

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สัณฐานวิทยา และค่าการนำไฟฟ้าของพอลิแอนิไลน์และอนุพันธ์



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

ปพ.

ก ๒๕๕๕ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

๒๕๓๙

ปีการศึกษา ๒๕๓๙

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 32019

วัน, เดือน, ปี - ๘ ก.พ. ๒๕๔๒

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**The Effects of Supporting Electrolytes on the Electrochemical Synthesis,
Morphology, and Conductivity of Polyaniline and its Derivatives**



Mr. Kittisak Phuengsomboonying
Mr. Chalermphol Wongdithnan
Miss Naowarat Sroysonthi

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

1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อการสังเคราะห์ด้วย
วิธีทางเคมีไฟฟ้า สัณฐานวิทยา และค่าการนำไฟฟ้าของพอลิแอนิไลน์
และอนุพันธ์

โดย นายกิตติศักดิ์ บึงสมบุญยิ่ง
นายเฉลิมพล วงศ์ศิษุพันธ์
นางสาวเนาวรัตน์ สร้อยสนธิ์

ภาควิชา เคมี

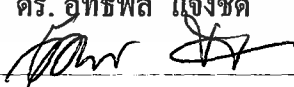
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. อรวรรณ ชัยลภากุล
ดร. อรุณี ทับเที่ยง*
* ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

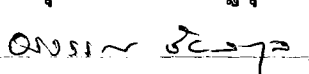
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต


ผศ. นงนุช เกตราณุวัฒน์ หัวหน้าภาควิชาเคมี

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ

() ประธานกรรมการ

ดร. อธิพิล แจ่มชัด
() กรรมการ

อ. สุจินต์ ดันติพิสิฐกุล
() กรรมการ

ดร. อรวรรณ ชัยลภากุล

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สัณฐานวิทยา และค่าการนำไฟฟ้าของพอลิแอนิลินและอนุพันธ์	
นักศึกษา	นายกิตติศักดิ์	ปingsมบูรณ์ยิ่ง
	นายเฉลิมพล	วงศ์ดิษฐ์นันท์
	นางสาวเนาวรัตน์	สร้อยสนธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. อรวรรณ	ชัยลภากุล
	ดร. อรุณี	ทับเที่ยง*
ภาควิชา	* ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล	
ปีการศึกษา	เคมี	
	2539	

บทคัดย่อ

การสังเคราะห์พอลิแอนิลินและอนุพันธ์ (Poly (N-methylaniline) และ Poly (o-toluidine)) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ (กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก) เพื่อศึกษาผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สัณฐานวิทยา และค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ สภาวะที่ทำการทดลอง ประกอบด้วยมอนอเมอร์ 0.1 โมลาร์ละลายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 1.0 โมลาร์ ทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าระหว่าง -0.2 ถึง 1.05 โวลต์ เทียบกับศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (Ag/AgCl) ให้กับแพลทินัมฟอยล์ ที่อัตราการป้อน 25 มิลลิโวลต์ / วินาที การศึกษาโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีพบว่าพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้เมื่อใช้กรดต่างชนิดกันจะมีโครงสร้างที่คล้ายกัน พอลิเมอร์ที่ได้มีลักษณะรูปร่างคล้ายฟองน้ำ นอกจากนี้แนวโน้มของการเกิดพอลิเมอร์ที่ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัว dope และมีแอนิลินเป็นมอนอเมอร์จะมีอัตราในการเกิดพอลิเมอร์เร็วที่สุดและให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ

Special Project Title The Effects of Supporting Electrolytes on the Electrochemical Synthesis, Morphology, and Conductivity of Polyaniline and its Derivatives

Name Mr. Kittisak Phuengsomboonying

Mr. Chalermphol Wongdithnan

Miss Naowarat Sroysonthi

Special Project Advisor Dr. Orawan Chailaphakul

Dr. Arunee Tubteang*

* Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahidol University

Department Chemistry

Academic Year 1996

Abstract

Polyaniline and its derivatives (Poly (N-methylaniline) and Poly (o-toluidine)) can be synthesized by electropolymerization in four supporting electrolytes : HCl, H₂SO₄, HNO₃ and HClO₄. We studied the effects of supporting electrolytes on the electrochemical synthesis, morphology and conductivity of polymer. The condition of the experiment was 0.1 M monomer in 1.0 M electrolyte. The voltages were applied to the platinum foil in the range from -0.2 to 1.05 V vs Silver-silver chloride electrode (Ag/AgCl) at scan rate of 25 mV/ s. The IR spectra results showed that the structures of the polymers from different acidic aqueous solution were similar. The morphologies of the deposited polymers were the sponge-like. The polymer with the highest conductivity was produced by using H₂SO₄ as the dopant and aniline as the monomer in the short time.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษนี้สำเร็จลงได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำที่เป็นประโยชน์จากบุคคลและองค์กรต่าง ๆ

ขอขอบคุณ ดร. อรรวรรณ ชัยลภากุล ดร. อรุณี ทับเที่ยง และ ดร. ตะวัน สุขน้อย ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือ ในการดำเนินการโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด ดร. อธิธิพล แจ่มชัด และ อาจารย์สุจินต์ ตันติพิสิฐกุล คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาแก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้รายงานฉบับนี้ถูกต้องยิ่งขึ้น และคณาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือ ในระหว่างการดำเนินงานโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ อาจารย์สมศักดิ์ เขียวศิริกุล ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ผศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และเจ้าหน้าที่ สำนักงานปรมานูเพื่อสันติ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับดำเนินการโครงการพิเศษครั้งนี้

นอกเหนือจากบุคคลและหน่วยงานที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีบุคคลอีกมากมายที่อยู่เบื้องหลังคอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษามาโดยตลอด ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทางคณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นายกิตติศักดิ์ ปิ่งสมบุญยัง
นายเฉลิมพล วงศ์ดิษฐ์นันท์
นางสาวเนาวรัตน์ สร้อยสนธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
บทนำ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า (Electrically Conducting Polymer)	3
2.2 ทฤษฎีแถบพลังงาน (Band Theory)	6
2.3 ค่าการนำไฟฟ้าและการ dope	10
2.4 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้า	12
2.5 พอลิแอนิลีน (Polyaniline)	13
2.6 การเตรียมพอลิเมอร์โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemically Initiated Polymerization)	17
2.7 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันบนผิวอิเล็กโทรด	19
2.8 ผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	21
2.9 การวัดค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity)	23

	หน้า
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	25
3.2 ขั้นตอนการวิจัย	27
3.3 การตรวจสอบคุณลักษณะของพอลิแอนิลินและอนุพันธ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	29
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	
4.1 การวิเคราะห์และตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของพอลิแอนิลินและอนุพันธ์ (ได้แก่ Poly (N-methylaniline) และ Poly (o-toluidine)) ที่ได้จากการสัง- เคราะห์โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	31
4.2 การศึกษาผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ ต่อการสังเคราะห์ พอลิแอนิลินและอนุพันธ์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	56
4.3 สัมฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ต่างชนิดกันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	72
4.4 ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิแอนิลินและอนุพันธ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	92
5.2 ข้อเสนอแนะ	93
ภาคผนวก ก ความถี่ย่านรังสี IR	94
ภาคผนวก ข ค่าการนำไฟฟ้า	97
ภาคผนวก ค สเปกตรัม	98
เอกสารอ้างอิง	101

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการแบ่งแยกของระดับชั้นพลังงาน	7
รูปที่ 2.2 แสดง Band Structure ของวัสดุประเภทต่าง ๆ	7
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเกิดของ polaron และ bipolaron	11
รูปที่ 2.4 แสดง โครงสร้างของพอลิแอนิลินที่อยู่ในรูปต่าง ๆ	13
รูปที่ 2.5 แสดง โครงสร้างของพอลิแอนิลินในลักษณะที่เป็น alternating benzenoid-quinoid structure	14
รูปที่ 2.6 แสดง Rechargeable Battery	15
รูปที่ 2.7 แสดง Electrochromic Display Device	16
รูปที่ 2.8 แสดง Light-Emitting Diode	17
รูปที่ 2.9 แสดงทิศทางการเกิดอิเล็กโทรไลซิสด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	17
รูปที่ 2.10 แสดง Cyclic voltammograms ของฟิล์มพอลิแอนิลินที่เคลือบบนแพลทินัมอิเล็กโทรดในสารละลาย 4 ชนิด ที่อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้า 50 mV/s	21
รูปที่ 2.11 แสดง Cyclic voltammograms ของฟิล์มพอลิแอนิลินที่เคลือบบนแพลทินัมอิเล็กโทรดในสารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นของกรดต่างกัน 3 ชนิด	22
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าแอนอดิก และศักย์ไฟฟ้าแคโทดิกของ Cyclic voltammograms ของฟิล์มพอลิแอนิลินเทียบกับ pH ของสารละลายคลอไรด์ ที่อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยเทียบกับ RHE	23
รูปที่ 2.13 แสดงหลักการวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค four-point probes	24
รูปที่ 4.1 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิแอนิลินที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	33

	หน้า
รูปที่ 4.2 แสดงฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิแอนิลินที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดเปอร์คลอริก	35
รูปที่ 4.3 แสดงฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิแอนิลินที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดไนตริก	37
รูปที่ 4.4 แสดงฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิแอนิลินที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดซัลฟิวริก	39
รูปที่ 4.5 แสดงฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(N-methylaniline) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	41
รูปที่ 4.6 แสดงฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(N-methylaniline) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดเปอร์คลอริก	43
รูปที่ 4.7 แสดงฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(N-methylaniline) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดไนตริก	45
รูปที่ 4.8 แสดงฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(N-methylaniline) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดซัลฟิวริก	47
รูปที่ 4.9 แสดงฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(o-toluidine) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	49
รูปที่ 4.10 แสดงฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(o-toluidine) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดเปอร์คลอริก	51
รูปที่ 4.11 แสดงฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(o-toluidine) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดไนตริก	53
รูปที่ 4.12 แสดงฟูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(o-toluidine) ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดซัลฟิวริก	55
รูปที่ 4.13 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ Polyaniline ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย Aniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	58
รูปที่ 4.14 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ Polyaniline ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย Aniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในกรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	59

รูปที่ 4.15 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ Polyaniline ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย Aniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในกรดไนตริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	60
รูปที่ 4.16 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ Polyaniline ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย Aniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	61
รูปที่ 4.17 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ Poly(N-methylaniline) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย N-methylaniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	63
รูปที่ 4.18 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ Poly(N-methylaniline) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย N-methylaniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในกรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	64
รูปที่ 4.19 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ Poly(N-methylaniline) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย N-methylaniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในกรดไนตริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	65
รูปที่ 4.20 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ Poly(N-methylaniline) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย N-methylaniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	66
รูปที่ 4.21 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ Poly(o-toluidine) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย o-toluidine เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	68
รูปที่ 4.22 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ Poly(o-toluidine) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย o-toluidine เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในกรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	69
รูปที่ 4.23 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ Poly(o-toluidine) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย o-toluidine เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในกรดไนตริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	70

	หน้า
รูปที่ 4.24 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ Poly(o-toluidine) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย o-toluidine เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	71
รูปที่ 4.25 แสดง Scanning electron micrographs ของ Polyaniline บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	74
รูปที่ 4.26 แสดง Scanning electron micrographs ของ Polyaniline บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดเปอร์คลอริก	75
รูปที่ 4.27 แสดง Scanning electron micrographs ของ Polyaniline บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดไนตริก	76
รูปที่ 4.28 แสดง Scanning electron micrographs ของ Polyaniline บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดซัลฟิวริก	78
รูปที่ 4.29 แสดง Scanning electron micrographs ของ Poly(N-methylaniline) บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	80
รูปที่ 4.30 แสดง Scanning electron micrographs ของ Poly(N-methylaniline) บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดเปอร์คลอริก	81
รูปที่ 4.31 แสดง Scanning electron micrographs ของ Poly(N-methylaniline) บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดไนตริก	83
รูปที่ 4.32 แสดง Scanning electron micrographs ของ Poly(N-methylaniline) บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายกรดซัลฟิวริก	84

- รูปที่ 4.33 แสดง Scanning electron micrographs ของ Poly(o-toluidine) บนแผ่น
แพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย
กรดไฮโดรคลอริก 86
- รูปที่ 4.34 แสดง Scanning electron micrographs ของ Poly(o-toluidine) บนแผ่น
แพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย
กรดเปอร์คลอริก 87
- รูปที่ 4.35 แสดง Scanning electron micrographs ของ Poly(o-toluidine) บนแผ่น
แพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย
กรดไนตริก 88
- รูปที่ 4.36 แสดง Scanning electron micrographs ของ Poly(o-toluidine) บนแผ่น
แพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลาย
กรดซัลฟิวริก 89

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของพอลิเมอร์ สารที่ใช้ dope และค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้า	5
ตารางที่ 4.1 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ Polyaniline โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย Aniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	32
ตารางที่ 4.2 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ Polyaniline โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย Aniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	34
ตารางที่ 4.3 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ Polyaniline โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย Aniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	36
ตารางที่ 4.4 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ Polyaniline โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย Aniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	38
ตารางที่ 4.5 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(N-methylaniline) โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย N-methylaniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	40

ตารางที่ 4.6 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(N-methylaniline) โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย N-methylaniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	42
ตารางที่ 4.7 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(N-methylaniline) โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย N-methylaniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	44
ตารางที่ 4.8 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(N-methylaniline) โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย N-methylaniline เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	46
ตารางที่ 4.9 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(o-toluidine) โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย o-toluidine เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	48
ตารางที่ 4.10 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(o-toluidine) โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย o-toluidine เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	50
ตารางที่ 4.11 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(o-toluidine) โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย o-toluidine เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	52

	หน้า
ตารางที่ 4.12 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญซึ่งพบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ Poly(o-toluidine) โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย o-toluidine เข้มข้น 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์	54
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน	90



คำย่อและสัญลักษณ์ที่ใช้ในรายงานโครงการพิเศษ

ตร.ชม.	ตารางเซนติเมตร
มล.	มิลลิลิตร
mV	มิลลิโวลต์
s	วินาที
mV/s	มิลลิโวลต์ต่อวินาที
cm ⁻¹	ต่อตารางเซนติเมตร
S	ซีเมนส์ (Siemens, σ)
S/cm	ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร
S/cm ²	ซีเมนส์ต่อตารางเซนติเมตร
Ω cm	โอห์ม เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

วัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ โดยส่วนมากได้แก่ โลหะหรือสารกึ่งตัวนำ แต่ยังมีวัสดุพอลิเมอร์บางชนิดสามารถนำไฟฟ้าได้ ทำให้เกิดการศึกษาค้นคว้าที่จะนำพอลิเมอร์ประเภทดังกล่าวมาเป็นส่วนประกอบหนึ่งในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเป็นการลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้วัสดุดังกล่าว เช่น แบตเตอรี่ มีปัญหาที่เกิดจากการใช้อยู่ด้วยกัน 2 ประการคือ ปัญหาที่เกิดจากน้ำหนักของตัวแบตเตอรี่ที่ใช้งาน และปัญหาจากปริมาณสารพิษที่เกิดขึ้นจากโลหะหนักในแบตเตอรี่ ได้แก่ แคดเมียม นิกเกิล เหล็ก ทองแดง สังกะสี สารหนู แอนติโมนี ซีลีเนียม และแมงกานีสอยู่⁽¹⁾ ทำให้มีปริมาณสารพิษตกค้างอยู่ในธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อนำพอลิเมอร์ประเภทนี้มาใช้งานจะเป็นการลดปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้วัสดุดังกล่าวยังมีราคาถูกและทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี

พอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้า (Conducting Polymers) มีการศึกษามาประมาณ 20 ปีมาแล้ว⁽²⁾ ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุที่เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เช่น แบตเตอรี่^(3,4,5,6) พอลิเมอร์ดังกล่าว ได้แก่ พอลิไพโรล (Polypyrrole) พอลิแอนิไลน์ (Polyaniline)⁽²⁾ พอลิอะเซทิลีน (Polyacetylene)^(7,8) ในโครงการวิจัยนี้จะศึกษาผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้า ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าจากพอลิแอนิไลน์และอนุพันธ์ของแอนิไลน์และสัมชานวิทยาที่ได้ เนื่องจากว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีส่วนทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ดีขึ้น สาเหตุที่เลือกใช้พอลิแอนิไลน์คือพอลิแอนิไลน์มีค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง 10 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (S/cm) เมื่อ dope ด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือกรดของบรอนสเตด (Bronsted acid)^(9,10) หากพิจารณาถึงโครงสร้างของพอลิแอนิไลน์พบว่ามีอะตอมของไนโตรเจนอยู่ระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำให้มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีและมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ^(2,10,11) ส่วนพอลิไพโรล (Polypyrrole) จะมีอะตอมของไนโตรเจนอยู่ในวงแหวน⁽¹²⁾ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่ามากเฉพาะในวงเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการเตรียมวัสดุพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าโดยวิธีการ Electropolymerization
2. ศึกษาวิธีการตรวจสอบพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ว่าเป็นพอลิเมอร์ชนิดใด โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีในการพิจารณาหมู่โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อการสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิแอนิลินและอนุพันธ์ของแอนิลิน
4. ศึกษาพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่เตรียมได้จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโกปี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อการเตรียมพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าซึ่งมีลักษณะเป็น conjugate สายโซ่ยาว โดยโครงการวิจัยนี้ใช้พอลิแอนิลินและอนุพันธ์ของพอลิแอนิลิน (Poly (N-methylaniline) และ Poly (o-toluidine)) มาทำการเตรียมพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ (HCl, HClO₄, HNO₃ และ H₂SO₄) และศึกษาหมู่โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้โดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์จาก four-point probes technique และพื้นฐานวิทยาจากเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโกปี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. สามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้จากมอนอเมอร์ที่มีลักษณะเป็น conjugate ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า
2. ทำให้ทราบถึงชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และมอนอเมอร์ที่เหมาะสมในการเตรียมพอลิเมอร์ที่มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดี
3. เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการเตรียมพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า⁽¹³⁾

(Electrically Conducting Polymer)

พอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้จะมีลักษณะเป็น conjugate หรือ delocalized double bond ตัวอย่างเช่น พอลิซัลเฟอร์ไนด์หรือ พอลิอะเซทิลีน โดยทั่วไปธรรมชาติของสารพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีลักษณะเป็น conjugate จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนหรือในบางครั้งเป็นสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนไม่สามารถมีการเคลื่อนที่ผ่านสายโซ่พอลิเมอร์ตลอดทั้งวัสดุได้ เพราะ ขาดประจุที่เป็นตัวพาและเกิดจากความแตกต่างของความยาวพันธะตลอดทั้งสายโซ่พอลิเมอร์ การที่จะทำให้พอลิเมอร์มีการนำไฟฟ้าได้นั้นต้องมีการเหนี่ยวนำทำให้เกิดมีประจุตัวพาขึ้น การกระทำดังกล่าวนี้เรียกว่าการ dope

การ dope พอลิเมอร์ที่จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนไปสู่ delocalized structure หรือทำให้อิเล็กตรอนออกจาก positive hole

พอลิเมอร์สามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังนี้⁽¹⁴⁾

1. Introducing delocalization : ทำปฏิกิริยาเพื่อทำให้เกิดโครงสร้าง conjugated polyene ได้แก่ พอลิเมอร์ที่มีองค์การ conjugate ในโซ่หลักมาก เช่น พอลิอะเซทิลีน พอลิฟีนิลีน การนำไฟฟ้าจะทำให้องค์การ conjugate ในโซ่หลักเกิดความว่องไว ทำให้มี ความเป็นระนาบของสายโซ่ (chain planarity) เพิ่มขึ้น
2. Introducing electrically active pendant group เช่น หมู่ amine ที่ถูกแทนที่ด้วย aromatic หรือ หมู่ aromatic ขนาดใหญ่ที่มี π อิเล็กตรอนขนาดใหญ่
3. Electrochemical doping : dope พอลิเมอร์ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าด้วยสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและไวต่อการนำไฟฟ้า โดยเกิด charge transfer interaction

การเคลื่อนที่ของไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะเกิดขึ้นที่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มี conjugated bond เช่น delocalized π - orbitals ถ้าค่าความเป็นฉนวนน้อยกว่า 10^{-11} S/cm ค่าการนำไฟฟ้าจะอยู่ในช่วง 10^{-5} - 10^{-9} S/cm

เมื่อพอลิเมอร์ถูก dope ด้วย electron donor (alkaline metals เช่น Li) จะเกิดเป็น monovalent cation และ polycarboanion ที่เสถียร เมื่อเติมอิเล็กตรอนจะทำให้ neutral soliton เปลี่ยนเป็น negative soliton (สมการที่ 2-1) การนำไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับตัวพาประจุลบ เรียก การ dope ชนิดนี้ว่า n-type

เมื่อพอลิเมอร์ถูก dope ด้วย electron acceptors (halogens เช่น I_2 , AsF_5) จะเกิดเป็น monovalent anion และ polycarbonium ion ที่เสถียร ตัวที่ใช้ dope จะเคลื่อนย้ายสปีนอิสระของ $(CH)_x$ ซึ่งเป็น neutral soliton และเปลี่ยนให้เป็น positive soliton (สมการที่ 2-2) การนำไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับตัวพาประจุบวก เรียกการ dope ชนิดนี้ว่า p-type



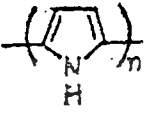
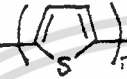
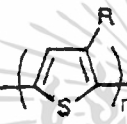
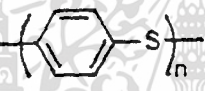
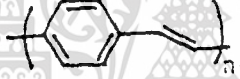
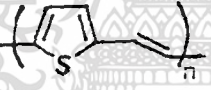
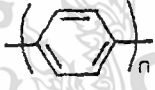
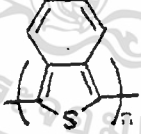
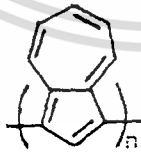
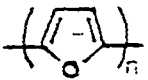
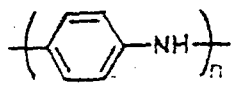
หลังจากที่พอลิเมอร์ถูก dope จะมีคุณสมบัติความเป็นสารกึ่งตัวนำถึงความเป็นโลหะ ค่าการนำไฟฟ้าประมาณ $10^6 - 10^4$ S/cm ตัวอย่างเทคนิคการ dope เช่น การ dope ที่ตัว dope (dopant) อยู่ในสภาพที่เป็นไอ (เช่น I_2 , H_2SO_4 , AsF_5 หรือ $SbCl_5$) หรือในภาวะที่ตัว dope เป็นสารละลาย (เช่น NO_2 , SbF_6 , I_2 หรือ sodium naphthalide) การนำไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ถ้ามีการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากตัวให้ (donor) ไปยังตัวรับ (acceptor) การเคลื่อนย้ายประจุจะเกิดขึ้นที่ cation หรือ anion states

ข้อดีของการ dope ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า คือ สามารถรักษาระดับการ dope ควบคุมได้อย่างเที่ยงตรง

ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่ dope ขึ้นกับ

- 1) โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์
- 2) องศาของการ dope เพราะค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของตัวที่ใช้ dope
- 3) ธรรมชาติของ dopant ion

ตารางที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของพอลิเมอร์ สารที่ใช้ dope และค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้า⁽¹⁵⁾

พอลิเมอร์	โครงสร้าง	สารที่ใช้ dope	ค่าการนำไฟฟ้า (S/cm)
Polyacetylene	$(CH)_n$	I_2, Br_2, Li, Na, AsF_5	10,000
Polypyrrole		BF_4^-, ClO_4^-	500-7,500
Polythiophene		$BF_4^-, ClO_4^-, FeCl_4^-$	1,000
Poly(3-alkylthiophene)		$BF_4^-, ClO_4^-, FeCl_4^-$	1,000-10,000 ^(a)
Polyphenylene sulfide		AsF_5	500
Polyphenylenevinylene		AsF_5	10,000 ^(a)
Polythienylenevinylene		AsF_5	2,700 ^(a)
Polyphenylene		AsF_5, Li, K	1,000
Polyisothianaphthene		BF_4^-, ClO_4^-	50
Polyazulene		BF_4^-, ClO_4^-	1
Polyfuran		BF_4^-, ClO_4^-	100
Polyaniline		HCl	200 ^(a)

หมายเหตุ a คือ Conductivity of oriented polymers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 Band Theory ⁽¹³⁾

การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าผ่านโมเลกุล และโครงสร้างโซลิตัสเตท (solid state structure) เมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเพราะมีการ delocalize ของสารไม่อิ่มตัว, สมบัติดังกล่าวเกิดได้ในโครงสร้างของอิเล็กตรอน (ที่มีพันธะคู่, พันธะสามต่อกับตัวอื่นอยู่มาก) ซึ่งไม่อาจพบได้ในโมเลกุลแบบง่ายที่มีขนาดเล็ก คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันของวัสดุต่าง ๆ เป็นผลมาจากโครงสร้างของอิเล็กตรอนที่มีความแตกต่างกัน

ตัวอย่างที่พิจารณาได้อย่างชัดเจน คือ โมเลกุลที่เป็นอะตอมคู่ และเกิดขึ้นจากอะตอมสองอะตอมที่มีอิเล็กตรอนเพียงหนึ่งตัวที่สามารถเกิดพันธะขึ้นได้ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสองตัวก่อนและหลังการเกิดพันธะแสดงดังรูปที่ 2.1 การเกิดเป็นพันธะขึ้นจะทำให้เกิดระดับพลังงานใหม่ขึ้นอีกสองระดับ คือ bonding level มีอิเล็กตรอนสองตัวอยู่ในระดับพลังงานนี้ และ antibonding level ซึ่งไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ในระดับพลังงานนี้ ระดับพลังงานนี้มีค่าพลังงานสูง ที่ระดับพลังงานนี้สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าอาจจะไม่มีอิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่เป็นการชั่วคราวได้ เมื่ออิเล็กตรอนในระดับ bonding ได้รับพลังงานกระตุ้นที่มากเพียงพอจากความร้อนและแสงทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานได้ (transition)

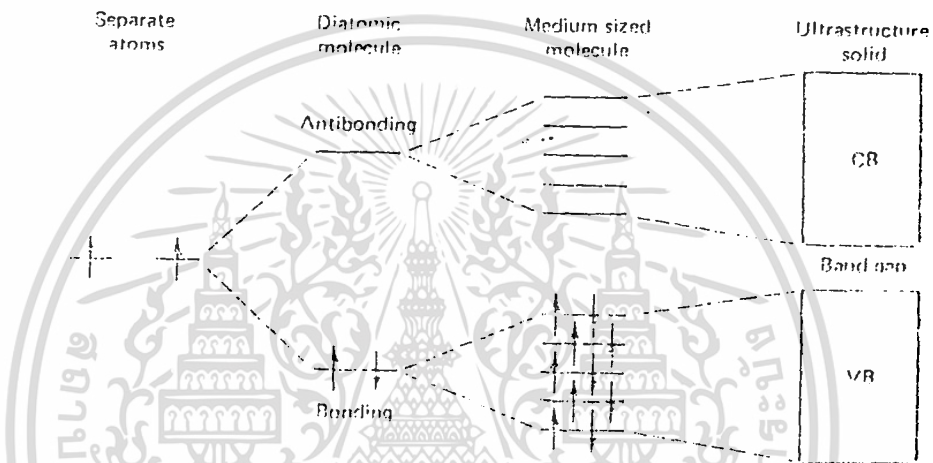
การเกิดพันธะของโมเลกุลที่มีความซับซ้อนก็มีลักษณะเหมือนกับแบบอย่างง่าย พันธะที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยระดับพลังงาน bonding และ antibonding ของการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนทั้งหมด จำนวนอะตอมที่มีอยู่มากจะเกิดการซ้อนเข้าด้วยกันในโมเลกุลหรือโครงสร้างที่มีความซับซ้อน ทำให้มีจำนวน bonding และ antibonding orbital มากขึ้น ในพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือในระบบโซลิตัสเตท (solid-state system) อะตอมจำนวนหนึ่งแสนหรือหนึ่งล้านอะตอมมารวมกัน และจำนวนของโมเลกุลาร์ออร์บิทัลมารวมกันจนมีขนาดใหญ่

นอกเหนือจากขนาดของโมเลกุล bonding orbital ที่รวมเป็นกลุ่มเข้าด้วยกัน ช่องว่างระหว่างระดับพลังงานจะมีการจัดเรียงตัวกันใกล้ชิดกันมากขึ้น การจัดเรียงตัวกันในลักษณะนี้เรียกว่า bonding band หรือในทาง solid-state terminology เรียกว่า valence band (VB) (คำว่า band นี้ใช้เรียกระดับพลังงานที่อยู่ใกล้กันมาก) ทำให้ภายในมีพลังงานเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งอิเล็กตรอนสามารถมีการแลกเปลี่ยนตำแหน่งกันและเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระรอบ ๆ วัสดุ มีลักษณะเหมือนกับการรวมเป็นกลุ่มและการเกิดพันธะนี้จะเกิดพันธะ antibonding orbital ขึ้นด้วย antibonding ที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายได้เหมือนกันกับการเกิดเป็น valence band เราเรียก band ที่เกิดขึ้นใหม่นี้ว่า conduction band (CB) ความสูงที่ใช้แยกระดับชั้นพลังงาน เรียกว่า

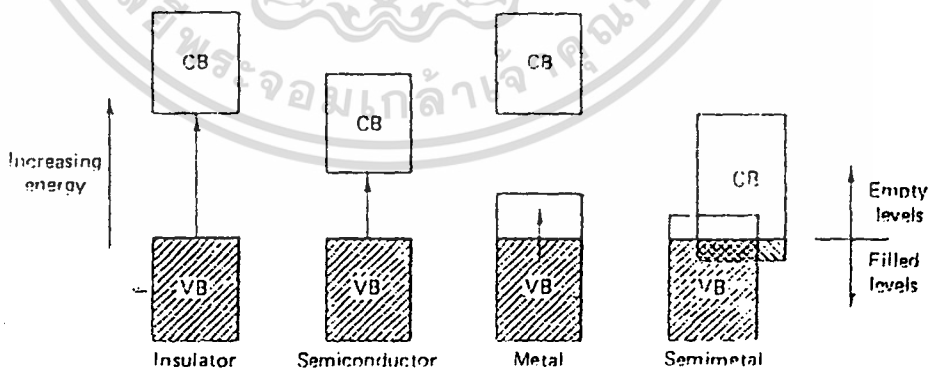
เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการคัดค้านจากเจ้าของลิขสิทธิ์อาจก่อให้เกิดความเสียหายทางกฎหมายได้

ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงาน (band gap) ถ้าวัสดุเป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำ โลหะหรือกึ่งโลหะ การเติมอิเล็กตรอนลงบน valence band และความสูงของช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงาน มีลักษณะที่เป็นไปได้ดังรูปที่ 2.2 ถึงแม้ว่าอิเล็กตรอนใน band จะเคลื่อนที่ได้ อย่างไรก็ตามแต่ยังถูกจำกัดอยู่ใน band อิเล็กตรอนทั้งหมดจะไม่เกิดการเคลื่อนที่ จะมีเพียงอิเล็กตรอนชั้นบนของระดับชั้นพลังงานเกิดการเคลื่อนที่ไปยังระดับพลังงานที่ว่างเกิดเป็นอิเล็กตรอนคู่โคตเดี่ยวขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงการแบ่งแยกของระดับชั้นพลังงาน



รูปที่ 2.2 แสดง Band structure ของวัสดุประเภทต่าง ๆ ส่วนที่แรเงา แทน ส่วนที่มีอิเล็กตรอนอยู่อย่างหนาแน่น (Filled level) ส่วนที่ไม่ได้แรเงา แทน ส่วนที่สามารถรับอิเล็กตรอน (Empty level) จากส่วนที่แรเงา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวน (Insulators)

ค่าการนำกระแสไฟฟ้าสามารถอธิบายได้จากการที่มีอิเล็กตรอนคู่โคตเดี่ยวอยู่หรือ derivative state ใน conduction band หรือ valence band หรือที่ระดับพลังงานใหม่ในช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงาน อิเล็กตรอนคู่โคตเดี่ยวนี้จะไม่ส่งผลต่ออิเล็กตรอนคู่สปิน (spin) ของตัวเองและโดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปจะกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่อย่างอิสระของอิเล็กตรอน

ถ้าระดับพลังงานทั้งหมดของ valence band เต็ม การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในทิศทางหนึ่ง ๆ ของตัวที่อยู่ใกล้เคียงกันจะเกิดขึ้นได้ยาก แต่อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนที่อีกแบบหนึ่งเกิดจากการที่อิเล็กตรอนคู่โคตเดี่ยวถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนหรือแสงทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานสูงของ valence band ไปสู่ระดับพลังงานที่ต่ำของ conduction band วัสดุที่เป็นฉนวนจะมีช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานกว้าง จึงเป็นข้อจำกัดของการกระโดดข้ามระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน ซึ่งพอลิเมอร์ส่วนมากจัดอยู่ในประเภทนี้

ไม่มีการกำหนดขอบเขตที่แน่นอนระหว่างสารที่เป็นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงไม่สามารถแยกความแตกต่างของวัสดุสองประเภทนี้ได้ ลักษณะทางไฟฟ้าของฉนวนบางชนิดเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิหรือศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นโดยไม่สามารถใช้ band theory อธิบายได้

สารกึ่งตัวนำ (semiconductor)

เป็นวัสดุที่ช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานแคบ นำไฟฟ้าได้เล็กน้อยแต่ก็มากพอที่จะแสดงค่ากระแสไฟฟ้าได้ ค่าการนำไฟฟ้าจะอยู่ในช่วง 10^{-7} และ 10^2 S/cm พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวมีการสลับกันระหว่างพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ (highly conjugated system) หรือมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างอิสระผ่านสายโซ่ของพอลิเมอร์ โดยทั่วไปการนำไฟฟ้าผ่านอิเล็กตรอนคู่โคตเดี่ยวหรือสถานะที่มีความสัมพันธ์กัน เกิดขึ้นได้หลายวิธี

วิธีแรก ถ้าช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานมีค่าน้อย พลังงานความร้อนหรือแสงที่มีค่ามากเพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากระดับพลังงานที่สูงของ valence band ไปยังระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดของ conduction band อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นขึ้นไปจะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระใน conduction band และกระแสที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านสายโซ่ไปยังขั้วบวกของอิเล็กโทรด ในขณะที่ตำแหน่งที่ว่างใน valence band จะประกอบไปด้วยช่องว่างของประจุบวก (positive charge hole) positive charge hole จะเกิดการเคลื่อนที่ไปตามสายโซ่ในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนใน conduction band ดังนั้นจึงเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น วัสดุประเภทนี้ถูกเรียกว่า intrinsic semiconductor ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภูมิหรือความเข้มของแสงมีค่าเพิ่มขึ้น

วิธีที่สอง ค่าการนำไฟฟ้าของเซมิคอนดักเตอร์พอลิเมอร์สามารถทำให้ดีขึ้นได้โดยการใส่หรือย้ายอิเล็กตรอนออกสู่ภายนอก อิเล็กตรอนที่ใส่เข้าไปโดยการเติมโมเลกุลเล็ก ๆ ที่ให้อิเล็กตรอน (เช่น อนุมูลแอนไอนอน sodium naphthalenide) หรือปฏิกิริยารีดักชันของพอลิเมอร์ในเซลล์ไฟฟ้า นอกจากนี้การให้อิเล็กตรอนถูกกำจัดออกโดยการ treat พอลิเมอร์ ด้วยตัวรับอิเล็กตรอน (เช่น AsF_5 , SbF_5 หรือ ไอโอดีน) หรือปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Oxidation) หรือที่เรียกกันว่า Doping การ dope จะไม่เป็นการเพิ่มประจุของตัวพา การ treat ด้วยวิธีการดังกล่าวนี้จะทำให้ช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานต่ำลง ถ้าใส่อิเล็กตรอนลงบนตำแหน่งที่ว่างในระดับพลังงานใหม่ภายใน gap

โลหะ (metal)

โลหะเป็นวัสดุที่ไม่มีการเติมอิเล็กตรอนลงใน conduction band และมีการเติมอิเล็กตรอนบางส่วนลงใน valence band รูปที่ 2.2 ลักษณะดังกล่าวนี้เกิดขึ้นจากอะตอมของโลหะส่วนมากมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวที่ไม่เกิดพันธะโคเวเลนต์กับอะตอมข้างเคียง อิเล็กตรอนจะเข้าไปอยู่ในระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดของ valence band และมีการเข้าไปที่ระดับพลังงานที่สูงกว่าของ band เดียวกันที่ยังไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ เพื่อเป็นการป้องกันความยุ่งยากที่เกิดขึ้นจึงไม่ให้อิเล็กตรอนอยู่บริเวณระหว่างช่องว่างระหว่างระดับชั้นพลังงานเพื่อที่จะหาระดับพลังงานที่เหมาะสมในการให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ โดยที่อิเล็กตรอนยังคงอยู่ใน band เดียวกัน เช่น โซเดียมมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนที่ระดับ 3s เพียงหนึ่งตัวต่อหนึ่งอะตอม หมายความว่าไม่มีโมเลกุลาร์ออร์บิทัลเกิดขึ้นในสภาวะที่เป็นโลหะ (metallic state) จึงสามารถเติมอิเล็กตรอนหนึ่งตัวลงในช่องว่างที่ระดับ 3s ใน valence band และที่ระดับพลังงานสูง ๆ ที่มีที่ว่างใน band เดียวกันอิเล็กตรอนก็สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระเช่นกัน

ดังนั้นโลหะที่เป็นสื่อไฟฟ้าจะมีระดับพลังงาน (energy state) ใน valence band มากกว่าจำนวนอิเล็กตรอนที่จะเติมลงในสถานะนั้น (state) สารกึ่งตัวนำและฉนวนจะมีจำนวนอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน (energy state) เท่ากัน

เมื่ออุณหภูมิของโลหะสูงขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าจะลดลง เพราะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการสั่นของโครงร่างผลึก (Lattice) และทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เกิดการกระเจิงมากขึ้น ที่อุณหภูมิต่ำค่าการนำไฟฟ้าของโลหะจะถูกจำกัดโดยการกระเจิงของอิเล็กตรอนจากความไม่สมบูรณ์ของโครงร่างผลึก

สารกึ่งโลหะ (semimetals)

เป็นวัสดุซึ่งส่วนบนของ valence band ซ้อนทับกับส่วนล่างของ conduction band มักมีการเติมอิเล็กตรอนใน valence band แต่การที่ valence band และ conduction band ซ้อนกันอยู่ จะทำให้อิเล็กตรอนเกิดการกระจายตัวใหม่ มีลักษณะเหมือนโลหะ ตำแหน่งที่ว่างอยู่ของระดับพลังงานที่สูง จะมีอิเล็กตรอนเติมเข้าไป ดังนั้นจึงเกิดการนำไฟฟ้าแบบโลหะ

2.3 ค่าการนำไฟฟ้าและการ dope ^(13,16)

พอลิเมอร์ที่บริสุทธิ์จะมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็น cis - trans มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 10^{-9} S/cm และเท่ากับ 10^{-5} S/cm สำหรับพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ trans - trans ค่าดังกล่าวนี้จะอยู่ในช่วงที่เป็นฉนวนและสารกึ่งตัวนำ ต่อมา มีการพบว่า พอลิอะเซทิลีนเมื่อถูกรีดิวซ์ด้วยโลหะแอลคาไลจะได้อนุมูลแอนไอออน หรือถ้าใช้วิธีทางเคมี ไฟฟ้าหรือออกซิโดสด้วยตัวที่รับอิเล็กตรอน เช่น AsF_5 , SbF_5 , iodine จะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น ในบางกรณีค่าการนำไฟฟ้าอาจมีค่าสูงถึง 10^6 S/cm หลังจากที่ทำการ dope นอกจากนี้ยังพบอีกว่า strong protonic acid เช่น เปอร์คลอริก , ซัลฟิวริก หรือไตรฟลูออโรมีเทนซัลโฟนิคแอซิด จะมีส่วนทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 10^3 S/cm

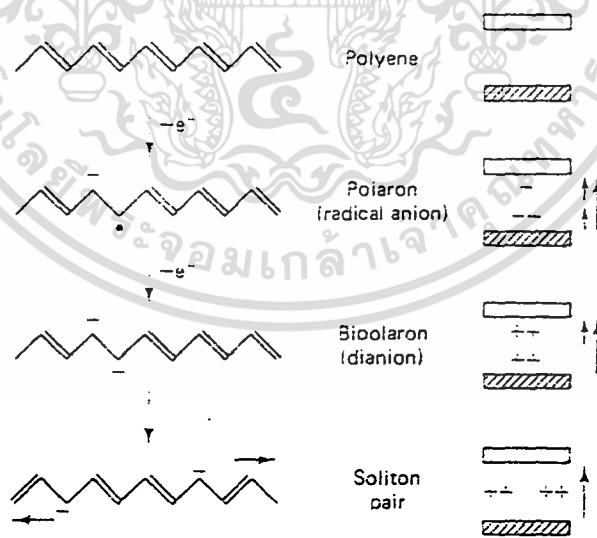
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ ที่ทำให้ลำดับความยาวสายโซ่ที่ต่อกัน หรือ องศาความเป็นผลึก (degree of crystallinity) รวมทั้งความเป็นระนาบของสายโซ่ (planarity of the chains) ต่ำจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดต่ำลงด้วย ตัวอย่างเช่น พอลิเมอร์ที่มีองศาความเป็นผลึกสูงและมีองศาการเชื่อมโยงต่ำ จะมีค่าการนำไฟฟ้าหลังจากที่ทำการ dope มีค่าสูงถึง 1.5×10^5 S/cm (ประมาณหนึ่งส่วนสามของค่าการนำไฟฟ้าของทองแดง) นอกจากนี้พอลิเมอร์ที่ได้ยังเสถียรในสภาวะบรรยากาศ

พอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้จะมีโครงสร้างเป็น conjugate หรือ delocalized double bond ซึ่งมีพันธะเป็นแบบ π ออร์บิทัล ทำให้มีการเคลื่อนที่ของ π อิเล็กตรอนระหว่างพันธะของสายโซ่ได้ ลักษณะดังกล่าวนี้ทำให้มีส่วนคล้ายกับโครงสร้างของโลหะและอาจมีการเติมอิเล็กตรอนคู่โคเดเดี่ยวลงในระดับที่ว่างของ valence band ส่งผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น

ผลของการ dope (เกิดการออกซิเดชัน หรือ รีดักชัน) พอลิเมอร์สามารถอธิบายได้ดังนี้ ปฏิกริยารีดักชันที่เกิดขึ้นจะส่งผลทำให้อิเล็กตรอนคู่โคเดเดี่ยวขึ้นไปยังระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดของ conduction band และมีการไหลของกระแสขึ้น ในทางกลับกันปฏิกริยาออกซิเดชันจะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่อยู่บนของ valence band เกิดเป็นช่องว่างของประจุบวกขึ้น

และมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวเหลืออยู่ ซึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแส แต่หลักฐานที่ได้จากการทดลองอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ที่ได้ขัดแย้งกับการอธิบายของ band theory เนื่องจากว่าพอลิเมอร์ที่ถูก dope จะมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น หมายความว่า เมื่อวัดจำนวนอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวจากการทดลองอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ น่าจะมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวอยู่มาก แต่พบว่าอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของพอลิเมอร์ที่ยังไม่มีการ dope มีมากกว่า จากข้อสังเกตดังกล่าวนี้นำไปสู่การหาข้อสรุปที่ขัดแย้งกับทฤษฎีที่มีอยู่เดิม บนแนวความคิดของ spinless conductivity และอิเล็กตรอนที่ส่งผ่านโครงสร้างที่ผิดไปจากเดิม

สมมติฐานนี้สรุปขึ้นว่า อิเล็กตรอนที่เพิ่มเข้าไปในพอลิเมอร์ที่ต้องการ dope นั้นไม่มีการเคลื่อนที่ไปยัง conduction band แต่จะอยู่ที่ intermediate electronic state ในช่องว่างของระดับพลังงาน (band gap) แสดงดังรูปที่ 2.3 จากปฏิกิริยารีดักชันจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุมูลแอนไอออน ระดับพลังงานที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนสองตัวจากพันธะ π และอิเล็กตรอนหนึ่งตัวที่เติมเข้าไปด้วยปฏิกิริยารีดักชัน สถานะนี้เรียกว่า polaron การเติมอิเล็กตรอนตัวที่สองลงที่ตำแหน่งเดียวกัน ทำให้เกิด dianion เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า bipolaron ในสถานะ bipolaron นี้จะไม่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวเหลืออยู่แต่จะทำให้ช่องว่างของชั้นระดับพลังงานสามารถทำให้อิเล็กตรอนกระโดดไปยัง conduction band ได้ง่ายจึงเกิดการไหลของกระแสขึ้น



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเกิดของ polaron และ bipolaron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วิธีการเตรียมพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้า

การเตรียมพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มีอยู่ 2 วิธี คือ วิธีทางเคมี และวิธีทางเคมีไฟฟ้า การเลือกวิธีการผลิตพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับ สภาพของการใช้งานและค่าการนำไฟฟ้าที่ต้องการ

2.4.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีทางเคมี ทำได้โดยใช้มอนอเมอร์ที่ต้องการจะสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์และทำการพอลิเมอไรซ์ในสารละลายกรด protonic ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย และมีสารออกซิเดนต์ที่แรง เช่น แอมโมเนียมเปอร์ออกซิไดซัลเฟต โพแทสเซียมไดโครเมต^(10a,17) เปอร์ซัลเฟต^(18,19,20) เปอร์คลอเรต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์⁽²¹⁻²³⁾

ตัวอย่างการเตรียมพอลิแอนิลินที่ละลายและมีน้ำหนักโมเลกุลสูงด้วยวิธีทางเคมี โดยการนำมอนอเมอร์แอนิลิน ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกซัลฟิวริก ที่มีแอมโมเนียมเปอร์ออกซิไดซัลเฟตเป็นตัวออกซิเดนต์ที่อุณหภูมิ -5 ถึง -3 องศาเซลเซียส^(24,25)

พอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากวิธีนี้มีปริมาณมาก ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาอันสั้นแต่ควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ยาก พอลิเมอร์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงซึ่งสามารถอัดเป็นเม็ดได้ แต่ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่เตรียมจากวิธีนี้จะมีค่าน้อยกว่าการเตรียมด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า⁽²⁶⁾

2.4.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ใช้สารละลายกรด protonic ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายหรือใช้สารละลายอินทรีย์เป็นตัว dope โดยการใช้เทคนิค potentiostatic, galvanostatic และ potential cycling^(27,10d,28)

การเตรียมพอลิเมอร์ด้วยวิธีนี้จะได้เป็นฟิล์มบางที่สามารถประยุกต์ใช้ใน molecular electronic, photoelectronics devices และ electrochromic display⁽²⁹⁾ และพอลิเมอร์ที่เกาะเป็นแผ่นฟิล์มจะมีเกาะกันอย่างแน่นหนา ฟิล์มเรียบและมีคุณสมบัติทางแสง^(30,31,32) นอกจากนี้สามารถควบคุมความหนาของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นได้ตามต้องการด้วยการควบคุมประจุไฟฟ้าที่ใช้ในการเกิดอิเล็กโทรไลซิส⁽²⁹⁾

หมายเหตุ รายละเอียดเกี่ยวกับกลไกปฏิกิริยาของการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าจะกล่าวอย่างละเอียดอีกครั้งหนึ่ง

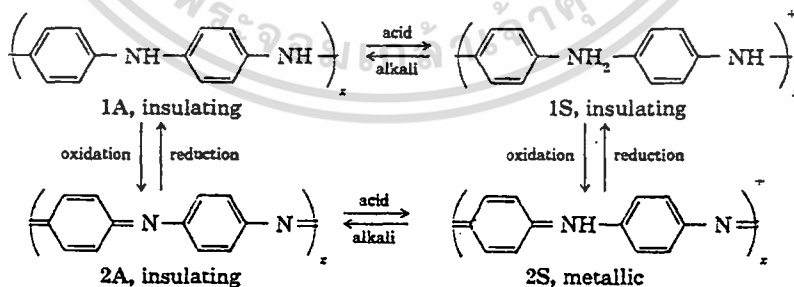
2.5 พอลิแอนิไลน์ (Polyaniline) ^(33)

พอลิแอนิไลน์เป็นพอลิเมอร์ที่มี π conjugate ในโซ่หลัก ประจุที่อยู่บนโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่ถูก dope จะมีการเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอม เกิดเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ soliton polaron และ bipolaron ซึ่งทำให้นำไฟฟ้าได้ พอลิแอนิไลน์ประกอบด้วย repeating unit มากกว่าหรือเท่ากับ 1,000 หน่วย มีค่าการนำไฟฟ้าตั้งแต่ 10^{-11} S/cm ถึง 10 S/cm เสถียรต่อน้ำ และออกซิเจน และมีคุณสมบัติทางแสงที่ดี ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ สารละลายกรด หรือแอลคาไล แต่ละลายได้ที่อุณหภูมิห้องใน N-methylpyrrolidinone (NMP) และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น โครงสร้างของพอลิแอนิไลน์ขึ้นกับการ protonation และ deprotonation ในโตรเจนอะตอมในโซ่หลัก

พอลิแอนิไลน์สามารถสังเคราะห์ได้โดยวิธีการทางเคมีหรือวิธีการออกซิเดชันด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrochemical oxidation) โดยใช้แอนิไลน์มอนอเมอร์ ($C_6H_5NH_2$) ซึ่งมีรูปโครงสร้างที่ไม่แน่นอน เช่น aniline black, emeraldine, nigraniline ฯลฯ

ถ้าแอนิไลน์ถูกออกซิไดซ์ด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าหรือด้วยตัวออกซิแดนท์ เช่น sodium peroxydisulfate ในตัวกลางที่เป็นกรดจะได้พอลิแอนิไลน์ที่อยู่ในรูปที่นำไฟฟ้าได้ (conducting form)

ถ้าทำการ treat ด้วย alkali/acid และ oxidation/reduction ก็จะทำให้พอลิเมอร์ที่ได้ อยู่ในรูปต่าง ๆ กันที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ กัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของพอลิแอนิไลน์ที่อยู่ในรูปต่าง ๆ -

1 แทน รูปที่เป็น reduced

2 แทน รูปที่เป็น oxidized

A แทน รูปของ amine

S แทน รูปของ salt

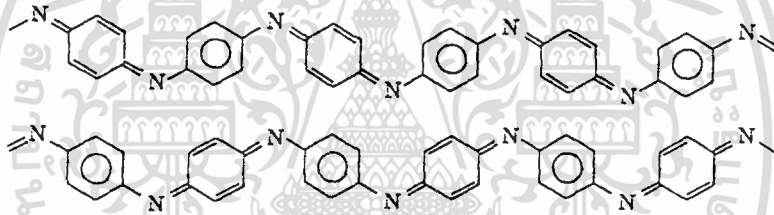
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะ โครงสร้างของพอลิแอนิลีนที่แตกต่างกันจะทำให้มีสีและคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบดังนี้⁽³⁴⁾

1. Leuco-emeraldine ไม่มีสี ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 310 nm เป็นฉนวนไฟฟ้า (1A)
2. Emeraldine base มีสีน้ำเงิน ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 320,620 nm เป็นฉนวนไฟฟ้า (1S)
3. Emeraldine salt มีสีเขียว ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 320,420,800 nm เป็นตัวนำไฟฟ้า (2S)
4. Pernigraniline มีสีม่วง ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 320,530 nm เป็นฉนวนไฟฟ้า (2A)

ตัวอย่างของ acid / base interaction คือ semiconductor-metal transition ระหว่าง 2A และ 2S ซึ่งไม่เกิดการออกซิเดชัน และรีดักชัน

จากการทดลองพบว่าโครงสร้างของ 2A อยู่ในลักษณะที่เป็น alternating benzenoid - quinoid structure (สัมพันธ์กับ screw-axis symmetry and of identical energy) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของพอลิแอนิลีนในลักษณะที่เป็น alternating benzenoid - quinoid structure

พอลิแอนิลีนนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ดังนี้^(35, 36)

1. Rechargeable Batteries

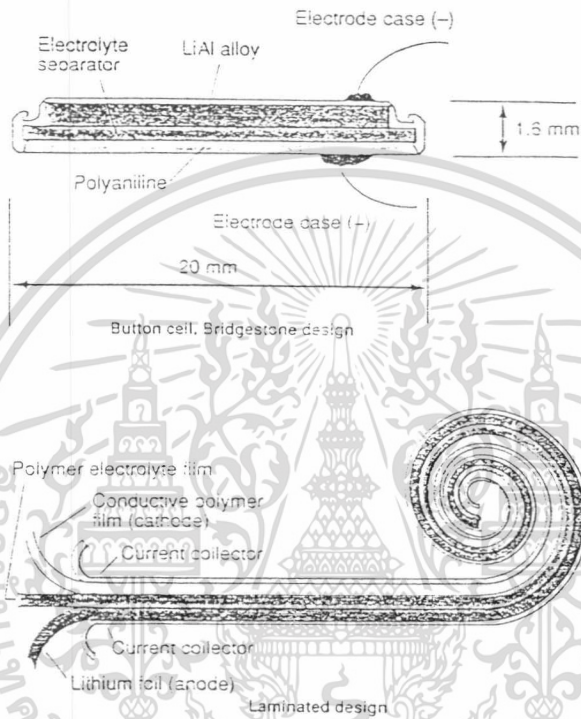
ใช้พอลิแอนิลีนเป็นขั้วแคโทดใช้ lithium หรือ lithium - aluminium alloy เป็นขั้วแอโนด ระหว่างที่เซลล์ไม่มีการถ่ายเทประจุ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดโดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าจากภายนอก เพื่อรีดิวซ์ p-doped polymer ให้เป็นสถานะที่เป็นกลาง (undoped) anion ที่ใช้ dope จะเคลื่อนที่ออกจากพอลิเมอร์เข้าไปในวัสดุภาคของอิเล็กโทรไลต์ ขณะเดียวกัน lithium ที่ขั้วแอโนดจะละลายเข้าไปในอิเล็กโทรไลต์กลายเป็น lithium ion

เมื่อพอลิเมอร์ทั้งหมดเปลี่ยนจาก p-doped ไปเป็นสถานะกลาง เซลล์จะไม่มีการถ่ายเทประจุอีกต่อไป เมื่อมีการถ่ายเทประจุใหม่ จะป้อนศักย์ไฟฟ้าให้อิเล็กโทรด ระหว่างการถ่ายเท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุ พอลิเมอร์ที่เป็นกลางที่ขั้วแคโทดจะถูกออกซิไดส์ไปเป็น p-doped โดยเอา anion จาก อิเล็กโทรไลต์ ขณะเดียวกัน lithium ion จะไปเกาะที่ขั้วแอโนดกลายเป็น lithium metal

Rechargeable Batteries ที่ใช้พอลิเอินิลีนเป็นส่วนประกอบนี้ มักจะทำเป็นปุ่มแบน หรือ laminated rolled films

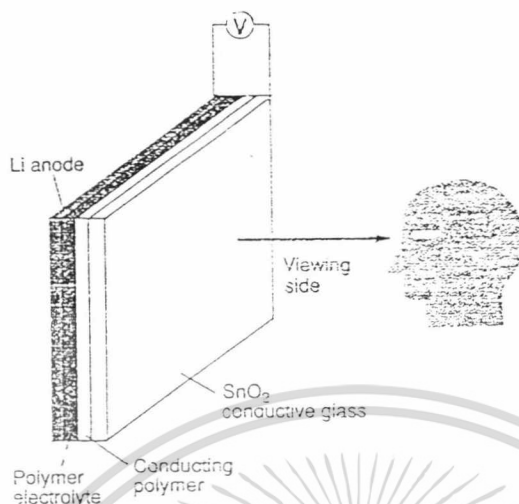


รูปที่ 2.6 แสดง rechargeable battery

2. Electrochromic Display Devices (ECD)

เนื่องจากพอลิเอินิลีนมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนสีได้ในสถานะที่เป็นกลาง และสถานะที่ถูกออกซิไดส์ สามารถควบคุมสีได้โดยควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ให้ ใช้พอลิเอินิลีนเคลือบบนแก้ว (substrate) เพื่อทำเป็นอิเล็กโทรด พอลิเอินิลีนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองใสไปเป็นสีน้ำเงินเข้ม เมื่อศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนจาก -0.1 โวลต์ไปเป็น 1.0 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดง Electrochromic Display Device

3. Biochemical และ Chemical Sensors

ใช้พอลิแอนิไลน์ใน Enzyme Biosensors เพื่อตรวจวัดกลูโคส และเพนนิซิลิน เนื่องจากมีความเสถียรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถรีเจนเอนไซม์ให้อยู่กับที่ได้ Enzyme Biosensors จะวัดกระแสไฟฟ้า หรือ ความต้านทานที่เปลี่ยนไปของฟิล์มพอลิแอนิไลน์ซึ่งเคลือบบนอิเล็กโทรด

หลักการทำงานของ Glucose Biosensors คือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มพอลิแอนิไลน์ซึ่งเคลือบบนอิเล็กโทรด เมื่อ glucose ถูกออกซิไดส์เปลี่ยนเป็น gluconic acid ทำให้ค่า pH ของสารละลายเปลี่ยนไป

4. Light - Emitting Diodes (LED)

ใช้พอลิแอนิไลน์ที่เป็นแผ่นฟิล์มแทนสารอินทรีย์ ซึ่งจะถูกระบายด้วย positive และ negative electron - injecting electrode

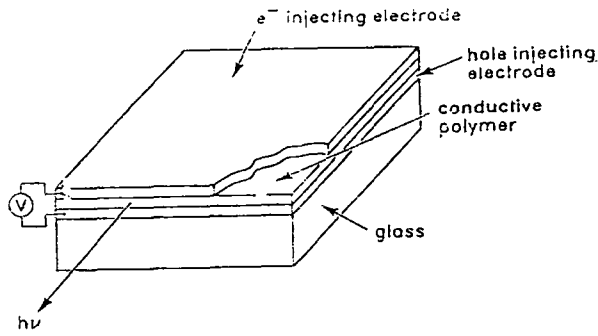
ข้อดีของการใช้พอลิแอนิไลน์แทนสารอินทรีย์ ได้แก่

- พอลิแอนิไลน์สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี และมีพื้นที่ผิวมาก
- การตอบสนองต่อการดูดกลืนแสงมีประสิทธิภาพกว่า และราคาถูกกว่า

ข้อจำกัดของการใช้พอลิแอนิไลน์แทนสารอินทรีย์ ได้แก่

- ไม่เสถียรต่อการใช้งานเป็นเวลานาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

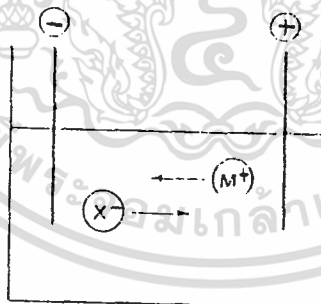


รูปที่ 2.8 แสดง Light - Emitting Diode

2.6 การเตรียมพอลิเมอร์โดยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า

(Electrochemically Initiated Polymerization) (18)

การถ่ายเทอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอโนดในระบบที่มีสารละลายอยู่ ระหว่างที่เกิดการอิเล็กโทรไลซิสกระแสที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านสารละลายในรูปของไอออน เป็นผลทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.9

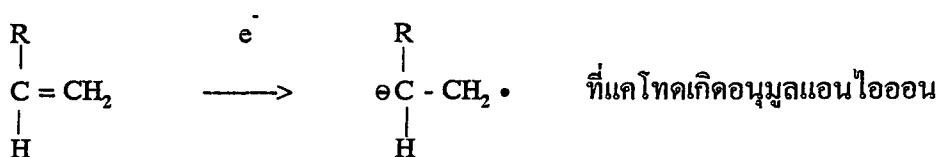


รูปที่ 2.9 แสดงทิศทางการเกิดอิเล็กโทรไลซิสด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

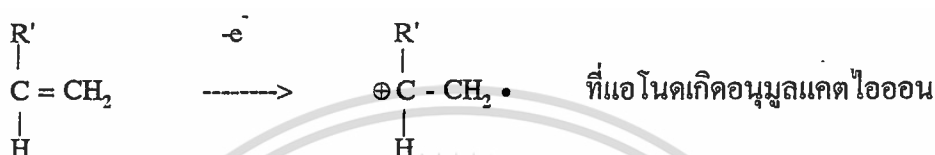
ถ้าในสารละลายมีมอนอเมอร์ที่ไม่อิมตัวอยู่ อิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดจะส่งผ่านไปยังมอนอเมอร์ ทำให้เกิดอนุมูลแอนไอออนขึ้นที่ขั้วแอโนด อิเล็กตรอนจากสารประกอบไม่อิมตัวถูกกำจัดออกทำให้เกิดเป็นอนุมูลแคตไอออนขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 2-3 และ 2-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 2-3



สมการที่ 2-4

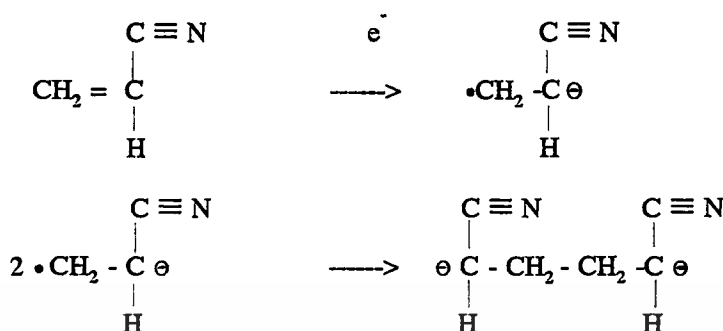


ในทางปฏิบัติ ไวนิลมอนอเมอร์มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่ำ ทำให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากขั้วอิเล็กโทรดไปสู่มอนอเมอร์ ในมอนอเมอร์ที่มีหมู่ดึงอิเล็กตรอน (withdrawing group) อยู่จะเกิดการรีดักชันได้ง่ายและมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่ำ ในทางกลับกัน ถ้ามีหมู่ electron-supplying อยู่จะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันที่ขั้วแคโทดจะลดลง

electroinitiated monomer ที่แสดงในสมการที่ 2-3 และ 2-4 สามารถเกิดจากปฏิกิริยาแอนไอออนิก, แคตไอออนิก หรือสายโซ่อนุมูลอิสระได้ กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันไม่สามารถบอกได้อย่างถูกต้อง ดังตัวอย่างต่อไปนี้

การพอลิเมอไรเซชันของ อะคริโลไนไตรล์, เมทิลเมทาไครเลต และสไตรีน ในสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ภายใต้สภาวะอิเล็กโทรไลต์ supporting-electrolyte ที่ใช้คือ โซเดียมไนเตรต พบว่าการพอลิเมอไรเซชันของอะคริโลไนไตรล์จะเกิดผ่านกลไกปฏิกิริยาแอนไอออนิก โดยเริ่มจากการรีดักชันของมอนอเมอร์โดยตรงที่ขั้วแคโทดิก (direct cathodic reduction of monomer) และ dimerization ของอนุมูลแอนไอออน (ดังสมการที่ 2-5) พอลิเมอร์ที่มีมากกว่า 3 สายโซ่จะเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่มอนอเมอร์ จากผลดังกล่าวนี้ทำให้เกิดการถ่ายโอนสายโซ่ขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์จะเป็นอิสระกับความหนาแน่นของกระแสหรือความเข้มข้นของมอนอเมอร์

สมการที่ 2-5



การอิเล็กโทรไลซิสสารละลายสไตรีน หรือเมทิลเมทาไครเลตในสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ ที่มีเททราเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ปนอยู่ การเกิดเป็นพอลิสไตรีนหรือพอลิเมทิลเมทาไครเลตผ่านกลไกปฏิกิริยาแอนไอออนิก และอาจเกิดเป็นโคพอลิเมอร์ได้ ตัวอย่างเช่น electro-initiation ของมอนอเมอร์ผสมในสารละลายไดเมทิลฟอร์มาไมด์ ทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมของสไตรีนและเมทิลเมทาไครเลต และพอลิเมอร์ร่วมที่เกิดขึ้นนี้สามารถเกิดผ่านกระบวนการแอนไอออนิกและอนุมูลอิสระ แต่ในสารละลายเททราไฮโดรฟูเร็น จะได้พอลิเมทิลเมทาไครเลตเป็นผลิตภัณฑ์หลัก

2.7 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันบนผิวอิเล็กโทรด ⁽¹⁸⁾

วิธีการพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยไฟฟ้า (Electropolymerization) เป็นวิธีการสร้างฟิล์มพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าที่ไม่ละลายที่ผิวอิเล็กโทรด แผ่นฟิล์มที่เกิดขึ้นสามารถแยกออกจากอิเล็กโทรดโดยการลอกออก

ปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมีไฟฟ้าของโมเลกุลอะโรมาติกที่เสถียร โดยการเรโซแนนซ์ (Resonance-stabilized aromatic molecule) ⁽³⁵⁾ เป็นวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้ที่มีโครงสร้างที่โซ่หลักเป็น conjugate และสามารถถูกออกซิไดส์ทางเคมีไฟฟ้าได้ จะเตรียมบนอิเล็กโทรดที่อยู่ในสารละลายที่มีอิเล็กโทรไลต์ และมอนอเมอร์อยู่ เมื่อฟิล์มพอลิเมอร์เกาะบนขั้วอิเล็กโทรดแล้วมันสามารถถูกทำซ้ำให้อยู่ในสภาวะที่ถูกออกซิไดส์และสภาวะที่เป็นกลางได้หลายรอบ พอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาวะที่ถูกออกซิไดส์จะนำไฟฟ้าได้มาก เพราะเกิด polaron และ bipolaron พอลิเมอร์ที่อยู่ในสภาวะที่ถูกรีดิวซ์จะเป็นฉนวนไฟฟ้าหรืออยู่ในสภาวะที่เป็นกลาง

เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าถูกนำมาใช้ตรวจสอบธรรมชาติของการออกซิเดชันหรือ การ dope ซึ่งจะควบคุมระดับของการนำไฟฟ้าได้ วิธีการเหล่านี้ ได้แก่ Cyclic voltammetry และ Chrono-coulometry เพราะง่ายที่จะนำประจุมาใช้งานและสามารถควบคุมให้พอลิเมอร์อยู่ในสภาวะออกซิเดชัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดชันได้อย่างถูกต้อง

ถ้ามอนอเมอร์มีช่วงความยาวของ conjugate เป็นช่วงกว้างอย่างน้อย 4 หน่วย พิกของการเกิดออกซิเดชันในการ dope มอนอเมอร์และพอลิเมอร์ จะไม่สามารถแยกออกจากกันได้ จะเห็นเป็น sharp oxidation peak พิกเดียว สาเหตุนี้ทำให้พิกกว้างเนื่องจากมีความยาวของ conjugate แตกต่างกัน เช่น ปฏิริยาออกซิเดชันของแอนิไลน์ที่แพลทินัมอิเล็กโทรด โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะทำให้เกิดฟิล์มที่นำไฟฟ้าได้ สารอะโรมาติกชนิดอื่นที่สามารถสังเคราะห์ได้โดยวิธีเดียวกันได้แก่ thiophenol, furan, carbazole, azulene, indole, pyrrole, selenophene, phenol, thiophenol polynuclear aromatic hydrocarbon เช่น 3-methylthiophene bithiophene และ pyrene

ปฏิริยาออกซิเดชันของมอนอเมอร์จะทำให้เกิดอนุมูลแคตไอออน หลังจากนั้นอนุมูลแคตไอออนจะ coupling เกิดเป็น dimer ซึ่งสามารถถูกออกซิไดส์ได้ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำ ๆ กลายเป็นไดเมอร์ของอนุมูลแคตไอออน (radical cation dimer) ที่มีความหนาแน่นของสปินสูงที่สุด dimer radical ion (oligomers) อาจ couple กับ radical ion monomer , dimer หรือ oligomer อื่น เกิดเป็นฟิล์มที่มีคุณสมบัติไม่ละลายได้ คุณสมบัตินี้ทำให้พอลิเมอร์มีสายโซ่หลักเป็น poly-conjugate planar คุณสมบัติในด้านความเป็นระนาบนี้ทำให้ใช้พลังงานในการซ้อนทับกันของ π orbital น้อย เพื่อจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปตามสายโซ่ได้

ฟิล์มของพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้ดีที่สุดเตรียมในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ใช้อิเล็กโทรด 3 ขั้ว ชนิดของตัวที่ใช้ dope หรือแอนไอออนที่ใช้ในการสังเคราะห์จะปรับปรุงสมบัติทางเคมีทางกายภาพ ทางเคมีไฟฟ้า และค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มพอลิเมอร์ ฟิล์มที่มีคุณสมบัติเชิงกลสูง (ความเรียบ และความยืดหยุ่น) จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูง คุณสมบัติเชิงกลนี้เกี่ยวข้องกับขนาดของแอนไอออน การเตรียมฟิล์มให้มีคุณภาพสูงขึ้นทำได้โดยการเพิ่มสายโซ่พอลิเมอร์ระหว่างการพอลิเมอไรเซชัน และการยึดเกาะบนอิเล็กโทรด ถ้าความเข้มข้นของกรดที่ใช้เป็นแอนไอออนใช้ dope มาก ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ตัวที่ใช้ dope เป็นสารเคมีขนาดใหญ่ จะทำให้มีการตอบสนองทางเคมีไฟฟ้าที่มีคุณภาพดีขึ้นและทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย

ธรรมชาติของแคตไอออนมีผลต่อพฤติกรรมทางเคมีไฟฟ้าของพอลิเมอร์ แต่ไม่มีผลต่อโครงสร้าง

ตัวแปรในการทดลองที่มีผลต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้า ได้แก่

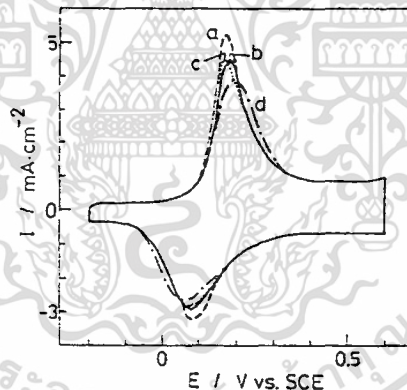
- วิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน เช่น ป้อนศักย์ไฟฟ้าคงที่ ให้กระแสไฟฟ้าคงที่
- potential sweep
- ชนิดของตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สภาพของบรรยากาศ เช่น ภายใต้อากาศของไนโตรเจน หรือ อากาศ
- วัสดุที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด เช่น Pt , Au , Indium-tin oxide (ITO) , Optically transparent electrode (OTE) และ glassy carbon
- ชนิดของพอลิเมอร์
- ปริมาณของ π - conjugate
- องศาการ protonation
- องศาการ oxidation

2.8 ผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ⁽³⁶⁾

จากการศึกษาของ Kobayashi และผู้ร่วมงาน พบว่า สปีชีส์ของ anionic จะส่งผลให้รูปร่างของกราฟไซคลิกโวลทามาแกรมเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.10



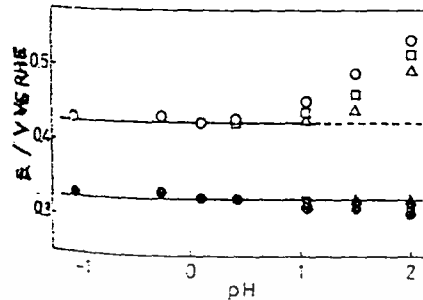
รูปที่ 2.10 แสดงไซคลิกโวลทามาแกรมของฟิล์มพอลิแอนิลินที่เคลือบบนแพลทินัมอิเล็กโทรด ในสารละลาย 4 ชนิด ที่อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้า 50 mV/s
a) 1.0 M HNO₃ b) 1.0 M HCl c) 0.5 M H₂SO₄ d) 1.0 M HClO₄

ในรูปที่ 2.11 รูปร่างของกราฟไซคลิกโวลทามาแกรมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนอันเนื่องมาจากความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น พีกของปฏิกิริยารีดอกซ์จะ sharp และพีกศักย์ไฟฟ้าจะเลื่อนไปทางแอนอดิกมากขึ้น เพื่อที่จะอธิบายธรรมชาติของการเลื่อนไปของศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์ พีกศักย์ไฟฟ้าแอนอดิก (E_{pa}) และพีกศักย์ไฟฟ้า

แคโทดิก (E_{pc}) ของโวลทามาแกรมจะบันทึกอยู่ในสภาวะสารละลายคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้นของกรดอยู่หลายค่า ที่อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) ที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้ผลสรุปดังแสดงในรูปที่ 2.12 ค่า E_{pa} และค่า E_{pc} จะถูกวัดเทียบกับ Reversible Hydrogen Electrode (RHE) ในแต่ละสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าค่าทั้งสองนี้จะมีค่าที่คงที่เมื่อเทียบกับ RHE สำหรับสารละลายที่มีค่าความเป็นกรดเป็นเบสไม่มากกว่า 1 นั่นคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลง -59 มิลลิโวลต์ต่อค่า pH ที่เปลี่ยนไป 1 ค่าเทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าสมมูลย์



รูปที่ 2.11 แสดงไซคลิกโวลทามาแกรมของฟิล์มพอลิแอนิตินที่เคลือบบนแพลทินัมอิเล็กโทรด ในสารละลายคลอไรด์ ที่มีความเข้มข้นของกรดต่างกัน 3 ชนิด
a) 0.1 M HCl + 0.9 M KCl b) 1.0 M HCl c) 5.0 M HCl
ที่อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็น 50 mV/s



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าแอโนดิก (E_{pa}) และศักย์ไฟฟ้าแคโทดิก (E_{pc}) ของไซคลิกโวลตาโมแกรมของฟิล์มพอลิแอนิลินเทียบกับ pH ของสารละลายคลอไรด์ ที่อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้า (scan rate) ที่แตกต่างกัน โดยเทียบกับ RHE

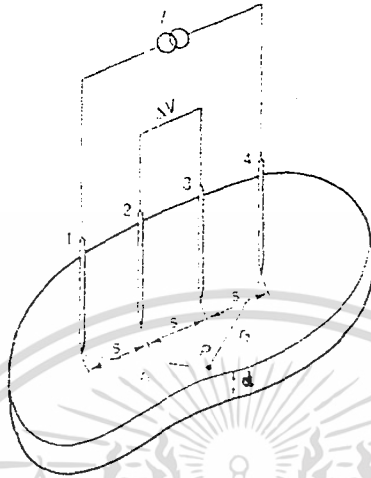
- (○, □, Δ) แทน E_{pa} , (●, ■, *) แทน E_{pc}
 (○, ●) แทน อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 50 mV/s
 (□, ■) แทน อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 20 mV/s
 (Δ, *) แทน อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 10 mV/s

ลักษณะหนึ่งที่น่าสนใจในรูปที่ 2.12 คือแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของพีกต่อพีก เริ่มมีการแยกจากกันเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้าในสารละลายที่มีค่า pH มากกว่า 1 การเพิ่มขึ้นของค่า pH ของสารละลาย จะทำให้ electrochemical activity ของฟิล์มพอลิแอนิลินลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และค่านี้จะหมดไปในที่สุดเมื่อค่า pH ของสารละลายมากกว่า 3 - 4 ⁽³⁷⁾

2.9 การวัดค่าการนำไฟฟ้า (Measurement of Electrical Conductivity)

จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า four-point probes technique ซึ่งเป็นเทคนิคมาตรฐานที่ใช้ค่าความต้านทาน ใช้ในการประเมินความต้านทานของผิวหน้าหรือ near-surface layer หรือ sheet ซึ่งจะแยกการนำไฟฟ้าออกจากชั้นล่าง เช่น ion-implanted layer บน high-resistivity ชั้นล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงหลักการวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเทคนิค four - point probes

วางอิเล็กโทรดบนแผ่นตัวอย่างโดยมีระยะห่างเท่ากัน ให้กระแส I คงที่ ผ่าน two outer probes และวัด voltage drop , ความต่างศักย์ระหว่าง two inner probes วัดความต้านทานและคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้า (conductivity , σ) ได้จากสูตร

$$\sigma = I \ln 2 / V \pi d$$

โดย d คือ ความหนาของตัวอย่างที่วัด

V คือ ความต่างศักย์ระหว่าง two inner probes (โวลต์)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนส์)

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมี

สารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต
aniline	ปฏิบัติการ	Riedel-De Haen AG Seelze-Hannove
N-methylaniline	วิเคราะห์	Fluka Chemical
o-toluidine	วิเคราะห์	Merck
กรดเปอร์คลอริก	วิเคราะห์	Merck
กรดไฮโดรคลอริก	วิเคราะห์	J.T.Baker
กรดซัลฟิวริก	วิเคราะห์	J.T.Baker
กรดไนตริก	วิเคราะห์	J.T.Baker
อะซิโตน	วิเคราะห์	J.T.Baker
น้ำกลั่น (deionized water)	การค้า	องค์การเบตเตอร์
ก๊าซไนโตรเจน	บริสุทธิ์	ไทยอินคัสเทรียลแก๊ส จำกัด (TIG)
น้ำแข็งแห้ง	การค้า	ทีจีไอ แอร์เคมีคัล จำกัด (TIG AC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ชุดกลั่นแบบลดความดัน ประกอบด้วย ขวดสามคอ ขวดก้นกลม คอนเดนเซอร์ เทอร์โมมิเตอร์ ปุ่มดูดอากาศ Dewar flask (บริษัท Aldrich Chemical Company , Inc.) Distillation adapter และ Receiving adapter
- 2) แผ่นแพลทินัมฟอยล์ ขนาด 1 x 4 ตร.ซม.
- 3) ขั้วแพลทินัม (Pt electrode)
- 4) Silver - silver chloride electrode (Ag/AgCl)
- 5) ขวดน้ำกลั่น
- 6) ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มล. และ 500 มล.
- 7) เครื่องให้ความร้อน (Heating Mantle) รุ่น EM 1000 / CE บริษัท Electrothermal
- 8) เครื่องทำความเย็น รุ่น CA - 111 บริษัท EYELA Tokyo Rikakikai Co.Ltd.
- 9) เครื่องโพเทนชิโอสแตท / กัลวานอสแตท (Potentiostat / Galvanostat) รุ่น PGSTAT 10 บริษัท Eco Chemie
- 10) เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope , SEM) รุ่น JSM - 5200 บริษัท JEOL LTD. / JEOL Technics LTD.
- 11) เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer , FTIR) รุ่น System 1600 Series FT-IR บริษัท Perkin Elmer .
- 12) เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า four point probe รุ่น Model FPP - 110 บริษัท Veeco Instruments INC.
- 13) เครื่องแก้วต่าง ๆ ที่มีความจำเป็นในห้องปฏิบัติการ เช่น บีกเกอร์ ขวดวัดปริมาตร กรวย แก้ว ปิเปต เป็นต้น

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

3.2.1 การทำแอนิซีนให้บริสุทธิ์

กลั่นแอนิซีนโดยวิธีการกลั่นแบบลดความดัน ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยขวดก้นกลมที่รองรับสารที่กลั่นได้แช่อยู่ในน้ำแข็งแห้ง (เพื่อลดอุณหภูมิ ซึ่งจะทำให้แอนิซีนที่ได้ถูกออกซิไดส์ได้ยากขึ้น) สารละลายที่ได้จะใส (สารละลายที่ได้ยิ่งใสมากแสดงว่ามีความบริสุทธิ์มาก) เก็บสารละลายที่กลั่นได้ในขวดสีชาและปิดฝาให้สนิท นำไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 2 - 5 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้แอนิซีนถูกออกซิไดส์ด้วยแสงและออกซิเจน

หมายเหตุ สำหรับอนุพันธ์ของแอนิซีน (ได้แก่ N-methylaniline และ o-toluidine) สามารถใช้ในการทดลอง โดยไม่ต้องกลั่น

3.2.2 การเตรียมสารละลายกรดความเข้มข้น 1.0 โมลาร์

ตัวอย่างการเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์

ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37.3 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 41.10 มิลลิลิตร ใสลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น (deionized water) จนได้ถึงขีดวัดปริมาตร เขย่าให้สารละลายรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียว

สำหรับการเตรียมสารละลายกรดอื่น ๆ ทำเช่นเดียวกับวิธีการข้างต้น โดยเปลี่ยนจากกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นเป็น

- กรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 71.0 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 42.36 มิลลิลิตร
- กรดไนตริกเข้มข้น 70.7 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 31.61 มิลลิลิตร
- กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 96.5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 27.26 มิลลิลิตร

3.2.3 การเตรียมสารละลายแอนิซีนและอนุพันธ์ของแอนิซีน (ได้แก่ N-methylaniline และ o-toluidine) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดความเข้มข้น 1.0 โมลาร์

ปีเปตแอนิซีน 2.29 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นละลายกรดชนิดต่าง ๆ ที่เตรียมได้ในข้อ 3.2.2 จนมีปริมาตร 250 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายเข้ากันจะได้สารละลายแอนิซีนความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดแต่ละชนิด

สำหรับอนุพันธ์ตัวอื่น ๆ ทำการเตรียมเช่นเดียวกับวิธีการข้างต้น โดยเปลี่ยนจากแอนิซีนเป็น N-methylaniline ปริมาตร 2.74 มิลลิลิตร และ o-toluidine ปริมาตร 2.72 มิลลิลิตร

3.2.4 การทำความสะอาดขั้วแพลทินัมและแผ่นแพลทินัมฟอยล์

นำขั้วแพลทินัมและแผ่นแพลทินัมฟอยล์มาล้างด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น เป็นเวลา 2-3 นาที จากนั้นนำไปป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบโดยใช้เครื่อง Potentiostat / Galvanostat ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 150 มิลลิลิตร โดยใช้แผ่นแพลทินัมฟอยล์เป็นขั้วทำงาน (Working Electrode) ขั้วแพลทินัมเป็น Counter Electrode และใช้ขั้ว Silver-silver chloride (Ag/AgCl) เป็นขั้วอ้างอิง (Reference Electrode) ทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ -0.43 ถึง 1.0 โวลต์ เทียบกับขั้ว Ag/AgCl ด้วย scan rate เท่ากับ 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที เป็นจำนวน 25 รอบ จากนั้นนำแผ่นแพลทินัมฟอยล์มาล้างด้วยน้ำกลั่น (deionized water) และเช็ดให้แห้ง

3.2.5 การเตรียมฟิล์มพอลิแอนิซีนและอนุพันธ์ (ได้แก่ Poly(N-methylaniline) และ Poly(o-toluidine)) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก)

นำสารละลายแอนิซีนและอนุพันธ์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ทำการ degas โดยการผ่านก๊าซไนโตรเจนลงไป ในสารละลาย เป็นเวลา 15 นาที นำขั้วแพลทินัม (ทำหน้าที่เป็น counter electrode) ขั้ว Ag/AgCl (ทำหน้าที่เป็นขั้วอ้างอิง) และแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว (ใช้เป็นขั้วทำงาน) จุ่มลงในสารละลาย โดยให้ส่วนของแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่จุ่มอยู่ในสารละลายมีพื้นที่เท่ากับ 1×3 ตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบโดยเครื่อง Potentiostat / Galvanostat โดยให้ศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ -0.2 ถึง 1.05 โวลต์ (สำหรับสารละลายของแอนิซีน) และ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ (สำหรับสารละลายของ N-methylaniline และ o-toluidine) ด้วย scan rate ที่เท่ากันคือ 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวนรอบที่ใช้ในการป้อนศักย์ไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการเกิดพอลิเมอร์บนผิวของแผ่นแพลทินัมฟอยล์ ลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ Cyclic voltammograms ของการเกิดพอลิเมอร์บนแผ่นแพลทินัม และจำนวนกระแสที่วัดได้ ในขณะที่ทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ (ไม่ควรให้เกิด I overload)

เมื่อทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าครบตามจำนวนรอบที่ต้องการ จะได้ฟิล์มของพอลิเมอร์เกาะอยู่บนผิวของแผ่นแพลทินัมฟอยล์ นำแผ่นแพลทินัมฟอยล์ดังกล่าวมาล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 ครั้ง ตามด้วยอะซิโตน และน้ำกลั่นอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นทำการ dope โดยนำไปจุ่มลงในสารละลายกรดที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3.3 การตรวจสอบคุณลักษณะของพอลิแอนิไลน์และอนุพันธ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

3.3.1 การหาหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

ชุดเอาพอลิเมอร์ที่แห้งออกจากผิวของแผ่นแพลทินัมฟอยล์ นำมาอัดกับ KBr (KBr pellet) โดยใช้น้ำหนักของพอลิเมอร์ เท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนัก KBr จากนั้นนำไปตรวจสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR)

3.3.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

ตัดแผ่นแพลทินัมที่มีฟิล์มพอลิเมอร์เกาะบนผิว และผ่านการทำให้แห้ง เป็นชิ้นเล็ก ๆ นำไปตรวจสอบด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope, SEM)

3.3.3 การตรวจสอบค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้

เทคนิค four-point probes technique

นำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้และผ่านการทำให้แห้งแล้ว มาอัดเป็นเม็ด (pellet) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร และนำไปวัดค่าการนำไฟฟ้า โดยเครื่อง four-probes



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

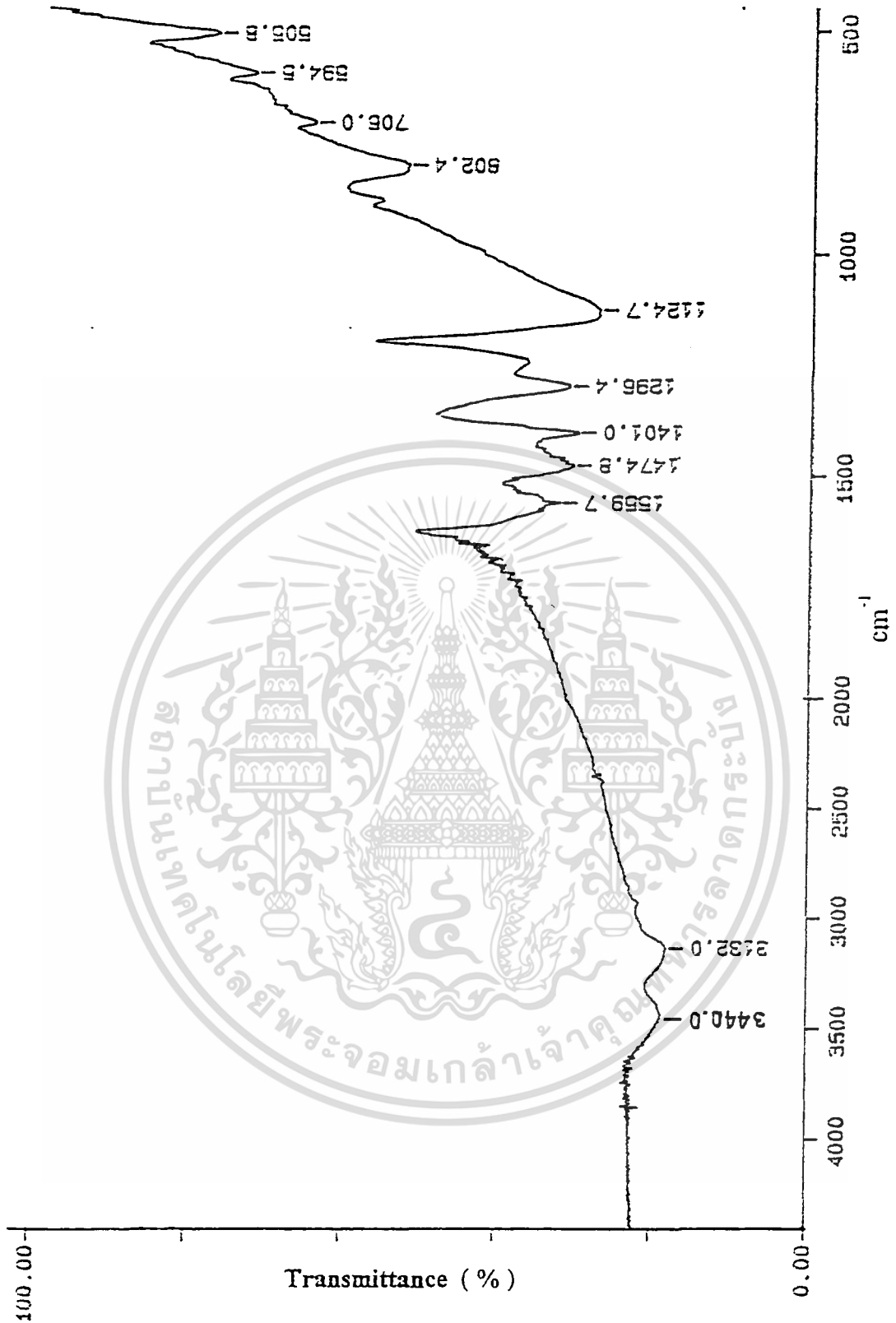
4.1 การวิเคราะห์และตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของพอลิแอนิไลน์และอนุพันธ์ (Poly (N-methylaniline) และ Poly (o-toluidine)) ที่ได้จากการสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เมื่อนำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ มาตรวจสอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) พบว่าสารที่ได้จากการสังเคราะห์มีหมู่ที่ทำให้เกิดการสั่นหลักซึ่งสามารถบ่งบอกถึงประเภทของหมู่ทำหน้าที่เฉพาะ (functional group) ของโมเลกุลได้ และพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันจะมีลักษณะของสเปกตรัมคล้ายกัน นอกจากนี้ยังพบการสั่นที่แสดงให้เห็นถึงอนุมูลแอนไอออนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์อีกด้วย ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 4.1 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polyaniline* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย แอนิลีนเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)	หมายเหตุ
3440.0	10	การยืดของ N-H และ O-H	Broad
1559.7	34	การยืดของ C-C aromatic	
1474.8	32	การยืดของ C-C aromatic	
1296.4	34	การยืดของ C-N	
1250.0	36	การยืดของ C-N	Broad
802.4	50	การงอออกนอกระนาบ ของ C-H (p-disub)	Broad
706.0	62	การงอออกนอกระนาบ ของ C-C	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



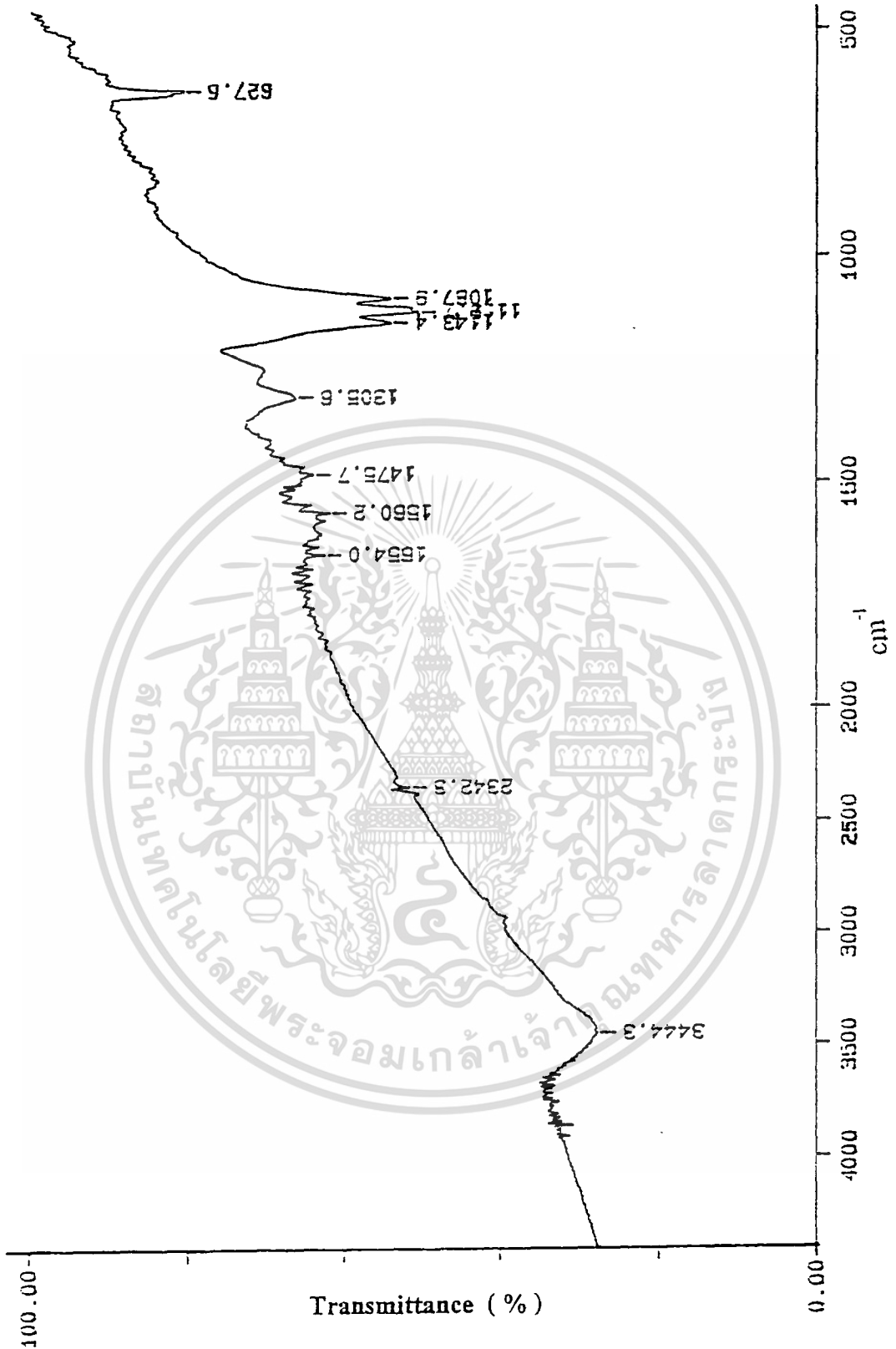
รูปที่ 4.1 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม ของ พอลิเอทิลีน ที่ได้จากการสังเคราะห์
ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดไฮโดรคลอริก
(เลขคลื่น 4000 - 600 cm⁻¹ จำนวนสแกน 4 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polyaniline* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย แอนิซีนเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)	หมายเหตุ
3444.3	26	การยืดของ N-H และ O-H	Broad
1654.0	62	การยืดของ C=N	
1475.7	64	การยืดของ C-C aromatic	
1305.6	65	การยืดของ C-N	Broad
1143.4	55	ClO_4^- (anionic)	Sharp
1087.9	55	ClO_4^- (anionic)	Sharp
800.0	82	การงอออกนอกระนาบ ของ C-H (p-disub)	
627.6	78	ClO_4^- (anionic)	Sharp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม ของ พอลิแอนิลีน ที่ได้จากการสังเคราะห์

ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดเปอร์คลอริก

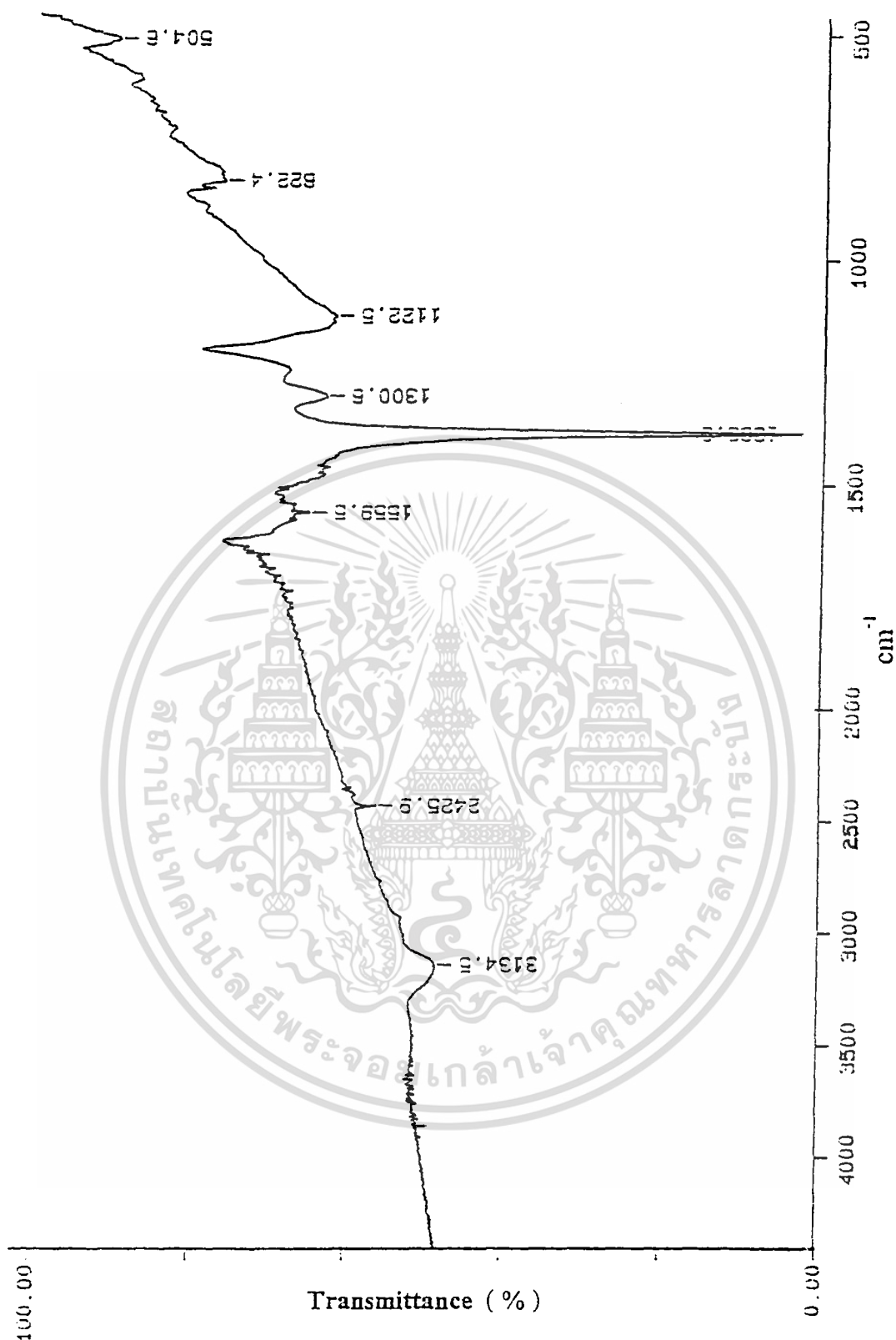
(เลขคลื่น 4000 - 600 cm⁻¹ จำนวนสแกน 4 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงเลขคลื่น เปรอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polyaniline* โดยมีสถานะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลายแอนิซีนเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)	หมายเหตุ
3134.5	52	การยืดของ N-H และ O-H	Broad
1559.5	64	การยืดของ C-C aromatic	Sharp
1383.9	4	NO_3^- (anionic)	
1300.6	62	การยืดของ C-N	
822.4	76	การงอออกนอกระนาบ ของ C-H (p-disub)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



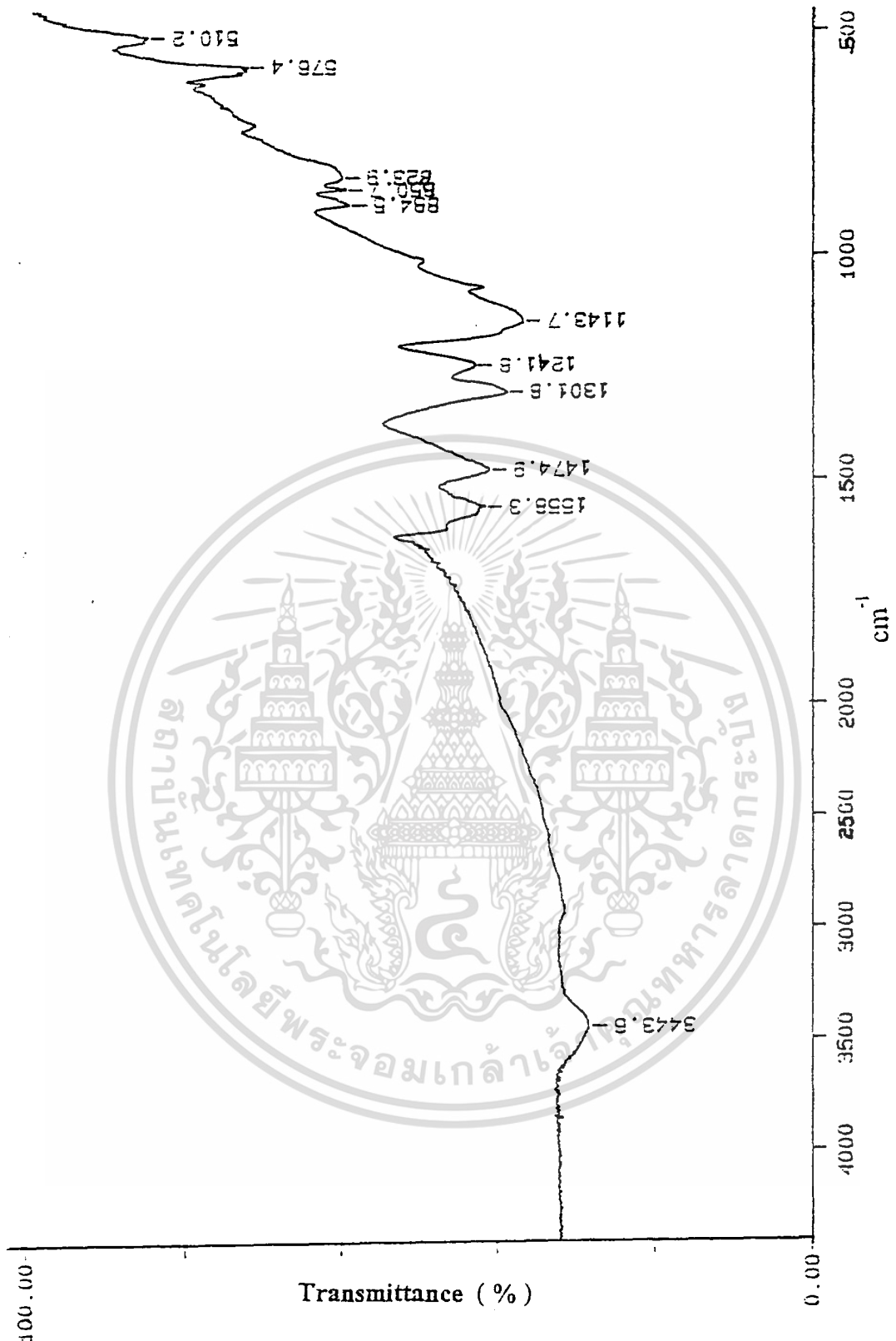
รูปที่ 4.3 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม ของ พอลิแอนิซีน ที่ได้จากการสังเคราะห์
ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดไนตริก
(เลขคลื่น 4000 - 600 cm⁻¹ จำนวนสแกน 4 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Polyaniline* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลายแอนิไลน์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)	หมายเหตุ
3443.6	32	การยืดของ N-H และ O-H	Broad
1474.9	40	การยืดของ C-C aromatic	Broad
1301.8	38	การยืดของ C-N	
1241.8	45	การยืดของ C-N	
1143.7	36	SO_4^{2-} (anionic)	
823.9	60	การงอออกนอกระนาบ ของ C-H (p-disub)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



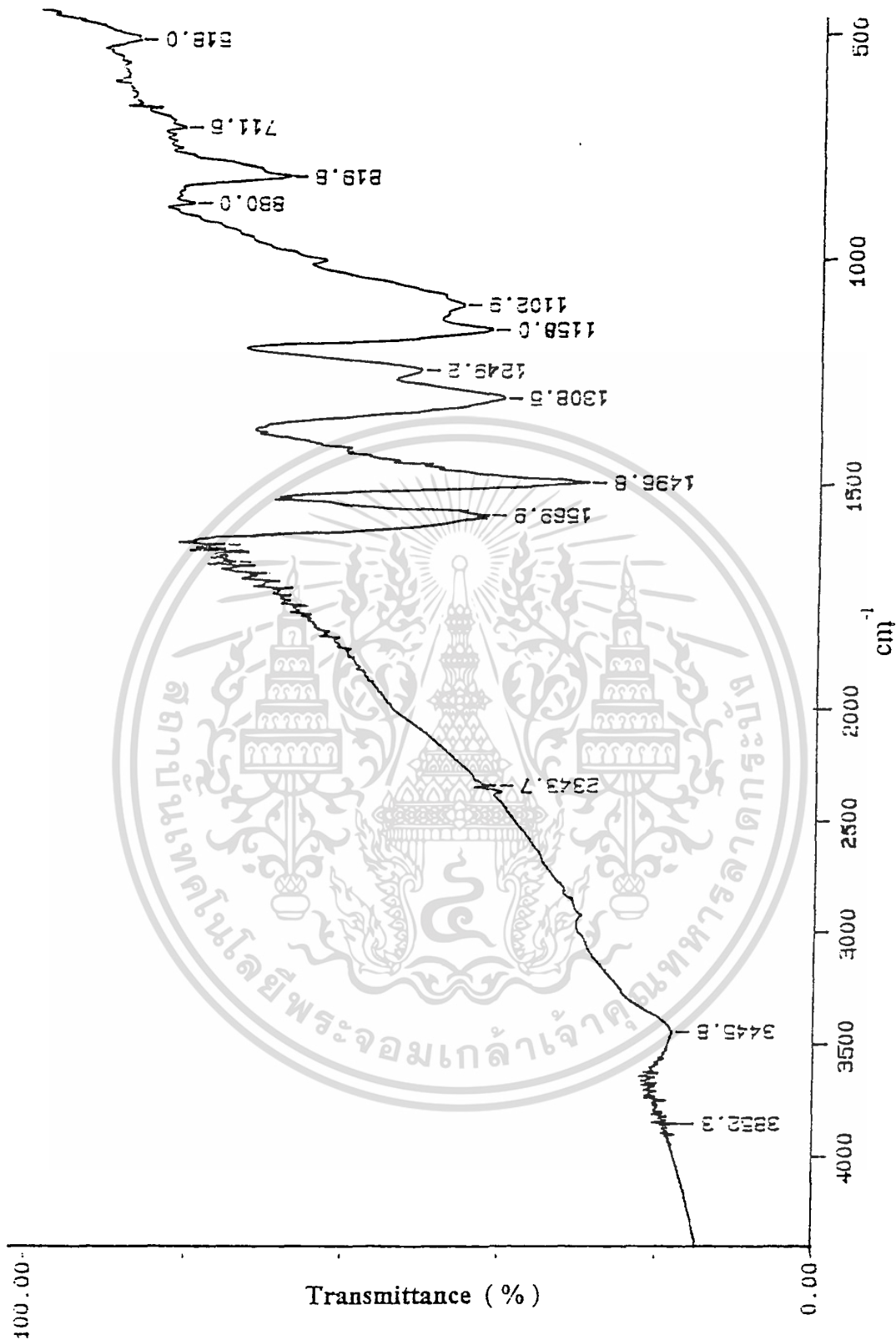
รูปที่ 4.4 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม ของ *พอลิเอนิลีน* ที่ได้จากการสังเคราะห์
 ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดซัลฟิวริก
 (เลขคลื่น 4000 - 600 cm⁻¹ จำนวนสแกน 4 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Poly(N-methylaniline)* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย *N-methylaniline* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)	หมายเหตุ
3445.8	16	การยืดของ N-H และ O-H	Broad
1636.1	75	การยืดของ C=N	
1496.8	24	การยืดของ C-C aromatic	Sharp
1308.5	38	การยืดของ C-N	Sharp
1249.2	44	การยืดของ C-N	Sharp
819.8	62	การงอออกนอกระนาบ ของ C-H (p-disub)	Sharp
711.6	81	การงอออกนอกระนาบ ของ C-C	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

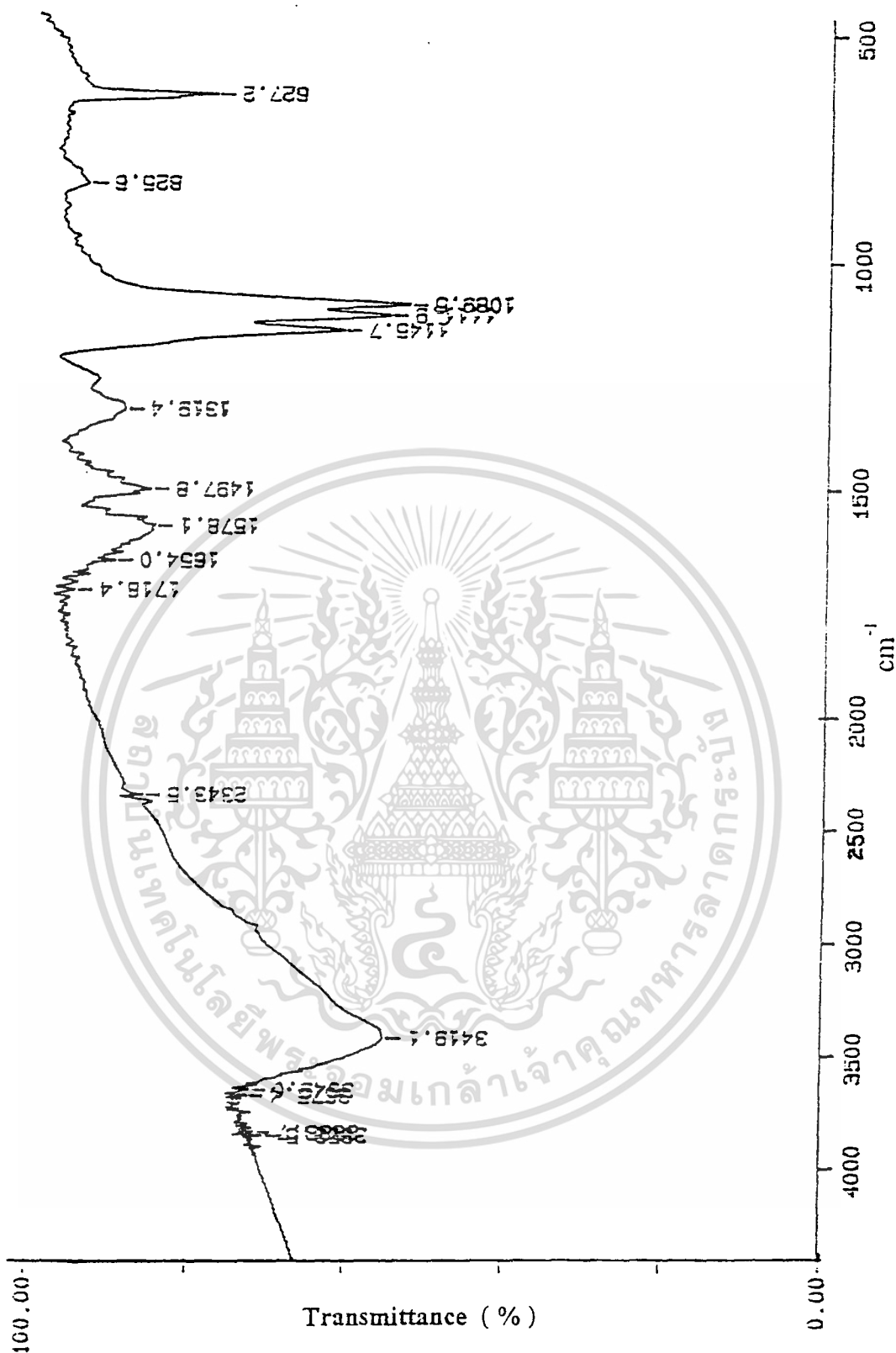


รูปที่ 4.5 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม ของ *Poly(N-methylaniline)* ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (เลขคลื่น 4000 - 600 cm^{-1} จำนวนสแกน 4 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Poly (N-methylaniline)* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย *N-methylaniline* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)	หมายเหตุ
3419.1	52	การยืดของ N-H และ O-H	Broad
1654.0	88	การยืดของ C=N	
1497.8	84	การยืดของ C-C aromatic	
1319.4	86	การยืดของ C-N	
1145.7	60	ClO_4^- (anionic)	Sharp
1089.5	55	ClO_4^- (anionic)	Sharp
825.6	88	การงอออกนอกระนาบ ของ C-H (p-disub)	
627.2	79	ClO_4^- (anionic)	Sharp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



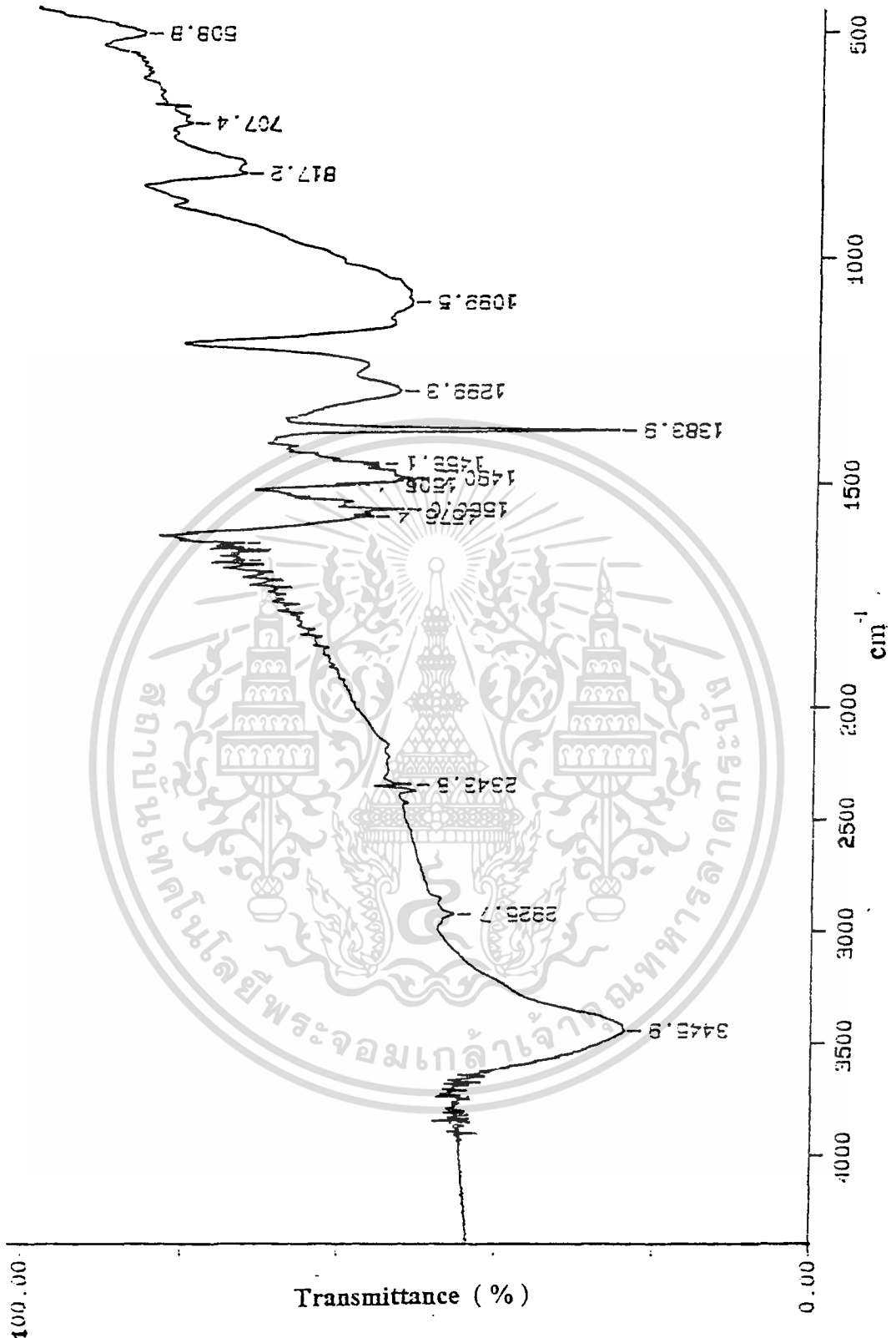
รูปที่ 4.6 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม ของ *Poly(N-methylaniline)* ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดเปอร์คลอริก (เลขคลื่น 4000 - 600 cm⁻¹ จำนวนสแกน 4 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงเลขคลื่น เปรอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Poly(N-methylaniline)* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย *N-methylaniline* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)	หมายเหตุ
3445.9	22	การยืดของ N-H และ O-H	Broad
1636.3	64	การยืดของ C=N	
1490.0	50	การยืดของ C-C aromatic	
1383.9	24	NO_3^- (anionic)	Sharp
1299.3	50	การยืดของ C-N	Broad
817.2	66	การงอออกนอกระนาบของ C-H (p-disub)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



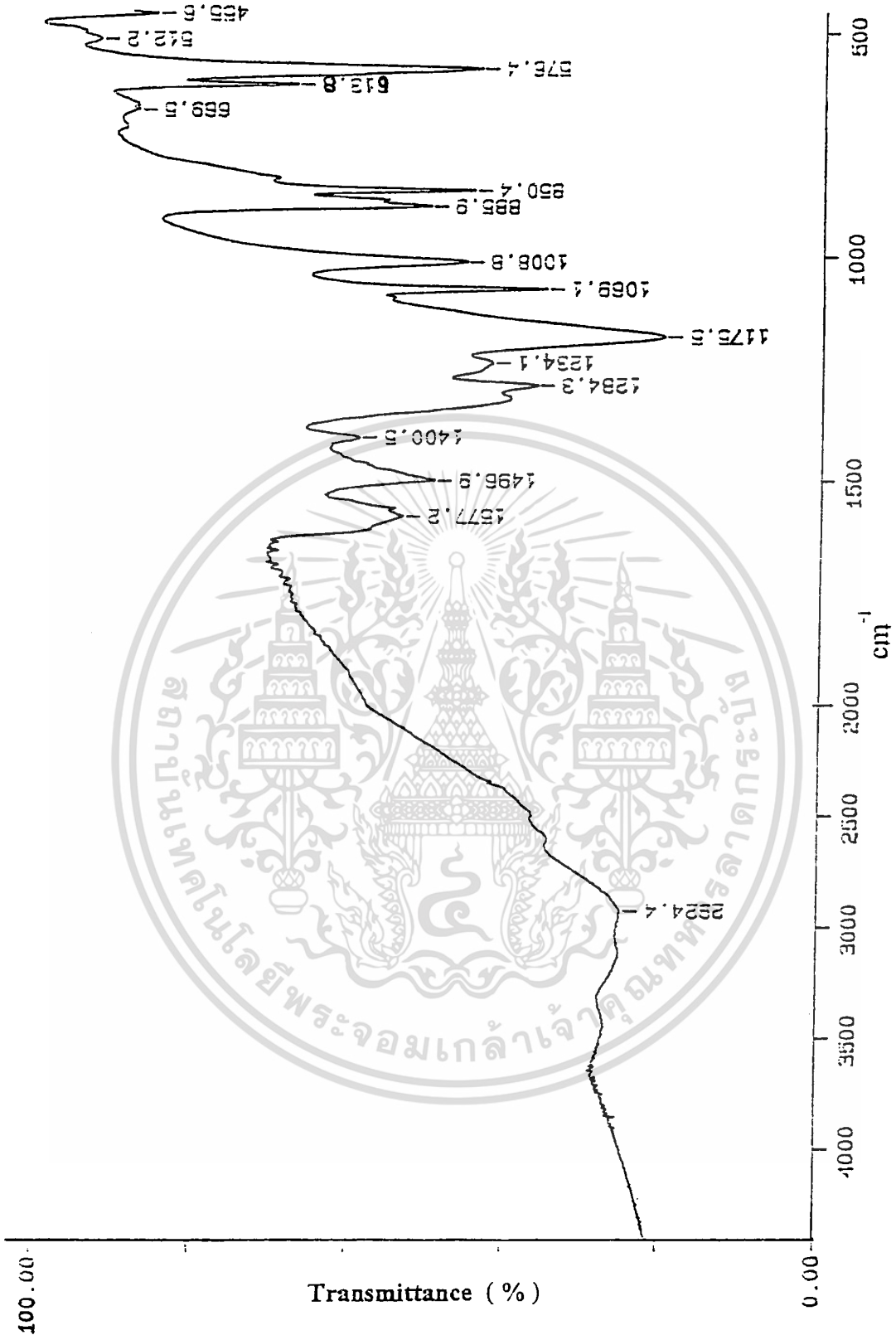
รูปที่ 4.7 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Poly(N-methylaniline)* ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดไนตริก (เลขคลื่น 4000 - 600 cm^{-1} จำนวนสแกน 4 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Poly(N-methylaniline)* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย *N-methylaniline* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)	หมายเหตุ
3445.6	12	การยืดของ N-H และ O-H	Sharp
1496.9	50	การยืดของ C-C aromatic	
1284.3	27	การยืดของ C-N	
1234.1	41	การยืดของ C-N	
1175.5	18	SO_4^{2-} (anionic)	
613.8	66	SO_4^{2-} (anionic)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



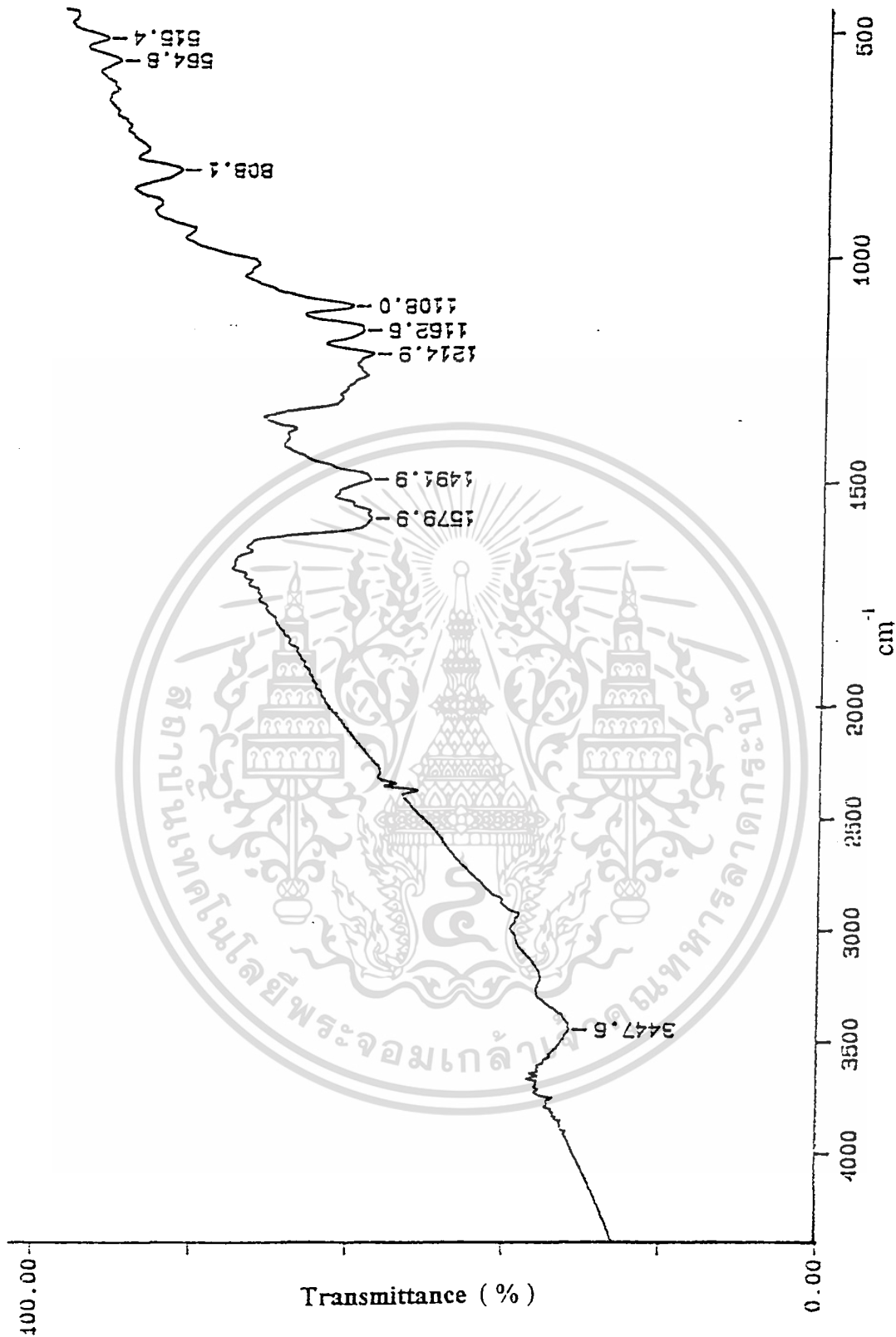
รูปที่ 4.8 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม ของ *Poly(N-methylaniline)* ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดซัลฟิวริก (เลขคลื่น 4000 - 600 cm^{-1} จำนวนสแกน 4 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr peilet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Poly(o-toluidine)* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย *o-toluidine* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)	หมายเหตุ
3447.6	27	การยืดของ N-H และ O-H	Broad
1491.9	58	การยืดของ C-C aromatic	
808.1	81	การงอออกนอกระนาบ ของ C-H (p-disub)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



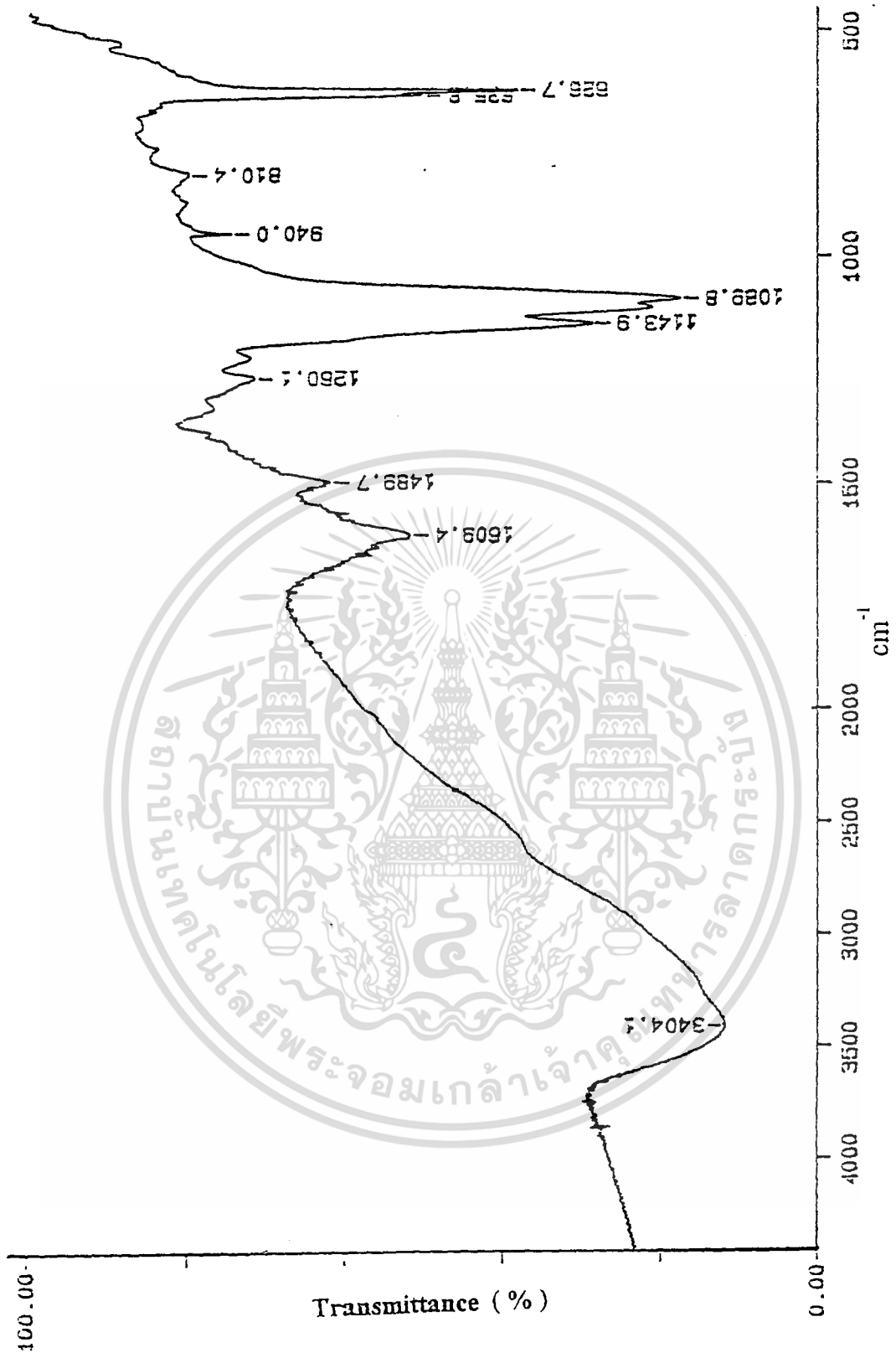
รูปที่ 4.9 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Poly(o-toluidine)* ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (เลขคลื่น 4000 - 600 cm^{-1} จำนวนสแกน 4 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Poly(o-toluidine)* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย *o-toluidine* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดเปอร์คลอริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)	หมายเหตุ
3404.1	14	การยืดของ N-H และ O-H	Broad
1489.7	61	การยืดของ C-C aromatic	
1260.1	68	การยืดของ C-N	
1143.9	30	ClO_4^- (anionic)	Sharp
1089.8	19	ClO_4^- (anionic)	Sharp
810.4	80	การงอออกนอกระนาบ ของ C-H (p-disub)	
626.7	40	ClO_4^- (anionic)	Sharp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



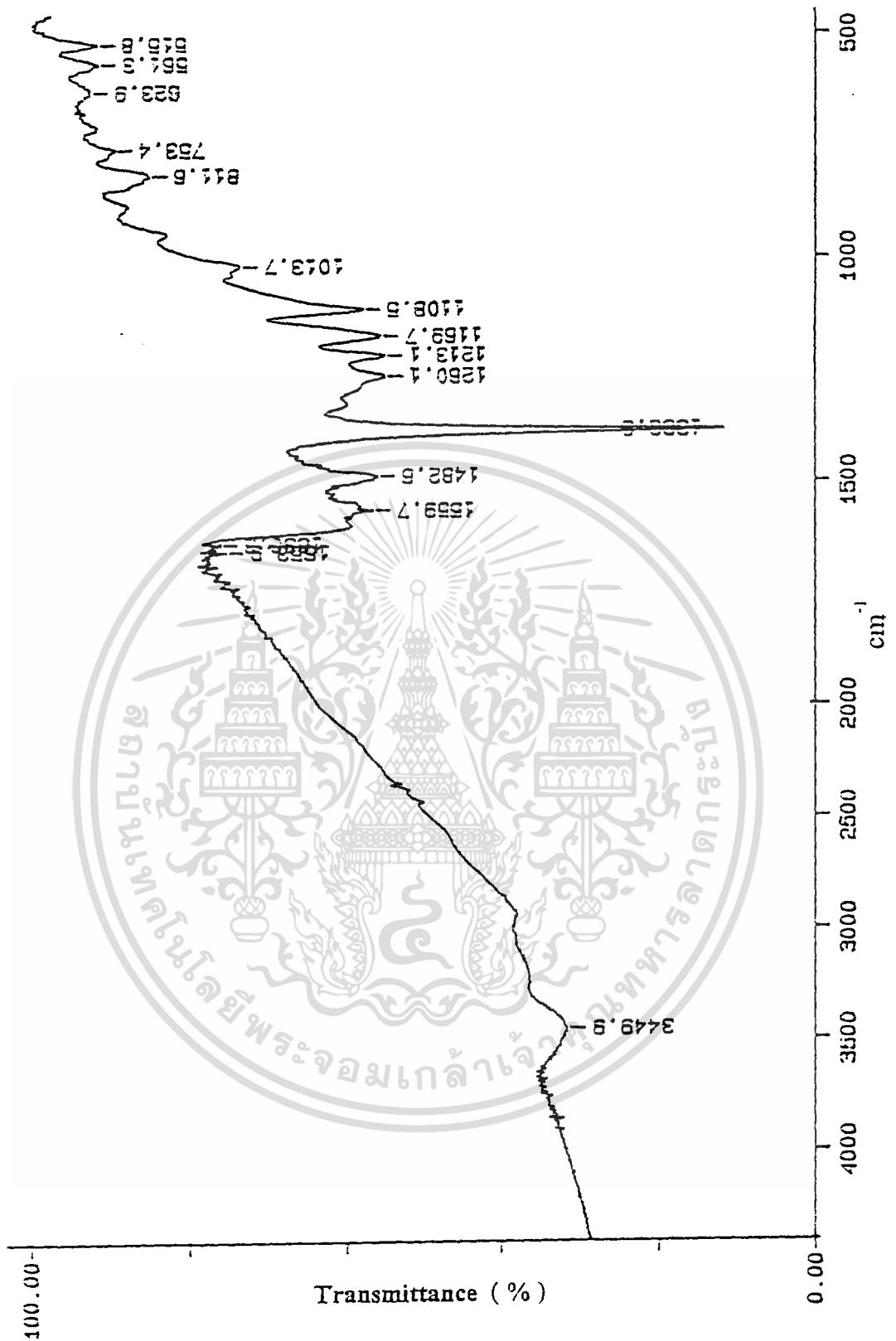
รูปที่ 4.10 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม ของ *Poly(o-toluidine)* ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดเปอร์คลอริก (เลขคลื่น 4000 - 600 cm⁻¹ จำนวนสแกน 4 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Poly(o-toluidine)* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย *o-toluidine* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไนตริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)	หมายเหตุ
3449.9	26	การยืดของ N-H และ O-H	Broad
1636.9	78	การยืดของ C=N	Sharp
1482.6	57	การยืดของ C-C aromatic	
1383.3	10	NO_3^- (anionic)	
1260.1	56	การยืดของ C-N	
811.6	84	การงอออกนอกระนาบ ของ C-H (p-disub)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



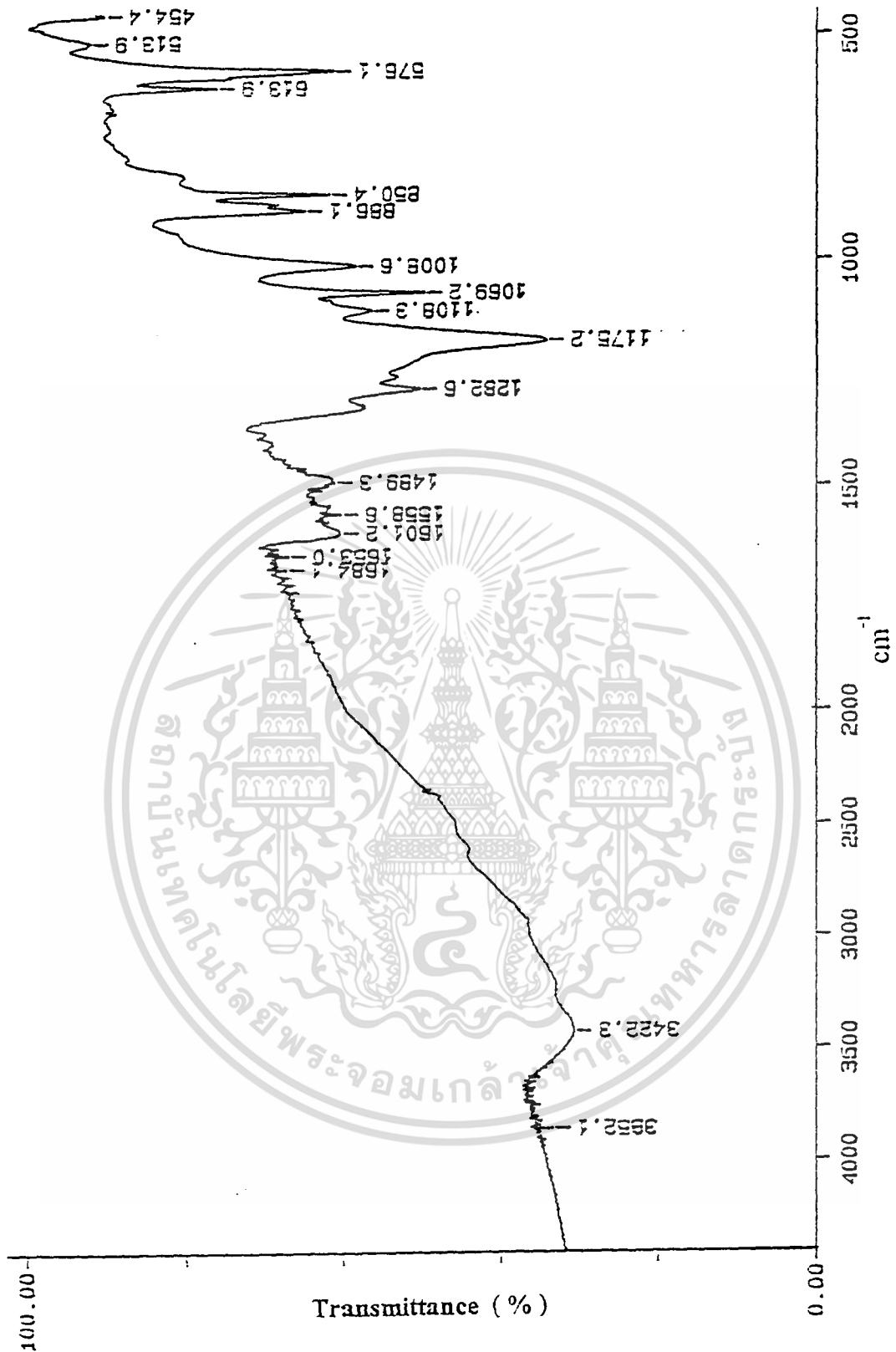
รูปที่ 4.11 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม ของ *Poly(o-toluidine)* ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดไนตริก (เลขคลื่น 4000 - 600 cm⁻¹ จำนวนสแกน + ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงเลขคลื่น เปอร์เซ็นต์การผ่านของแสงและชนิดของการสั่นหลักที่สำคัญที่พบในอินฟราเรดสเปกตรัมของ *Poly(o-toluidine)* โดยมีสภาวะการสังเคราะห์ คือ สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า สารละลาย *o-toluidine* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์

เลขคลื่น (cm^{-1})	การผ่านของแสง (% T)	ลักษณะเฉพาะของแถบ (peak characteristic)	หมายเหตุ
3422.3	30	การยืดของ N-H และ O-H	Broad
1653.0	65	การยืดของ C=N	
1489.3	61	การยืดของ C-C aromatic	
1282.6	50	การยืดของ C-N	
1175.2	34	SO_4^{2-} (anionic)	Sharp
613.9	77	SO_4^{2-} (anionic)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม ของ *Poly(o-toluidine)* ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดซัลฟิวริก (เลขคลื่น 4000 - 600 cm⁻¹ จำนวนสแกน 4 ครั้ง ชนิดสารตัวอย่าง : KBr pellet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ ต่อการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์และอนุพันธ์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

ผลกระทบดังกล่าวได้แก่ ผลกระทบต่ออัตราการเกิดพอลิเมอร์บนผิวแพลทินัมฟอยล์ ซึ่งสามารถศึกษาได้จาก Cyclic voltammograms ที่ได้ขณะทำการสังเคราะห์ ได้แสดงดังต่อไปนี้

มอนอเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ aniline, N-methylaniline และ o-toluidine

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่

- สารละลายกรดไฮโดรคลอริก
- สารละลายกรดเปอร์คลอริก
- สารละลายกรดไนตริก
- สารละลายกรดซัลฟิวริก

4.2.1 ผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ ต่อการสังเคราะห์ Polyaniline

จากกราฟไซคลิกโวลทามาแกรม (cyclic voltammograms, CV) ที่ได้จากพอลิแอนิไลน์กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ กัน พบว่า การสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) โดยใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ได้เร็วกว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดเปอร์คลอริก ($HClO_4$) และกรดไนตริก (HNO_3) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สังเกตได้จากจำนวนรอบที่ทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ชั่วแอมป์สูงถึง 0.080 แอมแปร์ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.519 โวลต์ ใช้จำนวนรอบในการสังเคราะห์พอลิเมอร์เพียง 7 รอบเท่านั้น ในขณะที่ใช้กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดเปอร์คลอริก เมื่อเทียบที่ศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกัน (0.519 โวลต์) และจำนวนรอบในการสังเคราะห์เท่ากันพบว่า จะมีปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.030, 0.028 และ 0.003 แอมแปร์ ตามลำดับ

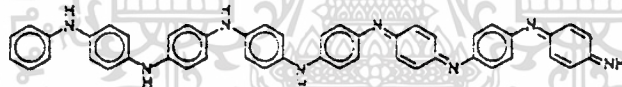
เมื่อจำนวนรอบในการให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จะพบว่าปริมาณกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าพอลิเมอร์มาเกิดขึ้นที่ชั่วแอมป์มากขึ้นและนอกจากนี้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ dope ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ จะมีผลต่อการเพิ่มค่าปริมาณกระแส ซึ่งสามารถเรียงลำดับการให้ปริมาณกระแสจากสูงไปต่ำ ตามสารละลายอิเล็กโทรไลต์ดังต่อไปนี้ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดเปอร์คลอริก เมื่อเทียบกับจำนวนรอบที่ป้อนศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากัน

ที่ศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน 0.2 โวลต์ สีของพอลิเมอร์ที่เกาะอยู่ที่แผ่นแพลทินัมที่ขั้วแอโนด จะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีเหลือง นั่นแสดงว่า พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของ Leuco - Emeraldine ⁽³³⁾

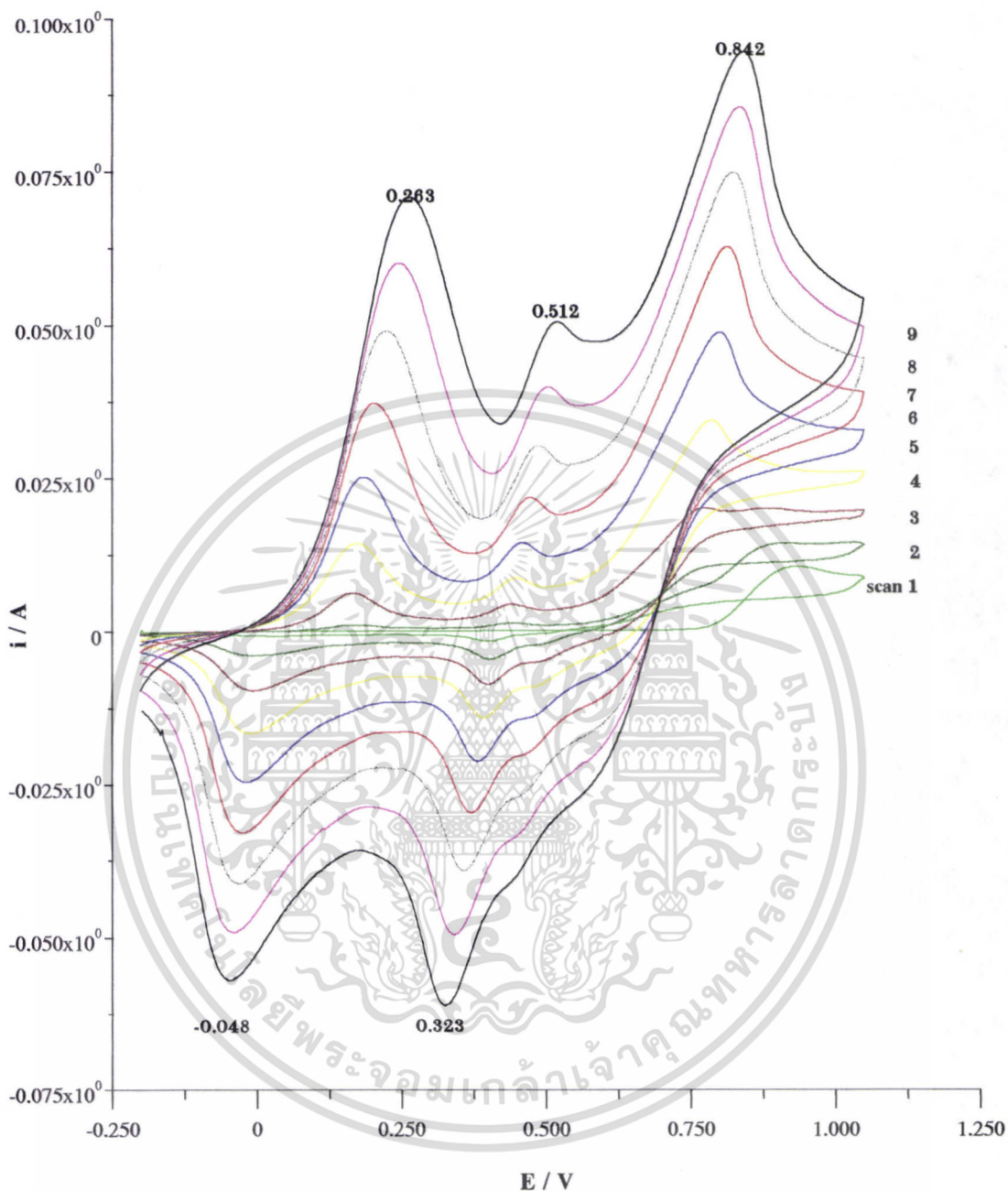
ที่ศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน 0.5 โวลต์ สีของพอลิเมอร์ที่เกาะอยู่ที่แผ่นแพลทินัมที่ขั้วแอโนด จะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีเขียว แสดงว่า พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของ Emeraldine salt ⁽³³⁾

ที่ศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน 0.8 โวลต์ สีของพอลิเมอร์ที่เกาะอยู่ที่แผ่นแพลทินัมที่ขั้วแอโนด จะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำเงินเข้ม นั่นแสดงว่า พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของ Emeraldine base ⁽³³⁾

ลักษณะโครงสร้างของ Polyaniline

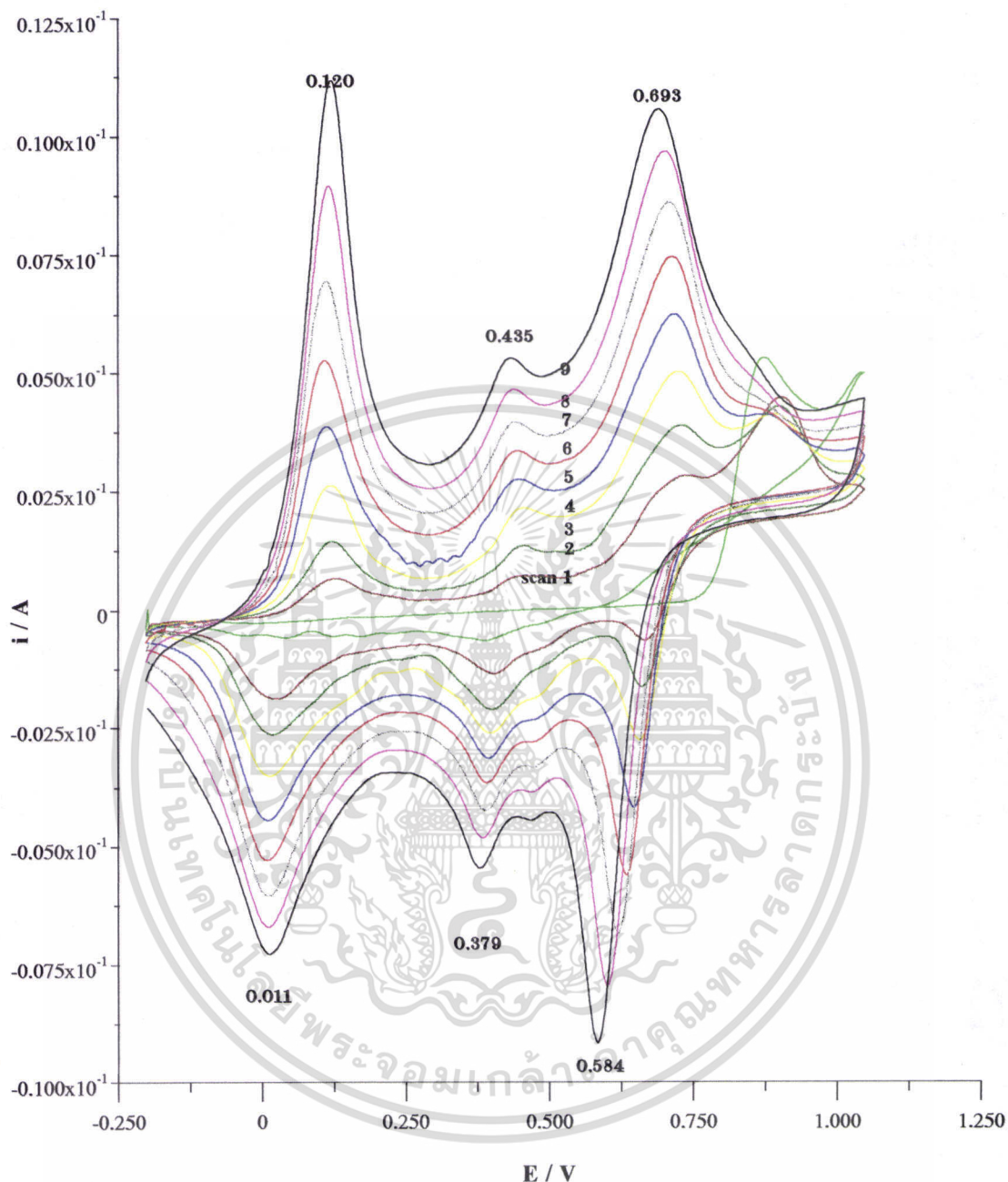


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



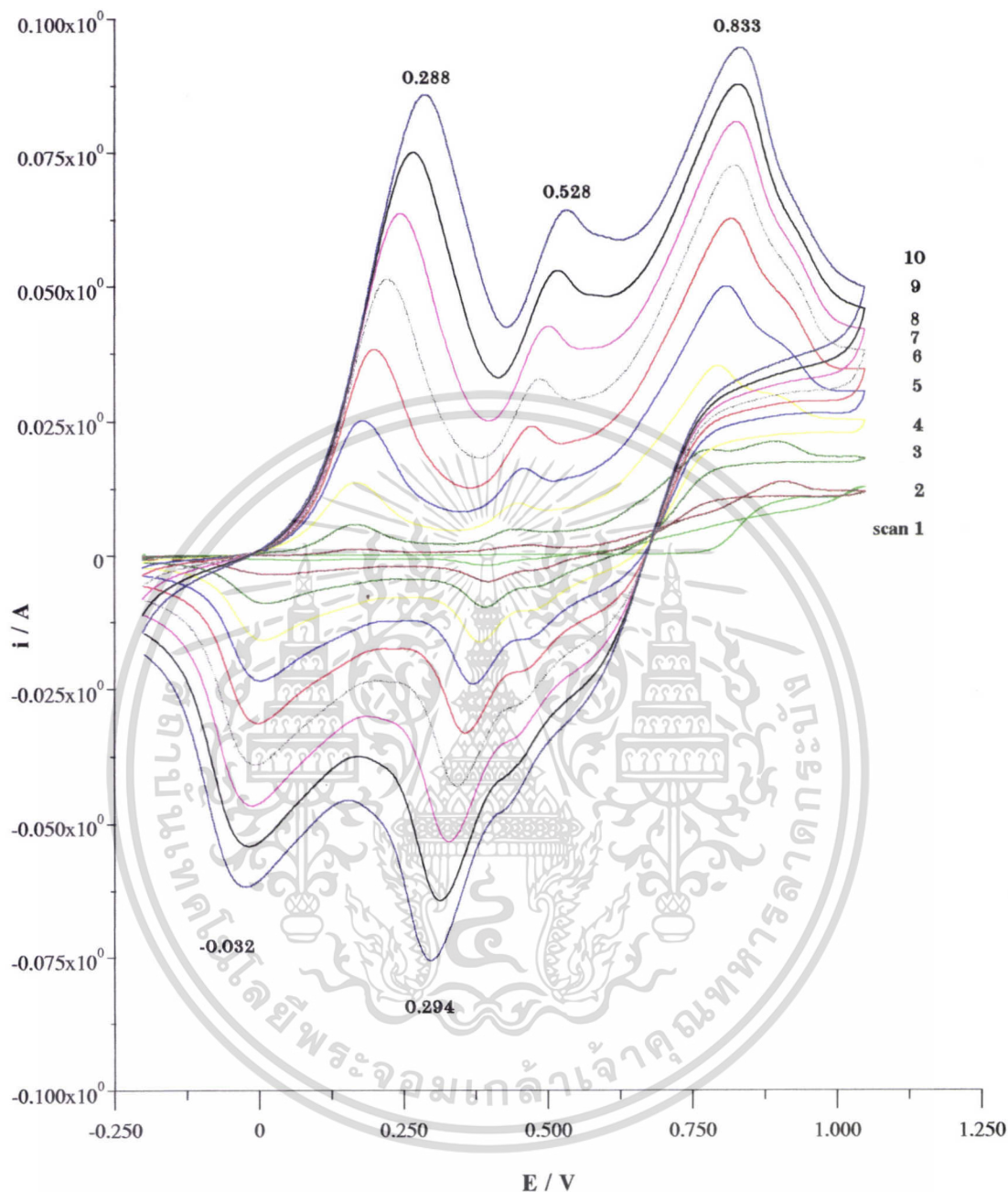
รูปที่ 4.13 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ *Polyaniline* ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย *Aniline* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 1.05 โวลต์ ด้วย Scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



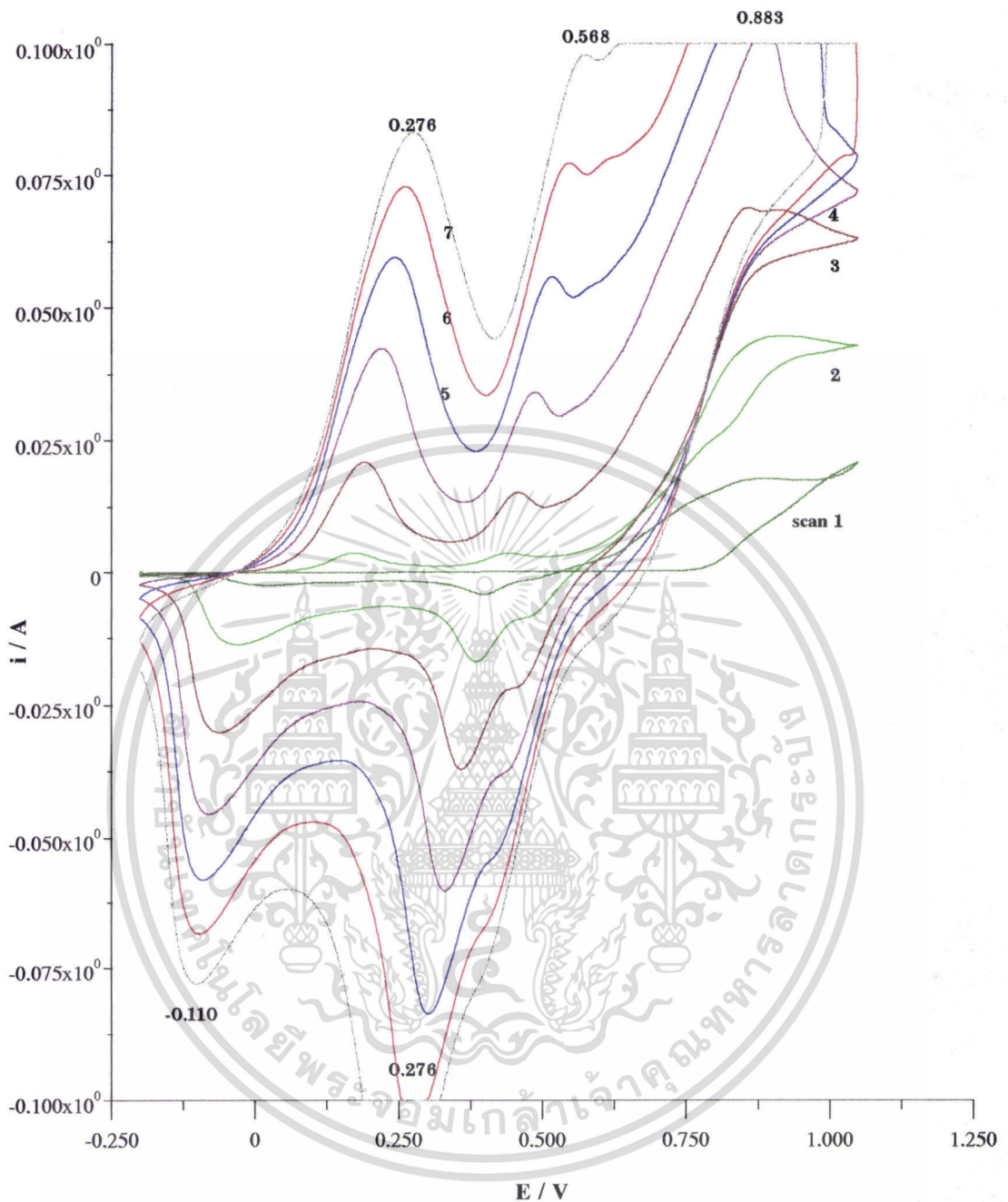
รูปที่ 4.14 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ *Polyaniline* ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย *Aniline* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 1.05 โวลต์ ด้วย Scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ *Polyaniline* ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย *Aniline* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไนตริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 1.05 โวลต์ ด้วย Scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ *Polyaniline* ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย *Aniline* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 1.05 โวลต์ ด้วย Scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

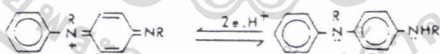
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ ต่อการสังเคราะห์ Poly (N-methylaniline)

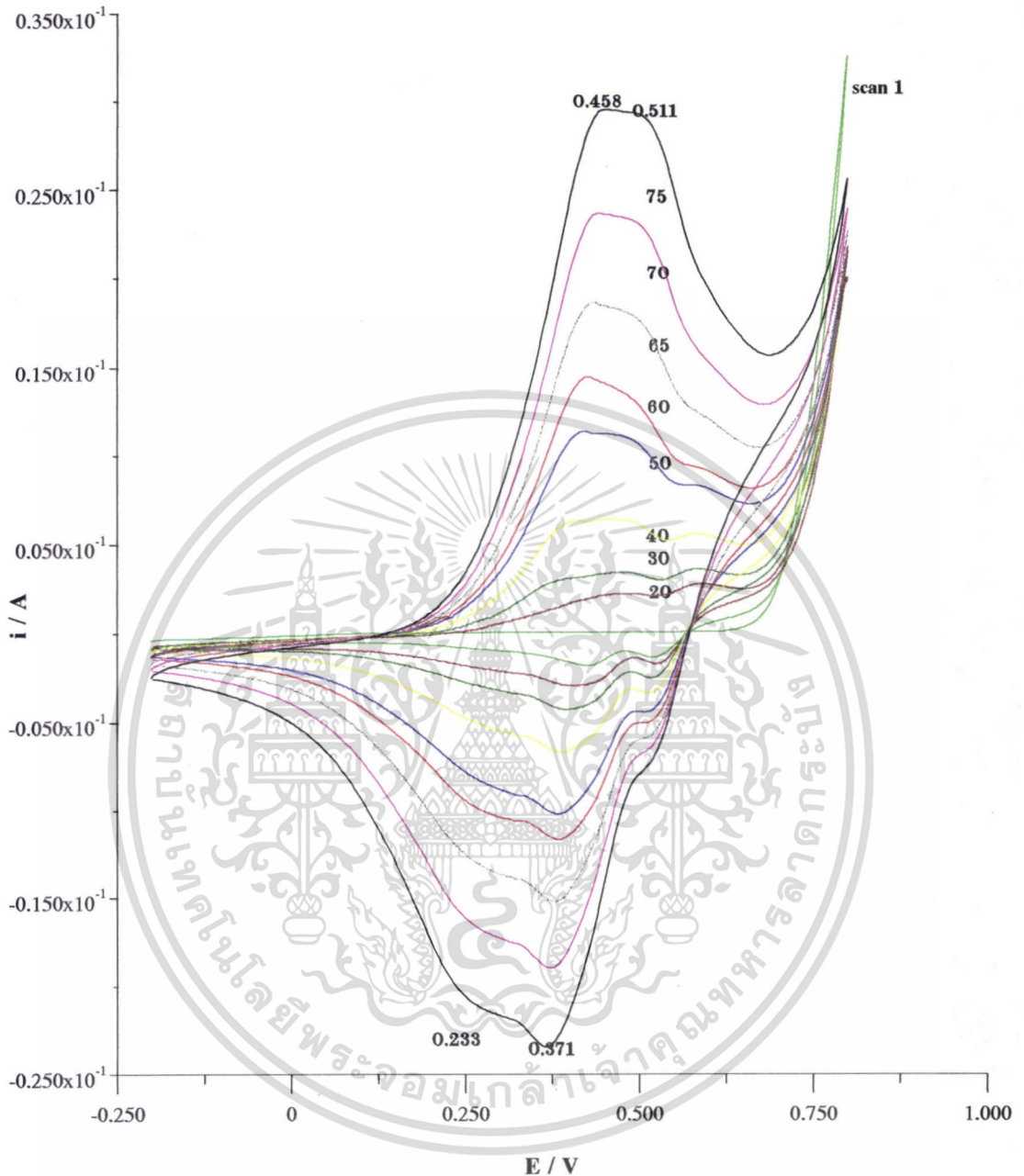
จากกราฟไซคลิกโวลทามาโมแกรม (cyclic voltammograms, CV) ที่ได้จาก Poly (N-methylaniline) กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ กันพบว่า การสังเคราะห์ Poly (N-methylaniline) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) โดยเปรียบเทียบกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังนี้คือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไนตริก (HNO_3) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดเปอร์คลอริก (HClO_4) ทำการเปรียบเทียบที่ศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน (0.457 โวลต์) ที่อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้าเดียวกันและที่จำนวนรอบในการสังเคราะห์เท่ากัน พบว่า พอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ด้วยกรดเปอร์คลอริกจะให้ปริมาณกระแสไฟฟ้า 0.047 แอมแปร์ ในขณะที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกในการสังเคราะห์จะให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงเพียง 0.030, 0.009 และ 0.006 แอมแปร์ตามลำดับ

ดังนั้น เมื่อเรียงลำดับการเกิดพอลิเมอร์โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกัน ผลที่ได้จะตรงข้ามกับการสังเคราะห์พอลิแอนิลีน (กรดเปอร์คลอริก กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก)

ลักษณะ โครงสร้างของ Poly (N-methylaniline)

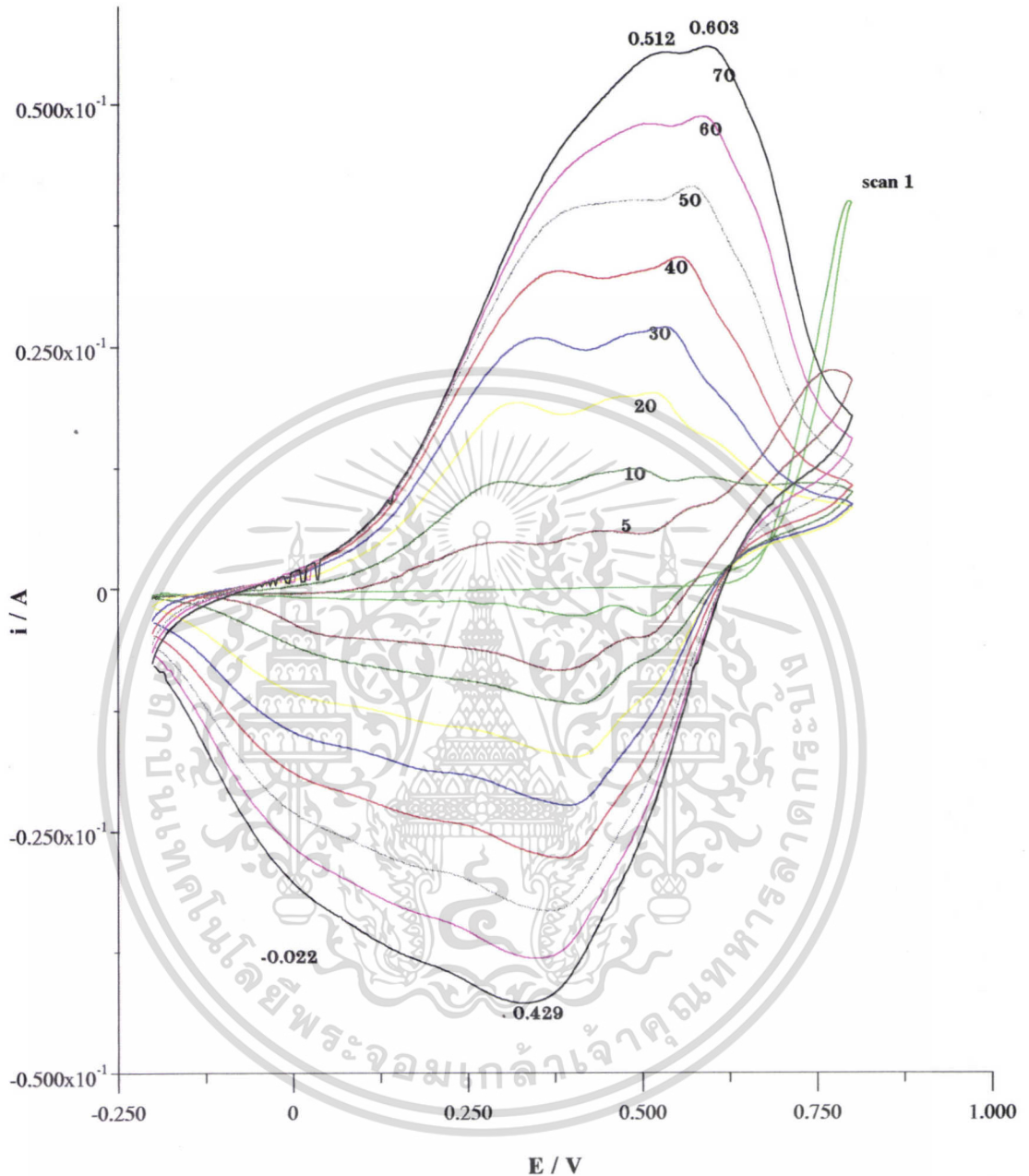


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



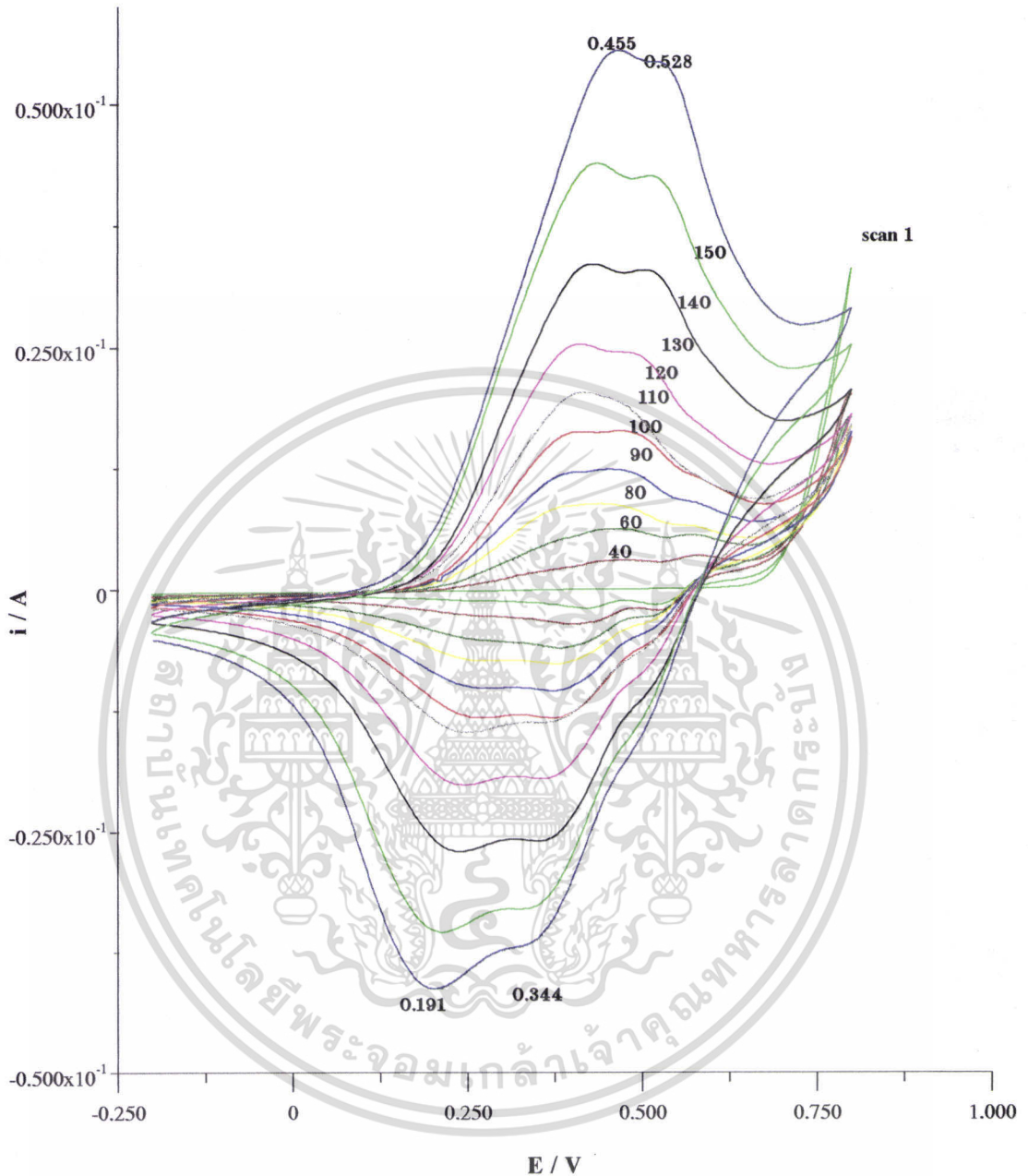
รูปที่ 4.17 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ *Poly(N-methylaniline)* ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย *N-methylaniline* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.8 โวลต์ ด้วย Scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



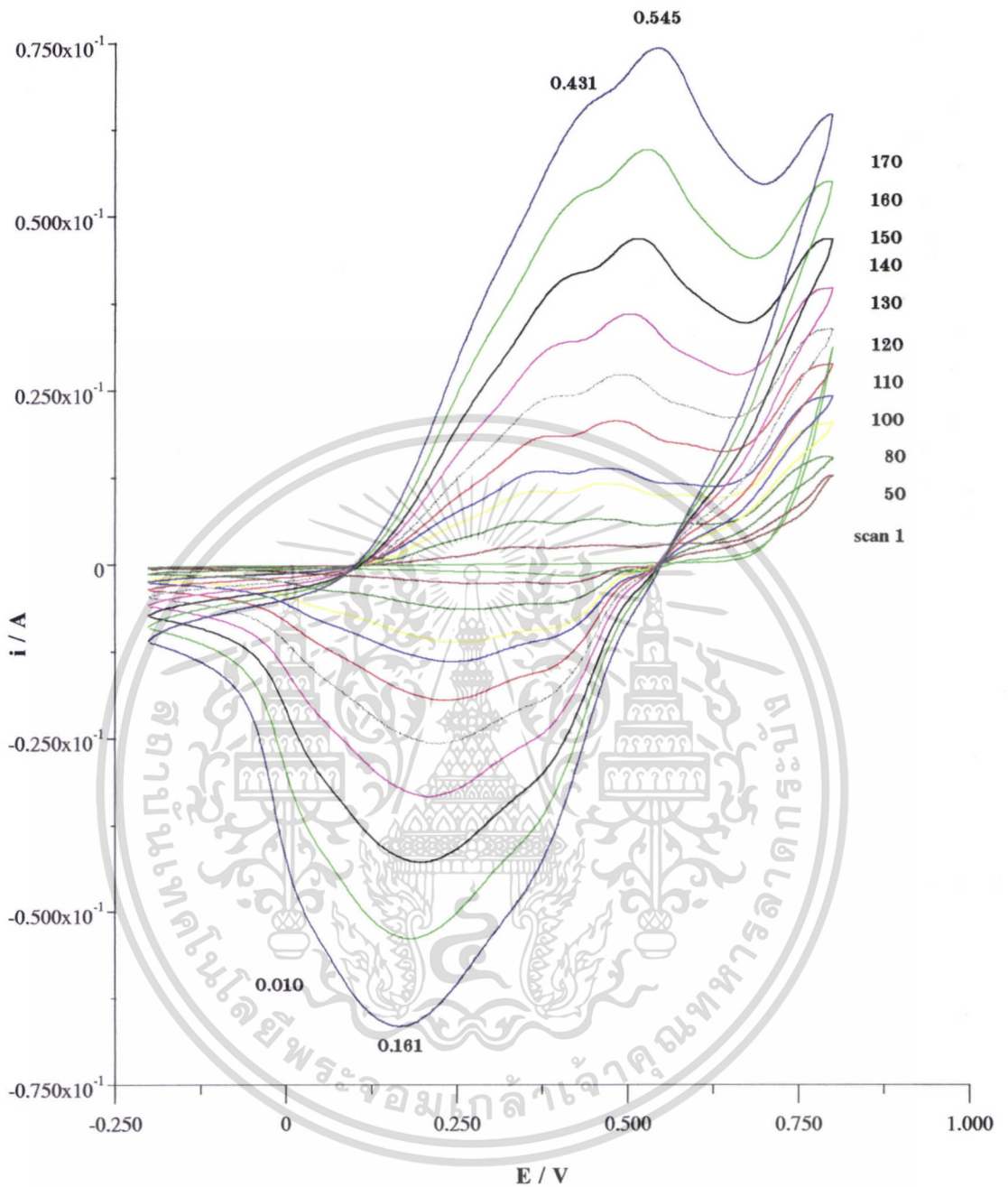
รูปที่ 4.18 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ *Poly(N-methylaniline)* ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย *N-methylaniline* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดเปอร์คลอริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.8 โวลต์ ด้วย Scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ *Poly(N-methylaniline)* ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย *N-methylaniline* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไนตริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.8 โวลต์ ด้วย Scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ *Poly(N-methylaniline)* ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย *N-methylaniline* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย Scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลกระทบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ ต่อการสังเคราะห์ Poly (o-toluidine)

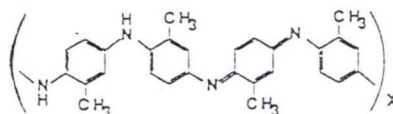
จากกราฟไซคลิกโวลทามาแกรม (cyclic voltammograms, CV) ที่ได้จาก Poly (o-toluidine) กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ กันพบว่า การสังเคราะห์ Poly (o-toluidine) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) โดยใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ได้เร็วกว่าการใช้กรดไนตริก (HNO_3) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดเปอร์คลอริก ($HClO_4$) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สังเกตได้จากปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ได้ เมื่อใช้จำนวนรอบในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ 50 รอบเท่ากัน อัตราการป้อนศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน และศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน (0.470 โวลต์) สามารถเรียงลำดับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการ dope ด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ตามลำดับข้างต้น ได้ดังนี้ 0.058 , 0.010, 0.008 และ 0.003 แอมแปร์

นอกจากนี้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ dope ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ และจำนวนรอบในการให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ยังมีผลต่อการเกิดพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้นที่ขั้วแอโนดและปริมาณกระแสที่เพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกับการสังเคราะห์พอลิแอนิลินด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ดังกล่าว ที่ศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันในช่วง 0.23 - 0.25 โวลต์ สีของพอลิเมอร์ที่เกาะอยู่ที่แผ่นแพลทินัมที่ขั้วแอโนดจะเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีเหลือง นั่นแสดงว่า พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของ Reduced salt ^(32,33)

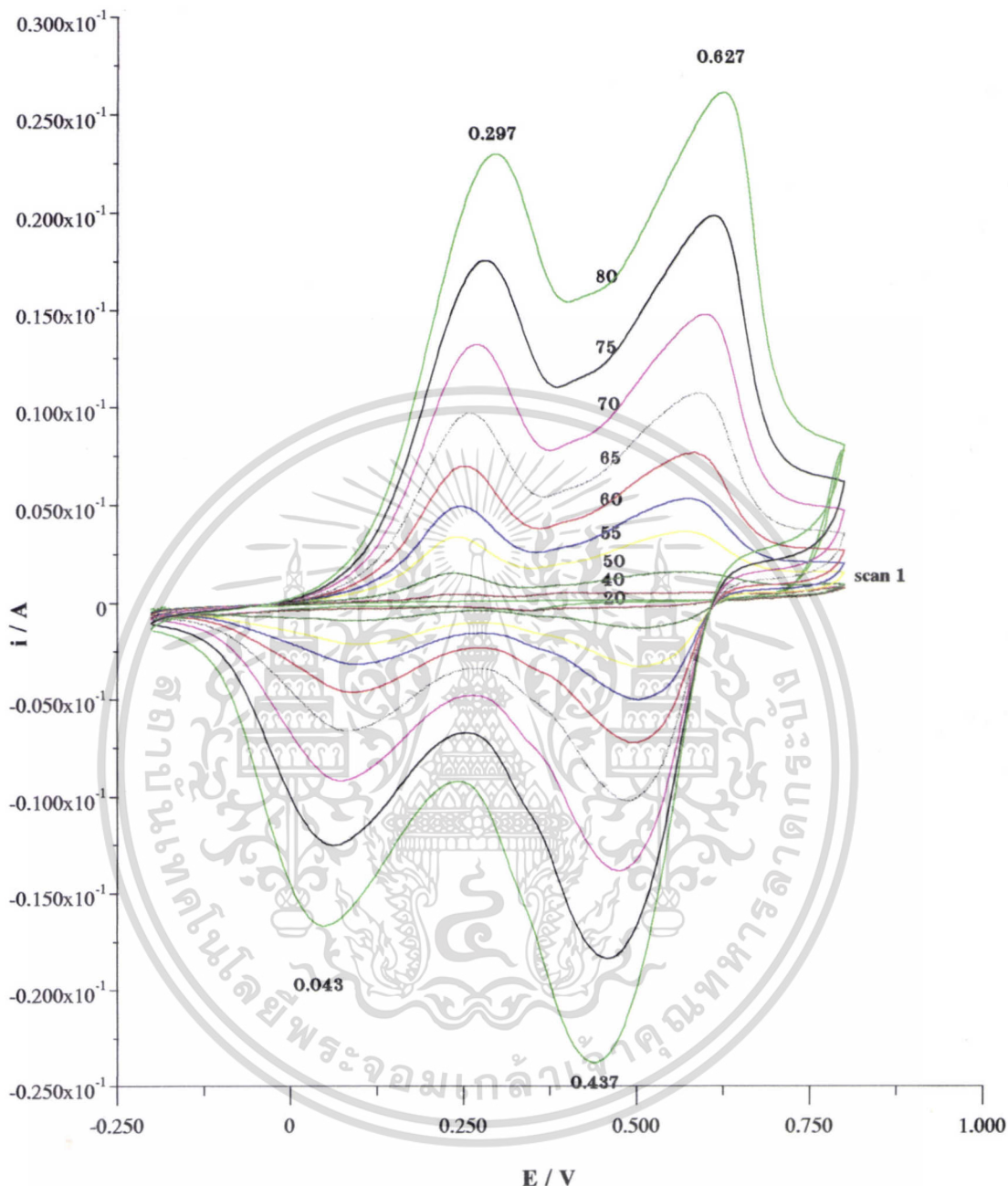
ที่ศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน 0.4 โวลต์ สีของพอลิเมอร์ที่เกาะอยู่ที่แผ่นแพลทินัมที่ขั้วแอโนดจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีเขียว แสดงว่า พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของ Oxidized salt ^(32,33)

ที่ศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันในช่วง 0.51 - 0.62 โวลต์ สีของพอลิเมอร์ที่เกาะอยู่ที่แผ่นแพลทินัมที่ขั้วแอโนดจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำเงินเข้ม นั่นแสดงว่า พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของ Oxidized amine ^(32,33)

ลักษณะโครงสร้างของ Poly (o-toluidine)

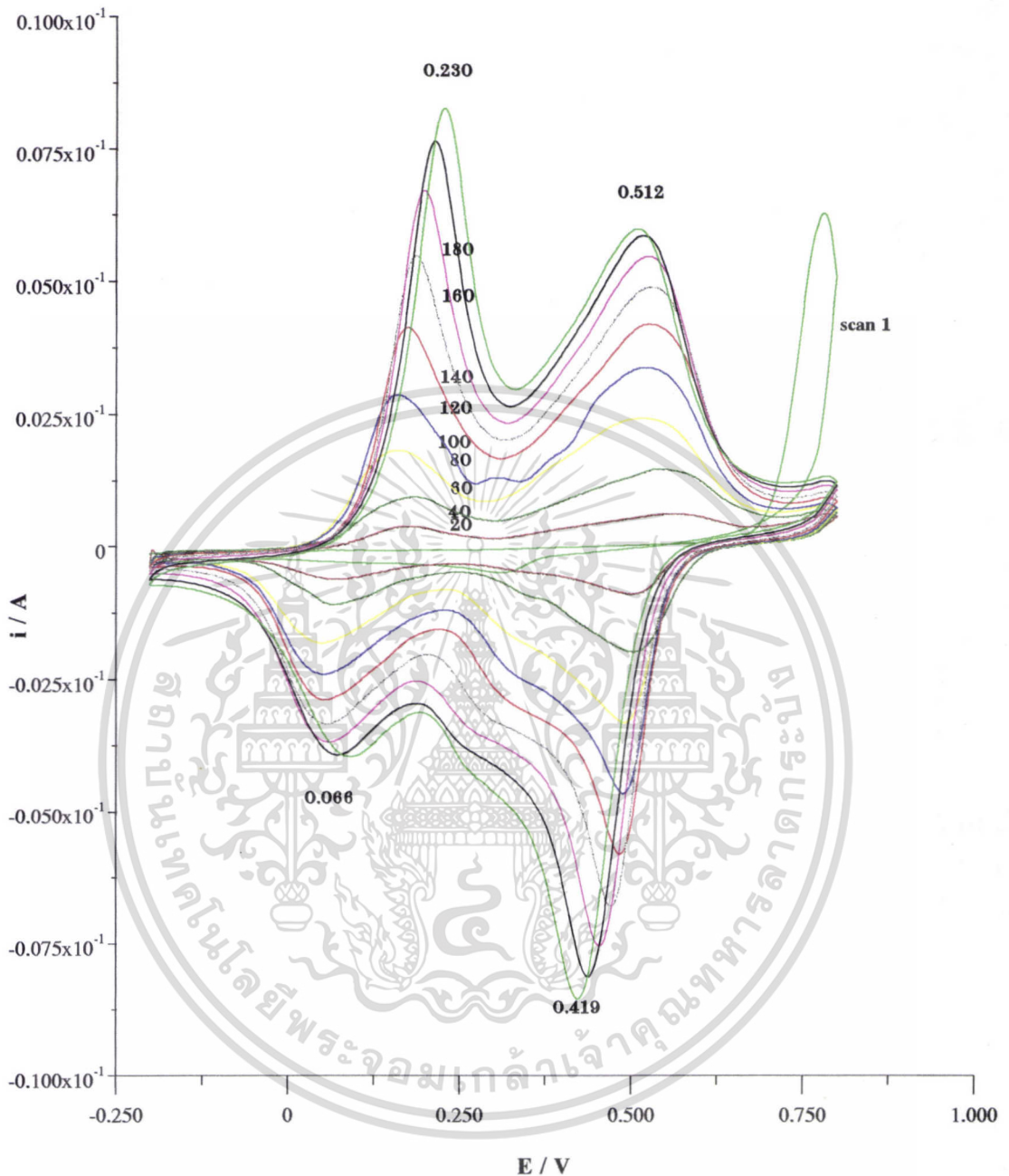


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



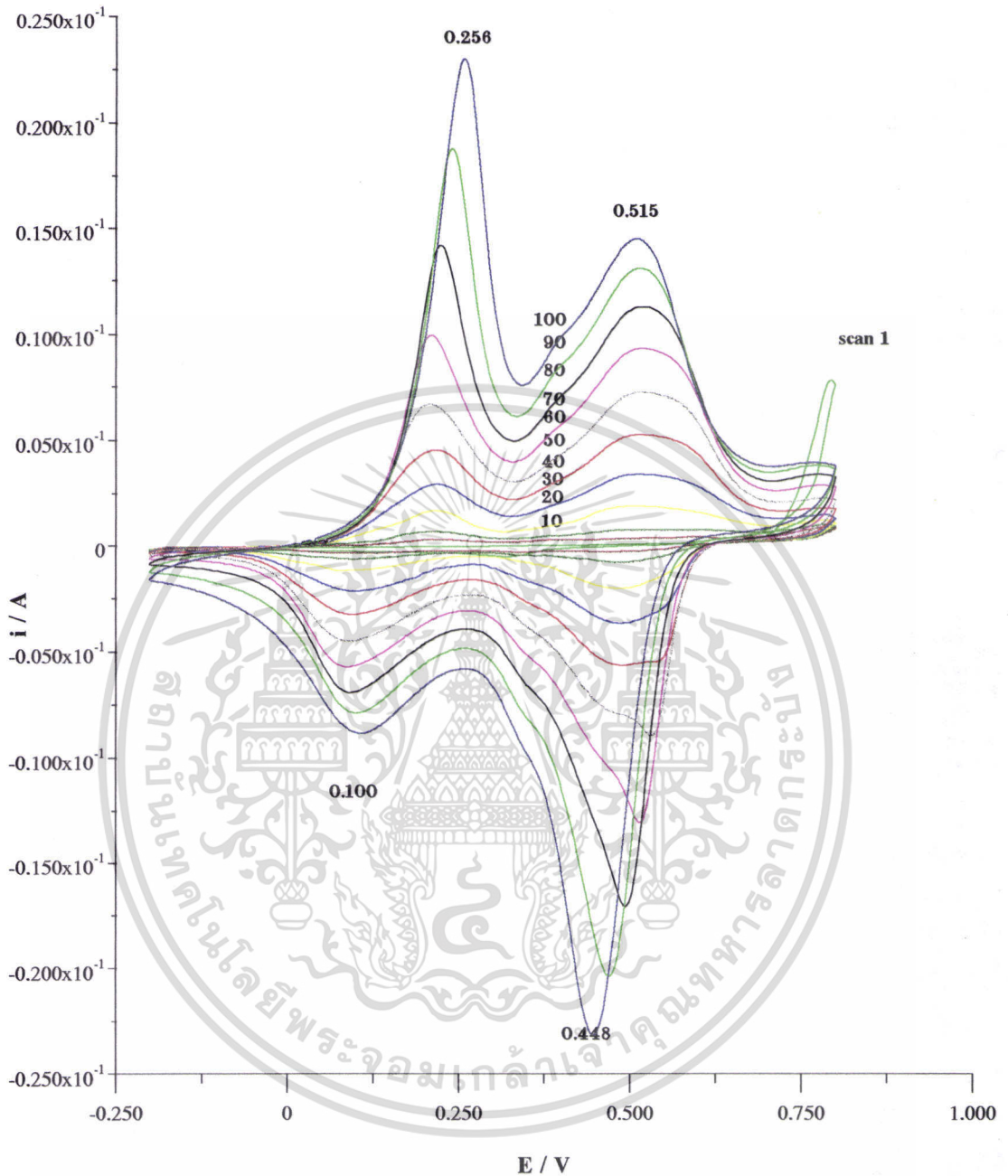
รูปที่ 4.21 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ *Poly(o-toluidine)* ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย *o-toluidine* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ ตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย Scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



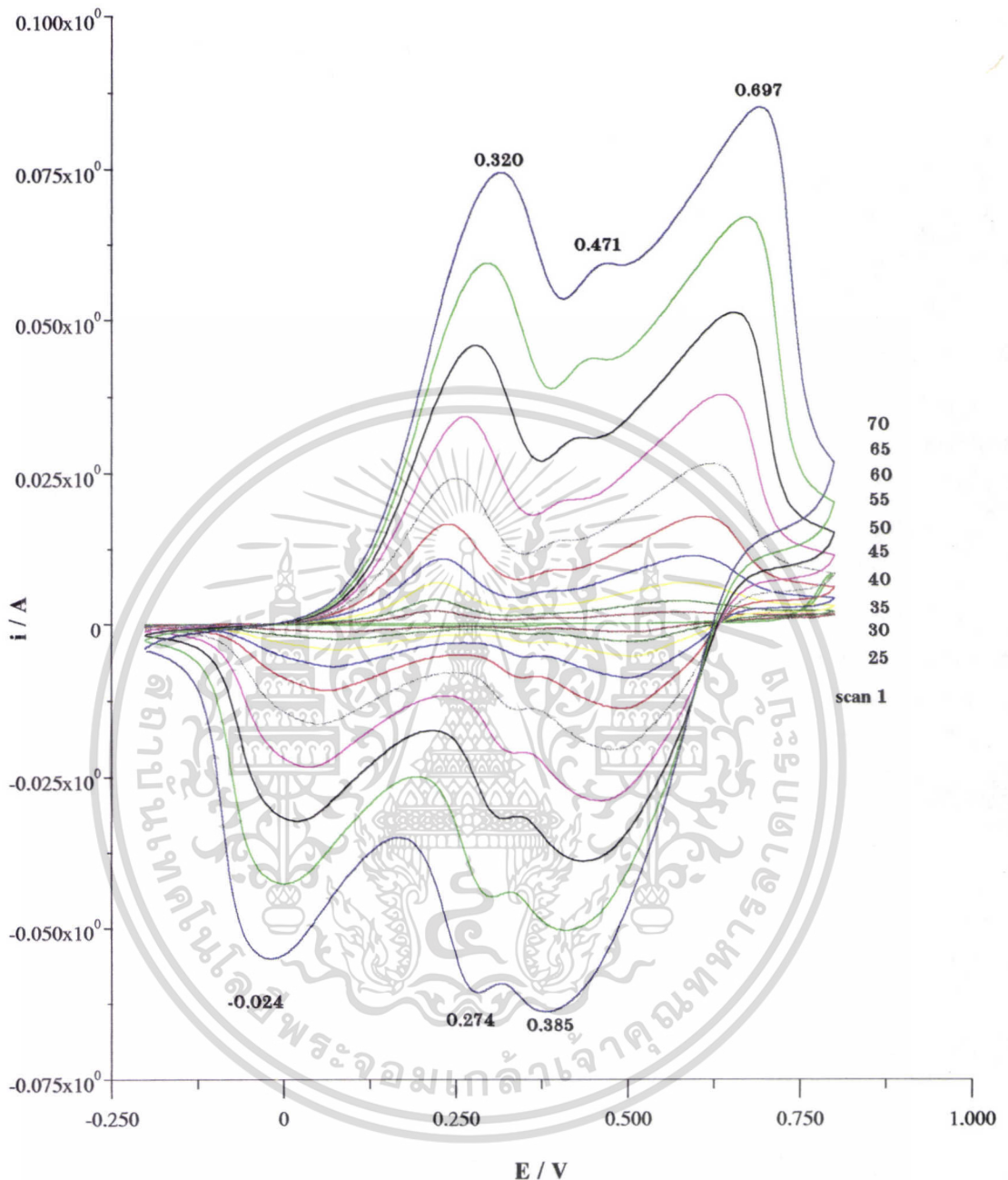
รูปที่ 4.21 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ *Poly(o-toluidine)* ด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย *o-toluidine* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดเปอร์คลอริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ ตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย Scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ *Poly(o-toluidine)* ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย *o-toluidine* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดไนตริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ ตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย Scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดง Cyclic voltammograms ที่ได้จากการสังเคราะห์ *Poly(o-toluidine)* ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลาย *o-toluidine* เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 1.0 โมลาร์ โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบ ตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย Scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกันด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

เมื่อพิจารณาจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการ dope ต่างชนิดกันในการสังเคราะห์พอลิเมอร์พบว่า ลักษณะของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นที่แผ่นแพลทินัมอิเล็กโทรดที่ใช้กรดซัลฟิวริก กรดไนตริกและกรดเปอร์คลอริกนั้นมีลักษณะไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือ พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวอย่างแน่นอนหนากระจ่ายตัวอยู่ตลอดทั้งแผ่นอิเล็กโทรด ในขณะที่เมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการ dope พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะโครงสร้างไม่แตกต่างไปจากพอลิเมอร์ที่เกิดจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดอื่นที่ทำการศึกษา แต่จะมีการจัดเรียงตัวไม่หนาแน่นเท่ากับพอลิเมอร์ที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ตัวอื่นที่ใช้ในการสังเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่ได้จากการ dope ด้วยกรดต่างชนิดกัน สามารถเรียงลำดับการกระจายตัวของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นได้เหมือนกันดังนี้ คือ พอลิเมอร์ที่เกิดจากการใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั้งแผ่นแพลทินัม มีรอยแตกแยกเล็กน้อย กรดไนตริก กรดเปอร์คลอริกและกรดไฮโดรคลอริกตามลำดับ

จาก Scanning Electron Micrographs ทางด้านข้างของแผ่นแพลทินัมอิเล็กโทรด เพื่อดูลักษณะการเกิดของพอลิเมอร์ออกจากแผ่นแพลทินัมและการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ภายใน จะสังเกตเห็นว่า พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นนั้นพุ่งออกจากพื้นผิวที่เรียบของแผ่นแพลทินัมในแนวตั้งจากกับแผ่นอิเล็กโทรดและลักษณะพอลิเมอร์ที่ด้านข้างมีส่วนคล้ายกับที่เห็นจากด้านบน

เปรียบเทียบลักษณะวิทยา (Morphology) ของพอลิเมอร์ทั้ง 3 ประเภทที่ได้จากการ dope ด้วยกรดไนตริกที่กล่าวข้างยาดเดียวกัน พบว่า ลักษณะของพอลิเมอร์ได้มีการจับตัวเป็นฟองน้ำ (sponge) เหมือนกัน ⁽³⁸⁾ แต่การกระจายตัวของพอลิเมอร์ที่เกิดและขนาดของพอลิเมอร์แตกต่างกันตามชนิดของมอนอเมอร์ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- สามารถจัดลำดับการกระจายตัวของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นบนแผ่นแพลทินัมอิเล็กโทรดจากมากไปหาน้อย ได้ดังนี้ Polyaniline , Poly (N-methylaniline) และ Poly (o-toluidine)
- ลำดับของขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ที่ได้เรียงจากขนาดอนุภาคใหญ่ไปเล็ก ได้ดังนี้ Polyaniline, Poly (o-toluidine) และ Poly (N-methylaniline) ตามลำดับ

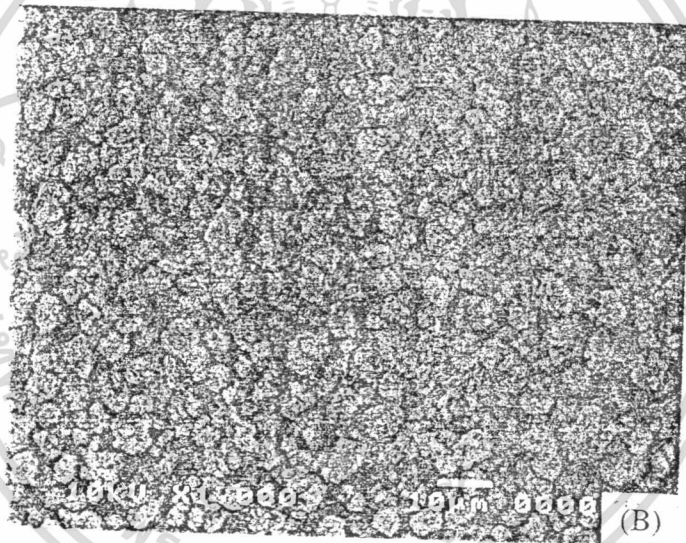
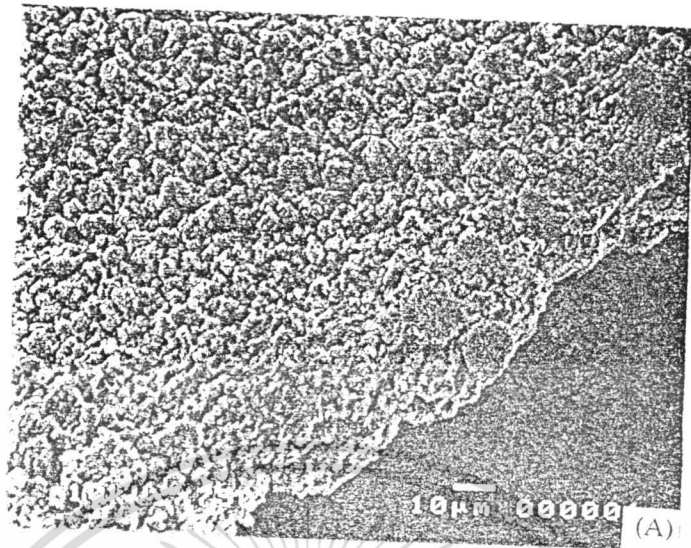
ในทำนองเดียวกันถ้าเปรียบเทียบลักษณะวิทยาของพอลิเมอร์ที่ได้จากการ dope ด้วยกรดซัลฟิวริก ลำดับของการกระจายตัวของพอลิเมอร์บนแผ่นแพลทินัมจะเหมือนกับผลของการสัง-

เคราะห์พอลิเมอร์ที่ใช้กรดไนตริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ แต่ไม่สามารถเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคได้ เนื่องจากอนุภาคของ Polyaniline และ Poly (N-methylaniline) ที่ได้มีการยึดเกาะกันอย่างแน่นหนา

ถ้าเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่ได้จากการ dope ด้วยกรดเปอร์คลอริก พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่ dope ด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดอื่น ๆ ลำดับของการกระจายตัวของพอลิเมอร์บนแผ่นแพลทินัมจะเหมือนกับผลของการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ใช้กรดไนตริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ แต่ลำดับของขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ที่ได้เรียงจากขนาดอนุภาคใหญ่ไปเล็ก ได้ดังนี้ Polyaniline, Poly (N-methylaniline) และ Poly (o-toluidine) ตามลำดับ

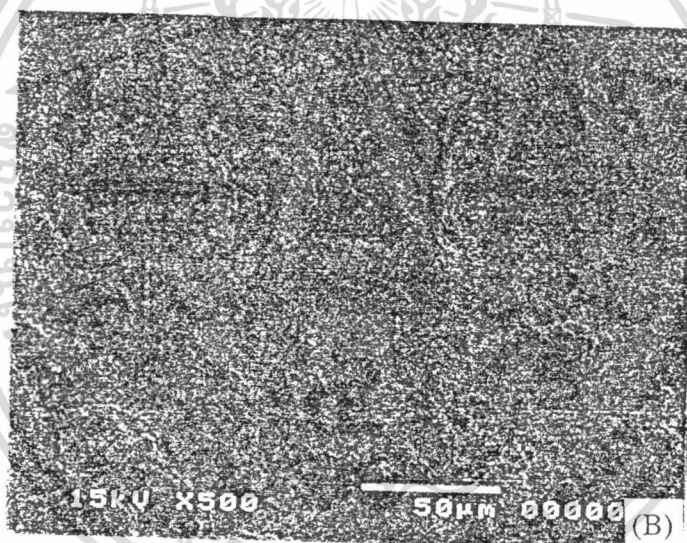
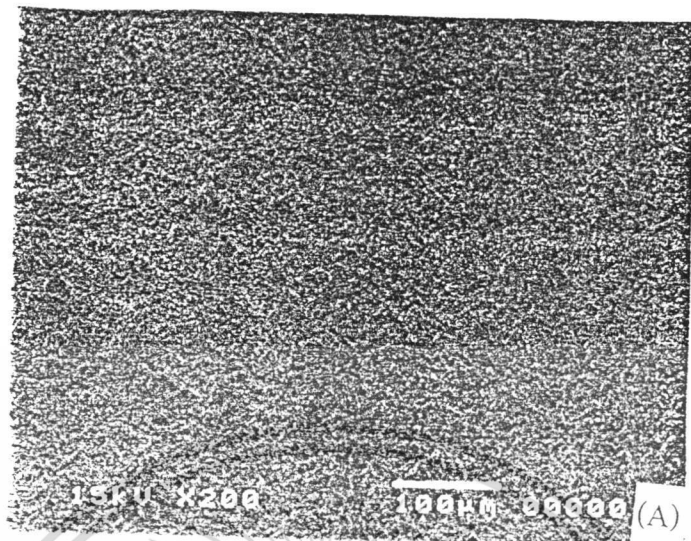
ในขณะที่การกระจายตัวของพอลิเมอร์บนแผ่นแพลทินัม (จากมากไปน้อย) และขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้น (จากใหญ่ไปเล็ก) เมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีการเรียงลำดับที่เหมือนกันดังนี้ Polyaniline, Poly (N-methylaniline) และ Poly (o-toluidine) ตามลำดับ

หมายเหตุ การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่ได้ด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) พอลิเมอร์ที่นำมาตรวจสอบสัณฐานวิทยาใช้จำนวนรอบในการสังเคราะห์ที่แตกต่างกันไป ดังนั้น การเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ที่ได้และการกระจายตัวของพอลิเมอร์จะคำนึงถึงจำนวนรอบที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดนั้น ๆ ด้วย



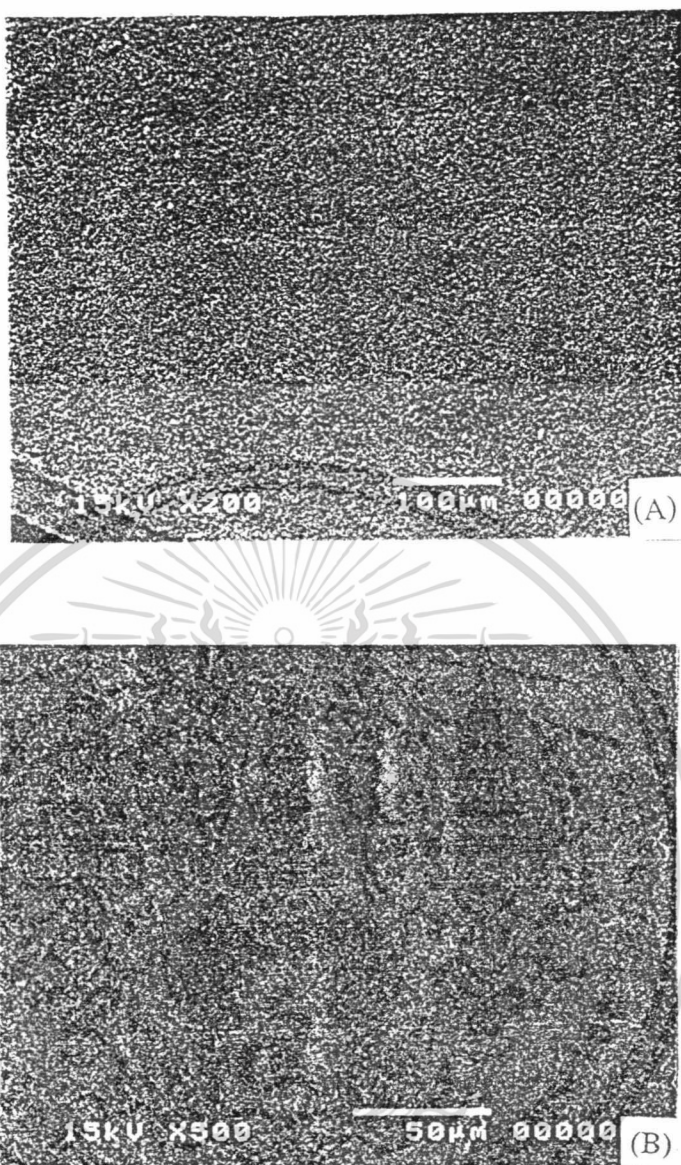
รูปที่ 4.25 แสดง Scanning electron micrographs ของ *Polyaniline* บนแผ่นพอลิไมด์ฟิล์มที่ได้ออกมาจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 1.05 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 9 รอบ : (A) กำลังขยาย 750 เท่า และ (B) กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



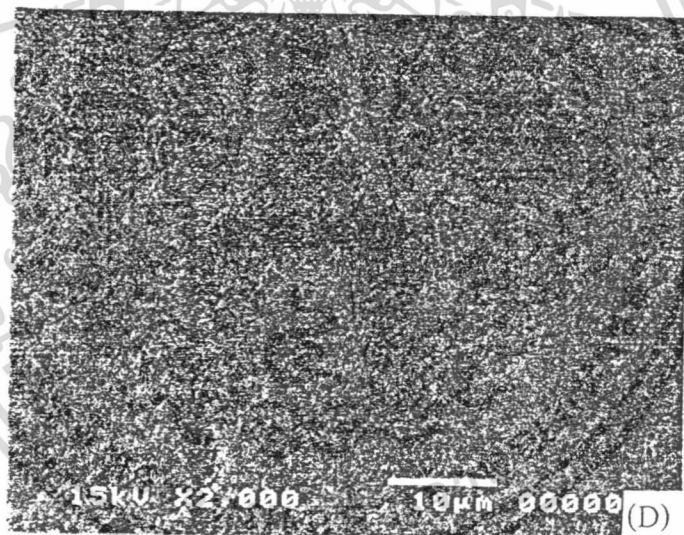
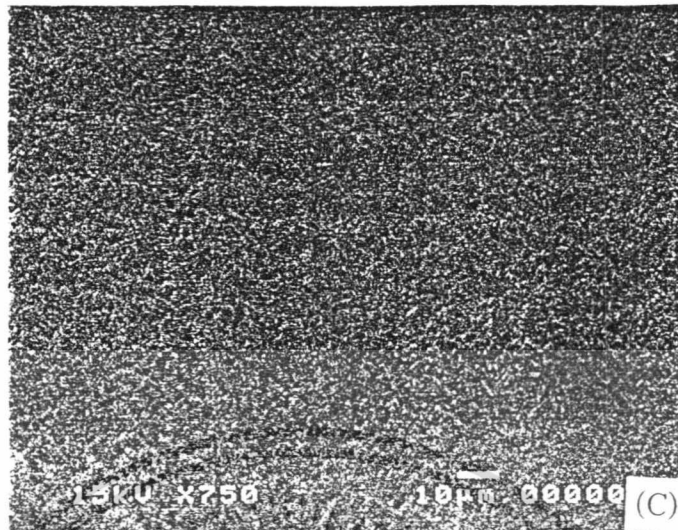
รูปที่ 4.26 แสดง Scanning electron micrographs ของ *Polyaniline* บนแผ่นพอลิอิมิดที่ผลิตจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดเปอร์คลอริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 1.05 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 9 รอบ : (A) กำลังขยาย 200 เท่า และ (B) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



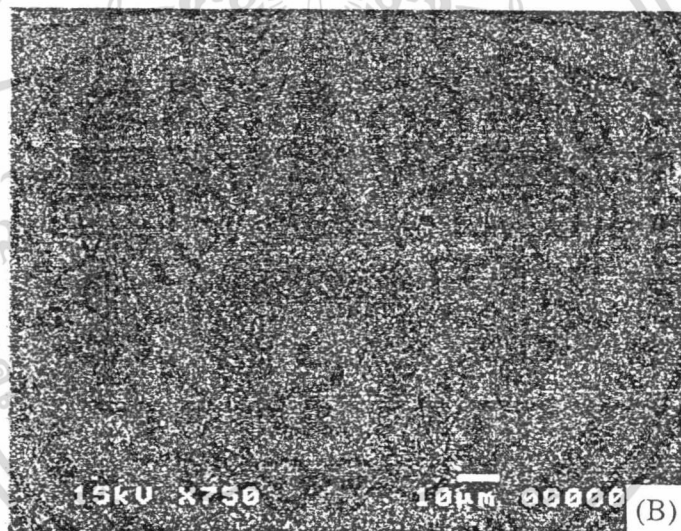
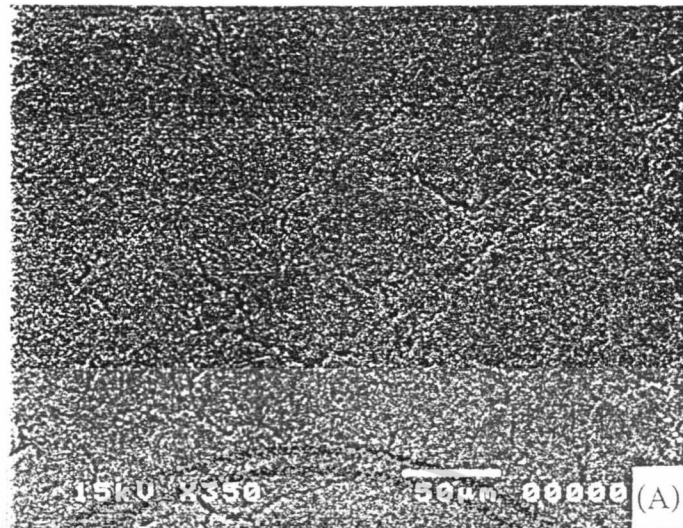
รูปที่ 4.27 แสดง Scanning electron micrographs ของ *Polyaniline* บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดไนตริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 1.05 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 10 รอบ : (A) กำลังขยาย 200 เท่า และ (B) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



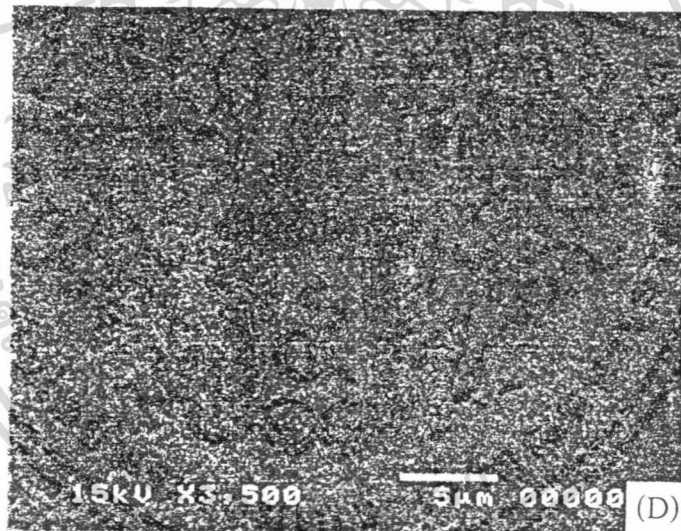
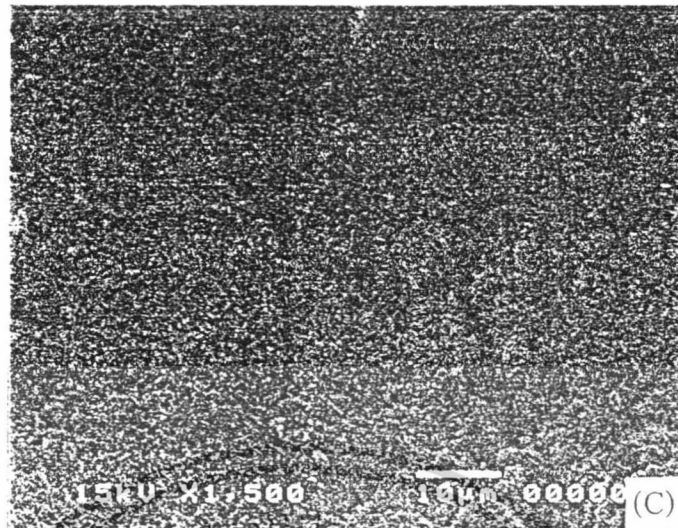
รูปที่ 4.27 (ต่อ) แสดง Scanning electron micrographs ของ *Polyaniline* บนแผ่นแพลทินัม-ฟอยล์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายกรดไนตริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 1.05 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 10 รอบ : (C) กำลังขยาย 750 เท่า และ (D) กำลังขยาย 2000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



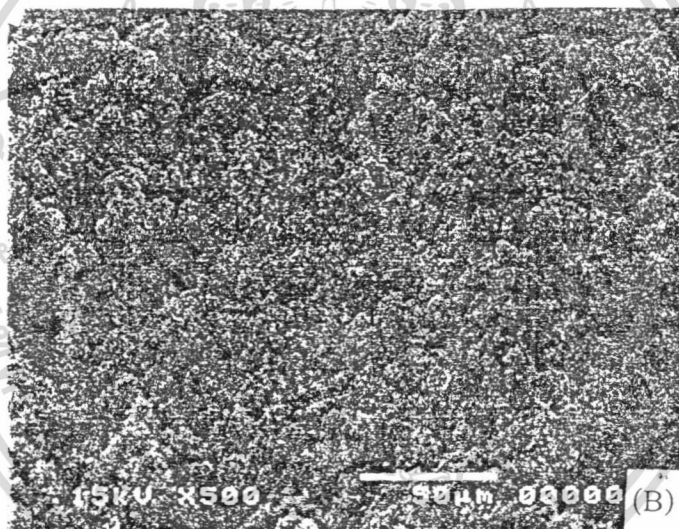
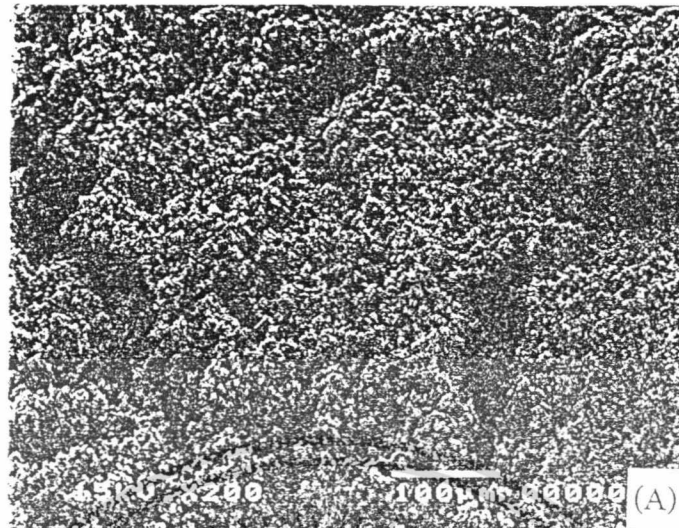
รูปที่ 4.28 แสดง Scanning electron micrographs ของ *Polyaniline* บนแผ่นเพลทินัมฟอยล์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดซัลฟิวริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 1.05 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 7 รอบ : (A) กำลังขยาย 350 เท่า และ (B) กำลังขยาย 750 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



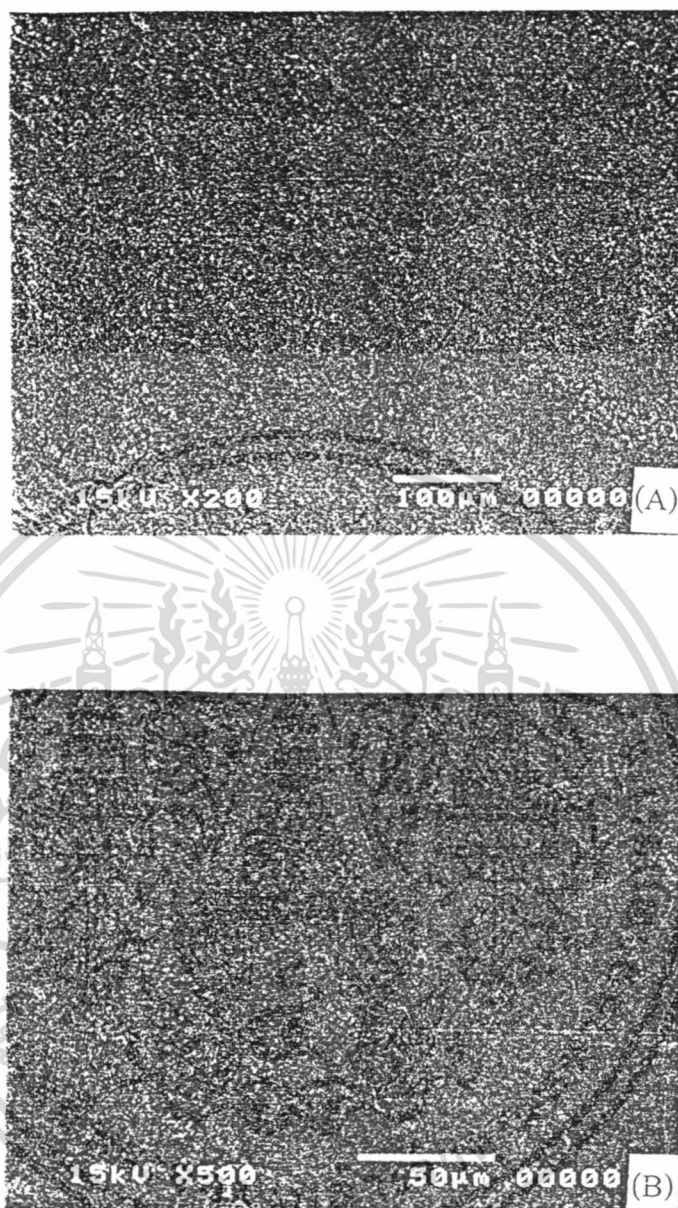
รูปที่ 4.28 (ต่อ) แสดง Scanning electron micrographs ของ *Polyaniline* บนแผ่นแพลทินัม-ฟอยล์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ในสารละลายกรดซัลฟิวริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 1.05 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 7 รอบ : (C) กำลังขยาย 1500 เท่า และ (D) กำลังขยาย 3500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



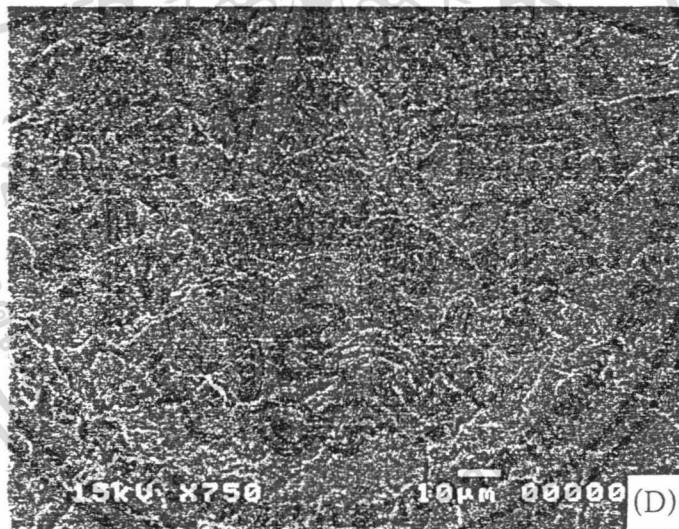
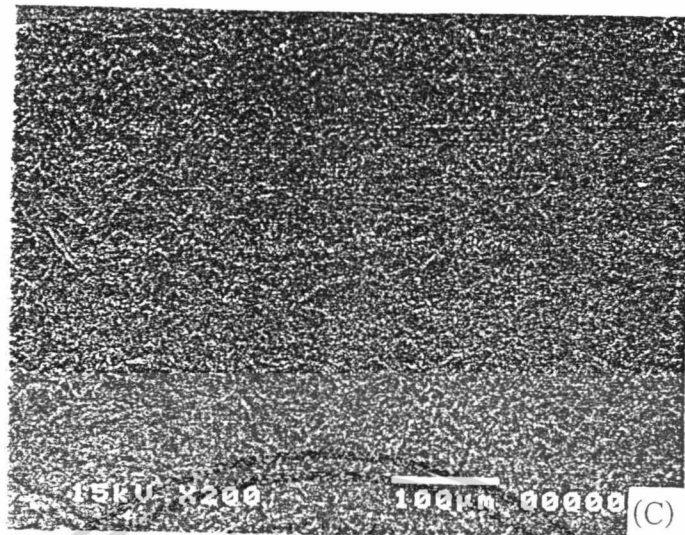
รูปที่ 4.29 แสดง Scanning electron micrographs ของ *Poly(N-methylaniline)* บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 75 รอบ : (A) กำลังขยาย 200 เท่า และ (B) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



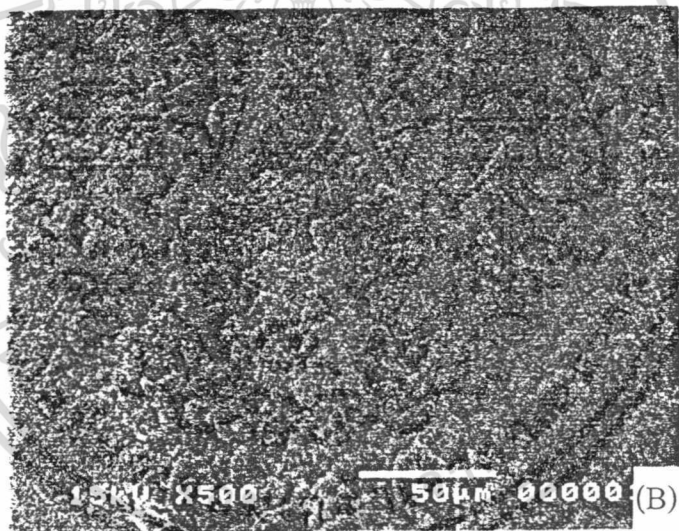
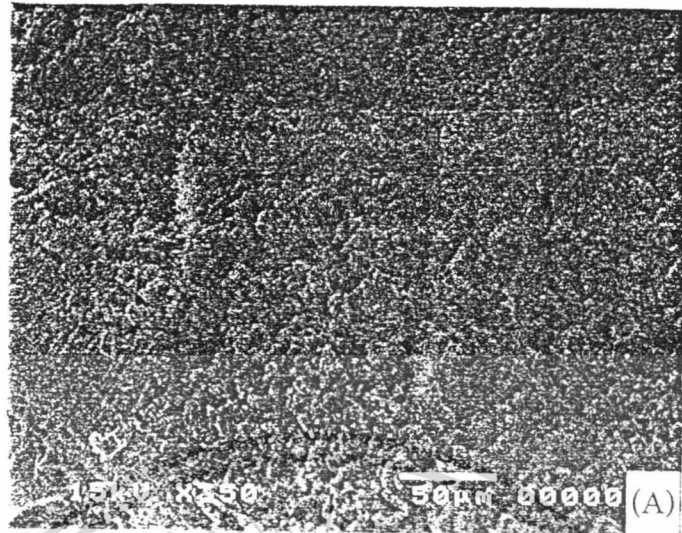
รูปที่ 4.30 แสดง Scanning electron micrographs ของ *Poly(N-methylaniline)* บนแผ่นแกรไฟท์ที่มีพอลิที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดเปอร์คลอริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 70 รอบ : (A) กำลังขยาย 200 เท่า และ (B) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



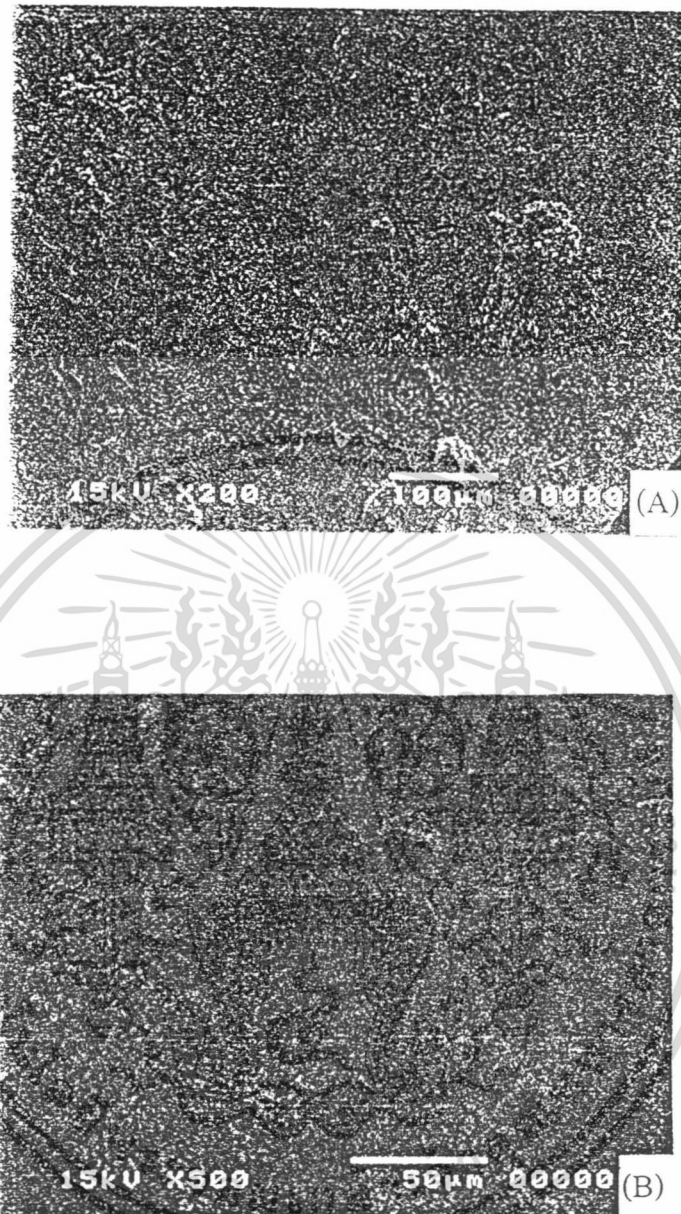
รูปที่ 4.30 (ต่อ) แสดง Scanning electron micrographs ของ *Poly(N-methylaniline)* บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดเปอร์คลอริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 70 รอบ : (C) กำลังขยาย 200 เท่า และ (D) กำลังขยาย 750 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



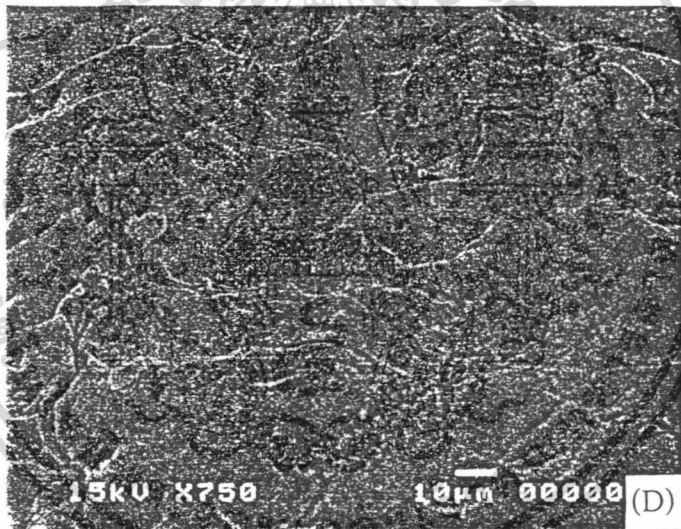
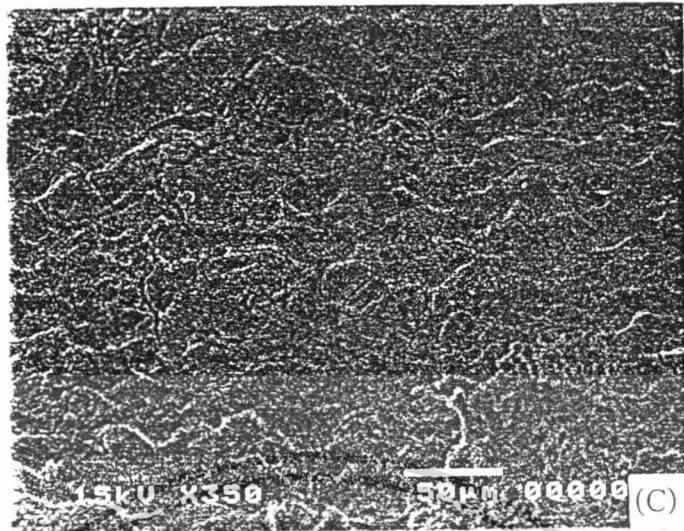
รูปที่ 4.31 แสดง Scanning electron micrographs ของ *Poly(N-methylaniline)* บนแผ่นเพลทินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดไนตริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 150 รอบ : (A) กำลังขยาย 350 เท่า และ (B) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



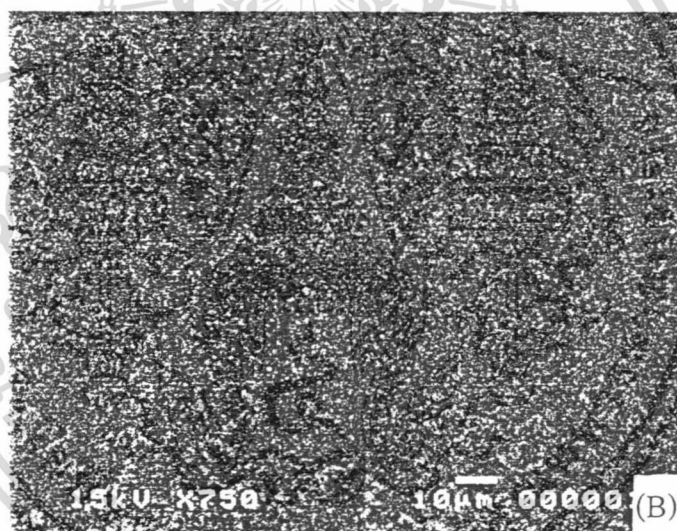
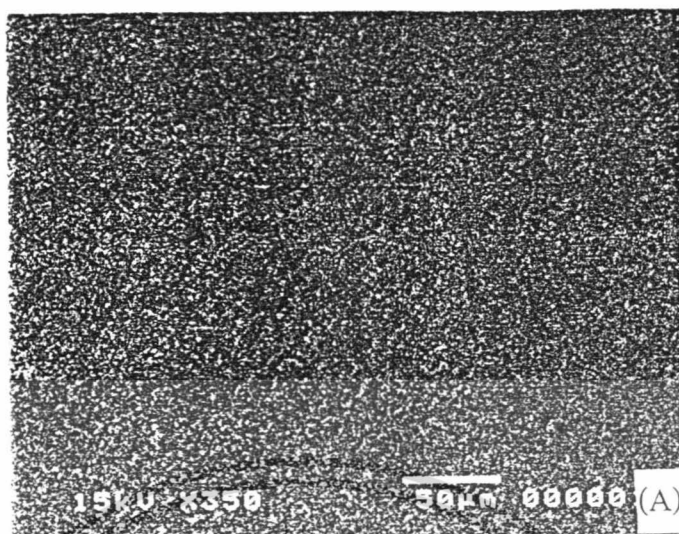
รูปที่ 4.32 แสดง Scanning electron micrographs ของ *Poly(N-methylaniline)* บนแผ่นแพลทินัม ฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดซัลฟิวริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 170 รอบ : (A) กำลังขยาย 200 เท่า และ (B) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



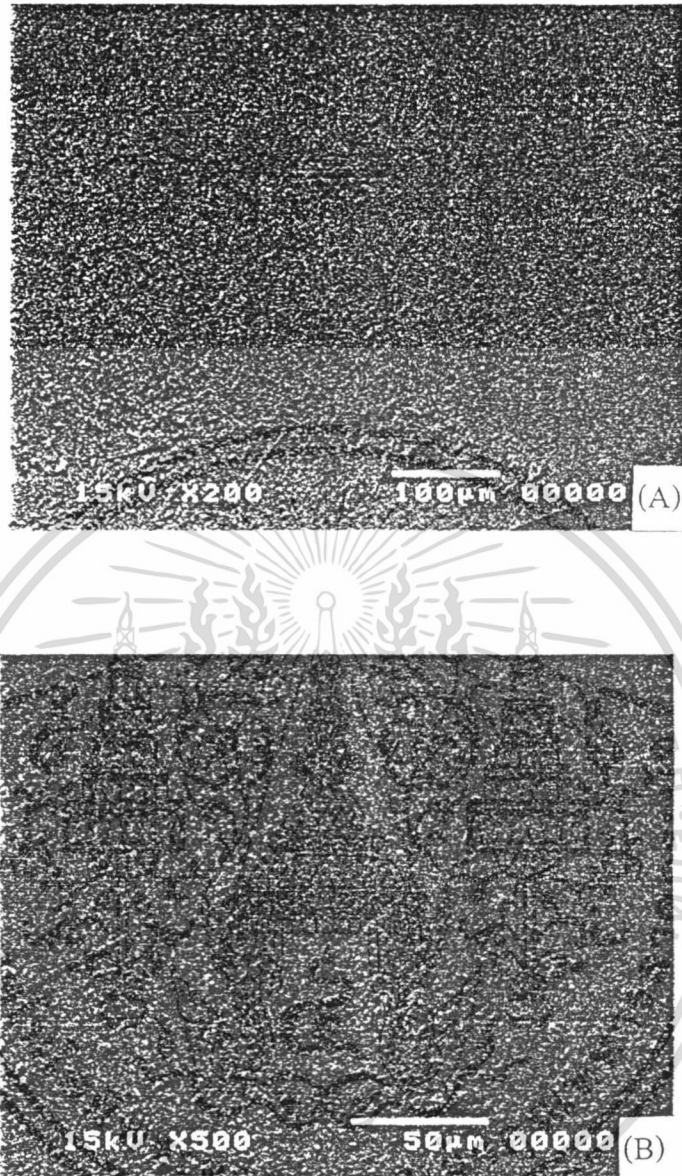
รูปที่ 4.32 (ต่อ) แสดง Scanning electron micrographs ของ *Poly(N-methylaniline)* บนแผ่นแพลตตินัมฟอยล์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลายกรดซัลฟิวริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 170 รอบ : (C) กำลังขยาย 350 เท่า และ (D) กำลังขยาย 750 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



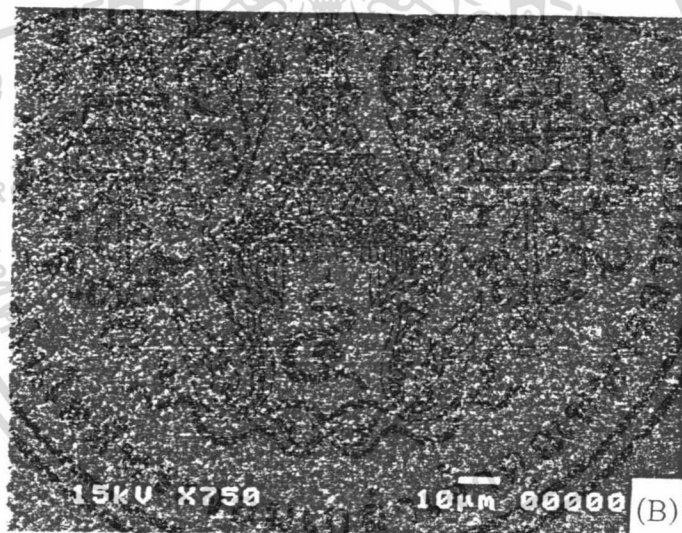
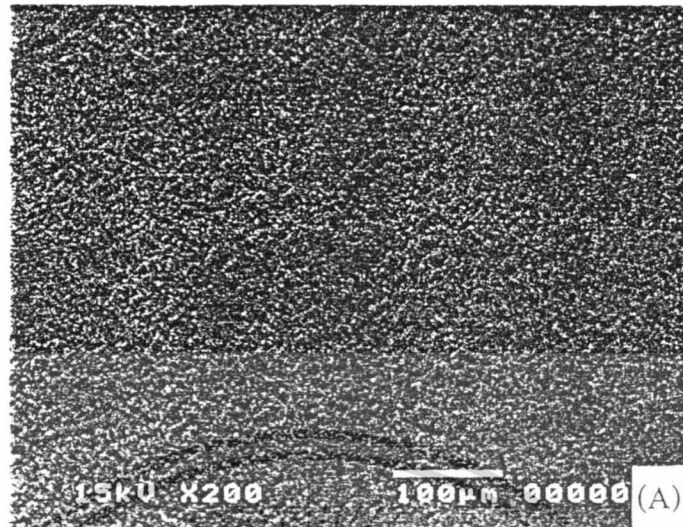
รูปที่ 4.33 แสดง Scanning electron micrographs ของ *Poly(o-toluidine)* บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลาย กรดไฮโดรคลอริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 80 รอบ : (A) กำลังขยาย 350 เท่า และ (B) กำลังขยาย 750 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



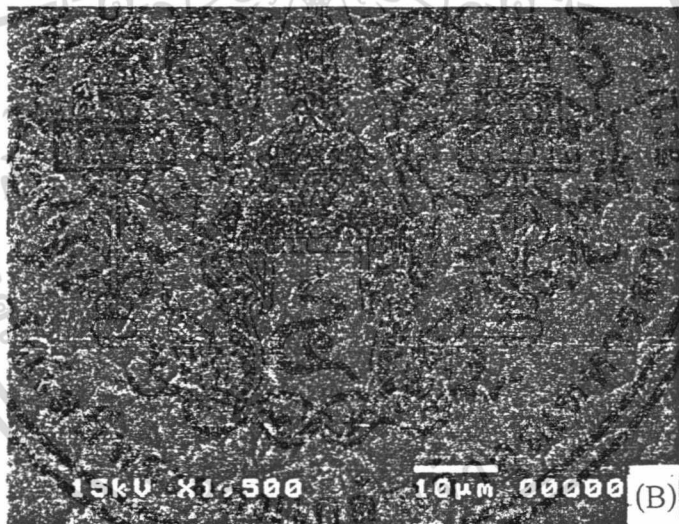
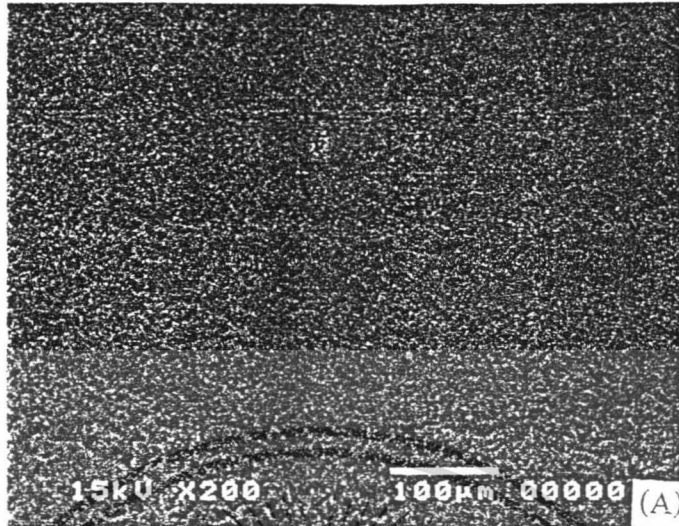
รูปที่ 4.34 แสดง Scanning electron micrographs ของ *Poly(o-toluidine)* บนแผ่นเพลทินัมพอยด์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลาย กรดเปอร์คลอริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 180 รอบ : (A) กำลังขยาย 200 เท่า และ (B) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 แสดง Scanning electron micrographs ของ *Poly(o-toluidine)* บนแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลาย กรดไนตริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 100 รอบ : (A) กำลังขยาย 200 เท่า และ (B) กำลังขยาย 750 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 แสดง Scanning electron micrographs ของ *Poly(o-toluidine)* บนแผ่นแพลทินัมฟอยล์ ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electropolymerization) ใน สารละลาย กรดซัลฟิวริก โดยการป้อนศักย์ไฟฟ้าเป็นรอบตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.80 โวลต์ ด้วย scan rate 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จำนวน 70 รอบ : (A) กำลังขยาย 200 เท่า และ (B) กำลังขยาย 1500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของพอลิแอนิไลน์และอนุพันธ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

เมื่อนำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มาวัดค่าการนำไฟฟ้าโดยใช้เทคนิค four-point probes ได้ค่าการนำไฟฟ้าดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกันดังนี้

พอลิเมอร์	สารละลายอิเล็กโทรไลต์	ค่าความต้านทาน ($\Omega \text{ cm}$)	ค่าเฉลี่ย	ค่าการนำไฟฟ้า (S / cm)
Polyaniline	HCl	0.34, 0.27, 0.36	0.32	3.13
	HClO ₄	0.12, 0.23, 0.26	0.20	5.00
	HNO ₃	0.08, 0.15, 0.20	0.14	7.14
	H ₂ SO ₄	0.13, 0.06, 0.05	0.08	12.50
Poly(N-methylaniline)	HCl	2.77, 3.06, 2.98	2.94	0.34
	HClO ₄	85.2, 124.7, 143.0	117.63	0.01
	HNO ₃	0.70, 0.88, 1.23	0.93	1.08
	H ₂ SO ₄	28.4, 46.8, 68.5	47.9	0.02
Poly(o-toluidine)	HCl	7.17, 8.68, 7.03	7.63	0.13
	HClO ₄	-	-	-
	HNO ₃	1.17, 1.85, 1.68	1.57	0.64
	H ₂ SO ₄	-	-	-

หมายเหตุ สำหรับพอลิเมอร์ที่มีได้แสดงค่าการนำไฟฟ้าเป็นเพราะมีค่าความต้านทานสูงกว่าเครื่องมือจะทำการวัดได้

จากตารางแสดงค่าการนำไฟฟ้าของพอลิแอนิไลน์และอนุพันธ์ที่ได้ พบว่ามีแนวโน้มที่เหมือนกันคือ พอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้กรดซัลฟิวริกเป็นอิเล็กโทรไลต์จะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงที่สุด รองลงมาคือ กรดไนตริก กรดเปอร์คลอริก และกรดไฮโดรคลอริก ตามลำดับ

การที่ค่าการนำไฟฟ้าของ Poly (N-methylaniline) และ Poly (o-toluidine) ที่สังเคราะห์
ได้ในสารละลายกรดเปอร์คลอริกและกรดซัลฟิวริกมีค่าการนำไฟฟ้าที่ผิดไปจากความเป็นจริง
อาจมีสาเหตุมาจาก พอลิเมอร์ดังกล่าวมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งหมดที่ทำการศึกษาที่มีต่อการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้า จากมอนอเมอร์ของ aniline และ o-toluidine จะมีแนวโน้มเหมือนกันคือ เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า จะทำให้เกิดพอลิเมอร์ได้เร็วที่สุด ในขณะที่การสังเคราะห์ Poly (N-methylaniline) ด้วยกรดเปอร์คลอริกจะเกิดพอลิเมอร์ได้เร็วที่สุด

เมื่อนำพอลิเมอร์ทั้งสามชนิดที่ทำการศึกษามาสังเคราะห์ด้วยกรดซัลฟิวริก สามารถเรียงลำดับความเร็วในการเกิดพอลิเมอร์ได้ดังต่อไปนี้ Polyaniline, Poly (o-toluidine) และ Poly (N-methylaniline) ตามลำดับ

ข้อมูลที่ได้จาก FTIR ทำให้ได้ข้อสรุปว่า พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นน่าจะมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน เนื่องจาก มอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์นั้นมีหมู่โครงสร้างที่คล้ายกัน ต่างกันที่หมู่แทนที่ (หมู่ $-CH_3$) และโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ได้จากการ dope ด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกัน จะมีแอนไอออนิกของอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ dope ปรากฏอยู่ด้วย

ภาพ Scanning Electron Micrographs ของพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกันจะมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (sponge-like)^(38) เหมือนกัน ต่างกันที่การกระจายตัวของพอลิเมอร์บนแผ่นอิเล็กโทรดเท่านั้น ทั้งนี้จะมีสาเหตุมาจากชนิดของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์และผลของแอนไอออนที่มีอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการ dope

จากตารางแสดงค่าการนำไฟฟ้าของพอลิแอนิลินและอนุพันธ์ที่ได้ พบว่ามีแนวโน้มที่เหมือนกันคือ พอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้กรดซัลฟิวริกเป็นอิเล็กโทรไลต์จะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงที่สุด รองลงมาคือ กรดไนตริก กรดเปอร์คลอริกและกรดไฮโดรคลอริก ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่าการนำไฟฟ้าของ Poly (N-methylaniline) และ Poly (o-toluidine) ที่สังเคราะห์ได้ในสารละลายกรดเปอร์คลอริกและกรดซัลฟิวริกมีค่าการนำไฟฟ้าที่ผิดไปจากความเป็นจริง อาจมีสาเหตุมาจาก พอลิเมอร์ดังกล่าวมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของความเข้มข้นของสารละลาย supporting electrolyte ที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า
2. ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดต่อการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า
3. ควรทำการศึกษาคุณสมบัติด้านอื่นของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ เช่น คุณสมบัติทางด้านเชิงกล ความคงทนต่อความร้อน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่นต่อไป
4. ในการทดลองครั้งต่อไปควรใช้สารละลาย supporting electrolyte ที่ไม่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เพื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเกิดของพอลิเมอร์ และค่าการนำไฟฟ้ากับผลของสารละลาย supporting electrolyte ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย

ภาคผนวก ก
ความถี่ย่านรังสี IR

ตารางที่ 1 แสดงความถี่ย่านรังสี IR ที่เป็นลักษณะพิเศษของหมู่ฟังก์ชันบางหมู่

ความถี่ (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
810	$\text{R}_2\text{C} = \text{CHR}$ (การงอออกนอกระนาบ)
1160	$(\text{CH}_3)_2\text{CH}$
1250	CH_2 หรือ CH_3 หลายหมู่
1475 และ 1380	CH_3
1475	CH_2
2950	C - H , CH_2 และ CH_3
3050	= C - H
675 - 870 (ความเข้มสูง)	aromatic (การงอออกนอกระนาบของ C - H)
1667 - 2000 (ความเข้มต่ำ)	aromatic ที่มีวง benzene
1000 - 1100	aromatic (การงอในระนาบของ C - H)
1500 - 1600	aromatic (การยืด C — C)
3000 - 3100	aromatic (การยืด C - H)
690 - 710 , 730 - 770	มีหมู่แทนที่หมู่เดียว (monosubstituted)
735 - 770	มีหมู่แทนที่ 2 หมู่แบบออร์โธ (o - disubstituted)
690 - 710, 750 - 810	มีหมู่แทนที่ 2 หมู่แบบเมตา (m - substituted)
810 - 840	มีหมู่แทนที่ 2 หมู่แบบพารา (p - substituted)
3200 - 3500	การยืด N - H การงอ N - H
650 - 900 (กว้าง) ,	1° amine
1590 - 1650	
1550 - 1650 (ความเข้มต่ำ)	2° amine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 (ต่อ) แสดงความถี่ย่านรังสี IR ที่เป็นลักษณะพิเศษของหมู่ฟังก์ชันบางหมู่

ความถี่ (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
1020 - 1220 (ความเข้มต่ำ)	<u>การยืด C - N</u> aliphatic
1180 - 1360 (ความเข้มสูง)	aromatic
1250 - 1340	1° amine
1280 - 1350	2° amine
1310 - 1360	3° amine

* จาก วิชัย รวีตระกูล, โกศลย์ คูสำราญ, พิเชษฐ์ วิริยะจิตรา, สุรัชชัย นิมิตรวัฒน์ และอภิชาติ สุขสำราญ
หนังสือการประยุกต์สเปกโทรสโกปีในเคมีอินทรีย์ พิมพ์ครั้งที่ 1 หน้า 72-73, 76-77 และ 102-103,
ห.จ.ก. นำอักษร การพิมพ์, กรุงเทพฯ, 2526.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงความถี่ย่านรังสี IR ที่เป็นลักษณะพิเศษของแอนไอออนิกที่ใช้เป็นสารละลาย
อิเล็กโทรไลต์

ความถี่ (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
625 (ความเข้มปานกลาง)	SO_4^{2-}
1140, 1090, 630 (ความเข้มสูง)	ClO_4^-
1175 - 1120 (ความเข้มสูง)	SO_4^{2-}
1424 - 1320 (ความเข้มสูง)	NO_3^-

* จาก อุดม ก๊กผล, โสภณ เรืองสำราญ และอมร เพชรสม หนังสืออินทรีย์เคมี I, พิมพ์ครั้งที่ 4, หน้า 328 - 329, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

และ Ohsaka, T., Ohnuki, Y. and Oyama, N. " IR Absorbtion Spectroscopic Identification of Electroactive and Electroinactive Polyaniline films Prepared by the Electrochemical Polymerization of Aniline. " *J. Electroanal. Chem.* 161 (1984) : 399-405.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่าการนำไฟฟ้า

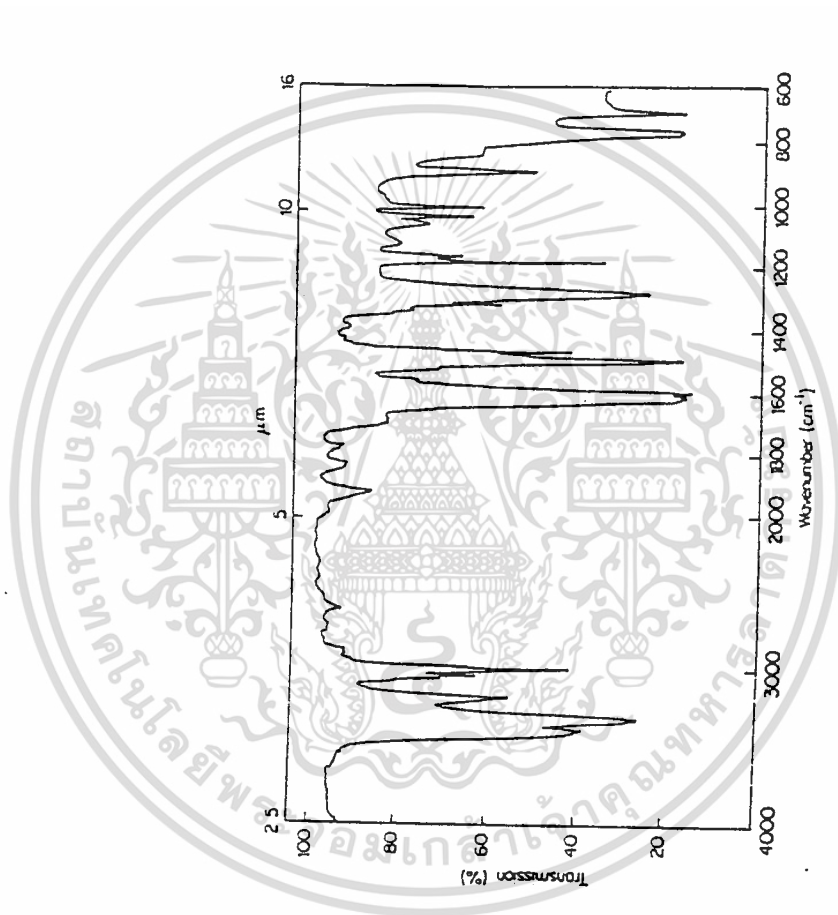
ตารางที่ 1 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของพอลิแอนิลินและอนุพันธ์

[มอนอเมอร์] (M)	[อิเล็กโทรไลต์] (M)	ค่าการนำไฟฟ้า (S / cm)
0.5 M aniline ⁽¹⁾	1.0 M H ₂ SO ₄	5.0
0.5 M o-toluidine	1.0 M H ₂ SO ₄	0.3
0.5 M aniline ⁽²⁾	0.5 M H ₂ SO ₄	15.0
1.0 M N-methylaniline	1.0 M H ₂ SO ₄	2.09 x 10 ⁻²
0.1 M aniline ⁽³⁾	1.0 M HCl	1.0 x 10 ⁻³
	1.0 M HClO ₄	1.3
	1.0 M HNO ₃	3.4
	1.0 M H ₂ SO ₄	8.3

หมายเหตุ [มอนอเมอร์] คือ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์

- (1) จาก Leclerc, M., Guay, J. and Dao, L. H. " Synthesis and Characterization of Poly (alkyilanilines)." *Macromolecules* 22 (1989) : 649-653.
- (2) จาก Watanabe, A., Mori, K., Iwabuchi, A., Iwasaki, Y. and Nakamura, Y. " Electrochemical Polymerization of Aniline and N-Alkylanilines. " *Macromolecules* 22 (1989) : 3521-3525.
- (3) จาก Duic, L., Mandic, Z. and Kovacicek, F. " The Effect of Supporting Electrolyte on the Electrochemical Synthesis, Morphology, and Conductivity of Polyaniline. " *J. Polym. Sci. : Part A : Polymer Chemistry* 32 (1994) : 105-111.

ภาคผนวก ค
สเปกตรา

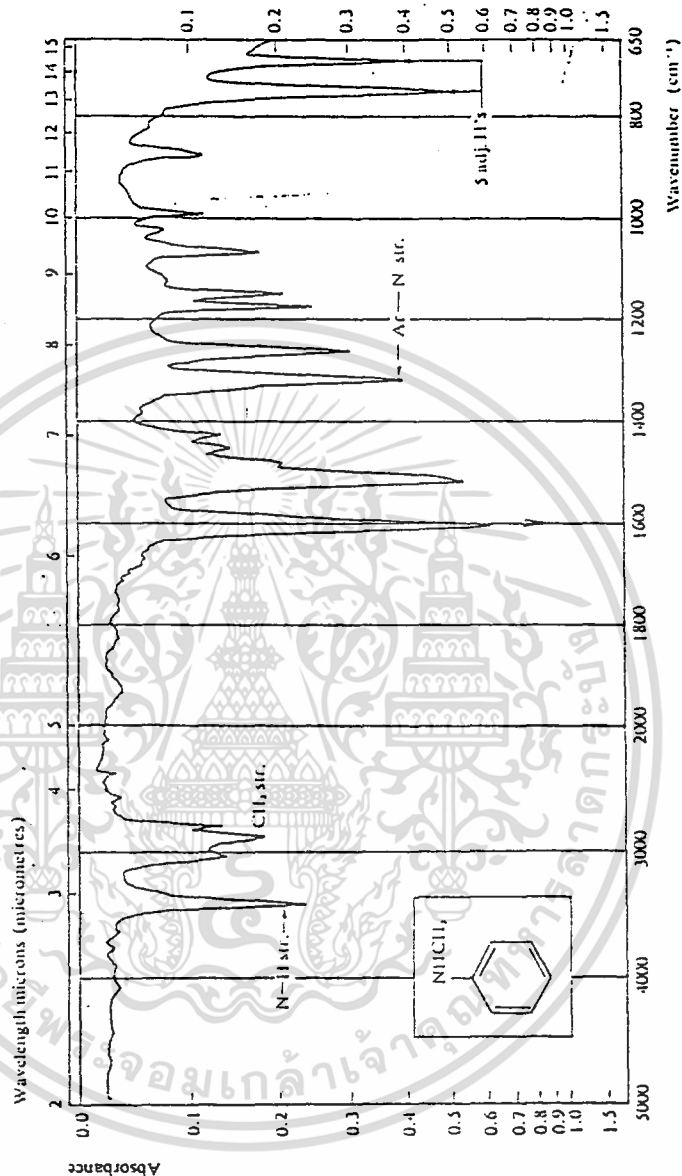


รูปที่ 1 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของแอนิลิน

* จาก Brown, D. W., Floyd, A. J. and Sainsbury, M. in *Organic Spectroscopy*, pp. 42, John Wiley & Sons,

1988.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

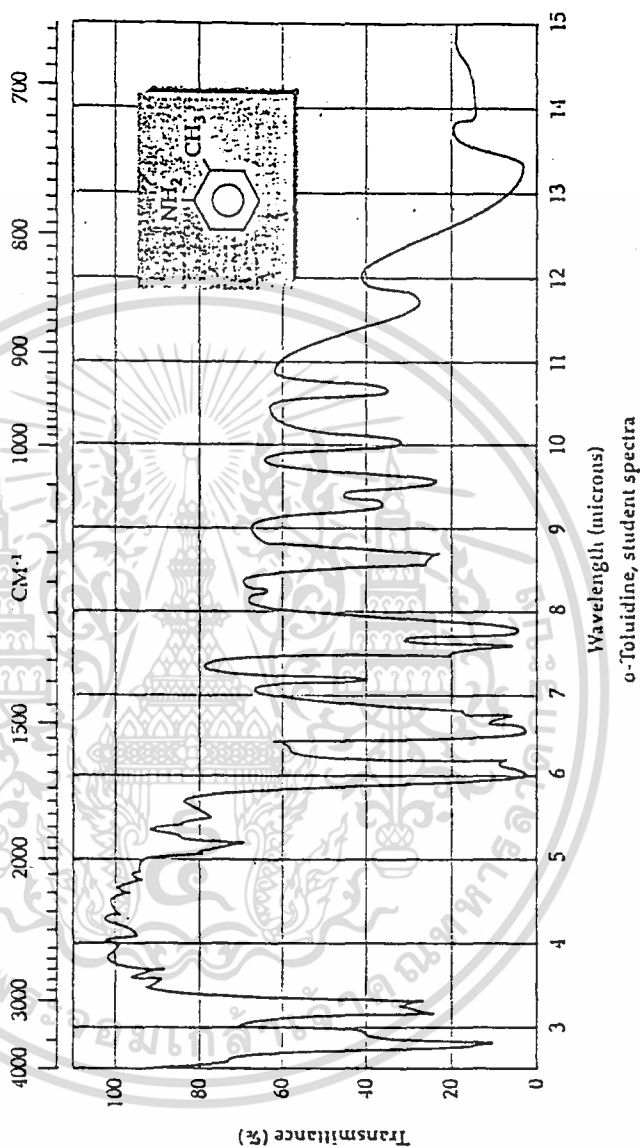


รูปที่ 2 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ N-methylaniline

* จาก Israel, V. A. in Vogel's Textbook of Practical Organic Chemistry, 4 th ed., pp. 978. English

Language Book Society / Longman, 1986.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ o-toluidine

* จาก Campbell Jr, B. N. and Ali, M. M. in Organic Chemistry Experiments Microscale & semi - microscale, pp. 189, Brook / Cole Publishing Company, California, 1994.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. " มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกรดซัลฟิวริก สำหรับแบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด." มอก. 13-2530, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, 2530.
2. Skothein, T. A. in *Handbook of Conducting Polymers*, Vols 1 and 2, Dekker, NewYork, 1986.
3. Kitani, A., Kaya, M. and Sasaki, K. " Performance Study of Aqueous Polyaniline Batteries. " *J. Electrochem. Soc.* 133 (1986) : 1069-1079.
4. a) Osaka, T., Naoi, K., Oagano, S. and Nagamura, S. " Electrochemical Polymerization of Electroactive Polyaniline in Nonaqueous Solution and Its Application in Rechargeable Lithium Batteries. " *Chem. Lett.* (1987) : 1986 (1987).
b) Osaka, T., Naoi, K., Oagano, S. and Nagamura, S. " Electrochemical Polymerization of Electroactive Polyaniline in Nonaqueous Solution and Its Application in Rechargeable Lithium Batteries. " *J. Electrochem. Soc.* 134 (1987) : 2096.
5. Osaka, T., Naoi, K. and Oagano, S. " Electrochemical Polymerization of Electroactive Polyaniline in Nonaqueous Solution and Its Application in Rechargeable Lithium Batteries." *J. Electrochem. Soc.* 134 (1987) : 285.
6. Abe, K., Goto, F., Okabayashi, K., Yoshida, T. and Morimoto, H. *Proc. 27th. Batt. Symp. Jpn.* pp. 201, 1986.
7. Etemad, S., Heeges, A. J. and McDiarmid, A. G. *Annu. Rev. Phys. Chem.* 33 (1982) : 443.
8. Chien, J. C. W. " Polyacetylene.", Academic, Orlando, 1984.
9. a) De Surville, R., Jozefowicz, M., Yu, L. T., Perichon, J. and Buvet, R. *Electrochem. Acta.* 13 (1968) : 1451.
b) Paul, E. W., Ricco, A. J. and Wrigton, M. S. *J. Phys. Chem.* 89 (1985) : 1441.
10. a) MacDiarmid, A. G., Chiang, J. -C., Halpern, M., Huang, W. -S., Mu, S. -L., Somasiri, N. L. D., Wu, W. and Yaniger, S. I. " Polyaniline : Interconversion of Metallic and Insulating Forms. " *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 121 (1985) : 173-180.
b) Chiang, J. -C. and MacDiarmid, A. G. *Synth. Met.* 13 (1986) : 193.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- c) MacDiarmid, A. G., Mu, S. -L., Somasiri, N. L. D. and Wu, W. " Electrochemical Characteristics of Polyaniline Cathodes and Anodes in Aqueous Electrolytes. " Mol. Cryst. Liq. Cryst. 121 (1985) : 187-190.
- d) Genies, E. M., Syed. A. A. and Tsintavis, C. " Electrochemical Study of Polyaniline in Aqueous and Organic Medium. Redox and Kinetic Properties. " Mol. Cryst. Liq. Cryst. 121 (1985) : 181-186.
11. Thayer, A. M. Chem. Eng. News, 16 (1992) : 22.
12. McManus, P. M., Cushman, R. J. and Yang, S. C. J. Phys. Chem. 91 (1987) : 477.
13. Allcock, H. R. and Lampe, F. W. in Contemporary Polymer Chemistry, 2 nd ed., pp. 558-563, Prentice Hall, Singapore, 1992.
14. Margolis, J. M. in Conductive Polymers and Plastics, pp. 173, Chapman and Hall, New York, 1989.
15. Kanatzidis, M. G. " Conductive Polymers. " C & EN , December 3 (1990) : 36-54.
16. Reynolds, J. R. " Electrically Conductive Polymers " Chem. tech. July 1988 : 440-447.
17. Travers, J. D., Chroboczek, J., Devreux, F., Genoud, F., Nechtschien, N., Syed, A., Genies, E. M. and Tsintavis, C. " Transport and Magnetic Resonance Studies of Polyaniline. " Mol. Cryst. Liq. Cryst. 121 (1985) : 195-199.
18. DeSurille, R., Jozefowicz, M., Yu, L. -T., Perichon, J. and Buvet, R. " Electrochemistry of Conductive Polymers. " Electrochim. Acta 13 (1968) : 1451.
19. MacDiarmid, A. G., Chiang, J. -C., Halpern, M., Huang, W. -S., Krawczyk, J. R., Mammone, R. L., Mu, S. -L., Somasiri, N, L. D., Wu, W. and Yaniger, S.I. " Electrochemistry of Conductive Polymers. " Polymer Preprintst 25 (1984) : 248.
20. Jozefowicz, M., Perichon, J. H., Yu, L. T. and Buvet, R. E. " Polyaniline, a Novel Conducting Polymer " Br. Pat 1,216,569, 1970.
21. Green, A. G. and Woodhead, A. E. " Electrochemistry of Conductive Polymers. " J. Chem. Soc. (Trans.) 97 (1910) : 2388.
22. Green, A. G. and Woodhead, A. E. " Electrochemistry of Conductive Polymers. " J. Chem. Soc. (Trans.) 101 (1912) : 1117.

23. a) Langer, J. " Electrochemistry of Conductive Polymers. " Solid State Commun, 26 (1978) : 839.
 b) Langer, J. Mater. Sci. 10 (1984) : 174.
24. Abe, M., Ohtani, A., Higuchi, H., Ezoe, M., Akizuki, S., Nakamoto, K., Mochizuki, K., Umemoto, Y. and Umeda, M. " Gas Permeation Property of Polyaniline Films. " U.S. Pat 5,264,552 (1993).
25. Abe, M., Ohtani, A., Umemoto, Y., Akizuki, S., Ezoe, M., Higuchi, H., Nakamoto, K., Okuno, A. and Noda, Y. " Gas Permeation Property of Polyaniline Films. " J. Chem. Soc., Chem. Commun. 22 (1989) : 1736.
26. Huang, W. S., Humphrey, B. D. and MacDiarmid, A. G. " Polyaniline, a Novel Conducting Polymer " J. Chem. Soc. Faraday Trans. 1 82 (1986) : 2385-2400.
27. Mohilner, D. M., Adams, R. N. and Argensinger, W. J. " Investigation of the Kinetics and Mechanism of the Anodic Oxidation of Aniline in Aqueous Sulfuric Acid Solution at a Platinum Electrode. " J. Am. Chem. Soc. 84 (1962) : 3618-3622.
28. Kitani, A., Izumi, J., Yano, J., Hiromoto, Y. and Suzuki, K. " Basic Behaviors and Properties of the Electrodeposited Polyaniline. " Bull. Chem. Soc. Jpn. 57 (1984) : 2254-2257.
29. Goldenberg, L. M., Petty, M. C. and Monkman, A. P. " A Comparative Study of the Electrochemical Properties of Dip-Coated, Spun, and Langmuir-Blodgett Films of Polyaniline. " J. Electrochem. Soc. 141 (1994) : 1573.
30. Diaz, A. F. and Logan, J. A. " Electrochemistry of Conductive Polymers. " J. Electroanal. Chem. Interfacial Electrochem. 115 (1980) : 111.
31. Carlin, M. C., Keprey, L. J., and Bard, A. J. " Polymer Films on Electrodes. " J. Electrochem. Soc. 132 (1985) : 353-359.
32. Glarum, S. H., and Marshall, J. H., " Electrochemistry of Conductive Polymers. " J. Electrochem. Soc. 134 (1987) : 142.
33. Hjertberg, T., Salaneck, W. R., Lundstrom, I., Somasiri, N. L. D. and Macdiarmid, A. G. " A ¹³C CP-MAS NMR Investigation of Polyaniline. " J. Polym. Sci. 23 (1985) : 503-508.

34. Sherman, B. C., Euler, W. B. and Force, R. R. " The Modern Student Laboratory " J. Chem. Edu. 71 (1994) : A94-A96.
35. Diaz, A. F., Nguyen, M. T. and Leclerc, M. in Physical Electrochemistry Principles, Methods, and Applications. PP. 555-583, Marcel Dekker, Inc., 1995.
36. Kobayashi, T. , Yoneyama, H. and Tamura, H. " Electrochemical Reactions Concerned with Electrochromism of Polyaniline Film-Coated Electrodes. " J. Electroanal. Chem. 177 (1984) : 281-297.
37. Diaz, A. F. and Logan, J. A. " Electrochemical Reactions Concerned with Electrochromism of Polyaniline Film-Coated Electrodes. " J. Electroanal. Chem. 111 (1980) : 111.
38. Duic, L., Mandic, Z. and Kovacicsek, F. " The Effect of Supporting Electrolyte on the Electrochemical Synthesis, Morphology, and Conductivity of Polyaniline. " J. Polym. Sci. : Part A : Polymer Chemistry 32 (1994) : 105-111.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้