



การพัฒนาตัวตรวจวัดก๊าซซมพิษจากอุตสาหกรรม
โดยใช้ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่ได้จากผลพลอยได้ของไบโอดีเซล

โดย

ธวัชชัย ชรินพานิชกุล
อภิรักษ์ สุทธิธารธวัช
โครงการวิจัยเลขที่ 105G-CHEM-2552
ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ

พฤศจิกายน 2553

การพัฒนาตัวตรวจวัดก๊าซมลพิษจากอุตสาหกรรม
โดยใช้ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่ได้จากผลพลอยได้ของไบโอดีเซล

โดย

ธวัชชัย ชรินพานิชกุล
อภิรักษ์ สุทธิธารธวัช
โครงการวิจัยเลขที่ 105G-CHEM-2552
ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ

พฤศจิกายน 2553

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้ ผู้วิจัยได้จัดทำขึ้นเพื่อสรุปผลงานวิจัยเรื่อง การพัฒนาตัวตรวจวัดก๊าซซมิลพิษจากอุตสาหกรรม โดยใช้ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่ได้จากผลพลอยได้ของไบโอดีเซล โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนทั่วไปจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ 2552 ตามสัญญาเลขที่ GRB_004_52_21_04 ซึ่งมีงบดำเนินการ 1,100,000 บาท (หนึ่งล้านหนึ่งแสนบาทถ้วน) ทั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และผู้เกี่ยวข้องที่ให้ทุนวิจัยดังกล่าวมา ณ ที่นี้ด้วย

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ ได้ทำการสังเคราะห์ อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรโดยใช้กลีเซอรินซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอล และเฟอร์โรซีนเป็น 5 ต่อ 1 10 ต่อ 1 และ 20 ต่อ 1 ตามลำดับ จากผลการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิการสังเคราะห์ 850 องศาเซลเซียส การเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนโดยควบคุมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาให้คงที่จะทำให้อนุภาคต่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น แต่ความยาวของอนุภาคมีค่าลดลง และมีปริมาณปริมาณคาร์บอนที่ไร้รูปร่างมากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เพียงพอที่จะทำให้กลุ่มอะตอมคาร์บอนเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ทั้งหมด นอกจากนี้ แต่เมื่อทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสพบว่า ที่สัดส่วนเฟอร์โรซีนต่ออนุภาคที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะเป็นแคปซูล แต่เมื่อสัดส่วนเฟอร์โรซีนเพิ่มขึ้นจะพบอนุภาคที่มีลักษณะคล้ายหอยเม่นซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าและคล้ายต่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรงอกอยู่บนแคปซูล

ในขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ประกอบแต่งของต่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตะไครเลทได้ด้วยวิธีการเติมต่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรลงในพอลิเมทิลเมตะไครเลทระหว่างการเกิดการปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของเมทิลเมตะไครเลท จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง พบว่าต่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่เติมลงในพอลิเมทิลเมตะไครเลทจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความคงทนต่อความร้อนของพอลิเมทิลเมตะไครเลทบริสุทธิ์ และเมื่อเพิ่มปริมาณของต่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรเข้าไปในพอลิเมทิลเมตะไครเลทจะทำให้โครงข่ายของต่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น

ในส่วนหลักของโครงการวิจัยซึ่งเป็นการพัฒนาตัวตรวจวัดก๊าซที่ทำจากพอลิเมอร์ประกอบแต่งของต่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร และ พอลิเมทิลเมตะไครเลทโดยที่ใช้วิธี Screen printing เมื่อนำตัวตรวจวัดก๊าซไปทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของตัวตรวจวัดก๊าซพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่อปริมาณของต่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่เติมลงในพอลิเมทิลเมตะไครเลทบริสุทธิ์สูงขึ้น เนื่องจากต่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรเกิดการพาดต่อกันจนเป็นโครงข่ายที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ไฟฟ้าไหลผ่านได้มากยิ่งขึ้น เมื่อนำตัวตรวจวัดก๊าซไปสัมผัสกับไอของโทลูอินพบว่าความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากไอของโทลูอินแพร่เข้าไปในเมทริกซ์ของพอลิเมทิลเมตะไครเลทจนทำให้ พอลิเมทิลเมตะไครเลทเกิดการ Swelling ขึ้น นอกจากนี้ไอของโทลูอินยังไปทำลายโครงข่ายของต่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรทำให้ไฟฟ้าไหลผ่านได้น้อยลงส่งผลให้การนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปซึ่งสามารถแปลผลออกมาเป็นปริมาณก๊าซที่ตรวจวัดได้

Abstract

In this research project synthesis of carbon nanoparticles from glycerine, which is a by-product of biodiesel production process, has been conducted by varying the molar ratio of glycerine to ferrocene in the range of 5:1 to 20:1, respectively. It was found that at 850 C, the increase in the glycerine as the carbon source resulted in the elevated production of carbon nanoparticles of which diameters became bigger but shorter in their length. The increase in amorphous carbon was also detected with the increase in the glycerine molar ratio because of the insufficient iron catalyst amount. However, at 1000 C with lower molar ratio of ferrocene, synthesis of carbon nanoparticles with capsule morphology was more enhanced. With the further increase in ferrocene molar ratio, urchin-like carbon nanoparticles were produced.

Preparation of carbon nanoparticle/PMMA composite could be achieved by adding the synthesized carbon nanoparticles into monomer MMA. Based on thermal analyses, the prepared composites exhibited an improved thermal stability when compared with bare PMMA. With an increase in carbon nanoparticles amount, the network of entangling carbon nanoparticles became more aligned.

In the main part, gas sensors containing polymeric composite of the synthesized carbon nanoparticles and PMMA were fabricated using screen printing method. Based on electrical analyses, the initial impedance of the fabricated sensors was strongly dependent upon the content of carbon nanoparticles added into the composites. The higher content the carbon nanoparticles were, the lower the initial impedance was. This is resulted from the formation of entangling carbon nanoparticle network which could enhance the electron transfer. After being exposed to toluene, the electrical impedance of the fabricated sensor became higher due to the penetration of toluene into the matrix of PMMA, resulted in the swelling of polymer which destroyed the entangling carbon nanoparticle network and increased the electron transfer resistance. Therefore, such change of the electrical impedance of the sensor could be interpreted as the adsorbed gas amount.

สารบัญ

หน้า

บทที่

1	บทนำ	1
1.1	บทคัดย่อ	1
1.2	ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.3	วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.4	ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
3	วิธีดำเนินงานวิจัย	12
3.1	สารเคมี.....	12
3.2	การเตรียมอุปกรณ์ทดลองเพื่อสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร	13
3.3	ขั้นตอนการทดลองเตรียมท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร	14
3.4	ตัวแปรที่ศึกษาในการสังเคราะห์.....	15
3.5	การเตรียมอุปกรณ์ทดลองสำหรับตัวตรวจวัดก๊าซ.....	15
3.6	ขั้นตอนการทดลองความสามารถในการตรวจวัดก๊าซ.....	16
3.7	เครื่องมือวิเคราะห์.....	19
4	ผลการดำเนินการวิจัย	22
4.1	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ ...	22
4.2	คุณสมบัติด้านความคงทนต่อความร้อนของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง.....	34

4.3 พันธะเคมีของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง	35
4.4 การจัดเรียง และการกระจายตัวของท่อคาร์บอนในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์	36
4.5 การเกิด Swelling ของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง	37
4.6 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง.....	40
4.7 คุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้า และการตรวจวัดก๊าซของตัวตรวจวัดก๊าซ.....	40
5 สรุปผลการวิจัย.....	45
เอกสารอ้างอิง	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรด้วยวิธีไพโรไลซิสร่วมของกลีเซอรอลและเฟอร์โรซีน ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งของคาร์บอนและตัวเร่งปฏิกิริยาหลักตามลำดับ และศึกษาการนำท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุประกอบแต่งของพอลิเมอร์เมทิลเมตาไครเลทสำหรับใช้ตรวจสอบจับก๊าซพิษของสารประกอบอินทรีย์ประเภทระเหยง่ายที่เป็นปัญหาสำคัญของชุมชนและสิ่งแวดล้อมใกล้เคียงโรงงานอุตสาหกรรม

1.2 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาทางด้านมลพิษในอากาศเป็นอย่างมาก อันเนื่องมาจากก๊าซพิษรั่วไหลหรือการปล่อยก๊าซพิษจากเขตอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง ปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงโดยตรงต่อชุมชนและสิ่งแวดล้อม จากงานวิจัยและหลักฐานต่าง ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปัญหาความรุนแรงดังกล่าว [1] ผลักดันให้นักวิจัยพยายามพัฒนาตัวตรวจวัดสำหรับตรวจวัดก๊าซพิษในอากาศให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

โดยทั่วไป ตัวตรวจวัดก๊าซพิษสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมหลายชนิดไม่สามารถใช้ตัวตรวจวัดก๊าซที่อุณหภูมิสูงได้ ดังนั้นการนำวัสดุชนิดใหม่ ๆ มาประยุกต์ใช้ในการผลิตตัวตรวจวัดก๊าซพิษจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก และหนึ่งในวัสดุที่ได้รับความสนใจมากที่สุดในปัจจุบันคือ ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร (Carbon nanotubes, CNTs) ซึ่งถูกค้นพบโดย Iijima ในปี 1991 [2] ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง (300-600 ตารางเมตรต่อกรัม) ส่งผลให้เกิดการดูดซับของโมเลกุลของก๊าซสูง โมเลกุลของก๊าซดังกล่าวจะส่งผลให้คุณสมบัติด้านความต้านทานของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรเปลี่ยนแปลงไป จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการเตรียมตัวตรวจวัดก๊าซพิษได้ เนื่องจากท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรมีลักษณะเป็นผงซึ่งยากต่อการขึ้นรูปเป็นตัวตรวจวัดก๊าซพิษ และมีราคาสูง ดังนั้นการนำท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรมาประยุกต์ใช้งานในการตรวจวัดก๊าซพิษโดยตรงจึงกระทำได้ยาก อย่างไรก็ตาม ปัญหาด้านการขึ้นรูปและราคาของตัวตรวจวัดก๊าซพิษที่ทำจากท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรสามารถแก้ไขและพัฒนาได้โดยการนำท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรไปใช้เป็นวัสดุ

ประกอบแต่งกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ชนิดอื่น ซึ่งจะช่วยให้ตัวตรวจวัดก๊าซที่เป็นพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรกับพอลิเมอร์นั้นขึ้นรูปได้ง่าย และมีปัจจัยด้านต้นทุนที่ถูกลง [3-4]

ในโครงการวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร และพอลิเมทิลเมตาไครเลท (Polymethyl methacrylate, PMMA) เป็นตัวตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compound, VOC) ซึ่งเป็นปัญหาที่พบบริเวณนิคมอุตสาหกรรมต่าง ๆ

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลพลอยได้ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาทำการบำบัดเบื้องต้น โดยทำการไพโรไลซิสร่วมกับเฟอร์โรซีนในบรรยากาศของไนโตรเจนเพื่อสังเคราะห์อนุภาคท่อคาร์บอนในระดับนาโนเมตรซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดก๊าซมลพิษที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นจึงพัฒนา และทดสอบสมรรถนะของตัวตรวจวัดก๊าซที่พัฒนาขึ้น โดยพิจารณาเงื่อนไขที่ใช้ในการพัฒนาว่ามีผลต่อสมรรถนะอย่างไร

ทั้งนี้ในช่วงแรกจะเป็นการทดสอบความเป็นไปได้ในการนำท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรมาเตรียมเป็นพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตาไครเลท (MWCNT/PMMA) แล้วนำไปทดสอบการตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย โดยใช้ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่มีจำหน่ายในท้องตลาดก่อนที่จะพัฒนาไปสู่การนำท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้เองมาใช้

1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยตลอดทั้งโครงการ จะเน้นการศึกษาวิธีสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรภายในห้องปฏิบัติการ โดยนำผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งคือ กลีเซอรอล มาไพโรไลซิสร่วมกับเฟอร์โรซีน จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เพื่อคัดแยกองค์ประกอบหลัก แล้วจึงนำไปทดลองใช้เป็นส่วนประกอบของการเตรียมพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตาไครเลท (MWCNT/PMMA) เพื่อใช้เป็นตัวตรวจวัดก๊าซ ซึ่งได้ถูกนำไปทดสอบสมรรถนะ และหาความสัมพันธ์กับเงื่อนไขที่ใช้ในการเตรียมตัวตรวจวัด เพื่อจะได้ใช้เป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาในระดับที่สามารถนำไปใช้งานจริงได้ต่อไปในอนาคต

ทั้งนี้ เพื่อให้สอดคล้องการแผนการทำงานในช่วงปีแรก การดำเนินงานสามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.3.1 เตรียมพอลิเมอร์ประกอบแต่งของ MWCNT/PMMA โดยใช้ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 % โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีอินซิทูพอลิเมอร์ไรเซชัน (In situ polymerization)

1.3.2 วิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติของพอลิเมอร์ประกอบแต่งของ MWCNT/PMMA

1.3.3 เตรียมตัวตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายของพอลิเมอร์ประกอบแต่งของ MWCNT/PMMA โดยวิธี screen printing

1.3.4 ตรวจสอบประสิทธิภาพทางด้าน การตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายของพอลิเมอร์ประกอบแต่งของ MWCNT/PMMA ภายใต้สภาวะแตกต่างกัน

1.3.4.1 ความเข้มข้นของก๊าซในช่วง 500-1500 ppm

1.3.4.2 ชนิดของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย เช่น เมทานอล โทลูอิน อะซีโตน และไซโคลเฮกเซน

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์และประยุกต์ใช้อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรเป็นจำนวนมาก แต่ในบรรดาผลงานวิจัยดังกล่าวเมื่อได้ทำการศึกษาในเบื้องต้นโดยพิจารณาถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์ตัวตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจากพอลิเมอร์ประกอบแต่งของอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมอร์ พบว่ามีงานที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนาเป็นงานวิจัยนี้ดังต่อไปนี้

2.1 หลักการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร และการประยุกต์ใช้ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในกระบวนการการดูดซับ พบว่ามีงานที่เป็นประโยชน์ในการพัฒนาเป็นงานวิจัยใหม่ด้วยคุณสมบัติที่พิเศษของอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตร เช่น ความสามารถในการดูดซับของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร (Carbon nanotube; CNT) อาจนำมาพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานนั้น มีการศึกษาอย่างกว้างขวางมาก ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ได้เลือกนำเสนอผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมุ่งเน้นข้อมูลงานที่ทำการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการต่างๆ ที่มีแนวโน้มจะได้ลดต้นทุนในการสังเคราะห์ต่ำ โดยตัวอย่างของกรรมวิธีในการสังเคราะห์ต่างๆ นั้นสามารถสรุปโดยสังเขปดังนี้

ก) การระเหยด้วยเลเซอร์

วิธีการระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) เป็นการปลูกท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรโดยใช้แสงเลเซอร์กำลังสูงยิงไปบนเป้าแกรไฟต์ (graphite target) ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน โดยก๊าซเฉื่อยดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นก๊าซตัวพาในการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทไอของอะตอมคาร์บอนไปยังตัวดักจับ (collector) เมื่อเป้าแกรไฟต์มีอุณหภูมิสูงขึ้น อะตอมของคาร์บอนจะกลายเป็นไอ หลังจากนั้นไอของคาร์บอนจะถูกพัดพาออกไปตามทิศทางกระแสของก๊าซเฉื่อยไปยังตัวดักจับ ที่ติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำ และก่อตัวเป็นของแข็งบนตัวดักจับ ข้อดีของเทคนิคนี้คือ ผลผลิตค่อนข้างสูง (70%) และผลผลิตที่ได้ส่วนมากจะเป็นท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรชนิดผนังเดี่ยว (Single-walled carbon nanotubes; SWCNTs) ซึ่งสามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้จากการควบคุมอุณหภูมิ ส่วนข้อเสียของเทคนิคนี้คือต้องใช้เลเซอร์ที่มีราคาแพงเป็นแหล่งพลังงานให้กับเป้าแกรไฟต์ [5]

ข) การปล่อยประจุแบบอาร์ค

วิธีการปล่อยประจุแบบอาร์ค (arc discharge) สามารถกระทำได้โดยต่อขั้วไฟฟ้าชนิดแกรไฟต์สองขั้ว ซึ่งวางห่างกันประมาณ 1 มิลลิเมตร เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ต่ำ (12 ถึง 25 โวลต์) กระแสสูงในระดับประมาณ 50 ถึง 120 แอมแปร์ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอนและก๊าซฮีเลียม เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วจะทำให้ฉนวนรอบขั้วแกรไฟต์เกิดการเบรกดาวน์และทำให้บรรยากาศรอบ ๆ ขั้วแกรไฟต์สามารถนำไฟฟ้าได้ ความร้อนจากการอาร์คทำให้อะตอมของคาร์บอนที่ผิวแท่งแกรไฟต์ระเหยกกลายเป็นไอสู่อุณหภูมิสูง เมื่ออะตอมเย็นตัวลงจะรวมตัวกันเป็นคาร์บอนในรูปแบบต่างๆ [5-6, 8]

ค) การปลูกด้วยไอเคมี

วิธีการปลูกด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD) เป็นวิธีที่ใช้ก๊าซที่มีส่วนผสมของคาร์บอนเช่น C_2H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 หรือ CO เป็นสารตั้งต้น โดยกระบวนการจะเริ่มจากการป้อนก๊าซที่มีส่วนผสมของคาร์บอนดังกล่าวเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ที่มีอุณหภูมิสูง หลังจากนั้นก๊าซจะแตกตัวเป็นไอของอะตอมต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซ ซึ่งไอของอะตอมคาร์บอนจะรวมตัวกันและก่อเป็นรูปทรงต่างๆ ของคาร์บอน ณ บริเวณแผ่นฐานที่อุณหภูมิต่ำกว่า สำหรับเทคนิคนี้หากแผ่นฐานมีการวางตำแหน่งตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ไว้ก็จะทำให้คาร์บอนเลือกที่จะก่อตัว ณ บริเวณที่มีตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า จึงสามารถทำการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบได้ สัดส่วนการก่อตัวเป็นท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรของเทคนิคนี้จะอยู่ระหว่าง 20-100 % ข้อจำกัดของเทคนิคนี้คือ ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่ผลิตได้ส่วนมากเป็นแบบผนังหลายชั้น [5, 7-8]

ง) การไพโรไลซิส

วิธีการไพโรไลซิสร่วม (co-pyrolysis) ต่างจากวิธีการปลูกด้วยไอเคมีที่สารตั้งต้นที่ใช้ไม่จำเป็นต้องเป็นก๊าซและไม่จำเป็นต้องมีตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา แหล่งคาร์บอนที่ใช้อาจเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ได้ผสมรวมกับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมากแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นเฟอร์โรซีนบรรจุอยู่ในถ้วยอะลูมินาวางในท่อควอทซ์บริเวณตำแหน่งต้นท่อซึ่งมีอุณหภูมิสูงพอจะทำให้สารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาระเหยกกลายเป็นไอได้ นอกจากนี้ยังใช้ก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซไฮโดรเจน เป็นก๊าซตัวพาในการพัดพาไอของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังบริเวณกลางท่อควอทซ์ที่มีอุณหภูมิสูง ประมาณ 800–1200 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้ไอของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการแตกตัวเป็นกลุ่มไอของอะตอมคาร์บอนและกลุ่มไอของอะตอมโลหะ หลังจากนั้นไอของอะตอมคาร์บอนจะแพร่เข้าสู่กลุ่มไอของอะตอมโลหะที่มาจากโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดการก่อตัวเองเป็นอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรบริเวณผนัง

ท่อควอทซ์ วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถผลิตท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรได้ในปริมาณมากและใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำเนื่องจากสามารถใช้แหล่งอะตอมคาร์บอนที่มีราคาถูกได้ในการสังเคราะห์ได้ เช่น แนฟทาลีนหรือกลีเซอรอล เป็นต้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกับสังเคราะห์

Nagaraju และคณะ (2002) ศึกษาการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร โดยใช้เหล็ก โคบอลต์ และเหล็กผสมโคบอลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับซิลิกาและอะลูมินา และใช้อะเซทิลีน (Acetylene, C_2H_2) เป็นแหล่งคาร์บอน ส่วนก๊าซไนโตรเจนใช้เป็นก๊าซตัวพา ผลศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ผลได้มากที่สุดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่างเหล็กและโคบอลต์ ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 700 องศาเซลเซียส โดยได้ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่มีคุณภาพดีมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออยู่ในช่วง 5-10 นาโนเมตร [9]

Zhang และคณะ (2003) ได้ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในปฏิกิริยาและระยะเวลาระหว่างการเกิดท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังหลายชั้นด้วยวิธีการไพโรไลซิสของเฟอร์โรซีนผสมกับไซลีน โดยใช้ผงโคบอลต์เป็นตัวรองรับ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่มีชั้นของผนังท่อหลายชั้น อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อจำนวนชั้นของผนังท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ยังพบว่าระยะเวลาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาส่งผลต่อความยาวท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรอีกด้วย [10]

Tokoro และคณะ (2004) ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคเหล็กระดับนาโนเมตรที่ถูกห่อหุ้มด้วยชั้นของแกรไฟต์ขนาดนาโนเมตรโดยการเผาสารผสมของฮีมาไทต์กับคาร์บอนภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน โดยฮีมาไทต์จะสลายตัวเป็นเหล็กอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ผลที่ได้พบว่าอนุภาคของเหล็กถูกห่อหุ้มด้วยชั้นของแกรไฟต์หลายชั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30-200 นาโนเมตร และพบท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 นาโนเมตร และความยาวหลายไมโครเมตรถูกสังเคราะห์ได้ระหว่างกระบวนการ [11]

Lu และคณะ (2005) ได้ทำการสังเคราะห์แคปซูลคาร์บอนระดับนาโนเมตรโดยอาศัยการระเบิดของกรดพิคริก (Picric acid, $2,4,6-(NO_2)_3C_6H_2OH$) และเฟอร์โรซีน เพื่อให้กรดพิคริกเฟอร์โรซีนเกิดการไพโรไลซิส โดยแคปซูลคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้มีส่วนแกนเป็นอนุภาคเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยชั้นแกรไฟต์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 5-20 นาโนเมตร และลักษณะของแคปซูลคาร์บอนระดับนาโนเมตรสามารถควบคุมได้ด้วยสัดส่วนของกรดพิคริกและ

เฟอร์โรซีน เมื่อสัดส่วนของคาร์บอนต่อเหล็กต่ำจะเกิดแคลเซียมคาร์บอนระดับนาโนเมตร เมื่อสัดส่วนของคาร์บอนต่อเหล็กสูงจะพบว่าท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรปนอยู่ด้วยเช่นกัน [12]

Kim และคณะ (2005) ทำการศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคเหล็กซึ่งอยู่ภายในของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร โดยสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรผนังหลายชั้นโดยวิธีการ chemical vapor deposition ของไซลีน ($C_6H_4(CH_3)_2$) และเฟอร์โรซีน ($Fe(C_5H_5)_2$) ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส พบเหล็กในสถานะ (-Fe) ที่เสถียรในปริมาณมาก คือปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคเหล็กทั้งหมด ส่วนสถานะอื่นที่พบจะเป็น (-Fe) และไอออนคาร์ไบด์จำนวนเล็กน้อย (Fe_3C) การที่พบเหล็กในสถานะ (-Fe) นั้นอธิบายได้ว่า เกิดจากไอออนคาร์ไบด์ที่ส่วนปลายหัวของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร แต่สมดุลระหว่างไอออนคาร์ไบด์และคาร์บอนนั้นไม่เสถียร ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็น (-Fe) และ (-Fe) และเกิดการงอกขึ้นเป็นท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในที่สุด [13]

Gulino และคณะ (2005) ศึกษาการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรโดยใช้ก๊าซอีเทน (Ethane, C_2H_6) เป็นแหล่งคาร์บอน และอนุภาคเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับอะลูมินา ผลผลิตที่ได้ปริมาณ 20 กรัมต่อ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 660 องศาเซลเซียส ผลึกภัณฑ์ที่ได้พบเพียงท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 20 – 40 นาโนเมตร และมีความยาวในหลักร้อยนาเมตร [14]

Zhao และคณะ (2006) ศึกษาเกี่ยวกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรโดยใช้วิธีการ Chemical vapor deposition (CVD) โดยใช้ก๊าซมีเทน (Methane, CH_4) เป็นแหล่งคาร์บอน และใช้ผง Ni-Cu-Al เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยศึกษาอิทธิพลของเวลาการเกิดปฏิกิริยา และชนิดของก๊าซตัวพา คือ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซไนโตรเจน พบว่าเมื่อใช้เวลาการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราผลผลิตเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซตัวพา ส่งผลให้ผลผลิตมีปริมาณมากกว่ากรณีที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซตัวพา ทั้งนี้โดยมีสมมติฐานว่าก๊าซไนโตรเจนจะส่งผลให้อัตราการส่งผ่านอะตอมคาร์บอนสู่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่า และทำให้อัตราการแพร่สูงขึ้นกว่าเมื่อไม่มีการใช้ก๊าซตัวพา [15]

Charinpanitkul และคณะ (2009) ศึกษาการไพโรไลซิสร่วมระหว่างเฟอร์โรซีนและแนฟทาลีน (Naphthalene) พบว่าแนฟทาลีนสามารถใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตร ทั้งท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและแคลเซียมคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่มีอนุภาคเหล็กระดับนาโนเมตรถูกห่อหุ้มอยู่ภายใต้ชั้นแกรไฟต์ โดยพบว่าลักษณะและขนาดของ

โครงสร้างอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรนั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการไพโรไลซิสเป็นสำคัญ โดยอุณหภูมิในการไพโรไลซิสสูงจะเกิดแคปซูลคาร์บอนระดับนาโนเมตรมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าสัดส่วนการผสมของสารตั้งต้นยังส่งผลต่อลักษณะของอนุภาค โดยจะพบท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรมากกว่าแคปซูลคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สัดส่วนของแนฟทาลินมากกว่าเฟอร์โรซีน [16]

Li และคณะ ศึกษาพอลิเมอร์ประกอบแต่งของคาร์บอนอสัณฐานและพอลิสไตรีนโดยเตรียมจากวิธีอินซิทูพอลิเมอร์ไรเซชันเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับผลิตตัวตรวจวัดจากการทดลองพบว่าพอลิเมอร์ประกอบแต่งจะตอบสนองทางไฟฟ้าสูงต่อไอของตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วและมีขั้วต่ำ ในทางกลับกัน สำหรับตัวทำละลายที่มีขั้วสูงพบว่าการตอบสนองทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งจะต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งดังกล่าวจะได้รับผลกระทบจากความสามารถในการดูดซับก๊าซของพอลิเมอร์และสารเติม โดยความสามารถในการดูดซับก๊าซนี้จะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับชนิดของก๊าซที่ใช้ในการทดลอง [4]

Skakalova และคณะ ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านกายภาพและนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังเดี่ยวและพอลิเมทิลเมตะไครเลท โดยเตรียมพอลิเมอร์ประกอบแต่งจากการผสมพอลิเมทิลเมตะไครเลทในคลอโรฟอร์ม (Chloroform) ด้วยท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร จากการทดลองพบว่าพอลิเมอร์ประกอบแต่งดังกล่าวนำไฟฟ้าได้ 17 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (S/cm) เมื่อเติมท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในพอลิเมอร์ประกอบแต่ง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลของพอลิเมอร์ประกอบแต่งที่ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรโคปด้วยไทโอนิลคลอไรด์ (Thionyl chloride) พบว่าไทโอนิลคลอไรด์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง เมื่อทำการศึกษาคูสมบัติทางด้านกายภาพของพอลิเมอร์ประกอบแต่งที่ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรโคปและไม่ได้โคปด้วยไทโอนิลคลอไรด์ (Thionyl chloride) พบว่าการโคปท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรด้วยไทโอนิลคลอไรด์จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพให้กับพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังเดี่ยวและพอลิเมทิลเมตะไครเลท [17]

Jia และคณะ ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติด้านกายภาพและความคงทนต่อความร้อนของพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตะไครเลท ซึ่งเตรียมด้วยวิธีอินซิทูพอลิเมอร์ไรเซชัน (In situ polymerization) จากการทดลองพบว่าท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรสามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ของพอลิเมทิลเมตะไครเลทได้ดี และพื้นที่ระหว่างท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมอร์มีความแข็งแรงสูง ซึ่งการกระจายตัวดังกล่าวจะขึ้นกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของเมทิลเมตะไครเลทก่อนที่จะเติมท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรลง

ไป เมื่อทำการศึกษาคุณสมบัติด้านกายภาพและความคงทนต่อความร้อนของพอลิเมอร์ประกอบ แต่งดังกล่าวพบว่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในเมทริกซ์ของ พอลิเมทิลเมตะไครเลท [18]

Zhang และคณะ ศึกษาพฤติกรรมในการนำไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังหลายชั้น และสไตรีน (Styrene) โดยเตรียม พอลิเมอร์ประกอบแต่งด้วยวิธีอินซิทูพอลิเมอร์โรเซชันและวิธีโซลูชันมิกซ์ซิง (Solution mixing) จากการการศึกษาพฤติกรรมในการนำไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง เมื่อสัมผัสกับไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่าง ๆ พบว่าพอลิเมอร์ประกอบแต่งที่ เตรียมจากวิธีอินซิทูพอลิเมอร์โรเซชันมีการกระจายตัวของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในเมทริกซ์ ของพอลิสไตรีนดีกว่าวิธีโซลูชันมิกซ์ซิง และสามารถสร้างพอลิเมอร์ประกอบแต่งที่มีสภาพไวและ อัตราการตอบสนองต่อไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายสูงเมื่ออัตราส่วนของท่อคาร์บอน ระดับนาโนเมตรต่อพอลิเมอร์อยู่ในช่วงร้อยละ 5 ถึง 15 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษา ผลของการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้อัตราการตอบสนองรวดเร็วขึ้น แต่ค่า การตอบสนองสูงสุดจะต่ำลง [3]

Li และคณะ ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อ คาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังหลายชั้นและพอลิเมทิลเมตะไครเลทต่อไอของเมทานอล (Methanol) โดยเตรียมพอลิเมอร์ประกอบแต่งด้วยวิธีการผสมโดยตรง (Direct blending) และศึกษา ลักษณะของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรภายในพอลิเมอร์ประกอบแต่งด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope, SEM) จากการศึกษพบว่าท่อคาร์บอนระดับนาโน เมตรสามารถกระจายตัวภายในเมทริกซ์ของพอลิเมทิลเมตะไครเลทได้ดี และสามารถตรวจสอบการ ตอบสนองทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งต่อไอของเมทานอล โดยการวัดความเปลี่ยนแปลง ความต้านทานภายใต้สภาวะบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง ได้ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อ พอลิเมอร์ประกอบแต่งสัมผัสกับไอของเมทานอล ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะสูงขึ้นและสามารถ ผันกลับได้เมื่อนำกลับมาวางในสภาวะปกติ [20]

Niu และคณะ ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งของ ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่ประกอบด้วยฟังก์ชันของคาร์บอกซิล (MWCNT-COOH) และ พอลิเอทิลีนไกลคอล (Poly(ethylene glycol, PEG) ในไดไซโคลเฮกซิลคาร์โบไดอิมิด (Dicyclohexylcarbodiimide, DCC) จากการทดลองพบว่าชนิดของไอของสารประกอบอินทรีย์ ระเหยง่ายมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการตอบสนองทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งดังกล่าว ซึ่ง

พฤติกรรมการตอบสนองทางไฟฟ้าดังกล่าวสามารถอธิบายจากการ Swelling และ Dissolvation ของเมทริกซ์ของพอลิเอทิลีน ไกคอล โดยไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย [21]

2.3 การพัฒนาตัวตรวจวัดก๊าซ

Quang และคณะ (2006) ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตเครื่องตรวจวัดก๊าซจากท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังชั้นเดียว ซึ่งพบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังเดี่ยวจะเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิต่างๆ และจะมีความไวในการตอบสนองต่อปริมาณความเข้มข้นของก๊าซแอมโมเนียที่เปลี่ยนแปลงโดยสามารถตรวจจับก๊าซแอมโมเนียที่มีความเข้มข้นต่ำสุดได้ที่ 5 ppm และเข้าสู่สถานะอิ่มตัวที่ความเข้มข้น 40 ppm [22]

Suehiro และคณะ (2006) ศึกษาการผลิตตัวตรวจจับก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ด้วยการใช้เขาคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังเดี่ยว (SWCNHs) โดยวัดผลจากการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของเขาคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังเดี่ยวขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของก๊าซทั้งสองชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าเขาคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังเดี่ยวมีพฤติกรรมเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p-type เช่นเดียวกับท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและมีผลใกล้เคียงกันในการตรวจจับก๊าซทั้งสองชนิด [23]

Bittencourt และคณะ (2006) เตรียมวัสดุสำหรับการใช้ในการศึกษาการตรวจจับก๊าซด้วยการเติมท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังหลายชั้นลงในทังสเตนไดออกไซด์ (WO_3) โดยวิธี Drop-coating deposition ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการตรวจจับก๊าซพิษ 3 ชนิด ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซแอมโมเนีย จากผลการวิจัยพบว่าปริมาณการเติมท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่เหมาะสมสามารถลดอุณหภูมิการดำเนินการตรวจจับก๊าซเป็นที่อุณหภูมิห้องได้ และพบว่าเมื่อเติมปริมาณท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังหลายชั้นเพียงเล็กน้อยส่งผลให้ความไวต่อการตอบสนองต่อการตรวจจับก๊าซแอมโมเนียเพิ่มขึ้น [24]

Ionescu และคณะ (2006) เตรียมตัวตรวจวัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และก๊าซแอมโมเนีย ซึ่งสามารถใช้ในการตรวจวัดก๊าซ ณ อุณหภูมิห้องได้ที่ความเข้มข้นของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์และก๊าซแอมโมเนียค่า ๆ ที่ 500 ppb. และ 200 ppm ตามลำดับ โดยใช้ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังหลายชั้นที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเกาะตัวลงบนตัวรองรับด้วยวิธี Drop-coating deposition และพบว่าชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นมีพฤติกรรมเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p-type โดยเสนอว่าออกซิเจนบนผิวของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรส่งผลต่อความไวในการตรวจจับก๊าซ

ไนโตรเจนไดออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะส่งผลต่อความไวในการตรวจจับก๊าซ
แอมโมเนีย [25]

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวในข้างต้น คือเพื่อสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรด้วยวิธีไพโรไลซิสร่วมของกลีเซอรอลและเฟอร์โรซีน และนำท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดก๊าซพิษโดยการนำมาเตรียมเป็นพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตะไครเลท อย่างไรก็ตาม ก่อนการนำท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดก๊าซพิษ ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการนำท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรมาเตรียมเป็นพอลิเมอร์ประกอบแต่งโดยใช้ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่มีจำหน่ายในท้องตลาด และทดสอบความสามารถในการตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย หลังจากการศึกษความเป็นไปได้ดังกล่าวพบว่าท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดก๊าซพิษได้ ผลของการศึกษาแสดงในบทที่ 4 หลังจากการทดสอบดังกล่าวทางผู้วิจัยจะดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับการนำท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดก๊าซพิษและจะรายงานผลให้ทราบต่อไป

ดังนั้น การดำเนินงานวิจัยของรายงานฉบับนี้จะประกอบไปด้วยขั้นตอนหลัก ๆ 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนของการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรโดยวิธีไพโรไลซิสร่วมของกลีเซอรอลและเฟอร์โรซีน และขั้นตอนของการนำท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเป็นตัวตรวจวัดก๊าซพิษ

3.1 สารเคมี

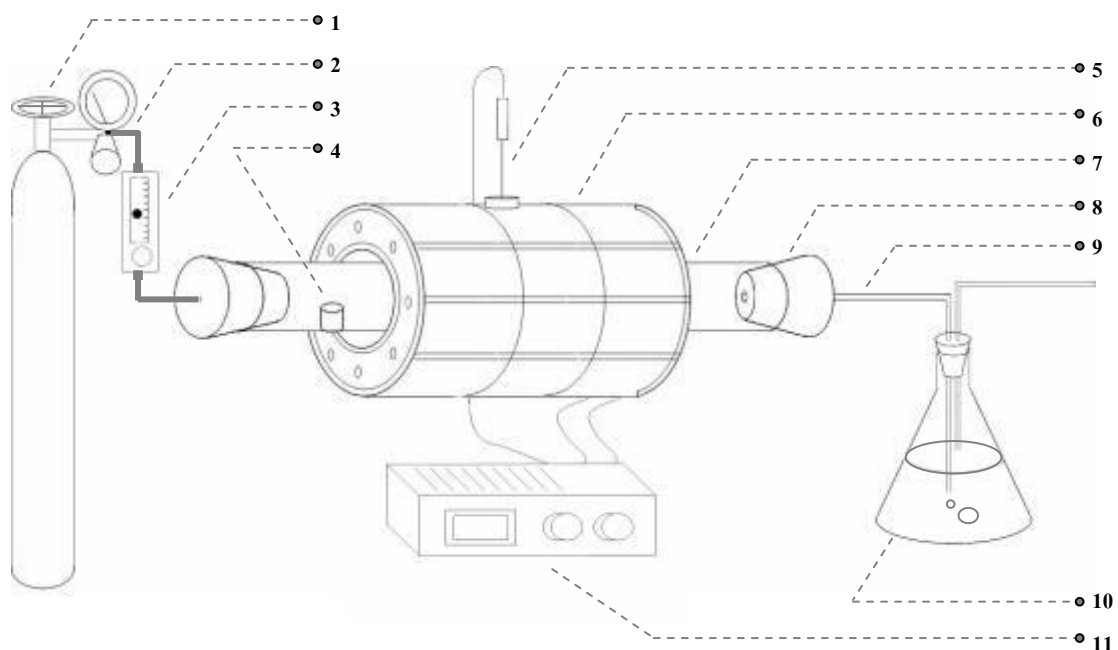
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

- 3.1.1 กลีเซอรอล ($C_3H_5(OH)_3$) (Ajax finechem, 99.5%)
- 3.1.2 เฟอร์โรซีน ($Fe(C_5H_5)_2$) (Sigma-Aldrich, $\geq 98\%$ Fe)
- 3.1.3 ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังหลายชั้น (MWCNT) 95.0% (Bayer Science)
- 3.1.4 เมทิลเมตะไครเลท (MMA) 99.5% (Thai MMA)
- 3.1.5 เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) 98.0% (Panreac Synthesis)
- 3.1.6 โทลูอีน (C_7H_8) 99.5% (Mallinckrodt Chemical, 99.5%)
- 3.1.7 อะซีโตน (CH_3COCH_3) 99.95% (VWR)
- 3.1.8 เมทานอล (CH_3OH) 99.99% (Fisher Scientific)

3.1.9 ไฮโดรเจน (C₆H₁₂) 99.99% (Fisher Scientific)

3.2 การเตรียมอุปกรณ์ทดลองเพื่อสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร

งานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรโดยวิธีการไพโรไลซิสร่วมของกลีเซอรอล ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและมีราคาถูก เป็นแหล่งคาร์บอน และเฟอร์โรซีนเป็นแหล่งของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก ทั้งนี้วิธีการนี้เป็นวิธีเดียวที่สามารถใช้สารตั้งต้นที่เป็นของเหลว (กลีเซอรอล) ในการสังเคราะห์เป็นอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรได้ ชุดเครื่องมืออุปกรณ์ทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องมืออุปกรณ์การทดลอง

- | | | |
|--------------------|---------------------------|----------------|
| 1. ก๊าซไนโตรเจน | 2. เล็กกูเรเตอร์ | 3. โรตاميเตอร์ |
| 4. ถ้วยคาร์บอน | 5. เทอร์โมคัปเปิล | 6. เตาเผาไฟฟ้า |
| 7. ท่อคองวาทซ์ | 8. จุกยาง | 9. สายยาง |
| 10. อุปกรณ์ดักก๊าซ | 11. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ | |

อุปกรณ์สำหรับสังเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ ประกอบด้วย

1. เตาเผาไฟฟ้า ASH รุ่น ARF-30M ให้ความร้อนโดยขดลวดไฟฟ้า มีขนาด $18 \times 18 \times 30$ เซนติเมตร สามารถปรับอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 200 - 1200 องศาเซลเซียสโดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อนประมาณ 100 องศาเซลเซียสต่อนาที
2. ท่อควอทซ์ทนความร้อน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร และหนา 2 มิลลิเมตร
3. จุกยางปิดปลายท่อควอทซ์ เบอร์ 11
4. ถ้วยคาร์บอน สำหรับใช้บรรจุสารตั้งต้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร สูง 1 เซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร
5. โรตاميเตอร์ (Kofloc) ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลก๊าซได้ระหว่าง 10- 100 มิลลิลิตรต่อนาที
6. ท่อสแตนเลสนำก๊าซตัวขนาด 1 นิ้ว
7. ท่อซิลิโคน นำก๊าซออก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร
8. อุปกรณ์ดักเก็บก๊าซขาออก ประกอบด้วย ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร จุกยางเบอร์ 14 และท่อแก้วขนาด 1 เซนติเมตร
9. ครอบบดสาร

3.3 ขั้นตอนการทดลองเตรียมท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร

การทดลองเพื่อสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรจากกลีเซอรอลและเฟอร์โรซีน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ใส่ท่อควอทซ์ในเตาเผาไฟฟ้า หลังจากนั้นปรับอุณหภูมิเตาเผาตามที่ต้องการศึกษา
2. นำเฟอร์โรซีน (Sigma-Aldrich, $\geq 98\%$ Fe) 0.1 กรัม ผสมกับกลีเซอรอลตามสัดส่วนที่ต้องการศึกษา (สัดส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีนเป็น 1 ต่อ 5 1 ต่อ 10 และ 1 ต่อ 20) ใส่ลงในถ้วยคาร์บอน แล้ววางในท่อควอทซ์ในตำแหน่งที่มีอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้กลีเซอรอลและเฟอร์โรซีนสามารถระเหยได้ (กลีเซอรอลระเหยที่ 290 องศาเซลเซียส เฟอร์โรซีนระเหยที่ 249 องศาเซลเซียส MSDS)
3. ปิดจุกยางที่ปลายท่อควอทซ์ทั้งสองด้าน หลังจากนั้นป้อนก๊าซอาร์กอนซึ่งทำหน้าที่เป็นก๊าซตัวพาผ่านเข้าไปในท่อควอทซ์โดยปรับให้มีอัตราการไหลตามที่กำหนด (50 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที)
4. ก๊าซตัวพาจะพัดพาไอของสารตั้งต้นเข้าสู่บริเวณกลางท่อที่มีอุณหภูมิสูง และเกิดการแตกตัวเป็นกลุ่มอะตอมคาร์บอนและกลุ่มอะตอมเหล็ก และเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวขึ้น ใช้เวลาทั้งสิ้น 30 นาที

5. หลังจากเสร็จปฏิบัติการ ปิดเตาเผา หยุดการป้อนก๊าซตัวพา และรอนเตาเผาไฟฟ้าเย็นลง ถึงอุณหภูมิห้อง ผลึกภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้เป็นฟิล์มสีดำของคาร์บอนเกาะบนผนังด้านในของท่อควอทซ์ จากนั้นเก็บผลึกภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์

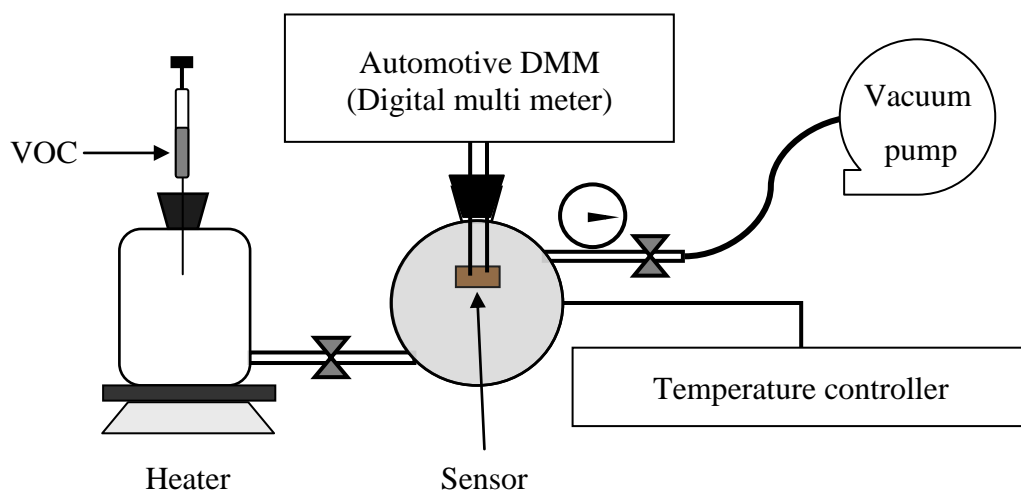
3.4 ตัวแปรที่ศึกษาในการสังเคราะห์

การศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตร มีดังนี้

1. อุณหภูมิในการไพโรไลซิส ศึกษาในช่วง 850 – 1200 องศาเซลเซียส
2. สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีน เป็น 5 ต่อ 1 10 ต่อ 1 และ 20 ต่อ 1
3. อัตราการไหลของก๊าซตัวพา เป็น 50 มิลลิตรต่อนาที และ 100 มิลลิตรต่อนาที

3.5 การเตรียมอุปกรณ์ทดลองสำหรับตัวตรวจวัดก๊าซ

อุปกรณ์สำหรับทดลองวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวตรวจวัดก๊าซที่ทำจากพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิมะโครเลท ประกอบด้วย ขวดรูปชมพู่ขนาด 600 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 1 ขวด สำหรับใส่สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 1 ขวด สำหรับใช้วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวตรวจวัดก๊าซ ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multi meter) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพอุปกรณ์สำหรับทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวตรวจวัดก๊าซ

หลังติดตั้งอุปกรณ์ทดลองแล้ว จะทำการควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้นของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในขวดรูปชมพู่สำหรับใช้วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของ

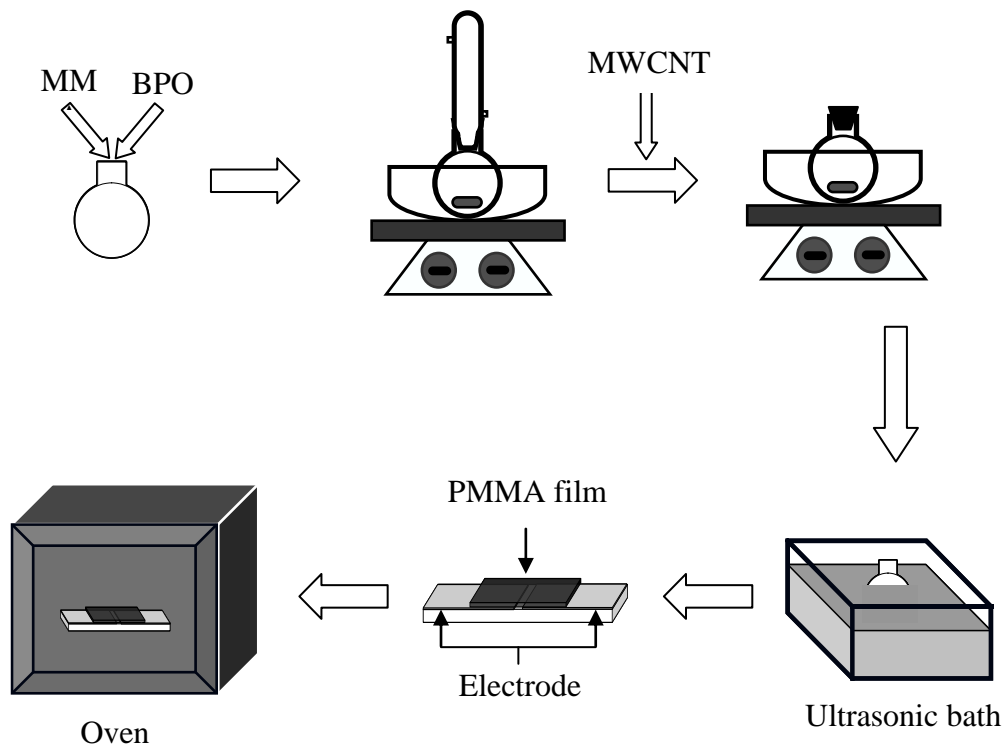
ตัวตรวจวัดก๊าซตามที่กำหนด และวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวตรวจวัดก๊าซด้วย
ดิจิตอลมัลติมิเตอร์



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายอุปกรณ์สำหรับทดลองวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวตรวจวัดก๊าซ

3.6 ขั้นตอนการทดลองความสามารถในการตรวจวัดก๊าซ

3.6.1 การเตรียมพอลิเมอร์ประกอบแต่งสำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดก๊าซ



รูปที่ 3.4 แผนภาพอุปกรณ์ในการเตรียมพอลิเมอร์ประกอบแต่งสำหรับใช้เป็นตัวตรวจวัดก๊าซ

แผนภาพอุปกรณ์ในการเตรียมพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร และ พอลิเมทิลเมตะไครเลทสำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดก๊าซ แสดงในรูปที่ 3.4 ขั้นตอนในการเตรียมพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตะไครเลทสำหรับใช้เป็นตัวตรวจวัดก๊าซ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

3.6.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ประกอบแต่ง

ขั้นแรกผสมเมทิลเมตะไครเลท 5 กรัม และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 20 มิลลิลิตร จากนั้นติดตั้งเข้ากับเครื่องควบแน่นชนิดรีฟลักซ์ (Reflux condenser) และกวนให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเริ่มต้น (Pre-polymerization) หลังจากนั้นเติมท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในปริมาณตามที่กำหนดลงไป (100, 125, 150 และ 175 มิลลิกรัม) ในสารผสมข้างต้นและกวนด้วยเครื่องคนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) เป็นเวลา 5 นาที สุดท้ายนำสารผสมที่ได้ไปโซนิเกต (Sonicate) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ประกอบแต่ง

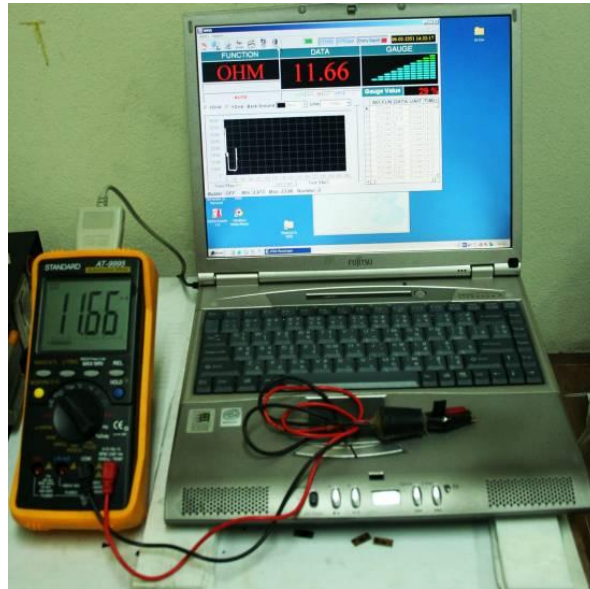
3.6.1.2 การเตรียมตัวตรวจวัดก๊าซ

ขั้นแรกนำแผ่นอิเล็กโทรดทองแดง (Copper electrode) ไปเคลือบตรงกลางแผ่นด้วยพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตะไครเลทให้มีพื้นที่ 5×5 ตารางมิลลิเมตร และความหนา 0.175 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำอิเล็กโทรดทองแดงที่ได้ไปอบในเตาอบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันอย่างสมบูรณ์

3.6.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวตรวจวัดก๊าซ

3.6.2.1 การวัดค่าความต้านทานเริ่มต้นของตัวตรวจวัดก๊าซ

ค่าความต้านทานเริ่มต้นของตัวตรวจวัดก๊าซที่ทำจากพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตะไครเลท จะตรวจวัดค่าด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม RS-232-PC กับคอมพิวเตอร์ แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 คิวจิตอลมัลติมิเตอร์ที่ติดตั้ง โปรแกรม RS-232-PC กับคอมพิวเตอร์

3.6.2.2 การวัดความสามารถในการตรวจวัดก๊าซของตัวตรวจวัดก๊าซ

ความสามารถในการตรวจวัดก๊าซของตัวตรวจวัดก๊าซที่ทำจากพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตะไครเลท จะวิเคราะห์จากค่าความต้านที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับเวลาที่ตัวตรวจวัดก๊าซสัมผัสกับไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย โดยวัดค่าด้วยมัลติมิเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม RS-232-PC กับคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ก) ทำให้ขั้วรูปรูขมพู่ที่จะใช้วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวตรวจวัดก๊าซอยู่ในสถานะสุญญากาศ -60 เซนติเมตรปรอท (cmHg)

ข) ให้ความร้อนกับขั้วรูปรูขมพู่สำหรับใส่สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายจนถึงอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นใส่สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายลงไป ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอในทันที

ค) เชื่อมต่อขั้วรูปรูขมพู่ทั้งสองข้างต้นด้วยท่อที่ติดตั้งด้วยวาล์ว

ง) เปิดวาล์วที่ติดตั้งที่ต่อระหว่างขั้วรูปรูขมพู่จนกระทั่งขั้วรูปรูขมพู่ที่จะใช้วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวตรวจวัดก๊าซอยู่ในสถานะสมดุล -30 เซนติเมตรปรอท

จ) เปิดวาล์วอีกตัวเพื่อปรับความดันภายในขั้วรูปรูขมพู่ให้เท่ากับความดันภายนอก

ฉ) ติดตั้งตัวตรวจวัดก๊าซที่เตรียมไว้ใส่ไปในขั้วรูปรูขมพู่ที่จะใช้วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวตรวจวัดก๊าซ

ข) วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวตรวจวัดก๊าซเมื่อเทียบกับเวลา โดยควบคุมให้อุณหภูมิคงที่

3.7 เครื่องมือวิเคราะห์

3.7.1 Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)

การวิเคราะห์การกระจายตัวของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรแบบผนังหลายชั้นในเมทริกซ์ของพอลิเมทิลเมตาไครเลตจะใช้ Field Emission Scanning Electron Microscopy หรือ FESEM แสดงในรูปที่ 3.6 เครื่องมือวิเคราะห์ดังกล่าวจะใช้หลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนโดยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงจะส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างสารและฉายภาพผิวของตัวอย่างสารดังกล่าวบนจอภาพ ทำให้สามารถเห็นภาพของตัวอย่างสาร และสามารถบันทึกภาพนั้นด้วยกล้องถ่ายรูปซึ่งประกอบอยู่กับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้



รูปที่ 3.6 Field Emission Scanning Electron Microscopy (JEOL รุ่น JSM-6400)

3.7.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

ในการวิเคราะห์พันธะเคมีของพอลิเมอร์ประกอบแต่งของงานวิจัยนี้จะใช้ Fourier Transform Infrared Spectroscopy หรือ FTIR แสดงในรูปที่ 3.7 เครื่องมือวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถตรวจสอบโมเลกุลของสารได้อย่างแม่นยำทั้งสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยโมเลกุลของสารแต่ละชนิดที่ต้องการตรวจสอบจะสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงสเปกตรัมได้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของโมเลกุลของสาร เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสี

อินฟราเรดจะถูกกระตุ้นให้โมเลกุลเกิดการสั่น (Vibration) และการหมุน (Rotation) และเนื่องจากความเฉพาะในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของโมเลกุลของสารแต่ละชนิดทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างและพันธะเคมีของโมเลกุลของสารรวมทั้งพอลิเมอร์ประกอบแต่งได้



รูปที่ 3.7 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) (รุ่น 1760x)

3.7.3 Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

ในงานวิจัยนี้จะใช้ Thermal Gravimetric Analysis หรือ TGA แสดงในรูปที่ 3.8 ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านความร้อนของพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร และพอลิเมทิลเมตาไครเลต โดยเทคนิคนี้จะวิเคราะห์ความคงทนต่อความร้อนของสารและการสูญเสียน้ำหนักของสารเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงอุณหภูมิโดยจะทำการวิเคราะห์ในระบบปิด เครื่องวิเคราะห์จะประกอบด้วยเตาเผา (Furnace) ที่มีโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Programmer) ควบคุมบรรยากาศ ความดัน และมีระบบการชั่งน้ำหนักเข้ามาประกอบ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารที่ทดสอบ เช่น การสูญเสียองค์ประกอบ (Decomposition) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นสารใหม่ (Formation)



រូបភាព 3.8 Thermal gravimetric analysis (រ៉ូប Q600)

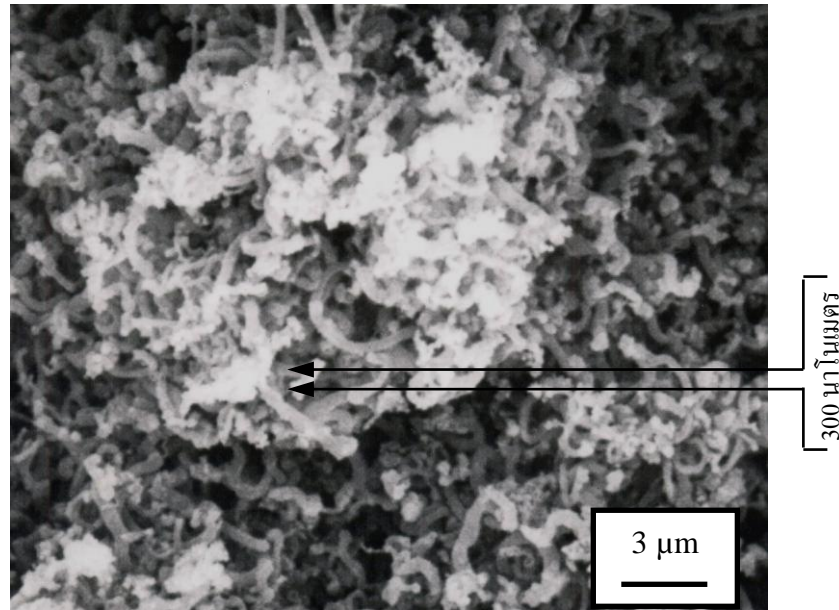
บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

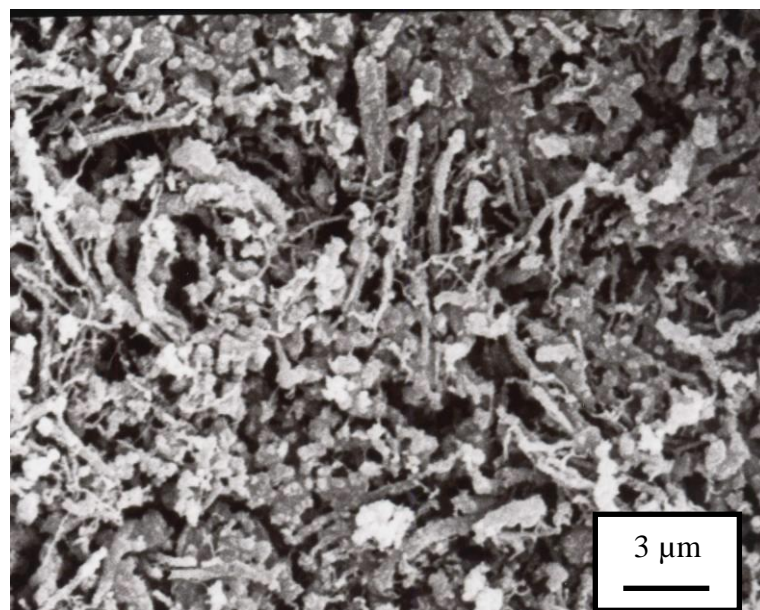
4.1. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้

ภายหลังจากการทดลองทำการสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตร คณะวิจัยพบว่าผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคสีดำเกาะเป็นชั้นฟิล์มอยู่บนผนังท่อควอทซ์ คณะวิจัยจึงทำการเก็บตัวอย่างของอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในบริเวณส่วนต่างๆ ของท่อ ได้แก่ ต้นท่อ กลางท่อ และปลายท่อ จากนั้นจึงนำผลดังกล่าวไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องมือต่างๆ เช่น SEM และ TEM เพื่อตรวจสอบลักษณะรูปร่างของอนุภาคที่สังเคราะห์ โดยได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

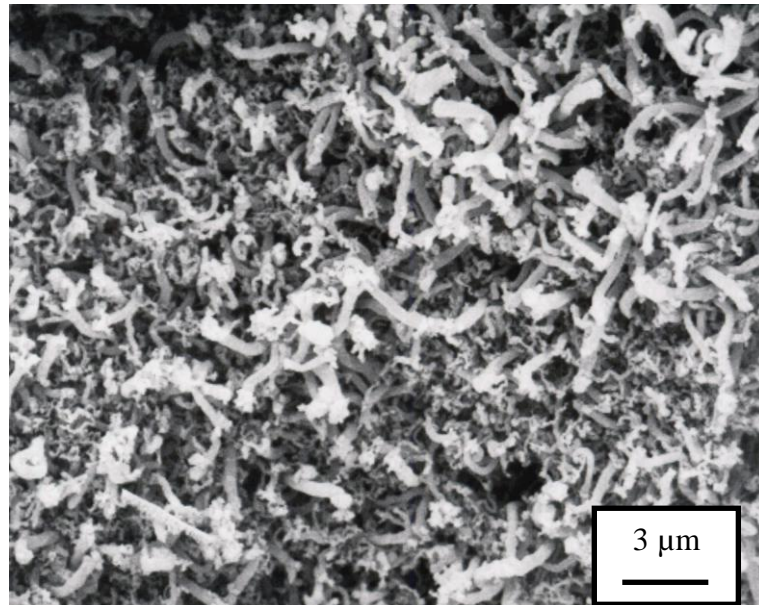
จากการศึกษาพบว่า เมื่อทำการสังเคราะห์โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีนเป็น 5 ต่อ 1 และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 50 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส 850 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานด้วยเทคนิค SEM ได้ผลดังรูปที่ 4.1 พบท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 300-500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นท่อคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ไม่นับว่าเป็นท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร เนื่องจากเป็นที่ยอมรับกันว่าท่อที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร จึงจะจัดว่าเป็นท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็น 1000 และ 1200 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยควบคุมสภาวะให้ตัวแปรอื่นคงที่พบว่าท่อคาร์บอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดประมาณ 100-500 นาโนเมตร ซึ่งเมตรกระจายตัวไม่เป็นระเบียบ ดังแสดงในภาพที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่าไม่ว่าทำการปรับอุณหภูมิในการไพโรไลซิสที่ 850 1000 หรือ 1200 องศาเซลเซียสผลิตภัณฑ์ที่ได้ ณ ตำแหน่งต้นท่อนี้จะมีขนาดที่ใหญ่กว่า 100 นาโนเมตรทั้งสิ้น



รูปที่ 4.1 SEM ไมโครกราฟของอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ ตำแหน่ง ต้นท่อที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีนเป็น 5 ต่อ 1 อัตราการไหลก๊าซอาร์กอน เป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.2 SEM ไมโครกราฟของอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ ตำแหน่ง ต้นท่อ ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีนเป็น 5 ต่อ 1 อัตราการไหล ก๊าซอาร์กอนเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที

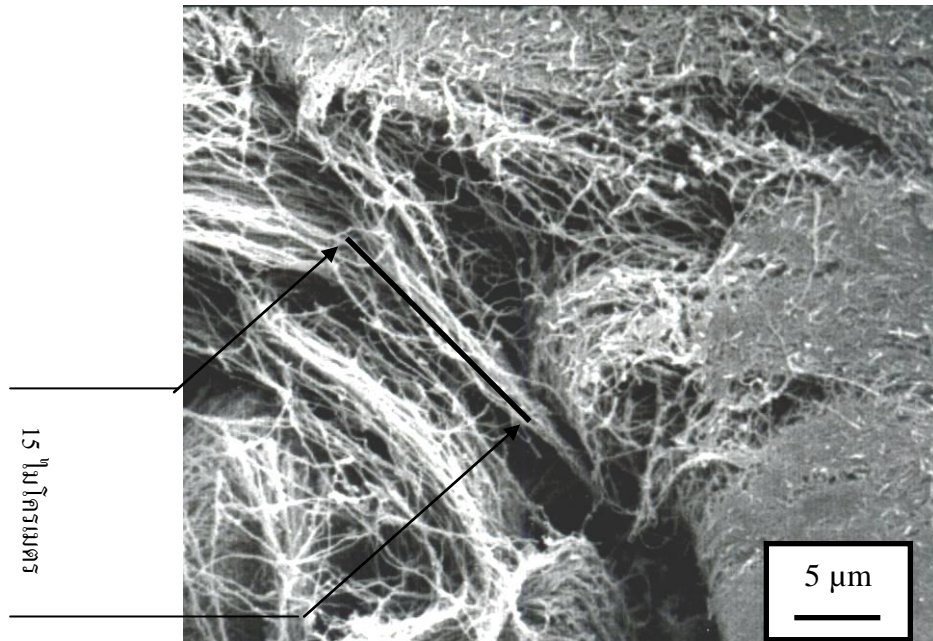


รูปที่ 4.3 SEM ไมโครกราฟของอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ ตำแหน่ง ต้นท่อ ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีนเป็น 5 ต่อ 1 และอัตราการไหลก๊าซอาร์กอนเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที

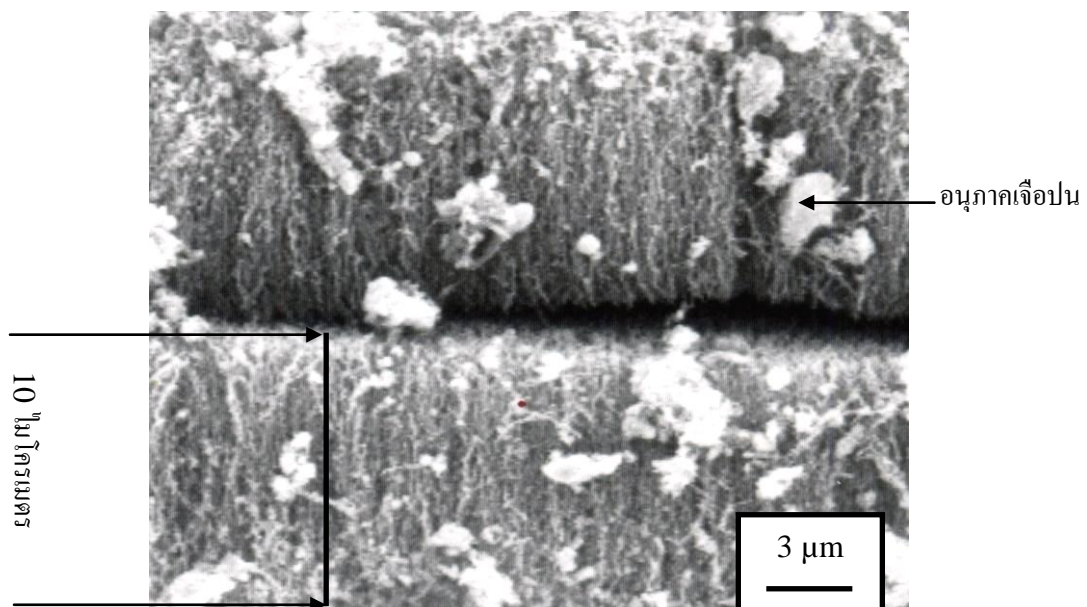
เมื่อทำการสุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงกลางท่อ โดยในการสังเคราะห์ใช้สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีนเป็น 5 ต่อ 1 และอัตราการไหลของก๊าซตัวพาเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที จากผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างผลิตภัณฑ์พบว่า ที่อุณหภูมิการไพโรไลซิส 850 องศาเซลเซียส พบผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเส้นละเอียดโดยมีขนาดสม่ำเสมอใกล้เคียงกัน มีการกระจายตัวดีโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดจากภาพถ่ายประมาณ 20-40 นาโนเมตร มีความยาวประมาณ 15 ไมโครเมตร อนุภาคที่สังเคราะห์ได้ค่อนข้างบริสุทธิ์ ดังรูปที่ 4.4 จากภาพถ่าย SEM ยังไม่สามารถสรุปในทันที ได้ว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้นี้เป็นท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร หรือเป็นเส้นใยคาร์บอนระดับนาโนเมตร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจวิเคราะห์ยืนยันด้วยเทคนิค TEM ซึ่งจะทำให้ทราบถึงลักษณะภายในว่าเป็นท่อกลวงหรือไม่ต่อไป

ในการทดลองศึกษาช่วงต่อไป ได้ทำการเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสเป็น 1000 องศาเซลเซียส โดยใช้เงื่อนไขตัวแปรอื่นๆ คงเดิม จากผลการวิเคราะห์พบว่ายังสามารถสังเคราะห์ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรได้เช่นเดียวกัน แต่มีลักษณะของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่แตกต่างไป กล่าวคือ ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 - 30 นาโนเมตร และยาวประมาณ 10 ไมโครเมตร และมีการจัดเรียงตัวของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรอย่าง

เป็นระเบียบ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่สม่ำเสมอ และพบอนุภาคที่มีลักษณะกลมเกือบนเล็กน้ยดังรูปที่ 4.5

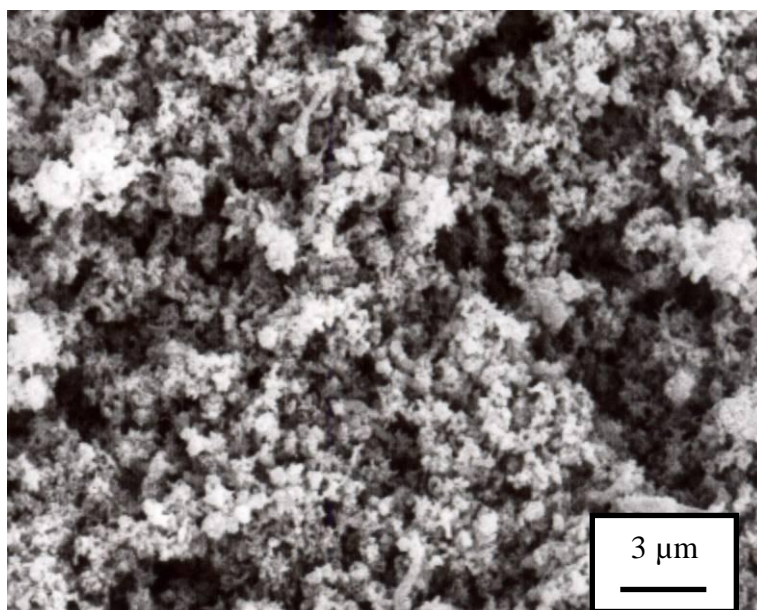


รูปที่ 4.4 SEM ไมโครกราฟของ อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ ตำแหน่งกลางท่อ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีน เป็น 5 ต่อ 1 อัตราการไหลก๊าซอาร์กอน เป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที

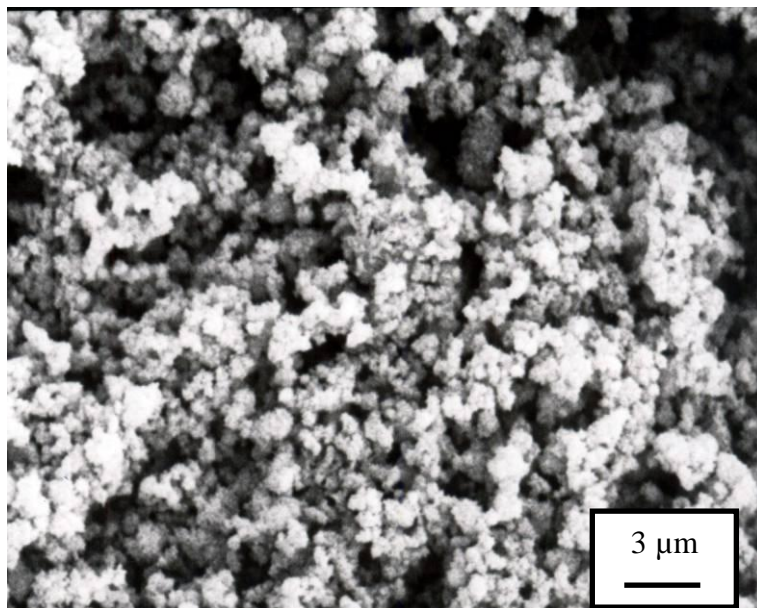


รูปที่ 4.5 SEM ไมโครกราฟของ อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ ตำแหน่งกลางท่อ ที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีน เป็น 5 ต่อ 1 อัตรา การไหลก๊าซอาร์กอน เป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที

ต่อมา เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการไพโรไลซิสสูงจนถึง 1200 องศาเซลเซียส พบว่าไม่มีอนุภาคสีน้ำตาลที่บริเวณกลางท่อควอทซ์นี้เลย จากผลการทดลองนี้ ทำให้สามารถสันนิษฐานได้ว่า ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสนั้น อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานสูงเกินไปเนื่องจากอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าที่สูง ทำให้อะตอมของคาร์บอนไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่งกลางท่อนี้ จะระเหยล่องลอยไปจนถึงตำแหน่งปลายท่อควอทซ์ และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการก่อตัวเป็นอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรได้ แต่ทั้งนี้ก็ยังพบว่ามียุติภัณฑ์จำนวนมากที่บริเวณปลายท่อควอทซ์ และเมื่อนำเอาอนุภาคคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้บริเวณปลายท่อควอทซ์มาวิเคราะห์ พบว่าที่อุณหภูมิการไพโรไลซิสเป็น 850 องศาเซลเซียส อนุภาคจะมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเกาะตัวกันอย่างหลวมๆ โดยแต่ละอนุภาคนั้นมีลักษณะกลมแตกต่างจากช่วงต้นท่อและกลางท่อที่มีลักษณะเป็นเส้น และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่วัดได้จากภาพถ่าย SEM ประมาณ 50 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM นี้ยังบอกแน่ชัดไม่ได้ว่าอนุภาคที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมนี้จะเป็อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรชนิดใด ต้องทำการวิเคราะห์ซ้ำด้วยเทคนิค TEM เพื่อยืนยันชนิดของอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้

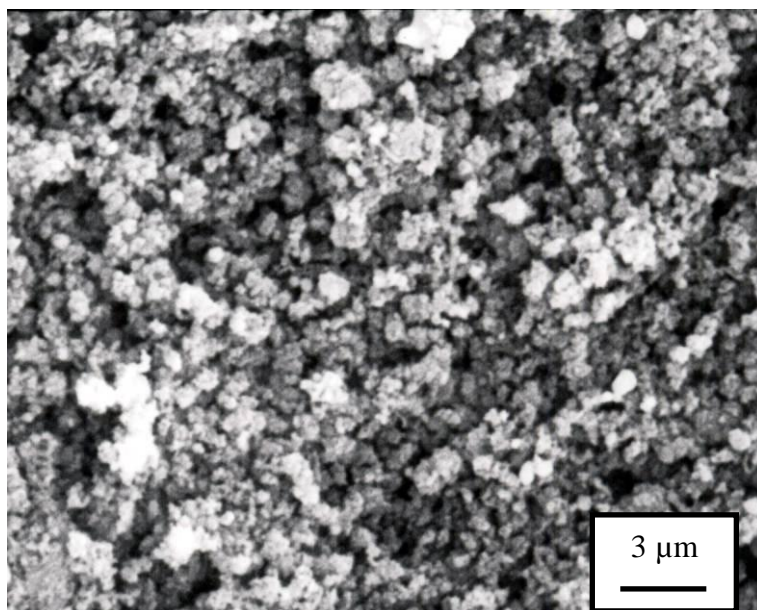


รูปที่ 4.6 SEM ไมโครกราฟของ อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ ตำแหน่งปลายท่อที่ อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีน เป็น 5 ต่อ 1 อัตรา การไหลก๊าซอาร์กอนเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที



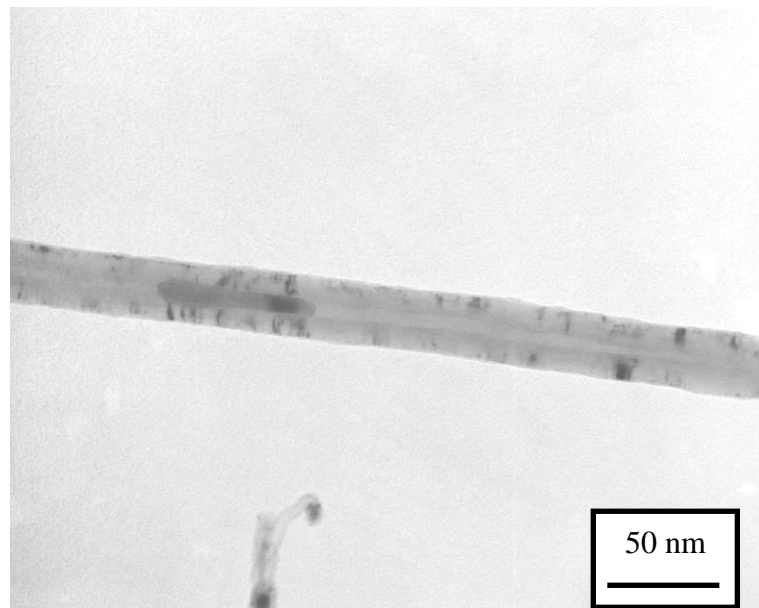
รูปที่ 4.7 SEM ไมโครกราฟของ อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ ตำแหน่งปลายท่อที่ อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีน เป็น 5 ต่อ 1 และอัตราการไหลก๊าซ อาร์กอนเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที

จากผลการทดลอง เมื่อปรับอุณหภูมิการไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นเป็น 1000 และ 1200 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่จะกระจายอยู่ที่บริเวณปลายท่อควอทซ์เป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่บริเวณกลางท่อ และต้นท่อมีผลิตภัณฑ์น้อยมาก ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะสัญญาณกลม และมีขนาดของอนุภาคใหญ่ขึ้น และเกาะกันอย่างหนาแน่นขึ้นเมื่อใช้ อุณหภูมิในการไพโรไลซิสเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงถึงอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่พบบริเวณปลายท่อควอทซ์ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 1000 และ 1200 องศาเซลเซียสตามลำดับ

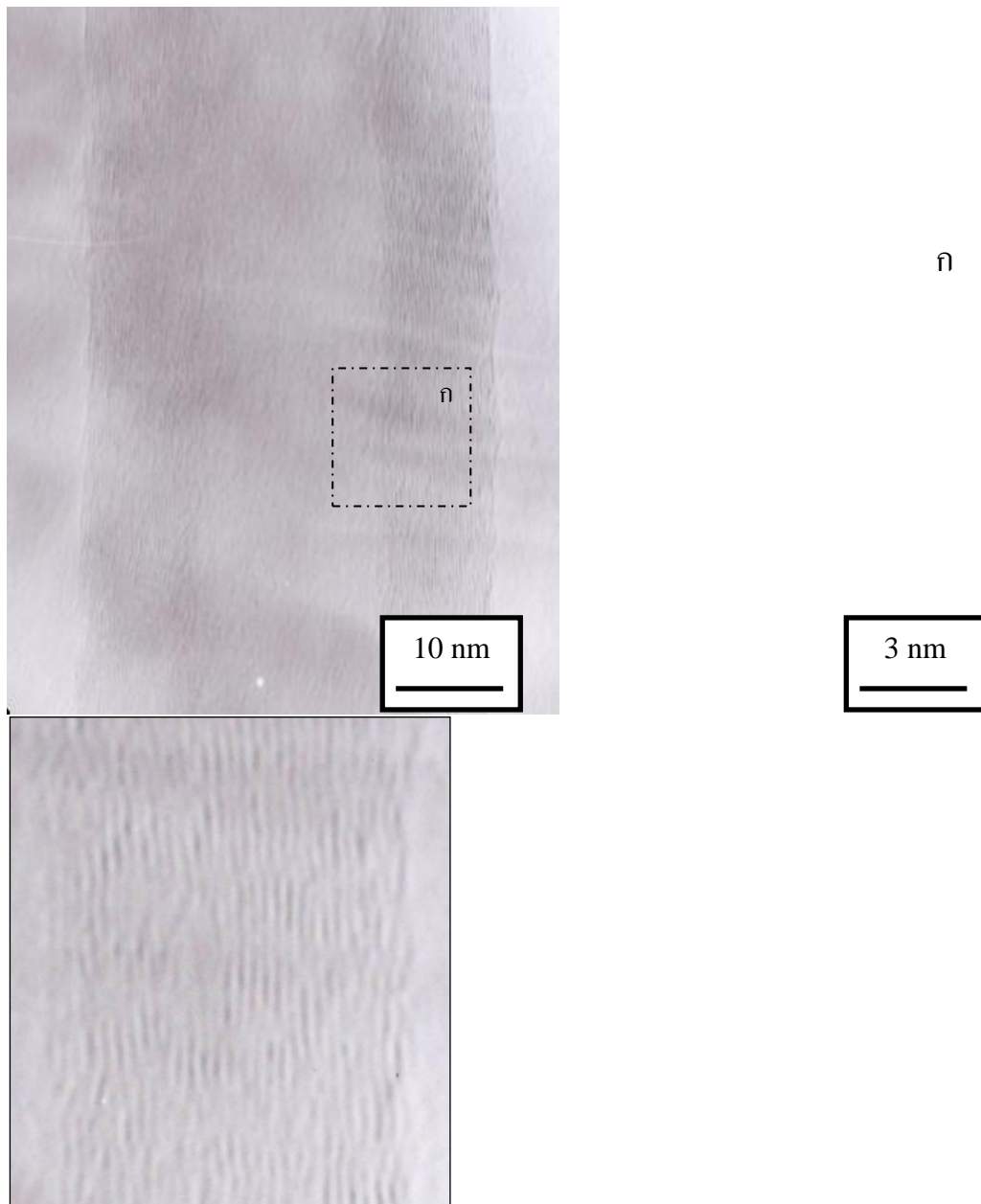


รูปที่ 4.8 SEM ไมโครกราฟของ อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ ตำแหน่งปลายท่อ ที่ อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีน เป็น 5 ต่อ 1 อัตราการไหลก๊าซอาร์กอนเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที

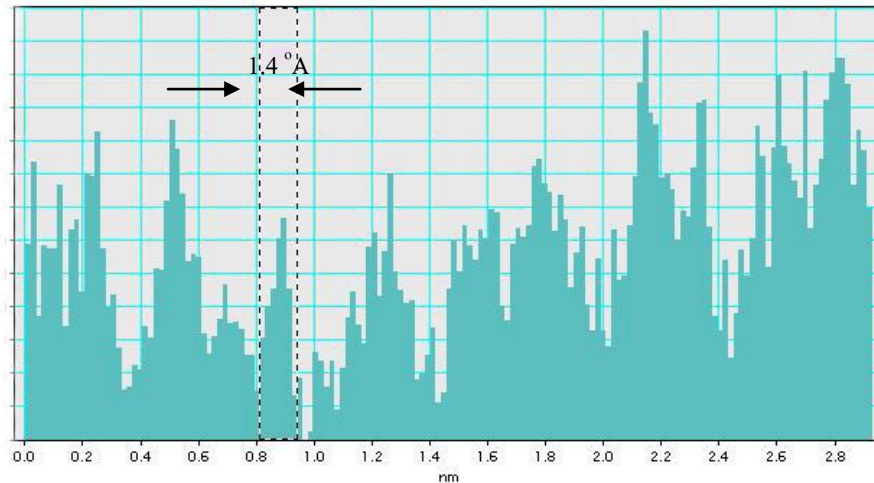
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ทำให้ทราบถึงลักษณะรูปร่างภายนอกของอนุภาคคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายในต่อไป โดยอาศัยเทคนิค TEM เพื่อตรวจยืนยันชนิดของอนุภาค และขนาดที่แน่นอน โดยเลือกอนุภาคคาร์บอนที่ตำแหน่งกลางท่อมาวิเคราะห์พบว่า ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 850 องศาเซลเซียส สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีนเป็น 5 ต่อ 1 อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่พบจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM นั้น คือท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร เนื่องจากพบว่าภายในมีลักษณะกลวง โดยท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้นั้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20-40 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4.9 นอกจากนี้ภายในท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร ยังพบอนุภาคเล็กซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะที่ได้จากโมเลกุลของเฟอร์โรซีนอีกด้วย และเมื่อทำการเพิ่มกำลังขยายของเครื่อง TEM พบว่าอนุภาคที่ได้นั้นเป็นอนุภาคท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่มีผนังหลายชั้น โดยมีจำนวนชั้นของผนังคาร์บอนประมาณ 10-30 ชั้น ดังรูปที่ 4.10 เมื่อตรวจสอบโดยใช้กำลังขยายสูงยิ่งขึ้น พบว่าระยะห่างระหว่างชั้นของผนังท่อคาร์บอนมีค่าประมาณ 1.4 อังสตรอม ดังกราฟรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.9 TEM ไมโครกราฟของ ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ ตำแหน่ง กลาง
ท่อ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสอัตราส่วน โดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีนเป็น 5
ต่อ 1 อัตราการไหลก๊าซ อาร์กอนเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที

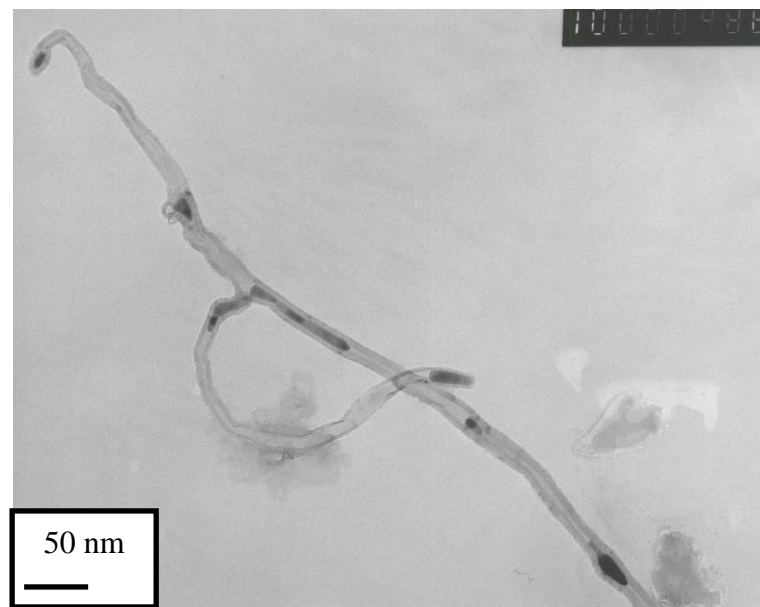


รูปที่ 4.10 TEM ไมโครกราฟของ กำลังขยายสูงแสดงชั้นผนังของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีนเป็น 5 ต่อ 1 อัตราการไหลก๊าซอาร์กอนเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที



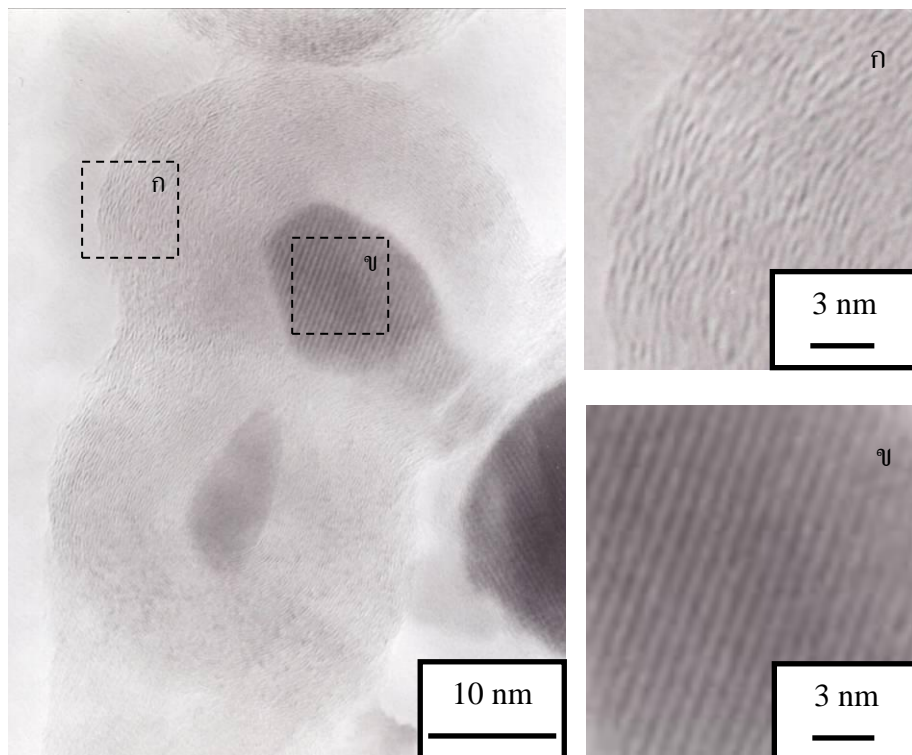
รูปที่ 4.11 ความหนาของแต่ละชั้นผนังของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร

เมื่อทำการวิเคราะห์ห่ออนุภาคท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่ได้จากการไพโรไลซิสที่ 1000 องศาเซลเซียส พบอนุภาคท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรซึ่งสังเคราะห์และเก็บได้จากภายในท่อมีอนุภาคเล็กอยู่เช่นเดียวกับ ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส แต่ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่า และมีความคงอมากกว่า โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 นาโนเมตร และพบอนุภาคคาร์บอนแบบอสัณฐาน (Amorphous carbon) เจือปนอยู่จำนวนหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 TEM ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ ตำแหน่ง กลางท่อ ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีนเป็น 5 ต่อ 1 อัตราการไหลก๊าซอาร์กอนเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที

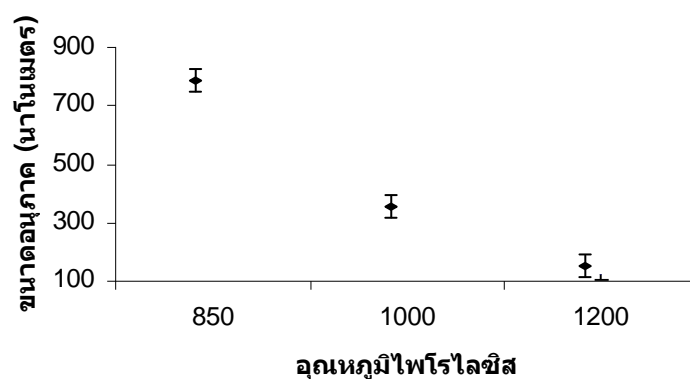
สำหรับอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์และเก็บรวบรวมได้จากบริเวณปลายท่อควอทซ์นั้น เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้นั้น เป็นอนุภาคแคลเซียมคาร์บอนระดับนาโนเมตรดังรูปที่ 4.13 โดยอนุภาคจะมีแผ่นกราฟีน (Graphene sheet) ห่อหุ้มอนุภาคเหล็กเอาไว้ โดยแคลเซียมคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่พบนั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 นาโนเมตร มีชั้นผนังกราฟีนคาร์บอนประมาณ 50 ชั้น และพบว่าอนุภาคของเหล็กที่ถูกห่อหุ้มนั้นมีขนาดประมาณ 20- 30 นาโนเมตรและมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทั้งนี้สามารถวัดระยะการจัดเรียงเรียงตัวของโมเลกุลเหล็กได้ประมาณ 6 อังสตรอม (จากภาพถ่าย TEM กำลังขยายสูง)



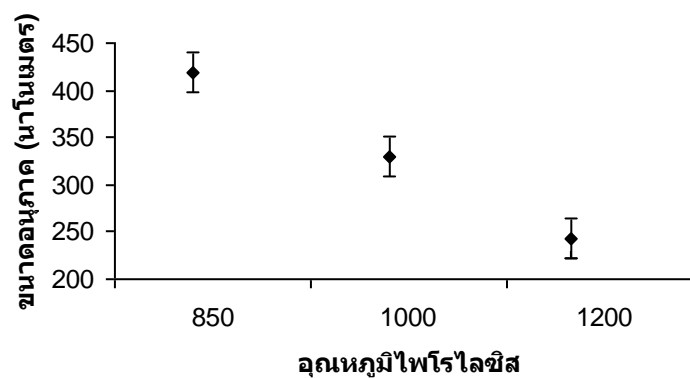
รูปที่ 4.13 TEM ไมโครกราฟของแคลเซียมคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ ตำแหน่งปลายท่อ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสอัตราส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อเฟอร์โรซีน เป็น 5 ต่อ 1 อัตราการไหลก๊าซ อาร์กอนเป็น 50 มิลลิลิตรต่อนาที

เมื่อนำอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้มาตรวจวัดขนาดด้วยเทคนิค DLS เพื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิการไพโรไลซิสต่าง ๆ กัน พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ขนาดของอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรบริเวณต้นท่อและกลางท่อมีขนาดเล็กลง ดังกราฟรูปที่ 4.14 และกราฟรูปที่ 4.15 แต่อนุภาคที่พบบริเวณปลายท่อควอทซ์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการไพโรไลซิส ทั้งนี้เนื่องจาก

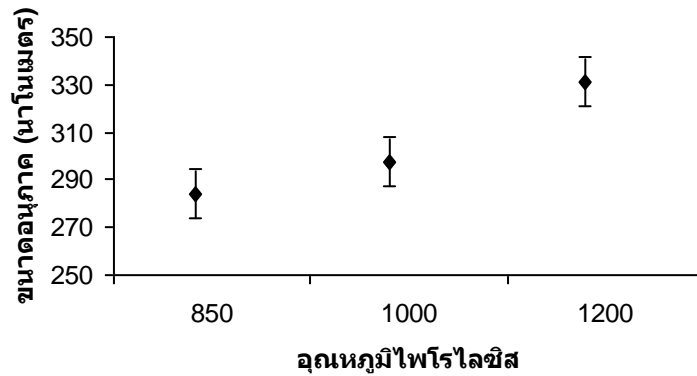
การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มอัตราการแพร่ของกลุ่มอะตอมคาร์บอนสู่ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ ทำให้อัตราการแพร่ผ่านสูงกว่าอัตราการแพร่ที่บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ ส่งผลให้ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กลง สอดคล้องกับการสังเกตจากภาพถ่าย TEM ซึ่งพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ขนาดและความเป็นระเบียบของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรลดลง ในทางกลับกัน ที่บริเวณปลายท่อควอทซ์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำลงสูงขึ้น ปริมาณกลุ่มคาร์บอนอะตอมที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาบริเวณต้นท่อและกลางท่อจึงไหลมาเกิดปฏิกิริยาบริเวณปลายท่อควอทซ์มากขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ตรงตำแหน่งปลายท่อควอทซ์มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.14 ขนาดของอนุภาคบริเวณต้นท่อควอทซ์ต่ออุณหภูมิไพโรไลซิส



รูปที่ 4.15 ขนาดของอนุภาคบริเวณกลางท่อควอทซ์ต่ออุณหภูมิไพโรไลซิส

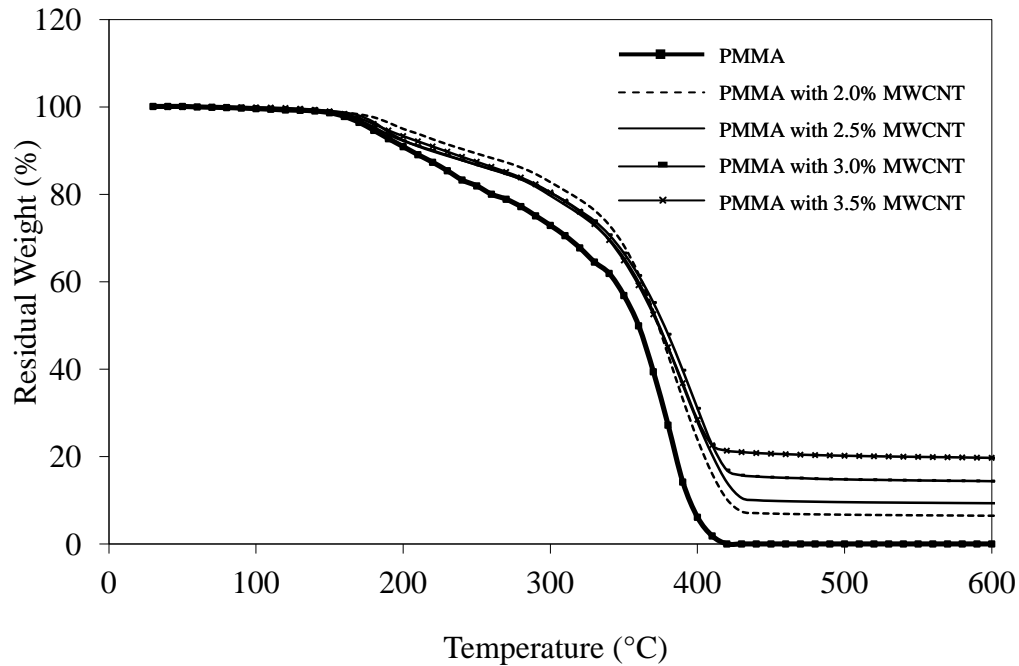


รูปที่ 4.16 ขนาดของอนุภาคบริเวณปลายท่อควอตซ์ต่ออุณหภูมิไฟโรไลซิส

เมื่อสังเกตขนาดอนุภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DLS พบว่าขนาดที่วิเคราะห์ได้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่สังเกตได้จากรูปภาพจากเทคนิค SEM และ TEM ทั้งนี้เพราะเทคนิค DLS นั้นทำการวัดขนาดอนุภาคโดยมีสมมติฐานให้รูปร่างของอนุภาคที่วัดมีลักษณะเป็นทรงกลม การสมมติให้อนุภาคท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ที่มีขนาดความยาวมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 300 เท่า คือมีขนาดความยาวของท่อประมาณ 10 - 15 ไมโครเมตรแต่เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่มีค่าเพียง 30 นาโนเมตรเท่านั้น ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลมเทียบเท่าที่ใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่ได้จากภาพถ่าย TEM และ SEM

4.2 คุณสมบัติด้านความคงทนต่อความร้อนของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง

การศึกษาคุณสมบัติด้านความคงทนต่อความร้อนของพอลิเมอร์ประกอบแต่งด้วย TGA ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์และพอลิเมอร์ประกอบแต่งจะเริ่มสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่อุณหภูมิที่เกิดการสูญเสียน้ำหนักสูงสุดแตกต่างกัน โดยพอลิเมอร์บริสุทธิ์จะสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิเมอร์ประกอบแต่งจะสูญเสียน้ำหนักสูงสุดที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การเติมท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรลงไปในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์จะช่วยเพิ่มความคงทนต่อความร้อนของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร 2 ถึง 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่เติมลงไปในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้ช่วยเพิ่มความคงทนต่อความร้อนของพอลิเมอร์บริสุทธิ์เท่า ๆ กัน

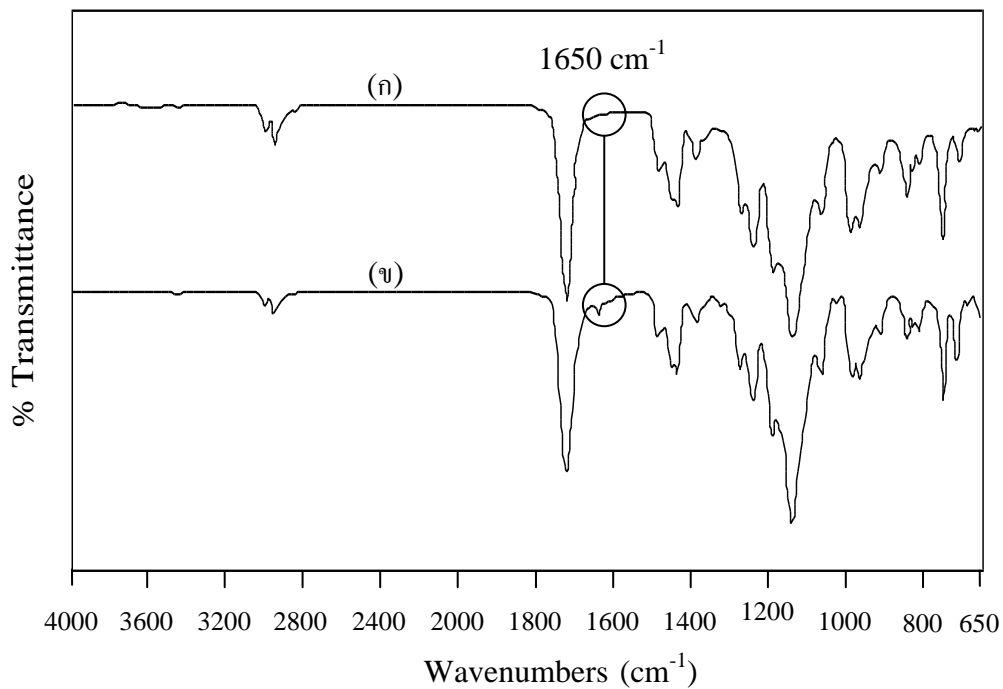


รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความคงทนต่อความร้อนของพอลิเมอร์ประกอบแต่งด้วย TGA

ทั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่าปริมาณกาก (Residue) ที่เหลือค้างหลังจากทำการวิเคราะห์ด้วย TGA นั้นยังมีค่าสูงถึงเกือบร้อยละ 20 โดยน้ำหนักนั้น ในขณะที่กำลังได้ทำการศึกษาถึงเสถียรภาพของพอลิเมทิลเมตะไครเลท และความถูกต้องของเครื่องมือวิเคราะห์หว่ามีผลต่อปริมาณกากที่เหลือหรือไม่ ซึ่งโดยหลักการแล้ว หากพอลิเมอร์ซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร เมื่อถูกให้ความร้อนจนสลายตัวไป ปริมาณกากที่เหลือควรจะมีมวลน้อยกว่าหรือเท่ากับมวลของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่เติมเข้าไป แต่ทั้งนี้มีความเป็นไปได้ที่พอลิเมอร์อาจจะสลายตัวแล้วเปลี่ยนสภาพเป็นคาร์บอนที่มีความเสถียรสูงจึงส่งผลให้ปริมาณกากที่เหลือยังคงมีอยู่มาก ทั้งนี้ได้จะรายงานให้ทราบความก้าวหน้าหลังจากทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจทานเพิ่มเติมในรายงานฉบับต่อไป

4.3 พันธะเคมีของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง

การวิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้างของพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตะไครเลทด้วย FTIR แสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบและโครงสร้างด้วย FTIR; (ก) พอลิเอทิลเมตอะไครเลทบริสุทธิ์ (ข) พอลิเอทิลเมตอะไครเลทประกอบแต่งด้วยท่อคาร์บอน 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นพีคของคาร์บอน-คาร์บอนที่ตำแหน่ง 1650 cm^{-1} เนื่องจากในการสร้างพันธะของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเอทิลเมตอะไครเลท ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรจะถูกกระตุ้นด้วยเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์จนกระทั่งเกิดพันธะ Π ขึ้น พันธะดังกล่าวจะเชื่อมพันธะอย่างแข็งแกร่งกับเมทริกซ์ของ พอลิเอทิลเมตอะไครเลท ส่งผลให้เกิดการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านกายภาพของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง

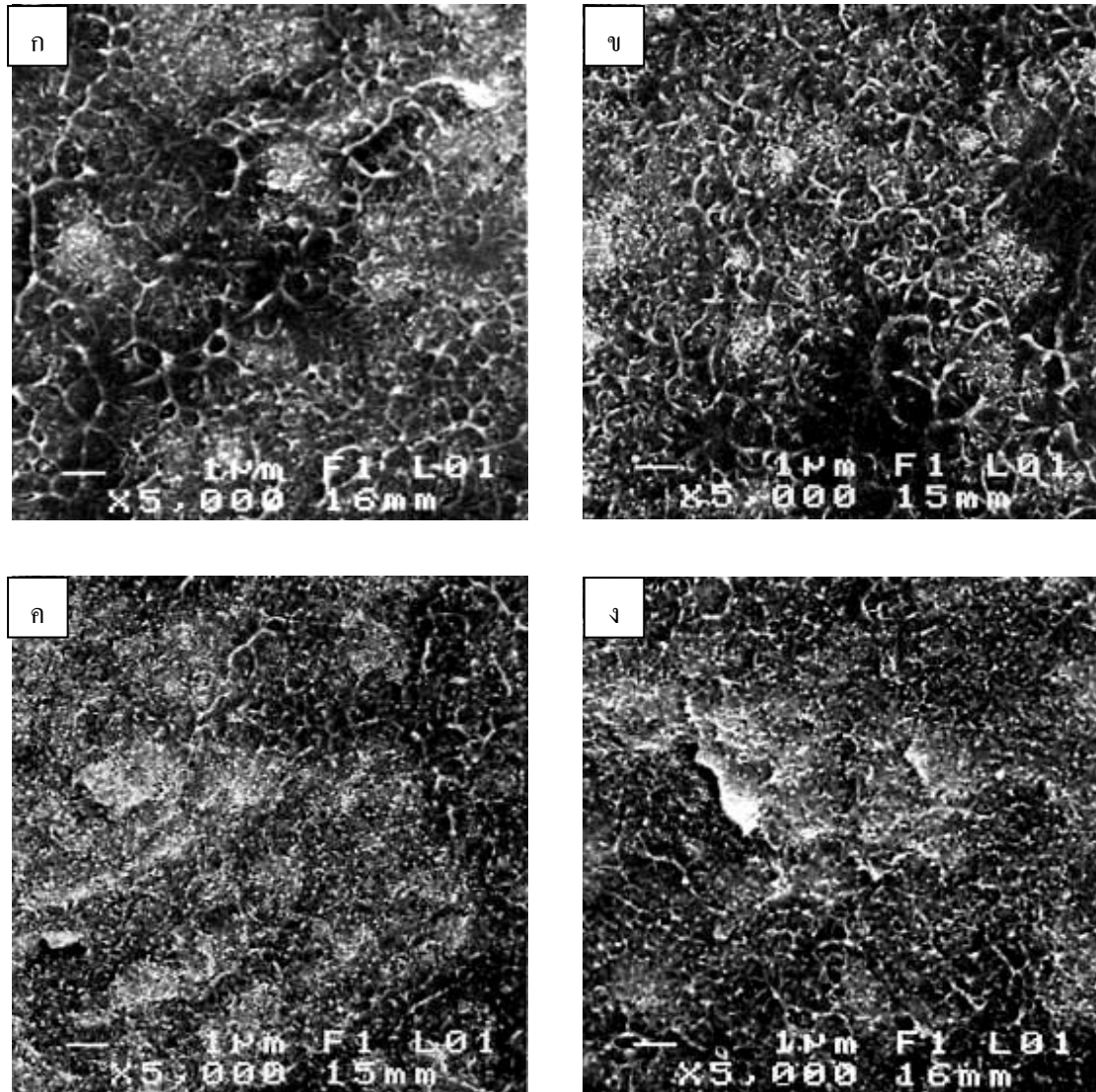
4.4 การจัดเรียงและกระจายตัวของท่อคาร์บอนในเมทริกซ์ของพอลิเอทิลเมตอะไครเลท

จากการวิเคราะห์การจัดเรียง และกระจายตัวของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ในเมทริกซ์ของพอลิเอทิลเมตอะไครเลทด้วย SEM แสดงในรูปที่ 4.19 (ก)-(ง) จะสังเกตเห็นว่า มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในเมทริกซ์ของพอลิเอทิลเมตอะไครเลท จากการทดลองเพิ่มปริมาณท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในเมทริกซ์ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรเข้าไปในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ การกระจายตัวของท่อคาร์บอน

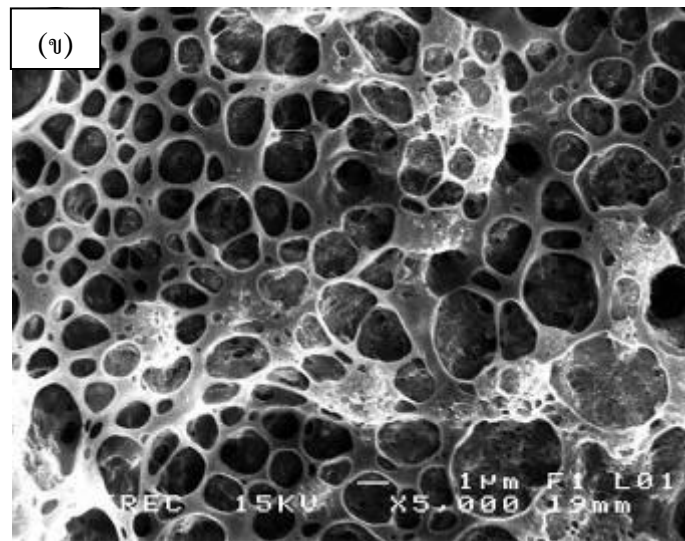
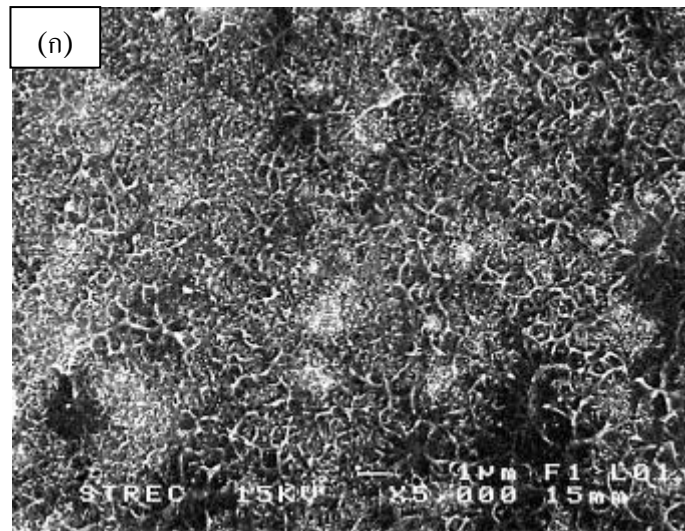
ระดับนาโนเมตรจะมีความสม่ำเสมอมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์สูงกว่า 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะสังเกตเห็นถึงความแตกต่างของการกระจายตัวของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร แสดงในรูปที่ 4.3 (ค) และ (ง)

4.5 การเกิด Swelling ของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง

การเกิด Swelling ของเมทริกซ์ของพอลิเมอร์เกิดจากการแทรกซึมของโมเลกุลของก๊าซเข้าไปในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ การแทรกซึมของโมเลกุลของก๊าซจะขึ้นกับคุณสมบัติด้านการแพร่และการละลายของโมเลกุลของก๊าซในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ การแทรกซึมดังกล่าวส่งผลทำให้เมทริกซ์ของพอลิเมอร์เกิดการบวมขึ้น งานวิจัยนี้พบว่าไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายส่งผลต่อการเกิด Swelling ของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง ในรูปที่ 4.4 เปรียบเทียบโครงสร้างของพอลิเมอร์ประกอบแต่งที่ไม่ได้สัมผัส (ก) และสัมผัส (ข) กับไอของโทลูอินความเข้มข้น 1000 ppm เป็นเวลา 5 นาที ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ประกอบแต่งที่สัมผัสกับไอของโทลูอินจะบวมขึ้นอย่างชัดเจน



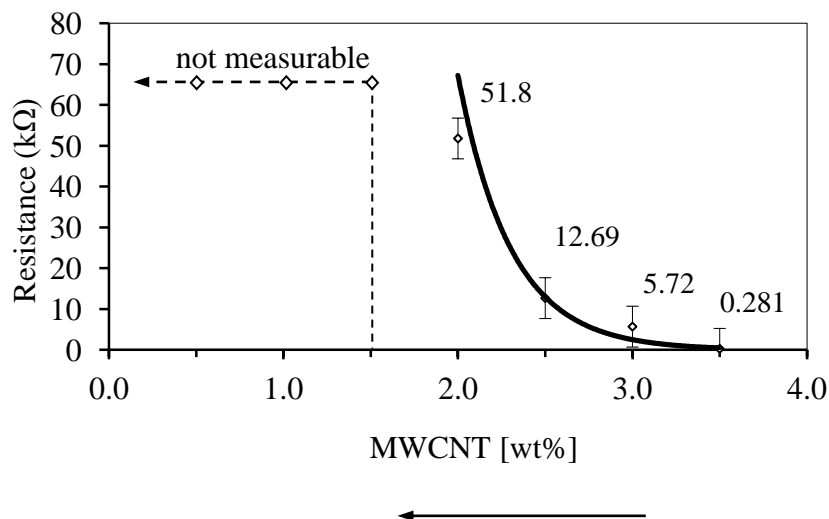
รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์การจัดเรียงและกระจายตัวของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในเมทริกซ์ของพอลิเมทิลเมตาไครเลท; (ก) 2.0 เปอร์เซ็นต์ (ข) 2.5 เปอร์เซ็นต์ (ค) 3.0 เปอร์เซ็นต์ (ง) 3.5 เปอร์เซ็นต์ของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรโดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.20 การเกิด Swelling ของพอลิเมอร์ประกอบแต่งที่มีปริมาณท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.6 การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง

โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์จะเป็นฉนวนไฟฟ้า แต่เมื่อเติมอนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรเข้าไปในเมทริกซ์พอลิเมอร์ อนุภาคดังกล่าวจะไปเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้กับพอลิเมอร์ขึ้น ในงานวิจัยนี้จะวัดค่าความต้านทานของพอลิเมอร์ประกอบแต่งด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตะไครเลทกับปริมาณของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่เติมลงไป ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ พบว่าความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรเข้าไปในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ ในงานวิจัยนี้สามารถวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งที่เริ่มลดลงได้เมื่อเติมปริมาณของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณของท่อคาร์บอนต่ำกว่านี้จะไม่สามารถวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าได้

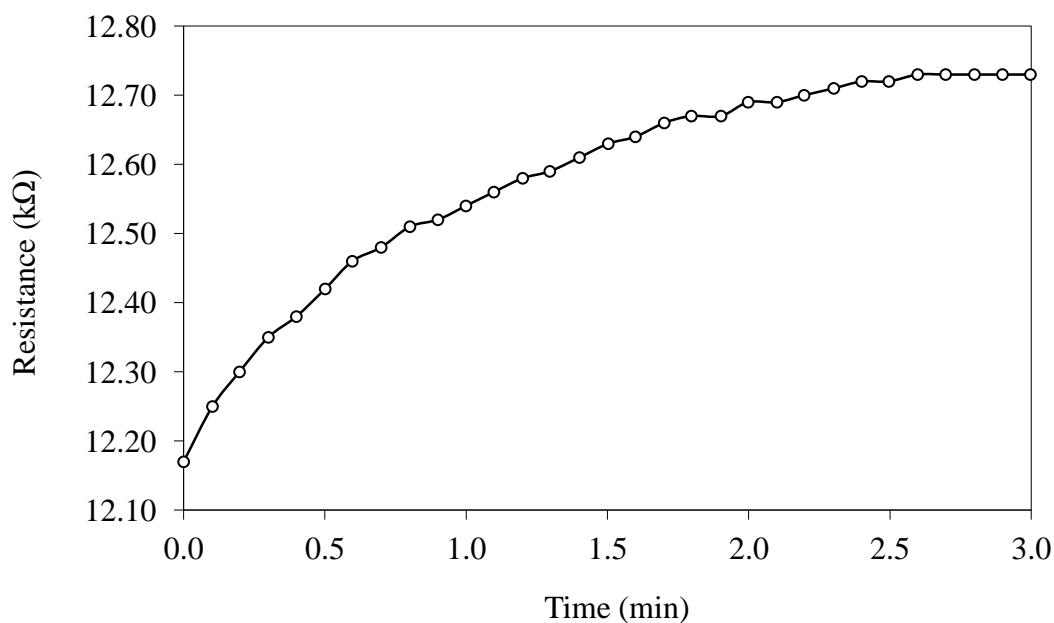


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งกับปริมาณของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์

4.7 คุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าและการตรวจวัดก๊าซของตัวตรวจวัดก๊าซ

งานวิจัยนี้จะศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย 4 ชนิด ได้แก่ โทลูอิน อะซีโตน เมทานอล และไซโคลเฮกเซน ด้วยตัวตรวจวัดก๊าซที่ทำจากพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตะไครเลทโดยวัดค่าการ

เปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางไฟฟ้า รูปที่ 4.22 แสดงการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งที่มีปริมาณท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเมื่อสัมผัสกับไอของโทลูอินความเข้มข้น 500 ppm อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส เทียบกับเวลา



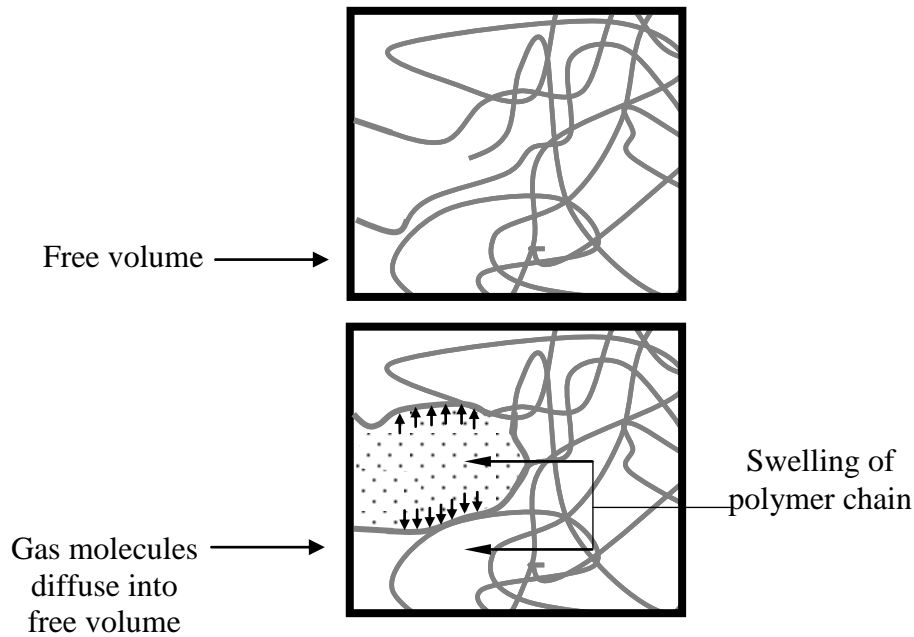
รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งที่มีปริมาณท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเมื่อสัมผัสกับไอของโทลูอินความเข้มข้น 500 ppm ที่อุณหภูมิคงที่ 40 องศาเซลเซียส

การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งเมื่อสัมผัสกับไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย สามารถอธิบายได้จากการเกิด Swelling ของเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ [21] ซึ่งเกี่ยวข้องกับปัจจัยของการแทรกซึม (Permeation) และการปฏิสัมพันธ์ระหว่างพอลิเมอร์กับตัวทำละลาย (Polymer-solvent interaction) เช่น ก๊าซหรือไอของสารระเหย [26-29]

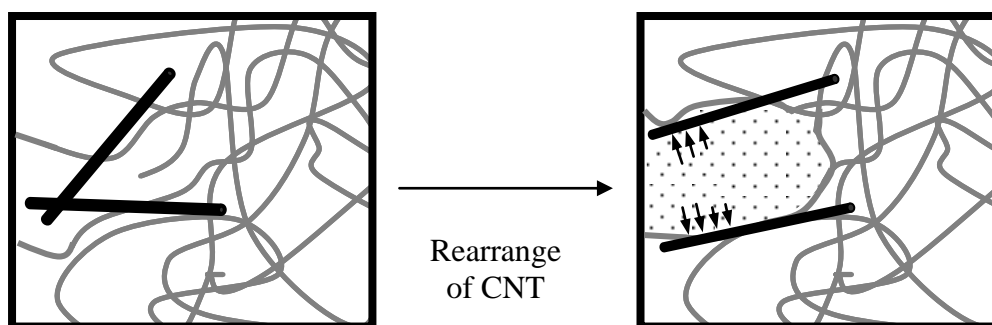
การแทรกซึมของไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าไปในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งเป็นอย่างมาก ซึ่งถูกนิยามด้วยอัตราที่ไอของสารระเหยผ่านเข้าไปในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ กลไกของการแทรกซึมของไอของสารระเหยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

- (ก) การดูดซับ Absorption
- (ข) การแพร่ Diffusion)
- (ค) การคายซับ Desorption

ในกรณีของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ กลไกของการแทรกซึมของไอของสารระเหยจะมีเพียง 2 ขั้นตอน ได้แก่ การดูดซึมและการแพร่ ซึ่งขั้นตอนการแพร่มีอัตราช้ากว่าการดูดซึมของไอของสารระเหย ดังนั้นขั้นตอนการแพร่จึงเป็นขั้นกำหนดอัตรา (Rate determining step) การแพร่ของไอของสารระเหยเข้าไปในช่องว่าง (Free volume) ของเมทริกซ์ของพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการจัดเรียงสายโซ่ของพอลิเมอร์ใหม่ และเกิดช่องว่างระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 การเกิด Swelling เมื่อมีการแทรกซึมของไอสารระเหยเข้าไปภายในพอลิเมอร์บริสุทธิ์

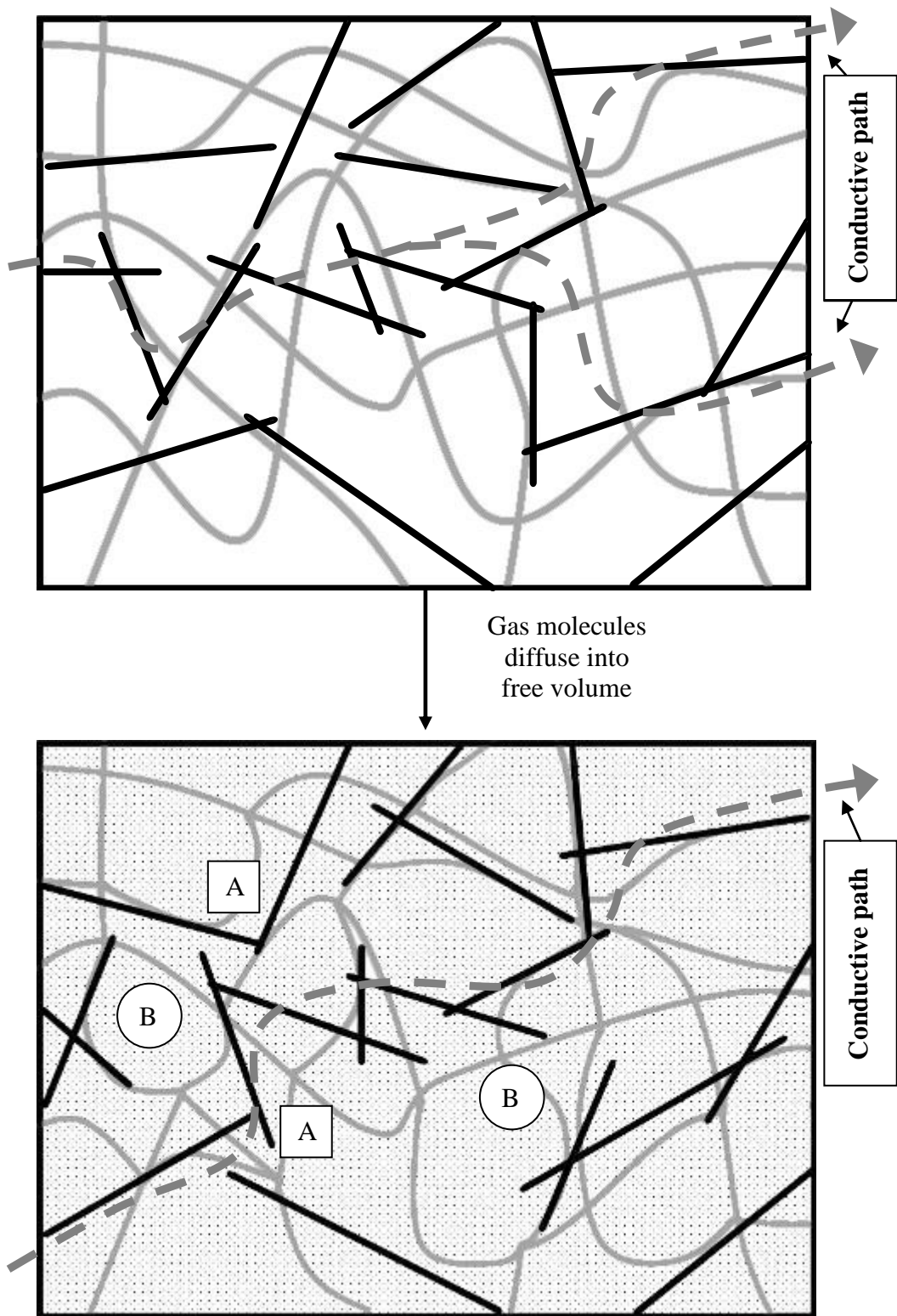


รูปที่ 4.24 การจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่พอลิเมอร์และท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรเมื่อไอของสารระเหยแพร่เข้าไปในพอลิเมอร์ประกอบแต่ง

เมื่อนำตัวตรวจวัดก๊าซที่ทำจากพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร และพอลิเมทิลเมทาไครเลทไปสัมผัสกับไอของสารประกอบอินทรีย์ระเหยขึ้น ไอระเหยดังกล่าวจะแพร่เข้าไปในช่องว่างของเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการจัดเรียงสายโซ่ใหม่และทำให้ท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่พาดกันอยู่ถูกผลักให้แยกออกจากกันจนเกิดช่องว่างใหม่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.24.

รูปที่ 4.25 แสดงแนวความคิดในการจัดเรียงตัวใหม่ของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในพอลิเมอร์ประกอบแต่ง เมื่อไอสารระเหยแพร่เข้าไปในช่องว่างของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง การแพร่ของโมเลกุลของไอของสารระเหยเข้าไปในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เกิดการ Swelling และท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ จากการทดสอบทางด้านไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.6 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ประกอบแต่งเพิ่มขึ้นเมื่อพอลิเมอร์ประกอบแต่งสัมผัสกับไอของโทลูอิน ซึ่งผลดังกล่าวเกิดขึ้นจากไอของสารระเหยที่แพร่เข้าไปในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ทำลายโครงข่ายของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรจนขาดออกจากกัน ทำให้พอลิเมอร์ประกอบแต่งนำไฟฟ้าได้น้อยลง ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้จากคิวิตอลมัลติมิเตอร์จึงสูงขึ้น

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของพอลิเมอร์ประกอบแต่งภายหลังจากการสัมผัสกับก๊าซส่งผลให้สมบัติทางไฟฟ้าของมันเปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับปริมาณ และสมบัติของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่เติมเข้าไปในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ ในโครงการวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่า เราสามารถทำการเตรียมตัวตรวจวัดก๊าซจากพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้จากกลีซอรอลและเฟอร์โรซีน ซึ่งจากการทดสอบ พบว่า ตัวตรวจวัดก๊าซที่พัฒนาได้มีความสามารถในการตรวจวัดก๊าซได้ดี



รูปที่ 4.25 การจัดเรียงของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรในพอลิเมอร์ประกอบแต่งใหม่เมื่อไอสารระเหยแพร่เข้าไปในพอลิเมอร์ประกอบแต่ง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 การสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนระดับนาโนเมตรจากกลีเซอรอลด้วยวิธีไพโรไลซิส

ในโครงการวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ โดยการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นระหว่างกลีเซอรอล และเฟอร์โรซีน เป็น 5 ต่อ 1 10 ต่อ 1 และ 20 ต่อ 1 ตามลำดับ พบว่าที่อุณหภูมิการสังเคราะห์ 850 องศาเซลเซียส การเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนโดยควบคุมปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาให้คงที่จะทำให้อนุภาคท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น แต่ความยาวของอนุภาคมีค่าลดลง และมีปริมาณปริมาณคาร์บอนที่ไร้รูปร่างมากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เพียงพอที่จะทำให้อัตราการเกิดอนุภาคคาร์บอนเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ทั้งหมด นอกจากนี้ ในส่วนของการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสพบว่า ที่สัดส่วนเฟอร์โรซีนต่ำๆอนุภาคที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะเป็นแคปซูล แต่เมื่อสัดส่วนเฟอร์โรซีนเพิ่มขึ้นจะพบอนุภาคที่มีลักษณะคล้ายหอยเม่นซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าและคล้ายท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรงอกอยู่บนแคปซูล เนื่องจากที่อัตราส่วนเฟอร์โรซีนต่ำ จำนวนอะตอมคาร์บอนไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดท่องอกอยู่บนแคปซูลได้ นอกจากนี้อัตราการไหลของก๊าซตัวพาจะส่งผลต่อลักษณะของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่สังเคราะห์ได้ โดยการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซจะทำให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณต้นท่อลดลง

5.2 การวิเคราะห์พอลิเมอร์ประกอบแต่ง

ในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยสามารถเตรียมพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรและพอลิเมทิลเมตะไครเลท ได้ด้วยการเติมท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรลงในพอลิเมทิลเมตะไครเลทระหว่างการเกิดการปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของเมทิลเมตะไครเลท จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของพอลิเมอร์ประกอบแต่ง พบว่าท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่เติมลงในพอลิเมทิลเมตะไครเลทจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความคงทนต่อความร้อนของพอลิเมทิลเมตะไครเลทบริสุทธิ์ ทั้งนี้พันธะเคมีภายในพอลิเมอร์ประกอบแต่งเป็นพันธะคาร์บอน-คาร์บอน ซึ่งเกิดจากการที่คาร์บอนอะตอมของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรสร้างพันธะกับคาร์บอนอะตอมของพอลิเมทิลเมตะไครเลท เมื่อเพิ่มปริมาณของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรเข้าไปในพอลิเมทิลเมตะไครเลทจะทำให้โครงข่ายของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากขึ้น

นอกจากนี้ยังพบการเกิด Swelling ของเมทริกซ์ของพอลิเมอร์เมื่อนำพอลิเมอร์ประกอบแต่งไปสัมผัสด้วยไอของโทลูอีน

5.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวตรวจวัดก๊าซ

จากผลของการพัฒนาตัวตรวจวัดก๊าซที่ทำจากพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตร และ พอลิเมทิลเมตะไครเลทที่ใช้ในงานวิจัยนี้เตรียมโดยวิธี Screen printing เมื่อนำตัวตรวจวัดก๊าซไปทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้นของตัวตรวจวัดก๊าซพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่อปริมาณของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรที่เติมลงไปในพอลิเมทิลเมตะไครเลทบริสุทธิ์สูงขึ้น เนื่องจากท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรเกิดการพาดต่อกันจนเป็นโครงข่ายที่จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้ไฟฟ้าไหลผ่านได้มากยิ่งขึ้น เมื่อนำตัวตรวจวัดก๊าซไปสัมผัสกับไอของโทลูอีนพบว่าความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากไอของโทลูอีนแพร่เข้าไปในเมทริกซ์ของพอลิเมทิลเมตะไครเลทจนทำให้ พอลิเมทิลเมตะไครเลทเกิดการ Swelling ขึ้น นอกจากนี้ไอของโทลูอีนยังไปทำลายโครงข่ายของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรทำให้ไฟฟ้าไหลผ่านได้น้อย

การทดลองความสามารถในการตรวจวัดก๊าซตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ โทลูอีน แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ประกอบแต่งของท่อคาร์บอนระดับนาโนเมตรกับพอลิเมทิลเมตะไครเลทนั้นมีสมบัติเพียงพอสำหรับการใช้งานในการตรวจวัดก๊าซได้ การพัฒนาในขั้นตอนต่อไปคือการพัฒนาให้ตัวตรวจวัดก๊าซมีความแข็งแรงคงทน และสามารถนำไปใช้ตรวจวัดก๊าซตัวอื่นๆ ซ้ำได้อีก ซึ่งในการนี้จำเป็นต้องทำการศึกษาทดลองเพิ่มเติมในลำดับต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Buakamsri, T. **Thailand's Air: Poison Cocktail**. Campaign for Alternative Industry Network (CAIN), 2005.
- [2] Peter, J., and Harris, F. **Carbon nanotubes and related structures**. Cambridge University, 1999.
- [3] Zhang, B., Fu, R.W., Zhang, M. Q, Donga, X. M., Lana, P. L., and Qiu, J. S. Preparation and characterization of gas-sensitive composites from multi-walled carbon nanotubes/polystyrene. **Sensors and Actuators B**. 109 (2005): 323–328.
- [4] Li, J. R., Xu, J. R., Zhang, M. Q. and Rong, M. Carbon black/polystyrene composites as candidates for gas sensing materials. **Carbon** 41 (2003): 2353–2360
- [5] Paradise M. and T. Goswami. Carbon nanotubes – Production and industrial applications. **Materials and design**. 28 (2007): 1477-1489.
- [6] O' Connell. M., Carbon nanotubes : properties and applications, United States of America, CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.
- [7] See C.H. and A.T. Harris. A Review of Carbon Nanotube Synthesis via Fluidized-Bed Chemical Vapor Deposition. **Ind. Eng. Chem. Res.** 46 (2007): 997-1012.
- [8] ทรงพล กาญจนชูชัย, นาโนอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น, พิมพ์ครั้งที่ 1 สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [9] Nagaraju, N., A. Fonseca, Z. Konya and J.B. Nagy. Alumina and silica metal catalysts for the production of carbon nanotubes. **Journal of molecular catalysis A: Chemical**. 181 (2002): 57-62.
- [10] Zhang, H., E. Liang, P. Ding, M. Chao. Layered growth of aligned carbon nanotube arrays by pyrolysis. **Physica B**. 337 (2003): 10–16.
- [11] Tokoro, H., S. Fujii and T. Oku, Iron nanoparticles coated with graphite nanolayers and carbon nanotube. **Diamond and Related Materials**. (2004): 1270–1273.
- [12] Lu, Y., Z. Zhua and Z. Liu. Carbon-encapsulated Fe nanoparticles from detonation-induced pyrolysis of ferrocene. **Carbon**. 43 (2005): 369–374.
- [13] Kim, H. and W. Sigmund. Iron nanoparticles in carbon nanotubes at various temperatures. **Crystal Growth**. 276 (2005): 594–605.

- [14] Gulino, G., et al. C_2H_6 as an active carbon source for large scale synthesis of carbon nanotubes by chemical vapour deposition. **Applied catalysis**. 279 (2005): 89-97.
- [15] Zhao, N., C. He, Z. Jiang, J. Li. and Y. Li. Fabrication and growth mechanism of carbon nanotubes by catalyticchemical vapor deposition. **Materials Letters**. 60 (2006): 159–163.
- [16] Charinpanitkul, T., N. Sano, P. Puengjinda, J. Klanwan, N. Akrapattangkul and W. Tanthapanichakoon. Naphthalene as an alternative carbon source for pyrolytic synthesis of carbon nanostructures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 86 (2009): 386-390.
- [17] Skakalova, V., Weglikowska, U. D. and Roth, S. Electrical and mechanical properties of nanocomposites of single wall carbon nanotubes with PMMA. **Synthetic Metals**. 152 (2005): 349-352.
- [18] Jia, Z., Wang, Z., Xu, C., Liang, J., Wei, B., Wu, D., and Zhu, S. Study on poly(methyl methacrylate):carbon nanotube composites. **Materials Science and Engineering A**. 271 (1999): 395–400.
- [20] Li, Y., Wang, H. C. and Yang, M. J. n-Type gas sensing characteristics of chemically modified multi-walled carbon nanotubes and PMMA composite. **Sensors and Actuators B**. 121 (2007): 167-172.
- [21] Niu, L., Luo, Y., and Li, Z. A highly selective chemical gas sensor based on functionalization of multi-walled carbon nanotubes with poly(ethylene glycol). **Sensors and Actuators B**. 126 (2007): 361–367.
- [22] Quang, N. H., Trinh, M. V., Lee, B. H. and Huh, J. S. Effect of NH_3 gas on the electrical properties of single-walled carbon nanotube bundles. **Sensors and Actuators B**. 113 (2006): 341–346.
- [23] Suehiro, J., Sano, N., Zhou, G., Imakiire, H., Imasaka, K. and Hara, M. Application of dielectrophoresis to fabrication of carbonnanohorn gas sensor. **Journal of Electrostatics**. 64 (2006): 408–415.
- [24] Bittencourt, C., et al. WO_3 films modified with functionalised multi-wall carbon nanotubes: Morphological, compositional and gas response studies. **Sensors and Actuators B**. 115 (2006): 33-41.
- [25] Ionescu, R., E.H. Espinosa, E. Sotter, E. Llobet, X. Vilanova, X. Correig, A. Felten, C. Bittencourt, G. Van Lier, J.C. Charlier and J.J. Pireaux. Oxygen functionalisation of MWNT and their use as gas sensitive thick-film layers. **Sensors and Actuators B**. 113 (2006): 36–46.

- [26] Sperling, L.H. **Introduction to physical polymer science**. forth editions, Wiley, 2006.
- [27] Burke, J. **Solubility parameters: theory and application**. Appeared in: the AIC Book and Paper Group Annual, Volume 3, 1984.
- [28] Hansen, C. M. **Hansen solubility parameter: a user's handbook**. CRC, 2000.
- [29] Koo, J. H. **Polymer_Nanocomposites**. McGraw-Hill, 2006.