



การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลเพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ

โดย

นางสาวนันทนิตย์ พ่วงเล็ก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลเพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ

โดย

นางสาวนันท์นิตย์ พ่วงเล็ก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**IMPROVEMENT OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF POLYPYRROLE FOR GAS
SENSOR APPLICATION**

By

Nuntanid Puanglek

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF ENGINEERING

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2009

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลเพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ ” เสนอโดย นางสาวนันท์นิตย์ พ่วงเล็ก เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตังกูร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. อาจารย์ ดร.อำนาจ ลีทศัตตระกุล
2. อาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สุนนมาลย์ เนียมกลาง)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อำนาจ ลีทศัตตระกุล)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)
...../...../.....

51402222 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : พอลิเมอร์นำไฟฟ้า/พอลิไพร์โรล/การตรวจสอบก๊าซ

นันทนิตย์ พ่วงเล็ก : การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลเพื่อประยุกต์ใช้
เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.อำนาจ ลีทนต์ตระกูล และ อ.ดร.
วันชัย เลิศวิจิตรจรัส. 153 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์และศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรล
และอนุพันธ์พอลิไพร์โรลสามชนิด ได้แก่ พอลิไพร์โรล (PPy) อนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่
แทนที่ ณ ตำแหน่งที่สามเป็นหมู่คาร์บอนิล (3-PPy) อนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่ง
ที่สามเป็นหมู่ออกซิม (3-PPy oxime) และเฟอร์โรซีนคาร์บอกซีเลตพอลิไพร์โรล (3-PPy oxime
FCC) และได้ทำการศึกษาอิทธิพลขนาดแอนไอออนของสารกระตุ้นพาหะนำประจุ 3 ชนิด ได้แก่
ลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) ลิเทียมเปอร์คลอเรต (LiClO₄) และ โซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกแอซิด
(DBSA) ต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน พบว่าพอลิเมอร์ที่
ผ่านการกระตุ้นพาหะนำประจุด้วย LiF สามารถนำไฟฟ้าได้ดีที่สุด เนื่องจากแอนไอออนฟลูออไรด์
(F⁻) มีขนาดเล็กที่สุด (1.33 Å) ในบรรดาสารกระตุ้นพาหะนำประจุทั้งสามชนิด สามารถเคลื่อนที่เข้า
ไปเสถียรประจุบวกบนโครงสร้างพอลิเมอร์ได้รวดเร็ว ดังนั้น ค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิ
เมอร์ที่ผ่านการกระตุ้นพาหะด้วย LiF สูงที่สุด ต่อจากนั้นได้นำพอลิเมอร์สามชนิด ได้แก่ PPy
3-PPy oxime และ 3-PPy oxime FCC ไปทดสอบการนำไฟฟ้าขณะผ่านไอระเหยเมทานอลและไ
อะระเหยไดเอทิลอีเทอร์ จากการทดสอบพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้าและความว่องไว
ในการตรวจสอบก๊าซของพอลิเมอร์ดังกล่าวขึ้นกับโครงสร้างของพอลิเมอร์ โครงสร้างไอระเหยที่
ใช้ทดสอบ และความเข้มข้นไอระเหยที่ใช้ทดสอบ กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีหมู่ให้อิเล็กตรอนได้ดีจะ
นำไฟฟ้าได้ดี ส่วนพอลิเมอร์ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลใหญ่จะมีระยะเวลาในการตอบสนองต่อ
ก๊าซเร็ว ไอระเหยทดสอบที่มีความเป็นขั้วสูงและมีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น เมทานอล จะช่วยทำให้
การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นไอระเหยที่มีปริมาณมากจะช่วยให้
นำไฟฟ้าได้ดีขึ้น อีกทั้งระยะเวลาในการตอบสนองเร็วขึ้น ผลของการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอนุพันธ์
พอลิไพร์โรลที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างแล้วสามารถนำมาใช้ตรวจสอบไอระเหยได้ดี

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2.

51402222 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORDS : CONDUCTIVE POLYMERS/POLYPYRROLE/GAS SENSOR

NUNTANID PUANGLEK : IMPROVEMENT OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF POLYPYRROLE FOR GAS SENSOR APPLICATION. THESIS ADVISORS : AMNARD SITTATTRAKUL, Ph.D., AND WANCHAI LERDWIJITJARUD, Ph.D. 153 pp.

The purpose of this research is to synthesize and study the effect of structure of polypyrrole and its derivatives, such as polypyrrole (PPy), 3-derivatized polypyrrole (3-PPy), 3-derivatized polypyrrole oxime (3-PPy oxime) and ferrocenecarboxylated polypyrrole (3-PPy oxime FCC). In this work, lithium fluoride (LiF), lithium perchlorate (LiClO₄) and p-dodecylbenzene sulfonic acid (DBSA) were used as dopants and the molar ratio of pyrrole and its derivatives to dopants were 1:1. The lithium fluoride doped polymers showed the highest electrical conductivity of all the doped polymers due to its smallest size of F⁻ anion (1.33 Å) which could be transported easily through the polymer matrix to stabilize the positive charges occurred on polymer chains. These polymers were then tested for their electrical conductivities while passing methanol and diethyl ether vapors. It is found that the factors that affected the electrical conductivity and sensitivity of the polymers when exposed to tested vapors were polymer structure, vapor structure and concentration of tested vapors. However, polymers with electron donating group will have good electrical conductivity while polymers having larger free volume will have faster response time. Organic molecular vapor with more polar group and smaller size will also assist the high electrical conductivity of polymers but larger vapor concentration will give faster response time. However, each polymers with more polar group will give slower recovery time. The result of the investigation indicates that 3-derivatized polypyrrole can be used as gas sensor.

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2009

Student's signature

Thesis Advisors' signature 1. 2.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์และทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลและอนุพันธ์ การทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ก็เนื่องมาจากการได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธิตระกูล ผู้เป็นที่ปรึกษาหลักของงานวิจัยในครั้งนี้ ที่คอยให้คำแนะนำและให้แนวทางการแก้ปัญหาในยามที่การทำงานวิจัยติดขัด อีกทั้งสอนให้รู้จักการวางแผนในการทำงานจนทำให้งานวิจัยสามารถบรรลุเป้าหมายตามเวลาที่กำหนด ตลอดจนการสนับสนุนงบประมาณในการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อใช้ในการสร้างเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าไว้ใช้ตลอดงานวิจัย จึงขอขอบพระคุณอาจารย์ไว้เป็นอย่างสูง ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมสำหรับคำแนะนำต่างๆ และ รศ.ดร.อนุวัฒน์ ศิริวัฒน์ สำหรับความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ในระยะเริ่มต้นของงานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.สุรัช นิมจิรวัฒน์ และพีรวิญญา สุทัศนวิชานนะ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ช่วยเหลือในการเตรียมสารและวิเคราะห์ผล $^1\text{H-NMR}$ ขอขอบคุณ รศ. กำชัย ตรีชัยศรี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สำหรับคำปรึกษาในการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.สรารัฐ ภูไพบีร์กุลสำหรับคำแนะนำในการต่อเครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้า ขอขอบคุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาที่ช่วยจัดหาเครื่องมือและสารเคมีทุกอย่าง ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูงวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเงินทุนการศึกษา ทุนสนับสนุนงานวิจัย และทุนการนำเสนอผลงานในงาน PACCON 2010 ณ ประเทศไทย ขอขอบคุณพี่โกสินทร์ หาชะวี ซึ่งแม้จะรู้จักกันในช่วงเวลาสั้นๆ แต่พี่ก็ได้ให้คำแนะนำ และแนวทางการทำงานวิจัยที่ใช้อ้างอิงตลอดงานวิจัยนี้ ขอชื่นชมน้องไทรสิทธิ์ ศรีสายัณห์ สำหรับความช่วยเหลือการเขียนโปรแกรม ทำให้พี่สามารถทำงานได้อย่างง่ายดายมากขึ้น ขอขอบคุณณัฐวัฒน์ กฐินหอม ที่คอยเป็นกำลังใจและคอยช่วยเหลืออยู่ข้างๆ กันตลอดมา สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกๆ กำลังใจจากครอบครัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณแม่ ที่ให้ทั้งชีวิต โอกาสทางการศึกษา และเป็นแรงผลักดันที่สำคัญที่สุด ทำให้หนูสามารถบรรลุเป้าหมายทางการศึกษาและการทำงานวิจัย ณ ที่แห่งนี้ได้อย่างสมบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ฐ
สารบัญภาพประกอบ	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
แนวคิดของงานวิจัย	6
ขอบเขตงานวิจัย	7
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
การนำไฟฟ้าของวัสดุ.....	9
การแบ่งประเภทการนำไฟฟ้าของวัสดุ.....	9
สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity, σ).....	13
พอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	16
π -Conjugated Linear polymers.....	16
Narrow Band-Gap Polymers.....	17
π -Conjugated Linear Oligomers.....	17
Non-conjugated Polymers Containing Pendant π -	
Electron Systems.....	18
โครงสร้างและกลไกการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	19
แนวคิดอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซหรือแก๊สอินทรีย์.....	24
การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ในการตรวจสอบก๊าซ.....	25
กลไกการตรวจสอบก๊าซด้วยพอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	27

บทที่	หน้า
พอลิไพร์โรลและอนุพันธ์.....	29
การประยุกต์ใช้งานพอลิไพร์โรลในอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซหรือจุ่ม	
อิเล็กทรอนิกส์.....	31
การนำไฟฟ้าของโมเลกุลที่โครงสร้างมีหมู่ฟังก์ชัน Ferrocene.....	36
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	38
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	38
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	39
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	41
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	41
การเตรียมพอลิเมอร์ตัวรองรับ.....	41
การสังเคราะห์อนุพันธ์ไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่งที่ 3	
(3-Py).....	41
การเตรียมอนุพันธ์พอลิไพร์โรล (3-PPy).....	43
การเตรียมอนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่งที่ 3 เป็นหมู่	
ออกซิม (3-PPy oxime).....	44
การทำเอสเตอร์ริฟิเคชันพอลิเมอร์ตัวรองรับด้วยเกลือโซเดียม	
เฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต.....	44
การสังเคราะห์พอลิไพร์โรล (PPy).....	45
การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ (Doping).....	46
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์.....	46
การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ตัวรองรับ.....	46
การทดสอบค่าการนำไฟฟ้าและความว่องไวต่อก๊าซตัวอย่างของ	
พอลิเมอร์.....	47
การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	47
การควบคุมความเข้มข้นของไอตัวอย่าง.....	48
การหา Linear ohmic regime.....	52
การทดสอบและคำนวณหาร้อยละความว่องไวต่อไอ	
ระเหยสารตัวอย่าง.....	53

บทที่	หน้า
	การหาเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อไอและเวลาที่ใช้ใน การคืนตัวกลับ..... 54
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 55
	การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ 55
	การพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิเมอร์ตัวรองรับซึ่งเป็นอนุพันธ์พอลิไพร์โรล (3-PPy)..... 55
	การสังเคราะห์อนุพันธ์ไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่ง 3 (3-Py)..... 55
	การเตรียมอนุพันธ์พอลิไพร์โรล; 3-(3-Bromopropionyl) polypyrrole หรือ 3-PPy..... 62
	การเตรียมอนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ตำแหน่งที่ 3 เป็นหมู่ออก ซิม (3-PPy oxime)..... 67
	การพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิเมอร์ตัวรองรับที่ผ่านการทำเอสเตอร์รี ฟิเค ชันด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลตด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ 67
	การพิสูจน์เอกลักษณ์เกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิ เลต (Na-FCC) ด้วยเทคนิค FT-IR..... 70
	การทำเอสเตอร์รีฟิเคชันของ 3-PPy oxime..... 72
	การพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิไพร์โรลด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ 75
	การพิสูจน์เอกลักษณ์อนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่งที่ 3 ภายหลังการทดสอบกับไอร่ะเหยเมทานอลด้วยเทคนิค FT-IR 79
	การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ตัวรองรับ..... 81
	การทดสอบหาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับด้วย เทคนิค TGA..... 81
	การทดสอบหาอุณหภูมิ glass transition ของพอลิเมอร์ตัวรองรับ ด้วยเทคนิค DSC..... 83

บทที่	หน้า
การทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าและความว่องไวต่อไอระเหยสารตัวอย่าง ของพอลิเมอร์.....	85
การหา linear ohmic regime.....	85
การตรวจสอบหา linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของ ก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 28 °C.....	85
การตรวจสอบหา linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของไอ เมทานอลที่อุณหภูมิ 28 °C.....	86
การทดสอบและคำนวณหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิ เมอร์ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน.....	87
การทดสอบและคำนวณหาร้อยละความว่องไวต่อไอระเหยสาร ตัวอย่าง.....	91
การทดสอบพฤติกรรมการตอบสนองเมื่อความเข้มข้นไอ ระเหยสารตัวอย่างคงที่.....	91
ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซ ไนโตรเจน ($I_{N_2,before}$) ก่อนการป้อนไอ ระเหยสารตัวอย่าง.....	92
ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศไอระเหยสาร ตัวอย่าง (I_{gas}).....	92
ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ($I_{N_2,after}$) ภายหลังการป้อนไอระเหยสาร ตัวอย่าง	94
การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อไอระเหยสาร ตัวอย่างของพอลิเมอร์เมื่อความเข้มข้นไอระเหยสาร ตัวอย่างเปลี่ยนแปลง.....	100
ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซ ไนโตรเจน ($I_{N_2,before}$) ก่อนการป้อนไอ ระเหยสารตัวอย่าง.....	100

บทที่	หน้า
ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศไอระเหยสาร	
ตัวอย่าง (I_{gas}).....	101
ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน	
($I_{N2,after}$) ภายหลังการป้อนไอระเหยสาร	
ตัวอย่าง	102
การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อไอระเหยสาร	
ตัวอย่างของพอลิเมอร์เมื่อความเข้มข้นไอระเหยสาร	
ตัวอย่างเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง.....	108
ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซ	
ไนโตรเจน ($I_{N2,before}$) ก่อนการป้อนไอ	
ระเหยสารตัวอย่าง.....	108
ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศไอระเหยสาร	
ตัวอย่าง (I_{gas}).....	109
ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน	
($I_{N2,after}$) ภายหลังการป้อนไอระเหยสาร	
ตัวอย่าง	109
ร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่าง (%S).....	114
ร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่าง	
ของพอลิเมอร์เมื่อความเข้มข้นคงที่.....	114
ร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่าง	
ที่ความเข้มข้นก๊าซเปลี่ยนแปลง.....	119
ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซของพอลิเมอร์	
(T_{res}).....	128
ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์ (T_{rec}).....	133
5 สรุปผลการทดลอง	138
สรุปผลการวิจัย	138
ข้อเสนอแนะ	139
บรรณานุกรม	141

บทที่	หน้า
ภาคผนวก	144
ภาคผนวก ก	145
ภาคผนวก ข	148
ภาคผนวก ค.....	150
ประวัติผู้วิจัย	153

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตัวอย่างมลพิษอากาศกับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง [3].....	3
2	สาร VOCs บางชนิดที่มีผลกระทบต่อระบบเนื้อเยื่อ และ เป็นอันตรายต่อสุขภาพ [4].....	4
3	สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง [18]	14
4	โครงสร้างและค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ผ่านการ กระตุ้นพาหะนำประจุแล้ว [20].....	23
5	พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ [24].....	25
6	พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ (ต่อ) [24].....	26
7	การประยุกต์ใช้งานพอลิไพร์โรลเป็นตัวตรวจสอบก๊าซ [27].....	31
8	การประยุกต์ใช้งานพอลิไพร์โรลเป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (ต่อ) [27].....	32
9	อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับ.....	82
10	อุณหภูมิ glass transition (T_g) ของพอลิเมอร์ตัวรองรับ.....	84
11	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนของพอลิเมอร์แต่ ละชนิดในการทดสอบหาค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific electrical conductivity, σ_{N_2}).....	87
12	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนของพอลิเมอร์แต่ ละชนิดในการทดสอบหาค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific electrical conductivity, σ_{N_2}) (ต่อ).....	88
13	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะผ่านไ ระเหยสารตัวอย่างและหลังผ่านไอะระเหยของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการ ทดสอบกับไอะระเหยเมทานอลความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm	95
14	ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะ ผ่านไอะระเหยสารตัวอย่างและหลังผ่านไอะระเหยของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ในการทดสอบกับไอะระเหยเมทานอลความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm	96

ตารางที่		หน้า
15	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะผ่านไอระเหย ตัวอย่างและหลังผ่านไอระเหยของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยไดเอทิลอีเทอร์ความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm.....	97
16	ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะผ่านไอระเหยตัวอย่างและหลังผ่านไอระเหยของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยไดเอทิลอีเทอร์ความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm.....	98
17	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะการผ่านไอระเหยสารตัวอย่างและหลังผ่านไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอเมทานอลที่ความเข้มข้นไอระเหยเปลี่ยนแปลง.....	103
18	ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะการผ่านไอระเหยสารตัวอย่างและหลังผ่านไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอระเหยเมทานอลที่ความเข้มข้นไอระเหยเปลี่ยนแปลง.....	104
19	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะการผ่านไอระเหยสารตัวอย่างและหลังผ่านไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอระเหยไดเอทิลอีเทอร์ที่ความเข้มข้นไอระเหยเปลี่ยนแปลง.....	105
20	ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะการผ่านไอระเหยสารตัวอย่างและหลังผ่านไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ที่ความเข้มข้นไอระเหยเปลี่ยนแปลง.....	106
21	ข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบไอเมทานอลความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง.....	111
22	ข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบไอไดเอทิลอีเทอร์ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง.....	112
23	ข้อมูลร้อยละการตอบสนองของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้น 500 ppm.....	116

ตารางที่		หน้า
24	ข้อมูลร้อยละการตอบสนองบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นค่าต่าง ๆ	120
25	ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องจาก 500 ppm 250 ppm และ 125 ppm ตามลำดับ.....	123
26	ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องจาก 500 ppm 250 ppm และ 125 ppm ตามลำดับ.....	124
27	ข้อมูลร้อยละการตอบสนองของพอลิเมอร์ในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องจาก 500 ppm 250 ppm และ 125 ppm ตามลำดับ.....	125
28	ข้อมูลเวลาในการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm.....	129
29	ข้อมูลเวลาในการตอบสนองในบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นค่าต่าง ๆ.....	130
30	ข้อมูลเวลาในการคืนตัวกลับต่อไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm.....	134
31	ข้อมูลเวลาในการคืนตัวในบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นต่าง ๆ...	135

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่		หน้า
1	ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในบรรยากาศบริเวณกรุงเทพมหานคร [2]...	2
2	ปริมาณสาร Carbonyl compounds ในบรรยากาศบริเวณกรุงเทพมหานคร [2].....	2
3	ประจุลบเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทางแบบสุ่ม ทำให้ไม่มีกระแสสุทธิ.....	9
4	แสดงกระแสของประจุไฟฟ้าเมื่อมีสนามไฟฟ้า.....	10
5	โครงสร้างอะตอมซิลิกอนบริสุทธิ์ [16].....	10
6	โครงสร้างอะตอมซิลิกอนที่ถูกเจือปนด้วยอะตอมฟอสฟอรัส [16].....	11
7	โครงสร้างอะตอมซิลิกอนที่ถูกเจือปนด้วยอะตอมโบรอน [16].....	12
8	การกระโดดข้ามชั้นพลังงานของวัสดุชนิดต่างๆ [17].....	12
9	แสดงพฤติกรรมสภาพการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและโลหะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ.....	15
10	ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ π -Conjugated linear polymers.....	16
11	ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ Narrow Band-Gap Polymers.....	17
12	แสดงโครงสร้างโอลิโกโรโอฟิน.....	17
13	ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ Non-conjugated Polymers Containing Pendant π -Electron Systems.....	18
14	การซ้อนเหลื่อมของ Orbital ในระบบ Conjugation.....	19
15	ระดับพลังงานของ Neutral chain, Polaron และ Bipolaron ของพอลิไพร์โรล.....	20
16	(a-b) การเกิด Radical cation หรือ polaron โดยการหลุดออกของอิเล็กตรอนจากคาร์บอนโมเลกุล Polyacetylene (c-e) การเคลื่อนย้ายตำแหน่ง polaron.....	20
17	เปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์กับวัสดุชนิดอื่นๆ [17].....	21
18	ผลของการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุของ Polyacetylene [19].....	21
19	การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุของ Polyacetylene ด้วยสารกระตุ้นพาหะนำประจุชนิดต่างๆ.....	22
20	ค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะและเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของพอลิไพร์โรลที่แต่ละอัตราส่วนมอนอเมอร์กับตัวออกซิไดซ์.....	23

ภาพที่	หน้า
21 การวัดค่าความต้านทานเริ่มต้น (R_u).....	27
22 การวัดค่าความต้านทานภายหลังการสัมผัสก๊าซ (R_g).....	28
23 การเกิด Physical และ Chemical Absorption ของโมเลกุลก๊าซบนผิวของพอลิไพร์โรล.....	29
24 แบบจำลองโครงสร้างสามมิติไพร์โรล.....	29
25 โครงสร้างพอลิไพร์โรล.....	29
26 สภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของ Polypyrrole ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอโอดีน.....	30
27 แสดงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีต่อ (a) Polypyrrole (b) Polypyrrole ที่มีการเจือปนด้วยอะตอมเฟอร์โรซีน.....	33
28 (a) Polypyrrole, (b) Poly-N-alkylpyrrole, (c) Poly-3-alkylpyrrole.....	34
29 แสดงปฏิกิริยาการเตรียม <i>N-p</i> -Toluenesulfonylpyrrole.....	34
30 (a) Poly (2-(3-pyrrole) propylamine), (b) Poly (2-(3-pyrrole) ethanol).....	35
31 (a) 3-pyrryl)ethane, (b) (3-pyrryl)butane, (c) (3-pyrryl)hexane, (d) (3-pyrryl)dodecane.....	35
32 Poly(vinyl ferrocene) ในรูปของ Reduced state และ Oxidized state ที่ทำหน้าที่เป็น host ให้กับ ClO_4^- ที่เป็น counterion.....	36
33 อุปกรณ์วางชิ้นงานเพื่อทดสอบหาสมบัติการนำไฟฟ้า.....	47
34 การวางชิ้นงานเพื่อทดสอบหาสมบัติการนำไฟฟ้า.....	47
35 แผนผังแสดงอุปกรณ์การควบคุมก๊าซและการวัดค่าการนำไฟฟ้า.....	51
36 เครื่องมือควบคุมความเข้มข้นของไอตัวอย่างและวัดค่าการนำไฟฟ้า.....	52
37 โครงสร้างทางเคมีของ (a) ไพร์โรล, (b) <i>p</i> -Toluenesulfonyl chloride และ (C) <i>N-p</i> -Toluenesulfonylpyrrole.....	55
38 FT-IR Spectrum ของ <i>p</i> -Toluenesulfonyl chloride และ <i>N-p</i> -Toluenesulfonylpyrrole.....	56
39 ^1H -NMR Spectrum ของ pyrrole ใน CDCl_3	57
40 ^1H -NMR Spectrum ของ <i>N-p</i> -Toluenesulfonylpyrrole ใน CDCl_3	58
41 โครงสร้างทางเคมีของ 3-bromopropionyl chloride และ 3-derivatized pyrrole precursor.....	58

ภาพที่	หน้า
42	FT-IR Spectrum ของ <i>p</i> -Toluenesulfonyl chloride, <i>N</i> - <i>p</i> -Toluenesulfonylpyrrole และ 3-derivatized pyrrole precursor..... 59
43	¹ H-NMR Spectrum ของ 3-derivatized pyrrole precursors ใน CDCl ₃ 60
44	โครงสร้างทางเคมีของ 3-Py..... 61
45	FT-IR Spectrum ของ 3-derivatized pyrrole precursor และ 3-Py..... 61
46	¹ H-NMR Spectrum ของ 3-Py ใน CDCl ₃ 62
47	โครงสร้างทางเคมีของ 3-PPy..... 63
48	ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของ 3-PPy..... 65
49	FT-IR Spectrum ของ 3-Py และ 3-PPy..... 66
50	¹ H-NMR Spectrum ของ 3-PPy ใน DMSO-d ₆ 67
51	โครงสร้างทางเคมีของ 3-PPy oxime..... 67
52	ปฏิกิริยาการเกิดหมู่ออกซิมของ 3-PPy..... 68
53	FT-IR Spectrum ของ 3-PPy และ 3-PPy oxime..... 69
54	¹ H-NMR Spectrum ของ 3-PPy oxime ใน DMSO-d ₆ 69
55	โครงสร้างทางเคมีของเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na-FCC)..... 70
56	ปฏิกิริยาการเตรียมเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต..... 70
57	FT-IR Spectrum ของ FCC (สังเคราะห์) และ Na-FCC..... 71
58	¹ H-NMR Spectrum ของ Na-FCC ใน CDCl ₃ 72
59	โครงสร้างทางเคมีของ 3-PPy oxime FCC..... 72
60	ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของ 3-PPy oxime FCC ด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต..... 73
61	FT-IR Spectrum ของ 3-PPy, 3-PPy oxime และ 3-PPy oxime FCC..... 74
62	¹ H-NMR Spectrum ของ 3-PPy oxime FCC ใน DMSO-d ₆ 75
63	โครงสร้างพอลิไพร์โรล..... 75
64	ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิไพร์โรล..... 77
65	FT-IR Spectrum ของ 3-PPy และ PPy..... 78
66	¹ H-NMR Spectrum ของ PPy ใน DMSO-d ₆ 78
67	FT-IR Spectrum ของอนุพันธ์พอลิไพร์โรลภายหลังทดสอบกับไอระเหย..... 79

ภาพที่	หน้า
68 FT-IR Spectrum substract ของอนุพันธ์พอลิไพร์โรลภายหลังการทดสอบกับไอรอะเหย	80
69 TGA thermogram เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับ.....	82
70 DSC thermogram เปรียบเทียบอุณหภูมิ glass transition (T_g) ของพอลิเมอร์ตัวรองรับ.....	84
71 ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ในสเกลล็อกที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ในการทดสอบหา linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน..	85
72 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าความต่างศักย์ (V) ในการทดสอบหา linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของไอเมทานอล.....	86
73 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิเมอร์ที่ผ่านการกระตุ้นพาหะด้วยสารกระตุ้นชนิดต่างๆ จากการทดลองซ้ำสามรอบเฉลี่ย (σ_{N_2}).....	89
74 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่ผ่านการกระตุ้นพาหะและไม่ผ่านการกระตุ้นพาหะด้วยลิเทียมฟลูออไรด์จากการทดลองซ้ำสามรอบ (σ_{N_2}).....	90
75 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลของพอลิเมอร์ในบรรยากาศของไอรอะเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm.....	99
76 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลของ 3-PPy oxime ในบรรยากาศของไอรอะเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นต่างๆ.....	107
77 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลของพอลิเมอร์ในบรรยากาศของไอรอะเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง (เฉลี่ยจากการทดสอบซ้ำสองครั้ง).....	113
78 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอรอะเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm.....	117
79 ค่าร้อยละการตอบสนองของพอลิเมอร์ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอรอะเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm.....	118
80 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอรอะเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นค่าต่างๆ.....	121

ภาพที่	หน้า
81	ค่าร้อยละการตอบสนองของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไธระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นค่าต่างๆ 122
82	ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไธระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง..... 126
83	ค่าร้อยละการตอบสนองของพอลิเมอร์ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไธระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง..... 127
84	ระยะเวลาในตอบสนองของพอลิเมอร์ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไธระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm..... 131
85	ระยะเวลาในตอบสนองของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไธระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นเปลี่ยนแปลง..... 132
86	ระยะเวลาในการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไธระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm..... 136
87	ระยะเวลาในการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไธระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นต่างๆ 137

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

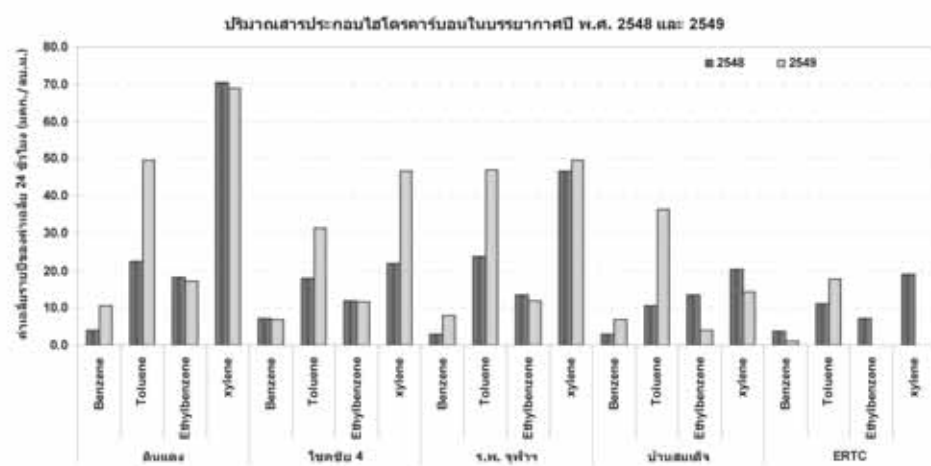
ผลจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วของประเทศ ทำให้มีโรงงานใหม่เกิดขึ้นมากมาย รวมถึงความต้องการในการขนส่งและการเดินทางที่มากขึ้น ส่งผลให้มีการระบายสารมลพิษจากโรงงาน และท่อไอเสียรถยนต์ในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้น จากสาเหตุดังกล่าวทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งมลพิษทางด้านอากาศ

มลพิษทางอากาศ [1] เป็นภาวะอากาศที่มีสารเจือปนอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าระดับปกติเป็นเวลานานพอที่จะทำให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์ สัตว์ พืช หรือทรัพย์สินต่าง ๆ

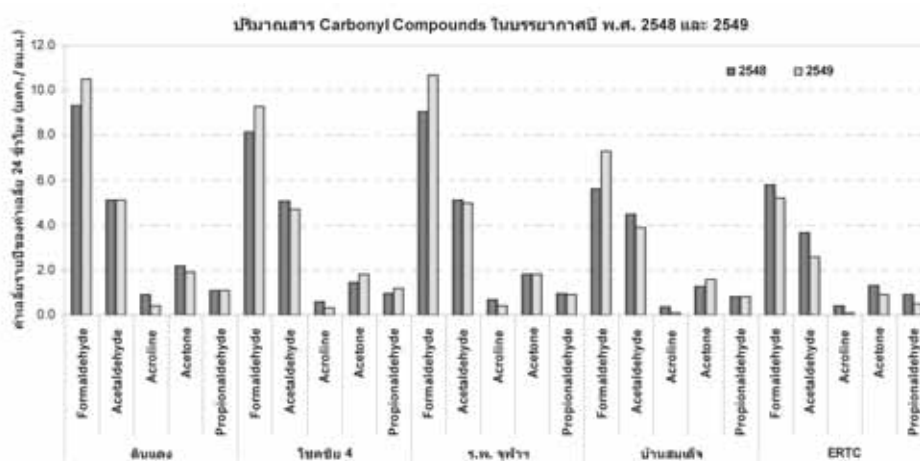
แหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่สำคัญของประเทศไทย แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้

- ยานพาหนะ
- โรงงานอุตสาหกรรม

ยานพาหนะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศจำกัดเฉพาะในเขตชุมชนขนาดใหญ่ เช่น กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ดังนั้นบริเวณที่ใกล้ถนนที่มีการจราจรติดขัด จะมีปัญหามลพิษทางอากาศที่รุนแรงกว่า ในบริเวณที่มีการจราจรคล่องตัว สารมลพิษที่ระบายเข้าสู่บรรยากาศที่เกิดจากการคมนาคมขนส่ง ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน สารตะกั่วและก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังแสดงในภาพที่ 1 และ 2 [2]



ภาพที่ 1 ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในบรรยากาศบริเวณกรุงเทพมหานคร [2]



ภาพที่ 2 ปริมาณสาร Carbonyl compounds ในบรรยากาศบริเวณกรุงเทพมหานคร [2]

มลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิดอุตสาหกรรม เป็นผลจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและกระบวนการผลิตซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพอากาศในบรรยากาศและยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนในชุมชนโดยทั่วไป จากรายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2540 สำนักนโยบายและสิ่งแวดล้อม กรมโรงงานอุตสาหกรรม ได้สรุปชนิดของมลพิษอากาศกับประเภทอุตสาหกรรม แสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ตัวอย่างมลพิษอากาศกับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง [3]

ประเภทอุตสาหกรรม	สารมลพิษอากาศ
อุตสาหกรรมปิ๋ย อุตสาหกรรมเซรามิก	ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ : HF
โรงกลั่นน้ำมัน อุตสาหกรรมก๊าซแอมโมเนีย อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ	ไฮโดรเจนซัลไฟด์ : H ₂ S
โรงถลุงโลหะ อุตสาหกรรมเคมี	เซเลเนียมไดออกไซด์ : SeO ₂
อุตสาหกรรมโซดาไฟ กระบวนการผลิตพลาสติก	ไฮโดรเจนคลอไรด์ : HCl
การผลิตกรดดินประสิว	ไนโตรเจนไดออกไซด์ : NO ₂
การผลิตกรดกำมะถัน	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ : SO ₂
อุตสาหกรรมย้อมสี	ฟอสจีน (PHOSGENE) : COCl ₂
อุตสาหกรรมผลิตปิ๋ย การชุบโลหะ	แอมโมเนีย : NH ₃
อุตสาหกรรมผลิตลัทธิคาไฟเบอร์	สไตรีน : C ₆ H ₅ CHCH ₂
การผลิตคาร์บอนไดออกไซด์	คาร์บอนไดซัลไฟด์ : CS ₂
การผลิตฟอร์มาลีน หนั ยางสังเคราะห์ การผลิตวานิช	ฟอร์มาลดีไฮด์ : HCHO
โรงกลั่นน้ำมัน การผลิตฟอร์มาลีน ตัวทำละลายอินทรีย์	เบนซีน : C ₆ H ₆
การผลิตเมทานอล การผลิตฟอร์มาลีน อุตสาหกรรมสี	เมทานอล : CH ₃ OH
อุตสาหกรรมก๊าซ การถลุงโลหะ	คาร์บอนมอนอกไซด์ : CO
อุตสาหกรรมสี ยางสังเคราะห์	ฟีนอล : C ₆ H ₅ OH
อุตสาหกรรมยา สารเคมี	Pyridine : C ₅ H ₅ N
อุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมเภสัชกรรม	Mercaptan : C ₂ H ₅ SH

จากข้อมูลในตารางที่ 2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างประเภทอุตสาหกรรมกับก๊าซพิษ และ/หรือไอระเหยจากสารประกอบอินทรีย์ (VOCs) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตใน อุตสาหกรรม ซึ่งมีความเป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์หากได้รับเข้าไปเกินกว่าปริมาณที่กำหนดไว้

ตารางที่ 2 สาร VOCs บางชนิดที่มีผลกระทบต่อระบบเนื้อเยื่อ และเป็นอันตรายต่อสุขภาพ [4]

สาร VOCs	เนื้อเยื่อที่ถูกทำลายโดยสาร VOCs	ผลร้ายต่อสุขภาพ
Benzene	Hemopoietic system, red blood cell, nerve	ทำลายไขกระดูก เม็ดเลือดแดงแตก โรคโลหิตจาง และอาการหรือโรคทางประสาทส่วนกลาง
Carbon tetrachloride (CCl ₄)	Liver, CNS	ตับเสื่อม ตับแข็ง
Chloroform (CHCl ₃)	Liver, Kidney, heart muscle, eyes, skin	ตับเสื่อม ตับแข็ง ไตเสื่อม หัวใจเต้นผิดปกติ การสลายร่างกายของตาและผิวหนัง
Dichlorobenzene (DCM)	Liver, kidney, blood, skin, eyes, upper respiratory tract	ฤทธิ์สลาย-ระคายเคือง ปวดบวม กดประสาทส่วนกลาง อาจหมดสติและตายได้
Ethyl alcohol	Liver, CNS nerve, placenta	ตับเสื่อม ตับแข็ง เร่งการเกิดมะเร็งตับ มีฤทธิ์กดประสาท ทำให้ทารกที่คลอดพิการ
Ethyl benzene, n-Hexane	Eyes, CNS nerve, nasal cavity nerve	ทำให้ระคายเคือง แสบตา แสบจมูก กดประสาทส่วนกลาง ทำให้ปวดหัว งุนงง และอาจหมดสติได้
Methanol	Liver, CNS nerve	ตับเสื่อม มีฤทธิ์กดประสาท ทำให้ตาบอด
Toluene	CNS nerve	มีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง
Trichlorobenzene	Liver ,Kidney	ตับแข็ง ตับเสื่อม ไตเสื่อม
1,1, 1-Trichloroethane	Liver, Nerve, Kidney	มีฤทธิ์กดประสาท ส่วนกลาง ทำให้ชัก หมดสติ และอาจตายได้
Xylene	Skin, nerve	ระคายเคืองผิวหนัง

ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อพัฒนาอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซที่ได้จากสารประกอบอินทรีย์ เช่น แอลกอฮอล์ อีเทอร์ เอสเทอร์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ โดยการตรวจสอบชนิดและปริมาณของก๊าซต่างๆ ที่เกิดขึ้นเพื่อควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า “จมูกอิเล็กทรอนิกส์” [5] ที่อาศัยหลักการเดียวกันกับการรับกลิ่นของมนุษย์ ซึ่งสามารถผลิตขึ้นได้จากวัสดุหลายชนิด เช่น โลหะออกไซด์ [6] และ พอลิเมอร์นำไฟฟ้า [7,8] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พอลิเมอร์นำไฟฟ้านั้นมีข้อได้เปรียบตรงที่มีน้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีราคาถูก ได้มีนักวิจัยหลายท่านที่ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวัสดุดังกล่าวมากมายเพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นจมูกอิเล็กทรอนิกส์ หรืออุปกรณ์ตรวจสอบแก๊ส โดยพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ พอลิไพร์โรล, พอลิอะนิลีน และพอลิไพโรฟิน เป็นต้น [9] นอกจากนี้ยังมีการใช้ระบบพอลิเมอร์ผสมเพื่อรวมข้อดีของพอลิเมอร์หรือวัสดุอื่นที่นำมารวมกันอีกด้วย [10] สิ่งหนึ่งที่เหมือนกันของพอลิเมอร์เหล่านี้ คือ หลักการทำงานพื้นฐานที่ต้องมีระบบคอนจูเกตเพื่อให้อิเล็กตรอนที่เป็นพาหะในการนำไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ในโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วย [11,12]

อย่างไรก็ตาม การทำให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้นั้นไม่จำเป็นต้องมีระบบคอนจูเกตอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลเสมอไป เช่น เพอร์โรซินพอลิเมอร์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างของสายโซ่หลักเป็นฉนวน เมื่อทำการปรับปรุงโดยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของเพอร์โรซินที่เป็นไอออนของเกลือเข้าไป และสามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อนำไปต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดความต่างศักย์ โดยหลักการนำไฟฟ้าของเพอร์โรซินพอลิเมอร์อาศัยการเคลื่อนที่แบบกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนจากไอออนของเกลือตัวหนึ่งไปสู่อีกตัวหนึ่งซึ่งอยู่ข้างเคียง โกสินทร์ หาชะวี [12] ได้สังเคราะห์เพอร์โรซินคาร์บอกซีเมทิลเลเตตพอลิเมอร์ และศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของเพอร์โรซินคาร์บอกซีเมทิลเลเตตพอลิเมอร์เมื่ออยู่ภายใต้บรรยากาศไอเมทานอล และอะซิโตน จากการศึกษา พบว่าเพอร์โรซินคาร์บอกซีเมทิลเลเตตพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างอ่อนตัวและมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์มาก จะแสดงค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่าเพอร์โรซินคาร์บอกซีเมทิลเลเตตพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแข็งทื่อและมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลน้อย สำหรับพอลิไพร์โรล เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าระบบคอนจูเกตชนิดหนึ่งที่จัดอยู่ในประเภทพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ rigid-rod พอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการทางเคมีทั่วๆ ไปนั้นไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายใดๆ เนื่องจากแรงกระทำระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีค่ามาก ทำให้พอลิไพร์โรลมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์น้อย ทำให้ร้อยละความว่องไวของพอลิไพร์โรลมีค่าไม่สูงนัก [13]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิไพร์โรลและอนุพันธ์พอลิไพร์โรล เพื่อปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าพอลิไพร์โรล ศึกษาอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันและชนิดของสารกระตุ้นพาหะนำประจุ รวมถึงทดสอบการวัดค่าการนำไฟฟ้าเมื่ออยู่ในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่าง และนำมาคำนวณหาค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่งนั้น เพื่อนำพอลิเมอร์ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิไพร์โรลและอนุพันธ์พอลิไพร์โรลชนิดต่างๆ ที่สังเคราะห์ขึ้น และการนำไฟฟ้าของสารต่างๆ ดังกล่าว

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารกระตุ้นพาหะนำประจุที่มีขนาดของแอนไอออนที่แตกต่างกัน ในแง่ของการนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลและอนุพันธ์

1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของก๊าซชนิดต่างๆ และโครงสร้างของพอลิไพร์โรลและอนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่สังเคราะห์ขึ้นเมื่ออยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซนั้น ๆ

1.3 แนวคิดงานวิจัย

พอลิไพร์โรลเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าระบบคอนจูเกตชนิดหนึ่งที่มีความสนใจอย่างมาก เนื่องจากพอลิไพร์โรลนั้นสามารถสังเคราะห์ได้ง่ายโดยผ่านปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี รวมถึงมีความเสถียรต่อสภาวะแวดล้อม แต่จากการศึกษาพบว่า พอลิไพร์โรลมีโครงสร้างแข็งทื่อและมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์น้อย ซึ่งมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซ และระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับ งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลโดยการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชัน ณ ตำแหน่งที่ 3 เป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน และเพิ่มโครงสร้างเฟอร์โรซีนเข้าไปที่หมู่ข้างเคียง โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไป ณ ตำแหน่งที่ 3 จะทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีโครงสร้างที่อ่อนตัวและมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมากขึ้น ซึ่งช่วยปรับปรุงระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซและระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับของพอลิไพร์โรลดีขึ้น อีกทั้งการเพิ่มหมู่เฟอร์โรซีนเข้าไปในโครงสร้างโมเลกุลพอลิไพร์โรลยังช่วยปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้า เนื่องจากการนำไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ใน 2 กลไก ทั้งทางระบบคอนจูเกตที่อยู่ในโมเลกุลพอลิไพร์โรล และการกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนจากไอออนของเหล็กจากเฟอร์โรซีนหมู่หนึ่งไปสู่อีก

หมุ่ที่อยู่ข้างเคียง โดยจากหลักการดังกล่าวนี้เองทำให้สามารถนำมาใช้ประยุกต์ในการตรวจจับก๊าซได้ เนื่องจากก๊าซแต่ละชนิดจะทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการซึมผ่านได้ของก๊าซและความสามารถในการทำให้ไอออนที่เกิดขึ้นเกิดความเสถียร นอกจากนี้โครงสร้างของพอลิเมอร์หลักที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์แต่ละชนิดไม่เท่ากันด้วย

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์ พิสูจน์เอกลักษณ์ และศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างของอนุพันธ์พอลิไพร์โรล อิทธิพลของของสารกระตุ้นพาหะนำประจุ และชนิดของก๊าซที่มีผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ ดังต่อไปนี้

1.4.1 พอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์และศึกษามี 4 ชนิด ได้แก่

1.4.1.1 พอลิไพร์โรล

1.4.1.2 พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่งที่ 3 เป็นหมู่คาร์บอนิล

1.4.1.3 พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่งที่ 3 เป็นหมู่ออกซิม

1.4.1.3 เฟอร์โรซีนคาร์บอนิลเลตพอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่งที่ 3 เป็นหมู่ออกซิม

1.4.2 ก๊าซตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ชนิด ได้แก่

1.4.2.1 ไอระเหยของเมทานอล ความเข้มข้นเท่ากับ 500 250 และ 125 ppm ที่อุณหภูมิ 28 °C โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวควบคุมความเข้มข้น ในระบบปิด

1.4.2.2 ไอระเหยของไดเอทิลอีเทอร์ ความเข้มข้นเท่ากับ 500 250 และ 125 ppm ที่อุณหภูมิ 28 °C โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวควบคุมความเข้มข้น ในระบบปิด

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลอง และวางแผนการทดลอง

1.5.3 จัดหาอุปกรณ์และสารเคมี

1.5.4 ดำเนินงานวิจัย

1.5.4.1 สังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้า

1.5.4.2 ทดสอบสมบัติการนำไฟฟ้า

1.5.5 วิเคราะห์ผลงานวิจัยที่ได้

1.5.6 สรุปผลงานวิจัย

1.5.7 รายงานผลงานวิจัย

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถสังเคราะห์พอลิไพร์โรลและอนุพันธ์ของพอลิไพร์โรลที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบก๊าซได้

1.6.2 ได้ข้อมูลอิทธิพลของโครงสร้างพอลิไพร์โรลและอนุพันธ์ของพอลิไพร์โรลที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า

1.6.3 ได้ข้อมูลอิทธิพลของไอระเหยที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลและอนุพันธ์ของพอลิไพร์โรล

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

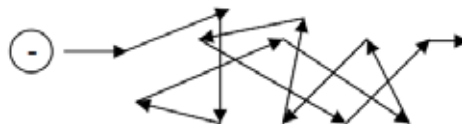
2.1 การนำไฟฟ้าของวัสดุ

กระแสไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ในตัวกลางหลายๆ ชนิด เรียกตัวกลางที่มีสมบัติยอมให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านได้ว่า ตัวนำไฟฟ้า ขณะที่มิกระแสไฟฟ้าในตัวนำ แสดงว่ามีการนำไฟฟ้า ตัวพาประจุในวัสดุได้แก่ อิเล็กตรอน เช่น ในวัสดุจำพวกโลหะ โพซิทีฟโฮล (positive holes) เช่น ในวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor materials) และอนุภาคที่มีประจุ (ions) เช่น ในวัสดุเซรามิก

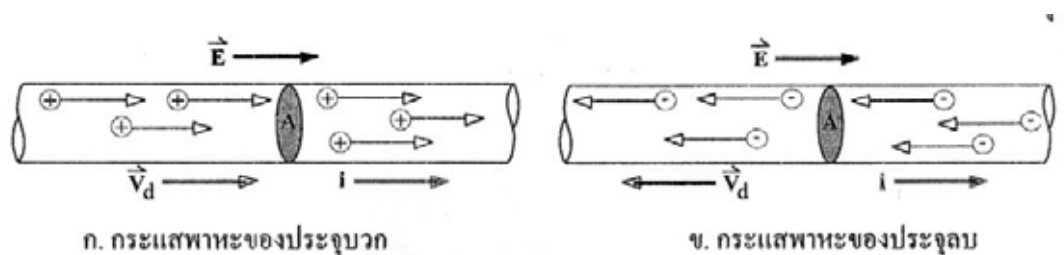
2.1.1 การแบ่งประเภทการนำไฟฟ้าของวัสดุ

วัสดุนำไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามชนิดของตัวพาประจุ [14] ได้แก่

สารตัวนำไฟฟ้า (Conductor) โลหะทุกชนิดเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากมีอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) โดยอิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่โดยเสรีไม่เป็นระเบียบ ไม่มีทิศทางแน่นอน เรียกการเคลื่อนที่แบบนี้ว่า การเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) ดังนั้นความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนอิสระทุกตัวจึงเป็นศูนย์ แต่เมื่อทำให้ปลายทั้งสองของแท่งโลหะมีความต่างศักย์ไฟฟ้า เช่น ต่อไว้กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในแท่งโลหะ แรงจากสนามไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ โดยมีความเร็วเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ เรียกว่าความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity) จึงมีกระแสไฟฟ้าในแท่งโลหะ [15]



ภาพที่ 3 ประจุลบเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทางแบบสุ่ม ทำให้ไม่มีกระแสสุทธิ



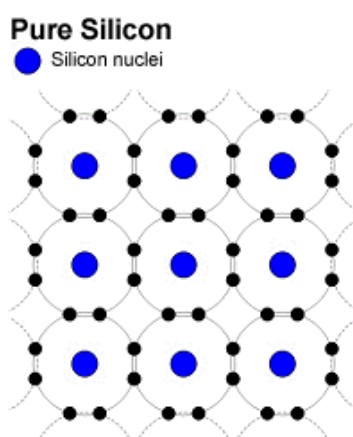
ภาพที่ 4 แสดงกระแสของประจุไฟฟ้าเมื่อมีสนามไฟฟ้า

สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า (Semiconductor) คือสารที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำกับฉนวน วัสดุส่วนมากในกลุ่มนี้เป็นของแข็งประเภทที่อะตอมของธาตุยึดเกาะตัวแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และประเภทพันธะไอออนิก (ionic bond) ตามปกติวัสดุพวกนี้ไม่นำไฟฟ้า เพราะอิเล็กตรอนในวาเลนซ์แบนด์ไม่สามารถไหลได้ง่าย ทั้งนี้เนื่องจากมีพลังงานไม่เพียงพอ แต่ถ้าเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอน เช่น การให้ความร้อน ฉายแสง หรือการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า อิเล็กตรอนก็สามารถเคลื่อนที่ได้และทำให้วัสดุนั้นกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า

ชนิดของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า

1. สารกึ่งตัวนำเนื้อแท้ (Intrinsic semiconductor)

ในสถานะที่เย็น สารกึ่งตัวนำเนื้อแท้จะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระเลย หรือพันธะระหว่างอะตอมไม่แตกจากกัน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้พันธะแตก มีอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระเกิดขึ้นเป็นคู่ ๆ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะมีคู่อิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ไปในเนื้อสารได้ เมื่อคู่ใดมาพบจะเกิดการรวมกันขึ้น สารกึ่งตัวนำที่รู้จักกันดี คือ ซิลิกอน และ เยอรมันเนียม เรียกสารเหล่านี้ว่า สารเตตระเวเลนซ์



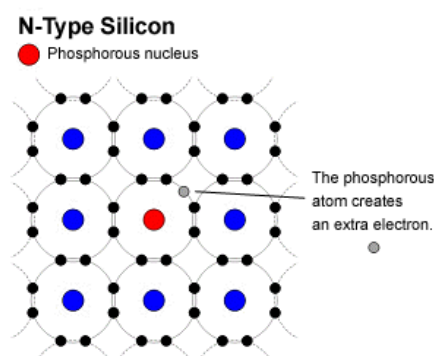
ภาพที่ 5 โครงสร้างอะตอมซิลิกอนบริสุทธิ์ [16]

2. สารกึ่งตัวนำกระแสไฟฟ้าดัดแปลง (Extrinsic semiconductor)

สารกึ่งตัวนำซิลิคอนหรือเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์เมื่อถูกใส่สารอื่นเจือปนลงไปจะทำให้เปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำดัดแปลง หรือสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินซิก มี 2 แบบคือแบบเอ็นกับแบบพี

1. สารกึ่งตัวนำแบบเอ็น (N-Type)

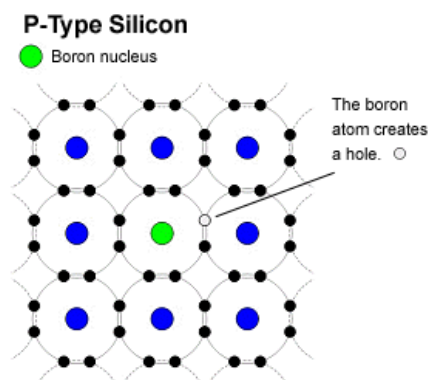
สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ถูกเจือปนด้วยสารที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว หรือสารเพนเตเวเลนซ์ จะมีอิเล็กตรอน 4 ตัวของสารเจือปนสร้างพันธะกับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น 1 ตัว เคลื่อนที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำดัดแปลงนี้ การที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ จึงมีการเรียกสารกึ่งตัวนำดัดแปลงนี้ว่า แบบเอ็น (Negative type) สารที่นำมาเจือปนประเภทนี้เป็นธาตุในหมู่ 5A เช่น อาเซนิก ฟอสฟอรัส และแอนติโมนี



ภาพที่ 6 โครงสร้างอะตอมซิลิคอนที่ถูกเจือปนด้วยอะตอมฟอสฟอรัส [16]

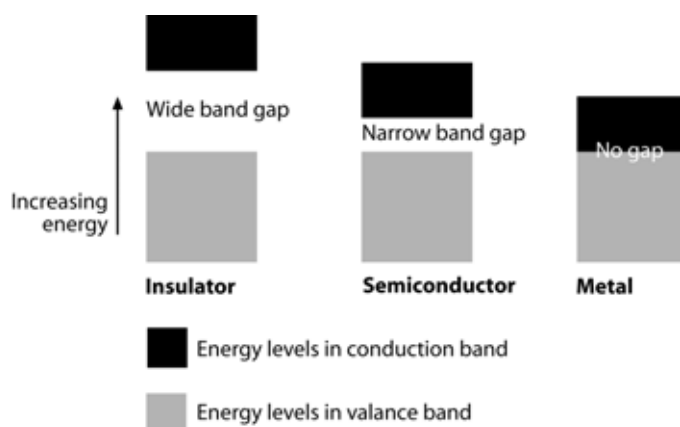
2. สารกึ่งตัวนำแบบพี (P-Type)

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ถูกเจือปนด้วยสารที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว หรือสารไตรเวเลนซ์ จะมีอิเล็กตรอนเพียง 3 ตัวของสารเจือปนสร้างพันธะกับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำทำให้ขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว สำหรับสร้างพันธะกับสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นโฮลขึ้นในสารกึ่งตัวนำดัดแปลงนี้ การที่มีโฮลอิสระในเนื้อสาร ทำให้มีการเรียกสารกึ่งตัวนำดัดแปลงนี้ว่า แบบพี (Positive type) สารที่นำมาเจือปนประเภทนี้เป็นธาตุในหมู่ 3A ได้แก่ อลูมิเนียม แกลเลียม และโบรอน



ภาพที่ 7 โครงสร้างอะตอมซิลิกอนที่ถูกเจือปนด้วยอะตอมโบรอน [16]

สารที่เป็นฉนวน (Insulator) วัสดุจำพวกฉนวนไฟฟ้ามีชื่อเรียกอีกอย่างว่า วัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) หรือจะเรียกสั้นๆ ว่า ไดอิเล็กทริก (dielectric) ดังนั้นไม่ว่าจะให้พลังงานไฟฟ้า ความร้อน หรือ แสง แก่อิเล็กทรอนิกส์ อิเล็กทรอนิกส์ก็ยังไม่สามารถเข้ามาอยู่ในแถบตัวนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า



ภาพที่ 8 การกระโดดข้ามชั้นพลังงานของวัสดุชนิดต่างๆ [17]

2.1.2 สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity, σ)

ตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law) กระแสไฟฟ้า (I) จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (V) ที่ใส่เข้าไป แต่จะเป็นปฏิภาคส่วนกลับกับความต้านทาน (R) ของตัวนำไฟฟ้า ดังสมการที่ (1)

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

ความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้า จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความยาวของตัวนำไฟฟ้า (l) และเป็นปฏิภาคส่วนกลับกับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำไฟฟ้า (A) ดังสมการที่ (2)

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2)$$

โดยที่ ρ คือ สภาพการต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistivity) ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับวัสดุแต่ละชนิดที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

ส่วนค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity, σ) จะเป็นปฏิภาคส่วนกลับกับค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ดังนี้

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

หน่วยของค่าสภาพการนำไฟฟ้าในหน่วย SI จะเรียกว่า Siemens (S) เมื่อทำการเปรียบเทียบสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ เป็นดังตารางที่ 3

กฎของโอห์ม สามารถเขียนได้ในรูปของความหนาแน่นกระแส (Current density, J หน่วย A/m^2) ดังนี้

$$J = \frac{E}{\rho} = \sigma E \quad (4)$$

โดยที่ E คือ สนามไฟฟ้า (Electric field) มีหน่วย คือ V/m ซึ่งทั้ง J และ E เป็น ปริมาณเวกเตอร์ ที่ไม่ขึ้นกับรูปร่างลักษณะของตัวนำไฟฟ้า

ตารางที่ 3 สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง [18]

ชนิดวัสดุ	สาร	สภาพการนำไฟฟ้า (S)
สารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า	เงิน	6.3×10^7
	ทองแดง	5.8×10^7
	ทอง	4.2×10^7
	อลูมิเนียม	3.4×10^7
	แกรไฟต์	1×10^5
สารกึ่งตัวนำไฟฟ้า	เจอร์เมเนียม	2.2
	ซิลิคอน	4.3×10^{-4}
สารที่เป็นฉนวนไฟฟ้า	พอลิเอทรีลีน	1×10^{-14}
	พอลิสไตรีน	1×10^{-14}
	เพชร	1×10^{-14}

ที่อุณหภูมิห้อง นิวเคลียสที่มีประจุบวกนั้นจะเกิดการสั่น ในขณะที่อิเล็กตรอนของตัวนำไฟฟ้านั้นสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่เป็นระเบียบ เมื่อให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไป อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป ซึ่งอาจพุ่งชนนิวเคลียสได้ทำให้มีความเร็วลดลง ดังนั้น ความเร็วโดยเฉลี่ยของอิเล็กตรอน หรือที่เรียกว่า ความเร็วลอยเลื่อน (v_d) นั้น จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้ ดังนี้

$$v_d = \mu E \quad (5)$$

เมื่อ μ คือ สภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็น $m^2 / (V \cdot s)$

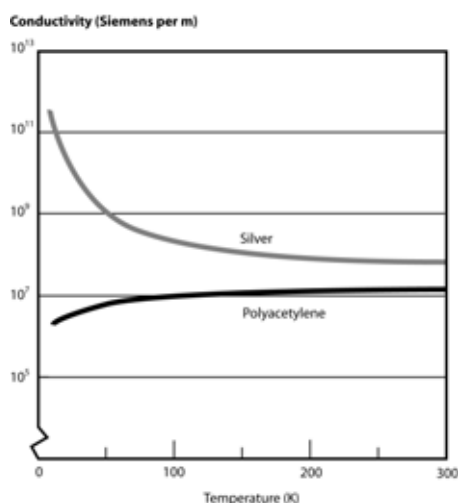
อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จะขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนในหนึ่งหน่วยปริมาตร ค่าประจุของอิเล็กตรอน ($e = -1.60 \times 10^{-19} C$) และความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน (v_d) ดังนั้น ความหนาแน่นของกระแส (J) จึงมีค่าดังนี้

$$J = nev_d \quad (6)$$

นั่นคือ สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับจำนวนอิเล็กตรอน
ดังนี้

$$\sigma = \frac{nev_d}{E} = ne\mu \quad (7)$$

ดังนั้น จำนวนอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ นั่น จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการนำ
ไฟฟ้าของวัสดุ



ภาพที่ 9 แสดงพฤติกรรมค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและโลหะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

ในกรณีของตัวนำไฟฟ้านั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้การชนกันของอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสมากขึ้น ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนลดลง สภาพการนำไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าจึงลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

ส่วนกรณีของสารกึ่งตัวนำนั้น เนื่องจากอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นให้สามารถข้ามช่องของ Energy band gap, E_g ได้ต้องอาศัยพลังงานความร้อน โดยที่จำนวนอิเล็กตรอนดังกล่าวจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับอุณหภูมิ ดังนี้

$$n \propto e^{-E_g/kT} \quad (8)$$

นั่นคือ สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุจำพวกสารกึ่งตัวนำจึงเป็นปฏิกากับอุณหภูมิ
ดังนี้

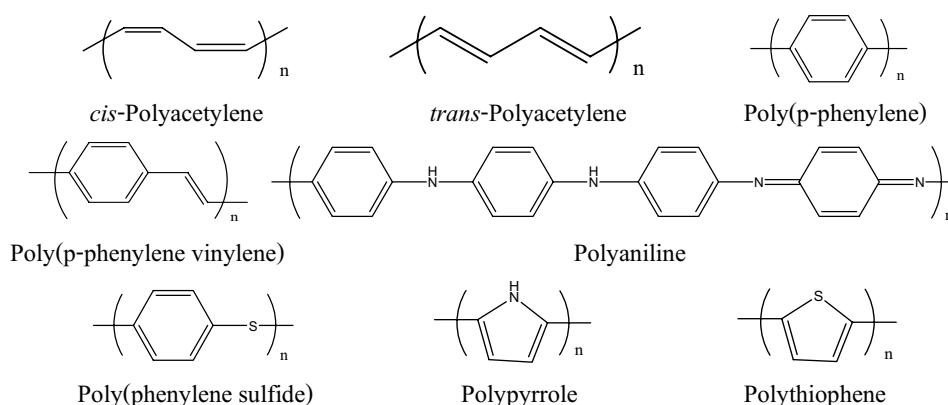
$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g / kT} \quad (9)$$

2.2 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า

ในปี ค.ศ. 2000 The Royal Swedish Academy of Sciences ได้มอบรางวัล Nobel Prize ในสาขาเคมีให้กับนักวิทยาศาสตร์ 3 ท่าน [17,18] คือ ศาสตราจารย์ Alan J. Heeger แห่งมหาวิทยาลัย California ประเทศสหรัฐอเมริกา ศาสตราจารย์ Alan G. MacDiarmid แห่งมหาวิทยาลัย Pennsylvania ประเทศสหรัฐอเมริกา และศาสตราจารย์ Hideki Shirakawa แห่งมหาวิทยาลัย Tsukuba ประเทศญี่ปุ่น ในเรื่องการค้นคว้าและพัฒนาพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นให้นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้เข้ามาสนใจในวัสดุดังกล่าวนี้มากขึ้น และเอาไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่หลากหลาย พอลิเมอร์นำไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม [19] ดังนี้

2.2.1 π -Conjugated Linear polymers

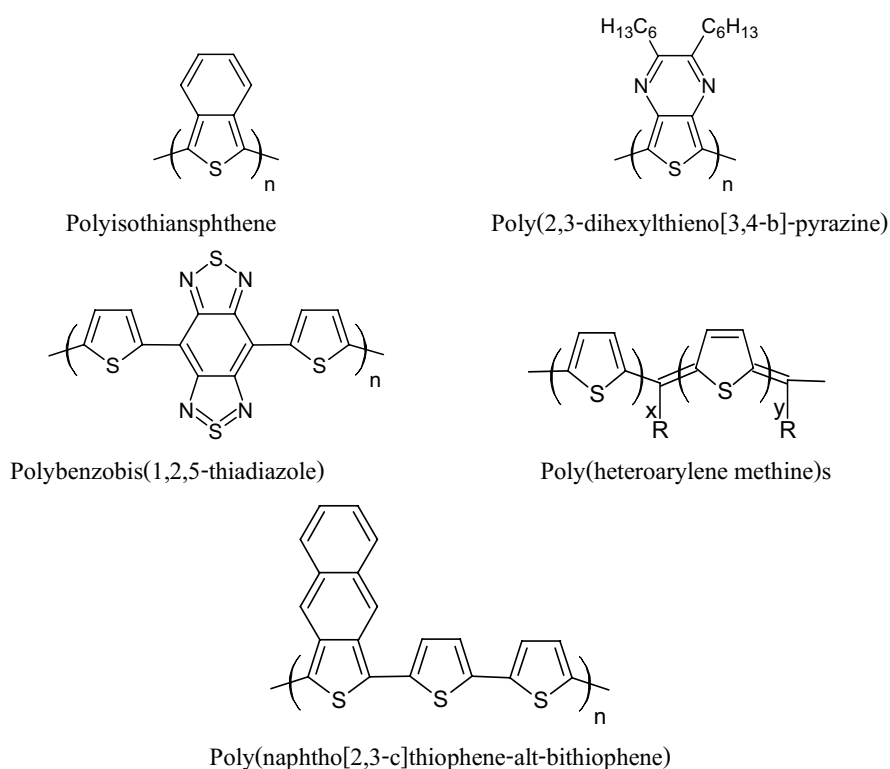
ในระบบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโซ่ตรงแบบ π คอนจูเกต เช่น พอลิอะเซทิลีน พอลิพาราฟีนิลีน พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ พอลิไพร์โรล พอลิไซโอฟิน และพอลิอะนิลีน จัดว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีความน่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากเมื่อพอลิเมอร์ชนิดนี้ได้ผ่านกระบวนการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำประจุแล้วจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง



ภาพที่ 10 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ π -Conjugated linear polymers

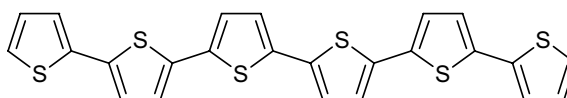
2.2.2 Narrow Band-Gap Polymers

ในการออกแบบและสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่มนี้ จุดมุ่งหมายเพื่อให้ได้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีค่าแถบพลังงานแคบ จนกระทั่งมีสมบัติเป็นสารประเภทกึ่งตัวนำไฟฟ้าเนื้อแท้หรืออินทรินซิก ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำไฟฟ้า ตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่มนี้ แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ Narrow Band-Gap Polymers

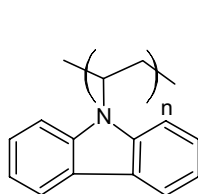
2.2.3 π -Conjugated Linear Oligomers พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่มนี้ เช่น โอลิโกฟีนิลลีน โอลิโกไซโอฟิน และโอลิโกไพร์โรล



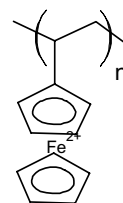
ภาพที่ 12 แสดงโครงสร้างโอลิโกไซโอฟิน

2.2.4 Non-conjugated Polymers Containing Pendant π -Electron Systems

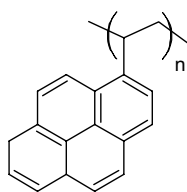
พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่มนี้มีโครงสร้างของพอลิเมอร์หลักมีสมบัติเป็นฉนวนโดยที่มีหมู่ข้างเคียงเป็นระบบคอนจูเกต ซึ่งการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้อาศัยการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำประจุที่หมู่ข้างเคียง ตัวอย่างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่มนี้ แสดงดังภาพที่ 13



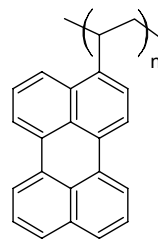
Poly(N-vinylcarbazole)



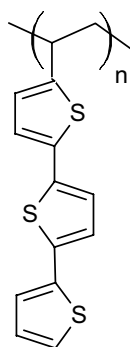
Poly(vinylferrocene)



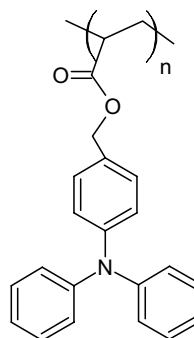
Poly(1-vinylpyrene)



Poly(3-vinylpyrene)



Poly(5-vinyl2,2':5',2''-terthiophene)

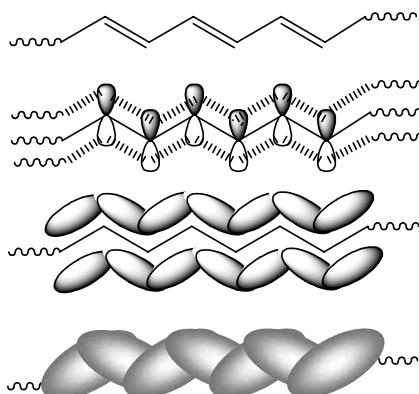


Poly[4-(diphenylamino)phenylmethyl methacrylate]

ภาพที่ 13 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ Non-conjugated Polymers Containing
Pendant π -Electron Systems

2.3 โครงสร้างและกลไกการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

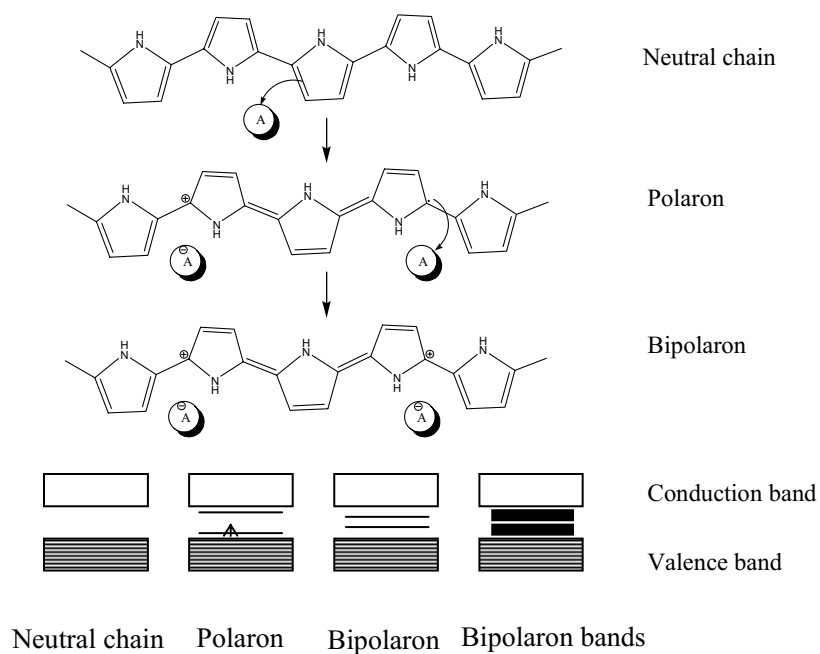
พอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะมีระบบ π -Conjugation อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล กล่าวคือ มีการซ้อนเหลื่อมกันของ p -Orbital ของแต่ละอะตอมส่งผลทำให้เกิดการ Delocalization ของ Electron ได้



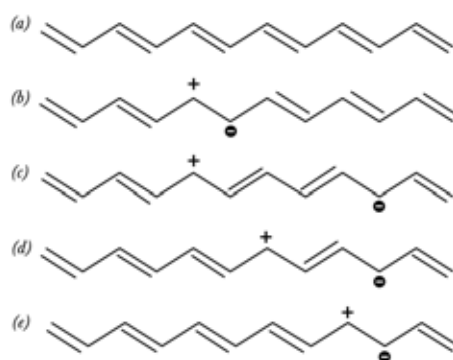
ภาพที่ 14 การซ้อนเหลื่อมของ Orbital ในระบบ Conjugation

การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้านั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อพอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้รับการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำไฟฟ้า (Doping) โดยการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากโครงสร้างโมเลกุล จะทำให้เกิดระดับพลังงาน (Electronic state) ใหม่ขึ้นมา ระหว่างระดับชั้นพลังงานสูงสุดที่บรรจุอิเล็กตรอน (Highest occupied molecular orbital, HOMO) หรือระดับชั้นพลังงาน Valence band กับระดับชั้นพลังงานต่ำสุดที่ไม่บรรจุอิเล็กตรอน (Lowest unoccupied molecular orbital, LUMO) หรือระดับชั้นพลังงาน Conduction band และโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไป เกิดเป็น Hole หรือ Radical cation ที่เรียกว่า Polarons และ Bipolarons ขึ้น ทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทประจุในโมเลกุล J.L. Bredas และ G.B. Street [20] ได้อธิบายว่า Polarons (เป็นศัพท์ที่ใช้ทางฟิสิกส์) คือ บางส่วนของโมเลกุลที่เกิดการ Delocalization ขึ้นได้ เนื่องจากมีประจุและ Radical อยู่ด้วยกัน บางครั้งจึงถูกเรียกว่า Radical cation หรือ Radical anion (Spin=1/2) และ Bipolarons คือ บางส่วนของโมเลกุลที่ประกอบไปด้วยประจุ 2 ตำแหน่งอยู่ด้วยกัน (Spin=0) หากทำการ Doping ในปริมาณน้อยจะทำให้ ได้ Polarons สูง แต่หากเพิ่มปริมาณการ Doping ให้สูงขึ้นจะทำให้เกิดเป็น Bipolarons ขึ้น ซึ่งทั้ง Polarons และ Bipolarons นี้ จะเคลื่อนที่พาประจุไปตลอด

ความยาวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยที่ Bipolarons นี้จะมีระดับพลังงานในช่วง Band gap ที่แคบกว่า ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่า Polarons

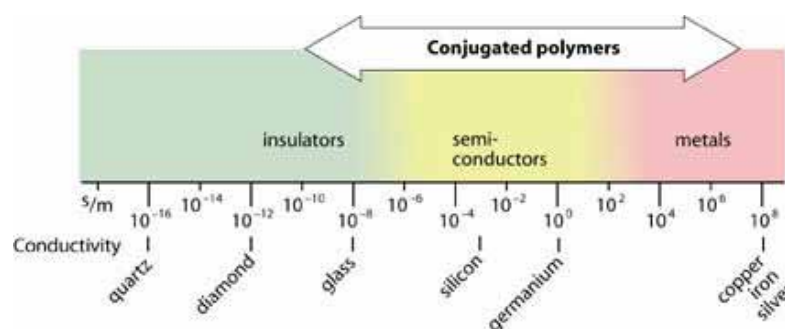


ภาพที่ 15 ระดับพลังงานของ Neutral chain, Polaron และ Bipolaron ของพอลิไพร์โรล



ภาพที่ 16 (a-b) การเกิด Radical cation หรือ polaron โดยการหลุดออกของอิเล็กตรอนจากคาร์บอนโมเลกุล Polyacetylene (c-e) การเคลื่อนย้ายตำแหน่ง polaron

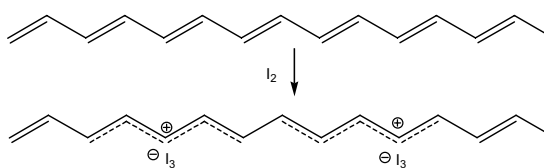
เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์กับวัสดุชนิดอื่นๆ พบว่า พอลิเมอร์นั้นสามารถเป็นได้ทั้งฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำไฟฟ้าที่ดีได้ ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง และปริมาณการ Doping



ภาพที่ 17 เปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์กับวัสดุชนิดอื่นๆ [17]

การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ (Doping)

เป็นกระบวนการที่สามารถเปลี่ยนพอลิเมอร์จากเดิมที่เป็นฉนวน เช่น Polyacetylene ที่มีค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะเพียง 0.1 S/cm ให้กลายเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ โดยการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถส่งผ่านประจุได้ ทำให้เกิดเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ผลของการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุของ Polyacetylene [19]

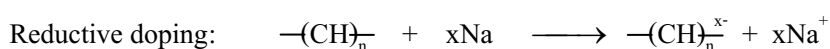
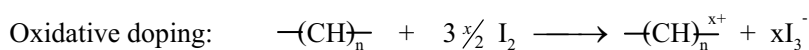
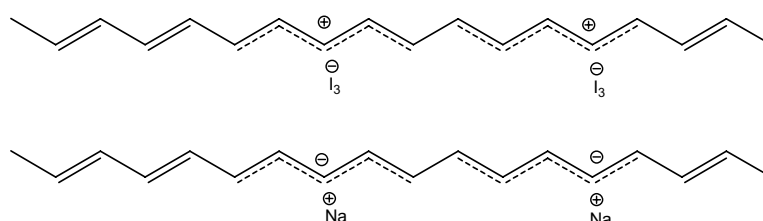
ในการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุได้นั้น สามารถก่อให้เกิดเป็นสารตัวนำไฟฟ้าได้ทั้งแบบชนิด P-type และ N-type ขึ้นอยู่กับชนิดของสารกระตุ้นพาหะนำประจุ ที่ใช้ ดังนี้

1. Electron-accepting species

ก่อให้เกิดสารตัวนำไฟฟ้าแบบ P-type ด้วยการเกิดปฏิกิริยา Oxidation กับโมเลกุลของพอลิเมอร์ สารกระตุ้นพาหะนำประจุ ในกลุ่มนี้ได้แก่ I_2 , AsF_5 , $FeCl_3$, H_2SO_4 , $HClO_4$

2. Electron-donating species

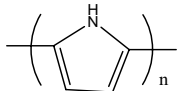
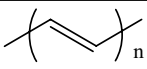
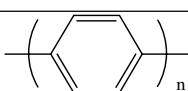
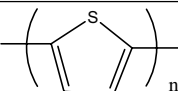
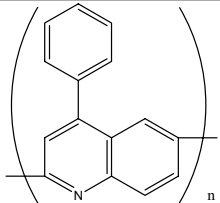
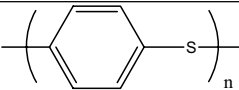
ก่อให้เกิดสารตัวนำไฟฟ้าแบบ N-type ด้วยการเกิดปฏิกิริยา Reduction กับโมเลกุลของพอลิเมอร์ สารกระตุ้นพาหะนำประจุ ในกลุ่มนี้ได้แก่ Sodium หรือ Potassium



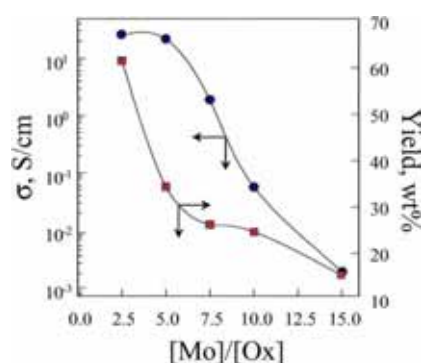
ภาพที่ 19 การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุของ Polyacetylene ด้วยสารกระตุ้นพาหะนำประจุชนิดต่างๆ

โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ผ่านการ Doping แล้ว จะมีประจุบวก (หรือลบ) เกิดขึ้นบนสายโซ่โมเลกุลหลัก โดยมีสารกระตุ้นพาหะนำประจุ ซึ่งมีประจุตรงข้ามกับโมเลกุลพอลิเมอร์ ทำหน้าที่เป็น Counterion ช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้าง เช่น Na^+ , K^+ , I_3^- , I_5^- , AsF_6^- , $FeCl_4^-$ พอลิเมอร์สามารถเปลี่ยนสภาพตัวเองจากสภาพที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เมื่อผ่านการ Doping กลับไปสู่สภาพที่เป็นฉนวนได้เมื่อผ่านการ Undoping โดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไป คล้ายกับการชาร์จแบตเตอรี่แบบชาร์จไฟได้ พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเมื่อผ่านการ Doping แล้วจะมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังตัวอย่าง ตารางที่ 4

ตารางที่ 4 โครงสร้างและค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ผ่านการกระตุ้นพาหะนำประจุแล้ว [20]

พอลิเมอร์	โครงสร้าง	วิธีการ Doping	สภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะ(S/cm)
Polypyrrole		Electrochemical	600
Polyacetylene		Electrochemical, Chemical (AsF ₅ , I ₂ , Li, K)	500-1.5 x 10 ⁵
Poly(<i>p</i> -phenylene)		Chemical (AsF ₅ , I ₂ , Li, K)	500
Polythiophene		Electrochemical	100
Poly(phenyl-quinoline)		Electrochemical, Chemical (Sodium naphthalide)	50
Poly(phenylene sulfide)		Chemical (AsF ₅)	1

นอกจากนี้ อัตราส่วนระหว่างมอนอเมอร์ต่อปริมาณตัวออกซิไดซ์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้า มีผลต่อค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะและเปอร์เซ็นต์ผลได้ของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ [21]



ภาพที่ 20 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะและร้อยละผลผลิตของพอลิไพร์โรลที่แต่ละอัตราส่วนมอนอเมอร์กับตัวออกซิไดซ์

2.4 แนวคิดอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซหรือจมูกอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อต้นเดือนตุลาคม ค.ศ. 2004 คณะกรรมการรางวัลโนเบล ได้มีมติตัดสินมอบรางวัลโนเบลสาขาสรีรวิทยาและการแพทย์แก่ Richard Axel กับ Linda B. Buck ในฐานะที่บุกเบิกงานวิจัยทางด้านกลไกการรับรู้กลิ่นของมนุษย์และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ซึ่งแสดงไว้ในผลงานตีพิมพ์ร่วมกันเมื่อ ค.ศ. 1991 ที่ทำให้นับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา การค้นคว้าวิจัยในศาสตร์ของการรับรู้กลิ่นระดับโมเลกุลก็ได้ถือกำเนิดขึ้น

อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซหรือที่เรียกว่า “จมูกอิเล็กทรอนิกส์” (Electronic Nose) [5] นั้น ได้แนวคิดมาจากการเลียนแบบระบบการรับกลิ่นของมนุษย์ เมื่อมีกลิ่นผ่านเข้าไปในโพรงจมูก ไปสัมผัสกับ Olfactory Epithelium ซึ่งเป็นบริเวณด้านบนของโพรงจมูก มีพื้นที่ประมาณ 5 cm^2 ที่มี Olfactory Neurons สามารถแยกแยะกลิ่นได้มากถึง 10^3 - 10^7 ชนิด ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าส่งไปยังสมองเพื่อการรับรู้ ในทำนองเดียวกัน “จมูกอิเล็กทรอนิกส์” ได้อาศัยหลักการดังกล่าว โดยจะมีตัวตรวจสอบที่ไวต่อก๊าซแต่ละชนิด ทำให้สามารถตรวจสอบก๊าซที่แตกต่างกันได้ ข้อดีของจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่เหนือกว่าจมูกมนุษย์ คือ สามารถตรวจสอบก๊าซได้ด้วยความเข้มข้นต่ำกว่าของมนุษย์จะสัมผัสได้ และสามารถตรวจสอบก๊าซที่ไม่มีกลิ่นได้อีกด้วย ปัจจุบันตัวตรวจสอบก๊าซในเชิงการค้าได้ผลิตขึ้นมาในหลาย ๆ รูปแบบ [5] ดังนี้

1. Metal Oxide Sensors (MOS)

เป็นอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซที่เตรียมได้จากการเคลือบแผ่นฟิล์มของโลหะออกไซด์ (เช่น SnO_2 , TiO_2 , ZnO , ZnO_2) ลงบนพื้นผิวของอะลูมินา การใช้งานจะทำให้อุณหภูมิ 200 - 500°C ดังนั้นจึงมีอุปกรณ์ให้ความร้อนติดอยู่ด้วย เมื่อออกซิเจนในอากาศมาทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของโลหะออกไซด์แล้ว ทำการวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้น

2. Thickness-Shear Mode (TSM)

เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย Piezoelectric Quartz Crystal ที่ติดอยู่บนอิเล็กโทรดเคลือบด้วยวัสดุที่มีความไวต่อก๊าซ การดูดซับก๊าซลงบนวัสดุดังกล่าวนี้จะทำให้เพิ่มน้ำหนักของอุปกรณ์ ส่งผลทำให้ความถี่ในการสั่นสะเทือนเปลี่ยนแปลงไป อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซในกลุ่มนี้ได้แก่ Quartz Crystal Microbalance (QCM), Bulk Acoustic Wave (BAW), และ Surface Acoustic Wave (SAW) โดยวัสดุที่ใช้ในการเคลือบนั้นมีหลายชนิด เช่น พอลิเมอร์นำไฟฟ้า สารชีวโมเลกุล หรือโลหะ

3. Mass Detection Sensors (MS)

ใช้หลักการของ Mass Spectroscopy ตรวจวัดอัตราส่วนระหว่างมวลต่อประจุ (m/z) เป็นตัวตรวจวัด ซึ่งมีข้อดี คือ เป็นวิธีการที่รู้จักกันดี มีความเสถียรและว่องไว และสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นได้ เช่น เทคนิค GC-MS

4. Conductive Polymer (CP)

พอลิเมอร์นำไฟฟ้า ซึ่งสังเคราะห์ได้จากสารจำพวก Aromatic หรือ Heteroaromatic (เช่น Polypyrrole, Polyaniline, Polythiophene) เคลือบอยู่บนขั้วอิเล็กโทรด 2 อัน ซึ่งเมื่อเกิดอันตรกิริยากับก๊าซตัวอย่างแล้ว ค่าการนำไฟฟ้าของตัวตรวจสอบก๊าซนั้นจะเปลี่ยนแปลงไป ข้อดีของตัวตรวจสอบก๊าซที่ผลิตจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้า คือ สามารถใช้งานได้ทั้งอุณหภูมิห้อง และสามารถตรวจสอบก๊าซได้แม้มีความเข้มข้นของก๊าซต่ำ มีการตอบสนองและคืนกลับสู่สภาวะปกติได้รวดเร็ว

2.6 การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ในการตรวจสอบก๊าซ

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าสามารถนำมาใช้ตรวจสอบก๊าซได้ เนื่องจากมีสมบัติแสดงความเป็นกรด-เบสหรือออกซิไดซ์ได้ โดยการตอบสนองต่อก๊าซนั้น สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ Glass transition ความรู้เกี่ยวกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีมากกว่า 30 ปีมาแล้ว โดยที่ Polyacetylene นั้นถือว่าเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดแรกที่เริ่มค้นคว้ากัน

มีการนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้าไปใช้ในงานตรวจสอบก๊าซได้หลายชนิด ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีความจำเพาะกับก๊าซแตกต่างกัน พอสรุปได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5 พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ [10]

Gas	Device/techniques/principles	Polymer	Sensor characteristics
NH ₃	Change in optical-transmittance using a 2 mm laser (He-Ne) source	PANI-PMMA	Sensitivity of PANI-PMMA coating are~10-4000 ppm, reversible response
	Electrical property measurement	Polypyrrole	Response time < 20 s, recovery time ~ 60s
	Electronic property of the film played the part in NH ₃ sensing	PPY-PVA Composite	Resistance increases with NH ₃ concentration but becomes irreversible beyond 10% NH ₃
	Electrical property measurement	PANI-isopolymolybdic acid nanocomposite	Resistance increases with NH ₃ concentration and is reversible up to 100 ppm NH ₃

ตารางที่ 6 พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ (ต่อ) [24]

Gas	Device/techniques/principles	Polymer	Sensor characteristics
NH ₃	Electrical property measurement	Acrylic acid doped polyaniline	Highly sensitive to even 1 ppm of NH ₃ at room temperature and shows stable responses up to 120 days
NO ₂	Electrical property measurement	PANI-isopolymolybdic acid nanocomposite	Resistance increases with NO ₂ concentration
	An amperometric gas sensor based on Pt/Nafion electrode	Nafion	Electrode shows sensitivity of 0.16 μ A/ppm at room temperature, response time of 45s and recovery time of 54s, a long-term stability >27 days
NO	Amperometric gas sensor	Polydimethylsiloxane (PDMS)	Shows sensitivity to 20 nM gas, high performance characteristics in terms of response time and selectivity
O ₂	Amperometric gas transducer	PDMS	Analyte can be measured up to 1.2 mM
	Optical sensing method	Tris(4,7'-diphenyl-1,10'-phenanthroline) Ru(II) perchlorate- luminescent dye dissolved in polystyrene layer	-
	Electrical property measurement	Nafion	Sensitivity 38.4 μ A/ppm, lowest limit 3.8 ppm, stability excellent (30h)
SO ₂	QCM-type gas sensor	Amino-functional poly (styrene-co-chloromethyl styrene) derivatives	DPEDA functional copolymer with 5 wt% of siloxane oligomer shows 11 min response time and good reversibility even near room temperature (50°C)
HCl	Optochemical sensor	5, 10, 15, 20-tetra (4'-alkoxy phenyl) porphyrin [TP (OR) PH ₂] embedded in poly(hexylacrylate), poly (hexylmethacrylate), poly(butyl methacrylate)	Reversibility sensitive to sub-ppm levels of HCl
	Optochemical detection	Ethylcellulose, poly(hexylmethacrylate)	Sensitivity smaller but faster recovery time compared to that of tetra-hydroxy substituted tetraphenylporphyrin
H ₂ S	Electrochemical detection	Nafion	High sensitivity (45 ppb v/v), good reproducibility, short response time (0.5 s)

2.7 กลไกการตรวจสอบก๊าซด้วยพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

Hee-Kwon Jun และคณะ [7] ทำการศึกษาอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซที่เตรียมได้จากพอลิไพร์โรล โดยอาศัยหลักการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าเมื่อพอลิเมอร์นั้นสัมผัสกับก๊าซ เนื่องจากพอลิไพร์โรลที่ผ่านการ Doping ด้วย DBSA แล้ว จะมี Hole เป็นพาหะในการพาประจุ ซึ่งเมื่อสัมผัสกับก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็น Electron donor ที่ดี เช่น Methanol จะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากก๊าซไปเติมเต็ม Hole ที่ยังขาดอิเล็กตรอนอยู่ ทำให้มีตัวพาหะในการพาประจุลดจำนวนลง ค่าความต้านทานจึงมีค่ามากขึ้น ดังนั้นเมื่อทำการวัดค่าความต้านทานของอุปกรณ์ที่ใช้

ในการตรวจสอบก๊าซก่อนและหลังการทดสอบจะทำให้ทราบถึงความว่องไวของอุปกรณ์ตรวจสอบที่เตรียมได้ ดังนี้

$$\% \text{Sensitivity } (\%S) = \frac{(R_g - R_a)}{R_a} \times 100 \quad (10)$$

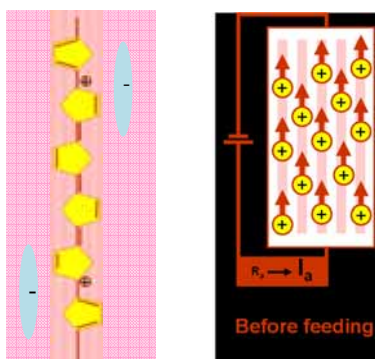
เมื่อ R_a คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซก่อนที่จะมีการสัมผัสก๊าซตัวอย่าง และ

R_g คือ ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซเมื่อผ่านก๊าซตัวอย่างแล้ว

ขั้นตอนการตรวจวัดค่าความว่องไวของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซ

1. การวัดค่าความต้านทานเริ่มต้น (R_a)

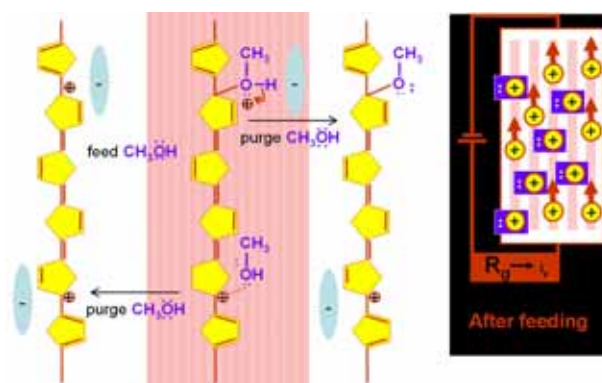
ค่าความต้านทานเริ่มต้น (R_a) ที่วัดได้จะมีค่าน้อยเนื่องจากจำนวน Hole ที่เป็นตัวพาหะนำพาประจุยังมีปริมาณมากอยู่



ภาพที่ 21 การวัดค่าความต้านทานเริ่มต้น (R_a)

2. การวัดค่าความต้านทานภายหลังการสัมผัสก๊าซ (R_g)

ค่าความต้านทานภายหลังการสัมผัสก๊าซ (R_g) ที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจำนวน Hole ที่เป็นตัวพาหะนำพาประจุมีปริมาณที่น้อยลง



ภาพที่ 22 การวัดค่าความต้านทานภายหลังการสัมผัสก๊าซ (R_g)

สิ่งที่เกิดขึ้นภายหลังการที่อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซได้สัมผัสก๊าซในครั้งแรกแล้ว พบว่า ค่าความต้านทานจะไม่กลับมาเท่าเดิมเหมือนเมื่อครั้งก่อนการทดลอง สาเหตุเนื่องจากการเกิด Absorption ของก๊าซบนผิวของพอลิไพร์โรลนั้นสามารถเกิดขึ้นได้สองลักษณะคือ

Physical Absorption: โมเลกุลของก๊าซจะถูกดูดซับบนผิวพอลิเมอร์ โดยที่ไม่เกิดพันธะเคมีขึ้น ดังนั้นภายหลังการปล่อยก๊าซออก โมเลกุลของก๊าซจึงสามารถหลุดออกจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้โดยง่าย

Chemical Absorption: โมเลกุลของก๊าซจะถูกดูดซับบนผิวพอลิเมอร์ โดยที่เกิดพันธะเคมีขึ้น ดังนั้นภายหลังการปล่อยก๊าซออก โมเลกุลของก๊าซจึงไม่สามารถหลุดออกจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้และยึดติดอยู่กับโมเลกุลของพอลิเมอร์ตลอด

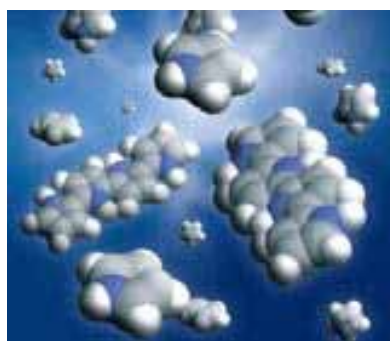
ดังนั้น ผลจาก Chemical Absorption จึงทำให้ปริมาณ Hole ที่เหลืออยู่มีน้อยลงเมื่อเทียบกับก่อนการทดลอง แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นในการทดสอบครั้งแรกเท่านั้น เนื่องจากบริเวณที่ว่องไวเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลของก๊าซได้นั้นจะเกิดปฏิกิริยาจนหมดบริเวณที่ว่องไว จนไม่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นอีก



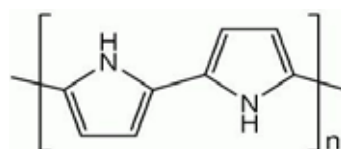
ภาพที่ 23 การเกิด Physical และ Chemical Absorption ของโมเลกุลก๊าซบนผิวของพอลิไพร์โรล

2.8 พอลิไพร์โรลและอนุพันธ์

พอลิไพร์โรลเป็นสารประกอบเคมีที่ได้จากการเชื่อมโยงโครงสร้างวงแหวนไพร์โรลเข้าด้วยกัน พอลิไพร์โรลเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าในกลุ่ม ที่จัดอยู่ในประเภท rigid-rod พอลิเมอร์ และจัดเป็นสารประกอบชนิดแรกของสารประเภทนี้ที่แสดงค่าการนำไฟฟ้าสูง พอลิไพร์โรลหรือที่เรียกกันในชื่อ pyrrole blacks หรือ polypyrrole blacks พอลิไพร์โรลที่พบในธรรมชาติมักเป็นส่วนหนึ่งของโคพอลิเมอร์กับพอลิอะเซทิลีนและพอลิอะนิลีนในเมลานินบางชนิด

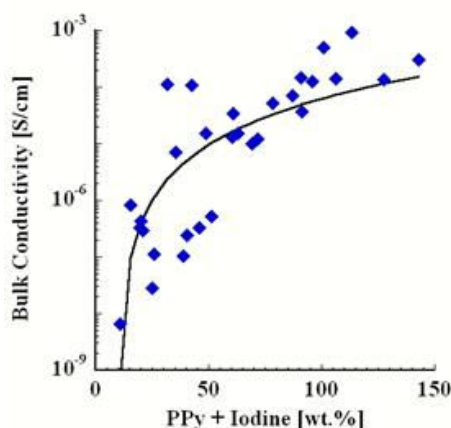


ภาพที่ 24 แบบจำลองโครงสร้างสามมิติไพร์โรล



ภาพที่ 25 โครงสร้างพอลิไพร์โรล

DE Weiss และผู้ร่วมวิจัยได้รายงานไว้ในงานวิจัยปี 1963 กล่าวว่าพอลิไพร์โรลที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอโอดีนแสดงค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของ Polypyrrole ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอโอดีน

วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ไพร์โรล สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่

วิธีที่ 1 ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

G. Torres-Gomez และ คณะ [22] อธิบายกระบวนการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลโดยกระบวนการเคมีไฟฟ้าไว้ กล่าวคือในการสังเคราะห์ประกอบด้วย working, counting และ reference electrode ซึ่งมีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.7-0.8 โวลต์ โดยที่ working electrode ทำจากลวดแพลทินัม ซึ่งต้องทำการกระตุ้นอิเล็กโทรดดังกล่าวก่อนสังเคราะห์ โดยการจุ่มลวดแพลทินัมในสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 10 % ให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ เป็นเวลา 5 นาที สำหรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ ประกอบด้วยสารละลาย $K_4[Fe(CN)_6]$ เข้มข้น 0.1 M และสารละลายไพร์โรลเข้มข้น 0.1 M โดยจะไม่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ระหว่างที่มีการสังเคราะห์

มีปัจจัยหลายประการในกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มพอลิเมอร์ ความสามารถในการยึดติดกับผิวอิเล็กโทรด สัณฐานวิทยาและความยืดหยุ่นของฟิล์มที่ได้ กระบวนการพอลิเมอไรเซชันบนแพลทินัมอิเล็กโทรดมีผลต่อลักษณะของฟิล์มที่ได้ กล่าวคือจะมีลักษณะเรียบ และมีความสามารถในการยึดเกาะที่ดีกว่าการทำพอลิเมอไรเซชันบนทินออกไซด์อิเล็กโทรด

วิธีที่ 2 ปฏิริยาเคมี

Y.Q. Shen และคณะ [23] ได้ทำการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลโดยกระบวนการ in situ doping polymerization โดยใช้กรดซัลฟอนิกเป็นสารกระตุ้นพาหะปริมาณ 14 mmol และไพร์โรลมอนอเมอร์ 14 mmol นำมาละลายในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 20 มิลลิลิตร ภายใต้สภาวะการกวนอย่างรุนแรงที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 0 องศาเซลเซียส จากนั้นค่อย ๆ หยดสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต 0.90 g ในน้ำกลั่นปราศจากไอออน 15 mL ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ทั้งปฏิกิริยาไว้ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นเทสารที่ได้จากปฏิกิริยาลงในน้ำปราศจากไอออนปริมาณมากเกินพอแล้วกรอง จากนั้นล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนและตามด้วยเมทานอลหลาย ๆ ครั้ง แล้วนำมาทำให้แห้งภายใต้สภาวะความดันต่ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน

2.9 การประยุกต์ใช้งานพอลิไพร์โรลในอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซหรือจุ่มกืออิเล็กทรอนิกส์

มีการศึกษาวิจัยการนำพอลิไพร์โรลมาประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจสอบก๊าซ พอสรุปได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 7 การประยุกต์ใช้งานพอลิไพร์โรลเป็นตัวตรวจสอบก๊าซ [24]

Sensor class	Analyte	Concentration range	Detection limit/sensitivity	Electrochemical response
Toxic gas noses	NH ₃	—	29.4 ppm	Conductometric
		—	100 ppm	Conductometric
		46–10,000 ppm	300 ppm	SAW
		4000–10,000 ppm	4 × 10 ³ ppm	Conductometric
		50–150 ppm	12.8 mΩ/ppm	
	NO _x	0.8–11 ppm	11 ppm	Voltammetric and Potentiometric
		—	50.1 ppm	Conductometric
		10–200	20 ppm	QMB
	CO _x	—	2 × 10 ⁴ ppm ^{123a}	Conductometric
		—		Conductometric
Toxic gas noses	SO ₂ and H ₂ S	500–2,500 ppm	500 ppm	Conductometric
		10–200	10 ppm	QMB
	CH ₄	—	40a	Conductometric

ตารางที่ 8 การประยุกต์ใช้งานพอลิไพร์โรลเป็นตัวตรวจสอบก๊าซ (ต่อ) [24]

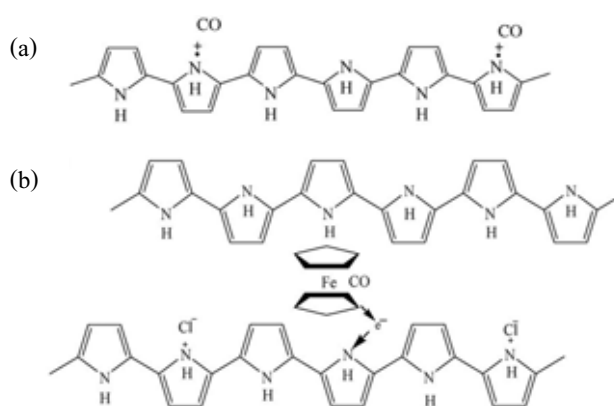
Sensor class	Analyte	Concentration range	Detection limit/sensitivity	Electrochemical response
Non-toxic gas EN	Oxygen	0–200 ppb	200 ppb	Photocurrent measurements
	Hydrogen	1000–5000 ppm	0.0519 $\mu\text{A/ppm}$	Potentiostatic
Aroma sensors	Methanol	15–218 mg l^{-1}	9.7 $\text{m}\Omega/\text{mg l}^{-1}$	Conductometric
		–	19.2 ^b	Conductometric
		14–250 mg l^{-1}	1.3 $\Omega/\text{mg l}^{-1}$	Conductometric
Aroma sensors	Ethanol	15–140 mg l^{-1}	7.7 $\text{m}\Omega/\text{mg l}^{-1}$	Conductometric
		–	13.4 ^b	Conductometric
		2630–24800 ppm	30 $\mu\text{V/ppm}$	Conductometric
	2-Propanol	–	8.8 ^b	Conductometric
	Butanol	5–80 mg/m^3	–	Conductometric
	Phenol	5–100 mg/m^3	–	Conductometric
	Butane	100–40,000 ppm	1000 ppm	Conductometric
	Benzene	–	3.1 ^b	Conductometric
	Carbon tetrachloride	–	5.3 ^b	Conductometric
Humidity sensors vapors	Water	RH: 35–65%	RH: 2–4%	Conductometric
		RH: 10–90%	$R_d/R_h: 4.2 \times 10^{-2}$ RH:	Potentiostatic
		RH: 20–90%	1%	Conductometric
Microbial nose	Acetic acid, butylamine, 2-pentanone, 3-pentanone, cyclohexanone, butanol, diethyl ether, acetaldehyde, benzyl acetone, N-decylaldehyde, isoamyl acetate, acetoacetic acid	Flow rate: 200 mL min^{-1}	–	Conductometric

RH: relative humidity; **Rd:** resistance under dry air; **Rh:** resistance under specific humidity; **SAW:** surface acoustic wave response; **QMB:** quartz microbalance response.

^a Sensitivity: $R_{\text{gas}}/R_{\text{air}}$.

^b Sensitivity: $(R_t - R_o)/R_o$, (R_t : resistance at contact time 't' R_o : resistance in absence of compound).

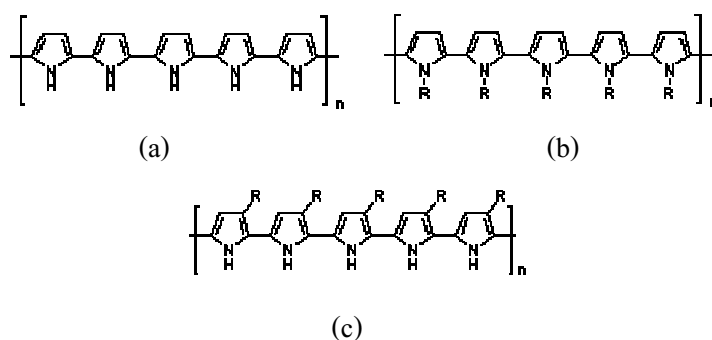
S. Radhakrishnan และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาการเตรียมพอลิไพร์โรลที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยเฟอร์โรซีน ด้วยวิธีการใส่เข้าไปโดยตรงขณะที่ทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันพอลิไพร์โรล พบว่าเฟอร์โรซีนที่เพิ่มเข้าไปในโครงสร้างนั้นช่วยเพิ่มค่าร้อยละความว่องไวต่อก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ให้แก่พอลิไพร์โรลซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานทางอุปกรณ์ตรวจวัด ในกระบวนการสังเคราะห์ทำผ่านปฏิกิริยาออกซิเดทีฟเคมีคัลพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งมีเฟอร์โรซีนอยู่ร่วมด้วย โดยมีเฟอร์ริกคลอไรด์ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ การตอบสนองของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์พบว่ามีความเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณเฟอร์โรซีนที่เจือปน



ภาพที่ 27 แสดงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่มีต่อ (a) Polypyrrole
(b) Polypyrrole ที่มีการเจือปนด้วยอะตอมเฟอร์โรซีน [25]

ข้อจำกัดพอลิไพร์โรล

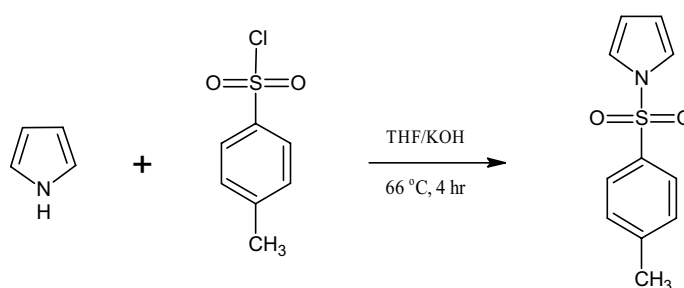
A. Ramanavicius และคณะ [26] ได้รายงานไว้ว่าพอลิไพร์โรลได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1912 ทั้งนี้พอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์ขึ้นโดยกระบวนการทางเคมีทั่วไปนั้นไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายใด ๆ เนื่องจากแรงกระทำระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีค่ามาก ดังนั้นจึงเป็นปัญหาหลักในกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์เพื่อการประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงโครงสร้างพอลิไพร์โรลโดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไปบนวงแหวนไพร์โรล



ภาพที่ 28 (a) Polypyrrole, (b) Poly-N-alkylpyrrole, (c) Poly-3-alkylpyrrole [26]

การเตรียมอนุพันธ์ไพร์โรล

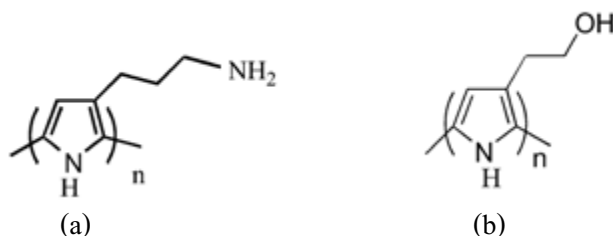
R.C. Foitzik และคณะ [27] ได้กล่าวถึงขั้นตอนการเตรียม *N-p*-Toluenesulfonylpyrrole เพื่อเป็นสารตัวกลางในการสังเคราะห์ 3-*iso*-butylpyrrole and 3-*iso*-pentylpyrrole สำหรับประยุกต์ใช้ในงาน wool coating ไว้ดังนี้



ภาพที่ 29 แสดงปฏิกิริยาการเตรียม *N-p*-Toluenesulfonylpyrrole [27]

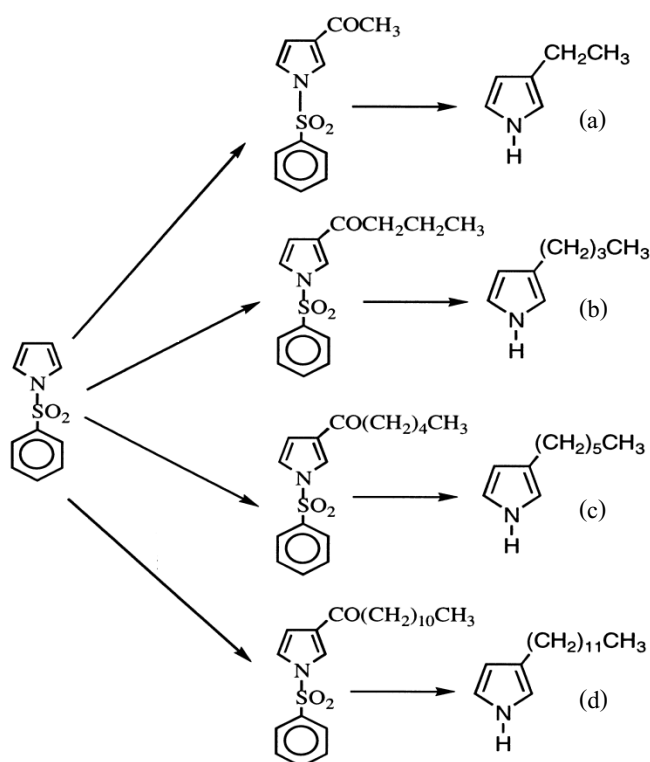
ความสำคัญของการเตรียม *N-p*-Toluenesulfonylpyrrole เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยา ณ ตำแหน่ง 2 และ 5 ซึ่งเป็นบริเวณที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกว่าตำแหน่งที่ 3 กระบวนการดังกล่าว เรียกว่าการ blocking ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญต่อการเตรียมอนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่งที่ 3

H. Korri-Youssoufi และคณะ [28] ศึกษาการเตรียมอนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่งที่ 3 เป็นหมู่เอมีน และหมู่ไฮดรอกซิล เพื่อการประยุกต์ใช้ในงานอุปกรณ์ตรวจสอบสารชีวโมเลกุล



ภาพที่ 30 (a) Poly (2-(3-pyrrole) propylamine), (b) Poly (2-(3-pyrrole) ethanol) [31]

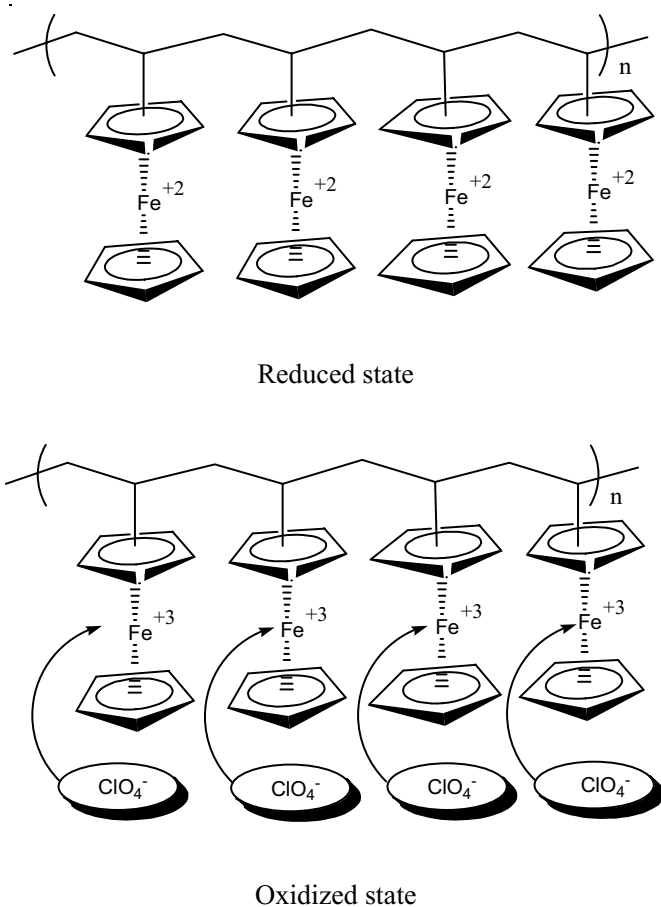
B.P.J. de Lacy Costello และคณะ [29] สังเคราะห์อนุพันธ์ไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ตำแหน่งที่ 3 ที่มีความยาวสายโซ่หมู่แทนที่แตกต่างกัน จากการศึกษาวิจัยพบว่าอนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่ความยาวของหมู่แทนที่เพิ่มขึ้นนั้น จะมีความว่องไวต่อสารประกอบไม่มีขั้วเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 31 (a) 3-pyrrolyl ethane, (b) 3-pyrrolyl butane, (c) 3-pyrrolyl hexane, (d) 3-pyrrolyl dodecane [29]

2.10 การนำไฟฟ้าของโมเลกุลที่โครงสร้างมีหมู่ฟังก์ชัน Ferrocene

เนื่องจาก Poly(vinyl ferrocene) (PVF) จัดเป็น Redox polymer ซึ่งจะมีบริเวณที่ถูก Oxidized หรือ Reduced ประจำที่ โดยที่ประจุจะไม่มีการเคลื่อนที่ไปตามสายโซ่โพลีเมอร์ แต่จะอยู่ที่บริเวณ Pendant group โครงสร้างทางเคมีของ PVF แสดงได้ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 Poly(vinyl ferrocene) ในรูปของ Reduced state และ Oxidized state ที่ทำหน้าที่เป็น Host ให้กับ ClO_4^- ที่เป็น counterion

กระบวนการ Oxidation สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้สาร Electrolyte ที่เหมาะสม (เช่น LiClO_4 ในสารละลาย Acetonitrile) มีการดึงอิเล็กตรอนออกจากโครงสร้างของ ferrocene และถูกทำให้เป็นกลางด้วยสารละลาย Electrolyte



ประจุจะเกิดการเคลื่อนที่ด้วยการกระโดดข้าม (Hopping) จากหมู่ ferrocene หนึ่งไปสู่มูล ferrocene ข้างเคียง ดังนั้นการมีสารโมเลกุลขนาดเล็กทำหน้าที่เป็น Plasticizer ช่วยเพิ่ม free volume ให้กับโมเลกุล จะยิ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุชนิดนี้ปกติจะอยู่ในช่วง 10^{-5} ถึง $10^{-7} (\Omega\text{-cm})^{-1}$ ซึ่งน้อยกว่ากรณีของ polypyrrole ที่มีระบบ π -Conjugation ในโครงสร้างที่มีค่าประมาณ $10 (\Omega\text{-cm})^{-1}$

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. 1,4-dioxane (AR grade)
2. 3-bromopropionyl chloride (Aldrich, Technical grade)
3. Absolute ethanol
4. Acetone
5. Acetonitrile (AR grade)
6. Ammonium persulfate (Riedel-de Haën, $\geq 97.0\%$)
7. Anhydrous aluminium chloride (Fluka, $\geq 99.0\%$)
8. Anhydrous dichloromethane (Sigma-Aldrich, $\geq 99.8\%$)
9. Anhydrous sodium sulfate
10. Copper (II) perchlorate hexahydrate (Aldrich, 98 %)
11. Deionized water
12. Dichloromethane (AR grade)
13. Diethyl ether (AR grade)
14. Dimethyl sulfoxide (Riedel-de Haën, $\geq 99.5\%$)
15. Distilled water
16. Dodecylbenzenesulfonic acid sodium salt (Fluka, Technical grade)
17. Ferrocene carboxylic acid (Fluka, $\geq 97.0\%$)
18. Hydroxylamine hydrochloride (Univar, 99%)
19. Lithium fluoride (Fluka, $\geq 99.0\%$)
20. Lithium perchlorate (Fluka, $\geq 98.0\%$)

21. Methanol
22. Nitrogen (g)
23. Potassium hydroxide
24. *p*-Toluenesulfonyl chloride (Fluka, $\geq 99.0\%$)
25. Pyrrole (Fluka, $\geq 97.0\%$)
26. Sodium chloride
27. Sodium hydroxide
28. Tetrahydrofuran (AR grade)
29. Ultra High Purity Nitrogen (g)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. 1-Necked round bottom flask
2. 3-Necked round bottom flask
3. 3-ways valve
4. Beaker
5. Buchner funnel
6. Rubber bulb
7. Burette
8. Clamp/Clamp holder
9. Condenser
10. Conical flask
11. Cylinder
12. Dropper
13. Drying tube
14. Equalizing dropping funnel
15. Evaporator
16. Expansion adapter

17. Filter paper
18. Forceps
19. Glass funnel
20. Hot plate
21. Magnetic bar
22. Mechanical stirrer
23. Oil bath
24. Pipette
25. Reducing adapter
26. Separatory funnel
27. Sintered glass funnel
28. Soxhlet extractor
29. Spatula
30. Still head
31. Stopper
32. Suction flask
33. Temperature controller
34. Test tube
35. Thermometer
36. Vacuum oven
37. Vial tube

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. Differential scanning calorimeter (Mettler Toledo: DSC1)
2. Electrometer/high-resistance meter (Keithley: 6517A, USA)
3. Fourier transform infrared spectrophotometer (Bruker Optik GmbH: Vertex70, Germany)
4. Proton nuclear magnetic resonance spectrometer (Bruker: 300 Ultrasheid, Germany)
5. Thermogravimetric analyzer (Mettler Toledo: TGA/DSC1)

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์ตัวรองรับ

3.4.1.1 การสังเคราะห์อนุพันธ์ไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่ง 3 (3-Py)

ขั้นที่ 1 การสังเคราะห์ *N-p*-Toluenesulfonylpyrrole

ไพร์โรลมอนอเมอร์ถูกทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นภายใต้ความดันต่ำ ก่อนนำมาใช้ในการทดลอง เติมไพร์โรล 25.00 g (0.373 mol) ลงใน 3-necked-round bottom flask ขนาด 2 L ซึ่งบรรจุเตตระไฮโดรฟูแรนปริมาตร 1.10 L กวนสารละลายไพร์โรลเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 41.85 g (0.746 mol) แล้วกวนสารละลายผสมจนครบ 20 นาที และเติมสารละลาย *p*-Toluenesulfonyl chloride 66.73 g (0.350 mol) แล้วตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการรีฟลักซ์ (reflux) สารผสม โดยควบคุมสภาวะการทดลองไว้ที่อุณหภูมิ 66 องศาเซลเซียส เมื่อครบกำหนดเวลา 4 ชั่วโมง หยุดให้ความร้อนจะได้สารที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้น สีชมพูอ่อน ปล่อยให้สารที่ได้จากปฏิกิริยาเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เติมไดเอทิลอีเทอร์ 500 mL ลงใน flask แล้วกวนสารผสมที่ได้จากปฏิกิริยาจนครบ 20 นาที นำสารที่ได้มาสกัดด้วยน้ำกลั่นโดยใช้กรวยแยก เติมน้ำกลั่นแล้วเขย่ากรวยแยก เพื่อให้สารทั้งสองเฟสสัมผัสกัน ตั้งทิ้งไว้จนสารที่อยู่ภายในกรวยแยก แยกออกเป็น 2 ชั้นอย่างสมบูรณ์ โดยชั้นบนเป็นชั้นของสารละลายอินทรีย์ ส่วนชั้นล่างเป็นสารละลายชั้นน้ำ เก็บชั้นสารละลายอินทรีย์ (ชั้นบน) ใส่ใน conical flask ขนาด 500 mL เติมโซเดียมซัลเฟตที่ปราศจากน้ำ (anhydrous Na_2SO_4) ในปริมาณที่มากเกินไปลงใน conical flask ปล่อยให้กวนทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลานำสารละลายไปกรองแยกของแข็งออกโดยใช้กรวยแก้ว นำของเหลวที่กวนได้ไปใส่ในตู้อบสูญญากาศ เพื่อดึงตัวทำละลายออกจากสาร จะได้ของแข็งสีเทาแล้วนำไปตกตะกอนใหม่อีกครั้ง [27] ด้วยเมทานอลร้อนปริมาตร 200 mL จะได้สารผลิตภัณฑ์เป็นผงละเอียดสีขาว อบให้แห้งโดยใช้

ดูดซับสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง น้ำหนักที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 66.70 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 86.06 % ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.1.1

ขั้นที่ 2 การสังเคราะห์ 3-derivatized pyrrole precursor;

N-p-Toluenesulfonylpyrrole-3-(3-bromopropionyl)pyrrole

เติม anhydrous dichloromethane 200 mL ลงใน 3-necked-round bottom flask ขนาด 500 mL ที่มีท่อไนโตรเจนถูกต้องเข้าที่คอด้านหนึ่งของ flask เพื่อตั้งสภาวะการทดลองให้อยู่ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน เติม anhydrous aluminium chloride 10.84 g (81.4 mmol) กวนสารผสมเป็นเวลา 20 นาที เมื่อครบกำหนดเวลา ค่อยๆ หยดสารละลาย 3-bromopropionyl chloride 16.28 g (95.0 mmol) ในไดคลอโรมีเทน 100 mL โดยควบคุมอุณหภูมิการทดลองไว้ที่ 20 องศาเซลเซียส กวนสารละลายต่อไปอีก 30 นาที แล้วปรับลดอุณหภูมิลงมาที่ 5 องศาเซลเซียส หยดสารละลาย *N-p-Toluenesulfonylpyrrole* 18.00 g ในไดคลอโรมีเทน 100 mL กวนสารผสมภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนจนครบกำหนดเวลา 20 ชั่วโมง นำสารที่ได้จากปฏิกิริยามาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยค่อยๆ หยดน้ำเย็นลงในสารที่ได้จากปฏิกิริยา สกัดสารผสมด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง แล้วแยกสารผสมโดยใช้กรวยแยก ตั้งไว้จนกระทั่งสารผสมแยกออกเป็น 2 ชั้นอย่างสมบูรณ์ สำหรับขั้นตอนนี้สารละลายอินทรีย์ที่ได้จะอยู่ชั้นล่าง และชั้นบนเป็นสารละลายชั้นน้ำ เก็บชั้นสารอินทรีย์ (ชั้นล่าง) สกัดซ้ำด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว แยกโดยใช้กรวยแยก เก็บสารละลายอินทรีย์ใน conical flask ขนาด 250 mL เติมโซเดียมซัลเฟตที่ปราศจากน้ำ (anhydrous Na_2SO_4) ในปริมาณที่มากเกินไป และกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลากองตะกอน Na_2SO_4 แล้วตักตะกอนสารใน petroleum ether (60-80 °C) ที่กวนอย่างแรง กรองสารผลิตภัณฑ์โดยใช้ sintered glass funnel อบสารที่กรองได้ในดูดซับสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารผลิตภัณฑ์เป็น *N-p-Toluenesulfonylpyrrole-3-(3-bromopropionyl)pyrrole* น้ำหนักที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 15.44 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 79.80 % ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.1.2

ขั้นที่ 3 การสังเคราะห์ 3-(3-bromopropionyl)pyrrole; 3-Py

เติม 1,4-dioxane ปริมาตร 300 mL ลงใน 3-necked-round bottom flask ขนาด 1 L จากนั้นค่อย ๆ หยด 3-derivatized pyrrole precursor 11.13 g (31.3 mmol) ลงใน flask กวนสารผสมที่อุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน 30 นาที ค่อย ๆ หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 M 300 mL ลงในสารละลายผสม กวนสารผสมที่อุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนจนครบกำหนดเวลา 72 ชั่วโมง เติมไดเอทิลอีเทอร์ 150 mL กวนสารละลาย 20 นาที นำสารผสมมาสกัดด้วยน้ำกลั่นโดยใช้กรวยแยก เขย่ากรวยแยกเพื่อให้สารทั้งสองเฟสสัมผัสกัน ตั้งไว้จนกระทั่งสารผสมแยกออกเป็น 2 ชั้นอย่างสมบูรณ์ แล้วเก็บชั้นสารละลายอินทรีย์ (ชั้นบน) แล้วนำมาสกัดซ้ำด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว แล้วเก็บชั้นสารละลายอินทรีย์ใน conical flask ขนาด 500 mL เติมโซเดียมซัลเฟตที่ปราศจากน้ำ (anhydrous Na_2SO_4) ในปริมาณที่มากเกินไป และกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลากรองตะกอน Na_2SO_4 ทิ้งไป เก็บสารละลายที่กรองได้ไปตั้งตัวทำละลายออกภายใต้สภาวะความดันต่ำ โดยใส่ไว้ในตู้อบสูญญากาศ ได้สารที่มีลักษณะคล้ายน้ำมันสีเหลืองอ่อน แล้วตกตะกอนน้ำมันสีเหลืองอ่อนในสารละลายผสมระหว่างไดเอทิลอีเทอร์กับ light petroleum ในอัตราส่วน 1:1 กรองสารผลิตภัณฑ์โดยใช้ sintered glass funnel อบสารที่กรองได้ในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง น้ำหนักสารที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 5.82 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 92.03 % ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.1.3

3.4.2 การเตรียมอนุพันธ์พอลิไพร์โรล 3-PPy

เติมสารละลายของ 3-(3-bromopropionyl)pyrrole 0.2020 g (1 mmol) ใน acetonitrile 10 mL ลงใน 3-necked-round bottom flask ขนาด 50 mL ควบคุมอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส กวนสารละลายภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน 10 นาที จากนั้นค่อย ๆ หยดสารละลาย Copper(II) perchlorate hexahydrate 0.7410 g (2 mmol) ใน acetonitrile 10 mL ลงในสารละลายอนุพันธ์ไพร์โรล จะมีตะกอนสีดำเกิดขึ้นภายในสารละลายใส กวนสารผสมภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนจนครบกำหนดเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยานำสารไปกรองด้วย sintered glass funnel ล้างตะกอนอนุพันธ์พอลิไพร์โรลด้วยน้ำกลั่นและ acetonitrile ในปริมาณที่มากเกินไปตามลำดับ ตะกอนอนุพันธ์พอลิไพร์โรลถูกนำมาล้างด้วย acetonitrile ร้อนโดยใช้ continuous

soxhlet extractor เมื่อครบกำหนดเวลา 8 ชั่วโมง หยดให้ความร้อน และปล่อยให้สารเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง นำตะกอนไปอบในตู้อบสูญญากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้สารผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งสีดำของตะกอนอนุพันธ์พอลิไพร์โรล น้ำหนักสารที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 0.1950 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 97.48 % ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.2 และผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2

3.4.3 การเตรียมอนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่งที่ 3 เป็นหมู่ออกซิม (3-PPy oxime)

เติม 3-PPy 1.0500 g (5 mmol) ใน DMSO 10 mL ใน 3-necked-round bottom flask ขนาด 100 mL กวนสารผสมภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน 20 นาที ค่อย ๆ หยด Hydroxylamine hydrochloride 0.3475 g (5 mmol) ใน absolute ethanol 10 mL กวนสารผสมต่ออีก 10 นาที แล้วตั้งอุปกรณ์เพื่อทำรีฟลักซ์ (reflux) อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาถูกควบคุมไว้ที่ 90 องศาเซลเซียส เมื่อครบกำหนดเวลา 90 นาที หยดให้ความร้อน แล้วปล่อยให้สารเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง เทสารที่ได้จากปฏิกิริยาลงในอะซิโตนที่มากเกินไปที่มีการกวนอย่างรุนแรง จะได้ตะกอนสีดำของพอลิเมอร์ นำมากรองและล้างตะกอนขณะกรองด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลตามลำดับ นำสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปอบโดยใช้ตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง น้ำหนักสารที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 1.0311 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 95.89 % ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.3 และผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2

3.4.4 การทำแอสเตอร์รีฟิเคชันพอลิเมอร์ตัวรองรับด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต

ขั้นที่ 1 การเตรียมเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na-FCC)

เติมเตตระไฮโดรฟูแรน 100 mL ใน 3-necked-round bottom flask ขนาด 500 mL ค่อย ๆ หยดสารละลายกรดเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิลิก น้ำหนัก 13.70 g (59.5 mmol) ในน้ำ แล้วกวนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ค่อย ๆ หยดสารละลาย 50% โซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป จนกระทั่งได้ตะกอนสีเหลืองทองของเกลือ Na-FCC เกิดขึ้น โดยระวังอย่าให้จำนวนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่ากรดเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิลิก ปล่อยให้กวนต่อไปอีก 12 ชั่วโมง กรองแยกเกลือที่ได้แล้วล้างให้สะอาดด้วยเตตระไฮโดรฟูแรน 3 ครั้ง แล้วอบให้แห้งในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3

วัน มีน้ำหนัก 14.35 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (%yield) เท่ากับ 95.32 % ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ และ FT-IR แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.4.1

ขั้นที่ 2 การทำเอสเทอร์รีฟิเคชันของอนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่ออกซิม (3-PPy oxime FCC)

เติมสารละลาย 3-PPy oxime 0.4301 g (2 mmol) ใน DMSO ปริมาตร 15 mL ลงใน 3-necked-round bottom flask ขนาด 100 mL กวนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนจนครบ 30 นาที เติมสารละลายเกลือ Na-FCC 0.5061 g (2 mmol) ในน้ำ 10 mL แล้วตั้งอุปกรณ์เพื่อทำรีฟลักซ์ (reflux) กวนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาหยุดให้ความร้อนและปล่อยให้สารเย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นเทสารละลายพอลิเมอร์ทั้งหมดลงในอะซิโตนที่มากเกินไปที่กวนอย่างแรง กรองแยกพอลิเมอร์ที่ได้และล้างด้วยอะซิโตน 50 mL 2 ครั้ง จึงนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง น้ำหนักสารที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 0.6954 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 95.47 % ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ และ FT-IR แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.4.2 และผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2

3.4.5 การสังเคราะห์พอลิไพร์โรล (PPy)

เติมสารละลายไพร์โรล 0.9393 g (14 mmol) ในน้ำปราศจากไอออน 20 mL ใน 3-necked-round bottom flask ขนาด 100 mL กวนสารละลายเป็นเวลา 20 นาทีภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาถูกควบคุมไว้ที่ 0 องศาเซลเซียส จากนั้นค่อย ๆ หยดสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต 0.9000 g (3.95 mmol) ในน้ำปราศจากไอออน 15 mL ควบคุมปฏิกิริยาไว้ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลา เทสารที่ได้จากปฏิกิริยาลงในน้ำปราศจากไอออนปริมาณมากเกินไปแล้วกรอง จากนั้นล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากไอออนและเมทานอลหลาย ๆ ครั้ง แล้วนำอบในตู้อบสุญญากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง น้ำหนักสารที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 0.8991 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 98.66 % ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.5 และผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2

3.4.6 การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ (Doping)

ละลายพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ต้องการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุในตัวทำละลาย DMSO ที่มีสาร Dopant คือ Lithium fluoride, Lithium perchlorate และ Sodium-dodecylbenzenesulfonic acid ผสมอยู่ในอัตราส่วนของโพรไรด์ต่อสาร Dopant เป็น 1 ต่อ 1 โดยการกวนที่อุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปประเหยเอาตัวทำละลายออกด้วยวิธีการลดความดันที่อุณหภูมิห้อง โดยการใส่ไว้ในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

3.4.7 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำมาพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrophotometer (Bruker Optik GmbH: Vertex70, Germany) โดยขั้นแรกจะทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยใช้วิธีการบดผสมพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้กับผง KBr แล้วนำไปทดสอบโดยใช้เทคนิค transparent mode ช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ ในส่วนการคำนวณหาปริมาณหมู่ฟังก์ชันจะใช้เครื่อง Proton nuclear magnetic resonance spectrometer (Bruker: 300 Ultraschild, Germany) โดยในการเตรียมชิ้นงานทดสอบนั้นจะใช้วิธีการละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย deuterated DMSO (DMSO-d_6)

3.4.8 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ตัวรองรับ

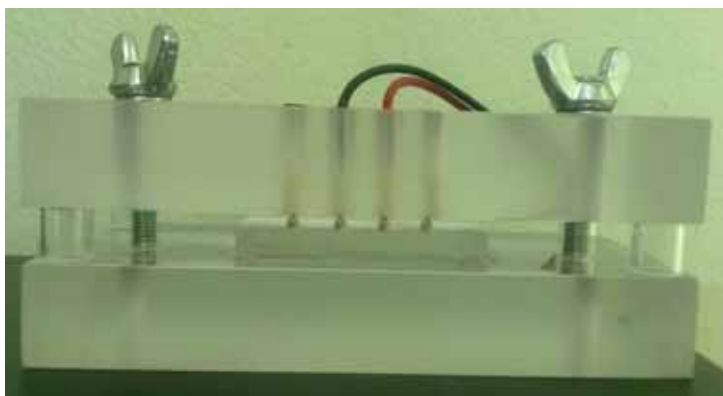
พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำมาทดสอบความเสถียรทางความร้อนเพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA1) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ $50\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน และหาอุณหภูมิ glass transition (T_g) ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC1) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ $25\text{--}225\text{ }^{\circ}\text{C}$ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

3.4.9 การทดสอบค่าการนำไฟฟ้าและความว่องไวต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์

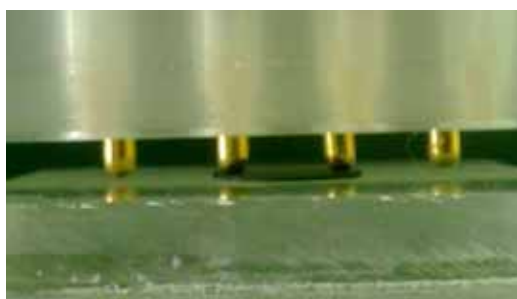
3.4.9.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกและแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ FT-IR มาอัดผงพอลิเมอร์ที่ผ่านการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุแล้วที่บดละเอียด น้ำหนักประมาณ 0.1 กรัม

ด้วยแรงอัด 3,000 ปอนด์ วัดความหนาของชิ้นงานด้วย dial thickness gauge (OZAKI MEG: PEACOCK) แล้วต่อเข้ากับ sensor chamber ที่ต่ออยู่กับเครื่อง Electrometer/high-resistance meter (Keithley: 6517A, USA) ดังภาพที่ 33 และ 34 ตามลำดับ



ภาพที่ 33 อุปกรณ์วางชิ้นงานเพื่อทดสอบหาสมบัติการนำไฟฟ้า



ภาพที่ 34 การวางชิ้นงานเพื่อทดสอบหาสมบัติการนำไฟฟ้า

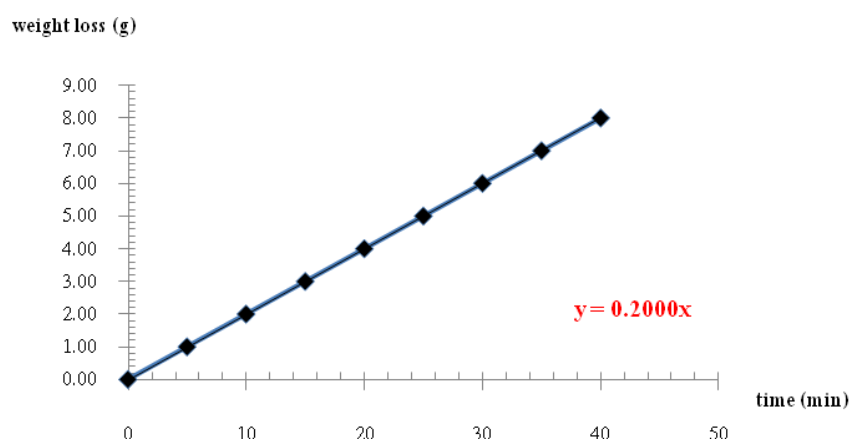
3.4.9.2 การควบคุมความเข้มข้นของไอระเหยตัวอย่าง

การควบคุมความเข้มข้นของไอระเหยตัวอย่าง ต้องมีการเทียบมาตรฐานไอระเหยของสารตัวอย่างก่อนเริ่มทำการทดลอง เพื่อให้หาความเข้มข้นของไอระเหยสารตัวอย่างเริ่มต้นก่อนการทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าและค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยตัวอย่าง โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นแรก กำหนดอัตราเร็วในการไหลของก๊าซไนโตรเจนให้มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยในการทดสอบเลือกใช้ค่าอัตราเร็วในการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 500 mL/min จากนั้นวัดค่าน้ำหนักที่หายไป (weight loss) ของสารตัวอย่าง โดยเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาที จนครบระยะเวลา 40 นาที

ขั้นสอง นำข้อมูลค่าน้ำหนักที่หายไปของสารตัวอย่างมาเขียนกราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่หายไปต่อเวลาที่เก็บข้อมูล จากกราฟเราจะได้สมการความสัมพันธ์สำหรับการกำหนดค่าความเข้มข้นของไอระเหยตัวอย่างเริ่มต้น

Calibration curve method



แทนค่า เวลาที่ใช้ในการให้ก๊าซไนโตรเจนผ่านสารตัวอย่างที่ตัวแปร x ในสมการ จะได้ค่าน้ำหนักที่หายไปของสารตัวอย่าง เพื่อนำไปใช้คำนวณเป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของไอระเหยตัวอย่างต่อไป

ขั้นที่สาม ความเข้มข้นไอระเหยตัวอย่าง กำหนดไว้ในหน่วย ppm โดย 1 ppm หมายถึงปริมาณสารตัวอย่าง 1 ส่วนในตัวทำละลาย 1,000,000 ส่วน หรือ ปริมาณสารตัวอย่าง 1 มิลลิกรัมในตัวทำละลายปริมาณ 1 ลิตร (mg/L)

ตัวอย่าง การคำนวณหาความเข้มข้นไอระเหยตัวอย่าง กำหนดให้ เวลาในการปล่อยก๊าซในโตรเจนผ่านสารตัวอย่าง เท่ากับ 32 นาที โดยก๊าซในโตรเจนมีอัตราเร็วเท่ากับ 500 mL/min หรือ 0.5 l/min จากสมการ

$$y = 0.200x$$

แทนค่า x ด้วย 32 min จะได้ $y = 6.4$

นั่นหมายความว่าปล่อยก๊าซในโตรเจนผ่านสารตัวอย่างเป็นเวลา 30 นาที ทำให้ค่าน้ำหนักที่หายไปของสารตัวอย่างเท่ากับ 6.4 g หรือ 6400 mg

และ ปริมาณก๊าซในโตรเจนที่ถูกใช้ไปในระยะเวลา 32 นาที เท่ากับ

$$32min * 0.5 L/min = 16 L$$

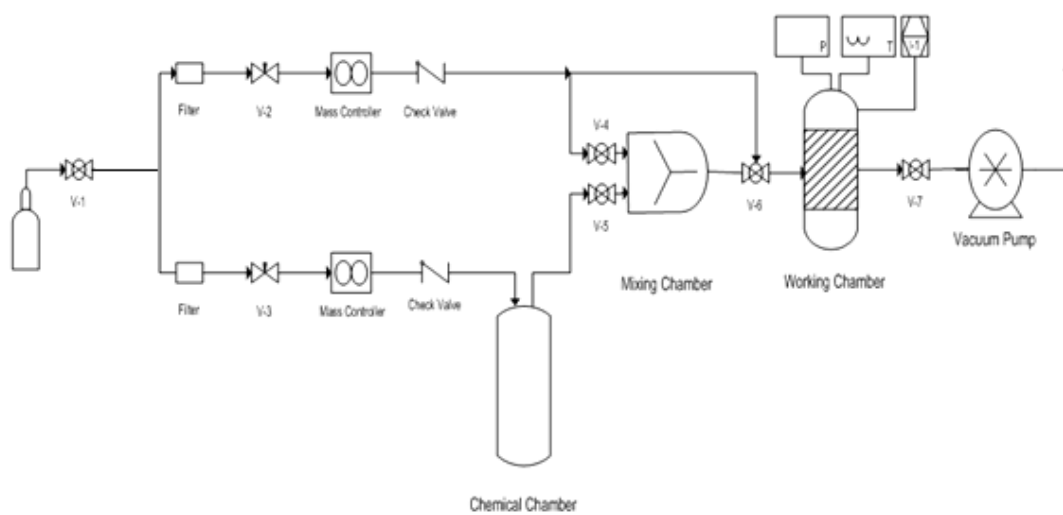
ดังนั้น ความเข้มข้นไอระเหยตัวอย่าง เท่ากับ

$$\frac{6400 \text{ mg}}{16 L} = 400 \text{ ppm}$$

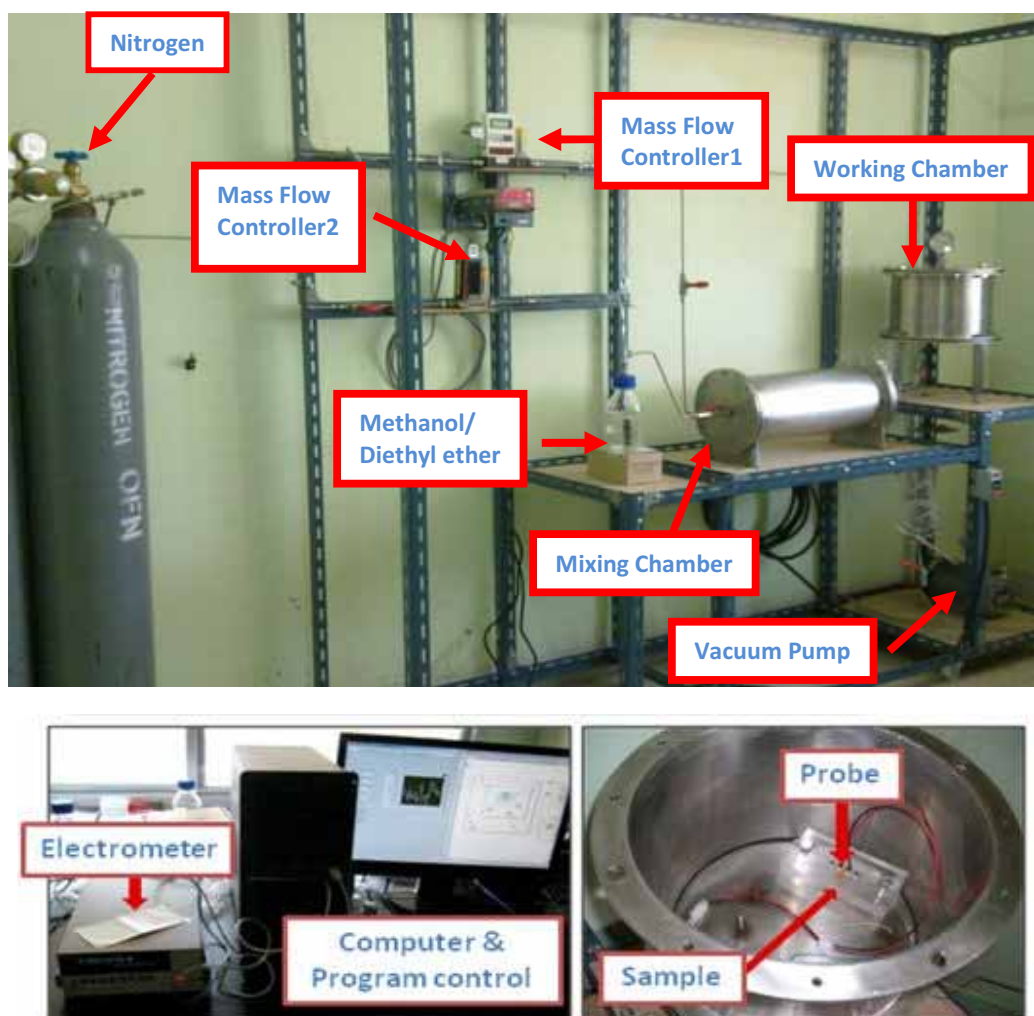
ขั้นที่สี่ ขั้นตอนการเตรียมสถานะบรรยากาศเมทานอล และไดเอทิลอีเทอร์ความเข้มข้นคงที่ อุปกรณ์ที่ใช้จะเป็นภาชนะบรรจุก๊าซขนาด 10 ลิตร 2 ถังต่อกัน ถังแรกด้านหนึ่งจะต่อกับท่อนำก๊าซซึ่งสามารถเลือกเปิดควาล์วสำหรับป้อนก๊าซในโตรเจน หรือ ไอระเหยตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ (เมทานอล หรือ ไดเอทิลอีเทอร์) โดยมีอุปกรณ์ Mass flow controller ที่ใช้

เป็นอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ ส่วนอีกด้านหนึ่งจะมีท่อที่มีวาล์วเปิดปิด เชื่อมต่อไปยัง working chamber สำหรับ working chamber ภายในจะมีสายไฟต่อไว้ สามารถเชื่อมต่อกับตัว probe ได้ ส่วนด้านล่างจะต่อกับปั๊มดูดอากาศ และมีท่อสำหรับเชื่อมต่อกับบรรยากาศภายนอก ในการอัดความดันเพื่อเตรียมบรรยากาศของเมทานอล หรือ ไดเอทิลอีเทอร์ จะเริ่มจากเปิดท่อสำหรับเชื่อมต่อถึงทั้ง 2 ใบ แล้วเปิดปั๊มดูดอากาศจนถึงทั้งสองใบมีความดันต่ำมาก ซึ่งในที่นี้จะใช้เป็น 0.2 bar จากนั้นจึงปิดวาล์วที่เชื่อมต่อระหว่างถึงทั้งสอง แล้วอัดไอระเหยที่จะทดสอบเข้าไปในถังใบแรก โดยเปิดวาล์วที่เชื่อมต่อระหว่างถึงใบแรกกับขวดบรรจุเมทานอล หรือ ไดเอทิลอีเทอร์ แล้วใช้ก๊าซไนโตรเจนช่วยในการพาไอระเหยของสารเข้าไปในถัง โดยใช้อัตราการป้อนก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 500 mL/min จนกระทั่งภายในถังมีปริมาณเมทานอลและไดเอทิลอีเทอร์เท่ากับ 8.75 กรัม ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟที่ทำการเทียบมาตรฐานมาก่อนแล้ว จึงทำการหยุดป้อนไอระเหยตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ เปลี่ยนมาป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ mixing chamber โดยตรงจนกระทั่งมีปริมาณก๊าซไนโตรเจนในถังเท่ากับ 17.5 ลิตร (จากการทดลองพบว่าเมื่อป้อนก๊าซไนโตรเจนจนกระทั่งมีปริมาณเท่ากับ 17.5 ลิตรสามารถอ่านค่าความดันได้เท่ากับ 1.0 ลิตร) จากนั้นเปิดวาล์วที่เชื่อมต่อระหว่างถึงทั้งสองใบเพื่อปล่อยก๊าซผสมจากถังใบแรกสู่ถังใบที่สองโดยความเข้มข้นของเมทานอล หรือ ไดเอทิลอีเทอร์ที่ได้ จะมีค่าเท่ากับ 500 ppm เราจะกำหนดให้ความเข้มข้นดังกล่าวนี้เป็นความเข้มข้น เริ่มต้นซึ่งเท่ากันในถังทั้งสองใบ

กรณีที่มีการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นไอระเหยที่ใช้ในการทดสอบเป็น 250 ppm และ 125 ppm ให้ปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการเตรียมไอระเหยตัวอย่างความเข้มข้น 500 ppm แต่ป้อนก๊าซไนโตรเจนจนกระทั่งภายในถังมีปริมาณเมทานอลและไดเอทิลอีเทอร์เท่ากับ 4.38 กรัม และ 2.19 กรัม ตามลำดับ



ภาพที่ 35 แผนผังแสดงอุปกรณ์การควบคุมก๊าซและการวัดค่าการนำไฟฟ้า



ภาพที่ 36 เครื่องมือควบคุมความเข้มข้นของไอระเหยตัวอย่างและวัดค่าการนำไฟฟ้า

3.4.9.3 การหา Linear ohmic regime

การตรวจสอบหา Linear ohmic regime นั้นเพื่อใช้หาค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมที่สามารถทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นงานนั้นเป็นไปตามกฎของโอห์ม โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นแรก ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้า(I) จากการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ (V) ที่ให้เข้าไป จาก 0.1-5.0 V ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยในแต่ละค่า V ที่ใช้นั้นจะรอให้ค่า I ที่วัดได้มีค่าคงที่ก่อน (ประมาณ 10 นาที)

ขั้นที่สอง ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้า(I) จากการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ (V) ที่ให้เข้าไป จาก 0.1-5.0 V ในบรรยากาศไอร่ะเหยเมทานอลโดยในแต่ละค่า V ที่ใช้นั้นจะรอให้ค่า I ที่วัดได้คงที่ก่อน (ประมาณ 10 นาที)

ค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมนั้นจะเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความต่างศักย์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

3.4.9.4 การทดสอบและคำนวณหาร้อยละความว่องไวต่อไอร่ะเหยตัวอย่าง

ก่อนทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าจริงนั้น จะต้องป้อนก๊าซไนโตรเจนก่อนเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ได้ค่ากระแสที่คงที่ค่าหนึ่ง ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อนที่จะทำการผ่านไอร่ะเหยของสารตัวอย่างนี้ คือ ค่า $I_{N_2,before}$ ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ; $\sigma_{N_2,before}$ สำหรับใช้คำนวณหาร้อยละความว่องไวของสารตัวอย่าง (% sensitivity) จากนั้นจึงป้อนไอร่ะเหยของสารตัวอย่างเข้าไป ค่าความต่างศักย์ที่ใช้เท่ากันทุกครั้งคือ 0.5 V (ได้จากการหา linear ohmic regime) ค่าของกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในบรรยากาศของไอร่ะเหยของสารตัวอย่างนี้ คือ ค่า I_{gas} ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศไอร่ะเหยตัวอย่าง; σ_{gas} โดยที่ทั้งค่า I_{gas} และ $I_{N_2,before}$ นี้จะได้จากการเฉลี่ยค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในช่วงที่ถึงจุดสมดุลแล้วในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนและไอร่ะเหยของสารตัวอย่างตามลำดับ ค่าร้อยละความว่องไวของไอร่ะเหยของสารตัวอย่าง (% sensitivity) นี้สามารถคำนวณได้จากสูตรดังสมการที่ 11

$$\%S = \frac{(\sigma_{gas} - \sigma_{N_2,before})}{\sigma_{N_2,before}} \times 100 \quad (11)$$

3.4.9.5 การหาเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อไอระเหยและเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับ

ในการทดลองนี้จะสร้างกราฟจากจุดความสับสนระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับเวลา โดยที่จะทำการเฉลี่ยค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในช่วงที่ถึงจุดสมดุลแล้วในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนและไอระเหยของสารตัวอย่างนั้นเป็นค่า I_{N_2} และ I_{gas} ตามลำดับ และจะได้ช่วงของการกระจายข้อมูลเป็นเส้น $\pm 2SD$ ในการหาเวลาที่ใช้ในการตอบสนองนั้นจะเริ่มตั้งแต่เส้นกราฟตัดกับเส้น $2SD$ ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ไปจนถึงจุดที่เส้นกราฟตัดกับเส้น $2SD$ ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนหลังจากการหยุดปล่อยก๊าซไนโตรเจนและเริ่มป้อนไอระเหยตัวอย่างเข้าไปแทน และในทำนองเดียวกันการหาเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับนั้นจะเริ่มตั้งแต่จุดที่เส้นกราฟตัดกับเส้น $2SD$ ในบรรยากาศของไอระเหยของสารตัวอย่าง ไปจนถึงจุดที่เส้นกราฟตัดกับเส้น $2SD$ ในบรรยากาศของไอระเหยไนโตรเจนหลังจากการหยุดปล่อยไอระเหยของสารตัวอย่างและเริ่มปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$

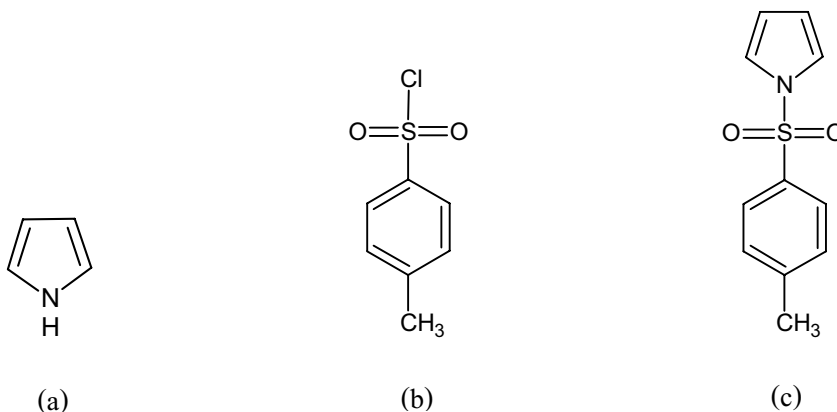
4.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิเมอร์ตัวรองรับซึ่งเป็นอนุพันธ์พอลิไพร์โรล (3-PPy)

ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ตัวรองรับ คือ 3-PPy จากมอนอเมอร์ Pyrrole derivative (3-Py) และได้ทำการการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ ได้ผลการสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ ดังนี้

4.1.1.1 การสังเคราะห์อนุพันธ์ไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่ง 3 (3-Py)

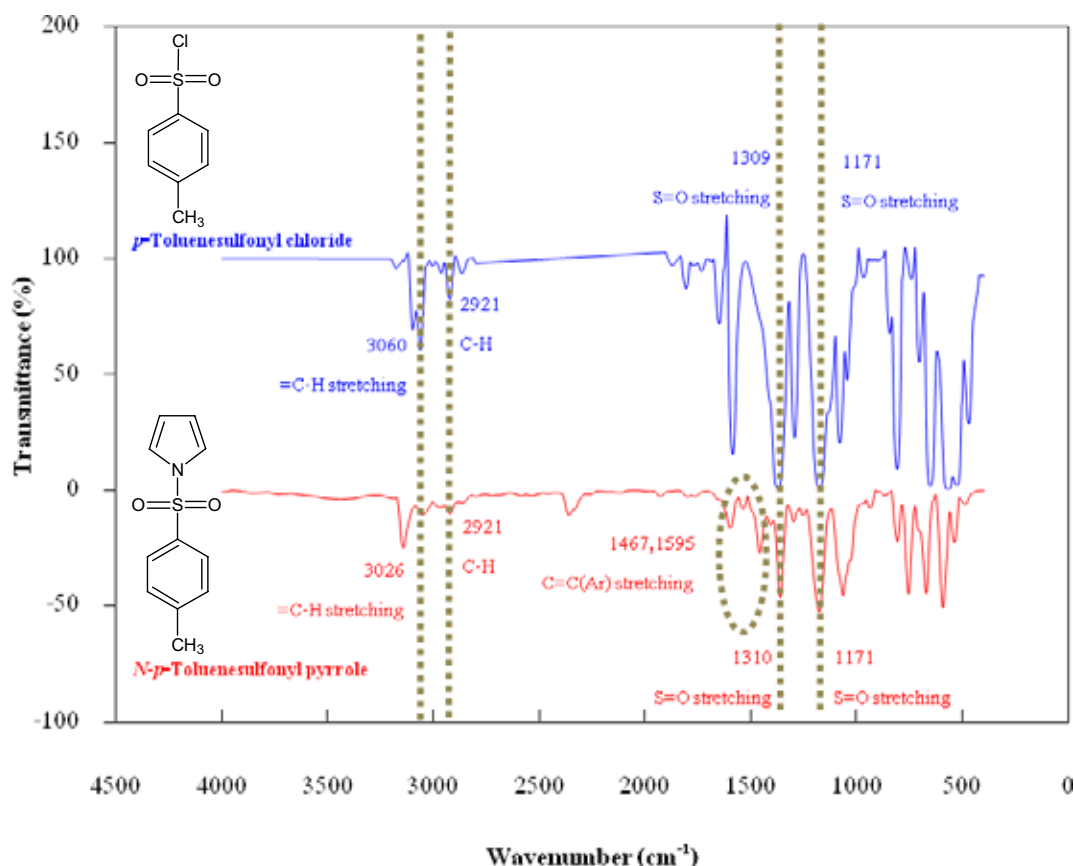
ขั้นที่ 1 การสังเคราะห์ *N-p-Toluenesulfonylpyrrole*

การทำปฏิกิริยาเพื่อติดหมู่ *p*-Toluenesulfonyl ที่ตำแหน่ง N (N-position) ของวงแหวนไพร์โรล โดยหมู่ *p*-Toluenesulfonyl นั้นจะไปทำหน้าที่เป็นตัว blocking ให้กับวงแหวนไพร์โรลโดยป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาแทนที่ที่ตำแหน่ง 2 และ 5 ทั้งนี้เนื่องจากที่ตำแหน่ง N และ 2,5 บนวงแหวนไพร์โรลมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาแทนที่มาก หากไม่มีการติดหมู่ blocking เข้าไปจะมีผลให้หมู่ฟังก์ชันที่จะทำปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไปไม่เข้าแทนที่ตำแหน่งที่สามบนวงแหวนไพร์โรล เนื่องจากที่ตำแหน่งสามนั้นมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาแทนที่น้อยกว่าตำแหน่ง N และ 2,5 ตามลำดับ



ภาพที่ 37 โครงสร้างทางเคมีของ (a)ไพร์โรล, (b) *p*-Toluenesulfonyl chloride และ (C) *N-p*-Toluenesulfonylpyrrole

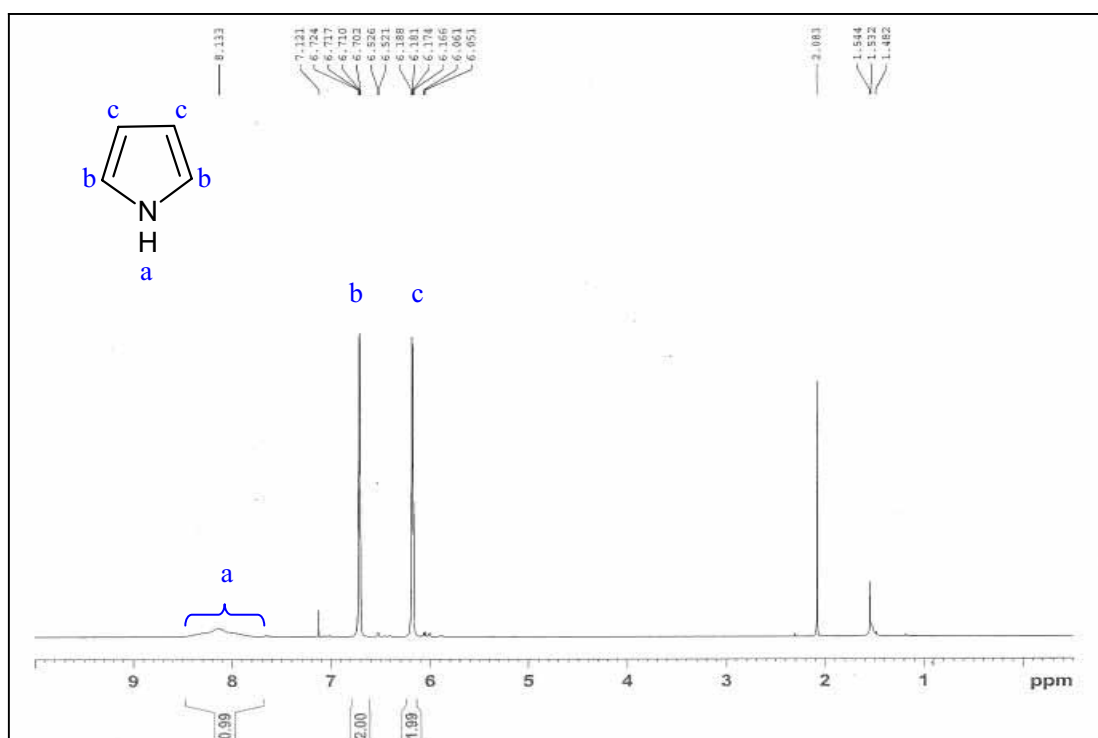
เมื่อมีการติดหมู่ blocking เข้าไปที่อะตอม N บนวงแหวนไพร์โรล โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างไพร์โรลและ *p*-Toluenesulfonyl chloride โดยมีเบสทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารผลิตภัณฑ์ (*N*-*p*-Toluenesulfonylpyrrole) ที่ได้มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็มสีขาว น้ำหนักที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 66.70 g คิดเป็นผลผลิตร้อยละ (% yield) เท่ากับ 86.06 % โดยที่โครงสร้างของไพร์โรล *p*-Toluenesulfonyl chloride และ *N*-*p*-Toluenesulfonylpyrrole แสดงได้ ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 38 FT-IR Spectrum ของ *p*-Toluenesulfonyl chloride และ *N*-*p*-Toluenesulfonylpyrrole

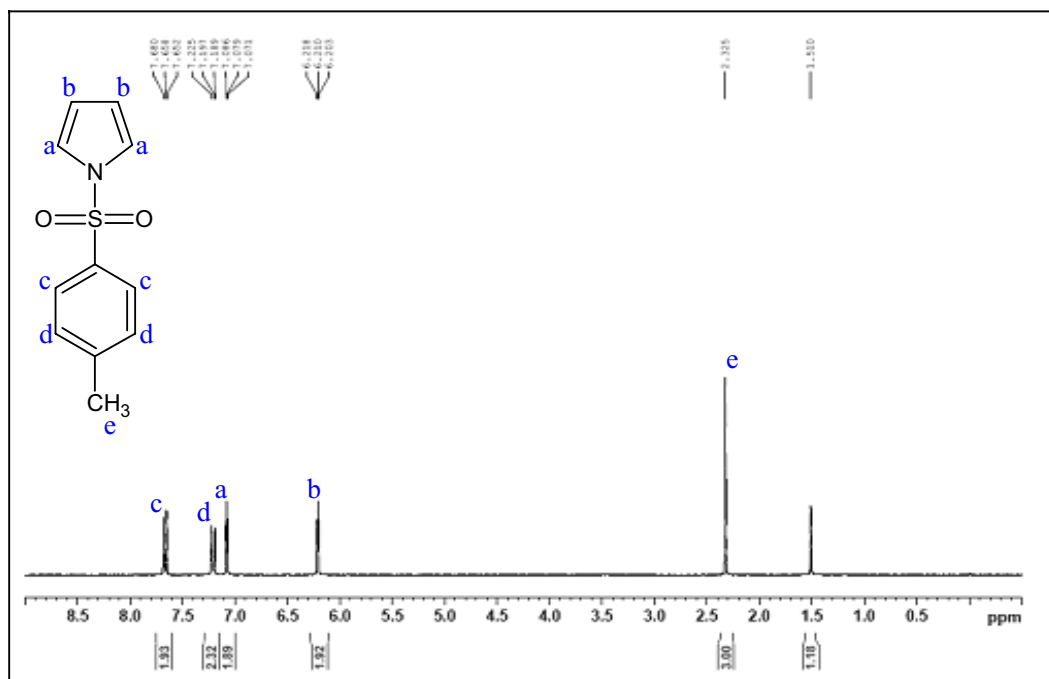
การทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ของ *p*-Toluenesulfonyl chloride และ *N*-*p*-Toluenesulfonylpyrrole นั้นจะไม่เห็นความแตกต่างระหว่าง spectra ของสารทั้งสอง โดยจะมีเส้นสเปกตรัมการดัดโค้งของ S=O ที่ตำแหน่ง 1309 และ 1171 cm^{-1} [30,31] และความเป็นวงแหวนอะโรมาติก จะแสดงแบนด์ที่สำคัญ 2 ตำแหน่ง จากการดัดโค้งของ C=C(Ar) คือ ที่ประมาณ 1400 และ 1600 cm^{-1} [30] ดังแสดงในภาพที่ 38

จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่าไพร์โรลมีลักษณะเฉพาะของโปรตอนตำแหน่ง N (N-position) แสดงลักษณะของแบนด์กว้างที่ตำแหน่ง 8.0-8.2 ppm (ตำแหน่ง a ในภาพที่ 39) และโปรตอนที่อยู่ติดกับคาร์บอนวงแหวนไพร์โรลตำแหน่ง 2,5 และ 3,4 แสดงสัญญาณเด่นชัดที่ตำแหน่งสัญญาณ 6.8 และ 6.2 ppm ตามลำดับ (ตำแหน่ง b และ c ในภาพที่ 39)



ภาพที่ 39 $^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของ pyrrole ใน CDCl_3

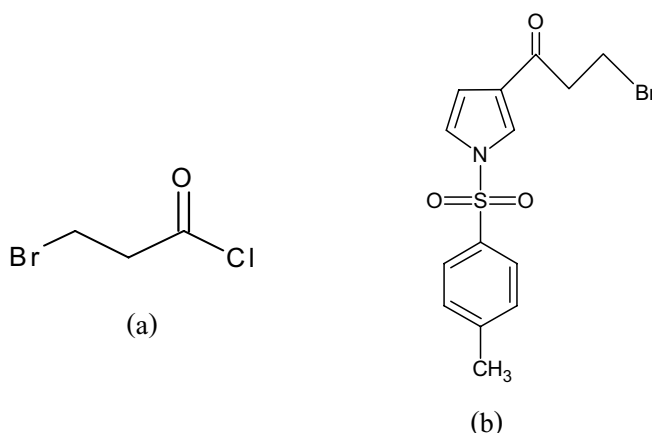
การทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า *N-p*-Toluenesulfonylpyrrole มีลักษณะเฉพาะของวงแหวนไพร์โรลที่จะทำให้เกิดสเปกตรัมขึ้นที่ตำแหน่งสัญญาณ 7.1-6.2 ppm เป็นสัญญาณของโปรตอนบนวงแหวนไพร์โรลที่ตำแหน่ง 2,5 และ 3,4 ตามลำดับ (ตำแหน่ง a และ b ในภาพที่ 40) และโปรตอนที่อยู่ติดกับคาร์บอนวงแหวนเบนซีนแสดงสัญญาณเด่นชัดที่ตำแหน่งสัญญาณ 7.2 และ 7.7 ppm ตามลำดับ (ตำแหน่ง c และ d ในภาพที่ 40) และสัญญาณที่ตำแหน่ง 2.3 ppm เป็นสัญญาณโปรตอนหมู่ $-\text{CH}_3$ ที่เกาะอยู่ตำแหน่งพาราของวงเบนซีน



ภาพที่ 40 ^1H -NMR Spectrum ของ *N-p*-Toluenesulfonylpyrrole ใน CDCl_3

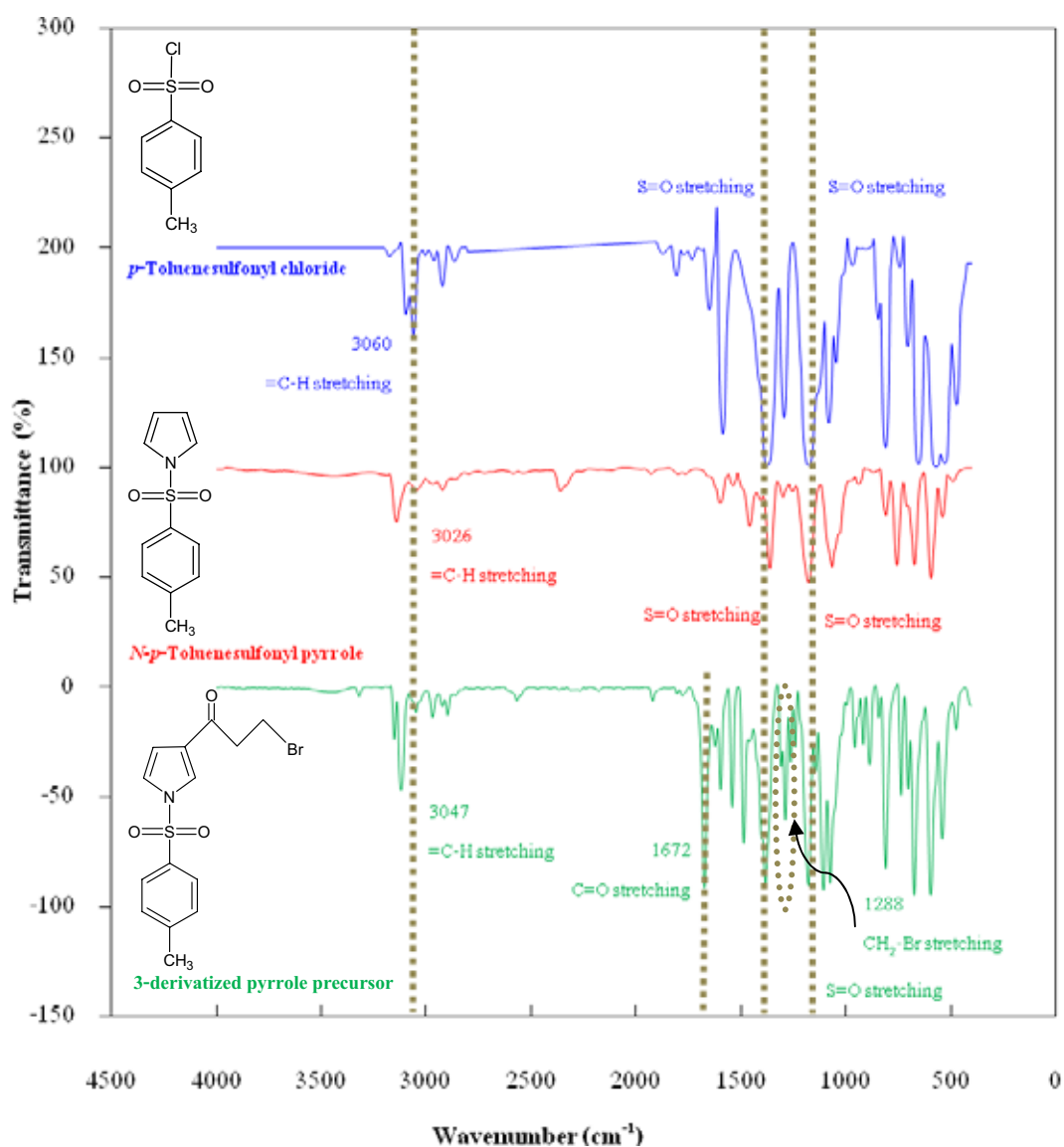
ขั้นที่ 2 การเตรียม *N-p*-Toluenesulfonyl-3-(3-bromopropionyl)pyrrole

จากปฏิกิริยาระหว่าง *N-p*-Toluenesulfonylpyrrole และ 3-bromopropionyl chloride โดยมี anhydrous AlCl_3 ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารผลิตภัณฑ์ (3-derivatized pyrrole precursor) ที่ได้มีลักษณะเป็นตะกอนสีน้ำตาลเข้ม น้ำหนักที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 15.44 g คิดเป็นผลผลิตร้อยละ (% yield) เท่ากับ 79.80 % โดยที่โครงสร้างของ 3-bromopropionyl chloride และ 3-derivatized pyrrole precursor แสดงได้ ดังภาพที่ 41



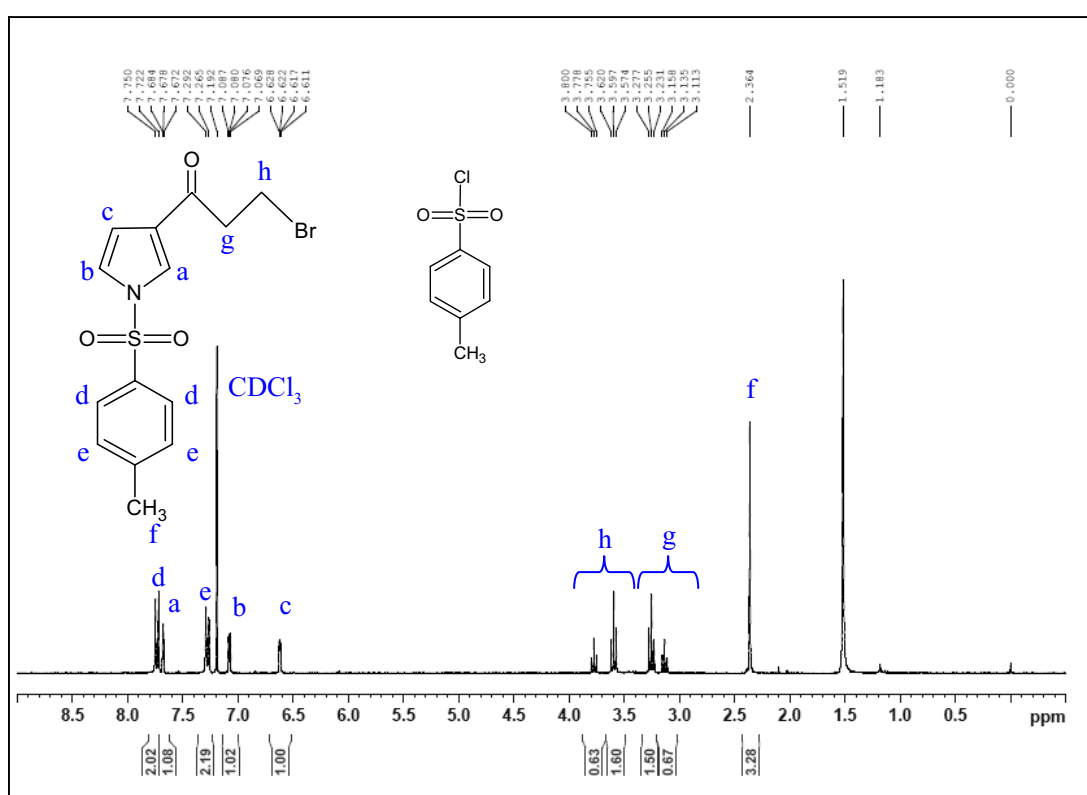
ภาพที่ 41 โครงสร้างทางเคมีของ (a) 3-bromopropionyl chloride และ (b) 3-derivatized pyrrole precursor

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ของ 3-derivatized pyrrole precursors นั้น จะมีเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของ C=O ที่ 1672 cm^{-1} ของ $\text{CH}_2\text{-Br}$ ที่ 1288 cm^{-1} และเส้นสเปกตรัม S=O ที่ตำแหน่ง 1309 และ 1171 cm^{-1} [30,31] ดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 FT-IR Spectrum ของ *p*-Toluenesulfonyl chloride, *N*-*p*-Toluenesulfonylpyrrole และ 3-derivatized pyrrole precursor

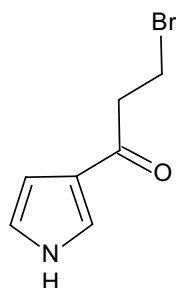
จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า 3-derivatized pyrrole precursor มีลักษณะเฉพาะของหมู่ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$ ทำให้เกิดสเปกตรัมขึ้นที่ตำแหน่งสัญญาณ 3.0 – 3.8 ppm (ตำแหน่ง h และ g ในภาพที่ 43) ซึ่งพบว่าจากลักษณะสัญญาณโปรตอนที่แสดงออกมาเป็น 4 ชุด ทั้งนี้สามารถอธิบายได้โดยเป็นผลจาก conformational effect เนื่องจากความเกาะกะของหมู่เมทิลเบนซีนซัลโฟเนตซึ่งทำหน้าที่เป็นตัว blocking ที่ติดอยู่กับอะตอมไนโตรเจนบนวงแหวนไพร์โรล ส่งผลให้โมเลกุล 3-derivatized pyrrole precursor แสดง conformation ได้ใน 2 ลักษณะ (ตำแหน่ง h และ g ในภาพที่ 43)



ภาพที่ 43 $^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของ 3-derivatized pyrrole precursors ใน CDCl_3

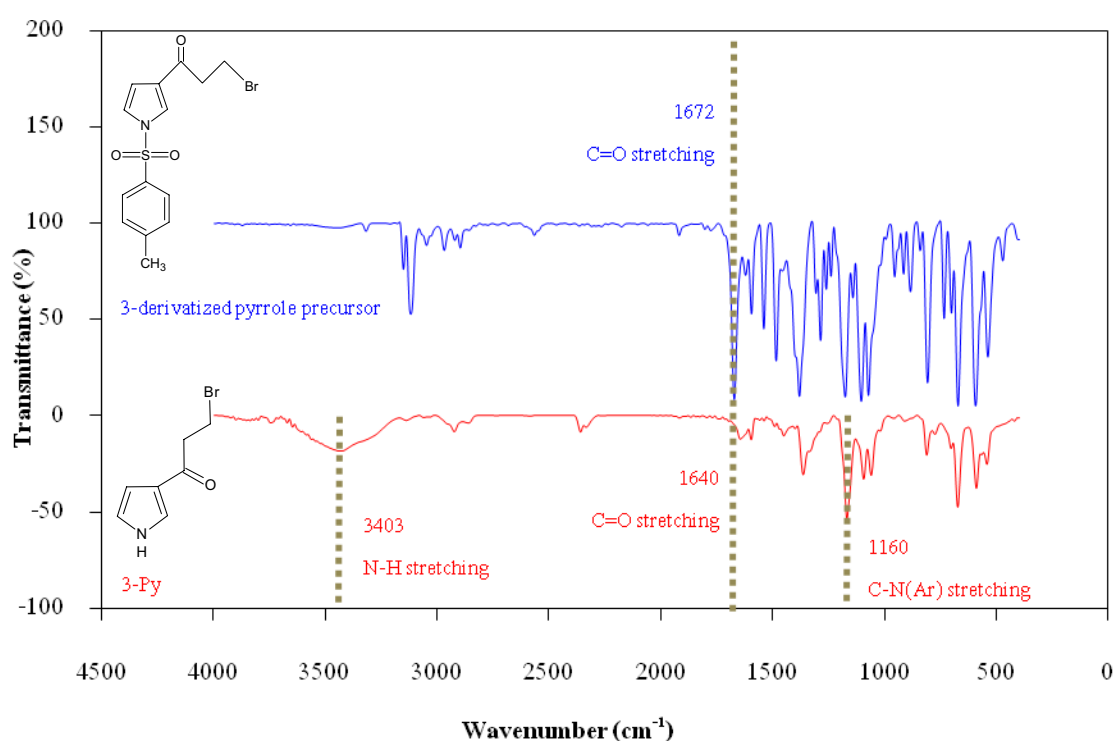
ขั้นที่ 3 การสังเคราะห์ 3-(3-bromopropionyl)pyrrole; 3-Py

การดึงหมู่ Blocking ออกจากโมเลกุลไพร์โรลที่ผ่านการปรับปรุง หมู่ฟังก์ชันเข้าไปที่ตำแหน่งที่สามบนวงแหวนไพร์โรลแล้ว สารผลิตภัณฑ์ (3-Py) ที่ได้มีลักษณะเป็นของแข็งสีเหลืองอ่อน น้ำหนักสารที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 5.82 g คิดเป็นผลผลิตร้อยละ (% yield) เท่ากับ 92.03 % โดยที่โครงสร้างของ 3-Py แสดงได้ ดังภาพที่ 44



ภาพที่ 44 โครงสร้างทางเคมีของ 3-Py

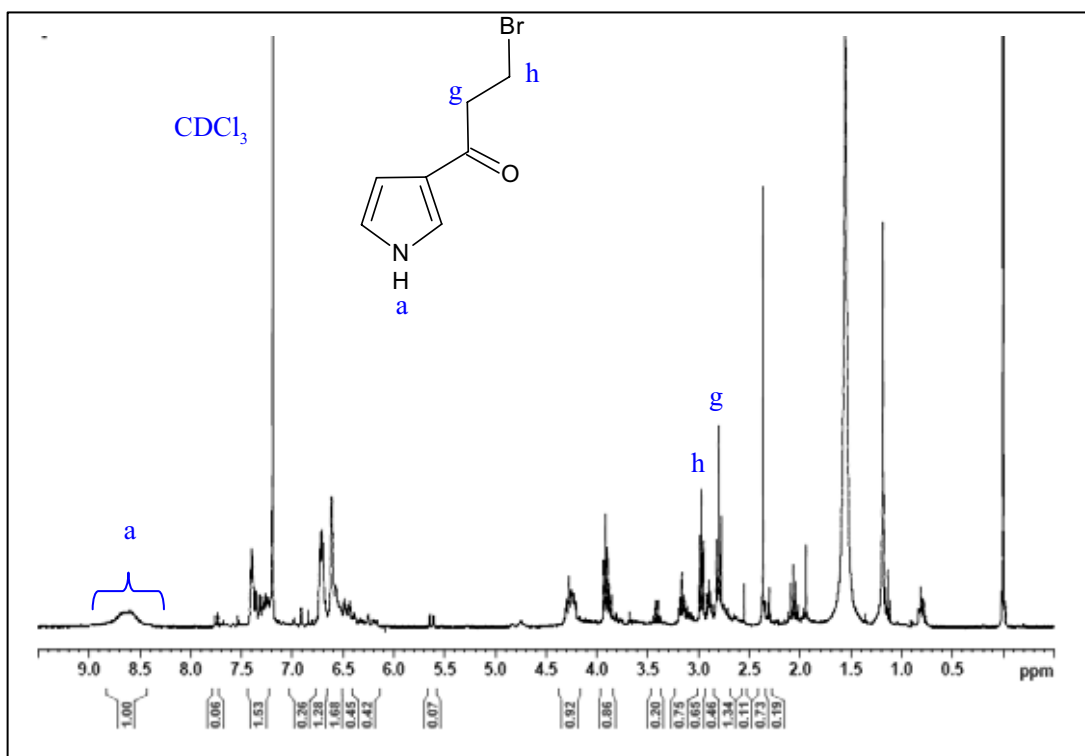
จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ของ 3-Py นั้นมีการปรากฏแบนด์กว้างการดึงยึดของ N-H ที่ $3600\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$ และ C=O ที่ 1640 cm^{-1} ดังแสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 45 FT-IR Spectrum ของ 3-derivatized pyrrole precursor และ 3-Py

ผลการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า 3-Py มีลักษณะเฉพาะของโปรตอนบนตำแหน่ง N (N-position) ซึ่งมีลักษณะเป็นแบนด์กว้างในช่วงตำแหน่งสัญญาณ 8.5-8.8 ppm (ตำแหน่ง a ในภาพที่ 46) เมื่อเทียบกับ $^1\text{H-NMR}$ ของไพร์โรลมอนอเมอร์นั้นพบการเลื่อน

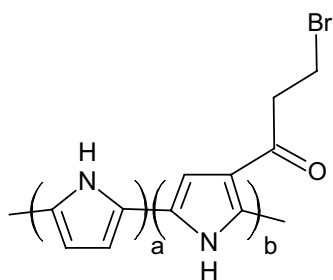
ตำแหน่งไปจากเดิมที่แสดงตำแหน่งสัญญาณ 8.0-8.2 ppm การเลื่อนตำแหน่งไปสามารถอธิบายได้จากผลของ deshielding effect จากความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนของหมู่คาร์บอนิล ทำให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนรอบ ๆ นิวเคลียสลดลงจึงใช้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการทำให้เกิด spin flipping ของโปรตอนลดลง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า deshielding effect



ภาพที่ 46 ¹H-NMR Spectrum ของ 3-Py ใน CDCl₃

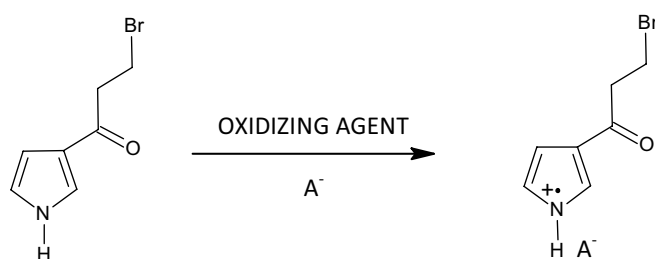
4.1.1.2 การเตรียมอนุพันธ์พอลิไพร์โรล; 3-(3-Bromopropionyl)polypyrrole หรือ 3-PPy

การเตรียม 3-PPy จากมอนอเมอร์ 3-Py ทำให้ได้สารผลิตภัณฑ์เป็นผงสีน้ำตาลเย็ด น้ำหนักสารที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 0.1950 g คิดเป็นผลผลิตร้อยละ (% yield) เท่ากับ 97.48 % โดยที่โครงสร้างของพอลิเมอร์ 3-PPy เป็นดังภาพที่ 47 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์เชนของ 3-PPy แสดงได้ ดังภาพที่ 48

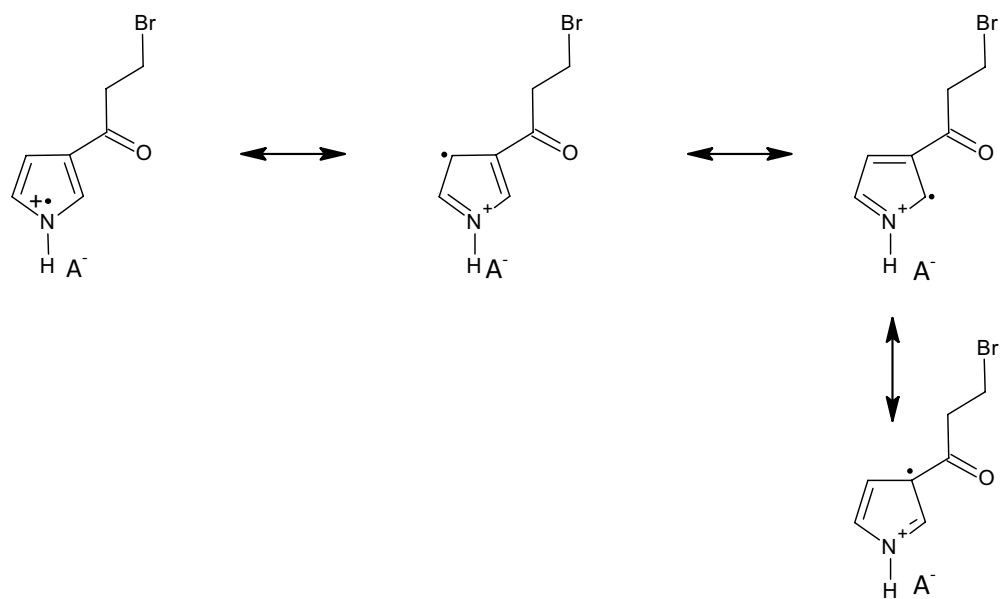


ภาพที่ 47 โครงสร้างทางเคมีของ 3-PPy

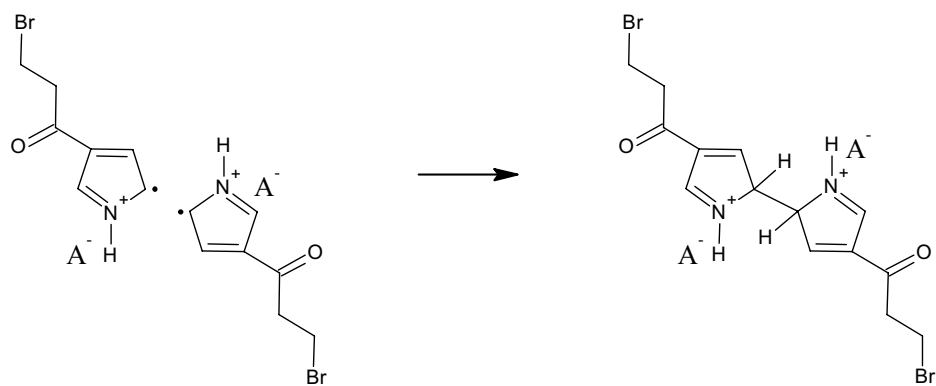
ขั้นตอนที่ 1 : Monomer Oxidation



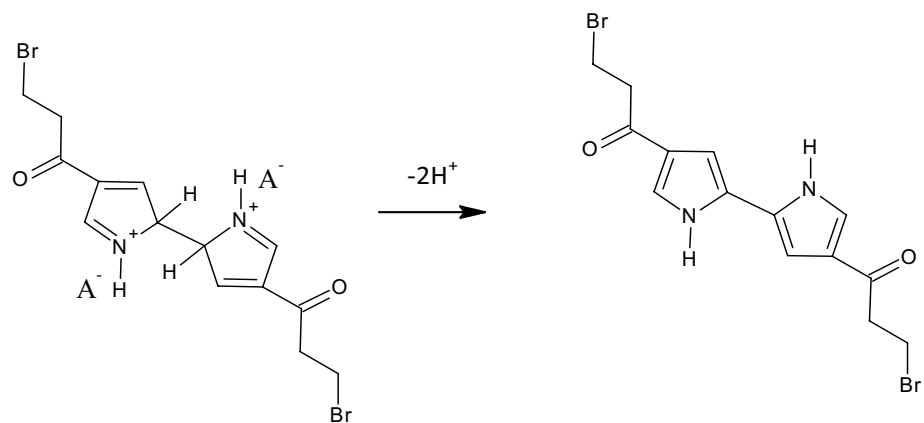
Resonance forms



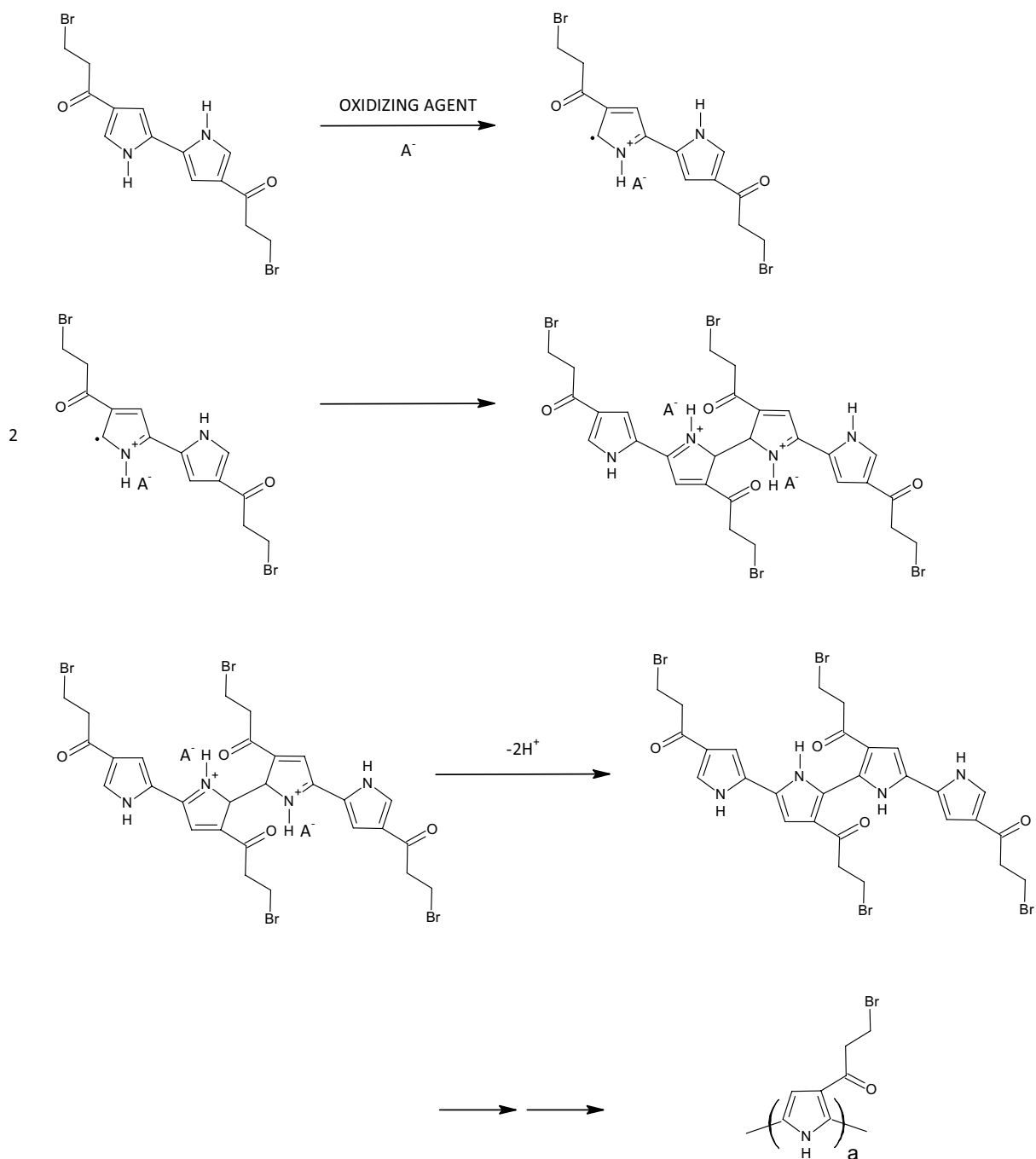
ขั้นที่ 2 : Radical-radical coupling



ขั้นที่ 3 : Re-aromatization

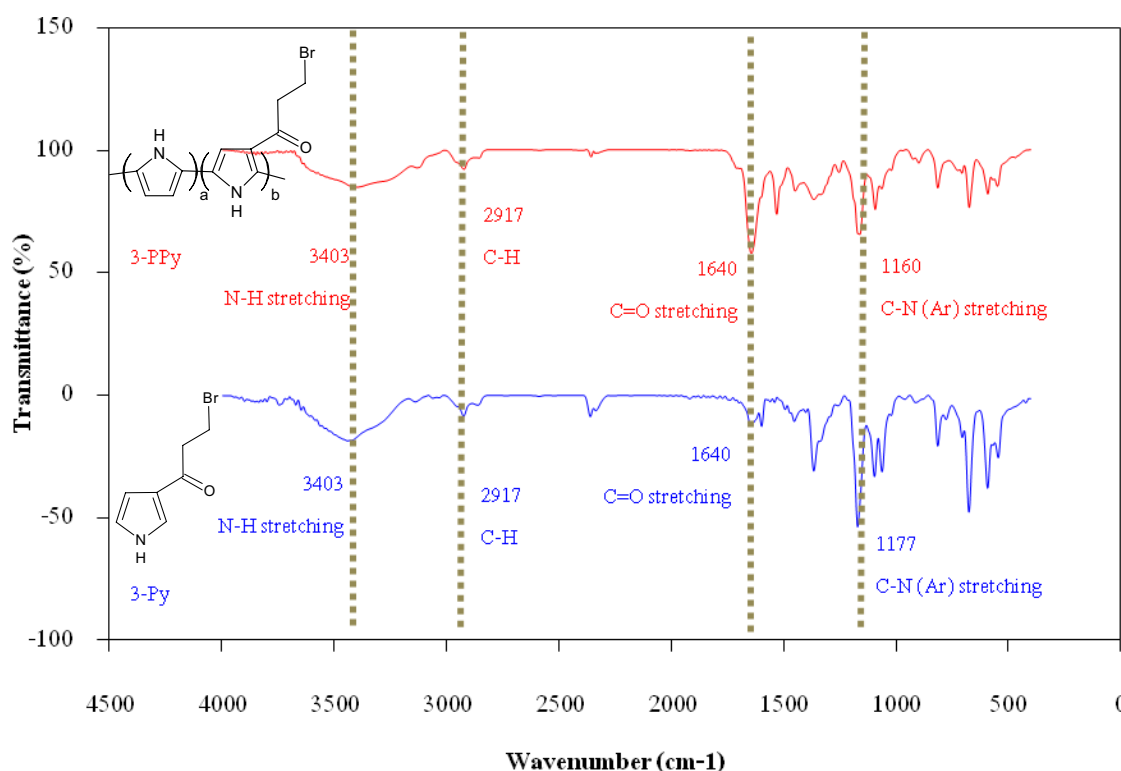


ขั้นที่ 4 : Chain propagation



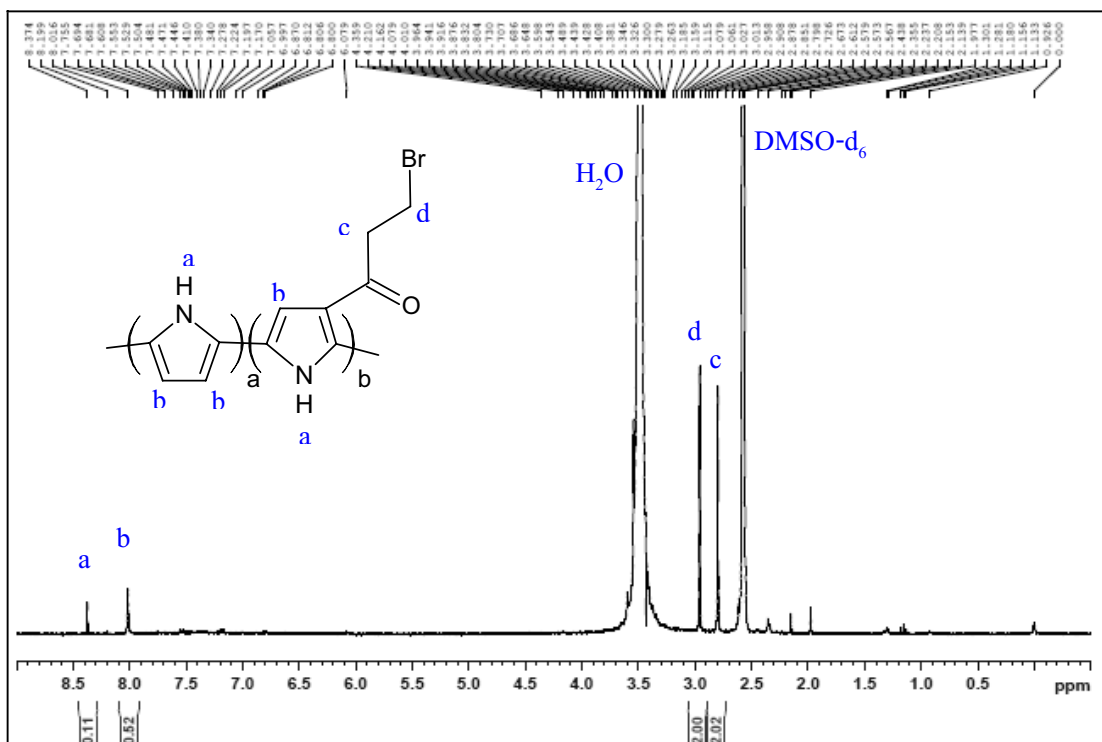
ภาพที่ 48 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โซ่ของ 3-PPy

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ของ 3-PPy นั้นมีลักษณะที่คล้ายกับ 3-Py ซึ่งมีการปรากฏแถบกว้างการดึงยืดของ N-H ที่ $3600\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$ และจะมีเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของ C=O ที่ 1640 cm^{-1} และ C-N ที่ 1160 cm^{-1} [30,31] ดังแสดงในภาพที่ 49



ภาพที่ 49 FT-IR Spectrum ของ 3-Py และ 3-PPy

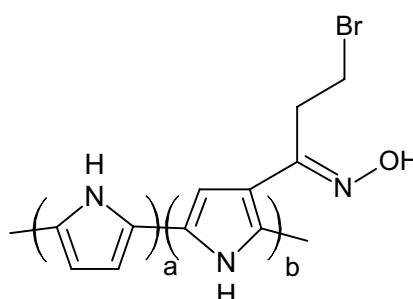
จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ของ 3-PPy ปรากฏสัญญาณของโปรตอนบนตำแหน่ง N (N-position) ขึ้นที่ตำแหน่งสัญญาณ 8.4 ppm (ตำแหน่ง a ในภาพที่ 50) และโปรตอนที่อยู่กับคาร์บอนบนวงไพโรโรลที่เหลือจากการติดหมู่ฟังก์ชันทำให้เห็นสเปกตรัมที่ตำแหน่งสัญญาณ 8.0 ppm (ตำแหน่ง b ในภาพที่ 50) สำหรับโปรตอนของหมู่ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$ ปรากฏสัญญาณเด่นชัดที่ตำแหน่ง 2.8-3.0 ppm (ตำแหน่ง c และ d ในภาพที่ 50)



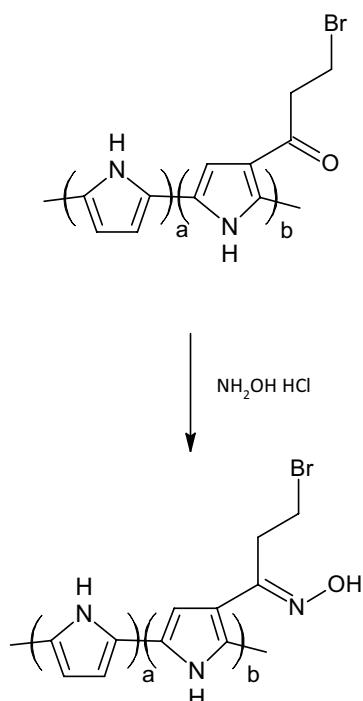
ภาพที่ 50 ^1H -NMR Spectrum ของ 3-PPy ใน DMSO-d_6

4.1.2 การเตรียมอนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ตำแหน่งที่ 3 เป็นหมู่ออกซิม (3-PPy oxime)

การปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันของ 3-PPy จากเดิมที่เป็นหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) ที่มีสมบัติเป็นหมู่ดึงอิเล็กตรอน เป็นหมู่ออกซิม ($\text{C}=\text{N}-\text{OH}$) เพื่อให้พอลิเมอร์มีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน ได้พอลิเมอร์เป็นผงสีดำละเอียด น้ำหนักสารที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 1.0311 g คิดเป็นผลผลิตร้อยละ (% yield) เท่ากับ 95.89 % โดยที่โครงสร้างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ดังภาพที่ 51 ปฏิกริยาการเกิดออกซิมของ 3-PPy oxime แสดงได้ ดังภาพที่ 52



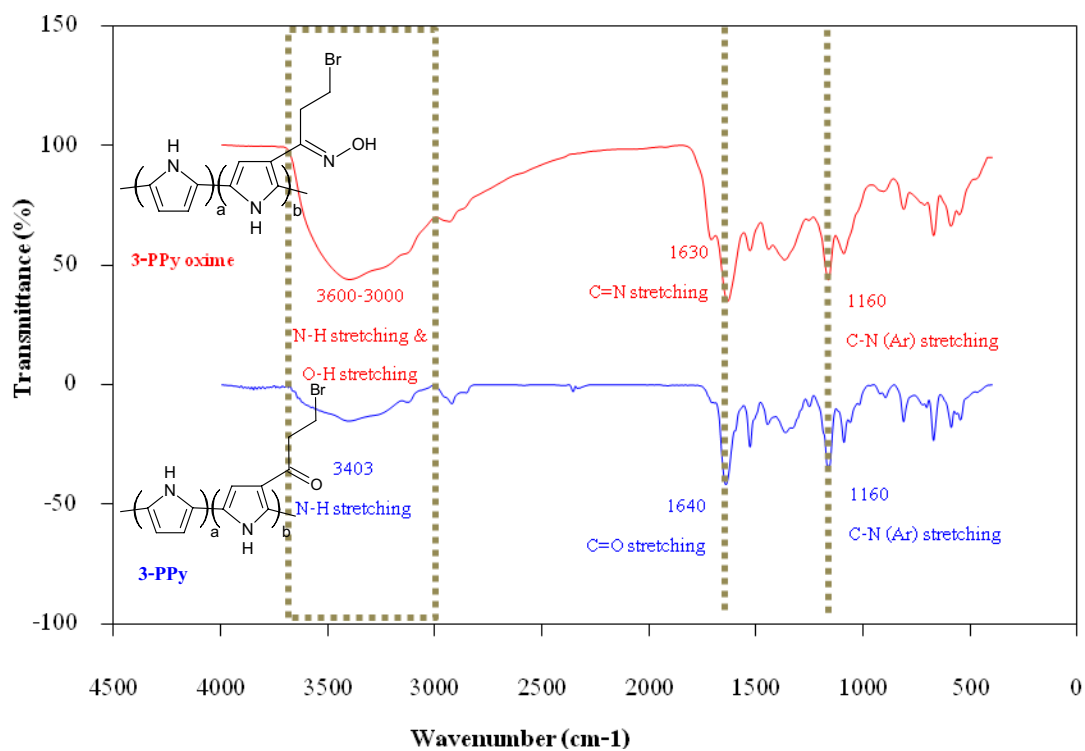
ภาพที่ 51 โครงสร้างทางเคมีของ 3-PPy oxime



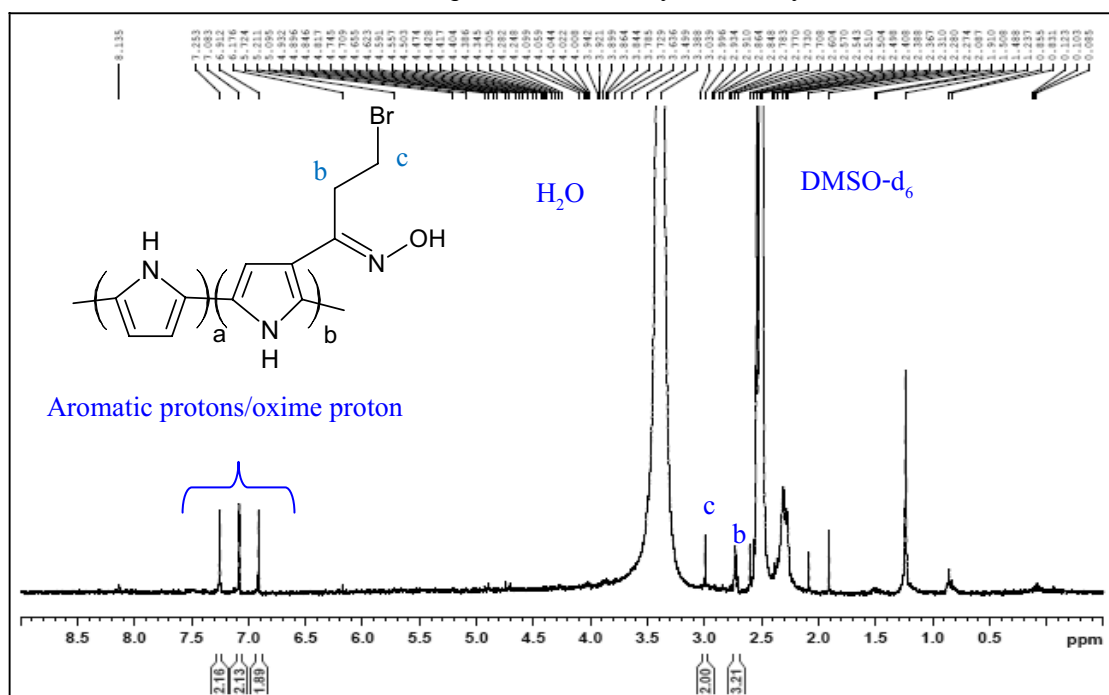
ภาพที่ 52 ปฏิกิริยาการเกิดหมู่ออกซิมของ 3-PPy

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ของการสังเคราะห์ 3-PPy oxime นั้น จะมีแบนด์กว้างที่เด่นชัดของ -OH ซึ่งมีการซ้อนทับกับแบนด์กว้างของ N-H ที่ $3600\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ [30,31] และการดึงยืดของ C=N ที่ 1600 cm^{-1} [30] ดังแสดงในภาพที่ 53

จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า 3-PPy oxime มีลักษณะเฉพาะของวงแหวนอะโรมาติกที่จะทำให้เกิดสเปกตรัมขึ้นที่ตำแหน่งสัญญาณ $6.9\text{--}7.3\text{ ppm}$ (ตำแหน่ง a ในภาพที่ 54) เมื่อเทียบกับ $^1\text{H-NMR}$ ของ 3-PPy พบว่ามีการเลื่อนตำแหน่งเส้นสเปกตรัมมาในตำแหน่งที่สูงขึ้น เนื่องจากหมู่ออกซิมมีความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนได้น้อยกว่าหมู่คาร์บอนิล ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสเพิ่มมากขึ้น จึงต้องใช้ความเข้มของสนามแม่เหล็กในการทำให้เกิด spin flipping ของโปรตอนเพิ่มสูงขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า shielding effect และโปรตอนของหมู่ $\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-Br}$ ปรากฏสัญญาณเด่นชัดที่ตำแหน่ง $2.8\text{--}3.0\text{ ppm}$ (ตำแหน่ง b และ c ในภาพที่ 54)



ภาพที่ 53 FT-IR Spectrum ของ 3-PPy และ 3-PPy oxime



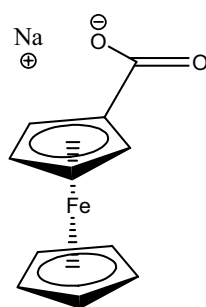
ภาพที่ 54 ¹H-NMR Spectrum ของ 3-PPy oxime ใน DMSO-d₆

4.1.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิเมอร์ตัวรองรับที่ผ่านการทำเอสเตอริฟิเคชันด้วย เกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลตด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$

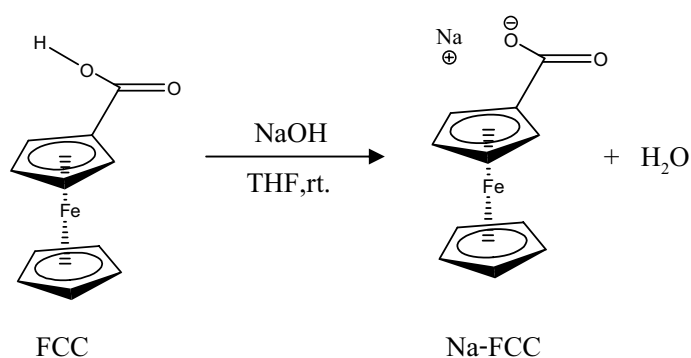
ในการทำเอสเตอริฟิเคชันของพอลิเมอร์ตัวรองรับด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลตนั้น จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

4.1.3.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na-FCC) ด้วยเทคนิค FT-IR

Na-FCC ที่สังเคราะห์ได้จาก FCC กับ NaOH จะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองทอง มีน้ำหนัก 14.35 g คิดเป็นผลผลิตร้อยละ (%yield) เท่ากับ 95.32 % และมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 55 และปฏิกิริยาการเกิด Na-FCC จาก FCC กับ NaOH นั้น แสดงได้ดังภาพที่ 56

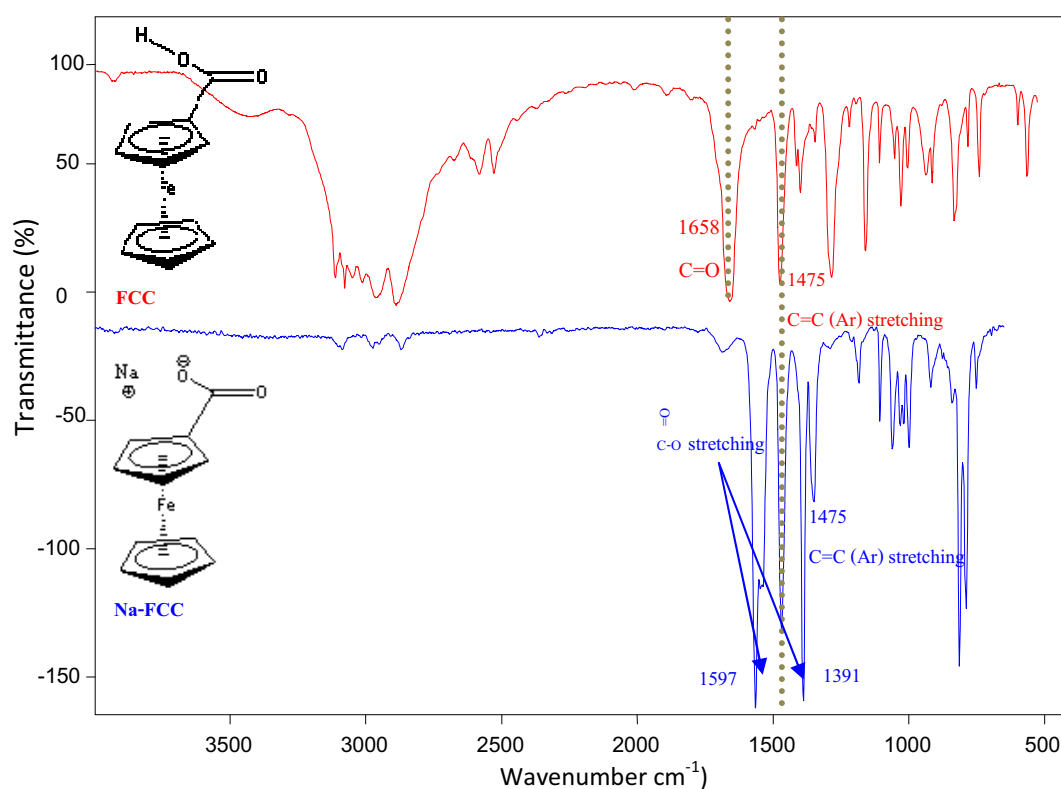


ภาพที่ 55 โครงสร้างทางเคมีของเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na-FCC)



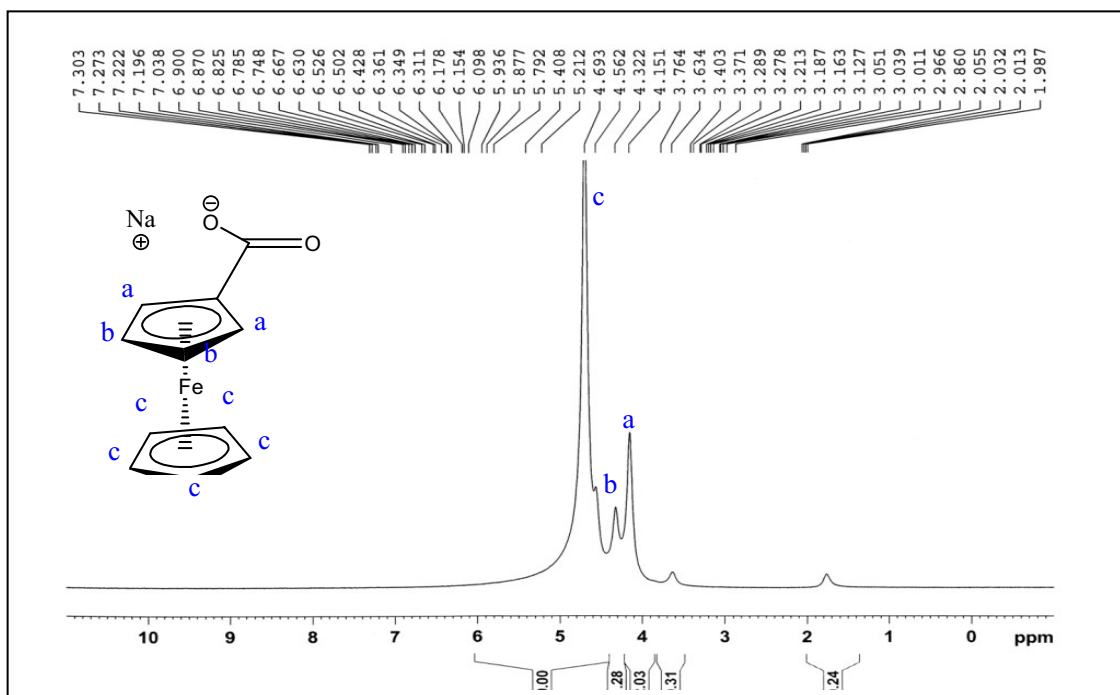
ภาพที่ 56 ปฏิกิริยาการเตรียมเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า เกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na-FCC) จะปรากฏแบนด์ของการดึงยืดหมู่ C=O 2 ตำแหน่ง คือ แบบอสมมาตร (asymmetric stretching) ที่ตำแหน่งใกล้เคียง 1600 cm^{-1} และแบบสมมาตร (symmetric stretching) อยู่ที่ตำแหน่งใกล้เคียง 1400 cm^{-1} ซึ่งถ้าเป็นกรดอิสระจะปรากฏตำแหน่งของแบนด์ที่สูงกว่านี้ [29] จากการวิเคราะห์เกลือที่สังเคราะห์ได้พบแบนด์ดังกล่าวที่ 1597 และ 1391 cm^{-1} และแบนด์ของ C=C(Ar) ที่ 1472 cm^{-1} จะเห็นได้ว่าการเลื่อนตำแหน่งของหมู่ C=O ของกรด FCC ไปเป็น C=O ของเกลือ Na-FCC อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 57



ภาพที่ 57 FT-IR Spectrum ของ FCC (สังเคราะห์) และ Na-FCC

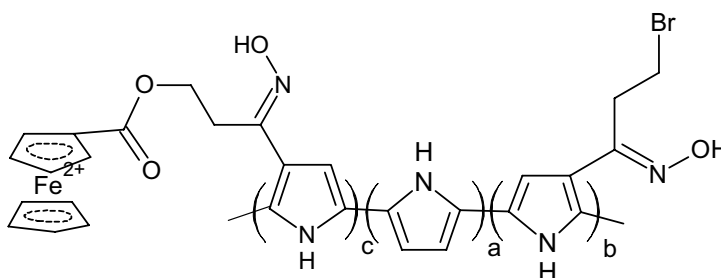
จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า Na-FCC ที่สังเคราะห์ได้จะปรากฏสเปกตรัมของโปรตอนบนวงแหวนอะโรมาติกห้ำเหลี่ยมในช่วง 4-5 ppm ดังแสดงในภาพที่ 58



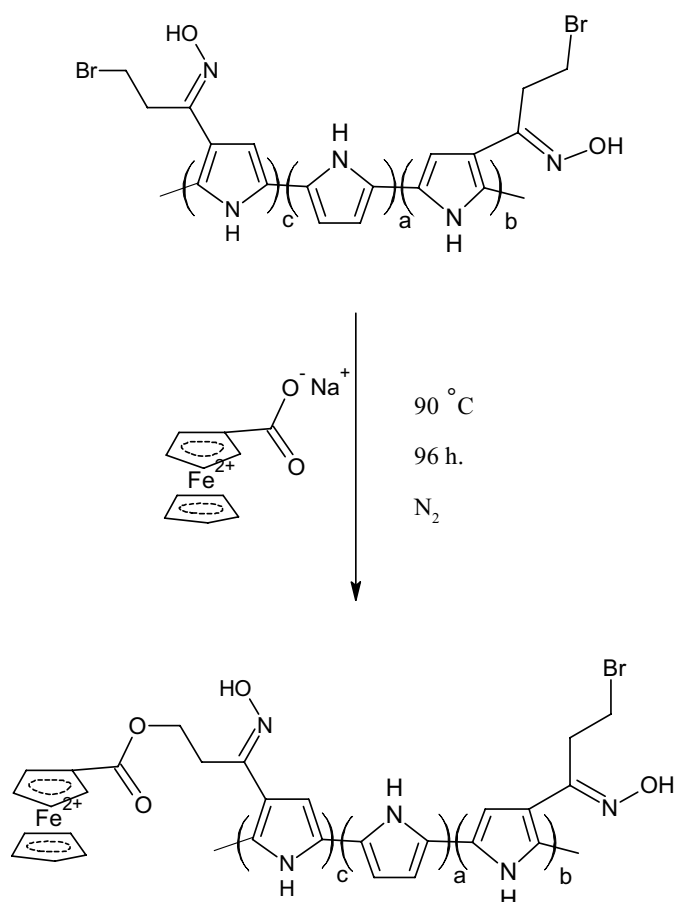
ภาพที่ 58 ^1H -NMR Spectrum ของ Na-FCC ใน CDCl_3

4.1.3.2 การทำเอสเทอร์ฟิเคชันของ 3-PPy oxime

ในการสังเคราะห์ 3-PPy oxime FCC ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 59 จากการทำเอสเทอร์ฟิเคชันของ 3-PPy oxime ด้วย Na-FCC ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนทำให้ได้เฟอร์โรซีนคาร์บอกซีเลตพอลิเมอร์ที่เป็นผงสีดำแกมน้ำตาล น้ำหนักสารที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 0.6954 g คิดเป็นผลผลิตร้อยละ (% yield) เท่ากับ 95.47 % โดยที่ปฏิกิริยาการทำเอสเทอร์ฟิเคชันดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 60



ภาพที่ 59 โครงสร้างทางเคมีของ 3-PPy oxime FCC

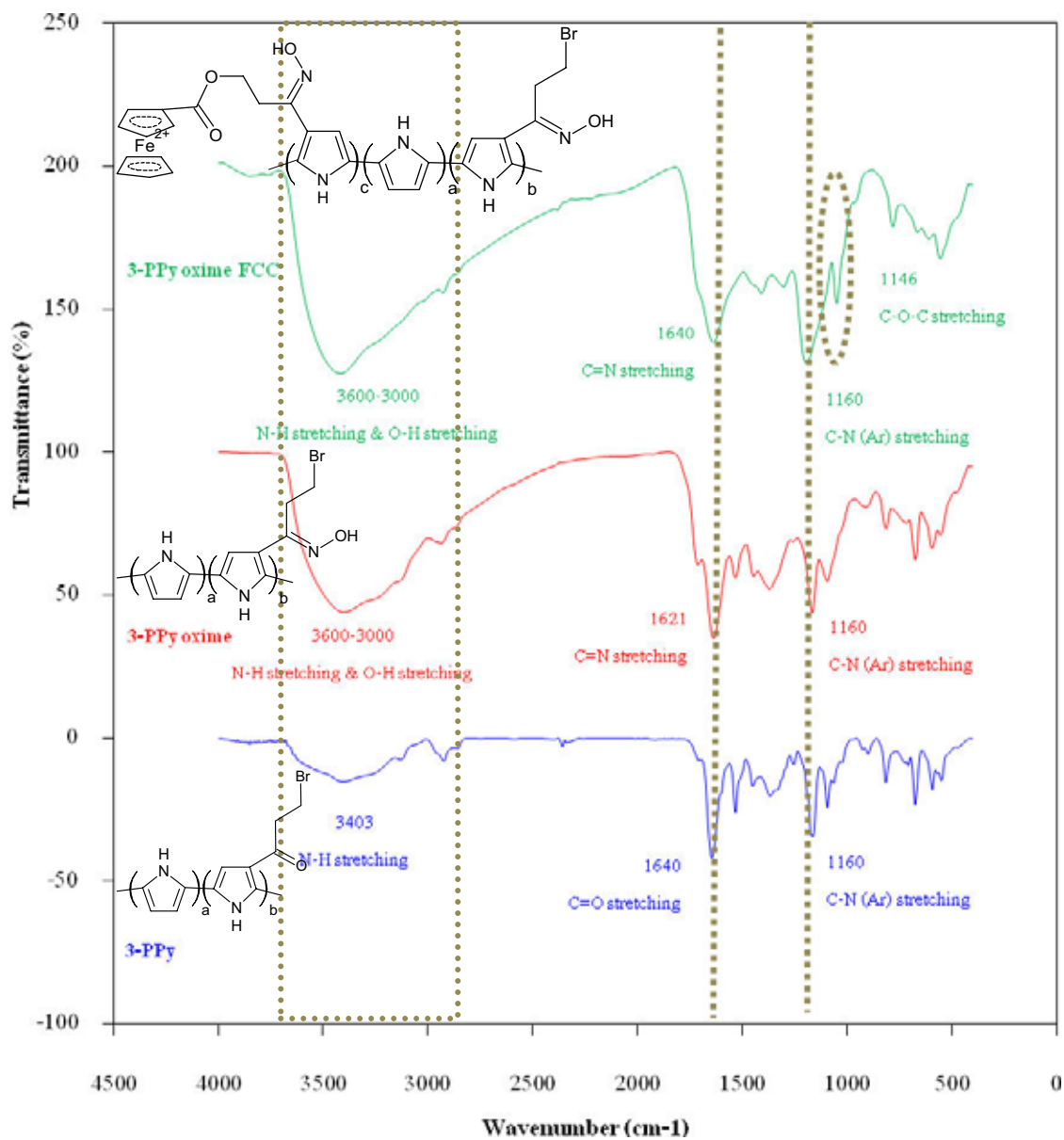


ภาพที่ 60 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ 3-PPy oxime FCC ด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต

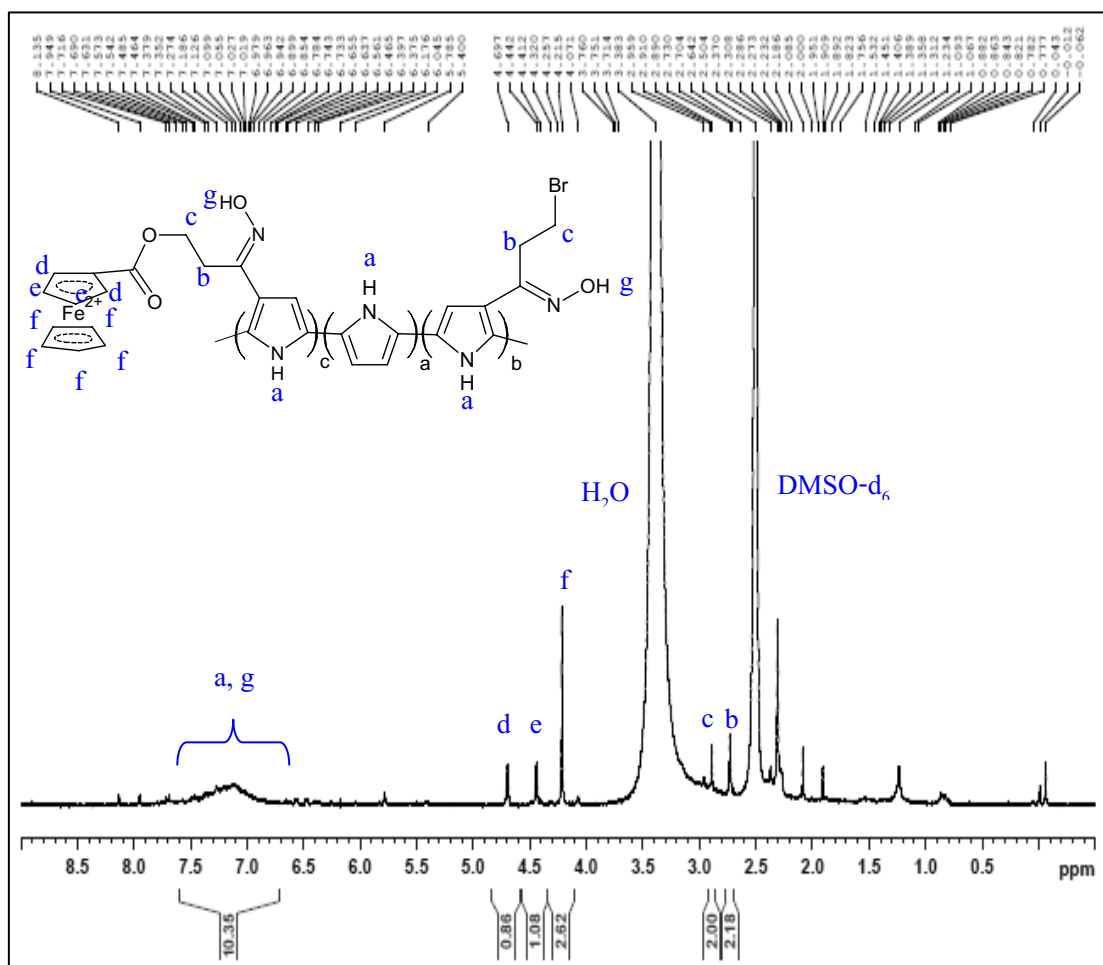
จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า 3-PPy oxime FCC ที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจาก 3-PPy oxime เดิม คือมีสเปกตรัมของ C-O-C ที่เกิดขึ้นจากการทำเอสเทอร์ฟิเคชัน ที่ 1146 cm^{-1} ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจน และพบว่าแบนด์ที่ตำแหน่งประมาณ 1600 cm^{-1} แสดงถึงการดักจับของ C=N ของ 3-PPy oxime ดังแสดงในภาพที่ 61

จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า 3-PPy oxime FCC ที่สังเคราะห์ได้นั้นจะปรากฏสเปกตรัมของ FCC เพิ่มขึ้นมาที่ตำแหน่งสัญญาณในช่วง 4.2-4.7 ppm 3 แบนด์ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ FCC (ตำแหน่ง d, e และ f ในภาพที่ 62) และพบแบนด์กว้างของโปรตอนตำแหน่ง N (N-position) และโปรตอนในวงแหวนไพร์โรลในช่วง 7.0-7.5 ppm

(ตำแหน่ง a และ g ในภาพที่ 62) และหมู่ $\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{-Br}$ ที่ตำแหน่ง 2.7 และ 2.9 ppm (ตำแหน่ง b และ c ในภาพที่ 62)



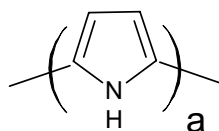
ภาพที่ 61 FT-IR Spectrum ของ 3-PPy, 3-PPy oxime และ 3-PPy oxime FCC



ภาพที่ 62 ^1H -NMR Spectrum ของ 3-PPy oxime FCC ใน DMSO-d_6

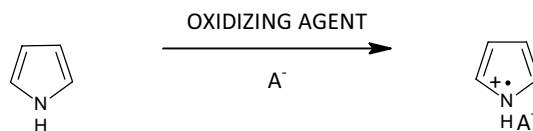
4.1.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิไพร์โรลด้วยเทคนิค FT-IR และ ^1H -NMR

พอลิไพร์โรลที่เตรียมได้เป็นตะกอนสีดำ น้ำหนักสารที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 0.8991 g คิดเป็นผลผลิตร้อยละ (% yield) เท่ากับ 98.66 % โครงสร้างของพอลิไพร์โรลแสดงดังภาพที่ 63 และ ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิไพร์โรลแสดงได้ ดังภาพที่ 64

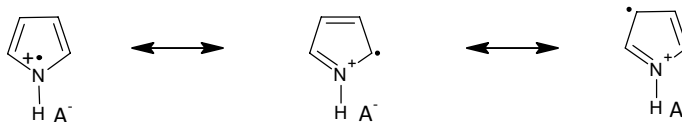


ภาพที่ 63 โครงสร้างพอลิไพร์โรล

ขั้นที่ 1 : Monomer Oxidation



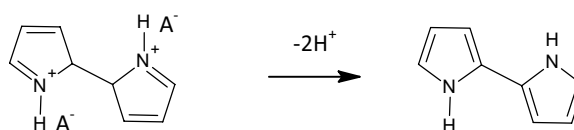
Resonance forms



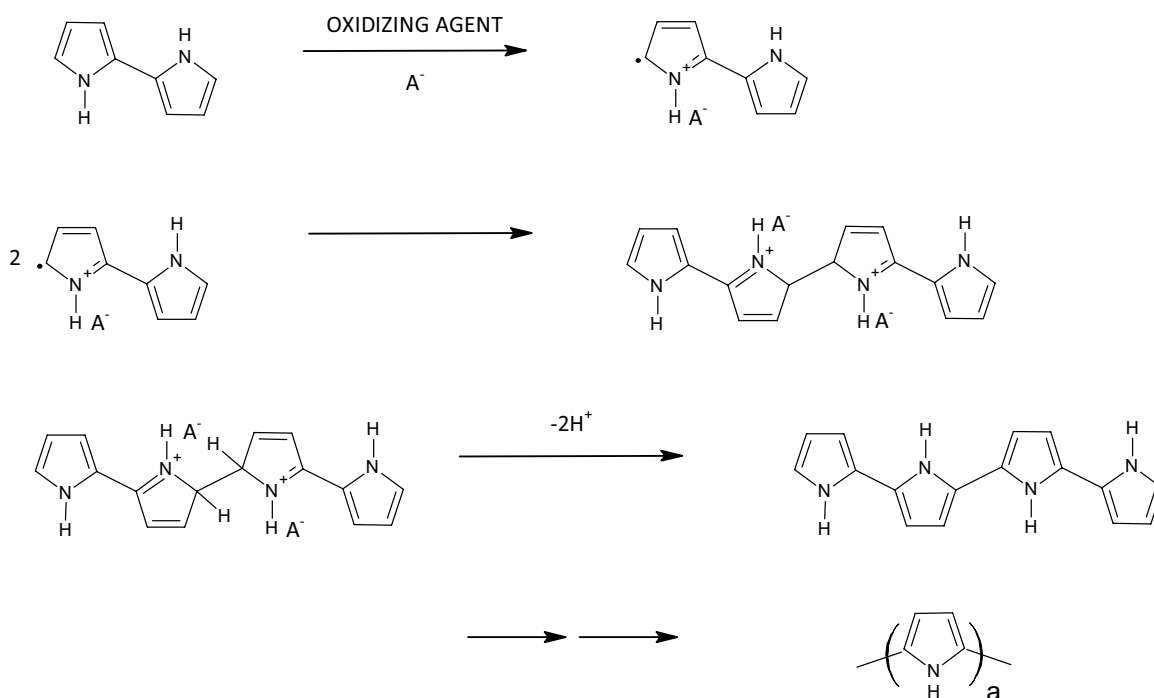
ขั้นที่ 2 : Radical-radical coupling



ขั้นที่ 3: Re-aromatization



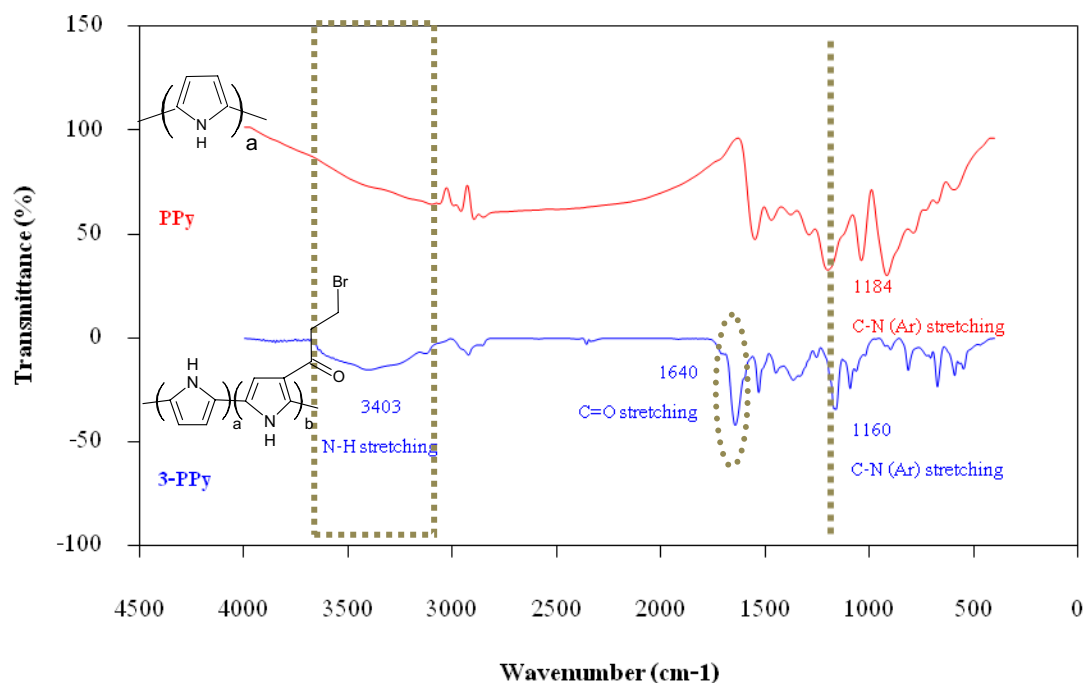
ขั้นที่ 4 : Chain propagation



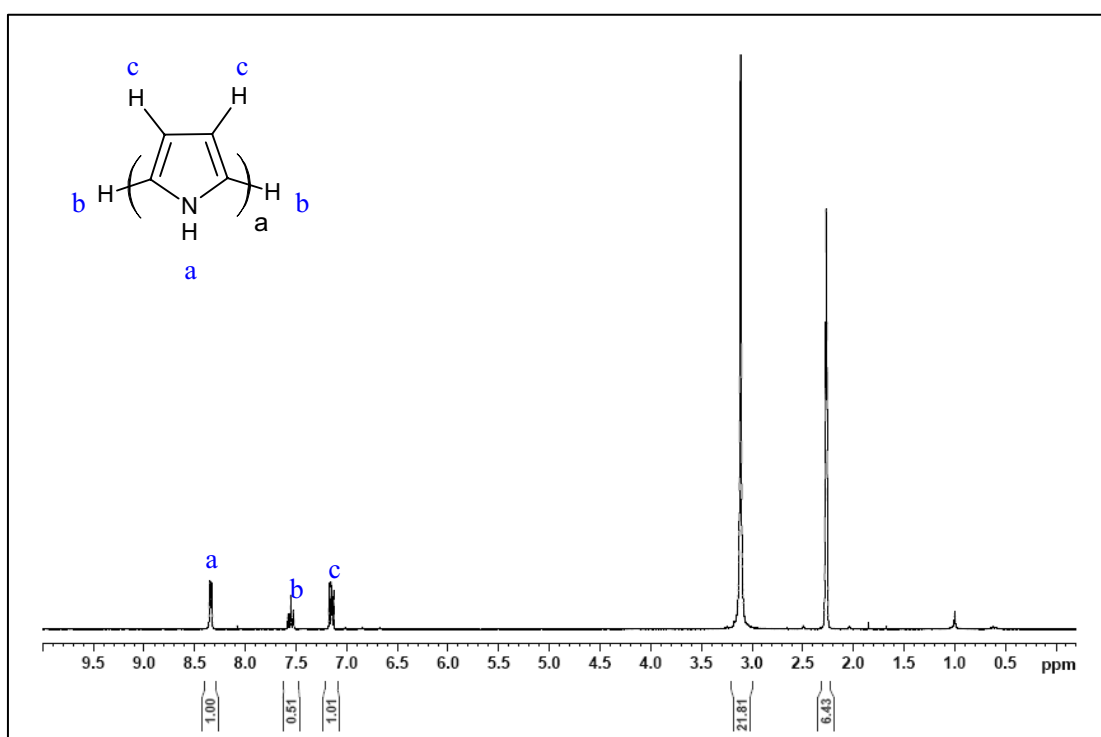
ภาพที่ 64 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิไพร์โรล

ผลการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าพอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์ได้แสดงสเปกตรัมเด่นชัดที่ตำแหน่ง 1184 cm^{-1} ซึ่งเป็นการดึงยึดของ C-N (Ar) และ ที่ $3000\text{-}3550\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการดึงยึดของ N-H ดังแสดงในภาพที่ 65

จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า พอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์ได้นั้นจะปรากฏสเปกตรัมที่ตำแหน่ง 8.4 ppm ซึ่งเป็นโปรตอนที่ตำแหน่ง N-H (N-position) (ตำแหน่ง a ในภาพที่ 66) และ โปรตอนที่ติดอยู่กับคาร์บอนบนวงแหวนไพร์โรลที่ตำแหน่ง 2,5 และที่ 3,4 แสดงสัญญาณเด่นชัดที่ตำแหน่งสัญญาณ 7.5 และ 7.2 ppm ตามลำดับ (ตำแหน่ง b และ c ในภาพที่ 66)



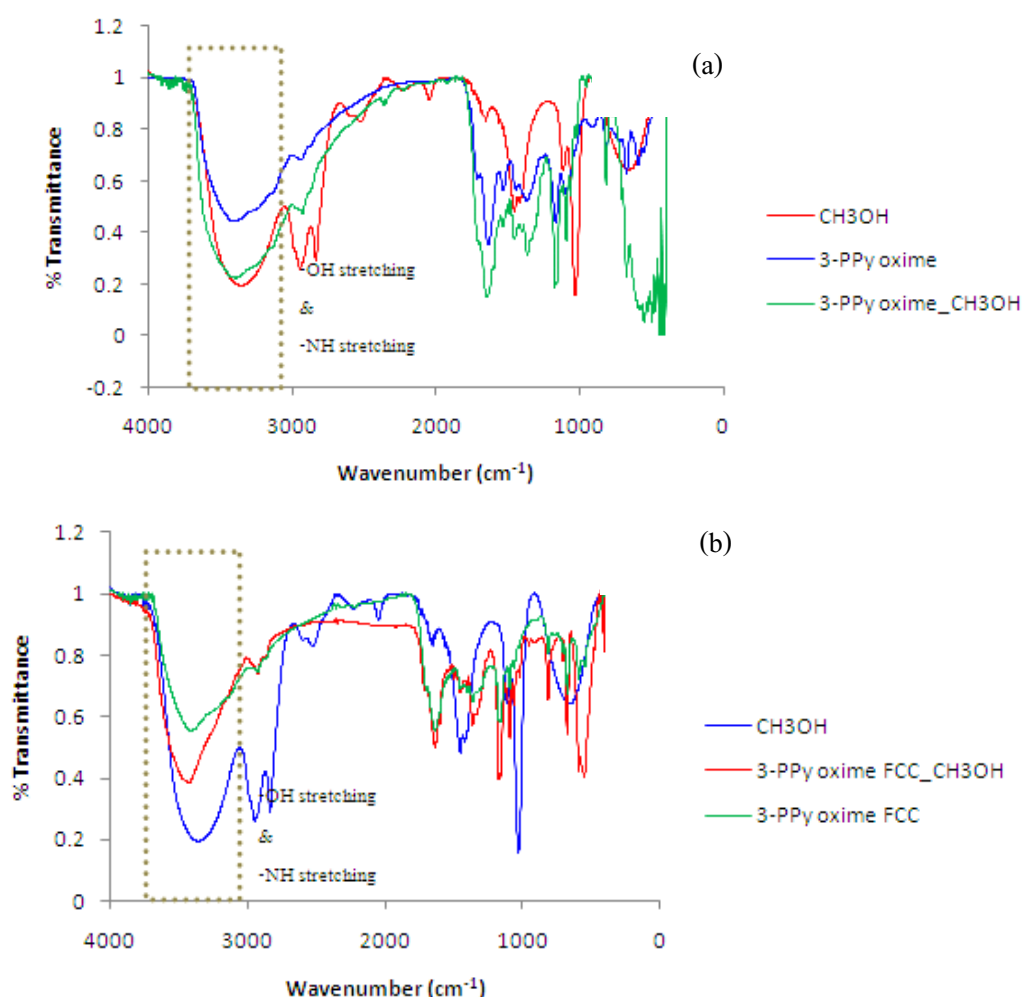
ภาพที่ 65 FT-IR Spectrum ของ 3-PPy และ PPy



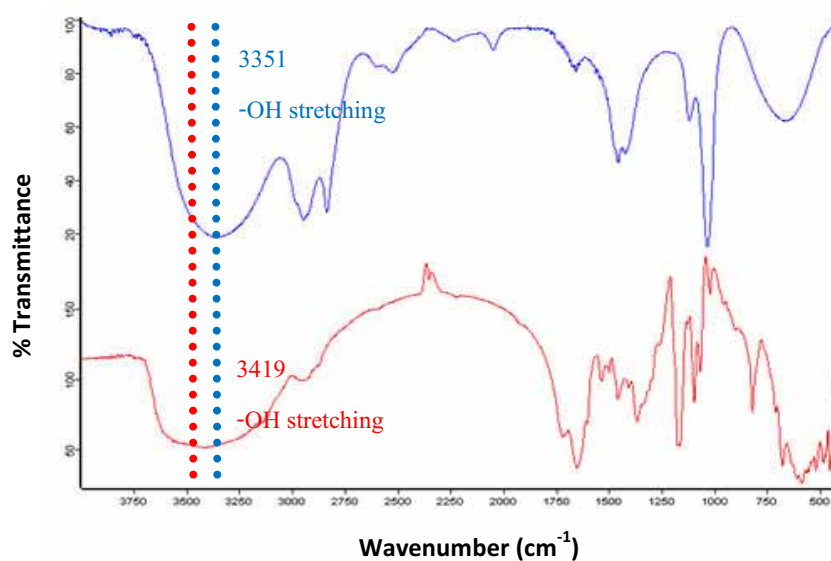
ภาพที่ 66 ¹H-NMR Spectrum ของ PPy ใน DMSO-d₆

4.1.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์อนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่ตำแหน่งที่ 3 ภายหลังการทดสอบกับไอระเหยเมทานอลด้วยเทคนิค FT-IR

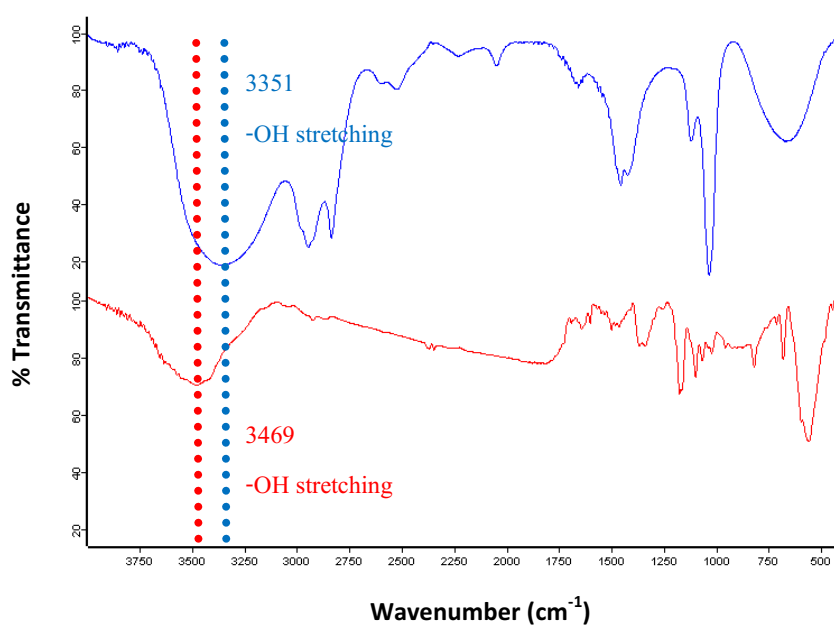
การพิสูจน์เอกลักษณ์ 3-PPy oxime และ 3-PPy oxime FCC ภายหลังการทดสอบภายใต้บรรยากาศไอระเหยเมทานอล พบว่าเกิดการดูดซับเชิงเคมี (chemical absorption) ระหว่างโมเลกุลเมทานอลกับโมเลกุลทั้งสองชนิด สังเกตได้จากพื้นที่ใต้กราฟในช่วงเลขคลื่น 3200-3500 cm^{-1} ของอนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่ผ่านการทดสอบกับไอเมทานอลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการซ้อนทับกันของแบนด์การดึงยืด -OH ของเมทานอลกับ N-OH และ -NH ของอนุพันธ์พอลิไพร์โรล ดังแสดงในภาพที่ 67



ภาพที่ 67 (a) FT-IR Spectrum เปรียบเทียบของ CH₃OH, 3-PPy oxime และ 3-PPy oxime_CH₃OH
(b) FT-IR Spectrum เปรียบเทียบของ CH₃OH, 3-PPy oxime FCC และ 3-PPy oxime FCC_CH₃OH



(a)



(b)

ภาพที่ 68 (a) FT-IR Spectrum เปรียบเทียบของ CH_3OH และกราฟ 3-PPy oxime_ CH_3OH substrate

(b) FT-IR Spectrum เปรียบเทียบของ CH_3OH และกราฟ 3-PPy oxime FCC_ CH_3OH substrate

FT-IR Spectrum ของอนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่ผ่านการ substrate ระหว่างพอลิเมอร์ ภายหลังการทดสอบกับไอระเหยตัวอย่างกับพอลิเมอร์ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบ พบการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์การดึงยืดของ -OH ในช่วงเลขคลื่น 3200-3600 cm^{-1} ไปในช่วงเลขคลื่นที่มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 68

4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ตัวรองรับ

4.2.1 การทดสอบหาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับด้วยเทคนิค TGA

อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิไพร์โรลและอนุพันธ์ของพอลิไพร์โรลที่ทดสอบได้จากเทคนิค TGA มีรายละเอียดของค่าอุณหภูมิการสลายตัว แสดงไว้ดังตารางที่ 9 และภาพที่ 69 โดยสามารถเรียงลำดับพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนจากน้อยไปมากได้ดังนี้ คือ $PPy < 3-PPy < 3-PPy \text{ oxime} < 3-PPy \text{ oxime FCC}$ ตามลำดับ

PPy เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีคัลพอลิเมอร์ไรเซชันของไพร์โรลมอนอเมอร์ PPy แสดงเสถียรภาพทางความร้อนที่ต่ำที่สุด โดยการสลายตัวของพอลิเมอร์เกิดขึ้นเพียงขั้นตอนเดียวของสายโซ่โมเลกุลหลัก แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าปริมาณ weight loss ที่เหลืออยู่เมื่อสิ้นสุดกระบวนการทดสอบมีค่าสูงที่สุดในบรรดาพอลิเมอร์ทั้งสี่ชนิด อธิบายได้จากพฤติกรรมการเกิดสารประกอบชนิดที่เรียกว่า carbonaceous compound ซึ่งสารประกอบดังกล่าวมีเสถียรภาพทางความร้อนอย่างมาก เห็นได้จากปริมาณ weight loss ที่ลดลงไม่มากแม้ว่าจะอยู่ภายใต้สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิสูงก็ตาม

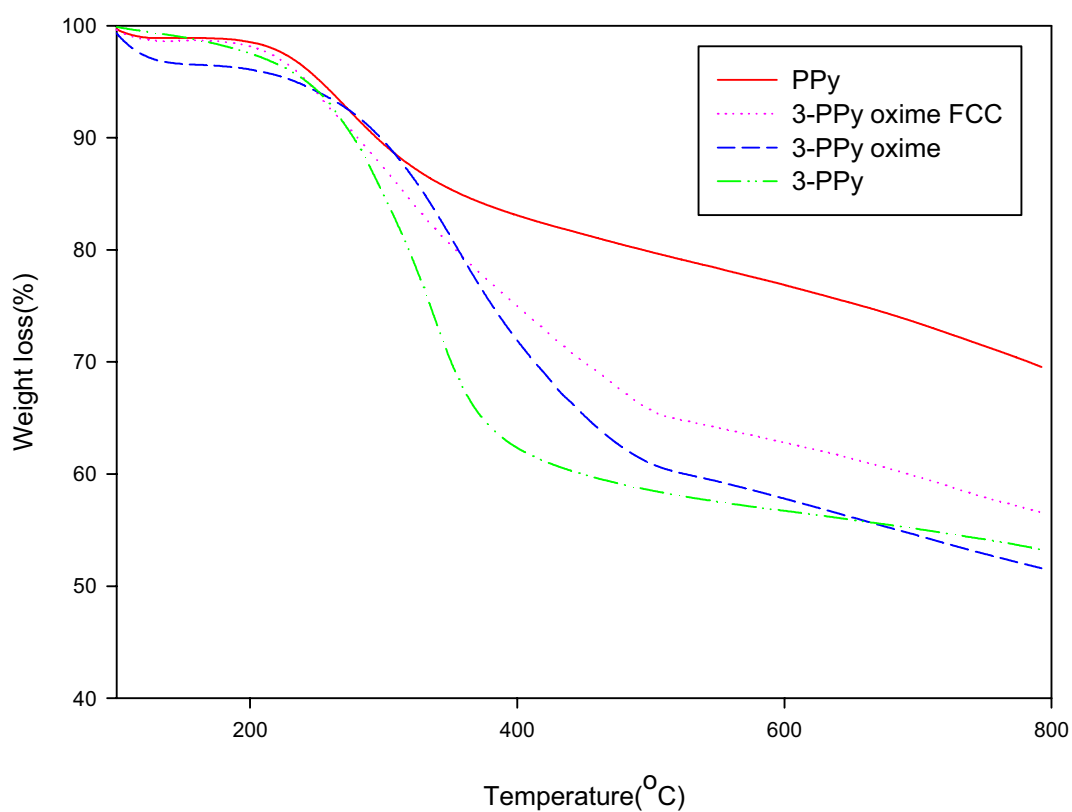
ในส่วนของ 3-PPy และ 3-PPy oxime นั้นมีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงกว่า PPy แม้ว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้จะผ่านกระบวนการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไปบนตำแหน่งที่สามของวงแหวนไพร์โรลแล้วก็ตาม แต่เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่เป็นหมู่คาร์บอนิล($C=O$)ของ 3-PPy หรือหมู่ออกซิเจน($N-OH$)ของ 3-PPy oxime สามารถเกิดแรงกระทำระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ที่เรียกว่าแรงระหว่างขั้วหรือพันธะไฮโดรเจน ตามลำดับ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ 3-PPy และ 3-PPy oxime มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า PPy

สำหรับ 3-PPy oxime FCC แสดงพฤติกรรมสลายตัวทางความร้อน 2 ขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนแรกเกิดจากการสลายตัวของหมู่เฟอร์โรซีนที่ถูกติดเข้าไปในโครงสร้างจากปฏิกิริยาการแทนที่หมู่ CH_2-Br เนื่องจากเกิดการสลายตัวของหมู่เฟอร์โรซีนซึ่งสลายตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำกว่า และช่วงสุดท้ายเกิดจากการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลหลัก

อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับนี้เป็นตัวบ่งบอกถึงอุณหภูมิการนำไปใช้งานที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนกับพอลิเมอร์ตัวรองรับ และสามารถเลือกใช้พอลิเมอร์ให้มีความเหมาะสมกับสภาวะการนำไปใช้งานได้ตามต้องการ

ตารางที่ 9 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับ

ชื่อพอลิเมอร์	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)					
	ช่วงที่ 1			ช่วงที่ 2		
	onset	peak	endset	onset	peak	endset
PPy	180.11	267.40	412.62	-	-	-
3-PPy	196.00	337.67	379.35	-	-	-
3-PPy oxime	212.46	352.11	431.08	-	-	-
3-PPy oxime FCC	154.06	248.79	309.50	456.60	469.87	491.96



ภาพที่ 69 TGA thermogram เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับ

4.2.2 การทดสอบหาอุณหภูมิ glass transition ของพอลิเมอร์ตัวรองรับด้วยเทคนิค DSC

การทดสอบหาอุณหภูมิ glass transition (T_g) ด้วยเทคนิค DSC นั้น ให้ผลในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิการสลายตัวที่ทดสอบด้วยเทคนิค TGA นั่นคือพอลิเมอร์ตัวรองรับที่มีอุณหภูมิ T_g เรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ PPy > 3-PPy > 3-PPy oxime FCC > 3-PPy oxime ตามลำดับ รายละเอียดของค่าอุณหภูมิ T_g นี้แสดงไว้ดังตารางที่ 10 และภาพที่ 70

PPy มี T_g สูงที่สุดเนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกที่แข็งแกร่งตลอดสายโซ่โมเลกุล อีกทั้งแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ (พันธะไฮโดรเจน) ที่มีค่าสูงมาก แต่เมื่อมีการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไปเป็น 3-PPy จะทำให้มี T_g ลดลงเนื่องจากหมู่คาร์บอนิลของ 3-PPy ที่เพิ่มเข้าไบนั้นจะไปช่วยเพิ่มช่องว่างระหว่างโมเลกุล (free volume) ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายมากขึ้น

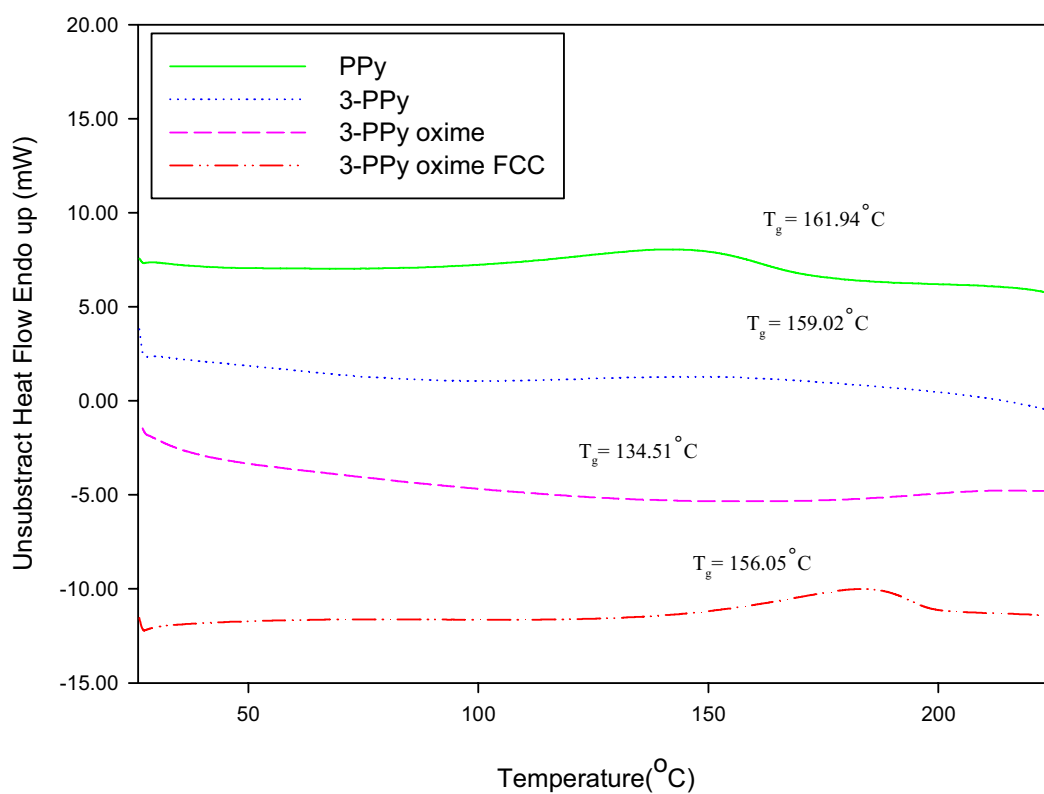
ในส่วนของ 3-PPy oxime แสดงค่า T_g ต่ำที่สุดทั้งนี้เนื่องจากผลการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันจากเดิมที่เป็นหมู่คาร์บอนิลมาเป็นหมู่ออกซิมินั้น เนื่องจากหมู่ N-OH เป็นหมู่โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่กว่าหมู่คาร์บอนิลโดยจะไปช่วยเพิ่มช่องว่างระหว่างโมเลกุลสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้น จึงมีความสามารถในการเคลื่อนไหวได้ง่ายกว่ากรณีที่ไม่สายโซ่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิล

สำหรับ 3-PPy oxime FCC ที่มีการเพิ่มหน่วยเฟอร์โรซีนเข้าไปในโครงสร้างนั้น แม้ว่าหมู่เฟอร์โรซีนจะเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ที่ทำให้มีช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลใหญ่มากก็ตาม แต่หมู่เฟอร์โรซีนซึ่งมีขนาดใหญ่นี้จะมีผลของความเกะกะ และมีผลให้ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวหรือการหมุนของสายโซ่โมเลกุลหลักจะทำให้ T_g ของ 3-PPy oxime FCC มีค่าสูงกว่า 3-PPy และ 3-PPy oxime ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่า T_g ของพอลิไพร์โรลและอนุพันธ์ของพอลิไพร์โรลทุกตัวมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 10 อุณหภูมิ glass transition (T_g) ของพอลิเมอร์ตัวรองรับ

ชื่อพอลิเมอร์	อุณหภูมิ glass transition (T_g , °C)	
	Onset	Midpoint
Polypyrrole	152.39	161.94
3-PPy	159.81	159.02
3-PPy oxime	112.17	134.51
3-PPy oxime FCC	145.15	156.05



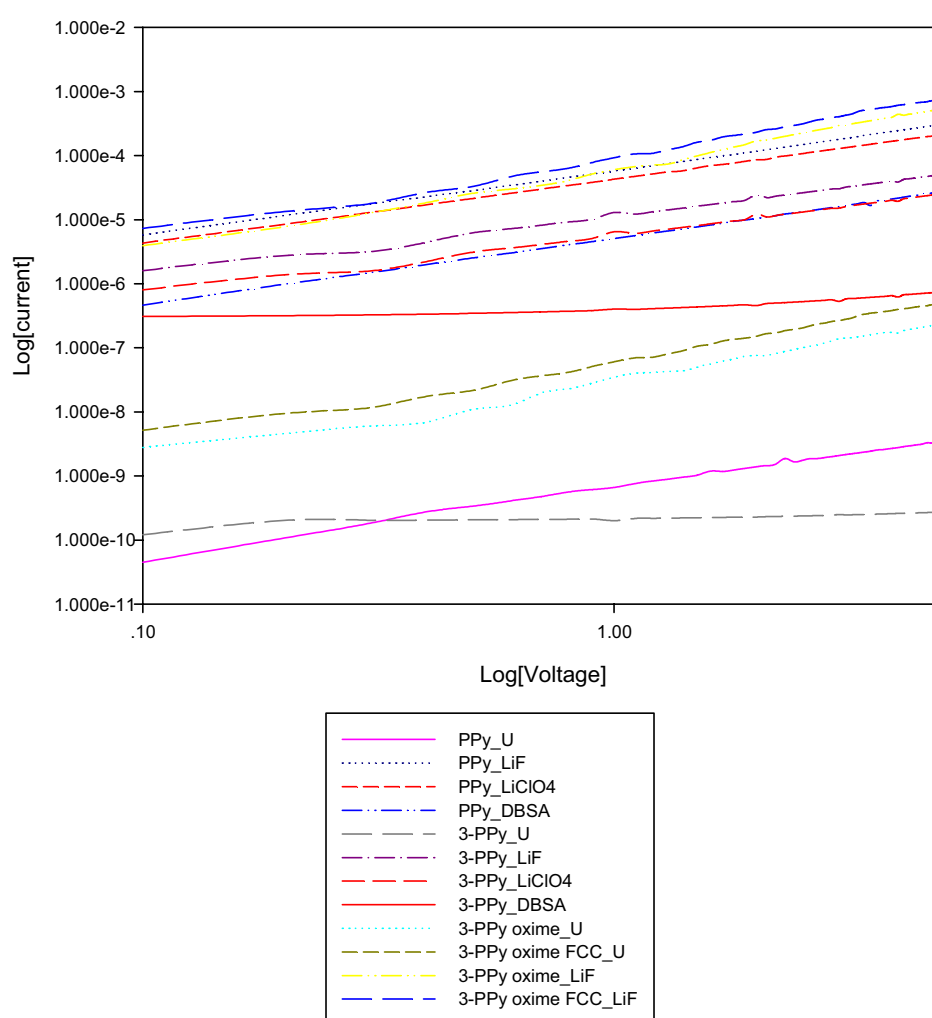
ภาพที่ 70 DSC thermogram เปรียบเทียบอุณหภูมิ glass transition (T_g) ของพอลิเมอร์ตัวรองรับ

4.3 การทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าและความว่องไวต่อไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์

4.3.1 การหา linear ohmic regime

การตรวจสอบหา linear ohmic regime โดยพอลิเมอร์ที่ใช้ผ่านการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุแล้วด้วยลิเทียมฟลูออไรด์ ได้ผลการทดสอบ ดังนี้

4.3.1.1 การตรวจสอบหา linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 28 °C

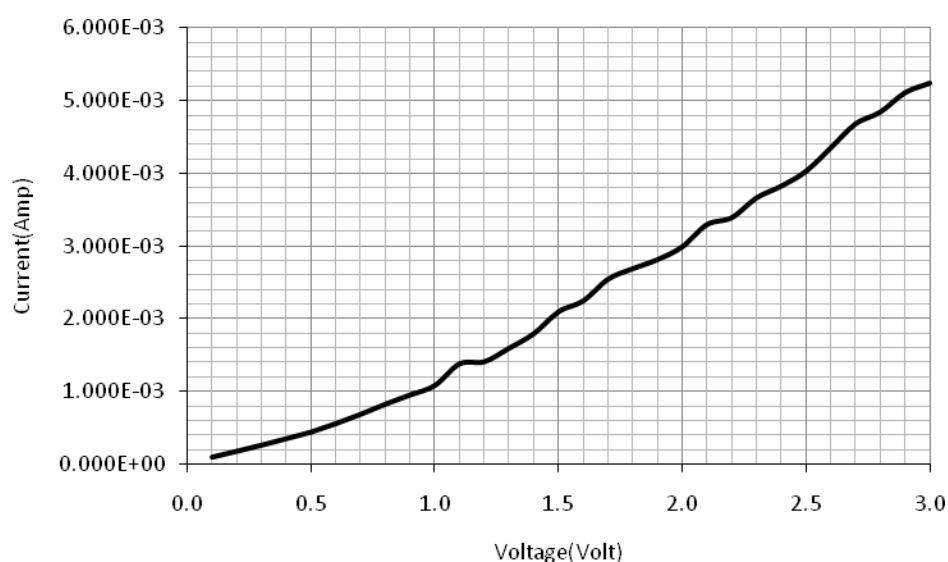


ภาพที่ 71 ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ในสเกลล็อกที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ในการทดสอบหา linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

จากภาพที่ 71 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าความต่างศักย์ (V) มีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงในช่วงค่าความต่างศักย์ตั้งแต่ 0.1 – 3 volt ซึ่งความสัมพันธ์ในช่วงดังกล่าวเป็นไปตามกฎของโอห์ม ดังนั้นจึงเลือกช่วงของการให้ค่าความต่างศักย์ในช่วงนี้ในการทดสอบหา linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่างต่อไป

4.3.2.2 การตรวจสอบหา Linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของไอเมทานอลที่อุณหภูมิ 28 °C

ในการตรวจสอบหา linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศไอระเหยสารตัวอย่าง โดยในการทดสอบจะเลือกพอลิเมอร์ 3-PPy oxime FCC เป็นชิ้นงานตัวแทนเพื่อใช้ในการตรวจสอบหา linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศไอเมทานอลความเข้มข้น 500 ppm จากภาพที่ 72 นี้ จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าความต่างศักย์ (V) มีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงในช่วงค่าความต่างศักย์ตั้งแต่ 0.1 – 3 volt เช่นเดียวกันกับในกรณีที่อยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งความสัมพันธ์ในช่วงดังกล่าวเป็นไปตามกฎของโอห์ม เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่ออยู่ภายใต้บรรยากาศของไอเมทานอลนั้นค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนั้นจะมีค่าสูงมากกว่าในกรณีที่อยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน



ภาพที่ 72 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าความต่างศักย์ (V) ในการทดสอบหา linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของไอเมทานอล

จากการทดสอบการหา linear ohmic regime ทั้งสองขั้นตอนนี้ทำให้สามารถเลือกช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) และค่าความต่างศักย์ (V) เป็นเส้นตรงตามกฎของโอห์มทั้งในสถานะของก๊าซไนโตรเจนและโอโระเหยสารตัวอย่างได้ คือ ต้องป้อนค่าความต่างศักย์ในช่วงที่ต่ำกว่า 1.0 volt ซึ่งในการทดลองต่อไปนี้จะเลือกป้อนค่าความต่างศักย์ที่คงที่ค่าเดียวกันตลอดการทดลองคือที่ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0.5 volt

4.3.2 การทดสอบและคำนวณหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิเมอร์ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน

ในการทดสอบเพื่อหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะ โดยทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อชิ้นงานอยู่ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ซึ่งจะทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง โดยข้อมูลค่าเฉลี่ยและการกระจายตัวแสดงไว้ในตารางที่ 11 และ 12 และภาพที่ 71 และ 72 ตารางที่ 11 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบหาค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific electrical conductivity, σ_{N_2})

Sample name	Anion radii (Å)[19]	Specimen thickness (cm)	I_{N_2} (Amp)	SD	σ_{N_2} (S cm ⁻¹)	$(\sigma_{N_2})^*$	SD*
PPy_U	-	0.0035	3.454E-09	1.152E-12	6.505E-02	6.281E-02	2.778E-03
		0.0037	3.351E-09	8.050E-13	5.970E-02		
		0.0034	3.284E-09	8.604E-13	6.367E-02		
PPy_LiF	1.33	0.0048	2.848E-05	8.548E-08	3.911E+02	3.938E+02	4.724E+00
		0.0047	2.847E-05	1.079E-08	3.993E+02		
		0.0048	2.848E-05	2.491E-08	3.911E+02		
PPy_LiClO ₄	2.88	0.0042	1.902E-05	1.183E-07	2.985E+02	2.955E+02	5.567E+00
		0.0048	2.105E-05	1.045E-08	2.891E+02		
		0.0052	2.358E-05	1.267E-08	2.989E+02		
PPy_DBSA	21.28	0.0032	2.541E-06	1.406E-09	5.234E+01	5.240E+01	4.145E-01
		0.0029	2.288E-06	1.676E-09	5.201E+01		
		0.0034	2.725E-06	2.880E-08	5.283E+01		
3-PPy_U	-	0.0040	2.138E-09	2.684E-10	3.523E-02	3.576E-02	5.283E-04
		0.0040	2.169E-09	3.003E-10	3.574E-02		
		0.0038	2.092E-09	1.680E-10	3.629E-02		
3-PPy_LiF	1.33	0.0037	6.481E-06	3.331E-07	1.155E+02	1.225E+02	8.875E+00
		0.0035	6.353E-06	2.916E-07	1.197E+02		
		0.0039	7.839E-06	3.726E-07	1.325E+02		

ตารางที่ 12 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ในการทดสอบหาค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific electrical conductivity, σ_{N_2}) (ต่อ)

Sample name	Anion radii (Å)[19]	Specimen Thickness (cm)	I_{N_2} (Amp)	SD	σ_{N_2} (S cm ⁻¹)	$(\sigma_{N_2})^*$	SD*
3-PPy_LiClO ₄	2.88	0.0041	3.231E-06	1.790E-07	5.195E+01	5.056E+01	1.352E+00
		0.0040	3.063E-06	1.538E-07	5.048E+01		
		0.0041	3.063E-06	1.886E-08	4.925E+01		
3-PPy_DBSA	21.28	0.0038	3.887E-07	9.400E-09	6.743E+00	6.678E+00	3.158E-01
		0.0030	2.883E-07	7.393E-09	6.335E+00		
		0.0034	3.588E-07	8.708E-09	6.956E+00		
3-PPy oxime_U	-	0.0030	1.064E-08	8.116E-10	2.338E-01	2.421E-01	1.196E-02
		0.0033	1.185E-08	1.271E-09	2.367E-01		
		0.0026	1.009E-08	2.018E-09	2.558E-01		
3-PPy oxime_LiF	1.33	0.0039	2.553E-05	2.462E-07	4.315E+02	4.261E+02	1.049E+01
		0.0045	2.954E-05	3.971E-07	4.327E+02		
		0.0035	2.198E-05	1.447E-07	4.140E+02		
3-PPy oxime FCC_U	-	0.0038	2.676E-08	4.991E-09	4.642E-01	4.238E-01	3.507E-02
		0.0029	1.764E-08	1.271E-09	4.010E-01		
		0.0033	2.034E-08	4.982E-09	4.063E-01		
3-PPy oxime FCC_LiF	1.33	0.0385	3.252E-05	1.298E-07	5.568E+02	5.572E+02	1.472E+00
		0.0039	3.289E-05	1.781E-07	5.559E+02		
		0.0039	3.306E-05	9.418E-08	5.588E+02		

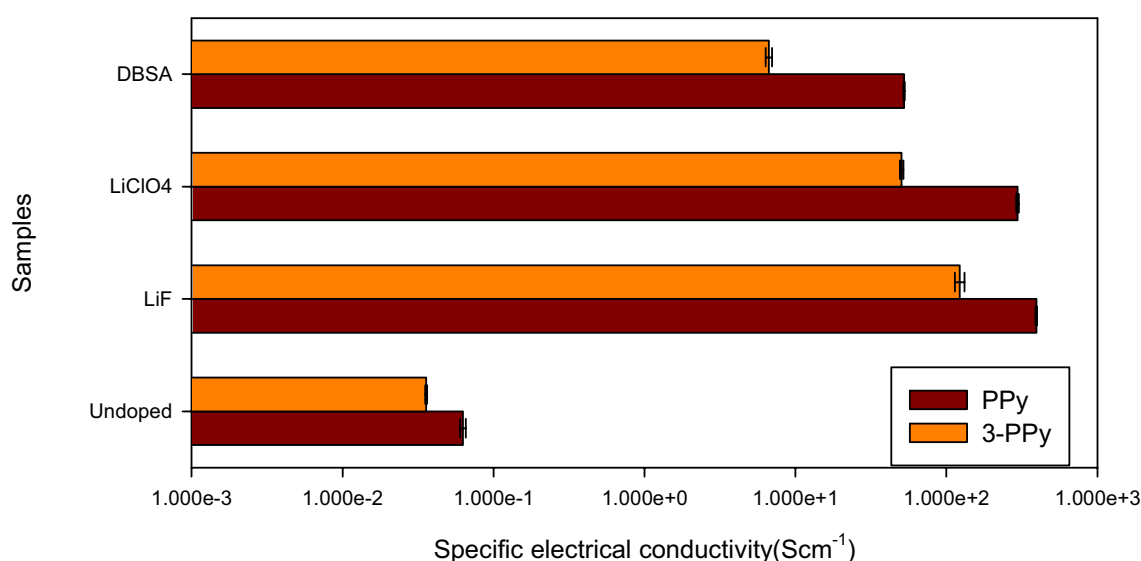
หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1

ตารางที่ 11 และ 12 แสดงข้อมูลสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนของพอลิเมอร์สี่ชนิด ได้แก่ PPy, 3-PPy, 3-PPy oxime และ 3-PPy oxime FCC พบว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิเมอร์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับปัจจัยทางโครงสร้างสารกระตุ้นพาหะนำประจุและโครงสร้างพอลิเมอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ผลของขนาดแอนไอออนของสารกระตุ้นพาหะต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ที่ผ่านการกระตุ้นพาหะด้วย LiF สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าพอลิเมอร์ที่ผ่านการกระตุ้นพาหะด้วย LiClO₄ และ DBSA ตามลำดับ ระบบการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์

ชนิดนี้สามารถอธิบายได้โดย เมื่อพอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้รับการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำประจุ (Doping) โครงสร้างของพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงไปเกิดเป็นประจุบวกหรือโฮล (Hole) บนสายโซ่โมเลกุลหลักโดยมีสารกระตุ้นพาหะนำประจุ (Dopant) ซึ่งมีประจุลบทำหน้าที่เป็น counterion ช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้าง เมื่อมีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่พอลิเมอร์จะเกิดการเคลื่อนที่ของพาหะนำประจุไปตลอดความยาวของสายโซ่ ดังนั้นการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์จึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่เข้าไปเสถียรประจุบวกบนสายโซ่พอลิเมอร์ระหว่างการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อพิจารณาถึงขนาดแอนไอออนของ Dopant ทั้งสามชนิดเรียงลำดับจากเล็กไปใหญ่ได้ดังนี้ $F^- < OCl_4^- < DBSA^-$ ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่แสดงดังภาพที่ 73 โดยจะแสดงผลในแนวโน้มเดียวกันทั้ง PPy และ 3-PPy แต่พบว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าของ 3-PPy มีค่าต่ำกว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของ PPy แสดงว่าปัจจัยด้านโครงสร้างของพอลิเมอร์มีผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้า สำหรับรายละเอียดได้แสดงไว้ในหัวข้อถัดไป

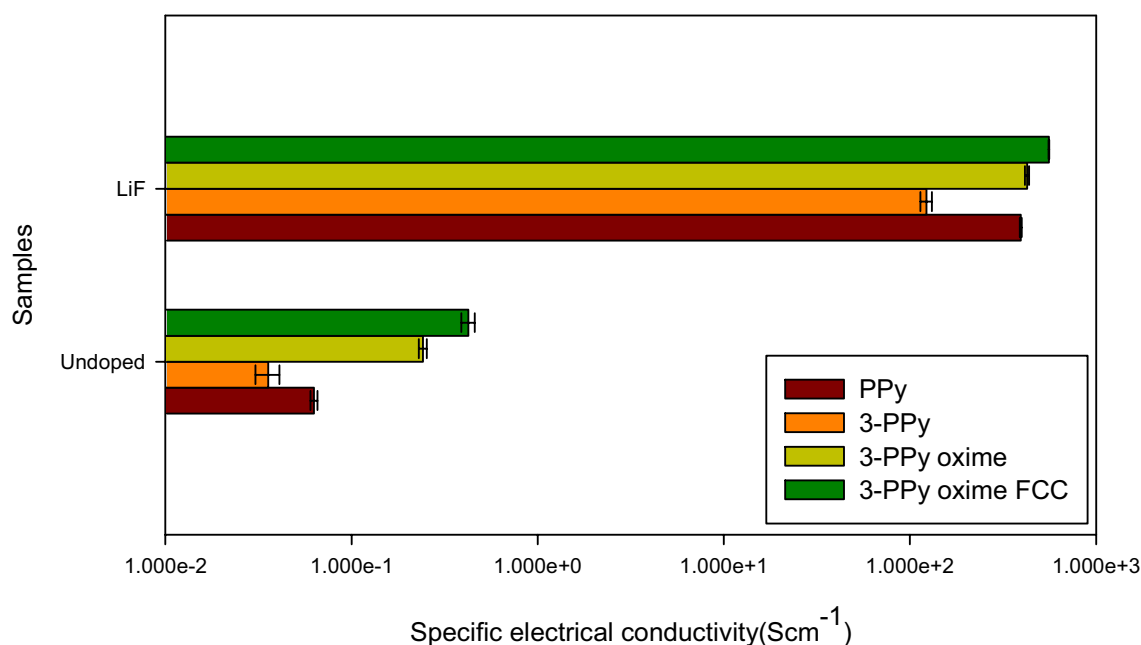


ภาพที่ 73 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิเมอร์ที่ผ่านการกระตุ้นพาหะด้วยสารกระตุ้นชนิดต่างๆ จากการทดลองซ้ำสามรอบเฉลี่ย (σ_{N_2})

2. ผลของชนิดโครงสร้างพอลิเมอร์ต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ที่นำมาทดสอบทั้งสี่ชนิดมีค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ 3-PPy oxime FCC > 3-PPy oxime > PPy > 3-PPy เริ่มพิจารณาจากโครงสร้างของ 3-PPy พบว่า 3-PPy มีโครงสร้างที่มีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่งที่สามบน

วงแหวนไพร์โรลเป็นหมู่คาร์บอนิล ($C=O$) โดยหมู่คาร์บอนิลจัดเป็นหมู่โครงสร้างที่แสดงสมบัติเป็นหมู่ดึงอิเล็กตรอน (Electron-withdrawing group) ซึ่งจะดึงอิเล็กตรอนจากสายโซ่หลักทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบนสายโซ่หลักถูกรบกวน พฤติกรรมดังกล่าวนี้ส่งผลให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของ 3-PPy ต่ำกว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของ PPy สำหรับ 3-PPy oxime ซึ่งมีหมู่แทนที่ ณ ตำแหน่งที่สามบนวงแหวนไพร์โรลเป็นหมู่ออกซิม ($N-OH$) สำหรับหมู่ออกซิมนี้มีสมบัติเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน ดังนั้นส่งผลให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากโครงสร้างหมู่ออกซิมสู่สายโซ่หลักพอลิเมอร์ ดังนั้นความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านสายโซ่หลักจึงมีเพิ่มขึ้น ค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะที่ได้จึงสูงกว่า PPy พอลิเมอร์ตัวสุดท้ายที่จะกล่าวถึงคือ 3-PPy oxime FCC พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความพิเศษมากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ โดยระบบการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์สามารถนำได้สองกลไก กลไกแรกคือการนำไฟฟ้าผ่านระบบคอนจูเกตของสายโซ่หลัก ร่วมกับกลไกที่สองคือการกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนจากเฟอร์โรซีนหมู่ที่อยู่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นความสามารถในการนำไฟฟ้าของ 3-PPy oxime FCC จะสูงกว่า 3-PPy oxime ซึ่งสอดคล้องกันกับค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะที่สูงที่สุดในบรรดาพอลิเมอร์ทั้งสี่ชนิด ดังแสดงในภาพที่ 74



ภาพที่ 74 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่ผ่านการกระตุ้นพาหะและไม่ได้ผ่านการกระตุ้นพาหะด้วยลิเทียมฟลูออไรด์จากการทดลองซ้ำสามรอบ (σ_{N_2})

4.3.3 การทดสอบและคำนวณหาร้อยละความว่องไวต่อไอระเหยสารตัวอย่าง

ในการทดสอบความว่องไวต่อไอระเหยสารตัวอย่างจะทำการศึกษาไอระเหยสารตัวอย่างสองชนิด คือ ไอเมทานอลและไอไดเอทิลอีเทอร์ โดยจะทำการทดสอบ 2 ระบบ คือ

1. ความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างคงที่

1.1 การทดสอบในระบบนี้เพื่อการศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ โดยไอระเหยสารตัวอย่าง(เมทานอลและไดเอทิลอีเทอร์) ถูกควบคุมความเข้มข้นไอระเหยไว้ที่ 500 ppm ทดสอบกับพอลิเมอร์ 3 ชนิด ที่ผ่านการกระตุ้นพาหะนำประจุด้วยลิเทียมฟลูออไรด์ คือ PPy, 3-PPy oxime, 3-PPy oxime FCC ในแต่ละตัวอย่างการทดสอบ จะทำการป้อนและปล่อยไอระเหยสารตัวอย่างทั้งหมดสามรอบ ในการทดสอบจะทำซ้ำทั้งหมดสองครั้ง ข้อมูลดิบทั้งหมดจะถูกรวบรวมไว้ในภาคผนวกท้ายเล่ม

2. ความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างเปลี่ยนแปลง

2.1 การทดสอบในระบบนี้เพื่อการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นไอระเหยต่อพฤติกรรมการตอบสนองพอลิเมอร์ โดยเลือกพอลิเมอร์ตัวอย่างมาหนึ่งชนิด คือ 3-PPy oxime ที่ผ่านการกระตุ้นพาหะนำประจุด้วยลิเทียมฟลูออไรด์ ทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้น 3 ค่า คือ 500 ppm 250 ppm และ 125 ppm โดยในแต่ละความเข้มข้นไอระเหยจะทำการป้อนและปล่อยไอระเหยสารตัวอย่างทั้งหมดสามรอบ ในการทดสอบจะทำซ้ำทั้งหมดสองครั้ง ข้อมูลดิบทั้งหมดจะถูกรวบรวมไว้ในภาคผนวกท้ายเล่ม

2.2 การทดสอบในระบบนี้เพื่อการศึกษาความสามารถในการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างเมื่อพอลิเมอร์อยู่ภายใต้บรรยากาศไอระเหยสารตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างต่อเนื่องจากความเข้มข้นไอระเหย 500 ppm-250 ppm-125 ppm ทดสอบกับพอลิเมอร์ 3 ชนิด ที่ผ่านการกระตุ้นพาหะนำประจุด้วยลิเทียมฟลูออไรด์ คือ PPy, 3-PPy oxime, 3-PPy oxime FCC ในการทดสอบจะทำซ้ำทั้งหมดสองครั้ง ข้อมูลดิบทั้งหมดจะถูกรวบรวมไว้ในภาคผนวกท้ายเล่ม

4.3.3.1 การทดสอบพฤติกรรมการตอบสนองเมื่อความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างคงที่

ในการทดสอบก่อนที่จะป้อนไอระเหยสารตัวอย่างจะวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ($I_{N_2, before}$) ก่อน จากนั้นจึงป้อนไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้น

คงที่ 500 ppm แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศไอระเหยสารตัวอย่าง (I_{gas}) ตามด้วยการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการป้อนไอระเหยสารตัวอย่าง ($I_{N_2,after}$) โดยจะทำการป้อนไอระเหยสารตัวอย่างทั้งหมดสามรอบเพื่อศึกษาผลของชนิดโครงสร้างพอลิเมอร์ต่อการตอบสนองของไอระเหยสารตัวอย่าง ซึ่งข้อมูลได้ดังแสดงในตารางที่ 13 และ 15 และภาพที่ 75 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.3.3.1.1 ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ($I_{N_2,before}$) ก่อนการป้อนไอระเหยสารตัวอย่าง

1. ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทดสอบในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ($I_{N_2,before}$) รอบแรกของพอลิเมอร์ทุกชนิดทั้งที่ทดสอบภายใต้บรรยากาศไอเมทานอลและไอไดเอทิลอีเทอร์ มีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากไม่มีโมเลกุลของไอระเหยอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์เลย ในขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2,before}$) ในรอบที่ 2 และ 3 มีค่าสูงกว่าในรอบแรกเล็กน้อย เนื่องจากมีโมเลกุลของไอระเหยบางส่วนหลงเหลืออยู่หลังจากการทดสอบรอบก่อนหน้าซึ่งถูกขับไล่ออกไปไม่หมด ทำหน้าที่เป็นตัวพลาสติกไซเซอร์ให้กับโมเลกุลพอลิเมอร์

2. ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2,before}$) ในรอบที่ 2 และ 3 ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดทั้งที่ทดสอบภายใต้บรรยากาศไอเมทานอลและไอไดเอทิลอีเทอร์มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าปริมาณไอระเหยที่หลงเหลืออยู่ในโครงสร้างมีค่าจำกัดค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของโครงสร้างพอลิเมอร์ โดยพบว่าค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2,before}$) ในรอบที่ 2 และ 3 ของ 3-PPy oxime FCC มีค่ามากกว่าค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2,before}$) ในรอบที่ 2 และ 3 ของ 3-PPy oxime และ PPy ตามลำดับ แสดงว่าโมเลกุลของไอระเหยภายหลังจากการทดสอบนั้นไม่สามารถถูกปลดปล่อยขับไล่ออกไปได้หมด โดยส่วนใหญ่ยังคงค้างอยู่ในโครงสร้าง เนื่องจาก 3-PPy oxime FCC มีความเป็นขั้วสูงกว่า 3-PPy oxime และ PPy ทำให้โมเลกุลของไอระเหยยังคงติดค้างอยู่ในโครงสร้างมากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าจึงสูงกว่า

4.3.3.1.2 ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศไอระเหยสารตัวอย่าง (I_{gas})

1. ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{gas}) ของพอลิเมอร์ทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม เนื่องจากโมเลกุลของไอระเหยสารตัวอย่างช่วยทำหน้าที่ในการพลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์เพิ่มความสามารถในการสั่นไหวและการเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน เนื่องจากไอออน F^- เคลื่อนที่ไปสะเทินประจุบวกบนสายโซ่พอลิเมอร์ และประจุบวกของ $Fe(III)$ สำหรับพอลิเมอร์ 3-

PPy oxime FCC ได้ง่ายขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าจึงสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ($I_{N_2, \text{before}}$) ก่อนการป้อนไอรอะเหย

2. ในกรณีการทดสอบกับไอเมทานอล พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{gas}) ในรอบที่ 2 และ 3 ของพอลิเมอร์ทุกชนิดมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสไฟฟ้า (I_{gas}) ที่วัดได้ในรอบแรกอธิบายได้จากผลของการเกิด Chemical Absorption โดยโมเลกุลของไอรอะเหยจะถูกดูดซับบนผิวพอลิเมอร์ โดยที่ก่เกิดพันธะเคมีขึ้น ดังนั้นภายหลังการปล่อยไอรอะเหยออก โมเลกุลของไอรอะเหยจึงไม่สามารถหลุดออกจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้และยึดติดอยู่กับโมเลกุลของพอลิเมอร์ตลอด จึงทำให้ปริมาณ Hole ที่เหลืออยู่มีน้อยลงเมื่อเทียบกับก่อนการทดลอง แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นในการทดสอบครั้งแรกเท่านั้น เนื่องจากบริเวณที่ว่องไวเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลของไอรอะเหยได้นั้นจะเกิดปฏิกิริยาจนหมดบริเวณที่ว่องไว จนไม่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นอีก

3. ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{gas}) ที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในทุกกรอบการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าไอไดเอทิลอีเทอร์ซึ่งมีความเป็นขั้วต่ำจึงไม่เกิดการดูดซับแบบ Chemical absorption กับโมเลกุลพอลิเมอร์เป็นผลให้ปริมาณ Hole ที่อยู่ในโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนักเมื่อเทียบกับก่อนการทดลอง ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในทุกๆ รอบจึงมีค่าใกล้เคียงกันมาก

4. ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอรอะเหยสารตัวอย่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{gas}) ที่วัดได้จากการทดสอบทั้งสามรอบของพอลิเมอร์ทุกชนิด (ยกเว้นค่ากระแสไฟฟ้าที่ทดสอบกับไอเมทานอลในรอบแรก) พบว่าในแต่ละรอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการที่ได้อยู่ในบรรยากาศของไอรอะเหยสารตัวอย่างในช่วงระยะเวลาหนึ่งจึงทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมีค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ และสมบัติของไอรอะเหยสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนั้นๆ

5. ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{gas}) ที่ทดสอบในบรรยากาศไอรอะเหยสารตัวอย่างมีแนวโน้มเดียวกัน คือ พอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วมากกว่าจะนำไฟฟ้าได้ดีกว่า เรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ 3-PPy oxime FCC > 3-PPy oxime > PPy

6. เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าของพอลิเมอร์ในกลุ่มที่ทดสอบกับไอเมทานอลจะให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงมากกว่ากลุ่มที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วของไอรอะเหยสารตัวอย่างมีผลต่อการทำหน้าที่พลาสม่าโพลิไซส์โมเลกุลของพอลิ

เมอร์ กล่าวคือ ยิ่งไอระเหยที่ทดสอบมีความเป็นขี้วมมาก การเคลื่อนที่ของไอออน F^- เพื่อเข้าไป สะเทินประจุบวกบนโครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์ และประจุบวกของ $Fe(III)$ สำหรับ 3-PPy oxime FCC จะเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มเสถียรภาพให้กับประจุบวกและไอออนของ $Fe(III)$ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของฟลูออไรด์จึงเป็นไปได้ดีขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของไอระเหยสารตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก สามารถแทรกแพร่ผ่านช่องว่างระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ได้ดีกว่า ช่วยทำหน้าที่ในการพลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ ได้ดีขึ้นอีกด้วย ดังนั้นกลุ่มที่ทำการทดสอบกับไอเมทานอลจึงมีค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงมากกว่ากลุ่มที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์

4.3.3.1.3 ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนภายหลังการป้อน

ไอระเหยสารตัวอย่าง ($I_{N_2,after}$)

1. ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2,after}$) ที่วัดได้มีแนวโน้มเดียวกัน คือ พอลิเมอร์ที่มีความเป็นขี้วมมากกว่าจะนำไฟฟ้าได้ดีกว่า เรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ 3-PPy oxime FCC > 3-PPy oxime > PPy

2. เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ต่างกลุ่มกันพบว่าพอลิเมอร์ในกลุ่มที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ (ยกเว้น 3-PPy oxime FCC) จะมีค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าในกลุ่มที่ทดสอบกับไอเมทานอล เนื่องจากภายหลังการขับไล่ไอระเหยสารตัวอย่างออกไปแล้ว ไอไดเอทิลอีเทอร์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าไอเมทานอล ส่งผลทำให้ไอไดเอทิลอีเทอร์ถูกขับไล่ออกไปไม่หมด และยังคงเหลือติดค้างอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์มากกว่า การทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของไอระเหยสารตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนและไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้มากกว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จึงมีค่าสูงกว่า

3. สำหรับค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2,after}$) ของ 3-PPy oxime FCC ที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ทุกรอบ จะมีค่าต่ำกว่าค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2,after}$) ที่ทดสอบกับไอเมทานอล เนื่องจากโครงสร้างของ 3-PPy oxime FCC มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมาก (free volume) ทำให้โมเลกุลของไอไดเอทิลอีเทอร์ที่มีความเป็นขี้วน้อย และมีความดันไอสูงกว่าเมทานอลสามารถถูกไล่ให้เคลื่อนที่ออกไปได้ง่ายกว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์จึงต่ำกว่า

ตารางที่ 13 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ก่อน ขณะ และหลังผ่านไอระเหยของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยเมทานอลความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm

Sample name	Cycle	Specimen Thickness (cm)	Current (Amp)								
			$I_{N_2, \text{before}}$ (Amp)	I_{gas} (Amp)	$I_{N_2, \text{after}}$ (Amp)	$I_{N_2, \text{before}}^*$ (Amp)	$SD_{IN_2, \text{before}}$	I_{gas}^* (Amp)	$SD_{I_{\text{gas}}}$	$I_{N_2, \text{after}}^*$ (Amp)	$SD_{IN_2, \text{after}}$
PPy	1 st	0.0048	2.865E-05	9.072E-05	4.798E-05	2.857E-05	1.202E-07	9.021E-05	7.212E-07	4.747E-05	7.283E-07
		0.0047	2.848E-05	8.970E-05	4.695E-05						
	2 nd	0.0048	4.798E-05	8.835E-05	4.720E-05	4.747E-05	7.283E-07	8.823E-05	1.697E-07	4.731E-05	1.556E-07
		0.0047	4.695E-05	8.811E-05	4.742E-05						
	3 rd	0.0048	4.720E-05	8.812E-05	4.734E-05	4.731E-05	1.556E-07	8.840E-05	3.889E-07	4.719E-05	2.192E-07
		0.0047	4.742E-05	8.867E-05	4.703E-05						
3-PPy oxime	1 st	0.0043	2.988E-05	1.374E-04	5.893E-05	2.879E-05	1.549E-06	1.389E-04	2.051E-06	5.924E-05	4.313E-07
		0.0040	2.769E-05	1.403E-04	5.954E-05						
	2 nd	0.0043	5.893E-05	1.284E-04	5.930E-05	5.887E-05	8.485E-08	1.299E-04	2.121E-06	5.956E-05	3.606E-07
		0.0040	5.881E-05	1.314E-04	5.981E-05						
	3 rd	0.0043	5.930E-05	1.310E-04	5.891E-05	5.892E-05	5.374E-07	1.318E-04	1.131E-06	5.938E-05	6.647E-07
		0.0040	5.854E-05	1.326E-04	5.985E-05						
3-PPy oxime FCC	1 st	0.0040	3.152E-05	4.215E-04	1.047E-04	3.201E-05	6.930E-07	4.279E-04	9.051E-06	1.045E-04	3.536E-07
		0.0042	3.250E-05	4.343E-04	1.042E-04						
	2 nd	0.0040	1.047E-04	4.036E-04	1.043E-04	1.001E-04	6.484E-06	4.076E-04	5.657E-06	1.044E-04	7.071E-08
		0.0042	9.553E-05	4.116E-04	1.044E-04						
	3 rd	0.0040	1.043E-04	4.034E-04	1.046E-04	1.019E-04	3.387E-06	4.078E-04	6.152E-06	1.072E-04	3.606E-06
		0.0042	9.951E-05	4.121E-04	1.097E-04						

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ

ตารางที่ 14 ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ก่อน ขณะ และหลังผ่านไอระเหยของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยเมทานอลความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm

Sample name	Cycle	Specimen Thickness (cm)	$\sigma (\text{S cm}^{-1})$								
			$\sigma_{\text{N}_2, \text{before}}$ (S cm^{-1})	σ_{gas} (S cm^{-1})	$\sigma_{\text{N}_2, \text{after}}$ (S cm^{-1})	$\sigma_{\text{N}_2, \text{before}}^*$ (S cm^{-1})	$\text{SD}_{\sigma_{\text{gas}}}$	σ_{gas}^* (S cm^{-1})	$\text{SD}_{\sigma_{\text{gas}}}$	σ_{gas}^* (S cm^{-1})	$\text{SD}_{\sigma_{\text{N}_2, \text{after}}}$
PPy	1 st	0.0048	3.935E+02	1.246E+03	6.589E+02	3.965E+02	4.234E+00	1.252E+03	8.628E+00	6.587E+02	3.017E-01
		0.0047	3.994E+02	1.258E+03	6.585E+02						
	2 nd	0.0048	6.589E+02	1.213E+03	6.482E+02	6.587E+02	3.017E-01	1.225E+03	1.587E+01	6.566E+02	1.193E+01
		0.0047	6.585E+02	1.236E+03	6.651E+02						
	3 rd	0.0048	6.482E+02	1.210E+03	6.501E+02	6.566E+02	1.193E+01	1.227E+03	2.366E+01	6.549E+02	6.707E+00
		0.0047	6.651E+02	1.244E+03	6.596E+02						
3-PPy oxime	1 st	0.0043	4.581E+02	2.106E+03	9.034E+02	4.572E+02	1.228E+00	2.209E+03	1.455E+02	9.423E+02	5.502E+01
		0.0040	4.563E+02	2.312E+03	9.812E+02						
	2 nd	0.0043	9.034E+02	1.968E+03	9.091E+02	9.363E+02	4.651E+01	2.067E+03	1.393E+02	9.474E+02	5.415E+01
		0.0040	9.692E+02	2.165E+03	9.857E+02						
	3 rd	0.0043	9.091E+02	2.008E+03	9.031E+02	9.369E+02	3.935E+01	2.097E+03	1.251E+02	9.447E+02	5.885E+01
		0.0040	9.647E+02	2.185E+03	9.863E+02						
3-PPy oxime FCC	1 st	0.0040	5.195E+02	6.946E+03	1.725E+03	5.148E+02	6.614E+00	6.881E+03	9.184E+01	1.680E+03	6.365E+01
		0.0042	5.101E+02	6.816E+03	1.635E+03						
	2 nd	0.0040	1.725E+03	6.651E+03	1.719E+03	1.612E+03	1.599E+02	6.556E+03	1.352E+02	1.679E+03	5.677E+01
		0.0042	1.499E+03	6.460E+03	1.639E+03						
	3 rd	0.0040	1.719E+03	6.648E+03	1.724E+03	1.640E+03	1.110E+02	6.558E+03	1.273E+02	1.723E+03	1.443E+00
		0.0042	1.562E+03	6.468E+03	1.722E+03						

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1

ตารางที่ 15 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ก่อน ขณะและหลังผ่านไอระเหยของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยไดเอทิลอีเทอร์ความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm

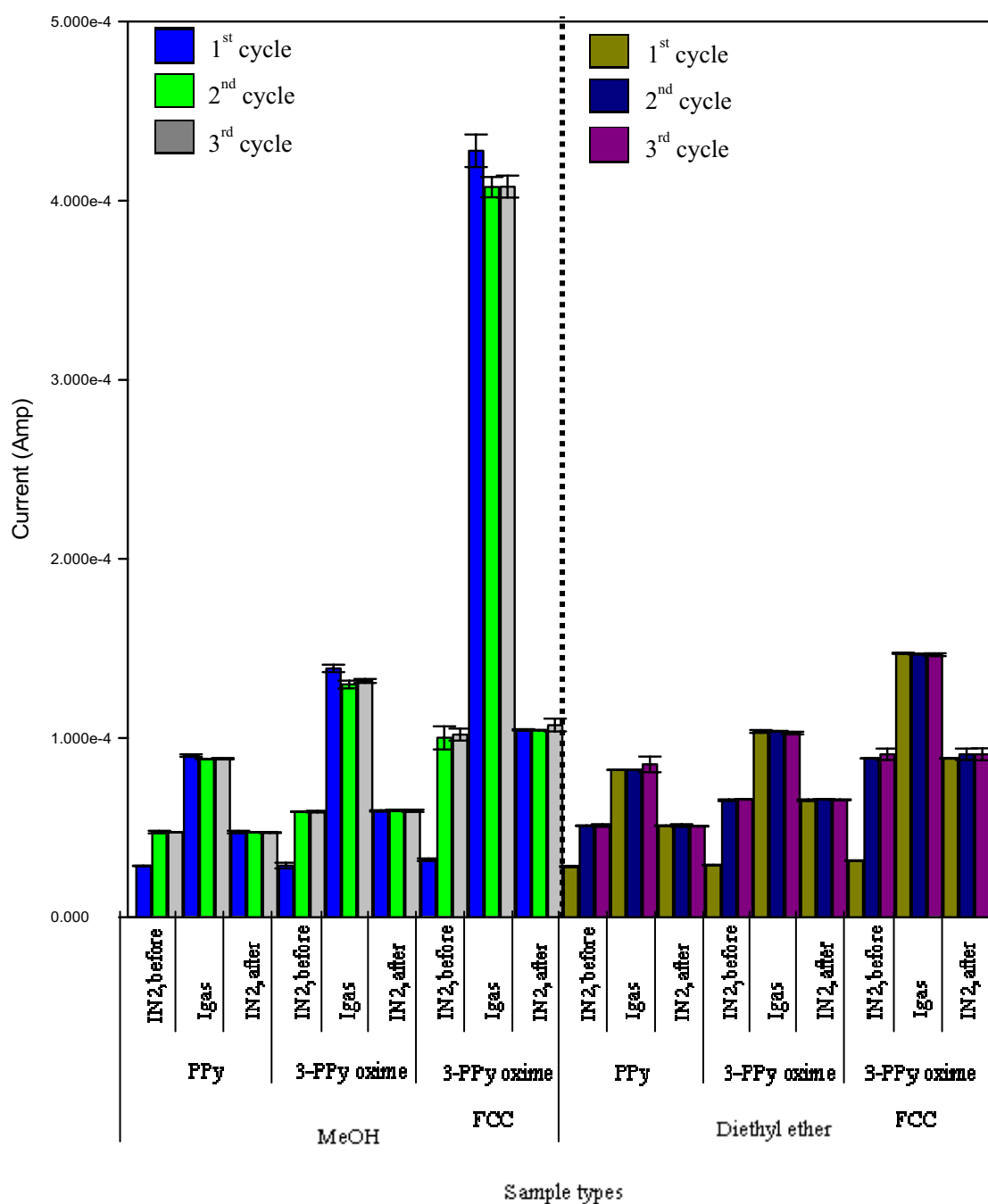
Sample name	Cycle	Specimen Thickness (cm)	Current (Amp)								
			$I_{N_2, \text{before}}$ (Amp)	I_{gas} (Amp)	$I_{N_2, \text{after}}$ (Amp)	$I_{N_2, \text{before}}^*$ (Amp)	$SD_{IN_2, \text{before}}$	I_{gas}^* (Amp)	$SD_{I_{\text{gas}}}$	$I_{N_2, \text{after}}^*$ (Amp)	$SD_{IN_2, \text{after}}$
PPy	1 st	0.0047	2.789E-05	8.225E-05	5.076E-05	2.821E-05	4.525E-07	8.222E-05	4.243E-08	5.096E-05	2.828E-07
		0.0048	2.853E-05	8.219E-05	5.116E-05						
	2 nd	0.0047	5.076E-05	8.219E-05	5.166E-05	5.096E-05	2.828E-07	8.223E-05	4.950E-08	5.112E-05	7.637E-07
		0.0048	5.116E-05	8.226E-05	5.058E-05						
	3 rd	0.0047	5.166E-05	8.840E-05	5.062E-05	5.112E-05	7.637E-07	8.531E-05	4.377E-06	5.079E-05	2.333E-07
		0.0048	5.058E-05	8.221E-05	5.095E-05						
3-PPy oxime	1 st	0.0045	2.893E-05	1.031E-04	6.485E-05	2.907E-05	1.980E-07	1.037E-04	7.778E-07	6.520E-05	4.879E-07
		0.0042	2.921E-05	1.042E-04	6.554E-05						
	2 nd	0.0045	6.485E-05	1.037E-04	6.566E-05	6.520E-05	4.879E-07	1.038E-04	1.414E-07	6.569E-05	4.243E-08
		0.0042	6.554E-05	1.039E-04	6.572E-05						
	3 rd	0.0045	6.566E-05	1.022E-04	6.535E-05	6.569E-05	4.243E-08	1.027E-04	7.071E-07	6.550E-05	2.051E-07
		0.0042	6.572E-05	1.032E-04	6.564E-05						
3-PPy oxime FCC	1 st	0.0038	3.166E-05	1.475E-04	8.857E-05	3.156E-05	1.485E-07	1.473E-04	2.828E-07	8.859E-05	2.828E-08
		0.0043	3.145E-05	1.471E-04	8.861E-05						
	2 nd	0.0038	8.857E-05	1.469E-04	9.316E-05	8.859E-05	2.828E-08	1.468E-04	2.121E-07	9.088E-05	3.231E-06
		0.0043	8.861E-05	1.466E-04	8.859E-05						
	3 rd	0.0038	9.316E-05	1.471E-04	9.325E-05	9.088E-05	3.231E-06	1.465E-04	8.485E-07	9.092E-05	3.295E-06
		0.0043	8.859E-05	1.459E-04	8.859E-05						

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1

ตารางที่ 16 ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะ และหลังผ่านไอระเหยของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยไดเอทิลอีเทอร์ความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm

Sample name	Cycle	Specimen Thickness (cm)	σ (S cm ⁻¹)								
			$\sigma_{N_2, before}$ (S cm ⁻¹)	σ_{gas} (S cm ⁻¹)	$\sigma_{N_2, after}$ (S cm ⁻¹)	$\sigma_{N_2, before}^*$ (S cm ⁻¹)	$SD_{\sigma_{gas}}$	σ_{gas}^* (S cm ⁻¹)	$SD_{\sigma_{gas}}$	σ_{gas}^* (S cm ⁻¹)	$SD_{\sigma_{N_2, after}}$
PPy	1 st	0.0047	391.17	1153.59	711.93	3.915E+02	4.525E-01	1.141E+03	1.758E+01	7.073E+02	6.603E+00
		0.0048	391.81	1128.74	702.59						
	2 nd	0.0047	711.93	1152.75	724.55	7.073E+02	6.603E+00	1.141E+03	1.630E+01	7.096E+02	2.116E+01
		0.0048	702.59	1129.70	694.63						
	3 rd	0.0047	724.55	1239.85	709.97	7.096E+02	2.116E+01	1.184E+03	7.837E+01	7.048E+02	7.254E+00
		0.0048	694.63	1129.01	699.71						
3-PPy oxime	1 st	0.0045	423.79	1510.29	949.97	4.411E+02	2.451E+01	1.573E+03	8.849E+01	9.893E+02	5.564E+01
		0.0042	458.45	1635.43	1028.66						
	2 nd	0.0045	949.97	1519.08	961.84	9.893E+02	5.564E+01	1.575E+03	7.894E+01	9.967E+02	4.925E+01
		0.0042	1028.66	1630.72	1031.48						
	3 rd	0.0045	961.84	1497.11	957.30	9.967E+02	4.925E+01	1.558E+03	8.671E+01	9.938E+02	5.157E+01
		0.0042	1031.48	1619.74	1030.23						
3-PPy oxime FCC	1 st	0.0038	549.21	2558.72	1536.45	5.157E+02	4.743E+01	2.407E+03	2.147E+02	1.447E+03	1.259E+02
		0.0043	482.13	2255.06	1358.40						
	2 nd	0.0038	1536.45	2548.31	1616.07	1.447E+03	1.259E+02	2.398E+03	2.128E+02	1.487E+03	1.824E+02
		0.0043	1358.40	2247.40	1358.10						
	3 rd	0.0038	1616.07	2551.78	1617.63	1.487E+03	1.824E+02	2.394E+03	2.228E+02	1.488E+03	1.835E+02
		0.0043	1358.10	2236.67	1358.10						

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1



ภาพที่ 75 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลของพอลิเมอร์ในบรรยากาศของไอร์อะเฮกซารด้อย่างความเข้มข้นคงที่ 500 ppm

4.3.3.2 การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์เมื่อความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างเปลี่ยนแปลง

ในการทดสอบเพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นไอระเหยต่อพฤติกรรมการตอบสนองพอลิเมอร์ โดยเลือกพอลิเมอร์ตัวอย่างมาหนึ่งชนิด คือ 3-PPy oxime ที่ผ่านการกระตุ้นพาหะนำประจุด้วยลิเทียมฟลูออไรด์ ทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้น 3 ค่า คือ 500 ppm 250 ppm และ 125 ppm ในแต่ละความเข้มข้นจะทำการป้อนและปล่อยไอระเหยสารตัวอย่างทั้งหมดสามรอบ ซึ่งข้อมูลได้ดังแสดงในตารางที่ 17 และ 19 และภาพที่ 76 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.3.2.1 ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ($I_{N_2, before}$) ก่อนการป้อนไอระเหยสารตัวอย่าง

1. ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทดสอบในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ($I_{N_2, before}$) รอบแรกของการทดสอบทั้งที่ทดสอบภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนและไอไดเอทิลอีเทอร์ที่ทุกค่าความเข้มข้นไอระเหยมีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากไม่มีโมเลกุลของไอระเหยอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์เลย ในขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2, before}$) ในรอบที่ 2 และ 3 มีค่าสูงกว่าในรอบแรกเล็กน้อย เนื่องจากมีโมเลกุลของไอระเหยบางส่วนหลงเหลืออยู่หลังจากการทดสอบรอบก่อนหน้าซึ่งถูกขับไล่ออกไปไม่หมดทำหน้าที่เป็นตัวพลาสติกไซเซอร์ให้กับโมเลกุลพอลิเมอร์

2. ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2, before}$) ในรอบที่ 2 และ 3 ของ 3-PPy oxime ที่ทดสอบทุกๆ ความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าปริมาณไอระเหยที่หลงเหลืออยู่ในโครงสร้างมีค่าจำกัดค่าหนึ่งเช่นเดียวกับที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ โดยพบว่าค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2, before}$) ในรอบที่ 2 และ 3 ของ 3-PPy oxime ที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์มีค่ามากกว่าค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2, before}$) ในรอบที่ 2 และ 3 ที่ทดสอบกับไอเมทานอล แสดงว่าโมเลกุลของไอไดเอทิลอีเทอร์อยู่หลังจากการทดสอบนั้นไม่สามารถถูกปลดปล่อยขับไล่ออกไปได้หมด โดยส่วนใหญ่ยังคงค้างอยู่ในโครงสร้าง เนื่องจากไอไดเอทิลอีเทอร์มีขนาดใหญ่กว่าไอระเหยเมทานอลทำให้โมเลกุลของไอระเหยยังคงติดอยู่ในโครงสร้างมากกว่า จึงทำหน้าที่เป็นตัวพลาสติกไซเซอร์ให้กับโมเลกุลพอลิเมอร์ค่ากระแสไฟฟ้าจึงสูงกว่า

4.3.3.2.2 ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศไอระเหยสารตัวอย่าง (I_{gas})

1. ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{gas}) ของ 3-PPy oxime มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเนื่องจากโมเลกุลของไอระเหยสารตัวอย่างช่วยทำหน้าที่ในการพลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ เพิ่มความสามารถในการสั่นไหวและการเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน เนื่องจากไอออน F^- เคลื่อนที่ไปสะเทินประจุบวกบนสายโซ่พอลิเมอร์ ได้ง่ายขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าจึงสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ($I_{N_2, before}$) ก่อนการป้อนไอระเหย

2. ในกรณีการทดสอบกับไอเมทานอล พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{gas}) ในรอบที่ 2 และ 3 มีค่าต่ำกว่าค่ากระแสไฟฟ้า (I_{gas}) ที่วัดได้ในรอบแรก อธิบายได้จากผลของการเกิด Chemical Absorption โดยโมเลกุลของไอระเหยจะถูกดูดซับบนผิวพอลิเมอร์ โดยที่เกิดพันธะเคมีขึ้น ดังนั้นภายหลังการปล่อยไอระเหยออกโมเลกุลของไอระเหยจึงไม่สามารถหลุดออกจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้และยึดติดอยู่กับโมเลกุลของพอลิเมอร์ตลอด จึงทำให้ปริมาณ Hole ที่เหลืออยู่มีน้อยลงเมื่อเทียบกับก่อนการทดลอง แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นในการทดสอบครั้งแรกเท่านั้น เนื่องจากบริเวณที่ว่องไวเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลของไอระเหยได้นั้นจะเกิดปฏิกิริยาจนหมดบริเวณที่ว่องไว จนไม่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นอีก

3. ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{gas}) ที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ในทุกรอบการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าไอไดเอทิลอีเทอร์ซึ่งมีความเป็นขั้วต่ำจึงไม่เกิดการดูดซับแบบ chemical absorption กับโมเลกุล 3-PPy oxime เป็นผลให้ปริมาณ Hole ที่อยู่ในโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนักเมื่อเทียบกับก่อนการทดลอง ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในทุกๆ รอบจึงมีค่าใกล้เคียงกันมาก

4. เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าของ 3-PPy oxime ที่ทุกค่าความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างมีแนวโน้มเดียวกัน สามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ 500 ppm > 250 ppm > 125 ppm เนื่องจากปริมาณไอระเหยสารตัวอย่างมีผลต่อความสามารถในการทำหน้าที่เป็นตัวพลาสติกไซส์โมเลกุลพอลิเมอร์ เมื่อความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างลดลง ค่ากระแสไฟฟ้าจึงต่ำลง

5. เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าของ 3 PPy oxime ที่ทดสอบกับไอเมทานอลจะให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงมากกว่ากลุ่มที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วของไอระเหยสารตัวอย่างมีผลต่อการทำหน้าที่พลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ กล่าวคือ ยิ่งไอระเหยที่ทดสอบมีความเป็นขั้วมาก การเคลื่อนที่ของไอออน F^- เพื่อเข้าไปสะเทินประจุบวกบนโครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มเสถียรภาพให้กับ

ประจวบกับ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของฟลูออไรด์จึงเป็นไปได้ดีขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของไฮดรอกไซด์ตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก สามารถแทรกแพร่ผ่านช่องว่างระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ง่ายกว่า ช่วยทำหน้าที่ในการพลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดีขึ้นอีกด้วย ดังนั้นกลุ่มที่ทำการทดสอบกับไอเมทานอลจึงมีค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงมากกว่ากลุ่มที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์

4.3.3.2.3 ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนภายหลังการป้อนไฮดรอกไซด์ตัวอย่าง ($I_{N2,after}$)

1. ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N2,after}$) ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆ รอบ แต่พบว่ากรณีที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่าสูงกว่ากรณีที่ทดสอบกับไอเมทานอลเนื่องจากไอไดเอทิลอีเทอร์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าไอเมทานอล ส่งผลทำให้ไอไดเอทิลอีเทอร์ถูกขับไล่ออกไปไม่หมด และยังคงเหลือติดค้างอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์มากกว่า การทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของไฮดรอกไซด์ตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนและไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้จึงมีมากกว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จึงมีค่าสูงกว่า

2. ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N2,after}$) ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันในทุกค่าความเข้มข้นไฮดรอกไซด์ตัวอย่าง แสดงว่าไฮดรอกไซด์ตัวอย่างมีความสามารถในการติดอยู่ในโครงสร้างได้สูงสุดค่าหนึ่งแม้ว่าจะทดสอบกับไฮดรอกไซด์ตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่างกัน ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N2,after}$) ที่อ่านได้ก็มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 17 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะและหลังผ่านไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอเมทานอลที่ความเข้มข้นไอระเหยเปลี่ยนแปลง

Gas concentration (ppm)	Cycle	Specimen Thickness (cm)	Current (Amp)								
			$I_{N_2, before}$ (Amp)	I_{gas} (Amp)	$I_{N_2, after}$ (Amp)	$I_{N_2, before}^*$ (Amp)	$SD_{IN_2, before}$	I_{gas}^* (Amp)	$SD_{I_{gas}}$	$I_{N_2, after}^*$ (Amp)	$SD_{IN_2, after}$
500	1 st	0.0043	2.988E-05	1.374E-04	5.893E-05	2.879E-05	1.549E-06	1.389E-04	2.051E-06	5.924E-05	4.313E-07
		0.0040	2.769E-05	1.403E-04	5.954E-05						
	2 nd	0.0043	5.893E-05	1.284E-04	5.930E-05	5.752E-05	1.994E-06	1.194E-04	1.273E-05	5.816E-05	1.619E-06
		0.0040	5.611E-05	1.104E-04	5.701E-05						
	3 rd	0.0043	5.930E-05	1.310E-04	5.891E-05	5.839E-05	1.294E-06	1.215E-04	1.351E-05	5.801E-05	1.273E-06
		0.0040	5.747E-05	1.119E-04	5.711E-05						
250	1 st	0.00405	2.739E-05	1.247E-04	5.856E-05	2.862E-05	1.739E-06	1.195E-04	7.354E-06	5.914E-05	8.202E-07
		0.0042	2.985E-05	1.143E-04	5.972E-05						
	2 nd	0.00405	5.856E-05	1.168E-04	5.892E-05	5.919E-05	8.910E-07	1.106E-04	8.768E-06	5.942E-05	7.000E-07
		0.0042	5.982E-05	1.044E-04	5.991E-05						
	3 rd	0.00405	5.892E-05	1.034E-04	5.934E-05	5.940E-05	6.788E-07	1.050E-04	2.192E-06	5.962E-05	3.889E-07
		0.0042	5.988E-05	1.065E-04	5.989E-05						
125	1 st	0.0045	2.879E-05	1.090E-04	5.958E-05	2.937E-05	8.132E-07	1.062E-04	3.960E-06	5.972E-05	1.909E-07
		0.0044	2.994E-05	1.034E-04	5.985E-05						
	2 nd	0.0045	5.958E-05	9.979E-05	5.964E-05	5.935E-05	3.323E-07	9.982E-05	3.536E-08	5.924E-05	5.657E-07
		0.0044	5.911E-05	9.984E-05	5.884E-05						
	3 rd	0.0045	5.964E-05	1.014E-04	5.891E-05	5.953E-05	1.626E-07	1.001E-04	1.810E-06	5.832E-05	8.386E-07
		0.0044	5.941E-05	9.884E-05	5.772E-05						

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1

ตารางที่ 18 ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะและหลังผ่านไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอระเหยเมทานอลที่ความเข้มข้นไอระเหยเปลี่ยนแปลง

Gas concentration (ppm)	Cycle	Specimen Thickness (cm)	σ (S cm ⁻¹)								
			$\sigma_{N_2, before}$ (S cm ⁻¹)	σ_{gas} (S cm ⁻¹)	$\sigma_{N_2, after}$ (S cm ⁻¹)	$\sigma_{N_2, before}^*$ (S cm ⁻¹)	$SD_{\sigma_{gas}}$	σ_{gas}^* (S cm ⁻¹)	$SD_{\sigma_{gas}}$	σ_{gas}^* (S cm ⁻¹)	$SD_{\sigma_{N_2, after}}$
500	1 st	0.0043	4.581E+02	2.106E+03	9.034E+02	4.572E+02	1.228E+00	2.209E+03	1.455E+02	9.423E+02	5.502E+01
		0.0040	4.563E+02	2.312E+03	9.812E+02						
	2 nd	0.0043	9.034E+02	1.968E+03	9.091E+02	9.140E+02	1.505E+01	1.894E+03	1.054E+02	9.243E+02	2.153E+01
		0.0040	9.247E+02	1.819E+03	9.395E+02						
	3 rd	0.0043	9.091E+02	2.008E+03	9.031E+02	9.281E+02	2.689E+01	1.926E+03	1.161E+02	9.221E+02	2.692E+01
		0.0040	9.471E+02	1.844E+03	9.412E+02						
250	1 st	0.00405	4.458E+02	2.030E+03	9.532E+02	4.572E+02	1.604E+01	1.912E+03	1.667E+02	9.452E+02	1.120E+01
		0.0042	4.685E+02	1.794E+03	9.373E+02						
	2 nd	0.00405	9.532E+02	1.901E+03	9.590E+02	9.460E+02	1.009E+01	1.770E+03	1.856E+02	9.497E+02	1.323E+01
		0.0042	9.389E+02	1.639E+03	9.403E+02						
	3 rd	0.00405	9.590E+02	1.683E+03	9.658E+02	9.494E+02	1.356E+01	1.677E+03	8.098E+00	9.529E+02	1.829E+01
		0.0042	9.398E+02	1.672E+03	9.400E+02						
125	1 st	0.0045	4.217E+02	1.597E+03	8.728E+02	4.351E+02	1.896E+01	1.573E+03	3.366E+01	8.847E+02	1.689E+01
		0.0044	4.486E+02	1.549E+03	8.967E+02						
	2 nd	0.0045	8.728E+02	1.462E+03	8.737E+02	8.792E+02	9.047E+00	1.479E+03	2.402E+01	8.776E+02	5.565E+00
		0.0044	8.856E+02	1.496E+03	8.815E+02						
	3 rd	0.0045	8.737E+02	1.485E+03	8.630E+02	8.819E+02	1.160E+01	1.483E+03	3.249E+00	8.639E+02	1.304E+00
		0.0044	8.901E+02	1.481E+03	8.648E+02						

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1

ตารางที่ 19 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะและหลังผ่านไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอระเหยไดเอทิลอีเทอร์ที่ความเข้มข้นไอระเหยเปลี่ยนแปลง

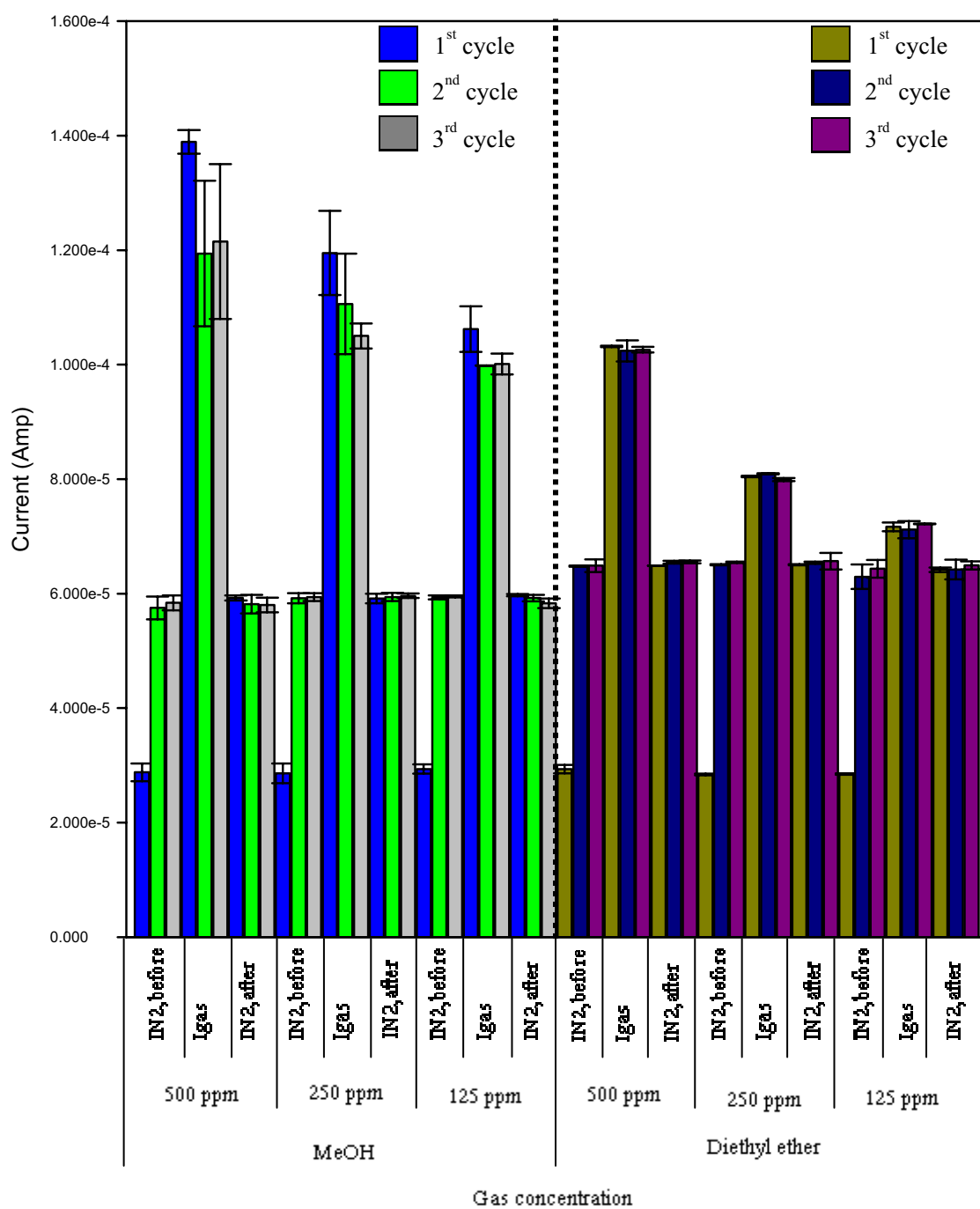
Gas concentration (ppm)	Cycle	Specimen Thickness (cm)	Current (Amp)								
			$I_{N_2, before}$ (Amp)	I_{gas} (Amp)	$I_{N_2, after}$ (Amp)	$I_{N_2, before}^*$ (Amp)	$SD_{IN_2, before}$	I_{gas}^* (Amp)	$SD_{I_{gas}}$	$I_{N_2, after}^*$ (Amp)	$SD_{IN_2, after}$
500	1 st	0.0045	2.988E-05	1.031E-04	6.485E-05	2.935E-05	7.566E-07	1.032E-04	1.414E-07	6.488E-05	4.243E-08
		0.0041	2.881E-05	1.033E-04	6.491E-05						
	2 nd	0.0045	6.485E-05	1.037E-04	6.566E-05	6.479E-05	9.192E-08	1.024E-04	1.838E-06	6.548E-05	2.616E-07
		0.0041	6.472E-05	1.011E-04	6.529E-05						
	3 rd	0.0045	6.566E-05	1.022E-04	6.535E-05	6.489E-05	1.096E-06	1.026E-04	4.950E-07	6.553E-05	2.546E-07
		0.0041	6.411E-05	1.029E-04	6.571E-05						
250	1 st	0.0041	2.832E-05	8.038E-05	6.498E-05	2.842E-05	1.414E-07	8.047E-05	1.202E-07	6.505E-05	9.899E-08
		0.0043	2.852E-05	8.055E-05	6.512E-05						
	2 nd	0.0041	6.498E-05	8.085E-05	6.554E-05	6.505E-05	9.899E-08	8.093E-05	1.131E-07	6.539E-05	2.121E-07
		0.0043	6.512E-05	8.101E-05	6.524E-05						
	3 rd	0.0041	6.554E-05	7.971E-05	6.462E-05	6.545E-05	1.273E-07	7.992E-05	2.899E-07	6.567E-05	1.478E-06
		0.0043	6.536E-05	8.012E-05	6.671E-05						
125	1 st	0.0042	2.856E-05	7.219E-05	6.447E-05	2.849E-05	1.061E-07	7.167E-05	7.425E-07	6.419E-05	3.960E-07
		0.0040	2.841E-05	7.114E-05	6.391E-05						
	2 nd	0.0042	6.447E-05	7.224E-05	6.543E-05	6.296E-05	2.143E-06	7.118E-05	1.499E-06	6.422E-05	1.711E-06
		0.0040	6.144E-05	7.012E-05	6.301E-05						
	3 rd	0.0042	6.543E-05	7.219E-05	6.542E-05	6.433E-05	1.556E-06	7.216E-05	4.243E-08	6.493E-05	7.000E-07
		0.0040	6.323E-05	7.213E-05	6.443E-05						

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1

ตารางที่ 20 ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อน ขณะและหลังผ่านไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ใน การทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ที่ความเข้มข้นไอระเหยเปลี่ยนแปลง

Gas concentration (ppm)	Cycle	Specimen Thickness (cm)	σ (S cm ⁻¹)								
			$\sigma_{N_2, before}$ (S cm ⁻¹)	σ_{gas} (S cm ⁻¹)	$\sigma_{N_2, after}$ (S cm ⁻¹)	$\sigma_{N_2, before}^*$ (S cm ⁻¹)	$SD_{\sigma_{gas}}$	σ_{gas}^* (S cm ⁻¹)	$SD_{\sigma_{gas}}$	σ_{gas}^* (S cm ⁻¹)	$SD_{\sigma_{N_2, after}}$
500	1 st	0.0045	4.377E+02	1.510E+03	9.500E+02	4.505E+02	1.803E+01	1.586E+03	1.065E+02	9.968E+02	6.622E+01
		0.0041	4.632E+02	1.661E+03	1.044E+03						
	2 nd	0.0045	9.500E+02	1.519E+03	9.618E+02	9.953E+02	6.406E+01	1.572E+03	7.524E+01	1.006E+03	6.215E+01
		0.0041	1.041E+03	1.625E+03	1.050E+03						
	3 rd	0.0045	9.618E+02	1.497E+03	9.573E+02	9.963E+02	4.873E+01	1.576E+03	1.112E+02	1.007E+03	7.013E+01
		0.0041	1.031E+03	1.654E+03	1.056E+03						
250	1 st	0.0041	4.553E+02	1.292E+03	1.045E+03	4.463E+02	1.281E+01	1.264E+03	4.066E+01	1.022E+03	3.284E+01
		0.0043	4.372E+02	1.235E+03	9.983E+02						
	2 nd	0.0041	1.045E+03	1.300E+03	1.054E+03	1.022E+03	3.284E+01	1.271E+03	4.102E+01	1.027E+03	3.791E+01
		0.0043	9.983E+02	1.242E+03	1.000E+03						
	3 rd	0.0041	1.054E+03	1.282E+03	1.039E+03	1.028E+03	3.661E+01	1.255E+03	3.770E+01	1.031E+03	1.151E+01
		0.0043	1.002E+03	1.228E+03	1.023E+03						
125	1 st	0.0042	4.483E+02	1.133E+03	1.012E+03	4.582E+02	1.410E+01	1.153E+03	2.782E+01	1.033E+03	2.925E+01
		0.0040	4.682E+02	1.172E+03	1.053E+03						
	2 nd	0.0042	1.012E+03	1.134E+03	1.027E+03	1.012E+03	4.661E-01	1.145E+03	1.538E+01	1.033E+03	8.107E+00
		0.0040	1.013E+03	1.156E+03	1.038E+03						
	3 rd	0.0042	1.027E+03	1.133E+03	1.027E+03	1.034E+03	1.067E+01	1.161E+03	3.936E+01	1.044E+03	2.477E+01
		0.0040	1.042E+03	1.189E+03	1.062E+03						

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1



ภาพที่ 76 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลของ 3-PPy oxime ในบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่าง ความเข้มข้นต่างๆ

4.3.3.3 การศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์เมื่อความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

ในการทดสอบนี้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของพอลิเมอร์เพื่อทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นอย่างต่อเนื่องจาก 500 ppm เป็น 250 ppm และ 125 ppm ตามลำดับ โดยในการทดสอบจะทำซ้ำ 2 ครั้งซึ่งข้อมูลค่าเฉลี่ยและการกระจายตัวได้ดังแสดงในตารางที่ 21 และ 22 และภาพที่ 77 ซึ่งสามารถสรุปพฤติกรรมการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างเมื่อความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องได้ดังนี้

4.3.3.3.1 ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ($I_{N_2, \text{before}}$) ก่อนการป้อนไอระเหยสารตัวอย่าง

1. ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทดสอบในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ($I_{N_2, \text{before}}$) รอบแรกของการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้น 500 ppm ทั้งที่ทดสอบภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนและไอโคเอทิลอีเทอร์มีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากไม่มีโมเลกุลของไอระเหยอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์เลย ในขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2, \text{before}}$) ในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้น 250 ppm และ 125 ppm มีค่าสูงกว่าในรอบแรกเล็กน้อย เนื่องจากมีโมเลกุลของไอระเหยบางส่วนหลงเหลืออยู่หลังจากการทดสอบรอบก่อนหน้าซึ่งถูกขับไล่ออกไปไม่หมดทำหน้าที่เป็นตัวพลาสติกไซเซอร์ให้กับโมเลกุลพอลิเมอร์

2. ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2, \text{before}}$) ในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้น 250 ppm และ 125 ppm ของพอลิเมอร์ทุกชนิดมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงว่าปริมาณไอระเหยที่หลงเหลืออยู่ในโครงสร้างมีค่าจำกัดค่าหนึ่ง โดยพบว่าค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2, \text{before}}$) ในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้น 250 ppm และ 125 ppm ของ 3-PPy oxime FCC มีค่ามากกว่าค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N_2, \text{before}}$) ในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้น 250 ppm และ 125 ppm ของ 3-PPy oxime และ PPy ตามลำดับ แสดงว่าโมเลกุลของไอระเหยภายหลังการทดสอบนั้นไม่สามารถถูกปลดปล่อยขับไล่ออกไปได้หมด โดยส่วนใหญ่ยังคงค้างอยู่ในโครงสร้าง เนื่องจาก 3-PPy oxime FCC มีความเป็นขั้วสูงกว่า 3-PPy oxime และ PPy ทำให้โมเลกุลของไอระเหยยังคงติดค้างอยู่ในโครงสร้างมากกว่า ค่ากระแสไฟฟ้าจึงสูงกว่า

4.3.3.3.2 ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศไอระเหยสารตัวอย่าง (I_{gas})

1. เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่ทุกค่าความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างมีแนวโน้มเดียวกัน คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $500 \text{ ppm} > 250 \text{ ppm} > 125 \text{ ppm}$ เนื่องจากปริมาณไอระเหยสารตัวอย่างมีผลต่อความสามารถในการทำหน้าที่เป็นตัวพลาสติกไซต์โมเลกุลพอลิเมอร์ และช่วยให้เกลือแตกตัวและช่วยห่อหุ้มแอนไอออนและแคทไอออนของเกลือเมื่อความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างลดลง ค่ากระแสไฟฟ้าจึงต่ำลง

2. ในกรณีการทดสอบกับไอเมทานอล เมื่อมีการปรับลดค่าความเข้มข้นไอระเหยจาก 500 ppm เป็น 250 ppm พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{gas}) ในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้น 250 ppm มีค่าต่ำกว่าค่ากระแสไฟฟ้า (I_{gas}) ที่วัดได้ในการทดสอบกับไอเมทานอล 500 ppm มีสาเหตุจาก 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยแรกเป็นผลจากการปรับลดความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างลงครึ่งหนึ่ง ปัจจัยที่สองดังที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้ ซึ่งเป็นผลจากการเกิด Chemical Absorption ระหว่างโมเลกุลไอเมทานอลและโมเลกุลพอลิเมอร์ ทั้งสองปัจจัยนี้ล้วนแล้วแต่ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ของพอลิเมอร์ที่ทดสอบกับไอระเหยเมทานอลความเข้มข้น 250 ppm มีค่าต่ำกว่าเมื่อทดสอบกับไอเมทานอล 500 ppm

4.3.3.3.3 ค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนภายหลังการป้อนไอระเหยสารตัวอย่าง ($I_{N2,after}$)

1. ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N2,after}$) ที่วัดได้ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีแนวโน้มเดียวกัน คือ พอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วมากกว่า และมีระยะห่างระหว่างสายโวลุ่มมากกว่าจะนำไฟฟ้าได้ดีกว่า เรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ $3\text{-PPy oxime FCC} > 3\text{-PPy oxime} > \text{PPy}$

2. ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N2,after}$) ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันในทุกค่าความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่าง แสดงว่าไอระเหยสารตัวอย่างมีความสามารถในการติดอยู่ในโครงสร้างได้สูงสุดค่าหนึ่งแม้ว่าค่าความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N2,after}$) ที่อ่านได้ก็มีค่าใกล้เคียงกันในทุกค่าความเข้มข้น

3. ในกรณีที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ค่ากระแสไฟฟ้า ($I_{N2,after}$) ที่อ่านได้มีค่าสูงกว่ากรณีที่ทดสอบกับไอเมทานอลเนื่องจากไอไดเอทิลอีเทอร์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าไอเมทานอล ส่งผลทำให้ไอไดเอทิลอีเทอร์ถูกขับไล่ออกไปไม่หมด และยังคงเหลือติดค้างอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์มากกว่า การทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของไอ

ระเหยสารตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนและไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้จึงมีมากกว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จึงมีค่าสูงกว่า

ตารางที่ 21 ข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบไอเมทานอลความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

Sample name	Gas concentration (ppm)	Specimen Thickness (cm)	Current(Amp)			Current*(Amp)					
			$I_{N_2,before}$	I_{gas}	$I_{N_2,after}$	$I^*_{N_2,before}$	SD*	I^*_{gas}	SD*	$I^*_{N_2,after}$	SD*
PPy	500	0.0048	2.887E-05	9.078E-05	4.668E-05	2.868E-05	2.758E-07	9.024E-05	7.637E-07	4.682E-05	1.909E-07
		0.0047	2.848E-05	8.970E-05	4.695E-05						
	250	0.0048	4.668E-05	8.326E-05	4.742E-05	4.682E-05	1.909E-07	8.285E-05	5.869E-07	4.723E-05	2.758E-07
		0.0047	4.695E-05	8.243E-05	4.703E-05						
	125	0.0048	4.742E-05	7.243E-05	4.708E-05	4.723E-05	2.758E-07	7.207E-05	5.091E-07	4.724E-05	2.263E-07
		0.0047	4.703E-05	7.171E-05	4.740E-05						
3-PPy oxime	500	0.0044	2.865E-05	1.375E-04	5.981E-05	2.817E-05	6.788E-07	1.389E-04	1.980E-06	5.968E-05	1.909E-07
		0.0040	2.769E-05	1.403E-04	5.954E-05						
	250	0.0044	5.981E-05	1.168E-04	5.981E-05	5.968E-05	1.909E-07	1.156E-04	1.768E-06	5.977E-05	6.364E-08
		0.0040	5.954E-05	1.143E-04	5.972E-05						
	125	0.0044	5.981E-05	1.034E-04	5.985E-05	5.977E-05	6.364E-08	1.014E-04	2.871E-06	5.973E-05	1.697E-07
		0.0040	5.972E-05	9.934E-05	5.961E-05						
3-PPy oxime FCC	500	0.0042	3.250E-05	4.343E-04	1.042E-04	3.232E-05	2.616E-07	4.312E-04	4.455E-06	9.887E-05	7.545E-06
		0.0040	3.213E-05	4.280E-04	9.353E-05						
	250	0.0042	1.042E-04	3.120E-04	1.044E-04	9.987E-05	6.131E-06	3.091E-04	4.172E-06	1.022E-04	3.175E-06
		0.0040	9.553E-05	3.061E-04	9.991E-05						
	125	0.0042	1.044E-04	2.191E-04	1.097E-04	1.022E-04	3.175E-06	2.079E-04	1.584E-05	9.995E-05	1.380E-05
		0.0040	9.991E-05	1.967E-04	9.019E-05						

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1

ตารางที่ 22 ข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบไอโคเอทิลอีเทอร์ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

Sample name	Gas concentration (ppm)	Specimen Thickness (cm)	Current(Amp)			Current*(Amp)					
			$I_{N_2,before}$	I_{gas}	$I_{N_2,after}$	$I^*_{N_2,before}$	SD*	I^*_{gas}	SD*	$I^*_{N_2,after}$	SD*
PPy	500	0.0049	2.898E-05	8.275E-05	5.083E-05	2.876E-05	3.182E-07	8.247E-05	3.960E-07	5.100E-05	2.333E-07
		0.0048	2.853E-05	8.219E-05	5.116E-05						
	250	0.0049	5.083E-05	7.166E-05	5.095E-05	5.100E-05	2.333E-07	7.164E-05	2.828E-08	5.077E-05	2.616E-07
		0.0048	5.116E-05	7.162E-05	5.058E-05						
	125	0.0049	5.095E-05	6.173E-05	5.095E-05	5.077E-05	2.616E-07	6.181E-05	1.131E-07	5.095E-05	0.000E+00
		0.0048	5.058E-05	6.189E-05	5.095E-05						
3-PPy oxime	500	0.0041	2.859E-05	1.033E-04	6.491E-05	2.890E-05	4.384E-07	1.038E-04	6.364E-07	6.523E-05	4.455E-07
		0.0042	2.921E-05	1.042E-04	6.554E-05						
	250	0.0041	6.491E-05	8.044E-05	6.576E-05	6.523E-05	4.455E-07	8.081E-05	5.233E-07	6.612E-05	5.091E-07
		0.0042	6.554E-05	8.118E-05	6.648E-05						
	125	0.0041	6.576E-05	7.214E-05	6.527E-05	6.612E-05	5.091E-07	7.253E-05	5.445E-07	6.559E-05	4.455E-07
		0.0042	6.648E-05	7.291E-05	6.590E-05						
3-PPy oxime FCC	500	0.0043	3.145E-05	1.476E-04	8.857E-05	3.139E-05	8.485E-08	1.483E-04	9.192E-07	8.884E-05	3.748E-07
		0.0044	3.133E-05	1.489E-04	8.910E-05						
	250	0.0043	8.857E-05	1.269E-04	8.740E-05	8.874E-05	2.404E-07	1.270E-04	7.071E-08	9.005E-05	3.748E-06
		0.0042	8.891E-05	1.270E-04	9.270E-05						
	125	0.0043	8.874E-05	1.094E-04	9.190E-05	8.951E-05	1.082E-06	1.090E-04	5.657E-07	9.153E-05	5.303E-07
		0.0042	9.027E-05	1.086E-04	9.115E-05						

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1

4.3.3.4 ร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่าง (%S)

ร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่าง (%S) คำนวณได้จากการเปรียบเทียบค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการปล่อยไอระเหยสารตัวอย่าง ($\sigma_{N_2, \text{before}}$) กับค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะในบรรยากาศไอระเหยสารตัวอย่าง (σ_{gas}) โดยจะพิจารณาตามลักษณะการทดสอบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.3.4.1 ร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์เมื่อความเข้มข้นคงที่

ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะแสดงไว้ในตารางที่ 14 และ 16 และภาพที่ 78 จากข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าสามารถนำมาหาค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 23 และภาพที่ 79 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ทุกชนิดในการทดสอบรอบที่ 1 จะสูงมากกว่าในรอบที่ 2 และ 3 เนื่องจากการเปรียบเทียบจากค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะในสภาพที่มีและไม่มีไอระเหยสารตัวอย่าง โดยในรอบที่ 1 นั้น โมเลกุลของพอลิเมอร์ไม่เคยผ่านไอระเหยมาก่อน ดังนั้นค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะที่วัดได้ในสภาพที่ไม่มีไอระเหยสารตัวอย่าง ($I_{N_2, \text{before}}$) จึงต่ำมาก ค่าร้อยละการตอบสนองของการทดสอบรอบแรกนี้จึงถือได้ว่าเป็นค่าความว่องไวบริสุทธิ์ (Virgin sensitivity) ของพอลิเมอร์นั้น ในขณะที่ในรอบที่ 2 และ 3 โมเลกุลของพอลิเมอร์เคยผ่านไอระเหยสารตัวอย่างมาก่อนแล้วทำให้มีโมเลกุลของไอระเหยสารตัวอย่างบางส่วนหลงเหลืออยู่จากการทดสอบในรอบก่อนหน้า ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในสภาพที่ไม่ได้อยู่ในไอระเหยสารตัวอย่างมีค่ามากกว่าในรอบที่ 1 ส่งผลทำให้ค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างในรอบที่ 2 และ 3 มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากการทดสอบในรอบที่ 1 มาก ค่าร้อยละการตอบสนองของการทดสอบรอบที่ 2 และ 3 นี้จึงถือได้ว่าเป็นค่าความว่องไวอิ่มตัว (Saturated sensitivity) ของพอลิเมอร์นั้น

2. ในกรณีของพอลิเมอร์ที่ทดสอบกับไอเมทานอล พบว่า ค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์มีแนวโน้มเดียวกัน คือพอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วสูงและมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมากกว่าจะตอบสนองต่อไอเมทานอลได้ดีกว่า และสามารถเรียงลำดับร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างจากมากไปน้อยได้ดังนี้ 3-PPy oxime FCC > 3-PPy oxime > PPy

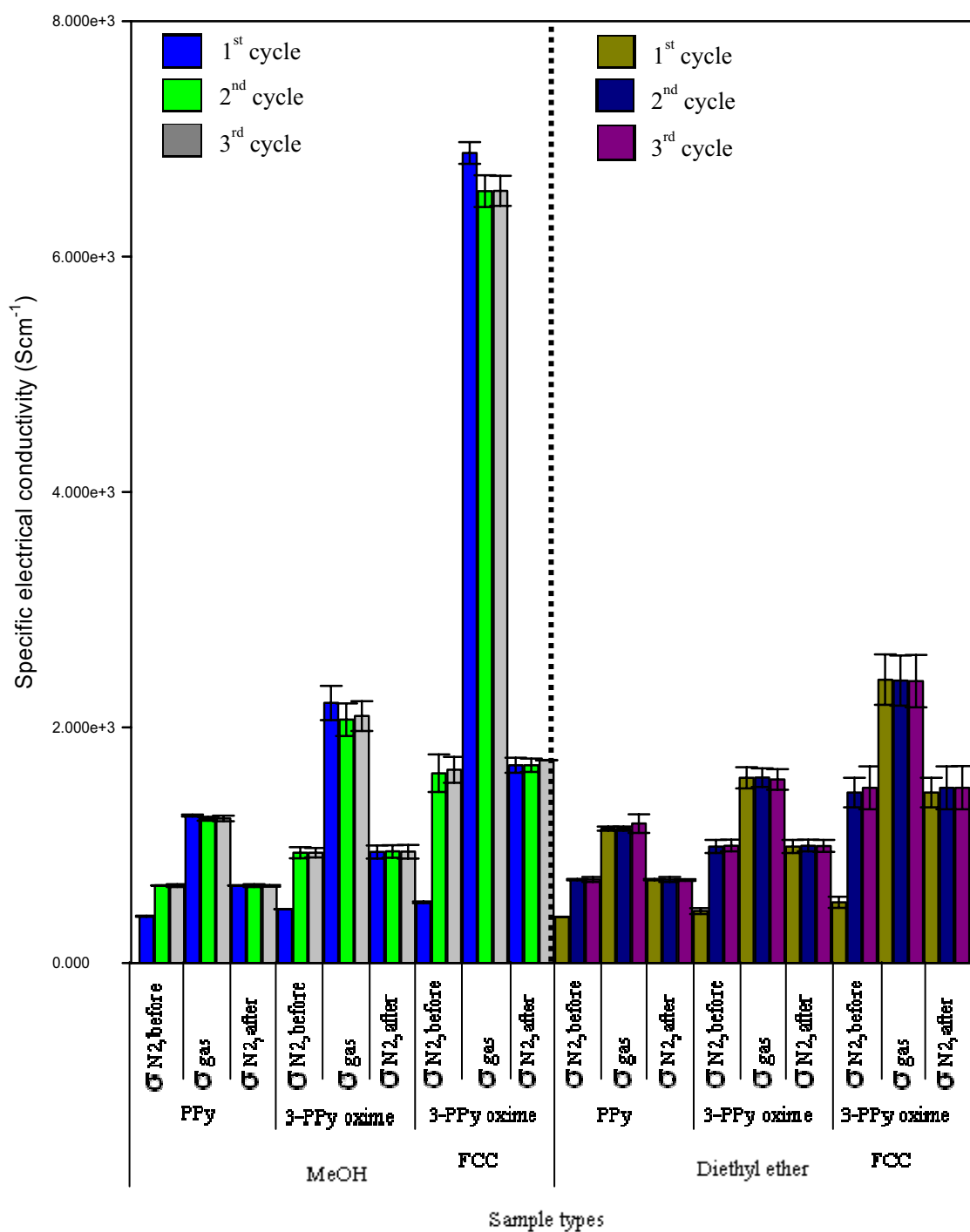
3. ในกรณีของพอลิเมอร์ที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ พบว่า ค่าร้อยละการตอบสนองของพอลิเมอร์ทุกชนิดต่อไอไดเอทิลอีเทอร์ในรอบที่ 2 และ 3 มีค่าใกล้เคียงกันมาก (อยู่ในช่วง 10%) เนื่องจากการที่ไอไดเอทิลอีเทอร์ มีความเป็นขั้วที่น้อยกว่า ทำให้การแตกตัวของ LiF ได้น้อยกว่าในกรณีไอของเมทานอล

4. เปรียบเทียบค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยของพอลิเมอร์ในกลุ่มที่ทดสอบกับไอเมทานอลจะให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงมากกว่ากลุ่มที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วของไอระเหยสารตัวอย่างมีผลต่อการทำหน้าที่พลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ ยิ่งไอระเหยทดสอบมีความเป็นขั้วมาก จะช่วยให้ LiF แตกตัวและถูก solvate ด้วยไอของสารได้ดีขึ้นเพิ่มเสถียรภาพให้กับไอออนของลิเทียม และฟลูออไรด์ซึ่งเกิดสารกระตุ้นให้เกิดพาหะในการพาประจุ (dopant) โดยทำให้ไอออนของฟลูออไรด์สามารถทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนประจุ (counter ion) ให้กับประจุบวกบนสายโซ่พอลิเมอร์ และ Fe(III) ในหมู่ FCC ดังนั้น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของฟลูออไรด์จึงเป็นไปได้ดีขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของไอระเหยสารตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก สามารถแทรกแพร่ผ่านช่องว่างระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ง่ายกว่า ช่วยทำหน้าที่ในการพลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดีขึ้นอีกด้วย ดังนั้นกลุ่มที่ทำการทดสอบกับไอเมทานอลจึงมีค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยที่สูงมากกว่ากลุ่มที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์

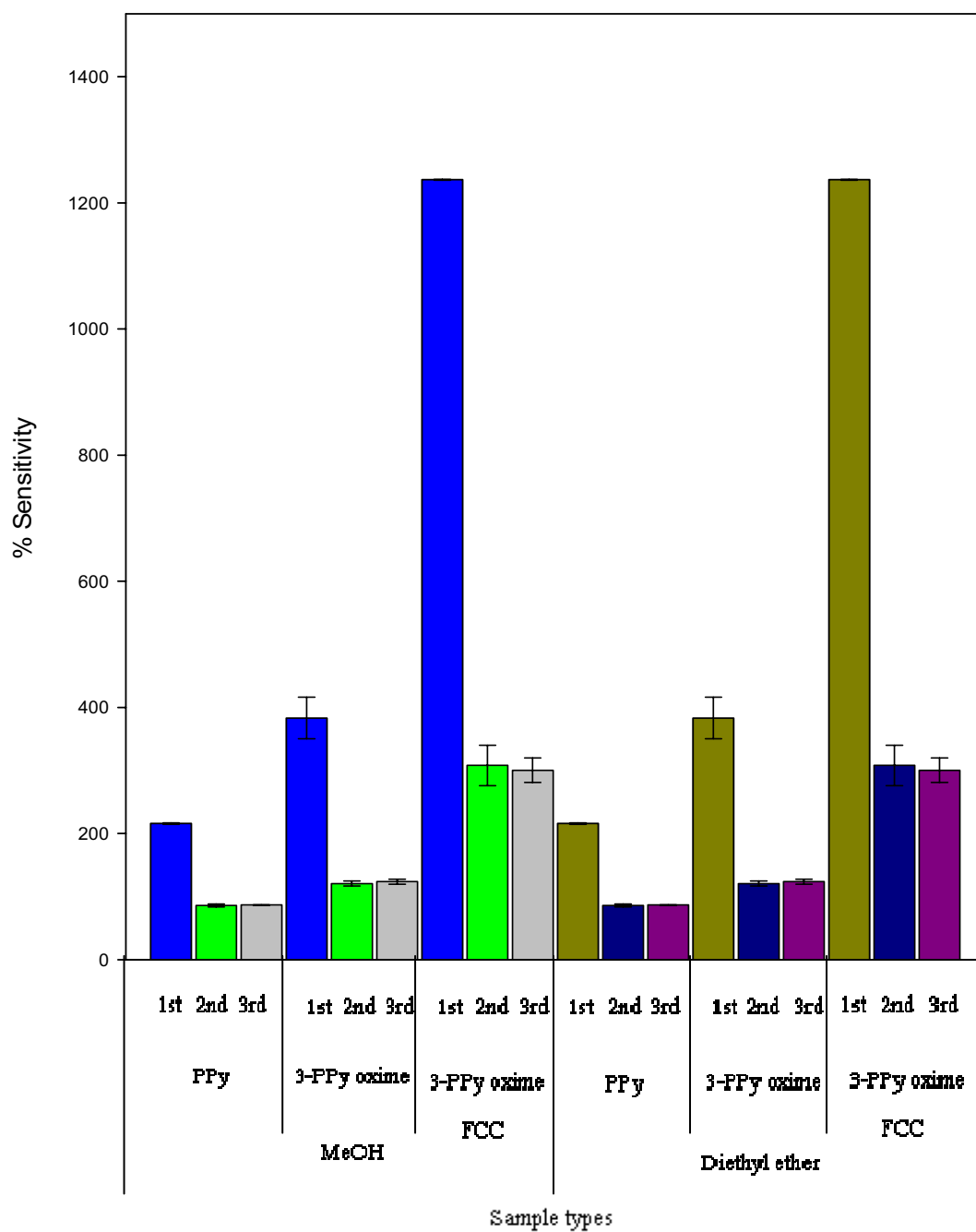
ตารางที่ 23 ข้อมูลร้อยละการตอบสนองของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้น 500 ppm

Sample name	Cycle	% sensitivity							
		MeOH				Diethyl ether			
		1 st sample	2 nd sample	avg	SD	1 st sample	2 nd sample	avg	SD
PPy	1 st	2.166E+02	2.150E+02	2.158E+02	1.192E+00	2.166E+02	2.150E+02	2.158E+02	1.192E+00
	2 nd	8.414E+01	8.767E+01	8.590E+01	2.496E+00	8.414E+01	8.767E+01	8.590E+01	2.496E+00
	3 rd	8.669E+01	8.699E+01	8.684E+01	2.080E-01	8.669E+01	8.699E+01	8.684E+01	2.080E-01
3-PPy oxime	1 st	3.598E+02	4.067E+02	3.833E+02	3.312E+01	3.598E+02	4.067E+02	3.833E+02	3.312E+01
	2 nd	1.179E+02	1.234E+02	1.207E+02	3.921E+00	1.179E+02	1.234E+02	1.207E+02	3.921E+00
	3 rd	1.209E+02	1.265E+02	1.237E+02	3.961E+00	1.209E+02	1.265E+02	1.237E+02	3.961E+00
3-PPy oxime FCC	1 st	1.237E+03	1.236E+03	1.237E+03	6.536E-01	1.237E+03	1.236E+03	1.237E+03	6.536E-01
	2 nd	2.855E+02	3.309E+02	3.082E+02	3.208E+01	2.855E+02	3.309E+02	3.082E+02	3.208E+01
	3 rd	2.868E+02	3.141E+02	3.004E+02	1.935E+01	2.868E+02	3.141E+02	3.004E+02	1.935E+01

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1



ภาพที่ 78 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่าง ความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm



ภาพที่ 79 ค่าร้อยละการตอบสนองของพอลิเมอร์ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอรอะเฮยสาร
ตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm

4.3.3.4.2 ร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างที่ความเข้มข้นไอระเหยเปลี่ยนแปลง

สำหรับในหัวข้อนี้จะอธิบายพฤติกรรมการตอบสนองของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime เมื่อความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่าง ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะแสดงไว้ในตารางที่ 18 และ 20 และภาพที่ 80 จากข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าสามารถนำมาหาค่าร้อยละความว่องไวต่อไอระเหยสารตัวอย่างซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 24 และภาพที่ 81 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างของ 3-PPy oxime ในการทดสอบรอบที่ 1 จะสูงมากกว่าในรอบที่ 2 และ 3 (แสดงพฤติกรรมในแนวนอนเดียวกันกับหัวข้อ 4.3.3.4.1)

2. ค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime มีค่าในแนวนอนเดียวกัน คือเมื่อความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างมีค่าลดลง ค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างมีค่าต่ำลง เรียงลำดับค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างจากมากไปน้อยดังนี้ $500 \text{ ppm} > 250 \text{ ppm} > 125 \text{ ppm}$

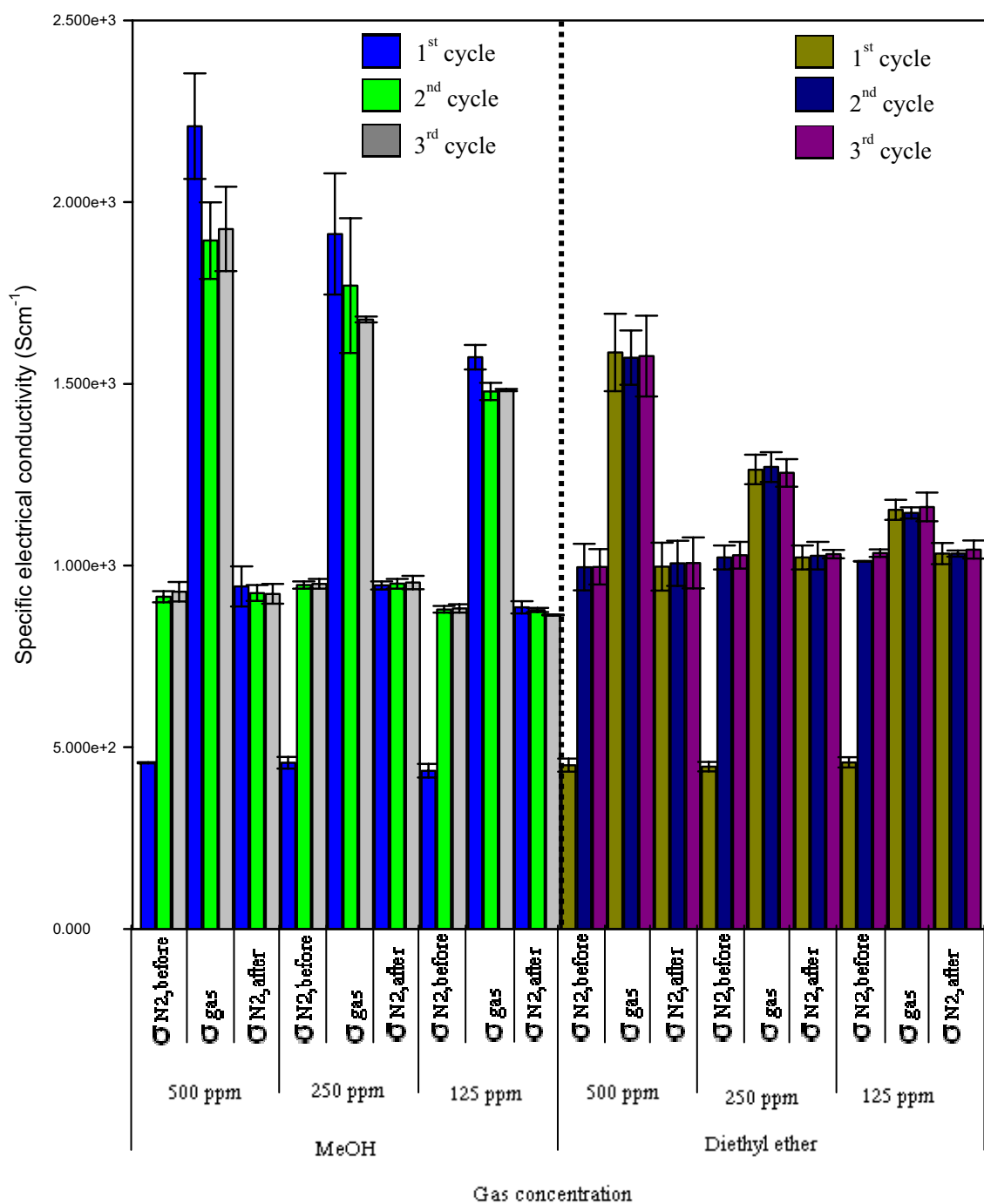
3. เปรียบเทียบค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ที่ค่าความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างค่าเดียวกันในกลุ่มที่ทดสอบกับไอเมทานอลจะให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงมากกว่ากลุ่มที่ทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วของไอระเหยสารตัวอย่างมีผลต่อการทำหน้าที่พลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์

สำหรับระบบการทดสอบที่ไอระเหยสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นอย่างต่อเนื่อง แสดงข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะแสดงไว้ในตารางที่ 25 และ 26 และภาพที่ 82 จากข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าสามารถนำมาหาค่าร้อยละความว่องไวต่อไอระเหยสารตัวอย่างซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 27 และภาพที่ 83 พบว่าแสดงพฤติกรรมการตอบสนองในทำนองเดียวกันกับระบบที่ทดสอบกับพอลิเมอร์ 3-PPy oxime เมื่อความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ค่าร้อยละการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างสามารถเรียงลำดับ จากมากไปน้อยดังนี้ $500 \text{ ppm} > 250 \text{ ppm} > 125 \text{ ppm}$ อีกทั้งปัจจัยด้านความเป็นขั้วและช่องว่างระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์มีผลต่อค่าร้อยละการตอบสนองเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ $3\text{-PPy oxime FCC} > 3\text{-PPy oxime} > \text{PPy}$

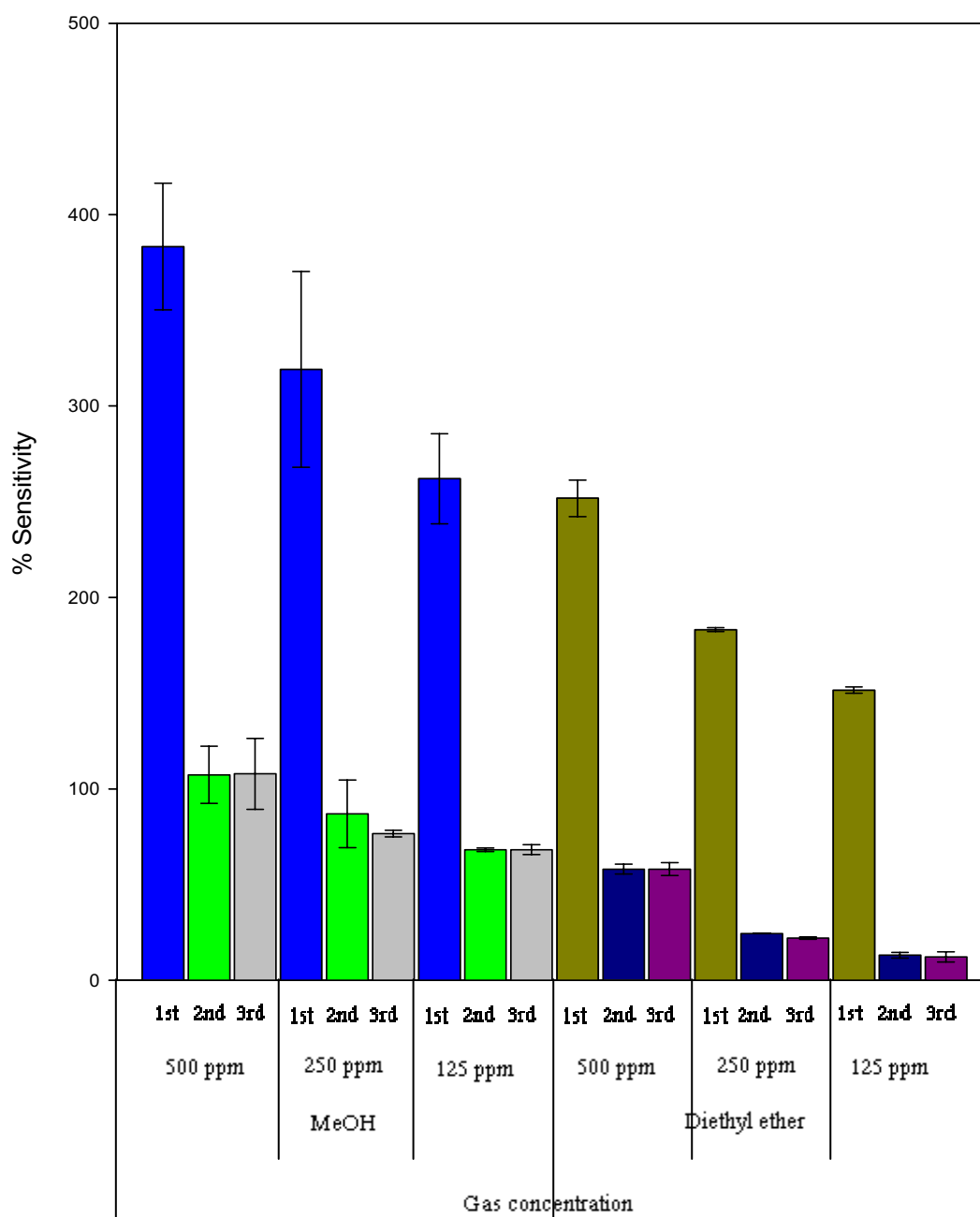
ตารางที่ 24 ข้อมูลร้อยละการตอบสนองบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่าง ความเข้มข้นค่าต่างๆ

Gas concentration (ppm)	Cycle	% sensitivity							
		MeOH				Diethyl ether			
		1 st sample	2 nd sample	avg	SD	1 st sample	2 nd sample	avg	SD
500	1 st	3.598E+02	4.067E+02	3.833E+02	3.312E+01	2.450E+02	2.586E+02	2.518E+02	9.552E+00
	2 nd	1.179E+02	9.676E+01	1.073E+02	1.494E+01	5.991E+01	5.621E+01	5.806E+01	2.614E+00
	3 rd	1.209E+02	9.471E+01	1.078E+02	1.853E+01	5.565E+01	6.050E+01	5.808E+01	3.432E+00
250	1 st	3.553E+02	2.829E+02	3.191E+02	5.117E+01	1.838E+02	1.824E+02	1.831E+02	9.880E-01
	2 nd	9.945E+01	7.452E+01	8.699E+01	1.763E+01	2.442E+01	2.440E+01	2.441E+01	1.614E-02
	3 rd	7.549E+01	7.786E+01	7.667E+01	1.672E+00	2.162E+01	2.258E+01	2.210E+01	6.805E-01
125	1 st	2.786E+02	2.454E+02	2.620E+02	2.351E+01	1.528E+02	1.504E+02	1.516E+02	1.669E+00
	2 nd	6.749E+01	6.891E+01	6.820E+01	1.003E+00	1.205E+01	1.413E+01	1.309E+01	1.468E+00
	3 rd	7.002E+01	6.637E+01	6.820E+01	2.582E+00	1.033E+01	1.408E+01	1.220E+01	2.647E+00

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1



ภาพที่ 80 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอระเหย สารตัวอย่างความเข้มข้นค่าต่างๆ



ภาพที่ 81 ค่าร้อยละการตอบสนองของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นค่าต่างๆ

ตารางที่ 25 ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องจาก 500 ppm 250 ppm และ 125 ppm ตามลำดับ

Sample name	Gas concentration (ppm)	Specimen	%S		%S*		SD	
			MeOH	Diethyl ether	MeOH	Diethyl ether	MeOH	Diethyl ether
PPy	500	I	2.144E+02	1.855E+02	2.147E+02	1.868E+02	3.633E-01	1.797E+00
		II	2.150E+02	1.881E+02				
	250	I	7.836E+01	4.098E+01	7.697E+01	4.049E+01	1.975E+00	6.983E-01
		II	7.557E+01	3.999E+01				
	125	I	5.274E+01	2.116E+01	5.261E+01	2.176E+01	1.869E-01	8.504E-01
		II	5.248E+01	2.236E+01				
3-PPy oxime	500	I	3.799E+02	2.613E+02	3.933E+02	2.590E+02	1.892E+01	3.244E+00
		II	4.067E+02	2.567E+02				
	250	I	9.529E+01	2.393E+01	9.363E+01	2.389E+01	2.343E+00	4.394E-02
		II	9.197E+01	2.386E+01				
	125	I	7.288E+01	9.702E+00	6.961E+01	9.687E+00	4.623E+00	2.112E-02
		II	6.634E+01	9.672E+00				
3-PPy oxime FCC	500	I	1.236E+03	3.693E+02	1.234E+03	3.723E+02	2.983E+00	4.205E+00
		II	1.232E+03	3.753E+02				
	250	I	1.994E+02	4.328E+01	2.099E+02	4.306E+01	1.485E+01	3.079E-01
		II	2.204E+02	4.284E+01				
	125	I	1.099E+02	2.328E+01	1.034E+02	2.179E+01	9.184E+00	2.104E+00
		II	9.688E+01	2.031E+01				

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1

ตารางที่ 26 ข้อมูลค่าสภาพการนำไฟฟ้าจำเพาะของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอไดเอทิลอีเทอร์ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องจาก 500 ppm 250 ppm และ 125 ppm ตามลำดับ

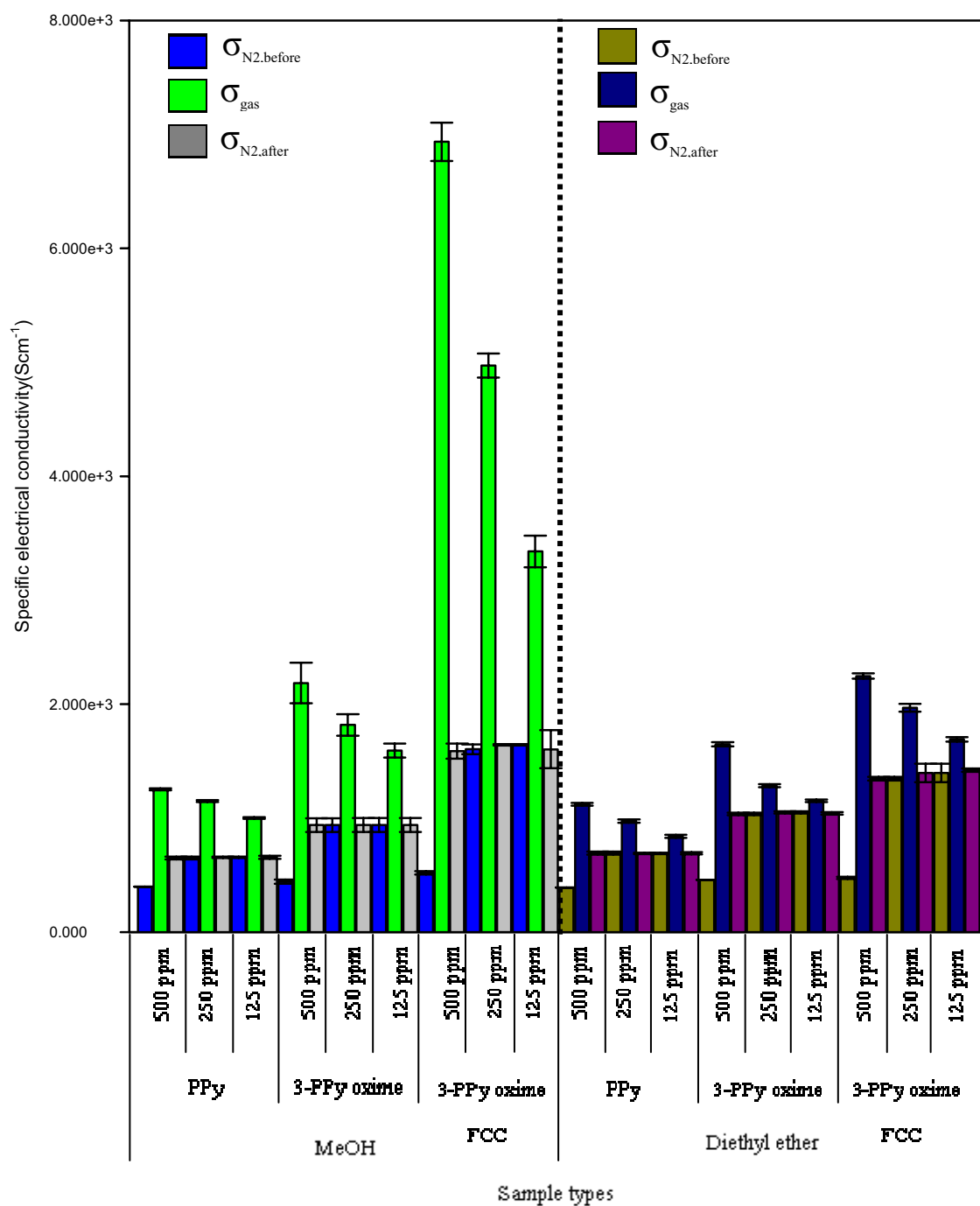
Sample name	Gas concentration (ppm)	Specimen Thickness (cm)	$\sigma_{N_2, before} (S\ cm^{-1})$			$\sigma^* (S\ cm^{-1})$					
			$\sigma_{N_2, before}$	σ_{gas}	$\sigma_{N_2, after}$	$\sigma^*_{N_2, before}$	SD*	σ^*_{gas}	SD*	$\sigma^*_{N_2, after}$	SD*
PPy	500	0.0049	3.899E+02	1.113E+03	6.838E+02	3.908E+02	1.373E+00	1.121E+03	1.096E+01	6.932E+02	1.328E+01
		0.0048	3.918E+02	1.129E+03	7.026E+02						
	250	0.0049	6.838E+02	9.640E+02	6.854E+02	6.932E+02	1.328E+01	9.738E+02	1.381E+01	6.900E+02	6.504E+00
		0.0048	7.026E+02	9.836E+02	6.946E+02						
	125	0.0049	6.854E+02	8.305E+02	6.854E+02	6.900E+02	6.504E+00	8.402E+02	1.379E+01	6.926E+02	1.010E+01
		0.0048	6.946E+02	8.500E+02	6.997E+02						
3-PPy oxime	500	0.0041	4.597E+02	1.661E+03	1.044E+03	4.591E+02	8.581E-01	1.648E+03	1.797E+01	1.036E+03	1.058E+01
		0.0042	4.585E+02	1.635E+03	1.029E+03						
	250	0.0041	1.044E+03	1.293E+03	1.057E+03	1.036E+03	1.058E+01	1.284E+03	1.356E+01	1.050E+03	9.810E+00
		0.0042	1.029E+03	1.274E+03	1.043E+03						
	125	0.0041	1.057E+03	1.160E+03	1.049E+03	1.050E+03	9.810E+00	1.152E+03	1.098E+01	1.042E+03	1.068E+01
		0.0042	1.043E+03	1.144E+03	1.034E+03						
3-PPy oxime FCC	500	0.0043	4.821E+02	2.263E+03	1.358E+03	4.758E+02	9.019E+00	2.247E+03	2.259E+01	1.346E+03	1.621E+01
		0.0044	4.694E+02	2.231E+03	1.335E+03						
	250	0.0043	1.358E+03	1.945E+03	1.340E+03	1.377E+03	2.663E+01	1.969E+03	3.386E+01	1.397E+03	8.138E+01
		0.0042	1.395E+03	1.993E+03	1.455E+03						
	125	0.0043	1.360E+03	1.677E+03	1.409E+03	1.389E+03	3.988E+01	1.691E+03	1.936E+01	1.420E+03	1.540E+01
		0.0042	1.417E+03	1.704E+03	1.431E+03						

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1

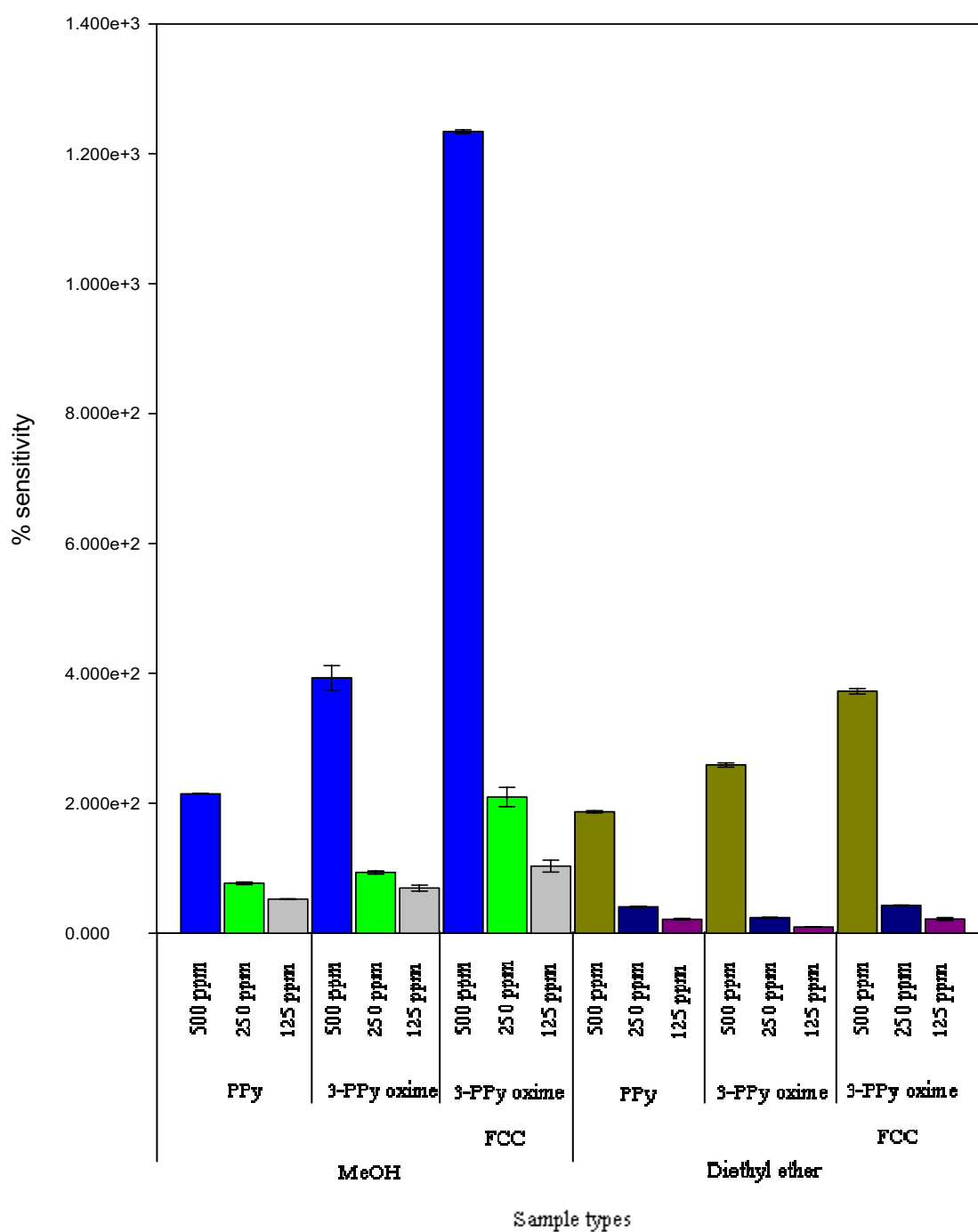
ตารางที่ 27 ข้อมูลร้อยละการตอบสนองของพอลิเมอร์ในการทดสอบกับไฮดรอกไซด์ตัวอย่าง ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องจาก 500 ppm 250 ppm และ 125 ppm ตามลำดับ

Sample name	Gas concentration (ppm)	Specimen	%S		%S*		SD	
			MeOH	Diethyl ether	MeOH	Diethyl ether	MeOH	Diethyl ether
PPy	500	I	2.144E+02	1.855E+02	2.147E+02	1.868E+02	3.633E-01	1.797E+00
		II	2.150E+02	1.881E+02				
	250	I	7.836E+01	4.098E+01	7.697E+01	4.049E+01	1.975E+00	6.983E-01
		II	7.557E+01	3.999E+01				
	125	I	5.274E+01	2.116E+01	5.261E+01	2.176E+01	1.869E-01	8.504E-01
		II	5.248E+01	2.236E+01				
3-PPy oxime	500	I	3.799E+02	2.613E+02	3.933E+02	2.590E+02	1.892E+01	3.244E+00
		II	4.067E+02	2.567E+02				
	250	I	9.529E+01	2.393E+01	9.363E+01	2.389E+01	2.343E+00	4.390E-02
		II	9.197E+01	2.386E+01				
	125	I	7.288E+01	9.702E+00	6.961E+01	9.687E+00	4.623E+00	2.110E-02
		II	6.634E+01	9.672E+00				
3-PPy oxime FCC	500	I	1.236E+03	3.693E+02	1.234E+03	3.723E+02	2.983E+00	4.205E+00
		II	1.232E+03	3.753E+02				
	250	I	1.994E+02	4.328E+01	2.099E+02	4.306E+01	1.485E+01	3.079E-01
		II	2.204E+02	4.284E+01				
	125	I	1.099E+02	2.328E+01	1.034E+02	2.179E+01	9.184E+00	2.104E+00
		II	9.688E+01	2.031E+01				

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1



ภาพที่ 82 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่าง ความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 83 ค่าร้อยละการตอบสนองของพอลิเมอร์ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

4.3.3.5 ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อไอระเหยของพอลิเมอร์ (T_{res})

เวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อไอระเหย (T_{res}) เมื่อมีการป้อนไอระเหยสารตัวอย่างเข้าไป ข้อมูลได้แสดงในตารางที่ 28 และ 29 และภาพที่ 84 และ 85 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. พอลิเมอร์ทุกชนิดมีเวลาที่ใช้ในการตอบสนองค่อนข้างเร็ว คือ น้อยกว่า 2 นาทีทุกชนิด (ภาพที่ 84) ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ถูกกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุด้วยลิเทียมฟลูออไรด์ ซึ่งเมื่อแตกตัวจะให้แอนไอออนฟลูออไรด์ซึ่งมีขนาดเล็ก จึงช่วยให้การเคลื่อนที่เข้าไปเสถียรประจุบวกบนสายโซ่พอลิเมอร์ และ Fe (III) ของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime FCC ได้อย่างรวดเร็ว ระยะเวลาในการตอบสนองจึงน้อย

2. ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองในรอบที่ 1 จะนานมากกว่ารอบอื่นๆ เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ไม่เคยผ่านไอระเหยสารตัวอย่างมาก่อนจึงมีความแข็งแรงของโมเลกุลสูงไอระเหยจึงแทรกแพร่ผ่านเข้าไปในโมเลกุลได้ค่อนข้างยาก แต่ในการทดสอบรอบที่ 2 และ 3 นั้น พบว่าใช้ระยะเวลาในการตอบสนองเร็วขึ้นตามลำดับเนื่องจากการที่โมเลกุลของไอระเหยเคยผ่านไอระเหยสารตัวอย่างมาแล้วและยังคงมีไอระเหยบางส่วนคงเหลือค้างอยู่ภายในโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีความอ่อนตัวและไอระเหยใหม่สามารถแทรกแพร่ผ่านเข้าไปได้ง่ายและเร็วขึ้นตามลำดับ

3. จากการทดสอบกับไอระเหยทั้งสองชนิดพอลิเมอร์ทุกชนิดให้ผลที่มีแนวโน้มที่ตรงกัน คือ พอลิเมอร์ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุล (free volume) ใหญ่จะใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองได้รวดเร็วกว่า เรียงตามลำดับการใช้เวลาจากมากไปน้อย ได้ดังนี้ 3-PPy oxime FCC > 3-PPy oxime > PPy เนื่องจากโมเลกุลที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุล (free volume) ใหญ่กว่าจะทำให้โมเลกุลของไอระเหยสารตัวอย่างสามารถแทรกแพร่ผ่านเข้าไปได้ง่ายและรวดเร็ว

4. เมื่อเปรียบเทียบผลของไอระเหยต่างชนิดกัน พบว่า ไอเมทานอล จะช่วยทำให้ระยะเวลาในการตอบสนองของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเร็วกว่ากรณีของไอไดเอทิลอีเทอร์เล็กน้อย เนื่องจากการที่ไอเมทานอลมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าไอไดเอทิลอีเทอร์ที่อุณหภูมิทดสอบเดียวกัน ส่งผลทำให้เพิ่มโอกาสในการแทรกแพร่ผ่านเข้าไปในโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้รวดเร็วมากขึ้น

5. สำหรับกรณีการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างต่อพฤติกรรมตอบสนองของพอลิเมอร์ตัวอย่าง (ภาพที่ 85) พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ใน

การตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่างมีค่าลดลง เนื่องจากการปรับลดค่าความเข้มข้นไอระเหยสารตัวอย่าง เท่ากับเป็นการลดปริมาณไอระเหยซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวพลาสติก ทำให้อิเล็กทรอนิกส์และไอออนเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างจึงเพิ่มขึ้น ตามลำดับ

ตารางที่ 28 ข้อมูลเวลาในการตอบสนองต่อไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm

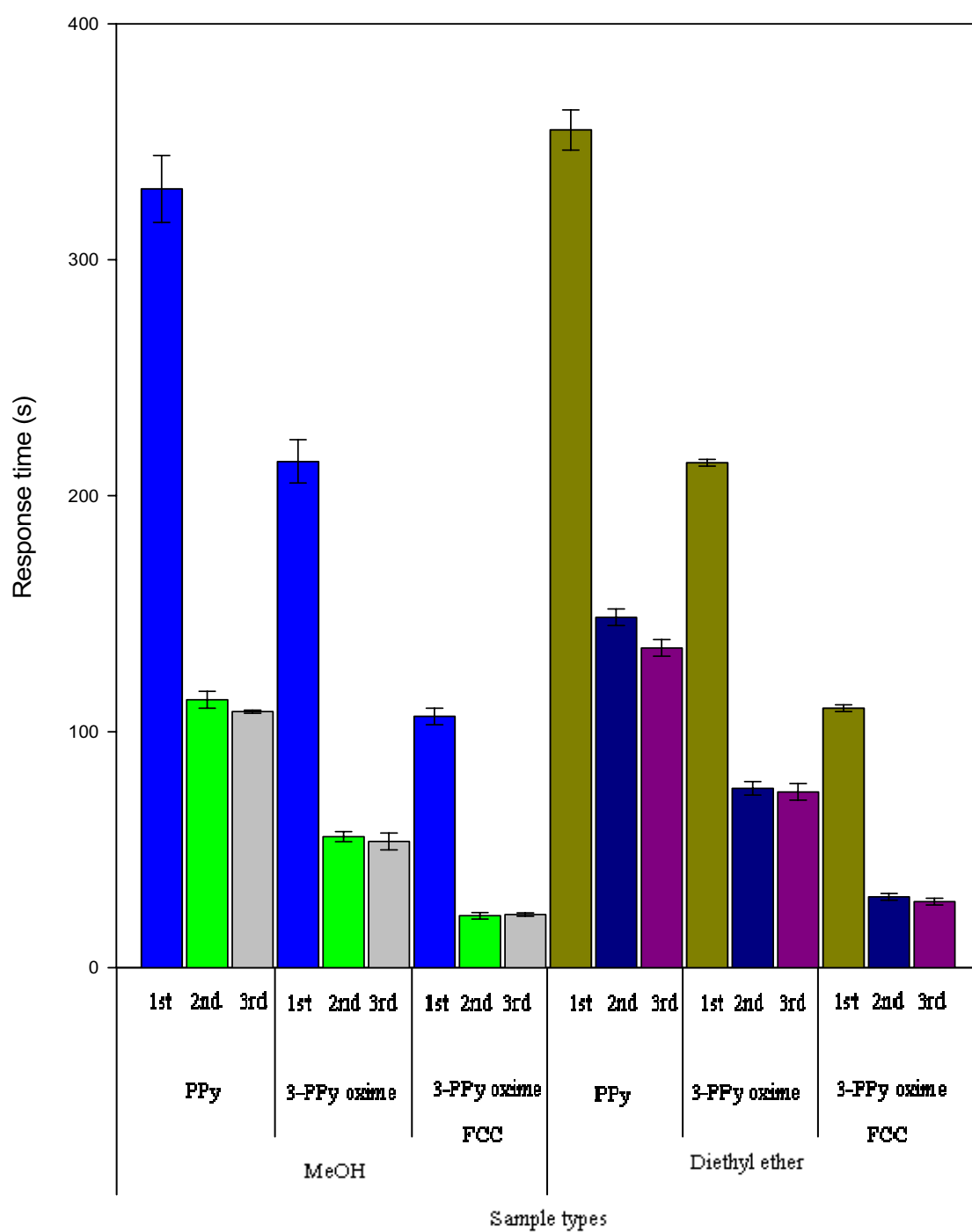
Sample name	Cycle	T_{res} (S)							
		MeOH				Diethyl ether			
		1 st sample	2 nd sample	avg	SD	1 st sample	2 nd sample	avg	SD
PPy	1 st	340	320	330	14	361	349	355	8
	2 nd	116	111	114	4	146	151	149	4
	3 rd	108	109	109	1	138	133	136	4
3-PPy oxime	1 st	208	221	215	9	213	215	214	1
	2 nd	54	57	56	2	78	74	76	3
	3 rd	56	51	54	4	72	77	75	4
3-PPy oxime FCC	1 st	109	104	107	4	111	109	110	1
	2 nd	21	23	22	1	29	31	30	1
	3 rd	23	22	23	1	27	29	28	1

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1

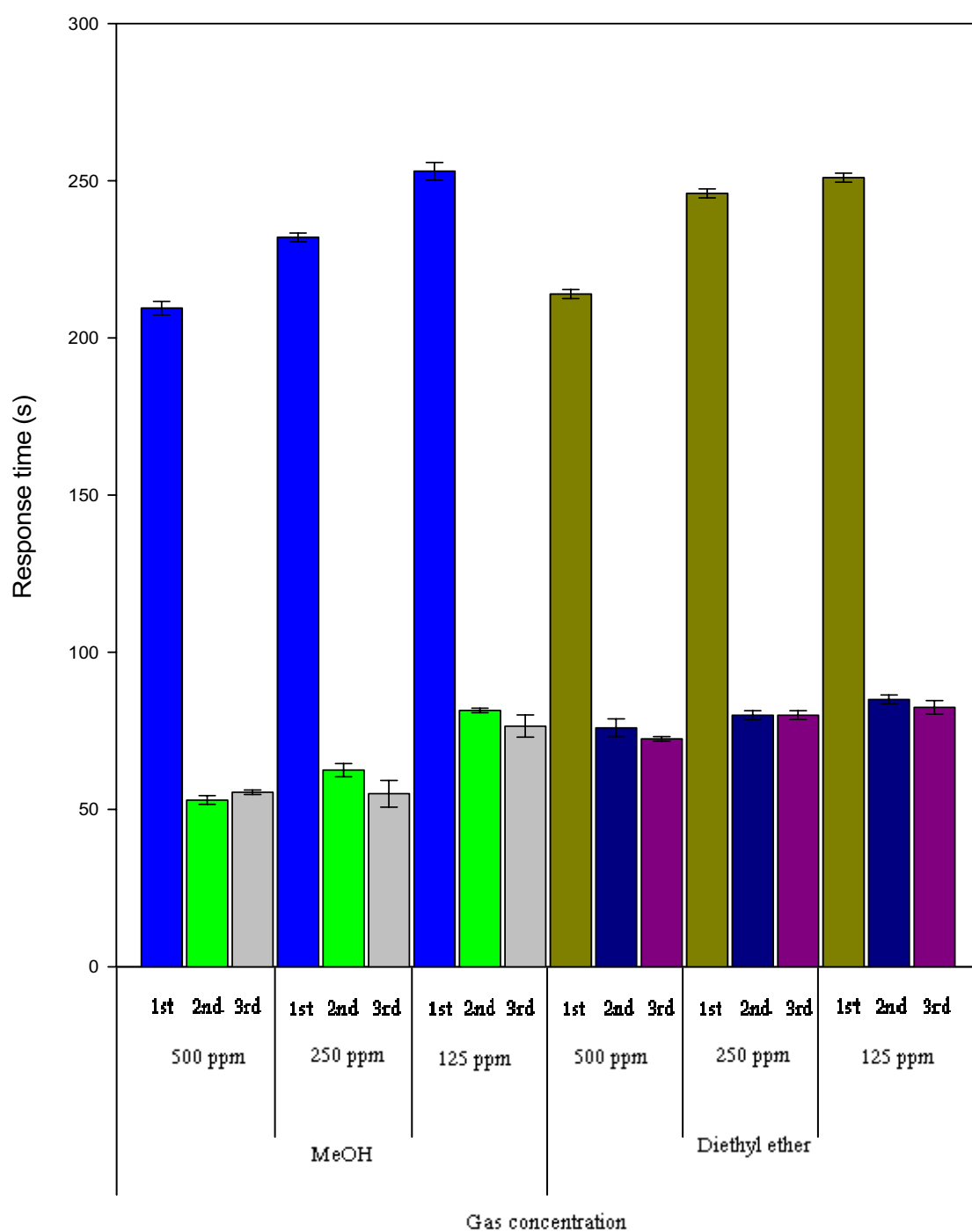
ตารางที่ 29 ข้อมูลเวลาในการตอบสนองในบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นค่าต่างๆ

Gas concentration (ppm)	Cycle	T _{res} (S)							
		MeOH				Diethyl ether			
		1 st sample	2 nd sample	avg	SD	1 st sample	2 nd sample	avg	SD
500	1 st	208	211	210	2	213	215	214	1
	2 nd	54	52	53	1	78	74	76	3
	3 rd	56	55	56	1	72	73	73	1
250	1 st	231	233	232	1	247	245	246	1
	2 nd	61	64	63	2	81	79	80	1
	3 rd	58	52	55	4	79	81	80	1
125	1 st	255	251	253	3	250	252	251	1
	2 nd	81	82	82	1	86	84	85	1
	3 rd	79	74	77	4	84	81	83	2

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1



ภาพที่ 84 ระยะเวลาในตอบสนองของพอลิเมอร์ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่าง ความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm



ภาพที่ 85 ระยะเวลาในตอบสนองของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นเปลี่ยนแปลง

4.3.3.5 ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์ (T_{rec})

ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์(T_{rec}) เมื่อไล่ไธระเหยสารตัวอย่างออกไปแล้ว ข้อมูลได้แสดงในตารางที่ 30 และ 31 และภาพที่ 86 และ 87 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. พอลิเมอร์ทุกชนิดมีเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับค่อนข้างเร็ว คือ น้อยกว่า 2 นาทีทุกชนิด (ดูภาพที่ 86 และ 87) โดยระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับในรอบที่ 1 จะนานมากกว่ารอบอื่นๆ เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เพิ่งจะมีไธระเหยเข้ามาอยู่ในโครงสร้างครั้งแรก โมเลกุลของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นระเบียบมากนัก ทำให้โมเลกุลของไธระเหยต้องอาศัยระยะเวลาในการเดินทางออกไปจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ แต่ในการทดลองรอบต่อไปจะใช้ระยะเวลาในการคืนตัวได้รวดเร็วมากขึ้นเนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เคยผ่านไธระเหยมาแล้วนั้น จะมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมากขึ้น

2. ในกรณีของไอเมทานอล พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime FCC มีค่ามากที่สุด เนื่องจากไอเมทานอลมีความเป็นขั้วสูงจึงเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไอเมทานอลกับพอลิเมอร์ 3-PPy oxime FCC ได้มาก เนื่องจากพอลิเมอร์ดังกล่าวมีขั้วสูงที่สุดในบรรดาพอลิเมอร์ทั้งสามชนิด ส่งผลทำให้การแพร่ผ่านออกไปจากโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นไปได้ยาก แม้ว่าพอลิเมอร์จะมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมากก็ตาม (free volume)

3. ในกรณีของไอโดเอทิลอีเทอร์ พบว่า จากการที่ไอโดเอทิลอีเทอร์มีสมบัติความเป็นขั้วที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับไอเมทานอล จึงเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไอโดเอทิลอีเทอร์และพอลิเมอร์ได้น้อยกว่ากรณีของไอเมทานอล ดังนั้น ปัจจัยทางโครงสร้างของพอลิเมอร์จึงมีบทบาทมากขึ้น กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุล (free volume) ใหญ่กว่าจะช่วยทำให้การเคลื่อนที่ออกไปของไธระเหยทำได้ง่ายขึ้นและใช้ระยะเวลาในการคืนตัวกลับได้เร็ว ซึ่งสามารถเรียงลำดับระยะเวลาในการคืนตัวกลับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ $PPy > 3-PPy \text{ oxime} > 3-PPy \text{ oxime FCC}$

4. สำหรับกรณีการทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นไธระเหยสารตัวอย่างต่อพฤติกรรมการตอบสนองของพอลิเมอร์ตัวอย่าง (ดูภาพที่ 87) พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์มีค่าน้อยลงเมื่อทดสอบกับไธระเหยสารตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่ำลง เนื่องจากการปรับลดค่าความเข้มข้นไธระเหยสารตัวอย่าง เท่ากับเป็นการลดปริมาณไธระเหย

ที่จะเข้าไปอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ ดังนั้นเมื่อเกิดการคายตัวของไฮดรอกซิลออกจากโครงสร้างพอลิเมอร์จึงสามารถคายตัวออกได้ง่าย ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวจึงน้อยลงตามลำดับ

ตารางที่ 30 ข้อมูลเวลาในการคืนตัวกลับต่อไฮดรอกซิลตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับไฮดรอกซิลตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm

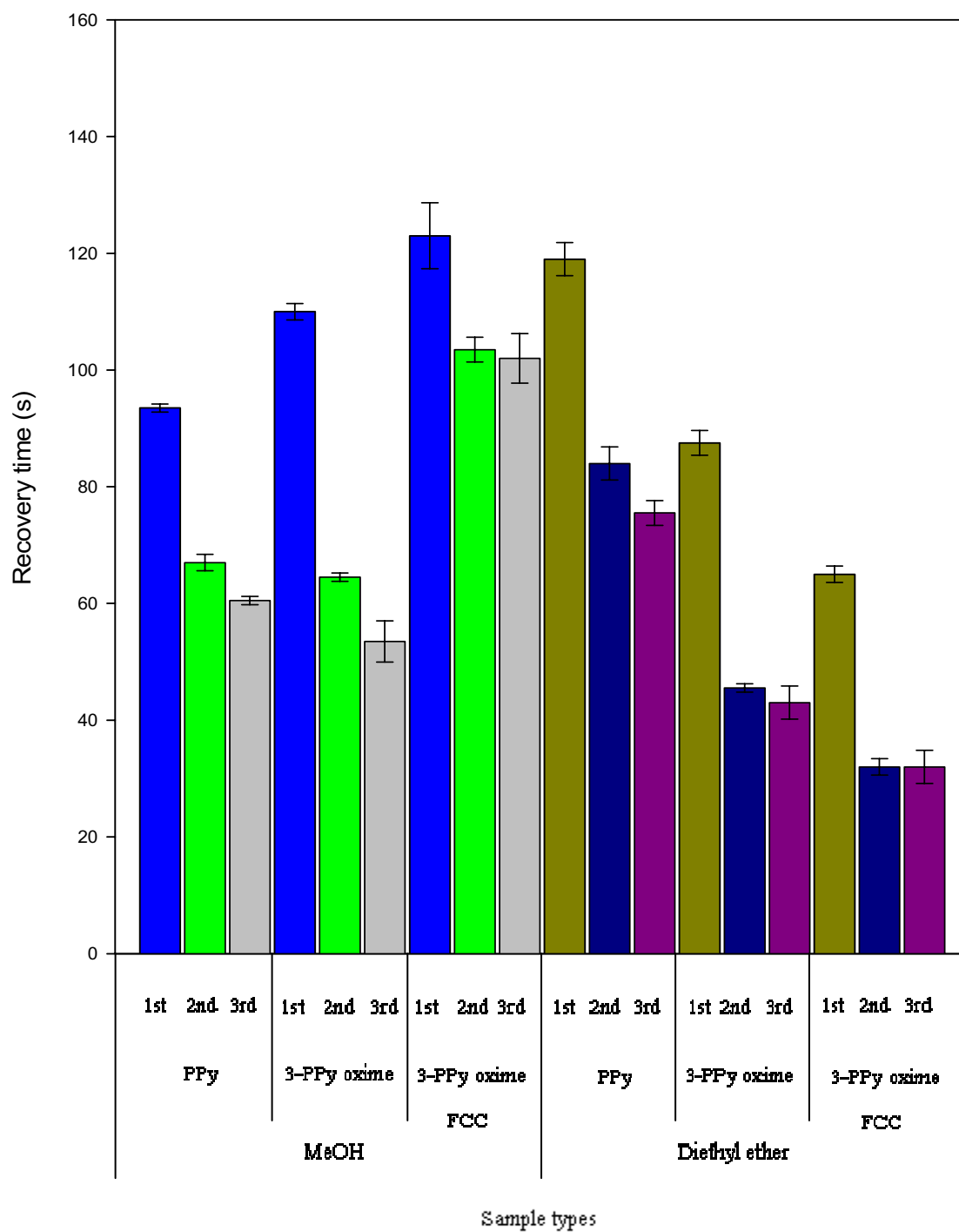
Sample name	Cycle	T _{rec} (S)							
		MeOH				Diethyl ether			
		1 st sample	2 nd sample	avg	SD	1 st sample	2 nd sample	avg	SD
PPy	1 st	94	93	94	1	117	121	119	3
	2 nd	68	66	67	1	86	82	84	3
	3 rd	60	61	61	1	74	77	76	2
3-PPy oxime	1 st	109	111	110	1	89	86	88	2
	2 nd	65	64	65	1	46	45	46	1
	3 rd	56	51	54	4	45	41	43	3
3-PPy oxime FCC	1 st	127	119	123	6	64	66	65	1
	2 nd	102	105	104	2	33	31	32	1
	3 rd	105	99	102	4	34	30	32	3

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1

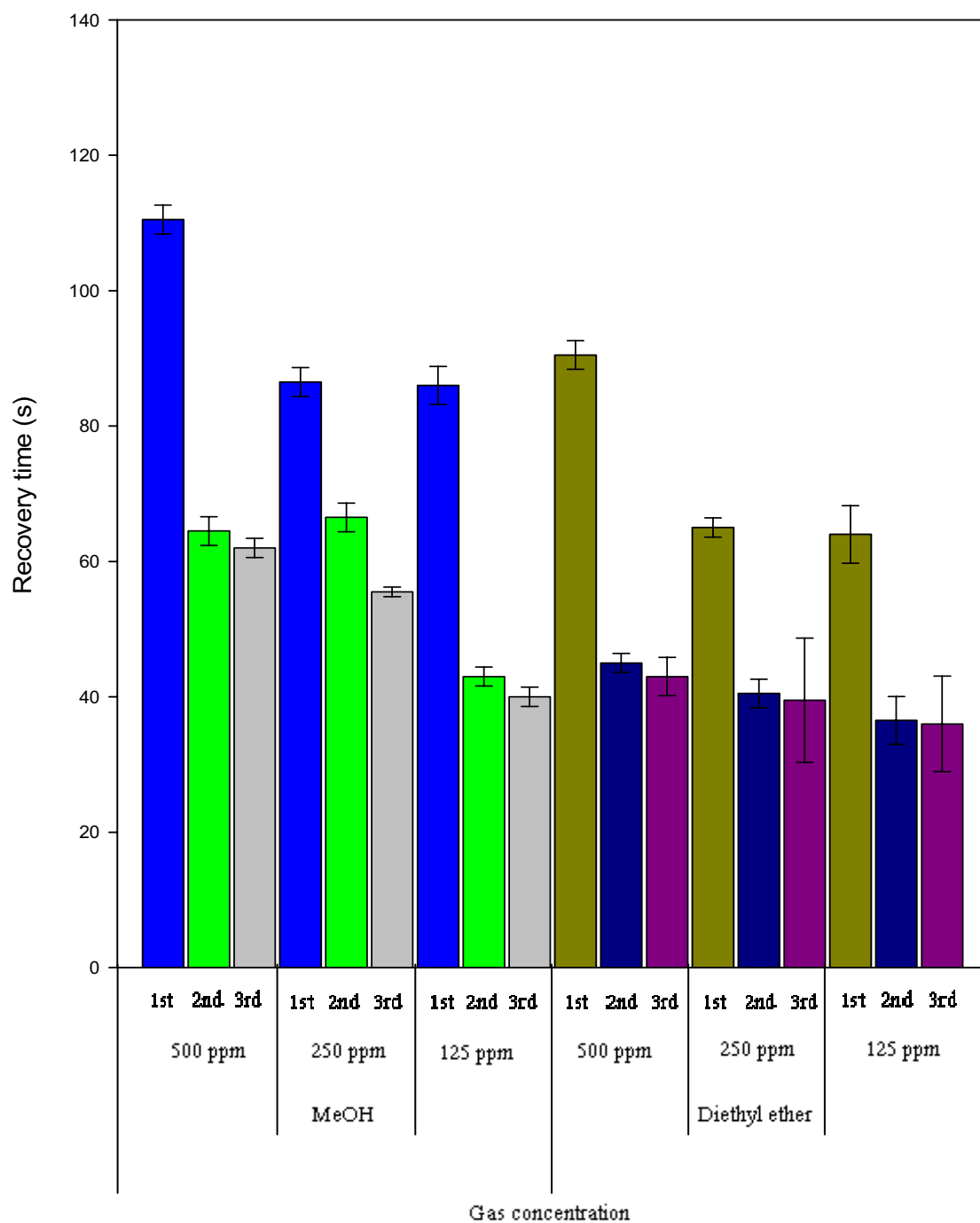
ตารางที่ 31 ข้อมูลเวลาในการคืนตัวในบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่างของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ในการทดสอบกับไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นต่างๆ

Gas concentration (ppm)	Cycle	T _{rec} (S)							
		MeOH				Diethyl ether			
		1 st sample	2 nd sample	avg	SD	1 st sample	2 nd sample	avg	SD
500	1 st	109	112	111	2	89	92	91	2
	2 nd	66	63	65	2	46	44	45	1
	3 rd	63	61	62	1	45	41	43	3
250	1 st	85	88	87	2	64	66	65	1
	2 nd	65	68	67	2	42	39	41	2
	3 rd	56	55	56	1	46	33	40	9
125	1 st	84	88	86	3	61	67	64	4
	2 nd	42	44	43	1	39	34	37	4
	3 rd	39	41	40	1	41	31	36	7

หมายเหตุ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างมอนอเมอร์กับสารกระตุ้นพาหะนำประจุเท่ากับ 1 ต่อ 1



ภาพที่ 86 ระยะเวลาในการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอระเหยสาร
ตัวอย่างความเข้มข้นคงที่ที่ 500 ppm



ภาพที่ 87 ระยะเวลาในการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์ 3-PPy oxime ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไอระเหยสารตัวอย่างความเข้มข้นต่างๆ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างพอลิเมอร์และไอระเหยตัวอย่าง รวมทั้งชนิดของเกลือที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าเพื่อนำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ โดยทำการศึกษาพอลิเมอร์สี่ชนิด ได้แก่ PPy, 3-PPy, 3-PPy oxime และ 3-PPy oxime FCC และทำการทดสอบกับไอระเหยตัวอย่างสองชนิดคือเมทานอลและไดเอทิลอีเทอร์ที่อุณหภูมิ 28 °C จากการทดสอบพบว่าปัจจัยเกี่ยวข้องที่มีอิทธิพลส่งผลต่อการนำไฟฟ้าและความว่องไวในการตรวจสอบไอระเหยซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. โครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์ และชนิดของสารกระตุ้นพาหะนำประจุ

1.1 ขนาดแอนไอออนของสารกระตุ้นพาหะนำประจุ

พอลิเมอร์ที่ผ่านการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุด้วยสารกระตุ้นพาหะที่มีขนาดแอนไอออนขนาดเล็กจะช่วยส่งเสริมให้พอลิเมอร์แสดงสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดี เนื่องจากแอนไอออนที่มีขนาดเล็กสามารถเคลื่อนที่เข้าไปเสถียรประจุบวกหรือโฮลบนโครงสร้างพอลิเมอร์ได้อย่างรวดเร็ว ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจึงมีค่าสูง ดังนั้นค่าสภาพการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์จึงสูงกว่าพอลิเมอร์ที่ผ่านการกระตุ้นให้เกิดพาหะด้วยสารกระตุ้นพาหะที่มีขนาดแอนไอออนใหญ่กว่า

1.2 สมบัติของหมู่แทนที่บนตำแหน่งที่สามของวงแหวนไพร์โรล

อนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่บนตำแหน่งที่สามของวงไพร์โรลเป็นหมู่ดิ่งอิเล็กตรอนจะแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าอนุพันธ์พอลิไพร์โรลที่มีหมู่แทนที่บนตำแหน่งที่สามของวงไพร์โรลเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน

1.3 สมบัติความเป็นขั้วของพอลิเมอร์

โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติความเป็นขั้วสูงกว่า ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าดีขึ้น โดยเฉพาะพอลิเมอร์ 3-PPy oxime FCC ที่มีระบบการนำไฟฟ้า 2 กลไกคือระบบการนำไฟฟ้าของสายโซ่หลักผ่านโครงสร้างคอนจูเกต ร่วมกับกลไกการกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนจากหมู่ FCC หนึ่งไปสู่อีกหมู่หนึ่ง ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจึงมีค่าสูง ดังนั้นเมื่อมีการผ่านไอระเหยตัวอย่างจะทำให้เกิดการตอบสนองได้มากกว่า

1.4 ช่องว่างระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลใหญ่ จะส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อไอระเหย เนื่องจากโมเลกุลของไอระเหยสามารถแพร่ผ่านเข้าไปได้ง่าย โดยพอลิเมอร์ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลใหญ่กว่าจะใช้ระยะเวลาในการตอบสนองต่อไอระเหยรวดเร็ว

2. โครงสร้างและสมบัติของไอระเหย

2.1 ความเป็นขั้วของไอระเหย

ไอระเหยที่มีความเป็นขั้วสูง จะทำให้ dopants แยกตัวได้ดีและยังสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับแคโทดไอออนและแอนไอออนของ dopants และทำให้ประจุบวกบนสายโซ่และที่ Fe^{3+} มีความเป็นกลางและทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น แต่จะส่งผลทำให้มีปริมาณไอระเหยดังกล่าวติดค้างอยู่ภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์มากเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากความเป็นขั้วของไอระเหยกับพอลิเมอร์ ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับนานกว่า

2.2 ขนาดโมเลกุลของไอระเหย

ไอระเหยที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าจะช่วยทำหน้าที่ในการพลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้มีความอ่อนตัวมากขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าจึงสูงขึ้น

2.3 ความเข้มข้นของไอระเหย

ไอระเหยที่มีปริมาณมากจะช่วยทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองเกิดได้รวดเร็วมากขึ้น เนื่องจากเพิ่มโอกาสในการแทรกเข้าไปในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้มากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เป็นการปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิไพร์โรลเพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจสอบไอระเหย โดยพบข้อบกพร่องที่ควรได้รับการแก้ไขในคราวต่อไป ดังนี้

1. หัว Probe ที่ใช้วัดค่าการนำไฟฟ้าควรมีลักษณะที่แหลมกว่านี้เพื่อสามารถเจาะเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ได้ ถ้าหากหัว Probe มีลักษณะที่ทู่มันก็จะตะกั่วเฉพาะที่ผิวของพอลิเมอร์ ทำให้มีความต้านทานระหว่างรอยต่อของ Probe กับพอลิเมอร์สูง ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้มีความแม่นยำน้อยลง

2. บริเวณ mixing chamber ควรจะมีการต่อท่อเข้าโดยตรงกับปั๊มสุญญากาศเพื่อจะได้ลดระยะเวลาในการทดสอบได้เนื่องจากเราสามารถดูดอากาศใน mixing chamber ได้ในขณะที่ working chamber ทดสอบการคายของแก๊สอยู่โดยไม่ต้องรอให้ working chamber ทดสอบการคายแก๊สเสร็จ

3. สำหรับพอลิเมอร์ 3-PPy oxime FCC ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า 2 กลไก ต้องมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการกระตุ้นพาหะนำประจุจากเดิมในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนโดยโมลมอนอเมอร์ต่อสารกระตุ้นพาหะนำประจุ เท่ากับ 1:1 ต้องเพิ่มเป็น 1:2 เพื่อให้แอนไอออนของ dopants สามารถดุลประจุบวกบนสายโซ่พอลิเมอร์ และ Fe^{3+} ได้อย่างสมบูรณ์

บรรณานุกรม

1. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. มลพิษทางอากาศ [Online]. Accessed 9 January 2010.
Available from http://www.aqnis.pcd.go.th/basic/pollution_basic.htm.
2. กรมควบคุมมลพิษ. มาตรฐานคุณภาพอากาศและเสียง [Online]. Accessed 9 January 2010.
Available from http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd01.htm.
3. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. มลพิษอากาศกับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง [Online].
Accessed 9 January 2010.
Available from <http://www.ac-control.net/index.php?mo=3&art=400837>
4. พิษวิทยาสาร. Volatile Organic Chemicals and Health. [Online]. Accessed 9 January 2010.
Available from http://www.optimal.co.th/news_pdf/
5. Ampuero S. and Bosset J.O. "The electronic nose applied to dairy products: a review." Sensors and Actuators B 94 (2003) : 1-12.
6. Kap-Duk S., Jung-II B., Sang-Rok L., Yun-Su L., Young-Ho H. and Duk-Dong L. "NO_x gas response characteristics of thin film mixed oxide semiconductor." Sensors and Actuators B 108 (2005) : 211–215.
7. Hee-Kwon J., Yong-Su H., Byung-Soo L., Sang-Tae L., Jeong-Ok L., Duk-Dong L. and Jeung-Soo H. "Electrical properties of polypyrrole gas sensors fabricated under various pretreatment conditions." Sensors and Actuators B 96 (2005) : 576-581.
8. Jae-Hyun C., Joon-Boo Y., Jung-Suk K., Sung-Ok S., Duk-Dong L. and Jeung-Soo H.. "Sensing behaviors of polypyrrole sensor under humidity condition." Sensors and Actuators B 108 (2005) : 389-392.
9. Gordon G.W., Geoffrey M.S., Leon A.P.K., and Peter R.T. Conductive electroactive polymers : Intelligent Materials Systems. Boca Raton : CRC press, 2002.
10. Basudam A. and Sarmishtha M.. "Polymers in sensor application." Progress in Polymer Science. 29 (2004) : 699-766.
11. George O. Principles of Polymerization. New Jersey : John Wiley & Sons, 2004.
12. Hachawee K., Lerdwijitjarud W., Sittattrakul A. and Sirivat A. "Structural effect of ferrocenecarboxymethylated polymers on their electrical behavior under the exposure to methanol and acetone vapors." Materials Science and Engineering B 153 (2008) : 10–20

13. Ruangchuay L., Sirivat A. and Schwank J. "Electrical conductivity response of polypyrrole to acetone vapor: effect of dopant anions and interaction mechanisms." Synthetic Metals 140 (2004) : 15–21
14. Akelah A. and Moet A. Functionalized polymers and their application. London: Chapman and Hall, 1990.
15. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้. พันธะโลหะ-metallic bond. [Online]. Accessed 18 February 2006. Available from http://www.il.mahidol.ac.th/course/ap_chemistry/chemical_bonding/metallic.htm.
16. สถาบันราชภัฏพิบูลสงคราม. เซมิคอนดักเตอร์ไดโอด. [Online]. Accessed 14 February 2010. Available from <http://pibul2.psu.ac.th/~prasit/elect/electro1.htm>.
17. Conductive polymers, The Nobel Prize in Chemistry, 2000. Kungl. Vetenskapsakademie, Inform. Dept.
18. แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา. วัสดุวิศวกรรม Principles of Materials Science and Engineering. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป, 2546.
19. Shirota, Y., "Electrically Conducting Polymers and Their Applications as Functional Materials", Suita, Japan.
20. Murrae J. B. and Richard T., ed. Electronic and Photonic Applications of Polymers. Washington DC: American Chemical Society, 1988.
21. Min-Kyu S., Young-Taek K., Bum-Seok K., Jinhwan K., Kookheon C. and Hee-Woo R. "Synthesis and characterization of soluble polypyrrole doped with alkylbenzenesulfonic acids." Synthetic Metals 141 (2004) : 315-319
22. Torres-Gómez G. and Gómez-Romero P. "Conducting organic polymers with electroactive dopants. Synthesis and electrochemical properties of hexacyanoferrate-doped polypyrrole." Synthetic Metals 98 (1998) : 95-102
23. Shen, Y. and M. Wan, "In situ doping polymerization of pyrrole with sulfonic acid as a dopant." Synthetic Metals. 96 (1998) : 127-132
24. Qaisar A. and Samuel B. A. "Polypyrrole-based electronic noses for environmental and industrial analysis." Sensors and Actuators B: Chemical. 106 (2005) : 541-552
25. Radhakrishnan S. and Paul S. "Conducting polypyrrole modified with ferrocene for applications in carbon monoxide sensors." Sensors and Actuators B 125 (2007) : 60–65

26. Ramanaviciene A. and Ramanavicius A. "Application of Polypyrrole for the Creation of Immunosensors." Analytical Chemistry, 32 (2002) : 245-252
27. Foitzik R.C., Kaynak A., Pfeffer F.M. and Beckman J. "Synthesis, polymerization and wool coating studies of 3-iso-butylpyrrole and 3-iso-pentylpyrrole." Synthetic Metals 156 (2006) : 1333–1340
28. Korri-Youssoufi H. and Yassar A. "Electrochemical Probing of DNA Based on Oligonucleotide-Functionalized Polypyrrole." Biomacromolecules, 2 (2001) : 58–64
29. B. P. J. de Lacy Costello, Evans P., Guernion N., Ratcliffe N. M., Sivanand P. S. and Teare G. C. "The synthesis of a number of 3-alkyl and 3-carboxy substituted pyrroles ; their chemical polymerisation onto poly(vinylidene fluoride) membranes, and their use as gas sensitive resistors" Synthetic Metals. 114 (2000) : 181-188
30. แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2534.
31. วิชัย รุ่งตระกูล และคณะ. การประยุกต์สเปกโตรสโกปีในเคมีอินทรีย์. กรุงเทพฯ : นำอักษรการพิมพ์, 2526.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาปริมาณสารด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ spectrum

ก.1 การคำนวณหาปริมาณหมู่โบรโมเอทิลเลดบนโครงสร้างของ 3-PPy ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ spectrum

จาก $^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของ 3-PPy สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณหมู่ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$ บน 3-PPy ได้ โดยทำการเปรียบเทียบสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 2.8-2.9 ppm (ตำแหน่ง c,d ในภาพที่ 50) ซึ่งเป็นตัวแทนของหมู่ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$ กับ พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 8.0 และ 8.4 ppm (ตำแหน่ง a และ b ในภาพที่ 50) ซึ่งเป็นตัวแทนของโปรตอนที่ติดกับคาร์บอนบนวงแหวนไพร์โรล และที่ตำแหน่ง $-\text{NH}$ ของ polypyrrole พบว่า

หมู่ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$: พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 2.8 ppm ประมาณเท่ากับ 2.02 เทียบเท่ากับ โปรตอนจำนวน 2 ตัว ของ CH_2-Br และพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 2.9 ppm ประมาณเท่ากับ 2.00 เทียบเท่ากับ โปรตอนจำนวน 2 ตัว ของ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$

Polypyrrole: พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 8.0 และ 8.4 ppm ประมาณเท่ากับ 0.11 และ 0.52 เทียบเท่ากับ โปรตอนจำนวน 1 ตัว ของ $-\text{NH}$ 1 หมู่ และ โปรตอนที่ติดกับคาร์บอนบนวงแหวนไพร์โรล (ตำแหน่งที่ 4) อีก 1 ตัว

นั่นคือ สัดส่วนของ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$: polypyrrole เท่ากับ

$$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br} : \text{polypyrrole} \equiv \frac{(2.00 + 2.02) / 4}{(0.11 + 0.52) / 2} = 3.19 \approx 3.2 : 1$$

แสดงว่า ทุกๆหน่วยย่อยซ้ำของ Polypyrrole 1 หน่วย จะมีหน่วยย่อยซ้ำของ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$ 3.2 หน่วย

ก.2 การคำนวณหาปริมาณหมู่เฟอร์โรซีนบนโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ spectrum

โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ผ่านการทำเอสเตอร์ริฟิเคชันด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลตแล้ว คือ 3-PPy oxime FCC นั้น จะปรากฏสเปกตรัมของ $^1\text{H-NMR}$ ดังแสดงในภาพที่ 62 ซึ่งจะปรากฏสเปกตรัมเฉพาะของ FCC ในช่วง 4-5 ppm จำนวน 3 แบนด์

จาก $^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของ 3-PPy oxime FCC สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณหมู่เฟอร์โรซีนบน 3-PPy oxime FCC ได้โดยทำการเปรียบเทียบสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 4.3-4.8 ppm (ตำแหน่ง d,e, และ f ในภาพที่ 62) ซึ่งเป็นตัวแทนของหมู่เฟอร์โรซีนกับพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 2.8-2.9 ppm (ตำแหน่ง b และ c ในภาพที่ 62) ซึ่งเป็นตัวแทนของหมู่ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$ พบว่า

หมู่เฟอร์โรซีน: พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 4.3-4.8 ppm ประมาณเท่ากับ $2.62+1.08+0.86$ เทียบเท่ากับโปรตอนจำนวน 9 ตัวของเฟอร์โรซีน 1 หมู่

หมู่ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$: พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 2.8-2.9 ppm ประมาณเท่ากับ $2.18+2.00$ เทียบเท่ากับโปรตอนจำนวน 4 ตัว ของ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$

นั่นคือ สัดส่วนของ Ferrocene : $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$ เท่ากับ

$$\text{Ferrocene } \text{CH}_2 - \text{Br} \equiv \frac{(0.86+1.08+2.62)/9}{(2.00+2.18)/4} = 0.48 \approx 0.5:1$$

แสดงว่า อัตราส่วนระหว่างหมู่เฟอร์โรซีนต่อหมู่ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Br}$ คิดเป็นสัดส่วนโดยประมาณเท่ากับ 0.5

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการทดลองภายใต้บรรยากาศไอระเหยสารตัวอย่าง

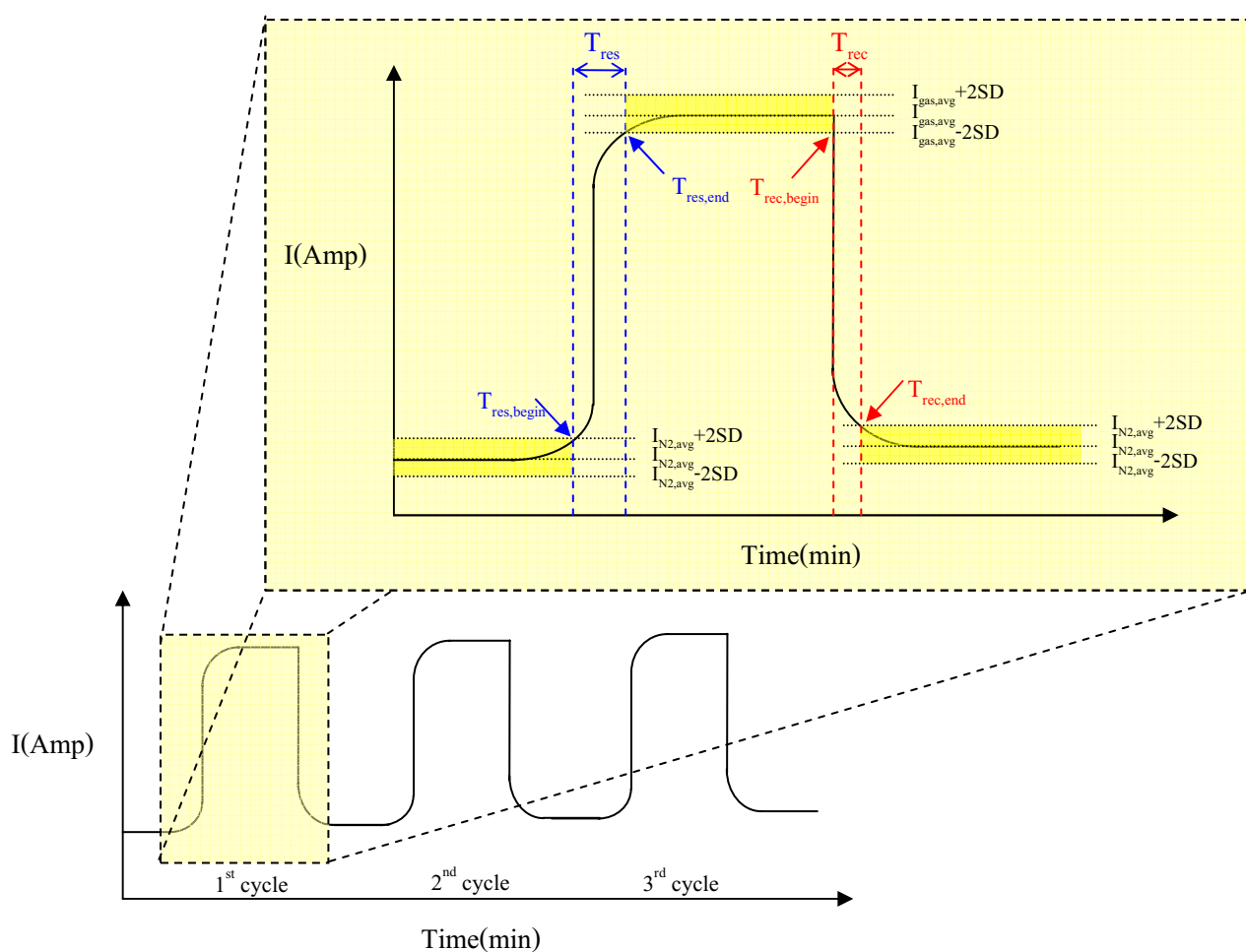
ข.1 การหาระยะเวลาเริ่มต้นในการตอบสนอง($T_{res,begin}$) ระยะเวลาสิ้นสุดการตอบสนอง($T_{res,end}$) ระยะเวลาเริ่มต้นการคืนตัวกลับ($T_{rec,begin}$) ระยะเวลาสิ้นสุดการคืนตัวกลับ($T_{rec,end}$) และค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในสถานะสมดุลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนและโอระเหยตัวอย่าง

ในการหาระยะเวลาต่างๆนี้จะใช้วิธีการอ่านจากเส้นกราฟค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลาต่างๆโดยเป็นจุดเวลาที่เส้นกราฟตัดกับเส้น $2SD$ ที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยค่ากระแสไฟฟ้าในสถานะสมดุลของก๊าซไนโตรเจนในขณะนั้น เพื่อใช้ในการหาระยะเวลาต่างๆ ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาในการตอบสนอง(Respond time, } T_{res}) = T_{res,end} - T_{res,begin}$$

$$\text{ระยะเวลาในการคืนตัวกลับ(Recovery time, } T_{rec}) = T_{rec,end} - T_{rec,begin}$$

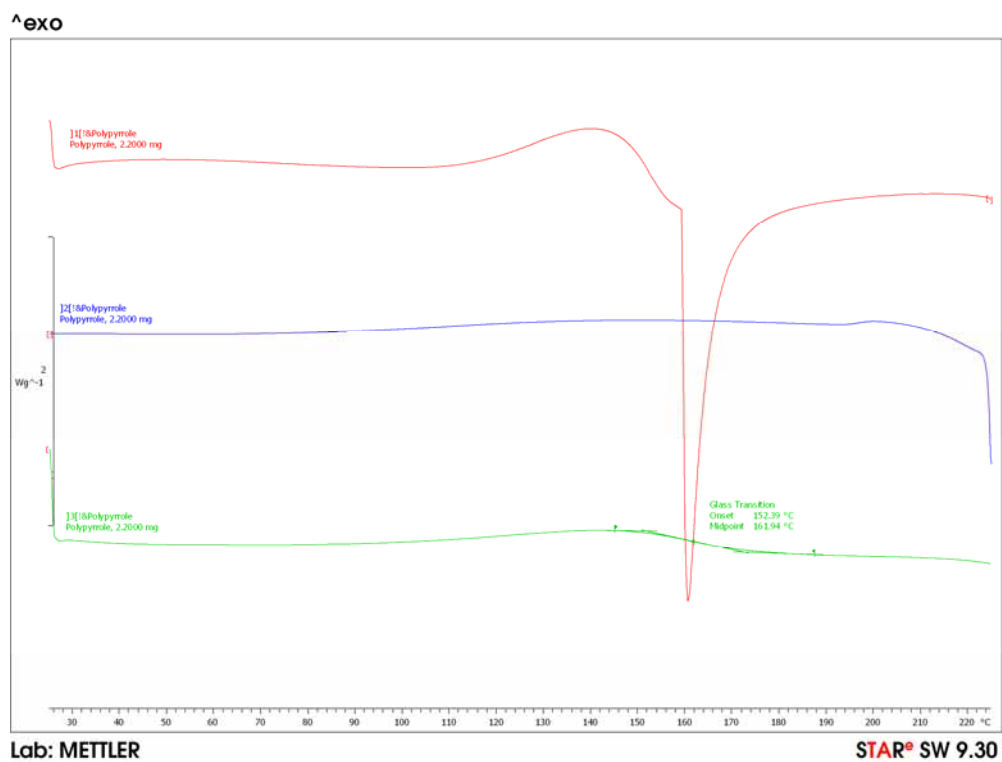
$$\text{ร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซ(\%Sensitivity, \%s)} = \left(\frac{\sigma_{gas} - \sigma_{N2}}{\sigma_{N2}} \right) \times 100$$



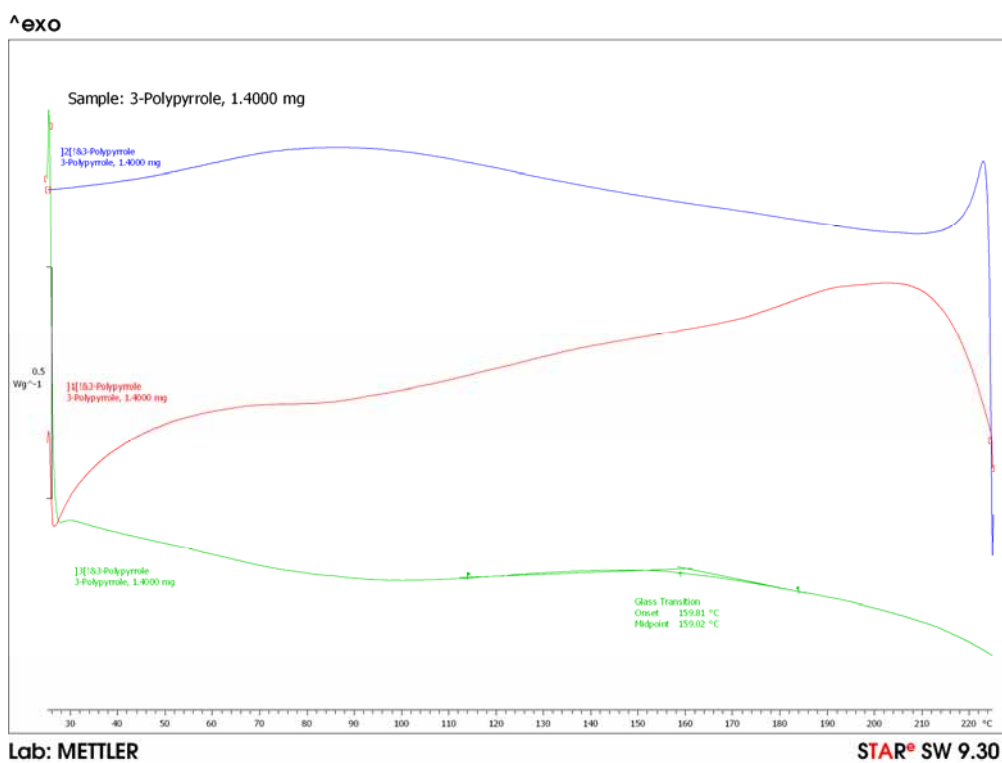
รูปที่ ข.1 การหาระยะเวลาต่างๆ จากกราฟค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่างๆ

ภาคผนวก ก

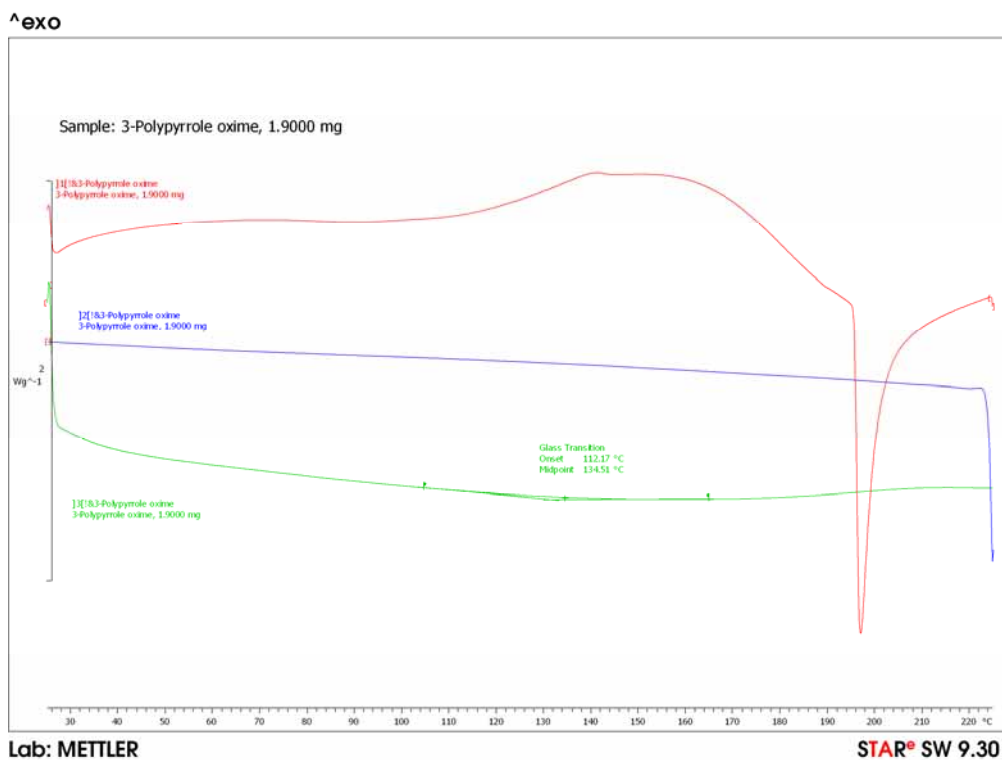
ข้อมูลผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



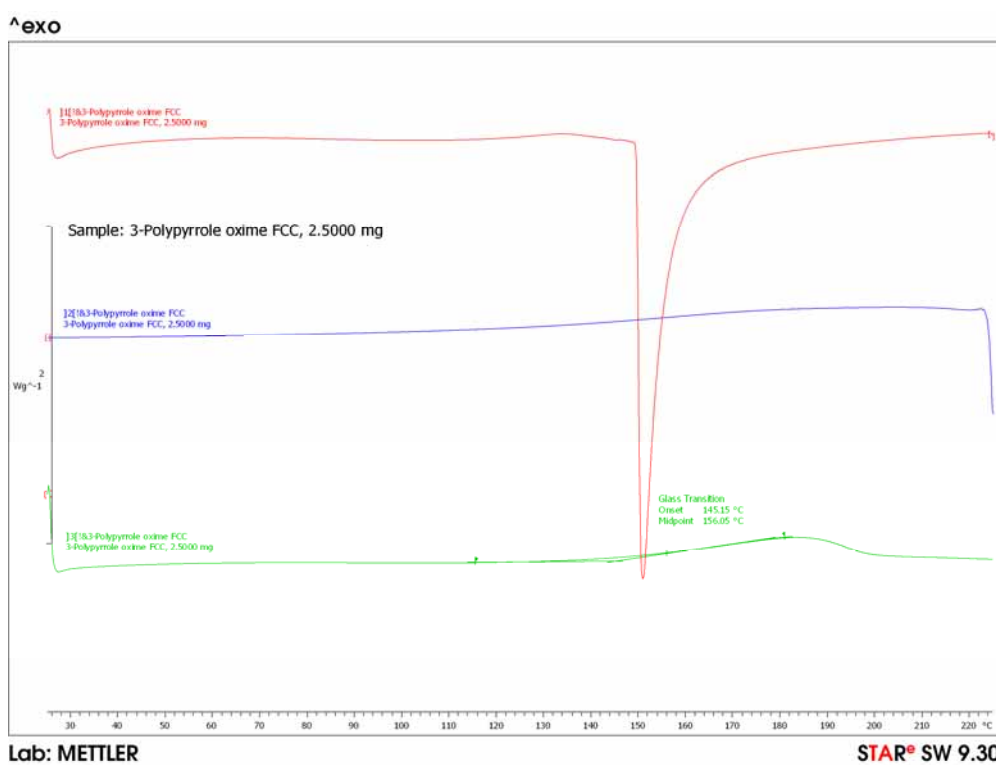
ภาพที่ ค.1 DSC Thermogram ของ Polypyrrole : PPy



ภาพที่ ค.2 DSC Thermogram ของ 3-derivatized polypyrrole : 3-PPy



ภาพที่ ก.3 DSC Thermogram ของ 3-derivatized polypyrrole oxime : 3-PPy oxime



ภาพที่ ก.4 DSC Thermogram ของ Ferrocenecarboxylated polypyrrole: 3-PPy oxime FCC

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล

นางสาวนันทนิตย์ พ่วงเล็ก

วันเกิด

14 พฤษภาคม 2529

ที่อยู่ที่ติดต่อได้

98 หมู่ 3 ต.บางไทรน้อย อ.โพธาราม จ.ราชบุรี 70120

โทรศัพท์

0-3274-1489

084-698-0882

E-mail address

fon_nunnid@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2547

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น-ตอนปลาย
โรงเรียนนารีวิทยา จังหวัดราชบุรี

พ.ศ. 2551

สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร

พ.ศ. 2553

สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2551-2552

ตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรม
วัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม