

ระบบการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟในทางการแพทย์

MICROWAVE HYPERTHERMIA SYSTEM

โดย

นายชัยสิทธิ์	สีหามาตย์	35104109
นายบัณฑิต	สุนทรมณี	35104233
นางสาวราอีน่า	ศรียานมาตย์	35104349

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. ไมโนย ไกรฤกษ์

ปริญญาบัตรสำหรับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ 2538

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

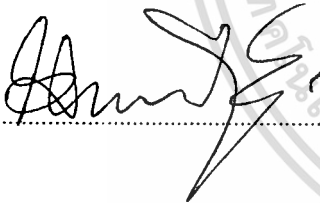
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟในทางการแพทย์

MICROWAVE HYPERTHERMIA SYSTEM

ผู้จัดทำ

- |                  |               |          |
|------------------|---------------|----------|
| 1. นายชัยสิทธิ์  | สีหามาตย์     | 35104109 |
| 2. นายบัณฑิต     | สุนทรภณี      | 35104233 |
| 3. นางสาวราอีน่า | ศิริยานุมาศย์ | 35104349 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. ไมโนย ไกรฤกษ์)

# ระบบการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟในทางการแพทย์

## MICROWAVE HYPERTHERMIA SYSTEM

โดย

นายชัยสิทธิ์	สีหามาตย์	35104109
นายบัณฑิต	สุนทรภณี	35104233
นางสาวราอีน่า	ศิริยานูมาตย์	35104349

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

### บทคัดย่อ

โครงการนี้รายงานการพัฒนากระบวนการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2450 MHz ควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อให้เป็นเครื่องต้นแบบในการรักษามะเร็ง ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบนี้ ได้แก่ เครื่องคอมพิวเตอร์, หลอดแมกนีตรอน, สายอากาศปล้อยคลื่น, ระบบตรวจวัดอุณหภูมิ, ระบบวัดกำลังงานคลื่น และระบบระบายความร้อน จากการทดลองกับสารจำลองเนื้อคน ระบบการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟในทางการแพทย์สามารถที่จะควบคุมอุณหภูมิที่ความลึกประมาณ 2 ซม. จากผิวซึ่งเป็นความลึก ที่ต้องการได้เป็นอย่างดี ในส่วนระบบระบายความร้อน ได้แสดงผลการควบคุมอุณหภูมิที่อัตราการไหลของน้ำต่าง ๆ กัน และในส่วนของระบบวัดกำลังงานคลื่นจากหลอดแมกนีตรอน ได้ทำการวัดและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์

### ABSTRACT

This paper reports the development of a Microwave Hyperthermia System , controlled by computer. It operates at the microwave frequency range, 2450 MHz. The application of this system is to construct a prototype for a medical work , i.e. cancer therapy. The system consists of a computer , a magnetron , an applicator , a temperature measurement system , a power measurement system and a surface cooling system. It is obviously that from the experiments in human tissue ( phantom ) , the system can control the temperature at the requiring depth of 2 cm. very well. At the surface cooling system this paper reports the experiments of different water flow rate to obtain the appropriately flow rate. The power from the magnetron is measured by the power measurement system , and displayed by computer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบการให้ความร้อน	3
2.1 ซิววิทยาเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบการให้ความร้อน	3
2.2 ฟิสิกส์เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบการให้ความร้อน	5
2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับผลของความร้อนที่มีต่อเซลล์	6
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการทํางานของระบบ	11
3.1 ระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์	11
3.2 ไตเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ ( Directional coupler )	16
3.3 เครื่องวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ ( Microwave power meter )	24
3.4 สตับจูนเนอร์ ( Stub tuner )	25
3.5 ตัวลดทอนกำลังงานคลื่น ( Attenuator )	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง	40
บทที่ 5 บทสรุป	54
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	

## สารบัญรูปภาพ

รูป

หน้า

รูปที่ 2.1	แสดงความสัมพันธ์ของการมีชีวิตรอดของเซลล์กับเวลาที่อุณหภูมิต่าง ๆ	8
รูปที่ 2.2	แสดงปริมาณการฉายรังสีเอ็กซ์กับสัดส่วนการอยู่รอดของเซลล์	9
รูปที่ 3.1	แสดงผังภูมิของระบบการให้ความร้อน	11
รูปที่ 3.2	แสดงเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง	16
รูปที่ 3.3	แสดงพอร์ทต่างๆ ของไดเรกชันแนลคัปเปิลอร์	17
รูปที่ 3.4	แสดงไดเรกชันแนลคัปเปิลอร์แบบต่างๆ	18
รูปที่ 3.5	แสดงทูไฮสไดเรกชันแนลคัปเปิลอร์	18
รูปที่ 3.6	แสดงไดเรกชันแนลคัปเปิลอร์ที่ใช้ในการทดลอง	20
รูปที่ 3.7	แสดงเครื่องวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ	24
รูปที่ 3.8	แสดงวงจรขยายสัญญาณ	25
รูปที่ 3.9	แสดงวงจรเสมือนการต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณกับโหลด	26
รูปที่ 3.10	แสดงการต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณกับโหลดที่สภาวะต่างๆ	26
รูปที่ 3.11	แสดงการสะท้อนกลับของกำลังงานที่เกิดจากการไม่แมทชิง	27
รูปที่ 3.12	แสดงดัดเบิ้ล สต๊ิบ จูนเนอร์	28
รูปที่ 3.13	แสดงสมิท ชาร์ต	29
รูปที่ 3.14	แสดงส่วนของสต๊ิบ 1	29
รูปที่ 3.15	แสดงส่วนของสต๊ิบ 2	34
รูปที่ 3.16	แสดงดัดเบิ้ล สต๊ิบ จูนเนอร์ที่ออกแบบได้	34
รูปที่ 3.17	แสดงแอทเทนนูเอเตอร์รูปแบบต่าง ๆ	37
รูปที่ 3.18	แสดงหลักการของแอทเทนนูเอเตอร์แบบปรับค่าได้	38
รูปที่ 3.19	แสดงแอทเทนนูเอเตอร์แบบปรับค่าได้ที่ใช้ในการทดลอง	39
รูปที่ 4.1	แสดงการต่อพอร์ทต่าง ๆ ของไดเรกชันแนลคัปเปิลอร์	40
รูปที่ 4.2	แสดงตำแหน่งของแขนแนลต่าง ๆ ของเทอร์มิเนตคัปเปิล	43
รูปที่ 4.3	แสดงการจัดระบบการทดลองเพื่อฉายคลื่นไมโครเวฟ	43
รูปที่ 4.4 - 4.7	แสดงผลการทดลองการควบคุมอุณหภูมิที่เงื่อนไขต่าง ๆ	44 - 47
รูปที่ 4.8 - 4.10	แสดงผลการทดลองวัดอุณหภูมิและกำลังงานที่เงื่อนไขต่าง ๆ	50 - 52
รูปที่ ก-1	แสดงวงจร 2 พอร์ท	ภาคผนวก
รูปที่ ก-2	แสดงสายส่งในลักษณะวงจร 2 พอร์ท	"
รูปที่ ก-3	แสดงวงจร 3 พอร์ท	"
รูปที่ ก-4	แสดงซิกแนลโฟลว์กราฟ (Signal flow graph) สำหรับเน็ตเวิร์กสองพอร์ท	"
รูปที่ ก-5	แสดงซิกแนลโฟลว์กราฟ (Signal flow graph) สำหรับเน็ตเวิร์กหลายพอร์ท	"

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

ระบบการรักษามะเร็งโดยการให้ความร้อน ( Hyperthermia Cancer Therapy ) เป็นรูปแบบการรักษามะเร็งแบบใหม่ที่เป็นความหวังของมนุษยชาติ มีพื้นฐานและหลักการทางชีววิทยาที่สามารถพิสูจน์ทดลองและอธิบายได้ เมื่อไม่นานมานี้มีผู้สามารถค้นพบเทคนิคที่นำระบบการให้ความร้อน ( Hyperthermia ) มารักษามะเร็งชนิดต่าง ๆ ได้ทั่วร่างกายและได้ผลการรักษาที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตามผลการทดลองทางคลินิกที่กำลังดำเนินการอยู่ในขณะนี้เพื่อดูประสิทธิภาพของการรักษา วิธีที่ปลอดภัยในการให้ความร้อนที่ก้อนเนื้ออก และการตรวจวัด วิธีการรักษา เป็นสิ่งที่สำคัญต่อแนวทางของเวชปฏิบัติในอนาคต

หนึ่งในภาษาไทยมีคำอยู่สองคำคือคำว่ารังสีรักษา ( Radiotherapy ) และเคมีบำบัด ( Chemotherapy ) ซึ่งสองคำนี้มีความหมายต่างจากการรักษามะเร็งด้วยความร้อนที่เรียกว่า ' Hyperthermia Cancer Therapy ' ซึ่งยังไม่มีศัพท์บัญญัติในภาษาไทย

มีการศึกษาและประเมินผลบทบาทของระบบการให้ความร้อนในการรักษามะเร็ง ณ สถาบันต่าง ๆ ในประเทศที่มีการพัฒนาทางวิทยาศาสตร์การแพทย์ทั่วโลก อาจจะต้องได้ว่าระบบการให้ความร้อน คือการรักษามะเร็งโดยการเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์มะเร็งให้ขึ้นไปถึง 41 ถึง 46 องศาเซลเซียส โดยการให้ความร้อนจากภายนอกแล้วรักษาอุณหภูมินี้ให้คงที่ไว้ตลอดช่วงเวลาที่เหมาะสม และต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของเซลล์ปกติไม่ให้สูงจนเกินไป การทำเช่นนี้จะเป็นการรักษามะเร็งที่นำมาช่วยเสริมให้วิธีการอื่นที่มีอยู่ อันได้แก่ การรักษาทางเคมี การรักษาทางรังสี ฯลฯ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจากเดิม 25 % เป็น 60 -70 % ซึ่งมีการพัฒนาระบบการให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้คลื่นไมโครเวฟซึ่งใช้สายอากาศปล่อยคลื่นแบบสลิตอาร์เรย์ ( Slot Array ) บนผิวทรงกลม

ความถี่คลื่นไมโครเวฟที่ใช้มีหลายค่าซึ่งการที่จะเลือกใช้ความถี่ใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะ ขนาด และตำแหน่งของเซลล์มะเร็ง โดยที่ความถี่ต่ำสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในร่างกายได้ลึก แต่ไม่สามารถโฟกัสสนามให้อยู่ในบริเวณแคบ ๆ ในขณะที่การเลือกใช้ความถี่สูง ๆ เช่น 915 MHz หรือ 2450 MHz สามารถโฟกัสสนามได้ดี แต่สามารถทะลุทะลวงเข้าไปในร่างกายได้เป็นบริเวณตื้นๆ

ถึงแม้ว่าจะมีหลักการในการใช้ระบบการให้ความร้อนรักษามะเร็งมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2503 แต่เทคนิคการให้ความร้อนและการตรวจวัดความร้อนในผู้ป่วยนั้นพบว่าเป็นไปด้วยความยากลำบากพอสมควร ดังนั้นแม้ว่านักฟิสิกส์และวิศวกรได้พัฒนาเทคนิคของการผลิตเครื่องมือไฮเปอร์เทอร์เมีย ได้แล้ว โดยมีแพทย์เป็นผู้ประเมินประสิทธิภาพของการใช้ในคลินิก แต่ก็ยังต้องการการวิจัย และพัฒนาอีกมากโดยเฉพาะในเรื่องของวิธีการรักษามะเร็งที่อยู่ลึก ( Deep-seated Tumors )

สำหรับโครงการนี้ได้พัฒนาส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบ ให้เป็นระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่ควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ในการควบคุมระดับของอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการโดยใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2450 MHz โดยข้อมูลที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาให้เป็นระบบที่สมบูรณ์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับหลักการการให้ความร้อน ผลของความร้อนที่มีต่อเซลล์ในเชิงชีววิทยาเพื่อเป็นความรู้พื้นฐานสำหรับวิศวกร หลักการทำงานของระบบการให้ความร้อน หลักการทำงานของระบบวัดกำลังงานคลื่น ตลอดจนอุปกรณ์ทางไมโครเวฟที่จำเป็นต้องใช้ในระบบวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ และรายงานผลการทดลองในสภาวะต่าง ๆ กันเพื่อศึกษาการทำงานของระบบฯ ในส่วนของการควบคุมอุณหภูมิ การระบายความร้อน และการวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบการให้ความร้อน

ในบทนี้จะกล่าวถึงประวัติการศึกษาและค้นคว้าเกี่ยวกับระบบการให้ความร้อน , การใช้ความร้อนในการรักษามะเร็ง เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและออกแบบระบบการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟต่อไป

#### 2.1 ชีววิทยาเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบการให้ความร้อน

มะเร็งเป็นสาเหตุการตายอันดับ 2 รองจากโรคหัวใจ โดยประมาณแล้วพบว่าประชากร 1 ใน 4 จะต้องมีโอกาสสัมผัสกับ “มะเร็ง” ในช่วงใดช่วงหนึ่งของชีวิต แม้ว่าจะมีความพยายามในการรักษา แต่ก็สามารถช่วยชีวิตผู้เคราะห์ร้ายได้เพียงครึ่ง วิธีรักษามะเร็งที่ได้ถูกรื้อฟื้นขึ้นมาใหม่เมื่อไม่นานมานี้คือการใช้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของเนื้ออกให้อยู่ในช่วง  $42 - 45^{\circ}\text{C}$  ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า “ Hyperthermia ”

ในปี 1866 W. Busch แพทย์ชาวเยอรมันได้มีรายงานเป็นครั้งแรกพบว่าเซลล์ของก้อนเนื้ออกที่ตายไปมีความสัมพันธ์กับอาการเป็นไข้ตัวร้อนของคนป่วย แต่รายงานการค้นคว้าก็ไม่ได้ดำเนินมาอย่างต่อเนื่อง ในช่วงปี 1900 - 1960 ในปี 1960 ได้มีการก่อตั้งองค์การระหว่างชาติเพื่อศึกษา “ Hyperthermia ” มีประเทศผู้เข้าร่วมหลายร้อยประเทศ และในการประชุมครั้งที่ 4 ที่เดนมาร์กในปี 1984 ตามรายงานของ G.M Hahn ได้ยืนยันว่าอุณหภูมิ  $42 - 45^{\circ}\text{C}$  สามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้ แต่ทั้งนี้จะต้องมีการศึกษาถึงกลไกและอิทธิพลของเซลล์บริเวณรอบ ๆ ปัญหาที่ว่าจะมีวิธีให้ความร้อนเฉพาะก้อนเนื้ออกได้อย่างไร การแสดงผลความร้อน , ปริมาณการให้ความร้อน จึงเป็นการท้าทายสำหรับวิศวกรเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ยังต้องอาศัยความร่วมมือกันเป็นอย่างดีของวิศวกร , นักฟิสิกส์ , นักชีววิทยาและแพทย์

ก่อนจะกล่าวถึงชีววิทยาของความร้อน ( Thermobiology ) ขอกล่าวถึงประวัติความเป็นมาของการใช้ความร้อนรักษาโรค โดยเฉพาะมะเร็งพอสั่งเขปดังนี้

\* 3000 ปี ก่อนคริสตกาล ในประเทศอินเดียมีการรักษาโรคด้วยวิธีอายุรเวชโดยใช้ความร้อนกับผู้ป่วยโดยใช้อ่างไอน้ำ ( Streambaths ) และในประเทศอียิปต์รักษามะเร็งเต้านมด้วยการใช้ไฟเผาบริเวณก้อนเนื้ออก

\* ศตวรรษที่ 4 Rufus แห่ง Ephesus สังเกตว่าการเกิดมีไข้ในผู้ป่วยสามารถบำบัดอาการของโรคต่าง ๆ ได้ รวมทั้งมะเร็งด้วย

\* ค.ศ. 1866 W. Busch แพทย์ชาวเยอรมันรายงานว่าก้อนมะเร็งซาร์โคมา ( Sarcoma ) ที่คอของผู้ป่วยหายไปเมื่อมีไข้สูง

\* ค.ศ. 1895 Roentgen ค้นพบรังสีเอ็กซ์ ( X-rays )

\* ค.ศ. 1909 Schmidt เสนอให้นำระบบการให้ความร้อนมาใช้เป็น Radiosensitizing agen หรือสารที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพของรังสีในการทำลายเซลล์มะเร็ง

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\* ค.ศ. 1932 - 1944 Freundlich ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง ( Ultrasound ) ในการกำเนิดความร้อน แต่ไม่ประสบความสำเร็จเป็นที่น่าพอใจ

\* ค.ศ. 1936 - 1947 เป็นช่วงเวลาที่มีการรายงานผลการรักษาด้วยคลื่นไมโครเวฟ ( Microwave ) ความถี่ 375 MHz และ 3000 MHz

\* ค.ศ. 1957 - 1965 Waeber ได้รับผลการรักษาเป็นที่น่าพอใจเมื่อใช้คลื่นเสียงความถี่สูงผสมผสานกับรังสีรักษา

ประวัติของระบบการให้ความร้อนในยุคประวัติศาสตร์การแพทย์แผนปัจจุบันโดยสรุปก็คือความก้าวหน้าและความสนใจของมนุษย์ในช่วงระยะแรกต่อการนำความร้อนมาใช้ในการรักษามะเร็งนั้นมีน้อยเนื่องจากความยากลำบากทางเทคนิค และการพัฒนาก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของการรักษาด้วยวิธีอื่น ได้แก่ การผ่าตัด รังสีรักษา และเคมีบำบัด จึงทำให้ความสนใจต่อไฮเปอร์เทอร์เมียไม่มากเท่าที่ควร แต่เมื่อเวลาผ่านไปมนุษยาก็ตระหนักถึงข้อจำกัดของการรักษาหลักทั้ง 3 วิธีดังกล่าว ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาของมะเร็งระยะลุกลามที่ผ่าตัดไม่ได้ ปัญหาของเซลล์มะเร็งที่ดื้อต่อรังสี ดื้อยาและอาการข้างเคียงที่เกิดจากรังสีและยา เป็นต้น ในปี ค.ศ. 1967 Cavaliere แพทย์ชาวอิตาลีเป็นผู้สรุปว่าเซลล์มะเร็งมีความไวต่อความร้อนมากกว่าเซลล์ปกติ จึงเป็นการจุดประกายให้หวนกลับมาวิจัยและพัฒนาการนำความร้อนมาใช้รักษามะเร็งอีกครั้ง ผลจากการวิจัยสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเพียงไม่กี่องศาจะมีผลอย่างมากต่อเซลล์และเนื้อเยื่อและยืนยันว่าความร้อนมีผลต่อการทำลายเซลล์มะเร็งแน่นอนโดยเฉพาะในช่วง 41 - 46 องศาเซลเซียส

### หลักการสำคัญในการนำระบบการให้ความร้อนมาใช้รักษามะเร็ง

สาเหตุสำคัญที่ทำให้มีการนำระบบการให้ความร้อนมาใช้ในการรักษามะเร็ง มีดังนี้

1. เซลล์ดื้อต่อรังสี ( ซึ่งเป็นปัญหาของการรักษาทางรังสี ) จะถูกทำลายได้ง่ายโดยความร้อน

2. ความร้อนจะเพิ่มประสิทธิภาพการทำลายเซลล์มะเร็งของรังสีและยารักษามะเร็งบางชนิดได้และจะยับยั้งขบวนการฟื้นตัวของเซลล์หลังการใช้รังสีและยา หลักการเพิ่มประสิทธิภาพการทำลายเซลล์มะเร็งจึงเป็นทั้งแบบแอดดิทีฟ ( Additive ) และซินเนอร์จิสติก ( Synergistic )

3. เซลล์มะเร็งในร่างกายจะถูกทำลายโดยความร้อนได้ง่ายกว่าเซลล์ปกติ เนื่องจากสภาพแวดล้อมของเซลล์มะเร็งได้แก่ สภาพออกซิเจนต่ำ สภาพความเป็นกรดสูง เซลล์ขาดอาหารเพราะเส้นเลือดที่ไปเลี้ยงไม่สมบูรณ์เท่าเซลล์ปกติ

4. การวิจัยเบื้องต้นทางคลินิกพบว่า เซลล์มะเร็งที่ได้รับความร้อน 41 - 45 องศาเซลเซียส มีการตอบสนองที่ดีต่อการรักษากว่า 70 % โดยที่อาการแทรกซ้อนไม่มากขึ้น แต่การให้ความร้อนแก่คนไข้แบบทั้งตัว ( Whole Body Hyperthermia ) ที่อุณหภูมิเกินกว่า 42 องศาเซลเซียส เป็นเรื่องยากและมีอาการแทรกซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ฟิสิกส์เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบการให้ความร้อน

การให้ความร้อนร่วมกับการฉายรังสีในการรักษามะเร็งเริ่มได้รับความสนใจมากขึ้น วิทยาการแขนงนี้ได้เริ่มมีผู้ค้นคว้ามาก่อนต้นศตวรรษที่ 19 โดย Rohdenburg ในปี ค.ศ. 1921 และเริ่มมีการศึกษาลักษณะของความร้อนร่วมกับการฉายรังสีอย่างมากและนำมาใช้รักษากับผู้ป่วยอย่างจริงจังในราวกลางศตวรรษที่ 19 โดยใช้ต้นกำเนิดความร้อนที่ต่างกัน

ในปัจจุบันนี้ต้นกำเนิดความร้อนสามารถแบ่งแยกออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ( Electromagnetic wave ) และคลื่นเสียงความถี่สูง ( Ultrasound )

1. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ( Electromagnetic wave ) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือคลื่นวิทยุ ( Radiofrequency ) ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 3 MHz จนถึง 100 MHz และคลื่นไมโครเวฟ ( Microwave ) ในช่วงความถี่ 300 MHz ถึง 3 GHz

2. คลื่นเสียงความถี่สูง ( Ultrasound ) ในช่วงความถี่ 1 MHz ถึง 10 MHz ซึ่งคลื่นแต่ละประเภทและความถี่ มีข้อจำกัดและประโยชน์ในการใช้งานต่างกัน

เนื่องจากโครงการนี้ใช้คลื่นไมโครเวฟความถี่ 2450 MHz ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงจะกล่าวถึงการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบการให้ความร้อนเพิ่มเติมดังนี้

เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการทำให้เกิดความร้อนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงความถี่ 0.3 จนถึง 3 GHz มีพลังงานในช่วง  $1 \times 10^{-2}$  eV จนถึง  $1 \times 10^{-5}$  eV จึงไม่สามารถทำให้เกิดการแตกตัวของประจุ ( Ionization ) เช่น H-bond ต้องใช้พลังงานประมาณ  $2 \times 10^1$  eV หรือทำให้เกิดการแตกตัวของประจุ ( ประมาณ 10eV ) ได้ ดังนั้นพลังงานที่สูงสูญเสียไปส่วนใหญ่จะกลายเป็นความร้อนให้แก่ระบบที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปความร้อนที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการที่โมเลกุลถูกบิดตัวไปจากสภาวะปกติ ( rotating polar molecule ) หรือการสั่นตัว ( oscillation ) ของอิเล็กตรอนอิสระ ( free electron ) และประจุอิสระ ( free ion ) ในกรณีของคลื่นไมโครเวฟความถี่ 300 MHz ถึง 30 GHz การเกิดความร้อนส่วนใหญ่จะเกิดจากการสั่นและบิดตัว ( oscillation ) ของโมเลกุลของน้ำ ดังนั้นอวัยวะที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ เช่น ผิวหนัง และกล้ามเนื้อต่าง ๆ จึงเป็นตัวดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟที่ดี

### การเลือกให้ความถี่ที่ความลึกต่าง ๆ

ความลึกของการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟจะน้อยลงเมื่อความถี่ของคลื่นที่ใช้เพิ่มขึ้น เนื่องจากคลื่นความถี่สูงกว่าสามารถทำให้เกิดสภาพของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่า ในตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน นั่นคือพลังงานที่ถูกดูดกลืนจะสูงขึ้นตามสมการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = 1/2 \sigma |E|^2 \quad (\text{watt} / \text{m}^3)$$

$P$  = พลังงานที่ถูกดูดกลืน ( Power absorbtion )

$\sigma$  = ค่าความนำของสารตัวกลาง ( Conductivity of medium )

$E$  = ค่าขนาดของสนามไฟฟ้า ( Magnetude of electric field )

สำหรับความถี่ที่ใช้ในด้านการแพทย์ที่ผลิตออกมาทางการค้า ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความถี่ 13.56 , 27.12 , 40.68 , 433 , 915 และ 2450 MHz และที่กำลังเป็นที่นิยมขณะนี้คือ 915 และ 2450 MHz โดยมีกำลังของคลื่นไมโครเวฟตั้งแต่ 10 ถึง 500 วัตต์ ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้เกิดความร้อนมากกว่า 43 องศาเซลเซียส ที่ความลึกประมาณ 2 ถึง 3 เซนติเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบและการโฟกัสของสายอากาศปล่อยคลื่นไมโครเวฟ ( Microwave Applicator )

### 2.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับผลของความร้อนที่มีต่อเซลล์

ปัจจุบันในการรักษามะเร็งเราพุ่งจุดสนใจไปที่การพยายาม 'ฆ่า' เซลล์เนื้อร้าย ซึ่งระบบการให้ความร้อน เป็นวิธีการที่สามารถทำได้ ซึ่งเป็นเพราะการไวต่อความร้อนของเซลล์มะเร็งเอง อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมทางกายภาพของเซลล์มะเร็งนั่นเอง

สภาวะที่ทำให้เซลล์มีความไวต่อความร้อนได้แก่ การมีอาหารมาเลี้ยงเซลล์ไม่เพียงพอ, สภาพภายในเซลล์เป็นกรด ( pH ต่ำ ) และการขาดแคลนออกซิเจนสำหรับขบวนการเมตาโบลิซึมภายในเซลล์

การให้ความร้อนจะช่วยเสริมให้การรักษาโดยใช้รังสีเอกซ์ ( X-ray ) และโดยการใช้ยาเพราะว่าการรักษาโดยวิธีดั้งเดิมร่วมกับการให้ความร้อน จะสามารถยับยั้งเซลล์มะเร็งได้ดีกว่าการรักษาโดยวิธีอย่างเดิมเพียงวิธีเดียว ซึ่งได้มีการทดสอบกับหนู แล้วได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนแก่เนื้ออกไม่ใช่ว่าจะสามารถ ทำให้เนื้ออกรับอุณหภูมิได้อย่างสม่ำเสมอ เพราะมีระบบไหลเวียนโลหิต ช่วยระบายความร้อนนั่นเอง และการไหลเวียนนี้ก็ได้มีอัตราการคงที่สม่ำเสมอ จึงทำให้การกระจายความร้อนไม่คงที่

แพทย์ชาวโรมันและกรีกพบถึงความสัมพันธ์ระหว่างอาการเป็นไข้ตัวร้อนมีผลช่วยในกระบวนการรักษาโรค ในช่วงที่ยังไม่มียาสมัยใหม่ในการรักษาโรคได้มีข้อสมมติฐานว่าอาการไข้ตัวร้อนช่วยให้ความเจ็บไข้หรือโรคภัยบางอย่างหายได้ แต่อย่างไรก็ดี ในปัจจุบันนี้พบว่าไม่ได้ผลดังนั้นนัก เพราะเชื้อแบคทีเรียสามารถปรับตัวให้อยู่ได้ในอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิร่างกาย

อุณหภูมิร่างกายที่สูงจากการเป็นไข้ตัวร้อนจะยับยั้งการเจริญและแพร่พันธุ์ของเชื้อไวรัสบางชนิด แต่ก็ไม่แน่ใจว่าการค้นพบความสัมพันธ์ดังกล่าวจริงๆแล้วจะเป็นวิธีการรักษาโรคที่เกิดจากเชื้อไวรัสหรือแบคทีเรียหรือไม่

ทราบชัดเจนแต่เพียงว่าอากาศใช้สูงมาก ( มากกว่า  $42^{\circ}\text{C}$  ) จะมีผลทำให้คนไข้ช็อค สิ้นสะท้านไปทั้งตัว พิษไข้ทำลายระบบสมอง ซึ่งอาจถึงตายได้

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ในห้องทดลองของอเมริกาและอีกหลายประเทศได้มีการทดลองและศึกษาผลของการใช้ความร้อนทั้งการให้ความร้อนอย่างเดี่ยวและการให้ความร้อนร่วมกับการฉายรังสีเอ็กซ์ หรือ ร่วมกับการใช้ยาบำบัดมะเร็ง โดยการทดลองกับหนูทดลอง ผลที่ได้เป็นที่น่าพอใจ สำหรับที่จะขยายให้ถึงขั้นใช้ใน คลินิกเพื่อทดลองกับคน ซึ่งจะต้องได้รับการพัฒนาเครื่องมือในการให้ความร้อน รวมถึงระบบการตรวจวัดความร้อนจากวิศวกรซึ่งไม่ใช่ช่างที่ง่ายนัก พร้อมกันนั้นก็ต้องอาศัยความร่วมมือของนักชีววิทยา และแพทย์

### อัตราการมีชีวิตรอดของเซลล์ที่อุณหภูมิสูง

การรักษามะเร็งทุกวิธีในปัจจุบันมุ่งความสำคัญไปที่การกำจัดเซลล์มะเร็งให้ได้มากที่สุดโดยไม่กระทบกระเทือนเซลล์ปกติ วิธีหนึ่งที่ใช้คือการผ่าตัดเซลล์มะเร็งออกไป แต่ก็มีข้อจำกัด คือ การผ่าตัดใช้ไม่ได้กับมะเร็งที่อวัยวะสำคัญ ๆ เช่น ปอด สมอง หัวใจ ฯลฯ ส่วนการรักษาโดยการฉายรังสีเอ็กซ์ มีข้อจำกัด คือ จะมีผลข้างเคียงต่อเซลล์ปกติที่อยู่รอบ ๆ บริเวณเซลล์มะเร็ง ระบบการให้ความร้อน ก็เป็นวิธีหนึ่งในการฆ่าเซลล์มะเร็ง และเป็นการให้ความร้อนเฉพาะจุดไม่ใช่การให้ความร้อนทั้งตัว

### ปริมาณการให้ความร้อน

พิจารณาจากกราฟของการตอบสนองต่อปริมาณการให้ความร้อน พบว่า 2 ตัวแปรคืออุณหภูมิ กับ เวลาที่ใช้สำหรับอุณหภูมินั้น ต่างก็มีความสำคัญเท่า ๆ กันต่อโอกาสการมีชีวิตรอดของเซลล์ ซึ่งความสัมพันธ์ของการมีชีวิตรอดของเซลล์กับตัวแปรทั้งสองไม่เป็นเส้นตรงดังรูป 2.1 ดังนั้นปริมาณการให้ความร้อนจึงไม่สามารถจะกำหนดได้โดยตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง จากกราฟพบว่าที่อุณหภูมิมากกว่า  $43^{\circ}\text{C}$  เซลล์ส่วนใหญ่มีพฤติกรรมแตกต่างมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

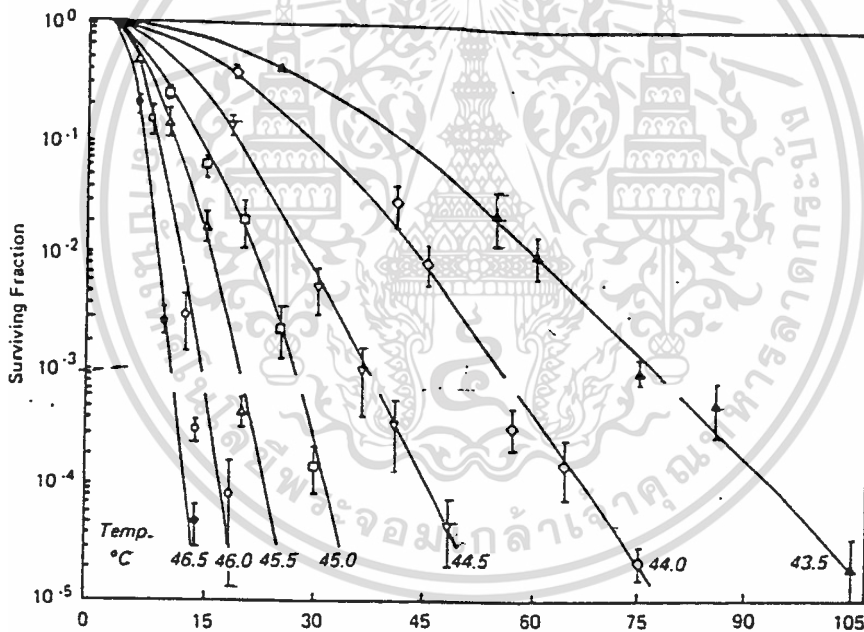
### การศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อการมีชีวิตรอดของเซลล์

จากกราฟรูปที่ 2.1 การทดลองทำในสภาวะมาตรฐานสำหรับเซลล์ปกติ กล่าวคือ เซลล์ได้รับสารอาหารและออกซิเจนอย่างเพียงพอ อุณหภูมิที่  $37^{\circ}\text{C}$  และภาวะความเป็นกรด-ด่าง ที่ pH 7.4 แต่ในสภาพทั่วไปของเนื้องอกพบว่าสารอาหารและออกซิเจนมีปริมาณจำกัดและค่า pH จะต่ำกว่าในเนื้อเยื่อปกติ ล้วนแต่มีผลทำให้เซลล์เนื้องอกไวต่อความร้อนมากกว่าเซลล์ปกติ แม้ว่าสภาพในการทดลองจะควบคุมให้เหมือนกัน ซึ่งถ้ารายงานการทดลองนี้ถูกต้องเป็นจริงก็นับว่าเป็นการโชคดีมากที่พบคุณสมบัติข้อนี้ เพราะเราเพียงแต่ให้ความร้อนแก่คนไข้ด้วยระยะเวลาที่เหมาะสม เซลล์เนื้อร้ายก็就会被กำจัดไปได้ กัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อัตราการเพิ่มปริมาณการให้ความร้อน

ในการใช้งานจริงทางคลินิกการให้ความร้อนไม่ได้ให้ในทันทีครั้งเดียว แต่จะค่อย ๆ ให้ความร้อนทีละน้อย ๆ เพราะว่าการให้ความร้อนโดยการเพิ่มอุณหภูมิอย่างทันทีทันใดเพื่อให้ขึ้นไปถึงอุณหภูมิ 43 หรือ 44 องศาเซลเซียสนั้นมีผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์ ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการเพิ่มอุณหภูมิอย่างเหมาะสม เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อเซลล์ โดยเฉพาะเซลล์ปกติของร่างกาย

ถ้าเราให้ความร้อนแก่เซลล์ที่อุณหภูมิ  $43^{\circ}\text{C}$  หรือมากกว่าเล็กน้อย ในเวลาสั้น ๆ เซลล์ที่รอดชีวิต (ซึ่งมีจำนวนน้อย) จะมีความไวต่อความร้อนยิ่งขึ้นสำหรับการรักษาที่ตามมาที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า สเต็ปดาวน์ (step-down heating) แต่ถ้าในตอนเริ่มต้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $43^{\circ}\text{C}$  เซลล์จะมีความต้านทานต่อความร้อนสำหรับทุกค่าของอุณหภูมิ



รูป 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการมีชีวิตรอดของเซลล์กับเวลาที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

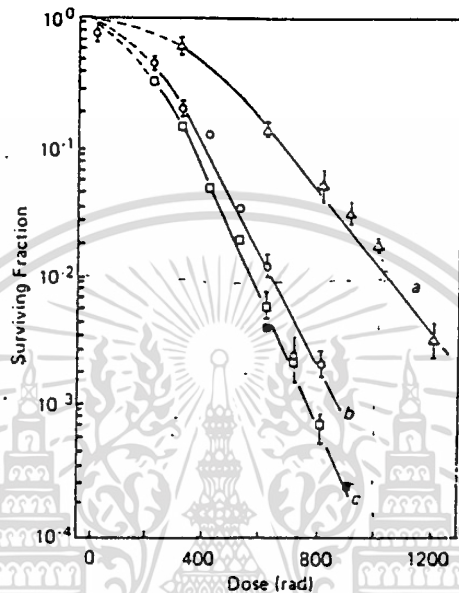
โดยสรุปถ้าเซลล์ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $43^{\circ}\text{C}$  หรือมากกว่า แล้วกลับมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $37^{\circ}\text{C}$  เซลล์ปกติของร่างกายจะมีความต้านทานต่อความร้อนมากกว่าเซลล์ซึ่งไม่ได้ถูกให้ความร้อนมาก่อน 2 กรณีหลังนี้เรียกว่า การทนต่อความร้อนของเซลล์ (Thermotolerant) ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ถึงแม้ว่าร่างกายสัตว์ทุกชนิดจะมีระบบระบายความร้อนอยู่ในตัวอยู่แล้วก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบการให้ความร้อนกับการเพิ่มประสิทธิภาพของการรักษาด้วยรังสีเอ็กซ์

ความร้อนช่วยเสริมประสิทธิภาพในการรักษา ร่วมกับการฉายรังสีเอ็กซ์ และการใช้เคมีบำบัด ตัวอย่าง แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2 การฉายรังสีเอ็กซ์และการให้ความร้อน บางทีอาจเปรียบเทียบกับกรให้โวลต์เดท และกระแสสูงสุด



รูป 2.2 แสดงปริมาณการฉายรังสีเอ็กซ์กับสัดส่วนการอยู่รอดของเซลล์  
 เส้น a แสดงการฉายรังสีโดยไม่มีการให้ความร้อนร่วมด้วย  
 เส้น b แสดงการฉายรังสีก่อนให้ความร้อนที่ 43° C 1 ชั่วโมง  
 เส้น c แสดงการฉายรังสีหลังจากให้ความร้อนที่ 43° C

การฉายรังสี ( Radiation ) เป็นวิธีที่ใช้แพร่หลายเป็นอันดับสองในการรักษามะเร็งดังแสดงในรูปที่ 2.2 การใช้รังสีเอ็กซ์จะดีขึ้นถ้ามีการให้ความร้อนก่อนหรือหลังการฉายรังสี ถ้าปริมาณการฉายรังสีมากกว่า 1000 rads ขึ้นไป พบว่าสำหรับเซลล์ที่ไม่ได้รับการให้ความร้อนจะมีชีวิตรอดถึง 1 ใน 100 แต่สำหรับเซลล์ที่ได้รับความร้อนด้วยจะรอดเพียง 1 ใน 10,000 นอกจากนี้จากกราฟยังพบว่า สำหรับเซลล์ที่ได้รับความร้อนควบคู่กับการฉายรังสีแล้วปริมาณการฉายรังสีเพื่อให้เซลล์ตายในปริมาณเดียวกับที่ใช้การฉายรังสีอย่างเดียว จะต้องการน้อยกว่าประมาณ 30%

ในร่างกายมนุษย์มีกลุ่มเซลล์อยู่ไม่น้อยที่มีออกซิเจนมาเลี้ยงต่ำ ซึ่งเซลล์เหล่านี้จะมีความต้านทานต่อการฉายรังสีเอ็กซ์มาก จึงใช้การรักษาด้วยวิธีนี้ไม่ได้ผล แต่ความร้อนสามารถทำลายเซลล์ดังกล่าวได้ดีเท่า ๆ กับเซลล์ปกติ และข้อสำคัญก็คือการให้ความร้อนในการรักษาตามที่กล่าวมาแล้ว จะได้ผลดีตามที่คาดหวัง หากเราไม่ต้องคำนึงถึงว่าเซลล์ปกติรอบข้างจะถูกทำลายไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลตอบสนองของเซลล์เนื้องอกต่อความร้อน

จากการทดลองกับหนูโดยใช้การปลูกเนื้อเยื่อที่เป็นเนื้องอกที่บริเวณต่าง ๆ พบว่า เนื้องอกบางกลุ่มไวต่อความร้อน ในขณะที่บางกลุ่มกลับต้านทานความร้อน ทั้ง ๆ ที่ให้สภาวะการทดลองเหมือนกัน กลุ่มที่ไวต่อความร้อนการรักษาจะได้ผลโดยใช้อุณหภูมิ  $44^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 30 นาที

และเป็นที่น่าสนใจว่าการให้ความร้อนร่วมกับการฉายรังสีเอกซ์จะมีประสิทธิภาพในการรักษาเซลล์เนื้องอกมากกว่าการฉายรังสีอย่างเดียว แต่ก็ยังมีข้อถกเถียงว่า ในการรักษาควรจะให้ความร้อนก่อนหรือหลังการฉายรังสีเอกซ์ ช่วงเวลาของการรักษาทั้ง 2 วิธี ควรจะเป็นเท่าไร และ ช่วงห่างของการใช้ทั้ง 2 วิธี ควรจะมากน้อยเพียงไร

## ผลของอัตราการใช้ความร้อนของโลหิต

อัตราการใช้ความร้อนของโลหิตมีบทบาทสำคัญ ในระบบการให้ความร้อนเป็นอย่างมาก ประการแรก คือ การไหลเวียนโลหิตจะมีผลต่อการกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอของความร้อนนั่นเอง สำหรับในเนื้อเยื่อปกติ ความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะมีผลให้อัตราการใช้ความร้อนของโลหิตสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยระบายความร้อนไปในตัว ตรงกันข้ามกับในเนื้องอก ซึ่งที่อุณหภูมิ  $43^{\circ}\text{C}$  ถ้าเวลาการให้ความร้อนนานกว่า 30 นาทีแล้ว การไหลเวียนของโลหิตจะหยุดโดยสิ้นเชิง

## การให้ความร้อนอย่างคงที่สม่ำเสมอ

ในการรักษามะเร็งจะต้องหาวิธีกำจัดเซลล์มะเร็งทุกเซลล์ไม่ให้เหลือ เพราะว่าถ้าเหลือแม้แต่เซลล์เดียว มันก็สามารถกระตุ้นให้เซลล์อื่น ๆ เป็นเซลล์มะเร็งขึ้นมาได้ และลูกหลานใหม่ทำให้การรักษาล้มเหลว ดังนั้น ถ้าการให้ความร้อนแก่ก้อนเนื้อเยื่อไม่ทั่วถึงเท่ากันหมดทุกเซลล์ก็อาจทำให้การรักษาไม่ได้ผล แล้วอะไรคือสาเหตุที่ทำให้การให้ความร้อนไม่ทั่วถึงดังกล่าว ดังที่ทราบแล้วว่าจำนวนเซลล์ที่ถูกฆ่าไม่ได้แปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จากกราฟรูป 2.1 จะเห็นว่าแม้แต่อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป  $1^{\circ}\text{C}$  ก็มีผลต่อจำนวนเซลล์ที่รอดชีวิตเป็นอย่างมาก

สำหรับการให้ความร้อนในการรักษานี้ เราต้องทำให้อุณหภูมิสูงพอที่จะ "ฆ่า" เซลล์ได้ แม้แต่ในบริเวณจุดอุณหภูมิต่ำ ( Cold Spot ) หรือจะต้องให้ความร้อนอย่างคงที่สม่ำเสมอที่บริเวณก้อนเนื้องอก และคงอุณหภูมิไว้ ให้เปลี่ยนแปลงได้ไม่เกิน  $1^{\circ}\text{C}$

จุดอุณหภูมิต่ำในร่างกายเกิดขึ้นได้จากการไหลเวียนโลหิตนั่นเอง ซึ่งการหลีกเลี่ยงปัญหานี้ทำได้ยาก โดยเฉพาะถ้ามีโลหิตผ่านบริเวณให้ความร้อนแล้วยังเป็นไปได้อย่างที่จะให้ความร้อนได้อย่างคงที่สม่ำเสมอ

ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นการยืนยันด้วยเหตุผลทางชีววิทยาของเซลล์ ว่าเซลล์เนื้องอกมีการตอบสนองต่อความร้อนที่ได้มากกว่าเซลล์ปกติของร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้ความร้อนร่วมกับการรักษาด้วยวิธีเดิมที่มีอยู่แล้วเช่นการ ผ่าตัด การฉายรังสี การใช้ยา โดยจะช่วยให้การรักษาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ปัญหาต่อไปของระบบการให้ความร้อน คือจะต้องได้รับการออกแบบระบบการให้ความร้อนซึ่งสามารถควบคุมการให้ความร้อนได้อย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เทียบกับอุณหภูมิที่ต้องการควบคุมซึ่งป้อนเข้าไปในตอนแรก ถ้าอุณหภูมิที่อ่านได้มีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม เครื่องคอมพิวเตอร์จะควบคุมให้สตีปปิงมอเตอร์ ( Stepping motor ) โดยผ่านพาราแลลพริ้นเตอร์ พอร์ท ( paralell printer port ) ให้หมุนหม้อแปลงปรับค่าได้ ( Variac ) เพื่อเพิ่มศักดาไฟฟ้าที่จะป้อนให้กับหลอดแมกนีตรอน ซึ่งจะทำการกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟที่ออกจากหลอดแมกนีตรอนมีค่ามากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของสารจำลองเนื้อคนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เพื่อให้เท่ากับอุณหภูมิที่จะควบคุม

ในทางตรงกันข้าม หากอุณหภูมิที่วัดได้มากกว่าที่ต้องการควบคุม เครื่องคอมพิวเตอร์จะควบคุมสตีปปิงมอเตอร์ให้หมุนหม้อแปลงปรับค่าได้ เพื่อลดค่าศักดาไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดแมกนีตรอนซึ่งจะทำให้หลอดแมกนีตรอนปล่อยคลื่นไมโครเวฟออกมาน้อยลง ดังนั้นอุณหภูมิของสารจำลองเนื้อคนก็จะลดลงมาสู่อุณหภูมิที่จะควบคุม การตรวจวัดอุณหภูมิที่สารจำลองเนื้อคนจะถูกกระทำโดยสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาที่ปล่อยคลื่น ด้วยวิธีการดังกล่าวมานี้จะทำให้ระบบสามารถรักษาอุณหภูมิของสารจำลองเนื้อคนให้คงที่ได้ตลอดระยะเวลาที่กำหนด

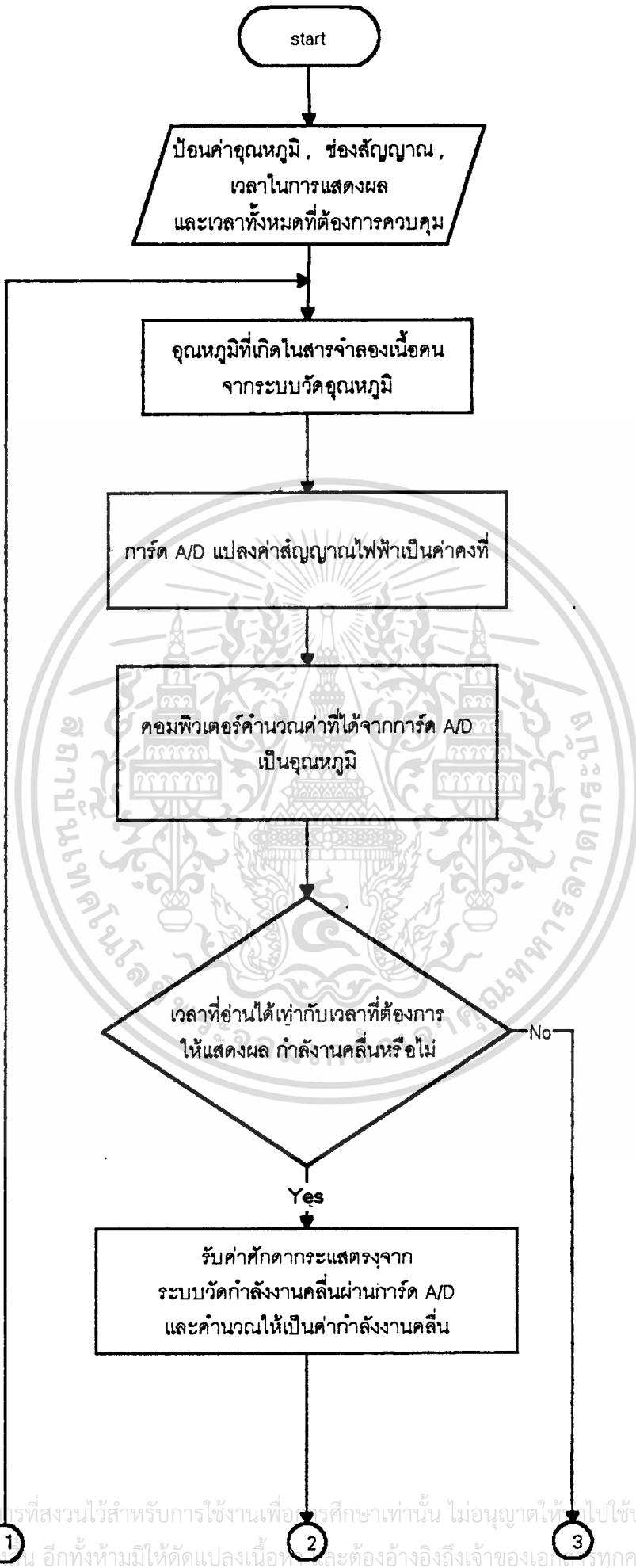
นอกจากการใช้คอมพิวเตอร์ ในการควบคุมการจ่ายศักดาไฟฟ้าให้กับหลอดแมกนีตรอนแล้วยังใช้คอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผลค่าอุณหภูมิที่วัดได้ของแต่ละเซนแนล ที่ความถี่ต่าง ๆ จากผิว และใช้สำหรับคำนวณและแสดงผลค่ากำลังงานเอาท์พุทของคลื่นที่เข้าไปยังสารจำลองเนื้อคนด้วย

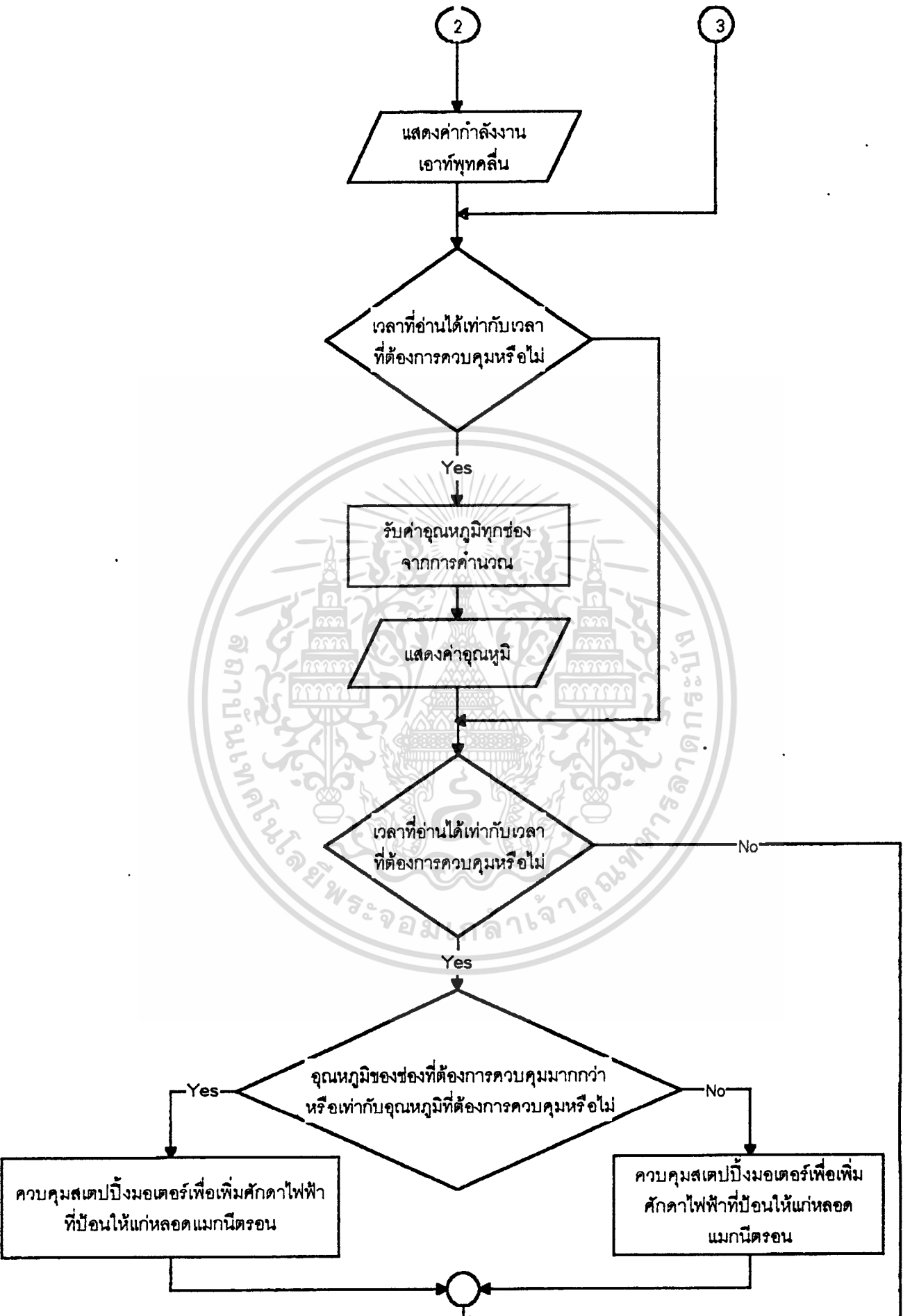
อนึ่งเนื่องจากสายอากาศปล่อยคลื่นที่ใช้เป็นแบบครึ่งทรงกลมเป็นรูสลิตภายใน ดังนั้นเวลาใช้ปล่อยคลื่น บริเวณผิวของสารจำลองเนื้อคนโดยเฉพาะที่ตรงกับรูสลิตจะได้รับสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ทำให้มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่นมาก ดังนั้นจึงต้องมีระบบระบายความร้อนที่บริเวณผิวโดยระบบนี้ประกอบด้วยถุงน้ำระบายความร้อน ( Bolus ) ป้อนน้ำ และเครื่องทำน้ำเย็น

จากที่กล่าวมานี้เพื่อต้องการให้เห็นถึงการทำงานโดยรวมของระบบ และเมื่อนำส่วนต่าง ๆ ของระบบมาประกอบเข้าด้วยกันภายในตู้ที่กระจัดไว้ เพื่อสะดวกในการใช้งานและให้ได้เครื่องต้นแบบสำหรับใช้ในการทดลอง บันทึกผลและเก็บข้อมูล เครื่องต้นแบบที่ได้จะมีลักษณะดังรูป 3.2 และจากการทำงานของระบบดังกล่าวสามารถเขียนเป็นผังงาน ( flow chart ) ดังแสดงในหน้าถัดไป

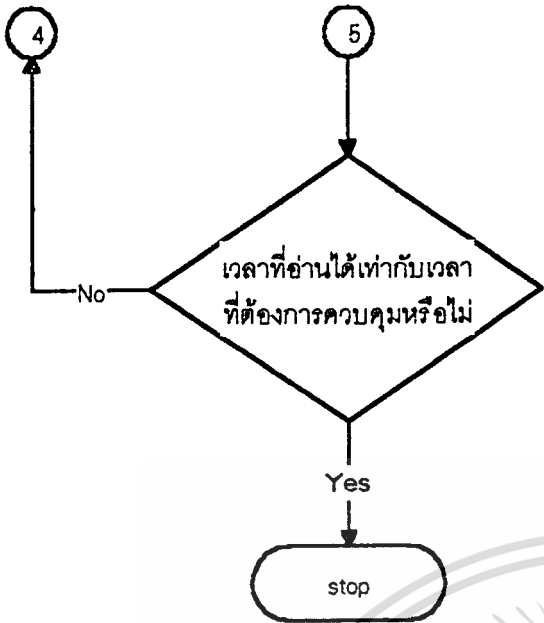
เนื่องจากโครงงานนี้เป็นโครงงานที่พัฒนาต่อเนื่องโดยในภาคการศึกษานี้ได้พัฒนาส่วนตรวจวัดและแสดงผลกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ โดยการใช้โปรแกรมภาษาปาสคาล ( Pascal ) ในการควบคุม,คำนวณ และแสดงผล

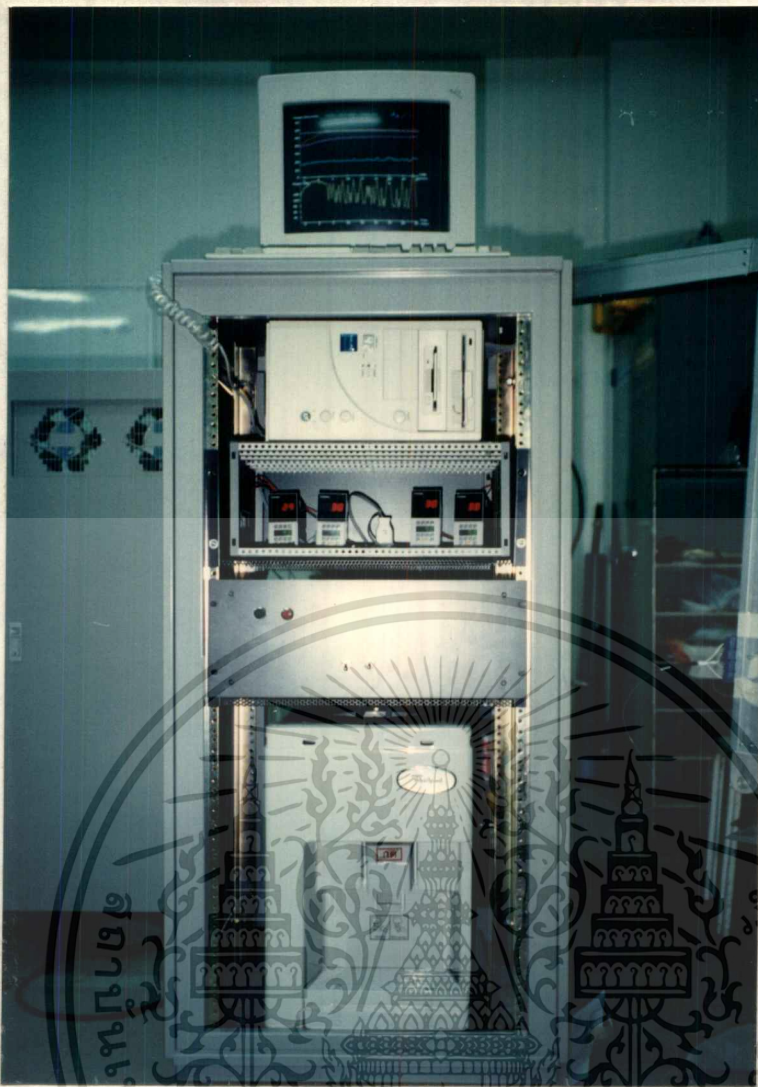
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา (b) ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูป 3.2 แสดงเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดลอง

และเนื่องจากส่วนตรวจวัดกำลังงานคลื่นมีอุปกรณ์ทางไมโครเวฟที่ต้องศึกษาและใช้งานหลายชนิด จึงจะได้กล่าวถึงในรายละเอียด ของหลักการท างาน การออกแบบ และผลการวัดโดยใช้เครื่องเน็ตเวิร์ก - อะนาไลเซอร์ ( network analyzer ) รวมทั้งผลการทดลองใช้งานในระบบจริงต่อไป

### 3.2 ไคเร็กชันแนลคัปเปิลเลอร์ ( Directional coupler)

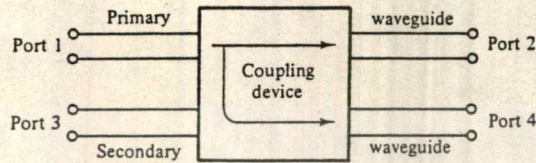
ไคเร็กชันแนลคัปเปิลเลอร์เป็นอุปกรณ์ทางไมโครเวฟที่ใช้สำหรับคัปปลิงกำลังงานคลื่นบางส่วนเพื่อใช้ในการวัดกำลังงาน และจากคุณสมบัติของไคเร็กชันแนลคัปเปิลเลอร์ ที่จะได้กล่าวต่อไป

ไคเร็กชันแนลคัปเปิลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ไมโครเวฟชนิด 4 พอร์ท ดังแสดงในรูป 3.3 จากรูปจะเห็นว่า ไคเร็กชันแนลคัปเปิลเลอร์ ประกอบด้วยส่วนที่เป็น เวฟไกด์หลัก ( Primary waveguide ) คือ พอร์ท 1 และ 2 และเวฟไกด์รอง ( Secondary waveguide ) คือ พอร์ท 3 และ 4 ตามรูป 3.3

ถ้าให้ทุกพอร์ทต่อได้ด้วยค่าแรมเดอริสติกอิมพีแดนซ์ ( Characteristic impedances) จะทำให้การส่งผ่านกำลังงานเป็นไปด้วยประสิทธิภาพเต็มที่ คือ จะไม่มีการสะท้อนกลับระหว่างพอร์ท 1 และ 2 และจะไม่มีกำลังงานคลื่นส่งผ่านระหว่างพอร์ท 1 กับ 3 หรือระหว่างพอร์ท 2 กับ 4 เนื่องจากจะไม่มีกรคัปปลิงเกิดขึ้นระหว่างพอร์ททั้ง 2 คู่นี้เลย

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีก็แต่การส่งผ่านคลื่นจากพอร์ท 1 ไปยังพอร์ท 2 ( ใช้พอร์ท 1 เป็นอินพุท ) และการคับปลิงกำลังงานคลื่นจากพอร์ท 1 ไปยัง 4 ซึ่งขนาดของการคับปลิงจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์เอง ซึ่งจะบอกขนาดด้วยค่าคับปลิงแฟคเตอร์ ( Coupling factor : C ) และการคับปลิงระหว่างพอร์ท 2 และ 3 ( เกิดขึ้นกรณีมีคลื่นสะท้อนกลับ ) อธิบายด้วยค่าไดเรกติวิตี ( Directivity : D )



รูป 3.3 แสดงพอร์ทต่าง ๆ ของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์

ตามรูป สมมติให้คลื่นเดินทางจากพอร์ท 1 เพื่อไปออกเป็นเอาต์พุทที่พอร์ท 2 ค่าคับปลิงแฟคเตอร์และไดเรกติวิตี คำนวณได้ดังนี้

$$\text{Coupling factor ( C )} = 10 \log ( P_1 / P_4 ) \quad (\text{dB})$$

$$\text{Directivity ( D )} = 10 \log ( P_4 / P_3 ) \quad (\text{dB})$$

โดยที่  $P_1$  คือ กำลังงานอินพุทที่พอร์ท 1

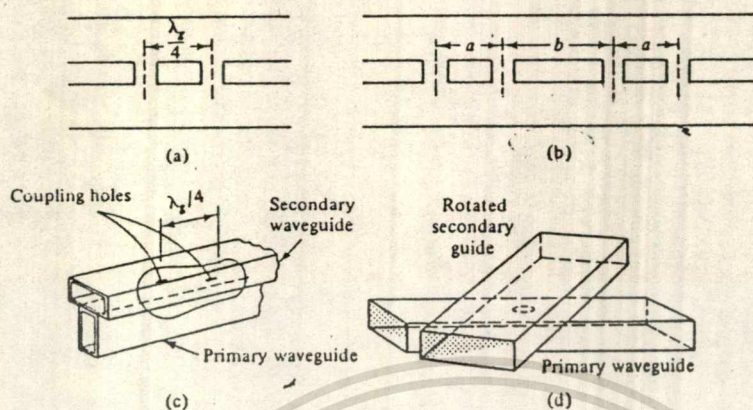
$P_3$  คือ กำลังงานเอาต์พุทจากพอร์ท 3

$P_4$  คือ กำลังงานเอาต์พุทจากพอร์ท 4

ซึ่งพอร์ท 2,3,4 ต้องถูกเทอร์มิเนต ( Terminate ) ไว้ด้วยค่าแรงสะท้อนรีฟลิติมพีแดนซ์ ของพอร์ทนั้น ๆ เอง เพราะว่าค่าคับปลิงแฟคเตอร์ได้จากการวัดอัตราส่วนของระดับกำลังงานในเวฟไกด์หลักและเวฟไกด์รอง ดังนั้นถ้าเรารู้ค่าคับปลิงแฟคเตอร์ เราสามารถวัดค่ากำลังงานจากพอร์ท 4 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สูงนัก เพื่อคำนวณย้อนกลับหาลำดับกำลังงานอินพุทที่พอร์ท 1 ได้ ซึ่งวิธีการวัดอย่างนี้จะมีข้อดีและเป็นที่ต้องการในระบบการวัดกำลังงานไมโครเวฟ เพราะว่าจะไม่มีการรบกวนสัญญาณคลื่นในเวฟไกด์หลัก ซึ่งถ้าหากต่ออุปกรณ์วัดเข้ากับเวฟไกด์หลักโดยตรงแล้วอาจมีการรบกวนซึ่งเกิดจากเครื่องมือวัดนั้นได้ อีกประการหนึ่งคือ ไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ต้องวัดกำลังงานสูงซึ่งจะสร้างได้ยากและราคาแพง สำหรับค่าไดเรกติวิตีเป็นค่าที่บอกให้ทราบว่าสัญญาณที่เดินทางในเวฟไกด์หลัก ( forward traveling ) สามารถคับปลิงไปยังพอร์ทเฉพาะ ( พอร์ท 4 ตามรูป 3.3 ) ในเวฟไกด์รองได้ดีเพียงใด ในทางทฤษฎีแล้วไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์จะมีค่าไดเรกติวิตีมากเป็นอนันต์ ( Infinity ) หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ กำลังงานที่พอร์ท 3 จะเป็น ศูนย์ เพราะว่าที่พอร์ท 2 และพอร์ท 4 มีการแมทช์อย่างสมบูรณ์ ( Perfectly matched ) แต่ในทางปฏิบัติแล้วสามารถสร้างไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ให้มีค่าไดเรกติวิตีสูงสุดได้เพียง 30 - 35 dB

ไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ มีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น แบบทวูโฮล ( Two-hole directional Coupler ) แบบเอจิสอาร์เป็นเอกสารที่สวนวิเศษสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไฟริโฮล ( Four-hole directional Coupler ), แบบรีเวอร์สคัปปลิง ( Reverse-Coupling directional Coupler ) หรือไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า Schwinger Coupler และแบบ เบท-โฮล (Bethe-hole directional Coupler) ตามรูป 3.4 ซึ่ง ใช้กันทั่วไป คือแบบทูโฮล ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

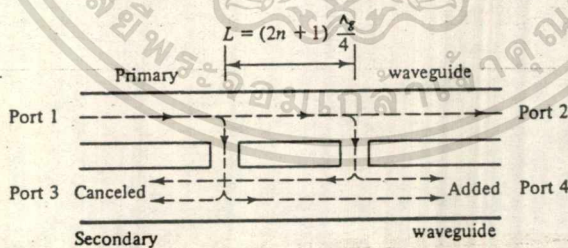


รูป 3.4 แสดงไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์แบบต่าง ๆ  
 a. แบบทูโฮล b. แบบโฟร์โฮล c. แบบรีเวอร์สคัปปลิ่ง d. แบบ เบท-โฮล

**ทูโฮลไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์**

รูป 3.5 แสดงไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์และเส้นทางเดินของคลื่นระหว่างพอร์ทต่าง ๆ ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของทั้ง 2 รู จะเป็น

$$L = (2n+1) \lambda_g / 4 \quad n : \text{จำนวนเต็มบวก}$$



รูป 3.5 แสดง ทูโฮล ไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์

คลื่นที่เข้ามาจากพอร์ท 1 จะแพร่กระจายเข้าไปยังเวฟไกด์รองตามรูทั้ง 2 ซึ่งประพฤติกรรมเหมือนสายอากาศแบบสล็อต (slot antennas) คลื่นที่เดินทางตรงไปยังพอร์ท 4 จากทั้ง 2 เส้นทางจะมีเฟสเดียวกัน เนื่องจากทางเดินของคลื่นทั้ง 2 เส้นทาง เท่ากัน จึง รวมกัน ไปออกที่พอร์ท 4

แต่คลื่นที่เดินทางในทิศกลับจากขวามาซ้ายในเวฟไกด์รองเพื่อออกยังพอร์ท 3 ใน 2 เส้นทางจะมีเฟสแตกต่างกันเท่ากับ  $(2L / \lambda_g) 2\pi$  rad ซึ่งจะหักล้างกันหมดไปที่พอร์ท 3 นั่นเอง  
 ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**สแกตเตอร์ริงเมตริกซ์ สำหรับ ไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์**

( S-Matrix of a Directional Coupler )

เพราะว่าทั้ง 4 พอร์ตของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ถูกต่ออย่างແທງซึ่ง ดังนั้นอีลิเมนต์ในแนวทแยงมุมของ S-Matrix จึงเป็นศูนย์ ( รายละเอียดเรื่อง สแกตเตอร์ริงเมตริกซ์ ดูในภาคผนวก ก. )

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0 \quad \dots\dots\dots 3.1$$

และดังที่ทราบว่าไม่มีการคัปปลิงระหว่างพอร์ต 1 กับ 3 และพอร์ต 2 กับ 4 ดังนั้น

$$S_{13} = S_{31} = S_{24} = S_{42} = 0 \quad \dots\dots\dots 3.2$$

จึงได้ S-Matrix ของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ เป็นดังนี้

$$S = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & 0 & S_{14} \\ S_{21} & 0 & S_{23} & 0 \\ 0 & S_{32} & 0 & S_{34} \\ S_{41} & 0 & S_{43} & 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots 3.3$$

ซึ่งสมการ 3.3 นี้สามารถเขียนลดรูปโดยอาศัยคุณสมบัติของ S-parameter ได้ดังนี้

จากสมการที่ ก - 19 ในภาคผนวก ก. จะได้

$$S_{12}S_{14}^* + S_{32}S_{34}^* = 0 \quad \dots\dots\dots 3.4$$

$$S_{21}S_{23} + S_{41}S_{43} = 0 \quad \dots\dots\dots 3.5$$

จากสมการ ก - 18 จะได้

$$S_{12}S_{12}^* + S_{14}S_{14}^* = 1 \quad \dots\dots\dots 3.6$$

จากสมการ 3.4 และ 3.5 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{vmatrix} S_{12} \\ S_{21} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} S_{14} \\ S_{41} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S_{32} \\ S_{43} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} S_{34} \\ S_{43} \end{vmatrix} \quad \dots\dots\dots 3.7$$

$$\begin{vmatrix} S_{12} \\ S_{14} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S_{32} \\ S_{43} \end{vmatrix} \quad \dots\dots\dots 3.8$$

เพราะว่า  $S_{12} = S_{21}$  ,  $S_{14} = S_{41}$  ,  $S_{23} = S_{32}$  และ  $S_{34} = S_{43}$  จะได้

$$\begin{vmatrix} S_{12} \\ S_{14} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S_{34} \\ S_{23} \end{vmatrix} \quad \dots\dots\dots 3.9$$

$$\begin{vmatrix} S_{14} \\ S_{12} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} S_{23} \\ S_{34} \end{vmatrix} \quad \dots\dots\dots 3.10$$

ให้  $S_{12} = S_{34} = p$  ..... 3.11

โดยที่ p เป็น จำนวนจริงบวก ดังนั้นจากสมการ 3.5 จะได้

$$p(S_{23} + S_{41}) = 0 \quad \dots\dots\dots 3.12$$

ให้

$$S_{23} = S_{41} = jq \quad \dots\dots\dots 3.13$$

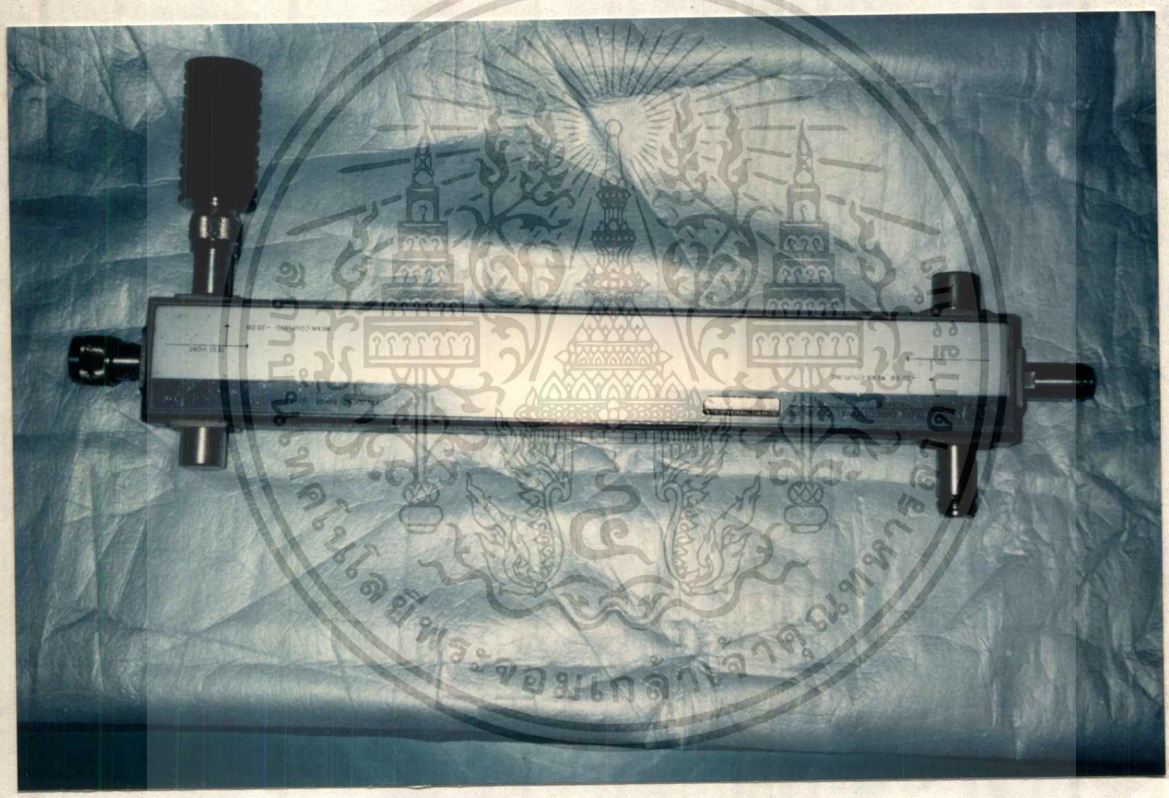
โดยที่ q เป็น จำนวนจริงบวก ดังนั้นจากสมการ 3.6 จะได้

$p^2 + q^2 = 1$  ..... 3.14

ดังนั้น S - matrix ของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์สามารถลดรูปเป็น

$$S = \begin{bmatrix} 0 & p & 0 & jq \\ p & 0 & jq & 0 \\ 0 & jq & 0 & p \\ jq & 0 & p & 0 \end{bmatrix}$$
 .....3.15

ไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ แบบที่ใช้ในการทดลอง เป็นดังรูปที่ 3.6



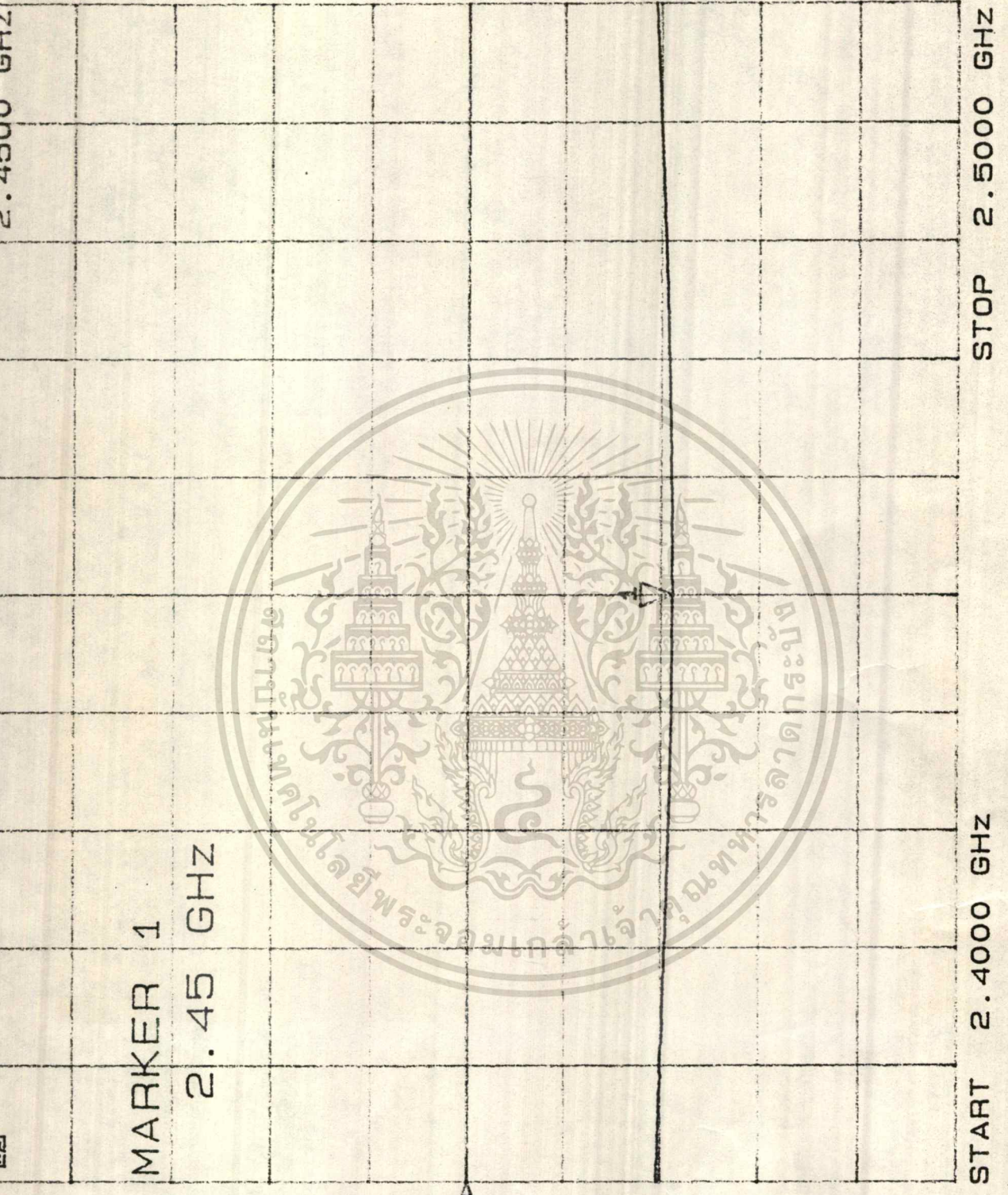
รูปที่ 3.6 แสดงไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ ที่ใช้ในการทดลอง

จากการทดลองกับเน็ตเวิร์กอะนาไลเซอร์เพื่อหาค่าการคัปปลิงระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ได้ผลดังนี้

- อินพุท พอร์ต 1 เอาท์พุท พอร์ต 4 ค่าการสูญเสีย - 21.279 dB
- อินพุท พอร์ต 1 เอาท์พุท พอร์ต 2 ค่าการสูญเสีย - 2.294 dB
- อินพุท พอร์ต 1 เอาท์พุท พอร์ต 3 ค่าการสูญเสีย - 34.353 dB

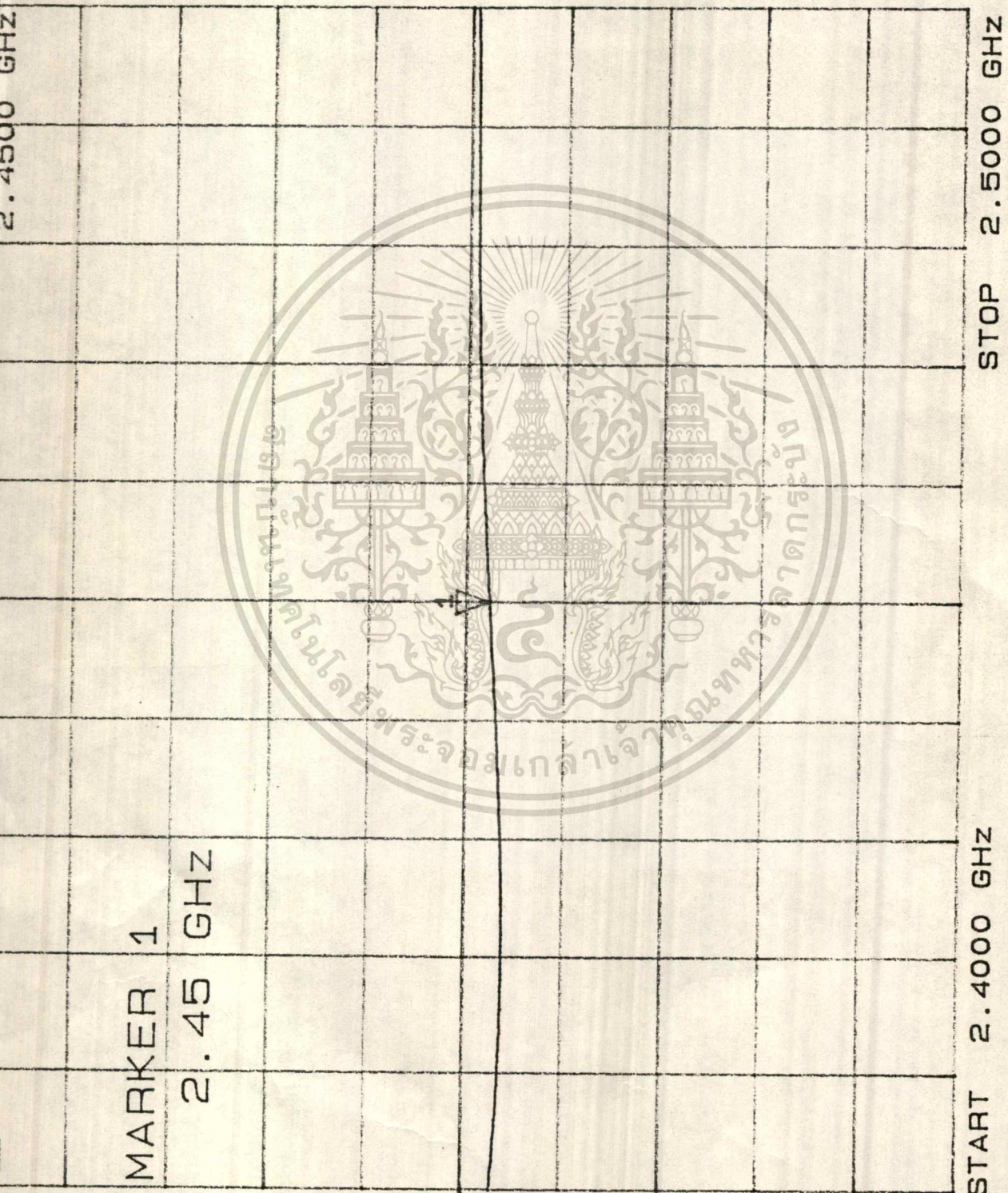
ผลการทดลองแสดงดังชาร์ต หน้าถัดไป

ซึ่งค่าอินพุท พอร์ต 1 ที่เอาท์พุทที่พอร์ต 4 คือค่าคัปปลิงแพคเตอร์นั่นเอง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

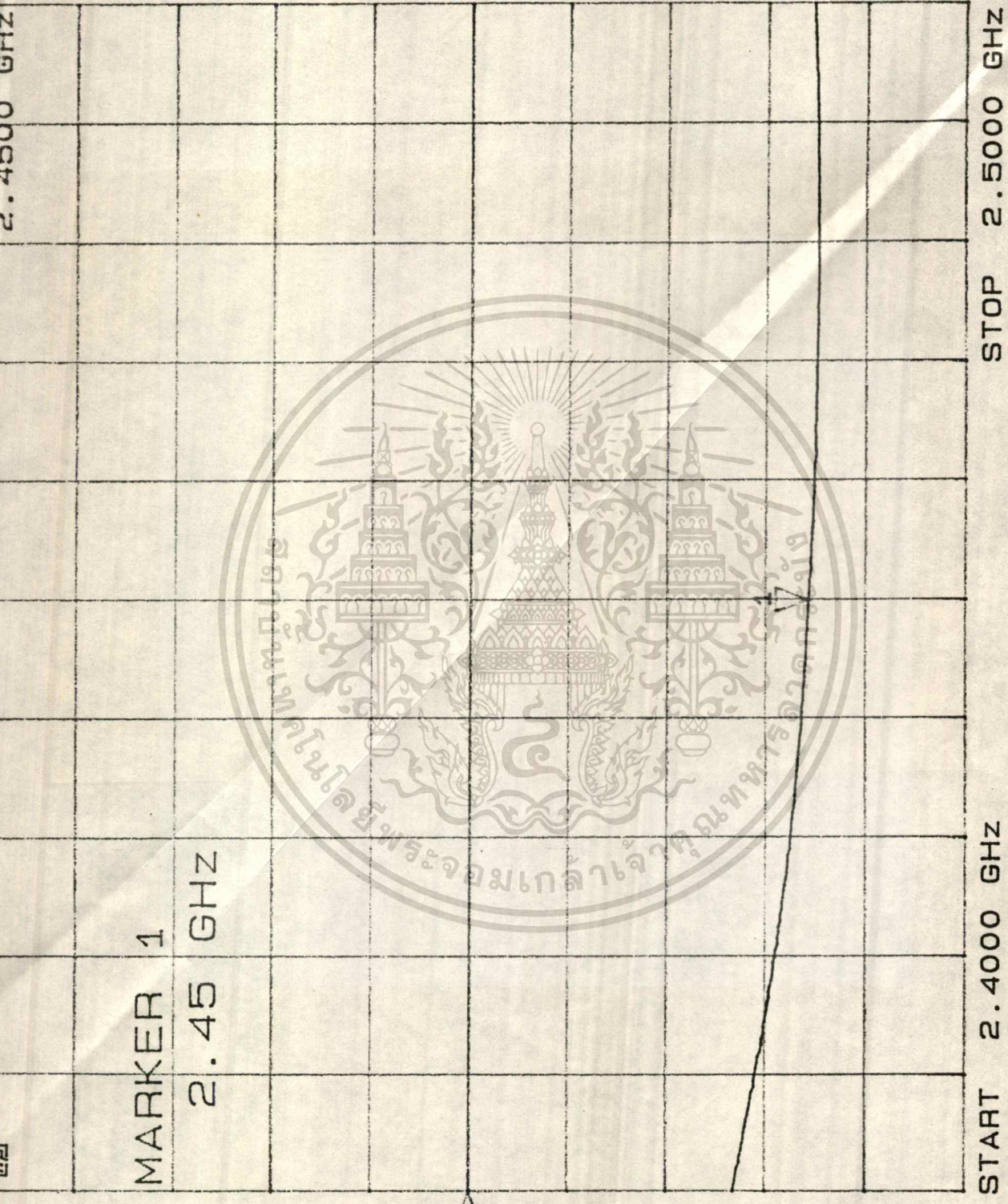


**ชาร์ตแสดงค่าคัปปลิงจากพอร์ท 1 ไปยังพอร์ท 4**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่า ใดใดทั้งสิ้น ย้ำทั้งที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกไปใช้



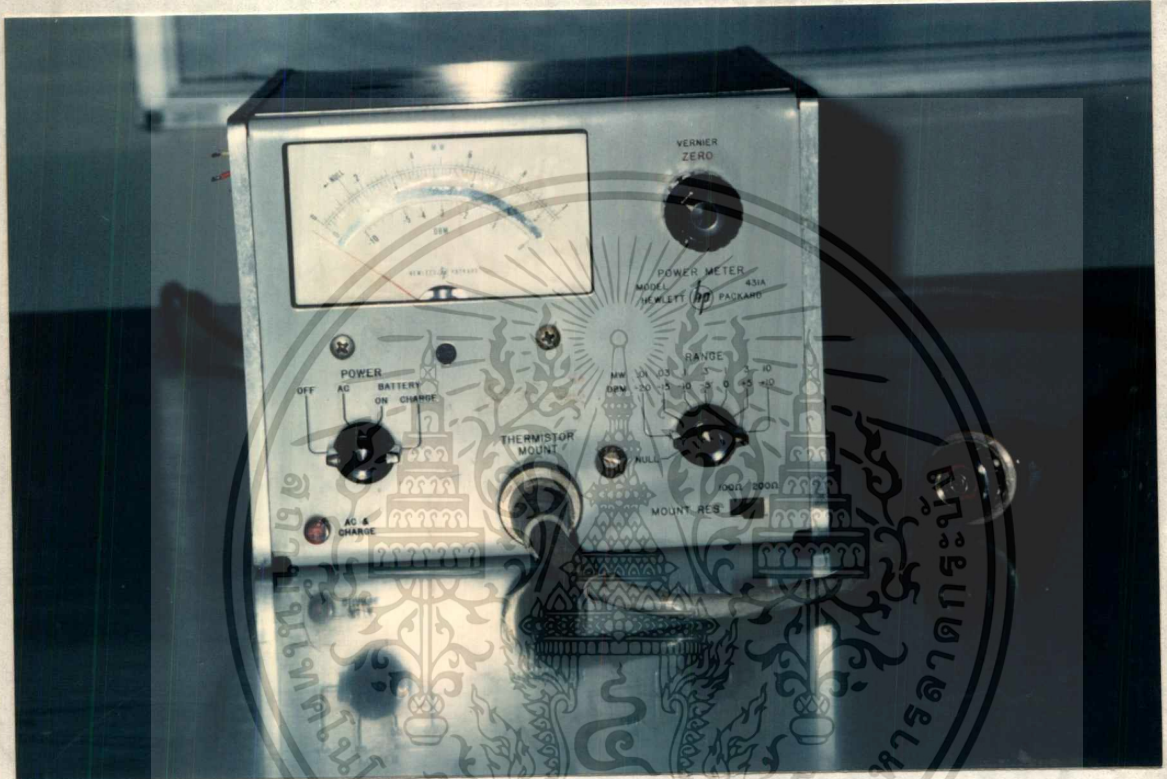
C2

**ชาร์ตแสดงค่าการลดทอนจากพอร์ท 1 ไปยังพอร์ท 3**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น. เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 เครื่องวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ ( Microwave Power Meter )

รูปที่ 3.7 แสดงเครื่องวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งประกอบด้วยเซนเซอร์ ( sensor ) ทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังงานคลื่นไมโครเวฟไปเป็นค่าศักดาไฟฟ้า ( voltage ) ที่สอดคล้องกัน และ ตัวเครื่องวัด ๆ เองจะกำหนดว่าที่ กำลังงานคลื่นไมโครเวฟค่าหนึ่งจะถูกแทนด้วยศักดาไฟฟ้าเท่าไร แล้วจึงแสดงค่ากำลังงานนั้นออกมา



รูป 3.7 แสดงเครื่องวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ

เซนเซอร์ ที่นิยมใช้มีอยู่ 3 ชนิด คือ เทอร์มิสเตอร์ ( thermistor ) , เทอร์โมคัปเปิ้ล ( thermocouple ) และ ไมโครเวฟไดโอด ( microwave diode )

เทอร์มิสเตอร์ และ เทอร์โมคัปเปิ้ล จะรับความร้อนที่สูงขึ้นที่เซนเซอร์ ซึ่งเกิดขึ้นจากคลื่นไมโครเวฟ และความร้อนที่เกิดขึ้นในเซนเซอร์ จะเปลี่ยนเป็นศักดาไฟฟ้าป้อนให้เครื่องวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะเปลี่ยนค่าศักดาไฟฟ้านั้นไปแสดงเป็นกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ

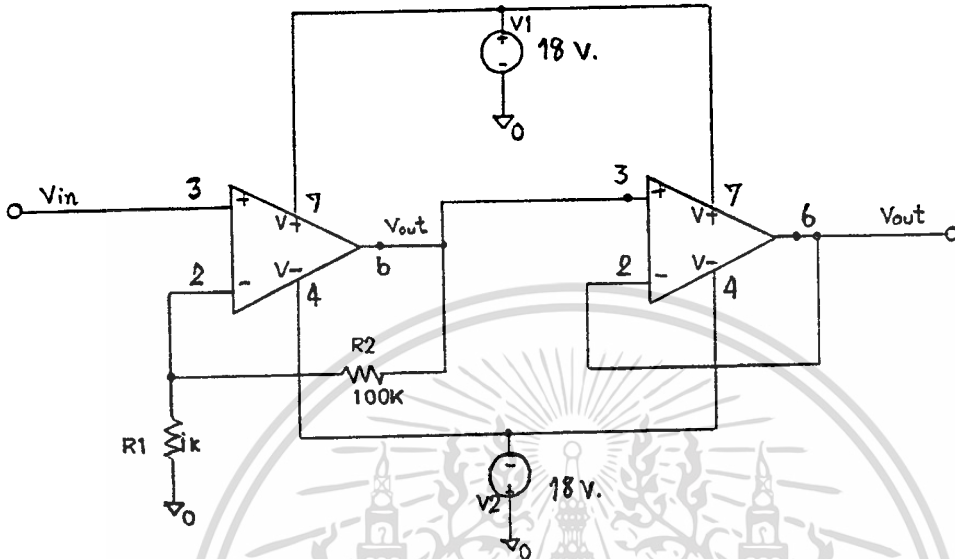
ไมโครเวฟไดโอด เป็นเซนเซอร์ที่เปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟไปเป็นศักดาไฟฟ้ากระแสตรง ( DC ) โดยตรงซึ่ง ไมโครเวฟไดโอด จะตอบสนองต่อพลังงานไมโครเวฟได้เร็วกว่าเซนเซอร์ 2 ชนิดแรก

ในโครงการนี้ ใช้เครื่องวัดกำลังงานคลื่น รุ่น Model 431A ของ Hewlett packard ในการวัดพลังงานไมโครเวฟซึ่งมีตัวเซนเซอร์ เป็นแบบเทอร์มิสเตอร์ โดยต่อ เทอร์มิสเตอร์ กับ พอร์ทคัปปลิง ( พอร์ท 4 ตามรูป 3.6 ) ของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ โดยเครื่องวัดกำลังงานคลื่น จะให้เอาท์พุทเป็นค่าศักดาไฟฟ้าดีซี

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่มีค่าที่อยู่ในระดับมิลลิโวลต์ จึงต้องมีวงจรขยายสัญญาณให้อยู่ในระดับ 1 - 9 โวลต์ เป็นอินพุตป้อนให้กับการ์ด A/D เพื่อแปลงเป็นค่าคงที่ สำหรับใช้ในการคำนวณ ( calibrate ) หากค่ากำลังงานเอาท์พุทของคลื่นที่ฉายไปยังสารจำลองเนื้อคน

วงจขยายสัญญาณที่ใช้เป็นดังรูป 3.8 ซึ่งใช้ IC LM741C



รูป 3.8 แสดงวงจขยายสัญญาณ

วงจขยายสัญญาณตามรูปเป็นวงจขยายสัญญาณไม่กลับเฟส ( non-inverting amplifier ) ซึ่งสามารถหาอัตราขยายได้จากสูตร

$$V_{out} = (1 + R_2/R_1) V_{in} \dots\dots\dots 3.16$$

และ IC ตัวที่สองทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ของวงจร ซึ่งมีกำลังขยายเป็น 1 ตามรูปวงจรที่ใช้มีอัตราขยายเป็น 101 เท่า

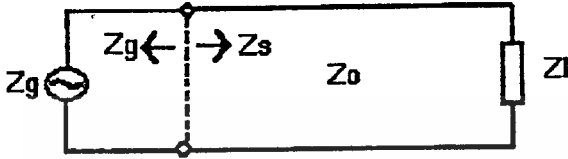
### 3.4 สตัมบูนเนอร์ ( STUB TUNER )

เนื่องจากการส่งคลื่นไมโครเวฟจากหลอดแมกนีตรอนไปยังสายอากาศปล่อยคลื่น ( Applicator ) จะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหลอดแมกนีตรอน ของสายส่ง และ ของสายอากาศไม่เท่ากัน จึงทำให้ไม่ได้กำลังงานสูงสุดที่ปล่อยจากสายอากาศ จึงต้องพยายามปรับให้อิมพีแดนซ์ ของทั้งสายส่งและสายอากาศเท่ากัน ด้วยวิธีการที่เรียกว่า อิมพีแดนซ์ แมทซิง ( Impedance matching )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทฤษฎีการแมทชิงอิมพีแดนซ์ ( Impedance matching )

จากส่วนประกอบหลักของวงจรหนึ่ง ๆ คือแหล่งกำเนิดสัญญาณ ( generator ) และโหลด ( load ) เมื่ออิมพีแดนซ์ ภายในแหล่งกำเนิดสัญญาณ คือ  $Z_g = R_g + jX_g$  แล้ว เพื่อที่จะได้กำลังงานสูงสุดที่เกิดขึ้นที่โหลดนั้น อิมพีแดนซ์ของโหลดจะต้องมีค่าเท่ากับคอนจูเกตอิมพีแดนซ์ ( conjugate impedance ) ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ



รูป 3.9 แสดงวงจรเสมือนการต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณกับโหลด

$$\text{เมื่อ } Z_g = R_g + jX_g \quad , \quad Z_s = R_s + jX_s$$

$$\therefore R_g = R_s$$

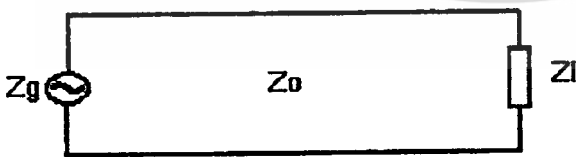
$$X_g = -X_s$$

ถ้าได้ความสัมพันธ์ดังที่กล่าวมาแล้ว จะทำให้การส่งพลังงานมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ ไม่มีพลังงานสะท้อนกลับที่โหลด

เมื่อใช้งานในความถี่ย่านไมโครเวฟนั้น การทำอิมพีแดนซ์ แมทชิง จะมีความสำคัญมากเพราะมีอยู่ 2 เหตุผลที่จำเป็นคือ

- 1) เพื่อให้การส่งพลังงานไปสู่ โหลด มีประสิทธิภาพสูงสุด
- 2) เพื่อไม่ให้เกิดการบิดเบือนของสัญญาณเนื่องมาจากการสะท้อนกลับของสัญญาณจากโหลด

ตัวอย่างพลังงานที่เกิดขึ้นที่ โหลดในกรณีต่าง ๆ เป็นดังต่อไปนี้



รูป 3.10 แสดงการต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณกับโหลดที่สภาวะต่าง ๆ

- 1) เมื่อ  $Z_l = Z_o / 2$

$$\Gamma = (Z_l - Z_o) / (Z_l + Z_o)$$

$$= \{ (Z_o / 2) - Z_o \} / \{ (Z_o / 2) + Z_o \}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= (-1/2) / (3/2)$$

$$= -1/3$$

$$\therefore P = E^2 / Z_1$$

$$= \{(1 - |\Gamma|) E_0\}^2 / (Z_0 / 2)$$

$$= \{(1 - 1/3) E_0\}^2 / (Z_0 / 2)$$

$$= 8 E_0^2 / 9 Z_0$$

$$= 8 P_0 / 9$$

2) เมื่อ  $Z_1 = 2 Z_0$

$$\Gamma = (Z_1 - Z_0) / (Z_1 + Z_0)$$

$$= \{(2 Z_0) - Z_0\} / \{(2 Z_0) + Z_0\}$$

$$= 1/3$$

$$\therefore P = E^2 / Z_1$$

$$= \{(1 - |\Gamma|) E_0\}^2 / (2 Z_0)$$

$$= (4 E_0 / 3)^2 / (2 Z_0)$$

$$= 8 P_0 / 9$$

โดยที่  $\Gamma$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของคลื่น

$Z_0$  คือ ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

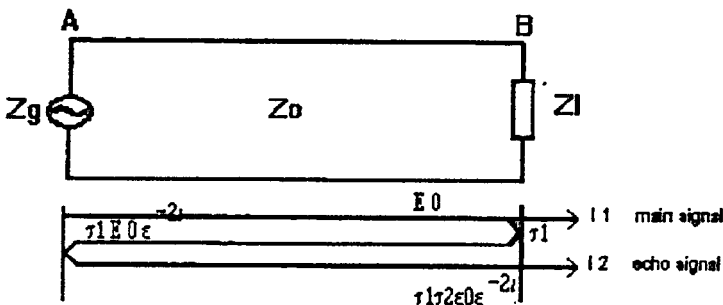
$Z_1$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด

$E_0, P_0$  คือ ค่าศักดาไฟฟ้า และ ค่ากำลังงาน ของแหล่งกำเนิด ตามลำดับ

$P$  คือ ค่ากำลังงาน ที่โหลด

กำลังงานที่เกิดขึ้นที่โหลดมีค่า  $(8/9) P_0$  และกำลังงานที่เหลือจะสะท้อนกลับมีค่า  $(1/9) P_0$

ลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่อวงจรไม่มีการแมทซิ่ง นอกจากนี้สัญญาณที่สะท้อนกลับยังทำให้เกิดการผิดเพี้ยน (distortion) อีกด้วย



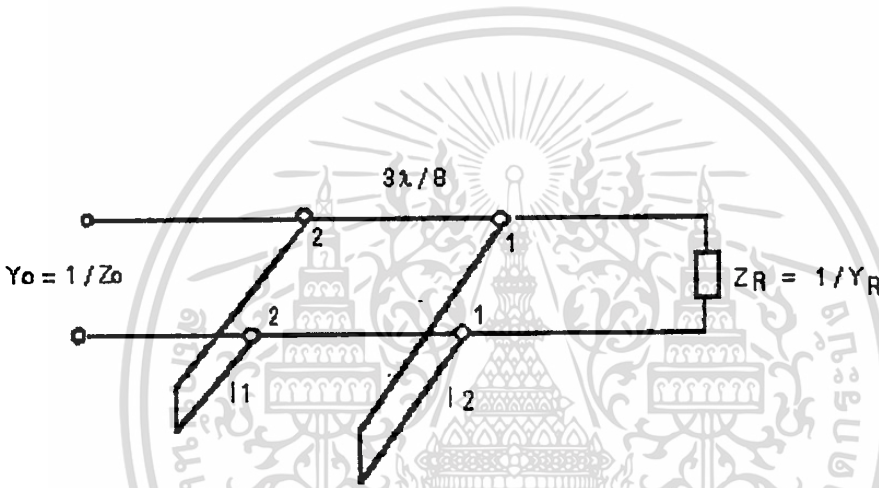
เอกสารนี้เป็นรูป 3.11 แสดงการสะท้อนกลับของกำลังงานที่เกิดจากการไม่แมทซิ่งให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเพื่อให้การส่งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและไม่เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ จึงต้องทำการแมทชิง อิมพีแดนซ์ ให้กับแหล่งกำเนิดสัญญาณและโหลด ให้มีความสัมพันธ์กันดังที่กล่าวมาแต่แรกแล้ว ซึ่งในที่นี้จะใช้ ดับเบิล สตับ จูนเนอร์ ( Double stub tuner ) เนื่องจากการออกแบบไม่ยุ่งยาก และในทางปฏิบัติไม่ต้องเปลี่ยนตำแหน่งของสตับถ้า โหลดเปลี่ยนค่าไป เมื่อเทียบกับซิงเกิล สตับ จูนเนอร์ ( single stub tuner ) ที่ต้องเปลี่ยนตำแหน่งสตับทุกครั้งเมื่อโหลดเปลี่ยนค่า

### หลักการทํางานของดับเบิล สตับ จูนเนอร์ ( Double stub tuner )

ประกอบด้วยสตับ 2 ตัว ที่ปรับค่าได้ ต่ออยู่กับสายส่ง ( transmission line ) ดังรูป 3.12



รูป 3.12 แสดง ดับเบิล สตับ จูนเนอร์

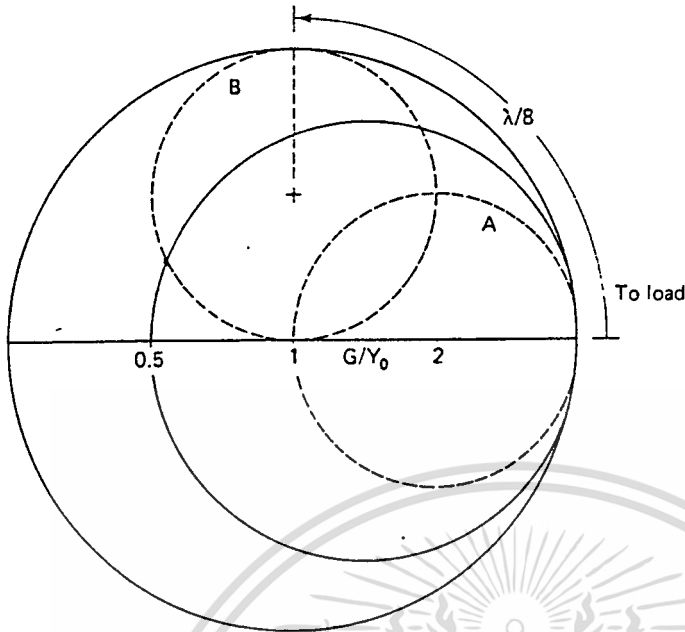
ระยะห่างระหว่างสตับมักจะใช้เป็นจำนวนคี่เท่าของ  $\lambda / 8$  เพื่อแมทชิง ได้กับหลาย ๆ ค่าของ อิมพีแดนซ์ ในที่นี้ใช้ประมาณ 3 เท่าของ  $\lambda / 8$

ค่าอินพุท นอร์มัลไลซ์ แอดมิตแตนซ์ ( input normalized admittance ) ทางด้านซ้ายของจุดต่อ 2-2 ดังรูป 3.12 ต้องเท่ากับ 1 ดังนั้นจึงต้องมีสตับ 2 เป็นตัวปรับค่านอร์มัลไลซ์ แอดมิตแตนซ์ ทางด้านขวาของจุดต่อ 2-2 โดยจะกำจัดค่าซัสเซปแตนซ์ ( susceptance ) ให้หมดไป ซึ่งวงกลม A บนสมิทชาร์ต ( smith chart ) จะแสดงค่าคอนดักแตนซ์เท่ากับ 1

โดยก่อนหน้านี้ ค่า  $1+jb$  ถูกย้ายมาจากค่า นอร์มัลไลซ์ แอดมิตแตนซ์ ทางด้านซ้ายของจุดต่อ 1-1 ด้วยความยาว  $3\lambda / 8$  ซึ่งค่า นอร์มัลไลซ์ แอดมิตแตนซ์ ทางด้านซ้ายของจุดต่อ 1-1 จะพล็อต อยู่บนวงกลม B ตามรูป 3.13 และสตับ 1 จะเปลี่ยนค่าของ นอร์มัลไลซ์ โหลดแอดมิตแตนซ์ ( normalized load admittance ) ให้มีค่าเท่ากับ นอร์มัลไลซ์ แอดมิตแตนซ์ ทางด้านซ้ายของจุดต่อ 1-1 โดยเปลี่ยนในส่วน

ของซัสเซปแตนซ์สารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.13 แสดงสมิท ชาร์ต

**การคำนวณการสร้างความดับเบิ้ล สดับ จูนเนอร์ ที่ใช้ในโครงงาน**

เนื่องจากสายอากาศปล่อยคลื่น ( applicator ) ที่ใช้มี อิมพีแดนซ์ เท่ากับ  $66.14 - j18.33 \Omega$  คิดเป็นค่า นอร์มัลไลซ์ อิมพีแดนซ์ ( normalized impedance ) เท่ากับ  $1.32 - j0.36\Omega$  และตั้งรูป สมิท ชาร์ต ที่ 1 ค่า นอร์มัลไลซ์ อิมพีแดนซ์ จะเปลี่ยนเป็นค่า นอร์มัลไลซ์ แอดมิตแดนซ์ ได้ เท่ากับ  $0.7 + j0.2$

ตั้งรูปสมิท ชาร์ตที่ 2 จุดที่ 1 คือค่า นอร์มัลไลซ์ แอดมิตแดนซ์ ทางด้านขวาของจุดต่อ 1-1 มีค่า  $0.7 + j0.2$  และเมื่อผ่านสดับ 1 ค่า นอร์มัลไลซ์ แอดมิตแดนซ์ จะเปลี่ยนไปเป็น

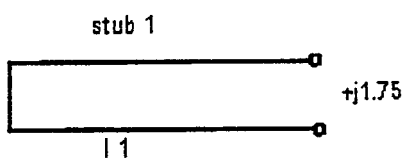
$$Y1 = 0.7 + j 1.95$$

ซึ่งแสดงอยู่บนวงกลม B ที่จุด 2 ในสมิท ชาร์ต ที่ 2

จะเห็นว่าสดับ 1 จะเปลี่ยนค่า นอร์มัลไลซ์ ซัสเซปแดนซ์ ( normalized susceptance ) ไปเป็น

$$(0.7 + j 1.95) - (0.7 + j 0.2) = j 1.75$$

และจากรูป สมิท ชาร์ต ที่ 3 ได้ค่า  $\Gamma_r = 0.168\lambda$

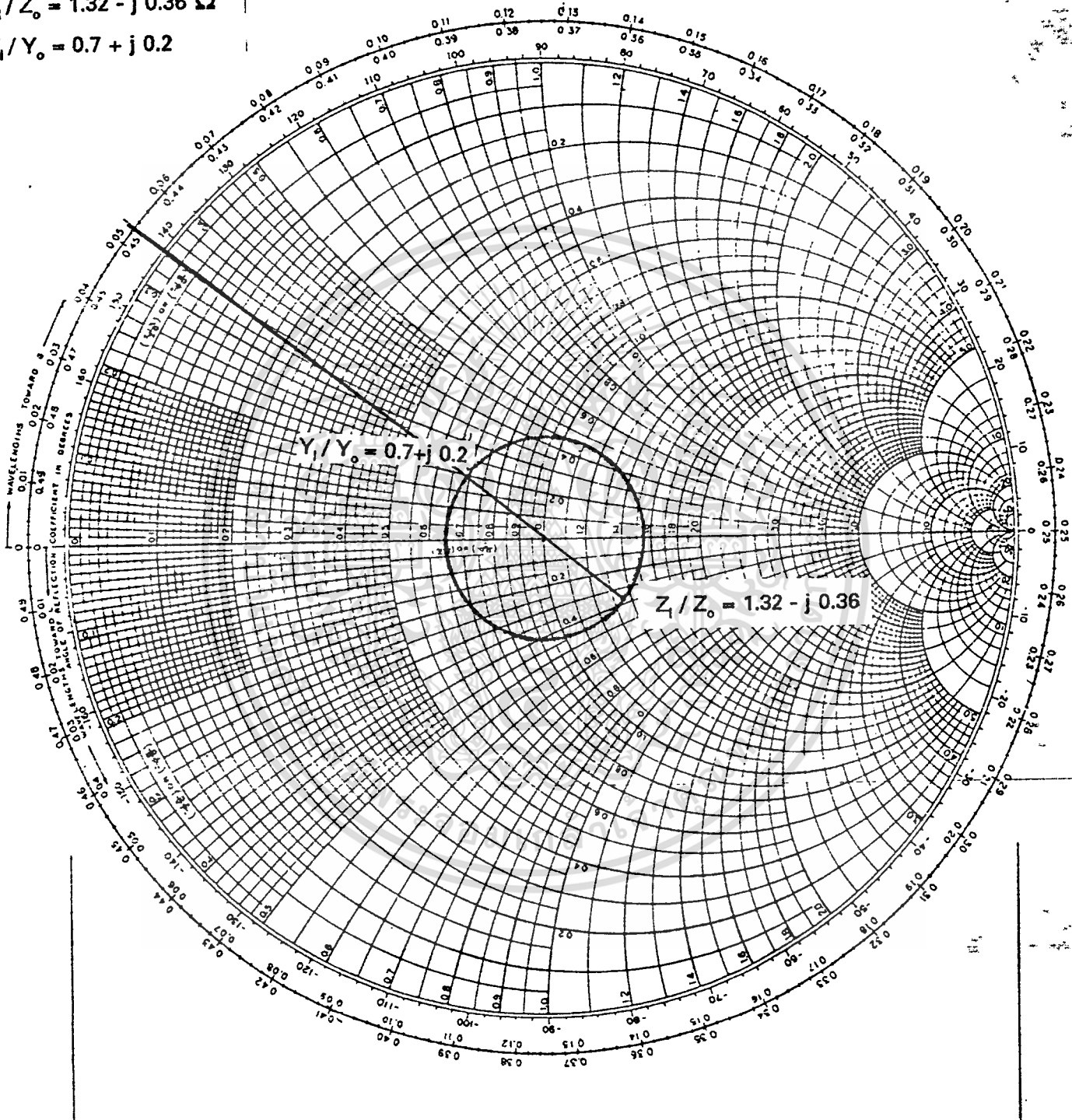


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ ร.ร.ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z = R - jX$ ,  $Z_0 = \Omega$   
 $Y = G - jB$ ,  $Y_0 = \text{U}$

DATE

$Z_1 = 66.14 - j 18.33 \Omega$   
 $Z_1/Z_0 = 1.32 - j 0.36 \Omega$   
 $Y_1/Y_0 = 0.7 + j 0.2$



สมิท ชาร์ต ที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z_z = R - jX, Z_o = \Omega$   
 $Y_y = G - jB, Y_o = U$

DATE

$Y_1/Y_o = 0.7 + j0.2$

$3\lambda/8$

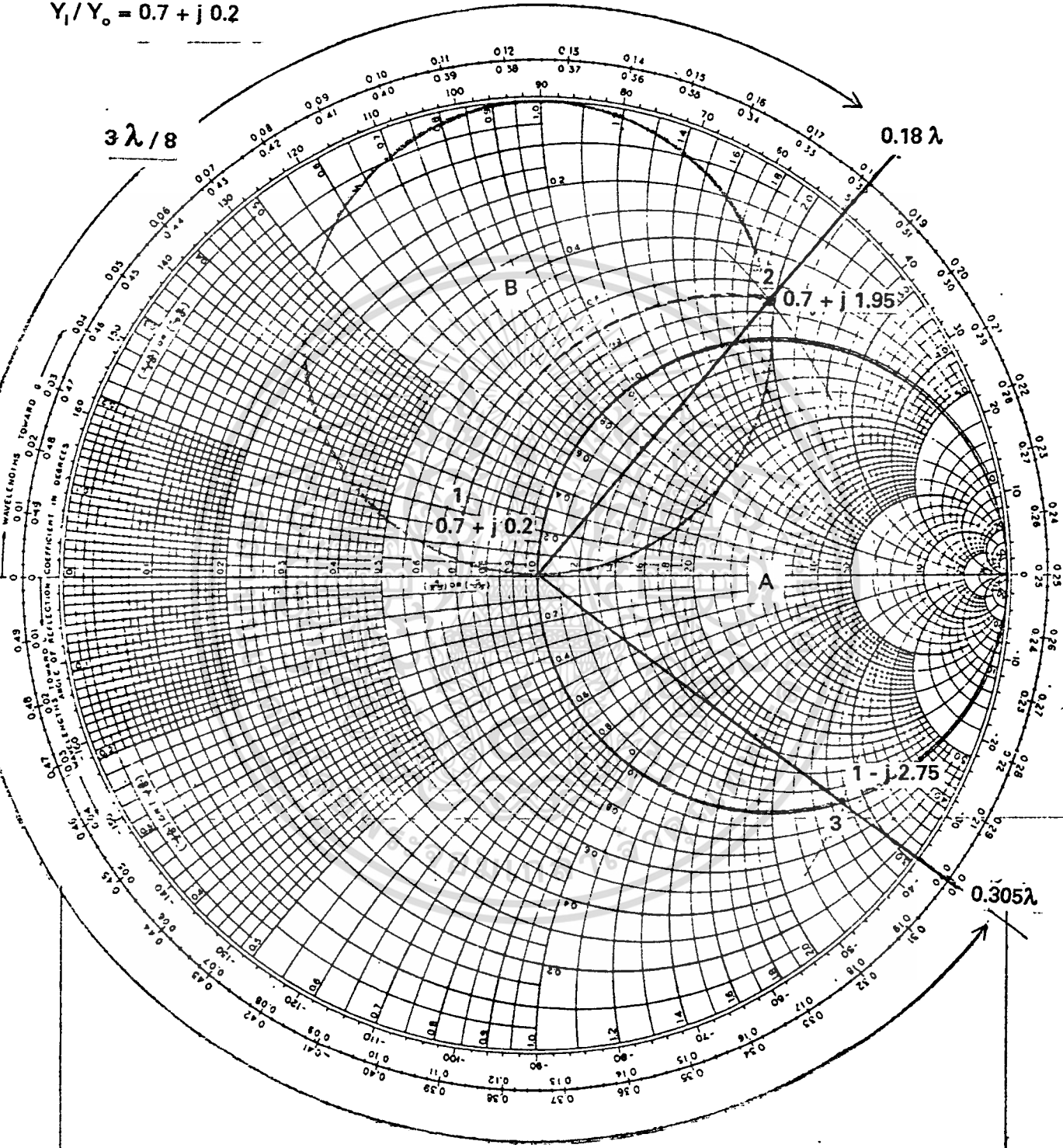
$0.18\lambda$

$0.7 + j0.2$

$0.7 + j1.95$

$1 - j2.75$

$0.305\lambda$



TRANSMISSION LOSS: VOL IN, 100 LOSS, MAJOR DB STEPS COEF, 00, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100  
 TOWARD GENERATOR →

SWR: 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, ∞

REFLECTION: VOL, CMR, LOSS, dB, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 100

สมิท ชาร์ต ที่ 2

CENTER

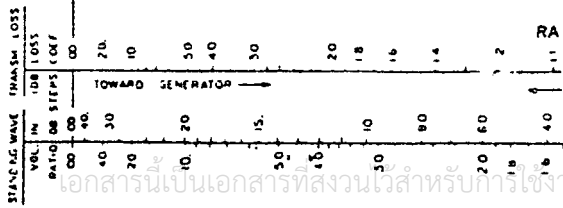
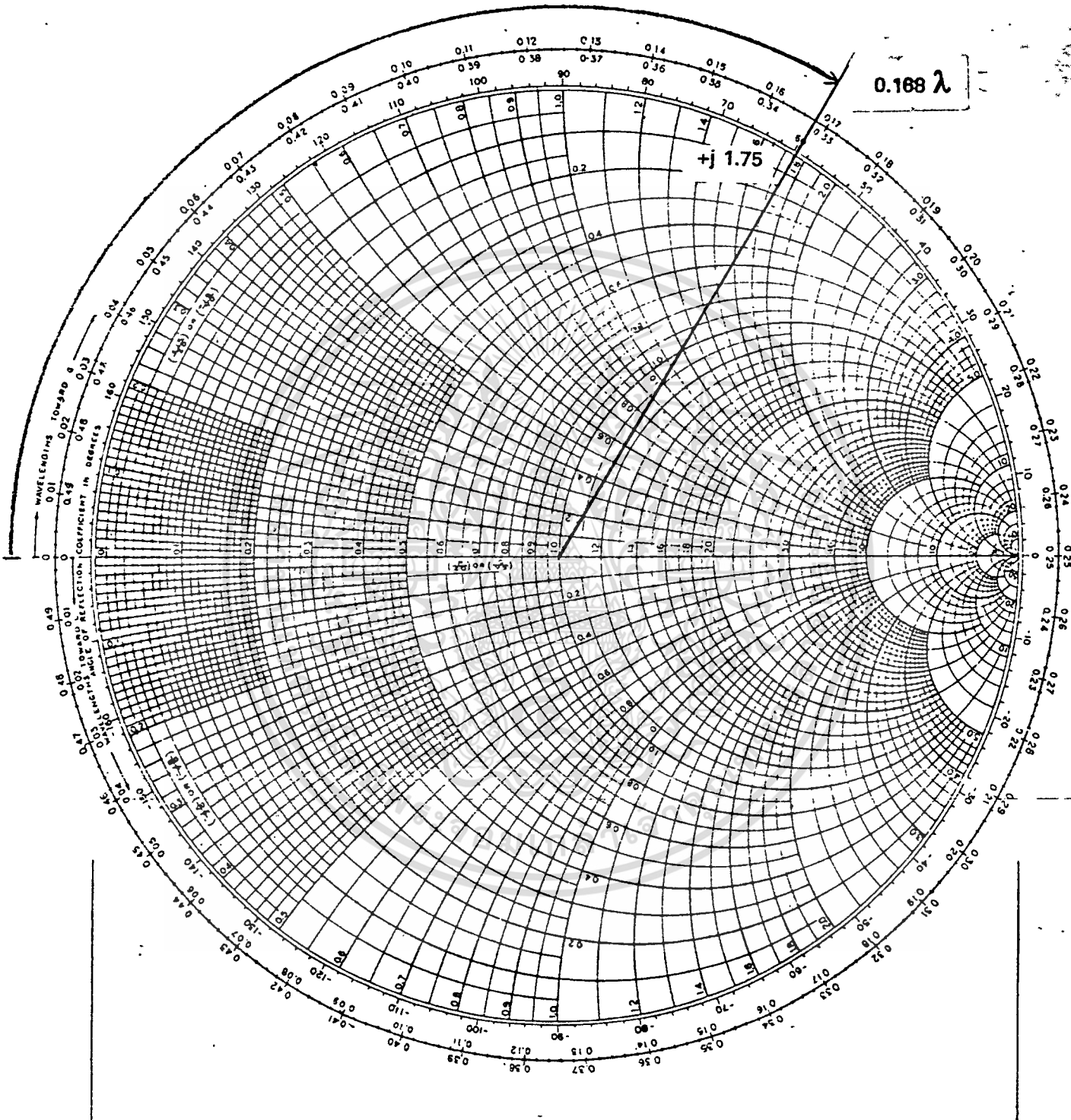
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณิดอกทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z_z = R - jX, Z_o = \Omega$

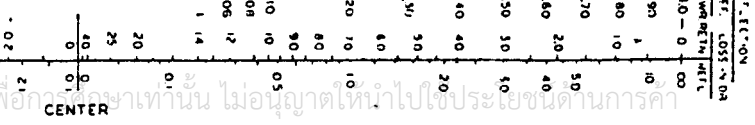
$Y_y = G - jB, Y_o = \Upsilon$

DATE

$(0.7 + j 1.95) - (0.7 + j 0.2) = j 1.75$



สมิท ชาร์ต ที่ 3



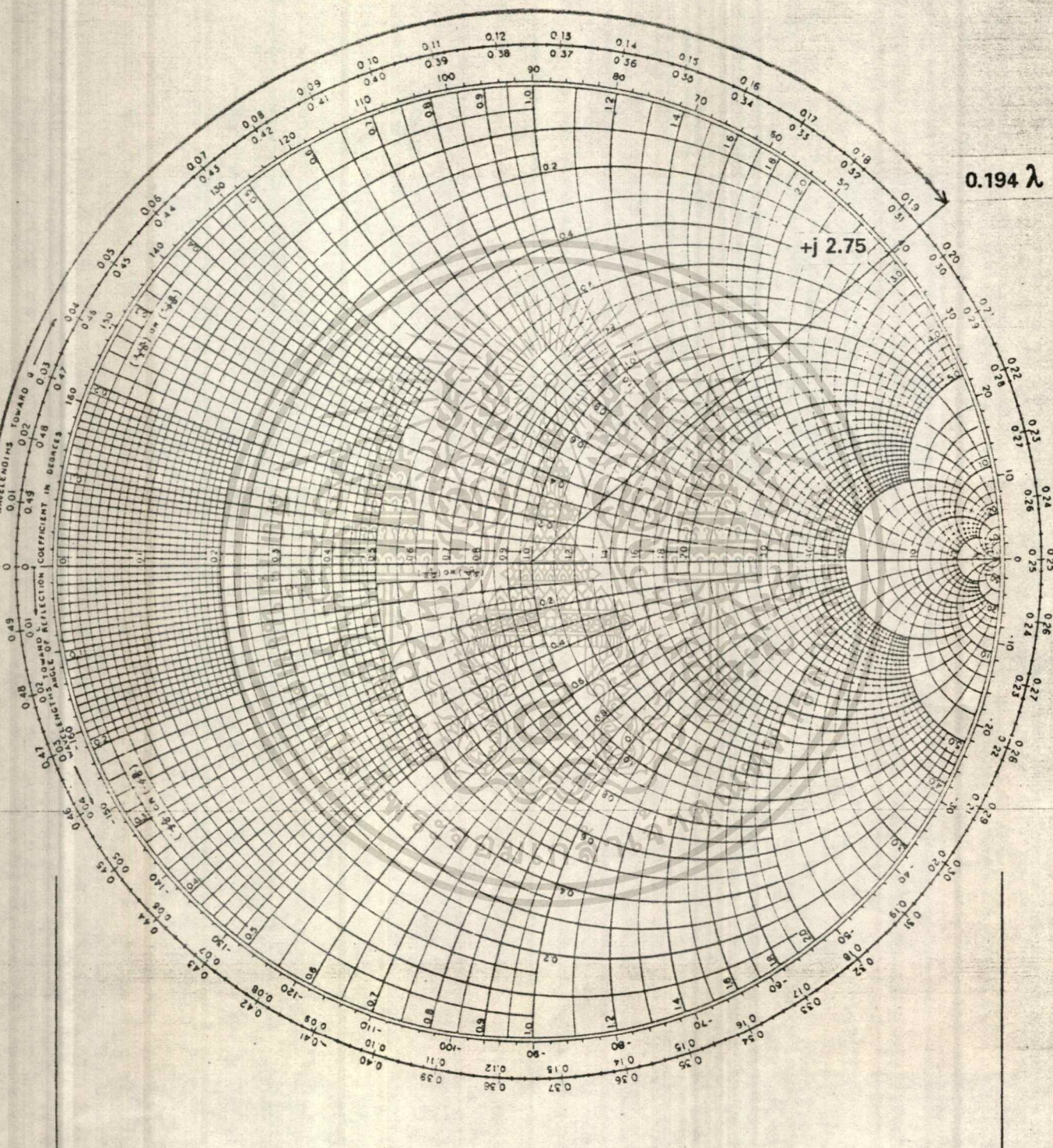
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Z_z = R - jX, Z_o = \Omega$   
 $Y_Y = G - jB, Y_o = U$

DATE

+j 2.75

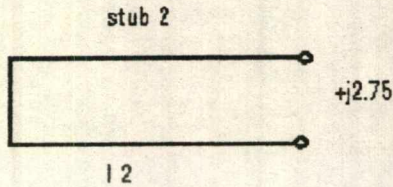


สมิท ชาร์ต ที่ 4

TRANSM. LOSS  
 VOL. IN DB LOSS  
 PATT. LOSS COEF  
 VOL. IN DB LOSS  
 REF. LOSS COEF  
 CENTER  
 TOWARD GENERATOR  
 TOWARD LOAD

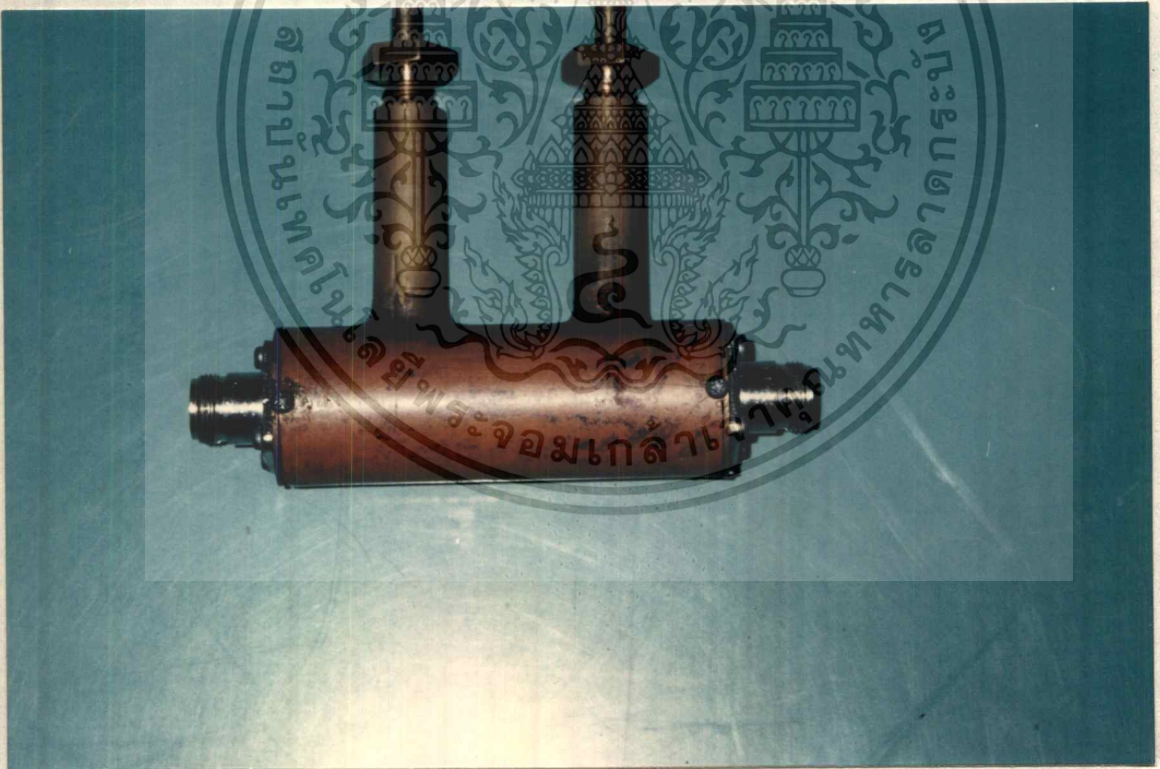
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานที่วิทยาลัยเทคนิคท่านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $Y_1$  จะเปลี่ยนค่าเมื่อเลื่อนไป  $3\lambda / 8$  เป็น นอร์มัลไลซ์ แอดมิตแตนซ์ ที่จุด 2-2 เมื่อยังไม่ผ่าน สตับ 2 มีค่า  $Y_2 = 1 - j2.75$  ดังนั้นสตับ 2 จึงต้องมีค่านอร์มัลไลซ์ แอดมิตแตนซ์ (normalized admittance) เป็น  $+j2.75$  เพื่อกำจัดค่ารีแอกแตนซ์  $-j2.75$  ให้หมดไป เหลือค่านอร์มัลไลซ์ แอดมิตแตนซ์ หลังจากผ่านสตับ 2 แล้วมีค่า เท่ากับ 1 จากรูป สมิท ซาร์ต ที่ 4 นั้น ความยาวที่ทำให้มีค่ารีแอกแตนซ์  $+j2.75$  คือ  $l_2 = 0.194\lambda$



รูปที่ 3.15 แสดงส่วนของสตับ 2

ความถี่คลื่นไมโครเวฟที่ใช้คือ 2.45 GHz จึงมีค่า  $\lambda$  ประมาณ 12.25 cm. ดังนั้นความยาวของสตับ 1 มีค่า  $l_1 = (0.168) \cdot (12.25) = 2.058$  cm. ความยาวสตับ 2 มีค่า  $l_2 = (0.194) \cdot (12.25) = 2.3765$  cm. และระยะห่างระหว่างสตับ ทั้ง 2 มีค่า  $(3) \cdot (12.25) / 8 = 4.6$  cm.



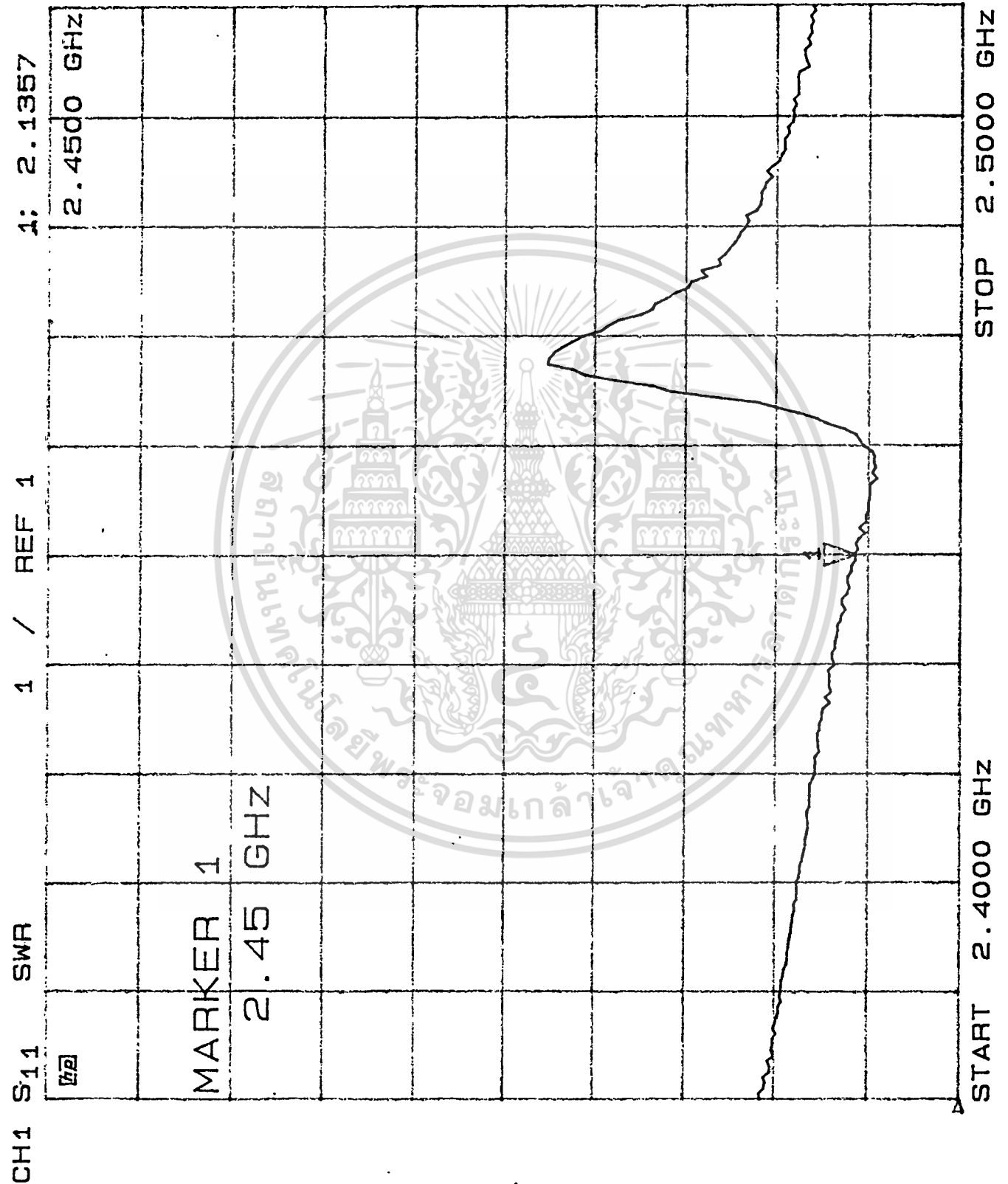
รูป 3.16 แสดงดับเบิล สตับ จูนเนอร์ ที่ออกแบบได้

จากการทดลองเปรียบเทียบหาค่า SWR เมื่อยังไม่ต่อสตับ และต่อสตับเข้ากับระบบวัดกำลังงานคลื่นได้

ผลแสดงดังในชาร์ตหน้าถัดไป พบว่าเมื่อมีการต่อสตับจะทำให้ค่า SWR ลดลงนั่นคือกำลังงานคลื่น

สามารถส่งผ่านออกไปยังสายอากาศเปลวคลื่นได้ดีขึ้น โดยมีการสะท้อนกลับน้อยที่สุด

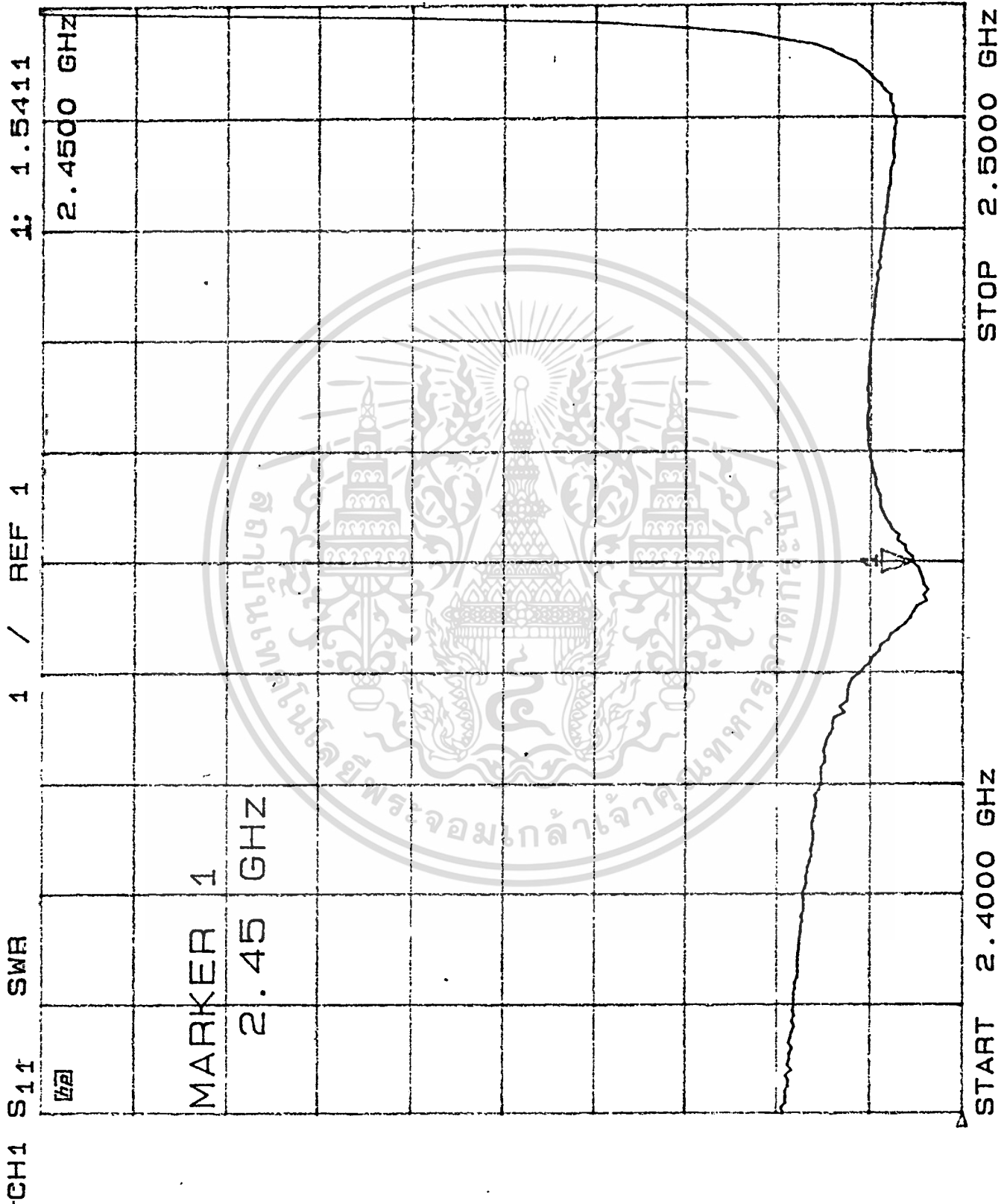
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชาร์ตแสดงค่า SWR เมื่อไม่ต่อ Stub tuner

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ แสดงค่า SWR เมื่อมีการต่อ Stub tuner กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

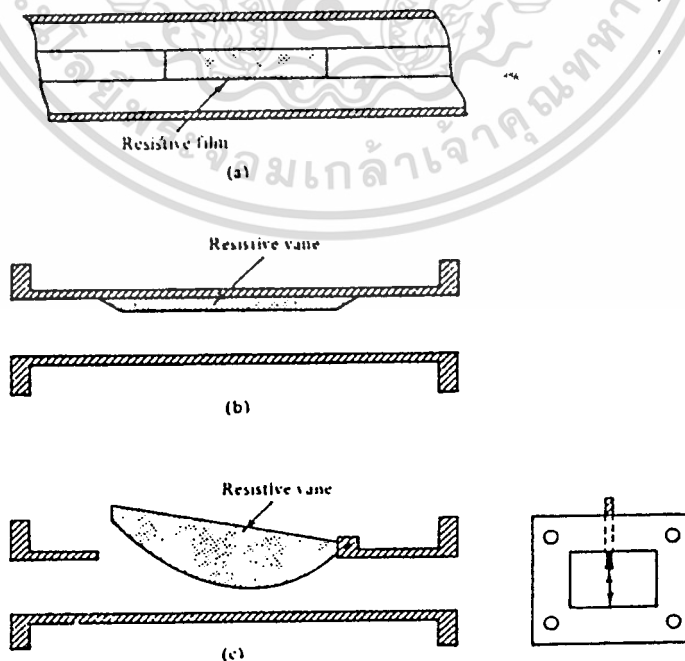
### 3.5 ตัวลดทอนกำลังงานคลื่น ( Attenuators )

ตัวลดทอนกำลังงานคลื่น หรือ แอทเทนูเอเตอร์ ใช้ในระบบไมโครเวฟเพื่อควบคุมระดับกำลังงานของคลื่นไมโครเวฟ โดยการดูดกลืนกำลังงานบางส่วนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านตัวแอทเทนูเอเตอร์ แอทเทนูเอเตอร์มีทั้งแบบค่าคงที่และแบบปรับค่าได้ ซึ่งแบ่งเป็นปรับค่าได้เป็นขั้น และปรับค่าได้ต่อเนื่อง โดยค่าการลดทอนจะใช้หน่วยเป็นเดซิเบล ( dB )

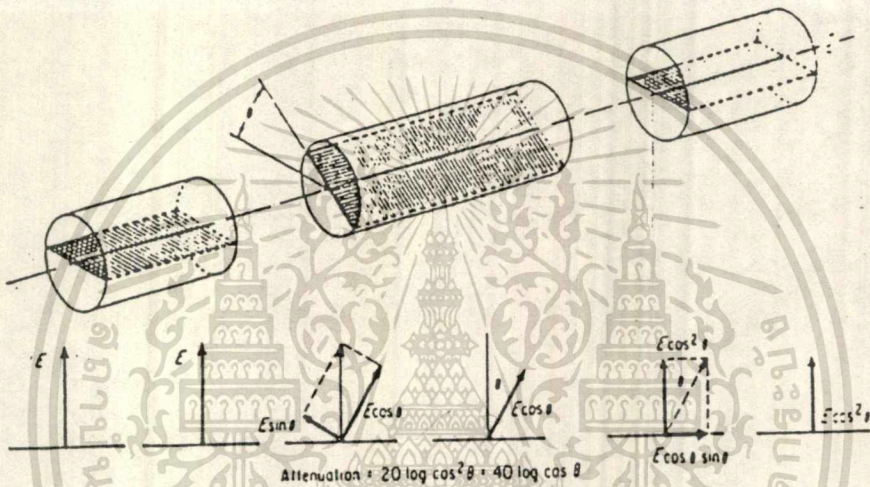
แอทเทนูเอเตอร์ชนิดต่าง ๆ มีรูปแบบดังแสดงในรูป 3.17 ซึ่งใช้หลักการเดียวกันคือ มีการสูญเสียกำลังงานคลื่นในแผ่นฟิล์มตัวต้านทานบาง ๆ ( Resistive film ) สำหรับแอทเทนูเอเตอร์แบบโคแอกเซียลดังในรูป 3.17 a แผ่นฟิล์มดังกล่าวจะเคลือบอยู่บนตัวนำใน ( Inner conductor ) ซึ่งจะทำหน้าที่ดูดกลืนกำลังงานของคลื่นไปบางส่วน

สำหรับแอทเทนูเอเตอร์แบบเวฟไกด์ค่าคงที่ ( Fixed waveguide ) ตามรูป 3.17 b ประกอบด้วยแถบไดอิเล็กทริก ( Dielectric strip ) ซึ่งถูกหุ้มด้วยแผ่นฟิล์มตัวต้านทาน จะถูกสอดแทรกเข้าไปในเวฟไกด์ ในขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านเวฟไกด์นี้จะมีการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสบนแผ่นฟิล์มตัวต้านทานนี้ นั่นคือมีกำลังงานของคลื่นบางส่วนได้หายไป ซึ่งเป็นการลดทอนกำลังงานคลื่นที่ส่งผ่านนั่นเอง แถบไดอิเล็กทริกที่หุ้มด้วยแผ่นฟิล์มนี้จะถูกทำให้ปลายทั้งสองด้านลาดเอียง ( Taper ) คล้ายลิ้ม เพื่อลดการสะท้อนกลับของคลื่น

ส่วนแอทเทนูเอเตอร์แบบปรับค่าได้ แสดงได้ดังรูป 3.17 c ค่าการลดทอนจะมากขึ้นถ้าหากแท่งความต้านทาน ( Resistive vane ) ถูกสอดลงไปในท่อลึกมากขึ้น



แอทเทนนูเอเตอร์แบบปรับค่าได้ที่มีความเที่ยงตรงมากแบบหนึ่งทำจากส่วนของท่อนำคลื่นแบบทอกลม ( Circular waveguide ) ดังแสดงในรูป 3.18 คลื่นในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ( Rectangular waveguide ) โหมด TE<sub>10</sub> จะถูกแปลงเป็นโหมด TE<sub>11</sub> ในท่อนำคลื่นแบบทอกลม แห่งความต้านทานในทอกลมจะหมุนรอบแกนของท่อได้ โดยถ้าแห่งความต้านทานตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ( E-field ) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะมีการลดทอนเกิดขึ้นน้อยและเมื่อหมุนตัวต้านทานทำมุมต่าง ๆ กับสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในแท่งตัวต้านทาน ซึ่งจะทำให้มีการลดทอนกำลังงานคลื่น และการลดทอนจะมากที่สุดเมื่อแท่งตัวต้านทานขนานกับทิศทางของสนามไฟฟ้า



รูป 3.18 แสดงหลักการของแอทเทนนูเอเตอร์แบบปรับค่าได้

ถ้าให้ P<sub>1</sub> คือ กำลังงานอินพุตที่เข้าแอทเทนนูเอเตอร์ และ P<sub>3</sub> คือ กำลังงานคลื่นทั้งหมดที่ถูกดูดกลืนโดยแท่งตัวต้านทาน เมื่อสมมติว่าไม่มีการสูญเสียอย่างอื่นจะได้กำลังงานเอาต์พุต P<sub>2</sub> ดังนี้

$$P_2 = P_1 - P_3 \quad \dots\dots\dots 3.17$$

ค่าการลดทอนในหน่วยเดซิเบล ( dB ) เท่ากับ

$$10 \log ( P_1 / P_2 ) \quad \dots\dots\dots 3.18$$

เนื่องจากแอทเทนนูเอเตอร์เป็นอุปกรณ์แบบ 2 พอร์ท ถ้าให้อินพุตเข้าที่พอร์ท 1 และพอร์ท 2 ถูกเทอร์มินेटไว้ด้วยแมทซ์โหลด จากความรู้เรื่อง S -Parameter จะได้

$$\text{ค่าการลดทอน ( dB )} = - 20 \log | S_{21} | \quad \dots\dots\dots 3.19$$

และส่วนใหญ่แล้วแอทเทนนูเอเตอร์จะมีคุณสมบัติสมมาตรกันระหว่างสองพอร์ท ( Reciprocal ) นั่นคือ

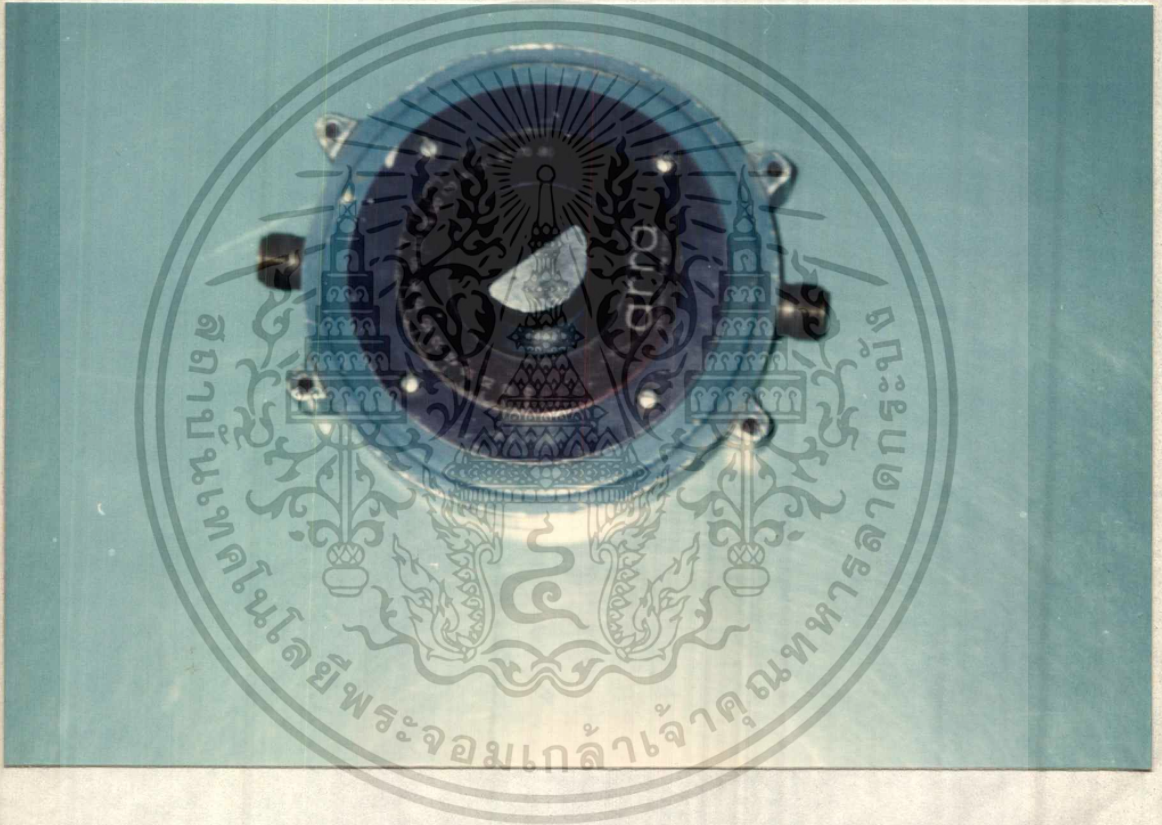
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$| S_{21} | = | S_{12} | \quad \dots\dots\dots 3.20$$

และเราทราบว่า  $S_{11}$  และ  $S_{22}$  ของอุปกรณ์สองพอร์ตใด ๆ จะหมายถึงค่าการสะท้อนกลับของคลื่นที่พอร์ตที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อมีการต่อแมทซ์โหลด ซึ่งการสะท้อนกลับของคลื่นของอุปกรณ์ไมโครเวฟมักจะระบุในรูปค่า VSWR ซึ่งในการหา  $|S_{11}|$  และ  $|S_{22}|$  ของแอมเพนนูเอเตอร์สามารถหาได้จากสมการ

$$|S_{11}| = |S_{22}| = (VSWR - 1) / (VSWR + 1) \quad \dots\dots\dots 3.21$$

แอมเพนนูเอเตอร์แบบที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดปรับค่าได้ต่อเนื่อง ซึ่งมีลักษณะดังรูป 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงแอมเพนนูเอเตอร์ชนิดปรับค่าได้แบบต่อเนื่อง

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ระบบการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยระบบต่างๆ ดังผังภูมิในรูป 3.1 ซึ่งในภาคการศึกษานี้ได้เพิ่มในส่วนระบบวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟตลอดจนให้มีการแสดงผลค่ากำลังงานเอาท์พุทของคลื่นทางคอมพิวเตอร์

ในการแสดงผลค่ากำลังงานเอาท์พุทของคลื่นนั้น จะต้องมีการคำนวณหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานที่อ่านได้จากเครื่องวัดกำลังงานคลื่น และค่ากำลังงานเอาท์พุทของคลื่นที่ฉายไปยังสารจำลองเนื้อคน ดังจะได้แสดงรายละเอียดในส่วนวัดกำลังงานตลอดจนการคำนวณหาสมการดังกล่าว ในระบบวัดกำลังงานคลื่นมีการต่ออุปกรณ์ทางไมโครเวฟกับพอร์ทต่าง ๆ ของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ ตามรูปที่ 4.1 ดังนี้

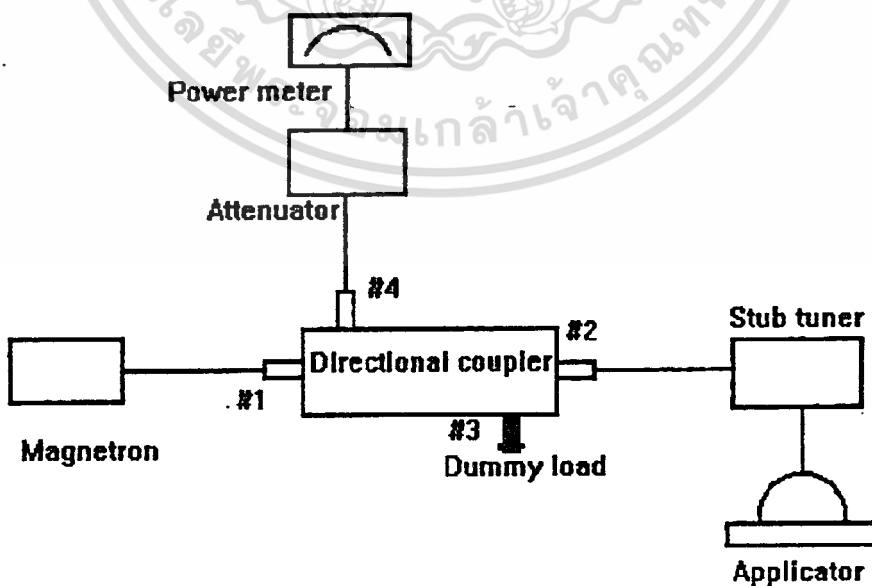
พอร์ท 1 ของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์ ต่อ กับหลอดแมกนีตรอน

พอร์ท 2 ต่อกับสตับจูนเนอร์และต่อไปยังสายอากาศปล่อยคลื่น

พอร์ท 3 ต่อกับดัมมี่โหลด

พอร์ท 4 เป็นพอร์ทคัปปลิ่งต่อเข้ากับแอกเทนนูเอเตอร์และพาวเวอร์มิเตอร์ตามลำดับ

ซึ่งแอกเทนนูเอเตอร์ใช้เพื่อลดกำลังงานคลื่นไม่ให้เกิน 10 มิลลิวัตต์ ซึ่งเป็นค่ากำลังงานสูงสุดที่พาวเวอร์มิเตอร์จะรับได้



รูปที่ 4.1 แสดงการต่อพอร์ทต่าง ๆ ของไดเรกชันแนลคัปเปิลเลอร์

ตามที่กล่าวมาแล้วว่า ในระบบวัดกำลังงานคลื่น ต้องมีการคำนวณหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานที่อ่านได้จากเครื่องวัดฯ และกำลังงานเอาต์พุตของคลื่นที่ฉายไปยังสารจำลองเนื้อคน ซึ่งจะใช้ในการแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ ทำการทดลองโดยปรับค่าศักดาไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดแมกนีตรอน ( $V_{dc}$ ) และวัดกำลังงานคลื่นโดยอ่านค่าจากเครื่องวัดกำลังงานคลื่น (Power) , ค่าศักดาไฟฟ้า ดีซี ที่ผ่านวงจรขยายแล้วและค่าคงที่ ที่อ่านจากการ์ด A/D ได้ผลดังตาราง 4.1

$V_{dc}$ (V)	POWER (mW)	$V_{dc}$ (V)	A/D	$P_{out}$ (W)
170	4.4	7.11	175.5	165.060
165	4.0	6.78	162.5	150.056
160	3.6	6.20	153.5	135.050
155	2.2	4.62	110.5	82.530
150	1.0	3.02	72.7	37.514
145	0.4	2.33	57.9	15.000

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าต่าง ๆ ที่วัดและคำนวณได้ ( $P_{out}$ ) โดยระบบวัดกำลังงานคลื่น

ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานที่อ่านได้จากเครื่องวัดกำลังงาน และค่าคงที่จากการ์ด A/D โดยประมาณเป็นสมการเส้นตรง แบ่งเป็นช่วงได้ 5 สมการ การหาสมการดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการเส้นตรงพื้นฐานดังนี้

$$\text{จาก } Y - Y_1 = m(X - X_1)$$

$Y_1$  คือ ค่าคงที่จากการ์ด A/D

$X_1$  คือ ค่ากำลังงานที่อ่านได้ (mW)

$m$  คือ ค่าความชันของกราฟแต่ละช่วง

$$m = (Y_1 - Y_2) / (X_1 - X_2)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูป  $X = mY + C$  เพื่อให้ค่าคงที่จากการ์ด A/D เป็นตัวแปรต้นและค่ากำลังงานที่อ่านได้จากเครื่องวัดกำลังงานคลื่น เป็นตัวแปรตาม

#### ตัวอย่างการคำนวณหาสมการ

$$\text{พิจารณาช่วงแรก ค่าพาวเวอร์} = 0.4 - 1.0 \text{ mW}$$

$$\text{ค่า A/D} = 57.9 - 72.7$$

$$Y - 72.7 = [(72.9 - 57.9) / (1.0 - 0.4)] * (x - 1.0)$$

$$Y = 24.67 X + 48.03$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่  $X = 0.0405Y - 1.9469$  ถูกนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดและในช่วงอื่น ๆ ก็พิจารณาได้ เช่นเดียวกัน ซึ่งจะได้สมการอีก 4 สมการ ดังนี้ที่มีการนำไปใช้

$X = 0.0317Y - 1.3079$	$72.7 < A/D \leq 110.5$
$X = 0.0325Y - 1.3984$	$110.5 < A/D \leq 153.5$
$X = 0.0444Y - 3.2220$	$153.5 < A/D \leq 162.5$
$X = 0.0307Y - 1.0000$	$162.5 < A/D \leq 175.5$

สำหรับการคำนวณหา กำลังงานเอาต์พุตที่ปล่อยจากสายอากาศปล่อยคลื่น สามารถคำนวณได้ดังนี้ เนื่องจากไดเรกชันแนลคัมเปิลเลอร์มีค่าคัมปลิงแพดเดอร์เท่ากับ  $-21.279$  dB และแอทเทนนูเอเตอร์ที่ต่อกับพอร์ทคัมปลิงนี้ใช้ค่า  $-26.757$  dB

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นค่าการลดทอนคลื่นจากพอร์ท 1 ไปยัง พอร์ท 4} &= -21.279 - 26.757 \\ &= -48.036 \text{ dB} \end{aligned}$$

คำนวณหา อินพุตพาวเวอร์ ( กำลังงานที่ออกจากแมกนีตรอนเข้าที่พอร์ท 1 )

จะได้

$$48.036 \text{ (dB)} = 10 \log ( P_{in} / \text{Power} )$$

$$P_{in} = 63620.92 * \text{Power}$$

และค่าการลดทอนของไดเรกชันแนลคัมเปิลเลอร์จากพอร์ท 1 ไปยังพอร์ท 2 ซึ่งเป็นเอาต์พุตของคลื่นที่ ปล่อยจากสายอากาศปล่อยคลื่นมีค่าเท่ากับ  $-2.294$

$$\text{ดังนั้น} \quad -2.294 \text{ (dB)} = 10 \log ( P_{out} / P_{in} )$$

$$P_{out} = 0.5896 * P_{in}$$

แทนค่า  $P_{in}$  และ กำลังงานที่อ่านได้ที่เครื่องวัด ( Power )

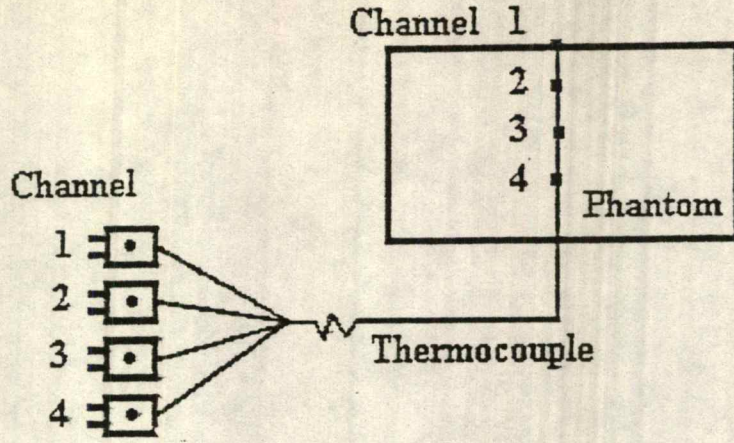
$$\begin{aligned} \text{จะได้} \quad P_{out} &= 63620.92 * 0.5896 * \text{Power} \\ &= 37514.56 / 1000 * \text{Power} \quad (\text{W}) \end{aligned}$$

$P_{out}$  คือค่ากำลังงานคลื่นจากสายอากาศปล่อยคลื่นที่ใช้ในการแสดงผลนั่นเอง ค่า  $P_{out}$  เป็นดังแสดงในตาราง 4.1 เป็นตัวอย่างค่าที่คำนวณได้

สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังงานที่อ่านได้จากเครื่องวัดฯ และค่ากำลังงานเอาต์พุตของคลื่นที่หาได้จะใช้สำหรับการทดลองในส่วนที่ 2 ซึ่งเป็นการทดลองระบบให้ความร้อนโดยมีการต่อระบบวัดกำลังงานคลื่นดังกล่าว เพื่อให้คอมพิวเตอร์แสดงผลค่ากำลังงานเอาต์พุตของคลื่นร่วมกับการแสดงผลค่าอุณหภูมิ

สำหรับการทดลองในส่วนแรก เป็นการทดลองเพื่อควบคุมอุณหภูมิของสารจำลองเนื้อคนที่มีความลึกต่างกัน 2 ระดับคือ 12,22 มม. และทดสอบระบบระบายความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำต่างๆ กันคือ 1.1 ลิตร / นาที และ 2.3 ลิตร / นาที ควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่โดยใช้เครื่องทำน้ำเย็น แล้ว ทำการทดลองระบบการให้ความร้อนโดยปล่อยคลื่นไมโครเวฟให้กับสารจำลองเนื้อคนซึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคล้ายกับเซลล์เนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ ( muscle tissue ) ซึ่งทำมาจากส่วนประกอบต่างๆดังภาคผนวก ( ข ) และทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลไว้ในการจำลองเนื้อคนเพื่อวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่มีความลึกต่าง ๆ กันดังแสดง

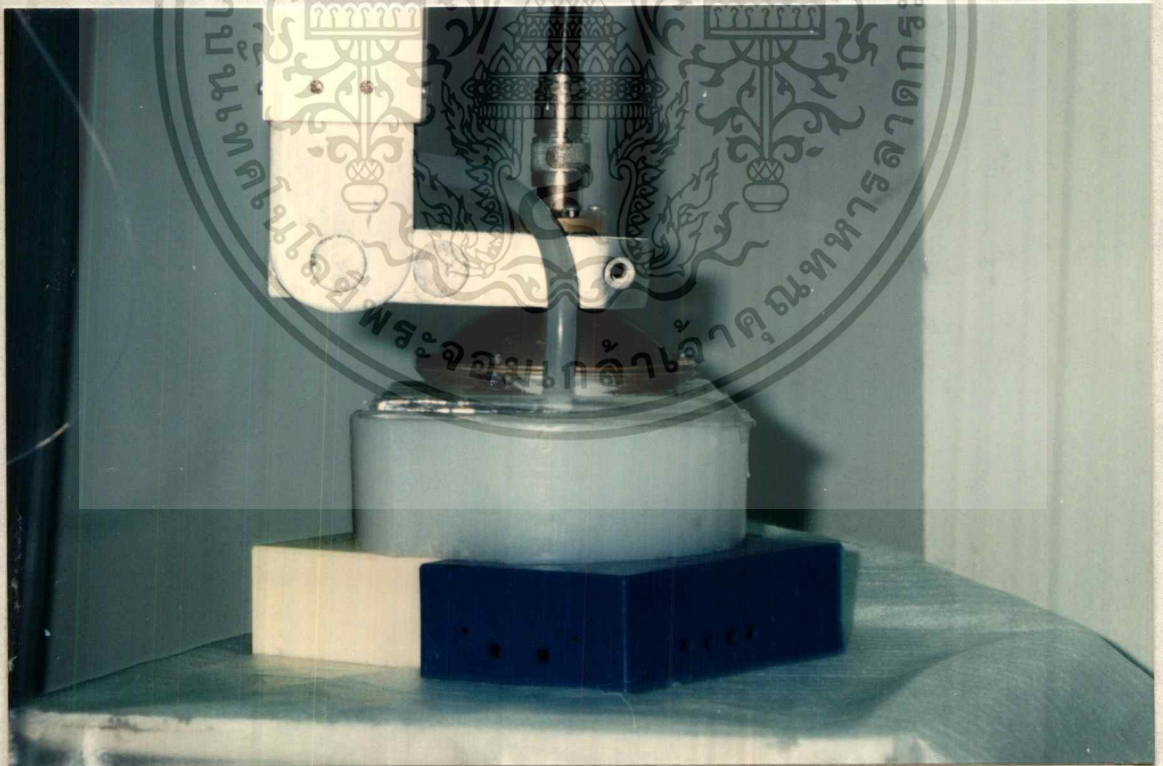
ในรูป 4.2 ไม่ควรดื่มกาแฟทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งของแชนเนลต่าง ๆ ของเทอร์โมคัปเปิล

- ช่องสัญญาณที่ 1 (Channel 1)    อยู่บริเวณผิว
- ช่องสัญญาณที่ 2 (Channel 2)    อยู่ที่ความลึกประมาณ 12 มม. จากผิว
- ช่องสัญญาณที่ 3 (Channel 3)    อยู่ที่ความลึกประมาณ 22 มม. จากผิว
- ช่องสัญญาณที่ 4 (Channel 4)    อยู่ที่ความลึกประมาณ 32 มม. จากผิว

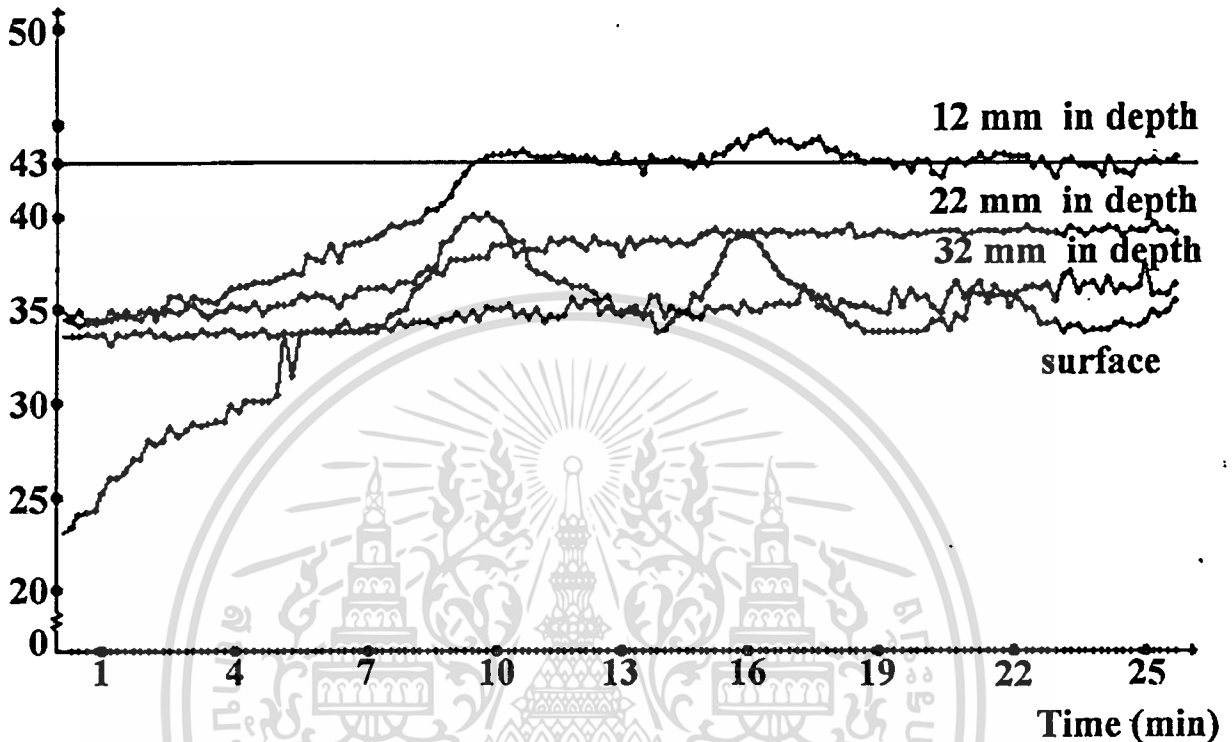
ตั้งแสดงการจัดระบบการทดลอง ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงการจัดระบบการทดลองเพื่อฉายคลื่นไมโครเวฟ

เอกสารการทดลอง ควบคุมอุณหภูมิของระบบให้ความร้อนฯ และทดสอบอัตราการไหลของน้ำค่าต่าง ๆ ภายใต้ค่า  
 ไม่เงื่อนไข เริ่มต้นต่างๆ กัน เป็นดังรูปที่ 4.4, 4.5, 4.6 และ 4.7 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature (°C)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่อควบคุมอุณหภูมิที่ความลึก 12 มม.  
อัตราการไหลของน้ำ 1.1 ลิตร / นาที

ตามรูปที่ 4.4 เป็นการทดลองที่เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

ศักดาไฟฟ้าเริ่มต้นที่จ่ายให้แหล่งจ่ายไฟสูงสำหรับหลอดแมกนีตรอน 165 โวลท์

ศักดาไฟฟ้าสูงสุด 170 โวลท์

อุณหภูมิเริ่มต้นของสารจำลองเนื้อคนที่มีความลึกต่าง ๆ กัน ( แชนเนล 1 , 2 , 3 , 4 ตามลำดับ ) คือ 24 , 34 , 35 , 33 องศาเซลเซียส

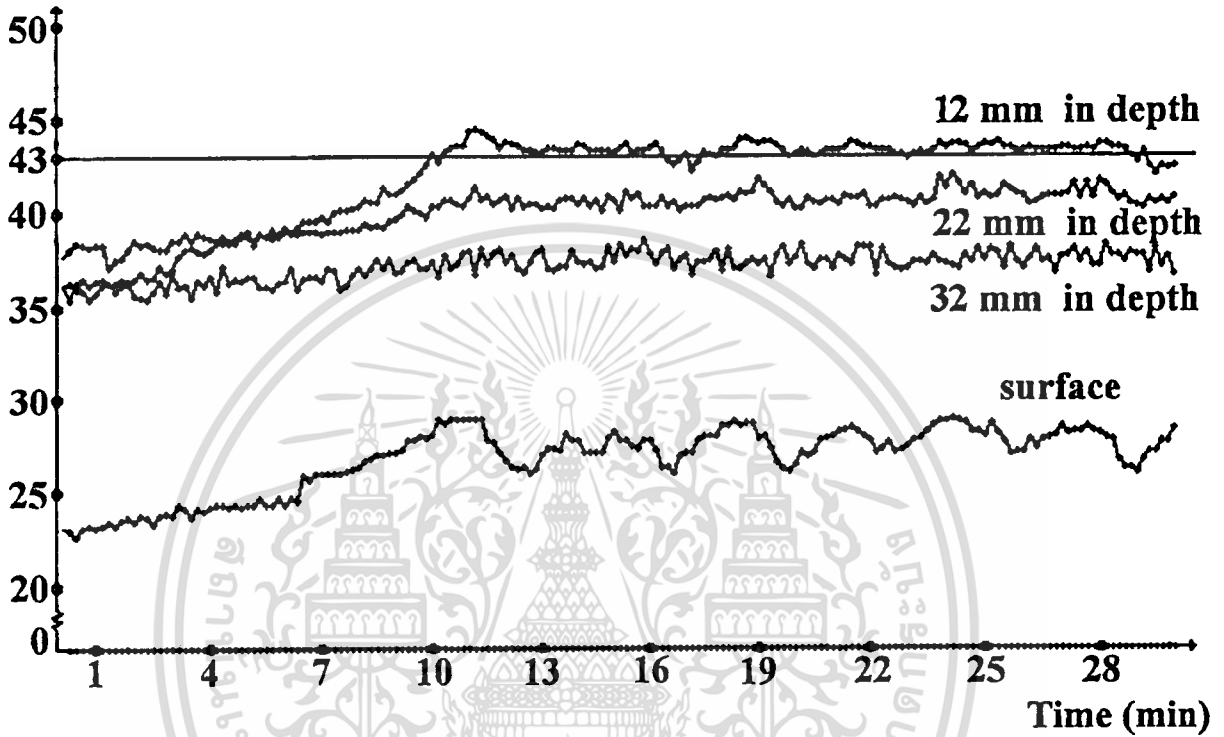
อุณหภูมิของน้ำในระบบระบายความร้อน 15 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลของน้ำ 1100 CC / นาที

ควบคุมอุณหภูมิที่แชนเนล 2 ที่ความลึก 12 มม.

เวลาในการทดลองปล่อยคลื่น 25 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น เว้นแต่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่อควบคุมอุณหภูมิที่ความลึก 12 มม.  
อัตราการไหลของน้ำ 2.3 ลิตร / นาที

ตามรูปที่ 4.5 เป็นการทดลองที่เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

ศักดาไฟฟ้าเริ่มต้นที่จ่ายให้แหล่งจ่ายไฟสูงสำหรับหลอดแมกนีตรอน 165 โวลท์

ศักดาไฟฟ้าสูงสุด 170 โวลท์

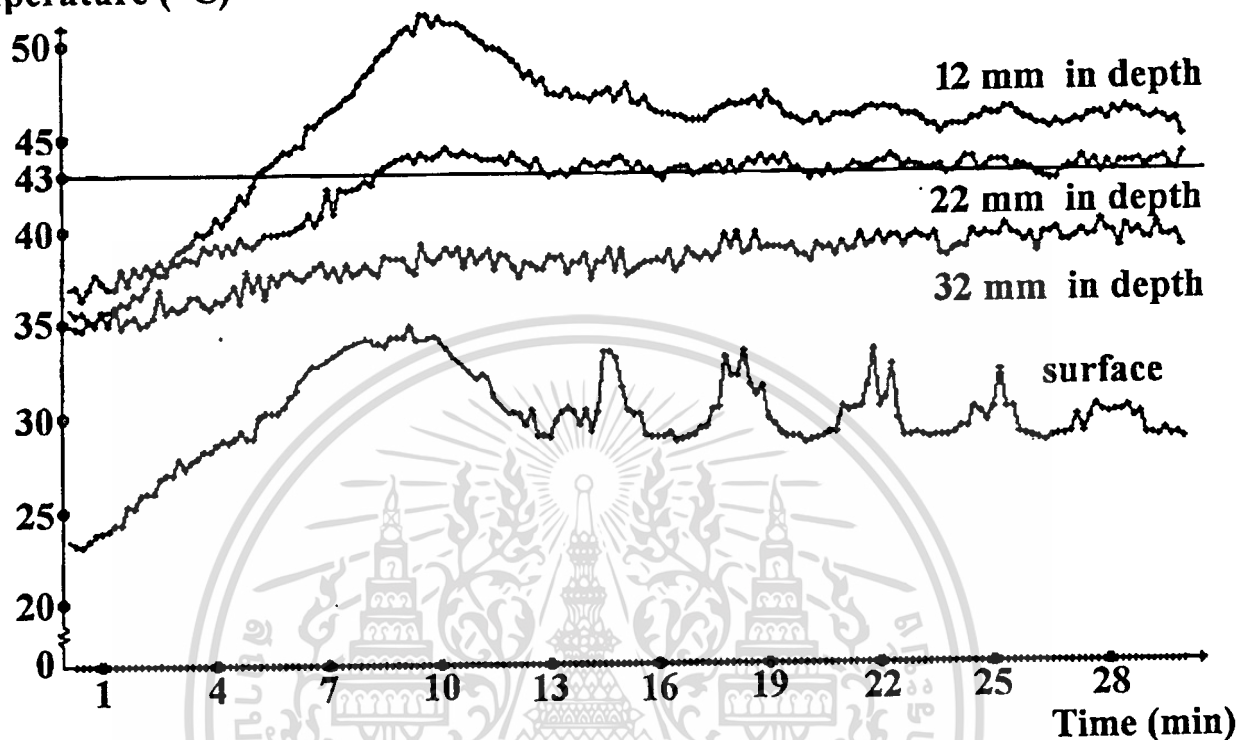
อุณหภูมิเริ่มต้นของสารจำลองเนื้อคนที่มีความลึกต่าง ๆ กัน ( แชนเนล 1, 2, 3, 4 ตามลำดับ ) คือ 22, 37, 38, 37 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของน้ำในระบบระบายความร้อน 14 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลของน้ำ 2300 CC / นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ควบคุมอุณหภูมิที่แชนเนล 2 ที่ความลึก 12 มม. นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ระยะเวลาในการทดลองปล่อยคลื่น และ 30 นาที เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่อควบคุมอุณหภูมิที่ความลึก 22 มม.  
อัตราการไหลของน้ำ 1.1 ลิตร / นาที

ตามรูปที่ 4.6 เป็นการทดลองที่เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

ศักดาไฟฟ้าเริ่มต้นที่จ่ายให้แหล่งจ่ายไฟสูงสำหรับหลอดแมกนีตรอน 165 โวลท์

ศักดาไฟฟ้าสูงสุด 170 โวลท์

อุณหภูมิเริ่มต้นของสารจำลองเนื้อคนที่มีความลึกต่าง ๆ กัน ( แชนเนล 1 , 2 , 3 , 4 ตามลำดับ ) คือ 23 , 35 , 37 , 36 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของน้ำ ในระบบระบายความร้อน 16 องศาเซลเซียส

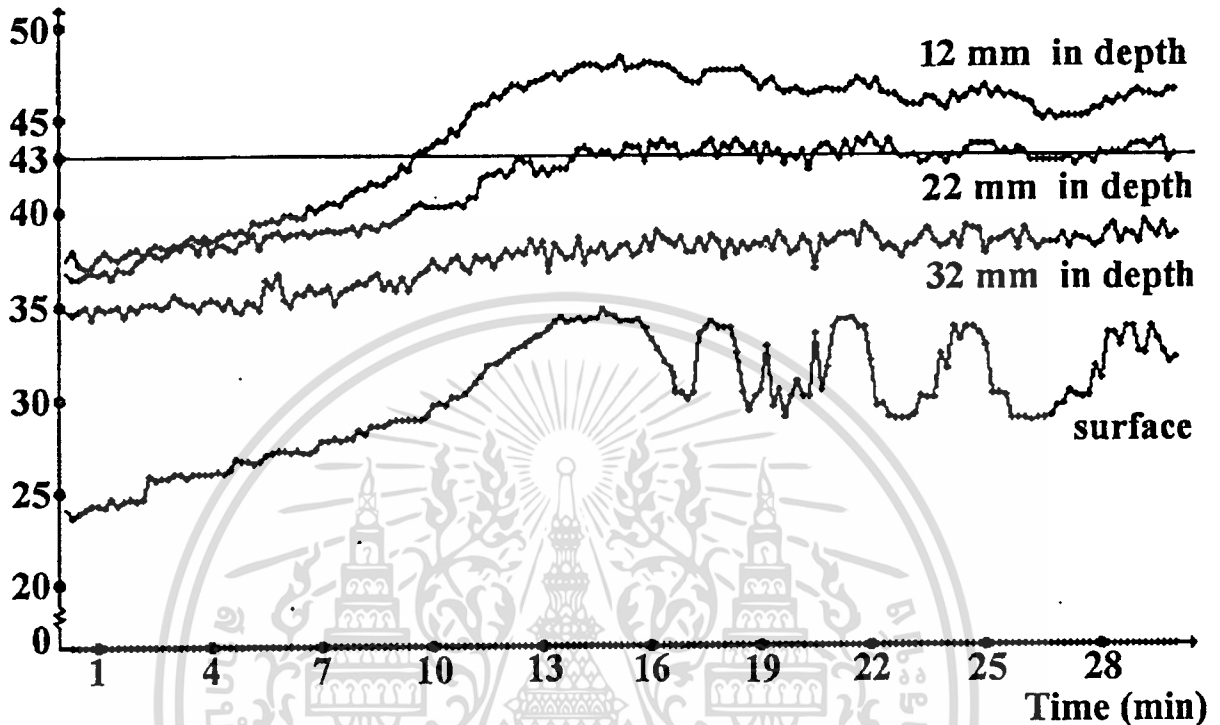
อัตราการไหลของน้ำ 1100 CC / นาที

ควบคุมอุณหภูมิที่แชนเนล 3 ที่ความลึก 22 มม.

เวลาในการทดลองปล่อยคลื่น 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการทดลองเมื่อควบคุมอุณหภูมิที่มีความลึก 22 มม.  
อัตราการไหลของน้ำ 2.3 ลิตร / นาที

ตามรูปที่ 4.7 เป็นการทดลองที่เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

ศักดาไฟฟ้าเริ่มต้นที่จ่ายให้แหล่งจ่ายไฟสูงสำหรับหลอดแมกนีตรอน 165 โวลท์

ศักดาไฟฟ้าสูงสุด 170 โวลท์

อุณหภูมิเริ่มต้นของสารจำลองเนื้อคนที่มีความลึกต่าง ๆ กัน ( แชนเนล 1 , 2 , 3 , 4 ตามลำดับ ) คือ 23 , 37 , 38 , 36 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของน้ำในระบบระบายความร้อน 15 องศาเซลเซียส

อัตราการไหลของน้ำ 2300 CC / นาที

ควบคุมอุณหภูมิที่แชนเนล 3 ที่ความลึก 22 มม.

เวลาในการทดลองปล่อยคลื่น 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงผลการทดลองทั้ง 4 รูป ได้ผลสรุปดังนี้

รูป 4.4 แสดงผลการทำงานของระบบให้ความร้อนโดยควบคุมอุณหภูมิที่ความลึก 12 มิลลิเมตร ที่ 43 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการไหลของน้ำ 1100 cc / นาที พบว่าช่วงแรกระบบ ๑ สามารถเพิ่มอุณหภูมิ ณ ความลึกที่ต้องการให้อยู่ในอัตราประมาณ 1 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 43 องศาเซลเซียส แล้วระบบ ๑ สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ความลึกดังกล่าวให้คงที่ได้ตลอดเวลาการทดลอง แต่อุณหภูมิที่บริเวณผิวมีค่าสูงสุดเป็น 40 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นค่าที่สูงเกินไป จึงได้เปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเป็น 2300 cc / นาที โดยควบคุมอุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียสที่ความลึก 12 มม. เช่นเดิม ตามกราฟ รูปที่ 4.5 พบว่าอุณหภูมิที่ความลึกดังกล่าวในช่วงการควบคุมอุณหภูมิ ค่อนข้างคงที่โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่เกิน  $\pm 1$  องศาเซลเซียสและอุณหภูมิที่บริเวณผิวโดยเฉลี่ยเป็น 28 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ยังได้แสดงให้เห็นผลการทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ความลึก 22 มิลลิเมตร ( CH 3 ) โดยควบคุมที่ 43 องศาเซลเซียสเช่นกัน ตามกราฟรูป 4.6 และ 4.7 จากกราฟรูป 4.6 ใช้อัตราการไหลของน้ำ 1100 cc / นาที ระบบ ๑ สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ความลึกดังกล่าวได้ แต่อุณหภูมิที่ความลึก 12 มิลลิเมตร กลับสูงเกิน 50 องศาเซลเซียส ซึ่งมากเกินไปสำหรับระบบการให้ความร้อน เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำเป็น 2300 cc / นาที ตามเงื่อนไขการทดลองใน รูป 4.7 อุณหภูมิที่ความลึก 12 มิลลิเมตร ก็ลดลงเป็น 48 องศาเซลเซียส

เปรียบเทียบการทดลองที่ใช้อัตราการไหลของน้ำเท่ากัน แต่ควบคุมอุณหภูมิ ที่ความลึกไม่เท่ากัน ในรูปที่ 4.4 กับ 4.6 และ รูปที่ 4.5 กับ 4.7 ตามรูปที่ 4.7 ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ความลึก 22 มม. ได้ดี แต่ที่ความลึก 12 มม. อุณหภูมิกลับสูงถึง 48 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมอุณหภูมิที่ความลึก 12 มม. ตามรูปที่ 4.5 พบว่าการควบคุมอุณหภูมิที่ความลึกดังกล่าวสามารถทำได้ และอุณหภูมิที่ความลึกอื่น ๆ ก็ไม่สูงมาก สำหรับรูป 4.4 และ 4.6 ก็พิจารณาในทำนองเดียวกัน แต่เนื่องจากใช้อัตราการไหลของน้ำต่ำ จึงทำให้อุณหภูมิที่บริเวณผิว ( ตามรูป 4.4 ) และอุณหภูมิที่ความลึก 12 มม. ( ตามรูป 4.6 ) ยังอยู่ในระดับสูงเกินไป

ดังนั้น ระบบให้ความร้อนนี้ใช้งานได้ดี สำหรับการควบคุมอุณหภูมิที่ 12 มม. และอัตราการไหลของน้ำ 2300 cc/นาที แต่ความต้องการของระบบ ๑ คือ การควบคุมอุณหภูมิที่ความลึกประมาณ 2 ซม. แต่เนื่องจากการทดลองได้ใช้ถุงน้ำระบายความร้อน ( Bolus ) ซึ่งหนาเกินไปจึง มีผลทำให้ระยะโฟกัสของคลื่นเปลี่ยนแปลงไป การควบคุมอุณหภูมิที่ความลึก 2 ซม.สามารถทำได้ แต่ที่ความลึก 12 มม. กลับมีอุณหภูมิสูงเกินไป จึงต้องมีกาปรับปรุงโดยใช้วัสดุทำถุงน้ำที่บางยิ่งขึ้นและต้องทนแรงดันของน้ำได้ด้วย ระบบมีแนวโน้มควบคุมอุณหภูมิที่ความลึก 2 ซม.ดังกล่าวได้ ในขณะเดียวกัน อุณหภูมิบริเวณผิวและที่ 12 มม.ก็ไม่สูงเกินไป

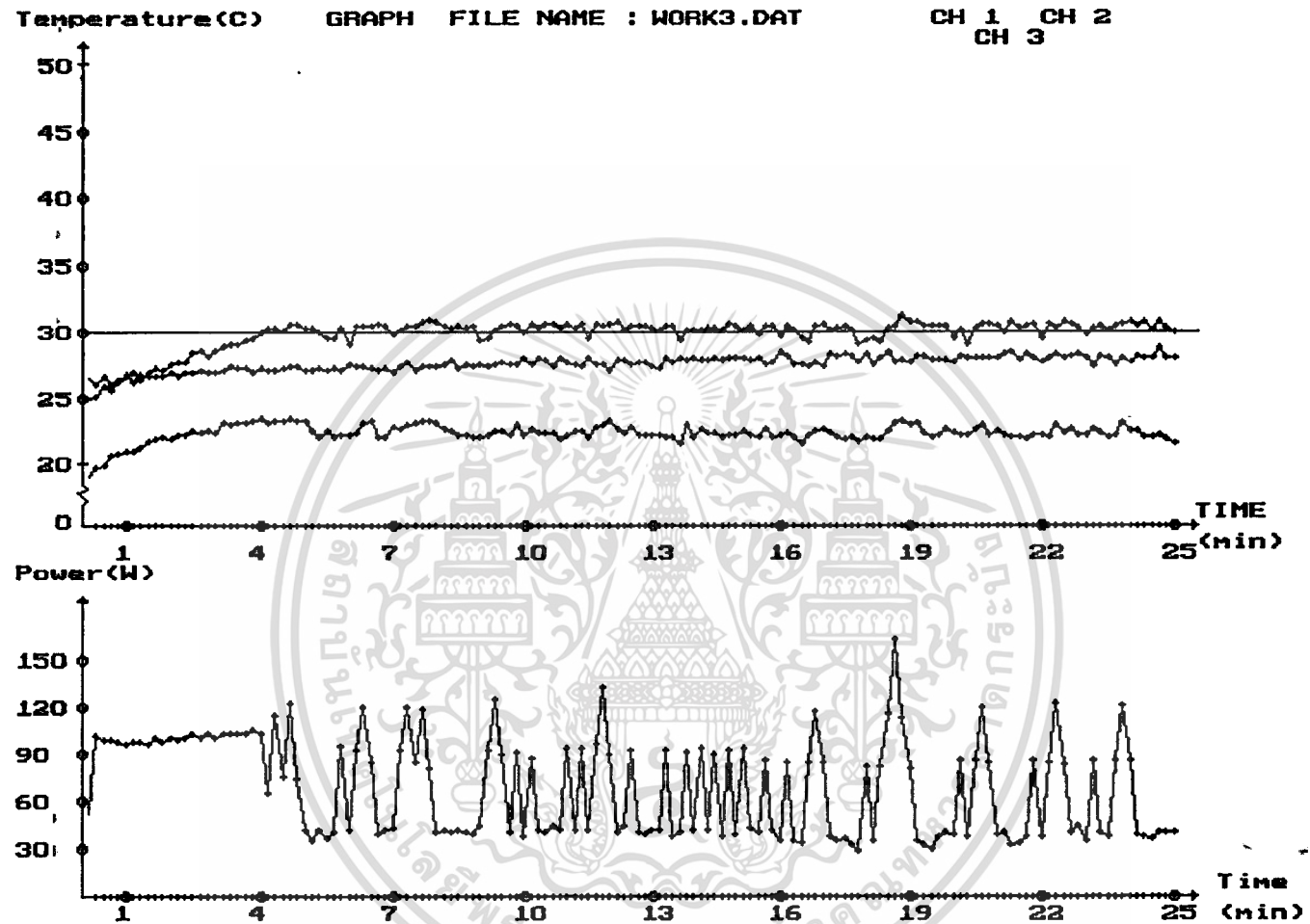
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในส่วนที่ 2 เป็นการทดลองโดยมีการต่อระบบวัดกำลังงานคลื่นไมโครเวฟ เพื่อให้ทราบค่ากำลังงานเอาต์พุทของคลื่นไมโครเวฟและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ โดยพล็อตกราฟ ในเวลาเดียวกันกับการแสดงผลอุณหภูมิ

เนื่องจากพอร์ทอินพุทของการ์ด A/D มี 4 พอร์ท ดังนั้นจึงลดการแสดงผลอุณหภูมิจาก 4 CH เหลือ 3 CH และใช้การแสดงผลกำลังงานเอาต์พุทของคลื่นแทนการแสดงผลอุณหภูมิที่ความลึก 32 มิลลิเมตร เพราะว่าจากการทดลองในส่วนแรก ได้ผลเป็นที่แน่นอนว่าที่ความความลึก 32 มิลลิเมตร ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่อยู่ในระดับที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ของร่างกาย

และในการทดลองส่วนที่ 2 นี้มีการใช้สลับ จูนเนอร์ ปรับค่าให้มีการแมทชิงเพื่อให้มีกำลังงานคลื่นส่งผ่านมากที่สุด และสะท้อนกลับน้อยที่สุด การทดลองที่เงื่อนไขต่าง ๆ ได้ผลดังกราฟรูป 4.8 - 4.10





รูป 4.8 แสดงกราฟผลการทดลองวัดอุณหภูมิและกำลังงาน (1)

การทดลองตามกราฟรูป 4.8 ใช้เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

ศักดาไฟฟ้าเริ่มต้นที่จ่ายให้แหล่งจ่ายไฟสูงสำหรับหลอดแมกนีตรอน 155 โวลท์

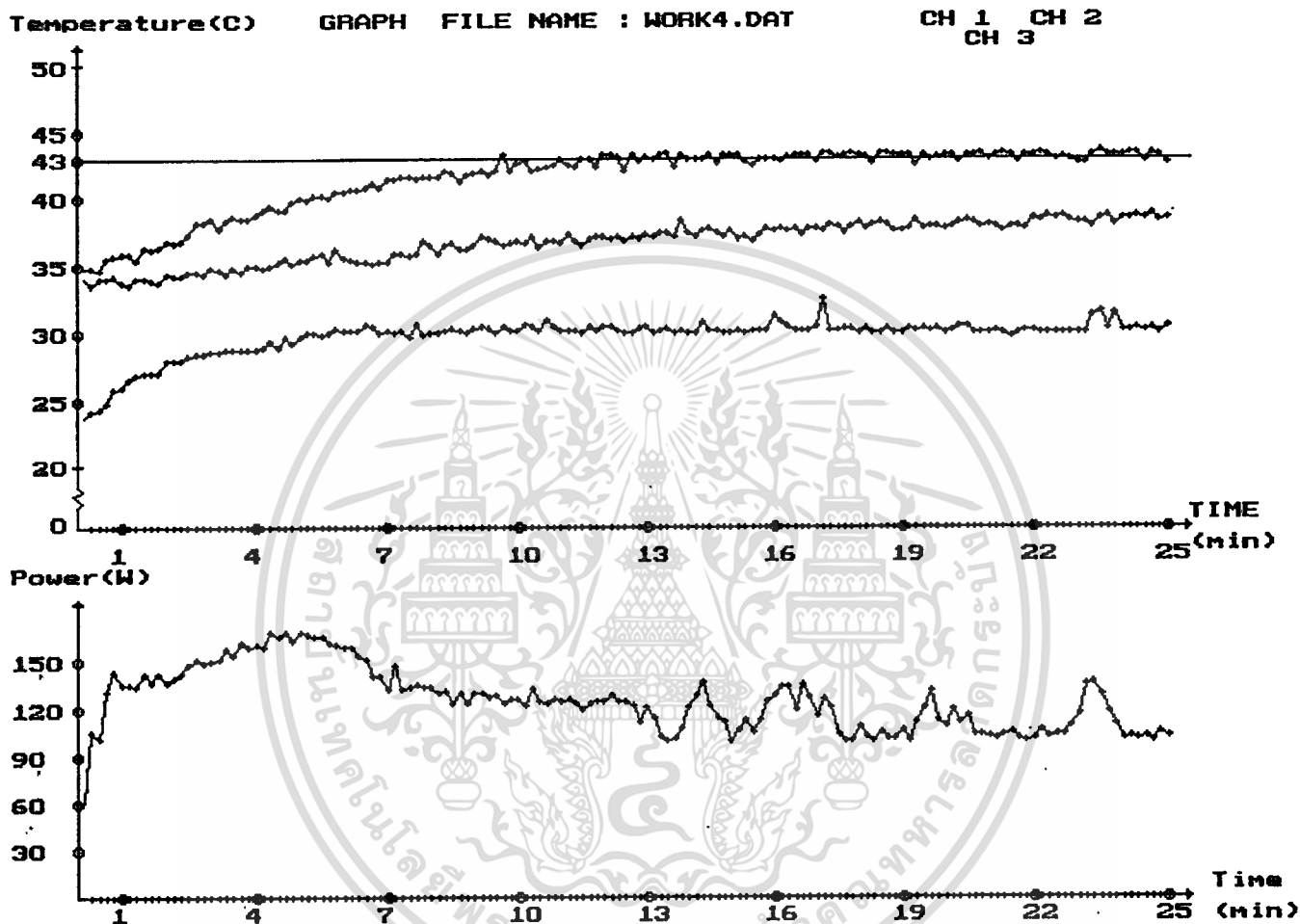
ศักดาไฟฟ้าสูงสุด 156 โวลท์      ศักดาไฟฟ้าต่ำสุด 147 โวลท์

การทดลองควบคุมอุณหภูมิเซนแนล 2 หรือ ความลึก 12 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

กำลังงานสูงสุด 133.23 วัตต์      ที่ค่าศักดาไฟฟ้า 156 โวลท์

เอกภาคกำลังงานต่ำสุด 41.12 วัตต์สำหรับที่ค่าศักดาไฟฟ้า 147 โวลท์ นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.9 แสดงกราฟผลการทดลองวัดอุณหภูมิและกำลังงาน ( 2 )

การทดลองตามกราฟรูป 4.9 ใช้เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

ศักดาไฟฟ้าเริ่มต้นที่จ่ายให้แหล่งจ่ายไฟสูงสำหรับหลอดแมกนีตรอน 155 โวลท์

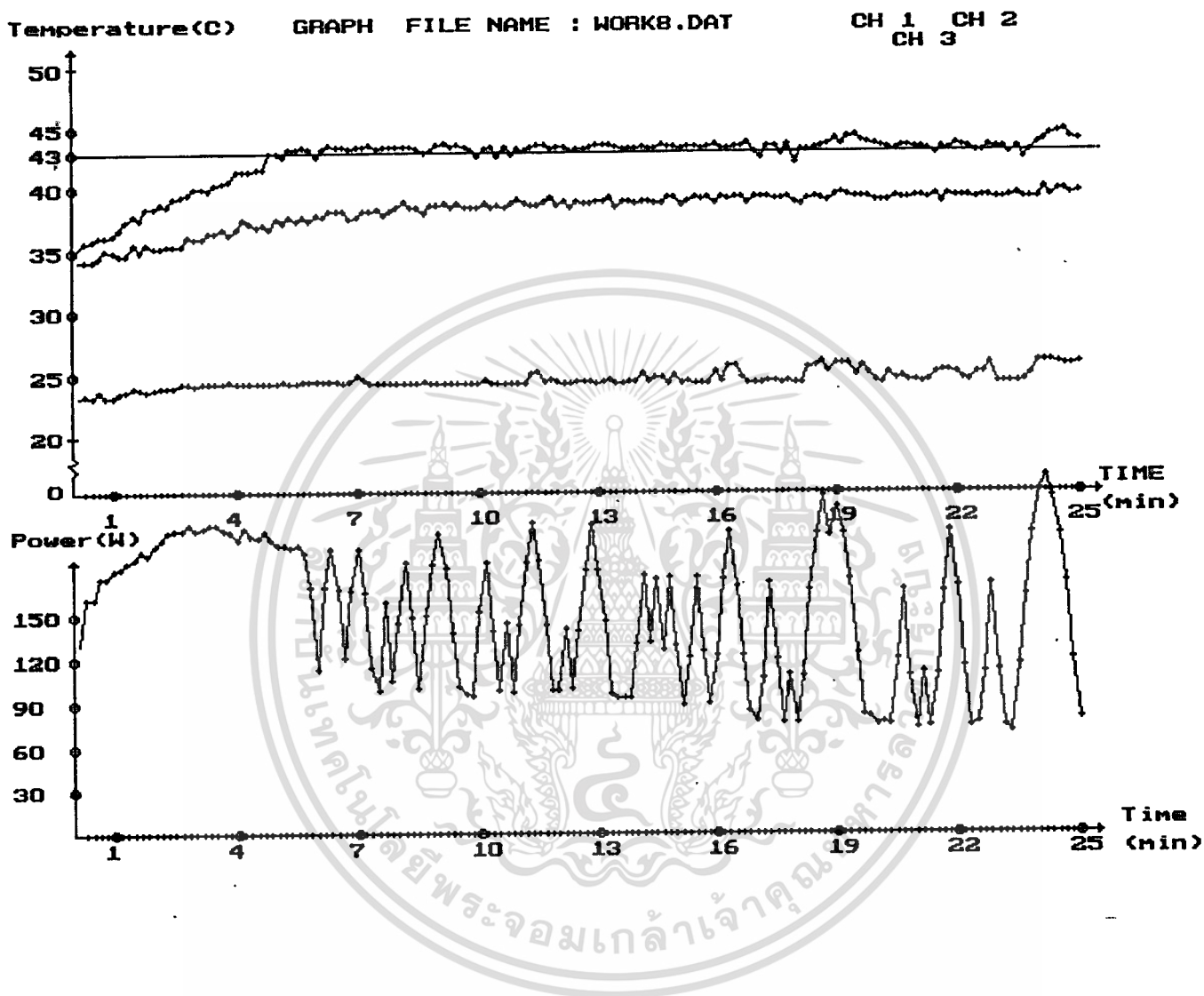
ศักดาไฟฟ้าสูงสุด 160 โวลท์      ศักดาไฟฟ้าต่ำสุด 149 โวลท์

การทดลองควบคุมอุณหภูมิแกนแนล 2 หรือ ความลึก 12 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส

กำลังงานสูงสุด 156.98 วัตต์      ที่ค่าศักดาไฟฟ้า 160 โวลท์

เอกสกำลังงานต่ำสุด 99.98 วัตต์      ที่ค่าศักดาไฟฟ้า 149 โวลท์นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.10 แสดงกราฟผลการทดลองวัดอุณหภูมิและกำลังงาน ( 3 )

การทดลองตามกราฟรูป 4.10 ใช้เงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

ศักดาไฟฟ้าเริ่มต้นที่จ่ายให้แหล่งจ่ายไฟสูงสำหรับหลอดแมกนีตรอน 155 โวลท์

ศักดาไฟฟ้าสูงสุด 161 โวลท์      ศักดาไฟฟ้าต่ำสุด 149 โวลท์

การทดลองควบคุมอุณหภูมิเซนแนล 2 หรือ ความลึก 12 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส

กำลังงานสูงสุด 212.01 วัตต์      ที่ค่าศักดาไฟฟ้า 161 โวลท์

กำลังงานต่ำสุด 70.7 วัตต์      ที่ค่าศักดาไฟฟ้า 149 โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงผลการวัดค่ากำลังงานเอาต์พุตของคลื่นไมโครเวฟทั้ง 3 รูป พบว่าค่า กำลังงานเอาต์พุตของคลื่นมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารจำลองเนื้อคน โดยช่วงแรกกำลังงานเอาต์พุตของคลื่นจะสูงขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้หลอดแมกนีตรอน จนกระทั่งอุณหภูมิที่ความลึกที่ต้องการ สูงขึ้นถึงค่าซึ่งต้องการควบคุม ระบบจะรักษาอุณหภูมิให้คงที่

พิจารณากราฟแสดงผลการทดลองดังรูป 4.8 ถึง 4.10 ในช่วงเวลาการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ พบว่า ค่ากำลังงานเอาต์พุตของคลื่นลดต่ำกว่าช่วงการเพิ่มอุณหภูมิ ทั้งนี้เพราะว่า ค่าศักดาไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดแมกนีตรอนในช่วงเวลาการควบคุมอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิ เพราะระบบต้องการกำลังงานคลื่นไม่สูงมากนัก เพียงเพื่อต้องการรักษาอุณหภูมิของสารจำลองเนื้อคนให้คงที่เท่านั้น

และจากกราฟแสดงผลการทดลองในช่วงเวลาควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ดังกล่าวยังพบว่า การแสดงค่ากำลังงานเอาต์พุตคลื่นมีระดับสูงและต่ำสลับกันซึ่งสามารถอธิบายโดย พิจารณากราฟการแสดงผลอุณหภูมิที่ใช้เวลาเดียวกันกับการแสดงผลกำลังงานคลื่น พบว่าช่วงที่กำลังงานคลื่นสูงขึ้น สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารจำลองเนื้อคน เพื่อให้เท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม ส่วนช่วงที่กำลังงานคลื่นต่ำลงนั้น สัมพันธ์กับการลดลงของอุณหภูมิของสารจำลองเนื้อคน เพื่อให้อุณหภูมิลดมาอยู่ในระดับที่ต้องการควบคุม ซึ่งการแสดงผลค่ากำลังงานเอาต์พุต ของคลื่นไมโครเวฟดังกล่าวให้ผลถูกต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริง

## บทที่ 5

### บทสรุป

จากผลการทดลองซึ่งแสดงโดยกราฟในบทที่ 4 การทดลองในส่วนแรกเป็นการแสดงผลการทำงานต่าง ๆ ของระบบการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่เงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อศึกษาการควบคุมอุณหภูมิที่ความลึกต่างกัน และศึกษาเพื่อหาค่าอัตราการไหลของน้ำในระบบระบายความร้อนที่เหมาะสมซึ่งจะได้ว่าระบบฯ สามารถควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในตอนต้นของการให้ความร้อน โดยมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิประมาณ 1 นาที่ต่อ 1 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอัตราที่เหมาะสม ไม่ช้าหรือเร็วเกินไปที่จะมีผลต่อปฏิกิริยาการตอบสนองต่อความร้อนของเซลล์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ถึงระดับที่ต้องการควบคุมแล้ว ระบบฯ สามารถรักษาอุณหภูมิ ที่ความลึกที่ต้องการได้ โดยมีค่าเบี่ยงเบนของอุณหภูมิโดยเฉลี่ยไม่เกิน 1 องศาเซลเซียส ในช่วงตลอดระยะเวลาการให้ความร้อน ทั้งนี้โดยการใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการจ่ายกำลังงานของหลอดแมกนีตรอน และใช้ในการแสดงผลค่าอุณหภูมิที่ความลึกต่าง ๆ

สำหรับระบบระบายความร้อน เปรียบเทียบกราฟแสดงผลการทดลองตามรูป 4.4 และ 4.5 ซึ่งเป็นการควบคุมอุณหภูมิ ที่ความลึก 12 มม. แต่ใช้อัตราการไหลของน้ำต่างกัน พบว่าในเงื่อนไขการทดลองดังรูป 4.5 คือ ใช้อัตราการไหลของน้ำ 2300 cc/นาที่ ระบบฯ สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ความลึกดังกล่าวได้ดีกว่า และในขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมอุณหภูมิจากบริเวณผิวให้อยู่ในระดับที่ไม่สูงนัก โดยเฉลี่ยคือ 28 องศาเซลเซียส

ส่วนการทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ความลึก 22 มม. ตามรูป 4.6 และ 4.7 พบว่า ระบบยังสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ความลึกดังกล่าวได้ดี แต่อุณหภูมิที่ความลึก 12 มม. ซึ่งอยู่ สูงขึ้นไป 10 มม. ยังอยู่ในระดับสูง แต่มีแนวโน้มลดลง ตามกราฟรูปที่ 4.7 ซึ่งใช้อัตราการไหลของน้ำมากกว่า ดังนั้นระบบฯ ที่ใช้อัตราการไหลของน้ำสูงขึ้นจะสามารถระบายความร้อนที่บริเวณผิวได้ดีขึ้น และยังสรุปได้ว่าระบบฯ สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ความลึกที่ต้องการได้เป็นอย่างดี

การทดลองในส่วนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อวัดกำลังงานเอาท์พุทของคลื่นไมโครเวฟและใช้การแสดงผลในเวลาเดียวกันกับการแสดงผลอุณหภูมิ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและค่ากำลังงานเอาท์พุทของคลื่น จะพบว่ากำลังงานเอาท์พุทของคลื่นในช่วงแรก จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ อันเนื่องมาจากค่าศักดาไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดแมกนีตรอนเพิ่มขึ้นตามการควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ เมื่อค่าศักดาไฟฟ้าเพิ่มถึงค่าที่กำหนดไว้ ค่ากำลังงานเอาท์พุทของคลื่นก็จะคงที่ แต่ค่าอุณหภูมิของสารจำลองเนื้อคนยังสูงขึ้นได้ทั้งนี้เพราะความร้อนมีการสะสม ในช่วงการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ พบว่า การเปลี่ยนแปลงของกำลังงานเอาท์พุทของคลื่นไมโครเวฟ เปลี่ยนแปลงตามการควบคุมของคอมพิวเตอร์ในการรักษาระดับของอุณหภูมิ โดยที่ถ้าอุณหภูมิของสารจำลองเนื้อคนสูงขึ้น ค่ากำลังงานเอาท์พุทของคลื่นก็สูงขึ้นด้วย และเป็นจริงในทางตรงกันข้าม ซึ่งการแสดงผลค่ากำลังงานเอาท์พุทของคลื่นไมโครเวฟตามกราฟแสดงผลการทดลองให้ผลถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริง คือช่วงการไม่ว่การณใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มอุณหภูมิ จะได้ว่า กำลังงานคลื่นมีค่าสูง แต่ช่วงการควบคุมอุณหภูมิ กำลังงานของคลื่นจะมีค่าต่ำลง และจากกราฟแสดงผลการทดลองในช่วงเวลาควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ดังกล่าวยังพบว่า การแสดงค่ากำลังงานเอาร์ททุกคลื่นมีระดับสูงและต่ำสลับกันซึ่งสามารถอธิบายโดย พิจารณากราฟการแสดงผลอุณหภูมิที่ใช้เวลาเดียวกันกับการแสดงผลกำลังงานคลื่น พบว่าช่วงที่กำลังงานคลื่นสูงขึ้น สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารจำลองเนื้อคน เพื่อให้เท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม ส่วนช่วงที่กำลังงานคลื่นต่ำลงนั้น สัมพันธ์กับการลดลงของอุณหภูมิของสารจำลองเนื้อคนเพื่อให้อุณหภูมิลดมาอยู่ในระดับที่ต้องการควบคุม

โดยสรุปแล้วระบบการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟนี้ สามารถควบคุมอุณหภูมิที่มีความลึกที่ต้องการได้ ตลอดจนแสดงผลค่าอุณหภูมิและกำลังงานเอาร์ททุกคลื่นไมโครเวฟได้ทางคอมพิวเตอร์





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### ไมโครเวฟเน็ตเวิร์กพารามิเตอร์ ( Microwave Network Parameter )

วงจรไมโครเวฟจะประกอบด้วยอุปกรณ์ทางไมโครเวฟ เช่น แหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ตัวลวดทอน สัญญาณ ฯลฯ โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ จะต่อกันด้วยสายส่งแบบต่าง ๆ หรือเวฟไกด์ ในการศึกษาถึงลักษณะประจำของอุปกรณ์เหล่านั้น พารามิเตอร์หรือตัวแปรอาจจะเป็นโวลต์เตตหรือกระแส หรืออาจเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับค่าขนาดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าพารามิเตอร์นั้นอาจจะทราบได้จากการวัดหรือคำนวณ โดยถ้าเราทราบพารามิเตอร์ทุกตัวของระบบ เราก็สามารถวิเคราะห์ทั้งระบบได้

เซตของพารามิเตอร์มีหลายแบบ บางเซตจะเกี่ยวข้องกับค่าโวลต์เตตและกระแส แต่ถ้าเป็นระบบที่ใช้ความถี่สูง เช่น ระบบของคลื่นไมโครเวฟ จะไม่ใช้ค่าทั้งสองดังกล่าวในการอธิบาย แต่ตัวแปรที่ใช้จะกำหนดโดย S - parameter ซึ่งมีการใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์รวมทั้งระบบไมโครเวฟ

### วงจรสองพอร์ท ( Two-ports network )

ลักษณะทั่ว ๆ ไปของวงจรสองพอร์ท แสดงดังรูป ก-1 โดยมีพอร์ท 1 เป็นพอร์ทอินพุท และพอร์ท 2 เป็นพอร์ทเอาท์พุท



รูป ก-1 แสดงวงจรสองพอร์ท

ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตตและกระแสของแต่ละพอร์ทอธิบายได้ด้วยแต่ละเทอมของพารามิเตอร์เซตของพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น

Z- parameter      กำหนดโดย       $V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2$$

Y- parameter      กำหนดโดย       $I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2$$

แต่ละเน็ตเวิร์กจะถูกกำหนดลักษณะสมบัติโดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นี้เอง ซึ่งสามารถหาได้จากการวัดหรือการคำนวณ และสามารถใช้พารามิเตอร์เหล่านี้ในการวิเคราะห์วงจรหรือเน็ตเวิร์กที่ใหญ่ขึ้นได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สแกตเตอร์ริง พารามิเตอร์ ( Scattering Parameter )

ในวงจรที่ใช้ความถี่สูง เช่น วงจรไมโครเวฟ จะไม่อธิบายด้วยค่าโวลต์เตทหรือกระแส แต่เนื่องจากค่าโวลต์เตทแปรผันโดยตรงกับค่าสนามไฟฟ้าตามขวาง ( Transverse electric field ) และกระแสแปรผันตรงกับสนามแม่เหล็กตามขวาง ( Transverse magnetic field ) ซึ่งผลก็คือทำให้มีกำลังงานคลื่นไหลในเน็ตเวิร์ก อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเนื่องด้วยโวลต์เตทและกระแสมีข้อจำกัดสำหรับที่จะใช้ในวงจรความถี่สูง เช่น ที่ความถี่ไมโครเวฟ เป็นการยากที่จะกำหนดค่าโวลต์เตทและกระแสในเวฟไกด์ นอกจากนั้นการวัดพารามิเตอร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับโวลต์เตทและกระแสทำได้ยากจนอาจถึงทำไม่ได้ การกำหนดตัวแปรคลื่นไมโครเวฟจึงใช้การวัดคลื่นตกกระทบและคลื่นสะท้อนกลับ และอธิบายในเทอม สแกตเตอร์ริง พารามิเตอร์ หรือ S - parameter

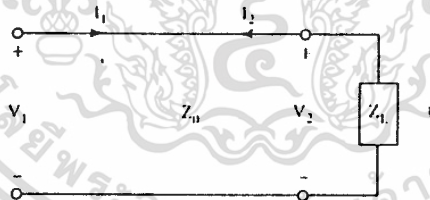
ที่จุดใด ๆ ในสายส่งหรือเวฟไกด์ โวลต์เตทรวมจะเท่ากับ โวลต์เตทของคลื่นตกกระทบบวกด้วยโวลต์เตทของคลื่นสะท้อนกลับ พิจารณาในส่วนของสายส่งหรือเวฟไกด์ในลักษณะของวงจรสองพอร์ท ดังรูป ก - 2 ที่แต่ละพอร์ทจะเขียนสมการโวลต์เตทรวมได้เป็น

$$V_1 = V_{i1} + V_{r1}$$

$$V_2 = V_{i2} + V_{r2}$$

$V_{i1}$ ,  $V_{i2}$  : โวลต์เตทตกกระทบที่พอร์ท 1 และ 2 ตามลำดับ

$V_{r1}$ ,  $V_{r2}$  : โวลต์เตทสะท้อนกลับที่พอร์ท 1 และ 2 ตามลำดับ



รูป ก - 2 แสดงสายส่งในลักษณะวงจรสองพอร์ท

สามารถกำหนดเทียของตัวแปรของคลื่นได้ดังนี้

$$a_1 = V_{i1} / \sqrt{Z_0}$$

$$b_1 = V_{r1} / \sqrt{Z_0}$$

$$a_2 = V_{i2} / \sqrt{Z_0}$$

$$b_2 = V_{r2} / \sqrt{Z_0}$$

( ก - 1 )

$a_1$ ,  $a_2$  แทน คลื่นตกกระทบที่พอร์ท 1 และ 2 ตามลำดับ ในขณะที่  $b_1$ ,  $b_2$  แทนคลื่นสะท้อนกลับที่

พอร์ท 1 และ 2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการกำหนดดังนี้จะได้ว่า กำลังงานเฉลี่ยของคลื่นใด ๆ กำหนดด้วยค่ากำลังสองของตัวแปรใดตัวแปรหนึ่ง เช่น

$$1/2 |a_1|^2 = \frac{|V_{11}|^2}{2Z_0} = \frac{|V_{11}| |I_{11}|}{2} = P_{11}$$

โดยที่  $P_{11}$  คือ กำลังงานของคลื่นตกกระทบที่พอร์ท 1

$Z_0$  คือ ค่าค่าแรงเตอร์รีสติคิมพีแดนซ์ ที่พอร์ท 1

โดยทั่ว ๆ ไปกำลังงานคลื่นสุทธิที่ไหลเข้าที่พอร์ทใด ๆ กำหนดโดย

$$P = 1/2 (aa^* - bb^*) = 1/2 (|a|^2 - |b|^2) \quad (n-2)$$

S - parameter กำหนดโดยให้ตัวแปรคลื่นสะท้อนกลับเป็นตัวแปรตาม และตัวแปรคลื่นตกกระทบเป็นตัวแปรอิสระ นั่นคือ

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (n-3)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (n-4)$$

หรือเขียนในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (n-5)$$

ดังนั้นค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวสามารถหาได้ เช่น

จากสมการที่ (n-3) จะได้  $S_{11} = b_1 / a_1 |_{a_2=0}$  (n-6)

ซึ่งการที่ตัวแปร  $a_2 = 0$  หมายความว่าไม่มีคลื่นตกกระทบที่ พอร์ท 2 ดังนั้นพารามิเตอร์  $S_{11}$  จึงแทนสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ พอร์ท 1 เมื่อ พอร์ท 2 ถูกเทอร์มินेटด้วยแมทซ์โหลด

และจากสมการ (n-4) จะได้  $S_{21} = b_2 / a_1 |_{a_2=0}$  (n-7)

อัตราส่วนนี้แสดงถึงคลื่นที่ออกไปจาก พอร์ท 2 ต่อคลื่นที่เข้ามาที่ พอร์ท 1 ภายใต้เงื่อนไขการแมทซ์ที่ พอร์ท 2 สำหรับสายส่งหรือเวฟไกด์ที่มีการสูญเสียแล้ว  $S_{21}$  จะมีค่าน้อยกว่า 1 และค่า  $S_{21}$  จะ

แสดงถึงค่าลดทอนกำลังงานคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณากำลังงานคลื่นตกกระทบที่ พอร์ต 1 เป็น  $P_{i1}$  ซึ่งจะก่อให้เกิดกำลังงานคลื่น  $P_{o2}$  ที่พอร์ต 2 ภายใต้เงื่อนไขแมทซ์โวลด์ซึ่งสามารถแสดงอัตราส่วนของ  $P_{i1}$  และ  $P_{o2}$  ได้เป็น

$$P_{i1} / P_{o2} = |a_1|^2 / |b_2|^2 = 1 / |S_{21}|^2$$

take log ทั้งสองข้างได้เป็น

$$\begin{aligned} \log(P_{i1} / P_{o2}) &= \log(1 / |S_{21}|^2) \\ &= -2 \log |S_{21}| \end{aligned}$$

ดังนั้น การลดทอน (Attenuation) =  $10 \log P_{i1} / P_{o2}$   
 $= -20 \log |S_{21}|$  (dB) (ก-8)

ซึ่งค่าการลดทอนในหน่วยเดซิเบล (dB) นี้ก็คือค่า insertion loss นั้นเอง สำหรับ S-parameter อีก 2 ค่าก็สามารถแสดงได้ในทำนองเดียวกัน

จากสมการ (ก-3) และ (ก-4)

$$S_{22} = b_2 / a_2 |_{a_1=0} \quad (\text{ก-9})$$

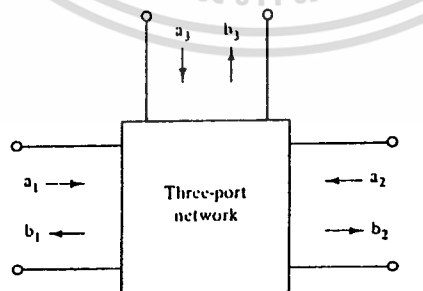
$$S_{12} = b_1 / a_2 |_{a_1=0} \quad (\text{ก-10})$$

ซึ่ง  $S_{22}$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ พอร์ต 2 โดยที่แมทซ์โวลด์ที่ พอร์ต 1 และ

$S_{12}$  คือค่าการลดทอน หรือกำลังขยาย (Gain) สำหรับคลื่นที่เดินทางจาก พอร์ต 2 ไปยัง พอร์ต 1

โดยทั่วไปแล้ว S-parameter เป็นจำนวนตัวเลขเชิงซ้อน ซึ่งประกอบด้วยทั้งขนาดและมุม

สำหรับเน็ตเวิร์กที่มีมากกว่า 2 พอร์ต ก็สามารถใช้ S-parameter ในการกำหนดความสัมพันธ์ได้ เช่น เน็ตเวิร์กตามรูป ก-3 ซึ่งเป็นเน็ตเวิร์ก 3 พอร์ต สมการ S-parameter จะเป็น



รูป ก-3 แสดงวงจรสามพอร์ต

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + S_{13}a_3$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}a_3$$

$$b_3 = S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + S_{33}a_3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (ก-11)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในเน็ตเวิร์ก n พอร์ตใดๆจะได้สมการ

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + \dots + S_{1n}a_n$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + \dots + S_{2n}a_n$$

$$b_3 = S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + \dots + S_{3n}a_n$$

.. ..

$$b_n = S_{n1}a_1 + S_{n2}a_2 + \dots + S_{nn}a_n$$

( n - 12 )

ซึ่งเขียนในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$[b] = [S][a]$$

( n - 13 )

โดย  $[b]$  และ  $[a]$  คือเมตริกซ์หลัก ( Column metrice ) ของตัวแปรคลื่น และ  $[S]$  คือเมตริกซ์  $n \times n$  ของ scattering parameters สำหรับเน็ตเวิร์ก n พอร์ต

### คุณสมบัติของ S - parameters

โดยทั่วไปแล้ว S - parameters จะประกอบด้วยทั้งขนาดและมุม และสามารถเขียนได้ทั้งในรูปเอ็กซ์โปเนนเชียล ( Exponential form ) หรือรูปเรคแทนกูลาร์ ( Rectangular form ) มีคุณสมบัติบางประการของ S - parameters ที่สำคัญดังนี้

1. ไม่มีการสะท้อนกลับที่พอร์ทใด ๆ ที่มีการต่อแมทชโหลด ( Match two - port with no reflection )

จากสมการ ( n - 6 ) และ ( n - 9 ) แสดงค่า  $S_{11}$  และ  $S_{22}$  ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่แต่ละพอร์ท ภายใต้เงื่อนไขการต่อแมทชโหลด ดังนั้น ถ้า ส.ป.ส. การสะท้อนกลับเป็น ศูนย์ สำหรับทั้งสองพอร์ทจะได้ว่า

$$S_{11} = S_{22} = 0 \quad ( n - 14 )$$

ในอุปกรณ์ไมโครเวฟส่วนมากมักจะถูกออกแบบให้มี ส.ป.ส.การสะท้อนกลับต่ำ ๆ ( VSWR = 1 ) ดังนั้นบ่อยครั้งที่เราจัดให้ ส.ป.ส.ในแนวเส้นทะแยงมุมของสแกตเตอร์เมตริกซ์เป็น 0 นั่นคือสำหรับเน็ตเวิร์ก n พอร์ต ในอุดมคติ ซึ่งจะไม่มีการสะท้อนกลับที่พอร์ทใด ๆ ภายใต้สภาวะแมทชโหลด จะได้

$$S_{ii} = 0 \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad ( n - 15 )$$

2. คุณสมบัติสมมาตรของตัวแปร ( Symmetry of S - Parameter )

สองพอร์ทต่างมีคุณสมบัติ การส่งในแต่ละทิศทางเหมือนกัน หมายความว่า ถ้าให้ พอร์ท 1 เป็น อินพุต แล้วเอาท์พุตที่ได้จากพอร์ท 2 จะเหมือนกับเอาท์พุตจากพอร์ท 1 เมื่อให้พอร์ท 2 เป็นอินพุต ดังนั้น

$$S_{12} = S_{21} \quad ( n - 16 )$$

เอกสารนี้สำหรับเน็ตเวิร์ก n พอร์ต จะได้การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามวิพากษ์เนื้อหา;  $ll \neq j$  อย่างอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง (ที่ 17) นำไปใช้

ซึ่งอุปกรณ์ไมโครเวฟโดยทั่วไปแล้วมีคุณสมบัติดังนี้ ยกเว้นอุปกรณ์พวกเฟอร์ไรต์ไดโอด ( Ferrite devices ) และแอคทีฟไดโอด ( Active devices ) เช่น ไมโครเวฟทรานซิสเตอร์

### 3. คุณสมบัติของการเท่ากันหนึ่ง ( Unity Property )

ผลรวมของผลคูณระหว่างแต่ละเทอมในแถวหรือหลักใด ๆ ของ เมตริกซ์ S กับคอมเพล็กซ์ คอนจูเกต ( complex conjugate ) ของมัน เท่ากับ หนึ่ง นั่นคือ

$$\sum_i^n S_{ij} S_{ij}^* = 1 \quad \text{สำหรับ } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (n - 18)$$

### 4. คุณสมบัติของการเท่ากับศูนย์ ( Zero Property )

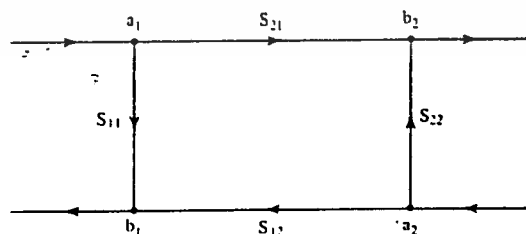
ผลรวมของผลคูณระหว่างแต่ละเทอมในแถวหรือหลักใด ๆ ของ เมตริกซ์ S กับคอมเพล็กซ์ คอนจูเกต ( complex conjugate ) ของเทอมที่สัมพันธ์กันในแถวหรือหลักอื่น ๆ เป็น ศูนย์ นั่นคือ

$$\sum_i^n S_{ik} S_{ij}^* = 0 \quad \text{สำหรับ } k \neq j \text{ และ } k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (n - 19)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n$$

### กราฟแสดงทิศทางการไหลของสัญญาณ ( Signal flow graphs )

กราฟแสดงทิศทางการไหลของสัญญาณอาศัยพื้นฐานจาก s - parameter เป็นการแสดงทิศทางการไหลของพลังงานในวงจรไมโครเวฟ ในซิกแนลโฟลว์กราฟนั้น ตัวแปรคลื่นแต่ละตัวจะแสดงด้วยโนด ( Node ) และแต่ละ scattering parameters แสดงด้วยบรานช์ ( Branch ) ซึ่งเชื่อมต่อแต่ละโนด โดยมีทิศทางของบรานช์จาก โหนด a ไปยังโนด b ซิกแนลโฟลว์กราฟสำหรับเน็ตเวิร์กสองพอร์ทแสดงดังรูป n - 4



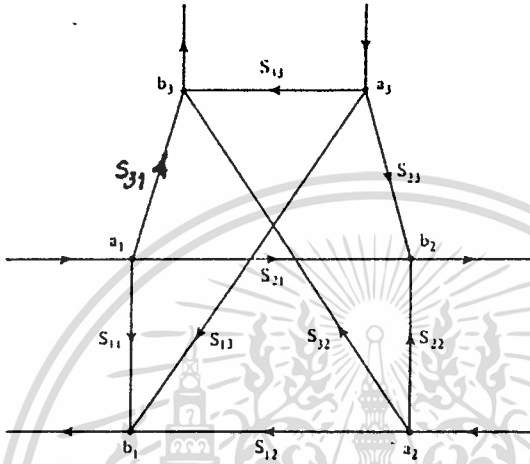
รูป n - 4 แสดงซิกแนลโฟลว์กราฟสำหรับเน็ตเวิร์ก สองพอร์ท

จากรูปจะทราบความสัมพันธ์ได้ง่าย ๆ ดังเช่น คลื่นสะท้อน  $b_2$  ที่พอร์ท 2 เป็นผลรวมของ  $S_{21}a_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
กับ  $S_{22}a_2$  ซึ่งก็เป็นไปตามวิธีที่นิยมได้แต่แรกในสมการ scattering parameter  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเน็ตเวิร์กใหญ่ ๆ ซึ่งประกอบด้วย ก่อร่างของหลาย ๆ เน็ตเวิร์ก 2 พอร์ต หรือมี  $n$  พอร์ต ซิกแนลไฟลด์กราฟก็จะซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ก็สามารถหาทิศทางการไหลของกำลังงานคลื่นในเน็ตเวิร์กได้ง่ายจากกราฟ

ตัวอย่างเช่น ซิกแนลไฟลด์กราฟตามรูป ก - 5



รูปที่ ก - 5 แสดงซิกแนลไฟลด์กราฟสำหรับเน็ตเวิร์ก หลายพอร์ต

จากกราฟสามารถหา  $b_2, b_3$  ได้เป็น

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}a_3$$

$$b_3 = S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + S_{33}a_3$$

ถ้าพอร์ต 2 และ พอร์ต 3 ถูกเทอร์มินเนตด้วยเมทซ์โหลด จะได้ว่า  $a_2 = a_3 = 0$  และ

$$b_2 = S_{21}a_1$$

$$b_3 = S_{31}a_1$$

เมื่อ  $a_1$  คือ อินพุตที่พอร์ต 1 และเพราะว่ากำลังงานคลื่นแปรผันตามกำลังสองของตัวแปรคลื่น จะได้กำลังงานคลื่นเอาท์พุตที่พอร์ต 2 และพอร์ต 3 เป็น

$$P_{o2} = |S_{21}|^2 P_{i1}$$

$$P_{o3} = |S_{31}|^2 P_{i1}$$

## ภาคผนวก ข.

### หลักการทำสารจำลองเนื้อคน ( Phantom )

สารจำลองเนื้อคนเป็นสารละลายของแข็งที่มีคุณลักษณะคล้ายเนื้อเยื่อจริงของมนุษย์ มีส่วนประกอบและวิธีการเตรียมดังนี้

#### ส่วนประกอบของ 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

#### ขั้นตอนการเตรียม

1. ต้มน้ำกลั่น ( Distilled water ) ให้มีอุณหภูมิสูงถึง  $70^{\circ}\text{C}$  -  $80^{\circ}\text{C}$  แล้วเติม NaCl คนให้ละลาย รักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง  $70^{\circ}\text{C}$  -  $80^{\circ}\text{C}$
2. เติม  $\text{NaN}_3$  ลงในน้ำ คนให้ละลาย รักษาอุณหภูมิให้คงที่
3. ค่อย ๆ เติม Agar powder ทีละน้อย ๆ ระวังอย่าให้จับเป็นก้อน หรือเกิดฟอง หรือไหม้ คนให้ละลายตลอดเวลา
4. เติมน้ำให้ได้สารละลายครบ 1 ลิตร
5. เพิ่มอุณหภูมิของสารละลายไปจนถึง  $95^{\circ}\text{C}$  ( ระวังอย่าให้ไหม้ )
6. ทำความสะอาดภาชนะที่จะเทสารละลายใส่ ให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น เทส่วนผสมสารละลายที่ได้จากข้อ 5. ลงในภาชนะนั้น แล้วใช้พลาสติกใสปิดภาชนะ เก็บไว้ 1 - 2 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลงไม่ได้หากไม่ได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายๆ คนตั้งแต่ช่วงการทำโครงงานตลอดจนการจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ นเสรีจสมบุญณ์

### ขอขอบคุณ

รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

### ขอบคุณ

นายมนตรี ธนาควัต

นักศึกษาปริญญาโท

นายคนองนิก ภิรมย์

นักศึกษาผู้ร่วมโครงงานชั้นปีที่ 3

นายอุทิศ ภูหงษ์สูง

นักศึกษาผู้ร่วมโครงงานชั้นปีที่ 3

นายชัยวัฒน์ หนูทอง

ผู้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องคอมพิวเตอร์

นายชาญชัย จอประเสริฐกุล

ผู้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องคอมพิวเตอร์

และผู้ให้ความช่วยเหลือทุกท่าน

ผู้จัดทำ

26 มีนาคม 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

- (1) 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.
- (2) G.M. Hahn, "Hyperthermia for Engineer: A Short Biological Primer," IEEE Transaction on Biomedical Engineering, vol. BME - 31, No. 1, pp. 3-8, Jan. 1984.
- (3) G.R. Collins, "Microwave Magnetron," McGraw-Hill Book Company, Inc., 1948.
- (4) A.C. Metaxas and R.J. Meredith, "Industrial Microwave Heating," Peter Peregrinus Ltd., ch. 4, 1983.
- (5) S. Y. Liao, "Microwave device and circuits", PRENTICE-HALL, INC.
- (6) J. A. Seeger, "Microwave theory, components and devices"
- (7) ไม่น้อย ไกรฤกษ์, มนตรี ธนาควัต, "ระบบให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์" .บทความเสนอในการสัมมนาวิชา"SEMINAR MII" ภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2538 บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- (8) พิสุทธิ วงศ์สนธิ และพิเชษฐ เขียวธนะกุล, "การควบคุมกำลังงานของหลอดแมกนีตรอนโดยใช้คอมพิวเตอร์ " ปรินุญานิพนธ์ปริญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, คณะวิศวกรรม - ศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2533.