

การประยุกต์โพลีเมอร์นำไฟฟ้าในการชุบโลหะบนผิวพลาสติก



นายฉลองชัย แก้วภูผา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิทยาศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2535

ISBN 974-582-008-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

019490.

117870494

Application of Conducting Polymer  
in Electroplating on Plastic Surface



Mr. Chalongchai Kaewpupa

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for the Degree of Master of Science  
Department of Physics  
Graduate School  
Chulalongkorn University

1992

ISBN 974-582-008-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์เทคโนโลยีเมอร์นาเพื่อใช้ในการระบุโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม

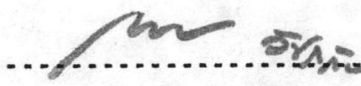
โดย นายฉลองชัย แก้วภูษา

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

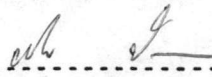
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เกษะภาณุ




บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาคำหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

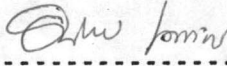
  
.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
( ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชรานิช )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร. วิษเย บัณฑิตกุล )

  
.....กรรมการ  
( ศาสตราจารย์ ดร. โฉวาท นิกิตัมภ์ประภาศ )

  
.....กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรฉัตร รัตนธรรมกันต์ )

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เกษะภาณุ )

ฉลองชัย แก้วภูผา : การประยุกต์โพลีเมอร์นำไฟฟ้าในการชุบโลหะบนผิวพลาสติก ...  
(Application of Conducting Polymer in Electroplating on Plastic Surface) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. อนันตสิน เตชะกำพุช, 180 หน้า. ISBN 974-582-008-3

ในการวิจัย ได้สังเคราะห์พอลิไพร์โรลฟิล์มโดยวิธี Chemical Vapour Deposition (CVD) โดยการเตรียมสารละลาย Poly (vinyl acetate) (PVAc) -  $FeCl_3$  ใน methanol ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และทำสารละลายนี้ลงบนแผ่นพลาสติกให้เป็นฟิล์มบาง จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 40-50 องศาเซลเซียส ต่อมาระเหยไอของไพร์โรลให้สัมผัสกับฟิล์มนี้ในสุญญากาศที่ 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา  $t_p = 6-24$  ชั่วโมง จะเกิดฟิล์มพอลิไพร์โรลฉาบบาง ๆ อยู่บนผิวพลาสติก ฟิล์มที่ได้นี้มีสีน้ำตาลเข้ม โปร่งแสงเล็กน้อย พบว่าเงื่อนไขการสังเคราะห์ที่ทำให้ได้ฟิล์มพอลิไพร์โรล มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวต่ำที่สุด (100-150 Ohm/square) ก็คือ การสังเคราะห์ที่ใช้อัตราส่วนโมลระหว่าง  $VAc:FeCl_3 = 3.1$  และ  $t_p = 17-24$  ชั่วโมง

ได้นำแผ่นฟิล์มนี้มาเคลือบผิวด้วยทองแดง โดยวิธีการชุบฉาบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) โดยใช้ฮีลิโกลด์เป็นส่วนผสมของ  $CuSO_4$  น้ำกลั่น และกรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) จำนวนเล็กน้อย พบว่าฟิล์มพอลิไพร์โรลจะชุบทองแดงได้ดีเมื่อค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวต่ำกว่า 200 Ohm/square ใช้เวลาชุบประมาณ 2 นาที สำหรับพื้นที่ผิวฟิล์ม 1 ตารางเซนติเมตร อนุภาคทองแดงที่เคลือบบนผิวฟิล์ม ณ บริเวณต่าง ๆ จะหนาไม่เท่ากัน และอนุภาคทองแดงจะฝังตัวลึกลงไปในพื้นที่ของฟิล์มพอลิไพร์โรล จึงหลุดลอกออกได้ง่ายมาก ซึ่งอาจจะนำวิธีการนี้ไปประยุกต์ในอุตสาหกรรมผลิตวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) ได้



ภาควิชา ..... **ฟิสิกส์** .....  
สาขาวิชา ..... **ฟิสิกส์** .....  
ปีการศึกษา ..... **2535** .....

ลายมือชื่อนิสิต Woot K. Hng .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Dr. J. J. J. .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## C125267 : MAJOR MAJOR PHYSICS

KEY WORD: CONDUCTING POLYMER/ ELECTROPLATING/ PLASTIC SURFACE

CHALONGCHAI KAEWPUPA : APPLICATION OF CONDUCTING POLYMER IN ELECTRO-  
PLATING ON PLASTIC SURFACE. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. ANUNTASIN  
TECHAGUMPUCH, Ph.D. 180 pp. ISBN 974-582-008-3

Conducting polypyrrole films were synthesized by chemical vapor deposition. First, poly(vinyl acetate)(PVAc) -  $\text{FeCl}_3$  solutions in methanol were prepared and coated on plastic films. After drying at 40 - 50°C, the films were exposed to pyrrole vapor in vacuum at 0°C for 6-24 hours. Polypyrrole films were then deposited on coated plastic surfaces. These films were dark green and slightly transparent. The optimum condition yielding polypyrrole films of low surface resistance (100-150 Ohm/square) is : molar ratio VAc :  $\text{FeCl}_3$  = 3:1 and polymerization time( $t_p$ ) : 17-24 hours.

Copper was coated on the resultant polypyrrole film by electrodeposition. The electrolyte contained  $\text{CuSO}_4$ , distilled water and small amount of  $\text{H}_2\text{SO}_4$  in suitable proportion. The electroplating of the polypyrrole film is possible when the surface resistance is lower than 200 Ohm/square. For the film of  $1 \text{ cm}^2$  the minimum plating time is about 2 minutes. It was found that thickness of copper was not the same at all areas and copper penetrated deeply into polypyrrole - poly (vinyl acetate) surface and cannot be removed from the film. This plating method has potential application in printed circuit board industries.



ภาควิชา..... ฟิสิกส์

สาขาวิชา..... ฟิสิกส์

ปีการศึกษา..... 2535

ลายมือชื่อนิสิต..... *Wolte Hase*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *Bru Jony*

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ  
รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เศษะภาหุช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และศาสตราจารย์  
ดร. โจวาท นิตินิตย์ประกาศ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ  
ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด ศิษย์จึงขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์มา ณ ที่นี้ด้วย

นอกจากนี้ยัง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ เฉลิม คุณแม่ อนงค์ คุณป้า สาย และ  
น้อง ๆ ทุกคน ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจเสมอมา พี่จ๊ะจ๋า พี่สุวรรณา ซึ่ง  
ช่วยเหลือทางด้านการจัดพิมพ์ คุณสากล มิ่งจันทร์ ซึ่งให้คำปรึกษาในด้านอุปกรณ์การวิจัย  
พี่วิโรจน์ บัววัฒนะ พี่ศักดา และพี่วรรณภา เข็มทอง หลานฟ้า คณะครูอาจารย์มหาวิทยาลัย  
โรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดจันทบุรี ทุกคน ที่ให้กำลังใจเสมอมา รวมทั้งบุคคลอื่น ๆ อีก  
หลายท่าน ที่มีส่วนในความสำเร็จครั้งนี้

# สารบัญ



	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	๗
กิตติกรรมประกาศ .....	๑
สารบัญตาราง .....	๑
สารบัญภาพ .....	๑
บทที่	
1 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า(Conducting Polymer).....	1
1.1 บทนำ .....	1
1.2 ประวัติการค้นพบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและการประยุกต์ .....	2
1.3 การสังเคราะห์พอลิไพร์โรล.....	8
1.3.1 การสังเคราะห์ทางเคมีในสารละลาย .....	8
1.3.2 การสังเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี .....	12
1.3.3 การสังเคราะห์แบบ CVD .....	14
1.4 โครงการวิจัยและจุดมุ่งหมายของการวิจัย .....	15
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....	16
1.6 ระยะเวลาที่ใช้ในการวิจัย .....	17
2 เคมีไฟฟ้าและการชุบผาผิวโลหะด้วยไฟฟ้า	
(Electrochemistry and Electroplating).....	18
2.1 กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส .....	18
2.2 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับอิเล็กโทรลิซิส .....	20
2.3 การพิสูจน์กฎของฟาราเดย์ .....	22
2.4 การนำไฟฟ้าในสารละลาย .....	25
2.5 การชุบผาผิวโลหะด้วยไฟฟ้า(Electroplating).....	28
ก. ประสิทธิภาพของน้ำยาชุบ .....	31
ข. ประสิทธิภาพของขั้วบวกและขั้วลบ .....	31

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
ค. ค่า pH ของน้ำยาชุบ .....	32
ง. ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบ .....	33
จ. ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะผิวของชิ้นงานและกำลัง เคลือบ ...	33
2.6 การชุบทองและขั้นตอนการชุบทอง .....	33
2.6.1 การทำความสะอาดผิวของชิ้นงาน .....	34
2.6.2 ชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง .....	36
2.6.3 ชุบเคลือบผิวด้วยนิกเกิล .....	37
2.6.4 ชุบทองคำ .....	38
2.6.5 สรุปลขั้นตอนการชุบทอง .....	39
2.7 การชุบพลาสติก .....	39
2.7.1 ขั้นตอนการชุบพลาสติก .....	40
ก. ทำความสะอาดผิวพลาสติก(Cleaning) .....	40
ข. Chemical Etching .....	41
ค. Sensitizing .....	41
ง. Activating .....	41
จ. ชุบทองแดงแบบนำเข้าไปไฟฟ้า หรือชุบนิกเกิล แบบนำเข้าไปไฟฟ้า .....	42
2.7.2 สรุปลขั้นตอนการชุบพลาสติก .....	53
2.7.3 สรุปลขั้นตอนการชุบพลาสติกแบบ Catalyst .....	45
3 การวัดความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์โรล .....	47
3.1 การวัดความต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าของสาร โดยวิธี ของแวนเคอพาว(Van der Pauw method), .....	48
3.2 การวัดความต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าของสาร โดยวิธี Four-Point Probe (V4PM) .....	50
3.3 ขั้นตอนการวัดและคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิเมอร์โรล	
3.3.1 วิธีของแวนเคอพาว .....	54



## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3.2 วิธี Four-Point Probe(V4PM) .....	58
3.4 การใช้ไมโครคอมพิวเตอร์คำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว ฟิล์มพอลิไพร์โรล .....	60
3.5 การประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้ในการวิจัย	
3.5.1 การประดิษฐ์เครื่องคนสารเคมี (stirrer).....	62
3.5.2 การประดิษฐ์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง .....	64
4 การสังเคราะห์แผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรล.....	71
4.1 การเตรียมแผ่นฟิล์มนำไฟฟ้าพอลิไพร์โรล .....	72
4.1.1 ขั้นตอนการละลายของ PVAc และ $FeCl_3$ ใน methanol ( $CH_3OH$ ) .....	72
4.1.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์(synthesis)แผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรล .....	74
4.1.3 ขั้นตอนการหยุดปฏิกิริยาและทำให้ผิวฟิล์มพอลิไพร์โรลแห้ง ..	77
4.1.4 สรุปขั้นตอนการสังเคราะห์แผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรล .....	78
4.2 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิไพร์โรล..	79
4.2.1 อุณหภูมิขณะเกิดกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ .....	79
4.2.2 ชนิดของ Polymeric matrix .....	79
4.2.3 ช่วงเวลาของกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ .....	80
4.2.4 อัตราส่วนระหว่าง PVAc และ $FeCl_3$ .....	80
4.2.5 ปัจจัยด้านอื่น ๆ .....	80
4.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิไพร์โรล .....	82
4.4 ผลการสังเคราะห์แผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรล .....	83
4.4.1 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว ฟิล์มพอลิไพร์โรล .....	83
4.4.2 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรล .....	89
4.4.3 อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิว ฟิล์มพอลิไพร์โรล .....	92

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4.5	สรุปผลการสังเคราะห์แผ่นฟิล์มพอลิทีราเรล ..... 93
5	การชุบฉาผิวโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนผิวฟิล์มพอลิทีราเรล..... 95
5.1	วิธีการชุบฉาผิวโลหะด้วยไฟฟ้าลงบนแผ่นฟิล์มพอลิทีราเรล ..... 95
5.2	การทดสอบเบื้องต้นก่อนทำการทดลอง ..... 97
5.3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ..... 98
5.4	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชุบ และผลการวิจัย ..... 100
5.4.1	ลักษณะของผิวฟิล์มพอลิทีราเรล ..... 100
5.4.2	ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิทีราเรล ..... 100
5.4.3	ระยะห่างระหว่างแผ่นฟิล์มพอลิทีราเรลกับตัวล่อ ..... 101
5.4.4	ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ชุบ ..... 102
5.4.5	ส่วนผสมของน้ำยาชุบ ..... 102
5.4.6	ลักษณะการเกาะของอนุภาคทองแดง บนผิวฟิล์มพอลิทีราเรล ..... 107
5.4.7	ลักษณะผิวการเคลื่อนของทองแดง ..... 109
5.5	เทคนิคการดำเนินการวิจัย ..... 111
5.5.1	การเลือกลักษณะของผิวฟิล์ม ..... 111
5.5.2	ไม่ควรใช้น้ำยาชุบนานมากเกินไป ..... 111
5.5.3	ผิวฟิล์มที่นำมาชุบ ไม่ควรบดสอยทิ้งในอากาศนานเกินไป.... 111
5.5.4	ความสะอาดของผิวฟิล์ม ..... 111
5.5.5	อย่าให้รอยต่อระหว่างผิวฟิล์มกับน้ำยาชุบ และรอยต่อระหว่างผิวฟิล์มกับแผ่นอลูมิเนียม ใกล้กันมากนัก ..... 111
5.6	การทดสอบคุณภาพการเคลือบ ..... 112
5.7	สรุปผลการวิจัย ..... 113
5.8	ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในครั้งต่อไป ..... 114
5.9	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ จากการวิจัยครั้งนี้ ..... 116

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
เอกสารอ้างอิง .....	119
ภาคผนวก ก .....	123
ภาคผนวก ข .....	126
ภาคผนวก ค .....	134
ภาคผนวก ง .....	150
ภาคผนวก จ .....	164
ภาคผนวก ฉ .....	167
ประวัติผู้เขียน .....	170

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่สำคัญและการประยุกต์.....	6
ตารางที่ 1.2 แสดงอัตราส่วนของอะตอมชนิดต่าง ๆ ในพอลิไพร์โรลซึ่งเกิดจาก ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน .....	10
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของไอออนบางชนิดในสารละลาย .....	28
ตารางที่ 3.1 แสดงลักษณะค่า V และ I ที่จะวัดได้จากแผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรล โดยวิธีเวนเคอพาว .....	56
ตารางที่ 3.2 แสดงลักษณะค่า V และ I ที่จะวัดได้จากแผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรล โดยวิธี Four-Point Probe .....	59
ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าตามที่วงจรถูกหนดกับที่วัดได้จริง ๆ .....	65
ตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลการตรวจสอบความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้า ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ขณะที่ตั้งแรงดัน 12 โวลต์.....	66
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิไพร์โรล ณ บริเวณต่าง ๆ ...	81
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิไพร์โรลทั้งสี่แผ่น..	81
ตารางที่ 4.3 แสดงช่วงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิไพร์โรล เมื่อใช้สารละลายที่มีอัตราส่วนระหว่างPVAc กับ FeCl <sub>3</sub> แตกต่างกัน .....	84
ตารางที่ 5.1 แสดงการแบ่งกลุ่มแผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรล .....	99
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสม และลักษณะการเคลือบผิวของ ทองแดงบนผิวฟิล์มพอลิไพร์โรล .....	104
ตารางที่ จ.1 สรุปคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของ Poly(vinyl acetate) (PVAc)166	



## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงวิธีสังเคราะห์พอลิไพร์โรล ด้วยวิธีทางเคมีในสารละลาย.....	11
รูปที่ 1.2 แสดงการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลทางไฟฟ้าเคมี .....	13
รูปที่ 1.3 แสดงโครงสร้างที่เป็นไปได้ของพอลิไพร์โรล .....	13
รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ .....	19
รูปที่ 2.2 แสดงโมเลกุลมีโซ .....	25
รูปที่ 2.3 แสดงการจับกันระหว่างโมเลกุลมีโซ .....	26
รูปที่ 2.4 แสดงการล้อมรอบของโมเลกุลของตัวทำละลายต่อไอออนของตัวถูกละลาย ..	26
รูปที่ 2.5 แสดงการดูดซับผิวโลหะด้วยไฟฟ้า .....	29
รูปที่ 2.6 แสดงการดูดซับผิวทองแดงบนสังกะสี .....	30
รูปที่ 2.7 แสดงการล้างชิ้นงานด้วยไฟฟ้า .....	35
รูปที่ 3.1 แสดงการวัดความต้านทานไฟฟ้า โดยวิธีแวนเคอเพาว์.....	48
รูปที่ 3.2 แสดงฐานรองแผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรล ในการวัดความต้านทานไฟฟ้า แบบแวนเคอเพาว์ .....	49
รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายของฐานรองแผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรลที่สร้างได้จริง ๗ .....	50
รูปที่ 3.4 แสดงการวัดความต้านทานไฟฟ้า โดยวิธี Four-Point Probe (V4PM) ..	51
รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องมือวัดความต้านทานไฟฟ้า ตามแบบ Four-Point Probe ที่สร้างเสร็จเรียบร้อย.....	52
รูปที่ 3.6 แปลนการสร้าง เครื่องมือวัดความต้านทานไฟฟ้าตามแบบ Four-Point Probe(V4PM) .....	53
รูปที่ 3.7 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิไพร์โรลด้วยวิธี แวนเคอเพาว์	55
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายแสดงการปฏิบัติการวัด ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์ม พอลิไพร์โรล โดยวิธีแวนเคอเพาว์ .....	55
รูปที่ 3.9 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิไพร์โรล โดยวิธี Four-Point Probe (V4PM) .....	59
รูปที่ 3.10 แสดงวงจรของ เครื่องคนสารเคมี.....	63
รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งการวางอุปกรณ์ของ เครื่องคนสาร เคมีในกล่อง .....	63
รูปที่ 3.12 แสดงวงจรภาคหลัก ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง .....	67

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.13 แสดงวงจรภาคแสดงผล ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง .....	68
รูปที่ 3.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V,I และ R ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง .	69
รูปที่ 3.15 แสดงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ที่สร้างเสร็จเรียบร้อย .....	70
รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งแผ่น PET พลาสติกบนแผ่นกระจก .....	74
รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งการวางขวดพิริโรล แผ่นฟิล์ม และน้ำใน desiccator ...	75
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายแสดงแผ่นฟิล์มพอลิพิริโรล เมื่อนำออกจาก desiccator .....	76
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิริโรล ณ อัตราส่วนต่อโมลต่าง ๆ กัน ของ PVAc:FeCl <sub>3</sub> .....	84
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิริโรล ในแต่ละช่วงเวลาการเกิดพอลิเมอร์ .....	85
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิริโรล เมื่อมีความชื้น และน้ำมีความชื้น ในขณะเกิดกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ .....	86
รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มพอลิพิริโรล ที่สังเคราะห์จากพิริโรลที่มีอายุการ ใช้งานต่างกัน .....	87
รูปที่ 4.8(ก) แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มพอลิพิริโรล ที่ใช้อัตราส่วนโมลระหว่างมอนอเมอร์ PVAc กับโมล FeCl <sub>3</sub> เป็น 1:1,2:1,4:1 และ 5:1 ตามลำดับ เมื่อใช้ช่วงเวลาในการเกิดพอลิเมอร์ 20 ชั่วโมง .....	90
รูปที่ 4.8(ข) แสดงลักษณะแผ่นฟิล์มพอลิพิริโรล ที่ใช้อัตราส่วนโมลระหว่างมอนอเมอร์ PVAc กับโมล FeCl <sub>3</sub> เป็น 3:1 และช่วงเวลาในการเกิด พอลิเมอร์ 20 ชั่วโมง .....	91
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิพิริโรล ....	92
รูปที่ 5.1 แสดงการประดิษฐ์ตัวสอบเพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้ .....	96
รูปที่ 5.2 แสดงการต่ออุปกรณ์ในการชูปrobe ผิวโลหะด้วยไฟฟ้า ลงบนผิวฟิล์มพอลิพิริโรล .....	97
รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะผิวฟิล์มพอลิพิริโรล ที่สามารถนำมาชูปrobe ของแคงได้คือ .....	101
รูปที่ 5.4 แสดงการแบ่งฟิล์มพอลิพิริโรลออกเป็นช่วง ๆ เพื่อสังเกตลักษณะ การเกาะของอนุภาคของแคง .....	107
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงพื้นที่การเคลือบของแคง บนแผ่นฟิล์มพอลิพิริโรล ณ เวลาต่าง ๆ	108

**สารบัญภาพ (ต่อ)**

	หน้า
รูปที่ 5.6 แสดงส่วนหนาของแผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูก เคลือบด้วยทองแดง.....	109
รูปที่ 5.7 แสดงการปฏิบัติการชุบผาผิวพอลิไพร์โรล ด้วยทองแดง.....	110
รูปที่ 5.8 แสดงแผ่นฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ชุบทองแดง เรียบร้อยแล้ว .....	110
รูปที่ 5.9 แสดงระยะห่างระหว่างรอยต่อที่เหมาะสมต่อการชุบ.....	112
รูปที่ ข.1 แสดง Flow chart ของภาษา BASIC สำหรับคำนวณค่าความ ต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิไพร์โรล ตามแบบ วิธีแวนเคอพาว .....	128
โปรแกรมที่ 1 โปรแกรมคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าที่ผิวฟิล์ม พอลิไพร์โรล ตามแบบวิธีแวนเคอพาว โดยภาษา BASIC .....	129
รูปที่ ข.2 แสดง Flow chart ของภาษา BASIC สำหรับคำนวณค่าความ ต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิไพร์โรล ตามแบบ วิธี Four-Point PROBE .....	131
โปรแกรมที่ 2 โปรแกรมคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าที่ผิว ฟิล์มพอลิไพร์โรล ตามแบบวิธี FOUR-POINT PROBE โดยภาษา BASIC .....	132
รูปที่ ค.1 แสดง Flow chart ของภาษา C สำหรับคำนวณหาค่าความต้านทาน ไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิไพร์โรล ตามแบบวิธีแวนเคอพาว.....	136
โปรแกรมที่ 3 โปรแกรมคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าที่ผิวฟิล์ม พอลิไพร์โรลตามแบบวิธีแวนเคอพาว โดยใช้ภาษา C .....	137
รูปที่ ค.2 แสดง Flow chart ของภาษา C สำหรับคำนวณค่าความ ต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าที่ผิวฟิล์มพอลิไพร์โรล ตามแบบวิธี FOUR-POINT PROBE .....	145
โปรแกรมที่ 4 โปรแกรมคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าและสภาพนำไฟฟ้าที่ผิวฟิล์ม พอลิไพร์โรล ตามแบบวิธี FOUR-POINT PROBE โดยภาษา C .....	146
รูปที่ ง.1 แสดงแบบฟอร์มการรับข้อมูล ในการคำนวณตามแบบ Van der pauw....	152
รูปที่ ง.2 แสดงการป้อนข้อมูลลงแบบฟอร์ม ในการคำนวณแบบ Van der pauw ...	152
รูปที่ ง.3 แสดงผลการคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อคำนวณแบบ Van der pauw .....	153
รูปที่ ง.4 แสดงผลการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้า เมื่อคำนวณแบบ Van der pauw... ..	153

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ง.5 แสดงแบบฟอร์มการรับข้อมูล ในการคำนวณตามแบบ Four-point probe .....	159
รูปที่ ง.6 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อคำนวณตามแบบ Four-point probe	160
รูปที่ ง.7 แสดงผลการคำนวณค่าสภาพหน้าไฟฟ้า เมื่อคำนวณ แบบ Four-point probe .....	160
โปรแกรมที่ 5 มาตรฐานของ LOTUS ใช้คำนวณค่าความต้านทานและสภาพหน้าไฟฟ้า ที่ผิวฟิล์มพอลิซิลิโคน ตามแบบวิธี Van der pauw และรายละเอียด การออกแบบ Worksheet.....	154
โปรแกรมที่ 6 มาตรฐานของ LOTUS ใช้คำนวณค่าความต้านทานและสภาพหน้าไฟฟ้า ที่ผิวฟิล์มพอลิซิลิโคน ตามแบบวิธี four point probe และรายละเอียดการออกแบบ Worksheet .....	161