



โครงการ

## การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนเพื่อพัฒนาพอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์

Optimization of Polythiophene Synthesis for Developing Porphyrin-thiophene Copolymer

ชื่อนิสิต นายพบชัย พานปรุ

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนเพื่อพัฒนาพอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์

Optimization of Polythiophene Synthesis for Developing Porphyrin-thiophene Copolymer



โดย

นายพชัย พานปรุ

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เรื่อง การหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิไทโอพีนเพื่อพัฒนาพอร์ไพริน-ไทโอพีน  
โคพอลิเมอร์

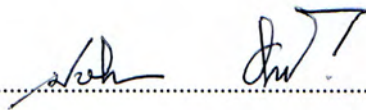
โดย นายพบชัย พานปรุ

ได้รับการอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบโครงการ

.....ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ปาริฉัตร วนลาภพัฒนา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.พัชณิตา ธรรมมงคลกิจ)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร.พรรณี สีลาดี)

รายงานฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติโดยหัวหน้าภาควิชาเคมี

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย พาราสุข)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

คุณภาพของการเขียนรายงานเล่มนี้อยู่ในระดับ

ดีมาก

ดี

พอใช้

ชื่อโครงการ การหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิไทโอพีนเพื่อพัฒนาพอร์ไพรีน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์

ชื่อนิติในโครงการ นายพบชัย พานปรุ เลขประจำตัว 5533118823

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.พีชฌิตา ธรรมรงค์กิจ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2558

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาภาวะที่ใช้ในการพอลิเมอไรเซชันของไปไทโอพีน และ พอร์ไพรีน-ไทโอพีน โดยมีภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ ได้แก่ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี, ทางเคมีเชิงแสง และทางเคมีเชิงแสงที่มีไอโอดีน และทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารผสมของปฏิกิริยาด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีและแมสสเปกโตรเมทรี ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าภาวะที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี (เพอร์ริก(III) คลอไรด์, สารละลายไอโอดีน และไอของไอโอดีน), การกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร, การกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ในภาวะที่มีการเติมไอโอดีน ที่น่าจะสามารถทำให้เกิดการพอลิเมอไรเซชันของไปไทโอพีนได้ โดยเมื่อนำภาวะดังกล่าวมาใช้กับพอร์ไพรีนเป้าหมาย ผลการวิเคราะห์ด้วยแมสสเปกโตรเมทรี ชี้ให้เห็นว่าภาวะที่มีการกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร สามารถทำให้พอร์ไพรีนเป้าหมายเกิดไดเมอร์ได้ ซึ่งผลจากการศึกษาดังกล่าวทำให้ได้แนวทางที่สำคัญต่อการปรับใช้เพื่อสังเคราะห์พอร์ไพรีน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์ต่อไป

คำสำคัญ: พอร์ไพรีน, พอลิไทโอพีน, พอลิเมอร์, ไทโอพีน

Title Optimization of Polythiophene Synthesis for Developing Porphyrin-thiophene Copolymer

Student name Mr. Popchai Panpru Student ID 5533118823

Advisor name Associate Professor Dr. Patchanita Thamyongkit

Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Academic Year 2015

### Abstract

This research aims to developing condition for polymerization of bithiophene and porphyrin-thiophene derivatives under chemically catalytic, and photochemical conditions with and without iodine. The reaction mixtures were characterized by nuclear magnetic resonance spectroscopy and mass spectrometry. The results indicated that the conditions possibly leading to the polymerization of bithiophene were the use of chemical catalysis ( $\text{FeCl}_3$ , iodine solution and iodine vapor), and photoexcitation by 254-nm light with and without iodine. When applying these conditions to the target porphyrin, the analysis by mass spectrometry showed that photoexcitation by 254-nm light resulted in the formation of its dimer. The result from this study provides the important guideline for using in the further preparation of the porphyrin-thiophene copolymer.

Keywords: porphyrin, polythiophene, polymer, thiophene

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พัชณิดา ธรรมรงค์กิจเป็นอย่างยิ่งที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำที่ดีเสมอมาในขั้นตอนต่างๆ ของงานวิจัย แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายวิทวัส แก้วส่องแสง นางสาวหทัยชนก ศีลาเจริญ รวมถึงพี่ๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ แนะนำวิธีการดำเนินงานและวิธีใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ

ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจตลอดการทำวิจัย

สุดท้ายผู้วิจัยขอบคุณโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ของคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

บทคัดย่อ .....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา มูลเหตุจูงใจ ทฤษฎี และความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้อง	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	7
บทที่ 2 การทดลอง.....	8
2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	8
2.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	8
2.1.2 สารเคมี	8
2.1.2.1 สารตั้งต้นและสารสำหรับปฏิกิริยา	8
2.1.2.2 ตัวทำละลาย	9
2.2 ขั้นตอนการทดลอง	9
2.2.1 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟินจาก 2,2'-ไบไทโอฟิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีแบบเอกพันธ์	9
ภาวะที่ 1) โดยใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์	9
ภาวะที่ 2) โดยใช้ไอโอดีน	10
2.2.2 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟินจาก 2,2'-ไบไทโอฟินทางเคมีเชิงแสง	10
ภาวะที่ 1) ในภาวะที่มีไอโอดีน	10
ภาวะที่ 2) ในภาวะที่ไม่มีไอโอดีน	11
2.2.3 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟินจาก 2,2'-ไบไทโอฟินทางเคมีแบบวิวิธพันธุ์	11
2.2.4 การสังเคราะห์พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟิน) (PEDOT)	12
2.2.5 การสังเคราะห์ [5,10,15,20-tetra(2,2'-bithiophen-5-yl)porphyrinato]zinc (Zn-T2TP)	12
2.2.6 การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟินโคพอลิเมอร์	13

<b>บทที่ 3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....</b>	<b>15</b>
3.1 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนจาก 2,2'-ไบไทโอฟีน ทางเคมีแบบเอกพันธ์	15
ภาวะที่ 1) โดยใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์	15
ภาวะที่ 2) โดยใช้ไอโอดีน	17
3.2 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนจาก 2,2'-ไบไทโอฟีนทางเคมีเชิงแสง	18
3.2.1 ในภาวะที่มีไอโอดีน	18
ภาวะที่ 1) ใช้หลอดกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร	19
ภาวะที่ 2) ใช้หลอดกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร	20
ภาวะที่ 3) ใช้หลอดกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 400–1,000 นาโนเมตร	21
3.2.2 ในภาวะที่ไม่มีไอโอดีน	21
ภาวะที่ 1) ใช้หลอดกำเนิดแสง 254 นาโนเมตร	22
ภาวะที่ 2) ใช้หลอดกำเนิดแสง 400 นาโนเมตร	22
ภาวะที่ 3) ใช้หลอดกำเนิดแสง 400–1,000 นาโนเมตร	23
3.3 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนจาก 2,2'-ไบไทโอฟีนทางเคมีแบบบิวิธพันธ์	23
3.4 การสังเคราะห์พอลิ(3,4-เอทิลีนไอออกซีไทโอฟีน) (PEDOT)	25
3.5 การสังเคราะห์ [5,10,15,20-tetra(2,2'-bithiophen-5-yl)pophyrinato]zinc (Zn-T2TP)	27
3.6 การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์	29
3.6.1 การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์ทางเคมีโดยใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์	29
3.6.2 การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์ทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่มีไอโอดีน	30
3.6.3 การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์ทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่ไม่มีไอโอดีน	32
<b>บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง.....</b>	<b>34</b>
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>35</b>



## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่ 1-1	องค์ประกอบหลักของเซลล์สุริยะอินทรีย์แบบฟิล์มบาง	2
รูปที่ 1-2	โครงสร้างของพอร์ไฟริน	4
รูปที่ 1-3	โครงสร้างของอนุพันธ์พอร์ไฟริน ที่พัฒนาโดย Li และคณะ	4
รูปที่ 1-4	โครงสร้างของอนุพันธ์พอร์ไฟริน ที่พัฒนาโดย Zhou และคณะ	5
รูปที่ 1-5	โครงสร้างของอนุพันธ์พอร์ไฟริน ที่พัฒนาโดย Wang และคณะ	5
รูปที่ 1-6	โครงสร้างของโมเลกุล PBDT88-TQ	6
รูปที่ 1-7	โครงสร้างของพอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์	7
รูปที่ 3-1	ฟิล์มของพอลิไทโอพีนจากการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมงถึง 24 ชั่วโมง	16
รูปที่ 3-2	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่ได้จากปฏิกิริยาที่มีเฟอร์ริก(III) คลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ	16
รูปที่ 3-3	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายในภาวะสารละลายไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ	17
รูปที่ 3-4	MALDI-TOF แมสสเปกตรัมของสารผสมของปฏิกิริยาที่ได้จากปฏิกิริยาที่ใช้สารละลายไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	18
รูปที่ 3-5	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายของปฏิกิริยาที่มีการฉายแสงที่ 254 นาโนเมตร ในภาวะที่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ	20
รูปที่ 3-6	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายของปฏิกิริยาที่มีการฉายแสงที่ 400 นาโนเมตร ในภาวะที่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ	20
รูปที่ 3-7	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายของปฏิกิริยาที่มีการฉายแสงที่ 400-1,000 นาโนเมตร ในภาวะที่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ	21
รูปที่ 3-8	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายของปฏิกิริยาที่มีการฉายแสงที่ 254 นาโนเมตร ในภาวะที่ไม่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ	22
รูปที่ 3-9	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายของปฏิกิริยาที่มีการฉายแสงที่ 400 นาโนเมตร ในภาวะที่ไม่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ	23
รูปที่ 3-10	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายของปฏิกิริยาที่มีการฉายแสงที่ 400-1,000 นาโนเมตร ในภาวะที่ไม่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ	23
รูปที่ 3-11	การสังเคราะห์พอลิไทโอพีนโดยใช้ไอของไอโอดีนในคิวเวทท์	24
รูปที่ 3-12	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มของไทโอพีนในภาวะมีไอของไอโอดีน ที่เวลาต่างๆ	25
รูปที่ 3-13	ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ EDOT ที่ภาวะต่างๆ	26
รูปที่ 3-14	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร Zn-T2TP ที่สังเคราะห์ได้ในคลอโรฟอร์ม	28
รูปที่ 3-15	MALDI-TOF แมสสเปกตรัมของสาร Zn-T2TP ที่สังเคราะห์ได้	28
รูปที่ 3-16	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์พอร์ไฟรินไทโอพีนโคพอลิเมอร์โดยใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์	30

รูปที่ 3-17 MALDI-TOF แมสสเปกตรัมของสารผสมของปฏิกิริยา จากปฏิกิริยาในภาวะที่ใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์ 30

รูปที่ 3-18 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารผสมของปฏิกิริยาจากการสังเคราะห์ พอร์ไพรินไทโอพีนโคพอร์เมอร์ ใน ภาวะใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร และไอโอดีน 31

รูปที่ 3-19 MALDI-TOF แมสสเปกตรัมของสารผสมของปฏิกิริยา โดยใช้ภาวะที่ใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร และใช้ไอโอดีน 32

รูปที่ 3-20 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารผสมของปฏิกิริยาจากสังเคราะห์พอร์ไพรินไทโอพีนโคพอร์เมอร์ในภาวะใช้ แสงที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร 33

รูปที่ 3-21 MALDI-TOF แมสสเปกตรัมของสารผสมของปฏิกิริยา จากปฏิกิริยาใช้ภาวะที่ใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร 33



ภาควิชาเคมี  
 คณะวิทยาศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญแผนภาพ

แผนภาพที่ 2-1 การสังเคราะห์พอลิไทโอพีนในภาวะที่มีเฟอร์ริก(III) คลอไรด์	9
แผนภาพที่ 2-2 การสังเคราะห์พอลิไทโอพีนจาก 2,2'-ไบไทโอพีนในภาวะที่มีไอโอดีน	10
แผนภาพที่ 2-3 การสังเคราะห์พอลิไทโอพีนทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่มีไอโอดีน	10
แผนภาพที่ 2-4 การสังเคราะห์พอลิไทโอพีนทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่ไม่มีไอโอดีน	11
แผนภาพที่ 2-5 การสังเคราะห์พอลิไทโอพีนทางเคมีแบบวิวิธพันธุ์	11
แผนภาพที่ 2-6 การสังเคราะห์พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอพีน)	12
แผนภาพที่ 2-7 การสังเคราะห์สารประกอบพอร์ไฟริน-ไทโอพีนเป้าหมาย	12
แผนภาพที่ 2-8 การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์	13
แผนภาพที่ 3-1 การสังเคราะห์พอลิไทโอพีนทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่ใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์	15
แผนภาพที่ 3-2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ 2,2'-ไบไทโอพีน ในภาวะที่มีเฟอร์ริก(III) คลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	15
แผนภาพที่ 3-3 การสังเคราะห์พอลิไทโอพีนทางเคมีในภาวะที่ใช้ไอโอดีน	17
แผนภาพที่ 3-4 การสังเคราะห์พอลิไทโอพีนทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่ใช้ไอโอดีน	18
แผนภาพที่ 3-5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะที่มีไอโอดีน	19
แผนภาพที่ 3-6 การสังเคราะห์พอลิไทโอพีนทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่ใช้ไอโอดีน	21
แผนภาพที่ 3-7 การสังเคราะห์พอลิไทโอพีนในภาวะที่มีไอของไอโอดีน	24
แผนภาพที่ 3-8 สมการการสังเคราะห์ พอร์ไฟริน-ไทโอพีน Zn-T2TP	27
แผนภาพที่ 3-9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ T2TP	27
แผนภาพที่ 3-10 สมการการสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์	29
แผนภาพที่ 3-11 สมการการสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์โดยใช้แสงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ในภาวะที่มีไอโอดีน	31
แผนภาพที่ 3-12 สมการการสังเคราะห์ พอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์ ทางเคมีเชิงแสงโดยใช้แสงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร	32

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

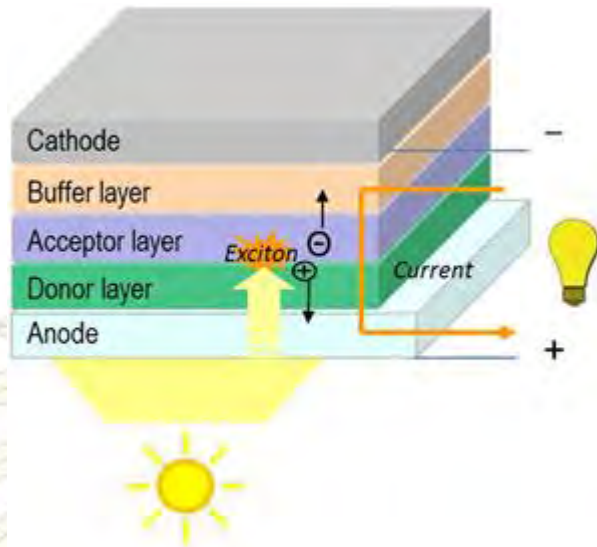
#### 1.1 ความเป็นมา มุมเหตุจูงใจ ทฤษฎี และความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาด้านพลังงาน กล่าวคือ อัตราการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยแหล่งพลังงานหลัก คือ พลังงานซากดึกดำบรรพ์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดภาวะขาดแคลนพลังงานในอนาคต ทำให้การศึกษาด้านพลังงานทดแทน ยกตัวอย่างเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานความร้อนใต้พิภพ ได้รับความนิยมนำมาใช้มากขึ้น ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญแหล่งหนึ่ง เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและไม่มีวันหมด โดยเราสามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ได้โดยการใช้เซลล์สุริยะที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์สุริยะจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะนำไปใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าแทนการผลิตโดยใช้ทรัพยากรธรรมชาติ

เซลล์สุริยะแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เซลล์สุริยะอินทรีย์ และเซลล์สุริยะอินทรีย์ โดยที่เซลล์สุริยะอินทรีย์มีจุดเด่นกว่าเซลล์สุริยะชนิดอินทรีย์ที่ใช้ทั่วไป คือ มีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่า มีขั้นตอนการผลิตที่ง่าย สามารถผลิตลงบนพื้นผิวที่นอกเหนือจากผิวกระจกได้ เช่น พอลิเมอร์ที่มีสมบัติโปร่งใส นั้นทำให้เซลล์สุริยะอินทรีย์สามารถโค้งงอได้ อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงสมบัติของเซลล์สุริยะอินทรีย์ได้ง่าย โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารไวแสง<sup>1</sup> จึงทำให้เซลล์สุริยะอินทรีย์เป็นที่สนใจและได้รับการพัฒนาเป็นอย่างดีแพร่หลายในปัจจุบัน

เซลล์สุริยะอินทรีย์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทฟิล์มบาง (Thin film) และประเภทสีย้อมไวแสง (Dye Sensitized Solar Cell; DSSC) ซึ่งสองประเภทนี้แตกต่างกันที่หลักการทำงานและชนิดขององค์ประกอบของเซลล์ โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุอินทรีย์สำหรับใช้ในเซลล์สุริยะแบบฟิล์มบาง จึงขอกกล่าวถึงแต่เซลล์ประเภทนี้ซึ่งมีองค์ประกอบหลักดังแสดงในรูป 1-1

คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1-1 องค์ประกอบหลักของเซลล์สุริยะอินทรีย์แบบฟิล์มบาง<sup>2</sup>

ส่วนประกอบสำคัญของเซลล์สุริยะอินทรีย์คือ ชั้นแอโนด ชั้นแคโทด ชั้นสารประกอบไวแสงชนิดให้อิเล็กตรอน ชั้นสารประกอบชนิดรับอิเล็กตรอน และชั้นเพิ่มเติมอื่นๆ

1. ชั้นไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์สุริยะอินทรีย์มี 2 ชั้น<sup>3</sup> ชั้นแอโนดโดยทั่วไปนิยมใช้ อินเดียมทินออกไซด์ (Indium tin oxide; ITO) เคลือบอยู่บนผิวกระจก ซึ่งมีสมบัติโปร่งแสงทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนจากวงจรภายนอกเข้าสู่เซลล์สุริยะ ส่วนชั้นแคโทด นิยมใช้เป็นโลหะบางๆ เช่น อะลูมิเนียม ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนจากเซลล์ออกสู่วงจรภายนอกเซลล์
2. ชั้นสารไวแสง ซึ่งมีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ โดยเฉพาะช่วงที่ตามองเห็น ทำให้ให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นและส่งผ่านไปยังวัสดุรับอิเล็กตรอน จะเกิดช่องว่างหรือโฮล (hole) ขึ้นซึ่งเป็นประจุบวกในชั้นสาร<sup>4</sup> เพราะฉะนั้นไม่ว่าจะเป็นสารประกอบชนิดสีย้อมโมเลกุลเดี่ยว เช่น อนุพันธ์ของพอร์ไฟริน (porphyrin) และสารประกอบชนิดพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เช่น อนุพันธ์ของพอลิไทโอฟีน และอนุพันธ์ของพอลิพีร์โรล เป็นต้น
3. ชั้นสารประกอบชนิดรับอิเล็กตรอน คือ ชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดี<sup>5</sup> เช่น อนุพันธ์ของฟูลเลอร์รีน (fullerene) แกรไฟต์ และท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) เป็นต้น
4. ชั้นเพิ่มเติมอื่นๆ คือ ชั้นที่เพิ่มเติมเข้ามาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งผ่านอิเล็กตรอน หรือป้องกันการรวมตัวกลับคืนระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล<sup>6</sup> เช่น พอลิไทโอฟีน พอลิพีร์โรล ลิเทียมฟลูออไรด์ ซึ่งสารกลุ่มนี้จะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้

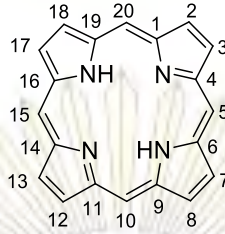
หลักการการทำงานของเซลล์สุริยะอินทรีย์แบบฟิล์มบางสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนได้แก่

1. สารประกอบไวแสงชนิดให้อิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้อิเล็กตรอนอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นเกิดเป็นอนุภาคเอ็กซิตอน (คู่ประจุอิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่ด้วยกันและเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน)
2. อนุภาคเอ็กซิตอนแพร่ไปโดยการแทนที่จากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งในชั้นของสารไวแสงชนิดให้อิเล็กตรอน จนไปถึงที่ผิวสัมผัสกับสารประกอบชนิดรับอิเล็กตรอน
3. เอ็กซิตอนถูกแยกออกเป็นโฮล และอิเล็กตรอน โฮลจะแพร่ไปในชั้นสารประกอบไวแสงชนิดให้อิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนไปยังสารประกอบชนิดรับอิเล็กตรอน
4. อิเล็กตรอนถูกถ่ายโอนไปยังขั้วไฟฟ้า และส่งไปสู่วงจรภายนอก
5. อิเล็กตรอนวิ่งกลับมายังเซลล์สุริยะอินทรีย์ โดยเติมเต็มโฮลที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 ทำให้กระแสครบวงจร

พอร์ไฟรินเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีระบบไพคอนจูเกต ( $\pi$ -conjugated system) ขนาดใหญ่ตลอดทั้งวง ซึ่งพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น คลอโรฟิลล์ในพืชนั้นซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของพอร์ไฟรินกับเกลือของแมกนีเซียมทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงในพืช<sup>7</sup> และฮีมีบี (Heme B) ในเลือดซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างพอร์ไฟรินกับเกลือของเหล็ก ทำหน้าที่ขนส่งออกซิเจนในระบบไหลเวียนโลหิต<sup>8</sup> เนื่องจากพอร์ไฟรินมีระบบไพคอนจูเกตขนาดใหญ่ ทำให้สารประกอบในกลุ่มพอร์ไฟรินมีสีเข้มอีกทั้งพอร์ไฟรินยังมีสมบัติเชิงแสงที่ดี กล่าวคือสามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ดี จากสมบัติที่ดีของพอร์ไฟรินข้างต้น จึงมีการศึกษาการนำพอร์ไฟรินไปใช้เป็นสารไวแสงในเซลล์สุริยะอินทรีย์อย่างกว้างขวาง

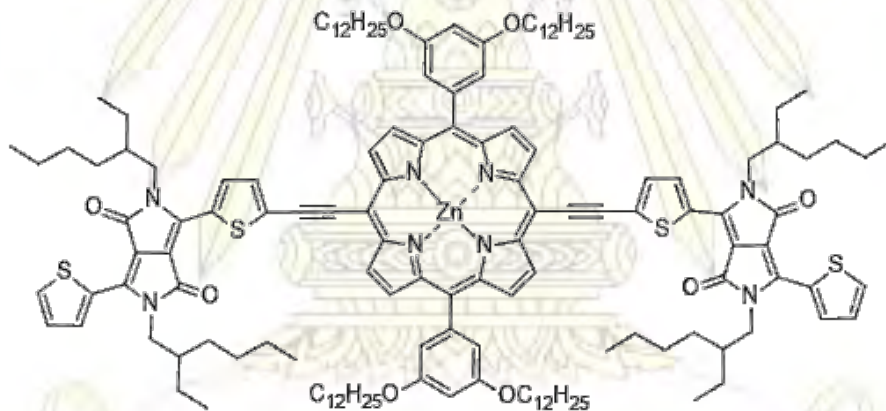
พอร์ไฟรินมีโครงสร้างหลักประกอบด้วยวงพีโรลสี่วงเชื่อมต่อกันด้วยมีไนด์คาร์บอนสี่วงต่อกันเป็นวง โดยมีพันธะคู่สลับเต็มตลอดทั้งโมเลกุล ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านระบบไพคอนจูเกตได้ตลอดทั้งวง (electron delocalization) ซึ่งระบบคอนจูเกตของโมเลกุลมีทั้งหมด 22 ไพอิเล็กตรอน แต่ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการดีโกล์โลซีในวงมีเพียง 18 อิเล็กตรอน หมู่แทนที่ตำแหน่งต่างๆ ของโมเลกุลพอร์ไฟริน แบ่งเป็น 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งมีโซ (ตำแหน่งที่ 5, 10, 15, 20) และตำแหน่งปีตา (ตำแหน่งที่ 2, 3, 7, 8, 12, 13, 17, 18) ดังรูปที่ 1-2

คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



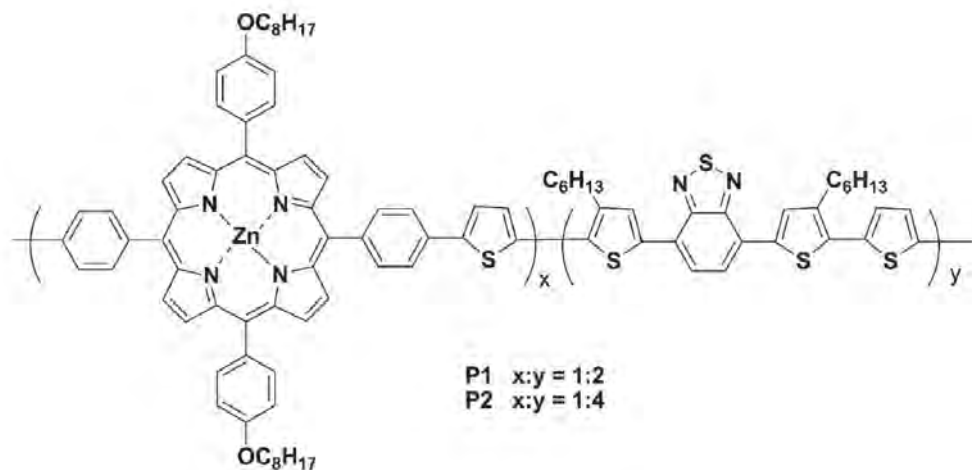
รูปที่ 1-2 โครงสร้างของพอร์ไฟริน

การดัดแปลงโครงสร้างของโมเลกุลพอร์ไฟรินนั้นโดยทั่วไปจะมีการแทนที่ที่ตำแหน่งมีโซและตำแหน่งปีต้าเพื่อที่จะปรับปรุงให้มีสมบัติเชิงแสง และทางกายภาพดีขึ้น เช่น ในปี 2013 Li และคณะ<sup>9</sup> ได้สังเคราะห์พอร์ไฟรินที่ถูกแทนที่ตำแหน่งมีโซ โดยใช้หมู่แทนที่เป็น diketopyrrolopyrrole (DPP) และหมู่ 3,5-di(dodecyloxy)phenyl ดังรูปที่ 1-3 ทำให้โมเลกุลของสารพอร์ไฟรินมีช่วงการดูดกลืนแสงที่กว้างขึ้น และมีการเติมไพริดีนเพื่อทำให้ผิวของฟิล์มเรียบ ทำให้ได้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะสูงขึ้น



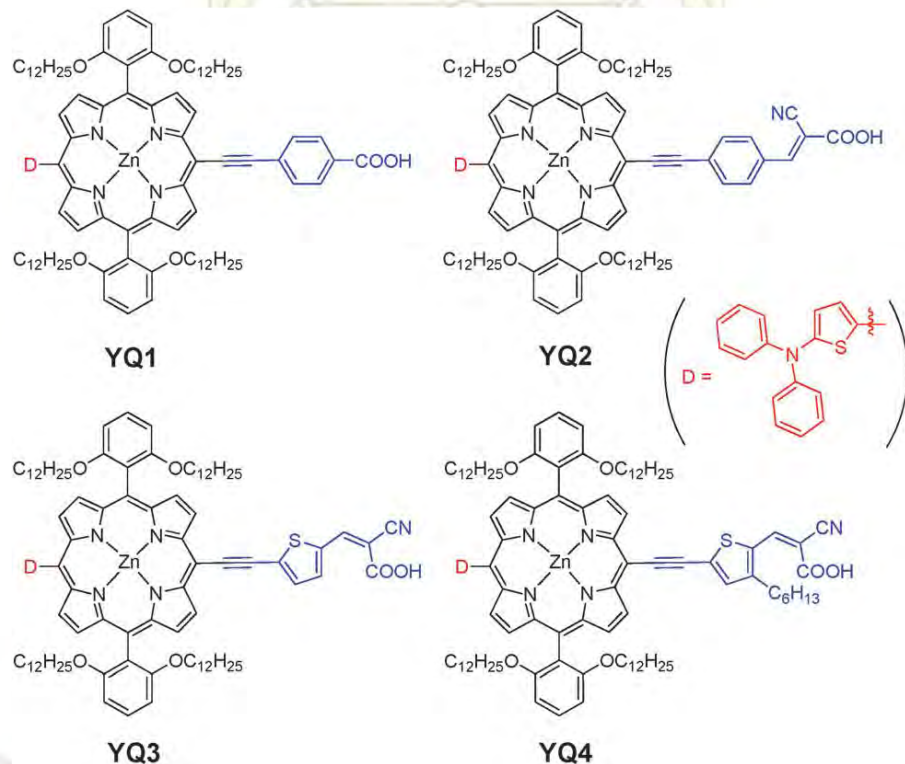
รูปที่ 1-3 โครงสร้างของอนุพันธ์พอร์ไฟริน ที่พัฒนาโดย Li และคณะ<sup>9</sup>

ในปี 2011 Zhou และคณะ<sup>10</sup> ได้สังเคราะห์โคพอลิเมอร์ระหว่างพอร์ไฟริน (P1) และไทโอฟีน (P2) โดยมีโครงสร้างดังรูปที่ 1-4 เพื่อใช้เป็นสารประกอบไวแสงในเซลล์สุริยะอินทรีย์ในอัตราส่วน 1:2 และ 1:4 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สูงที่สุด พบว่าอัตราส่วน 1:4 ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 0.91% เนื่องจากการดูดกลืนแสงมีช่วงที่กว้างขึ้นและเกิด red shift ส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น



รูปที่ 1-4 โครงสร้างของอนุพันธ์พอร์ไฟริน ที่พัฒนาโดย Zhou และคณะ<sup>10</sup>

ในปี 2014 Wang และคณะ<sup>11</sup> ได้ทำการสังเคราะห์ porphyrin-based dyes มาสี่ตัว (YQ1-YQ4) ด้วย 2-diphenylaminothiophene ที่ต่ออยู่บนตำแหน่งมีโซโดยทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน จากผลการทดลองพบว่า การเติม 2-diphenylaminothiophene ลงในโครงสร้างของวงจะทำให้เกิด red shift และกว้างขึ้นของแถบของการดูดกลืนแสงของสารประกอบที่ได้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานแสงของ DSSC ที่ได้มีค่าเพิ่มมากขึ้น

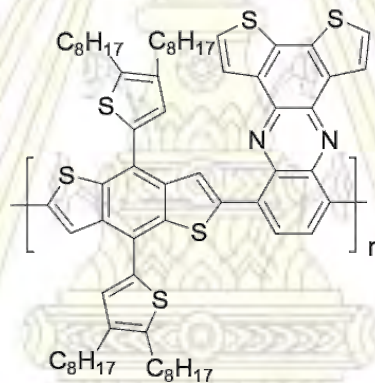


รูปที่ 1-5 โครงสร้างของอนุพันธ์พอร์ไฟริน ที่พัฒนาโดย Wang และคณะ<sup>11</sup>



ไทโอฟีนเป็นสารประกอบเฮเทอโรไซคลิกแอรอแมติกที่มีอะตอมซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไทโอฟีน คือ สารประกอบพอลิไทโอฟีน ซึ่งมีสมบัติสามารถนำไฟฟ้าได้ดี<sup>12</sup> เนื่องจากมีโพธิ์เล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ สมบัติเชิงแสงของพอลิไทโอฟีนนั้น ขึ้นกับจำนวนหน่วยย่อยของไทโอฟีน อีกทั้งสารประกอบไทโอฟีนมีความเสถียรสูง และสามารถปรับเปลี่ยนหมู่แทนที่บนวงไทโอฟีนได้ ทำให้ยังมีการวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้สารกลุ่มไทโอฟีนและพอลิไทโอฟีนกันอย่างกว้างขวาง เช่น เซลล์สุริยะ<sup>13</sup> ตัวตรวจวัดทางเคมี<sup>14</sup> และไดโอดเปล่งแสง<sup>15</sup> เป็นต้น

ในปี 2016 Fan และคณะ<sup>16</sup> ใช้โคพอลิเมอร์ poly(benzodithiophene-co-dithienobenzoxinoline) (PBDT88-TQ) ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 1-6 ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีอนุพันธ์ไทโอฟีนที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำช่วยเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านโฮล ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะอินทรีย์เพิ่มขึ้นเป็น 4.50%

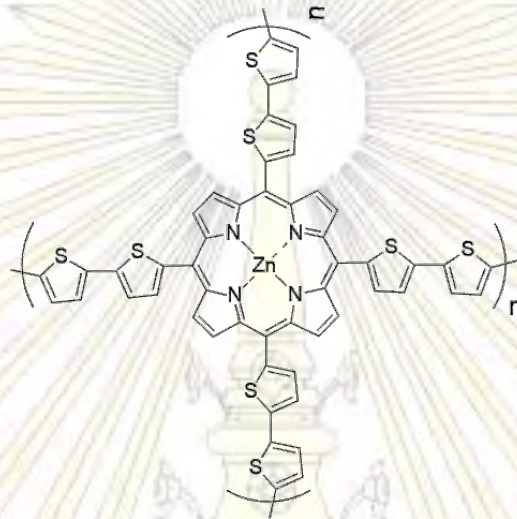


รูปที่ 1-6 โครงสร้างของโมเลกุล PBDT88-TQ

งานวิจัยดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยเห็นว่า อนุพันธ์ของพอร์ไฟรินและไทโอฟีนมีสมบัติทางกายภาพเชิงแสงและทางเคมีไฟฟ้าที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของอนุพันธ์ของพอร์ไฟรินที่มีหมู่ไปไทโอฟีนที่ตำแหน่งมีโซเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่สามารถสังเคราะห์หมู่แทนที่ได้ง่าย โดยในเบื้องต้นเริ่มจากการพัฒนาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของโมเลกุลแม่แบบ ซึ่งได้แก่ 2,2'-ไบไทโอฟีน ก่อนที่จะนำมาปรับใช้กับสารประกอบพอร์ไฟริน-ไทโอฟีนเป้าหมายต่อไป ซึ่งภาวะของพอลิเมอไรเซชันที่พิจารณา ได้แก่ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริทางเคมี การใช้ไอโอดีน และการใช้แสงกระตุ้น ทั้งแบบเอกพันธ์และวิวิธพันธ์ ซึ่งความสำเร็จในการพัฒนาภาวะดังกล่าว จะนำมาสู่ภาวะที่สามารถทำการสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนจาก 2,2'-ไบไทโอฟีน ด้วยวิธีทางเคมีและทางเคมีเชิงแสงเพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 1-7



รูปที่ 1-7 โครงสร้างของพอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การทดลอง

#### 2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

##### 2.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (nuclear magnetic resonance spectrometer)
2. เครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน (rotary evaporator)
3. ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible spectrophotometer)
4. แมสสเปกโตรมิเตอร์ (mass spectrometer)
5. เครื่องกวนแม่เหล็กแบบให้ความร้อน (hotplate and stirrer)
6. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง
7. แผ่นซิลิกาเจลบนอะลูมินัม
8. หลอดกำเนิดแสง 254 นาโนเมตร, Germicidal UV lamp-18W,
9. หลอดกำเนิดแสง 400 นาโนเมตร, Philips-20W, 59V, 0.36A
10. หลอดกำเนิดแสง 400–1,000 นาโนเมตร, Philips-75W, 12V

##### 2.1.2 สารเคมี

###### 2.1.2.1 สารตั้งต้นและสารสำหรับปฏิกิริยา

1. 2,2'-ไบไทโอฟีน-5-คาร์บอกซัลดีไฮด์ (2,2'-bithiophene-5-carboxaldehyde)
2. 2,2'-ไบไทโอฟีน (2,2'-bithiophene)
3. เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน (3,4-ethylenedioxythiophene, EDOT)
4. เฟอริก(III) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต (ferric(III) chloride hexahydrate)
5. ไพร์โรล (pyrrole)
6. ซิลิกาเจล (silica gel)
7. ซิงค์แอสซิเตท ไดไฮเดรต (zinc acetate dihydrate)
8. โซเดียมซัลเฟต แอนไฮดรัส (sodium sulfate anhydrous)
9. โซเดียมไบคาร์บอเนต (sodium bicarbonate)

10. โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride)
11. น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

#### 2.1.2.2 ตัวทำละลาย

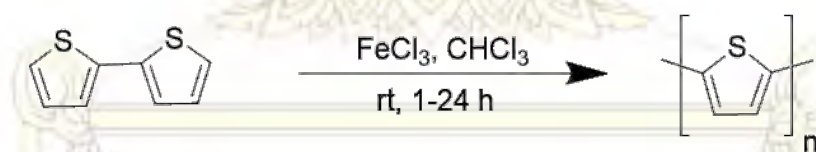
1. ไดคลอโรมีเทน (dichloromethane)
2. เมทานอล (methanol)
3. เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran)
4. คลอโรฟอร์ม (chloroform)
5. เฮกเซน (hexane)
6. อะซิโตน (acetone)
7. กรดโพรพิโอนิก (propionic acid)

## 2.2 ขั้นตอนการทดลอง

### 2.2.1 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟินจาก 2,2'-ไบไทโอฟิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีแบบเอกพันธุ์

#### ภาวะที่ 1) โดยใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์

สมการของปฏิกิริยาสำหรับการทดลองนี้แสดงดังแผนภาพที่ 2-1

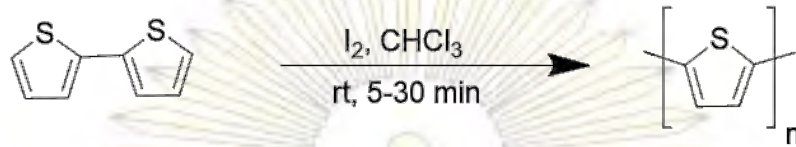


แผนภาพที่ 2-1 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟินในภาวะที่มีเฟอร์ริก(III) คลอไรด์

วิธีการสังเคราะห์พอลิไทโอฟินทางเคมีโดยใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดัดแปลงมาจากเอกสารอ้างอิง<sup>17</sup> โดยเติมสารละลายของเฟอร์ริก(III) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต (0.186 g, 0.688 mmol, 3 equivalent) ในคลอโรฟอร์ม (2 mL) ลงในสารละลายของ 2,2'-ไบไทโอฟิน (0.038 g, 0.23 mmol, 1 equivalent) ในคลอโรฟอร์ม (1 mL) ในขวดแก้วเล็กที่มีแผ่นกระจก ขนาด 5×10 mm ใส่ในลักษณะวางนอนที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 1, 2, 3, 4, 7 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นกระจกที่ได้มาล้างด้วยเมทานอลและคลอโรฟอร์ม และปล่อยให้แห้งเพื่อนำไปวัดการดูดกลืนแสงต่อไป

## ภาวะที่ 2) โดยใช้ไอโอดีน

สมการของปฏิกิริยาสำหรับการทดลองนี้แสดงดังแผนภาพที่ 2-2



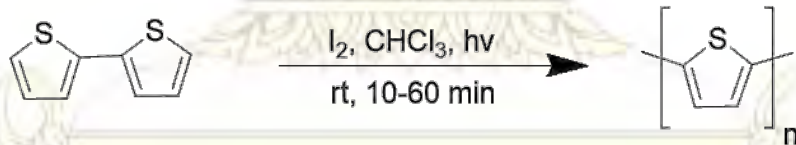
แผนภาพที่ 2-2 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟินจาก 2,2'-ไบไทโอฟินในภาวะที่มีไอโอดีน

วิธีการสังเคราะห์พอลิไทโอฟินทางเคมีโดยใช้ไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตัดแปลงมาจากเอกสารอ้างอิง<sup>18</sup> ในสารละลายของ 2,2'-ไบไทโอฟิน (0.046 mg, 0.28 mmol) ในคลอโรฟอร์ม (1.5 mL) ถูกทำปฏิกิริยากับสารละลายไอโอดีนเข้มข้น (0.14 mg, 0.55 mmol) ในคลอโรฟอร์ม (1.5 mL) ในบริเวณที่อุณหภูมิห้อง สารผสมของปฏิกิริยาถูกนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ ทุกๆ 5 นาทีเป็นเวลา 30 นาที เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง

### 2.2.2 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟินจาก 2,2'-ไบไทโอฟินทางเคมีเชิงแสง

#### ภาวะที่ 1) ในภาวะที่มีไอโอดีน

สมการของปฏิกิริยาสำหรับการทดลองนี้แสดงดังแผนภาพที่ 2-3

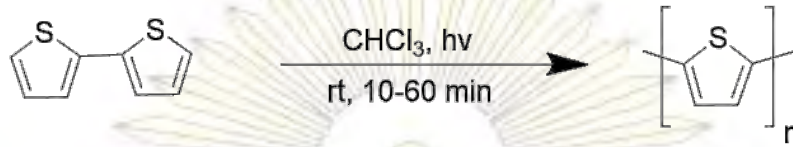


แผนภาพที่ 2-3 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟินทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่มีไอโอดีน

การทดลองนี้ตัดแปลงมาจากเอกสารอ้างอิง<sup>19</sup> โดยเริ่มจากการบรรจุไบไทโอฟิน (0.247 g, 1.48 mmol, 10 equivalent) ในบริเวณที่และละลายด้วยคลอโรฟอร์ม (1 mL) จากนั้นเติมสารละลายไอโอดีน (0.038 g, 0.15 mmol, 1 equivalent) ในคลอโรฟอร์ม (1 mL) ลงไป แล้วทำการฉายแสงด้วยหลอดไฟที่มีความยาวคลื่น 245 , 400 และ 400-1,000 นาโนเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างบริเวณที่และหลอดไฟเท่ากับ 5 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อป้องกันผลของความร้อนจากหลอดไฟที่มีต่อปฏิกิริยา สารผสมของปฏิกิริยาถูกนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ต-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ ทุกๆ 10 นาทีเป็นเวลา 60 นาที เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง

## ภาวะที่ 2) ในภาวะที่ไม่มีไอโอดีน

สมการของปฏิกิริยาสำหรับการทดลองนี้แสดงดังแผนภาพที่ 2-4

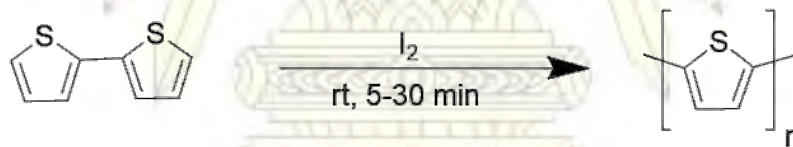


แผนภาพที่ 2-4 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่ไม่มีไอโอดีน

ในลักษณะที่คล้ายกับการทดลองข้างต้น สารละลายของ 2,2'-ไบไทโอฟีน (0.247 g, 1.48 mmol, 10 equivalent) ในคลอโรฟอร์ม (2 mL) ในคิวเวทท์ถูกนำไปฉายแสงด้วยหลอดไฟที่มีความยาวคลื่น 245, 400 และ 400-1,000 นาโนเมตร โดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ ทุกๆ 10 นาทีเป็นเวลา 60 นาที เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง

### 2.2.3 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนจาก 2,2'-ไบไทโอฟีนทางเคมีแบบวิวิธพันธุ์

สมการของปฏิกิริยาสำหรับการทดลองนี้แสดงดังแผนภาพที่ 2-5



แผนภาพที่ 2-5 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนทางเคมีแบบวิวิธพันธุ์

การทดลองนี้ดัดแปลงวิธีการมาจากเอกสารอ้างอิง<sup>19</sup> สารละลาย 2,2'-ไบไทโอฟีน (0.494 g, 2.96 mmol) ในคลอโรฟอร์ม (1 mL) ถูกนำมาหยดลงบนผิวด้านใดด้านหนึ่งของคิวเวทท์ แล้วปล่อยให้แห้ง จากนั้นวางเกล็ดไอโอดีนในคิวเวทท์ ปิดฝาแล้วปล่อยให้ไอของไอโอดีนทำปฏิกิริยากับฟิล์มของไบไทโอฟีนที่อุณหภูมิห้อง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่ได้ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ ทุกๆ 5 นาทีเป็นเวลา 30 นาที เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง

### 2.2.4 การสังเคราะห์พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน) (PEDOT)

สมการของปฏิกิริยาสำหรับการทดลองนี้แสดงดังแผนภาพที่ 2-6

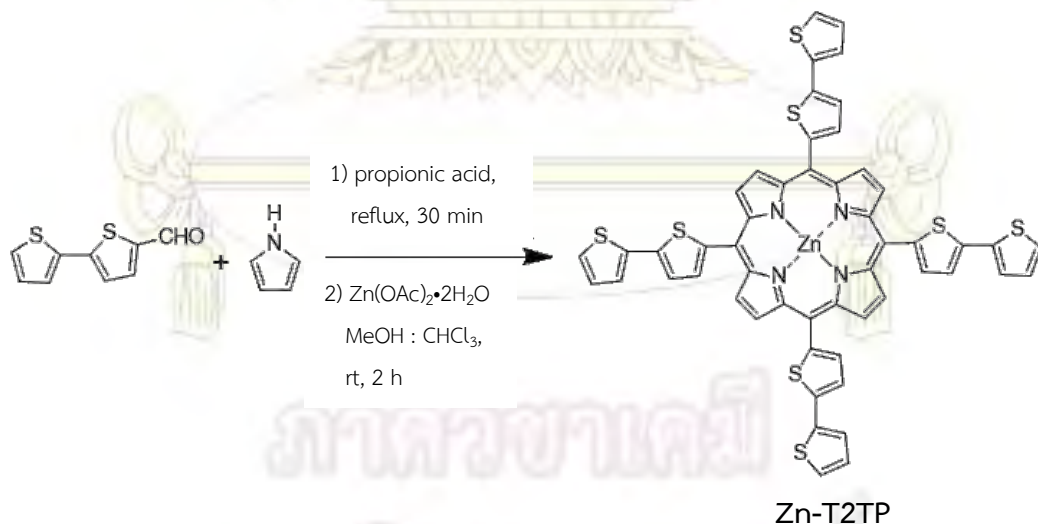


แผนภาพที่ 2-6 การสังเคราะห์พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน)

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ พอลิ(3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน) จาก 3,4-เอทิลีนไดออกซีไทโอฟีน โดยใช้วิธีการทดลองสัดส่วนของปริมาณสารในปฏิกิริยาและภาวะเดียวกันกับการสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 2.2.1, 2.2.2 และ 2.2.3

### 2.2.5 การสังเคราะห์ [5,10,15,20-tetra(2,2'-bithiophen-5-yl)pophyrinato]zinc (Zn-T2TP)

สมการของปฏิกิริยาสำหรับการทดลองนี้แสดงดังแผนภาพที่ 2-7



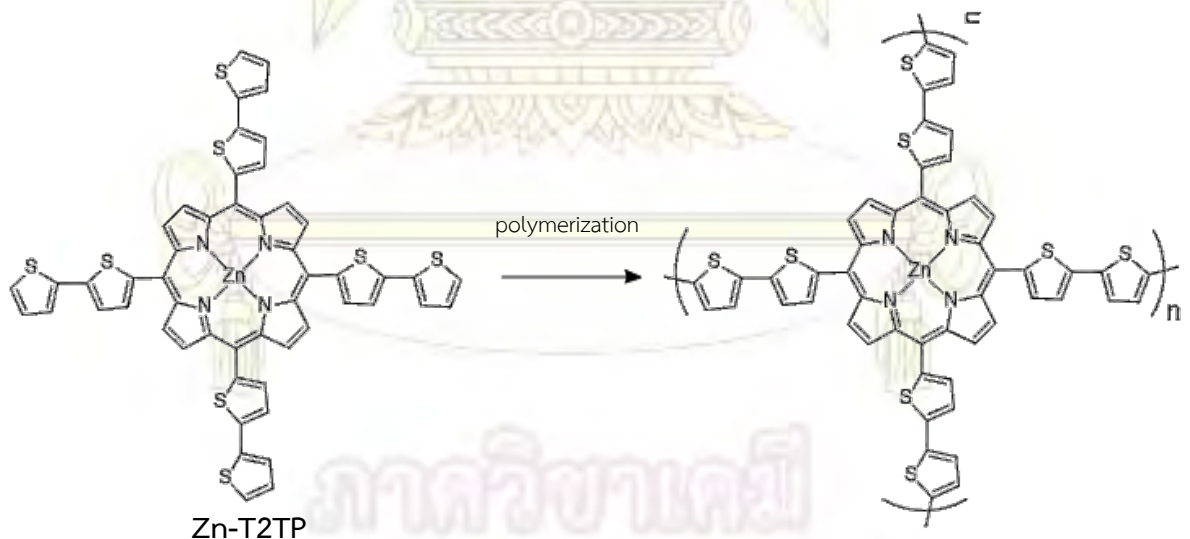
แผนภาพที่ 2-7 การสังเคราะห์สารประกอบพอร์ไฟริน-ไทโอฟีนเป้าหมาย

วิธีการสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนดัดแปลงมาจากเอกสารอ้างอิง<sup>20</sup> โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายของ 2,2'-ไบไทโอฟีน-5-คาร์บอกซาลดีไฮด์ (0.385 g, 1.84 mmol) ในกรดพอร์ฟิโอนิก (8 mL) กับพีร์โรล (0.134 g, 2.00 mmol) ในขวดก้นกลม ขนาด 50 mL ภายใต้อุณหภูมิ 150 องศาเซล-

เซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากการปล่อยให้เย็นลงไปที่อุณหภูมิห้อง เมทานอล (5 mL) ถูกเติมลงไป จากนั้นกรองตะกอนสีน้ำเงินเข้มที่ได้ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ทำการล้างด้วยเมทานอล และน้ำร้อน นำของแข็งที่ได้มาละลายคลอโรฟอร์ม (30 mL) และทำปฏิกิริยากับสารละลายซิงก์แอสซิเตตไดไฮเดรต (0.145 g, 0.661 mmol, 5 equivalent) ในตัวทำละลายเมทานอล (4 mL) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำสารผสมของปฏิกิริยามาสกัดด้วยสารละลายอิมตัวของโซเดียมไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต (30 mL) น้ำปราศจากไอออน (30 mL) และสารละลายอิมตัวของโซเดียมคลอไรด์ (30 mL) เก็บชั้นสารอินทรีย์และทำให้แห้งด้วยโซเดียมซัลเฟตแอนไฮดรัส แล้วนำไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุน จากนั้นนำของแข็งที่ได้ทำให้บริสุทธิ์ด้วยคอลัมน์โครมาโทกราฟี โดยให้ซิลิกาเจลเป็นวัฏภาคหนึ่ง และใช้ 1% เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran) ในไดคลอโรมีเทนเป็นวัฏภาคเคลื่อนที่ได้ Zn-T2TP เป็นของแข็งสีน้ำเงินเข้ม (0.926 g, 38%) ซึ่งสามารถยืนยันได้โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MALDI-TOF แมสสเปกโตรเมตรีโดยการเกิดพิกของไอออนของโมเลกุล Zn-T2TP (M+H)<sup>+</sup> ที่ m/z 1029.14 ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้รายงานไว้ในเอกสารอ้างอิง<sup>20</sup>

## 2.2.6 การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์

สมการของปฏิกิริยาสำหรับการทดลองนี้แสดงดังแผนภาพที่ 2-8



แผนภาพที่ 2-8 การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์



เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 2.2.1 ถึง 2.2.2 Zn-T2TP ถูกนำมาทำปฏิกิริยาโดยใช้ปริมาณของ ตัวทำละลายและรีเอเจนต์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

ภาวะจากข้อ 2.2.1 ภาวะที่ 1) Zn-T2TP (30 mg, 0.035 mmol) ในคลอโรฟอร์ม (3 mL) ทำปฏิกิริยากับเฟอร์ริก(III) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต (28.4 mg, 0.110 mmol) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ภาวะจากข้อ 2.2.2 ภาวะที่ 1) Zn-T2TP (20 mg, 0.019 mmol) ในคลอโรฟอร์ม (2 mL) ทำปฏิกิริยากับไอโอดีน (0.5 mg, 0.002 mmol) นำไปฉายแสงความยาวคลื่นที่ 254 นาโนเมตรที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10-60 นาที

ภาวะจากข้อ 2.2.2 ภาวะที่ 2) Zn-T2TP (20 mg, 0.019 mmol) ในคลอโรฟอร์ม (2 mL) นำไปฉายแสงความยาวคลื่นที่ 254 นาโนเมตรที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10-60 นาที



ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

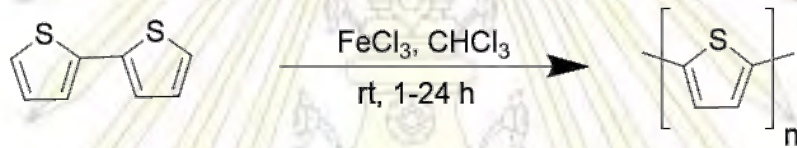
### บทที่ 3

#### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

##### 3.1 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนจาก 2,2'-ไบไทโอฟีน ทางเคมีแบบเอกพันธ์

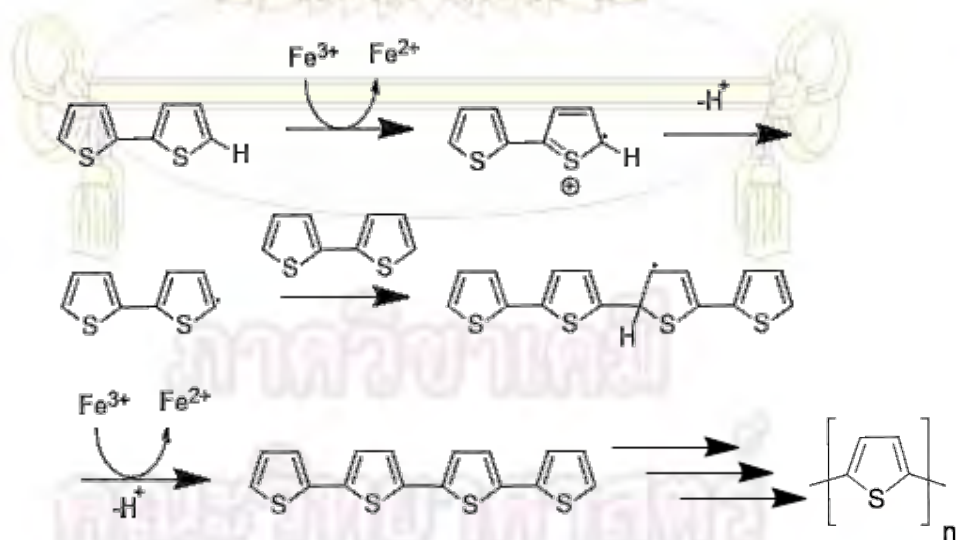
###### ภาวะที่ 1) โดยใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์

การทดลองนี้เป็นการสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนจากไบไทโอฟีน ในภาวะที่มีเฟอร์ริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในขวดแก้วเล็กเป็นเวลา 1, 2, 3, 4, 7 และ 24 ชั่วโมง โดยใส่แผ่นกระจกลงในขวดแก้วขนาดเล็ก เพื่อให้เกิดฟิล์มของพอลิเมอร์ที่ติดบนแผ่นกระจก ซึ่งปฏิกิริยาที่คาดหวังไว้แสดงดังสมการตามแผนภาพที่ 3-1

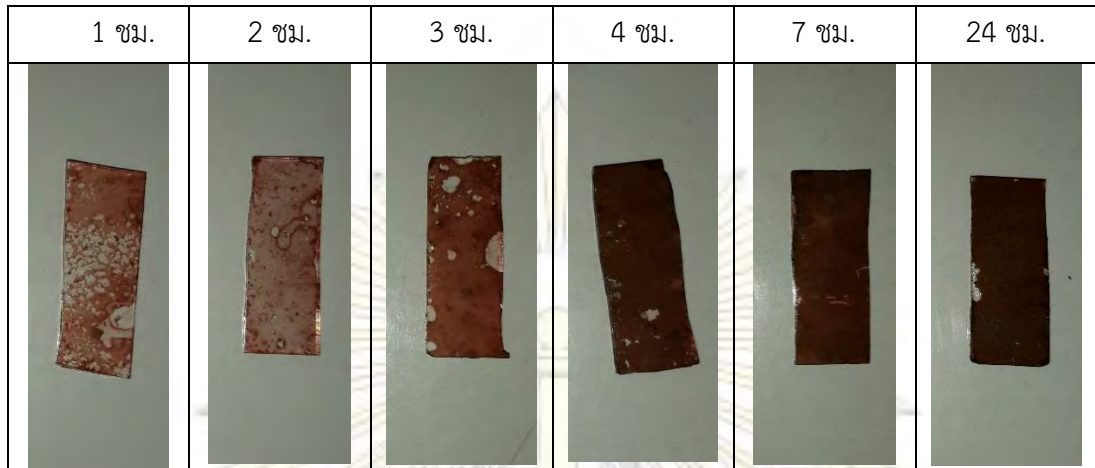


###### แผนภาพที่ 3-1 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่ใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันคาดว่าเกิดผ่านกลไกดังแผนภาพที่ 3-1<sup>17</sup> เริ่มจากเฟอร์ริก(III)คลอไรด์เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้เกิดเป็นไบไทโอฟีนเรดิคัลซึ่งเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยารีดอกซ์พอลิเมอไรเซชัน เกิดเป็นพอลิไทโอฟีน ผลที่ได้คือฟิล์มสีแดงบนแผ่นกระจกในสารผสมของปฏิกิริยา ดังรูปที่ 3-1 โดยสังเกตได้ว่าเมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาผ่านไปทำให้ฟิล์มบนกระจกมีความหนาเพิ่มขึ้น

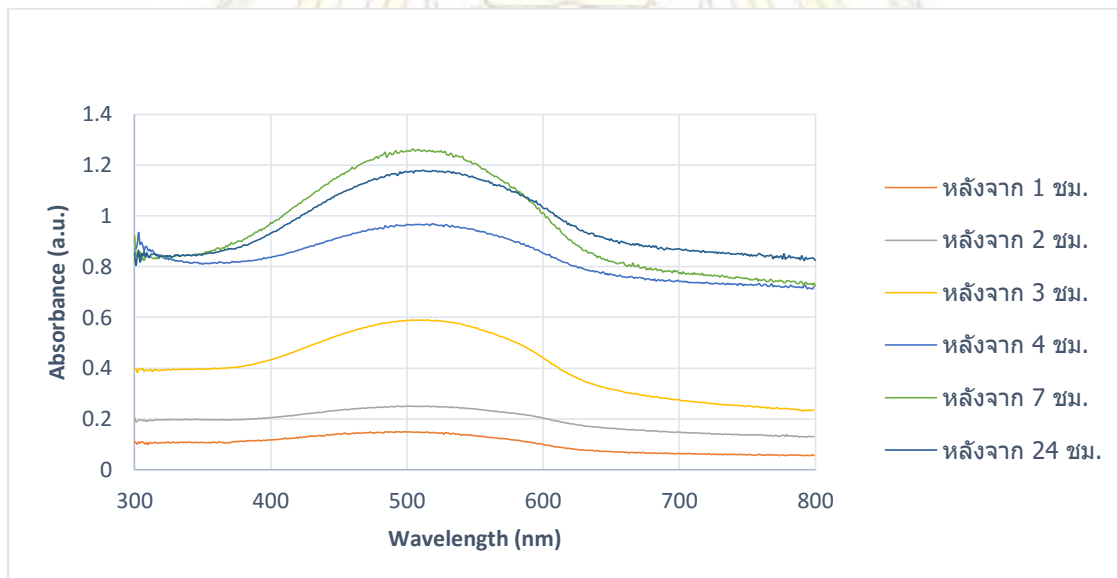


###### แผนภาพที่ 3-2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ 2,2'-ไบไทโอฟีน ในภาวะที่มีเฟอร์ริก(III) คลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3-1 फिल्मของพอลิไทโอพีนจากการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมงถึง 24 ชั่วโมง

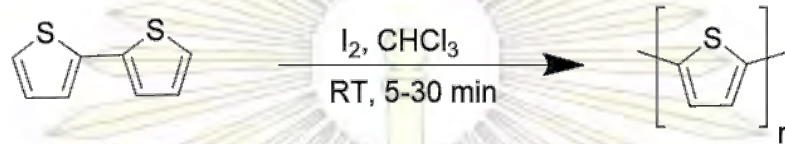
จากสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของพอลิไทโอพีนฟิล์มดังรูปที่ 3-2 สังเกตได้ว่า เมื่อเวลาของปฏิกิริยานานขึ้น การดูดกลืนแสงที่ช่วง 500 ถึง 530 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนของพอลิไทโอพีนตามเอกสารอ้างอิง<sup>21</sup> มีความเข้มสูงขึ้น จึงพิจารณาว่าฟิล์มที่เกิดขึ้นนั้นอาจเป็นพอลิเมอร์ แต่เนื่องจากฟิล์มที่ได้นั้นไม่ละลายในคลอโรฟอร์ม จึงไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรีได้



รูปที่ 3-2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่ได้จากปฏิกิริยาที่มีเฟอร์ริก(III) คลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ

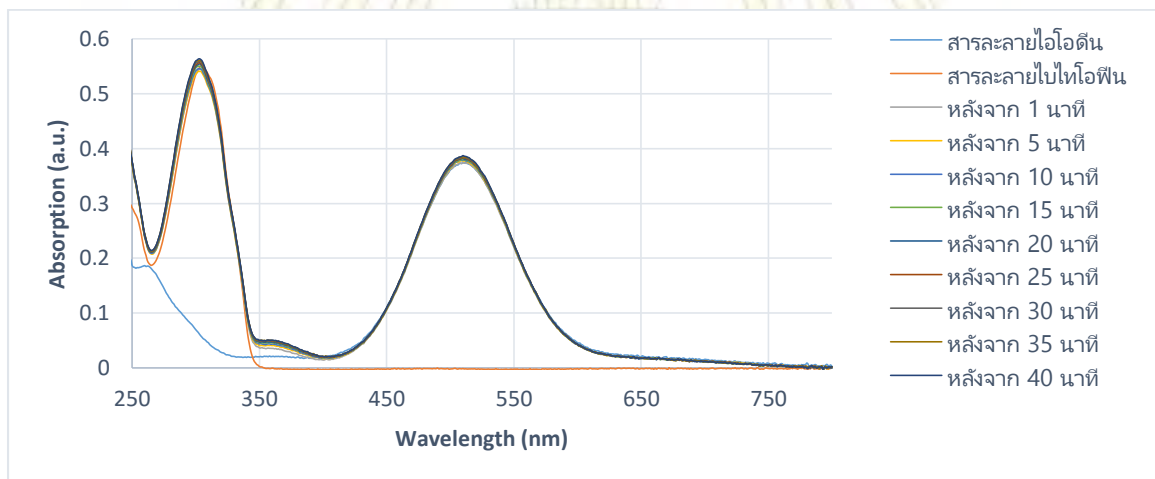
## ภาวะที่ 2) โดยใช้ไอโอดีน

ในการทดลองนี้สารละลาย 2,2'-ไบไทโอฟีน (1.5 mL) และไอโอดีน (1.5 mL) ถูกนำมาผสมกันในควิเวทท์ และวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายผสมทุก 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง ปฏิกิริยาที่คาดหวังไว้เป็นไปดังแผนภาพที่ 3-3



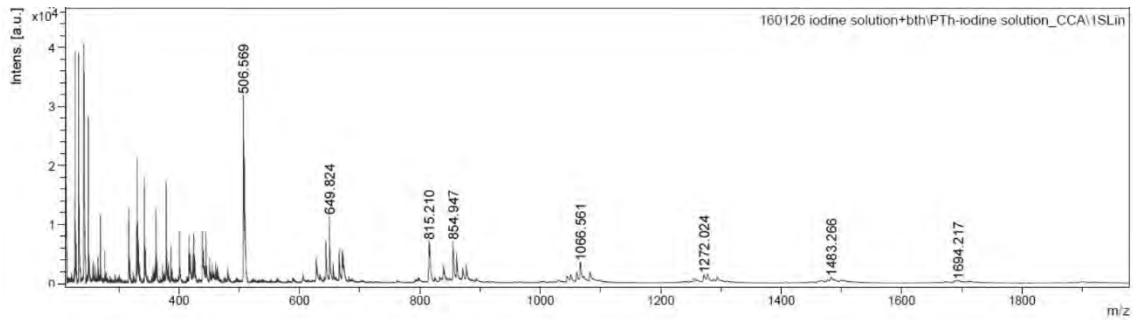
แผนภาพที่ 3-3 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนทางเคมีในภาวะที่ใช้ไอโอดีน

รูปที่ 3-3 แสดงให้เห็นว่าสารละลายไบไทโอฟีนมีการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 300 นาโนเมตร ในขณะที่สารละลายไอโอดีนมีการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 510 นาโนเมตร การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อเวลาผ่านไปการดูดกลืนแสงไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ จึงเป็นไปได้ว่า อาจมีพอลิไทโอฟีนเกิดขึ้นเล็กน้อย แต่การดูดกลืนแสงนั้นถูกบดบังด้วยการดูดกลืนแสงของไอโอดีน หรือ อาจไม่เกิดพอลิไทโอฟีนเลย



รูปที่ 3-3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายในภาวะสารละลายไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ

อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MALDI-TOF แมสสเปกโตรเมตรี ดังรูปที่ 3-4 พบสัญญาณของไอออนที่  $m/z$  649.824, 854.947, 1066.561, 1272.024, 1483.266 และที่ 1694.217 ซึ่งสอดคล้องกับโพลิเมอร์ของ 2,2'-ไบไทโอฟีน (มวลโมเลกุล = 166.26) ที่มีจำนวนหน่วยซ้ำ 4, 5, 6, 8, 9 และ 10 หน่วย ตามลำดับ แต่เนื่องจากโพลิเมอร์ดังกล่าวอาจเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยจึงไม่สามารถสังเกตได้จากสเปกตรัมของการดูดกลืนแสง

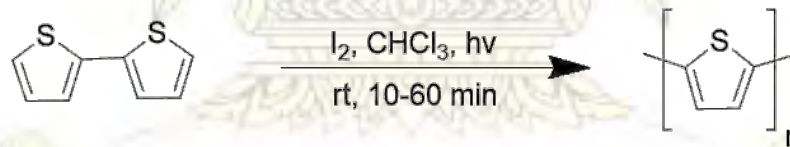


รูปที่ 3-4 MALDI-TOF แมสสเปกตรัมของสารผสมของสารผลสมของปฏิกิริยาที่ได้จากปฏิกิริยาที่ใช้สารละลายไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 3.2 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟินจาก 2,2'-ไบไทโอฟินทางเคมีเชิงแสง

#### 3.2.1 ในภาวะที่มีไอโอดีน

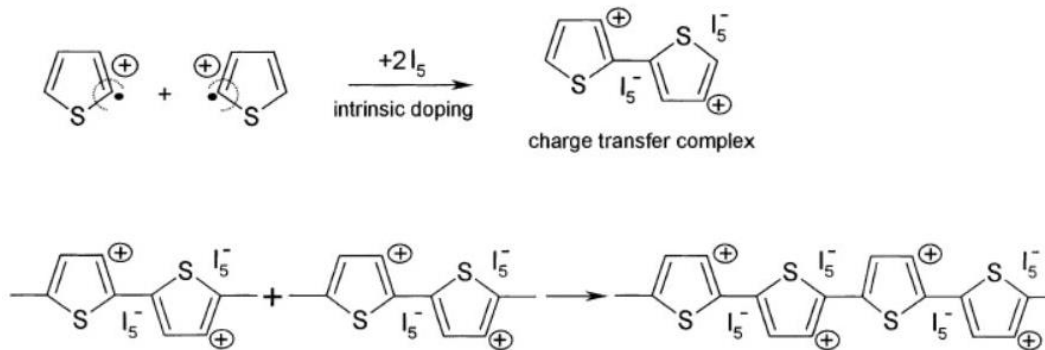
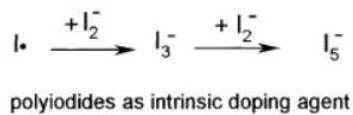
ในการทดลองนี้ สารละลาย 2,2'-ไบไทโอฟิน และสารละลายไอโอดีนถูกนำมาผสมกันในคิวเวทท์ 3 คิวเวทท์แล้วนำไปฉายแสงแยกกันที่ความยาวคลื่น 254, 400 และ 400–1,000 นาโนเมตร จากนั้นทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงทุกๆ 10 นาที ทั้งหมด 60 นาที เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง ปฏิกิริยาที่คาดหวังไว้เป็นไปดังแผนภาพที่ 3-4



แผนภาพที่ 3-4 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟินทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่มีไอโอดีน

Kruse และคณะ ได้เสนอกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในแผนภาพที่ 3-5<sup>19</sup> โดยเมื่อไอโอดีนได้รับพลังงานแสงจะอยู่ในรูปไอออน เกิดการเหนี่ยวนำโมเลกุลของไทโอฟินให้เกิดเป็นแรดิคอลที่มีประจุบวก จากนั้นปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจึงเกิดขึ้น

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

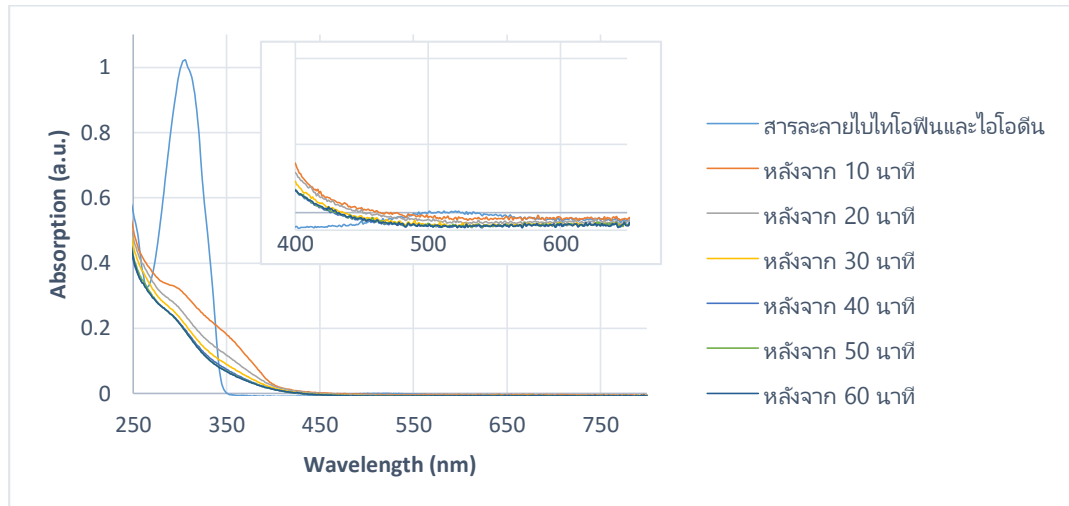


แผนภาพที่ 3-5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะที่มีไอโอดีน

### ภาวะที่ 1) ใช้หลอดกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในรูปที่ 3-5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที การดูดกลืนแสงของสารละลายที่มีความยาวคลื่น 310 นาโนเมตร มีความเข้มที่ลดต่ำลง แต่เมื่อพิจารณาพบว่าไม่มีการดูดกลืนความยาวคลื่น 500 ถึง 530 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าเมื่อสารละลายที่มีการเติมไอโอดีนถูกฉายแสงที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาบางประเภทขึ้นในสารละลาย แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นอาจไม่ใช่พอลิไทโอฟิน ด้วยเหตุนี้เอง ผู้วิจัยจึงไม่ได้นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรี และเนื่องจากที่ภาวะนี้ใช้ปริมาณไอโอดีนต่ำกว่าไบโทโอฟิน 10 เท่าซึ่งต่างจากการทดลองในภาวะที่ 2 ของหัวข้อ 3.1 ซึ่งให้ปริมาณไอโอดีน 2 เท่าเมื่อเทียบกับไบโทโอฟินพีการดูดกลืนของไอโอดีนที่ 510 นาโนเมตร จึงมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้

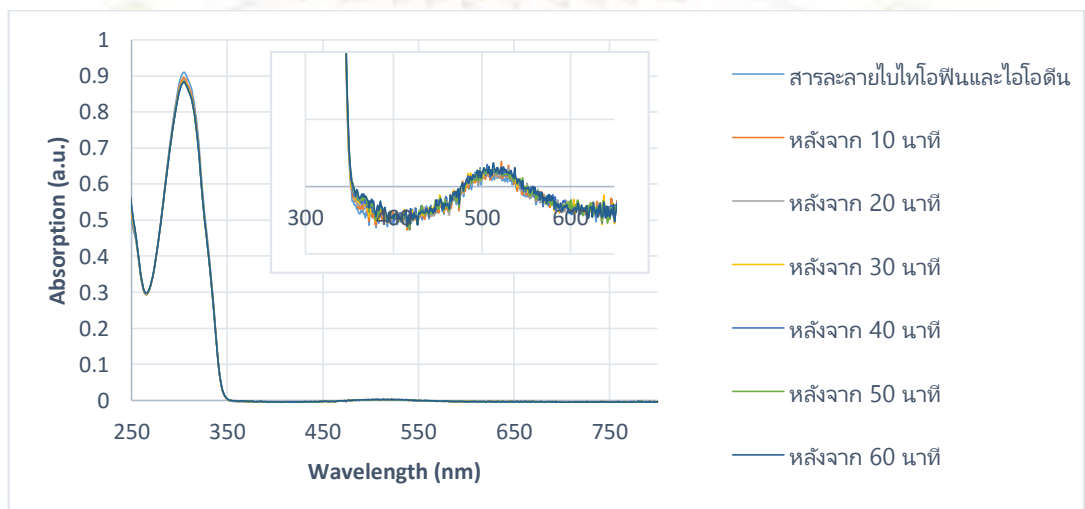
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายของปฏิกิริยาที่มีการฉายแสงที่ 254 นาโนเมตร ในภาวะที่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ

#### ภาวะที่ 2) ใช้หลอดกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร

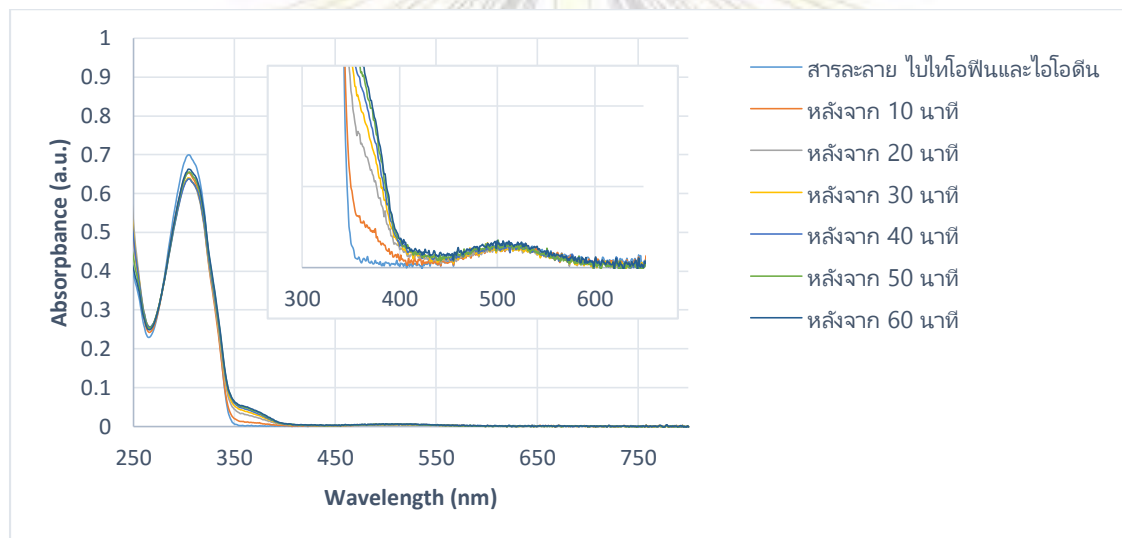
จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 3-6 สังเกตได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป การดูดกลืนแสงของสารละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการฉายแสงที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันหรือแม้กระทั่งปฏิกิริยาอื่นๆ ที่สังเกตได้ชัดในสารละลาย จึงพิจารณาได้ว่าไม่เกิดพอลิไทโอฟินขึ้น นั่นอาจเพราะแสงที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร มีพลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ด้วยเหตุนี้เอง ผู้วิจัยจึงไม่นำผลผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรี



รูปที่ 3-6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายของปฏิกิริยาที่มีการฉายแสงที่ 400 นาโนเมตร ในภาวะที่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ

### ภาวะที่ 3) ใช้หลอดกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 400–1,000 นาโนเมตร

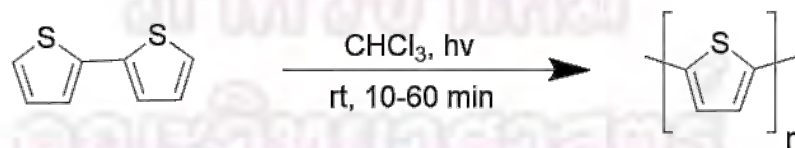
จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 3-7 สังเกตได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป การดูดกลืนแสงของสารละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อสารละลายถูกฉายแสงที่มีความยาวคลื่น 400–1,000 นาโนเมตร ไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันหรือแม้กระทั่งปฏิกิริยาอื่นๆ ที่สังเกตได้ชัดในสารละลาย จึงพิจารณาได้ว่าไม่เกิดพอลิไทโอฟินขึ้น นั่นอาจเพราะแสงที่มีความยาวคลื่น 400–1,000 นาโนเมตร อาจมีพลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ผู้วิจัยจึงไม่นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรี



รูปที่ 3-7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายของปฏิกิริยาที่มีการฉายแสงที่ 400–1,000 นาโนเมตร ในภาวะที่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ

#### 3.2.2 ในภาวะที่ไม่มีไอโอดีน

ในการทดลองนี้ สารละลายไปไทโอฟินในคิวเวทท์ 3 คิวเวทท์ ถูกนำไปฉายแสงแยกกันที่ความยาวคลื่น 254, 400 และ 400–1,000 นาโนเมตร จากนั้นทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงทุกๆ 10 นาที ทั้งหมด 60 นาที เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง ปฏิกิริยาที่คาดหวังไว้เป็นไปดังแผนภาพที่ 3-6

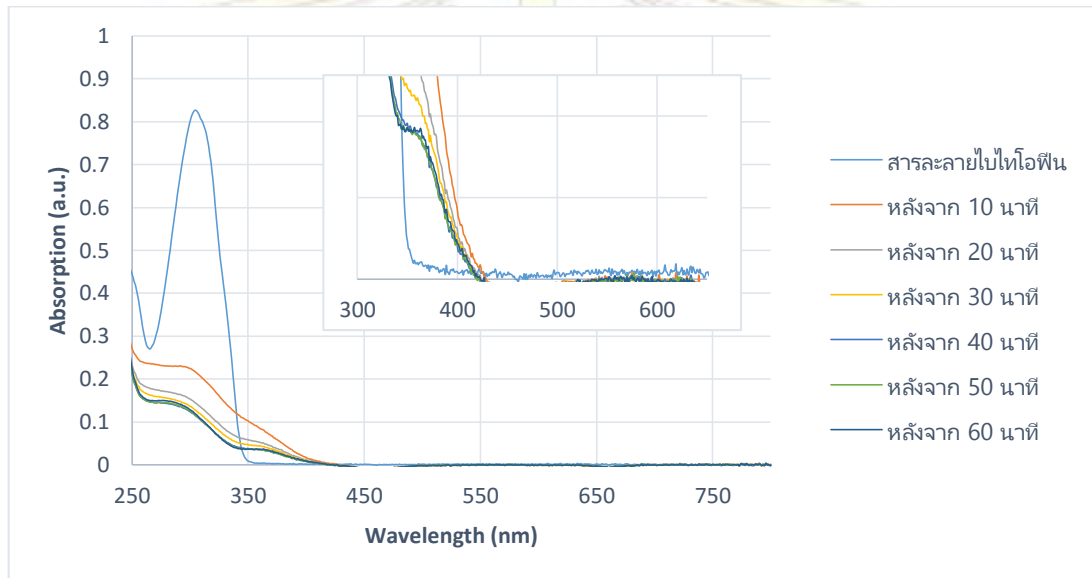


แผนภาพที่ 3-6 การสังเคราะห์พอลิไทโอฟินทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่ใช้ไอโอดีน



### ภาวะที่ 1) ใช้หลอดกำเนิดแสง 254 นาโนเมตร

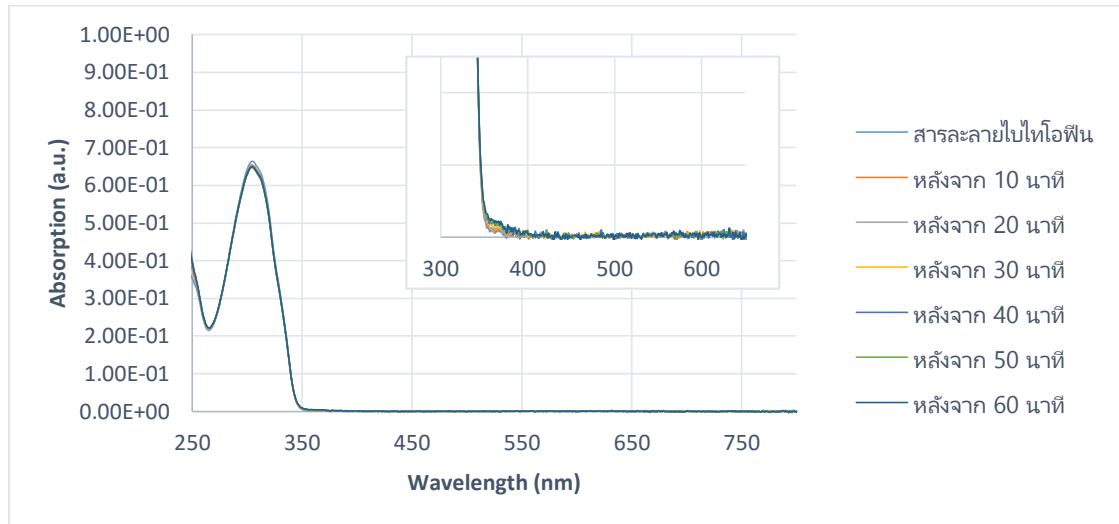
สเปกตรัมการดูดกลืนแสง รูปที่ 3-8 สังเกตได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที การดูดกลืนแสงของสารละลายที่มีความยาวคลื่น 308 นาโนเมตร มีความเข้มที่ลดต่ำลง แต่เมื่อพิจารณาพบว่าไม่มีการดูดกลืนที่มีความยาวคลื่น 500 ถึง 530 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าเมื่อสารละลายถูกฉายแสงที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาบางประเภทขึ้นในสารละลาย แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจไม่ใช่พอลิไทโอพีน ด้วยเหตุนี้เองผู้วิจัยจึงไม่นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรี



รูปที่ 3-8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายของปฏิกิริยาที่มีการฉายแสงที่ 254 นาโนเมตร ในภาวะที่ไม่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ

### ภาวะที่ 2) ใช้หลอดกำเนิดแสง 400 นาโนเมตร

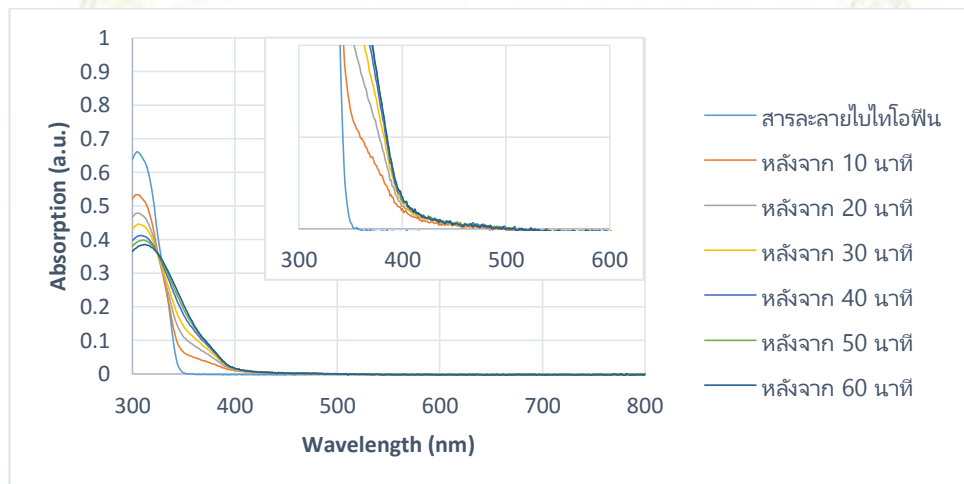
จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสง รูปที่ 3-9 สังเกตได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป การดูดกลืนแสงของสารละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการฉายแสงที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ไม่ทำให้เกิดพอลิเมอร์ไฮดรอกซีหรือแม้กระทั่งปฏิกิริยาอื่นๆ ที่สังเกตได้ชัดในสารละลาย จึงพิจารณาได้ว่าไม่เกิดพอลิไทโอพีนขึ้น นั่นอาจเพราะแสงที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร มีพลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไฮดรอกซี ด้วยเหตุนี้เองผู้วิจัยจึงไม่นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรี



รูปที่ 3-9 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายของปฏิกิริยาที่มีการฉายแสงที่ 400 นาโนเมตร ในภาวะที่ไม่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ

### ภาวะที่ 3) ใช้หลอดกำเนิดแสง 400–1,000 นาโนเมตร

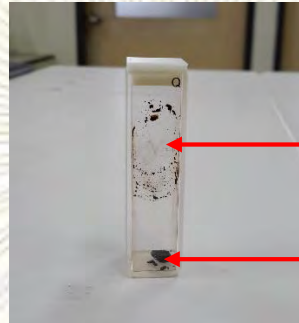
จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสง รูปที่ 3-10 สังเกตได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 308 นาโนเมตร มีความเข้มในการดูดกลืนที่ลดต่ำลง แต่ไม่มีการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 500–530 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสารละลายเมื่อถูกฉายแสงที่ความยาวคลื่น 400–1,000 นาโนเมตร อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น แต่ไม่ทำให้เกิดพอลิเมอร์โซชันในสารละลาย พิจารณาได้ว่าไม่เกิดพอลิไทโอพีน ซึ่งอาจเพราะแสงที่ความยาวคลื่น 400–1,000 นาโนเมตร มีพลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์โซชัน ด้วยเหตุนี้เองผู้วิจัยจึงไม่ได้นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรี



รูปที่ 3-10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายของปฏิกิริยาที่มีการฉายแสงที่ 400–1,000 นาโนเมตร ในภาวะที่ไม่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เวลาต่างๆ

### 3.3 การสังเคราะห์พอลิไทโอพีนจาก 2,2'-ไปไทโอพีนทางเคมีแบบวิวิธพันธุ์

การทดลองนี้ทำโดยการให้ไอของไอโอดีนมาสัมผัสกับฟิล์มของ 2,2'-ไบโทโอฟิน ที่อยู่บนผนังด้านใดด้านหนึ่งของควาทดตั้งรูปที่ 3-11 จากนั้นนำฟิล์มไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่เวลาต่างๆ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลง

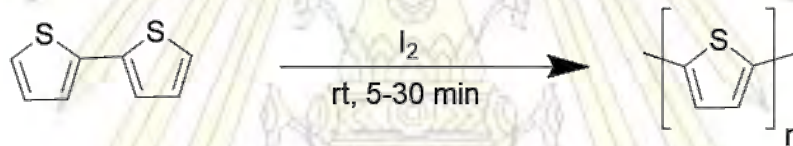


ฟิล์มของ 2,2'-ไบโทโอฟิน

เกล็ดไอโอดีน

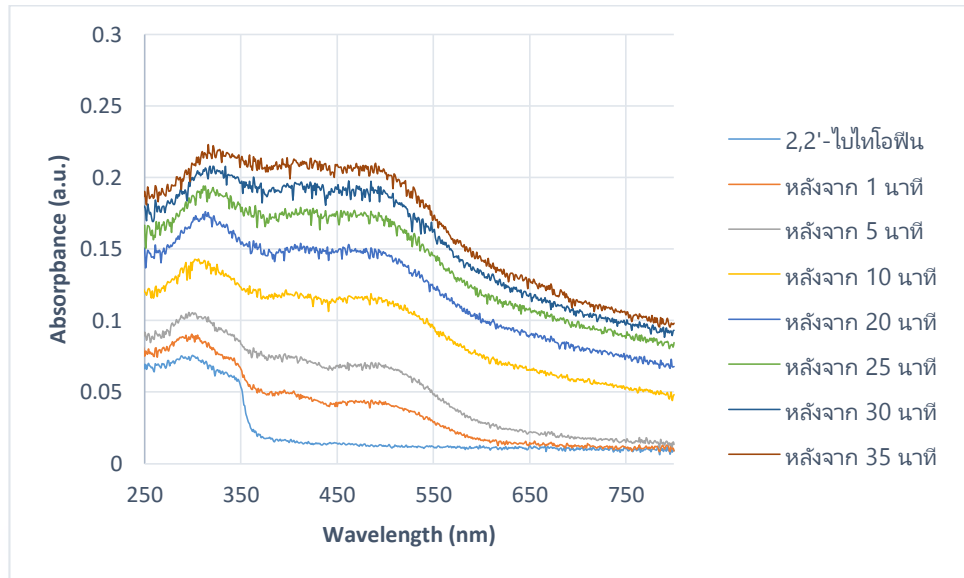
รูปที่ 3-11 การสังเคราะห์พอลิโทโอฟินโดยใช้ไอของไอโอดีนในควาทด

ปฏิกิริยาที่คาดหวังว่าจะเกิดแสดงดังแผนภาพที่ 3-7



แผนภาพที่ 3-7 การสังเคราะห์พอลิโทโอฟินในภาวะที่มีไอของไอโอดีน

จากสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงดังรูปที่ 3-12 สังเกตได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 360 ถึง 550 นาโนเมตร มีความเข้มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับช่วงการดูดกลืนของพอลิโทโอฟิน จึงสามารถพิจารณาได้ว่าอาจเกิดพอลิโทโอฟินในฟิล์มของแข็งของโทโอฟินเมื่อใช้ภาวะในการสังเคราะห์ด้วยไอของไอโอดีน แต่เนื่องจากฟิล์มที่ได้ไม่สามารถละลายได้จึงไม่สามารถทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรี

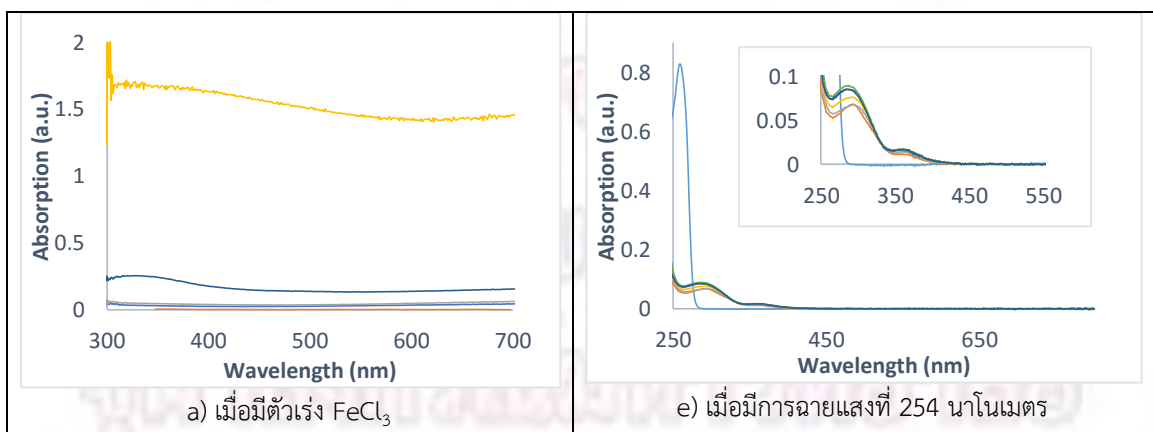


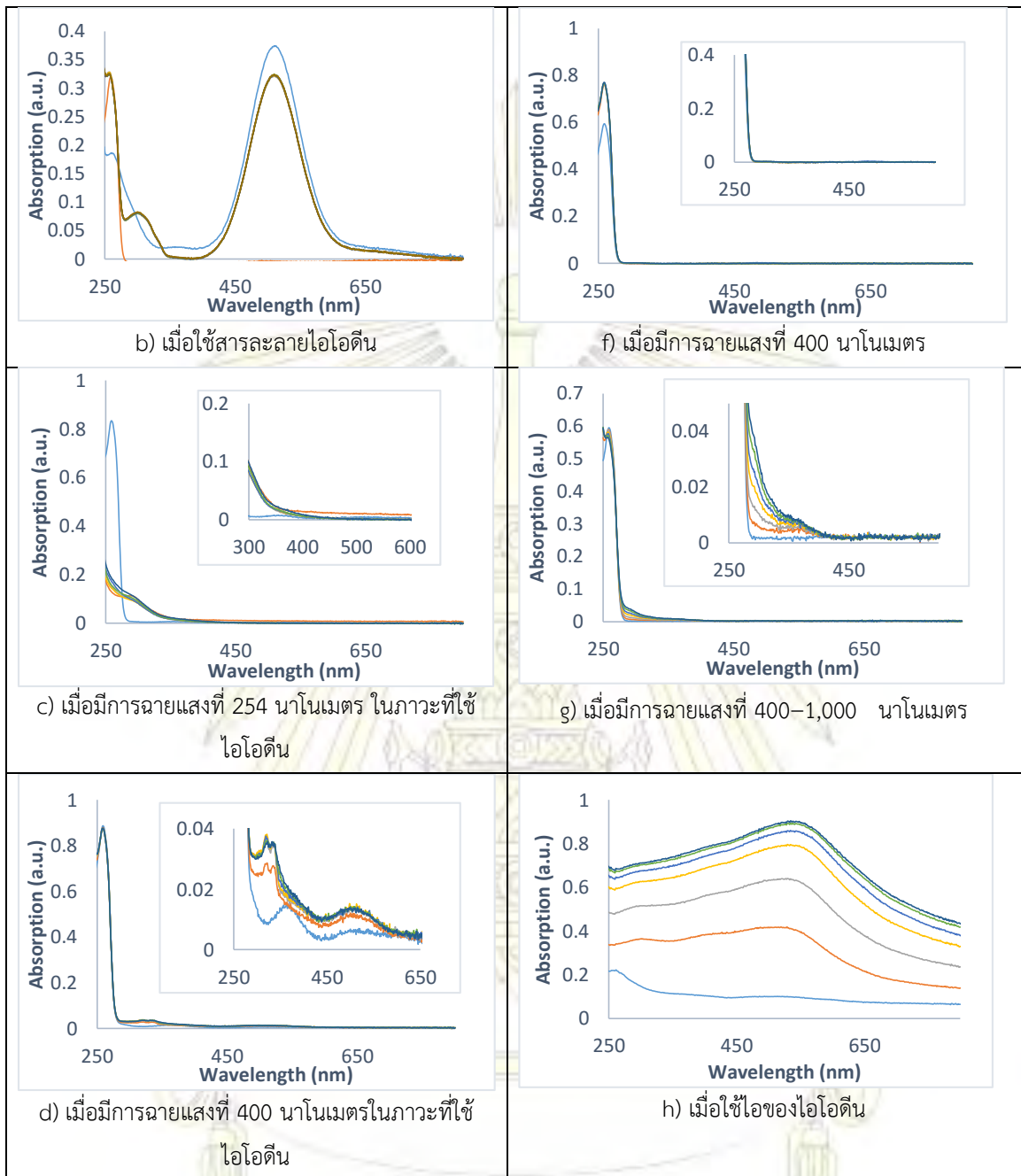
รูปที่ 3-12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มของไทโอฟีนในภาวะมีไอของไอโอดีน ที่เวลาต่างๆ

### 3.4 การสังเคราะห์พอลิ(3,4-เอทิลีนไอออกซีไทโอฟีน) (PEDOT)

การสังเคราะห์พอลิ(3,4-เอทิลีนไอออกซีไทโอฟีน) (PEDOT) จาก 3,4-เอทิลีนไอออกซีไทโอฟีน (EDOT) ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบว่า วิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์นั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้จริงหรือไม่ เนื่องจาก EDOT มีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นพอลิเมอร์ได้ง่ายกว่าสารประกอบไทโอฟีน อีกทั้ง PEDOT มีความสามารถในการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดี<sup>22</sup> ดังนั้นหากสามารถพัฒนาภาวะสำหรับสังเคราะห์ PEDOT ที่เหมาะสมได้ อาจนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปได้กับการสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า EDOT แสดงการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันกับไบโอฟีนในทุกการทดลอง โดยให้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแต่ละภาวะให้ลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ดังสรุปในรูปที่ 3-13





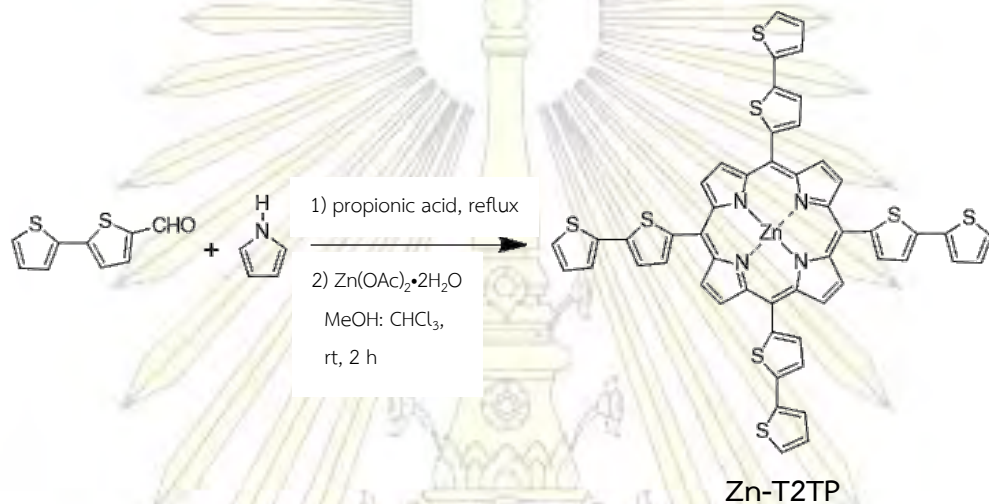
รูปที่ 3-13 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ EDOT ที่ภาวะต่างๆ

จึงสรุปได้ว่า ภาวะที่มีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดพอลิเมอร์เชนของ EDOT ได้แก่ ภาวะที่ใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์ และภาวะที่มีการใช้แสงความยาวคลื่น 254 nm ทั้งในภาวะที่มีไอโอดีนและไม่มีไอโอดีน

คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

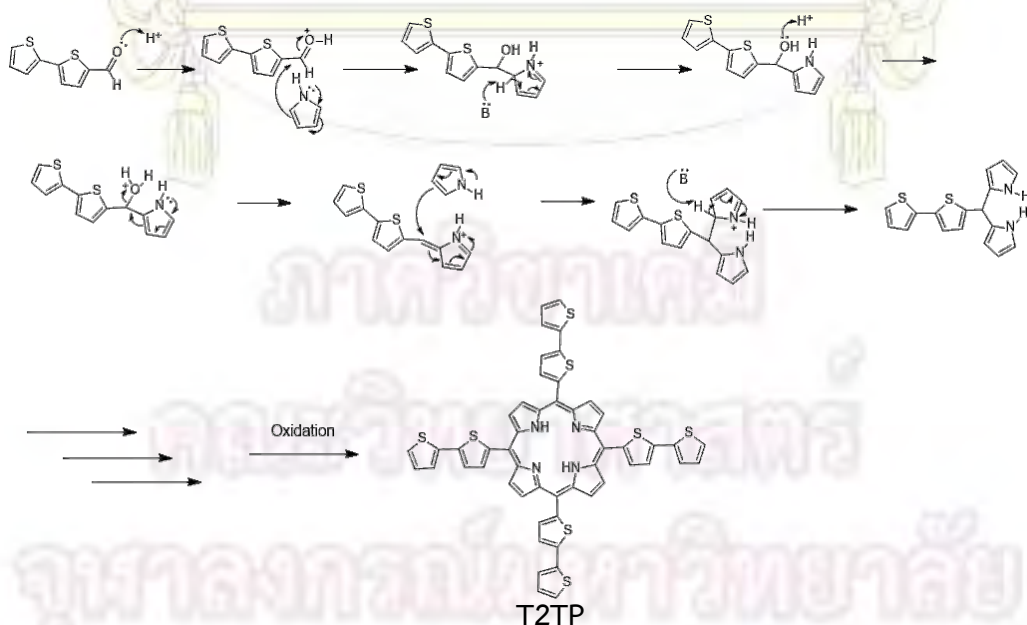
### 3.5 การสังเคราะห์ [5,10,15,20-tetra(2,2'-bithiophen-5-yl)porphyrinato]zinc (Zn-T2TP)

การสังเคราะห์สารประกอบ Zn-T2TP เริ่มจากการทำปฏิกิริยาของ 2,2'-ไบไทโอฟิน-5-คาร์บอกซัลดีไฮด์ และพีร์โรล ในกรดโพรพิโอนิกที่ภาวะรีฟลักซ์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามด้วยการทำปฏิกิริยากับซิงก์ซีเตรตไดไฮเดรต<sup>20</sup> ดังแสดงในแผนภาพที่ 3-8



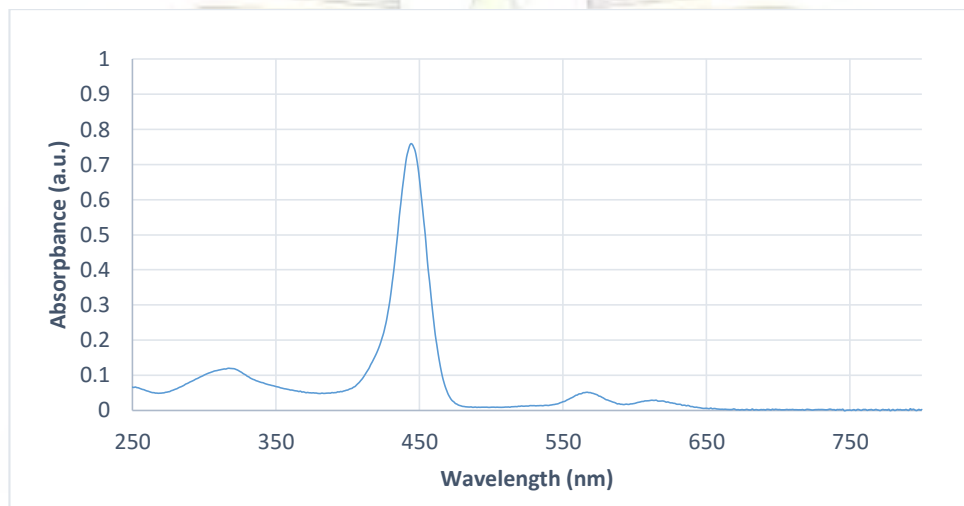
แผนภาพที่ 3-8 สมการการสังเคราะห์ พอร์ไฟริน-ไทโอฟิน Zn-T2TP

กลไกการเกิดสารประกอบ T2TP เป็นดังแผนภาพที่ 3-9<sup>23</sup> โดยเริ่มจากพีร์โรล เป็นนิวคลีโอไฟล์ เข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งคาร์บอนิลของ 2,2'-ไบไทโอฟิน-5-คาร์บอกซัลดีไฮด์ในภาวะกรด จากนั้นพีร์โรลอีกโมเลกุลหนึ่งเข้ามาทำปฏิกิริยา สลับกันจนกระทั่งโมเลกุลของไบไทโอฟินและพีร์โรลครบ 4 โมเลกุล เกิดการปิดวงขึ้น และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เป็นวงแอมโรแมติก

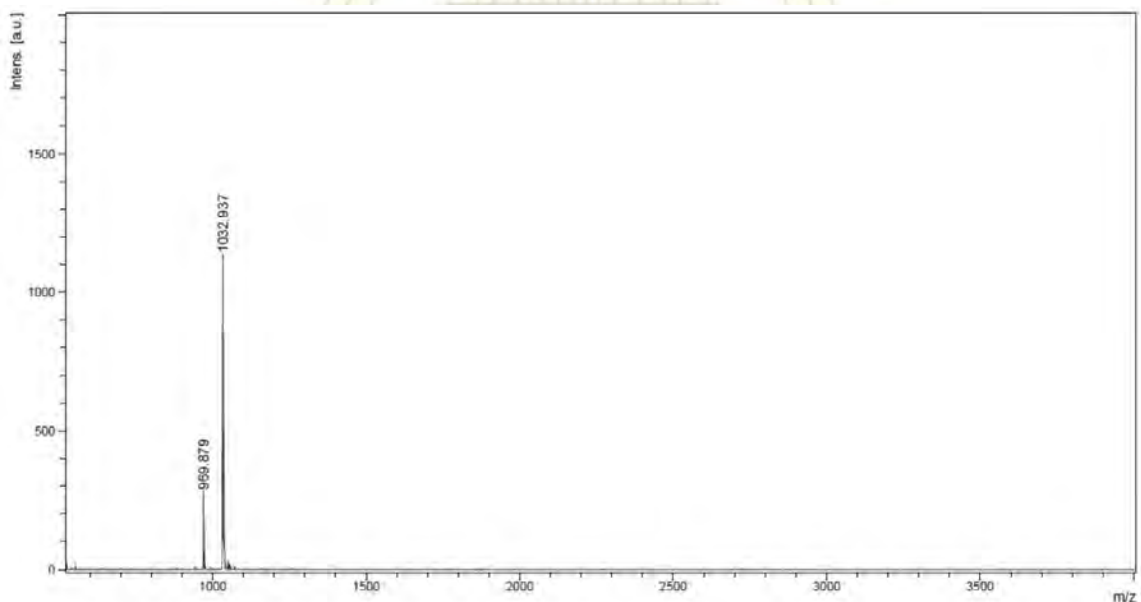


แผนภาพที่ 3-9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ T2TP

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโมเลกุล Zn-T2TP มีเอกลักษณ์ของสารประกอบพอร์ไฟริน กล่าวคือ พบการดูดกลืนแสงความยาวคลื่น 445 นาโนเมตร ซึ่งมีความเข้มที่สูงที่สุด และที่ความยาวคลื่น 550-650 นาโนเมตร ดังรูปที่ 3-14 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MALDI-TOF แมสสเปกโตรเมตรีดังรูปที่ 3-15 แสดงสัญญาณไอออนของโมเลกุลที่  $m/z$  1032.937 (สาร Zn-T2TP มีมวลโมเลกุล = 1030.71) และมีสัญญาณไอออนอื่นที่  $m/z$  969.879 ซึ่งคาดว่าเป็นของไอออน (M-Zn)<sup>+</sup>



รูปที่ 3-14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสาร Zn-T2TP ที่สังเคราะห์ได้ในคลอโรฟอร์ม



รูปที่ 3-15 MALDI-TOF แมสสเปกตรัมของสาร Zn-T2TP ที่สังเคราะห์ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

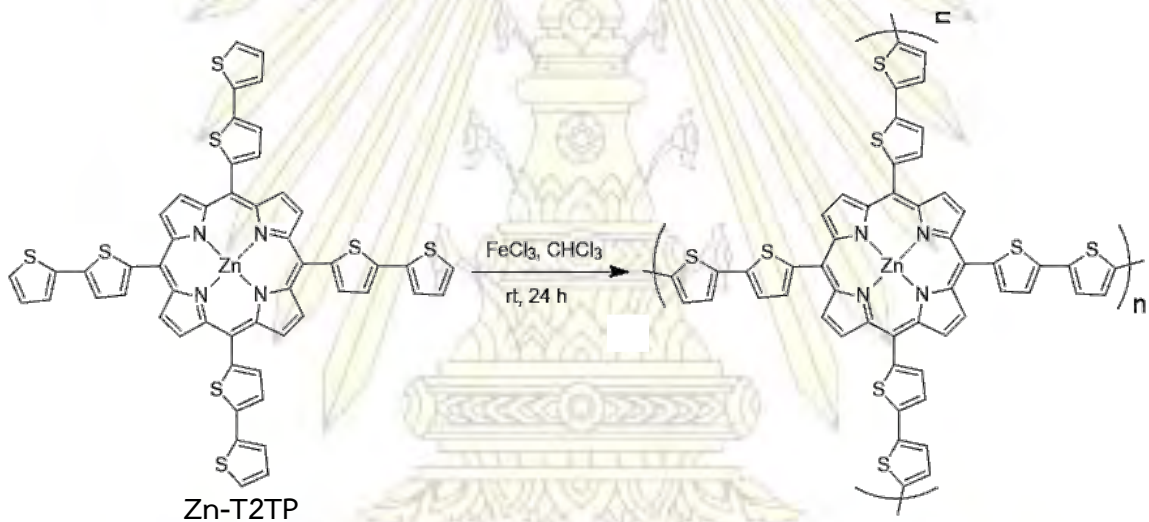
### 3.6 การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์ เป็นภาวะที่คาดว่าสามารถสังเคราะห์พอลิไทโอฟีนได้ดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมา ประกอบด้วย 3 ภาวะดังต่อไปนี้

#### 3.6.1 การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์ทางเคมีโดยใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์

การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์ทางเคมีโดยใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดำเนินในลักษณะคล้ายกับการสังเคราะห์พอลิไทโอฟีน โดยใช้ Zn-T2TP ในการสังเคราะห์แต่ใช้ความเข้มข้นที่ต่ำกว่า คือ 10 mg/mL เนื่องจากข้อจำกัดด้านความสามารถในการละลายของ Zn-T2TP

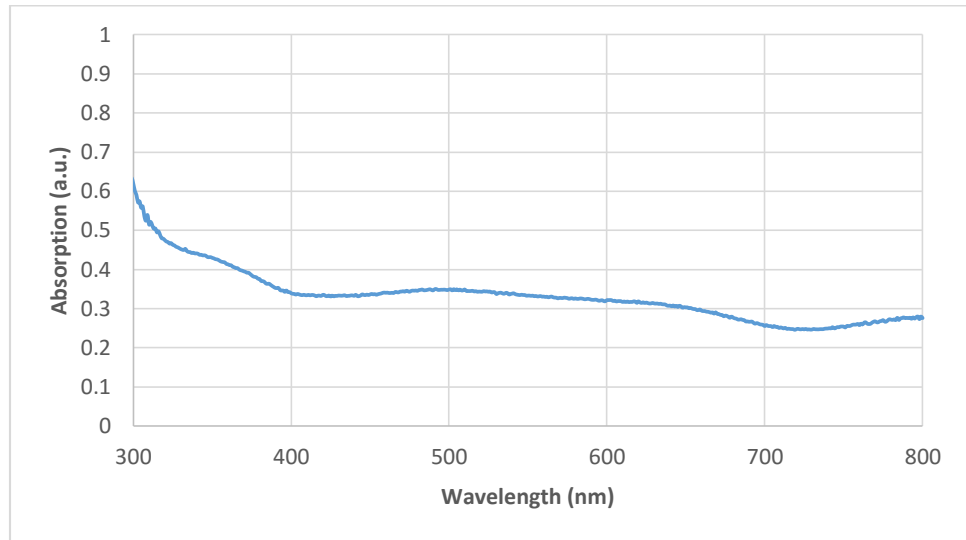
สมการของปฏิกิริยาสำหรับการทดลองนี้แสดงดังแผนภาพที่ 3-10



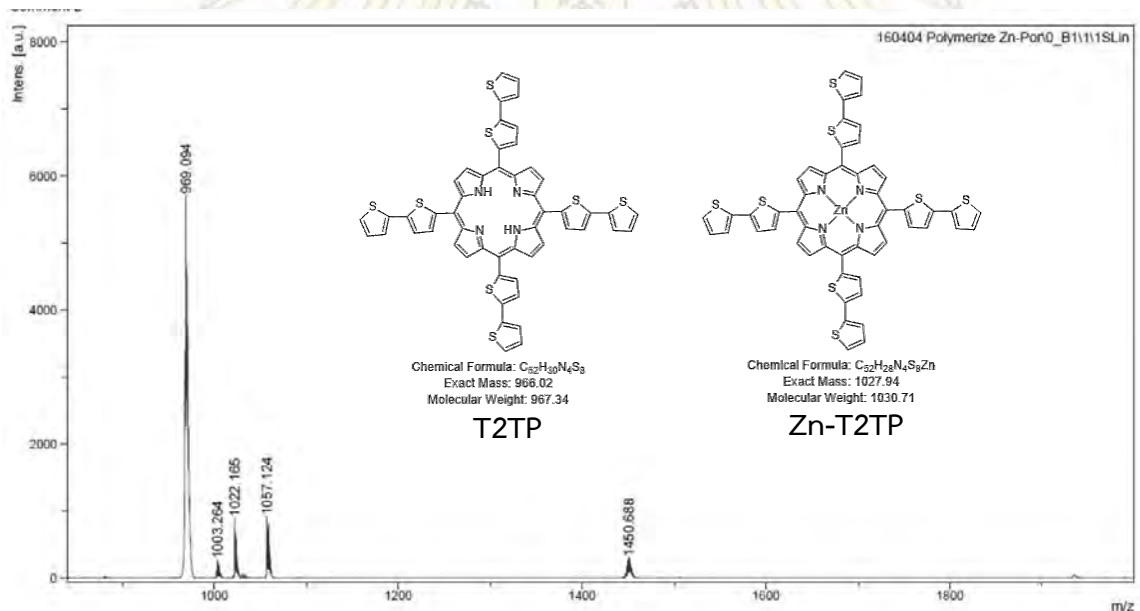
แผนภาพที่ 3-10 สมการการสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่สังเคราะห์ได้สังเกตเห็นว่าเอกลักษณ์การดูดกลืนแสงของโมเลกุลพอร์ไฟรินหายไปดังรูปที่ 3-16 จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MALDI-TOF แมสสเปกโตรเมตรีดังรูปที่ 3-17 พบเพียงสัญญาณไอออนของโมเลกุลที่  $m/z$  969.094 ซึ่งสอดคล้องกับมวลโมเลกุลของ T2TP จึงอาจเป็นไปได้ว่าสังกะสีหลุดออกจากโครงสร้างของพอร์ไฟรินในภาวะของการวัดหรือในภาวะของปฏิกิริยา จึงสรุปได้ว่าภาวะในการสังเคราะห์โดยใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์ ไม่สามารถทำให้เกิดพอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์ตามแผนภาพที่ 3-10





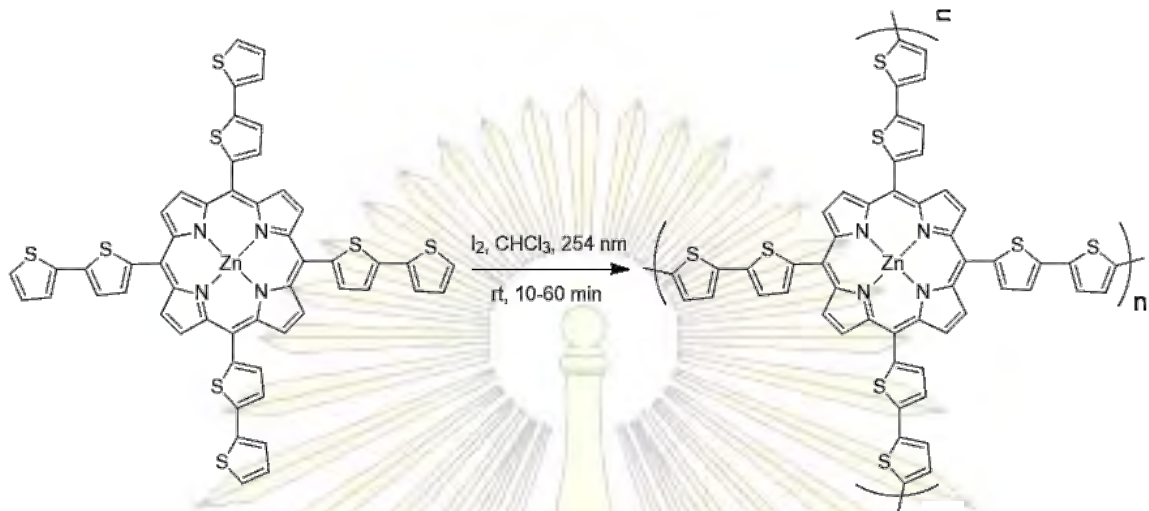
รูปที่ 3-16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่ได้จากการสังเคราะห์พอร์ไฟรินไทโอพีนโคพอลิเมอร์โดยใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์



รูปที่ 3-17 MALDI-TOF แมสสเปกตรัมของสารผสมของปฏิกิริยา จากปฏิกิริยาในภาวะที่ใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์

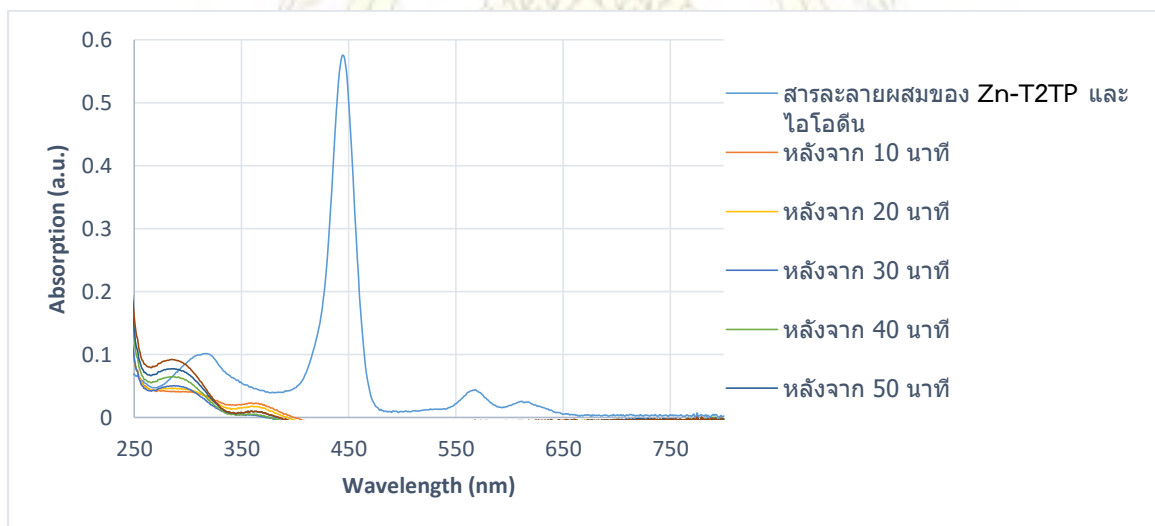
### 3.6.2 การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์ทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่มีไอโอดีน

การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์ทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่มีไอโอดีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และฉายแสงที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ดำเนินในลักษณะที่คล้ายกับการสังเคราะห์พอลิไทโอพีน โดยใช้ Zn-T2TP เป็นสารตั้งต้น แต่ใช้ความเข้มข้นที่ต่ำกว่า คือ 10 mg/mL สมการของปฏิกิริยาสำหรับการทดลองนี้แสดงดังแผนภาพที่ 3-11



แผนภาพที่ 3-11 สมการการสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอฟีนโคพอลิเมอร์โดยใช้แสงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ในภาวะที่มีไอโอดีน

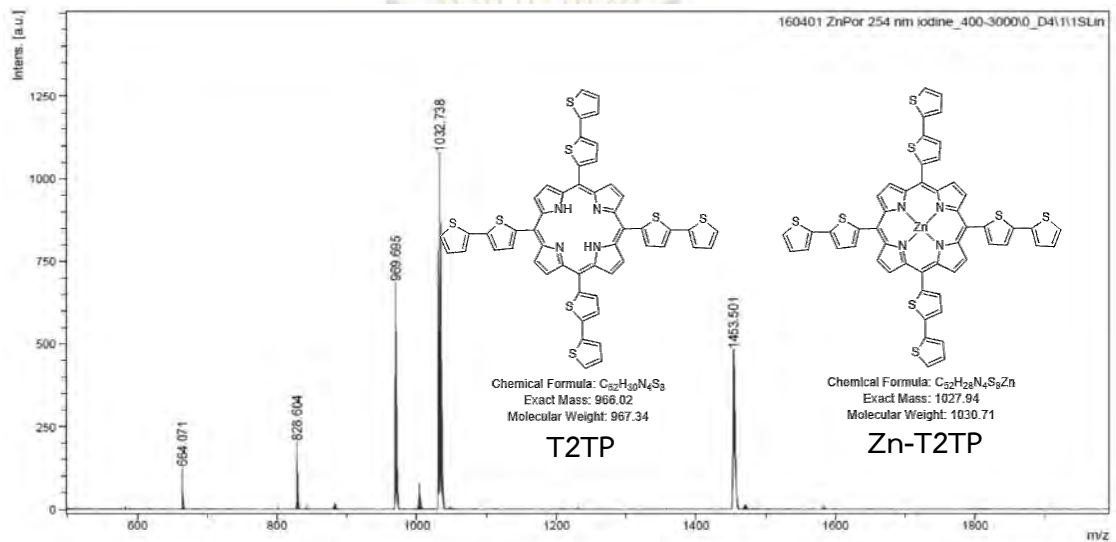
จากการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสารผสมของปฏิกิริยาที่ได้ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปการดูดกลืนแสงที่เป็นเอกลักษณ์ของพอร์ไฟรินทั้งหมดหายไป และเกิดช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงต่ำกว่าความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ดังรูปที่ 3-18



รูปที่ 3-18 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารผสมของปฏิกิริยาจากการสังเคราะห์ พอร์ไฟรินไทโอฟีนโคพอลิเมอร์ ในภาวะใช้แสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร และไอโอดีน

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MALDI-TOF แมสสเปกโตรเมตรีดังรูปที่ 3-19 พบเพียงสัญญาณไอออนของโมเลกุลที่  $m/z$  969.695 ซึ่งสอดคล้องกับมวลโมเลกุลของ T2TP จึงอาจเป็นไปได้ว่าสังกะสีหลุดออกจากโครงสร้างของพอร์ไฟรินในภาวะของการวัดหรือในภาวะของปฏิกิริยา จึงสรุปได้ว่า

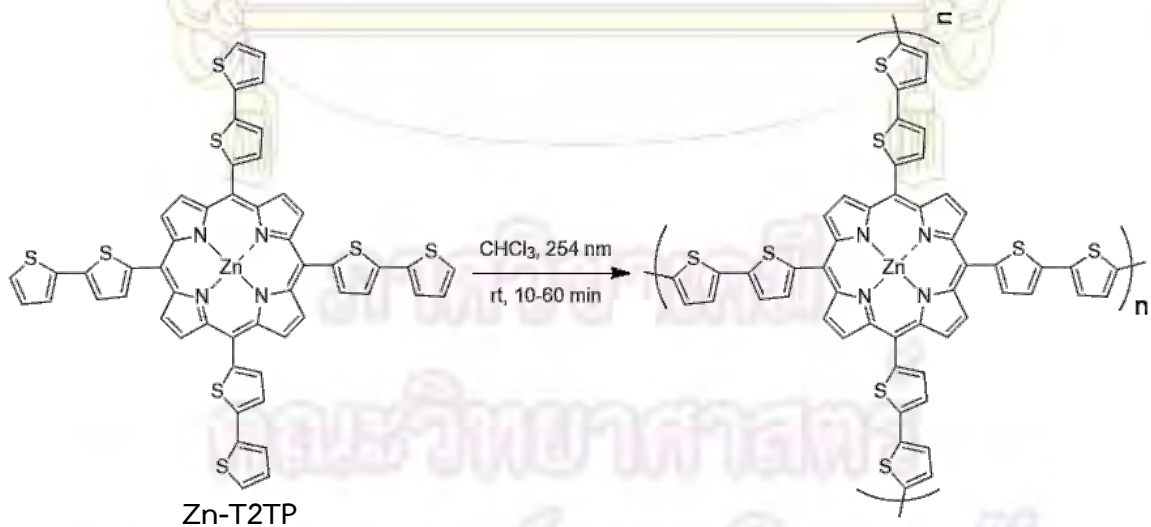
ภาวะในการสังเคราะห์ทางเคมีเชิงแสงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ในภาวะที่มีไอโอดีน ไม่สามารถทำให้เกิดพอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์



รูปที่ 3-19 MALDI-TOF แมสสเปกตรัมของสารผสมของปฏิกิริยา โดยใช้ภาวะที่ใช้แสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร และใช้ไอโอดีน

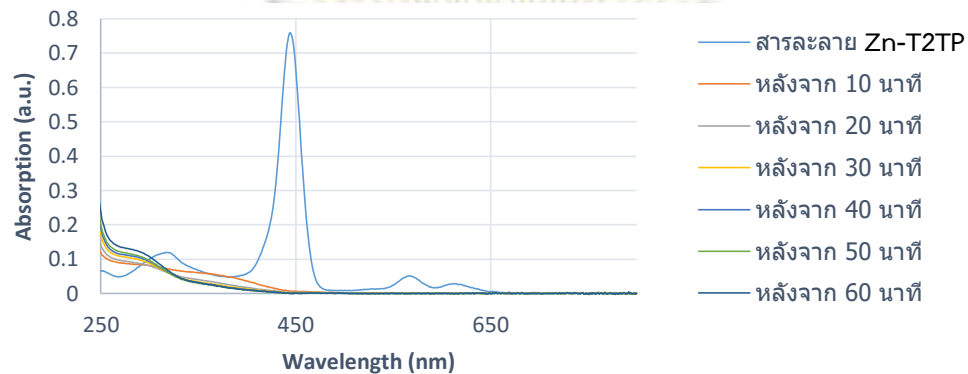
### 3.6.3 การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์ทางเคมีเชิงแสงในภาวะที่ไม่มีไอโอดีน

การสังเคราะห์พอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์ทางเคมีเชิงแสงโดยฉายแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ดำเนินในลักษณะที่คล้ายกับการสังเคราะห์พอลิไทโอพีน โดยใช้ Zn-T2TP เป็นสารตั้งต้น แต่ใช้ความเข้มข้นที่ต่ำกว่า คือ 10 mg/mL สมการของปฏิกิริยาสำหรับการทดลองนี้แสดงดังแผนภาพที่ 3-12



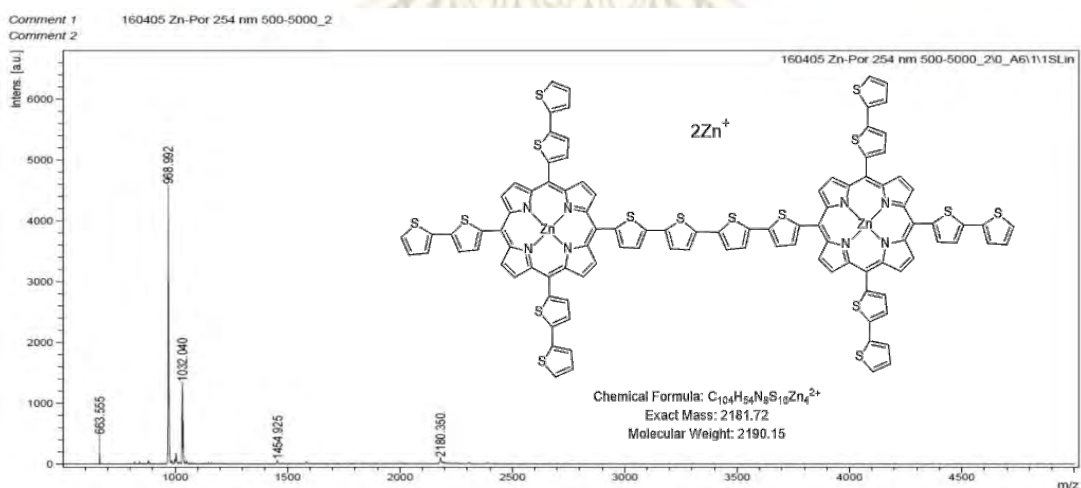
แผนภาพที่ 3-12 สมการการสังเคราะห์ พอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์ ทางเคมีเชิงแสงโดยใช้แสงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

การวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสารผสมของปฏิกิริยาที่ได้ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปการดูดกลืนแสงที่เป็นเอกลักษณ์ของพอร์ไฟรินทั้งหมดหายไป และเกิดช่วงการดูดกลืนแสงที่ช่วงต่ำกว่าความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ดังรูปที่ 3-20



รูปที่ 3-20 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารผสมของปฏิกิริยาจากการสังเคราะห์พอร์ไฟรินไทโอฟีนโคพอร์เมอร์ในภาวะใช้แสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค MALDI-TOF แมสสเปกโตรเมตริ์ดรูปที่ 3-21 พบว่า เกิดสัญญาณไอออนของโมเลกุลที่  $m/z$  2180.350 ซึ่งสอดคล้องกับไดเมอร์ของ Zn-T2TP ที่มีการรวมตัวกับสังกะสีไอออนอีก 2 ไอออน ซึ่งถึงแม้ว่าไอออนที่ให้พิกดังกล่าวอาจมาจากภาวะของการวิเคราะห์แมสสเปกโตรเมตรี แต่ก็เป็นไปได้สูงเช่นกันว่าภาวะในการสังเคราะห์นี้อาจสามารถทำให้เกิดไดเมอร์ของพอร์ไฟริน-ไทโอฟีนได้จริง จึงควรถูกนำมาศึกษาเพิ่มเติมต่อไป



รูปที่ 3-21 MALDI-TOF แมสสเปกตรัมของสารผสมของปฏิกิริยา จากปฏิกิริยาในภาวะที่ใช้แสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

## บทที่ 4

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสังเคราะห์พอลิไทโอพีน พบว่าภาวะที่เป็นไปได้ที่จะสามารถใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์มี 3 ภาวะได้แก่ ภาวะที่ใช้เฟอร์ริก(III) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ภาวะที่ใช้แสงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร และภาวะที่ใช้แสงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรและมีไอโอดีน โดยเมื่อนำภาวะทั้งสามมาใช้ในการเตรียมพอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์พบว่าสารผสมของปฏิกิริยาที่ได้จากภาวะที่ฉายแสงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ให้ผลจากแมสสเปกโตรเมทรีที่แสดงความเป็นไปได้ของการเกิดไดเมอร์ของสารประกอบเป้าหมายเกิดขึ้น จึงเป็นภาวะที่น่าจะนำไปศึกษาพัฒนาให้เหมาะสมสำหรับการเตรียมพอร์ไฟริน-ไทโอพีนโคพอลิเมอร์มากยิ่งขึ้นต่อไป

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## เอกสารอ้างอิง

1. Organic Photovoltaics.  
<http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/organic-electronics/opv-tutorial.html> สืบค้นข้อมูลเมื่อ 25 มีนาคม 2559
2. Sygkridou, D.; Sahin, C.; Varlikli, C.; Stathatos, E., Comparative studies of pyridine and bipyridine ruthenium dye complexes with different side groups as sensitizers in sol-gel quasi-solid-state dye sensitized solar cells. *Electrochimica Acta* **2015**, *160*, 227–234.
3. Ke, J.-C.; Wang, Y.-H.; Chen, K.-L.; Huang, C.-J., Effect of organic solar cells using various sheet resistances of indium tin oxide and different cathodes: Aluminum, silver. *Synthetic Metals* **2015**, *201*, 25–29.
4. Angaridis, P. A.; Lazarides, T.; Coutsolelos, A. C., Functionalized porphyrin derivatives for solar energy conversion. *Polyhedron* **2014**, *82*, 19–32.
5. Kaiser, M.; Nádaždy, V.; Šiffalovič, P.; Ivančo, J.; Majková, E., Correlation between electrical parameters and defect states of polythiophene:fullerene based solar cell. *Thin Solid Films* **2016**, in press.
6. Arrechea, S.; Clifford, J. N.; Pellejà, L.; Aljarilla, A.; de la Cruz, P.; Palomares, E.; Langa, F., Charge recombination losses in thiophene-substituted porphyrin dye-sensitized solar cells. *Dyes and Pigments* **2016**, *126*, 147–153.
7. Vicente, M. G. H.; Jaquinod, L.; Smith, K. M. “Oligomeric Porphyrin Arrays” *Chem. Commun.* **1999**, 1771–1782.
8. Thunell, S. “Porphyrins, Porphyrin Metabolism and Porphyrins. I. Update.” *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* **2000**, *60*, 509–540.
9. Li, L.; Huang, Y.; Peng, J.; Cao, Y.; Peng, X. Enhanced performance of solution-processed solar cells based on porphyrin small molecules with a diketopyrrolopyrrole acceptor unit and a pyridine additive. *J. Mater. Chem. A* **2013**, *1*, 2144–2150.

10. Zhou, W.; Shen, P.; Zhao, B.; Jiang, P.; Deng, L.; Tan, S., Low band gap copolymers consisting of porphyrins, thiophenes, and 2,1,3-benzothiadiazole moieties for bulk heterojunction solar cells. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry* **2011**, *49* (12), 2685–2692.
11. Wang, Y.; Xu, L.; Wei, X.; Li, X.; Ågren, H.; Wu, W.; Xie, Y., 2-Diphenylaminothiophene as the donor of porphyrin sensitizers for dye-sensitized solar cells. *New Journal of Chemistry* **2014**, *38* (7), 3227.
12. Afrooz, M.; Dehghani, H., Significant improvement of photocurrent in dye-sensitized solar cells by incorporation thiophene into electrolyte as an inexpensive and efficient additive. *Organic Electronics* **2016**, *29*, 57–65.
13. Li, G.; Zhu, R.; Yang, Y. “Polymer Solar Cells” *Nat. Photonics* **2012**, *6*, 153–161.
14. Gonçalves, V. C.; Balogh, D. T. “Optical Chemical Sensors Using Polythiophene Derivatives as Active Layer for Detection of Volatile Organic Compounds” *Sensors and Actuators B* **2012**, *162*, 307–312.
15. Perepichka, I. F.; Perepichka, D. F.; Meng, H.; Wudl, F. “Light-Emitting Polythiophenes” *Advanced Materials* **2005**, *17*, 2281–2305.
16. Fan, J.; Zhang, Y.; Lang, C.; Qiu, M.; Song, J.; Yang, R.; Guo, F.; Yu, Q.; Wang, J.; Zhao, L., Side chain effect on poly(benzodithiophene-co-dithienobenzoquinoxaline) and their applications for polymer solar cells. *Polymer* **2016**, *82*, 228–237.
17. Jaymand, M.; Hatamzadeh, M.; Omid, Y., Modification of polythiophene by the incorporation of processable polymeric chains: Recent progress in synthesis and applications. *Progress in polymer science* **2015**, *47*, 26–69.
18. Kruse, A.; Baalman, A.; Budden, W.; Schlett, V.; Hennecke, M., Thin conductive coatings formed by plasma polymerization of 2-iodothiophene. *Surface and Coatings Technology* **1993**, *59* (1), 359–364.
19. Teslaru, T.; Topala, I.; Dobromir, M.; Pohoata, V.; Curecheriu, L.; Dumitrascu, N., Polythiophene films obtained by polymerization under atmospheric pressure plasma conditions. *Materials Chemistry and Physics* **2016**, *169*, 120–127.

20. Wittawat Keawsongsaeng. Synthesis of benzoporphyrin-thiophene derivatives for optoelectronic applications. Master's Thesis, Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 2013.
21. Fuks-Janczarek, I.; Kityk, I. V.; Miedzinski, R.; Gondek, E.; Danel, A.; Zagorska, M., Specific features of UV-vis absorption spectra of cis- and trans-polythiophenes. *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy* **2006**, *64* (1), 264–71.
22. Huang, J.-H.; Chu, C.-W., Achieving efficient poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-based supercapacitors by controlling the polymerization kinetics. *Electrochimica Acta* **2011**, *56* (20), 7228–7234.
23. Shimidzu, T.; Segawa, H.; Wu, F.; Nakayama, N. Approaches to conducting polymer devices with nanostructures: photoelectrochemical function of one-dimensional and two-dimensional porphyrin polymers with oligothieryl molecular wire. *Journal of Photochemistry and Photobiology A* **1995**, *92*, 121–127.

ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้วิจัย

นายพชัย พานปฐุ รหัสประจำตัวนิสิต 553 31188 23 เกิดเมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายสายสามัญ แผนกวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2554 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2555 ที่อยู่ปัจจุบันเลขที่ 314 ถนน สีปศิริ ซอย 3/40 ตำบลในเมือง อำเภอเมือง นครราชสีมา 30000



ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย