

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อิทธิพลของพีเอชและชนิดของอิเล็กทรอนิกส์ที่มีต่อการเตรียม
พอลิไพโรลอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการตรึงกลูโคสออกซิเดส

นายธีระโชติ ศรีธีระวิโรจน์
นางสาวหทัยทิพย์ จันทระประภาเลิศ
นายอภิวัฒน์ รัตนชาติชัย

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2540

ปพ.

ศ ๖๖๓๑

๒๕๔๐

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 32032

วัน, เดือน, ปี - 8 11.พ. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**The Effect of pH and Electrolytes on Preparation of Immobilized Glucose
Oxidase Polypyrrole Electrodes**

Mr. Theerachote Sritheerawirod
Miss. Hathaithip Chantharapraphalerd
Mr. Apiwat Rattanachatchai

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

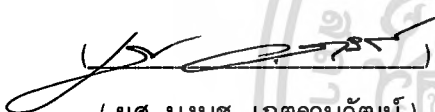
1997

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

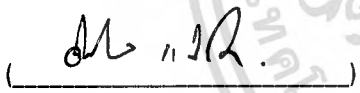
หัวข้อโครงการพิเศษ อิทธิพลของพีเอชและชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อการเตรียม
พอลิไพโรลอิเล็กโทรดที่มีการตรึงกลูโคสออกซิเดส

โดย นายธีระโชติ ศรีธีระวิโรจน์
นางสาวหทัยทิพย์ จันทระภาเลิศ
นายอภิวัฒน์ รัตนชาติชัย
ภาควิชา เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. อรวรรณ ชัยลภากุล
ผศ. นงนุช เกตรานูวัฒน์
อ. คณิตา ตั้งคณานุรักษ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

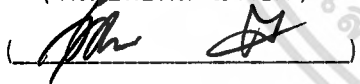

(ผศ. นงนุช เกตรานูวัฒน์)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

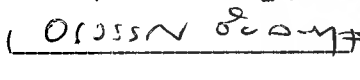

(ดร. อิทธิพล แจ่มชัด)

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ


ประธานกรรมการ


(อ. สุจินต์ ตันติพิสิฐกุล)

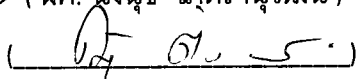
กรรมการ


(ดร. อรวรรณ ชัยลภากุล)

กรรมการ


(ผศ. นงนุช เกตรานูวัฒน์)

กรรมการ


(อ. คณิตา ตั้งคณานุรักษ์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ อิทธิพลของพีเอชและชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อการเตรียม
พอลิไพโรลอิเล็กโทรดที่มีการตรึงกลูโคสออกซิเดส

นักศึกษา	นายธีระโชติ	ศรัทธาวิโรจน์
	นางสาวหทัยทิพย์	จันทร์ประภาเลิศ
	นายอภิวัฒน์	รัตนชาติชัย
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. อรวรรณ	ชัยลภากุล
	ผศ. นงนุช	เกตุรานูวัฒน์
	อ. คณิตา	ตั้งคณานุรักษ์
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2540	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของพีเอชและชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อการเตรียมพอลิไพโรลอิเล็กโทรดที่มีการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส โดยการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้คือ โพลแทสเซียมคลอไรด์ โพลแทสเซียมซัลเฟต และโพลแทสเซียมฟอสเฟต นอกจากนี้ในการทดลองได้ทำการเปลี่ยนพีเอชในการเตรียมพอลิไพโรล โดยการใช้บัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่มีพีเอชต่างกันอยู่ 3 ค่า (พีเอช 5,7 และ 10) สภาวะที่ทำการทดลองประกอบด้วย มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 โมลาร์ เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์ ทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ เทียบกับศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานคาโลเมลล์อิ่มตัว (SCE) ให้กับแพลทินัมฟอยล์ นอกจากนี้เราได้ทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของพอลิไพโรลที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีพบว่าพอลิไพโรลที่สังเคราะห์ได้เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีพีเอชต่าง ๆ กันจะให้โครงสร้างที่คล้ายกัน จากภาพถ่ายอิเล็กตรอนสแกนิงไมโครกราฟพบว่าสัณฐานวิทยาของพอลิไพโรลที่ได้มีลักษณะการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นเมื่อใช้โพลแทสเซียมคลอไรด์และโพลแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการใช้โพลแทสเซียมคลอไรด์ที่มีพีเอช 5 เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง และยังให้สัญญาณกระแสสูงที่สุดในการหาปริมาณกลูโคส

**Special Project Title The Effects of pH and Electrolytes on Preparation of
Immobilized Glucose Oxidase Polypyrrole Electrodes**

Name	Mr. Theerachote	Sritheerawirod
	Miss Hathaitip	Chantharaphalerd
	Mr. Apiwat	Rattanachatchai
Special Project Advisor	Dr. Orawan	Chailaphakul
	Mrs. Khanita	Tangkhananurak
	Asst.Prof. Nongnut	Paetranuwat
Department	Chemistry	
Academic Year	1997	

Abstract

The effects of pH and electrolytes on the preparation of immobilized glucose oxidase (GOD) polypyrrole electrodes were studied. Electrodes were fabricated by electrochemical polymerization. Electrolytes used were KCl, K_2SO_4 , and K_3PO_4 . The pH of the solution was also varied (5,7, and 10) by using phosphate buffers. The conditions for preparation of the polypyrrole glucose oxidase films were 0.3 M pyrrole, GOD 30 unit/ml in 0.1 M electrolyte. The voltage was applied to platinum foil at a potential of 0.8 volt versus a Saturated Calomel Electrode (SCE). In addition, these films were examined by using FTIR. The structures of polypyrroles from different electrolytes with different pH were similar. The morphology of the deposited polypyrroles (determined by SEM) was dense, when KCl and K_2SO_4 were used. In conclusion, It was found that using KCl as the electrolyte at pH 5 provided high conductivity films and the highest response current for determination of glucose.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จลงได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์จากบุคคลและองค์กรต่างๆ

ขอขอบคุณโครงการศิษย์ก้นกุฏิ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้สนับสนุนทางด้านเงินทุนวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.อรรธรณ ชัยลภากุล อ.คณิดา ตั้งคณานุรักษ์ ผศ.นงนุช เกตุรานุวัฒน์ ดร.ตะวัน สุขน้อย และอาจารย์นพพร สงศ์อิม ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือ ในการดำเนินการโครงการพิเศษนี้มาตลอด ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และ อาจารย์สุจินต์ ดันดีพิสิษฐกุล คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาแก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้รายงานฉบับนี้ถูกต้องยิ่งขึ้น คณาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาช่วยเหลือ และ เจ้าหน้าที่ธุรการทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านเอกสารในระหว่างการดำเนินงานโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ผศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับดำเนินการโครงการพิเศษในครั้งนี้

นอกเหนือจากบุคคลและหน่วยงานที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีบุคคลอีกมากมายที่อยู่เบื้องหลังคอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษามาโดยตลอด ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทางคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นาย ธีระชาติ

ศรีธีระวิโรจน์

นางสาว หทัยทิพย์

จันทร์ประภาเลิศ

นาย อภิวัฒน์

รัตนชาติชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ต
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	6
1.3 ขอบเขตโครงการพิเศษ	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.5 แผนการดำเนินงาน	7
1.6 ตัวแปรที่ศึกษาในโครงการพิเศษ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า	9
2.2 ประโยชน์ของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าแบบไม่บริสุทธิ์	11
2.3 Band Theory	13
2.4 พิล์มพอลิไพโรลอสถฐานที่สังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	29
2.5 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า	31
2.6 สารทางชีวภาพที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์พอลิเมอร์โรเซชัน	32
2.7 กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์พอลิเมอร์โรเซชันของมอนอเมอร์ไพโรลที่มี GOD อยู่ด้วย	35
2.8 การวัดค่าการนำไฟฟ้า	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	38
3.2 ขั้นตอนการวิจัย	39
3.3 การตรวจสอบคุณลักษณะของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	42
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	
4.1 การวิเคราะห์และตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	43
4.2 ผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และ pH ที่มีต่อการเตรียมฟิล์ม	72
4.3 สัณฐานวิทยาของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	81
4.4 ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	115
4.5 การวัดปริมาณกลูโคสโดยใช้อิเล็กโทรดที่มีฟิล์มพอลิไพโรลที่ทำการตรึงกลูโคสออกซิเดส ซึ่งสังเคราะห์ในสภาวะต่างๆ ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	117
บทที่ 5 สรุป วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุป วิจารณ์ผลการทดลอง	124
5.2 ข้อเสนอแนะ	126
ภาคผนวก สเปกตรัมของมอนอเมอร์ไพโรล	127
การคำนวณหาปริมาณมอนอเมอร์ไพโรลที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์ม	128
การคำนวณหาปริมาณเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ใช้สังเคราะห์ฟิล์ม	128
การคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในการเตรียมบัฟเฟอร์	128
การคำนวณหาปริมาณตรรกกลูโคสที่ต้องฉีดในการวัดปริมาณกลูโคส	129
เอกสารอ้างอิง	131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่สำคัญ	10
รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดแถบพลังงาน(Band)ของออร์บิทัล	14
รูปที่ 2.3 แสดง s-Band , p-Band และ Band gap	14
รูปที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบช่องว่างพลังงานของวัสดุประเภทต่างๆ	16
รูปที่ 2.5 แสดงการโด๊ปซิลิกอน	17
รูปที่ 2.6 แสดงพลังงานที่เกี่ยวข้องในการไอออไนเซชันของโมเลกุล	18
รูปที่ 2.7 แสดงระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ของโมเลกุลอินทรีย์	19
รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างแถบของโซ่พอลิเมอร์	20
รูปที่ 2.9 แสดงเรดิคัลแคตไอออน (โพลารอน)	21
รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างแถบระหว่างโพลารอนและไบโพลารอน	21
รูปที่ 2.11 แสดงเส้นโค้งพลังงานรวมสำหรับทรานพอลิอะเซทีลีน	23
รูปที่ 2.12 แสดงเรโซแนนซ์ฟอร์มของพอลิไพโรลและทรานพอลิอะเซทีลีน	24
รูปที่ 2.13 แสดงการเกิดโซลิตอนบนพอลิอะเซทีลีน	24
รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างรูปทรงอะโรมาติกและรูปควินอยด์	25
รูปที่ 2.15 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลิไพโรล	26
รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของพอลิไพโรล	27
รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างแถบของพอลิไพโรล	29
รูปที่ 2.18 แสดงการโด๊ปไพโรลด้วยเปอร์คลอเรต	30
รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างของพอลิไพโรล	30
รูปที่ 2.20 แสดงพอลิไพโรลที่ถูกโด๊ปและไม่ถูกโด๊ป	31
รูปที่ 2.21 แสดงถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดบริเวณผิวของอิเล็กโทรด	35
รูปที่ 2.22 แสดงกลไกการเกิดพอลิเมอร์โรเซชันของไพโรล	36
รูปที่ 2.23 แสดงการวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยวิธี Four-point probe method	37
รูปที่ 4.1 แสดงฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ pH 5	45

รูปที่ 4.2	แสดงฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ pH 7	47
รูปที่ 4.3	แสดงฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ pH 10	49
รูปที่ 4.4	แสดงฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตที่ pH 5	51
รูปที่ 4.5	แสดงฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตที่ pH 7	53
รูปที่ 4.6	แสดงฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตที่ pH 10	55
รูปที่ 4.7	แสดงฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ pH 5	57
รูปที่ 4.8	แสดงฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ pH 7	59
รูปที่ 4.9	แสดงฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ pH 5 และกลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	61
รูปที่ 4.10	แสดงฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ pH 7 และกลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	63

รูปที่ 4.11 แสดงฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ pH 10 และกลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	65
รูปที่ 4.12 แสดงฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทาง เคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตที่ pH 5 และกลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	67
รูปที่ 4.13 แสดงฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตที่ pH 7 และกลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	69
รูปที่ 4.14 แสดงฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตที่ pH 10 และกลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	71
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5	73
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7	73
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10	74
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5	74
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7	75

รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชัน ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียม ซัลเฟต และสารละลายบิฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10	75
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชัน ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียม ฟอสเฟต และสารละลายบิฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5	76
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชัน ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียม ฟอสเฟต และสารละลายบิฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7	76
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชัน ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียม ฟอสเฟต และสารละลายบิฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10	77
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยวิธี ทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และสารละลายบิฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5	78
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยวิธี ทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และสารละลายบิฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7	78
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยวิธี ทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และสารละลายบิฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10	79
รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยวิธี ทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และสารละลายบิฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5	79
รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยวิธี ทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และสารละลายบิฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7	80

รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยโพลี 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10	80
รูปที่ 4.30 แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิโพลีโพรพิลีนบนแผ่นแทลทินัม ฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ที่ pH 5	82
รูปที่ 4.31 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิโพลีโพรพิลีนบนแผ่นแทลทินัม ฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ที่ pH 5	83
รูปที่ 4.32 แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิโพลีโพรพิลีนบนแผ่นแทลทินัม ฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ที่ pH 7	84
รูปที่ 4.33 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิโพลีโพรพิลีนบนแผ่นแทลทินัม ฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ที่ pH 7	85
รูปที่ 4.34 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิโพลีโพรพิลีนบนแผ่นแทลทินัม ฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ที่ pH 7	86
รูปที่ 4.35 แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิโพลีโพรพิลีนบนแผ่นแทลทินัม ฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ที่ pH 10	87
รูปที่ 4.36 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิโพลีโพรพิลีนบนแผ่นแทลทินัม ฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ที่ pH 10	88
รูปที่ 4.37 แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิโพลีโพรพิลีนบนแผ่นแทลทินัม ฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต ที่ pH 5	89

รูปที่ 4.38 แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม ซัลเฟต ที่ pH 7	90
รูปที่ 4.39 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม ซัลเฟต ที่ pH 7	91
รูปที่ 4.40 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม ซัลเฟต ที่ pH 7	92
รูปที่ 4.41 แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม ซัลเฟต ที่ pH 10	93
รูปที่ 4.42 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม ซัลเฟต ที่ pH 10	94
รูปที่ 4.43 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม ซัลเฟต ที่ pH 10	95
รูปที่ 4.44 แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม ฟอสเฟต ที่ pH 5	96
รูปที่ 4.45 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม ฟอสเฟต ที่ pH 5	97
รูปที่ 4.46 แสดง Scanning electron Micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม ฟอสเฟต ที่ pH 7	98

รูปที่ 4.47 แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม คลอไรด์ ที่ pH 5 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	99
รูปที่ 4.48 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม คลอไรด์ ที่ pH 5 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	100
รูปที่ 4.49 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม คลอไรด์ ที่ pH 5 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	101
รูปที่ 4.50 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม คลอไรด์ ที่ pH 5 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	102
รูปที่ 4.51 แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม คลอไรด์ ที่ pH 7 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	103
รูปที่ 4.52 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม คลอไรด์ ที่ pH 7 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	104
รูปที่ 4.53 แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม คลอไรด์ ที่ pH 10 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	105
รูปที่ 4.54 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม คลอไรด์ ที่ pH 10 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	106
รูปที่ 4.55 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโพแทสเซียม คลอไรด์ ที่ pH 10 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	107

รูปที่ 4.56 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายไพแทลเซียม คลอไรด์ ที่ pH 10 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	108
รูปที่ 4.57 แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายไพแทลเซียม ซัลเฟต ที่ pH 5 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	109
รูปที่ 4.58 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายไพแทลเซียม ซัลเฟต ที่ pH 5 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	110
รูปที่ 4.59 แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายไพแทลเซียม ซัลเฟต ที่ pH 7 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	111
รูปที่ 4.60 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายไพแทลเซียม ซัลเฟต ที่ pH 7 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	112
รูปที่ 4.61 แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายไพแทลเซียม ซัลเฟต ที่ pH 10 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	113
รูปที่ 4.62 (ต่อ) แสดง Scanning electron Micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแทลทินัม พอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายไพแทลเซียม ซัลเฟต ที่ pH 10 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml	114
รูปที่ 4.63 แสดงการหาปริมาณกลูโคสโดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลายที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายไพแทลเซียม คลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5	118
รูปที่ 4.64 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกลูโคสกับกระแส ที่วัดได้โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 4.63	118

รูปที่ 4.65 แสดงการหาปริมาณกลูโคสโดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลายที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียม คลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7	119
รูปที่ 4.66 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกลูโคสกับกระแส ที่วัดได้โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 4.65	119
รูปที่ 4.67 แสดงการหาปริมาณกลูโคสโดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลายที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียม คลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10	120
รูปที่ 4.68 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกลูโคสกับกระแส ที่วัดได้โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 4.67	120
รูปที่ 4.69 แสดงการหาปริมาณกลูโคสโดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลายที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียม ซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5	121
รูปที่ 4.70 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกลูโคสกับกระแส ที่วัดได้โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 4.69	121
รูปที่ 4.71 แสดงการหาปริมาณกลูโคสโดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลายที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียม ซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7	122
รูปที่ 4.72 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกลูโคสกับกระแส ที่วัดได้โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 4.71	122
รูปที่ 4.73 แสดงการหาปริมาณกลูโคสโดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลายที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียม ซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10	123
รูปที่ 4.74 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกลูโคสกับกระแส ที่วัดได้โดยใช้ข้อมูลจากรูปที่ 4.73	123

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5	44
ตารางที่ 4.2 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7	46
ตารางที่ 4.3 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10	48
ตารางที่ 4.4 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5	50
ตารางที่ 4.5 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7	52
ตารางที่ 4.6 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10	54

ตารางที่ 4.7	แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟต และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5	56
ตารางที่ 4.8	แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟต และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7	58
ตารางที่ 4.9	แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5	60
ตารางที่ 4.10	แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7	62
ตารางที่ 4.11	แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10	64
ตารางที่ 4.12	แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5	66
ตารางที่ 4.13	แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่ สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิไพโรล โดยสังเคราะห์ด้วย วิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10	70
ตารางที่ 4.15 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของพอลิไพโรลที่ยังไม่ได้ทำการตรึงเอนไซม์ซึ่ง สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ pH ต่างๆ	115
ตารางที่ 4.16 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของพอลิไพโรลที่ทำการตรึงเอนไซม์ซึ่งสังเคราะห์ ได้ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ pH ต่างๆ	116



บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทางไฟฟ้าชนิดใหม่ที่มีความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งานทางด้านเทคโนโลยี เช่น แบตเตอรี่ เซนเซอร์ การป้องกันการกัดกร่อน และอื่นๆ พอลิเมอร์เหล่านี้ได้ให้การผสมผสานกันของคุณสมบัติที่น่าสนใจ ระหว่างคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติทางแสง เพราะว่ามีความเป็นไปได้ในการที่จะนำเอาพอลิเมอร์เหล่านี้มาใช้ในสถานการณ์ต่างๆ ในขณะที่วัสดุอนินทรีย์ไม่เหมาะสม^[1,2]

พอลิไพโรลเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีการศึกษากันอย่างมากที่สุดเพราะว่ามีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น ออกซิเจน อุณหภูมิ และความชื้น พอลิไพโรลที่อยู่ในรูปที่เป็นตัวนำ (ถูกออกซิไดส์) จะมีประจุบวกและสามารถยึดเกาะกับโมเลกุลที่มีประจุลบได้ โมเลกุลเหล่านี้สามารถหลุดออกได้เมื่อพอลิเมอร์ถูกรีดิวซ์ให้กลับไปอยู่ในสถานะที่ไม่นำไฟฟ้า (สภาพที่เป็นกลาง) ทำให้มีความสนใจที่จะใช้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้

คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิไพโรลได้มีการให้เหตุผลว่าเป็นคุณลักษณะเรโซแนนซ์ของพอลิเมอร์ที่ประกอบกันเป็นสายโซ่ซึ่งมีการเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง 2 และ 5 ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิไพโรลเป็น 10^2 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (S/cm) ซึ่งพบว่าสูงพอสมควรเมื่อเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของโลหะซึ่งมีค่า 10^4 - 10^6 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (S/cm) และค่าการนำไฟฟ้าของฉนวนซึ่งมีค่า 10^{-14} ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (S/cm)^[3]

ในระยะสิบปีที่ผ่านมาเองได้มีการศึกษากันมากขึ้นในเรื่องของการนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน (Electropolymerization) ของมอนอเมอร์ที่เป็นชนิดเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic)^[4] เช่น พอลิไพโรล (Polypyrrole) นำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ในการตรึงเอนไซม์ ในการทำเอนไซม์อิเล็กโทรด (Enzyme electrode) เอนไซม์สามารถถูกตรึงได้ที่ผิว โดยทั้งการติดกับชั้นพอลิไพโรลตรงหมู่ฟังก์ชันด้วยพันธะโควาเลนต์ หรือทำได้โดยการดักจับโดยผ่านกระบวนการอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิไพโรลจากสารละลายที่มีเอนไซม์อยู่^[5] วิธีการเตรียมอิเล็กโทรดที่มีการปรับปรุงโดยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของสารประกอบอินทรีย์เป็นวิธีที่ง่าย^[6] และชั้นพอลิไพโรล/กลูโคสออกซิเดส สามารถเกาะบนผิวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แพลทินัมได้โดยใช้เทคนิคนี้^[5] โดยฟิล์มพอลิไพโรลที่ตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแบบเอกพันธ์ มีความคงทนต่อสภาวะทางเคมี และเกาะติดกับผิวของอิเล็กโทรดอย่างแข็งแรง ฟิล์มเหล่านี้สามารถเตรียมได้ในกระบวนการขั้นตอนเดียวจากทั้งสารละลายที่มีน้ำ หรือเตรียมจากตัวทำละลายอินทรีย์^[6]

กระบวนการตรึงเอนไซม์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าอันเกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical oxidation) ของสารละลายที่ประกอบไปด้วยเอนไซม์ ซึ่งจะเกิดเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าบนพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด^[7] โดยในโครงการวิจัยนี้ได้ทำอิเล็กโทรดพอลิเมอร์โรเซชันของมอนอเมอร์ไพโรล ในสารละลายที่มี pH และ อิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ เพื่อทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการที่จะให้องค์ประกอบทางชีวภาพสามารถรวมเข้ากันได้กับฟิล์มพอลิเมอร์ได้

ในจำพวกมอนอเมอร์อินทรีย์ที่สามารถเกิดอิเล็กโทรพอลิเมอร์โรเซชันนั้น ได้มีการใช้มอนอเมอร์ไพโรลมากเนื่องจากเหตุผลสองข้อ คือ

1. การออกซิเดชันของมอนอเมอร์ไพโรลเกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำ และสามารถทำในตัวทำละลายที่ใช้น้ำโดยไม่มีการเกิดออกซิเจน
2. พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นนี้นำไฟฟ้าได้ โดยไม่เกิด Passive film ในระหว่างที่มีการเตรียมฟิล์ม และนอกจากนี้ ยังสามารถควบคุมความหนาฟิล์มได้โดยการควบคุมสภาวะในการทำอิเล็กโทรไลซิส^[6]

การประยุกต์ใช้งาน

ในหลายปีที่ผ่านมา การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ที่มีพื้นฐานในเรื่องเครื่องมือตรวจวัดขนาดเล็กสำหรับการใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางการแพทย์ ทางด้านสิ่งแวดล้อม และการควบคุมกระบวนการทางชีวได้กลายเป็นเรื่องวิจัยที่น่าสนใจมาก ในจำพวกไบโอเซนเซอร์ (Biosensor) ที่ถูกออกแบบมาเพื่อจุดประสงค์ทางด้านนี้ล้วนแล้วแต่เป็นอิเล็กโทรดที่มีการตรึงเอนไซม์ทั้งสิ้น^[8]

ไบโอเซนเซอร์เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีการเอาวัสดุทางชีวภาพร่วมกับเครื่องส่งสัญญาณเพื่อผลิตสัญญาณทางไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของตัวที่ต้องการวิเคราะห์ ประโยชน์ของไบโอเซนเซอร์อยู่ที่การใช้ความสามารถที่เฉพาะเจาะจงของสารชีวภาพในการที่จะตรวจวัดสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ที่มีความเข้มข้นต่ำมากในสารผสม^[1]

การตรวจวัดสารโดยใช้เอนไซม์ไบโอเซนเซอร์นั้น เนื่องจากว่าเอนไซม์ที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถติดต่อกับขั้วอิเล็กโทรดธรรมดา ศูนย์กลางที่ไวของเอนไซม์เหล่านี้ถูกป้องกันโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นโปรตีนที่หนา ซึ่งทำให้ไม่สามารถที่จะถ่ายเทอิเล็กตรอนไปยังผิวอิเล็กโทรดได้โดยตรง ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบโดยทางอ้อมตัวอย่างเช่น การวัด การลดลงของออกซิเจน หรือการวัดการเพิ่มขึ้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์^[9]

ในการประดิษฐ์เซนเซอร์ สำหรับความเฉพาะเจาะจงต่อสารชีวโมเลกุลที่ต้องการ สามารถทำได้โดยการตรึงเอนไซม์เข้ากับพอลิเมอร์ในปริมาณที่พอเหมาะส่วนใหญ่แล้วเอนไซม์ถูกตรึงใน Gel โกล์อิเล็กโทรดโดยเยื่อเลือกผ่าน (Semipermeable membrane) การตอบสนองของของชีวอิเล็กโทรดโดยมากเกิดจากอิเล็กโทรไลซิสของผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง การทำงานของอิเล็กโทรดนั้นจำเป็นต้องมีการแพร่ของตัวที่ต้องการวิเคราะห์จากสารละลายผ่านเยื่อเลือกผ่าน และผ่านตัวกลางที่ถูกตรึงไว้ไปยังบริเวณที่มีเอนไซม์ สารที่ต้องการวิเคราะห์จะเกิดปฏิกิริยากับเอนไซม์ และมีการตรวจสอบของผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทันทีโดยชีวอิเล็กโทรด ก่อนที่ผลิตภัณฑ์จะแพร่ลงสู่สารละลาย^[8]

จากที่กล่าวไป สามารถอธิบายได้อย่างง่าย ๆ คือ เอนไซม์จะถูกตรึงในพอลิเมอร์ โดยการดักจับทางกายภาพ (Physics) ดังนั้นพอลิเมอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวตรึงเอนไซม์ และเป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณทางชีวเคมีให้กลายเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า การตอบสนองของเซนเซอร์เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากปฏิกิริยาของเอนไซม์^[11]

ประโยชน์ของชีวที่มีการตรึงเอนไซม์นั้นประกอบด้วย ความง่ายในการตรวจหาตัวที่ต้องการวิเคราะห์ในสารผสมที่ซับซ้อน (Complex mixture) มีการใช้ปริมาณตัวอย่างน้อย และ การได้เอนไซม์กลับคืนมาอย่างสะดวกในการที่จะทำซ้ำ อย่างไรก็ตาม ประโยชน์ของชีวที่มีการตรึงเอนไซม์นั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น วิธีการตรึง สถานะทางเคมีและกายภาพที่ใช้ (pH อุณหภูมิ ความสกปรก) ความหนา และความคงทนของเยื่อที่ใช้ดักจับเอนไซม์ ความไวและความคงทนของเอนไซม์เมื่อถูกตรึงแล้ว ความคงทนของเครื่องตรวจวัด เวลาในการตอบสนอง และสุดท้ายคือ สถานะที่ใช้ในการเก็บรักษา^[8]

จากข้อคิดข้างต้น จึงได้มีการนำเอนไซม์อิเล็กโทรดไปใช้ประโยชน์ในการหาปริมาณกลูโคส โดยใช้พอลิไพโรลที่มีการตรึงกลูโคสออกซิเดส

การนำเอนไซม์อิเล็กโทรดไปใช้ประโยชน์ได้มีการศึกษาไว้ด้วยดังแสดงในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าความสนใจในเรื่องนี้มีระดับความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในตารางได้แสดงตัวอย่างความหลากหลายของการนำไปใช้งานที่สำคัญมากมาย^[7]

ตารางที่ 1 แสดงการตรึงเอนไซม์ลงในฟิล์มที่ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน⁷¹

เอนไซม์ออกซิเดสรวมกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า	สภาวะที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม	คุณลักษณะประโยชน์ของฟิล์ม
เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส พอลิไพโรล	-มอนอเมอร์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ -โพแทสเซียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์ -ไม่ใช้สารละลายบัฟเฟอร์ -เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสเข้มข้น 500 หน่วยต่อซม. ³ -ใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตตที่ศักย์ไฟฟ้า 0.61 โวลต์ เทียบกับขั้วเงิน/เงินคลอไรด์ -ฟิล์มหนา 5 ไมครอนบนขั้วแพลทินัมหรือขั้ว Glassy carbon	-ใช้ไอโอดีที่มีโมลิบดีนัม(VI)เป็นตัวเร่งในการหาปริมาณ H_2O_2 โดยทางอ้อมด้วยการทำรีดักชันไอโอดีที่เกิดขึ้นที่ศักย์ไฟฟ้า 0.04 โวลต์ เทียบกับขั้วเงิน/เงินคลอไรด์
เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส พอลิไพโรล	-มอนอเมอร์เข้มข้น 0.2 โมลาร์ -เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสเข้มข้น 180 หน่วยต่อซม. ³ -ไฮโดรควิโนนซัลโฟเนตเข้มข้น 0.1-10 มิลลิโมลาร์ -ใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตตที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์ เทียบกับขั้วคาโธดิกเป็นเวลา 7 นาที	-ทำการวัดปริมาณกลูโคสที่ศักย์ไฟฟ้า 0.35 โวลต์ เทียบกับขั้วคาโธดิก -ใช้ไฮโดรควิโนนซัลโฟเนตที่ถูกตรึงในฟิล์มทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทอิเล็กตรอน
เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส พอลิแอนิลีน	-มอนอเมอร์เข้มข้น 0.2 โมลาร์ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.2 โมลาร์ -ใช้ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ เทียบกับขั้วคาโธดิก	-ทำการวัดปริมาณกลูโคสที่ศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์ เทียบกับขั้วคาโธดิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอนไซม์ออกซิเดสรวมกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า	สภาวะที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม	คุณลักษณะประโยชน์ของฟิล์ม
เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส พอลิแอนิลีน	<ul style="list-style-type: none"> -มอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ -บัฟเฟอร์ฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (pH 7.2) -เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 20 มก. ต่อ ซม.³ -ใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตตที่ศักย์ไฟฟ้า 1.24 โวลต์เทียบกับขั้วเงิน/เงินคลอไรด์เป็นเวลา 30 วินาทีที่ขั้วแพลทินัม 	<ul style="list-style-type: none"> -วัดกระแสรีดักชันของการลดลงของออกซิเจนที่ศักย์ไฟฟ้า -0.54 โวลต์เทียบกับขั้วเงิน/เงินคลอไรด์
เอนไซม์ดีไฮโดรจีเนสรวมกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้า	สภาวะที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม	คุณลักษณะประโยชน์ของฟิล์ม
เอนไซม์กลูโคสดีไฮโดรจีเนส พอลิไพโรล	<ul style="list-style-type: none"> -มอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ -เอนไซม์กลูโคสดีไฮโดรจีเนสเข้มข้น 10 หน่วยต่อ ซม.³ -NAD⁺เข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ -ใช้เทคนิคควาโนสแตตในการเตรียมฟิล์มโดยใช้ NQS เป็นตัวกลาง 	<ul style="list-style-type: none"> -ทำการหาปริมาณกลูโคส โดยเทคนิคแอมเปโรเมตริกด้วยการใช้ NQS เป็นตัวกลาง ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.2 โวลต์เทียบกับขั้วคาโบลอิมิตัว -สัญญาณที่ได้ไม่ขึ้นกับออกซิเจน และเป็นมีความเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้นกลูโคสมากกว่า 20 มิลลิโมลาร์
เอนไซม์แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส พอลิไพโรล	<ul style="list-style-type: none"> -มอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ -NADH 25 มิลลิโมลาร์ -เมลโดลาบลู (Meldola blue) เข้มข้น 100 มิลลิโมลาร์ -เอนไซม์ 15 มิลลิกรัมต่อ ซม.³ -ทำในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ -ใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตตที่ศักย์ไฟฟ้า 0.95 โวลต์ ประจุ 1 คูลอมป์ ต่อ ซม.³ เกาะบนขั้วอิเล็กโทรด 	<ul style="list-style-type: none"> -วัดเอทานอลที่ศักย์ไฟฟ้า 0.25 โวลต์ เทียบกับขั้วเงิน/เงินคลอไรด์ -ใช้เมลโดลาบลูเป็นตัวกลางในการเกิดออกซิเดชันของ NADH ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้เอนไซม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอนไซม์ออกซิเดสรวมกับพอลิเมอร์ไม่นำไฟฟ้า	สภาวะที่ใช้ในการเตรียมฟิล์ม	คุณลักษณะประโยชน์ของฟิล์ม
เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส พอลิพีนอล	-มอนอเมอร์เข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ -บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 -เอนไซม์ 5-10 มก.ต่อซม. ³ -ใช้เทคนิคโพเทนชิโอสแตตที่ศักย์ไฟฟ้า 0.65 โวลต์เทียบกับขั้วคาโบลเมอิมตัวโดยใช้ขั้วแพลทินัม	-ตรวจวัด H ₂ O ₂ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.8 โวลต์เมื่อเทียบกับขั้วคาโบลเมอิมตัว -มีความเสถียรที่ดี -การตอบสนองจะคงที่ที่ความเข้มข้นกลูโคสเป็น 0.1 โมลาร์

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาตัวแปรต่างๆเช่น pH และ ชนิดอิเล็กโทรไลต์ ที่มีอิทธิพลต่อการเตรียมฟิล์มพอลิไพโรลที่มีการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส
2. ศึกษาหุ้ฟังก์ชันของฟิล์มที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิคทางสเปกโทรสโกปี
3. ศึกษาพื้นฐานวิทยาของฟิล์มที่เตรียมได้จากสารละลายชนิดต่างๆโดยใช้เทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโกปี
4. ศึกษาค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมได้จากสารละลายชนิดต่างๆโดยใช้เทคนิค Four-point probes technique
5. ศึกษาการวัดปริมาณกลูโคส โดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสภาวะที่ศึกษาในข้อ 1

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

โครงการพิเศษนี้ เป็นการเตรียมพอลิไพโรลฟิล์มที่มีการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส โดยวิธีอิเล็กโทรเคมีคอลพอลิเมอร์ไรเซชัน (Electrochemical polymerization) ของมอนอเมอร์ไพโรลในสารละลายที่มีเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส ในโครงการพิเศษนี้จะทำการศึกษาผลของ pH และชนิดอิเล็กโทรไลต์ที่มีอิทธิพลต่อการเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิไพโรล แล้วทำการศึกษาลักษณะของแผ่นฟิล์มพอลิไพโรลที่เตรียมได้โดยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี และเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโกปี นอกจากนี้จะนำอิเล็กโทรดที่เตรียมได้ไปใช้ประโยชน์ในการหาปริมาณกลูโคส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มพอลิไพโรล
2. สามารถเตรียมพอลิไพโรลฟิล์มที่มีเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสตรึงอยู่โดยใช้วิธี
Electrochemical polymerization
3. นำมาใช้ประโยชน์ในการหาปริมาณกลูโคสได้โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่มีฟิล์มพอลิไพโรลที่ตรึงด้วยกลูโคสออกซิเดส

1.5 แผนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ทำการเตรียมแผ่นฟิล์มพอลิไพโรลบนอิเล็กโทรดพร้อมทั้งทำการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสในสภาวะ pH ต่างๆ และ ในอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ
3. นำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มาตรวจสอบด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปี เทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโกปี และทำการวัดค่าการนำไฟฟ้า
4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
5. ทำรายงานการวิจัย

1.6 ตัวแปรที่ศึกษาในโครงการพิเศษ

ในโครงการนี้ได้ศึกษาตัวแปร 2 ตัว ที่มีผลต่อการเตรียมฟิล์มพอลิไพโรล ซึ่งตัวแปร 2 ตัวนี้ได้แก่ pH และ อิเล็กโทรไลต์

pH

ในโครงการพิเศษนี้จะทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิไพโรลในสภาวะต่างๆกันเพื่อเปรียบเทียบและหาสภาวะที่เหมาะสมได้ โดยทำการเตรียมฟิล์มในสภาวะ ที่เป็น กรด กลาง และ เบส ที่ pH ต่างๆกัน 3 ค่าด้วยกันคือ

1. pH 5
2. pH 7
3. pH 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กโทรไลต์

จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษากาตรึงเอนไซม์ลงในฟิล์มพอลิไพโรล โดยใช้ โพลแทสเซียมคลอไรด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ทั้งสิ้น เช่น M. Umana and J. Waller^[7] ได้ทำการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสลงในฟิล์มพอลิไพโรลโดยใช้สภาวะดังนี้

- มอนอเมอร์ไพโรลที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์
- โพลแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์
- กลูโคสออกซิเดส 500 หน่วยต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- ทำการเตรียมฟิล์มโดยวิธี Potentiostatic ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.61 โวลต์เมื่อเทียบกับขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์
- ฟิล์มหนา 5 ไมโครเมตรเกาะอยู่บนขั้วแพลทินัมหรือขั้ว glassy carbon

S-I. Yabuki, H. Shinohara and M. Aizawa^[7] ได้ทำการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสลงในฟิล์มพอลิไพโรลโดยใช้สภาวะดังนี้

- มอนอเมอร์ไพโรลที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์
- โพลแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์
- กลูโคสออกซิเดส 30000 หน่วยต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- ทำการเตรียมฟิล์มโดยวิธี Potentiostatic ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.66 โวลต์เมื่อเทียบกับขั้วซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ โดยใช้ประจุ 850 มิลลิคูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร
- ทำการเตรียมฟิล์มลงบนขั้วแพลทินัม

ดังนั้นจึงน่าสนใจในการที่จะเตรียมฟิล์มพอลิไพโรลโดยใช้อิเล็กโทรไลต์ชนิดอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบผลของแอนไอออนที่มีผลต่อการเตรียมฟิล์มพอลิไพโรล โดยคาดว่าผลของแอนไอออนจะส่งผลต่อลักษณะของฟิล์มที่แตกต่างกัน

ดังนั้นในโครงการพิเศษนี้ นอกจากจะทำการศึกษาค่าของ pH แล้ว ยังทำการศึกษาค่าของชนิดอิเล็กโทรไลต์ด้วย โดยได้เลือกชนิดอิเล็กโทรไลต์ที่มีแคตไอออนเหมือนกัน แต่มีแอนไอออนต่างกัน 3 ชนิด ดังนี้

1. โพลแทสเซียมคลอไรด์
2. โพลแทสเซียมซัลเฟต
3. โพลแทสเซียมฟอสเฟต

บทที่ 2

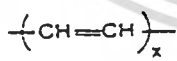
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า (Conducting Polymers)^[10]

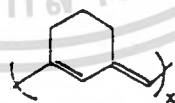
ในการเลือกระบบพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้อย่างมีศักยภาพนั้น สิ่งสำคัญคือควรเลือกพอลิเมอร์ที่สามารถถูกออกซิไดส์และสามารถเกิดเป็นแคตไอออน (Cation) มากกว่าที่จะเกิดลักษณะทางเคมีอย่างอื่น จากการพิจารณาแล้วพบว่าพอลิเมอร์ชนิดที่มีพันธะไม่อิ่มตัวแบบพันธะพาย (π -bond) ซึ่งมีลักษณะเป็นคอนจูเกต (Conjugate) มีความเหมาะสมในการที่จะนำมาใช้เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เพราะว่าพายอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระจะช่วยให้ได้พอลิเมอร์ิกแคตไอออน (Polymeric cation) โดยที่ไม่มีการทำลายพันธะซิกมา (σ -bond) ซึ่งเป็นพันธะปฐมภูมิที่ทำให้เกิดการยึดจับระหว่างพอลิเมอร์ด้วยกัน ในทางตรงกันข้าม การออกซิเดชันพอลิเมอร์ที่อิ่มตัวจะทำให้มีการเคลื่อนที่ของซิกมาอิเล็กตรอน (σ -electron) และทำให้พันธะเกิดการแตกหักและเกิดการสลายตัวทางเคมีได้ เนื่องจากมีการใช้พอลิเมอร์ที่มีพันธะชนิดพาย (π -bond) ทำให้เป็นสิ่งสำคัญในการที่จะเลือกตัวออกซิไดส์ที่อ่อนๆ ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างอื่นได้ เช่น การเติมตรงตำแหน่งพันธะคาร์บอน-คาร์บอน ซึ่งมักจะเกิดในพอลิอะเซทิลีน (CH_x) เมื่อมีการใช้โบรมีนเป็นตัวออกซิไดส์



(a)



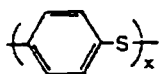
(b)



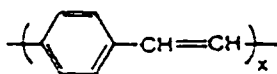
(c)



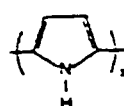
(d)



(e)



(f)

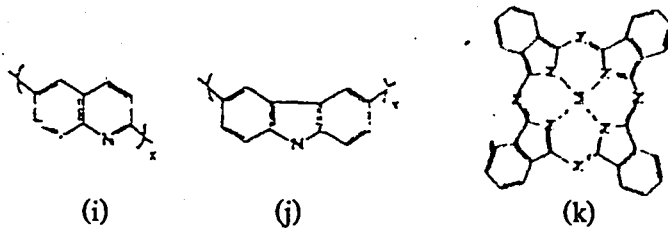


(g)



(h)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



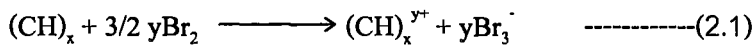
รูปที่ 2.1 แสดงพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่สำคัญ^[10]

- พอลิซัลเฟอร์ไนไตรด์ (Poly(sulfur nitride)) หรือ พอลิโรอาซิล (Poly(thiazyl))
- พอลิอะเซทิลีน (Polyacetylene)
- พอลิ 1,6-เฮปทาไดเอิน (Poly(1,6-heptadiene))
- พอลิพารา-ฟีนิลีน (Poly(p-phenylene))
- พอลิพารา-ฟีนิลีนซัลไฟด์ (Poly(p-phenylene sulfide))
- พอลิพารา-ฟีนิลีนไวนิลีน (Poly(p-phenylene vinylene))
- พอลิไพโรล (Polypyrrole)
- พอลิไทโอฟิน (Polythiophene)
- พอลิควินอลีน (Polyquinoline)
- พอลิคาบาไซล (Polycarbazole)
- เมทัลโลฟทาโลไซยานิน (Metallo-phthalocyanine)

โดยทั่วไปธรรมชาติของสารพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นคอนจูเกตจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนหรือในบางครั้งเป็นสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนไม่สามารถมีการเคลื่อนที่ผ่านสายโซ่พอลิเมอร์ตลอดวัสดุได้ เพราะขาดตัวพาประจุและเกิดจากความแตกต่างของความยาวพันธะตลอดทั้งสายโซ่พอลิเมอร์ คุณลักษณะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเหนี่ยวนำทำให้เกิดตัวพาประจุ (Charge carrier) ขึ้น การกระทำดังกล่าวเรียกว่า การโด๊ป (Doping)^[11]

เมื่อทำการโด๊ปพอลิเมอร์โดยการออกซิเดชันด้วยการใช้ตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) เช่น Br_2 จะทำให้พอลิเมอร์กลายเป็นพอลิเมอร์กแคตไอออน (Polymeric cation) ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าโดยการเคลื่อนที่ของประจุบวก เราเรียกการโด๊ปชนิดนี้ว่า p-type (สมการที่ 2.1)

เมื่อทำการโด๊ปพอลิเมอร์โดยการรีดักชันด้วยการใช้ตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) เช่น Li จะทำให้พอลิเมอร์กลายเป็นพอลิเมอร์แอนไอออน (Polymeric anion) ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าโดยการเคลื่อนที่ของประจุลบ เราเรียกการโด๊ปชนิดนี้ว่า n-type (สมการที่ 2.2)



ในบางกรณีการออกซิไดส์หรือการรีดิวซ์พอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการนำพอลิเมอร์ที่เป็นกลางมาทำให้อยู่ภายใต้ศักย์ไฟฟ้าออกซิไดส์หรือศักย์ไฟฟ้ารีดิวซ์ด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าในเซลล์เคมีไฟฟ้า ประจุบนพอลิเมอร์ถูกทำให้เป็นกลางโดยเคาเตอร์ไอออน (Counter ion) จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากรูปที่ 2.1 แสดงถึงพอลิเมอร์หลักๆซึ่งนำมาทำหรือสามารถนำมาทำเป็นวัสดุนำไฟฟ้าได้ กลุ่มย่อยที่สำคัญของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าแบบไม่บริสุทธิ์ที่ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ๆเหล่านี้สามารถเตรียมได้โดยการออกซิเดชันมอนอเมอร์ด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า พอลิเมอร์เหล่านี้ประกอบด้วย พอลิไพโรล พอลิไทโอฟีน พอลิอะซิวัลีน และพอลิเมอร์ที่มีต้นกำเนิดมาจากพรีเคอร์เซอร์ (Precursors) ชนิดอะโรมาติกเฮเทอโรไซคลิกอื่นๆ^[10]

ข้อดีของการโดปด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า คือสามารถรักษาระดับการโดปควบคุมได้อย่างเที่ยงตรง

ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่ทำการโดปจะขึ้นกับ

- 1) โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์
- 2) องศาของการโดป เพราะค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของตัวที่ใช้โดป
- 3) ธรรมชาติของ Dopant ion^[11]

2.2 ประโยชน์ของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าแบบไม่บริสุทธิ์

(Nonintrinsically Conducting Polymer)^[10]

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าแบบไม่บริสุทธิ์มีคุณลักษณะเด่นที่สำคัญที่น่าสนใจมากมาย การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์เหล่านี้สามารถควบคุมได้หลายวิธีโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณการโดป เพื่อให้ระบบหนึ่งๆสามารถขยายช่วงของการนำไฟฟ้าทั้งหมดจากฉนวนไฟฟ้าไปยังกึ่งตัวนำไปยังโลหะ ในบางระบบการโดปสามารถทำให้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นโดยการใช้เทคนิคการโดปด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของระบบนี้สามารถเปลี่ยนไปมาระหว่างสถานะตัวนำและสถานะฉนวนโดยการให้ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม

ความว่องไวต่อไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาแบตเตอรี่ที่ใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นขั้วไฟฟ้าเพียงหนึ่งขั้วหรือทั้งสองขั้วเหมือนกัน ในกรณีของแบตเตอรี่ที่ทำจากพอลิอะเซทิลีน $(\text{CH})_x$ มีการใช้พอลิเมอร์เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วทั้งสองขั้วซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา

ด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของระบบนี้สามารถเปลี่ยนไปมาระหว่างสถานะตัวนำและสถานะฉนวนโดยการให้ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม

ความไวต่อไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาแบตเตอรี่ที่ใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเป็นขั้วไฟฟ้าเพียงหนึ่งขั้วหรือทั้งสองขั้วเหมือนกัน ในกรณีของแบตเตอรี่ที่ทำจากพอลิอะเซทิลีน (CH)_x มีการใช้พอลิเมอร์เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วทั้งสองขั้วซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการคายประจุ ตัวอย่างเช่น การรีดักชันพอลิเมอร์อะเซทิลีนเปอร์คลอเรต ไปเป็นพอลิอะเซทิลีนที่มีสภาพเป็นกลางที่ขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่ง และที่ขั้วไฟฟ้าอีกขั้วหนึ่งจะเกิดออกซิเดชันเกล็ดลิเทียมซึ่งเป็นเกล็ดของพอลิอะเซทิลีนที่อยู่ในรูปรีดิวซ์ฟอร์มทำให้ได้พอลิอะเซทิลีนที่เป็นกลาง ในการประยุกต์ใช้งานด้านแบตเตอรี่นั้นลักษณะที่เป็นเส้นตรงของพอลิอะเซทิลีนมีประโยชน์ตรงที่จะให้ความหนาแน่นของกระแสสูง

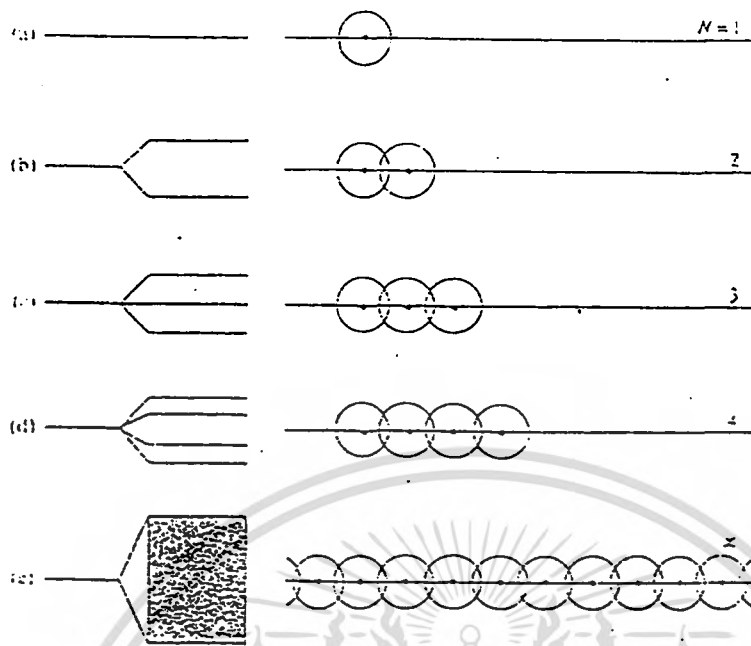
เคาเตอร์ไอออนที่มีอยู่ในระบบการนำไฟฟ้าแบบไม่บริสุทธิ์ทำให้เกิดประโยชน์ในการพัฒนาคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์หลัก เช่น การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของพอลิไพโรลให้ดีขึ้นโดยการใช้โพลีอีนซัลโฟเนตเป็นแอนไอออน ศักยภาพทางด้านเทคโนโลยีทำให้มีความพยายามที่จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความคงทนของระบบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าให้ดีขึ้นซึ่งไม่นานมานี้ก็ได้ประสบผลสำเร็จเป็นอย่างมากในพอลิเมอร์ที่เป็นอนุพันธ์ของอะโรมาติกเฮเทอโรไซคลิกโดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิไพโรลไฮยานิน และ พอลิไพโรล โดยพอลิไพโรลไฮยานินได้นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์เคฟลา (Kevlar) ที่มีความแข็งแรงสูงทำให้ได้วัสดุประกอบเส้นใยที่นำไฟฟ้าได้ซึ่งมีส่วนช่วยในด้านความแข็งแรงเชิงกลและความคงทน ส่วนพอลิไพโรลสามารถนำมาทำเป็นพลาสติกที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นโดยการเลือกชนิดของแอนไอออนที่เหมาะสม หรือทำให้อยู่ในรูปของกราฟท์โคพอลิเมอร์ หรือทำโดยการเกาะยึดติดด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ที่สามารถบวมได้เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ หรือพอลิไวนิลคลอไรด์

เพื่อที่จะทำความเข้าใจให้มากขึ้นในเรื่องของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า จุดเริ่มต้นในการพิจารณา ก็คือ Band theory ซึ่งเป็นแนวความคิดพื้นฐานที่สำคัญในการอธิบายการนำไฟฟ้าในของแข็งระดับโมเลกุล (Molecular solid)^[12]

2.3 Band Theory^[12]

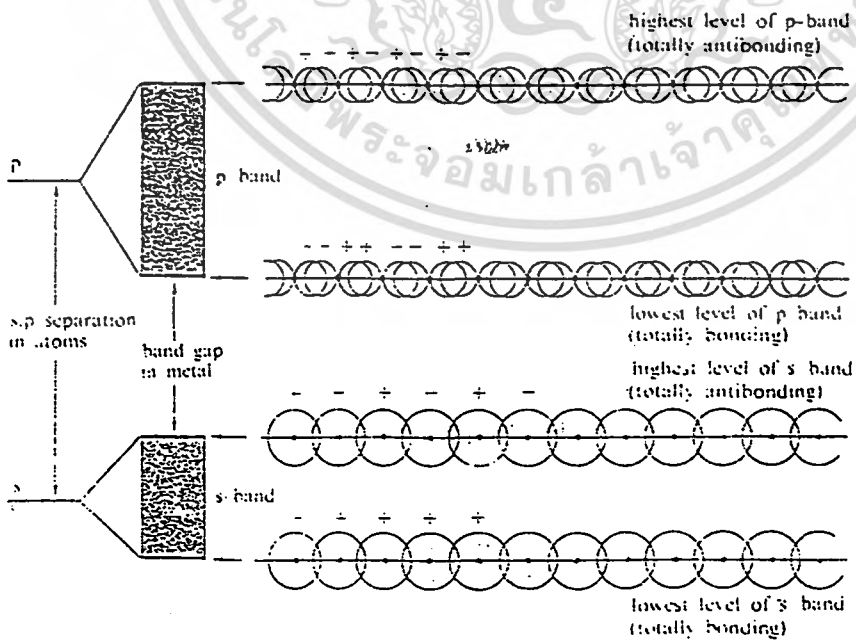
2.3.1 โครงสร้างของแถบ (Band structure)

เพื่อความสะดวกได้มีการสร้างสมมติฐานว่า อะตอมประกอบด้วยออร์บิทัลอะตอมระดับ s (Atomic s-orbital) อยู่หนึ่งออร์บิทัลที่ระดับพลังงานค่าใดค่าหนึ่ง (รูป 2.2a) เมื่ออะตอมตัวที่สองมาอยู่ด้วยกันทำให้เกิดการโอเวอร์แลป (Overlap) กับอะตอมตัวแรกและเกิดเป็นออร์บิทัลที่ก่อกัน (Bonding orbital) และออร์บิทัลที่ต้านกัน (Antibonding orbital) (รูป 2.2b) อะตอมตัวที่สามก็จะเกิดโอเวอร์แลปกับอะตอมที่อยู่ใกล้กันที่สุด (และเกิดโอเวอร์แลปกับตัวที่อยู่ใกล้ที่สุดที่อยู่ถัดไปเพียงเล็กน้อย) และจากออร์บิทัลอะตอมทั้งสามออร์บิทัลทำให้มีออร์บิทัลโมเลกุล (Molecular orbital) 3 ออร์บิทัลเกิดขึ้น (รูป 2.2 c) อะตอมตัวที่สี่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของออร์บิทัลโมเลกุลตัวที่สี่ จะเห็นได้ว่าผลกระทบต่างๆไปของการที่อะตอมหลายๆตัวมาอยู่ต่อเนื่องกันทำให้เกิดการแยกช่วงของพลังงานซึ่งจะถูกครอบคลุมอยู่ในออร์บิทัลซึ่งมีลักษณะคล้ายกับแถบพลังงาน (Energy band) ที่ต่อเนื่องกัน^[12,13] และยังทำให้เกิดการเติมอิเล็กตรอนในช่วงที่เป็นพลังงานออร์บิทัลได้ เมื่ออะตอมจำนวน N อะตอมมีการเรียงตัวกันตามแนวยาวจะทำให้มีออร์บิทัลโมเลกุลจำนวน N ออร์บิทัลซึ่งจะครอบคลุมแถบ (Band) ที่มีความกว้างแน่นอน เมื่อ N เพิ่มขึ้นเรื่อยๆอย่างไม่มีกำหนดทำให้พลังงานออร์บิทัลใกล้ชิดกันโดยไม่มีกำหนดแน่นอน และจะเกิดเป็น Band ที่ต่อเนื่องกันนั่นเอง โดย Band ที่ต่อเนื่องกันนี้ประกอบไปด้วยออร์บิทัลโมเลกุลที่ต่างกันจำนวน N ออร์บิทัล ดังนั้นออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานที่สูงที่สุดใน Band จะทำให้เกิดการต้านกัน (Antibonding) และออร์บิทัลที่มีระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดใน Band จะทำให้เกิดการก่อกัน (Bonding)



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดแถบพลังงาน (Band) ของออร์บิทัลจำนวน N ออร์บิทัลโดยการเพิ่มจำนวนอะตอมในแนวตรง^[12]

Band ที่เกิดจากออร์บิทัลระดับ s (s-orbital) เรียกว่า s-Band ถ้าอะตอมมีออร์บิทัลระดับ p (p-orbital) ก็จะเกิดกระบวนการอย่างเดียวกัน และ Band ของออร์บิทัลโมเลกุลเรียกว่า p-Band ถ้าอะตอมระดับ p อยู่สูงกว่าระดับ s ดังนั้น p-Band จะอยู่สูงกว่า s-Band (รูป 2.3)



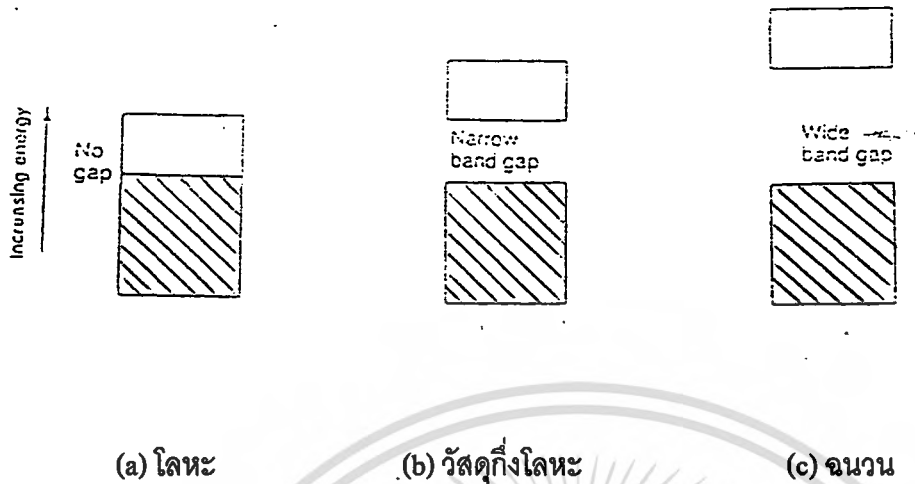
รูปที่ 2.3 แสดง s-Band p-Band และ Band gap^[12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 โลหะ, วัสดุกึ่งตัวนำ และ ฉนวน^[12]

แผนภาพแถบพลังงาน (Energy band) (รูป 2.4) สามารถแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างโลหะ วัสดุกึ่งตัวนำ และฉนวนได้ ในวัสดุประเภทโลหะ แถบวาเลนซ์ (Valence band) จะมีอิเล็กตรอนจะเต็มอย่างสมบูรณ์ ส่วนในแถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่าจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย ณ ที่จุดศูนย์ของศาสสมบูรณ์ (Absolute zero) ดังแสดงในรูป 2.4a จะเห็นว่าไม่มีช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้าในโลหะ ที่จุดเหนือกว่าศูนย์ของศาสสมบูรณ์ (Absolute zero) อิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณชั้นบนของระดับพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนเต็ม (Highest occupied electron) สามารถรับความร้อนและขึ้นไปอยู่บนระดับพลังงานต่ำสุดที่ยังว่าง (Lowest unoccupied electron) ของแถบนำไฟฟ้าได้ อิเล็กตรอนสามารถถูกกระตุ้นกลายเป็นระดับพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่เพียงหนึ่งตัวได้ซึ่งสามารถเกิดได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำซึ่งอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวจะทำให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ วัสดุประเภทนี้เราเรียกว่า โลหะ

ในวัสดุกึ่งตัวนำและฉนวนแสดงดังภาพ 2.4b และ 2.4c แถบวาเลนซ์จะมีอิเล็กตรอนเต็มอย่างสมบูรณ์ และช่องว่างพลังงาน (Energy gap) จะอยู่ระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบพลังงานที่สูงกว่าที่อยู่ถัดไป ถ้าช่องว่างพลังงาน (Energy gap) กว้างจะมีโอกาสเพียงเล็กน้อยในการที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (แถบที่ยังว่าง) เราเรียกวัสดุประเภทนี้ว่าฉนวน ถ้าช่องว่างพลังงาน (Energy gap) มีค่าเพียงเล็กน้อย เราเรียกวัสดุประเภทนี้ว่าวัสดุกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor) เนื่องจาก อิเล็กตรอน สามารถถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ง่าย ถ้าช่องว่างพลังงาน (Energy gap) กว้าง แต่ถ้ามีการเติมอะตอมที่เป็นสารมลทิน จะมีโอกาสที่จะเกิดระดับพลังงานที่อยู่ในช่องว่างพลังงาน (Energy gap) เพื่อให้ อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปยัง แถบนำไฟฟ้าได้อย่างสะดวก วัสดุประเภทนี้เรียกว่าวัสดุกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Impurity semiconductor , Extrinsic semiconductor)

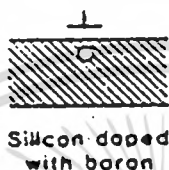
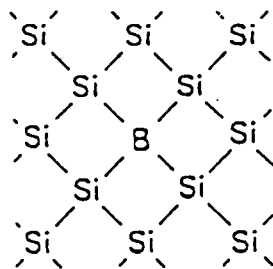


รูปที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบช่องว่างพลังงาน (Band gap) ของวัสดุของแข็งทั้งสามชนิด

ส่วนที่แรงาแทนระดับพลังงานในแถบวาเลนซ์ (Valence band)
ส่วนที่ไม่แรงาแทนระดับพลังงานในแถบนำไฟฟ้า (Conduction band)^[12]

2.3.3 การโคปในวัสดุกึ่งตัวนำ

วัสดุกึ่งตัวนำที่สำคัญส่วนใหญ่ในทางอุตสาหกรรมล้วนแล้วแต่เป็นวัสดุกึ่งตัวนำชนิดไม่บริสุทธิ์ซึ่งการเกิดตัวพาประจุสามารถทำได้โดยการเติมสารมลทินลงไปจำนวนเล็กน้อยหรือทำให้เกิดจุดบกพร่องในโครงร่างผลึก (Lattice imperfection)^[12] ตัวอย่างเช่น การโคปซิลิกอนด้วยธาตุโบรอนหรือลิเทียมในปริมาณส่วนในล้านส่วน (พีพีเอ็ม) ซึ่งมีขนาดเหมาะสมพอดีกับโครงร่างผลึก (Lattice) ของซิลิกอน การโคปนี้ทำได้ทั้งวิธีการแทนที่แบบ Substitutional หรือ Interstitial (รูปที่ 2.5) กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ออกไปของอะตอมซิลิกอนที่เป็นกลางและการแทนที่ช่องว่างนั้นด้วยอะตอมที่เป็นกลาง เช่นอะตอมโบรอน โดยที่อะตอมซิลิกอนมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว แต่อะตอมโบรอนมีแค่ 3 ตัว ทำให้เกิดการปรากฏของระดับพลังงานที่ว่างที่เกี่ยวเนื่องกับอะตอมโบรอนซึ่งอยู่เหนือแถบวาเลนซ์ (Valence band) ของซิลิกอนเพียงเล็กน้อย อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนย้ายจากซิลิกอนไปยังระดับโบรอนด้วยความร้อน ทำให้เกิดช่องว่างในแถบวาเลนซ์ของโบรอน และทำให้มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวเกิดขึ้น ซึ่งสามารถทำการตรวจสอบได้ด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (Electron spin resonance)^[10]



รูปที่ 2.5 แสดงการโดปซิลิคอนด้วยโบรอน^[10]

2.3.4 Charge Storage

คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์อินทรีย์สามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยการโดป การเพิ่มขึ้นของการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.3.4.1 ธรรมชาติของการเกิดประจุบนสายโซ่พอลิเมอร์

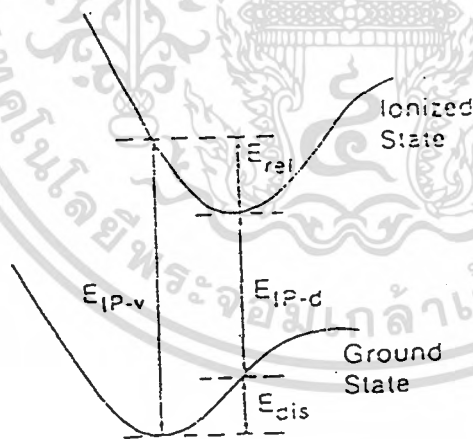
ในพอลิเมอร์ที่เป็นคริสตัล แรงอันตรกิริยาระหว่างหน่วยเซลล์ (Unit cell) ของพอลิเมอร์กับตัวที่อยู่ใกล้เคียงจะทำให้เกิดแถบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic band) ระดับอิเล็กทรอนิกส์ที่สูงสุดที่มีอิเล็กตรอนเต็มเรียกว่า แถบวาเลนซ์ (Valence band) และในระดับที่ต่ำสุดที่ยังว่างเรียกว่า แถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ความกว้างของแถบต้องห้าม (Forbidden band) หรือ ช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ระหว่างแถบวาเลนซ์ และ แถบนำไฟฟ้า จะเป็นสิ่งพิจารณาคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าของวัสดุ ในพอลิเมอร์อินทรีย์ที่เป็นคอนจูเกตทั้งหมดที่มีช่องว่างพลังงาน (Energy gap) มากกว่า 1.5 eV จัดเป็นฉนวนไฟฟ้าบริสุทธิ์ (Intrinsic insulating)

ในระยะแรกการนำไฟฟ้าที่สูงของพอลิเมอร์อินทรีย์ที่ถูกโดปคิดว่าเป็นผลมาจากการเกิดแถบอิเล็กทรอนิกส์ที่ยังว่าง มีการสมมติฐานโดยการใช้การโดปชนิด p-type และ n-type อิเล็กตรอนย้ายตำแหน่งออกจากส่วนบนสุดของแถบวาเลนซ์ หรือเติมเข้าไปในส่วนล่างของแถบนำไฟฟ้า ซึ่งเปรียบเทียบคล้ายกับกลไกการเกิดตัวพาประจุในวัสดุกึ่งตัวนำอินทรีย์ที่ถูกโดป อย่างไรก็ตามข้อสมมติฐานนี้ได้ถูกท้าทายเนื่องจากมีการค้นพบว่าพอลิไพโรลสามารถแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติในการนำไฟฟ้าซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์โดยตรง แต่เกี่ยวข้องกับตัวพาประจุไรต์สปีนมากกว่า

ในโมเลกุลอินทรีย์ รูปทรงสมดุลง (Equilibrium geometry) ในสถานะไอออนที่แตกต่างกันจากรูปทรงสมดุลงที่อยู่ในสถานะพื้น เช่นรูปทรงของพอลิไพโรลซึ่งเหมือนอะโรมาติกในสถานะพื้น แต่เหมือนควินอยด์ในสถานะไอออน พลังงานที่เกี่ยวข้องในกระบวนการไอออนเซชันของโมเลกุลอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.6 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการไอออนเซชันคือ E_{ip-v} ถ้าเกิดการผ่อนคลายรูปทรงในสถานะไอออนจะทำให้ได้พลังงานในการคลายตัวกลับคืนมาเรียกว่า E_{rel} ตามแนวความคิดนี้การเคลื่อนที่จากสถานะพื้นไปสู่สถานะไอออนที่ผ่อนคลายแล้วล้วนเป็นขั้นตอนดังนี้ รูปทรงของโมเลกุลเกิดบิดเบือนครั้งแรกในสถานะพื้นจำเป็นต้องใช้พลังงานในการที่ทำให้โมเลกุลเกิดรูปทรงสมดุลงในสถานะไอออนซึ่งพลังงานที่ใช้ในการบิดเบือนเรียกว่า E_{dis} (รูป 2.6) สำหรับระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์หนึ่งตัวในโมเลกุล การบิดเบือนทำให้ ΔE ของออร์บิทัลโมเลกุลสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนอยู่ (HOMO) เกิดการเลื่อนขึ้น และทำให้ออร์บิทัลโมเลกุลต่ำสุดที่ยังว่าง (LUMO) เกิดการเลื่อนลง แสดงดังรูป 2.7 ถ้าต้องการให้เกิดการไอออนเซชันของโมเลกุลที่เกิดการบิดเบือนจำเป็นต้องให้พลังงาน E_{ip-d} (รูป 2.6)

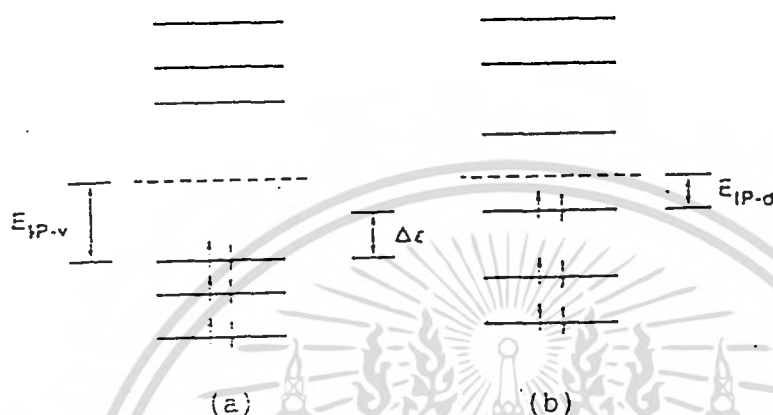


รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงพลังงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไอออนเซชันของโมเลกุล

E_{ip-v} เป็นพลังงานในการไอออนเซชัน E_{rel} เป็นพลังงานผ่อนคลายที่กลับคืนมาในสถานะไอออน E_{dis} เป็นพลังงานการบิดเบือนที่ใช้ในสถานะพื้นเพื่อที่จะทำให้โมเลกุลอยู่ในรูปทรงสมดุลงในสถานะไอออน และ E_{ip-d} เป็นพลังงานไอออนเซชันของโมเลกุลที่ถูกบิดเบือนแล้ว^[12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.6 มีความชัดเจนว่ามีแนวโน้มที่จะเกิดการผ่อนคลายรูปทรงในสถานะไอออไนซ์ เมื่อปริมาณ $E_{ip-v} - E_{ip-d}$ (ซึ่งสัมพันธ์กับ $\Delta\epsilon$ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 2.7) มีค่ามากกว่าพลังงานการบิดเบือน (E_{dis}) หรืออีกนัยหนึ่งก็คือเมื่อการลดลงของ $\Delta\epsilon$ ในการไอออไนเซชันของการบิดเบือนมีค่ามากกว่า E_{dis} ที่ใช้ในการบิดเบือน



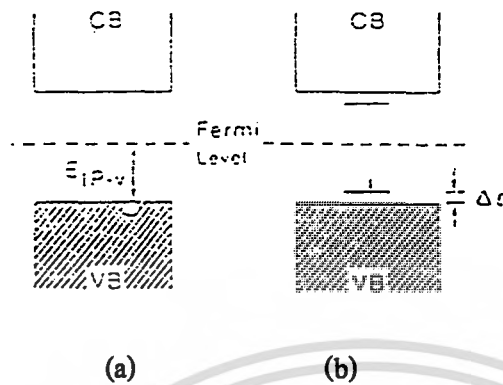
รูปที่ 2.7 ระดับพลังงาน อิเล็กตรอน หนึ่งตัว สำหรับโมเลกุลอินทรีย์ในการจัดเรียงตัว อิเล็กตรอนในสถานะพื้น

a) รูปทรงสมดุทธ์ของสถานะพื้น

b) รูปทรงของสถานะกระตุ้นขั้นแรก (First ionized state)^[12]

ในพอลิเมอร์หรือของแข็งใดๆ กระบวนการไอออไนซ์ในแนวตรงส่งผลให้เกิดโฮล (Hole) บนส่วนบนของแถบวาเลนซ์ ดังรูป 2.8a ในกรณีดังกล่าวจะมีข้อสังเกต 3 ประการเกิดขึ้น ประการแรกคือ จากนิยามของกระบวนการ ดังนั้นไม่มีการผ่อนคลายรูปทรง (การบิดเบือนโครงร่างผลึก) บนสายโซ่พอลิเมอร์ อย่างที่สองคือประจุบวกบนสายโซ่เกิดการดีโลคัลไลซ์ตลอดทั้งสายโซ่พอลิเมอร์ อย่างที่สามคือมีโฮลเกิดขึ้นตรงส่วนบนของแถบวาเลนซ์ ทำให้เกิดการปรากฏลักษณะเฉพาะแบบโลหะ การเกิดเหตุการณ์แบบนี้ตรงกับข้อสมมติฐานในระยะแรกที่เกี่ยวข้องกับกลไกการนำไฟฟ้าในพอลิเมอร์อินทรีย์ที่ถูกโด๊ป อย่างไรก็ตามในสายโซ่พอลิเมอร์อินทรีย์มักจะมีข้อจำกัดประจุที่เกิดบนสายโซ่พอลิเมอร์และมีการบิดเบือนเฉพาะแห่ง(การผ่อนคลายโครงร่างผลึก)บริเวณรอบๆประจุ กระบวนการนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสถานะอิเล็กตรอนิกส์ที่ถูกจำกัดให้อยู่ในช่องว่างพลังงาน (Energy gap) เนื่องจากการที่ $\Delta\epsilon$ ของ HOMO เพิ่มขึ้นและ $\Delta\epsilon$ ของ LUMO เกิดการลดลง (รูป 2.8b) เมื่อพิจารณาในกรณีการเกิดออกซิเดชัน เช่น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนออกจากโซ่จะทำให้พลังงานไอออไนเซชันจะลดลงเป็นจำนวน $\Delta\epsilon$

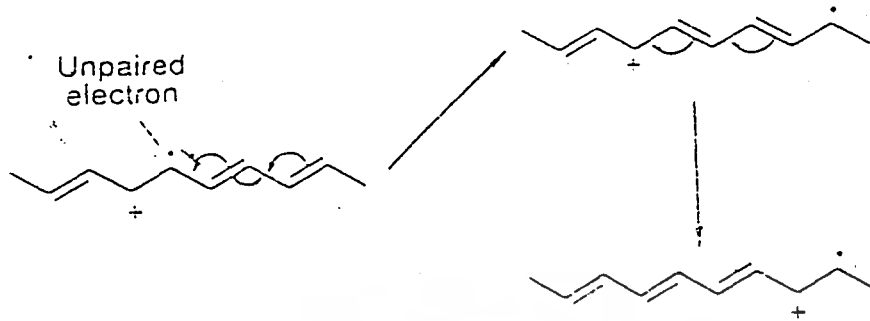
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างแถบของโซ่พอลิเมอร์ในกรณีของ

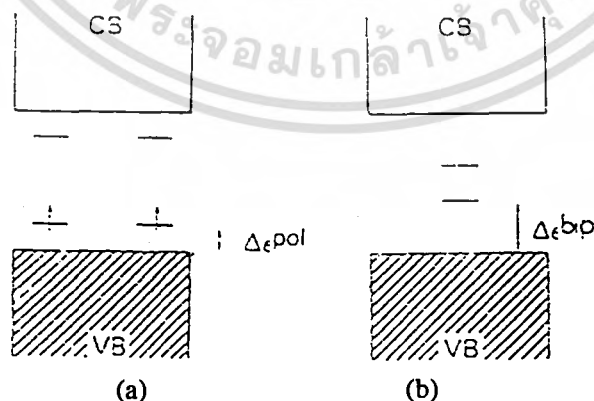
- กระบวนการไอออไนเซชันในแนวตรง
- การเกิดโพลารอน¹²⁾

ถ้า ΔE มากกว่า E_{dis} ที่ต้องใช้ในการบิดเบือนโครงร่างผลึกบริเวณรอบๆ ประจุแล้ว การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Localization) ของประจุจะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของแถบ ทำให้เกิดวัตถุที่ทางฟิสิกส์เรียกว่า โพลารอน (Polaron) (รูป 2.9) ใน Chemical terminology โพลารอนจะมีเรดิคัลไอออน (สปิน 1/2) ที่เกี่ยวเนื่องเกี่ยวกับการบิดเบือนผลึก และการเกิด Electronic state ที่ถูกจำกัดใน Gap ซึ่งอ้างอิงว่าเป็นสถานะโพลารอน ปริมาณ $\Delta E - E_{dis}$ ($= E_{rel}$) จะสัมพันธ์กับระดับพลังงานพันธะของโพลารอนจากการคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีของ Huckel ซึ่งเกี่ยวกับความสามารถในการหดของพันธะ (Bond compressibility) จะแสดงให้เห็นว่าการเกิดโพลารอนมักจะเกิดในพอลิเมอร์อินทรีย์ที่เป็นคอนจูเกตทุกชนิด เช่นพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะ (Binding energy) ในพอลิไพโรลเป็น 0.12 eV ในกรณีของการเกิดโพลารอน Valence band ยังคงเต็มอยู่และ Conduction band ยังว่างอยู่ซึ่งจะไม่ปรากฏลักษณะของโลหะ เนื่องจากระดับที่มีอิเล็กตรอนอยู่ครึ่งหนึ่งถูกจำกัดให้อยู่ใน Gap ดังรูป 2.8b



รูปที่ 2.9 เบริดคัลแคตไอออนที่เกิดการดีโลคัลไลซ์ตลอดเพียงบางส่วนของสายโซ่ เรียกว่า โพลารอน (polaron)^[12]

ถ้าอิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัวถูกเอาออกไปจากพอลิเมอร์ที่ถูกออกซิไดซ์แล้วที่ประกอบด้วยโพลารอนจะมีสิ่งที่เกิดขึ้นสองประการ อย่างแรกคืออิเล็กตรอนสามารถตำแหน่งออกจากส่วนอื่นๆ ของโซ่พอลิเมอร์จะทำให้เกิดโพลารอนอิสระอีกตัวหนึ่ง และอย่างที่สองคือ ถ้าอิเล็กตรอนย้ายตำแหน่งออกจากระดับโพลารอนตัวแรก (การเคลื่อนที่ออกของอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว) จะทำให้เกิดไดแคตไอออน (Dication) ซึ่งทางฟิสิกส์โซลิตอสเตดเรียกว่า ไบโพลารอน (Bipolaron) ซึ่งนิยามว่าเป็นคู่ของประจุที่เหมือนกันซึ่งเกี่ยวข้องกับการบิดเบือนโครงร่างผลึกเฉพาะแห่งอย่างแข็งแรง การเกิดไบโพลารอนอธิบายได้ว่าเนื่องจากพลังงานที่ได้รับจากการเกิดอันตรกิริยากับโครงร่างผลึกมีค่ามากกว่าแรงผลักระหว่างสองประจุที่มีเครื่องหมายเดียวกันที่ถูกจำกัดอยู่ในแนวเดียวกัน ประจุบวกสองประจุของไบโพลารอนที่เกิดขึ้นจะไม่อิสระแก่กันและอยู่กันเป็นคู่



รูปที่ 2.10 โครงสร้างแถบโซ่พอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย

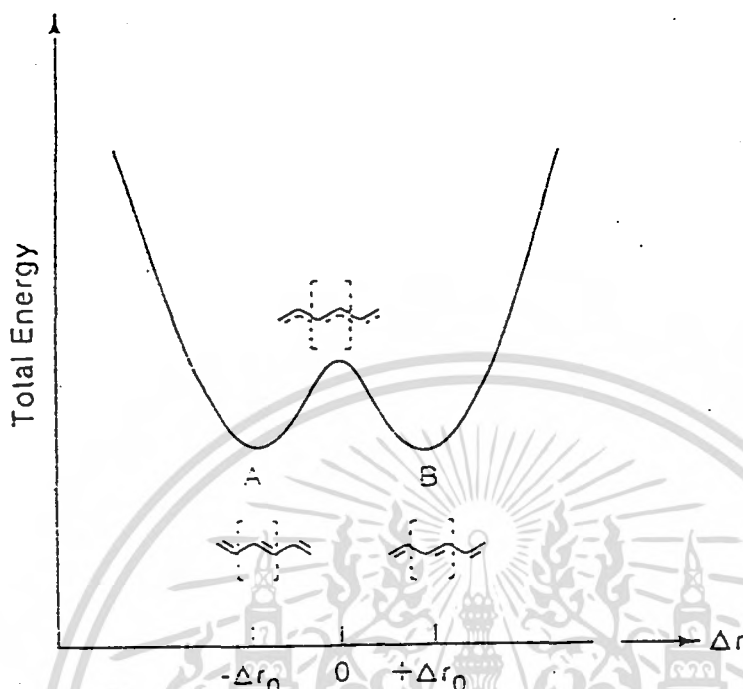
- a) โพลารอนสองตัว b) ไบโพลารอน 1 ตัว^[12]

โครงสร้างแถบอิเล็กทรอนิกส์ (Electron band structure) ที่สัมพันธ์กับการปรากฏโพลาารอนสองตัว และไบโพลาารอนหนึ่งตัว แสดงได้ดังรูป 2.10 เนื่องจากการผ่อนคลายโครงสร้างผลึกบริเวณรอบๆ ประจุสองประจุจะแข็งแรงกว่าบริเวณรอบๆ ประจุหนึ่งประจุ ดังนั้น E_{dis} สำหรับไบโพลาารอนจะอยู่ในตำแหน่งที่ไกลจากขอบของแถบมากกว่าโพลาารอน

ในการเปรียบเทียบการเกิดไบโพลาารอนกับการเกิดโพลาารอนสองตัว จากการคำนวณในพอลิอะเซทิลีนแสดงให้เห็นว่าพลังงานการบิดเบือน (E_{dis}) เพื่อทำให้เกิดไบโพลาารอนหนึ่งตัวประมาณครึ่งๆว่าเท่ากับ E_{dis} ของการเกิดเป็นโพลาารอนสองตัว นอกจากนี้การลดลงของพลังงานไอออนไนเซชันในกรณีของไบโพลาารอน ($2 \Delta E^{bip}$) เป็นสิ่งสำคัญมากกว่าในกรณีของโพลาารอนสองตัว ($2 \Delta E^{pol}$) มาก ดังรูปที่ 2.10 จึงเป็นเหตุผลว่า ทำไมไบโพลาารอนจึงเสถียรทางอุณหพลศาสตร์มากกว่าโพลาารอนสองตัว ในระบบเหล่านี้แม้ว่าจะมีการผลักดันทางประจุระหว่างสองประจุที่เหมือนกันก็ตาม ยิ่งกว่านั้นการผลักดันของประจุถูกกันไว้มากโดยการที่มีตัวโดดอยู่ด้วย (เคาเตอร์ไอออน) ซึ่งเป็นประจุตรงข้าม พลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะ (ผลต่างของ $\Delta E^{bip} - E_{dis}^{bip}$) ของไบโพลาารอนมีการคำนวณแล้วพบว่ามีความมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวพันธะของโพลาารอนสองตัวอยู่ประมาณ 0.45 eV

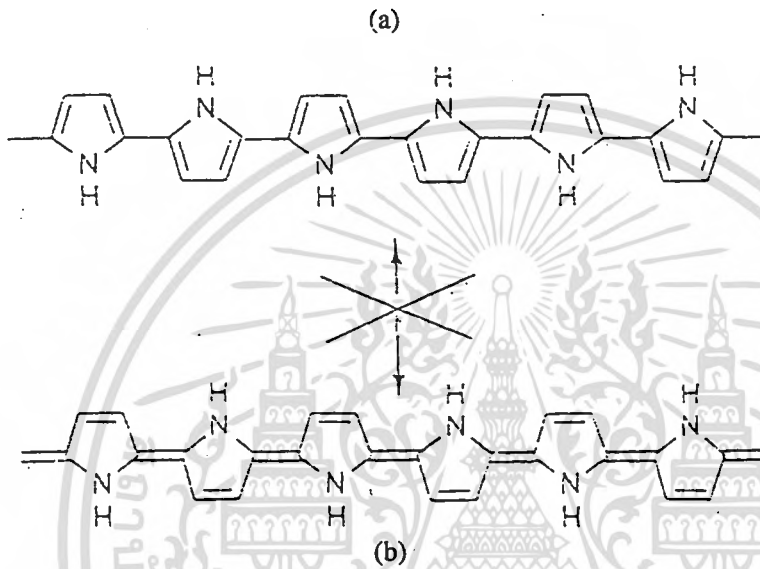
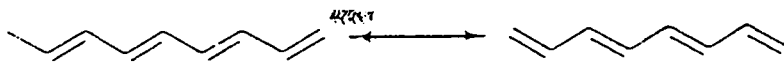
ในกรณีการโดปชนิด p-type ระดับโพลาารอนใน Gap จะว่าง ส่วนการโดปชนิด n-type จะทำให้ระดับโพลาารอนใน Gap จะเต็ม (รูปที่ 2.10b) ดังนั้นไบโพลาารอนจึงไม่มีสปีน การปรากฏไบโพลาารอนบนโซลิติเมอร์จะส่งผลให้มีโอกาสที่จะเกิดการทรานสิชันด้วยแสง (Optical transition) สองประเภท เช่นในกรณีของพอลิไพโรล (โดปแบบ p-type) การทรานสิชันชนิดแรกคือการทรานสิชันจากแถบวาเลนซ์ไปยังระดับไบโพลาารอนที่อยู่ต่ำกว่า (มีพลังงานต่ำ) และการทรานสิชันชนิดที่สองคือการทรานสิชันจากแถบวาเลนซ์ไปยังระดับไบโพลาารอนที่อยู่สูงกว่า (มีพลังงานสูง) ส่วนในกรณีของโพลาารอนอาจจะมีการดูดกลืนชนิดที่สามเกิดขึ้นได้ซึ่งตรงกับการทรานสิชันระหว่างระดับไบโพลาารอนสองระดับแสดงดังรูปที่ 2.10a

ใน ทราน-พอลิอะเซทิลีนจะผิดแปลกไปจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้าทั้งหลายเพราะว่ามี Degenerate ground state (โครงสร้างทางรูปทรงสองโครงสร้างที่มีระดับพลังงานรวมอยู่ในระดับเดียวกัน) (รูปที่ 2.11) โครงสร้างทั้งสองโครงสร้างจะแตกต่างจากอีกอันหนึ่งโดยการเปลี่ยนแปลงพันธะคาร์บอน-คาร์บอนทั้งพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ จากการทดลองพบว่าองศาของการเปลี่ยนแปลงความยาวพันธะ Δr (ผลต่างระหว่างความยาวพันธะเดี่ยวและคู่) เป็น 0.08 อังสตรอม



รูปที่ 2.11 แสดงเส้นโค้งพลังงานรวมสำหรับ ทราน-พอลิอะเซทีลีน^[12]

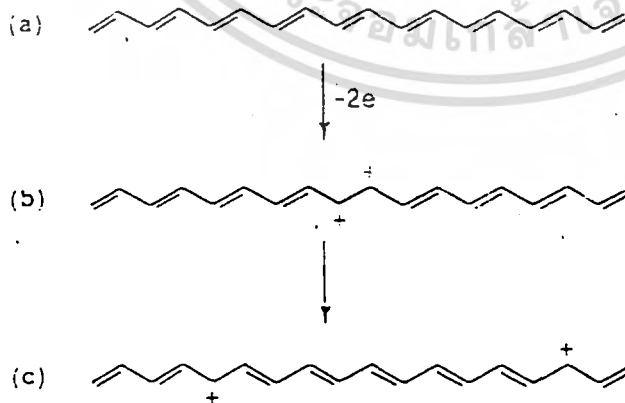
ในพอลิเมอร์อะเซทีลีนซึ่งมี Degenerate ground state (รูปเรโซแนนซ์ฟอร์มที่เหมือนกันสองรูป) ไบโพลารอนจะเกิดการแตกเป็นแคตไอออนอิสระสองตัวที่ไร้สปินด้วยเช่นกันเรียกว่าโซลิตอน (Soliton) ซึ่งโซลิตอนจะไม่เกิดในพอลิเมอร์ที่เป็น Nondegenerate ground state เช่นพอลิไพโรล พอลิไฮโอฟิน และพอลิพีนิลีน พอลิเมอร์เหล่านี้เรียกว่า Nondegenerate เพราะว่ารูปเรโซแนนซ์ฟอร์มจะไม่เหมือนกันถ้านำโครงสร้างมาทับกัน



รูปที่ 2.12 รูปเรโซแนนซ์ฟอร์มที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์ทั้งสองประเภท

a) พอลิอะเซทีลีน

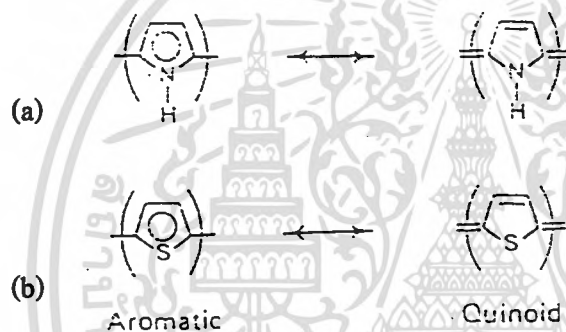
b) พอลิไพโรล^[12]



รูปที่ 2.13 การเกิดโซลิตอนบนสายโซ่พอลิเมอร์อะเซทีลีน^[12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลของ Degeneracy ทำให้ประจุทั้งสองที่เกิดเป็นไบโพลารอนในทราน-พอลิอะเซทิลีนสามารถแยกออกจากกันได้อย่างง่ายดาย (รูปที่ 2.13) กระบวนการนี้มักจะเกิดขึ้นเพราะว่าไม่มีการเพิ่มพลังงานบิดเบือนผลึกเมื่อประจุทั้งสองแยกออกจากกัน เนื่องจากโครงสร้างทางรูปทรงที่ปรากฏระหว่างประจุทั้งสองมีพลังงานเดียวกันกับโครงสร้างทางรูปทรงอีกด้านหนึ่งที่เหลือของประจุ ถ้าเป็นระบบที่ไม่เหมือนทราน-พอลิอะเซทิลีน เช่น พอลิไพโรลหรือพอลิไทโอฟีนซึ่งจะมีสถานะพื้นแบบ Non-degenerate เนื่องจากสถานะพื้นเหล่านั้นสัมพันธ์กับโครงสร้างทางรูปทรงที่เป็นอะโรมาติก โครงสร้างเรโซแนนซ์ที่คล้ายควินอยด์ (Quinoid) มีพลังงานรวมสูงกว่า (รูปที่ 2.14) และมีอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีมากกว่าโครงสร้างอะโรมาติกจึงอธิบายได้ว่า ทำไมการโดปนั้นทำให้รูปทรงสายโซ่ในส่วนประกอบเหล่านี้เกิดการผ่อนคลายบริเวณรอบๆ ประจุในโครงสร้างควินอยด์



รูปที่ 2.14 โครงสร้างรูปทรงอะโรมาติก (สถานะพื้น) และรูปควินอยด์^[12]

2.3.4.2 การเกิดคุณสมบัติทรานซิสชันและคุณสมบัติทางไฟฟ้า

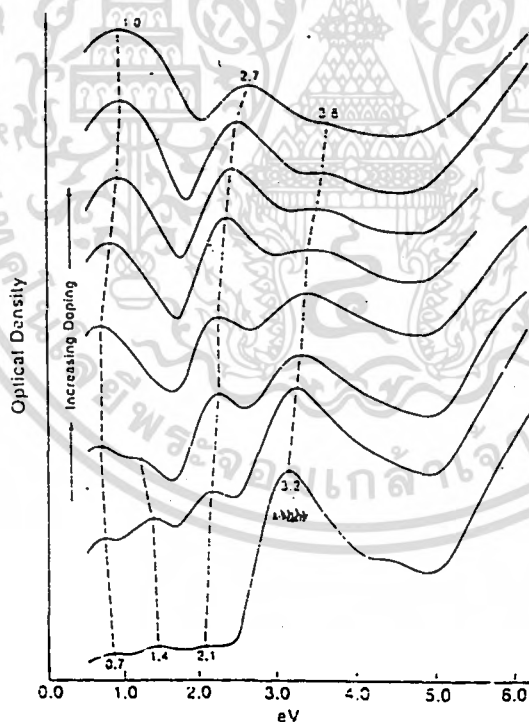
สถานะของโพลารอนและไบโพลารอนสามารถสังเกตและอธิบายได้โดยอาศัยข้อมูลการดูดกลืนแสง การอธิบายกลไกการทรานซิสชันทางไฟฟ้าในพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ถูกต้องเป็นองค์ประกอบของปัญหาในการทำความเข้าใจวัสดุเหล่านี้ การคำนวณโครงสร้างแถบบนโซ่พอลิไพโรลที่สามารถเปลี่ยนรูปได้ แสดงให้เห็นว่าโพลารอนและไบโพลารอนถูกทำให้เกิดขึ้นด้วยการโดปและตัวพากระแสที่สามารถอธิบายได้โดยอาศัยตัวพาประจุที่สัมพันธ์กับไบโพลารอนที่ประจุทั้งคู่ไร้สปิน การเปลี่ยนแปลงที่ถูกจำกัดเกี่ยวข้องกับโพลารอนหรือไบโพลารอนซึ่งประกอบด้วยการยาวขึ้นของพันธะคู่และการสั้นลงของพันธะเดี่ยว

Yakushiki, K^[12] ได้ทำการบันทึกสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลิไพโรลที่สถานะต่างๆกันของการออกซิเดชันโดยเริ่มจากพอลิไพโรลที่ถูกออกซิไดส์มากที่สุดจนถึงพอลิไพโรลที่เป็นกลางมากที่สุด (แสดงได้ดังรูปที่ 2.13) ที่ระดับการออกซิเดชันต่ำๆ (เส้นโค้งที่อยู่ต่ำกว่า) มีการดูดกลืนสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดที่ 3.2 eV ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทรานสิชันระหว่างแถบ π และแถบ π^* ในช่องว่างพลังงาน (Gap) จะมีลักษณะของส่วนที่สำคัญเพิ่มขึ้นมาอยู่สามอย่างคือจะมีพีคที่ 0.7, 1.4, และ 2.1 eV ขณะที่ระดับการออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดกลืนแสงที่ 1.4 eV หายไปและการทรานสิชันระหว่างแถบจะอ่อนลงและเลื่อนไปยังพลังงานที่สูงขึ้น ในตัวอย่างที่เกิดออกซิเดชันอย่างเต็มที่ (เส้นโค้งที่อยู่สูงกว่า) มีลักษณะสองประการที่เพิ่มขึ้นอย่างมากคือ พีคการดูดกลืนที่มีลักษณะบรอดจะเกิดขึ้นที่ 1.0 และ 2.7 eV และการทรานสิชันระหว่างแถบจะปรากฏที่ 3.6 eV

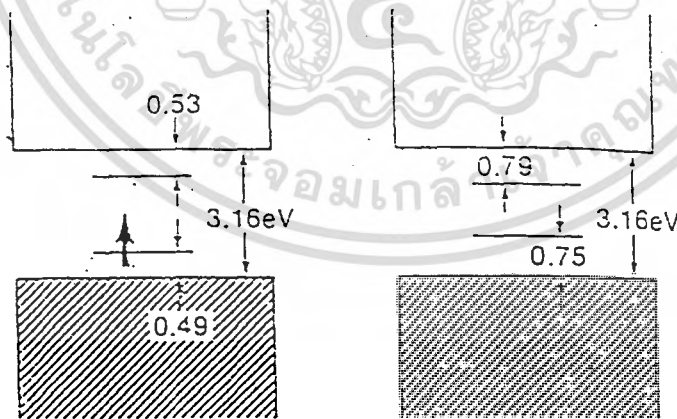
การที่จะวิเคราะห์ผลการทดลองเหล่านี้จะแสดงการศึกษาทฤษฎีการเกิด โพลารอนและไบโพลารอนบนโซ่พอลิไพโรล และการปรากฏโครงสร้างแถบ (Band-structure) ในการเกิดออกซิเดชัน จากผลเหล่านี้จะแสดงให้เห็นว่าการปรากฏสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในการออกซิเดชันสามารถอธิบายได้ในเทอมของการเกิดโพลารอนขั้นเริ่มต้นและการเกิดไบโพลารอนบนโซ่พอลิไพโรล จากการทดลองพบว่าไบโพลารอนเป็นตัวพาประจุที่ไร้สปินในระบบการนำไฟฟ้าของพอลิไพโรลที่ถูกโด๊ป



รูปที่ 2.15 การปรากฏสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอลิไพโรลเป็นฟังก์ชันกับระดับการโด๊ปจากเส้นโค้งล่างสุด (พอลิไพโรลที่เป็นกลางมากที่สุด) ไปยังเส้นโค้งบนสุด (ระดับการโด๊ป 33เปอร์เซ็นต์)¹²¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณการเกิดโพลารอนและไบโพลารอนบนสายโซ่พอลิไพโรลสามารถทำได้โดยใช้ทฤษฎี Tight-binding Huckle theory ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการอัดพันธะซิกมาและความสัมพันธ์ของความยาวพันธะ โพลารอนจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงาน π plus σ ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพลังงานการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกมีค่ามากกว่าพลังงานที่ได้รับการชดเชยโดยพลังงานไอออไนเซชันที่ต่ำลง ผลต่างคือพลังงานยึดเหนี่ยวพันธะของโพลารอน เมื่อประจุบวกเกิดขึ้นบนโซ่พอลิไพโรลทำให้เกิดโพลารอนที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวพันธะ 0.12 eV ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างพลังงานการไอออไนเซชันที่ลดต่ำลง (0.49 eV) และพลังงาน π plus σ ที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปทรง (3.7 eV) การที่มีโพลารอนเกิดขึ้นจะทำให้เกิดระดับอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกจำกัดอยู่สองระดับในช่องว่างพลังงาน (Gap) คือสถานะโพลารอนที่ก่อพันธะ (Bonding polaron) ที่มีอิเล็กตรอนหนึ่งตัวซึ่งอยู่เหนือขอบแถบวาเลนซ์อยู่ 4.9 eV และสถานะโพลารอนที่ต้านพันธะซึ่งอยู่ข้างล่างขอบแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) อยู่ 0.53 eV แสดงดังรูปที่ 2.14a สถานะโพลารอนในช่องว่างพลังงาน (Gap) เป็นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสามอย่างที่สังเกตได้ในช่องว่างพลังงานของพอลิไพโรลที่ถูกออกซิไดส์เพียงเล็กน้อย (เส้นโค้งที่ต่ำๆ ในรูปที่ 2.13) อย่างแรกคือพีการดูดกลืนฟิสิกแรกที่ 0.7 eV สัมพันธ์กับการเปลี่ยนจากแถบวาเลนซ์ไปเป็นสถานะโพลารอนที่ก่อพันธะ อย่างที่สองคือมีฟิสิกที่ 1.4 eV ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนสถานะโพลารอนที่ก่อพันธะไปเป็นสถานะโพลารอนที่ต้านพันธะ และอย่างสุดท้ายคือฟิสิกที่ 2.1 eV ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนจากแถบวาเลนซ์เป็นสถานะโพลารอนที่ต้านพันธะ จะสังเกตได้ว่าผลรวมของพลังงานสองฟิสิกแรกจะตรงกับพลังงานของการเปลี่ยนแปลงในฟิสิกที่สาม



(a)

(b)

รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์สำหรับโซ่พอลิไพโรลซึ่งประกอบด้วย

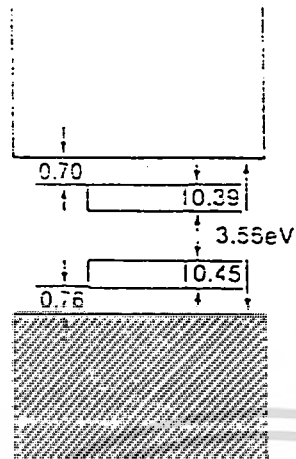
a) ระดับการโคปที่ต่ำ(เกิดโพลารอน) b)ระดับการโคปที่สูง(เกิดไบโพลารอน)^[12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีข้อสังเกตว่าตำแหน่งของพีคจะแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของสถานะ โพลารอนที่ด้าน พันธะจะอยู่ไกลจากขอบแถบการนำไฟฟ้ามากกว่าตำแหน่งของสถานะโพลารอนที่ก่อกันจาก ขอบแถบวาเลนซ์

ที่ระดับการออกซิเดชันสูงๆสถานะโพลารอนเริ่มเกิดอันตรกิริยากัน จากการคำนวณแสดงให้เห็นว่าโพลารอนสองตัวกลายเป็นไปโพลารอนที่ประจุไม่มีสปิน (รูปที่ 2.14b) ซึ่งมีการผ่อนคลายรูปทรงที่แรงกว่าโพลารอน (การผ่อนคลายในไปโพลารอนจนเกิดรูปควิโนนมากกว่าการผ่อนคลายในโพลารอน) ดังนั้นสถานะอิเล็กทรอนิกส์ไปโพลารอนที่ว่างอยู่ใน Gap จะมีค่าเป็น 0.75 eV เมื่ออยู่เหนือขอบแถบวาเลนซ์ และมีค่าเป็น 0.79 eV เมื่ออยู่ใกล้ขอบแถบการนำไฟฟ้า (รูปที่ 2.14b) พลังงานยึดเหนี่ยวพันธะของไปโพลารอนเป็น 0.69 eV หมายความว่าไปโพลารอนมักจะอยู่เหนือโพลารอนสองตัวอยู่ 0.45 eV ($0.69 - 2 \times 0.12$) สถานะไปโพลารอนที่ก่อกันจะว่างอยู่ซึ่ง ตรงข้ามกับกรณีโพลารอน ผลที่ตามมาคือมีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้สองแบบเท่านั้นในช่องว่าง พลังงานจึงเป็นเหตุผลทำให้พีคการดูดกลืนที่ 1.4 eV หายไป เมื่อลำดับการออกซิเดชันของพอลิไพโรลเพิ่มขึ้น

โครงสร้างแถบการโดป 33 % (ต่อหน่วยที่ซ้ำกันของพอลิเมอร์) แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.15 การโอเวอร์แลปกันระหว่างสถานะไปโพลารอนจะก่อให้เกิดแถบไปโพลารอนที่กว้างมีค่าประมาณ 0.4 eV จำนวนสองแถบอยู่ในช่องว่างพลังงาน ช่องว่างพลังงานได้กว้างเพิ่มขึ้นจาก 3.16 eV ในสถานะกลางไปเป็น 3.56 eV ในสถานะการโดป 33% หรือมีค่ามากกว่าในกรณีที่ไม่โดปอยู่ 0.4 eV เกิดเนื่องจากความจริงที่ว่า สถานะไปโพลารอนที่อยู่ในช่องว่างพลังงานได้มาจากขอบแถบวาเลนซ์ และแถบการนำไฟฟ้า โครงสร้างของแถบสนับสนุนความจริงที่ว่า การใช้สนามไฟฟ้าทำให้ไปโพลารอนซึ่งไร้สปินจะสามารถเคลื่อนที่ได้ที่ระดับการโดปสูงๆ โดยที่แรงกระทำระหว่างประจุกับเคาเตอร์ไอออนจะถูกบดบังไปอย่างมาก



รูปที่ 2.17 โครงสร้างแถบของพอลิไพโรลที่เกิดออกซิเดชันมาก (ระดับการโคป 33%)

จะแสดงให้เห็นถึงการเกิดการขยายของแถบไบโพลารอนในช่องว่างพลังงาน^[12]

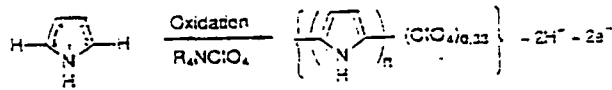
โดยสรุปแล้วการนำไฟฟ้าโดยโพลารอนและไบโพลารอนเป็นกลไกที่สำคัญในการถ่ายเทประจุในพอลิเมอร์ ซึ่งแนวความคิดนี้อธิบายการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนแสงที่เห็นได้ชัดในพอลิเมอร์ที่มีการโคป ซึ่งจากข้อมูลแสดงให้เห็นว่า

- 1) โพลารอนจะเกิดบนโซ่เมื่อระดับการออกซิเดชันต่ำ
- 2) ที่ระดับการออกซิเดชันสูงๆ โพลารอนจะรวมกันกลายเป็นไบโพลารอนที่ไร้ประจุ
- 3) แถบไบโพลารอนที่กว้างที่อยู่ในช่องว่างพลังงานจะพบในระบบที่มีการนำไฟฟ้าสูงๆ

2.4 พิล์มพอลิไพโรลอสัณฐานที่สังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า^[13]

ฟิล์มพอลิไพโรลมีลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ถึงแม้ว่าโดยส่วนใหญ่แล้วหน่วยไพโรลของฟิล์มจะเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง 2,5 แต่ว่าก็ยังมีจำนวนหน่วยที่ต่อแบบ 2,3 ด้วยเหมือนกันซึ่งจะทำให้เกิด Defect ในการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ที่สมมติฐานว่าเป็นโซ่ตรง ทำให้ความยาวของคอนจูเกตสั้นลงดังนั้นการนำไฟฟ้าก็ลดลงด้วย

ฟิล์มพอลิไพโรลจะโตบนขั้วแอโนดเมื่อไพโรลถูกออกซิไดส์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ฟิล์มมีความคงทนและยืดหยุ่นสูง ทำให้สามารถคงทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยที่มิมีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย

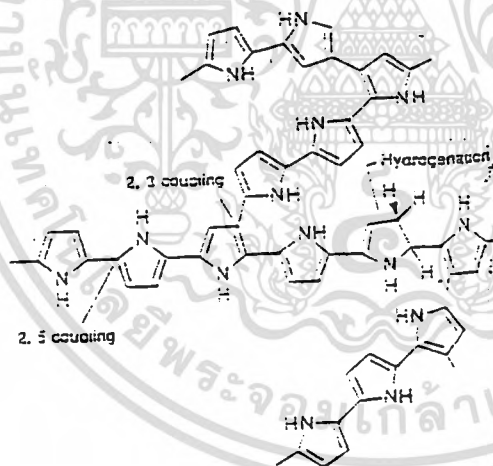


รูปที่ 2.18 แสดงการเกิดโพลิไพโรลด้วยเปอร์คลอเรต^[13]

หน่วยไพโรลจะต่อกันแบบไม่เฉพาะเจาะจง เพราะว่าการออกซิเดชันของมอนอเมอร์ในขั้นเริ่มต้นจะทำให้เกิดเรดิคัลแคตไอออนซึ่งจะว่องไวมาก ถึงแม้ว่าตามทฤษฎีแล้วการเกาะกันในตำแหน่ง 2,5 จะมีมากก็ตาม แต่ว่าการเกาะกันในตำแหน่ง 2,3 ที่เกิดน้อยกว่าจะใช้พลังงานน้อยกว่า

นอกจากนี้อาจเกิดการเติมไฮโดรเจนตรงโครงหลักของพอลิเมอร์โดยบังเอิญก็ได้ การเติมไฮโดรเจนตรงพันธะคู่ทำให้ลักษณะคอนจูเกตที่อยู่ระหว่างพันธะคู่และพันธะเดี่ยวถูกทำลายลงไปด้วย ดังนั้นทำให้คุณสมบัติในการนำไฟฟ้าลดลง

แบบจำลองโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบของพอลิไพโรลแสดงดังรูปข้างล่าง



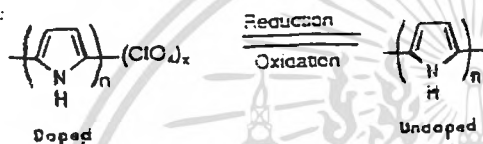
รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างของพอลิไพโรล^[13]

ในโครงสร้างพอลิเมอร์ หน่วยไพโรลจะมีประจุบวกซึ่งถูกบาลานซ์โดยแอนไอออน(ตัวโดป) ชนิดต่างๆ แอนไอออนสามารถถูกกำจัดออกจากฟิล์มพอลิเมอร์ได้เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าที่เป็นลบให้กับฟิล์มทำให้เกิดการรีดิวซ์กลับไปสู่สถานะที่เป็นกลาง (Undoping) ในทางตรงกันข้ามเมื่อให้ศักย์

ไฟฟ้าที่เป็นบวกไปออกซิไดส์ฟิล์มในสถานะที่เป็นกลางทำให้แอนไอออนสามารถเกาะติดได้ (Doping)

ในระหว่างที่เกิดกระบวนการ Doping และ Undoping ปริมาตรของฟิล์มจะเปลี่ยนไปมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับปริมาตรจำเพาะของแอนไอออน การเปลี่ยนสีก็เกิดขึ้นด้วยเนื่องจากว่าแถบสเปกตรัมช่วงวิสิเบิลของฟิล์มที่โด๊ปกับฟิล์มที่ไม่โด๊ปมีความแตกต่างกันมาก

ในสถานะ Undoping พอลิไพโรลมีคุณสมบัติเป็นกลางมีสีเขียวเหลืองโปร่งแสงเมื่อทำการโด๊ปจะกลายเป็นสีทึบที่สามารถดูดกลืนได้ทุกความยาวคลื่น



รูปที่ 2.20 แสดงพอลิไพโรลในรูปที่ถูกโด๊ปและไม่ถูกโด๊ป^[13]

2.5 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า

การเตรียมพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มีอยู่ 2 วิธีคือ วิธีทางเคมี และวิธีทางเคมีไฟฟ้า การเลือกวิธีการผลิตพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับสภาพของการนำไปใช้งานและค่าการนำไฟฟ้าที่ต้องการ

2.5.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีทางเคมี

ทำได้โดยใช้มอนอเมอร์ที่ต้องการจะสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์และทำการพอลิเมอร์ไรโซลในสารละลายกรด Protonic ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย และมีสารออกซิแดนซ์ที่แรงเช่น แอมโมเนียม เปอร์ออกซิไดซัลเฟต โพแทสเซียมไดโครเมต เปอร์ซัลเฟต เปอร์คลอเรต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์^[11]

ตัวอย่างการสังเคราะห์พอลิไพโรลด้วยวิธีทางเคมีสามารถทำได้ทั้ง 2 วิธีคือการสังเคราะห์สารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย หรืออาจทำในตัวทำละลายอินทรีย์ก็ได้

การสังเคราะห์พอลิไพโรลในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายด้วยวิธีทางเคมีสามารถทำได้โดยวิธี Armes method ซึ่งทำได้ดังนี้ ทำการละลายแอนไฮดริสเฟอริกคลอไรด์ (36กรัม) ในน้ำกลั่น 400 มิลลิลิตรที่กลั่นสองครั้งและทำให้เย็นที่ 0 °C ในอ่างน้ำแข็ง จากนั้นทำการเติมไพโรลที่กลั่นและทำการ Precool แล้วจำนวน 4 มิลลิลิตรลงในสารละลายเฟอริกคลอไรด์ ทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกวนอย่างแรงเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะเกิดพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำให้ทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 6 และล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้งจนกระทั่งสารละลายมีลักษณะเป็น Clear solution จากนั้นล้างด้วยเอทานอลและไดเอทิลอีเธอร์ ก่อนนำไปทำให้แห้งที่ 35 °C

การสังเคราะห์พอลิไพโรลในตัวทำละลายอินทรีย์ทำได้โดยวิธีของไมเออร์ ซึ่งทำได้ดังนี้ เติมไดเอทิลอีเธอร์จำนวน 16.9 กรัมลงในปีกเกอร์ที่มีแอนไฮดริสเฟอริกคลอไรด์จำนวน 500 มิลลิลิตร จากนั้นเติมไพโรลที่กลั่นและถูกทำให้เย็นแล้วจำนวน 12 มิลลิลิตรลงในสารละลายเฟอริกคลอไรด์อีเธอร์ ที่ทำการปั่นกวนและถูกทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 0 °C และทำการกวนต่อที่ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้พอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำจากนั้นทำการล้างและทำให้แห้งด้วยวิธีที่กล่าวมาแล้ว^[3]

2.5.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า^[11]

ใช้สารละลายกรด Protonic ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายหรือใช้สารละลายอินทรีย์เป็นตัว Dope ด้วยเทคนิค Potentiostatic , Galvanostatic และ Potential cycling

การเตรียมพอลิเมอร์ด้วยวิธีนี้จะได้เป็นฟิล์มบางที่สามารถประยุกต์ใช้ใน Molecular electronic , Photoelectronic devices และ Electrochromic display และพอลิเมอร์ที่เกาะกันเป็น แผ่นฟิล์มจะมีการเกาะกันอย่างหนาแน่น ผิวฟิล์มเรียบและมีคุณสมบัติทางแสง นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมความหนาของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นได้ตามต้องการด้วยการควบคุมประจุไฟฟ้าที่ใช้ในการเกิดอิเล็กโทรไลซิส

2.6 สารทางชีวภาพที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน

สารทางชีวภาพที่มีความหลากหลายแตกต่างกัน ถูกนำมาตรึงในฟิล์มที่ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน ทั้งชนิดฟิล์มนำไฟฟ้าและฟิล์มไม่นำไฟฟ้า ซึ่งสารทางชีวภาพมีขนาดที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ขนาดที่เป็นเซลล์จนถึงขนาดที่เป็นส่วนของโปรตีน อย่างไรก็ตามงานส่วนใหญ่ที่ประสบผลสำเร็จแล้วจะตรึงเอนไซม์ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ สำหรับการพัฒนาไบโอเซนเซอร์ที่ใช้เทคนิค Amperometric

ในจำพวกเอนไซม์ทั้งหลายที่พอจะนำมาใช้ได้นั้นได้มุ่งความสนใจไปที่เอนไซม์รีดอกซ์ (Redox enzyme) เอนไซม์เหล่านี้จะเร่งการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น (Substrate) ระหว่างสถานะรีดิวซ์ และสถานะออกซิไดซ์ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ที่ผิวอิเล็กโทรด ถึงแม้ว่าโดยทั่วไปรีดอกซ์เอนไซม์ที่ใช้ตรึงในพอลิเมอร์นั้นจะใช้ในการศึกษาโดยเทคนิค Amperometric แต่ก็ยังสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคเคมีไฟฟ้าอื่นๆได้ เช่น Conductimetry หรือ Potentiometry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแบ่งชนิดรีดอกซ์เอนไซม์โดยยึดหมู่ฟังก์ชันเป็นสำคัญแล้วจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. เอนไซม์ออกซิเดส (Oxidase enzyme)
2. เอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส (Dehydrogenase enzyme)

ทั้งสองชนิดนี้เป็นรีดอกซ์โปรตีนทั้งสิ้น คุณลักษณะของเอนไซม์เหล่านี้คือการที่มีหมู่โปรสเทติก (Prosthetic group) ซึ่งจะมีนิวคลีโอไทด์ยึดอยู่ด้วยพันธะโควาเลนต์ (เช่น FAD) คอมเพล็กซ์ควิโนน (Complex quinone) (เช่น PQQ) และ/หรือ โลหะทรานสิชันที่ยึดอยู่ด้วยพันธะโคออดิเนตอยู่ เช่น เหล็ก โมลิบดีนัม ทองแดง หรือสังกะสี ตำแหน่งของหมู่โปรสเทติกเหล่านี้อยู่ในพอลิเปปไทด์เมทริกซ์ของเอนไซม์ ซึ่งใกล้พื้นผิวของโปรตีนที่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์กับสารตั้งต้น (Substrate) ได้ ซึ่ง Prosthetic group เหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตำแหน่งว่องไว (Active site) ของเอนไซม์

แบบแผนปฏิกิริยาโดยทั่วไปสำหรับรีดอกซ์เอนไซม์อิเล็กโทรดมีดังนี้



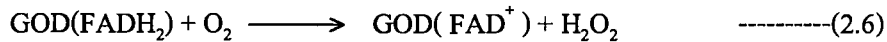
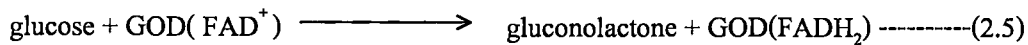
หมายเหตุ RED หมายถึงรูปรีดิวซ์ฟอร์ม และ OX หมายถึงรูปออกซิไดส์ฟอร์ม

เอนไซม์ออกซิเดสจะใช้ออกซิเจนทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งถือว่าเป็นสารตั้งต้นร่วมชนิดปฐมภูมิ (Primary co-substrate) เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสก็เป็นตัวอย่างชนิดหนึ่งของเอนไซม์ออกซิเดสด้วย^[7]

ในการหาปริมาณกลูโคสได้มีการใช้เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส (GOD) เพราะว่ามีความสะดวกและจลนศาสตร์ของเอนไซม์ก็เป็นที่ยู่งักกันดี^[6]

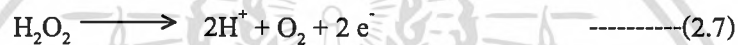
กลูโคสจะแพร่จากสารละลายบัลค์ (Bulk solution) ไปยังฟิล์มพอลิไพโรล ซึ่งบริเวณนี้ GOD จะเร่งการออกซิเดชันของกลูโคสโดยออกซิเจนที่ละลายอยู่ในสารละลาย จากนั้นจะเกิดการรีดักชัน สองอิเล็กตรอนสมมูลของออกซิเจน 1 โมเลกุล ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1 โมเลกุล ดังสมการต่อไปนี้^[6,7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



FAD^+ และ FADH_2 จะแทน Flavin adenine dinucleotide ของ GOD ในรูปออกซิไดส์ฟอร์ม และรีดิวซ์ฟอร์มตามลำดับ^[14]

อัตราการเกิดของ H_2O_2 จะสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น (Substrate) จากนั้นก็ทำการหาปริมาณ H_2O_2 ได้โดยเทคนิค Amperometric โดยการออกซิเดชันด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าที่ศักย์ประมาณ 0.7 โวลต์ เทียบกับขั้วคาโบลเมอิมิตัว ดังสมการต่อไปนี้^[7,8]



หรืออาจจะหาปริมาณ H_2O_2 โดยการใส่ปฏิกิริยาที่มี Mo(VI) เป็นตัวเร่งทำปฏิกิริยากับ ไอโอดีน ดังสมการต่อไปนี้

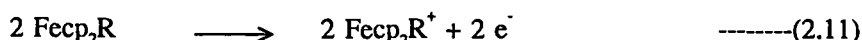


จากนั้นทำการวัดศักย์ I_2 ด้วยเทคนิค Amperometric ที่ศักย์น้อยกว่า 0.2 โวลต์เทียบกับขั้วคาโบลเมอิมิตัว^[8]

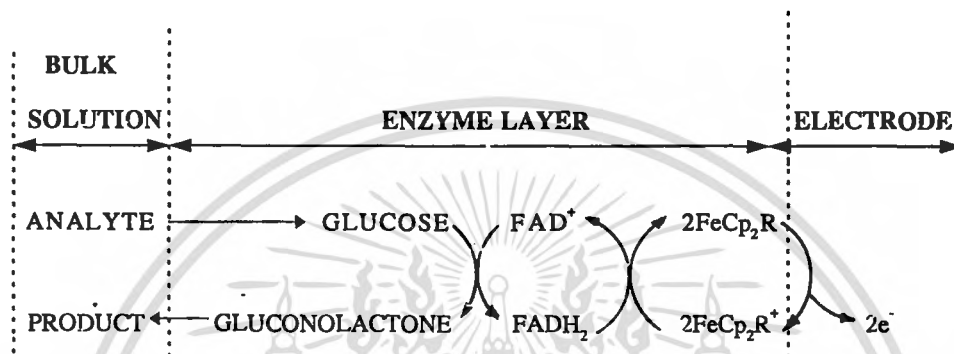
ในระหว่างการเกิดวัฏจักร เอนไซม์ถูกรีดิวซ์และถูกทำให้นำกลับมาใช้ได้โดยการออกซิเดชันกับออกซิเจนที่มีอยู่ในสารละลาย ยังมีอีกหนทางหนึ่งที่จะสามารถนำเอาเอนไซม์กลับมาใช้ได้ใหม่โดยการใช้ตัวกลางถ่ายเทอิเล็กตรอนแทนการใช้ออกซิเจน ตัวกลางนี้เป็นรีดอกซ์คัพเพิล (Redox couple) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเบา เช่น เฟอร์โรซีนมอนอคาร์บอกซิลิกเลซิด ($\text{Fc}(\text{cp})_2\text{R}^+$) ซึ่งจะมีการนำเอาอิเล็กตรอนวิ่งกลับไปกลับมาระหว่างบริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox centre) ของเอนไซม์กับพื้นผิวของอิเล็กโทรด ในวัฏจักรตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวกลางจะเกิดปฏิกิริยากับเอนไซม์ที่อยู่ในรูปรีดิวซ์ฟอร์ม และจะแพร่ไปยังผิวอิเล็กโทรดซึ่งจะทำให้มีการถ่ายเทประจุอย่างรวดเร็ว สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ลำดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดสามารถแสดงได้ดังนี้^[14]



รูปที่ 2.21 แสดงการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวอิเล็กโทรด

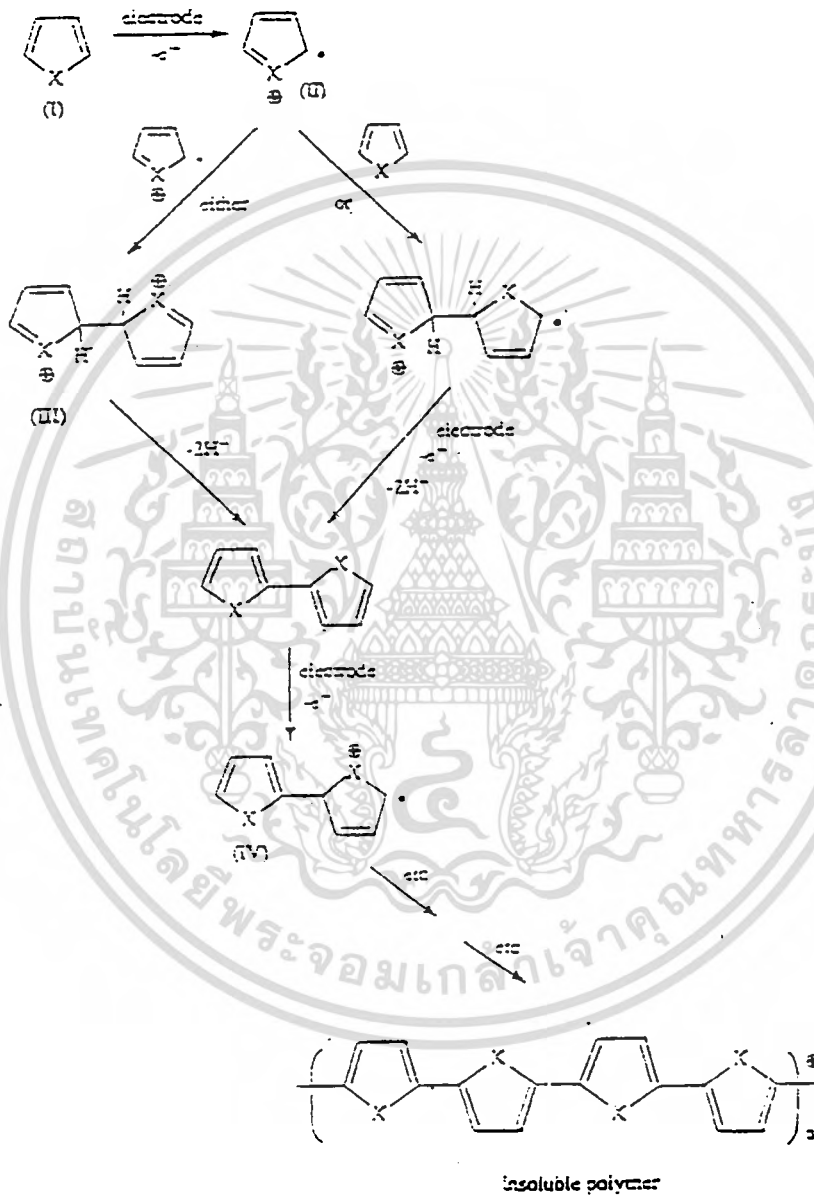
2.7 กระบวนการอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของมอนอเมอร์ไพโรลที่มี GOD อยู่ด้วย^[7]

ไพโรลสามารถเกิดอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันกลายเป็นฟิล์มพอลิไพโรลที่นำไฟฟ้าได้ที่ศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกมากกว่า 600 มิลลิโวลต์ เทียบกับขั้วคาโบลเมอิมตัว ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสภาวะของปฏิกิริยา และพื้นผิวของอิเล็กโทรดด้วย โดยทั่วไปแล้วฟิล์มจะเกิดที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Potentiostat) หรือ โดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยวิธีโพเทนชิโอสแตตมีข้อดีตรงที่ว่าสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ง่าย รูปร่างลักษณะที่หนาที่บของฟิล์มและคุณสมบัติมากมายทางกายภาพของฟิล์มจะขึ้นอยู่กับช่วงของตัวแปรต่างๆที่ประกอบด้วย ลักษณะของขั้วอิเล็กโทรด ความเร็วในการเกาะติดที่ขั้ว การที่มีสปีชีส์ไอออนิกและพอลิไอออนิก (Ionic and polyionic) และ pH ของสารละลายด้วย

ขั้นแรกจะเกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันของมอนอเมอร์ไพโรล (I) ไปเป็น Radical cation (II) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับ Radical cation ตัวที่สองให้เป็น Dimeric species (III) หรือทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ที่เป็นกลางแล้วเกิดออกซิเดชันของ Dimer ไปเป็นโครงสร้างที่ 3 (III) ได้เหมือนกัน จากนั้นก็จะเกิดการเสียสองโปรตอนได้ไดเมอร์ดังโครงสร้างที่ 4 (IV) ยิ่งไปกว่านั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาคัพปลิง (Coupling) ชนิดนี้จะนำไปสู่การเกิดโพลิเมอร์และในที่สุดก็จะเกิดการยึดเกาะติดของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นพอลิแคตไอออนิกที่ขั้วอิเล็กโทรด^[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแผนต่างๆไปสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันแสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงกลไกการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าของมอนอเมอร์ไฟโรล⁽⁷⁾

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การวัดค่าการนำไฟฟ้า (Measurement of Electrical Conductivity)^[12]

การวัดค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างโดยวิธี Four-point probe method เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วแต่ก็มีปัญหาในเรื่องของความถูกต้องที่เที่ยงตรง

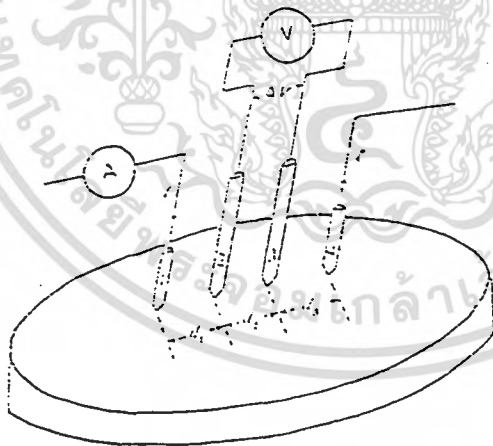
ในการวัดวิธีนี้ได้ใช้อิเล็กโทรดขนาดเล็กจำนวน 4 ขั้วซึ่งเรียงกันเป็นแนวเส้นตรงและมีระยะห่างเท่ากัน เมื่อทำการวัดโดยการนำอิเล็กโทรดสัมผัสกับผิวตัวอย่างแล้วทำการให้กระแส (I) ผ่านจุดสัมผัสที่ 1 และ 4 จากนั้นทำการวัดผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสัมผัสที่ 2 และ 3 ค่าการนำไฟฟ้าของตัวอย่างหาได้จากสมการดังนี้

$$\sigma = I \pi \ln 2 / (dv)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างจุดสัมผัสแต่ละจุด

ความเที่ยงตรงถูกต้อง ของการวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบ Four-point probe จะขึ้นอยู่กับ

- 1) ขนาดของตัวอย่างต้องใหญ่พอเมื่อเทียบกับระยะห่างของอิเล็กโทรด
- 2) ความหนาของตัวอย่างต้องน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด



รูปที่ 2.23 แสดงการวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบ Four-point probe method^[12]

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมี

1. มอนอเมอริไพโรล (Pyrrole)
2. เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส (Oxidase enzyme)
3. โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)
4. โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4)
5. โพแทสเซียมฟอสเฟต (K_3PO_4)
6. น้ำกลั่น
7. อะซิโตน (CH_3COCH_3)
8. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
9. ก๊าซไนโตรเจน
10. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)
11. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (KH_2PO_4)
12. ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4)
13. β -D(+) glucose

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดกลั่นแบบลดความดัน ประกอบด้วยขวดก้นกลม คอนเดนเซอร์ เทอร์โมมิเตอร์ บีม ดูดอากาศ
2. แผ่นแพลทินัม ขนาด 2 x 1 ตร.ซม.
3. ขั้วเคาเตอร์แพลทินัม (Counter Pt electrode)
4. Saturated Calomel Electrode (SCE)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ขวดน้ำกลั่น
6. เครื่องให้ความร้อน
7. เครื่องให้ความเย็น
8. เครื่องโพเทนชิโอสแตต/กัลวานอสแตต (Potentiostat/Galvanostat)
9. เครื่องสแกนิงอิเล็กตรอนไมโครสโคป(Scanning Electron Microscope, SEM)
10. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR)
11. ไมโครปิเปต ขนาด 100 และ 1000 ไมโครลิตร
12. เครื่องอัลตราโซนิก
13. เครื่องแก้วที่จำเป็น เช่น ขวดวัดปริมาตร ปีกเกอร์ กรวยแก้ว ฯลฯ

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

3.2.1 การทำไพโรไลส์ให้บริสุทธิ์

1. ฟันก๊าซไนโตรเจนลงในมอนอเมอร์ไพโรไล เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ก๊าซออกซิเจน
2. ทำการล้างคอนเดนเซอร์โดยการกลั่นอะซิโตน
3. ทำการกลั่นมอนอเมอร์ไพโรไลแบบลดความดัน

(หมายเหตุ : เมื่อทำการกลั่นไพโรไลส์เสร็จแล้วควรหุ้มขวดกันกลมให้มีดขีดไม่ให้โดนแสงแดดและนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นทันที)

3.2.2 การเตรียมสารละลาย

3.2.2.1 การเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ปิเปตกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 95.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จำนวน 2.66 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น จนได้ถึงขีดวัดปริมาตร เขย่าให้สารละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกัน

3.2.2.2 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์

ซึ่งโพแทสเซียมคลอไรด์ 7.4555 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นจนละลายหมด จากนั้นเทใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ได้ถึงขีดบอกระดับ

3.2.2.3 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ซึ่งโปแตสเซียมซัลเฟต 17.4258 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นจนละลายหมดจากนั้นเทใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ได้ถึงขีดบอกระดับ

3.2.2.4 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์

ซึ่งโพแทสเซียมฟอสเฟต 17.316 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นจนละลายหมดจากนั้นเทใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ได้ถึงขีดบอกระดับ

3.2.2.5 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5

ซึ่งโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนอโรฟอสเฟต 12.92 กรัม และ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.2145 กรัม ทำการละลายด้วยน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ครบ 1000 มิลลิลิตรและทำการปรับ pH โดยใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์

3.2.2.6 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7

ซึ่งโปแตสเซียมไดไฮโดรเจนอโรฟอสเฟต และ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3.925 กรัม ทำการละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ครบ 1000 มิลลิลิตร และทำการปรับ pH ด้วย เครื่องพีเอชมิเตอร์

3.2.2.7 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10

ซึ่งไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 4.46 กรัม และ โซเดียมฟอสเฟต 0.3762 กรัม ทำการละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ครบ 1000 มิลลิลิตร และทำการปรับpHด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์

3.2.2.8 การเตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐาน 0.1 โมลาร์

ซึ่ง β -D(+) glucose 4.505 กรัม ทำการละลายด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ครบ 250 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำความสะอาดด้วยวิธีการขัด

นำแผ่นแพลทินัมมาขัดทำความสะอาดขั้นต้นโดยใช้ผงอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีลักษณะเป็น Slurry โดยใช้น้ำกลั่นเล็กน้อย เมื่อขัดจนสะอาดดีแล้วก็นำไปทำความสะอาดโดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นเช็ดให้แห้ง

(หมายเหตุ : ก่อนนำมาทำความสะอาดด้วยวิธีการขัด ให้แช่แผ่นแพลทินัมในกรดไนตริกเข้มข้นเสียก่อนเป็นเวลา 1 คืน หลังจากนั้นนำมาทำความสะอาดด้วยการขัดแล้วนำมาทำความสะอาดด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง)

การทำความสะอาดด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า

นำแผ่นแพลทินัมมาต่อเข้ากับวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้าจากนั้นทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบโดยใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร โดยใช้แผ่นแพลทินัมเป็นทั้งขั้วทำงานและขั้วเคาเตอร์ และใช้ขั้วคาโบลเมลอิมตัวเป็นขั้วอ้างอิง ทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ -0.2 ถึง 1.60 โวลต์ เทียบกับขั้วคาโบลเมลอิมตัว ด้วยอัตราเร็วเท่ากับ 50 มิลลิโวลต์ต่อนาที เป็นจำนวน 100 รอบ จากนั้นนำแผ่นแพลทินัมมาล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วทำให้แห้ง

3.2.4 การเตรียมฟิล์มพอลิไพโรล

เตรียมสารละลายที่ประกอบด้วย มอนอเมอร์ไพโรล 0.3 โมลาร์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์ สารละลายบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ และ เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 Unit/มิลลิลิตร จำนวน 5 มิลลิลิตร นำแผ่นแพลทินัมที่ทำหน้าที่เป็นขั้วเคาเตอร์ ขั้วคาโบลเมลอิมตัว และแผ่นแพลทินัมที่ทำหน้าที่เป็นขั้วทำงานที่ผ่านการทำความสะอาดมาแล้วจุ่มลงในสารละลาย โดยให้ส่วนของแผ่นแพลทินัมที่จุ่มในสารละลายมีพื้นที่ เท่ากับ 1 x 1 ตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 0.8 โวลต์

เมื่อทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าครบตามกำหนดที่ต้องการ (ในโครงการพิเศษนี้จะป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นเวลา 2,000 วินาที) จะได้ฟิล์มของพอลิไพโรลเกาะอยู่บนผิวของแผ่นแพลทินัม นำแผ่นแพลทินัมดังกล่าวมาล้างด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตหลายๆครั้ง แล้วทำการเก็บแผ่นฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส

3.2.5 การวัดปริมาณกลูโคส

นำแผ่นอิเล็กโทรดที่สังเคราะห์ได้มาทำการหาปริมาณกลูโคสโดยเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่มี pH 7 จำนวน 4,900 มิลลิลิตร จากนั้นทำการให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์เทียบกับขั้วคาโธดอิเล็กโทรด รวจน Base line คงที่ แล้วจึงฉีดสารละลายกลูโคสลงไปให้มีความเข้มข้นของกลูโคสในสารละลายเป็น 2 mM จากนั้นรอจนคงที่แล้วทำการฉีดสารละลายกลูโคสอีกครั้งให้มีความเข้มข้นในของกลูโคสในสารละลายเป็น 4mM , 6mM , 8mM , 10mM ตามลำดับ (หมายเหตุ ก่อนฉีดทุกครั้งต้องรอจน Base line คงที่ก่อนทุกครั้ง)

3.3 การตรวจสอบคุณลักษณะของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธี

Electrochemical Polymerization

3.3.1 การหาหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

ชุดเอาพอลิเมอร์ที่แห้งออกจากผิวของแผ่นแพลทินัม นำมาอัดกับ KBr (KBr pellet) โดยน้ำหนักของโพลิเมอร์เท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก KBr จากนั้นนำไปตรวจสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer FTIR)

3.3.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของฟิล์มพอลิเมอร์ โดยใช้

เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

นำแผ่นแพลทินัมที่มีฟิล์มพอลิเมอร์เกาะบนผิวและผ่านการทำให้แห้ง นำไปตรวจสอบด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope , SEM)

3.3.3 การศึกษาค่าการนำไฟฟ้า

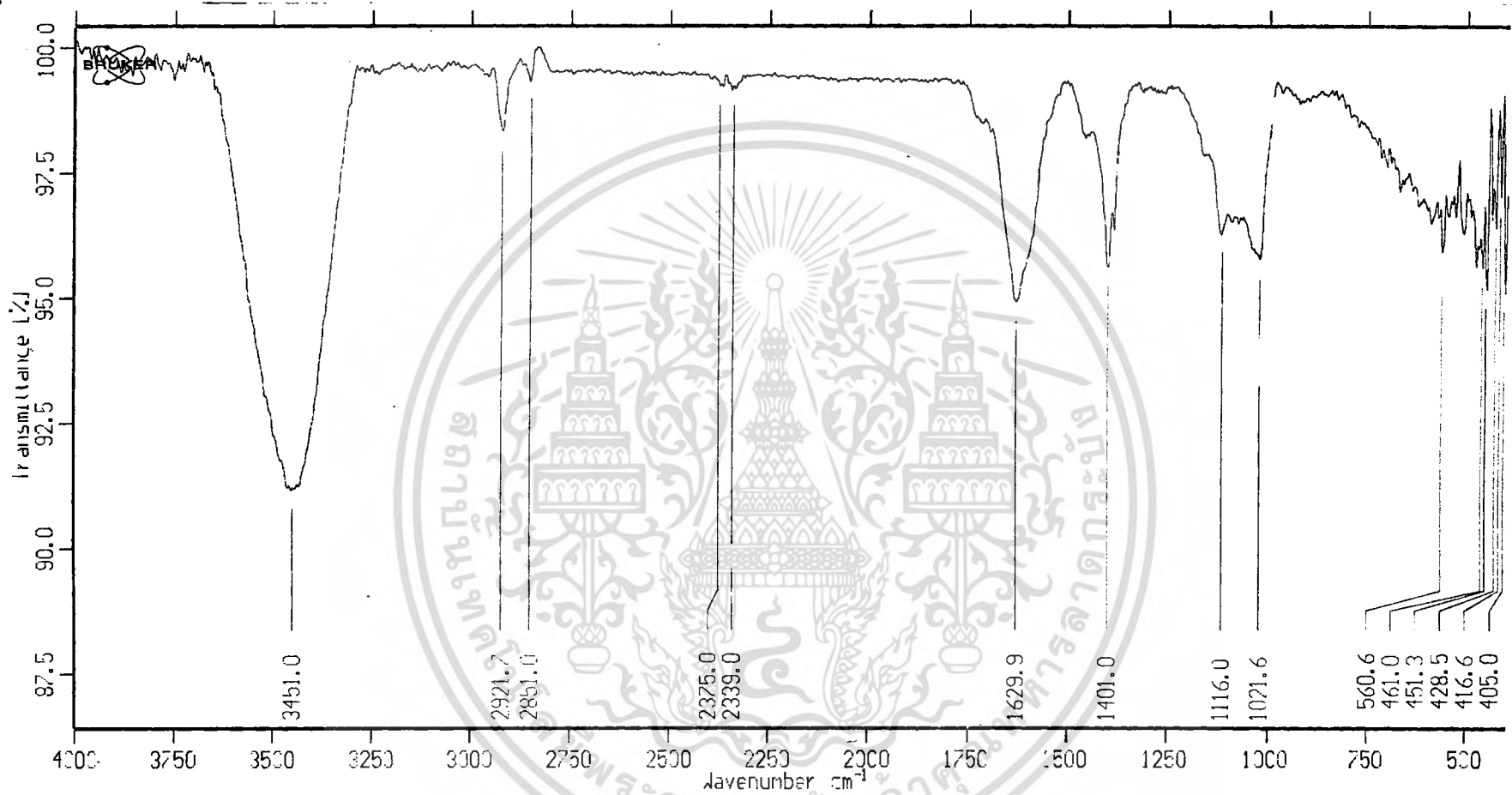
นำแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้และผ่านการทำให้แห้งแล้วนำไปทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า Four-point probes technique

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

4.1 การวิเคราะห์และตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มพอลิไพโรล (Polypyrrole) ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เมื่อนำฟิล์มพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์และ pH ต่างๆกัน มาตรวจสอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) พบว่าสารที่ได้จากการสังเคราะห์มีหมู่ที่ทำให้เกิดการสั่นหลักซึ่งสามารถบ่งบอกถึงประเภทของหมู่ทำหน้าที่เฉพาะ (Functional group) ของโมเลกุลได้ นอกจากนี้ยังพบการสั่นที่แสดงให้เห็นถึงอนุมูลแอนไอออนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์อีกด้วย ดังแสดงในตาราง

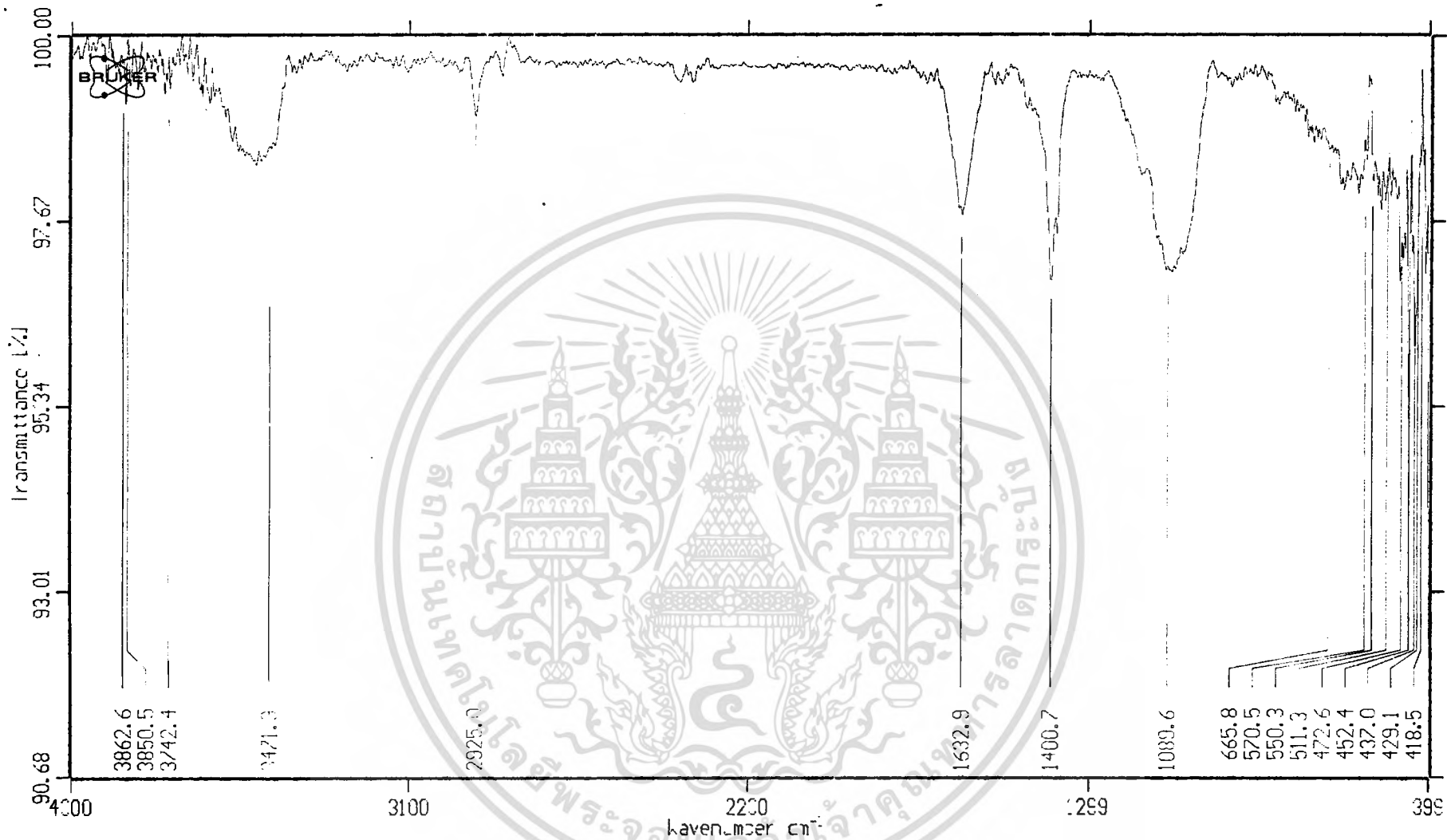


รูปที่ 4.1 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไพโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์
 ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ pH5
 (เลขคลื่น 4000 - 400 cm⁻¹ จำนวนสแกน 8 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.2 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ และบัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 7

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3471.9	98.4	การยืดของ N-H
2925.0	99.0	การยืดของ =C-H
2850.9	99.5	การยืดของ =C-H
1632.9	97.7	การยืดของ C=C
1089.6	97.0	การยืดของ C-N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

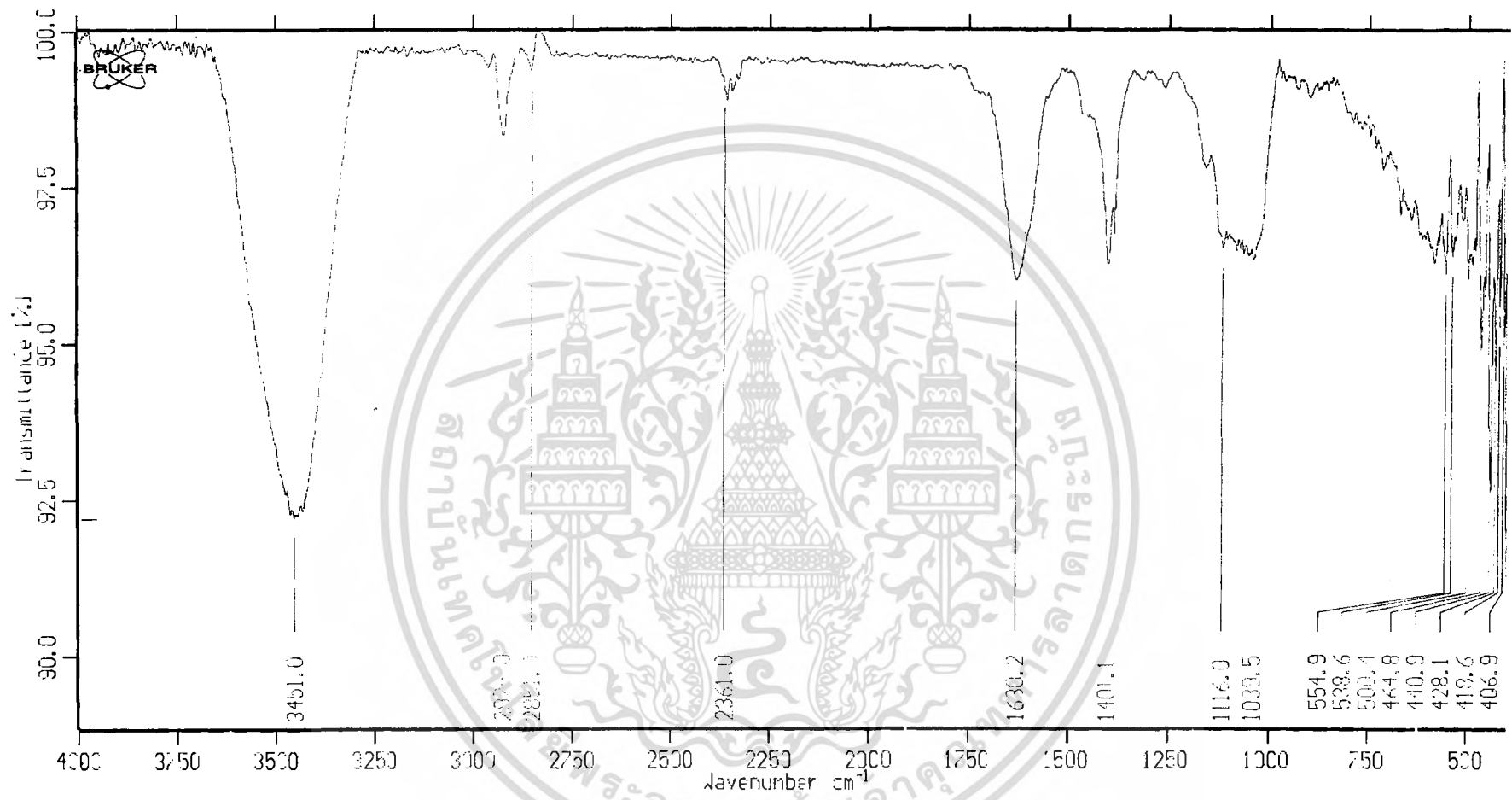


รูปที่ 4.2 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไพโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์
 ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ pH7
 (เลขคลื่น 4000 - 400 cm^{-1} จำนวนสแกน 8 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.3 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ และบัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 10

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3451.0	92.2	การยืดของ N-H
2924.0	98.3	การยืดของ =C-H
2851.0	99.4	การยืดของ =C-H
1630.2	96.0	การยืดของ C=C
1116.0	96.5	การยืดของ C-N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

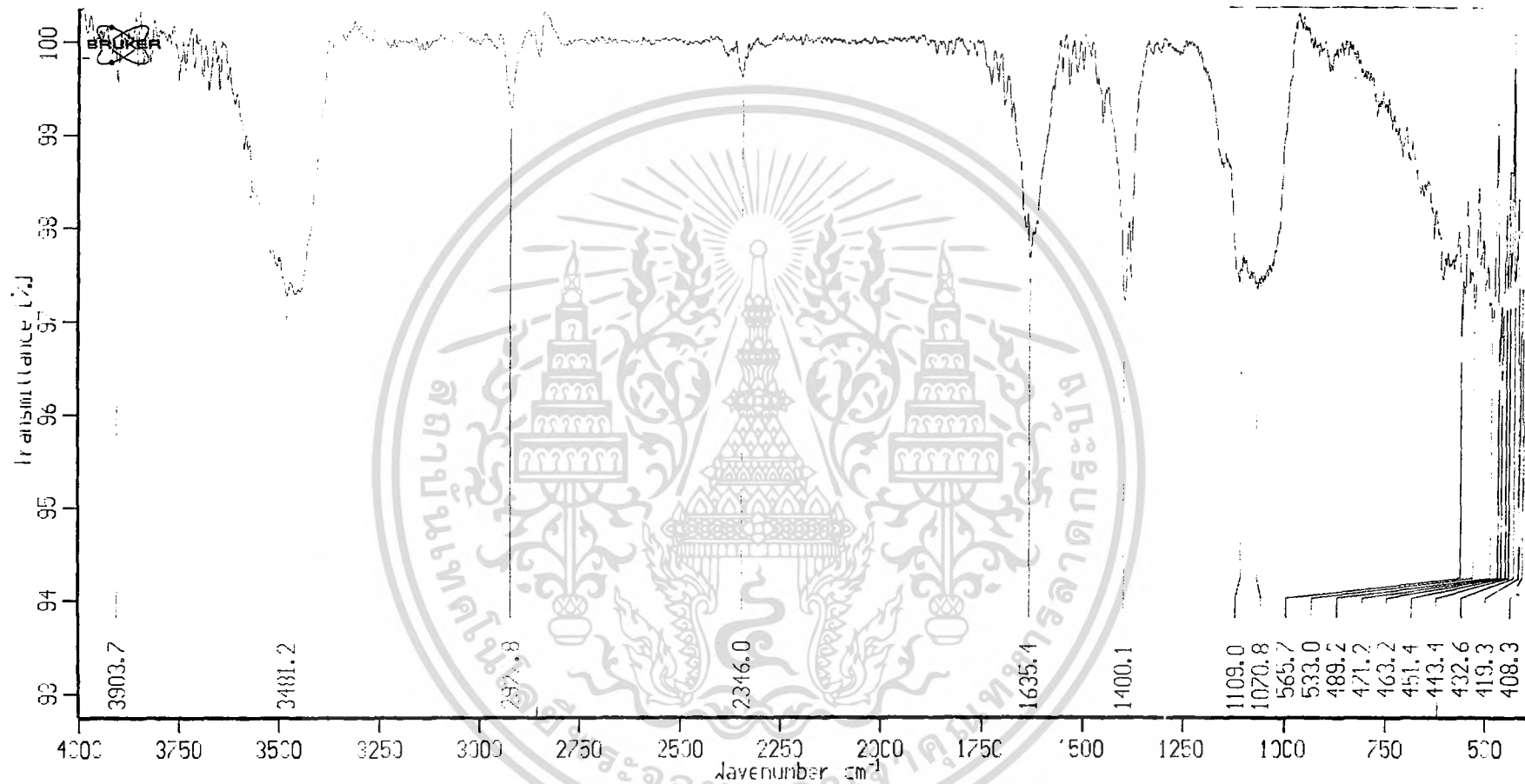


รูปที่ 4.3 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไพโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์
 ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ pH10
 (เลขคลื่น 4000 - 400 cm⁻¹ จำนวนสแกน 8 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.4 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และบัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 5

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3481.2	97.3	การยืดของ N-H
2922.8	99.3	การยืดของ =C-H
2858.3	99.8	การยืดของ =C-H
1635.4	91.7	การยืดของ C=C
1109.0	91.5	การยืดของ C-N
612.9	91.5	SO_4^{2-} (anionic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

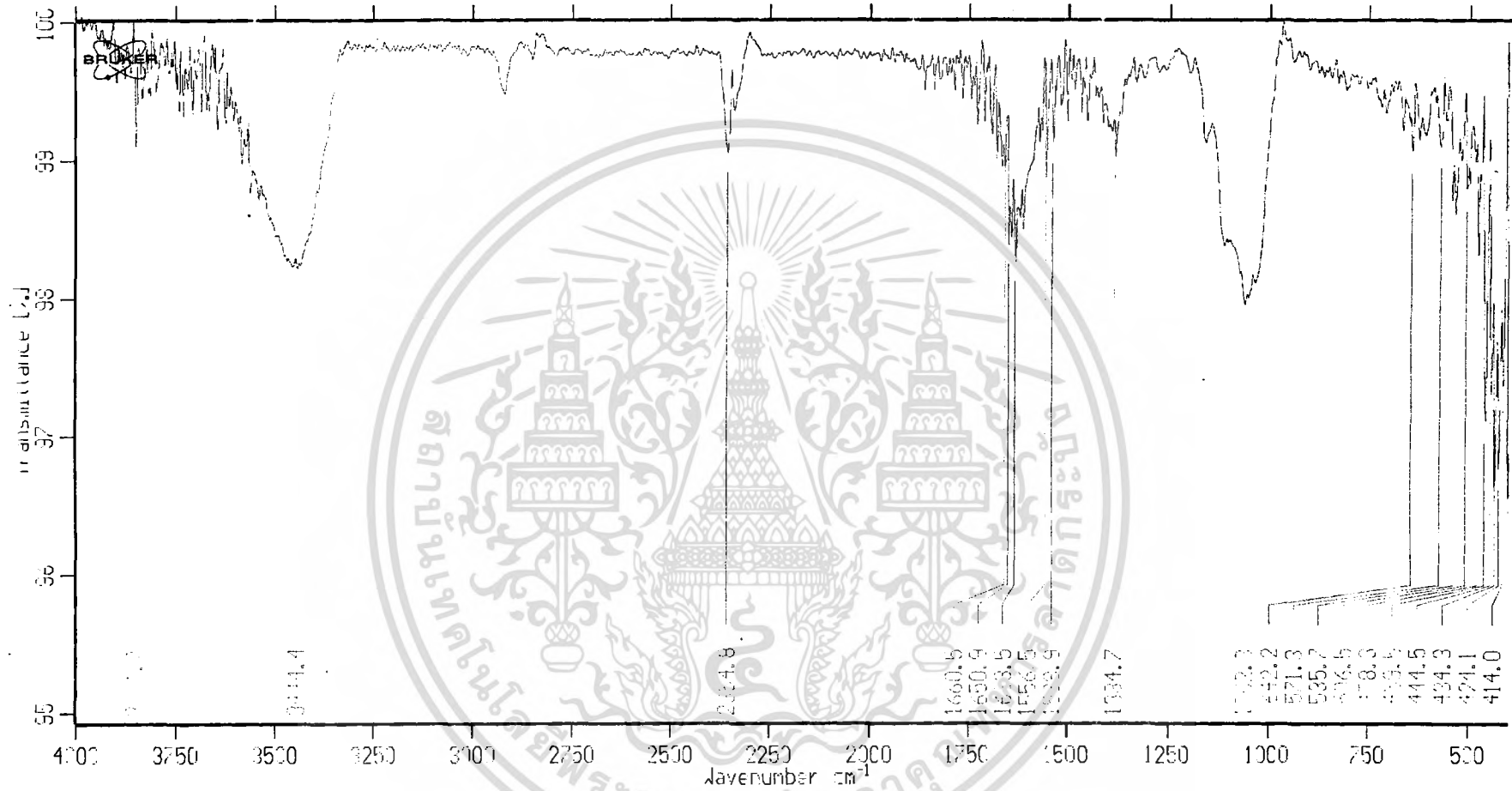


รูปที่ 4.4 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไพโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์
 ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตที่ pH5
 (เลขคลื่น 4000 - 400 cm⁻¹ จำนวนสแกน 8 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.5 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และบัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 7

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3444.4	98.2	การยืดของ N-H
2916.7	99.5	การยืดของ =C-H
2850.0	99.7	การยืดของ =C-H
1633.5	98.3	การยืดของ C=C
1062.3	98.0	การยืดของ C-N
642.2	99.1	SO_4^{2-} (anionic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

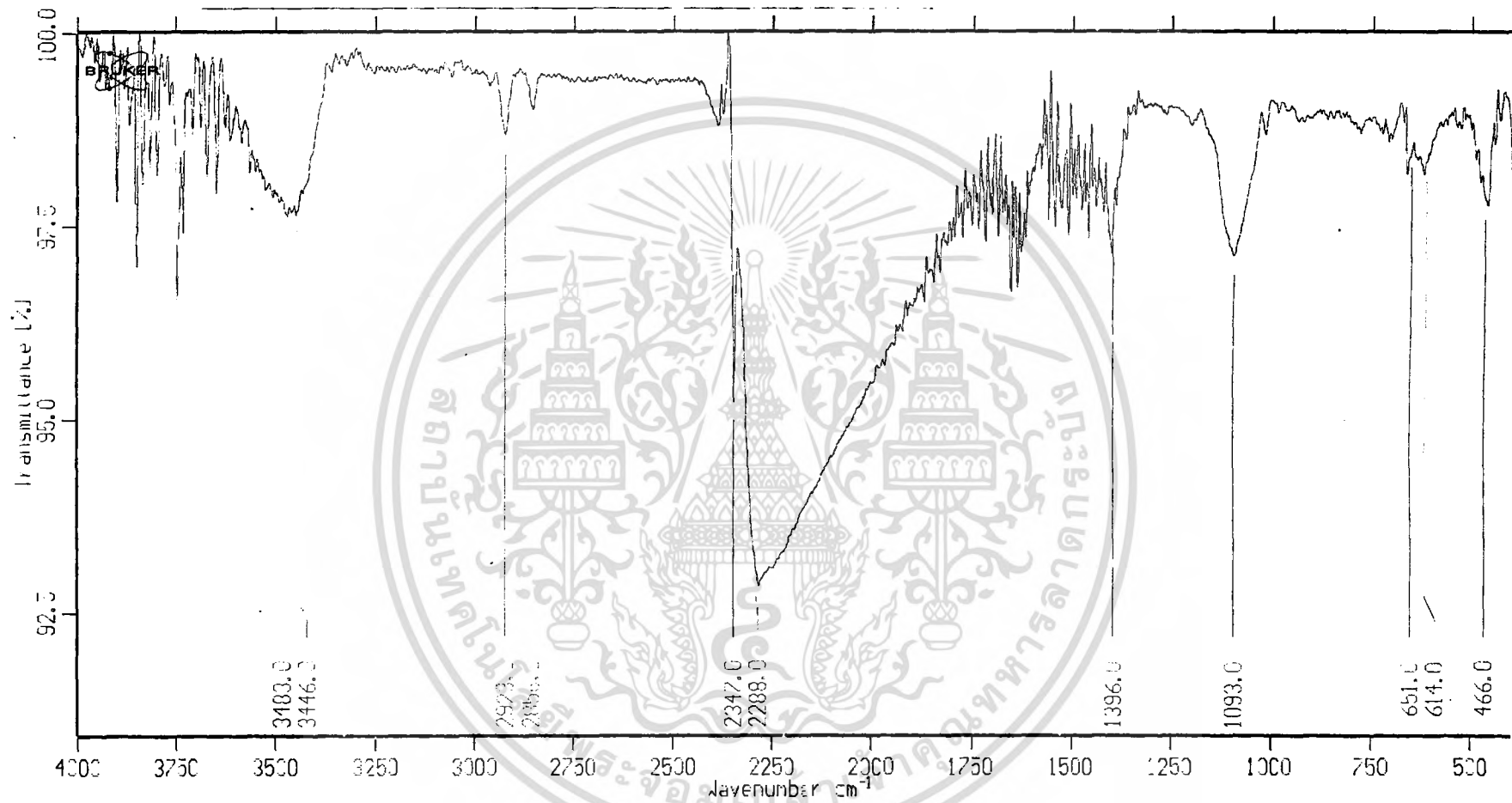


รูปที่ 4.5 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไพลด์ ที่ได้จากการสังเคราะห์
 ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตที่ pH7
 (เลขคลื่น 4000 - 400 cm⁻¹ จำนวนสแกน 8 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.6 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และบัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 10

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3446.0	97.6	การยืดของ N-H
2923.0	98.7	การยืดของ =C-H
2856.0	99.0	การยืดของ =C-H
1633.3	97.1	การยืดของ C=C
1093.0	97.0	การยืดของ C-N
614.0	98.1	SO_4^{2-} (anionic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

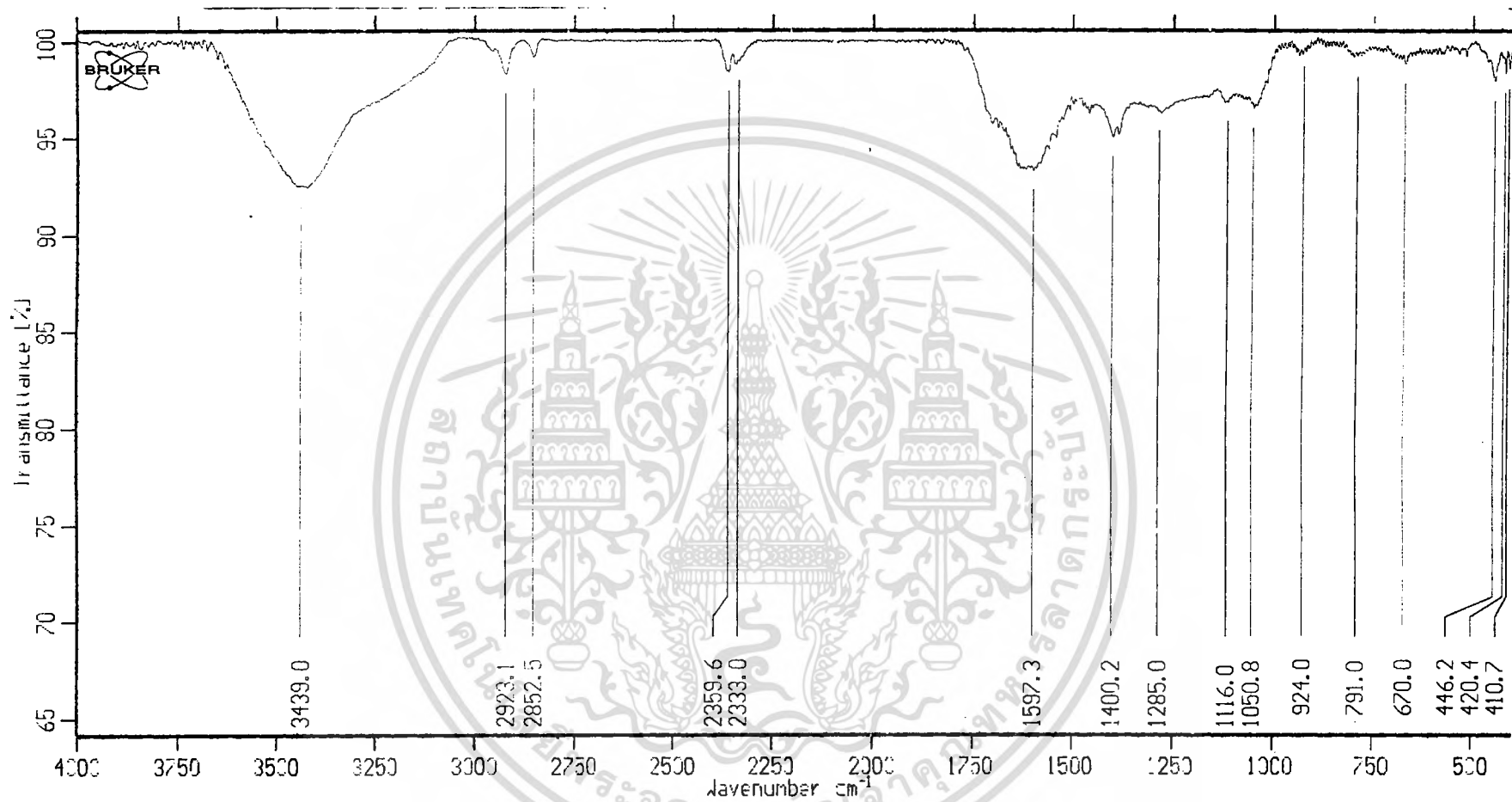


รูปที่ 4.6 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดเปกตรัมของ พอลิไพโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตที่ pH10 (เลขคลื่น 4000 - 400 cm⁻¹ จำนวนสแกน 8 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.7 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์และบัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 5

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3439.0	92.3	การยืดของ N-H
2923.1	98.0	การยืดของ =C-H
2852.5	99.2	การยืดของ =C-H
1597.3	93.0	การยืดของ C=C
1116.0	96.6	การยืดของ C-N
1050.8	96.4	PO_4^{3-} (anionic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

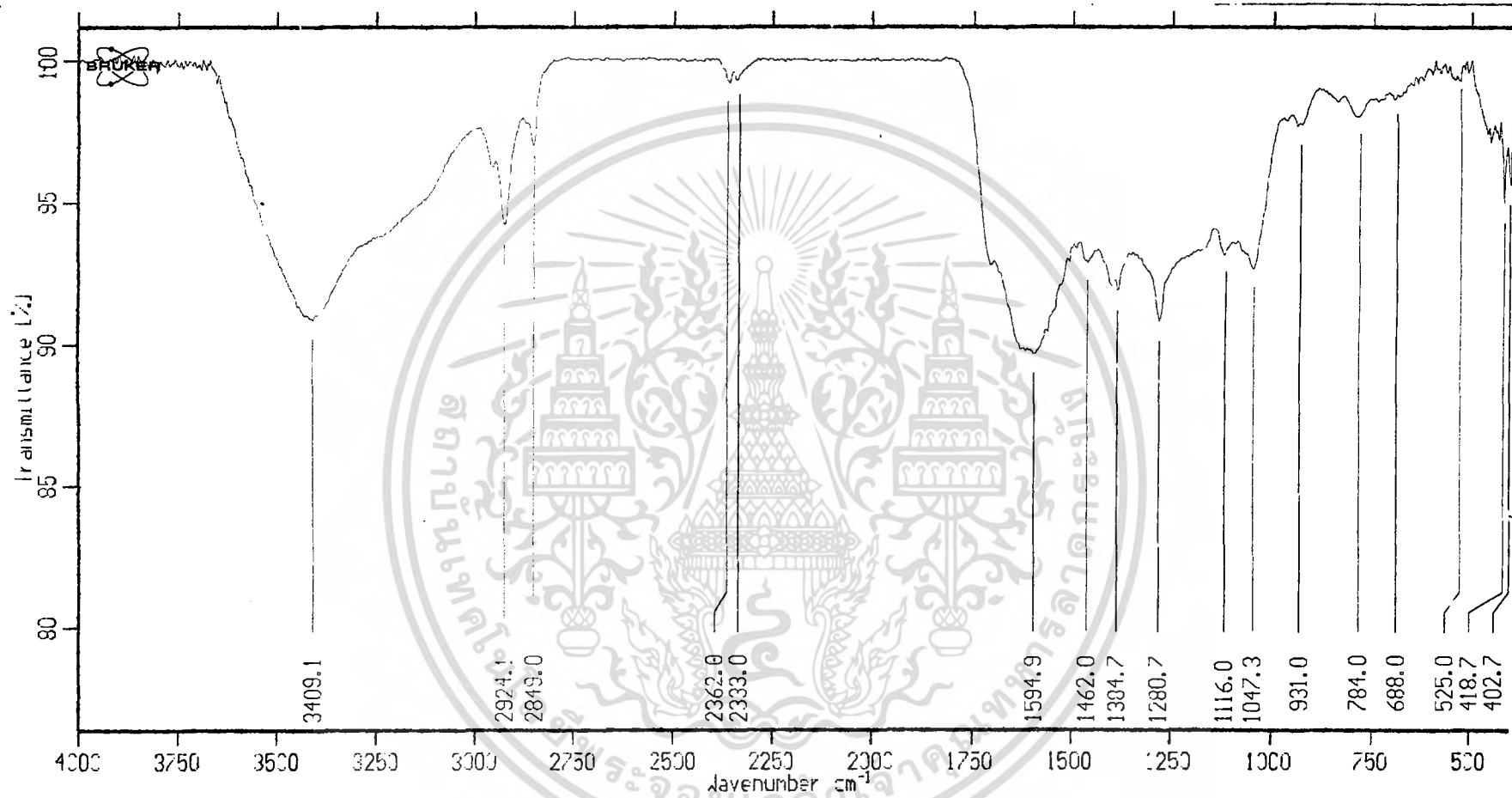


รูปที่ 4.7 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไพโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ pH5 (เลขคลื่น 4000 - 400 cm^{-1} จำนวนสแกน 8 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.8 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์และบัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 7

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3409.1	90.8	การยืดของ N-H
2924.1	94.2	การยืดของ =C-H
2849.0	97.0	การยืดของ =C-H
1594.9	89.8	การยืดของ C=C
1116.0	93.3	การยืดของ C-N
1047.3	92.8	PO_4^{3-} (anionic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

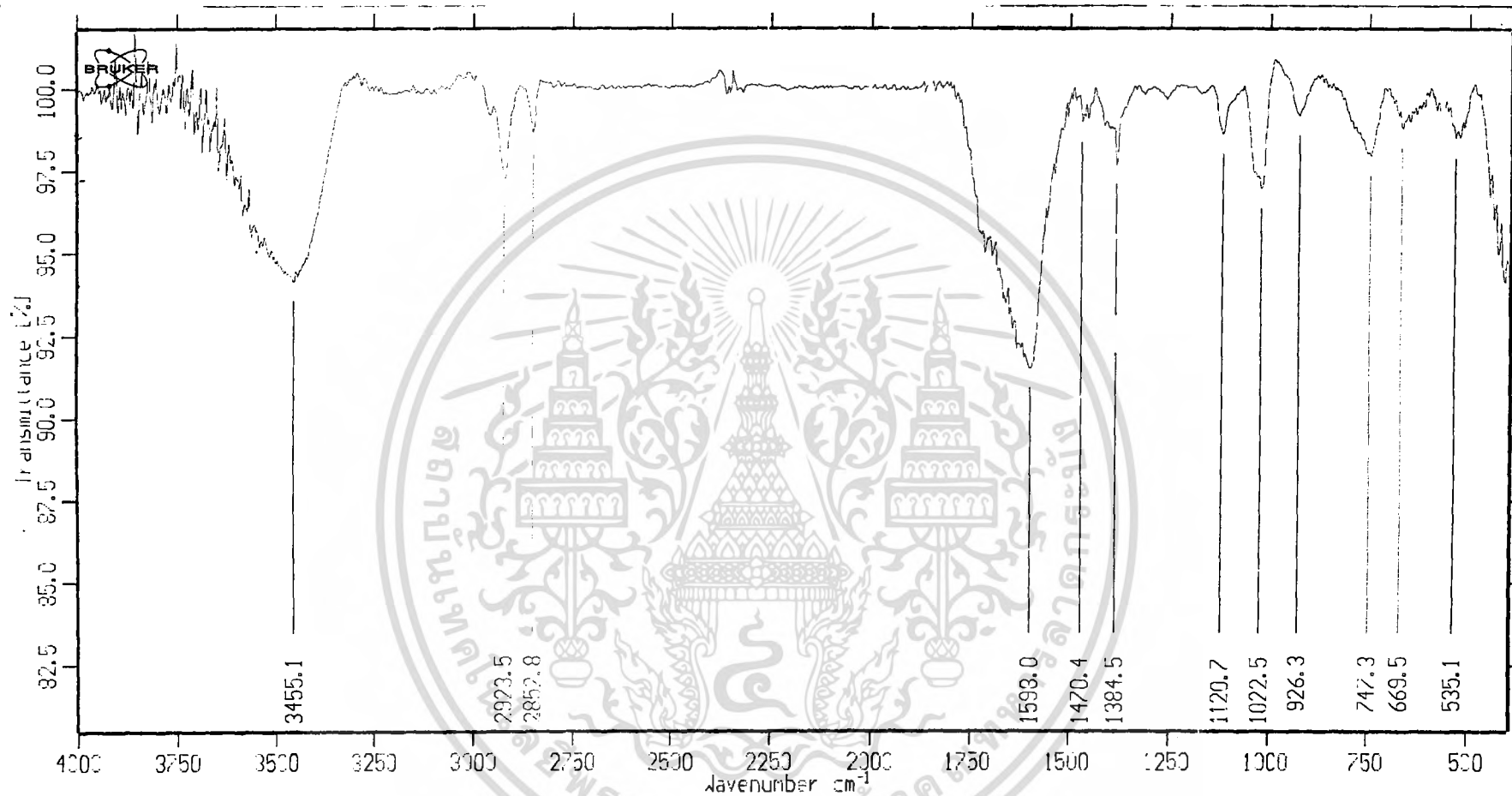


รูปที่ 4.8 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไพโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์
 ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟตที่ pH7
 (เลขคลื่น 4000 - 400 cm⁻¹ จำนวนสแกน 8 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.9 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 5 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3455.5	94.0	การยืดของ N-H
2923.5	94.5	การยืดของ =C-H
2852.8	98.5	การยืดของ =C-H
1598.0	91.5	การยืดของ C=C
1120.7	98.5	การยืดของ C-N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไพโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์

ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ pH 5

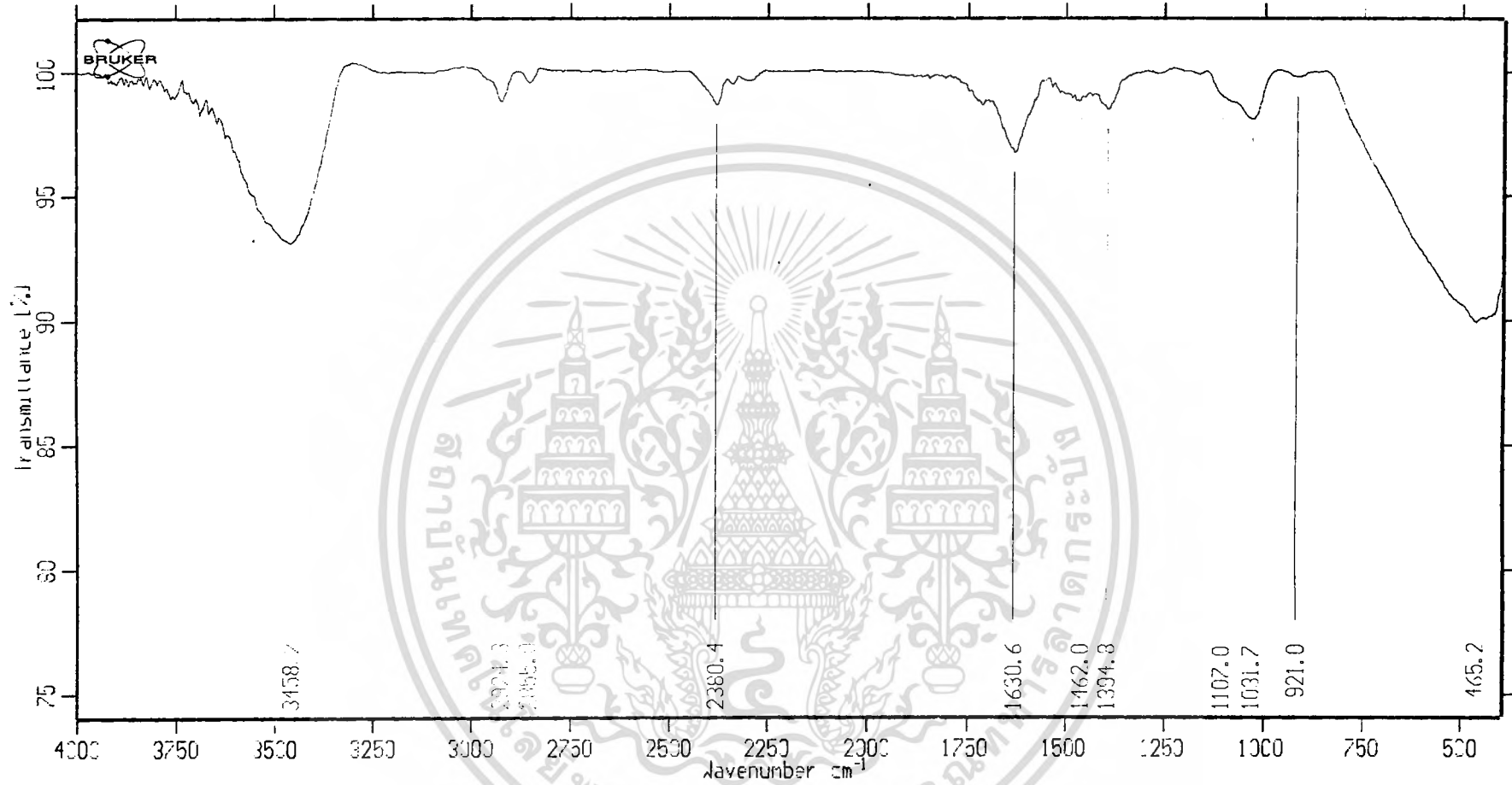
และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml (เลขคลื่น 4000 - 400 cm⁻¹ จำนวนสแกน 8 ครั้ง

ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.10 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 7 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3458.2	93	การยืดของ N-H
2924.3	98.8	การยืดของ =C-H
2855.0	99.6	การยืดของ =C-H
1630.6	96.8	การยืดของ C=C
1107.0	98.7	การยืดของ C-N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

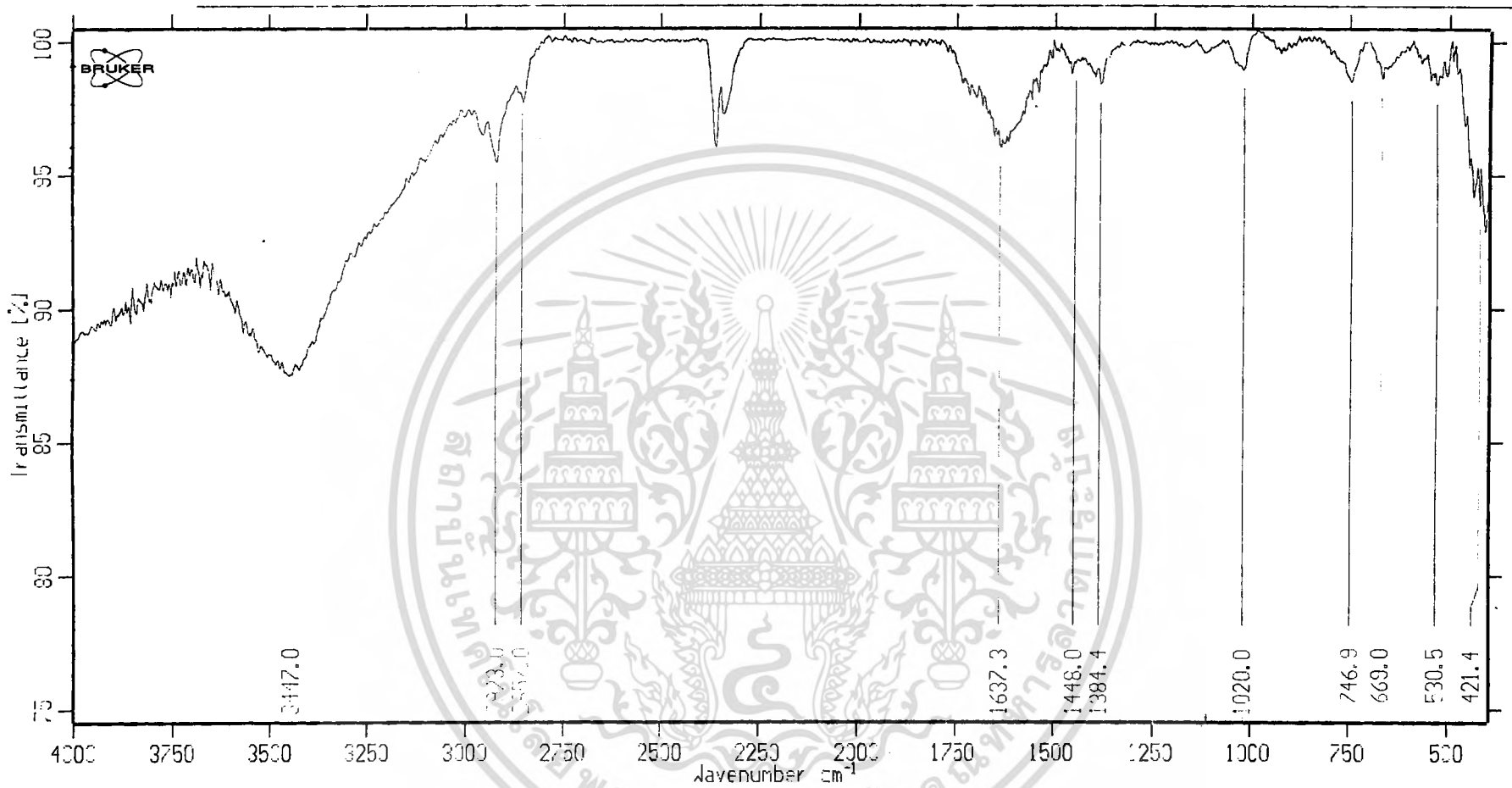


รูปที่ 4.10 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไพโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ pH 7 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml (เลขคลื่น 4000 - 400 cm⁻¹ จำนวนสแกน 8 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.11 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 10 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3447.0	87.5	การยืดของ N-H
2923.0	95.5	การยืดของ =C-H
2857.0	98.0	การยืดของ =C-H
1637.3	96.3	การยืดของ C=C
1020.0	99.0	การยืดของ C-N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

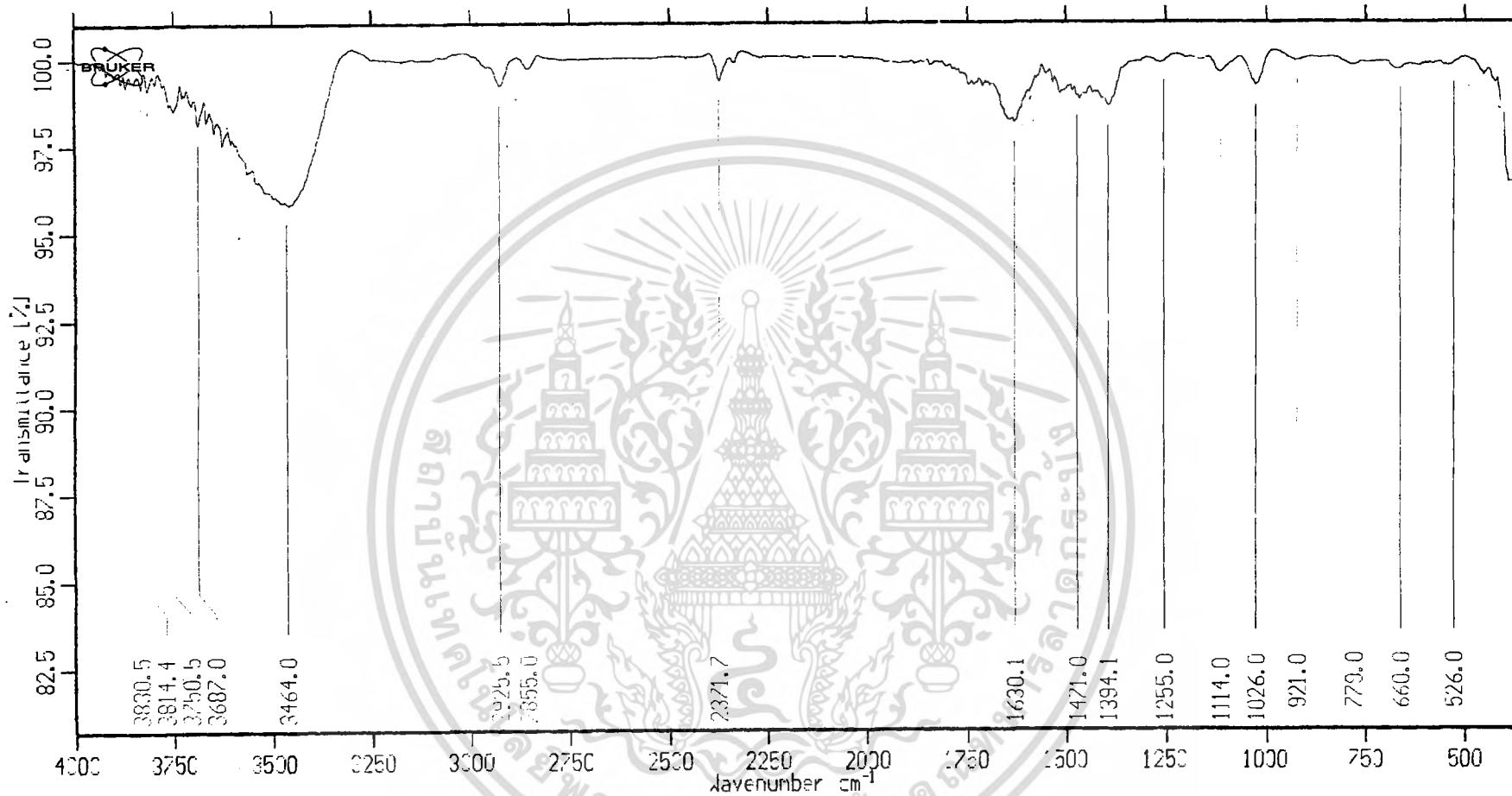


รูปที่ 4.11 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไพโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์
 ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่ pH 10
 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml (เลขคลื่น 4000 - 400 cm^{-1} จำนวนสแกน 8 ครั้ง
 ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.12 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 5 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3464.0	95.8	การยืดของ N-H
2925.5	99.2	การยืดของ =C-H
2855.0	99.7	การยืดของ =C-H
1630.1	98.1	การยืดของ C=C
1114.0	99.1	การยืดของ C-N
660.0	99.5	SO_4^{2-} (anionic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

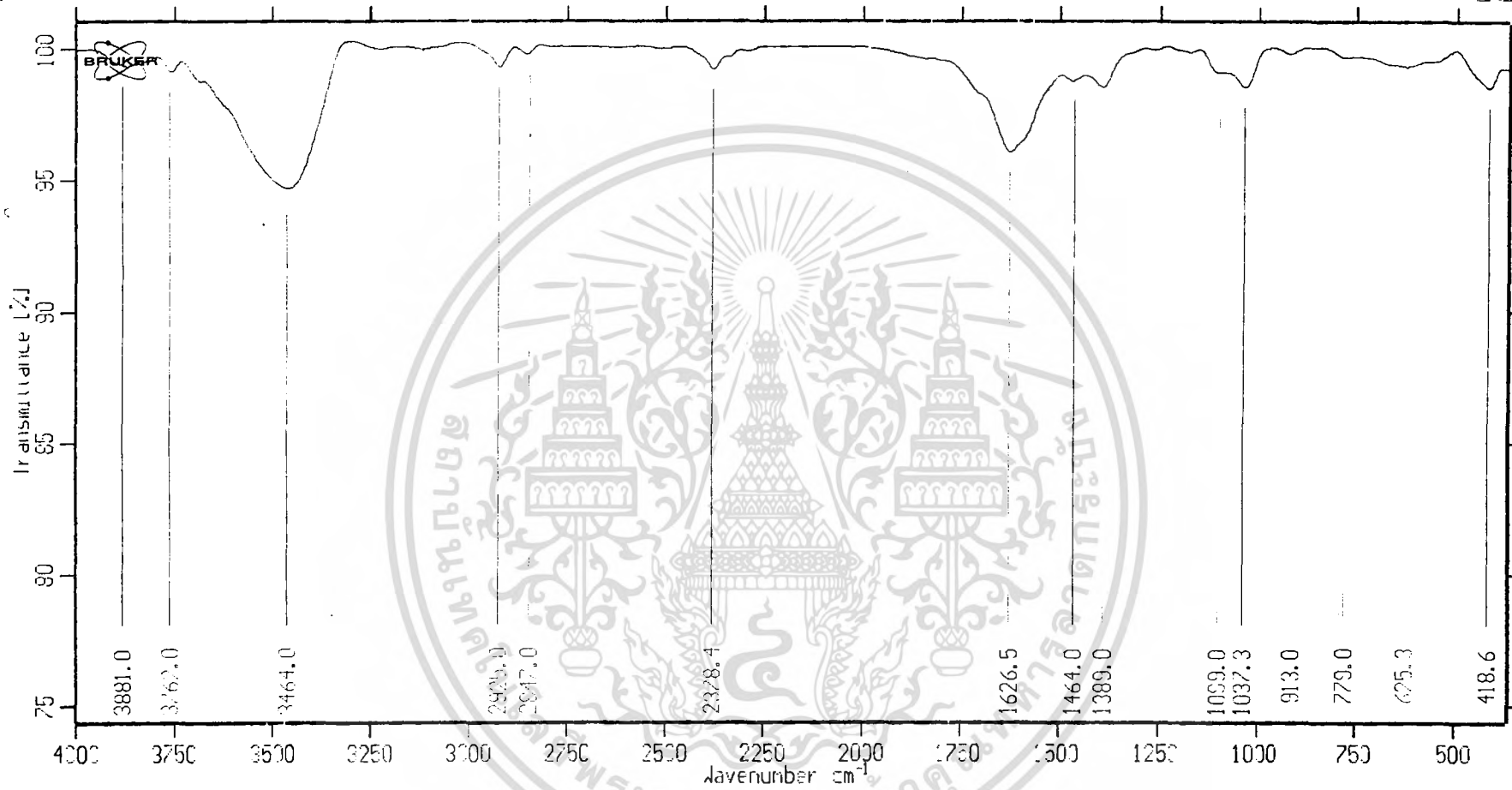


รูปที่ 4.12 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไทโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต ที่ pH 5 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml (เลขคลื่น 4000 - 400 cm⁻¹ จำนวนสแกน 8 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.13 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 7 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3464.0	94.7	การยืดของ N-H
2925.0	94.7	การยืดของ =C-H
2847.0	99.7	การยืดของ =C-H
1626.5	95.7	การยืดของ C=C
1099.0	99.0	การยืดของ C-N
625.3	625.3	SO_4^{2-} (anionic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

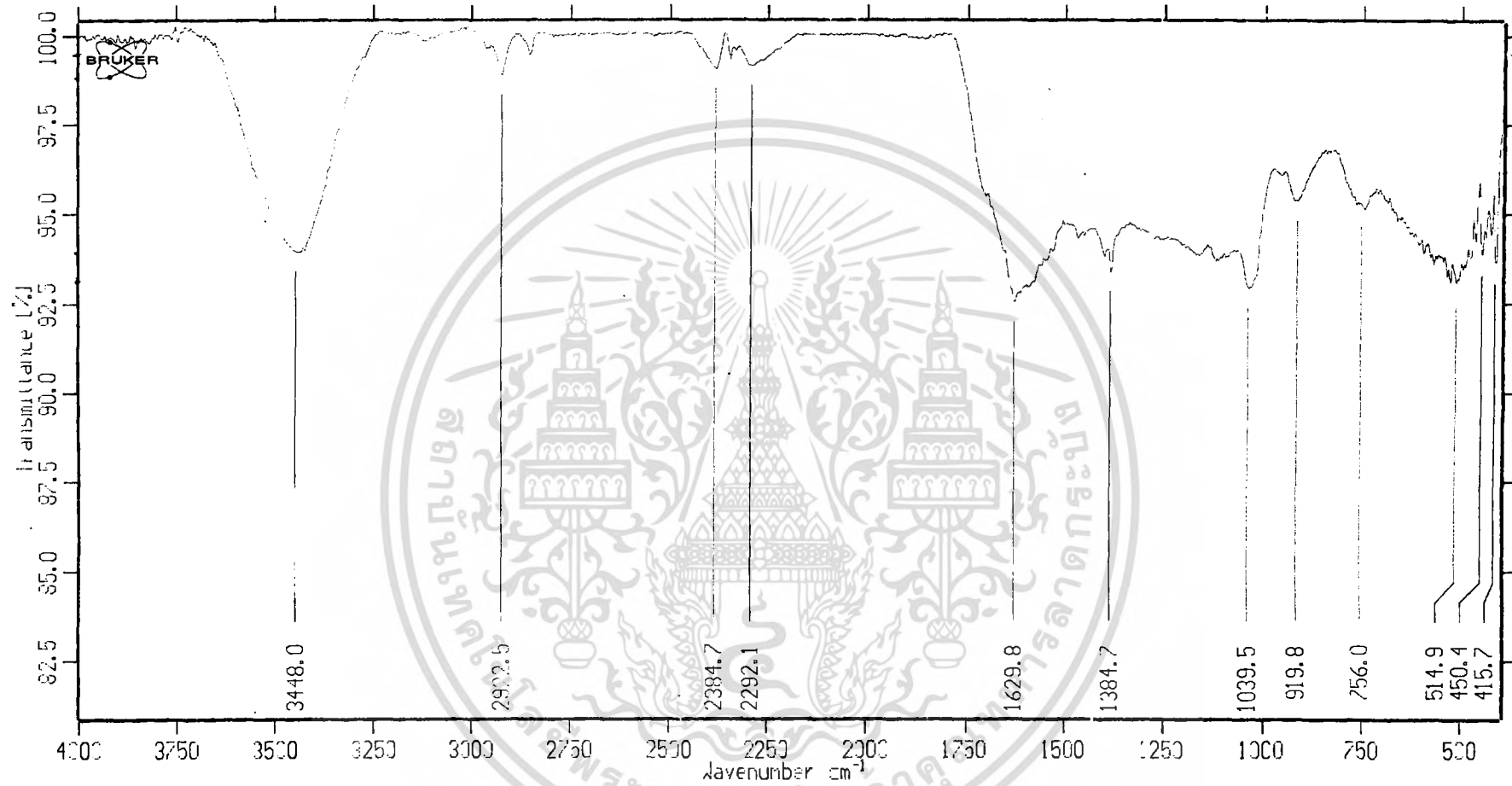


รูปที่ 4.13 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไพโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์
 ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต ที่ pH 7
 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml (เลขคลื่น 4000 - 400 cm⁻¹ จำนวนสแกน 8 ครั้ง
 ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

ตารางที่ 4.14 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซนต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polypyrrole* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มอนอเมอร์ไพโรลเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 10 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)
3448.0	94.0	การยืดของ N-H
2922.5	99.0	การยืดของ =C-H
2856.2	99.5	การยืดของ =C-H
1629.8	92.5	การยืดของ C=C
1039.5	93.0	การยืดของ C-N
756.0	95.3	SO_4^{2-} (anionic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไพโรล ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า(Electropolymerization)ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต ที่ pH 10 และเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml (เลขคลื่น 4000 - 400 cm⁻¹ จำนวนสแกน 8 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

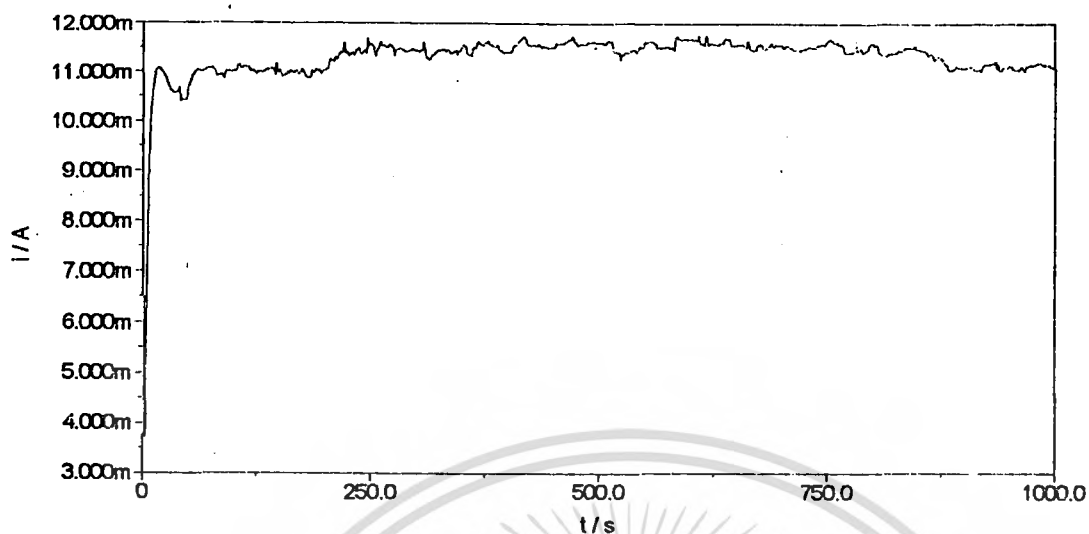
4.2 ผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และ pH ที่มีต่อการเตรียมฟิล์ม

จากการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มพอลิไพโรลโดยใช้อิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆแล้ว พบว่าเมื่อใช้โพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้เกิดฟิล์มได้ดีกว่าการใช้โพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยแผ่นฟิล์มที่สังเคราะห์จากการใช้โพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟตจะมีลักษณะหนามีสีดำและ มีการกระจายตัวเต็มแผ่นแพลทินัมอิเล็กโทรด ในขณะที่แผ่นฟิล์มที่ได้จากการใช้โพแทสเซียมฟอสเฟตจะมีลักษณะเป็นเพียงคราบบางๆ และมีการกระจายตัวไม่เต็มแผ่นอิเล็กโทรดซึ่งสามารถสังเกตได้จากกระแสที่ได้ขณะทำการสังเคราะห์จะมีค่าน้อยมาก นอกจากนี้จะพบว่าการใช้โพแทสเซียมคลอไรด์ และโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้ได้ค่ากระแสมากกว่าการใช้โพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างผลกระทบของโพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟต จะพบว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตจะทำให้ค่ากระแสที่ได้ขณะทำการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิไพโรลมีค่ามากกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ LJ. Duic , Z.Mandic ,and F. Kovacicek^[15] อีกด้วย โดยจากงานวิจัยจะพบว่าการเพิ่มของกระแสจะมีแนวโน้มดังนี้ $\text{HSO}_4^- > \text{NO}_3^- \approx \text{Cl}^- > \text{ClO}_4^-$ ซึ่งจากผลเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการเติบโตของฟิล์มขึ้นอยู่กับแอนไอออนที่มีอยู่ในสารละลายเป็นอย่างมาก

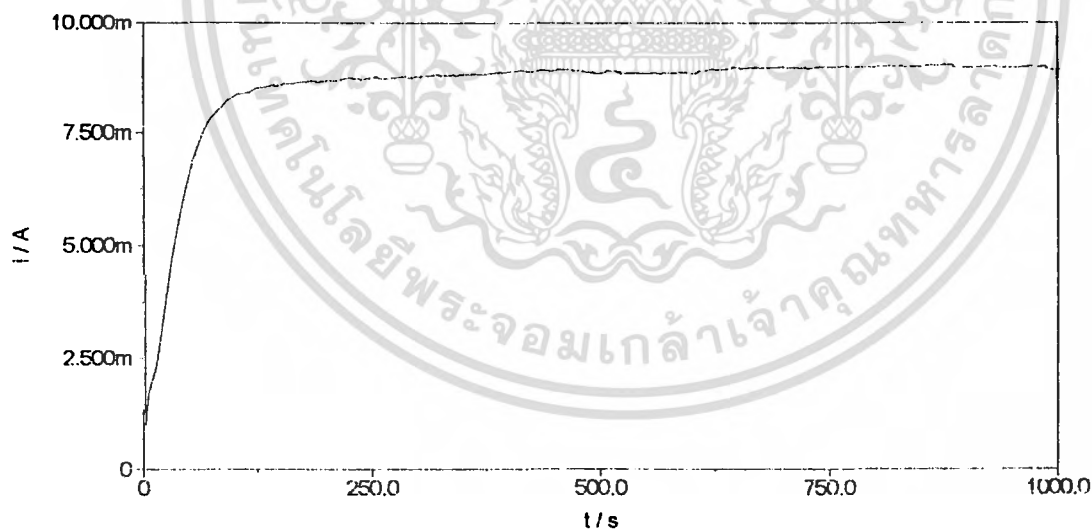
สำหรับการสังเคราะห์ในสภาวะที่มี pH ต่างกัน จะพบว่ามีแนวโน้มที่เหมือนกันคือเมื่อทำการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิไพโรลโดยใช้โพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในสภาวะที่มี pH 5 จะมีอัตราการเกิดฟิล์มพอลิไพโรลได้ดีที่สุด ซึ่งสังเกตได้จากค่ากระแสในขณะที่ทำการสังเคราะห์จะพบว่ามีมากกว่าค่ากระแสที่ได้จากการสังเคราะห์ในสภาวะที่มี pH 7 และ pH 10 ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $\text{pH } 5 > \text{pH } 10 > \text{pH } 7$

เมื่อทำการสังเคราะห์ฟิล์มที่มีการตรึงเอนไซม์ด้วยจะพบว่ามีแนวโน้มที่คล้ายกันเมื่อทำการสังเคราะห์โดยการโพแทสเซียมคลอไรด์ กล่าวคือในสภาวะที่ pH 5 จะเกิดฟิล์มพอลิไพโรลได้เร็วที่สุดซึ่งสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $\text{pH } 5 > \text{pH } 7 > \text{pH } 10$ แต่เมื่อทำการสังเคราะห์ฟิล์มที่มีการตรึงเอนไซม์โดยการโพแทสเซียมซัลเฟต จะพบว่าในสภาวะที่ pH 7 จะมีอัตราการเกิดฟิล์มได้ดีที่สุด ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $\text{pH } 7 > \text{pH } 5 > \text{pH } 10$

(หมายเหตุ โพแทสเซียมฟอสเฟตไม่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มเนื่องจากว่าค่ากระแสที่ได้ขณะทำการสังเคราะห์ฟิล์มโดยไม่ตรึงเอนไซม์จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงไม่ควรที่จะทำการสังเคราะห์ฟิล์มที่มีการตรึงเอนไซม์โดยการโพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นอิเล็กโทรไลต์)

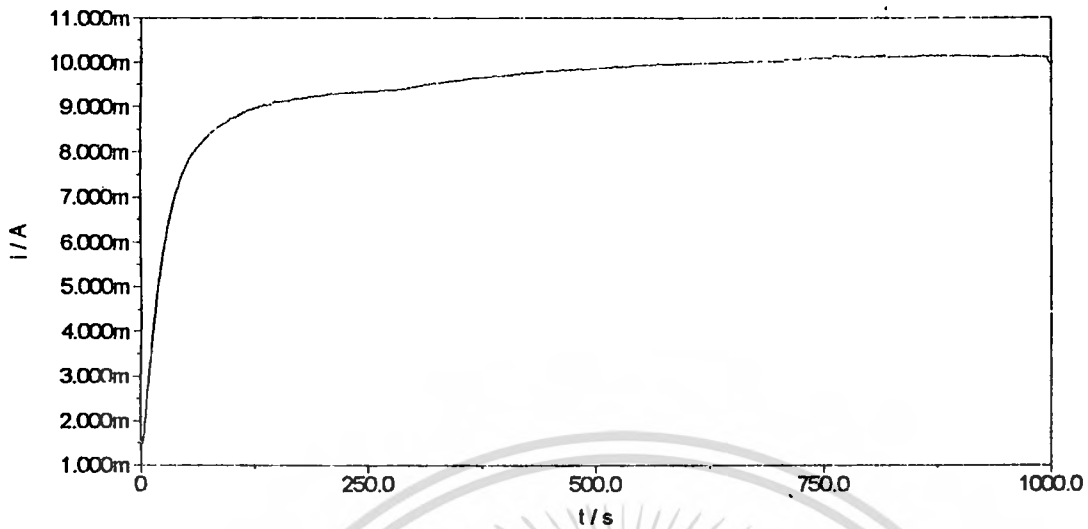


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5

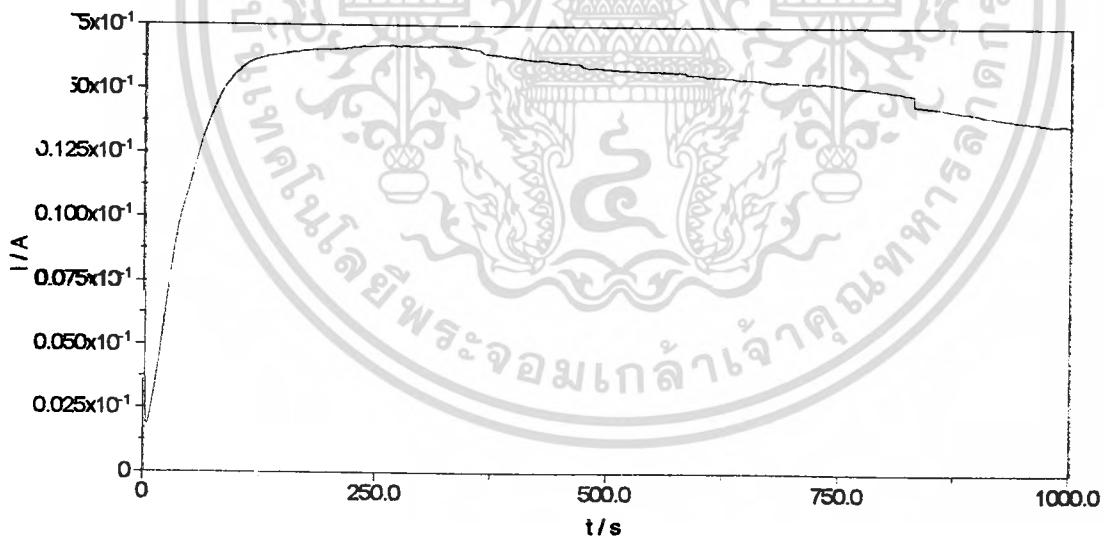


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7

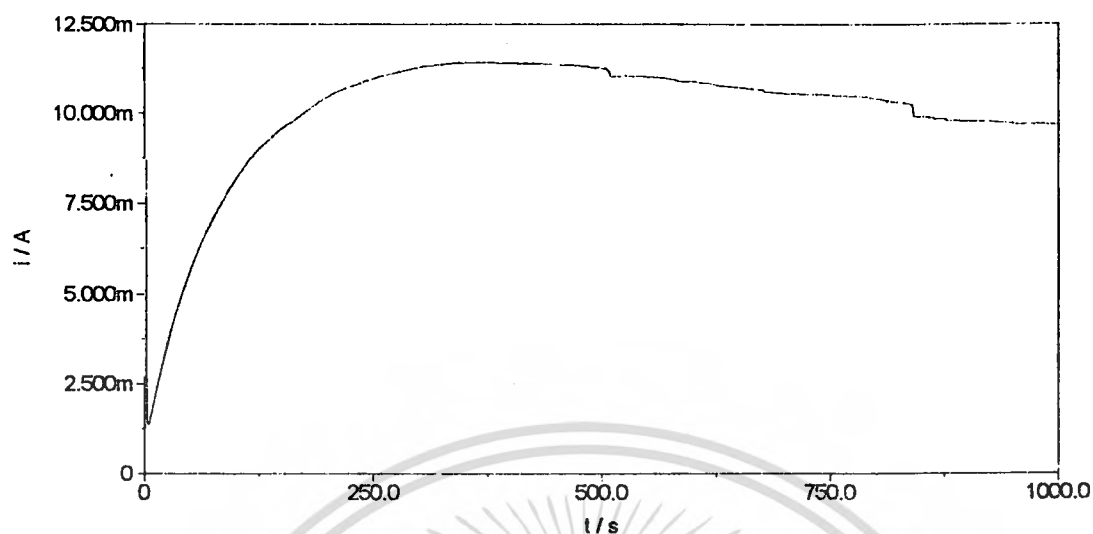
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



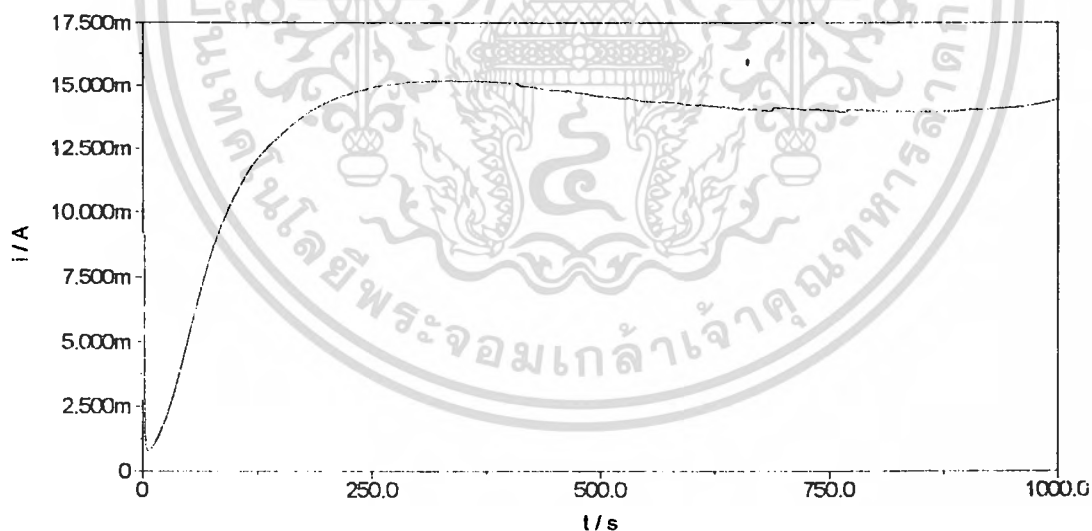
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย โพลีโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย โพลีโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5

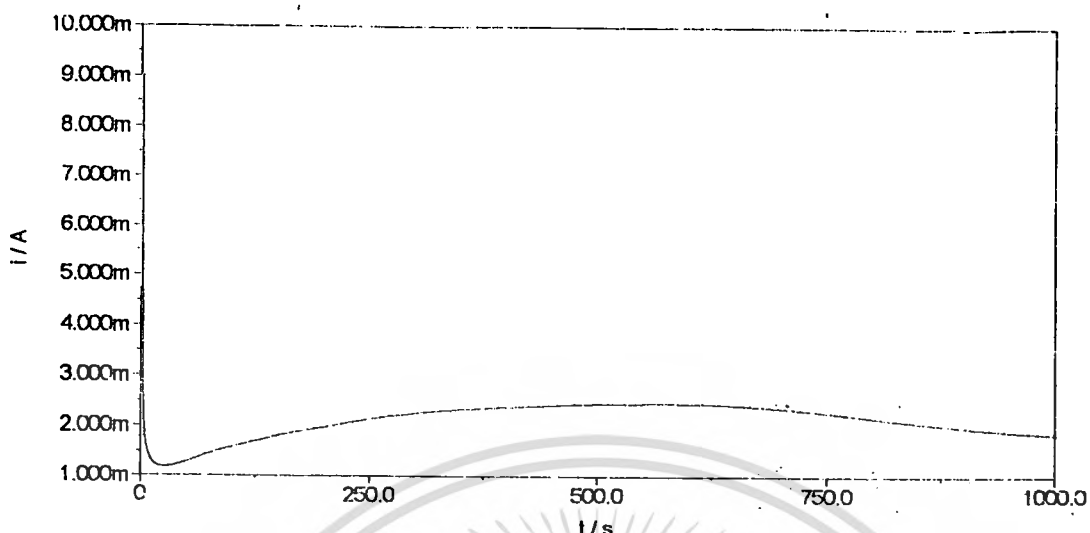


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย โพลีโวล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7

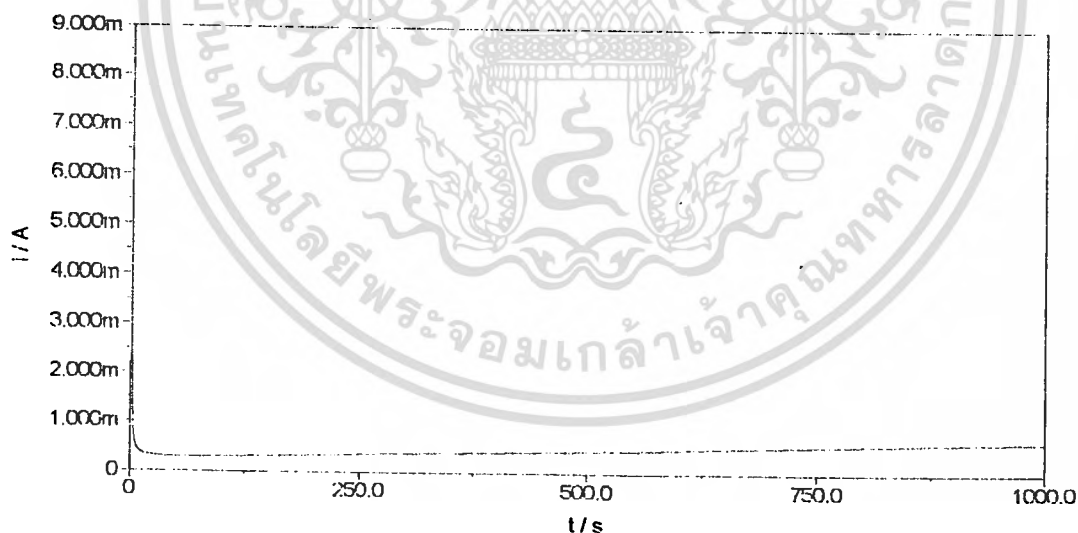


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย โพลีโวล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10

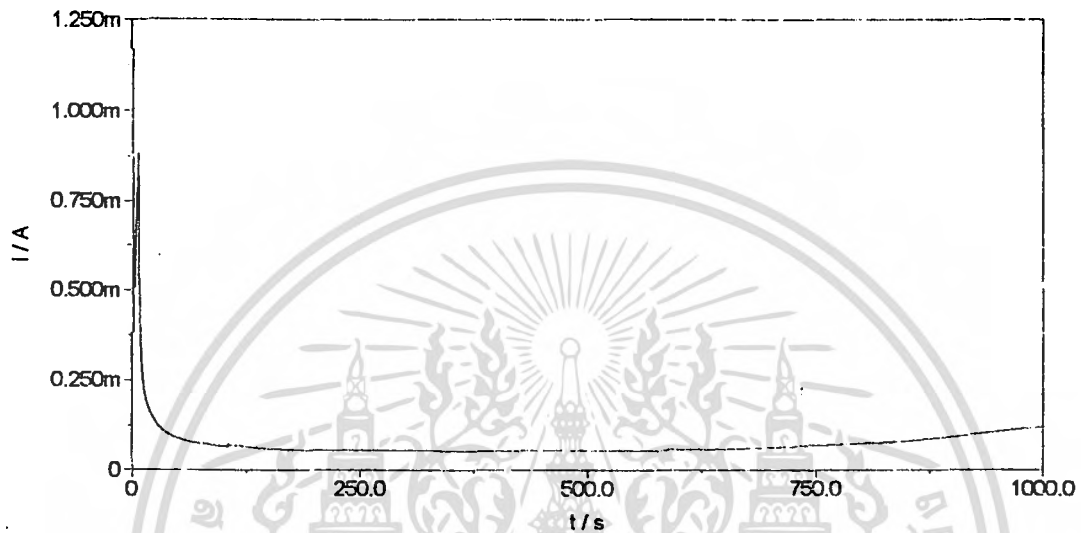
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



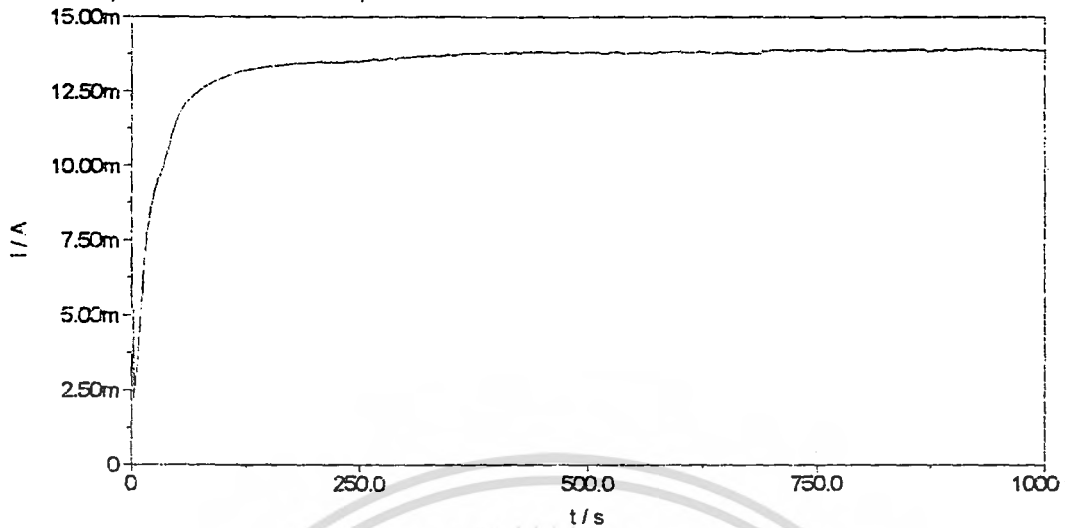
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟต และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5



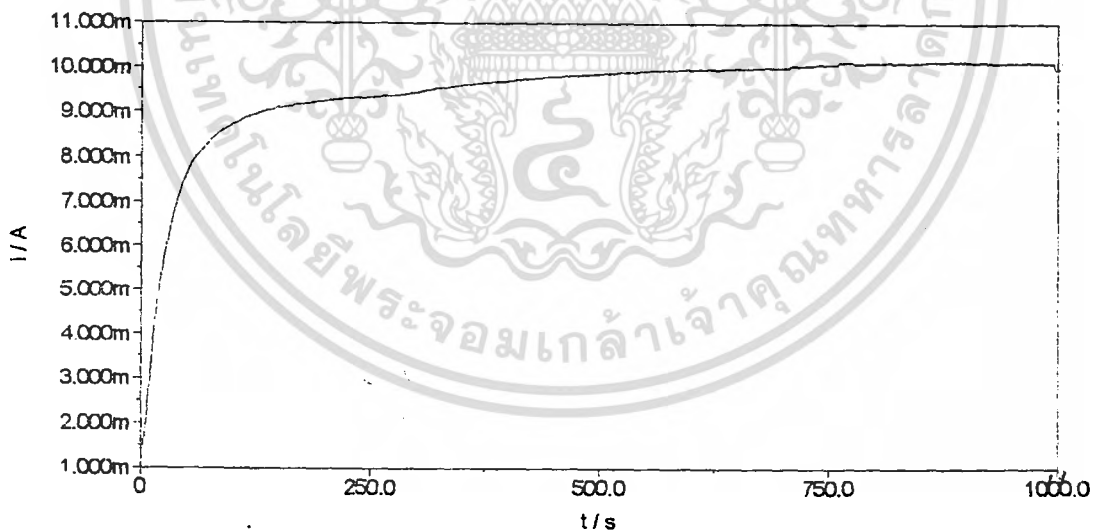
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟต และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7



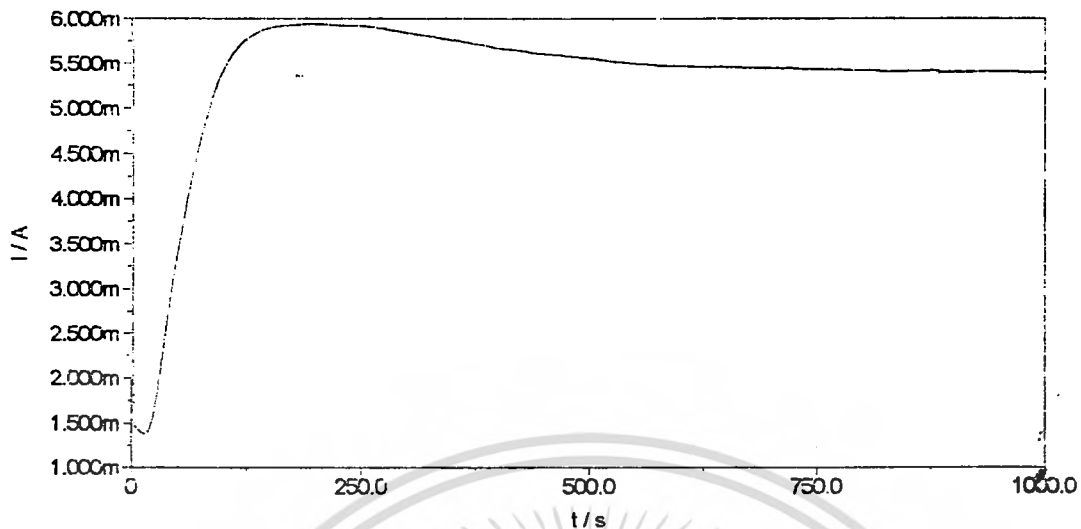
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M ในสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟต และสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10



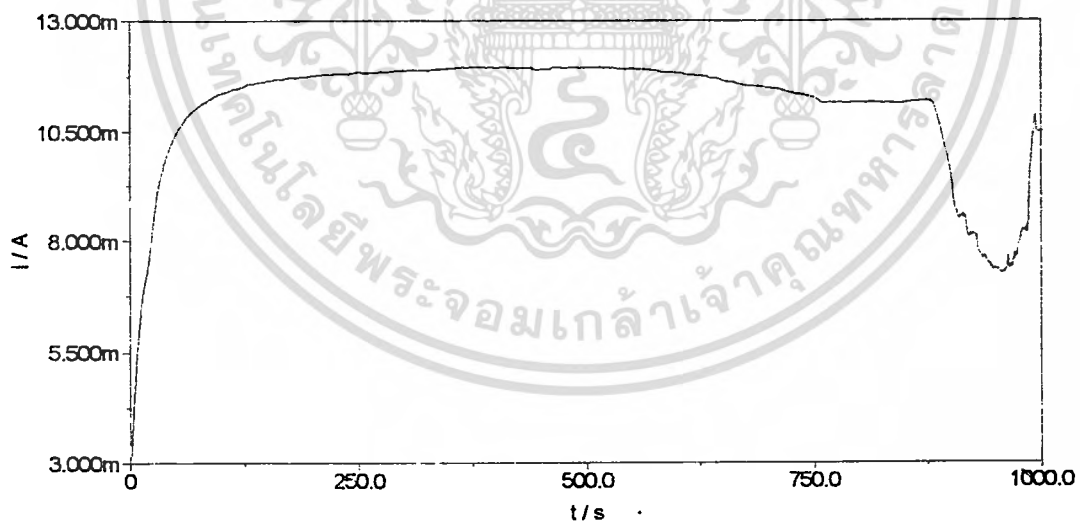
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลาย โฟแทสเซียมคลอไรด์ และ สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลาย โฟแทสเซียมคลอไรด์ และ สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7

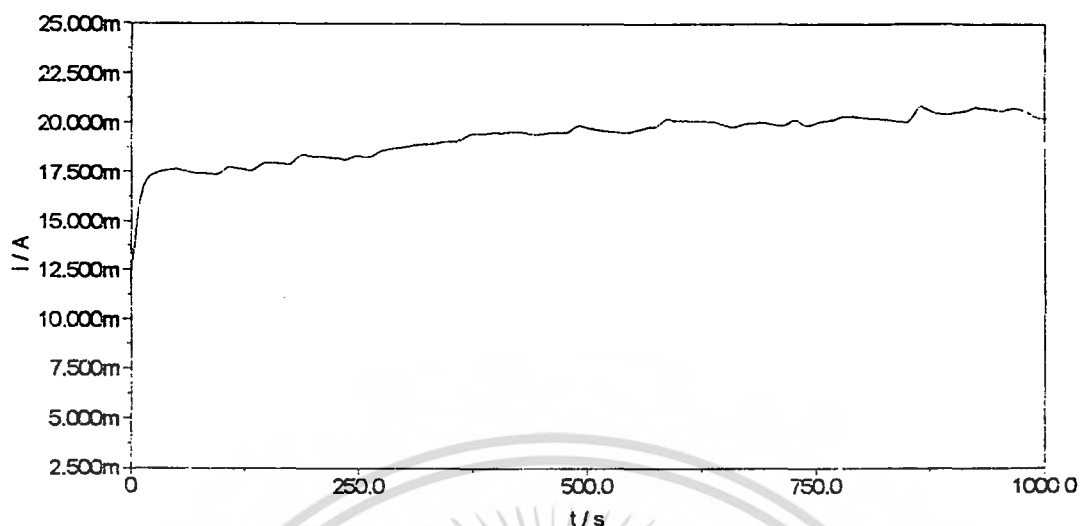


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอไรเซชัน ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลาย ไพแทสเซียมคลอไรด์ และ สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10

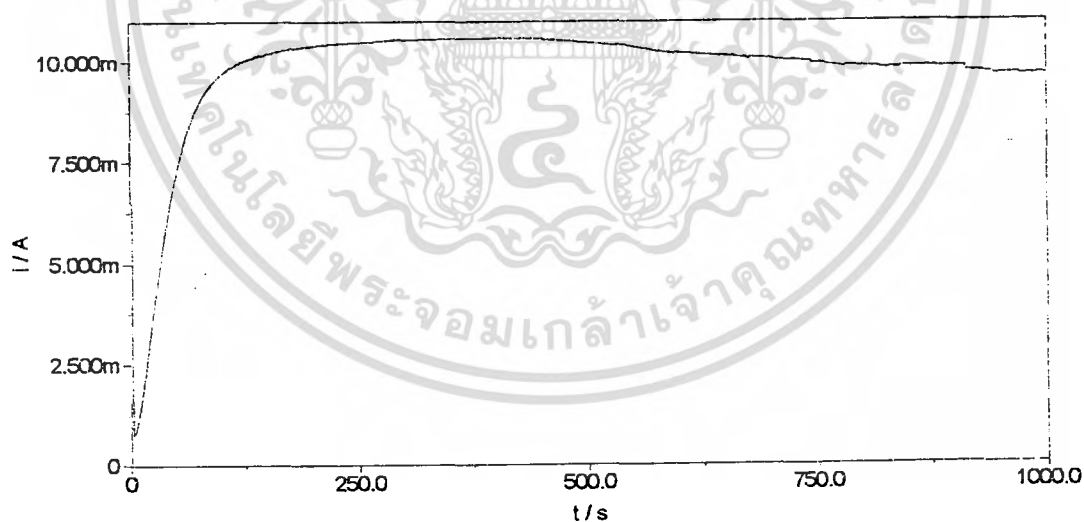


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอไรเซชัน ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลาย ไพแทสเซียมซัลเฟต และ สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลาย โฟแทสเซียมซัลเฟต และ สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลา ขณะทำการพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ที่ประกอบด้วย ไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลาย โฟแทสเซียมซัลเฟต และ สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10

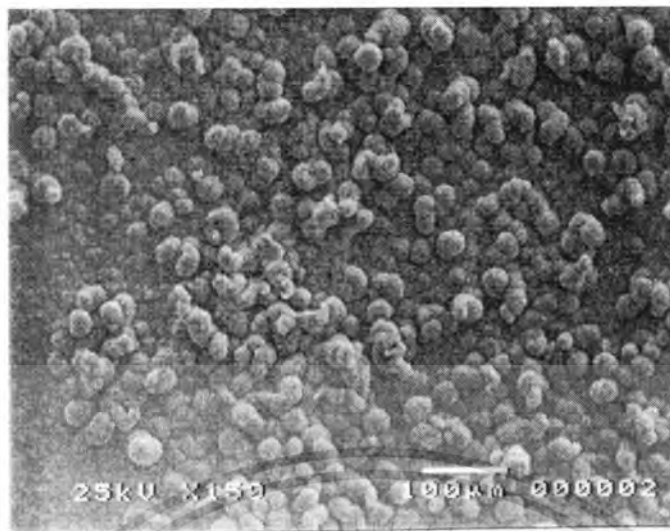
4.3 สันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิไพโรไลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิไพโรไลต่างชนิดกันจะพบว่า ลักษณะของฟิล์มพอลิไพโรไลที่เกิดขึ้นบนแผ่นแพลทินัมอิเล็กโทรดเมื่อสังเคราะห์ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟตนั้นจะมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือพอลิเมอร์จะมีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นกระจายทั่วแผ่นอิเล็กโทรด (ฟิล์มที่เกิดขึ้นจะเต็มแผ่นอิเล็กโทรด) ลักษณะฟิล์มที่ได้จะมีสีดำ ในขณะที่เมื่อใช้โพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้มีการกระจายตัวไม่ทั่วแผ่นอิเล็กโทรดจะเป็นลักษณะเหมือนคราบบางๆที่เกาะอยู่บนแผ่นอิเล็กโทรด (จะเกิดฟิล์มไม่เต็มแผ่นอิเล็กโทรด)

เมื่อพิจารณาทางสันฐานวิทยาของฟิล์มพอลิไพโรไลที่เกาะอยู่บนแผ่นอิเล็กโทรด จะพบว่า เมื่อใช้โพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้ลักษณะของฟิล์มไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่การใช้โพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้ฟิล์มพอลิไพโรไลที่ได้มีลักษณะแตกต่างจากฟิล์มพอลิไพโรไลที่ได้การใช้โพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือสายโซ่ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้โพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีขนาดใหญ่และมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นตลอดทั่วทั้งแผ่นและยังพบว่าโครงสร้างยังมีลักษณะที่เป็น sponge ด้วย ส่วนพอลิไพโรไลที่ได้จากการใช้โพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีขนาดสายโซ่ที่เล็กกว่าซึ่งสังเกตได้จากกำลังขยายที่ใช้จะมีค่าสูงมากถึงจะเห็นลักษณะของสายโซ่และนอกจากนี้สายโซ่ที่ได้ยังมีลักษณะการเรียงตัวคล้ายกิ่งไม้เล็กๆมาต่อกัน

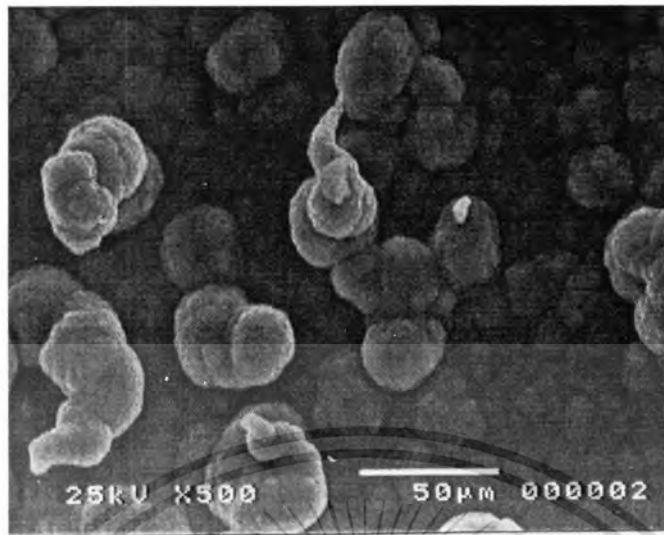
นอกจากนี้ ลักษณะการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์โดยการใช้โพแทสเซียมคลอไรด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากกว่าพอลิเมอร์ที่ได้สังเคราะห์โดยการใช้โพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เมื่อทำการศึกษาสันฐานวิทยาของพอลิไพโรไลที่ทำการตรึงเอนไซม์จะพบว่าโมเลกุลของเอนไซม์ถูกตรึงไว้กับสายโซ่พอลิไพโรไลอย่างเห็นได้ชัด และมีลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์กันอย่างหนาแน่นซึ่งลักษณะของฟิล์มพอลิไพโรไลที่สังเคราะห์ได้โดยการใช้โพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟตจะไม่แตกต่างกันมากนัก



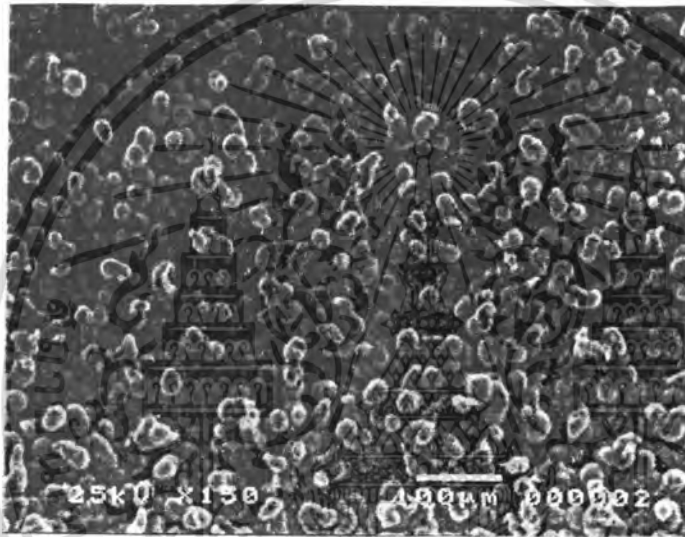
รูปที่ 4.30 แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมพอยล์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลีเทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่
 0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 150 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 350 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



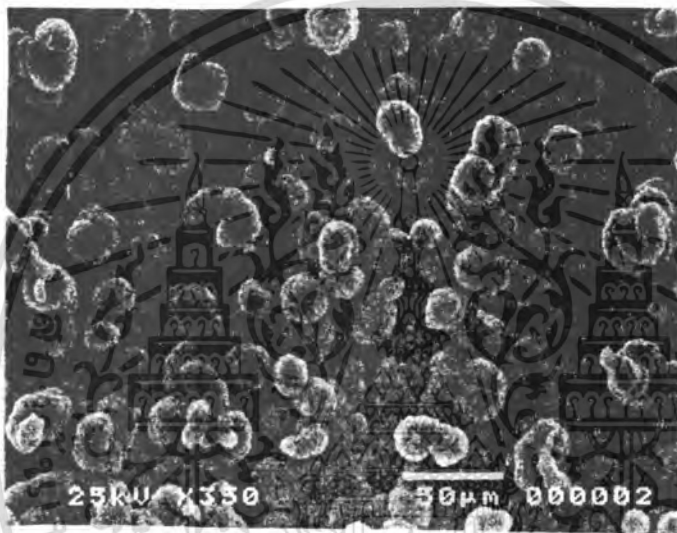
รูปที่ 4.31 (ต่อ) แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 500 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



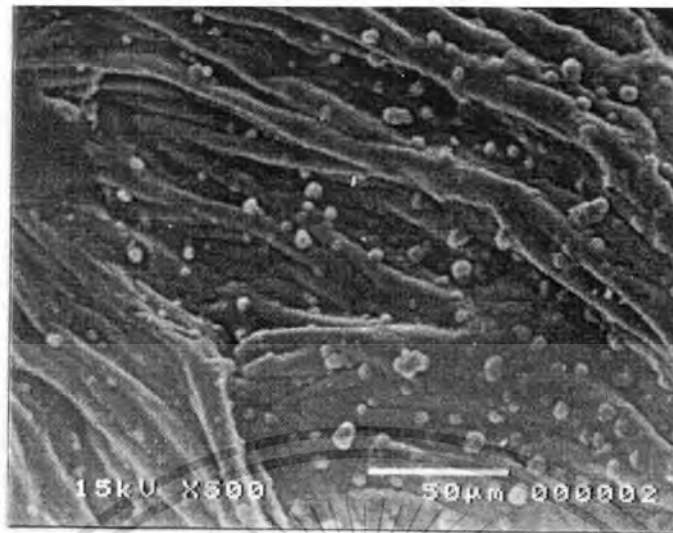
รูปที่ 4.32 แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 150 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



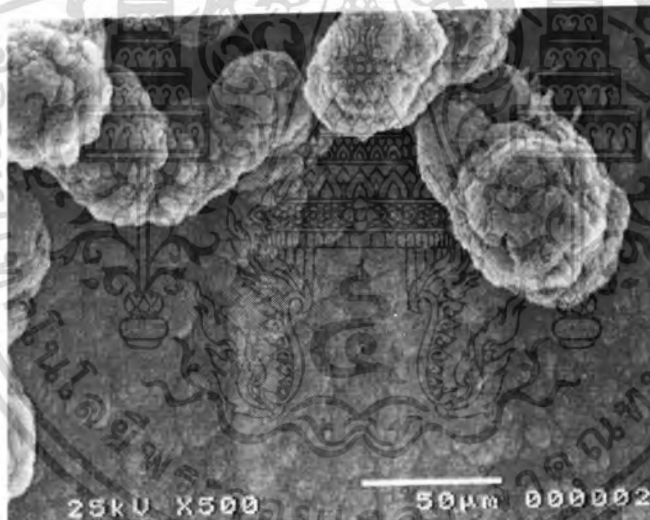
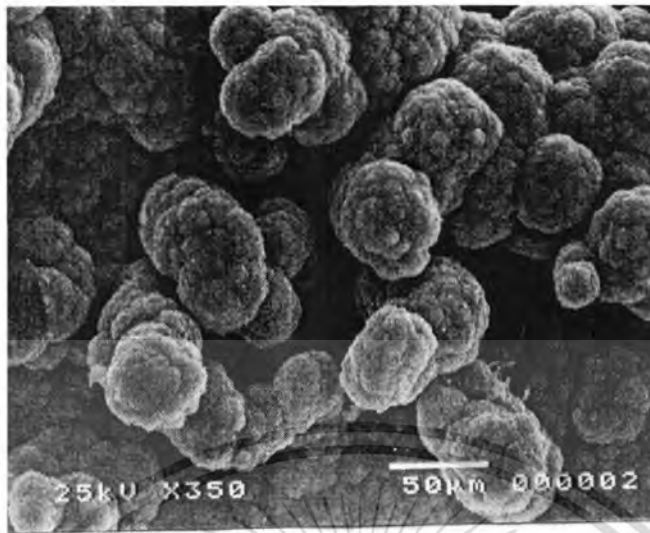
รูปที่ 4.33 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 350 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

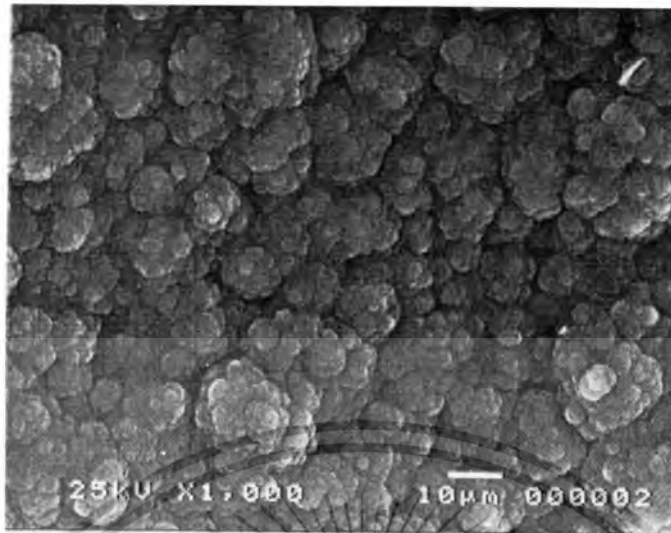


รูปที่ 4.34 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลีแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่
 0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 500 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

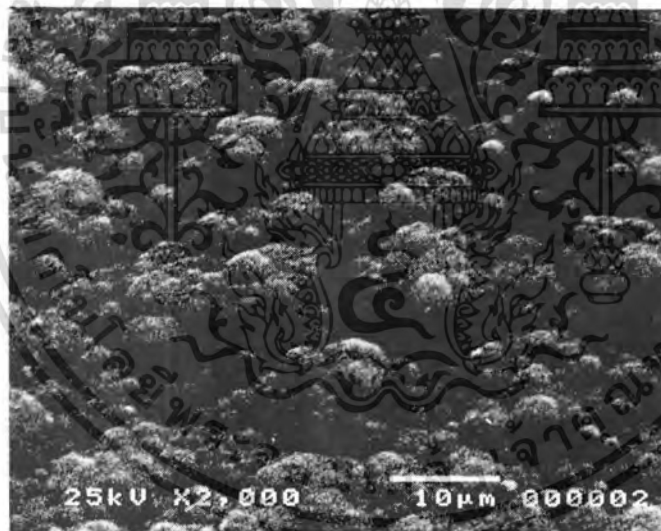
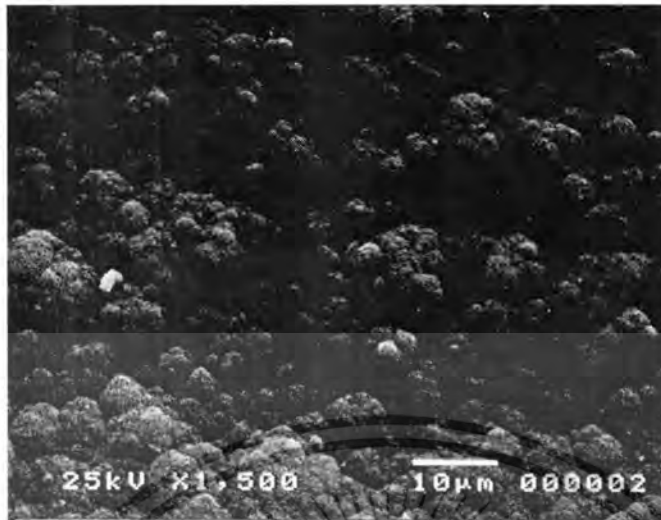


รูปที่ 4.35 แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 350 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 500 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

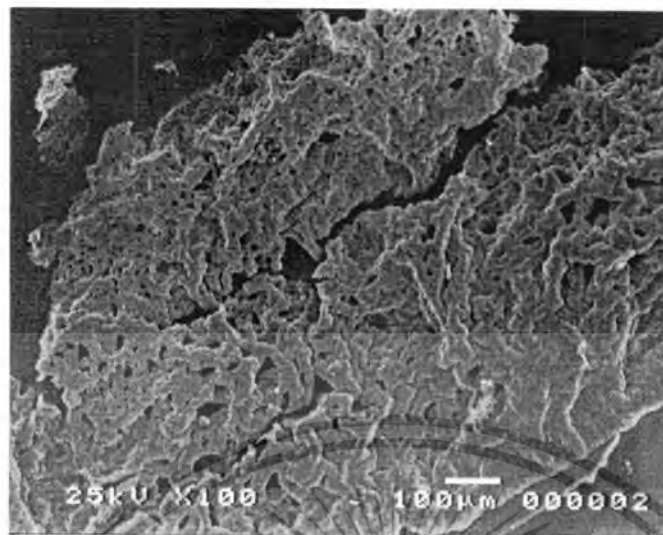


รูปที่ 4.36 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 2,000 เท่า

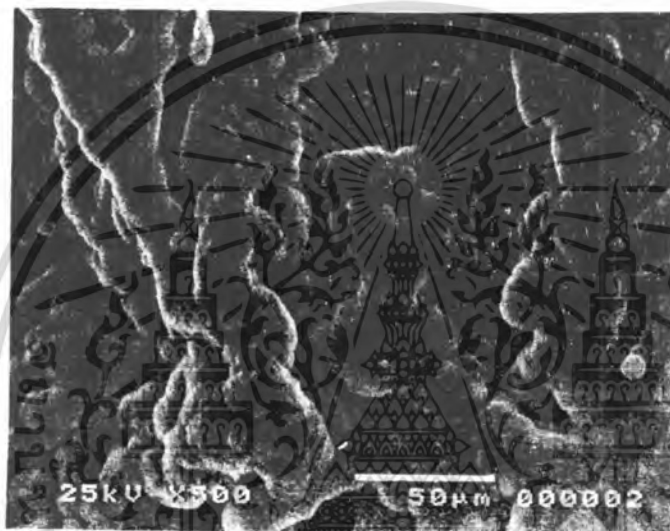
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 2,000 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

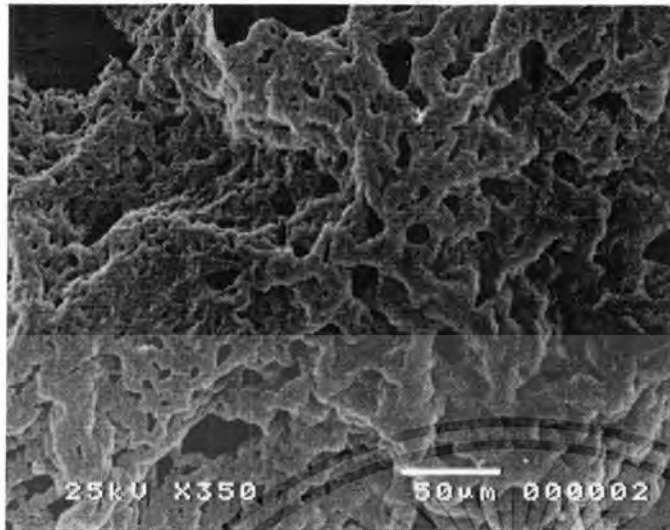


รูปที่ 4.38 แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นพลาสติกที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลีเอทิลีนไดออกไซด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่
 0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 100 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 150 เท่า
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



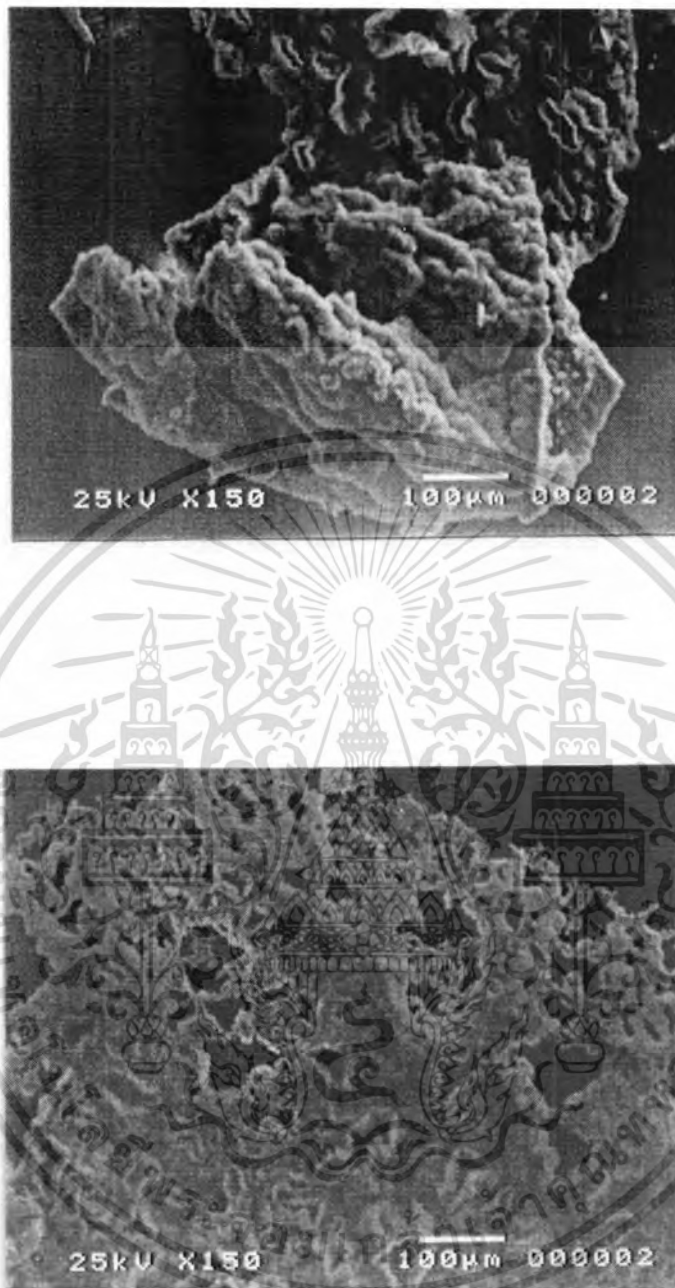
รูปที่ 4.39 แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



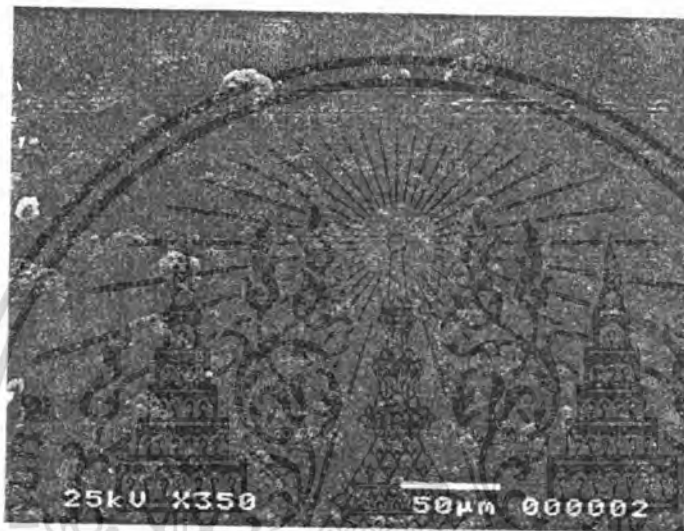
รูปที่ 4.40 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลีเอทิลีนออกไซด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่
 0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 350 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 750 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นพอลิไมด์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลีเอทิลีนออกไซด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่
 0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 150 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 150 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

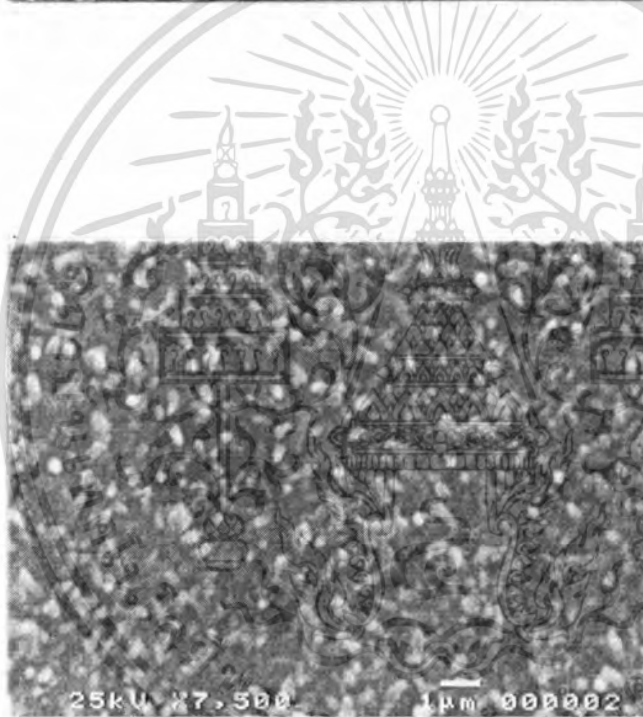
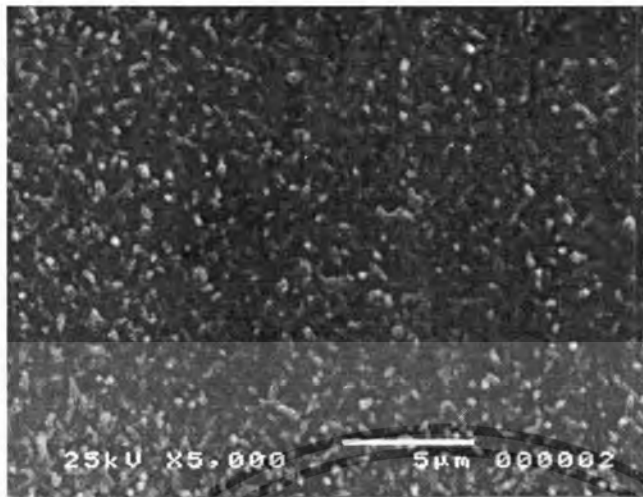


รูปที่ 4.42 (ต่อ) แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 350 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 (ต่อ) แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 750 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 1,500 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



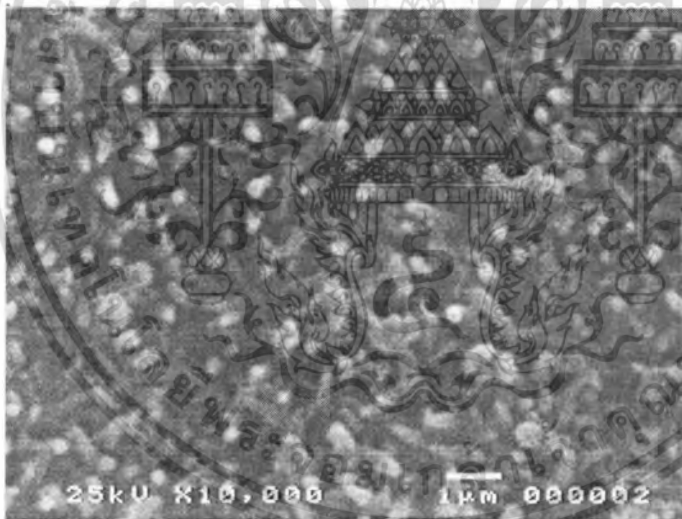
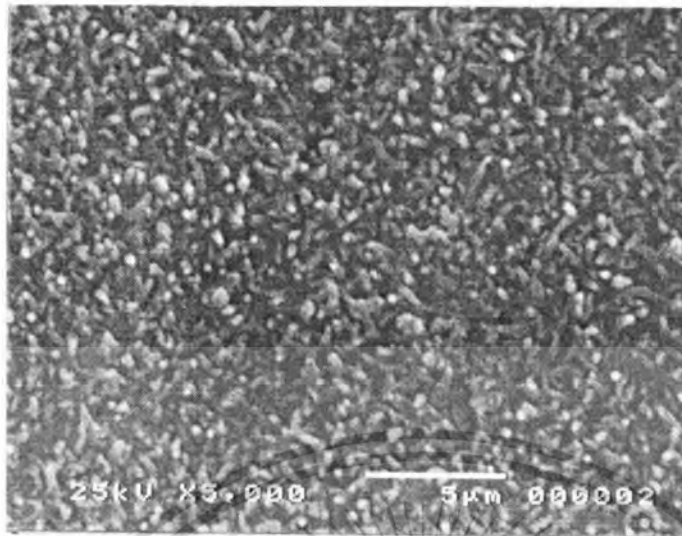
รูปที่ 4.44 แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่

ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย

โพแทสเซียมฟอสเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่

0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 5,000 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 7,500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



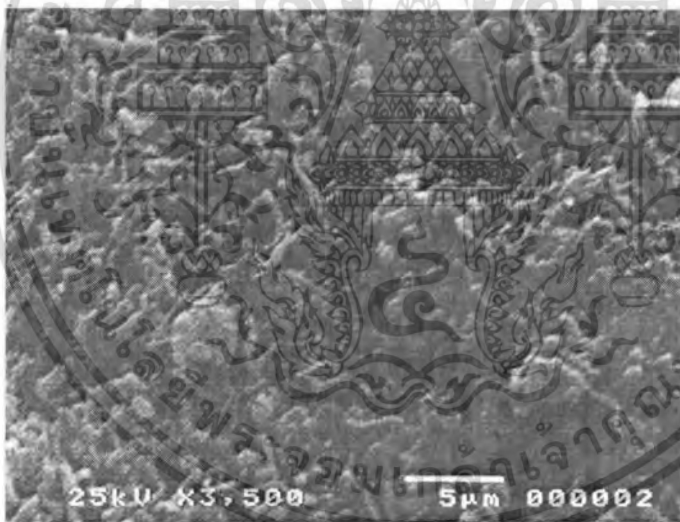
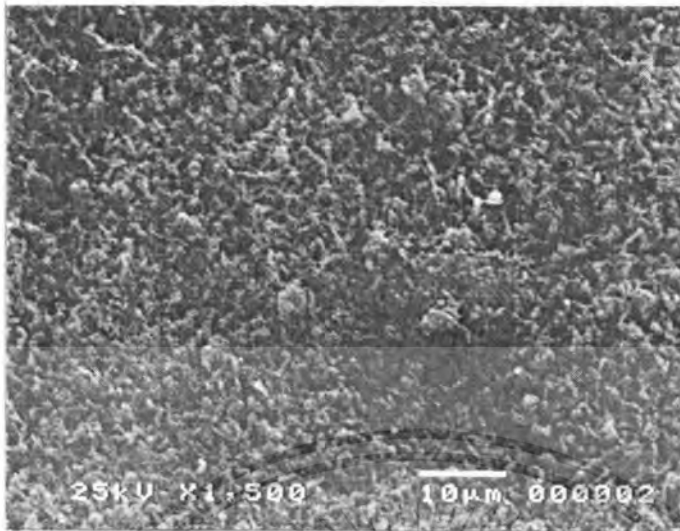
รูปที่ 4.45 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่

ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย

โพแทสเซียมฟอสเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่

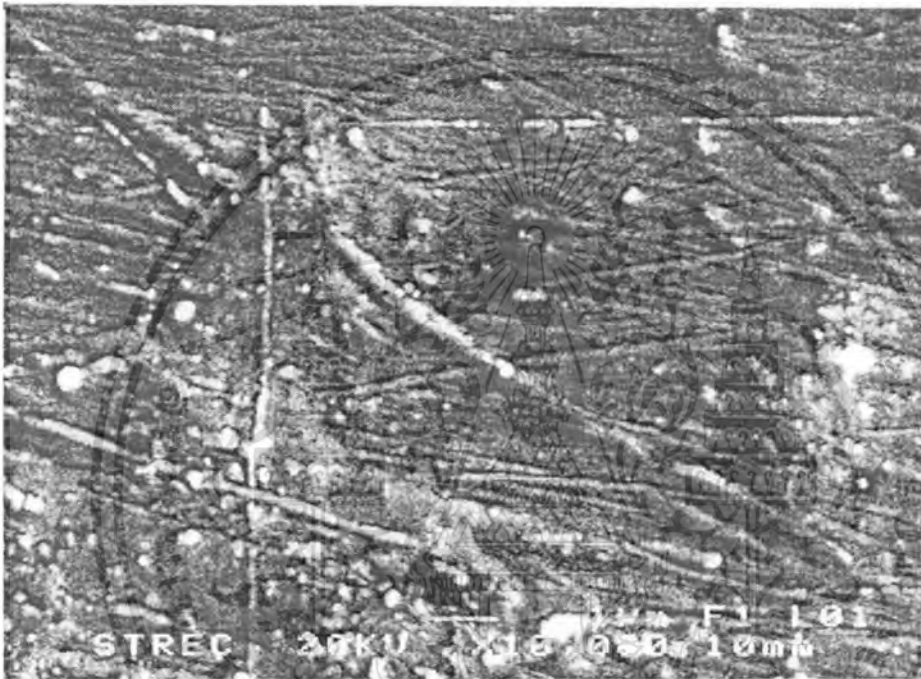
0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 5,000 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

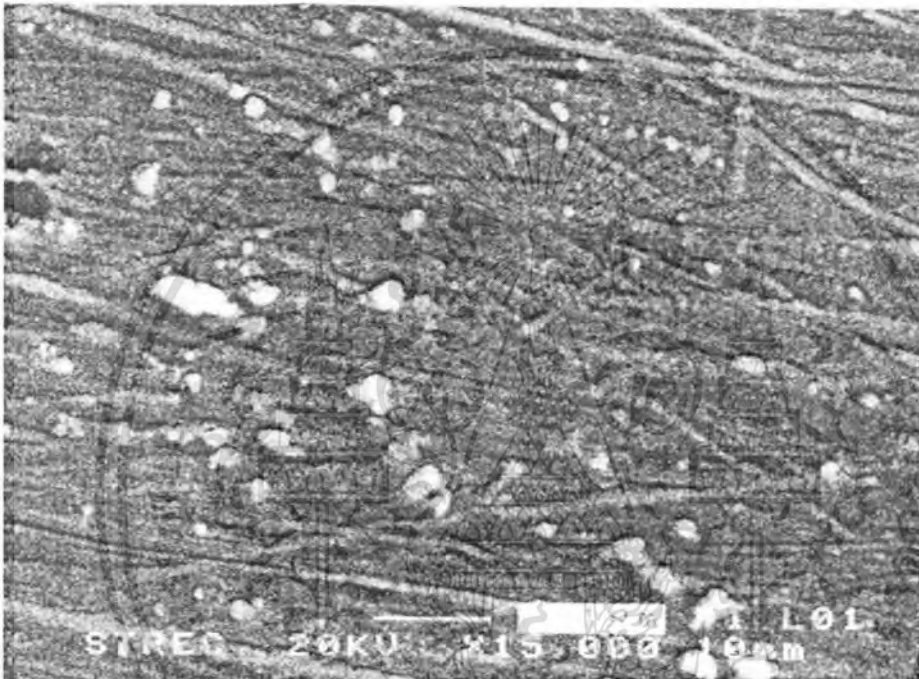


รูปที่ 4.46 แสดง Scanning electron micrographs ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ (บน) กำลังขยาย 1,500 เท่า และ (ล่าง) กำลังขยาย 3,500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

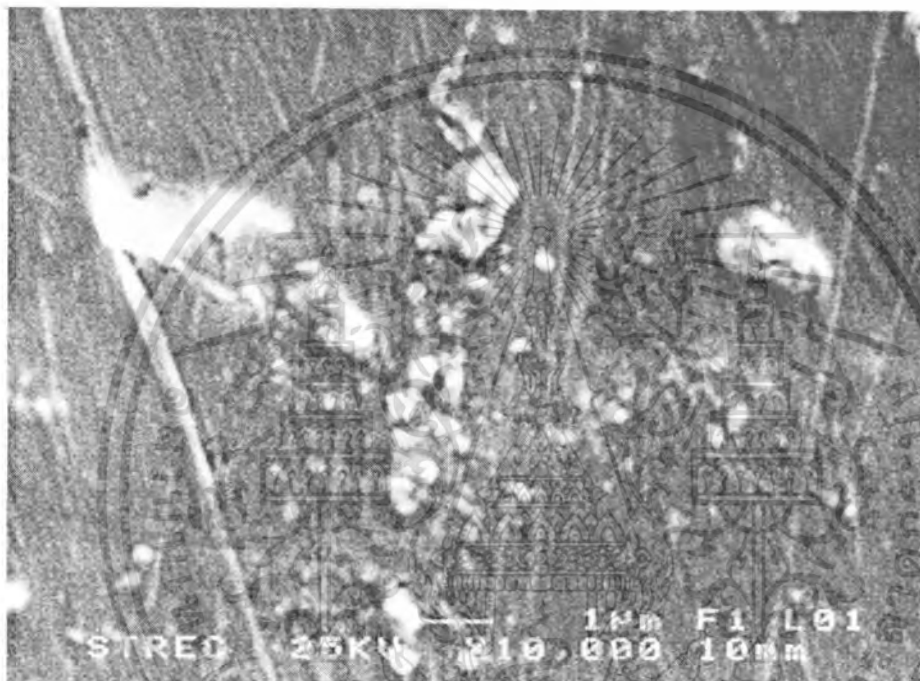


รูปที่ 4.47 แสดง Scanning electron micrograph: ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมพอยล์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml
 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

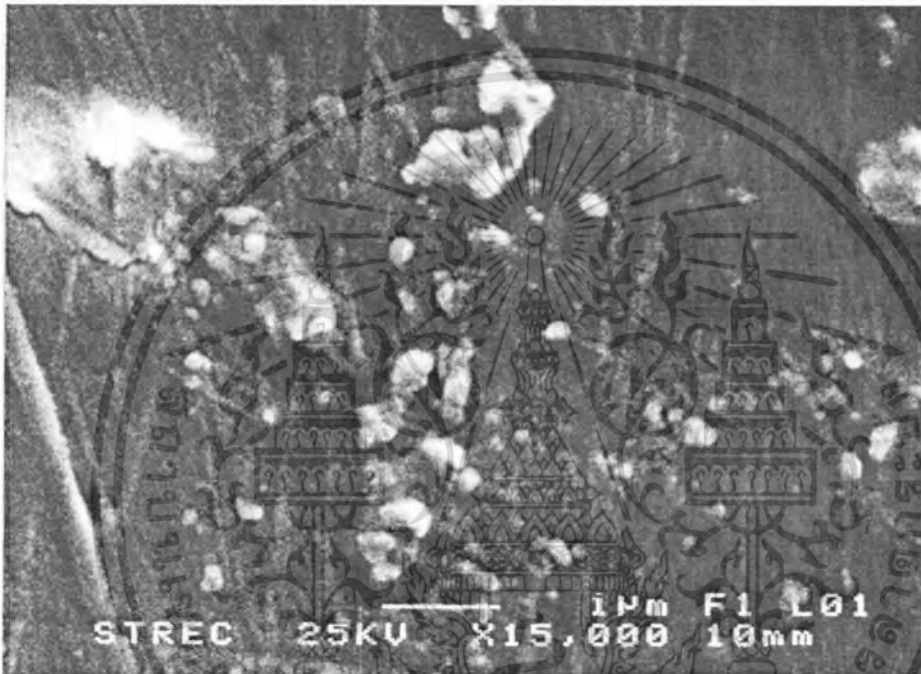


รูปที่ 4.48 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrograph. ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml
 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 15,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

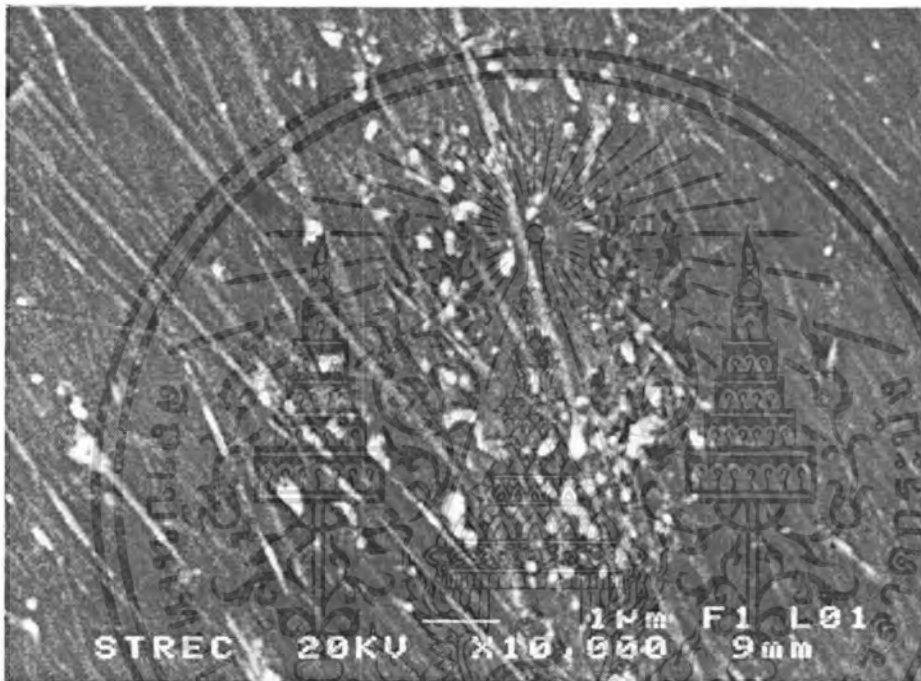


รูปที่ 4.49 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

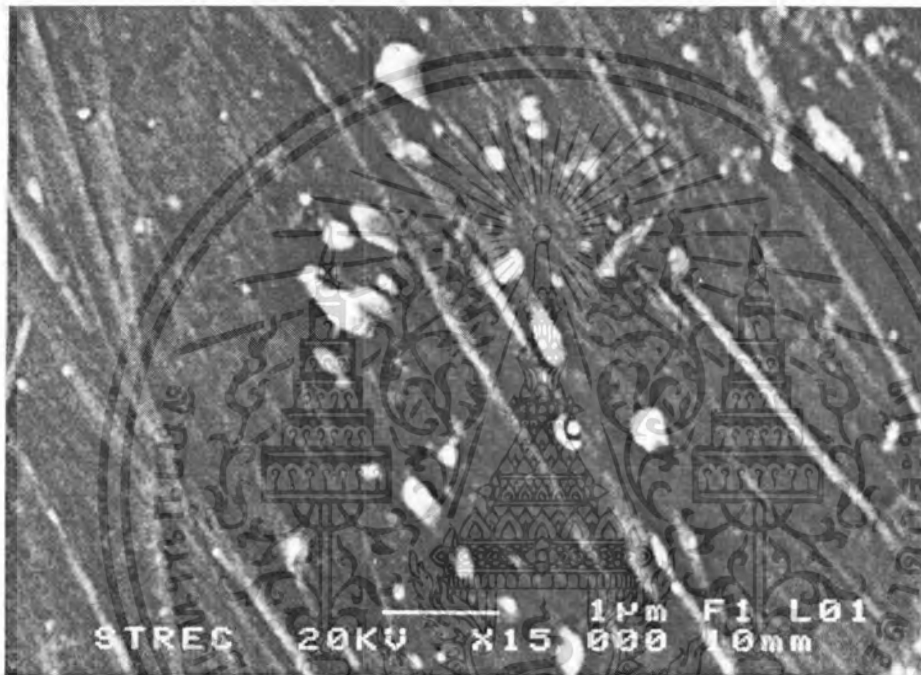


รูปที่ 4.50 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 15,000 เท่า

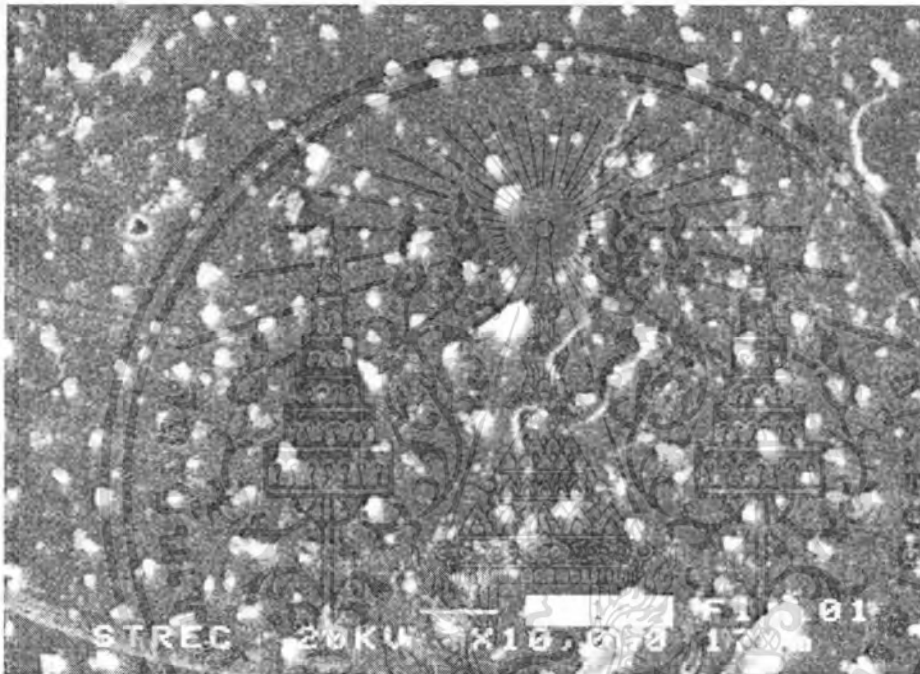
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



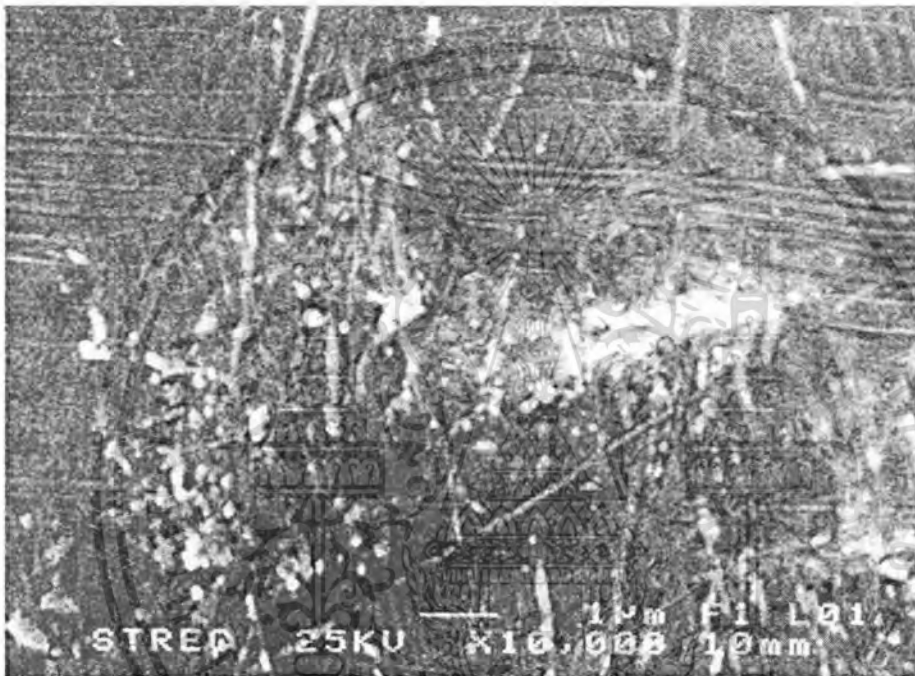
รูปที่ 4.51 แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.52 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 15,000 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

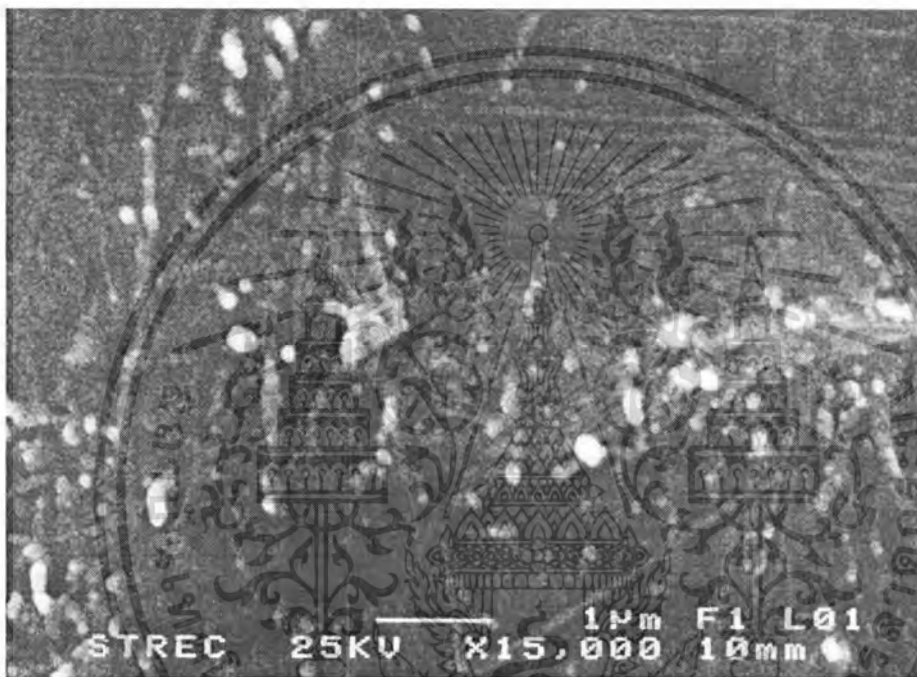


รูปที่ 4.53 แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลีแซลไซม์คลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml
 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



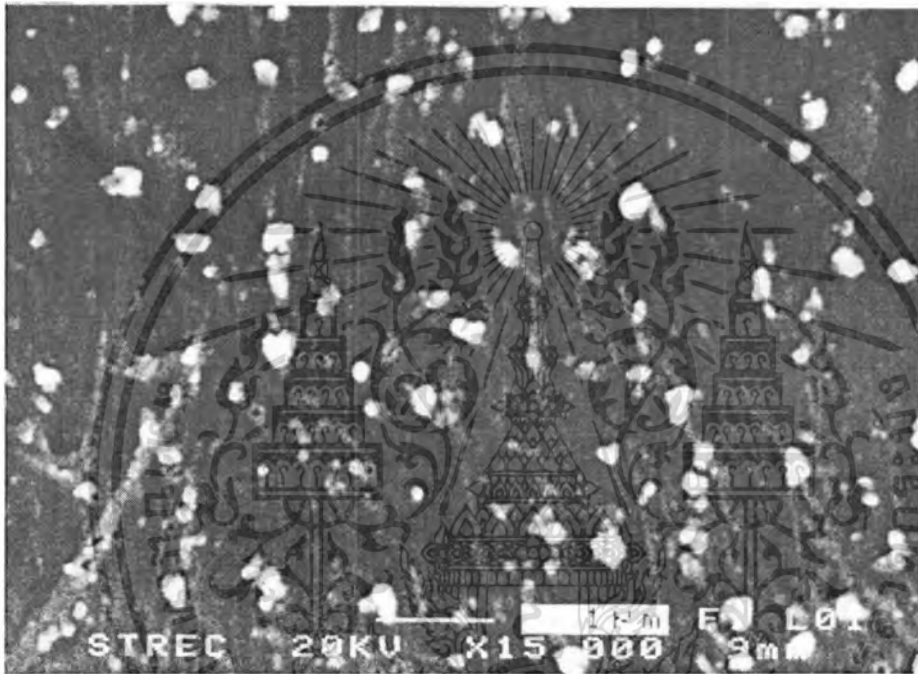
รูปที่ 4.54 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลีแซลไซม์คลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml
 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



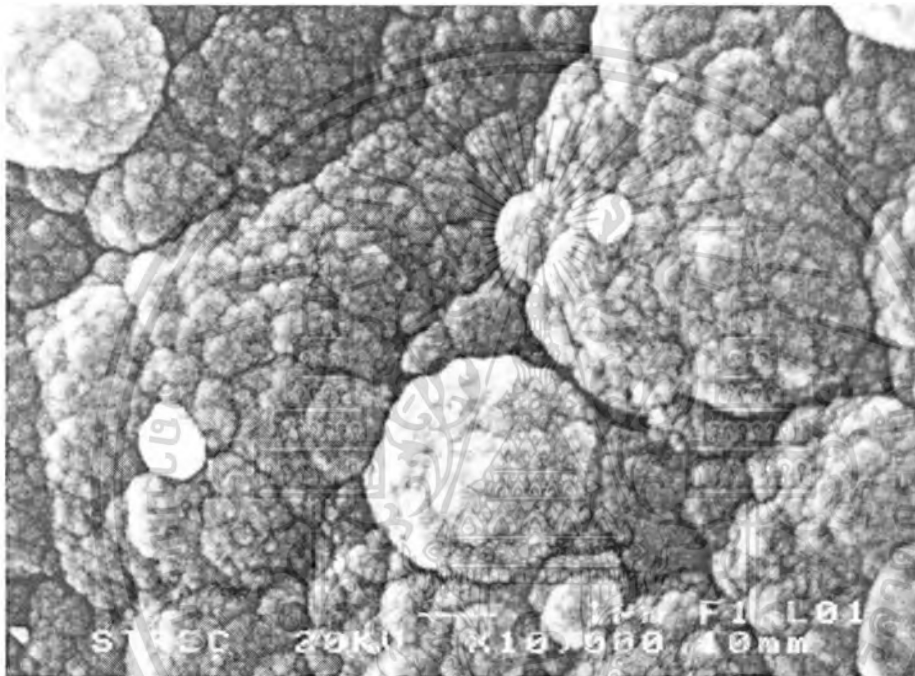
รูปที่ 4.55 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลีแซลไซม์คลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml
 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 15,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



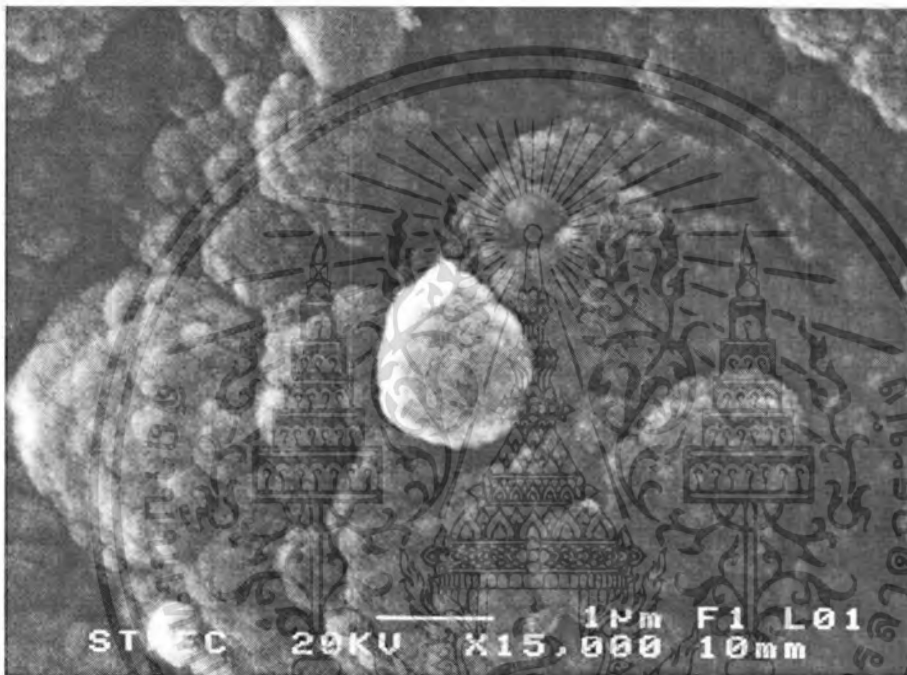
รูปที่ 4.56 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 15,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



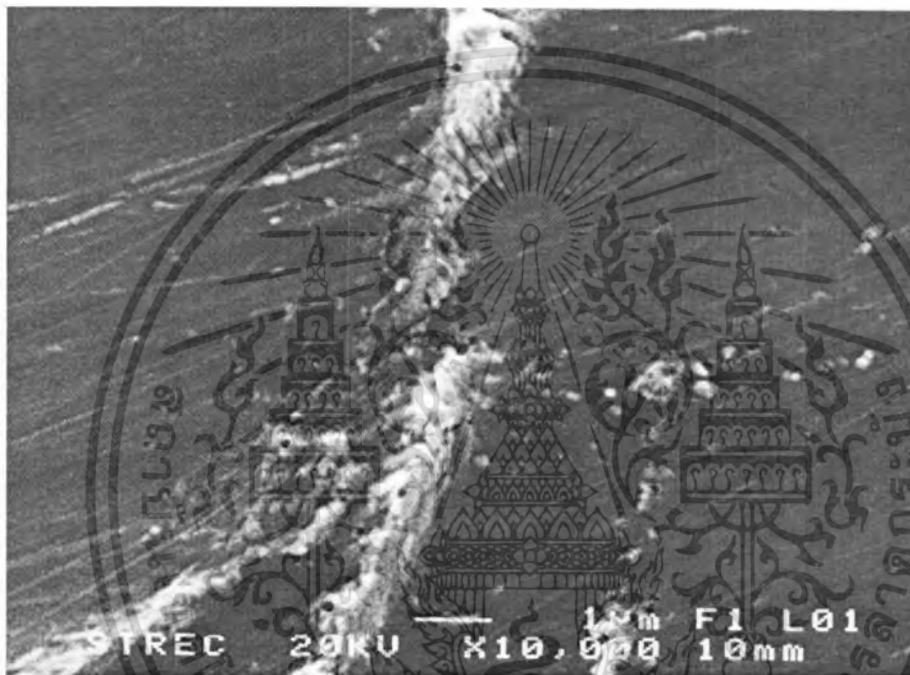
รูปที่ 4.57 แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



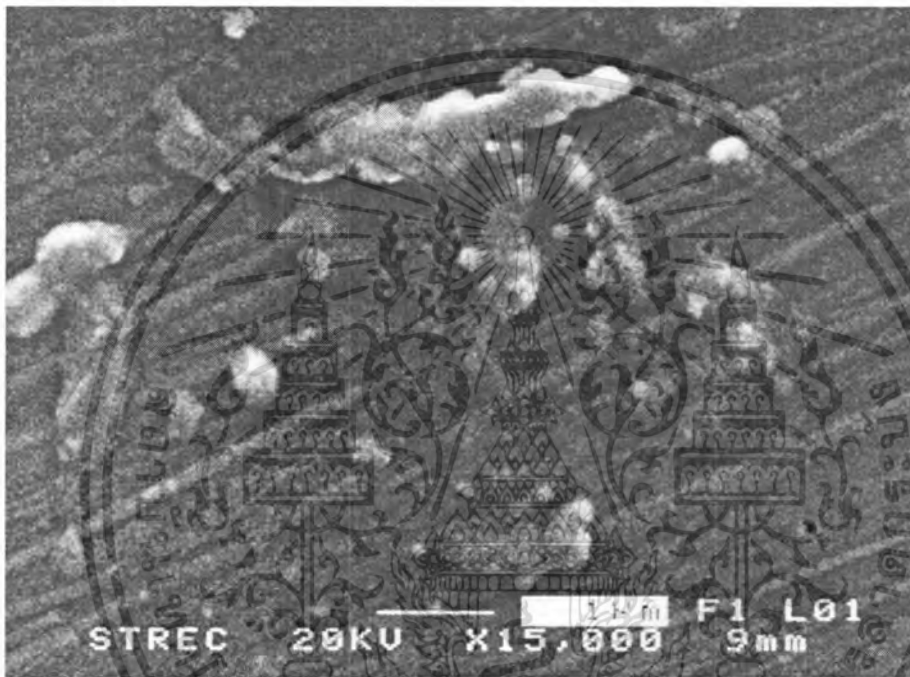
รูปที่ 4.58 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลีแทสเซียมซิลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml
 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



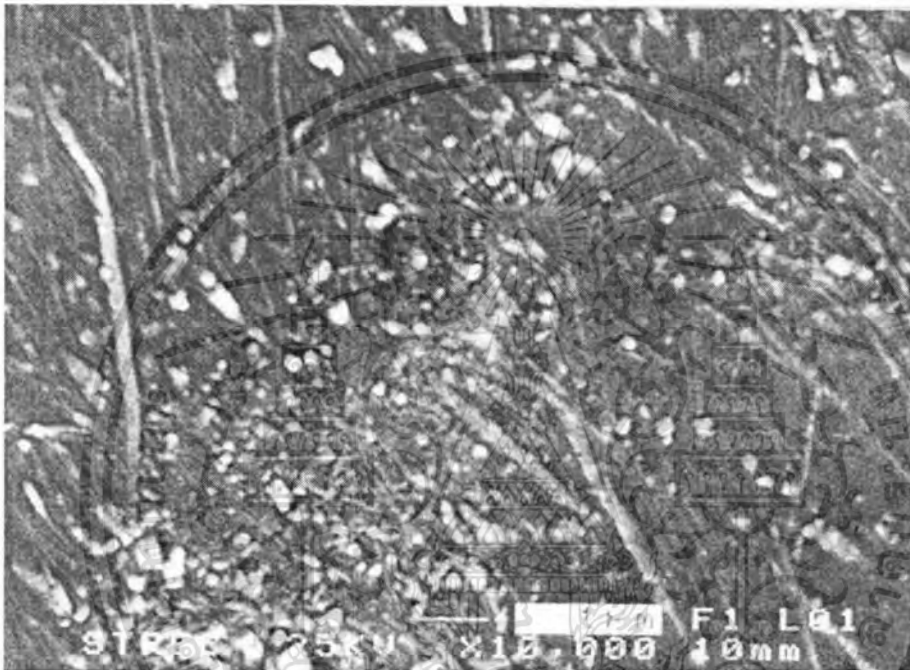
รูปที่ 4.59 แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นเพลททินัมฟอยล์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลแทสเซียมซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml
 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

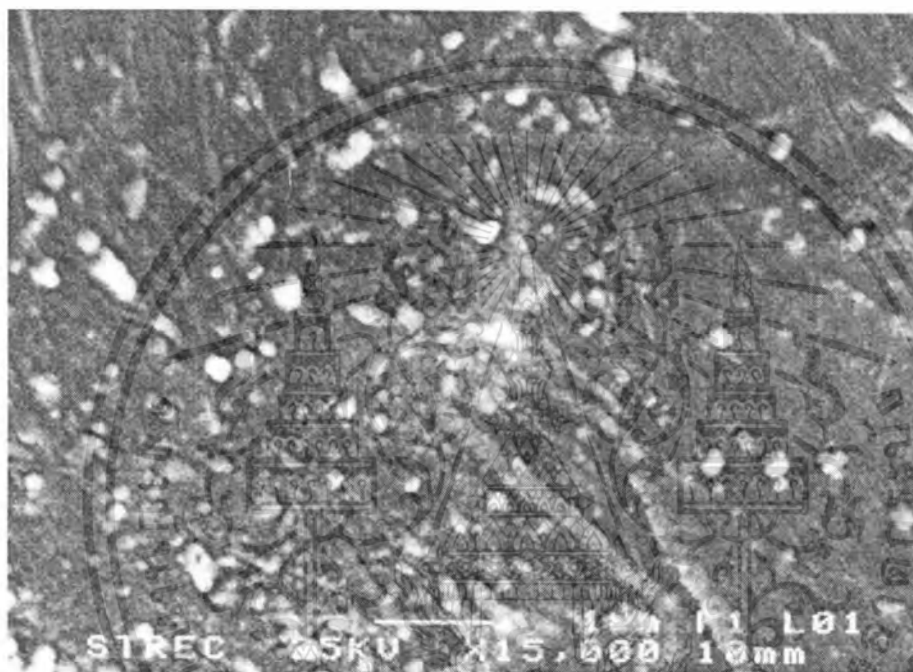


รูปที่ 4.60 (ต่อ)แสดง Scanning electron micrograph: ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลีเอทิลีนออกไซด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml
 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 15,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.61 แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 10,000 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.62 แสดง Scanning electron micrograph ของพอลิไพโรลบนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่
 ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย
 โพลแทสเซียมซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10 เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml
 โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ กำลังขยาย 15,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

เมื่อนำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มาทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าโดยใช้เทคนิค Four-point probes จะได้ค่าการนำไฟฟ้างดงตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่ยังไม่ได้ทำการตรึงเอนไซม์ซึ่งสังเคราะห์ได้ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มี pH ต่างๆ

สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์		ค่าการนำไฟฟ้า (S/cm)			
อิเล็กโทรไลต์	pH	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
KCl	5	0.170	0.179	0.187	0.179
	7	0.022	0.029	0.024	0.025
	10	0.068	0.068	0.069	0.068
K ₂ SO ₄	5	0.157	0.166	0.158	0.160
	7	1.445 E ⁻⁴	1.562 E ⁻⁴	3.984 E ⁻⁴	2.330 E ⁻⁴
	10	0.020	0.022	0.023	0.022
K ₃ PO ₄	5	--	-	-	-
	7	-	-	-	-
	10	-	-	-	-

(หมายเหตุ สำหรับฟิล์มที่ไม่ได้แสดงค่าการนำไฟฟ้าเป็นเพราะว่าขนาดของฟิล์มเล็กเกินกว่าระยะความกว้างของ Probe ที่จะสามารถวัดได้)

จากตารางแสดงค่าการนำไฟฟ้าจะพบว่า มีแนวโน้มดังนี้ ฟิล์มพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้โพแทสเซียมคลอไรด์จะมีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าฟิล์มพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้โพแทสเซียมซัลเฟต และพบว่าค่าการนำไฟฟ้าที่ pH 5 จะมีค่าสูงที่สุด

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่ทำการตรึงเอนไซม์ซึ่งสังเคราะห์ได้
ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มี pH ต่างๆ

สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์		ค่าการนำไฟฟ้า (S/cm)			
อิเล็กโทรไลต์	pH	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
KCl	5	0.446	0.407	0.310	0.388
	7	0.014	0.021	0.019	0.018
	10	0.091	0.093	0.094	0.093
K ₂ SO ₄	5	0.011	0.006	0.008	0.008
	7	0.006	0.006	0.007	0.006
	10	0.024	0.014	0.019	0.019
K ₃ PO ₄	5	-	-	-	-
	7	-	-	-	-
	10	-	-	-	-

(หมายเหตุ สำหรับฟิล์มพอลิไพโรลที่ไม่ได้แสดงค่าการนำไฟฟ้าเป็นเพราะว่าในสภาวะดังกล่าวไม่มีความเหมาะสมในการเตรียมฟิล์มพอลิไพโรล)

จากตารางค่าการนำไฟฟ้าจะพบว่าเมื่อมีแนวโน้มดังนี้ ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้โพแทสเซียมคลอไรด์จะมีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่าฟิล์มพอลิไพโรลที่ได้จากการใช้โพแทสเซียมซัลเฟต และที่ pH 5 จะมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงที่สุด

สำหรับค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มที่เตรียมได้จากการใช้โพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์อาจจะมีแนวโน้มที่ผิดจากความจริงเนื่องจากว่าฟิล์มดังกล่าวอาจมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี

4.5 การวัดปริมาณกลูโคสโดยใช้อิเล็กโทรดที่มีฟิล์มพอลิไพโรลที่ทำการตรึงกลูโคสออกซิเดสซึ่งสังเคราะห์ในสภาวะต่างๆ ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

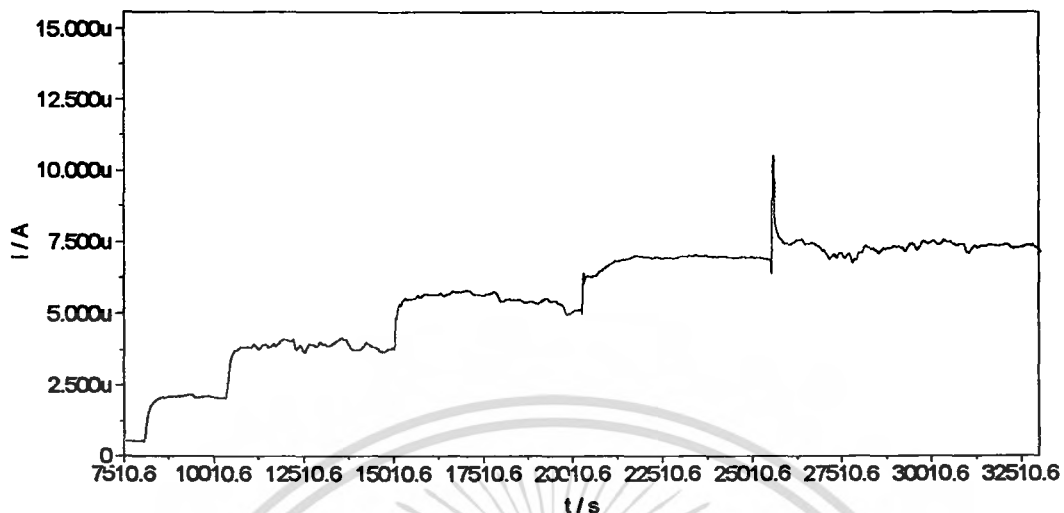
หลังจากที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิไพโรลที่มีการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสแล้วก็จะนำไปใช้ประโยชน์ในการวัดปริมาณกลูโคสโดยทำการวัดในสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7 โดยใช้วิธี โพเทนชิโอสแตต ด้วยการป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.8 โวลต์ จากนั้นรอกจน base line นิ่ง แล้วทำการฉีดสารละลายมาตรฐานกลูโคสความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ 5 ครั้ง ซึ่งปริมาณในการฉีดแต่ละครั้งจะทำให้ความเข้มข้นของกลูโคสในสารละลายเป็น 2 mM , 4mM , 6mM , 8mM , และ 10mM ตามลำดับ

เมื่อทำการวัดปริมาณกลูโคสโดยใช้อิเล็กโทรดที่สังเคราะห์ในสภาวะที่มีอิเล็กโทรไลต์และ pH ต่างๆ แล้วพบว่าข้อมูลที่ได้เป็นดังนี้

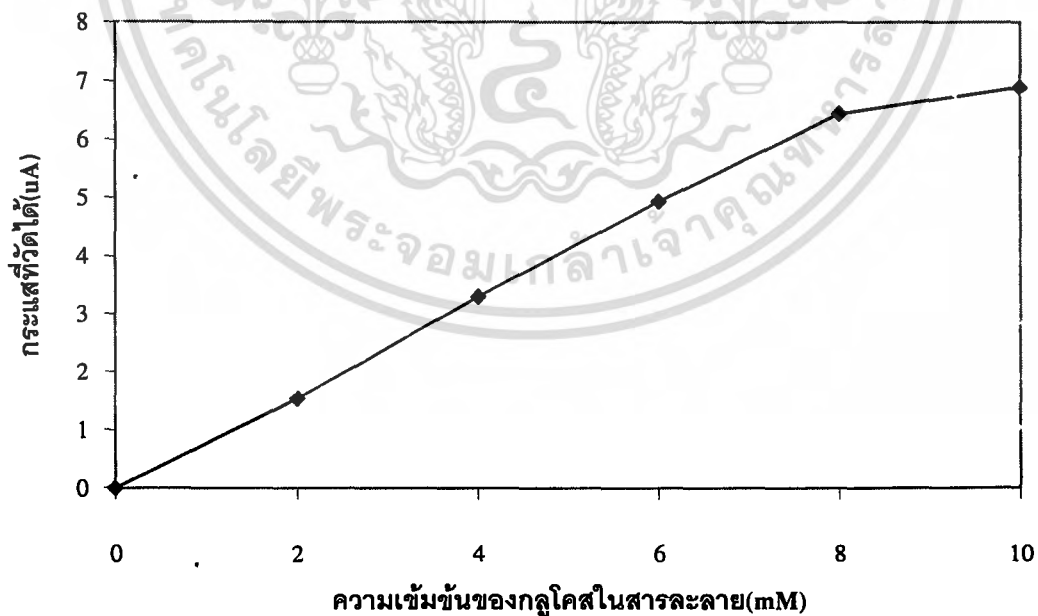
ตารางที่ 4.17 แสดงค่ากระแสที่วัดได้เมื่อใช้อิเล็กโทรดที่สังเคราะห์ในสภาวะต่างๆกัน

สภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์	ค่ากระแสที่วัดได้ (uA) เมื่อความเข้มข้นของกลูโคสเป็น 2 mM	ค่ากระแสที่วัดได้ (uA) เมื่อความเข้มข้นของกลูโคสเป็น 4 mM	ค่ากระแสที่วัดได้ (uA) เมื่อความเข้มข้นของกลูโคสเป็น 6 mM	ค่ากระแสที่วัดได้ (uA) เมื่อความเข้มข้นของกลูโคสเป็น 8 mM	ค่ากระแสที่วัดได้ (uA) เมื่อความเข้มข้นของกลูโคสเป็น 10 mM
KCl pH 5	1.540	3.299	4.934	6.444	6.884
KCl pH 7	0.082	0.163	0.572	0.798	0.982
KCl pH 10	0.172	0.482	0.623	0.708	1.422
K ₂ SO ₄ pH5	0.021	0.062	0.079	0.254	0.359
K ₂ SO ₄ pH7	0.079	0.184	0.475	0.922	1.288
K ₂ SO ₄ pH10	0.070	0.139	0.393	0.520	0.578

จากข้อมูลที่ได้ เมื่อนำไปสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของกลูโคสกับกระแสที่วัดได้ จะพบว่ากราฟที่ได้จะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ซึ่งกราฟที่ได้จากการวัดปริมาณกลูโคสโดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มี pH 5 จะทำให้ได้สัญญาณกระแสมากที่สุด และมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงมากที่สุดด้วย

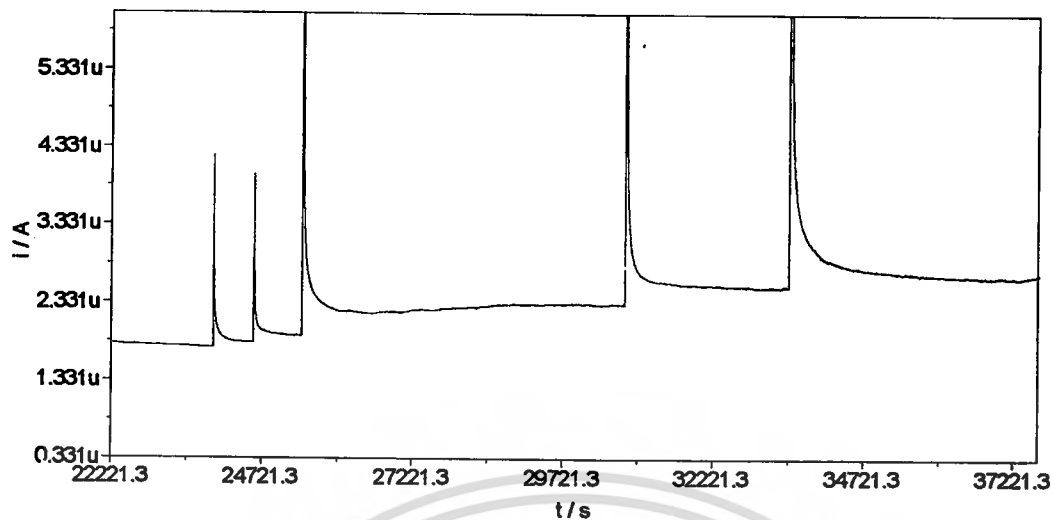


รูปที่ 4.63 แสดงการหาปริมาณกลูโคสในสารละลายโดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลาย
ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลาย
โพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5

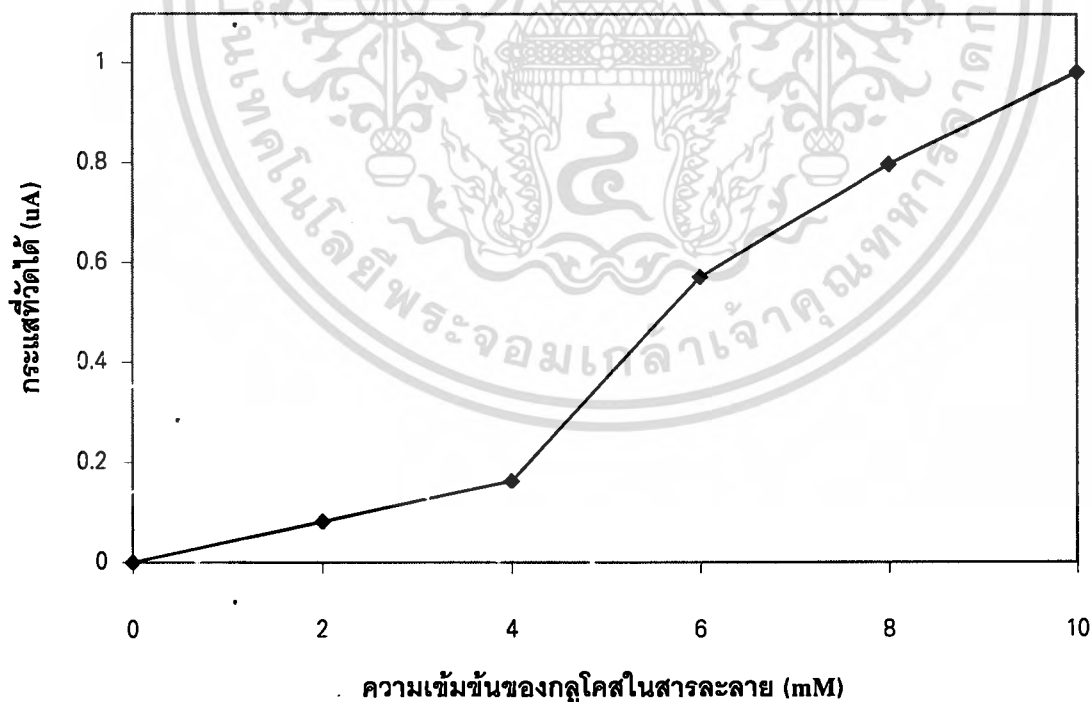


รูปที่ 4.66 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ
กลูโคสกับกระแสที่วัดได้โดยอาศัยข้อมูลจากรูปที่ 4.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

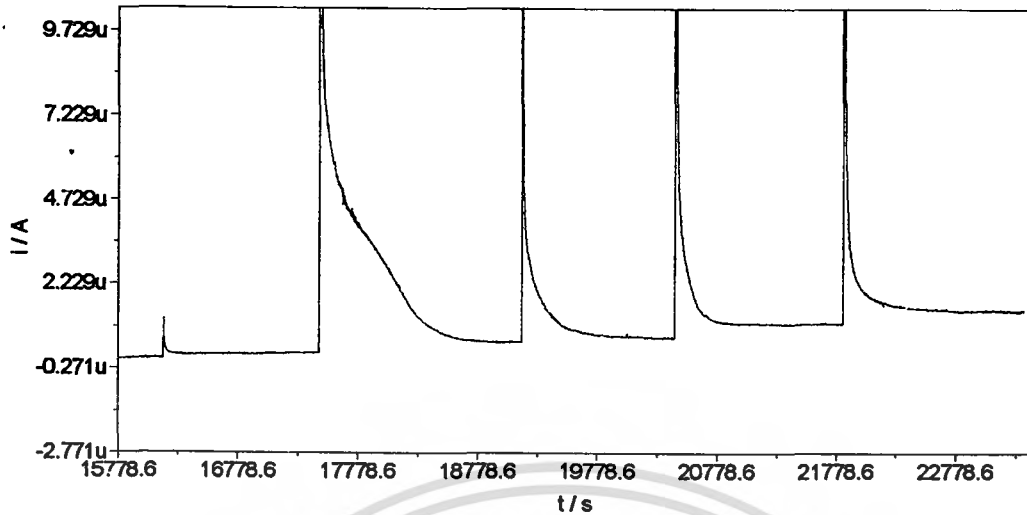


รูปที่ 4.67 แสดงการหาปริมาณกลูโคสในสารละลาย โดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลาย
ที่ประกอบด้วยไพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลาย
โพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7

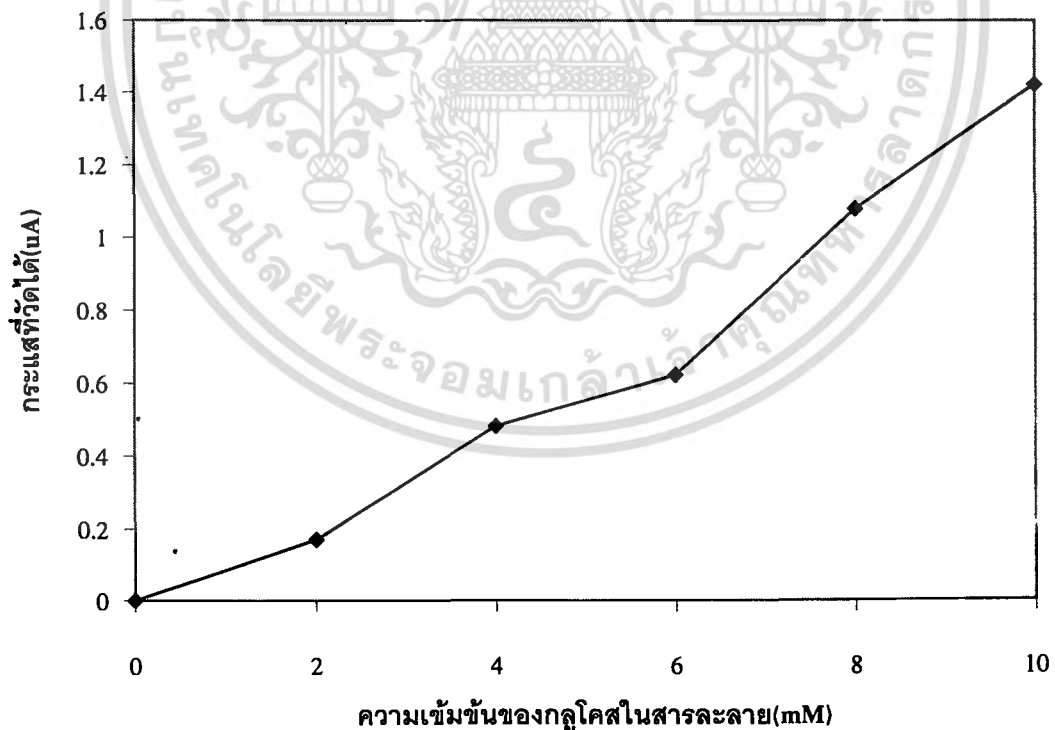


รูปที่ 4.66 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ
กลูโคสกับกระแสที่วัดได้โดยอาศัยข้อมูลจากรูปที่ 4.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

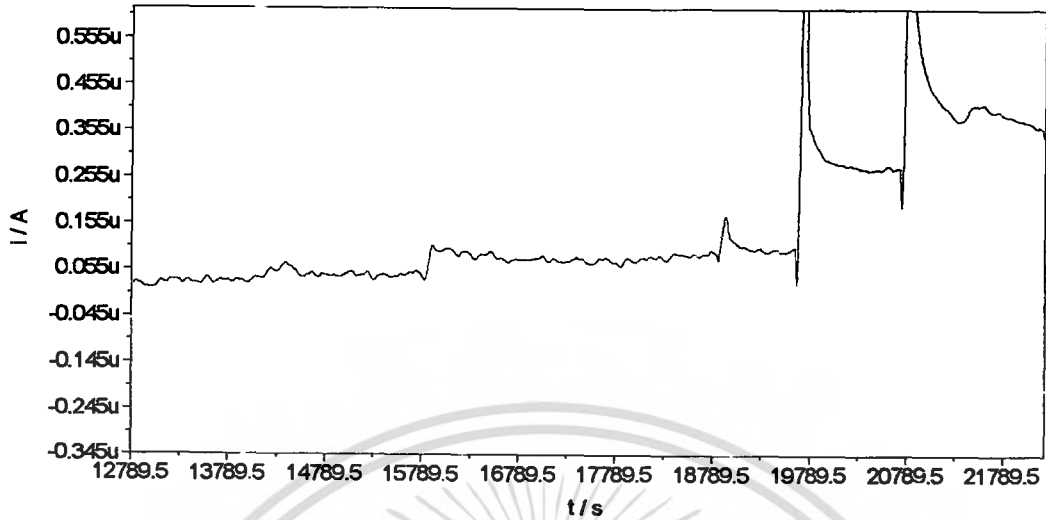


รูปที่ 4.67 แสดงการหาปริมาณกลูโคสในสารละลายโดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลายที่ประกอบด้วยไฟโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10

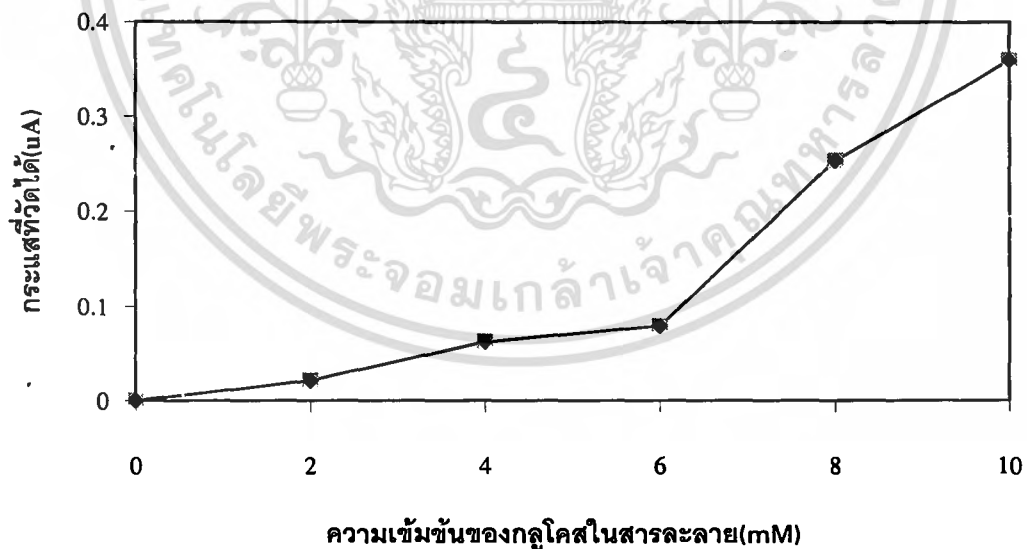


รูปที่ 4.68 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกลูโคสกับกระแสที่วัดได้โดยอาศัยข้อมูลจากรูปที่ 4.67

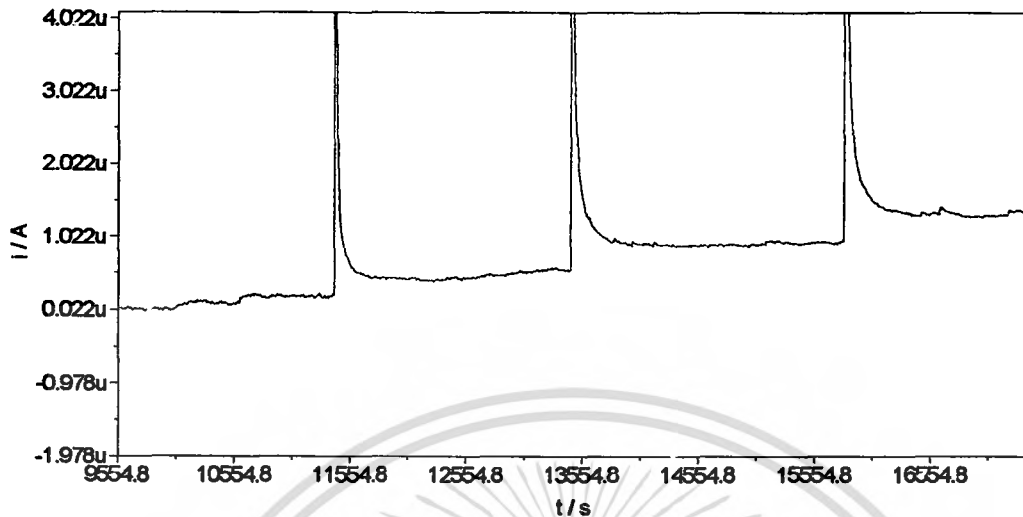
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



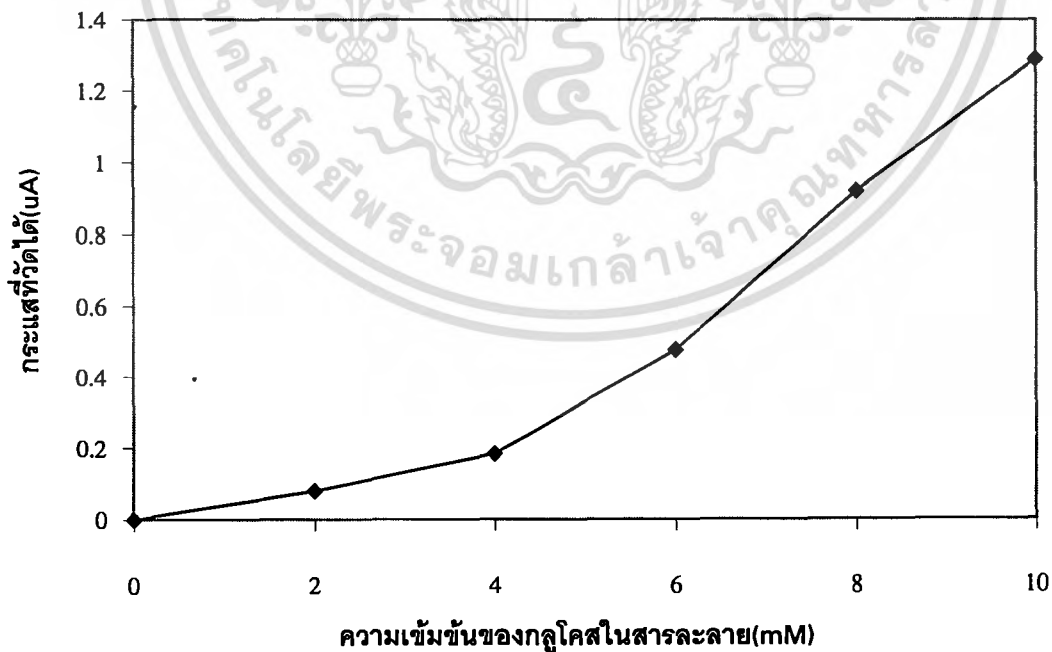
รูปที่ 4.69 แสดงการหาปริมาณกลูโคสในสารละลายโดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลาย
ที่ประกอบด้วยไฟโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลาย
โพแทสเซียมซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 5



รูปที่ 4.70 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ
กลูโคสกับกระแสที่วัดได้โดยอาศัยข้อมูลจากรูปที่ 4.69



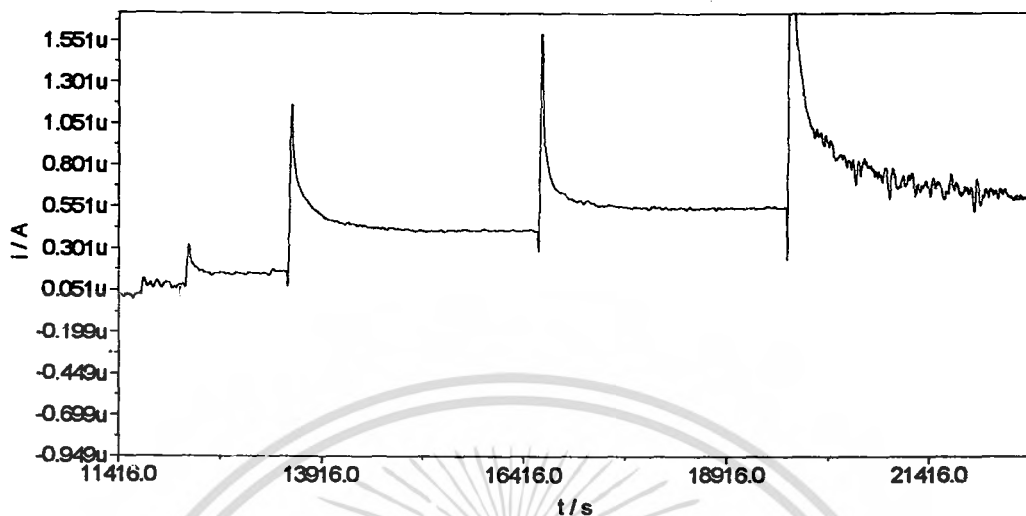
รูปที่ 4.71 แสดงการหาปริมาณกลูโคสในสารละลายโดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลายที่ประกอบด้วยโพโรล 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 7



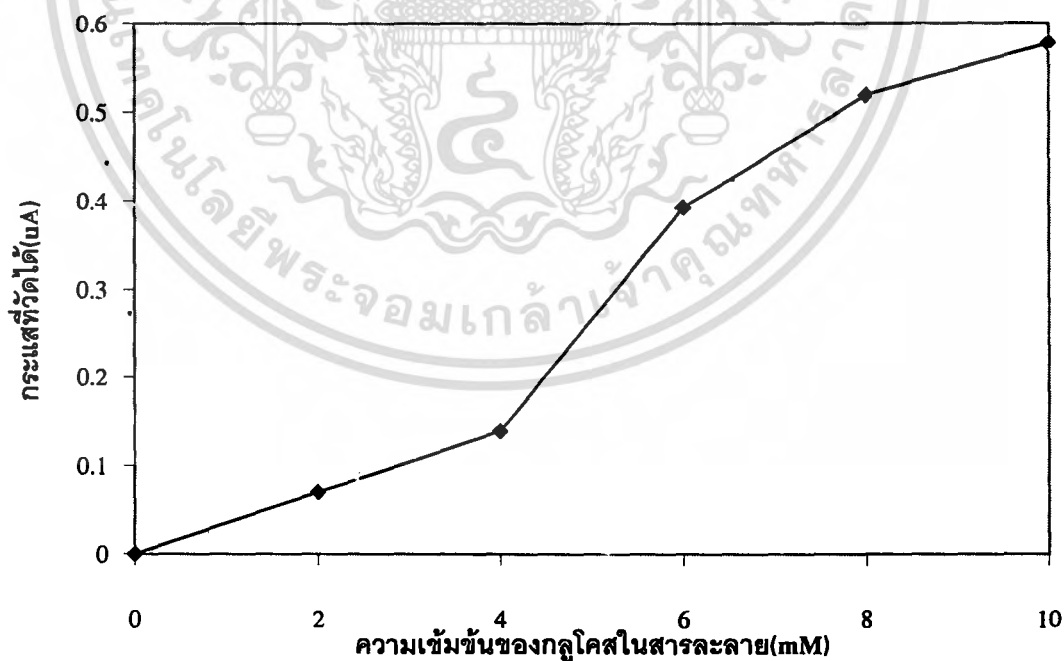
รูปที่ 4.74 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ

กลูโคสกับกระแสที่วัดได้โดยอาศัยข้อมูลจากรูปที่ 4.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.73 แสดงการหาปริมาณกลูโคสในสารละลายโดยใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลาย
ที่ประกอบด้วยโพโรส 0.3 M เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส 30 unit/ml ในสารละลาย
โพแทสเซียมซัลเฟต บัฟเฟอร์ฟอสเฟต pH 10



รูปที่ 4.74 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ
กลูโคสกับกระแสที่วัดได้โดยอาศัยข้อมูลจากรูปที่ 4.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุป วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งหมดที่ทำการศึกษาที่มีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิไพโรลที่ทำการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส จะมีแนวโน้มคือ เมื่อใช้โพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าจะทำให้เกิดพอลิเมอร์ได้ดีกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟต โดยดูจากลักษณะของฟิล์มที่สังเกตุได้ด้วยตาเปล่า จะพบว่าฟิล์มที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเต็มแผ่นอิเล็กโทรดเมื่อใช้โพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในขณะที่ฟิล์มที่เกิดจากการใช้โพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะไม่เต็มแผ่นอิเล็กโทรด และยังพบว่าเมื่อใช้โพแทสเซียมคลอไรด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้กราฟที่ได้ในขณะที่ทำการสังเคราะห์จะมีลักษณะชันมากกว่ากราฟที่ได้จากการสังเคราะห์โดยการใช้โพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดพอลิเมอร์ได้เร็วในช่วงแรก นอกจากนี้ยังพบว่าที่สภาวะ pH 5 จะทำให้เกิดฟิล์มพอลิเมอร์ได้ดีที่สุดโดยสังเกตุได้จากค่ากระแสที่ได้ขณะทำการสังเคราะห์จะพบว่ามีความมากที่สุด

เมื่อทำการสังเคราะห์ฟิล์มที่ทำการตรึงเอนไซม์ลงไปด้วยจะพบว่าแนวโน้มดังนี้ เมื่อใช้โพแทสเซียมคลอไรด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้เกิดฟิล์มได้ดีที่สุดเมื่อใช้สภาวะที่มี pH 5 แต่เมื่อใช้โพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะพบว่าในสภาวะที่ pH 7 จะเกิดฟิล์มได้ดีที่สุด

ข้อมูลที่ได้จาก FTIR ทำให้ได้ข้อสรุปว่า พอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ในสภาวะที่มีอิเล็กโทรไลต์ และ pH ต่างกันจะทำให้ได้โครงสร้างที่คล้ายกันและโครงสร้างพอลิไพโรลที่ได้จากการโดปด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกันจะมีแอนไอออนของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้โดปปรากฏแตกต่างกันด้วย

เมื่อทำการศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของพอลิไพโรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้โพแทสเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะพบว่าลักษณะของพอลิไพโรลไม่แตกต่างกันมากนัก โดยจะมีลักษณะเป็นสายโซ่ที่มีการจัดเรียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกันอย่างหนาแน่นแต่ในขณะที่การใช้โพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้สายโซ่ของพอลิไพโรลที่ได้มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งจะสังเกตได้จากกำลังขยายที่ใช้จะต้องใช้กำลังขยายสูงมากถึงจะเห็นสายโซ่พอลิเมอร์ และพบว่าสายโซ่ของพอลิไพโรลที่ได้จากการใช้โพแทสเซียมฟอสเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีลักษณะเป็นกิ่งสั้นๆ ซึ่งยืนยันได้ว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมฟอสเฟตจะไม่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิไพโรลด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า และผลดังกล่าวยังสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้ในขณะที่ทำการสังเคราะห์อีกด้วย กล่าวคือค่ากระแสที่ได้ขณะทำการสังเคราะห์จะมีค่าน้อยมากซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเกิดพอลิเมอร์จะไม่ได้

นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิไพโรลที่ทำการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส จะพบว่าสามารถเห็นอนุภาคของเอนไซม์ที่ถูกตรึงไว้ที่สายโซ่ได้อย่างชัดเจน และยังพบว่าการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นอีกด้วย

จากข้อมูลของค่าการนำไฟฟ้าที่ได้จะพบว่าฟิล์มที่สังเคราะห์โดยใช้โพแทสเซียมคลอไรด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะให้ค่าการนำไฟฟ้าที่สูงกว่า ฟิล์มพอลิไพโรลที่สังเคราะห์โดยใช้โพแทสเซียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะสังเกตได้ว่ามีแนวโน้มที่เหมือนกันกับฟิล์มที่ทำการตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดส

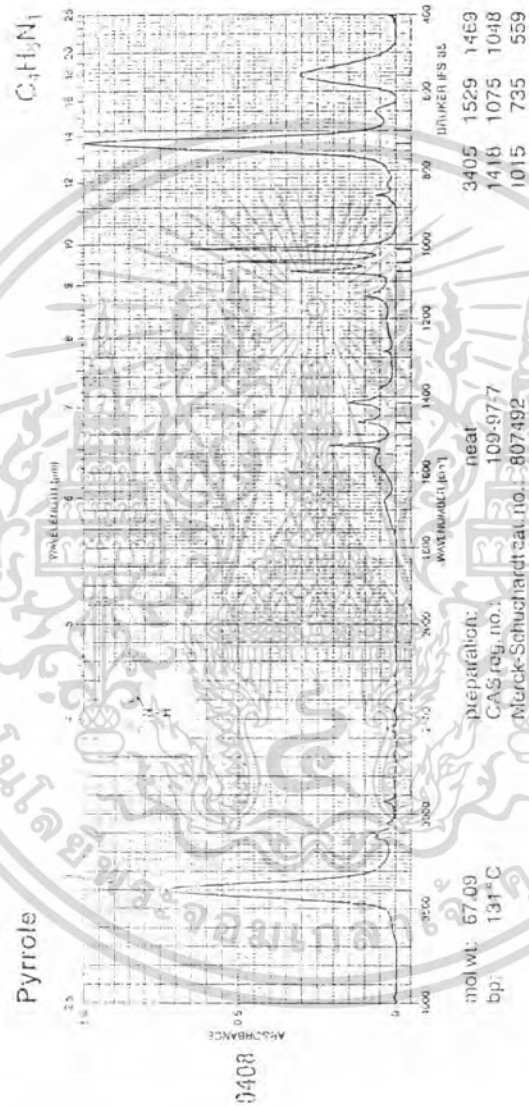
ข้อมูลที่สำคัญอย่างสุดท้ายคือค่าสัญญาณกระแสที่ได้จากการหาปริมาณกลูโคส ซึ่งเมื่อใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์จะทำให้การตอบสนองมีลักษณะราบเรียบกว่าการใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต นอกจากนี้ค่ากระแสที่ได้เมื่อใช้อิเล็กโทรดที่เตรียมจากสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ที่มี pH 5 จะให้ค่ากระแสที่มากที่สุด และมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linearity) มากที่สุดด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิไพโรลโดยการใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าอื่นๆ เช่น การใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี เพื่อทำการเปรียบเทียบว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีใดจะทำให้อิเล็กโทรดที่ได้มีประสิทธิภาพมากกว่ากัน
2. ควรทำการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิไพโรลในตัวทำละลายอินทรีย์ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเกิดพอลิเมอร์และค่าการนำไฟฟ้ากับผลที่ได้จากการสังเคราะห์ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย
3. ควรศึกษาถึงปริมาณเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่เหมาะสมที่ทำให้มีการตอบสนองที่สูงที่สุด
4. ควรศึกษาถึงความหนาของฟิล์มที่มีผลต่อการหาปริมาณกลูโคส
5. ควรศึกษาถึง Stability ของอิเล็กโทรดที่เตรียมได้
6. ควรหาช่วงความเข้มข้นของกลูโคสที่ทำให้กราฟมาตรฐานที่ได้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงมากที่สุด
7. ควรทำการเตรียมอิเล็กโทรดที่ทำการตรึงตัวกลางถ่ายเทอิเล็กตรอน (Mediator) เช่นเฟอริไซยาไนด์

ภาคผนวก

สเปกตรัม



รูปที่ 1 แสดงสเปกตรัมของไพโรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาปริมาณมอนอเมอร์โพลีที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นฟิล์ม

ในโครงการพิเศษนี้ได้ใช้ปริมาณมอนอเมอร์โพลีที่มีความเข้มข้นเป็น 0.3 โมลาร์ในสารละลาย บัฟเฟอร์ฟอสเฟต และ อิเล็กโทรไลต์ ที่มีปริมาตรรวมเป็น 5 มิลลิลิตร ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

น้ำหนักโมเลกุลของมอนอเมอร์โพลีเป็น 67.09 กรัมต่อโมล

ความหนาแน่นของมอนอเมอร์โพลีเป็น 0.966 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ดังนั้น โพลี 1 โมล จะมี 67.09 กรัม

โพลี 0.3 โมล จะมี $67.09 \times 0.3 = 20.172$ กรัม

แสดงว่าในสารละลาย 1000 มิลลิลิตร จะมีโพลี 20.172 กรัม

ดังนั้นในสารละลาย 5 มิลลิลิตร จะมีโพลี $(20.172 \times 5)/1000 = 0.100635$ กรัม

จาก $d = m/v$

ดังนั้น $v = m/d$

$$= 0.100635 / 0.966$$

$$= 104 \text{ ไมโครลิตร}$$

การคำนวณหาปริมาณเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ใช้ในการสังเคราะห์แผ่นฟิล์ม

จากจำนวนแอกติวิตีของเอนไซม์ที่ระบุไว้ข้างขวดเป็น 23,000 หน่วยต่อกรัม เราสามารถหาปริมาณเอนไซม์ที่ต้องใช้ในการเตรียมฟิล์มที่ตรึงเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสในจำนวน 30 หน่วยต่อมิลลิลิตร ในสารละลายจำนวน 5 มิลลิลิตรได้ดังนี้

ปริมาณเอนไซม์กลูโคสออกซิเดสที่ต้องชั่ง (กรัม) = (ปริมาณสารละลายที่ต้องใช้ในการเตรียมฟิล์ม x จำนวนหน่วยเอนไซม์ที่ต้องการ) / จำนวนแอกติวิตีของเอนไซม์

ดังนั้นในการเตรียมฟิล์มที่มีจำนวนเอนไซม์เป็น 30 หน่วยต่อมิลลิลิตร ต้องชั่งเอนไซม์มาในปริมาณ $(5\text{ml.} \times 30 \text{ unit/ml.}) / 23,000 \text{ unit/g.} = 0.0065 \text{ g.}$

การคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในการเตรียมบัฟเฟอร์

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมบัฟเฟอร์มีดังนี้

1. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4)
2. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (KH_2PO_4)
3. โซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 6.3 หน้า 208 ^[16] พบว่าส่วนประกอบของบัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH ต่างๆมีดังนี้

KH_2PO_4 , (g)	Na_2HPO_4 , (g)	Na_3PO_4 , (g)	Measured pH
5.168	0.0858	-	5.05
0.942	1.57	-	7.00
-	1.784	0.1505	10.00

หมายเหตุ อัตราส่วนตามตารางนี้สำหรับปริมาตรรวมสุดท้ายเป็น 200 มิลลิลิตร และจะมีค่า Ionic strength เป็น 0.2

ในโครงการพิเศษนี้ได้เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ที่มี Ionic strength เป็น 0.1 และทำปริมาตรรวมเป็น 1,000 มิลลิลิตร ซึ่งสามารถทำได้โดยการเอาตัวเลขตามตารางมาคูณด้วย 5 (เพื่อปรับให้เหมาะสมกับปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร) และหารด้วย 2 (เพื่อทำให้ Ionic strength มีค่าเป็น 0.1)

การคำนวณหาปริมาตรกลุโคสที่ต้องทำการฉีดในขั้นตอนการวัดปริมาณกลุโคส กำหนดให้

C_1 แทนความเข้มข้นของสารละลายกลุโคสมาตรฐาน 0.1 โมลาร์

V_1 แทนปริมาตรสารละลายกลุโคสมาตรฐานที่ต้องฉีดลงไป

C_2 แทนความเข้มข้นของกลุโคสในสารละลายรวม (โมลาร์)

V_2 แทนปริมาตรรวมของสารละลาย

ฉีดครั้งที่ 1 (ความเข้มข้นกลุโคสในสารละลายรวมเป็น 2 มิลลิโมลาร์)

$$\begin{aligned} \text{จาก } C_1 V_1 &= C_2 V_2 \\ (0.1) V_1 &= 2E^{-3}(5) \\ V_1 &= 0.1 \text{ มิลลิลิตร} \\ &= 100 \text{ ไมโครลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นตอนเริ่มต้นจะใช้ปริมาตรสารละลายบัฟเฟอร์เป็น 4,900 มิลลิลิตร และเมื่อทำการฉีดสารละลายกลุโคสครั้งแรกลงไป 100 ไมโครลิตร (ปริมาตรรวมเป็น 5 มิลลิลิตร) จะทำให้ความเข้มข้นของกลุโคสในสารละลายรวมเป็น 2 มิลลิโมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉีดครั้งที่ 2 (ความเข้มข้นของกุกุโคสในสารละลายรวมเป็น 4 มิลลิโมลาร์)

$$\begin{aligned} \text{จาก } C_1V_1 &= C_2V_2 \\ (0.1)V_1 &= 4E^{-3}(V_1 + 5) \\ V_1 &= 0.208 \text{ มิลลิลิตร} \\ &= 208 \text{ ไมโครลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นครั้งที่สองทำการฉีดกุกุโคสในปริมาตร 208 ไมโครลิตร

ฉีดครั้งที่ 3 (ความเข้มข้นของกุกุโคสในสารละลายรวมเป็น 6 มิลลิโมลาร์)

$$\begin{aligned} \text{จาก } C_1V_1 &= C_2V_2 \\ (0.1)V_1 &= 6E^{-3}(V_1 + 5.208) \\ V_1 &= 0.332 \text{ มิลลิลิตร} \\ &= 302 \text{ ไมโครลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นครั้งที่สามทำการฉีดกุกุโคสในปริมาตร 302 ไมโครลิตร

ฉีดครั้งที่ 4 (ความเข้มข้นของกุกุโคสในสารละลายรวมเป็น 8 มิลลิโมลาร์)

$$\begin{aligned} \text{จาก } C_1V_1 &= C_2V_2 \\ (0.1)V_1 &= 8E^{-3}(V_1 + 5.540) \\ V_1 &= 0.482 \text{ มิลลิลิตร} \\ &= 482 \text{ ไมโครลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นครั้งที่สี่ทำการฉีดกุกุโคสในปริมาตร 482 ไมโครลิตร

ฉีดครั้งที่ 5 (ความเข้มข้นของกุกุโคสในสารละลายรวมเป็น 10 มิลลิโมลาร์)

$$\begin{aligned} \text{จาก } C_1V_1 &= C_2V_2 \\ (0.1)V_1 &= 10E^{-3}(V_1 + 6.022) \\ V_1 &= 0.669 \text{ มิลลิลิตร} \\ &= 669 \text{ ไมโครลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นครั้งที่ห้าทำการฉีดกุกุโคสในปริมาตร 669 ไมโครลิตร

เอกสารอ้างอิง

1. Sukeerthi , S. , Contractor , A.Q. “Application of Conducting Polymer as Sensors.” *Indian Journal of Chemistry* . 33A (1994) : 565-571.
2. Zhiqiang , G. , Johan , B. , and Ari , I “Electrochemical Study of Bilayer Conducting Polymers : Polypyrrole / Polyaniline System.” *Journal of Electroanalytical Chemistry* 364 (1994) : 127-133.
3. Abraham , B. Smith , and Christopher , J. Knoeles. “Investigation of the Relationship Between Conductivity and Protein-Binding Properties of Polypyrrole.” *Journal of Applied Polymer Science*. 43 (1991) : 399-403.
4. Daniel E. Raymond and D.Jed Harison. “Observation of Pyrrole Radical Cations as Transient Intermediate the Anodic Formation of Conduction Polypyrrole Films.” *Journal of Electroanalytical Chemistry* . 361 (1993) : 65-76.
5. Hammerle , M. , Schuhmann , W. , and Schmidt , H.-L. “Amperometric Polypyrrole Enzyme Electrode : Effect of Permiability and Enzyme Location.” *Sensors and Actuators*. B,6,(1992) : 106-112.
6. Pierre , G. and Alain , Bergel “Improved Model of a Polypyrrole Glucose Oxidase Modified Electrode.” *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 386 (1995) : 65-73.
7. Bartlett , P.N. ,and Copper , J. M. “A Review of the Immobilization of Enzymes in Electropolymerized Films.” *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 362 (1993) : 1-12.
8. Mirths , U. and Jess , W. “Protein-Modified Electrode : The Glucose Oxidase/Polypyrrole System.” *Analytical Chemistry*. 58 (1986) : 2979-2983.
9. Koopal , C.G.J. , Feiters , M.C. and Nolte , R.J. “Glucose Sensor Utilizing Polypyrrole Incorporated in Track-Etch Membranes as the Mediator.” *Biosensors & Bioelectronics*. 7 (1992) : 467-471.
10. Greene , R.L. , and Street , G.B. “Conducting Organic Materials.” *Science*. 226 (1984) : 651-656.
11. นายกิตติศักดิ์ ปิงสมบุญมิ่ง , นายเฉลิมพล วงศ์ดิษฐ์นันท์ และ นางสาวเนาวรัตน์ สร้อยสนธิ์ . “การศึกษาผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สัณฐานวิทยา และค่าการนำไฟฟ้าของพอลิแอนิลีนและอนุพันธ์”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2539.

12. นางสาวธนาวดี ลี้จากภักย์. "การสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าด้วยวิธีพอลิเมอร์ไรเซชันแบบ
สารละลาย" วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาปิโตรเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์-
มหาวิทยาลัย 2536.
13. Kanatzidis , M.G. "Conductive Polymers." C&EN . December 3 (1990) : 35-64.
14. Sethi , R.S. "Transducer Aspects of Biosensors." Biosensors & Bioelectronics. 9(3) .
(1993) : 243-264.
15. Duic , Lj. , Mandic , Z. and Kovacicek , F. "The Effect of Supporting Electrolyte on the
Electrochemical Synthesis , Morphology , and Conductivity of Polyaniline" Journal of
Polymer Science.: Part A : Polymer Chemistry 32 (1994) : 105-111.
16. Christian , G.D. , and Purdy , W.C. Analytical Chemistry. 5 th ed. , pp. 208 , Mc. Graw
Hill , Newyork , 1994.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้