



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุน (ว.1)

ประจำปีงบประมาณ 2559

เรื่อง เซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงประสิทธิภาพสูงจากอนุภาคนาโนคาร์บอน ที่สามารถตรวจวัดแสงในหลายช่วงคลื่นตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ต แสงขาวและอินฟราเรด

High Performance Broad Spectral Optical Sensor

Based on Carbon Nanoparticles

คณะผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายสุทัศน์ รัตนพันธ์ หัวหน้าโครงการ
สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ชื่อ-สกุล นายวีระศักดิ์ สุระเรืองชัย ผู้ร่วมโครงการ
สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ชื่อ-สกุล นายสรารุช ชื่นคำ ผู้ร่วมโครงการ
สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ชื่อ-สกุล นายมติ ห่อประทุม ผู้ร่วมโครงการ
สังกัด ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
ชื่อ-สกุล นางสาวกมลวรรณ อุปเงิน ผู้ร่วมโครงการ
สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ชื่อ-สกุล นายนันท์ นามมหาจักร ผู้ร่วมโครงการ
สังกัด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เดือน มีนาคม พ.ศ. 2560

บทคัดย่อ

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลจากน้ำตาลซูโครส เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงที่สามารถตรวจวัดแสงในหลายช่วงคลื่นตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ต แสงขาวและอินฟราเรด ในเบื้องต้นคณะผู้วิจัยสามารถทำการสังเคราะห์และควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนคาร์บอนให้มีขนาดระหว่าง 4 ถึง 14 นาโนเมตร พบว่าอนุภาคนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติฟลูออเรสเซนซ์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความถี่แสงที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานของหมู่ฟังก์ชันที่ล้อมรอบแกนกลางของอนุภาคนาโนคาร์บอน นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังพบว่า การเจืออนุภาคนาโนคาร์บอนด้วยแคดเมียมซัลไฟด์สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตให้เพิ่มไปถึงช่วงแสงขาวและอินฟราเรดได้ ผลจากการเจืออนุภาคนาโนคาร์บอนด้วยแคดเมียมซัลไฟด์นี้เองสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงในหลายช่วงคลื่น โดยเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงนี้คาดว่าจะสามารถนำไปใช้ร่วมกับเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้น และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งข้อมูลที่วัดได้จะสามารถส่งผ่านระบบไร้สายและจัดเก็บที่คลาวด์สตอเรจเพื่อใช้ในการพัฒนาการปลูกพืชที่ไวต่อแสงสูงหรือมีความต้องการแสงจำเพาะในโรงเรือนปิด เพื่อทดสอบการใช้งานของระบบคณะผู้วิจัยมีความสนใจที่จะทดสอบระบบเซ็นเซอร์ในพื้นที่โครงการหลวงในลำดับถัดไป

คำสำคัญ: อนุภาคนาโนคาร์บอน/ เซ็นเซอร์ตรวจวัดแสง/ ฟลูออเรสเซนซ์/ ไฮโดรเทอร์มอล

Abstract

Carbon dots (CDs) were synthesized using a one-step hydrothermal technique from a sucrose precursor. In order to use these CDs for the broad spectral optical sensor, we have investigated the fluorescence properties of these CDs that have average grain sizes ranging from 4 to 14 nm. By using broad spectral excitation, we found that the fluorescence properties were less influenced by the size but strongly influenced by the surface functional groups of the carbon dots. In addition, we demonstrated that absorbance of CDs can be significantly enhanced by blending with CdS nanoparticles. These blended nanoparticles shall be used as active materials for the high performance broad spectral optical sensor that could measure the characteristics of light (UV, visible, and infrared regions). The proposed optical sensor shall be used with the temperature, humidity, and CO₂ sensors. The physical data monitored from these sensors were transferred through the wireless network and collected on the cloud storage. It would be of interest to test our sensor system with light-sensitive plants at the Royal Development Projects.

Keywords: Carbon nanoparticle/ Optical sensor/ Fluorescent/ Hydrothermal

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ได้สนับสนุนงบประมาณสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเป็นทุนวิจัยหมวดเงินอุดหนุนที่ได้รับการจัดสรรจากรัฐ และขอขอบคุณภาควิชาเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่และเครื่องมือต่างๆ สำหรับการศึกษาวิจัย ขอขอบคุณ รศ. ดร. ไพศาล คงกาญจนาย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับคำแนะนำและการชี้แนะรายละเอียดในการทำงานเครื่องเฟลมสเปร์ย์ไพโรไลซิส และ รศ. ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของอนุภาคนาโนคาร์บอน

คณะผู้วิจัย

30 มีนาคม 2560

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญภาพ	ง
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ฉ
บทนำ	1
ทฤษฎี สมมุติฐาน และการทบทวนวรรณกรรม	3
วิธีดำเนินการวิจัย	8
อภิปรายผล	9
สรุปและข้อเสนอแนะ	14
เอกสารอ้างอิง	15
ผลงานตีพิมพ์	17

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1	ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งผ่าน (TEM) แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนคาร์บอน (ก) โครงสร้างแบบโครงตาข่าย (ข) โครงสร้างแบบหัวหอม (Onion-Like Structure)	3
2	แสดงขั้นตอนการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงจากอนุภาคนาโนคาร์บอน (CNP) บนแผ่น Polydimethylsiloxane (PDMS)	3
3	แสดงขั้นตอนการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตแบบผสมระหว่างกราฟีนควอนตัมดอทกับกราฟีนออกไซด์	4
4	แสดงกลไกการของกระบวนการการเกิดอิเล็กตรอนและโฮลในโครงสร้างแบบผสมระหว่างกราฟีนควอนตัมดอทกับกราฟีนออกไซด์	4
5	ภาพแสดงสมมุติฐานกระบวนการจ่ายและการรับอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีขนาดอนุภาคและขนาดแถบพลังงานที่แตกต่างกัน โดยขนาดอนุภาคใน (ก) เล็กกว่า (ข) และ (ค) ตามลำดับ และความถี่ ν_1 น้อยกว่า ν_2 และ ν_3 ตามลำดับ	5
6	อุปกรณ์วัดความเข้มแสงต้นแบบจากอนุภาคนาโนคาร์บอนที่สามารถดูดกลืนแสงได้ตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ตแสงขาว และอินฟราเรด	5
7	แสดงกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล	6
8	แสดงกระบวนการก่อกำเนิดอนุภาคนาโนจากกระบวนการเฟลมสเปร์ย์ไพโรไลซิส	7
9	ภาพถ่าย Stainless steel autoclave with Teflon tube	8
10	(ก) แสดงภาพถ่ายของอนุภาคนาโนคาร์บอนภายใต้แสงขาว (ข) แสดงภาพถ่ายของอนุภาคนาโนคาร์บอนภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (ค-จ) แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และ (ฉ) กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโน	9

	คาร์บอน	
11	(ก) ฟลูออโรกราฟีนอินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคนาโนคาร์บอน และ (ข) รามานสเปกตรัมของอนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเฉลี่ย 4 นาโนเมตร	10
12	(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์กับความยาวคลื่น และ (ข) กราฟแสดงการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต การกระตุ้นและการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์สูงสุด	11
13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่นของ (ก) แคดเมียมซัลไฟด์ และ (ข) อนุภาคนาโนคาร์บอนที่เจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์	11
14	ภาพถ่ายอิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตัลของคำ	12
15	ขั้นตอนการเคลือบอนุภาคนาโนคาร์บอนลงบนบวมอิเล็กโตรดแบบอินเตอร์ดิจิตัล	13
16	ภาพถ่ายแพทเทอร์มสำหรับติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงและระบบจัดเก็บข้อมูลทางคลาวด์สตอเรจ	14

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

a.u.	=	Arbitrary unit
CdS	=	Cadmium sulfide
CNPs	=	Carbon nanoparticles
PDMS	=	Polydimethylsiloxane
GQDs	=	Graphene quantum dots
GO	=	Graphene oxide

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

สินค้าส่งออกทางการเกษตรเป็นรายได้หลักของประเทศ ในปี 2555 ประเทศไทยมีมูลค่าสินค้าส่งออกสินค้าทางการเกษตร 1,349,335 ล้านบาทหรือคิดเป็นร้อยละ 19 ของมูลค่าสินค้าส่งออกทั้งหมด 7,091,162 ล้านบาท [1] ดังนั้น การใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตและมูลค่าสินค้าจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการพัฒนาการเกษตรของไทยอย่างยั่งยืน ปัจจุบันมีกลุ่มนักวิจัยไทยได้พัฒนาเทคโนโลยีเซ็นเซอร์เพื่อการเกษตร เช่น จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose) เซ็นเซอร์ตรวจสอบสภาพดิน (Soil Sensor) รวมถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีประมวลผลทางภาพในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของต้นพืช สภาพผลผลิตรวมไปถึงการตรวจสอบแมลงและศัตรูพืช [2]

แสงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช [3] ซึ่งพืชแต่ละชนิด เช่น กุหลาบ เบญจมาศ ผักกาด จะเจริญเติบโตได้ดีภายใต้คุณภาพแสงที่ประกอบไปด้วยความเข้มแสงและความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน [4][5][6] ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพของแสง ที่สามารถวัดความเข้มแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน เพื่อช่วยในการควบคุมความเข้มแสงและจำแนกคลื่นแสงให้มีความเหมาะสมต่อพืชแต่ละชนิดจึงเป็นสิ่งสำคัญ อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มแสงที่ใช้ในปัจจุบันมีข้อจำกัด เช่น สามารถตรวจวัดได้เฉพาะปริมาณความเข้มแสงแต่ไม่สามารถจำแนกช่วงคลื่นแสงได้ ทำให้การศึกษาความสัมพันธ์ของคุณภาพแสงกับการเจริญเติบโตของพืชทำได้ไม่ละเอียด นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยหลายชิ้นที่ได้ทำการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่สามารถวัดความเข้มแสงและจำแนกคลื่นแสงได้ แต่ยังมีข้อจำกัดทางเทคนิคในการใช้งาน เช่น สามารถวัดช่วงคลื่นแสงได้เฉพาะบางช่วงคลื่นความถี่ [7] และยังต้องให้ความร้อนแก่ตัวตรวจวัด [8] ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานหรือมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น [9]

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น หากมีการพัฒนาวัสดุที่ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสง ที่สามารถตรวจวัดความเข้มแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันและสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องให้ความร้อนแก่วัสดุที่ใช้ในการตรวจวัดแสง จะส่งผลให้การควบคุมคุณภาพแสงมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถบูรณาการเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงนี้ให้ทำงานร่วมกับเซ็นเซอร์ตรวจวัดทางกายภาพชนิดอื่นๆ ในพื้นที่เพาะปลูก โดยเซ็นเซอร์ทั้งหมดเชื่อมโยงกันด้วยระบบโครงข่ายไร้สาย (Wireless Network) เพื่อให้ผู้ใช้งานใช้ในการควบคุมปัจจัยทางกายภาพทางการเกษตร [10] และยังสามารถอ้างอิงข้อมูลทางสถิติที่ได้เก็บบันทึกไว้เพื่อกำหนดแผนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

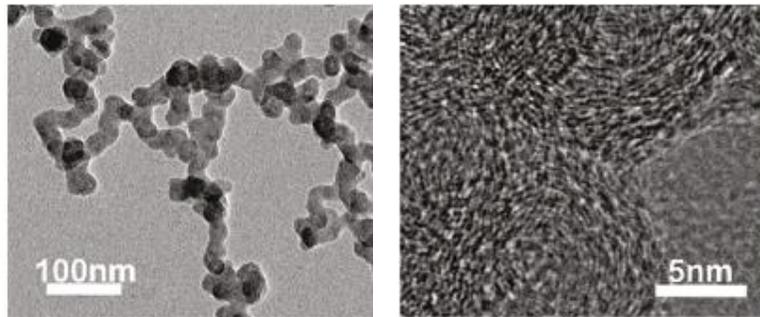
1. สังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนเพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงประสิทธิภาพสูงที่สามารถตรวจวัดความเข้มแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน ตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ต แสงขาวและอินฟราเรด
2. เพื่อศึกษากลไกการทำงานเชิงกายภาพและกระบวนการผลิตเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงจากอนุภาคนาโนคาร์บอน
3. พัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงต้นแบบเพื่อใช้ควบคุมคุณภาพแสงในการเกษตร

ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Synthesis) และกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรไลซิส (Flame Spray Pyrolysis)
2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพโดยเฉพาะคุณสมบัติทางแสงของอนุภาคนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสง
3. การพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงต้นแบบ โดยให้ความสำคัญกับกลไกการทำงานของกิตติญาณไฟฟ้าเมื่ออนุภาคนาโนคาร์บอนถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีค่าพลังงานต่างกัน โดยมีความถี่ตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ต แสงขาวจนถึงอินฟราเรด
4. เมื่อสามารถสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงต้นแบบได้แล้วจะทำการทดลองใช้งานกับพืชที่ไวต่อแสงสูงหรือมีความต้องการแสงจำเพาะในโรงเรือนปิด เช่น เบญจมาศ ของสถานีวิจัยโครงการหลวงหรือในห้องปฏิบัติการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ

ทฤษฎี สมมุติฐาน และการทบทวนวรรณกรรมสารสนเทศ

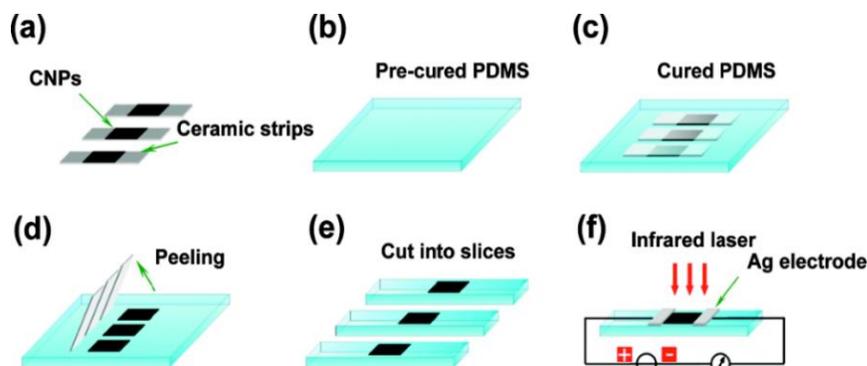
โครงการวิจัยนี้มีแนวความคิดที่จะนำคุณสมบัติทางแสงที่พิเศษของวัสดุนาโนมาใช้ โดยได้พิจารณาเลือกใช้วัสดุนาโนคาร์บอน เพื่อพัฒนาเป็นอุปกรณ์วัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน ตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ต แสงขาว และอินฟราเรด อนุภาคนาโนคาร์บอน (Carbon Nanoparticles: CNPs) เป็นวัสดุนาโนชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติทางแสงที่สามารถดูดกลืนช่วงคลื่นแสงขาวได้กว้าง และสามารถนำอิเล็กทรอนิกส์ได้ดี [11] จากคุณสมบัติดังกล่าว Yuan et al. [12] จึงได้ทำการวิจัยและประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนคาร์บอนเป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงประสิทธิภาพสูง โดยใช้กระบวนการเฟลมซินทีซิส (Flame Synthesis Process) ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนบนแผ่น Polydimethylsiloxane (PDMS) ซึ่งเป็นแผ่นโพลิเมอร์ที่ยืดหยุ่นได้ โดยอนุภาคนาโนคาร์บอนประกอบด้วย อนุกรมกราฟไฟต์และนาโนคาร์บอนที่เรียงตัวไม่เป็นระเบียบ แสดงดังรูปที่ 1 เซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงจากอนุภาคนาโนคาร์บอนในงานวิจัยนี้ สามารถตรวจวัดแสงได้ครอบคลุมตั้งแต่ย่านแสงขาวจนถึงย่านอินฟราเรด โดยขั้นตอนการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสง แสดงดังรูปที่ 2



(ก)

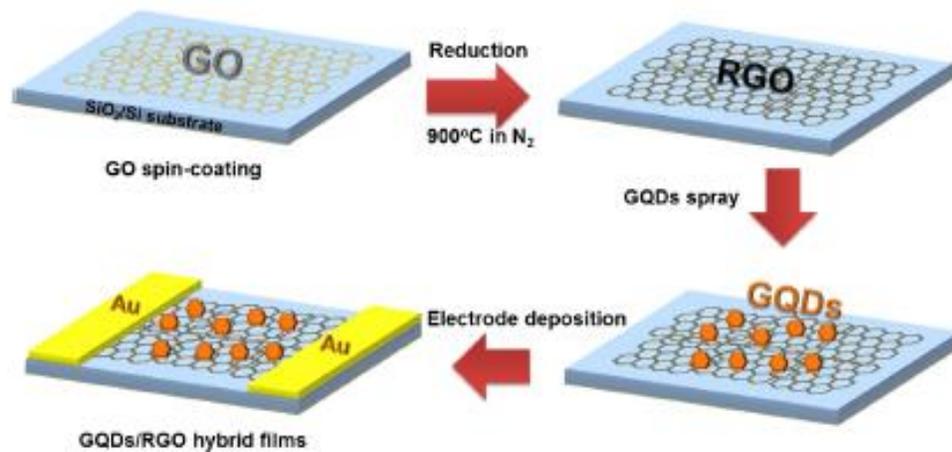
(ข)

รูปที่ 1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งผ่าน (TEM) แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนคาร์บอน (ก) โครงสร้างแบบโครงตาข่าย (ข) โครงสร้างแบบหัวหอม (Onion-Like Structure) [12]

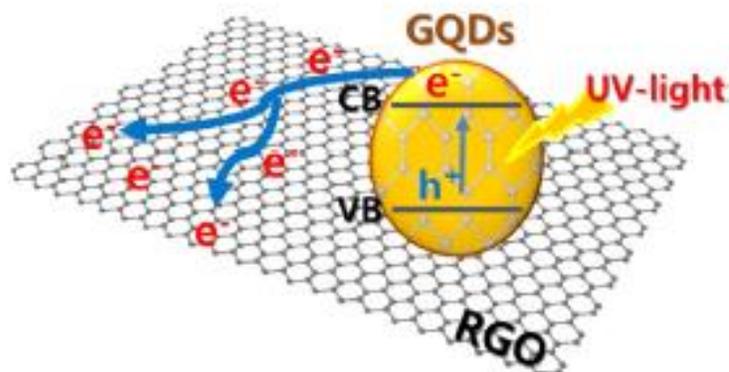


รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงจากอนุภาคนาโนคาร์บอน (CNPs) บนแผ่น Polydimethylsiloxane (PDMS) [12]

งานวิจัยของ Tam et al. [13] ได้ทำการสังเคราะห์กราฟีนควอนตัมดอท (Graphene Quantum Dots: GQDs) และกราฟีนออกไซด์ (Graphene Oxide: GO) ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตแบบผสมระหว่าง กราฟีนควอนตัมดอทกับกราฟีนออกไซด์ (Ultraviolet Light Sensor based on GQDs/GO Hybrid Film) โดยมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคประมาณ 4.4 นาโนเมตร และให้ค่าตอบสนองทางแสง (Photoresponsivity) ที่สูง ขั้นตอนการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสง แสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 แสดงกลไกการของกระบวนการการเกิดอิเล็กตรอนและโฮลในโครงสร้างแบบผสมระหว่าง กราฟีนควอนตัมดอทกับกราฟีนออกไซด์

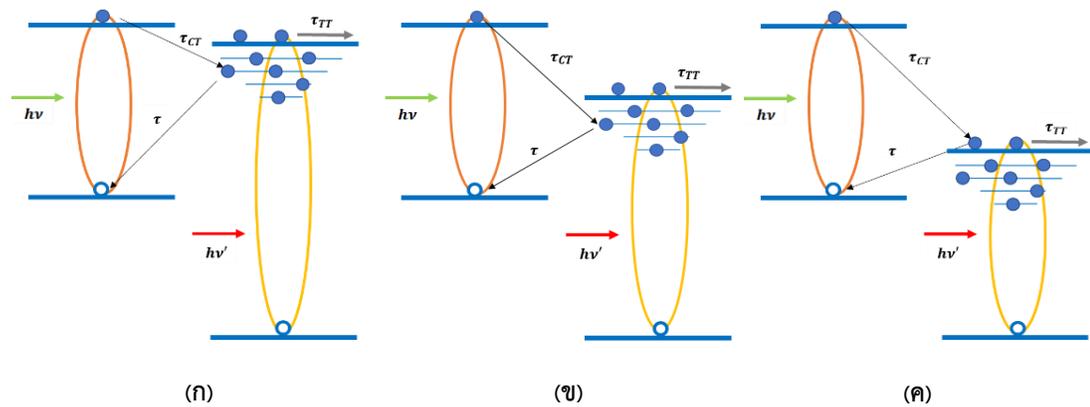


รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงอัลตราไวโอเล็ตแบบผสมระหว่างกราฟีนควอนตัมดอทกับกราฟีนออกไซด์ (Ultraviolet Light Sensor based on GQDs/GO Hybrid Film) [13]

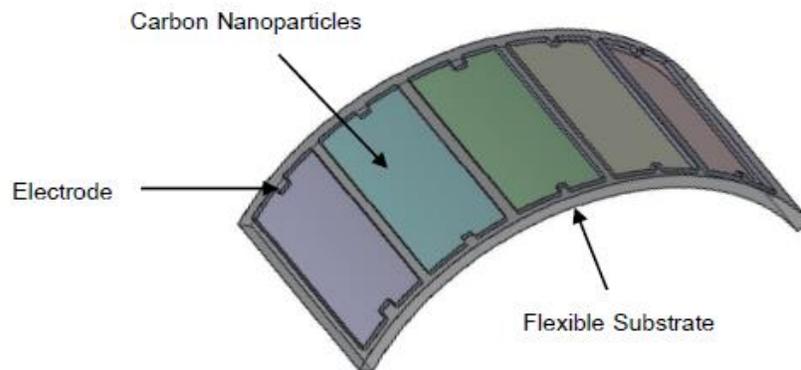


รูปที่ 4 แสดงกลไกการของกระบวนการการเกิดอิเล็กตรอนและโฮลในโครงสร้างแบบผสมระหว่างกราฟีนควอนตัมดอทกับกราฟีนออกไซด์ [13]

เนื่องจากการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนคาร์บอนขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคนาโนคาร์บอน [14][15] จึงมีความเป็นไปได้ที่กลไกการของการเกิดอิเล็กตรอนและโฮลในอนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีขนาดแตกต่างกันจะมีลักษณะเฉพาะภายใต้แสงที่มอดกกระทบ แสดงดังรูปที่ 5 และส่งผลให้อนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีขนาดแตกต่างกันมีคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันด้วย จากสมมุติฐานนี้ คณะผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของอนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยใช้กระบวนการเฟลมซินทีซิสและกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยอนุภาคนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ได้นั้นจะนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่สามารถวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน ตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ต แสงขาว และอินฟราเรด แสดงดังรูปที่ 6

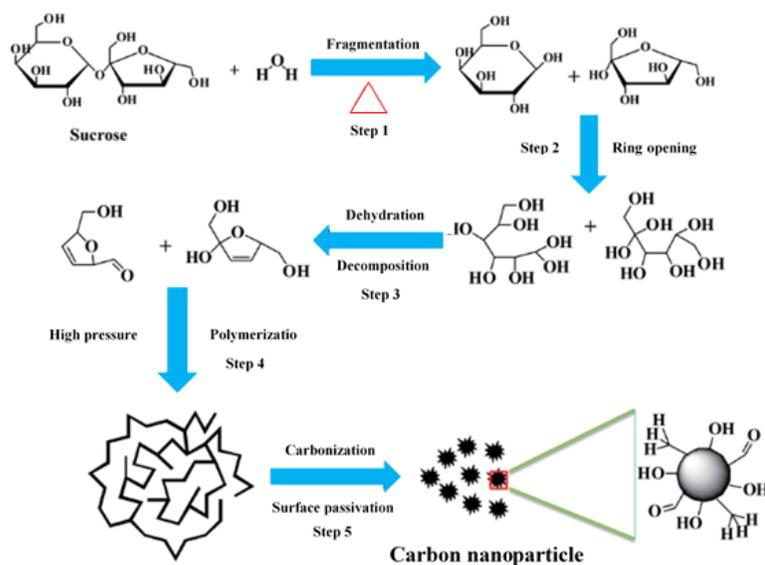


รูปที่ 5 ภาพแสดงสมมุติฐานกระบวนการจ่ายและการรับอิเล็กตรอนของอนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีขนาดอนุภาคและขนาดแถบพลังงานที่ต่างกัน โดยขนาดอนุภาคใน (ก) เล็กกว่า (ข) และ (ค) ตามลำดับ และความถี่ ν'_1 น้อยกว่า ν'_2 และ ν'_3 ตามลำดับ



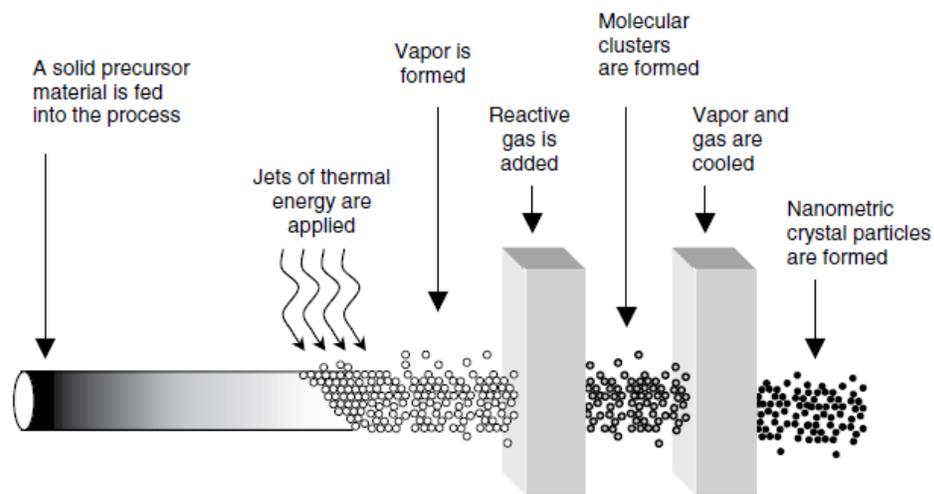
รูปที่ 6 อุปกรณ์วัดความเข้มแสงต้นแบบจากอนุภาคนาโนคาร์บอนที่สามารถดูดกลืนแสงได้ตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ตแสงขาว และอินฟราเรด

วัสดุนาโน (Nanomaterials) เป็นวัสดุที่มีขนาดโครงสร้างระหว่าง 1 ถึง 100 นาโนเมตร เนื่องด้วยขนาดที่เล็กนี้ ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรของวัสดุนาโนมีอัตราส่วนที่สูง (High Surface Area to Volume Ratio) ส่งผลให้วัสดุนาโนมีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่พิเศษ จากเหตุผลดังกล่าว วัสดุนาโนจึงได้รับความสนใจในการนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Nanoelectronics) [16] โครงการวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและกระบวนการเฟลมสเปร์ย์ไพโรไลซิสในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนเพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสง โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนในตัวทำละลายน้ำที่สภาวะอุณหภูมิสูงและความดันไอสูงเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของสารประกอบหลากหลายชนิดทั้งที่เป็นออกไซด์ ซัลไฟด์ โมลิบเดท คาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นต้น [17] อนุภาคนาโนที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีความเป็นผลึกที่ดี (Crystalline) สามารถสังเคราะห์ได้ทั้งอนุภาคผลึกเดี่ยว (Single crystal) และอนุภาคหลายผลึก (Polycrystal) นอกจากนี้ อนุภาคที่สังเคราะห์ได้ยังมีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันทั้งขนาดและรูปร่าง (Homogeneous size and shape) การควบคุมอุณหภูมิ ระยะเวลาการให้ความร้อน ความเข้มข้นของสารตั้งต้นในตัวทำละลายจะเป็นกลไกสำคัญที่ควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการนี้ [18][19][20] รูปที่ 7 แสดงกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล [21]



รูปที่ 7 แสดงกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล [21]

โครงการวิจัยนี้จะใช้สารตั้งต้นของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนจากน้ำตาลโมเลกุลคู่ คือ ซูโครส (Sucrose) ซึ่งเป็นน้ำตาลพื้นฐานพบมากในอ้อยและหญ้าหวานและให้ความร้อนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลในภาชนะเทฟลอนที่อยู่ในกระบอกสแตนเลสตีลทนความดัน (Teflon Lined Stainless Steel Autoclave) ที่อุณหภูมิ 150 - 200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 1-12 ชั่วโมง นอกจากการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลแล้ว คณะผู้วิจัยยังมีความสนใจที่จะทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนด้วยกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรไลซิส (Flame Spray Pyrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคในระดับนาโนด้วยการเผาไหม้สารตั้งต้นให้กลายเป็นไอเพื่อรวมกับแก๊สที่อุณหภูมิสูง ภายใต้สภาวะควบคุมความดันและแก๊ส โดยหลักการพื้นฐานของกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรไลซิส แสดงดังรูปที่ 8 เริ่มจากการป้อนสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งเข้าสู่ระบบและทำการถ่ายโอนพลังงานความร้อนให้กับสารตั้งต้นเพื่อให้เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอระเหย จากนั้นทำการป้อนแก๊สเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงก็จะก่อกำเนิดเป็นอนุภาคนาโน [22]



รูปที่ 8 แสดงกระบวนการก่อกำเนิดอนุภาคนาโนจากกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรไลซิส [22]

วิธีดำเนินการวิจัย

จากแบบเสนอโครงการที่คณะผู้วิจัยได้นำเสนอ มีจุดประสงค์เพื่อทำการออกแบบและสร้างเครื่องเฟลมสเปรย์ไพโรไลซิสต้นแบบสำหรับสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนนั้น แต่เนื่องด้วยอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟลมสเปรย์ไพโรไลซิสนั้น จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องตลอดจนงานวิจัยต่าง ๆ คณะผู้วิจัยพบว่ากระบวนการนี้เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์อนุภาคนาโนประเภทโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Nanoparticle) และในขณะเผาไหม้สารตั้งต้นเพื่อให้เกิดกระบวนการกำเนิดอนุภาคนาโนนั้น การควบคุมคุณภาพการกระจายตัวของอนุภาคให้มีขนาดตามที่ต้องการทำได้ยาก [23][24]

เนื่องด้วยเหตุผลดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอน โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเป็นกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยตัวทำละลายน้ำ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันไอสูง อนุภาคนาโนคาร์บอนที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีความเป็นผลึกที่ดี นอกจากนี้อนุภาคที่สังเคราะห์ได้ยังมีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันทั้งขนาดและรูปร่าง (Homogeneous Size and Shape) การควบคุมขนาดของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์สามารถทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิ ระยะเวลาในขณะเกิดกระบวนการ ความเข้มข้นของสารตั้งต้นในตัวทำละลาย และสัดส่วนปริมาตรของสารตั้งต้นต่อปริมาตรของภาชนะบรรจุ **รูปที่ 9** แสดงภาพถ่าย Stainless Steel Autoclave with Teflon Tube ที่ใช้สำหรับสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

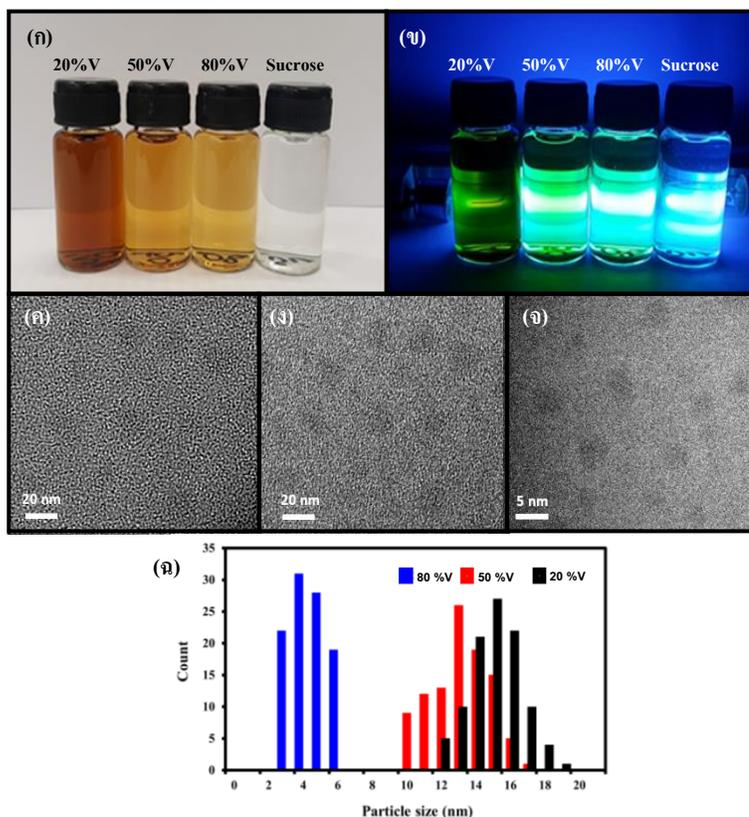


รูปที่ 9 ภาพถ่าย Stainless Steel Autoclave with Teflon Tube

อภิปรายผล

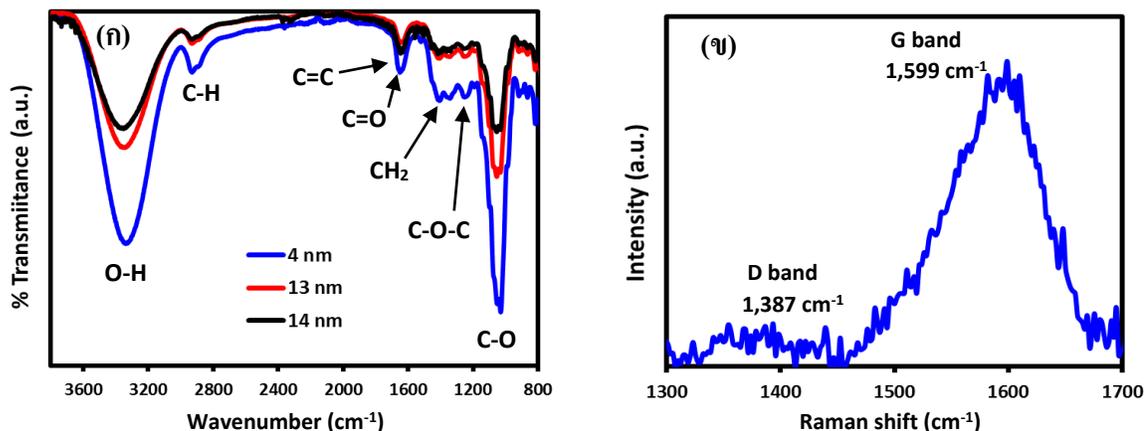
การสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอน

คณะผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) โดยใช้น้ำตาลซูโครส (Sucrose) เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการสังเคราะห์ ปริมาณของสารตั้งต้นต่อปริมาณของภาชนะบรรจุเป็นสัดส่วน 20% 50% และ 80% เพื่อให้ได้อนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีขนาดแตกต่างกัน **รูปที่ 10 (ก)** แสดงภาพถ่ายของอนุภาคนาโนคาร์บอนภายใต้แสงขาว และ **รูปที่ 10 (ข)** แสดงภาพถ่ายของอนุภาคนาโนคาร์บอนภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต โดยพบว่าอนุภาคนาโนคาร์บอนมีคุณสมบัติฟลูออเรสเซนต์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นอนุภาคนาโนคาร์บอนได้ถูกทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) แสดงดัง **รูปที่ 10 (ค-จ)** อนุภาคนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์จากสัดส่วน 20% 50% และ 80% มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 14 (± 1.4) 13 (± 1.6) และ 4 (± 1) นาโนเมตร ตามลำดับ โดยกราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนคาร์บอน แสดงดัง **รูปที่ 10 (ฉ)**



รูปที่ 10 (ก) แสดงภาพถ่ายของอนุภาคนาโนคาร์บอนภายใต้แสงขาว **(ข)** แสดงภาพถ่ายของอนุภาคนาโนคาร์บอนภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต **(ค-จ)** แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และ **(ฉ)** กราฟแสดงขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนคาร์บอน

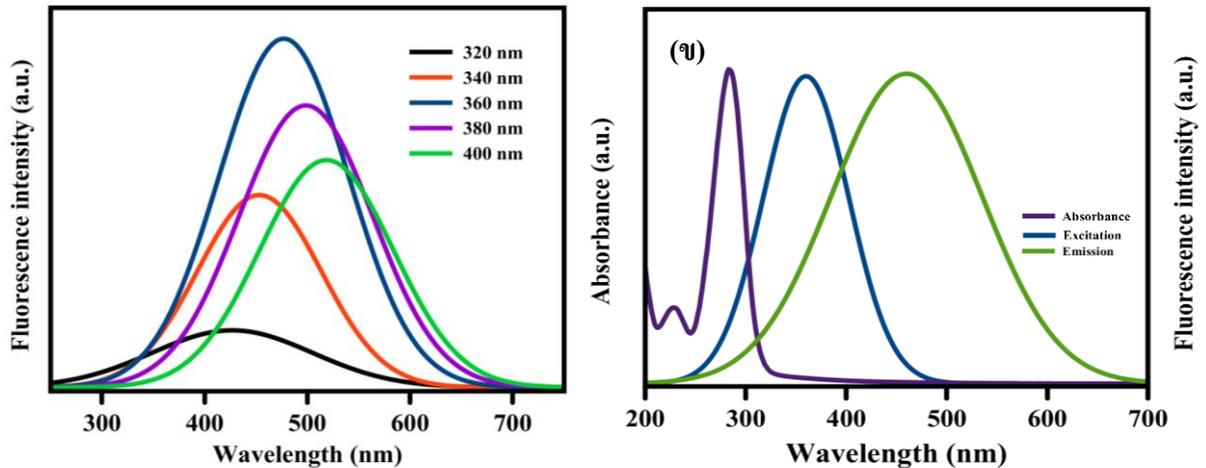
องค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคนาโนคาร์บอนได้ทำการวิเคราะห์จากเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ **รูปที่ 11 (ก)** แสดงฟูเรียร์เรย์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคนาโนคาร์บอน โดยพบว่าตำแหน่งของพีคเด่นของทุกตัวอย่างเกิดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยพบว่าหมู่ฟังก์ชันหลักที่ล้อมรอบแกนกลางของอนุภาคนาโนคาร์บอนประกอบด้วยออกซิเจนเป็นหมู่ฟังก์ชันหลัก ซึ่งประกอบไปด้วยหมู่คาร์บอกซิลิก คาร์บอนิล และไฮดรอกซิล ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแกนกลางอนุภาคนาโนคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้จากจากรามานสเปกโตรมิเตอร์ **รูปที่ 11 (ข)** แสดงรามานสเปกตรัมของอนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเฉลี่ย 4 นาโนเมตร โดยพบพีคเด่นที่ตำแหน่ง $1,387\text{ cm}^{-1}$ และ $1,599\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นโครงสร้างคาร์บอนแบบไม่เป็นระเบียบ (Disorder Phase) และโครงสร้างแบบ sp^2 ของกราฟไฟต์ (Graphitic Phase) ตามลำดับ



รูปที่ 11 (ก) ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคนาโนคาร์บอน และ **(ข)** รามานสเปกตรัมของอนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีขนาดเฉลี่ย 4 นาโนเมตร

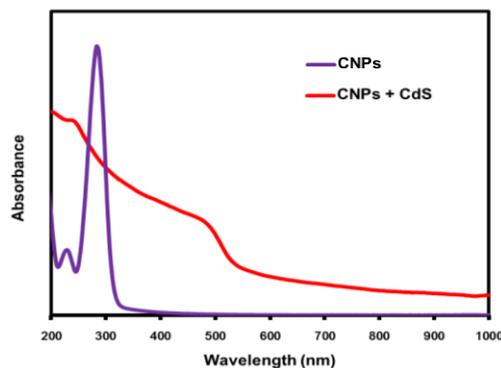
สมบัติฟลูออเรสเซนซ์ของอนุภาคนาโนคาร์บอนแสดงดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์กับความยาวคลื่นของอนุภาคนาโนคาร์บอน (ขนาดเฉลี่ย 4 นาโนเมตร) **รูปที่ 12 (ก)** เมื่อทำการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่นจาก 320 ถึง 400 นาโนเมตร ความเข้มของการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์มีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร เมื่อกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 360 นาโนเมตร และลดลงเมื่อความยาวคลื่นที่กระตุ้นเพิ่มขึ้น โดยความสัมพันธ์ของการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์กับคลื่นแสงที่กระตุ้นสัมพันธ์กันแบบขึ้นตรง (Excitation-Emission Dependent) โดยสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ของอนุภาคนาโนคาร์บอนนี้พบว่า ทุกตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติใกล้เคียงกัน **รูปที่ 12 (ข)** แสดงกราฟการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลต การกระตุ้นและการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์สูงสุด โดยความสัมพันธ์ของการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์กับคลื่นแสงที่กระตุ้นที่สัมพันธ์กันแบบขึ้น

ตรงนี้ มีความเกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ล้อมรอบแกนกลางอนุภาคนาโนคาร์บอน เนื่องด้วยหลากหลายของหมู่ฟังก์ชันส่งผลให้ระดับชั้นพลังงานพื้นผิว (Surface State Energy) มีค่าพลังงานแตกต่างกันซึ่งส่งผลให้การปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์แตกต่างกันด้วย



รูปที่ 12 (ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์กับความยาวคลื่น และ (ข) กราฟแสดงการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต การกระตุ้นและการปลดปล่อยแสงฟลูออเรสเซนซ์สูงสุด

จากผลการทดสอบสมบัติในการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนคาร์บอน พบว่าสามารถดูดกลืนแสงย่านอัลตราไวโอเล็ต (ความยาวคลื่น 283 นาโนเมตร) ได้อย่างยอดเยี่ยม และเพื่อเพิ่มสมบัติการดูดกลืนแสงให้อนุภาคนาโนคาร์บอนให้สามารถดูดกลืนแสงได้ในช่วงแสงขาวจนถึงอินฟราเรด คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการเจืออนุภาคนาโนคาร์บอนด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เนื่องจากมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงแสงขาวได้ดี โดยหลังจากทำการเจือแคดเมียมซัลไฟด์แล้วพบว่าอนุภาคนาโนคาร์บอนที่เจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์สามารถดูดกลืนช่วงแสงได้เพิ่มมากขึ้นจนถึงย่านแสงขาวและอินฟราเรด แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่นของอนุภาคนาโนคาร์บอนที่เจือด้วยแคดเมียมซัลไฟด์

การสร้างเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสง

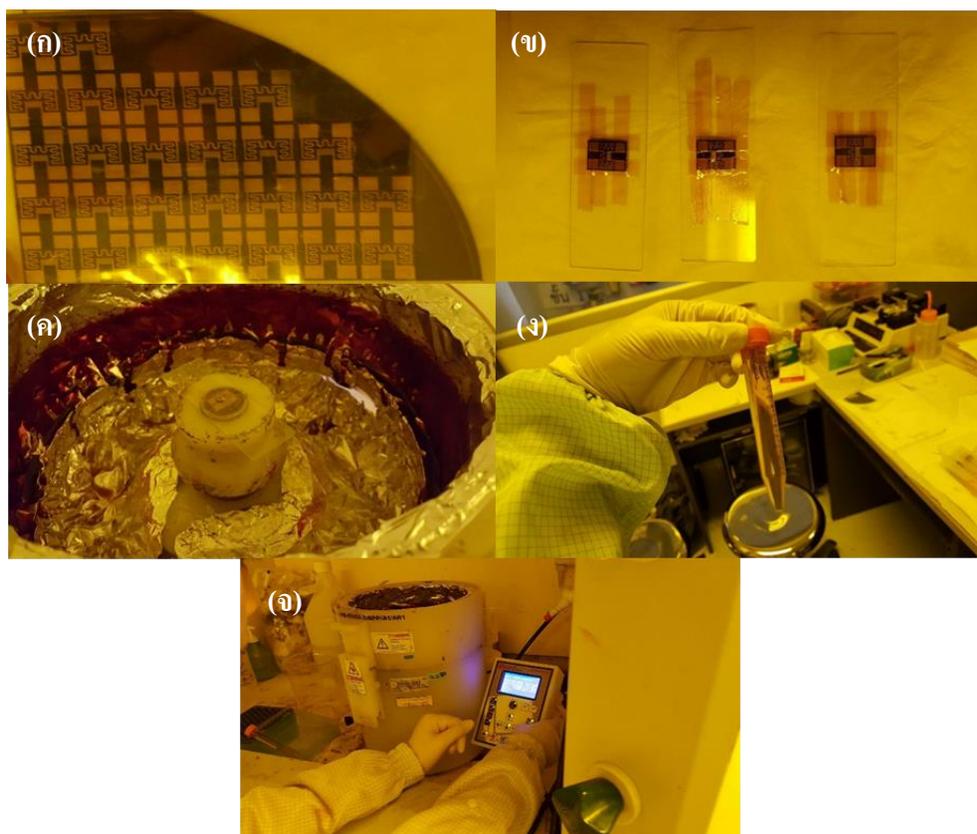
เมื่อสามารถทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีสมบัติในการดูดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ต แสงขาว และอินฟราเรดได้แล้ว ลำดับถัดไปจะทำการเคลือบอนุภาคนาโนคาร์บอนลงบนแผ่นอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตเทททองคำ (Gold Interdigitated Electrodes) ที่มีขนาดพื้นที่ผิวสัมผัสประมาณ 1×0.5 ตารางเซนติเมตร ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุน (Spin Coating) แสดงดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ภาพถ่ายอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตเทททองคำ

ขั้นตอนการเคลือบอนุภาคนาโนคาร์บอนลงบนอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตเทท ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุน (รูปที่ 15) แสดงดังต่อไปนี้

- (ก) ตัดแผ่นอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตเททที่ต้องการเคลือบออกจากแผ่นใหญ่
- (ข) ปิดทับบริเวณที่ไม่ใช่พื้นผิวสัมผัสด้วยสก็อตเทป
- (ค) ติดตั้งแผ่นอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตเททเข้าไปในเครื่องสปินโค้ตเตอร์
- (ง) ใช้ไมโครปิเปตหยอดสารละลายอนุภาคนาโนคาร์บอนลงบนบริเวณพื้นผิวสัมผัส
- (จ) ดำเนินขั้นตอนการสปินโค้ตเตอร์

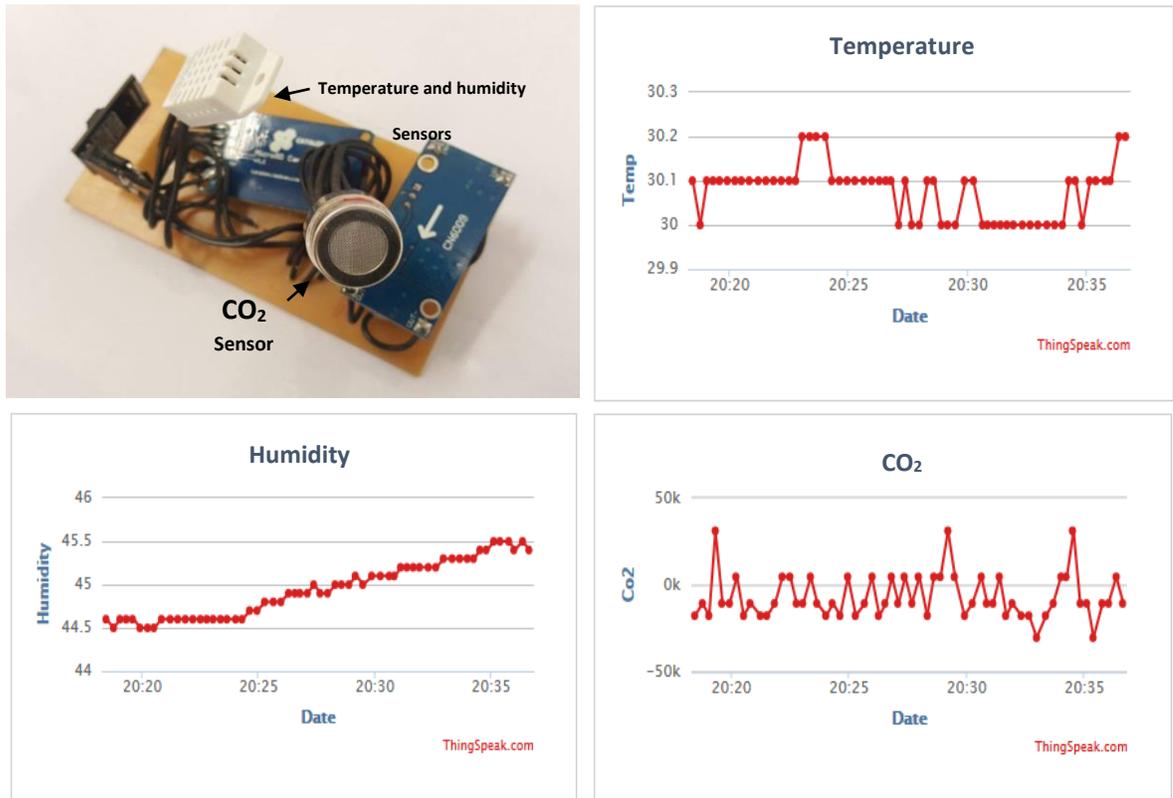


รูปที่ 15 ขั้นตอนการเคลือบอนุภาคนาโนคาร์บอนลงบนขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิตัล

สรุปและข้อเสนอแนะ

อนุภาคนาโนคาร์บอนที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล สามารถทำการเปลี่ยนแปลงและควบคุมขนาดของอนุภาคให้อยู่ในช่วงประมาณ 4 ถึง 14 นาโนเมตรได้ โดยการเปลี่ยนสัดส่วนปริมาตรของสารตั้งต้นต่อปริมาตรของภาชนะบรรจุ ซึ่งพบว่าหมู่ฟังก์ชันหลักที่ล้อมรอบแกนกลางของอนุภาคนาโนคาร์บอนประกอบด้วยออกซิเจนเป็นหมู่ฟังก์ชันหลัก นอกจากนี้อนุภาคนาโนคาร์บอนยังมีสมบัติฟลูออเรสเซนซ์ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความถี่แสงที่สัมพันธ์กับค่าพลังงานของระดับชั้นพลังงานพื้นผิว และยังพบว่าคุณสมบัติการดูดกลืนแสงและการปลดปล่อยแสงของอนุภาคนาโนคาร์บอนนั้นขึ้นกับระดับชั้นพลังงานของหมู่ฟังก์ชันมากกว่าขนาดของอนุภาคนาโนคาร์บอน โดยจะเห็นได้จากการเจืออนุภาคนาโนคาร์บอนด้วยด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ สามารถเพิ่มคุณสมบัติการดูดกลืนแสงให้มีช่วงการดูดกลืนที่กว้างขึ้นจากช่วงอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงแสงขาว และลำดับสุดท้ายได้ทำการเคลือบอนุภาคนาโนคาร์บอนลงบนอิเล็กทรอนิกส์แบบอินทรีย์ดีเจิตา ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุน

ในส่วนของการวิจัยในขั้นต่อไป จะทำการทดสอบลักษณะเฉพาะทางกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (I-V Characteristic) ทดสอบคุณสมบัติทางกระแสไฟฟ้าที่ขึ้นกับแสง (Photocurrent) ทดสอบสมบัติการตอบสนอง (Responsivity) รวมทั้งพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสง โดยที่คณะผู้วิจัยได้ทำการจัดสร้างแพลตฟอร์ม (Platform) เพื่อใช้สำหรับติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงให้ทำงานร่วมกับเซ็นเซอร์ตรวจวัดทางกายภาพอื่นๆ เช่น เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้น เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และเซ็นเซอร์ตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสามารถทำการเก็บข้อมูลได้ในแบบเรียลไทม์ (Real-Time) และจัดเก็บข้อมูลผ่านทางคลาวด์สตอเรจ (Cloud Storage) แสดงดังรูปที่ 16 ในส่วนสุดท้ายจะนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ตามวัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัยข้างต้นต่อไป



รูปที่ 16 ภาพถ่ายแพลตฟอร์มสำหรับติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจวัดแสงและระบบจัดเก็บข้อมูลทางคลาวด์สตอเรจ

เอกสารอ้างอิง

1. ศูนย์สารสนเทศการเกษตรสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, “สถิติการค้าสินค้าเกษตรไทยกับต่างประเทศ ปี ๒๕๕๕.”
2. ธีรเกียรติ์ เกิดเจริญ, “Precision Farming / Smart Farm,” คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล, vol. 2550, p. http://nanotech.sc.mahidol.ac.th/i-sense/precision_farming.html.
3. สังคม เตชะวงศ์เสถียร, “ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืช,” ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, [http://ag.kku.ac.th/suntec/134101/134101%20Factors%20affecting%20G-D%20\(note\).pdf](http://ag.kku.ac.th/suntec/134101/134101%20Factors%20affecting%20G-D%20(note).pdf).
4. อนุสร จันทรแดง, “เทคโนโลยีการผลิตเบญจมาศที่เหมาะสม ตำบลไทยสามัคคี อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา,” ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพการเกษตร จังหวัดนครราชสีมา สำนักงานส่งเสริมและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 4 จังหวัดขอนแก่น กรมส่งเสริมการเกษตร, 2549.
5. ประรณนา ชูรัตน์, “ผลของแสง ความเป็นกรดต่าง และน้ำตาลซูโครส ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานินในดอกกุหลาบพันธุ์ดัลส์,” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, vol. 2542.
6. K.-H. Lin, M.-Y. Huang, W.-D. Huang, M.-H. Hsu, Z.-W. Yang, and C.-M. Yang, “The Effects of Red, Blue, and White Light-Emitting Diodes on the Growth, Development, and Edible Quality of Hydroponically Grown Lettuce (*Lactuca Sativa* L. Var. *Capitata*),” *Sci. Hortic.*, vol. 150, pp. 86–91, 2013.
7. L.T. Hoa, H.N. Tien and S.H. Hur, “A Highly Sensitive UV Sensor Composed of 2D NiO Nanosheets and 1D ZnO Nanorods Fabricated by A Hydrothermal Process,” *Sens. Actuators A*, vol. 207, pp. 20–24, 2014.
8. Y. Chen, H. Lu, G. Wang, D. Chen, F. Ren, R. Zhang, and Y. Zheng, “Metal-Semiconductor-Metal Ultraviolet Photodetectors Directly Fabricated on Semi-Insulating GaN:Fe Template Grown by Hydride Vapor Phase Epitaxy,” *Sens. Actuators A*, vol. 216, pp. 308–311, 2014.
9. F. Guo, Z. Xiao and J. Huang, “Fullerene Photodetectors with a Linear Dynamic Range of 90 dB Enabled by a Cross-Linkable Buffer Layer,” *Adv. Opt. Mater.*, vol. 1, no. 4, pp. 289–294, 2013.
10. I. F. Akyildiz and J. M. Jornet, “Electromagnetic Wireless Nanosensor Networks,” *Nano Commun. Netw.*, vol. 1, pp. 3–19, 2010.
11. A. Kelarakis, “From Highly Graphitic to Amorphous Carbon Dots : A Critical Review,” *MRS Energy Sustain.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–15, 2014.

12. L. Yuan, J. Dai, X. Fan, T. Song, Y. T. Tao, K. Wang, Z. Xu, J. Zhang, X. Bai, P. Lu, J. Chen, J. Zhou, and Z. L. Wang., "Self-Cleaning Flexible Infrared Nanosensor Based on Carbon Nanoparticles," *ACS NANO*, vol. 5, no. 5, pp. 4007–4013, 2011.
13. T.V. Tam, S.H. Hur, J.S. Chung, W.M. Choi, "Ultraviolet Light Sensor based on Graphene Quantum Dots/ Reduced Graphene Oxide Hybrid Film," *Sens. Actuators Phys.*, no. 233, pp. 368–373. 2014.
14. A.M. Smith and S. Nie., "Semiconductor Nanocrystals: Structure, Properties, and Band Gap Engineering," *Acc. Chem. Res.*, no. 43, pp. 190–200, 2010.
15. S. Zhu, Y. Song, X. Zhao, J. Shao, J. Zhang and B. Yang., "The Photoluminescence Mechanism in Carbon Dots (Graphene Quantum Dots, Carbon Nanodots and Polymer Dots) Current State and Future Perspective," *Nano Res.*, 2014.
16. M. Richter, T. Heumüller, G. J. Matt, W. Heiss, "Carbon Photodetectors: The Versatility of Carbon Allotropes," *Adv. Energy Mater.*, vol. 1601574, pp. 1–36. 2016.
17. K. Byrappa and M. Yoshimura., "Handbook of Hydrothermal Technology," *William Andrew*, 2013.
18. H. Uchiyama, S. Nakanishi and H. Kozuka., "Hydrothermal Synthesis of Nanostructured SnO Particles Through Crystal Growth in The Presence of Gelatin," *J. Solid State Chem.*, no. 217, pp. 87–91, 2014.
19. M. Souleiman, G.M. Bhalerao, T. Guillet, A. Haidoux, M. Cambon, C. Levelut and J. Haines., "Hydrothermal Growth of Large Piezoelectric Single Crystals of GaAsO₄," *J. Cryst. Growth*, no. 397, pp. 29–38, 2014.
20. S.T. Mitchell, N. Frese, A. Gölzhäuser, A. Bowers and K. Sattler., "Ultralight Carbon Nanofoam from Naphtalene-Mediated Hydrothermal Sucrose Carbonization," *Carbon*, no. 95, pp. 434–441, 2015.
21. H. K. Sadhanala, J. Khatei and K. K. Nanda., "Facile hydrothermal synthesis of carbon nanoparticles and possible application as white light phosphors and catalysts for the reduction of nitrophenol," *RSC Adv*, no. 4, pp. 11481–11485, 2014.
22. Y. Gogotsi, "Nanomaterials Handbook," *Taylor Francis Group*, vol. 2006, pp. 19–20.
23. R. Wallace , A. P. Brown, R. Brydson, K. Wegner and S. J. Milner, "Synthesis of ZnO nanoparticles by flame spray pyrolysis and characterisation protocol," *J Mater Sci*, no. 48, pp. 6393–6403, 2013.

24. M. Abul Hossain and S. Islam, "Synthesis of Carbon Nanoparticles from Kerosene and their Characterization by SEM/EDX, XRD and FTIR," *Am. J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 1, no. 2, pp. 52–56, 2013.

ผลงานตีพิมพ์ สิ่งตีพิมพ์เพื่อเผยแพร่ สิทธิบัตรหรือผลงานอื่น ๆ จากโครงการนี้

ในขณะนี้ คณะผู้วิจัยกำลังทำการรวบรวมผลการศึกษาและทำการสังเคราะห์บทความ เพื่อจัดทำผลงานตีพิมพ์ทางวารสารวิชาการ โดยคาดว่าจะทำการจัดส่งไปที่วารสาร *Materials letters* เพื่อเผยแพร่ผลงานในระดับนานาชาติในระยะช่วงปีที่สองต่อไป