บทที่ 3

การวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของแผ่นฟิล์มพอลิพิรารีน

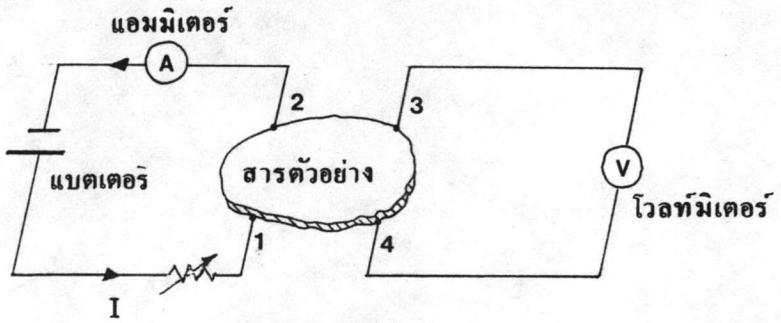
ตามที่กล่าวมาแล้วว่าจุดประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ก็คือ การสังเคราะห์แผ่นฟิล์มนำไฟฟ้าพอลิพิรารีนโดยวิธี CVD(จะกล่าวถึงวิธีการสังเคราะห์ในบทต่อไป) เพื่อนำแผ่นฟิล์มที่ได้นี้มาพัฒนาวิธีการชุบฉาบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า เพราะฉะนั้นแผ่นฟิล์มพอลิพิรารีนที่จะนำมาใช้พัฒนานั้น จะต้องมีลักษณะทางกายภาพ เช่น ลักษณะผิวที่เหมาะสมต่อการพัฒนา โดยเฉพาะค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์ม (Surface Resistance ; R_S) หรือสภาพนำไฟฟ้าของผิวฟิล์ม (Surface Conductivity ; δ)ซึ่งมีความสำคัญมาก แผ่นฟิล์มที่จะชุบฉาบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าได้ดีนั้น จะต้องมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มต่ำ ๆ หรือสภาพนำไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มสูง ๆ แต่เนื่องจากเราไม่ทราบวิธีการและเงื่อนไขการสังเคราะห์ ที่ทำให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวต่ำ ๆ ฉะนั้นการสังเคราะห์ในตอนแรก ๆ จึงเป็นการสังเคราะห์เพื่อหาวิธีการและเงื่อนไขการสังเคราะห์ ที่ทำให้ได้แผ่นฟิล์มพอลิพิรารีนที่มีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มต่ำ ๆ ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องมีวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ของแผ่นฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์แต่ละครั้งว่า มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มเป็นเท่าใด เพื่อให้รู้เงื่อนไขการสังเคราะห์ ที่ทำให้แผ่นฟิล์มมีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มต่ำที่สุด

เมื่อศึกษาวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าสภาพนำไฟฟ้าโดยวิธีต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในการวิจัยปัจจุบันนี้ พบว่าวิธีการวัดแบบแวนเดอพาว(Van der Pauw) และวิธี four-point probe มีความเหมาะสมกับการวิจัยในครั้งนี้มาก จึงเลือกใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของทั้งสองวิธีนี้ มาใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มพอลิพิรารีนที่สังเคราะห์ได้ ตลอดการวิจัยครั้งนี้

สำหรับในบทนี้ จะกล่าวถึงหลักการและวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ของทั้งวิธีแวนเดอพาว และ four-point probe โดยละเอียด พร้อมทั้งวิธีการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วยการสร้างเครื่องมือวัดตามแบบของทั้งสองวิธี พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการวัดของทั้งสองวิธี ว่ามีส่วนดีและบกพร่องทางด้านใดบ้าง สุดท้ายจะกล่าวถึงการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้ในการวิจัย ซึ่งเป็นการประดิษฐ์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 1.2 ถึง 24 โวลท์ เพื่อนำมาใช้ในการชุบฉาบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนแผ่นฟิล์มพอลิพิรารีน และเครื่องคนสารเคมี เพื่อนำมาใช้ในการเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิพิรารีน รายละเอียดของสิ่งต่าง ๆ ที่กล่าวมาแต่ต้นนี้ จะบรรยายโดยละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าของสาร โดยวิธีของแวนเดอพาว (Van der Pauw method)

การวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีของแวนเดอพาวนั้น ใช้วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารที่มีความหนาแน่นคงที่ และมีความหนาสม่ำเสมอ (กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ และ อนันศลิน เตชะกาพุช, 2527) วิธีวัดทำได้ง่าย ๆ โดยต่อขั้วไฟฟ้า 4 ขั้ว เข้ากับขอบของสารตัวอย่าง โดยพยายามให้มีระยะห่างเท่า ๆ กัน จากนั้นปล่อยกระแสไฟฟ้า I ขนาดพอเหมาะเข้าทางขั้วหมายเลข 1 ผ่านสารตัวอย่างออกทางขั้วหมายเลข 2 ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วหมายเลข 4 กับขั้วหมายเลข 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งจะได้ค่า I_{12} และ V_{43} ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 แสดงการวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีแวนเดอพาว

หลังจากนั้นเปลี่ยนมาผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าทางขั้วหมายเลข 2 ออกทางขั้วหมายเลข 3 พร้อมกับวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วหมายเลข 1 กับขั้วหมายเลข 4 ซึ่งจะได้ค่า I_{23} และ V_{14} ตามลำดับอีกเช่นกัน ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว (R_S) ของสารตัวอย่างจะหาได้ โดยการคำนวณตามสมการ

$$\exp(-\pi R_1/R_S) + \exp(-\pi R_2/R_S) = 1 \quad \text{.....(3.1)}$$

เมื่อ R_1 ก็คืออัตราส่วนระหว่าง V_{43} กับ I_{12} และ R_2 ก็คืออัตราส่วนระหว่าง V_{14} กับ I_{23} ตามลำดับ สำหรับค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ผิวของสารตัวอย่างจะหาได้โดยสมการ

$$\sigma = 1/R_S d \quad \text{.....(3.2)}$$

เมื่อ d คือ ความหนาของสารตัวอย่างในหน่วย เซนติเมตร (cm)

ค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างซึ่งวัดได้โดยวิธีนี้ จะถูกต้องแม่นยำเพียงใดขึ้นกับเงื่อนไขดังต่อไปนี้

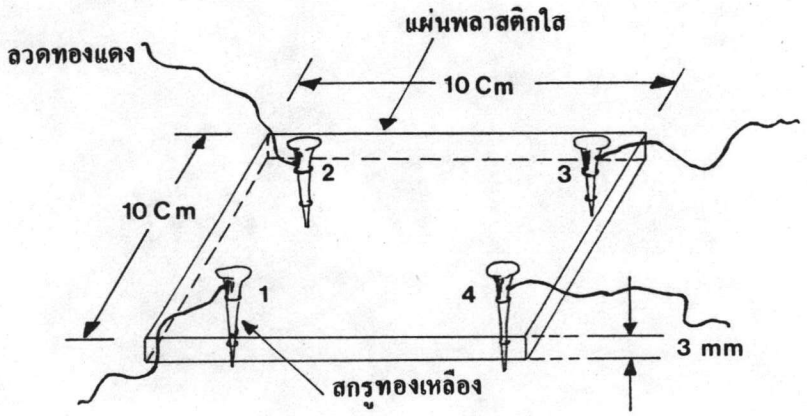
3.1.1 จุดสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารตัวอย่าง ต้องอยู่ที่ขอบของสารตัวอย่าง

3.1.2 จุดสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารตัวอย่าง ต้องมีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของสารตัวอย่าง

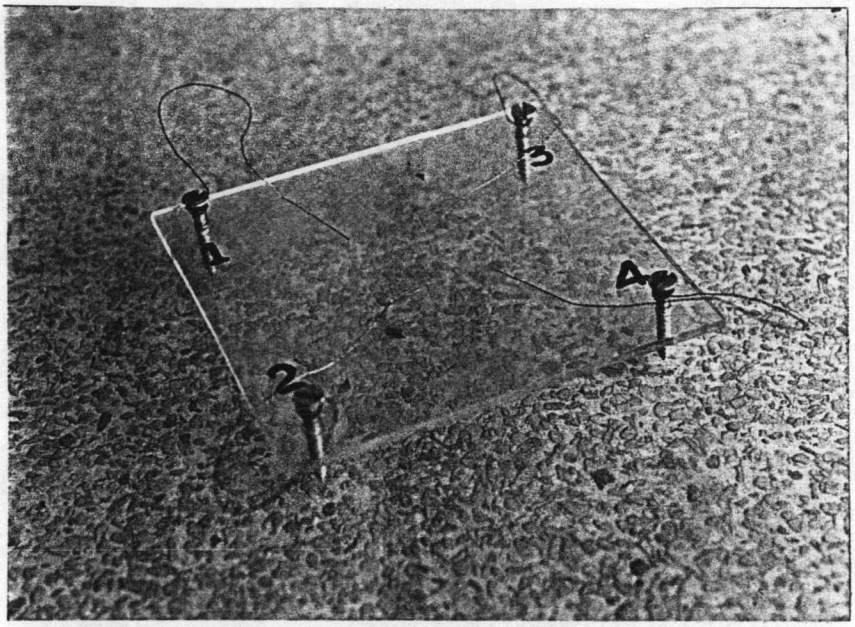
3.1.3 สารตัวอย่างต้องมีความหนาแน่นเท่ากันตลอด

3.1.4 สารตัวอย่าง ต้องมีเนื้อสารสม่ำเสมอ ไม่มีรูหรือรอยแยกใด ๆ และต้องมีความหนาเท่ากันตลอดทั้งแผ่น

จะเห็นว่าวิธีการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบวิธีแวนเดอพาวนี้ เป็นวิธีการที่ง่ายในการปฏิบัติ ไม่ต้องออกแบบสร้างเครื่องมือวัดที่ซับซ้อนแต่อย่างใด แต่เพื่อให้การปฏิบัติงานขณะวัดเป็นไปโดยความสะดวก จึงได้สร้างฐานรองสารตัวอย่าง (ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ก็คือแผ่นฟิล์มพอลิพีรารีน์นั่นเอง) โดยใช้แผ่นพลาสติกใสหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ที่มุมทั้งสี่เจาะรูใส่สกรูทองเหลืองขนาดยาว 1 นิ้วทั้งสี่มุม เพื่อทำเป็นขาตั้งและที่พักสายไฟ โดยสกรูแต่ละตัวจะบัดกรีติดกับลวดทองแดงอาบน้ำยาขนาดเล็กสุดซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้ววัด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ส่วนรูปที่ 3.3 จะเป็นภาพถ่ายของฐานรองแผ่นฟิล์มพอลิพีรารีน์ ที่สร้างขึ้นใช้จริง ๆ



รูปที่ 3.2 แสดงฐานรองแผ่นฟิล์มพอลิพีรารีน์ ในการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบแวนเดอพาว



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายของฐานรองแผ่นฟิล์มพอลิพิรารสที่สร้างได้จริง ๆ

วิธีวัดความต้านทานไฟฟ้าของสารตัวอย่างด้วยวิธีแวนเดอพาวนี้ ได้รับความนิยมในหมู่นักวิจัยด้านต่าง ๆ เป็นอย่างมาก เพราะค่าที่ได้จากการวัดโดยวิธีนี้ มีความแม่นยำและเชื่อถือได้ค่อนข้างสูง อีกทั้งวิธีวัดและการควบคุมการวัดก็ทำได้ง่าย ไม่ยุ่งยากเหมือนวิธีอื่น ๆ

3.2 <u>การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่าง</u>

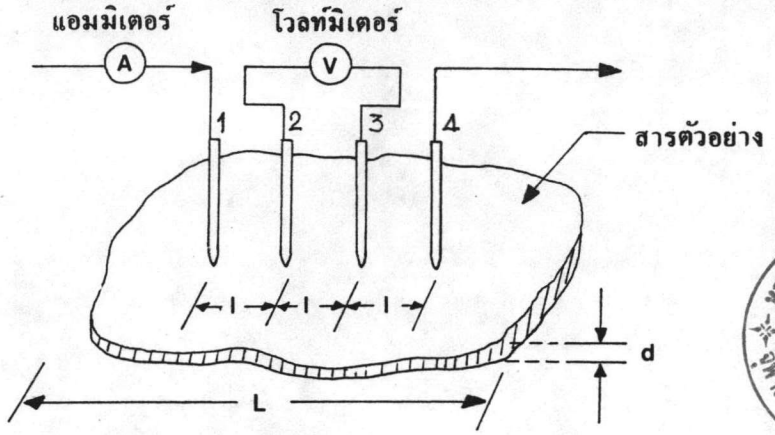
<u>โดยวิธี Four-Point Probe (V4PM)</u>

วิธีนี้จะมีขั้วไฟฟ้า 4 ขั้ว วางเรียงในแนวเดียวกัน โดยมีระยะห่างเท่า ๆ กัน การวัดทำโดยการปล่อยให้กระแสไฟฟ้า (I) ไหลผ่านสารตัวอย่าง เข้าทางขั้วหมายเลข 1 ออกทางขั้วหมายเลข 4 ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ระหว่างขั้วหมายเลข 2 กับขั้วหมายเลข 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (อยู่ในหน้าต่อไป) (สมเกียรติ ศุภเดช, 2525)

ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_S) ของสารตัวอย่าง จะหาได้โดยนำค่ากระแสไฟฟ้า I และความต่างศักย์ไฟฟ้า V ที่วัดได้ แทนลงในสมการข้างล่าง

$$R_S = V\pi/I(Ln2) \qquad .....(3.3)$$

เมื่อวัดความหนา (d) ของสารตัวอย่าง จะสามารถหาค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างได้ตามสมการที่ (3.2) อีกเช่นกัน



หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.4 แสดงการวัดความต้านทานไฟฟ้า โดยวิธี four-point probe (V4PM)

สำหรับค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้โดยวิธี four-point probe นี้ จะถูกต้องเพียงใดนั้น ขึ้นกับเงื่อนไขดังต่อไปนี้

3.2.1 สารตัวอย่างที่วัด ต้องมีขนาดความกว้าง และความยาวมากกว่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามาก ๆ (L >> l)

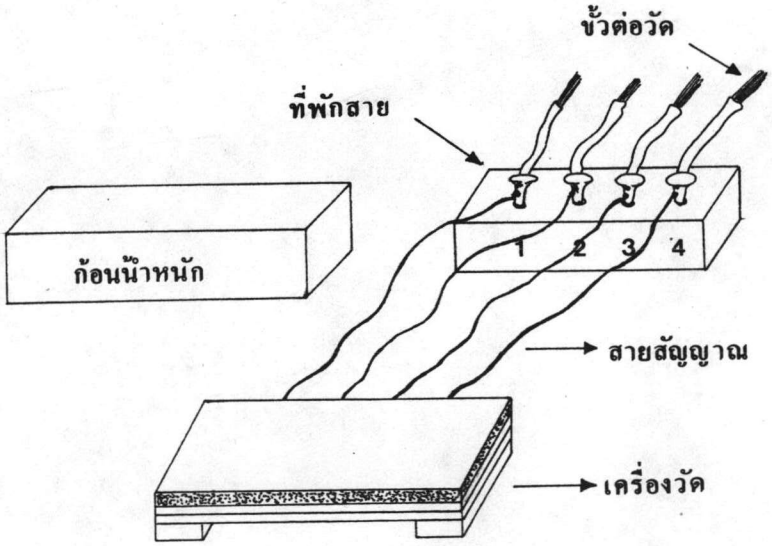
3.2.2 ความหนา(d)ของสารตัวอย่าง ต้องน้อยกว่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามากๆ (d << l)

การประดิษฐ์เครื่องมือวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธี four-point probe เพื่อนำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้นั้น จะใช้แผ่นวงจรพิมพ์(Printed Circuit broad) ขนาดหนา 1.5 มิลลิเมตร กว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น นำมาซ้อนและยึดติดกันด้วยกาวชนิดพิเศษ เพื่อทำเป็นตัวเครื่องวัด ในแนวกลางจะเจาะรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5 มิลลิเมตร จำนวน 4 รู โดยให้มีระยะห่างระหว่างแต่ละรู 3 มิลลิเมตร ที่ปลายทั้งสองข้างของตัวเครื่องวัด ติดด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ขนาดกว้าง 4 มิลลิเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นฐานรองตัวเครื่องมือ ส่วนขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 ขั้ว จะใช้เข็มหมุดขนาดเล็กที่ใช้ในสำนักงาน(office-pin) ยี่ห้อตราม้า(Horse) ซึ่งวางขายตามท้องตลาด มีลักษณะหัวกลม ปลายแหลม ยาวประมาณ 5 เซนติเมตร นำมาตัดปลายทั้งสองข้างออกให้ยาวเพียง 7 มิลลิเมตร โดยพยายามตัดปลายทั้งสองข้างให้เรียบมากที่สุดเท่าที่จะทำได้(อาจต้องใช้กระดาษทรายขัดปลายด้วย) ซึ่งเมื่อนำมาใส่ลงในรูของตัวเครื่องมือแล้ว จะเหลือปลายพ้นเกินจากแผ่นบนของตัวเครื่องมือ 1 มิลลิเมตรพอดี ที่บนปลายของเข็ม

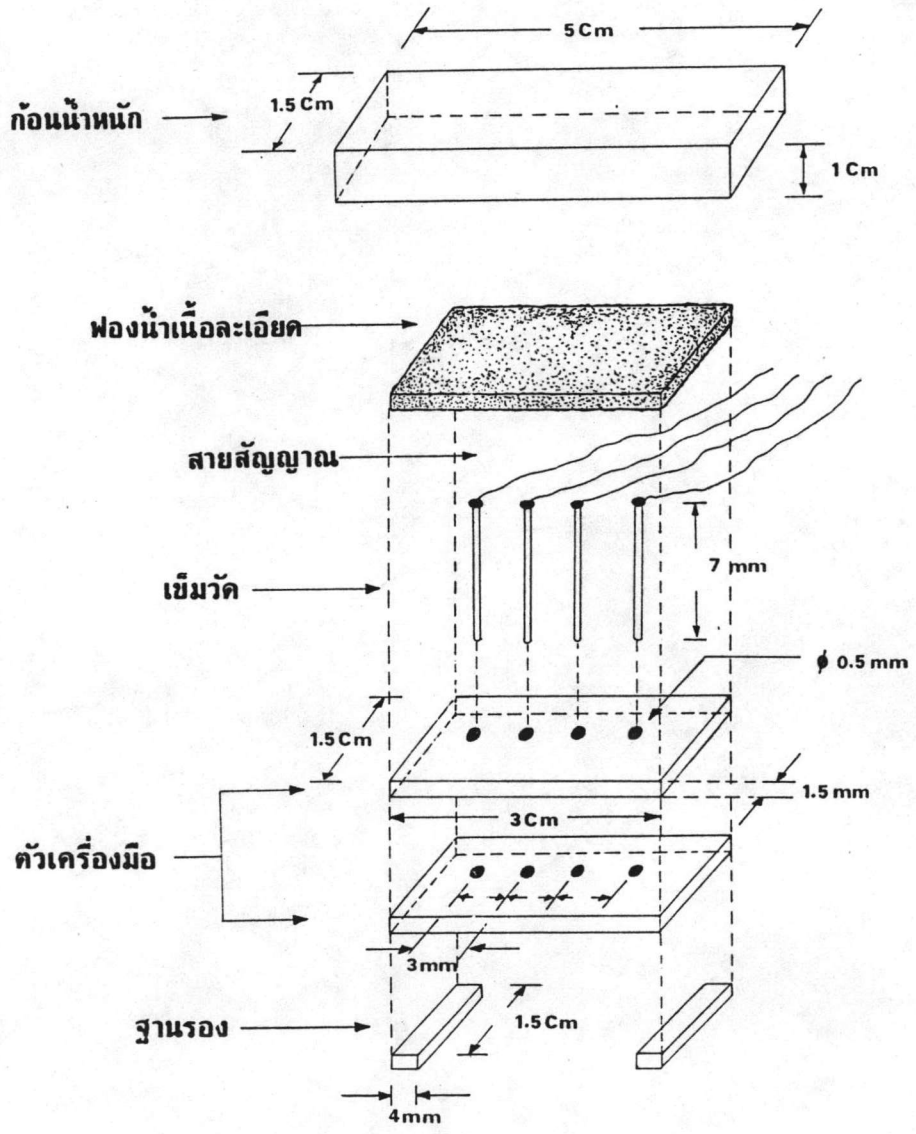
หมุดทั้งสี่ จะบัดกรีติดกับลวดทองแดงอาบน้ำยาขนาดเล็กสุดยาวประมาณ 10 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นสายส่งสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากสารตัวอย่าง และเพื่อให้ขั้วไฟฟ้า (เข็มหมุด) มีความยืดหยุ่นในการเคลื่อนที่ และเกิดแรงกดพอดีกับสารตัวอย่างในขณะที่วัด จึงใช้ฟองน้ำชนิดเนื้อละเอียดตัดให้มีขนาดเท่ากับเครื่องมือ ปิดทับด้านบนอีกชั้นหนึ่ง

สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งก็คือ ในขณะวัดนั้น ขั้วไฟฟ้าหรือเข็มหมุดจะต้องมีแรงกดที่พอเหมาะต่อผิวของสารตัวอย่าง โดยจะต้องไม่มีแรงกดมากเกินไป เพราะอาจทำให้ผิวของสารตัวอย่างเสียหายได้ แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องไม่เบาจนเกินไป จึงได้สร้างน้ำหนักเพื่อใช้สำหรับกดขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ ให้สัมผัสกับผิวของสารตัวอย่าง (ในที่นี้ก็คือ แผ่นฟิล์มพอลิพิรารีลีน์) โดยใช้ก้อนเหล็กขนาดกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร ทำเป็นก้อนน้ำหนักเพื่อใช้กดทับ

เนื่องจากเครื่องมือมีขนาดเล็กพอสมควร จึงต้องสร้างที่พักลวดทองแดงอาบน้ำยาทั้งสี่เส้น เพื่อให้มีความสะดวกในขณะวัด เครื่องมือที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว มีลักษณะดังรูปที่ 3.5 ส่วนแปลนการสร้างของเครื่องมือชิ้นนี้ แสดงอยู่ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องมือวัดความต้านทานไฟฟ้า ตามแบบ four-point probe ที่สร้างเสร็จเรียบร้อย



รูปที่ 3.6 แปลนการสร้างเครื่องมือวัดความต้านทานไฟฟ้า
ตามแบบ Four-Point Probe (V4PM)

3.3 ขั้นตอนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรโรล์

เพื่อให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรโรล์ ที่ได้จากการวัด มีความถูกต้องหรือใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมากที่สุด จึงได้กำหนดขั้นตอนการวัด และวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรโรล์ ตามแบบวิธีของแวนเดอพาว และ four-point probe ไว้ดังต่อไปนี้

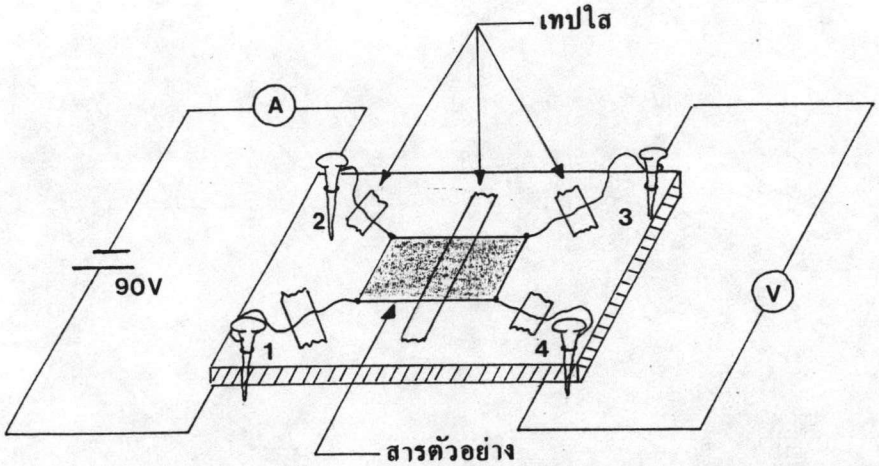
3.3.1 วิธีของแวนเดอพาว

ในการวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรโรล์ โดยใช้วิธีของแวนเดอพาวนี้ จะมีวิธีการวัดเหมือนที่อธิบายในหัวข้อที่ 3.1 ทุกประการ แต่ได้เพิ่มขั้นตอนการวัดให้มากขึ้นกว่าเดิม เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมากขึ้น โดยมีขั้นตอนการวัดดังต่อไปนี้

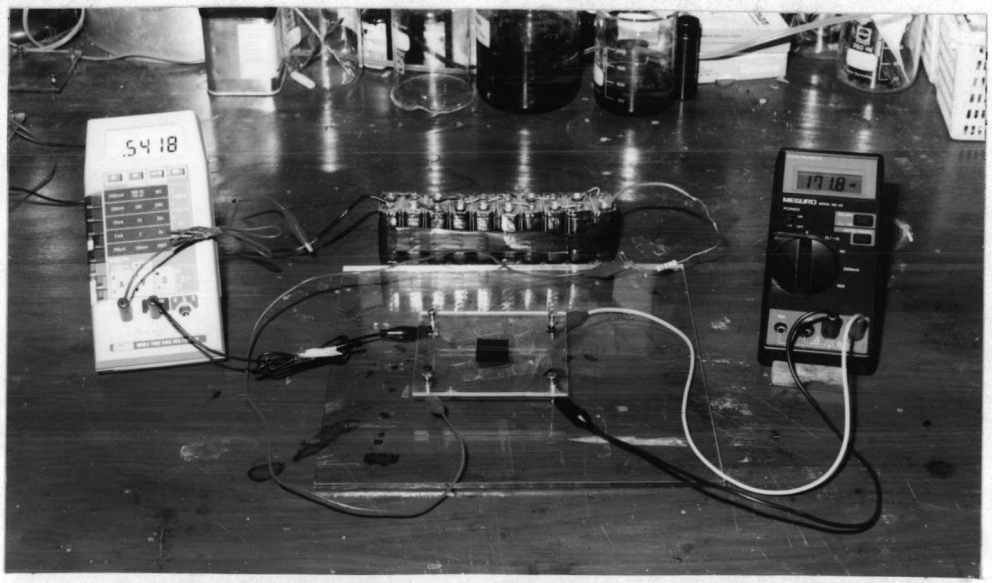
ก. นำแผ่นฟิล์มพอลิพิรโรล์ที่สังเคราะห์ได้ (รายละเอียดการสังเคราะห์จะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 4)ซึ่งมีขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร มาตัดเอาขอบซึ่งเป็นส่วนที่ไม่เรียบทิ้งไป ทำให้เหลือแผ่นฟิล์มกว้างประมาณ 1.5 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2.5 เซนติเมตร นำแผ่นฟิล์มที่ได้นี้มาวางบนฐานรองที่สร้างไว้ ตามที่อธิบายในหัวข้อ 3.1 ตัดเทปใส(transparent tape)ขนาดความกว้างประมาณ 0.5 เซนติเมตร ยาว 3 - 4 เซนติเมตร ปิดทับแผ่นฟิล์มให้ยึดแน่นกับฐานรอง นำปลายลวดทองแดงทั้งสี่เส้นมาแตะและทำให้ยึดติดกับขอบของแผ่นฟิล์มที่มุมทั้งสี่ด้านด้วยกาวคาร์บอน(Carbon paste) โดยพยายามทำให้จุดสัมผัสนี้เล็กที่สุด เท่าที่จะทำได้ แล้วใช้เทปใสปิดทับเส้นลวดทองแดงทั้งสี่เส้นให้ติดแน่นกับฐานรองอีกครั้งหนึ่ง

ข. ใช้แบตเตอรี่ขนาดความต่างศักย์ 90 โวลต์ จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านแผ่นฟิล์มเข้าทางขั้วหมายเลข 1 ออกทางขั้วหมายเลข 2 โดยกระแสที่ไหลผ่านนี้จะบังคับให้มีขนาดไม่เกิน 1 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งทำได้โดยการใช้ตัวต้านทานที่ปรับค่าได้เป็นตัวควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้า ในขณะเดียวกันนี้ ก็วัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วหมายเลข 4 กับขั้วหมายเลข 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ

สาเหตุที่ใช้แบตเตอรี่ความต่างศักย์ถึง 90 โวลต์ก็เพราะ ต้องการแบตเตอรี่ที่มีแรงดันไฟฟ้าสูง ๆ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ไม่เปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากในขณะที่ทำการวัด เมื่อมีความต้านทานสูง ๆ ต่ออนุกรมในวงจร กระแสไฟฟ้าที่คงที่นี้จะเป็นผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดและคำนวณได้นั้น แม่นยำมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.7 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรโรล์ด้วยวิธีแวนเดอพาว



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายแสดงการปฏิบัติการวัด ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์ม พอลิพิรโรล์ โดยวิธีแวนเดอพาว

เพื่อให้ได้ผลการวัดที่ดีที่สุด จึงปรับตัวต้านทานที่ต่ออนุกรม ให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นฟิล์มเดกต่างกัน 3 ค่าด้วยกัน โดยปรับค่าความต้านทานเป็น 100 K , 200 K และ 300 K ตามลำดับ ข้อมูลที่วัดได้นี้ จะได้เป็นค่าความต่างศักย์(V)และกระแสไฟฟ้า(I) โดยแต่ละค่าของ V และ I ประกอบด้วยค่าที่เดกต่างกันชนิดละ 3 ค่า คือ V_1, V_2, V_3 และ I_1, I_2, I_3 ตามลำดับ เราจะเรียกข้อมูลชุดแรกที่วัดได้นี้ว่า **"ข้อมูลกลุ่มที่ 1"** ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ค่าความต้านทาน (Ohm)	ค่าความต่างศักย์(V) (Volt)	ค่ากระแสไฟฟ้า(I) (Ampere)
100 K	V_1	I_1
200 K	V_2	I_2
300 K	V_3	I_3

ตารางที่ 3.1 แสดงลักษณะค่า V และ I ที่จะวัดได้จากแผ่นฟิล์มพอลิพิรโรล์ โดยวิธีแวนเดอพาว

ค. จากนั้นเปลี่ยนมาจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านฟิล์มเข้าทางขั้วหมายเลข 2 ออกทางขั้วหมายเลข 3 ในขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วหมายเลข 1 กับขั้วหมายเลข 4 โดยปรับกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านแผ่นฟิล์ม 3 ค่าอีกเช่นกัน ทำให้ได้ข้อมูลกลุ่มที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยค่า V_1, V_2, V_3 และ I_1, I_2, I_3 ตามลำดับ อีกเช่นกัน

ข้อมูลกลุ่มที่ 1 จากข้อ ก. กับข้อมูลกลุ่มที่ 2 จากข้อ ข. นี้ เราจะเรียกรวมว่า **"ข้อมูลชุดที่ 1"** ซึ่งเราสามารถจะหาค่า R_1 ได้จากความชันของเส้นกราฟระหว่างความต่างศักย์(V) กับกระแสไฟฟ้า(I) ของข้อมูลกลุ่มที่ 1 และหาค่า R_2 ได้จากความชันของเส้นกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์(V) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของข้อมูลกลุ่มที่ 2 ตามลำดับ โดยการหาค่า R_1 และ R_2 ของการวิจัยครั้งนี้ จะไม่หาด้วยวิธีนำค่าความต่างศักย์(V) และกระแสไฟฟ้า(I)ของข้อมูลแต่ละกลุ่มมาเขียนกราฟ แล้วหาความชันของเส้นกราฟ แต่จะหาค่าโดยวิธี **Least-square fit** (จเร สุรวัฒน์ปัญญา,2531) เพราะจะได้ค่า R_1 และ R_2 ที่ถูกต้องที่สุด

ง. นำค่า R_1 และ R_2 ของข้อมูลแต่ละกลุ่ม ซึ่งคำนวณได้จากวิธี Least - square fit แทนค่าในสมการที่ 3.1 ซึ่งเมื่อแก้สมการแล้วจะได้ค่าความต้านทานไฟฟ้า(R_S) ที่ผิวฟิล์มพอลิพิรารีน ซึ่งถ้าเราไม่ต้องการความละเอียดถูกต้องในการวัดมากนัก ก็สามารถใช้ค่าที่ได้จากการแก้สมการนี้ เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรารีนที่นำมาวัดในครั้งนั้น ๆ ได้ แต่ในการวิจัยครั้งนี้ได้เพิ่มเติมขั้นตอนการวัดขึ้นอีก ซึ่งมั่นใจว่าจะทำให้ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่แม่นยำมากขึ้น โดยจะอธิบายถึงรายละเอียดของขั้นตอนที่เพิ่ม ดังต่อไปนี้

จ. จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าทางขั้วหมายเลข 3 ออกทางขั้วหมายเลข 4 และในขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วหมายเลข 2 กับขั้วหมายเลข 1 โดยเปลี่ยนค่าของกระแสไฟฟ้าให้แตกต่างกัน 3 ค่า ในลักษณะทำนองเดียวกันกับข้อ ข. ผลจากการปฏิบัติการตามข้อนี้ จะทำให้เราได้ข้อมูลกลุ่มที่ 3

ฉ. สุดท้ายจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าทางขั้วหมายเลข 4 ออกทางขั้วหมายเลข 1 ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วหมายเลข 3 กับหมายเลข 2 โดยปฏิบัติการวัดในทำนองเดียวกับที่กล่าวมาแต่ต้น ซึ่งเราจะได้ข้อกลุ่มที่ 4 เป็นข้อมูลกลุ่มสุดท้าย

ช. จากนั้นนำข้อมูลแต่ละกลุ่มทั้ง 4 กลุ่ม มาจับคู่เป็นชุดของข้อมูล 4 ชุด ในลักษณะดังนี้

ข้อมูลกลุ่มที่ 1 กับกลุ่มที่ 2 เป็น **ข้อมูลชุดที่ 1**

ข้อมูลกลุ่มที่ 2 กับกลุ่มที่ 3 เป็น **ข้อมูลชุดที่ 2**

ข้อมูลกลุ่มที่ 3 กับกลุ่มที่ 4 เป็น **ข้อมูลชุดที่ 3**

ข้อมูลกลุ่มที่ 4 กับกลุ่มที่ 1 เป็น **ข้อมูลชุดที่ 4**

ซ. นำข้อมูลแต่ละชุดทั้ง 4 ชุด ไปหาค่า R_1 และ R_2 โดยวิธี Least-square fit แล้วนำค่า R_1 และ R_2 ที่หาได้มาแทนในสมการที่ 3.1 เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของข้อมูลแต่ละชุดออกมา ซึ่งจะได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมด 4 ค่า ด้วยกัน

ฌ. นำค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้ง 4 ค่า มาหาค่าเฉลี่ยโดยแทนลงในสมการ

$$\text{ความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ย}(R_S) = \frac{R_{S1} + R_{S2} + R_{S3} + \ldots + R_{Sn}}{n} \quad \ldots\ldots(3.5)$$

เมื่อ R_{S1}, R_{S2}, R_{S3} และ R_{S4} คือค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากของข้อมูลชุดที่ 1,2,3 และ 4 ตามลำดับ

ค่า R_S ที่หาได้จากสมการ 3.5 นี้ จะใช้เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรารีน ที่ได้จากการสังเคราะห์ครั้งนั้น ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการอ้างอิง เปรียบเทียบ

และวิเคราะห์ผล ในการสรุปผลการวิจัยต่อไป

ฌ. ถ้าทราบความหนา(d)ของแผ่นฟิล์มพอลิพิรรโรล์ แล้วนำค่าความหนาพร้อมกับค่าความต้านทานไฟฟ้า(R_S)ที่ผิวฟิล์มพอลิพิรรโรล์ แทนลงในสมการที่ 3.2 เมื่อแก้สมการจะได้ค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มพอลิพิรรโรล์(σ)ตามที่เราต้องการ

ในส่วนของการวัดค่าความต่างศักย์(V) และค่ากระแสไฟฟ้า(I) ของแผ่นฟิล์มพอลิพิรรโรล์นั้น ในบางครั้งอาจวัดได้ไม่ครบทั้ง 4 กลุ่ม โดยอาจวัดเพียง 2 หรือ 3 กลุ่มเท่านั้น ซึ่งแล้วแต่ความสะดวกและเหมาะสมของการวัดในแต่ละครั้ง แต่ถึงอย่างไรก็ตาม เราก็ยังคงใช้วิธีการตามขั้นตอนที่บรรยายมาแล้ว เหมือนเดิม เพียงแต่ดัดแปลงการแก้สมการและการคำนวณเพียงเล็กน้อย เพื่อให้สอดคล้องเท่านั้น

3.3.2 วิธี Four-Point Probe (V4PM)

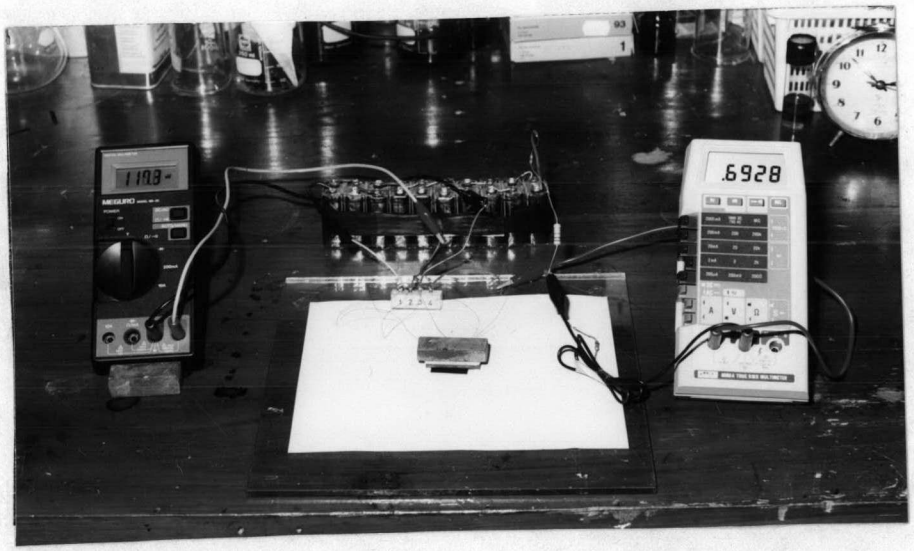
สำหรับขั้นตอน และวิธีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรรโรล์ โดยวิธี four-point probe นี้ มีขั้นตอนและวิธีการไม่ซับซ้อนมากนัก อีกทั้งการวัดก็ทำได้สะดวกและรวดเร็ว แต่อาจมีปัญหาในเรื่องความแม่นยำของการวัดบ้าง เพราะขนาดของแผ่นฟิล์มไม่ใหญ่มาก เมื่อเทียบกับระยะระหว่างเข็มวัด แต่ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้วิธีการวัดแบบ four-point probe ก็ต่อเมื่อ ต้องการได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรรโรล์โดยประมาณเท่านั้น เช่น เมื่อต้องการทราบค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรรโรล์ที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละเงื่อนไข เพื่อหาเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ทำให้ได้แผ่นฟิล์มมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวต่ำที่สุด แต่ในกรณีที่ต้องการทราบค่าที่แน่นอนหรือต้องการค่าที่ค่อนข้างแม่นยำ จะใช้วิธีวัดแบบ Van der Pauw ซึ่งให้ค่าที่ค่อนข้างแม่นยำและเชื่อถือได้ค่อนข้างสูง

สำหรับขั้นตอนและวิธีวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า(R_S) และสภาพนำไฟฟ้า(σ) ของผิวฟิล์มพอลิพิรรโรล์ โดยวิธี four-point probe มีขั้นตอนและวิธีการดังต่อไปนี้

ก. นำแผ่นฟิล์มพอลิพิรรโรล์ที่สังเคราะห์ได้ มาตัดเอาขอบซึ่งเป็นส่วนของแผ่นฟิล์มที่ไม่เรียบทิ้งไป(เหมือนวิธีการในข้อ 3.3.1.ก.) แล้วนำแผ่นฟิล์มไปวางบนแผ่นกระจกหรือวัสดุใดก็ได้ ที่ผิวเรียบและแข็งพอสมควร

ข. นำเครื่องมือวัดแบบ four-point probe ซึ่งสร้างขึ้นตามที่บรรยายวิธีการสร้างมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2. วางทับบนแผ่นฟิล์ม แล้วใช้ก้อนน้ำหนักที่สร้างขึ้นวางทับบนเครื่องมืออีกครั้งหนึ่ง จากนั้นใช้แบตเตอรี่ขนาด 90 โวลต์ เป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านแผ่นฟิล์มเข้าทางขั้วหมายเลข 1 ออกทางขั้วหมายเลข 4 โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นฟิล์มนี้ เราจะบังคับให้มีขนาดไม่เกิน 1 มิลลิแอมแปร์ ด้วยการใช้ตัวต้านทานที่ปรับค่าได้เป็นตัวควบคุม ซึ่ง

ในการวัดแต่ละครั้งนั้น จะปรับค่าความต้านทานเป็น 100K , 200 K และ 300 K ตามลำดับ ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นฟิล์มมีทั้งหมด 3 ค่า คือ I_1, I_2 และ I_3 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรรโรล์ด้วยวิธี **V4PM**

ในขณะที่เราจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านแผ่นฟิล์มอยู่นั้น จะวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม ระหว่างขั้วหมายเลข 2 กับหมายเลข 3 ซึ่งผลของการเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าดังที่กล่าวมาแต่ต้น จะทำให้ได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 3 ค่าอีกเช่นกัน คือ V_1, V_2 และ V_3 ตามลำดับ ค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มพอลิพิรรโรล์ ที่วัดได้โดยวิธี four-point probe ในแต่ละครั้งนั้น จะมีลักษณะดังแสดงในตารางที่ 3.2

ค่าความต้านทาน (Ohm)	ค่าความต่างศักย์ (Volt)	ค่ากระแสไฟฟ้า (Ampere)
100 K	V_1	I_1
200 K	V_2	I_2
300 K	V_3	I_3

ตารางที่ 3.2 แสดงลักษณะของค่า V และ I ที่วัดได้โดยวิธี four-point probe

ค. เนื่องจาก V เปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นไปกับ I โดยที่ V = 0, I = 0 จึงใช้วิธี Least-square fit หาค่า V/I จากนั้นแทนค่าลงในสมการ (3.3) เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว (R_S)

ง. ปฏิบัติการวัดตามลำดับเหมือนข้อ ก ถึงข้อ ค แต่เปลี่ยนบริเวณที่ทำการวัดไปยังบริเวณอื่น ๆ ให้ทั่วตลอดแผ่นฟิล์ม ซึ่งรวมแล้วจะเป็นการวัดทั้งหมดกี่บริเวณสำหรับแผ่นฟิล์มแผ่นหนึ่ง ๆ นั้น ก็แล้วแต่ความสะดวก และเหมาะสมของการวัดในแต่ละครั้ง

ผลจากข้อ ง. นี้ ทำให้เราได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรโรลที่บริเวณต่าง ๆ หลาย ๆ บริเวณครอบคลุมพื้นที่ผิวทั้งหมดของแผ่นฟิล์ม หลังจากนั้นนำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของบริเวณต่าง ๆ ของแผ่นฟิล์ม มาหาค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ยของผิวฟิล์มทั้งแผ่น โดยนำค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มของแต่ละบริเวณ แทนลงในสมการที่ 3.8

$$\text{ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์ม}(R_S) = \frac{R_{S1} + R_{S2} + R_{S3} + \ldots + R_{Sn}}{n} \quad \ldots(3.8)$$

เมื่อ R_{S1} , R_{S2} , R_{S3} , ... , R_{Sn} คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของผิวฟิล์มพอลิพิรโรลที่วัดและคำนวณได้จากบริเวณต่าง ๆ บนแผ่นฟิล์ม n บริเวณ

ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มซึ่งหาได้ในขั้นตอนสุดท้ายนี้ จะใช้เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มทั้งแผ่น เพื่อใช้เป็นค่าสำหรับเปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลการวิจัยต่อไป

จะเห็นว่า วิธีการวัด และขั้นตอนการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรโรลที่สังเคราะห์ได้นั้น มีความซับซ้อนพอสมควร ทั้งนี้ก็เพราะต้องการได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มที่มีค่าถูกต้อง หรือใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมากที่สุด จึงใช้เวลาในการวัดแต่ละครั้งนานพอสมควร กว่าที่จะวัดและคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรโรล์ออกมาได้

เพื่อให้ได้ผลการวัดที่รวดเร็วและถูกต้อง จึงนำไมโครคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรโรล์ ซึ่งปรากฏผลว่าสามารถทำให้การคำนวณสะดวก รวดเร็ว และได้ค่าที่แม่นยำมาก รายละเอียดของวิธีการในการนำไมโครคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยคำนวณในการวิจัยครั้งนี้นั้น จะอธิบายในหัวข้อต่อไปนี้

3.4 การใช้ไมโครคอมพิวเตอร์คำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรโรล์

แผ่นฟิล์มพอลิพิรโรล์ ที่สังเคราะห์ได้จากการวิจัยในครั้งนี้นั้น จะนำมาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว โดยใช้วิธีวัดตามแบบของ แวนเดอพาว และ four-point probe ตามที่กล่าวมาแล้วแต่ต้น แต่เมื่อพิจารณาดูแล้วจะพบว่าในการวัดแต่ละแบบนั้น เราไม่ได้ค่าความ

ต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรรโรล์ในทันที แต่จะได้ค่ากระแสไฟฟ้า(I) และค่าความต่างศักย์(V)ของแผ่นฟิล์ม เราต้องนำค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่วัดได้นี้ มาแทนลงในสมการที่ 3.1 , 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มอีกครั้งหนึ่ง จึงจะได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรรโรล์ ตามที่เราต้องการ

เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง รวดเร็ว และแม่นยำ จึงนำไมโครคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรรโรล์ โดยจะนำขั้นตอนการ และวิธีการคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรรโรล์ ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.3 (ทั้งวิธีวัดตามแบบของแวนเดอพาว และ four-point probe) มาเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเขียนขึ้นสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้โดยเฉพาะ เพราะถ้าเราพิจารณาแล้วจะพบว่า การคำนวณโดยการแก้สมการที่ 3.1 , 3.2 และ 3.3 นั้น ไม่สามารถกระทำได้โดยง่ายและยังใช้เวลานานพอสมควรในการหาค่าครั้งหนึ่ง ๆ โดยเฉพาะสมการที่ 3.1 ซึ่งเป็นการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าตามแบบวิธีของแวนเดอพาวนั้น ใช้เวลาในการคำนวณและแก้สมการในแต่ละครั้งนานพอสมควรทีเดียว การนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรรโรล์ จึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งสำหรับการวิจัยครั้งนี้

สำหรับโปรแกรมการคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิรรโรล์ ซึ่งเขียนขึ้นใช้ในการวิจัยครั้งนี้นั้น ได้เขียนด้วยโปรแกรมภาษาถึง 2 ภาษา คือ ภาษา BASIC และภาษา C นอกจากนั้นยังเขียนด้วยโปรแกรม **มาโคร** ในโปรแกรมสำเร็จรูปของ **LOTUS** อีกด้วย ซึ่งรายละเอียดในเรื่องนี้จะบรรยายไว้ในภาคผนวก ก ถึง ภาคผนวก ง ตามลำดับ (ในตัวของโปรแกรม ได้เพิ่มเติมการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าเข้าไปด้วย เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและนำไปประยุกต์ สำหรับการวิจัยอื่น ๆ)

3.5 การประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้ในการวิจัย

เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้ จำเป็นต้องใช้เครื่องมือเพื่อช่วยในการวิจัยหลายชนิด ซึ่งบางชนิดเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาแพง ประกอบกับทางห้องปฏิบัติการที่ทำการวิจัยครั้งนี้นั้นยังอยู่ในระยะเริ่มต้นก่อตั้ง ฉะนั้นเครื่องมือและอุปกรณ์บางชนิดจึงไม่สามารถจัดหาได้ทันตามที่ต้องการ จึงได้แก้ปัญหาโดยการประดิษฐ์ขึ้นใช้เอง ซึ่งแม้ว่าอาจจะไม่ได้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงมากนัก แต่ก็ได้เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพพอเหมาะตามที่ต้องการ ประหยัดค่าใช้จ่าย และที่สำคัญก็คือ ได้ประสบการณ์จากการประดิษฐ์เครื่องมือ ซึ่งสามารถนำไปใช้ช่วยแก้ปัญหาในการวิจัย ซึ่งจะมีในภายหน้าได้

สำหรับเครื่องมือที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อนำใช้ในการวิจัยครั้งนี้นั้น ก็คือ **เครื่องคนสารเคมี**

(stirrer) และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง(power supply) ซึ่งรายละเอียดในการประดิษฐ์ของเครื่องมือทั้งสองชนิดนี้ มีดังต่อไปนี้

3.5.1. <u>การประดิษฐ์เครื่องคนสารเคมี(stirrer)</u>

ในการวิจัยครั้งนี้ เครื่องคนสารเคมีนับว่า มีความความสำคัญมากทีเดียว เพราะในการเตรียมสารละลายเกือบจะทุกครั้ง จำเป็นจะต้องคนให้เนื้อสารผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ แต่ราคาของเครื่องคนสารเคมีในปัจจุบันค่อนข้างสูง ประกอบกับการวิจัยในครั้งนี้ ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องคนสารเคมีที่มีประสิทธิภาพสูงมาก การประดิษฐ์ขึ้นมาใช้เองจึงเป็นหนทางการแก้ปัญหาที่ดีที่สุด

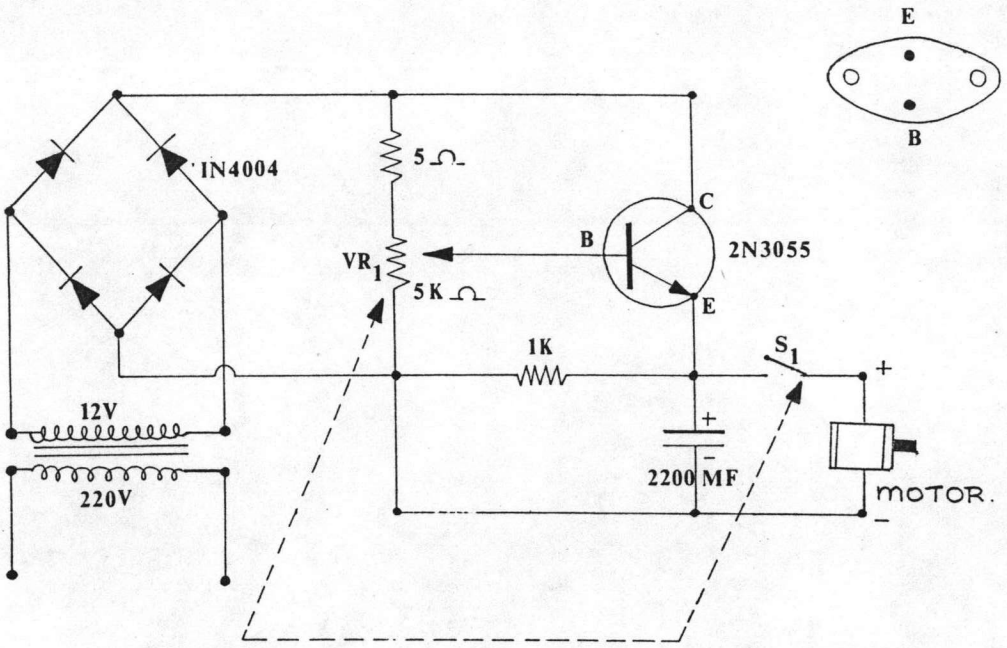
เครื่องคนสารเคมีที่ประดิษฐ์ขึ้นสำหรับใช้ในการวิจัยครั้งนี้นั้น ประกอบด้วยส่วนการทำงานสองส่วน คือ ส่วนควบคุมความเร็ว และส่วนกำเนิดความเร็วหรือมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งแต่ละส่วนมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้

ส่วนกำเนิดความเร็ว ใช้มอเตอร์ที่ใช้ขับสายพานของวิทยุคาสเซทเทป(casettes-tape)เป็นตัวกำเนิดความเร็ว โดยติดปลายของแกนมอเตอร์ไว้ด้วยแท่งแม่เหล็กขนาดเล็กขนาดกว้างประมาณ 2 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร และสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการประดิษฐ์ครั้งนี้นั้น เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็ก(micromotor) เบอร์ NE-A33L-238 ของ Nissei electri Co.LtD. ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 12 โวลท์

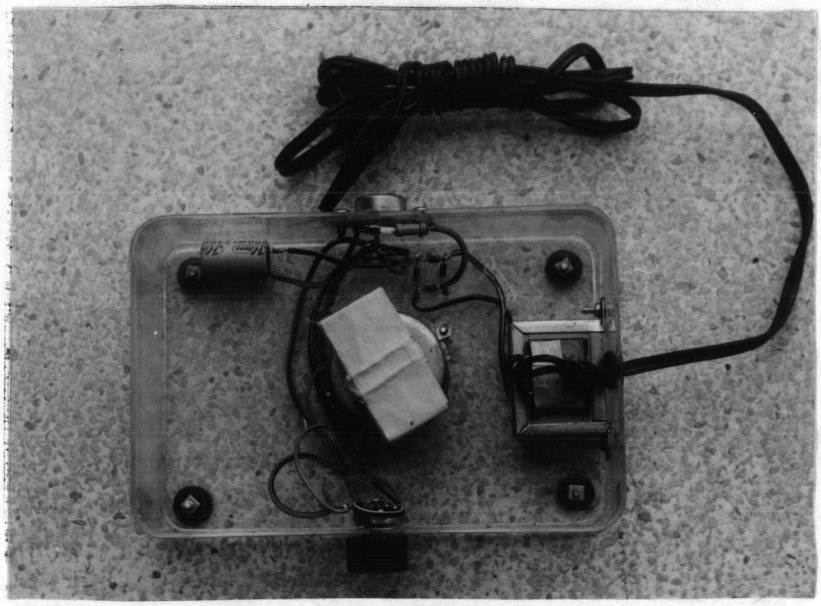
ส่วนควบคุมความเร็ว ประกอบด้วยวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับ 220 โวลท์ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลท์ ตามวงจรในรูปที่ 3.10 ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3055 เป็นตัวควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้า ซึ่งเมื่อพิจารณาวงจรแล้วจะเห็นว่า เมื่อปรับความต้านทาน VR_1 จะทำให้แรงดันไบเอสของทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้กระแสไฟฟ้าทางขา E ของทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลงมากน้อยไปด้วย กระแสที่ได้นี้จะจ่ายให้มอเตอร์ ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุนเร็วหรือช้า ตามที่เราต้องการได้ (ยืน ภู่วรวรรณ,2526)

เนื่องจากวงจรไม่ซับซ้อน จึงสามารถต่ออุปกรณ์ได้ง่ายและไม่จำเป็นต้องวางอุปกรณ์บนแผ่นวงจรพิมพ์ เมื่อต่ออุปกรณ์ตามวงจรเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะนำมาติดตั้งในกล่องพลาสติกใสขนาดกว้าง 12 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร โดยจัดตำแหน่งการวางอุปกรณ์ในกล่องพลาสติกใสตามรูปที่ 3.11

เมื่อประกอบอุปกรณ์ลงกล่องเรียบร้อยแล้ว ได้นำมาทดสอบการทำงาน โดยนำไปคนของเหลวหลายชนิดที่มีความหนืดมากน้อยแตกต่างกัน เช่น น้ำ น้ำหวาน เพื่อทดสอบกำลังในการคนและความเร็วรอบในการหมุน เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับเครื่องคนสารเคมี



รูปที่ 3.10 แสดงวงจรของเครื่องคนสารเคมี(stirrer)



รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งการวางอุปกรณ์ของเครื่องคนสารเคมีในกล่องพลาสติก

ที่จำหน่ายตามท้องตลาด พบว่าเครื่องคนสารเคมีที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้มีประสิทธิภาพทัดเทียมกับเครื่องคนสารเคมีที่จำหน่ายตามท้องตลาด จะด้อยกว่าก็คงจะเป็นกำลังในการคน ไม่สามารถบอกความเร็วรอบในการหมุน และไม่สามารถให้ความร้อนแก่สารเคมีในขณะคนได้ แต่คุณสมบัติเหล่านี้ก็ไม่มีความจำเป็นต่อการวิจัยในครั้งนี้แต่อย่างใด จึงไม่ได้สร้างเพิ่มเติมลงไป

จากการสังเกตการทำงานเมื่อนำมาใช้งานในขณะทำการวิจัย พบว่าตลอดเวลาที่ทำการวิจัยประมาณ 2 ปีครึ่ง ซึ่งใช้งานเกือบทุกวัน ๆ ละประมาณ 2 ถึง 3 ชั่วโมง ไม่เกิดปัญหาแต่อย่างไร นับว่ามีประสิทธิภาพและความทนทานมากพอสมควร

3.5.2. <u>การประดิษฐ์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง</u>

นอกจากเครื่องคนสารเคมีแล้ว ยังได้ประดิษฐ์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ทั้งแบบต่อเนื่องและเป็นขั้น ๆ โดยในกรณีปรับแรงดันแบบต่อเนื่องจะสามารถปรับได้ในช่วงระหว่าง 1.27 โวลท์ ถึง 22.8 โวลท์ ส่วนในกรณีปรับแรงดันแบบเป็นขั้น ๆ จะปรับได้ 4 ระดับ คือ 3,6,9 และ 12 โวลท์ ตามลำดับ ซึ่งครอบคลุมการใช้งานในการวิจัยครั้งนี้

ตามรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 เป็นวงจรของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้น(พงษ์ศักดิ์ มเหศักดิ์,2535) ซึ่งวงจรจะมี 2 ภาค คือ ภาควงจรหลัก และภาคแสดงผล ออกแบบมาให้จ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบต่อเนื่องได้ในช่วงระหว่าง 1.2 - 24 โวลท์ และจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 3 แอมแปร์ เมื่อพิจารณาตามวงจรของภาควงจรหลักจะเห็นว่า เมื่อปิดสวิตช์ S_1 จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า T_1 ซึ่งจะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับจาก 220 โวลท์ ไปเป็น 18 โวลท์ แล้วผ่านไดโอดบริดจ์เรกติไฟลเออร์ BD_1 ออกมาเป็นกระแสตรงที่ยังไม่เรียบ จากนั้นตัวเก็บประจุ C_1 จะกรองกระแสให้เรียบกว่าเดิมอีกครั้งหนึ่ง โดยมี LED_1 ติดสว่าง เพื่อแสดงให้รู้ว่ามีไฟฟ้าเข้าเครื่องแล้ว

จากนั้นจะผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในวงจรเรกูเลเตอร์ โดยมี IC_1 เป็น IC เรกูเลเตอร์เบอร์ LM317T และ Q_1 เป็นทรานซิสเตอร์กำลังเบอร์ 2N3055 แต่ก่อนที่กระแสไฟฟ้าจะผ่านเข้า IC_1 นั้น จะมี C_2 ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนทิ้งไป เมื่อเราปรับตัวต้านทาน VR_1 หรือหมุนสวิตช์ปิด S_3 ก็ตาม จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขา ADJ และขา OUT ของ IC_1 ซึ่งจะเป็นผลให้แรงดันตกคร่อมระหว่างขาเบสกับขาอีมิตเตอร์ของ Q_1 เปลี่ยนไป ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ต่อไปใช้งาน(OUT PUT) มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยมี C_3 กรองกระแสให้เรียบอีกครั้งหนึ่งก่อนที่จะนำออกไปใช้งาน

ในส่วนภาคแสดงผล จะประกอบด้วย LED 7 ส่วน และไดโอดเบอร์ 1N4148 ในกรณีที่เราปรับสวิตช์ S_2 ไปยังตำแหน่ง "ปรับเป็นขั้น ๆ " นั้น จะมีไฟฟ้าวิ่งเข้าไปเลี้ยง

ภาคแสดงผล และขณะที่เราหมุนสวิตช์ S_3 ไดรอดจะนำกระแสไบาให้ LED 7 ส่วน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของตัวเลขบน LED 7 ส่วนตัวนี้ แต่ในกรณีที่เราปรับ S_2 มาที่ตำแหน่ง "ปรับละเอียด" จะทำให้ LED 7 ส่วนดับ ส่วน LED_2 จะติดขึ้นมาแสดงผลแทน

การประกอบวงจรและการปรับแต่ง ต้องอาศัยความละเอียดและรอบคอบพอสมควร และต้องติดแผ่นระบายความร้อนที่ Q_1 ด้วย เพราะขณะใช้งาน ทรานซิสเตอร์ตัวนี้จะร้อนมาก โดยเฉพาะเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าออกมามาก ๆ อีกสิ่งหนึ่งที่ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษก็คือ ในขณะติดตั้งอุปกรณ์ลงกล่องโลหะ อย่าให้เกิดการลัดวงจรโดยเด็ดขาด เพราะอาจทำให้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3055 ร้อนมากจนไหม้ได้

ก่อนนำไปใช้งาน ได้ทดสอบความเที่ยงตรงในการจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกมาเมื่อยังไม่มีโหลดภายนอก สำหรับโวลท์มิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบครั้งนี้เป็นโวลท์แบบเชิงตัวเลข ซึ่งสามารถวัดแรงดันได้ละเอียดถึง 10 มิลลิโวลท์ ซึ่งได้ผลการตรวจสอบดังตารางที่ 3.3

แรงดันที่จ่าย ตามที่วงจรกำหนด(Volt)	แรงดันที่วัดได้จริง ๆ (Volt)
3	3.01 - 3.02
6	6.01 - 6.02
9	9.13 - 9.14
12	12.02 - 12.03

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าตามที่วงจรกำหนด กับที่วัดได้จริง ๆ

จากวงจรจะเห็นว่า ค่าที่วัดได้จริง ๆ นั้น คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่วงจรกำหนดมาประมาณ 1% ซึ่งนับว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เชื่อถือได้มากพอสมควร ส่วนกรณีการจ่ายแรงดันแบบต่อเนื่องนั้นพบว่า สามารถจ่ายแรงดันได้ต่ำสุด 1.27 โวลท์ และสูงสุด 22.8 โวลท์ ซึ่งนับว่าครอบคลุมช่วงการใช้งานของการวิจัยครั้งนี้

สำหรับความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้น ได้ทดสอบความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ (เมื่อกำหนดให้จ่ายแรงดันที่ 12 โวลท์) พร้อมทั้งวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมา กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วของตัวต้านทาน ซึ่ง

ได้ข้อมูลตามตารางที่ 3.4

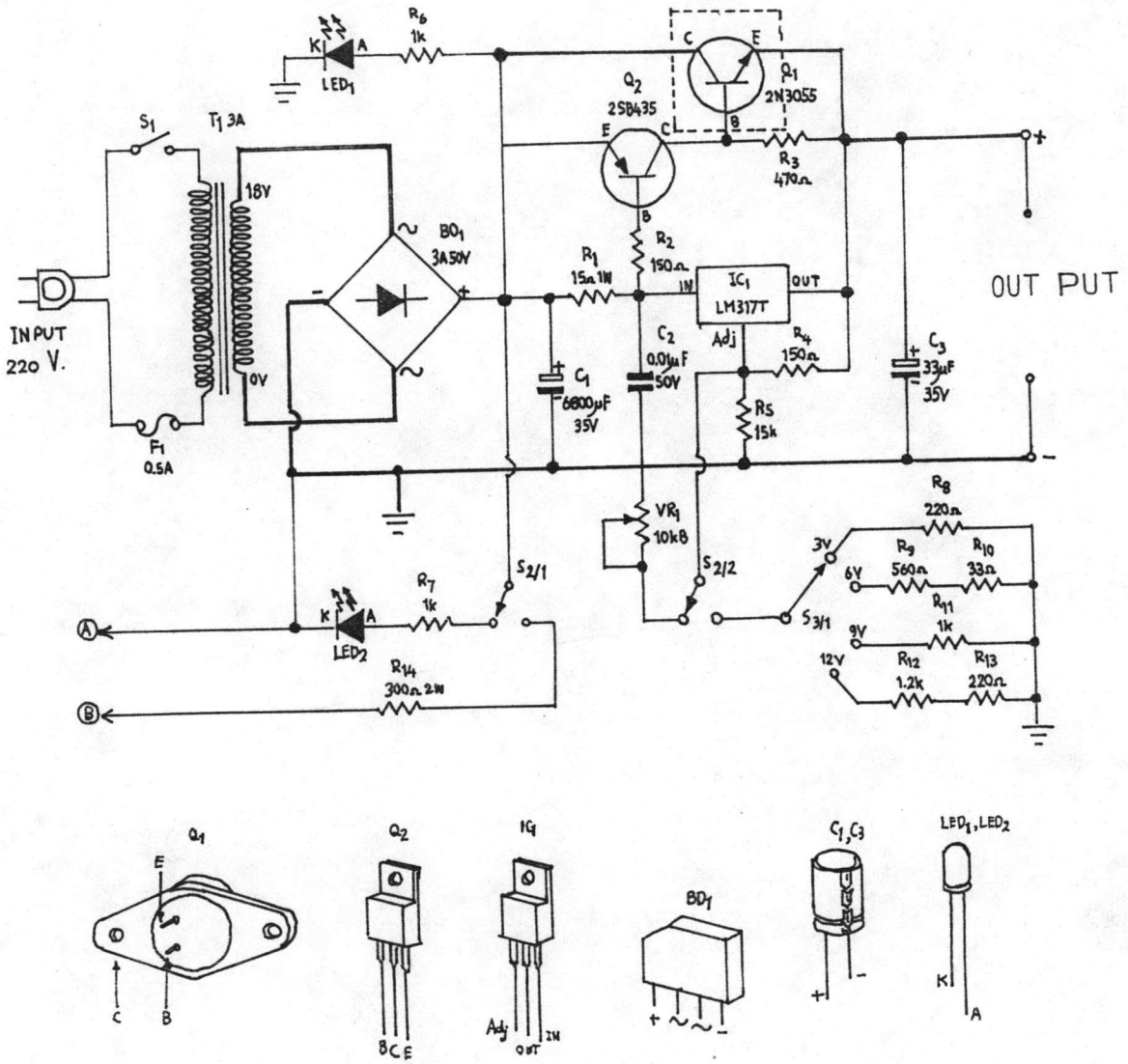
ความต้านทาน(Ohm)	ความต่างศักย์(Volt)	กระแสไฟฟ้า(Ampere)
3	9.84	3.29
4	10.20	2.55
5	10.47	2.06
10	11.02	1.09
20	11.54	0.56
30	11.68	0.38
50	11.58	0.22
60	11.64	0.18
70	11.70	0.15
80	11.73	0.13

ตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลการตรวจสอบความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ขณะที่ตั้งแรงดัน 12 โวลท์

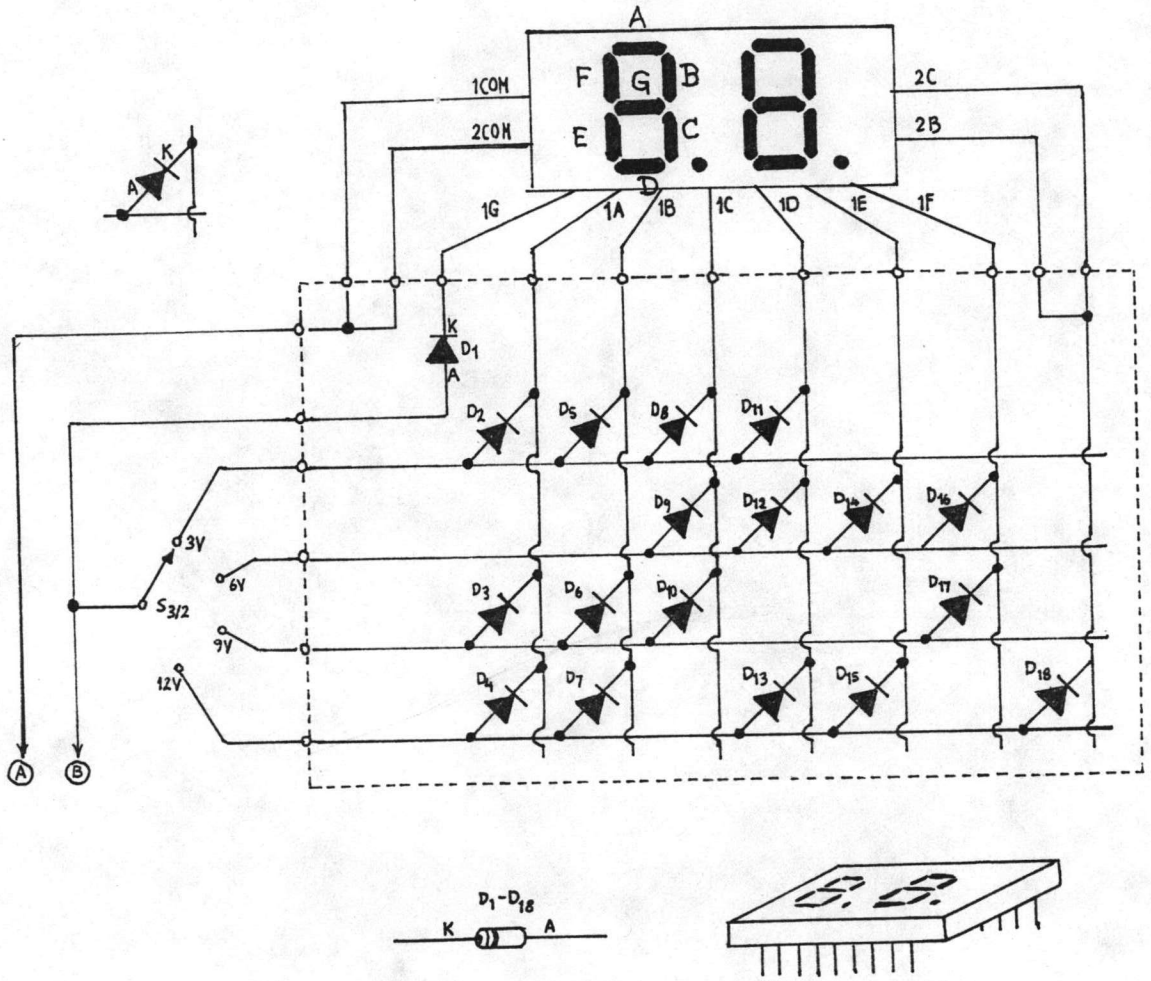
เมื่อนำข้อมูลตามตารางที่ 3.4 มาเขียนกราฟเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่าง ความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า และความต้านทาน จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 3.14 และเมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปนี้แล้วจะเห็นว่า ช่วงการจ่ายกระไฟฟ้าที่ค่อนข้างสม่ำเสมอคือช่วงที่จ่ายกระแสไฟฟ้าไม่เกิน 2 แอมแปร์ แต่ก็ยังใช้งานในช่วงที่จ่ายกระแสไฟฟ้าระหว่าง 2 - 3 แอมแปร์ได้ แต่กำลังในการจ่ายกระแสไฟ้าจะตกลงบ้าง เพราะทรานซิสเตอร์ 2N3055 จะทำงานหนัก ซึ่งสังเกตจากการที่ทรานซิสเตอร์ตัวนี้จะร้อนมาก ๆ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าในช่วงนี้

และจากการสังเกตการใช้งาน แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างขึ้นนี้ ในขณะทำการวิจัยการชุบฉาบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า พบว่า ไม่มีปัญหาในการใช้งานแต่ประการใด และมีส่วนอย่างมากในความสำเร็จของการวิจัยครั้งนี้

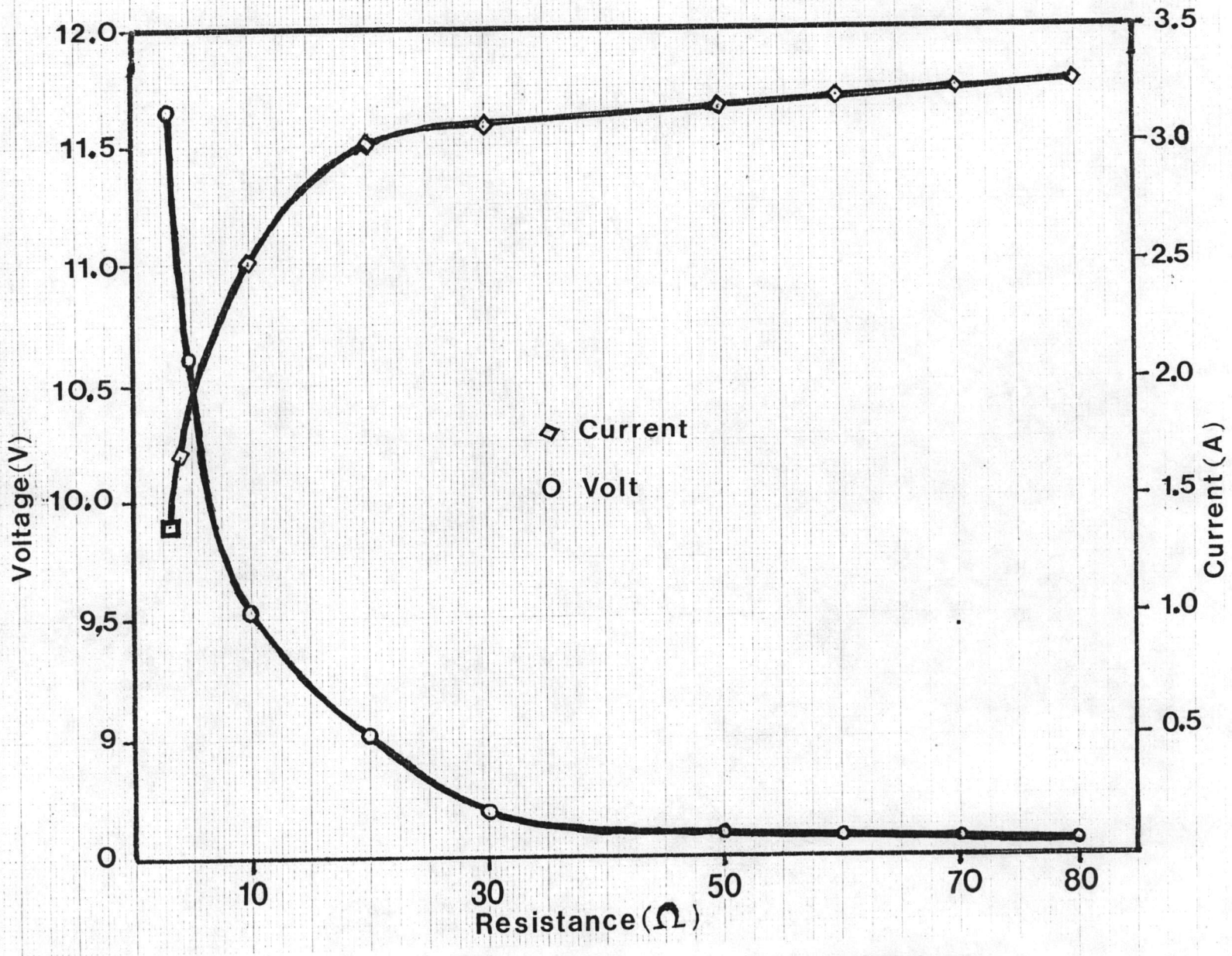
สำหรับในบทต่อไป จะกล่าวถึงรายละเอียดของการสังเคราะห์แผ่นฟิล์มพอลิพิร์โรล์ ซึ่งเป็นขั้นตอนการวิจัยที่สำคัญมาก ขั้นตอนหนึ่ง



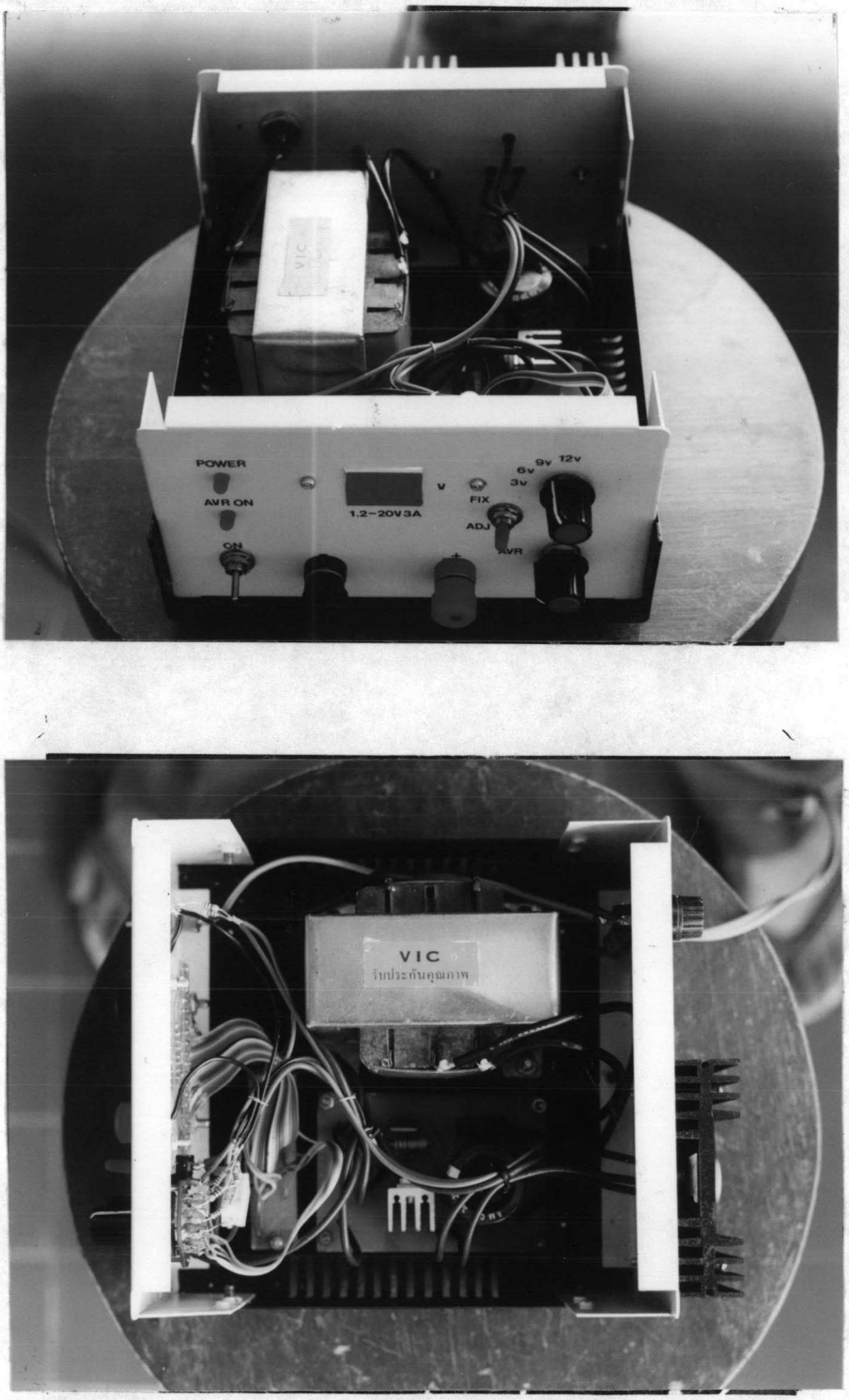
รูปที่ 3.12 แสดงวงจรภาคหลัก ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรภาคแสดงผล ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V,I และ R ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.15 แสดงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ที่สร้างเสร็จเรียบร้อย