



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

การสังเคราะห์และทดสอบสมบัติคาร์บอนดอทนำไฟฟ้าจากเปลือกผลไม้เพื่อใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่
Synthesis and Characterization of Conductive Carbon Dot from Fruit Peels for Next Generation
Electronics

รหัสโครงการ 4707787

โดย

ภูมิรัตน์ นวรัตน์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เดือน สิงหาคม ปี พ.ศ. 2568

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยด้วยวิธีการไมโครเวฟโดยใช้น้ำเป็นสารละลาย และสามารถสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยที่ความสูงต่างกันสามระดับ ออกมาเป็นสารละลายคาร์บอนดอท CD1, CD2 และ CD3 ซึ่งเป็นสารละลายใสสีน้ำตาล แสดงสมบัติเรืองแสงที่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่าในที่มืดเมื่อกระตุ้นด้วยแสง UV ที่ความยาวคลื่น 395 nm ออกมาเป็น สีฟ้า สีฟ้าอมเขียว และสีเขียว ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ขนาดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด TEM พบว่า คาร์บอนดอท ในงานวิจัยนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1.5 - 4.5 nm ผลการวิเคราะห์ขนาดของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค DLS พบว่าคาร์บอนดอทในสารละลายมีเส้นผ่านศูนย์กลางจากเฉลี่ยในช่วง 90 - 183 nm เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมี ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ ด้วย Raman, FTIR, UV-Vis และ NMR ผลการวิเคราะห์ FTIR เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าพบหมู่ฟังก์ชัน C=C, C=O, C-H และ O-H ในทั้งสามตัวอย่างคาร์บอนดอท ผลการวิเคราะห์ UV-Vis ยืนยันการมีของหมู่ฟังก์ชัน C=C และ C=O ในทั้งสามตัวอย่างคาร์บอนดอท ผลการวิเคราะห์ขนาดและทางเคมียืนยันความเป็นคาร์บอนดอทของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้ทั้งสามที่มีขนาดต่างกัน มีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกันแต่ไม่เหมือนกัน ความเข้มข้นของน้ำตาลในเปลือกกล้วยต่างระดับ ความสุกกันอาจเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแตกต่างของตัวอย่างคาร์บอนดอททั้งสามชนิด นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบตัวอย่างคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค C-AFM และ CV รวมถึงมีการทำ simulation เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์ C-AFM พบว่า คาร์บอนดอททั้งสามตัวอย่างนำไฟฟ้าได้น้อยกว่า Rh/Au junction โดย Rh/CD1/Au นำไฟฟ้าได้ดีที่สุดใน molecular junction จากสามตัวอย่างคาร์บอนดอท ผลการวิเคราะห์ CV พบว่าการตอบสนองของความเข้มกระแสต่อความต่างศักย์ เพิ่มขึ้นจาก CD1, CD2 และ CD3 ตามลำดับ ท้ายที่สุดผู้วิจัยได้ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยเทคนิค Density Functional Theory (DFT) ของคาร์บอนดอทระหว่างอะตอมโลหะสองอะตอมในรูปแบบที่แตกต่างกัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่า band gap ของคาร์บอนดอทเมื่ออะตอมของโลหะเปลี่ยนแปลงไปเป็นการยืนยันถึงแนวทางในการควบคุมสมบัติทางไฟฟ้าของโมเลกุลคาร์บอนดอทได้โดยการเปลี่ยนขั้วไฟฟ้า

คำสำคัญ : คาร์บอนดอท, กลไกการนำไฟฟ้า, กลไกการสังเคราะห์

Abstract

In this research, we successfully developed a method to synthesize carbon dots from banana peel using water as solution via microwave radiation. Then we synthesized three different carbon dots solution namely CD1 CD2 and CD3 from banana peel at three different maturity stages. As synthesized solutions appeared with clear brown color at natural light. When exposed to 395 nm UV light source CD1 CD2 and CD3 emitted sky blue, turquoise, and green respectively. The size of carbon dot was estimated to 1.5 - 4.5 nm and 90 - 183 nm via Transmission Electron Microscopy (TEM) and Dynamic Light Scattering (DLS), respectively. Raman Spectroscopy, Fast Fourier Infrared (FTIR) spectroscopy, Ultraviolet-Visible (UV-vis) spectroscopy analysis and Nuclear Magnetic Resonance (NMR) spectroscopy were performed on carbon dots to determine its chemical properties. C=C, C=O, C-H and O-H functional groups are identified in all three carbon dots samples. In addition, C=C and C=O presents were confirmed in UV-vis analysis result. From particles size measurement and chemical analyses, the status of three samples is confirmed as carbon dots with different sizes. Three carbon dots share similar but not identical chemical compositions. These differences are likely the consequence of the different sugar content intrinsic to the banana peel maturity stage. In addition, we study the electrical properties of carbon dot samples using conductive Atomic Force Microscopy (C-AFM) and Cyclic Voltammetry (CV). Using C-AFM, it is revealed that all carbon dot molecular junctions were less conductive than Rh/Au metal junction. Rh/CD1/Au is the best conductor among three carbon dots samples. In CV measurement, the rate of change of current density changes with respect to voltage increased from CD1 CD2 and CD3, consecutively. Finally, the Density Functional theory simulation of carbon dot sandwiched between two metal atoms in various types. The alteration of carbon dot bandgap was predicted with different choices of metal atoms. This simulation result supports the potential of carbon dot as a new generation electronic due to its tunability with choice of metal electrodes.

Keyword : carbon dot, conduction mechanism, synthesis mechanism

กิตติกรรมประกาศ

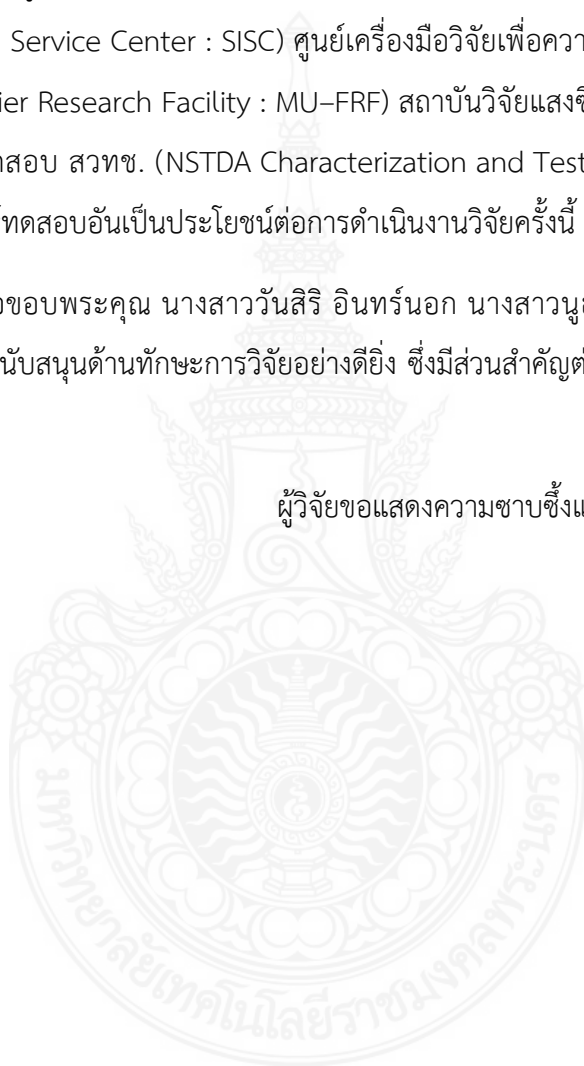
โครงการวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี อันเป็นผลมาจากการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ผ่านงบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF) ตลอดจนการสนับสนุนด้านเครื่องมือและสถานที่วิจัยจากสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และบริการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (Scientific Instrument and Service Center : SISC) ศูนย์เครื่องมือวิจัยเพื่อความเป็นเลิศ มหาวิทยาลัยมหิดล (Mahidol University Frontier Research Facility : MU-FRF) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และศูนย์บริการวิเคราะห์ทดสอบ สวทช. (NSTDA Characterization and Testing Service Center : NCTC) สำหรับการให้บริการวิเคราะห์ทดสอบอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ นางสาววันสิริ อินทร์นอก นางสาวนุชา ยาแลแด และนางสาวชุตติกาญจน์ นพพันธ์ ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านทักษะการวิจัยอย่างดียิ่ง ซึ่งมีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จของโครงการวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอแสดงความซาบซึ้งและขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 แนวคิด ทฤษฎี และสมมติฐานงานวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้.....	6
2.1.1 กล้วยหอม.....	6
2.1.2 เปลือกกล้วย	7
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.2 การทดสอบคุณสมบัติคาร์บอนดอท (Carbon Dots, CDs)	11
2.2.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและขนาดอนุภาค	11
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง TEM และ Nano Particle Analyzer.....	12
2.2.2 การศึกษาสมบัติทางเคมี.....	14
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง FTIR	15

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง Raman	16
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง NMR	20
2.2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง (Photoluminescence).....	21
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง Fluorescence และ UV-Visible	23
2.2.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties).....	27
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง Cyclic Voltammetry (CV)	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	29
3.1 แผนการดำเนินงาน	29
3.1.1 การพัฒนาการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ไทย.....	29
3.1.2 การวิเคราะห์และพิสูจน์ความเป็นคาร์บอนดอท.....	29
3.1.3 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนดอท	29
3.1.4 การ Simulation เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนดอท	29
3.2 การพัฒนาการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ไทย	29
3.2.1 การเตรียมผงเปลือกกล้วย.....	30
3.2.2 การวิเคราะห์ภาพถ่ายก่อน – หลังอบ.....	31
3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมผงเปลือกกล้วย.....	31
3.2.4 การสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากผงเปลือกกล้วยด้วยเทคนิค Microwave.....	32
3.2.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์	33
3.3 การศึกษาคุณสมบัติความเป็นนาโนคาร์บอนดอท	33
3.3.1 สารละลายคาร์บอนดอท.....	33
3.3.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและขนาดอนุภาค	34
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางเคมี.....	35
3.3.4 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง (Photoluminescence).....	36

3.3.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ คาร์บอนดอท.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง	40
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและขนาดอนุภาค	40
4.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ TEM.....	40
4.1.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ Size distribution	41
ตารางที่ 1 ตารางแสดงผล Size distribution จากการทดสอบ Dynamic light scattering (DSL).....	41
4.2 การศึกษาสมบัติทางเคมี.....	43
4.2.1 การศึกษาสมบัติทางเคมี FTIR	43
4.2.2 การศึกษาสมบัติทางเคมี Raman.....	44
4.2.3 การศึกษาสมบัติทางเคมี NMR.....	45
4.3 การศึกษาสมบัติทางแสง.....	49
4.3.1 การศึกษาสมบัติทางแสง Fluorescent	49
4.3.2 การศึกษาสมบัติทางแสง UV-Vis	52
4.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยไฟฉาย UV	53
4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า.....	54
4.4.1 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า AFM ด้วย Rh/Au junction ในช่วงความต่างศักย์ -2V ถึง 2V	54
ตารางที่ 2 ตารางแสดงผล Rh/Au junction ในช่วงความต่างศักย์ -2V ถึง 2V	56
4.4.2 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า Cyclic Voltammetry.....	57
4.5 Simulation	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	62
ข้อเสนอแนะ	63
อ้างอิง	64
ประวัติผู้วิจัย	66

สารบัญตาราง

ตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ตารางแสดงผล Size distribution จากการทดสอบ Dynamic light scattering (DSL)	41
ตารางที่ 2 ตารางแสดงผล Rh/Au junction ในช่วงความต่างศักย์ -2V ถึง 2V	56



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1 แสดงสารชีวภาพต่าง ๆ ที่สามารถนำมาสังเคราะห์เป็นคาร์บอนดอทได้ [1].....	4
รูปที่ 2 แสดงแผนภูมิสรุปตัวอย่างการสังเคราะห์คาร์บอนดอท [1].....	4
รูปที่ 3 การสังเคราะห์เมล็ดถั่วธรรมชาติด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล [2].....	8
รูปที่ 4 การสังเคราะห์ (CQD) จากเปลือกกล้วยด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล [10].....	9
รูปที่ 5 การสังเคราะห์ (CQDs) จากสารสกัดใบพืชสมุนไพร Calotropis gigantea โดยวิธีไมโครเวฟ [11].....	10
รูปที่ 6 TEM ของคาร์บอนดอทจากเปลือกส้มที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล [3].....	12
รูปที่ 7 TEM ของคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล [12].....	13
รูปที่ 8 TEM ของคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล [10].....	13
รูปที่ 9 FTIR ของคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วย [10]	15
รูปที่ 10 คาร์บอนดอทจากเมล็ดถั่วธรรมชาติ CB-CD (a) สเปกตรัม Raman และ (b) สเปกตรัม FTIR [2].....	16
รูปที่ 11 คาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยสเปกตรัม Raman [10]	17
รูปที่ 12 คาร์บอนดอทจากเปลือกส้มสเปกตรัม Raman [3].....	18
รูปที่ 13 คาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยสเปกตรัม Raman [12]	19
รูปที่ 14 สเปกตรัม NMR (a) ^1H และ (b) ^{13}C [11]	20
รูปที่ 15 สเปกตรัม NMR ^{13}C [3]	21
รูปที่ 16 (a, b) สเปกตรัม UV-vis (c, d) สเปกตรัม Fluorescence [10]	23
รูปที่ 17 (a) สเปกตรัม UV-vis (b) สเปกตรัม Fluorescence [12]	24
รูปที่ 18 (a) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-visible (b) สเปกตรัม Fluorescence [3]	25
รูปที่ 19 (a) คาร์บอนดอทภายใต้แสงธรรมชาติ และแสง UV (b) สเปกตรัม Fluorescence [10].....	26
รูปที่ 20 กราฟ Cyclic Voltammetry CV [12]	28
รูปที่ 21 (a) กล้วยดิบ, (b) กล้วยสุก, และ (c) กล้วยสุกมาก.....	30
รูปที่ 21 (a) กล้วยดิบ, (b) กล้วยสุก, และ (c) กล้วยสุกมาก.....	30
รูปที่ 22 (a) เปลือกกล้วยดิบ, (b) เปลือกกล้วยสุก, และ (c) เปลือกกล้วยสุกมาก	30
รูปที่ 22 (a) เปลือกกล้วยดิบ, (b) เปลือกกล้วยสุก, และ (c) เปลือกกล้วยสุกมาก	30
รูปที่ 23 ตัดเปลือกกล้วยให้ได้ขนาด 2 x 2 cm ก่อนอบแห้ง.....	31
รูปที่ 24 อบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	31

รูปที่ 25	วิธีการสังเคราะห์จากผงเปลือกกล้วยด้วยเทคนิค Microwave	32
รูปที่ 26	สารละลายคาร์บอนดอท CD1, CD2 และ CD3 แสงไฟปกติ และแสงไฟ UV 395 nm	33
รูปที่ 27	เตรียมสารละลายคาร์บอนดอทส่งทดสอบ TEM และ Nano Particle Analyzer	34
รูปที่ 28	เตรียมสารละลายคาร์บอนดอทส่งทดสอบ NMR	35
รูปที่ 29	เตรียมสารละลายคาร์บอนดอทส่งทดสอบ Raman	36
รูปที่ 30	ทดสอบสมบัติทางแสง ก่อน freeze dryer	36
รูปที่ 31	CD1,CD2,CD3 หยดลงบนฟิล์มทอง	37
รูปที่ 32	(Au) ฟิล์มทองเปล่า, (CD1, CD2 และ CD3) หยดบนฟิล์มทอง	38
รูปที่ 33	CD1,CD2, และ CD3 หยดลงบนโพรบ glassy carbon voltammetry	39
รูปที่ 34	การศึกษาลักษณะทางกายภาพ TEM (a) CD1 , (b) CD2 และ (c) CD3	40
รูปที่ 35	แสดงค่า Diameter ของอนุภาค CD1 CD2 และ CD3 ที่วิเคราะห์ TEM	41
รูปที่ 36	แสดงค่า Diameter Average Size distribution CD1, CD2 และ CD3	42
รูปที่ 37	ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค FTIR.....	43
รูปที่ 38	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy	44
รูปที่ 39	CD1 (a) ^1H -NMR และ (b) ^{13}C -NMR	45
รูปที่ 40	CD2 (a) ^1H และ (b) ^{13}C	46
รูปที่ 41	CD3 (a) ^1H และ (b) ^{13}C	47
รูปที่ 42	แสดงสเปกตรัม Fluorescent ของตัวอย่างชุด 202367	49
รูปที่ 43	แสดงสเปกตรัม Fluorescent ของตัวอย่างชุด 30567	50
รูปที่ 44	ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy.....	52
รูปที่ 45	แสดงลักษณะสีของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้.....	53
รูปที่ 46	การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค I-V.....	54
รูปที่ 47	ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry	57
รูปที่ 48	การจำลองโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนดอท.....	59
รูปที่ 49	การจำลองโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนดอท.....	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้พัฒนามาอย่างต่อเนื่องมากกว่า 50 ปี โดยสามารถลดขนาดอุปกรณ์และเพิ่มประสิทธิภาพได้ทุก ๆ 18 เดือน ตามแนวโน้มที่ Moore's Law ได้คาดการณ์ไว้ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันเทคโนโลยีดังกล่าวเริ่มเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว เนื่องจากข้อจำกัดทางฟิสิกส์ เมื่อระบบอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลงจนปรากฏการณ์ควอนตัมส่งผลให้พฤติกรรมทางไฟฟ้าของระบบเปลี่ยนแปลงไป จากข้อจำกัดนี้ นักวิจัยทั่วโลกจึงให้ความสนใจกับการพัฒนาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ Next Generation Electronics ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบวัสดุสองมิติ 2D Materials, อิเล็กทรอนิกส์เชิงโมเลกุล Molecular Electronics หรือวัสดุนาโนชนิดใหม่ แม้ว่ามีแนวทางที่หลากหลาย แต่ทั้งหมดล้วนตั้งอยู่บนพื้นฐานของความพยายามในการควบคุมพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ผ่านปรากฏการณ์ควอนตัม เนื่องจากปรากฏการณ์ควอนตัมนี้เองเป็นสาเหตุหลักของการอิ่มตัวของเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นการปฏิวัติทางเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จะเกิดขึ้นอย่างแน่นอนขึ้นอยู่กับว่าจะเกิดขึ้นเมื่อไหร่ และหากประเทศไทยไม่มีองค์ความรู้ที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนแปลงนี้ ประเทศไทยจะเสียโอกาสในการแข่งขันทางด้านเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคต

นอกจากนี้ประเทศไทยในปัจจุบันยังติดอยู่ในภาวะ “กับดักรายได้ปานกลาง” แม้จะมีความได้เปรียบด้านทรัพยากรธรรมชาติและสภาพภูมิอากาศเอื้อต่อการผลิตสินค้าเกษตรเพื่อการส่งออก แต่กลับประสบปัญหาการสร้างมูลค่าเพิ่มจากสินค้าเกษตร เนื่องจากขาดการประยุกต์ใช้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอย่างเหมาะสม อีกทั้งโครงสร้างการผลิตยังพึ่งพาแรงงานมากแต่ได้ผลตอบแทนน้อย นอกจากนี้จากอัตราการเกิดและการเสียชีวิตที่น้อยลง ทำให้ประเทศไทยเริ่มเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ ซึ่งจะทำให้จำนวนแรงงานของประเทศลดลง หากประเทศไทยยังไม่สามารถก้าวข้ามกับดักรายได้ปานกลางได้ ประเทศไทยจะมีแนวโน้มเข้าสู่วิกฤติเงินเฟ้อ เนื่องจากกำลังการผลิตของประเทศจะลดลงตามจำนวนแรงงาน เพื่รองรับการเปลี่ยนผ่านไปสู่อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ ประเทศไทยจำเป็นต้องเตรียมความพร้อมด้านองค์ความรู้พื้นฐาน โดยเฉพาะความเข้าใจพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวัสดุในระดับนาโน พร้อมทั้งควรใช้จุดแข็งด้านเกษตรกรรมและความหลากหลายทางชีวภาพเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น เปลือกกล้วย ซึ่งเป็นวัตถุดิบราคาต่ำและอุดมด้วยคาร์บอน ในการสังเคราะห์คาร์บอนดอท (Carbon Dots: CDs) วัสดุนาโนที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 10 nm โดดเด่นด้วยคุณสมบัติการเรืองแสงและความยืดหยุ่นทางเคมี สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย ทั้งในเซนเซอร์

ชีวภาพ ไบโออิมเมจจิง ตัวเร่งปฏิกิริยา และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ งานวิจัยนี้จะใช้เปลือกกล้วยใน 3 ระดับความสุก (ดิบ สุก และสุกมาก) ผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟ 750 วัตต์ ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และลดการใช้สารเคมี จากนั้นจะทำการวิเคราะห์สมบัติของคาร์บอนดอทางกายภาพ การกระจายขนาดอนุภาคด้วย TEM, Size Distribution วิเคราะห์สมบัติทางเคมีด้วย FTIR, Raman, NMR วิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วย Fluorescence, UV-Vis, การกระตุ้นด้วยไฟฉาย UV 395 nm วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วย AFM, Cyclic Voltammetry รวมถึงการจำลองเชิงทฤษฎี Simulation เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์กลไกการนำไฟฟ้า

ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้จะทำให้เข้าใจอิทธิพลของระดับความสุกของเปลือกกล้วยต่อคุณสมบัติของคาร์บอนดอท และสามารถคัดเลือกช่วงสุกที่เหมาะสมที่สุดในการใช้เป็นวัตถุดิบต้นทางสำหรับการผลิตคาร์บอนดอทคุณภาพสูง ซึ่งจะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่ช่วยให้ประเทศไทยเพิ่มศักยภาพด้านอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่อย่างยั่งยืน ควบคู่ไปกับการสร้างมูลค่าเพิ่มจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร คุณภาพสูง เพื่อประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่อย่างยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 สังเคราะห์คาร์บอนดอทที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี จากเปลือกผลไม้
- 1.2.2 เข้าใจกลไกการสังเคราะห์ (synthesis mechanism) คาร์บอนดอทนำไฟฟ้าจากเปลือกผลไม้
- 1.2.3 เข้าใจกลไกการนำไฟฟ้า (electrical conduction mechanism) ของคาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีขอบเขตในการดำเนินการ ดังต่อไปนี้

- 1.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์
ใช้เปลือกกล้วยสายพันธุ์หอมทอง ซึ่งจัดแบ่งตามระดับความสุกออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ กล้วยดิบ กล้วยสุก และกล้วยสุกมาก
- 1.3.2 กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนดอท
ใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (Microwave-assisted method) ที่กำลังไฟฟ้า 750 วัตต์ ในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากผงเปลือกกล้วย โดยไม่มีการเติมสารเคมีปรับปรุงสมบัติเพิ่มเติม
- 1.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของคาร์บอนดอท
ทดสอบคุณสมบัติของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละช่วงความสุกของกล้วย ครอบคลุมด้านต่าง ๆ ดังนี้

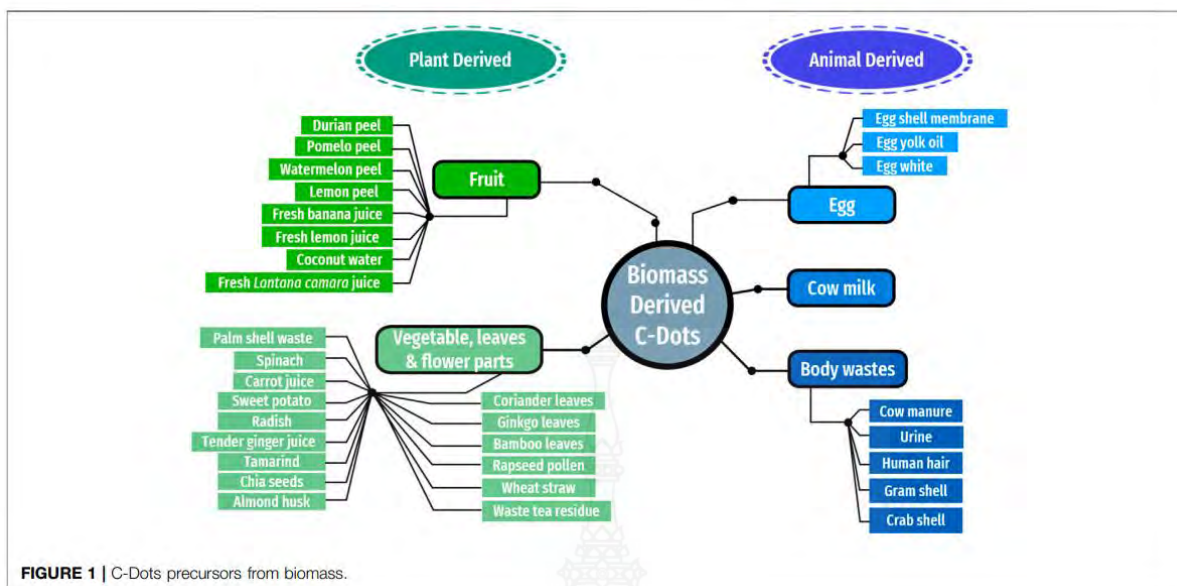
- (ก) ลักษณะทางกายภาพ: วิเคราะห์ด้วย TEM และการกระจายขนาดอนุภาค
- (ข) สมบัติทางเคมี: วิเคราะห์ด้วย FTIR, Raman และ NMR
- (ค) สมบัติทางแสง: ตรวจสอบด้วย Fluorescence Spectroscopy, UV-Vis Spectroscopy และการกระตุ้นด้วยไฟฉาย UV ที่ความยาวคลื่น 395 นาโนเมตร
- (ง) สมบัติทางไฟฟ้า: วิเคราะห์ด้วย AFM และ Cyclic Voltammetry
- (จ) การจำลองสมบัติทางทฤษฎี (Simulation) ศึกษากลไกการนำไฟฟ้าในระดับโมเลกุล

1.3.4 สถานที่ดำเนินการทดสอบ

การทดสอบ NMR, FTIR, Raman และ UV-Vis Spectroscopy ดำเนินการที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยเพื่อความ เป็นเลิศ มหาวิทยาลัยมหิดล ส่วน TEM, AFM และ Size Distribution ทดสอบที่ศูนย์บริการวิเคราะห์ ทดสอบแห่งชาติ (NCTC), สวทช.

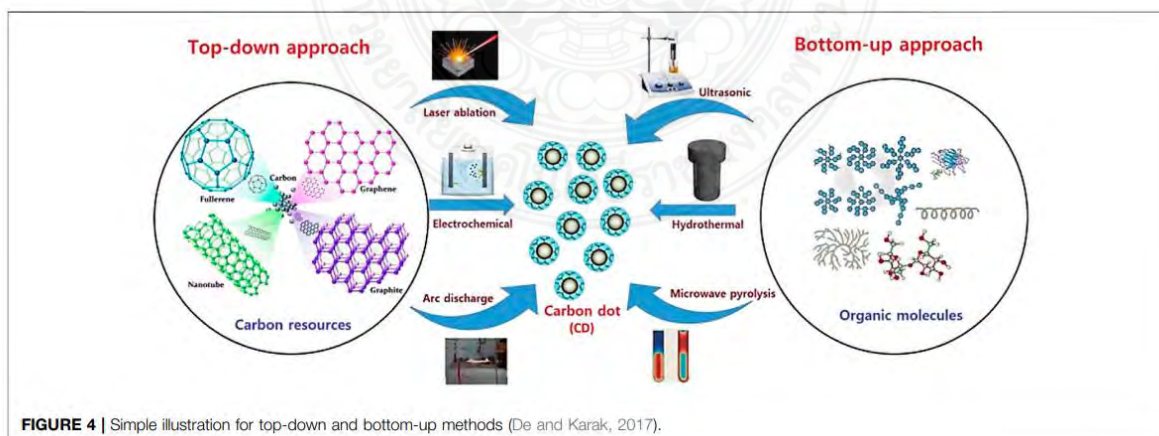
1.4 แนวคิด ทฤษฎี และสมมติฐานงานวิจัย

คาร์บอนดอท คือ สารกลุ่มใหม่ที่เพิ่มขึ้นมาของ สารระดับนาโนในกลุ่มคาร์บอน (carbon-based nanomaterial) ซึ่งถูกค้นพบโดยความบังเอิญจากการสังเคราะห์ single-walled carbon nanotubes (CNTs) ด้วยวิธี arc discharge คาร์บอนดอท จัดเป็นวัสดุนาโนประเภท หนึ่งมิติ เช่นเดียวกับ fullerene เป็นต้น คาร์บอนดอทมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่า 10 nm มีรูปร่างเกือบเป็นทรงกลม มีแกนเป็นผลึกประเภทไม่อสัณฐาน ประกอบด้วย โครงสร้างคาร์บอนแบบ sp^2 เป็นส่วนมาก ในปัจจุบันคาร์บอนดอทได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็น จำนวนมากในฐานะตัวแทนของควอนตัมดอทจากโลหะ (metal-based quantum dot) ที่มีความเป็นพิษสูงและมีข้อจำกัดต่องานทางชีวภาพและสิ่งแวดล้อม ซึ่งต่างจากคาร์บอนดอทที่มีการรายงานว่ามีความเข้ากันได้ทางชีวภาพและสิ่งแวดล้อมที่ดีกว่า เป็นพิษน้อยกว่า นอกจากนี้ยังมี ค่าความเข้มการเรืองแสงสูง ความเสถียรทางเคมีสูง และมีสมบัติทางชีวภาพ ทางเคมี และทางกายภาพที่ดี เหมาะสมกับประยุกต์ใช้ในหลายด้าน



รูปที่ 1 แสดงสารชีวภาพต่าง ๆ ที่สามารถนำมาสังเคราะห์เป็นคาร์บอนดอทได้ [1]

คาร์บอน เป็นหนึ่งในสารที่หาได้ง่ายที่สุดบนผิวโลก ซึ่งสารประกอบคาร์บอนที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์คาร์บอนดอทนั้นมีหลากหลายมาก รวมถึงขยะทางชีวภาพจากอาหาร อาทิ ขยะชีวภาพจากผลไม้ต่าง ๆ เช่น เปลือกทุเรียน เปลือกส้มโอ เปลือกแตงโม เปลือกมะนาวเหลือทิ้ง น้ำกล้วย น้ำมะนาวเหลือทิ้ง น้ำมะพร้าว เป็นต้น ขยะชีวภาพจากพืชผัก เช่น น้ำแครอท มันหวาน หัวไชเท้า น้ำขิง มะขาม เมล็ดเจีย ใบผักชี ใบแปะก๊วย เป็นต้น หรือแม้แต่ ขยะทางชีวภาพจากเปลือกไข่และนมวัวก็สามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทได้เช่นกัน



รูปที่ 2 แสดงแผนภูมิสรุปตัวอย่างการสังเคราะห์คาร์บอนดอท [1]

จากการพัฒนาการสังเคราะห์คาร์บอนดอทสามารถในงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา สามารถแบ่งแนวทางในการสังเคราะห์คาร์บอนออกได้เป็นสองแนวทางหลัก ๆ ได้แก่ การสังเคราะห์จากบนลงล่าง (Top-Down) และล่างขึ้นบน (Bottom-Up) การสังเคราะห์จากบนลงล่าง คือ การสังเคราะห์ด้วยการสลายตัวของคาร์บอนขนาดใหญ่ เช่น แผ่น graphene oxide หรือ เส้นใยคาร์บอน ให้มีขนาดเล็กลงมาในระดับนาโนจนกลายเป็นคาร์บอนดอท โดยใช้แรงทางกายภาพ เช่น วิธีการสังเคราะห์ด้วยเลเซอร์ (laser ablation) การสังเคราะห์ด้วยไฟฟ้า (arc discharge) และการสังเคราะห์ด้วยไฟฟ้าเคมี (electrochemical oxidation) เป็นต้น ในขณะที่การสังเคราะห์แบบล่างขึ้นบน คือ การสังเคราะห์โดยการเลือกสารประกอบคาร์บอนขนาดเล็กในระดับโมเลกุลเพื่อนำมารวมตัวกันจนกลายเป็นโครงสร้างคาร์บอนในระดับนาโนจนกลายเป็นคาร์บอนดอทผ่านกระบวนการสังเคราะห์ เช่น กระบวนการให้ความร้อนผ่านสารละลาย (hydrothermal) การให้ความร้อนโดยปราศจากออกซิเจน (pyrolysis) และการสังเคราะห์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ (microwave irradiation) เป็นต้น รูปที่ 2 แสดงแผนภูมิสรุปตัวอย่างการสังเคราะห์คาร์บอนดอท



บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้

ปัจจุบันการสังเคราะห์คาร์บอนดอทได้รับการพัฒนาให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยมีการลดการใช้สารเคมีที่นำมาเป็นสารตั้งต้นและสารเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ แทนที่ด้วยวัตถุดิบจากธรรมชาติ เช่น ผักผลไม้ และผลผลิตทางการเกษตรอื่น ๆ เนื่องจากวัตถุดิบเหล่านี้ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก จึงเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอนดอท อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณขยะอินทรีย์จากการบริโภคได้ มีงานวิจัยจำนวนมากที่สังเคราะห์คาร์บอนดอทจากผลผลิตหรือส่วนเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น จากเปลือกกล้วย [2] เปลือกส้ม [3] และ เปลือกมะม่วง [4] วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนดอทสามารถทำได้หลากหลาย ทั้งวิธีทางเคมีและกระบวนการทางฟิสิกส์ อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีบางชนิดอาจทำให้คาร์บอนดอทมีความเป็นพิษสูงและจำกัดการนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงมีการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์โดยเน้นใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติมากขึ้น เพื่อให้กระบวนการผลิตทำได้ง่าย รวดเร็ว และมีต้นทุนต่ำ วัตถุดิบจากส่วนเหลือทิ้งทางการเกษตรเปลือกผลไม้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตคาร์บอนดอทอย่างแพร่หลาย

2.1.1 กล้วยหอม

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Musa acuminata* วงศ์ : MUSACEAE เป็นผลไม้หลักชนิดหนึ่งที่ปลูกเพื่อรับประทานในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน [5] เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มีผลขนาดใหญ่และออกผลดก เมื่อสุกจะมีรสหวาน สีเหลือง มีประโยชน์ทางโภชนาการ และยังสามารถแปรรูปได้หลากหลาย ทำให้มีอัตราการบริโภคที่สูงมากในประเทศแถบเอเชียใต้ประเทศไทยมีเกษตรกรผู้ผลิตกล้วยมากเป็นอันดับที่ 20 ของโลก โดยสามารถผลิตได้ปีละถึงแสนตัน มีการส่งออกมากกว่า 3 – 4,000 ตันต่อปี และการบริโภคในไทยมีมากถึง 8 -90,000 ตันต่อปี ซึ่งรูปแบบการบริโภคนั้นมีทั้งการบริโภคผลสด และแปรรูป การแปรรูปนี้อีกกล้วย ทำได้หลากหลายและสามารถเพิ่มมูลค่าได้มาก แต่ในการบริโภคกล้วยไม่ว่าจะทางไหนนั้นย่อมต้องมีเปลือกกล้วยเป็นส่วนเหลือทิ้ง ในอัตราส่วน 1/5 ของน้ำหนักกล้วย แม้จะมีการแปรรูปเปลือกกล้วยบ้างในปัจจุบัน แต่ด้วยปริมาณเปลือกกล้วยจึงเป็นส่วนเหลือทิ้งที่มีมาก เมื่อเทียบกับอัตราการบริโภค [6]

2.1.2 เปลือกกล้วย

เปลือกกล้วยคิดเป็นประมาณ 35% ของน้ำหนักผลสุกสดทั้งหมด แต่ยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์อย่างเต็มศักยภาพ แม้จะมีคุณค่าต่อสุขภาพของมนุษย์และศักยภาพในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบมาตรฐานสำหรับอุตสาหกรรมและครัวเรือนต่างๆ โดยเปลือกกล้วยอุดมไปด้วยใยอาหาร โปรตีน กรดอะมิโนจำเป็น กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน สารต้านอนุมูลอิสระ และโพแทสเซียม [7] โดยทั่วไปเปลือกกล้วยจะถูกทิ้งลงในสิ่งแวดล้อมโดยไม่ผ่านการบำบัดใด ๆ ในบางกรณี เปลือกกล้วยอาจใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์และอาหารสัตว์ได้ เนื่องจากมีแทนนินต่ำ และมีปริมาณเส้นใยสูง [8]

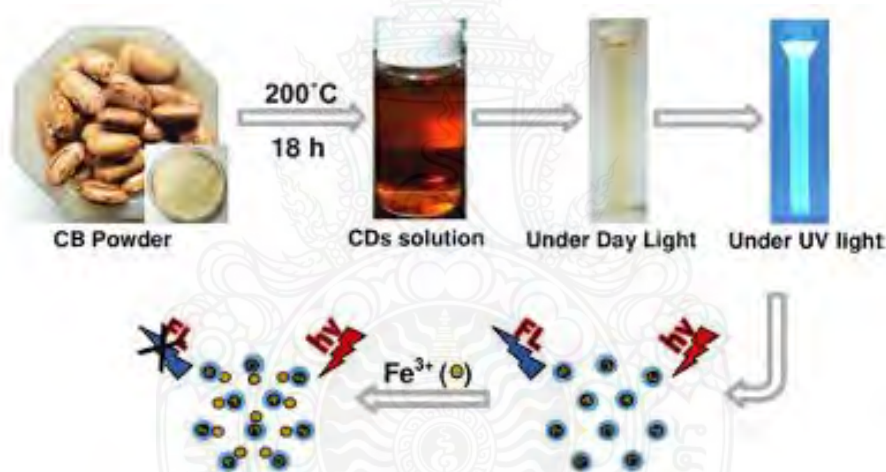
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ ปิยะณัฐ เสถียรพันธุ์ และคณะ ในปี 2564 [4] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนดอท (Carbon Dots: CDs) จากเปลือกมังคุด โดยใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method) ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 170–240 °C เพื่อตรวจสอบผลของอุณหภูมิต่อสมบัติการเรืองแสงและขนาดอนุภาค ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิการสังเคราะห์มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนดอท โดยที่อุณหภูมิ 200 °C ให้ผลการเรืองแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 438 nm ในช่วงของแสงสีฟ้า (blue emission) และได้คาร์บอนดอทที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 3.1 nm การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า การควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลมีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติของคาร์บอนดอท ทั้งในด้านประสิทธิภาพการเรืองแสงและขนาดอนุภาค ซึ่งสามารถนำข้อมูลไปใช้เป็นแนวทางในการปรับสภาวะสังเคราะห์เพื่อให้ได้คาร์บอนดอทที่มีสมบัติที่ต้องการสำหรับงานประยุกต์ต่าง ๆ เช่น เซนเซอร์ วัสดุเรืองแสง หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

งานวิจัยของ จันทรเพ็ญ ทองเหลือง และคณะ ในปี 2565 [9] ได้ศึกษาและพัฒนากระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท (Carbon Quantum Dots: CQDs) จากสารสกัดมัลเบอร์รี่ เพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านชีวการแพทย์ โดยใช้เทคนิคไพโรไลซิสด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave-assisted pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความรวดเร็วและประหยัดพลังงาน ในกระบวนการทดลอง มีการปรับกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟระหว่าง 600–800 วัตต์ และระยะเวลาการสังเคราะห์ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อนสมบัติการเรืองแสงของ CQDs ผลการทดลองพบว่า กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์เป็นเวลา 10 นาที ให้ CQDs ที่มีความเข้มการเรืองแสงสูงสุด โดยเปล่งแสงสีฟ้าภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของการปรับความเป็นกรดของสารละลาย (ด้วย HCl) พบว่าการเติม HCl ส่งผลให้การเรืองแสงของ CQDs เปลี่ยนจากสีฟ้าเป็นสีเขียวอมเหลือง ภายใต้การกระตุ้นด้วยความยาวคลื่นเดียวกัน การเปลี่ยนสีดังกล่าวแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างและสถานะพื้นผิวของอนุภาค ซึ่งมีนัยสำคัญต่อการประยุกต์ใช้งาน ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการควบคุม กำลังไฟฟ้า ระยะเวลา

และความเป็นกรดในการสังเคราะห์สามารถปรับแต่งคุณสมบัติการเรืองแสงของ CQDs ให้เหมาะสมกับการประยุกต์ในด้านชีวการแพทย์ เช่น การถ่ายภาพทางชีวภาพ (bioimaging) และการวิเคราะห์ทางชีวภาพ (biosensing)

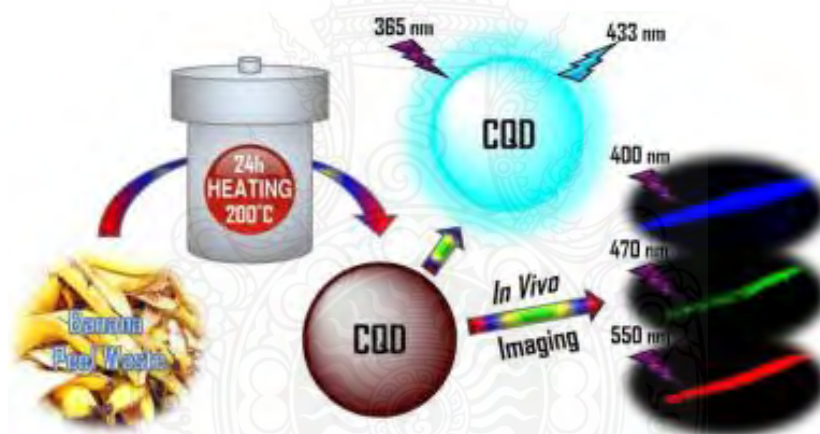
งานวิจัยของ Zulfajri et., 2019 [2] ได้ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนดอทโดยใช้ผงเมล็ดแคโรตซึ่งอบแห้ง ที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่าง ๆ ในการสกัด และการตรวจจับโลหะหนัก Fe^{3+} ด้วยคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ พบว่า การใช้ผงแคโรต 1 กรัม กับ 1.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 25 ml และให้ความร้อนด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลนั้นให้ผลการวาวแสงไม่ต่างกันมาก โดยมีการเปล่งแสงที่ 450 nm ภายใต้ความยาวคลื่นกระตุ้น 380 nm มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 3.96 nm และพบว่าสามารถตรวจจับโลหะหนัก Fe^{3+} ได้ โดยสังเกตจากการเรืองแสงของสารละลายคาร์บอนดอทที่ลดลงเมื่อทำปฏิกิริยากับโลหะ Fe^{3+}



รูปที่ 3 การสังเคราะห์เมล็ดถั่วธรรมชาติด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล [2]

กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเมล็ดถั่วธรรมชาติด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 °C นาน 18 ชั่วโมง และการทดสอบคุณสมบัติการเรืองแสงของสารละลายคาร์บอนดอทภายใต้แสงธรรมชาติและแสงอัลตราไวโอเล็ต UV 350 นาโนเมตร รวมทั้งการศึกษาก่อเกิดคอมเพล็กซ์ระหว่างคาร์บอนดอทกับไอออน Fe^{3+}

งานวิจัยของ Atchudan et al., 2021 [10] มุ่งเน้นการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท (Carbon Quantum Dots: CQDs) จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ เปลือกกล้วยตากแห้ง โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method) ซึ่งเป็นเทคนิคที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนต่ำ กระบวนการสังเคราะห์เริ่มจากการนำเปลือกกล้วยที่ผ่านการอบแห้งและบดละเอียดไปทำปฏิกิริยาในหม้อปฏิกิริยาแบบปิดที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นสารละลายที่ได้ถูกกรองผ่าน เมมเบรนขนาด 0.22 μm เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนและได้สารละลาย CQDs ที่มีความบริสุทธิ์สูง ผลการวิเคราะห์สมบัติพบว่า CQDs ที่ได้มีขนาดอนุภาคนาโนขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอ แสดงสมบัติการเรืองแสงที่ชัดเจนภายใต้การกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต มีเสถียรภาพสูงในสารละลาย และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านการถ่ายภาพทางชีวภาพในร่างกาย (in vivo bioimaging) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของวิธีไฮโดรเทอร์มอล ในการเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ราคาถูกให้กลายเป็นวัสดุนาโนที่มีมูลค่าสูง สามารถนำไปต่อยอดในงานด้านชีวการแพทย์และอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่



รูปที่ 4 การสังเคราะห์ (CQD) จากเปลือกกล้วยด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล [10]

การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท (CQDs) จากเปลือกกล้วยด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200 °C นาน 24 ชั่วโมง และการแสดงคุณสมบัติการเรืองแสงที่หลากหลาย (excitation-dependent emission) รวมถึงศักยภาพในการประยุกต์ใช้สำหรับการถ่ายภาพชีวภาพ (in vivo imaging)

งานวิจัยของ Neetu Sharma et al. 2022 [11] มุ่งเน้นการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท (Carbon Quantum Dots: CQDs) จากใบ *Calotropis gigantea* โดยใช้เทคนิคการสังเคราะห์สีเขียว (Green synthesis) ด้วยไมโครเวฟ (Microwave-assisted method) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สะดวก รวดเร็ว และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการสังเคราะห์เริ่มจากการเตรียมสารละลายสกัดจากใบพืช แล้วนำไปให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลัง 900 วัตต์ โดยตรวจสอบทุก ๆ 1 นาที จนกระทั่งสารละลายแห้ง จากนั้นสารตกค้างที่ได้ถูกละลายกลับด้วยน้ำกลั่น (DI water) เพื่อทำให้เป็นสารละลายใหม่ ขั้นตอนต่อมาคือการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) ที่ความเร็ว 10,000 rpm เป็นเวลา 15 นาที เพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลายใส ส่วนของเหลวที่ได้ถูกกรองผ่าน Syringe filter ขนาด $0.22\ \mu\text{m}$ เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่เหลือ ทำให้ได้สารละลาย CQDs ที่มีความบริสุทธิ์สูง ผลการวิเคราะห์พบว่า CQDs ที่ได้มีขนาดอนุภาคระดับนาโนขนาดเล็กและสม่ำเสมอ มีสมบัติการเรืองแสงเด่นชัด (fluorescence) และมีความเสถียร สามารถนำไปใช้เป็น fluorescent probe สำหรับการถ่ายภาพทางชีวภาพ (bioimaging) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5 การสังเคราะห์ (CQDs) จากสารสกัดใบพืชสมุนไพร *Calotropis gigantea* โดยวิธีไมโครเวฟ [11]

กระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท (CQDs) จากสารสกัดใบพืชสมุนไพร *Calotropis gigantea* โดยวิธีไมโครเวฟ ประกอบด้วยขั้นตอนการบดใบพืช การกรอง การสังเคราะห์ด้วยไมโครเวฟ การปั่นแยก (centrifugation) และการกรองซ้ำ ก่อนนำมาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติการเรืองแสงภายใต้แสงปกติและแสงอัลตราไวโอเล็ต

2.2 การทดสอบคุณสมบัติคาร์บอนดอท (Carbon Dots, CDs)

ในการศึกษาคุณสมบัติของคาร์บอนดอท (Carbon Dots, CDs) จำเป็นต้องวิเคราะห์ในหลากหลายมิติ เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะโครงสร้างและสมบัติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่งผ่าน (Transmission Electron Microscopy: TEM) เพื่อให้ได้ภาพของอนุภาคในระดับนาโนเมตร และการวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Size Distribution) เพื่อประเมินความสม่ำเสมอของอนุภาคที่ได้ จากนั้นจึงศึกษาสมบัติทางเคมีของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) และรามานสเปกโทรสโกปี (Raman) เพื่อระบุหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่อยู่บนผิวของอนุภาค ตลอดจนใช้นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (NMR) เพื่อศึกษาความเชื่อมโยงของโครงสร้างโมเลกุลในระดับอะตอม นอกจากนี้ ยังมีการทดสอบสมบัติทางแสงโดยใช้เทคนิค Fluorescence Spectroscopy เพื่อวัดการเรืองแสงของคาร์บอนดอท และ UV-Visible Spectroscopy สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นต่าง ๆ รวมถึงการทดสอบด้วยไฟฉาย UV เพื่อสังเกตการเรืองแสงด้วยตาเปล่าในเชิงคุณภาพ สำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า จะใช้เทคนิค Atomic Force Microscopy (AFM) เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและความหนาของฟิล์มคาร์บอนดอท พร้อมทั้งใช้ Cyclic Voltammetry (CV) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและศักย์ภาพทางไฟฟ้าเคมีของวัสดุ นอกจากนี้ ยังมีการใช้ซอฟต์แวร์จำลองโมเลกุลในระดับควอนตัม (Molecular Simulation) เช่น DFT (Density Functional Theory) เพื่อศึกษาพลังงานระดับ HOMO-LUMO และโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของคาร์บอนดอทในเชิงทฤษฎี ซึ่งช่วยเสริมความเข้าใจเชิงลึกให้กับผลการทดลองจริง

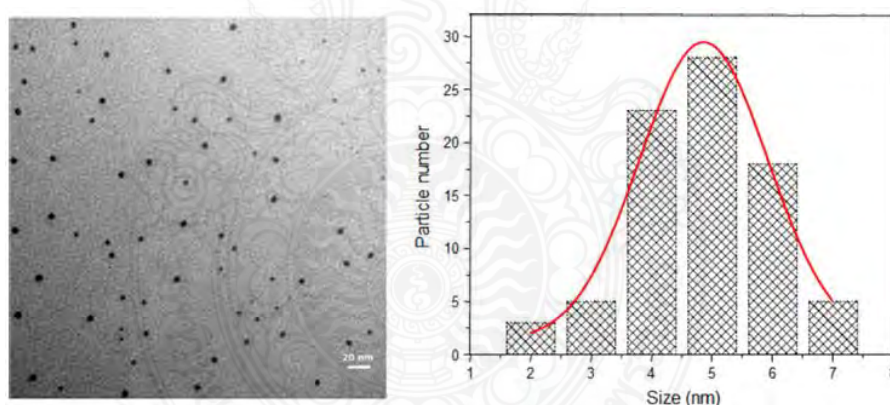
2.2.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและขนาดอนุภาค

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและขนาดของคาร์บอนดอท (Carbon Dots, CDs) ดำเนินการโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ระดับนาโนที่มีความแม่นยำสูง เพื่อยืนยันคุณสมบัติทางกายภาพในระดับนาโนเมตร โดยใช้เทคนิควิเคราะห์สำคัญ 2 ประเภท ได้แก่ TEM และ Nano Particle Analyzer การวิเคราะห์ทั้งหมดดำเนินการที่สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมแห่งชาติ (สวทช.) โดยผ่านศูนย์บริการวิเคราะห์ทดสอบ (NSTDA Characterization and Testing Service Center: NCTC) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีความเชี่ยวชาญด้านการวิเคราะห์วัสดุระดับนาโน และมีเครื่องมือวิเคราะห์ที่ทันสมัยและแม่นยำสูง โดยมีรายละเอียดดังนี้

การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy, TEM) ใช้สำหรับศึกษารูปร่างและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคคาร์บอนดอทในระดับนาโนเมตร โดยภาพจาก TEM สามารถแสดงลักษณะภายนอกของอนุภาค รวมถึงพฤติกรรมการรวมตัวหรือ การกระจายตัวของอนุภาคในภาพรวมได้อย่างชัดเจน สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้เครื่อง TEM รุ่น JEM-2100Plus ที่แรงดันไฟฟ้า 100 kV

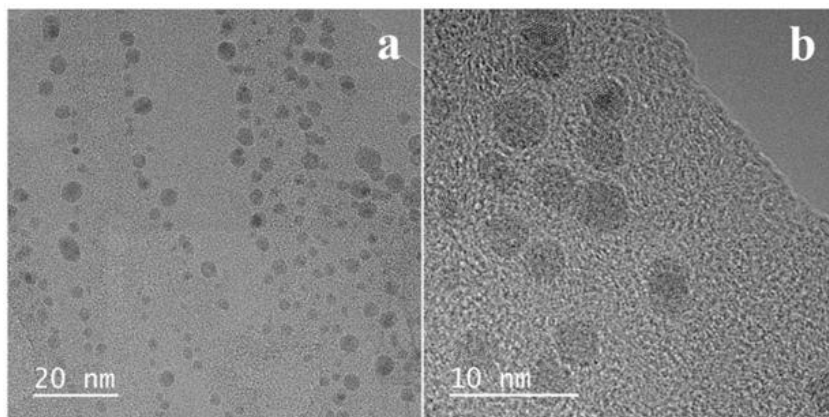
การศึกษาลักษณะทางกายภาพและขนาดอนุภาคของวัสดุนาโน (Nano Particle Analyzer) การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุนาโน เครื่องมือที่มีความสำคัญคือเครื่องวิเคราะห์อนุภาคนาโน (Nano Particle Analyzer) ซึ่งทำหน้าที่วัดขนาดอนุภาคศักย์ไฟฟ้าผิว (Zeta Potential) และคุณสมบัติอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่อง HORIBA nano Particle SZ-100V2 Series ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์อนุภาคด้วยเทคนิค Dynamic Light Scattering (DLS) ร่วมกับ Electrophoretic Light Scattering (ELS) เครื่องรุ่นนี้สามารถวิเคราะห์ขนาดอนุภาคได้ในช่วง 0.3 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร และสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าผิว (Zeta Potential) ได้อย่างแม่นยำ เหมาะสำหรับวัสดุประเภทคอลลอยด์ สารแขวนลอย หรือสารละลายที่มีอนุภาคนาโน โดยใช้น้ำกลั่นหรือตัวทำละลายที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่าง

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง TEM และ Nano Particle Analyzer



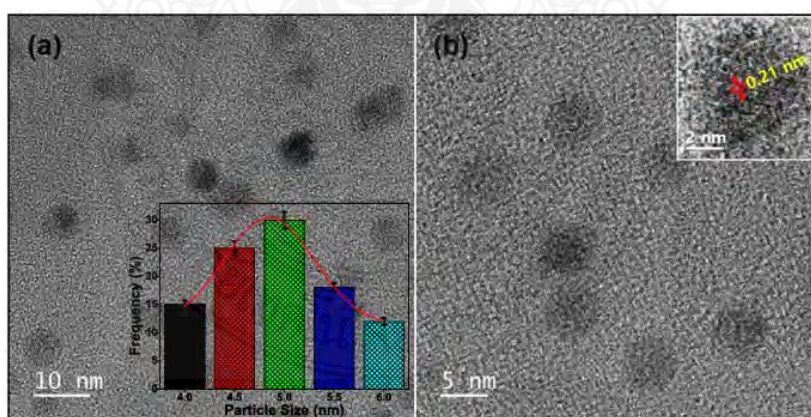
รูปที่ 6 TEM ของคาร์บอนดอทจากเปลือกส้มที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล [3]

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าคาร์บอนดอทจากเปลือกส้มเป็นอนุภาคนาโนที่กระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน มีพื้นฐานวิทยาทางกลและผลของ Nano Particle Analyzer ยืนยันขนาดของคาร์บอนดอทว่ามีขนาดตั้งแต่ 2-7 นาโนเมตร



รูปที่ 7 TEM ของคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล [12]

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของจุดคาร์บอนมีความสม่ำเสมอมากในกริดทองแดง แม้ว่าจะมีขนาดแตกต่างกันก็ตาม TEM ในความละเอียดสูงแสดงให้เห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดคาร์บอนอยู่ในช่วง 3 - 6 นาโนเมตร แม้ว่าจุดคาร์บอนจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน แต่คุณสมบัติของ PL ก็ไม่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ จุดคาร์บอนใน (b) ยังแสดงนิวเคลียส (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.128 นาโนเมตร) ของภาพ TEM ความละเอียดสูง



รูปที่ 8 TEM ของคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล [10]

จากรูปที่ 8 แสดงช่วงขนาดอนุภาคภายในขอบเขต 4 - 6 นาโนเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 5 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีการกระจายตัวแคบและมีรูปร่างเป็นทรงกลม ฮิสโตแกรมขนาดอนุภาคของ CQD แสดงให้เห็นว่า CQD ที่สังเคราะห์มีขอบโครงตาข่ายที่ดี ซึ่งบ่งชี้ถึงโครงสร้าง

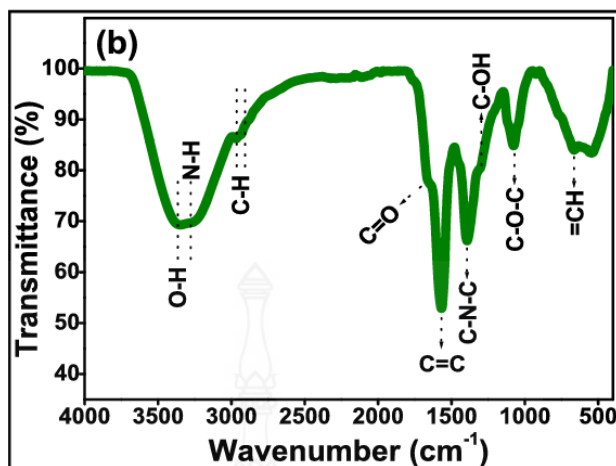
ผลึกที่ดี ส่วนด้านในของ CQD มีผลึกสูงเมื่อเทียบกับพื้นผิวด้านนอกของ CQD ซึ่งยืนยันได้จากแทรกใน (b) CQD แสดงระยะห่างของโครงตาข่ายประมาณ 0.21 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากระนาบ (100) ของกราฟีนทั่วไป

2.2.2 การศึกษาสมบัติทางเคมี

การศึกษาสมบัติทางเคมีของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมี และโครงสร้างของคาร์บอนที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาค ซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติของคาร์บอนดอท ในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างวัสดุถูกส่งไปทดสอบ 4 เทคนิค ได้แก่ FTIR, Raman, NMR และ UV-Vis โดยดำเนินการทั้งหมดที่ ศูนย์เครื่องมือวิจัยเพื่อความเป็นเลิศ มหาวิทยาลัยมหิดล (Central Instrument Facility for Excellence in Research, Mahidol University) รายละเอียดแต่ละเทคนิคมีดังนี้

FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่ใช้ในการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่อยู่บนพื้นผิวของคาร์บอนดอท โดยการวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสาร ซึ่งสามารถระบุการมีอยู่ของพันธะเคมีต่าง ๆ ได้ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$), หมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$), หมู่อะมิโน ($-NH_2$), หมู่คาร์บอนิล ($C=O$) พันธะ $C-O$, $C=C$ หรือ $C-H$ เป็นต้น ข้อมูลจาก FTIR สามารถช่วยยืนยันว่าคาร์บอนดอทมีหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้มีความสามารถในการละลายน้ำ หรือเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นได้ดี ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญต่อการนำไปใช้งาน อิเล็กทรอนิกส์งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง FTIR Spectrometer รุ่น Nicolet iS50 จาก Thermo Scientific, USA สามารถวัดได้ในช่วงคลื่น $80-7,000\text{ cm}^{-1}$

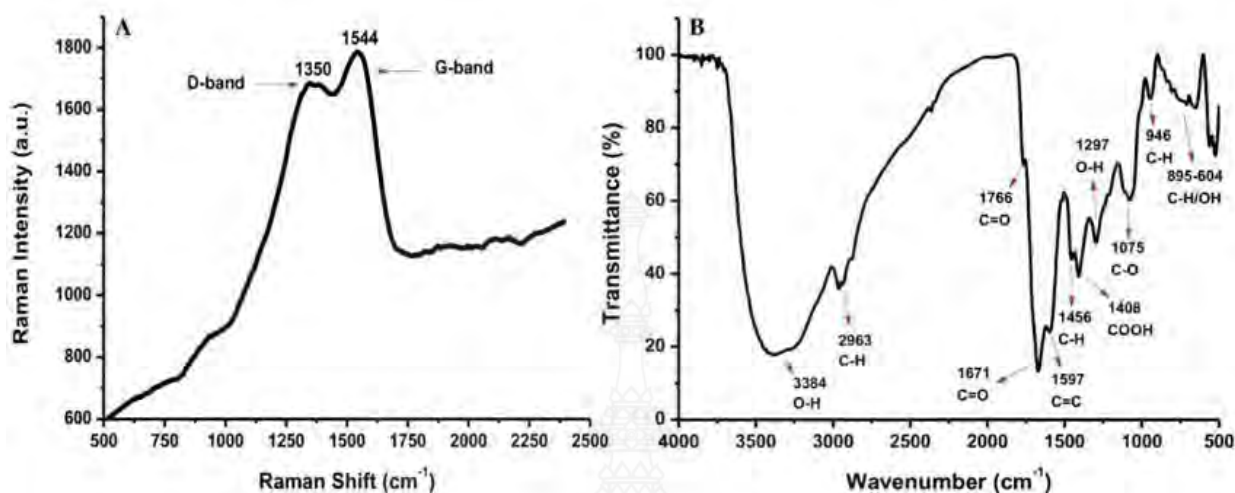
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง FTIR



รูปที่ 9 FTIR ของคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วย [10]

จากรูปที่ 9 ในสเปกตรัม ATR-FTIR จุดสูงสุดที่สังเกตได้บริเวณ 3366 และ 3277 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดของหมู่ O-H และ N-H ตามลำดับ ตรวจสอบการสั่นแบบยืดแบบไม่สมมาตรและสมมาตรของ C-H ที่ 2936 และ 2868 cm^{-1} ตามลำดับ จุดสูงสุดที่สังเกตได้บริเวณ 1686 , 1570 , 1395 , 1290 และ 1072 cm^{-1} สอดคล้องกับหมู่ฟังก์ชัน C=O, C=C, C-N-C, C-OH และ C-O-C ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของธาตุไนโตรเจนและออกซิเจนใน/บนพื้นผิวของ CQD จุดสูงสุดที่สังเกตได้บริเวณ 670 cm^{-1} สามารถระบุได้จากการสั่นแบบดัดโค้งแบบสมมาตรของเมทิลีนใน CQD ฟังก์ชันการทำงานทั้งหมดนี้มีส่วนช่วยให้ CQD มีความสามารถในการละลายน้ำที่ดีเยี่ยม และชี้ให้เห็นว่า CQD ที่เตรียมไว้จะมีประโยชน์สำหรับการดัดแปลงเพิ่มเติมและการประยุกต์ใช้ทางชีวภาพ

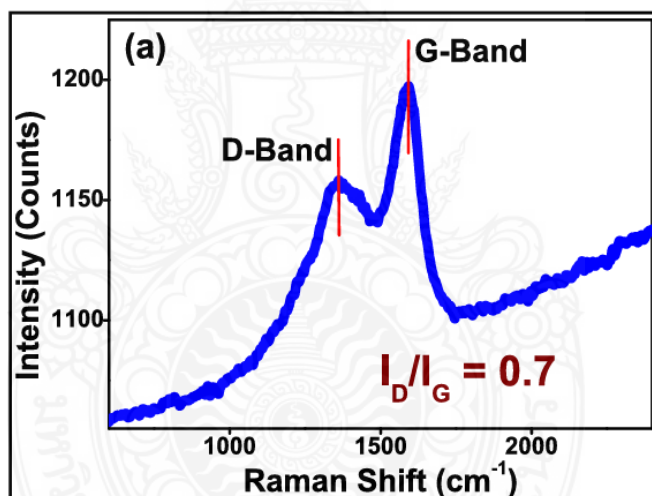
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง Raman



รูปที่ 10 คาร์บอนดอทจากเมล็ดถั่วธรรมชาติ CB-CD (a) สเปกตรัม Raman และ (b) สเปกตรัม FTIR [2]

จากรูปที่ 10 คาร์บอนดอทจากเมล็ดถั่วธรรมชาติ CB-CD ถูกวัดเพื่อแยกความแตกต่างระหว่างอะตอมคาร์บอนไฮบริด sp^2 และอะตอมคาร์บอนไฮบริด sp^3 สเปกตรัมแสดงแถบที่แตกต่างกันสองแถบที่ 1350 และ 1544 cm^{-1} ซึ่งอาจเชื่อมโยงกับแถบ D และ G ตามลำดับ (a) แถบ D มาจากอะตอมคาร์บอนไฮบริด sp^3 ที่ไม่เป็นระเบียบ และแถบ G มาจากโหมดการสั่นสะเทือน E_{2g} ของอะตอมคาร์บอนไฮบริด sp^2 ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะกราฟไฟต์ของ CB-CD22 นอกจากนี้ ยังได้ใช้สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดแบบฟูริเยร์ทรานส์ (FT-IR) เพื่อประเมินข้อมูลเชิงลึกของหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวของ CB-CD ดังแสดง (b) สเปกตรัม FT-IR แสดงแถบการสั่นสะเทือนแบบโค้งงอและแบบยืดของ O-H ที่ 737 และ 3384 cm^{-1} ตามลำดับ 2,7 นอกจากนี้ แถบการสั่นสะเทือนแบบยืดของ C-H ปรากฏที่ 2963 cm^{-1} 23 แถบการสั่นสะเทือนแบบโค้งงอของ C-H ปรากฏที่ประมาณ 604-895, 946 และ 1456 cm^{-1} 24-26 แถบการสั่นสะเทือนแบบยืดของ C-O สังเกตได้ที่ 1075 cm^{-1} 27 จากนั้นพบแถบการสั่นสะเทือนแบบยืดของ C=C และ C=O ที่ 1597 และ 1671/1766 cm^{-1} ตามลำดับ 20,28 แถบที่ 1297 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบโค้งงอในระนาบ O-H26 นอกจากนี้ แถบการสั่นสะเทือนแบบสมมาตร การสั่นสะเทือนแบบยืดของ -COOH ถูกสังเกตที่ 1408 cm^{-1} การมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิล คาร์บอกซิล และคาร์บอนิลบนพื้นผิวของ CB-CD ทำให้มีความสามารถในการละลายและความเสถียรสูงในระบบน้ำ

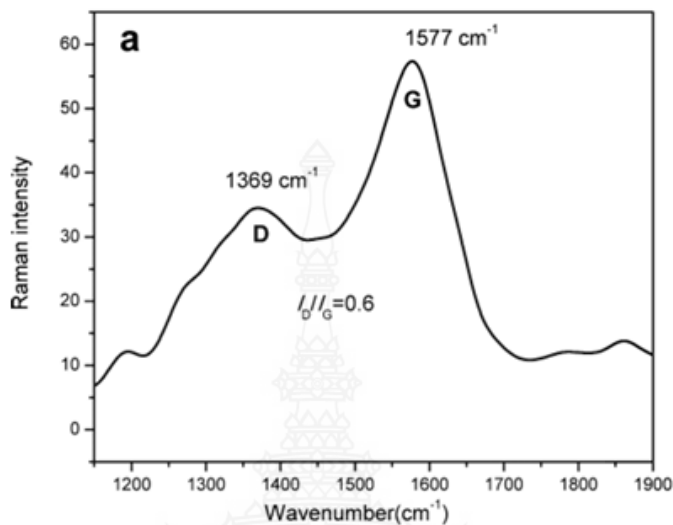
Raman spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างคาร์บอนภายในคาร์บอนดอท โดยเฉพาะพันธะในรูปของ sp^2 และ sp^3 ซึ่งสัมพันธ์กับระดับของความไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างของวัสดุ โดยพิจารณาจากสัญญาณหลักที่เรียกว่า D-band (ประมาณ 1350 cm^{-1}) และ G-band (ประมาณ 1580 cm^{-1}) การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความเข้มของ D และ G band (I_D/I_G) สามารถใช้ประเมินความเป็นระเบียบของโครงสร้างและระดับของ defect ภายในวัสดุได้ ในการวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ Raman spectrum ของตัวอย่างคาร์บอนดอทในช่วง Raman shift ระหว่าง $1,000 - 2,000\text{ cm}^{-1}$ เพื่อเน้นการตรวจสอบ band สำคัญของโครงสร้างคาร์บอน สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ HORIBA รุ่น XPlora PLUS ซึ่งมีเลเซอร์ excitation หลักที่ 532 nm และ 785 nm พร้อม grating 600 และ 1,800 ลาย/มม. ช่วยให้สามารถวัดสเปกตรัมด้วยความละเอียดสูงและสามารถวิเคราะห์พื้นที่จำกัด (confocal) ได้ รวมถึงรองรับการทำ spectral mapping ขององค์ประกอบภายในตัวอย่าง



รูปที่ 11 คาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยสเปกตรัม Raman [10]

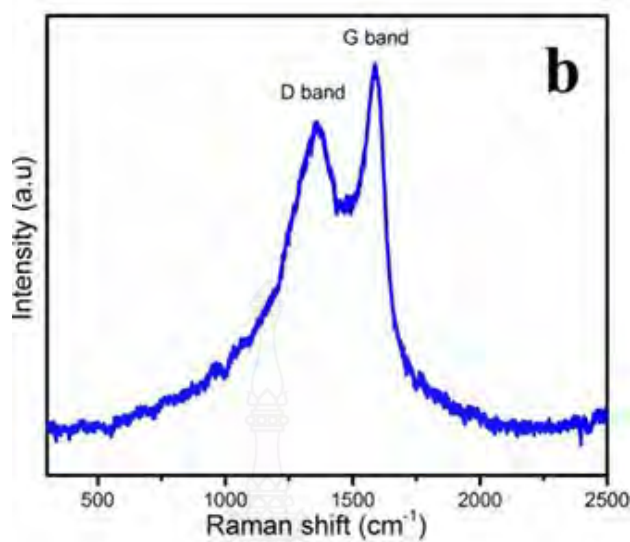
จากรูปที่ 11 สเปกตรัม Raman ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์แสดงจุดสูงสุดสองจุดที่ 1360 และ 1592 cm^{-1} จุดสูงสุดที่ 1360 cm^{-1} โดยทั่วไปเรียกว่า แถบ D ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าจะกลายเป็นผลึกของกราฟิตที่บกพร่อง/ผิดปกติ จุดสูงสุดความถี่สูงที่ 1592 cm^{-1} โดยทั่วไปเรียกว่า แถบ G ของกราฟิต ซึ่งกำหนดให้การสั่นสะเทือนแบบยืดในระนาบ C-C (E_{2g}) ของกราฟิต ดังนั้น อัตราส่วนแถบ D ต่อ G (I_D/I_G) แสดงถึงความเข้มข้นของข้อบกพร่องในโครงสร้าง กราไฟต์ และค่า I_D/I_G ที่ต่ำใน CQD บ่งชี้ว่าความสมบูรณ์ของเปลือกกราฟิตนั้นสูงเพียงพอที่จะปกป้องวัสดุแกนกลางจากการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันได้ดี อัตราส่วน I_D/I_G ของ CQD

อยู่ที่ประมาณ 0.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า CQD มีการสร้างกราฟไต์ในระดับที่ยอมรับได้ ไม่สามารถตัดองค์ประกอบจากหมู่ฟังก์ชันและ/หรือคาร์บอนอสัณฐานในระหว่างการสังเคราะห์ออกไปได้ ดังนั้นจึงนำไปสู่แถบ D ที่กว้าง



รูปที่ 12 คาร์บอนดอทจากเปลือกส้มสเปกตรัม Raman [3]

จากรูปที่ 12 สเปกตรัม Raman ของจุด C แสดงแถบหลักสองแถบที่ 1369 และ 1577 cm^{-1} ซึ่งสามารถอธิบายได้จากแถบ D (sp^3) และแถบ G (sp^2) ตามลำดับ โดยทั่วไป แถบ D แสดงถึงโหมดการสั่นสะเทือนของอะตอมคาร์บอนในออร์บิทัลไฮบริดไดส์ sp^3 และแถบ G สัมพันธ์กับโหมดการสั่นสะเทือนของอะตอมคาร์บอน sp^2 ความเข้มพื้นที่สัมผัสของแถบ D และ G เท่ากับ 0.60 ซึ่งบ่งชี้ว่าเมื่อเตรียมจุด C จะแสดงชนิดของคาร์บอนสองชนิดที่มีปริมาณใกล้เคียงกัน

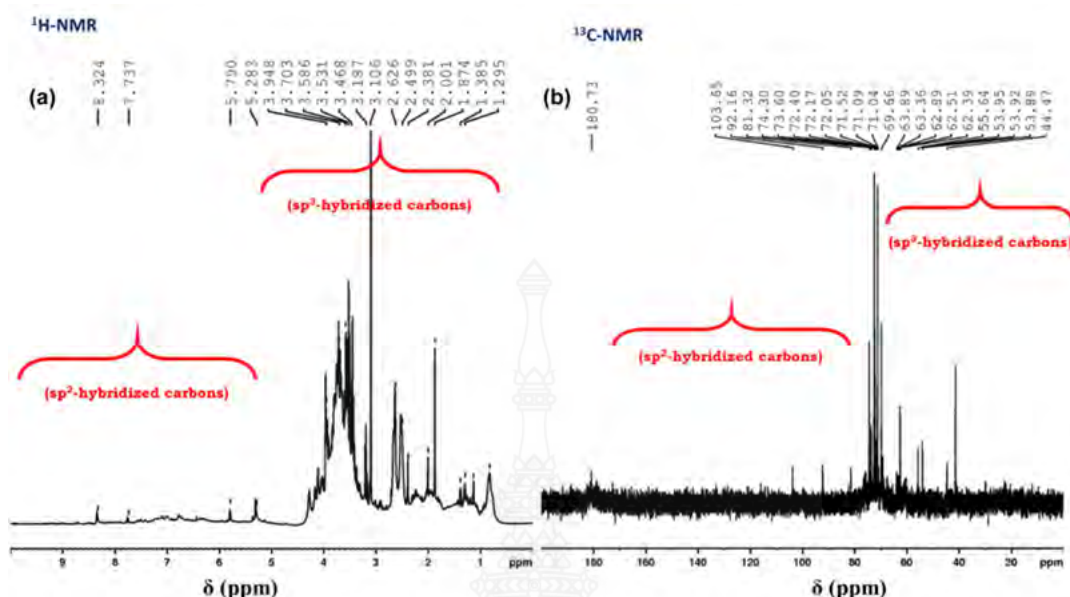


รูปที่ 13 คาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยสเปกตรัม Raman [12]

จากรูปที่ 13 สเปกตรัม Raman ประมาณ 1360 cm^{-1} (แถบ D) และ 1590 cm^{-1} (แถบ G) แถบ D แสดงถึงโครงสร้างกราฟไฟต์ที่ไม่เป็นระเบียบ และแถบ G สอดคล้องกับคาร์บอนกราฟไฟต์ที่เป็นเส้นผลึก อัตราส่วนความเข้มระหว่าง แถบ D และแถบ G (ID/IG) แสดงถึงตำแหน่งมีข้อบกพร่องและระดับการเกิดกราฟไฟต์ ในตัวอย่างคาร์บอนกัมมันต์ จากสเปกตรัมรามาน อัตราส่วน ID/IG 0.84 บ่งชี้เฟสกราฟไฟต์ต่ำกว่าในตัวอย่าง

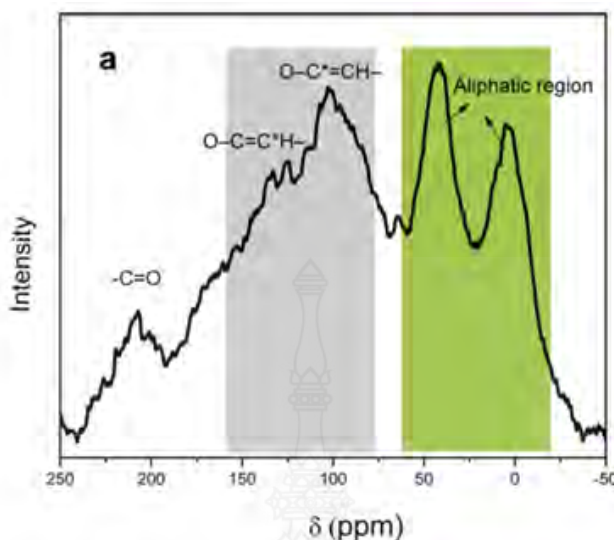
NMR (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy) เทคนิค NMR ใช้ศึกษาการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโมเลกุล โดยเฉพาะอะตอมของธาตุที่มีสมบัติเหมาะสม เช่น ไฮโดรเจน (^1H), คาร์บอน (^{13}C) หรือไนโตรเจน (^{15}N) เพื่อให้เข้าใจโครงสร้างทางเคมีของคาร์บอนดอท หรือสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ การวิเคราะห์ด้วย NMR จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของพันธะ โครงสร้างของหมู่ฟังก์ชัน และการจัดเรียงตัวทางเคมีที่สำคัญ โดยเฉพาะในงานวิจัยนี้จะเน้นการตรวจสอบคาร์บอน (^{13}C NMR) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างพื้นฐานของคาร์บอนดอทที่ได้จากเปลือกกล้วย และความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของเปลือกกล้วยทั้ง 3 ระยะ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้รุ่น BRUKER NMR ADVANCE NEO 600 MHz (Bruker, Germany) ซึ่งเป็นระบบ NMR ความถี่สูงที่สามารถให้สัญญาณชัดเจนและความละเอียดสูง เหมาะกับการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของสารละลายหรือสารชีวโมเลกุลในตัวทำละลายหลากหลายชนิด

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง NMR



รูปที่ 14 สเปกตรัม NMR (a) ^1H และ (b) ^{13}C [11]

จากรูปที่ 14 สเปกโทรสโกปีเรโซแนนซ์แม่เหล็กนิวเคลียร์ (NMR) (^1H และ ^{13}C) ของ CQD ถูกนำมาใช้เพื่อแยกแยะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ไฮบริด sp^3 และอะตอมคาร์บอนที่ไฮบริด sp^2 สเปกตรัม NMR แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของสภาพแวดล้อมทางเคมีสี่แบบที่แตกต่างกันในพื้นที่ที่แยกกันที่กล่าวถึงด้านล่าง บริเวณการเลื่อนทางเคมี (δ) ต่อไปนี้ถูกค้นพบในสเปกตรัม ^1H NMR (a) 1–3 ppm (มีโปรตอน sp^3 C–H เป็นหลัก), 3–6 ppm (เกี่ยวข้องกับโปรตอนของหมู่ไฮดรอกซิล อีเทอร์ และคาร์บอนิล), 6–8 ppm (สำหรับโปรตอนอะโรมาติกหรือ sp^2) และ 8–10 ppm (เกี่ยวข้องกับโปรตอนอัลดีไฮด์) สเปกตรัม NMR ^1H แสดงให้เห็นว่าสองบริเวณแรกที่กล่าวถึงข้างต้นมีมากกว่าสองบริเวณสุดท้าย ซึ่งบ่งชี้ว่าอะตอมคาร์บอนที่ไฮบริด sp^3 ถูกครอบงำเหนืออะตอมคาร์บอนที่ไฮบริด sp^2 จุดควอนตัมคาร์บอนถูกผสมเข้ากับอะตอมคาร์บอนที่ไฮบริด sp^3 และ sp^2 จริง ๆ ในขณะเดียวกัน สเปกตรัม NMR ^{13}C (b) เผยให้เห็นส่วนผสมของอะตอมคาร์บอนที่ไฮบริด sp^3 และ sp^2 พบบริเวณที่แตกต่างกันสี่บริเวณ ได้แก่ 20–80 ppm (สำหรับคาร์บอน sp^3 และคาร์บอนที่ยึดติดด้วยหมู่ไฮดรอกซิล), 80–100 ppm (สำหรับคาร์บอนที่ยึดติดด้วยพันธะอีเทอร์), 100–120 ppm (สำหรับอะตอมคาร์บอนไฮบริดไดซ์ $\text{C} = \text{C}$ หรือ sp^2) และสุดท้าย 175–190 ppm (สำหรับคาร์บอน $\text{C} = \text{O}$)



รูปที่ 15 สเปกตรัม NMR ^{13}C [3]

จากรูปที่ 15 สเปกตรัม NMR ^{13}C ในสถานะของแข็งของอนุภาคคาร์บอนดอทจากการศึกษาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับ คาร์บอนดอท ซึ่งประกอบด้วยสายโซ่พอลิฟรานิกล้ายพอลิเมอร์ สัญญาณ 21-23 ที่สูงกว่า 100 ppm สามารถกำหนดเป็นคาร์บอนอะโรมาติกได้ สัญญาณที่ 103.5 และ 133.5 ppm มาจากตำแหน่ง $\text{O}-\text{C}^*=\text{CH}-$ และ $\text{O}-\text{C}=\text{C}^*\text{H}-$ ของวงแหวนฟรานิกลตามลำดับ สัญญาณกว้างที่ 206.6 ppm มาจากกลุ่มคาร์บอนิล สัญญาณเหล่านี้เหมือนกับเฮเทอโรไซคลิกอะโรมาติกฟูลเรน ซึ่งหมายความว่าจุด C อาจประกอบด้วยวงแหวนฟูลเรน เช่น 5-ไฮดรอกซีเมทิลเพอร์ฟูลรีล 22, 23 สัญญาณลักษณะเฉพาะของอะตอมคาร์บอน sp^3 ถูกระบุที่ 3.7 และ 40.8 ppm ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีสปีชีส์อะลิฟาติกอยู่ในจุด C21

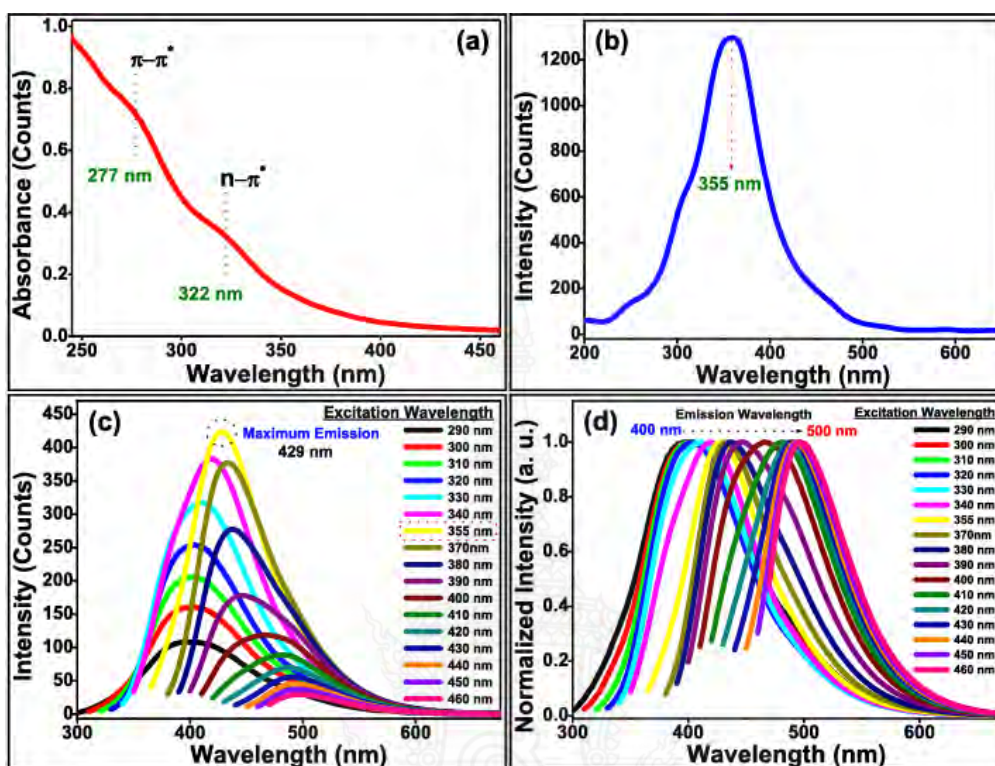
2.2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง (Photoluminescence)

การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเปลือกกล้วย มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินพฤติกรรมเรืองแสง และการตอบสนองต่อการกระตุ้นด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ โดยทำการทดสอบคุณสมบัติด้านแสงด้วยเครื่องมือ 2 ประเภท ได้แก่ Fluorescence Spectrophotometer ดำเนินการทดสอบที่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และ UV-Visible Spectrophotometer ตัวอย่างวัสดุถูกส่งไปทดสอบที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยเพื่อความเป็นเลิศ มหาวิทยาลัยมหิดล (Central Instrument Facility for Excellence in Research, Mahidol University) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Fluorescence Spectrophotometer การวิเคราะห์การเรืองแสงของสารละลายคาร์บอนดอท ดำเนินการโดยใช้เครื่อง Fluorescence Spectrophotometer ยี่ห้อ HORIBA รุ่น Duetta ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งค่าการเรืองแสง (Fluorescence Emission Spectrum) และค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ในเครื่องเดียว โดยตั้งค่าความยาวคลื่นกระตุ้น (Excitation wavelength) ที่เหมาะสม และตรวจสอบความยาวคลื่นของแสงที่ปล่อยออกมา (Emission wavelength) เพื่อประเมินความสามารถในการเรืองแสงของคาร์บอนดอทที่ได้จากกล้วยในแต่ละระยะความสุก การทดสอบนี้เน้นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสุกของกล้วยกับความเข้มและตำแหน่งของพีคการเรืองแสง ซึ่งสามารถใช้พิจารณาคุณภาพของสารเรืองแสงและความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือเซนเซอร์

UV-Visible Spectroscopy เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 200–800 นาโนเมตร โดยเฉพาะการดูดกลืนที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การเปลี่ยนผ่านของอิเล็กตรอนแบบ $\pi-\pi^*$ จากพันธะคู่ $C=C$ และ $n-\pi^*$ ของหมู่คาร์บอนิล $C=O$ ซึ่งสามารถใช้ในการประเมินพลังงาน bandgap ที่สัมพันธ์กับคุณสมบัติการเรืองแสงของวัสดุได้ ตัวอย่างที่ผ่านการกรองอย่างเหมาะสมจะถูกนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) โดยบรรจุในเซลล์ควอตซ์โปร่งใส ก่อนทำการวัดในช่วงความยาวคลื่นที่กำหนด ในการทดลองนี้ใช้เครื่อง Nanodrop Spectrophotometer รุ่น Nano Drop (Thermo Scientific) ซึ่งออกแบบมาสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างปริมาณน้อยในช่วงคลื่น 190 – 850 นาโนเมตร

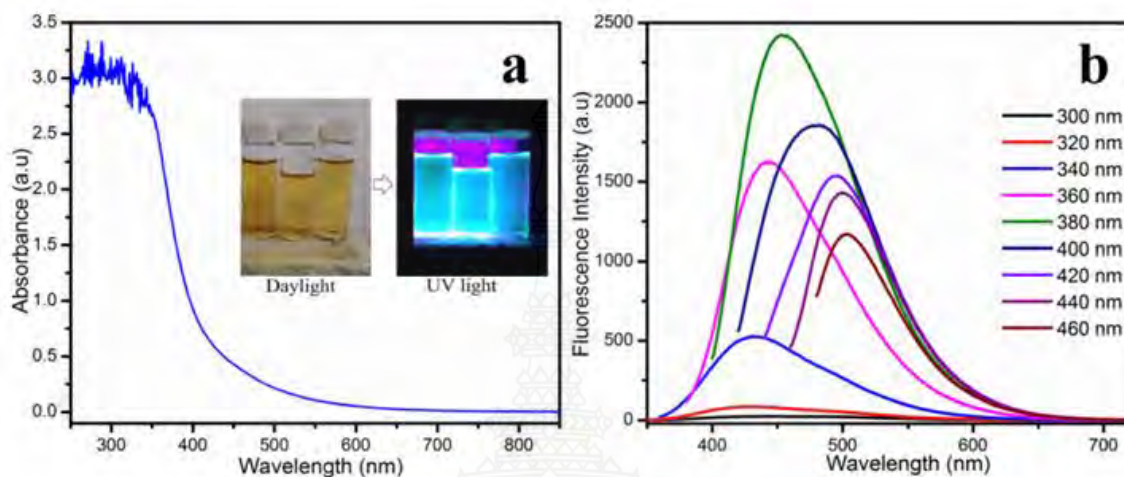
การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง Fluorescence และ UV-Visible



รูปที่ 16 (a, b) สเปกตรัม UV-vis (c, d) สเปกตรัม Fluorescence [10]

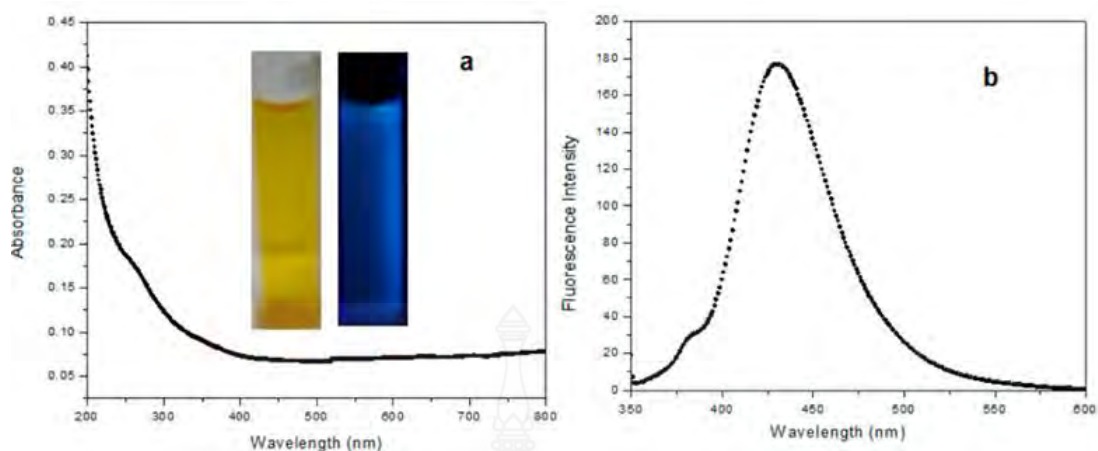
จากรูปที่ 16 (a) สเปกตรัม UV-vis ของ CQD ที่สังเคราะห์แสดงช่วงการดูดกลืนแสงที่กว้างที่ 277 และ 322 นาโนเมตร ในช่วง UV ซึ่งสัมพันธ์กับแถบทรานซิชัน $\pi \rightarrow \pi^*$ ทัวไปของออร์บิทัลไฮบริดอะโรมาติก ($C=C$) sp^2 และแถบ ทรานซิชัน $n \rightarrow \pi^*$ ของออร์บิทัลไฮบริด sp^3 ($C=O$) (หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ CQD) ตามลำดับ (b) แสดงสเปกตรัมการกระตุ้นการเรืองแสงของ CQD ในสารละลายน้ำ แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นสูงสุดอยู่ที่จุดศูนย์กลางประมาณ 355 นาโนเมตร (c) แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ของสารละลายน้ำ CQD ที่ความยาวคลื่นกระตุ้นต่าง ๆ ความเข้มของการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ของ CQD เพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นกระตุ้นเพิ่มขึ้นจนถึง 355 นาโนเมตร หลังจากนั้นจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความยาวคลื่นกระตุ้นเท่ากับ 355 นาโนเมตร CQD แสดงการเปล่งแสงที่แรงที่สุด นอกจากนี้ ยังเป็นที่น่าสนใจว่าสเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์แสดงการเลื่อนไปทางแดง (ความยาวคลื่นการเปล่งแสงที่ยาวขึ้น, λ_{em}) เมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของความยาวคลื่นกระตุ้นในช่วง 290 ถึง 460 นาโนเมตร ซึ่งเห็นได้ชัดเจนในสเปกตรัมการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ปรับมาตรฐานแล้ว (d) ควรสังเกตว่า CQD ที่สังเคราะห์ขึ้นนั้น มีคุณสมบัติการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เกี่ยวข้องกับความยาวคลื่นกระตุ้น ต้นกำเนิดของคุณสมบัติทางแสงของ CQD ยังคงเป็นที่ถกเถียงกันอย่างดุเดือด และยังไม่เป็น

ที่เข้าใจกันดีนัก ดังนั้นจึงมีการเสนอกลไกที่เกี่ยวข้องกับการกักเก็บควอนตัม, กับดักพื้นผิว, การก่อตัวของโครงสร้างอะโรมาติก และการรวมตัวใหม่ของเอกไซตอน การปล่อยฟลูออเรสเซนซ์ที่ปรับได้และเสถียรเป็นที่นิยมสำหรับการถ่ายภาพทางชีวภาพในทางปฏิบัติ



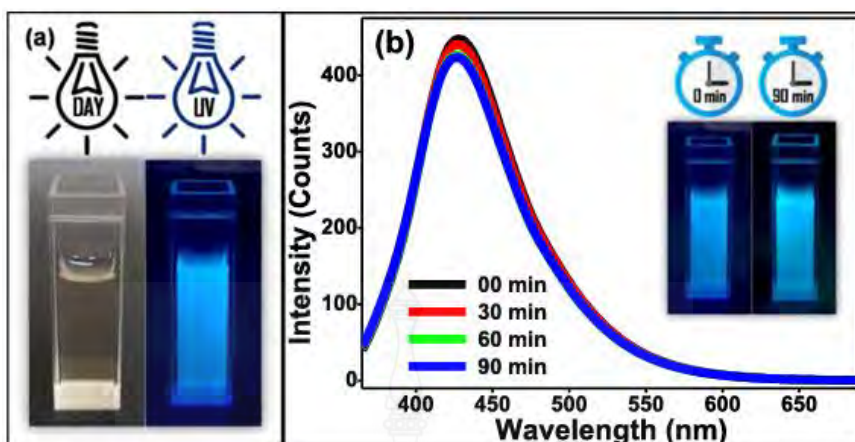
รูปที่ 17 (a) สเปกตรัม UV-vis (b) สเปกตรัม Fluorescence [12]

จากรูป 17 แสดงจุดสูงสุดที่ประมาณ 280 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนผ่าน $\pi-\pi^*$ ของแถบ C=C และการเปลี่ยนผ่าน $n-\pi^*$ ของแถบ C=O ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ระหว่างการเตรียมจุดคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ (a) สารละลายจุดคาร์บอนมีสีเหลืองสดใสและโปร่งใสในตอนกลางวัน แต่จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มเมื่ออยู่ภายใต้แสงยูวี (ดูภาพแทรก) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการดูดซับอนุภาคคาร์บอนในตัวทำละลายได้อย่างดีเยี่ยม สเปกตรัม PL ของจุดคาร์บอนภายใต้ความยาวคลื่นกระตุ้นต่างๆ ตั้งแต่ 300 ถึง 460 นาโนเมตร แสดงไว้ในรูปที่ (b) ช่วงการกระตุ้นที่กว้างของการวัด PL บ่งชี้ว่าการแผ่รังสีเรืองแสงสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 450 นาโนเมตร โดยมีความยาวคลื่นกระตุ้นที่ 380 นาโนเมตร จุดคาร์บอนในการทดลองแสดงความเข้มของการเรืองแสงที่ดีเยี่ยม ซึ่งสามารถนำไปใช้กับการประยุกต์ใช้งานอื่น ๆ ที่ใช้การเรืองแสงได้



รูปที่ 18 (a) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง UV-visible (b) สเปกตรัม Fluorescence [3]

จากรูปที่ 18 พบว่าคาร์บอนดอทที่เตรียมไว้ (a) มีแถบดูดกลืนแสงอ่อนที่ประมาณ 268 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนผ่านอิเล็กตรอนแบบ $\pi-\pi^*$ ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้สำหรับอนุภาคคาร์บอนที่เตรียมโดยการคาร์บอนไนเซชันของวัสดุที่มีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบ 20 สารละลายคาร์บอนดอทในน้ำ แสดงแถบการเปล่งแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่ 431 นาโนเมตร เมื่อถูกกระตุ้นที่ 340 นาโนเมตร (b) ผลผลิตควอนตัมการเรืองแสงจากแสงของสารละลายคาร์บอนดอท ในน้ำสูงถึง 36% โดยใช้ควินินซัลเฟตเป็นมาตรฐาน กลุ่มอื่น ๆ ได้รายงานคุณสมบัติการเรืองแสงของจุด C ที่คล้ายคลึงกัน 9, 17, 20 พวกเขาอธิบายว่าปรากฏการณ์เฉพาะตัวของคุณสมบัติการเปล่งแสงของจุด C อาจเกิดจากขนาดของจุด C ความพร้อมของตำแหน่ง sp^2 โครงสร้างคอนจูเกตอะโรมาติก และข้อบกพร่องของโครงสร้าง



รูปที่ 19 (a) คาร์บอนดอทภายใต้แสงธรรมชาติ และแสง UV (b) สเปกตรัม Fluorescence [10]

จากรูปที่ 19 ตรวจสอบโดยใช้วิธีฟลูออโรเมตริก (a) CQD ที่สังเคราะห์จะมีสีเหลืองอ่อนในสารละลายน้ำ ภายใต้แสงธรรมชาติ และเปล่งแสงฟลูออเรสเซนส์สีน้ำเงิน ไซแอนเข้มขึ้นภายใต้การกระตุ้นด้วยแสง UV 365 นาโนเมตร สารละลายน้ำของ CQD ถูกฉายแสงยูวี 365 นาโนเมตร จากนั้นจึงวัดความเข้มของการเรืองแสงของ CQD ในสารละลายน้ำ ซึ่งแสดงใน (b) เส้นโค้งการเรืองแสงของ CQD ไม่แสดงการเรืองแสงที่อ่อนลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อได้รับแสงยูวี 0–90 นาที ความเข้มของจุดสูงสุดของการเปล่งแสงยังคงไม่เปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับความเข้มเริ่มต้น (0 นาที) แม้หลังจากถูกกระตุ้นเป็นเวลา 90 นาที แสดงให้เห็นว่า CQD ที่สังเคราะห์มีความคงตัวทางแสงที่ดีเยี่ยมเป็นเวลานานขึ้น คุณสมบัตินี้ทำให้ CQD เหมาะเป็นโพรบเรืองแสงสำหรับการถ่ายภาพเซลล์มีชีวิต ซึ่งอาจมีศักยภาพสำหรับการใช้งานด้านกล้องจุลทรรศน์และการวิเคราะห์

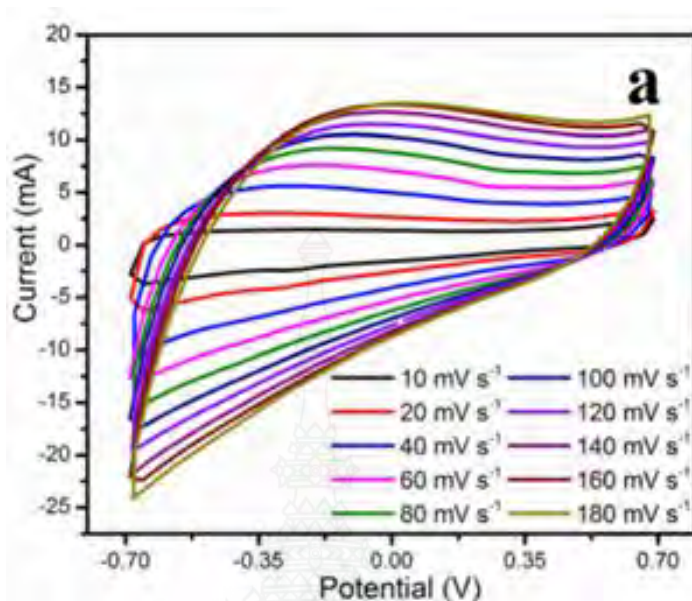
2.2.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical Properties)

คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้อาจแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าในระดับนาโน ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ เช่น วัสดุนำไฟฟ้านาโน เซนเซอร์ หรืออิเล็กทรอนิกส์ ในงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนดอทด้วย 2 เทคนิค ได้แก่ AFM โดยตัวอย่างวัสดุถูกส่งไปทดสอบที่สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมแห่งชาติ (สวทช.) โดยผ่านศูนย์บริการวิเคราะห์ทดสอบ (NSTDA Characterization and Testing Service Center: NCTC) และ เทคนิค Cyclic Voltammetry (CV) ได้ดำเนินการทดสอบที่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy AFM) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิว ความสูง และความขรุขระของอนุภาคในระดับนาโนเมตร ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์คือสารละลายคาร์บอนดอท ซึ่งหยดลงบนแผ่นฟิล์มทอง (Au) ที่ผ่านการล้างทำความสะอาดอย่างเหมาะสม จากนั้นปล่อยให้แห้งก่อนทำการวัด นอกจากการวิเคราะห์ภาพพื้นผิวแล้ว AFM ยังสามารถใช้โหมด Conductive AFM (C-AFM) เพื่อศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าเฉพาะจุดบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งช่วยประเมินความสม่ำเสมอและการกระจายตัวของพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของคาร์บอนดอทได้อย่างแม่นยำ ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Park Systems รุ่น NX10 AFM ซึ่งเป็นระบบกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมความละเอียดสูง รองรับการวัดเชิงโครงสร้างและเชิงไฟฟ้าระดับนาโนได้อย่างหลากหลาย

เทคนิค Cyclic Voltammetry (CV) เป็นวิธีการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทอิเล็กตรอนของวัสดุ โดยอาศัยการวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการป้อนศักย์ไฟฟ้าแบบเป็นวงรอบ (cycle) เข้าไปยังเซลล์ไฟฟ้าเคมี ตัวอย่างในงานวิจัยนี้คืออนุภาคคาร์บอนดอท ซึ่งมีสมบัติในการรับและส่งอิเล็กตรอนที่สำคัญต่อการประยุกต์ใช้ในด้านเซนเซอร์ วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์จัดเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ ในขั้นตอนการทดสอบ ตัวอย่างคาร์บอนดอทจะถูกหยดลงบนอิเล็กโทรดชนิด Glassy Carbon Electrode (GCE) แล้วปล่อยให้แห้ง ก่อนนำไปวัดสัญญาณด้วยเทคนิค CV การวิเคราะห์นี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องมือ Modulab XM AMETEK (Solatron Analytical) รุ่น Modulab XM ซึ่งสามารถตรวจวัดกระแสและศักย์ไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการประเมินสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของวัสดุที่สังเคราะห์ได้อย่างชัดเจน

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง Cyclic Voltammetry (CV)



รูปที่ 20 กราฟ Cyclic Voltammetry CV [12]

จากรูปที่ 20 การทดสอบ Cyclic Voltammetry (CV) ที่อัตราการสแกนระหว่าง 10 - 180 mV s⁻¹ พบว่ากราฟ CV มีลักษณะโค้งที่มีขนาดใหญ่และคงรูปได้สม่ำเสมอ แม้ในอัตราการสแกนสูงถึง 180 mV s⁻¹ แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการคายประจุที่ดีและเสถียรภาพทางเคมีไฟฟ้าที่โดดเด่น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 แผนการดำเนินงาน

3.1.1 การพัฒนาการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ไทย

เป็นขั้นตอนในการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ไทย โดยการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเพื่อประกอบการพิจารณาเลือก เปลือกผลไม้ไทยที่มีความเหมาะสมเพื่อพัฒนาเป็นการสังเคราะห์คาร์บอนดอท

3.1.2 การวิเคราะห์และพิสูจน์ความเป็นคาร์บอนดอท

เพื่อเป็นการยืนยันว่ากระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนดอทที่ได้พัฒนาในงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ไทยได้จริงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เช่น ขนาดของอนุภาค ความสามารถในการเรืองแสง เป็นต้น นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการทดสอบสมบัติทางเคมีที่เกี่ยวข้องเพื่อให้คณะผู้วิจัยสามารถเข้าใจเกี่ยวกับคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มากขึ้น และเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้คณะผู้วิจัยสามารถเสนอกลไกการสังเคราะห์คาร์บอนดอทในเบื้องต้นได้

3.1.3 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนดอท

การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้านับเป็นขั้นตอนแรกที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความพยายามในการพัฒนาคาร์บอนดอทเพื่อใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ ในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อพยายามเข้าใจกลไกการนำไฟฟ้าของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเปลือกผลไม้ไทยในงานวิจัยนี้

3.1.4 การ Simulation เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนดอท

การ Simulation แม้จะมีข้อจำกัดแต่นับเป็นเครื่องมือสำคัญในการสำรวจความเป็นไปได้ที่ในแนวกว้าง ที่สามารถทำได้รวดเร็วและต้นทุนต่ำ เหมาะสมกับการศึกษาความเป็นไปได้ของระบบอย่างรวดเร็วก่อนที่จะสามารถเริ่มต้นการพัฒนาระบบทางกายภาพหรือทางการทดลองอย่างจริงจัง

3.2 การพัฒนาการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ไทย

การเลือกชนิดของเปลือกผลไม้ ประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อนประกอบกับการส่งออกเป็นจำนวนมากทำให้มีผลไม้มากมายที่สามารถนำมาทดลองได้ เปลือกกล้วยถูกเลือกเนื่องจากเป็นผลไม้ที่มีจำหน่ายตลอดทั้งปี

ในการพัฒนาวิธีการสังเคราะห์ที่ดีที่สุดผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวรรณกรรมและกำหนดแนวทางการสังเคราะห์เบื้องต้นไว้ กระนั้นแนวทางในการสังเคราะห์ที่กำหนดไว้ไม่มีแนวทางที่มีประสิทธิภาพที่สุด ผู้วิจัยจำเป็นต้องผ่านการทดลองและปรับเปลี่ยนสูตรการสังเคราะห์หลายครั้งกว่าจะได้แนวทางการสังเคราะห์ที่ดีที่สุด ทั้งนี้ในการรายงานผลการวิจัยในเล่มรายงานนี้ ผู้วิจัยต้องการนำเสนอผลให้กระฉับจึงเลือกนำเสนอ วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนดอทที่ดีที่สุดเท่านั้น แม้เปลือกกล้วยจะเป็นสารตั้งต้นที่เข้าถึงได้ง่าย แต่เพื่อความสามารถในการควบคุมตัวแปรในการวิจัยให้มากที่สุดผู้วิจัยจึงมีแนวคิด ในการเตรียมเปลือกกล้วยสดให้กลายเป็นเปลือกกล้วยอบเพื่อสามารถที่จะเก็บรักษาเปลือกกล้วยได้ง่าย เพื่อการสังเคราะห์คาร์บอนดอทตามความต้องการต่อไป

3.2.1 การเตรียมผงเปลือกกล้วย

เปลือกกล้วยที่ใช้ในการทดลองนำมาจากตลาดหรือร้านผลไม้ในพื้นที่จังหวัดนนทบุรี คัดแยกกล้วยตามระดับความสุกออกเป็น 3 ระยะโดยการสังเกตด้วยสายตา ได้แก่ กล้วยดิบ (เปลือกสีเขียวทั่วทั้งผล), กล้วยสุก (เปลือกสีเหลืองทั่วทั้งผล) และกล้วยสุกมาก (เปลือกสีเหลืองทั่วผล มีจุดสีน้ำตาลถึงดำกระจายบางจุด) ตามรูปที่ 21



รูปที่ 21 (a) กล้วยดิบ, (b) กล้วยสุก, และ (c) กล้วยสุกมาก



รูปที่ 22 (a) เปลือกกล้วยดิบ, (b) เปลือกกล้วยสุก, และ (c) เปลือกกล้วยสุกมาก

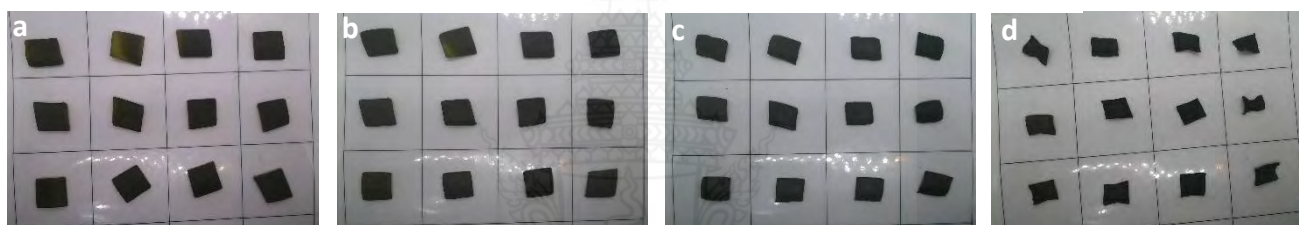
หลังจากนั้น แยกเปลือกออกจากเนื้อกล้วย และตัดเปลือกกล้วยเป็นชิ้นขนาดประมาณ 2×2 เซนติเมตร ก่อนนำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนกว่าเปลือกจะแห้งสนิท ทั้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปบดด้วยเครื่องปั่นให้ละเอียด จากนั้นกรองผ่านตะแกรงร่อนเพื่อควบคุมขนาดอนุภาคให้เหมาะสม

ผงเปลือกกล้วยที่ได้จะถูกเก็บรักษาไว้ในถุงซิปล็อกเพื่อป้องกันความชื้นและคงคุณภาพก่อนนำไปใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนต่อไป

3.2.2 การวิเคราะห์ภาพถ่ายก่อน – หลังอบ



รูปที่ 23 ตัดเปลือกกล้วยให้ได้ขนาด 2 x 2 cm ก่อนอบแห้ง



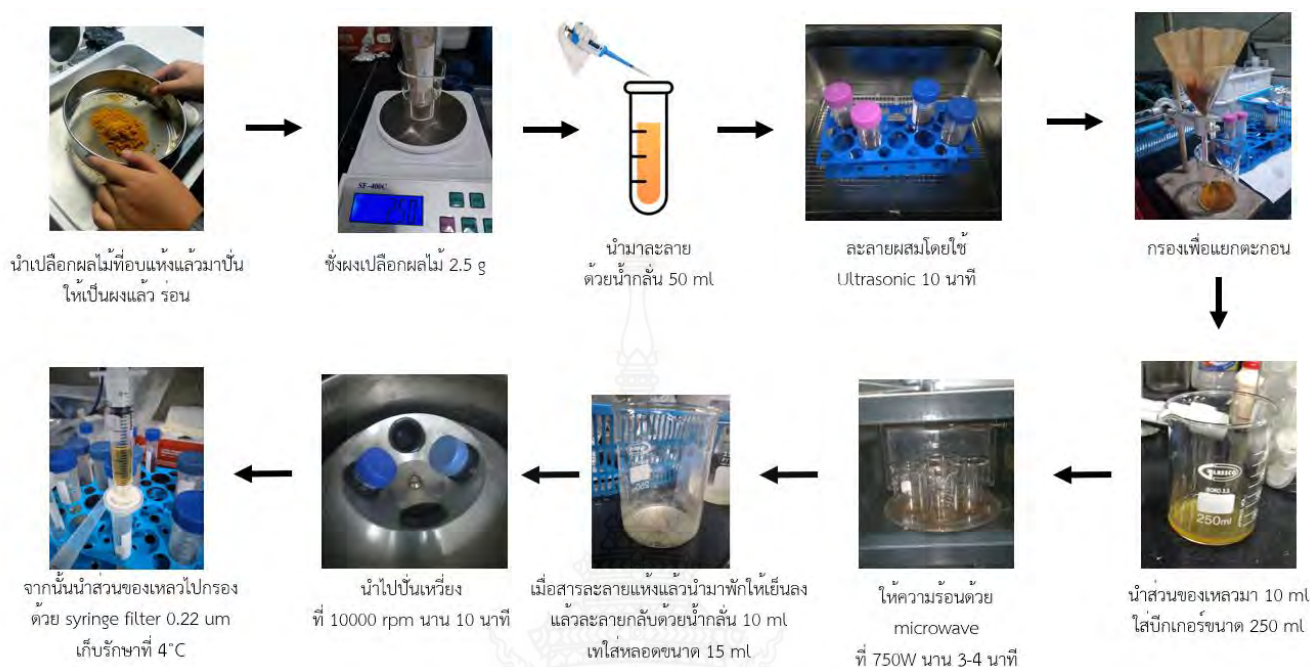
รูปที่ 24 อบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

(a) หลังจากการอบแห้ง 5 นาที, (b) หลังจากอบแห้ง 10 นาที, (c) หลังจากอบแห้ง 60 นาที และ (d) หลังจากอบแห้ง 120 นาที ตามลำดับ

3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมผงเปลือกกล้วย

1. มีด / เขียง (Knife / Cutting board)
2. ไม้บรรทัด (Ruler)
3. ถาดอบขนมชนิดเคลือบสารกันติด (Non-stick baking tray)
4. เครื่องปั่น (Blender Philips HR2221)
5. ถุงซิปล็อกใส 15 x 23 cm (Transparent zip-lock bag)
6. ช้อนตักสาร (Spoon spatula)
7. ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven ยี่ห้อ Memmert UF55)

3.2.4 การสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากผงเปลือกกล้วยด้วยเทคนิค Microwave



รูปที่ 25 วิธีการสังเคราะห์จากผงเปลือกกล้วยด้วยเทคนิค Microwave

นำผงเปลือกกล้วยที่เตรียมไว้จำนวน 2.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าให้สารละลายเข้ากันเป็นเวลา 1 นาที และทำการเขย่าตัวอย่างด้วยเครื่อง Ultrasonic เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นทำการกรองเพื่อแยกตะกอนออกและ ดูดสารละลายส่วนใสปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ในปิกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

นำปิกเกอร์เข้าสู่กระบวนการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟ 750 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที หรือจนกว่าสารจะระเหยแห้ง โดยตรวจสอบทุก ๆ 1 นาที เพื่อสังเกตความเปลี่ยนแปลง เมื่อสารละลายในปิกเกอร์ระเหยแห้งหมดแล้ว ทิ้งให้หายร้อนประมาณ 10 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร เพื่อละลายคาร์บอนดอทให้กลับมาในรูปแบบสารละลาย จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10000 rpm เป็นเวลา 10 นาที เพื่อแยกตะกอนออก

ขั้นตอนสุดท้าย ทำการกรองสารละลายส่วนใสได้ด้วย Syringe filter ขนาด 0.22 ไมโครเมตร ซ้ำหลายครั้ง เพื่อให้ได้สารละลายคาร์บอนดอทที่สะอาดและปราศจากสิ่งเจือปน จากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C จนกว่าจะนำไปวิเคราะห์และทดสอบคุณสมบัติต่อไป

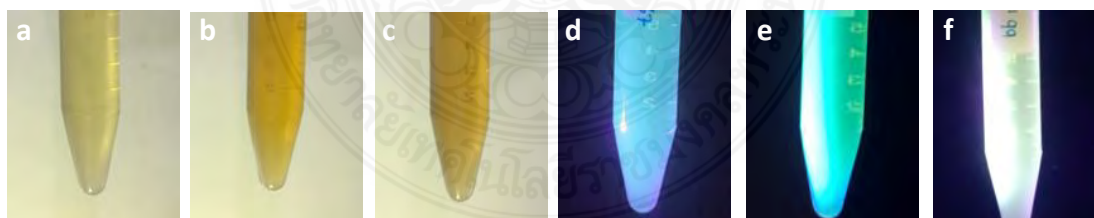
3.2.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์

1. ตะแกรงร่อนสารเคมี (fine sieve)
2. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (balance scale)
3. น้ำดีไอ (DI-Water)
4. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner)
5. ไมโครเวฟ (Microwave)
6. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)
7. กระดาษกรองกาแฟ (Coffee filter)
8. ปีกเกอร์ขนาด 250 ml (Beaker)
9. ไมโครปิเปต 1-10 ml (Micropipette)
10. หลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 ml (Centrifuge)
11. ตัวกรองแบบกระบอกฉีดยา 0.22 μm (syringe filter)

3.3 การศึกษาคุณสมบัติความเป็นนาโนคาร์บอนดอท

หลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยในแต่ละระยะของการสุกแล้ว จำเป็นต้องมีการศึกษาคุณสมบัติของสารที่ได้ เพื่อยืนยันความเป็นวัสดุนาโน และประเมินคุณสมบัติด้านฟิสิกส์ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ โดยเน้นการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ขนาดอนุภาค และคุณสมบัติการเรืองแสงของสารละลายที่ได้

3.3.1 สารละลายคาร์บอนดอท



รูปที่ 26 สารละลายคาร์บอนดอท CD1, CD2 และ CD3 แสงไฟปกติ และแสงไฟ UV 395 nm

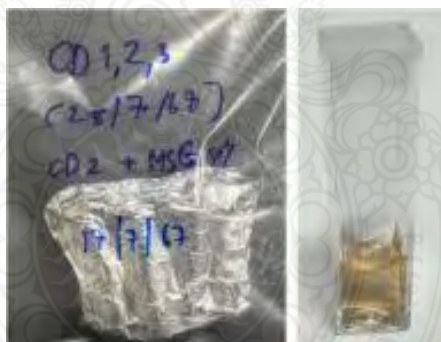
สารละลายคาร์บอนดอทที่อยู่ภายใต้แสงไฟปกติ a สังเคราะห์จากเปลือกกล้วยดิบ (CD1), b สังเคราะห์จากเปลือกกล้วยสุก (CD2) และ c สังเคราะห์จากเปลือกกล้วยสุกมาก (CD3) สารละลายคาร์บอนดอท

ที่อยู่ภายใต้แสงไฟ UV 395 nm d สังเคราะห์จากเปลือกกล้วยดิบ (CD1), e สังเคราะห์จากเปลือกกล้วยสุก (CD2) และ f สังเคราะห์จากเปลือกกล้วยสุกมาก (CD3)

3.3.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและขนาดอนุภาค

ตัวอย่างจะถูกส่งไปยังศูนย์บริการวิเคราะห์ทดสอบ (NSTDA Characterization and Testing Service Center: NCTC) เพื่อทดสอบด้วยเครื่องมือ Transmission Electron Microscopy (TEM) รุ่น JEM-2100Plus และ Nano Particle Analyzer รุ่น HORIBA Nano Particle SZ-100V2 Series โดยเริ่มจากการทดสอบ TEM ก่อน ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับ TEM คือการเตรียมสารละลายตัวอย่างให้บางพอสำหรับให้อิเล็กตรอนผ่านได้ จากนั้นหยดสารละลายบนตะแกรงทองแดงที่เคลือบฟิล์มคาร์บอน และปล่อยให้แห้งก่อนนำไปทดสอบ

หลังจากนั้นจะทำการทดสอบด้วย Nano Particle Analyzer โดยเตรียมตัวอย่างในรูปสารละลายที่มีความเข้มข้นประมาณ 0.1–1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L) เพื่อให้เหมาะสมต่อการวัดขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนด้วยเทคนิค Dynamic Light Scattering (DLS)



รูปที่ 27 เตรียมสารละลายคาร์บอนดอส่งทดสอบ TEM และ Nano Particle Analyzer

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางเคมี

เตรียมตัวอย่างในรูปแบบสารละลาย ดังภาพที่ 28 เพื่อส่งทดสอบที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยเพื่อความเป็นเลิศ มหาวิทยาลัยมหิดล โดยใช้เทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (NMR) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง BRUKER รุ่น NMR ADVANCE NEO 600 MHz (Bruker, Germany) ก่อนทดสอบตัวอย่างจะถูกเตรียมโดยการทำ Freeze Dryer เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นให้ออกจนหมดเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนจากน้ำปกติ (H_2O) จากนั้นนำตัวอย่างที่แห้งแล้วมาละลายใน (D_2O) ปริมาตร 600 ไมโครลิตร ก่อนนำไปทดสอบ NMR เพื่อทดสอบสัญญาณ 1H และ ^{13}C การละลายใน D_2O ช่วยลดสัญญาณรบกวนจากไฮโดรเจนในน้ำปกติที่อาจรบกวนการวิเคราะห์ และยังช่วยให้เครื่อง NMR ใช้สัญญาณดิฟเฟอเรนเชียลล็อก (lock) เพื่อคงความนิ่งของสนามแม่เหล็กระหว่างการวัด ส่งผลให้ผลการทดสอบมีความแม่นยำและเชื่อถือได้มากขึ้น



รูปที่ 28 เตรียมสารละลายคาร์บอนดอทส่งทดสอบ NMR

ตัวอย่างอีกชุดหนึ่งได้ถูกส่งไปทดสอบที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยเพื่อความเป็นเลิศ มหาวิทยาลัยมหิดล เช่นเดียวกันกับตัวอย่างที่ทดสอบ NMR เพื่อทดสอบ Raman โดยในส่วนของ การวิเคราะห์สมบัติเคมีด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้สำหรับการศึกษาลักษณะโครงสร้างและการสั่นสะเทือนของโมเลกุลในวัสดุ ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง HORIBA รุ่น XPlora PLUS ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความละเอียดสูงและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ Raman Spectra เพื่อทดสอบในช่วง Raman shift ตั้งแต่ 1000 ถึง 2000 cm^{-1} โดยช่วงนี้ครอบคลุมลักษณะการสั่นสะเทือนของพันธะเคมีหลัก ๆ ที่สำคัญรวมถึงสามารถวิเคราะห์จุดเด่นของ

กราฟที่เรียกว่า G band และ D band ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญสำหรับการประเมินคุณสมบัติของวัสดุประเภทคาร์บอน เช่น การประเมินความเป็นผลึกหรือความผิดปกติของโครงสร้างคาร์บอนในตัวอย่าง ดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 เตรียมสารละลายคาร์บอนต่อทดสอบ Raman

3.3.4 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง (Photoluminescence)

หลังจากทำการทดสอบด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy เสร็จสิ้นแล้ว ตัวอย่างถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยเครื่อง Nanodrop Spectrophotometer รุ่น NanoDrop (Thermo Scientific) โดยทำการบันทึกสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200–700 นาโนเมตร เพื่อประเมินพฤติกรรมการดูดกลืนและการตอบสนองต่อแสงของคาร์บอนดอท จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปทำให้แห้งสนิทด้วยเครื่อง Freeze Dryer เพื่อกำจัดความชื้นให้ออกจนหมด ก่อนนำไปทดสอบสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ในลำดับถัดไป



รูปที่ 30 ทดสอบสมบัติทางแสง ก่อน freeze dryer

ตัวอย่างคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยทั้ง 3 ระยะ หลังการสังเคราะห์ถูกทำให้แห้งสนิทด้วยเครื่อง Freeze Dryer เพื่อกำจัดความชื้นออกจากตัวอย่างอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อระบุชนิดของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีบนพื้นผิวของอนุภาคคาร์บอนดอท การวัดจะบันทึกสเปกตรัมในรูปแบบ Transmittance ครอบคลุมช่วงค่าจำนวนคลื่น $4000 - 500 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถตรวจสอบการสั่นของพันธะเคมีของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ได้ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH), หมู่คาร์บอนิล (C=O) และพันธะ C-H เป็นต้น ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์จะช่วยยืนยันการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันที่มีบทบาทต่อคุณสมบัติทางเคมีและสมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนดอท

3.3.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ คาร์บอนดอท

Atomic Force Microscopy (AFM) งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Park Systems รุ่น NX10 AFM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างในระดับนาโนเมตร รวมถึงวิเคราะห์ความสูง ความขรุขระ และโครงสร้างเชิงพื้นที่ของคาร์บอนดอทบนพื้นผิว ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาประเมินพฤติกรรมการนำไฟฟ้าของอนุภาคคาร์บอนดอทบนพื้นผิววัสดุได้ทางอ้อม

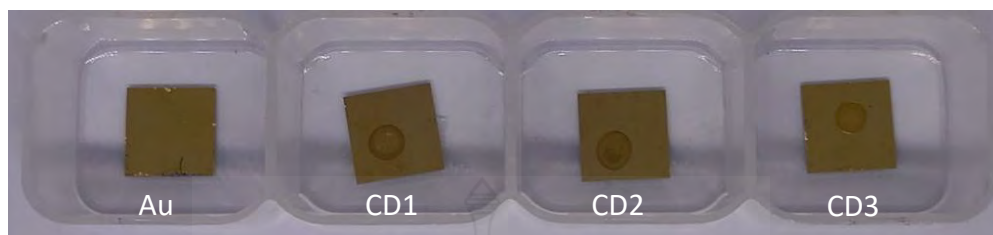
ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวัด Atomic Force Microscopy (AFM)

1. ทำความสะอาดแผ่นฟิล์มทอง (Gold-coated substrate) ด้วยกระบวนการดังนี้
 - 1.1 ล้างด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์ (DI water)
 - 1.2 ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone)
 - 1.3 ล้างด้วยเมทานอล (Methanol)
 - 1.4 ล้างด้วยเอทานอล (Ethanol)
 - 1.5 เป่าด้วยไดร์เป่าผมให้แห้งสนิท
2. หยดสารละลายคาร์บอนดอทแต่ละตัวอย่าง (CD1, CD2, CD3) ลงบนพื้นผิวของฟิล์มทอง



รูปที่ 31 CD1,CD2,CD3 หยดลงบนฟิล์มทอง

3. ปลอ่ยให้สารละลายแห้งในอุณหภูมิห้องโดยไม่ใช้ความร้อนดังรูปที่ 35



รูปที่ 32 (Au) ฟิล์มทองเปล่า, (CD1, CD2 และ CD3) หยดบนฟิล์มทอง

4. นำแผ่นฟิล์มเข้าสู่การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AFM สถานที่ทดสอบ สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมแห่งชาติ (สวทช.) ผ่านศูนย์วิเคราะห์ทดสอบวัสดุ NSTDA Characterization and Testing Service Center (NCTC)

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวัด Cyclic Voltammetry (CV)

สารละลายคาร์บอนดอทที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์มีความเข้มข้น 50 mg/mL ใช้ในการทดสอบ Cyclic Voltammetry (CV) งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Modulab XM AMETEK (Solatron Analytical) รุ่น Modulab-XM ณ ห้องปฏิบัติการวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร โดยใช้อิเล็กโทรดกระจกคาร์บอน (Glassy Carbon Electrode: GCE) เป็นขั้วทำงานหลัก สำหรับการเตรียมตัวอย่างทดสอบ สารละลายคาร์บอนดอทจะถูกหยดลงบนพื้นผิวของ GCE ด้วยไมโครปิเปตในปริมาตร 30 ไมโครลิตร (μL) ซึ่งมีปริมาณเนื้อสารคาร์บอนดอทประมาณ 1.5 มิลลิกรัม ต่อครั้ง หลังจากนั้นปลอ่ยให้สารละลายแห้งที่อุณหภูมิห้องจนของเหลวระเหยหมด ขั้นตอนดังกล่าวจะทำซ้ำรวม 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ชั้นเคลือบคาร์บอนดอทที่มีความหนาเพียงพอ รวมปริมาตรสารละลายที่หยดทั้งหมดเป็น 90 ไมโครลิตร (0.09 มิลลิลิตร) ซึ่งเทียบเท่ากับปริมาณเนื้อสารคาร์บอนดอทรวม 4.5 มิลลิกรัม ดังแสดงในรูปที่ 33



รูปที่ 33 CD1, CD2, และ CD3 หยดลงบนโพรบ glassy carbon voltammetry

5. นำ GCE ที่เคลือบคาร์บอนดอทแล้วไปติดตั้งในชุดเซลล์ไฟฟ้าเคมี และทำการทดสอบด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry ตามพารามิเตอร์ที่กำหนด ทำการวัด Cyclic Voltammetry โดยใช้ระบบ อิเล็กโทรด 3 ขั้ว ได้แก่

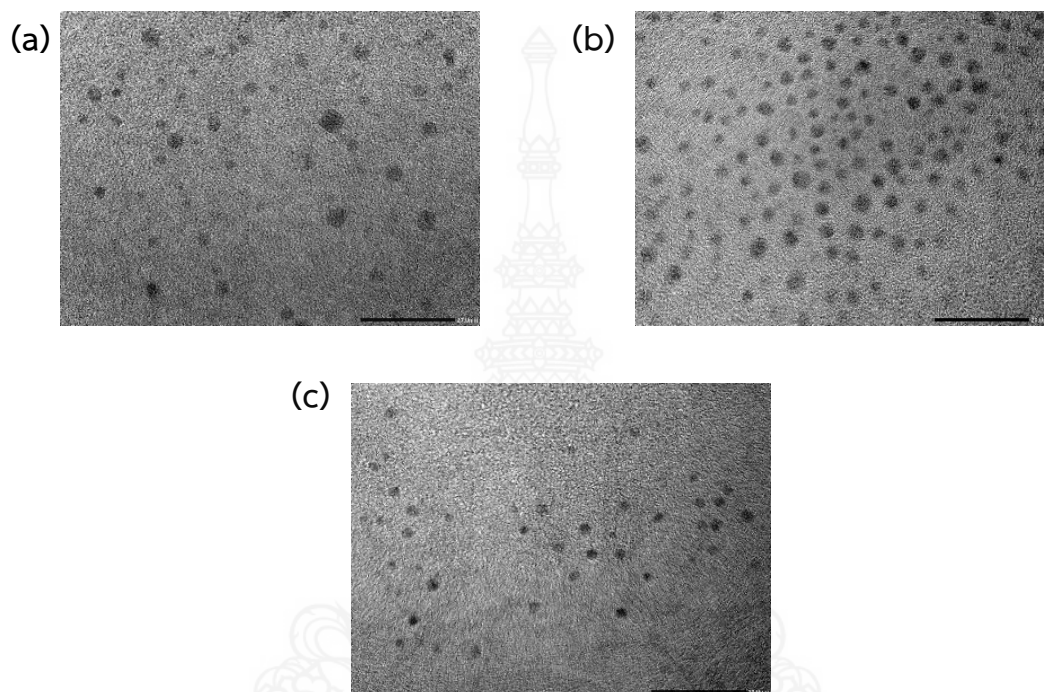
- ขั้วทำงาน (Working Electrode: GCE ที่หยดสารตัวอย่าง)
- ขั้วอ้างอิง (Reference Electrode: Ag/AgCl)
- ขั้วรองรับ (Counter Electrode: Pt wire)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

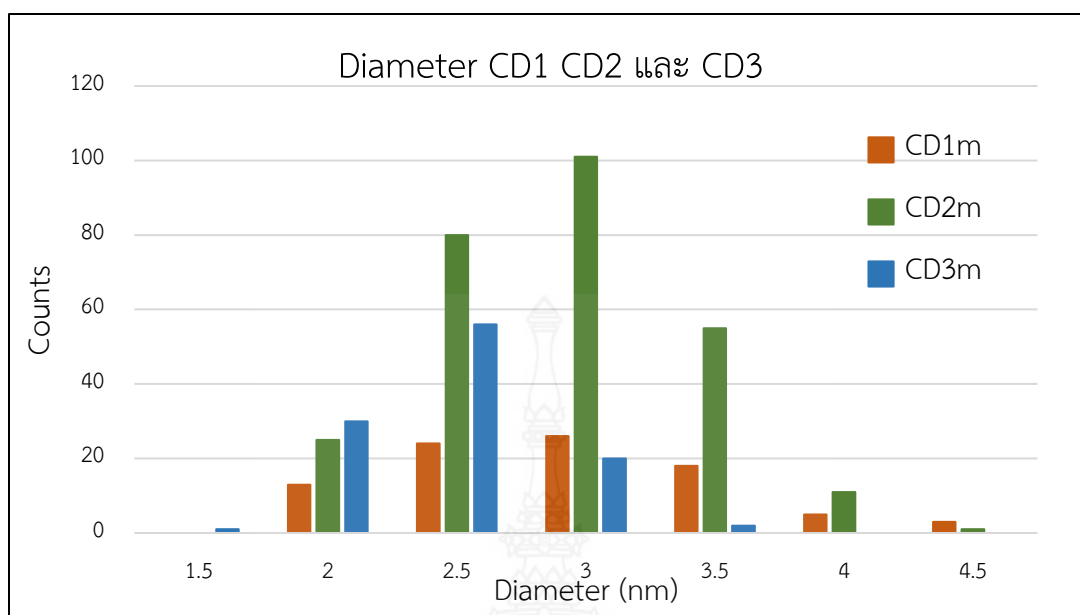
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและขนาดอนุภาค

4.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ TEM



รูปที่ 34 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ TEM (a) CD1 , (b) CD2 และ (c) CD3

จากการวิเคราะห์ Diameter ผลการกระจายขนาดของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคในหลายช่วง โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่พบมากที่สุดในแต่ละตัวอย่าง ได้แก่ CD1 และ CD2 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.5 นาโนเมตร ขณะที่ CD3 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า อยู่ที่ประมาณ 3.5 นาโนเมตร ทั้งนี้ CD1 แสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของขนาดอนุภาคมากที่สุด โดยมีช่วงตั้งแต่ 2-15 นาโนเมตร รองลงมาคือ CD2 ที่มีช่วงขนาด 2-10 นาโนเมตร และ CD3 ซึ่งมีช่วงขนาด 2-8 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 35

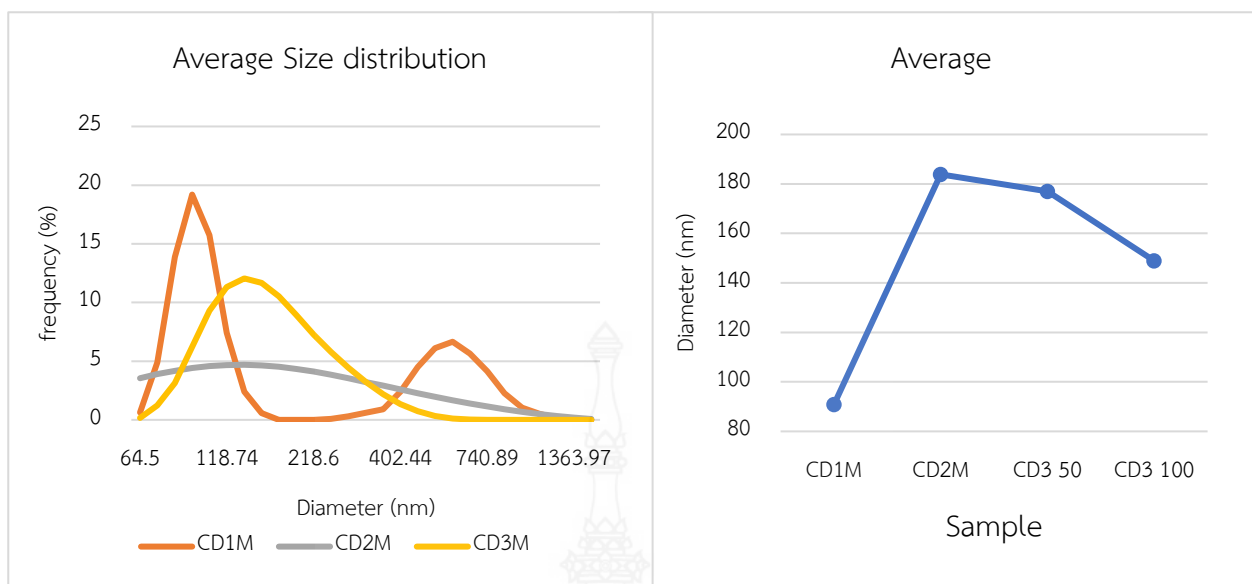


รูปที่ 35 แสดงค่า Diameter ของอนุภาค CD1 CD2 และ CD3 ที่วิเคราะห์จาก TEM

4.1.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ Size distribution

ตารางที่ 1 ตารางแสดงผล Size distribution จากการทดสอบ Dynamic light scattering (DSL)

no.	CD1M (nm)	CD2M (nm)	CD3 5x (nm)	CD3 10x (nm)
1	96	175	180	176
2	88.8	189	172	144.5
3	94.1	187.6	180	148.9
4	87	175.9	173	157.7
5	85.2	184.7	178.8	138.3
6	93.9	191	178.2	128.6
Average	90	183	177	149



รูปที่ 36 แสดงค่า Diameter Average Size distribution CD1, CD2 และ CD3

การวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Size distribution) ของสารละลายคาร์บอนดอท (Carbon Dots: CDs) ทั้งสามชนิด ได้แก่ CD1, CD2 และ CD3 (ที่ผ่านการเจือจาง 5 เท่า และ 10 เท่า) ทำโดยใช้เทคนิคการวัดขนาดอนุภาคแบบกระเจิงแสง (Dynamic Light Scattering: DLS) ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางและกราฟ พบว่า CD1 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 90 nm แสดงถึงการกระจายตัวของอนุภาคที่มีขนาดเล็กและค่อนข้างสม่ำเสมอ สอดคล้องกับค่ามาตรฐานเบี่ยงเบนที่ไม่สูงมาก

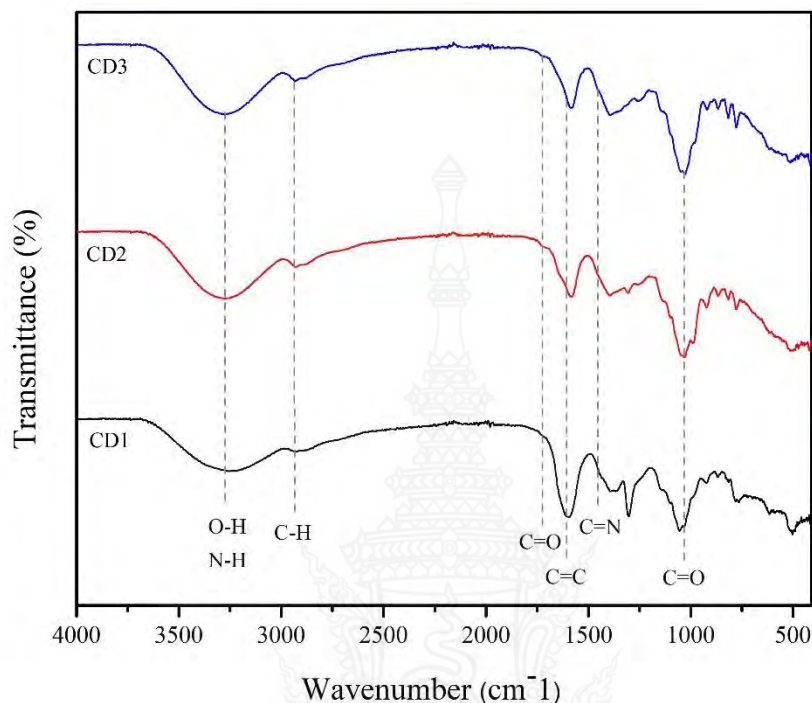
CD2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 183 nm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า CD1 อย่างชัดเจน อาจเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาค (aggregation) หรือโครงสร้างที่มีการเชื่อมโยงระหว่างอนุภาคมากกว่า CD1

CD3 ที่เจือจาง 5 เท่า มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 177 nm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ CD2 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นนี้ อนุภาอยังคงมีแนวโน้มรวมตัวคล้ายกับ CD2

CD3 ที่เจือจาง 10 เท่า มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 149 nm ซึ่งลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับที่เจือจาง 5 เท่า สะท้อนว่าการลดความเข้มข้นของสารละลายช่วยลดการรวมตัวของอนุภาค ส่งผลให้อนุภาคที่วัดได้มีขนาดเล็กลง จากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคของคาร์บอนดอทขึ้นอยู่กับทั้งชนิดของตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลาย โดย CD1 มีขนาดเล็กที่สุด ขณะที่ CD2 และ CD3 มีแนวโน้มมีขนาดใหญ่กว่า และการเจือจางมีบทบาทสำคัญต่อการกระจายตัวของอนุภาค ซึ่งอาจมีผลต่อสมบัติทางแสงและการประยุกต์ใช้งานในขั้นตอนถัดไป

4.2 การศึกษาสมบัติทางเคมี

4.2.1 การศึกษาสมบัติทางเคมี FTIR



รูปที่ 37 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค FTIR

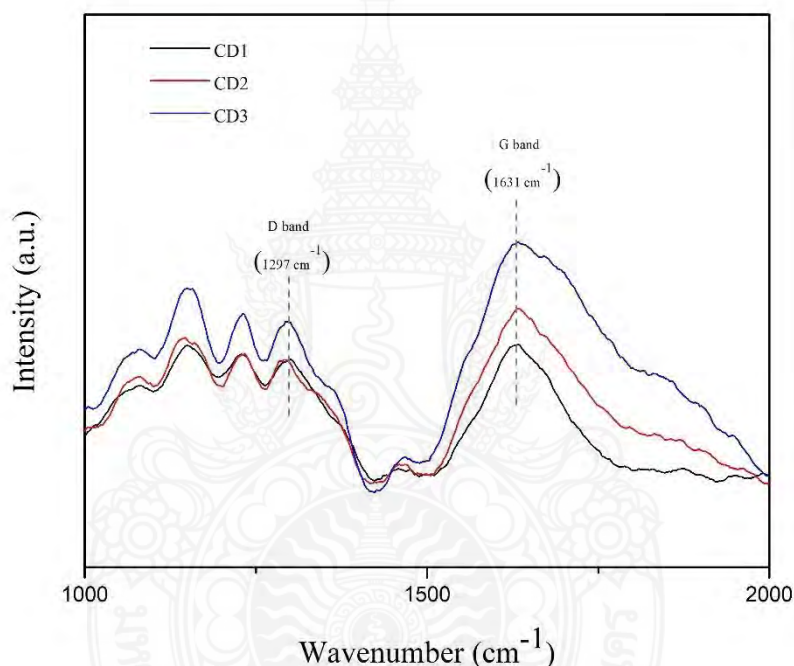
จากการวิเคราะห์สเปกตรัม FTIR ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเปลือกกล้วยใน 3 ระยะ ได้แก่ CD1, CD2 และ CD3 พบแถบการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกันในทุกตัวอย่าง แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญดังนี้

บริเวณ 3400 cm^{-1} พบแถบกว้างที่สัมพันธ์กับการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) และแอมิโน (N-H) บ่งชี้ถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เช่น แอลกอฮอล์ หรือเอมีน ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติการละลายน้ำและความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจน บริเวณ 2920 cm^{-1} เป็นแถบการสั่นของพันธะ C-H ซึ่งบ่งชี้ถึงการมีหมู่เมทิล ($-\text{CH}_3$) หรือเมทิลีน ($-\text{CH}_2-$) อยู่ในโครงสร้าง บริเวณ 1700 cm^{-1} พบแถบที่สัมพันธ์กับพันธะคาร์บอนิล (C=O) ซึ่งอาจเกิดจากกรดคาร์บอกซิลิกหรือคีโตน บริเวณ 1600 cm^{-1} แสดงการสั่นของพันธะคู่คาร์บอน-คาร์บอน (C=C) ในวงแหวนอะโรมาติก และการสั่นของพันธะคาร์บอน-ไนโตรเจน (C=N) ซึ่งบ่งบอกถึงโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น บริเวณ $1100\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ พบแถบดูดกลืนของพันธะ C-O ซึ่งอาจเกิดจากหมู่แอลกอฮอล์ อีเทอร์ หรือเอสเทอร์

จากผลการวิเคราะห์พบว่า คาร์บอนดอททั้ง 3 ระยะมีองค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนและไนโตรเจนที่คล้ายกัน ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมี เช่น ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจน และอาจส่งผลต่อการเรืองแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ โดยความแตกต่างของความเข้มข้นในช่วงความยาวคลื่นอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบเคมีหรือระดับการออกซิไดซ์ในแต่ละระยะการสังเคราะห์

4.2.2 การศึกษาสมบัติทางเคมี Raman

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

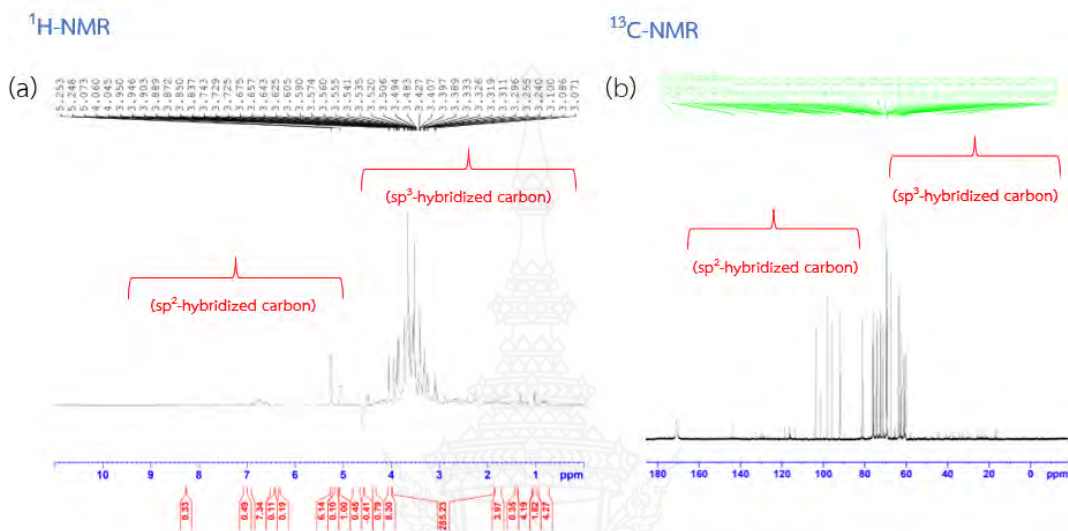


รูปที่ 38 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

จากการวิเคราะห์ Raman spectroscopy ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเปลือกกล้วยในแต่ละระยะพบพีกสำคัญบริเวณ 1297 cm^{-1} (D band) และ 1631 cm^{-1} (G band) ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างคาร์บอนแบบ sp^3 (defect/disorder) และ sp^2 (graphitic carbon) ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 3 ตัวอย่างแสดงความเข้มของพีก G band ที่มีแนวโน้ม มากกว่า D band โดยตัวอย่างของ CD3 แสดงความเข้มของ G band เด่นชัดกว่าตัวอย่างอื่น แสดงถึงโครงสร้างที่มีการจัดเรียงของพันธะ sp^2 สูงกว่า ในขณะที่ CD2 แสดงความเข้ม G band ต่ำกว่า และ CD1 ต่ำที่สุด ในขณะที่ CD3 แสดง D band มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเช่นกันกับ G band บ่งบอกถึงโครงสร้างที่มี defect สูงกว่าตัวอย่างอื่น อัตราส่วน I_D/I_G ของ CD1 CD2 และ CD3 อยู่ที่ประมาณ 0.89, 0.69

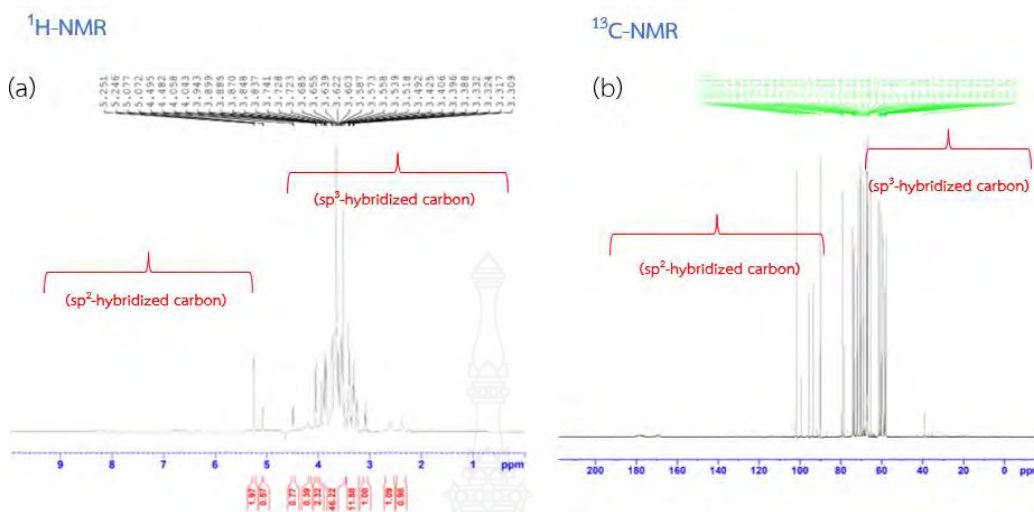
และ 0.65 ตามลำดับ อัตราส่วน I_D/I_G ของ CD3 ต่ำกว่าตัวอย่างอื่น แสดงให้เห็นถึงการจัดเรียงของโครงสร้างคาร์บอนที่เป็นระเบียบมากกว่า CD2 และ CD1 ผลการวิเคราะห์ Raman จึงสามารถแสดงให้เห็นถึงผลของความสูงของกล้วยที่ใช้ในการสังเคราะห์ต่อระดับความเป็นระเบียบของโครงสร้างคาร์บอนดอทที่ได้อย่างชัดเจน

4.2.3 การศึกษาสมบัติทางเคมี NMR



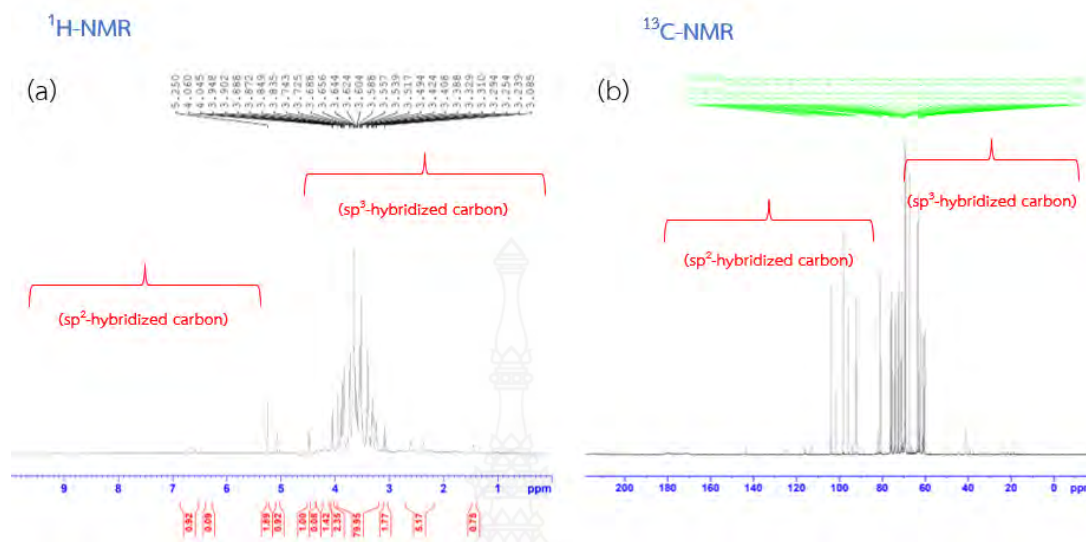
รูปที่ 39 CD1 (a) $^1\text{H-NMR}$ และ (b) $^{13}\text{C-NMR}$

จากรูปที่ 39 สเปกโทรสโกปีเรโซแนนซ์แม่เหล็กนิวเคลียร์ (NMR) จากตัวอย่างของ CD1 $^1\text{H-NMR}$ และ $^{13}\text{C-NMR}$ เพื่อแยกระหว่างอะตอมคาร์บอนไฮบริด sp^3 และอะตอมคาร์บอนไฮบริด sp^2 สเปกตรัม NMR แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของสภาพแวดล้อมทางเคมี 4 แบบที่แตกต่างกัน โดยบริเวณการเลื่อนทางเคมี (δ) ถูกค้นพบในสเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ (a) 1-3 ppm มีโปรตอน sp^3 C-H เป็นหลัก, 3-6 ppm เกี่ยวข้องกับโปรตอนของหมู่ไฮดรอกซิล อีเทอร์ และคาร์บอนิล 6-8 ppm สำหรับโปรตอนอะโรมาติกหรือ sp^2 และ 8-10 ppm เกี่ยวข้องกับโปรตอนอัลดีไฮด์ สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ แสดงให้เห็นว่าบริเวณพีคช่วง 1-5 ppm มีพีคที่มากกว่า ช่วง 6-10 ppm บ่งบอกอะตอมคาร์บอนที่ไฮบริด sp^3 มีมากกว่า อะตอมคาร์บอนที่ไฮบริด sp^2 ในขณะเดียวกัน สเปกตรัม $^{13}\text{C-NMR}$ (b) แสดงให้เห็นส่วนผสมของอะตอมคาร์บอนที่ไฮบริด sp^3 และ sp^2 พบบริเวณที่แตกต่างกัน 4 บริเวณ ได้แก่ 20-80 ppm สำหรับคาร์บอน sp^3 และ คาร์บอนที่ยึดติดด้วยหมู่ไฮดรอกซิล, 80-100 ppm สำหรับคาร์บอนที่ยึดติดด้วยพันธะอีเทอร์, 100-120 ppm สำหรับอะตอมคาร์บอนไฮบริดไคซ์ $\text{C} = \text{C}$ หรือ sp^2 และสุดท้าย 175-190 ppm สำหรับคาร์บอน $\text{C} = \text{O}$



รูปที่ 40 CD2 (a) ^1H และ (b) ^{13}C

จากรูปที่ 40 สเปกโทรสโกปีเรโซแนนซ์แม่เหล็กนิวเคลียร์ (NMR) จากตัวอย่างของ CD2 ^1H -NMR และ ^{13}C -NMR เพื่อแยกระหว่างอะตอมคาร์บอนไฮบริด sp^3 และอะตอมคาร์บอนไฮบริด sp^2 สเปกตรัม NMR แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของสภาพแวดล้อมทางเคมี 4 แบบที่แตกต่างกัน โดยบริเวณการเลื่อนทางเคมี (δ) ถูกค้นพบในสเปกตรัม ^1H -NMR (a) 1-3 ppm มีโปรตอน sp^3 C-H เป็นหลักซึ่งมีพีคน้อยกว่า CD1, 3-6 ppm เกี่ยวข้องกับโปรตอนของหมู่ไฮดรอกซิล อีเทอร์ และคาร์บอนิล 6-8 ppm สำหรับโปรตอนอะโรมาติกหรือ sp^2 มีพีคน้อยกว่า CD1 และ 8-9 ppm เกี่ยวข้องกับโปรตอนอัลดีไฮด์พบว่าไม่มีสัญญาณ ในขณะเดียวกัน สเปกตรัม ^{13}C -NMR (b) แสดงให้เห็นส่วนผสมของอะตอมคาร์บอนที่ไฮบริด sp^3 และ sp^2 พบบริเวณที่แตกต่างกัน 4 บริเวณ ได้แก่ 20-80 ppm สำหรับคาร์บอน sp^3 และ คาร์บอนที่ยึดติดด้วยหมู่ไฮดรอกซิล มีพีคที่สูงกว่า CD1, 80-100 ppm สำหรับคาร์บอนที่ยึดติดด้วยพันธะอีเทอร์ ซึ่งมีพีคที่สูงกว่า CD1, 100-120 ppm สำหรับอะตอมคาร์บอนไฮบริดไคซ์ $\text{C} = \text{C}$ หรือ sp^2 มีพีคสูงกว่า CD1 ด้วยเช่นกัน และสุดท้าย 175-190 ppm สำหรับคาร์บอน $\text{C} = \text{O}$ มีพีคน้อยกว่า CD1



รูปที่ 41 CD3 (a) ^1H และ (b) ^{13}C

จากรูปที่ 41 สเปกโทรสโกปีเรโซแนนซ์แม่เหล็กนิวเคลียร์ (NMR) จากตัวอย่างของ CD2 ^1H -NMR และ ^{13}C -NMR เพื่อแยกระหว่างอะตอมคาร์บอนไฮบริด sp^3 และอะตอมคาร์บอนไฮบริด sp^2 สเปกตรัม NMR แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของสภาพแวดล้อมทางเคมี 4 แบบที่แตกต่างกัน โดยบริเวณการเลื่อนทางเคมี (δ) ถูกค้นพบในสเปกตรัม ^1H -NMR (a) 1-3 ppm มีโปรตอน sp^3 C-H เป็นหลักซึ่งมีพีคน้อยกว่า CD1 เช่นเดียวกับ CD2, 3-6 ppm เกี่ยวข้องกับโปรตอนของหมู่ไฮดรอกซิล อีเทอร์ และคาร์บอนิล 6-8 ppm สำหรับโปรตอนอะโรมาติกหรือ sp^2 มีพีคน้อยกว่า CD1 เช่นเดียวกับ CD2 และ 8-9 ppm เกี่ยวข้องกับโปรตอนอัลดีไฮด์พบว่าไม่มีสัญญาณในขณะเดียวกัน สเปกตรัม ^{13}C -NMR (b) แสดงให้เห็นส่วนผสมของอะตอมคาร์บอนที่ไฮบริด sp^3 และ sp^2 พบบริเวณที่แตกต่างกัน 4 บริเวณ ได้แก่ 20-80 ppm สำหรับคาร์บอน sp^3 และ คาร์บอนที่ยึดติดด้วยหมู่ไฮดรอกซิล มีพีคที่สูงกว่า CD1 ใกล้เคียงกับ CD2, 80-100 ppm สำหรับคาร์บอนที่ยึดติดด้วยพันธะอีเทอร์ ซึ่งมีพีคที่สูงกว่า CD1 แต่ต่ำกว่า CD2, 100-120 ppm สำหรับอะตอมคาร์บอนไฮบริดไคซ์ $\text{C} = \text{C}$ หรือ sp^2 มีพีคสูงกว่า CD1 แต่ต่ำกว่า CD2 ด้วยเช่นกัน และสุดท้าย 175-190 ppm สำหรับคาร์บอน $\text{C} = \text{O}$ มีพีคน้อยกว่า CD1 เช่นเดียวกับ CD2

การวิเคราะห์ด้วยโปรตอนและคาร์บอนของ CD1, CD2 และ CD3

การวิเคราะห์สเปกตรัมโปรตอนและคาร์บอนของตัวอย่าง CD1, CD2 และ CD3 ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างคาร์บอนดอทและระดับความเป็นระเบียบของโครงสร้างได้

สำหรับ CD1 พบว่าพีคในสเปกตรัมโปรตอนช่วง 1–5 ppm sp^3 C–H และหมู่ไฮดรอกซิล อีเทอร์ คาร์บอนิลมีมากกว่าช่วง 6–10 ppm (sp^2 /อะโรมาติก และอัลดีไฮด์) สะท้อนว่าคาร์บอน sp^3 มีปริมาณสูงกว่า sp^2 ในสเปกตรัมคาร์บอนก็พบสัญญาณ sp^3 และ C–OH ในช่วง 20–80 ppm ปานกลาง ส่วน C–O–C (80–100 ppm) และ sp^2 C=C (100–120 ppm) มีปริมาณปานกลาง ขณะที่ C=O (175–190 ppm) มีปริมาณสูง โดยรวมแสดงให้เห็นว่า CD1 มีคาร์บอน sp^3 เหนือกว่า sp^2 สะท้อนโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบสูง

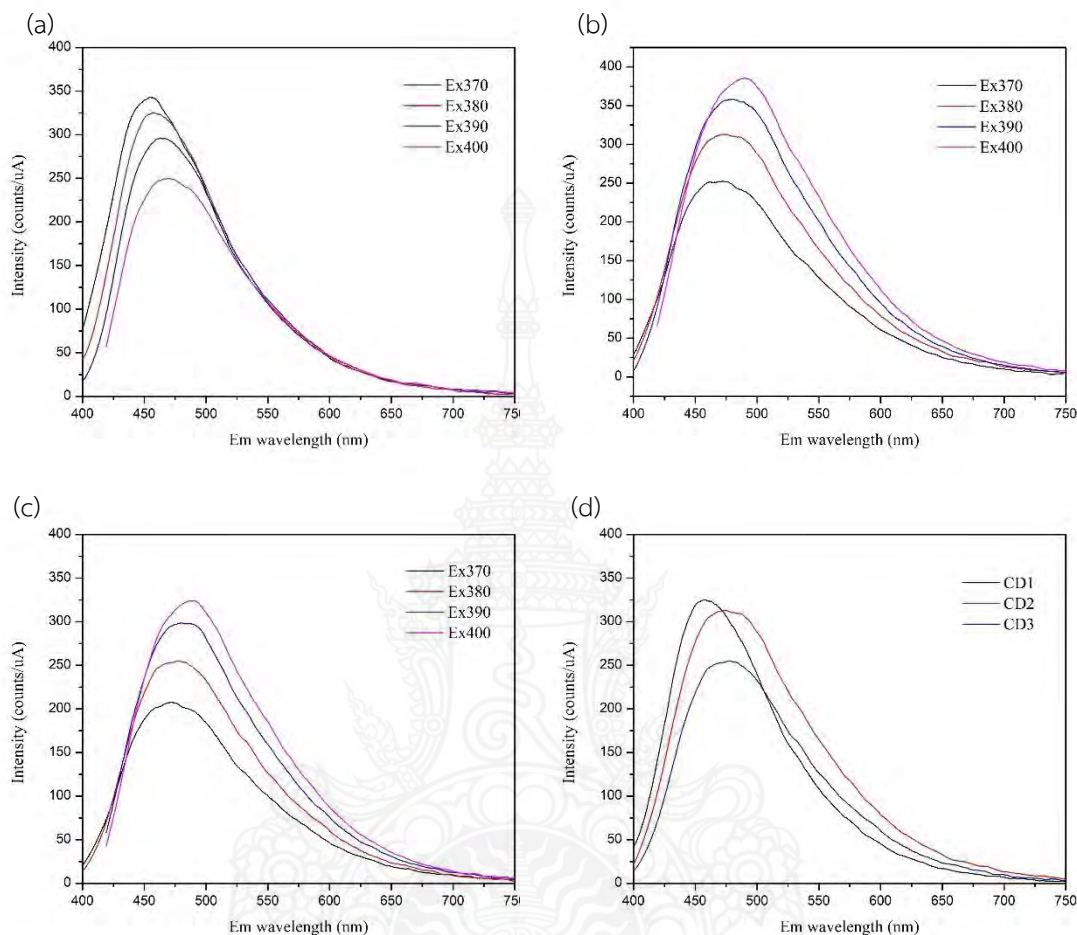
สำหรับ CD2 สเปกตรัมโปรตอนแสดงพีค 1–3 ppm (sp^3 C–H) น้อยกว่า CD1 ช่วง 6–8 ppm (sp^2 /aromatic) ก็มีปริมาณน้อยกว่า CD1 และไม่พบสัญญาณอัลดีไฮด์ ในสเปกตรัมคาร์บอนพบสัญญาณ sp^3 และ C–OH (20–80 ppm), C–O–C (80–100 ppm) และ sp^2 C=C (100–120 ppm) สูงกว่า CD1 ขณะที่ C=O (175–190 ppm) มีปริมาณต่ำกว่า โดยรวม CD2 มีทั้ง sp^3 และ sp^2 สูง แต่สัดส่วน sp^2 เพิ่มขึ้นสะท้อนถึงโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบสูงมากที่สุดในสามตัวอย่าง

สำหรับ CD3 พบลักษณะใกล้เคียง CD2 สเปกตรัมโปรตอนพีค sp^3 และ sp^2 ใกล้เคียงกับ CD2 ไม่มีสัญญาณอัลดีไฮด์ ในสเปกตรัมคาร์บอนพบ sp^3 และ C–OH สูงกว่า CD1 ใกล้เคียง CD2 แต่ C–O–C และ sp^2 C=C มีปริมาณต่ำกว่า CD2 เล็กน้อย โดยรวม CD3 มีความเป็นระเบียบสูงกว่า CD1 แต่ต่ำกว่า CD2

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ระดับความเป็นระเบียบของตัวอย่างคือ CD1 มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบสูงที่สุด (sp^3 เหนือกว่า sp^2), CD3 โครงสร้างกึ่งระเบียบ (sp^3 และ sp^2 ใกล้เคียงกัน) CD2 โครงสร้างเป็นระเบียบสูงที่สุด (sp^2 และพันธะอีเทอร์เด่นชัด)

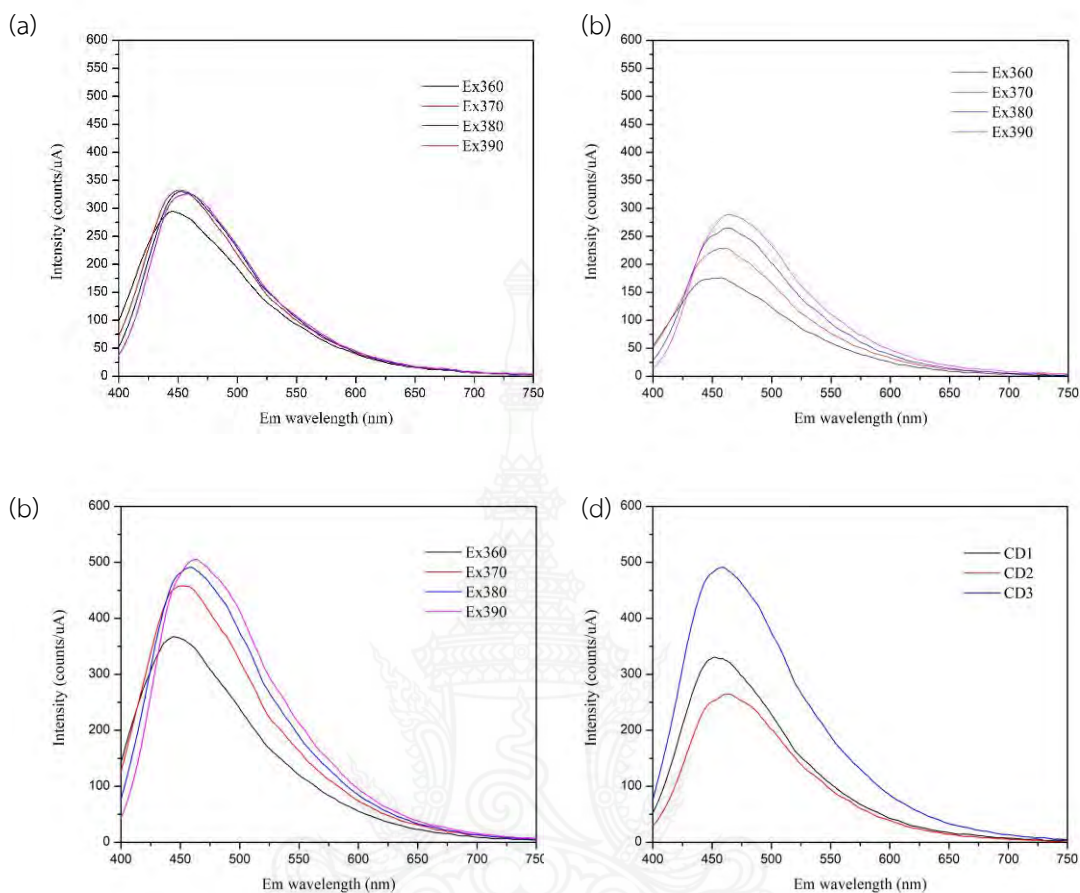
4.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

4.3.1 การศึกษาสมบัติทางแสง Fluorescent



รูปที่ 42 แสดงสเปกตรัม Fluorescent ของตัวอย่างชุด 202367

(a) ExCD1, (b) ExCD2 , (c) ExCD3 และ (d) Ex380 เปรียบเทียบผลระหว่าง CD1, CD2 และ CD3 จากผลการแสดงสเปกตรัมความยาวคลื่นกระตุ้นในช่วง 400 ถึง 750 นาโนเมตร (a) CD1 Ex370 Ex380 Ex390 และ Ex400 ตามลำดับ Intensity 342, 325, 296, และ 249 นาโนเมตร Intensity สูงสุดอยู่ที่ 342 นาโนเมตร Ex370 (b) CD2 Ex370 Ex380 Ex390 และ Ex400 ตามลำดับ Intensity 252, 312, 356 และ 384 นาโนเมตร Intensity สูงสุดอยู่ที่ 384 Ex400 (c) CD3 Ex370 Ex380 Ex390 และ Ex400 ตามลำดับ Intensity 207, 254, 294, และ 324 Intensity สูงสุดอยู่ที่ 324 นาโนเมตร (d) Ex380 เปรียบเทียบผลระหว่าง CD1, CD2 และ CD3 Intensity อยู่ที่ 324, 312 และ 254 นาโนเมตร ตามลำดับ จากผลสเปกตรัมแสดงให้เห็นว่า Intensity สูงสุดคือ CD1 รองลงมาคือ CD2 และ CD3 เป็นลำดับถัดไป



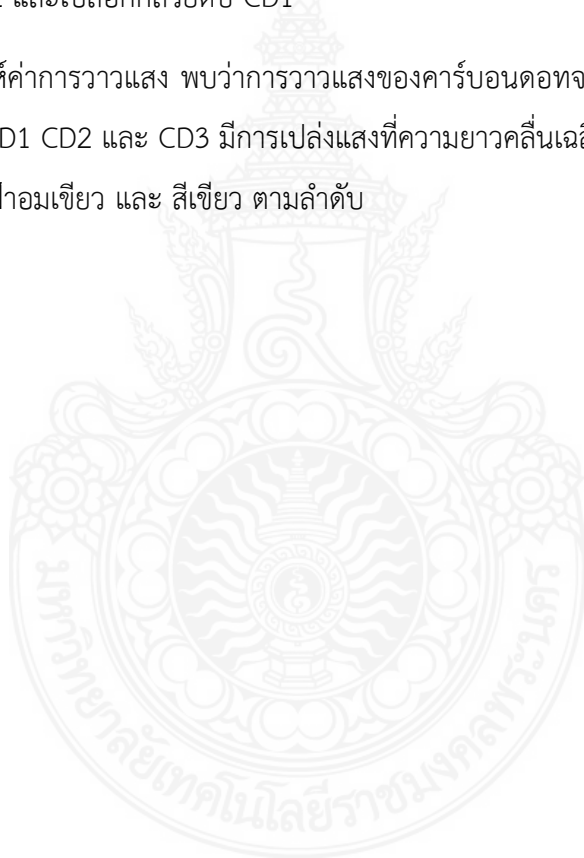
รูปที่ 43 แสดงสเปกตรัม Fluorescent ของตัวอย่างชุด 30567

(a) ExCD1, (b) ExCD2 , (c) ExCD3 และ (d) Ex380 เปรียบเทียบผลระหว่าง CD1, CD2 และ CD3 จากผลการแสดงสเปกตรัมความยาวคลื่นกระตุ้นในช่วง 400 ถึง 750 นาโนเมตร (a) CD1 Ex360 Ex370 Ex380 และ Ex390 ตามลำดับ Intensity 294, 332, 330 และ 325 นาโนเมตร Intensity สูงสุดอยู่ที่ 330 นาโนเมตร Ex380 (b) CD2 Ex360 Ex370 Ex380 และ Ex390 ตามลำดับ Intensity 175, 227, 265 และ 289 นาโนเมตร Intensity สูงสุดอยู่ที่ 265 นาโนเมตร Ex380 (c) CD3 Ex360 Ex370 Ex380 และ Ex390 ตามลำดับ Intensity 366, 457, 490 และ 504 นาโนเมตร Intensity สูงสุดอยู่ที่ 504 นาโนเมตร (d) Ex380 เปรียบเทียบผลระหว่าง CD1, CD2 และ CD3 Intensity อยู่ที่ 330, 265, และ 490 นาโนเมตร ตามลำดับ จากผลสเปกตรัมแสดงให้เห็นว่า Intensity สูงสุดคือ CD3 รองลงมาคือ CD1 และ CD2 เป็นลำดับถัดไป

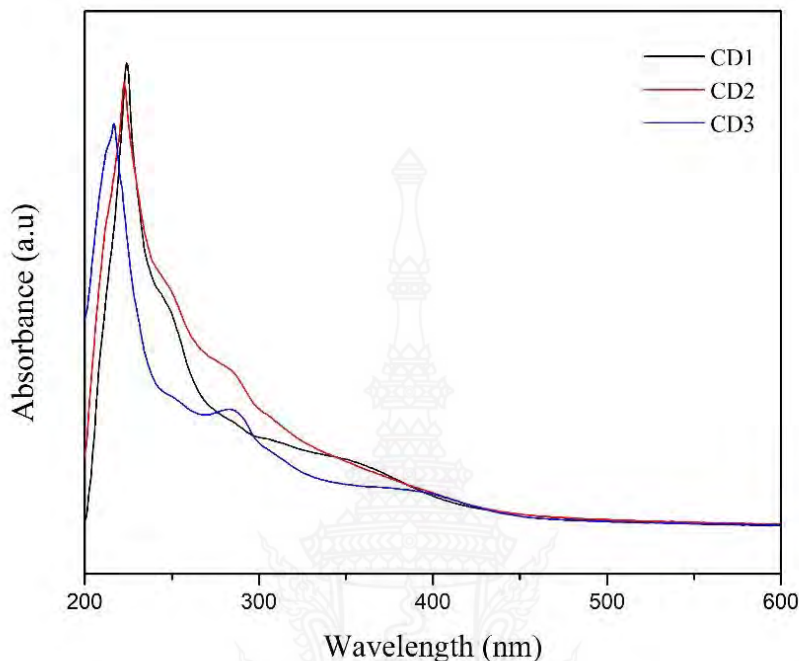
จากการศึกษาการวางแสงของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเปลือกกล้วยระยะต่าง ๆ คือ เปลือกกล้วยดิบ เปลือกกล้วยสุก และเปลือกกล้วยสุกมาก การสังเคราะห์นั้นมาจากการเตรียมผงเปลือกกล้วยอบแห้งแตกต่างกัน โดยจะควบคุมเปลือกกล้วยให้เป็นเปลือกกล้วยหอมให้มากที่สุด ผลการศึกษาการวางแสงของคาร์บอนดอทชุด

จากชุดข้อมูลวันที่ 20/03/67 พบว่าค่า intensity ของสารสกัด CD1 CD2 และ CD3 อยู่ที่ 324, 312 และ 254 ตามลำดับ และจากชุดข้อมูลวันที่ 30/05/67 พบว่าค่า intensity ของ CD1 CD2 และ CD3 อยู่ที่ 330, 265 และ 490 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลจากแต่ละชุดข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ย พบว่าค่า intensity ของสารสกัด CD1 CD2 และ CD3 เท่ากับ 327, 288 และ 372 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า คาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยระยะสุกมากหรือ CD3 มีค่า intensity สูงสุด หรือก็คือสามารถสังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพการเปล่งแสงที่ดีกว่า คาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยสุก CD2 และเปลือกกล้วยดิบ CD1

และจากการวิเคราะห์ค่าการวางแสง พบว่าการวางแสงของคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยทั้ง 3 ระยะนั้น ให้การวางแสงที่ต่างกัน คือ CD1 CD2 และ CD3 มีการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นเฉลี่ย 455, 468 และ 466 นาโนเมตร ดังรูปที่ 26 คือ สีฟ้า สีฟ้าอมเขียว และ สีเขียว ตามลำดับ



4.3.2 การศึกษาสมบัติทางแสง UV-Vis

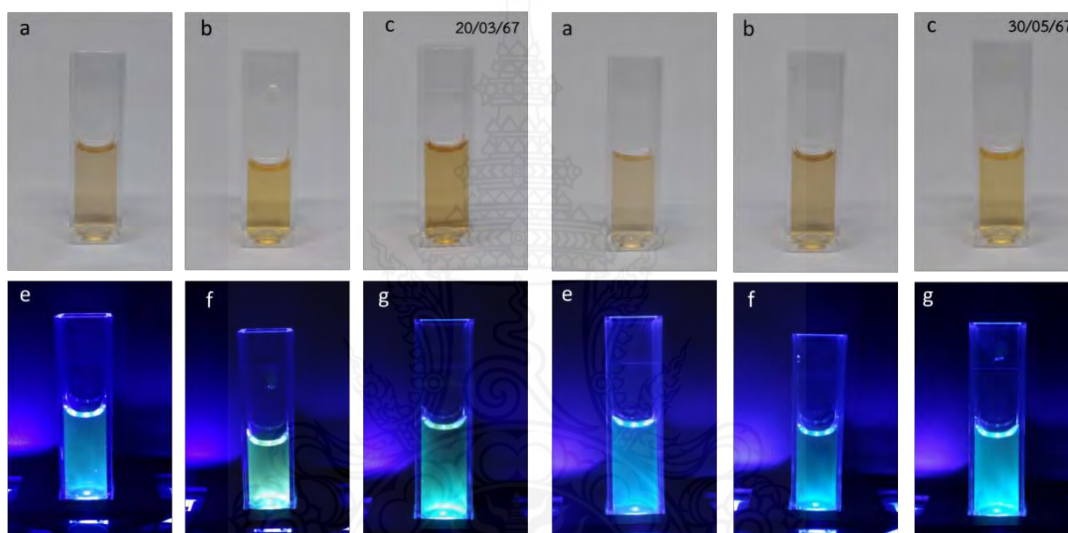


รูปที่ 44 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy

จากกราฟสเปกตรัม UV-Vis ของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเปลือกกล้วยในช่วงความยาวคลื่น 200–600 nm พบว่าทุกตัวอย่างมีแถบดูดกลืนหลักในบริเวณ 210–230 nm ซึ่งสัมพันธ์กับการดูดกลืนของอิเล็กตรอนแบบ $\pi \rightarrow \pi^*$ จากพันธะคู่คาร์บอน-คาร์บอน ($C=C$) ในโครงสร้างอะโรมาติกของคาร์บอนดอท และแถบที่มีการดูดกลืนต่อเนื่องในช่วง $\sim 280\text{--}320$ nm ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนผ่านของอิเล็กตรอนแบบ $n \rightarrow \pi^*$ จากพันธะคาร์บอนิล ($C=O$) หรือกลุ่มที่มีออกซิเจน ตัวอย่าง CD1 และ CD2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่สูงกว่าตัวอย่าง CD3 เล็กน้อยในช่วง UV ซึ่งอาจบ่งชี้ว่ามีหมู่ฟังก์ชันหรือโครงสร้างคาร์บอนบางชนิดในปริมาณมากกว่า อย่างไรก็ตาม แถบการดูดกลืนที่กว้างและลดระดับอย่างต่อเนื่องจาก UV ไปยัง Visible สะท้อนถึงลักษณะของวัสดุนาโนที่มีแถบพลังงาน (band gap) กว้าง และมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงกว้าง ผลการวิเคราะห์นี้ช่วยสนับสนุนว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากเปลือกกล้วยมีสมบัติทางแสงที่ดีและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์หรือเซนเซอร์ทางแสง

4.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยไฟฉาย UV

จากการศึกษาด้วยไฟฉาย UV ที่ความยาวคลื่น 370 365 และ 395 nm พบว่า Carbon dot ที่สังเคราะห์ มีการเรืองแสง โดยมีสีฟ้าจนถึงฟ้าอมเขียว โดยที่ CD1 มีการเปล่งแสงสีฟ้า และ CD2 CD3 มีสีฟ้าอมเขียว จากการสังเคราะห์ ได้คาร์บอนดอทที่มีสีหลากหลายตั้งแต่สีน้ำตาลใสจนถึงสีน้ำตาลเข้ม โดยในแต่ละชุดการสังเคราะห์พบว่า CD1 ค่อนข้างมีสีน้ำตาลใส หรือเหลืองใส ใน CD2 ค่อนข้างมีสีน้ำตาล และ CD3 ค่อนข้างมีสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งสีของสารละลายมีความคล้ายกันแต่ไม่เหมือนกันในแต่ละครั้งที่สังเคราะห์

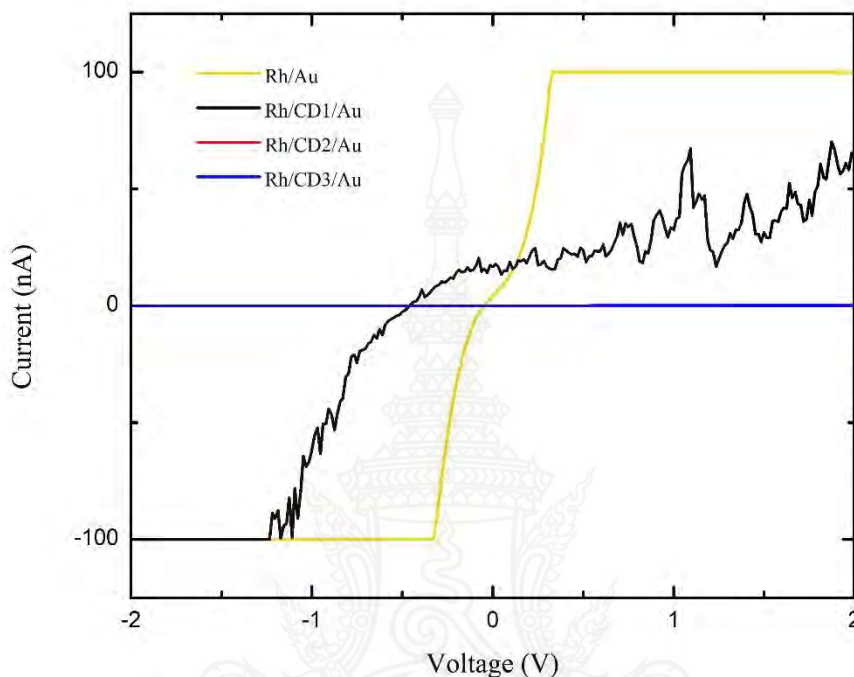


รูปที่ 45 แสดงลักษณะสีของคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้

เมื่อวันที่ 20/03/67 และ 30/05/67 (a) CD1 (b) CD2 (c) CD3 ภายใต้แสงธรรมชาติ และ (e) CD1 (f) CD2 (g) CD3 ภายใต้แสงยูวี 370 nm

4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

4.4.1 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า AFM ด้วย Rh/Au junction ในช่วงความต่างศักย์ -2V ถึง 2V



รูปที่ 46 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มคาร์บอนดอตด้วยเทคนิค I-V

จากรูปที่ 46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (Current) กับแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ของตัวอย่าง carbon dot molecular junction ซึ่งสามารถสังเกตถึงพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ซึ่งพฤติกรรมนี้สามารถใช้ในการจำแนกสมบัติทางไฟฟ้าของ molecular junction ได้กราฟสีดำ แสดงถึงผลของ Rh/Au molecular junction ซึ่งเป็นตัวอย่างอ้างอิง (blank sample) หรือ molecular junction ที่ไม่มีคาร์บอนดอต โดยสมมติฐาน molecular junction เช่นนี้ควรประพฤติตัวเป็นโลหะเพราะ เป็นเพียงการต่อกันของ Rh และ Au ซึ่งควรมีการเปลี่ยนแปลงของกระแส เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความตามศักย์ ในลักษณะเชิงเส้น (linear I-V) ตามกฎของโอห์ม ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ในการวิจัยนี้พบว่า พฤติกรรมของ Rh/Au molecular junction มีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear I-V) โดยการเปลี่ยนแปลงของกระแส ต่อการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ เกิดขึ้นช้ากว่าที่ ช่วงขนาดของกระแสใกล้ศูนย์ และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อขนาดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น โดยที่พฤติกรรมของ Rh/Au มีความสมมาตรในทั้งสองทิศทางสังเกตได้ว่า

กระแสเข้าสู่จุดอิ่มตัว (saturated current) ที่ 100 nA ซึ่งเป็นกระแสสูงที่เครื่องมือสามารถบันทึกได้ ที่ความต่างศักย์ ประมาณ 3.5 V (ในช่วงความต่างศักย์เป็นลบ กระแสอิ่มตัวที่ -100 nA เกิดขึ้นที่ ประมาณ -3.5V)

กราฟสีแดง แสดงถึงผลของ Rh/CD1/Au molecular junction ซึ่งเป็นตัวอย่าง molecular junction ของ CD1 สังเกตได้ว่า มี noise (การเปลี่ยนแปลงกระแส ขึ้นลงอย่างรวดเร็วในช่วงการเปลี่ยนแปลงกระแสอย่างสั้นๆ ซึ่งแสดงถึงความไม่เสถียรของระบบ หนึ่งในปัจจัยอาจเกิดจากความไม่แน่นอนในการทดลอง) โดยเมื่อสังเกตแนวโน้มของพฤติกรรมพบว่า มีความไม่สมมาตรของ I-V ในสองทิศทางของความต่างศักย์ ในช่วงความต่างศักย์เป็นบวก (0V ถึง 2V) กระแสเริ่มต้นจาก ค่ามากกว่าศูนย์ ที่ความต่างศักย์เป็นศูนย์และค่อยๆเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าอัตราการเพิ่มกระแสไฟฟ้าค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึง 2V ซึ่งกระแายังคงไม่ถึงจุดอิ่มตัว ในส่วนของความต่างศักย์ที่เป็นลบ (-2V ถึง 0V) พบว่ากระแสค่อยลดลง จากค่าบวก กลายเป็นลบที่ประมาณ -0.5V และกระแสมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจนเกินกระแสที่วัดได้ (-100 nA) ที่ความต่างศักย์ประมาณ -1.25V ในภาพรวมพบว่า Rh/CD1/Au มีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับ Rectification ซึ่งมีความเหมาะสมในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในกลุ่มของ diode ได้

กราฟสีน้ำเงินและสีม่วง แสดงถึงผลของ Rh/CD2/Au และ Rh/CD3/Au ตามลำดับ เป็นที่น่าสนใจที่ทั้งสองระบบแสดงถึง I-V ที่คงที่ โดยมีกระแสเป็น 0 nA ตลอด ช่วง -2V ถึง 2V ซึ่งแสดงให้เห็นว่า molecular junction ของ CD1 และ CD2 ประพฤติตัวเป็นฉนวนทางไฟฟ้า (insulator)

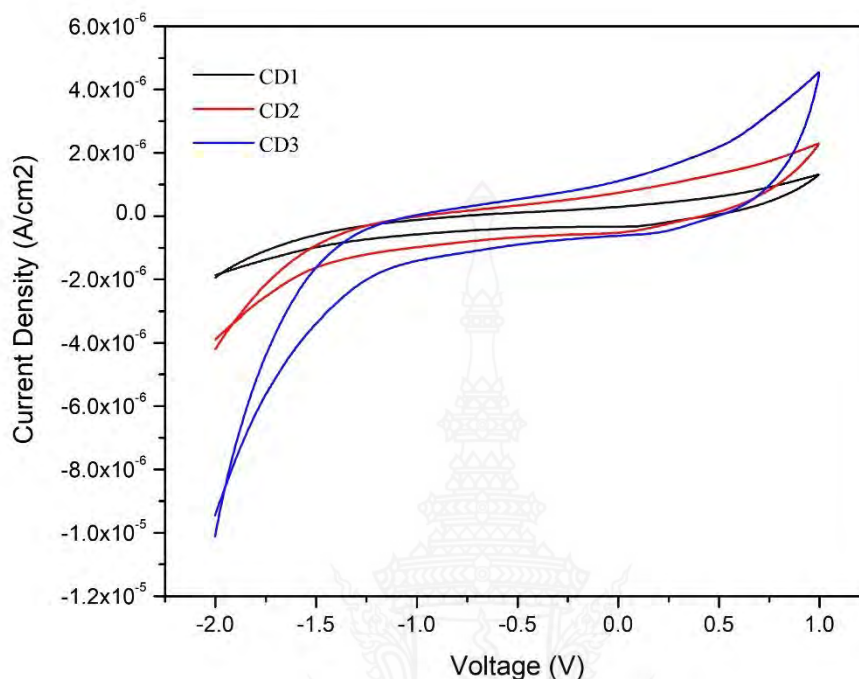
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (Current) กับแรงดันไฟฟ้า (Voltage) พบว่า Rh/Au junction (เส้นสีดำ) หรือ junction ที่ไม่มีคาร์บอนดอท มีลักษณะนำไฟฟ้าเรียบ (smooth) และเรียบ มีความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้าและกระแสไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear I-V) ขณะที่ CD1 (เส้นสีแดง) แสดงพฤติกรรมการนำไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องและค่อนข้างเสถียร เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้งานในอิเล็กทรอนิกส์ระดับโมเลกุล ในขณะที่ CD2 (เส้นสีน้ำเงิน) และ CD3 (เส้นสีชมพู) ไม่แสดงค่ากระแสที่ชัดเจนหรือคงที่ แสดงถึงความไม่เสถียรของวัสดุ จึงไม่เหมาะสมสำหรับใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์โมเลกุล

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผล Rh/Au junction ในช่วงความต่างศักย์ -2V ถึง 2V

ตัวอย่าง	สมบัติทางไฟฟ้าในช่วง -2V ถึง 2V		
	การนำไฟฟ้า	สมมาตร	ความสัมพันธ์ของ I-V
Rh/Au	นำ	สมมาตร	ไม่เชิงเส้น
Rh/CD1/Au	นำ	ไม่สมมาตร	ไม่เชิงเส้น
Rh/CD2/Au	ไม่นำ	สมมาตร	คงที่ที่ศูนย์
Rh/CD3/Au	ไม่นำ	สมมาตร	คงที่ที่ศูนย์



4.4.2 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า Cyclic Voltammetry



รูปที่ 47 ผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry

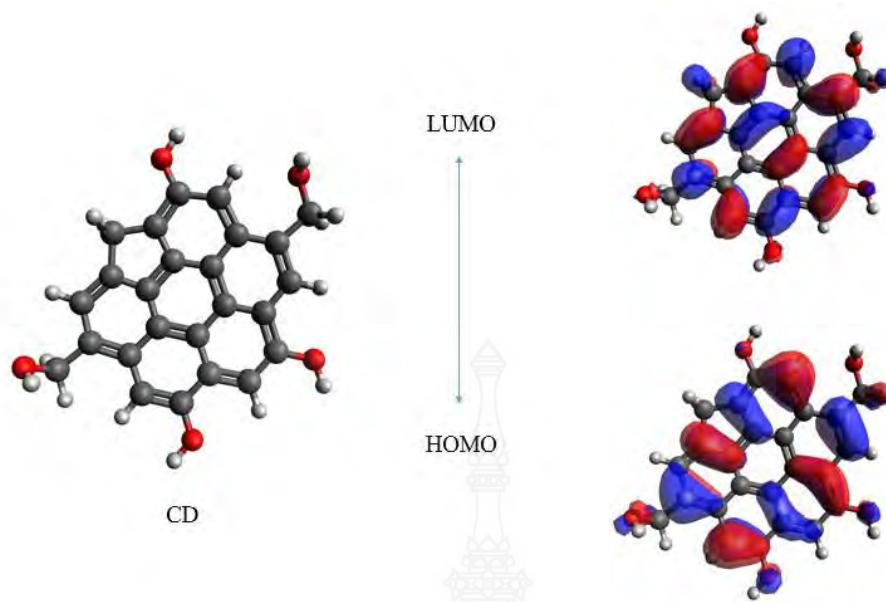
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (Current Density) และแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ของคาร์บอนดอททั้งสามชนิด (CD1, CD2 และ CD3) พบว่าแต่ละตัวอย่างมีพฤติกรรมการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยในช่วงแรงดันบวกและลบ ค่าความหนาแน่นกระแสของ CD3 (เส้นสีน้ำเงิน) มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น สะท้อนถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูงกว่า ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างภายในที่มีบริเวณ sp^2 มาก ทำให้การเคลื่อนที่ของพาหะประจุเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับ CD2 (เส้นสีแดง) พบว่ามีค่าความหนาแน่นกระแสอยู่ในระดับปานกลาง รองจาก CD3 แต่สูงกว่า CD1 ขณะที่ CD1 (เส้นสีดำ) มีค่าความหนาแน่นกระแสต่ำที่สุดในทุกช่วงแรงดัน แสดงว่ามีสมบัติการนำไฟฟ้าต่ำที่สุดในสามตัวอย่าง ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณ defect ที่สูงหรือการจัดเรียงตัวของโครงสร้างคาร์บอนที่ไม่เอื้อต่อการขนส่งประจุ โดยสรุป สมบัติการนำไฟฟ้าของตัวอย่างเรียงลำดับจากมากไปน้อยคือ $CD3 > CD2 > CD1$ ซึ่งข้อมูลนี้สามารถนำไปเชื่อมโยงกับผลการวิเคราะห์โครงสร้าง (เช่น ค่า ID/IG) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับสมบัติทางไฟฟ้าได้อย่างชัดเจน

4.5 Simulation

เพื่อศึกษาต่อยอดถึงความเป็นไปได้ในการนำคาร์บอนดอทไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์โมเลกุล (molecular electronics) ผู้วิจัยเลือกใช้กระบวนการจำลองระบบโลหะ-คาร์บอนดอท-โลหะ (Metal-carbon dot-metal system) เพื่อศึกษายืนยันความเป็นไปได้ในการใช้คาร์บอนดอทในงานอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ โดยผู้วิจัยเลือกใช้โครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนดอทจากงานวิจัยของ Nawarat et al. 2021 [13] เพื่อเป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าของโมเลกุลด้วยการเลือกชนิดของโลหะ (metal) ที่เป็นขั้ว ในงานวิจัยนี้เลือกที่จำลองขั้วโลหะเป็นเพียงแค่อะตอมโลหะเพียงอะตอมเดียวในแต่ละขั้วเท่านั้น เพื่อให้ระบบมีความเหมาะสมกับการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ในเวลาที่ย่น แม้วผลการ simulation ที่ได้ อาจไม่สามารถเป็นตัวแทนของระบบ molecular junction ที่แท้จริง ซึ่งควรมีโลหะที่เป็นขั้วมากกว่าหนึ่งอะตอม (ในการทดลอง molecular junction จริงขั้วโลหะที่ใช้ปกติเป็นขั้วโลหะในระดับนาโนเมตรหรือเป็นโลหะแบบ Bulk) จากผลการ simulation ในการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าของ carbon dot ใน molecular junction ได้อย่างชัดเจน และเป็นที่ยืนยันถึงความเป็นไปได้ในการใช้ carbon dot ในงานอิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่

การจำลองโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนดอทที่ยึดเกาะด้วยโลหะด้วยโปรแกรม Avogadro ในการศึกษานี้ ได้ทำการจำลองโมเลกุล (Molecular Simulation) ของคาร์บอนดอทที่มีโลหะทอง (Au), ทองแดง (Cu) และ เงิน (Ag) ยึดเกาะกับผิวของคาร์บอนดอท โดยใช้โปรแกรม Avogadro ในการสร้างและจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุล เบื้องต้น แล้วนำไปคำนวณค่าทางพลังงานและคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธี Density Functional Theory (DFT)

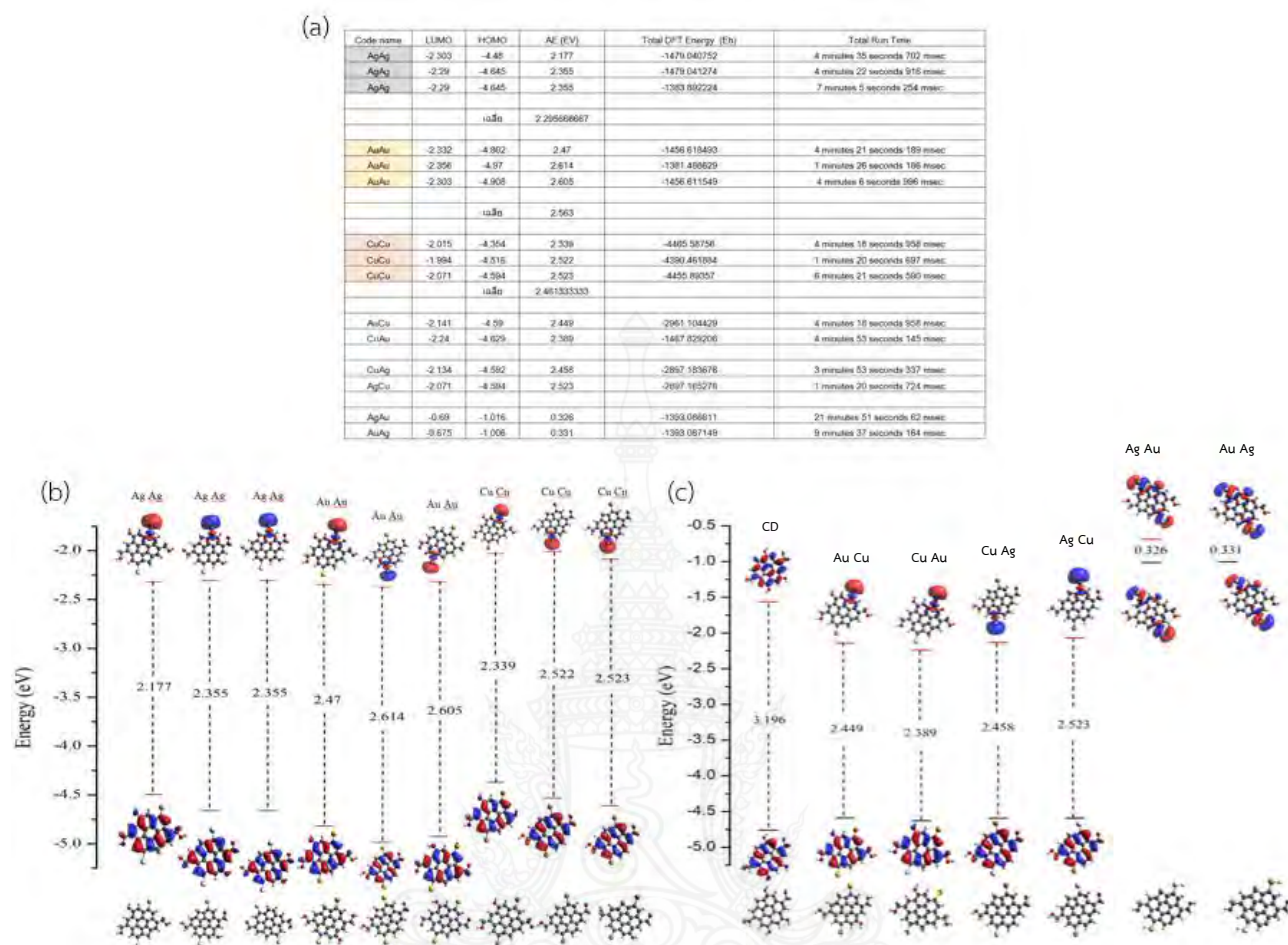


รูปที่ 48 การจำลองโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนดอท

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

1. การรันค่าพลังงานซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากแต่ละรอบ ได้แก่ ค่าระดับพลังงานสูงสุดของออร์บิทัลที่ถูกครอบครอง (HOMO), ค่าระดับพลังงานต่ำสุดของออร์บิทัลว่าง (LUMO), ค่า band gap (HOMO–LUMO), และค่าพลังงานรวม (Total DFT Energy) เพื่อประเมินความเสถียรและความแม่นยำของแบบจำลอง
2. การสลับตำแหน่งโลหะที่ยึดเกาะ เพื่อศึกษาผลของตำแหน่งต่อค่าพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ โดยได้สลับตำแหน่งของโมเลกุลโลหะระหว่างกัน ได้แก่ Au กับ Cu, Cu กับ Au, Cu กับ Ag, Ag กับ Cu, Ag กับ Au และ Au กับ Ag

โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาว่า การเปลี่ยนตำแหน่งของโลหะที่ยึดเกาะกับคาร์บอนดอทจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์และความเสถียรของโมเลกุลมากน้อยเพียงใด ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบในรูปแบบกราฟและตารางในลำดับถัดไป



รูปที่ 49 การจำลองโครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอนดอท

จากรูป (a) ผลการคำนวณทางทฤษฎีด้วย Density Functional Theory (DFT) ของคาร์บอนดอท (CD) และคาร์บอนดอทที่เกิดการยึดเกาะกับโลหะชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เงิน (Ag), ทองคำ (Au), ทองแดง (Cu) และการจับแบบผสม (Au Cu, Cu Ag, Ag Au) พบว่าค่าพลังงาน HOMO–LUMO gap (Eg) และค่า Adsorption Energy (AE) มีการเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของโลหะที่เข้ามาจับ ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์และเสถียรภาพของโครงสร้าง สำหรับคาร์บอนดอทเพียว (CD) พบว่ามีค่า Eg อยู่ที่ 3.196 eV ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง แสดงถึงโครงสร้างที่เสถียรแต่มีการถ่ายโอนประจุได้ยาก เมื่อมีการเติมโลหะเข้าไป ค่า Eg ลดลงอย่างชัดเจนเหลือเพียง 2.3–2.6 eV ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ใช้ แสดงว่าระบบสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ง่ายขึ้น ทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าของคาร์บอนดอทดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

จากการวิเคราะห์ในเชิงเปรียบเทียบพบว่า Ag Ag ให้ค่า AE ต่ำที่สุด (เฉลี่ย 2.296 eV) แม้จะมีโครงสร้างคงตัว แต่การถ่ายโอนอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ไม่คึกคัก Au Au ให้ค่า AE เฉลี่ยสูงสุด (2.563 eV) และมีค่า Eg ระดับ

ปานกลาง แสดงถึงการยึดเกาะที่แข็งแรง เหมาะสมกับงานด้านโฟโตอิเล็กทริกทรอนิกส์ที่ต้องการทั้งเสถียรภาพและการนำไฟฟ้า Cu Cu ให้ค่า AE ใกล้เคียงกับ Au Au (2.461 eV) แต่มีค่า E_g ต่ำกว่า จึงถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดีกว่า เหมาะกับงานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซ็นเซอร์ที่ต้องการการนำไฟฟ้าสูง

กลุ่มผสมโลหะ (Au Cu, Cu Ag, Ag Au) พบว่ามีสมบัติผสมผสาน โดย Au Cu และ Cu Ag ยังคงให้ค่า AE และ E_g อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งาน แต่ Ag Au มีค่า AE ต่ำมาก (0.326–0.331 eV) บ่งบอกถึงความไม่มั่นคงของโครงสร้าง โดยสรุป การเติมโลหะลงในคาร์บอนดอทมีผลทำให้ค่า E_g ลดลงจากเดิม (3.196 eV) อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้สมบัติการนำไฟฟ้าและการถ่ายโอนประจุดีขึ้น ขณะที่ค่าพลังงาน AE ช่วยบ่งบอกถึงความแข็งแรงในการยึดเกาะและความเสถียรของโครงสร้าง ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิดของโลหะ โดย Au และ Cu แสดงผลที่สมดุลระหว่างการนำไฟฟ้าและเสถียรภาพ ในขณะที่ Ag แม้จะทำให้ E_g ลดลงได้ดี แต่มีข้อจำกัดด้านความเสถียร



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการพัฒนากระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ไทย โดยเลือกใช้เปลือกกล้วยที่ 3 ระดับความสุก ผ่านกระบวนการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยไมโครเวฟโดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวกลางในการสังเคราะห์ สามารถสังเคราะห์คาร์บอนดอทที่มีสมบัติการเรืองแสงทั้ง 3 สูตร และมีขนาดอนุภาคที่วัดด้วย TEM ที่ขนาดต่ำกว่า 10 นาโนเมตร จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี พบว่าคาร์บอนดอททั้งสามสูตรมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกันทั้งสามสูตร แต่มีความแตกต่างกันในอัตราส่วนและปริมาณ

ในด้านสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าคาร์บอนดอทมีการตอบสนองทางไฟฟ้าเคมีที่ชัดเจนขึ้นเมื่อระดับความสุกของกล้วยเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพยายามนำสารละลายคาร์บอนดอทที่ได้ไปพัฒนาเป็น AFM-molecular junction พบว่ามีเพียงคาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยดิบเท่านั้นที่มีการตอบสนองทางไฟฟ้าในเบื้องต้น และเป็นการตอบสนองที่ต่ำกว่า จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า CD1, CD2, และ CD3 เป็นคาร์บอนดอท (Carbon Dots) โดยมีเหตุผลสนับสนุนดังนี้

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพและขนาดอนุภาคของคาร์บอนดอท (CD1, CD2 และ CD3) ด้วย TEM และ DLS พบว่าแต่ละตัวอย่างมีลักษณะและการกระจายตัวที่แตกต่างกัน โดย CD1 มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 4.5 nm และมีการกระจายขนาดกว้างที่สุด แสดงถึงโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบ ขณะที่ CD3 มีขนาดเล็กที่สุดราว 3.5 nm และการกระจายตัวแคบกว่า สะท้อนถึงความเป็นระเบียบของโครงสร้างภายใน ส่วนผลการวิเคราะห์ DLS แสดงว่า CD2 และ CD3 มีแนวโน้มเกิดการรวมตัว (aggregation) เมื่อความเข้มข้นสูง แต่สามารถลดการรวมตัวได้เมื่อทำการเจือจาง

ในการศึกษาสมบัติทางเคมี (FTIR, Raman, NMR) พบว่าคาร์บอนดอททุกชนิดมีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนและไนโตรเจนคล้ายคลึงกัน ส่งผลต่อการละลายน้ำและการเกิดพันธะไฮโดรเจน ผล Raman แสดงค่า ID/IG ลดลงจาก CD1 $\rightarrow$ CD3 (0.89 $\rightarrow$ 0.65) บ่งชี้ว่า CD3 มีการจัดเรียง sp^2 ดีที่สุด ขณะที่ NMR แสดงว่า CD1 มีโครงสร้างที่ sp^3 เต็ม, CD2 มี sp^2 เต็มที่สุด และ CD3 มีลักษณะกึ่งระเบียบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการกระจายขนาดและการเรียงตัวของอนุภาค

สำหรับสมบัติทางแสง พบว่า CD3 มีค่า fluorescence intensity สูงที่สุด แสดงถึงประสิทธิภาพการเรืองแสงดีกว่า CD1 และ CD2 ขณะที่ผล UV-Vis แสดงแถบการดูดกลืน $\pi \rightarrow \pi^*$ และ $n \rightarrow \pi^*$ ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้าง aromatic และกลุ่ม carbonyl ของคาร์บอนดอท

สมบัติทางไฟฟ้าที่วิเคราะห์ด้วย AFM พบว่า CD1 แสดงพฤติกรรมคล้ายไดโอด ขณะที่ CD2 และ CD3 มีลักษณะฉนวน ส่วนผล Cyclic Voltammetry ชี้ให้เห็นว่า CD3 มีการนำไฟฟ้าสูงที่สุด รองลงมาคือ CD2 และต่ำสุดคือ CD1 ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นระเบียบของ sp^2 และปริมาณ defect ภายในโครงสร้าง

ในส่วนของการคำนวณเชิงทฤษฎีด้วย DFT พบว่าคาร์บอนดอทเพียวมี E_g สูง 3.196 eV ทำให้โครงสร้างมีความเสถียรแต่ถ่ายโอนประจุได้ยาก อย่างไรก็ตาม การเติมโลหะ Ag, Au และ Cu สามารถลด E_g ลงเหลือ 2.3–2.6 eV ทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าและการถ่ายโอนประจุดีขึ้น โดย Au และ Cu ให้สมมูลที่ตรงระหว่างการนำไฟฟ้าและความเสถียร ขณะที่ Ag แม้ช่วยลด E_g แต่ให้ความเสถียรต่ำ ส่วนโลหะผสมบางชนิด เช่น Au Cu และ Cu Ag แสดงสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากกว่า

การสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยในแต่ละระยะเวลามีผลต่อขนาดอนุภาค การรวมตัว และความเรียงตัวภายในของโครงสร้าง ซึ่งสะท้อนให้เห็นจากการวิเคราะห์ด้วย TEM, Raman และ NMR โดยพบว่าโครงสร้างที่มีการจัดเรียง sp^2 ดีและมี defect น้อยจะส่งผลให้คาร์บอนดอทมีสมบัติการเรืองแสงและการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า นอกจากนี้ สมบัติทางเคมีของคาร์บอนดอทยังสอดคล้องกับผล UV-Vis และ Fluorescence โดยฟังก์ชันออกซิเจนและไนโตรเจนที่มีอยู่ช่วยสนับสนุนการละลายน้ำและการเปล่งแสง ขณะที่สมบัติการนำไฟฟ้าที่วัดด้วย AFM และ Cyclic Voltammetry แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของคาร์บอนดอทขึ้นอยู่กับความเรียงตัวของ sp^2 และปริมาณ defect ภายในตัวอย่าง

การจำลองทางทฤษฎีด้วย DFT ยืนยันว่าโลหะชนิดต่าง ๆ เช่น Ag, Au และ Cu สามารถปรับค่า HOMO–LUMO gap (E_g) และ Adsorption Energy (AE) ของคาร์บอนดอท ทำให้สมมูลระหว่างสมบัติการนำไฟฟ้าและความเสถียรของโครงสร้างดีขึ้น โลหะบางชนิดและการจัดเรียงแบบผสม สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนประจุและรักษาเสถียรภาพของตัววัสดุได้ การวิเคราะห์เชิงประจักษ์ทั้งจากการทดลองและการจำลองเชิงทฤษฎีช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างภายในกับสมบัติทางกายภาพ เคมี แสง และไฟฟ้า ทำให้สามารถออกแบบคาร์บอนดอทที่เหมาะสมสำหรับงานด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์และเซ็นเซอร์ได้อย่างชัดเจน

ข้อเสนอแนะ

1. ทำการทดลอง molecular junction ในระบบ Au/Au C-AFM
2. สังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกกล้วยด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอล
3. เพิ่มความบริสุทธิ์ของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค column chromatography

อ้างอิง

- [1] Khairol Anuar, Nurul Kamilah, et al. "A review on multifunctional carbon-dots synthesized from biomass waste: design/fabrication, characterization and applications." *Frontiers in energy research* 9 (2021): 626549.
- [2] Schaal S, Gonzalez-Zalba MF. Silicon qubit devices. In: *Frontiers of Nanoscience*. Vol. 20. Elsevier; 2021. p. 265–93.
- [3] Prasannan, A., & Imae, T. (2013). One-pot synthesis of fluorescent carbon dots from orange waste peels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(some issue), 15673–15678. <https://doi.org/10.1021/ie402421s>
- [4] ปิยะณัฐ เสถียรพันธุ์, เขมฤทัย ถามะพัฒน์ และวัชร เลี้ยวเรียน. (2564). การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทแบบเคมีสีเขียวด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- [5] W. M. Hikal, H. A. H. Said-Al Ahl, A. Bratovic, K. G. Tkachenko, J. Sharifi-Rad, M. Kačániová, M. Elhourri, and M. Atanassova, “Banana peels: A waste treasure for human being,” *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, vol. 2022, Article ID 7616452, pp. 1–9, 2022, doi:10.1155/2022/7616452
- [6] กรมวิชาการเกษตร, การปรับปรุงพันธุ์กล้วยหอมทองโดยการชักนำให้เกิดการกลายพันธุ์โดยรังสีแกมมา [PDF], กรมวิชาการเกษตร, ตุลาคม 2563. สืบค้นจาก <http://www.aopdb03.doae.go.th/home/wp-content/uploads/2020/10/กล้วยหอมทอง-รังสี.pdf>
- [7] Gomes, S., Vieira, B., Barbosa, C., & Pinheiro, R. (2020). Evaluation of mature banana peel flour on physical, chemical, and texture properties of a gluten-free Rissol. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(8), Article e14441. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14441> [researchgate.net+4onlinelibrary.wiley.com+4researchgate.net+4](https://www.researchgate.net/publication/344414441)
- [8] Mohd Zaini, H., Roslan, J., Saallah, S., Munsu, E., Sulaiman, N. S., & Pindi, W. (2022). Banana peels as a bioactive ingredient and its potential application in the food industry. *Journal of Functional Foods*, 92, 105054. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105054>

- [9] Jiao, X.-Y., Li, L.-S., Qin, S., Zhang, Y., Huang, K., & Xu, L. (2019). The synthesis of fluorescent carbon dots from mango peel and their multiple applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 577, 306–314.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.06>
- [10] Atchudan, R., Immanuel Edison, T. N. J., Shanmugam, M., Perumal, S., Somanathan, T., & Lee, Y. R. (2021). Sustainable synthesis of carbon quantum dots from banana peel waste using hydrothermal process for in vivo bioimaging. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 126, 114417. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2020.114417>
- [11] Sharma, N., Sharma, I. และ Bera, M. K. (2022). Microwave-assisted green synthesis of carbon quantum dots derived from *Calotropis gigantea* as a fluorescent probe for bioimaging. *Journal of Fluorescence*, 32(3), 1039–1049. <https://doi.org/10.1007/s10895-022-02923-4>
- [12] T. N. Nguyen, P. A. Le, and V. B. T. Phung, “Facile green synthesis of carbon quantum dots and biomass-derived activated carbon from banana peels: synthesis and investigation,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 27, pp. 33692–33701, Jun. 2020, doi: 10.1007/s11356-020-09621-y.
- [13] Nawarat, P., Beach, K., Meunier, V., Terrones, H., Wang, G.-C., & Lewis, K. M. (2021). Voltage-Dependent Barrier Height of Electron Transport through Iron Porphyrin Molecular Junctions. *Journal of Physical Chemistry C*, 125(13), 7350–7357. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c11319>

ไม่มีเนื้อหาจากต้นฉบับ



ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย):นายภูมิรัตน์ นวรัตน์

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ): Mr.Poomirat Nawarat

2. หน่วยงาน หมายเลขโทรศัพท์มือถือ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

- หน่วยงาน: คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

- หมายเลขโทรศัพท์มือถือ: 0988245755

- E-mail: poomirat.n@rmutp.ac.th...

3. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	คุณวุฒิและสถานศึกษา	ปีที่จบการศึกษา
Ph.D. Physics	Rensselaer Polytechnics Institute, USA	2562
M.S. Physics	Rensselaer Polytechnics Institute, USA	2561
B.A. Physics	Middlebury College	2557

4. สมรรถนะด้านการวิจัย

ผลงานตีพิมพ์

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
1	High-temperature corrosion investigations of deposit containing eutectic KCl-K ₂ SO ₄ mixture on AISI 1015 and SS304 steels	Corrosion Science	นานาชาติ	2565
2	Voltage-Dependent Barrier Height of Electron Transport through Iron Porphyrin Molecular Junctions	Journal of Physical Chemistry C	นานาชาติ	2564

3	Tunable Infrared Plasmonic Properties of Epitaxial $\text{Ti}_{1-x}\text{Mg}_x\text{N}(001)$ Layers	ACS Applied Materials and Interfaces	นานาชาติ	2564
4	Large Metallic Vanadium Disulfide Ultrathin Flakes for Spintronic Circuits and Quantum Computing Devices	ACS Applied Nano Materials	นานาชาติ	2562

5. ระบุประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

ลำดับ	ชื่อโครงการ / แผนงาน	ปีงบประมาณ	แหล่งทุน	งบประมาณ (บาท)	หน้าที่ความรับผิดชอบ (หัวหน้าโครงการ/ผู้ร่วมวิจัย)
1	ความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากเปลือกผลไม้ไทยเพื่อประยุกต์ใช้ในในงานภาพถ่ายเชิงชีวภาพ	2565	กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และ นวัตกรรม (กสว.)	158,000	หัวหน้าโครงการ
2	การศึกษากลไกการเคลื่อนตัวของทองในระดับอะตอม ในการเปลี่ยนโครงสร้างทางพื้นผิวของฟิล์มทองที่ผลิตจากทองคำเปลว	2564	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	16,000	หัวหน้าโครงการ