

## การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากขยะพลาสติกด้วยวิธีไมโครเวฟ

วิทยานิพนธ์ ของ ธนพร จันทรโคตร

เสนอต่อมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ธันวาคม 2565 ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

## การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากขยะพลาสติกด้วยวิธีไมโครเวฟ

วิทยานิพนธ์ ของ ธนพร จันทรโคตร

เสนอต่อมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ธันวาคม 2565 ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

#### SYNTHESIS CNTs FROM PLASTIC WASTE BY MICROWAVE-DRIVEN

DESTRUCTION METHOD

ΒY

THANAPORN JUNTRAKOTE

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for The Master of Science Degree in Physics at Sakon Nakhon Rajabhat University December 2022 All Right Reserved by Sakon Nakhon Rajabhat Universit



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากขยะพลาสติกด้วยวิธีไมโครเวฟ ธนพร จันทรโคตร ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประธานกรรมการสอบ กรรมการสอบและ และผู้ทรงคุณวุฒิ (ศาสตราจารย์ ดร.ทศวรรษ สีตะวัน) ประธานที่ปรึกษา (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม ทิพราช ) วิทยานิพนธ์ init Kidkhurthed กรรมการสอบ กรรมการสอบ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หรรษกร วรรธนะสาร) (ดร.พินิจ กิจขุนทด) คณะกรรมการบริหารหลักสูตรรับรองแล้ว บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว (ผู้ช่วยศาสตรภจารย์ ดร.สุรศักดิ์ แสนทวีสุข) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หรรษกร วรรธนะสาร) ประธานหลักสูตร ผู้อานวยการบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร หาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

> เมื่อวันที่ 16 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2565 ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

#### ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือ เป็นอย่างดีจาก ศาสตราจารย์ ดร.ทศวรรษ สีตะวัน ประธานกรรมการที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่กรุณาแนะนำ เสนอแนะ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจ ใส่ตลอดมา ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จเรียบร้อย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และ

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้การช่วยเหลือการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณ ดร.พินิจ กิจขุนทด นักวิทยาศาสตร์ระบบลำเลียงแสง สถาบันวิจัย แสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ได้ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และเอื้อเฟื้อเครื่องมือใน การดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์ความเป็นเลิศด้านพลังงานทางเลือก สถาบันวิจัย และพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร ที่ได้ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และเอื้อเฟื้อสถานที่ ในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย ราชภัฏสกลนคร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

คุณค่าและประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บิดา มารดาของ ผู้วิจัย และบูรพาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนจนผู้วิจัยสามารถดำรงตนและบรรลุผล สำเร็จในปัจจุบัน

ธนพร จันทรโคตร

ชื่อเรื่อง	การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากขยะพลาสติกด้วยวิธีไมโครเวฟ
ผู้วิจัย	ธนพร จันทรโคตร
กรรมการที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.ทศวรรษ สีตะวัน
ปริญญา	วท.ม. (ฟิสิกส์)
สถาบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ปีที่พิมพ์	2565

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นด้วยวิธีไมโครเวฟ ผ่านกระบวนการ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกการนำถุงพลาสติกหูหิ้วพอลิเอทิลีนชนิดความ หนาแน่นสูง (HDPE) ชนิดบางอย่างดีมาล้างด้วยน้ำและปั่นบดให้มีขนาดเล็ก ขั้นตอนที่สอง นำพลาสติกมาผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> และขั้นตอนสุดท้ายนำสารตัวอย่างที่ผสม แล้วเข้าเครื่องไมโครเวฟกำลัง 1,200 W ในเวลา 20, 30, 40, และ 45 นาที ตามลำดับ อุณหภูมิสูงสุดภายใต้การทดลองประมาณ 200 °C จากนั้นนำสารตัวอย่างที่ได้จากการ สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นด้วยวิธีไมโครเวฟมาศึกษาลักษณะสัณฐาน และวิเคราะห์สมบัติของวัสดุจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิค XRD, SEM, TEM, และ XAS พบว่า ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นดีกมายชั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมี ขนาดประมาณ 8 – 29 nm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีขนาดประมาณ 4 – 12 nm สามารถประหยัดเวลาในการสังเคราะห์ได้ถึง 20%

**คำสำคัญ:** พลาสติก, ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น, ตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub>

TITLE	Synthesis CNTs from Plastic Waste by Microwave–Driven
	Destruction Method
AUTHOR	Thanaporn Juntrakote
ADVISORS	Prof. Dr.Tosawat Seetawan
DEGREE	M.Sc. (Physics)
INSTITUTION	Sakon Nakhon Rajabhat University
YEAR	2022

#### ABSTRACT

The multi–walled carbon nanotube (MWCNT) was synthesized by microwave radiation composed of 3 steps. Firstly, the high–density polyethylene (HDPE) plastic was washed with water. Second, the plastic was mixed with a catalyst (FeAIO<sub>x</sub>). Finally, the mixer was input into a microwave to generate MWCNT under 1,200 W for 20, 30, 40, and 45 mins. The highest temperature recorded under the microwave was ~200 C. It was found that MWCNT outer and inner diameters were ~8–29 nm and ~4 –12 nm, saving time by 20%. XRD, SEM, TEM, and XAS were utilized to confirm this research's successful crystalline structure and microstructure.

Keywords: Plastic, Microwave, Multiwall carbon nanotube, FeAlO<sub>x</sub> catalyst

# สารบัญ

บทที่

ภูมิหลัง	••••••
ความมุ่งหมายของการวิจัย	3
ความสำคัญของการวิจัย	5
ขอบเขตของการวิจัย	2
กรอบแนวคิดของการวิจัย	2
นิยามศัพท์เฉพาะ	Ę
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	8
โครงสร้างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	8
คุณสมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	8
ท่อนาโนคาร์บอน	ç
โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน	ç
สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน	1′
การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน	13
ตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอนอะลูมินัมออกไซด์ (Iron Aluminum oxide: FeAlO <sub>x</sub> )	)16
การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก	
ลักษณะการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก	17
สมบัติทางไดอิเล็กทริก	19
กระบวนการทำงานของไมโครเวฟ	20
ประวัติความเป็นมาของไมโครเวฟ	20
การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ	2 <sup>.</sup>
พลังงานที่ถูกดูดซับในวัสดุ (Absorbed power)	24
ลักษณะการเดินทางของไมโครเวฟ	

IV

หน้า

# สารบัญ (ต่อ)

## บทที่

## หน้า

เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD)
เทคนิคการดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption Spectroscopy: XAS)27
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)31
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
3 วิธีการดำเนินการวิจัย
สืบค้นเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
ขั้นตอนดำเนินการวิจัย40
4 ผลและการอภิปราย
ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดบุ๊กมาร์ก47
การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา47
การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธิไมโครเวฟ
การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วย
วิธีไมโครเวฟด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction:
XRD)
การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไมโครเวฟ
ด้วยเทคนิคการดูดกลื่นของรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption Spectroscopy:

# สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า
การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไมโครเวฟ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron
microscope)
การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไมโครเวฟ
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron
microscope)
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ
สรุปผล59
ข้อเสนอแนะ
บรรณานุกรม61
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก EDS70
ภาคผนวก ข นำเสนอผลงานวิจัย77
ประวัติย่อของผู้วิจัย91

# บัญชีตาราง

ตา	าราง	หน้า
	1 แสดงสมบัติเชิงกลของ HDPE	9
	2 การเปรียบเทียบของท่อนาโนคาร์บอนแบบ SWCNT และ MWCNT	11
	3 สมบัติของท่อนาโนอาร์บอน	

# บัญชีภาพประกอบ

#### ภาพประกอบ

1	กรอบแนวคิดการวิจัย	5
2	โครงสร้างลักษณะสายโซ่ของ HDPE	8
3	อัญรูปของคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุเดียวกันแต่โครงสร้างต่างกัน	. 10
4	ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (ซ้าย) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (ขวา)	11
5	เทคนิคอาร์คดิสชาร์จ	. 13
6	เทคนิคระเหยด้วยเลเซอร์	. 14
7	เทคนิคการตกสะสมไอเคมี	. 15
8	กระบวนการสังเคราะห์ CNTs จากพลาสติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาFeAlO <sub>x</sub>	
	ผ่านไมโครเวฟ	.16
9	การเกิดความร้อนในเนื้อวัสดุจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก	.18
10	) การให้ความร้อนกับวัสดุแบบต่าง ๆ	.18
11	สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็ไฟฟ้าช่วงควมถี่ต่าง ๆ	. 19
12	การกระจายความร้อนภายในเนื้อของวัสดุเมื่อให้ความร้อนด้วยวิธี	.22
13	โมเลกุลของน้ำที่เปลี่ยนทิศสลับไปมาอย่างรวดเร็วตามทิศทางของสนามไฟฟ้า	
	ทำให้เกิดความร้อน	23
14	ลักษณะการเดินทางของไมโครเวฟผ่านตัวกลางและวัสดุต่าง ๆ	25
15	์ หลักการของ Bragg's law	.27
16	ร กลไกการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของอะตอมชั้นการดูดกลืน K (K-edge absorption)	28
17	์ แผนภาพเทคนิค X-ray absorption spectroscopy โดยใช้เครื่องวัด	
	ความเข้มรังสีเอกซ์ในตำแหน่งก่อนและหลังถูกดูดกลื่นโดยตัวอย่าง	29
18	์ สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของอะตอมในโครงสร้าง XANES และ EXAFS	30
19	) แสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	.31
20	) แผนภาพส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	33
21	ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา Iron (III) nitrate nonahydrate: Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , Aluminium nitrate	
	nonahydrate: Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , Citric acid: C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> และน้ำ	. 41

หน้า

# บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

#### ภาพประกอบ

22	กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสารที่อุณหภูมิ 90 ℃	. 41
23	สารละลายมีลักษณะเป็นเจล (Brown gel)	.42
24	เผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง 500 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	.42
25	ตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอนอะลูมินัมออกไซด์ (Iron Aluminum oxide: FeAlO <sub>x</sub> )	.43
26	หลอดแก้วควอทซ์บรรจุพลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO <sub>x</sub>	
	ในไมโครเวฟ	.43
27	แผนผังการทดลอง	.46
28	ตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO <sub>x</sub>	.47
29	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO <sub>x</sub>	.48
30	ลักษณะภายนอกของท่อนาโนคาร์บอน	.49
31	ภาพถ่ายอุณหภูมิด้วยเครื่องเทอร์โมสแกน	5
32	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของ MWCNTs standard	
	และ MWCNTs จากการสังเคราะห์ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟเป็นเวลา	
	20, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ	.51
33	สเปกตรัม XANES ของ Fe K-edge	53
34	SEM และ EDX  (α) ตัวอย่างมาตรฐานของ MWCNTs (b – e) ท่อนาโนคาร์บอน	
	จากการผสมพลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO <sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วย	
	วิธีไมโครเวฟเป็นเวลา 20, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ	.54
35	ร้อยละโดยมวลจากธาตุที่พบในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน จากการผสม	
	พลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlOx ให้ความร้อนด้วยวิธี	
	ไมโครเวฟ	56
36	TEM (α) ตัวอย่างมาตรฐานของ MWCNTs (b) ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสม	
	พลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO <sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟ	
	เป็นเวลา 220, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ	.57

หน้า

## บทที่ 1

## บทน้ำ

### ภูมิหลัง

พลาสติกเป็นวัสดุที่มุษย์คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นจากเม็ดพลาสติก เพื่อใช้เป็น บรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ช่วยให้เกิดความสะดวกสบายในการดำรงชีวิตประจำวันในทุก ๆ ด้าน ในแต่ละปี ประเทศไทยมีการผลิตและการใช้ถุงพลาสติกจำนวนมาก จากสถิติงานวิจัยที่ ์ ตีพิมพ์ในวารสาร Science Advances เมื่อเดือนตุลาคม ปี 2563 พบว่า ประเทศไทยมีการ สร้างขยะพลาสติกต่อประชากรสูงเป็นอันดับที่ 5 ของโลก โดยมีปริมาณขยะพลาสติก 4,796,494 ตัน/ปี (หรือราว 69.54 กิโลกรัม/ปี/คน) และมีสัดส่วนขยะพลาสติกในขยะทั่วไป มากเป็นอันดับที่ 3 ของโลก ปริมาณพลาสติกในประเทศไทย แบ่งเป็นประเภทถุงพลาสติก 1.11 ล้านตัน ขวดพลาสติก 0.40 ล้านตัน แก้ว กล่อง และถาดพลาสติก 0.23 ล้านตัน ตามลำดับ (สำนักนโยบานและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2565) เนื่องจาก ด้วยคุณสมบัติของพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่นสูงและราคาถูกทำให้มีการใช้ พลาสติก ในผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย โดยพลาสติกมากกว่า ครึ่งหนึ่งที่ผลิตขึ้นใช้ในชีวิตประจำวันเป็นประเภทใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง (Single-use plastics) ซึ่งมีอายุการใช้งานสั้นและทำให้เกิดการใช้พลาสติกมากเกินความจำเป็น ทั่วโลกจึงกำลัง ประสบปัญหามลพิษจากขยะพลาสติก โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศกำลังพัฒนาที่ไม่มีระบบ ้จัดการขยะที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งต้องใช้เวลาย่อยสลายยาวนานถึง 450 ปี โดยพบว่าขยะ พลาสติก 50% กำจัดไม่ถูกวิธี ที่สำคัญหากใช้วิธีฝังกลบจะใช้พื้นที่มากกว่าขยะปกติถึง 3 เท่า หรือหากนำไปเผาทำลายจะทำลายสิ่งแวดล้อมอย่างมาก รวมทั้งมีสารตกค้าง ในสิ่งแวดล้อม เนื่องจากถุงพลาสติกทำจากเม็ดปิโตรเลียม ทำให้มีการปนเปื้อนของสาร ตกค้างในดินและน้ำ ส่งผลก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก สาเหตุของภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน ้ (พิชามญช์ รักรอด. 2562) นักวิจัยคาดการณ์ว่าขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นทั่วโลกมีเพียงร้อยละ 9 เท่านั้นที่มีการนำกลับมาใช้ใหม่ (รีไซเคิล) และส่วนใหญ่ (ร้อยละ 79) สะสมในแหล่ง ฝังกลบหรือตกค้างในสิ่งแวดล้อมบนบกและในทะเล (Geyer, Jambeck & Law, 2017)

นอกจากนั้นทั่วโลกกำลังเผชิญกับโรคระบาดเชื้อไวรัสโคโรน่า 2019 ที่ส่งผลต่อ การดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก มีการใช้พลาสติกที่เพิ่มขึ้นกว่า 45% หรือคิดเป็น ค่าเฉลี่ยการใช้ปริมาณพลาสติกอยู่ที่ 139 กรัม/คน/วัน (ปาริชาติ บุญเอก. 2564) เมื่อวิถีชีวิต และพฤติกรรมการบริโภคของผู้คนเปลี่ยนแปลงไป เช่น การทำงานที่บ้าน (Work from home) และการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของการใช้บริการส่งอาหาร (Food delivery) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งทางการแพทย์และ การป้องกันตัวเองที่มีการใช้อุปกรณ์ที่ทำจากวัสดุจำพวกพลาสติก คือ อุปกรณ์ป้องกัน ส่วนบุคคล (Personal protective equipment: PPE), หมวกคลุมผม, หน้ากาก Face shield และรองเท้า (มหาวิทยาลัยมหิดล, 2563)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นหนึ่งในพลาสติกประเภท Polyethylene ที่มีสารตั้งต้นที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ คือ เนฟทาชนิดเบา มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น และมีความทนทานสูง เนื่องจากโมเลกุลมีการจับตัวกันอย่างเหนียวแน่น พลาสติกจัดเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วย โมเลกุลซ้ำ ๆ กันต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาว ๆ ประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน, ไฮโดรเจน, และออกซิเจน นอกจากนี้อาจมีธาตุอื่น ๆ เป็นส่วนประกอบย่อย ซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน, ฟลูออรีน, คลอรีน, และกำมะถัน (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2561)

ท่อนาโนคาร์บอน หรือ Carbon nanotubes ประกอบด้วยอะตอมของ ธาตุคาร์บอน มีลักษณะคล้ายแผ่นแกรไฟต์ที่ม้วนตัวเกิดเป็นท่อทรงกระบอกกลวง มีรูปร่าง เป็นโครงตาข่ายม้วนเชื่อมติดกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ท่อนาโนคาร์บอนถือได้ว่าเป็นสารที่ได้รับความสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ ทางด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษที่ดีมาก มีความแข็งแรง มีความยืดหยุ่นสูง มีน้ำหนักเบา มีความสามารถในการนำไฟฟ้า สามารถ นำความร้อนได้ดี (พิศิษฐ์ สิงห์ใจ, 2543; Kai, Mingyuan, Yiping, Xifeng, & Guohong, 2009)

การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนมีหลายวิธี แต่ละวิธีมีทั้งข้อดีและข้อเสีย แตกต่างกันไป สำหรับวิธีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์มีดังนี้ วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc- discharge) เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายถูกแต่ท่อนาโนคาร์บอน ที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอจะต้องถูกทำ ให้บริสุทธิ์ในภายหลัง ให้ผลผลิตสูงที่เป็นไปได้ของท่อนาโน และการควบคุมอย่างระมัดระวัง, วิธีระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization) ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง

2

มีสารเจือปนโลหะค่อนข้างต่ำ แต่ไม่สม่ำเสมอและแตกแขนงได้, วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition : CVD) ได้ผลผลิตในปริมาณมาก มีความบริสุทธิ์สูง การจัดตำแหน่งสม่ำเสมอ มีต้นทุนต่ำ แต่มีตำหนิและโค้งงอ และวิธีไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นวิธีที่ใช้อุณหภูมิสูง สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ครั้งละปริมาณมาก เหมาะสำหรับ การผลิตเพื่อจำหน่าย (สมศักดิ์ ดำรงเลิศ, 2551; สุทธิษา ก้อนเรือง, 2551; ฐิยาพร ปานสง, 2555; ศิริกาญจนา ทองมี, 2556; Ebbesen, 1996; Daenen et al., 2003; Haris, Hirsch, Backes, 2009; Futaba et al., 2006; Pham, Jang, Whang, Choi, 2017; Rahman et al., 2019)

จากที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน จากขยะพลาสติกด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยมี FeAlO<sub>x</sub> เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อศึกษาลักษณะ สัณฐาน (Morphology) ของท่อนาโนคาร์บอนจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากขยะ พลาสติกด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยมี FeAlO<sub>x</sub> เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเพื่อวิเคราะห์สมบัติ ของวัสดุจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

## ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดความมุ่งหมายของการวิจัยไว้ ดังนี้

 เพื่อสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากขยะพลาสติกด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยมี FeAlO<sub>x</sub> เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

 เพื่อศึกษาลักษณะสัณฐาน (Morphology) ของท่อนาโนคาร์บอนจากการ สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากขยะพลาสติกด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยมี FeAlO<sub>x</sub> เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา

3. เพื่อวิเคราะห์สมบัติของวัสดุจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

### ความสำคัญของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดความสำคัญของการวิจัยไว้ ดังนี้

- 1. ทราบวิธีสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน
- 2. เพิ่มพูนความรู้ในศาสตร์สาขาวิชาฟิสิกส์
- 3. ได้แนวทางการประยุกต์ใช้หรือพัฒนาในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

### ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตของการวิจัยไว้ ดังนี้

 สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากขยะพลาสติกด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยมี FeAlO<sub>x</sub> เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระยะเวลาที่เหมาะสม

ศึกษาลักษณะสัณฐานของท่อนาโนคาร์บอน ด้วยกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3. วิเคราะห์สมบัติของวัสดุจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

## กรอบแนวคิดของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดกรอบแนวคิดของการวิจัย ดำเนินการตาม ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- R<sub>1</sub> : ศึกษาข้อมูลพื้นฐาน
- D<sub>1</sub> : ร่างแผนการทดลอง
- R : ทดลองและประเมินผล (น้ำแผนการทดลองไปใช้)
- R : ปรับปรุงเพื่อเผยแพร่ต่อไป



ภาพประกอบ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

### นิยามศัพท์เฉพาะ

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดนิยามศัพท์เฉพาะของการวิจัยไว้ ดังนี้ 1. ขยะพลาสติก (Plastic west) หมายถึง ถุงพลาสติกหูหิ้วพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นสูง (HDPE) ชนิดบางอย่างดี ยี่ห้อปลาหมึก นำมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ 2. ไมโครเวฟ (Microwave) หมายถึง อุปกรณ์หรือเตาไมโครเวฟที่ใช้ในการ ให้ความร้อนผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ย่านความถี่ไมโครเวฟ ยี่ห้อเตาไมโครเวฟชาร์พ (Sharp Microwave Oven) รุ่น R-390I กำลังไฟ 1,200 วัตต์ ความจุ 32 ลิตร 3. ตัวเร่งปฏิกิริยา หมายถึง ตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอนอะลูมินัมออกไซด์ (Iron Aluminum oxide: FeAlO<sub>x</sub>) เป็นสารที่ช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ประกอบด้วย Iron (III) nitrate nonahydrate: Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, Aluminium nitrate nonahydrate: Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>,Citric acid: C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> อย่างละ 50 กรัมและน้ำ ในอัตราส่วน 1:1:1:1

# บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการ การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากพลาสติกโพลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยวิธีไมโครเวฟ โดยสามารถสรุปสาระสำคัญตามลำดับ ดังนี้

- 1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง *(*HDPE*)*
- 2. ท่อนาโนคาร์บอน
  - 2.1 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน
  - 2.2 สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน
  - 2.3 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน
- 3. ตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอนอะลูมินัมออกไซด์ (Iron Aluminum oxide: FeAlO<sub>x</sub>)
- 4. การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก
- 5. กระบวนการทำงานของไมโครเวฟ
- 6. เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD)
- 7. เทคนิคการดูดกลื่นของรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption Spectroscopy: XAS)
- 8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
- 9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron

microscope)

- 10. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
  - 10.1 งานวิจัยในประเทศ
  - 10.2 งานวิจัยต่างประเทศ

### พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1954 โดย Karl Ziegler ประเทศเยอรมัน โดยบริษัท Standard Oil และ Philips Petroleum ประเทศสหรัฐอเมริกา เริ่มการผลิตขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1957 ในประเทศเยอรมัน สหรัฐอเมริกา และอีตาลี (ชลธิชา นุ่มหอม, 2538)

#### 1. โครงสร้างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) มีโครงสร้างหน่วยย่อยของ พอลิเอทิลีน ประกอบด้วยสายโช่ตรงค่อนข้างสูงของ CH<sub>2</sub> และมีกิ่งสาขาบ้างเล็กน้อย ดังภาพประกอบ 1

gomenore

ภาพประกอบ 2 โครงสร้างลักษณะสายโซ่ของ HDPE ที่มา : (Graziano, Jaffer & Sain, 2018)

#### 2. คุณสมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

HDPE เป็นหนึ่งในพลาสติกประเภท Polyethylene ที่มีสารตั้งต้นที่ได้จาก การกลั่นน้ำมันดิบ คือ เนฟทาชนิดเบา มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น และมีความทนทานสูง เนื่องจากโมเลกุลมีการจับตัวกันอย่างเหนียวแน่น ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ได้ ดังตาราง 1

#### ตาราง 1 แสดงสมบัติเชิงกลของ HDPE

สมบัติ	หน่วย	ค่า
ความหนาแน่น	kg/m <sup>3</sup>	955 – 961
จุดหลอมเหลว	°C	126 – 135
Coefficient of Thermal Expansion $\times 10^{-5}$	cm / (cm °C)	12.5 – 18.0
Heat Deflection Temperature, 0.5 MPa	°C	64 - 77
Thermal Conductivity	W / mK	0.35 – 0.49
Tensile Strength, Yield at 23 C	MPa	23.0 - 29.5
Tensile Strength, Break at 23 C	MPa	30.5 - 33
Elongation, Yield	%	9 – 18
Elongation, Break	%	600 – 1350
Tensile Modulus at 23 C	MPa	900 – 1550
Flexural Modulus	MPa	970- 1380
Volume Resistivity	Ohm–cm	6 × 10 <sup>15</sup>
Dielectric Strength	V/mm x 10 <sup>4</sup>	2.1 – 3.5
Dielectric Constant @ 1 MHz	n/a	2.2 - 2.4
Dissipation Factor @ 1 MHz	n/a	0.0001 – 0.0005

ที่มา : (Awad, Elgamsy, Wahab & Hazem, 2019; Polymer database, 2022)

## ท่อนาโนคาร์บอน

## 1. โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน

Carbon nanotubes หรือท่อนาโนคาร์บอน ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1976 โดย Morinobu Endo ซึ่งได้ค้นพบวิธีการสังเคราะห์เส้นใยคาร์บอนที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร หลังจากนั้น ในปี ค.ศ.1985 นักวิทยาศาสตร์รางวัลโนเบล 3 ท่าน ได้แก่ Richard Smalley, Harold Kroto และ Robert Curl (ได้รับรางวัล Nobel สาขาเคมี ในปี ค.ศ.1996) ได้ค้นพบ โครงสร้างของคาร์บอนที่มีขนาดเล็กและเรียกว่า Fullerene ซึ่งมีรูปร่างหลายแบบ เช่น ทรงกลม (bucky balls) และท่อ (nanotubes) เป็นต้น และในปี ค.ศ.1991 ได้รับรางานครั้งแรก ในวารสาร Nature จากนักฟิสิกส์ชาวญี่ปุ่น Sumio Iijima ขณะที่เขาใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนที่มีกำลังขายสูงมาก ตรวจสอบเขม่าสีดำที่ได้จากการเตรียมฟลูเลอรีนด้วยวิธี อาร์คดิสชาร์จ (Arc Discharge) แล้วสังเกตเห็นวัสดุที่มีลักษณะคล้ายรากไม้ เป็นเส้นตรง ยาว บาง จับกันเป็นกลุ่ม โดยมีโครงสร้างของอะตอมเป็นระเบียบและสมมาตร จึงให้ชื่อว่า ท่อนาโนคาร์บอน (carbon Nanotubes: CNTs) (Kai, Mingyuan, Yiping, Xifeng & Guohong, 2009)

ท่อนาโนคาร์บอนประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนเช่นเดียวกับเพชร แกรไฟต์และฟูลเลอรีน (พิศิษฐ์ สิงห์ใจ, 2543) เนื่องจากคาร์บอนสามารถเกิดพันธะได้ หลายรูปแบบ เช่น พันธะเดี่ยว พันธะคู่ และพันธะสาม จึงทำให้คาร์บอนสามารถจับตัวกัน และเกิดเป็นโครงสร้างการจัดเรียงอะตอมที่แตกต่างกันได้หลายรูปแบบ ได้แก่ เพชร แกรไฟต์ ฟูลเลอรีน และท่อนาโนคาร์บอน (ณัฐพงษ์ ศรีเมือง, 2560) ดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 อัญรูปของคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุเดียวกันแต่โครงสร้างต่างกัน ที่มา : (ณัฐพงษ์ ศรีเมือง, 2560)

ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะคล้ายแผ่นแกรไฟต์ที่ม้วนตัวเกิดเป็นท่อ ทรงกระบอกกลวง มีรูปร่างเป็นโครงตาข่ายม้วนเชื่อมติดกัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ในระดับนาโนเมตร การสังเคราะห์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ ท่อนาโนคาร์บอน ผนังชั้นเดียว (Single wall carbon nanotube: SWCNT) และท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multiwall carbon nanotube: MWCNT) ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 ท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียว (ซ้าย) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (ขวา) ที่มา : (Ribeiro, Botelho, Costa & Bandeira, 2017)

ตาราง 2 การเปรียบเทียบของท่อนาโนคาร์บอนแบบ SWCNT และ MWCNT

SWNT	MWNT
Single graphene layer	Multiple graphene layers
Synthesis requires catalyst	No catalyst is required
Difficult bulk synthesis due to the requirement of appropriate growth and atmospheric condition.	Easy bulk synthesis
Poor purity	High purity
Greater chances of defects during functionalization	Lesser defect chances but when this occurs, it is hard to recover
Aggregation in the body is less	Aggregation in the body is greater
Easy assessment and characterization	Structure is complicated
More pliable and easily twisted	Twisting is not easy

ที่มา : (Rahman, et al., 2019)

### 2. สมบัติของท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนถือได้ว่าเป็นสารที่ได้รับความสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้ ประโยชน์ทางด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษ ที่ดีมาก โดยท่อนาโนคาร์บอนผนังชั้นเดียวมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.4 – 2 nm ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 1.5 – 15 nm ส่วนเส้นผ่าน ศูนย์กลางภายนอกขนาด 2.5 – 30 nm โดยแต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.34 – 0.36 nm มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็ก 10 – 100 เท่า และมีความแข็งแรงมากกว่าเพชรและแกรไฟต์ มีความยืดหยุ่นสูงถึง 1 TPa มีขนาดเล็กแต่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงถึง 1,500 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup> ซึ่งมากกว่า วัสดุทั่วไป มีความหนาแน่น 0.8 – 1.8 g cm<sup>-3</sup> และมีน้ำหนักเบา นอกจากสมบัติเชิงกลที่ดี แล้ว ท่อนาโนคาร์บอนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ถึง 10<sup>9</sup> แอมแปร์ต่อตารางเมตร (A·m<sup>-2</sup>) และสามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของท่อนาโนคาร์บอนในสภาวะ สุญญากาศได้ เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Potential) ต่ำกว่าสำหรับที่ปลายขั้ว โมลิปดินัม ท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำความร้อนได้ดีมากตามแนวของท่อนาโนคาร์บอน แต่เป็นฉนวนความร้อนได้ดีตามแนวขวางของท่อนาโนคาร์บอน ทั้งนี้ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2,000 °C ภายใต้สภาวะสุญญากาศ และอุณหภูมิ 750 °C ในสภาวะปกติ สำหรับสมบัติ อื่น ๆ สามารถแสดงได้ดังตาราง 3

ตาราง 3	สมบัติของท่อนา	โนคาร์บอน

Property	SWCNT	MWCNT
Density (g•cm <sup>-3</sup> )	0.8	1.8
Electrical conductivity (S*cm <sup>-1</sup> )	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>6</sup>
Thermal conductivity (W•K <sup>-3</sup> )	6,000	2,000
Thermal stability in air ( <sup>o</sup> C)	>600	>600
Tensile Modulus (GPa)	1,054	1,200
Tensile Strength (GPa)	150	150

ที่มา : (Ribeiro, Botelho, Costa & Bandeira, 2017; Teng, Elbio & Sumio, 2010)

งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการนำวิจัยเพื่อนำ CNT มาประยุกต์ใช้งานจริง ท่อนาโนคาร์บอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายด้าน เช่น ตัวนำไฟฟ้าขนาด นาโนทรานซิสเตอร์ในวงจรไอซีที สารกึ่งตัวนำยิ่งยวด ตัวเก็บประจุ ขั้วอิเล็กโทรดของ แบตเตอรี่ ชนิด Li-ion ในโทรศัพท์มือถือ วัสดุผสมพลาสติกให้นำไฟฟ้า วัสดุถ่ายเทความร้อน และตัวรองรับคะตะลิสต์ เป็นต้น

#### 3. การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอนสามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและ ข้อเสียแตกต่างกันในเรื่องความสมบูรณ์ของโครงสร้าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณผลผลิตที่ได้ และความบริสุทธิ์ของท่อนาโนคาร์บอนที่ได้ วิธีการสังเคราะห์ สามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธีหลัก ๆ ดังนี้

3.1 วิธีอาร์คดิสชาร์จ (Arc discharge)

เป็นวิธีเริ่มแรกที่ใช้สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยการป้อนไฟฟ้า กระแสตรงตั้งแต่ 20 - 200 A และความต่างศักย์ประมาณ 20 - 40 V ตกคร่อมแท่ง แกรไฟต์สองแท่งที่วางห่างกันประมาณ 1 - 3 มิลลิเมตร ภายใต้ความดันต่ำระหว่าง 100 - 500 Torr ในบรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียมหรืออาร์กอน ดังแสดงใน ภาพประกอบ 5 จึงเกิดความร้อนสูงจนทำให้คาร์บอนเกิดการแตกตัวกลายเป็นสถานะ พลาสมา และเกิดการควบแน่นกลายเป็นท่อนาโนคาร์บอนบริเวณปลายแท่งแกรไฟต์ที่ต่อ กับขั้วลบ (Cathode) ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ การควบคุมขนาดหรือจำนวนชั้นของท่อนาโนคาร์บอน สามารถทำโดยการควบคุมความดัน อุณหภูมิ และการเติมผงโลหะคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก นิกเกิล หรือโคบอลต์ อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือผสมกันลงในแท่งแกรไฟต์ที่ต่อกับขั้วบวก (Anode) วิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและค่าใช้จ่ายถูกแต่ ท่อนาโนคาร์บอน ที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนค่อนข้างมากจาก โลหะคะตะลิสต์ ที่ผสมอยู่ในแท่งแกรไฟต์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์และจากขี้เถ้า ค่อนข้างมาก (ฐิยาพร ปานสง, 2555; ศิริกาญจนา ทองมี, 2556)



ภาพประกอบ 5 เทคนิคอาร์คดิสชาร์จ ที่มา : (Rahman, et al., 2019)

#### 3.2 วิธีระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser vaporization)

วิธีนี้จะใช้พัลล์แสงเลเซอร์ (Laser pulse) ที่มีความเข้มแสงสูง ยิงกระทบ แกรไฟต์ผสมกับผงโลหะคะตะลิสต์ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1200–1500 °C และความดันต่ำประมาณ 500 Torr ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอนหรือ ไนโตรเจนดังแสดงในภาพประกอบ 6 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีนี้จะดีกว่าวิธี อาร์คดิสชาร์จ เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้มีความบริสุทธิ์สูง แต่ค่าใช้จ่าย ในการสังเคราะห์ค่อนข้างแพง และผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบ ผนังชั้นเดียว



ภาพประกอบ 6 เทคนิคระเหยด้วยเลเซอร์ ที่มา : (Daenen, et al., 2003)

3.3 วิธีการตกสะสมไอเคมี (Chemical vapor deposition: CVD) เป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ด้วยหลักการของการทำให้ ไอของสารตั้งต้นเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนและตกสะสมบนวัสดุรองรับ ดังแสดงใน ภาพประกอบ 7 เมื่อผ่านไอหรือแก๊สของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งทำหน้าที่เป็น แหล่งกำเนิดคาร์บอน เช่น มีเทน (CH₄) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อะเซทิลีน (C₂H₄) และ เอทานอล (C₂H₅OH) เข้าไปในเตาเผาที่มีอุณหภูมิสูง 600 – 1,200 °C ซึ่งมีโลหะคะตะลิสต์ อยู่ด้วย เช่น ไททาเนียม เหล็ก นิกเกิล ภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย จะทำให้โมเลกุล เกิดการแตกตัว (decomposed) ออกเป็นอะตอมของคาร์บอนและตกสะสมบนวัสดุรองรับ ที่มีโลหะคะตะลิสต์ฉาบอยู่ ซึ่งทำให้ได้ผลผลิตในปริมาณมาก มีความบริสุทธิ์สูง สามารถ ควบคุมขนาดและความยาวของท่อนาโนคาร์บอนได้ อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์ ท่อนาโนคาร์บอนให้ขึ้นตรงตำแหน่งที่ต้องการบนวัตถุที่สนใจได้ ใช้ต้นทุนต่ำ แต่อาจมี ข้อเสียที่ปริมาณในการเกิดตำหนิหรือความไร้ระเบียบของโครงสร้างสูง (defect) ทำให้ ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้มากเป็นท่อโค้ง (สมศักดิ์ ดำรงเลิศ, 2551; Futaba, et al., 2006)



ภาพประกอบ 7 เทคนิคตกสะสมไอเคมี ที่มา : (Daenen, et al., 2003)

3.4 วิธีไพโรไลซิส (Pyrolysis)

เป็นวิธีการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยการให้ความร้อนที่ อุณหภูมิสูงอย่างน้อย 600 °C แก่โมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซิน โดยโมเลกุล ของสารไฮโดรคาร์บอนจะจับกับไอออนหรืออะตอมของโลหะซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เหล็กนิกเกิล และโครบอลต์ แล้วก็ตัวเป็นท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธีนี้ถ้าที่อุณหภูมิ 1000 °C ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน พบว่า ได้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 นาโนเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 80 nm วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถผลิตท่อนาโนคาร์บอนได้ ครั้งละปริมาณมาก เหมาะสำหรับการผลิตเพื่อจำหน่าย และการนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ (สุทธิษา ก้อนเรือง, 2551)





ภาพประกอบ 8 กระบวนการสังเคราะห์ CNTs จากพลาสติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

FeAlO<sub>x</sub> ผ่านไมโครเวฟ

- (a) พลาสติกผสมตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> (HDPE + FeAlO<sub>x</sub>) ภายใต้การแผ่รังสีไมโครเวฟ
- (b) พลาสติกและตัวเร่งปฏิกิริยาที่สัมผัสกับรังสีไมโครเวฟ
- (c, e) การชนบริเวณผิวและบริเวณตัวกลาง
- (d) การรวมตัวเกิด Fe<sub>3</sub>C และคาร์บอน
- (f) การเกิด CNTs
- ที่มา : (Jie, et al., 2020; Lopez & Santamaria, 2020)

กระบวนการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) จากพลาสติกโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ผ่านไมโครเวฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 8 โดยเริ่มต้นกระบวนการ จาก 8(a) การผสมพลาสติกกับตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> โดยมีอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา เกาะบริเวณผิวของพลาสติก และผ่านการให้รังสีไมโครเวฟ ซึ่งกระบวนการของพลาสติก และตัวเร่งปฏิกิริยาในการสัมผัสกับรังสีไมโครเวฟมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ ดังแสดงใน ภาพประกอบ 8(b) คือ ประการแรก การถ่ายโอนการดูดกลืนพลังงานจากรังสีไมโครเวฟที่ เข้ามาเพื่อเริ่มต้นกระบวนการให้ความร้อนทางกายภาพของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาและ ประการที่สองปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างอนุภาคพลาสติก 8(c, e) บริเวณที่ส่วนต่อรอยต่อ กระบวนการเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาและพลาสติกสำหรับ การย่อยสลายสารตัวกลางของไฮโดรคาร์บอน ต่อมาสารตัวกลางเหล่านี้ถูกแผ่ออกไป โดยรังสีไมโครเวฟแล้วกระจายไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กเพื่อสร้าง Fe<sub>3</sub>C (d, f) แบบจำลอง กลไกของตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของมีเทนบนตัวเร่งปฏิกิริยา Fe–Al และการกลาย เปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนและ CNTs (Jie, et al., 2020; Lopez, & Santamaria, 2020; Linga, Lu, Zhou, Saih, & et al., 2016)

## การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก

#### 1. ลักษณะการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก

การให้ความร้อนแบบไดอิเล็คตริค (Dielectric Heating) เป็นการให้ ความร้อนโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านคลื่นวิทยุ (f = 300 GHz – 300 MHz) หรือไมโครเวฟ (f = 300 GHz – 3 Hz) กำลังสูงผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ สนามของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้โมเลกุลของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบมีขั้ว (Dipolar molecules) ซึ่งมี ขั้วไฟฟ้าเป็นขั้วบวกและขั้วลบพยายามจัดเรียงตัวตามทิศทางของสนามคลื่นที่ส่งเข้ามา โดยความถิ่ของคลื่นจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและการเสียดสีของโมเลกุลจนเกิดเป็น ความร้อนภายในเนื้อวัสดุโดยตรง หรือถ่ายเทพลังงานจากคลื่นไปยังวัสดุ (Linn, 2003; กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555, ออนไลน์) ดังแสดงในภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 การเกิดความร้อนในเนื้อวัสดุจากการให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริก ที่มา : (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555, ออนไลน์)

วัสดุที่สามารถใช้การให้ความร้อนแบบไดอิเล็กทริกได้จะต้องเป็นวัสดุที่มี คุณสมบัติที่ตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะต้องเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมี ขั้วหรือประกอบไปด้วยน้ำซึ่งมีโมเลกุลแบบมีขั้ว วัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว เช่น อากาศ เทฟล่อน หรือแก้ว จะไม่สามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นได้ โดยคลื่นจะผ่านทะลุ เข้าไปในเนื้อวัสดุโดยไม่เกิดความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ส่วนวัสดุที่เป็นโลหะจะมี คุณสมบัติสะท้อนคลื่นจึงไม่สามารถเกิดความร้อนได้ เหมาะสำหรับทำโครงสร้างเตาและ ตัวสะท้อนคลื่น ดังแสดงในภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 การให้ความร้อนกับวัสดุแบบต่าง ๆ

- (a) การให้ความร้อนกับวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้ว
- (b) การให้ความร้อนกับวัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่มีขั้ว
- (c) การให้ความร้อนกับวัสดุที่เป็นโลหะ

ที่มา : (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555, ออนไลน์)

#### 2. สมบัติทางไดอิเล็กทริก

สมบัติทางทางไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) เป็นสมบัติที่บ่งบอกว่า สารชนิดหนึ่งสามารถดูดซับไมโครเวฟได้ดีเพียงใด เนื่องจากสมบัติทางไดอิเล็กทริกจะ เปลี่ยนไปตามองค์ประกอบของสาร ซึ่งสมบัติทางไดอิเล็กทริกที่สำคัญและแสดงค่าเป็น ตัวเลขแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ (Willert-Porada, (Ed.), 2006)

2.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant : □<sup>□</sup>) เป็นค่าที่แสดง ความสามารถของวัสดุที่จะกักเก็บพลังงานไฟฟ้าหรือที่จะโพลาไรซ์ในการตอบสนองต่อ สนามไฟฟ้า ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าเก็บพลังงานได้มาก ซึ่งสนามแม่เหล็กไม่ได้มีส่วนในการดูดซับ ไมโครเวฟและความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมด

2.2 ค่าไดอิเล็กทริกสูญเสีย (Dielectric loss: □<sup>□□</sup>) เป็นค่าที่แสดง ความสามารถของวัสดุที่จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า (การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) เป็นพลังงานความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าจะเกิดความร้อนสูง โดยค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และค่าไดอิเล็กทริกสูญเสีย มีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

$$\Box^{\Box} = \Box^{\Box} \Box \Box \Box \Box \Box$$
 (1)

หรือ

$$\Box \Box \Box \Box = \frac{\Box^{\Box}}{\Box^{\Box}}$$

(2)

จากสมการค่า Loss tangent ( 🗆 🗆 🗆 ) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวัสดุ ในการแปลงพลังงานที่ดูดซับมาเป็นความร้อน ถ้าค่านี้สูงแสดงว่าวัสดุจะเกิดความร้อนได้ดี

# กระบวนการทำงานของไมโครเวฟ

## 1. ประวัติความเป็นมาของไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นหนึ่งในประเภทของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ ด้วยความเร็วแสง ถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี ค.ศ.1945 โดยบริษัทเรย์เธอร์น ประเทศสหรัฐอเมริกา นำหลักการของคลื่นไมโครเวฟจากเรดาห์ในสงครามโลกครั้งที่สองมาใช้เพื่อปรุงอาหาร จากนั้นก็มีการพัฒนาขึ้นด้วยเทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น เปลี่ยนระบบเตาไมโครเวฟธรรมดา เป็นระบบจานหมุน มีการควบคุมการทำงานด้วยระบบ Micro Processor นำระบบ Computer Program Card ระบบ Sensor (ชวน คล้ายปาน, 2545; ดวงเดือน อาจองค์, 2546) ช่วงคลื่นความถี่ของไมโครเวฟอยู่ระหว่าง 300 MHz ถึง 300 GHz หรืออยู่ในช่วง ที่มีความยาวคลื่น 1 mm ถึง 1 m ดังแสดงในภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็ไฟฟ้าช่วงควมถี่ต่าง ๆ ที่มา : ดัดแปลงจาก Elliot, 2018

### 2. การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ

การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟแตกต่างจากเตาอบธรรมดาเพื่อทำให้ อาหารสุก คือ เตาอบธรรมดาจะให้ความร้อนไปกระทบกับอาหารที่ส่วนนอกก่อนแล้วจึง เคลื่อนที่เข้าไปข้างในโดยการถ่ายเทความร้อน คือ การนำ การพาและการแผ่รังสีความ ร้อน แต่ไมโครเวฟใช้คลื่นไมโครเวฟ ที่มีความถี่สูงทะลุผ่านอาหารไปสะท้อนที่พื้นผนัง แล้ว กลับมาผ่านอาหารซ้ำอีกครั้ง รวมถึงจะทำให้โมเลกุลของน้ำหรือของเหลวที่มีขั้วไฟฟ้าถูก เหนี่ยวนำและเกิดการสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่น ๆ ตามทิศทางของคลื่นที่ส่งเข้าไปจน เกิดเป็นพลังงานจลน์ที่เปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน (สุขสันต์ อมรรักษา และแอ๊ปเบิ้ล แจ่มจำรัส, 2556) ดังแสดงในภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 การกระจายความร้อนภายในเนื้อของวัสดุเมื่อให้ความร้อนด้วยวิธี (a) โดยใช้ความร้อนทั่วไป (b) โดยใช้ไมโครเวฟ ที่มา : (Yolanda, Ana & Angel Menendez, 2011)

การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟแตกต่างจากเตาอบธรรมดาเพื่อทำให้อาหารสุก คือ เตาอบธรรมดาจะให้ความร้อนไปกระทบกับอาหารที่ส่วนนอกก่อนแล้วจึงเคลื่อนที่ เข้าไปข้างในโดยการถ่ายเทความร้อน คือ การนำ การพาและการแผ่รังสีความร้อน แต่ไมโครเวฟใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่สูงทะลุผ่านอาหารไปสะท้อนที่พื้นผนัง แล้วกลับมาผ่านอาหารซ้ำอีกครั้ง รวมถึงจะทำให้โมเลกุลของน้ำหรือของเหลวที่มีขั้วไฟฟ้า ถูกเหนี่ยวนำและเกิดการสั่นสะเทือนและชนโมเลกุลอื่น ๆ ตามทิศทางของคลื่นที่ส่งเข้าไป ส่วนที่เกิดปฏิสัมพันธ์กับคลื่นไมโครเวฟ (Interaction) เมื่อน้ำอยู่ในสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ น้ำจะจัดเรียงตัวให้เป็นไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ แต่เนื่องจากทิศทาง ของขั้วสนามไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟเปลี่ยนสลับไปมาหลายล้าน ๆ ครั้งต่อวินาที โมเลกุลของ น้ำซึ่งถูกจำกัดด้วยพื้นที่เล็ก ๆ ในอาหารก็จะเริ่มหมุนในทิศทางหนึ่ง เมื่อสนามไฟฟ้าสลับขั้ว โมเลกุลน้ำก็จะหมุนในอีกทิศทางหนึ่งด้วยความถี่สูงเช่นกัน การหมุนสลับกันนี้ทำให้เกิด พลังงานจลน์สูงและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน (สุขสันต์ อมรรักษา และแอ๊ปเปิ้ล แจ่มจำรัส, 2556) ดังแสดงในภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 โมเลกุลของน้ำที่เปลี่ยนทิศสลับไปมาอย่างรวดเร็วตามทิศทางของ สนามไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อน ที่มา : (ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร, 2565, ออนไลน์)

กลไกการเกิดความร้อนเนื่องจากไมโครเวฟ เกิดจากการที่วัตถุดูดซับพลังงาน ไมโครเวฟ เนื่องจากมีสมบัติไดอิเล็กทริก ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นภายในวัตถุ โดยการเกิดความร้อนภายในวัตถุที่สัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟนั้นมีสาเหตุมาจากกลไก 2 ประการ (Singh & Heldman, 2001. pp. 306 – 331) ได้แก่

 การเคลื่อนที่ของไอออนเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า (Ionic polarization) ภายในเตาไมโครเวฟ (microwave Oven) จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า แมกนีตรอน (Magnetron) ที่ทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะถูก สร้างออกมาในลักษณะ 3 ทิศทาง คือบนสู่ล่าง ข้างสู่ข้างและหน้าสู่หลัง เมื่ออนุภาคที่มี ประจุสัมผัสกับคลื่นไมโครเวฟ จะทำให้เกิดการสั่นและเคลื่อนที่จึงเกิดการชน (Collisions) หรือเสียดสีกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงเป็นผลให้เกิดความร้อนขึ้น โดยโมเลกุลเหล่านี้จะแตก ตัวให้ ไอออนบวก (Cations) และไอออนลบ (Anions) ดังนั้นอนุภาคที่มีประถุจึงสามารถที่ จะมีอันตรกิริยา (Interactions) กับสนามไฟฟ้า รวมทั้งสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นใน เตาไมโครเวฟเช่นเดียวกัน
2) การหมุนของสารประกอบที่มีขั้ว (Dipole rotation)

เป็นการเกิดความร้อนกับสารประกอบมีขั้ว (Polar) ได้แก่ น้ำ ซึ่งในสภาพ ปกติจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ (Random oriented) เมื่อผ่านเข้าไปอยู่ในสนามไฟฟ้า ประจุบวกและลบในโมเลกุลจะหมุนตัวเพื่อเปลี่ยนทิศทางตามทิศของสนามไฟฟ้า โดยการหมุนตัวกลับไปมาจะเกิดอย่างรวดเร็วตามความถี่ของไมโครเวฟคือ 915 - 2,450 เมกกะเฮิร์ตซ์ (พ้นล้านครั้งต่อวินาที) ทำให้เกิดความร้อนขึ้นและกระจายไปยังโมเลกุล ข้างเคียง เนื่องมาจากการชนระหว่างโมเลกุลของน้ำในอาหาร (สายสนม ประดิษฐ์ดวง, 2546, หน้า 199-200)

เนื่องจากกลไกทั้งสองแบบดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ความร้อนจะกระจายออกไปยัง ส่วนอื่น ๆ เนื่องจากผลของการร้อนขึ้นของน้ำโดยการนำความร้อนและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม

## 3. พลังงานที่ถูกดูดซับในวัสดุ (Absorbed power)

การให้ความร้อนโดยไมโครเวฟเกี่ยวข้องกับการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็น พลังงานความร้อนโดยวัสดุ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่าง ไมโครเวฟกับวัสดุที่มีสมบัติไดอิเล็กทริก การเปลี่ยนแปลงของพลังงานเป็นพลังงาน ความร้อนหรือพลังงานที่ถูกดูดซับในวัสดุ สามารถคำนวณได้จากสมการ (Decareau & Peterson, 1986)

$$\mathbf{P} = 2\pi f \mathbf{E}^2 \mathbf{\varepsilon}^{\Box} \tan \delta \tag{3}$$

โดยที่ P = พลังงานที่สารดูดซับ (วัตต์/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
f = ความถี่ของไมโครเวฟ (เฮิรตซ์)
E = ความเข้มของสนามไฟฟ้า (โวลต์/เซนติเมตร)
ε<sup>□</sup> = Dielectric constant
tan δ = Loss tangent

## 4. ลักษณะการเดินทางของไมโครเวฟ

การเดินทางของคลื่นไมโครเวฟผ่านตัวกลางและวัสดุต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการ นำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้งาน รวมถึงข้อควรระวังในการออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องไมโครเวฟ โดยรูปแบบการเดินทางของคลื่นไมโครเวฟผ่านตัวกลางและวัสดุ ต่าง ๆ มีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ดังภาพแสดงในภาพประกอบ 14 (จิราพร เลื่อนผลเจริญชัย, 2564) คือ



ภาพประกอบ 14 ลักษณะการเดินทางของไมโครเวฟผ่านตัวกลางและวัสดุต่าง ๆ ที่มา : (Manoj, Wong-Wai, & Eugene, 2007)

1) การสะท้อน (Reflection)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่เป็นโลหะหรือส่วนที่มีองค์ประกอบ ของโลหะ คลื่นจะไม่สามารถวิ่งทะลุผ่านโลหะได้ และจะสะท้อนกลับทั้งหมด ดังนั้น อาหาร ที่ถูกหุ้มด้วยภาชนะดังกล่าวจะไม่เกิดการสุก

2. การส่งผ่าน (Transmission)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ ได้แก่ แก้ว พลาสติก กระดาษ เซรามิก และไม้ เป็นต้น คลื่นจะสามารถทะลุผ่านได้ ดั้งนั้น วัสดุเหล่านี้จึงนิยมใช้ เป็นภาชนะสำหรับรองหรือห่อหุ้มอาหารเข้าตู้ไมโครเวฟ เพราะไม่มีส่วนผสมของโลหะ

#### 3. การดูดซับ (Adsorption)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อวิ่งกระทบกับวัสดุที่มีน้ำหรือความชื้นภายในคลื่นจะ เกิดบางส่วนจะถูกดูดซับเอาไว้ ทำให้โมเลกุลของน้ำดูดซับพลังงานคลื่น และเปลี่ยนเป็น พลังงานความร้อนเอาไว้จนเกิดความร้อนตามมา รวมถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำ ซึ่งทำให้เกิดความร้อนเช่นกัน ทั้งนี้ คลื่นไมโครเวฟหลังถูกดูดซับจะสลายตัวทันที ไม่มีสาร ตกค้างในอาหาร

# เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD)

X-ray difftractometer (XRD) เป็นเครื่องมือ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มี อยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับ โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากับ ทำให้ Patter ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของ สารประกอบต่าง ๆ กับ Pattern การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า ในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไร (ศันศนีย์ รักไทยเจริญชีพ, 2558)

การนำเทคนิด X-ray diffraction มาใช้ในการวิเคราะห์ดินในส่วนที่เป็นผลึก จะใช้ลำแสงของ Monochromatic x-ray ตกกระทบกับผิวของผลึกที่มุมตกกระทบที่ เหมาะสม รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการเลี้ยวเบน (diffract) รังสีบางส่วนจะกระจัดกระจาย และผ่านทะลุลงไปยังผิวชั้นที่สองของผลึกที่ต่ำลงไป จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ อีกครั้งและรังสีเอกซ์ บางส่วนก็จะทะลุลงไปยังผิวผลึกชั้นที่สาม จะเกิดการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ ซึ่งสามารถอธิบายและเขียนเป็นสมการ ดังภาพแสดงในภาพประกอบ 15 ตามกฎของ Sir William Henry Bragg (Bragg's law) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ที่อาศัยหลักการ ทางฟิสิกส์โดยการเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ XRD เพื่อใช้อธิบายโครงสร้างของผลึก เมื่อตกกระทบเข้ากับรังสีเอกซ์ ด้วยมุมตกกระทบที่แตกต่างกัน โดยระยะห่าง และความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไป (สุภิญญา มากุล, 2557)



 $n\lambda = 2d \sin\theta$ 

(4)

โดย  $\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

- θ = มุมตกกระทบระหว่างรังสีเอกซ์กับระนาบในผลึก
- d = ระยะห่างระหว่างระนาบในผลึก
- n = ลำดับการเลี้ยวเบนโดยเป็นเลขจำนวนเต็ม

## เทคนิคการดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption Spectroscopy: XAS)

เทคนิค X-ray absorption spectroscopy (XAS) คือ การศึกษาการดูดกลืน รังสีเอ็กซ์ของอะตอมในสารตัวอย่างที่เป็นฟังก์ชันของพลังงานโฟตอนหรือพลังงานรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์ที่ใช้สำหรับการทดลองต้องมีความยาวคลื่นเดียวที่สามารถปรับค่าได้ (Tunable monochromatic x-ray) และมีพลังงานโฟตอนอยู่ในช่วงพลังงานการดูดกลืนของอะตอม หรือใกล้เคียงกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม (วันทนา คล้ายสุบรรณ์, 2552) การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของอะตอมนั้นเกิดจากการสลายตัวของโฟตอนโดยที่ พลังงานของโฟตอนหนึ่งตัวจะถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะพลังงนอิเล็กตรอนหนึ่งตัว ในอะตอ, เนื่องจากโฟตอนของรังสีเอ็กซ์ดังกล่าวจะมีพลังงานใกล้เคียงกับพลังงานยืด เหนี่ยวของอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้น K L หรือ M ซึ่งเป็นพลังงานชั้นในของอะตอม ดังนั้นเมื่อ อะตอมถูกกระตุ้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้น K, L หรือ M จะเปลี่ยนระดับพลังงานไปสู่ชั้น เวเลนซ์ หรือชั้นสถานะพลังงานต่อเนื่อง (continuum) เมื่ออิเล็กตรอนย้ายไป จะเกิดสถานะ ว่างในชั้นพลังงาน K, L หรือ M สามารถเรียกการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของอิเล็กตรอนในชั้น K, L หรือ M ว่า K, L, M- edge absorption ตามลำดับ ซึ่งการเกิด K-edge absorption ดังภาพแสดงในภาพประกอบ 16



ภาพประกอบ 16 กลไกการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของอะตอมชั้นการดูดกลืน K (K-edge absorption) ที่มา : (กมลวรรณ สามกองนาม, 2559)

เทคนิค XAS ใช้การฉายลำแสงของรังสีเอกซ์ลงบนตัวอย่างและวัดปริมาณ การดูดกลืนรังสีของตัวอย่าง ดังแสดงในภาพประกอบ 17 เราสามารถวัดการดูดกลืนรังสี จากความเข้มแสงที่ลดลงหลังจากการเดินทางของลำรังสีผ่านตัวอย่างโดยใช้ เครื่องตรวจวัดความเข้มของรังสีเอกซ์ (Ionization chamber) ความเข้มของรังสีก่อน (I<sub>0</sub>) และหลังการดูดกลืน (I) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 \mathbf{e}^{-\mu \Box} \tag{5}$$

โดย μ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสึ □ = ความหนาของตัวอย่าง



ภาพประกอบ 17 แผนภาพเทคนิค X-ray absorption spectroscopy โดยใช้เครื่องวัดความเข้มรังสีเอกซ์ในตำแหน่งก่อนและหลัง ถูกดูดกลื่นโดยตัวอย่าง

ที่มา : (วันทนา คล้ายสุบรรณ์ และประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์, 2548)

จากสมการที่ (4) ในการทดลองเราจะปรับค่าพลังงานโฟตอนของรังสีเอกซ์ด้วย เครื่องคัดเลือกพลังงานแสง (x-ray monochromator) เมื่อนำค่า μ(E) มาแสดงเป็นกราฟกับ ค่าพลังงานโฟตอน E เราจะได้สเปกตรัม XAS ของตัวอย่าง

นอกจากนี้ยังสามารถวัดสเปกตรัมของสารมาตรฐานพร้อมกันได้ สเปกตรัม ของสารมาตรฐานนี้มักจะนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการทำ Energy calibration ในการ เปรียบเทียบค่าพลังงานที่ขอบของการดูดกลืน และสำหรับการเปรียบเทียบโครงสร้าง XANES และ EXAFS

สเปกตรัม XAS ประกอบไปด้วยโครงสร้างหลัก 2 ชนิด คือ โครงสร้าง X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES) และโครงสร้าง Extended X-ray Absorption Fine Structure (EXAFS) ดังภาพแสดงในภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของอะตอม ในโครงสร้าง XANES และ EXAFS ที่มา : (กมลวรรณ สามกองนาม, 2559)

1. โครงสร้าง X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES)

โครงสร้าง XANES เป็นสัญญาณการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการย้าย สถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานด้านในไปยังสถานะพลังงานที่ยังว่างใน อะตอม ซึ่งอาจเป็นชั้นเวเลนซ์ หรือสถานะพลังงานต่อเนื่อง (continuum) โครงสร้าง XANES มีความเฉพาะเจาะจงกับสภาพแวดล้อมทางเคมีของอะตอม สามารถใช้วิเคราะห์ เลขออกซิเดซันของธาตุต่าง ๆ ได้

#### 2. โครงสร้าง Extended X-ray Absorption Fine Structure (EXAFS)

มีลักษณะเป็นรูปคลื่นที่มีขนาดลดลงตามพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิด จากการแทรกสอดของโฟโตอิเล็กตรอนที่ประพฤติตัวแบบคลื่น โฟโตอิเล็กตรอนที่ถูก ปล่อยออกมาจากอะตอมในระหว่างการดูดกลืนรังสีเอ็กข์จะถูกกระเจิงโดยอะตอมรอบข้าง ทำให้สะท้อนกลับมาแทรกสอดกับตัวเองได้ ขนาดของการกระเจิง (scattering amplitude) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริม และหักล้างสลับกันทำให้เห็นเป็นคลื่นในสเปกตรัม EXAFS

#### กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) เป็นการถ่ายภาพรายละเอียดของโครงสร้างภายนอก ทำได้โดยการ ตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ส่วนประกอบ และหลักการทำงานโดยสังเขปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังภาพประกอบ 10 ส่วนบนสุด เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun)อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมี สภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage)ในช่วง 0–30 kV โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่าและปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอพเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่างกันตามลักษณะการใช้งาน



ภาพประกอบ 19 แสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่มา: (ดนัย กิจชัยนุกูล, 2547, ออนไลน์)

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มี ขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำ หน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยม เล็ก ๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่าง ๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะมี อุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ เหล่านั้นแล้วส่งไปประมวลผล เป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ภาพที่ได้จากกล้อง SEM เป็นภาพ 3 มิติที่มีระยะชัดลึกสูง ทำให้สามารถระบุลักษณะของพื้นผิวชิ้นงานได้อย่างชัดเจน

ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้น ได้แก่

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons, SE): สัญญาณชนิดนี้ จะให้ ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมาก ที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ(Secondary Electron Image, SEI)

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons, BSE): ให้ข้อมูล เกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของ ฟื้นผิว

นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอกซ์เรย์ (X-Ray), คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave),โอเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป (ดนัย กิจชัยนุกูล, 2547)

## กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา รายละเอียดของโครงสร้างภายนอกหรือผิวของตัวอย่างกล้องชนิดนี้ใช้อิเล็กตรอนที่มีความ ยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสง และใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าแทนเลนส์กระจก รวมถึงมี อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนกับวัตถุ จากนั้นจึงใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นภาพแสดงบนจอรับภาพ ซึ่งผลที่ได้คือ ภาพเสมือน 3 มิติที่มีกำลังขยายสูงมีระยะชัดลึกสูง ทำให้สามารถระบุลักษณะของพื้นผิว ของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน และสามารถแยกแยะรายละเอียดของภาพได้ถึง 100 nm (อัจฉราพร ศรีอ่อน, 2559, หน้า 77)

ส่วนประกอบและหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด ดังภาพแสดงในภาพประกอบ (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2562, ออนไลน์)



ภาพประกอบ 20 แผนภาพส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่มา: (สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2562, ออนไลน์) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิด อิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน (Primary electron) เพื่อป้อนให้กับ ระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่ม อิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็น ลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำ อิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ ต้องการศึกษา ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น และกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) และส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jie, et al. (2020, unpaged) ทำการทดลองและศึกษา การย่อยสลายขยะ พลาสติกให้กลายเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนที่มีมูลค่าสูงโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่มีธาตุเหล็กจำนวนมาก (FeAlO<sub>x</sub>) พบว่า เมื่อเริ่มกระบวนการสลายโดยไมโครเวฟ ด้วยกระบวนการขั้นตอนเดียวจะใช้เวลาประมาณ 30–90 วินาที ในการเปลี่ยนตัวอย่าง พลาสติกที่บดให้ละเอียดประมาณ 1–5 mm ให้กลายเป็นไฮโดรเจนและท่อนาโนคาร์บอน ผนังหลายชั้น MWCNTs ให้ผลผลิตไฮโดรเจนสูงถึง 55.6 mmol/g โดยมีมวลตามทฤษฏี มากกว่า 97%

Kunwar, Cheng, Chandrashekaran, & Sharma (2016, pp. 421–428) ศึกษา กระบวนการทางความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาของการเปลี่ยนขยัพลาสติกให้กลายเป็น เชื้อเพลิง พบว่า การสลายพลาสติกด้วยความร้อนสามารถได้ผลิตภัณฑ์เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ก๊าซ น้ำมันดับ และกากของแข็ง (Solid residue) น้ำมันดิบจากไพโรไลซิสที่ไม่ใช่ตัวเร่ง ปฏิกิริยาประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดสูง การปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมที่สุด เช่น การเลือกตัวเร่งปฏิกิริยา การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ อุณหภูมิไพโรไลซิส และอัตราส่วนพลาสติกต่อตัวเร่งปฏิกิริยา มีบทบาทสำคัญในการผลิตน้ำมันเอย่างมี ประสิทธิภาพ Carlos, & Chase (2001, pp. 4749–4756) ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการ ไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟจากการสลาย High-density polyethylene และ aluminum/polymer laminates พบว่า การทดลองใช้อุณหภูมิระหว่าง 500–700 °C ผลิตภัณฑ์จากการย่อยสลาย ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนแบบเส้นตรง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแอลคีน อัลเคน และไดอัลคีน ซึ่งคิดเป็น ≈81–93% ของน้ำมัน/แว็กซ์ ส่วนที่เหลือเป็นส่วนผสมที่ชับซ้อนมากของอะลิฟาติกแบบ ไซคลิกและแบบกิ่งและสารประกอบอะโรมาติก

Wu, Nahil, Miskolczi, Huang & Williams (2014, pp. 819–826) ศึกษาการผลิต ไฮโดรเจนและท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) ที่ได้จากพลาสติกเหลือทิ้งโดยใช้วิธีไพโรไลซิสที่ ประกอบด้วยระบบปฏิกิริยาสองขั้นตอน โดยมีไอน้ำและตัวเร่งปฏิกิริยา Ni–Mn–Al ขยะพลาสติกประกอบด้วยพลาสติกจากภาชนะบรรจุน้ำมันเครื่อง (MOC) ขยะพลาสติก หนาแน่นสูง (HDPE) เชิงพาณิชย์ และโพลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พบว่า สามารถผลิต ไฮโดรเจนได้จากกระบวนการไพโรไลซิส และสร้างท่อนาโนคาร์บอนบนตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณโพลีไวนิลคลอไรด์ 0.3% โดยน้ำหนัก HDPE (HDPE/PVC) แสดงให้เห็นว่าเป็นพิษต่อ ตัวเร่งปฏิกิริยา และลดปริมาณและความบริสุทธิ์ของ CNT การปรากฏตัวของกำมะถันมี อิทธิพลน้อยลงต่อการผลิต CNT ในแง่ของปริมาณและสัณฐานวิทยาของ CNT จากพลาสติกประมาณ 94.4 mmolH<sub>2</sub>/g สำหรับไพโรไลซิสของขยะ HDPE ต่อตัวเร่ง ปฏิกิริยา Ni–Mn–Al และไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 °C การเพิ่มไอน้ำในกระบวนการส่งผลให้การ ผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นและผลผลิตคาร์บอนลดลง

Mishra, N., et al. (2012, pp. 91–98) ศึกษาขยะโพรพิลีน (PP) ที่ใช้เป็นสาร ตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) โดยวิธีการ สะสมไอเคมีแบบขั้นตอนเดียว (CVD) โดยใช้นิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การย่อยสลาย ไพโรไลซิสของ PP เป็น MWCNT ทำได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 °C ภายใต้บรรยากาศอาร์กอนและไฮโดรเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า คาร์บอนที่เป็นผลลัพธ์ถูกทำให้บริสุทธิ์และแสดงคุณลักษณะโดย XRD, Raman scattering, SEM, TEM และ HRTEM การวิเคราะห์ทั้งหมดยืนยันลักษณะสัณฐานวิทยาแบบผนังหลาย ชั้นของ CNT มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 20 nm

Dingding, Yeshui, Paul, & Haiping (2017, pp. 584–597) ศึกษาการใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา Ni-Fe สำหรับไพโรไลซิสของพลาสติก เพื่อผลิตไฮโดรเจนและท่อนาโนคาร์บอนที่ (CNT) การทดลองดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบตายตัวสองขั้นตอน โดยที่พลาสติกถูก ไพโรไลซ์ในระยะแรกตามด้วยปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาในระยะที่สอง อุณหภูมิของตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน (700, 800, 900 °C) และอัตราส่วนไอน้ำต่อพลาสติก (0, 0.3, 1, 2.6) พบว่า การเดิบโตของท่อนาโนคาร์บอนและไฮโดรเจนซึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่ง ปฏิกิริยาและพารามิเตอร์ในการปฏิบัติงาน Fe/**γ**-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ให้ผลผลิตไฮโดรเจนสูงสุด (22.9 mmol H<sub>2</sub>/g<sub>plastic</sub>) และผลผลิตท่อนาโนคาร์บอน (195 mg/g<sub>พลาสติก</sub>) ในบรรดาตัวเร่งปฏิกิริยา monometallic Fe/**α**-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni/**γ**- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Ni/**α** - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Fe imetallic ให้ผลผลิตของ H<sub>2</sub> ที่สูงกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาที่เหมาะสมระหว่างโลหะและส่วน รองรับ การตรวจสอบเพิ่มเติมของอิทธิพลของไอน้ำที่ป้อนเข้าและอุณหภูมิตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีต่อการผลิต CNTs (287 mg/g<sub>พลาสติก</sub>) และการผลิตไฮโดรเจนที่เหมาะสมที่สุด (31.8 mmoH<sub>2</sub>/g<sub>plastic</sub>) ที่ 800 °C ในกรณีที่ไม่มีไอน้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยา Bimetallic Ni-Fe/**γ**-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Barbarias, Lopez, Alvarez, Artetxe, Arregi, Bilbao, & Olazar (2016, pp. 191–198) ศึกษากระการไพโรไลซิสต่อเนื่อง (500 °C) ของโพลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกรวยพ่น (CSBR) ตามด้วยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด (ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni) อุณหภูมิในการเปลี่ยนรูปในช่วง 600– 700 °C เวลา 2.1 ถึง 20.8 min g<sub>cat</sub>/g<sub>HDPE</sub> และอัตราส่วนไอน้ำ/พลาสติกระหว่าง 3 ถึง 5 พบว่า กระบวนการไพโรไลซิสอย่างต่อเนื่องทำงานได้ดี ไม่มีปัญหาในการดำเนินงานและ เปลี่ยน HDPE อย่างสมบูรณ์ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เช่น 700 °C ในเวลา 16.7 min g<sub>cat</sub>/g<sub>HDPE</sub> และไอน้ำ/พลาสติกในอัตราส่วน 5 ผลผลิต H<sub>2</sub> เท่ากับ 92.5% ซึ่งคิดเป็นการ ผลิต H<sub>2</sub> 38.1 กรัมต่อ 100 g ของ HDPE

Acomb, Wu, & Williams (2016, pp. 497–510) ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล เหล็ก โคบอลต์ และทองแดงถูกเตรียมโดยการทำให้อิ่มตัว และใช้ในการผลิตท่อนาโน คาร์บอนและก๊าซไฮโดรเจนจาก LDPE โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา แบบสองขั้นตอน ตัวอย่างพลาสติกถูกไพโรไลซ์ในไนโตรเจนที่ 600 °C ก่อนจะถูกส่งไปยัง ขั้นตอนที่สองและปล่อยให้นำคาร์บอนไว้บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 800 °C พบว่า ท่อนาโนคาร์บอนสร้างได้สำเร็จบนนิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ แต่แทบไม่พบเห็นในตัวเร่ง ปฏิกิริยาทองแดง ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กและนิกเกิลให้ผลผลิตที่ดีที่สุดทั้งไฮโดรเจนและ ท่อ นาโนคาร์บอนอันเป็นผลมาจากปฏิกิริยารองรับโลหะซึ่งไม่แข็งแรงเกินไป เช่น โคบอลต์ หรืออ่อนเกินไป เช่น ทองแดง โดยรวมแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กให้ผลผลิตของ CNT มากที่สุด Osorio, & Bergmann (2015, pp. 164–170) ศึกษาการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) ด้วยวิธี Chemical Vapor Deposition กับเฟอร์โรซีน พบว่า CNTs เต็มไปด้วย อนุภาคนาโนที่ประกอบด้วย Fe งานนี้ได้เสนอแนวทางใหม่ในการอธิบายลักษณะเฟสของ Fe ใน CNT ซึ่งมีอยู่ในกระบวนการสังเคราะห์ CNT และหลังจากนั้น CNT ถูกโดนความร้อน ที่ 1,000 °C เป็นเวลา 20 นาที ในบรรยากาศเฉื่อย วิเคราะห์ด้วย X-Ray Absorption Spectroscopy (XAS) ขณะที่สเปกตรัม XANES เกิดขึ้นในระหว่างการให้ความร้อนแก่ ด้วอย่าง นอกจากนี้ยังสังเกตการเปลี่ยนแปลงเฟสของอนุภาคนาโนที่ใช้ Fe จากคาร์ไบด์ ของเหล็กโลหะ เมื่อทำการทดลอง ผลลัพธ์ยังระบุด้วยว่าวิธีการสังเคราะห์ที่ใช้ยืนยันว่า เฟส Fe จะไม่ถูกออกซิไดซ์ นอกจากนี้ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนภายใต้ บรรยากาศเฉื่อยสามารถควบคุมเฟสที่ยังคงถูกห่อหุ้มโดย CNTs สเปกตรัมดูดกลืนรังสีเอกซ์ Fe K-edge (XAS) ของ Fe และ CNT มาตรฐานก่อนและหลังการให้ความร้อนจะ การเปลี่ยนสภาวะของอิเล็กตรอนที่ประกอบด้วยสเปกตรัม XAS นั้นซับซ้อนและต้อง พัฒนาต่อไป แต่ละสเปกตรัมประกอบ Shoulder peak ~7116 eV และมียอด ~7132 eV ที่เกิดจากการเปลี่ยนผ่านไปสู่สถานะสุดท้ายที่มีองค์ประกอบ 4s และ 4p

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ผู้วิจัยพบประเด็นปัญหาที่ต้องการนำมาแก้ไขหรือ พัฒนา คือ ในการสังเคราะห์สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีต่าง ๆ ใช้อุณหภูมิที่สูงถึง 500 – 900 °C รวมไปถึงใช้วัสดุอุปกรณ์ ขั้นตอนหลายส่วน และระยะเวลาในการ สังเคราะห์ที่ใช้เวลานาน จึงต้องการที่จะใช้อุปกรณ์และขั้นตอนไม่ยุ่งยากซับซ้อน ระยะเวลาในการทดลองไม่ยาวนานซึ่งน้อยกว่า 1 ชั่วโมง และให้ผลลัพธ์ของคาร์บอน มากกว่า 70

# บทที่ 3

# วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากพลาสติกโพลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นสูง (HDPE) ด้วยวิธีไมโครเวฟ ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

- 1. สืบค้นเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2. การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
- 3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

# สืบค้นเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สืบค้นเอกสารที่เกี่ยวข้องกับจากเอกสารวิชาการ งานวิจัย เพื่อให้ได้ข้อมูล เกี่ยวกับขั้นตอนการทดลอง การใช้สารในการทดลอง ได้แก่ ข้อมูลของพลาสติกโพลิ-เอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) ตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอน อะลูมินัมออกไซด์ (Iron Aluminum oxide: FeAlOx) การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน กระบวนการทำงานของไมโครเวฟ เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD) เทคนิคการดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption Spectroscopy: XAS) และเอกสารที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ศึกษามาปรับใช้กับการทดลองในการวิจัย ให้เหมาะสมที่สุด

# การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการวิจัยนี้ ประกอบด้วย สารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง 1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 1.1 Iron (III) nitrate nonahydrate: Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> โดยบริษัท Carlo ความบริสุทธิ์ 98%

1.2 Aluminium nitrate nonahydrate: Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> โดยบริษัท Panreac ความบริสุทธิ์ 98.5%

1.3 Citric acid: C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> โดยบริษัท Loba ความบริสุทธิ์ 99.5%

1.4 ถุงพลาสติก High Density Polyethylene: HDPE ชนิดบางอย่างดี HDPE 100% ตราปลาหมึก

#### 2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 2.1 อุปกรณ์เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา
  - 2.1.1 เครื่องชั่งสารเคมี
  - 2.1.2 ช้อนตักสาร
  - 2.1.3 กระดาษชั่งสาร (Weighing paper)
  - 2.1.4 ปีกเกอร์
  - 2.1.5 แท่งแม่เหล็กกวนสาร
  - 2.1.6 เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer)
  - 2.1.7 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace)
- 2.2 อุปกรณ์สังเคราะห์ท่อนานาร์บอนด้วยวิธีไมโครเวฟ
  - 2.2.1 ไมโครเวฟ Inverter 1,200 วัตต์ รุ่น R-390I โดยบริษัท Sharp
  - 2.2.2 เครื่องชั่งสารเคมี
  - 2.2.3 ช้อนตักสาร
  - 2.2.4 กระดาษชั่งสาร (Weighing paper)
  - 2.2.5 กระบอกตวงพลาสติกขนาด 500 มิลลิลิตร
  - 2.2.6 กล่องโฟม
  - 2.2.7 หลอดแก้วควอทซ์
  - 2.2.8 ปีกเกอร์
  - 2.2.9 เทอร์มอมิเตอร์ Mini clamp meter
  - 2.2.10 ถุงเก็บสารตัวอย่าง
  - 2.2.11 จุกยาง
  - 2.2.12 สายยางน้ำแก๊ส

2.3 อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัย

2.3.1 ถุงมือยาง

2.3.2 หน้ากากปิดจมูก

2.3.3 แว่นตากันสาร

2.4 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

2.4.1 เครื่องมือวิเคราะห์เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD) รุ่น 6100 Shimadzu, Japan ในห้องปฏิบัติการ ศูนย์วิจัยเทอร์โมอิเล็กทริก สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร โดยการเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล ของ ICDD (International Centre for Diffraction)

2.4.2 เครื่องมือวิเคราะห์เทคนิคการดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption Spectroscopy: XAS) ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ในสถานีทดลอง XAS ของระบบลำเลียงแสง beamline 8

2.4.3 เครื่องมือวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด (Scanning electron microscope) ยี่ห้อ JOEL JSM 7800F ที่ศูนย์เครื่องมือ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4.4. เครื่องมือวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง ผ่าน (Transmission electron microscope) ยี่ห้อ FEI TECNAI G2 20 S-Twin ที่ศูนย์ เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

#### ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

3.1.1 ผสม Iron (III) nitrate nonahydrate: Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, Aluminium nitrate nonahydrate: Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, Citric acid: C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> อย่างละ 50 กรัมและน้ำ ในอัตราส่วน 1:1:1:1 ดังสมการ (6) ในปีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ดังภาพประกอบ 21 18Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>•9H<sub>2</sub>O + 9Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>•9H<sub>2</sub>O + 23C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>

 $\Box$  9FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> + 335H<sub>2</sub>O + 81N + 138CO<sub>2</sub> (6)



ภาพประกอบ 21 ผสมตัวเร่งปฏิกิริยา Iron (III) nitrate nonahydrate: Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, Aluminium nitrate nonahydrate: Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, Citric acid: C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> และน้ำ

3.1.2 นำแม่เหล็กสำหรับกวนสารละลาย ใส่ในปีกเกอร์แล้วนำไปกวน ด้วยเครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer) ที่อุณหภูมิ 90 ℃ เป็นเวลา 120 นาที ดังภาพประกอบ 22 โดยจากสารละลายโซล (Viscous sol) ให้มีลักษณะเป็นเจล (Brown gel) ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 22 กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนสารที่อุณหภูมิ 90 ℃



ภาพประกอบ 23 สารละลายมีลักษณะเป็นเจล (Brown gel)

3.1.3 นำสารละลายเจลที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.1.2 ไปเผาด้วยเตาเผา อุณหภูมิสูง 500 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 24 และจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาใน ลักษณะผง (Powder) ดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 24 เผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง 500 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 25 ตัวเร่งปฏิกิริยาไอรอนอะลูมินัมออกไซด์ (Iron Aluminum oxide: FeAlO<sub>x</sub>)

3.2 สังเคราะห์ท่อนานาร์บอนด้วยวิธิไมโครเวฟ
3.2.1 เตรียมอุปกรณ์ในการสังเคราะห์ ได้แก่ ไมโครเวฟ, กระบวก
ตวงขนาด 500 มิลลิลิตร, กล่องโฟม, จุกยาง และสายยาง
3.2.2 ชั่งพลาสติก HDPE 1.5 กรัม และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ลงใน

5.2.2 บงพล เฉพาาย 1 1.3 กาม และควรรรษฎการยา 1.4 และควรรรษฎการยา 1440x สงเส หลอดแก้วควอทซ์ ปิดจุกยางและต่อสายยางน้ำแก๊สออกสู่ถังชุดกระบอกตวงเก็บแก็ส ในกล่องโฟม ดังภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 26 หลอดแก้วควอทซ์บรรจุพลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ในไมโครเวฟ 3.2.3 ตั้งเวลาไมโครเวฟที่ 10 นาที และกำลัง 100P (1200 วัตต์) กดเริ่มทำงาน เมื่อไมโครเวฟหยุดทำงาน วัดอุณหภูมิของไมโครเวฟด้วยเทอร์โมสแกน สังเกตระดับน้ำจากกระบวกตวง บันทึกผลการทดลอง

3.2.3 พักเครื่องไมโครเวฟให้เย็นลง ทำตามขั้นตอนที่ 3.2.3 โดยเพิ่ม เวลาครั้งละ 10 นาที ทำให้เวลารวมเป็น 20 30 40 และ 45 นาทีตามลำดับ พร้อมวัด อุณหภูมิ

3.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของการสังเคราะห์ ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไมโครเวฟ

3.3.1 วิเคราะห์วัสดุจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี ไมโครเวฟด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD) โดยการ ตรวจสอบสมบัติของวัสดุที่อาศัยการเลี้ยวเบนของรักสีเอ็กซ์ เมื่อลำรังสีตกกระทบวัตถุ หรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำ รังสีตกกระทบ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุ ที่พบได้

3.3.2 วิเคราะห์วัสดุจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี ไมโครเวฟด้วยเทคนิคการดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption Spectroscopy: XAS) เครื่อง XRD เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัย หลักการของ Bragg's law ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ยิงผ่านชั้นผลึกที่ อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้เครื่องรับสัญญาณรับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ ที่เกิดจากการเสี้ยว เบนในมุมต่าง ๆ ของการทดสอบ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ใน สารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้ ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของ รังสีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้น ๆ มีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง 3.3.3 วิเคราะห์วัสดุจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี

ไมโครเวฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอน จะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอนซึ่งสามารถ ปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะ ถูกปรับระยะไฟกัสโดยเลนส์ไกส์วัคถุลงไปบนผิวขึ้นงานที่ต้องการศึกษา ซึ่งสัญญาณ จากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิล็กทรอนิกส์ และสามารถบันทึกภาพได้เลข นำมาใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะ ฟื้นผิวของสารตัวอย่างได้

3.3.4 วิเคราะห์วัสดุจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี ไมโครเวฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope) ซึ่งอาศัยลำแสงอิเล็กตรอนวิ่งไปชนกับวัดถุที่ต้องการจะส่อง โดยอาศัยการ ป้อนพลังงานไฟฟ้าไปยังขดลวดที่เป็นขั้วแคโทด เมื่อพลังงานมากพออิเล็กตรอนจะถูก ปลดปล่อยออกมา แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นขั้วประจุไฟฟ้า ก็จะวิ่งเข้าไปหาอนุภาคที่มี ขั้วประจุต่างกัน ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถวิ่งเข้าไปชนเป้าชิ้นตัวอย่างหรือ sample ได้ ดังนั้น ภายในกล้องจุลทรรศน์จะต้องทำให้เป็นระบบสุญญากาศ และจะมี Condenser เป็นตัวเพิ่มความเข้มแสง ซึ่งจะใช้ป็นขดลวดพันรอบแท่งเหล็ก เพื่อเหนี่ยวนำให้ทิศทาง ของลำอิเกตรอนอยู่ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะให้เกิดความเข้มของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น เมื่ออนุภาคหรือลำแสงอิเล็กตรอนสามารถวิ่งไปชนวัสดุหรือชิ้นงาน แสงก์จะถูกคูดกลืน และลำแสงส่วนที่เหลือก็จะสามารถทะลุผ่านชิ้นวัสดุไปยังเลนส์ใกล้วัตถุ มีระบบเลนส์ ต่าง ๆ เพื่อแยกการมองออกเป็นสอลทาง ทำให้ได้ภาพเป็นสองมิติ ซึ่งนำมาใช้เพื่อการ ตรวจสอบโครงสร้างของท่านาโนคาร์บอนว่าเป็นแบบหลายชั้นหรือแบบผนังท่อชั้นเดียว และใช้ตรวจสอบเพื่อหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง

45



ภาพประกอบ 27 แผนผังการทดลอง

# บทที่ 4

### ผลและการอภิปราย

ในบทนี้เป็นรายงานผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย ประกอบไปด้วย รายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

2. การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธิไมโครเวฟ

## การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> จากการผสม Iron (III) nitrate nonahydrate: Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, Aluminium nitrate nonahydrate: Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, Citric acid: C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> อย่างละ 50 กรัมและน้ำ ในอัตราส่วน 1:1:1:1 แล้วนำไปกวนด้วยเครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 120 นาที ให้มีลักษณะเป็นเจล (Brown gel) จากนั้น นำไปเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง 500 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งลักษณะภายนอกของตัวเร่ง ปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาล (Powder) ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 ตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub>

การตรวจสอบโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ดังภาพประกอบ 29 พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุม 20 ระหว่าง 20 ถึง 80 โดยที่มุม 36.0 ซึ่งใช้ตำแหน่งการอ้างอิงจากมาตรฐาน ICDD FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> เลขที่ 00-007-0068, 00-003-0894 และ FeAlO<sub>3</sub> เลขที่ 00-018-0633 และพบระนาบเท่ากับ (311) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Enhessari Morteza (2017, p. 791) พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของ FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ที่มุม 30.5 (220) 35.8 (311), 43.6 (400), 58.0 (511) และ 63.7 (440) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นคิวบิค



ภาพประกอบ 29 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub>

# การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไมโครเวฟ

ผลการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีไมโครเวฟ จากการผสมพลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟเป็นเวลา 20, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ พบว่า ลักษณะภายนอกของ ท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเป็นผงสีดำ (Powder) เมื่อในเวลา 20, 30, 40, และ 45 นาที ตามลำดับ โดยมีอุณหภูมิสูงสุดภายใต้การทดลองประมาณ 200 °C



ภาพประกอบ 30 ลักษณะภายนอกของท่อนาโนคาร์บอน



ภาพประกอบ 31 ภาพถ่ายอุณหภูมิด้วยเครื่องเทอร์โมสแกน

# การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี ไมโครเวฟด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD)

การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสม พลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟเป็นเวลา 20, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ และตัวอย่างมาตรฐานของ MWCNTs สำหรับรูปแบบ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ดังภาพประกอบ 32 พบรูปแบบการเลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์ที่มุม 20 ระหว่าง 20 ถึง 80 เมื่อโดยที่มุม 26, 44, 64 และ 77.5 สอดคล้องกับงานวิจัยของ F. Zahra, et al. (2017) และ A. Saravanan, et al. (2014) พบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของ MWCNTs ที่มุม 26.05 (002) และ 43.53 (100)



ภาพประกอบ 32 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD ของ MWCNTs standard และ MWCNTs จากการสังเคราะห์ ให้ความร้อนด้วยวิธิไมโครเวฟเป็นเวลา 20, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ

2. การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี ไมโครเวฟด้วยเทคนิคการดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption Spectroscopy: XAS)

การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสม พลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAIO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟเป็นเวลา 20, 30, 40, และ 45 นาทีตามลำดับ และตัวอย่างมาตรฐานของ MWCNTs สำหรับการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคการดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ ใช้วิธีการแยกสเปกตรัมการดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ ใกล้ขอบพลังงาน (X-ray Absorption Near Edge Structure: XANES) สำหรับการวิเคราะห์ สเปกตรัม XANES ของ Fe K-edge ดังภาพประกอบ 33 พบจุดสูงสุดสำหรับตัวอย่าง มาตรฐานของ MWCNTs อยู่ที่ ~7132 eV และท่อนาโนคาร์บอนจากการผสมพลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAIO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟเป็นเวลา 20, 30, 40 และ 45 นาที ตามลำดับพบจุดสูงสุดอยู่ที่ ~7132 eV ซึ่งสอดคล้องกับ Jinwoo, et al, Li J, et al, S. Young Jin, et al. โดยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะมี Oxidation state เปลี่ยนไปทาง +2 มีความคล้าย FeO มากขึ้น

สามารถคำนวณความยาวคลื่นของโฟโตอิเล็กตรอน λ<sub>e</sub> ได้จากเลขคลื่น k โดยใช้ความสัมพันธ์

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_e} \tag{7}$$

โฟโตอิเล็กตรอนจะมีเลขคลื่นที่เปลี่ยนไปตามพลังงานโฟตอนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงาน

$$\mathbf{k} = \sqrt{\frac{2\mathbf{m}}{\Box^2} (\mathbf{E} - \mathbf{E}_0)} \tag{8}$$

ตัวแปร E<sub>0</sub> คือ ionization energy ซึ่งเป็นพลังงานเริ่มต้นที่ทำให้อิเล็กตรอนย้าย สถานะจากสถานะพลังงานระดับลึกไปสถานะที่ว่างแบบต่อเนื่อง พบว่า เลขคลื่น k มีค่า 2.29x10<sup>10</sup> m<sup>-1</sup> และความยาวคลื่นของโฟโตอิเล็กตรอน λ<sub>e</sub> มีค่า 0.27 nm



ภาพประกอบ 33 สเปกตรัม XANES ของ Fe K-edge

# 3. การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี ไมโครเวฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสม พลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟเป็นเวลา 20, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ และตัวอย่างมาตรฐานของ MWCNTs ดังภาพประกอบ 34 ที่แสดงภาพแบบ 3 มิติของสภาพพื้นผิวของตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์ท่อนาโน คาร์บอนจากการผสมพลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธี ไมโครเวฟอนุภาคมีลักษณะที่ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นยืนยันการเติบโตของเส้นใยคาร์บอนจำนวน มาก และนอกจากนั้นทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างจาก Energy Dispersive Spectrometry (EDS) พบว่า ในแต่ละตัวอย่างประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) ที่เป็นส่วนหนึ่งของท่อนาโนคาร์บอน นอกจากนั้นยังพบธาตุ Al, Fe และ 0 ซึ่งเป็น ส่วนประกอบหนึ่งของตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlOx ที่ยังคงเหลือเนื่องจากการกำหนดอัตราส่วน ที่ยังไม่พอเหมาะสำหรับการทดลองวิจัย



ภาพประกอบ 34 SEM และ EDX (a) ตัวอย่างมาตรฐานของ MWCNTs (b – e) ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสมพลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟ เป็นเวลา 20, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ



ภาพประกอบ 34 (ต่อ) SEM และ EDX (a) ตัวอย่างมาตรฐานของ MWCNTs (b – e) ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสมพลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธิไมโครเวฟ เป็นเวลา 20, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ

การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสม พลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAIO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟเป็นเวลา 20, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ และตัวอย่างมาตรฐานของ MWCNTs ดังภาพประกอบ 34 แสดงร้อยละโดยมวลจากธาตุที่พบในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสม พลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAIOx ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟในช่วงเวลา ต่าง ๆ พบว่า หลังจากการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสมพลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAIO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟในช่วงเวลา ร้อยละของคาร์บอนที่พบเจอมากที่สุด คิดเป็น 88.54% รองลงมาคือในช่วงเวลา 30, 20, และ 45 นาทีตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 ร้อยละโดยมวลจากธาตุที่พบในการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน จากการผสมพลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlOx ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟ

4. การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธี ไมโครเวฟด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope)

การตรวจสอบโครงสร้างของการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสม พลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟเป็นเวลา 20, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ และตัวอย่างมาตรฐานของ MWCNTs ดังภาพประกอบ 36 พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางภายภายนอกมีค่าประมาณในช่วง 8 – 29 nm และเส้นผ่าน ศูนย์กลางภายภายในมีค่าประมาณในช่วง 4 – 12 nm ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arras, Matthias & Schillai, Christoph & Keller, Thomas & Stoessel, Robert & Jandt, Klaus. (2013, pp. 366 – 378) และ Boldoo, Tsogtbilegt & Ham, & Cho, Honghyun. (2019, p.5) มีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกที่ 10 – 25 nm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมี ค่าประมาณในช่วง 5 – 15 nm



ภาพประกอบ 36 TEM (a) ตัวอย่างมาตรฐานของ MWCNTs (b) ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสมพลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธี ไมโครเวฟเป็นเวลา 20, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ



ภาพประกอบ 36 (ต่อ) TEM (c – e) ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสมพลาสติก HDPE และตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟเป็นเวลา 20, 30, 40 และ 45 นาทีตามลำดับ

# บทที่ 5

## สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผล

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้สรุปผลของการวิจัยไว้ ดังนี้

 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากการผสมพลาสติก HDPE และตัวเร่ง ปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟ เป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่ายและใช้เวลา ไม่นาน ตัวเร่งปฏิกิริยา FeAlO<sub>x</sub> สามารถเร่งปฏิกิริยากับขยะพลาสติกขนาดเล็กโดยการใช้ รังสิไมโครเวฟ ผลึกของสารตัวอย่าง (HDPE + FeAlO<sub>x</sub>) ให้ความร้อนด้วยวิธีไมโครเวฟ เป็นเวลา 20, 30, 40, และ 45 นาทีตามลำดับ อุณหภูมิสูงสุดภายใต้การทดลองประมาณ 200 °C

 การศึกษาลักษณะสัณฐาน (Morphology) ของท่อนาโนคาร์บอนจากการ สังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากขยะพลาสติกด้วยวิธีไมโครเวฟ โดยมี FeAlO<sub>x</sub> เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเทคนิค XRD มีความสอดคล้อง เมื่อเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานของ MWCNTs ท่อนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้มีค่า สเปกตรัม XANES ที่ ~7132 eV และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายภายนอกมีค่าประมาณในช่วง 8 – 29 nm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายภายในมีค่าประมาณในช่วง 4 – 12 nm

 การสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนจากขยะพลาสติกด้วยวิธีไมโครเวฟ สำหรับวัสดุที่สังเคราะห์ได้เป็นท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น และมีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางภายภายนอกและภายในอยู่ในช่วงของท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น
## ข้อเสนอแนะ

 ควรมีการเก็บปริมาณแก๊สต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เพื่อน้ำมาตรวจหาปริมาณสารที่ สังเคราะห์ได้

- 2. ใช้อัตราส่วนในการสังเคราะห์ที่หลากหลาย
- 3. ควรมีการใช้กำลังของไวโครเวฟและเวลาในการทำลองที่หลากหลาย

บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

กมลวรรณ สามกองนาม. (2559). *การศึกษาไอออนของโลหะแทรนซิชันในแก้วซิลิเกตโดย ใช้เทคนิคทางสเปกโทรสโกปี*. ปริญญานิพนธ์ วท.ม. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัย ศิลปากร.

กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2555). *ข้อมูลเทคโนโลยีเชิงลึก การให้ความ ร้อนแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric Heating)*. เข้าถึงได้จาก http://www2.dede.go.th/Advancetech/Vol2/04Sample/PDF/08dielectric.pdf 13 กรกฎาคม 2565.

- จิราพร เลื่อนผลเจริญชัย. (2564). *พลาสติกแบบไหนที่สามารถเข้าไมโครเวฟได้*. เข้าถึงได้ จาก https://pharmacy.mahidol.ac.th/th/knowledge/article/572/ 12 กรกฎาคม 2565.
- ชลธิชา นุ่มหอม. (2538). *พอลิเมอร์*. กรุงเทพฯ: พรศิวการพิมพ์
- ชวน คล้ายปาน. (2545). *เตาอบไมโครเวฟ*. เข้าถึงได้จาก https://www.dss.go.th/ images/st-article/pep\_2\_2546\_microwave.pdf 19 มิถุนายน 2565.
- ฐิยาพร ปานสง. (2555). *การเติมท่อนาคาร์บอนที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงใน* กาวต่าง ๆ. ปริญญานิพนธ์ วท.ม. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ณัฐพงษ์ ศรีเมือง. (2560). *Carbon nanotubes วัสดุแห่งอนาคต*. เข<sup>้</sup>าถึงได้จาก https://www.scimath.org/article-chemistry/item/7391-carbon-nanotubes. 23 มกราคม 2565.

ดนัย กิจชัยนุกูล. (2547). การทำงานของ SEM. เรื่องน่ารู้ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM). เข้าถึงได้จาก http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf?fbclid=IwAR1iISY oS9UNbYAk7vhNFu3vv6kR3qMfFNr7tSsCKjhIFNsbEAwUqCY8H7c 12 กรกฎาคม 2565.

ดวงเดือน อาจองค์. (2546). วัสดุจากคลื่นไมโครเวฟ. *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*, 13, 13-17.

- พิชามญชุ์ รักรอด. (2562). *คนไทยใช้ถุงพลาสติกมากถึง 5,300 ตัน/วัน เอกชนหนุนยกเลิก พลาสติกใช้ครั้งเดียว*. เข้าถึงได้จาก https://www.bltbangkok.com/CoverStory 12 กรกฎาคม 2565.
- พิศิษฐ์ สิงห์ใจ. (2543). ท่อนาโนคาร์บอนเทคโนโลยีแห่งศตวรรษที่ 21. Industrial Technology Review, 69, 98–100.
- มหาวิทยาลัยมหิดล, สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้. (2562). *ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด*. เข้าถึงได้จาก https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html 12 กรกฎาคม 2565.
- วันทนา คล้ายสุบรรณ์ และประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์. (2548). เทคนิคสเปกโทรสโกปี การดูดกลืนรังสีเอกซ์ด้วยแสงซินโครตรอน. *แสงสยาม MTEC*, ตุลาคม – ธันวาคม, 22-24.
- วันทนา คล้ายสุบรรณ์. (2552). *เทคนิคการทดลอง X-ray Absorption Spectroscopy ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยาม* (พิมพ์ครั้งที่ 3). นครราชสีมา: บริษัท สมบูรณ์การ พิมพ์จำกัด.
- ศันศนีย์ รักไทยเจริญชีพ. (2558). ประโยชน์จากเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในงาน ทดสอบวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์. *กรมวิยาศาสตร์บริการ*. 63(197), 38, เข้าถึงได้จาก http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss\_j/2558\_63\_197\_p38-40.pdf?fbclid= IwAR1AIDVM-dAOqWIx9UREdZKa6tI\_Vc9T6K0AR0h1tq0zw-bukvXahV4v\_E 12 กรกฎาคม 2565.
- ศิริกาญจนา ทองมี. (2556). การผลิตและสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน. *วารสาร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*, 5(10), 97-109.
- ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. (2565). ไมโครเวฟ. เข้าถึงได้จาก https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0401/microwave-%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%82%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0 %B9%80%E0%B8%A7%E0%B8%9F 12 กรกฎาคม 2565.

สมศักดิ์ ดำรงเลิศ. (2551). ท่อนาโนคาร์บอน : การสังเคราะห์และสมบัติ. *วารสาร ราชบัณฑิตยสถาน*, 33(3), 110–118.

สายสนม ประดิษฐูดวง. (2546). การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการฉายรังสี อาหาร. กรุงเทพฯ: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร.

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2565). ไทยสร้างขยะ มากเป็นอันดับ 3 ของโลก. เข้าถึงได้จาก https://www.onep.go.th/4– %E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B8%96%E0%B8%B8%E0%B8%99%E0 %B8%B2%E0%B8%A2%E0%B8%99–2565–%E0%B9%84%E0%B8% 97%E0%B8%A2%E0%B8%AA%E0%B8%A3%E0%B9%89%E0%B8%B2 %E0%B8%87%E0%B8%82%E0%B8%A2%E0%B8%A2%E0%B8%B0%E0%B8%A1%E0 %B8%B2/ 11 กรกฎาคม 2565.

สุขสันต์ อมรรักษา และแอ๊ปเปิ้ล แจ่มจำรัส. (2556) การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟไพโรไลซิส สำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี. วารสารวิชาการพระจอมเจ<sup>้</sup>าพระนครเหนือ, 23(2) พฤษภาคม – สิงหาคม, 480–488.

สุทธิษา ก้อนเรื่อง. (2551). *การสังเคราะห์วัสดุนาโนด้วยกระบวนการทางพลาสมา*. ปริญญานิพนธ์ วท.ม. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สุภิญญา มากุล. (2557). *การวิเคราะห์ดินด้วยวิธี X-ray diffract meter (XRD) เพื่อ* ประยุกต์ใช*้ทางนิติวิทยาศาสตร์*, ปริญญานิพนธ์ วท.ม. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร.

อัจฉราพร ศรีอ่อน. (2559). หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิง. *เทคโนโลยีวัสดุ*, 21(81). 78–80. เข้าถึงได้จาก https://www2.mtec.or.th/th/ emagazine/admin/upload/299\_77.pdf 2019: 4(2): 34–42

- Acomb, J. C., Wu, C., & Williams, P. T. (2016). The use of different metal catalysts for the simultaneous production of carbon nanotubes and hydrogen from pyrolysis of plastic feedstocks. *Applied Catalysis B: Environmental*, 180, 497–510. doi:10.1016/j.apcatb.2015.06.054
- Arras, Matthias & Schillai, Christoph & Keller, Thomas & Stoessel, Robert & Jandt, Klaus. (2013). Alignment of Multi–Wall Carbon Nanotubes by Disentanglement in Ultra–Thin Melt–Drawn Polymer Films. Carbon. 60. 366–378. 10.1016/j.carbon.2013.04.049.
- Awad, A., Elgamsy, R.,Wahab, A., & Hazem, A. M. (2019). Mechanical and Physical Properties of PP and HDPE. *SciencePG*, 4(2), 34–42. doi: 10.11648/j.es.20190402.12.

- Barbarias, I., Lopez, G., Alvarez, J., Artetxe, M., Arregi, A., Bilbao, J., & Olazar, M.
  (2016). A sequential process for hydrogen production based on continuous
  HDPE fast pyrolysis and in–line steam reforming. *Chemical Engineering Journal*, 296, 191–198. doi:10.1016/j.cej.2016.03.091
- Boldoo, Tsogtbilegt & Ham, & Cho, Honghyun. (2019). Comparison Study on Photo-Thermal Energy Conversion Performance of Functionalized and Non-Functionalized MWCNT Nanofluid. Energies. 12. 3763. 10.3390/en12193763.
- Bragg, L.W. (1915). X RAYS AND CRYSTAL STRUCTURE. G. Bell and sons LTD London (ed.).
- Carlos, L. P., & Chase, H. A. (2001). Microwave–Induced Pyrolysis of Plastic Wastes. Industrial & Engineering Chemistry Research, 40(22), 4749– 4756. doi:10.1021/ie010202j
- Daenen, M. et al. (2003). *The wondrous world of carbon nanotubes*. Eindhoven University of Technology.
- Decareau R. V., and Peterson, R. A. (1986). *Microwave Processing and Engineering*. Florida: VCH Publishing.
- Dingding, Y., Yeshui, Z., Paul, W. T., Haiping Y., & Hanping C. (2017). Co-production of hydrogen and carbon nanotubes from real-world waste plastics: Influence of catalyst composition and operational parameters. *Applied Catalysis B: Environmental*, 221, 584–597. doi:10.1016/j.apcatb.2017.09.035
- Elliot, O. (2018). *Is your mobile phone destroying your digestion? The EMF–Microbiome interaction.* Retrieved from https://www.sott.net/article/391863–Is–your– mobile–phone–destroying–your–digestive–system–On–EMF–Microbiome– interaction July 13<sup>th</sup>, 2022. Engineering Science
- Enhessari, Morteza (2017). FeAl2O4 Nanopowders; Structural Analysis and Band Gap Energy. High Temperature Materials and Processes, 36(8), – . doi:10.1515/htmp-2015-0229
- Fernandez, Y., Arenillas, A., & Angel, M. J. (2011). *Microwave Heating Applied to Pyrolysis*. Retrieved from https://www.intechopen.com/chapters/13466 July 13<sup>th</sup>, 2022.
- Futaba, D., et al. (2006). 84% Catalyst Activity of Water–Assisted Growth of Single Walled Carbon Nanotube Forest Characterization by a Statistical and

Macroscopic Approach. *The journal of physical chemistry*. B. 110. 8035–8, doi: 10.1021/jp060080e.

- Geyer, R., Jambeck, J.R. and Law, K.R. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances. 3(7) DOI: 10.1126/sciadv.1700782 ; https://www.greenpeace.org/usa/ keyfacts-about-plastic-pollution/
- Graziano, A., Jaffer, S., & Sain, M. (2018). Review on modification strategies of polyethylene/polypropylene immiscible thermoplastic polymer blends for enhancing their mechanical behavior. *Journal of Elastomers & Plastics*, 51(4), 4. doi: 10.1177/0095244318783806
- Gupta, M., Leong, & W. W., Eugene. (2007). *Microwave and Metals*, Singapore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.

http://www.sciencepublishinggroup.com/j/es Jan 23<sup>th</sup>, 2022.

- Jie, X., Li, W., Slocombe, D. et al. (2020). Microwave–initiated catalytic deconstruction of plastic waste into hydrogen and high–value carbons. *Nat Catal*, 3, 902– 912. https://doi.org/10.1038/s41929–020–00518–5
- Kai, Y., Mingyuan, G., Yiping, G., Xifeng, P., & Guohong, M. (2009). Effects of carbon nanotube functionalization on the mechanical and thermal properties of epoxy composites. *Carbon*, 47(7), 1723–1737. doi:10.1016/j.carbon.2009.02.029
- Kunwar, B., Cheng, H.N., Chandrashekaran, S.R., & Sharma, B.K. (2016). Plastics to fuel: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 421– 428. doi:10.1016/j.rser.2015.10.015
- Li JC, Cheng M, Li T, Ma L, Ruan X, Liu D, Shao M (2019) Carbon nanotube–linked hollow carbon nanospheres doped with iron and nitrogen as single–atom catalysts for oxygen reduction reaction in acidic solutions. J Mater Chem A **7**:14478 – 14482. doi: 10.1039/c9ta00508k
- Linn, H., & Möller M. (2003). Microwave Heating, Thermprocess Symposium. Retrieved from https://www.linn-hightherm.de/fileadmin/user\_upload/pages/about\_us/download/publications/micro wave\_heating/Microwave\_heating.pdf July 13<sup>th</sup>, 2022.
- Lopez, G., Santamaria, L. Microwaving plastic into hydrogen and carbons. Nat Catal **3**, 861–862 (2020). Retrieved from https://doi.org/10.1038/s41929– 020–00538–1

- Mishra, N., et al. (2012). Pyrolysis of waste Polypropylene for the synthesis of Carbon nanotubes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, 91–98. doi:10.1016/j.jaap.2011.11.012
- Osorio, A. G., & Bergmann, C. P. (2015). Evaluation of iron–containing carbon nanotubes by near edge X–ray absorption technique. *Radiation Physics and Chemistry*, 115, 164–170. doi:10.1016/j.radphyschem.2015.07.001
- Polymer database. (2022). High–Density Polyethylene (HDPE). Retrieved from https://polymerdatabase.com/Commercial%20Polymers/HDPE.html#top.
- Porada M. W. (Ed.). (2006). Advances in Microwave and Radio Frequency Processing, Report from the 8<sup>th</sup> International Conference on Microwave and High Frequency Heating, Springer–Verlag, Berlin, Heidelberg,
- Rahman, G. et al. (2019). An Overview of the Recent Progress in the Synthesis and Applications of Carbon Nanotubes. *Journal of Carbon Research*, 5(3), doi: 10.3390/c5010003.
- Ribeiro, B., Botelho, E. C., Costa, M. L., & Bandeira, C. F. (2017). Carbon nanotube buckypaper reinforced polymer composites: A review. *Polímeros*, 27(3), 247–255. doi: 10.1590/0104–1428.03916.
- Sa YJ, Seo DJ, Woo J, et al (2016) A General Approach to Preferential Formation of Active Fe–Nx Sites in Fe–N/C Electrocatalysts for Efficient Oxygen Reduction Reaction. J Am Chem Soc 138:15046 – 15056. doi: 10.1021/jacs.6b09470
- Saravanan A, Karthika P, Narasimhan G, Kalaivani R, Thirunavukkarasu S (2014) Efficiency of Transition Metals in Combustion Catalyst for High Yield Helical Multi–Walled Carbon Nanotubes. Advanced Science 5:809–813. doi: 10.1166/asem.2014.1569
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2001) . Microwave Heating. *In Introduction to Food Engineering* (3rd ed). London: Academic Press.
- Teng, A., Elbio D., & Sumio, I. (2010). Physical Properties of Carbon Nanotubes. *Solid State II.* Physics, Tennessee University.
- Woo J, Yang S, Sa YJ, et al (2018) Promoting Oxygen Reduction Reaction Activity of Fe–N/C Electrocatalysts by Silica Coating–Mediated Synthesis for Anion Exchange Membrane Fuel Cells. Chem Mater 30:1 – 53. doi: 10.1021/acs.chemmater.8b02117.

- Wu, C., Nahil, M. A., Miskolczi, N., Huang, J., & Williams, P. T. (2014). Processing Real–World Waste Plastics by Pyrolysis–Reforming for Hydrogen and High– Value Carbon Nanotubes. *Environmental Science & Technology*, 48(1), 819– 826. doi:10.1021/es402488b
- Zahra F, Nejad K, Homa RM, Satari T (2017) Investigating of a wide range of concentrations of multi–walled carbon nanotubes on germination and growth of castor seeds (Ricinus communis L.). J Plant Prot Res 57:228 – 236. doi: 10.1515/jppr–2017–0032.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

EDS



HDPE + FeAlO<sub>x</sub> 30 นาที่





10µm





10µm

Al Kα1



\_10μm





[10μm]





10µm

HDPE +  $FeAlO_x$ 

4 C Electron AI

10µm

EDS Layered Image 2









\_10μm





10µm





10µm

HDPE + FeAlO<sub>x</sub> 40 นาที่

## ภาคผนวก ข

น้ำเสนอผลงานวิจัย

1. ISTEM2022

2. Manuscript

## 1. ISTEM2022



# CONFERENCE PROGRAM ISTEM 2022

INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON SCIENCE, TECHNOLOGY, AND ENGINEERING OF MATERIALS

**29 November - 2 December 2022** 

 Nongnooch tradition conference center

 Patraya, thailand

 Image: Image



S3 P9

### MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE SYNTHESIS BY MICROWAVE-INITIATED CATALYTIC OF PLASTIC WASTE POLYETHYLENE PRODUCTS

Thanaporn Juntrakote<sup>1</sup>, Pinit Kidkhunthod<sup>2</sup> and Tosawat Seetawan<sup>1,\*</sup> <sup>1</sup>Program of Physics, Faculty of Science and Technology, Sakon Nakon Rajabhat University, 680 Nittayo Road, Mucang District, Sakon Nakon, 47000, Thailand. <sup>2</sup>Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand \*E-mail: t.thanapornjun@gmail.com

#### Abstract

The multi walled carbon nanotube (MWCNT) has a new synthesized of by microwave radiation compose of 3 steps. First, the high density polyethylene (HDPE) plastic was washed by water. Second, the plastic was mixed with catalyst (FeAIO<sub>x</sub>). Finally, the mixer was input a microwave for generate MWCNT under 1,200 W. It was found that MWCNT outer and inner diameter of  $\sim 8 - 29$  nm and  $\sim 4 - 12$  nm saving time 20% and confirmed successfully crystalline structure, and microstructure by XRD, SEM, TEM, and XAS.

Keyword: Plastic, Microwave, Multiwall carbon nanotube, FeAlOx catalyst.

## 2. Manuscript

to ~12 billion tons by 2050 and then it became to plastic pollution [1 - 2]. Plastics includes materials composed of various elements such as carbon, hydrogen, oxygen, nitrogen, chlorine, and sulfur. Plastics typically have high molecular weight, meaning each molecule can have thousands of atoms bound together.

Recently, researchers have been working on extracting carbon and hydrogen that the main product of plastics to synthesize rich material carbon nanotube (CNT). There have variety method for synthesis CNT such as arc discharge with simple method but the products need to be purified later, non-uniform, possible high yield of nanotubes and careful control [3], laser ablation method with relatively low metallic impurities, relatively high yield but not be regularly straight and have some degree of branching [4], chemical vapor deposition (CVD) that the typical method usually used with the purity and yield is very high, alignment is regular, having low cost, being suitable for large scale fabrication but defect and bend [5-6], pyrolysis with high temperature and gasification temperature around 600 °C [7 - 8].

In this study, synthesis MWCNT from plastic waste by microwave-driven destruction method is presented. This is a fast synthesis of MWCNT by microwave irradiation, washed plastic HDPE, mixed with catalyst (FeAlO<sub>x</sub>), and then use microwave generate MWCNT to very shot synthesis time, separation and purification are also very simple and time saving [9]. Moreover, the trace evidence of FeAlO<sub>x</sub> catalysts used in this MWCNT synthesis is also studied by Fe K-edge X-ray absorption spectroscopy (XAS).

#### **Materials and Methods**

#### Preparation of FeAlOx Catalyst

The FeAlO<sub>x</sub> catalyst was prepared by using analytical grade Iron (III) nitrate nonahydrate (Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9(H<sub>2</sub>O), Carlo, Erba, France), Aluminium nitrate nonahydrate (Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9(H<sub>2</sub>O), Panreac, Spain), Citric acid (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>, Loba, India) and a minimum amount

of distilled water were mixed in a desirable molar ratio produce a viscous orange gel with magnetic stirrer at 90 °C for 2 hr. The gel was burnt and calcined by kilns and furnaces in air at 500 °C for 3 hr in self propagation combustion manner and formed loose powder.

#### **Experiment Set-Up and Microwave Reactor**

The microwave reactor set-up is consisting of microwave generator, tube, rubber stopper for bringing the combustion gas to cylinder for measure the volume of gas, metal cabinet to prevent microwave transmission, heating and temperature as shown in Fig. 1.



Figure 1 Experiment set-up and microwave reactor, heating and temperature.

Microwave electromagnetic spectrum has frequencies ranging from 300 MHz to 300 GHz. Microwave heating represent the transfer of electromagnetic energy to thermal energy [10]. The mechanistic model's catalytic methane decomposition over Fe-Al catalyst and claimed the important role of Fe<sub>3</sub>C transformed to hydrogen and MWCNT [9, 11 - 14].

#### **Experimental Procedure**

The plastic waste of HDPE was washed and pretreated by crushing into small pieces using a blender. These pieces of plastic were then mixed with  $FeAlO_x$  catalyst in a typical weight ratio of 1 : 1 used 1.5 g of plastic for test. The sample (HDPE +  $FeAlO_x$ ) was place in a quartz tube with inner diameter 1.9 cm, outer diameter 2.2 cm. The filled tube was placed in refractory brick and then was placed axially in the center of R-390I microwave cavity to

minimize depolarization effects under microwave radiation. The clean HDPE was irradiated microwave under 1,200 W for 20, 30, 40, and 45 mins get the samples.

#### **Characterization and Analysis of Samples**

The crystal structure of samples was measured by power X-ray Diffraction (XRD). The morphology and the element analysis of samples was observed by Scanning electron microscope (SEM) and Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX). The characteristically MWCNT of samples and diameter were analyzed by Transmission Electron Microscope (TEM). Additionally, The Fe K-edge at the BL5.2 was measured by X-ray absorption Spectroscopy (XAS, SUT-Nanotec-SLPI XAS Beamline, Thailand) at Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), Thailand.

#### **Results and Discussion**

The XRD pattern of FeAlO<sub>x</sub> catalyst is shown in Fig. 2 (a), which scanning range in 20 of 20° to 80° which main peak correspond with FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, FeAlO<sub>3</sub> ICDD data. The XRD patterns of the MWCNTs standard, irradiated microwave for 20, 30, 40, and 45 mins respectively as shown in Fig. 2(b). The main peak of XRD patterns the sample (HDPE + FeAlO<sub>x</sub>) in 20, 30, 40, and 45 mins were corresponded with MWCNT standard at the angle about  $2\theta = 26^{\circ}$ , 44°, 64°, and 77.5° together with F. Zahra *et al* [15]. and A. Saravanan *et al* [16].



**Figure 2** XRD pattern of (a) FeAlO<sub>x</sub> catalyst and (b) the sample MWCNTs standard, irradiated microwave for 20, 30, 40, and 45 mins respectively.

The local geometric and absorption of atoms in the sample as a function of electronic structure were measured by X-ray absorption spectroscopy (XAS) technique. The XAS has tunable monochromatic X-rays and energy in their absorption energy range or close to the binding energy of electrons in atom [17]. The absorption edge energy was corresponded with the energy required to eject an electron from an electron shell of an element of interest. Small changes in how X-rays are absorbed near an atom's absorption edge provide insight into the state of the electrons [18]. The transitions from core electronic states of the metal to the excited electronic states lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) is measured by XAS known as X-ray absorption near-edge structure (XANES). The fine structure in the absorption at energies greater than the threshold for electron release latter was studies by extended X-ray absorption

fine structure (EXAFS) to give complementary structural information. The XANES spectra reporting electronic structure and symmetry of the metal site, and the EXAFS reporting numbers, types, and distances to ligands and neighboring atoms from the absorbing element [19]. The Fe K-edge XANES spectra of MWCNT standard was found for the peak at ~7132 eV as shown in Fig. 3. However, the Fe K-edge XANES spectra of the sample (HDPE + FeAIO<sub>x</sub>) in 20, 30, 40, and 45 mins was found for the peak at ~7132 eV which are consistent with W. Jinwoo et al [20], Li. J *et al* [21], and S. Young Jin *et al* [22].



Figure 3 Fe K-edge XANES spectra of MWCNT standard, the sample  $(\text{HDPE} + \text{FeAlO}_x)$  in

20, 30, 40, and 45 mins respectively.

The SEM and EDX images of MWCNT standard and the sample (HDPE +  $FeAlO_x$ ) in 20, 30, 40, and 45 mins are shown in Fig. 4. It appears that many particles and shows EDX spectra of the metal particles presented, suggesting that Al, Fe and O which part of with catalyst (FeAlO<sub>x</sub>).



**Figure 4** SEM and EDX images (a) MWCNT standard (b - e) the sample (HDPE + FeAlO<sub>x</sub>) in 20, 30, 40, and 45 mins respectively.

The TEM images of images (a) MWCNT standard (b – e) the sample (HDPE + FeAlO<sub>x</sub>) in 20, 30, 40, and 45 mins as shown in Fig. 5. It showed outer and inner diameter of  $\sim 8 - 9$  nm and  $\sim 4 - 12$  nm, respectively.



**Figure 5** TEM images (a) MWCNT standard (b – e) the sample (HDPE + FeAlO<sub>x</sub>) in 20, 30, 40, and 45 mins respectively.

#### Conclusions

We can value added of the plastic waste by general microwave irradiated to obtain the MWCNT and very simple to save time. The FeAlO<sub>x</sub> can catalytically process with small plastic wastes by the microwave irradiated. The crystallographic of the sample (HDPE + FeAlO<sub>x</sub>) in 20, 30, 40, and 45 mins were corresponded MWCNT structure. The morphology of sample confirmed MWCNT and corresponded with MWCNT standard at ~7132 eV by XANES. Moreover, the outer and inner tube diameter of MWCNT of ~ 8 – 9 nm and ~ 4 – 12 nm.

The authors declare that they have no conflict of interest.

#### References

- Pratch Rujivanarom (2021) Thailand's Plastic Waste Conundrum Heinrich Böll Stiftung -Southeast Asia Regional Office. https://th.boell.org/en/2021/10/26/thailands-plastic-wasteconundrum. Accessed 26 October 2021
- [2] Geyer R, Jambeck JR, Law KL (2017) Production, use and fate of all plastics ever made. Sci Adv, 3:1 – 5. doi: 10.1126/sciadv.1700782
- [3] Mohammad MI, Moosa AA, Potgieter JH, Ismael MK (2013) Carbon Nanotubes Synthesis via Arc Discharge with a Yttria Catalyst. ISRN Nanomaterials 1 – 7. doi:10.1155/2013/785160.
- [4] Das R, Shahnavaz Z, Ali ME, Islam MM, Hamid SBA (2016) Can We Optimize Arc Discharge and Laser Ablation for Well-Controlled Carbon Nanotube Synthesis. Nanoscale Res Lett 11:1 – 23. doi.org/10.1186/s11671-016-1730-0
- [5] Kazemizadeh F, Bellah SM, Malekfar R (2017) Optimization of cooling devices used in laser ablation setups for carbon nanotube synthesis. J Laser Appl 29:1 – 5. doi:10.2351/1.4990494
- [6] Tripathi P, Durbach S, Coville N (2017) Synthesis of Multi-Walled Carbon Nanotubes from Plastic Waste Using a Stainless-Steel CVD Reactor as Catalyst Nanomaterials 7:1 – 17. doi:10.3390/nano7100284
- [7] Wu C, Nahil MA, Miskolczi N, Huang J, Williams PT (2013) Processing Real-World Waste Plastics by Pyrolysis-Reforming for Hydrogen and High-Value Carbon Nanotubes. Environ Sci Technol 48:819 – 826. doi: 10.1021/es402488b
- [8] Harussani MM, Sapuan SM, Rashid U, Khalina A, Ilyas RA (2022) Pyrolysis of polypropylene plastic waste into carbonaceous char: Priority of plastic waste management amidst COVID-19 pandemic. Sci Total Environ 803:1 – 16. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149911

- [9] Jie X, Li W, Slocombe D, et al (2020) Microwave-initiated catalytic deconstruction of plastic waste into hydrogen and high-value carbons. Nat Catal 3:902 – 912. doi: 10.1038/s41929-020-00518-5
- [10] Fernández Y, Arenillas A, Menéndez JA (2011) Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials, Prof. StanisÅaw Grundas (Ed.), pp 732. http://www.intechopen.com/articles/ show/title/microwave-heating-applied-to-pyrolysis. Accessed 26 October 2021
- [11] Lopez G, Santamaria L (2020) Microwaving plastic into hydrogen and carbons. Nat Catal
   3:861 862. doi: 10.1038/s41929-020-00538-1
- [12] Zhou L, Enakonda LR, Harb M, et al (2017) Fe catalysts for methane decomposition to produce hydrogen and carbon nano materials. Appl Catal B: Environmental 208:44 – 59. doi: 10.1016/j.apcatb.2017.02.052
- [13] Lopez G, Santamaria L (2020) Microwaving plastic into hydrogen and carbons. Nat. Catal. 3:861 – 862. doi: 10.1038/s41929-020-00538-1
- [14] Reddy LE, Zhou L, Saih Y, et al (2016) Methane-induced Activation Mechanism of Fused
   Ferric Oxide-Alumina Catalysts during Methane Decomposition. Chem Sus Chem 9:1911

   1915. doi: 10.1002/cssc.201600500
- [15] Zahra F, Nejad K, Homa RM, Satari T (2017) Investigating of a wide range of concentrations of multi-walled carbon nanotubes on germination and growth of castor seeds (Ricinus communis L.). J Plant Prot Res 57:228 – 236. doi: 10.1515/jppr-2017-0032.
- [16] Saravanan A, Karthika P, Narasimhan G, Kalaivani R, Thirunavukkarasu S (2014) Efficiency of Transition Metals in Combustion Catalyst for High Yield Helical Multi-Walled Carbon Nanotubes. Advanced Science 5:809-813. doi: 10.1166/asem.2014.1569
- [17] Klysubun W (2002) X-ray absorption spectroscopy (XAS) technique. National Synchrotron Research Center, Thailand, pp 7 – 9

- [18] Sigray (2020) X-ray absorption spectroscopy (XAS). https://sigray.com/x-ray-absorptionspectroscopy. Accessed 24 April 2022
- [19] Koningsberger DC, Prins R (1988) X-ray absorption: principles, applications, techniques of EXAFS, SEXAFS and XANES. Wiley, New York
- [20] Woo J, Yang S, Sa YJ, et al (2018) Promoting Oxygen Reduction Reaction Activity of Fe-N/C Electrocatalysts by Silica Coating-Mediated Synthesis for Anion Exchange Membrane Fuel Cells. Chem Mater 30:1 – 53. doi: 10.1021/acs.chemmater.8b02117.
- [21] Li JC, Cheng M, Li T, Ma L, Ruan X, Liu D, Shao M (2019) Carbon nanotube-linked hollow carbon nanospheres doped with iron and nitrogen as single-atom catalysts for oxygen reduction reaction in acidic solutions. J Mater Chem A 7:14478 – 14482. doi: 10.1039/c9ta00508k
- [22] Sa YJ, Seo DJ, Woo J, et al (2016) A General Approach to Preferential Formation of Active Fe-Nx Sites in Fe-N/C Electrocatalysts for Efficient Oxygen Reduction Reaction. J Am Chem Soc 138:15046 – 15056. doi: 10.1021/jacs.6b09470

ประวัติย่อของผู้วิจัย

## ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวธนพร จันทรโคตร
วัน เดือน ปีเกิด	14 ตุลาคม 2539
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	169 หมู่ 4 ตำบลธาตุพนม อำเภอธาตุพนม
	จังหวัดนครพนม รหัสไปรษณีย์ 48110
ตำแหน่งปัจจุบัน	ครูผู้ช่วย
สถานที่ทำงาน	โรงเรียนธาตุพนม ตำบลธาตุพนม อำเภอธาตุพนม
	จังหวัดนครพนม รหัสไปรษณีย์ 48110
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2558	ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6
	โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย มุกดาหาร
พ.ศ. 2563	การศึกษาบัณฑิต (กศ.บ.) สาขาวิชาฟิสิกส์
	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2565	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาฟิสิกส์
	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร