



การสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเพื่อการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ

โดย

นายโกสินทร์ หาชะวี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเพื่อการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ

โดย

นายโกสินทร์ หาชะวี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

SYNTHESIS OF CONDUCTIVE POLYMERS FOR GAS SENSOR APPLICATION

By

Kosin Hachawee

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

2007

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเพื่อการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ” เสนอโดย นายโกสินทร์ หาชะวี เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตังกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธีตระกูล
2. อาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส
3. รองศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ ศิริวัฒน์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธีตระกูล)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ ศิริวัฒน์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)

...../...../.....

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ กำชัย ตรีชัยรัมย์)

...../...../.....

48402203: สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : พอลิเมอร์นำไฟฟ้า/เฟอร์ไรต์/การตรวจสอบก๊าซ

โกสินทร์ หาชะวี : การสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเพื่อการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.อำนาจ สิริวัชรตระกูล , อ.ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส และ รศ.ดร.อนุวัฒน์ ศิริวัฒน์. 225 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์และศึกษาโครงสร้างของเฟอร์ไรต์คาร์บอนกัมมันต์เมทิลเลเตดพอลิเมอร์สังเคราะห์ ได้แก่ พอลิไวนิลเบนซิลเฟอร์ไรต์คาร์บอนกัมมันต์(PVBFCC) พอลิไวนิลเบนซิลเฟอร์ไรต์คาร์บอนกัมมันต์-โกล-เอทเทอโรเอทิลเมทิลเลเตดในอัตราส่วนโมลของไวนิลเบนซิลเฟอร์ไรต์คาร์บอนกัมมันต์ต่อเอทเทอโรเอทิลเมทิลเลเตดเป็น 75 ต่อ 25 (Co-PVBFCC75/25) และ 50 ต่อ 50 (Co-PVBFCC50/50) และเฟอร์ไรต์คาร์บอนกัมมันต์เมทิลเลเตดพอลิซัลโฟน(BPSFCC) ต่อจากนั้นได้นำเฟอร์ไรต์คาร์บอนกัมมันต์เมทิลเลเตดพอลิเมอร์ทั้งสี่ชนิดดังกล่าวไปทดสอบการนำไฟฟ้าขณะผ่านก๊าซเมทานอลและก๊าซอะซิโตน จากการทดสอบพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้าและความว่องไวในการตรวจสอบก๊าซของพอลิเมอร์ดังกล่าวขึ้นกับโครงสร้างของทั้งพอลิเมอร์และก๊าซที่ใช้ทดสอบ กล่าวคือ เฟอร์ไรต์คาร์บอนกัมมันต์เมทิลเลเตดพอลิเมอร์ที่มีปริมาณหมู่เฟอร์ไรต์คาร์บอนมากจะนำไฟฟ้าได้ดี ส่วนพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่มีความอ่อนตัวและ/หรือมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลใหญ่จะใช้เวลาในการตอบสนองต่อก๊าซและเวลาที่ใช้ในการคืนตัวที่เร็ว ก๊าซทดสอบที่มีความเป็นขั้วสูงและมีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น เมทานอล จะช่วยให้การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ก๊าซที่มีปริมาณมากจะช่วยให้ระยะเวลาในการตอบสนองเร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยดังกล่าวข้างต้นจะมีบทบาทมากขึ้นขึ้นอยู่กับระบบที่กำลังศึกษาอยู่ในขณะนั้นว่าปัจจัยใดจะมีอิทธิพลเหนือกว่ากัน ผลของการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเราอาจใช้เฟอร์ไรต์คาร์บอนกัมมันต์เมทิลเลเตดพอลิเมอร์สำหรับตรวจสอบก๊าซได้

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2550
ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2. 3.

48402203: MAJOR: POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORD: CONDUCTIVE POLYMERS/FERROCENE/GAS SENSOR

KOSIN HACHAWEE: SYNTHESIS OF CONDUCTIVE POLYMERS FOR GAS SENSOR APPLICATION. THESIS ADVISORS: AMNARD SITTATTRAKUL, Ph.D., WANCHAI LERDWIJITJARUD, Ph.D., AND ASSOC. PROF. ANUVAT SIRIVAT, Ph.D. 225 pp.

The purpose of this research is to synthesize and study the structure of four ferrocenecarboxymethylated polymers. They are poly(vinylbenzyl ferrocenecarboxylate) (PVBFCC), poly(vinylbenzyl ferrocenecarboxylate-co-ethoxyethylmethacrylate) which has the mole ratio between vinylbenzyl ferrocenecarboxylate and ethoxyethylmethacrylate of 75:25 (Co-PVBFCC 75/25) and 50:50 (Co-PVBFCC50/50) and ferrocenecarboxymethylated polysulfone (BPSFCC). These four ferrocenecarboxymethylated polymers are then tested for their electrical conductivities while passing methanol and acetone gases. It is found that the factors that affect the electrical conductivity and sensitivity in checking the two gases of polymers are both the polymer structures and types of tested gases. However, ferrocenecarboxymethylated polymers with higher amount of ferrocene functions will have good electrical conductivity while polymers with flexible structures and/or having larger free volume will have faster response and recovery time. Gas molecule with more polar group and smaller size will also assist the high electrical conductivity of polymers but larger amount of gases will give faster response time. However, the factors mentioned above will have different impact depending on what parameters are more important for the investigated system. The result of the investigation indicates that we may use ferrocenecarboxymethylated polymers as gas sensor.

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2007

Student's signature.....

Thesis Advisors' signature 1. 2. 3.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เริ่มต้นทำที่ภาควิชานี้เป็นครั้งแรก เครื่องมือใหม่ วิธีการใหม่ ทุกอย่างต้องลงมือทำเพื่อใช้เองทั้งหมด จึงประสบกับปัญหาและความล่าช้าในตอนต้น ไม่นาน การทำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ก็เนื่องมาจากการได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธิตระกูล ผู้เป็นที่ปรึกษาหลักของงานวิจัยในครั้งนี้ ที่คอยให้คำแนะนำและสอนให้ผมรู้จักการทำอะไรให้คิดก่อนเป็นอย่างดี จึงขอขอบพระคุณอาจารย์ไว้เป็นอย่างสูง ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส และ รศ.ดร.อนุวัฒน์ ศิริวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมสำหรับคำแนะนำในเรื่องการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.สุรัช นิมจิรวัฒน์ และพี่พันสรวง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ช่วยเหลือในการเตรียมสารและวิเคราะห์ผล $^1\text{H-NMR}$ ขอขอบคุณ รศ. กำชัย ตรีชัยรัมย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ช่วยเหลือในการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า และอนุเคราะห์ลวดตัวนำไฟฟ้าให้ใช้ตลอดการวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ Dr. Hidefusa Takahara สำหรับความใจดี คำสอนเรื่องการวัดค่าการนำไฟฟ้าและความอนุเคราะห์ Silver paint ให้ใช้ตลอดการวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.อรัญ วสันตกรรม ห้วนหน้า ภาควิชา ที่ทำให้เรามีเครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว และกระตุ้นให้ผมรู้สึกกระตือรือร้นอยู่ตลอดเวลาทุกครั้งที่ผมเห็นอาจารย์ ขอขอบคุณพี่พินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาที่ช่วยจัดหาเครื่องมือและสารเคมีทุกอย่างให้ แม้ว่าอุปกรณ์บางอย่างไม่มีแต่พี่พินิจก็แนะนำให้รู้จักหาสิ่งอื่นมาใช้แทนซึ่งมันก็ใช้ได้ดีกว่าสิ่งที่เราอยากจะได้เสียอีก ขอขอบคุณเรนทร์ กิตติพัฒน์ ปิยาณี พี่องฉัตรและเพื่อนที่อยู่ห้องวิจัยเดียวกันที่คอยช่วยเหลือกันและกันอยู่ตลอดเวลา ขอขอบคุณนิภารัตน์ มนชยาพิสุทธิ์ที่คอยเป็นกำลังใจและทำให้ผมรู้สึกฮึดสู้ขึ้นมาทุกครั้ง สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุดในชีวิตของผม คือ คุณพ่อ และคุณแม่ ที่เลี้ยงดูเอาใจใส่ผมเป็นอย่างดีเสมอมา ทำให้การศึกษาและการทำงานวิจัย ณ ที่แห่งนี้ของผมเป็นไปได้ด้วยดี

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น ผมขอขอบพระคุณทุกท่านจากใจจริงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 แนวคิดงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	5
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	5
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	6
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 การนำไฟฟ้าของวัสดุ.....	7
2.1.1 การแบ่งประเภทการนำไฟฟ้าของวัสดุ	7
2.1.1.1 การนำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์(Electronic Conduction)...	7
2.1.1.2 การนำไฟฟ้าแบบไอออน (Ionic Conduction).....	7
2.1.2 สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity, σ).....	13
2.2 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	13
2.3 โครงสร้างและกลไกการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	16
2.4 แนวคิดอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซหรือแก๊สอิเล็กทรอนิกส์.....	17
2.5 เทคโนโลยีของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซ.....	21
2.6 การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ในการตรวจสอบก๊าซ	23
2.7 กลไกการตรวจสอบก๊าซด้วยพอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	25
2.8 ผลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อการทำงานของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	27
2.9 พอลิซิลิโคนและอนุพันธ์.....	30

บทที่	หน้า
2.10 การนำไฟฟ้าของโมเลกุลที่โครงสร้างมีหมู่ฟังก์ชัน Ferrocene.....	37
2.11 Phase-transfer catalyst	38
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	39
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	39
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	40
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	41
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย	42
3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์ตัวรองรับ	42
3.4.1.1 การสังเคราะห์ไฮโมพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิล คลอไรด์(PVBC).....	42
3.4.1.2 การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอ ไรด์-โค-เอทอริกซ์เอทิลเมทาคริเลต(Co-PVBC75/ 25, Co-PVBC50/50).....	42
3.4.1.3 การทำโบรโมเมทิลเลชันพอลิซัลโฟน(BPS).....	43
3.4.2 การสังเคราะห์กรดเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิลิก.....	44
3.4.2.1 การสังเคราะห์ (2-Chlorobenzoyl) ferrocene.....	44
3.4.2.2 การสังเคราะห์ Ferrocenecarboxylic acid.....	45
3.4.3 การเตรียมเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na-FCC).....	45
3.4.4 การทำเอสเทอร์ฟิเคชันพอลิเมอร์ตัวรองรับด้วยเกลือโซเดียม เฟอร์โรซีน คาร์บอกซิเลต.....	45
3.4.4.1 การทำเอสเทอร์ฟิเคชันของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์.	45
3.4.4.2 การทำเอสเทอร์ฟิเคชันของโคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิล เบนซิลคลอไรด์-โค-เอทอริกซ์เอทิลเมทาคริเลต 75/25 (Co_PVBFCC75/25).....	46
3.4.4.3 การทำเอสเทอร์ฟิเคชันของโคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิล เบนซิลคลอไรด์-โค-เอทอริกซ์เอทิลเมทาคริเลต 50/50 (Co_PVBFCC50/50).....	46
3.4.4.4 การทำเอสเทอร์ฟิเคชันของโบรโมเมทิลเตพอลิซัล โฟน (BPS).....	47

บทที่	หน้า
3.4.5 การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ(Doping).....	47
3.4.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของพอลิเมอร์.....	47
3.4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ตัวรองรับ.....	48
3.4.8 การทดสอบค่าการนำไฟฟ้าและความว่องไวต่อก๊าซตัวอย่างของ พอลิเมอร์.....	48
3.4.8.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	48
3.4.8.2 การควบคุมความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่าง.....	49
3.4.8.3 การหา Linear ohmic regime.....	50
3.4.8.4 การทดสอบและคำนวณหาร้อยละความว่องไวต่อก๊าซ ตัวอย่าง.....	51
3.4.8.5 การหาเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซและเวลาที่ใช้ ในการคืนตัวกลับ.....	52
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	53
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$	53
4.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิเมอร์ตัวรองรับ.....	53
4.1.1.1 การสังเคราะห์ไฮโมพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบน ซิลคลอไรด์ (PVBC)	53
4.1.1.2 การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอ ไรด์-โค-เอพทอออกซิเอทิลเมทาคริเลต (Co-PVBC 75/25, Co-PVBC50/50).....	57
4.1.1.3 การทำโบรโมเมทิลเลชันพอลิซัลโฟน (BPS).....	62
4.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์กรดเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิลิกด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$	67
4.1.2.1 การสังเคราะห์ (2-Chlorobenzoyl) ferrocene.....	67
4.1.2.2 การสังเคราะห์ ferrocenecarboxylic acid (FCC).....	69
4.1.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์เกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na- FCC) ด้วยเทคนิค FT-IR.....	71

บทที่	หน้า
4.1.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิเมอร์ตัวรองรับที่ผ่านการทำเอสเตอร์ริฟิเคชันด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลตด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$	73
4.1.4.1 การทำเอสเตอร์ริฟิเคชันของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์.	73
4.1.4.2 การทำเอสเตอร์ริฟิเคชันของโคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์- <u>โค</u> -เอทชอกซิเอทิลเมททาคริเลต 75/25.....	76
4.1.4.3 การทำเอสเตอร์ริฟิเคชันของโคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์- <u>โค</u> -เอทชอกซิเอทิลเมททาคริเลต 50/50.....	79
4.1.4.4 การทำเอสเตอร์ริฟิเคชันของโพรโมเมทิลเลตพอลิซิลโฟน.....	82
4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ตัวรองรับ.....	85
4.2.1 การทดสอบหาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับด้วยเทคนิค TGA.....	85
4.2.2 การทดสอบหาอุณหภูมิ glass transition ของพอลิเมอร์ตัวรองรับด้วยเทคนิค DSC.....	87
4.3 การทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าและความว่องไวต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์.....	89
4.3.1 การควบคุมความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่าง.....	89
4.3.2 การหา Linear ohmic regime.....	89
4.3.2.1 การตรวจสอบหา Linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 28°C	90
4.3.2.2 การตรวจสอบหา Linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลที่อุณหภูมิ 28°C	90
4.3.3 การทดสอบและคำนวณหาร้อยละความว่องไวต่อก๊าซตัวอย่าง....	91
4.3.3.1 ค่ากระแสไฟฟ้าก่อนการป้อนก๊าซตัวอย่างในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน (I_{N_2}).....	92

บทที่	หน้า
4.3.3.2 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่าง (I_{gas}).....	97
4.3.3.3 ค่ากระแสไฟฟ้าหลังการป้อนก๊าซตัวอย่างในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ($I_{N_2, after}$).....	102
4.3.3.4 ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซของพอลิเมอร์ (T_{res}).....	107
4.3.3.5 ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์ (T_{rec}).....	111
4.3.3.6 ร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่าง (%S).....	115
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	120
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	120
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	121
บรรณานุกรม.....	123
ภาคผนวก.....	126
ภาคผนวก ก การคำนวณหาปริมาณสารด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ 1H -NMR spectrum.....	127
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลองการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซตัวอย่าง.....	133
ประวัติผู้วิจัย.....	225

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป [3]..... 2
1.2	มาตรฐานคุณภาพอากาศของประเทศไทยเปรียบเทียบกับประเทศอื่นๆ [4]..... 3
2.1	ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง [18]..... 14
2.2	โครงสร้างและค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ผ่านการ Doping แล้ว [12]..... 21
2.3	ระดับความเข้มข้นของก๊าซต่างๆ ที่มนุษย์ และจุมกือเล็กทรอนิกส์สามารถรับรู้ ได้ [5]..... 22
2.4	พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ [10]..... 25
2.5	พอลิซิลิโคนในเชิงการค้า [23]..... 30
2.6	ข้อมูล Themogravimetric analysis ของ Polystyrene และอนุพันธ์ [24]..... 33
2.7	ข้อมูล Themogravimetric analysis ของ Polysulfone และอนุพันธ์ [24]..... 34
4.1	อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับ..... 86
4.2	อุณหภูมิ glass transition (T_g) ของพอลิเมอร์ตัวรองรับ..... 88
4.3	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อนการผ่าน ก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทธานอล เจือจางจากการทดลองซ้ำสองรอบ..... 94
4.4	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อนการผ่าน ก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตน เจือจางจากการทดลองซ้ำสองรอบ..... 95
4.5	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละ ชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทธานอลเจือจางจากการทดลองซ้ำสอง รอบ..... 99
4.6	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละ ชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนเจือจางจากการทดลองซ้ำสองรอบ.. 100
4.7	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนหลังการผ่านก๊าซ ตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทธานอล เจือจางจากการทดลองซ้ำสองรอบ..... 104

ตารางที่	หน้า
4.8 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนหลังการผ่านก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ.....	105
4.9 ข้อมูลการวัดเวลาที่ใช้ในการตอบสนอง (T_{rec}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอลเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ.....	108
4.10 ข้อมูลการวัดเวลาที่ใช้ในการตอบสนอง (T_{rec}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ.....	109
4.11 ข้อมูลการวัดเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับ (T_{rec}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอลเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ.....	112
4.12 ข้อมูลการวัดเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับ (T_{rec}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ.....	113
4.13 ข้อมูลร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอลเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ.....	117
4.14 ข้อมูลร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ.....	118
ข.1 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อนการผ่านก๊าซตัวอย่างและเวลาเริ่มต้นการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอล.....	211
ข.2 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างและเวลาสิ้นสุดการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างและเวลาเริ่มต้นการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอล.....	212
ข.3 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนหลังการผ่านก๊าซตัวอย่างและเวลาสิ้นสุดการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอล.....	213
ข.4 ข้อมูลเวลาที่ใช้ในการตอบสนอง เวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับ และร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอล.....	214

ตารางที่	หน้า
ข.5	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อนการผ่าน ก๊าซตัวอย่างและเวลาเริ่มต้นการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิ เมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตน..... 215
ข.6	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างและเวลาสิ้นสุดการ ตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างและเวลาเริ่มต้นการคืนตัวกลับของพอลิ เมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตน..... 216
ข.7	ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนหลังการผ่านก๊าซ ตัวอย่างและเวลาสิ้นสุดการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการ ทดสอบกับก๊าซอะซิโตน..... 217
ข.8	ข้อมูลเวลาที่ใช้ในการตอบสนอง เวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับ และร้อยละการ ตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับ ก๊าซอะซิโตน..... 218

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 อัตราการเกิดอุบัติเหตุและอัตราการเสียชีวิตเนื่องจากก๊าซพิษ ต่อประชากรไทย 100,000 คน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1978 – 2004 [1].....	1
2.1 โครงสร้างอะตอม [15].....	7
2.2 แบบจำลองทะเลอิเล็กตรอน [15].....	8
2.3 ระดับชั้นพลังงานของอะตอมที่สร้างพันธะกัน [15].....	9
2.4 แถบพลังงานของอะตอมลิเทียม [15].....	9
2.5 แถบพลังงานที่เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของอิเล็กตรอน [15].....	10
2.6 เปรียบเทียบแถบพลังงานของวัสดุชนิดต่าง ๆ [15].....	10
2.7 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอน [16].....	11
2.8 การเคลื่อนที่ของตัวพาหะพาประจุ [16].....	12
2.9 การกระโดดข้ามชั้นพลังงานของวัสดุชนิดต่างๆ [17].....	13
2.10 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ π -Conjugated linear polymers.....	17
2.11 การซ้อนเหลื่อมของ Orbital ในระบบ Conjugation.....	17
2.12 ระดับพลังงานของ Neutral chain, Polaron และ Bipolaron ของพอลิไพร์โรล....	18
2.13 เปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์กับวัสดุชนิดอื่นๆ [19].....	19
2.14 ผลของการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุของ Polyacetylene [19].....	19
2.15 การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุของ Polyacetylene ด้วยสาร Dopant ชนิดต่าง ๆ	20
2.16 หลักการทำงานของ MOS [5].....	23
2.17 การวัดค่าความต้านทานเริ่มต้น (R_u).....	27
2.18 การวัดค่าความต้านทานภายหลังการสัมผัสก๊าซ (R_g).....	28
2.19 การเกิด Physical และ Chemical Absorption ของโมเลกุลก๊าซบนผิวของพอลิไพร์โรล.....	29
2.20 โครงสร้าง Poly(<i>p</i> -phenylene sulfone).....	30
2.21 การสังเคราะห์ Udel-type ของ Union Carbide.....	31
2.22 อุณหภูมิการใช้งานของวัสดุเทอร์โมพลาสติกทางวิศวกรรม [23].....	32
2.23 โครงสร้างของ Sensor ที่ออกแบบโดย Takaaki Kuroiwa และคณะ [25].....	34
2.24 ค่า Capacitance ที่อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และระดับความชื้นต่างๆ (%U) [25].....	35

รูปที่	หน้า
2.25	การทำ Chloromethylation Polysulfone..... 36
2.26	โครงสร้าง Aminated Polysulfone..... 36
2.27	Poly(vinyl ferrocene) ในรูปของ Reduced state และ Oxidized state ที่ทำหน้าที่เป็น Host ให้กับ ClO_4^- ที่ทำหน้าที่เป็น Counterion..... 37
2.28	กลไกการทำงานของ Phase transfer catalyst..... 38
3.1	การเชื่อมติดเส้นลวดตัวนำลงบนชิ้นงานด้วย Silver paint..... 48
3.2	การต่อชิ้นงานเข้ากับเครื่อง Electrometer..... 49
3.3	เครื่องมือควบคุมความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่างและวัดค่าการนำไฟฟ้า..... 50
4.1	การสกัดแยกตัวยับยั้งออกจากมอนอเมอร์..... 53
4.2	โครงสร้างทางเคมีของ VBC monomer..... 54
4.3	โครงสร้างทางเคมีของ PVBC..... 54
4.4	ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์..... 55
4.5	FT-IR Spectrum ของ VBC และ PVBC..... 56
4.6	$^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของ PVBC ใน CDCl_3 56
4.7	โครงสร้างทางเคมีของ EEM..... 57
4.8	โครงสร้างทางเคมีของ Co-PVBC75/25..... 57
4.9	โครงสร้างทางเคมีของ Co-PVBC50/50..... 58
4.10	ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของโคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์-โกลิเอทอโรกซิเอทิลเมทาคริลเลต..... 59
4.11	FT-IR Spectrum ของ VBC, EEM, Co-PVBC75/25 และ Co-PVBC50/50..... 60
4.12	$^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของ Co-PVBC75/25 ใน CDCl_3 61
4.13	$^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของ Co-PVBC50/50 ใน CDCl_3 61
4.14	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์โพรโมเมทิลเมทิล อีเธอร์..... 62
4.15	โครงสร้างทางเคมีของ BMME..... 62
4.16	$^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของสารละลายผสมระหว่าง BMME และสารปนเปื้อน..... 63
4.17	โครงสร้างทางเคมีของ Polysulfone (PS)..... 63
4.18	โครงสร้างทางเคมีของ BPS..... 63
4.19	ปฏิกิริยาการทำโพรโมเมทิลเลชันพอลิซัลโฟนด้วย BMME..... 64
4.20	FT-IR Spectrum ของ BMME, Polysulfone และ BPS..... 65

รูปที่	หน้า
4.21 ^1H -NMR Spectrum ของ Polysulfone ใน CDCl_3	66
4.22 ^1H -NMR Spectrum ของ BPS ใน CDCl_3	66
4.23 โครงสร้างทางเคมีของ 2-chlorobenzoyl chloride.....	67
4.24 โครงสร้างทางเคมีของ ferrocene.....	67
4.25 โครงสร้างทางเคมีของ (2-chlorobenzoyl) ferrocene.....	67
4.26 ปฏิกิริยาการการสังเคราะห์ (2-Chlorobenzoyl)ferrocene.....	68
4.27 FT-IR Spectrum ของ 2-chlorobenzoyl chloride, ferrocene และ (2-chloroben zoyl) ferrocene.....	69
4.28 โครงสร้างทางเคมีของกรด ferrocene carboxylic (FCC).....	69
4.29 ปฏิกิริยาการการสังเคราะห์ ferrocenecarboxylic acid.....	70
4.30 FT-IR Spectrum ของ (2-chlorobenzoyl) ferrocene, FCC (สังเคราะห์) และ FCC (สั่งซื้อ).....	70
4.31 โครงสร้างทางเคมีของเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na-FCC).....	71
4.32 ปฏิกิริยาการเตรียมเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต.....	71
4.33 FT-IR Spectrum ของ FCC (สังเคราะห์) และ Na-FCC.....	72
4.34 ^1H -NMR Spectrum ของ Na-FCC ใน CDCl_3	72
4.35 โครงสร้างทางเคมีของ PVB FCC.....	73
4.36 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของ PVBC ด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิ เลต.....	74
4.37 FT-IR Spectrum ของ Na-FCC, PVBC และ PVB FCC.....	75
4.38 ^1H -NMR Spectrum ของ PVB FCC ใน CDCl_3	75
4.39 โครงสร้างทางเคมีของ Co-PVB FCC75/25.....	76
4.40 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของ Co-PVBC75/25 ด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีน คาร์บอกซิเลต.....	77
4.41 FT-IR Spectrum ของ Na-FCC, Co-PVBC75/25 และ Co-PVB FCC75/25.....	78
4.42 ^1H -NMR Spectrum ของ Co-PVB FCC75/25 ใน CDCl_3	78
4.43 โครงสร้างทางเคมีของ Co-PVB FCC50/50.....	79
4.44 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของ Co-PVBC50/50 ด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีน คาร์บอกซิเลต.....	80

รูปที่		หน้า
4.45	FT-IR Spectrum ของ Na-FCC, Co-PVBC50/50 และ Co-PVBFCC50/50.....	81
4.46	$^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของ Co-PVBFCC50/50 ใน CDCl_3	81
4.47	โครงสร้างทางเคมีของ BPSFCC.....	82
4.48	ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของ BPS ด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต	83
4.49	FT-IR Spectrum ของ Na-FCC, BPS และ BPSFCC.....	84
4.50	$^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของ BPSFCC ใน CDCl_3	84
4.51	TGA thermogram เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับ....	86
4.52	DSC thermogram เปรียบเทียบอุณหภูมิ glass transition (T_g) ของพอลิเมอร์ตัวรองรับ.....	88
4.53	การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุของ PVBFCC ด้วย Lithium perchlorate.....	89
4.54	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าความต่างศักย์ (V) ในการทดสอบหา Linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน.....	90
4.55	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าความต่างศักย์ (V) ในการทดสอบหา Linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทธานอล.....	91
4.56	ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไนโตรเจนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ(ก่อนการผ่านก๊าซตัวอย่าง)(I_{N_2})..	96
4.57	ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ (I_{gas}).....	101
4.58	ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไนโตรเจนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ(หลังการผ่านก๊าซตัวอย่าง)($I_{N_2,after}$).....	106
4.59	เวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่าง (T_{res}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ.....	110
4.60	เวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับภายหลังจากการผ่านก๊าซตัวอย่าง(T_{rec}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ.....	114
4.61	ร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่าง(%S) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ.....	119

รูปที่	หน้า
ก.1 แสดงแบนด์ของ PVBC ที่ผ่านการทำเอสเตอริฟิเคชันด้วยเกลือ Na-FCC ไป 70% ของหมู่ $\text{CH}_2\text{-Cl}$ ทั้งหมด.....	131
ก.2 แสดงแบนด์ของ BPS ที่ผ่านการทำเอสเตอริฟิเคชันด้วยเกลือ Na-FCC ไป 70% ของหมู่ $\text{CH}_2\text{-Br}$ ทั้งหมด.....	132
ข.1 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ PVBFC (ครั้งที่ 1).....	135
ข.2 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ Co-PVBFC75/25(ครั้งที่ 1).....	135
ข.3 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ Co-PVBFC50/50(ครั้งที่ 1).....	136
ข.4 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ BPSFC (ครั้งที่ 1).....	136
ข.5 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ PVBFC (ครั้งที่ 2).....	138
ข.6 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ Co-PVBFC75/25(ครั้งที่ 2).....	138
ข.7 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ Co-PVBFC50/50(ครั้งที่ 2).....	139
ข.8 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ BPSFC (ครั้งที่ 2).....	139
ข.9 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซอะซิโตนของ PVBFC (ครั้งที่ 1).....	141
ข.10 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซอะซิโตนของ Co-PVBFC75/25(ครั้งที่ 1).....	141
ข.11 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซอะซิโตนของ Co-PVBFC50/50(ครั้งที่ 1).....	142
ข.12 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซอะซิโตนของ BPSFC (ครั้งที่ 1).....	142

รูปที่	หน้า
ข.13	ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้ บรรยากาศของก๊าซอะซิโตนของ PVB FCC (ครั้งที่ 2)..... 144
ข.14	ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้ บรรยากาศของก๊าซอะซิโตนของ Co-PVB FCC 75/25 (ครั้งที่ 2)..... 144
ข.15	ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้ บรรยากาศ ของก๊าซอะซิโตนของ Co-PVB FCC 50/50 (ครั้งที่ 2)..... 145
ข.16	ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้ บรรยากาศ ของก๊าซอะซิโตนของ BPS FCC (ครั้งที่ 2)..... 145
ข.17	การหาระยะเวลาต่างๆ จากกราฟค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่างๆ..... 146
ข.18	การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทาน นอลของ 1 st cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 1)..... 147
ข.19	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทาน นอลของ 1 st cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 1)..... 147
ข.20	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอล ของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซ ไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 1)..... 148
ข.21	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทาน นอลของ 2 nd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 1)..... 148
ข.22	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอล ของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซ ไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 1)..... 149
ข.23	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทาน นอลของ 3 rd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 1)..... 149

รูปที่	หน้า
ข.24	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่1)..... 150
ข.25	การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle ของ Co-PVB FCC75/25 (ครั้งที่1)..... 151
ข.26	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle ของ Co-PVB FCC75/25 (ครั้งที่1)..... 151
ข.27	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ Co-PVB FCC75/25 (ครั้งที่1)..... 152
ข.28	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ Co-PVB FCC75/25 (ครั้งที่1)..... 152
ข.29	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ Co-PVB FCC75/25 (ครั้งที่1)..... 153
ข.30	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ Co-PVB FCC75/25 (ครั้งที่1)..... 153
ข.31	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ Co-PVB FCC75/25 (ครั้งที่1)..... 154
ข.32	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle ของ Co-PVB FCC50/50 (ครั้งที่1)..... 155

รูปที่	หน้า
ข.33	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)..... 156
ข.34	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)..... 156
ข.35	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)..... 157
ข.36	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)..... 157
ข.37	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)..... 158
ข.38	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)..... 159
ข.39	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)..... 160
ข.40	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)..... 160

รูปที่	หน้า
ข.41	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)..... 161
ข.42	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)..... 161
ข.43	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)..... 162
ข.44	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่2)..... 163
ข.45	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่2)..... 164
ข.46	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่2)..... 164
ข.47	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่2)..... 165
ข.48	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่2)..... 165
ข.49	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่2)..... 166

รูปที่	หน้า
ข.50	การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)..... 167
ข.51	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)..... 167
ข.52	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)..... 168
ข.53	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)..... 168
ข.54	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)..... 169
ข.55	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)..... 169
ข.56	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)..... 170
ข.57	การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)..... 171
ข.58	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)..... 171

รูปที่	หน้า
ข.59	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)..... 172
ข.60	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)..... 172
ข.61	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)..... 173
ข.62	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)..... 173
ข.63	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)..... 174
ข.64	การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)..... 175
ข.65	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)..... 175
ข.66	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)..... 176
ข.67	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)..... 176

รูปที่	หน้า
ข.68	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)..... 177
ข.69	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)..... 177
ข.70	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3 rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)..... 178
ข.71	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่1)..... 179
ข.72	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่1)..... 180
ข.73	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่1)..... 180
ข.74	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่1)..... 181
ข.75	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่1)..... 181
ข.76	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่1)..... 182

รูปที่	หน้า
ข.77	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)..... 183
ข.78	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)..... 184
ข.79	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)..... 184
ข.80	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)..... 185
ข.81	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)..... 185
ข.82	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)..... 186
ข.83	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)..... 187
ข.84	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)..... 188
ข.85	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)..... 188

รูปที่		หน้า
ข.86	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1).....	189
ข.87	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1).....	189
ข.88	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1).....	190
ข.89	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1).....	191
ข.90	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1).....	192
ข.91	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1).....	192
ข.92	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1).....	193
ข.93	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1).....	193
ข.94	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1).....	194

รูปที่	หน้า
ข.95 การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่2).....	195
ข.96 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่2).....	195
ข.97 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่2).....	196
ข.98 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่2).....	196
ข.99 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่2).....	197
ข.100 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่2).....	197
ข.101 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่2).....	198
ข.102 การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle ของ Co-PVB FCC75/25 (ครั้งที่2).....	199
ข.103 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle ของ Co-PVB FCC75/25 (ครั้งที่2).....	199

รูปที่	หน้า
ข.104	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)..... 200
ข.105	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)..... 200
ข.106	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)..... 201
ข.107	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)..... 201
ข.108	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)..... 202
ข.109	การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)..... 203
ข.110	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)..... 203
ข.111	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)..... 204
ข.112	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)..... 204

รูปที่		หน้า
ข.113	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2).....	205
ข.114	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2).....	205
ข.115	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2).....	206
ข.116	การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2).....	207
ข.117	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2).....	207
ข.118	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1 st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2).....	208
ข.119	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2).....	208
ข.120	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2 nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2).....	209
ข.121	การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3 rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2).....	209

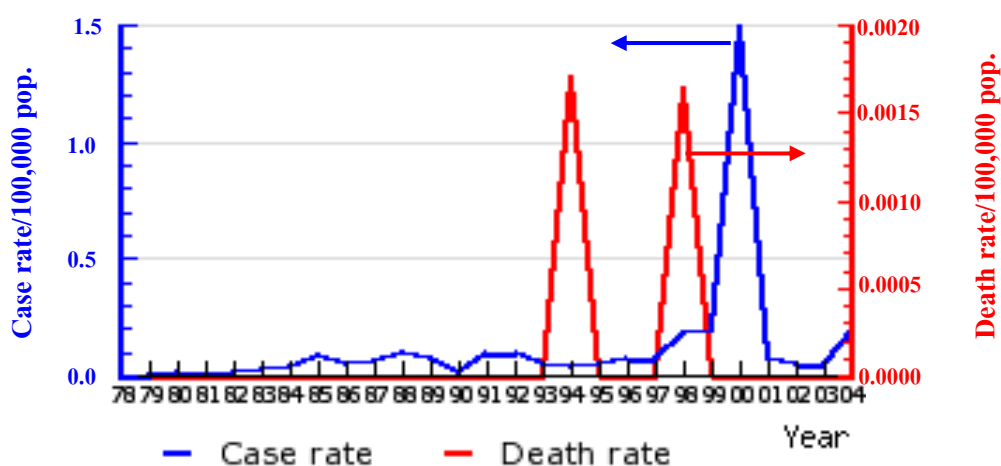
รูปที่	หน้า
ข.122	การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตน ของ 3 rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)..... 210
ข.123	ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไนโตรเจนของพอลิเมอร์แต่ละ ชนิด(ก่อนการผ่านก๊าซตัวอย่าง)..... 219
ข.124	ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละ ชนิด..... 220
ข.125	ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไนโตรเจนของพอลิเมอร์แต่ละ ชนิด(หลังการผ่านก๊าซตัวอย่าง)..... 221
ข.126	เวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่าง(T_{res}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด..... 222
ข.127	เวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับภายหลังจากการผ่านก๊าซตัวอย่าง(T_{rec}) ของพอลิ เมอร์แต่ละชนิด..... 223
ข.128	ร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่าง(%S) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด..... 224

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความเจริญก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีในปัจจุบัน ทำให้มีโรงงานใหม่เกิดขึ้นมากมายทั้งในเขตเมืองและชนบท ทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งมลพิษทางด้านอากาศส่งผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายของมนุษย์และสัตว์ เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเจ็บป่วยต่างๆ เช่น โรคภูมิแพ้ หืดหอบ ตลอดจนโรคมะเร็ง สำนักระบาดวิทยา กรมควบคุมโรคติดต่อ กระทรวงสาธารณสุข มีรายงานผู้ป่วยเนื่องจากพิษของก๊าซและไอสารระเหย [1] ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 อัตราการเกิดอุบัติเหตุและอัตราการเสียชีวิตเนื่องจากก๊าซพิษ ต่อประชากรไทย 100,000 คน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1978 – 2004 [1]

ในปี พ.ศ. 2543 (ค.ศ. 2000) มียอดผู้ป่วยสูงกว่าปีอื่นๆ เนื่องจากมีเหตุการณ์รั่วไหลของก๊าซพิษครั้งใหญ่ด้วยกัน 3 ครั้ง คือ

1. ก๊าซฟอสจีน(คาร์บอนิลคลอไรด์)รั่วไหลจากโรงงานผลิตเม็ดพลาสติกแห่งหนึ่งในจังหวัดระยองในเดือนมีนาคม มีผู้ป่วย 739 ราย,
2. ก๊าซแอมโมเนียรั่วในโรงงานผลิตอาหารแช่แข็งแห่งหนึ่งในจังหวัดตรัง มีผู้ป่วย 79 ราย
3. เดือนเมษายน มีการรายงานผู้ป่วย 33 ราย เหตุจากก๊าซแอมโมเนียรั่วในโรงงานปลากระป๋องแห่งหนึ่ง

จะเห็นได้ว่าอุบัติเหตุจากก๊าซพิษรั่วในแต่ละครั้งนั้น ทำให้มีจำนวนผู้ป่วยเป็นจำนวนมาก ในขณะที่สถานการณ์มลพิษของประเทศไทยในส่วนของคุณภาพอากาศนั้น แม้ว่าในปี พ.ศ. 2548 จะพบว่าปัญหาหลักคือ ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ในย่านชุมชนเมืองและย่านอุตสาหกรรมที่มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐาน[2] อย่างไรก็ตามก็ตีปัญหาเรื่องก๊าซพิษที่ปล่อยออกมาจากโรงงานและยานพาหนะก็ยังได้รับการตรวจสอบอย่างเข้มงวด โดยคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติได้ออกประกาศเรื่องการกำหนดมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป สรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 1.1 มาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป [3]

สารมลพิษ	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นในเวลา		ค่ามาตรฐาน
ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	1 ชม.	ชม.	ไม่เกิน 30 ppm. (34.2 มก. /ลบ.ม.)
	8 ชม.	ชม.	ไม่เกิน 9 ppm. (10.26 มก. /ลบ.ม.)
ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂)	1 ชม.	ชม.	ไม่เกิน 0.17 ppm. (0.32 มก. /ลบ.ม.)
ก๊าซโอโซน (O ₃)	1 ชม.	ชม.	0.10 ppm. (0.20 มก. /ลบ.ม.)
ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	1 ปี	ปี	ไม่เกิน 0.04 ppm. (0.10 มก. /ลบ.ม.)
	24 ชม.	ชม.	ไม่เกิน 0.12 ppm. (0.30 มก. /ลบ.ม.)
	1 ชม.	ชม.	ไม่เกิน 0.3 ppm. (780 มก./ลบ.ม.)
ตะกั่ว (Pb)	1 เดือน	เดือน	ไม่เกิน 1.5 มก. /ลบ.ม.
ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน	24 ชม.	ชม.	ไม่เกิน 0.12 มก. /ลบ.ม.
	1 ปี	ปี	ไม่เกิน 0.05 มก. /ลบ.ม.
ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 100 ไมครอน	24 ชม.	ชม.	ไม่เกิน 0.33 มก. /ลบ.ม.
	1 ปี	ปี	ไม่เกิน 0.10 มก. /ลบ.ม.

เมื่อทำการเปรียบเทียบมาตรฐานคุณภาพอากาศของประเทศไทยกับประเทศอื่นๆ เป็นดังนี้

ตารางที่ 1.2 มาตรฐานคุณภาพอากาศของประเทศไทยเปรียบเทียบกับประเทศอื่นๆ [4]

ประเทศ	SO ₂			NO ₂			CO		O ₃		TSP		PM10		Pb		
	1 ชม.	24 ชม.	1 ปี	1 ชม.	24 ชม.	1 ปี	1 ชม.	8 ชม.	1 ชม.	8 ชม.	24 ชม.	1 ปี	24 ชม.	1 ปี	1 ชม.	24 ชม.	1 ปี
สหรัฐอเมริกา	-	0.37	-	-	-	0.10	0.10	10.0	0.24	-	-	-	0.15	0.05	-	-	-
ญี่ปุ่น	0.26	0.11	-	-	0.08	-	-	22.8	0.12	-	-	-	-	-	0.10	-	-
เนเธอร์แลนด์	0.76	0.23	-	0.18	-	-	40.0	6.0	0.12	-	-	-	-	-	2.00	-	-
ออสเตรเลีย	0.44	0.16	-	0.30	0.12	-	34.3	11.4	0.24	0.10	-	-	-	-	-	-	-
เม็กซิโก	-	-	-	0.40	-	-	-	15.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ไต้หวัน	0.78	0.26	-	-	0.10	-	22.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
แคนาดา	0.82	0.27	-	0.40	0.20	-	15.0	6.0	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-
เยอรมนี	-	0.27	-	0.20	-	0.80	30.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00
WHO	0.35	0.13	0.05	0.40	0.15	-	30.0	10.0	0.15	0.10	-	-	-	-	-	-	0.05
ประเทศไทย	0.78	0.30	0.04	0.32	-	-	34.2	10.3	0.20	-	0.33	0.10	0.12	0.05	-	1.50	-

หมายเหตุ TSP คือ ฝุ่นละอองไม่เกิน 100 μm , PM10 คือฝุ่นละอองไม่เกิน 10 μm

โดยที่ประเทศไทยมีการตั้งมาตรฐานคุณภาพอากาศใกล้เคียงกับที่องค์การอนามัยโลก (WHO) ตั้งไว้ จะเห็นได้ว่าทั่วโลกต่างให้ความสำคัญกับปัญหามลพิษทางอากาศเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์

นอกจากนี้ ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม ก็มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการควบคุมคุณภาพตลอดการผลิต การตรวจสอบด้านกลิ่นซึ่งเกิดจากก๊าซของอาหารก็เป็นอีกวิธีการหนึ่ง ดังนั้นนักวิจัยหลายท่านจึงได้ให้ความสนใจในการคิดค้นพัฒนาอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซที่ได้จากสารประกอบอินทรีย์ เช่น แอลกอฮอล์ อีเทอร์ เอสเทอร์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ โดยในระยะเริ่มต้น เครื่องมือที่ถูกนำมาใช้วิเคราะห์แยกก๊าซคือ GC-MS แต่อย่างไรก็ดีวิธีการดังกล่าวก็มีความยุ่งยาก และใช้ไม่ได้กับกลิ่นทั้งหมด

ทางออกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ คือ การตรวจสอบชนิดและปริมาณของก๊าซต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเพื่อควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า“จมูกอิเล็กทรอนิกส์”[5] ที่อาศัยหลักการเดียวกันกับการรับกลิ่นของมนุษย์ ซึ่งสามารถผลิตขึ้นได้จากวัสดุหลายชนิด เช่น โลหะออกไซด์ [6] และ พอลิเมอร์นำไฟฟ้า[7,8] เป็นต้น โดยเฉพาะพอลิเมอร์นำไฟฟ้านั้นมีข้อได้เปรียบตรงที่มีน้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีราคาถูก จึงมีนักวิจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวัสดุดังกล่าวมากมาย พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่นิยมใช้ได้แก่ พอลิไพร์โรล, พอลิอะนิลีน และ พอลิไธโอฟิน เป็นต้น[9] นอกจากนี้ยังมีการใช้ระบบพอลิเมอร์ผสมเพื่อรวมข้อดีของพอลิเมอร์

หรือวัสดุอื่นที่นำมารวมกันอีกด้วย[10] สิ่งหนึ่งที่เหมือนกันของพอลิเมอร์เหล่านี้ คือ หลักการทำงานพื้นฐานที่ต้องมีระบบคอนจูเกต เพื่อให้อิเล็กตรอนที่เป็นพาหะในการนำไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ในโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วย[11,12] ซึ่งความเป็นจริงการทำให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้นั้นไม่จำเป็นต้องมีระบบคอนจูเกตอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลเสมอไป พอลิเมอร์ที่แต่เดิมมีสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้าสามารถถูกปรับเปลี่ยนให้มีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ นอกจากจะปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นได้แล้วยังคงสมบัติเดิมของพอลิเมอร์นั้นไว้ได้อีกด้วย ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางมากขึ้น เฟอร์โรซีนพอลิเมอร์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างของสายโซ่หลักเป็นฉนวนเมื่อทำการปรับปรุงโดยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของเฟอร์โรซีนที่เป็นไอออนของเหล็กเข้าไป ซึ่งเมื่อถูกออกซิไดซ์แล้วจะทำให้เลขออกซิเดชันเปลี่ยนแปลงไปและสามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อนำไปต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดความต่างศักย์ หลักการนำไฟฟ้าของเฟอร์โรซีนพอลิเมอร์นั้นจะแตกต่างจากพอลิเมอร์ นำไฟฟ้าโดยทั่วไปที่มีระบบคอนจูเกตในโครงสร้าง กล่าวคือเฟอร์โรซีนพอลิเมอร์นั้นจะนำไฟฟ้าได้เนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่แบบกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนจากไอออนของเหล็กตัวหนึ่งไปสู่อีกตัวหนึ่งซึ่งอยู่ข้างเคียง ซึ่งจากหลักการดังกล่าวนี้เองทำให้สามารถนำมาใช้ประยุกต์ในการตรวจจับก๊าซได้ เนื่องจากก๊าซแต่ละชนิดจะทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่แบบกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนได้แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการซึมผ่านได้ของก๊าซและความสามารถในการทำให้ไอออนที่เกิดขึ้นเกิดความเสถียร

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของเฟอร์โรซีนพอลิเมอร์จากพอลิเมอร์ที่แต่เดิมมีสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้าและมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างที่มีต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเมทิลเลเตดพอลิเมอร์ และทดสอบการวัดค่าการนำไฟฟ้าเมื่ออยู่ในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่าง และนำมาคำนวณหาค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่งนั้น เพื่อนำพอลิเมอร์ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับก๊าซต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของเฟอร์โรซีนพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่สังเคราะห์ขึ้น

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของก๊าซชนิดต่างๆ และโครงสร้างของเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเมทิลเลเตดพอลิเมอร์ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ที่สังเคราะห์ขึ้นเมื่ออยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซนั้นๆ

1.3 แนวคิดงานวิจัย

เฟอร์โรซีนพอลิเมอร์ เป็นพอลิเมอร์ที่ผ่านการตรึงหมู่ฟังก์ชันของเฟอร์โรซีนที่มีไอออนของเหล็กเข้าไปในโครงสร้างของพอลิเมอร์หลักซึ่งเดิมมีสมบัติเป็นฉนวน ซึ่งเมื่อถูกออกซิไดซ์แล้วจะทำให้เลขออกซิเดชันของเหล็กในหมู่เฟอร์โรซีนเปลี่ยนแปลงไปและสามารถมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้เมื่อนำไปต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดความต่างศักย์ หลักการนำไฟฟ้าของเฟอร์โรซีนพอลิเมอร์นั้นจะแตกต่างจากการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าทั่วไปที่มีระบบคอนจูเกชันในโครงสร้าง กล่าวคือ เฟอร์โรซีนพอลิเมอร์จะนำไฟฟ้าได้เนื่องจากการเคลื่อนที่แบบกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนจากไอออนของเหล็กตัวหนึ่งไปสู่ไอออนของเหล็กอีกตัวหนึ่งที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งจากหลักการดังกล่าวนี้เองทำให้สามารถนำมาใช้ประยุกต์ในการตรวจจับก๊าซได้ และเนื่องจากก๊าซแต่ละชนิดจะทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่แบบกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนจากหมู่เฟอร์โรซีนข้างเคียงได้แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการซึมผ่านได้ของก๊าซและความสามารถในการทำให้ไอออนของเหล็กนั้นเกิดความเสถียร นอกจากนี้โครงสร้างของพอลิเมอร์หลักที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์แต่ละชนิดไม่เท่ากันด้วย

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์ พิสูจน์เอกลักษณ์ และศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างของเฟอร์โรซีนคาร์บอกซีเมทิลเลเตตพอลิเมอร์และชนิดของก๊าซที่มีผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ ดังต่อไปนี้

1.4.1 พอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์และศึกษามี 4 ชนิด ได้แก่

1.4.1.1 พอลิไวนิลเบนซิลเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต

1.4.1.2 พอลิไวนิลเบนซิลเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต-โกล-เอทอโรกซิเอทิลเมทาคริเลต ในอัตราส่วนจำนวนโมลของไวนิลเบนซิลเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลตต่อเอทอโรกซิเอทิลเมทาคริเลต เป็น 75 ต่อ 25

1.4.1.3 พอลิไวนิลเบนซิลเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต-โกล-เอทอโรกซิเอทิลเมทาคริเลต ในอัตราส่วนจำนวนโมลของไวนิลเบนซิลเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลตต่อเอทอโรกซิเอทิลเมทาคริเลต เป็น 50 ต่อ 50

1.4.1.4 เฟอร์โรซีนคาร์บอกซีเมทิลเลเตตพอลิซิลโฟน

1.4.2 ก๊าซตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ชนิด ได้แก่

1.4.2.1	ไอระเหยของเมทานอล	ความเข้มข้นเท่ากับ	1.619×10^5	ppm
ที่อุณหภูมิ 28 °C โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวควบคุมความเข้มข้น ในระบบปิด				
1.4.2.2	ไอระเหยของอะซิโตน	ความเข้มข้นเท่ากับ	2.556×10^5	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 สามารถสังเคราะห์พอร์โรซินคาร์บอกซีเมทิลเลเตดพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบก๊าซได้

1.6.2 ได้ข้อมูลอิทธิพลของโครงสร้างพอร์โรซินคาร์บอกซีเมทิลเลเตดพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า

1.6.3 ได้ข้อมูลอิทธิพลของก๊าซ ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของพอร์โรซินคาร์บอกซีเมทิลเลเตดพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การนำไฟฟ้าของวัสดุ

การนำไฟฟ้าของวัสดุเกิดจากการไหลของตัวพาประจุ (Charge carriers) ที่มีอยู่ในเนื้อวัสดุนั้นๆ ตัวพาประจุในวัสดุได้แก่ อิเล็กตรอน เช่น ในวัสดุจำพวกโลหะ โพซิทีฟโฮล (positive holes) เช่น ในวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor materials) และ อนุภาคที่มีประจุ (ions) เช่น ในวัสดุเซรามิก

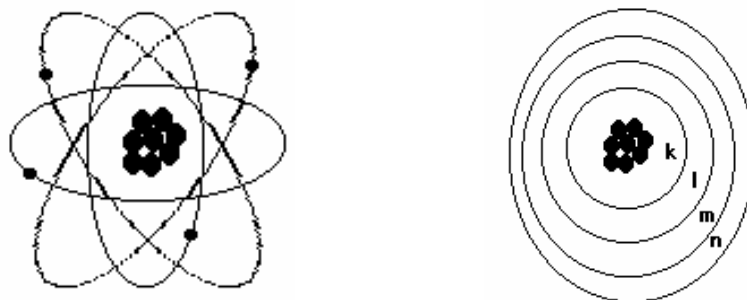
วัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีได้แก่ วัสดุที่มีสมบัติเป็นโลหะเพราะเนื้อโลหะมีอิเล็กตรอนที่สามารถไหลเคลื่อนนำไฟฟ้าได้ง่ายเมื่อถูกเหนี่ยวนำในสนามไฟฟ้าที่แม้ว่าจะมีขนาดน้อย ๆ ก็ตาม เช่น ทองแดง(Cu) จัดเป็นโลหะที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีมาก เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะสามัญ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้ทองแดงเป็นตัวอ้างอิงเมื่อต้องการเปรียบเทียบความสามารถในการนำไฟฟ้าของโลหะอื่น หน่วยที่ใช้เปรียบเทียบก็คือ เปอร์เซ็นต์ IACS ย่อมาจาก international annealed copper standard ซึ่งถือว่าทองแดงจะมีค่าของการนำไฟฟ้าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ [13]

2.1.1 การแบ่งประเภทการนำไฟฟ้าของวัสดุ

วัสดุนำไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทตามชนิดของตัวพาประจุ[14] ได้แก่

2.1.1.1 การนำไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Conduction)

สารทุกชนิดเมื่อทำให้มีขนาดเล็กที่สุดจะได้เป็นอะตอมของธาตุที่ประกอบกันเป็นสารนั้น อะตอมประกอบด้วยแกนกลางเป็นนิวเคลียสล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอน



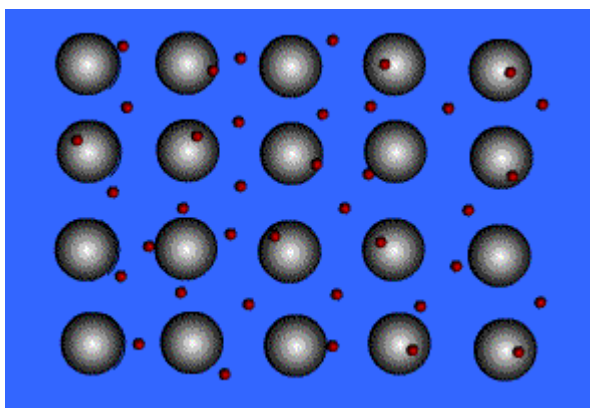
รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะตอม [15]

อิเล็กตรอนวิ่งวนรอบ ๆ นิวเคลียส เพราะนิวเคลียสมีประจุไฟฟ้าบวก อิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าลบ (1.6×10^{-19} คูลอมบ์) วงโคจรของอิเล็กตรอนเป็นรูปวงรีรอบนิวเคลียส จำนวนอิเล็กตรอนของอะตอมใช้จำแนกสารเป็นธาตุต่าง ๆ กัน เช่น ธาตุไฮโดรเจน มี 1 อิเล็กตรอน โคจร ฮีเลียม มี 2 อิเล็กตรอนโคจร ธาตุที่มีจำนวนอิเล็กตรอนมาก ๆ จะไม่มีวงโคจรทับซ้ำกัน แต่จะมีย่านวงโคจรของกลุ่มอิเล็กตรอนเรียกว่า เซลล์ ชื่อ k, l, m, n อิเล็กตรอนที่อยู่ภายใน ๆ ถูกยึดอยู่กับ นิวเคลียสด้วยแรงที่มาก ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุดซึ่งถูกยึดด้วยแรงที่น้อยจะหลุดออกจาก อะตอมได้ง่าย เรียกอิเล็กตรอนดังกล่าวว่า เวเลนซ์อิเล็กตรอน

สารตัวนำไฟฟ้า (Conductor) เช่น โลหะ สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีลักษณะเป็นเงาและมีความวาวเมื่อถูกแสง นอกจากนี้ยังสามารถดึงเป็นเส้น ดึงเป็นแผ่น หรือบิดงอได้โดยไม่แตกหัก ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญเหล่านี้ก็เป็นผลมาจากโลหะยึดกันด้วย พันธะโลหะ

ทฤษฎีที่ใช้อธิบายพันธะโลหะ

1. แบบจำลองทะเลอิเล็กตรอน (Electron sea model)



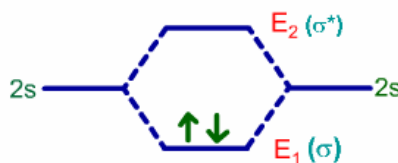
รูปที่ 2.2 แบบจำลองทะเลอิเล็กตรอน [15]

จากรูปแสดงลักษณะของพันธะโลหะ ทรงกลมใหญ่ คือ ไอออนบวกของโลหะ ทรงกลมเล็กที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา คือ อิเล็กตรอน เรามักเรียกแบบจำลองของการเกิดพันธะโลหะนี้ว่า ทะเลอิเล็กตรอนเนื่องจากในผลึกของโลหะมีจำนวนอิเล็กตรอนมหาศาลที่ไหลไปมาได้อย่างอิสระตลอดเวลา

โลหะมีค่าพลังงานไอออไนเซชันที่ต่ำ ดังนั้นจึงยึดอิเล็กตรอนวงนอกสุดไว้อย่างหลวมๆ ทำให้อิเล็กตรอนเหล่านี้เคลื่อนที่ไปมารอบ ๆ โลหะตลอดเวลาเหมือนกับว่าไม่ได้เป็นอิเล็กตรอนของอะตอมตัวใดตัวหนึ่ง แต่เป็นเสมือนกับว่าเป็นของอะตอมทุกตัว ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้ทำหน้าที่คล้ายซีเมนต์ ที่ช่วยยึดไอออนของโลหะที่มีประจุบวกให้อยู่ในตำแหน่งที่คงที่ การที่อิเล็กตรอนสามารถไหลไปมาในโลหะได้นี้ ทำให้โลหะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี (เมื่อมีสนามไฟฟ้ากระทำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก) และการที่อิเล็กตรอนทำหน้าที่คล้ายซีเมนต์นี้ (Cement effect) ทำให้โลหะแข็ง ผิวหน้าของโลหะเป็นมันวาวเนื่องจากโลหะสามารถดูดกลืน และคายพลังงานได้ในช่วงความยาวคลื่นที่ต่อเนื่องกัน ทั้งนี้เนื่องจากอิเล็กตรอนอยู่ไม่ประจำที่และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระจึงสามารถมีพลังงานเท่าไรก็ได้

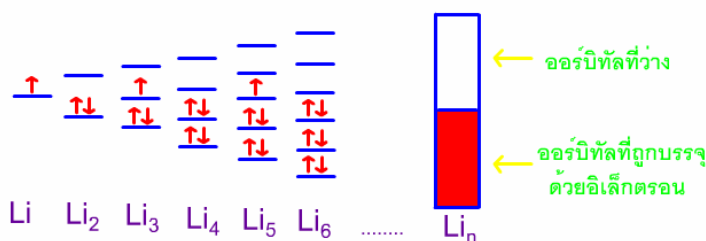
2. ทฤษฎีแถบพลังงาน (Band theory)

เมื่อออร์บิทัลอะตอมสองออร์บิทัลมารวมกันจะได้ออร์บิทัลโมเลกุลสองชนิดคือ ออร์บิทัลโมเลกุลแบบมีพันธะ (Bonding molecular orbital) และออร์บิทัลโมเลกุลแบบต้านพันธะ (Anti-bonding molecular orbital) ดังเช่นกรณีของ Li_2 ($\text{Li}: 1s^2 2s^1$) ซึ่งแสดงออร์บิทัลโมเลกุลที่ระดับ $2s$ ได้ดังนี้



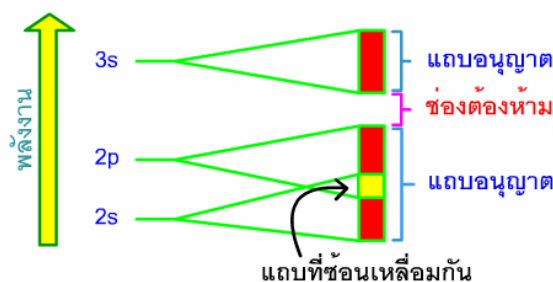
รูปที่ 2.3 ระดับชั้นพลังงานของอะตอมที่สร้างพันธะกัน [15]

เมื่อมีอะตอมมากขึ้นและจำนวนออร์บิทัลโมเลกุลมากขึ้น ระดับพลังงานจะใกล้ชิดกันมากขึ้นจนดูเหมือนว่าเป็นแถบต่อเนื่องกัน แถบดังกล่าวนี้ เรียกว่า แถบพลังงาน (Energy band) ดังรูป

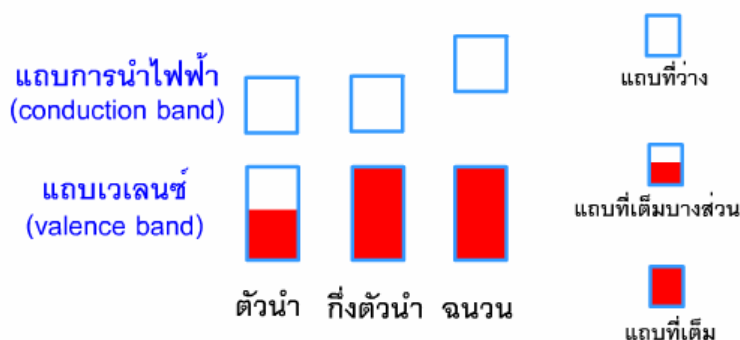


รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของอะตอมลิเทียม [15]

อิเล็กตรอนจะมีพลังงานค่าต่างๆได้ภายในแถบ หรือภายในแถบที่มีการซ้อนเหลื่อมกันเท่านั้น (กรณีที่ระดับพลังงานไม่ห่างกันมากแถบพลังงานสามารถซ้อนเหลื่อมกันได้) แถบพลังงานนี้เรียกว่า แถบอนุญาต (Allowed band) สำหรับช่องที่ว่างที่ไม่มีแถบพลังงานเรียกว่า ช่องต้องห้าม (Forbidden gap) ดังรูป



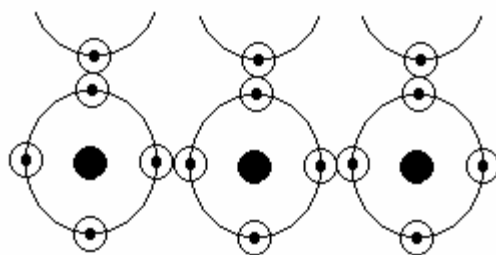
รูปที่ 2.5 แถบพลังงานที่เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของอิเล็กตรอน [15]



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบแถบพลังงานของวัสดุชนิดต่าง ๆ [15]

เมื่อพิจารณากรณีของสารตัวนำไฟฟ้า จะเห็นว่าแถบเวเลนซ์มีลักษณะเป็นแถบที่เต็มบางส่วนซึ่งก็คือ ในออร์บิทัลมีทั้งส่วนที่ว่างและส่วนที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ ซึ่งลักษณะเช่นนี้ เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า ก็จะสามารถเคลื่อนที่ไปอยู่ในส่วนที่ว่างของออร์บิทัลได้ ทำให้ไหลวนไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตาม นอกจากโลหะจะมีแถบเวเลนซ์ที่มีลักษณะเป็นแถบที่เต็มบางส่วนแล้ว ยังสามารถมีแถบที่เต็มแล้วแต่สามารถเกิดการซ้อนเหลื่อม กับแถบนำไฟฟ้า (แถบที่ว่าง) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าแต่ใกล้เคียงกันได้จึงทำให้ไหลวนไฟฟ้าได้ หรือแม้แต่แถบที่เต็มบางส่วนก็สามารถซ้อนเหลื่อมกับแถบนำไฟฟ้าที่มีระดับพลังงานสูงกว่าแต่ใกล้เคียงกันได้

สารกึ่งตัวนำกระแสไฟฟ้า (Semiconductor) สารกึ่งตัวนำได้แก่สารที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำกับฉนวน มีอิเล็กตรอนอยู่ที่เชลล์นอกสุดจำนวน 4 ตัว จากจำนวนมากที่สุดที่มีได้ 8 ตัว มีหลายสารที่รู้จักกันดี คือ ซิลิกอน และ เยอรมันเนียม เรียกสารเหล่านี้ว่า สารเตตระเวเลนซ์ และเรียกสารเหล่านี้ที่บริสุทธิ์ว่า สารกึ่งตัวนำอินทรีนซิคหรือสารกึ่งตัวนำเนื้อแท้ อะตอมของซิลิกอนและเยอรมันเนียมจะเกาะกับอะตอมข้างเคียงสร้างตัวเป็นผลึกโดยไม่มีอิเล็กตรอนตัวใดเหลือเป็นอิเล็กตรอนอิสระเลย หรือทุกอะตอมไม่มีอิเล็กตรอนขาดหรือเกินเลย



รูปที่ 2.7 โครงสร้างอะตอมของซิลิกอน [16]

กรณีของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ (แถบที่เต็มแล้ว) ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้เนื่องจากช่องต้องห้ามค่อนข้างกว้าง แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าทำการกระตุ้นอิเล็กตรอนโดยให้พลังงานที่สูงกว่าช่วงของช่องต้องห้าม เช่น ให้ความร้อน หรือฉายแสง อิเล็กตรอนก็จะสามารถเข้ามาอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยทั่วไปแล้วช่องต้องห้ามระหว่างแถบเวเลนซ์ และแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำมักจะไมกว้างนัก และโลหะกึ่งตัวนำมักจะเป็นตัวนำที่ดีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ชนิดของสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า

1. สารกึ่งตัวนำเนื้อแท้ (Intrinsic semiconductor)

ในสถานะที่เย็น สารกึ่งตัวนำเนื้อแท้ จะไม่มีอิเล็กตรอนอิสระเลย หรือพันธะระหว่างอะตอมไม่แตกจากกัน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้พันธะแตก มีอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระเกิดขึ้นเป็นคู่ ๆ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะมีคู่อิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ไปในเนื้อสารได้ เมื่อคู่ใดมาพบจะเกิดการรวมกันขึ้น

2. สารกึ่งตัวนำกระแสไฟฟ้าตัดแปลง (Extrinsic conductor)

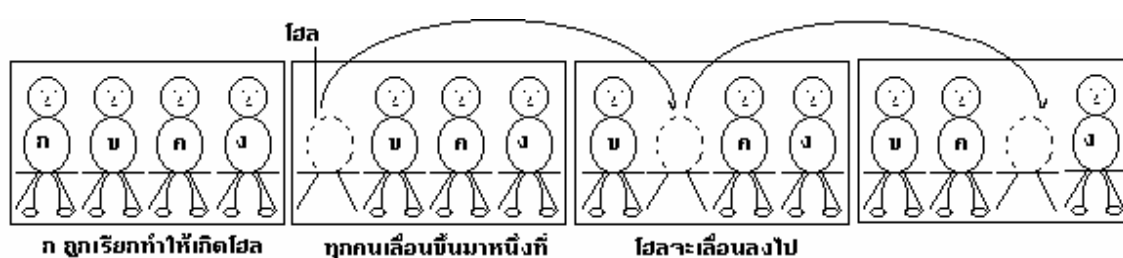
สารกึ่งตัวนำซิลิคอนหรือเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์เมื่อถูกใส่สารอื่นเจือปนลงไปจะทำให้เปลี่ยนเป็นสารกึ่งตัวนำตัดแปลง หรือสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินซิก มี 2 แบบคือ แบบเอ็นกับแบบพี

- สารกึ่งตัวนำแบบเอ็น (N-Type)

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ถูกเจือปนด้วยสารที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว หรือสารเพนเตเวเลนซ์ จะมีอิเล็กตรอน 4 ตัวของสารเจือปนสร้างพันธะกับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้น 1 ตัว เคลื่อนที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำตัดแปลงนี้ การที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่และอิเล็กตรอนมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ทำให้มีการเรียกสารกึ่งตัวนำตัดแปลงนี้ว่า แบบเอ็น วิธีเจือปนสารอื่นเข้าไปในสารกึ่งตัวนำเนื้อแท้เรียกว่า การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ (Doping) สารที่นำมาเจือปน เช่น อาเซนิก ฟอสฟอรัส และแอนติโมนี

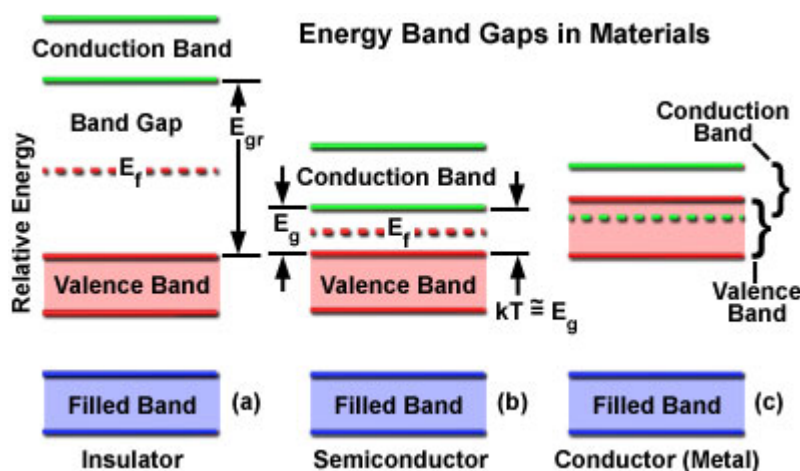
- สารกึ่งตัวนำแบบพี (P-Type)

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ถูกเจือปนด้วยสารที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว หรือสารไตรเวเลนซ์ จะมีอิเล็กตรอนเพียง 3 ตัวของสารเจือปนสร้างพันธะกับอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำทำให้ขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว สำหรับสร้างพันธะกับสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นโฮลขึ้นในสารกึ่งตัวนำตัดแปลงนี้ โฮลนี้เสมือนมีการเคลื่อนที่ได้เมื่อมีอิเล็กตรอนใกล้เคียงมาสร้างพันธะด้วย ทำให้อะตอมใกล้เคียงเกิดโฮลขึ้นโฮลเดิมจะหายไป การที่มีโฮลอิสระในเนื้อสาร และโฮลมีประจุไฟฟ้าบวกเพราะขาดอิเล็กตรอน ทำให้มีการเรียกสารกึ่งตัวนำตัดแปลงนี้ว่า แบบพี สารที่นำมาเจือปน ได้แก่ อลูมิเนียม แกลเลียม และโบรอน



รูปที่ 2.8 การเคลื่อนที่ของตัวพาหะพาประจุ [16]

สารที่เป็นฉนวน (Insulator) กรณียของ ฉนวน คล้ายๆกับกรณีของสารกึ่งตัวนำแต่ต่างกันตรงที่ ช่วงว่างต้องห้ามมีความกว้างมากดังนั้นไม่ว่าจะให้พลังงานไฟฟ้า ความร้อน หรือ แสง แก้อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนก็ยังไม่สามารถเข้ามาอยู่ในแถบตัวนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.9 การกระโดดข้ามชั้นพลังงานของวัสดุชนิดต่างๆ [17]

2.1.1.2 การนำไฟฟ้าแบบไอออน (Ionic Conduction)

เป็นการนำไฟฟ้าโดยที่มีอนุภาคหรือไอออนเป็นตัวพาประจุซึ่งจะเกิดกับวัสดุที่มีโครงสร้างทางเคมีที่มีประจุอยู่ในโครงสร้างและสามารถเกิดการกระโดดข้ามของไอออนหรืออิเล็กตรอนจากตำแหน่งหนึ่งไปสู่อีกตำแหน่งหนึ่งได้เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ไป

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) จะเป็นปฏิกิริยาคส่วนกลับกับค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ดังนี้

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

หน่วยของค่าสภาพการนำไฟฟ้าในหน่วย SI จะเรียกว่า Siemens (S) เมื่อทำการเปรียบเทียบสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุต่างๆ เป็นดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง [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	พอลิเอทธีลีน	1×10^{-14}
	พอลิสไตรีน	1×10^{-14}
	เพชร	1×10^{-14}

กฎของโอห์ม สามารถเขียนได้ในรูปของความหนาแน่นกระแส (Current density, 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

ที่อุณหภูมิห้อง นิวเคลียสที่มีประจุบวกนั้นจะเกิดการสั่น ในขณะที่อิเล็กตรอน ของตัวนำไฟฟ้านั้นสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อให้สนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไป อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป ซึ่งอาจพุงชนนิวเคลียสได้ทำให้มีความเร็วลดลง ดังนั้น ความเร็วโดยเฉลี่ยของอิเล็กตรอน หรือที่ เรียกว่าความเร็วลอยเลื่อน (v_d) นั้น จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ให้ ดังนี้

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

เมื่อ μ คือ สภาพเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน มีหน่วยเป็น $m^2/(V \cdot s)$
อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จะขึ้นอยู่กับจำนวน อิเล็กตรอนในหนึ่งหน่วยปริมาตร ค่าประจุของอิเล็กตรอน ($e = -1.60 \times 10^{-19} C$) และความเร็วลอย เลื่อนของอิเล็กตรอน (v_d) ดังนั้น ความหนาแน่นของกระแสจึงมีค่าเท่ากับ

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

นั่นคือ สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนอิเล็กตรอน ดังนี้

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

ดังนั้น จำนวนอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ นั่น จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการนำ ไฟฟ้าของวัสดุ

ในกรณีของตัวนำไฟฟ้านั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้การชนกันของ อิเล็กตรอนกับนิวเคลียสมีมากขึ้น ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนลดลง สภาพการ นำไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าจึงลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

ส่วนกรณีของสารกึ่งตัวนำนั้น เนื่องจากอิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นให้สามารถข้าม ชั้นของ Energy band gap, E_g ได้ต้องอาศัยพลังงานความร้อน โดยที่จำนวนอิเล็กตรอนดังกล่าวจะ เป็นปฏิภาคโดยตรงกับอุณหภูมิ ดังนี้

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

นั่นคือ สภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุจำพวกสารกึ่งตัวนำจึงเป็นปฏิภาคกับอุณหภูมิ
ดังนี้

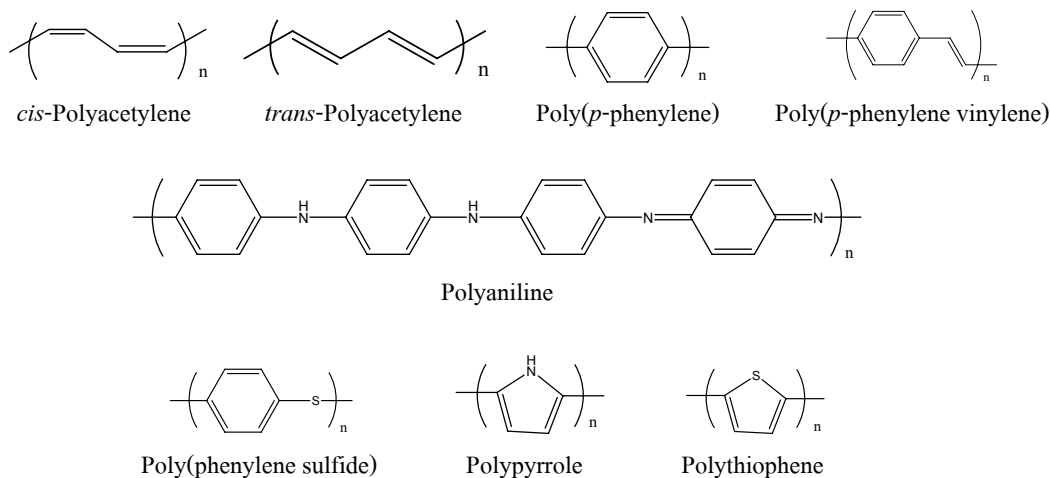
$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g/kT} \quad (9)$$

2.2 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า

ในปี ค.ศ. 2000 The Royal Swedish Academy of Sciences ได้มอบรางวัล Noble Prize ในสาขาเคมีให้กับนักวิทยาศาสตร์ 3 ท่าน [19] คือ ศาสตราจารย์ Alan J. Heeger แห่งมหาวิทยาลัย California ประเทศสหรัฐอเมริกา ศาสตราจารย์ Alan G. MacDiarmid แห่งมหาวิทยาลัย Pennsylvania ประเทศสหรัฐอเมริกา และศาสตราจารย์ Hideki Shirakawa แห่งมหาวิทยาลัย Tsukuba ประเทศญี่ปุ่น ในเรื่องการค้นคว้าและพัฒนาพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เป็นจุดเริ่มต้นให้นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้เข้ามาสนใจในวัสดุดังกล่าวนี้มากขึ้น และเอาไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่หลากหลาย

พอลิเมอร์นำไฟฟ้า คือ วัสดุที่มีระบบ Conjugation อยู่ในโมเลกุล ซึ่งเมื่อได้รับการ Doping ด้วยปฏิกิริยา Reduction หรือ Oxidation แล้ว จะช่วยทำให้การนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นได้ถึง 10^5 S/cm [20] วัสดุชนิดนี้แตกต่างจากพอลิเมอร์ที่มีการเติมโลหะหรือ Carbon black เนื่องจากพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารเหล่านี้จะนำไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่ออนุภาคของสารตัวเติมเหล่านี้เชื่อมต่อกันไปตลอดเท่านั้น

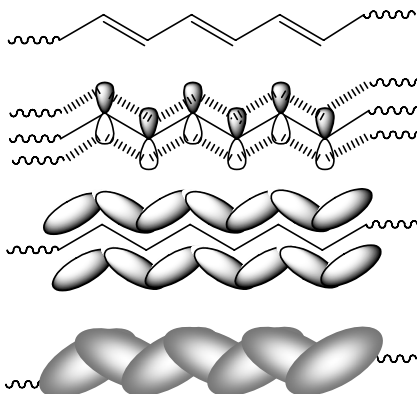
พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Heeger, MacDiarmid และ Shirakawa [21] สามารถนำมาใช้ได้ในการค้า เนื่องจากมีราคาถูก และสามารถเตรียมให้อยู่ในรูปของแผ่นฟิล์มได้ ตัวอย่างเช่น อนุพันธ์ของ Polythiophene จะถูกใช้เพื่อป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตในฟิล์มถ้ายรูป Polyaniline ที่ผ่านการ Doping แล้วจะใช้กันมากในการป้องกันไฟฟ้าสถิตบนพรมเช็ดเท้า หน้าจอคอมพิวเตอร์ และยับยั้งการสึกกร่อนของวัสดุได้ Polyphenylene vinylene จะใช้เป็นจอแสดงผลในหน้าจอโทรศัพท์เคลื่อนที่ Polydialkylfluorecene จะใช้ในการผลิตจอโทรทัศน์ ต่อมาได้มีการพัฒนานำพอลิเมอร์นำไฟฟ้านี้มาใช้เป็น Transistor, Light emitting diodes และ Laser และใช้ในการตรวจสอบสารเคมีในปัจจุบัน



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ π -Conjugated linear polymers

2.3 โครงสร้างและกลไกการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

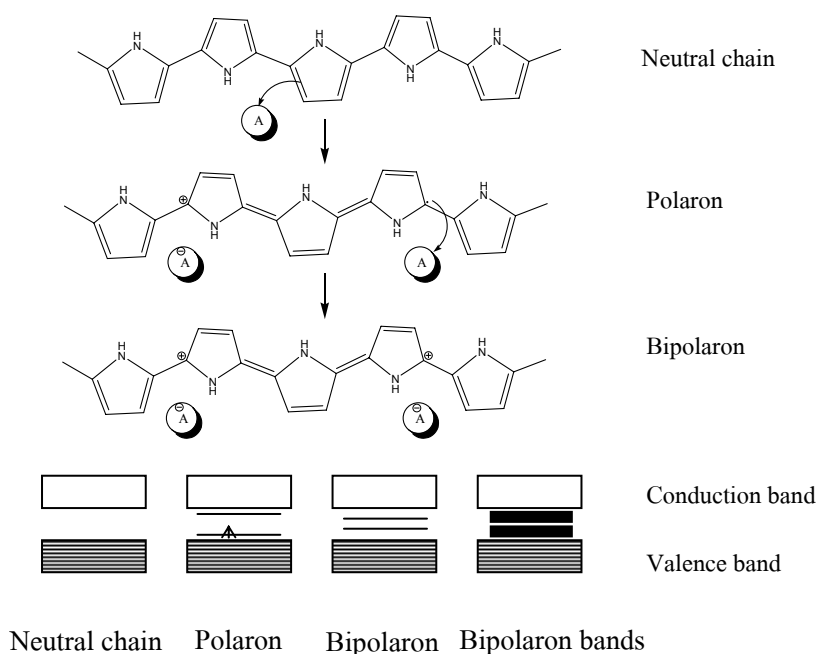
พอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะมีระบบ π -Conjugation อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล กล่าวคือ มีการซ้อนเหลื่อมกันของ p -Orbital ของแต่ละอะตอมส่งผลทำให้เกิดการ Delocalization ของ Electron ได้



รูปที่ 2.11 การซ้อนเหลื่อมของ Orbital ในระบบ Conjugation

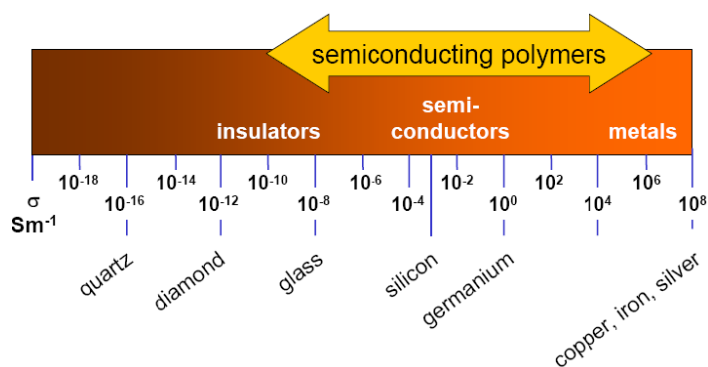
ปัจจัยของ Steric hindrance, Conformation และ Charge interaction เป็นตัวจำกัดความสามารถในการเกิด Delocalization ของ Electron ทำให้ต้องใช้พลังงานในการเกิด Delocalization ไม่เท่ากันของแต่ละโมเลกุล เช่นเดียวกับการเกิด Energy band gap ในสารกึ่งตัวนำจำพวก Si หรือ Ge พลังงานที่อยู่กึ่งกลางของ Band gap จะถูกเรียกว่า Fermi energy level ซึ่งจะสัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้าเคมีของอิเล็กตรอน

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 [22] 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 ให้สูงขึ้น จะทำให้เกิดเป็น Bipolarons ขึ้น ซึ่งทั้ง Polarons และ Bipolarons นี้ จะเคลื่อนที่พาประจุไปตลอดความยาวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยที่ Bipolarons นี้จะมีระดับพลังงานในช่วง Band gap ที่แคบกว่า ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า Polarons



รูปที่ 2.12 ระดับพลังงานของ Neutral chain, Polaron และ Bipolaron ของพอลิไพร์โรล

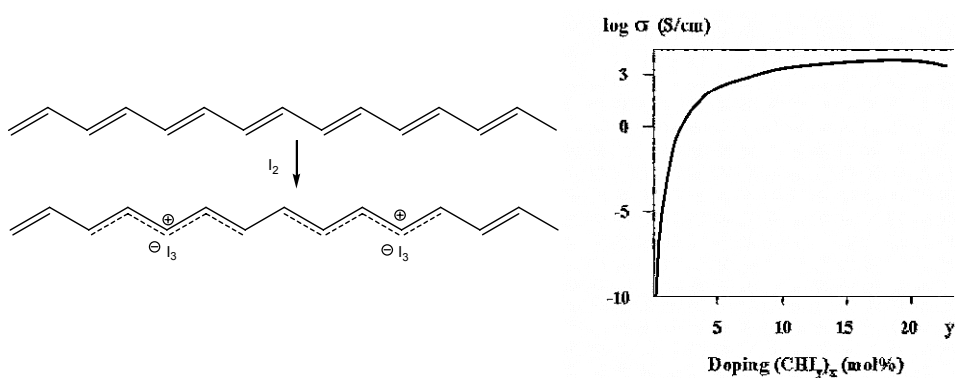
เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์กับวัสดุชนิดอื่นๆ พบว่า พอลิเมอร์นั้นสามารถเป็นได้ทั้งฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำไฟฟ้าที่ดีได้ ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง และปริมาณการ Doping



รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์กับวัสดุชนิดอื่นๆ [19]

การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ (Doping)

เป็นกระบวนการที่สามารถเปลี่ยนพอลิเมอร์จากเดิมที่เป็นฉนวน เช่น Polyacetylene ที่มีค่าการนำไฟฟ้าเพียง 0.1 S/cm ให้กลายเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ โดยการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถส่งผ่านประจุได้ ทำให้เกิดเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ผลของการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุของ Polyacetylene [19]

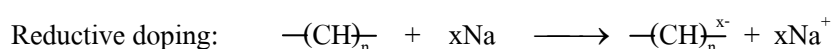
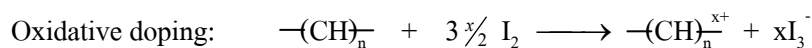
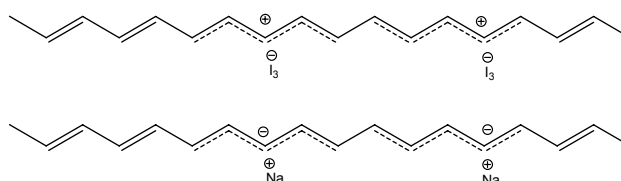
ในการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุได้นั้น สามารถก่อให้เกิดเป็นสารตัวนำไฟฟ้าได้ทั้งแบบชนิด P-type และ N-type ขึ้นอยู่กับชนิดของสาร Dopant ที่ใช้ ดังนี้

1. Electron-accepting species

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

2. Electron-donating species

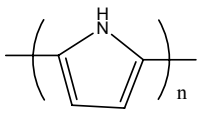
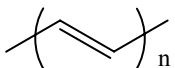
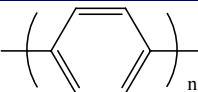
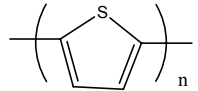
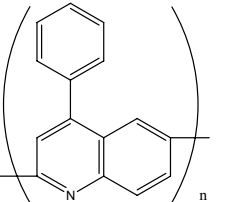
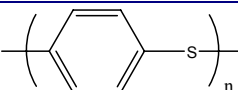
ก่อให้เกิดสารตัวนำไฟฟ้าแบบ N-type ด้วยการเกิดปฏิกิริยา Reduction กับโมเลกุลของพอลิเมอร์ สาร Dopant ในกลุ่มนี้ได้แก่ Sodium หรือ Potassium



รูปที่ 2.15 การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุของ Polyacetylene ด้วยสาร Dopant ชนิดต่างๆ

โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ผ่านการ Doping แล้ว จะมีประจุบวก (หรือลบ) เกิดขึ้นบนสายโซ่โมเลกุลหลัก โดยมีสาร Dopant ซึ่งมีประจุตรงข้ามกับโมเลกุลพอลิเมอร์ ทำหน้าที่เป็น Counterion ช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้าง เช่น Na^+ , K^+ , I_3^- , I_5^- , AsF_6^- , $FeCl_4^-$ พอลิเมอร์สามารถเปลี่ยนสภาพตัวเองจากสภาพที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เมื่อผ่านการ Doping กลับไปสู่สภาพที่เป็นฉนวนได้ เมื่อผ่านการ Undoping โดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไป คล้ายกับการชาร์ตแบตเตอรี่แบบชาร์ตไฟได้ พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเมื่อผ่านการ Doping แล้วจะมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังตัวอย่าง ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างและค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ผ่านการ Doping แล้ว [12]

พอลิเมอร์	โครงสร้าง	วิธีการ Doping	ค่าการนำไฟฟ้า (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

2.4 แนวคิดอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซหรือจมูกอิเล็กทรอนิกส์

อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซหรือที่เรียกว่า “จมูกอิเล็กทรอนิกส์” (Electronic Nose) [5] นั้น ได้แนวคิดมาจากการเลียนแบบระบบการรับกลิ่นของมนุษย์ เมื่อมีกลิ่นผ่านเข้าไปในโพรงจมูก ไปสัมผัสกับ Olfactory Epithelium ซึ่งเป็นบริเวณด้านบนของโพรงจมูก มีพื้นที่ประมาณ 5 cm² ที่มี Olfactory Neurons สามารถแยกแยะกลิ่นได้มากถึง 10³-10⁷ ชนิด ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าส่งไปยังสมองเพื่อการรับรู้

ในทำนองเดียวกัน “จมูกอิเล็กทรอนิกส์” ได้อาศัยหลักการดังกล่าว โดยจะมีตัวตรวจสอบที่ไวกับก๊าซแต่ละชนิด ทำให้สามารถตรวจสอบก๊าซที่แตกต่างกันได้ (คล้ายกับการพิมพ์ลายนิ้วมือ) ข้อดีของจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่เหนือกว่าจมูกมนุษย์ คือ สามารถตรวจสอบก๊าซได้ด้วยความเข้มข้นต่ำกว่าของมนุษย์จะสัมผัสได้ และสามารถตรวจสอบก๊าซที่ไม่มีกลิ่นได้อีกด้วย ปัจจุบันมีผู้ผลิตอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซขึ้นมาหลายชนิด ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ระดับความเข้มข้นของก๊าซต่างๆ ที่มนุษย์ และจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถรับรู้ได้ [5]

Volatile compound	Reported human threshold (ppm)	Electronic nose threshold (ppm)	Type of electronic nose
Ethyl acetate ^a	7–17 ^b	5–25	Fox 3000 (12 MOS)
Butyric acid ^a	0.4–10 ^b	<1	Fox 3000 (12 MOS)
Diacetyl ^a	$(4-15) \times 10^{-3}$ ^b	$(50-100) \times 10^{-3}$	Fox 3000 (12 MOS)
<i>n</i> -Hexanal ^a	$(10-50) \times 10^{-3}$	$(10-50) \times 10^{-3}$	Fox 3000 (12 MOS)
Methional ^a	$(2-50) \times 10^{-3}$	$(10-50) \times 10^{-3}$	Fox 3000 (12 MOS)
Furanol ^a	$(20-40) \times 10^{-6}$ ^b	$(50-100) \times 10^{-6}$	Fox 3000 (12 MOS)
<i>n</i> -Nonane ^c	0.2–7	<0.2	20 CP composite
<i>n</i> -Octane ^c	3–9	0.6	20 CP composite
<i>n</i> -Heptane ^c	7–13	<2	20 CP composite
<i>n</i> -Hexane ^c	13–30	<10	20 CP composite
<i>n</i> -Pentane ^c	20–50	40	20 CP composite
1-Pentanol ^c	0.13–1.3	<0.06	20 CP composite
1-Butanol ^c	0.2–1.3	0.3	20 CP composite
1-Butanol ^d	0.7	-	Aromascan (32 CP)
1-Butanol ^d		-	Fox 3000 (12 MOS)
1-Butanol ^d		+	6 Taguchi (SnO ₂)
1-Propanol ^c	0.9–1.9	1.3	20 CP composite
Ethanol ^c	5–500	2	20 CP composite
Methanol ^c	13–600	3	20 CP composite
Acetone ^d	141	-	Aromascan (32 CP)
Acetone ^d		+	Fox 3000 (12 MOS)
Acetone ^d		+	6 Taguchi (SnO ₂)
Ethanethiol ^d	0.1×10^{-3}	-	Aromascan (32 CP)
Ethanethiol ^d		-	Fox 3000 (12 MOS)
Ethanethiol ^d		-	6 Taguchi (SnO ₂)

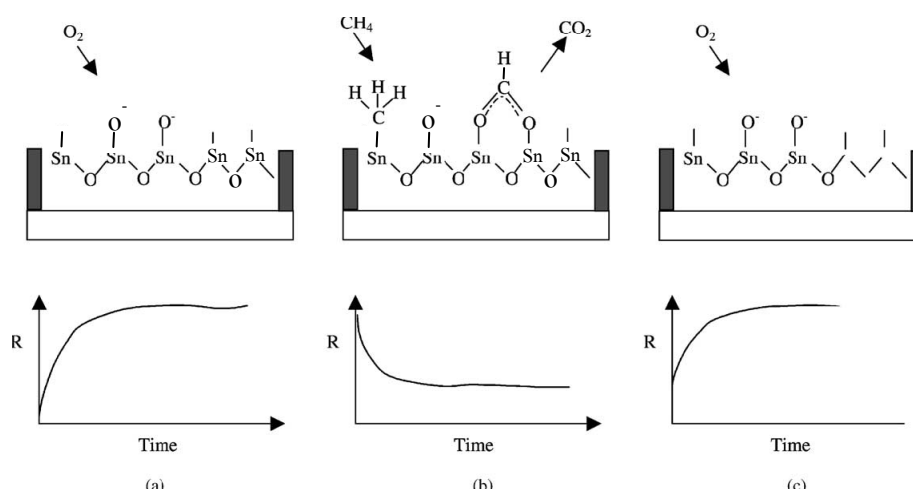
- หมายเหตุ
- + คือ สามารถตรวจสอบได้เช่นเดียวกับมนุษย์
 - คือ ไม่สามารถตรวจสอบได้เมื่อสัญญาณตอบสนองน้อยกว่าสามเท่าของสัญญาณ Back ground ที่ความเข้มข้นเดียวกันกับมนุษย์
 - a ความเข้มข้นในน้ำ
 - b วิเคราะห์ด้วยการดมกลิ่นโดยตรง (Orthonasal analysis)
 - c ความเข้มข้นในอากาศ
 - d ความเข้มข้นในเฟสไอที่สมดุลกับเฟสของเหลวที่อุณหภูมิ 22.5-25°C

2.5 เทคโนโลยีของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซ

ตัวตรวจสอบก๊าซในช่วงแรกๆ จะอยู่ในรูปของแข็ง (Solid State Sensors) ที่มีข้อเสียคือ ไม่มีความจำเพาะต่อก๊าซที่ตรวจสอบ ในทศวรรษ 1980s จึงได้เริ่มมีการนำ Solid State Sensors หลายๆ ชนิดที่มีความไวต่อก๊าซต่างกันมารวมเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถตรวจสอบก๊าซได้ดีขึ้น [5] ปัจจุบันตัวตรวจสอบก๊าซในเชิงการค้าได้ผลิตขึ้นมาในหลายๆรูปแบบ ดังนี้

1. Metal Oxide Sensors (MOS)

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



รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของ MOS [5]

- สถานะเริ่มต้นในอากาศปกติที่อุณหภูมิทดสอบ จะได้ค่าความต้านทานเริ่มต้น
- ก๊าซตัวอย่างเข้ามาสัมผัสทำปฏิกิริยากับอะตอมของออกซิเจนบนผิวของโลหะออกไซด์ ทำให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป
- การทำ Regenerated เพื่อนำมาใช้ตรวจสอบครั้งต่อไปโดยใช้อากาศปกติ

เมื่อนำไปตรวจสอบกับก๊าซตัวอย่าง ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนที่พื้นผิวโลหะออกไซด์ได้ จะทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 2.16 ทำให้สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบก๊าซได้

2. Thickness-Shear Mode (TSM)

เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย Piezoelectric Quartz Crystal ที่ติดอยู่บนอิเล็กโทรด เคลือบทับด้วยวัสดุที่มีความว่องไวต่อก๊าซ การดูดซับก๊าซลงบนวัสดุดังกล่าวนี้จะทำให้เพิ่มน้ำหนักของอุปกรณ์ ส่งผลทำให้ความถี่ในการสั่นสะเทือนเปลี่ยนแปลงไป อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซในกลุ่มนี้ได้แก่ Quartz Crystal Microbalance (QCM), Bulk Acoustic Wave (BAW), และ Surface Acoustic Wave (SAW) โดยวัสดุที่ใช้ในการเคลือบนั้นมีหลายชนิด เช่น พอลิเมอร์นำไฟฟ้า สารชีวะโมเลกุล หรือโลหะ นอกจากนี้แล้วยังสามารถเพิ่มความจำเพาะให้มากขึ้นได้ โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเข้าไปในโมเลกุลเช่นเดียวกับกรณีของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

3. Mass Detection Sensors (MS)

ถึงแม้ว่าจะไม่ใช่อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซโดยตรง แต่สามารถประยุกต์ใช้ตรวจสอบกลิ่นได้ โดยใช้หลักการของ 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 ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซตัวอย่างแล้ว ค่าการนำไฟฟ้าของตัวตรวจสอบก๊าซนั้นจะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งโดยปกติแล้ว ตัวตรวจสอบก๊าซนี้จะว่องไวต่อก๊าซที่มีความเป็นขั้ว แต่สามารถปรับปรุงความจำเพาะให้ดีขึ้นได้โดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ว่องไวต่อสารที่ไม่มีขั้วได้ นอกจากนี้แล้ว พอลิเมอร์ที่ไม่นำไฟฟ้าสามารถนำมาใช้ตรวจสอบก๊าซได้ โดยการใช้สารเติมแต่งที่นำไฟฟ้าได้ เช่น Carbon black ซึ่งมีหลักการทำงานคือ เมื่อก๊าซตัวอย่างแพร่ผ่านเข้าไปจะทำให้เพิ่มระยะห่างระหว่างโมเลกุลของ Carbon black ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยปกติแล้ว ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีความชื้นสูง และอุณหภูมิใช้งานต่ำ [8] ดังนั้นจึงสามารถใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าในการตรวจสอบความชื้นได้ ข้อดีของตัวตรวจสอบก๊าซที่ผลิตจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้า คือ สามารถใช้งานได้ทั้งอุณหภูมิห้อง และสามารถตรวจสอบก๊าซได้แม้มีความเข้มข้นของก๊าซต่ำ มีการตอบสนองและคืนกลับสู่สภาวะปกติได้รวดเร็ว

ปัจจุบันมีความพยายามที่จะผลิตอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซในเชิงการค้า โดยการรวมเอาอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซที่ผลิตจากวัสดุต่างๆ เข้าไว้ด้วยกัน เช่น MOS กับ CP, MOS กับ MS เป็นต้น

2.6 การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ในการตรวจสอบก๊าซ

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าสามารถนำมาใช้ตรวจสอบก๊าซได้ เนื่องจากมีสมบัติแสดงความเป็นกรด-เบสหรือถูกออกซิไดซ์ได้ โดยการตอบสนองต่อก๊าซนั้น สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ Glass transition ความรู้เกี่ยวกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีมากกว่า 30 ปีมาแล้ว โดยที่ Polyacetylene นั้นถือว่าเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดแรกๆ ที่เริ่มค้นคว้ากัน

มีการนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้าไปใช้ในงานตรวจสอบก๊าซได้หลายชนิด ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีความจำเพาะกับก๊าซแตกต่างกัน พอสรุปได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.4 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-isopolymolybdc acid nanocomposite	Resistance increases with NH ₃ concentration and is reversible up to 100 ppm 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-isopolymolybdc 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

ตารางที่ 2.4 พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ [10] (ต่อ)

Gas	Device/techniques/principles	Polymer	Sensor characteristics
	Amperometric gas sensor	SPE (10% PVC, 3% tetrabutyl ammonium hexafluorophosphate, 87% 2-nitrophenyl octyl ether)	Sensitivity is 277 nA/ppm, recovery time is 19s
NO	Amperometric gas sensor	Polydimethylsiloxane (PDMS)	Shows sensitivity to 20 nM gas, high performance characteristics in terms of response time and selectivity
O₂	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 (3oh)
SO₂	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
H₂S	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 แล้ว จะมี Hole เป็นพาหะในการพาประจุ ซึ่งเมื่อสัมผัสกับก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็น Electron donor ที่ดี เช่น Methanol จะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากก๊าซไปเติมเต็ม Hole ที่ยังขาดอิเล็กตรอนอยู่ ทำให้มีตัวพาหะในการพาประจุลดจำนวนลง ค่าความต้านทานจึงมีค่ามากขึ้น ดังนั้นเมื่อทำการวัดค่าความต้านทานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบก๊าซก่อนและหลังการทดสอบจะทำให้ทราบถึงความไวของอุปกรณ์ตรวจสอบที่เตรียมได้ ดังนี้

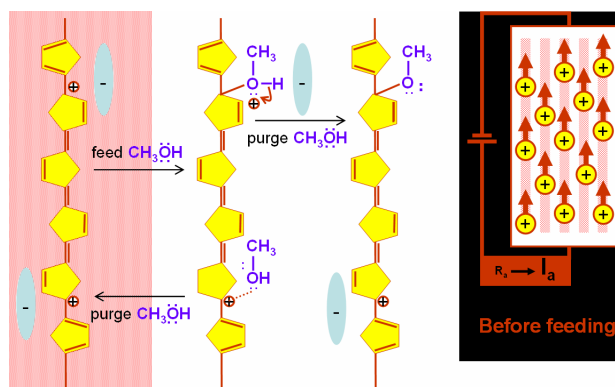
$$\% \text{Sensitivity } (\%S) = \frac{(R_g - R_a)}{R_a} \times 100 \quad (10)$$

เมื่อ R_a คือ ค่าความต้านทานเริ่มต้นของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซก่อนที่จะมีการสัมผัสก๊าซตัวอย่าง และ R_g คือ ค่าความต้านทานเมื่อผ่านก๊าซตัวอย่างแล้ว ของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซ

ขั้นตอนการตรวจวัดค่าความไวของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซ

1. การวัดค่าความต้านทานเริ่มต้น (R_a)

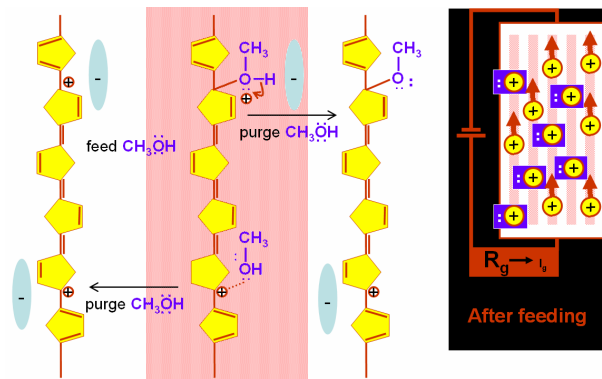
ค่าความต้านทานเริ่มต้น (R_a) ที่วัดได้จะมีค่าน้อยเนื่องจากจำนวน Hole ที่เป็นตัวพาหะนำพาประจุยังมีปริมาณมากอยู่



รูปที่ 2.17 การวัดค่าความต้านทานเริ่มต้น (R_a)

2. การวัดค่าความต้านทานภายหลังการสัมผัสก๊าซ (R_g)

ค่าความต้านทานภายหลังการสัมผัสก๊าซ (R_g) ที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจำนวน Hole ที่เป็นตัวพาหะนำพาประจุมีปริมาณที่น้อยลง



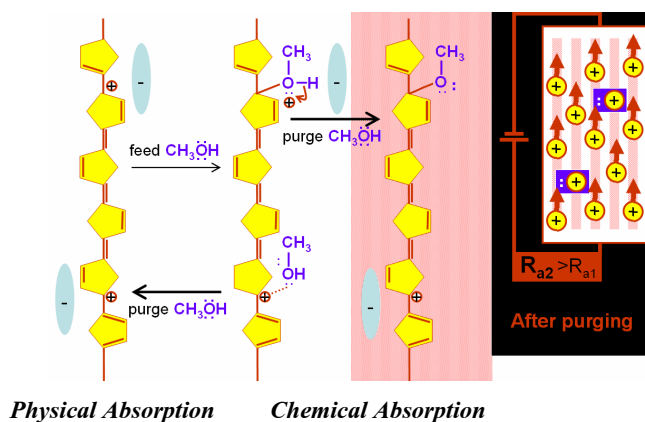
รูปที่ 2.18 การวัดค่าความต้านทานภายหลังการสัมผัสก๊าซ (R_g)

สิ่งที่เกิดขึ้นภายหลังการที่อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซได้สัมผัสก๊าซในครั้งแรกแล้ว พบว่า ค่าความต้านทานจะไม่กลับมาเท่าเดิมเหมือนเมื่อครั้งก่อนการทดลอง สาเหตุเนื่องจากการเกิด Absorption ของก๊าซบนผิวของพอลิเมอร์โรลนั้นสามารถเกิดขึ้นได้สองลักษณะ คือ

Physical Absorption: โมเลกุลของก๊าซจะถูกดูดซับบนผิวพอลิเมอร์ โดยที่ไม่เกิดพันธะเคมีขึ้น ดังนั้นภายหลังการปล่อยก๊าซออก โมเลกุลของก๊าซจึงสามารถหลุดออกจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้โดยง่าย

Chemical Absorption: โมเลกุลของก๊าซจะถูกดูดซับบนผิวพอลิเมอร์ โดยที่เกิดพันธะเคมีขึ้น ดังนั้นภายหลังการปล่อยก๊าซออก โมเลกุลของก๊าซจึงไม่สามารถหลุดออกจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้และยึดติดอยู่กับโมเลกุลของพอลิเมอร์ตลอด

ดังนั้น ผลจาก Chemical Absorption จึงทำให้ปริมาณ Hole ที่เหลืออยู่มีน้อยลงเมื่อเทียบกับก่อนการทดลอง แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นในการทดสอบครั้งแรกเท่านั้น เนื่องจากบริเวณที่ว่องไวเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลของก๊าซได้นั้นจะเกิดปฏิกิริยาจนหมดบริเวณที่ว่องไว จนไม่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นอีก



รูปที่ 2.19 การเกิด Physical และ Chemical Absorption ของโมเลกุลก๊าซบนผิวของพอลิไพร์โรล

2.8 ผลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อการทำงานของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

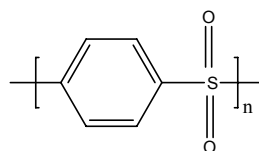
Hee-Kwon Jun และคณะ [7] ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้น ในช่วงการเตรียมอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซที่เตรียมจากพอลิไพร์โรล จากผลการทดลองพบว่าในช่วงการเตรียมชิ้นงานนี้การปรับปรุงสภาพของพอลิไพร์โรลก่อนนั้นจะส่งผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซ โดยที่เมื่อทำการจุ่มแช่พอลิไพร์โรลในสารละลายเมทานอลเพื่อชะล้างแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตและกรดโคเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค ส่วนเกินออกก่อนจะทำให้อุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซมีระยะเวลาในการตอบสนองต่อก๊าซที่แพร่ผ่านและระยะเวลาในการคืนตัวเมื่อปลอดจากก๊าซได้รวดเร็วมากขึ้น และช่วยเพิ่มเสถียรภาพในการตรวจสอบก๊าซให้คงที่อยู่ที่ได้แม้เวลาจะผ่านไปนานกว่า 3 เดือน ในขณะที่ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพ พบว่าเมื่อให้ความร้อนพอลิไพร์โรลก่อนจะทำให้ค่าความต้านทานในตอนต้นลดลงและช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซให้สามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น

Jae-hyun Cho และคณะ [8] ทำการศึกษาในส่วนในช่วงการนำไปใช้งาน พบว่าค่าความต้านทานเริ่มต้นของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้น และอุณหภูมิที่นำไปใช้งานมีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบความว่องไวที่มีต่อก๊าซเมทานอล ไอน้ำ และก๊าซผสมระหว่างเมทานอลและไอน้ำ พบว่าการตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซที่มีต่อก๊าซเมทานอลและไอน้ำมีความแตกต่างกัน เนื่องจากเมื่อรวมค่าความว่องไวที่วัดได้จากการทดสอบก๊าซที่ละชนิดเข้าด้วยกันจะไม่เท่ากับค่าความว่องไวที่วัดได้จากการทดสอบก๊าซผสมพร้อมกันทั้งสองชนิด แสดงให้เห็นว่าก๊าซเมทานอลและไอน้ำนั้นเมื่อผสมกันแล้วจะเกิดการแข่งขันกันเพื่อแย่งกันถูกดูดซับลงบนพื้นผิวของอุปกรณ์ตรวจสอบก๊าซ ค่าความว่องไวของอุปกรณ์ตรวจสอบ

ก๊าซจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อนำไปใช้งานในสภาวะที่มีระดับความชื้นและอุณหภูมิต่ำ ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซและระยะเวลาที่ใช้ในการกลับสู่สภาวะเดิมจะใช้เวลาน้อยที่สุด เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิ 25 °C ความสามารถในการตรวจสอบก๊าซเมื่อนำไปใช้งานหลายครั้ง พบว่าสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีที่ระดับความชื้นที่แตกต่างกัน และอุณหภูมิใช้งานที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 25°C

2.9 พอลิซัลโฟนและอนุพันธ์

พอลิซัลโฟนจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกวิศวกรรม ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง Poly (*p*-phenylene sulfone) ที่จัดเป็น Aromatic Polysulfone อย่างง่ายนั้น จะไม่แสดงสมบัติความเป็นเทอร์โมพลาสติก แต่จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 °C [23]



รูปที่ 2.20 โครงสร้าง Poly(*p*-phenylene sulfone)

ในการปฏิบัติเพื่อให้สามารถขึ้นรูปพอลิซัลโฟนได้ จะต้องทำให้โครงสร้างโมเลกุลของพอลิซัลโฟนมีความอ่อนตัวมากขึ้น ด้วยการทำให้มี Ether linkage ขึ้นภายในโครงสร้าง ทำให้อุณหภูมิ Glass transition ลดต่ำลง ตัวอย่างพอลิซัลโฟนในทางการค้า แสดงได้ดังตารางที่ 2.5

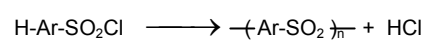
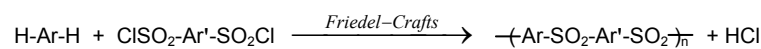
ตารางที่ 2.5 พอลิซัลโฟนในเชิงการค้า [23]

ที่	โครงสร้าง	T _g (°C)	ชื่อทางการค้า
1		190	Udel (Union Carbide)
2		285	Astrel (3M Corp.)
3		230	Victrex (ICI)
4		250	Polyether-Sulfone 720P (ICI)
5		-	Rodel (Union Carbide)

พอลิซัลโฟนในเชิงการค้าตัวแรกมีชื่อว่า Udel ของบริษัท Union Carbide เป็น Bakelite Polysulfone ซึ่งนิยมนำไปใช้ในช่วงอุณหภูมิ 150-170°C ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการฉีด ในปี ค.ศ.1967 Minnesota Mining and Manufacturing (3M) ได้ผลิต Astrel 360 ที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง ปี ค.ศ.1972 ICI ได้ผลิต Polyethersulfone ในชื่อ Victrex และ Polyethersulfone 720 P ปลายปี ค.ศ.1970 Union Carbide ผลิต Rodel ที่มีความเหนียวสูงขึ้น

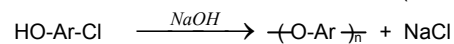
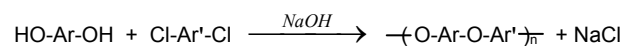
วิธีการที่ใช้ในการสังเคราะห์ Polysulfone สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่

วิธีที่ 1 ปฏิกิริยา Polysulfonation



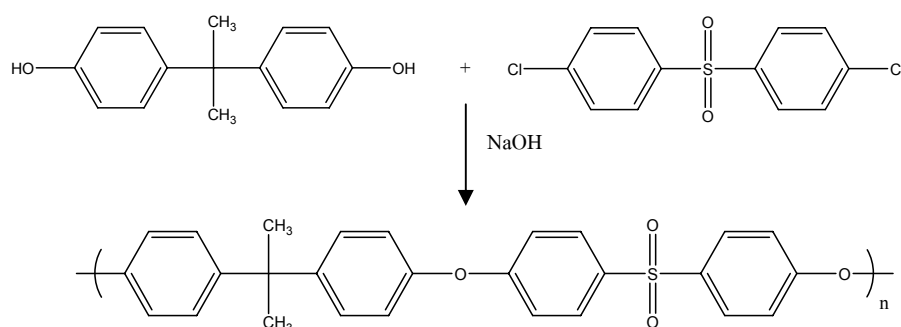
หมู่ Ar และ Ar' นี้ จะมี ether oxygen อยู่ด้วย ซึ่งหากว่า Ar = Ar' แล้ว ทั้ง 2 วิธีนี้จะให้สารผลิตภัณฑ์เดียวกัน

วิธีที่ 2 ปฏิกิริยา Polyetherification



หมู่ Ar และ Ar' จะมี sulfone group อยู่ด้วย ซึ่งหากว่า Ar = Ar' แล้วทั้ง 2 วิธีนี้จะให้ผลิตภัณฑ์เดียวกัน

ตัวอย่างเช่น Udel-type ซึ่งสามารถเตรียมได้จาก 4,4'-dichlorodiphenylsulfone กับเกลือ Alkali ของ Bisphenol A ในตัวกลางที่มีขั้วสูง เช่น Dimethyl sulfoxide หรือ Sulfolane



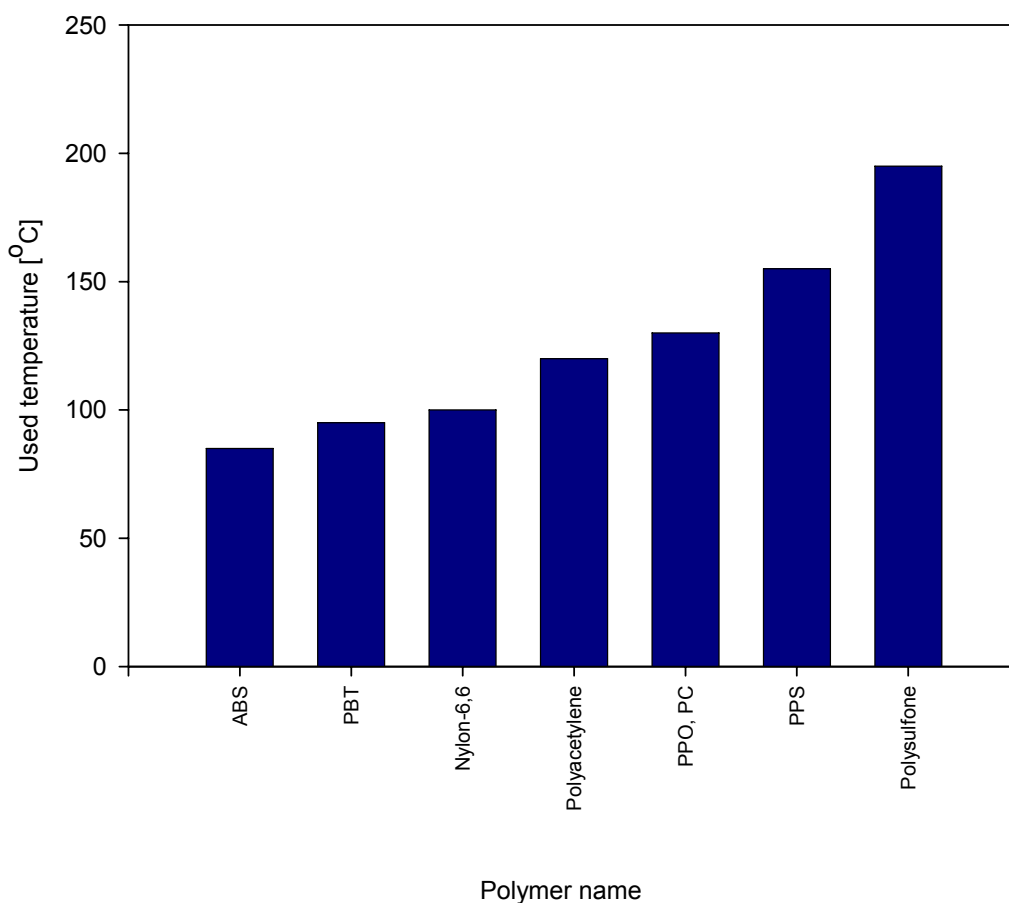
รูปที่ 2.21 การสังเคราะห์ Udel-type ของ Union Carbide

สมบัติของพอลิซัลโฟน

ถึงแม้ว่าโครงสร้างโมเลกุลของพอลิซัลโฟนจะเป็นเส้นตรง แต่มีความ Stiffness สูง ดังนั้นจึงเกิดการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบได้ยาก จึงมีสมบัติเป็น Amorphous ที่มีอุณหภูมิ Glass transition สูง ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปมากกว่า 300°C

พอลิซัลโฟนในเชิงการค้าจะทนทานต่อสารละลายกรดและเบส แต่จะไม่ทนทานต่อกรดซัลฟิวริกเข้มข้น และเนื่องจากมีความเป็นขั้วสูง ดังนั้นจึงไม่ละลายในสารละลายอลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน แต่จะละลายได้ดีใน Dimethyl formamide และ Dimethyl acetamide

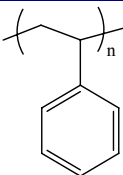
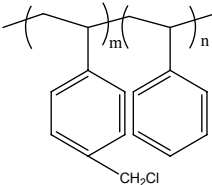
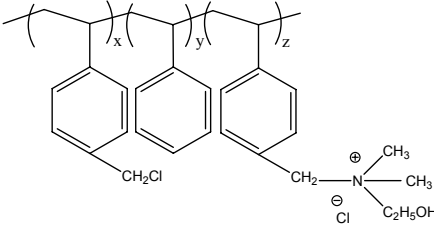
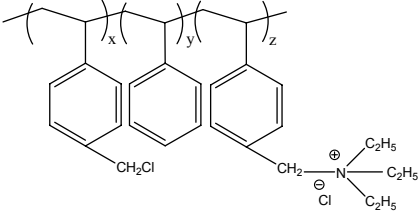
นอกจากนี้ พอลิซัลโฟนยังมีความเสถียรทางเคมีสูง ไม่เกิด Cross-linking แม้จะได้รับความร้อนหรือการฉายแสง เนื่องจากโครงสร้างที่สามารถเกิด Resonance ได้นั่นเอง อุณหภูมิการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกวิศวกรรมอื่นๆ เป็นดังนี้



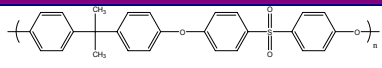
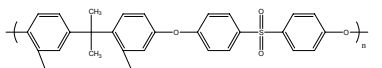
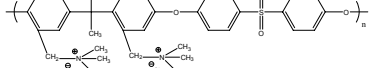
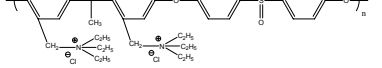
รูปที่ 2.22 อุณหภูมิการใช้งานของวัสดุเทอร์โมพลาสติกทางวิศวกรรม [23]

Gabriela Lisa และคณะ[24] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิสไตรีน พอลิซัลโฟน และอนุพันธ์ พบว่าอิทธิพลทางโครงสร้างมีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ เช่น เมื่อทำ Chloromethylation จะทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ลดลง โดยในกลุ่มของพอลิสไตรีนความเสถียรทางความร้อนเรียงตามลำดับได้ดังนี้ Polystyrene(PS)> Poly(p-chloromethyl)styrene(CMPS) > อนุพันธ์ของพอลิสไตรีนที่มีหมู่ 2-(N,N-dimethyl amino)ethanol (HAPS) > อนุพันธ์ของพอลิสไตรีนที่มี Triethylamine (APS) และสำหรับพอลิซัลโฟนเป็นดังนี้ Polysulfone(PSF) > Chloromethylated Polysulfone (CMPSF) > อนุพันธ์ของพอลิซัลโฟนที่มีหมู่ 2-(N,N-dimethylamino)ethanol (HAPSF) > อนุพันธ์ของพอลิซัลโฟนที่มี Triethylamine (APSF)

ตารางที่ 2.6 ข้อมูล Thermogravimetric analysis ของ Polystyrene และอนุพันธ์ [24]

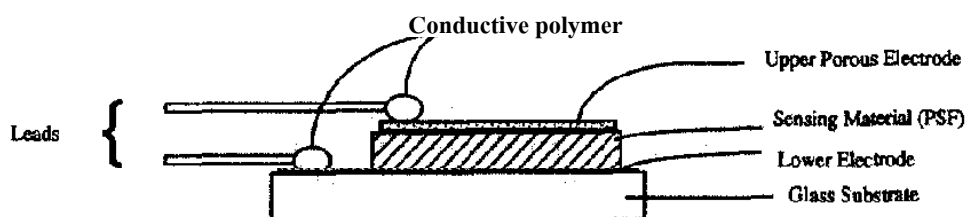
ชื่อ	โครงสร้าง	ช่วงอุณหภูมิ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) และน้ำหนักที่หายไป (%)		
		ช่วงที่1	ช่วงที่2	ช่วงที่3
PS			$\Delta T = 310-570^\circ\text{C}$	
			W = 100%	
CMPS		$\Delta T_I = 305-427^\circ\text{C}$	$\Delta T_{II} = 427-517^\circ\text{C}$	$\Delta T_{III} = 517-760^\circ\text{C}$
		W _I = 23.2%	W _{II} = 18.8%	W _{III} = 57.9%
HAPS		$\Delta T_I = 217-395^\circ\text{C}$	$\Delta T_{II} = 395-570^\circ\text{C}$	$\Delta T_{III} = 570-775^\circ\text{C}$
		W _I = 33.8%	W _{II} = 27.8%	W _{III} = 38.4%
APS		$\Delta T_I = 160-277^\circ\text{C}$	$\Delta T_{II} = 277-500^\circ\text{C}$	$\Delta T_{III} = 500-800^\circ\text{C}$
		W _I = 20.2 %	W _{II} = 37.7%	W _{III} = 42.1 %

ตารางที่ 2.7 ข้อมูล Thermogravimetric analysis ของ Polysulfone และอนุพันธ์ [24]

ชื่อ	โครงสร้าง	ช่วงอุณหภูมิ ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) และน้ำหนักที่หายไป ($W, \%$)		
		ช่วงที่1	ช่วงที่2	ช่วงที่3
PSF		$\Delta T_I = 490-640 ^\circ\text{C}$		$\Delta T_{II} = 640-900 ^\circ\text{C}$
		$W_I = 49.6\%$		$W_{II} = 50.4\%$
CMPSF		$\Delta T_I = 340-440 ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{II} = 440-530 ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{III} = 530-750 ^\circ\text{C}$
		$W_I = 9.4\%$	$W_{II} = 26.6\%$	$W_{III} = 64.1\%$
HAPSF		$\Delta T_I = 170-390 ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{II} = 390-550 ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{III} = 550-820 ^\circ\text{C}$
		$W_I = 25.2\%$	$W_{II} = 19.8\%$	$W_{III} = 54.9\%$
APSF		$\Delta T_I = 160-400 ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{II} = 400-600 ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{III} = 600-835 ^\circ\text{C}$
		$W_I = 27.9 \%$	$W_{II} = 25.2\%$	$W_{III} = 46.9 \%$

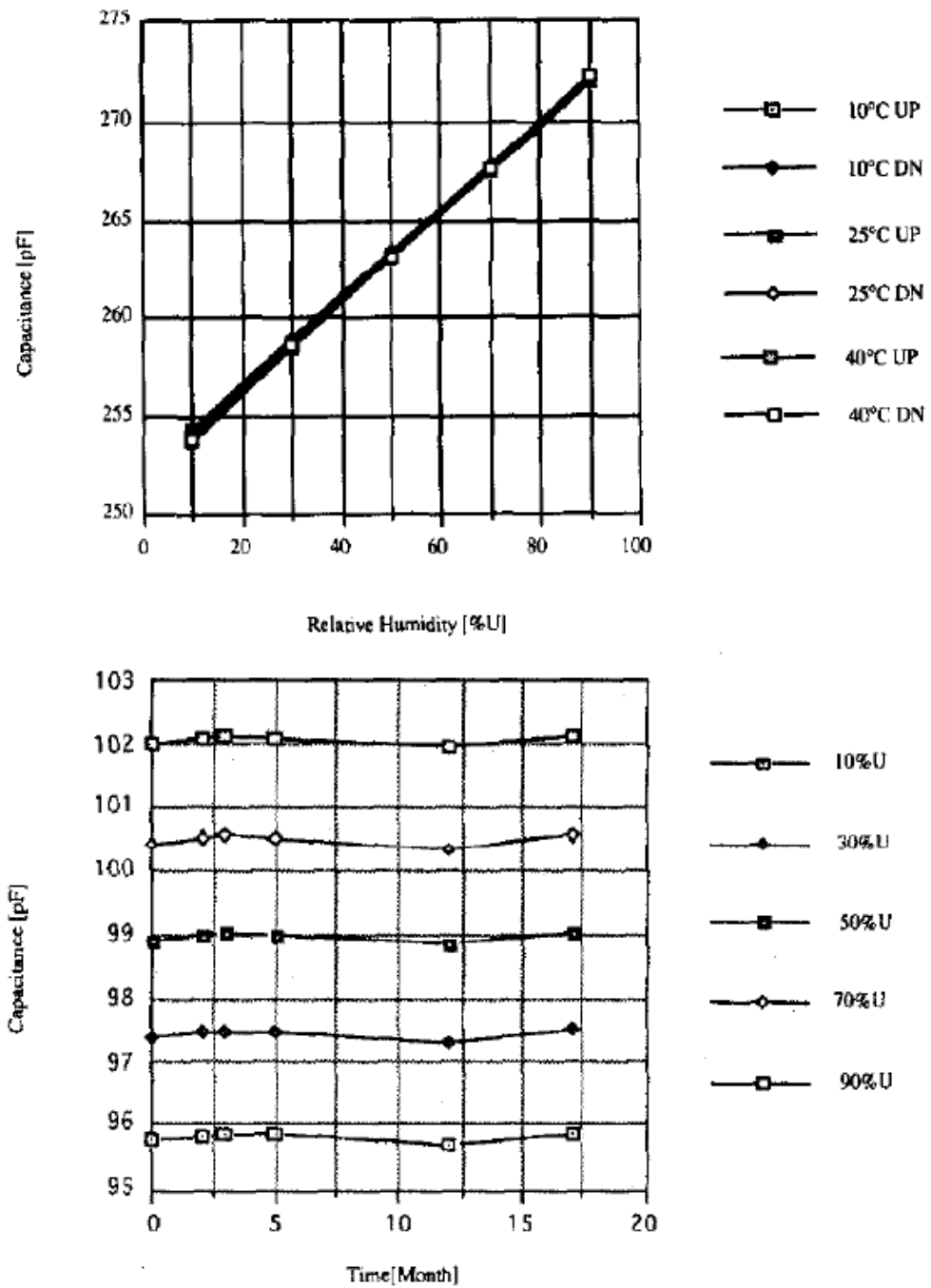
การนำพอลิซัลโฟนมาใช้ในการตรวจสอบความชื้น

Takaaki Kuroiwa และคณะ [25] ศึกษาการใช้ฟิล์มพอลิซัลโฟนในการตรวจสอบความชื้น ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง และโอโระเหยได้หลายชนิด



รูปที่ 2.23 โครงสร้างของ Sensor ที่ออกแบบโดย Takaaki Kuroiwa และคณะ [25]

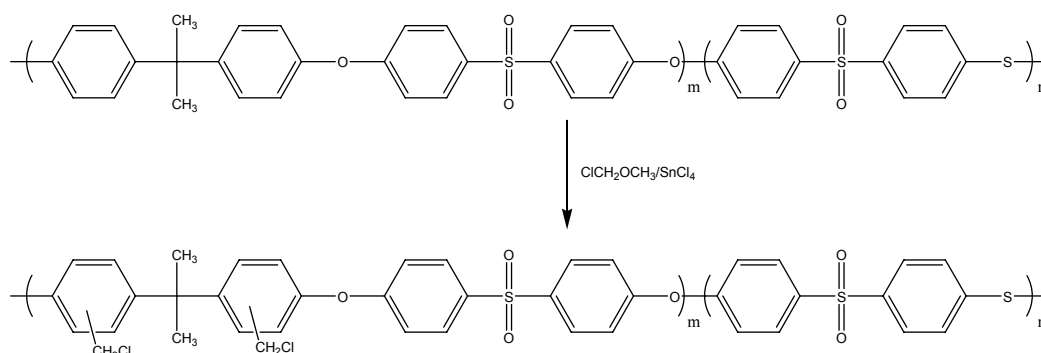
จากการทดลองวัดค่า Capacitance ที่อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ (%U) พบว่าเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ค่า Capacitance จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อความชื้นที่อุณหภูมิ 25°C นั้น น้อยกว่า 30 วินาที นอกจากนี้แล้วยังพบว่าเมื่อนำไปใช้งานเป็นระยะเวลานานกว่า 1 เดือน ตัวตรวจสอบความชื้นยังคงสามารถทำงานได้ตามปกติ



รูปที่ 2.24 ค่า Capacitance ที่อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และระดับความชื้นต่างๆ (%U) [25]

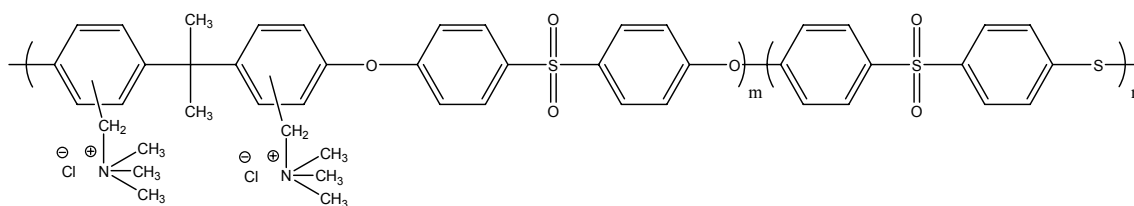
การทำ Chloromethylation และ Amination พอลิซัลโฟน

Gab-Jim Hwang และคณะ [26] ทดลองเตรียม Anion-exchange membrane จาก Block copolymer โดยมีการทำ chloromethylation พอลิซัลโฟน โดยใช้ Friedel-Crafts Catalyst เช่น ZnCl_2 หรือ SnCl_4 ช่วยในการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิซัลโฟนกับ Halomethyl alkyl ethers โดยการละลายพอลิซัลโฟนใน 1,1,2,2-Tetrachloroethane ที่อุณหภูมิ 110°C และตกตะกอนสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ใน Methanol แล้วจึงล้างตะกอนให้สะอาด



รูปที่ 2.25 การทำ Chloromethylation Polysulfone

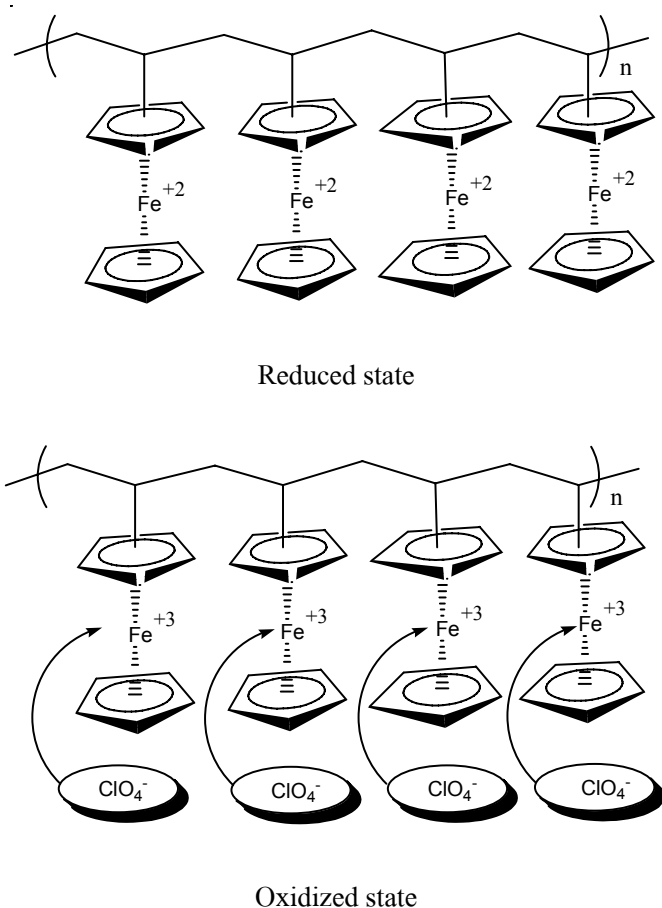
ในส่วนของการทำ Amination ทำได้โดยนำ Chloromethylated polysulfone ไปละลายใน N,N-dimethylformamide (DMF) จากนั้นจึงเติม Trimethylamine และ Methanol ลงในสารละลายดังกล่าว



รูปที่ 2.26 โครงสร้าง Aminated Polysulfone

2.10 การนำไฟฟ้าของโมเลกุลที่โครงสร้างมีหมู่ฟังก์ชัน Ferrocene

เนื่องจาก Poly(vinyl ferrocene) (PVF) จัดเป็น Redox polymer ซึ่งจะมีบริเวณที่ถูก Oxidized หรือ Reduced ประจำที่ โดยที่ประจุจะไม่มีการเคลื่อนที่ไปตามสายโซ่โพลิเมอร์ แต่จะอยู่ที่บริเวณ Pendant group โครงสร้างทางเคมีของ PVF แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 2.27 Poly(vinyl ferrocene) ในรูปของ Reduced state และ Oxidized state ที่ทำหน้าที่เป็น Host ให้กับ ClO₄⁻ ที่เป็น Counterion

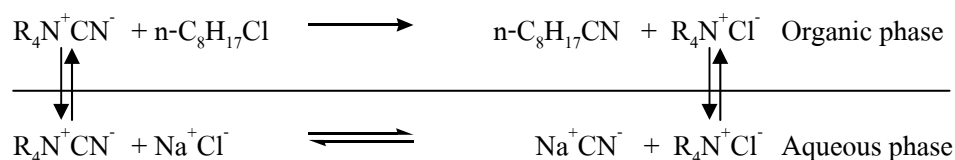
กระบวนการ Oxidation สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อใช้สาร Electrolyte ที่เหมาะสม (เช่น LiClO₄ ในสารละลาย Acetonitrile) มีการดึงอิเล็กตรอนออกจากโครงสร้างของ Ferrocene และถูกทำให้เป็นกลางด้วยสารละลาย Electrolyte



ประจุจะเกิดการเคลื่อนที่ด้วยการกระโดดข้าม (Hopping) จากหมู่ Ferrocene หนึ่งไปสู่หมู่ Ferrocene ข้างเคียง ดังนั้นการมีสารโมเลกุลขนาดเล็กทำหน้าที่เป็น Plasticizer ช่วยเพิ่ม Free volume ให้กับโมเลกุล จะยิ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตามค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุชนิดนี้ปกติจะอยู่ในช่วง 10^{-5} ถึง $10^{-7} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ ซึ่งน้อยกว่ากรณีของ Polypyrrole ที่มีระบบ π -Conjugation ในโครงสร้างที่มีค่าประมาณ $10 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$

2.11 Phase-transfer catalyst

Phase-transfer catalyst [27] ถูกนำมาใช้เร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์สารเคมีจากสารตั้งต้น 2 ชนิดที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ ด้วยการทำหน้าที่เป็นตัวพาสารตั้งต้นชนิดหนึ่งจากเฟสหนึ่งข้ามไปยังอีกเฟสหนึ่งได้ เช่น การเร่งปฏิกิริยาระหว่างเกลือที่ละลายในน้ำได้กับสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายในน้ำนั้น โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่ม Quaternary ammonium หรือ Phosphonium salts ถูกคิดค้นขึ้นโดย Starks และ Makoaza ในปี 1960 โดยสารที่นิยมใช้ได้แก่ Tetra-*n*-butylammonium, Trioctylmethylammonium หรือ Hexadecyltri-*n*-butylphosphonium ion ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาระหว่าง Sodium cyanide ในน้ำ กับ 1-Chlorooctane ในตัวทำละลายอินทรีย์ ดังนี้



รูปที่ 2.28 กลไกการทำงานของ Phase transfer catalyst

หากไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้ามากที่อุณหภูมิ 110°C การมีตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. 1,1,2,2-Tetrachloroethane (86962 Fluka)
2. 1,4-Dioxane (A3510 Lab-Scan)
3. 2,6-Di-tert-butyl-p-methylpheno (I34750 Fluka)
4. 2-Ethoxyethyl methacrylate (280666 Aldrich)
5. Acetone
6. Acetyl bromide (960 Fluka)
7. Benzoyl peroxide (P16237 Panreac)
8. Bromomethyl methyl ether
9. Chloroform
10. Diethyl ether (A3509 Lab-Scan)
11. Dimethoxymethane (D134651 Aldrich)
12. Distilled water
13. Ferrocene carboxylic acid (46264 Fluka)
14. Liq. Nitrogen
15. Lithium Perchlorate 99% (62579 Fluka)
16. Magnesium sulfate anhydrous (63136 Fluka)
17. Methanol
18. Methanol absolute (01 101586 BBDH)
19. Nitrogen (g)
20. Phenothiazine (88580 Fluka)
21. Poly (ethylene glycol) (81188 Fluka)
22. Polysulfone (374296 Aldrich)
23. Sodium hydroxide
24. Stannic chloride (R14550 Riedel-de Haën)

25. Tetrahydrofuran
26. Tetra-*n*-butylammonium chloride (86870 Fluka)
27. Toluene
28. Triethylamine (90340 Fluka)
29. Vinylbenzyl chloride (94908 Fluka)

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. 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. Spatula
29. Still head
30. Stopper
31. Suction flask
32. Temperature controller
33. Test tube
34. Thermometer
35. Vacuum oven
36. Vial tube
37. Volumetric flask

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. Differential scanning calorimeter (Perkin Elmer: Pyris1, USA)
2. Electrometer/high-resistance meter (Keithley: 6517A, USA)
3. Flow meter (Aalborg: P, USA)
4. Fourier transform infrared spectrophotometer (Bruker Optik GmbH: Vertex70, Germany)
5. Proton nuclear magnetic resonance spectrometer (Bruker: 300 Ultrasheild, Germany)
6. Thermogravimetric analyzer (Perkin Elmer: TGA7HT, USA)

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์ตัวรองรับ

3.4.1.1 การสังเคราะห์โพลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์ (PVBC)

สังเคราะห์พอลิเมอร์พื้นฐานเพื่อใช้เป็นตัวรองรับ คือ โพลิเมอร์ของ พอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์ (PVBC) จากมอนอเมอร์ คือ 45 ml (0.32 mol) ไวนิลเบนซิลคลอไรด์ (VBC, Fluka) ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์โดยการสกัดด้วย 0.5 % โซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำกลั่น เพื่อแยกเอาตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาที่อยู่ในมอนอเมอร์คือ t-Butyl catechol (TBC) และ Nitromethane ให้ออกไปอยู่ในชั้นน้ำ โดยแยกส่วนของสารละลายชั้นน้ำที่เป็นสีแดงออกไปจนได้ สารละลายใสของชั้นมอนอเมอร์ แล้วทำให้แห้งด้วยการใส่แมกนีเซียมซัลเฟตที่ปราศจากน้ำกวนทิ้งไว้โดยเติมฟิโนโรซีนเป็นตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งที่สามารถแยกออกได้ง่ายเป็นเวลา 1 คืน นำมอนอเมอร์ที่ได้มากลั่นจนได้ของเหลวใส (100 °C, 0.1 mPa) และเก็บไว้ในตู้เย็น (-5 °C) ก่อนทำการพอลิเมอร์ไรเซชันต้องไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากมอนอเมอร์ทั้งหมดด้วยการจุ่มแช่ในไนโตรเจนเหลวจนแข็ง แล้วยกขึ้นมาดูดอากาศออกให้เป็นสุญญากาศจนหมดจากนั้นจึงปล่อยก๊าซไนโตรเจนที่แห้งเข้าไปแทน ทำซ้ำ 3 ครั้ง ทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง โดยมี 0.49 g (1%wt) เบนโซิลเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มแล้วรับนำไปจุ่มในน้ำเย็นทันทีเพื่อหยุดปฏิกิริยา นำพอลิเมอร์ที่ได้ซึ่งมีลักษณะขุ่นหนืดไปละลายในคลอโรฟอร์ม แล้วตกตะกอนด้วยการหยดสารละลายพอลิเมอร์ดังกล่าวอย่างช้า ๆ ที่ละหยดในเมทานอลที่มากเกินพอที่กำลังกวนอย่างแรง กรองแยกพอลิเมอร์ที่ได้แล้วนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำพอลิเมอร์ที่ได้นี้มาทำให้บริสุทธิ์ด้วยการละลายซ้ำในคลอโรฟอร์มและตกตะกอนซ้ำในเมทานอลอีกครั้ง แล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ ¹H-NMR, น้ำหนัก, ร้อยละผลผลิต และปริมาณหมู่ Cl ต่อ 1 g ของ PVBC ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.1.1 และผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2

3.4.1.2 การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์-โค-เอเทรอกซิ

เอเทริลเมทาคริลเลต (Co-PVBC75/25, Co-PVBC50/50)

สังเคราะห์พอลิเมอร์พื้นฐานเพื่อใช้เป็นตัวรองรับ คือ โพลิเมอร์ของ พอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์-โค-เอเทรอกซิเอเทริลเมทาคริลเลตจากมอนอเมอร์ คือ ไวนิลเบนซิลคลอไรด์ (VBC) และเอเทรอกซิเอเทริลเมทาคริลเลต (EEM, Aldrich) ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์แล้วด้วยวิธีการเดียวกับขั้นตอนการเตรียมมอนอเมอร์สำหรับสังเคราะห์โพลิเมอร์ PVBC ในหัวข้อ

3.4.1.1 ในอัตราส่วนจำนวนโมล VBC ต่อ EEM เป็น 75:25 สำหรับการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ของ Co-PVBC75/25 และในอัตราส่วนจำนวนโมล VBC ต่อ EEM เป็น 50:50 สำหรับการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ของ Co-PVBC50/50 นั่นคือ ในกรณีของ Co-PVBC75/25 ใช้ปริมาณ VBC เท่ากับ 20 ml (142.3 mmol), EEM เท่ากับ 7.78 ml (47.4 mmol) และ BPO เท่ากับ 0.29 g (1%wt) ในขณะที่กรณีของ Co-PVBC50/50 ใช้ปริมาณ VBC เท่ากับ 15 ml (106.7 mmol), EEM เท่ากับ 17.5 ml (106.7 mmol) และ BPO เท่ากับ 0.33 g (1%wt) โดยก่อนทำการพอลิเมอร์ไรเซชันต้องไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากมอนอเมอร์จนหมดด้วยการจุ่มแช่ในไนโตรเจนเหลวจนแห้ง แล้วยกขึ้นมาสูดอากาศออกให้เป็นสุญญากาศจนหมดจากนั้นจึงปล่อยก๊าซไนโตรเจนที่แห้งเข้าไปแทน ทำซ้ำ 3 ครั้ง ทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง แล้วรีบนำไปจุ่มในน้ำเย็นทันทีเพื่อหยุดปฏิกิริยา พอลิเมอร์ที่ได้มีลักษณะขุ่นหนืดและจับตัวกันเป็นก้อนคล้ายยางซึ่งยังมีปริมาณ EEM มากขึ้น จะได้โคพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวมากขึ้น นำพอลิเมอร์ที่ได้ไปละลายในคลอโรฟอร์ม แล้วตกตะกอนด้วยการหยดสารละลายพอลิเมอร์ดังกล่าวอย่างช้า ๆ ที่ละหยดในเมทานอลที่มากเกินพอที่กำลังกวนอย่างแรง กรองแยกพอลิเมอร์ที่ได้แล้วนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำพอลิเมอร์ที่ได้นี้มาทำให้บริสุทธิ์ด้วยการละลายซ้ำในคลอโรฟอร์มและตกตะกอนซ้ำในเมทานอลอีกครั้ง แล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ ¹H-NMR, น้ำหนัก, ร้อยละผลผลิต และปริมาณหมู่ Cl ต่อ 1 g ของ Co-PVBC75/25 และ Co-PVBC50/50 ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.1.2 และผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2

3.4.1.3 การทำโบรโมเมทิลเลชันพอลิซัลโฟน (BPS)

เตรียมโบรโมเมทิลเมทิล อิเธอร์ (BMME) ก่อน โดยการกวน 45 ml (0.5 mol) ไดเมทอksomิเซนที่ผ่านการดูดความชื้นมาแล้วกับ 1.20 ml (0.029mol) เมทานอลที่อุณหภูมิ 0 °C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจึงค่อย ๆ หยด 36.20 ml (0.49mol) อะซิติกโบรไมด์ ในระบบปิดอุณหภูมิจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิห้อง ปล่อยให้กวนต่อไปอีกเป็นเวลา 96 ชั่วโมง จะได้สารละลายผสมระหว่าง BMME กับ เมทิลอะซิเตต ซึ่งสามารถตรวจสอบความเข้มข้นของ BMME ได้จากเทคนิค ¹H-NMR ซึ่งผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค ¹H-NMR และการหาความเข้มข้นของ BMME ในสารละลายผสมนี้ถูกรายงานไว้ในหัวข้อ 4.1.1.3

สังเคราะห์โบรโมเมทิลเลชันพอลิซัลโฟน (BPS) ได้จากการทำโบรโมเมทิลเลชันพอลิซัลโฟนด้วย BMME ที่เตรียมได้ โดยการผสม 70 ml (454 mmol) BMME กับ 0.40 g (1.13 mmol) สแตนนิกคลอไรด์เพนตะไฮเดรตที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใน 38 ml 1,1,2,2-

เตตระคลอโรอีเทน กวนที่อุณหภูมิ 90 °C จากนั้นจึงค่อย ๆ หยดสารละลาย 5.00 g (11.25meq) พอลิซัลโฟนใน 63 ml 1,1,2,2-เตตระคลอโรอีเทนให้หมดใน 15 นาที กวนที่อุณหภูมิ 90 °C ต่อไปอีก 3 ชั่วโมง แล้วจึงหยุดปฏิกิริยาด้วยการเติม 2 ml เมทานอล ลงไป นำสารละลายโบรโมเมทิลเตตระพอลิซัลโฟนที่สังเคราะห์ได้ไปตกตะกอนในเมทานอลที่มากเกินไปที่กำลังกวนอย่างแรง กรองแยกพอลิเมอร์ที่ได้แล้วนำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 °C ทำให้บริสุทธิ์อีกครั้งด้วยการละลายซ้ำในตัวทำละลายไดออกเซน กรองแยกเอาเฉพาะส่วนที่เป็นของเหลวไปตกตะกอนซ้ำในเมทานอลที่มากเกินไปที่กำลังกวนอย่างแรง กรองแยกพอลิเมอร์แล้วล้างด้วยสารละลาย 40% ไดออกเซน, สารละลาย 40% ไดออกเซนผสมกับ 10% กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น, น้ำกลั่น และ เมทานอล ตามลำดับ นำไปอบในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ ¹H-NMR, น้ำหนัก, ร้อยละผลผลิต และ ปริมาณหมู่ Br ต่อ 1 g ของ BPS ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.1.3 และผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน แสดงไว้ในหัวข้อ 4.2

3.4.2 การสังเคราะห์กรดเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิลิก

การสังเคราะห์กรดเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิลิกประกอบด้วยสองขั้นตอน คือ

3.4.2.1 การสังเคราะห์ (2-Chlorobenzoyl) ferrocene

เติม 18.60 g (0.100 mol) ferrocene ลงในขวดก้นกลม 3 คอ ที่มี 12.7 ml (0.100 mol) 2-chlorobenzoyl chloride และ 200 ml dichloromethane กวนให้ละลาย จากนั้นค่อย ๆ เติม 14.00 g (0.105 mol) AlCl₃ ที่บรรจุอยู่ใน addition funnel ให้หมดในเวลาประมาณ 20 นาที โดยเครื่องมือทั้งหมดจะต้องต่อเนื่องกันเป็นระบบปิดเนื่องจาก AlCl₃ ไวต่อความชื้นมาก ในระหว่างที่เติมนั้นให้กวนสารละลายทั้งหมดในอ่างน้ำแข็งและต้องควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 5 °C จนได้สารละลายสีน้ำเงินเข้ม จากนั้นจึงกวนต่อที่อุณหภูมิห้องต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำขวดก้นกลมดังกล่าวมาจุ่มในอ่างน้ำแข็งอีกครั้ง ค่อย ๆ เติมน้ำกลั่น 200 ml อย่างช้า ๆ จนเกิดการแยกชั้นกัน นำสารละลายที่แยกชั้นกันดังกล่าวมาแยกออกจากกันด้วย separatory funnel ชั้นของน้ำจะถูกนำไปสกัดด้วย dichloromethane 50 ml อีก 2 ครั้ง แล้วรวมชั้นของ dichloromethane ทั้งหมดเข้าไว้ด้วยกันเอาไปสกัดด้วยน้ำกลั่น 50 ml และ 10% NaOH อีก 2 ครั้ง ทำให้ปราศจากน้ำด้วย anhydrous MgSO₄ กรองแยก MgSO₄ ออกแล้วระเหยเอาตัวทำละลายทั้งหมดออกให้แห้งด้วยเครื่องดูดสุญญากาศ จะได้ (2-Chlorobenzoyl) ferrocene เป็นผงของแข็งสีแดงเข้ม ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR, น้ำหนัก และร้อยละผลผลิตของ (2-Chlorobenzoyl) ferrocene ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.2.1

3.4.2.2 การสังเคราะห์ Ferrocenecarboxylic acid

เติม 46.00 g (0.411 mol) potassium-*t*-butoxide ลงในขวดก้นกลม 3 คอ ที่บรรจุ 250 ml 1,2-dimethoxyethane ที่ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายซึ่งผ่านการดูดความชื้นแล้วด้วยโลหะโซเดียม แล้วนำมากลั่นก่อนการใช้งาน ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ทำการกวนที่อุณหภูมิ 80 °C จากนั้นจึงเติม 2.20 ml (0.12 mol) น้ำกลั่น จะเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงมาก ค่อยๆเติม (2-Chlorobenzoyl)ferrocene ลงไป ทิ้งให้สารละลายเย็นลงแล้วเทใส่น้ำกลั่น 1 ลิตร ล้างให้สะอาดด้วย 150 ml diethyl ether 3 ครั้ง แยกชั้นน้ำและชั้น diethyl ether ออกจากกัน รวมชั้นของ Diethyl ether มาสกัดซ้ำด้วย 50 ml 10% NaOH 2 ครั้ง รวมชั้นน้ำทั้งหมดไว้ด้วยกัน ค่อยๆหยด ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น จนได้ตะกอนสีเหลืองของ ferrocenecarboxylic acid ออกมา ระวังไม่หยดกรดมากเกินไป จากนั้นจึงกรองแยกตะกอนที่ได้ออกมาทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR, น้ำหนัก และร้อยละผลผลิตของ ferrocenecarboxylic acid ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.2.2

3.4.3 การเตรียมเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na-FCC)

สังเคราะห์เกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na-FCC) โดยการละลายกรดเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิลิก น้ำหนัก 13.70 g ในสารละลายเตตระไฮโดรฟูแรน แล้วกวนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ค่อย ๆ หยดสารละลาย 50% โซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไป จนกระทั่งได้ตะกอนสีเหลืองทองของเกลือ Na-FCC เกิดขึ้น โดยระวังอย่าให้จำนวนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่ากรดเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิลิก ปล่อยให้กวนต่อไปอีก 12 ชั่วโมง กรองแยกเกลือที่ได้แล้วล้างให้สะอาดด้วยเตตระไฮโดรฟูแรน 3 ครั้ง แล้วอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 วัน ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค ¹H-NMR และ FT-IR, น้ำหนัก และร้อยละผลผลิตของ Na-FCC ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.3

3.4.4 การทำเอสเทอร์ฟิเคชันพอลิเมอร์ตัวรองรับด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต

3.4.4.1 การทำเอสเทอร์ฟิเคชันของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์

ละลาย 1.50 g PVBC ใน Toluene 30 ml เติมเกลือ Na-FCC 7.42 g ที่ละลายอยู่ในชั้นน้ำ 7 ml และ tetra-*n*-butylammonium chloride (TBAC) 2.73 g กวนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 90 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเทสารละลายพอลิเมอร์ทั้งหมดลงในเมทานอลที่มากเกินไปที่กวนอย่างแรง กรองแยกพอลิเมอร์ที่ได้และล้างด้วยเมทานอล 50 ml 2 ครั้ง จึงนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ทำให้บริสุทธิ์อีกครั้งด้วยการละลายพอลิเมอร์ซ้ำในคลอโรฟอร์ม และตกตะกอนซ้ำในเมทานอล ล้างตะกอนพอลิไวนิลเบนซิลเฟอโรซีนคาร์บอกซิเลต (PVB FCC) ด้วยเมทานอลแล้วจึงนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องอีกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ และ FT-IR, น้ำหนัก และร้อยละผลผลิตของ PVB FCC ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.4.1

3.4.4.2 การทำเอสเตอร์ริฟิเคชันของโคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์-โค-เอทอกรอกซิเอทิลเมทาคลิเลต75/25

ละลาย 1.00 g Co-PVBC75/25 ใน Toluene 50 ml เติมเกลือ Na-FCC 3.68 g ที่ละลายอยู่ในชั้นน้ำ 3 ml และ tetra-*n*-butyl ammonium chloride (TBAC) 1.35 g กวนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 90 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเทสารละลายพอลิเมอร์ทั้งหมดลงในเมทานอลที่มากเกินไปที่กวนอย่างแรง กรองแยกพอลิเมอร์ที่ได้และล้างด้วยเมทานอล 50 ml 2 ครั้ง จึงนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้บริสุทธิ์อีกครั้งด้วยการละลายพอลิเมอร์ซ้ำในคลอโรฟอร์มและตกตะกอนซ้ำในเมทานอล ล้างตะกอนพอลิไวนิลเบนซิลเฟอโรซีนคาร์บอกซิเลต-โค-เอทอกรอกซิเอทิลเมทาคลิเลต75/25 (Co-PVB FCC75/25) ด้วยเมทานอลแล้วจึงนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องอีกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ และ FT-IR, น้ำหนัก และร้อยละผลผลิตของ Co-PVB FCC75/25 ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.4.2

3.4.4.3 การทำเอสเตอร์ริฟิเคชันของโคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์-โค-เอทอกรอกซิเอทิลเมทาคลิเลต50/50

ละลาย 1.34 g Co-PVBC50/50 ใน Toluene 50 ml เติมเกลือ Na-FCC 3.24 g ที่ละลายอยู่ในชั้นน้ำ 3 ml และ tetra-*n*-butyl ammonium chloride (TBAC) 1.19 g กวนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 90 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเทสารละลายพอลิเมอร์ทั้งหมดลงในเมทานอลที่มากเกินไปที่กวนอย่างแรง กรองแยกพอลิเมอร์ที่ได้และล้างด้วยเมทานอล 50 ml 2 ครั้ง จึงนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้บริสุทธิ์อีกครั้งด้วยการละลายพอลิเมอร์ซ้ำในคลอโรฟอร์มและตกตะกอนซ้ำในเมทานอล ล้างตะกอนพอลิไวนิลเบนซิลเฟอโรซีนคาร์บอกซิเลต-โค-เอทอกรอกซิเอทิลเมทาคลิเลต50/50 (Co-PVB FCC50/50) ด้วยเมทานอลแล้วจึงนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องอีก

เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ และ FT-IR, น้ำหนัก และร้อยละผลผลิตของ Co-PVB FCC75/25 ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.4.3

3.4.4.4 การทำเอสเทอร์ฟิเคชันของโบรโมเมทิลเลเตตพอลิซัลโฟน

ละลาย 1.00 g BPS ใน Chloroform 50 ml เติมเกลือ Na-FCC 3.00 g ที่ละลายอยู่ในชั้นน้ำ 3 ml และ tetra-*n*-butylammonium chloride (TBAC) 0.82 g กวนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 90 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงเทสารละลายพอลิเมอร์ทั้งหมดลงในเมทานอลที่มากเกินพอที่กวนอย่างแรง กรองแยกพอลิเมอร์ที่ได้และล้างด้วยเมทานอล 50 ml 2 ครั้ง จึงนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้บริสุทธิ์อีกครั้งด้วยการละลายพอลิเมอร์ซ้ำในคลอโรฟอร์มและตกตะกอนซ้ำในเมทานอล ล้างตะกอนเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลตพอลิซัลโฟน ด้วยเมทานอลแล้วจึงนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องอีกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ และ FT-IR, น้ำหนัก และร้อยละผลผลิตของ BPS ที่ได้ แสดงไว้ในหัวข้อ 4.1.4.4

3.4.5 การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุ (Doping)

ละลายพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ต้องการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุในตัวทำละลาย Chloroform ที่มีสาร Dopant คือ Lithium perchlorate ผสมอยู่ในอัตราส่วนของหมู่เฟอร์โรซีนต่อสาร Dopant เป็น 1 ต่อ 1 โดยการกวนที่อุณหภูมิห้องภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปประเหยเอาตัวทำละลายออกด้วยวิธีการลดความดันที่อุณหภูมิห้อง โดยการใส่ไว้ในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

3.4.6 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 Ultrasheild, Germany) โดยในการเตรียมชิ้นงานทดสอบนั้นจะใช้วิธีการละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลาย deuterated chloroform (CDCl_3)

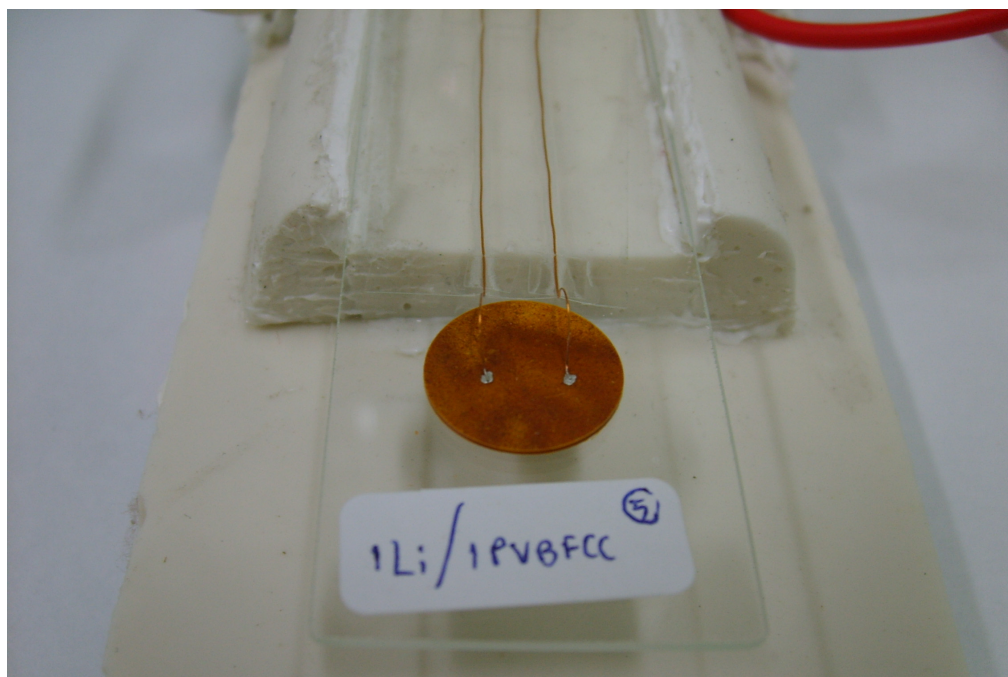
3.4.7 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ตัวรองรับ

พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำมาทดสอบความเสถียรทางความร้อนเพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (Perkin Elmer: TGA7HT, USA) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50 – 1200 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน และหาอุณหภูมิ glass transition (T_g) ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (Perkin Elmer: Pyris1, USA) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25 – 225 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

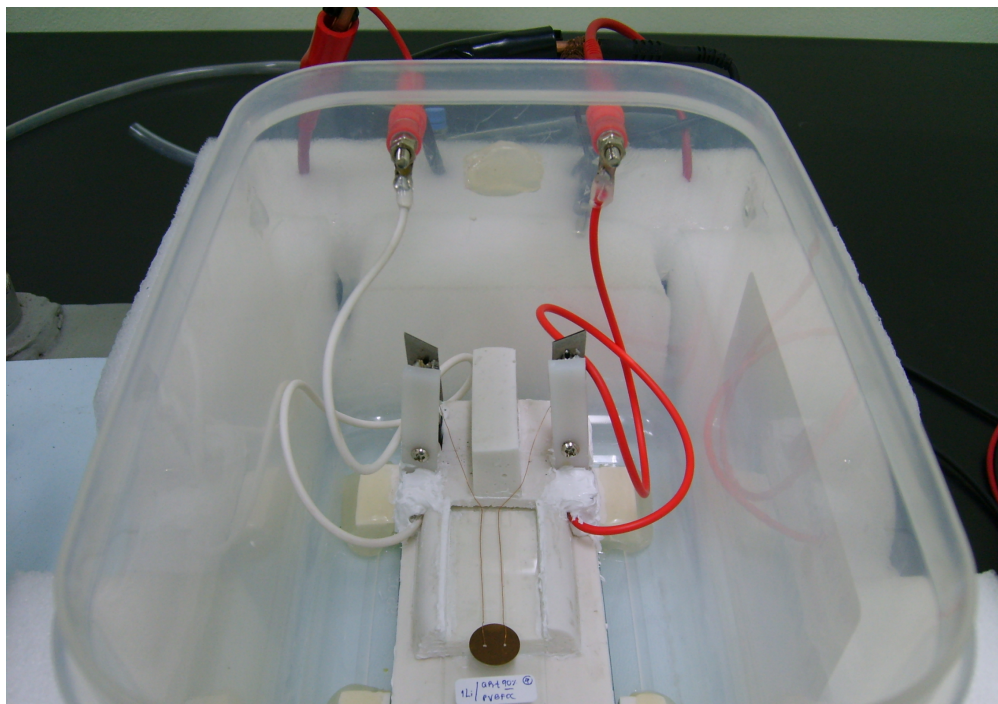
3.4.8 การทดสอบค่าการนำไฟฟ้าและความว่องไวต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์

3.4.8.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

ใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกและแม่พิมพ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ FT-IR มาอัดพอลิเมอร์ที่ผ่านการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุแล้วด้วย LiClO_4 ที่บดละเอียด น้ำหนักประมาณ 0.1 กรัม ด้วยแรงอัด 1,300 ปอนด์ วัดความหนาของชิ้นงานด้วย dial thickness gauge (OZAKI MEG: PEACOCK) นำเส้นลวดตัวนำไฟฟ้า 2 เส้น มาติดลงบนชิ้นงานตัวอย่างให้ห่างกันประมาณ 0.5 cm โดยใช้ Silver paint เป็นตัวยึดติด แล้วต่อเข้ากับ sensor chamber ที่ต่ออยู่กับเครื่อง Electrometer/high-resistance meter (Keithley: 6517A, USA) ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 การเชื่อมติดเส้นลวดตัวนำลงบนชิ้นงานด้วย Silver paint



รูปที่ 3.2 การต่อชิ้นงานเข้ากับเครื่อง Electrometer

3.4.8.2 การควบคุมความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่าง

ใช้ความดันไอของของเหลวตัวอย่าง คือ methanol และ acetone ที่คำนวณได้จากสมการ Antoine equation ดังนี้

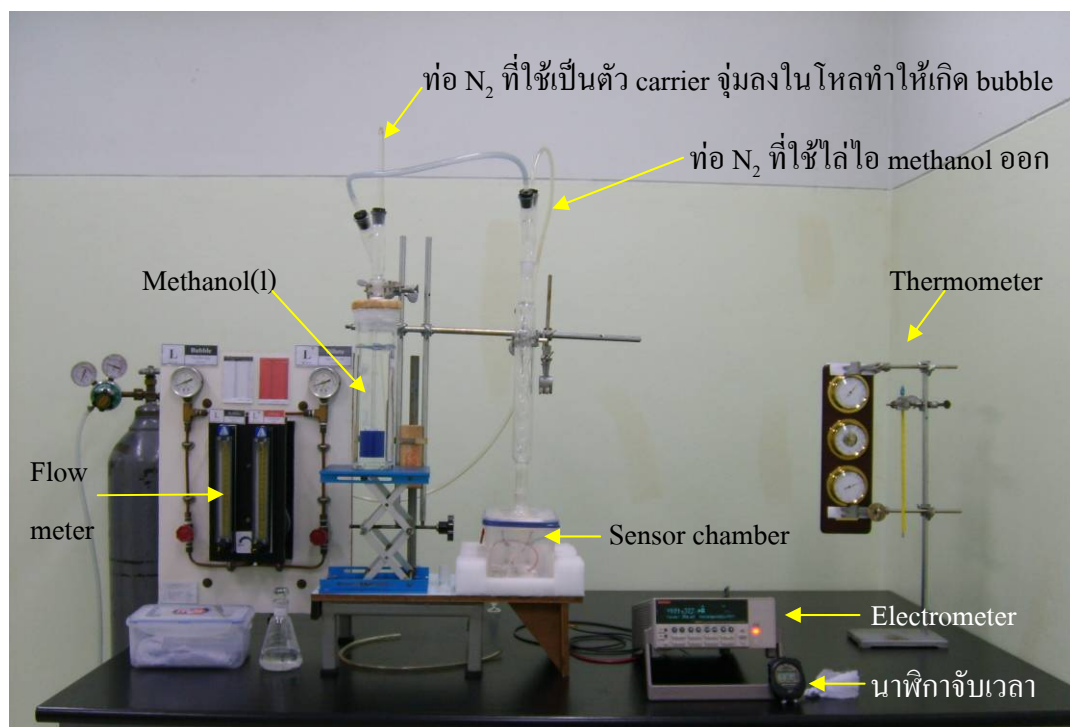
$$\ln P^* (kPa) = A - \frac{B}{T(K) - C} \quad \text{สมการ 3.1}$$

โดยที่ค่าคงที่ A B และ C เป็นค่าคงที่ของไอของของเหลวตัวอย่าง สำหรับ methanol และ acetone มีค่าดังกล่าว ดังนี้ [28]

methanol มีค่า A = 16.4948 B = 3593.39 และ C = -35.2249

acetone มีค่า A = 14.7171 B = 2975.95 และ C = -34.5228

นำของเหลวตัวอย่างมาใส่ในขวดโหลแก้วทรงสูง ที่มีการจุ่มท่อก๊าซไนโตรเจน ไว้แล้ว ดังรูปที่ 3.16 จากนั้นจึงทำการปล่อยก๊าซไนโตรเจน เพื่อใช้เป็นตัวพาหะพาไอของของเหลวตัวอย่างเข้าไปใน sensor chamber ที่เตรียมไว้



รูปที่ 3.3 เครื่องมือควบคุมความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่างและวัดค่าการนำไฟฟ้า

ความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่างคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$concentration[ppm] = \frac{(P^*xC)/760}{[(P^*xC)/760] + C} \times 10^6 \quad \text{สมการ 3.2}$$

เมื่อ P^* คือ ความดันไอของก๊าซตัวอย่าง และ C คือ carrier gas flow rate ซึ่งควบคุมการไหลของก๊าซได้จากเครื่อง Flow meter (Aalborg: Type P, USA)

3.4.8.3 การหา Linear ohmic regime

การตรวจสอบหา Linear ohmic regime นั้นเพื่อใช้หาค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมที่สามารถทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชิ้นงานนั้นเป็นไปตามกฎของโอห์ม โดยในการทดลองครั้งนี้จะเลือกใช้พอลิเมอร์ในการทดลองเพียงหนึ่งชนิด คือ PVB FCC ที่ผ่านการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุแล้ว เป็นตัวแทนของชิ้นงานทดสอบทั้งหมด โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นแรก ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้า(I) จากการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ (V) ที่ให้เข้าไป จาก 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2, 3, 4, 5 และ 6 V ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยในแต่ละค่า V ที่ใช้นั้นจะรอให้ค่า I ที่วัดได้มีค่าคงที่ก่อน (ประมาณ 10 นาที)

ขั้นที่สอง ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้า(I) จากการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ (V) ที่ให้เข้าไป จาก 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 และ 1.5 volt ในก๊าซ เมททานอลโดยในแต่ละค่า V ที่ใช้นั้นจะรอให้ค่า I ที่วัดได้คงที่ก่อน (ประมาณ 10 นาที)

ค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสมนั้นจะเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

3.4.8.4 การทดสอบและคำนวณหาร้อยละความว่องไวต่อก๊าซตัวอย่าง

ก่อนทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าจริงนั้น จะต้องป้อนก๊าซไนโตรเจนก่อนเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ได้ค่ากระแสที่คงที่ที่เวลา $t = 0$ ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อนที่จะทำการผ่านก๊าซตัวอย่างนี้ คือ ค่า I_{N_2} ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาร้อยละความว่องไวของก๊าซตัวอย่าง (%sensitivity) จากนั้นจึงป้อนก๊าซตัวอย่างเข้าไป ค่าความต่างศักย์ที่ใช้เท่ากันทุกครั้งคือ 0.5 V (ได้จากการหา linear ohmic regime) ทำการจดบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่อ่านได้ด้วยมือ ทุก ๆ 30 วินาที จนกว่าจะได้ค่าที่คงที่แล้ว ค่าของกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างนี้ คือ ค่า I_{gas} ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาร้อยละความว่องไวของก๊าซตัวอย่าง โดยที่ทั้งค่า I_{gas} และ I_{N_2} นี้จะได้อาจจากการเฉลี่ยค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในช่วงที่ถึงจุดสมดุลแล้วในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซตัวอย่างตามลำดับ ค่าร้อยละความว่องไวของก๊าซตัวอย่าง(%sensitivity) นี้สามารถคำนวณได้จากสูตรดังสมการที่ 3.3

$$\%S = \frac{(I_{gas} - I_{N_2})}{I_{N_2}} \times 100 \quad \text{สมการ 3.3}$$

3.4.8.5 การหาเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซและเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับ

ในการทดลองนี้จะสร้างกราฟจากจุดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า(I) กับเวลา โดยที่จะทำการเฉลี่ยค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในช่วงที่ถึงจุดสมดุลแล้วในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซตัวอย่างนั้นเป็นค่า I_{N_2} และ I_{gas} ตามลำดับ และจะได้ช่วงของการกระจายข้อมูลเป็นเส้น $\pm 2SD$ ในการหาเวลาที่ใช้ในการตอบสนองนั้นจะเริ่มตั้งแต่เส้นกราฟตัดกับเส้น $2SD$ ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ไปจนถึงจุดที่เส้นกราฟตัดกับเส้น $2SD$ ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนภายหลังจากการหยุดปล่อยก๊าซไนโตรเจนและเริ่มป้อนก๊าซตัวอย่างเข้าไปแทน และในทำนองเดียวกันการหาเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับนั้นจะเริ่มตั้งแต่จุดที่เส้นกราฟตัดกับเส้น $2SD$ ในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่าง ไปจนถึงจุดที่เส้นกราฟตัดกับเส้น $2SD$ ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนภายหลังจากการหยุดปล่อยก๊าซตัวอย่างและเริ่มปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

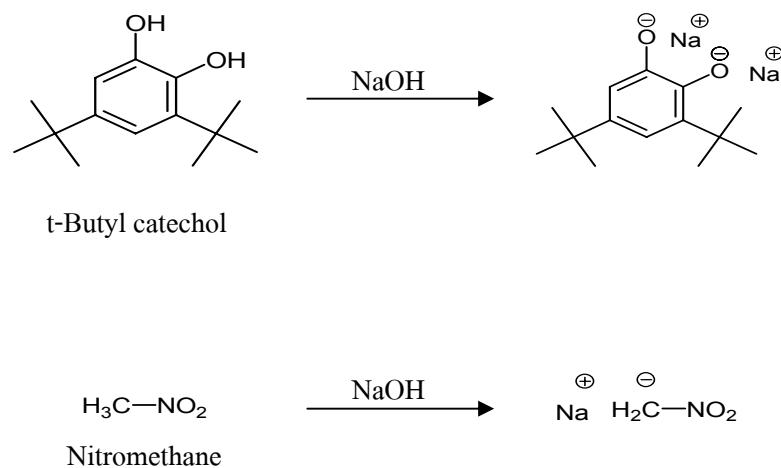
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$

4.1.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิเมอร์ตัวรองรับ

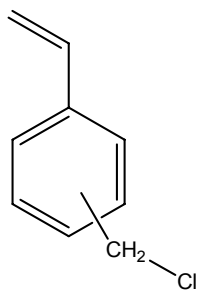
ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ตัวรองรับ คือ PVBC, Co-PVBC75/25 และ Co-PVBC50/50 จากมอนอเมอร์ คือ VBC และ EEM และการทำโพรโมเมทิลเลชันพอลิซัลโฟนด้วย BMME จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ ได้ผลการวิเคราะห์ ดังนี้

4.1.1.1 การสังเคราะห์ไอโอมพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์ (PVBC)

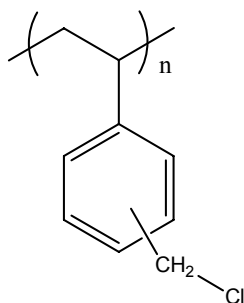
มอนอเมอร์ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์โดยการสกัดด้วย 0.5 % โซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำกลั่นแล้วจะสามารถแยกเอาตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาที่อยู่ในมอนอเมอร์ คือ t-Butyl catechol (TBC) และ Nitromethane ให้ออกไปจากมอนอเมอร์ได้โดยการเปลี่ยนรูปตัวยับยั้งดังกล่าวให้อยู่ในรูปของเกลือที่สามารถละลายในชั้นน้ำได้ ซึ่งสามารถแยกชั้นของน้ำและชั้นของมอนอเมอร์ออกจากกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การสกัดแยกตัวยับยั้งออกจากมอนอเมอร์



รูปที่ 4.2 โครงสร้างทางเคมีของ VBC monomer

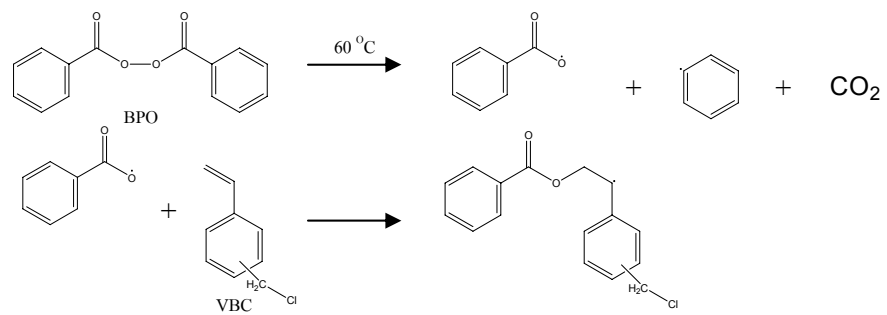
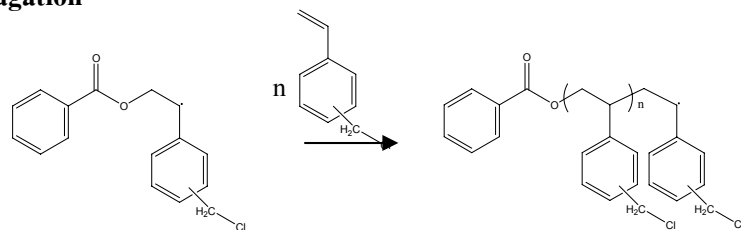
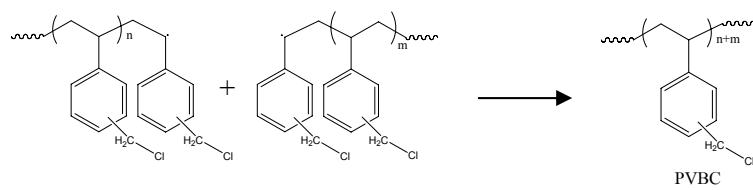


รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางเคมีของ PVBC

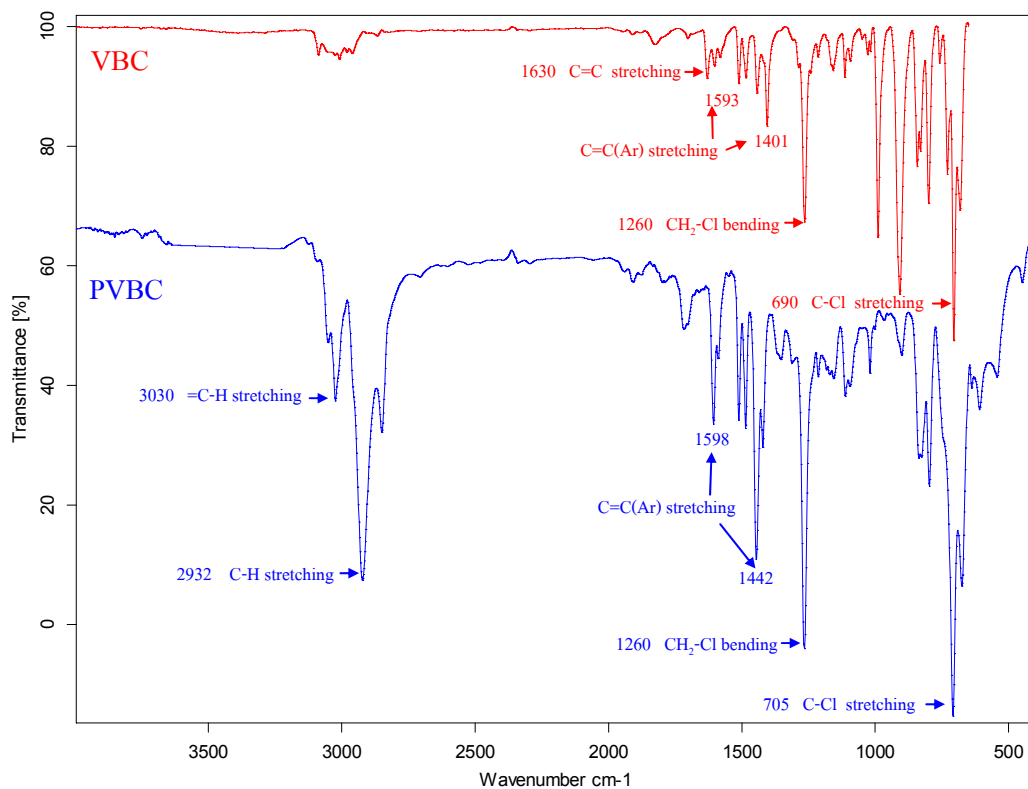
การทำพอลิเมอร์ไรเซชัน PVBC จากโมโนเมอร์ VBC ทำให้ได้พอลิเมอร์เป็นผงสีขาวละเอียด มีน้ำหนักที่สังเคราะห์ได้เท่ากับ 32.33 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 66.16 % ซึ่ง PVBC ที่สังเคราะห์ได้นี้มีปริมาณหมู่ Cl คิดเป็น 6.5521 meq.Cl ต่อ 1 g ของ PVBC โดยที่โครงสร้างของมอนอเมอร์ VBC และพอลิเมอร์ PVBC แสดงได้ ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ปฏิกริยาการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของ PVBC แสดงได้ ดังรูปที่ 4.4

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ในกรณีของการสังเคราะห์ไฮโดรพอลิเมอร์ของ PVBC จากมอนอเมอร์ VBC นั้น จะมีเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของ $\text{CH}_2\text{-Cl}$ ที่ $1300\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ C-Cl ที่ $800\text{-}600\text{ cm}^{-1}$ [29,30] และความเป็นวงแหวนอะโรมาติก จะแสดงแบนด์ที่สำคัญ 2 ตำแหน่ง จากการดึงยึดของ $\text{C}=\text{C}(\text{Ar})$ คือ ที่ประมาณ 1400 และ 1600 cm^{-1} [29] ดังแสดงในรูปที่ 4.5

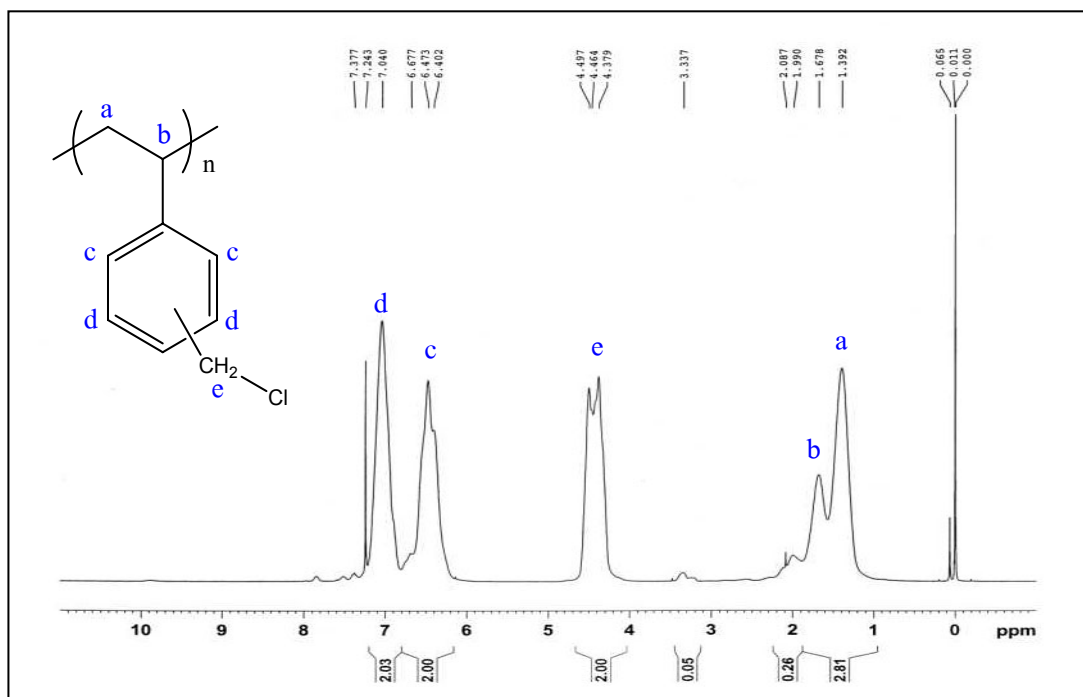
จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า PVBC มีลักษณะเฉพาะของวงแหวนอะโรมาติกที่จะทำให้เกิดสเปกตรัมขึ้นที่ตำแหน่งสัญญาณ $6.4 - 7.0\text{ ppm}$ (ตำแหน่ง c และ d ในรูปที่ 4.6) และโปรตอนที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนซึ่งต่ออยู่กับอะตอมของคลอรีนทำให้เห็นสเปกตรัมชัดเจนที่ตำแหน่งสัญญาณ 4.4 ppm (ตำแหน่ง e ในรูปที่ 4.6)

Initiation**Propagation****Termination**

รูปที่ 4.4 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์



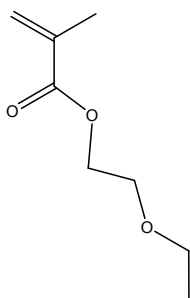
รูปที่ 4.5 FT-IR Spectrum ของ VBC และ PVBC



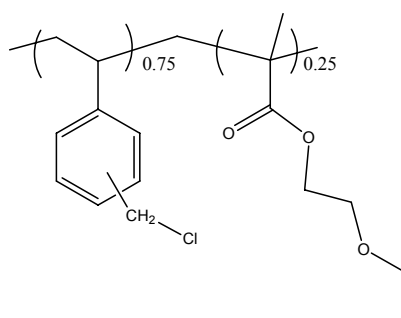
รูปที่ 4.6 ^1H -NMR Spectrum ของ PVBC ใน CDCl_3

4.1.1.2 การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์-โค-เอเทอร์ออกซีเอทิลเมทาคริเลต (Co-PVBC75/25, Co-PVBC50/50)

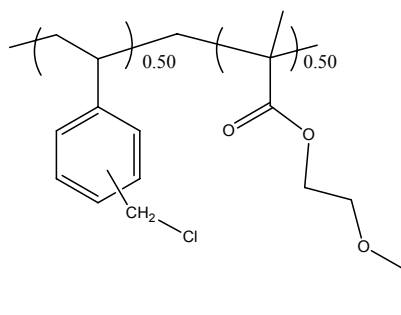
การสังเคราะห์ จากโมโนเมอร์ VBC และ EEM ได้พอลิเมอร์เป็นของแข็งสีขาวอมส้ม พอลิเมอร์ที่มีปริมาณของ EEM มากจะมีสีส้มเข้มมากขึ้นและมีลักษณะที่แข็งเหนียวมากขึ้น โดย Co-PVBC75/25 ที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักเท่ากับ 27.57 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 94.33 % ซึ่ง Co-PVBC-75/25 ที่สังเคราะห์ได้นี้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ มีปริมาณหมู่ Cl คิดเป็น 4.8696 meq.Cl ต่อ 1 g ของ Co-PVBC-75/25 ในขณะที่ Co-PVBC50/50 ที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักเท่ากับ 31.92 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 96.23 % ซึ่ง Co-PVBC-50/50 ที่สังเคราะห์ได้นี้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ มีปริมาณหมู่ Cl คิดเป็น 3.2173 meq.Cl ต่อ 1 g ของ Co-PVBC-50/50 โครงสร้างของมอนอเมอร์ EEM และพอลิเมอร์ Co-PVBC75/25 และ Co-PVBC50/50 แสดงได้ ดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ ปฏิบัติการเกิด พอลิเมอร์ไรเซชันของ Co-PVBC75/25 และ Co-PVBC50/50 แสดงได้ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.7 โครงสร้างทางเคมีของ EEM



รูปที่ 4.8 โครงสร้างทางเคมีของ Co-PVBC75/25

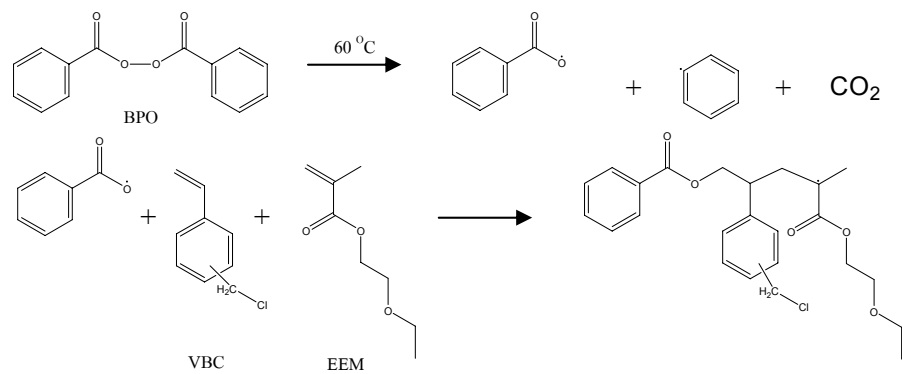
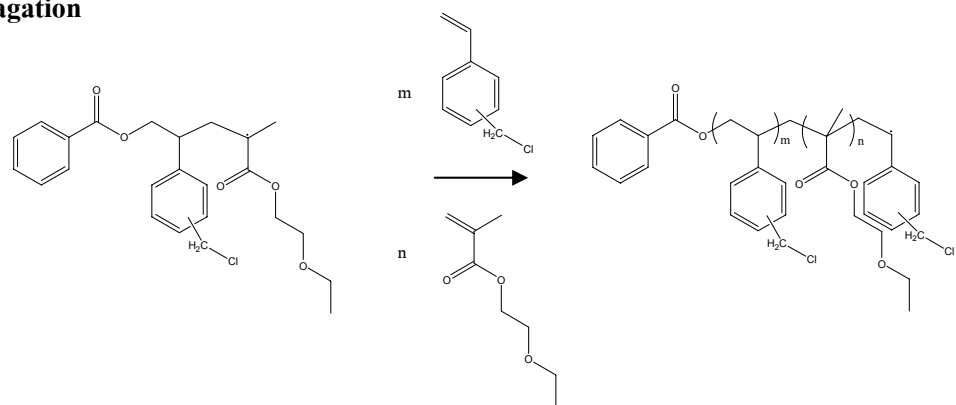
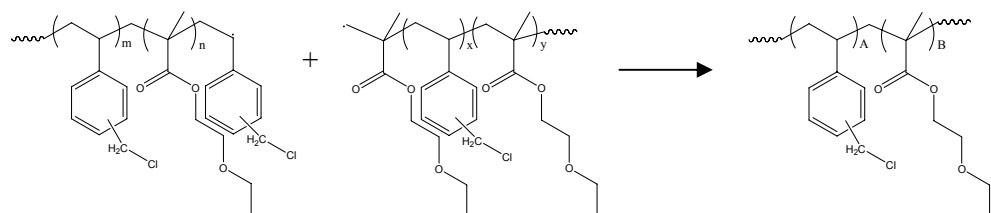


รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางเคมีของ Co-PVBC50/50

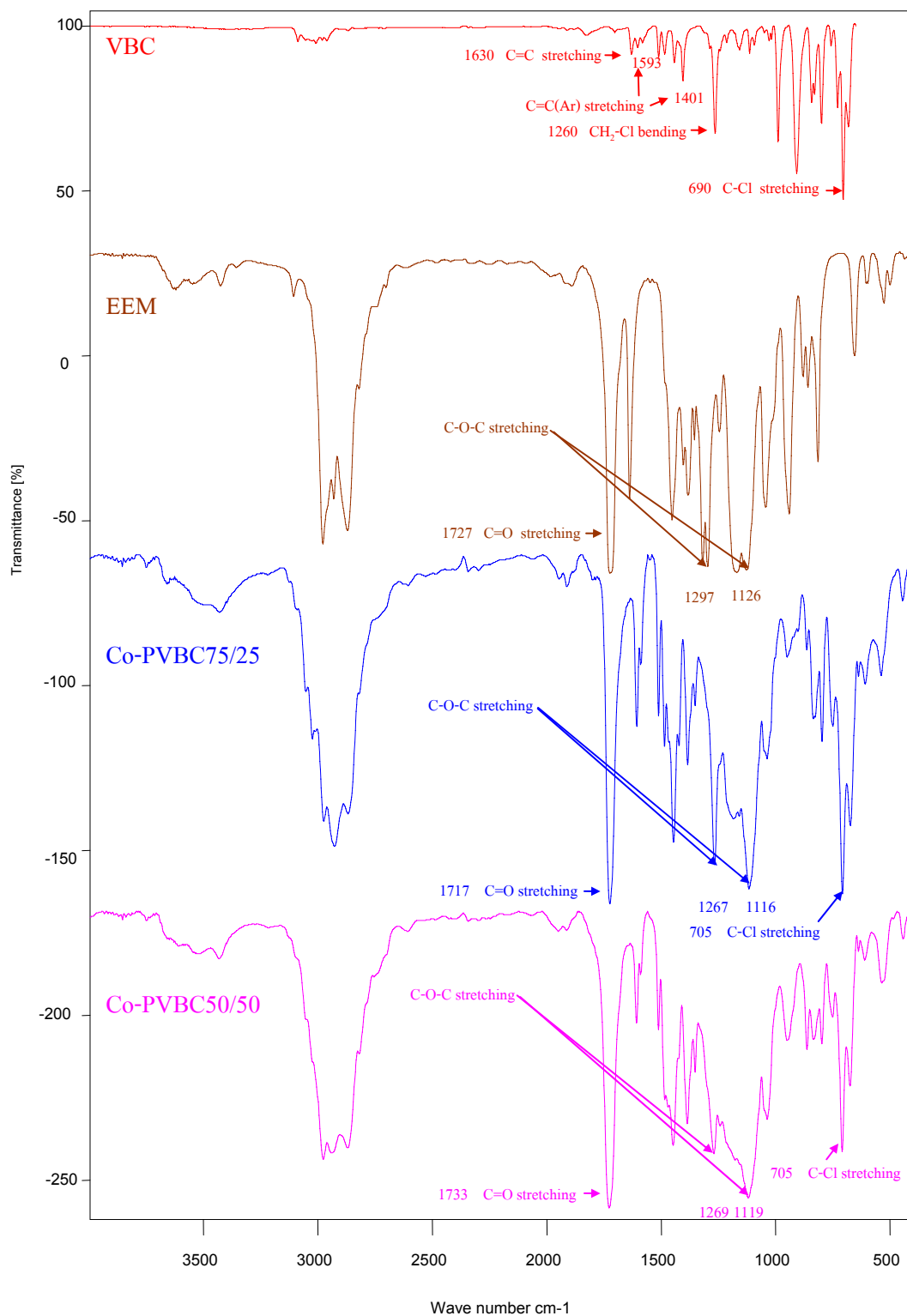
จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ในกรณีการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ของ Co-PVBC75/25 และ Co-PVBC50/50 จากมอนอเมอร์ VBC และ EEM นั้น จะมีเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของ $\text{CH}_2\text{-Cl}$ ที่ $1300\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ และ C-Cl ที่ $800\text{-}600\text{ cm}^{-1}$ [29,30] และจะมีลักษณะเฉพาะของ EEM คือหมู่ C=O ที่ประมาณ 1700 cm^{-1} และ C-O-C ของหมู่เอสเตอร์ในย่าน $1050\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ ที่มีความเข้มสูง 2 แบนด์ [29,30] เพิ่มขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 4.11

จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า Co-PVBC75/25 และ Co-PVBC50/50 มีลักษณะเฉพาะของวงแหวนอะโรมาติกที่จะทำให้เกิดสเปกตรัมขึ้นที่ตำแหน่งสัญญาณ $6.3 - 7.0\text{ ppm}$ (ตำแหน่ง c และ d ในรูปที่ 4.12 และ 4.13) และโปรตอนที่ติดอยู่กับคาร์บอนซึ่งต่ออยู่กับอะตอมของคลอรีนทำให้เห็นสเปกตรัมชัดเจนที่ตำแหน่งสัญญาณ 4.4 ppm (ตำแหน่ง e ในรูปที่ 4.12 และ 4.13) นอกจากนี้จะมีเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของหมู่ CH_3 เพิ่มขึ้นมาซึ่งจะไม่พบในกรณีของ PVBC ที่ตำแหน่ง 1.2 และ 0.4 ppm (ตำแหน่ง f และ i ในรูปที่ 4.12 และ 4.13) และของหมู่ CH_2 ที่ติดกับออกซิเจน ที่ตำแหน่งประมาณ 3.5 ppm (ตำแหน่ง g และ h ในรูปที่ 4.12 และ 4.13)

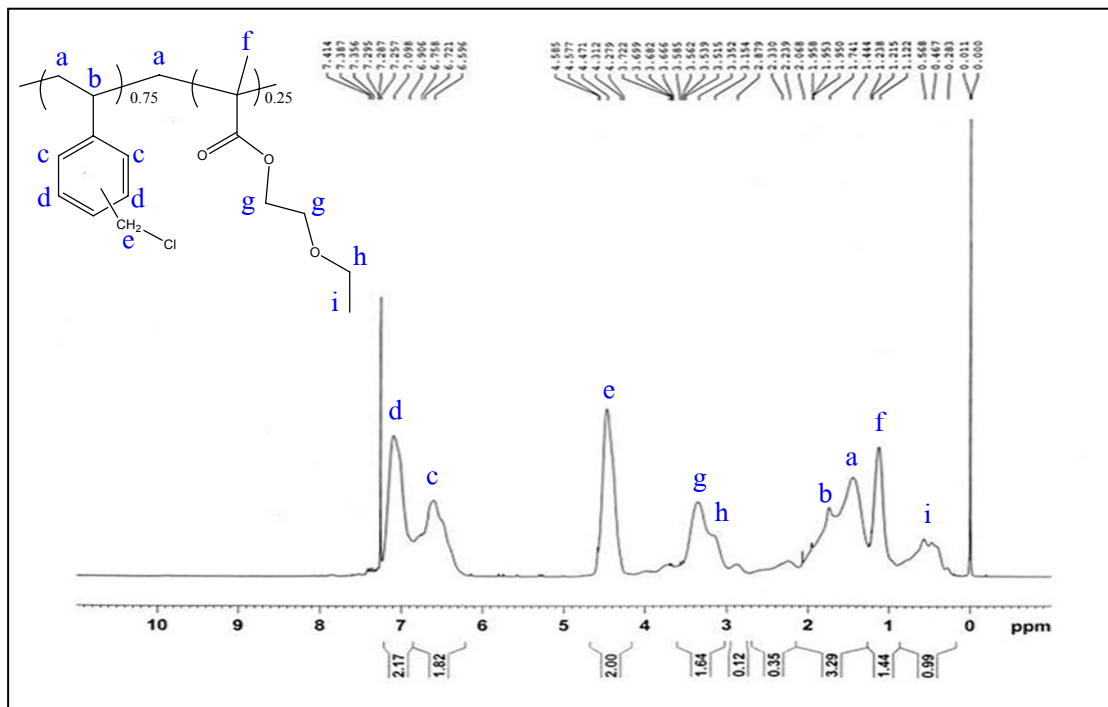
จาก $^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของ Co-PVBC75/25 และ Co-PVBC50/50 ใน CDCl_3 สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณ EEM และ VBC ที่มีอยู่ในโครงสร้างได้ โดยทำการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 4.4 ppm (ตำแหน่ง e ในรูปที่ 4.9 และ 4.10) ซึ่งเป็นตัวแทนของหมู่ $\text{CH}_2\text{-Cl}$ ใน VBC กับพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 0.5 ppm (ตำแหน่ง i ในรูปที่ 4.9 และ 4.10) ซึ่งเป็นตัวแทนของหมู่ $-\text{CH}_2-$ ใน EEM พบว่าในกรณีของ Co-PVBC75/25 มีปริมาณ VBC ต่อ EEM เป็น 75 ต่อ 25 และในกรณีของ Co-PVBC50/50 มีปริมาณ VBC ต่อ EEM เป็น 50 ต่อ 50 ตรงตามที่ได้สังเคราะห์ไว้

Initiation**Propagation****Termination**

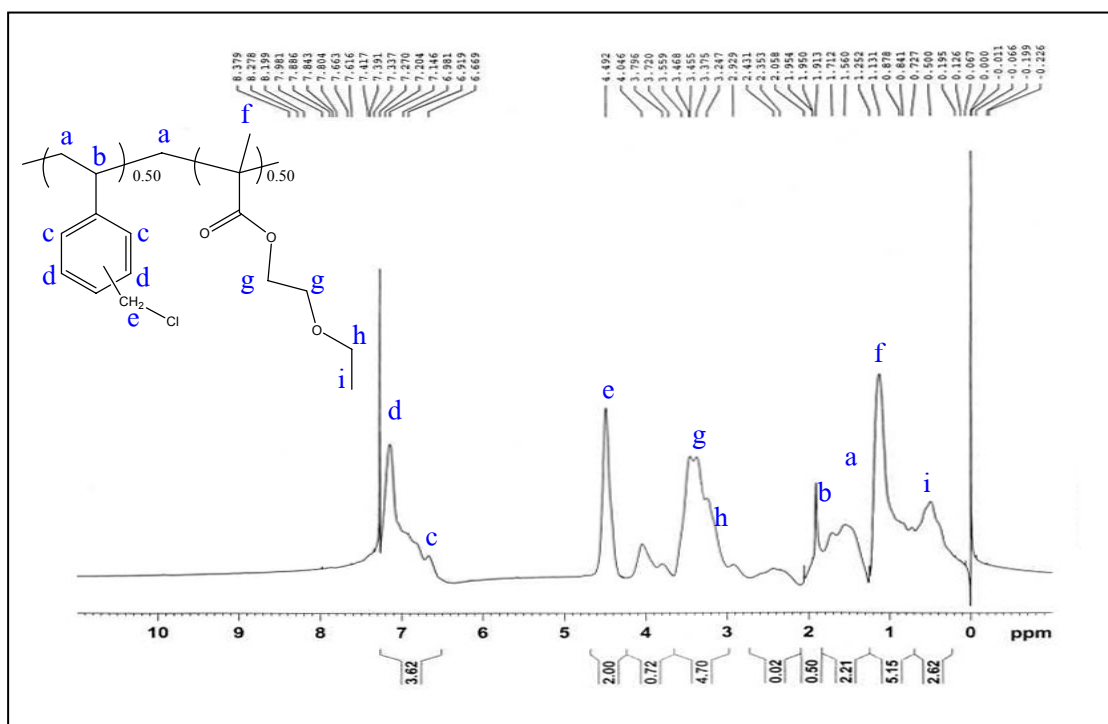
รูปที่ 4.10 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของโคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์-โค-เอทิลเมทาคริเลต



รูปที่ 4.11 FT-IR Spectrum ของ VBC, EEM, Co-PVBC75/25 และ Co-PVBC50/50



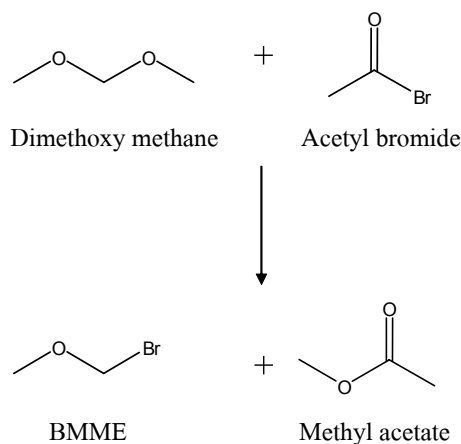
รูปที่ 4.12 ^1H -NMR Spectrum ของ Co-PVBC75/25 ใน CDCl_3



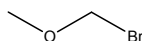
รูปที่ 4.13 ^1H -NMR Spectrum ของ Co-PVBC50/50 ใน CDCl_3

4.1.1.3 การทำโบรโมเมทิลเลชันพอลิซัลโฟน (BPS)

ในการสังเคราะห์ BMME เพื่อใช้ในการทำโบรโมเมทิลเลชันพอลิซัลโฟนนั่น จะได้เป็นสารละลายซึ่งเป็นสารผสมระหว่าง BMME กับสารผลิตภัณฑ์ร่วมคือ methyl acetate และสารตั้งต้นที่ยังคงเหลืออยู่คือ dimethoxymethane (DMM) และ methanol ปฏิกิริยาการเกิด BMME นั้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และ โครงสร้างของ BMME แสดงได้ดังรูปที่ 4.15

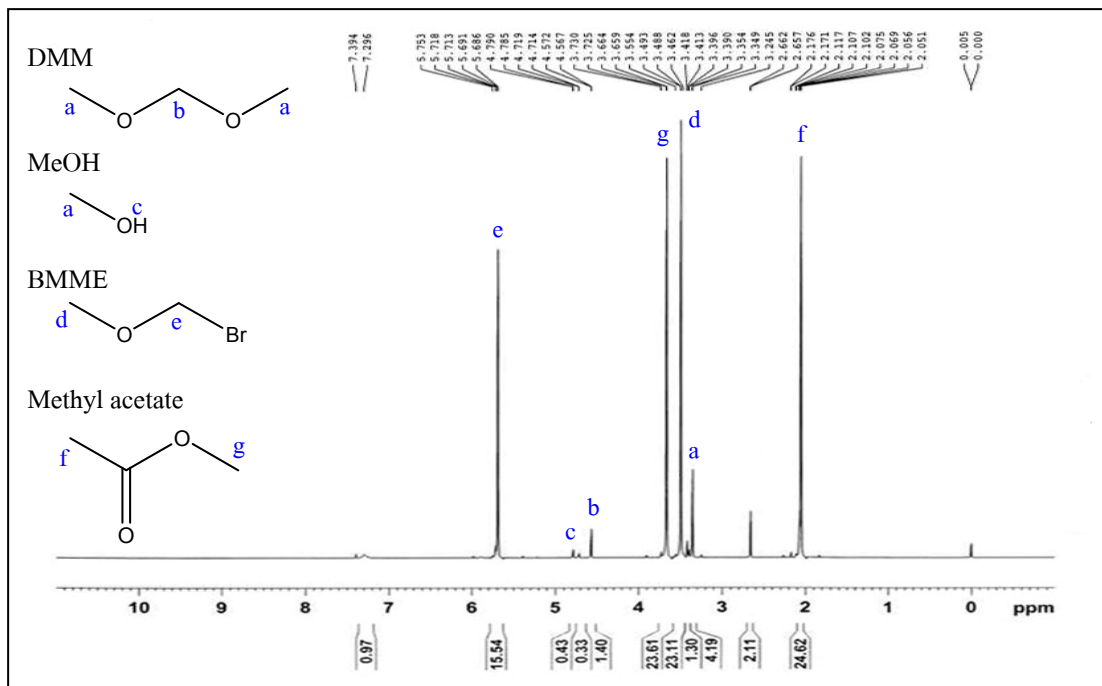


รูปที่ 4.14 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์โบรโมเมทิลเมทิล อีเธอร์



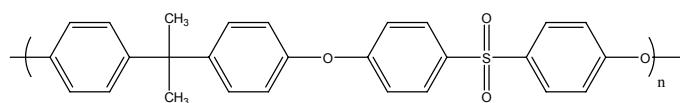
รูปที่ 4.15 โครงสร้างทางเคมีของ BMME

เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ จะพบสเปกตรัมเฉพาะของ BMME คือ $\text{O-CH}_2\text{-Br}$ ปรากฏที่ตำแหน่ง 5.6 ppm (ตำแหน่ง c ในรูปที่ 4.16) และสารอื่นๆ ที่ปนเปื้อนแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ปริมาณของสารแต่ละตัวนั้นสามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟจากสเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ดังแสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ก พบว่ามีปริมาณของ BMME คิดเป็นความเข้มข้นเท่ากับ 5.676 โมล/ลิตร

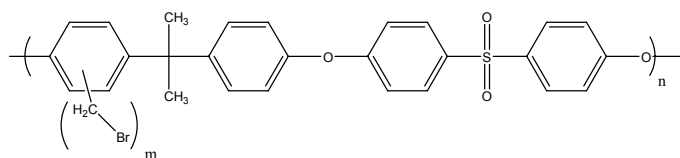


รูปที่ 4.16 ¹H-NMR Spectrum ของสารละลายผสมระหว่าง BMME และสารปนเปื้อน

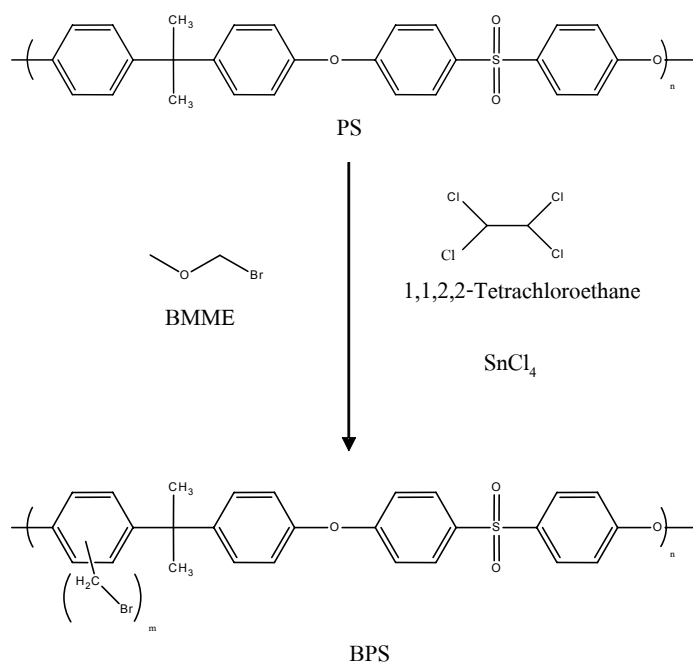
ทำโพลิเมทิลเลชัน Polysulfone ด้วย BMME ที่สังเคราะห์ได้ โดยโครงสร้างของ Polysulfone ก่อนการทำโพลิเมทิลเลชัน และโครงสร้างของ BPS ที่ได้หลังการทำโพลิเมทิลเลชันแล้ว แสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ ปฏิกริยาการทำโพลิเมทิลเลชันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.17 โครงสร้างทางเคมีของ Polysulfone (PS)



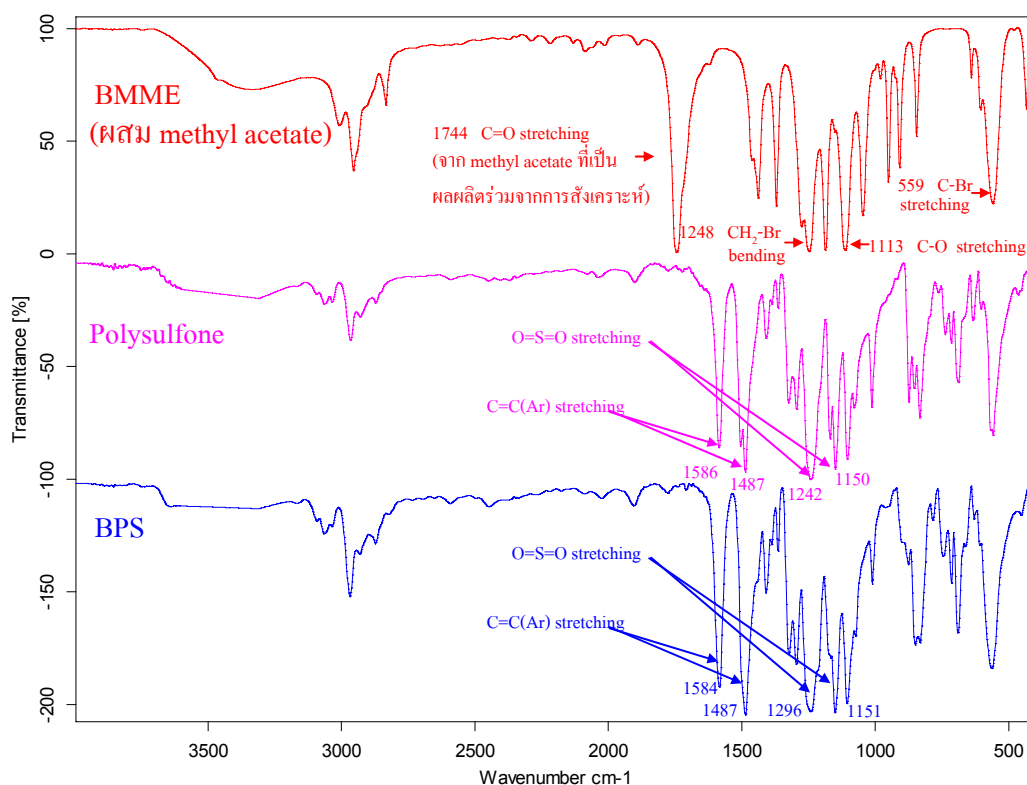
รูปที่ 4.18 โครงสร้างทางเคมีของ BPS



รูปที่ 4.19 ปฏิกิริยาการทำโบรมอเมทิลเลชันพอลิซัลโฟนด้วย BMME

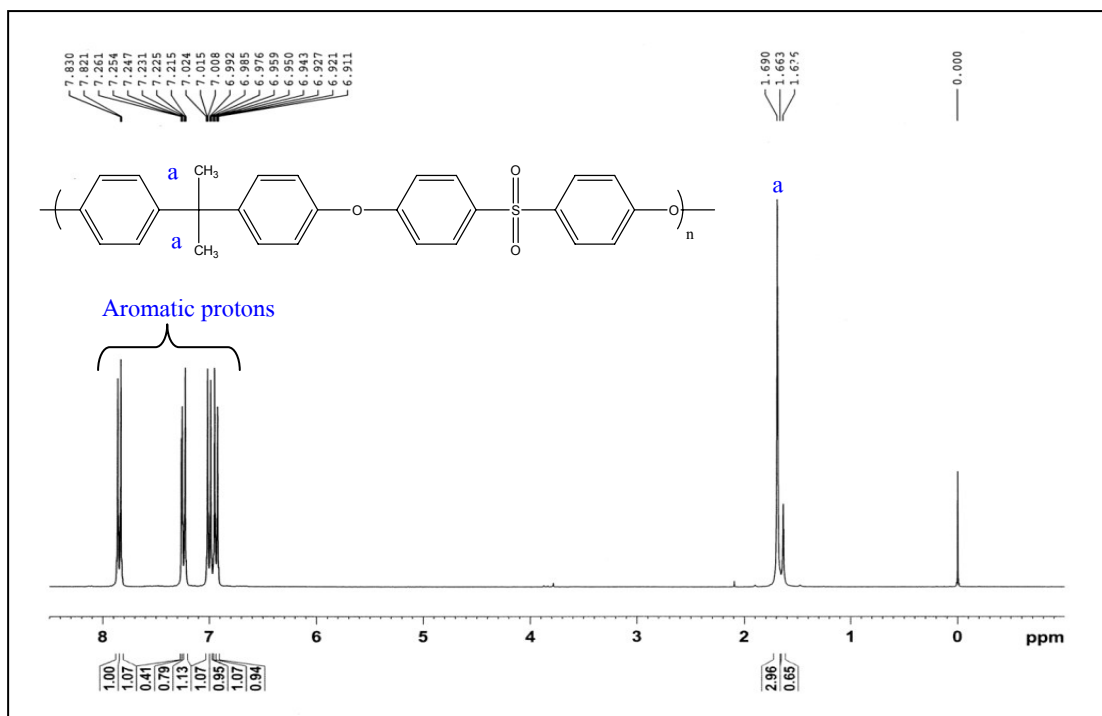
BPS ที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นผงสีขาวมีน้ำหนัก 6.36 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (%Yield) เท่ากับ 68.78 % ซึ่ง BPS ที่สังเคราะห์ได้นี้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ¹H-NMR มีปริมาณหมู่ Br คิดเป็น 2.9547 meq.Br ต่อ 1 g ของ BPS

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า ในส่วนของสารละลายผสมระหว่าง BMME กับสารผลิตภัณฑ์ร่วมคือ methyl acetate ที่ปนมาด้วย จะปรากฏเส้นสเปกตรัมของหมู่ C=O ที่ 1744 cm⁻¹ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่เอสเตอร์ของ methyl acetate ในขณะที่ BMME นั้น จะแสดงลักษณะเฉพาะตัว คือ หมู่ฟังก์ชัน CH₂-Br ที่ 1248 cm⁻¹ , C-Br ที่ 559 cm⁻¹ และ หมู่ C-O ที่เป็นลักษณะเฉพาะของหมู่อีเทอร์ที่ 1113 cm⁻¹ ในส่วนของ Polysulfone นั้น จะแสดงหมู่ซัลโฟน 2 แบนด์ คือ ที่ 1242 cm⁻¹ (asymmetric stretching) และ ที่ 1150 cm⁻¹ (symmetric stretching) [29] ความเป็นวงแหวนอะโรมาติก จะแสดงแบนด์ที่สำคัญ 2 ตำแหน่ง จากการดึงยึดของ C=C(Ar) [29] คือที่ 1487 และ 1586 cm⁻¹ นอกจากนี้แล้วแบนด์ที่ 833 cm⁻¹ แสดงให้เห็นถึงการแทนที่ 2 ตำแหน่งบนวงแหวนอะโรมาติกเป็นแบบ *para* อีกด้วย[30] แบนด์ที่แสดงถึงหมู่อีเทอร์ C-O คือ 1104 cm⁻¹ ดังแสดงในรูปที่ 4.20

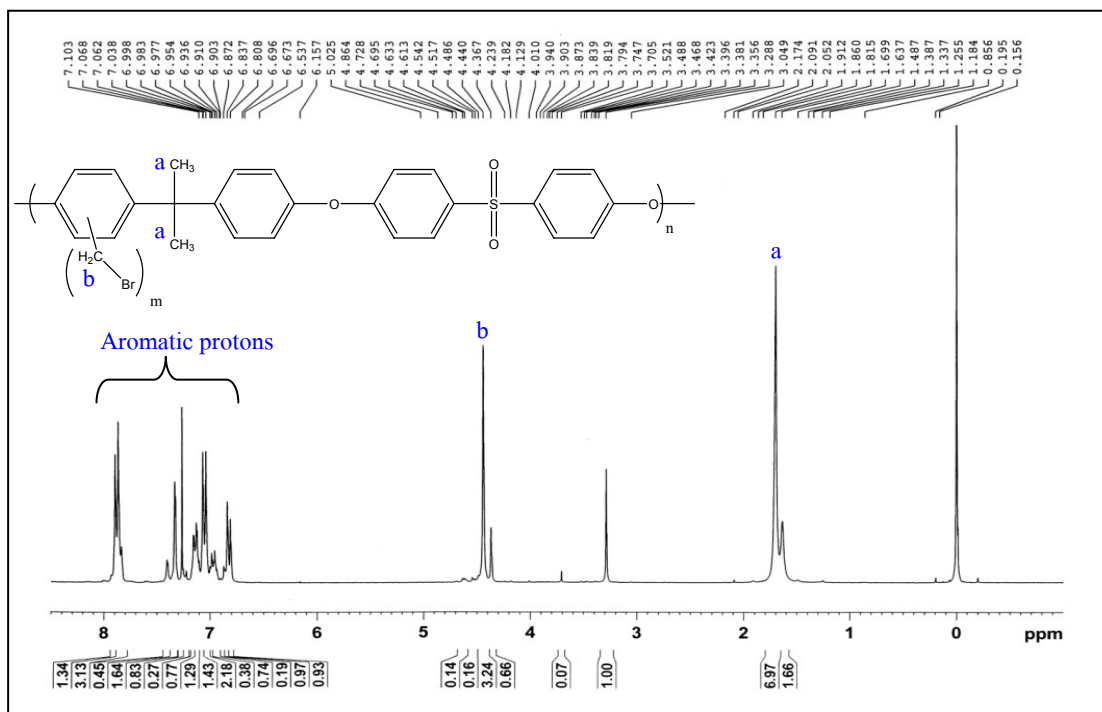


รูปที่ 4.20 FT-IR Spectrum ของ BMME, Polysulfone และ BPS

เมื่อผ่านการทำโบรมิเมทิลเลชันแล้ว Polysulfone จะมีหมู่ฟังก์ชันของ $\text{CH}_2\text{-Br}$ เพิ่มขึ้นมา ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR นั้นจะไม่เห็นความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังการทำปฏิกิริยา แต่จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ จะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน เนื่องจากจะปรากฏสเปกตรัมของ $\text{CH}_2\text{-Br}$ ที่ประมาณ 4.4 ppm ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22 และสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณ $\text{CH}_2\text{-Br}$ ที่ติดอยู่กับ Polysulfone ได้โดยการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 4.4 ppm (ตำแหน่ง b ในรูปที่ 4.22) ซึ่งเป็นตัวแทนของ $\text{CH}_2\text{-Br}$ กับพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 1.6 ppm (ตำแหน่ง a ในรูปที่ 4.22) ซึ่งเป็นตัวแทนของ CH_3 พบว่ามีปริมาณ $\text{CH}_2\text{-Br}$ บน Polysulfone เท่ากับ 1.8 ตัวต่อหนึ่งหน่วยซ้ำ



รูปที่ 4.21 ¹H-NMR Spectrum ของ Polysulfone ใน CDCl₃



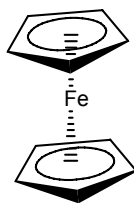
รูปที่ 4.22 ¹H-NMR Spectrum ของ BPS ใน CDCl₃

4.1.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์กรดเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิลิกด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$

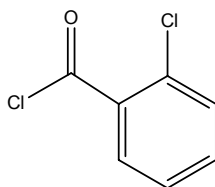
การสังเคราะห์กรดเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิลิกนั้น ประกอบด้วยสองขั้นตอน ดังนี้

4.1.2.1 การสังเคราะห์ (2-Chlorobenzoyl) ferrocene

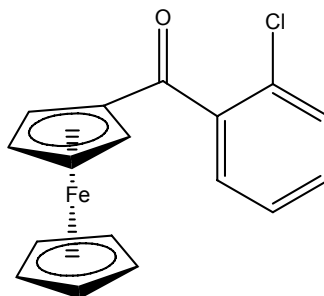
เมื่อนำ ferrocene ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.23 และ 2-chlorobenzoyl chloride ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.24 มาทำปฏิกิริยากันโดยมี AlCl_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้น ทำให้ได้ (2-Chlorobenzoyl) ferrocene ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.25 ที่มีลักษณะเป็นผงของแข็งสีแดงเข้ม ซึ่งจากการสังเคราะห์สามารถได้ (2-Chlorobenzoyl) ferrocene น้ำหนัก 28.32 g ซึ่งคิดเป็นร้อยละผลผลิต (%yield) เท่ากับ 87.35 % โดยที่ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.26 ดังนี้



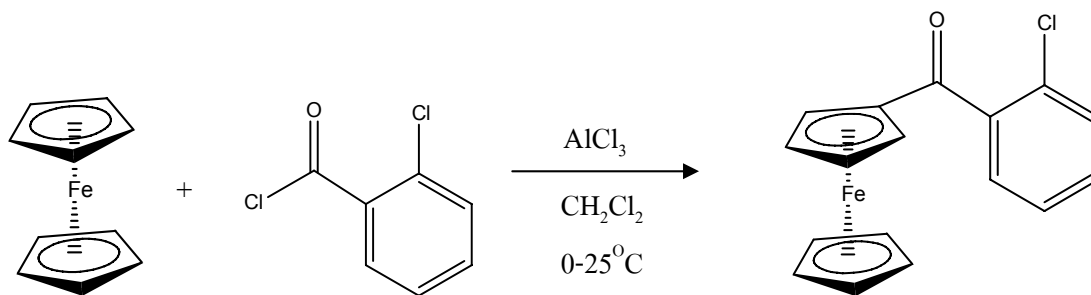
รูปที่ 4.23 โครงสร้างทางเคมีของ ferrocene



รูปที่ 4.24 โครงสร้างทางเคมีของ 2-chlorobenzoyl chloride

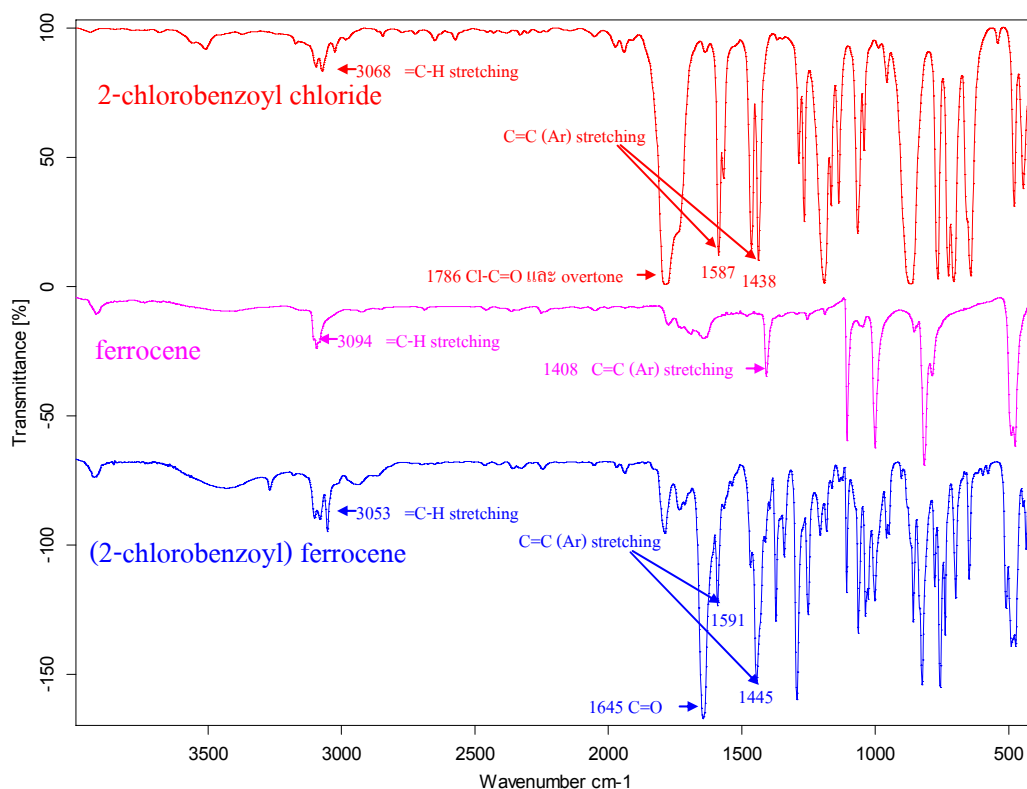


รูปที่ 4.25 โครงสร้างทางเคมีของ (2-chlorobenzoyl) ferrocene



รูปที่ 4.26 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ (2-Chlorobenzoyl) ferrocene

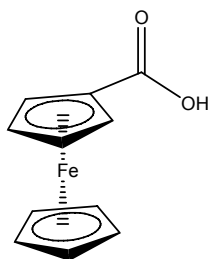
จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า คลอไรด์ของกรดประเภอะโรมาติกของ 2-chlorobenzoyl chloride จะให้แบนด์ของหมู่ C=O ในช่วง $1770-1800\text{ cm}^{-1}$ และจะมี overtone ที่มีความเข้มต่ำปรากฏเป็น “หัวไหล่” ทางด้านเลขคลื่นต่ำของแบนด์ C=O นี้ด้วย [30] นอกจากนี้ยังปรากฏแบนด์การดึงยืดของ =C-H บริเวณ 3068 cm^{-1} และ C=C (Ar) ที่ 1438 และ 1587 cm^{-1} ของวงแหวนอะโรมาติกอีกด้วย ในส่วนของ Ferrocene นั้นจะแสดงความเป็นอะโรมาติกซึ่งเห็นได้จากแบนด์การดึงยืดของ C=C (Ar) ที่ 1408 cm^{-1} และ =C-H ที่ 3094 cm^{-1} ในส่วนของ (2-chlorobenzoyl) ferrocene นั้น จะแสดงหมู่ C=O ที่แตกต่างจากของ 2-chlorobenzoyl chloride อย่างชัดเจน กล่าวคือจะย้ายมาเกิดที่ 1645 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ C=O ที่ไม่ได้ติดอยู่กับคลอไรด์อีกต่อไป และแสดงความเป็นอะโรมาติกซึ่งเห็นได้จากแบนด์การดึงยืดของ C=C (Ar) ที่ 1445 และ 1591 cm^{-1} และ =C-H ที่ 3053 cm^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 4.27



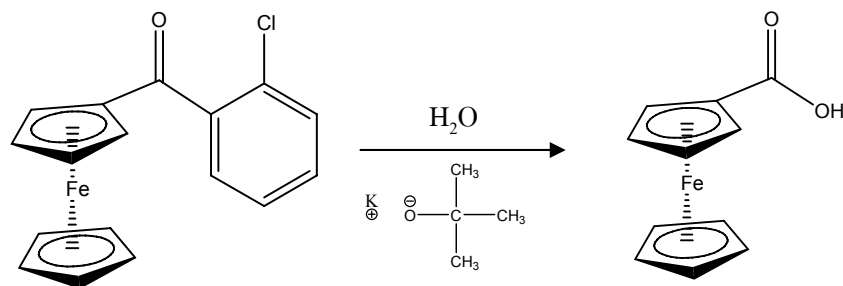
รูปที่ 4.27 FT-IR Spectrum ของ 2-chlorobenzoyl chloride, ferrocene และ (2-chlorobenzoyl) ferrocene

4.1.2.2 การสังเคราะห์ ferrocenecarboxylic acid (FCC)

ferrocenecarboxylic acid (FCC) ที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.28 ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง (2-chlorobenzoyl) ferrocene ที่เตรียมได้จากขั้นตอนแรก กับ potassium-*t*-butoxide และน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.29 FCC ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลือง มีน้ำหนัก 13.80 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (%yield) เท่ากับ 68.78 %

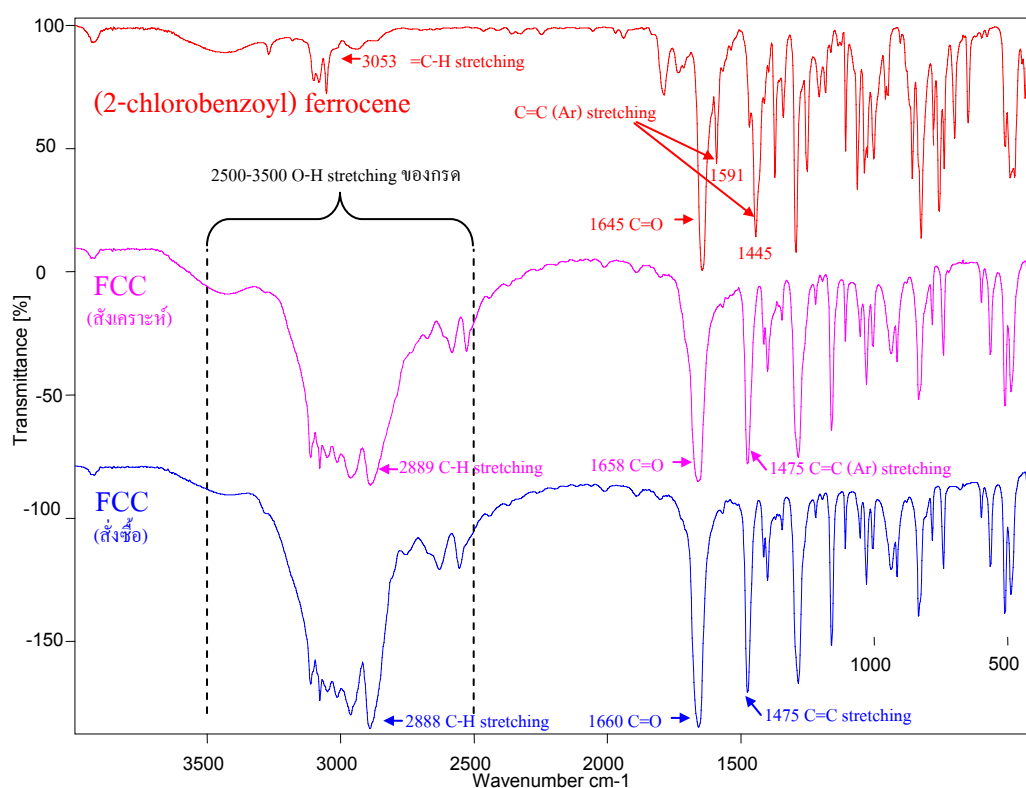


รูปที่ 4.28 โครงสร้างทางเคมีของกรด ferrocene carboxylic (FCC)



รูปที่ 4.29 ปฏิกิริยาการการสังเคราะห์ ferrocenecarboxylic acid

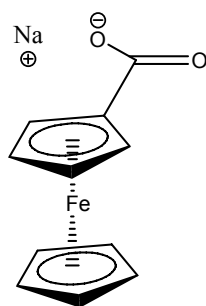
จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า FCC ที่สังเคราะห์ได้ให้เส้นสเปกตรัมที่ตรงกับ FCC ที่สั่งซื้อมา กล่าวคือ พบแบนด์กว้างในช่วง $2500\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของหมู่ OH ของกรด และซ้อนทับกับแบนด์การดึงยืดของ C-H ที่ประมาณ $2888\text{--}2889\text{ cm}^{-1}$ และพบหมู่ C=O ที่ประมาณ $1658\text{--}1660\text{ cm}^{-1}$ และ C=C (Ar) ของวงแหวนอะโรมาติกที่ 1475 cm^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 4.30



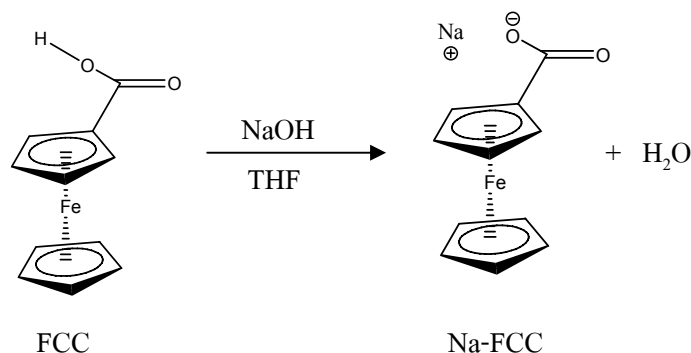
รูปที่ 4.30 FT-IR Spectrum ของ (2-chlorobenzoyl) ferrocene, FCC (สังเคราะห์) และ FCC (สั่งซื้อ)

4.1.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์เกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na-FCC) ด้วยเทคนิค FT-IR

Na-FCC ที่สังเคราะห์ได้จาก FCC กับ NaOH จะมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองทอง มีน้ำหนัก 14.35 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (%yield) เท่ากับ 99.17 % มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 4.31 และปฏิกิริยาการเกิด Na-FCC จาก FCC กับ NaOH นั้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.32



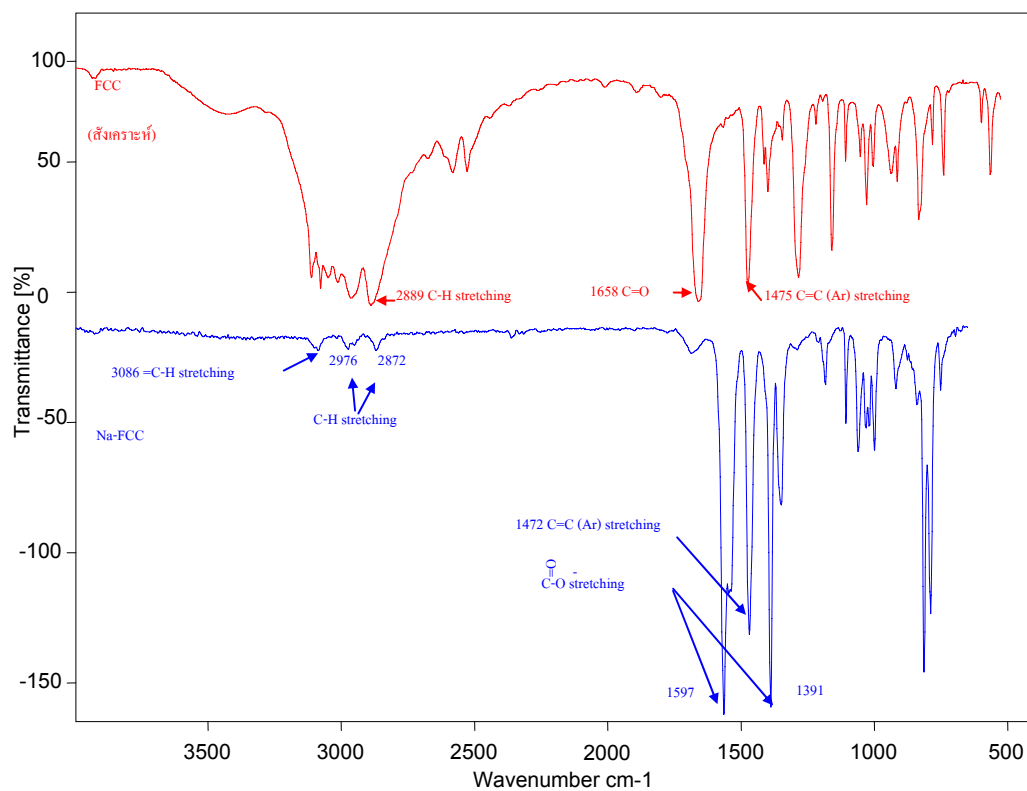
รูปที่ 4.31 โครงสร้างทางเคมีของเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na-FCC)



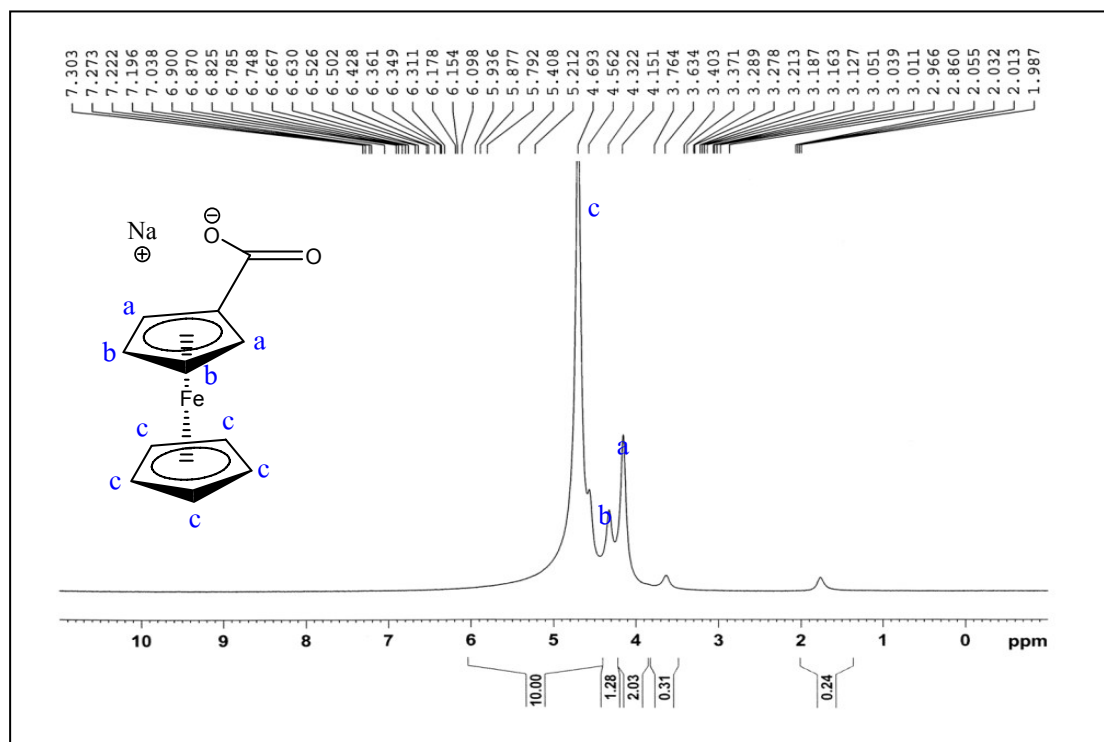
รูปที่ 4.32 ปฏิกิริยาการเตรียมเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า เกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต (Na-FCC) จะปรากฏแบนด์ของการคืบยืดหมู่ C=O 2 ตำแหน่ง คือ แบบอสมมาตร (asymmetric stretching) ที่ตำแหน่งใกล้ 1600 cm^{-1} และแบบสมมาตร (symmetric stretching) อยู่ที่ตำแหน่งใกล้ 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 ดังแสดงในรูปที่ 4.33

จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า Na-FCC ที่สังเคราะห์ได้จะปรากฏสเปกตรัมของโปรตอนบนวงแหวน อะโรมาติกห้าเหลี่ยมในช่วง 4-5 ppm ดังแสดงในรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.33 FT-IR Spectrum ของ FCC (สังเคราะห์) และ Na-FCC



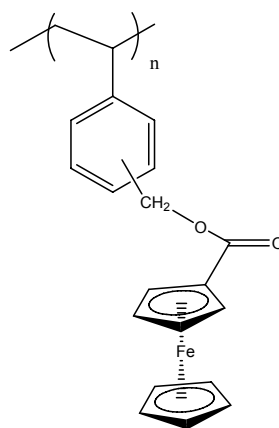
รูปที่ 4.34 ^1H -NMR Spectrum ของ Na-FCC ใน CDCl_3

4.1.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์พอลิเมอร์ตัวรองรับที่ผ่านการทำเอสเทอร์รีฟิเคชันด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์ไรซินคาร์บอกซิเลตด้วยเทคนิค FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$

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

4.1.4.1 การทำเอสเทอร์รีฟิเคชันของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์

การสังเคราะห์ PVB FCC ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.35 จากการทำเอสเทอร์รีฟิเคชัน PVBC ด้วย Na-FCC ทำให้ได้เฟอร์ไรซินคาร์บอกซิเมทิลเลเตตพอลิเมอร์ที่เป็นผงละเอียดสีน้ำตาลแกมเหลือง มีน้ำหนักเท่ากับ 2.3 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 68.84 % โดยที่ปฏิกิริยาการทำเอสเทอร์รีฟิเคชันดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.36



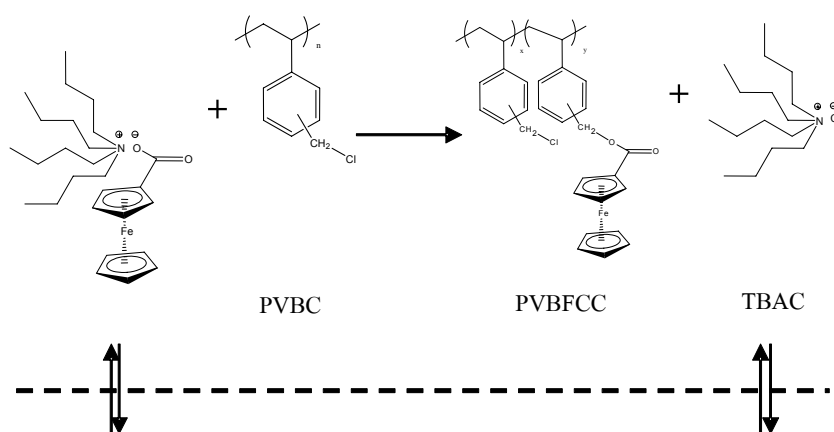
รูปที่ 4.35 โครงสร้างทางเคมีของ PVB FCC

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า PVB FCC ที่สังเคราะห์ได้นั้นจะมีหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของหมู่เอสเทอร์ ปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน คือ C=O ที่ 1713 cm^{-1} และ C-O-C ที่จะมีแบนด์การดัดงอที่มีความเข้มสูง 2 แบนด์ คือ 1131 และ 1275 cm^{-1} นอกจากนี้แบนด์ที่เคยเป็นของ C-Cl ที่เกิดขึ้นที่ประมาณ 705 cm^{-1} จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.37

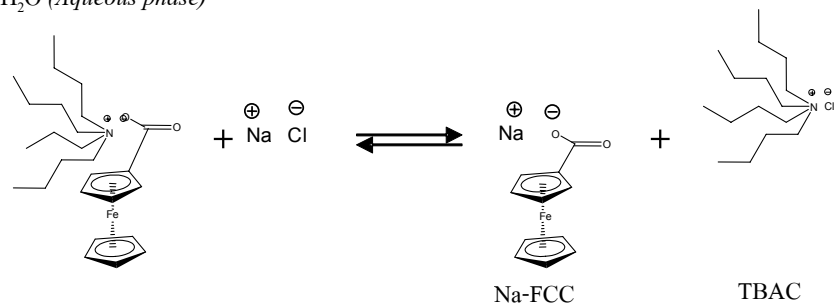
จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า PVB FCC ที่สังเคราะห์ได้นั้นจะปรากฏสเปกตรัมของ FCC เพิ่มขึ้นมาที่ตำแหน่งสัญญาณในช่วง 4.3-5.2 ppm 3 แบนด์ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ FCC (ตำแหน่ง f, g และ h ในรูปที่ 4.38) นอกจากนี้ยังพบการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์ $\text{CH}_2\text{-Cl}$ ที่กลายมาเป็น $\text{CH}_2\text{-FCC}$ จากเดิมจะเกิดที่ตำแหน่ง 4.4 ppm ลดลงมาเป็น 4.0 ppm

(ตำแหน่ง e ในรูปที่ 4.38) เนื่องจาก FCC มีความสามารถในการดึงคู่อิเล็กตรอนได้น้อยกว่าอะตอมของคลอรีน ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสเพิ่มมากขึ้นจึงต้องใช้ความเข้มของสนามแม่เหล็กในการทำให้เกิดสปินของโปรตอนเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง

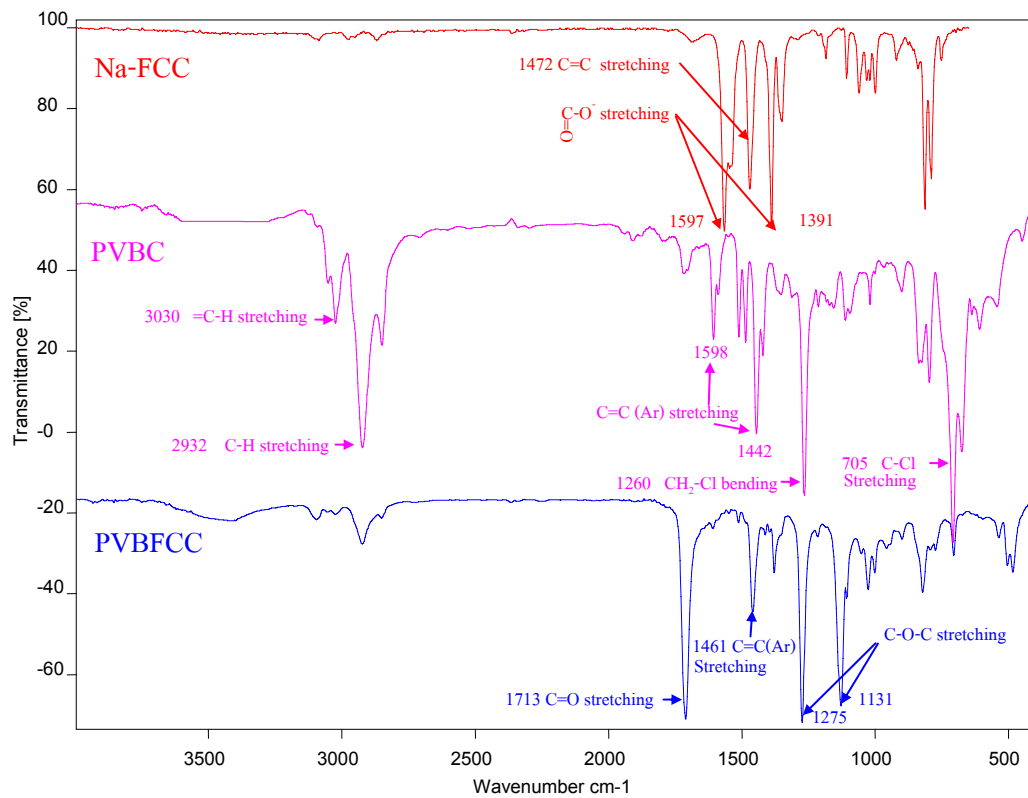
Toluene (Organic phase)



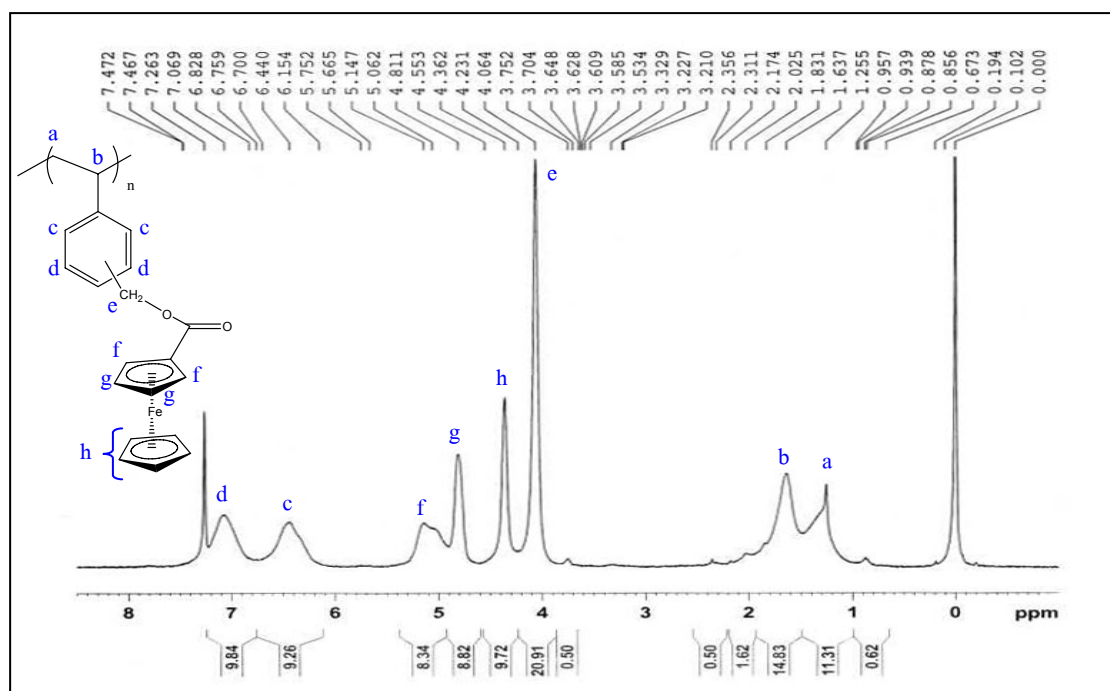
H₂O (Aqueous phase)



รูปที่ 4.36 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของ PVBC ด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต



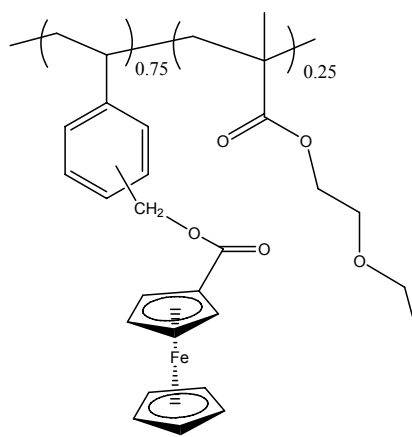
รูปที่ 4.37 FT-IR Spectrum ของ Na-FCC, PVBC และ PVB FCC



รูปที่ 4.38 ^1H -NMR Spectrum ของ PVB FCC ใน CDCl_3

4.1.4.2 การทำเอสเทอร์ฟิเคชันของโคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์- โค-เอทอกรอกซิเอทิลเมทาคริเลต 75/25

การสังเคราะห์ Co-PVBFCC75/25 ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.39 จากการทำเอสเทอร์ฟิเคชัน Co-PVBC75/25 ด้วย Na-FCC ทำให้ได้เฟอร์โรซีนคาร์บอกซีเมทาคริเลตพอลิเมอร์ที่เป็นผงสีน้ำตาล มีน้ำหนักเท่ากับ 1.8 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 93.75 % โดยที่ปฏิกิริยาการทำเอสเทอร์ฟิเคชันดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.40



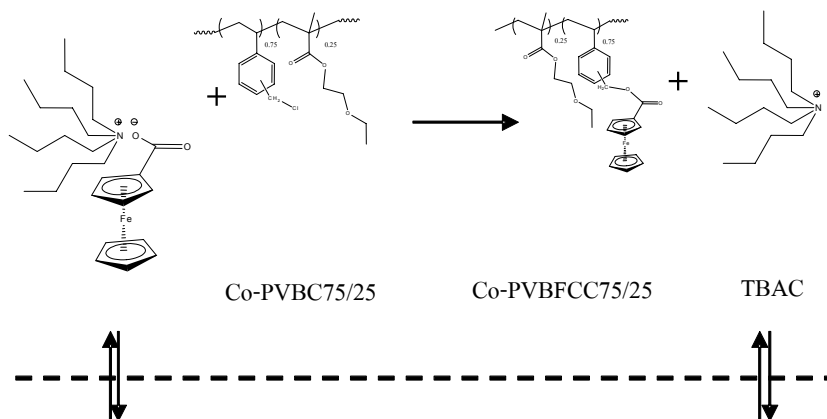
รูปที่ 4.39 โครงสร้างทางเคมีของ Co-PVBFCC75/25

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า Co-PVBFCC75/25 ที่สังเคราะห์ได้นั้นจะมีความแตกต่างที่ไม่เด่นชัดนักเมื่อเปรียบเทียบกับ Co-PVBC75/25 เนื่องจากสารทั้งสองมีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์เช่นเดียวกัน โดยที่หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ของ Co-PVBFCC75/25 นั้นจะปรากฏ C=O ที่ 1711 cm^{-1} และ C-O-C ที่จะมีแบนด์การดัดงอที่มีความเข้มสูง 2 แบนด์ ที่ 1127 และ 1273 cm^{-1} แต่สิ่งที่เห็นได้เด่นชัด คือ การลดลงของแบนด์ C-Cl ที่เกิดขึ้นที่ประมาณ 705 cm^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 4.41

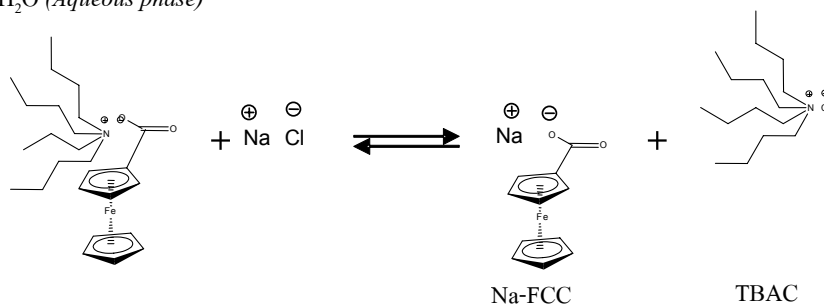
จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า Co-PVBFCC75/25 ที่สังเคราะห์ได้นั้นจะปรากฏสเปกตรัมของ FCC เพิ่มขึ้นมาที่ตำแหน่งสัญญาณในช่วง 4.3-5.2 ppm 3 แบนด์ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ FCC (ตำแหน่ง f, g และ h ในรูปที่ 4.42) นอกจากนี้ยังพบการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์ $\text{CH}_2\text{-Cl}$ ที่กลายมาเป็น $\text{CH}_2\text{-FCC}$ จากเดิมจะเกิดที่ตำแหน่ง 4.4 ppm ลดลงมาเป็น 4.09 ppm (ตำแหน่ง e ในรูปที่ 4.42) เช่นเดียวกันกับกรณีของ PVBFCC นอกจากนี้จะมีเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของหมู่ CH_3 เพิ่มขึ้นมาซึ่งจะไม่พบในกรณีของ PVBFCC ที่ตำแหน่ง 1.11 และ

0.87 ppm (ตำแหน่ง i และ l ในรูปที่ 4.42) และของหมู่ CH_2 ที่ติดกับออกซิเจน ที่ตำแหน่งประมาณ 3.32-3.33 ppm (ตำแหน่ง k และ j ในรูปที่ 4.42)

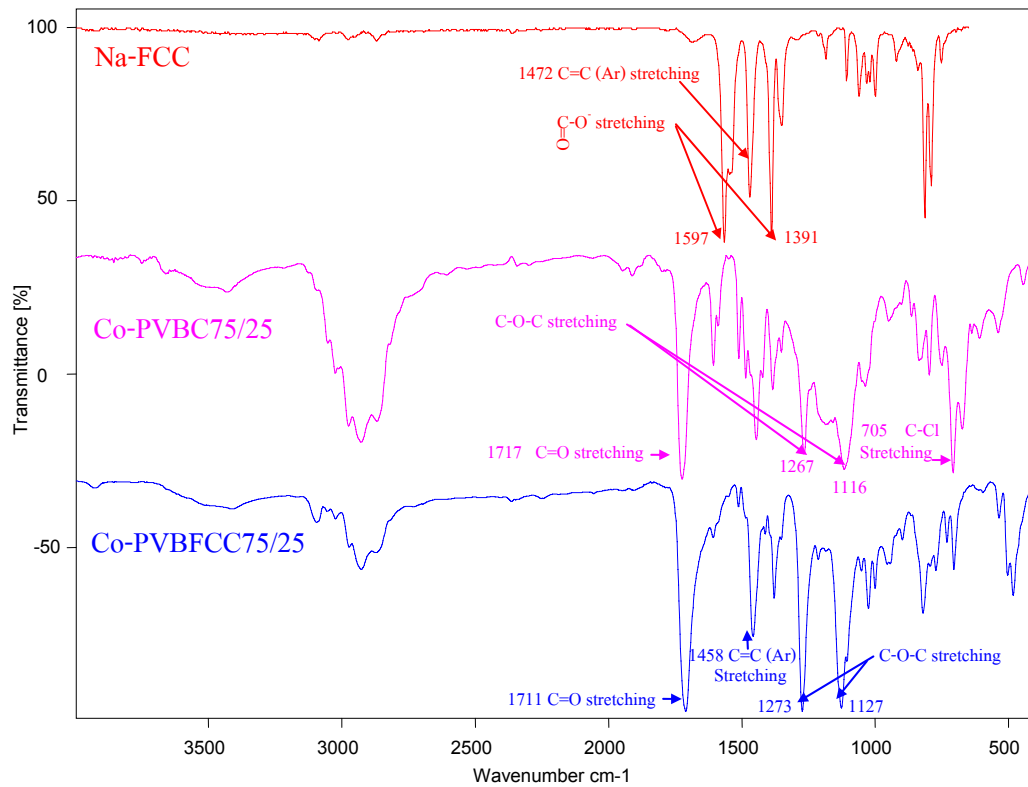
Toluene (*Organic phase*)



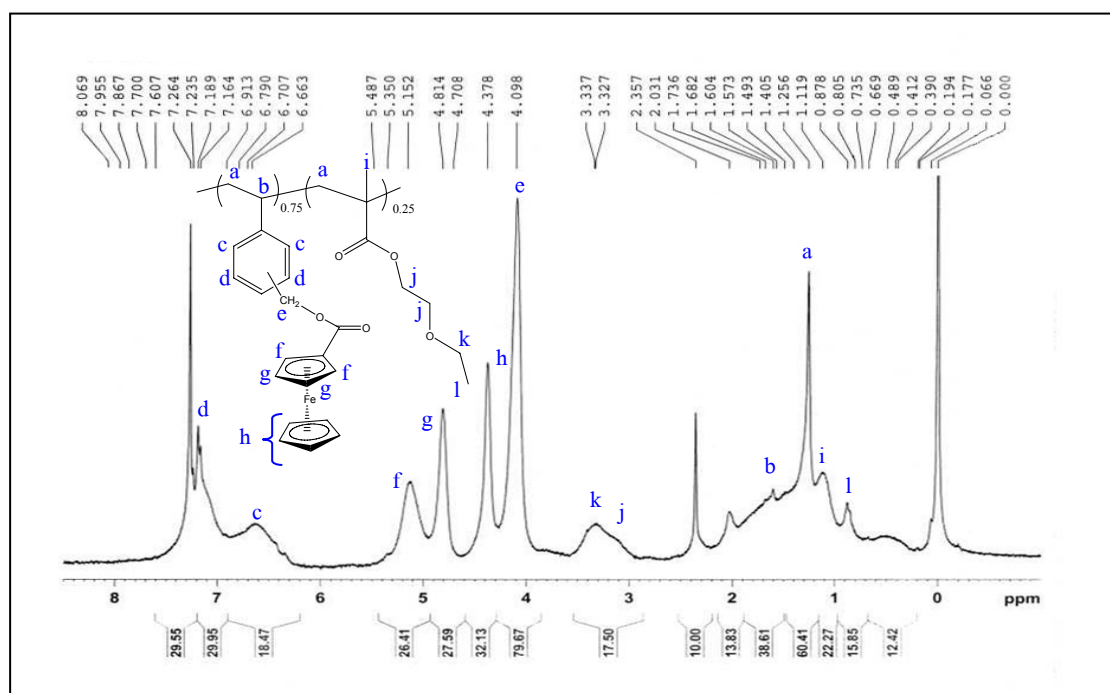
H_2O (*Aqueous phase*)



รูปที่ 4.40 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของ Co-PVBC75/25 ด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต



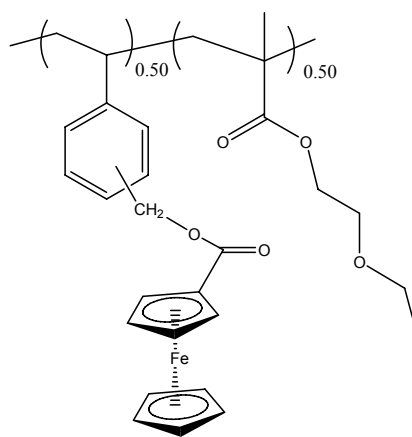
รูปที่ 4.41 FT-IR Spectrum ของ Na-FCC, Co-PVBC75/25 และ Co-PVBFCC75/25



รูปที่ 4.42 ¹H-NMR Spectrum ของ Co-PVBFCC75/25 ใน CDCl₃

4.1.4.3 การทำเอสเทอร์ฟิเคชันของโคพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์- โกล-เอท ทรอกซีเอทธีลเมทาคริเลต 50/50

การสังเคราะห์ Co-PVBFCC50/50 ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.43 จากการทำเอสเทอร์ฟิเคชัน Co-PVBC50/50 ด้วย Na-FCC ทำให้ได้เฟอร์โรซีนคาร์บอกซีเมทธีลเลเตตพอลิเมอร์ที่เป็นผงสีน้ำตาลเข้ม มีน้ำหนักเท่ากับ 2.09 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 98.29 % โดยที่ปฏิกิริยาการทำเอสเทอร์ฟิเคชันดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.44



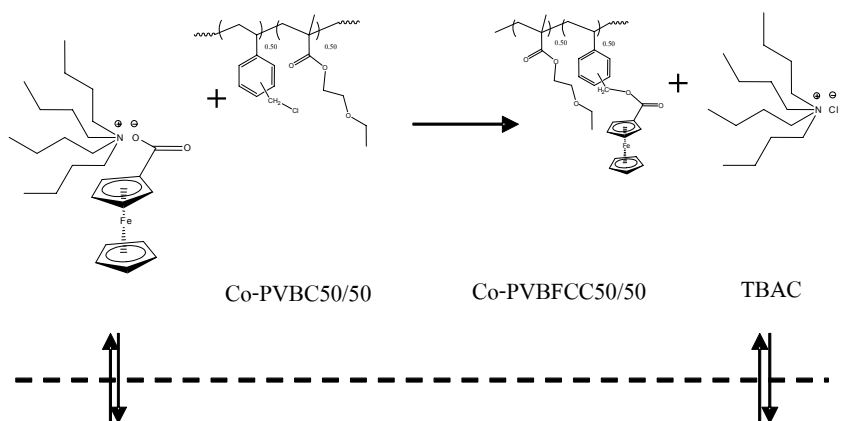
รูปที่ 4.43 โครงสร้างทางเคมีของ Co-PVBFCC50/50

จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า Co-PVBFCC50/50 มีลักษณะเช่นเดียวกันกับกรณีของ Co-PVBFCC75/25 คือ Co-PVBFCC50/50 ที่สังเคราะห์ได้นั้นจะมีความแตกต่างที่ไม่เด่นชัดนักเมื่อเปรียบเทียบกับ Co-PVBC50/50 เนื่องจากสารทั้งสองมีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์เช่นเดียวกัน โดยที่หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ของ Co-PVBFCC50/50 นั้น จะปรากฏ C=O ที่ 1713 cm^{-1} และ C-O-C ที่จะมีแบนด์การดิงยัดที่มีความเข้มสูง 2 แบนด์ ที่ 1127 และ 1273 cm^{-1} แต่สิ่งที่เห็นได้เด่นชัดคือการลดลงของแบนด์ C-Cl ที่เกิดขึ้นที่ประมาณ 705 cm^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 4.45

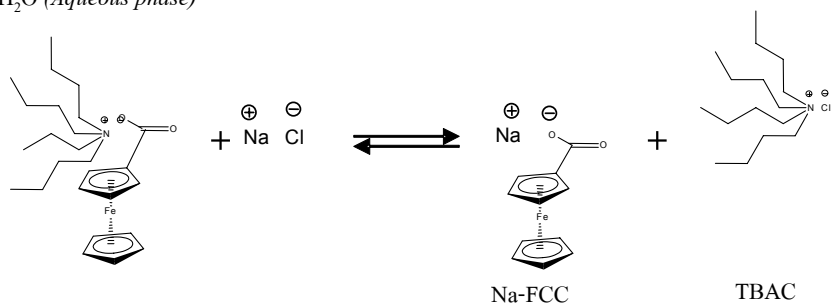
จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า Co-PVBFCC50/50 ที่สังเคราะห์ได้นั้นจะปรากฏสเปกตรัมของ FCC เพิ่มขึ้นมาที่ตำแหน่งสัญญาณในช่วง 4.38-5.15 ppm 3 แบนด์ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ FCC (ตำแหน่ง f, g และ h ในรูปที่ 4.46) นอกจากนี้ยังพบการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์ $\text{CH}_2\text{-Cl}$ ที่กลายมาเป็น $\text{CH}_2\text{-FCC}$ จากเดิมจะเกิดที่ตำแหน่ง 4.4 ppm ลดลงมาเป็น 4.12 ppm (ตำแหน่ง e ในรูปที่ 4.46) เช่นเดียวกันกับกรณีของ PVBFCC นอกจากนี้จะมีเส้นสเปกตรัมเด่นชัดของหมู่ CH_3 เพิ่มขึ้นมาซึ่งจะไม่พบในกรณีของ PVBFCC ที่ตำแหน่ง 1.15 และ

0.87 ppm (ตำแหน่ง i และ l ในรูปที่ 4.46) และของหมู่ CH_2 ที่ติดกับออกซิเจน ที่ตำแหน่งประมาณ 3.19-3.45 ppm (ตำแหน่ง k และ j ในรูปที่ 4.46)

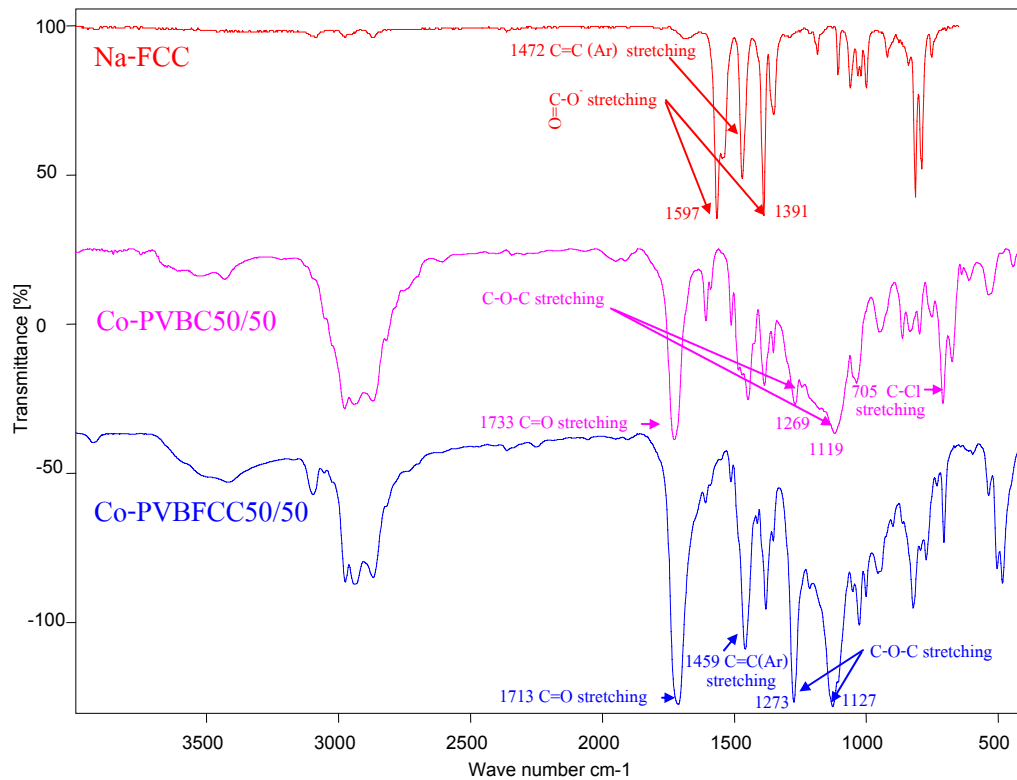
Toluene (*Organic phase*)



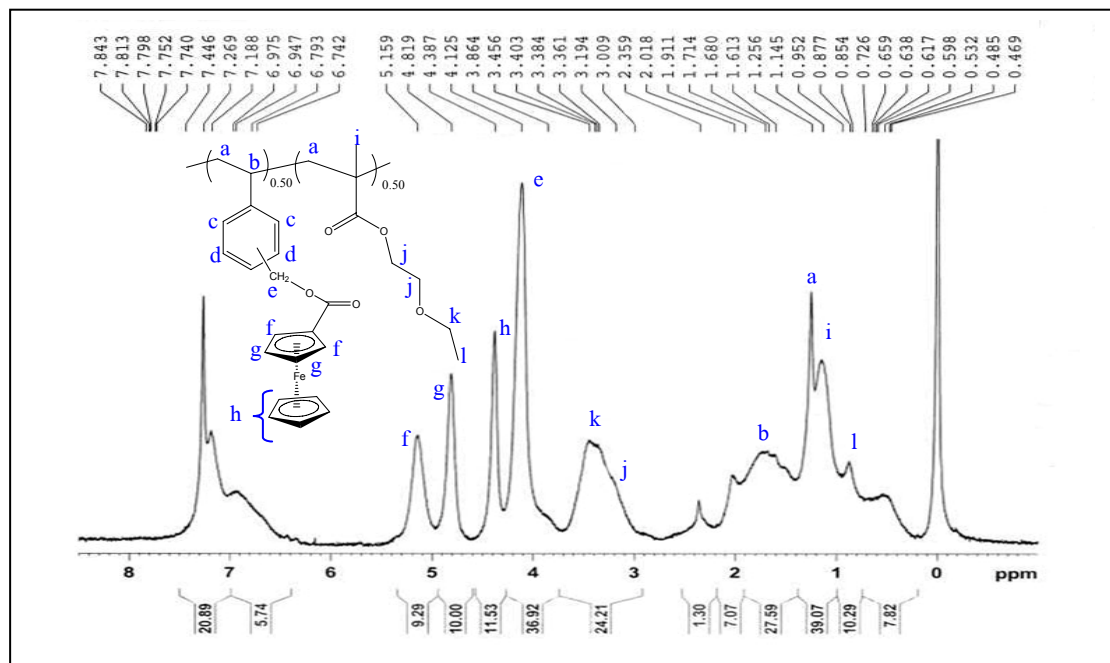
H_2O (*Aqueous phase*)



รูปที่ 4.44 ปฏิกิริยาเอสเตอร์รีฟิเคชันของ Co-PVBC50/50 ด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต



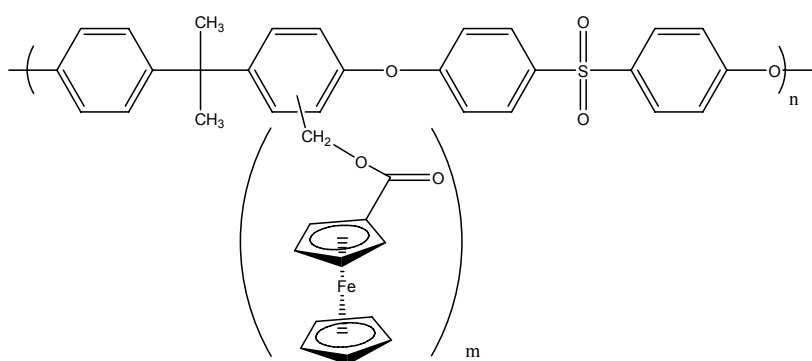
รูปที่ 4.45 FT-IR Spectrum ของ Na-FCC, Co-PVBC50/50 และ Co-PVBFCC50/50



รูปที่ 4.46 ^1H -NMR Spectrum ของ Co-PVBFCC50/50 ใน CDCl_3

4.1.4.4 การทำเอสเทอร์ฟิเคชันของโบรโมเมทิลเลตพอลิซัลโฟน

การสังเคราะห์ BPSFCC ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.47 จากการทำเอสเทอร์ฟิเคชัน BPS ด้วย Na-FCC ทำให้ได้เฟอร์โรซีนคาร์บอกซีเมทิลเลตพอลิเมอร์ที่เป็นผงสีน้ำตาลแกมเหลือง มีน้ำหนักเท่ากับ 1.24 g คิดเป็นร้อยละผลผลิต (% yield) เท่ากับ 93.12 % โดยที่ปฏิกิริยาการทำเอสเทอร์ฟิเคชันดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.48

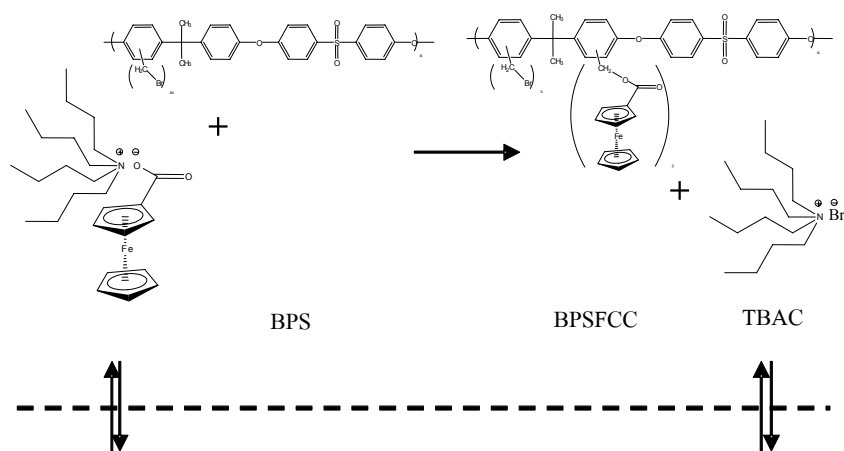


รูปที่ 4.47 โครงสร้างทางเคมีของ BPSFCC

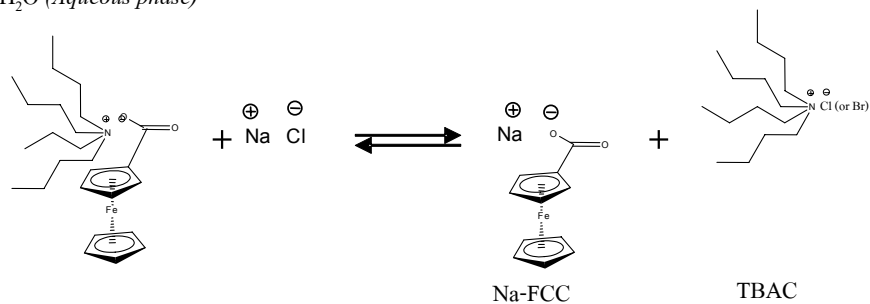
จากการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR พบว่า BPSFCC ที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจาก BPS เดิม คือ มีสเปกตรัมของ C=O ที่มาจาก FCC ที่ 1715 cm^{-1} ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.49

จากการทดสอบด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่า BPSFCC ที่สังเคราะห์ได้นั้นจะปรากฏสเปกตรัมของ FCC เพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งสัญญาณในช่วง 4.38-5.16 ppm 3 แบนด์ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ FCC (ตำแหน่ง b, c และ d ในรูปที่ 4.50) นอกจากนี้ยังพบการเลื่อนตำแหน่งของแบนด์ $\text{CH}_2\text{-Br}$ ที่กลายมาเป็น $\text{CH}_2\text{-FCC}$ จากเดิมจะเกิดที่ตำแหน่ง 4.4 ppm ลดลงมาเป็น 4.13 ppm (ตำแหน่ง a ในรูปที่ 4.50) และพบสเปกตรัมของโปรตอนในวงแหวนอะโรมาติกในช่วง 6.50-7.45 ppm และหมู่ CH_3 ที่ 1.25 ppm (ตำแหน่ง e ในรูปที่ 4.50)

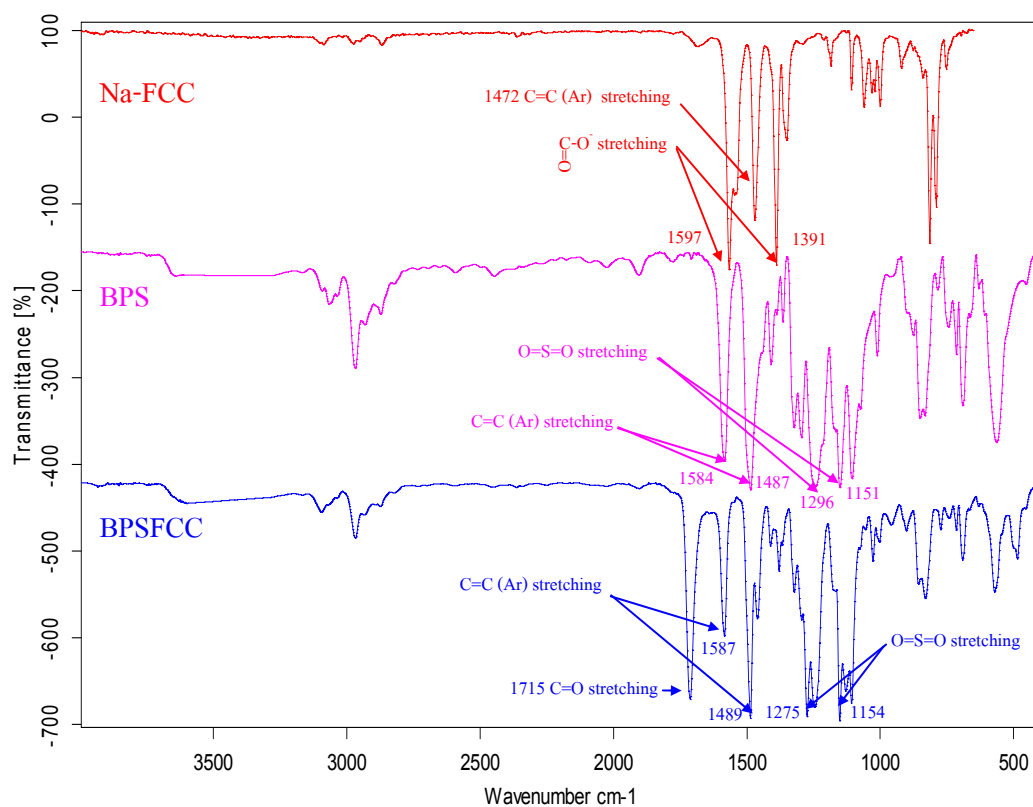
Toluene (*Organic phase*)



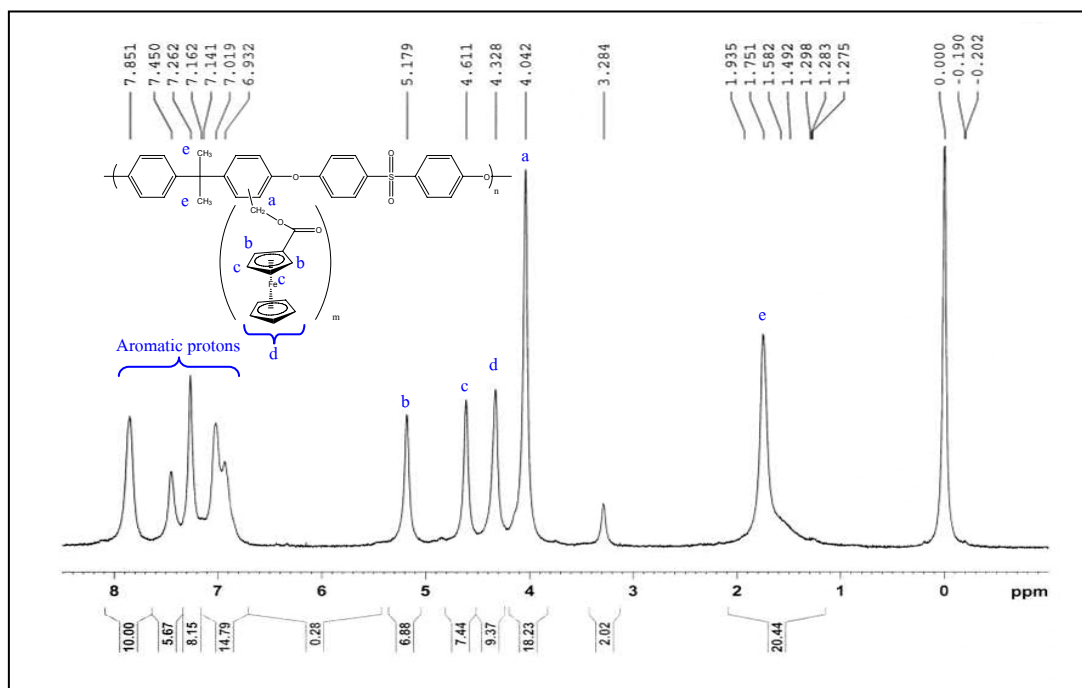
H₂O (*Aqueous phase*)



รูปที่ 4.48 ปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของ BPS ด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลต



รูปที่ 4.49 FT-IR Spectrum ของ Na-FCC, BPS และ BPSFCC



รูปที่ 4.50 ^1H -NMR Spectrum ของ BPSFCC ใน CDCl_3

4.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ตัวรองรับ

4.2.1 การทดสอบหาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับด้วยเทคนิค TGA

อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์พื้นฐานที่เป็นตัวรองรับที่ทดสอบได้จากเทคนิค TGA มีรายละเอียดของค่าอุณหภูมิการสลายตัว แสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.51 โดยสามารถเรียงลำดับพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนจากมากไปน้อยได้ดังนี้ คือ Polysulfone > BPS > PVBC > Co-PVBC75/25 > Co-PVBC50/50 ตามลำดับ

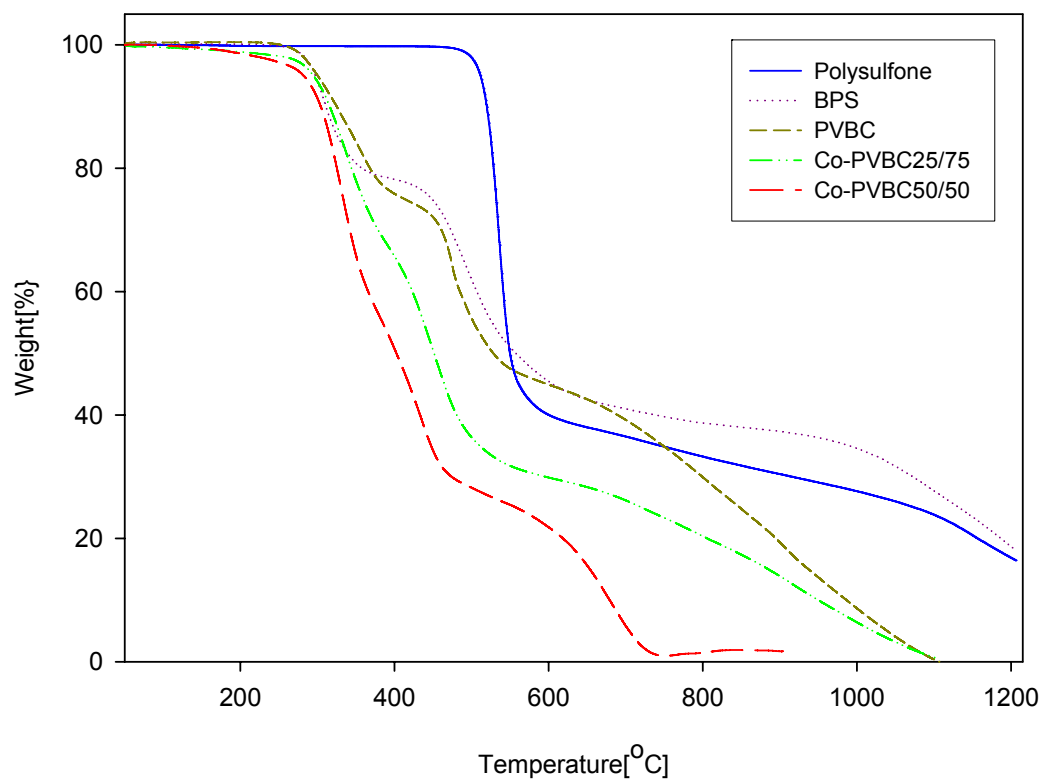
Polysulfone เป็นพอลิเมอร์ตัวรองรับที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงที่สุดเนื่องจากโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติกตลอดทั้งโมเลกุลจึงมีความแข็งแรงไม่สลายตัวได้ง่าย แต่เมื่อมีการปรับปรุงเพิ่มหมู่ $\text{CH}_2\text{-Br}$ เข้าไปจะทำให้เสถียรภาพทางความร้อนลดลง เนื่องจากเกิดการสลายตัวของอะตอมโบรมีนซึ่งสลายตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำกว่า และจะเห็นลักษณะการสลายตัวเป็นสองขั้นคือ ช่วงแรกที่เป็นการสลายตัวของอะตอมโบรมีน และช่วงสุดท้ายที่เกิดจากการสลายตัวของสายโซ่โมเลกุลหลัก

ในส่วนของ PVBC, Co-PVBC75/25 และ Co-PVBC50/50 นั้นมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่า Polysulfone เนื่องจากโครงสร้างของโมเลกุลเหล่านี้เกิดจากการสร้างพันธะกันระหว่างอะตอมของคาร์บอนเป็นเส้นตรงเรียงต่อกันไปตลอดทั้งโมเลกุลซึ่งพันธะดังกล่าวมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะในวงแหวนอะโรมาติก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างโซ่โมพอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์พบว่าโคพอลิเมอร์จะเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีองค์ประกอบที่เป็น EEM ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเอสเตอร์ที่สลายตัวได้ง่าย ยิ่งมีปริมาณของ EEM มากขึ้นอุณหภูมิการสลายตัวจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำลง

อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับนี้เป็นตัวบ่งบอกถึงอุณหภูมิการนำไปใช้งานที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนกับพอลิเมอร์ตัวรองรับ และสามารถเลือกใช้พอลิเมอร์ให้มีความเหมาะสมกับสถานะการนำไปใช้งานได้ตามต้องการ

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับ

ชื่อพอลิเมอร์ ตัวรองรับ	อุณหภูมิการสลายตัว (°C)								
	ช่วงที่ 1			ช่วงที่ 2			ช่วงที่ 3		
	onset	inflection	end	onset	inflection	end	onset	inflection	end
Polysulfone	517.65	536.72	551.76	-	-	-	-	-	-
BPS	286.32	310.26	335.11	453.71	492.35	555.51	-	-	-
PVBC	299.87	326.93	358.36	461.17	476.12	500.02	8824.94	977.68	1058.91
Co-PVBC75/25	299.34	343.63	377.88	420.61	448.99	485.99	781.97	899.94	1020.63
Co-PVBC50/50	300.23	332.31	364.18	394.10	434.99	457.28	621.53	664.71	714.92



รูปที่ 4.51 TGA thermogram เปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ตัวรองรับ

4.2.2 การทดสอบหาอุณหภูมิ glass transition ของพอลิเมอร์ตัวรองรับด้วยเทคนิค DSC

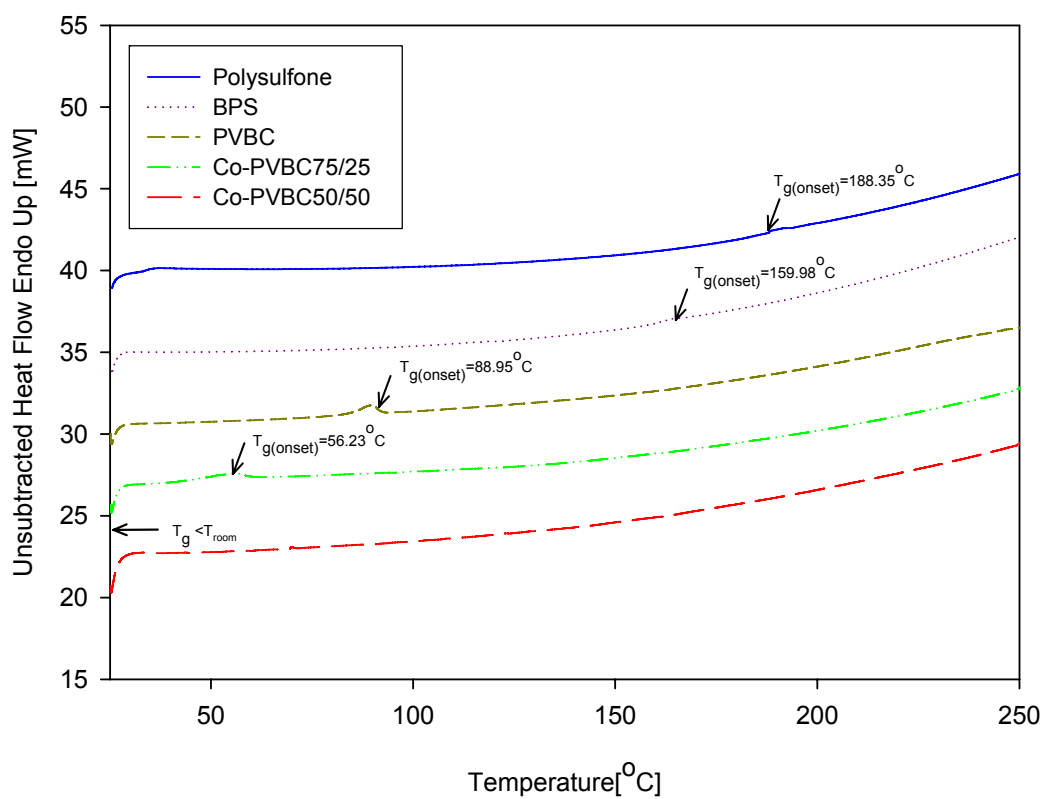
การทดสอบหาอุณหภูมิ glass transition (T_g) ด้วยเทคนิค DSC นั้น ให้ผลในทำนองเดียวกันกับอุณหภูมิการสลายตัวที่ทดสอบด้วยเทคนิค TGA นั่นคือพอลิเมอร์ตัวรองรับที่มีอุณหภูมิ T_g เรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ Polysulfone > BPS > PVBC > Co-PVBC75/25 > Co-PVBC50/50 ตามลำดับ รายละเอียดของค่าอุณหภูมิ T_g นี้แสดงไว้ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.52

Polysulfone มี T_g สูงที่สุดเนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นวงแหวนอะโรมาติกที่แข็งแกร่งตลอดสายโซ่โมเลกุล แต่เมื่อมีการเพิ่มหมู่ $-CH_2-Br$ เข้าไปและได้เป็น BPS จะทำให้มี T_g ลดลงเนื่องจากหมู่ $-CH_2-Br$ ที่เพิ่มเข้าไบนั้น จะไปช่วยเพิ่มช่องว่างระหว่างโมเลกุล (free volume) ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายมากขึ้น

ในส่วนของไฮโปพอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์คือ PVBC, Co-PVBC75/25 และ Co-PVBC50/50 นั้นมี T_g ต่ำกว่า Polysulfone และ BPS มาก เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลเป็นการเชื่อมต่อกันระหว่างอะตอมของคาร์บอนเป็นพันธะเดี่ยวตลอดทั้งสายโซ่โมเลกุล จึงมีความสามารถในการเคลื่อนไหวได้ง่ายกว่ากรณีที่เป็นสายโซ่เป็นวงแหวนอะโรมาติก เช่น ในกรณีของ Polysulfone และ BPS ในขณะที่เดียวกันการมีปริมาณของ EEM เป็นองค์ประกอบร่วม เช่น ในกรณีของโคพอลิเมอร์ จะยิ่งทำให้ T_g มีค่าต่ำลงมากขึ้น เนื่องจาก EEM ที่มีหมู่เอสเทอร์และอีเทอร์อยู่ด้วยกันนั้น เป็นโครงสร้างที่อ่อนนุ่มสามารถเคลื่อนไหวได้โดยง่ายยิ่งมีปริมาณ EEM มากขึ้น อุณหภูมิ T_g จะยิ่งลดต่ำลง เช่น ในกรณีของ Co-PVBC50/50 นั้น จากการทดลองพบว่ามีอุณหภูมิ T_g ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิ glass transition (T_g) ของพอลิเมอร์ตัวรองรับ

ชื่อพอลิเมอร์ ตัวรองรับ	อุณหภูมิ glass transition (T_g , °C)		
	Onset	Half Cp	End
Polysulfone	188.35	190.63	191.77
BPS	159.98	160.84	162.75
PVBC	88.95	89.81	92.11
Co-PVBC75/25	56.23	57.99	59.78
Co-PVBC50/50	$< T_{\text{room}}$	$< T_{\text{room}}$	$< T_{\text{room}}$



รูปที่ 4.52 DSC thermogram เปรียบเทียบอุณหภูมิ glass transition (T_g) ของพอลิเมอร์ตัวรองรับ

4.3 การทดสอบวัดค่าการนำไฟฟ้าและความว่องไวต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์

4.3.1 การควบคุมความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่าง

ความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่างสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.2 ซึ่งสมการดังกล่าวจะมีความถูกต้องได้เมื่อไอระเหยของของเหลวตัวอย่างที่ทำการทดสอบมีความอิ่มตัวที่อุณหภูมิทดสอบ ซึ่งสมบัติดังกล่าวสามารถทดสอบได้โดยการปล่อยให้ก๊าซในโตรเจนที่ใช้เป็นตัวพาหะพาไอระเหยของของเหลวตัวอย่างที่อุณหภูมิทดสอบ (28°C) ไหลไปเก็บไว้ใน chamber ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (ในการทดสอบใช้อุณหภูมิ 25°C) จะปรากฏเป็นฝ้าขาวเกาะบนผิว chamber ซึ่งเป็นพฤติกรรมของไออิ่มตัวที่จะเกิดการควบแน่นได้เมื่อสัมผัสกับพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

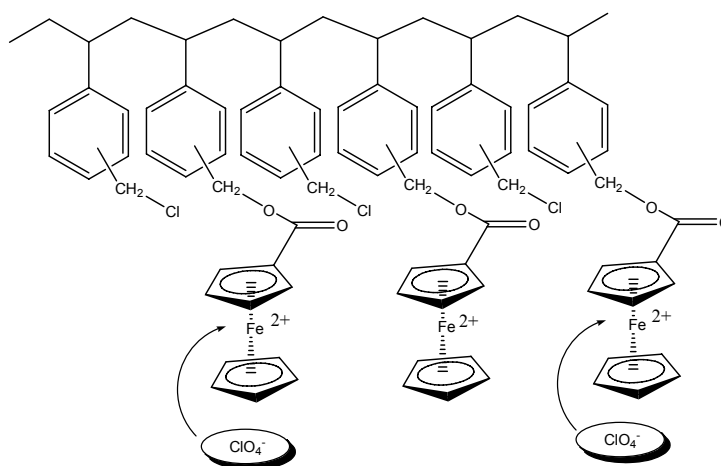
จากการทดสอบดังกล่าวทำให้ทราบความเข้มข้นของก๊าซตัวอย่างที่ใช้เป็นดังนี้

ก๊าซเมทานอล มีความเข้มข้น 1.619×10^5 ppm ที่อุณหภูมิ 28°C

ก๊าซอะซิโตน มีความเข้มข้น 2.556×10^5 ppm ที่อุณหภูมิ 28°C

4.3.2 การหา Linear ohmic regime

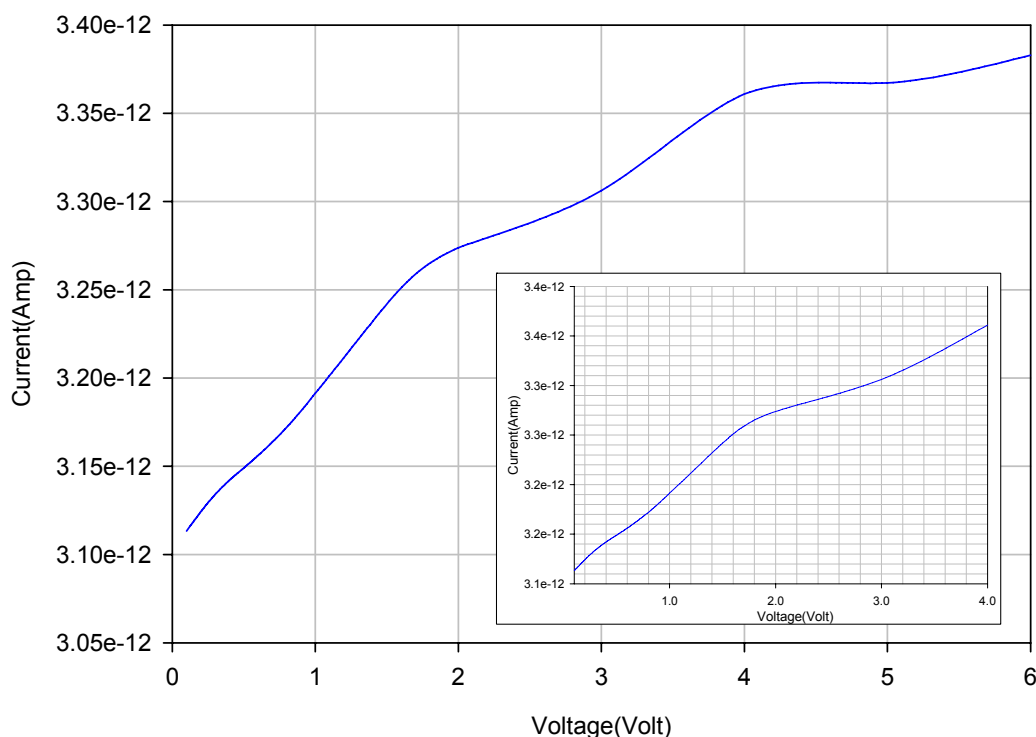
การตรวจสอบหา Linear ohmic regime โดยเลือกใช้พอลิเมอร์ในการทดลองเพียงหนึ่งชนิดเพื่อเป็นตัวแทนของชิ้นงานทดสอบทั้งหมด คือ PVBFCC ที่ผ่านการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุแล้วด้วยลิเทียมเปอร์คลอเลต ซึ่งกลไกการกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.53 ได้ผลการทดสอบ ดังนี้



รูปที่ 4.53 การกระตุ้นให้เกิดพาหะพาประจุของ PVBFCC ด้วย Lithium perchlorate

4.3.2.1 การตรวจสอบหา Linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 28 °C

จากกราฟรูปที่ 4.54 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าความต่างศักย์ (V) มีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงในช่วงค่าความต่างศักย์ตั้งแต่ 0.1 – 4 volt (กราฟส่วนขยายในรูปที่ 4.54) ซึ่งความสัมพันธ์ในช่วงดังกล่าวเป็นไปตามกฎของโอห์ม ดังนั้นจึงเลือกช่วงของการให้ค่าความต่างศักย์ในช่วงนี้ในการทดสอบหา Linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลต่อไป

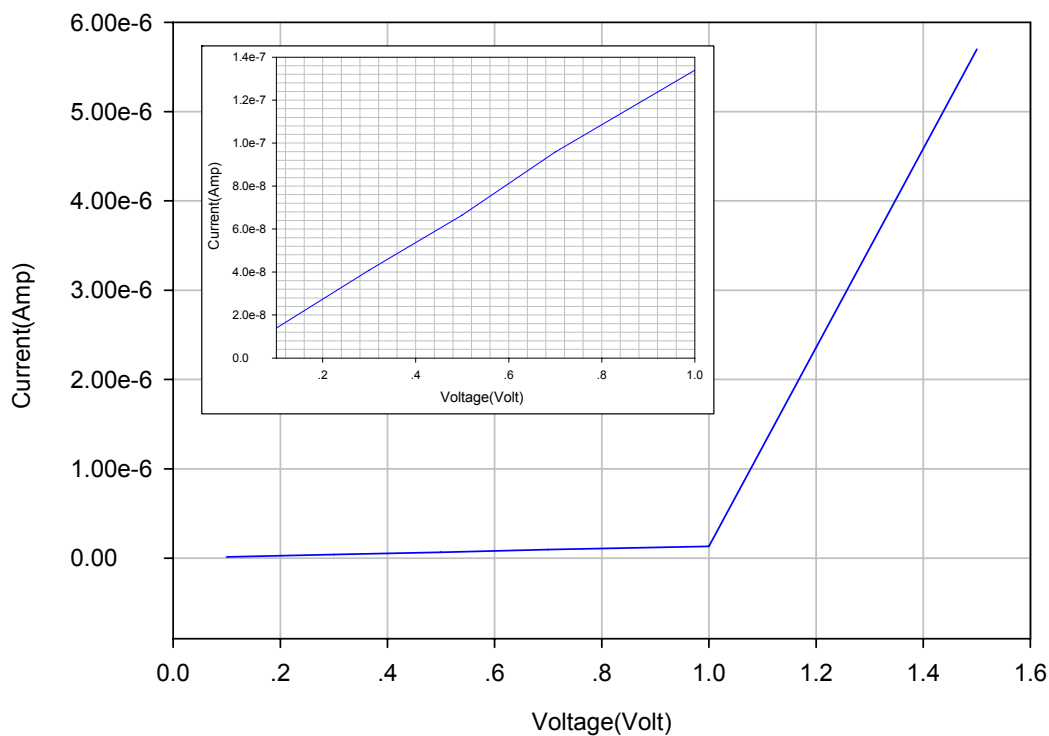


รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าความต่างศักย์ (V) ในการทดสอบหา Linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

4.3.2.2 การตรวจสอบหา Linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลที่อุณหภูมิ 28 °C

จากกราฟรูปที่ 4.55 นี้ จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าความต่างศักย์ (V) มีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงในช่วงค่าความต่างศักย์ตั้งแต่ 0.1 – 1 volt (กราฟส่วนขยายในรูปที่ 4.55) เช่นเดียวกันกับในกรณีที่อยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งความสัมพันธ์ในช่วงดังกล่าวเป็นไปตามกฎของโอห์ม เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่ออยู่ภายใต้บรรยากาศ

ของก๊าซเมทานอลนั้นค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง μA ซึ่งสูงมากกว่าในกรณีที่อยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีค่าอยู่ในช่วง pA



รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับค่าความต่างศักย์ (V) ในการทดสอบหา

Linear ohmic regime ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอล

จากการทดสอบการหา Linear ohmic regime ทั้งสองขั้นตอนนี้ทำให้สามารถเลือกช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I) และค่าความต่างศักย์ (V) เป็นเส้นตรงตามกฎของโอห์มทั้งในสถานะของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซตัวอย่างได้ คือ ต้องป้อนค่าความต่างศักย์ในช่วงที่ต่ำกว่า 1.0 volt ซึ่งในการทดลองต่อไปนั้นจะเลือกป้อนค่าความต่างศักย์ที่คงที่ค่าเดียวกันตลอดการทดลองคือที่ค่าความต่างศักย์เท่ากับ 0.5 volt

4.3.3 การทดสอบและคำนวณหาร้อยละความว่องไวต่อก๊าซตัวอย่าง

ในการทดสอบความว่องไวต่อก๊าซตัวอย่างจะทำการศึกษาก๊าซตัวอย่างสองชนิด คือ ก๊าซเมทานอลและก๊าซอะซิโตน โดยจะทำการทดสอบซ้ำสองครั้ง ในแต่ละครั้งจะทำการป้อนและปล่อยก๊าซตัวอย่างทั้งหมดสามรอบเพื่อนำค่าที่ได้ในการทดสอบซ้ำทั้งสองครั้งมาเฉลี่ยกัน และดูพฤติกรรมของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ที่มีต่อก๊าซตัวอย่างแต่ละชนิด โดยข้อมูลดิบทั้งหมดจะถูกรวบรวมไว้ในภาคผนวกท้ายเล่ม

4.3.3.1 ค่ากระแสไฟฟ้าก่อนการป้อนก๊าซตัวอย่างในบรรยากาศของก๊าซ

ไนโตรเจน (I_{N_2})

ก่อนที่จะป้อนก๊าซตัวอย่างจะวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน (I_{N_2}) ก่อนเพื่อใช้ในการคำนวณร้อยละความว่องไว (%S) ซึ่งจากการทดลองซ้ำทั้งสองครั้งสามารถหาค่าเฉลี่ยและการกระจายของข้อมูลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 และรูปที่ 4.56 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ค่ากระแสไฟฟ้า(I_{N_2}) ของพอลิเมอร์ทุกชนิดที่วัดในบรรยากาศของไนโตรเจนมีค่าต่ำมาก คือ อยู่ในช่วง 10^{-10} Amp เนื่องจากการนำไฟฟ้าได้ของพอลิเมอร์ประเภทนี้จำเป็นต้องอาศัยความสามารถในการเคลื่อนที่แบบกระโดด(hopping) ของอิเล็กตรอนจากอะตอมของเหล็กในหมู่เฟอร์โรซีนหนึ่งไปสู่อีกอะตอมหนึ่งของเหล็กในหมู่เฟอร์โรซีนข้างเคียง ดังนั้นโมเลกุลจำเป็นต้องมีความอ่อนตัวซึ่งเกิดได้จากการที่มีโมเลกุลของก๊าซแพร่ผ่านเข้าไปและทำหน้าที่เป็นตัวพลาสติกไซเซอร์ ในกรณีนี้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทดสอบในรอบแรกจึงมีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากไม่มีโมเลกุลของก๊าซอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์เลย ในขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้า(I_{N_2})ในรอบที่ 2 และ 3 มีค่าสูงกว่าในรอบแรกเล็กน้อย เนื่องจากมีโมเลกุลของก๊าซบางส่วนหลงเหลืออยู่หลังจากการทดสอบรอบก่อนหน้าซึ่งถูกขับไล่ออกไปไม่หมด

2. ค่ากระแสไฟฟ้า(I_{N_2})ของพอลิเมอร์ทุกชนิด (ยกเว้น BPSFCC ที่ทดสอบกับก๊าซอะซิโตน) ค่าการนำไฟฟ้า(I_{N_2})ในการทดสอบรอบที่ 1 จะต่ำกว่าในรอบที่ 2 และ 3 เป็นผลมาจากโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ไม่เคยผ่านก๊าซมาก่อนทำให้โมเลกุลมีความแข็งทื่อ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นไปได้ยาก เนื่องจากไอออน ClO_4^- ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปสะเทินประจุบวกของ Fe(III)ได้ แตกต่างจากค่ากระแสไฟฟ้า(I_{N_2}) ในรอบที่ 2 และ 3 ที่โมเลกุลของพอลิเมอร์เคยผ่านก๊าซมาแล้วและยังคงมีโมเลกุลของก๊าซหลงเหลืออยู่ทำให้โมเลกุลมีความอ่อนตัว ไอออน ClO_4^- สามารถเคลื่อนที่ไปสะเทินประจุบวกของ Fe(III)ได้ง่าย ค่ากระแสไฟฟ้าจึงสูงกว่าในรอบแรก

3. ค่ากระแสไฟฟ้า(I_{N_2}) ของ BPSFCC ที่ทดสอบกับก๊าซอะซิโตนทุกรอบ จะมีค่าใกล้เคียงกันหมดแสดงว่าโมเลกุลของก๊าซภายหลังจากการทดสอบนั้นสามารถถูกปลดปล่อยขับไล่ออกไปได้หมด เนื่องจากโครงสร้างของ BPSFCC ที่ใหญ่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุล (free volume) มาก ทำให้โมเลกุลของก๊าซอะซิโตนที่มีความเป็นขั้วน้อยกว่าและมีความดันไอสูงกว่าเมทานอล จึงสามารถถูกขับไล่ให้เคลื่อนที่ออกไปได้ง่ายเกือบทั้งหมด ค่ากระแสไฟฟ้าจึงต่ำใกล้เคียงกันทุกรอบ

4. ค่ากระแสไฟฟ้า(I_{N_2}) ของ BPSFCC ที่ทดสอบกับก๊าซเมทานอลมีค่าใกล้เคียงกับ Co-PVBFCC50/50 แม้จะมีปริมาณ FCC อยู่น้อยกว่า เป็นผลมาจากการที่ก๊าซเมทานอลมีความเป็นขั้วสูงมากและมีความดันไอต่ำ จึงยังคงติดอยู่ภายในโมเลกุลของ BPSFCC ที่มี free volume ใหญ่อยู่มากไม่สามารถถูกไล่ให้ออกไปได้หมด ซึ่งต่างจากก๊าซอะซิโตนที่มีความเป็นขั้วน้อยและมีความดันไอสูงกว่า จึงสามารถถูกขับออกไปจากโมเลกุลได้ง่ายกว่า

5. ในกรณีของโพลิเมอร์และโคโพลิเมอร์ คือ PVBFCC และ Co-PVBFCC75/25 กับ Co-PVBFCC50/50 นั้นจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งการทดสอบกับก๊าซเมทานอลและก๊าซอะซิโตน คือ สารที่มีปริมาณของ FCC อยู่ในโครงสร้างมากกว่าจะนำไฟฟ้าได้ดีกว่า เรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ PVBFCC > Co-PVBFCC75/25 > Co-PVBFCC50/50 แม้จะมีปริมาณก๊าซหลงเหลืออยู่ภายในโครงสร้างน้อยก็ตาม

6. ในกรณีของโพลิเมอร์และโคโพลิเมอร์ คือ PVBFCC และ Co-PVBFCC75/25 กับ Co-PVBFCC50/50 นั้น ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{N_2}) จากการที่เคยทดสอบกับก๊าซอะซิโตนมีค่ามากกว่าที่เคยทดสอบกับก๊าซเมทานอล ทั้งนี้เนื่องจากแม้ก๊าซอะซิโตนจะมีความเป็นขั้วน้อยกว่า แต่เนื่องจากมีปริมาณก๊าซอยู่มากกว่า (ที่อุณหภูมิทดสอบเดียวกันอะซิโตนระเหยได้ง่ายกว่าจึงมีความเข้มข้นของก๊าซอะซิโตนอยู่สูงกว่าเมทานอล) และก๊าซอะซิโตนมีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าเมทานอล จึงมีโอกาที่ก๊าซอะซิโตนยังคงเหลือติดค้างอยู่ในโมเลกุลของโพลิเมอร์มากกว่า ส่งผลทำให้มีค่ากระแสไฟฟ้าสูงกว่า

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อนการผ่านก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอลเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

Sample name	Cycle	Specimen	I_{N_2} (amp)	SD	n	$I_{N_2}^*$ (Amp)	SD*
Li_PVBFCC	1 st	I	3.169E-12	5.613E-14	9	3.210E-12	1.399E-13
		II	3.578E-12	xxx	1		
	2 nd	I	8.573E-11	3.534E-12	15	1.709E-10	6.742E-11
		II	2.241E-10	3.782E-12	24		
	3 rd	I	3.588E-10	5.357E-11	13	2.672E-10	6.935E-11
		II	2.247E-10	2.888E-12	28		
Li_Co-PVBFCC75/25	1 st	I	3.312E-12	3.072E-14	10	3.579E-12	8.080E-13
		II	4.112E-12	1.237E-12	5		
	2 nd	I	1.573E-10	1.389E-11	8	1.748E-10	1.495E-11
		II	1.818E-10	8.025E-12	20		
	3 rd	I	1.557E-10	1.001E-11	10	1.695E-10	1.075E-11
		II	1.753E-10	3.019E-12	24		
Li_Co-PVBFCC50/50	1 st	I	3.219E-12	xxx	1	3.745E-12	2.596E-13
		II	3.850E-12	3.467E-14	5		
	2 nd	I	1.330E-10	9.390E-12	18	1.342E-10	6.865E-12
		II	1.354E-10	2.331E-12	19		
	3 rd	I	1.294E-10	6.148E-12	15	1.416E-10	9.736E-12
		II	1.479E-10	2.757E-12	29		
Li_BPSFCC	1 st	I	3.318E-12	xxx	1	4.112E-12	1.038E-12
		II	4.225E-12	1.067E-12	7		
	2 nd	I	1.614E-10	9.005E-12	25	1.495E-10	1.496E-11
		II	1.346E-10	1.685E-12	20		
	3 rd	I	1.084E-10	5.973E-12	11	1.277E-10	1.365E-11
		II	1.366E-10	2.339E-12	24		

หมายเหตุ

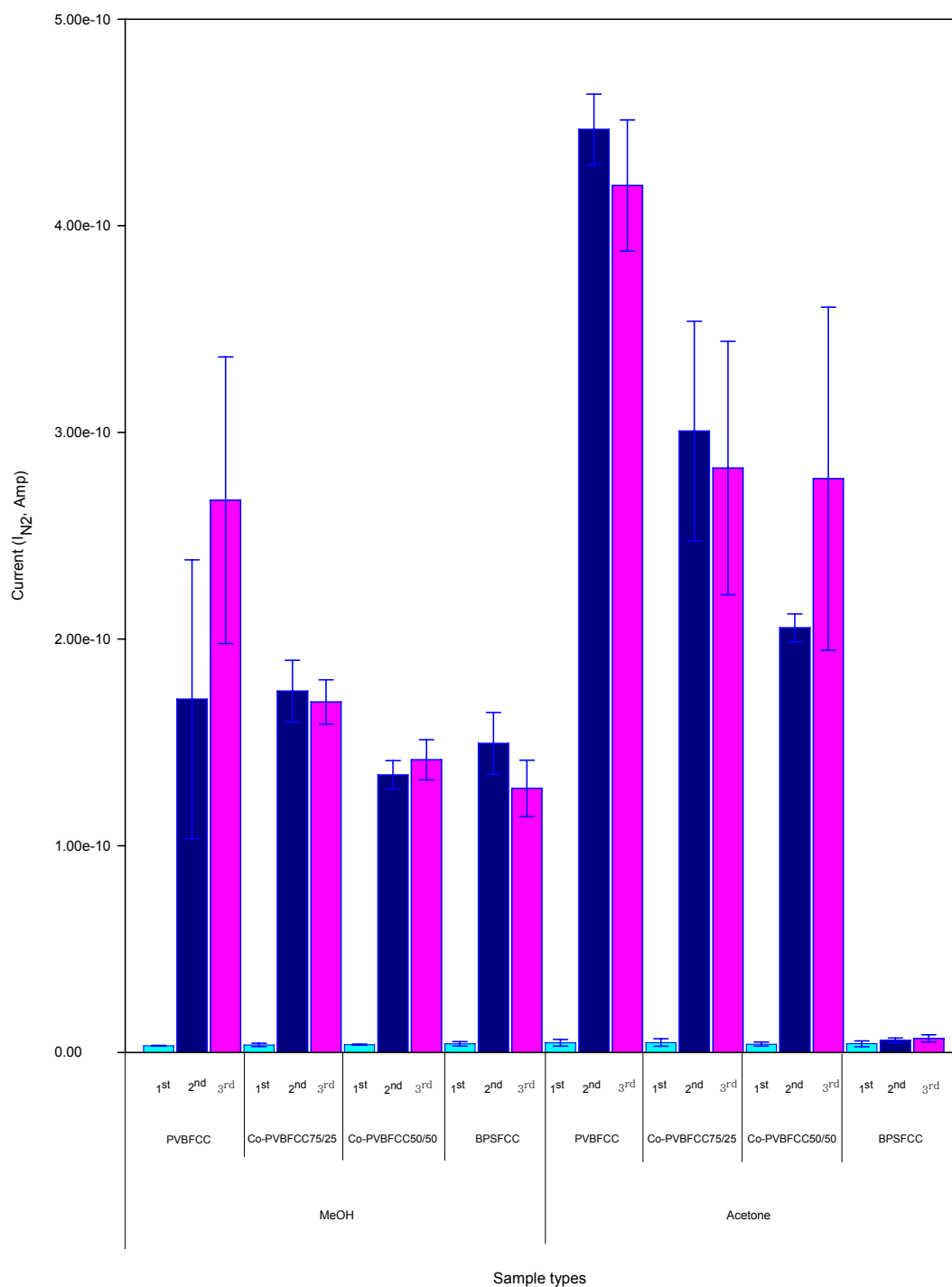
- xxx คือข้อมูลที่ไม่สามารถหาค่า SD ได้ เนื่องจากข้อมูลมีเพียงค่าเดียว
- ค่า $I_{N_2}^*$ และ SD* คัดจากข้อมูลดิบทั้งหมดจากการทดลองซ้ำทั้งสองรอบ
- n คือ จำนวนข้อมูล

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อนการผ่านก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนเฉื่อยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

Sample name	Cycle	Specimen	I_{N_2} (amp)	SD	n	$I_{N_2}^*$ (Amp)	SD*
Li_PVBFCC	1 st	I	3.378E-12	xxx	1	4.651E-12	1.598E-12
		II	4.833E-12	1.635E-12	7		
	2 nd	I	4.476E-10	1.058E-11	25	4.466E-10	1.709E-11
		II	4.458E-10	2.124E-11	28		
	3 rd	I	4.377E-10	1.321E-11	26	4.195E-10	3.178E-11
		II	4.019E-10	3.444E-11	27		
Li_Co-PVBFCC75/25	1 st	I	3.471E-12	xxx	1	4.719E-12	1.800E-12
		II	4.875E-12	1.858E-12	8		
	2 nd	I	3.593E-10	1.804E-12	18	3.006E-10	5.321E-11
		II	2.526E-10	4.603E-12	22		
	3 rd	I	3.619E-10	5.304E-12	13	2.828E-10	6.133E-11
		II	2.360E-10	8.973E-12	22		
Li_Co-PVBFCC50/50	1 st	I	3.366E-12	xxx	1	3.980E-12	9.672E-13
		II	4.103E-12	1.028E-12	5		
	2 nd	I	2.056E-10	8.036E-12	44	2.054E-10	6.746E-12
		II	2.051E-10	2.317E-12	21		
	3 rd	I	3.175E-10	7.968E-11	60	2.776E-10	8.301E-11
		II	2.073E-10	9.651E-12	34		
Li_BPSFCC	1 st	I	3.393E-12	xxx	1	4.161E-12	1.415E-12
		II	4.289E-12	1.505E-12	6		
	2 nd	I	4.958E-12	5.036E-13	53	5.752E-12	1.171E-12
		II	7.256E-12	1.815E-13	28		
	3 rd	I	5.065E-12	4.270E-13	31	6.727E-12	1.746E-12
		II	8.504E-12	3.167E-14	29		

หมายเหตุ

- xxx คือข้อมูลที่ไม่สามารถหาค่า SD ได้ เนื่องจากข้อมูลมีเพียงค่าเดียว
- ค่า $I_{N_2}^*$ และ SD* คัดจากข้อมูลดิบทั้งหมดจากการทดลองซ้ำทั้งสองรอบ
- n คือ จำนวนข้อมูล



รูปที่ 4.56 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไนโตรเจนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ(ก่อนการผ่านก๊าซตัวอย่าง)(I_{N_2})

4.3.3.2 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่าง (I_{gas})

การวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่าง (I_{gas}) เพื่อใช้ในการคำนวณร้อยละความว่องไว (%S) ซึ่งจากการทดลองซ้ำทั้งสองครั้งสามารถหาค่าเฉลี่ยและการกระจายของข้อมูลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 และรูปที่ 4.57 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ค่ากระแสไฟฟ้า(I_{gas}) ของพอลิเมอร์ทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นมาก คือ อยู่ในช่วง 10^{-7} Amp เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซตัวอย่างช่วยทำหน้าที่ในการพลาสติไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์เพิ่มความสามารถในการสั่นไหวและการเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน เนื่องจากไอออน ClO_4^- เคลื่อนที่ไปสะเทินประจุของ Fe (III) ได้ง่ายขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าจึงสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน (I_{N_2}) ก่อนการป้อนก๊าซ

2. ที่จุดสมดุลในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่าง ค่ากระแสไฟฟ้า(I_{gas}) ที่วัดได้จากการทดสอบทั้งสามรอบของพอลิเมอร์ทุกชนิด พบว่า ในแต่ละรอบค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการที่ได้อยู่ในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างในช่วงระยะเวลาหนึ่งจึงทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมีค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์และสมบัติของก๊าซตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนั้นๆ

3. ในกรณีการทดสอบกับก๊าซเมทานอล พบว่า ค่ากระแสไฟฟ้า(I_{gas}) มีแนวโน้มเดียวกัน คือ พอลิเมอร์ที่มีปริมาณ FCC มากกว่าจะนำไฟฟ้าได้ดีกว่า เรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ $PVBFCC > Co-PVBFCC75/25 > Co-PVBFCC50/50 > BPSFCC$

4. ในกรณีการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนจะให้ผลที่ตรงข้ามกับกรณีทดสอบกับก๊าซเมทานอล คือ แม้จะมีปริมาณ FCC มากกว่า แต่ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าต่ำลง เนื่องจากการที่ก๊าซอะซิโตนมีความเป็นขั้วที่น้อยกว่า การทำหน้าที่ในการพลาสติไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์จึงทำได้ไม่ดีเท่ากับก๊าซเมทานอล ดังนั้นการนำไฟฟ้าได้จึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์เป็นหลัก กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่าจะช่วยให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่า T_g ของพอลิเมอร์ ที่ยังมีค่า T_g น้อย ยิ่งมีความอ่อนตัวมาก ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านพอลิเมอร์ในการทดสอบนี้ เรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ $Co-PVBFCC50/50 > Co-PVBFCC75/25 > PVBFCC$ แต่ในส่วนของ BPSFCC แม้จะมีค่า T_g สูงที่สุดซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งของโมเลกุลที่ไม่สามารถสั่นไหวได้ง่าย แต่เนื่องจากการที่โครงสร้างของ BPSFCC ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่ใหญ่ ทำให้โมเลกุลของก๊าซอะซิโตนสามารถแพร่ผ่านเข้าไปได้มาก อิเล็กตรอนจึงสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้นค่ากระแสไฟฟ้าจึงมีค่าสูง

5. เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าของพอลิเมอร์ในกลุ่มที่ทดสอบกับก๊าซเมทานอลจะให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงมากกว่ากลุ่มที่ทดสอบกับก๊าซอะซิโตน เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วของก๊าซตัวอย่างมีผลต่อการทำหน้าที่พลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ กล่าวคือ ยิ่งก๊าซที่ทดสอบมีความเป็นขั้วมาก การเคลื่อนที่ของไอออน ClO_4^- เพื่อเข้าไปสะเทินประจุของ Fe(III) จะเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เสถียรภาพให้กับไอออนของ Fe(III) ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของเปอร์คลอเรตจึงเป็นไปได้ดีขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของก๊าซตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก สามารถแทรกแพร่ผ่านช่องว่างระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ง่ายกว่า ช่วยทำหน้าที่ในการพลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดีขึ้นอีกด้วย ดังนั้นกลุ่มที่ทำการทดสอบกับก๊าซเมทานอลจึงมีค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงมากกว่ากลุ่มที่ทดสอบกับก๊าซอะซิโตน

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอลเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

Sample name	Cycle	Specimen	I_{gas} (amp)	SD	n	I_{gas}^* (Amp)	SD*
Li_PVBFCC	1 st	I	2.085E-07	9.233E-10	37	2.117E-07	4.280E-09
		II	2.155E-07	3.537E-09	31		
	2 nd	I	2.062E-07	1.354E-09	25	2.157E-07	1.073E-08
		II	2.256E-07	6.429E-09	24		
	3 rd	I	2.142E-07	2.817E-09	36	2.155E-07	4.185E-09
		II	2.171E-07	4.941E-09	30		
Li_Co-PVBFCC75/25	1 st	I	1.978E-07	2.203E-09	12	1.938E-07	4.350E-09
		II	1.906E-07	2.672E-09	15		
	2 nd	I	1.974E-07	2.909E-09	22	1.964E-07	2.977E-09
		II	1.958E-07	2.855E-09	38		
	3 rd	I	1.986E-07	2.094E-09	22	1.954E-07	3.636E-09
		II	1.936E-07	3.034E-09	40		
Li_Co-PVBFCC50/50	1 st	I	1.648E-07	2.949E-09	21	1.580E-07	7.470E-09
		II	1.508E-07	2.207E-09	20		
	2 nd	I	1.754E-07	1.867E-09	25	1.742E-07	2.209E-09
		II	1.735E-07	2.088E-09	41		
	3 rd	I	1.769E-07	6.441E-10	27	1.732E-07	3.262E-09
		II	1.709E-07	1.811E-09	45		
Li_BPSFCC	1 st	I	1.157E-07	8.792E-10	28	1.075E-07	1.001E-08
		II	9.647E-08	4.654E-09	21		
	2 nd	I	1.141E-07	1.769E-09	20	1.068E-07	5.842E-09
		II	1.029E-07	2.680E-09	38		
	3 rd	I	1.169E-07	6.418E-10	24	1.009E-07	1.248E-08
		II	9.127E-08	1.563E-09	40		

หมายเหตุ

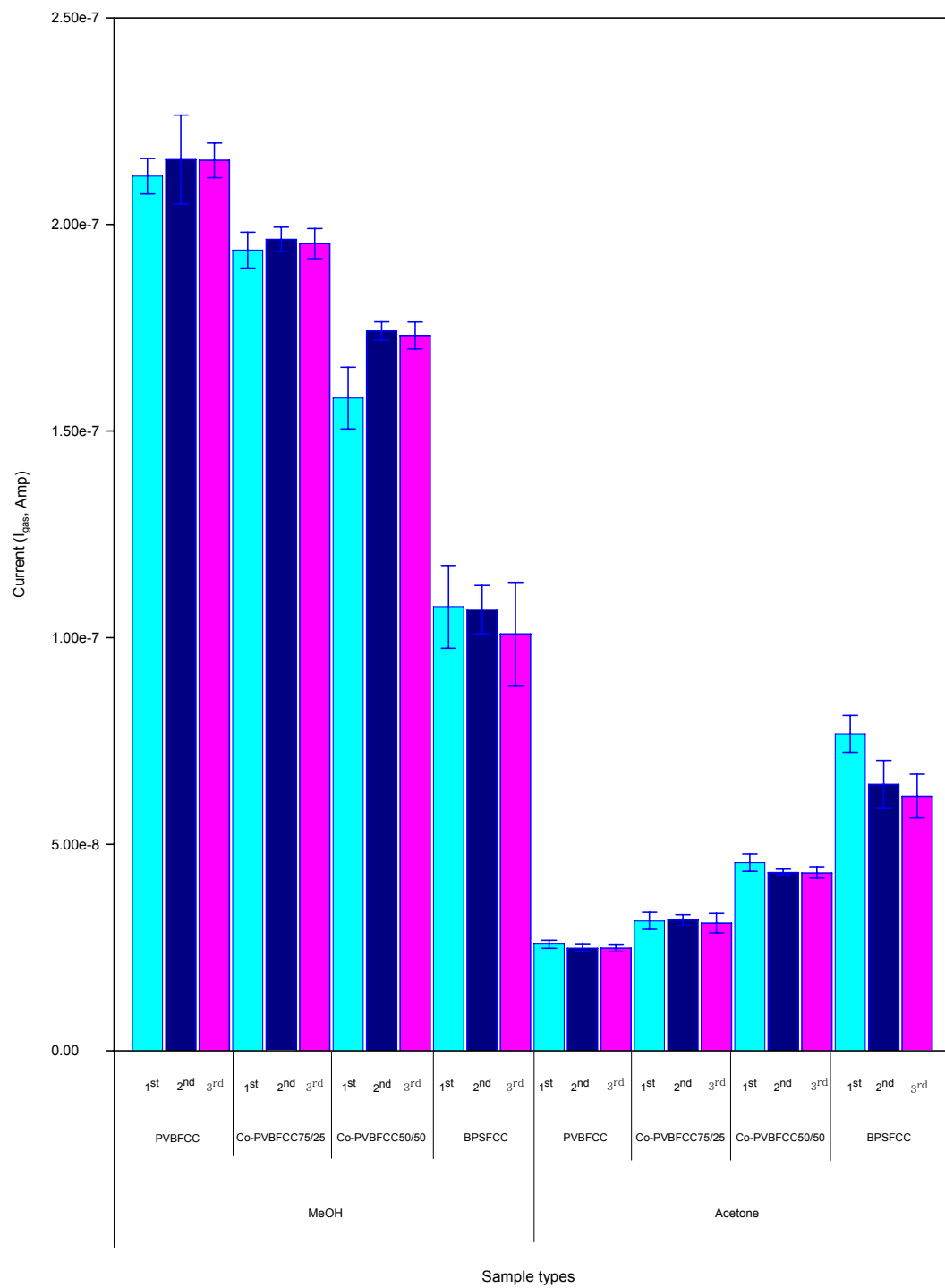
- ค่า I_{gas}^* และ SD* คิดจากข้อมูลดิบทั้งหมดจากการทดลองซ้ำทั้งสองรอบ
- n คือ จำนวนข้อมูล

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

Sample name	Cycle	Specimen	I_{gas} (amp)	SD	n	I_{gas}^* (Amp)	SD*
Li_PVBFCC	1 st	I	2.663E-08	7.484E-10	25	2.583E-08	9.716E-10
		II	2.525E-08	6.476E-10	34		
	2 nd	I	2.550E-08	1.462E-10	27	2.485E-08	8.694E-10
		II	2.437E-08	8.679E-10	37		
	3 rd	I	2.520E-08	1.967E-10	29	2.488E-08	7.599E-10
		II	2.464E-08	9.189E-10	39		
Li_Co-PVBFCC75/25	1 st	I	3.167E-08	2.272E-09	43	3.149E-08	2.055E-09
		II	3.122E-08	1.630E-09	28		
	2 nd	I	3.074E-08	9.456E-10	30	3.168E-08	1.337E-09
		II	3.273E-08	8.354E-10	27		
	3 rd	I	2.943E-08	1.874E-09	44	3.095E-08	2.363E-09
		II	3.298E-08	1.070E-09	33		
Li_Co-PVBFCC50/50	1 st	I	4.757E-08	6.562E-10	33	4.559E-08	2.076E-09
		II	4.423E-08	1.560E-09	48		
	2 nd	I	4.362E-08	4.919E-10	40	4.322E-08	8.029E-10
		II	4.261E-08	8.038E-10	26		
	3 rd	I	4.284E-08	9.237E-10	26	4.311E-08	1.301E-09
		II	4.331E-08	1.490E-09	35		
Li_BPSFCC	1 st	I	7.557E-08	4.614E-09	59	7.670E-08	4.450E-09
		II	7.822E-08	3.714E-09	44		
	2 nd	I	5.967E-08	2.263E-09	55	6.447E-08	5.773E-09
		II	7.076E-08	7.335E-10	42		
	3 rd	I	5.761E-08	1.628E-09	64	6.165E-08	5.256E-09
		II	6.781E-08	1.696E-09	42		

หมายเหตุ

- ค่า I_{gas}^* และ SD* คิดจากข้อมูลดิบทั้งหมดจากการทดลองซ้ำทั้งสองรอบ
- n คือ จำนวนข้อมูล



รูปที่ 4.57 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ (I_{gas})

4.3.3.3 ค่ากระแสไฟฟ้าหลังการป้อนก๊าซตัวอย่างในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ($I_{N_2, \text{after}}$)

หลังจากที่ป้อนก๊าซตัวอย่างจะวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน (I_{N_2}) อีกครั้ง เพื่อดูพฤติกรรมภายหลังการแพร่ผ่านของก๊าซ ซึ่งจากการทดลองซ้ำทั้งสองครั้งสามารถหาค่าเฉลี่ยและการกระจายของข้อมูลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8 และรูปที่ 4.58 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. สภาพที่สนใจอยู่คือ ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{N_2}) ที่จุดสิ้นสุดการทดสอบความว่องไวต่อก๊าซตัวอย่างในแต่ละรอบ ซึ่งจะกลายเป็นจุดเริ่มต้นของค่ากระแสไฟฟ้า (I_{N_2}) ในการทดสอบรอบต่อไป เนื่องจากในการทดสอบนี้ทำการทดลองปล่อยให้ก๊าซให้แพร่ผ่านแล้วไล่ก๊าซดังกล่าวออกไปเป็นรอบๆ ต่อเนื่องกันสามครั้ง ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้า (I_{N_2}) ที่อ่านได้บางส่วนจะซ้ำกับในหัวข้อ 4.3.3.1 แต่ให้คำนึงถึงว่าเป็นการพิจารณาคนละสภาพการณ์กัน

2. ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{N_2}) ของพอลิเมอร์ทุกชนิดมีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีทดสอบในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่าง คือ อยู่ในช่วง 10^{-10} Amp เนื่องจากก๊าซส่วนใหญ่ถูกขับไล่ออกไป แต่ยังคงมีก๊าซบางส่วนหลงเหลืออยู่ ดังนั้น ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จึงมีค่ามากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดตอนก่อนเริ่มการทดลองซึ่งไม่มีก๊าซอยู่เลย

3. ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{N_2}) ของพอลิเมอร์ทุกชนิดภายหลังการผ่านก๊าซในรอบที่ 1 นั้น พบว่าจะมีค่าสูงมากกว่าค่ากระแสไฟฟ้า (I_{N_2}) ที่วัดได้ก่อนการผ่านก๊าซตัวอย่าง (เปรียบเทียบจากรูปที่ 4.56 และ 4.58) เนื่องจากภายหลังการผ่านก๊าซแล้วจะมีปริมาณของก๊าซบางส่วนที่ยังหลงเหลืออยู่ช่วยทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ทำให้ไอออน ClO_4^- และอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จึงมีค่าสูง

4. ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{N_2}) ของพอลิเมอร์ทุกชนิดภายหลังการผ่านก๊าซในรอบที่ 2 และ 3 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสไฟฟ้า (I_{N_2}) ก่อนที่เริ่มทำการผ่านก๊าซในรอบที่ 2 และ 3 (เปรียบเทียบจากรูปที่ 4.56 และ 4.58) แสดงให้เห็นว่าปริมาณของก๊าซที่หลงเหลืออยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ภายหลังการผ่านก๊าซแต่ละรอบนั้นมีปริมาณใกล้เคียงกัน

5. เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ในแต่ละกลุ่มพบว่าภายหลังการผ่านก๊าซตัวอย่างและทำให้มีก๊าซบางส่วนหลงเหลืออยู่จะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีแนวโน้มที่เหมือนกันทั้งในกลุ่มที่ทดสอบกับก๊าซเมทานอลและก๊าซอะซิโตน คือ พอลิเมอร์ที่มีปริมาณของ FCC มากกว่าจะนำไฟฟ้าได้ดีกว่า เมื่อเรียงลำดับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากมากไปน้อย จะได้ดังนี้ $PVBFCC > Co-PVBFCC75/25 > Co-PVBFCC50/50 > BPSFCC$ แม้จะมีปริมาณก๊าซเหลืออยู่น้อยก็ตาม

6. เมื่อเปรียบเทียบพอลิเมอร์ต่างกลุ่มกันพบว่าพอลิเมอร์ในกลุ่มที่ทดสอบกับก๊าซอะซิโตน (ยกเว้น BPSFCC) จะมีค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าในกลุ่มที่ทดสอบกับก๊าซเมทานอล เนื่องจากภายหลังการขับไล่ก๊าซตัวอย่างออกไปแล้ว ก๊าซอะซิโตนที่มีปริมาณมากกว่า (ความเข้มข้นของก๊าซอะซิโตนที่อุณหภูมิการทดสอบมีมากกว่าของก๊าซเมทานอล) อีกทั้งขนาดโมเลกุลของก๊าซอะซิโตนที่มีขนาดใหญ่กว่าก๊าซเมทานอล ส่งผลทำให้ก๊าซอะซิโตนถูกขับไล่ออกไปไม่หมด และยังคงเหลือติดค้างอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์มากกว่า การทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของก๊าซตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนและไอออนสามารถเคลื่อนที่ได้จึงมีมากกว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จึงมีค่าสูงกว่า

7. ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{N_2}) ของ BPSFCC ที่ทดสอบกับก๊าซอะซิโตนทุกรอบ จะมีค่าต่ำใกล้เคียงกันหมดแสดงว่าโมเลกุลของก๊าซภายหลังจากการทดสอบนั้นสามารถถูกปลดปล่อยไล่ออกไปได้เกือบทั้งหมด เนื่องจากโครงสร้างของ BPSFCC ที่ใหญ่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมาก (free volume) ทำให้โมเลกุลของก๊าซอะซิโตนที่มีความเป็นขั้วน้อยกว่าเมทานอล สามารถถูกไล่ให้เคลื่อนที่ออกไปได้ง่ายกว่า ค่ากระแสไฟฟ้าจึงต่ำใกล้เคียงกันทุกรอบ

8. ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{N_2}) ของ BPSFCC ที่ทดสอบกับก๊าซเมทานอลมีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสไฟฟ้า (I_{N_2}) ของ Co-PVBFCC50/50 แม้จะมีปริมาณ FCC อยู่น้อยกว่า เป็นผลมาจากการที่ก๊าซเมทานอลมีความเป็นขั้วสูงมาก จึงยังคงติดอยู่ภายในโมเลกุลของ BPSFCC ที่มี free volume ใหญ่อยู่มากไม่สามารถถูกไล่ให้ออกไปได้หมด ซึ่งต่างจากก๊าซอะซิโตนที่มีความเป็นขั้วน้อยกว่าจึงสามารถถูกขับออกไปจากโมเลกุลได้ง่ายกว่า

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนหลังการผ่านก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอลเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

Sample name	Cycle	Specimen	$I_{N_2,after}$ (amp)	SD	n	$I_{N_2,after}^*$ (Amp)	SD*
Li_PVBFCC	1 st	I	8.573E-11	3.534E-12	15	1.709E-10	6.742E-11
		II	2.241E-10	3.782E-12	24		
	2 nd	I	3.588E-10	5.357E-11	13	2.672E-10	6.935E-11
		II	2.247E-10	2.888E-12	28		
	3 rd	I	3.878E-10	7.879E-11	17	2.871E-10	9.225E-11
		II	2.259E-10	2.209E-12	28		
Li_Co-PVBFCC75/25	1 st	I	1.573E-10	1.389E-11	8	1.748E-10	1.495E-11
		II	1.818E-10	8.025E-12	20		
	2 nd	I	1.557E-10	5.005E-12	10	1.695E-10	9.673E-12
		II	1.753E-10	3.019E-12	24		
	3 rd	I	1.560E-10	3.308E-12	20	1.729E-10	1.433E-11
		II	1.845E-10	2.817E-12	29		
Li_Co-PVBFCC50/50	1 st	I	1.330E-10	9.39E-12	18	1.342E-10	6.865E-12
		II	1.354E-10	2.331E-12	19		
	2 nd	I	1.294E-10	6.148E-12	15	1.416E-10	9.736E-12
		II	1.479E-10	2.757E-12	29		
	3 rd	I	1.266E-10	3.646E-12	23	1.429E-10	1.401E-11
		II	1.543E-10	2.922E-12	33		
Li_BPSFCC	1 st	I	1.614E-10	9.005E-12	25	1.495E-10	1.496E-11
		II	1.346E-10	1.685E-12	20		
	2 nd	I	1.084E-10	5.973E-12	11	1.277E-10	1.365E-11
		II	1.366E-10	2.339E-12	24		
	3 rd	I	1.041E-10	1.953E-12	15	1.371E-10	2.340E-11
		II	1.536E-10	1.597E-12	30		

หมายเหตุ

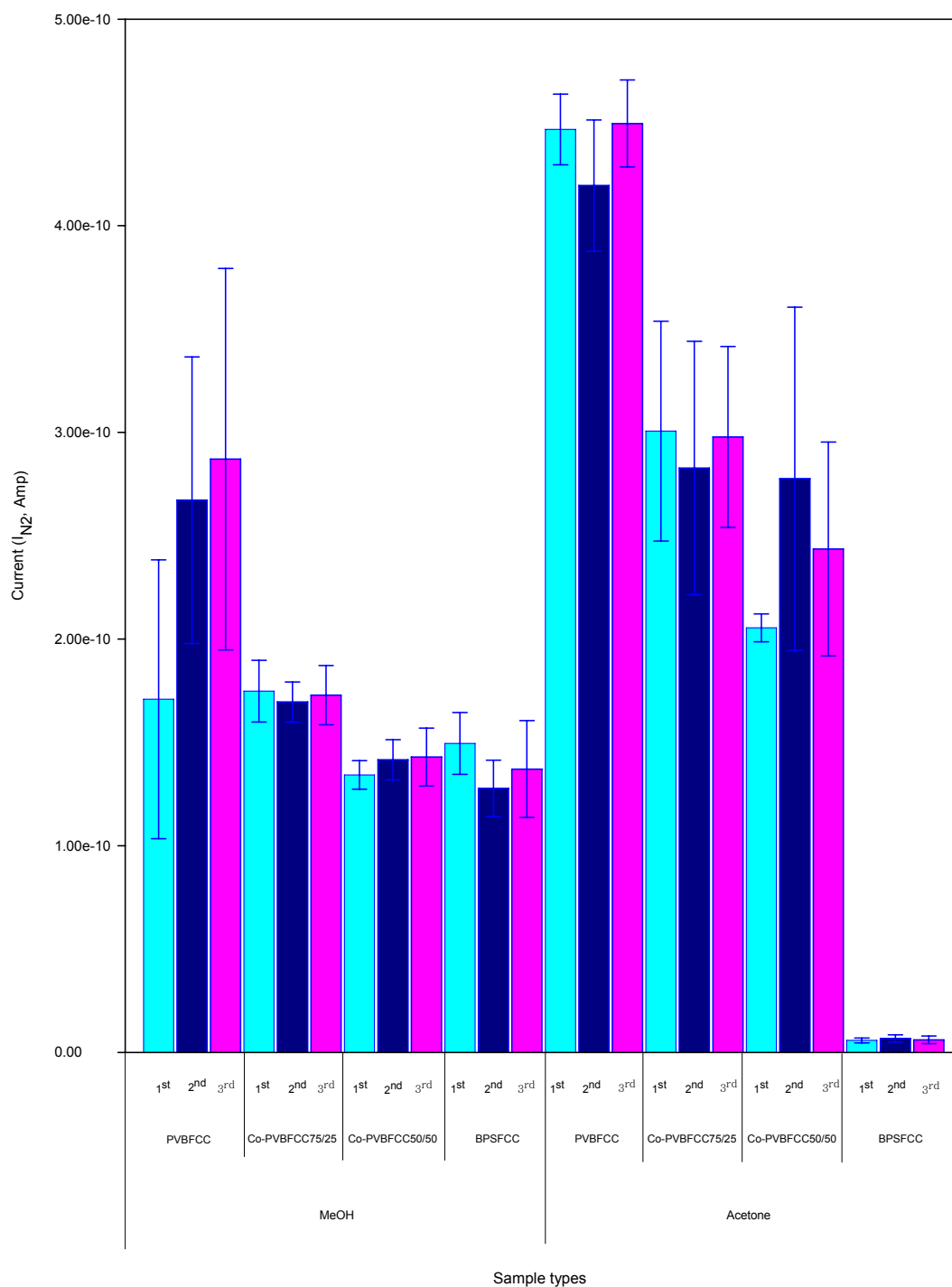
- ค่า $I_{N_2,after}^*$ และ SD* คิดจากข้อมูลดิบทั้งหมดจากการทดลองซ้ำทั้งสองรอบ
- n คือ จำนวนข้อมูล

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนหลังการผ่านก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนเจ็ลจากการทดลองซ้ำสองรอบ

Sample name	Cycle	Specimen	$I_{N2,after}$ (amp)	SD	n	$I_{N2,after}^*$ (Amp)	SD*
Li_PVBFCC	1 st	I	4.476E-10	1.058E-11	25	4.466E-10	1.709E-11
		II	4.458E-10	2.124E-11	28		
	2 nd	I	4.377E-10	1.321E-11	26	4.195E-10	3.178E-11
		II	4.019E-10	3.444E-11	27		
	3 rd	I	4.568E-10	1.958E-11	20	4.495E-10	2.104E-11
		II	4.449E-10	2.063E-11	32		
Li_Co-PVBFCC75/25	1 st	I	3.593E-10	1.804E-12	18	3.006E-10	5.321E-11
		II	2.526E-10	4.603E-12	22		
	2 nd	I	3.619E-10	5.304E-12	13	2.828E-10	6.133E-11
		II	2.360E-10	8.973E-12	22		
	3 rd	I	3.303E-10	1.984E-11	39	2.978E-10	4.370E-11
		II	2.491E-10	1.512E-11	26		
Li_Co-PVBFCC50/50	1 st	I	2.056E-10	8.036E-12	44	2.054E-10	6.746E-12
		II	2.051E-10	2.317E-12	21		
	2 nd	I	3.175E-10	7.968E-11	60	2.776E-10	8.301E-11
		II	2.073E-10	9.651E-12	34		
	3 rd	I	2.727E-10	5.417E-11	42	2.436E-10	5.173E-11
		II	2.076E-10	3.791E-12	34		
Li_BPSFCC	1 st	I	4.958E-12	5.036E-13	53	5.752E-12	1.171E-12
		II	7.256E-12	1.815E-13	28		
	2 nd	I	5.065E-12	4.270E-13	31	6.727E-12	1.746E-12
		II	8.504E-12	3.167E-14	29		
	3 rd	I	4.366E-12	2.894E-13	41	6.043E-12	1.882E-12
		II	8.127E-12	7.262E-14	33		

หมายเหตุ

- ค่า $I_{N2,after}^*$ และ SD* คิดจากข้อมูลดิบทั้งหมดจากการทดลองซ้ำทั้งสองรอบ
- n คือ จำนวนข้อมูล



รูปที่ 4.58 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไนโตรเจนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ(หลังการผ่านก๊าซตัวอย่าง)($I_{N_2,after}$)

4.3.3.4 ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซของพอลิเมอร์ (T_{res})

ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซ (T_{res}) เมื่อมีการป้อนก๊าซตัวอย่างเข้าไปจากการทดลองซ้ำทั้งสองครั้งสามารถหาค่าเฉลี่ยและการกระจายของข้อมูลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และ 4.10 และรูปที่ 4.59 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. พอลิเมอร์ทุกชนิดมีระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองค่อนข้างช้า คือ มากกว่า 2 นาที่ทุกชนิด (ดูรูปที่ 4.58) ทั้งนี้เนื่องจากการนำไฟฟ้าได้ของพอลิเมอร์ประเภทนี้จะต้องอาศัยความอ่อนตัวของโมเลกุลซึ่งเกิดจากการที่โมเลกุลของก๊าซแทรกแพร่ผ่านเข้าไปในโมเลกุลของพอลิเมอร์ให้ได้เสียก่อน เพราะพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์นี้ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์อื่นเข้าไปเพื่อช่วยในเรื่องดังกล่าวเลยต้องอาศัยก๊าซตัวอย่างทำหน้าที่ช่วยในเรื่องนี้เท่านั้น

2. ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองในรอบที่ 1 จะนานมากกว่ารอบอื่นๆ เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ไม่เคยผ่านก๊าซตัวอย่างมาก่อนจึงมีความแข็งของโมเลกุลสูงก๊าซจึงแทรกแพร่ผ่านเข้าไปในโมเลกุลได้ค่อนข้างยาก แต่ในการทดสอบรอบที่ 2 และ 3 นั้น พบว่าใช้ระยะเวลาในการตอบสนองเร็วขึ้นตามลำดับเนื่องจากการที่โมเลกุลของก๊าซเคยผ่านก๊าซตัวอย่างมาแล้วและยังคงมีก๊าซบางส่วนคงเหลือค้างอยู่ภายในโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีความอ่อนตัวและก๊าซใหม่สามารถแทรกแพร่ผ่านเข้าไปได้ง่ายและเร็วขึ้นตามลำดับ

3. ในกรณีของไฮโดรเจนพอลิเมอร์และโคพอลิเมอร์ จากการทดสอบกับก๊าซทั้งสองชนิดให้ผลที่มีแนวโน้มที่ตรงกัน คือ พอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลที่อ่อนตัวมากกว่า (มีอุณหภูมิ T_g ต่ำกว่า) จะใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองได้รวดเร็วกว่า เรียงตามลำดับการใช้เวลาจากมากไปน้อย ได้ดังนี้ $PVBFCC > Co-PVBFCC75/25 > Co-PVBFCC50/50$ เนื่องจากโมเลกุลที่มีความอ่อนตัวมากกว่าจะทำให้โมเลกุลของก๊าซตัวอย่างสามารถแทรกแพร่ผ่านเข้าไปได้ง่ายและรวดเร็ว

4. ในกรณีของ BPSFCC ที่มีค่า T_g สูงแสดงถึงความแข็งของสายโซ่โมเลกุลทำให้ก๊าซแทรกแพร่ผ่านเข้าไปในโมเลกุลของพอลิเมอร์นี้ได้ยาก ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซของ BPSFCC จึงช้า แต่รวดเร็วกว่าในกรณีของ PVFCC ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของ BPSFCC ที่ถึงแม้จะมีความแข็งแต่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุล (free volume) ใหญ่ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลทำให้โมเลกุลของก๊าซแพร่ผ่านเข้าไปได้รวดเร็วกว่า PVBFCC ที่ถึงแม้จะมีความอ่อนตัวมากกว่าก็ตาม

5. เมื่อเปรียบเทียบผลของก๊าซต่างชนิดกัน พบว่า ก๊าซอะซิโตนจะช่วยทำให้ระยะเวลาในการตอบสนองของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเร็วกว่ากรณีของก๊าซเมทานอลเล็กน้อย เนื่องจากการที่ก๊าซอะซิโตนมีปริมาณมากกว่าก๊าซเมทานอลที่อุณหภูมิทดสอบเดียวกัน ส่งผลทำให้เพิ่มโอกาสในการแทรกแพร่ผ่านเข้าไปในโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้รวดเร็วมากขึ้น

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลการวัดเวลาที่ใช้ในการตอบสนอง (T_{rec}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทธานอลเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

Sample name	Cycle	Specimen	T_{res} (min)	T_{res}^* (min)	R^*
Li_PVBFCC	1 st	I	32.83	26.52	12.63
		II	20.20		
	2 nd	I	15.30	13.80	3.00
		II	12.30		
	3 rd	I	13.50	11.84	3.32
		II	10.18		
Li_Co-PVBFCC75/25	1 st	I	15.35	15.84	0.97
		II	16.32		
	2 nd	I	4.90	5.15	0.50
		II	5.40		
	3 rd	I	4.90	4.95	0.10
		II	5.00		
Li_Co-PVBFCC50/50	1 st	I	9.70	11.44	3.48
		II	13.18		
	2 nd	I	3.65	4.08	0.85
		II	4.50		
	3 rd	I	2.90	2.70	0.40
		II	2.50		
Li_BPSFCC	1 st	I	13.65	12.66	1.98
		II	11.67		
	2 nd	I	5.55	5.88	0.65
		II	6.20		
	3 rd	I	5.80	5.28	1.05
		II	4.75		

หมายเหตุ

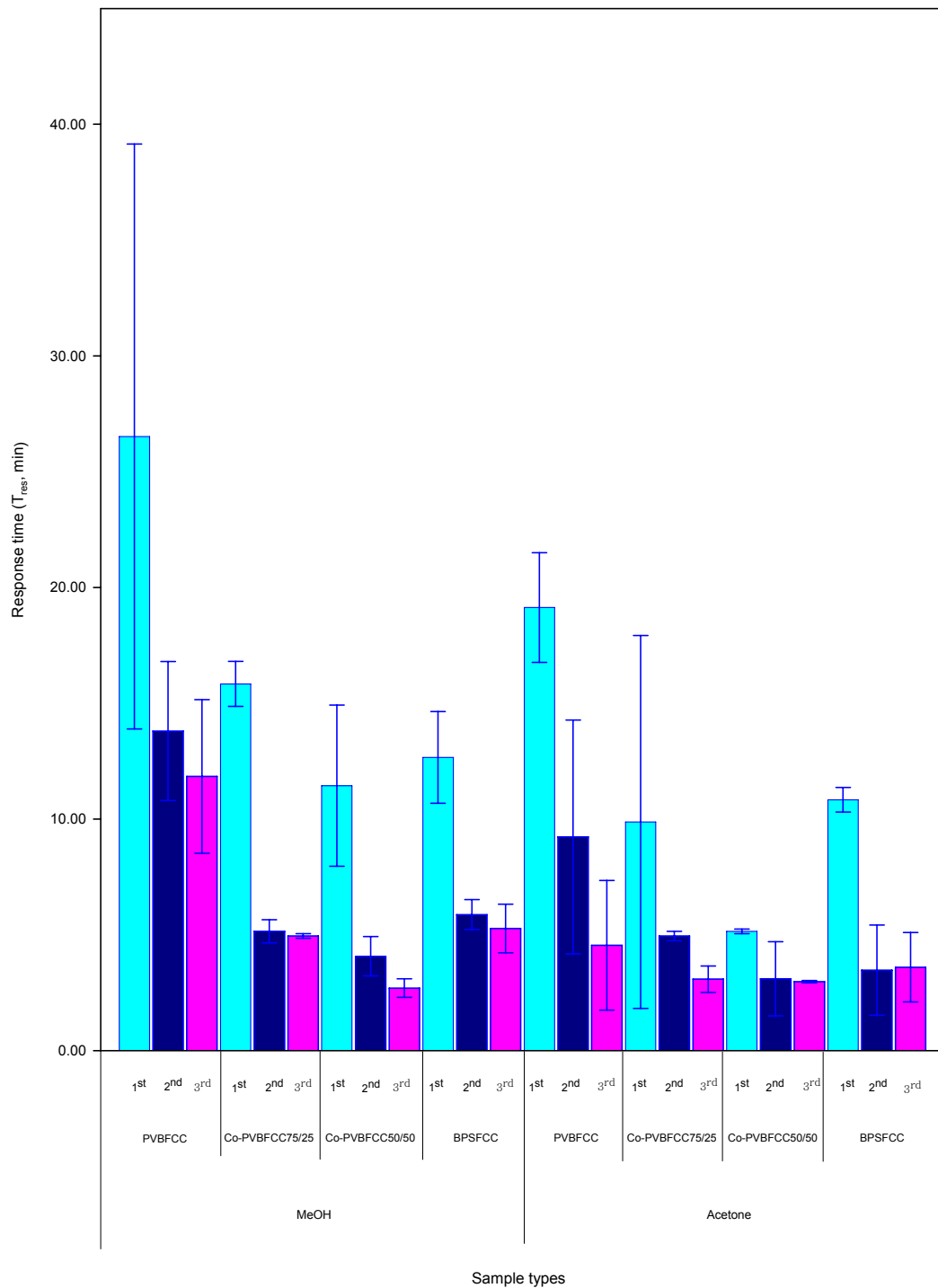
ค่า T_{rec}^* และ R^* คือ ค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยตามลำดับ ซึ่งคิดจากข้อมูลสองข้อมูลที่ได้จากการทดลองซ้ำในแต่ละรอบ

ตารางที่ 4.10 ข้อมูลการวัดเวลาที่ใช้ในการตอบสนอง (T_{rec}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

Sample name	Cycle	Specimen	T_{res} (min)	T_{res}^* (min)	R^*
Li_PVBFCC	1 st	I	17.95	19.14	2.37
		II	20.32		
	2 nd	I	11.75	9.23	5.05
		II	6.70		
	3 rd	I	3.15	4.55	2.80
		II	5.95		
Li_Co-PVBFCC75/25	1 st	I	13.90	9.88	8.05
		II	5.85		
	2 nd	I	4.85	4.95	0.20
		II	5.05		
	3 rd	I	2.80	3.09	0.57
		II	3.37		
Li_Co-PVBFCC50/50	1 st	I	5.10	5.15	0.10
		II	5.20		
	2 nd	I	3.90	3.10	1.60
		II	2.30		
	3 rd	I	3.00	2.98	0.05
		II	2.95		
Li_BPSFCC	1 st	I	11.10	10.84	0.53
		II	10.57		
	2 nd	I	2.50	3.48	1.95
		II	4.45		
	3 rd	I	2.85	3.60	1.50
		II	4.35		

หมายเหตุ

ค่า T_{rec}^* และ R^* คือ ค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยตามลำดับ ซึ่งคิดจากข้อมูลสองข้อมูลที่ได้จากการทดลองซ้ำในแต่ละรอบ



รูปที่ 4.59 เวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่าง (T_{res}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

4.3.3.5 ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์ (T_{rec})

ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์(T_{rec}) เมื่อไล่ก๊าซตัวอย่างออกไปแล้ว จากการทดลองซ้ำทั้งสองครั้งสามารถหาค่าเฉลี่ยและการกระจายของข้อมูลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และ 4.12 และรูปที่ 4.60 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. พอลิเมอร์ทุกชนิดมีเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับก่อนข้างเข้า คือ มากกว่า 3 นาทีทุกชนิด (ดูรูปที่ 4.60) เพื่อให้โมเลกุลของก๊าซมีระยะเวลามากพอสมควรในการที่จะแพร่กลับออกไปจากพอลิเมอร์ซึ่งมากกว่าระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซ ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วของโมเลกุลของก๊าซและโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้เกิดแรงกระทำระหว่างกัน เป็นผลทำให้โมเลกุลของก๊าซหลุดออกไปจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ไม่สะดวก

2. ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับในรอบที่ 1 จะนานมากกว่ารอบอื่นๆ เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เพิ่งจะมีก๊าซเข้ามาอยู่ในโครงสร้างครั้งแรก โมเลกุลของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นระเบียบมากนัก ทำให้โมเลกุลของก๊าซต้องอาศัยระยะเวลาในการเดินทางออกไปจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ แต่ในการทดลองรอบต่อไปจะใช้ระยะเวลาในการคืนตัวได้รวดเร็วกว่าขึ้น เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เคยผ่านก๊าซมาแล้วนั้น จะมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมากขึ้น

3. ในกรณีของก๊าซเมทานอล พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากก๊าซเมทานอลมีความเป็นขั้วสูงจึงเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของก๊าซเมทานอลกับพอลิเมอร์ได้มาก ส่งผลทำให้การแพร่ผ่านออกไปจากโมเลกุลของพอลิเมอร์เป็นไปได้ยาก แม้ว่าพอลิเมอร์จะมีความอ่อนตัวมากขึ้นก็ตาม

4. ในกรณีของก๊าซอะซิโตน พบว่า จากการที่ก๊าซอะซิโตนมีสมบัติความเป็นขั้วที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับก๊าซเมทานอล จึงเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของก๊าซอะซิโตนและพอลิเมอร์ได้น้อยกว่ากรณีของก๊าซเมทานอล ดังนั้น ปัจจัยทางโครงสร้างของพอลิเมอร์จึงมีบทบาทมากขึ้น กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่าจะช่วยทำให้การเคลื่อนที่ออกไปของก๊าซทำได้ง่ายขึ้นและใช้ระยะเวลาในการคืนตัวกลับได้เร็ว ซึ่งสามารถเรียงลำดับระยะเวลาในการคืนตัวกลับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ BPSFCC > PVB FCC >

Co-PVB FCC 75/25 > Co-PVB FCC 50/50

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลการวัดเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับ (T_{rec}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอลเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

Sample name	Cycle	Specimen	T_{rec} (min)	T_{rec}^* (min)	R^*
Li_PVBFCC	1 st	I	33.20	27.78	10.85
		II	22.35		
	2 nd	I	6.70	7.10	0.80
		II	7.50		
	3 rd	I	7.23	7.32	0.17
		II	7.40		
Li_Co-PVBFCC75/25	1 st	I	12.80	14.11	2.62
		II	15.42		
	2 nd	I	10.05	11.68	3.25
		II	13.30		
	3 rd	I	9.93	10.19	0.52
		II	10.45		
Li_Co-PVBFCC50/50	1 st	I	14.75	14.78	0.05
		II	14.80		
	2 nd	I	11.65	11.40	0.50
		II	11.15		
	3 rd	I	8.55	8.75	0.40
		II	8.95		
Li_BPSFCC	1 st	I	10.30	12.15	3.70
		II	14.00		
	2 nd	I	9.95	11.25	2.60
		II	12.55		
	3 rd	I	7.85	9.10	2.50
		II	10.35		

หมายเหตุ

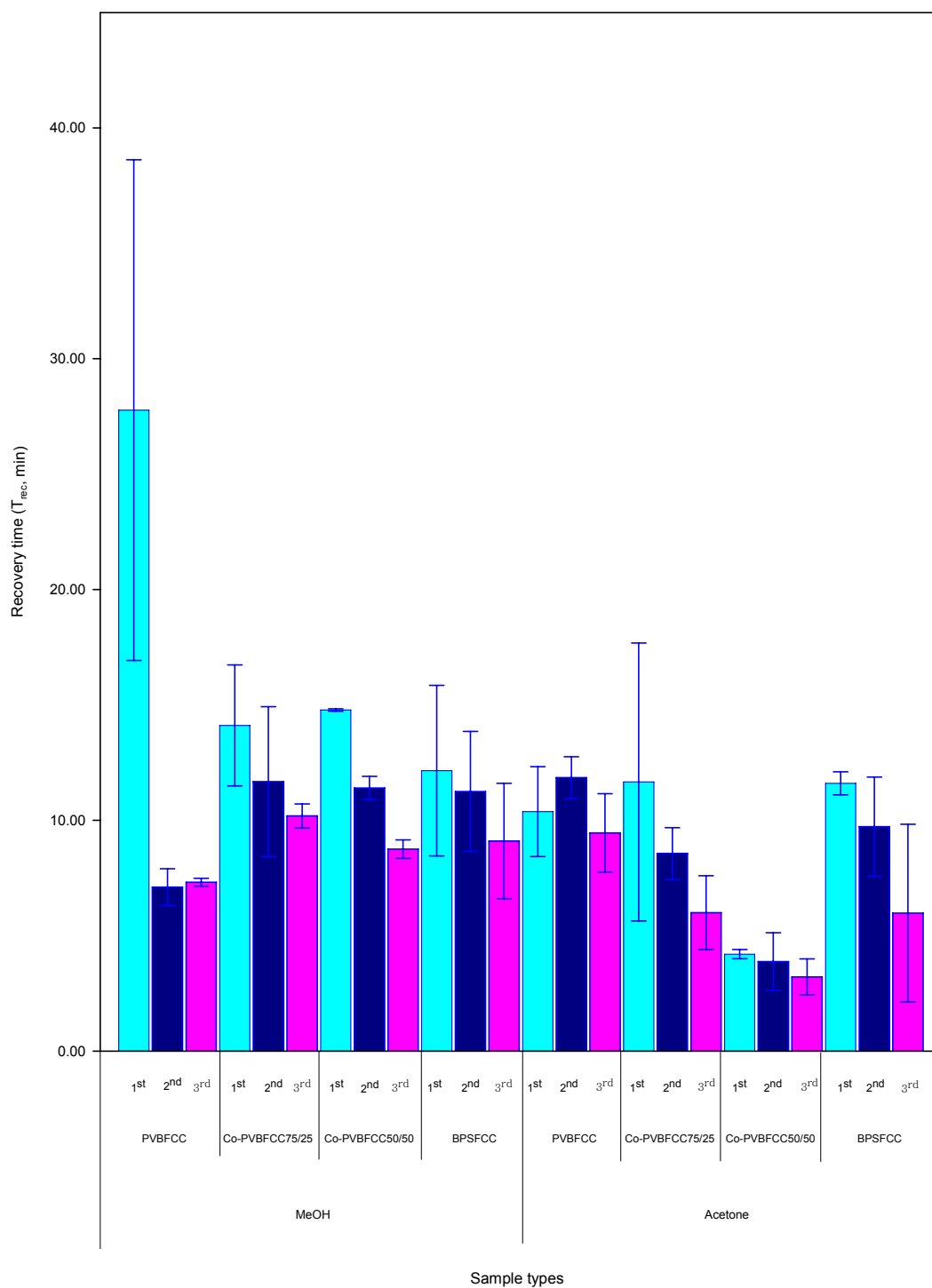
ค่า T_{rec}^* และ R^* คือ ค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยตามลำดับ ซึ่งคิดจากข้อมูลสองข้อมูลที่ได้จากการทดลองซ้ำในแต่ละรอบ

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลการวัดเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับ (T_{rec}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

Sample name	Cycle	Specimen	T_{rec} (min)	T_{rec}^* (min)	R^*
Li_PVBFCC	1 st	I	11.35	10.38	1.95
		II	9.40		
	2 nd	I	12.30	11.85	0.90
		II	11.40		
	3 rd	I	10.30	9.45	1.70
		II	8.60		
Li_Co-PVBFCC75/25	1 st	I	14.67	11.66	6.02
		II	8.65		
	2 nd	I	8.00	8.56	1.12
		II	9.12		
	3 rd	I	5.20	6.00	1.60
		II	6.80		
Li_Co-PVBFCC50/50	1 st	I	4.10	4.20	0.20
		II	4.30		
	2 nd	I	4.50	3.88	1.25
		II	3.25		
	3 rd	I	3.60	3.21	0.78
		II	2.82		
Li_BPSFCC	1 st	I	11.85	11.60	0.50
		II	11.35		
	2 nd	I	8.65	9.73	2.15
		II	10.80		
	3 rd	I	4.05	5.98	3.85
		II	7.90		

หมายเหตุ

ค่า T_{rec}^* และ R^* คือ ค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยตามลำดับ ซึ่งคิดจากข้อมูลสองข้อมูลที่ได้จากการทดลองซ้ำในแต่ละรอบ



รูปที่ 4.60 เวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับภายหลังจากการผ่านก๊าซตัวอย่าง (T_{rec}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

4.3.3.6 ร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่าง (%S)

ร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่าง (%S) คำนวณมาจากการเปรียบเทียบค่า I_{N_2} กับ I_{gas} ของการทดสอบแต่ละรอบในสภาพการใช้งานจริงที่ต้องมีการผ่านเข้า-ออกของก๊าซตัวอย่างที่ต่อเนื่องกันตลอด จากการทดลองซ้ำทั้งสองครั้งสามารถหาค่าเฉลี่ยและการกระจายของข้อมูลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และ 4.14 และรูปที่ 4.61 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์ทุกชนิดมีค่าสูงมากกว่า 100 % (ดูรูปที่ 4.61) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสไฟฟ้าเมื่ออยู่ในสถานะของก๊าซตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการผ่านก๊าซ ซึ่งจากการที่โมเลกุลของก๊าซตัวอย่างช่วยทำหน้าที่ในการพลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้เพิ่มความสามารถในการสั่นไหวของโมเลกุลพอลิเมอร์และการเคลื่อนที่ได้ของเปอร์คลอเรตและอิเล็กตรอนเกิดได้ดี

2. ค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซของพอลิเมอร์ทุกชนิด(ยกเว้น BPSFCC ที่ทดสอบกับก๊าซอะซิโตน)ในการทดสอบรอบที่ 1 จะสูงมาก (อยู่ในช่วง $10^6\%$) ในขณะที่รอบที่ 2 และ 3 นั้นจะมีค่าต่ำกว่ารอบที่ 1 มาก(อยู่ในช่วง $10^3-10^5\%$) เนื่องจากการเปรียบเทียบจากค่ากระแสไฟฟ้าในสภาพที่มีและไม่มีก๊าซตัวอย่าง โดยในรอบที่ 1 นั้น โมเลกุลของพอลิเมอร์ไม่เคยผ่านก๊าซมาก่อน ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในสภาพที่ไม่มีก๊าซตัวอย่าง (I_{N_2}) จึงต่ำมาก ค่าร้อยละการตอบสนองของการทดสอบรอบแรกนี้จึงถือว่าเป็นค่าความไวบริสุทธิ์ (Virgin sensitivity) ของพอลิเมอร์นั้น ในขณะที่ในรอบที่ 2 และ 3 โมเลกุลของพอลิเมอร์เคยผ่านก๊าซตัวอย่างมาก่อนแล้วทำให้มีโมเลกุลของก๊าซตัวอย่างบางส่วนหลงเหลืออยู่จากการทดสอบในรอบก่อนหน้า ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในสภาพที่ไม่ได้อยู่ในก๊าซตัวอย่างมีค่ามากกว่าในรอบที่ 1 มาก ส่งผลทำให้ค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างในรอบที่ 2 และ 3 มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากการทดสอบในรอบที่ 1 มาก ค่าร้อยละการตอบสนองของการทดสอบรอบที่ 2 และ 3 นี้จึงถือว่าเป็นค่าความไวอิ่มตัว (Saturated sensitivity) ของพอลิเมอร์นั้น อย่างไรก็ตาม ค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างทุกรอบจะให้ค่าที่สูงมากกว่า $10^3\%$ ซึ่งนับว่ามีการตอบสนองต่อก๊าซที่ชัดเจนเป็นอย่างมาก

3. ในกรณีของ BPSFCC ที่ทำการทดสอบกับก๊าซอะซิโตน พบว่า ค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างในแต่ละรอบมีค่าที่สูงใกล้เคียงกัน(อยู่ในช่วง $10^6\%$) เป็นผลมาจากการที่ก๊าซอะซิโตนถูกขับไล่ออกจากโมเลกุลของ BPSFCC ได้เกือบทั้งหมด เพราะโครงสร้างของ BPSFCC ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลมาก และการที่ก๊าซอะซิโตนมีความเป็นขั้วน้อยจึงทำให้โมเลกุลของก๊าซอะซิโตนสามารถถูกขับไล่ออกไปได้ง่าย ค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้

ก่อนการผ่านก๊าซตัวอย่างในรอบต่อ ๆ ไปจึงมีค่าต่ำใกล้เคียงกันทั้งหมดทุกรอบ เมื่อนำมาคำนวณค่าร้อยละการตอบสนองจึงทำให้ได้ค่าที่สูงใกล้เคียงกัน

4. ในกรณีการทดสอบกับก๊าซเมทานอล พบว่า ร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างมีแนวโน้มเดียวกัน คือ พอลิเมอร์ที่มีปริมาณ FCC มากกว่าจะตอบสนองต่อก๊าซได้ดีกว่า และสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ $PVBFCC > Co-PVBFCC75/25 > Co-PVBFCC50/50 > BPSFCC$

5. ในกรณีการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนจะให้ผลที่ตรงข้ามกับกรณีที่ทดสอบกับก๊าซเมทานอล คือ แม้จะมีปริมาณ FCC มากกว่า แต่ค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซมีค่าลดลง เนื่องจากการที่ก๊าซอะซิโตนมีความเป็นขั้วที่น้อยกว่า การทำหน้าที่ในการพลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์จึงทำได้ไม่ดีเท่ากับก๊าซเมทานอล ดังนั้นการนำไฟฟ้าได้จึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์เป็นหลัก กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่าจะช่วยทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่า T_g ของพอลิเมอร์ ที่ยิ่งมีค่า T_g น้อย ยิ่งมีความอ่อนตัวมาก ดังนั้นค่าร้อยละการตอบสนองของพอลิเมอร์ในการทดสอบนี้ สามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ ดังนี้ $Co-PVBFCC50/50 > Co-PVBFCC75/25 > PVBFCC$ แต่ในส่วน of BPSFCC แม้จะมีค่า T_g สูงที่สุดซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งทื่อของโมเลกุลที่ไม่สามารถลื่นไหวได้ง่าย แต่เนื่องจากการที่โครงสร้างของ BPSFCC ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่ใหญ่ ทำให้โมเลกุลของก๊าซอะซิโตนสามารถแพร่ผ่านเข้าไปได้มาก อิเล็กตรอนจึงสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น และสามารถไล่ก๊าซอะซิโตนออกไปได้เกือบทั้งหมด ทำให้ค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซที่คำนวณได้มีค่าสูง

6. เปรียบเทียบค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซของพอลิเมอร์ในกลุ่มที่ทดสอบกับก๊าซเมทานอลจะให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงมากกว่ากลุ่มที่ทดสอบกับก๊าซอะซิโตน (ยกเว้น BPSFCC ที่ทดสอบกับก๊าซอะซิโตน สามารถอธิบายพฤติกรรมได้ตามเหตุผลในข้อ 3.) เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วของก๊าซตัวอย่างมีผลต่อการทำหน้าที่พลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ กล่าวคือ ยิ่งก๊าซทดสอบมีความเป็นขั้วมาก จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับไอออนของลิเทียม ซึ่งเกิดสารกระตุ้นให้เกิดพาหะในการพาประจุ(dopant) โดยทำให้ไอออนของเปอร์คลอเรตสามารถทำหน้าที่เป็นตัวสะเทินประจุ(counter ion) ให้กับ $Fe(III)$ ในหมู่ FCC ดังนั้น การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของเปอร์คลอเรตจึงเป็นไปได้ดีขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของก๊าซตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก สามารถแทรกแพร่ผ่านช่องว่างระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ง่ายกว่า ช่วยทำหน้าที่ในการพลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดีขึ้นอีกด้วย ดังนั้นกลุ่มที่ทำการทดสอบกับก๊าซเมทานอลจึงมีค่าร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซที่สูงมากกว่ากลุ่มที่ทดสอบกับก๊าซอะซิโตน

ตารางที่ 4.13 ข้อมูลร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทธานอลเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

Sample name	Cycle	Specimen	%S	%S*	R*
Li_PVBFCC	1 st	I	6.579E+06	6.301E+06	5.564E+05
		II	6.023E+06		
	2 nd	I	2.404E+05	1.705E+05	1.399E+05
		II	1.006E+05		
	3 rd	I	5.960E+04	7.806E+04	3.692E+04
		II	9.652E+04		
Li_Co-PVBFCC75/25	1 st	I	5.972E+06	5.304E+06	1.337E+06
		II	4.635E+06		
	2 nd	I	1.254E+05	1.165E+05	1.779E+04
		II	1.076E+05		
	3 rd	I	1.275E+05	1.189E+05	1.711E+04
		II	1.103E+05		
Li_Co-PVBFCC50/50	1 st	I	5.120E+06	4.518E+06	1.203E+06
		II	3.917E+06		
	2 nd	I	1.318E+05	1.299E+05	3.741E+03
		II	1.280E+05		
	3 rd	I	1.366E+05	1.260E+05	2.116E+04
		II	1.155E+05		
Li_BPSFCC	1 st	I	3.487E+06	2.885E+06	1.204E+06
		II	2.283E+06		
	2 nd	I	7.059E+04	7.347E+04	5.755E+03
		II	7.635E+04		
	3 rd	I	1.077E+05	8.723E+04	4.103E+04
		II	6.672E+04		

หมายเหตุ

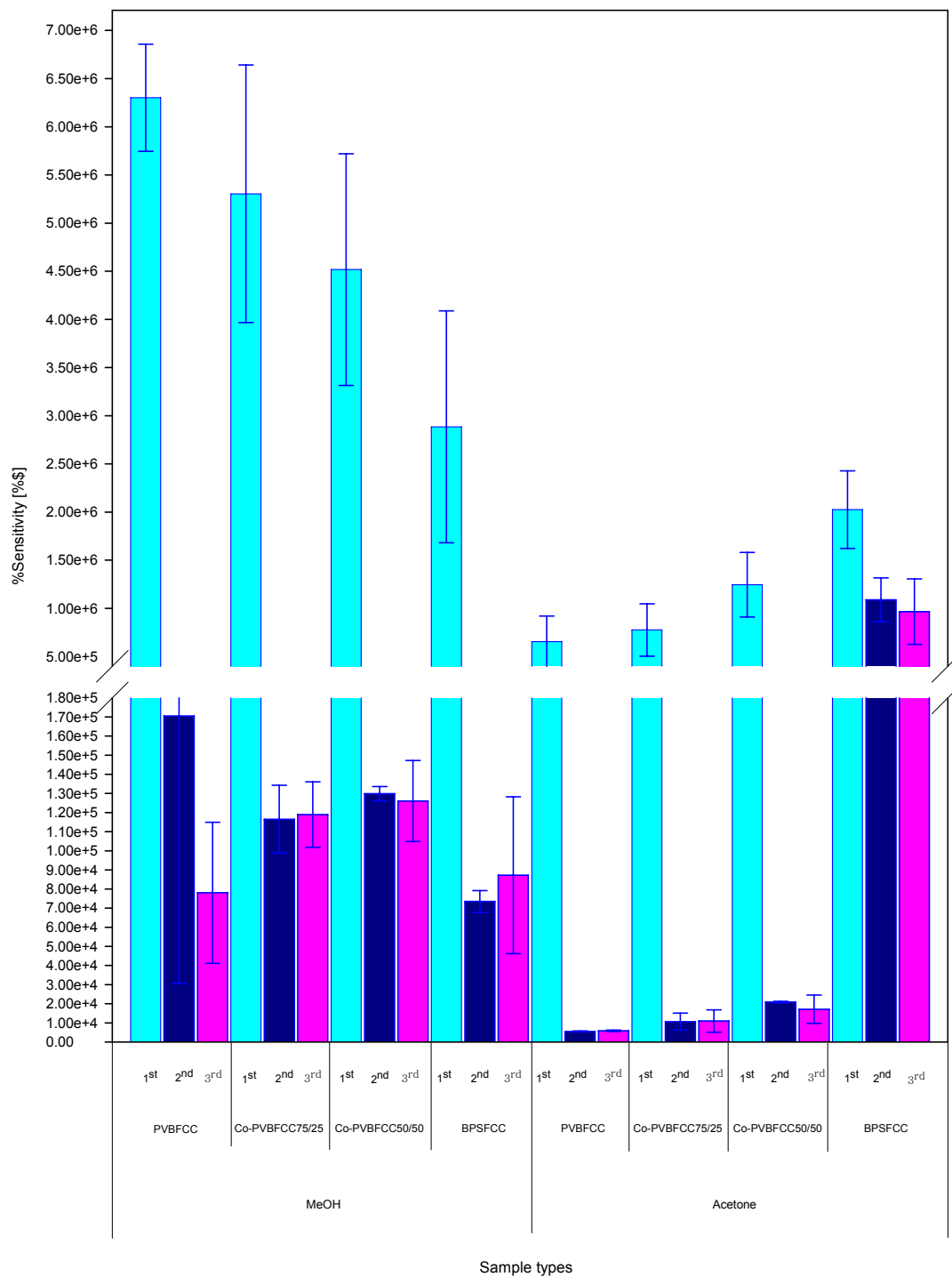
ค่า %S* และ R* คือ ค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยตามลำดับ ซึ่งคิดจากข้อมูลสองข้อมูลที่ได้จากการทดลองซ้ำในแต่ละรอบ

ตารางที่ 4.14 ข้อมูลร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตนเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

Sample name	Cycle	Specimen	%S	%S*	R*
Li_PVBFCC	1 st	I	7.882E+05	6.553E+05	2.659E+05
		II	5.223E+05		
	2 nd	I	5.597E+03	5.482E+03	2.305E+02
		II	5.367E+03		
	3 rd	I	5.657E+03	5.844E+03	3.739E+02
		II	6.031E+03		
Li_Co-PVBFCC75/25	1 st	I	9.123E+05	7.763E+05	2.720E+05
		II	6.403E+05		
	2 nd	I	8.456E+03	1.066E+04	4.402E+03
		II	1.286E+04		
	3 rd	I	8.032E+03	1.095E+04	5.842E+03
		II	1.387E+04		
Li_Co-PVBFCC50/50	1 st	I	1.413E+06	1.246E+06	3.353E+05
		II	1.078E+06		
	2 nd	I	2.112E+04	2.090E+04	4.407E+02
		II	2.068E+04		
	3 rd	I	1.339E+04	1.709E+04	7.400E+03
		II	2.079E+04		
Li_BPSFCC	1 st	I	2.227E+06	2.025E+06	4.035E+05
		II	1.824E+06		
	2 nd	I	1.203E+06	1.089E+06	2.283E+05
		II	9.751E+05		
	3 rd	I	1.137E+06	9.673E+05	3.400E+05
		II	7.973E+05		

หมายเหตุ

ค่า %S* และ R* คือ ค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยตามลำดับ ซึ่งคิดจากข้อมูลสองข้อมูลที่ได้จากการทดลองซ้ำในแต่ละรอบ



รูปที่ 4.61 ร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่าง (%S) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองรอบ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างพอลิเมอร์และก๊าซตัวอย่างที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าเพื่อนำพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ โดยทำการศึกษาพอลิเมอร์สี่ชนิด ได้แก่ PVBFCC, Co-PVBFCC75/25, Co-PVBFCC50/50 และ BPSFCC และทำการทดสอบกับก๊าซตัวอย่างสองชนิดคือก๊าซเมทานอลและก๊าซอะซิโตนที่อุณหภูมิ 28 °C หลักการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าประเภทนี้ต้องอาศัยการเคลื่อนที่แบบกระโดดข้าม (hopping) ของอิเล็กตรอนจากหมู่ FCC หนึ่งไปสู่อีกหมู่หนึ่ง จากการทดสอบพบว่า มีปัจจัยเกี่ยวข้องที่มีอิทธิพลส่งผลต่อการนำไฟฟ้าและความว่องไวในการตรวจสอบก๊าซซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. โครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์

1.1 ปริมาณของหมู่เฟอร์โรซีน

โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มีปริมาณของหมู่เฟอร์โรซีนมากกว่า จะส่งผลทำให้มีพาหะในการพาประจุมากขึ้น และพาหะในการพาประจุจะอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกระโดดข้ามของอิเล็กตรอนจากหมู่ FCC หนึ่งไปสู่อีกหมู่หนึ่งเกิดได้ดียิ่งขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจึงมีค่าสูง ดังนั้นเมื่อมีการผ่านก๊าซตัวอย่างจะทำให้เกิดการตอบสนองได้มากกว่า

1.2 ความอ่อนตัวของโครงสร้างพอลิเมอร์

ความอ่อนตัวของโครงสร้างพอลิเมอร์ซึ่งดูได้จาก T_g นั้น จะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซและระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับ คือ พอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวมากกว่าจะใช้ระยะเวลาทั้งสองแบบนี้สั้นกว่า

1.3 ช่องว่างระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ที่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุลที่ใหญ่ เช่น BPSFCC ถึงแม้จะมีค่า T_g สูง แต่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซสามารถแพร่ผ่านเข้าไปได้ง่าย เวลาที่ใช้ในการตอบสนองรวดเร็ว และทำให้มีปริมาณก๊าซที่ติดค้างในโครงสร้างน้อยกว่า ช่วยทำให้ระยะเวลาในการคืนตัวเร็วขึ้นอีกด้วย

2. โครงสร้างและสมบัติของก๊าซ

2.1 ความเป็นขั้วของก๊าซ

ก๊าซที่มีความเป็นขั้วสูง จะสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับไอออนของเหล็กและลิเทียม และทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น แต่จะส่งผลทำให้มีปริมาตรก๊าซดังกล่าวติดค้างอยู่ภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์มากเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากความเป็นขั้วของก๊าซกับพอลิเมอร์ ทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับนานกว่า

2.2 ขนาดโมเลกุลของก๊าซ

ก๊าซที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าจะช่วยทำหน้าที่ในการพลาสติกไซส์โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้มีความอ่อนตัวมากขึ้น ค่าการนำไฟฟ้าจึงสูงขึ้น

2.3 ปริมาณของก๊าซ

ก๊าซที่มีปริมาณมากจะช่วยทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองเกิดได้รวดเร็วมากขึ้น เนื่องจากเพิ่มโอกาสในการแทรกเข้าไปในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้มากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ปัจจัยดังกล่าวข้างต้นจะมีบทบาทมากขึ้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระบบที่กำลังศึกษาอยู่ในขณะนั้นว่าปัจจัยใดจะมีอิทธิพลเหนือกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ เป็นครั้งแรกที่ทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ โดยที่พอลิเมอร์นำไฟฟ้าดังกล่าวมีหลักการนำไฟฟ้าที่แตกต่างจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจสอบก๊าซโดยทั่วไปทำให้พบข้อบกพร่องที่ควรได้รับการแก้ไขในคราวต่อไป ดังนี้

1. ระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อก๊าซและเวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับค่อนข้างนาน เนื่องจากความยากลำบากในการแพร่ผ่านของก๊าซ ดังนั้นเพื่อให้การแพร่ผ่านของก๊าซเป็นไปได้ง่ายขึ้นจึงควรผสมพลาสติกไซเซอร์เพื่อช่วยให้โมเลกุลของพอลิเมอร์มีความสามารถในการเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น น่าจะช่วยลดระยะเวลาในการแพร่ผ่านของก๊าซได้ โดยจะต้องเลือกใช้พลาสติกไซเซอร์ที่ไม่ดูดความชื้นเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อความไวต่อการตรวจสอบก๊าซของพอลิเมอร์

2. ในการประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ดังกล่าวในการตรวจสอบก๊าซควรทำการทดสอบกับก๊าซที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวตรวจจับก๊าซที่สังเคราะห์ได้ โดยควรมีระบบควบคุมความเข้มข้นของก๊าซที่แม่นยำและสามารถควบคุมความเข้มข้นของก๊าซในระดับที่ต่ำมากได้

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าควรมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องตามเวลาจริง เพื่อให้การสังเกตพฤติกรรมการตอบสนองต่อก๊าซเป็นไปอย่างต่อเนื่องและแม่นยำ

บรรณานุกรม

1. สำนักระบาดวิทยา. พิษจากก๊าซ/สารไอระเหย [Online]. Accessed 8 April 2005. Available from <http://www.epid.moph.go.th/dssur/enocc/gasvapor.htm>.
2. กรมควบคุมมลพิษ. สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2548 [online]. Accessed 8 April 2006. Available from http://www.pcd.go.th/info_serv/pol_state48.htm.
3. กรมควบคุมมลพิษ. มาตรฐานคุณภาพอากาศและเสียง [online]. Accessed 8 April 2006. Available from http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_airsnd01.htm.
4. กรมควบคุมมลพิษ. มาตรฐานคุณภาพอากาศของประเทศไทยเปรียบเทียบกับประเทศอื่นๆ [online]. Accessed 8 April 2006. Available from http://www.pcd.go.th/info_serv/air_std.htm.
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-Il 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. Murrae J. B. and Richard T., ed. Electronic and Photonic Applications of Polymers. Washington DC: American Chemical Society, 1988.
13. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. สมบัติอื่นๆของวัสดุ [Online]. Accessed 13 May 2007. Available from <http://www.mtec.or.th/th/labs/mech/tips3.html>.
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 18 February 2006. Available from <http://pibul2.psru.ac.th/~prasit/elect/electro1.htm>.
17. Fluo View Resource Center. Semiconductor Diode Lasers. [online]. Accessed 18 February 2006. Available from <http://www.olympusfluoview.com/java/diodelasers/>
18. แม้น อมรสิทธิ์ และ สมชัย อัครทิวา. วัสดุวิศวกรรม Principles of Materials Science and Engineering. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป, 2546.
19. Conductive polymers, The Nobel Prize in Chemistry, 2000. Kungl. Vetenskapsakademie, Inform. Dept.
20. Hans R. Kricheldorf, Oskar Nuyken, and Graham Swift, comps. Handbook of polymer synthesis. 2nd ed..New York : Marcel Dekker, 2005.
21. Krishna C. Persaud. "Polymers for chemical sensing." Materials Today. April 2005.
22. Bredas J.L. and Street G.B.. "Polarons, Bipolarons, and Solitons in Conducting polymers." Accounts of Chemical Research. 18 (1985) : 309-315.
23. Manas Chanda and Salil K. Roy. Plastics Technology Handbook. 2nd ed.. New York : Marcel Dekker, 1993.
24. Gabriela Lisa, et al. "Thermal behavior of polystyrene, Polysulfone and their substituted derivatives." Polymer Degradation and Stability 82(2003):73-79.
25. Tahaaki kuroiwa, et al. "A thin-film Polysulfone-based capacitive-type relative-humidity sensor." Sensors and Actuators B 24-25(1995):692-695.

26. Gab-Jin Hwang and Haruhiko ohya. "Preparation of anion-exchange membrane based on block copolymers: Part 1. Amination of Chloromethylated copolymers." Journal of Membrane Science 140(1998) :195-203.
27. Charles M. S., Charles L. L. and Marc H. ,Phase-Transfer Catalysis: Fundamentals, Applications and Industrial Perspectives. New York: Chapman and Hall, 1994.
28. เกริกชัย สุกาญจน์ทที. อุณหพลศาสตร์สำหรับอุตสาหกรรมซีพีไอ. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
29. แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2534.
30. วิชัย รื้อตระกูล และคณะ. การประยุกต์สเปกโตรสโคปีในเคมีอินทรีย์. กรุงเทพฯ : นำอักษรการพิมพ์, 2526.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

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

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

ก.1 การคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างไวนิลเบนซิลคลอไรด์(VBC) ต่อเอททอกซิเอทิลเมทาคริเลต (EEM) ในโครงสร้างของพอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์-โค-เอททอกซิเอทิลเมทาคริเลต (Co-PVBC75/25, Co-PVBC50/50) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ spectrum

ก.1.1 พอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์-โค-เอททอกซิเอทิลเมทาคริเลต75/25 (Co-PVBC75/25)

จาก $^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของ Co-PVBC75/25 สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณ VBC และ EEM ที่มีอยู่ในโครงสร้างได้ โดยทำการเปรียบเทียบสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 4.4 ppm (ตำแหน่ง e ในรูปที่ 4.12) ซึ่งเป็นตัวแทนของหมู่ $\text{CH}_2\text{-Cl}$ ใน VBC กับพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 0.5 ppm (ตำแหน่ง i ในรูปที่ 4.12) ซึ่งเป็นตัวแทนของหมู่ $-\text{CH}_2$ ใน EEM พบว่า

VBC: พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 4.4 ppm ประมาณเท่ากับ 2.00 เทียบเท่ากับ โปรตอนจำนวน 2 ตัว ของ $\text{CH}_2\text{-Cl}$

EEM: พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 0.5 ppm ประมาณเท่ากับ 0.99 เทียบเท่ากับ โปรตอนจำนวน 3 ตัว ของ $-\text{CH}_2$

นั่นคือ สัดส่วนของ VBC: EEM เท่ากับ

$$VBC : EEM \equiv \frac{2.00/2}{0.99/3} = 3.03 \approx 3:1$$

แสดงว่า ทุกๆหน่วยย่อยซ้ำของ VBC 3 หน่วย จะมีหน่วยย่อยซ้ำของ EEM 1 หน่วย คิดเป็นร้อยละปริมาณของ VBC ในโคพอลิเมอร์นี้ เท่ากับ

$$\frac{3}{3+1} \times 100 = 75\%$$

และคิดเป็นร้อยละปริมาณของ EEM ในโคพอลิเมอร์นี้ เท่ากับ

$$\frac{1}{3+1} \times 100 = 25\%$$

ดังนั้น Co-PVBC75/25 ที่สังเคราะห์มีปริมาณ VBC และ EEM ในโครงสร้าง เท่ากับ 75 % และ 25 % ตามลำดับ

ก.1.2 พอลิไวนิลเบนซิลคลอไรด์-โค-เอทอออกซิเอทิลเมทาคริเลต50/50(Co-PVBC50/50)

จาก¹H-NMR Spectrum ของ Co-PVBC50/50 สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณ VBC และ EEM ที่มีอยู่ในโครงสร้างได้ โดยทำการเปรียบเทียบสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 4.4 ppm (ตำแหน่ง e ในรูปที่ 4.13) ซึ่งเป็นตัวแทนของหมู่ CH₂-Cl ใน VBC กับพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 0.5 ppm (ตำแหน่ง i ในรูปที่ 4.13) ซึ่งเป็นตัวแทนของหมู่ -CH₃ ใน EEM พบว่า

VBC: พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 4.4 ppm ประมาณเท่ากับ 2.00 เทียบเท่ากับ โปรตอนจำนวน 2 ตัว ของ CH₂-Cl

EEM: พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 0.5 ppm ประมาณเท่ากับ 2.62 เทียบเท่ากับ โปรตอนจำนวน 3 ตัว ของ -CH₃

นั่นคือ สัดส่วนของ VBC: EEM เท่ากับ

$$VBC : EEM = \frac{2.00/2}{2.62/3} = 1.15 \approx 1:1$$

แสดงว่า ทุกๆหน่วยย่อยซ้ำของ VBC 1 หน่วย จะมีหน่วยย่อยซ้ำของ EEM 1 หน่วย คิดเป็นร้อยละปริมาณของ VBC ในโคพอลิเมอร์นี้ เท่ากับ

$$\frac{1}{1+1} \times 100 = 50\%$$

และคิดเป็นร้อยละปริมาณของ EEM ในโคพอลิเมอร์นี้ เท่ากับ

$$\frac{1}{1+1} \times 100 = 50\%$$

ดังนั้น Co-PVBC50/50 ที่สังเคราะห์มีปริมาณ VBC และ EEM ในโครงสร้าง เท่ากับ 50 % และ 50 % ตามลำดับ

ก.2 การคำนวณหาปริมาณ BMME ในสารผสม ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ ¹H-NMR spectrum

จาก¹H-NMR Spectrum ของสารผสมระหว่าง BMME ที่ต้องการกับสารผลิตภัณฑ์ร่วมคือ methyl acetate และสารตั้งต้นที่ยังคงเหลืออยู่ คือ dimethoxymethane(DMM) และ methanol สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณ BMME ในสารผสมดังกล่าวได้ โดยทำการเปรียบเทียบสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟสเปกตรัมเฉพาะของ BMME คือ O-CH₂-Br ปรากฏที่ตำแหน่ง 5.6 ppm (ตำแหน่ง e ในรูปที่ 4.16) กับพื้นที่ใต้กราฟสเปกตรัมเฉพาะของ DMM คือ O-CH₂-O ปรากฏที่ตำแหน่ง 4.5 ppm (ตำแหน่ง b ในรูปที่ 4.16) โดยอาศัยหลักการคิด คือ BMME ทั้งหมดเกิดขึ้นมาจาก DMM ดังนั้นเมื่อรวมปริมาณของ BEEM ที่เกิดขึ้นกับ DMM ที่เหลืออยู่จะต้องเท่ากับปริมาณ DMM ที่ใส่ไปตอนเริ่มต้น พบว่า

DMM: พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 0.5 ppm ประมาณเท่ากับ 1.40 เทียบเท่ากับ โปรตอนจำนวน 2 ตัว ของ $\text{O}-\text{CH}_2-\text{O}$

BMME: พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 5.6 ppm ประมาณเท่ากับ 15.54 เทียบเท่ากับ โปรตอนจำนวน 2 ตัว ของ $\text{O}-\text{CH}_2-\text{Br}$

นั่นคือ สัดส่วนของ DMM: BMME เท่ากับ

$$DMM : BMME = \frac{1.40/2}{15.54/2} = 0.09009 \approx 0.09 : 1$$

เนื่องจาก ปริมาณสารตั้งต้น DMM ที่ใช้ เท่ากับ 0.5086 โมล

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \text{DMM ที่ใช้} &= \text{DMM ที่เหลือ} + \text{BMME ที่เกิด} \\ 0.5086 &= 0.09 \text{ BMME} + 1 \text{ BMME} \\ 0.5086 &= 1.09 \text{ BMME} \\ \text{BMME} &= \frac{0.5086}{1.09} \\ \text{BMME} &= 0.4666 \end{aligned}$$

เนื่องจาก ปริมาตรของสารผสมรวมที่ใช้ทั้งหมด เท่ากับ 82.2 มล.

ดังนั้น ความเข้มข้นของ BMME ในสารผสมนี้ เท่ากับ

$$\begin{aligned} [\text{BMME}] &= \frac{0.4666}{82.2} \times 1000 \\ &= 5.676 \quad \text{โมล/ลิตร} \end{aligned}$$

ก.3 การคำนวณหาปริมาณหมู่โบรโมเมทิลเลตนบนโครงสร้างของ BPS ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ spectrum

จาก $^1\text{H-NMR}$ Spectrum ของ BPS สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณหมู่ CH_2-Br บน BPS ได้ โดยทำการเปรียบเทียบสัดส่วนพื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 4.4 ppm (ตำแหน่ง b ในรูปที่ 4.22) ซึ่งเป็นตัวแทนของหมู่ CH_2-Br กับ พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 1.6 ppm (ตำแหน่ง a ในรูปที่ 4.22) ซึ่งเป็นตัวแทนของ $-\text{CH}_2-$ ของ polysulfone พบว่า

หมู่โบรโมเมทิลเลต : พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 4.4 ppm ประมาณเท่ากับ 4.20 เทียบเท่ากับโปรตอนจำนวน 2 ตัว ของ CH_2-CBr

Polysulfone: พื้นที่ใต้กราฟที่ตำแหน่ง 1.6 ppm ประมาณเท่ากับ 8.63 เทียบเท่ากับ โปรตอนจำนวน 6 ตัว ของ $-\text{CH}_2-$ 2 หมู่

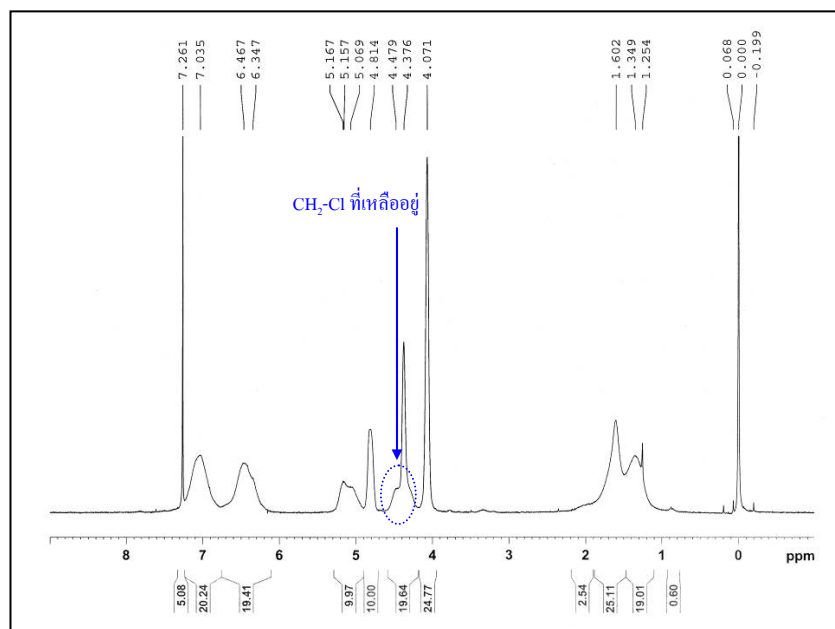
นั่นคือ สัดส่วนของ $\text{CH}_2\text{-Br}$: polysulfone เท่ากับ

$$\text{CH}_2 - \text{Br} : \text{polysulfone} \equiv \frac{4.20/2}{6.97/6} = 1.8077 \approx 1.8:1$$

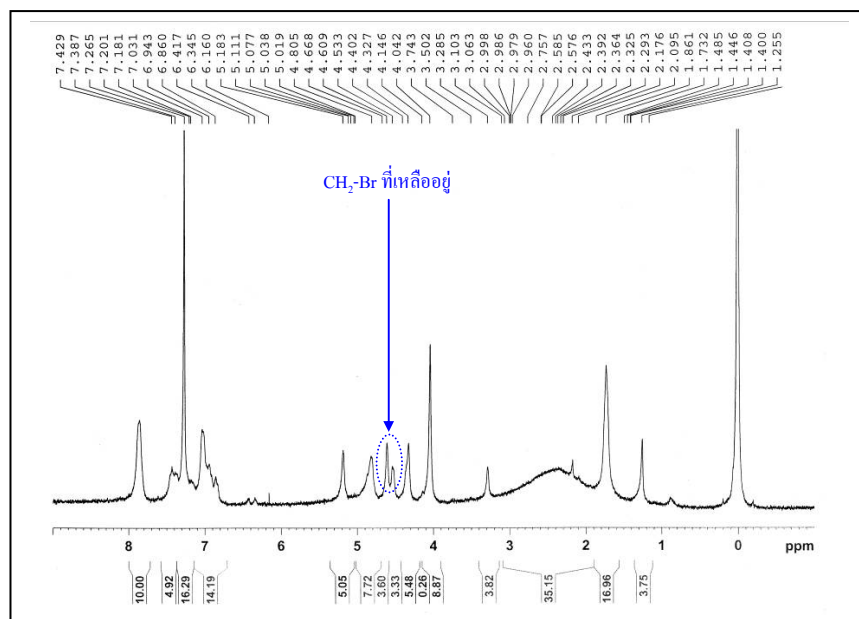
แสดงว่า ทุกๆหน่วยย่อยซ้ำของ Polysulfone 1 หน่วย จะมีหน่วยย่อยซ้ำของ $\text{CH}_2\text{-Br}$ 1.8 หน่วย

ก.4 การคำนวณหาปริมาณหมู่เฟอร์โรซีนบนโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ $^1\text{H-NMR}$ spectrum

โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ผ่านการทำเอสเตอร์ริฟิเคชันด้วยเกลือโซเดียมเฟอร์โรซีนคาร์บอกซิเลตแล้ว คือ PVB FCC, Co-PVB FCC75/25, Co-PVB FCC50/50 และ BPS FCC นั้น จะปรากฏสเปกตรัมของ $^1\text{H-NMR}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.38, 4.42, 4.46 และ 4.50 ตามลำดับ ซึ่งจะปรากฏสเปกตรัมเฉพาะของ FCC ในช่วง 4-5 ppm จำนวน 3 แบนด์ และเกิดการเคลื่อนของแบนด์ $\text{CH}_2\text{-Cl}$ หรือ $\text{CH}_2\text{-Br}$ ที่ตอนนี้อยู่กลายเป็น $\text{CH}_2\text{-FCC}$ จากเดิม 4.5 ppm มาอยู่ที่ 4.0 ppm ซึ่งจากสเปกตรัมดังกล่าวไม่ปรากฏแบนด์ของ $\text{CH}_2\text{-Cl}$ หรือ $\text{CH}_2\text{-Br}$ เหลืออยู่เลย ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้จาก PVBC และ BPS ที่ผ่านการทำเอสเตอร์ริฟิเคชันด้วยเกลือ Na-FCC ในปริมาณ 70 % ของหมู่ $\text{CH}_2\text{-Cl}$ และ $\text{CH}_2\text{-Br}$ ทั้งหมดที่มีอยู่ในโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ ก.1 และ ก.2 ตามลำดับ ซึ่งจะปรากฏแบนด์ดังกล่าวให้เห็นหลงเหลืออยู่



รูปที่ ก.1 แสดงแบนด์ของ PVBC ที่ผ่านการทำเอสเตอร์ริฟิเคชันด้วยเกลือ Na-FCC ไป 70% ของหมู่ $\text{CH}_2\text{-Cl}$ ทั้งหมด



รูปที่ ก.2 แสดงแบนด์ของ BPS ที่ผ่านการทำเอสเตอร์ริฟิเคชันด้วยเกลือ Na-FCC ไป 70% ของหมู่ CH₂-Br ทั้งหมด

ดังนั้น แสดงว่า PVBFCC, Co-PVBFCC75/25 Co-PVBFCC50/50 และ BPSFCC ที่สังเคราะห์ได้ สามารถแทนที่อะตอมของคลอรีนหรือโบรมีนด้วยหมู่ FCC ได้ทั้งหมด

ภาคผนวก ข

ข้อมูลผลการทดลองการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซตัวอย่าง

ข. ข้อมูลผลการทดลองการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซตัวอย่าง

ข.1 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซตัวอย่าง

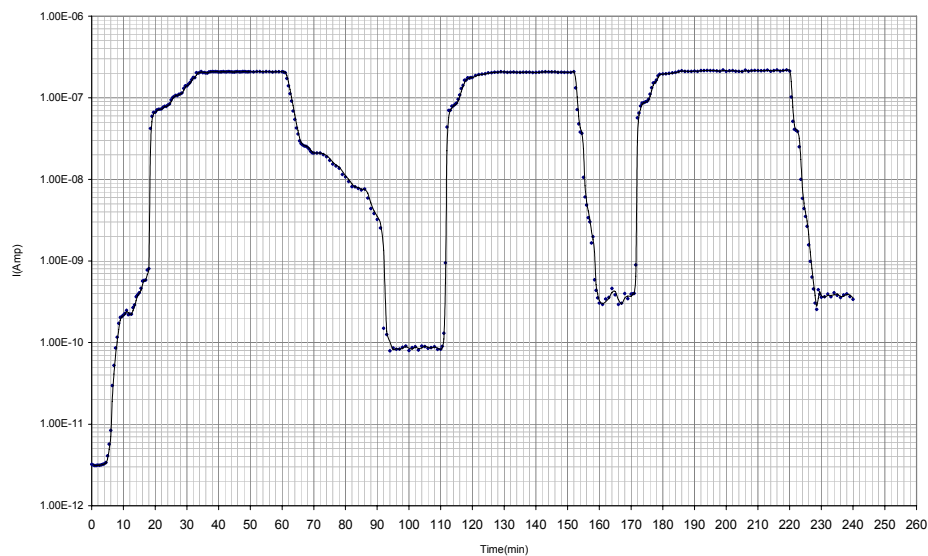
ข.1.1 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของของก๊าซเมทานอล (ครั้งที่1)

สภาวะทดสอบ

อุณหภูมิ	:	28	$^{\circ}\text{C}$
ความเข้มข้นก๊าซ	:	1.619×10^5	ppm
ค่าความต่างศักย์	:	0.5	Volt

ชื่อสาร : PVBFCC

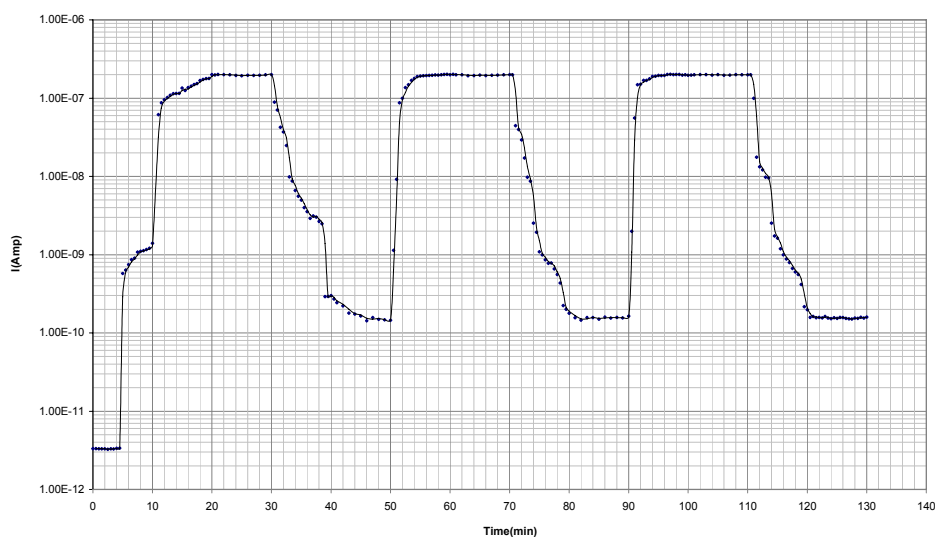
ความหนา : 0.405 mm



รูปที่ ข.1 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ PVBFCC (ครั้งที่ 1)

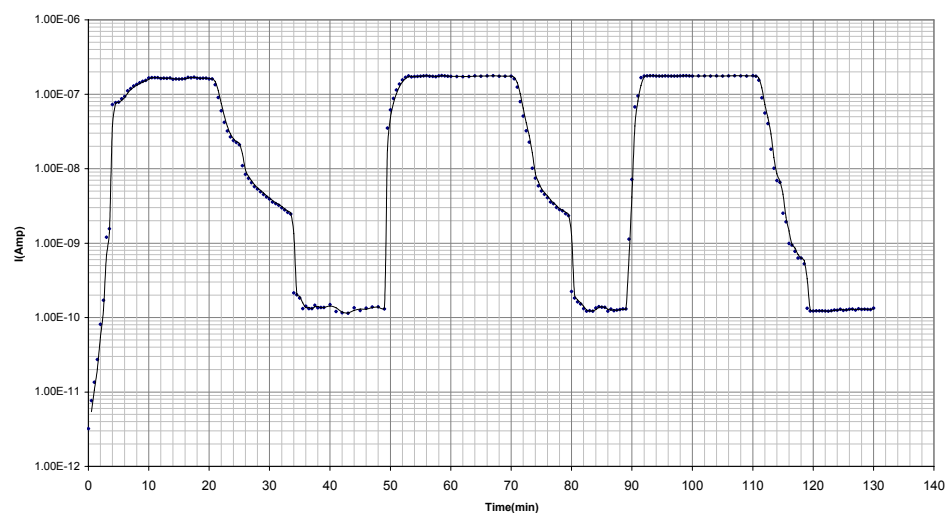
ชื่อสาร : Co-PVBFCC75/25

ความหนา : 0.380 mm



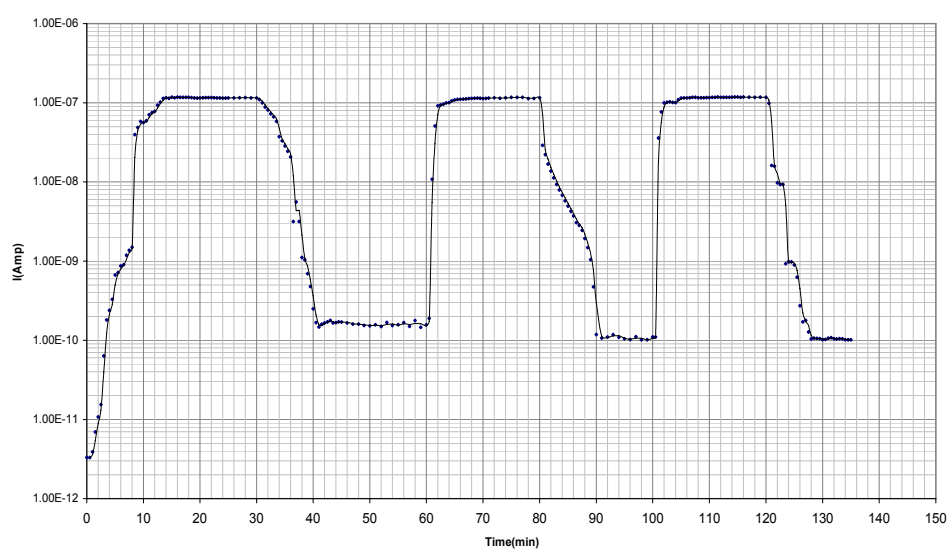
รูปที่ ข.2 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ Co-PVBFCC75/25(ครั้งที่ 1)

ชื่อสาร : Co-PVBFCC50/50
 ความหนา : 0.385 mm



รูปที่ ข.3 ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่ 1)

ชื่อสาร : BPSFCC
 ความหนา : 0.395 mm



รูปที่ ข.4 ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ BPSFCC (ครั้งที่ 1)

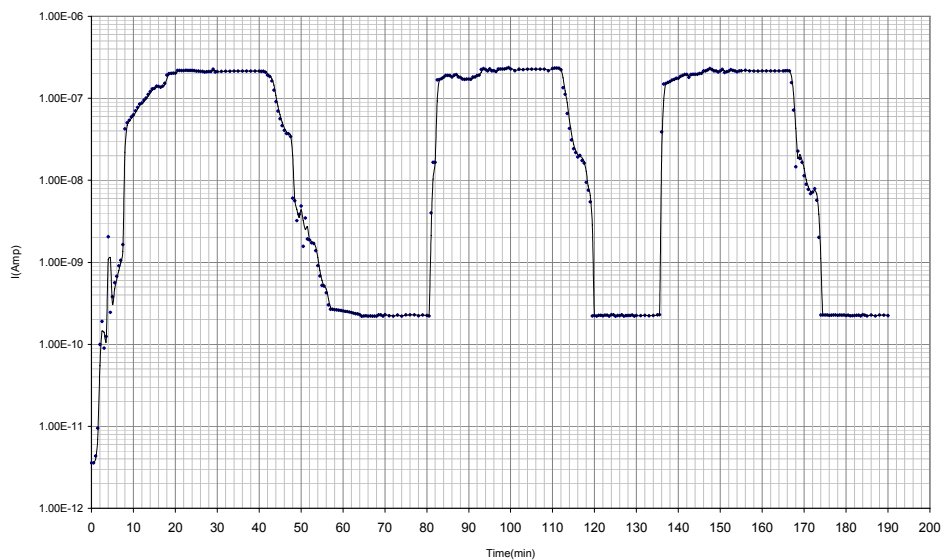
**ข.1.2 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้า
ภายใต้บรรยากาศของของก๊าซเมทานอล (ครั้งที่2)**

สภาวะทดสอบ

อุณหภูมิ	:	28	$^{\circ}\text{C}$
ความเข้มข้นก๊าซ	:	1.619×10^5	ppm
ค่าความต่างศักย์	:	0.5	Volt

ชื่อสาร : PVBFCC

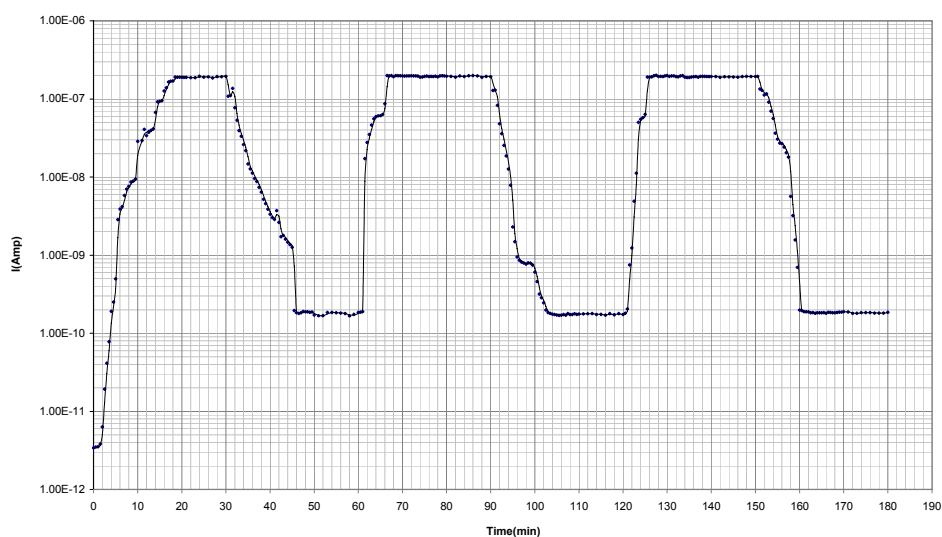
ความหนา : 0.390 mm



รูปที่ ข.5 ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ PVBFCC (ครั้งที่ 2)

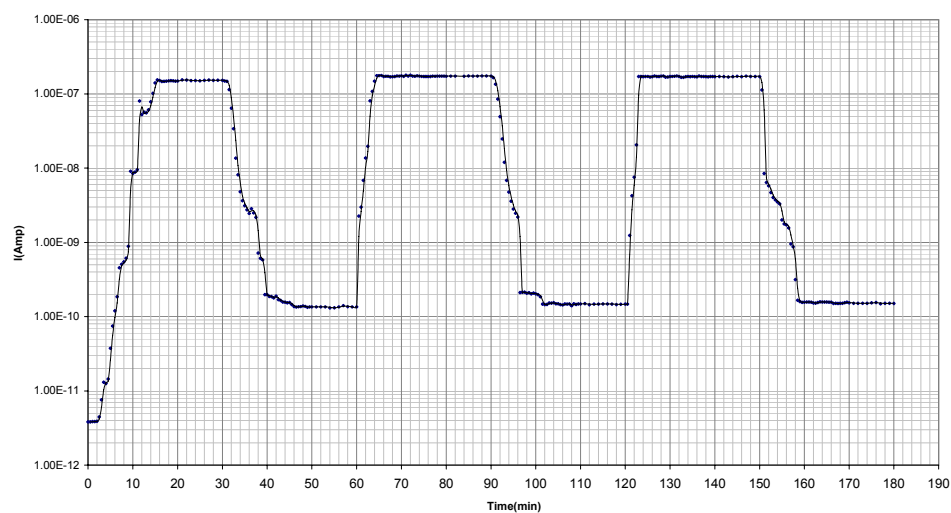
ชื่อสาร : Co-PVBFCC75/25

ความหนา : 0.410 mm



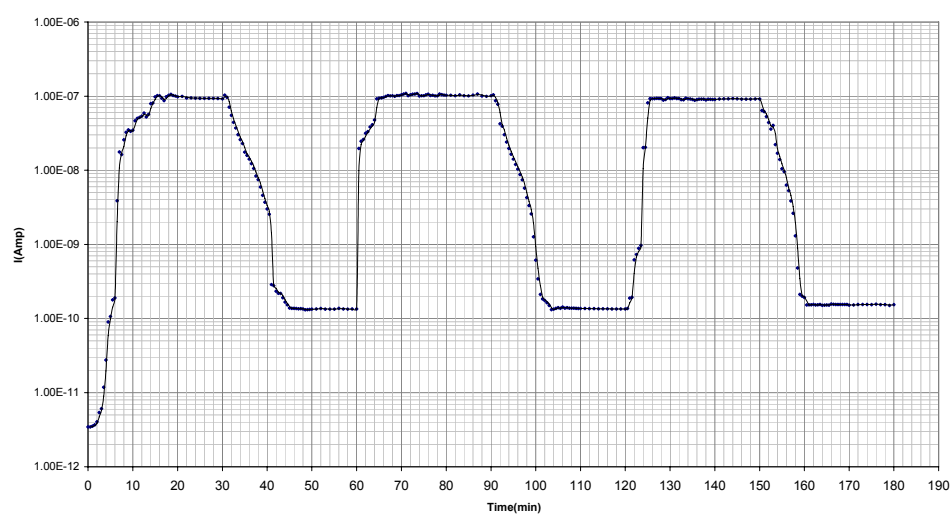
รูปที่ ข.6 ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่ 2)

ชื่อสาร : Co-PVBFCC50/50
 ความหนา : 0.350 mm



รูปที่ ข.7 ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่ 2)

ชื่อสาร : BPSFCC
 ความหนา : 0.365 mm



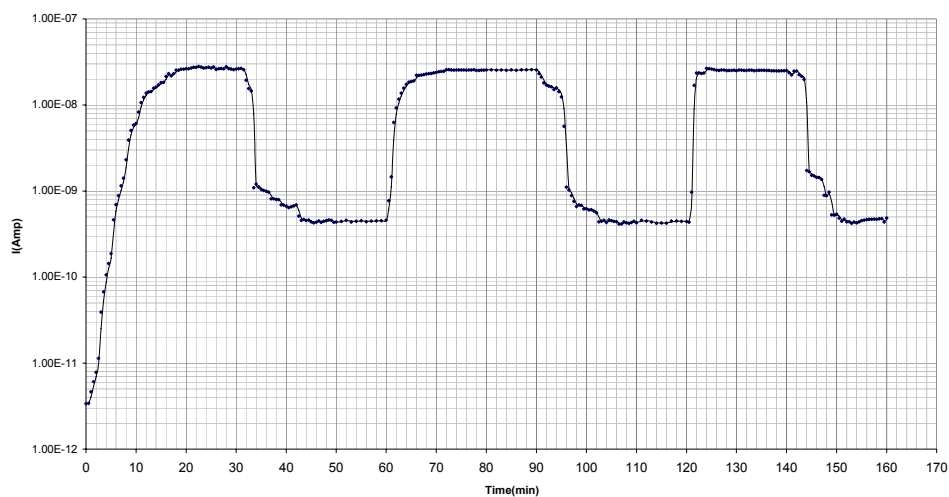
รูปที่ ข.8 ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซเมทานอลของ BPSFCC (ครั้งที่ 2)

**ข.1.3 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้า
ภายใต้บรรยากาศของของก๊าซอะซิโตน (ครั้งที่1)**

สภาวะทดสอบ

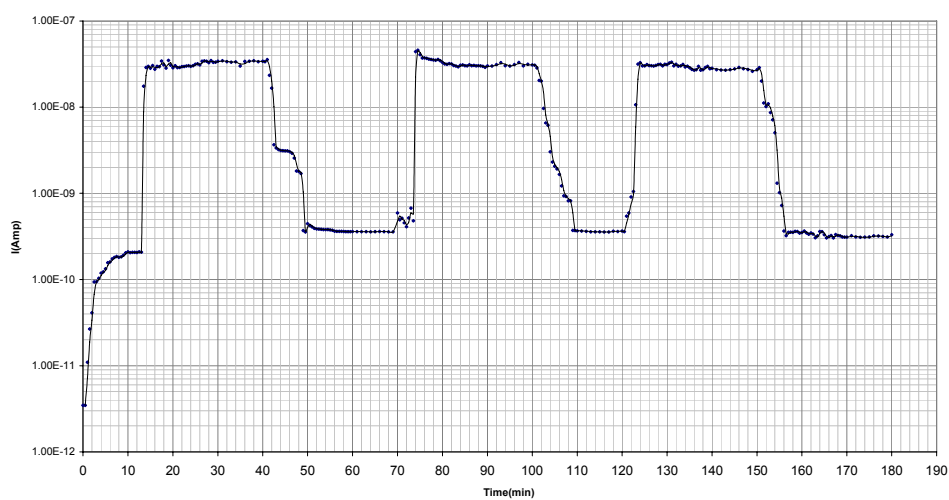
อุณหภูมิ	:	28	^o C
ความเข้มข้นก๊าซ	:	2.556×10^5	ppm
ค่าความต่างศักย์	:	0.5	Volt

ชื่อสาร : PVBFCC
 ความหนา : 0.350 mm



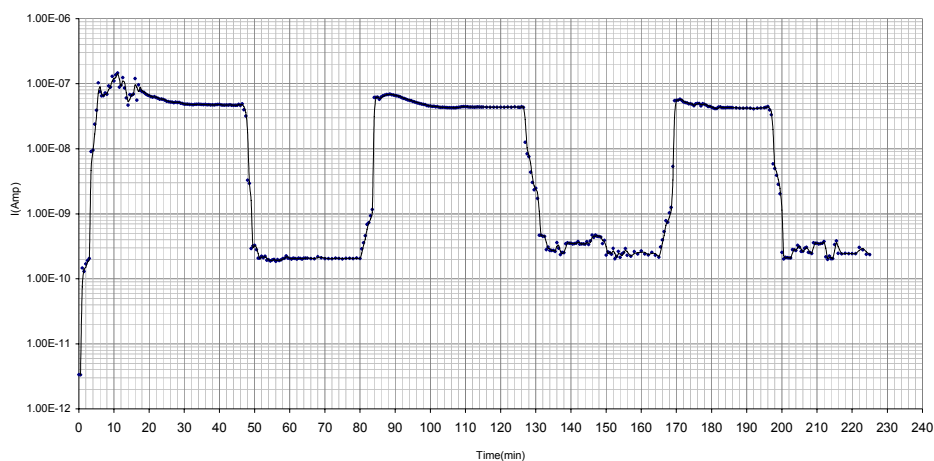
รูปที่ ข.9 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซอะซิโตนของ PVBFCC (ครั้งที่ 1)

ชื่อสาร : Co-PVBFCC75/25
 ความหนา : 0.370 mm



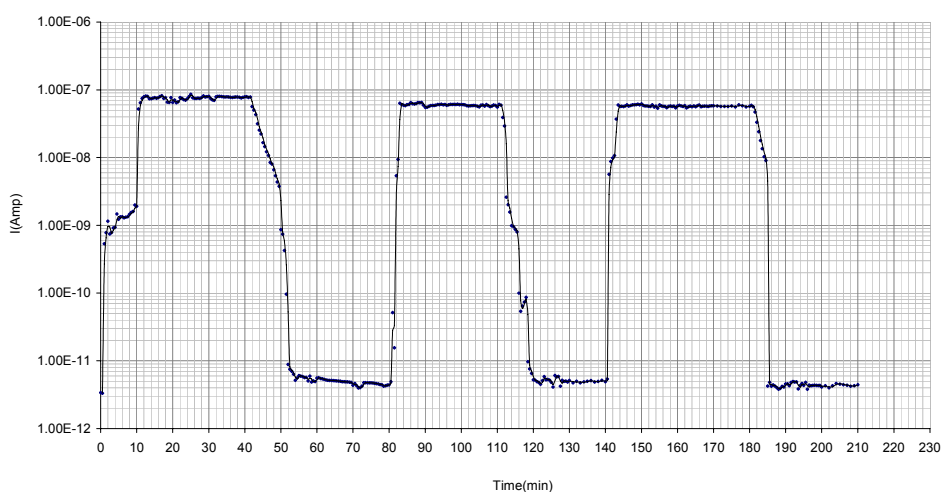
รูปที่ ข.10 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซอะซิโตนของ Co-PVBFCC75/25(ครั้งที่ 1)

ชื่อสาร : Co-PVBFCC50/50
 ความหนา : 0.375 mm



รูปที่ ข.11 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้
 บรรยากาศของก๊าซอะซิโตนของ Co-PVBFCC50/50(ครั้งที่ 1)

ชื่อสาร : BPSFCC
 ความหนา : 0.385 mm



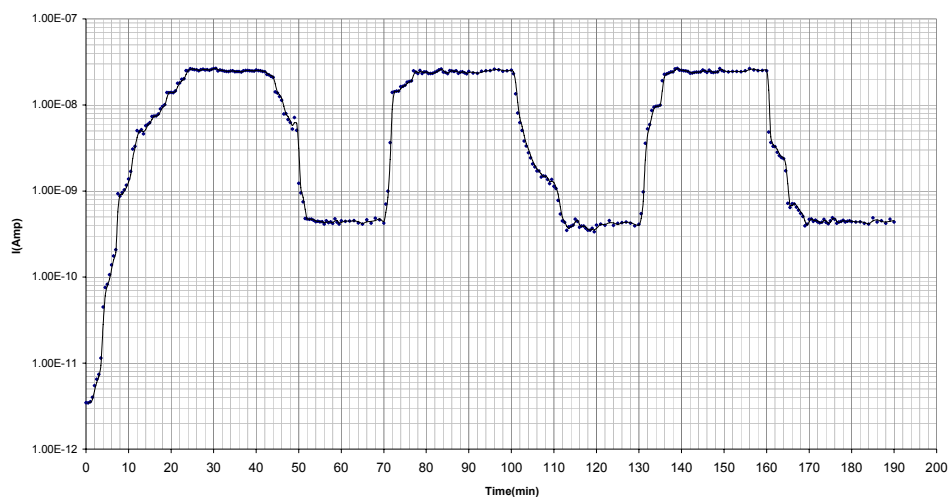
รูปที่ ข.12 ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้
 บรรยากาศของก๊าซอะซิโตนของ BPSFCC (ครั้งที่ 1)

**ข.1.4 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้า
ภายใต้บรรยากาศของของก๊าซอะซิโตน (ครั้งที่2)**

สภาวะทดสอบ

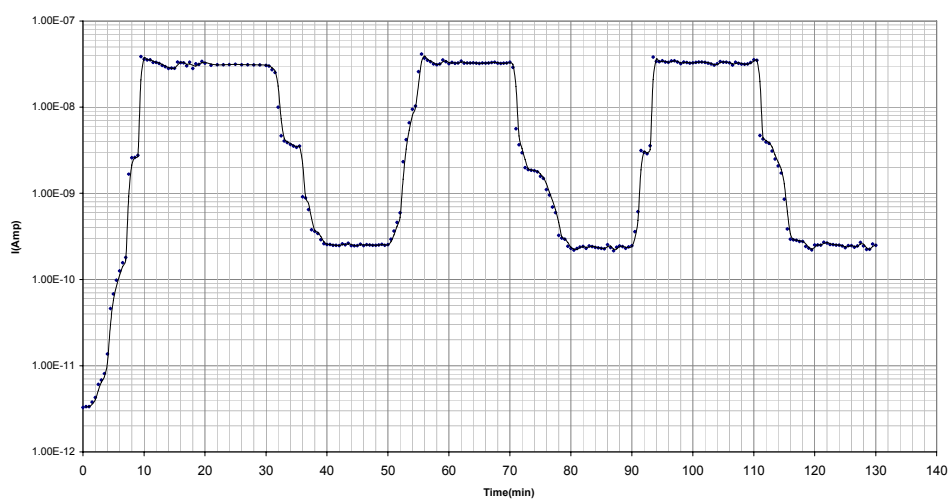
อุณหภูมิ	:	28	$^{\circ}\text{C}$
ความเข้มข้นก๊าซ	:	2.556×10^5	ppm
ค่าความต่างศักย์	:	0.5	Volt

ชื่อสาร : PVBFCC
 ความหนา : 0.390 mm



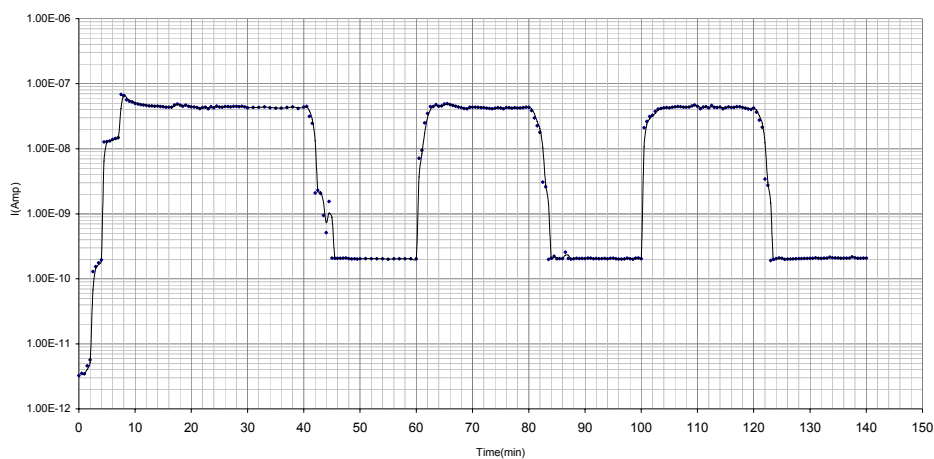
รูปที่ ข.13 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซอะซิโตนของ PVBFCC (ครั้งที่ 2)

ชื่อสาร : Co-PVBFCC75/25
 ความหนา : 0.365 mm



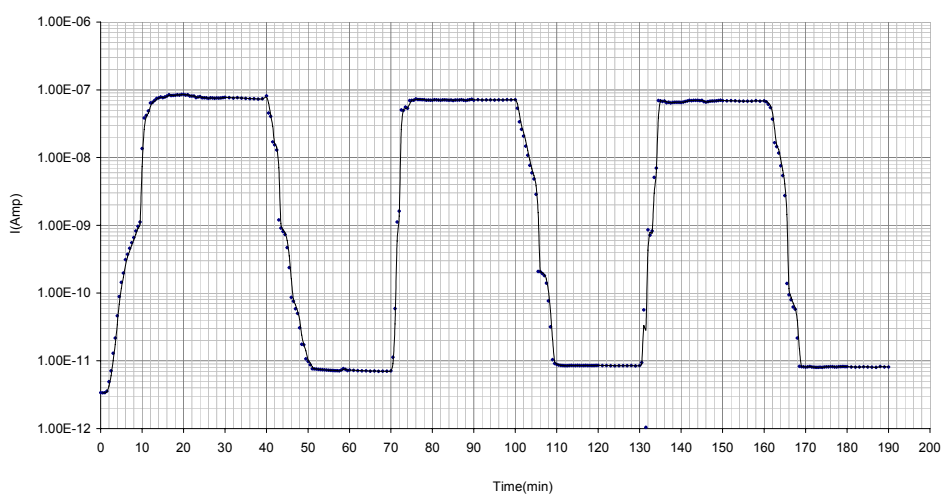
รูปที่ ข.14 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศของก๊าซอะซิโตนของ Co-PVBFCC75/25(ครั้งที่ 2)

ชื่อสาร : Co-PVBFCC50/50
 ความหนา : 0.380 mm



รูปที่ ข.15 ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้
 บรรยากาศ ของก๊าซอะซิโตนของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่ 2)

ชื่อสาร : BPSFCC
 ความหนา : 0.390 mm



รูปที่ ข.16 ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่เวลาต่าง ๆ จากการทดสอบการวัดค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้
 บรรยากาศ ของก๊าซอะซิโตนของ BPSFCC (ครั้งที่ 2)

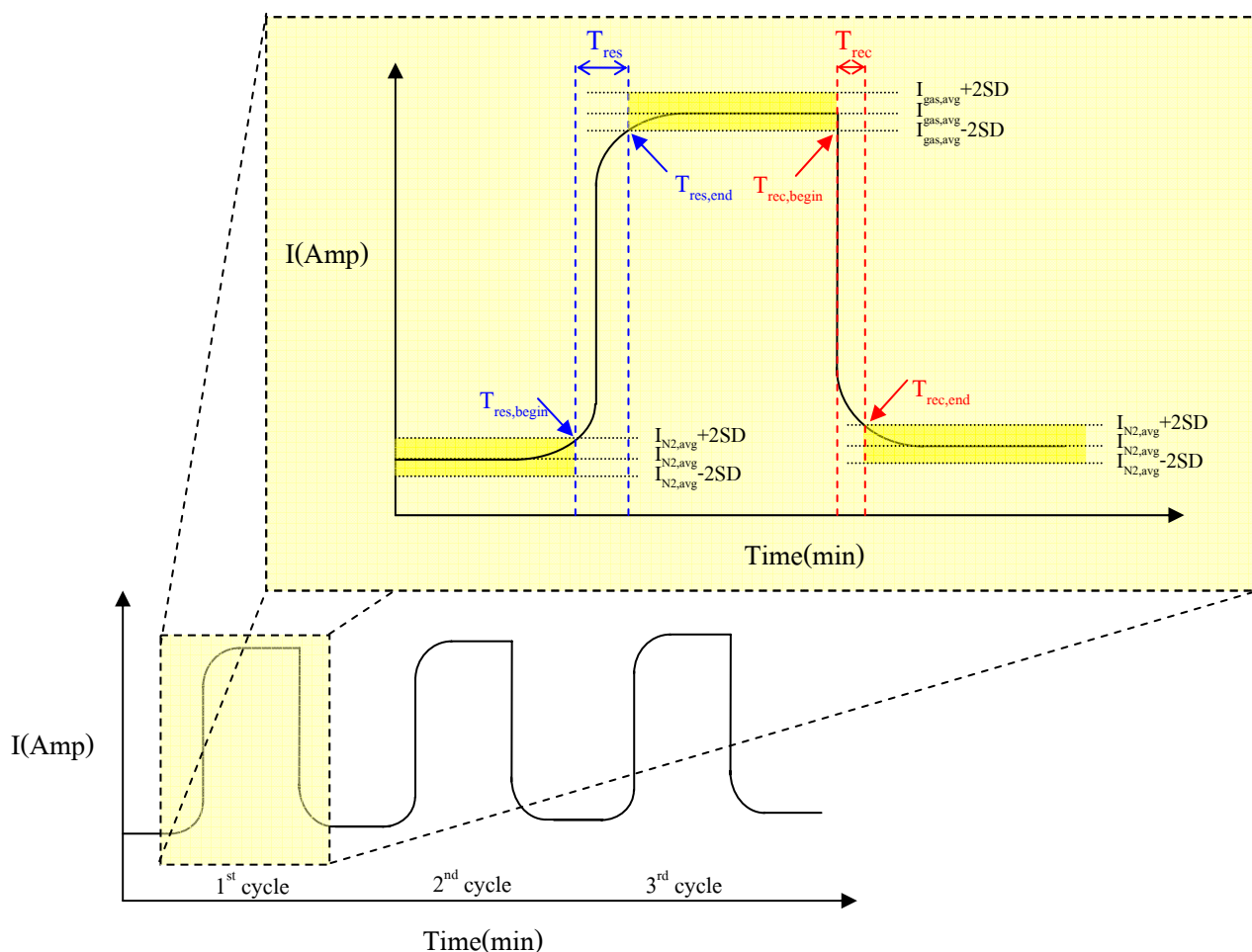
ข.2 การหาระยะเวลาเริ่มต้นในการตอบสนอง($T_{res,begin}$) ระยะเวลาดิ้นสุดการตอบสนอง($T_{res,end}$)
 ระยะเวลาดำเนินการคืนตัวกลับ($T_{rec,begin}$) ระยะเวลาดำเนินการคืนตัวกลับ($T_{rec,end}$) และค่า
 กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในสภาวะสมดุลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซตัวอย่าง

ในการหาระยะเวลาต่างๆนี้จะใช้วิธีการอ่านจากเส้นกราฟค่ากระแสไฟฟ้าที่เวลา
 ต่างๆโดยเป็นจุดเวลาที่เส้นกราฟตัดกับเส้น $2SD$ ที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยค่ากระแสไฟฟ้าใน
 สภาวะสมดุลคงที่ในบรรยากาศของก๊าซในขณะนั้น เพื่อใช้ในการหาระยะเวลาต่างๆ ดังนี้

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

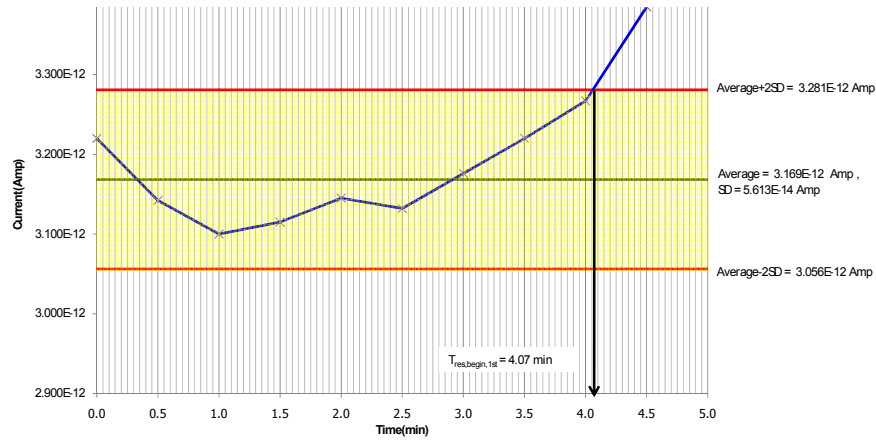
$$\text{ระยะเวลาในการคืนตัวกลับ(Recovery time, } T_{rec}) = T_{rec,end} - T_{rec,begin}$$

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

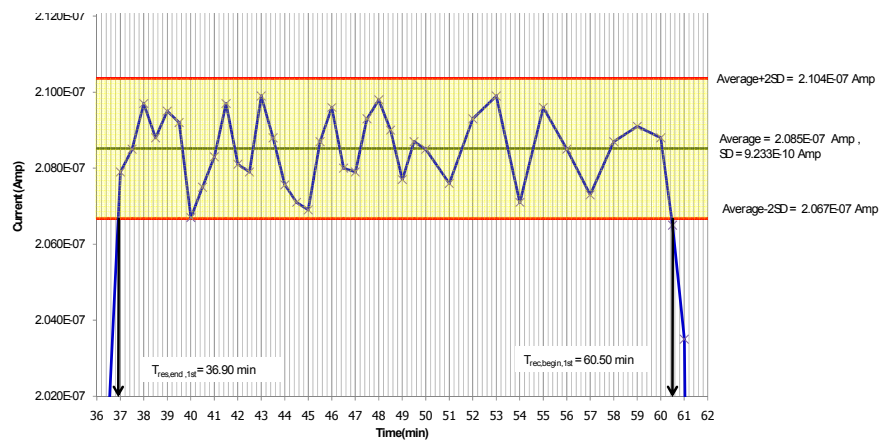


รูปที่ ข.17 การหาระยะเวลาต่างๆ จากกราฟค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เวลาต่างๆ

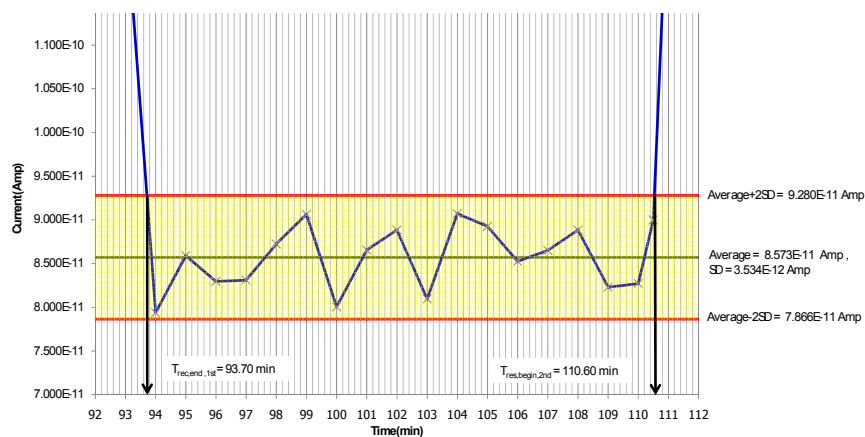
ข.2.1 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซเมทานอลของ PVBFCC (ครั้งที่ 1)



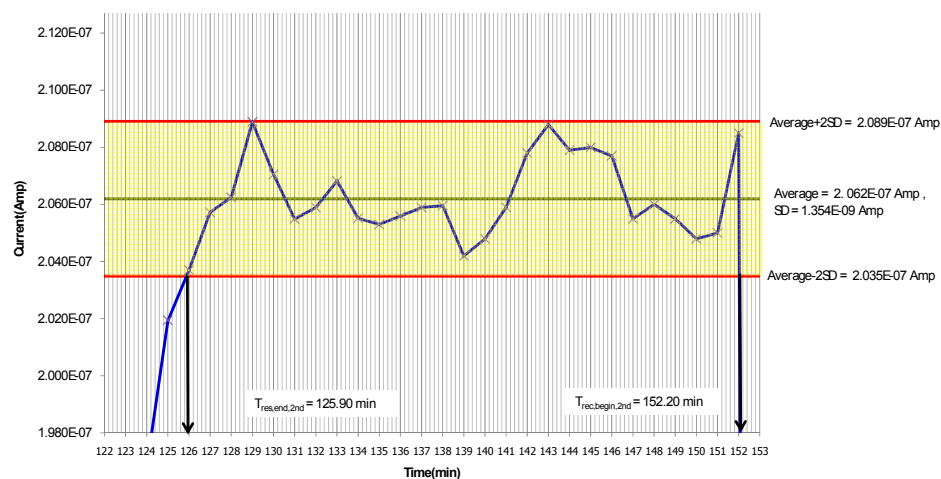
รูปที่ ข.18 การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่ 1)



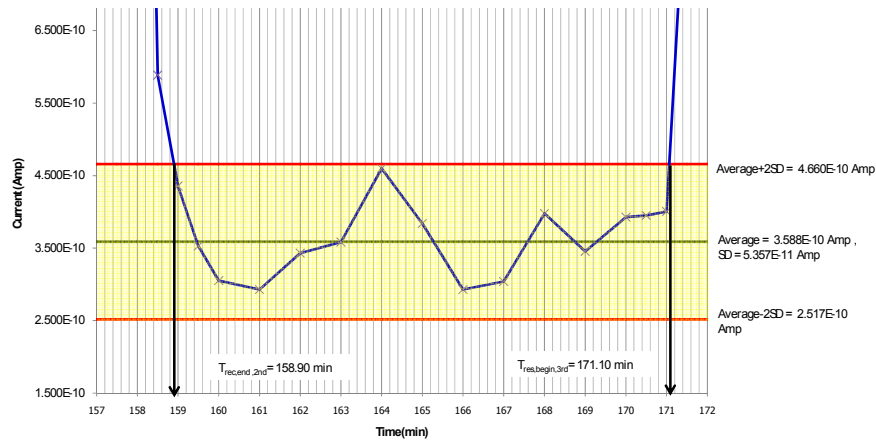
รูปที่ ข.19 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่ 1)



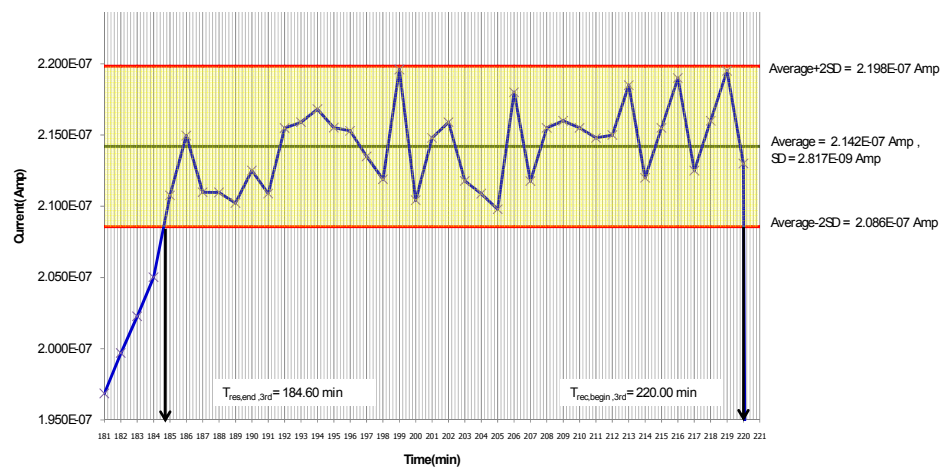
รูปที่ ข.20 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 1)



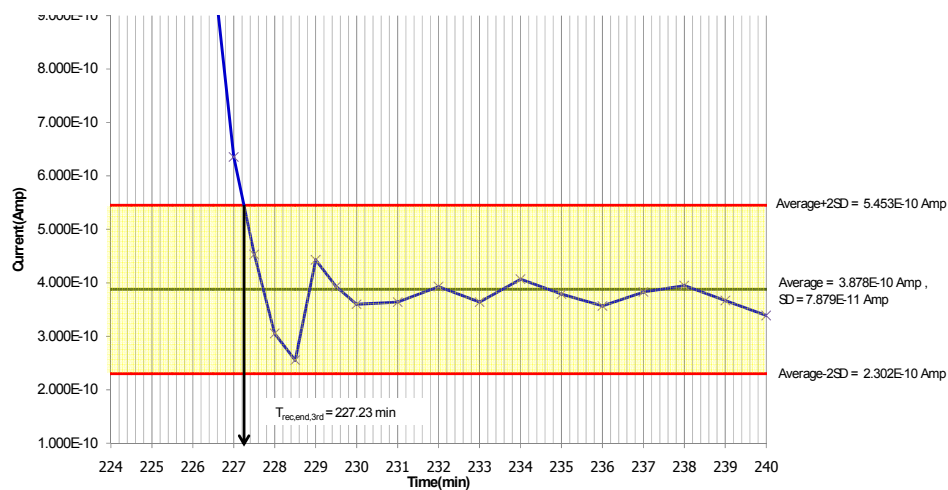
รูปที่ ข.21 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 1)



รูปที่ ข.22 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทธานอลของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทธานอลของ 3rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่ 1)

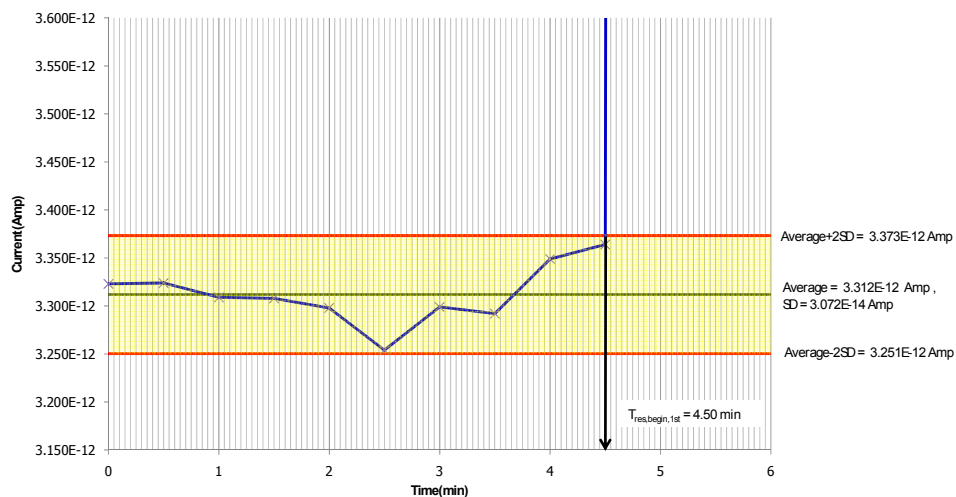


รูปที่ ข.23 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทธานอลของ 3rd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทธานอลของ 3rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่ 1)

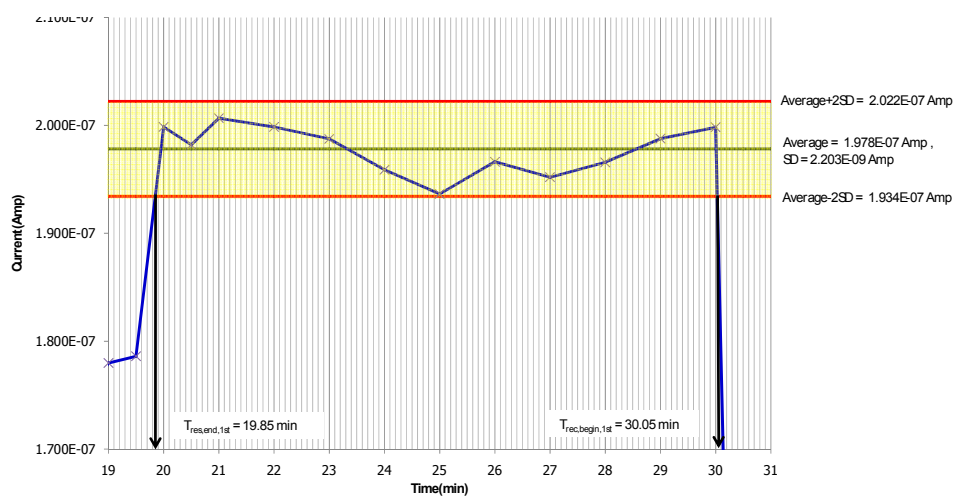


รูปที่ ข.24 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรายาก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 1)

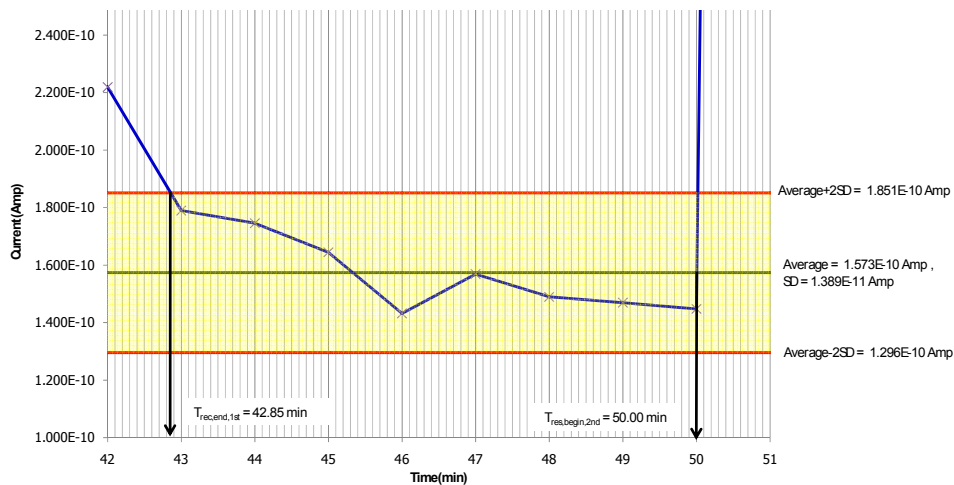
ข.2.2 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซเมทานอลของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)



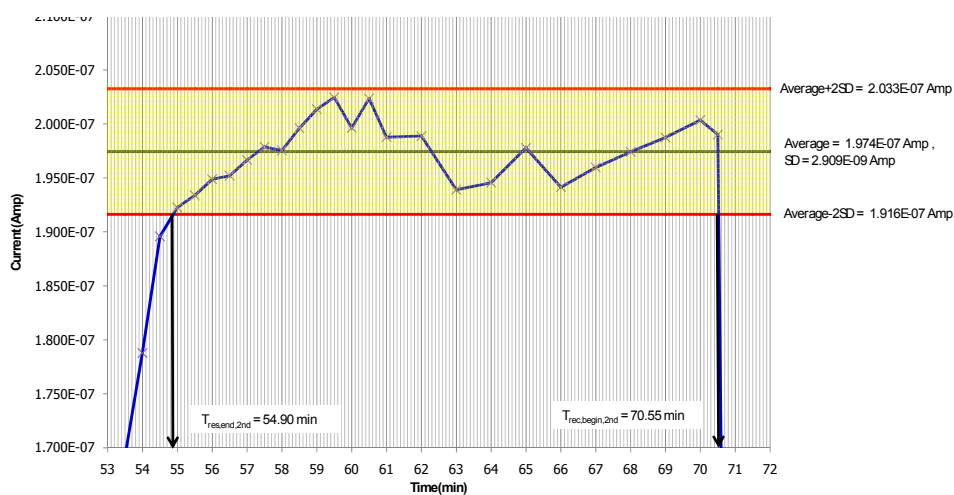
รูปที่ ข.25 การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)



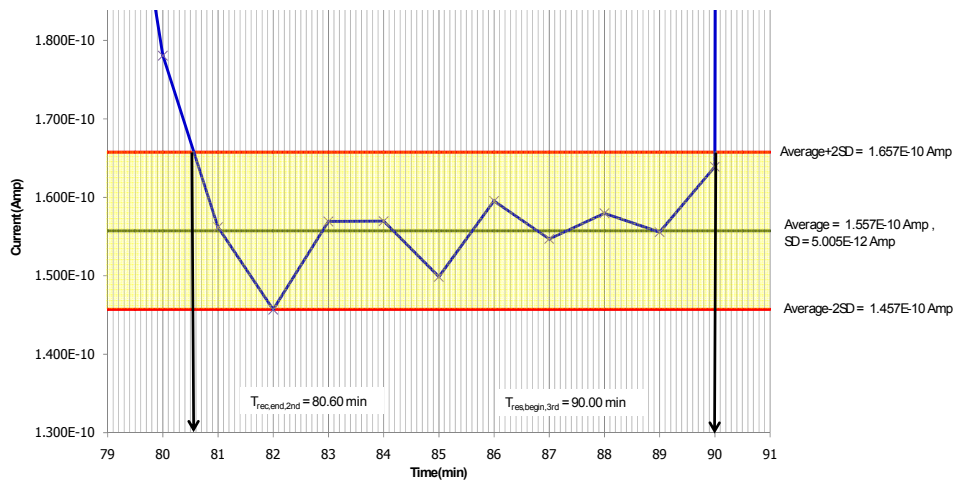
รูปที่ ข.26 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)



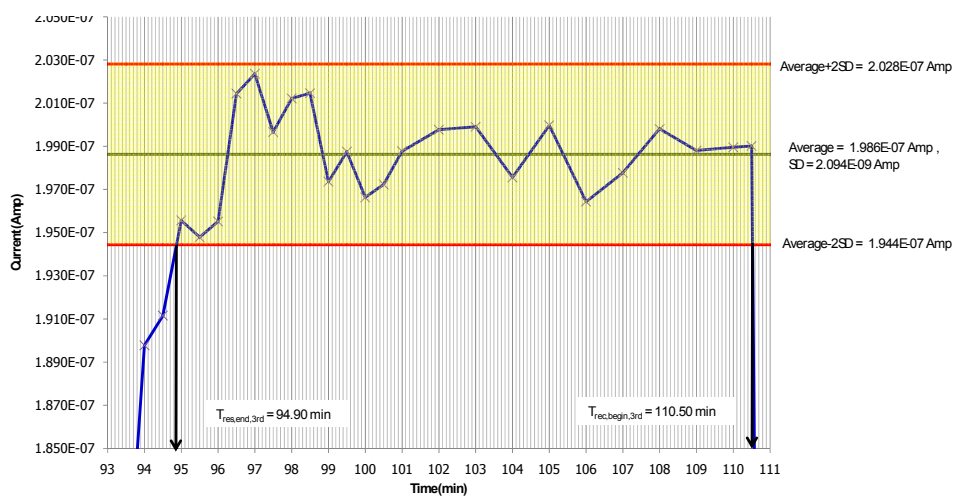
รูปที่ ข.27 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)



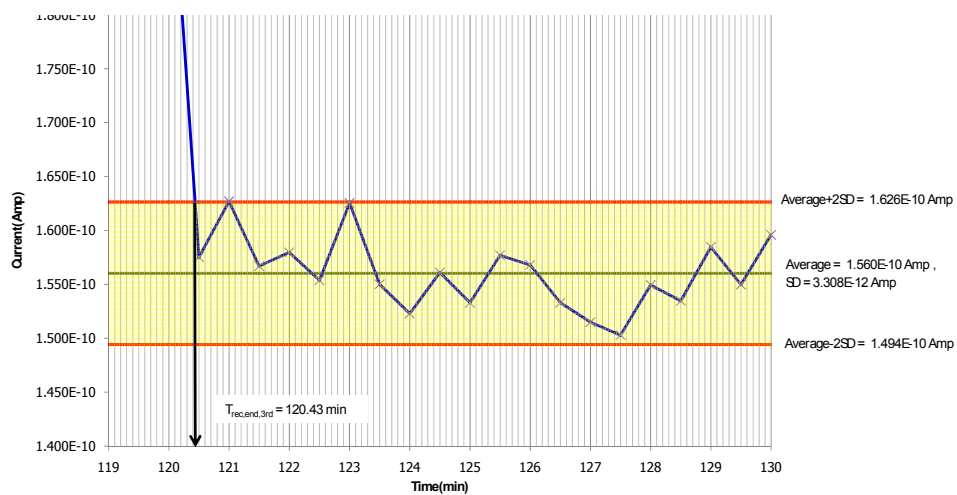
รูปที่ ข.28 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)



รูปที่ ข.29 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่ 1)



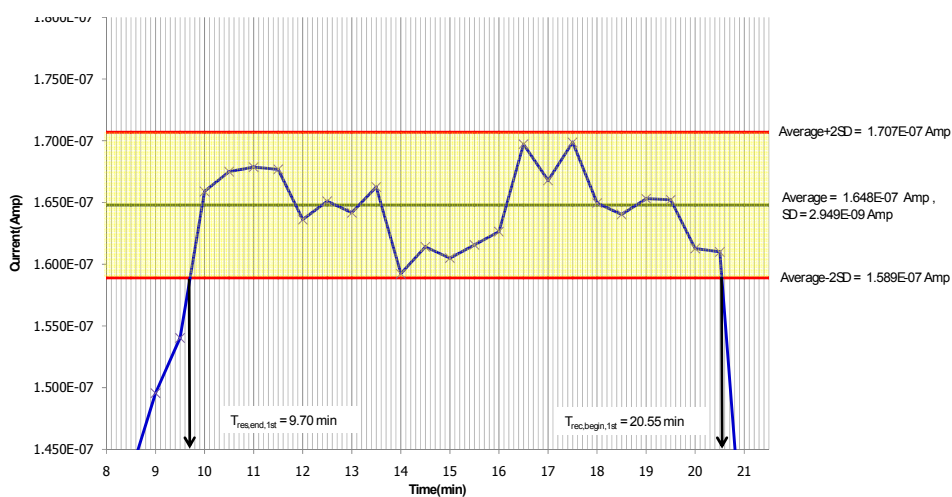
รูปที่ ข.30 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่ 1)



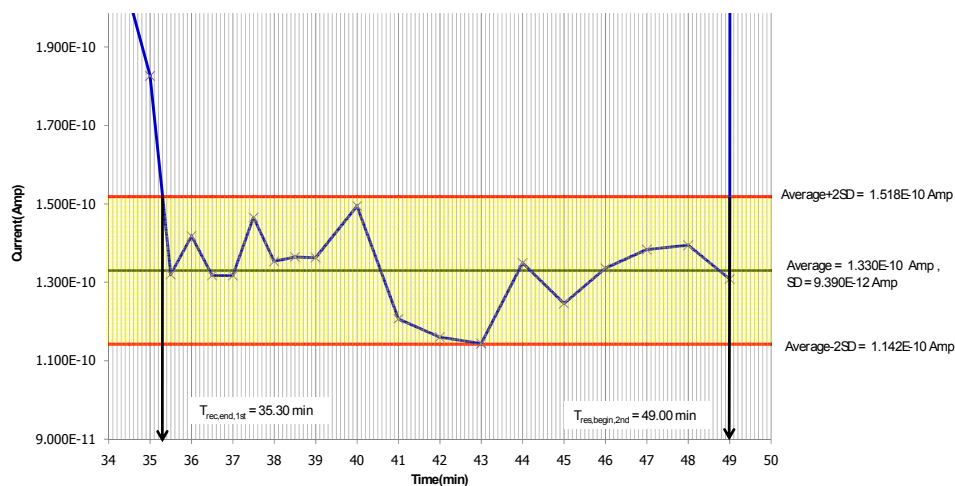
รูปที่ ข.31 การหา $T_{rec, end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมททานอลของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่ 1)

ข.2.3 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซเมทานอลของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)

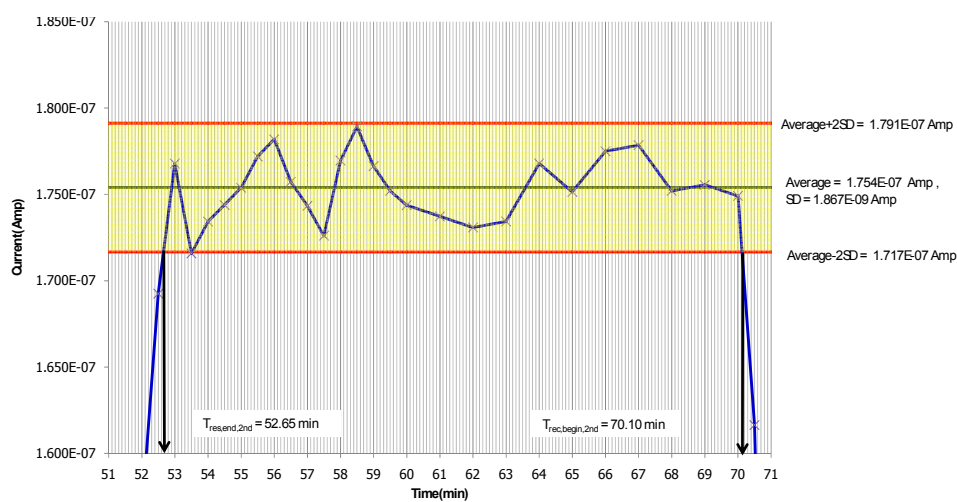
* การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1) นั้นเริ่มเกิดสัญญาณตั้งแต่วันที่ 0 ดังนั้น จึงเริ่มนับ $T_{res,begin} = 0$ min และ $I_{avg} = 3.219 \times 10^{-12}$ amp



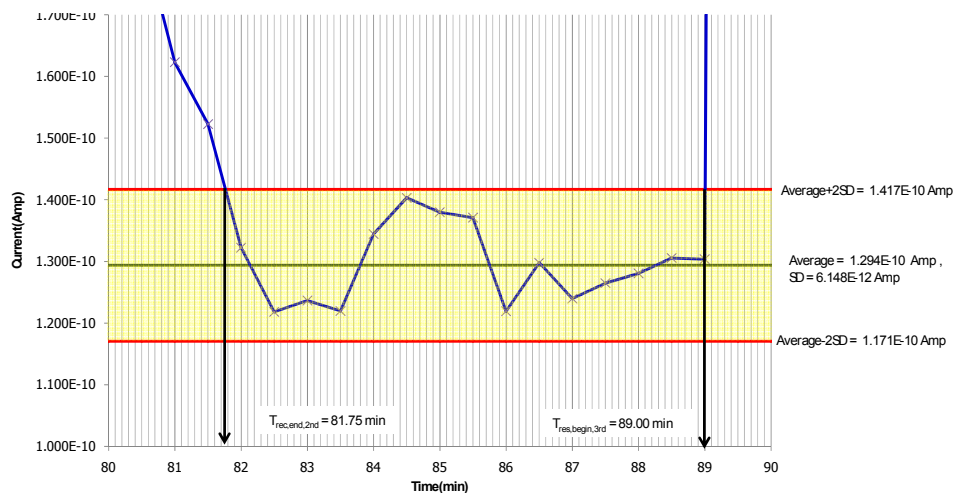
รูปที่ ข.32 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)



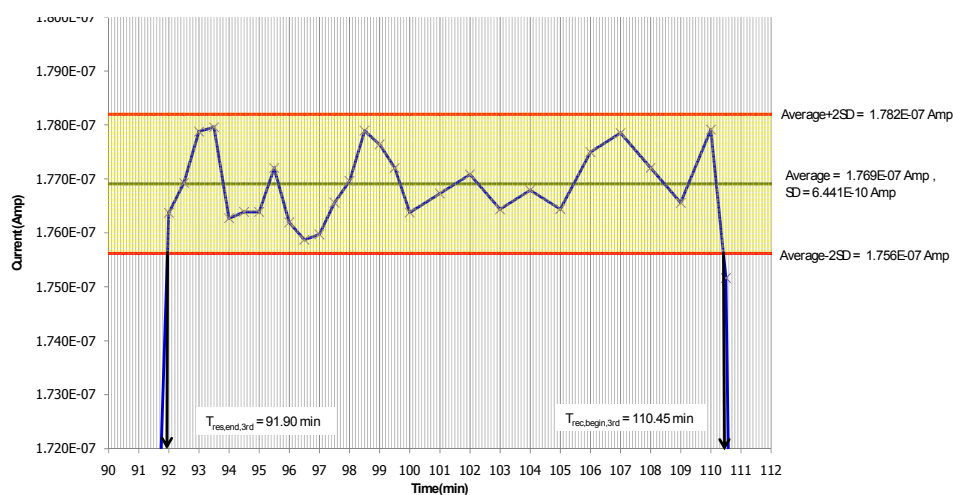
รูปที่ ข.33 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่ 1)



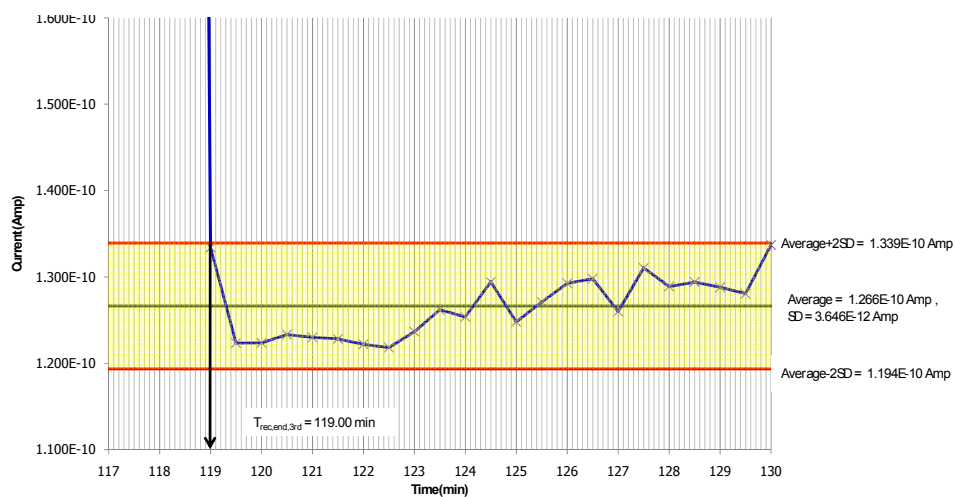
รูปที่ ข.34 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่ 1)



รูปที่ ข.35 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)



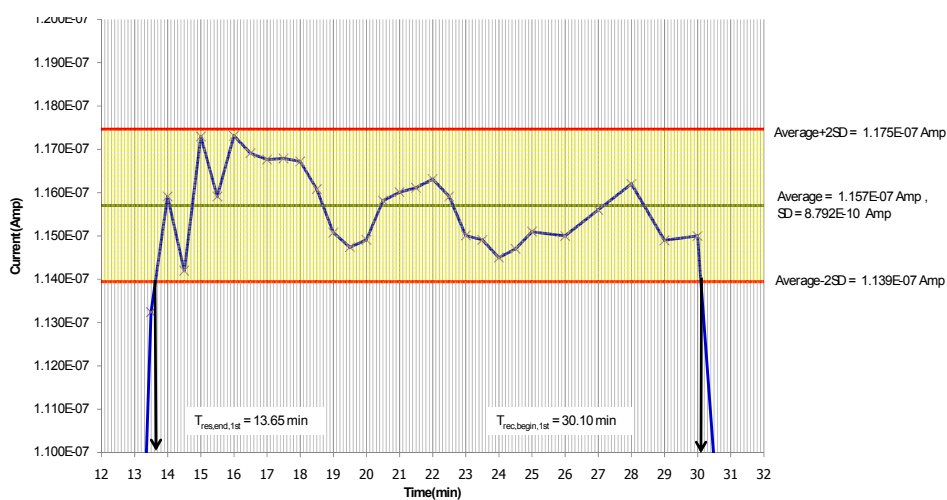
รูปที่ ข.36 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)



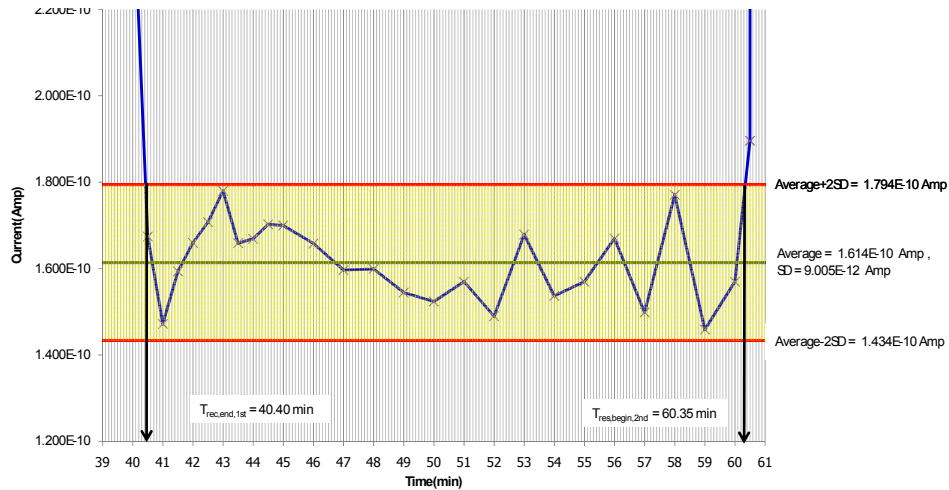
รูปที่ ข.37 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการใส่ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)

ข.2.4 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซเมทานอลของ BPSFCC (ครั้งที่1)

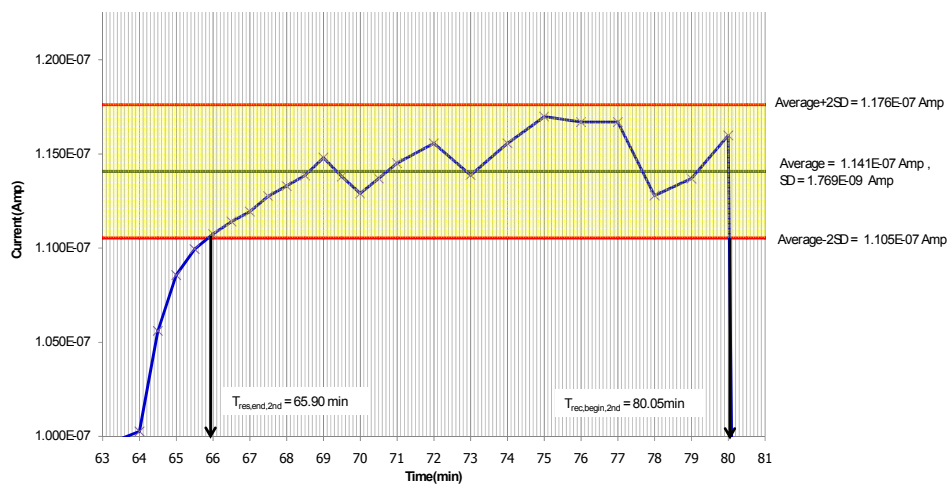
* การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1) นั้นเริ่มเกิดสัญญาณตั้งแต่วันที่ 0 ดังนั้น จึงเริ่มนับ $T_{res,begin} = 0$ min และ $I_{avg} = 3.318 \times 10^{-12}$ amp



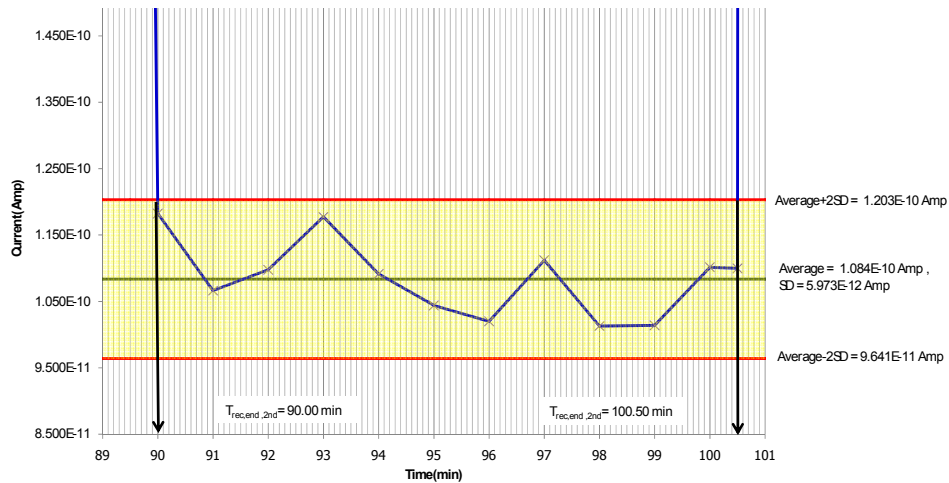
รูปที่ ข.38 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)



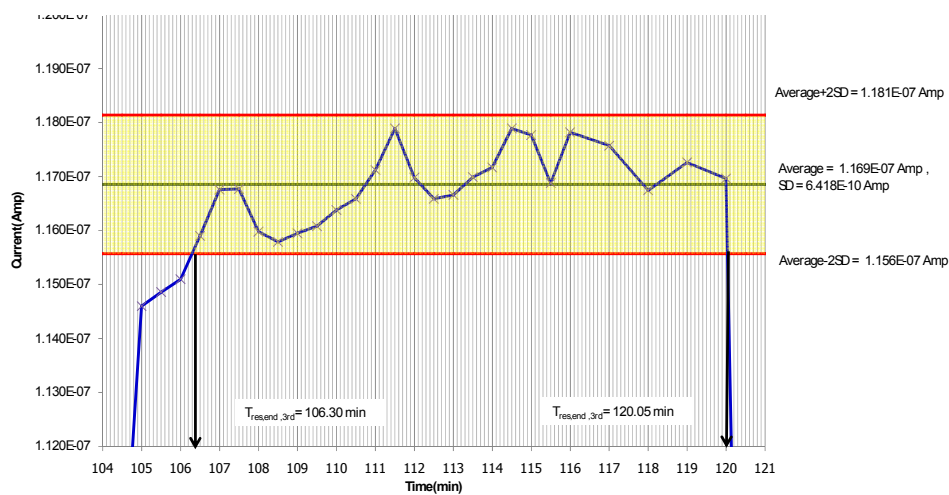
รูปที่ ข.39 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทธานอลของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทธานอลของ 2nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)



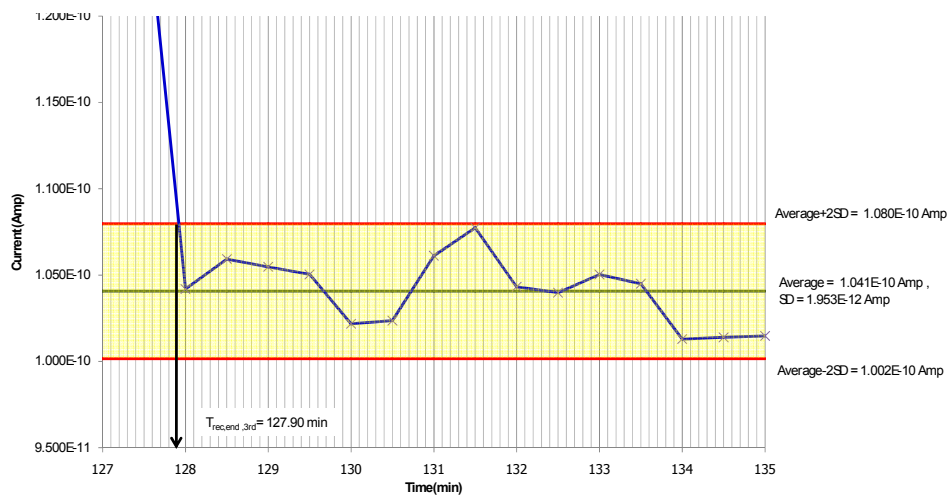
รูปที่ ข.40 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทธานอลของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทธานอลของ 2nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)



รูปที่ ข.41 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)



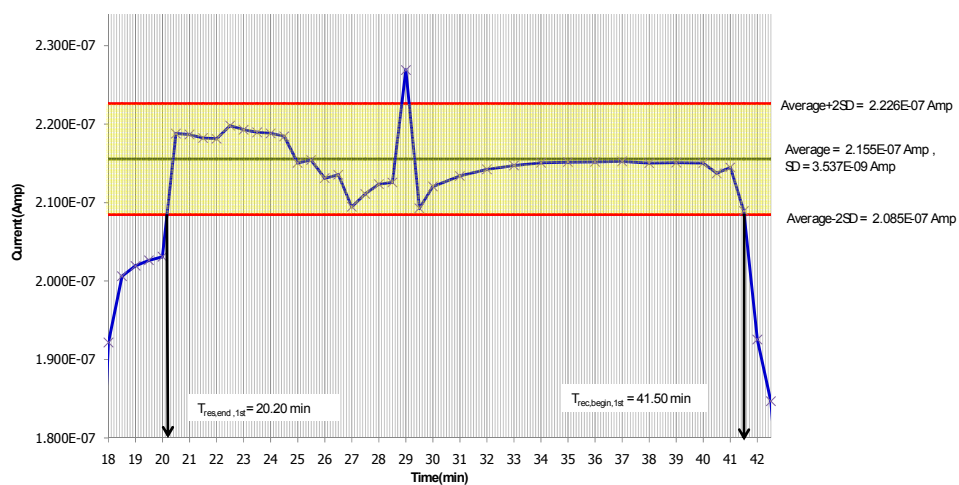
รูปที่ ข.42 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)



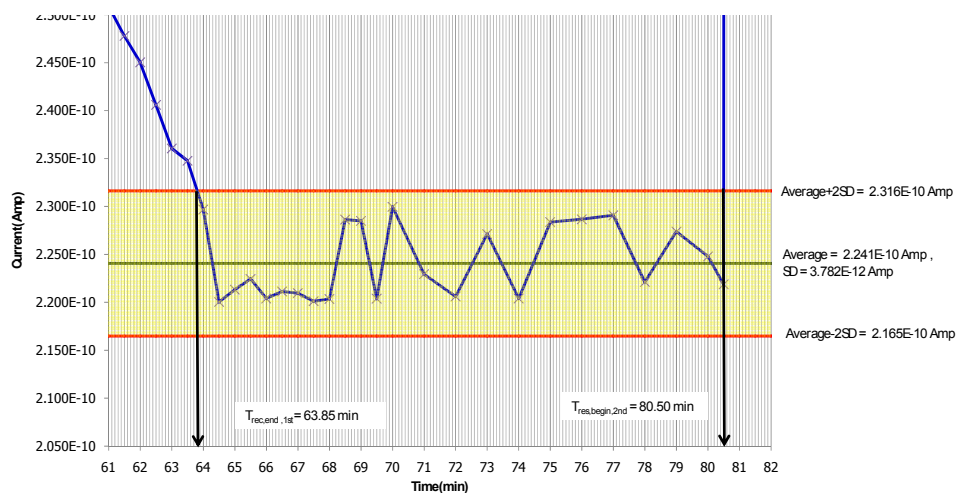
รูปที่ ข.43 การหา $T_{\text{rec, end}}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่ 1)

ข.2.5 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซเมทานอลของ PVB FCC (ครั้งที่ 2)

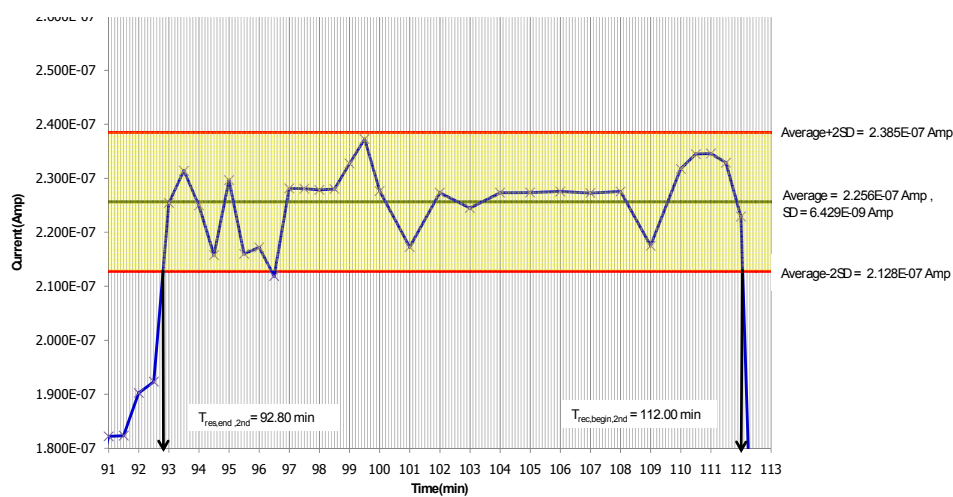
* การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 2) นั้นเริ่มเกิดสัญญาณตั้งแต่นาทีที่ 0 ดังนั้น จึงเริ่มนับ $T_{res,begin} = 0$ min และ $I_{avg} = 3.578 \times 10^{-12}$ amp



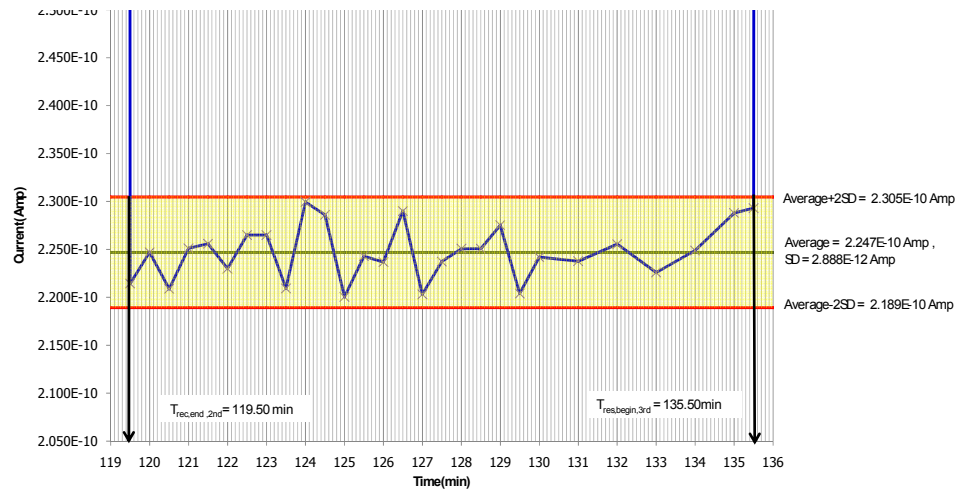
รูปที่ ข.44 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 2)



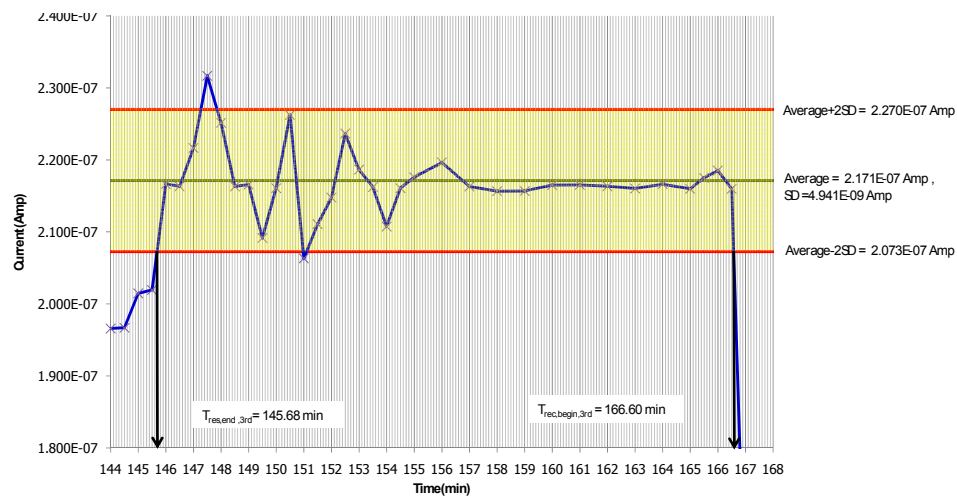
รูปที่ ข.45 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่ 2)



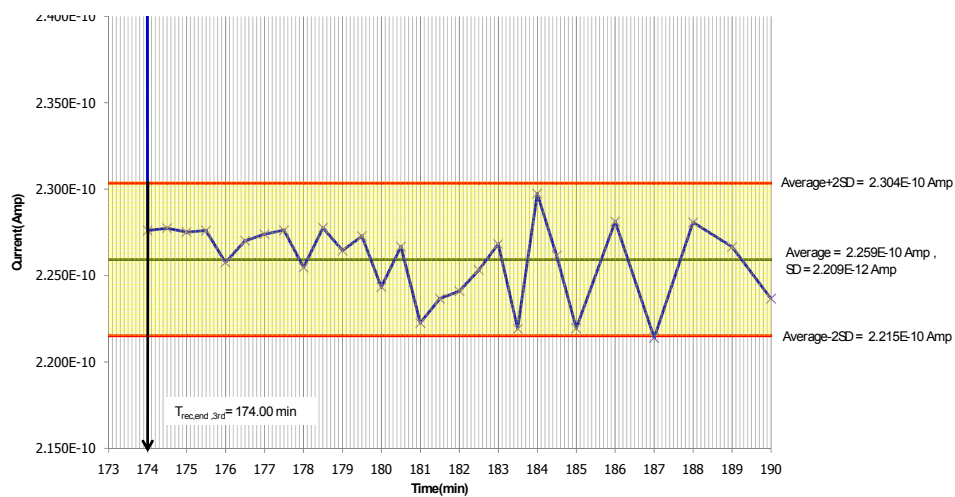
รูปที่ ข.46 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่ 2)



รูปที่ ข.47 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่2)

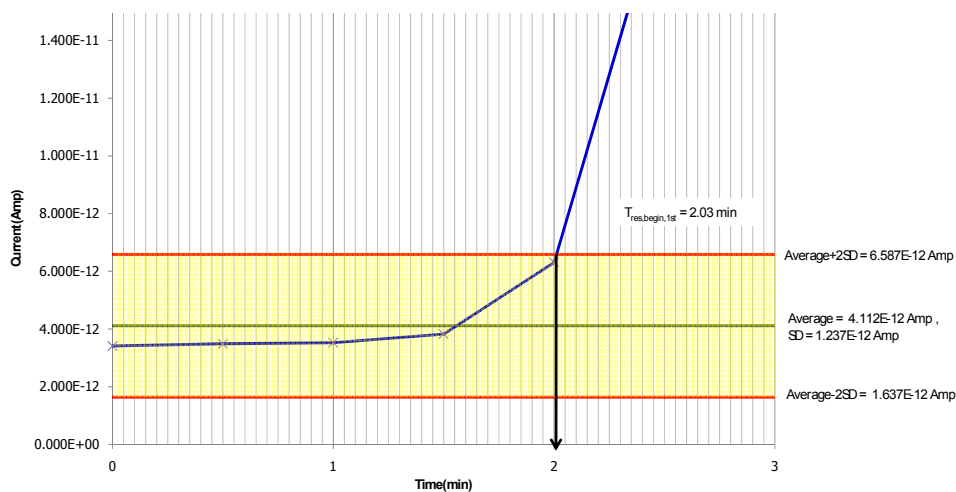


รูปที่ ข.48 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่2)

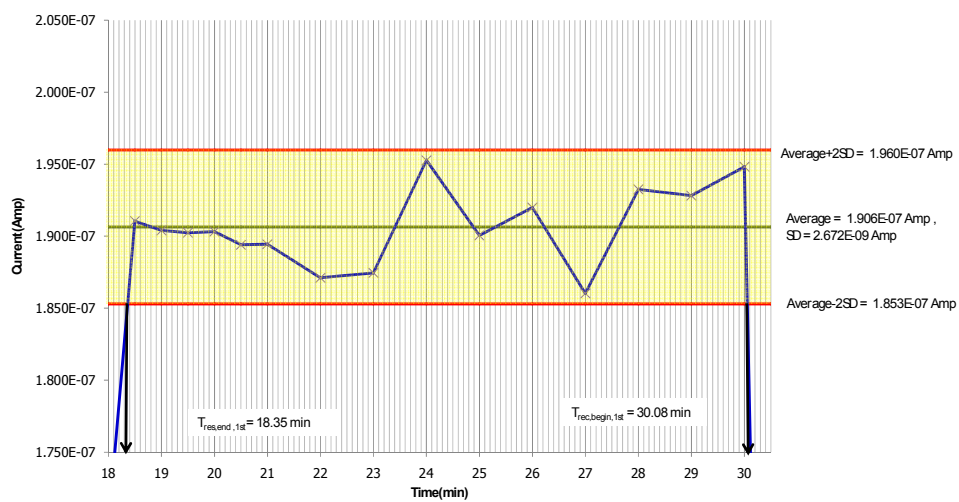


รูปที่ ข.49 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่ 2)

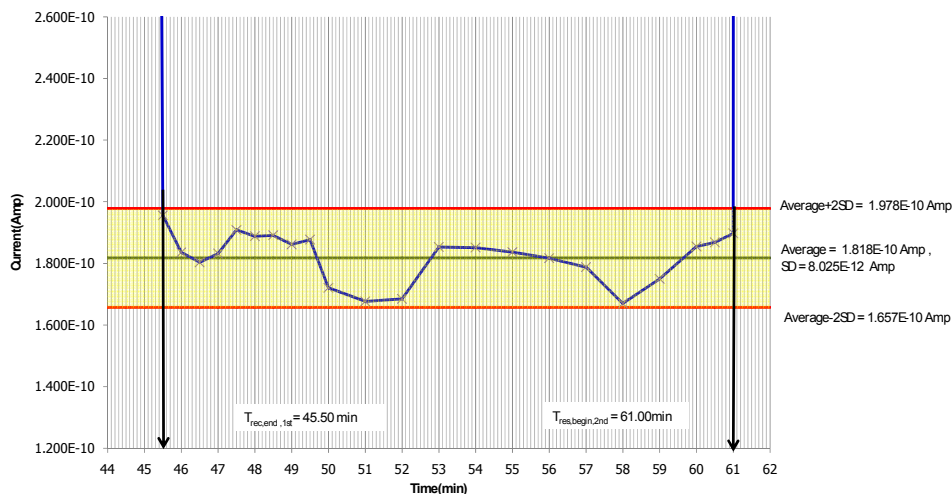
ข.2.6 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซเมทานอลของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)



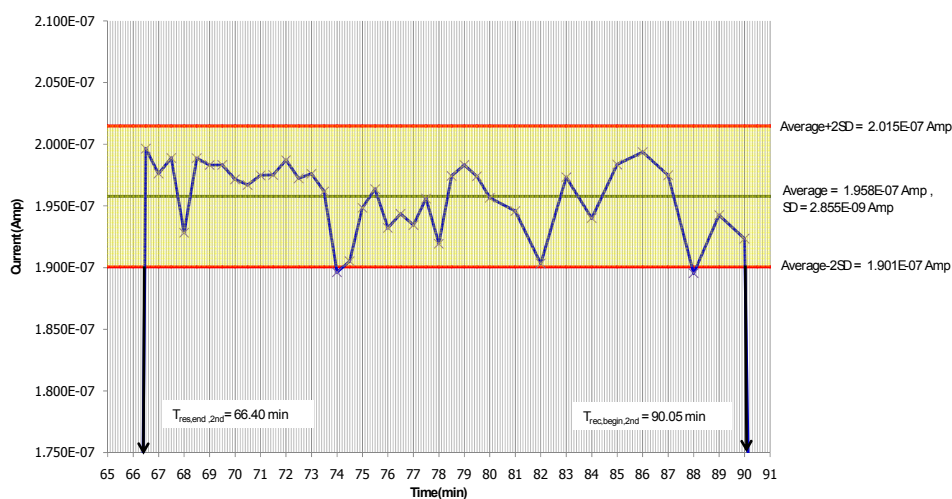
รูปที่ ข.50 การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)



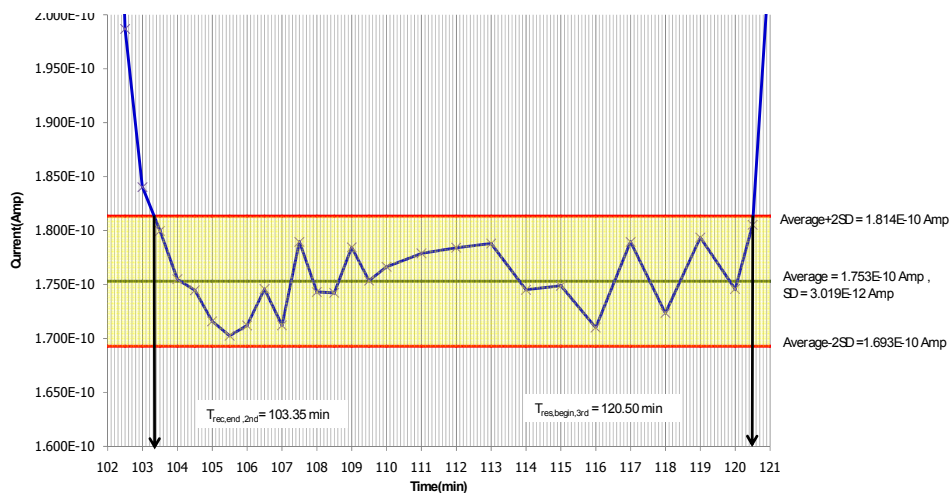
รูปที่ ข.51 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)



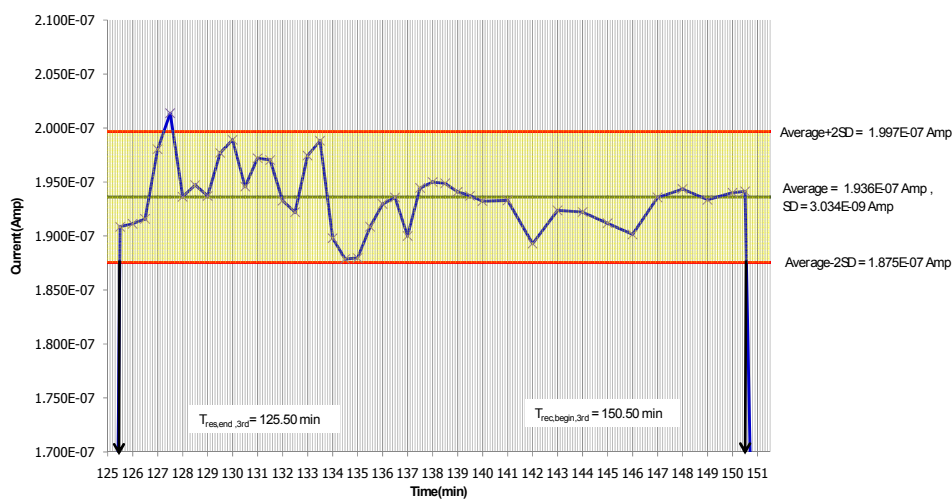
รูปที่ ข.52 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)



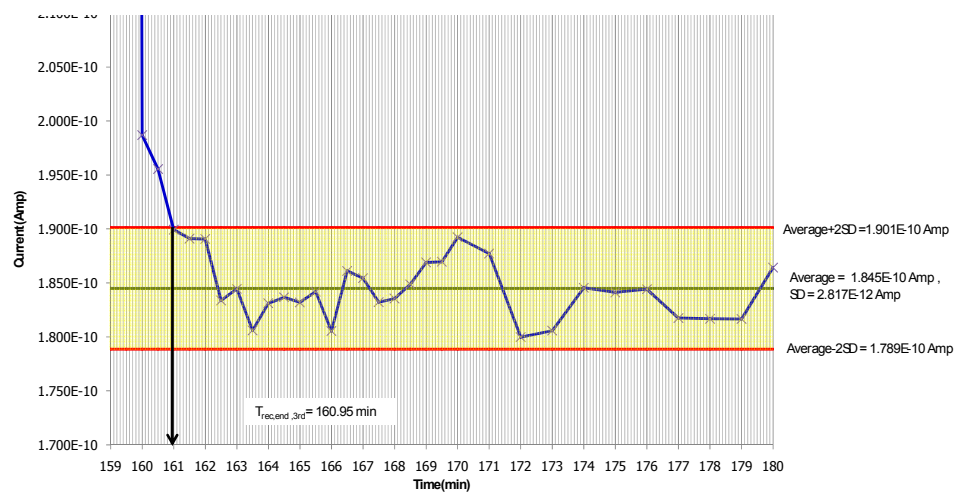
รูปที่ ข.53 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)



รูปที่ ข.54 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่ 2)

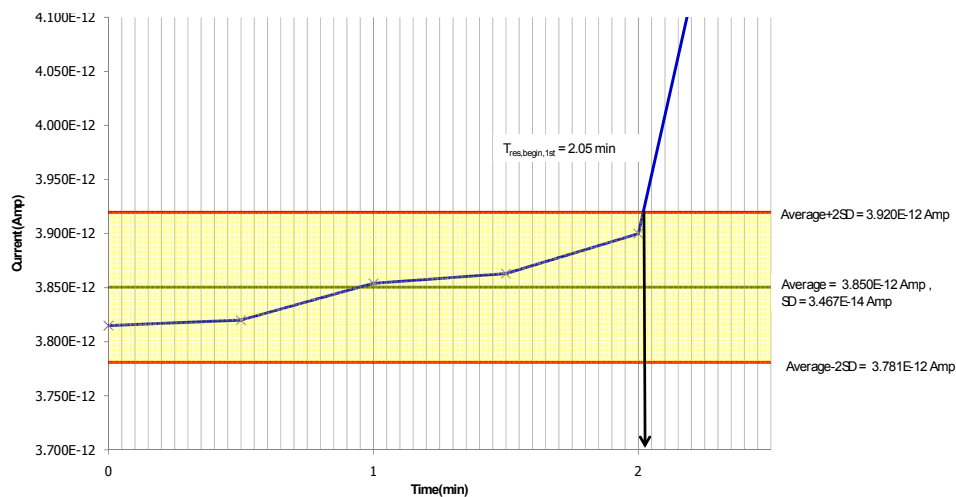


รูปที่ ข.55 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่ 2)

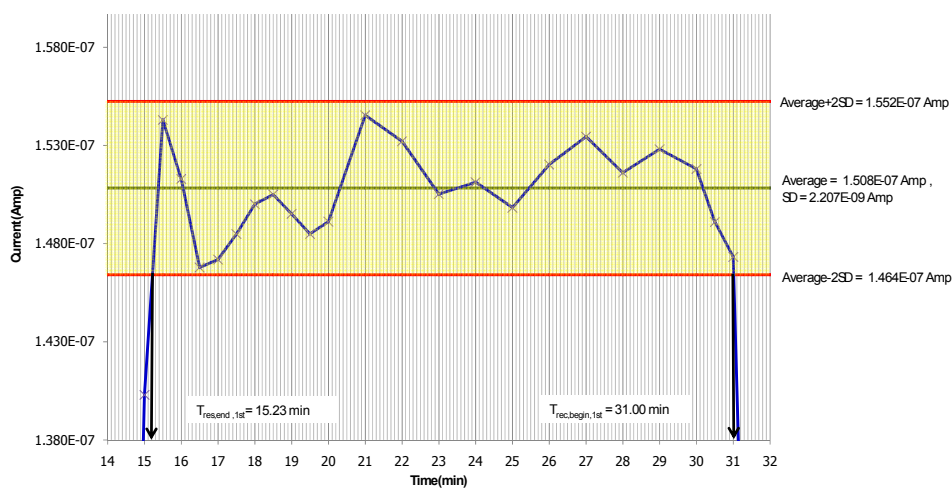


รูปที่ ข.56 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมททานอลของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่ 2)

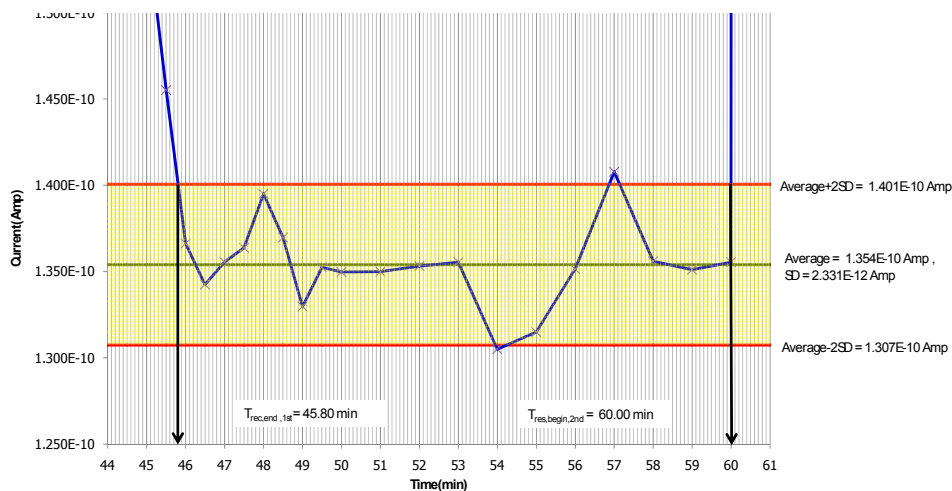
ข.2.7 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซเมทานอลของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)



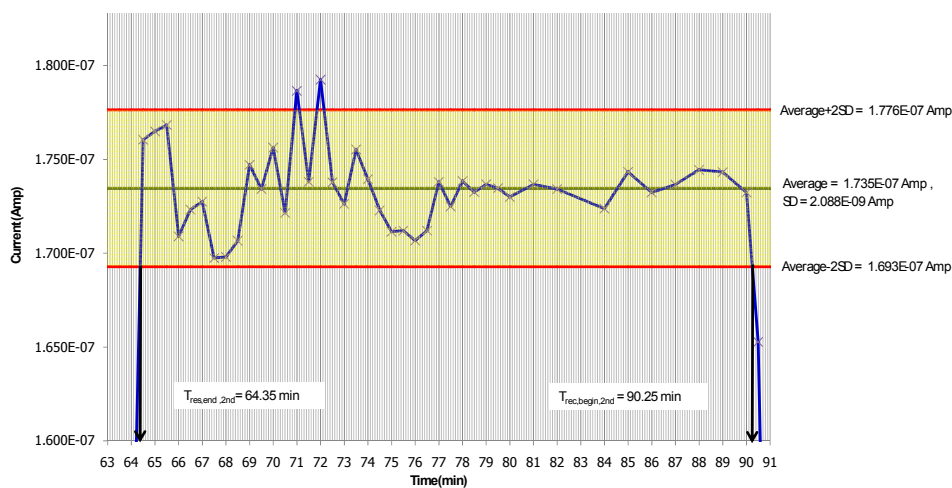
รูปที่ ข.57 การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)



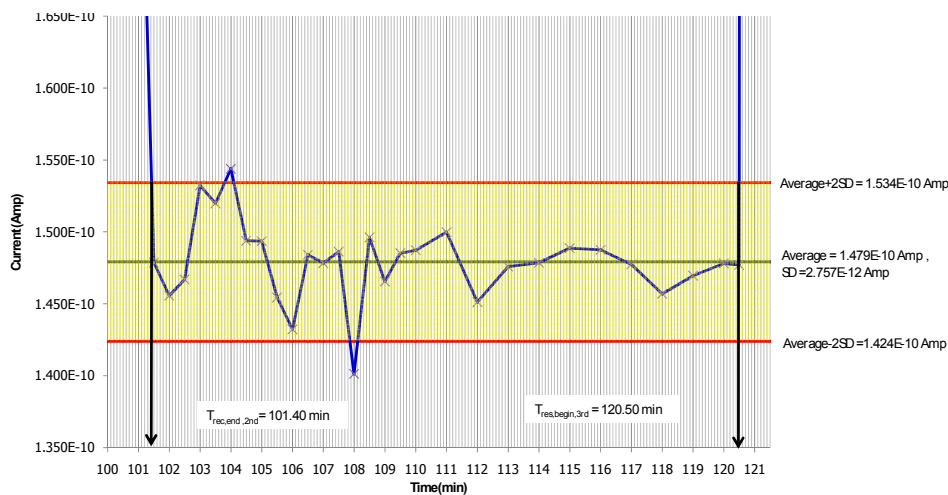
รูปที่ ข.58 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)



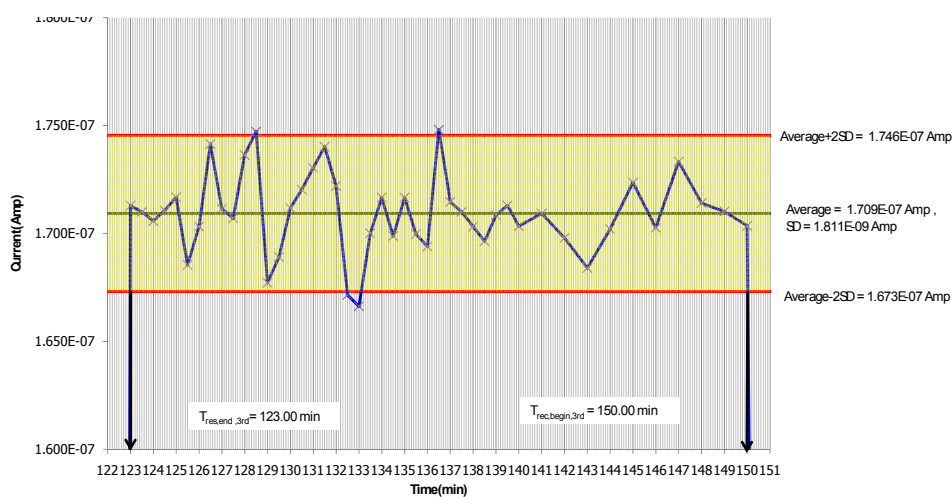
รูปที่ ข.59 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล้ก๊าซเมทธานอลของ 1st cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทธานอลของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)



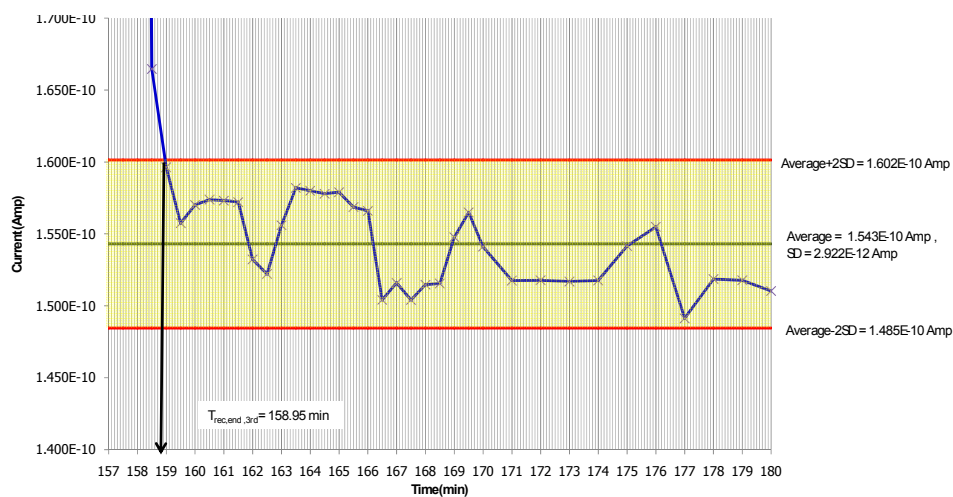
รูปที่ ข.60 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทธานอลของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล้ก๊าซเมทธานอลของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)



รูปที่ ข.61 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)

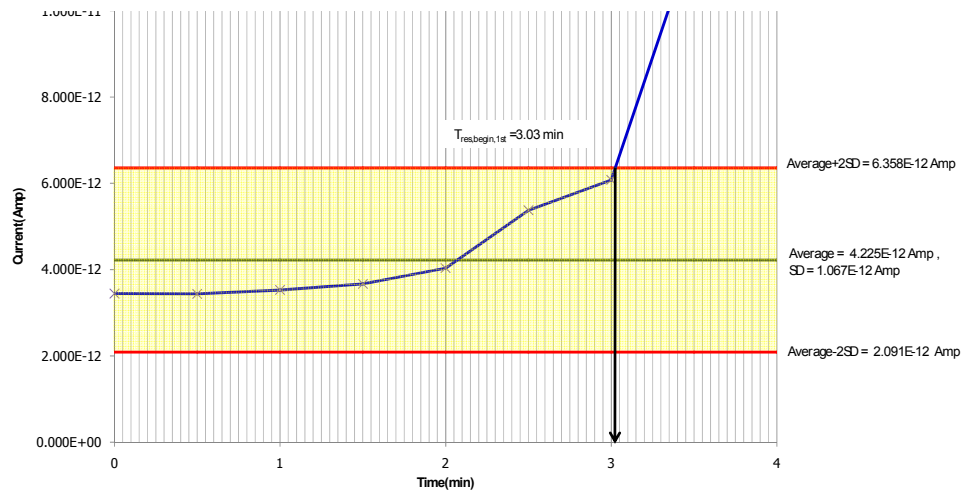


รูปที่ ข.62 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)

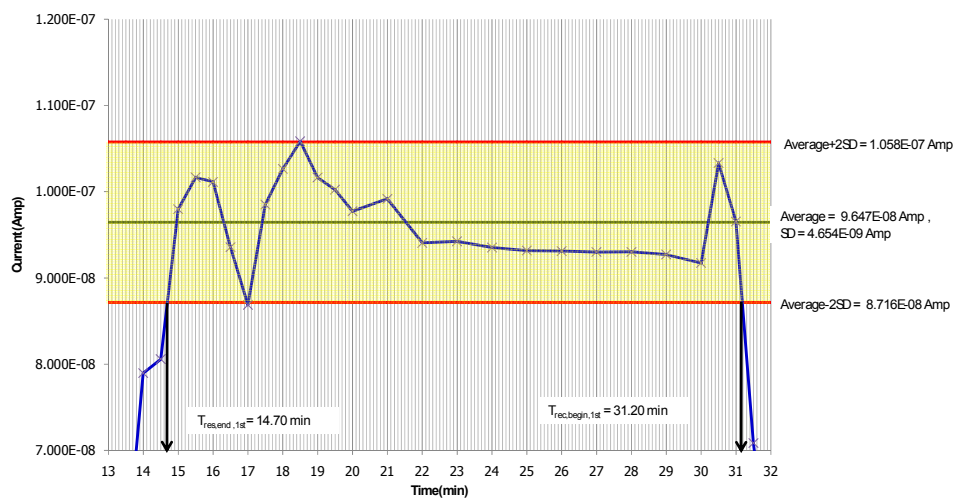


รูปที่ ข.63 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)

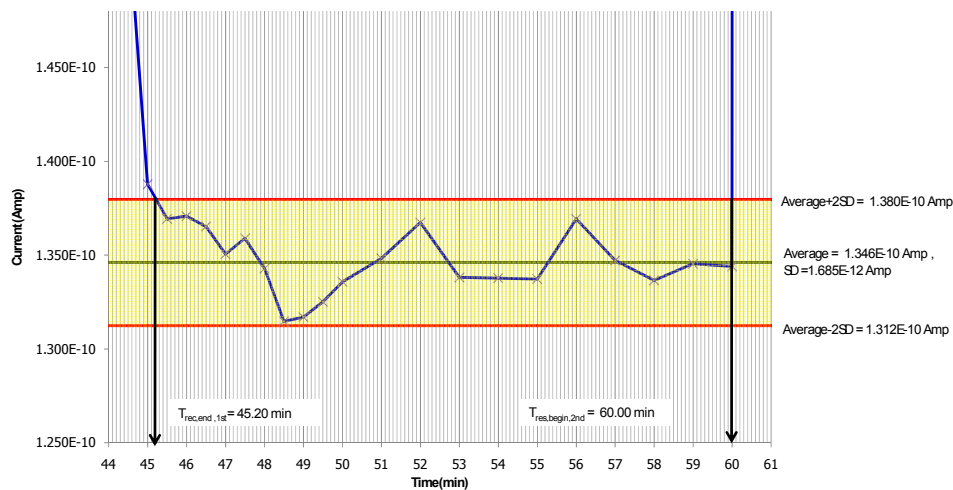
ข.2.8 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซเมทานอลของ BPSFCC (ครั้งที่ 2)



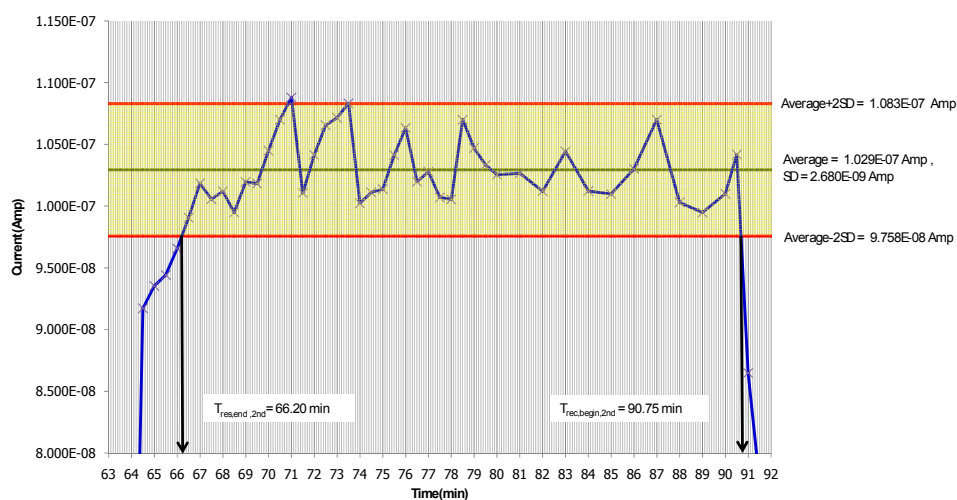
รูปที่ ข.64 การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่ 2)



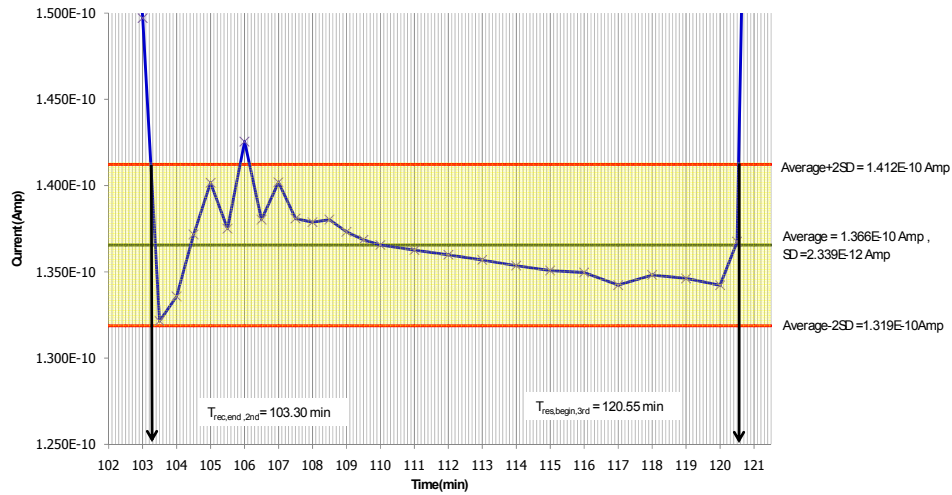
รูปที่ ข.65 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่ 2)



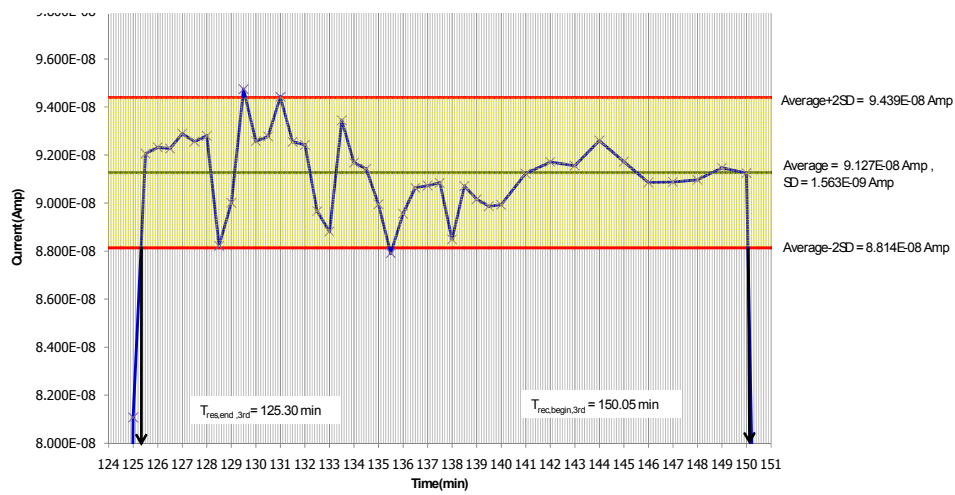
รูปที่ ข.66 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 1st cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)



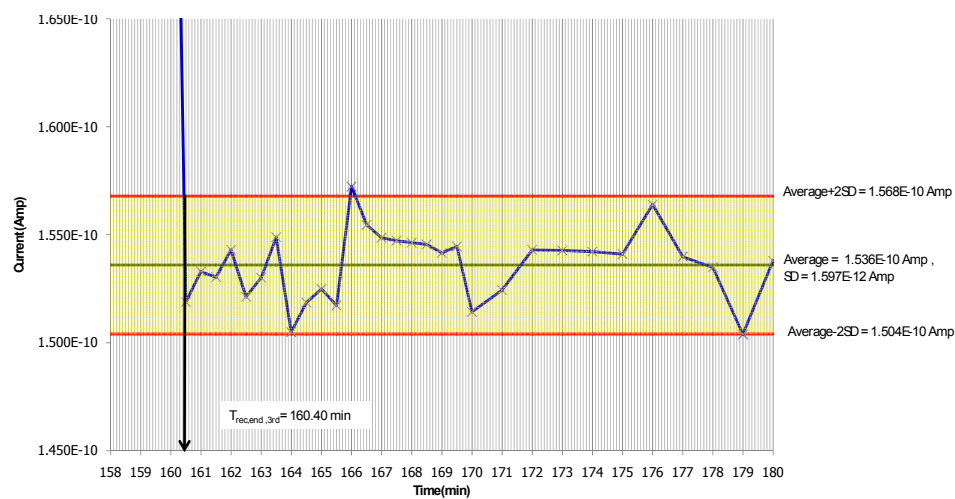
รูปที่ ข.67 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)



รูปที่ ข.68 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 2nd cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)



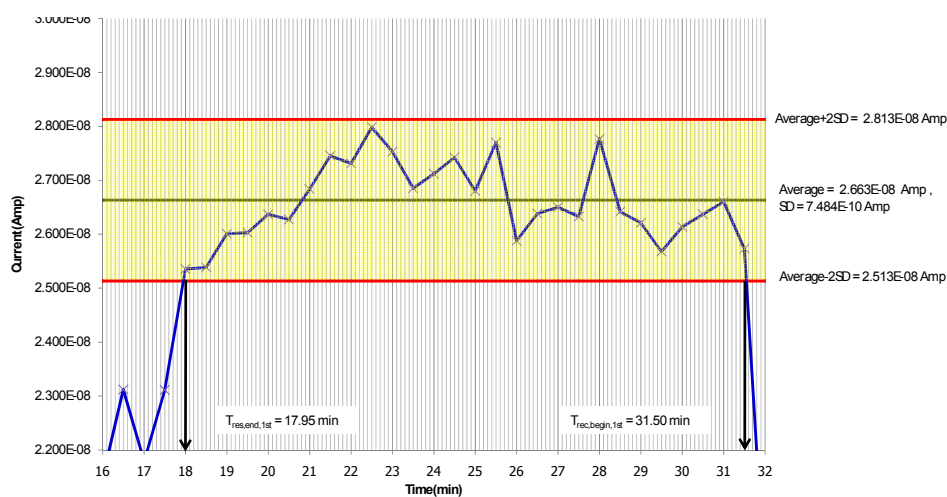
รูปที่ ข.69 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)



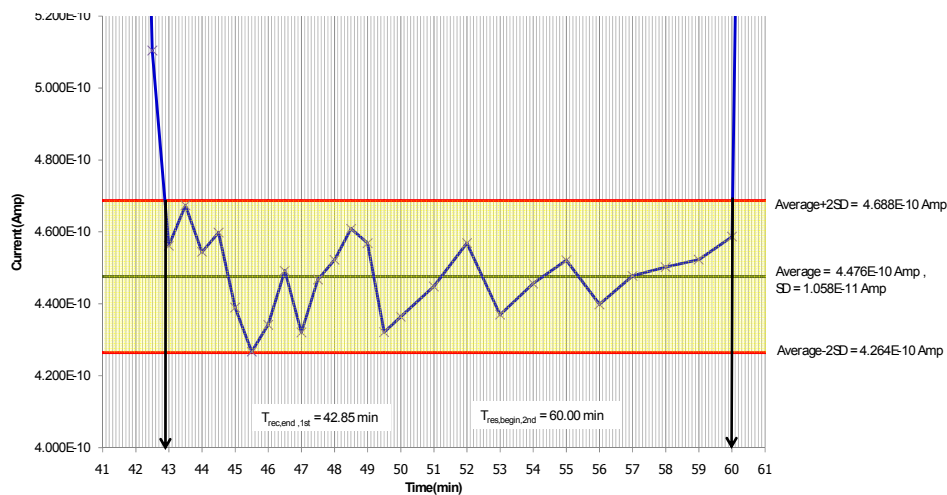
รูปที่ ข.70 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซเมทานอลของ 3rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่ 2)

ข.2.9 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซอะซิโตนของ PVB FCC (ครั้งที่1)

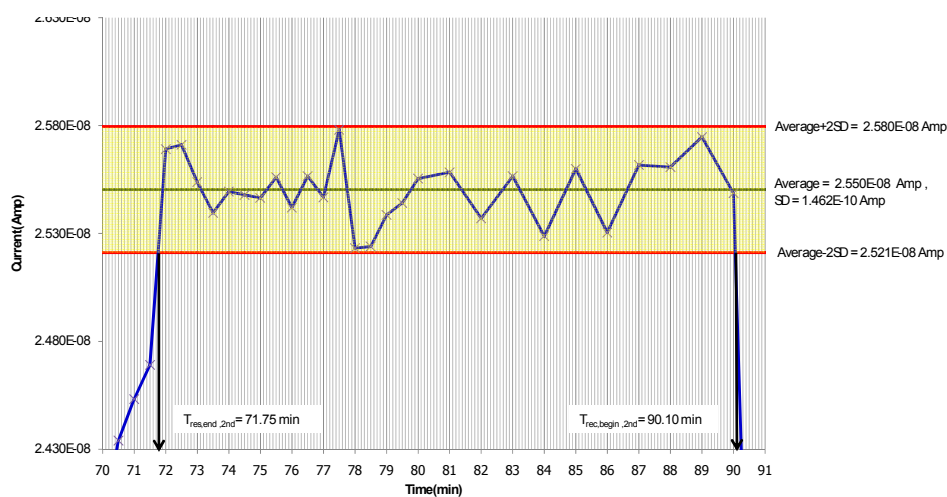
* การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่1) นั้นเริ่มเกิดสัญญาณตั้งแต่วันที่ 0 ดังนั้น จึงเริ่มนับ $T_{res,begin} = 0$ min และ $I_{avg} = 3.378 \times 10^{-12}$ amp



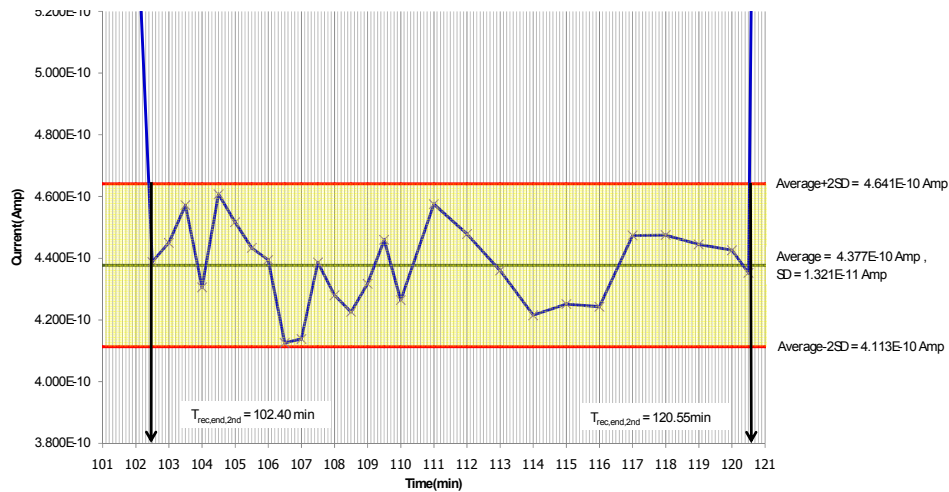
รูปที่ ข.71 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่1)



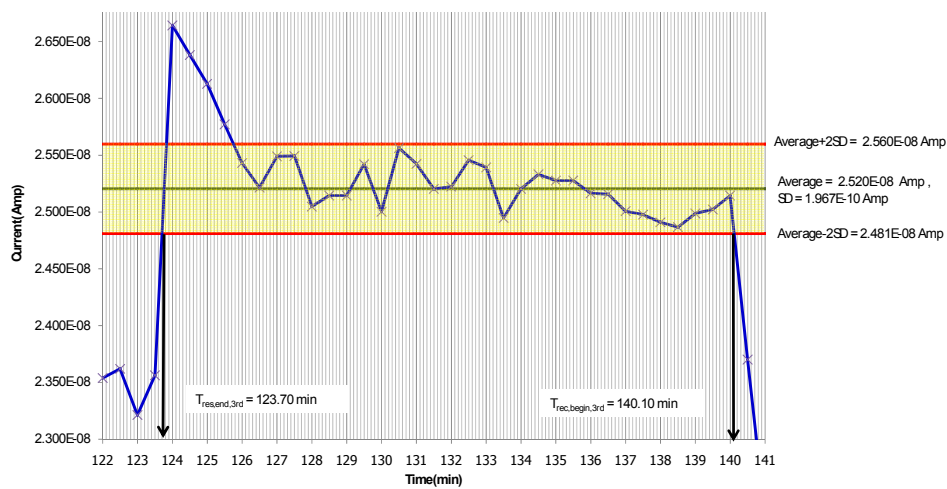
รูปที่ ข.72 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 1)



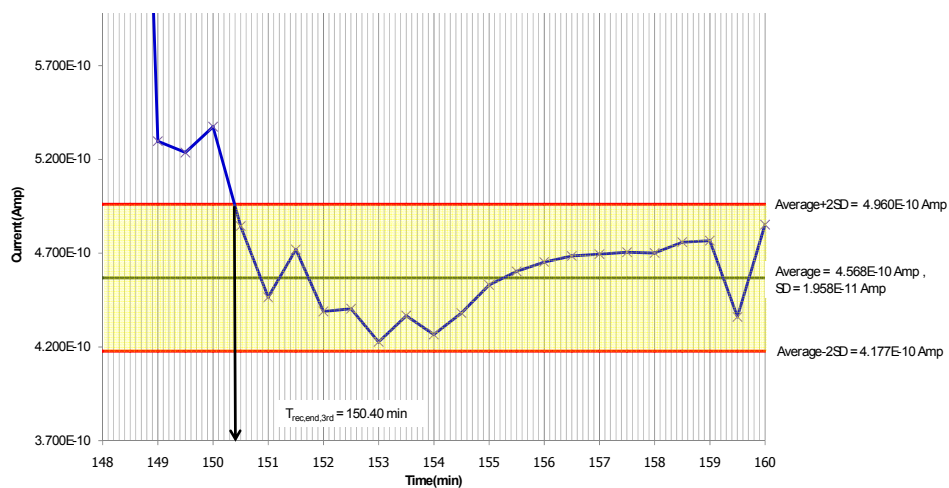
รูปที่ ข.73 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 1)



รูปที่ ข.74 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล้ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่1)



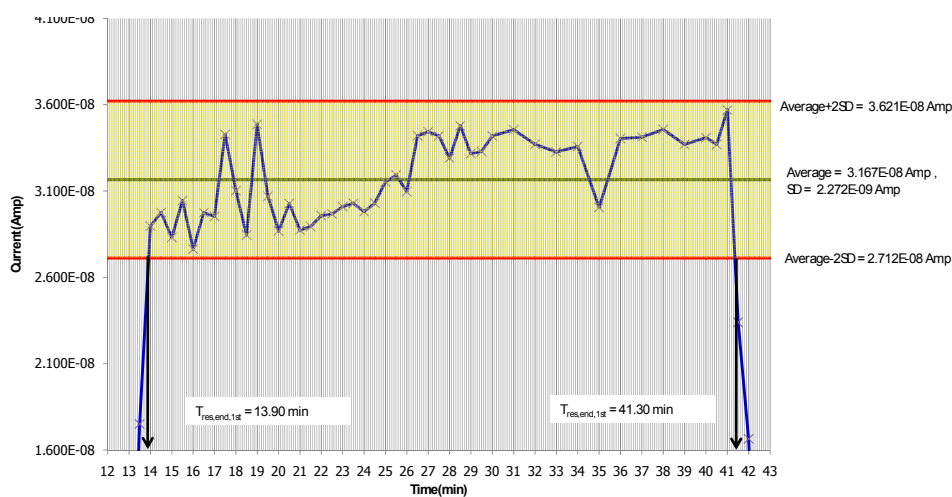
รูปที่ ข.75 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล้ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่1)



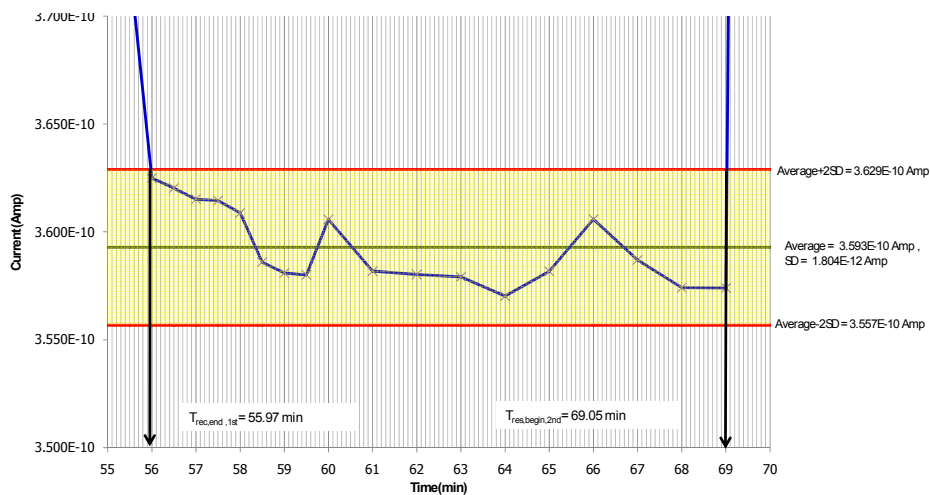
รูปที่ ข.76 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการใส่ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 1)

ข.2.10 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซอะซิโตนของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)

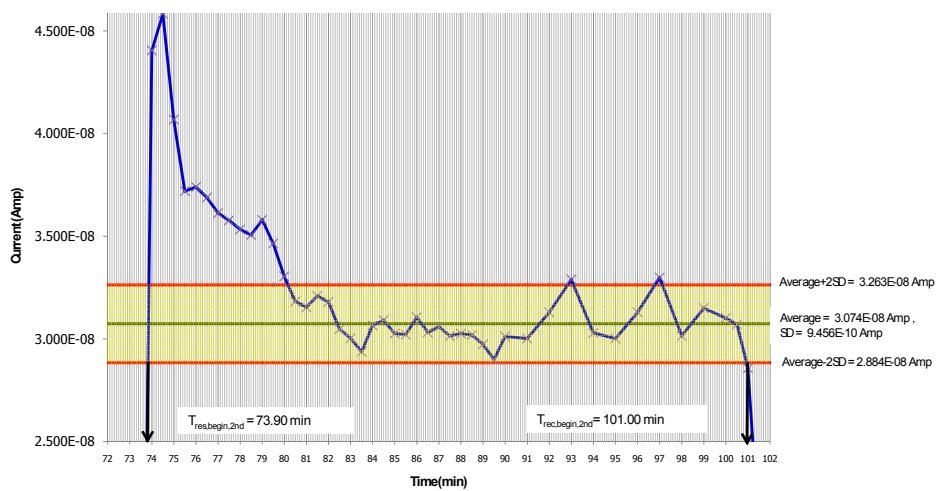
* การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1) นั้นเริ่มเกิดสัญญาณตั้งแต่วันที่ 0 ดังนั้น จึงเริ่มนับ $T_{res,begin} = 0$ min และ $I_{avg} = 3.471 \times 10^{-12}$ amp



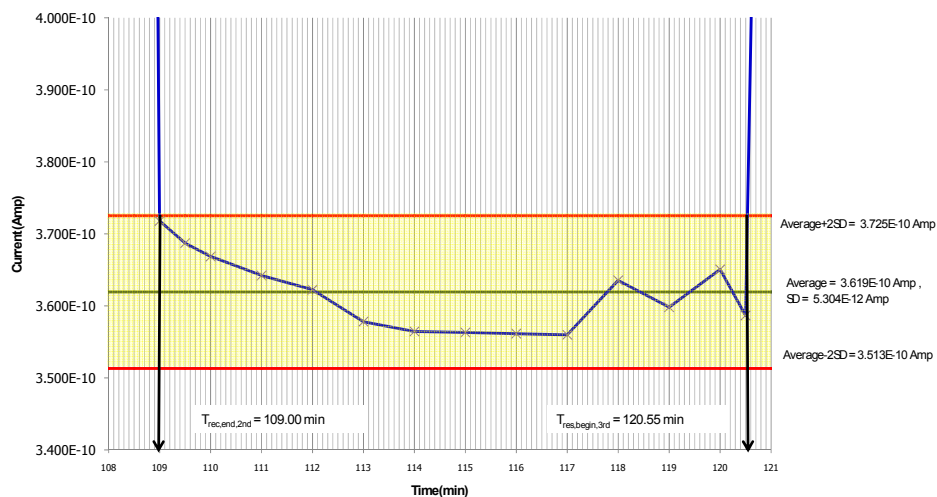
รูปที่ ข.77 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)



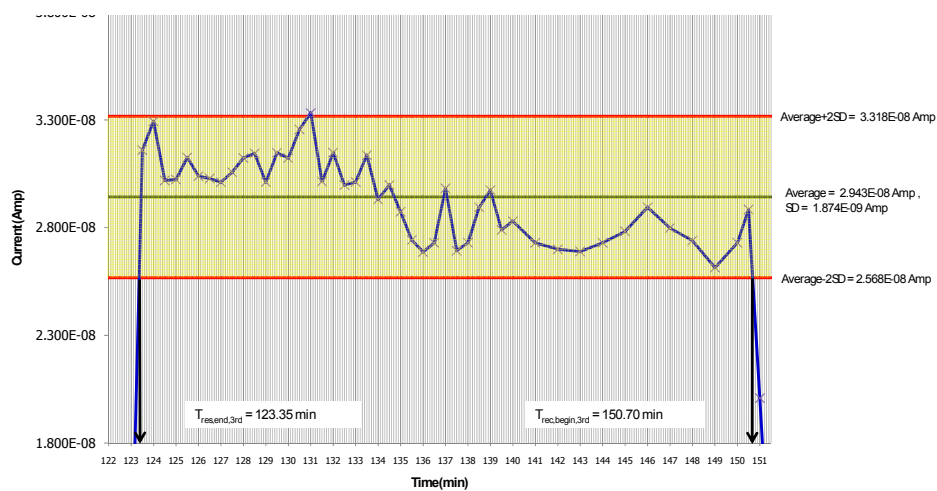
รูปที่ ข.78 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่ 1)



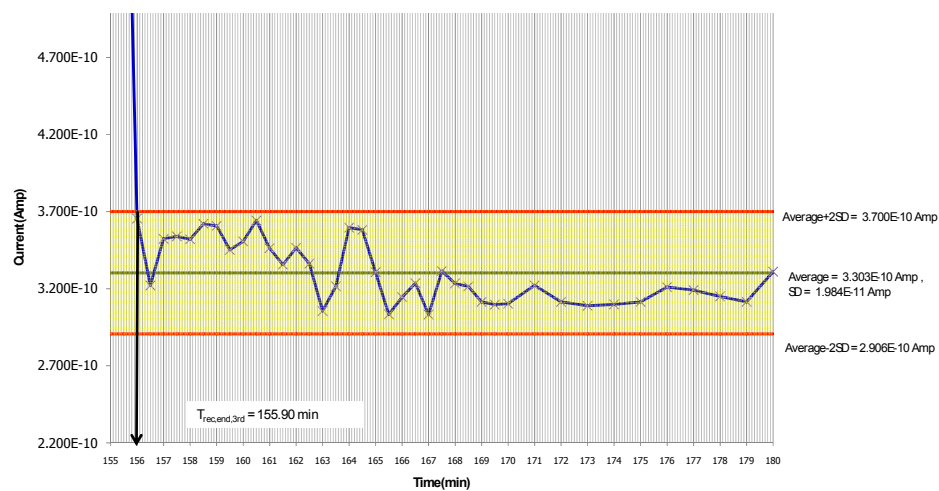
รูปที่ ข.79 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่ 1)



รูปที่ ข.80 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)



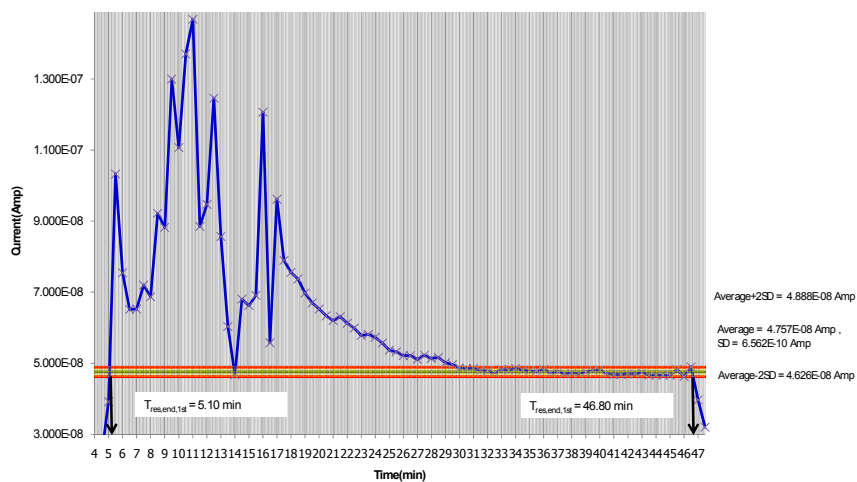
รูปที่ ข.81 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่1)



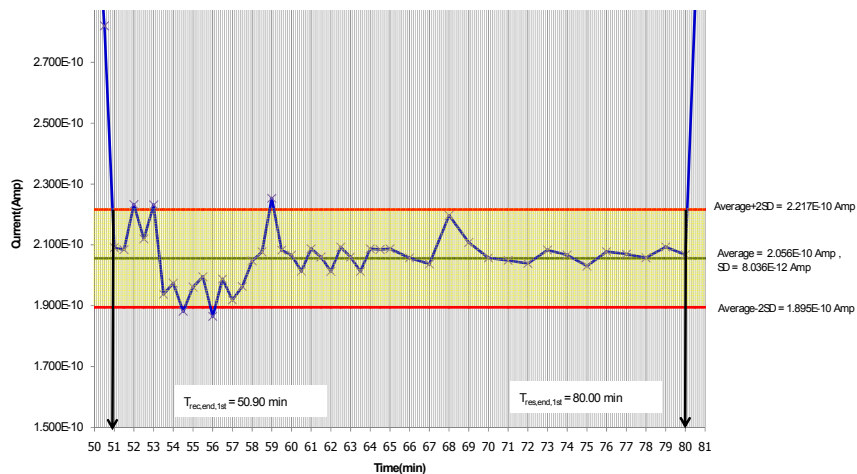
รูปที่ ข.82 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการใส่ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่ 1)

ข.2.11 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซอะซิโตนของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)

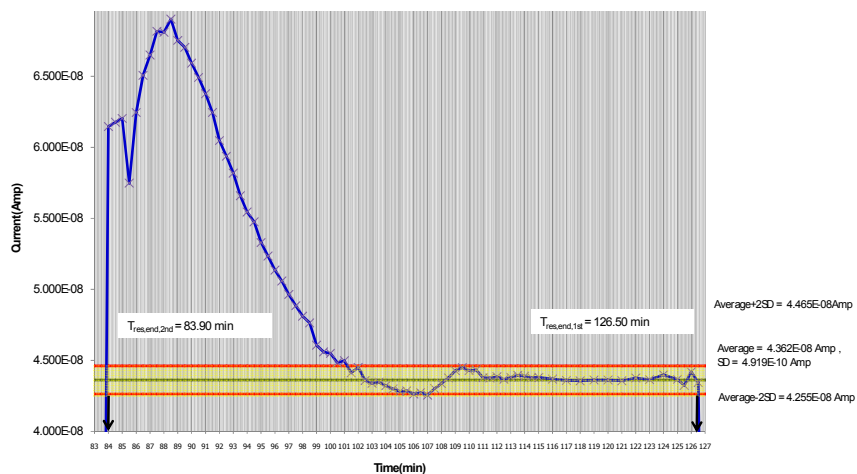
* การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1) นั้นเริ่มเกิดสัญญาณตั้งแต่วันที่ 0 ดังนั้น จึงเริ่มนับ $T_{res,begin} = 0$ min และ $I_{avg} = 3.366 \times 10^{-12}$ amp



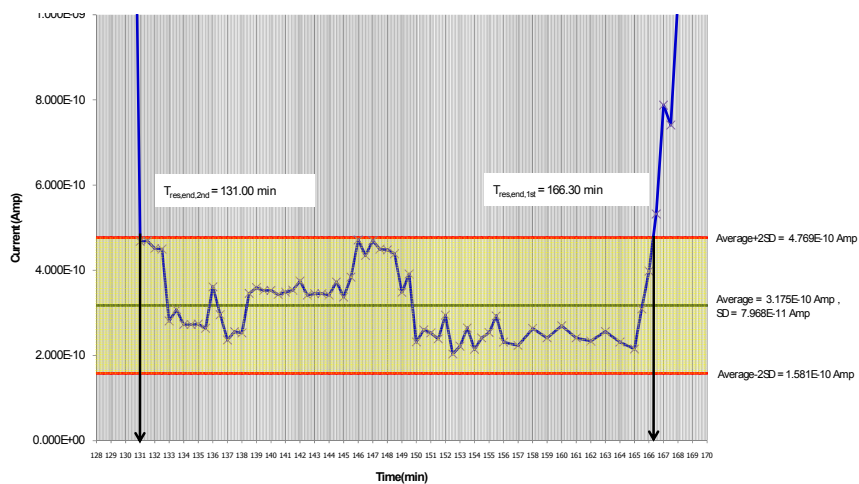
รูปที่ ข.83 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)



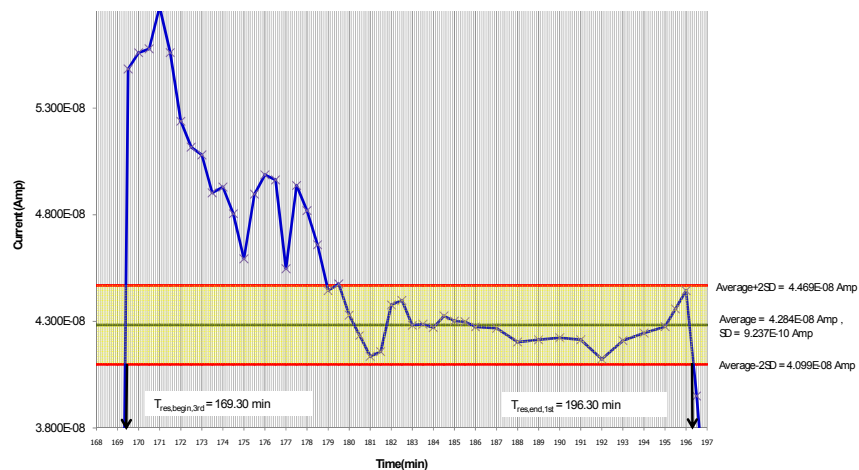
รูปที่ ข.84 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่ 1)



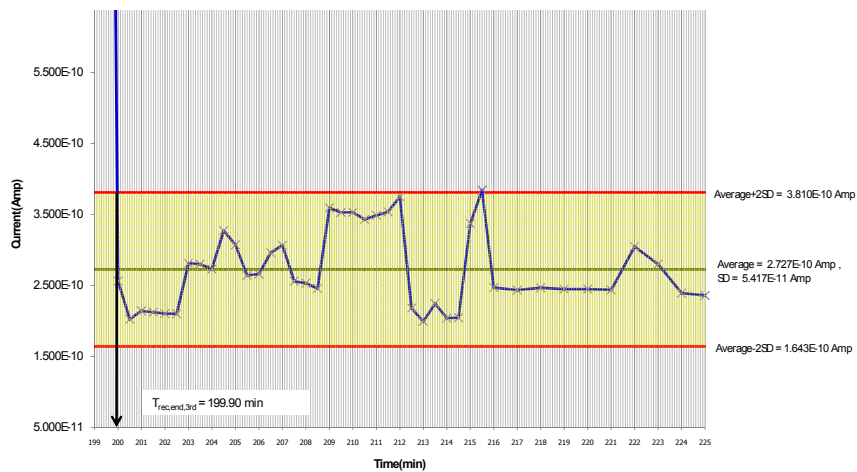
รูปที่ ข.85 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่ 1)



รูปที่ ข.86 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)



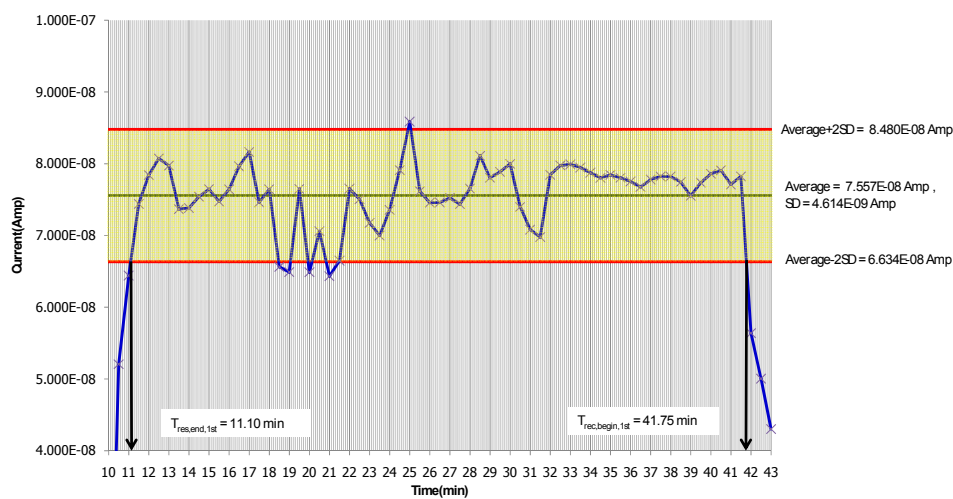
รูปที่ ข.87 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)



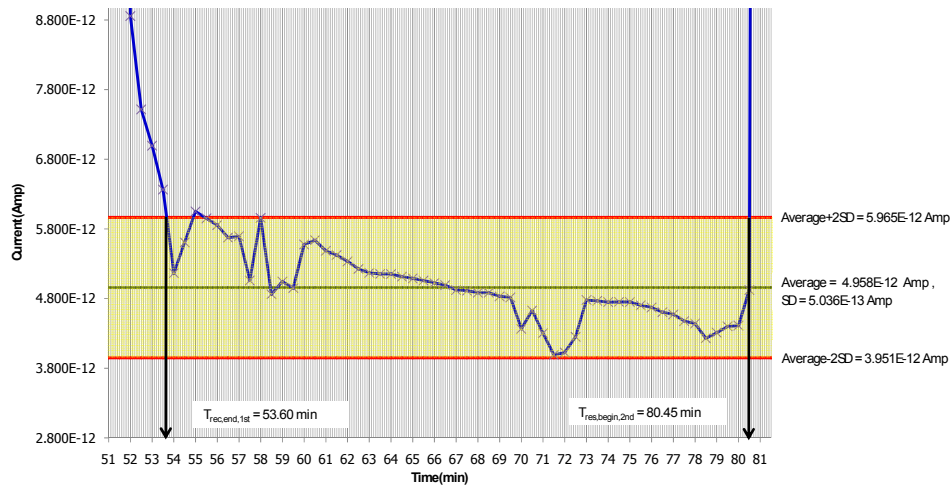
รูปที่ ข.88 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการใส่ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่1)

ข.2.12 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซอะซิโตนของ BPSFCC (ครั้งที่1)

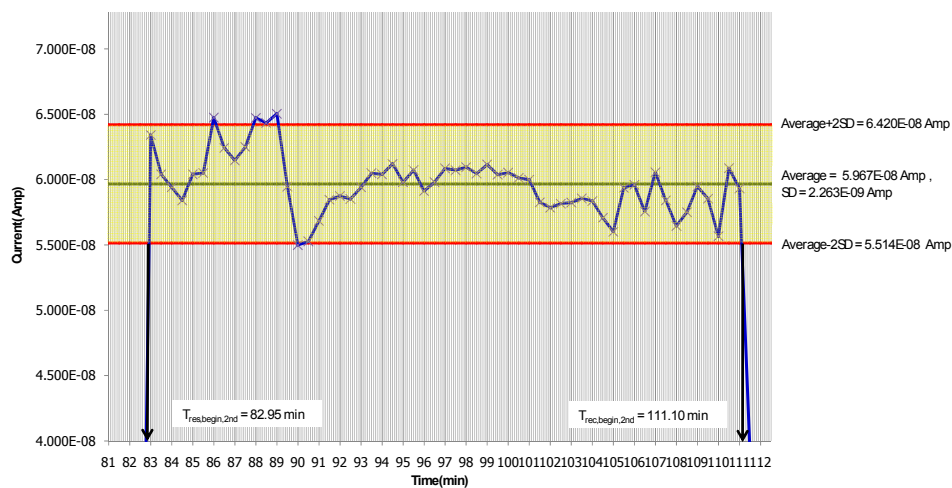
* การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1) นั้นเริ่มเกิดสัญญาณตั้งแต่วันที่ 0 ดังนั้น จึงเริ่มนับ $T_{res,begin} = 0$ min และ $I_{avg} = 3.393 \times 10^{-12}$ amp



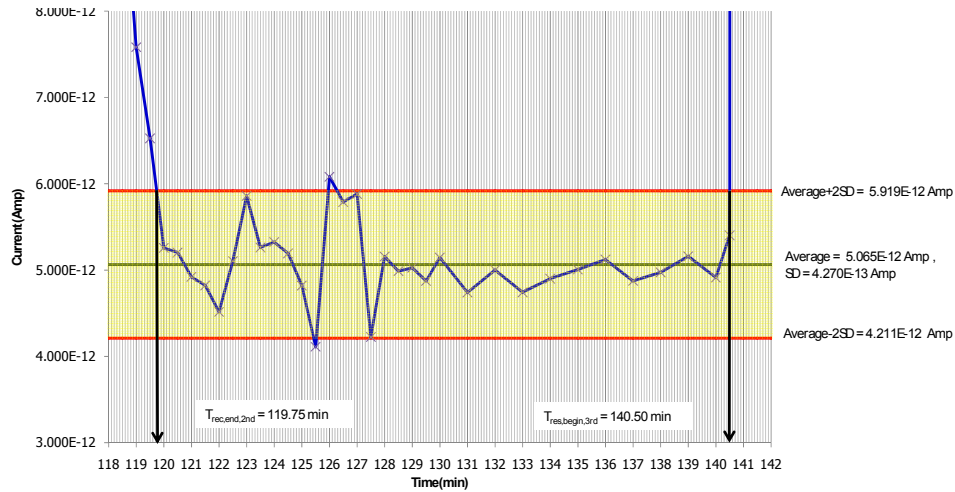
รูปที่ ข.89 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)



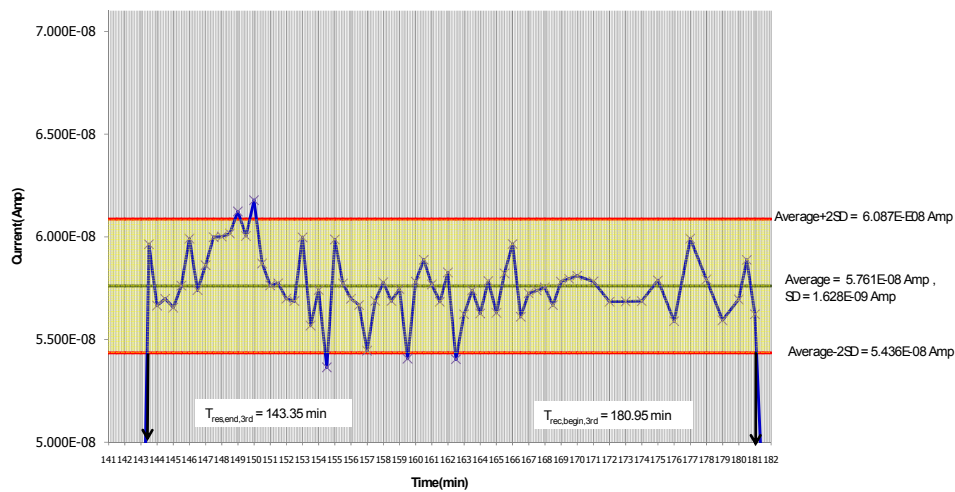
รูปที่ ข.90 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล้ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่ 1)



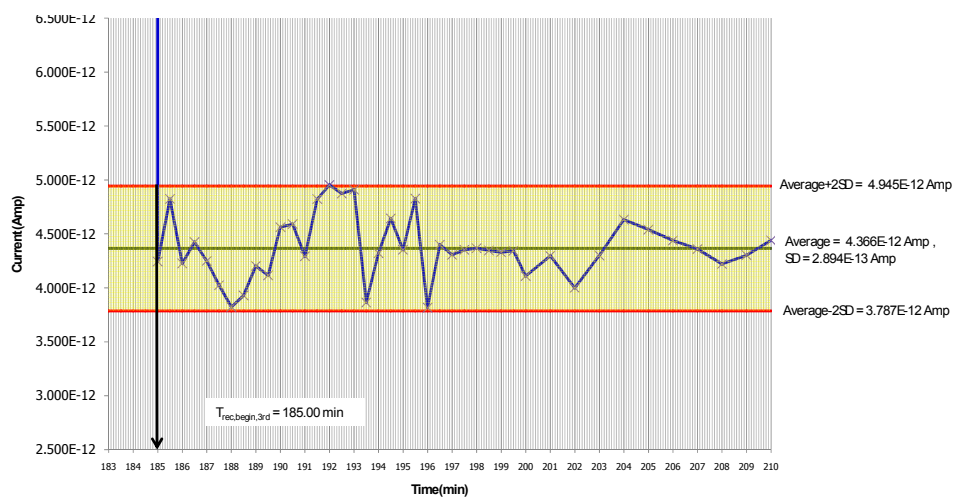
รูปที่ ข.91 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล้ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่ 1)



รูปที่ ข.92 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)

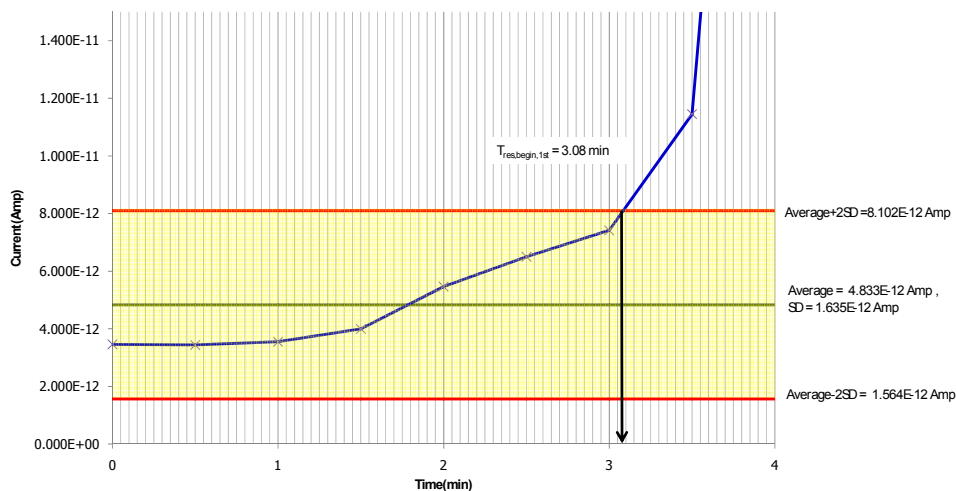


รูปที่ ข.93 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)

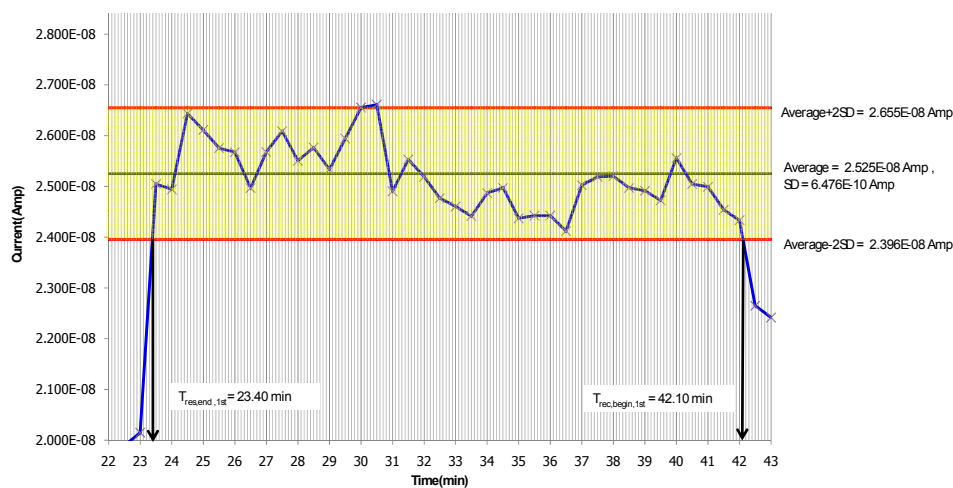


รูปที่ ข.94 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่1)

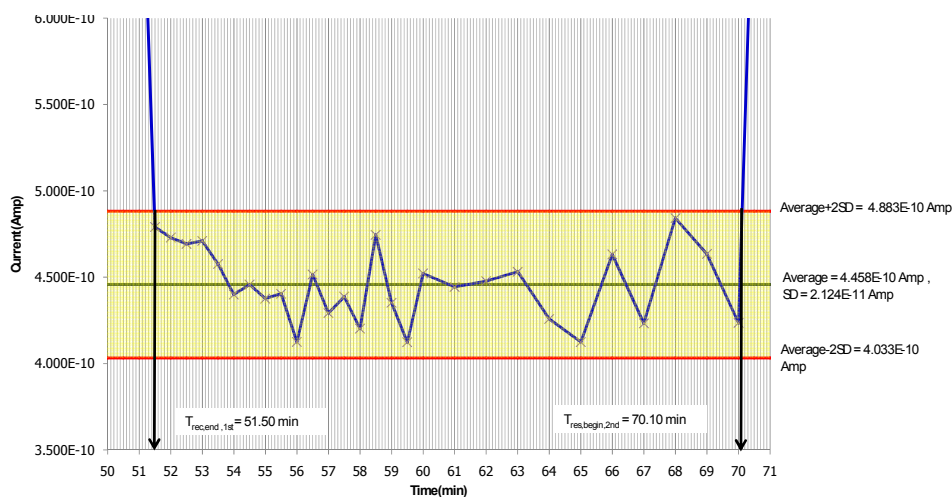
ข.2.13 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซอะซิโตนของ PVBFCC (ครั้งที่2)



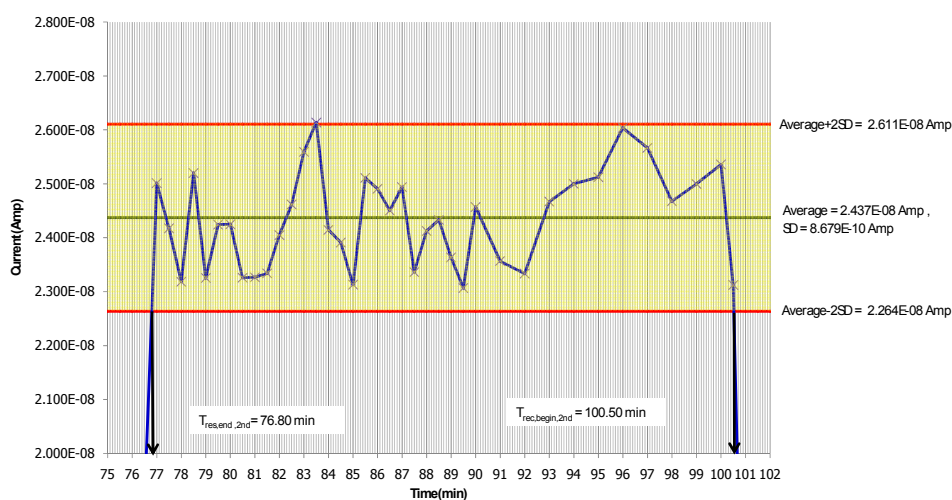
รูปที่ ข.95 การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่2)



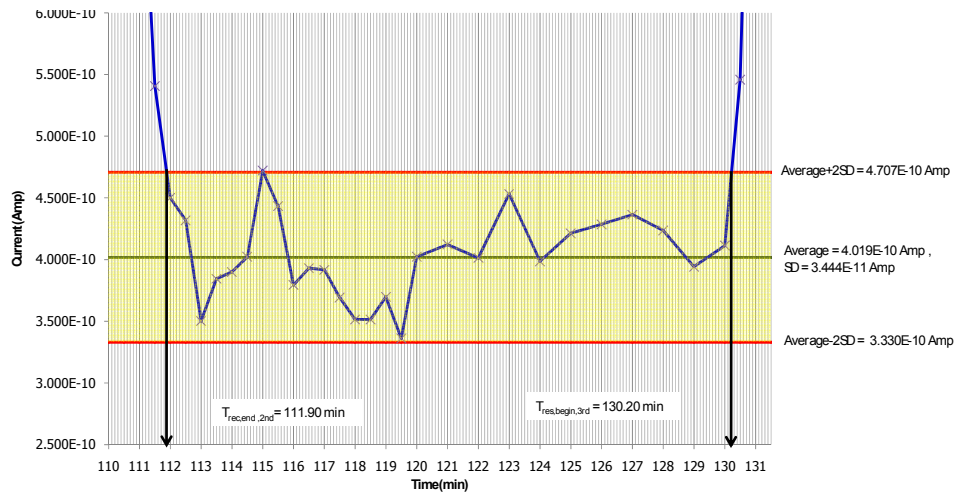
รูปที่ ข.96 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่2)



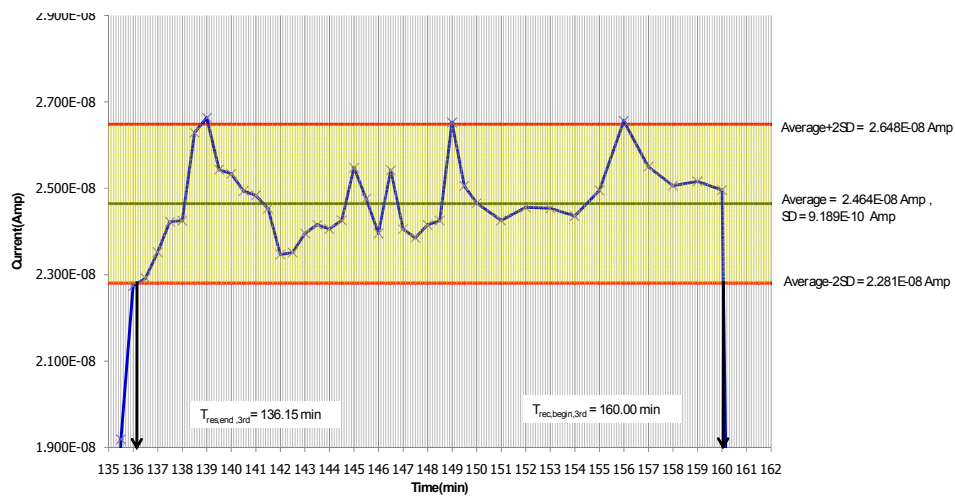
รูปที่ ข.97 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 2)



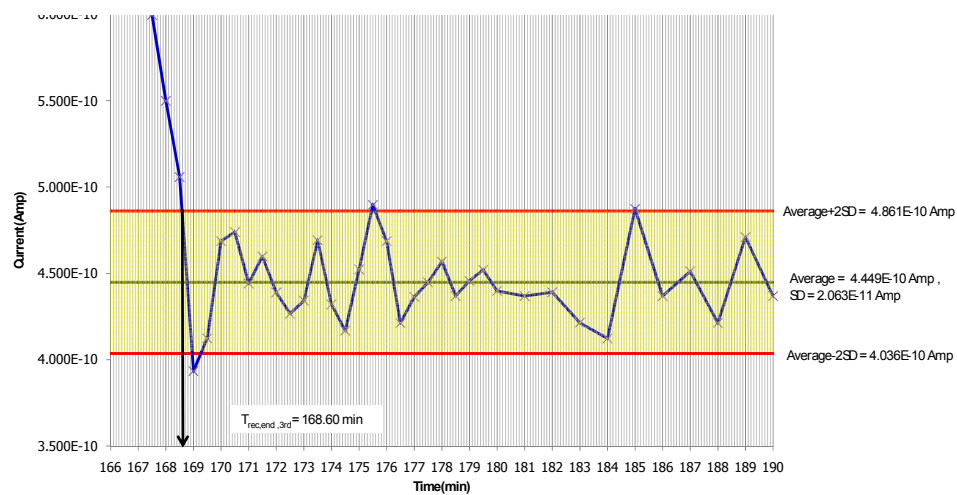
รูปที่ ข.98 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 2)



รูปที่ ข.99 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่2)

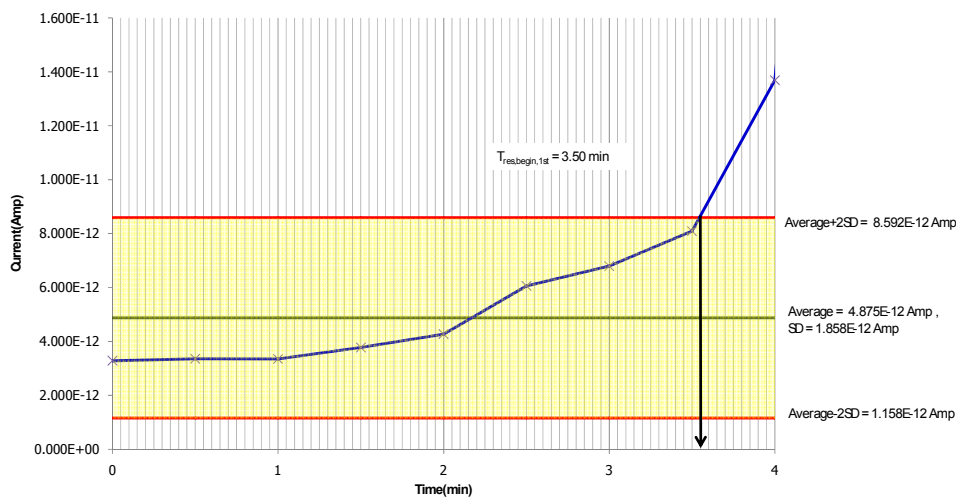


รูปที่ ข.100 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ PVBFCC (ครั้งที่2)

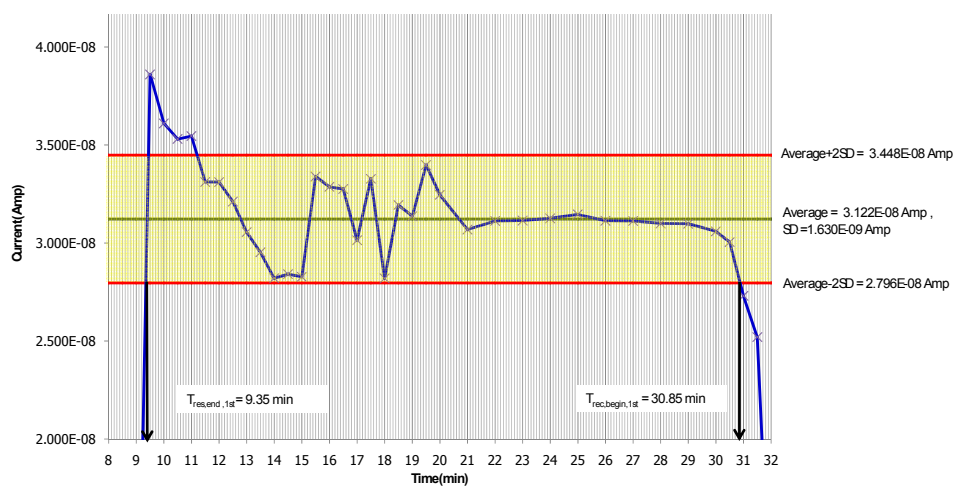


รูปที่ ข.101 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ PVB FCC (ครั้งที่ 2)

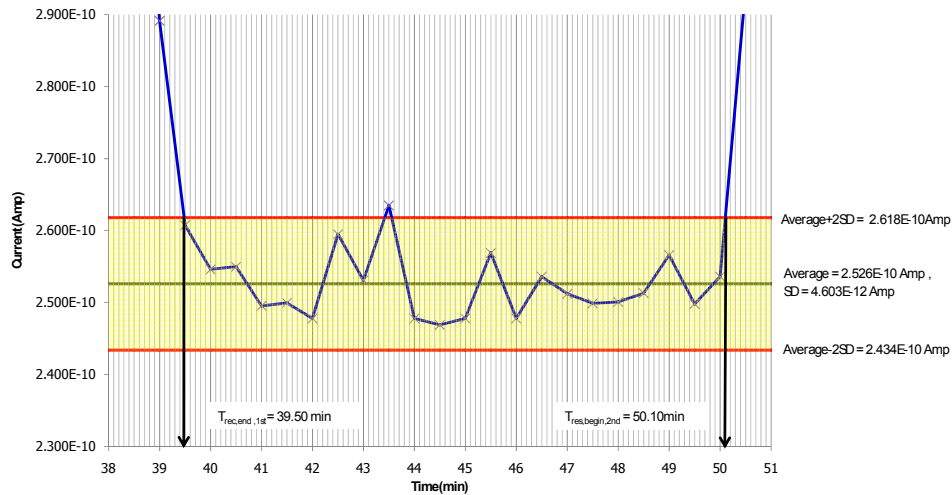
ข.2.14 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซอะซิโตนของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)



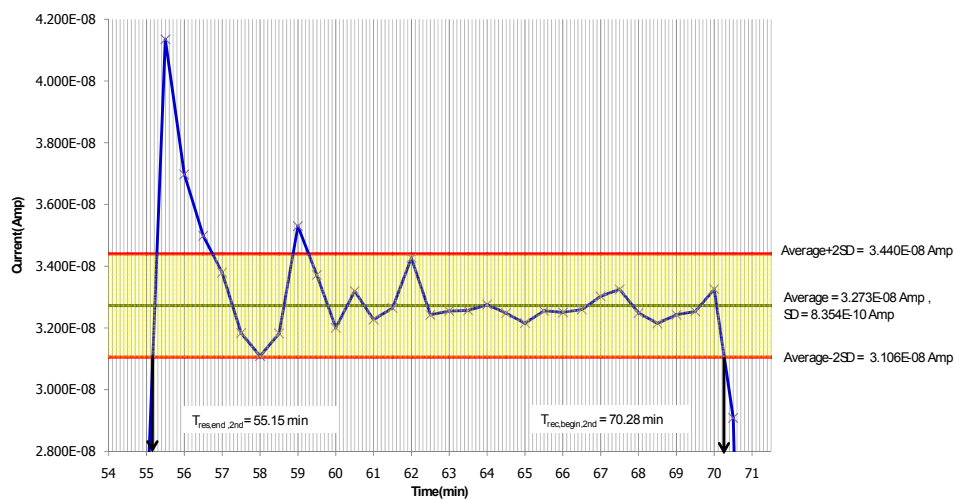
รูปที่ ข.102 การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)



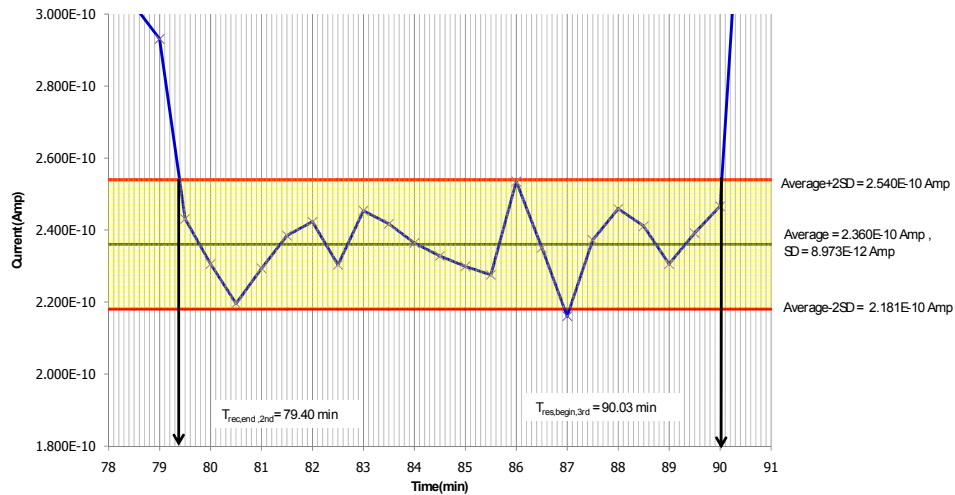
รูปที่ ข.103 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และการหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)



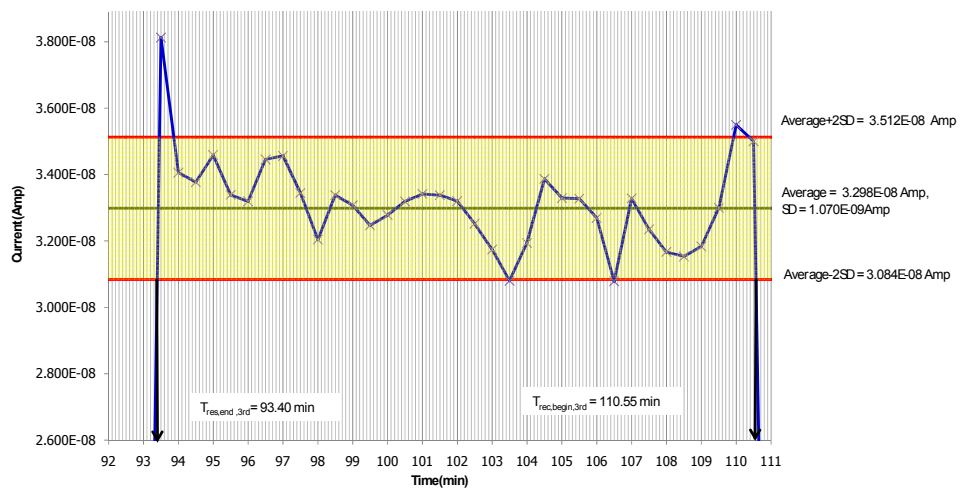
รูปที่ ข.104 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)



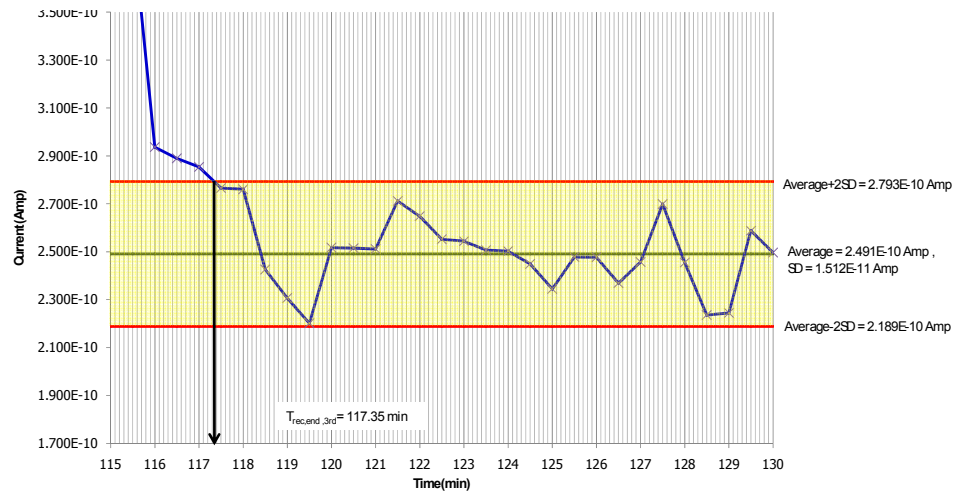
รูปที่ ข.105 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)



รูปที่ ข.106 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการใส่ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)

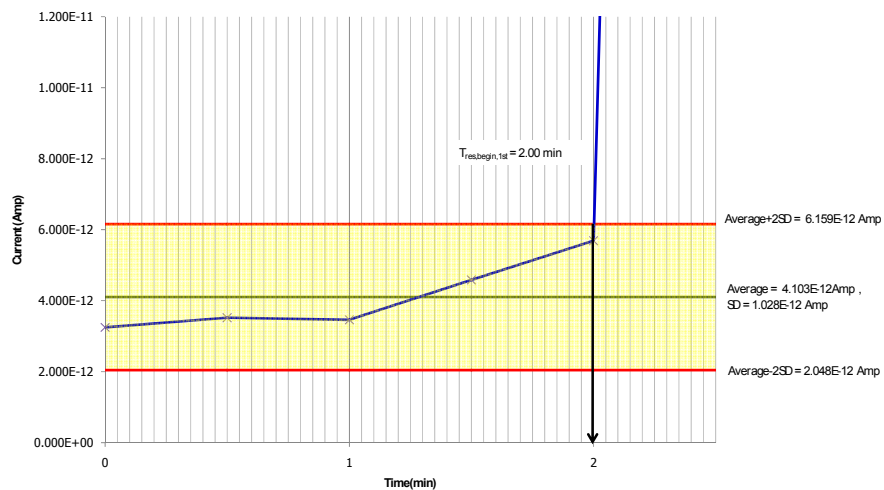


รูปที่ ข.107 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการใส่ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่2)

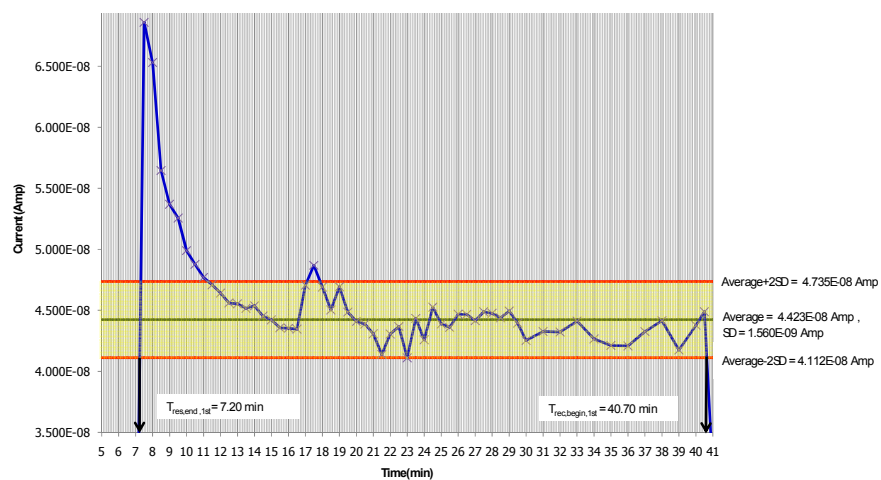


รูปที่ ข.108 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC75/25 (ครั้งที่ 2)

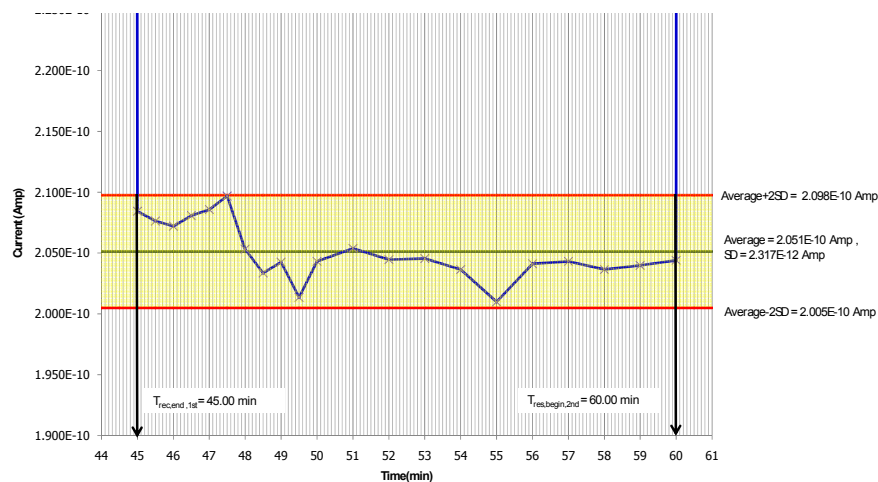
ข.2.15 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซอะซิโตนของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)



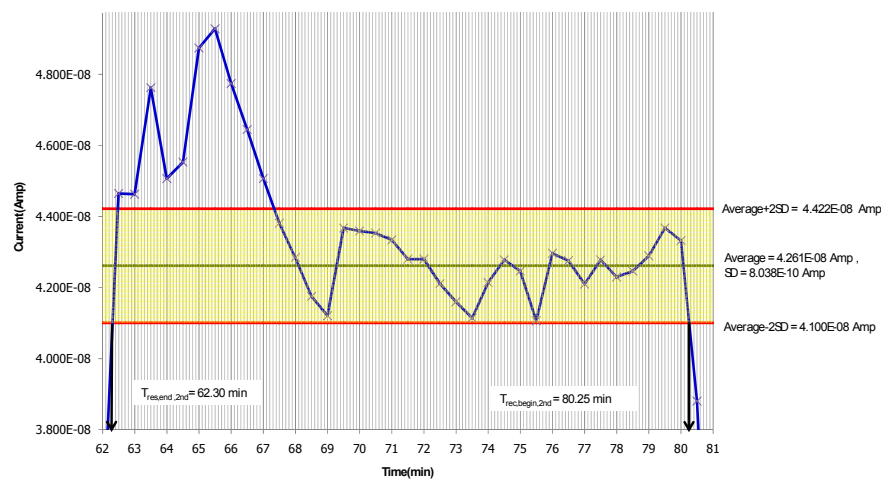
รูปที่ ข.109 การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)



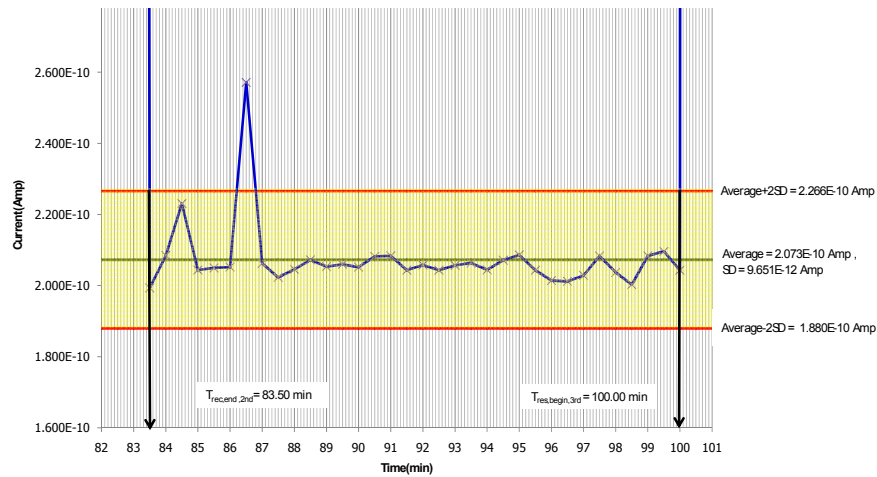
รูปที่ ข.110 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)



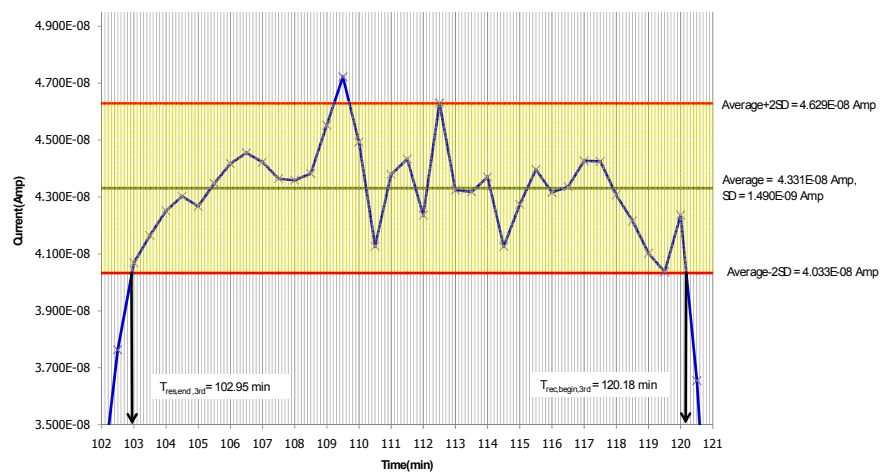
รูปที่ ข.111 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ Co-PVB FCC50/50 (ครั้งที่2)



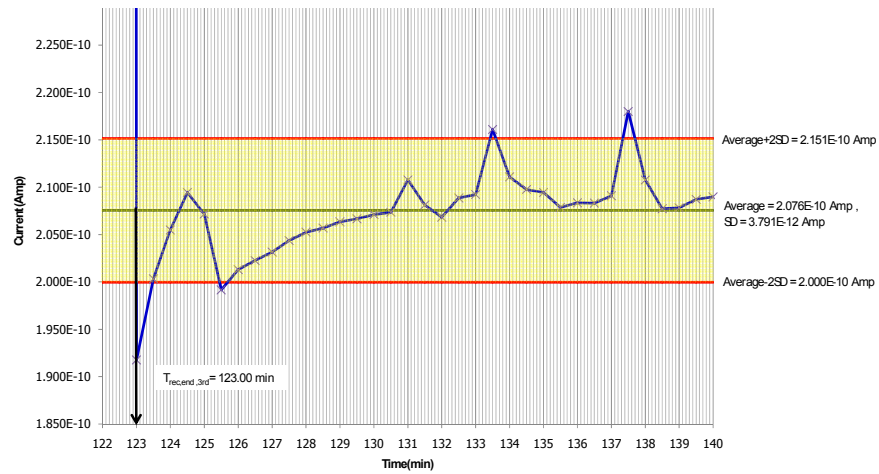
รูปที่ ข.112 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ Co-PVB FCC50/50 (ครั้งที่2)



รูปที่ ข.113 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล้ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)

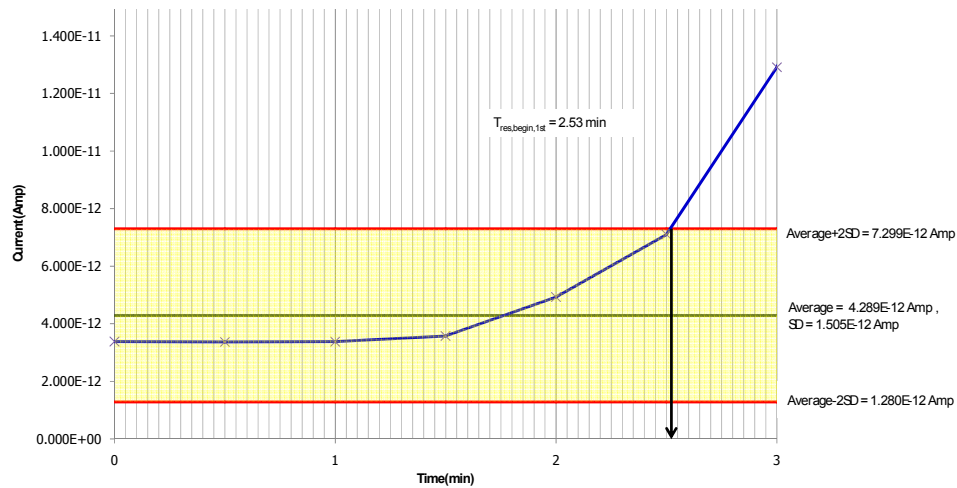


รูปที่ ข.114 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล้ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่2)

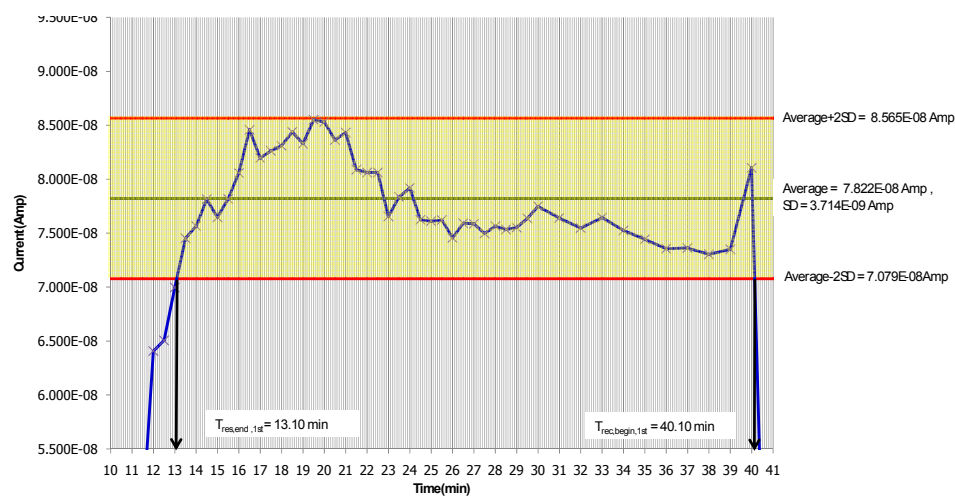


รูปที่ ข.115 การหา $T_{rec, end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการใส่ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ Co-PVBFCC50/50 (ครั้งที่ 2)

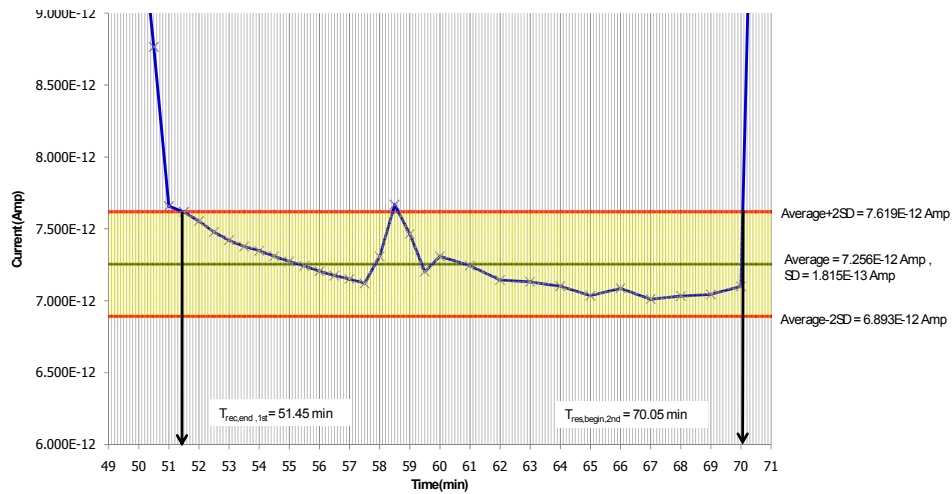
ข.2.16 การทดสอบการตรวจสอบก๊าซอะซิโตนของ BPSFCC (ครั้งที่2)



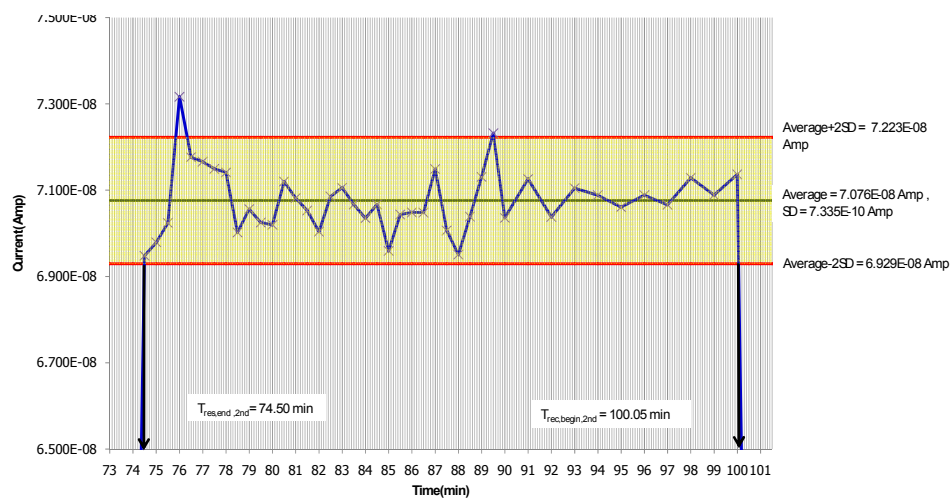
รูปที่ ข.116 การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)



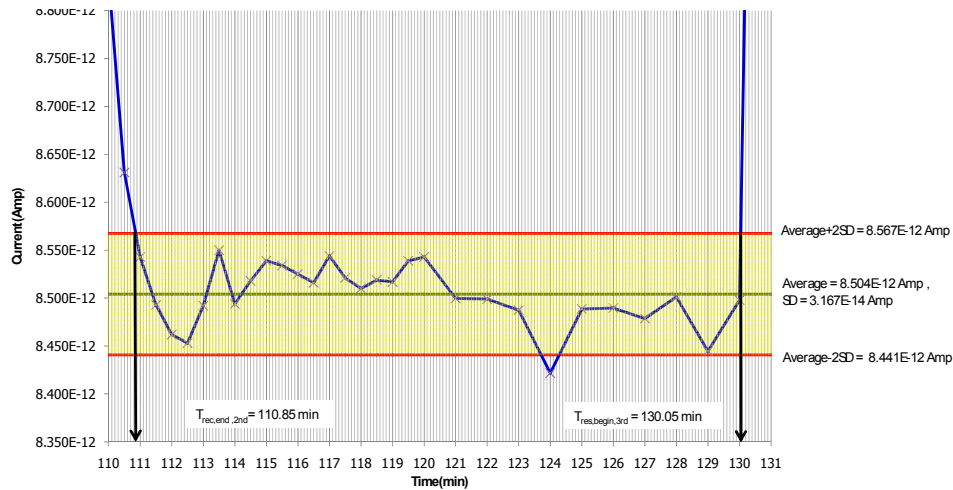
รูปที่ ข.117 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และการหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)



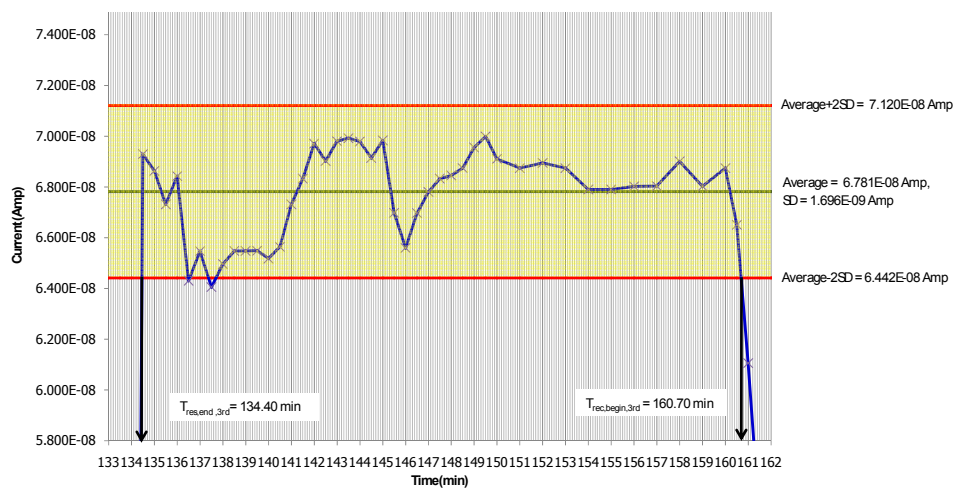
รูปที่ ข.118 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซอะซิโตนของ 1st cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)



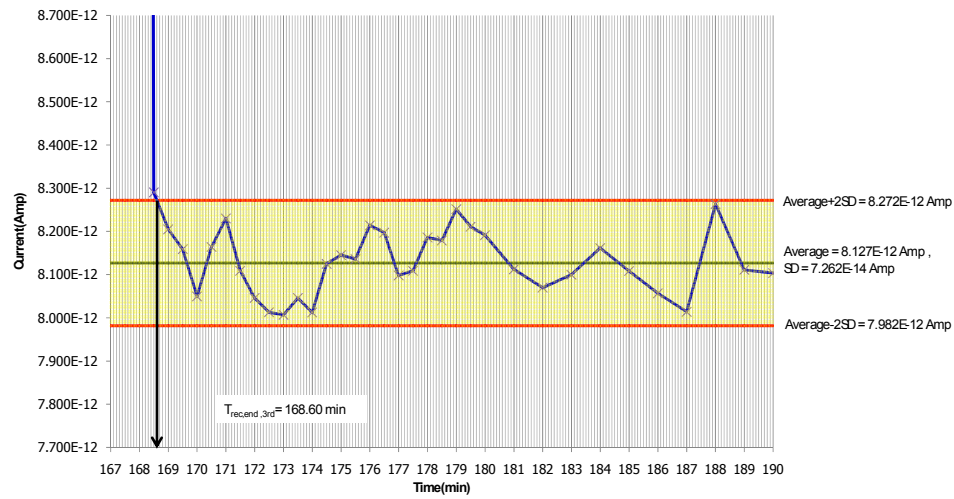
รูปที่ ข.119 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่2)



รูปที่ ข.120 การหา $T_{rec,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซอะซิโตนของ 2nd cycle และ การหา $T_{res,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนก่อนการป้อนก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่ 2)



รูปที่ ข.121 การหา $T_{res,end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle และ การหา $T_{rec,begin}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการได้ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่ 2)



รูปที่ ข.122 การหา $T_{rec, end}$ และ I_{avg} ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนหลังการไล่ก๊าซอะซิโตนของ 3rd cycle ของ BPSFCC (ครั้งที่ 2)

ข.3 ข้อมูลการทดสอบและคำนวณหาร้อยละความว่องไวต่อก๊าซตัวอย่างแยกแต่ละชนิด

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อนการผ่านก๊าซตัวอย่างและเวลาเริ่มต้นการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมททานอล

Test	Sample name	Thickness (mm)	Cycle	Begin			
				T _{res,begin} (min)	I _{avg} (Amp)	SD	n
I	Li_PVBFCC	0.405	1 st	4.07	3.169E-12	5.613E-14	9
			2 nd	110.60	8.573E-11	3.534E-12	15
			3 rd	171.10	3.588E-10	5.357E-11	13
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.380	1 st	4.50	3.312E-12	3.072E-14	10
			2 nd	50.00	1.573E-10	1.389E-11	8
			3 rd	90.00	1.557E-10	1.001E-11	10
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.385	1 st	0.00	3.219E-12	xxx	1
			2 nd	49.00	1.330E-10	9.390E-12	18
			3 rd	89.00	1.294E-10	6.148E-12	15
	Li_BPSFCC	0.395	1 st	0.00	3.318E-12	xxx	1
			2 nd	60.35	1.614E-10	9.005E-12	25
			3 rd	100.50	1.084E-10	5.973E-12	11
II	Li_PVBFCC	0.390	1 st	0.00	3.578E-12	xxx	1
			2 nd	80.50	2.241E-10	3.782E-12	24
			3 rd	135.50	2.247E-10	2.888E-12	28
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.410	1 st	2.03	4.112E-12	1.237E-12	5
			2 nd	61.00	1.818E-10	8.025E-12	20
			3 rd	120.50	1.753E-10	3.019E-12	24
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.350	1 st	2.05	3.850E-12	3.467E-14	5
			2 nd	59.85	1.354E-10	2.331E-12	19
			3 rd	120.50	1.479E-10	2.757E-12	29
	Li_BPSFCC	0.365	1 st	3.03	4.225E-12	1.067E-12	7
			2 nd	60.00	1.346E-10	1.685E-12	20
			3 rd	120.55	1.366E-10	2.339E-12	24

หมายเหตุ

xxx คือ ข้อมูลที่ไม่สามารถหาค่า SD ได้ เนื่องจากข้อมูลมีเพียงค่าเดียว

n คือ จำนวนข้อมูล

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างและเวลาสิ้นสุดการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างและเวลาเริ่มต้นการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอล

Test	Sample name	Thickness (mm)	Cycle	Equilibrium				
				T _{res,end} (min)	I _{avg} (Amp)	SD	n	T _{rec,begin} (min)
I	Li_PVBFCC	0.405	1 st	36.90	2.085E-07	9.233E-10	37	60.50
			2 nd	125.90	2.062E-07	1.354E-09	25	152.20
			3 rd	184.60	2.142E-07	2.817E-09	36	220.00
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.380	1 st	19.85	1.978E-07	2.203E-09	12	30.05
			2 nd	54.90	1.974E-07	2.909E-09	22	70.55
			3 rd	94.90	1.986E-07	2.094E-09	22	110.50
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.385	1 st	9.70	1.648E-07	2.949E-09	21	20.55
			2 nd	52.65	1.754E-07	1.867E-09	25	70.10
			3 rd	91.90	1.769E-07	6.441E-10	27	110.45
	Li_BPSFCC	0.395	1 st	13.65	1.157E-07	8.792E-10	28	30.10
			2 nd	65.90	1.141E-07	1.769E-09	20	80.05
			3 rd	106.30	1.169E-07	6.418E-10	24	120.05
II	Li_PVBFCC	0.390	1 st	20.20	2.155E-07	3.537E-09	31	41.50
			2 nd	92.80	2.256E-07	6.429E-09	24	112.00
			3 rd	145.68	2.171E-07	4.941E-09	30	166.60
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.410	1 st	18.35	1.906E-07	2.672E-09	15	30.08
			2 nd	66.40	1.958E-07	2.855E-09	38	90.05
			3 rd	125.50	1.936E-07	3.034E-09	40	150.50
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.350	1 st	15.23	1.508E-07	2.207E-09	20	31.00
			2 nd	64.35	1.735E-07	2.088E-09	41	90.25
			3 rd	123.00	1.709E-07	1.811E-09	45	150.00
	Li_BPSFCC	0.365	1 st	14.70	9.647E-08	4.654E-09	21	31.20
			2 nd	66.20	1.029E-07	2.680E-09	38	90.75
			3 rd	125.30	9.127E-08	1.563E-09	40	150.05

หมายเหตุ

n คือ จำนวนข้อมูล

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนหลังการผ่านก๊าซตัวอย่างและเวลาสิ้นสุดการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอล

Test	Sample name	Thickness (mm)	Cycle	End			
				T _{rec,end} (min)	I _{avg} (Amp)	SD	n
I	Li_PVBFCC	0.405	1 st	93.70	8.573E-11	3.534E-12	15
			2 nd	158.90	3.588E-10	5.357E-11	13
			3 rd	227.23	3.878E-10	7.879E-11	17
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.380	1 st	42.85	1.573E-10	1.389E-11	8
			2 nd	80.60	1.557E-10	5.005E-12	10
			3 rd	120.43	1.560E-10	3.308E-12	20
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.385	1 st	35.30	1.330E-10	9.390E-12	18
			2 nd	81.75	1.294E-10	6.148E-12	15
			3 rd	119.00	1.266E-10	3.646E-12	23
	Li_BPSFCC	0.395	1 st	40.40	1.614E-10	9.005E-12	25
			2 nd	90.00	1.084E-10	5.973E-12	11
			3 rd	127.90	1.041E-10	1.953E-12	15
II	Li_PVBFCC	0.390	1 st	63.85	2.241E-10	3.782E-12	24
			2 nd	119.50	2.247E-10	2.888E-12	28
			3 rd	174.00	2.259E-10	2.209E-12	28
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.410	1 st	45.50	1.818E-10	8.025E-12	20
			2 nd	103.35	1.753E-10	3.019E-12	24
			3 rd	160.95	1.845E-10	2.817E-12	29
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.350	1 st	45.80	1.354E-10	2.331E-12	19
			2 nd	101.40	1.479E-10	2.757E-12	29
			3 rd	158.95	1.543E-10	2.922E-12	33
	Li_BPSFCC	0.365	1 st	45.20	1.346E-10	1.685E-12	20
			2 nd	103.30	1.366E-10	2.339E-12	24
			3 rd	160.40	1.536E-10	1.597E-12	30

หมายเหตุ

n คือ จำนวนข้อมูล

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลเวลาที่ใช้ในการตอบสนอง เวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับ และร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซเมทานอล

Test	Sample name	Thickness (mm)	Cycle	T _{res} (min)	T _{rec} (min)	%S
I	Li_PVBFCC	0.405	1 st	32.83	33.20	6.579E+06
			2 nd	15.30	6.70	2.404E+05
			3 rd	13.50	7.23	5.960E+04
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.380	1 st	15.35	12.80	5.972E+06
			2 nd	4.90	10.05	1.254E+05
			3 rd	4.90	9.93	1.275E+05
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.385	1 st	9.70	14.75	5.120E+06
			2 nd	3.65	11.65	1.318E+05
			3 rd	2.90	8.55	1.366E+05
	Li_BPSFCC	0.395	1 st	13.65	10.30	3.487E+06
			2 nd	5.55	9.95	7.059E+04
			3 rd	5.80	7.85	1.077E+05
II	Li_PVBFCC	0.390	1 st	20.20	22.35	6.023E+06
			2 nd	12.30	7.50	1.006E+05
			3 rd	10.18	7.40	9.652E+04
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.410	1 st	16.32	15.42	4.635E+06
			2 nd	5.40	13.30	1.076E+05
			3 rd	5.00	10.45	1.103E+05
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.350	1 st	13.18	14.80	3.917E+06
			2 nd	4.50	11.15	1.280E+05
			3 rd	2.50	8.95	1.155E+05
	Li_BPSFCC	0.365	1 st	11.67	14.00	2.283E+06
			2 nd	6.20	12.55	7.635E+04
			3 rd	4.75	10.35	6.672E+04

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนก่อนการผ่านก๊าซตัวอย่างและเวลาเริ่มต้นการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตน

Test	Sample name	Thickness (mm)	Cycle	Begin			
				T _{res,begin} (min)	I _{avg} (Amp)	SD	n
I	Li_PVBFCC	0.350	1 st	0.00	3.378E-12	xxx	1
			2 nd	60.00	4.476E-10	1.058E-11	25
			3 rd	120.55	4.377E-10	1.321E-11	26
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.370	1 st	0.00	3.471E-12	xxx	1
			2 nd	69.05	3.593E-10	1.804E-12	18
			3 rd	120.55	3.619E-10	5.304E-12	13
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.375	1 st	0.00	3.366E-12	xxx	1
			2 nd	80.00	2.056E-10	8.036E-12	44
			3 rd	166.30	3.175E-10	7.968E-11	60
	Li_BPSFCC	0.385	1 st	0.00	3.393E-12	xxx	1
			2 nd	80.45	4.958E-12	5.036E-13	53
			3 rd	140.50	5.065E-12	4.270E-13	31
II	Li_PVBFCC	0.390	1 st	3.08	4.833E-12	1.635E-12	7
			2 nd	70.10	4.458E-10	2.124E-11	28
			3 rd	130.20	4.019E-10	3.444E-11	27
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.365	1 st	3.50	4.875E-12	1.858E-12	8
			2 nd	50.10	2.526E-10	4.603E-12	22
			3 rd	90.03	2.360E-10	8.973E-12	22
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.380	1 st	2.00	4.103E-12	1.028E-12	5
			2 nd	60.00	2.051E-10	2.317E-12	21
			3 rd	100.00	2.073E-10	9.651E-12	34
	Li_BPSFCC	0.390	1 st	2.53	4.289E-12	1.505E-12	6
			2 nd	70.05	7.256E-12	1.815E-13	28
			3 rd	130.05	8.504E-12	3.167E-14	29

หมายเหตุ

xxx คือ ข้อมูลที่ไม่สามารถหาค่า SD ได้ เนื่องจากข้อมูลมีเพียงค่าเดียว

n คือ จำนวนข้อมูล

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซตัวอย่างและเวลาสิ้นสุดการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างและเวลาเริ่มต้นการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตน

Test	Sample name	Thickness (mm)	Cycle	Equilibrium				
				T _{res,end} (min)	I _{avg} (Amp)	SD	n	T _{rec,begin} (min)
I	Li_PVBFCC	0.350	1 st	17.95	2.663E-08	7.484E-10	25	31.50
			2 nd	71.75	2.550E-08	1.462E-10	27	90.10
			3 rd	123.70	2.520E-08	1.967E-10	29	140.10
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.370	1 st	13.90	3.167E-08	2.272E-09	43	41.30
			2 nd	73.90	3.074E-08	9.456E-10	30	101.00
			3 rd	123.35	2.943E-08	1.874E-09	44	150.70
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.375	1 st	5.10	4.757E-08	6.562E-10	33	46.80
			2 nd	83.90	4.362E-08	4.919E-10	40	126.50
			3 rd	169.30	4.284E-08	9.237E-10	26	196.30
	Li_BPSFCC	0.385	1 st	11.10	7.557E-08	4.614E-09	59	41.75
			2 nd	82.95	5.967E-08	2.263E-09	55	111.10
			3 rd	143.35	5.761E-08	1.628E-09	64	180.95
II	Li_PVBFCC	0.390	1 st	23.40	2.525E-08	6.476E-10	34	42.10
			2 nd	76.80	2.437E-08	8.679E-10	37	100.50
			3 rd	136.15	2.464E-08	9.189E-10	39	160.00
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.365	1 st	9.35	3.122E-08	1.630E-09	28	30.85
			2 nd	55.15	3.273E-08	8.354E-10	27	70.28
			3 rd	93.40	3.298E-08	1.070E-09	33	110.55
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.380	1 st	7.20	4.423E-08	1.560E-09	48	40.70
			2 nd	62.30	4.261E-08	8.038E-10	26	80.25
			3 rd	102.95	4.331E-08	1.490E-09	35	120.18
	Li_BPSFCC	0.390	1 st	13.10	7.822E-08	3.714E-09	44	40.10
			2 nd	74.50	7.076E-08	7.335E-10	42	100.05
			3 rd	134.40	6.781E-08	1.696E-09	42	160.70

หมายเหตุ

n คือ จำนวนข้อมูล

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนหลังการผ่านก๊าซ ตัวอย่างและเวลาสิ้นสุดการคืนตัวกลับของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตน

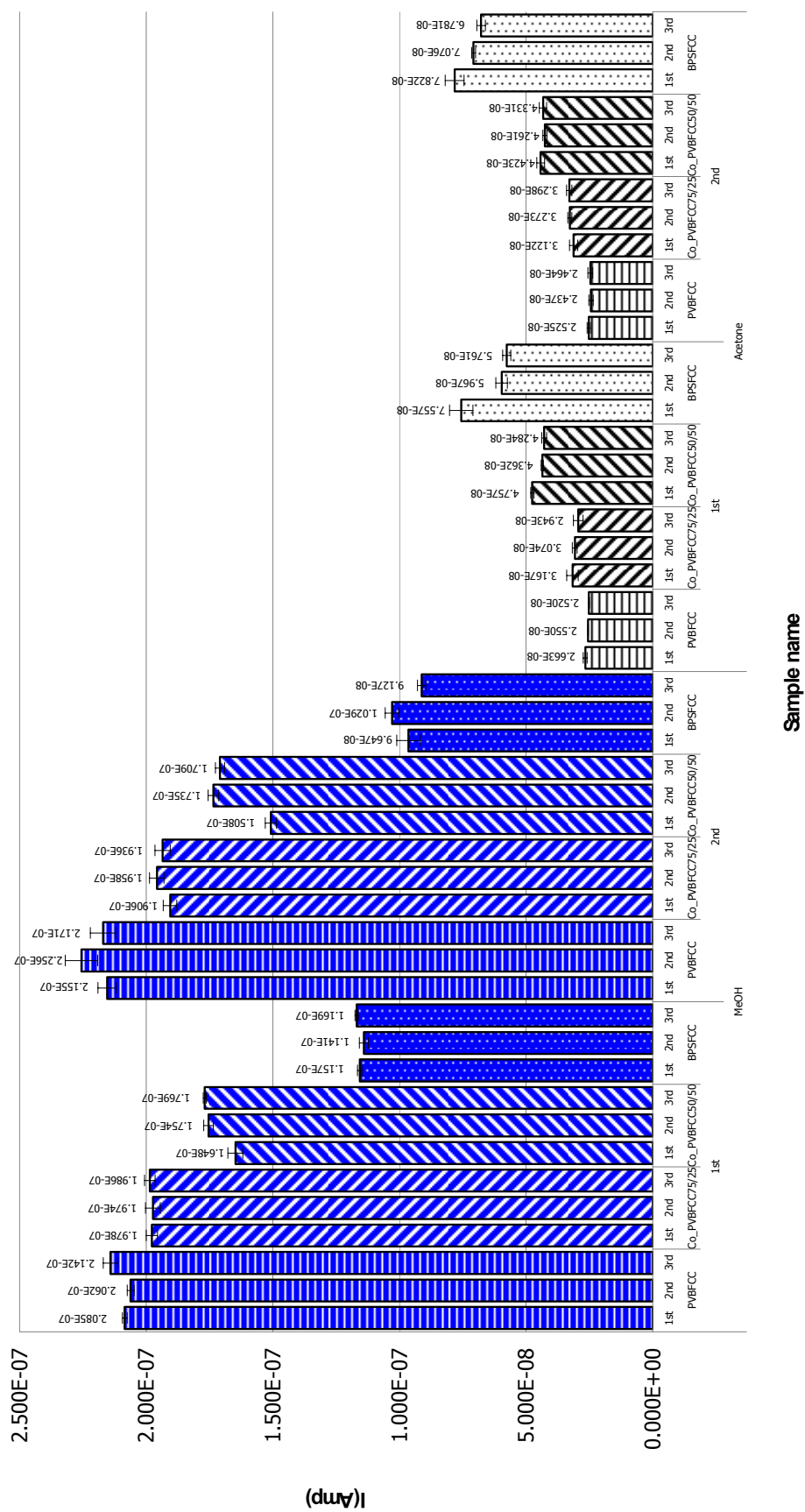
Test	Sample name	Thickness (mm)	Cycle	End			
				T _{rec,end} (min)	I _{avg} (Amp)	SD	n
I	Li_PVBFCC	0.350	1 st	42.85	4.476E-10	1.058E-11	25
			2 nd	102.40	4.377E-10	1.321E-11	26
			3 rd	150.40	4.568E-10	1.958E-11	20
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.370	1 st	55.97	3.593E-10	1.804E-12	18
			2 nd	109.00	3.619E-10	5.304E-12	13
			3 rd	155.90	3.303E-10	1.984E-11	39
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.375	1 st	50.90	2.056E-10	8.036E-12	44
			2 nd	131.00	3.175E-10	7.968E-11	60
			3 rd	199.90	2.727E-10	5.417E-11	42
	Li_BPSFCC	0.385	1 st	53.60	4.958E-12	5.036E-13	53
			2 nd	119.75	5.065E-12	4.270E-13	31
			3 rd	185.00	4.366E-12	2.894E-13	41
II	Li_PVBFCC	0.390	1 st	51.50	4.458E-10	2.124E-11	28
			2 nd	111.90	4.019E-10	3.444E-11	27
			3 rd	168.60	4.449E-10	2.063E-11	32
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.365	1 st	39.50	2.526E-10	4.603E-12	22
			2 nd	79.40	2.360E-10	8.973E-12	22
			3 rd	117.35	2.491E-10	1.512E-11	26
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.380	1 st	45.00	2.051E-10	2.317E-12	21
			2 nd	83.50	2.073E-10	9.651E-12	34
			3 rd	123.00	2.076E-10	3.791E-12	34
	Li_BPSFCC	0.390	1 st	51.45	7.256E-12	1.815E-13	28
			2 nd	110.85	8.504E-12	3.167E-14	29
			3 rd	168.60	8.127E-12	7.262E-14	33

หมายเหตุ

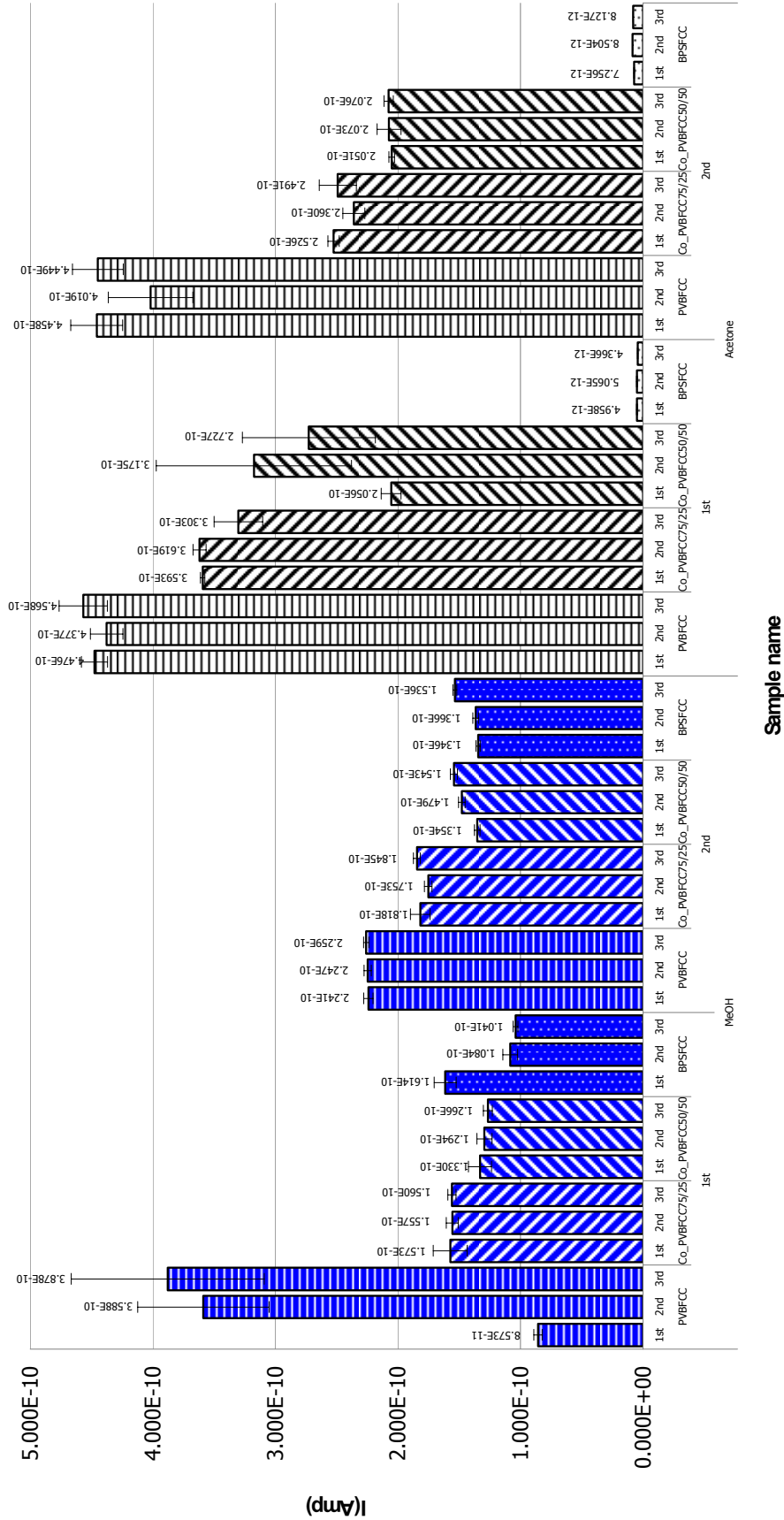
n คือ จำนวนข้อมูล

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลเวลาที่ใช้ในการตอบสนอง เวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลับ และร้อยละการตอบสนองต่อก๊าซตัวอย่างของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในการทดสอบกับก๊าซอะซิโตน

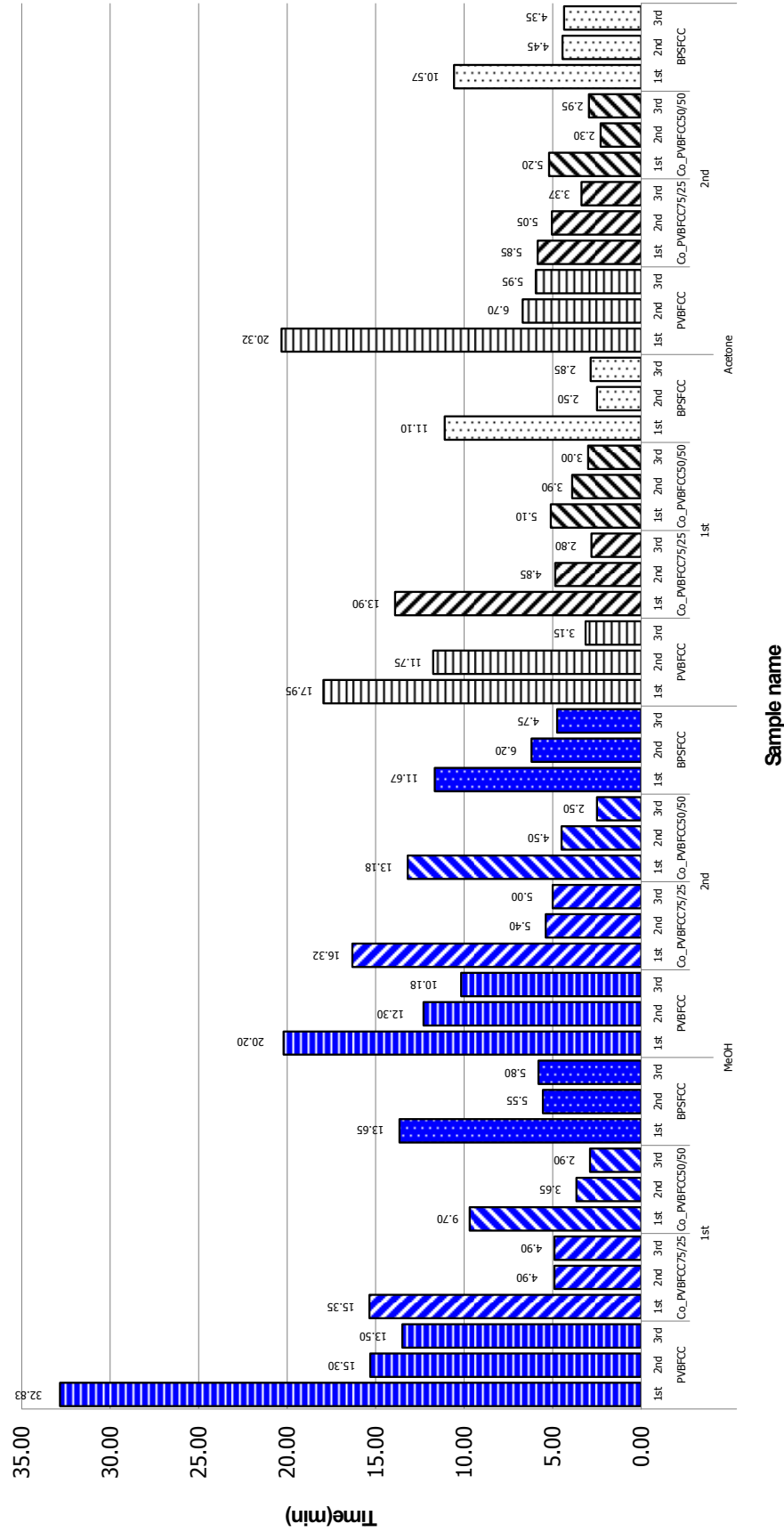
Test	Sample name	Thickness (mm)	Cycle	T _{res} (min)	T _{rec} (min)	%S
I	Li_PVBFCC	0.405	1 st	17.95	11.35	7.882E+05
			2 nd	11.75	12.30	5.597E+03
			3 rd	3.15	10.30	5.657E+03
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.380	1 st	13.90	14.67	9.123E+05
			2 nd	4.85	8.00	8.456E+03
			3 rd	2.80	5.20	8.032E+03
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.385	1 st	5.10	4.10	1.413E+06
			2 nd	3.90	4.50	2.112E+04
			3 rd	3.00	3.60	1.339E+04
	Li_BPSFCC	0.395	1 st	11.10	11.85	2.227E+06
			2 nd	2.50	8.65	1.203E+06
			3 rd	2.85	4.05	1.137E+06
II	Li_PVBFCC	0.390	1 st	20.32	9.40	5.223E+05
			2 nd	6.70	11.40	5.367E+03
			3 rd	5.95	8.60	6.031E+03
	Li_Co-PVBFCC75/25	0.410	1 st	5.85	8.65	6.403E+05
			2 nd	5.05	9.12	1.286E+04
			3 rd	3.37	6.80	1.387E+04
	Li_Co-PVBFCC50/50	0.350	1 st	5.20	4.30	1.078E+06
			2 nd	2.30	3.25	2.068E+04
			3 rd	2.95	2.82	2.079E+04
	Li_BPSFCC	0.365	1 st	10.57	11.35	1.824E+06
			2 nd	4.45	10.80	9.751E+05
			3 rd	4.35	7.90	7.973E+05



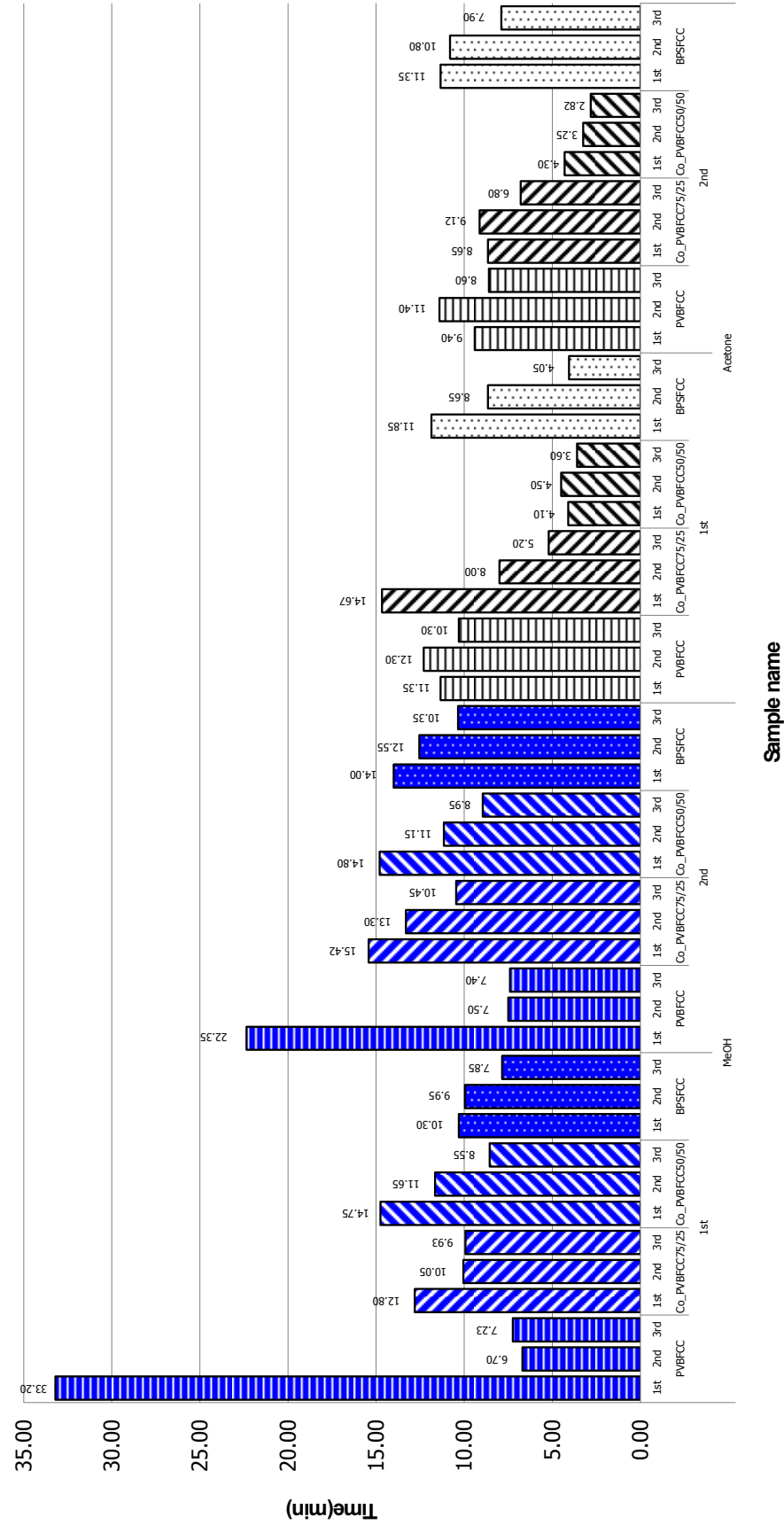
รูปที่ ข.124 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของพอลิเมอร์แต่ละชนิด



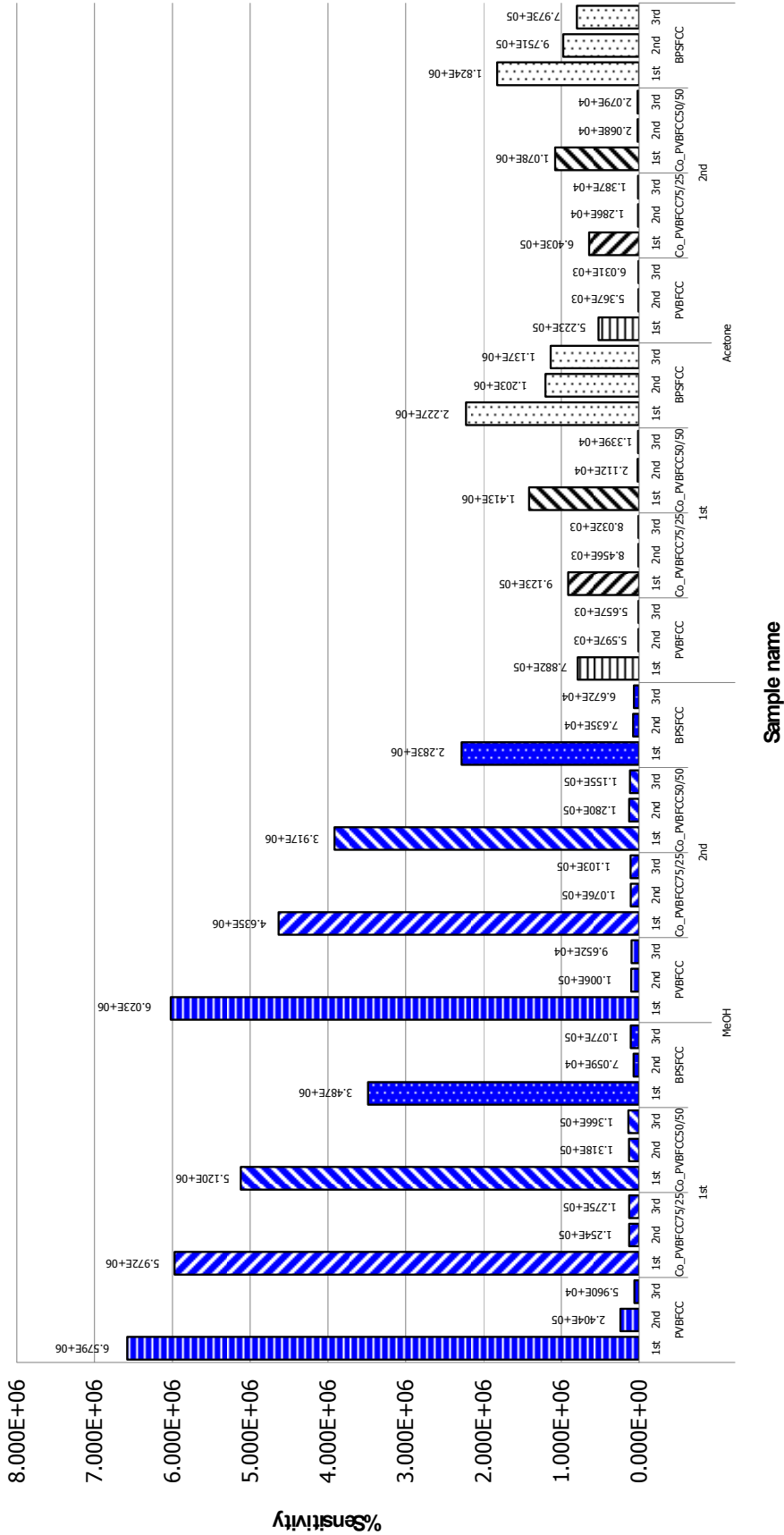
รูปที่ ข.125 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดสมดุลในบรรยากาศของไนโตรเจนของพอลิเมอร์แต่ละชนิด(หลังการผ่านก๊าซตัวอย่าง)



รูปที่ ข.126 เวลาที่ใช้ในการทดสอบของตัวอย่าง(T_{res}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด



รูปที่ จ.127 เวลาที่ใช้ในการคืนตัวกลายสภาพหลังจากการผ่านก๊าซตัวอย่าง(T_{rec}) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด



รูปที่ จ.128 ร้อยละการตอบสนองต่อการดูดซับ (%S) ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล

นายโกสินทร์ หาชะวี

วันเกิด

24 เมษายน 2525

ประวัติการศึกษา

ระดับประถมศึกษา

โรงเรียนวัดท่าพระ จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น

โรงเรียนวัดประดู่ในทรงธรรม จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนวัดประดู่ในทรงธรรม จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

ระดับปริญญาโท

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

ประวัติการฝึกงาน

กิจกรรมฝึกงานเทคโนโลยีสะอาด ประจำปี 2547

เครือข่ายมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ณ ห้างหุ้นส่วน

จำกัด หลุยส์ พลาสติก

ที่อยู่ติดต่อได้

234/52 ซอยจรัญสนิทวงศ์ 2 ถนนจรัญสนิทวงศ์

แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพมหานคร

10600

โทรศัพท์

0-2467-1334

086-712-7244

E-mail address

benzene_24@hotmail.com