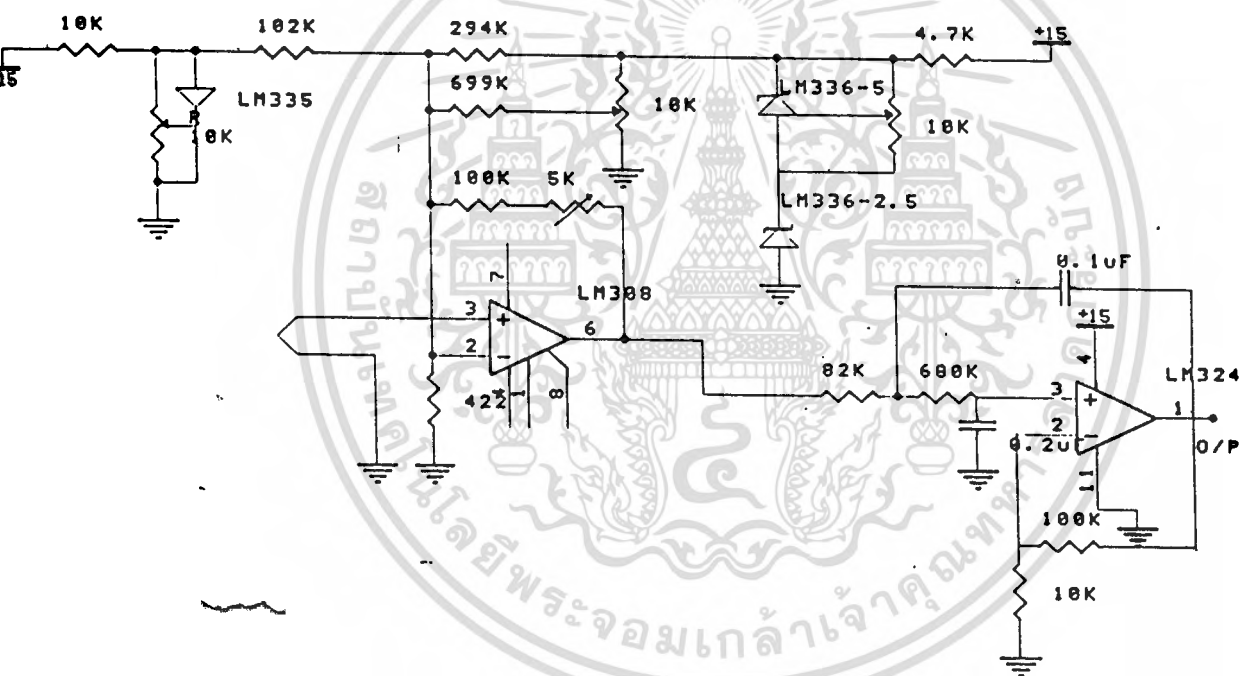
ประกอบด้วยไอซีเบอร์ LM308 เป็นไอซีที่ใช้รับค่าสัญญาณไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการชดเชยรอยต่อที่เย็นของเทอร์โมคัปเปิล จากนั้นเมื่อได้รับสัญญาณไฟฟ้ามาก็จะผ่านวงจรขยายสัญญาณ โดยใช้ไอซีเบอร์ LM324 เพื่อทำการขยายสัญญาณไฟฟ้าให้มีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.3 เป็นการแสดงวงจรในส่วนของระบบการวัดอุณหภูมิ โดยแสดงเพียงการวัด 1 แชนแนล ซึ่งวงจรที่ใช้ในแต่ละแชนแนลจะมีลักษณะของวงจรเหมือนกัน ดังนั้นในการวัดอุณหภูมิทั้ง 4 แชนแนล ก็จะต้องมีวงจรนี้ 4 ชุด





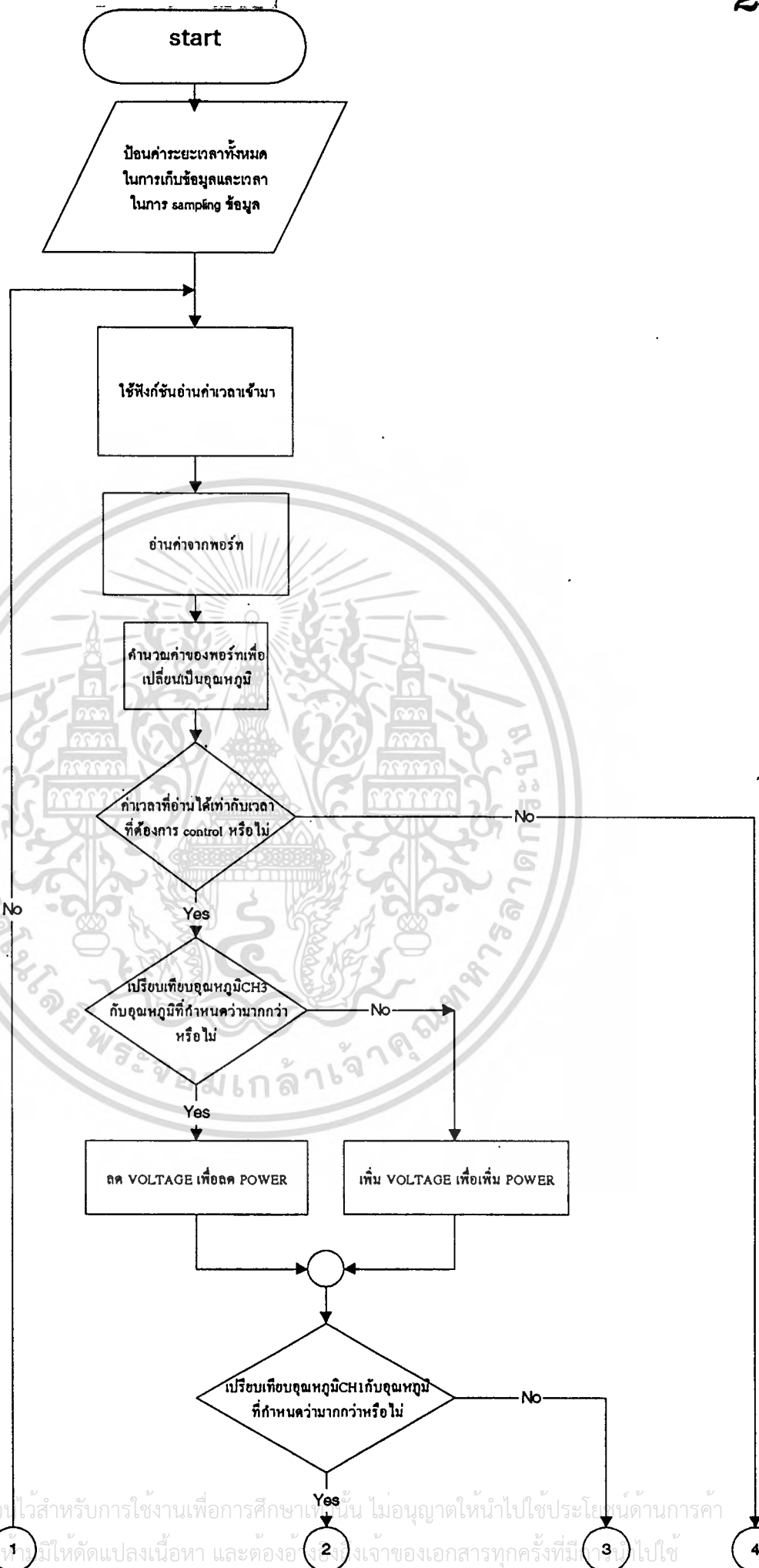
รูปที่ 3.2 แสดงวงจรขยายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

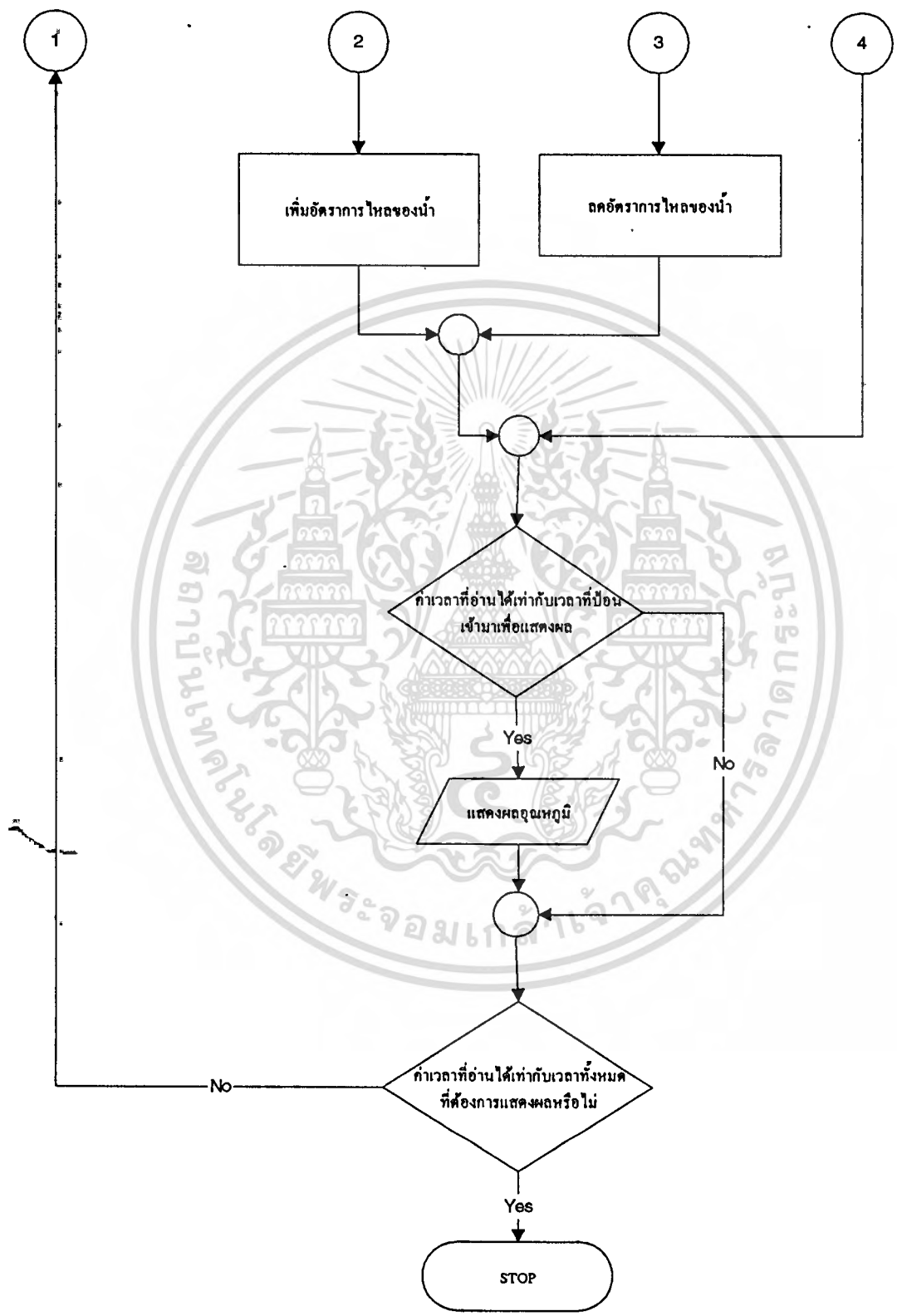


รูปที่ 3.3 แสดงวงจรขยายสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลแบบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีผู้ใช้



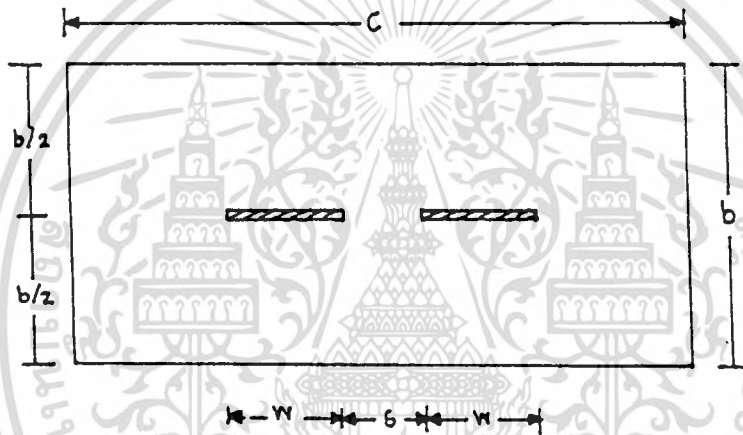
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### โคเรชันแนลคัปเปิลอร์และการออกแบบ

#### สตริปไลน์ (Strip Line)

ในการใช้งานที่ย่านความถี่สูงประมาณ 200-300 เมกกะเฮิรตซ์ ปัจจุบันนิยมใช้สตริปไลน์ หรือสายส่งแบบไตรเพลท (Tri Plate Transmission Line) สำหรับสตริปไลน์จะมีข้อดีกว่าสายส่งแบบโคแอกเซียล (Coaxial) หรือท่อเวฟไกด์แบบทรงกลม สตริปไลน์ที่ใช้กันส่วนใหญ่เป็นโลหะตัวนำ บางๆ ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม นำมาต่อไว้ที่กึ่งกลางของแผ่นกราวด์เพลนทั้งสอง เพื่อทำเป็นคัปเปิลอร์ มีลักษณะตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของสตริปไลน์

#### โคเรชันแนลคัปเปิลอร์แบบแผ่นขนาน (Parallel Plate Directional Coupler)

โคเรชันแนลคัปเปิลอร์ชนิดนี้จะมีแผ่นสตริปไลน์ต่ออยู่ภายในกล่องอลูมิเนียม ที่ปิดทั้ง 6 ด้าน โดยแผ่นคู่ขนานด้านบนและล่างทำหน้าที่เป็นกราวด์เพลน โคเรชันแนลคัปเปิลอร์ มี 4 พอร์ต คือ

พอร์ตที่ 1 เป็นพอร์ตทางเข้า (Input Port)

พอร์ตที่ 2 เป็นพอร์ตคัปปลิงที่ทางเข้า (Input-Coupling Port)

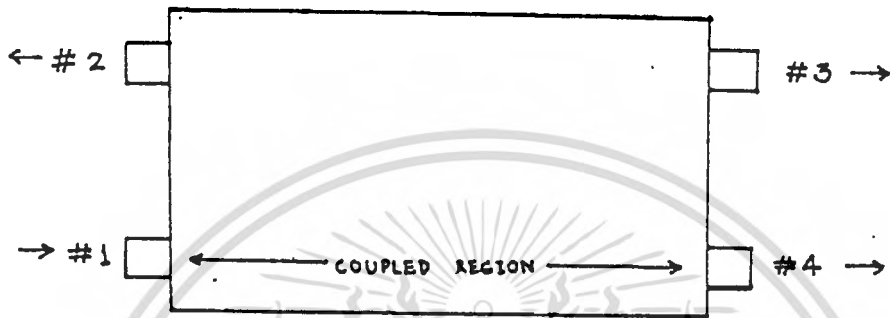
พอร์ตที่ 3 เป็นพอร์ตคัปปลิงทางออก (Output-Coupling Port)

พอร์ตที่ 4 เป็นพอร์ตทางออก (Output Port)

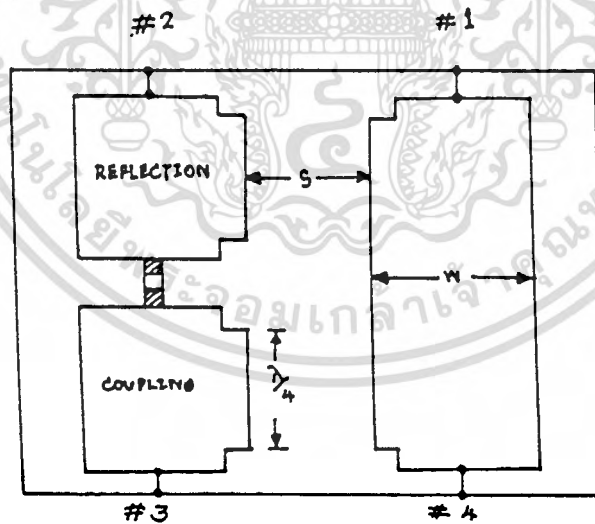
พาราเลลเพลทสตริป (Parallel Plate Stripline) โดยปกติจะใช้แผ่นสตริป 2 แผ่นวางเรียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนานในแนวเดียวกัน แต่ในโครงการนี้ต้องการวัดรีเฟลกด้วยจึงต้องใช้สตรีป 3 แผ่นซึ่ง 2 แผ่นที่วางด้านพอร์ท 2 และ 3 จะต้องมีความยาวเป็น 1/4 ของความยาวคลื่น ส่วนอีกแผ่นหนึ่งทางด้านพอร์ท 1 กับ 4 ไม่จำกัดความยาวแล้วแต่ความเหมาะสม ซึ่งลักษณะรูปแบบโคเรกชันแนลคัปเปิลอร์ แสดงดังรูป 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงพอร์ทของโคเรกชันแนลคัปเปิลอร์



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะโคเรกชันแนลคัปเปิลอร์

ถ้ากำหนดให้พลังงานที่เข้าไปยังพอร์ทที่ 1 เป็น  $P_1$  และพลังงานที่ออกจากพอร์ทที่ 2,3,4 เป็น  $P_2, P_3, P_4$  ตามลำดับแล้ว ค่าคัปปลิงและค่าโคเรกติวิตีของคัปเปิลอร์ หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{คัปปลิงแฟล็กเตอร์ (C)} = 10 \log (P_1/P_2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าโคเรคทีวิตี =  $10 \log (P2/P3)$

สำหรับคลื่นที่เดินทางในโหมด TEM จะมีทั้งสนามไฟฟ้าในโหมดคู่ (even mode) และ สนามไฟฟ้าในโหมดคี่ (odd mode) ดังนั้น ค่าอิมพีแดนซ์ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบ โครเรชันแนลคัปเปิลเลอร์จะต้องใช้ทั้งอิมพีแดนซ์ของสนามไฟฟ้าในโหมดคู่และโหมดคี่ด้วยดังสมการต่อไปนี้

$$Z_{oo} \cdot Z_{oe} = (Z_o)^2 \tag{4.1}$$

โดยมีที่มาจาก

$$E_2/E = \frac{(jC_v \sin \theta)}{(1 - C_v^2) \cos \theta + j \sin \theta} \tag{4.2}$$

$$E_4/E = \frac{1 - C_v^2}{(1 - C_v^2) \cos \theta + j \sin \theta} \tag{4.3}$$

$$C_v = \frac{(Z_{oe} / Z_{oo}) - 1}{(Z_{oe} / Z_{oo}) + 1} \tag{4.4}$$

เมื่อ  $Z_{oo}$  คือคุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ในโหมดคี่ (odd mode characteristic impedance)

$Z_{oe}$  คือคุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ในโหมดคู่ (even mode characteristic impedance)

$C_v$  คือค่าคัปปลิง (coupling coefficient)

$\theta$  คือความยาวของแผ่นสตริป

จากสมการที่ (4.2) เพื่อที่จะให้  $E_2/E$  มีค่ามากที่สุด

ดังนั้น  $\sin \theta = 1$

$\theta = \pi/2$  (ทางไฟฟ้า)

นั่นคือ ความยาวของแผ่นโลหะ (สตริปไลน์) =  $\theta$   
 =  $\pi/4$  ของความถี่คลื่นที่ใช้งาน

จากสมการที่ (4.1)

$$Z_{oo} = Z_o^2 / Z_{oe}$$

แทนลงในสมการที่ (4.4) จะได้

$$Z_{oo} = Z_o \sqrt{(1 - C_v) / (1 + C_v)} \tag{4.5}$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อแทน

$$Z_{oe} = Z_o^2 / Z_{oo}$$

แทนในสมการที่ (4.1) จะได้

$$Z_{oe} = Z_o \sqrt{(1 - C_v) / (1 + C_v)} \tag{4.6}$$

เมื่อแทนค่า  $C_v$  ลงใน (4.5) และ (4.6) ก็จะสามารถคำนวณหาค่า  $Z_{oo}, Z_{oe}$  ได้ตามลำดับ โดยค่า  $Z_{oo}$  และ  $Z_{oe}$  จะนำไปใช้ในการหาขนาดความกว้างของสตริป (w) และระยะห่างระหว่างสตริปทั้งสอง (s) ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สูตรที่ใช้คำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ในการคำนวณหาค่าอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นสตริป (s) ต่อระยะของกราวด์เพลน (b) หาได้จากสมการ

$$s/b = (1/\pi) \ln[\coth\{(94.15\pi C_v) / (\sqrt{\epsilon_r} Z_0 \sqrt{1-C_v^2})\}] \quad (4.7)$$

อัตราส่วนของความกว้างของสตริปต่อระยะกราวด์เพลนหาได้จากสมการ

$$w/b = (94.15 / \sqrt{\epsilon_r} Z_0) \sqrt{(1-C_v) / (1+C_v)} - 1/\pi \ln[2(1+e^\theta)] \quad (4.8)$$

$$\theta = -188.3\pi C_v / \sqrt{\epsilon_r} Z_0 \sqrt{1-C_v^2} \quad (4.9)$$

เมื่อ  $w/b \geq 0.35$

เมื่อ  $\epsilon_r$  คือค่าคงที่ไดเรกทิวิตีสัมพัทธ์ (relative directivity constant) ของตัวกลางระหว่างแผ่นสตริป ในที่นี้คืออากาศ ( $\epsilon_r=1$ )

ดังนั้นจากรูป 4.3 เราจะกำหนดค่า b เป็นค่าคงที่ ดังนั้น จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณหาค่า w และ s เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบสร้างคัปเปิลอร์ได้

### การท้าวแมทซิ่ง (Matching)

ในการออกแบบ ไดเรกชันแนลคัปเปิลอร์ ที่พอร์ททั้ง 4 จะต้องมี คอนเนคเตอร์ (Connector) เพื่อต่อกับสายอากาศ ซึ่งปกติมักใช้สายอากาศที่มีค่าคาแรกเตอร์อิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม แต่สำหรับแผ่นสตริปที่ออกแบบให้มีความกว้าง w นั้นอาจมีค่าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับ 50 โอห์ม จึงต้องมีการทำให้อิมพีแดนซ์แมทกัน (Matching Impedance)

ค่าอิมพีแดนซ์ของแผ่นสตริปคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Z_0 \sqrt{\epsilon_r} = 94.15 / \left[ \frac{(w/b)}{(1-t/b)} + \frac{C_f}{0.0885\epsilon_r} \right] \quad (4.10)$$

โดย

$$C_f = \frac{0.0885\epsilon_r}{\pi} \left[ \frac{2}{1-t/b} \ln\left(\frac{1}{1-t/b} + 1\right) - \left(\frac{1}{1-t/b} - 1\right) \ln\left(\frac{1}{(1-t/b)^2} - 1\right) \right] \text{ (pF/cm)} \quad (4.11)$$

ดังนั้น เมื่อแทนค่า w, b, t และ  $C_f$  ก็จะหาค่าอิมพีแดนซ์ของสตริปได้ ถ้าได้ไม่เท่ากับ 50 โอห์ม จะต้องคำนวณค่า w ใหม่ โดยแทน  $Z_0$  เท่ากับ 50 โอห์ม

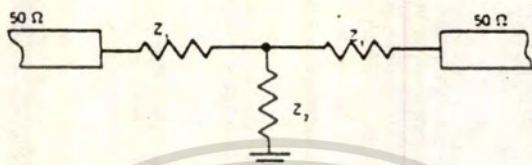
### ตัวต้านทาน (Flat Chip Resistor)

ในวงจรสตริปไลน์มักไม่ค่อยพบ ตัวต้านทานที่ต่อกันแบบอนุกรม แต่ส่วนใหญ่จะใช้ตัวต้านทานขนาด 50 โอห์มต่อชั้น (shunt) ลงกราวด์ ลักษณะของตัวต้านทานที่ใช้ในวงจรสตริปไลน์มีทั้งแบบเป็นก้อน และแบบแพ็คเกจ (package) มีหลายขนาดเช่น ตัวต้านทานขนาด 50 โอห์มที่ทำด้วยคาร์บอน จะใช้สำหรับความถี่ต่ำกว่า 1000 เมกะเฮิรตซ์ ถ้าเป็นแบบคอมเพล็กซ์ แพ็คเกจ

(Complex Package) 50 โอห์ม จะใช้กับความถี่สูงๆได้ สำหรับตัวต้านทานในวงจรสตริปไลน์มักไม่วางกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อเป็นแบบ ที (Tee) ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทาน 3 ตัว ต่ออนุกรมและขนั้ทลงกราวด์ มีลักษณะ ดังรูป 4.4

สำหรับในย่านความถี่สูงๆจะมีการลดทอนมาก ในโครงงานนี้ได้เลือกใช้ตัวต้านทานที่เป็น แพลทชิพ (Flat Chip Resistor) ซึ่งเป็นชิพขนาดเล็กมาก ดังจะสังเกตุได้จากรูปที่ 4.5



dB	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	dB	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>
1.0	2.875	433.3	16.0	26.32	16.25
2.0	5.731	215.2	17.0	37.62	14.41
3.0	8.549	141.9	18.0	38.82	12.79
4.0	11.31	104.8	19.0	39.91	11.36
5.0	14.00	82.24	20.0	40.91	10.1
6.0	16.61	66.93	21.0	43.39	7.115
7.0	19.12	55.80	25.0	44.67	5.641
8.0	21.53	47.31	26.0	45.23	5.024
9.0	23.81	40.59	27.0	45.72	4.476
10.0	25.97	35.14	30.0	46.93	3.165
11.0	28.01	30.62	35.0	48.25	1.778
12.0	29.92	26.81	40.0	49.00	1.000
13.0	31.71	23.57	45.0	49.44	0.562
14.0	33.37	20.78	50.0	49.68	0.316
15.0	34.90	18.38	55.0	49.82	0.177

รูปที่ 4.4 แสดงการต่อตัวต้านทานแบบ ที (Tee)



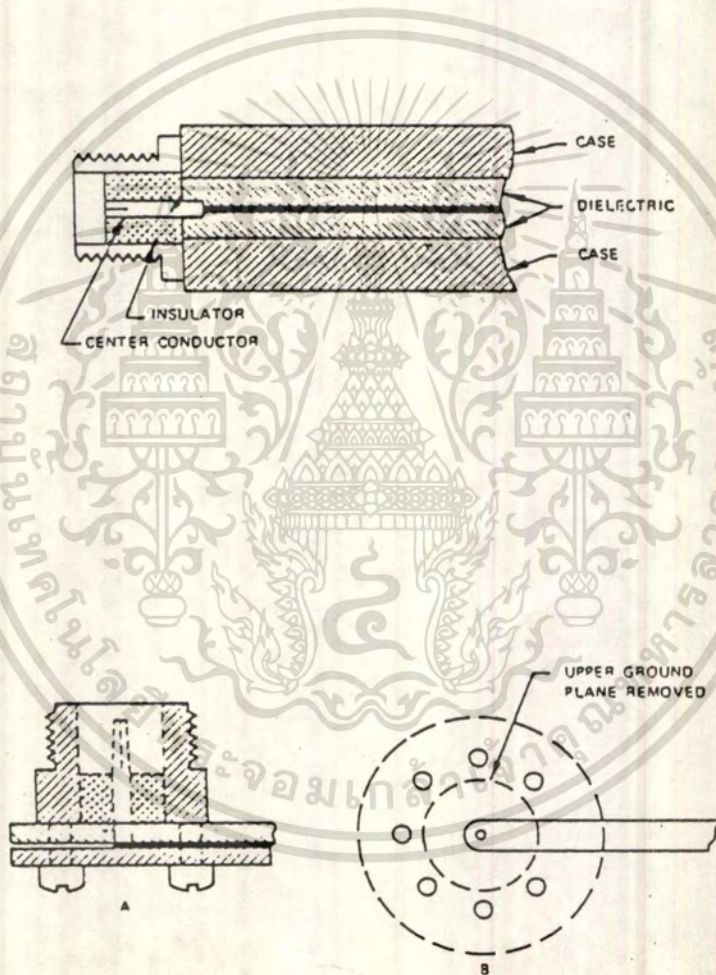
รูปที่ 4.5 แสดงชิพตัวต้านทานแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คอนเนคเตอร์ (Connector)

สำหรับการสร้างโคเรคชั่นแนล คัปเปิลเลอร์ ที่ใช้สตริปไลน์ทำหน้าที่เป็นตัวกลางส่งผ่านคลื่น แต่คลื่นที่เดินทางในสตริปไลน์ไม่สามารถส่งผ่านไปยังตัวสายอากาศ(มักใช้สายโคแอกเซียล) ได้โดยตรง อาจเนื่องจากความไม่แมทซ์ซึ่งจึงต้องใช้อุปกรณ์อินเตอร์เฟสซึ่งเรียกว่า คอนเนคเตอร์ (Connector) รูปที่ (4.6)

คอนเนคเตอร์ขนาดปกติจะใช้กับย่านความถี่ต่ำ (UHF,L-band,S-band) ถ้าใช้ในย่านความถี่สูงๆ เช่น ย่านไมโครเวฟ ,C-band และ X-band จำเป็นต้องเลือกใช้คอนเนคเตอร์ที่มีขนาดเล็กลงซึ่งมีราคาแพง



รูปที่ 4.6 แสดงภาพตัดขวางของโคแอกเซียล คอนเนคเตอร์

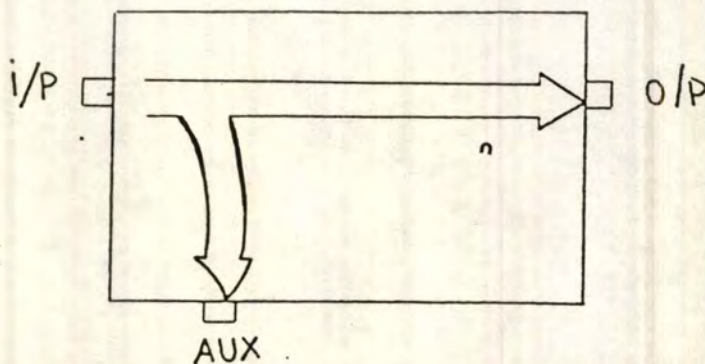
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงคอนเนคเตอร์แบบต่าง ๆ

#### การออกแบบไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์

ไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์(directional coupler) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หาค่าพลังงานที่ออกมาจากเครื่องแบ่งกำลังงาน(power divider) แต่กำลังงานที่ออกมาจาก เครื่องแบ่งกำลังงาน จะมีค่ามากถ้าต่อผ่าน เครื่องวัดกำลังงาน(power meter) จะทำให้เกิดความเสียหายแก่ เครื่องวัดกำลังงาน ได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ ไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ เนื่องจากภายใน ไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ จะประกอบด้วยพอร์ทอินพุท, พอร์ทเอาพุท, พอร์ทแขนเสริม ซึ่งพอร์ทแขนเสริมนี้จะใช้เพื่อสุ่มกำลังงานบางส่วน(ซึ่งน้อยกว่ากำลังที่เข้ามาในพอร์ทอินพุทอยู่เท่ากับค่า คัปปลิงแฟคเตอร์(coupling factor (dB)) ออกไปเพื่อต่อผ่านไปยังตัวลดทอน จากนั้นจึงต่อไปยัง เครื่องวัดกำลังงาน ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย โดยในการทดลองจะใช้ค่า คัปปลิงแฟคเตอร์ เท่ากับ 45 dB รูปที่ 4.8 ประกอบ



รูปที่ 4.8 แสดงส่วนประกอบของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์(directional coupler) โดยความเอกลักษณะเป็นอนุกรมที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่แนะนำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สัมพันธ์ระหว่างกำลังงานที่พอร์ทอินพุทกับพอร์ทแขนเสริม เขียนได้ดังนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C \text{ (dB)} = 10 \log \left[ \frac{P_{in}}{P_{aux}} \right] \quad (4.12)$$

เมื่อ C : coupling factor มีหน่วยเป็น dB

### หลักการ

โคเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ ที่ทำการดึงเอากำลังงานส่วนหนึ่งจากกำลังงานที่ผ่านเวฟไกด์หลักออกมา ซึ่งให้เลือกใช้งานตามค่าการลดทอนต่างๆ ตัวคัปเปิลเลอร์ช่วยให้สามารถทำการวัดคลื่นสัญญาณ ที่มีกำลังสูงด้วยมิเตอร์วัดกำลังต่ำได้

โคเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ มีหลายแบบ เช่น

1.แบบแขนเสริม (Auxillary arm) คือประกอบด้วยเวฟไกด์ 2 ท่อนประกบติดกัน โดยแขนเสริมจะดึงกำลังงาน ที่ส่งผ่านในท่อนตรงออกมาส่วนหนึ่ง

2.แบบ แบค-ทู-แบค (Back to back) ซึ่งใช้ประโยชน์ ในการคำนวณหาค่า การสะท้อนกลับของกำลังงานได้ ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะสร้างในแบบ แบค-ทู-แบค เพราะจำเป็นต้องวัด การสะท้อนกลับของกำลังงานหลัก ที่จะจ่ายให้กับน้ำที่ทดสอบด้วย

### การออกแบบ

เนื่องจาก กำลังงานที่ออกมาจาก หลอดแมกนีตรอน (Magnetron) ที่ความถี่ประมาณ 2450 เมกะเฮิรตซ์ มีค่าสูงมาก โดยที่เราจะนำกำลังงานที่ได้นี้ ส่งไปยังน้ำที่จะทดสอบซึ่งคอยวัดอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น เราจำเป็นต้องรู้ว่าหลอดแมกนีตรอนได้จ่ายกำลังงานมากน้อยเพียงใดจำเป็นต้องใช้โคเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ไปแยกกำลังงานส่วนหนึ่งเข้าเครื่องวัดซึ่งเครื่องวัดจะประกอบด้วยไดโอดคิเทคเตอร์ (Diode detector) โดยเมื่อป้อนอินพุตเป็นกำลังงาน จะได้เอาท์พุตเป็นกระแสตรงมีค่าน้อยๆ ในการใช้งาน จะต้องผ่านวงจรขยาย (Amplifier) ทั้งหมดรวมเรียกว่า ลอกแอมพลิฟาย์ (Log Amplifier)

ไดโอดคิเทคเตอร์ สามารถที่จะให้เอาท์พุตเป็นกระแสตรง ได้ในช่วงหนึ่ง ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องออกแบบ โคเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ให้มีค่าคัปปลิงเฟคเตอร์ (Coupling factor) ที่เหมาะสมประมาณ 45 dB เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุด

P1 และ P4 เป็นกำลังงานหลัก ที่ส่งผ่านโคเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ ซึ่งกำลังงานจะคัปปลิง ออก P3 และ P2 โดยค่าคัปปลิงเฟคเตอร์ หากจากสมการ

$$45 \text{ dB} = 10 \log (P1/P3)$$

สิ่งที่ต้องคำนึงถึง

1. กำปปลิ่งเฟคเตอร์ต้องใกล้เคียง 45 dB

ใช้สมการต่างๆ ต่อไปนี้

$$s/b = \frac{1}{\pi} \ln \left[ \coth \left\{ \frac{94.15 \pi C_v}{\sqrt{\epsilon_r} Z_o \sqrt{1-C_v^2}} \right\} \right] \quad (4.13)$$

$$w/b = \frac{94.15 \sqrt{1-C_v}}{\sqrt{\epsilon_r} Z_o \sqrt{1-C_v}} - \frac{1}{\pi} \ln [2(1+e^\theta)] \quad (4.14)$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ ดังนี้

$$-45 \text{ dB} = 10 \log C_v$$

b = ความสูงของกล่อง 2.5 เซ็นติเมตร (ระยะกราวด์เพลน)

$\epsilon_r$  = ไดอิเล็กตริก เท่ากับ 1

$Z_o$  = 50 โอห์ม

คำนวณแล้ว จะได้

s = 6.82 เซ็นติเมตร

w = 3.72 เซ็นติเมตร

2. การแมทซิ่งกันระหว่าง คอนเนคเตอร์กับโคเรกชันแนลคัปเปิลอร์

เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของแผ่นสตริปขึ้นอยู่กับ ความหนาของแผ่นสตริป (t) ความกว้างของแผ่นสตริป (w) และความสูงของกล่อง (b) ซึ่งค่า w ที่คำนวณมาได้จากหัวข้อที่ 1 ก็จะได้ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่ง ซึ่งมีค่าไม่เท่ากับอินพุทอิมพีแดนซ์ของคอนเนคเตอร์ (Characteristic impedance 50 ohm) จึงต้องทำการแมทซิ่งเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์ของแผ่นสตริปเท่ากับอิมพีแดนซ์ของคอนเนคเตอร์

โดยคำนวณจากสูตร

$$Z_o \sqrt{\epsilon_r} = \frac{94.15}{\left( \frac{w/b}{x} + \frac{C_f}{0.0885 \epsilon_r} \right)} \quad (4.15)$$

$$C_f = \frac{0.0885 \epsilon_r}{\pi} \left\{ \frac{2}{x} \ln \left( \frac{1}{x} + 1 \right) - \left( \frac{1}{x} - 1 \right) \ln \left( \frac{1}{x^2} - 1 \right) \right\} \quad (4.16)$$

$$x = 1 - t/b$$

ซึ่ง  $\epsilon_r = 1$  เพราะเดินทางในอากาศ

t = ความหนาของแผ่นสตริปที่ใช้ 1.2 มิลลิเมตร

b = 2.5 เซ็นติเมตร

w = ความกว้างของแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่า

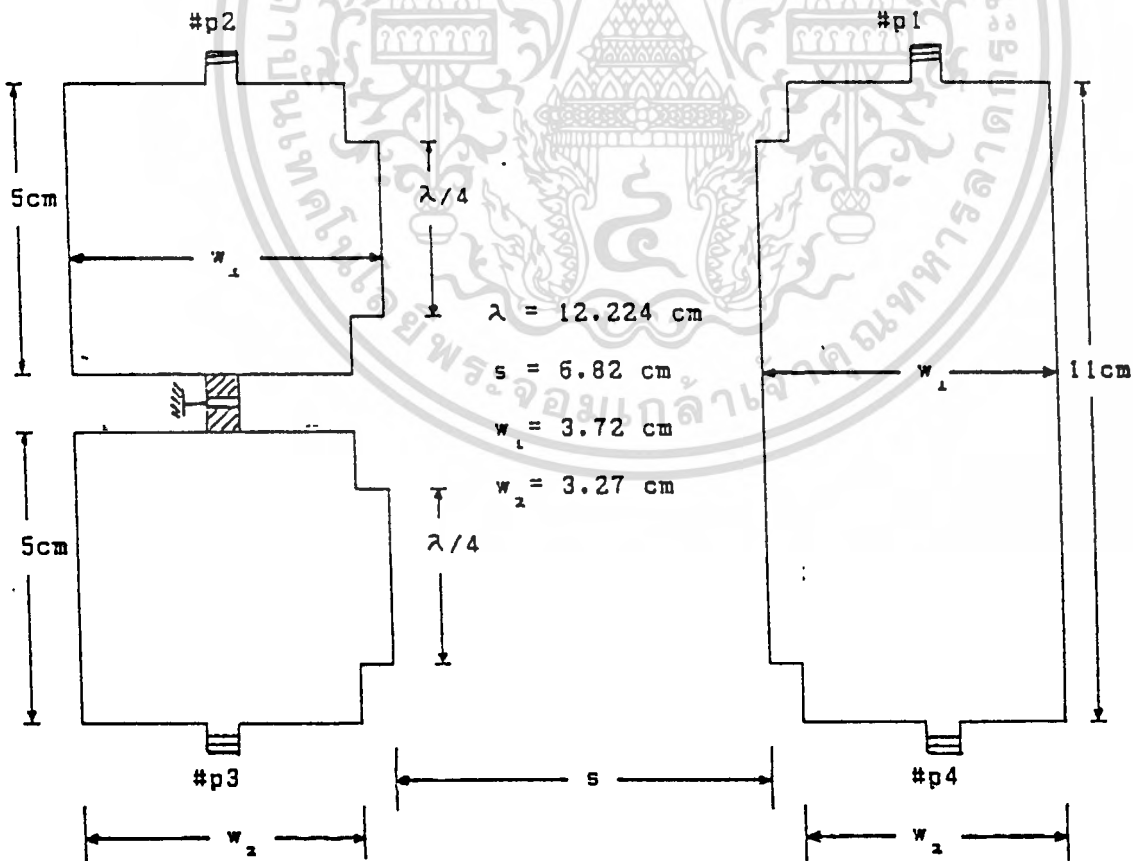
จะได้  $w = 3.273$  เซนติเมตร

ซึ่งความกว้างของแผ่นสตริปที่ได้จะเล็กกว่าความกว้างของส่วนคัปปลิง

### 3. จะต้องสามารถวัดพลังงานสะท้อนกลับได้

ดังนั้น ผู้ทดลองเลือกใช้ พาราเลล คัปเปิลเลอร์ สตริปไลน์ (Pararell couple stripline) เนื่องจาก มีอุปกรณ์ที่พร้อมที่สุด เมื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ  $s, w_1, w_2$  ได้แล้ว ทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ตัดแผ่นสตริปให้มีความกว้าง ( $w$ ) และยาวดังรูปที่ 4.9
2. พับกล่องอลูมิเนียมมีความสูง 2.5 ซม. ยาว 20 ซม. กว้าง 12 ซม.
3. เจาะช่องสำหรับต่อคอนเนคเตอร์ 4 ช่อง
4. บัดกรีตัวต้านทาน (flat chip) เข้ากับแผ่นสตริป (แผ่นที่ยาว  $\lambda/4$ ) ทำเช่นเดียวกันทั้งสองแผ่น
5. ต่อตัวต้านทานทั้งสองตัวลงกราวด์ตามรูป
6. บัดกรีแกนคอนเนคเตอร์เข้ากับแผ่นสตริป ลักษณะตามรูป 4.9



รูป 4.9 แสดงขนาดและตำแหน่งการวางแผ่นสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทดลองและผลการทดลอง

### การทดลองวัดการคับปลิ่ง

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แผ่นสตริปความหนา 1.2 มิลลิเมตร
2. กล่องอลูมิเนียมขนาด 12×20×2.5 เซ็นติเมตร
3. คอนเนคเตอร์ N-type 4 ตัว
4. ตัวต้านทาน flat chip 2 ตัว
5. เน็ตเวิร์ค อนุาไลเซอร์ (network analyzer)
6. สายโคแอกเซียล
7. ครัมมีโหลด

#### วิธีการทดลอง

1. สร้างโคเรกชันแนลคัปเปิลอร์ที่มีขนาด ตามรูปที่ 4.9
2. เปิดเครื่องและทำการเซตฟังก์ชัน เน็ตเวิร์ค อนุาไลเซอร์ (วิธีใช้ตามบทแทรกที่ 2 )
3. ทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz ป้อนอินพุตเข้าที่พอร์ต 1 แล้ววัดเอาต์พุตพาวเวอร์ที่พอร์ต 2 ในขณะที่พอร์ตที่เหลือใส่ตัวครัมมีโหลดไว้
4. เปลี่ยนมาวัด เอาต์พุตพาวเวอร์ ที่พอร์ต 3 โดยพอร์ตอื่นๆ ใส่ครัมมีโหลดไว้
5. เปลี่ยนมาวัดที่พอร์ต 4 เช่นเดียวกับข้อ 3 และ 4
6. บันทึกผลการคับปลิ่งกำลังงาน ในข้อ 3,4 และ 5
7. พิมพ์กราฟที่ปรากฏบนจอของเน็ตเวิร์ค อนุาไลเซอร์

### ผลการทดลอง

เมื่อทำการป้อนอินพุตที่พอร์ต 1 ด้วยความถี่ 2.45 GHz แล้ววัดเอาต์พุตที่พอร์ตต่าง ๆ เมื่อระดับอ้างอิงที่ 0 dB

-ที่พอร์ต 4 แสดงได้คังกราฟที่ 4.11 อ่านค่า Insertion Loss ได้ -2.967 dB ซึ่งสามารถนำมาคิด Power ได้ดังนี้ (อินพุตของหลอดแมกนีตรอนที่พอร์ต 1 = 50 W)

พอร์ต 4 ซึ่งต่อกับสายอากาศสามารถคิด Power ได้ดังนี้

$$-2.967 \text{ dB} = 10\log(P_4/P_1)$$

$$= 10\log(P_4/50\text{W})$$

$$P_4 = 25.25050 \text{ W}$$

-ที่พอร์ต 2 (Incident coupling) แสดงได้คังกราฟที่ 4.12 อ่านค่าได้ -45.177 dB

พอร์ต 2 ซึ่งต่อกับ reflectometer สามารถคิด Power ได้ดังนี้

$$-45.177 \text{ dB} = 10\log(P_2/P_1)$$

$$= 10\log(P_2/50\text{W})$$

$$P_2 = 1.5179 \text{ mW}$$

-ที่พอร์ต 3 (Directive coupling) แสดงได้คังกราฟที่ 4.13 อ่านค่าได้ -45.337 dB

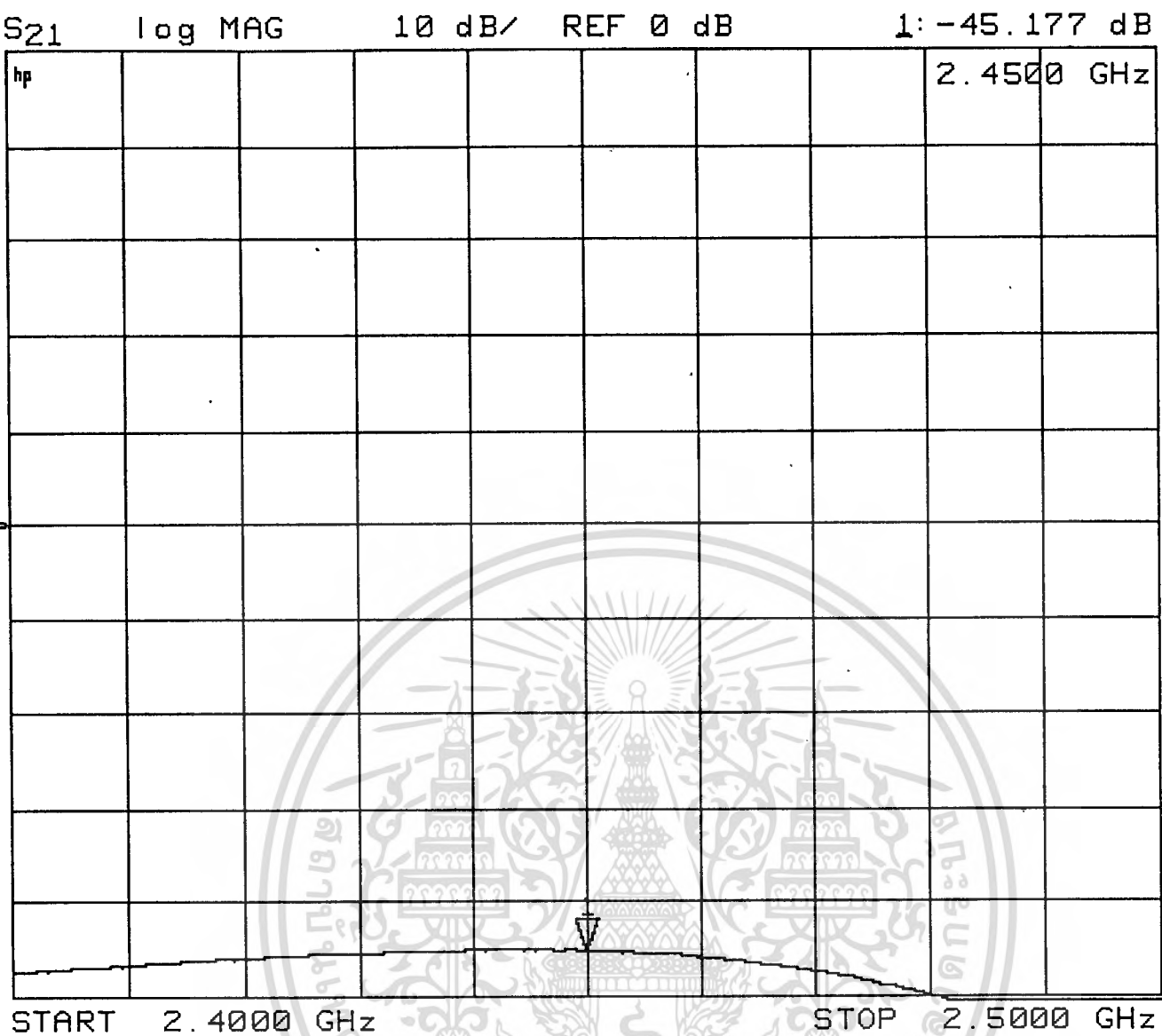
พอร์ต 3 ซึ่งต่อกับ dummy load สามารถคิด power ได้ดังนี้

$$-45.337 \text{ dB} = 10\log(P_3/P_1)$$

$$= 10\log(P_3/50\text{W})$$

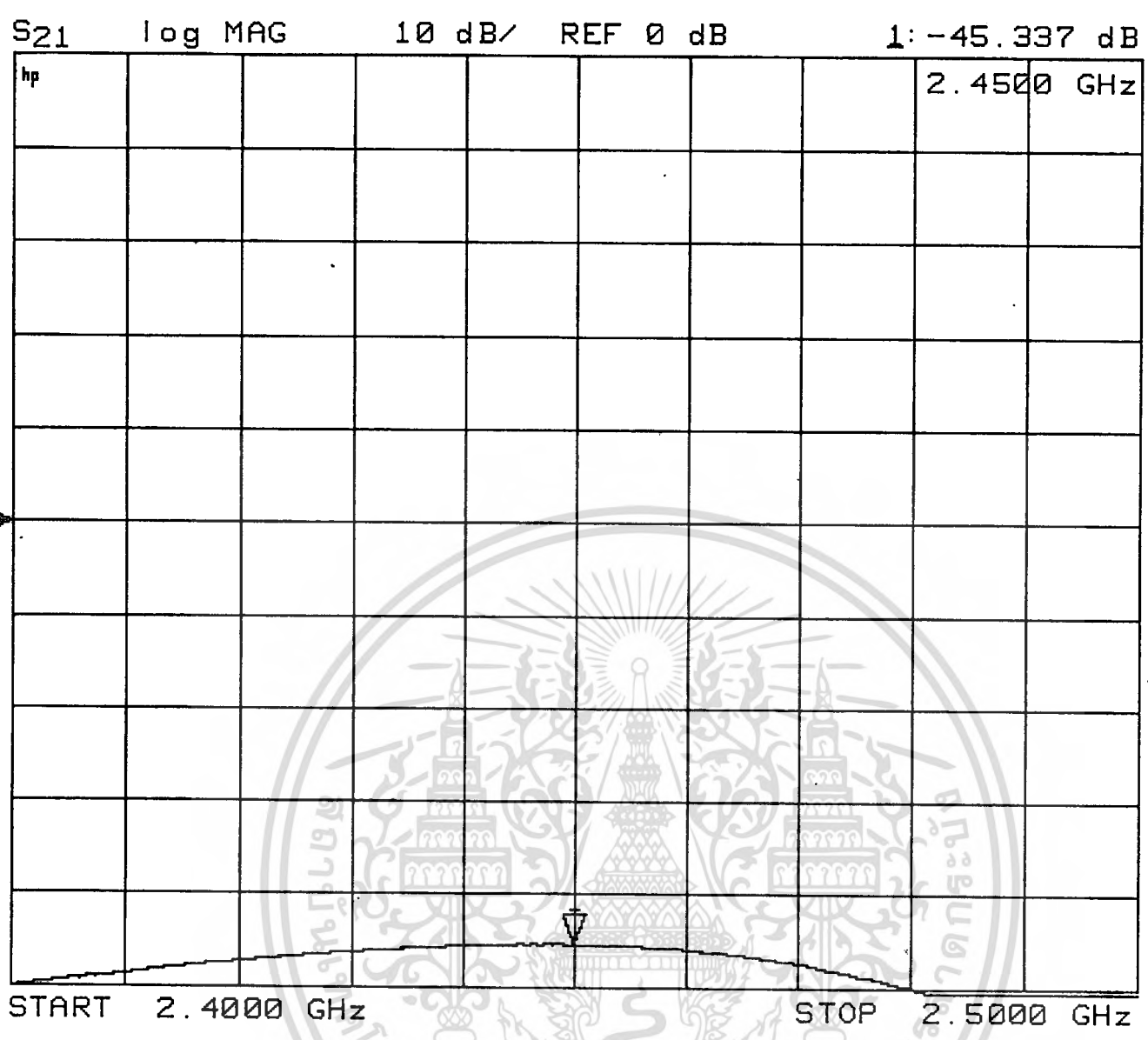
$$P_3 = 1.463 \text{ mW}$$





รูปที่ 4.12 แสดงกำลังงานที่ออกจากพอร์ตที่ 2 ของโคเรกชันแนลคัปเปิลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงกำลังงานที่ออกจากพอร์ตที่ 3 ของโคเรคชันแนลคัปเปิลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 (ก) แสดงไดเรคชันคัปเปเตอร์ แบบแผ่นขนานที่สร้างขึ้น



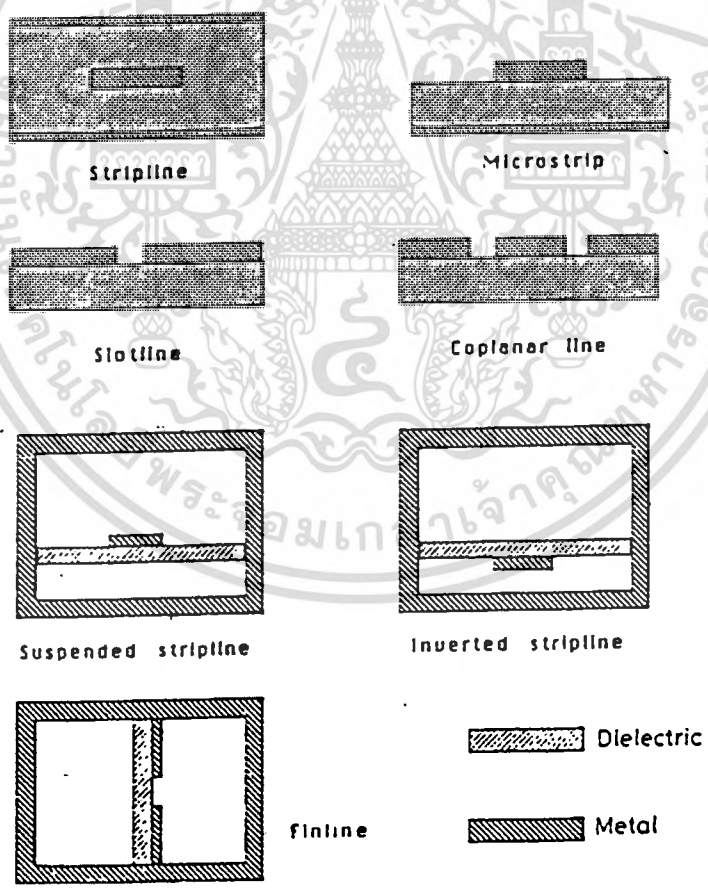
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงรูปที่ 4.10 (ข) แสดงไดเรคชันคัปเปเตอร์ แบบแผ่นขนานที่สร้างขึ้น ะโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

## ระบบวัดการสะท้อนกลับ

### สายส่งไมโครสตริป

สายนำสัญญาณหรือสายส่งสัญญาณ(Transmission Line) ทำหน้าที่เป็นสื่อกลางในการนำ พาคืนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) จากที่แห่งหนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง สายส่งสัญญาณ อาจจะใช้เป็นแท่งตัวนำชิ้นเดียวจางพวกท่อนำคลื่น (Wave Guide) หรือ พวงสายโคแอกเซียล (Coaxial) สายส่งสัญญาณเหล่านี้ มักมีน้ำหนักมาก เทอะทะ ขาดต่อการต่อกับอุปกรณ์ที่เป็นตัว เดี่ยว (discrete component) ได้แก่ ไดโอด ทรานซิสเตอร์ ซึ่งต้องใช้ในการออกแบบเป็นอย่างดี (ปกติมักใช้ท่อนำคลื่นในกรณีพิเศษ เช่น สำหรับกำลังสูงๆ หรือที่ความถี่สูงมากๆ) กรณีที่ว่างๆ ไป สามารถใช้แทนด้วยสายส่งแบบแผ่นระนาบ (planar lines) ชนิดต่างๆ ดังรูป 5.1

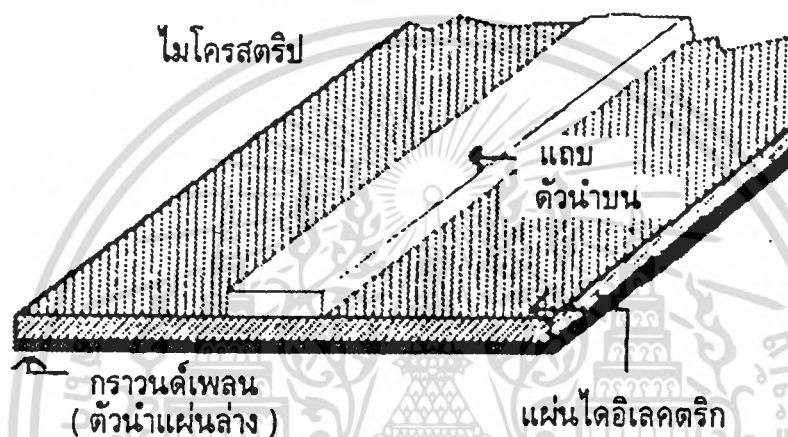


รูปที่ 5.1 สายส่งแบบแผ่นระนาบแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายส่งไมโครสตริป (Microstrip Transmission Line) เป็นสายส่งสัญญาณย่านไมโครเวฟ (Microwave) (ครอบคลุมความถี่ 300 MHz ถึง 300 GHz) และโดยเฉพาะอย่างยิ่งนำไปใช้งานในระบบจ่ายสัญญาณให้สายอากาศ (Antenna Feed System) บนแผ่นวงจรไมโครเวฟขนาดเล็ก หรือ MICs (Microwave Integrated Circuit) ซึ่งส่วนใหญ่ที่พบเห็นกันก็คือ แถบที่ติดอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit) ของอุปกรณ์ไมโครเวฟ

สายไมโครสตริปประกอบด้วยแผ่นกราวด์เพลน 1 แผ่น แผ่นไดอิเล็กตริก และแถบตัวนำ ซึ่งเป็นส่วนบนของสายอากาศ ดังรูป 5.2



รูปที่ 5.2 สายส่งไมโครสตริป

จะเห็นได้ว่า สายส่งชนิดนี้เป็นสายส่งที่ไดอิเล็กตริกไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogenous) และสนามจะกระจายอยู่ทั้งในแผ่นไดอิเล็กตริกและอากาศ ซึ่งความเร็วการเดินทางของคลื่นระนาบ (plane wave) ในตัวกลาง 2 ชนิด มีค่าแตกต่างกัน

เนื่องจากโครงสร้างของไมโครสตริปไม่มีการป้องกัน (shield) สัญญาณ ทำให้มีการสูญเสียเนื่องจากการแผ่กระจายคลื่นออกไป (Radiation Loss) นอกเหนือจากการสูญเสียตามปกติ แต่ข้อดีของไมโครสตริปคือ สามารถนำมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำบนแผ่นวงจรได้ง่ายและสะดวกต่อการทำการแมตชิ่ง (Matching) ระหว่างอุปกรณ์ในวงจร ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ามีความคล่องตัวในการใช้งาน

ในการศึกษาถึงโครงสร้างและทฤษฎีเพื่อนำมาออกแบบและสร้างสายส่งไมโครสตริปเพื่อนำไปใช้เป็นสายนำสัญญาณไมโครเวฟ ในส่วนของการคำนวณและการสร้างสายส่งต้องใช้ความละเอียดสูงเพื่อลดข้อผิดพลาดต่างๆที่อาจเกิดขึ้นอีกทั้งการสร้างสายส่งไมโครสตริปลงบน

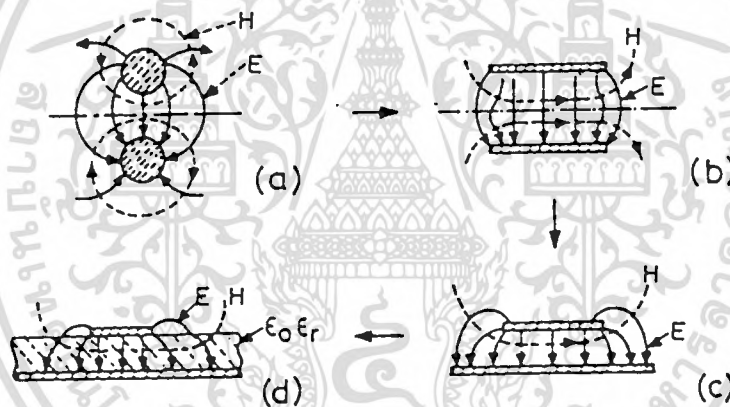
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นวงจรพิมพ์ ถ้าวงจรที่นำมานั้นไม่เป็นไปตามขนาดที่ออกแบบไว้จะต้องสร้างใหม่ทั้งหมด ฉะนั้นจึงควรมีความแม่นยำในการสร้าง

สายส่งไมโครสตริปที่ใช้นี้ทำจากแผ่นวงจรพิมพ์โดยตัวนำทั้งคู่เป็นแผ่นทองแดง และแผ่นไดอิเล็กตริกนั้นทำด้วยสารอีพอกซี (Epoxy) ซึ่งหาได้ง่าย ราคาไม่แพง

### รูปแบบของสนามและพารามิเตอร์ต่างๆ

ไมโครสตริปเป็นสายส่งที่มีสองตัวนำ โดยที่เราเริ่มพิจารณาการกระจายสนามในสายส่งคู่ขนาน ดังแสดงในรูป 5.3 การแปลงรูปจาก (a) เป็น (b) เป็นการเปลี่ยนรูปร่างตัวนำจาก (b) เป็น (c) จะเปลี่ยนเป็นแผ่นตัวนำที่วางในระนาบสมมาตร และสุดท้ายตามรูป (d) มีการแทรกแผ่นไดอิเล็กตริกบางๆ ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง และในขั้นตอนสุดท้ายนั้นจะทำให้ตัวกลางไดอิเล็กตริกของสายส่งชนิดนี้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 5.3 การกระจายสนามของไมโครสตริปโดยแปลงจากสนามของสายคู่ขนาน

สายส่งไมโครสตริปนั้นแตกต่างจากสายส่งชนิดอื่น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสตริปไลน์ (stripline) มีข้อแตกต่างที่สังเกตได้คือ โครงสร้างไมโครสตริปเป็นแบบเปิดด้านบน ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ทำให้สะดวกต่อการนำไมโครสตริปไปใช้ในวงจรรวมไมโครเวฟ ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้ติดตั้งหรือวางอุปกรณ์ที่เป็นชิ้น และด้วยการปรับแต่งเพียงเล็กน้อยก็สามารถนำมาใช้งานได้หลังจากที่วงจรถูกสร้างขึ้น แม้ว่าจะมีข้อได้เปรียบดังกล่าว แต่โครงสร้างที่เป็นแบบเปิดของไมโครสตริปทำให้เกิดความซับซ้อนในการวิเคราะห์และออกแบบ

## การลดทอนไมโครสตริป

### การสูญเสียในสายส่งมี 3 ชนิด คือ

-การสูญเสียภายในแถบตัวนำ (Ohmic Loss) เนื่องจากค่าความนำที่มีจำกัดของโลหะตัวนำ ค่าการสูญเสียนี้จะเพิ่มขึ้นโดยการเกิดชั้นยึดเกาะระหว่างแผ่นไดอิเล็กตริกกับแถบตัวนำอีกทั้งความขรุขระของผิวจะเพิ่มค่าลดทอน สำหรับไมโครสตริป ค่าการสูญเสียชนิดนี้ประมาณ โดย Janssen

$$\alpha_c \cong \frac{R_s}{Z_0 W} \quad (\text{Np/m}) \quad (5.1)$$

ซึ่งค่า  $\alpha_c$  คือค่าการสูญเสียภายในแถบตัวนำ

$R_s$  คือความต้านทานพื้นผิวของแถบตัวนำ (Surface Resistivity)

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad (5.2)$$

-การสูญเสียในแผ่นไดอิเล็กตริก (Dielectric Loss) เกิดขึ้นจากพลังงานที่กระจายหายไป ในแผ่นไดอิเล็กตริก ซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่าคงที่การสูญเสียของไดอิเล็กตริก นั้น (Dielectric Loss Factor)  $\tan \delta$  (Loss Tangent) ของไดอิเล็กตริกในไมโครสตริป ค่าการสูญเสียมีค่า

$$\alpha_d \cong \frac{\pi \epsilon_r (\epsilon_r - 1) \tan \delta}{\lambda_0 \sqrt{\epsilon_r (\epsilon_r - 1)}} \quad (\text{Np/m}) \quad (5.3)$$

สำหรับแผ่นไดอิเล็กตริกของไมโครสตริปส่วนใหญ่ ค่าความสูญเสียในตัวนำจะมีค่ามากกว่าค่าความสูญเสียในแผ่นไดอิเล็กตริกอย่างเห็นได้ชัด ยกเว้นแผ่นที่ทำจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) บางชนิด

-การสูญเสียที่เกิดจากการแผ่กระจาย (Radiation Loss) การเดินทางของคลื่นในสายส่งเส้นตรงที่มีความยาวจำกัดในโหมดหลักนั้น จะไม่มีการแพร่กระจายคลื่น อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่งซึ่งเกิดความไม่ต่อเนื่องของสายจะเกิดโหมดอันดับสูงขึ้น (High Order Modes) ทำให้สัญญาณบางส่วนเกิดการแผ่กระจาย

**หลักการออกแบบการหาค่าเพอร์มิททีฟของแผ่นไดอิเล็กทริก**

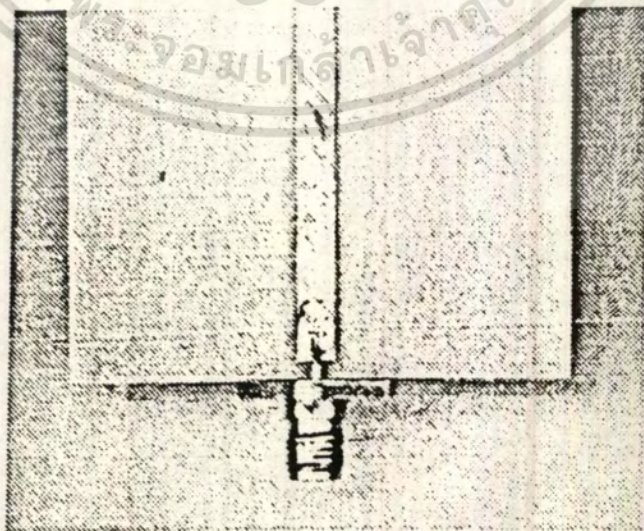
**1. การหาค่าเพอร์มิททีฟของแผ่นไดอิเล็กทริก**

1. ออกแบบสร้างสายส่งไมโครสตริปที่มีแถบตัวนำบน กว้าง (W) 4.01583 มม. (158/1000 นิ้ว) แผ่นไดอิเล็กทริกหนา (H) 0.965 มม. ขนาดแผ่นวงจรมิเตอร์เป็น 2x2 ตารางนิ้ว ได้ตามวงจรถามรูป



รูปที่ 5.4 แสดงการออกแบบสายส่งไมโครสตริปที่มีแถบตัวนำกว้าง 4.01583 มม.

2. วัดค่าคาบเรคเตอร์สติกอิมพีแดนซ์ของสายโดยใช้วิธีตัด-เปิดวงจรปลายสายแสดงสมการดังบทแทรกที่ 1 ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวัดค่าอิมพีแดนซ์ ที่ความถี่ประมาณ 2.45 Ghz การวางตัวเชื่อม (Connector) แสดงดังรูป 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงการวางคอนเนคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดครั้งที่ 1	วัดได้	$Z_r=3.11-15.86j$	โอห์ม
		$Z_r=0.05+56.7j$	โอห์ม
		$Z_o=30.2719 \angle 5.52194$	โอห์ม
วัดครั้งที่ 2	วัดได้	$Z_r=2.66-15.74j$	โอห์ม
		$Z_r=0.006+57.6j$	โอห์ม
		$Z_o=30.3229 \angle 4.75308$	โอห์ม

3. ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่มักต้องการทราบค่าอัตราส่วน  $W/h$  จากค่า  $Z_o$  กระบวนการย้อนกลับของการสังเคราะห์ หากจากการเฉลี่ยของการประมาณนิพจน์ (ความผิดพลาดใน 1%) หาโดย Wheeler ,[1],[2],[11]

สำหรับ  $\frac{W}{h} \leq 2$

$$\frac{W}{h} \cong \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \tag{5.4}$$

เมื่อ  $A = \frac{2\pi}{\eta} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.25 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$

สำหรับ  $\frac{W}{h} \geq 2$

$$\frac{W}{h} \cong \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \tag{5.5}$$

เมื่อ  $B = \frac{\pi\eta}{2Z_o\sqrt{\epsilon_r}}$

โดยเราหาค่าเพอร์มิททิวิตี จาก (5.5)  $\frac{W}{h} \geq 2$

โดยใช้ค่า  $Z_o, \frac{W}{h} = 4.1615$

เมื่อวัดครั้งที่ 1 ได้  $\epsilon_r = 4.22432$

เมื่อวัดครั้งที่ 2 ได้  $\epsilon_r = 4.20893$

โดยที่เราใช้ค่าเฉลี่ยของทั้ง 2 ครั้ง จะได้ค่าเพอร์มิททิวิตี  $\epsilon_r = 4.2166$

2. สร้างสายส่งไมโครสตริปที่มีค่า  $Z_o = 50$  โอห์ม ที่ความถี่ 2.45 GHz

1. กำหนดหาค่าความกว้าง (W) ของแถบตัวนำ จากข้อมูลของสารไดอิเล็กตริก (อีพอกซี) ของแผ่นวงจรพิมพ์และคาเรคเตอร์สติกอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสร้าง มีดังนี้

$Z_o = 50 \text{ ohm}$

$h = 0.965 \text{ mm.}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\epsilon_r = 4.2166$$

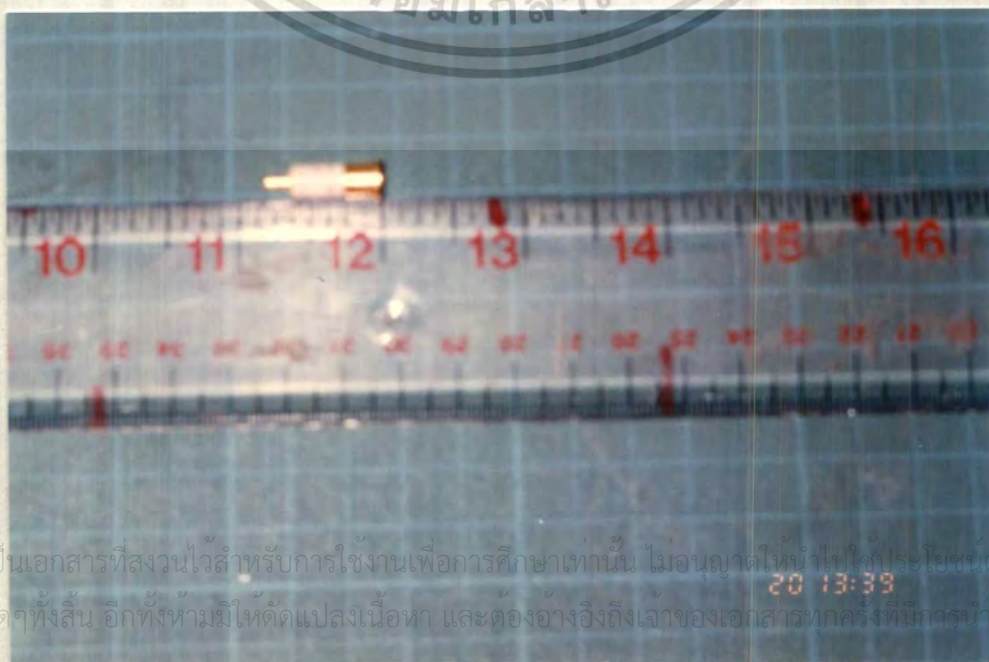
แทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการ (5.4) จะได้ค่า  $W = 1.9043$  มม. (ประมาณ  $75/1000$  นิ้ว ซึ่งมีค่า  $1.90624$  มม.) จะได้ลายวงจรดังรูป 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงการออกแบบสายส่งไมโครสตริปที่มีแถบค้วนำกว้าง  $1.9043$  มม.

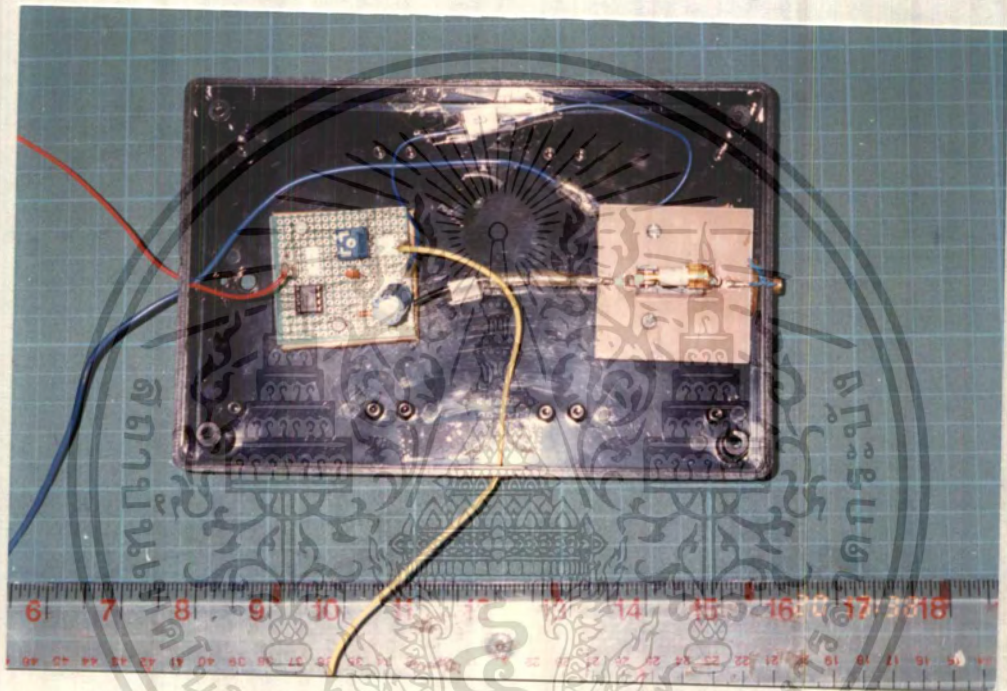
2. สร้างสายส่งบนแผ่นวงจรพิมพ์ และวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ความถี่  $2.45$  GHz ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายซึ่งทำการ Calibrate แบบ Full 2-port (บทแทรกที่ 2)

ซึ่งสามารถวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง วัดได้  $44.912 + 5.0879j$  โอห์ม จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้ใกล้เคียง  $50$  โอห์ม ซึ่งสามารถนำสายส่งสัญญาณแบบ ไมโครสตริปที่สร้างขึ้นได้นี้ มาต่อเข้ากับไดโอด ซึ่งมีลักษณะดังรูป 5.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20 13:39



รูปที่ 5.9 แสดงไดโอดและวงจรขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อพอร์ต 2 ของไครเรชันแนลคัปเปิลเลอร์เข้ากับเครื่องวัดการสะท้อนกลับ

จากหลักการของไครเรชันแนลคัปเปิลเลอร์ที่กล่าวมาแล้วนั้น เราจะนำส่วนของเครื่องมือวัดการสะท้อนกลับมาต่อเข้า เพื่อคิดและขยายสัญญาณที่ได้มาจากไครเรชันแนลคัปเปิลเลอร์

เครื่องมือวัดการสะท้อนกลับ(Reflecto meter) ประกอบด้วยไดโอดซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนเอาท์พุทของไครเรชันแนลคัปเปิลเลอร์ที่มีสัญญาณ AC ให้เป็น DC และส่วนวงจรขยายซึ่งจะเป็นส่วนขยายสัญญาณที่ได้มาจากไดโอดคือเทคเตอร์

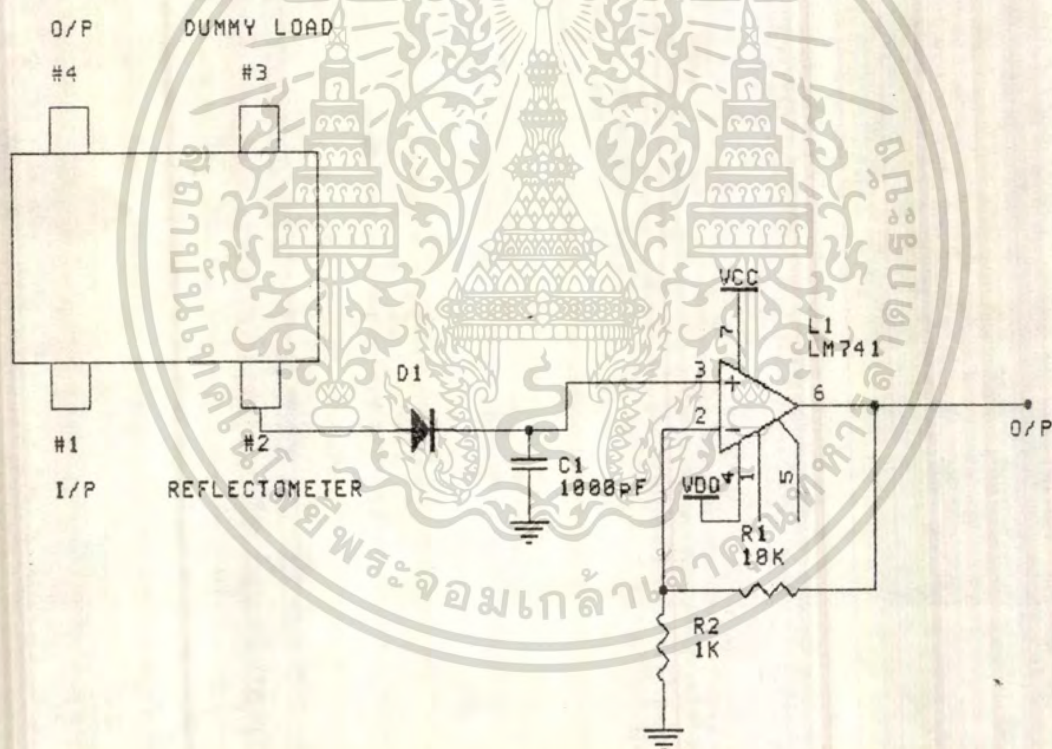
จากรูป 5.8 แสดงวงจรพอร์ตต่างๆของไครเรชันแนลคัปเปิลเลอร์จะต่อเข้ากับส่วนต่างๆดังนี้

พอร์ต 1 ต่อเข้ากับสัญญาณเอาท์พุทที่ออกมาจากหลอดแมกนีตรอน

พอร์ต 2 ต่อเข้ากับเครื่องมือวัดการสะท้อนกลับ

พอร์ต 3 ต่อเข้ากับ dummy load

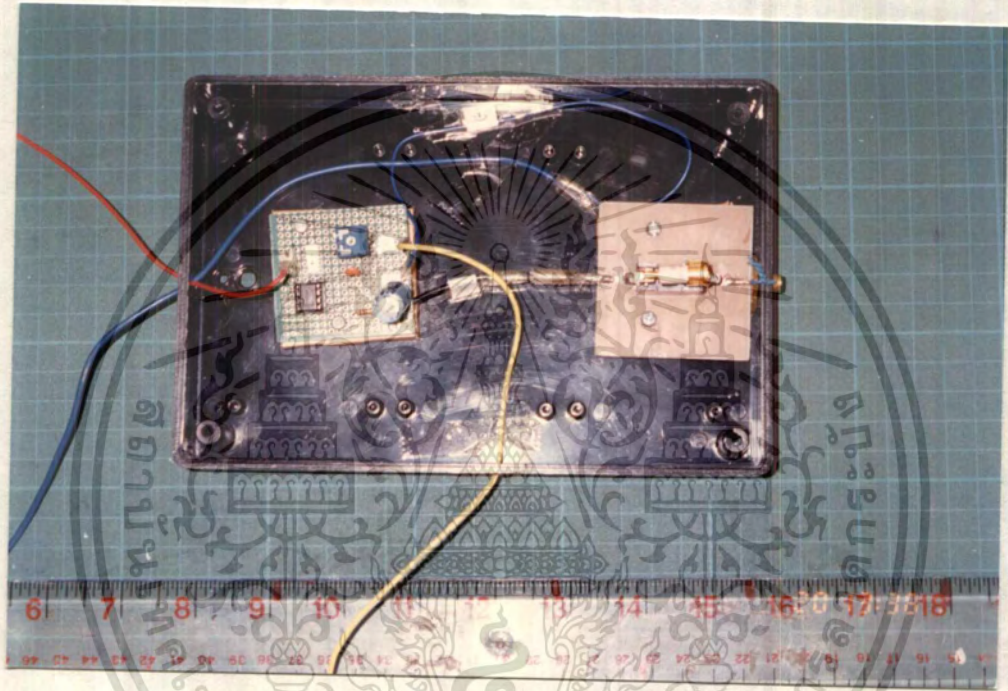
พอร์ต 4 ต่อเข้ากับสายอากาศปล่องคลื่น



รูปที่ 5.8 แสดงการต่อไครเรชันแนลคัปเปิลเลอร์พอร์ต 2 เข้ากับไดโอดและวงจรขยาย

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการต่อพอร์ต 2 ของไครเรชันแนลคัปเปิลเลอร์เข้ากับไดโอดคือเทคเตอร์ โดยมีการนำสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่เราออกแบบขึ้นนี้มาใช้ต่อกับไดโอดซึ่งสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงๆ โดยในโครงการของเราที่กำหนดความถี่ไว้ที่ 2.45 GHz ซึ่งไดโอดจะทำการคิดเทคสัญญาณให้ได้เป็น DC และสัญญาณ DC ที่ได้นี้จะส่งเข้าสู่วงจรขยายซึ่งใช้ IC เบอร์ LM 741

เอกสารนี้เป็นเอกสารส่วนบุคคลไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางผู้จัดทำ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ



รูปที่ 5.9 แสดงไดโอดและวงจรถยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

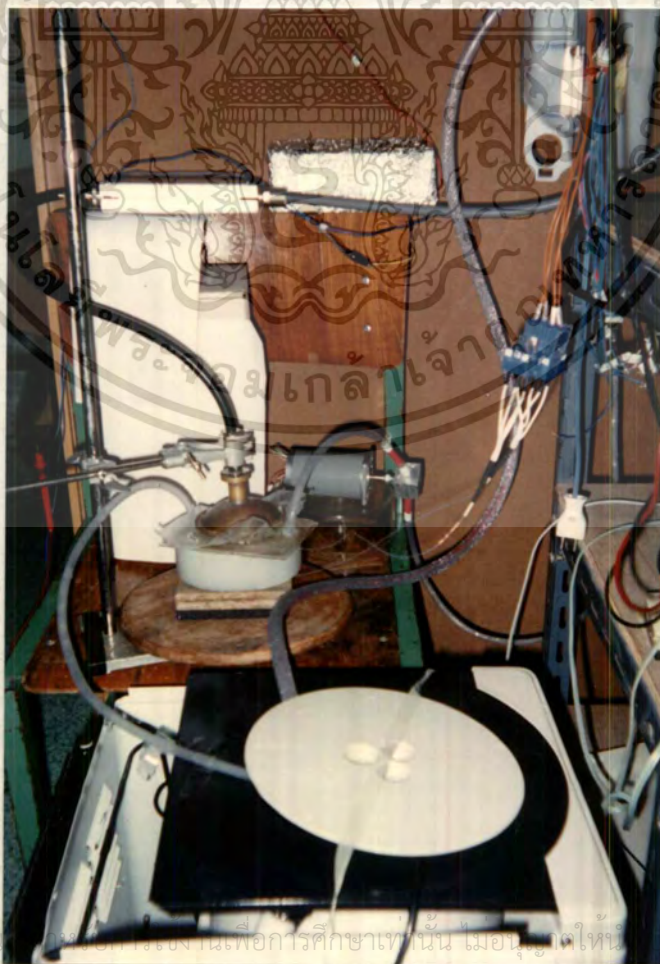
## บทที่ 6

### ระบบน้ำไหลเวียน (Cooling System)

คลื่นไมโครเวฟที่ออกจากสายอากาศแบบสล็อตอาร์เรย์ จะผ่านถุงน้ำระบายความร้อน (bolus) ซึ่งมีลักษณะแบนตรงกลาง ทั้งนี้เพื่อให้ แมทซิง (matching) กับสายอากาศ จุดโฟกัสของคลื่นอยู่ที่ภายในเนื้อเยื่อ ณ ความลึกประมาณ 3 เซนติเมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่เราต้องการให้ความร้อน หรือ สมมติเป็นบริเวณเซลล์มะเร็งนั่นเอง ส่วนบริเวณผิวซึ่งตรงกับรูสล็อต จะมีความเข้มของสนามของคลื่นไมโครเวฟสูงมาก ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิสูงมาก เราจำเป็นต้องใช้ระบบถุงน้ำระบายความร้อน ระบบน้ำไหลเวียนถูกนำมาเพื่อใช้ระบายความร้อนที่บริเวณผิว

ส่วนประกอบและอุปกรณ์ในระบบน้ำ (ตามรูปที่ 6.1)

1. ป้อนน้ำ ขนาด  $7\text{cm} \times 6.3\text{cm} \times 5.0\text{cm}$
2. เครื่องทำความเย็น
3. stepping motor



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ในประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.1 แสดงระบบน้ำไหลเวียน (Cooling System)

4. ถุงน้ำ (bolus)
5. วาล์ว
6. ท่อหด
7. โปรแกรมควบคุมการทำงานของ stepping motor
8. สายยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม.

เนื่องจาก phantom มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและนำความร้อนคล้ายเนื้อเยื่อของมนุษย์ ดังนั้นในห้องทดลองเราจึงใช้การฉายคลื่นไมโครเวฟไปยังเนื้อเยื่อจำลอง (phantom) แทนเนื้อเยื่อของมนุษย์จริงๆ (วิธีการสร้างเนื้อเยื่อจำลอง ดังปรากฏในบทแทรกที่ 3 )

น้ำที่ไหลเวียนอยู่ในระบบปิดกล่าวคือ น้ำที่อยู่ในเครื่องทำความเย็นซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  จะถูกปั๊มขึ้นไปเก็บพักในถัง จากนั้นน้ำจะไหลเวียนในสายยาง ซึ่งจะมีวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำอยู่ด้วยและผ่านถุงน้ำ (bolus) ซึ่งวางอยู่บน phantom โดยคลื่นจากสายอากาศจะผ่านถุงน้ำไปยัง phantom และน้ำที่ไหลออกจากถุงน้ำจะถูกนำกลับไปหมุนเวียนในระบบอีกครั้ง ที่เครื่องทำความเย็น

#### การควบคุมอัตราการไหลของน้ำ

เนื่องจาก อุณหภูมิบริเวณผิว โดยเฉพาะบริเวณที่ตรงกับรูสล็อตจะสูงมาก ดังนั้นน้ำที่ไหลเวียนในถุงน้ำจะเป็นตัวระบายความร้อนออกไป เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิที่ผิวไม่ให้สูงเกินไป ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อเซลล์อื่น ที่ไม่เป็นมะเร็ง

ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้เปลี่ยนไปตามกำลังงานที่จ่ายจากสายอากาศ และระยะเวลาที่ปล่อยคลื่น ดังนั้นอัตราการระบายความร้อนอาจจะเป็นไปได้ 2 วิธีคือ

#### วิธีที่ 1

ใช้วิธีการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ กล่าวคือ ถ้าตรวจจับได้ว่าอุณหภูมิบริเวณผิวสูงมาก ก็จะลดอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนลง และในทางตรงกันข้าม เช่นถ้าอุณหภูมิต่ำลงเป็น  $35^{\circ}\text{C}$  ใช้อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียน  $13^{\circ}\text{C}$  และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น  $38^{\circ}\text{C}$  ก็จะลดอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนลงเป็น  $8^{\circ}\text{C}$  แต่วิธีนี้กระทำได้ยากในทางปฏิบัติ เราจึงใช้วิธีที่ 2 แทน คือ

#### วิธีที่ 2

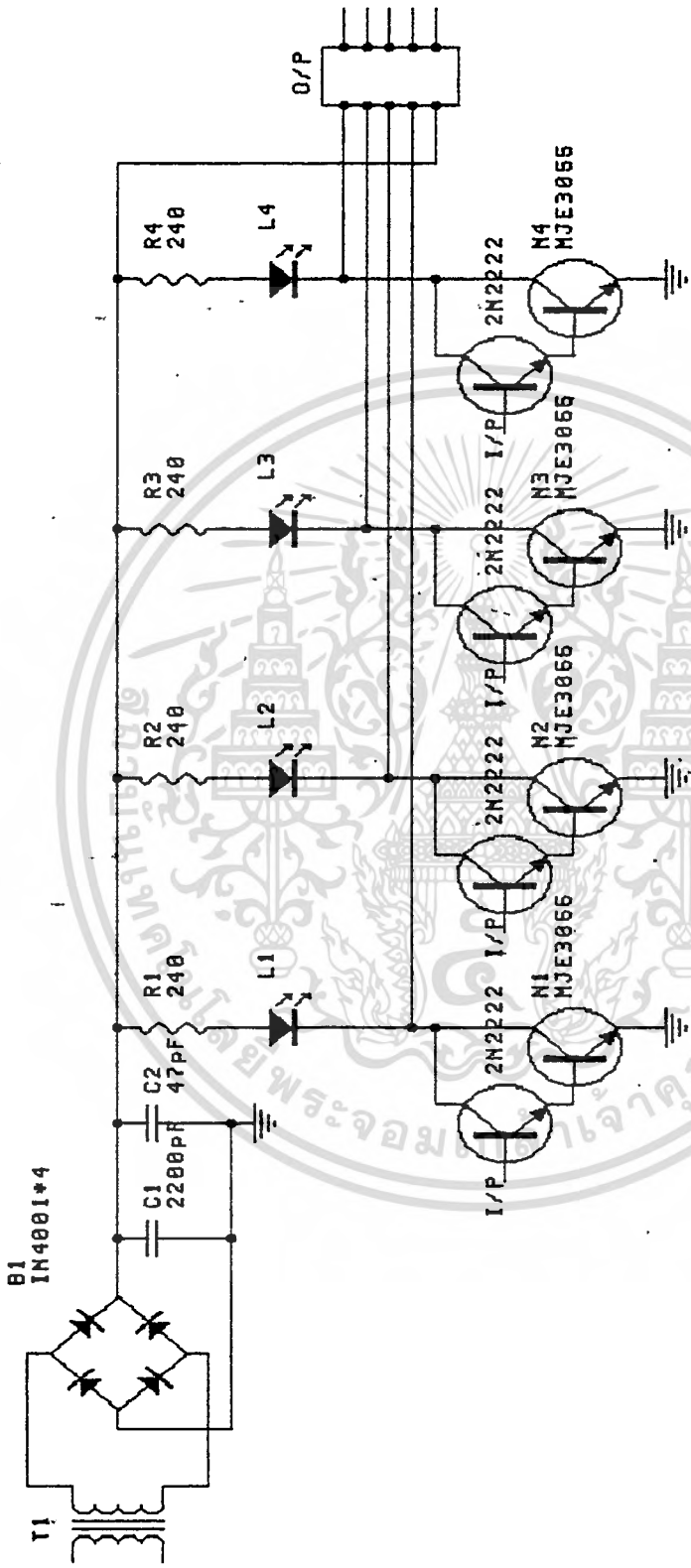
ใช้วิธีปรับอัตราการไหลของน้ำ โดยใช้อุณหภูมิของน้ำคงที่ประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  การควบคุมอัตราการไหลของน้ำ ทำได้โดยปรับวาล์วซึ่งจะปรับขนาดของท่อให้เปิด ปิด มากน้อยตามอุณหภูมิที่ตรวจจับได้ วาล์วจะถูกควบคุมการเปิด ปิด โดย Stepping motor ซึ่งมีโปรแกรมควบคุม

คุมการทำงานอีกชั้นหนึ่ง โดยโปรแกรมจะรับค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากวงจรที่ต่ออยู่กับเทอร์โมคัปเปิล โปรแกรมจะทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่รับได้กับอุณหภูมิที่ได้กำหนดไว้ โดยผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองจะเป็นตัวควบคุมการหมุนของ stepping motor และจะสัมพันธ์กับการเปิด-ปิดวาล์วน้ำ ซึ่งจะให้อัตราการไหลของน้ำเป็นไปตามที่ต้องการ โดยถ้าอุณหภูมิของผิวของ Phantom สูงเกินไป วาล์วจะเปิดกว้างทำให้อัตราการไหลของน้ำจะเร็วขึ้นเพื่อช่วยในการระบายความร้อนจากผิวของ Phantom ถ้าอุณหภูมิของผิว Phantom ต่ำกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิที่กำหนดไว้ วาล์วน้ำจะปิดทำให้น้ำหยุดไหล

การไหลของน้ำจะเป็นระบบปิดโดยที่น้ำที่ไหลผ่านถุงน้ำออกมาซึ่งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะถูกนำมาผ่านเครื่องทำความเย็น ซึ่งจะทำให้น้ำมีอุณหภูมิต่ำลง และจะนำกลับไปใช้ในการระบายความร้อนอีก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



วงจรขับ Stepping Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### ผลการทดลอง

การทำงานของระบบการวัดอุณหภูมิ เป็นการใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิของเนื้อเยื่อที่ต้องการวัด จากนั้นเทอร์โมคัปเปิลจะกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าที่มีค่าแปรผันตามอุณหภูมิขึ้นมา นำมาผ่านวงจรขยายสัญญาณ จากนั้นก็ส่งไปยังคอมพิวเตอร์โดยผ่าน การ์ด A/D สัญญาณไฟฟ้าที่ส่งออกจากวงจรขยายสัญญาณมีหน่วยเป็นโวลต์ เมื่อสัญญาณไฟฟ้าผ่านการ์ด A/D จะเกิดค่าคงที่ขึ้นมาโดยแปรผันตามสัญญาณไฟฟ้าที่เข้ามา ดังในตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าที่ได้รับจากการ์ด A/D ซึ่งนำมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 7.1 ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงจึงต้องมีการปรับเทียบอุณหภูมิกับค่าที่ได้จาก การ์ด A/D เพื่อให้การแสดงผลของคอมพิวเตอร์ออกมาเป็นอุณหภูมิที่ทำการวัดดังในตารางแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดโดยเทอร์โมมิเตอร์กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์ ซึ่งนำมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 7.2

ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าที่ได้รับจากการ์ด A/D

อุณหภูมิ	CH 1	CH 2	CH 3	CH 4
20	54	55	59	55
25	66	69	72	68
30	79	82	84	82
35	101	104	107	104
40	111	114	117	115
45	124	127	131	128
50	137	141	145	141
55	150	154	157	154
60	167	171	174	172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัด โดยเทอร์โมมิเตอร์กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์

CHANNEL 1

อุณหภูมิจริง ( °C)	อุณหภูมิที่ได้จากคำนวณ ( °C)	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาด (%)
39	38.42	1.4871
40	39.55	1.1250
41	40.67	0.8048
42	41.43	1.3570
43	42.92	0.1860
44	43.68	0.7272
45	44.80	0.4440
46	46.30	0.6521
47	46.67	0.7021
48	47.80	0.4166
49	48.93	0.1428
50	50.80	1.600
51	51.18	0.0918

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CHANNEL 2

อุณหภูมิจริง (°C)	อุณหภูมิที่ได้จากคำนวณ (°C)	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาด (%)
39	38.48	1.3330
40	39.57	1.0750
41	40.30	1.7070
42	41.75	0.5950
43	42.84	0.3720
44	43.93	0.1590
45	45.02	0.0440
46	45.38	1.3478
47	46.83	0.3610
48	47.56	0.9160
49	49.37	0.7550
50	50.46	0.9200
51	51.19	0.0969

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## CHANNEL 3

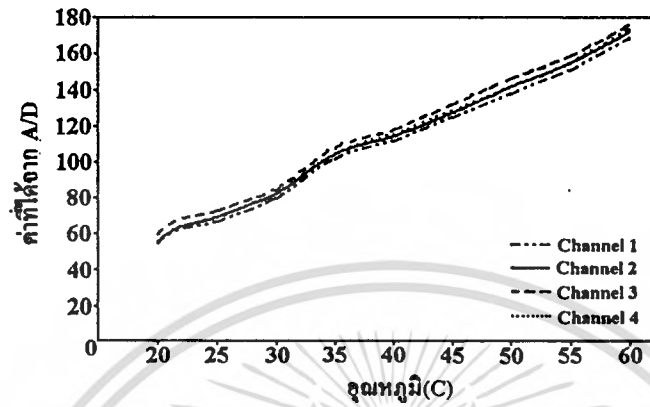
อุณหภูมิจริง ( °C)	อุณหภูมิที่ได้จากคำนวณ ( °C)	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาด ( % )
39	38.27	1.8710
40	39.00	2.5000
41	40.45	1.3400
42	41.54	1.0900
43	42.63	0.8600
44	43.72	0.6360
45	44.44	1.2440
46	45.53	1.0210
47	46.62	0.8080
48	48.07	0.1458
49	48.80	0.4080
50	49.89	0.2200
51	50.61	0.7640

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

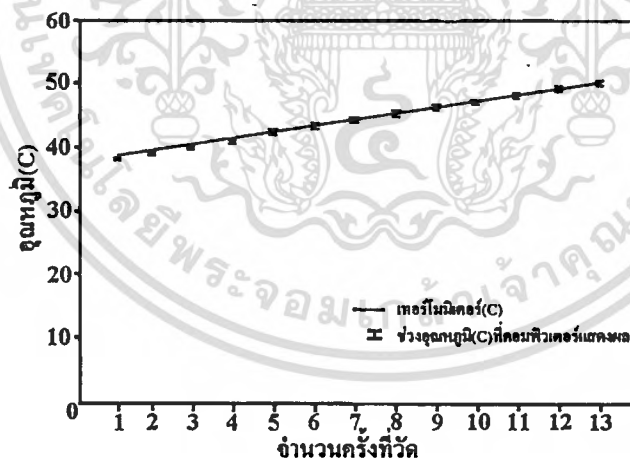
## CHANNEL 4

อุณหภูมิจริง (°C)	อุณหภูมิที่ได้จากคำนวณ (°C)	เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาด (%)
39	38.59	1.0500
40	39.67	0.8250
41	40.39	1.4800
42	41.83	0.4040
43	43.72	0.6270
44	44.35	0.7950
45	45.07	0.1550
46	46.51	1.1080
47	47.23	0.4890
48	47.95	0.1040
49	49.39	0.7950
50	50.47	0.9400
51	51.19	0.3700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าที่ได้รับจากการ์ด A/D



รูปที่ 7.2 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดโดยเทอร์โมมิเตอร์กับอุณหภูมิที่อ่านได้จากคอมพิวเตอรื

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองฉายคลื่นไมโครเวฟไปยัง phantom จะได้กราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิของ Channel ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนตัวแปรเป็นอัตราการไหลของน้ำและอุณหภูมิเริ่มต้นได้ดังนี้

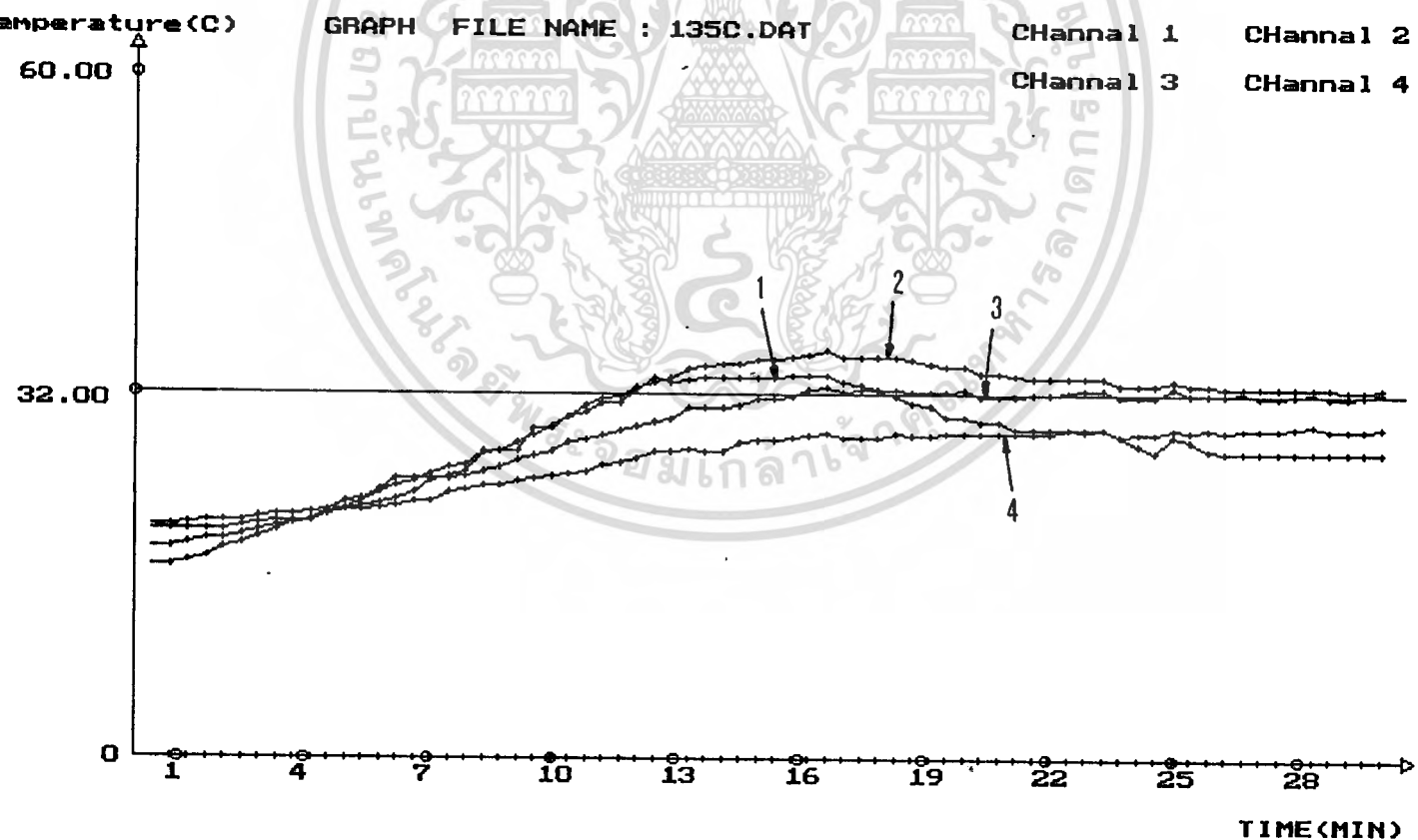
รูปที่ 7.1

ช่วง Voltage ในการควบคุม 125 V -160 V Voltage เริ่มต้น 135 V

อัตราการไหลของน้ำ 500 cc/นาที อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนเข้า 13 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนออก 15 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเริ่มต้นของ Phantom: 26 องศาเซลเซียส(อุณหภูมิห้อง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

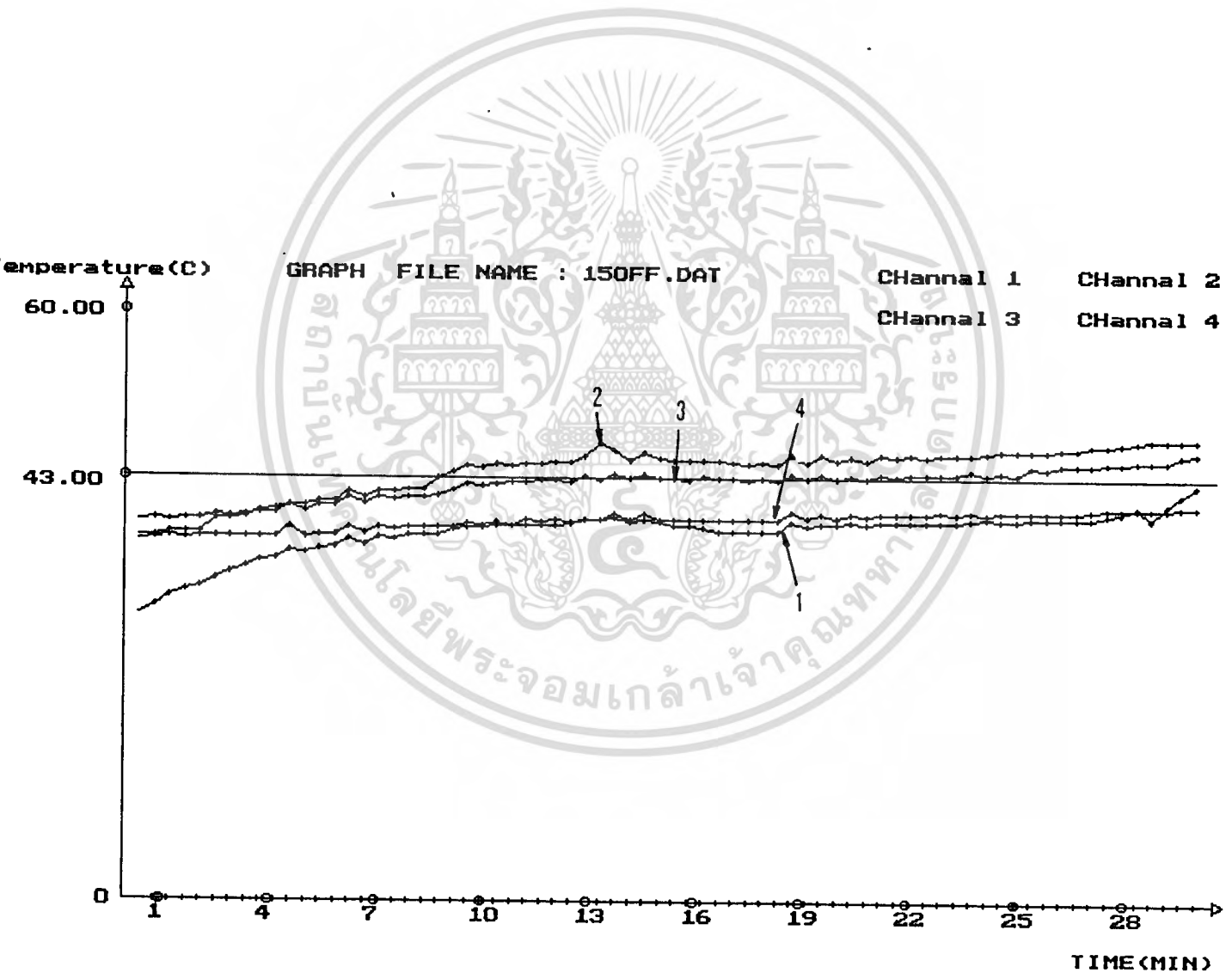
รูปที่ 7.2

ช่วง Voltage ในการควบคุม 125 V -160 V Voltage เริ่มต้น 150 V

อัตราการไหลของน้ำ 500 cc/นาที อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนเข้า 12 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนออก 13 องศาเซลเซียส

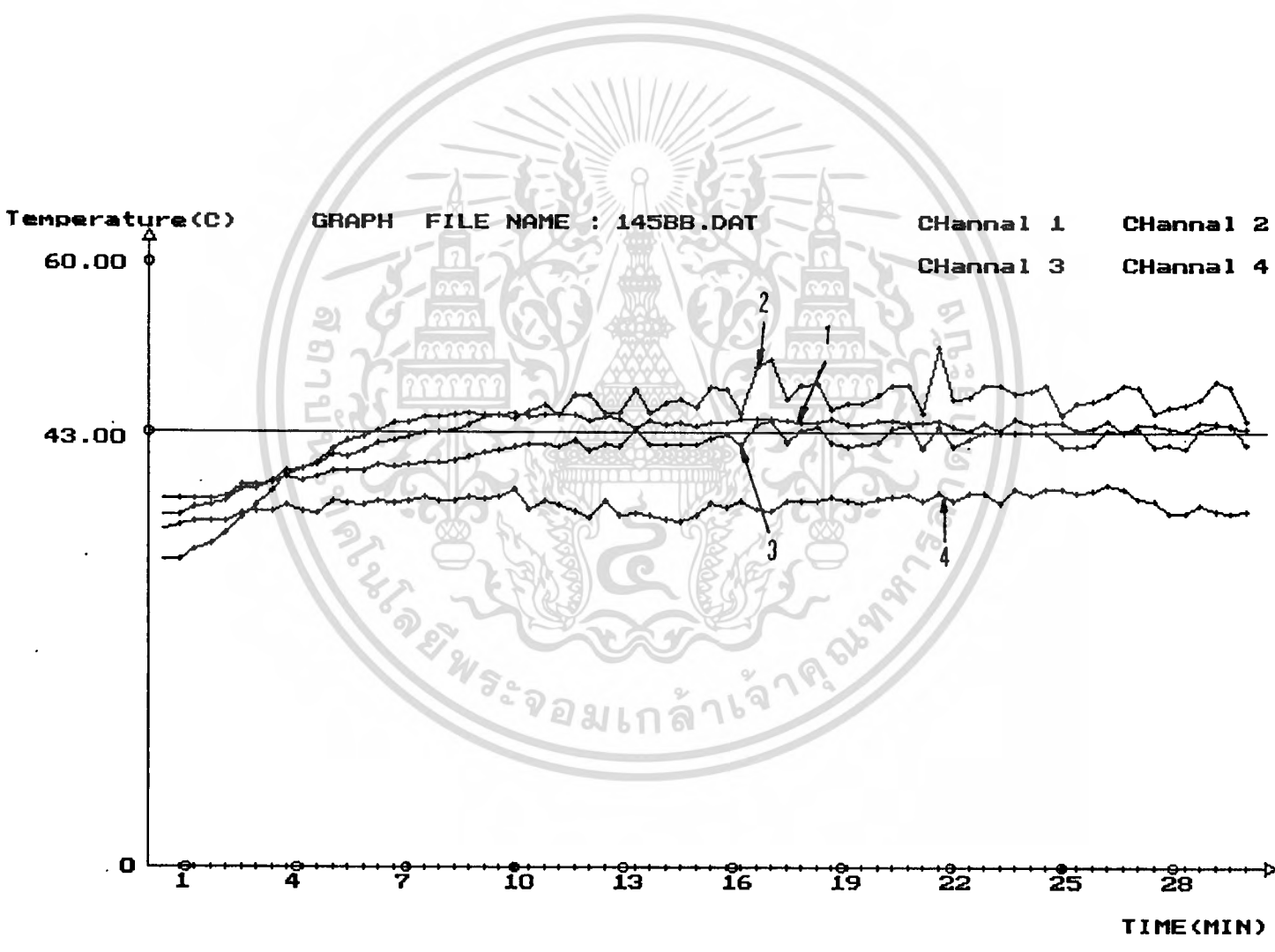
อุณหภูมิเริ่มต้นของ Phantom 37 องศาเซลเซียส(อุณหภูมิร่างกาย)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.3

ช่วง Voltage ในการควบคุม 125 V -165 V Voltage เริ่มต้น 145 V  
 อัตราการไหลของน้ำ 500 cc/นาที อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนเข้า 12 องศาเซลเซียส  
 อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนออก 13 องศาเซลเซียส  
 อุณหภูมิเริ่มต้นของ Phantom 37 องศาเซลเซียส(อุณหภูมิร่างกาย)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

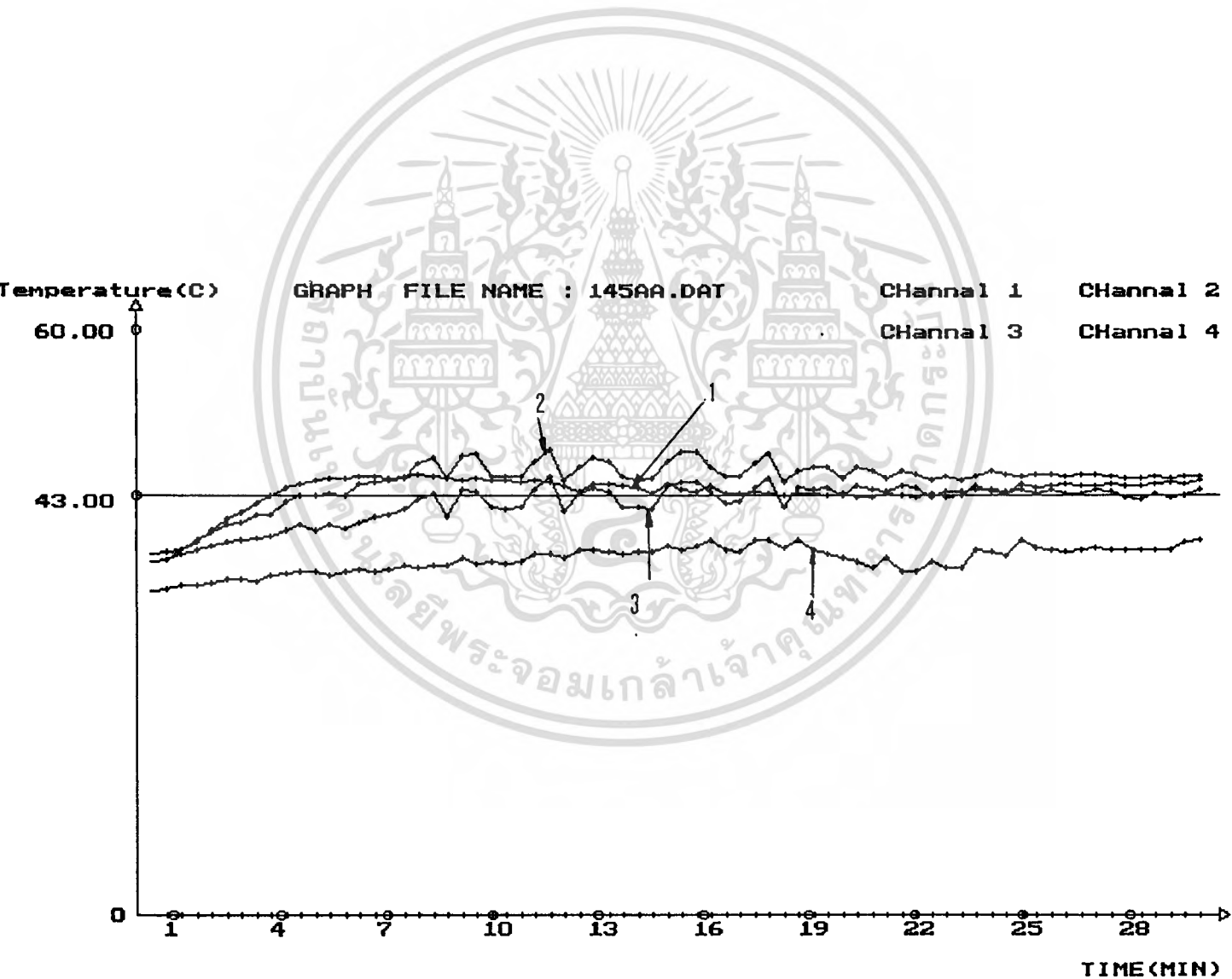
รูปที่ 7.4

ช่วง Voltage ในการควบคุม 125 V -160 V Voltage เริ่มต้น 145 V

อัตราการไหลของน้ำ 500 cc/นาที อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนเข้า 11.5 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนออก 13.5 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเริ่มต้นของ Phantom 37 องศาเซลเซียส(อุณหภูมิร่างกาย)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

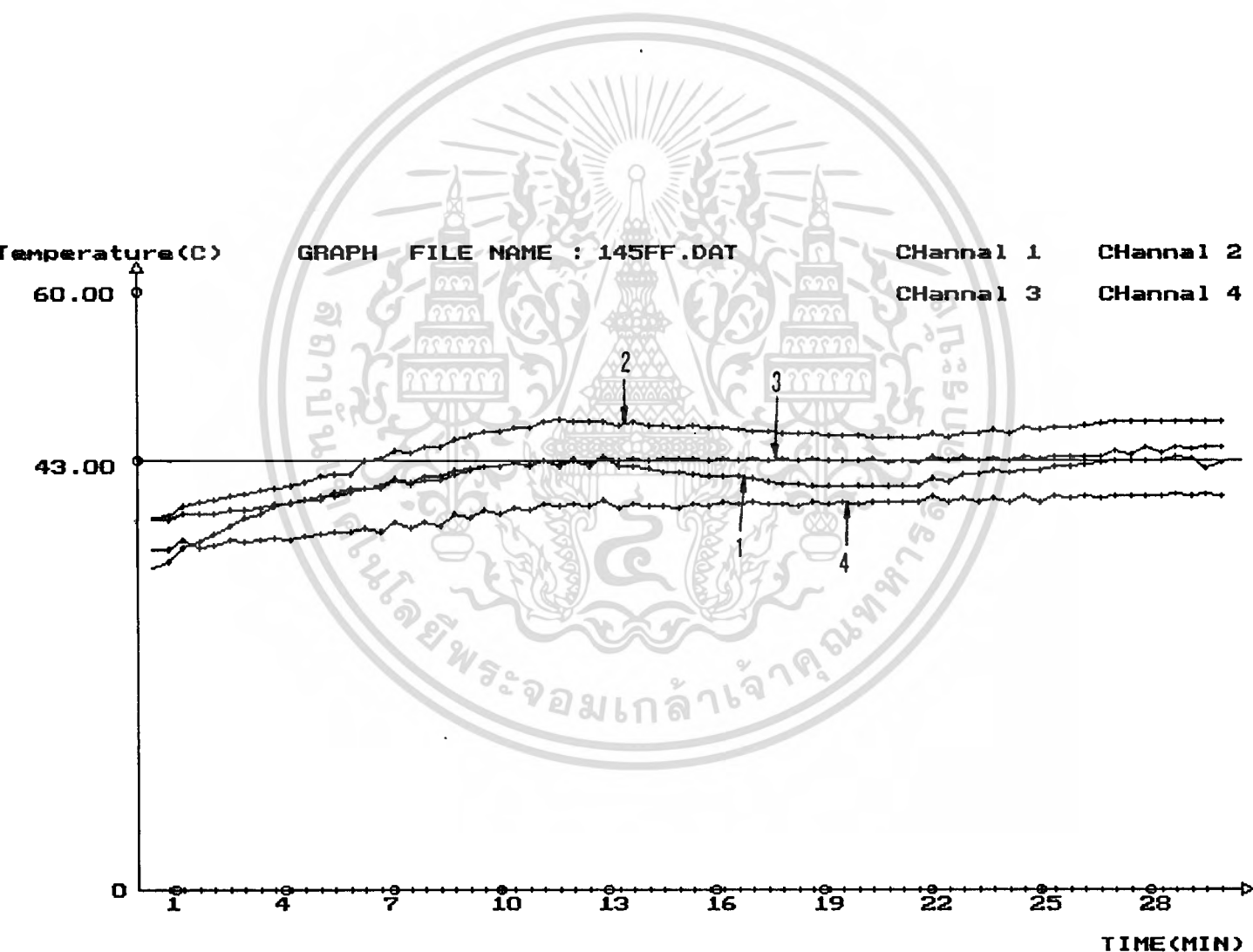
รูปที่ 7.5

ช่วง Voltage ในการควบคุม 125 V -160 V Voltage เริ่มต้น 145 V

อัตราการไหลของน้ำ 1250 cc/นาที อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนเข้า 12 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนออก 13.5 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเริ่มต้นของ Phantom 37 องศาเซลเซียส(อุณหภูมิร่างกาย)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.6

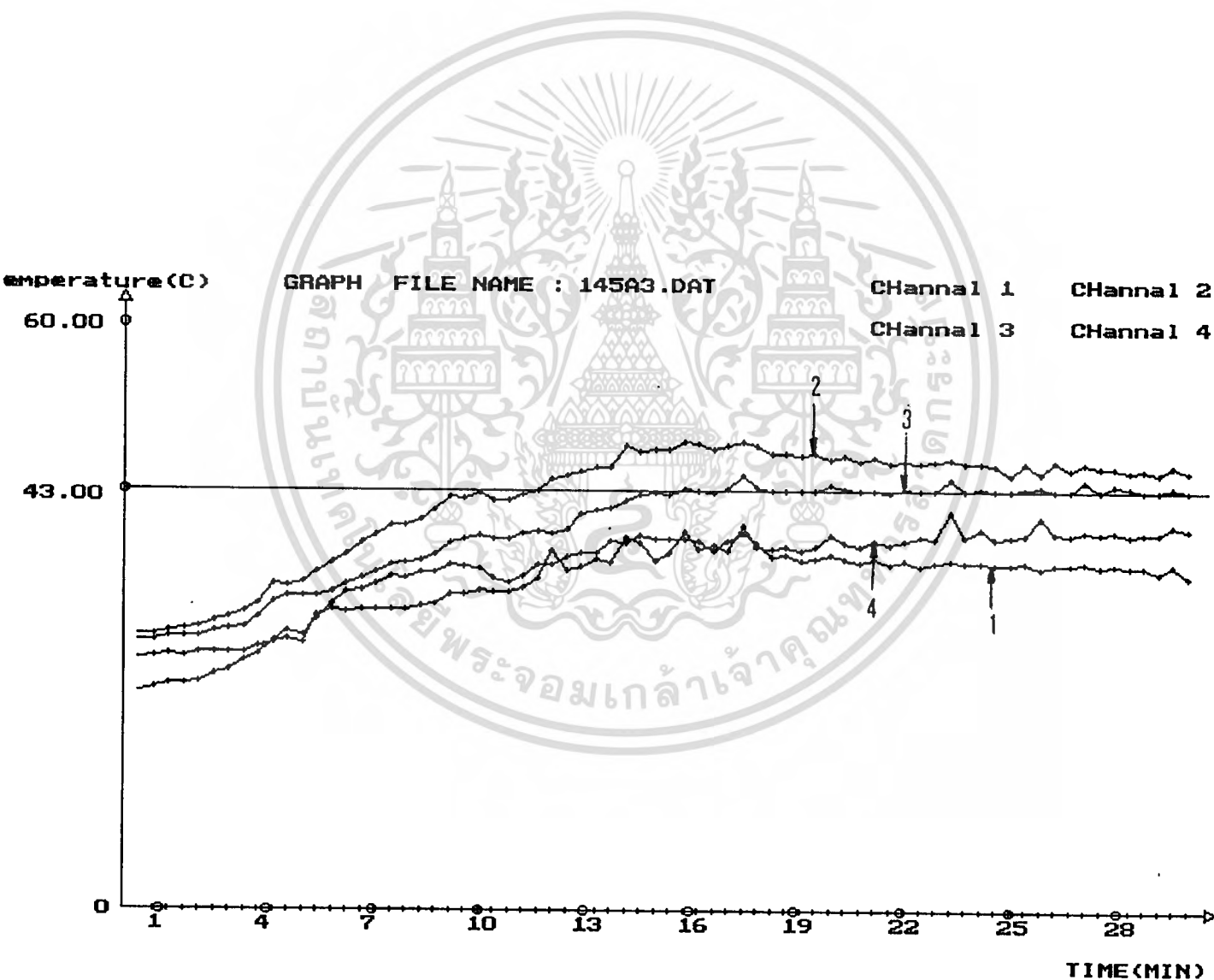
ช่วง Voltage ในการควบคุม 125 V -160 V Voltage เริ่มต้น 145 V

อัตราการไหลของน้ำ 1250 cc/นาที อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนเข้า 8.6 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเวียนออก 9.6 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเริ่มต้นของ Phantom 37 องศาเซลเซียส(อุณหภูมิร่างกาย)

มีการใช้วาล์วในการควบคุมและนำเครื่องทำน้ำเย็นมาใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิของ Phantom ที่เพิ่มขึ้นตามกราฟรูปที่ 7.6

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ CH 1	อุณหภูมิ CH 2	อุณหภูมิ CH 3	อุณหภูมิ CH 4
0	35.40	42.00	37.00	32.40
50	35.13	42.80	38.14	32.24
100	33.77	42.01	38.50	32.77
150	35.43	43.00	38.93	34.00
200	36.36	44.65	39.14	34.96
250	36.76	45.54	41.04	36.02
300	37.70	47.74	42.09	38.20
350	38.15	47.30	42.87	36.70
400	38.19	48.11	43.26	38.96
450	37.85	47.77	43.30	37.40
500	38.70	48.07	44.64	39.50
550	36.33	46.93	43.00	37.28
600	35.80	46.66	43.00	37.00
650	36.49	46.35	43.75	38.44
700	35.67	46.18	43.00	37.32
750	35.43	45.84	43.07	37.48
800	35.32	45.84	43.16	38.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวัดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ

ลักษณะการใช้งานของระบบให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟ เป็นการให้ความร้อนกับ Phantom ให้เกิดอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ในการเริ่มต้นการให้ความร้อนจะต้องควบคุมการเพิ่มของอุณหภูมิให้อยู่ในอัตราส่วน 1 องศาเซลเซียสต่อ 1 นาที จากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนดก็จะทำการควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ในระดับของอุณหภูมิที่ต้องการ จากตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนศักดาไฟฟ้าให้กับแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟกับค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำ เมื่อนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 7.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนค่าศักดาไฟฟ้าระหว่าง 125 โวลท์ ถึง 160 โวลท์ โดยปรับศักดาไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 145 โวลท์ลักษณะของการเพิ่มของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที ในช่วงอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ถึง 43 องศาเซลเซียส และรักษาอุณหภูมิให้คงที่ในช่วงอุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียสและที่ระดับผิว(CH1) ก็จะทำการควบคุมให้มีอุณหภูมิประมาณ 36 องศาเซลเซียสโดยใช้วาล์วน้ำควบคุม



## บทที่ 8

### หลักการเปรียบเทียบ

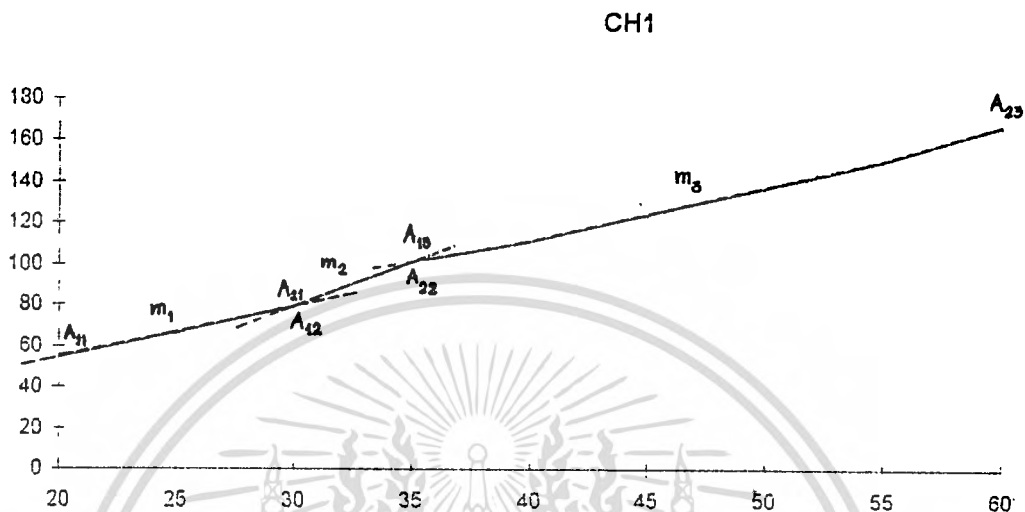
เนื่องจากวงจรเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมินั้น จะแสดงค่าออกมาในรูปโวลต์ตรงจึงต้องทำการแปลงให้เป็นอุณหภูมิเสียก่อน โดยใช้หลักการเปรียบเทียบเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

หลักการที่ใช้คือ นำค่าโวลต์ตรงจากวงจรที่ต่อจากเทอร์โมคัปเปิลผ่านการ์ด A/D ซึ่งค่าที่ได้จากการ์ด A/D มีค่าแปรผันตรงกับค่าโวลต์ตรงที่ได้จากวงจรเทอร์โมคัปเปิล แล้วนำไปเปรียบเทียบเพื่อให้การแสดงผลอยู่ในรูปของอุณหภูมิ

#### วิธีการเปรียบเทียบ

เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นชนิด T ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้รับจากการ์ด A/D กับอุณหภูมิ ไม่แปรผันเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 7.1 ดังนั้น ในการเปรียบเทียบจึงต้องทำการเปรียบเทียบเป็นช่วง ๆ ดังรูปที่ 8.1 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1. ทำการแบ่งอุณหภูมิที่ใช้ออกเป็นช่วง ๆ
2. ทำการเตรียมอุณหภูมิเริ่มต้นในช่วงแรกที่  $T_1$
3. วัดค่าที่ได้จากการ์ด A/D ให้เป็น  $A_1$
4. ทำการเตรียมอุณหภูมิสุดท้ายในช่วงแรกที่  $T_2$
5. วัดค่าที่ได้จากการ์ด A/D ให้เป็น  $A_2$
6. หาค่าความชัน  $m = (T_2 - T_1) / (A_2 - A_1)$
7. หาสมการการเปรียบเทียบในการแปลงค่าที่ได้จากการ์ด A/D ให้เป็นค่าอุณหภูมิ
8. ทำช่วงต่อไปตามข้อ 2-7
9. นำสมการที่ได้ทั้งหมดมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าอุณหภูมิจากค่าที่ได้จากการ์ด A/D



รูปที่ 8.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ กับค่าที่ได้รับจากการ์ด A/D channel ที่ 1 พร้อมทั้งแสดงการ calibration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ ๑

### บทสรุปและวิจารณ์

ในปฏิญญาฉบับนี้แสดงให้เห็นรายละเอียดต่าง ๆ ของระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่จะใช้ในการรักษาโรคมะเร็งด้วยความร้อน เราสามารถวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล แล้วนำสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลไปขยาย หลังจากนั้นจะนำสัญญาณที่ได้เข้าวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล แล้วแสดงผลทางอุณหภูมิที่คอมพิวเตอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์จะทำการควบคุมในการเปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้าเพื่อควบคุมการปล่อยคลื่นไมโครเวฟจากหลอดแมกนีตรอน และจากผลการทดลองสามารถวัดอุณหภูมิได้ทั้ง 4 จุด ที่ระดับความลึกต่าง ๆ ในช่วงของศักดาไฟฟ้าระหว่าง 125-160 โวลต์ โดยกำหนดศักดาไฟฟ้าเริ่มแรกเป็น 145 โวลต์ ซึ่งจะมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นในอัตรา  $1^{\circ}\text{C}$  ต่อนาที ในช่วงอุณหภูมิ  $37^{\circ}\text{C}$ - $43^{\circ}\text{C}$  และรักษาระดับอุณหภูมิที่  $43^{\circ}\text{C}$  นั้น โดยระบบนี้ได้เพิ่มส่วนของระบบหล่อเย็น (Cooling System) ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ โดยการหมุนของวาล์วในการรักษาอุณหภูมิที่ระดับผิวหนังไม่ให้ร้อนจนเกินไป และในส่วนของเครื่องวัดกำลังสะท้อนกลับ (Reflectometer Power) ซึ่งทำหน้าที่ในการวัดกำลังงานที่สะท้อนกลับ

## บทแทรกที่ 1

### หลักการทำเนื้อเยื่อจำลอง ( Phantom )

เนื้อเยื่อจำลอง เป็นสารละลายของแข็งที่มีคุณลักษณะสมบัติคล้ายเนื้อเยื่อจริงของมนุษย์ มีส่วนประกอบและวิธีการเตรียมดังนี้

#### ส่วนประกอบ ของ Phantom 1 litter

1) Distilled water	956.6	cc.
2) Agar Powder	40.0	gm.
3) NaCl	2.4	gm.
4) $\text{NaN}_3$	1.0	gm.

#### ขั้นตอนการทำ

- 1) ต้มน้ำกลั่น (Distilled water) ในมีอุณหภูมิสูงถึง  $70^{\circ}\text{C}$  -  $80^{\circ}\text{C}$  แล้วเติม NaCl คนให้ละลาย รักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง  $70^{\circ}\text{C}$  -  $80^{\circ}\text{C}$
- 2) เติม  $\text{NaN}_3$  ลงในน้ำ คนให้ละลาย รักษาอุณหภูมิให้คงที่
- 3) ค่อยๆเติม Agar powder ทีละน้อยๆ ระวังอย่าให้จับเป็นก้อน หรือเกิดฟอง หรือไหม้ คนให้ละลายตลอดเวลา
- 4) เติมน้ำให้ได้สารละลายครบ 1 litter
- 5) เพิ่มอุณหภูมิของสารละลายไปจนถึง  $95^{\circ}\text{C}$  (ระวังอย่าให้ไหม้)
- 6) ทำความสะอาดภาชนะที่จะเทสารละลายใส่ ให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นเทส่วนผสมสารละลายที่ได้จากข้อ(5) ลงในภาชนะนั้น แล้วใช้พลาสติกใสปิดภาชนะ เก็บไว้ 1 - 2 วัน



รูปที่ 1 แสดงเนื้อเชื้อจำดอง Phantom

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทแทรกที่ 2

### หลักการ Calibrate เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

#### S11 1-Port Calibration for Reflection Measurements

This procedure uses the S11 1-port menu illustrated in Figure 6-15 to perform a complete vector error correction for reflection measurements of one-port devices or properly terminated two-port devices. This is a high-accuracy calibration that effectively removes the directivity, source match, and frequency response errors from the measured data.

**NOTE:** For broadband reflection measurements, use either a broadband load or, for the highest level of accuracy, a combination of lowband and sliding loads. For measurements above 3 GHz in 3.5 mm (2 GHz in 7 mm or type-N), the lowband load calibration can be omitted. For measurements below 3 GHz in 3.5 mm (2 GHz in 7 mm or type-N), the lowband load alone is sufficient (see Table 6-6). If you try to use only a sliding load or only a lowband load beyond these frequency cutoff points, the message "CAUTION: ADDITIONAL STANDARDS NEEDED" will be displayed to indicate that both loads are required.

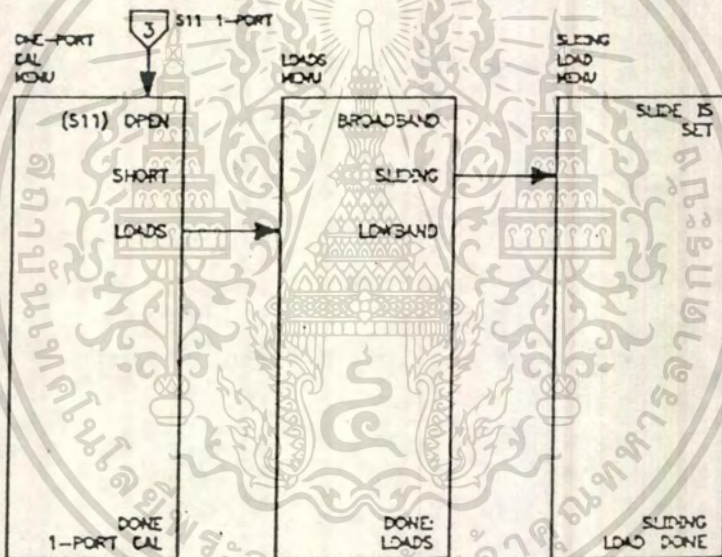


Figure 6-15. Menus for S11 1-Port Calibration

- Press **CAL**.
- Select the proper calibration kit. If the connector type or cal kit name shown in the **CAL KIT** softkey label is not the same as the calibration kit to be used, refer to *Select Cal Kit Menu*.
- Press **CALIBRATE MENU S11 1-PORT**. (S11 will now be measured regardless of any other S-parameter previously selected.)
- Connect an open circuit to port 1.
- When the trace settles, press **(S11) OPEN**.
- The message "WAIT- MEASURING CAL STANDARD" is displayed while the open circuit data is measured. The softkey label **OPEN** is then underlined.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Disconnect the open, and connect a short circuit to port 1.
- When the trace settles, press **SHORT**. The short circuit data is measured and the softkey label is underlined.
- Disconnect the short, and connect an impedance-matched load (see *NOTE* above) at port 1.
- Press **LOADS**. The loads menu is displayed. When the trace settles, press the softkey corresponding to the load used. If a sliding load is used, the sliding load menu is displayed. Position the slide and press **SLIDE IS SET**. The sliding load must be set and measured five times before **SLIDING LOAD DONE** is pressed. Otherwise, the message "CAUTION: MORE SLIDES NEEDED" is displayed.
- When all the appropriate load measurements are complete, press **DONE LOADS**. The load data is measured and the **LOADS** softkey label is underlined.
- Press **DONE 1-PORT CAL**. (If you press **DONE** without measuring all the required standards, the message "CAUTION: ADDITIONAL STANDARDS NEEDED" will be displayed.) The calibration coefficients are computed and stored. A corrected S11 trace is displayed, and the notation "Cor" appears at the left side of the screen.
- The save menu is displayed. (It is recommended that calibration data be saved, either in internal non-volatile memory or on an external disk. Refer to Chapter 11, *Saving Instrument States*, for more information.)
- This completes the S11 1-port calibration. The test device can now be connected and measured.

## S22 1-Port Calibration

This procedure performs a complete vector error correction for a reverse reflection measurement of a one-port device or a properly terminated two-port device. It is similar to the S11 1-port calibration except that S22 is selected automatically.

## Full 2-Port Calibration for Reflection and Transmission Measurements

This procedure uses the menu sequence illustrated in Figure 6-16 to perform complete vector error correction for measurement of all four S-parameters. This is the most accurate calibration for measurements of two-port devices, and effectively removes all correctable systematic errors in both the forward and reverse directions.

**NOTE:** For broadband measurements, use either a broadband load or, for the highest level of accuracy, a combination of lowband and sliding loads. For measurements above 3 GHz in 3.5 mm (2 GHz in 7 mm or type-N), the lowband load calibration can be omitted. For measurements below 3 GHz in 3.5 mm (2 GHz in 7 mm or type-N), the lowband load alone is sufficient (see Table 6-8). If you try to use only a sliding load or only a lowband load beyond these frequency cutoff points, the message "CAUTION: ADDITIONAL STANDARDS NEEDED" will be displayed to indicate that both loads are required.

To maximize the lifetime of the electro-mechanical transfer switch in the network analyzer, switching occurs only once in a measurement sequence using full two-port error correction. On the first sweep all four S-parameters are measured. On subsequent sweeps, the assumption is made that the reverse parameters have not changed, and only the forward parameters are measured. It is possible to override this protection feature for applications where the data changes significantly with time, for example with tuning or drift. To perform an override, use MEASURE RESTART in the S-parameter menu (see Chapter 5). Alternatively, for repeated update of all four S-parameters, set an appropriate number of groups using the trigger menu (see Chapter 4).

Isolation calibration can be omitted for most measurements, except where wide dynamic range is a consideration. Refer to the explanation under **CAL** Key.

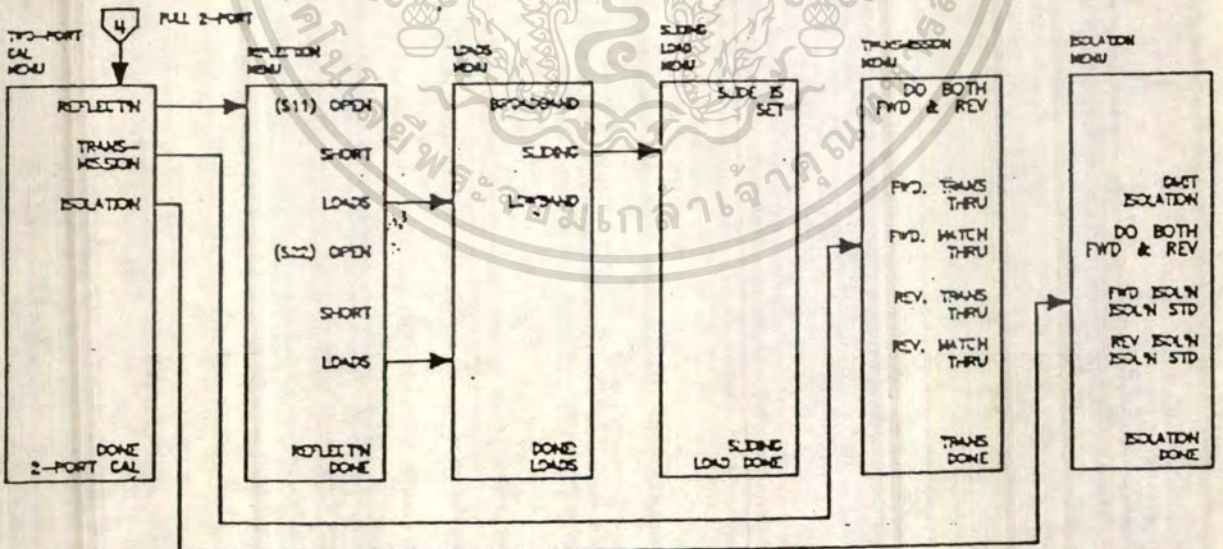


Figure 6-16. Menus for Full 2-Port Calibration

- Press **AVG**, **IF BW** to reduce the IF bandwidth.
- Press **CAL**.

- Select the proper calibration kit. If the connector type or cal kit name shown in the **CALKIT** softkey label is not the same as the calibration kit to be used, refer to *Select Cal Kit Menu*.
- Press **CALIBRATE MENU FULL 2-PORT REFLECT'N**.
- Connect an open circuit to port 1.
- When the trace settles, press (S11) **OPEN**. The open circuit data is measured, and the softkey label **[OPEN]** is underlined.
- Disconnect the open, and connect a short circuit to port 1.
- When the trace settles, press (S11) **SHORT**. The short circuit data is measured and the softkey label **SHORT** is underlined.
- Disconnect the short, and connect an impedance-matched load (see *NOTE* above) at port 1.
- Press (S11) **LOADS**. The loads menu is displayed. When the trace settles, press the softkey corresponding to the load used. If a sliding load is used, the sliding load menu is displayed. Position the slide and press **SLIDE IS SET**. The sliding load must be set and measured five times before **SLIDING LOAD DONE** is pressed. Otherwise, the message "CAUTION: MORE SLIDES NEEDED" is displayed.
- When all the appropriate load measurements are complete, press **DONE LOADS**. The load data is measured, and the **LOADS** softkey label is underlined.
- Repeat the open-short-load measurements described above, connecting the devices in turn to port 2 and using the (S22) softkeys.
- Press **REFLECT'N DONE**. (If you press **DONE** without measuring all the required standards, the message "CAUTION: ADDMONAL STANDARDS NEEDED" is displayed.)
- The reflection calibration coefficients are computed and stored. The two-port cal menu is displayed, with the **REFLECT'N** softkey underlined.
- Press **TRANSMISSION**.
- Make a thru connection between port 1 and port 2 (connect together the points at which the test device will be connected).
- Press **DO BOTH FWD & REV**. When both are completed the measurement has been made. The softkeys for the individual classes are underlined.
- Press **TRANS:DONE**. The transmission coefficients are computed and stored. The two-port cal menu is displayed, with the **TRANSMISSION** softkey underlined.
- Disconnect the thru.
- If correction for isolation is not required, press **ISOLATION OMIT ISOLATION ISOLATION DONE**.

- If correction for isolation is required, press **AVO** **AVERAGING ON**.\*
- Press **CAL** **RESUME CAL SEQUENCE ISOLATION**.
- Connect impedance-matched loads to port 1 and port 2 (broadband or lowband loads are sufficient).
- Press **DO BOTH FWD & REV** to measure both the forward and reverse isolation. When this is complete, the softkeys will be underlined.
- Press **ISOLATION DONE**. The isolation error coefficients are stored. The two-port cal menu is displayed, with the **ISOLATION** softkey underlined.
- Press **AVO** **AVERAGING DFF**.
- Press **CAL** **RESUME CAL SEQUENCE**.
- Press **DONE 2-PORT CAL**. (If you press **DONE** without measuring all the required standards, the message "CAUTION: ADDITIONAL STANDARDS NEEDED" will be displayed.) The calibration coefficients are computed and stored. A corrected trace is displayed, and the notation "C2" at the left of the screen indicates that two-port error correction is on.

The save menu is displayed. (It is recommended that calibration data be saved, either in internal nonvolatile memory or on an external disk. Refer to Chapter 11, *Saving Instrument States*, for more information.)

- \* For maximum dynamic range use an averaging factor of 32.
- This completes the full two-port calibration procedure. Now the test device can be connected. Press the **MEAS** key to measure all four S-parameters.

## TRL\*/LRM\* 2-Port Calibration

This procedure uses the menu sequence illustrated in Figure 6-17 to perform complete vector error correction for measurement of all four S-parameters of a microstrip package in a fixture. Coaxial TRL\*/LRM\* measurements are not recommended.

To maximize the lifetime of the electro-mechanical transfer switch in the network analyzer, switching occurs only once in a measurement sequence using full two-port error correction. On the first sweep, all four S-parameters are measured. On subsequent sweeps, the assumption is made that the reverse parameters have not changed, and only the forward parameters are measured. It is possible to override this protection feature for applications where the data changes significantly with time, for example with tuning or drift. To perform an override, use **MEASURE RESTART** in the S-parameter menu (see Chapter 5). Alternatively, for repeated update of all four S-parameters, set an appropriate number of groups using the trigger menu (see Chapter 4.)

Isolation calibration can be omitted for most measurements, except where wide dynamic range is a consideration. Refer to the explanation under **CAL** Key.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น สิ่งนี้ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 HP 8719C/8720C/8722A Measurement Calibration 6-29

## เอกสารอ้างอิง

- [1] David M. Pozar "Microwave Engineering," Reading, MA: Addison Wesley, 1990.
- [2] Brian C. Wadell "Transmission Line Design Handbook," Norwood, MA  
Artech House, Inc., 1991
- [3] K.C. Gupta Ramesh Garg and I.J.Bahl "Microstrip Lines and Slotlines," Norwood, MA  
Artech House, Inc., 1979.
- [4] T.C. Edwards "Foundation For Microstrip Circuit Design," New York  
John Wiley & Sons Ltd., 1981.
- [5] "HP 8720C Network Analyzer Operating Manual," Santa Rosa, CA  
Hewlett-Packard Company, 1991.
- [6] Bharathi Bhat, Shibani K. Koul, "Stripline-Like Transmission Lines for Microwave  
Integrated Circuits", Wiley Eastern Limited, 1989.
- [7] Vincent F. Fusco, "Microwave Circuits Analysis and Computer-aided  
Design", Prentice Hall.
- [8] A.W. Guy, "History of Biology Effects and Medical Applications of Microwave  
Energy," IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-32, No.9  
pp,1182-1199, Sep. 1984.
- [9] M. Kravits, T. Wakabayashi and W. Kiranon, "A Spherical Slot Array Applicator for  
Medical Applications," to be published in IEEE Transactions on Microwave Theory  
and Techniques.
- [10] Jacques Thuerly "Microwaves: Industrial, Scientific, and Medical Applications",  
edited by Edward H. Grant King's College London, ARTECH HOUSE, INC. 1992.
- [11] J.R. James and P.S. Hall "Handbook of Microstrip Antenna Volume II," LONDON:  
Peter Peregrinus Ltd., 1989.
- [12] Stephen Wolfram "Mathematica A System for Doing Mathematic by Computer,"  
Redwood City, CA: Addison-Wesley, 1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณในความช่วยเหลือสนับสนุนของท่านเหล่านี้เป็นอันมากเพราะ  
ถ้าขาดความช่วยเหลือจากท่านเหล่านี้แล้ว โครงการนี้คงไม่สำเร็จตุ่่วงไปได้ด้วยดี

-รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

-คุณมนตรี ชนภควัต นักศึกษาทดลองวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย

-คุณปริชญ์ ฉินานุตตวงศ์ นักศึกษาภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

น้องอ้อย , น้องปู , น้องสิทธี นักศึกษาภาควิชาโทรคมนาคมปี 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

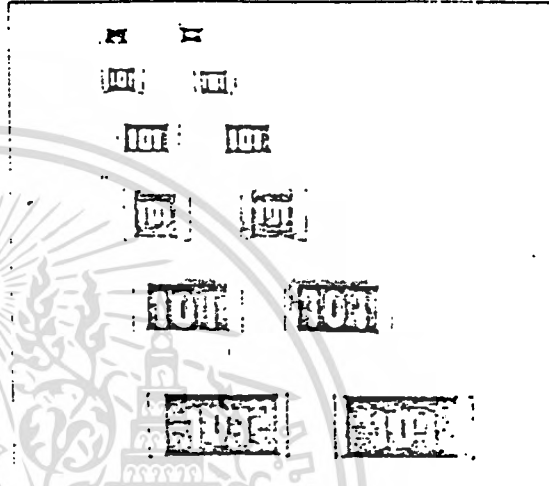
# FLAT CHIP

## 角板形チップ抵抗器 ▶ RK73

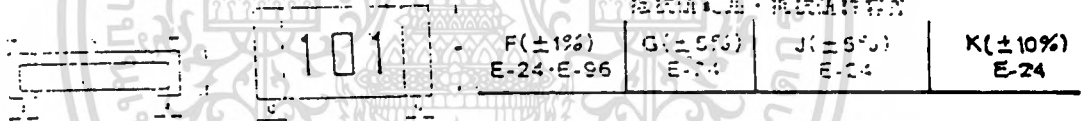
FLAT CHIP RESISTORS

51Ω 1W

Part No. **RK73K3ATE** J  
 1W パッケージ印  
 510  
 51. Ω  
 3 PCS.  
 Lot No. **KOON JAPAN**



### 外形寸法 DIMENSION



形名 TYPE	寸法 DIMENSIONS (mm)				
	L ± 0.2	W ± 0.2	C ± 0.2	d $\begin{smallmatrix} +0.2 \\ -0.1 \end{smallmatrix}$	t ± 0.1
1J	1.6	0.8	0.3	0.2	0.4
2A	2.0	1.25	0.4	0.3	0.5
2B	3.2	1.6	0.5	0.4	0.6
2E	3.2	2.5	0.5	0.4	0.6
2H	5.1	2.6	0.6	0.4	0.6
→ 3A	6.5	3.2	0.6	0.4	0.6

### 定格 RATING

形名 TYPE	抵抗温度係数 T.C.R. (ppm/°C)	定格電力 POWER RATING	最大 使用電圧 MAX. WORKING VOLTAGE	最高 過負荷電圧 MAX. OVERLOAD VOLTAGE	定格周囲温度 RATING AMBIENT TEMPERATURE	使用温度範囲 OPERATING TEMP. RANGE
RK73M2B	± 500	0.125 W	200 V	400 V	+ 70°C	- 55°C ~ + 125°C
RK73K2B	± 200					
RK73H2B	± 100 (± 200) (± 500)					
RK73K2E		0.25 W				
RK73K2H		0.5 W				
→ RK73K3A		1 W				

เอกสารที่ส่งมาเป็นการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม้วการณเตฯทงส้น อึกทงหามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตองอางอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



National  
Semiconductor  
Corporation

## LM741/LM741A/LM741C/LM741E Operational Amplifier

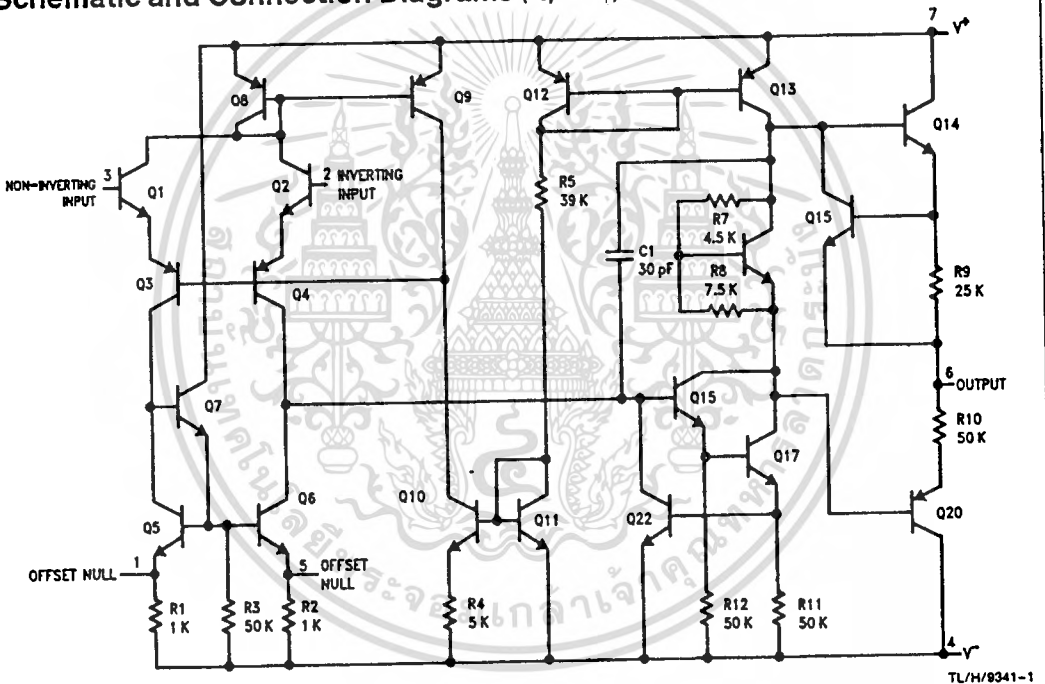
### General Description

The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct, plug-in replacements for the 709C, LM201, MC1439 and 748 in most applications. The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload protection on the input and

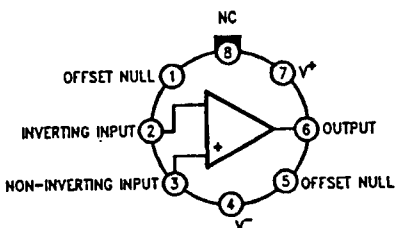
output, no latch-up when the common mode range is exceeded, as well as freedom from oscillations.

The LM741C/LM741E are identical to the LM741/LM741A except that the LM741C/LM741E have their performance guaranteed over a 0°C to +70°C temperature range, instead of -55°C to +125°C.

### Schematic and Connection Diagrams (Top Views)



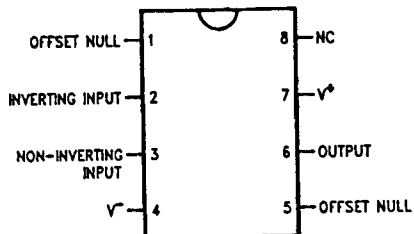
Metal Can Package



Order Number LM741H, LM741AH,  
LM741CH or LM741EH  
See NS Package Number H08C

TL/H/9341-2

Dual-In-Line or S.O. Package



Order Number LM741CJ, LM741CM,  
LM741CN or LM741EN  
See NS Package Number J08A, M08A or N08E

TL/H/9341-3

## Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.  
(Note 5)

	LM741A	LM741E	LM741	LM741C
Supply Voltage	±22V	±22V	±22V	±18V
Power Dissipation (Note 1)	500 mW	500 mW	500 mW	500 mW
Differential Input Voltage	±30V	±30V	±30V	±30V
Input Voltage (Note 2)	±15V	±15V	±15V	±15V
Output Short Circuit Duration	Indefinite	Indefinite	Indefinite	Indefinite
Operating Temperature Range	-55°C to +125°C	0°C to +70°C	-55°C to +125°C	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Junction Temperature	150°C	100°C	150°C	100°C
Soldering Information				
N-Package (10 seconds)	260°C	260°C	260°C	260°C
J- or H-Package (10 seconds)	300°C	300°C	300°C	300°C
M-Package				
Vapor Phase (60 seconds)	215°C	215°C	215°C	215°C
Infrared (15 seconds)	215°C	215°C	215°C	215°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" (Appendix D) for other methods of soldering surface mount devices.

## Electrical Characteristics (Note 3)

Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ $R_S \leq 50\Omega$		0.8	3.0		1.0	5.0		2.0	6.0	mV mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			4.0			6.0			7.5	mV mV
Average Input Offset Voltage Drift				15							$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Voltage Adjustment Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	±10			±15			±15			mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3.0	30	20	200		20	200		nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			70	85	500			300		nA
Average Input Offset Current Drift				0.5							$\text{nA}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80	80	500		80	500		nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			0.210		1.5			0.8		$\mu\text{A}$
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0		$\text{M}\Omega$
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $V_S = \pm 20\text{V}$	0.5									$\text{M}\Omega$
Input Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$							±12	±13		V
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$				±12	±13					V
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$	50			50	200		20	200		V/mV V/mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ , $V_S = \pm 20\text{V}$ , $V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}$ , $V_O = \pm 10\text{V}$	32			25			15			V/mV V/mV V/mV
	$V_S = \pm 5\text{V}$ , $V_O = \pm 2\text{V}$	10									V/mV

## Electrical Characteristics (Note 3) (Continued)

Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 20V$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	$\pm 16$ $\pm 15$									V V
	$V_S = \pm 15V$ $R_L \geq 10\text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$				$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$		$\pm 12$ $\pm 10$	$\pm 14$ $\pm 13$		V V
Output Short Circuit Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$	10 10	25	35 40		25			25		mA mA
Common-Mode Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega, V_{CM} = \pm 12V$ $R_S \leq 50\text{ k}\Omega, V_{CM} = \pm 12V$	80	95		70	90		70	90		dB dB
Supply Voltage Rejection Ratio	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $V_S = \pm 20V$ to $V_S = \pm 5V$ $R_S \leq 50\text{ k}\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	86	96		77	96		77	96		dB dB
Transient Response Rise Time Overshoot	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain		0.25	0.8		0.3			0.3		$\mu\text{s}$ %
			6.0	20		5			5		
Bandwidth (Note 4)	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.437	1.5								MHz
Slew Rate	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , Unity Gain	0.3	0.7			0.5			0.5		V/ $\mu\text{s}$
Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$					1.7	2.8		1.7	2.8	mA
Power Consumption	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_S = \pm 20V$ $V_S = \pm 15V$		80	150		50	85		50	85	mW mW
	LM741A $V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$			165 135							mW mW
LM741E	$V_S = \pm 20V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$			150 150							mW mW
LM741	$V_S = \pm 15V$ $T_A = T_{AMIN}$ $T_A = T_{AMAX}$					60 45	100 75				mW mW

Note 1: For operation at elevated temperatures, these devices must be derated based on thermal resistance, and  $T_J$  max. (listed under "Absolute Maximum Ratings").  $T_J = T_A + (\theta_{JA} P_D)$ .

Thermal Resistance	Cerdip (J)	DIP (N)	TO-5 (H)	SO-8 (M)
$\theta_{JA}$ (Junction to Ambient)	100°C/W	100°C/W	150°C/W	195°C/W
$\theta_{JC}$ (Junction to Case)	N/A	N/A	80°C/W	N/A

Note 2: For supply voltages less than  $\pm 15V$ , the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

Note 3: Unless otherwise specified, these specifications apply for  $V_S = \pm 15V$ ,  $-55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$  (LM741/LM741A). For the LM741C/LM741E, these specifications are limited to  $0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$ .

Note 4: Calculated value from: BW (MHz) = 0.35/Rise Time( $\mu\text{s}$ ).

Note 5: For military specifications see RETS741X for LM741 and RETS741AX for LM741A.