หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำและทฤษฎีทั่วไป

1.1 บทนำ

หลังจากได้มีการค้นพบพอลิอะเซทีลีน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าโดยการสังเคราะห์โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมี ในปี ค.ศ. 1976 ได้มีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในเรื่องนี้กันอย่างกว้างขวาง พบว่าพอลิเมอร์นำไฟฟ้านี้เป็นสารองค์ประกอบคาร์บอนสังยุคแบบเชิงเส้น (linearly conjugated carbon compound) โดยอะตอมของคาร์บอนเชื่อมโยงกันด้วยพันธะเดี่ยว(single bond) และพันธะคู่(double bond) สลับกันไป และพบว่า π-อิเล็กตรอนของระบบนี้เป็นตัวทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น จึงได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์สังยุค(conjugated polymers) แบบอื่นๆขึ้น ทั้งที่เป็นแบบเชิงเส้นและเป็นแบบวง ปรากฏว่าได้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าอีกหลายชนิด พอลิพิรโรล์เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งถูกค้นพบโดยการสังเคราะห์โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมี(Electrochemical synthesis) ในปี ค.ศ. 1979 ในช่วง 7 ปีแรก ค.ศ. 1979-1988 ได้มีการศึกษาพอลิพิรโรล์กันอย่างกว้างขวาง พบว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าของพอลิพิรโรล์ มีค่าต่ำกว่าพอลิอะเซทีลีน แต่ปรากฏว่ามีความเสถียรภาพทางไฟฟ้ามากกว่า ต่อมาในปี ค.ศ. 1988 พบว่าพอลิพิรโรล์ที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูง สามารถผลิตขึ้นได้โดยวิธีการสังเคราะห์ทางเคมีในสารละลาย(Chemical synthesis in solution) จึงได้มีการศึกษากระบวนการขนส่งทางไฟฟ้าของพอลิพิรโรล์ที่สังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีในสารละลาย(CSppy)นี้ว่ามีคุณสมบัติเหมือนกับพอริพิรโรล์ที่สังเคราะห์โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมี(ECSppy) หรือไม่ ได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัย ค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ของ CSppy แล้วพบว่ามีคุณสมบัติเหมือนกับของ ECSppy ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพอลิพิรโรล์ทั้งสอง จึงควรศึกษาค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆของ CSppy เพิ่มเติม เพื่อจะได้เปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของ ECSppy ซึ่งเคยมีผู้อื่นทำไว้ก่อนแล้ว ว่ามีคุณสมบัติคล้ายกันหรือแตกต่างกันอย่างไร

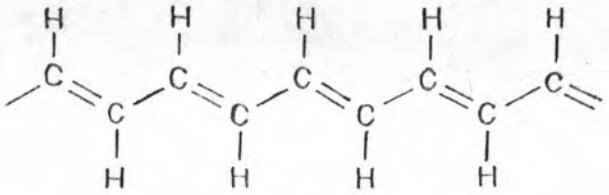
จุดมุ่งหมายในการวิจัยครั้งนี้จะศึกษาถึงกระบวนการขนส่งทางไฟฟ้า ของพอลิพิรโรล์ ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นโดยวิธีทางเคมีในสารละลาย โดยวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของพอลิพิรโรล์นี้ ในช่วงอุณหภูมิ 77 เคลวินจนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้า-ความร้อนกับอุณหภูมิ และวิเคราะห์ชนิดของพาหะนำไฟฟ้าของพอลิพิรโรล์ และกระบวนการนำไฟฟ้าโดยทั่วๆไปของพอลิพิรโรล์แบบนี้

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยครั้งนี้เริ่มด้วยการศึกษาค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนทางทฤษฎี ต่อมาพัฒนาชุดทดลองสำหรับวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสาร ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ หลังจากนั้นทำการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของ CSppy ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่ำเรื่อยลงไปจนถึงช่วงอุณหภูมิ 77 เคลวิน สุดท้ายนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาวิเคราะห์และสรุปผล

ประโยชน์ที่จะได้จากการวิจัยครั้งนี้คือจะได้ความรู้ความชำนาญในการพัฒนาเครื่องมือทดลองทางวิทยาศาสตร์ ได้ความเข้าใจในวิธีการวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของสาร ตลอดจนได้รับความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับกระบวนการขนส่งของพอลิพิรโรล์ที่สังเคราะห์ขึ้นแบบใหม่นี้

1.2 ประวัติของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer) ที่ค้นพบชนิดแรกคือ พอลิอะเซทีลีน [1] (polyacetylene) พบว่า จากการโดปพอลิอะเซทีลีนด้วยไอโอดีน จะทำให้พอลิอะเซทีลีนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงเทียบได้กับทองแดง [2] ได้มีการอธิบายปรากฏการณ์การนำไฟฟ้าของพอลิอะเซทีลีนกันอย่างกว้างขวาง แต่จนถึงปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีใดที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ขนส่งของพอลิอะเซทีลีน ได้ทุกแง่ทุกมุม ทฤษฎีที่ยอมรับกันอย่างกว้างๆ มีดังนี้ [1,3] สารตัวอย่างพอลิอะเซทีลีนที่ไม่ถูกโดป (pristine sample) จะมีสภาพเป็นฉนวน กล่าวคือ



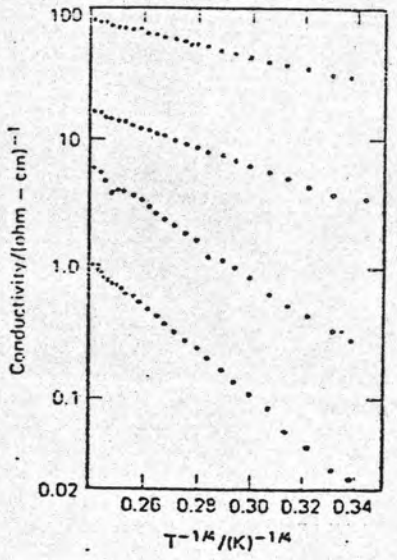
รูปที่ 1.1 แสดงสูตรโมเลกุลของพอลิอะเซทีลีน

π-อิเล็กตรอน จากพันธะสังยุคของพอลิอะเซทีลีน จะฟอร์มแถบนำ (conducting band) และแถบวาเลนซ์ (valence band) จะมีระดับพลังงานต่างกันมาก พบว่าแถบพลังงานนี้อาจให้อิเล็กตรอน หรือ รับอิเล็กตรอนจากอะตอมโดป ทำให้เกิดพาหะแบบ p หรือ n ขึ้น คล้าย ๆ ในเรื่องของสารกึ่งตัวนำ แต่ในรายละเอียดแล้ว สำหรับพอลิเมอร์ยังมีปรากฏการณ์ที่แตกต่างไปอีก ตัวอย่างเช่น สำหรับการโดปแบบ p อิเล็กตรอนจากอะตอมของพอลิเมอร์จะเคลื่อนไปอยู่ที่โดปอะตอม ทำให้เกิดไอออนลบ ประจุบวกขึ้นที่พอลิเมอร์อะตอม และประจุลบที่เกิดขึ้นใหม่นี้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของพอลิเมอร์ขึ้นในบริเวณที่มีประจุอยู่ ซึ่งจะเป็นบริเวณที่อะตอมเคลื่อนออกจากตำแหน่งปกติของมัน เมื่อการโดปเกิดมากขึ้น บริเวณเหล่านี้เกิดมากขึ้น จะมีระยะใกล้กันเข้า และในที่สุดจะซ้อนกัน ผลคือทำให้เกิดแถบพลังงานใหม่ขึ้นซึ่งแถบนี้จะซ้อนกับแถบนำและแถบวาเลนซ์ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่นำไฟฟ้าได้อย่างสะดวก ทำให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าขึ้น

ที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นกระบวนการนำไฟฟ้า ภายในสายโซ่พอลิเมอร์ กระบวนการนี้สำคัญในการนำไฟฟ้าของพอลิอะเซทีลีน ได้มีผู้พัฒนาการยืดทำให้โมเลกุลของพอลิอะเซทีลีนเรียงตัวกันตามยาว morphology ของพอลิอะเซทีลีนฟิล์มแบบนี้ จะมีลักษณะเป็นเส้นใยยาวๆ ซ้อนๆ กัน พบว่าพอลิอะเซทีลีนแบบนี้มีสภาพนำไฟฟ้าสูงมาก (10^5 S/cm) [3] แต่สภาพการนำไฟฟ้าไม่มีความเสถียร

หลังจากค้นพบพอลิอะเซทีลีน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดแรกแล้ว ได้มีผู้พยายามสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าแบบอื่นๆอีก ซึ่งปรากฏว่าได้พบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าอีกหลายชนิด เช่น พอลิพาราฟินีลีน(polyparaphenylene) พอลิไธโอฟีน(polythiophine) พอลิ-แอนีลีน(polyaniline) และพอลิพิรโรล์(polypyrrole) เป็นต้น พอลิพิรโรล์ซึ่งตอนแรกสังเคราะห์ขึ้นโดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมี [3-7] เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่น่าสนใจในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ พบว่าพอลิเมอร์นี้มีค่าสภาพนำไฟฟ้าประมาณ 10^{2} S/cm แม้ว่าค่าสภาพนำไฟฟ้านี้จะต่ำกว่าของพอลิอะเซทีลีน แต่ความเสถียรทางไฟฟ้ามีมากกว่า (วิธีการสังเคราะห์พอลิพิรโรล์โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมี จะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อ 1.3)

ในการวิเคราะห์ด้วย electron spin resonance(ESR) พบว่าขณะนำไฟฟ้าพอลิพิรโรล์จะมีสปินของอิเล็กตรอนเป็นศูนย์ [8] มีการเสนอว่าการนำไฟฟ้าเป็นแบบ bipolaron ทฤษฎีนี้มีผู้เชื่อถือมากที่สุด แต่ก็ยังมีการวิจัยเพิ่มเติมต่อเนื่องในปัจจุบัน ตามทฤษฎีนี้พาหะนำไฟฟ้าในพอลิพิรโรล์น่าจะเป็นโฮล พาหะดังกล่าวสามารถนำไฟฟ้าได้ดีในแต่ละสายโซ่โมเลกุล เมื่อสุดสายโซ่พาหะจำต้องกระโดด(hop) ไปสู่สายโซ่อื่น และอย่างที่กล่าวแล้ว เนื่องจากโมเลกุลพอลิพิรโรล์มีขนาดค่อนข้างสั้น [8,9] และยึดให้ตรงไปทางเดียวได้ยาก ไม่เหมือนในกรณีของพอลิอะเซทีลีน ดังนั้นการนำไฟฟ้าจึงถูกควบคุมโดยกระบวนการกระโดด(hopping mechanism) นี้เอง ความสัมพันธ์ระหว่าง σ กับ T จึงเป็นดังกราฟในรูปที่ 1.2 [10]



รูปที่ 1.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า log σ กับ $T^{-1/4}$

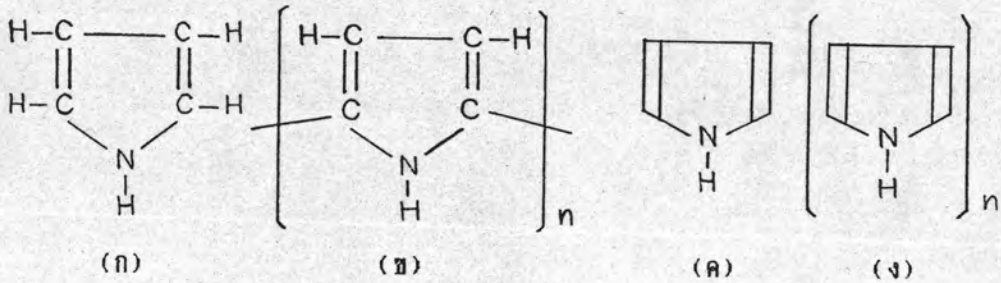
ต่อมาอีก 7 ปี หลังค้นพบพอลิพิรโรล์ที่สังเคราะห์โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมี ก็สามารถสังเคราะห์ขึ้นแบบใหม่ โดยวิธีทางเคมีในสารละลาย(รายละเอียดทางการสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีในสารละลายจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อ 1.4) วิธีการสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีในสารละลายนี้เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก สามารถทำเป็นสารตัวอย่างของพอลิพิรโรล์ ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ซึ่งจะนำมาศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ตามที่ได้กล่าวข้างต้นแล้วว่าพอลิพิรโรล์มีความเสถียรทางไฟฟ้ามากกว่าเมื่อเทียบกับพอลิอะเซทีลีน กล่าวคือค่าสภาพนำไฟฟ้าจะไม่ลดลงอย่างรวดเร็วกับเวลา เมื่อเก็บไว้ในอากาศ ดังนั้นพอลิพิรโรล์สามารถนำไปประยุกต์เป็นเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ มากมาย เช่น แบตเตอรี่ที่ประจุใหม่ได้(rechargeable battery), ตัวเก็บประจุพอลิพิรโรล์ (polypyrrole condenser), ลำโพงเสียงโปร่งใส(transparency loudspeaker) และอุปกรณ์แสดงผล(display device) เป็นต้น

พอลุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 พอลิพิรโรล์ที่สังเคราะห์โดยวิธีไฟฟ้า-เคมี (ECSppy)

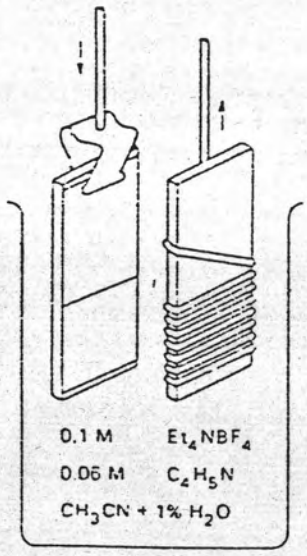
พิรโรล์และพอลิพิรโรล์มีโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 1.3 (ก) และ (ข) ในบางครั้งเขียนย่อๆ เป็นดังรูป (ค) และ (ง) ตามลำดับ พอลิพิรโรล์ประกอบด้วยพิรโรล์ซึ่งโมเลกุลมีลักษณะเป็นวงเชื่อมโยงกันสังเคราะห์ขึ้นได้โดยวิธีการทางไฟฟ้า-เคมี(electrochemical synthesis) พบว่าเมื่อโดปพอลิพิรโรล์ ด้วยไอออนบางอย่างเช่น BF_4^- จะทำให้พอลิพิรโรล์กลายเป็นสารที่นำไฟฟ้าสูงขึ้นได้ [3,4]



(ก) (ข) (ค) (ง)

รูปที่ 1.3 สูตรโครงสร้างของพิรโรล์ (ก) และ พอลิพิรโรล์ (ข)
สูตรโครงสร้างย่อของพิรโรล์ (ค) และ พอลิพิรโรล์ (ง)

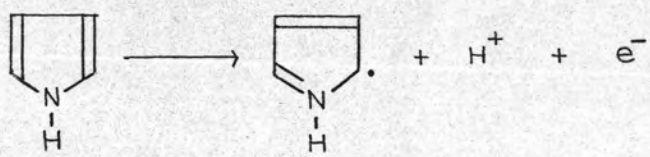
ในการสังเคราะห์ใช้ Et_4NBF_4 0.1 M เป็นอิเล็กโตรไลต์ ละลายในตัวทำละลาย CH_3CN 99% และมีพิรโรล์ผสมอยู่ 0.06 M Et_4NBF_4 จะแตกตัวเป็นไอออนบวก Et_4N^+ และไอออนลบ BF_4^- สำหรับขั้วไฟฟ้าใช้ Pt เป็นขั้วไฟฟ้าลบ และ TiO เป็นขั้วไฟฟ้าบวก ต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าขนาดพอเหมาะกับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งอยู่ในสารละลายของอิเล็กโตรไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แสดงการสังเคราะห์พอลิพิรโรล์โดยวิธีการทางไฟฟ้า-เคมี

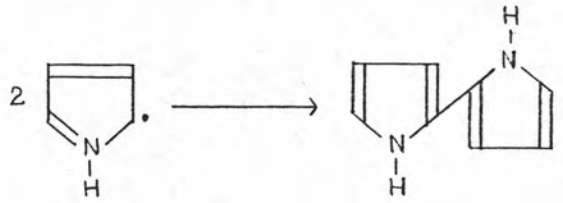
เมื่อปิดวงจรให้กระแสไฟฟ้าไหล สามารถเขียนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ได้ตามลำดับดังนี้

1) พิรโรล์ จะแตกตัวเป็นไอออนลบของพิรโรล์



(1.3.1)

2) ไอออนลบของพิรโรล์ 2 ตัว รวมกันเป็น dimer ของพิรโรล์ ที่ขั้วไฟฟ้าบวก พร้อมกับให้อิเล็กตรอน 2 ตัว แก่ขั้วไฟฟ้าบวกนั้น



(1.3.2)

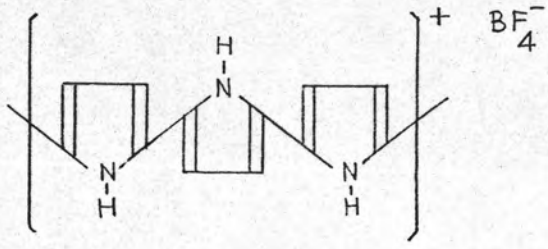
3) ไอออนบวกของไฮโดรเจน 2 ตัว จะรับอิเล็กตรอน 2 ตัว จากขั้วไฟฟ้าลบ Pt กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2 \qquad (1.3.3)$$

4) dimer ของพิรโรล์ จะแตกตัวเป็นไอออนลบ จากนั้นจะรวมกับไอออนลบของพิรโรล์ในข้อ 1) ให้ trimer ของพิรโรล์ พร้อมกับเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วไฟฟ้าบวก ทำนองเดียวกันกับปฏิกิริยาที่อธิบายข้างบน

5) ปฏิกิริยาเกิดขึ้นต่อเนื่องเรื่อยๆไปจนเกิดสายโซ่พอลิพิรโรล์ยาวขึ้นเรื่อยๆ มองเห็นเป็นฟิล์มดำจับอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าบวก

6) จากการวิเคราะห์ต่อมาพบว่าทุกๆ 3 กลุ่มของพิรโรล์ในพอลิเมอร์จะให้อิเล็กตรอนแก่ขั้วไฟฟ้าบวก ขณะเดียวกันที่ BF_4^- จะแทรกตัวเข้าไปอยู่ในพอลิเมอร์ เข้ารวมกับพิรโรล์ทั้ง 3 กลุ่มนี้ ดังแสดงในรูปที่ 1.5 BF_4^- จึงเป็น dopant ของพอลิพิรโรล์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยวิธีนี้



รูปที่ 1.5 แสดงโครงสร้างของพอลิพิรโรล์ที่สังเคราะห์โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมี

พบว่าการสังเคราะห์จะได้ผลดีมากถ้าทำในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน ปัจจุบันได้มีการพัฒนาพอลิพิรโรล์แบบไฟฟ้า-เคมีนี้ขึ้นมากมายหลายแบบ [11] พอลิพิรโรล์ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นแบบนี้(ECSppy) นับได้ว่าเป็นสารที่มีโครงสร้างสมบูรณ์ มีผิวเงามัน มีสภาพนำไฟฟ้าสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้หลายแบบ เช่นนำไปทำแบตเตอรี่อัดไฟได้เป็นต้น

1.4 พอลิพิรโรล์ที่สังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีในสารละลาย (CSppy)

ในตอนแรกเชื่อกันว่า พอลิพิรโรล์คุณภาพสูงสามารถสังเคราะห์ได้โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมีเท่านั้น แต่ต่อมาอีก 7 ปี ก็ค้นพบว่าพอลิพิรโรล์สามารถสังเคราะห์ได้โดยการสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีในสารละลาย ได้พอลิพิรโรล์มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงและได้ปริมาณมากในการสังเคราะห์แต่ละครั้งเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมี ที่กล่าวมาแล้ว

1.4.1 วิธีการสังเคราะห์โดยสังเขป สามารถเขียนเป็นข้อๆ ได้ดังนี้ [12]

1) เตรียมสารละลายเฟอริคคลอไรด์($FeCl_3$) 2.5 M ในเมทานอล (CH_3OH) (1 โมล ของ $FeCl_3$ + CH_3OH 1 ลิตร)

2) พ่นไนโตรเจนแห้ง(N_2) ลงไปในสารละลายที่อุณหภูมิ 0°C ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ออกซิเจน(O_2)

3) ใส่พิรโรล์ลงไปมวลพอเหมาะ(หาได้จากสมการข้างล่าง)

4) กวนเป็นเวลา 20 นาที จะได้ผงสีดำตกตะกอนนำมากรอง และล้างด้วยเมทานอล 2 ครั้ง กรองนำตะกอนพอลิพิรโรล์ออกมา หลังจากนั้นทำให้แห้งโดยการอบในสูญญากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

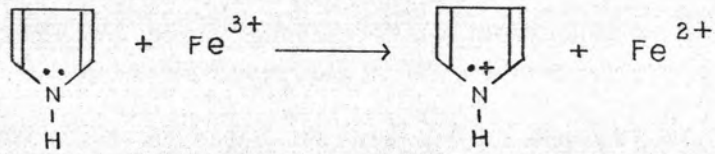
5) อัดเป็นแผ่นบางที่ความดันสูงมาก จะได้สารตัวอย่างพอลิพิรโรล์

1.4.2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชั่นในการสังเคราะห์

เมื่อใส่ $FeCl_3$ ลงไปในสารละลาย เมทิลแอลกอฮอล์ หรือเมทานอล จะเกิดการแตกตัวเป็น $Fe^{3+} + 3Cl^-$ ดังสมการ

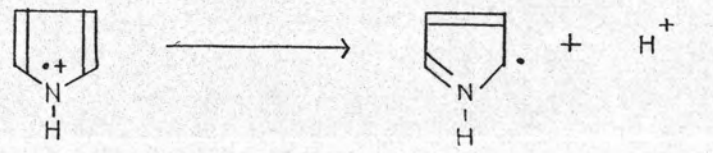
$$FeCl_3 \longrightarrow Fe^{3+} + 3Cl^- \qquad (1.4.1)$$

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของพิรโรล์ จะเห็นว่า N มีอิเล็กตรอน 2 ตัว ที่ไม่ได้จับคู่กับใคร อิเล็กตรอนตัวหนึ่งจะหลุดไปจับกับ Fe^{3+} กลายเป็น Fe^{2+} โครงสร้างของพิรโรล์ จะกลายเป็นดังสมการ



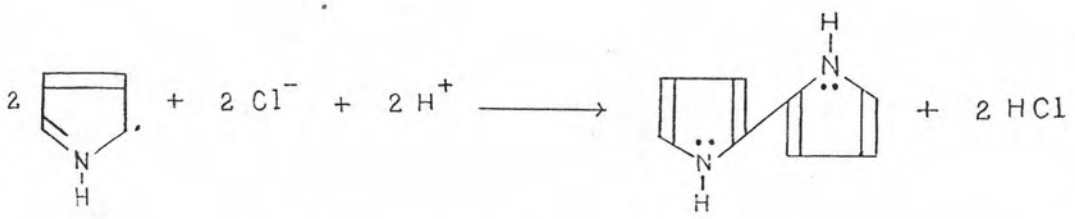
(1.4.2)

ต่อมาไอออนบวกของพิรโรล์มีการจัดพันธะใหม่ โดยเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เกิดการจับคู่ของอิเล็กตรอนกันใหม่ระหว่าง C , N ทำให้เกิดเป็นพันธะคู่ (douple bond) และอิเล็กตรอนของ C คู่บนก็จะเกิดการจับคู่กลายเป็นพันธะคู่เช่นกัน โครงสร้างแสดงได้ดังสมการ



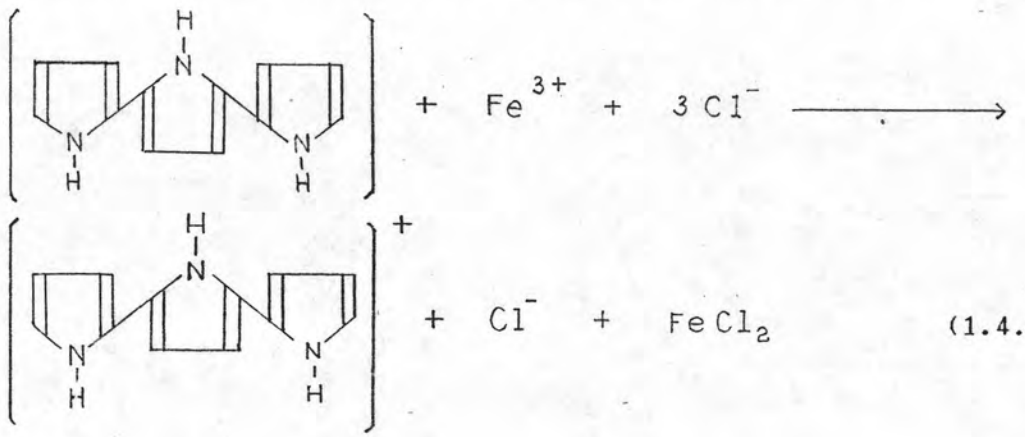
(1.4.3)

จะสังเกตได้ว่า ไอออนบวกที่จัดตัวใหม่แล้ว มี C ตัวหนึ่งที่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี และเมื่อมีโมเลกุลอย่างนี้ 2 ตัว (ซึ่งเกิดจาก 2 พิรโรล์ และ $2FeCl_3$) รวมกับ $2Cl^-$ จะได้ dimer ของพิรโรล์ และ 2HCl ดังสมการ



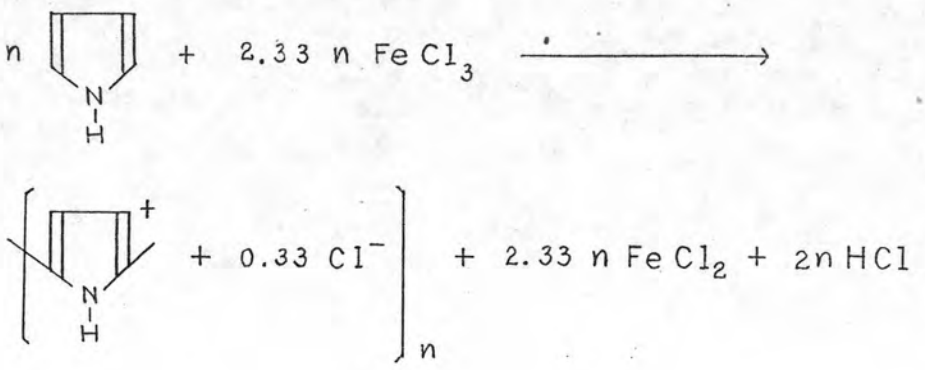
(1.4.4)

ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อเนื่องไป เกิดพอลิพิรโรล์ที่โมเลกุลยาวขึ้นตามลำดับจำนวนมาก จนหมดมอนอเมอร์ของพิรโรล์ พบว่าทุกๆพิรโรล์ 3 ตัว ในพอลิพิรโรล์ที่สังเคราะห์ได้จะให้อิเล็กตรอนหนึ่งตัวกับ Fe^{3+} ทำให้กลายเป็น Fe^{2+} พร้อมกับจับกับ Cl^- ดังแสดงในปฏิกิริยา



(1.4.5)

และมีสมการของปฏิกิริยารวมเป็น



(1.4.6)

ข้อดีของการสังเคราะห์พอลิพิรโรล์โดยวิธีทางเคมีในสารละลายคือมีวิธีการสังเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยาก ในการสังเคราะห์แต่ละครั้งจะได้พอลิพิรโรล์มีปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์โดยวิธีทางไฟฟ้า-เคมี และการสังเคราะห์โดยวิธีทางเคมีในสารละลายนี้ยังสามารถปรับปรุงพัฒนาวิธีการสังเคราะห์ได้อีกมาก

ได้มีการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติต่างๆของ CSppy ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นแบบนี้และเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของ ECSppy สำหรับการศึกษาค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆของพอลิพิรโรล์ทั้งสองแบบนี้ พบว่ามีลักษณะเป็นการนำไฟฟ้าแบบกระบวนการกระโดดคล้ายๆกัน [13]

สำหรับในการวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนของ CSppy ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อจะได้ศึกษาเปรียบเทียบ ECSppy ว่ามีคุณสมบัติคล้ายกันหรือไม่ ในการศึกษาวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนนั้นจะอาศัยทฤษฎีของปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อนของสาร และใช้หลักการของทฤษฎีนี้มาพัฒนาเครื่องมือชุดทดลองสำหรับวัดค่ากำลังไฟฟ้าความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ทฤษฎีของปรากฏการณ์ไฟฟ้าความร้อนจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป