บทที่ 2

การวัดค่าไดอิเลกตริกที่ความถี่ต่าง ๆ

จากบทที่ 1 เราทราบว่าการหาค่าเวลาผ่อนคลาย และไดโพลโมเมนต์ถาวรทางไฟฟ้านั้นต้องหาจากค่าไดอิเลกตริกที่ความถี่ต่าง ๆ ซึ่งการวัดค่าไดอิเลกตริกดังกล่าวจะต้องได้ค่าที่เชื่อถือได้สูง ให้ความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด การวัดค่าไดอิเลกตริกที่ความถี่ต่าง ๆ มีหลายวิธี ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้ เป็นวิธีหนึ่งที่ง่ายและสะดวกทั้งจะให้ค่าที่แม่นยำเชื่อถือได้พอสมควร ซึ่งเมื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าไดโพลโมเมนต์ และเวลาผ่อนคลาย จะได้ค่าที่ถูกต้องใกล้เคียงความจริง

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดค่าไดอิเลกตริกที่ความถี่ต่ำ ความถี่ไมโครเวฟและความถี่แสงโดยทั่วไป ส่วนรายละเอียดของวิธีการต่าง ๆ และการปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาดของการวัดด้วยวิธีเหล่านี้จะได้กล่าวในบทต่อไป

2.1 การวัดค่าไดอิเลกตริกที่ความถี่ต่ำ

การวัดค่าไดอิเลกตริก K ที่ความถี่ต่ำ หมายถึง การวัดค่าไดอิเลกตริกของสารไดอิเลกตริกในขณะที่สารอยู่ในสนามไฟฟ้าคงที่ หรือสนามไฟฟ้าสลับที่ความถี่ต่ำ ๆ ในช่วง 1,000 เฮิร์ทซ์ วิธีการวัดค่าไดอิเลกตริกในช่วงความถี่ต่ำ ๆ นี้ คือ การวัดจากค่าความจุไฟฟ้า C ของตัวเก็บประจุ (capacitor) ซึ่งใช้สารไดอิเลกตริกบรรจุไว้ภายใน เราเลือกตัวเก็บประจุที่มีลักษณะเป็นแบบแผ่นโลหะขนาน เพื่อความสะดวกที่จะบรรจุสารไดอิเลกตริกลงในระหว่างแผ่นโลหะนี้ จากนั้นจึงทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้า C_o ของตัวเก็บประจุในอากาศ ถ้าแผ่นโลหะมีพื้นที่ A และแยกห่างกันเป็นระยะ d ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าบนแผ่นโลหะของตัวเก็บประจุในอากาศต่อพื้นที่มีค่าเป็น σ ตามสมการ

$$\sigma = \frac{\varepsilon_o V}{d} \qquad (2.1.1)$$

เมื่อ V เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะ

จากสมการนี้ เราสามารถหาค่าความจุไฟฟ้า C_o ได้ตามสมการ

$$C_o = \frac{\sigma A}{V} = \frac{\varepsilon_o A}{d} \qquad (2.1.2)$$

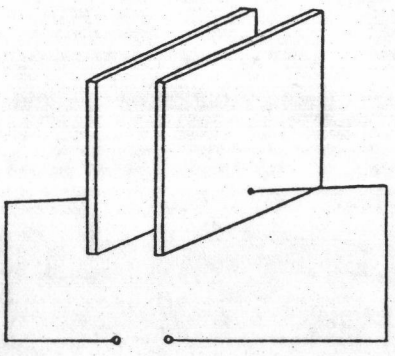
วิธีการบรรจุสารไดอิเลกตริกลงในแผ่นโลหะขนานของตัวเก็บประจุโดยสารไดอิเลกตริกอยู่ในสภาพสารละลายความเข้มข้นต่ำที่มีเบนซีนเป็นตัวทำละลาย วิธีที่ง่ายคือหาภาชนะใส่สารละลายดังกล่าวที่มีขนาดใกล้เคียงกับตัวเก็บประจุ แล้วนำตัวเก็บประจุแช่ลงในสารละลายนี้ จากนั้นทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า C จะได้ตามสมการ

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \qquad (2.1.3)$$

จากสมการ (2.1.2) และ (2.1.4) จะทำให้เราคำนวณค่าไดอิเลกตริก K ได้เป็น

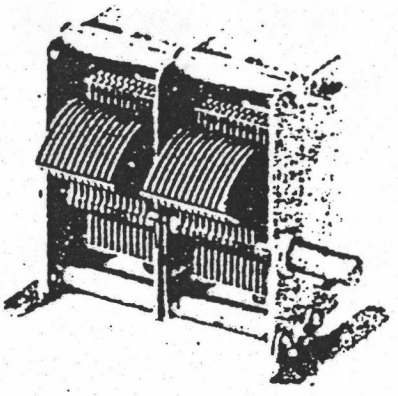
$$K = \frac{C}{C_o} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} \qquad (2.1.4)$$

แต่เนื่องจากการใช้ตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะขนานดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะขนาน

ทำให้วัดค่า C_o ได้น้อยมาก จึงทำให้การวัดเกิดการผิดพลาดได้ง่าย เนื่องจากค่า ε_o มีค่า 8.8542×10^{-12} $C^2/N.m^2$ ซึ่งน้อยมาก ดังนั้นเราจึงต้องเลือกตัวเก็บประจุที่มีแผ่นโลหะขนานซ้อนกันหลาย ๆ แผ่นดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะขนานซ้อนกันหลายแผ่น

ตัวเก็บประจุแบบนี้จะทำให้ค่า C_o มากขึ้นตามสมการ

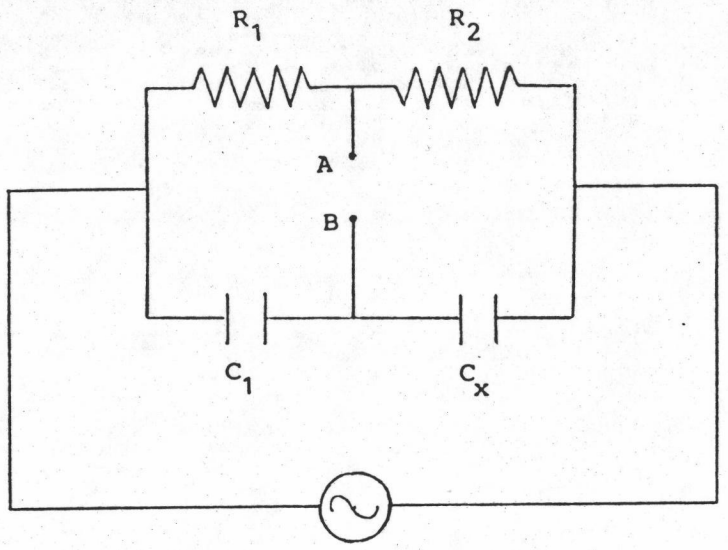
$$C_o = \frac{\varepsilon_o NA}{d} \qquad (2.1.6)$$

เมื่อ N เป็นจำนวนแผ่นโลหะที่ขนานกัน

ตัวเก็บประจุแบบนี้มีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor)ที่ใช้ในวิทยุ เอ เอ็ม ซึ่งมีค่าความจุไฟฟ้าในอากาศ C_o ประมาณ 300 pF และค่าความจุไฟฟ้าในสารไดอิเลกตริกจะมีค่าเป็น

$$C = \frac{\varepsilon NA}{d} \qquad (2.1.7)$$

เนื่องจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าในที่นี้ต้องการค่าที่แม่นยำมาก จึงต้องอาศัยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง ซึ่งเราจะอาศัยการวัดจากวงจรบริดจ์ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรบริดจ์สำหรับวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

จากรูป R_1 และ R_2 เป็นความต้านทานมาตรฐานที่ต่ออยู่ในวงจร

C_1 เป็นตัวเก็บประจุมาตรฐานที่ต่ออยู่ในวงจร

C_x เป็นตัวเก็บประจุที่นำมาต่อในวงจรเพื่อวัดค่าความจุไฟฟ้า

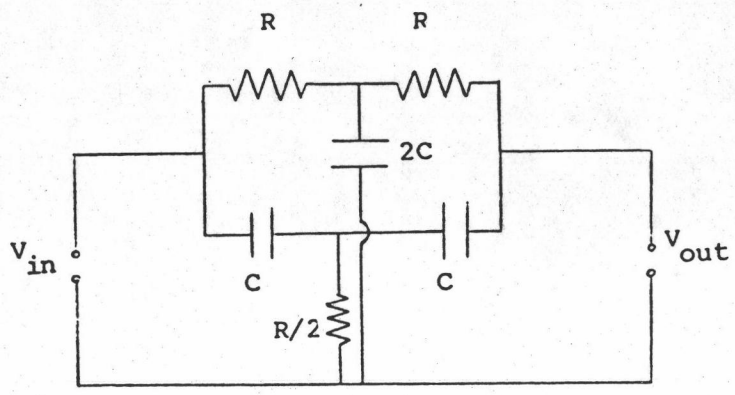
$\textcircled{\sim}$ เป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับที่ให้แก่วงจร

เมื่อนำ C_x มาต่อเข้ากับวงจรบริดจ์ดังกล่าวแล้ว เราอาจปรับค่าของตัวเก็บประจุ C_1 ในวงจรจนกระทั่งศักย์ไฟฟ้าที่จุด A และจุด B มีค่าเท่ากันแสดงว่าบริดจ์สมดุลย์ การวัดว่าบริดจ์สมดุลย์หรือไม่ อาจใช้โวลต์มิเตอร์วัดความต่างศักย์ระหว่างจุด A และจุด B หรือใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) วัดสัญญาณไฟฟ้าจากจุดทั้งสอง เมื่อบริดจ์สมดุลย์ค่า C_x จะมีค่าตามสมการ

$$R_1C_1 = R_2C_x \qquad (2.1.8)$$

การวัดความต่างศักย์ที่จุด A และ B ไม่สามารถทำได้ง่ายนัก เนื่องจากมีการรบกวนของกระแสไฟฟ้าสลับที่เราใช้ รวมทั้งการรบกวนจากคลื่นวิทยุในบรรยากาศ ทำให้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณไฟฟ้าที่จุด A และจุด B คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง แม้ว่าบริดจ์จะสมดุลย์แล้ว ก็ยังมีสัญญาณไฟฟ้าจากจุดทั้งสองออกมา จึงต้องมีการกรองสัญญาณไฟฟ้าที่ไม่ต้องการนี้ทิ้งไป

วงจรกรองสัญญาณแบบง่าย ๆ ที่หาอุปกรณ์ได้ไม่ยากแบบหนึ่งคือวงจรกรองสัญญาณแบบทวินที (Twin - Tee) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรกรองสัญญาณแบบทวินที (Twin - Tee)

วงจรตามรูปนี้จะใช้กรองสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ f โดย

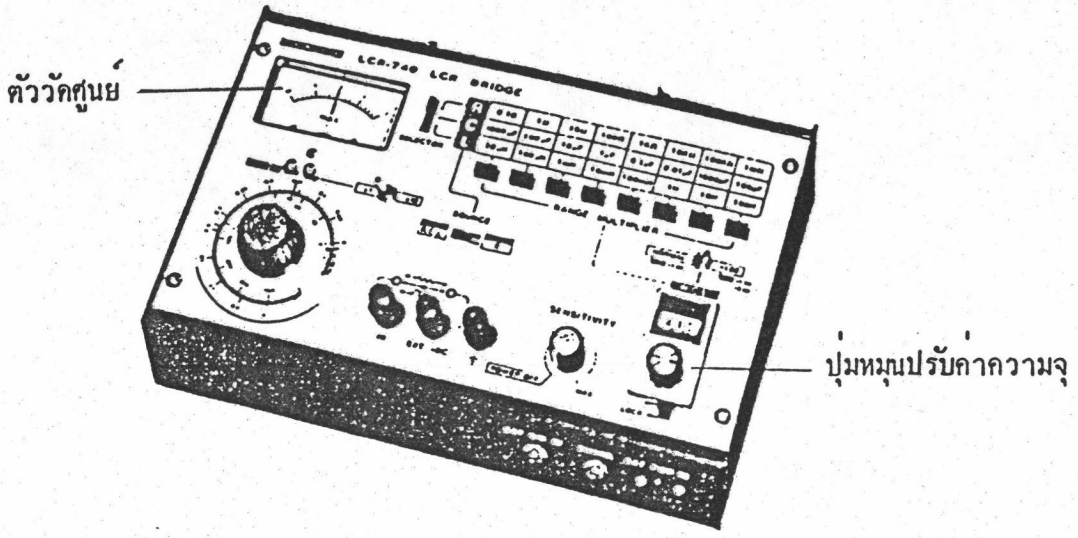
$$f = \frac{1}{2\pi RC} \qquad (2.1.9)$$

เมื่อ R เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้า

C เป็นค่าความจุไฟฟ้า

ค่า R และ C ในวงจรนี้ เราจะเลือกใช้เพื่อให้ได้ค่า f ที่เราไม่ต้องการ โดยใช้ C มีค่าน้อย ๆ ประมาณ 0.01 μF เพื่อไม่ให้วงจรกรองสัญญาณมีอิมพีแดนซ์ (Impedance) มากเกินไปจนทำให้สัญญาณไฟฟ้าจากวงจรบริดจ์ที่ใช้วัดค่าความจุไฟฟ้าที่ผ่านวงจรนี้ออกมามีค่าลดลงไปด้วย ซึ่งจะทำให้การวัดยากขึ้น

ในการทดลองได้ใช้บริดจ์สำเร็จที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการวัดค่าความจุไฟฟ้า ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของบริษัท Leader Electronics Corp. Model LCR-740 ซึ่งใช้วงจรบริดจ์แบบเดียวกันกับที่กล่าวมาตอนต้นและมีวงจรตัดสัญญาณรบกวนสร้างเสริมอยู่ภายใน พร้อมกับเครื่องขยายสัญญาณและตัววัดศูนย์ (null - detector) ที่ไวมาก เครื่องมือนี้มีความไวสูงพอที่จะใช้กับการวัดนี้ได้ดี



รูปที่ 2.5 เครื่องมือบริดจ์สำเร็จ LCR-740

เมื่อนำเครื่องมือนี้ไปทดสอบโดยทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ในอากาศ C_o พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าเครื่องมือมีความแม่นยำสูงโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5 % แต่เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องจึงใช้วิธีวัดหลาย ๆ ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย

ในขณะทำการวัดเราต้องนำตัวเก็บประจุแช่ลงในสารละลายของเบนซีน หลังจากวัดเสร็จแล้วจึงต้องนำมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้ง โดยให้น้ำไหลผ่านระหว่างแผ่นโลหะเพื่อล้างสารละลายออกให้หมด แล้วปล่อยให้แห้งสนิท จึงจะนำมาใช้ทดลองต่อไปได้ ทั้งนี้ต้องวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุในอากาศ C_o ก่อนใช้ทุกครั้งเพื่อเปรียบเทียบกับค่าเดิมว่าใกล้เคียงกันหรือไม่

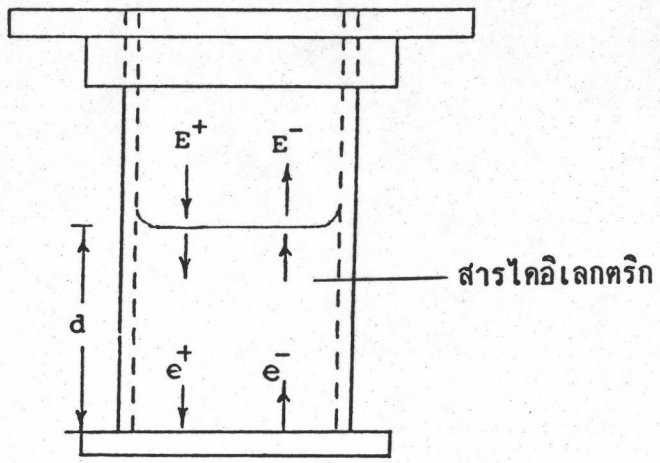
ถ้าค่า C_o นี้เปลี่ยนไปจากเดิมเกิน 0.5 % ต้องเลิกใช้ตัวเก็บประจุนั้นทันที

2.2 การวัดค่าไดอิเลกตริกที่ความถี่ไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง $10^9 - 10^{12}$ เฮิร์ทซ์ ในการวัดค่าไดอิเลกตริกที่ความถี่ไมโครเวฟจึงต้องอาศัยเครื่องมือที่มีความละเอียดและเที่ยงตรงสูง วิธีการโดยทั่วไปซึ่งมีผู้นิยมใช้กัน เช่น วิธีคลื่นนิ่งของเฮสตัน[5] (Standing Wave Method of Heston) ก็เป็นวิธีหนึ่งซึ่งได้ผลดี

สำหรับการทดลองนี้ ได้ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมาจากเครื่องมือหลักในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้วัดค่าไดอิเลกตริกให้ได้ความละเอียดและเที่ยงตรงมากที่สุด โดยอาศัยหลักการสะท้อนของคลื่นจากสารละลายไดอิเลกตริกที่บรรจุไว้ในท่อนำคลื่นปิด แล้ววัดสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟที่ผิวของสารละลายเพื่อหาค่าเฟสที่เลื่อนไป (Phase Shift) และการสูญเสียพลังงานของคลื่นที่สะท้อนกลับออกมาจากสารละลายนั้น

ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดแบบนี้คือ เมจิกที[6] (Magic Tee) มีลักษณะเป็นท่อนำคลื่นประกอบด้วยขา 4 ข้าง ซึ่งจะใช้แยกสัญญาณคลื่นไมโครเวฟที่เข้ามาทางขา 1 ออกเป็น 2 สัญญาณ ที่มีเฟสและความเข้มเหมือนกันออกที่ขา 2 และ 3 สัญญาณที่ออกจาก 2 จะผ่านเครื่องลดสัญญาณ (Attenuator) และไปสะท้อนที่แผ่นปิดท่อนำคลื่นซึ่งสามารถเลื่อนได้ (Movable Short) ซึ่งเรียกว่า พลันเจอร์ (Plunger) คลื่นที่สะท้อนจากพลันเจอร์นี้จะกลับมาผ่านเครื่องลดสัญญาณอีกครั้งหนึ่งและกลับเข้าสู่ขา 2 ของเมจิกที ส่วนสัญญาณที่ออกจากขา 3 จะผ่านสารไดอิเลกตริกซึ่งอยู่ในสภาพของสารละลาย ซึ่งบรรจุอยู่ในท่อนำคลื่นปลายปิด คลื่นไมโครเวฟจะสะท้อนที่ปลายปิดนี้กลับมาผ่านสารละลายกลับออกมาอีกครั้ง ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสารไดอิเลกตริก

สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของคลื่น Γ จะมีค่าตามสมการ

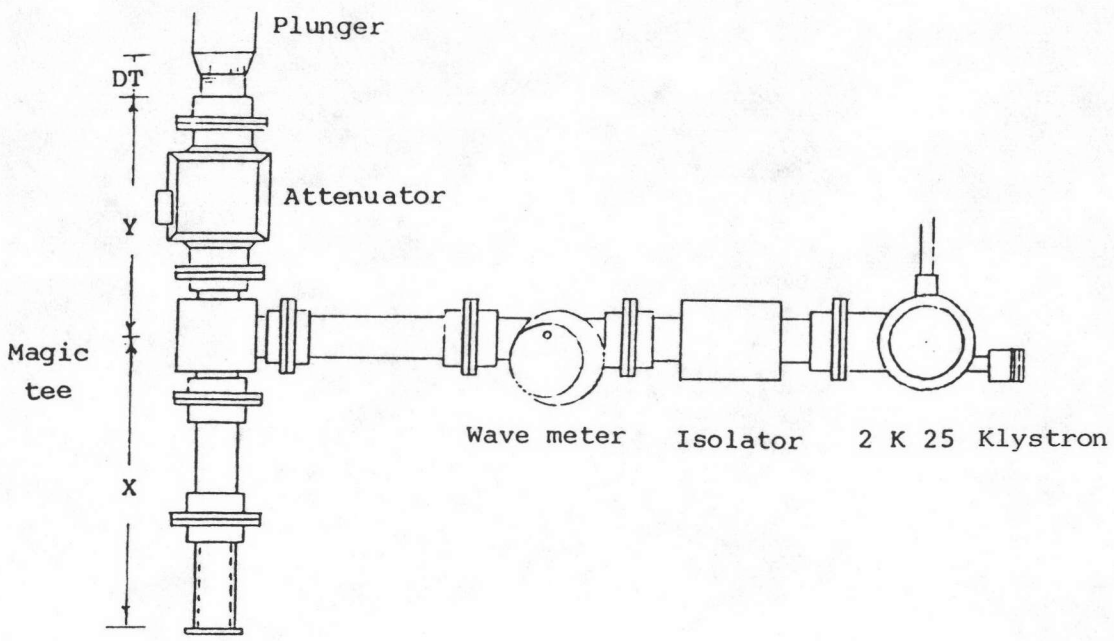
$$\Gamma = \frac{E^-}{E^+} = \rho e^{i\theta} \qquad (2.2.1)$$

โดย ρ เป็นค่าที่แสดงถึงการสูญเสียพลังงานของคลื่น

θ เป็นเฟสที่เลื่อนไป (Phase Shift)

คลื่นที่สะท้อนจากพลันเจอร์ และสะท้อนจากปลายปิดของท่อนำคลื่นที่บรรจุสารละลายจะกลับมาทางขา 2 และขา 3 ของเมจิกทีอีกครั้งหนึ่ง ถ้าคลื่นทั้งสองมีเฟสและแอมปลิจูด (Amplitude) ตรงกันจะรวมกันผ่านออกมาทางขา 1 แต่ถ้าคลื่นทั้งสองมีเฟสและแอมปลิจูดต่างกันจะรวมกันผ่านออกมาทางขา 4 ซึ่งเราสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องรับสัญญาณ (Signal detector) และส่งสัญญาณที่รับได้ไปยังออสซิลโลสโคป

ในตอนแรกเราจัดเครื่องมือเพื่อวัดค่า DT ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การจัดเครื่องมือไมโครเวฟเพื่อวัดค่า DT

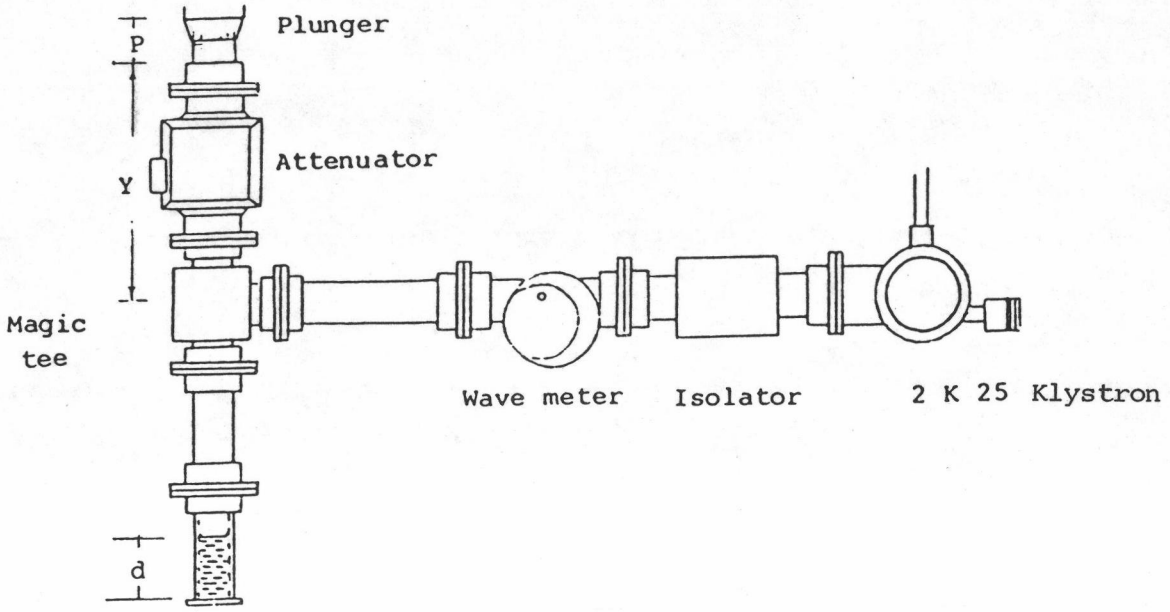
เมื่อเราจัดระยะห่างของท่อนำคลื่นจากขา 2 ไปยังพลันเจอร์ให้เท่ากันกับระยะห่างจากขา 3 ไปยังปลายท่อนำคลื่นปิด พบว่าคลื่นทั้งสองที่สะท้อนกลับมารวมกันจะมีเฟสตรงกัน เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสะท้อนที่ผิวโลหะจะมีเฟสเปลี่ยนไป π เรเดียน เราเขียนสมการของคลื่นในรูปของสนามไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะที่คลื่นแผ่ (Propagate) ไปในทิศ z ตามสมการ

$$E = E_o e^{i(\omega t \pm \beta z)} \qquad (2.2.2)$$

โดย E_o เป็นแอมปลิจูดของสนามไฟฟ้า E

จากรูปที่ 2.7 ระยะ X เป็นระยะห่างจากเมจิกทีไปถึงปลายท่อนำคลื่นปิดและระยะ Y เป็นระยะห่างจากเมจิกทีไปถึงปลายท่อนำคลื่น ซึ่งต่อกับพลันเจอร์ เมื่อวัดระยะจากปลายท่อนำคลื่นนี้ไปยังแผ่นโลหะของพลันเจอร์ จะเป็นระยะเลื่อนของพลันเจอร์ซึ่งเรียกว่า DT ดังนั้นคลื่นไมโครเวฟจึงแผ่จากเมจิกทีเป็นระยะทาง Y + DT และ X ตามลำดับก่อนที่จะสะท้อนกลับมายังเมจิกทีอีกครั้งหนึ่งโดยไม่เสียพลังงาน ถ้าระยะทั้งสองนี้เท่ากันคลื่นทั้งสองจะมีเฟสและ

แอมปลิจูดเท่ากัน เครื่องรับสัญญาณที่ขา 4 จะไม่ได้รับสัญญาณทำให้ออสซิลโลสโคปอ่านค่าศูนย์ ต่อมาเราเทสารละลายลงในท่อนำคลื่นปิด เพื่อวัดค่า P ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การจัดเครื่องมือไมโครเวฟเพื่อวัดค่า P

จากรูปที่ 2.8 ถ้าสารละลายในท่อนำคลื่นปิดมีความสูง d คลื่นซึ่งสะท้อนจากสารละลายนี้จะมีเฟสเลื่อนไป θ เมื่อเราต้องการให้คลื่นที่สะท้อนจากพลันเจอร์มีเฟสตรงกัน เราต้องปรับระยะเลื่อนของพลันเจอร์ให้เป็น P เมื่อเราเขียนสมการของเฟสของคลื่นไมโครเวฟทั้งสองด้านของเมจิกทีได้เป็น

$$-2\beta_1(Y + P) + \pi = -2\beta_1(x-d) + \theta \qquad (2.2.3)$$

เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ (2.2.3) กับ DT เป็น

$$-2\beta_1(P - DT) + \pi = 2\beta_1 d + \theta \qquad (2.2.4)$$

และเราสามารถคำนวณ θ ออกมาได้เป็น

$$\theta = 2\beta_1(DT - p - d) + \pi \qquad (2.2.5)$$

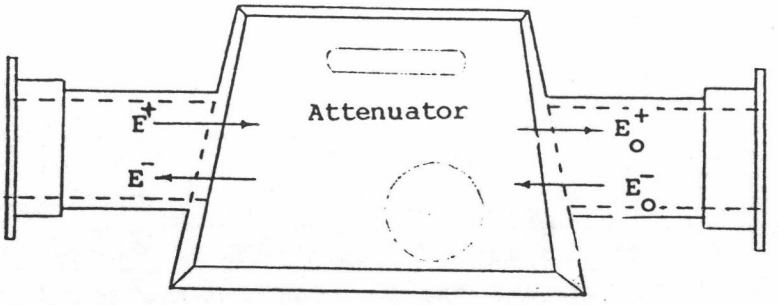
เมื่อเราปรับระยะเลื่อนของพลันเจอร์จนทำให้เฟสของคลื่นที่สะท้อนกลับมาตรงกันแล้ว พบว่าแอมปลิจูดของคลื่นที่สะท้อนมาจากสารไดอิเลกตริกจะมีค่าลดลงเนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานของคลื่นขณะผ่านสารละลาย ทำให้คลื่นที่สะท้อนจากพลันเจอร์อีกด้านหนึ่งของเมจิกทีมีแอมปลิจูดมากกว่า เราจึงต้องปรับเครื่องลดสัญญาณให้แอมปลิจูดของคลื่นด้านนี้ลดลง จนคลื่นทั้งสองด้านมีแอมปลิจูดเท่ากัน อ่านค่าจากเครื่องลดสัญญาณได้เป็น DB ซึ่งมีค่าตามสมการ

$$DB = 10 \log \frac{I}{I_o} = 10 \log\left(\frac{E}{E_o}\right)^2 \qquad (2.2.6)$$

หรือ

$$DB = 20 \log \frac{E}{E_o} \qquad (2.2.7)$$

คลื่นไมโครเวฟได้ผ่านเครื่องลดสัญญาณนี้สองครั้งดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านเครื่องลดสัญญาณ

ค่า DB เมื่อสัญญาณผ่านเครื่องลดสัญญาณครั้งแรกเป็น DB_1 มีค่าตามสมการ

$$DB_1 = 20 \log \frac{E_o^+}{E^+} \qquad (2.2.8)$$

คลื่นที่สะท้อนกลับมา E_o^- จะมีแอมปลิจูดเท่ากันกับ E_o^+ แต่มีทิศการแผ่ของคลื่นตรงกันข้าม ค่า DB เมื่อสัญญาณผ่านเครื่องลดสัญญาณครั้งที่สองเป็น DB_2 มีค่าตามสมการ

$$DB_2 = 20 \log \frac{E^-}{E^+} \qquad (2.2.9)$$

จากสมการ (2.2.8) และ (2.2.9) เราหาค่า DB ได้เมื่อ $DB_1 = DB_2$

ดังนั้น $$2DB = DB_1 + DB_2 = 20 \log \frac{E^-}{E^+} \qquad (2.2.10)$$

หรือ $$DB = 10 \log \frac{E^-}{E^+} \qquad (2.2.11)$$

ค่า DB ตามสมการ (2.2.11) นี้จะมีความสัมพันธ์กับค่า ρ ตามสมการ

$$\rho = \frac{1}{(\log^{-1} \frac{DB}{10})} \qquad (2.2.12)$$

จากวิธีการวัดค่าไดอิเลกตริกที่ความถี่ไมโครเวฟที่กล่าวมา เราจะวัดค่า ρ และ θ ได้ ค่าทั้งสองนี้ขึ้นอยู่กับความสูงของสารละลายไดอิเลกตริก d ตัวประกอบการแผ่ของคลื่นในอากาศ β_1 และตัวประกอบการแผ่ของคลื่นในสารละลายไดอิเลกตริก β_2^* ซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อน

โดย $$\beta_1 = \left\{ (\frac{\omega}{c})^2 - (\frac{\pi}{a})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (2.2.13)$$

$$\beta_2^* = \beta_2' - \beta_2'' \qquad (2.2.14)$$

เมื่อ a เป็นความกว้างของท่อนำคลื่นในการทดลองใช้ท่อนำคลื่นกว้าง 2.286 cm. เราเขียนความสัมพันธ์ของค่า ρ และ θ กับค่าที่กล่าวมานี้ได้ตามสมการ[8]

$$\rho = (\frac{A^2 + B^2}{C^2 + D^2}) \qquad (2.2.15)$$

$$\tan\theta = (\frac{BC - AD}{AC + BD}) \qquad (2.2.16)$$

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

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

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

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

จากสมการ (2.2.15) และ (2.2.16) นี้ เมื่อเราทราบค่า θ และ ρ แล้ว จึงสามารถแก้สมการหาค่า β_2' และ β_2'' ออกมาได้ โดยอาศัยเครื่องคำนวณแบบโปรแกรมเพื่อความสะดวกและรวดเร็ว

ในการคำนวณหาค่า β_2' และ β_2'' นี้ใช้เครื่องคำนวณของบริษัท CASIO Model PB-700 ซึ่งให้ค่าละเอียดเป็นทศนิยม 9 ตำแหน่ง เขียนโปรแกรมด้วยภาษา BASIC

เมื่อเราได้ค่า β_2' และ β_2'' แล้ว จึงนำไปคำนวณหาค่าไดอิเลกตริกที่ความถี่ไมโครเวฟซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อน ได้ตามสมการ

$$K' = \left\{\beta_2'^2 - \beta_2''^2 + \left(\frac{\pi}{a}\right)^2\right\}\left(\frac{c}{\omega}\right)^2 \qquad (2.2.17)$$

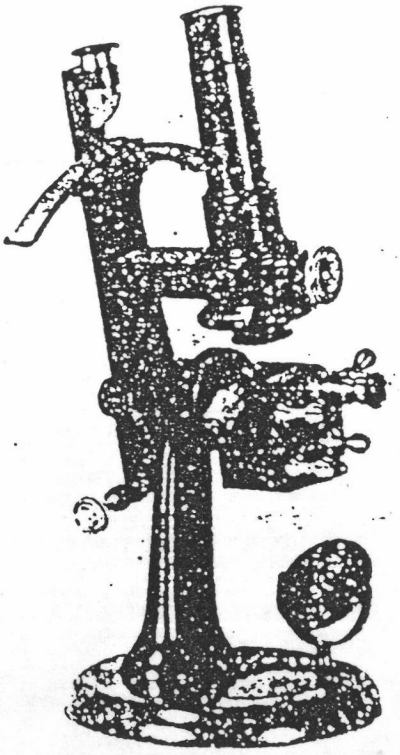
$$\tan\delta = \frac{2\beta_2'\beta_2''}{\beta_2'^2 - \beta_2''^2 + \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \qquad (2.2.18)$$

$$K'' = K' \tan\delta \qquad (2.2.19)$$

2.3 การวัดค่าไดอิเลกตริกที่ความถี่แสง

ค่าไดอิเลกตริกที่ความถี่ของแสงนั้นเป็นค่ากำลังสองของดัชนีหักเหของสารไดอิเลกตริก ซึ่งในที่นี้อยู่ในสภาพสารละลายที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ จึงทำให้สะดวกต่อการหาค่าดัชนีหักเห วิธีการหาค่าดัชนีหักเหที่สะดวกและรวดเร็ววิธีหนึ่งคือ การใช้รีแฟรกโตมิเตอร์ (Refractometer)

ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้รีแฟรกโตมิเตอร์ของแอบบี[8] (Abbe's Refractometer) ซึ่งอาศัยหลักการสะท้อนกลับหมดของแสง จึงทำให้ได้ค่าดัชนีหักเหที่ค่อนข้างเชื่อถือได้ เครื่องมือดังกล่าวนี้อ่านค่าดัชนีหักเหได้ละเอียดเป็นทศนิยม 3 ตำแหน่ง มีความแม่นยำสูงโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.1 %



รูปที่ 2.10 รีแฟรกโตมิเตอร์ของแอบบี