หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 3

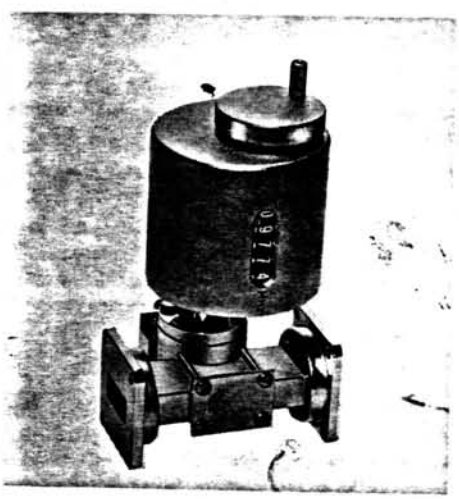
การทดลอง

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองอย่างคร่าว ๆ และวิธีวัดค่าคงที่ฉนวนซึ่งได้แก่วิธีที่ใช้เครื่องตรวจคลื่นสถิตย์ และวิธีใช้แม่เหล็กที่ดังจะได้กล่าวเป็นหัวข้อต่อไป

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

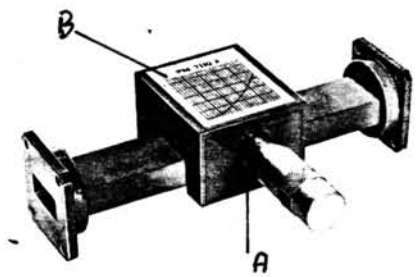
ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้เครื่อง sweep oscillator ของ Hewlett Packard แบบ HP 694 B เป็นแหล่งกำเนิดไมโครเวฟ ส่วนอุปกรณ์การทดลองอื่น ๆ มีดังต่อไปนี้

3.1.1 เวฟมิเตอร์ (wave meter) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความถี่ของคลื่นไมโครเวฟในท่อนำคลื่น เวฟมิเตอร์ประกอบไปด้วยโพรงกลม (cylendrical cavity) ที่วางคล่อมบนท่อนำคลื่น ในการวัดความถี่ก็อาศัยหลักการที่ว่า ที่ความถี่หนึ่ง ๆ ถ้าปริมาตรของโพรงกลมพอเหมาะก็จะเกิดอภินาท (resonance) ในโพรงกลมนั้น ซึ่งการเกิดอภินาทนี้จะทำให้ความแรงของสัญญานลดลงและสามารถสังเกตได้จากจอสโคป และความถี่อาจอ่านได้จากเกลของเวฟมิเตอร์นี้ ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโพรงกลมนั้นสามารถทำได้โดยใช้สกรูบังคับ



รูปที่ 3.1 เวฟมิเตอร์

3.1.2 แอทเทนูเอเตอร์ (attenuator) เป็นเครื่องมือที่ใช้ลดกำลังของคลื่นไมโครเวฟ แอทเทนูเอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบมีแพน (vane) ซึ่งทำด้วยแก้วหุ้มด้วยนิเกิลแพนนี้จะอยู่ขนานกับสนามไฟฟ้า และสามารถปรับให้เลื่อนไปมาได้ กำลังของคลื่นไมโครเวฟจะลดลงมากที่สุดเมื่อแพนนี้อยู่ตรงกลางท่อนำคลื่น เพราะตรงนั้นมีความเข้มของคลื่นมากที่สุดนั่นเอง ในการใช้แอทเทนูเอเตอร์สามารถอ่านว่าแพนเลื่อนออกจากขอบออกไปเป็นมิลลิเมตรได้จากเสกล (A) ที่เครื่อง จากนั้นก็นำระยะนี้มาเปลี่ยนเป็นเดซิเบล (DB) ได้จากแผนภูมิ (B) ซึ่งก็ติดอยู่บนเครื่องอีกเช่นเดียวกัน

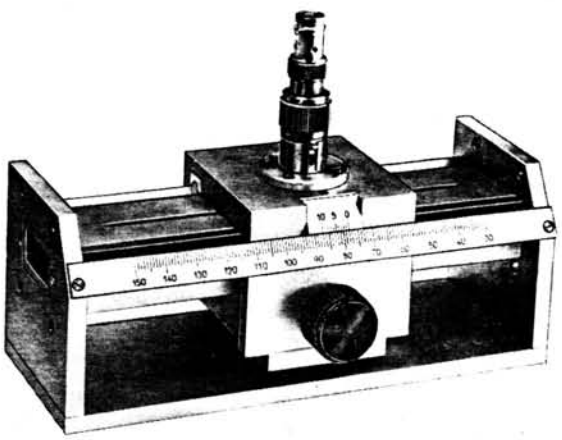


รูปที่ 3.2 แอทเทนูเอเตอร์

3.1.3 พลันเจอร์ (plunger) เป็นท่อนำคลื่นที่มีปลายปิดด้วยแผ่นโลหะ โดยที่แผ่นโลหะนี้สามารถเลื่อนไปมาได้ จึงสามารถใช้พลันเจอร์เป็นตัวเปลี่ยนเฟส (phase) ของสัญญาณได้

รูปที่ 3.3 พลันเจอร์

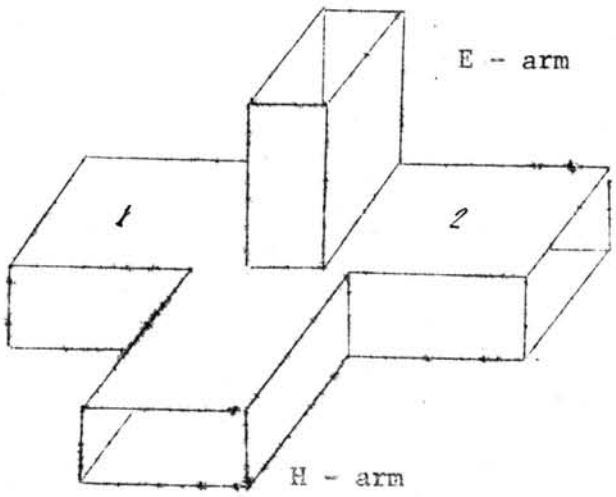
3.1.4 <u>เครื่องตรวจคลื่นสถิตย์</u> (standing wave detector) คือท่อนำคลื่นที่มีด้านกว้างด้านหนึ่งเจาะทะลุเป็นรูแคบและยาวไปตามยาวของท่อเรียกว่า slotted line บนผนังนี้มีกลไกที่สามารถเลื่อนไปมาได้ตลอดความยาวของรู เครื่องกลไกนี้มีโลหะทรงกลมที่เรียวเล็ก



รูปที่ 3.4 เครื่องตรวจคลื่นสถิตย์

เรียกโลหะนี้ว่าโปรบ (probe) ที่โปรบนี้มีผลึกไดโอด (crystal diode) ติดอยู่ด้วย เมื่อโปรบอยู่ในสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้อิเลคตรอนอิสระในโปรบเคลื่อนที่ไปมา ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสลับขึ้น เมื่อกระแสสลับนี้ผ่านผลึกไดโอดก็จะกลายเป็นกระแสตรงเข้าสู่ออสซิโลสโคปต่อไป สัญญาณที่ได้ออกมาจะแปรผันตามอำพนของสนามไฟฟ้า จึงทำให้ทราบตำแหน่งต่าง ๆที่มีความเข้มสนามไฟฟ้ามากที่สุดหรือน้อยที่สุดได้โดยอ่านจากสเกลที่ติดอยู่ข้าง ๆ ทำให้ทราบความยาวคลื่นของสัญญานในท่อนำคลื่นได้

3.1.5 แมจิกที[11] (magic tee) เป็นเครื่องมือที่มีท่อนำคลื่นหลายท่อมาต่อเข้าด้วยกันดังในรูป

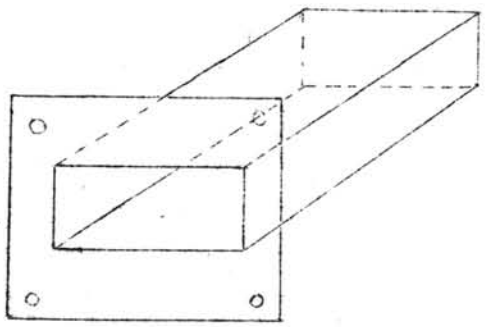


รูปที่ 3.5 แมจิกที

คุณสมบัติของแมจิกทีคือ จากรูป 3.5 เมื่อมีสัญญานไมโครเวฟเข้ามาทางขา H (หรือ E) สัญญานนี้จะแยกเข้าสู่ขา 1 และ 2 โดยมีอำพน (amplitude) และเฟสเท่ากันแต่จะไม่เข้าสู่ขา E (หรือ H) และสัญญานที่สะท้อนกลับมาจากขา 1 และ 2 มีอำพนและเฟสเท่ากันแล้วก็จะไม่มีสัญญานเข้าสู่ E (หรือ H) เลย ดังนั้นจึงสามารถใช้แมจิกทีเป็นเครื่องเปรียบเทียบสัญญานได้

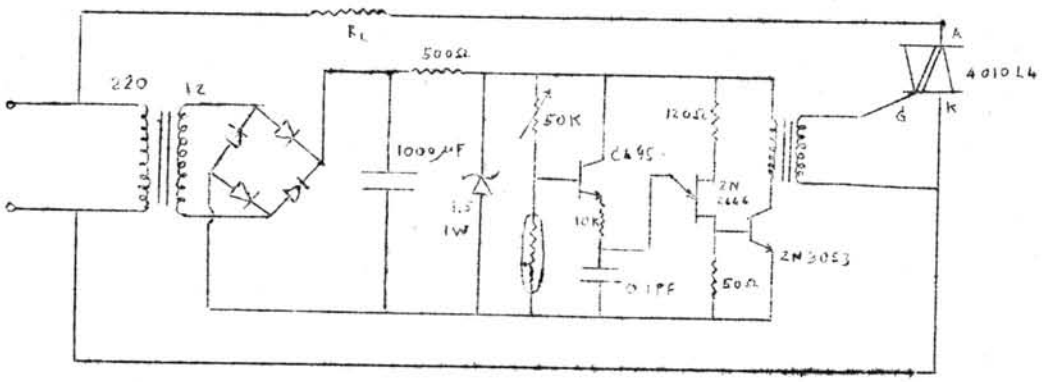
3.1.6 ท่อสั้น เป็นท่อนำคลื่นที่มีปลายข้างหนึ่งปิดตันด้วยแผ่นโลหะใช้ใส่ผลึกเหลวในขณะที่จัดค่าคงที่ฉนวน ท่อสั้นนี้ได้ทำขึ้นเองโดยตัดท่อนำคลื่นที่ทำด้วยทองเหลืองสำหรับไมโครเวฟ X - BAND ยาวประมาณ 5 เซ็นติเมตร เมื่อไสปลายทั้งสองให้เรียบแล้วก็ติดปลายข้างหนึ่งด้วยแผ่นทองเหลืองที่มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อเล็กน้อย วิธีการติดก็ต้องเชื่อมด้วยตะกั่วบัดกรีซึ่งทำ

ได้โดยวางแผ่นทองเหลืองลงบนเตาร้อน (hot plate) รอจนกระทั่งอุณหภูมิของแผ่นทองเหลืองเพิ่มขึ้นจนสามารถทำให้ตะกั่วละลายได้ จากนั้นก็วางท่อทองเหลืองลงบนแผ่นนั้น แล้วไล้รอยต่อระหว่างท่อกับแผ่นทองเหลืองด้วยลวดตะกั่วที่ใช้ในการบัดกรีสายไฟ เมื่อเสร็จแล้วก็ปล่อยทิ้งไว้จนเย็น ปลายอีกข้างหนึ่งของท่อสั้นจะต้องยึดกับแผ่นทองเหลืองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เรียกว่า Flange วิธีการติดก็เหมือนกับครั้งแรก แต่ในการบัดกรีครั้งที่สองนี้อาจจะทำให้ตะกั่วที่บัดกรีในครั้งแรกหลอมละลายได้ จึงใช้สำลีชุบน้ำวางลงบนแผ่นทองเหลืองแผ่นแรกเพื่อช่วยลดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.6 ท่อสั้น

3.1.7 วงจรควบคุมอุณหภูมิ ดังได้กล่าวมาแล้วว่าในการวิจัยครั้งนี้ใช้ผลึกเหลวแบบนีมาติกชนิด MBBA และ EBBA สำหรับผลึกเหลวแบบ MBBA นั้นเป็นผลึกเหลวที่อุณหภูมิห้อง ส่วนผลึกเหลวแบบ EBBA เป็นผลึกเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 40° C[12] ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิห้อง จึงจำเป็นต้องสร้างวงจรควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ วงจรนี้แสดงอยู่ในรูปข้างล่าง

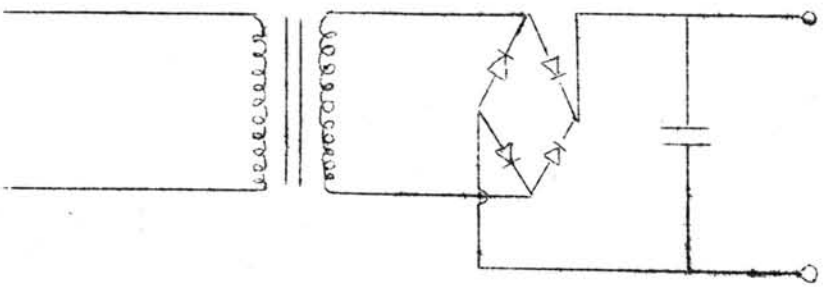


รูปที่ 3.7 วงจรควบคุมอุณหภูมิ

I15553881.

วงจรในรูปเมื่อนำมาพิจารณาอย่างละเอียดแล้วสามารถเขียนได้เป็นวงจรต่าง ๆ ดังนี้

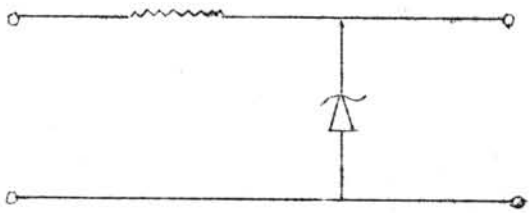
ก. วงจรเรคติไฟเออร์และฟิลเตอร์ (Rectifier and Filter)



รูปที่ 3.8 วงจรเรกติไฟเออร์และฟิลเตอร์

วงจรนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟจากกระแสสลับ(AC) 220 โวลต์ให้เป็นกระแสตรง (DC) คือเป็นเรกติไฟเออร์(rectifier) นอกจากนี้วงจรนี้ยังทำหน้าที่กรองกระแส DC ที่ได้ให้เรียบคือเป็นตัวฟิลเตอร์ (filter) ด้วย

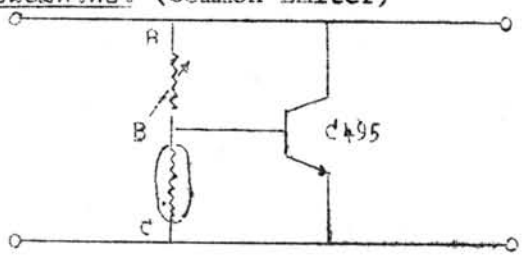
ข. วงจรเรคกูเลเตอร์ (Recgulator)



รูปที่ 3.9 วงจรเรคกูเลเตอร์

วงจรนี้มีซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) ที่จะทำให้กระแสไฟตรงที่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเพราะไฟบ้านเปลี่ยนแปลงเรียบยิ่งขึ้น นั่นคือซีเนอร์ไดโอดตัวนี้ทำหน้าที่เป็นเรคกูเลเตอร์ (recgulator) นั่นเอง

ค. วงจรคอมมอนอีมิตเตอร์ (Common Emiter)

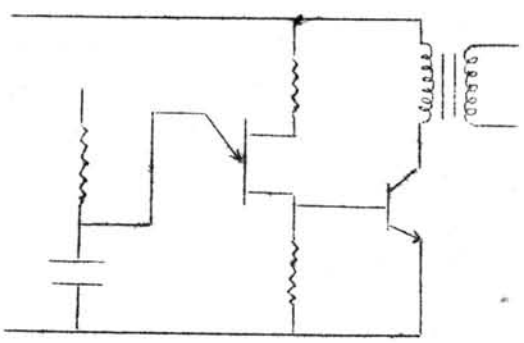


รูปที่ 3.10 วงจรคอมมอนอีมิตเตอร์

วงจรนี้ประกอบด้วยความต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ (variable resistor) ซึ่งใช้สัญญลักษณ์ว่า VR และเทอร์มิสเตอร์ (thermister) ซึ่งเป็นความต้านทานที่มีค่าความต้านทานเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ใช้สัญญลักษณ์ว่า TH โดยเทอร์มิสเตอร์ที่ใช้นี้เป็นแบบ NTC (Negative Temperature Coefficient) คือค่าความต้านทานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และทรานซิสเตอร์เบอร์ C 495 ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบส (I_B) มาก วงจรนี้เป็นหัวใจสำคัญของการควบคุมอุณหภูมิ

หลักการทำงานของวงจรนี้อาศัยคุณสมบัติที่ว่าทรานซิสเตอร์ 495 จะทำงาน (ON State) ก็ต่อเมื่อมีกระแสเบสมากพอโดยที่กระแสจะไหลจากจุด A ผ่าน VR แล้วมาแยกไหลเข้าทรานซิสเตอร์และ TH ที่ B ถ้าความต้านของ TH มากก็จะมีกระแสแยกเข้าขาเบสมาก ทรานซิสเตอร์ก็จะทำงานทำให้มีกระแสไหลเข้าตัวทำความร้อน (heater) อุณหภูมิก็เพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันความต้านทานของ TH ก็ลดลง ทำให้กระแสไหลผ่าน TH มากขึ้น และแยกไหลเข้าเบสน้อยลงจนในที่สุดทรานซิสเตอร์หยุดทำงานก็ไม่มีกระแสไหลเข้าตัวทำความร้อน อุณหภูมิก็เย็นลง ความต้านทานของ TH ก็เพิ่มขึ้น จนกระแสไหลเข้าเบสมากพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานอีก ตัวทำความร้อนก็ร้อนขึ้นอีกเป็นอย่างนี้เรื่อย ๆ ไป ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปรอบ ๆ อุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อต้องการจะเปลี่ยนอุณหภูมิที่ควบคุมใหม่ก็สามารถทำได้โดยเปลี่ยนค่าความต้านทานของ VR

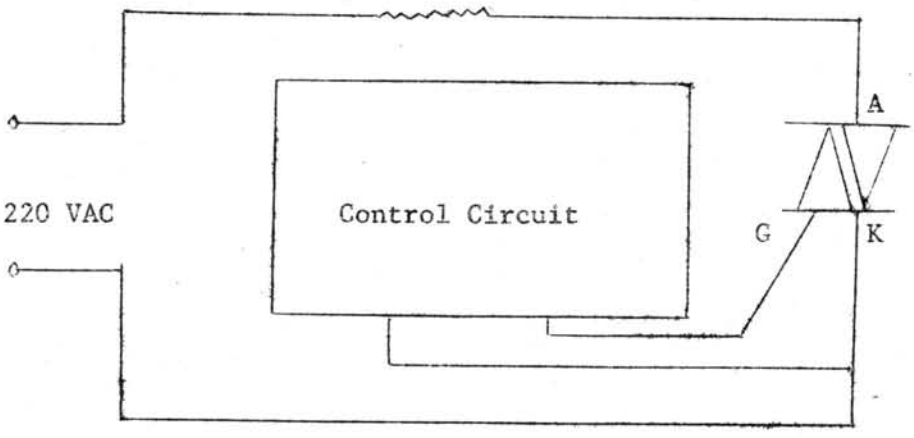
ง. <u>วงจรออสซิเลเตอร์และเอ้าพุททรานฟอร์เมอร์</u> (Oscillator and Out put transformer)



รูปที่ 3.11 วงจรออสซิเลเตอร์และเอ้าพุททรานฟอร์เมอร์

เมื่อทรานซิสเตอร์ C 495 กำลังทำงานก็จะมีกระแสไหลเข้าขา E ของ UJT (unijunction transistor) ซึ่งทำหน้าที่เป็นออสซิเลเตอร์ โดยจะมีสัญญานบวกออกมาที่ขา B_1 เมื่อสัญญานนี้ผ่านเข้าทรานซิสเตอร์ 2N 3053 ก็จะทำสัญญานขยายมากขึ้นและเข้าสู่เอ้าพุททรานฟอร์ - เมอร์ทำให้มีกระแสไหลในขดทุติยภูมิ

จ. ไตรแอคและโหลด (Triac and Load)



รูปที่ 3.12 ไตรแอคและโหลด

เมื่อกระแสไหลในขดลวดทุติยภูมิของเอ้าพุททรานฟอร์เมอร์ก็จะทำให้มีกระแสไหลเข้าขา G และไตรแอคซึ่งจะทำให้ไตรแอคทำงานจึงมีกระแสไหลผ่านโหลดหรือตัวทำความร้อนของเรานั่นเอง ถ้ากระแสที่ขา G หยุดไหลไตรแอคก็จะหยุดทำงานและทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่านโหลดเป็นอย่างนี้เรื่อยไป

3.2 การวัดค่าคงที่ฉนวน

ในการวัดค่าคงที่ฉนวนไม่ว่าจะใช้เครื่องตรวจคลื่นสถิตย์ หรือแมจิกที จำเป็นต้องทราบความหนาของสารตัวอย่าง ซึ่งสามารถทำได้โดยทราบความหนาแน่น (density) และน้ำหนักของมัน รายละเอียดในการหาความหนาของผลึกเหลวได้กล่าวไว้ในหัวข้างล่างนี้ จากนั้นจะได้กล่าวถึงวิธีการวัดค่าคงที่ฉนวนโดยเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์และแมจิกทีต่อไป

3.2.1 การวัดความหนาของผลึกเหลว การวัดความหนากระทำโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดความลึกของท่อสั้น สมมุติว่าเป็น X ซ.ม. (ดังรูป 3.13) แล้วนำท่อสั้นเปล่าไปชั่งน้ำหนักสมมุติว่าได้ A กรัม แล้วเทผลึกเหลวลงในท่อสั้น ใช้เวอร์เนียวัดความลึกจากปากท่อถึงผิวผลึกเหลว สมมุติว่าเป็น Y ซ.ม. จากนั้นก็นำท่อสั้นที่ใส่ผลึกเหลวนี้ไปชั่งด้วยเครื่องเครื่องไฟฟ้า สมมุติว่าได้ B กรัม ถ้า L และ M เป็นความหนาและน้ำหนักของผลึกเหลวตามลำดับจะได้ว่า

$$L = X - Y$$

และ $$M = A - B$$

ก ข

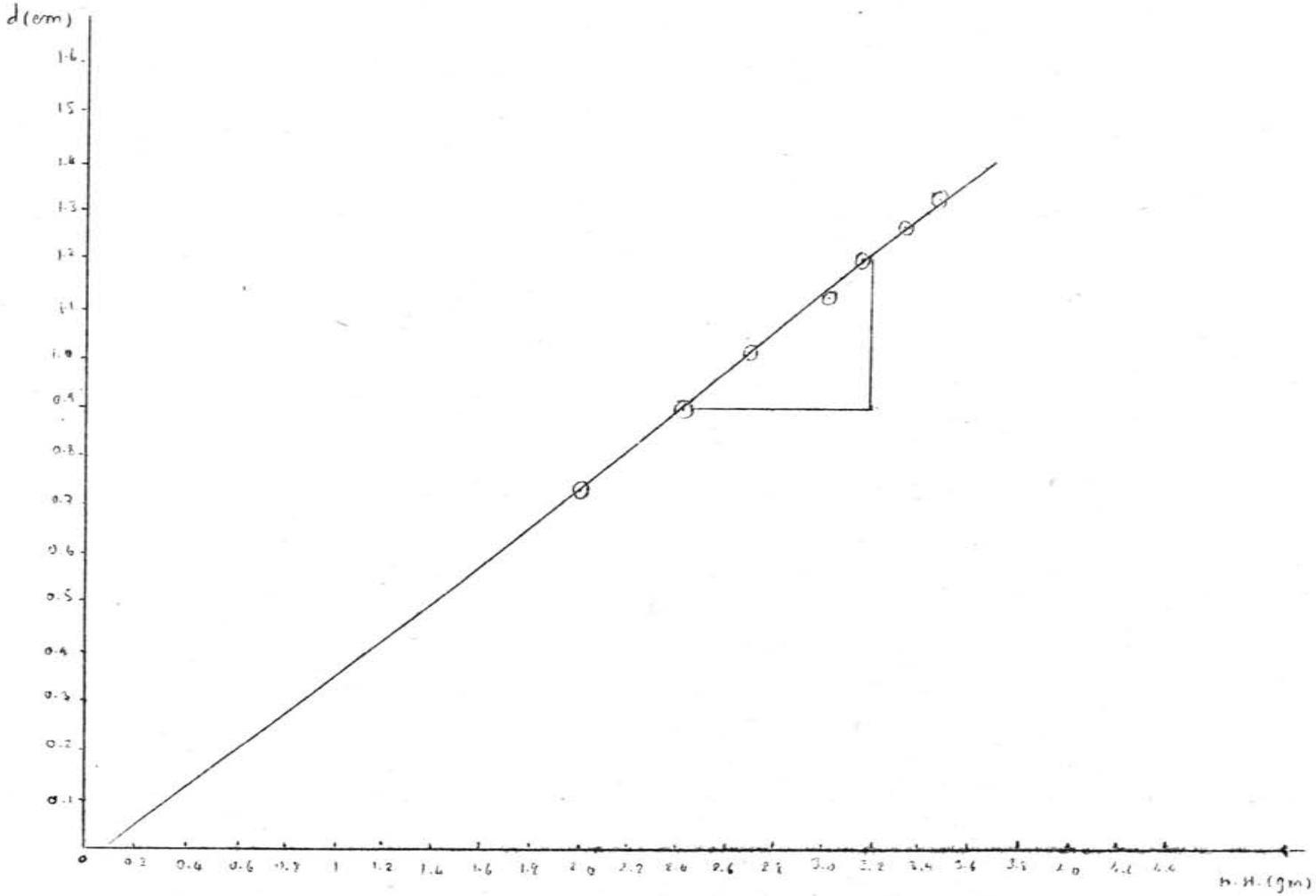
รูป 3.13 ก. ความลึกของท่อสั้นเปล่า ข. ความลึกจากปากท่อสั้นถึงผิวผลึกเหลว

ถ้าค่อย ๆ เติมผลึกเหลวจากน้อยไปหามากและเมื่อเติมแต่ละครั้งก็จะทำการวัดตามวิธีข้างบน ก็จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนักของผลึกเหลวดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรูป 3.14 และจากการวัดในการทดลองปรากฏว่าท่อสั้นมีความลึก 5.016 $\pm$ 0.005 ซ.ม. หนัก 114.495 กรัม

น้ำหนักของผลึกเหลว (กรัม)	ความหนา (ซ.ม.)
2.0818	0.734
2.4313	0.826
2.6987	1.017
2.828	1.069
3.0318	1.148
3.175	1.209
3.352	1.280
3.4815	1.330

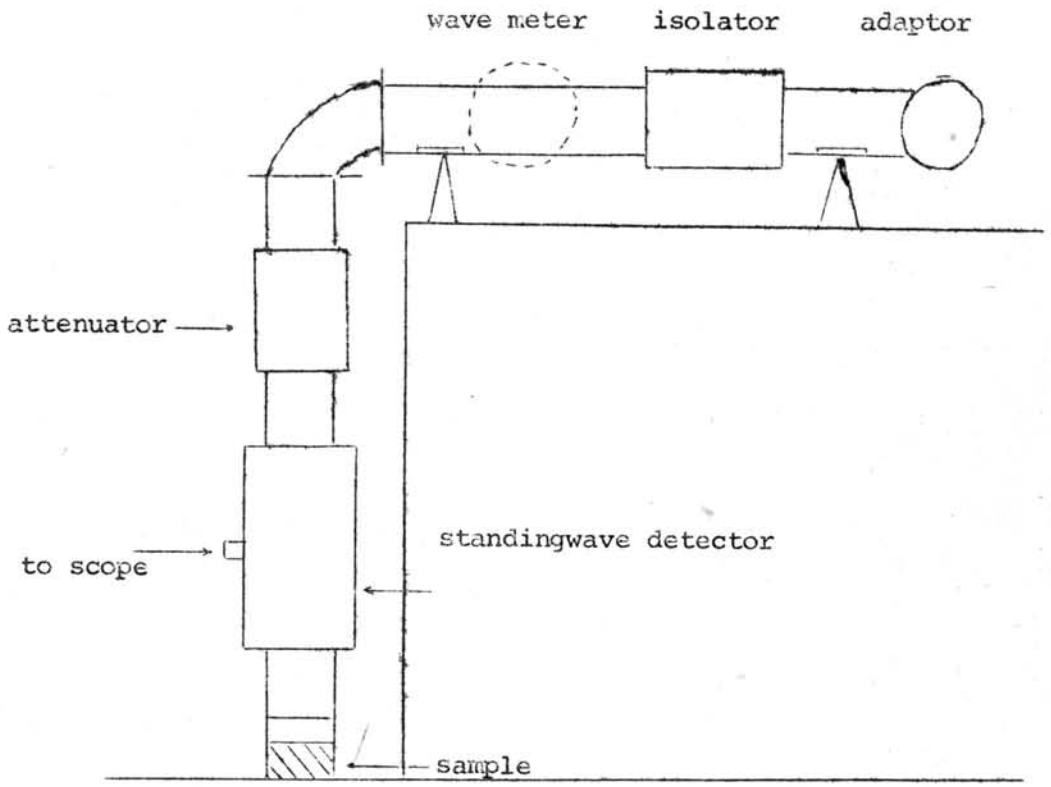
ตาราง3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนักของผลึกเหลว MBBA

จากข้อมูลที่ได้นี้ทำให้ได้ความหนาแน่นของ MBBA เท่ากับ 1.24 กรัมต่อ ลบ.ซม. ในการทำการทดลองนั้นก็ชั่งน้ำหนักของผลึกเหลวและเนื่องจากทราบความกว้างยาวของท่อน้ำคลื่น จึงทำให้สามารถทราบความหนาของผลึกเหลวได้โดยใช้ความหนาแน่นที่ได้มาแล้ว



รูป 3.14กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความหนาของผลึกเหลวMBBA

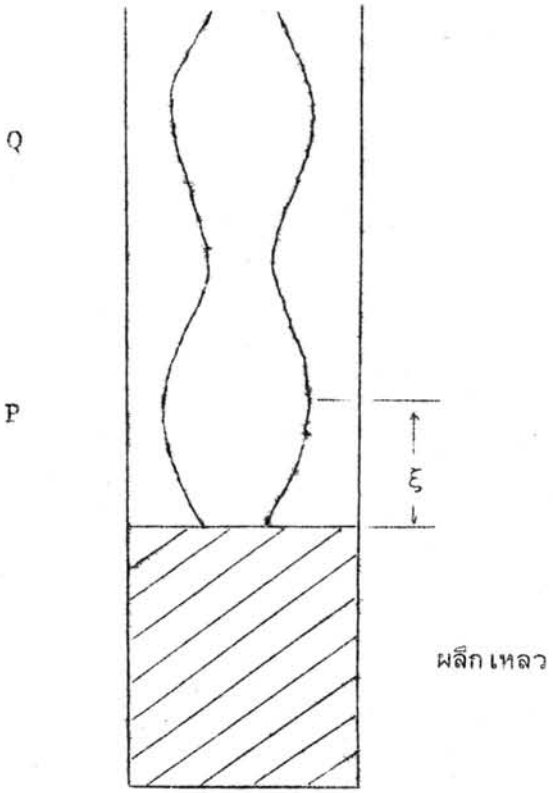
3.2.2 <u>การวัดค่าคงที่ฉนวนด้วยเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์</u> การวัดค่าคงที่ฉนวนด้วยวิธีนี้มีการจัดเครื่องมือดังรูป 3.15



รูปที่ 3.15 การวัดค่าคงที่ฉนวนด้วยเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์

ในการทดลองได้ทำการวัดค่าคงที่ฉนวนของผลึกเหลวด้วยเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์ กระทำได้โดยเทผลึกเหลวลงในท่อสั้น เมื่อทราบความหนาของผลึกเหลวแล้วก็นำท่อสั้นไปต่อกับเครื่องมืออื่น ๆ ดังรูปที่ 3.15 จากนั้นก็ปรับเครื่องให้สัญญาณและตรวจสอบความถี่ด้วยเวฟมิเตอร์จนได้ความถี่ที่ต้องการแล้วก็ปรับเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์จนสัญญาณที่จอออสซิลโลสโคปมากที่สุด โดยพยายามให้โปรบ (Probe) อยู่ใกล้ผลึกเหลวมากที่สุด บันทึกค่าที่อ่านได้จากสเกลไว้ สมมุติให้เท่ากับ P จากนั้นก็เลื่อนโปรบออกห่างจากผลึกเหลวจนได้สัญญาณมากที่สุดอีก บันทึกค่าจากสเกลไว้ให้เท่ากับ Q ค่าผลต่างระหว่างตำแหน่งของโปรบทั้งสองครั้งก็คือครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นของไมโครเวฟในท่อนำคลื่นโดยมีสุญกลางเป็นอากาศนั่นเอง ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่า ρ_1 ได้เพราะ β_1 เท่ากับ $2\pi/\lambda$ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นในอากาศ และจากข้อมูลที่ได้นี้สามารถทำให้ทราบตำแหน่ง

ที่ความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดเรียกระยะนี้ว่า ξ วิธีการที่ได้กล่าวมาแล้วนี้อาจจะทำความเข้าใจได้โดยพิจารณารูป 3.16 จากค่า ξ ที่ได้และสมการ (2.2.23) ทำให้คำนวณ tan θ ได้ ซึ่งจะเป็นทางนำไปสู่ค่าคงที่ฉนวนต่อไป



รูป 3.16 แสดงตำแหน่งต่าง ๆ ที่มีความเข้มสนามไฟฟ้ามากที่สุดในท่อนำคลื่น

ในการวัดค่าแอทเทนูเอชั่นนั้นก็ปรับเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์จนทำให้สัญญาณที่ปรากฏบนจอออส - ซิลโลสโคปน้อยที่สุด จำตำแหน่งของสัญญาณนี้ไว้แล้วปรับเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์จนสัญญาณมากที่สุดอีก จากนั้นก็ปรับแอทเทนูเอเตอร์จนสัญญาณบนสโคปลดลงเท่ากับสัญญาณที่ได้จากเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์ แล้วบันทึกค่าที่ได้จากแอทเทนูเอเตอร์ไว้เป็นอันสิ้นสุดการทดลองหนึ่งครั้ง

ค่าที่อ่านจากแอทเทนูเอเตอร์จะเป็น DB ซึ่งมีค่าเป็น

$$DB = 20 \log \frac{E}{E_o}$$

โดย E คือความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ลดลง และ E_o เป็นความเข้มของสนามไฟฟ้าเดิม ดังนั้นถ้า DB_{max} และ DB_{min} เป็นค่าที่อ่านได้จากแอทเทนูเอเตอร์เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดตามลำดับจะได้ว่า

$$DB_{max} - DB_{min} = 20 \log \frac{E_{max}}{E_{min}}$$

เพราะว่า $DB_{max} = 0$

ถ้าเรียก DB_{min} ว่า DB และพิจารณาค่าสัมบูรณ์ (absolute value) จะได้

$$DB = 20 \log \frac{E_{max}}{E_{min}}$$

หรือ $$\frac{E_{max}}{E_{min}} = \log^{-1} \frac{DB}{20}$$

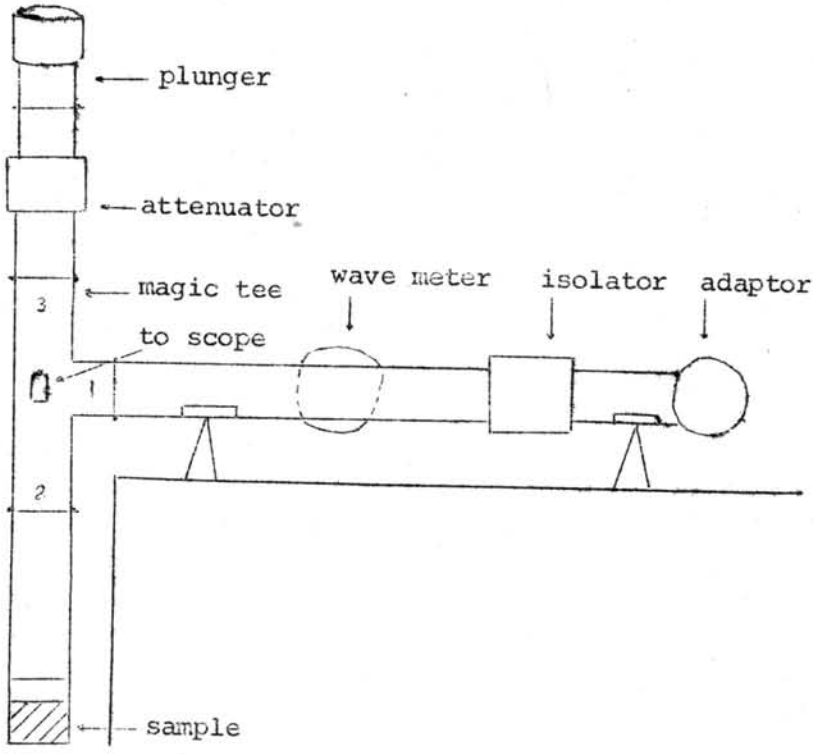
จากสมการที่ว่า $$\frac{E_{max}}{E_{min}} = A$$

ดังนั้นจึงได้ว่า $$A = \log^{-1} \frac{DB}{20}$$

และ $$\rho = \frac{A - 1}{A + 1}$$

จากค่า ρ และ $\tan \theta$ ที่วัดได้ในการทดลองจะเป็นทางนำไปสู่ค่าคงที่ฉนวน ผลการทดลองและการคำนวณค่าคงที่ฉนวนจากการวัดด้วยเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์นี้จะได้กล่าวโดยละเอียดในหัวข้อ 4.1

3.2.3 <u>การวัดค่าคงที่ฉนวนด้วยแมจิกที</u> การวัดค่าคงที่ฉนวนนั้นนอกจากจะใช้เครื่องตรวจคลื่นสถิตย์แล้วยังสามารถใช้แมจิกทีได้ด้วย ในการวัดด้วยวิธีนี้ไม่สามารถคำนวณหา $\tan \theta$ ได้ เพราะแอทเทนเอเตอร์ที่ใช้จะทำให้ ฟส ของสัญญาณที่ผ่านตัวมันผิดไป ดังนั้นจึงสามารถวัดได้แต่เพียงค่า ρ เท่านั้น แต่จากการวัดหลาย ๆ ครั้ง โดยแต่ละครั้งความหนาของสลักเหลวจะเปลี่ยนไปก็สามารถทำให้คำนวณค่าคงที่ฉนวนได้เช่นกัน ในการวัดค่าคงที่ฉนวนก็เทผลึกเหลวลงในท่อสั้น หลังจากทราบความหนาของสารตัวอย่างแล้วก็นำท่อสั้นไปต่อกับเครื่องมือต่าง ๆ ดังรูป 3.17



รูป 13.7 การจัดเครื่องมือเมื่อวัดโดยใช้แมจิกที

ในการวัดนั้นนอกจากความหนาของผลึกเหลวแล้วสิ่งที่ต้องการทราบอีกได้แก่ ความถี่ของสัญญาณที่ใช้วัดและค่า ρ โดยวัดความถี่ของสัญญาณด้วยเวฟมิเตอร์และวัดค่า ρ โดยใช้แอทเทนูเอเตอร์ เมื่อจะวัดก็ให้สัญญาณไมโครเวฟเข้าสู่แมจิกทีทางขาหนึ่ง (ตามรูป 3.17) จากนั้นสัญญาณจะแบ่งออกไปสู่ผลึกเหลวและแอนเทนูเอเตอร์กับพลันเจอร์ทางขาสองและสามตามลำดับ ส่วนขาสี่จะเป็นทางที่ต่อกับเครื่องจับสัญญาณและเข้าสู่สโคป แล้วปรับแอทเทนูเอเตอร์และพลันเจอร์จนกระทั่งสัญญาณที่สท้อนกลับเข้าสู่แมจิกทีทางขาสองและสามเท่ากัน อ่านค่าที่วัดได้จากแอทเทนูเอเตอร์เป็น DB แล้วคำนวณหา และโดยที่สัญญาณต้องผ่านแอทเทนูเอเตอร์ 2 ครั้งจึงได้ว่า

$$\rho = (\log^{-1} DB/10)^{-1} .$$

ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้การวัดด้วยแมจิกทีเป็นส่วนใหญ่ เพราะการวัดด้วยเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์ในสนามแม่เหล็กไม่สะดวก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อวัด EBBA รายละเอียดของผลการทดลองด้วยแมจิกทีนี้จะได้กล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

3.3 <u>การนำข้อมูลที่ได้ไปหาค่า β_2' , β_2''</u>

จากสมการของค่าคงที่ฉนวน (2.3.13) ซึ่งก็คือ

$$K = \left(\frac{c}{2\pi f}\right)^2 \left[K' + \frac{\pi^2}{a^2}\right] \qquad (2.3.13)$$

เห็นได้ว่าปริมาณต่าง ๆ ทางขวามืออันได้แก่ความกว้างของท่อนำคลื่น (a) และความถี่(f) สามารถวัดได้โดยตรงจากการทดลอง c เป็นความเร็วแสงซึ่งทราบ แต่สิ่งที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการทดลองคือ K' และจากบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าการที่จะทราบ K' ได้นั้นต้องทราบค่า β_2' และ β_2'' เสียก่อน จากการเปรียบเทียบสมการ (2.2.19) และ (2.2.20)จะได้ว่า

$$\tan\theta = \frac{BC - AD}{AC - BD} \qquad (3.3.1)$$

$$\rho = \left(\frac{AC + BD}{C^2 + D^2}\right)^2 + \left(\frac{BC - AD}{C^2 + D^2}\right)^2 \frac{1}{2} \qquad (3.3.2)$$

โดยได้กำหนดค่า A, B, C, D ไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งสรุปได้ว่า

$$A = d(\beta_1 - \beta_2') - d(\beta_1 + \beta_2')e^{-2\beta_2''d}\cos 2\beta_2'd + \beta_2''de^{-2\beta_2''d}\sin 2\beta_2'd$$

$$B = d(\beta_1 + \beta_2')e^{-2\beta_2''d}\sin 2\beta_2'd + \beta_2''d + \beta_2''de^{-2\beta_2''d}\cos 2\beta_2'd$$

$$C = d(\beta_1 + \beta_2') - d(\beta_1 - \beta_2')e^{-2\beta_2''d}\cos 2\beta_2'd - \beta_2''de^{-2\beta_2''d}\sin 2\beta_2'd$$

$$D = d(\beta_1 - \beta_2')e^{-2\beta_2''d}\sin 2\beta_2'd - \beta_2''d - \beta_2''de^{-2\beta_2''d}\cos 2\beta_2'd$$

ดังนั้นถ้าเราทราบค่า tan θ และ ρ จากการทดลองสำหรับความหนา d ของผลึกเหลวหลาย ๆ ค่าเราอาจนำค่า tan θ และ ρ เหล่านั้นไปคำนวณหา β_2' และ β_2'' ซึ่งในที่สุดสามารถนำไปหาค่าคงที่ฉนวน K และ tan δ ได้ ค่า β_2' และ β_2'' ที่ถูกต้องก็คือค่า β_2' และ β_2'' ที่ให้ tan θ และ ρ สอดคล้องกับการทดลองพอดี

3.3.1 <u>ข้อมูลจากเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์</u> ในการวัดโดยใช้เครื่องตรวจคลื่นสถิตย์ ได้ทำการวัดค่าคงที่ฉนวนของผลึกเหลว MBBA ที่ความหนาต่าง ๆ กันหลายค่า และแต่ละความหนา d_e ก็สามารถวัดค่า tan θ และ ρ ได้ เรียก tan θ และ ρ ที่วัดได้นี้ว่า $\tan\theta_e$ และ ρ_e เมื่อพิจารณาสมการ (3.3.1) และ (3.3.2) เห็นได้ว่า สำหรับ d_e ค่าหนึ่ง ๆ ถ้าเรากำหนดค่า β_2' ขึ้นเราก็จะสามารถหา β_2'' ที่ทำให้ค่า $\tan\theta = \tan\theta_e$ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองได้

ดังนั้นถ้าเปลี่ยน β_2' ไปเรื่อย ๆ ก็สามารถหา β_2'' ค่าต่าง ๆ ได้หลายค่า เมื่อนำ β_2' และ β_2'' ต่าง ๆ ที่ได้นี้ไปเขียนบนกระดาษกราฟก็จะได้เส้นกราฟของ tan θ ดังในรูป 4.1 ในทำนองเดียวเดียวกันสำหรับค่า β_2' ค่าหนึ่ง ๆ เราก็สามารถคำนวณหา β_2'' ที่ทำให้ได้ค่า $\rho = \rho_e$ สอดคล้องกับการทดลอง และถ้าเปลี่ยน β_2' ไปเรื่อย ๆ เราจะได้ β_2'' ค่าต่าง ๆ กันดังแสดงในกราฟของ ρ ในรูป 4.1 จุดที่เส้นกราฟ tan θ และ ρ ตัดกันจะให้ค่า β_2' และ β_2'' ที่ต้องการ กล่าวคือเป็นค่า β_2' , β_2'' ที่ให้ค่า ρ และ tan θ เท่ากับ ρ_e และ $\tan\theta_e$ ที่ได้จากการทดลองจริง ๆ สำหรับความหนา d_e อื่น ๆ เราก็จะได้เส้นกราฟในทำนองนี้หลายคู่ ทำให้ได้ค่า β_2' , β_2'' ที่สอดคล้องกับการทดลองออกมาหลายคู่เช่นเดียวกันนำค่า β_2' , β_2'' ที่ได้เหล่านี้มาเฉลี่ยก็จะได้คำตอบตามต้องการ แต่อย่างไรก็ดี กราฟเหล่านี้มีจุดตัดกันเป็นกลุ่มมากกว่าหนึ่งกลุ่ม วิธีการตรวจสอบว่ากลุ่มใดเป็นกลุ่มที่ถูกต้องก็ทำได้โดยนำเอาค่าเฉลี่ย β_2' , β_2'' ที่ได้จากกลุ่มเหล่านั้นไปแทนในสมการ (3.3.1) หรือ (3.3.2) อีกครั้งหนึ่งแล้วเปลี่ยนค่า d ก็จะทำให้คำนวณค่า tan θ หรือ ρ ออกมาได้ นำค่าที่ได้นี้ไปเขียนกราฟกับ d แล้วเปรียบเทียบกับค่า tan θ และ ρ จากผลการทดลองดังในรูป 4.2 ถ้ากราฟเส้นใดใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด β_2' β_2'' ของกราฟเส้นนั้นก็จะเป็นคำตอบที่ถูกต้องที่สุด รายละเอียดการคำนวณจะแสดงในบทที่ 4

3.3.2 <u>ข้อมูลจากแมจิกที</u> ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าการทดลองโดยใช้เครื่องตรวจคลื่นสถิตย์บางครั้งไม่สะดวก โดยเฉพาะการทดลองในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นการทดลองส่วนใหญ่จึงทำด้วยแมจิกที แต่การทดลองด้วยวิธีนี้สามารถวัดได้เพียงค่า ρ สำหรับค่าความหนาของผลึก d_e ค่าหนึ่ง ในการคำนวณค่าคงที่ฉนวนเราจึงต้องใช้วิธี Least square fit พร้อมกับอาศัยข้อมูลบางอย่างจากผลการทดลองโดยเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์มาช่วย พบว่าทำให้การคำนวณง่ายเข้าและให้ผลแม่นยำดี

จากค่า ρ_e , d_e หลายคู่ที่ได้จากการทดลองเราเริ่มต้นคำนวณหา β_2' , β_2'' ด้วยการใช้ β_2' , β_2'' ของผลึกเหลวชนิดเดียวกันที่ได้จากการทดลองโดยเครื่องตรวจคลื่นสถิตย์เป็นค่าเริ่มต้น และสำหรับ d_e ค่าหนึ่ง ๆ คำนวณ ρ ออกมาโดยใช้สมการ (3.3.2) เรียก ρ นี้ว่า ρ_{ce} จากนั้นคำนวณหา

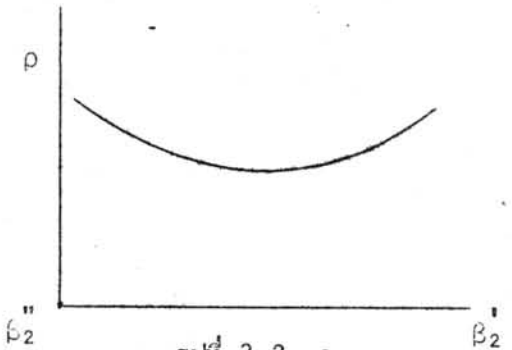
$$SD = \sum_e (\rho - \rho_{ce})^2 \qquad (3.3.3)$$

ในขั้นต่อมาค่อยเปลี่ยนค่า β_2' , β_2'' ไปจากเดิมเล็กน้อยแล้วคำนวณ ρ_{ce} และ SD ออกมาอีก ถ้าพิจารณากราฟระหว่าง SD และ β'_2 และ β''_2 แล้ว โดยให้ SD เป็นแกน Z β'_2 และ β''_2 เป็นแกน X และ Y ตามลำดับ เราจะได้พื้นผิว (surface เป็นหลุมหรือแอ่ง และค่า β_2' , β_2'' ที่ต้องการจะอยู่ที่จุดต่ำสุดของหลุม ซึ่งหมายถึงเป็นค่า β_2' , β_2'' ที่ทำให้ค่า ρ จากการคำนวณ (ρ_{ce}) ทั้งหลายสอดคล้องกับ ρ_e จากการทดลองมากที่สุดการคำนวณข้างบนอาจทำง่าย ๆ โดยอาศัยเครื่องคอมพิวเตอร์ วิธีการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์นี้ได้แสดงอยู่ข้างล่าง

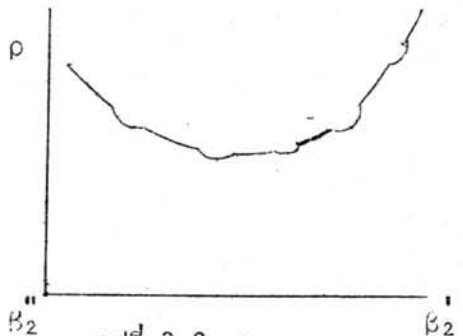
3.4 <u>การเขียนโปรแกรมให้เครื่องคอมพิวเตอร์</u>[13]

ในการหาค่า β'_2 , β''_2 ที่ทำให้ SD มีค่าน้อยที่สุดนั้น จำเป็นต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ โปรแกรมที่ใช้มีสองโปรแกรมคือ

1. เป็นโปรแกรมที่ใช้ตรวจดูว่าในพื้นผิวที่เป็นหลุมแต่ละหลุมนั้นไม่มีหลุมเล็ก ๆ อยู่ด้วย กล่าวคือควรจะมีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 3.2 ก ไม่ใช่ 3.2 ข



รูปที่ 3.2 ก



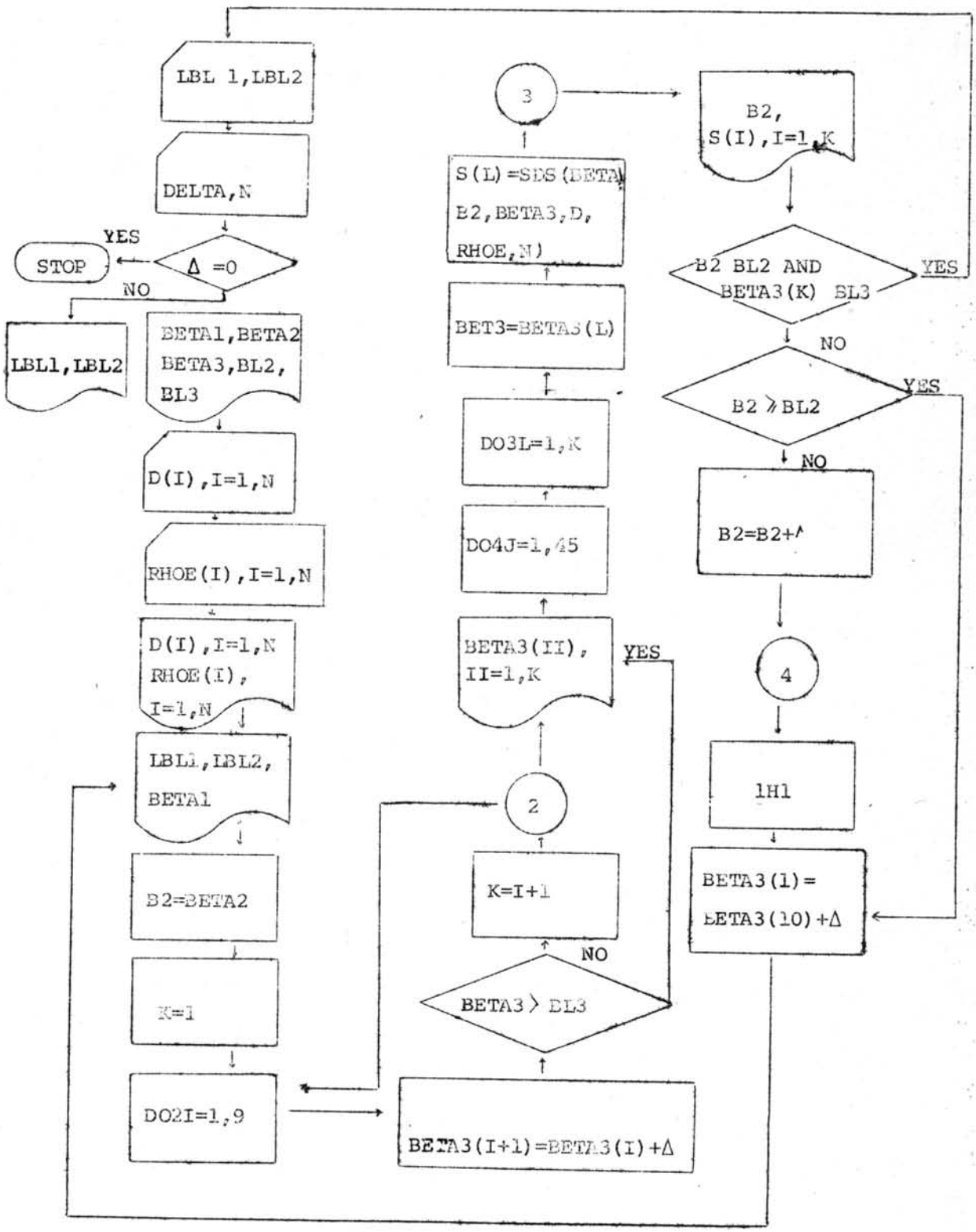
รูปที่ 3.2 ข

โปรแกรมนี้ประกอบด้วยโปรแกรมย่อย 2 โปรแกรมคือ

FUNCTION SUBPROGRAM RHO. ใช้คำนวณค่า ρ_{cc}

FUNCTION SUBPROGRAM SDS ใช้คำนวณค่า SD

Flow Chart ของโปรแกรมนี้จะได้แสดงในหน้าต่อไป


LBL 1,LBL2
DELTA,N
YES
STOP
Δ =0
NO
LBL1,LBL2
BETA1,BETA2
BETA3,BL2,
BL3
D(I),I=1,N
RHOE(I),I=1,N
D(I),I=1,N
RHOE(I),
I=1,N
LBL1,LBL2,
BETA1
B2=BETA2
K=1
DO2I=1,9
BETA3(I+1)=BETA3(I)+Δ
2
K=I+1
NO
BETA3 > BL3
BETA3(II),
II=1,K
YES
DO4J=1,45
DO3L=1,K
BET3=BETA3(L)
S(L)=SBS(BETA
B2,BETA3,D,
RHOE,N)
3
B2,
S(I),I=1,K
B2 BL2 AND
BETA3(K) BL3
YES
NO
B2 > BL2
YES
NO
B2=B2+Δ
4
1H1
BETA3(1)=
BETA3(10)+Δ

สัญญลักษณ์ต่าง ๆ ใน Flow Chart เป็นดังนี้คือ

LBL 1, LBL 2 หมายถึงข้อความที่แสดงให้ทราบว่าข้อมูลนั้นเป็นข้อมูลที่ได้มาจากการทดลอง โดยใส่สนามแม่เหล็กหรือไม่ ความถี่ที่ใช้เท่าใดเป็นต้น ในบัตรข้อมูล (DATA CARD) สำหรับ LBL1, LB2 นี้ อาจเป็นได้ว่า NORMAL CONDITION FREQUENCY 8.5 GHE เป็นต้น

DELTA (Δ) หมายถึงตัวเลขที่ใช้ในการเปลี่ยน β_2' , β_2'' ในโปรแกรมนี้ใช้ Δ = 0.001

N หมายถึงจำนวนข้อมูลที่ใส่เข้าไปโดยจำนวนข้อมูลจะมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับว่าจะเปลี่ยนค่า d ในการทดลองกี่ครั้งเช่นในโปรแกรมนี้มีค่า d 8 ค่า N จึงมีค่าเป็น 8

BETA 1 หมายถึง β_1 หรือตัวประกอบการแผ่ในอากาศ

BETA 2, BETA 3 หมายถึง β_2' , β_2'' ตามลำดับ ซึ่งจะใช้เป็นค่าเริ่มต้นการคำนวณด้วย

D(I) หมายถึงความหนาหรือ d ของผลึกเหลว แต่เนื่องจากความหนาที่เปลี่ยนมีถึง 8 ค่า จึงต้องมีตัวแปร I เป็นเลขตรรชนีกำกับอยู่

RHOE (I) หมายถึงค่า ρ ที่ได้จากการทดลองซึ่งมี 8 ค่าเช่นเดียวกับ d

BL2, BL3 หมายถึงค่าสูงสุดของ β_2' และ β_2'' ตามลำดับ ซึ่งก็คือขอบเขตในการคำนวณของโปรแกรมนี้นั่นเอง

โปรแกรมที่เขียนให้เครื่องคอมพิวเตอร์เป็นดังนี้

```
      DIMENSION BETA 3(10), D(20), RHOE(20), LBL1(6), LBL2(8), S(10)
1     READ (2,120), LBL1, LBL 2
      READ (2,100), DELTA, N
      IF (DEDTA. EQ.0) GOTO 8
      WRITE (2,310) LBL1, LBL2
      READ (2,110) BETA1, BETA 2, BETA 3(1), BL 2, BL 3
      READ (2,110), (D(I), I = 1, N)
      READ (2,110), (RHOE(I), I = 1, N)
      WRITE ( 3,220) BETA 1
```

```
      WRITE (3,250) (S(I), I = 1, N)
      WRITE (3, 260)(RHOE(I), I = 1, N)
      WRITE(3,270) LBL1, LBL2, BETA 1
      B2 =     BETA 2
      K    =   1
      DO2 I =  1, 9
      BETA 3(I + 1) =  BETA 3(I) + DELTA
      IF (BETA 3(I). GT. BL3)G OTO 5
2     K          = I + 1
5     WRITE (3,230), (BETA 3(II), II = 1, K)
      WRITE (3, 201)
      DO4 J      =  1,45
      DO3 L      =  1, K
      BET 3      =  BETA 3(L)
3     S(L)       =  SDS (BETA 1, B2, BET 3,D, RHOE, N)
      WRITE (3,240), B2, (S(I), I = 1, K)
      IF (J - J/5* 5. EQ.0) GOTO 9
10    IF (B2. GE. BL 2). AND.(BETA 3(K). GT. BL3) GO TO 1
      IF (B2. GE. BL2) GO TO 6
4     B2         =   B2 + DELTA
      WRITE (3,200)
      GOTO 5
6     BETA3(1)   =   BETA 3(10) + DELTA
      GOTO 7
100   FORMAT (F 6.0, 3I2)
110   FORMAT (10 F 7.5)
```

```
120   FORMAT (14 A3)
200   FORMAT (1H1)
201   FORMAT (1H )
210   FORMAT (1H1, 6A3/ 1H , 8A3)
220   FORMAT (1H , 6H BETA 1 =,F 8.5/)
230   FORMAT (1HO, 11x, 10 (F 9.6, 3 x 1)
240   FORMAT (1H , F8.5, 3x, 10(f 9.6, 3x1)
250   FORMAT (1H , 9HTHICKNESS/ 1H , 10(F 8.5, 4 x 1)
260   FORMAT (1H , 14 RHO EXPERIMENT/ 1H ,10(F 8.5, 4 x ) )
270   FORMAT (1H1, 45H SUM DELTA RHO SQUARE (VARIES BETA 2
      AND BETA 3), 12 x, 6A3, 2x, 8A3, 3x, 6HBETA 1 =,F 8.5)
 9    WRITE (3,201)
      GOTO 10
 8    STOP
      END
      FUNCTION RHO (A, B, C, D)
      F = A* A + B * B + C + C
      G = 2.*A*A - F
      O = E x p (-2. *C*D)
      R = 1.+ O * O
      S = 2.- R
      P = O * SIN (2. *B *D)
      Q = O * COS(2. * B*D)
      X = (G * R - 2. *Q*F) **2
      Y = (2. *A*(C*S + 2. *B * P)) **2
      RHO = SQRT (x + y)/(F*R + 2*(A*(B*S - 2*C*P) - Q * G))
      RETURN
      END
```

```
      FUNCTION SDS (A, B, C, D, RH, N)
      DIMENSION D(20), RH (20)
      SDS  =  0
      DO1I  =  1, N
      DD    =  D(I)
1     SDS   =  SDS + (RHO (A, B, C, DD) - RH (I)) **2)
      RETURN
      END
```

การคำนวณโดยใช้โปรแกรมข้างบนนี้ใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสนามแม่เหล็กโดยที่สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตั้งฉากกัน และใช้ความถี่ของไมโครเวฟ 8.5 จิกกะเฮิทร์ ที่ความถี่นี้มี β_1 เทากับ 1.211 ซ.ม.$^{-1}$ ได้เปลี่ยนแปลงความหนาของผลึกเหลว 8 ครั้ง ใช้ DELTA = 0.001 ค่าเริ่มต้นของ β_2', β_2'' เป็น 2.7 และ 0.155 ซ.ม.$^{-1}$ และค่าสูงสุดเป็น 2.815 - 0.19 ซ.ม.$^{-1}$ ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ β_2', β_2'' เปลี่ยนแปลงไปแล้ว การเปลี่ยนแปลงของ SD ในสมการ (3.3.3) จะเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 3.2 ก ซึ่งทำให้การคำนวณในขั้นต่อไปง่ายขึ้นมาก การตรวจฟังค์ชั่นนี้กระทำเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ในการคำนวณการทดลองครั้งอื่น ๆ ได้ใช้โปรแกรมที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

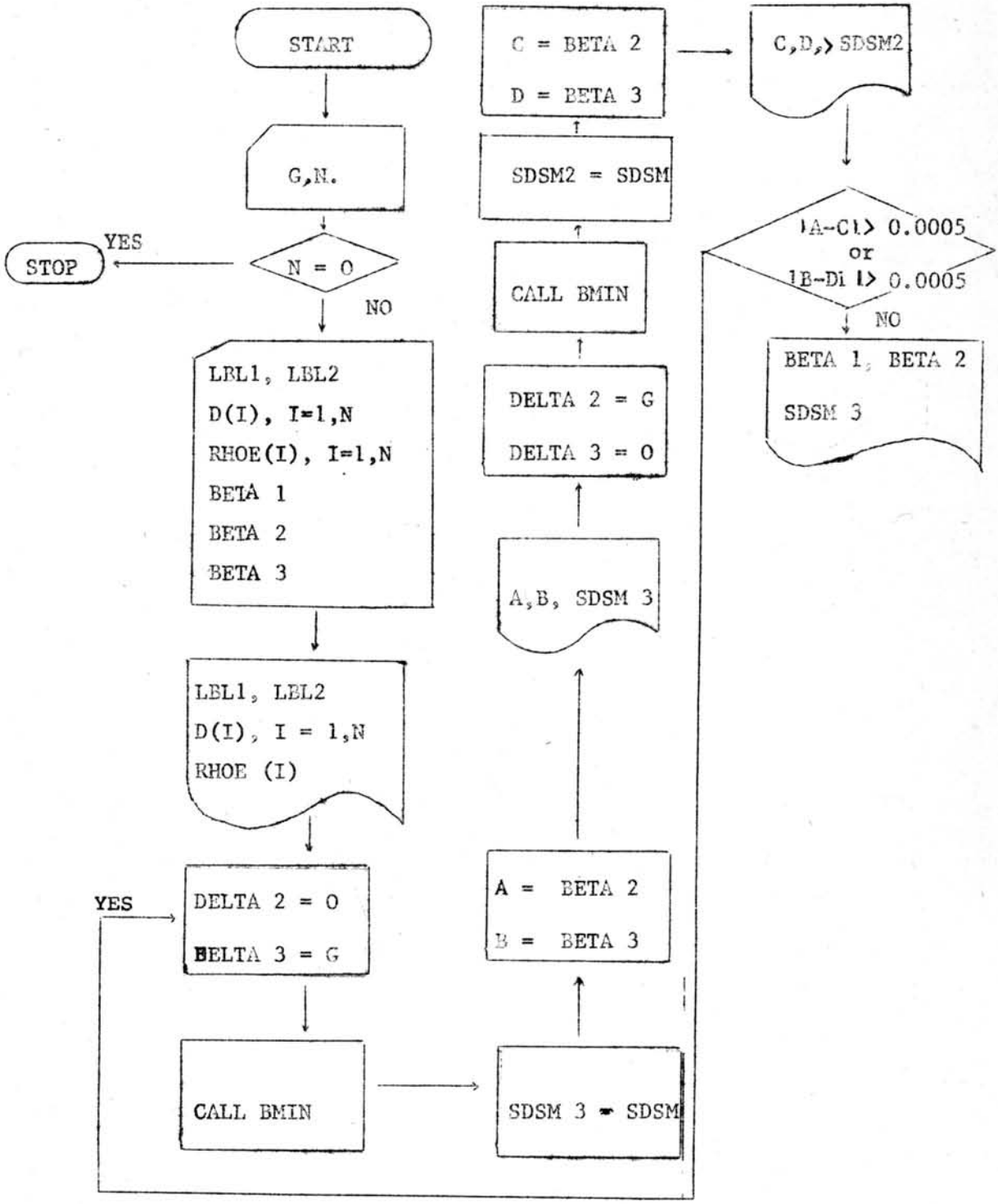
2. โปรแกรมสำหรับหา β_2', β_2'' ที่ทำให้ค่า SD ในสมการ (3.3.2) มีค่าน้อยที่สุด ในโปรแกรมนี้ประกอบด้วยโปรแกรมย่อย 3 โปรแกรมคือ

SUBROUTINE SUBPROGRAM BMIN ใช้ในการหา β_2' หรือ β_2'' ที่ทำให้ค่า SD น้อยที่สุด ในขณะที่ตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งคงที่

FUNCTION SUBPROGRAM RHO ใช้ในการหาค่า ρ_{cc}

FUNCTION SUBRPOGRAM SDS ใช้ในการหาค่า SD

Flow Chart ของโปรแกรมหลัก เป็นดังนี้


START
G,N.
N = 0
YES
STOP
NO
LBL1, LBL2
D(I), I=1,N
RHOE(I), I=1,N
BETA 1
BETA 2
BETA 3
LBL1, LBL2
D(I), I = 1,N
RHOE (I)
YES
DELTA 2 = 0
BELTA 3 = G
CALL BMIN
SDSM 3 = SDSM
A = BETA 2
B = BETA 3
A,B, SDSM 3
DELTA 2 = G
DELTA 3 = 0
CALL BMIN
SDSM2 = SDSM
C = BETA 2
D = BETA 3
C,D, SDSM2
|A-C| > 0.0005
or
|B-D| > 0.0005
NO
BETA 1, BETA 2
SDSM 3

สัญญลักษณ์ต่าง ๆ ในโปรแกรมหลักนี้ ก็ใช้เหมือนกับในโปรแกรมที่ 1 ที่มีบางตัวเกินมาก็ได้แก่

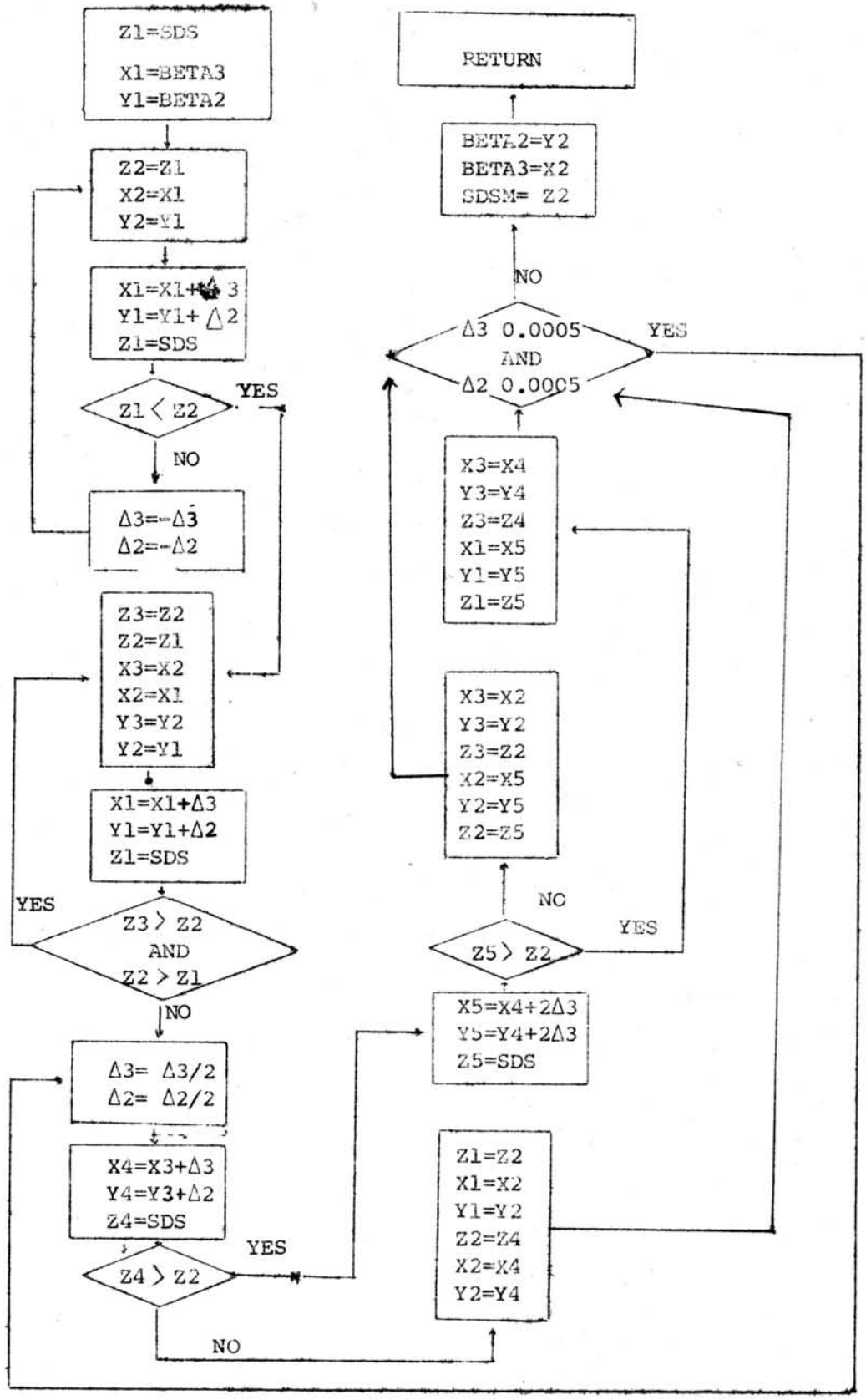
G เป็นตัวเลขที่ใช้เปลี่ยนแปลง β_2' β_2'' ในตอนเริ่มต้น

DELTA 2 และ DELTA 3 ตัวเปลี่ยนแปลง β_2' , β_2'' ตามลำดับโดยในตอนแรกค่าทั้ง 2 จะเท่ากับ G

B MIN เป็นชื่อ Subroutine Subrpogram ที่ใช้ในการหาค่า SD น้อยที่สุด เมื่อ β_2' หรือ β_2'' คงที่ ซึ่งจะได้กล่าวถึงโปรแกรมย่อยนี้โดยละเอียดต่อไป

SDSM เป็นค่า SD ต่าง ๆ ที่ได้จาก B MIN

Flow Chart ของโปรแกรมย่อย BMIN จะได้แสดงในหน้าต่อไป


Z1=SDS
X1=BETA3
Y1=BETA2
Z2=Z1
X2=X1
Y2=Y1
X1=X1+Δ3
Y1=Y1+Δ2
Z1=SDS
Z1 < Z2
YES
NO
Δ3=-Δ3
Δ2=-Δ2
Z3=Z2
Z2=Z1
X3=X2
X2=X1
Y3=Y2
Y2=Y1
X1=X1+Δ3
Y1=Y1+Δ2
Z1=SDS
YES
Z3 > Z2
AND
Z2 > Z1
NO
Δ3= Δ3/2
Δ2= Δ2/2
X4=X3+Δ3
Y4=Y3+Δ2
Z4=SDS
Z4 > Z2
YES
NO
X5=X4+2Δ3
Y5=Y4+2Δ3
Z5=SDS
Z5 > Z2
NO
YES
X3=X2
Y3=Y2
Z3=Z2
X2=X5
Y2=Y5
Z2=Z5
X3=X4
Y3=Y4
Z3=Z4
X1=X5
Y1=Y5
Z1=Z5
Δ3 0.0005
AND
Δ2 0.0005
YES
NO
BETA2=Y2
BETA3=X2
SDSM= Z2
RETURN
Z1=Z2
X1=X2
Y1=Y2
Z2=Z4
X2=X4
Y2=Y4

สัญญลักษณะต่าง ๆ ในโปรแกรมย่อยเป็นดังนี้คือ Z เป็นค่า SD, X และ Y เป็น μ_2' และ μ_2'' ตามลำดับ

โปรแกรมที่เขียนให้คอมพิวเตอร์เป็นดังนี้

```
      DIMENSION D(20), RHOE(20), LBL 1(6), LBL 2(8)
    1 READ (2,100) G,N)
  100 FORMAT (F 6.0, I2)
      If (N. E,Q.0) GO TO 25
      READ (2,99) LBL 1, LBL 2
   99 FORMAT (14 A 3)
      READ (2,110), (D(I), I = 1,N)
      READ (2,110) (RHOE(I), I = 1, N)
  110 FORMAT (11F 7.5)
      READ (2,120) BETA 1, BETA 2, BETA 3
  120 FORMAT (3 F 7.5)
      WRITE (3,130), LBL 1, LBL 2
  130 FORMAT (1H1, 6A3/ 1H   , 8 A 3)
      WRITE (3, 170) (D(I), I = 1,N)
  170 FORMAT (1HO, 9H THICKNESS/ 1H  , 10(F 8.5, 4 x) )
      WRITE (3, 180) (RHOE(I), I = 1,N)
  180 FORMAT (1HO, 14 H RHO  EXPERIMENT/ 1H  10(F 8.5, 4 x) )
   18 DELTA 2 = 0
      DELTA 3 = G
      CALL BMIN (BETA 1, BETA 2, BETA 3, D, RHOE, N, DELTA 2, DELTA 3, SDSM)
      SDSM 3  =  SDSM
      A       =  BETA 2
      B       =  BETA 3
      WRITE (3,200), A, B, SDSM 3
```

```
200   FORMAT (1HO, 5x, 2 (F 7.4, 4 x), F 10.7)
      DELTA 2  =  G
      DELTA 3 =   0
      CALL BMIN (BETA 1, BETA 2, BETA 3, D, RHOE, N, DELTA 2, DELTA 3, SDSM)
      SDSM 2   =  SDSM
      C        =  BETA 2
      D        =  BETA 3
      WRITE (3,200) C,D, SDSM 2
      IF (ABS (A - C).GT. 0.0005.OR.ABS(B-D). GT. 0.0005) GO TO 18
      WRITE (3,190) BETA 1, BETA 2, BETA 3, SDSM
190   FORMAT (1HO, 5x, 3 (F7.4, 4x 1, F 10.7)
      GO TO 1
 25   STOP
      END
      SUBROUTINE BMIN (BETA 1, BETA 2,BETA 3, D, RHOE,N,DELTA2,DELTA3, SDSM)
      DIMENSION D(20), RHOE (20)
      Z1  =  SDS (BETA 1, BETA 2, BETA 3, D, RHOE, N)
      X1  =  BETA 3
      Y1  =  BETA 2
310   Z2  = Z1
      X2  =  X1
      Y2  =  Y1
      X1  =  X1 + DELTA 3
      Y1  =  Y1 + DELTA 2
      Z1  =  SDS (BETA 1, Y1, X1, D, RHOE,N)
      IF (Z1, LT. Z2) GO TO 320
      DELTA 3  = - DELTA 3
```

```
      DELTA 2  =  - DELTA 2
      GOTO 310
320   Z  = Z 2
      Z  =  1
      X3  =  X2
      X2  =  X1
      Y3  =  Y2
      Y2  =  Y1
      X1  =  X1 + DELTA 3
      Y1  =  Y1 + DELTA 2
      Z1  =  SDS(BETA 1, Y1, X1, D, RHOE, N)
      IF (Z3. GT. Z2. AND. Z2. GT. Z1) GOTO 320
380   DELTA 3  =  DELTA 3/2.
      DELTA 2  =  DELTA 2/2.
      X4       =  X3+ DELTA 3
      Y4       =  Y3 + DELTA 2
      Z4       =  SDS (BETA 1, Y4, X4, D, RHOE, N)
      IF(Z4. GT. Z2) GOTO 340
      Z1       =  Z2
      X1       =  X2
      Y1       =  Y2
      Z2       =  Z4
      X2       =  X4
      Y2       =  Y4
      GOTO 350
340   X5       =  X4 + 2.* DELTA 3
      Y5       =  Y4 + 2.*DELTA 2
```

```
      Z5        =  SDS (BETA 1,X5, X5, D, RHOE,N)
      IF (Z5. GT. Z2) GOTO 360
      X3        =  X2
      Y3        = Y2
      Z3        =  Z2
      X2        =  X5
      Y2        =  Y5
      Z2        =  Z5
      GOTO 350
360   X3        =  X4
      Y3        =  Y4
      Z3        =  Z4
      X1        =  X5
      Y1        =  Y5
      Z1        =  Z5
350   If(ABS(DELTA 3.GT. 0.0005 OR. ABS(DELTA2).GT 0.0005) GOTO 380
      BETA 2    =  Y2
      BETA 3    =  X2
      SDSM      =  Z 2
      RETURN
      END.
      FUNCTION RHO( A, B, C, D)
      F         =  A*A + B*B +C*C
      G         =  2. * A * A - F
      O         =  EXP(-2.*C *D)
      R         =  1. +  O*O
      S         =  2. -R
```

```
      P        =  O* SIN(2.*B*D)
      Q        =  O *COS(2. *B*D)
      X        =  (G * R -2. *Q*F) **2
      Y        =(2.*A*(C*S + 2. + B*P)) **2
      RHO  =  SQRT (x+y)/(F*R + 2.*(A*(B*S - 2. *C*P) - Q * G))
      RETURN
      END
      FUNCTION SDS(A, B, C, D, RH, N)
      DIMENSION D(20), RH(20)
      SDS = 0
      DO 1I  = 1,N
      DD     =  D(I)
1     SDS = SDS + (RHO(A,B,C,DD) - RH(I) * * 2
      RETURN
      END
```

ผลการคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์นี้ได้กล่าวโดยละเอียดในบทที่ 4