

การพัฒนาไฮโดรเจลเรืองแสงจากคาร์บอนดอท/ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/
คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน/ ออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนต

DEVELOPMENT OF FLUORESCENT HYDROGEL FROM CARBON
DOTS/ POLYVINYL ALCOHOL/ CARBOXYETHYL CHITOSAN/
OXIDIZED SODIUM ALGINATE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF FLUORESCENT HYDROGEL FROM CARBON
DOTS/ POLYVINYL ALCOHOL/ CARBOXYETHYLCHITOSAN/
OXIDIZED SODIUM ALGINATE



YANIKA SAKBORIBOON

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2023-SC-M-012-069



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาไฮโดรเจลเรืองแสงจากคาร์บอนดอท/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน/ออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนต
ชื่อนักศึกษา	นางสาวญานิกา ศักดิ์บริบูรณ์
รหัสประจำตัว	62605073
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาไฮโดรเจลเรืองแสง โดยใช้คาร์บอนดอทเป็นสารเรืองแสงและสารเชื่อมโยงในโครงสร้างของไฮโดรเจล ซึ่งคาร์บอนดอทถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีการแบบไมโครเวฟเป็นเวลา 3 นาที จากการสังเคราะห์คาร์บอนดอทพบว่า BCU/Ag-CDs มีค่าความเข้มการเรืองแสงและค่า Quantum yield มากที่สุด เนื่องจาก Synergistic effect ของการมีอะตอมไนโตรเจน โบรอน และซิลเวอร์ ในโครงสร้างของคาร์บอนดอท โดยคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มีขนาดเฉลี่ย 5.9 ± 1 นาโนเมตร มีลักษณะเป็นสารละลายใสเมื่ออยู่ภายใต้แสงวิสิเบิล (Visible light) และเรืองแสงเป็นสีฟ้าภายใต้แสงยูวี (UV light) คาร์บอนดอทสามารถละลายน้ำได้ เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำบนพื้นผิวของคาร์บอนดอท นอกจากนี้คาร์บอนดอทยังสามารถตอบสนองต่อค่าพีเอชได้จากการเปลี่ยนแปลงความเข้มการเรืองแสงในสภาวะกรดและเบส โดยมีความเข้มการเรืองแสงมากในสภาวะเบส และความเข้มการเรืองแสงน้อยในสภาวะกรด จากนั้นคาร์บอนดอทถูกนำมาเตรียมเป็นไฮโดรเจลเรืองแสง โดยนำมาผสมกับคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนต ซึ่งสารทั้งหมดสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจน (H-bond) และพันธะอิมมีน (Immine bond) โดยไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีความสามารถในการเรืองแสง และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี การเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ไฮโดรเจลด้วยกระบวนการแช่เยือกแข็งและการหลอมละลาย (Freezing/Thawing) พบว่า เมื่อจำนวนรอบ Freezing/Thawing มากขึ้น โครงสร้างภายในไฮโดรเจลจะมีการเชื่อมโยงมากขึ้น ส่งผลให้มีพฤติกรรมการบวมตัวลดลง

คำสำคัญ : คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน คาร์บอนดอท ไฮโดรเจลเรืองแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Development of Fluorescent Hydrogel from Carbon Dots/Polyvinyl alcohol/Carboxyethyl chitosan/Oxidized Sodium Alginate
Student Name	Miss Yanika Sakboriboon
Student ID	62605073
Degree	Master of Science (Polymer technology)
Department	Chemistry
Year	2023
Thesis advisor	Assoc.Prof.Dr. Pathavuth Monvisade

Abstract

This research developed fluorescent hydrogels using carbon dots as the fluorophores and cross-linking agent in the hydrogel structure. Carbon dots were synthesized using domestic microwave irradiation for 3 minutes. BCU/Ag-CDs exhibit the highest fluorescent intensity and quantum yield due to synergistic effect of nitrogen, boron, and silver atoms in the carbon dot structure. The average size of the synthesized carbon dots is 5.9 ± 1 nanometers, and they exhibit a clear solution under visible light and emit blue light under UV light. They are water-soluble due to their hydrophilic functional groups on the surface. Furthermore, they are responsive to pH changes, exhibiting high fluorescent intensity in a basic environment and low fluorescent intensity in an acidic environment. These carbon dots were then used to prepare fluorescent hydrogels by mixing them with carboxyethyl chitosan, polyvinyl alcohol and sodium oxidized alginate. These components can form hydrogen bonds and imine bonds in the hydrogel structure. The prepared hydrogel exhibits excellent light emission properties and stabilizes at various temperatures. Increasing the strength of the hydrogel is achieved through a freezing/thawing process. When the number of freezing/thawing increase the internal structure of the hydrogel forms stronger bonds leading to reduced swelling behavior.

Keywords : Carboxyethyl chitosan, Carbon dot, Fluorescent hydrogel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเชิงานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาเป็ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลาย ๆ ท่าน โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ที่คอยดูแลให้คำปรึกษา ให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ชี้แนะในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนประสบผลสำเร็จ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี ประธานกรรมการ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตลอดจนเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการเคมี เจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชา ที่คอยสนับสนุนจัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณบุคลากรภายในห้องปฏิบัติการ Polymer Synthesis and Functional Materials Research Unit (PSFMU) ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ รวมถึงให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะ ดร.จงจิต ชลิตางกูร และนายอาณัฐ หรันเต

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวที่คอยเป็นแรงผลักดัน ให้คำปรึกษา ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจ ให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นางสาวญาณิกา ศักดิ์บริบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 คาร์บอนดอท (Carbon dots)	4
2.1.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของคาร์บอนควอนตัมดอท	4
2.1.2 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท	5
2.1.3 สมบัติทางแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท	6
2.1.4 การปรับปรุงสมบัติการเปล่งแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท	7
2.1.5 กลไกการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท	9
2.1.6 กลไกการเป็นตัวตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท	11
2.1.7 การออกแบบการเป็นตัวตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท	14
2.1.8 การประยุกต์ใช้งานคาร์บอนควอนตัมดอท	15
2.2 ไฮโดรเจล	20
2.2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล	21
2.2.2 ชนิดของไฮโดรเจล	21
2.2.3 การเตรียมไฮโดรเจล	22
2.2.4 ไฮโดรเจลซ่อมแซมตนเอง	23
2.2.5 การประยุกต์ใช้งานไฮโดรเจล	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ไคตินและไคโตซาน (Chitin and Chitosan)	27
2.3.1 แหล่งที่มาของไคติน-ไคโตซาน	28
2.3.2 โครงสร้างของไคติน-ไคโตซาน	28
2.3.3 การผลิตไคโตซาน	29
2.3.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซาน	31
2.3.5 การประยุกต์ใช้งานของไคโตซาน	33
2.3.6 ไคโตซานละลายน้ำ	34
2.4 อัลจีเนต (Alginate)	37
2.4.1 โครงสร้างของอัลจีเนต	37
2.4.2 สมบัติทางกายภาพของอัลจีเนต	38
2.4.3 การประยุกต์ใช้งานของอัลจีเนต	39
2.4.4 ออกซิไดซ์โซเดียมอัลจีเนต (Oxidized sodium alginate)	41
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	45
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	45
3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	45
3.3 การเตรียมคาร์บอนดอทประเภทต่าง ๆ (Carbon Dots : CDs)	47
3.3.1 การเตรียมคาร์บอนดอทที่เจือด้วยอะตอมไนโตรเจน (CU-CDs)	47
3.3.2 การเตรียมคาร์บอนดอทที่เจือด้วยอะตอมไนโตรเจน และซิลเวอร์ (CU/Ag-CDs)	47
3.3.3 การเตรียมคาร์บอนดอทที่เจือด้วยอะตอมไนโตรเจน และ โบรอน (BCU -CDs)	47
3.3.4 การเตรียมคาร์บอนดอทที่เจือด้วยอะตอมไนโตรเจน โบรอน และ ซิลเวอร์ (BCU/Ag -CDs)	48
3.4 การเตรียมพอลิเมอร์	48
3.4.1 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน (Carboxyethyl Chitosan : CECS)	48
3.4.2 การสังเคราะห์ออกซิไดซ์โซเดียมอัลจีเนต (Oxidized Sodium Alginate: OSA)	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การเตรียมไฮโดรเจลเรืองแสง	49
3.6 การตรวจวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของคาร์บอนดอท	50
3.6.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอท	50
3.6.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของคาร์บอนดอท	50
3.6.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของคาร์บอนดอท	51
3.6.4 การศึกษาสมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนดอท	51
3.6.5 การศึกษาสมบัติผลผลิตควอนตัม (Quantum yield) ของคาร์บอนดอท	51
3.6.6 การทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชของคาร์บอนดอท	52
3.7 การตรวจวิเคราะห์และศึกษาสมบัติของเจล	53
3.7.1 การศึกษาสมบัติการเรืองแสงของไฮโดรเจล	53
3.7.2 การศึกษาระยะเวลาในการเกิดเจลจากผลของคาร์บอนดอท	53
3.7.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจล	53
3.7.4 การศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงของไฮโดรเจลด้วยกระบวนการ Freezing/Thawing	53
3.7.5 การทดสอบพฤติกรรมบวมตัวของไฮโดรเจล (Swelling test)	54
บทที่ 4 วิธีการดำเนินงานวิจัย	55
4.1 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท	55
4.1.1 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท	55
4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนดอท	59
4.1.3 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของคาร์บอนดอท	65
4.1.4 การวิเคราะห์สมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนดอท	65
4.1.5 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและรูปร่างของคาร์บอนดอท	70
4.1.6 การตอบสนองต่อค่าพีเอชของคาร์บอนดอท	71
4.2 การเตรียมไฮโดรเจลเรืองแสง	73
4.2.1 การศึกษาสมบัติการเรืองแสงของไฮโดรเจล	79
4.2.2 การศึกษาสมบัติการเป็นสารเชื่อมโยงของคาร์บอนดอท	79
4.2.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจล	81
4.2.4 การเพิ่มความแข็งแรงให้กับไฮโดรเจล	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.5 การศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว (Swelling test)	84
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	89
5.1 สรุปผลการวิจัย	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	91
เอกสารอ้างอิง	92
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก FT-IR spectrum ของสารตั้งต้นคาร์บอนดอท	107
ภาคผนวก ข ค่าเฉลี่ยร้อยละการบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ พีเอช 7.4 ที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส	111



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท	6
2.2 การเติมไนโตรเจนในคาร์บอนควอนตัมดอท	8
2.3 การเติมไนโตรเจนและโบรอนในคาร์บอนควอนตัมดอท	8
2.4 การเติมไนโตรเจนและซิลเฟอร์ในคาร์บอนควอนตัมดอท	9
2.5 การเติมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในคาร์บอนควอนตัมดอท	9
2.6 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นวัสดุตรวจจับทางชีวภาพ และเคมี	15
2.7 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทในการพิมพ์ภาพทางชีวภาพ	16
2.8 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นตัวขนส่งยาและยีนส์	18
2.9 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง	19
3.1 ชื่อสูตรและสัดส่วนของสารตั้งต้นในการเตรียมไฮโดรเจล	49
3.2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์	52
4.1 ความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้น และการคายพลังงานของคาร์บอนดอท	67
4.2 สรุปสูตรไฮโดรเจลเรืองแสง	78
4.3 ระยะเวลาการเกิดเจลของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของคาร์บอนควอนตัมดอท	4
2.2 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท	5
2.3 การดูดกลืนแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท	6
2.4 การเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน (Surface functionalization) และการทำแพสซิเวชัน (Passivation) ของคาร์บอนควอนตัมดอท	7
2.5 สถานะพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอทและพลังงานแบนด์แกป	10
2.6 การใช้กลไก Reductive PET เป็นกลไกในอธิบายการตรวจจับ	11
2.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการปลดปล่อยแสงของตัวให้ และตัวรับอิเล็กตรอน	12
2.8 การใช้กลไก FRET ในการอธิบายการเป็นตัวตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท	13
2.9 การใช้กลไก IFE ในการอธิบายการเป็นตัวตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท	13
2.10 การตรวจจับไอออนของเหล็กโดยใช้คาร์บอนควอนตัมดอท	14
2.11 การตรวจจับน้ำตาลกลูโคสจากคาร์บอนควอนตัมดอท	15
2.12 การใช้คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นตัวตรวจจับปรอทไอออน	16
2.13 การใช้คาร์บอนควอนตัมดอทในการพิมพ์ภาพทางชีวภาพของ <i>S. cerevisiae</i>	17
2.14 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นวัสดุในการขนส่งยาและยีนส์	18
2.15 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงในการเร่งการเชื่อมสภาพของเมทิลีนบลู	19
2.16 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำและสายโซ่พอลิเมอร์	20
2.17 การบวมตัวของไฮโดรเจล	20
2.18 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้สารเชื่อมขวาง	22
2.19 การซ่อมแซมตนเองของ Ureidopyrimidinone (UPy) ไฮโดรเจล โดยการเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจน	23
2.20 การซ่อมแซมตนเองของ ACD-AA _d -S4P ไฮโดรเจลโดยการเกิดอันตรกิริยาแบบโฮสต์-เกสต์	24
2.21 การซ่อมแซมตนเองของ Poly[BDI][FSl] ไฮโดรเจล โดยการเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไอออนิก	25
2.22 การเตรียมไฮโดรเจลผ่านปฏิกิริยาซิฟเบส	25
2.23 การรักษาบาดแผลด้วย Alginate dialdehyde cross-linked gelatin hydrogels	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลเป็นตัวดูดซับไอออนของคอปเปอร์	27
2.25 แหล่งวัตถุดิบที่สำคัญของไคติน-ไคโตซาน	28
2.26 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส ไคติน และไคโตซาน	29
2.27 แผ่นปิดแผลจากไคโตซาน	34
2.28 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน	35
2.29 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีเอทิลไคโตซาน	35
2.30 รูปแบบของคาร์บอกซีเมทิลไคโตซาน	36
2.31 การสังเคราะห์ไตรเมทิลไคโตซาน	36
2.32 การสังเคราะห์ไคโตซานต่อกิ่งด้วยพอลิบิวทิลีนเทอร์เทรต	37
2.33 โครงสร้างของอัลจินต	38
2.34 การเกิดเจลของอัลจินต	39
2.35 ผลิตภัณฑ์ขุ่นจากอัลจินต	40
2.36 วัสดุพิมพ์ฟันจากอัลจินต	40
2.37 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซเดียมอัลจินต	41
2.38 การเชื่อมโยงเส้นใยคอลลาเจนด้วยออกซิไดซ์โซเดียมอัลจินต	41
4.1 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท	55
4.2 การเรืองแสงของคาร์บอนดอทแต่ละชนิดโดยเปรียบเทียบระยะเวลาในการเผาไหม้	57
4.3 ค่าการเรืองแสงของคาร์บอนดอท (ก) CU-CDs (ข) CU/Ag-CDs (ค) BCU-CDs และ (ง) BCU/Ag-CDs จากเทคนิค Fluorescent spectroscopy โดยเปรียบเทียบระยะเวลาในการเผาไหม้	58
4.4 FT-IR spectra (ก) FT-IR spectra ของคาร์บอนดอทแต่ละประเภท และ (ข) FT-IR spectra ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมคาร์บอนดอท	60
4.5 XPS spectra ของ BCU-CDs (ก) Survey spectra (ข) C1s (ค) N1s (ง) O1s และ (จ) B1s	62
4.6 XPS spectra ของ BCU/Ag-CDs (ก) Survey spectra (ข) C1s (ค) N1s (ง) O1s (จ) B1s และ (ฉ) Ag3d	64
4.7 UV-vis spectra ของคาร์บอนดอทแต่ละประเภท	65
4.8 Fluorescent spectra ของ (ก) CU-CDs (ข) CU/Ag-CDs (ค) BCU-CDs และ (ง) BCU/Ag-CDs ในช่วงความยาวคลื่น 300-400 นาโนเมตร	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ภาพ 3D spectrum แสดงความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้นและการคายพลังงานของ (ก) CU-CDs (ข) CU/Ag-CDs (ค) BCU-CDs และ (ง) BCU/Ag-CDs	67
4.10 การเรืองแสงของคาร์บอนดอทแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 1%w/v (ก) Fluorescent spectra ของคาร์บอนดอทแต่ละชนิด และ (ข) การเรืองแสงของคาร์บอนดอทแต่ละชนิด ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV light) และแสงยูวี (Visible light)	69
4.11 ความเข้มข้นและการเรืองแสงของ BCU/Ag-CDs (ก) Fluorescent spectra ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และ (ข) สารละลาย BCU/Ag-CDs ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV light) และแสงยูวี (Visible light)	70
4.12 การวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างอนุภาคของ BCU/Ag-CDs (ก) ภาพจากจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ข) กราฟแท่งแสดงขนาดอนุภาค และ (ค) จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง แสดงระนาบของผลึกในแกนกลางคาร์บอนดอท	71
4.13 การตอบสนองต่อค่าพีเอชของ BCU/Ag-CDs (ก) fluorescent spectra การเรืองแสงของ BCU/Ag-CDs ที่พีเอชต่างๆ (ข) กราฟแสดงค่า zeta potential ของ BCU/Ag-CDs ที่พีเอชต่างๆ และ (ค) สารละลาย BCU/Ag-CDs ที่พีเอชต่าง ๆ ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (Visible light) และแสงยูวี (UV light)	72
4.14 แผนภาพการเตรียมไฮโดรเจลเรืองแสง	73
4.15 การศึกษาความคงตัวของไฮโดรเจลเมื่อระยะเวลาผ่านไป 5 วัน (ก) ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มี PVA (CD1C2O0.5) เป็นองค์ประกอบ และ (ข) ไฮโดรเจลสูตรที่มี PVA 1 %w/v (CD1P1C2O0.5)	74
4.16 ผลของ CECS กับการเกิดเจล (ก) ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มี CECS เป็นองค์ประกอบ (CD1P2O0.5) (ข) ไฮโดรเจลสูตรที่มี CECS 1 %w/v (CD1P2C1O0.5) และ (ค) ไฮโดรเจลสูตรที่มี CECS และ 2 %w/v (CD1P2C2O0.5)	75
4.17 ผลของคาร์บอนดอทและการเกิดเจล (ก) ไฮโดรเจลสูตร CD0.5P2C2O0.5 (ข) ไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2O0.5 และ (ค) ไฮโดรเจลสูตร CD1.5P2C2O0.5	76
4.18 ผลของ OSA กับการเกิดเจล (ก) ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มี OSA เป็นองค์ประกอบ (CD1P2C2) (ข) สูตรที่มี OSA 0.5 %w/v (CD1P2C2O0.5) และ (ค) สูตรที่มี OSA 1 %w/v (CD1P2C2O1)	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 Fluorescent spectra ของไฮโดรเจลสูตร P2C2O0.5, CD0.5P2C2O0.5, CD1P2C2O0.5 และ CD1.5P2C2O0.5	79
4.20 การเกิดเจลของไฮโดรเจลเรียงแสงสูตรต่าง ๆ (ก) กราฟแท่งแสดงระยะเวลาการเกิดเจล ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ และ (ข) ตัวอย่างการทดลองการเกิดเจลของไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2O0.5	80
4.21 TGA thermogram ของไฮโดรเจลสูตร P2C2O0.5 และ CD1P2C2O0.5	81
4.22 TGA thermogram ของไฮโดรเจลสูตร CD1P4C2O0.5, CD1P3C2O0.5, CD1P2C2O0.5 และ CD1P1C2O0.5	82
4.23 TGA thermogram ของไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2O0.5 และ CD1P2C2O1	82
4.24 แผนภาพการเพิ่มความแข็งแรงให้กับไฮโดรเจลด้วยกระบวนการ Freezing/Thawing	83
4.25 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2O0.5-F1, CD1P2C2O0.5-F2 และ CD1P2C2O0.5-F3 ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส	85
4.26 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ก) ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing (ข) ไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 1 รอบ (ค) ไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 2 รอบ และ (ง) ไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 3 รอบ	87
4.27 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ ที่เวลา 48 ชั่วโมง ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส	88

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
CDs	Carbon Dots
CECS	Carboxyethyl chitosan
OSA	Oxidized Sodium Alginate
PVA	Polyvinyl alcohol
PBS	Phosphate buffered saline
UV-Vis	UV-Vis spectrophotometer



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันไฮโดรเจลเรืองแสง (Fluorescent hydrogels) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติการเปล่งแสงสีต่าง ๆ (Photoluminescence) รวมถึงการเปล่งแสงขาว (White light emission) สมบัติการซ่อมแซมตนเอง และความเข้ากันได้ทางชีวภาพ โดยวัสดุนี้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปล่งแสงได้เมื่อตอบสนองต่อสิ่งเร้าต่าง ๆ เช่น สภาพกรด-เบส, ตัวทำละลาย, สารเคมี, อุณหภูมิ และแรงเชิงกล เป็นต้น ทำให้มีการนำวัสดุนี้ไปใช้งานหลากหลายโดยเฉพาะในด้านชีวการแพทย์ เช่น ตัวตรวจจับทางเคมี (Chemical sensor) และการพิมพ์ภาพทางชีวภาพ (Bioimaging) เป็นต้น อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลเรืองแสงนี้อาจมีความเป็นพิษต่อเซลล์ ซึ่งเกิดจากสารที่ทำหน้าที่เปล่งแสง เช่น โมเลกุลสีย้อมเรืองแสง (Fluorescent dye) ควอนตัมดอท (Quantum dots) และโลหะกลุ่มแลนทาไนด์ เป็นต้น การเตรียมพอลิเมอร์สำหรับไฮโดรเจลเรืองแสงนั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนทำให้มีข้อจำกัดในการเตรียมปริมาณมาก และสมบัติการเปล่งแสงของไฮโดรเจลยังมีข้อจำกัด เนื่องจากสมบัติการเปล่งแสงจะลดลงเมื่อผสมอยู่ในสารพอลิเมอร์ หรือเมื่อปริมาณน้ำในไฮโดรเจลลดลงทำให้ยุ่งยากในการเก็บรักษา ด้วยข้อจำกัดต่าง ๆ เหล่านี้จึงเป็นสิ่งที่ท้าทายสำหรับนักวิจัยในปัจจุบัน [1]

คาร์บอนดอท (Carbon dots) หรือเรียกว่า คาร์บอนควอนตัมดอท (Carbon quantum dots) เป็นวัสดุหนึ่งในกลุ่มของควอนตัมดอท ที่ถูกค้นพบโดยบังเอิญจากการทำให้ท่อคาร์บอนนาโนชนิดผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotube : SWCNTs) มีความบริสุทธิ์ [2] คาร์บอนควอนตัมดอทสามารถสังเคราะห์ผ่าน 2 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีจากบนลงล่าง (Top-down method) เช่น การปล่อยกระแสไฟฟ้า (Arc-discharge), การยิงด้วยแสงเลเซอร์ (Laser ablation), วิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical method) และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) และวิธีจากล่างขึ้นบน (Bottom-up method) เช่น การสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition), ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal), ไมโครเวฟ (Microwave) และการฉายรังสีอัลตราโซนิก (Ultrasonic irradiation) [3-4] คาร์บอนดอทมีสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่น เช่น สามารถเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ดี ความเป็นพิษต่ำ และเสถียรต่อสารเคมีหรือแสง [4] นอกจากนี้คาร์บอนควอนตัมดอทมักจะมีสมบัติการตอบสนองและการเปล่งแสงที่แตกต่างกันขึ้นกับแหล่งของคาร์บอนที่นำมาสังเคราะห์ ทำให้มีงานวิจัยที่นำคาร์บอนดอทมาผสมกับพอลิเมอร์เพื่อเตรียมเป็นไฮโดรเจลเรืองแสงสำหรับใช้งานที่หลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวตรวจจับโลหะหนักและสารบางชนิด [5-7] การตรวจวัดเชื้อแบคทีเรีย [8] วัสดุปิดแผลเพื่อติดตามกระบวนการหายของบาดแผล [9] รวมไปถึงการปรับปรุงสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรีย [10] และสมบัติเชิงกล [11] เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ถูกกำจัดหมู่อะเซทิล (Deacetylation) ออกไปบางส่วน พบมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส [12] เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้รับความนิยมแทนการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นพิษ สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อได้ดี [13] อย่างไรก็ตามไคโตซานมีความสามารถในการละลายในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ต่ำ เนื่องจากมีโครงสร้างที่แข็งแรง และน้ำหนักโมเลกุลที่ค่อนข้างสูง ทำให้เป็นข้อจำกัดในการใช้งาน [14] จึงได้มีการดัดแปรโครงสร้างของไคโตซาน โดยการเติมหมู่ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ลงไปบนโครงสร้าง เพื่อทำให้เป็นอนุพันธ์ของไคโตซานที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน (Carboxyethyl chitosan) [15] ไฮดรอกซีเอทิลไคโตซาน (Hydroxyethyl chitosan) [16] คาร์บอกซีเมทิลไคโตซาน (Carboxymethyl chitosan) [17] และไตรเมทิลไคโตซาน (Trimethyl chitosan) [18] เป็นต้น

อัลจินेट (Alginate) สามารถสกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติอีกหนึ่งชนิดที่ได้รับความนิยม และถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านชีวการแพทย์ เนื่องจากอัลจินेटมีสมบัติที่สามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อร่างกาย ความเป็นพิษต่ำ ราคาถูก และสามารถทำให้เกิดเป็นเจลได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปรโครงสร้างของอัลจินेटให้มีหมู่แอลดีไฮด์ เพื่อให้เกิดพันธะอิมินกับหมู่เอมีนของพอลิเมอร์ธรรมชาติบางชนิด เช่น คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน (Carboxyethyl chitosan) และออกซิไดซ์อัลจินेट (Oxidized alginate) [19-22] โดยพันธะอิมินเป็นพันธะโควาเลนต์แบบไดนามิกชนิดหนึ่ง เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่แอลดีไฮด์ (-CHO) กับหมู่เอมีน (-NH₂) พันธะอิมินมักถูกนำมาใช้เป็นกลไกของการเกิดสมบัติการซ่อมแซมตนเองในไฮโดรเจล เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้

งานวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลเรืองแสงจากคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และออกซิไดซ์อัลจินेट โดยใช้คาร์บอนดอทเป็นสารเรืองแสง และสารเชื่อมโยง โดยไฮโดรเจลที่เตรียมได้จะมีจุดเชื่อมโยงที่เกิดจากพันธะอิมินระหว่างหมู่เอมีนของคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน และหมู่แอลดีไฮด์ของออกซิไดซ์อัลจินेट และพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ออกซิไดซ์อัลจินेट และคาร์บอนดอท ไฮโดรเจลเรืองแสงที่เตรียมได้จะนำไปทดสอบสมบัติการเรืองแสง สมบัติทางความร้อน พฤติกรรมการบวมตัว เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเตรียมไฮโดรเจลเรืองแสงจากคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และออกซิไดซ์อัลจินेट โดยใช้คาร์บอนดอทเป็นสารเรืองแสง และสารเชื่อมโยง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาเวลาในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทจากกรดซิตริก ยูเรีย โบแรกซ์ และซิลเวอร์-ไนเตรต ด้วยวิธีการแบบไมโครเวฟที่ 800 วัตต์ ในช่วงเวลา 2-4 นาที
- 2) ศึกษาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอท
- 3) ศึกษาสมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนดอท ความเข้มข้น 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 และ 1% w/v ในช่วงความยาวคลื่นในการกระตุ้น 300-400 นาโนเมตร
- 4) ศึกษาการตอบสนองต่อค่าพีเอชของคาร์บอนดอทในช่วงพีเอช 2-13
- 5) เตรียมไฮโดรเจลเรืองแสงจากคาร์บอนดอท พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ คาร์บอกซีเอทิล-ไคโตซาน และออกซิไดซ์อัลจินต
- 6) ศึกษาสมบัติการเรืองแสงของไฮโดรเจลที่มีความเข้มข้นคาร์บอนดอท 0.5, 1 และ 1.5 %w/v ที่ความยาวคลื่นในการกระตุ้น 350 นาโนเมตร
- 7) ศึกษาสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจลที่ช่วงอุณหภูมิ 25-800 องศาเซลเซียส
- 8) ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสังเคราะห์คาร์บอนดอทที่มีความเข้มข้นการเรืองแสงสูง เพื่อนำมาใช้เป็นสารเรืองแสงและสารเชื่อมโยงในไฮโดรเจล

บทที่ 2

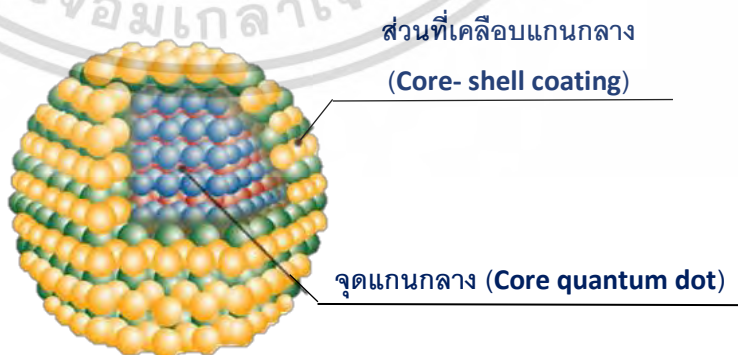
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คาร์บอนดอท (Carbon dots) [23-24]

คาร์บอนดอท หรือเรียกว่า คาร์บอนควอนตัมดอท (Carbon quantum dots) เป็นวัสดุหนึ่งในกลุ่มของควอนตัมดอท ถูกค้นพบโดยบังเอิญจากการทำให้ท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังชั้นเดียว (Single-walled carbon nanotube : SWCNTs) มีความบริสุทธิ์ [2] โดยคาร์บอนดอทที่เกิดขึ้นจะมีโครงสร้างอยู่ในระบบศูนย์มิติ (Zero-dimensional) ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 10 นาโนเมตร มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ สามารถแปลงแสงที่มีความถี่เฉพาะได้หากได้รับกระแสไฟฟ้า หรือ มีแสงมาตกกระทบ นอกจากนี้การเปลี่ยนขนาด รูปร่าง และชนิดสารตั้งต้นของคาร์บอนดอทยังสามารถเปลี่ยนความถี่ของแสงที่เปล่งออกมาได้อย่างแม่นยำ

2.1.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของคาร์บอนควอนตัมดอท [24]

คาร์บอนควอนตัมดอทมีลักษณะโครงสร้างเสมือนทรงกลม ขนาดอนุภาคประมาณ 2-10 นาโนเมตร มีระยะห่างระหว่างระนาบ (Lattice spacing) อยู่ในช่วง 0.18-0.24 นาโนเมตร ประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนที่เคลือบแกนกลาง (Core-shell coating) และ จุดแกนกลาง (Core quantum dot) ดังรูปที่ 2.1 คาร์บอนควอนตัมดอทจะมีทั้งส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนที่เป็นผลึกขนาดเล็ก (Nanocrystal) ซึ่งมีไฮบริไดเซชัน (Hybridization) แบบ sp^2 อยู่บริเวณจุดแกนกลาง แต่ทั้งนี้การเตรียมคาร์บอนควอนตัมดอทอาจทำให้เกิดไฮบริไดเซชันแบบ sp^3 ร่วมด้วย เนื่องมาจากการสร้างพันธะที่ยังไม่สมบูรณ์ของกราฟไฟต์ (Graphite) ในส่วนของบริเวณพื้นผิว คาร์บอนควอนตัมดอทจะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น หมู่คาร์บอนิล (Carbonyl), หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) และ หมู่เอมีน (Amine) เป็นต้น ซึ่งสามารถกำหนดหมู่ฟังก์ชันบนผิวของคาร์บอนควอนตัมดอทได้ โดยการเลือกสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของคาร์บอนควอนตัมดอท [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท [25-26]

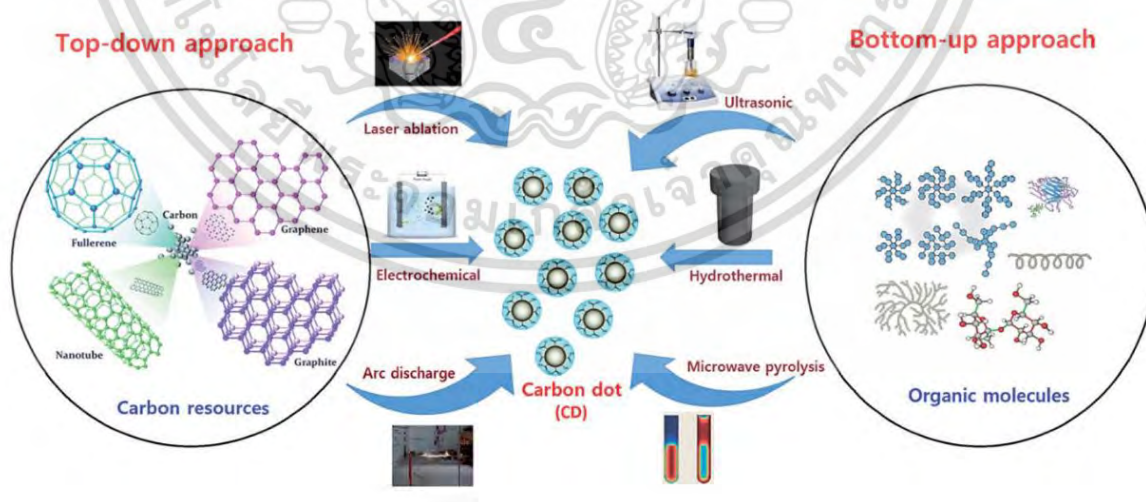
2.1.2.1 การสังเคราะห์โดยวิธีจากบนลงล่าง (Top-down method)

เป็นการสังเคราะห์โดยเริ่มจากคาร์บอนที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ เช่น กราไฟต์ (Graphite), ท่อนาโนคาร์บอนที่มีผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes), กราฟีน (Graphene) ให้กลายเป็นคาร์บอนควอนตัมดอท โดยผ่านวิธีการที่มีสภาวะอุณหภูมิและความดันสูง ได้แก่ วิธีการปล่อยกระแสไฟฟ้า (Arc-discharge), การยิงด้วยแสงเลเซอร์ (Laser ablation), วิธีการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical method) และ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) เป็นต้น

2.1.2.2 การสังเคราะห์โดยวิธีจากล่างขึ้นบน (Bottom-up method)

เป็นการสังเคราะห์โดยเริ่มจากสารที่มีโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะมิโน (Amino acid), กรดซิตริก (Citric acid), ไบโอมแอส (Biomass) และคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ให้กลายเป็นคาร์บอนควอนตัมดอท โดยผ่านวิธีที่มีสภาวะไม่รุนแรง ได้แก่ วิธีการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition), ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal), ไมโครเวฟ (Microwave) และการฉายรังสีอัลตราโซนิก (Ultrasonic irradiation) เป็นต้น

การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทโดยใช้วิธีที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้ได้คาร์บอนควอนตัมดอทที่มีองค์ประกอบไม่เหมือนกัน กล่าวคือ คาร์บอนควอนตัมดอทที่ได้จากวิธีจากล่างขึ้นบนจะมีผลึกขนาดเล็กของ sp^2 น้อยกว่าวิธีแบบบนลงล่าง และมีส่วนที่เป็นอสัณฐานมากกว่า นอกจากนี้การเปลี่ยนอัตราส่วน และองค์ประกอบของสารตั้งต้น, สารเติมแต่ง, ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และ ภาวะในการสังเคราะห์ ยังส่งผลต่อองค์ประกอบสุดท้ายของควอนตัมดอทที่แตกต่างกัน [27]



รูปที่ 2.2 วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3 สารตั้งต้นในการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท

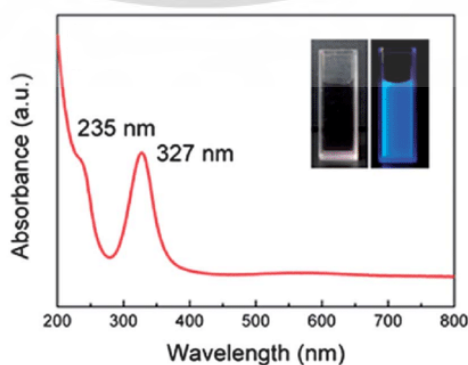
คาร์บอนควอนตัมดอทสามารถสังเคราะห์ได้จากสารตั้งต้นที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นสารตั้งต้นที่มาจากธรรมชาติ หรือเป็นสารทางเคมี ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท

สารตั้งต้น	กระบวนการสังเคราะห์	อ้างอิง
เจลาติน	Hydrothermal	[28]
ซีอิ๊วโกแลต	Hydrothermal	[29]
นม	Hydrothermal	[30]
ข้าวบาร์เลย์ไฮแลนด์, เอทิลีนไดเอมีน	Hydrothermal	[31]
กระเทียม	Hydrothermal	[32]
ใบชา	Hydrothermal	[33]
น้ำส้ม	Hydrothermal	[34]
ไคโตซาน	Microwave	[35]
ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น	Chemical oxidation	[36]
กราไฟต์	Chemical oxidation	[37]

2.1.3 สมบัติทางแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท [38-39]

คาร์บอนควอนตัมดอทจะมีการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 230-340 นาโนเมตร และสามารถขยายออกไปให้อยู่ในช่วงของแสงที่มองเห็นได้ (Visible light) โดยการดูดกลืนแสงช่วงแรกจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 230-280 นาโนเมตร เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของ $\pi-\pi^*$ ในพันธะ C=C บริเวณจุดแกนกลางของคาร์บอนควอนตัมดอท และการดูดกลืนแสงในช่วงที่สองจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 300-340 นาโนเมตร เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของ $n-\pi^*$ ในพันธะ C=O บริเวณผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท ดังรูปที่ 2.3



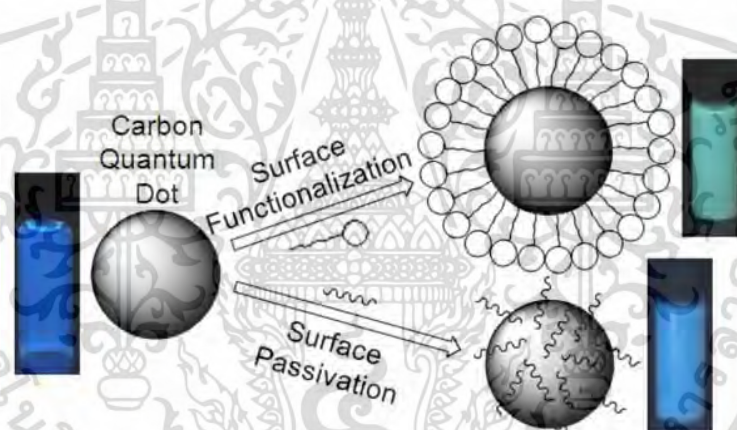
รูปที่ 2.3 การดูดกลืนแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การปรับปรุงสมบัติการเปล่งแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท [39-41]

- การเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน (Surface functionalization) บนผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท และการทำแพสซีเวชัน (Passivation)

กระบวนการเหล่านี้เป็นกระบวนการที่สำคัญในการปรับปรุงพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอทก่อนนำไปใช้งาน โดยกระบวนการแพสซีเวชันเป็นกระบวนการสร้างชั้นบาง ๆ เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล (Poly ethylene glycol : PEG), ไทโอนิลคลอไรด์ (Thionyl chloride), ไทออล (Thiols) และสไปโรไพแรน (Spiro pyran) เคลือบบนผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความสามารถในการเก็บและการปลดปล่อยพลังงานให้กับคาร์บอนควอนตัมดอท อีกหนึ่งกระบวนการถัดมาคือการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวโดยสร้างหมู่ฟังก์ชันที่มีความว่องไว เช่น หมู่คาร์บอนิล, หมู่คาร์บอกซิล และหมู่เอมีน บนผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะมีความสามารถในการกักเก็บพลังงานได้มาก จึงส่งผลให้สามารถปลดปล่อยพลังงานออกมาได้มาก กระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะช่วยเพิ่มสมบัติการเปล่งแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทได้มากขึ้นถึง 55-60 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.4 การเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน (Surface functionalization) และการทำแพสซีเวชัน (Passivation) ของคาร์บอนควอนตัมดอท [40]

- การเพิ่มธาตุเข้าไปในคาร์บอนควอนตัมดอท (Doping)

นอกจากการเพิ่มสมบัติการเปล่งแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทโดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันและการทำแพสซีเวชันแล้ว อีกหนึ่งกระบวนการที่เป็นที่นิยม คือการเติมธาตุต่างชนิดเพียงหนึ่งชนิดเข้าไปในโครงสร้างของคาร์บอนควอนตัมดอท (Doping) และการเติมธาตุต่างชนิดจำนวนหลายชนิดเข้าไปในโครงสร้างของคาร์บอนควอนตัมดอท (Co-doping) เช่น ไนโตรเจน (nitrogen : N), ซัลเฟอร์ (Sulfur : S), โบรอน (Boron : B) และฟอสฟอรัส (Phosphorus : P) เป็นต้น โดยกระบวนการนี้จะช่วยเพิ่มสมบัติการเปล่งแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทได้มากถึง 80-83 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งธาตุที่นิยมเติมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าไป คือ ไนโตรเจน เนื่องจากไนโตรเจนมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคของคาร์บอน และยังสามารถทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) แก่คาร์บอนควอนตัมดอท ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการจัดเรียงอิเล็กตรอน (Electronic configuration) ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตควอนตัมมีค่าสูงขึ้น การเติมไนโตรเจนสามารถเติมได้ในระหว่างการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท หรือหลังจากการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทแล้ว โดยเติมสารที่มีองค์ประกอบของธาตุไนโตรเจนเข้าไป ซึ่งสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ร่วมกับคาร์บอนควอนตัมดอทแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเติมไนโตรเจนในคาร์บอนควอนตัมดอท [41]

แหล่งของคาร์บอน	แหล่งของไนโตรเจน	ผลผลิตควอนตัม (%)
Citric acid	Urea	14.0
Citric acid	Ethylene diamine	80.0
Citric acid	Formamide	11.9
Citric acid	Diethylenetriamine	88.6

การเติมธาตุต่างชนิดหลายชนิดเข้าไปในโครงสร้างของคาร์บอนควอนตัมดอทเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ถูกนำมาใช้ เนื่องจากจะทำให้เกิดผลที่ส่งเสริมกัน (Synergistic effect) ระหว่างธาตุหลายชนิดที่เติมเข้าไปกับคาร์บอนควอนตัมดอท ก่อให้เกิดการจัดเรียงอิเล็กตรอนที่เป็นเอกลักษณ์ ตัวอย่างการเติมธาตุหลายชนิดเข้าด้วยกันแสดงดังตารางที่ 2.3-2.5

ตารางที่ 2.3 การเติมไนโตรเจนและโบรอนในคาร์บอนควอนตัมดอท [41]

แหล่งของคาร์บอน	แหล่งของไนโตรเจน	แหล่งของโบรอน	ผลผลิตควอนตัม (%)
Citric acid	Ethylene diamine	Boric acid	51.42
Citric acid	Ethylene diamine	Sodium tetraborate	29.01
Citric acid	Ethylene diamine	Manganese borate	68.28
3-aminophenylboronic acid			25.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 การเติมไนโตรเจนและซัลเฟอร์ในคาร์บอนควอนตัมดอท [41]

แหล่งของคาร์บอน	แหล่งของไนโตรเจน	แหล่งของซัลเฟอร์	ผลผลิตควอนตัม (%)
Citric acid	Urea	Sodium thiosulphate	-
Citric acid	Cystamine dihydrochloride		39.7
Citric acid	L-cysteine		73

ตารางที่ 2.5 การเติมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในคาร์บอนควอนตัมดอท [41]

แหล่งของคาร์บอน	แหล่งของไนโตรเจน	แหล่งของฟอสฟอรัส	ผลผลิตควอนตัม (%)
Citric acid	Diammonium phosphate		10.58
Glucose	1,2-ethylenediamine	Phosphoric acid	9.59
Citric acid	Urea	Phosphoric acid	15
Ethylenediamine		o-Phosphoric acid	51

2.1.5 กลไกการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท [39, 42-43]

เมื่อคาร์บอนควอนตัมดอทได้รับการกระตุ้นจากภายนอกอย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอจะสามารถทำให้อิเล็กตรอนภายในคาร์บอนควอนตัมดอทเคลื่อนที่จากชั้นนอกสุดที่มีอิเล็กตรอนอยู่ หรือที่เรียกว่า เวเลนซ์แบนด์ (Valence band) ไปสู่ชั้นว่างเปล่าที่เรียกว่า คอนดักชันแบนด์ (Conduction band) ทำให้เกิดหลุมบวก (Positively charged hole) ในเวเลนซ์แบนด์ และมีจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มมากขึ้นในคอนดักชันแบนด์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า เอกซิตอน (Exciton) และระยะห่างระหว่างหลุมบวกและอิเล็กตรอนเรียกว่า รัศมีเอกซิตอนบอร์ (Exciton bohr radius) โดยระยะห่างนี้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของคาร์บอนควอนตัมดอท จากนั้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นเวเลนซ์แบนด์ จะไม่มีความเสถียรจึงตกกลับลงมาพร้อมกับคายพลังงานออกมาเกิดเป็นพลังงานแสงขึ้น ซึ่งถ้าระยะห่างระหว่างแบนด์ไม่เท่ากันจะทำให้พลังงานที่คายออกมาไม่เท่ากัน นำไปสู่การเปล่งแสงที่ไม่เหมือนกันของคาร์บอนควอนตัมดอท โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะห่างของแบนด์มีดังนี้

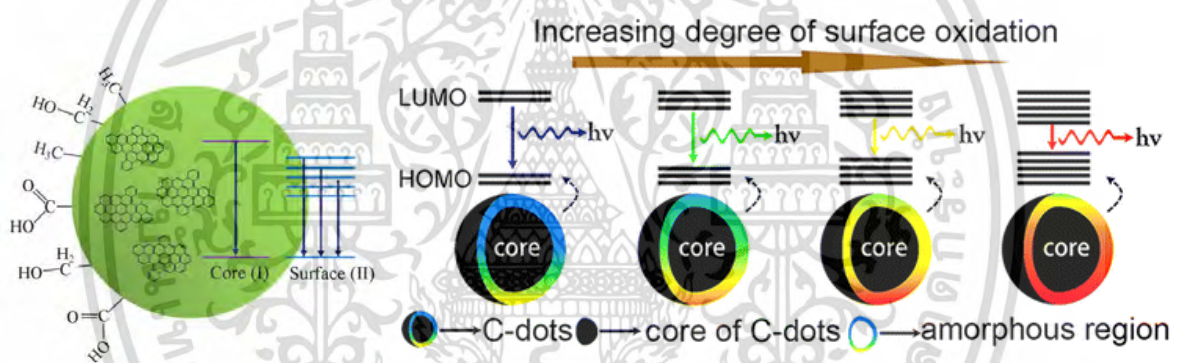
2.1.5.1 ขนาดอนุภาคของคาร์บอนควอนตัมดอท (Quantum size)

เมื่อขนาดอนุภาคของคาร์บอนควอนตัมดอทไม่เท่ากันย่อมส่งผลให้เกิดการเปล่งแสงที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ถ้าคาร์บอนควอนตัมดอทมีขนาดใหญ่จะทำให้ค่าพลังงานแบนด์แกป (Band gap energy) ลดลงส่งผลให้พลังงานที่คายออกมาเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น (Red shift) ในทางกลับกันถ้าคาร์บอนควอนตัมดอทมีขนาดเล็กจะทำให้ค่าพลังงานแบนด์แกปเพิ่มขึ้นส่งผลให้พลังงานที่คายออกมาเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง (Blue shift) โดยคาร์บอนควอนตัมดอทที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดอนุภาคเล็กประมาณ 1.2 นาโนเมตร จะคายพลังงานออกมาอยู่ในช่วงแสงยูวี (UV light) คาร์บอนควอนตัมดอทที่มีขนาดอนุภาคปานกลางประมาณ 1.5-3 นาโนเมตร จะคายพลังงานออกมาอยู่ในช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ (Visible light) และคาร์บอนควอนตัมดอทที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ประมาณ 3.8 นาโนเมตร จะคายพลังงานออกมาอยู่ในช่วงใกล้แสงอินฟราเรด (Near-infrared)

2.1.5.2 สถานะพื้นผิว (Surface state) ของคาร์บอนควอนตัมดอท

เมื่อคาร์บอนควอนตัมดอทถูกปรับปรุงพื้นผิวจะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันขึ้นบนผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท และหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีความสามารถในการดูดพลังงานมาเก็บไว้ เมื่อมีแสงมากระตุ้นหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะทำการปลดปล่อยแสงที่กักเก็บออกมา ยังมีการเกิดออกซิเดชันบนพื้นผิว (Surface oxidation) ของคาร์บอนควอนตัมดอทมากจะทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันมากขึ้น ส่งผลให้พลังงานแสงที่ปล่อยออกมาเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น โดยการเปล่งแสงที่เกิดขึ้นจะไม่ได้มาจากหมู่ฟังก์ชันเพียงอย่างเดียว แต่จะมาจากคาร์บอนที่อยู่บริเวณกึ่งกลางและหมู่ฟังก์ชันที่ต่อออกมาของคาร์บอนควอนตัมดอทดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สถานะพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอทและพลังงานแบนด์แกป [43]

2.1.5.3 โมเลกุลของคาร์บอนควอนตัมดอท (Molecule state) [44]

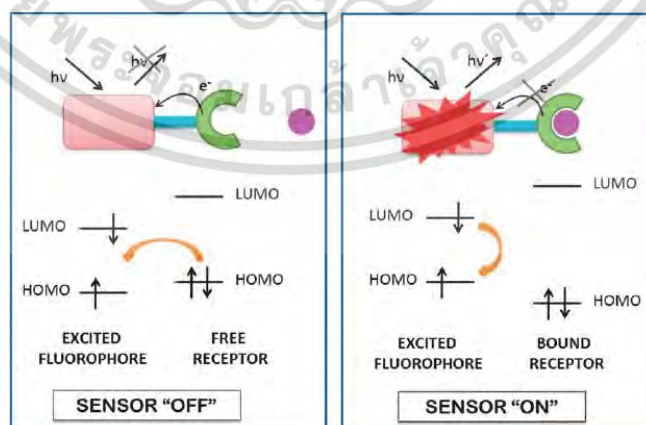
ปัจจัยของโมเลกุลของคาร์บอนควอนตัมดอทที่มีผลต่อการเปล่งแสงจะมาจากสารเรืองแสงขนาดเล็กที่อยู่บนผิว หรือด้านในโครงสร้างของคาร์บอนควอนตัมดอท โดยสารเรืองแสงขนาดเล็กจะเกิดขึ้นในขั้นตอนของการเตรียมคาร์บอนควอนตัมดอท เมื่ออุณหภูมิ และระยะเวลาในการเผาไหม้มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการสร้างโมเลกุลของสารเรืองแสงมาก ตัวอย่างการเปล่งแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทเนื่องมาจากสารเรืองแสงในโครงสร้าง เช่น การเตรียมคาร์บอนควอนตัมดอทจากซูโครส (Sucrose) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ได้คาร์บอนควอนตัมดอทที่ด้านในโครงสร้างประกอบไปด้วยการเกาะกลุ่มกันของ Hydroxymethylfurfural (HMF) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเรืองแสง โดยมีการปลดปล่อยความยาวคลื่นอยู่ที่ 590 นาโนเมตร ทำให้คาร์บอนควอนตัมดอทที่เตรียมได้เรืองแสงเป็นแสงสีส้มแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 กลไกการเป็นตัวตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท [39]

2.1.6.1 Photo-Induced Electron transfer (PET)

เป็นทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายการเป็นตัวตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท โดยกระบวนการ PET สามารถอธิบายได้ว่า สารประกอบจะเกิดขึ้นระหว่างตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) และตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) เมื่อสารประกอบเหล่านี้ถูกกระตุ้นด้วยแสงให้ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) จะไม่มีความเสถียรจึงตกกลับมาที่สถานะพื้น (Ground state) โดยไม่มีการปลดปล่อยโฟตอน (Photons) ออกมา กระบวนการ PET สามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย ได้แก่ Reductive PET และ Oxidative PET ซึ่ง Reductive PET เป็นกระบวนการที่คาร์บอนควอนตัมดอทจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ในขณะที่สารที่ต้องการวิเคราะห์ (Analyte) จะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากชั้นระดับพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนอยู่ (Highest Occupied Molecular Orbital : HOMO) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ไปสู่ชั้นระดับพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนอยู่ของคาร์บอนควอนตัมดอท ดังรูปที่ 2.6 ในทางกลับกัน Oxidative PET เป็นกระบวนการที่คาร์บอนควอนตัมดอททำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะเคลื่อนที่จากชั้นระดับพลังงานต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอยู่ (Lowest Unoccupied Molecular Orbital : LUMO) ของคาร์บอนควอนตัมดอทไปสู่ชั้นระดับพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนอยู่ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการ PET ประกอบด้วยพลังงานแบนด์แกประหว่าง LUMO และ HOMO หรือ LUMO และ LUMO ของคาร์บอนควอนตัมดอทและสารที่ต้องการวิเคราะห์ตามลำดับ กระบวนการ PET มักเป็นกลไกที่ใช้ในการอธิบายการดับลงของแสงคาร์บอนควอนตัมดอท เนื่องจากคาร์บอนควอนตัมดอทเมื่อถูกปรับปรุงพื้นผิวแล้วจะสามารถเกิดหมู่ฟังก์ชันจำนวนมาก ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้ [45-46]

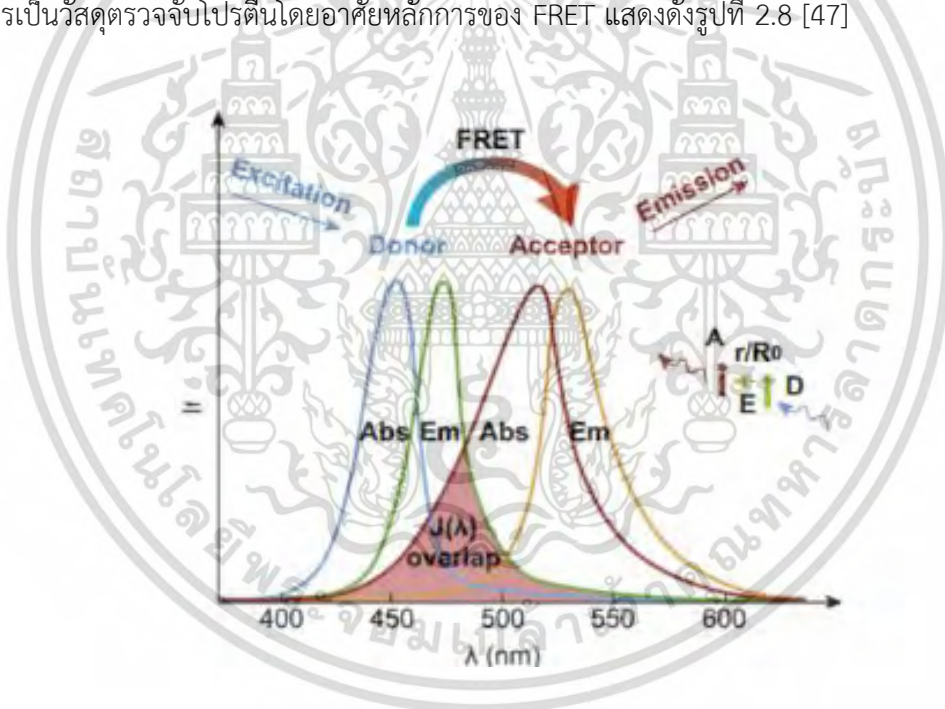


รูปที่ 2.6 การใช้กลไก Reductive PET เป็นกลไกในอธิบายการตรวจจับ [46]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

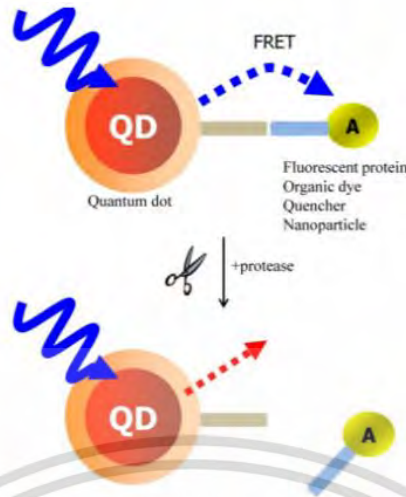
2.1.6.2 Forster Resonance Energy Transfer (FRET)

เป็นอีกหนึ่งกลไกที่นำมาใช้อธิบายการเป็นตัวตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท สารประกอบจะเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวแบบไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole) ระหว่างตัวให้อิเล็กตรอน นั่นคือคาร์บอนควอนตัมดอท และตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งคือสารที่ต้องการวิเคราะห์ ในกลไก FRET การดูดกลืนแสงจะกระตุ้นให้โมเลกุลของตัวให้อิเล็กตรอนขึ้นไปสู่ชั้น LUMO จากนั้นโมเลกุลของตัวให้อิเล็กตรอนจะตกกลับลงมาสู่สถานะพื้นพร้อมกับการปลดปล่อยพลังงานออกมาให้กับโมเลกุลของตัวรับอิเล็กตรอน ในกลไก FRET จะมีข้อที่ควรคำนึงคือ สเปกตรัมการปลดปล่อยของตัวให้อิเล็กตรอนจะต้องซ้อนทับกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวรับอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 2.7 อีกทั้งตัวรับอิเล็กตรอนและตัวให้อิเล็กตรอนต้องอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน กลไก FRET มักใช้ในการอธิบายการเป็นตัวตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท เนื่องจากคาร์บอนควอนตัมดอทมีสเปกตรัมการปลดปล่อยที่กว้างจะถูกจับคู่กับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้ง่าย โดยสารที่ต้องการวิเคราะห์สามารถเป็นได้ทั้งสารที่เรืองแสงและสารที่ไม่เรืองแสง ตัวอย่างการใช้งานคาร์บอนควอนตัมดอทในการเป็นวัสดุตรวจจับโปรตีนโดยอาศัยหลักการของ FRET แสดงดังรูปที่ 2.8 [47]



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการปลดปล่อยแสงของตัวให้ และตัวรับอิเล็กตรอน [39]

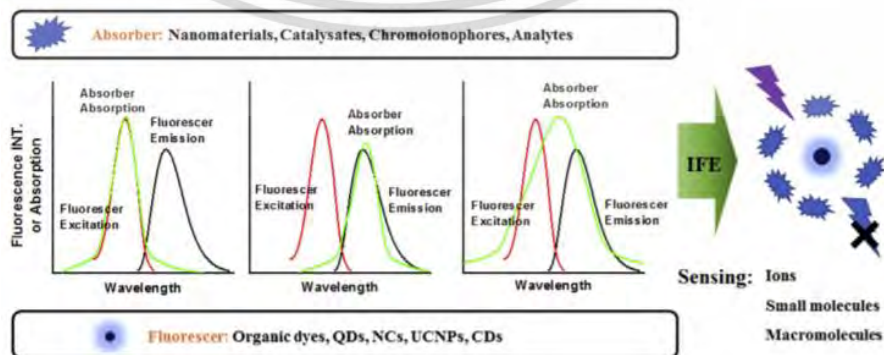
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การใช้กลไก FRET ในการอธิบายการเป็นตัวตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท [47]

2.1.6.3 Inner filter Effect (IFE) [48]

กลไกนี้ประกอบไปด้วยสาร 2 ชนิดในระบบ ได้แก่ ตัวเรืองแสง (Fluorescer) คือ คาร์บอนควอนตัมดอท และตัวดูดซับ (Absorber) คือสารที่ต้องการวิเคราะห์ (Analyte) หรือโครโมฟอร์ (Chromophore) กลไก IFE เป็นกลไกที่อธิบายการดับลงของแสงคาร์บอนควอนตัมดอท เนื่องมาจากการดูดกลืนแสงที่ใช้ในการกระตุ้น (Excitation light) หรือแสงที่ปลดปล่อยออกมา (Emission light) โดยตัวดูดซับ โดยจะแบ่งเป็น IFE ปฐมภูมิ (Primary IFE) ซึ่งเป็นการดูดกลืนพลังงานแสงที่ใช้ในการกระตุ้นโดยโครโมฟอร์ (Chromophore) และ IFE ทติยภูมิ (Secondary IFE) เป็นการดูดกลืนแสงที่ปลดปล่อยออกมาโดยโครโมฟอร์ ในกลไกนี้มีข้อที่ควรคำนึงคือ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวดูดซับจะต้องซ้อนทับกับสเปกตรัมการกระตุ้นหรือสเปกตรัมการปลดปล่อยของตัวเรืองแสง ดังรูปที่ 2.9 และสมบัติทางแสงของตัวดูดซับและตัวเรืองแสงจะต้องไม่ขึ้นอยู่กับสารที่ต้องการวิเคราะห์ ดังนั้นในกลไกนี้การเลือกตัวดูดซับและตัวเรืองแสงจึงเป็นสิ่งที่มีความซับซ้อน



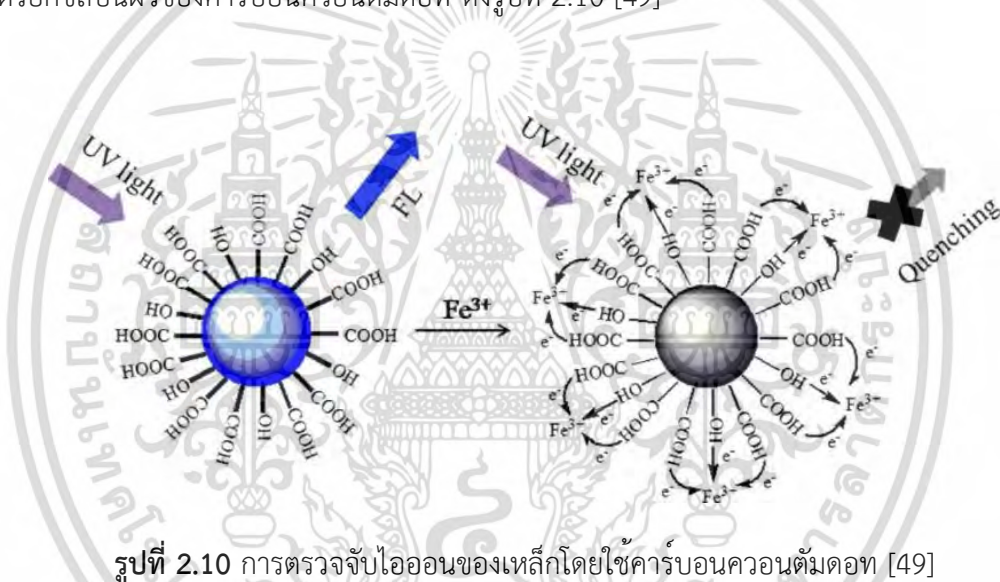
รูปที่ 2.9 การใช้กลไก IFE ในการอธิบายการเป็นตัวตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท [48]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.7 การออกแบบการเป็นตัวตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท [45]

2.1.7.1 การออกแบบให้เกิดปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างคาร์บอนควอนตัมดอทกับสารที่ต้องการวิเคราะห์

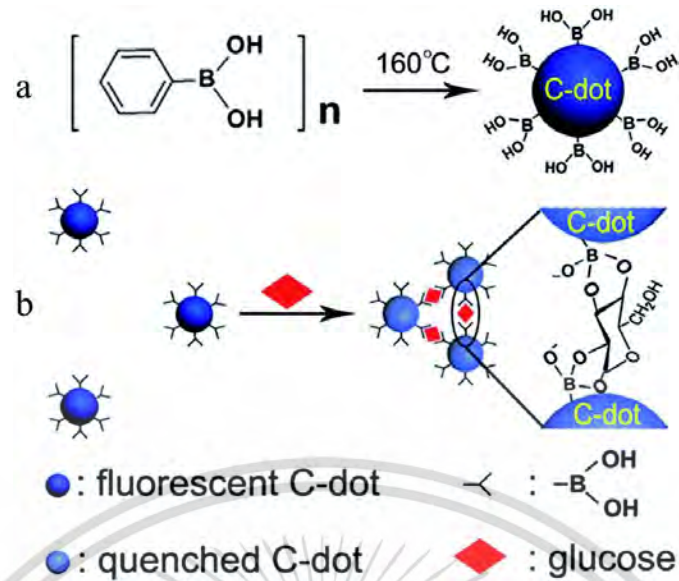
โดยในขั้นตอนแรกคาร์บอนควอนตัมดอทจะถูกออกแบบให้มีหมู่ฟังก์ชันตามที่ต้องการบนพื้นผิวเพื่อสามารถตรวจจับโลหะไอออนได้ โดยหมู่ฟังก์ชันบนผิวของคาร์บอนควอนตัมดอทจะเกิดพันธะโคออร์ดิเนต (Coordinate) กับโลหะไอออนที่ต้องการวิเคราะห์อย่างว่องไวและแม่นยำ ยกตัวอย่างเช่น คาร์บอนควอนตัมดอทจะถูกทำปฏิกิริยาโดยการรีฟลักซ์ (Reflux) เพื่อให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) ขึ้นบนผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท จึงสามารถใช้เป็นตัวตอบสนองต่อค่าพีเอช (pH) ได้ และยังสามารถใช้เป็นตัวตรวจจับไอออนของเหล็ก (Fe^{3+}) เนื่องจากการเกิดพันธะโคออร์ดิเนตที่แข็งแรงและแม่นยำระหว่างไอออนของเหล็กและหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท ดังรูปที่ 2.10 [49]



รูปที่ 2.10 การตรวจจับไอออนของเหล็กโดยใช้คาร์บอนควอนตัมดอท [49]

2.1.7.2 การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันให้คาร์บอนควอนตัมดอท

การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนผิวของคาร์บอนควอนตัมดอทเพื่อให้มีความจำเพาะเจาะจงกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มหมู่โบโรนิก (Boronic acid) ลงไปบนผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท โดยหมู่โบโรนิกจะมีความสามารถในการจับกับน้ำตาลได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะน้ำตาลกลูโคส (Glucose) จึงทำให้คาร์บอนควอนตัมดอทนี้สามารถเป็นตัวตรวจจับน้ำตาลกลูโคสได้ ดังรูปที่ 2.11 [50]



รูปที่ 2.11 การตรวจจับน้ำตาลกลูโคสจากคาร์บอนควอนตัมดอท [50]

2.1.8 การประยุกต์ใช้งานคาร์บอนควอนตัมดอท [51]

2.1.8.1 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นวัสดุตรวจจับ (Sensing applications)

คาร์บอนควอนตัมดอทมักนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุในการตรวจจับทางชีวภาพ และทางเคมี เนื่องจากสมบัติเด่นของคาร์บอนควอนตัมดอท กล่าวคือ มีความเป็นพิษต่ำ สามารถละลายน้ำได้ดี มีเสถียรภาพทางแสงสูง และการปลดปล่อยแสงที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้น ไอออนบางประเภทเมื่อทำการจับกับคาร์บอนควอนตัมดอทแล้วจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเปล่งแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท กล่าวคือ อาจทำให้ความเข้มแสงลดลงหรือดับลงตามกลไกที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้คาร์บอนควอนตัมดอทมีสมบัติที่สามารถเป็นตัวตรวจจับได้ ตัวอย่างการใช้คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นวัสดุตรวจจับแสดงดังตารางที่ 2.6 และรูปที่ 2.12

ตารางที่ 2.6 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นวัสดุตรวจจับทางชีวภาพ และเคมี [51]

สารตั้งต้น	สารที่ตรวจจับ	ลิมิตการตรวจจับ
L-Glutamic acid	H_2O_2	20 μM
BBr_3 , Hydroquinone	H_2O_2	10 mM
Dopamine, (3-aminopropyl) triethoxysilane, Glycerol	Ag^+	2.5 nM
Oxalic acid, Urea	Fe^{3+}	1-130 μM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นวัสดุตรวจจับทางชีวภาพ และเคมี [51]

สารตั้งต้น	สารที่ตรวจจับ	ขีดจำกัดการตรวจจับ
Citric acid, Melamine	Glutathione	-
Phenolphthalein, Ethylenediamine	Hg ²⁺	5.8 μM
Citric acid, Acetic acid	Fe ³⁺	0.18 μM
Pomelo peel	Hg ²⁺	0.23 nM
Citric acid, Triethylamine	Hg ²⁺	2.8 nM
Citric acid, Aminoguanidine	Nitric oxide	-



รูปที่ 2.12 การใช้คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นตัวตรวจจับปรอทไอออน [52]

2.1.8.2 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทในด้านการพิมพ์ภาพทางชีวภาพ

(Bioimaging applications)

คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นวัสดุทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในงานด้านการพิมพ์ภาพทางชีวภาพ เนื่องจากมีสมบัติการเรืองแสงที่เป็นเอกลักษณ์ ทนทานต่อการหลุดออกของสี และมีความเป็นพิษต่ำ ตัวอย่างการใช้งานคาร์บอนควอนตัมดอทในการพิมพ์ภาพทางชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2.7 และรูปที่ 2.13

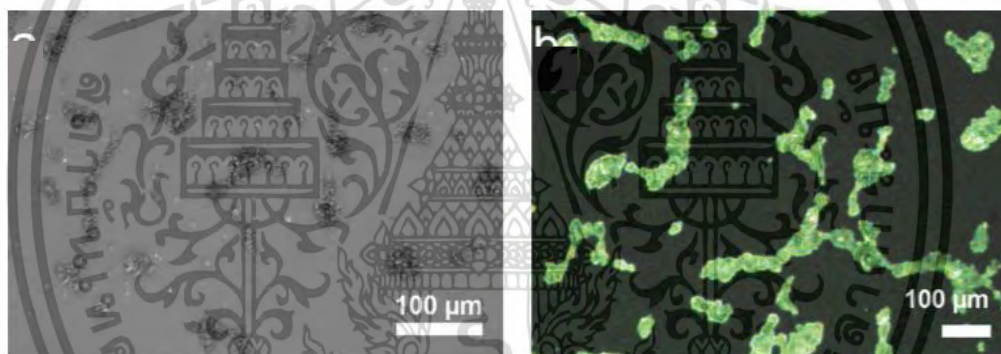
ตารางที่ 2.7 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทในการพิมพ์ภาพทางชีวภาพ [51]

สารตั้งต้น	สีของคาร์บอนควอนตัมดอท	เซลล์ที่ใช้ในการพิมพ์ภาพ
Carbon soot	Blue-yellow	HepG2 cell
Graphene oxide, DMF	Green	MG-63 cell
Glycerol, Polyethylenimine	Blue	COS-7 cell
Glycine	Green	MCF-10A, MCF-7 cells

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 (ต่อ) การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทในการพิมพ์ภาพทางชีวภาพ [51]

สารตั้งต้น	สีของคาร์บอนควอนตัมดอท	เซลล์ที่ใช้ในการพิมพ์ภาพ
Glucose, TTDDA	Green	HeLa, MCF-7, NH-3T3 celll
Glycerol solvent	Blue	HeLa cell
Citric acid, Ethylenediamine	Blue	MC3T3 cell
Sucrose	Green	16HBE cell
Urea, Polyethylene glycol	Blue	L929 cells
Citric acid, Urea, Sodium fluoride	Red	Glioma C6 cells
Folic acid	Blue-Green	U87 glioma cell
Graphite powder	Blue-Green	A549 cell



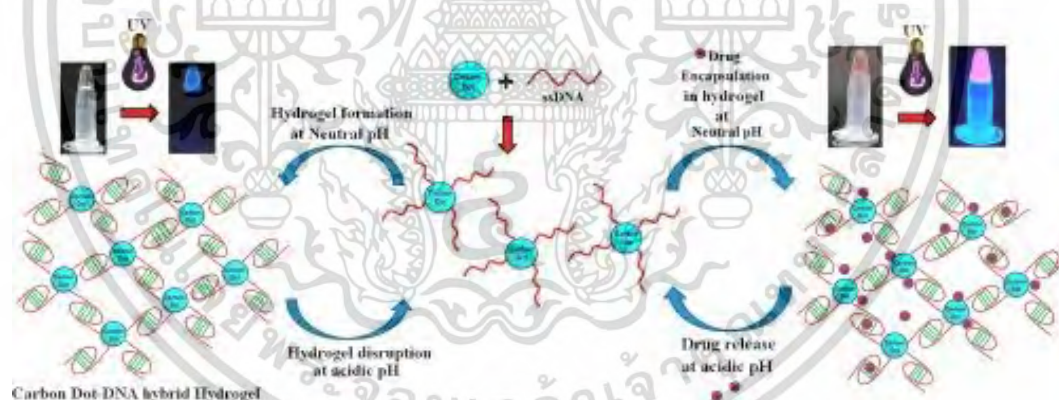
รูปที่ 2.13 การใช้คาร์บอนควอนตัมดอทในการพิมพ์ภาพทางชีวภาพของ *S. cerevisiae* [53]

2.1.8.3 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นตัวขนส่งยาและยีนส์ (Drug and gene delivery applications)

คาร์บอนควอนตัมดอทสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุในการขนส่งยา หรือยีนส์ได้ เนื่องจากการปรับปรุงพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอทสามารถทำได้ง่าย อีกทั้งคาร์บอนควอนตัมดอทมีขนาดอนุภาคเล็ก และมีความเข้ากันได้ดีกับร่างกายมนุษย์ ตัวอย่างการใช้งานคาร์บอนควอนตัมดอทในการขนส่งยาและยีนส์แสดงดังตารางที่ 2.8 และรูปที่ 2.14

ตารางที่ 2.8 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมคอตเป็นตัวขนส่งยาและยีนส์ [51]

สารตั้งต้น	ยา/ยีนส์	เซลล์เป้าหมาย
EDTA	DOX	HeLa
Sorbitol, NaOH	DOX	HeLa
Citric acid, o-phenylenediamine	DOX	HeLa, L929 cells
Urea, Citric acid	DOX	HepG2, HL-7702
Citric acid, Polyene polyamine	Oxaliplatin	Hepatic cancer cells
Citric acid, Ethylene diamine	DOX	L929, MCF-7, CCK-8
Citric acid, Diethylenetriamine	Cisplatin	A2780
Citric acid, Tryptophan	siRNA	MGC-803
Arginine, Glucose	pSOX-9	Fibroblasts, Chondrogenic of mouse embryonic
Polyethyleneimine, Fluorinated diglycidyl ethers	siRNA / DNA	A549, HepG2



รูปที่ 2.14 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมคอตเป็นวัสดุในการขนส่งยาและยีนส์ [54]

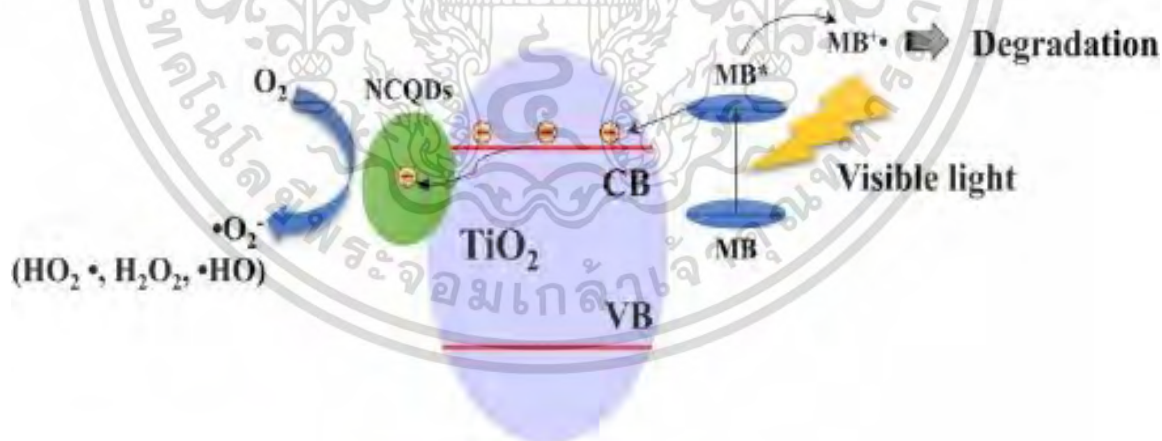
2.1.8.4 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมคอตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalytic application)

คาร์บอนควอนตัมคอตเป็นวัสดุที่มักนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ด้วยสมบัติของคาร์บอนควอนตัมคอตที่มีความเป็นพิษต่ำ มีเสถียรภาพทางเคมีสูง เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงชนิดอื่น เช่น ZnO, CdS, TiO₂ และอื่น ๆ ตัวอย่างการใช้งานคาร์บอนควอนตัมคอตในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงแสดงดังตารางที่ 2.9 และรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมคอตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสง [51]

สารตั้งต้น	การใช้งาน
Citric acid, Urea, Thiourea	Degradation of Rhodamine B
Citric acid, Ethylenediamine	Degradation of Rhodamine B
Citric acid	H ₂ generation
Glycerol, TTDDA	Degradation of methylene blue
Carbon black pigment	Degradation of malachite green
Glucose, Ammonia	Photodegradation of methyl orange
Citric acid, Urea, Dicyandiamide	Degradation of tetracycline
Urea	Methyl orange
Ascorbic acid, Kollicoat	Degradation of RBX
Graphite	H ₂ generation
Citric acid, Thiourea	Degradation of Rhodamine B
Urea, Melamine	Conversion of CO ₂ into methanol
Vitamin C	H ₂ generation
Glucose	Degradation of methylene blue

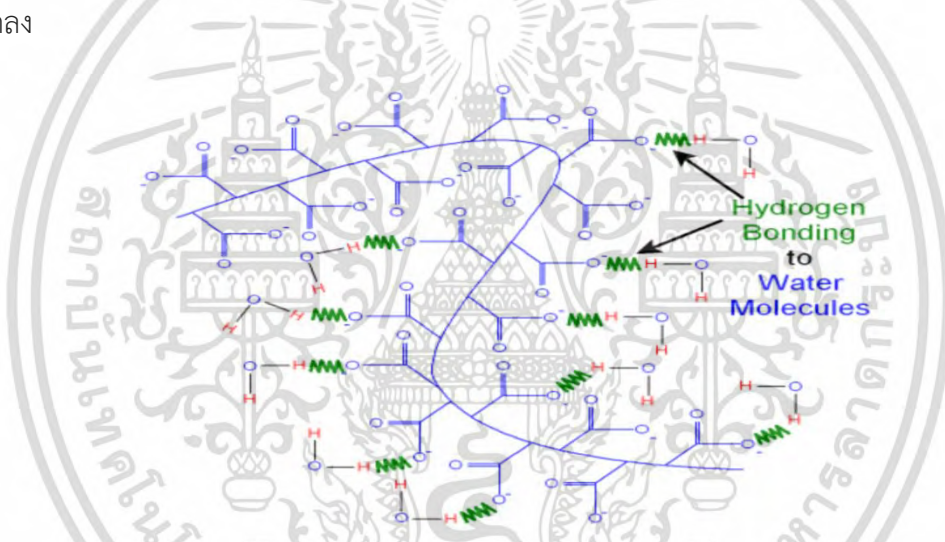


รูปที่ 2.15 การประยุกต์ใช้คาร์บอนควอนตัมคอตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงในการเร่งการเสื่อมสภาพของเมทิลีนบลู [55]

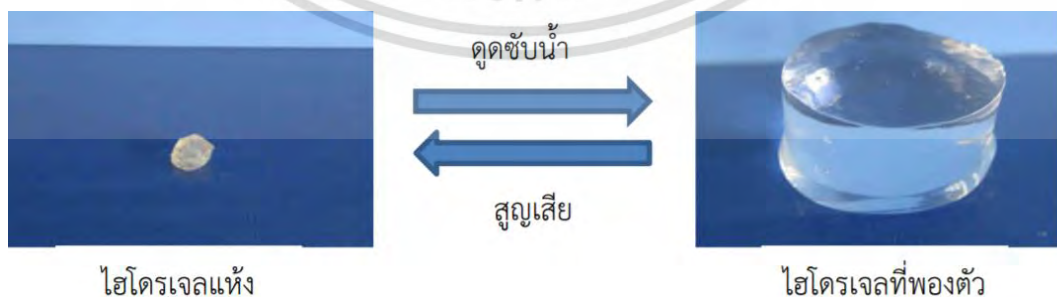
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ไฮโดรเจล (Hydrogel) [56-57]

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilic polymer) มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslink structure) โดยส่วนใหญ่ไฮโดรเจลจะถูกสังเคราะห์จากพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันชนิดกรด (Acid group) อยู่ในสายโซ่โมเลกุล เมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่ในน้ำอะตอมไฮโดรเจนในสายโซ่พอลิเมอร์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นประจุบวก (H_3O^+) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดเป็นประจุลบ ส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างสายโซ่ดันให้สายโซ่ที่เกี่ยวข้องกันอยู่แยกออกจากกัน จากนั้นอะตอมไฮโดรเจนในโมเลกุลของน้ำที่มีความเป็นบวกลดลง ๆ จะทำปฏิกิริยากับอะตอมที่มีประจุลบในสายโซ่พอลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.16 เป็นการเหนี่ยวนำโมเลกุลของน้ำเข้าสู่โครงสร้างของไฮโดรเจล ดังนั้นจึงทำให้ไฮโดรเจลเกิดการพองตัว ยืดหยุ่น แต่ไม่ละลายน้ำ เนื่องจากมีโครงสร้างแบบโครงร่างตาข่ายจึงทำให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรง เมื่อไฮโดรเจลมีการสูญเสียน้ำจะเกิดการหดตัวกลับคืนสู่สภาพเดิม ดังรูปที่ 2.17 และยังคงสามารถดูดซับน้ำได้อีกแต่จะมีประสิทธิภาพการดูดซับลดลง



รูปที่ 2.16 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำและสายโซ่พอลิเมอร์ [56]



รูปที่ 2.17 การบวมตัวของไฮโดรเจล [58]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล [56]

2.2.1.1 ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group)

ถ้าในโครงสร้างของไฮโดรเจลมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำมาก ไฮโดรเจลจะยิ่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี

2.2.1.2 แรงดันออสโมติก (Osmotic pressure)

ปริมาณน้ำที่อยู่ภายในและภายนอกโครงสร้างของไฮโดรเจลจะไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดแรงดันออสโมติกขึ้น ถ้าแรงดันออสโมติกมีความแตกต่างกันมากโมเลกุลของน้ำจะสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างของไฮโดรเจลได้มากขึ้น

2.2.1.3 รูพรุนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ในไฮโดรเจล

ถ้ารูพรุนหรือช่องว่างภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลมีมากจะส่งผลให้โมเลกุลของน้ำสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างได้มากยิ่งขึ้น

2.2.2 ชนิดของไฮโดรเจล [59]

2.2.2.1 ไฮโดรเจลชนิดแผ่นฟิล์ม (Cast film)

ไฮโดรเจลชนิดแผ่นฟิล์ม มักจะนำไปใช้ในการเคลือบพื้นผิวของวัสดุต่าง ๆ ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลชนิดแผ่นฟิล์ม เช่น การเตรียมไฮโดรเจลชนิด Poly(*N*-isopropylacrylamide) ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของมอนอเมอร์ *N*-isopropylacrylamide, *N*, *N*'-methylene-bis-acrylamide และ Acrylic acid โดยมีตัวริเริ่มปฏิกิริยา คือ Potassium persulfate ใช้ Epichlorohydrin เป็นสารเชื่อมขวาง

2.2.2.2 ไฮโดรเจลชนิดตอกกับบนพื้นผิว (Surface grafted polymer)

ไฮโดรเจลชนิดตอกกับบนพื้นผิว สามารถเตรียมได้จากการทำให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ซึ่งพิจารณาจากอุณหภูมิวิกฤตกลางที่ทำให้พอลิเมอร์ไม่รวมตัวกับน้ำ (Lower Critical Solution Temperature : LCST) โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า LCST พอลิเมอร์จะสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี จึงแสดงพฤติกรรมการบวมตัว แต่เมื่อที่อุณหภูมิสูงกว่า LCST พอลิเมอร์จะมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ จึงแสดงพฤติกรรมการหดตัว การเตรียมไฮโดรเจลด้วยเทคนิคนี้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสังเคราะห์ง่าย และสามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการได้

2.2.2.3 ไฮโดรเจลชนิดโครงร่างตาข่าย (Crosslinked Network)

ไฮโดรเจลชนิดโครงร่างตาข่าย สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสารละลายผสมกับมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา และสารเชื่อมขวาง จากนั้นเทลงไปในแม่พิมพ์ ลักษณะของไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากวิธีนี้จะมีลักษณะใส เหนียว และค่อนข้างคงรูป แต่ยังมีขีดจำกัดง่าย จึงได้มีการพัฒนาวิธีการเตรียมไฮโดรเจลให้เป็นพอลิเมอร์โครงร่างตาข่ายชนิดแทรกสอดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Interpenetrating Network, IPN) ซึ่งไฮโดรเจลชนิดนี้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีมาก และมีความสามารถในการดูดซับน้ำที่ดีเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลโครงร่างตาข่ายธรรมดา

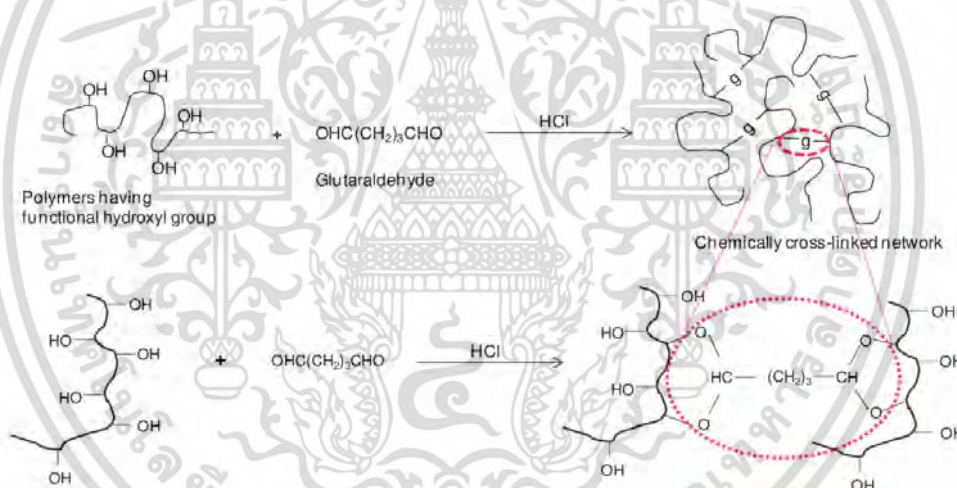
2.2.3 การเตรียมไฮโดรเจล [59]

2.2.3.1 วิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslinking)

เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยม เนื่องจากทำได้ง่าย และสะดวก ไม่จำเป็นต้องใช้สารเชื่อมขวาง ซึ่งเป็นการช่วยลดต้นทุนในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล การเตรียมไฮโดรเจลโดยใช้วิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพสามารถทำได้โดยผ่านอันตรกิริยาต่าง ๆ เช่น อันตรกิริยาแบบไอออนิก (Ionic interaction), Complex coacervation และ การสร้างพันธะไฮโดรเจน เป็นต้น

2.2.3.2 วิธีการเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical crosslinking)

เป็นการเตรียมไฮโดรเจลโดยการเชื่อมโยงทางเคมีของมอนอเมอร์ภายในสายโซ่ของพอลิเมอร์ การใช้วิธีนี้ต้องอาศัยการเติมสารเชื่อมขวางเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เข้าด้วยกัน ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้สารเชื่อมขวาง [60]

2.2.3.3 วิธีการเชื่อมโยงด้วยรังสี [61]

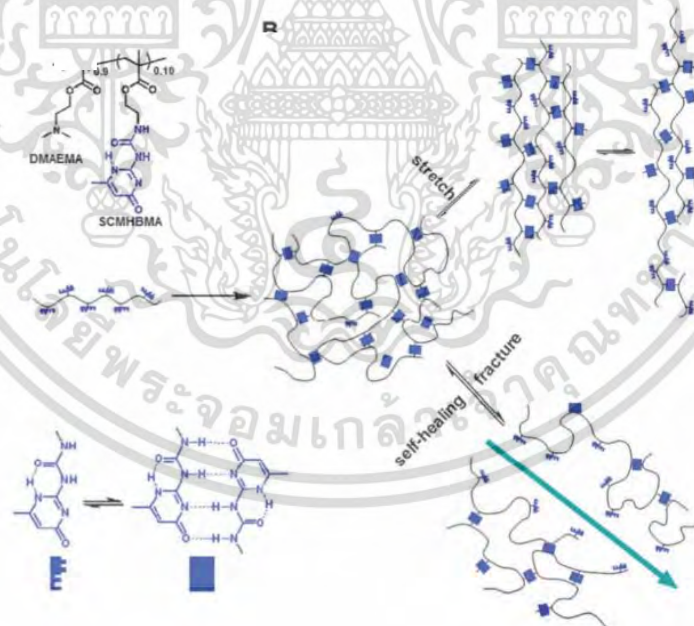
เป็นการเตรียมไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้รังสีกระตุ้นให้โมเลกุลเกิดการแตกตัวเป็นไอออน และเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมโยงผ่านกลไกอนุมูลอิสระ ตัวอย่างรังสีที่ใช้ เช่น รังสีเอกซ์, รังสีแกมมา และรังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น

2.2.4 ไฮโดรเจลซ่อมแซมตนเอง (Self-healing hydrogel)

กลไกในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับความสามารถในการผันกลับได้ (Reversibility) ของพันธะที่ใช้ในการเชื่อมโยงไฮโดรเจล โดยจำนวนพันธะในการเชื่อมโยงและความแข็งแรงของพันธะที่ใช้ในการเชื่อมโยงเป็นตัวกำหนดความสามารถในการซ่อมแซมตนเอง [62] กลไกในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลมีดังนี้

2.2.4.1 Hydrogen bond [63]

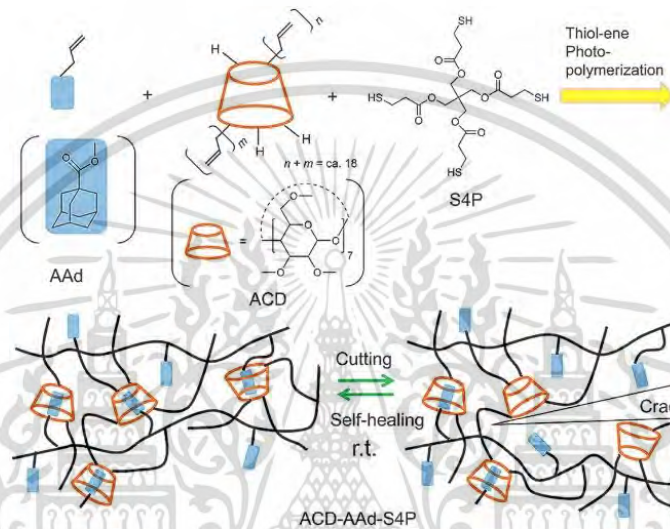
พันธะไฮโดรเจนเป็นพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างไฮโดรเจนอะตอมที่มีประจุบวกกับอะตอมของธาตุที่มีประจุลบ เช่น ออกซิเจน, ไนโตรเจน และฟลูออรีน โดยความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนจะขึ้นอยู่กับธาตุที่มีประจุลบ เช่น การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (OH--OH) และการเกิดพันธะระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอไมด์ (OH--HN-C=O) จะมีความแข็งแรงมากกว่าพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างไฮโดรเจนและฟลูออรีน (H--F) อย่างไรก็ตามพันธะไฮโดรเจนก็ยังคงมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะไอออนิก พอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลเพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่มีสมบัติซ่อมแซมตนเองได้โดยใช้การเชื่อมโยงแบบพันธะไฮโดรเจน ได้แก่ Polyvinyl alcohol (PVA), Polyacrylamide (PAM) และ Ureidopyrimidinone (UPy) เป็นต้น ตัวอย่างการซ่อมแซมตนเองของ UPy โดยใช้พันธะไฮโดรเจนแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การซ่อมแซมตนเองของ Ureidopyrimidinone (UPy) ไฮโดรเจล โดยการเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจน [64]

2.2.4.2 Host-guest interaction [62-63]

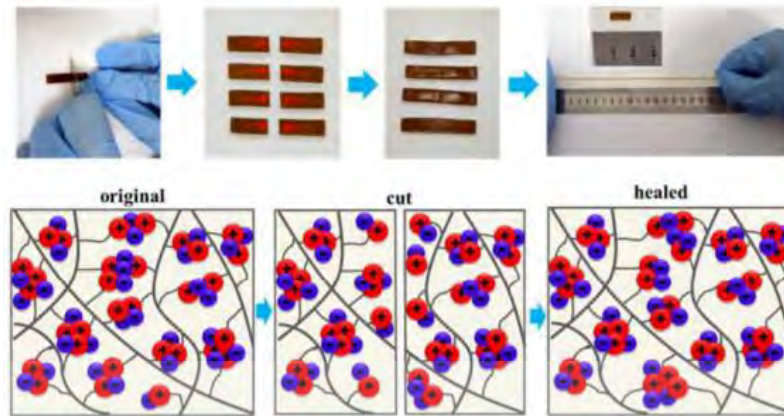
อันตรกิริยาแบบโฮสต์-เกสต์ เกี่ยวข้องกับสารเคมีสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิด เกิดจากการรวมตัวของโมเลกุลด้วยอันตรกิริยาที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์ อันตรกิริยานี้มักใช้ไซโคลเดกซ์ทรินเป็นโฮสต์ ซึ่งไซโคลเดกซ์ทรินเป็นสารที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน มีโพรงอยู่ตรงกลาง ประกอบด้วยหมู่ที่ไม่ชอบน้ำอยู่ด้านในโครงสร้าง และมีหมู่ที่ชอบน้ำอยู่บริเวณผิว นำไปจับกับโมเลกุลของเกสต์ที่มีความไม่ชอบน้ำไว้ที่โพรงด้านใน เกิดเป็นการเชื่อมโยงที่สามารถผันกลับได้ ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การซ่อมแซมตนเองของ ACD-AAAd-S4P ไฮโดรเจลโดยการเกิดอันตรกิริยาแบบโฮสต์-เกสต์ [65]

2.2.4.3 Ionic bonds [62-63]

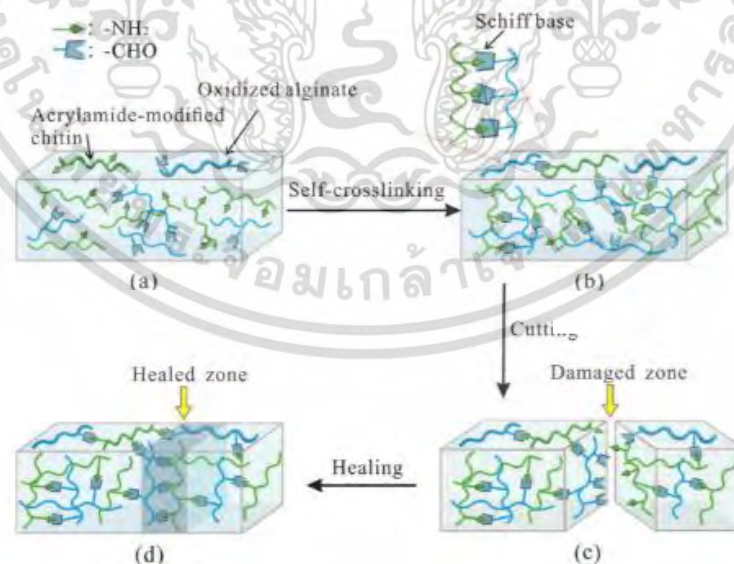
พันธะไอออนิกเป็นพันธะที่เกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างพอลิเมอร์ที่มีประจุตรงข้ามกัน เช่น ไฮโดรเจลจากอัลจินต เป็นการเตรียมจากอัลจินตซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุลบ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโดยใช้แคลเซียมที่มีประจุบวก นอกจากนั้นการรวมตัวกันของพอลิอิเล็กโทรไลต์หรือแคตไอออนในสารละลายจะทำให้เกิดอันตรกิริยาและส่งผลให้สร้างโครงข่ายสามมิติของไฮโดรเจลจากพันธะไอออนิก ดังรูปที่ 2.21 ลักษณะทางกายภาพของอันตรกิริยาแบบนี้ทำให้เหมาะสำหรับการใช้เป็นกลไกในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล



รูปที่ 2.21 การซ่อมแซมตนเองของ Poly[BDI][FSI] ไฮโดรเจล โดยการเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไอออนิก [66]

2.2.4.4 Dynamic Covalent Bonds [67]

พันธะแบบไดนามิกส์ เป็นพันธะที่สามารถสร้างขึ้นใหม่เมื่อเกิดการแตกหัก ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลโดยใช้พันธะแบบไดนามิกส์ เช่น การใช้อะคริลาไมด์ (Acrylamide) ที่ถูกปรับปรุงสมบัติด้วยไคติน (Chitin) มาผสมกับออกซิไดซ์อัลจินเตต (Oxidized alginate) จะได้ไฮโดรเจลที่เกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะอิมีน ($-\text{CH}=\text{CN}$) ซึ่งเป็นพันธะแบบไดนามิกส์ ผ่านปฏิกิริยาชิฟเบส (Schiff's base reaction) ส่งผลให้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีสมบัติในการซ่อมแซมตนเอง ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การเตรียมไฮโดรเจลผ่านปฏิกิริยาชิฟเบส [67]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

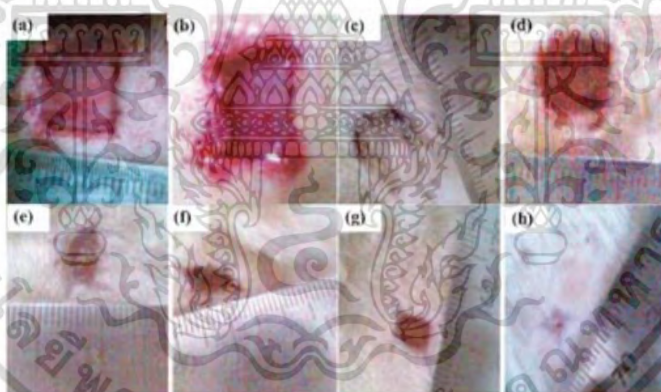
2.2.5 การประยุกต์ใช้งานไฮโดรเจล [59]

ไฮโดรเจลมีสมบัติเด่นในเรื่องความสามารถในการดูดซับน้ำได้สูง ซึ่งสามารถดูดซับน้ำได้ถึง 600 เท่าของน้ำหนักตนเอง และยอมให้โมเลกุลต่าง ๆ เช่น แก๊สออกซิเจน, ยา, โปรตีน และสารอื่น ๆ แพร่ผ่านได้ จึงมีการนำไฮโดรเจลมาใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย ดังนี้

2.2.5.1 ด้านการแพทย์

- **ระบบนำส่งยา** ไฮโดรเจลได้รับการประยุกต์ใช้ในด้านทางการแพทย์ เพราะสามารถเข้ากันได้ดีกับร่างกายของมนุษย์ และไม่เป็นที่พิษต่อเซลล์ จึงได้มีการประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลเป็นระบบนำส่งยา เนื่องจากสมบัติในการดูดซับของเหลวที่ดี จึงมีความสามารถในการดูดซับยาเก็บไว้แล้วปล่อยออกมาในปริมาณ และตามสภาวะที่ต้องการได้

- **วัสดุปิดแผล** เนื่องจากสมบัติของไฮโดรเจลที่สามารถดูดซับน้ำหรือของเหลวได้หลายเท่าตัวโดยที่ไม่ละลาย ไฮโดรเจลจึงถูกนำมาใช้ในการดูดซับของเหลวต่าง ๆ ที่ไหลออกมาจากบาดแผล และใช้ในการรักษาความชุ่มชื้นของบาดแผลให้อยู่ในภาวะที่เหมาะสม ในขณะเดียวกันออกซิเจนก็ยังสามารถแพร่ผ่านรูพรุนของไฮโดรเจลได้ ทำให้ร่างกายสร้างเนื้อเยื่อได้ดีกว่าปกติ ตัวอย่างการใช้งานไฮโดรเจลเป็นวัสดุปิดแผล แสดงดังรูปที่ 2.23



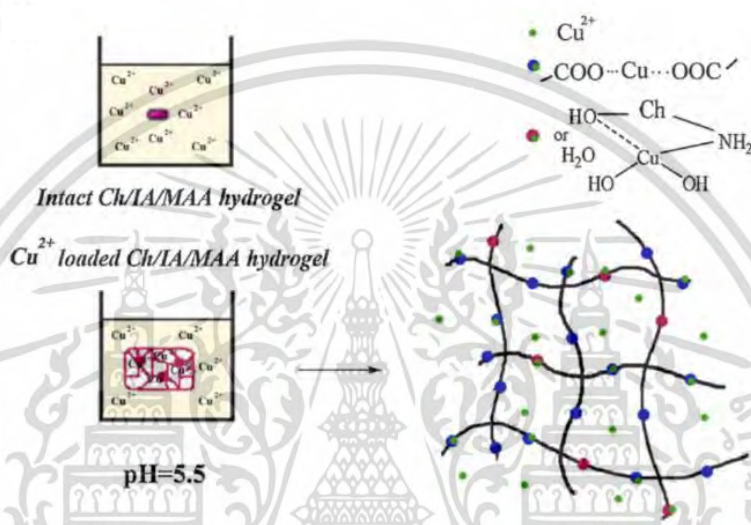
รูปที่ 2.23 การรักษาบาดแผลด้วย Alginate dialdehyde cross-linked gelatin hydrogels [68]

2.2.5.2 ด้านอุตสาหกรรมเกษตร

ไฮโดรเจลถูกนำมาประยุกต์เป็นวัสดุอุ้มน้ำเพื่อเพิ่มความชุ่มชื้นในดิน ทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่ขาดแคลนน้ำ โดยไฮโดรเจลจะค่อย ๆ ปล่อยน้ำที่ดูดซับไว้ออกมา นอกจากนี้ไฮโดรเจลยังช่วยป้องกันการเส้ำร้ธาตุในดิน เนื่องจากสามารถดูดซับแร่ธาตุต่าง ๆ ได้ แต่ส่วนใหญ่ไฮโดรเจลที่นำมาใช้ในการเกษตร เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์จากปีโตรเคมีซึ่งย่อยสลายยาก

2.2.5.3 ด้านอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสีย

เนื่องจากสมบัติของไฮโดรเจลที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะ และสามารถเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนได้โดยการเกิดคีเลตระหว่างไอออนของโลหะหนักกับไฮโดรเจล เรียกว่า พอลิคีเลโทเจน (Polychelatogen) จึงทำให้ไฮโดรเจลถูกนำไปประยุกต์ใช้งานด้านโรงงานอุตสาหกรรมในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียหรือน้ำทิ้งจากโรงงาน ตัวอย่างการใช้งานไฮโดรเจลในการดูดซับโลหะหนัก แสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลเป็นตัวดูดซับไอออนของคอปเปอร์ [69]

2.3 ไคตินและไคโตซาน (Chitin and Chitosan) [12, 70]

ไคติน (Chitin) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) จัดอยู่ในกลุ่มของคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) พบมากเป็นอันดับที่สองรองจากเซลลูโลส โดยไคตินถูกค้นพบโดยศาสตราจารย์ Henri Braconnot ในปี ค.ศ. 1811 และในช่วงทศวรรษที่ 1820 ได้มีรายงานการสกัดพอลิเมอร์จากแมลง โดยพอลิเมอร์ชนิดนี้ถูกเรียกว่าไคติน (Chitin) ซึ่งมาจากคำในภาษาฝรั่งเศสว่า “Chitine” รากศัพท์ของไคตินมาจากภาษาลาตินคือคำว่า “Chiton” และในภาษากรีกคำว่า “Khiton” หมายถึงสัตว์น้ำที่มีเปลือกแข็งเป็นเกราะหุ้ม และได้มีการเสนอโครงสร้างของไคตินโดย Albert Hofmann ในปี ค.ศ. 1929

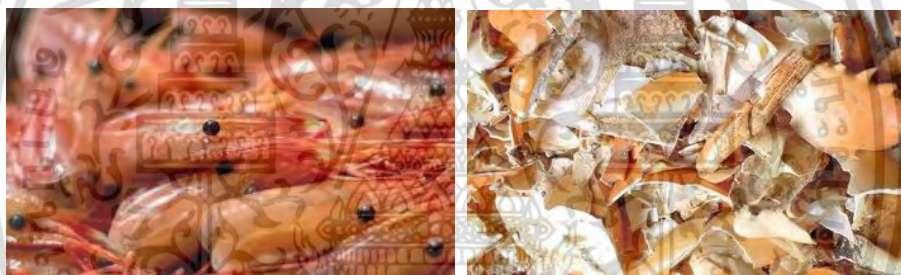
ไคโตซาน (Chitosan) เป็นอนุพันธ์ (derivative) ของไคตินที่ได้จากการทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิทิล (Deacetylation) ของไคตินในสารละลายต่างเข้มข้น ทำให้โครงสร้างทางเคมีของไคตินเปลี่ยนแปลงไป ได้ถูกค้นพบโดยบังเอิญโดยศาสตราจารย์ C. Rouget ในปี ค.ศ. 1859

2.3.1 แหล่งที่มาของไคติน-ไคโตซาน [70]

ไคติน-ไคโตซานพบในโครงสร้างเปลือกนอกของสัตว์จำพวกกุ้ง ปู แกนปลาหมึก แมลง ตัวไหม หอยมุก ยีสต์และจุลินทรีย์หลายชนิด นอกจากนี้ยังพบในผนังเซลล์ของเห็ดราและสาหร่ายบางสายพันธุ์ แหล่งวัตถุดิบสำคัญที่สามารถพบไคติน-ไคโตซาน จำแนกได้ดังนี้

1. สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังประเภทมีข้อปล้อง (Arthropods) ได้แก่ หนอนทะเล (Annelida), หอย (Mollusk), Coelentera, Crustaceans, กุ้งก้ามกราม (Lobster), กุ้ง (Shrimp), กุ้งนาง (Prawn), Krill, ปู (Crab) เป็นต้น
2. แมลง (Insect) ได้แก่ แมงป่อง, Brachiopods, มด, แมลงสาบ, แมลงปีกแข็ง เป็นต้น
3. จุลินทรีย์ (Microorganisms) ได้แก่ สาหร่ายสีเขียวน้ำตาล, ยีสต์ (β -type), เชื้อรา (ผนังเซลล์), ก้านชูสปอร์ของ penicillium เป็นต้น

แหล่งวัตถุดิบหลักของไคติน-ไคโตซานได้จากเปลือกของกุ้งและปู ดังรูปที่ 2.25 โดยมีการประมาณปริมาณการผลิตไคติน-ไคโตซานทั่วโลกต่อปีที่ 50,000 ตัน โดยเฉพาะในสหรัฐอเมริกามีกำลังการผลิตประมาณไม่ต่ำกว่า 15,000 ตันต่อปี



รูปที่ 2.25 แหล่งวัตถุดิบที่สำคัญของไคติน-ไคโตซาน

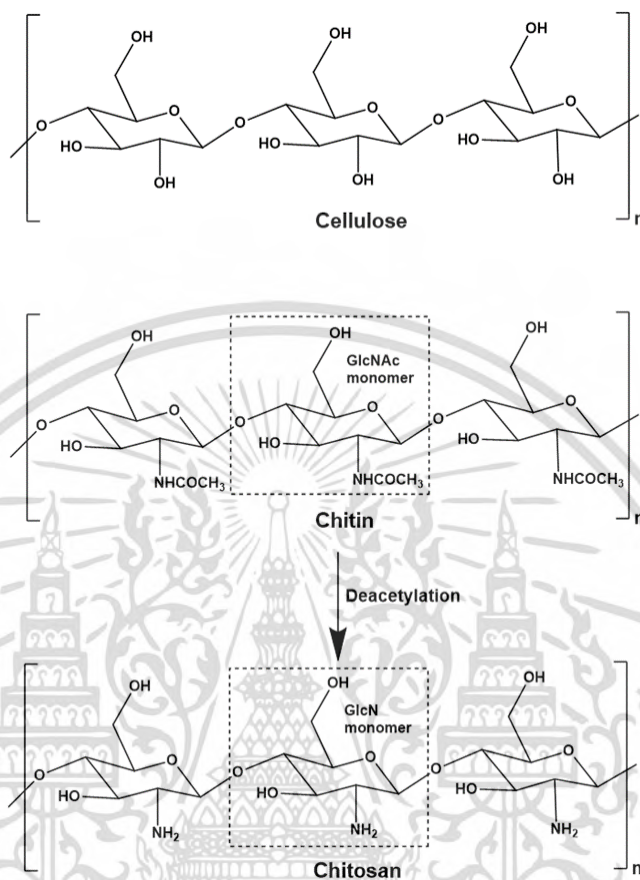
2.3.2 โครงสร้างของไคติน-ไคโตซาน [12, 71]

ไคติน ($C_8H_{13}O_5N$)_n มีโครงสร้างทางเคมี คือ Poly (β -(1-4)-2 acetamido-D-glucose) ประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีธาตุไนโตรเจน และหมู่อะซิทิล (Acetyl) เกาะอยู่ภายในโมเลกุล ในธรรมชาติไคตินจะประกอบด้วยหน่วยที่มีหมู่ Acetylated amino ประมาณ 84 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลืออีก 16 เปอร์เซ็นต์ เป็นหน่วยที่กำจัดหมู่อะซิทิลออกไป

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ (Derivative) ของไคตินที่ได้จากการทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิทิล (Deacetylation) ออกมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป โดยมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหมู่อะซิทามิโด (-NHCOCH₃) เป็นหมู่เอมิโนหรือหมู่เอมีน (-NH₂) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ไคโตซานมีโครงสร้างทางเคมี คือ poly(β -(1-4)-2 amino-D-glucose) ไคตินและไคโตซานมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับเซลลูโลสแต่แตกต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ในวงแหวนไพราโนส (Pyranose ring) โดยหมู่แทนที่ที่ตำแหน่งของเซลลูโลสจะเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) แต่ของไคตินเป็นหมู่อะซิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทาไมด์ (Acetamide group) ส่วนของโคโตซานจะเป็นหมู่อะมิโน (Amino group) สามารถแสดงโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส ไคติน และโคโตซานได้ ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส ไคติน และโคโตซาน [71]

2.3.3 การผลิตโคโตซาน [72]

2.3.3.1 กระบวนการผลิตโคโตซาน

กระบวนการผลิตโคโตซานสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ ในส่วนของวิธีการทางชีวภาพไม่ได้รับความนิยมมากนัก โดยเป็นวิธีการที่ยังอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นวิธีการใช้เอนไซม์ (Enzyme) ในการดึงหมู่อะมิโนออกจากไคติน ส่วนวิธีการทางเคมีเป็นวิธีการที่นิยมในปัจจุบัน แต่ยังคงมีข้อเสียในเรื่องของคุณภาพในการผลิตที่ควบคุมยาก เครื่องมือที่ใช้ถูกกัดกร่อนอันเนื่องมาจากสารเคมีที่เข้มข้นและที่สำคัญคือปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม โดยการสกัดโคโตซานด้วยวิธีการทางเคมีสามารถทำได้ดังนี้

1. กระบวนการแยกโปรตีน โดยการแช่เปลือกกุ้งใน 4 เปอร์เซ็นต์ ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. **กระบวนการแยกแร่ธาตุ** เป็นกระบวนการที่ถัดมาจากกระบวนการแยกโปรตีน โดยการนำเปลือกกุ้งมาแช่ต่อใน 4 เปอร์เซ็นต์กรดไฮโดรคลอริก ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ต่อจากนั้นทำการล้างน้ำจนได้ค่าพีเอชเป็นกลาง จะได้โคตินออกมาซึ่งอาจจะนำไปกำจัดสีด้วย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$)

3. **กระบวนการกำจัดหมู่อะซิทิล** ในโครงสร้างของโคติน ทำได้โดยการแช่โคตินใน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (40-50%) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส หรืออาจใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า ทำให้หมู่อะซิทิลบางส่วนหรือทั้งหมดถูกเปลี่ยนไปเป็นหมู่ อะมิโน ได้เป็นโคโตซานออกมา

2.3.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตโคโตซาน

1. **ชนิดของสารละลายต่าง** โดยสารละลายต่างที่นิยมใช้ในการกำจัดหมู่อะซิทิลใน โครงสร้างของโคติน คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ยังมีการใช้สารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในการกำจัดหมู่อะซิทิลด้วย โดยพบว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียม- ไฮดรอกไซด์ในการกำจัดหมู่อะซิทิลมีผลทำให้ได้สารละลายโคโตซานที่มีความหนืดสูงกว่าการใช้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

2. **ความเข้มข้นของสารละลายต่าง** ต่างที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิทิลมักอยู่ในรูป ของสารละลายต่าง ซึ่งมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงร้อยละ 40-60 โดยน้ำหนัก โดยการใช้สารละลายต่างที่ มีความเข้มข้นสูงเกินไปจะทำให้โคโตซานที่ผลิตได้เกิดการเสียสภาพ เนื่องจากการใช้สภาวะที่รุนแรง ทั้งอุณหภูมิที่สูง และเวลาที่ค่อนข้างนาน แต่การใช้ความเข้มข้นต่างที่ต่ำเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์ โคโตซานที่ได้ละลายในกรดอ่อนได้ยากขึ้น หรือไม่สามารถละลายได้เลย

3. **อุณหภูมิในการกำจัดหมู่อะซิทิล** โดยส่วนใหญ่การกำจัดหมู่อะซิทิลจะทำให้ อุณหภูมิค่อนข้างสูง ตั้งแต่ 80-180 องศาเซลเซียส การใช้อุณหภูมิในการกำจัดหมู่อะซิทิลที่สูงเกินไป ทำให้โคโตซานที่ผลิตได้เกิดการเสียสภาพทำให้โคโตซานมีมวลโมเลกุลลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าใช้ ความเข้มข้นของสารละลายต่างสูงขึ้น อุณหภูมิในการกำจัดหมู่อะซิทิลควรลดลง เพื่อไม่ให้สภาวะที่ ใช้ในการกำจัดหมู่อะซิทิลรุนแรงเกินไป

4. **เวลาในการกำจัดหมู่อะซิทิล** ระยะเวลาในการผลิตโคโตซานที่มากขึ้น โคโต ซานจะมีปริมาณหมู่อะซิทิล และขนาดของมวลโมเลกุลลดลง แต่มีความหนาแน่นของประจุ (Charge density) สูงขึ้น

5. **ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)** ออกซิเจนในอากาศจะส่งผลต่อขนาดของ มวลโมเลกุลของโคโตซาน โดยถ้ามีปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นในขั้นตอนระหว่างการจัดหมู่ อะซิทิล จะทำให้โคโตซานเกิดการเสียสภาพได้ ส่งผลให้โคโตซานที่ได้มีมวลโมเลกุลลดลง

6. **คุณภาพของโคติน** มีผลต่อคุณภาพของโคโตซานที่ผลิตได้ เนื่องจากโคตินเป็น สารตั้งต้นในการผลิตโคโตซาน โดยสมบัติของโคตินที่มีผลต่อการกำจัดหมู่อะซิทิลที่สำคัญ ได้แก่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของไคติน และความหนาแน่นของไคติน โดยมีผลต่ออัตราการแพร่ของต่างในขั้นตอนการกำจัด หมูอะซีทิล ซึ่งสมบัติและคุณภาพของไคตินจะขึ้นกับ 2 ปัจจัย ได้แก่ แหล่งของไคตินและกรรมวิธีที่ใช้ ในการแยกไคติน

2.3.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซาน [73]

1. การละลาย (Solubility) ไคโตซานไม่สามารถละลายในน้ำ ต่าง และตัวทำละลายอินทรีย์ ได้ แต่สามารถละลายในกรดอินทรีย์ที่มีค่าพีเอชต่ำกว่า 6 ได้ทุกชนิด โดยทั่วไปกรดที่นิยมใช้ในการ นำมาละลายไคโตซาน ได้แก่ กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก ซึ่งสารละลายไคโตซานที่ได้จะมีลักษณะใส และหนืด มีพฤติกรรมแบบนอนนิวโทเนียน (Non-Newtonian) เมื่อไคโตซานอยู่ในสารละลาย หมูอะ มิโนของไคโตซานจะแตกตัวโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแตกตัว (pKa) ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของประจุ พอลิเมอร์โดยมีค่า pKa อยู่ในช่วง 6.2-6.8

2. ค่าระดับการกำจัดหมูอะซีทิล (Degree of deacetylation) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความเป็น ไคตินและไคโตซาน เนื่องจากไคตินและไคโตซานเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง 2 มอนอเมอร์ ได้แก่ N-acetyl-D-glucosamine และ D-glycosamine โดยถ้าสัดส่วนของมอนอเมอร์แรกมากกว่าจะมีค่า การกำจัดหมูอะซีทิลต่ำ จะแสดงสมบัติเด่นของไคติน ในทางกลับกันถ้าสัดส่วนของมอนอเมอร์ที่ 2 มากกว่าจะมีระดับการกำจัดหมูอะซีทิลสูง ซึ่งจะแสดงสมบัติเด่นของไคโตซาน

3. ความหนืด (Viscosity) ความหนืดของสารละลายขึ้นอยู่กับ ค่าการกำจัดหมูอะซีทิล น้ำหนักโมเลกุล ความเป็นกรด-เบสของตัวทำละลาย และอุณหภูมิ โดยทั่วไปถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความ หนืดของไคโตซานจะลดลง และถ้าความเข้มข้นของกรดที่ใช้เป็นตัวทำละลายสูงขึ้นจะส่งผลให้ความ หนืดของไคโตซานสูงขึ้นด้วย แต่ถ้าในกรณีที่ใช้กรดไฮโดรคลอริก หากกรดมีความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้ ความหนืดลดลง เนื่องจากกรดจะเข้าไปตัดสายโซ่โมเลกุลของไคโตซาน ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ส่งผลให้ความหนืดลดลง

4. ความสามารถในการตกตะกอน (Coagulation ability) ไคโตซานมีหมูอะมิโนในสายโซ่ โมเลกุลจำนวนมาก สามารถแตกตัวเป็นประจุบวกซึ่งสามารถจับกับประจุลบ เช่น โปรตีน สีย้อมและ พอลิเมอร์อื่น ๆ ได้ ไคโตซานจึงมีสมบัติเป็นตัวตกตะกอนที่ดี นอกจากนี้ยังพบว่าหมูอะมิโนของ ไคโตซานมีประสิทธิภาพในการจับกับไอออนของโลหะได้ดีกว่าหมูอะซีทิลในไคติน ดังนั้นไคโตซานที่มี ค่าระดับการกำจัดหมูอะซีทิลสูงจะมีอัตราการดูดซับหรือความสามารถในการจับกับไอออนโลหะสูง

5. โครงสร้างโมเลกุล (Molecular conformation) ไคโตซานมีสมบัติเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ ประเภทบวก (Cationic polyelectrolyte) เนื่องจากในสภาวะกรดหมูอะมิโนของไคโตซานจะรับ โปรตรอนและอยู่ในรูป $-NH_3^+$ โดยโครงสร้างของสารละลายไคโตซานจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ ความแรงของไอออน ค่าพีเอช อุณหภูมิ น้ำหนักโมเลกุลและค่าระดับการกำจัดหมูอะซีทิล

6. การเสื่อมสลาย (Degradation) ไคโตซานมีสมบัติการเสื่อมสลายเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ กล่าวคือ เมื่อเกิดการเสื่อมสลายขนาดโมเลกุลของไคโตซานจะสั้นลงกลายเป็นโอลิโกเมอร์ หรือโอลิโกแซคคาไรด์ ซึ่งการเสื่อมสลายสามารถเกิดได้หลายวิธี โดยมีความแตกต่างกันที่ตำแหน่งการตัดสายโซ่พอลิเมอร์ และสมบัติที่ได้หลังจากการตัดสายโซ่ แบ่งออกเป็น 5 วิธี ดังนี้ [54]

- **การเสื่อมสลายด้วยกรด (Acid hydrolysis)** การเสื่อมสลายของสายโซ่โมเลกุลของไคโตซานโดยการใช้กรด ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ โอลิโกเมอร์ขนาดต่าง ๆ และมอนอเมอร์ขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ เช่น ชนิดของกรด เวลา อุณหภูมิ ชนิดของพันธะของสายโซ่โมเลกุล ชนิดของพอลิเมอร์ โดยไคตินสามารถต้านทานต่อการเสื่อมสลายด้วยกรดได้ดีกว่าไคโตซาน

- **การเสื่อมสลายด้วยเบส (Alkaline degradation)** การเสื่อมสลายของสายโซ่โมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์ในเบสเริ่มจากปลายสุดของสายโซ่โมเลกุล การเสื่อมสลายแบบนี้เรียกว่า Peeling Reaction

- **การเสื่อมสลายด้วยการสั่นด้วยคลื่นเสียง (Degradation by sonication)** การเสื่อมสลายด้วยการสั่นด้วยคลื่นเสียงควบคู่กับการใช้กรดมีผลให้ได้โอลิโกเมอร์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันมากกว่าการเสื่อมสลายโดยใช้กรดเพียงอย่างเดียว

- **การเสื่อมสลายด้วยเอนไซม์ (Enzymic degradation)** มีความจำเพาะเจาะจงมากกว่าการใช้สารเคมี เอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายไคติน-ไคโตซาน ได้แก่

- Chitinase สามารถย่อยสลายสายโซ่โมเลกุลของไคตินแบบสุ่ม (Random) ตรงตำแหน่งพันธะ (1,4-Linkage) ได้เป็น *N*-acetyl-chitooligosaccharide

- Chitosanase สามารถย่อยสลายสายโซ่โมเลกุลของไคโตซานแบบสุ่ม (Random) ตรงตำแหน่งพันธะ (1,-4-Linkage) ได้เป็น Chitooligosaccharide

- Lysozyme เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่คล้ายกับ Chitinase

- *N*-acetylglucosaminidase ทำหน้าที่ย่อย *N*-acetylchitooligo saccharide เป็น *N*-acetyl-glucosamine โดยเริ่มจากปลายสายโซ่โมเลกุล (Non-reducing end)

- **การเสื่อมสลายโดยความร้อน (Thermal degradation)** มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของไคโตซาน การใช้ความร้อนแบบแห้ง (Dry heat) ที่อุณหภูมิน้อยกว่าหรือเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส มีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลมีความยืดหยุ่นมากขึ้น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง และความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ส่วนความร้อนแบบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้ไคโตซานเกิดสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาล ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลา และความสามารถในการละลายของไคโตซานลดลงที่อุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส สำหรับการอบแบบใช้ไอร้อน (Saturated steam) อุณหภูมิน้อยกว่าหรือเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อสมบัติทางกายภาพของไคโตซาน

2.3.5 การประยุกต์ใช้งานของไคโตซาน [70, 74]

การนำไคตินไปใช้ประโยชน์มีน้อยมาก เนื่องจากข้อจำกัดของไคติน กล่าวคือ ไคตินมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายต่าง ๆ ได้ยาก เนื่องจากโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกสูงสำหรับไคโตซานถูกนำไปประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมาย เช่น

1. อุตสาหกรรมอาหาร

ไคโตซานมีสมบัติในการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดโดยมีกลไกที่สำคัญ คือ ไคโตซานมีประจุบวกจึงสามารถจับกับเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ที่มีประจุลบได้ ทำให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีนและสารอื่น ๆ ของเซลล์ ไคโตซานเป็นสารที่ใช้เติมในอาหารได้ โดยนำไปใช้เป็นสารกันบูด สารช่วยรักษากลิ่น รส นอกจากนั้นยังเป็นสารเคลือบอาหาร ผัก และผลไม้ เพื่อรักษาความสด หรือผลิตอยู่ในรูปของฟิล์มที่รับประทานได้ (Edible film) สำหรับบรรจุอาหาร

2. อุตสาหกรรมกำจัดของเสีย

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารโดยทั่วไปมักมีสารแขวนลอยสูง ด้วยสมบัติของไคโตซานที่มีประจุบวกจึงทำให้สามารถจับกับโปรตีนและไขมันได้ดี โดยโปรตีนที่ได้สามารถนำมาแยกไปใช้เป็นอาหารสัตว์ต่อไป อีกทั้งไคโตซานยังมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักและจับกับสารจำพวกสีย้อมได้ดี ซึ่งช่วยในการบำบัดน้ำเสียได้

3. อุตสาหกรรมเภสัช

จากสมบัติการเป็นสารก่อฟิล์ม และเป็นเจลใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น จึงสามารถนำมาฉีดพ่นเคลือบผิวเพื่อรักษาอายุของผลผลิตทางการเกษตรได้ นอกจากนั้นไคโตซานยังมีสมบัติยับยั้งเชื้อราและเชื้อแบคทีเรียบางชนิดที่ก่อให้เกิดโรคแก่พืชได้อีกด้วย

4. อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

ไคโตซานถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางสำหรับผิวหน้าและเส้นผม โดยไคโตซานมีประจุบวกทำให้สามารถเกาะกับประจุลบบนผิวหน้าและเส้นผมได้เป็นอย่างดี จึงถูกนำไปใส่ในเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของกรดผลไม้ธรรมชาติที่เรียกว่า กรดแอลฟาไฮดรอกซี (Alpha Hydroxyl acid : AHA) ซึ่งกรดดังกล่าวจะกระตุ้นทำให้ผิวหน้าเก่าหลุดออกเพื่อสร้างผิวหน้าใหม่ ทำให้ผิวดูอ่อนเยาว์ขึ้น ส่วนในการบำรุงผม ไคโตซานจะก่อตัวเป็นฟิล์มเคลือบเส้นผมไว้ ทำให้เส้นผมคงสภาพนุ่มสวยไม่เสียง่าย

5. ทางการแพทย์

ไคโตซานได้รับความนิยมอย่างมากในการนำไปใช้งานในด้านการแพทย์เนื่องจากไคโตซานมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ เป็นสารต้านทานการเกิดออกซิเดชัน อีกทั้งไคโตซานยังมีสมบัติเป็นสารก่อฟิล์ม สามารถนำมาเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะบางใส ดังรูปที่ 2.27 นำมาปิดรักษาบาดแผลช่วยป้องกันการติดเชื้อของบาดแผล กระตุ้นให้เกิดการ

ผลิตและการสร้างเซลล์ใหม่ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ผลิตหนังเทียม ผลิตยาลดไขมันในเลือด ใช้เคลือบยาเม็ดแคปซูล ใช้ควบคุมคลอเรสเตอรอล ยับยั้งการเกิดมะเร็ง



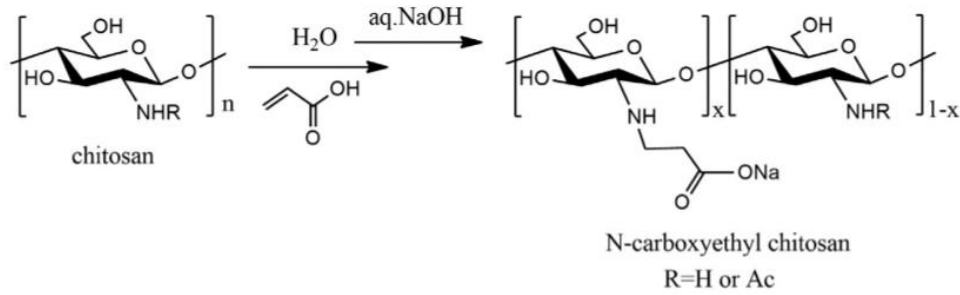
รูปที่ 2.27 แผ่นปิดแผลจากไคโตซาน [75]

2.3.6 ไคโตซานละลายน้ำ

ไคโตซานมีสมบัติการละลายที่ดีในกรด แต่ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่เป็นกลาง เนื่องจากการมีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลของโครงสร้างไคโตซาน ส่งผลให้เป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน จึงมีการพัฒนาไคโตซานให้มีความสามารถในการละลายน้ำ หรือละลายในตัวทำละลายที่เป็นกลางได้ซึ่งเรียกว่า อนุพันธ์ของไคโตซาน (Chitosan Derivative) โดยการเติมหมู่ที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic group) ลงไปบนโครงสร้างไคโตซาน ทำให้สามารถประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น

2.3.6.1 คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน (Carboxyethyl chitosan : CECS) [15]

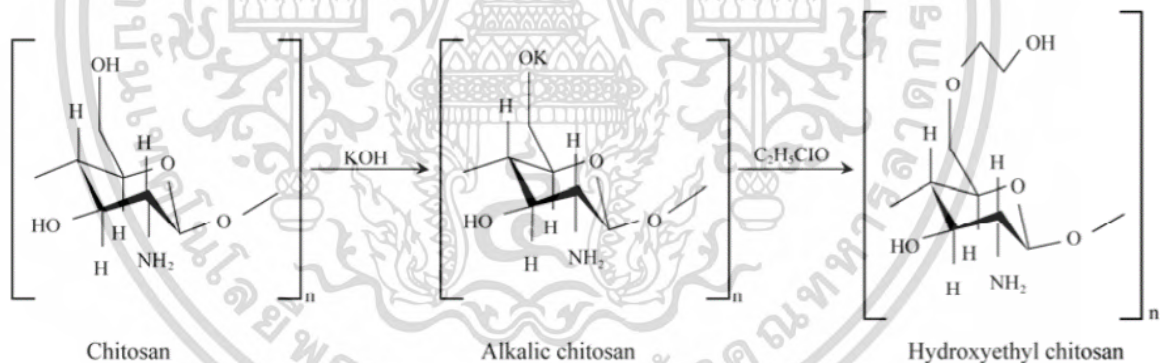
คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคโตซานที่ได้มาจากการเติม เอทิลอะคริเลต (ethyl acrylate) เข้าที่ตำแหน่งหมู่อะมิโน ($-NH_2$) บนโครงสร้างของไคโตซานผ่านปฏิกิริยาการเติมแบบไมเคิล (Michael addition) ดังรูปที่ 2.28 โดยค่าองศาการแทนที่ (Degree of substitution) ของ N-carboxyethyl group จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าองศาการจำกัดหมู่อะซีทิล (degree of deacetylation) ของไคโตซานมีค่ามากขึ้น กล่าวคือมีจำนวนหมู่อะมิโนมากขึ้น นอกจากนี้คาร์บอกซีเอทิลไคโตซานยังมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่ดีกว่าไคโตซาน เนื่องจากมีสมบัติการละลายน้ำที่ดี



รูปที่ 2.28 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน [15]

2.3.6.2 ไฮดรอกซีเอทิลไคโตซาน (Hydroxyethyl chitosan : HEC) [16]

ไฮดรอกซีเอทิลไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคโตซานที่ได้มาจากการเติมหมู่ไฮดรอกซีเอทิล (Hydroxyethyl group) เข้าไปที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 (C6) บนโครงสร้างของไคโตซาน ดังรูปที่ 2.29 การเติมหมู่ไฮดรอกซีเอทิลจะช่วยลดแรงระหว่างโมเลกุลของไคโตซานส่งผลให้สามารถละลายน้ำได้มากยิ่งขึ้น อีกทั้งช่วยปรับปรุงสมบัติในการอุ้มน้ำได้อีกด้วย ไฮดรอกซีเอทิลไคโตซาน มักถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการแพทย์ เช่น การใช้เป็นวัสดุในด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ, วัสดุห่อหุ้มยา และวัสดุปิดแผล เป็นต้น

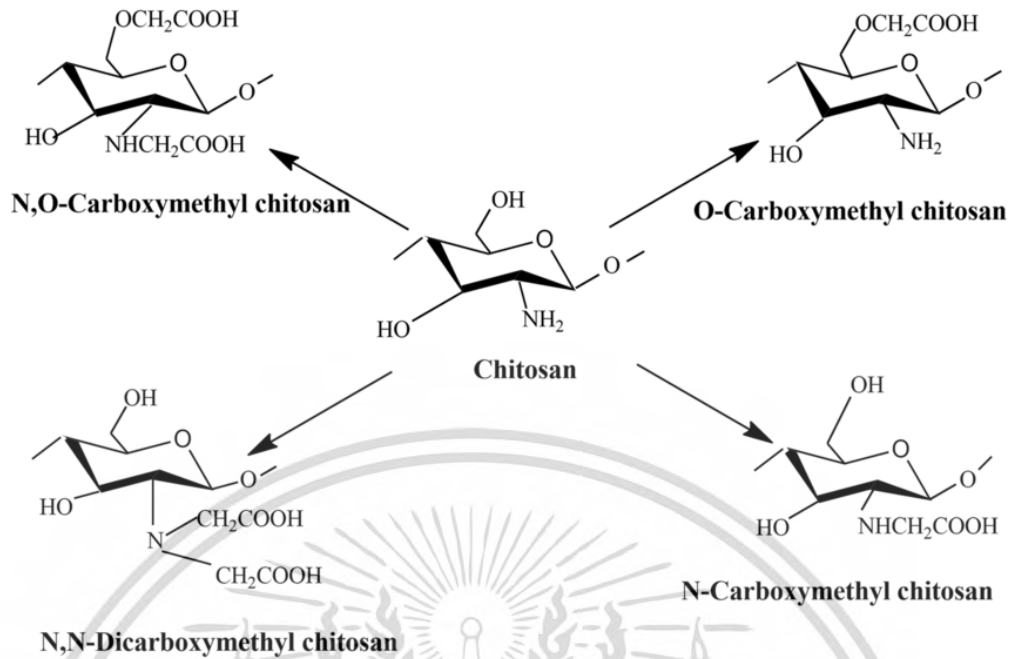


รูปที่ 2.29 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีเอทิลไคโตซาน [16]

2.3.6.3 คาร์บอกซีเมทิลไคโตซาน (Carboxymethyl chitosan : CMC) [17]

คาร์บอกซีเมทิลไคโตซานเป็นอนุพันธ์ไคโตซานที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไคโตซานกับกรดโมโนคลอโรอะซิติก (Monochloroacetic acid) โดยรูปแบบของคาร์บอกซีเมทิลไคโตซานมีได้หลายแบบ ได้แก่ O-CMC, N,O-CMC, N,N-CMC และ N-CMC ดังรูปที่ 2.30 สมบัติและการใช้งานของคาร์บอกซีเมทิลไคโตซานจะขึ้นอยู่กับองศาการแทนที่ (Degree of substitution) และตำแหน่งของการเติมหมู่เมทิล (Carboxymethylation) คาร์บอกซีเมทิลไคโตซานไม่เพียงแต่จะมีสมบัติการละลายน้ำที่ดี แต่ยังมีสมบัติอื่นที่โดดเด่น ได้แก่ มีความหนืดสูง, มีความเป็นพิษต่ำ, เข้ากับร่างกายได้ดี และมีความสามารถในการเป็นฟิล์ม เส้นใย และไฮโดรเจลได้

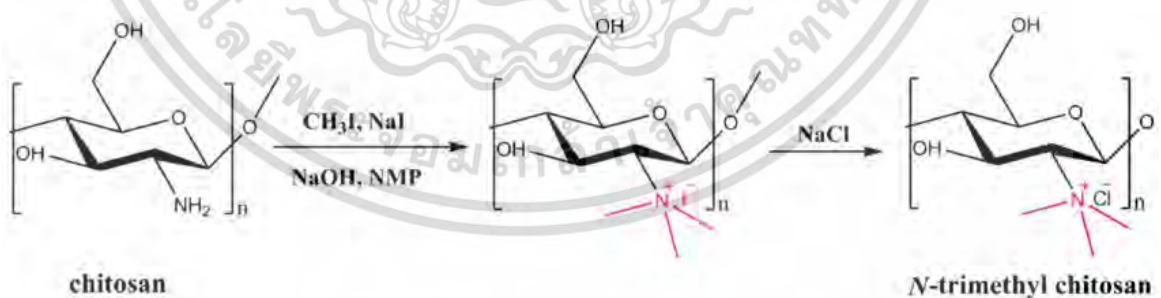
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 รูปแบบของคาร์บอกซีเมทิลโคโตซาน [17]

2.3.6.4 ไตรเมทิลโคโตซาน (Trimethyl chitosan) [18]

ไตรเมทิลโคโตซานเป็นสารที่ได้จากการเติมหมู่เมทิล (Methylation) เข้าไปที่บริเวณหมู่อะมิโนของโครงสร้างโคโตซาน ดังรูปที่ 2.31 ทำให้ได้อนุพันธ์ของโคโตซานที่สามารถละลายในตัวทำละลายได้ทุกช่วงของค่าพีเอช นอกจากนี้ไตรเมทิลโคโตซานยังมีความสามารถในการจับกับไทท์จังก์ชัน (Tight junction) ได้ดีเมื่อเทียบกับโคโตซาน

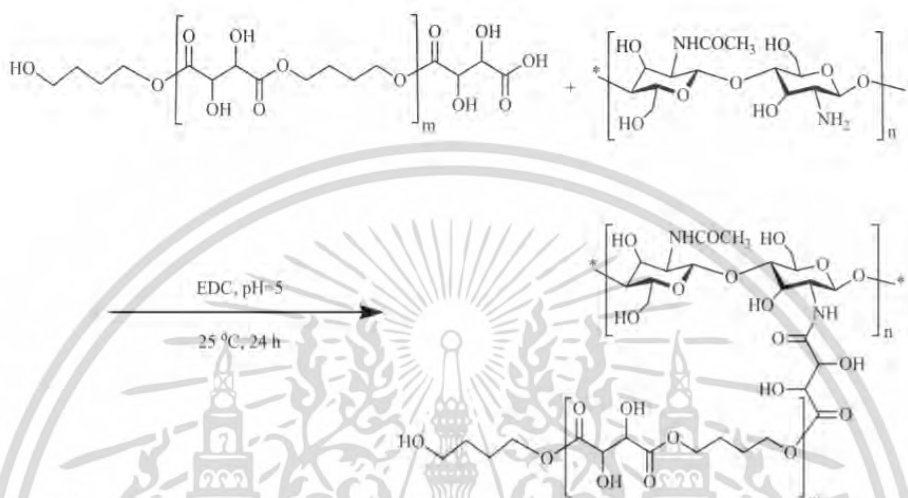


รูปที่ 2.31 การสังเคราะห์ไตรเมทิลโคโตซาน [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6.5 ไคโตซานต่อกิ่งด้วยพอลิบิวทิลีนทาร์เทรต (Chitosan grafted with polybutylene tartrate : PBT) [76]

อนุพันธ์นี้เกิดจากการต่อกิ่งบริเวณหมู่อะมิโนของไคโตซาน ด้วย PBT ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างปริมาณมาก ดังรูปที่ 2.32 จึงทำให้อนุพันธ์ไคโตซานนี้มีความชอบน้ำมาก และสามารถละลายน้ำได้ดี มักถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวควบคุมการปลดปล่อยยา



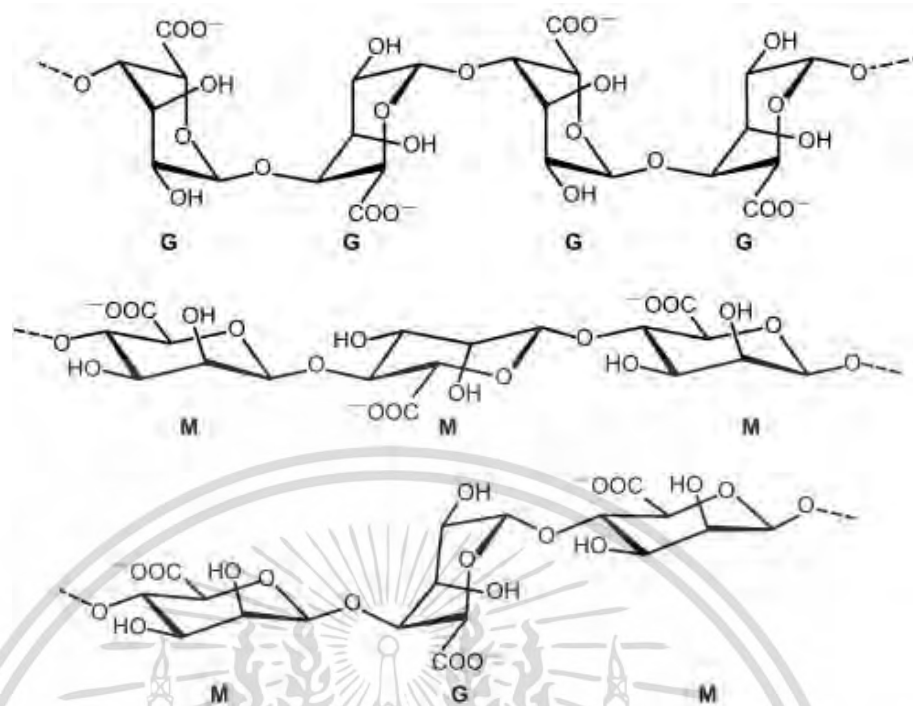
รูปที่ 2.32 การสังเคราะห์ไคโตซานต่อกิ่งด้วยพอลิบิวทิลีนทาร์เทรต [76]

2.4 อัลจิเนต (Alginate) [19]

อัลจิเนต เป็นกัมธรรมชาติที่สกัดได้จากผนังเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาล *Phaeophyceae* พบเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1800 ในประเทศสหราชอาณาจักร อยู่ใน Genus *Laminaria japonica* อัลจิเนตถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 และเริ่มมีการผลิตเชิงอุตสาหกรรมในปี ค.ศ. 1929 ในรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ประเทศผู้ผลิตอัลจิเนต ได้แก่ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนาดา และญี่ปุ่น

2.4.1 โครงสร้างของอัลจิเนต [19, 70]

Alginic acid (Algin) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์เชิงเส้นซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยของมอนอแซ็กคาไรด์ 2 ชนิด คือ (1-4)-linked ของ β -D-mannuronic acid (M) และ α -L-guluronic acid (G) เชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยเมื่ออยู่ในรูปเกลือต่าง ๆ เช่น แคลเซียม แมกเนเซียม โซเดียม และ โพแทสเซียม จะเรียกว่าอัลจิเนต การจัดเรียงโครงสร้างของหน่วยซ้ำเกิดได้ทั้งแบบบล็อก (G-blocks และ M-blocks), แบบสลับ (MG-blocks) และแบบสุ่ม ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 โครงสร้างของอัลจิเนต

สมบัติของอัลจิเนตถูกกำหนดด้วยสัดส่วนของพอลิเมอร์รวม (Copolymer) โดยถ้าพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบ G ในปริมาณที่สูง จะมีสมบัติเป็นเจลที่แข็งเปราะเมื่อเชื่อมโยงด้วยโลหะประจุบวกกลุ่ม Polyvalent metal ที่ความเข้มข้นที่เหมาะสม ทนความร้อนได้ดี แต่จะเกิด Syneresis เมื่อละลายจากการแช่แข็ง แต่ถ้าพอลิเมอร์มี M ปริมาณสูง จะมีแนวโน้มที่จะเกิดเจลที่อ่อนนุ่ม มีความยืดหยุ่น สามารถนำไปละลายจากการแช่แข็งได้ดี และมีสภาวะในการเกิดเจลที่กว้าง

2.4.2 สมบัติทางกายภาพของอัลจิเนต [70]

1. การละลายน้ำและการอุ้มน้ำ

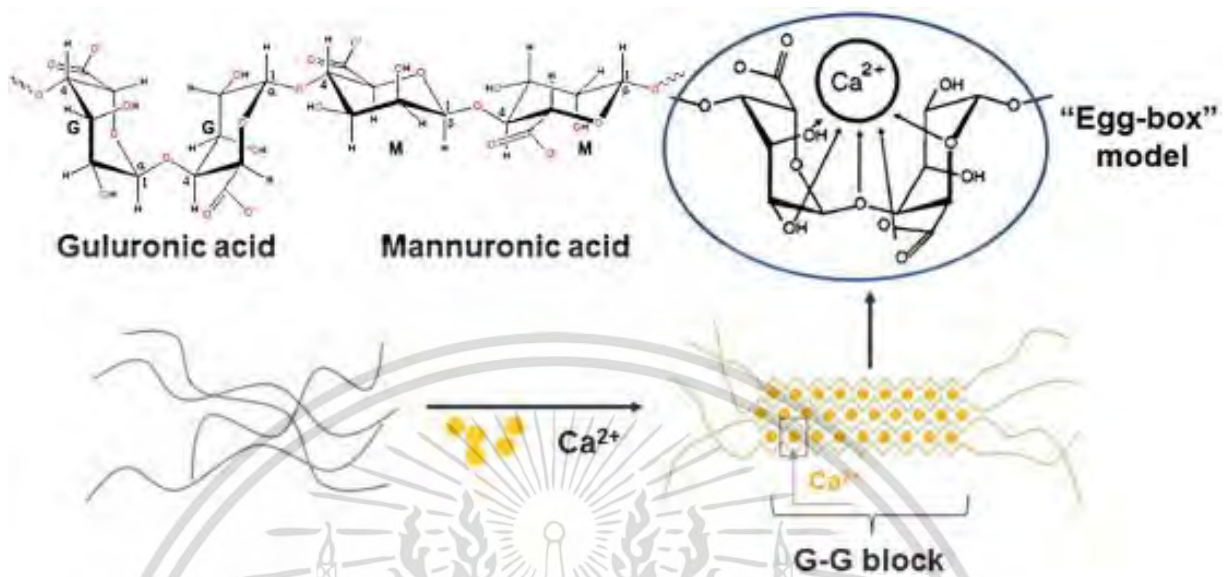
ความสามารถในการละลายและการอุ้มน้ำ (Water holding capacity) ของอัลจิเนตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ค่าพีเอช, น้ำหนักโมเลกุล, ความเข้มข้นของไอออนของตัวทำละลาย (Ionic strength) และไอออนที่ปรากฏอยู่ในระบบ โดยทั่วไปอัลจิเนตสามารถดูดซับน้ำได้ดีและอาจใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ทำให้เกิดความหนืดเล็กน้อย

2. การเกิดเจล

อัลจิเนตมีสมบัติเป็นเจล โดยสามารถเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} ไอออน โครงสร้างของเจลมีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (Egg box) โดยมี Ca^{2+} ไอออนเกาะอยู่กับสายพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.34 สมบัติที่ดีของอัลจิเนตคือทำให้เกิด Irreversible gel ในน้ำเย็นเมื่อมี Ca^{2+} ไอออนรวมอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสมบัติในการเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำนี้ทำให้อัลจิเนตแตกต่างจากไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากสาหร่ายสีแดง [77]



รูปที่ 2.34 การเกิดเจลของอัลจิเนต [77]

3. ความหนืด

ความหนืดของโซเดียมอัลจิเนตลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่สำหรับค่าความเป็นกรดต่างจะส่งผลต่อความหนืดดังนี้ ความหนืดในช่วงพีเอชที่มากกว่า 5 ความหนืดจะคงที่ เมื่อค่าพีเอชต่ำกว่า 4.5 ความหนืดจะเพิ่มขึ้น และเมื่อค่าพีเอชเท่ากับ 3 จะเริ่มมีการเกิดผลึกของ Alginate เพิ่มขึ้น

2.4.3 การประยุกต์ใช้งานของอัลจิเนต

1. อุตสาหกรรมอาหาร [77-78]

อัลจิเนตถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรมอาหารหลากหลายชนิดตั้งแต่ปี ค.ศ.1920 โดยเติมในอาหารกระป๋องบางชนิด เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัว สารทำให้เกิดเจล และใช้เป็นสารที่ยับยั้งการเกิด Syneresis

- ผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ เนื่องด้วยสมบัติของอัลจิเนตที่เป็นสารสกัดจากธรรมชาติ ทำให้ไม่เป็นอันตรายและมีประโยชน์ต่อร่างกาย จึงมีการนำอัลจิเนตมาผลิตเป็นอาหารเพื่อสุขภาพในเชิงการแพทย์ สำหรับผู้ป่วยความดันโลหิตสูง ไขมันสูง และน้ำตาลในเลือดสูง เช่น การนำมาผลิตเป็นเจลลี่ และน้ำผลไม้ สำหรับผู้ป่วยโรคดังกล่าว นอกจากนี้อัลจิเนตยังมีความสามารถในการช่วยกำจัดสารโลหะหนักในร่างกายได้อีกด้วย

- เครื่องดื่ม เนื่องจากอัลจิเนตเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้เป็นวัตถุดิบอย่างดีในการผลิตเครื่องดื่ม โดยทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืดและเป็นสารช่วยให้เกิดอิมัลชัน เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วยป้องกันการแยกชั้นและการตกตะกอนในการผลิตน้ำผลไม้, ช่วยป้องกันการเกาะกลุ่ม (Agglutination) และการตกตะกอนของโปรตีนในเครื่องดื่มนมหมัก เป็นต้น

- เบเกอร์รี่ อัลจิเนตถูกนำมาใช้ในการทำขนมมากมาย เช่น เป็นสารช่วยเพิ่มอัตราการขยายตัวของไอศกรีม ทำให้ได้เนื้อไอศกรีมที่มีความนุ่มละมุน และยังเป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับไอศกรีมและเจลลี่อีกด้วย ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากอัลจิเนตแสดงดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 ผลิตภัณฑ์จากอัลจิเนต [78]

2. อุตสาหกรรมการแพทย์และเภสัชกรรม [79]

ในปัจจุบันมีการนำอัลจิเนตมาใช้งานในด้านการแพทย์และเภสัชกรรมอย่างหลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น

- ใช้เป็นวัสดุทำแบบพิมพ์ฟันในด้านทันตแพทย์ ดังรูปที่ 2.36
- แคลเซียมอัลจิเนต (Calcium alginate) นำมาใช้เป็นแผ่นปิดแผล เนื่องจากมีความสามารถในการช่วยสมานแผลได้ อีกทั้งเมื่อดึงออกจะเจ็บน้อยกว่าแผ่นปิดแผลแบบเก่า
- เนื่องจากความสามารถของอัลจิเนตที่มีความเข้ากันได้ดีกับร่างกาย และเกิดเป็นเจลได้ง่ายด้วย Divalent cations จึงนิยมใช้เป็น Cell immobilization และ Encapsulation

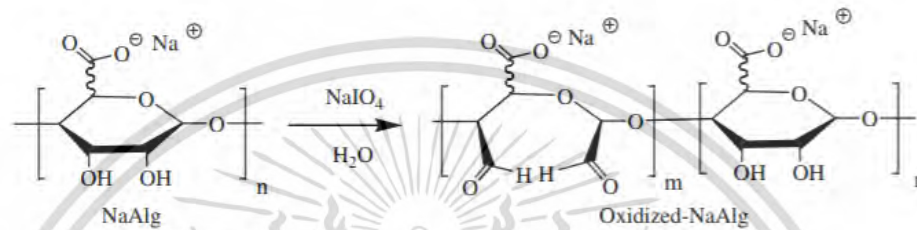


รูปที่ 2.36 วัสดุพิมพ์ฟันจากอัลจิเนต [79]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 ออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนต (Oxidized sodium alginate) [80-81]

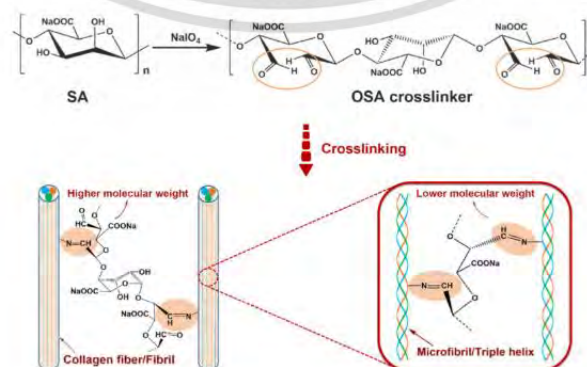
ออกซิไดซ์อัลจิเนตได้มาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ของหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) บนคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ในโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนต โดยมีโซเดียมเพอร์ไอโอดีตเป็นตัวออกซิไดซ์ ดังรูปที่ 2.37 เกิดเป็นหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) ที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาขึ้นบนโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนต นอกจากนี้ยังทำให้ออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนตมีสมบัติในการย่อยสลายได้รวดเร็ว เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดการตัดขาดของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง



รูปที่ 2.37 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโซเดียมอัลจิเนต [80]

2.4.4.1 การประยุกต์ใช้งานออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนตเป็นสารเชื่อมโยง (Crosslinker) [82]

ออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนตมักนิยมนำมาใช้เป็นสารเชื่อมโยงในผลิตภัณฑ์ทางชีวการแพทย์ เนื่องจากสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีความเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ เมื่อโซเดียมอัลจิเนตเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะส่งผลให้เกิดหมู่แอลดีไฮด์ขึ้นบนโครงสร้างทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนของโปรตีน (Protein) หรือ พอลิเปปไทด์ (Polypeptide) ตัวอย่างเช่น การใช้ออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนตเป็นตัวเชื่อมโยงเส้นใยคอลลาเจน (Collagen fiber) เพื่อเพิ่มสมบัติในการทนทานต่อกรดต่าง และความร้อน โดยการเชื่อมโยงจะเกิดขึ้นระหว่างหมู่แอลดีไฮด์บนโครงสร้างของออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนต และหมู่อะมิโนบนโครงสร้างของเส้นใยคอลลาเจน ผ่านปฏิกิริยาชิฟเบส ดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 การเชื่อมโยงเส้นใยคอลลาเจนด้วยออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนต [82]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nguyen, K. G และคณะ [83] สังเคราะห์คาร์บอนดอทที่เจือด้วยอะตอมของไนโตรเจน (N-CQDs) โดยใช้กลูโคส (Glucose) เป็นแหล่งคาร์บอน และแอมโมเนีย (Ammonia) เป็นแหล่งไนโตรเจน ผ่านวิธีการสังเคราะห์โดยใช้วิธีการแบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1.8 วินาที คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1.78-6.5 นาโนเมตร เรืองแสงเป็นสีฟ้าภายใต้แสงยูวี มีค่า Quantum yield 9.6 % ซึ่งมีค่าสูงกว่าคาร์บอนดอทที่ไม่มีการเจือด้วยอะตอมไนโตรเจน คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับโครเมียม (VI) โดยเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มขึ้นการเรืองแสงของคาร์บอนดอทจะลดลง ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงได้จากทฤษฎี inner filter effect (IFE) การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงนี้ทำให้คาร์บอนดอทสามารถใช้เป็นตัวตรวจจับได้

Niu, Q และคณะ [84] สังเคราะห์คาร์บอนดอทจากกรดซิตริก (Citric acid) และยูเรีย (Urea) ผ่านวิธีการสังเคราะห์โดยใช้ไมโครเวฟ (Microwave) ที่ 750 วัตต์เป็นเวลา 15 นาที เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับกรดพิคริก (Picric acid) คาร์บอนควอนตัมดอทที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 4-6 นาโนเมตร และสามารถเปล่งแสงสีฟ้าภายใต้แสงยูวี (UV light) โดยความเข้มแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทจะต่ำลงเมื่อมีกรดพิคริกในระบบ เนื่องจากหมู่ไนโตร (-NO₂) บนโครงสร้างของกรดพิคริกเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้ากับหมู่ฟังก์ชันเอมีน (Amine) บนผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท โดยปริมาณกรดพิคริกที่ทำให้การเปล่งแสงของคาร์บอนดอทดับสนิทอยู่ที่ 0.5 มิลลิโมลาร์ การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของคาร์บอนดอทนี้ทำให้สามารถใช้เป็นตัวตรวจจับกรดพิคริกได้

Xu, J และคณะ [85] สังเคราะห์คาร์บอนดอทที่เจือด้วยอะตอมไนโตรเจน และโบรอน (BN-CDs) โดยใช้สารตั้งต้น 2 ชนิด ได้แก่ พารา-ฟีนิลีนไดอะมีน (*p*-Phenylenediamine) เป็นทั้งแหล่งอะตอมคาร์บอนและไนโตรเจน และบอแรกซ์ (Borax) เป็นแหล่งอะตอมโบรอน ผ่านวิธีการสังเคราะห์แบบโซลโวเทอร์มอล (Solvothermal) คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มีค่า Quantum yield 17 % สามารถเปล่งแสงสีส้มภายใต้แสงยูวี (UV light) โดยคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้สามารถตอบสนองต่อคอปเปอร์ไอออน (Cu²⁺) และโคบอลต์ไอออน (Co²⁺) ในช่วงความเข้มข้น 1-8 μM โดยคาร์บอนดอทมีความเข้มการเรืองแสงลดลงเมื่อจับกับ Cu²⁺ และ Co²⁺ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยทฤษฎี Dynamic และ Static quenching การเปลี่ยนแปลงความเข้มการเรืองแสงนี้ทำให้ BN-CDs สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับ Cu²⁺ และ Co²⁺ ได้ นอกจากนี้คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปใช้ในการเตรียมวัสดุสำหรับตรวจจับ Cu²⁺ และ Co²⁺ ในรูปแบบไฮโดรเจล และกระดาษ

Wang, J และคณะ [86] สังเคราะห์คาร์บอนดอทที่เจือด้วยอะตอมไนโตรเจน และอะตอมโลหะ (Ag,N-CQDs) โดยใช้กรดซิตริก (Citric acid) เป็นแหล่งอะตอมคาร์บอน สารละลายแอมโมเนีย (Ammonia) เป็นแหล่งอะตอมไนโตรเจน และซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate) เป็นแหล่งอะตอมโลหะซิลเวอร์ คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 5-9 นาโนเมตร มีค่า Quantum yield 35 % สามารถเปล่งแสงสีส้มภายใต้แสงยูวี (UV light) โดยคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* (*E. coli*) และแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*)

Wang, Y และคณะ [87] สังเคราะห์คาร์บอนดอทโดยใช้แล็กโทส (Lactose) เป็นแหล่งคาร์บอน และทริสเบส (Tris base) เป็นแหล่งอะตอมไนโตรเจน จากนั้นนำคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มาใช้เตรียมเป็นไฮโดรเจลเรืองแสง โดยทำการผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) เพื่อเตรียมไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยง 2 ระบบ ได้แก่ การเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical crosslink) โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) และการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslink) โดยกระบวนการ Freezing/Thawing ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีความแข็งแรงกด (Compression strength) เท่ากับ 3.462 เมกะปาสคาล (MPa) และมอดุลัสของยัง (Young's modulus) เท่ากับ 4.5 กิโลปาสคาล (KPa) เนื่องจากผลที่เสริมกัน (Synergistic effect) ของคาร์บอนดอทที่ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง การเชื่อมโยงทางเคมี และการเชื่อมโยงทางกายภาพ ทำให้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นกระดูกเทียมในงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อได้

Konwar, A และคณะ [11] เตรียมคาร์บอนดอทจากแอมโมเนียมไฮโดรเจนซิเตรต (Ammonium hydrogen citrate : AHC) ผ่านวิธีการแบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปผสมกับไคโตซาน (Chitosan) เพื่อขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลเรืองแสงสำหรับใช้เป็นวัสดุปิดแผล พบว่าไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีสมบัติเข้ากับร่างกายมนุษย์ได้ดี ไม่เป็นพิษ และสามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ จึงช่วยในการสมานบาดแผลให้หายเร็วมากขึ้น โดยแผลจะมีขนาดเล็กลงภายใน 9 วัน และสมานได้สนิทเมื่อเวลาผ่านไป 18 วัน ซึ่งใช้ระยะเวลาเร็วกว่าไคโตซานที่ไม่มีการผสมคาร์บอนดอท นอกจากนี้ยังพบว่าคาร์บอนดอทในไฮโดรเจลสามารถตอบสนองต่อค่าพีเอช (pH) ได้โดยเมื่อเริ่มเกิดแผลค่าพีเอชจะมีค่าประมาณ 5.5 ไฮโดรเจลมีความเข้มแสงต่ำ เมื่อบาดแผลเริ่มสมานจะมีค่าพีเอชเป็น 7.3 ไฮโดรเจลจะมีความเข้มแสงที่มากขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงนี้ทำให้ไฮโดรเจลสามารถเป็นตัวบอกระยะของบาดแผลได้

Ding, F และคณะ [88] เตรียมไฮโดรเจลที่สามารถซ่อมแซมตนเอง (ACSH) โดยเกิดจากการเชื่อมโยงผ่านปฏิกิริยาชิฟเบสระหว่างไคโตซานที่ดัดแปลงด้วยอะคริลาไมด์ (AMCS) และออกซีไดซัลไฟด์ โดยพบว่าไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงโดยใช้ระยะเวลา 2 ชั่วโมง มีความสามารถในการซ่อมแซมตนเอง และสมบัติเชิงกลดีกว่าไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยง 24 ชั่วโมง เนื่องจากเมื่อระยะเวลาในการเชื่อมโยงมากจะส่งผลให้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีความเปราะ ทำให้สูญเสียความสามารถในการซ่อมแซมตนเอง แต่ทั้งนี้พบว่าไฮโดรเจลที่สูญเสียความสามารถในการซ่อมแซมตนเองจะสามารถคืนสมบัติการซ่อมแซมตนเองและสมบัติเชิงกลได้โดยการปรับค่า pH จากกรดเป็นกลาง ซึ่งเป็นการสร้างพันธะชิฟเบสขึ้นมาใหม่ ผู้วิจัยคาดว่าไฮโดรเจลที่ใช้พอลิแซ็กคาไรด์ซึ่งมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพและมีสมบัติซ่อมแซมตนเองได้นี้จะสามารถนำไปใช้ในงานด้านชีวการแพทย์ได้

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลเรืองแสงจากคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และออกซิไดซ์อัลจิเนต โดยใช้คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์จากกรดซิตริก ยูเรีย บอแรกซ์ และซิลเวอร์ไนเตรต เป็นสารเรืองแสงและสารเชื่อมโยงในไฮโดรเจล โดยไฮโดรเจลที่เตรียมได้จะมีจุดเชื่อมโยงที่เกิดจากพันธะอิมมีนระหว่างหมู่เอมีนของคาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน และหมู่แอลดีไฮด์ของออกซิไดซ์อัลจิเนต และสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างคาร์บอนดอท คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และออกซิไดซ์อัลจิเนตได้ ไฮโดรเจลเรืองแสงที่เตรียมได้จะนำไปทดสอบสมบัติการเรืองแสง สมบัติทางความร้อน และพฤติกรรมการบวมตัว เพื่อศึกษาถึงศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านทางการแพทย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดซิตริก (Citric acid: $C_6H_8O_7$) เกรดวิเคราะห์ CARLO ERBA Reagents
2. ยูเรีย (Urea: $CO(NH_2)_2$) เกรดวิเคราะห์ CARLO ERBA Reagents
3. โซเดียมเตตระไฮเดรต เดคาไฮเดรต (Sodium tetrahydrate decahydrate: $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) เกรดวิเคราะห์ CARLO ERBA Reagents
4. ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate: $AgNO_3$) เกรดวิเคราะห์ Fisher Chemical
5. ไคโตซาน (Chitosan: CS) เกรดการค้า Eland International (Thailand), น้ำหนักโมเลกุล 330,000 KDa, องศาการกำจัดหมู่อะเซทิล (%DD) เท่ากับ 85%
6. กรดอะคริลิก (Acrylic acid: $C_3H_6O_2$) เกรดวิเคราะห์ Acros Organics
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide: NaOH) เกรดวิเคราะห์ CARLO ERBA Reagents
8. โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate: SA) น้ำหนักโมเลกุล 1,296 KDa เกรดวิเคราะห์ Acros Organics
9. โซเดียมเมตาเพอริโอเดต (Sodium metaperiodate: $NaIO_4$) เกรดวิเคราะห์ CARLO ERBA Reagents
10. เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol: $C_2H_6O_2$) เกรดวิเคราะห์ CARLO ERBA Reagents
11. เอทานอล (Ethanol: CH_3CH_2OH) เกรดการค้า องค์การสุรา กรมสรรพสามิต
12. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride: NaCl) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagents
13. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA) เกรดการค้า NL-05, Nippon Gohsei Osaka Japan (Viscosity 4% 20 °C (mPa.s) เท่ากับ 4.6-6, Degree of hydrolysis (Mol %) เท่ากับ 99.0-100)
14. น้ำกลั่น (Distilled water)

3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว และอุปกรณ์พื้นฐาน
2. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ที่กรองสารสำหรับไซริงค์ เนื้อไนลอน (Syringe Filter Nylon) ขนาด 13 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 μm , VERTICAL
4. ไซริงค์ (Syringe) ขนาด 3 มิลลิลิตร
5. กระดาษกรอง เบอร์ 1, Whatman
6. จานเพาะเชื้อพลาสติก (Plastic petri dish)
7. ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ (Universal indicator), Merck
8. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น MS-TS (Metler Toledo)
9. ถังไดอะไลซิส (Dialysis tubing): MWCO 14000
10. ชุดกรองแบบลดความดัน
11. เครื่องอัลตราโซนิก รุ่น S 30H, Elma
12. ไมโครเวฟ Sharp R-220
13. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ยี่ห้อ Hettich รุ่น Universal 320
14. ตู้อบ (Oven) รุ่น UF110 (Mettler)
15. โถดูดความชื้น (Desiccator)
16. เครื่องฟลูออโรมิเตอร์ (Fluorometer) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น RF-6000
17. เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze-dryer) ยี่ห้อ Scan Vac รุ่น Coolsafe 110-4
18. เครื่อง Attenuated Fourier Transform Infrared Spectrometer ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700
19. เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Pyris 1
20. เครื่อง UV-vis spectrophotometer ยี่ห้อ Lab Tech รุ่น BlueStar B spectrophotometer (ศูนย์เครื่องมือสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)
21. เครื่อง X-ray photoelectron spectrometer ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น Kratos Axis ultra DLD (ศูนย์บริการวิเคราะห์และทดสอบ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
22. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope : TEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง (High-resolution transmission electron microscopy : HRTEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEM-2100Plus (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สวทช.)
23. เตาให้ความร้อนและกวนสาร (Hotplate and stirrer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมคาร์บอนดอทประเภทต่าง ๆ (Carbon Dots: CDs)

3.3.1 การเตรียมคาร์บอนดอทที่เจือด้วยอะตอมไนโตรเจน (CU-CDs)

1. ชั่งกรดซิตริก และ ยูเรีย อย่างละ 3 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรจากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จนได้เป็นสารละลายใส
3. นำสารละลายที่ได้ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร นำเข้าไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟ 800 วัตต์ เป็นเวลาประมาณ 3 นาที
4. เมื่อครบเวลา นำขวดรูปชมพู่ออกมาเติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร เพื่อละลายของแข็งที่ได้
5. นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง โดยใช้ความเร็ว 9000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
6. นำสารละลายที่ได้หลังจากการปั่นเหวี่ยงมากรองด้วยไซริงค์เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.22 ไมโครเมตร
7. จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาเทใส่ลงจานเพาะเชื้อ
8. นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะได้ CU-CDS

3.3.2 การเตรียมคาร์บอนดอทที่เจือด้วยอะตอมไนโตรเจน และซิลเวอร์ (CU/Ag-CDs)

1. ชั่งกรดซิตริก และ ยูเรีย อย่างละ 3 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรจากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จนได้เป็นสารละลายใส
3. เติมน้ำสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 15 มิลลิลิตร
4. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที
5. ดำเนินการทดลองตามขั้นตอน 3-8 ในข้อ 3.3.1 จะได้ CU/Ag-CDs

3.3.3 การเตรียมคาร์บอนดอทที่เจือด้วยอะตอมไนโตรเจน และ โบรอน (BCU -CDs)

1. ชั่งกรดซิตริก ยูเรีย และโซเดียมเตตระโบรเรต เดคาไฮเดรต อย่างละ 3 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จนได้เป็นสารละลายใส
3. ดำเนินการทดลองตามขั้นตอน 3-8 ในข้อ 3.3.1 จะได้ BCU-CDs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การเตรียมคาร์บอนดอทที่เจือด้วยอะตอมไนโตรเจน โบรอน และซิลเวอร์ (BCU/Ag -CDs)

1. ชั่งกรดซิตริก ยูเรีย และโซเดียมเตตระโบเรต เดคาไฮเดรต อย่างละ 3 กรัม ลงใน ปีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จนได้เป็น สารละลายใส
3. เติมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาณ 15 มิลลิลิตร
4. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที
5. ดำเนินการทดลองตามขั้นตอน 3-8 ในข้อ 3.3.1 จะได้ BCU/Ag-CDs

3.4 การเตรียมพอลิเมอร์

3.4.1 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน (Carboxyethyl Chitosan : CECS)

1. ชั่งไคโตซาน 6 กรัมลงในปีกเกอร์ขนาด 2000 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่น 600 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
2. เติมกรดอะคริลิก 4.657 กรัม ปั่นกวนอย่างต่อเนื่องที่ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
3. เมื่อครบ 48 ชั่วโมง ปรับค่าพีเอชของสารละลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น ร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร (10 %w/v) ให้พีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 10
4. จากนั้นนำสารละลายมาผ่านกระบวนการไดอะไลซิสด้วยน้ำกลั่น โดยเปลี่ยนน้ำทุกวัน เป็นเวลา 3 วัน
5. นำสารที่ได้จากการทำไดอะไลซิสแล้วมาเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเวลา 96 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักสารที่ได้

3.4.2 การสังเคราะห์ออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนต (Oxidized Sodium Alginate: OSA)

1. ชั่งโซเดียมอัลจิเนต 2 กรัม เติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยความเร็ว 350 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. เติมโซเดียมเพอร์ไอโอดีต 2.2 กรัม ลงในสารละลายข้างต้น ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที ในที่มีดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
3. เมื่อครบกำหนดเวลาเติมเอทิลีนไกลคอล 3 มิลลิลิตร เพื่อหยุดปฏิกิริยา และปั่นกวน ต่อเนื่องที่ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำมาไดอะไลซิสด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 3 วัน โดยเปลี่ยนน้ำทุกวัน
5. นำสารที่ได้หลังจากการไดอะไลซิสมาตกตะกอนในเอทานอล 1000 มิลลิลิตร ที่มีโซเดียม

คลอไรด์ประมาณ 1 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กรองด้วยชุดกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล
7. นำตะกอนมาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน

3.5 การเตรียมไฮโดรเจลเรืองแสง

1. นำคาร์บอนดอทมากระจายตัวในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยใช้ปีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร ให้ได้ความเข้มข้นตามตารางที่ 3.1
2. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกระจายตัวคาร์บอนดอทจนได้เป็นสารละลายใส
3. เติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ให้ได้ความเข้มข้นตามตารางที่ 3.1
4. ปั่นกวนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส จนได้เป็นสารละลายใส จากนั้นลดอุณหภูมิลงเหลือ 60 องศาเซลเซียส
5. เติมคาร์บอกซีเอทิลไคโตซานให้ได้ความเข้มข้นตามตารางที่ 3.1
6. ปั่นกวนที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนได้เป็นสารละลายใส
7. นำสารละลายไปเข้าเครื่องแยกสารความถี่สูง ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดฟองในสารละลาย
8. เมื่อครบเวลานำสารละลายมาเติมสารละลายออกซิไดซ์โซเดียมอัลจินตความเข้มข้นตามตารางที่ 3.1 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
9. เทสารละลายลงแม่พิมพ์ (หลอดฉีดยาปริมาตร 3 มิลลิลิตร) เพื่อขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลเรืองแสง

ตารางที่ 3.1 ชื่อสูตรและสัดส่วนของสารตั้งต้นในการเตรียมไฮโดรเจล

ลำดับที่	ชื่อสูตร	ความเข้มข้นสุดท้าย (%w/v) ของสารต่าง ๆ ในสารละลาย 10 มิลลิลิตร			ความเข้มข้นออกซิไดซ์อัลจินต (%w/v) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
		CDs	PVA	CECS	
1	CD1P4C2O3	1	4	2	3
2	CD1P4C2O2	1	4	2	2
3	CD1P4C2O1	1	4	2	1
4	CD1P4C2O0.5	1	4	2	0.5
5	CD1P3C2O3	1	3	2	3
6	CD1P3C2O2	1	3	2	2
7	CD1P3C2O1	1	3	2	1
8	CD1P3C2O0.5	1	3	2	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับที่	ชื่อสูตร	ความเข้มข้นสุดท้าย (%w/v) ของสารต่าง ๆ ในสารละลาย 10 มิลลิลิตร			ความเข้มข้น ออกซิไดซ์อัลจินต (%w/v) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
		CDs	PVA	CECS	
9	CD1P2C2O3	1	2	2	3
10	CD1P2C2O2	1	2	2	2
11	CD1P2C2O1	1	2	2	1
12	CD1P2C2O0.5	1	2	2	0.5
13	CD1P1C2O3	1	1	2	3
14	CD1P1C2O2	1	1	2	2
15	CD1P1C2O1	1	1	2	1
16	CD1P1C2O0.5	1	1	2	0.5
17	CD1P1C3O3	1	1	3	3
18	CD1P1C3O2	1	1	2	2
19	CD1P1C3O1	1	1	3	1
20	CD1P1C3O0.5	1	1	3	0.5

โดยที่ CD = คาร์บอนดอท
P = พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
C = คาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน
O = ออกซิไดซ์ไฮเดียมอัลจินต

3.6 การตรวจวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของคาร์บอนดอท

3.6.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอท

นำตัวอย่างคาร์บอนดอทที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) ในช่วง $400-4000\text{ cm}^{-1}$ ที่ค่าความละเอียด (Resolution) = 4 cm^{-1} และเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) โดยใช้ Al K α (15 kV, 50w) เป็นแหล่งพลังงานในการกระตุ้น

3.6.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของคาร์บอนดอท

นำตัวอย่างคาร์บอนดอทความเข้มข้น 0.1 %w/v ไปวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค การกระจายตัว ลักษณะของอนุภาค และระนาบของผลึก ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Transmission electron microscope : TEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนความละเอียดสูงแบบส่องผ่าน (High-resolution transmission electron microscopy : HRTEM) โดยใช้ความแรงสนามไฟฟ้าที่ใช้เร่งอิเล็กตรอนเท่ากับ 200 kV

3.6.3 การศึกษาสมบัติทางแสงของคาร์บอนดอท

นำคาร์บอนควอนตัมดอทที่เตรียมได้ความเข้มข้น 3 %w/v ไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy ในช่วงความยาวคลื่น 200-600 นาโนเมตร

3.6.4 การศึกษาสมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนดอท

สมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนดอทศึกษาโดยใช้เทคนิค Fluorescence spectroscopy ความกว้างของแถบคลื่นความถี่ (Band width) ที่ใช้ในการกระตุ้น และการปลดปล่อยเท่ากับ 5 nm ความเร็วในการทดสอบ (Scanning speed) เท่ากับ 200 nm/min โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเรืองแสงของคาร์บอนดอท ได้แก่

1. เตรียมคาร์บอนดอททุกชนิดความเข้มข้น 1 %w/v ไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการสังเคราะห์และความเข้มการเรืองแสงของคาร์บอนดอท
2. เตรียมคาร์บอนดอททุกชนิดความเข้มข้น 1 %w/v ไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการกระตุ้นและความเข้มแสงของคาร์บอน โดยใช้ความยาวคลื่นในการกระตุ้นเท่ากับ 300-400 nm
3. เตรียมคาร์บอนดอททุกชนิดความเข้มข้น 1 %w/v ไปศึกษาความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการกระตุ้นเพื่อให้ได้ค่าความเข้มการเรืองแสงมากที่สุด โดยใช้เทคนิค Fluorescence spectroscopy ในโหมด 3D spectrum
4. เตรียมคาร์บอนดอททุกชนิดความเข้มข้น 1 %w/v ไปเปรียบเทียบความเข้มการเรืองแสงโดยใช้ความยาวคลื่นในการกระตุ้นที่เหมาะสมกับคาร์บอนดอทแต่ละชนิด (ได้จากข้อ 3)
5. เตรียม BCU/Ag-CDs ความเข้มข้น 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 และ 1 %w/v ไปศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มการเรืองแสงและความเข้มข้นของคาร์บอนดอท ความยาวคลื่นในการกระตุ้น เท่ากับ 350 nm

3.6.5 การศึกษาสมบัติผลผลิตควอนตัม (Quantum yield) ของคาร์บอนดอท

เตรียมคาร์บอนดอททุกชนิดความเข้มข้น 0.1 M เพื่อนำไปศึกษาผลผลิตควอนตัม ด้วยเทคนิค Fluorescent spectroscopy โดยใช้ควินินซัลเฟต (quinine sulphate) ความเข้มข้น 0.1 M ในกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นสารอ้างอิง โดยคำนวณค่า Quantum yield ตามสูตร ดังนี้

$$\phi = \phi_s \left[\frac{F \times A_s \times n^2 \times D}{F_s \times A \times n_s^2 \times D_s} \right] \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\emptyset คือ ค่า Quantum yield

\emptyset_s คือ ค่า Quantum yield ของสารมาตรฐาน

F คือ พื้นที่ใต้กราฟของสารตัวอย่าง

F_s คือ พื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐาน

A คือ ค่าการดูดกลืนพลังงานของสารตัวอย่าง

A_s คือ ค่าการดูดกลืนพลังงานของสารมาตรฐาน

n คือ ดรรชนีหักเห (refractive index) ของสารตัวอย่าง

n_s คือ ดรรชนีหักเห (refractive index) ของสารมาตรฐาน

D คือ ค่าระดับการเจือจาง (dilution factor) ของสารตัวอย่าง

D_s คือ ค่าระดับการเจือจาง (dilution factor) ของสารมาตรฐาน

3.6.6 การทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชของคาร์บอนดอท

3.6.6.1 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 2-13 สามารถเตรียมได้จากตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์

พีเอช	ปริมาตรสารละลาย	ปริมาตรกรด/เบส
2	25 ml ของ 0.2 M KCl	6.5 ml ของ 0.2 M HCl
3	50 ml ของ 0.1 M KHP	22.3 ml ของ 0.1 M HCl
4	50 ml ของ 0.1 M KHP	0.1 ml ของ 0.1 M HCl
5	50 ml ของ 0.1 M KHP	22.6 ml ของ 0.1 M NaOH
6	50 ml ของ 0.1 M KH_2PO_4	5.6 ml ของ 0.1 M NaOH
7	50 ml ของ 0.1 M KH_2PO_4	29.1 ml ของ 0.1 M NaOH
8	50 ml ของ 0.1 M KH_2PO_4	46.1 ml ของ 0.1 M NaOH
9	50 ml ของ 25 mM Borax	4.6 ml ของ 0.1 M HCl
10	50 ml ของ 25 mM Borax	18.3 ml ของ 0.1 M NaOH
11	100 ml ของ 0.05M NaHCO_3	45.4 ml ของ 0.1 M NaOH
12	50 ml ของ 0.2 M KCl	12 ml ของ 0.2 M NaOH
13	50 ml ของ 0.2 M KCl	132 ml ของ 0.2 M NaOH

3.6.6.2 การทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชของคาร์บอนดอท

1. เตรียมคาร์บอนดอทความเข้มข้น 1% w/v ปริมาตร 3 ml ลงในขวดไวโอล
2. ปิเปตสารละลายบัฟเฟอร์พีเอชต่าง ๆ ปริมาตร 100 μl ใส่ลงในขวดไวโอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผสมสารละลายโดยการปั่นกวนเป็นเวลา 5 นาที
4. เมื่อครบเวลานำสารละลายไปวัดความเข้มการเรืองแสง ด้วยเทคนิค Fluorescence spectroscopy ซึ่งมีความกว้างของแถบคลื่นความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้น และการปลดปล่อยเท่ากับ 5 nm ความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 200 nm/min และใช้ความยาวคลื่นในการกระตุ้นเท่ากับ 320 nm

3.7 การตรวจวิเคราะห์และศึกษาสมบัติของเจล

3.7.1 การศึกษาสมบัติการเรืองแสงของไฮโดรเจล

เตรียมไฮโดรเจลที่ไม่มีคาร์บอนดอทเป็นองค์ประกอบ P2C2O0.5 และไฮโดรเจลที่มีคาร์บอนดอทเป็นองค์ประกอบโดยมีความเข้มข้นของคาร์บอนดอทเท่ากับ 0.5 (CD0.5P2C2O0.5), 1 (CD1P2C2O0.5) และ 1.5 %w/v (CD1.5P2C2O0.5) ไปศึกษาสมบัติการเรืองแสง โดยใช้เทคนิค Fluorescence spectroscopy ซึ่งมีความกว้างของแถบคลื่นความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้น และการปลดปล่อยเท่ากับ 5 nm ความเร็วในการทดสอบ เท่ากับ 200 nm/min ความยาวคลื่นในการกระตุ้นเท่ากับ 350 nm

3.7.2 การศึกษาระยะเวลาในการเกิดเจลจากผลของคาร์บอนดอท

ศึกษาระยะเวลาในการเกิดเจลด้วยวิธี Vial inversion ที่อุณหภูมิห้อง โดยเตรียมไฮโดรเจลที่ไม่มีคาร์บอนดอทเป็นองค์ประกอบ P2C2O0.5 และไฮโดรเจลที่มีคาร์บอนดอทเป็นองค์ประกอบโดยมีความเข้มข้นของคาร์บอนดอทเท่ากับ 0.5 (CD0.5P2C2O0.5), 1 (CD1P2C2O0.5) และ 1.5 %w/v (CD1.5P2C2O0.5) จากนั้นจับเวลา (ตั้งแต่ทำการผสมออกซิไดซ์อัลจินตความเข้มข้น 0.5 %w/v) จนถึงระยะเวลาที่เมื่อกลับหัวขวดไวโอลแล้วสารละลายเกิดเจลและไม่สามารถไหลได้

3.7.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจล

สมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจลทดสอบด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis ในช่วงอุณหภูมิ 25-800 องศาเซลเซียส อัตราความร้อน (heating rate) 10 °C/min ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน 20 ml/min โดยไฮโดรเจลสูตรที่นำไปทดสอบสมบัติทางความร้อน ได้แก่ ไฮโดรเจลสูตร P2C2O0.5, CD1P2C2, CD1P1C2O0.5, CD1P2C2O0.5, CD1P3C2O0.5 และ CD1P4C2O0.5

3.7.4 การศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงของไฮโดรเจลด้วยกระบวนการ Freezing/Thawing

ไฮโดรเจลสูตร CD1P4C2O0.5, CD1P3C2O0.5, CD1P2C2O0.5, CD1P1C2O0.5 และ CD1C2O0.5 ถูกนำมาศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงของไฮโดรเจลด้วยกระบวนการ freezing/thawing จำนวน 3 รอบ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ
2. นำไฮโดรเจลเข้าตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ขั้นตอนของ freezing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เมื่อครบเวลา 24 ชั่วโมงนำไฮโดรเจลออกมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง (ขั้นตอน thawing)
4. ทำตามข้อที่ 2 และ 3 จนครบ 3 รอบ

3.7.5 การทดสอบพฤติกรรมบวมตัวของไฮโดรเจล (Swelling test)

ไฮโดรเจลสูตร CD1P4C2O0.5, CD1P3C2O0.5, CD1P2C2O0.5, CD1P1C2O0.5 และ CD1C2O0.5 ถูกนำมาทดสอบพฤติกรรมบวม โดยมีขั้นตอน ดังนี้

1. นำไฮโดรเจลที่เตรียมได้ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง
2. แช่ไฮโดรเจลลงสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส
3. นำไฮโดรเจลขึ้นมาซับน้ำแล้วนำไปชั่งน้ำหนักตามเวลาต่าง ๆ ดังนี้ 2, 4, 6, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง
4. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของไฮโดรเจล (%Swelling) ตามสูตร ดังนี้

$$\%Swelling = \frac{\text{น้ำหนักเจลที่บวมตัว} - \text{น้ำหนักเจลแห้งก่อนการบวมตัว}}{\text{น้ำหนักเจลแห้งก่อนการบวมตัว}} \times 100 \quad (3.2)$$

ทำซ้ำทั้งหมด 3 ตัวอย่าง

บทที่ 4

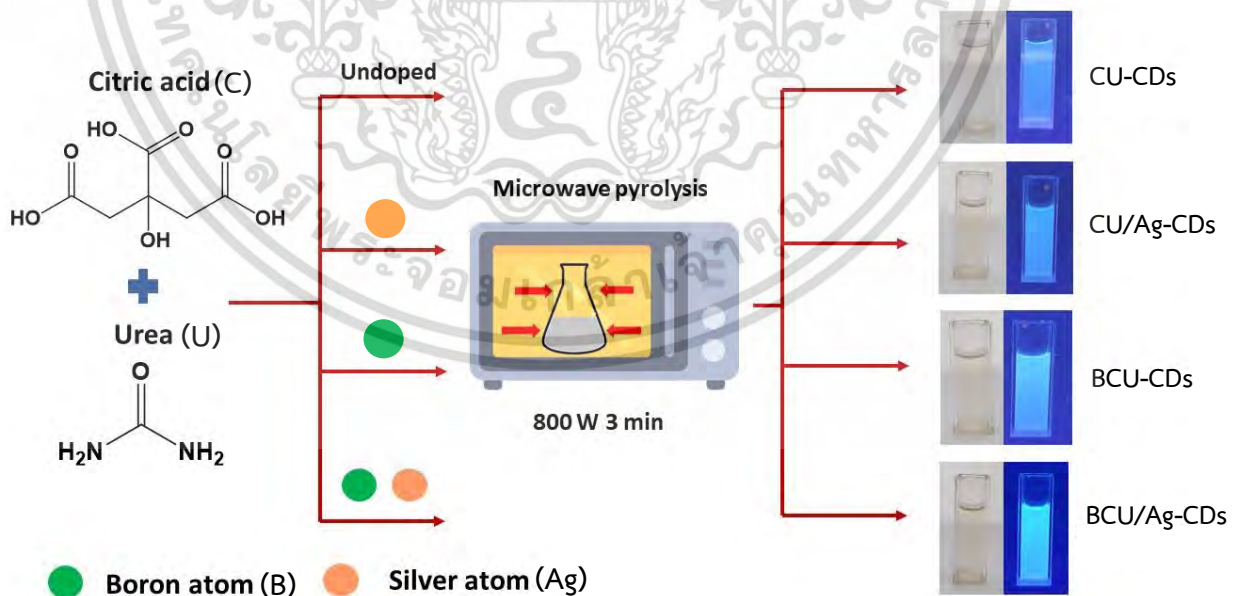
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมไฮโดรเจลเรืองแสงเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางการแพทย์ โดยเริ่มจากการสังเคราะห์คาร์บอนดอทเพื่อใช้เป็นสารเรืองแสง และสารเชื่อมโยงในไฮโดรเจล ซึ่งคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง สมบัติในการเรืองแสง และการตอบสนองต่อสิ่งเร้า จากนั้นคาร์บอนดอทจะถูกนำไปเตรียมเป็นไฮโดรเจลเพื่อทำเป็นไฮโดรเจลเรืองแสง โดยไฮโดรเจลที่เตรียมได้จะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติการเรืองแสง ระยะเวลาการเกิดเจล สมบัติทางความร้อน และพฤติกรรมการบวมตัว

4.1 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท

4.1.1 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท

คาร์บอนดอทในงานวิจัยนี้สังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีการแบบไมโครเวฟ โดยมีกรดซิตริก (Citric acid) เป็นแหล่งคาร์บอน ในขณะที่ยูเรีย (Urea) บอแรกซ์ (Borax) และซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate) ทำหน้าที่เป็นตัวให้ ไนโตรเจน (N-doped) โบรอน (B-doped) และ โลหะซิลเวอร์ (Ag-doped) ตามลำดับ โดยวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนดอทแสดงดังรูปที่ 4.1

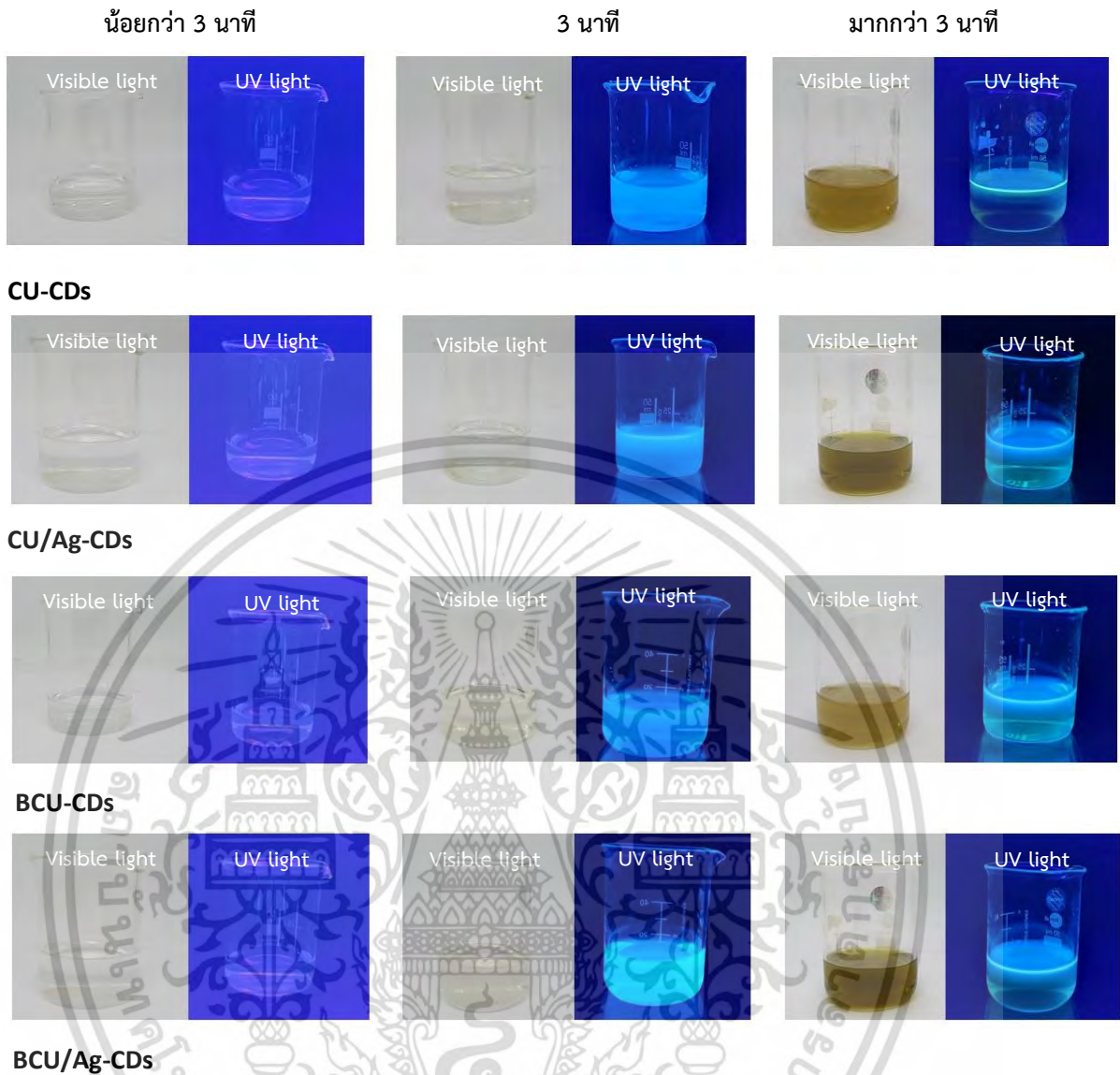


รูปที่ 4.1 การสังเคราะห์คาร์บอนดอท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยวิธีการแบบไมโครเวฟมีกลไกการเกิดคาร์บอนดอท คือ ในช่วงแรกความร้อนที่ให้กับสารส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในการระเหยของน้ำ ไม่ได้ใช้ในการเผาไหม้สารโดยตรง สังเกตได้จากคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้มีการเรืองแสงน้อยหรือไม่เกิดการเรืองแสง เมื่อระยะเวลาการให้ความร้อนนานขึ้นจนน้ำเกิดการระเหยหมด ความร้อนจึงถูกนำมาใช้ในการเผาไหม้สารโดยตรง ทำให้เกิดคาร์บอนดอทจำนวนมาก ส่งผลให้มีการเรืองแสงมาก ทั้งนี้เมื่อระยะเวลาในการเผาไหม้มากเกินไป สารจะถูกเผาไหม้จนเกิดการทำลายหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวคาร์บอนดอทที่เกิดขึ้น ส่งผลให้การเรืองแสงลดลง [89]

จากการศึกษาผลของระยะเวลาในการเผาไหม้ที่มีต่อการเรืองแสงของคาร์บอนดอท โดยนำสารที่ได้จากไมโครเวฟมาเติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร และนำมากรองด้วยไซริงค์ที่มีฟิลเตอร์ขนาด 0.2 μm นำมาศึกษาสมบัติการเรืองแสงที่ระยะเวลาการเผาไหม้ต่าง ๆ พบว่า เมื่อระยะเวลาในการเผาไหม้น้อยกว่า 3 นาที คาร์บอนดอทมีลักษณะเป็นสารละลายใส ไม่มีสีภายใต้แสงวิสิเบิล และเรืองแสงได้น้อยหรือไม่เกิดการเรืองแสงภายใต้แสงยูวี เนื่องจากยังไม่เกิดคาร์บอนดอทหรือเกิดคาร์บอนดอทที่ไม่สมบูรณ์โดยมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวคาร์บอนดอทน้อย แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเผาไหม้เป็น 3 นาที พบว่า คาร์บอนดอทมีลักษณะเป็นสารละลายใส มีสีเหลืองอ่อนภายใต้แสงวิสิเบิล และมีการเรืองแสงมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญภายใต้แสงยูวี เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันบริเวณพื้นผิวของคาร์บอนดอทจำนวนมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเผาไหม้มากกว่า 3 นาที พบว่า คาร์บอนดอทมีสีเหลืองอมเขียวภายใต้แสงวิสิเบิล เนื่องจากมีการเผาไหม้คาร์บอนดอทมาก และมีการเรืองแสงแยกชั้นเป็นชั้นสีเขียวยและสีฟ้า รวมถึงมีการเรืองแสงลดลงภายใต้แสงยูวีเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอทจะถูกทำลายด้วยความร้อนที่มากเกินไป ภาพถ่ายแสดงการเรืองแสงภายใต้แสงยูวีของคาร์บอนดอทชนิดต่าง ๆ ที่สังเคราะห์โดยใช้เวลาในการเผาไหม้ต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.2

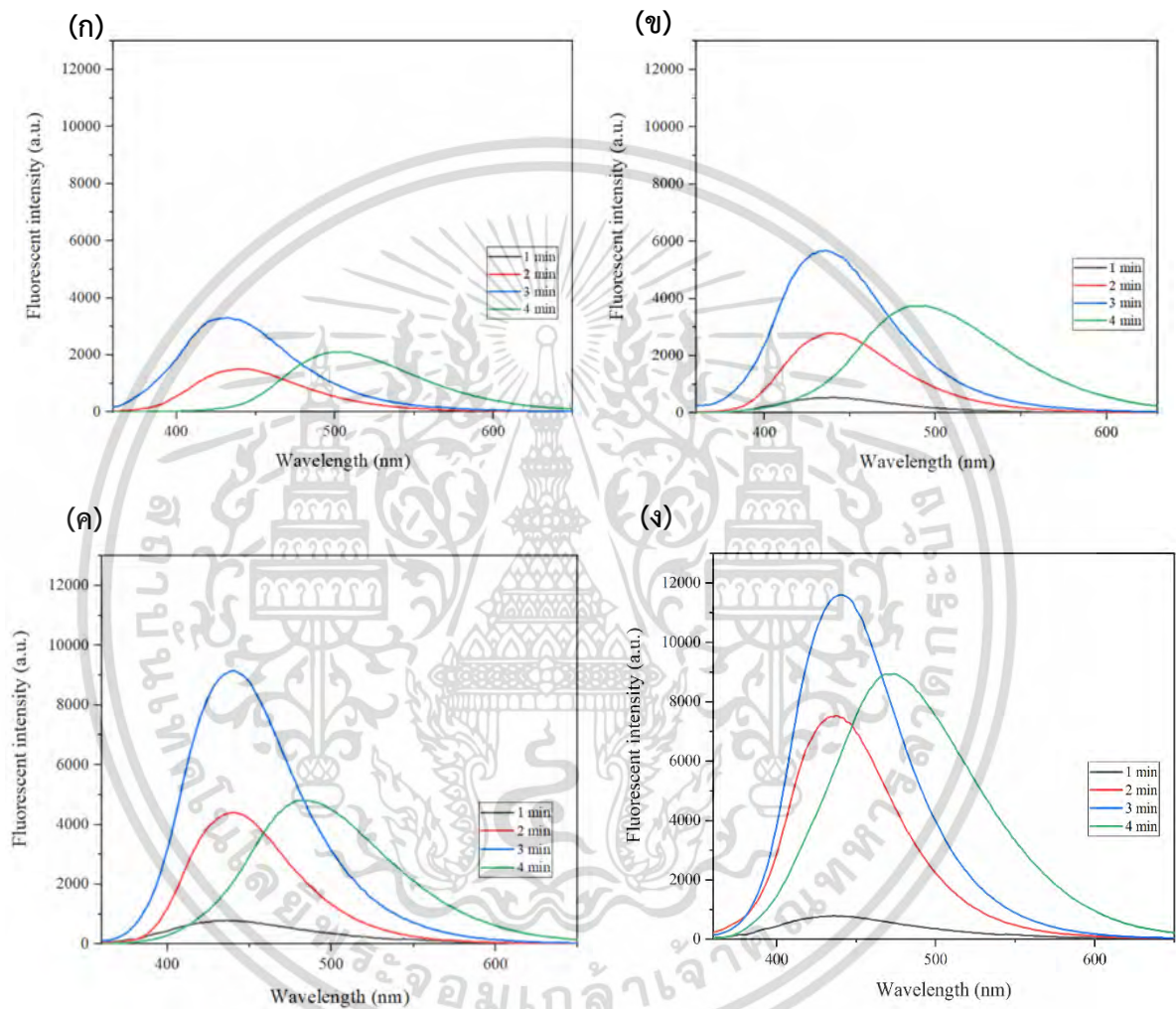


รูปที่ 4.2 การเรืองแสงของคาร์บอนดอทแต่ละชนิดโดยเปรียบเทียบระยะเวลาในการเผาไหม้

เมื่อนำคาร์บอนดอทชนิดต่าง ๆ ความเข้มข้น 1 %w/v ที่ระยะเวลาการเผาไหม้ 1, 2, 3 และ 4 นาที ไปวิเคราะห์การเรืองแสงด้วยเทคนิค Fluorescent spectroscopy พบว่า เมื่อเวลาการสังเคราะห์คาร์บอนดอทเพิ่มขึ้นจาก 1 นาที ไป 3 นาที คาร์บอนดอททุกชนิดมีความเข้มในการเรืองแสงมากขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์ไปที่ 4 นาที พบว่าความเข้มในการเรืองแสงของคาร์บอนดอทลดลง และความยาวคลื่นในการคายพลังงานเลื่อนจาก 430-450 ไปที่ 480-510 นาโนเมตร รวมถึงมีช่วงการคายพลังงานที่กว้างขึ้น ซึ่งแสดงถึงการมีขนาดอนุภาคคาร์บอนดอทที่หลากหลายมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.3 (ก-ง) จากการวิเคราะห์ระยะเวลาการเผาไหม้กับการเรืองแสงของคาร์บอนดอท สามารถสรุปได้ว่า คาร์บอนดอทจะมีความเข้มการเรืองแสงมากขึ้นเมื่อเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลาในการสังเคราะห์เนื่องจากมีจำนวนหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้ ระยะเวลาการเผาไหม้ที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้ความเข้มข้นของแสงลดลง เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถูกทำลายด้วยความร้อน โดยระยะเวลาในการเผาไหม้คาร์บอนดอทที่เหมาะสมด้วยวิธีการแบบไมโครเวฟอยู่ที่ 3 นาที และเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการเผาไหม้ 3 นาที ความเข้มข้น 1 %w/v พบว่า BCU/Ag-CDs มีความเข้มในการเรืองแสงมากที่สุดเนื่องจากมีอิเล็กตรอนในโครงสร้างจำนวนมาก



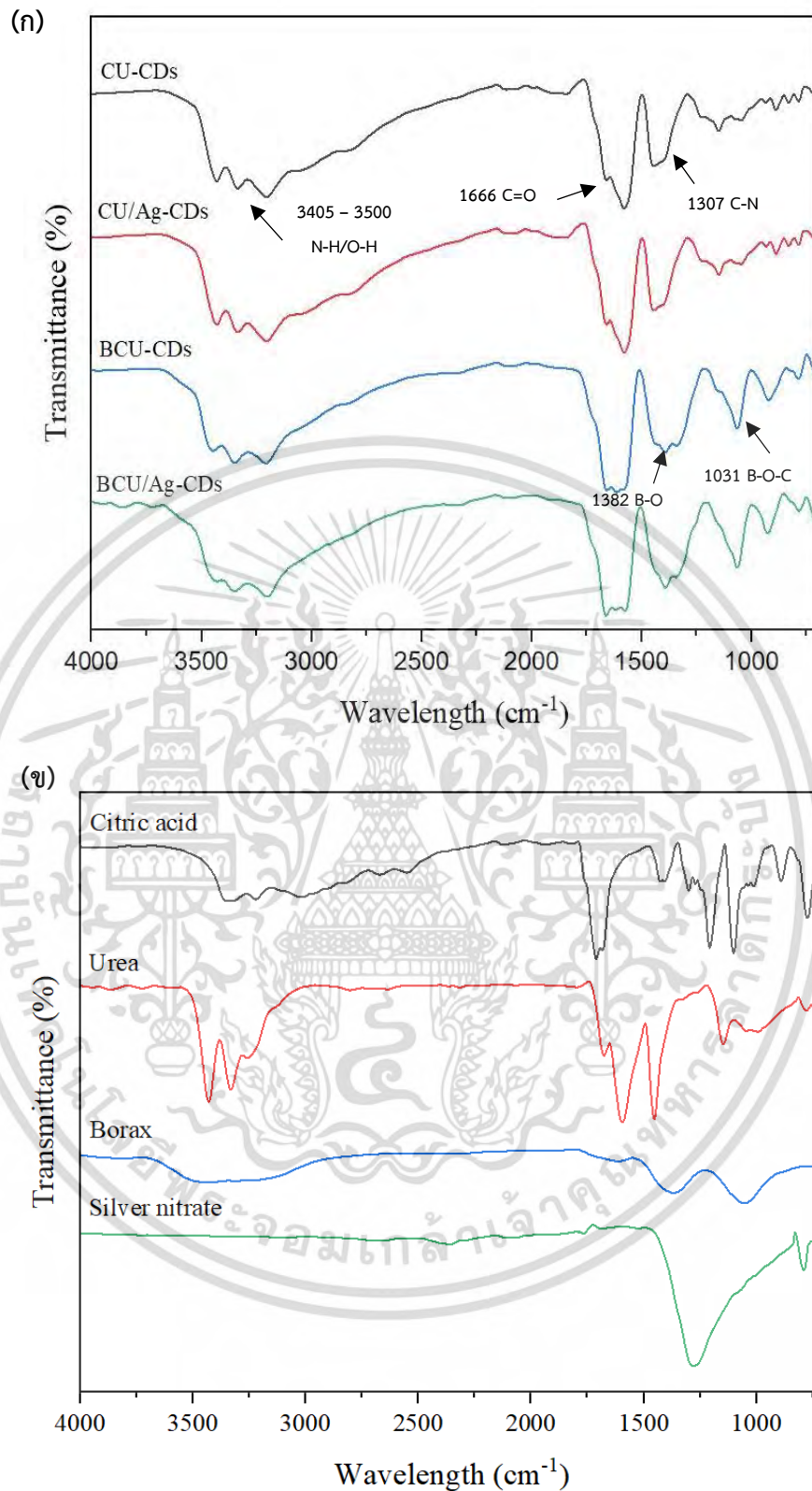
รูปที่ 4.3 ค่าการเรืองแสงของคาร์บอนดอท (ก) CU-CDs (ข) CU/Ag-CDs (ค) BCU-CDs และ (ง) BCU/Ag-CDs จากเทคนิค Fluorescent spectroscopy โดยเปรียบเทียบระยะเวลาในการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนดอท

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอทด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) พบว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ทุกชนิดมีเลขคลื่นที่ 3392-3197, 2980, 1666 และ 1620 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของ O-H stretching, C-H stretching, C=O stretching และ C=C stretching ตามลำดับ การเพิ่มอะตอมไนโตรเจน (N) ในโครงสร้างของคาร์บอนดอทสามารถยืนยันได้จาก เลขคลื่นที่ 1307 และ 3405-3500 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของ C-N stretching และ N-H stretching ตามลำดับ และการเพิ่มอะตอมโบรอน (B) ในโครงสร้างของคาร์บอนดอทยืนยันได้จากเลขคลื่นที่ 1382 และ 1031 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของ B-O stretching และ B-O-C stretching [90-91] อย่างไรก็ตามการสั่นของอะตอมซิลเวอร์ (Ag) (ปกติจะสังเกตเห็นเลขคลื่นที่เป็นเอกลักษณ์ที่ 1280 และ 700-500 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของ N-O stretching และ Ag-O stretching ตามลำดับ [92]) ไม่สามารถยืนยันได้จากเทคนิค ATR-FTIR เนื่องจากในคาร์บอนดอทมีปริมาณซิลเวอร์น้อย และเกิดการซ้อนทับของพีคการสั่นต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.4 (ก) ทั้งนี้จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนดอทสามารถสรุปได้ว่า คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน และคาร์บอกซิลิกจำนวนมาก ทำให้คาร์บอนดอทมีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) และส่งผลให้คาร์บอนดอทสามารถละลายน้ำได้

จากการเปรียบเทียบ FTIR spectra ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมคาร์บอนดอทที่แสดงดังรูปที่ 4.4 (ข) และ FTIR spectra ของคาร์บอนดอทชนิดต่าง ๆ (รูปที่ 4.4 ก) พบว่าคาร์บอนดอทที่เตรียมได้มีช่วงการสั่นที่คล้ายคลึงกับสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียม แต่ทั้งนี้ความเข้มการส่องผ่าน (Transmittance) มีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าสารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นคาร์บอนดอทได้สำเร็จ

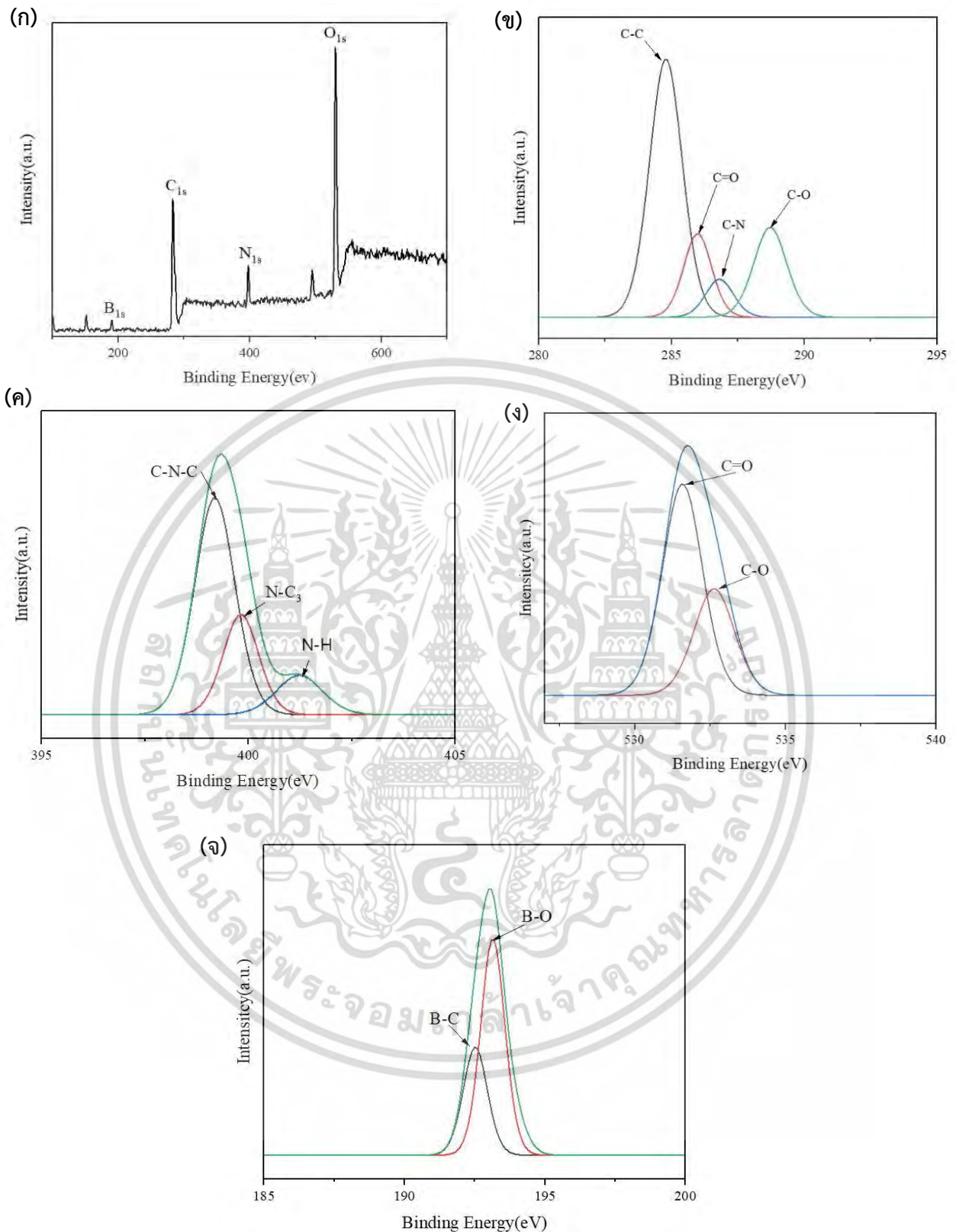


รูปที่ 4.4 FT-IR spectra (ก) FT-IR spectra ของคาร์บอนดอตแต่ละประเภท และ (ข) FT-IR spectra ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมคาร์บอนดอต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BCU-CDs และ BCU/Ag-CDs ถูกเลือกมาวิเคราะห์หาธาตุในโครงสร้าง โดยทดสอบด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) จาก XPS survey spectra ของ BCU-CDs ที่แสดงดังรูปที่ 4.5 (ก) แสดงถึงพลังงานยึดเหนี่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของอะตอมในออร์บิทัลต่าง ๆ ได้แก่ O_{1s} , N_{1s} , C_{1s} และ B_{1s} ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 530, 397, 283 และ 190 eV ตามลำดับ เมื่อดูรายละเอียดเฉพาะธาตุ พบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของ C_{1s} ที่ 284.86, 286.05, 286.85, และ 288.75 eV สัมพันธ์กับพันธะ C-C, C=O, C-N และ C-O ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.5 (ข) พลังงานยึดเหนี่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของ N_{1s} ที่ 399.15, 399.85 และ 401.25 eV สัมพันธ์กับพันธะ C=N-C, N-(C)₃ and N-H ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.5 (ค) พลังงานยึดเหนี่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของ O_{1s} ที่ 531.65 และ 532.65 eV สัมพันธ์กับพันธะ C=O และ C-O ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.5 (ง) พลังงานยึดเหนี่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของ B_{1s} ที่ 192.49 และ 193.19 eV สัมพันธ์กับพันธะ B-C และ B-O ตามลำดับ [93-95] แสดงดังรูปที่ 4.4 (จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

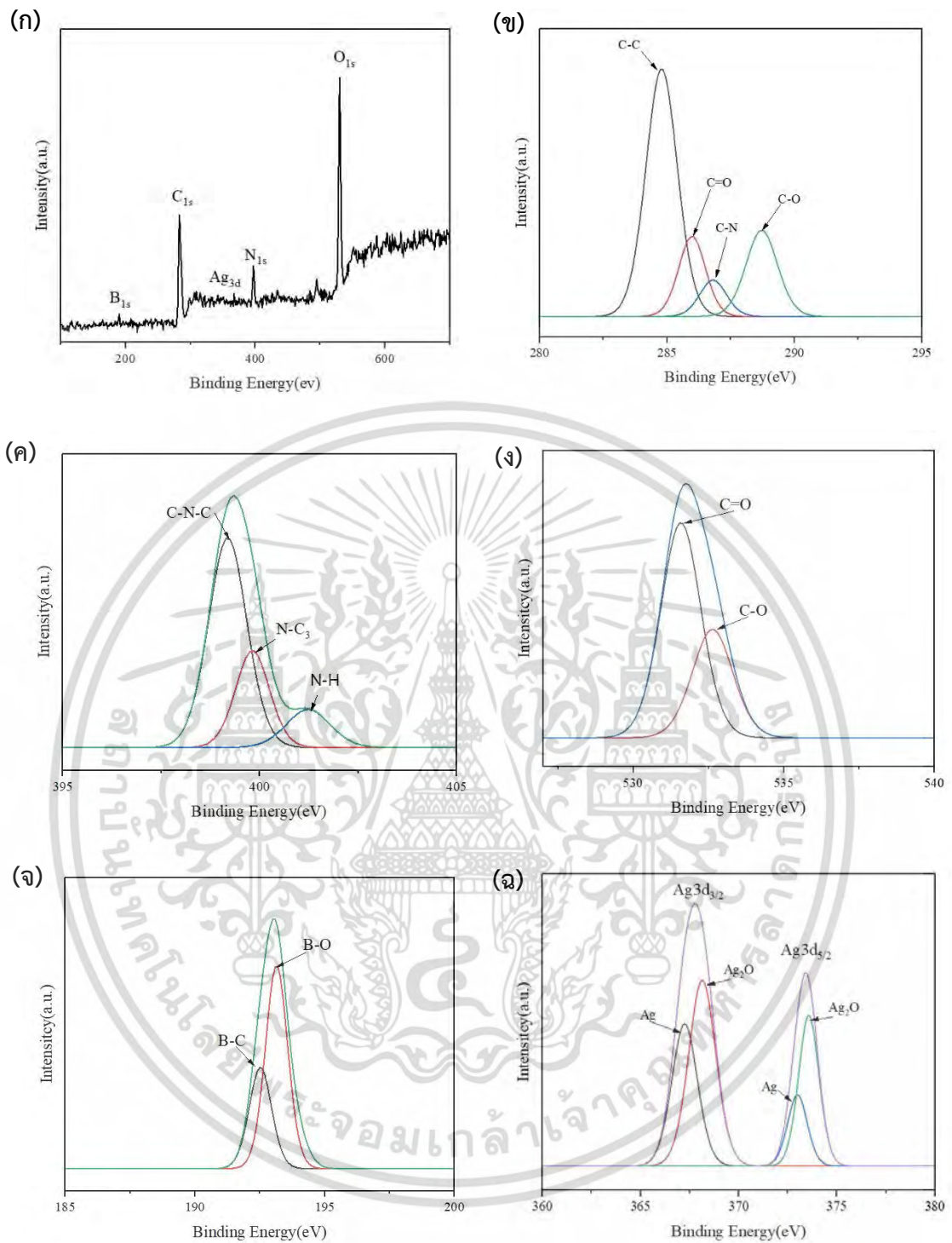


รูปที่ 4.5 XPS spectra ของ BCU-CDs (ก) Survey spectra (ข) C_{1s} (ค) N_{1s} (ง) O_{1s} และ (จ) B_{1s}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ XPS survey spectra ของ BCU/Ag-CDs ที่แสดงดังรูปที่ 4.6 (ก) แสดงถึงพลังงานยึดเหนี่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของอะตอมในออร์บิทัลต่าง ๆ เช่นเดียวกันกับ XPS survey spectra ของ BCU-CDs ได้แก่ O_{1s} , N_{1s} , C_{1s} , B_{1s} และ Ag_{3d} ที่พลังงานยึดเหนี่ยว 530, 397, 283, 190 และ 367 eV ตามลำดับ เมื่อดูรายละเอียดเฉพาะธาตุ พบว่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของ O_{1s} , N_{1s} , C_{1s} , B_{1s} เช่นเดียวกันกับ XPS survey spectra ของ BCU-CDs แสดงดังรูปที่ 4.5 (ข-จ) โดยมีรายละเอียดดังนี้ พลังงานยึดเหนี่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของ C_{1s} ที่ 284.86, 286.05, 286.85, และ 288.75 eV สัมพันธ์กับพันธะ C-C, C=O, C-N และ C-O ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 (ข) พลังงานยึดเหนี่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของ N_{1s} ที่ 399.15, 399.85 และ 401.25 eV สัมพันธ์กับพันธะ C=N-C, N-(C)₃ and N-H ตามลำดับ ดังรูป 4.6 (ค) พลังงานยึดเหนี่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของ O_{1s} ที่ 531.65 และ 532.65 eV สัมพันธ์กับพันธะ C=O และ C-O ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 (ง) พลังงานยึดเหนี่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของ B_{1s} ที่ 192.49 และ 193.19 eV สัมพันธ์กับพันธะ B-C และ B-O ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 (จ) และมีพลังงานยึดเหนี่ยวที่เป็นเอกลักษณ์ของ Ag_{3d} เพิ่มเติมที่ 367.35 และ 368.25 eV สัมพันธ์กับพันธะ Ag และ Ag_2O ใน $Ag_{3d_{3/2}}$ ตามลำดับ และที่ 372.95 และ 373.65 eV สัมพันธ์กับพันธะ Ag และ Ag_2O ใน $Ag_{3d_{5/2}}$ ตามลำดับ [96-98] แสดงดังรูปที่ 4.6 (ฉ)

จากการวิเคราะห์ XPS survey spectra ของ BCU-CDs และ BCU/Ag-CDs สามารถสรุปได้ว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 2 ชนิด มีการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยอะตอมไนโตรเจน และโบรอน ได้สำเร็จ เนื่องจากพบพีคที่แสดงถึงอะตอมโบรอน และไนโตรเจนในโครงสร้างของคาร์บอนดอท ในขณะที่ BCU/Ag-CDs ที่มีการเพิ่มอะตอมของซิลเวอร์เพื่อทำให้ประสิทธิภาพการเรืองแสงมากขึ้น สามารถสังเกตเห็นพีคของซิลเวอร์ใน XPS spectra ซึ่งเป็นการยืนยันการมีอะตอมซิลเวอร์ในโครงสร้างของ BCU/Ag-CDs

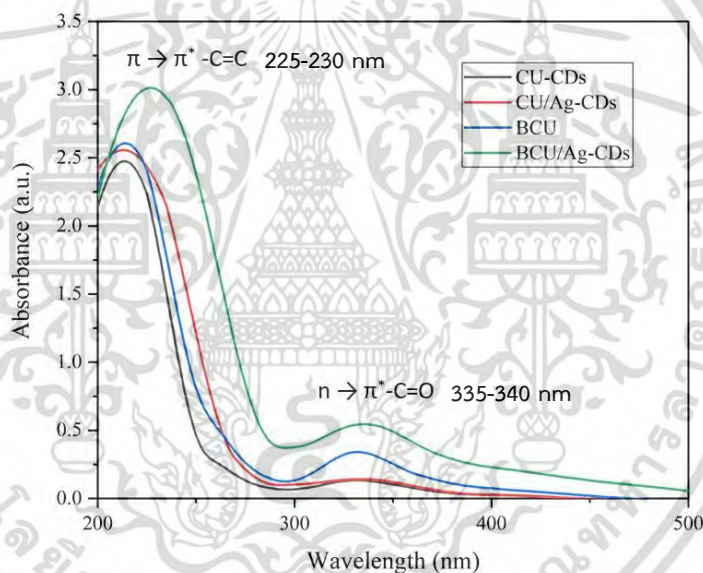


รูปที่ 4.6 XPS spectra ของ BCU/Ag-CDs (ก) Survey spectra (ข) C_{1s} (ค) N_{1s} (ง) O_{1s} (จ) B_{1s} และ (ฉ) Ag_{3d}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของคาร์บอนดอท

จากการนำคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy พบว่าคาร์บอนดอททุกชนิดมีช่วงการดูดกลืนแสงที่เป็นเอกลักษณ์ 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงความยาวคลื่นในช่วง 225-230 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการดูดกลืนพลังงานเพื่อใช้ในการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $\pi \rightarrow \pi^*$ ในพันธะ $-C=C$ ที่อยู่บริเวณแกนกลางของคาร์บอนดอท [99] และในช่วงความยาวคลื่นในช่วง 335-340 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการดูดกลืนพลังงานเพื่อใช้ในการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $n \rightarrow \pi^*$ ในพันธะ $-C=O$, $-C-N$ และ $-C-OH$ ของหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บริเวณพื้นผิวของคาร์บอนดอท [100-101] แสดงดังรูปที่ 4.7 นอกจากนี้จากภาพจะสามารถสังเกตได้ว่า BCU/Ag-CDs มีความเข้มการดูดกลืนแสงทั้ง 2 ช่วงความยาวคลื่นสูงที่สุด เมื่อเทียบกับคาร์บอนดอทชนิดอื่น ๆ เนื่องจาก BCU/Ag-CDs มีอะตอมที่สามารถให้อิเล็กตรอนในโครงสร้างจำนวนมาก ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมากกว่าคาร์บอนดอทชนิดอื่น



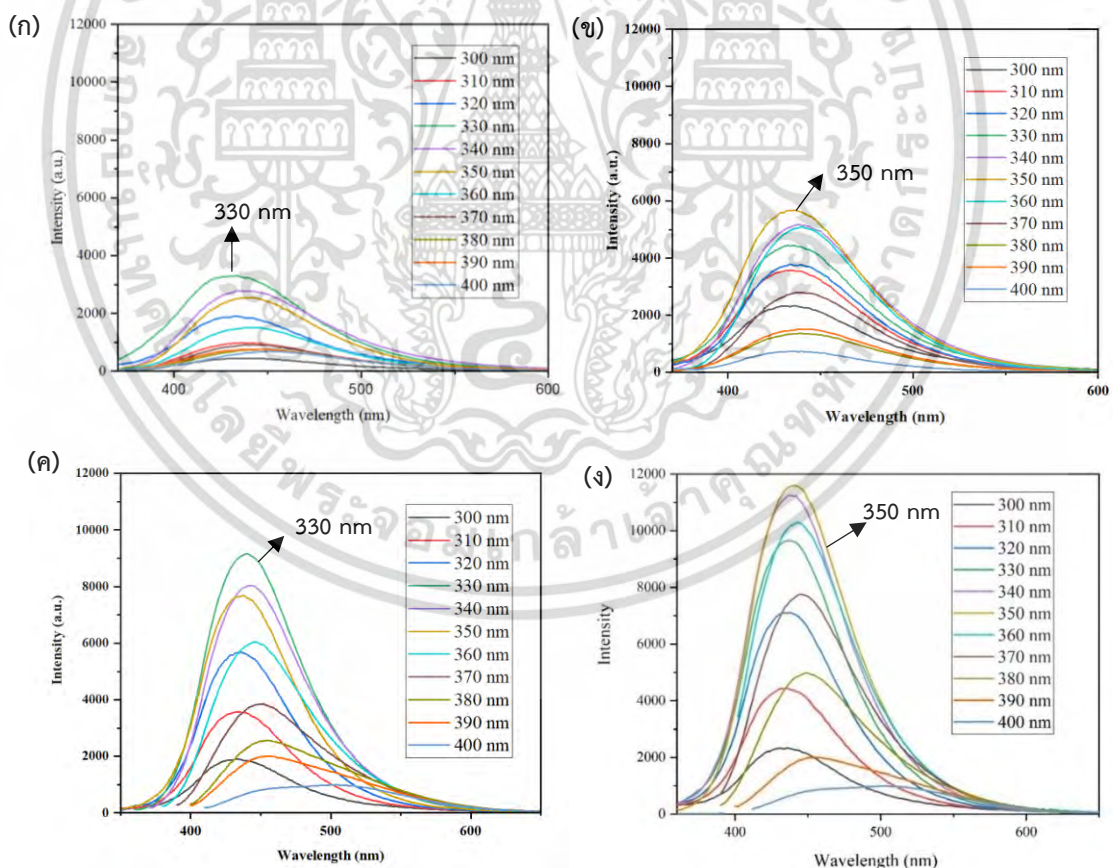
รูปที่ 4.7 UV-vis spectra ของคาร์บอนดอทแต่ละประเภท

4.1.4 การวิเคราะห์สมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนดอท

จากการศึกษาความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้นคาร์บอนดอทประเภทต่าง ๆ โดยใช้เทคนิค Fluorescent spectroscopy ในช่วงความยาวคลื่น 300-400 นาโนเมตร พบว่าความเข้มแสงของ CU-CDs เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสงจนถึง 330 นาโนเมตร จากนั้นความเข้มแสงจะค่อย ๆ ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.8 (ก) ในส่วนของ CU/Ag-CDs มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความยาวคลื่นจนถึง 350 นาโนเมตร จากนั้นความเข้มแสงจะค่อย ๆ ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.8 (ข) BCU-CDs มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความยาวคลื่นจนถึง 330 นาโนเมตร จากนั้นความเข้มแสงจะค่อย ๆ ลดลง แสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 4.8 (ค) และ BCU/Ag-CDs มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความยาวคลื่นจนถึง 350 นาโนเมตร จากนั้นความเข้มแสงจะค่อย ๆ ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.8 (ง) จากผลการศึกษาสามารถวิเคราะห์ได้ว่าคาร์บอนดอทแต่ละประเภทมีความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการกระตุ้นให้มีความเข้มแสงมากที่สุดแตกต่างกัน เนื่องจากคาร์บอนดอทแต่ละประเภทมีระดับพลังงานในโครงสร้างที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ดูดซับและปลดปล่อยพลังงานไม่เท่ากัน แต่ทั้งนี้จะสามารถสังเกตได้ว่าแนวโน้มการดูดซับพลังงาน และการปลดปล่อยพลังงานของคาร์บอนดอทแต่ละประเภทไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นความเข้มแสงของคาร์บอนดอทจะเพิ่มขึ้นจนถึงความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับคาร์บอนดอทแต่ละประเภท จากนั้นความเข้มแสงจะค่อย ๆ ลดลง ซึ่งมาจากสาเหตุดังนี้ เมื่อความยาวคลื่นสั้นโฟตอน (photon) จะมีพลังงานมากทำให้เกิดการถ่ายโอนประจุ (charge transfer) ระหว่างคาร์บอนดอทและโฟตอน ส่งผลให้การเรืองแสงของคาร์บอนดอทน้อย ดังนั้นเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นโฟตอนจะมีพลังงานน้อยลง การถ่ายโอนประจุเกิดน้อย ส่งผลให้คาร์บอนดอทมีการเรืองแสงมากขึ้น [102-104] แต่ทั้งนี้เมื่อความยาวคลื่นมากเกินไปคาร์บอนดอทจะไม่สามารถดูดกลืนพลังงานได้ เนื่องจาก พลังงานในการกระตุ้นน้อยส่งผลให้ความเข้มแสงของคาร์บอนดอทลดลงเช่นกัน [105-107]



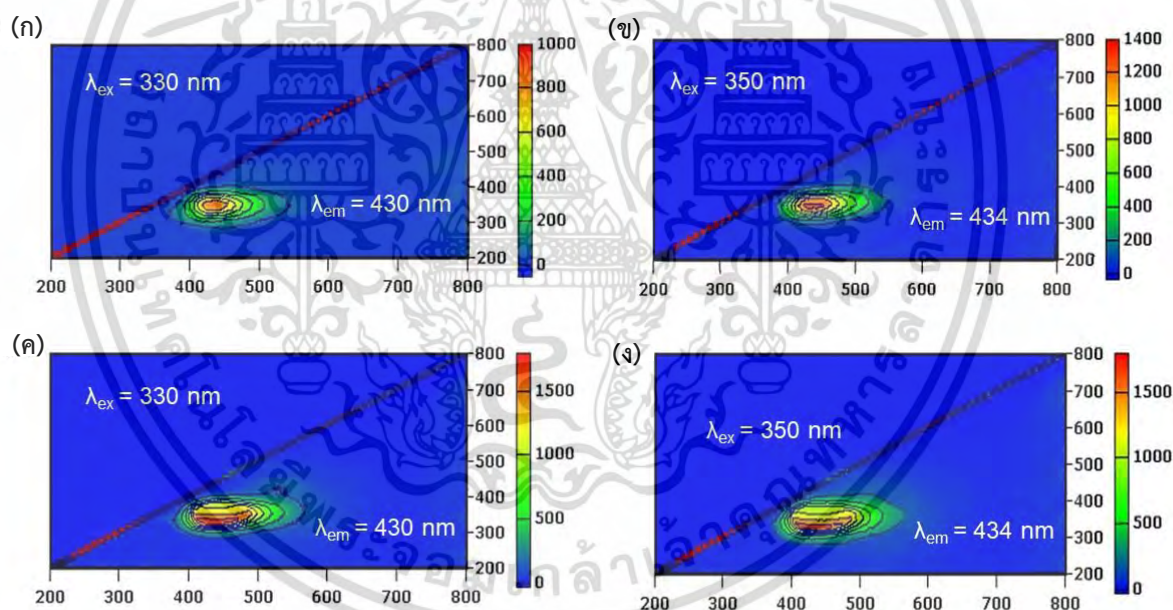
รูปที่ 4.8 Fluorescent spectra ของ (ก) CU-CDs (ข) CU/Ag-CDs (ค) BCU-CDs และ (ง) BCU/Ag-CDs ในช่วงความยาวคลื่น 300-400 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการนำคาร์บอนดอทแต่ละประเภทไปศึกษาสมบัติการเรืองแสงด้วยเทคนิค Fluorescent spectroscopy ในโหมด 3D spectra เพื่อแสกนหาความยาวคลื่นในการกระตุ้นที่เหมาะสมกับคาร์บอนดอทแต่ละประเภท พบว่าคาร์บอนดอทแต่ละประเภทมีความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการกระตุ้น และการคายพลังงานที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.1 ความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้น และการคายพลังงานของคาร์บอนดอท

ประเภทของคาร์บอนดอท	ความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้น (nm)	ความยาวคลื่นที่คายพลังงาน (nm)	Quantum yield (%)
CU-CDs	330	438	6
CU/Ag-CDs	350	434	9
BCU-CDs	330	439	19
BCU/Ag-CDs	350	434	26



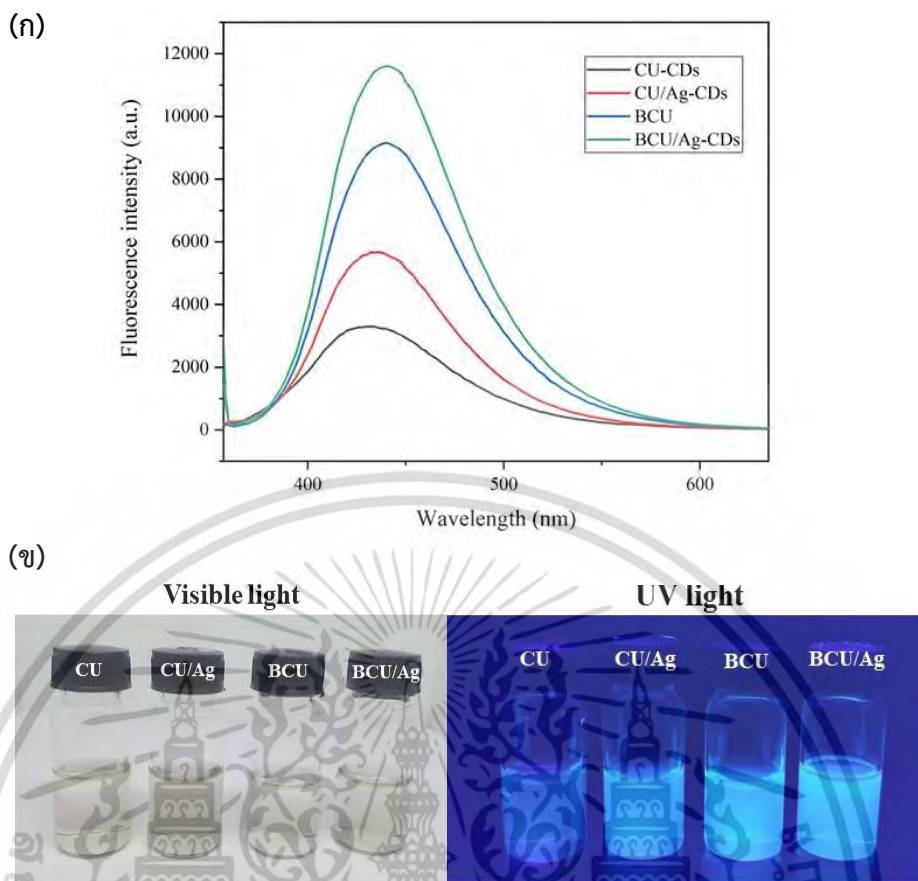
รูปที่ 4.9 ภาพ 3D spectrum แสดงความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้นและการคายพลังงานของ

(ก) CU-CDs (ข) CU/Ag-CDs (ค) BCU-CDs และ (ง) BCU/Ag-CDs

Quantum yield เป็นการวัดประสิทธิภาพการเรืองแสงของคาร์บอนดอทเมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแสงเข้าไป โดยใช้ควินินซัลเฟต (Quinine sulfate) เป็นตัวอ้างอิง [108] ซึ่งจากการศึกษา ค่า Quantum yield (แสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.1) พบว่า การเพิ่มอะตอมซิลเวอร์เข้าไปในโครงสร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

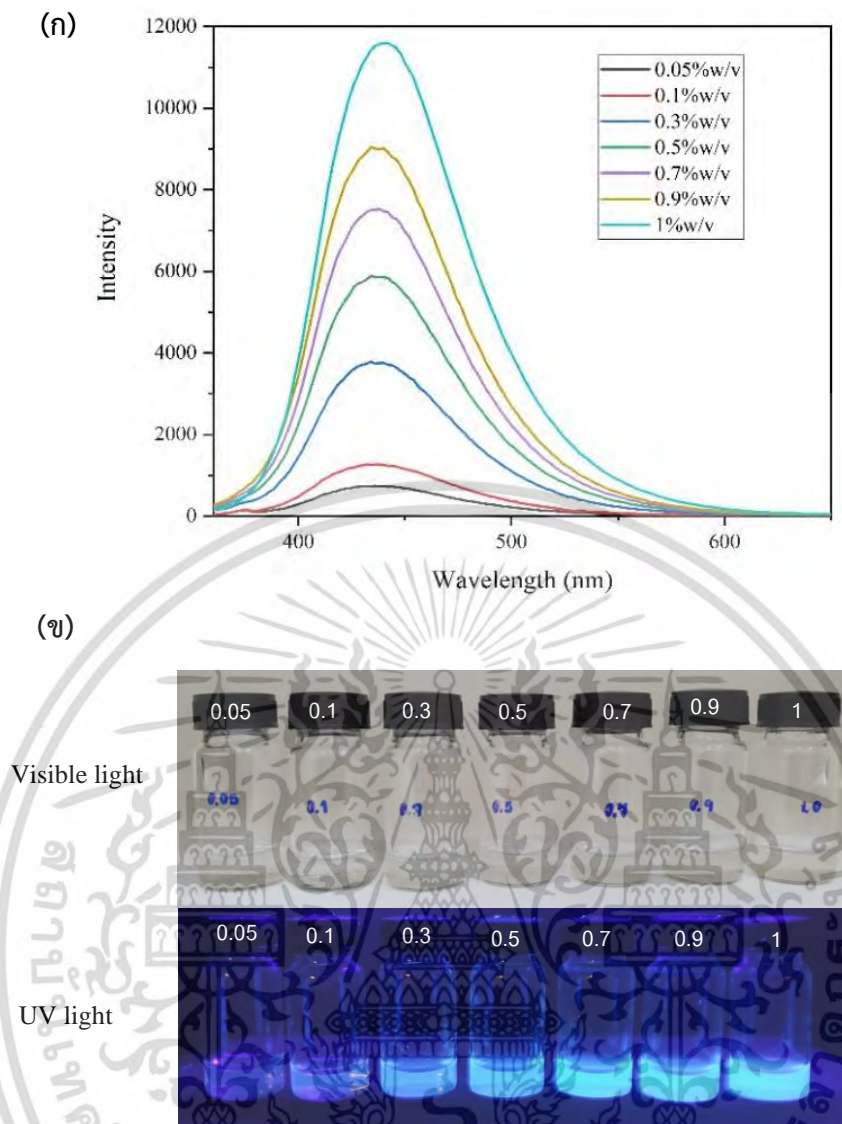
คาร์บอนดอท (CU/Ag-CDs) ทำให้ค่า Quantum yield เท่ากับ 9% เพิ่มขึ้น 3% จากค่าของ CU-CDs (6%) และการเพิ่มอะตอมโบรอนเข้าไปในโครงสร้างคาร์บอนดอท (BCU-CDs) ทำให้ค่า Quantum yield เท่ากับ 19% เพิ่มขึ้น 13% จากค่าของ CU-CDs ดังนั้นการมีทั้งอะตอมซิลเวอร์และโบรอนในโครงสร้างของคาร์บอนดอท (BCU/Ag-CDs) ค่า Quantum yield จากการประมาณการควรเพิ่มขึ้น 16% จากค่าของ CU-CDs ซึ่งควรมีค่าประมาณการที่ 22% แต่จากการศึกษาพบว่า BCU/Ag-CDs มีค่า Quantum yield อยู่ที่ 26% ซึ่งสูงกว่าค่าประมาณการ แสดงถึง Synergistic effect ของการเจืออะตอมโบรอนร่วมกับซิลเวอร์ เนื่องจาก BCU/Ag-CDs มีการเพิ่มอะตอมโบรอนและไนโตรเจน ซึ่งเป็นธาตุที่มีขนาดอะตอมใกล้เคียงกับคาร์บอนเข้าไปในโครงสร้างของคาร์บอนดอท ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแถบนำ (Conduction band) และแถบเวเลนซ์ (Valence band) ส่งผลให้การเรืองแสงของคาร์บอนดอทเพิ่มขึ้น [109-110] นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มอะตอมของซิลเวอร์ซึ่งเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเข้าไปในโครงสร้างของคาร์บอนดอท ทำให้คาร์บอนดอทมีจำนวนอิเล็กตรอนมาก นำไปสู่การเรืองแสงที่เพิ่มขึ้น [111] ดังนั้นทำให้ BCU/Ag-CDs มีค่า Quantum yield สูงที่สุด

เมื่อนำคาร์บอนดอทแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 1%w/v มาเปรียบเทียบกับสมบัติในการเรืองแสงด้วยเทคนิค Fluorescent spectroscopy โดยเลือกใช้ความยาวคลื่นในการกระตุ้นที่เหมาะสมกับคาร์บอนดอทแต่ละชนิด กล่าวคือ ความยาวคลื่น 330, 350, 330 และ 350 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้น CU-CDs, CU/Ag-CDs, BCU-CDs และ BCU/Ag-CDs ตามลำดับ ผลการตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 4.10 (ก) โดยสามารถสังเกตได้ว่าคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ทุกชนิดมีลักษณะเป็นสารละลายใส แต่เมื่ออยู่ภายใต้แสงยูวี (UV-light) จะเรืองแสงเป็นแสงสีฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.10 (ข)จากการศึกษาพบว่า BCU/Ag-CDs มีความเข้มการเรืองแสงมากที่สุด (รูปที่ 4.10 ก) ซึ่งสอดคล้องกับค่า Quantum yield (ตารางที่ 4.1) เนื่องจาก BCU/Ag-CDs มีซิลเวอร์ ไนโตรเจน และโบรอนเป็นองค์ประกอบ โดยซิลเวอร์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนที่ดี เพราะมีออร์บิทัลที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เป็นจำนวนมาก และมีรัศมีของอะตอมใหญ่ทำให้มีโอกาสในการเกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างกราฟีนและไอออนของโลหะมาก [112-113] ในขณะที่เดียวกันการมีไนโตรเจน และโบรอนเป็นองค์ประกอบ จะสามารถเพิ่มความเข้มในการเรืองแสงได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้น จึงเลือกใช้ BCU/Ag-CDs ในการนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป



รูปที่ 4.10 การเรืองแสงของคาร์บอนดอตแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 1%w/v (ก) Fluorescent spectra ของคาร์บอนดอตแต่ละชนิด และ (ข) การเรืองแสงของคาร์บอนดอตแต่ละชนิด ภายใต้แสงวิสิเบิล (UV light) และแสงยูวี (Visible light)

เมื่อศึกษาความเข้มข้นและการเรืองแสงของ BCU/Ag-CDs ด้วยเทคนิค Fluorescent spectroscopy ที่ความเข้มข้น 0.05-1% w/v พบว่า ความเข้มข้นของคาร์บอนดอตแปรผันตรงกับ ความเข้มแสง กล่าวคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนดอตมากขึ้นความเข้มในการเรืองแสงจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากสารละลายที่มีความเข้มข้นมากจะมีปริมาณคาร์บอนดอตอยู่มาก เกิดการดูดกลืนแสงและปล่อยพลังงานออกมาในรูปของการเรืองแสงได้มาก [114] โดยสารละลาย BCU/Ag-CDs ความเข้มข้น 1%w/v มีความเข้มในการเรืองแสงมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.11 (ก) สอดคล้องกับภาพถ่ายของสารละลาย BCU/Ag-CDs ในทุกความเข้มข้นที่มีลักษณะเป็นสารละลายใส ภายใต้แสงวิสิเบิล (Visible light) และมีการเรืองแสงเป็นแสงสีฟ้าภายใต้แสงยูวี (UV light) โดยมีความเข้มในการเรืองแสงมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้น แสดงดังรูปที่ 4.11 (ข)



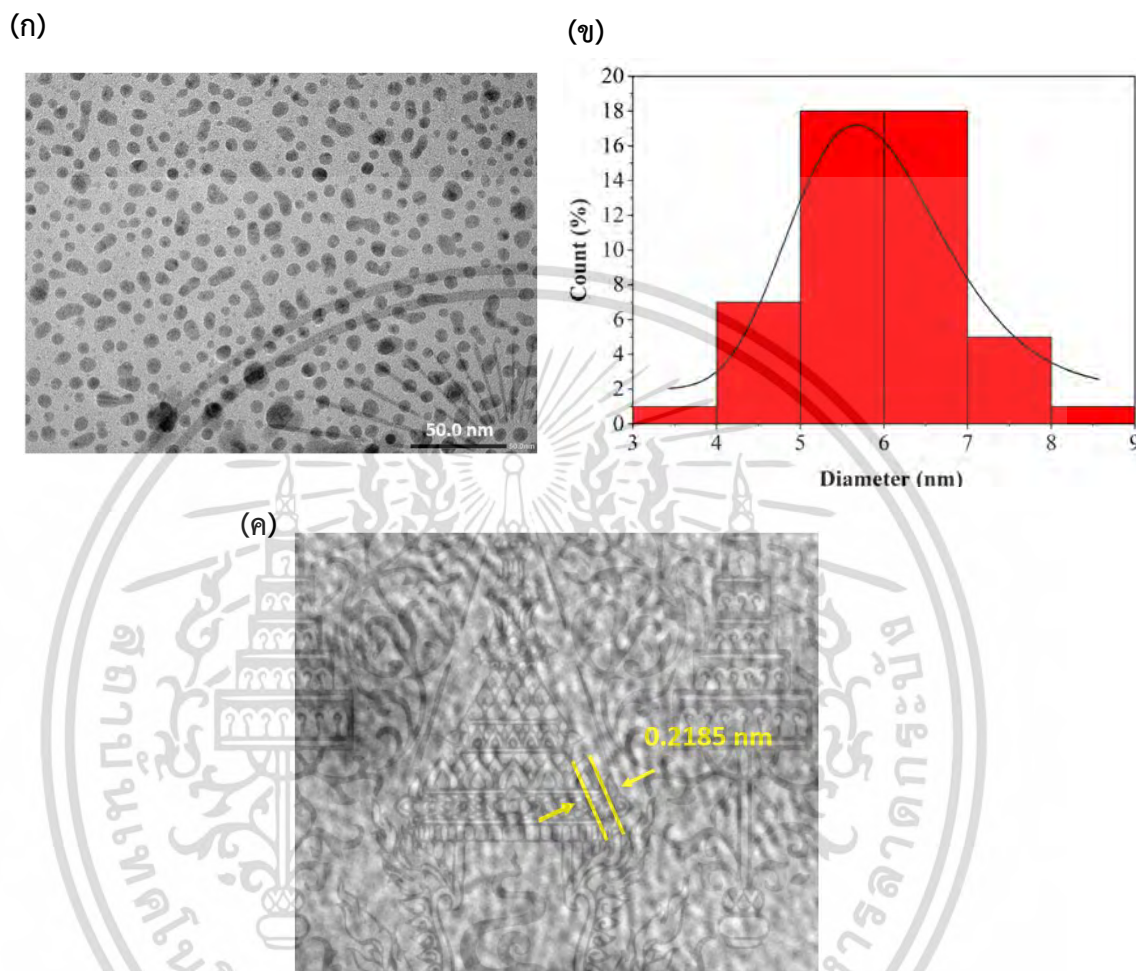
รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นและการเรืองแสงของ BCU/Ag-CDs (ก) Fluorescent spectra ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และ (ข) สารละลาย BCU/Ag-CDs ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ภายใต้แสงวิสิเบิล (UV light) และแสงยูวี (Visible light)

4.1.5 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและรูปร่างของคาร์บอนดอท

การศึกษาขนาดและรูปร่างของคาร์บอนดอทสามารถศึกษาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope : TEM) โดยนำตัวอย่างคาร์บอนดอท BCU/Ag-CDs ไปตรวจวิเคราะห์ จากการศึกษาพบว่า BCU/Ag-CDs มีรูปร่างค่อนข้างกลม กระจายตัวดีไม่เกาะเป็นกลุ่มก้อน แสดงดังรูปที่ 4.12 (ก) โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.9 ± 1 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.12 (ข) นอกจากนี้ความเป็นผลึกในแกนกลางของคาร์บอนดอทสามารถยืนยันได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง (High-resolution transmission electron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

microscopy : HRTEM) ซึ่งพบว่า interplanar spacing มีค่าเท่ากับ 0.22 นาโนเมตร สอดคล้องกับ ระนาบผลึก 100 ของแกรไฟต์ [115-116] แสดงดังรูปที่ 4.12 (ค) จึงสามารถสรุปได้ว่าแกนกลางของ คาร์บอนดอทมีความเป็นผลึก



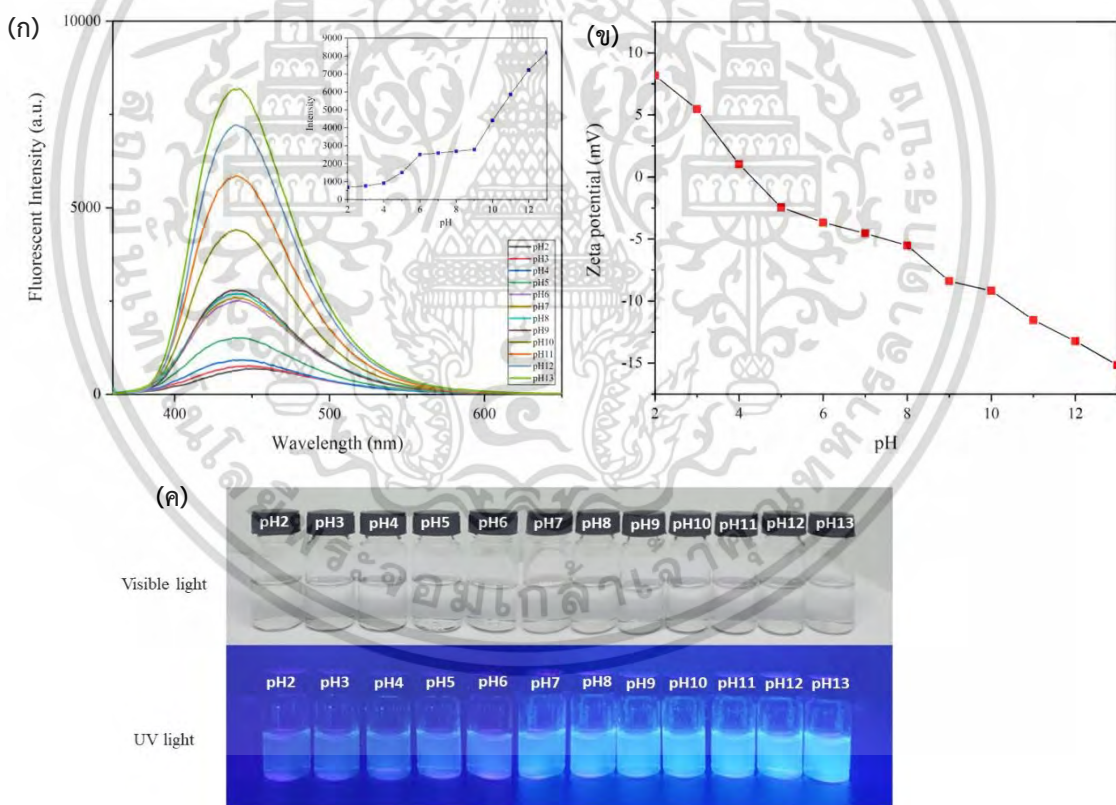
รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างอนุภาคของ BCU/Ag-CDs (ก) ภาพจากจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ข) กราฟแท่งแสดงขนาดอนุภาค และ (ค) จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านความละเอียดสูง แสดงระนาบของผลึกในแกนกลางคาร์บอนดอท

4.1.6 การตอบสนองต่อค่าพีเอชของคาร์บอนดอท

จากการศึกษาการตอบสนองต่อค่าพีเอชของ BCU/Ag-CDs ด้วยเทคนิค Fluorescent spectroscopy พบว่าคาร์บอนดอทมีความเข้มการเรืองแสงต่ำในสภาวะกรด และมีความเข้มการเรืองแสงสูงในสภาวะเบส เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลบนพื้นผิวของคาร์บอนดอทถูกโปรโตเนต (Protonate) ในสภาวะกรด ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของคาร์บอนดอทส่งผลให้การเรืองแสงลดลง [117] แสดงดังรูปที่ 4.13 (ก) การเกาะกลุ่มกันของคาร์บอนดอทในสภาวะกรดสามารถตั้งสมมติฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จาก zeta (ζ) potential จากรูปที่ 4.13 (ข) โดย zeta (ζ) potential เป็นการวัดประจุที่เกิดขึ้นในสารละลาย ซึ่งพบว่าในสภาวะกรดที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2 ประจุรวมในสารละลายมีค่าเป็นบวก (8.15) เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิล และหมู่เอมีโนบนพื้นผิวของคาร์บอนดอทถูกโปรโตเนตเกิดเป็นประจุบวก ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างคาร์บอนดอทแต่ละอนุภาคด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคคาร์บอนดอท นำไปสู่การเรืองแสงที่ลดลง เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจนถึง 13 ค่า zeta potential ลดลงเป็น -15.17 mV ซึ่งหมายความว่าหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอทเกิดดีโปรโตเนต (Deprotonate) ทำให้เกิดเป็นประจุลบส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคคาร์บอนดอท ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มน้อยลง ส่งผลให้การเรืองแสงมากขึ้น [118] จากภาพถ่ายสารละลาย BCU/Ag-CDs ที่ช่วงพีเอช 2-13 ซึ่งมีลักษณะเป็นสารละลายใสภายใต้แสงวิสิเบิล (Visible light) และสามารถเรืองแสงเป็นแสงสีฟ้าได้เมื่ออยู่ภายใต้แสงยูวี (UV light) พบว่ามีการเรืองแสงมากขึ้นในช่วงพีเอชที่เป็นเบส แสดงดังรูปที่ 4.13 (ค) สอดคล้องกับผลของค่าการเรืองแสงและค่า zeta (ζ) potential

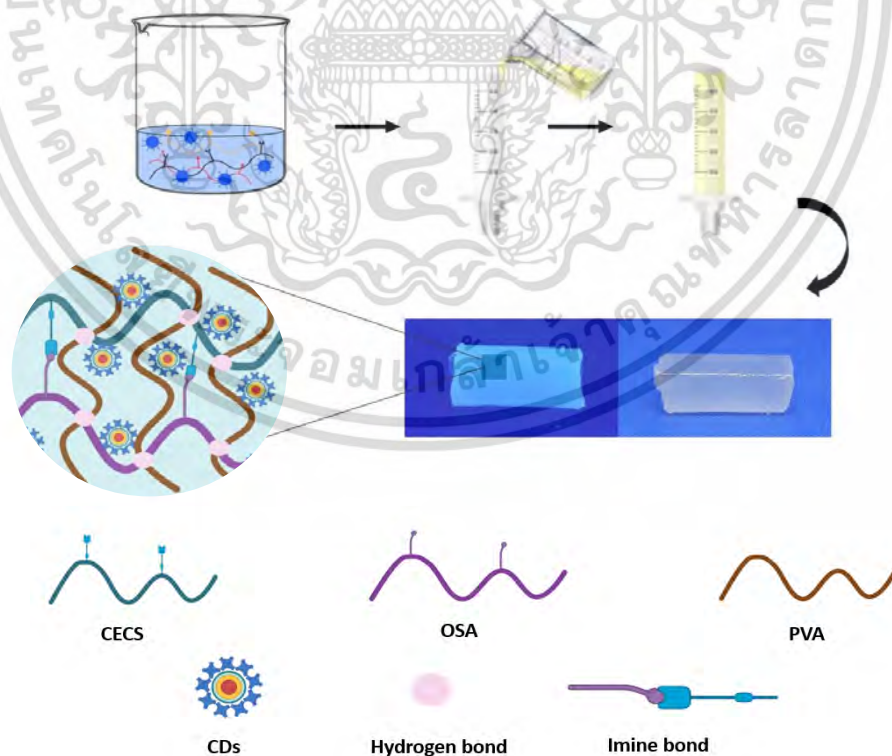


รูปที่ 4.13 การตอบสนองต่อค่าพีเอชของ BCU/Ag-CDs (ก) fluorescent spectra การเรืองแสงของ BCU/Ag-CDs ที่พีเอชต่างๆ (ข) กราฟแสดงค่า zeta potential ของ BCU/Ag-CDs ที่พีเอชต่างๆ และ (ค) สารละลาย BCU/Ag-CDs ที่พีเอชต่าง ๆ ภายใต้แสงวิสิเบิล (Visible light) และแสงยูวี (UV light)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเตรียมไฮโดรเจลเรืองแสง

ไฮโดรเจลเรืองแสงในงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการใช้คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน (CECS) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาตินำมาดัดแปรให้มีสมบัติการละลายน้ำในสภาวะที่ไม่ต้องมีกรด นำมาผสมกับคาร์บอนดอทซึ่งนอกจากใช้เป็นสารเรืองแสงแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยง เนื่องจากการมีหมู่ฟังก์ชัน เช่น $-NH_2$, $-C=O$ และ $-C-OH$ ที่สามารถสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจนกับ CECS โดยคาร์บอนดอทที่เลือกใช้ คือ BCU/Ag-CDs เนื่องจากเป็นคาร์บอนดอทที่มีผลผลิตควอนตัมมากที่สุด อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลที่เตรียมได้ยังไม่สามารถคงรูปได้ดี จึงปรับสูตรไฮโดรเจลโดยการเติมออกซิไดซ์อัลจินต (OSA) ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงทางชีวภาพด้วยพันธะอิมินผ่านปฏิกิริยาซิฟเบสระหว่างหมู่เอมีนของไคโตซานกับหมู่อัลดีไฮด์ของออกซิไดซ์อัลจินต ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ ทำให้ไฮโดรเจลสามารถคงรูปได้ดีมากยิ่งขึ้น และมีสมบัติการซ่อมแซมตนเองได้ นอกจากนี้ยังมีการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ลงไปในส่วนผสมเพื่อส่งเสริมการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโครงสร้างพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิดได้แก่ CECS, OSA และ PVA รวมถึงคาร์บอนดอท ซึ่งเป็นการเพิ่มความคงตัวให้กับระบบไฮโดรเจล การเตรียมไฮโดรเจลทำโดยเทสารผสมลงในกระบอกของหลอดฉีดยาเพื่อขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลเรืองแสง แผนภาพการเตรียมไฮโดรเจลแสดงดังรูปที่ 4.14

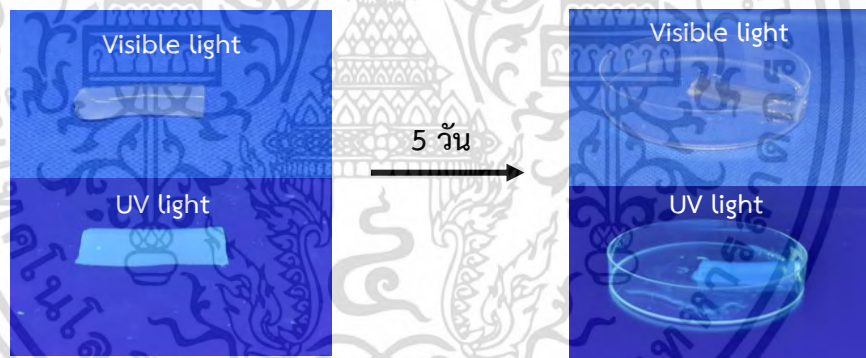


รูปที่ 4.14 แผนภาพการเตรียมไฮโดรเจลเรืองแสง

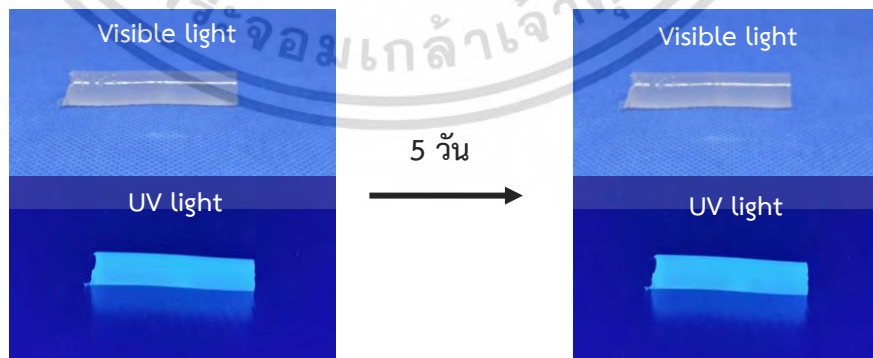
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ศึกษาโดยใช้ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มี PVA คือ CD1C2O0.5 เปรียบเทียบกับตัวอย่างไฮโดรเจลสูตรที่มี PVA คือ CD1P1C2O0.5 โดยจากการศึกษาพบว่า เมื่อขึ้นรูปและเก็บไฮโดรเจลไว้เป็นระยะเวลา 5 วัน ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มี PVA จะไม่สามารถคงตัวได้ กล่าวคือ เกิดการบวมออกของน้ำภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล แสดงดังรูปที่ 4.15 (ก) ในขณะที่ไฮโดรเจลสูตรที่มี PVA เป็นองค์ประกอบเมื่อระยะเวลาผ่านไป 5 วัน ไฮโดรเจลยังสามารถคงตัวได้ แสดงดังรูปที่ 4.15 (ข) จึงสามารถสรุปได้ว่าการมี PVA จะสามารถทำให้ไฮโดรเจลคงรูปได้นานกว่าไฮโดรเจลที่ไม่มี PVA เนื่องจาก PVA มีสมบัติดูดซับน้ำ และสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจนกับน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจลทำให้สามารถกักเก็บน้ำในโครงสร้างไว้ได้นาน นอกจากนี้ยังสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจน (H-bond) กับ CECS, OSA และคาร์บอนดอท ที่อยู่ในโครงสร้างของไฮโดรเจลได้ ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในไฮโดรเจลน้อย ดังนั้นน้ำในโครงสร้างของไฮโดรเจลจะแพร่ออกจากโครงสร้างได้น้อย จึงทำให้ไฮโดรเจลยังสามารถคงรูป และมีความชุ่มชื้นอยู่ได้เป็นระยะเวลานาน [119] แต่ทั้งนี้ความเข้มข้นของ PVA ไม่ควรมากเกินไป 4 %w/v เนื่องจากจะทำให้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้เหนียวจนเกินไป

(ก) CD1C2O0.5



(ข) CD1P1C2O0.5



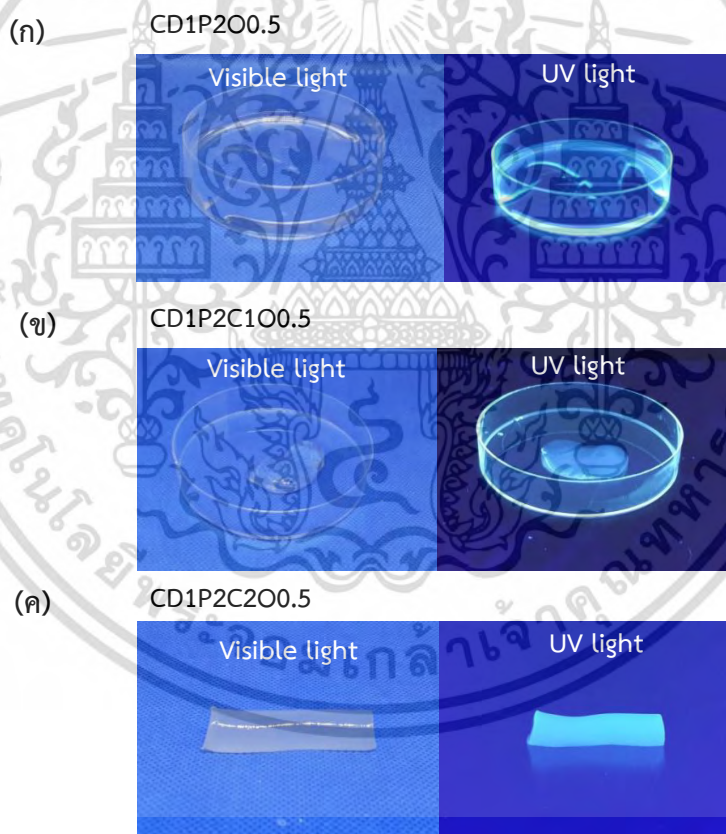
รูปที่ 4.15 การศึกษาความคงตัวของไฮโดรเจลเมื่อระยะเวลาผ่านไป 5 วัน (ก) ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มี

PVA (CD1C2O0.5) เป็นองค์ประกอบ และ (ข) ไฮโดรเจลสูตรที่มี PVA 1 %w/v

(CD1P1C2O0.5)

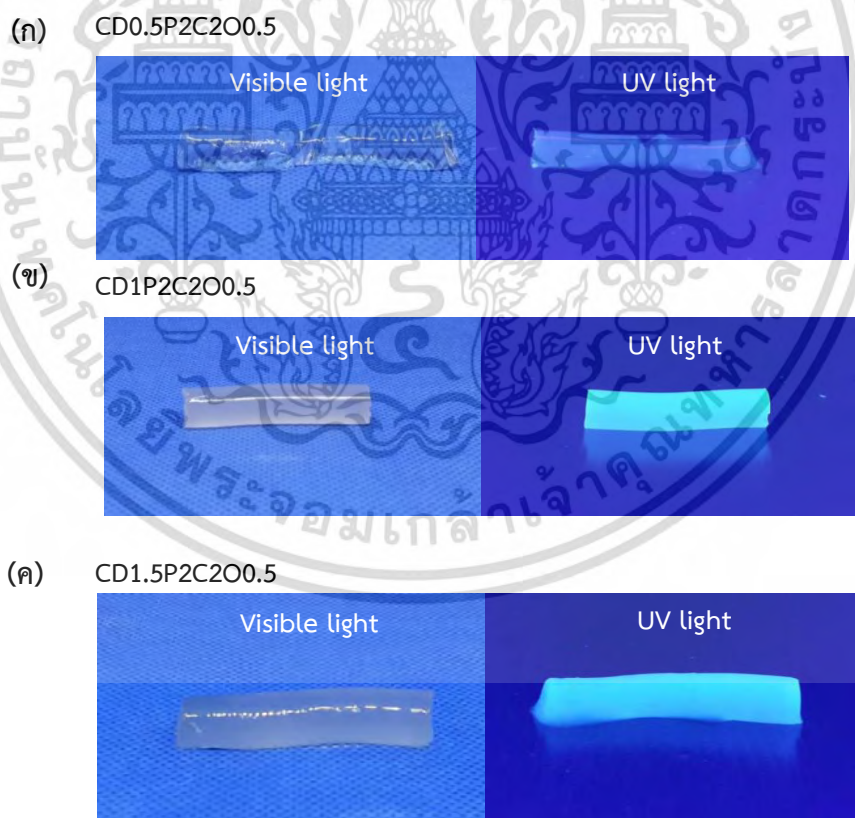
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจลสูตร CD1P2O0.5, CD1P2C1O0.5, CD1P2C2O0.5 ถูกนำมาศึกษาผลของคาร์บอกซีเอทิลโคโตซาน (CECS) ที่มีผลต่อการขึ้นรูปไฮโดรเจล พบว่า ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มี CECS เป็นองค์ประกอบจะไม่สามารถขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลได้ แสดงดังรูปที่ 4.16 (ก) เมื่อความเข้มข้นของ CECS เพิ่มขึ้นเป็น 1 %w/v จะสามารถเกิดเจลได้เล็กน้อยแต่ไม่สามารถคงรูปได้ แสดงดังรูปที่ 4.16 (ข) ทั้งนี้เมื่อความเข้มข้นของ CECS เพิ่มขึ้นเป็น 2 %w/v จะสามารถเกิดเป็นเจลได้ โดยได้เป็นไฮโดรเจลที่สามารถคงรูปได้ แสดงดังรูปที่ 4.16 (ค) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CECS เป็น 3 %w/v จะทำให้การเกิดเจลเร็วเกินไปจนไม่สามารถขึ้นรูปได้ทันในบางสูตร จึงสรุปได้ว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของ CECS ที่ใช้ต้องไม่น้อยกว่า 2 %w/v และไม่เกิน 3 %w/v เนื่องจากจะทำให้เวลาในการเกิดเจลเร็วเกินไป โดย CECS จะเกิดการเชื่อมโยงกับสารอื่น ๆ ในโครงสร้างของไฮโดรเจล ได้แก่ พันธะอิมินที่เกิดจากหมู่เอมีนบนโครงสร้างของโคโตซานเชื่อมโยงกับหมู่อัลดีไฮด์ของออกซีโดซ์อัลจิเนต และพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากการเชื่อมโยงระหว่าง CECS กับ PVA, OSA และคาร์บอนดอท



รูปที่ 4.16 ผลของ CECS กับการเกิดเจล (ก) ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มี CECS เป็นองค์ประกอบ (CD1P2O0.5) (ข) ไฮโดรเจลสูตรที่มี CECS 1 %w/v (CD1P2C1O0.5) และ (ค) ไฮโดรเจลสูตรที่มี CECS และ 2 %w/v (CD1P2C2O0.5)

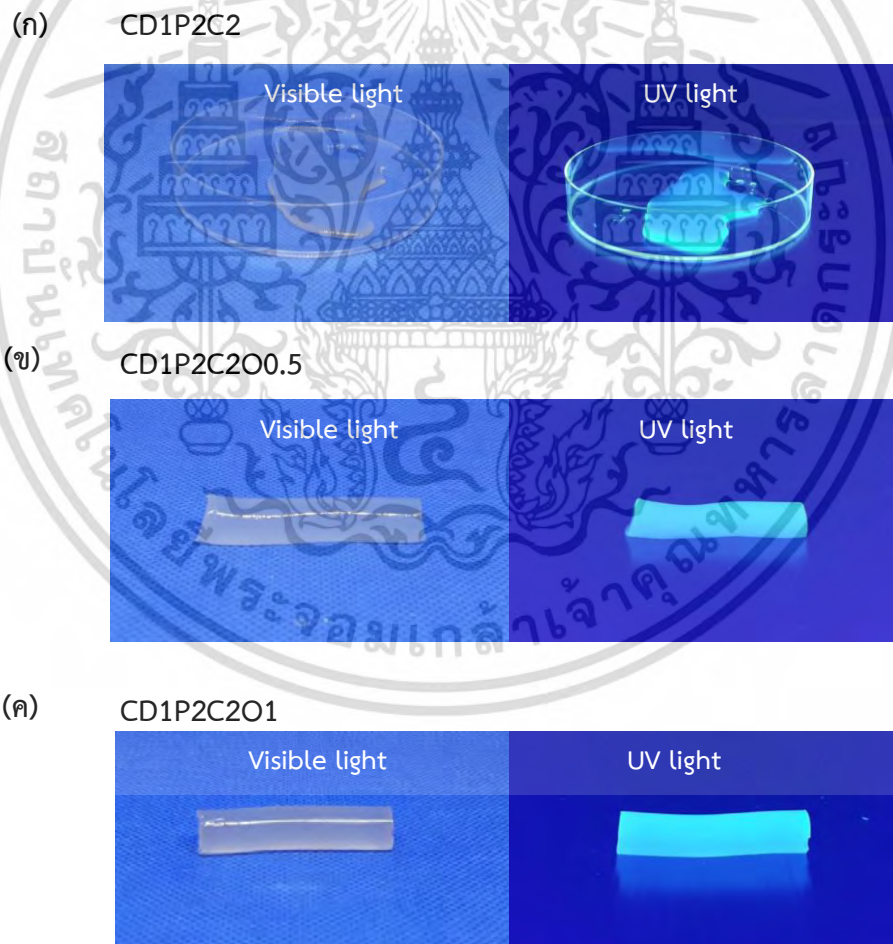
ไฮโดรเจลสูตร CD0.5P2C2O0.5, CD1P2C2O0.5 และ CD1.5P2C2O0.5 ถูกนำมาศึกษาผลของปริมาณคาร์บอนดอท (CDs) กับการขึ้นรูปไฮโดรเจล โดยจากการศึกษาพบว่าไฮโดรเจลที่มีคาร์บอนดอทเป็นองค์ประกอบจะสามารถเรืองแสงได้ และเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนดอทเพิ่มขึ้นไฮโดรเจลจะมีการเรืองแสงมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.17 (ก) และ (ข) แต่ทั้งนี้ถ้าความเข้มข้นของคาร์บอนดอทมากเกินไปจะสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลมาก ทำให้การผสมไม่ดี และไม่สามารถขึ้นรูปไฮโดรเจลได้ นอกจากนี้อาจทำให้เกิด การเกาะกลุ่มกันของคาร์บอนดอท (aggregation) ในไฮโดรเจลส่งผลให้การเปล่งแสงของไฮโดรเจลลดลง [120] แสดงดังรูปที่ 4.17 (ค) จึงสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของคาร์บอนดอทที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมไฮโดรเจลเรืองแสงสูงสุดอยู่ที่ 1 %w/v ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สามารถเห็นการเปล่งแสงของไฮโดรเจลได้ชัดเจนที่สุด และ นอกจากการใช้คาร์บอนดอทเป็นสารเรืองแสงในไฮโดรเจลแล้ว คาร์บอนดอทยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงได้อีกด้วย โดยหมู่ฟังก์ชันบริเวณพื้นผิวของคาร์บอนดอท เช่น หมู่คาร์บอกซิล (-COOH) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน กับ OSA, PVA และ CECS ได้ ส่งผลให้ไฮโดรเจลที่มีคาร์บอนดอทเป็นองค์ประกอบมีความแข็งแรงมากขึ้นและมีระยะเวลาในการเกิดเจลสั้นลง



รูปที่ 4.17 ผลของคาร์บอนดอทและการเกิดเจล (ก) ไฮโดรเจลสูตร CD0.5P2C2O0.5 (ข) ไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2O0.5 และ (ค) ไฮโดรเจลสูตร CD1.5P2C2O0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนต (OSA) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงทางชีวภาพ เพื่อให้ไฮโดรเจลสามารถคงรูปได้ดีมากยิ่งขึ้น โดย OSA สามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะอิมินผ่านปฏิกิริยา Schiff base กับ CECS ได้ นอกจากนี้ยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับ PVA, CECS และคาร์บอนดอทได้อีกด้วย จากการขึ้นรูปไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2, CD1P2C2O0.5 และ CD1P2C2O1.5 พบว่าไฮโดรเจลที่ไม่มี OSA เป็นองค์ประกอบจะไม่สามารถคงรูปได้ แสดงดังรูปที่ 4.18 (ก) เมื่อความเข้มข้นของ OSA มากขึ้นไฮโดรเจลจะสามารถคงรูปได้ และมีความแข็งแรงของไฮโดรเจลมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.18 (ข) และ (ค) จึงสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นต่ำสุดของ OSA ที่ใช้คือ 0.5 %w/v เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่ทำให้ไฮโดรเจลคงรูปได้ไม่น้อยจนเกินไป แต่ทั้งนี้ความเข้มข้นสูงสุดจะไม่เกิน 1 %w/v เนื่องจากถ้าความเข้มข้นสูงเกินไป จะทำให้เกิดเจลเร็วส่งผลให้การผสมไม่ดี เนื่องจากมีระยะเวลาการผสมก่อนเกิดเจลสั้น และไม่สามารถเทลงในแม่แบบ (กระบอกฉีดยา) เพื่อขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลได้ในบางสูตร



รูปที่ 4.18 ผลของ OSA กับการเกิดเจล (ก) ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มี OSA เป็นองค์ประกอบ (CD1P2C2)

(ข) สูตรที่มี OSA 0.5 %w/v (CD1P2C2O0.5) และ (ค) สูตรที่มี OSA 1 %w/v

(CD1P2C2O1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าสารทุกชนิด ได้แก่ คาร์บอนดอท, CECS, OSA และ PVA มีผลต่อการเตรียมเป็นไฮโดรเจลเรืองแสงทั้งสิ้น จึงสรุปสูตรไฮโดรเจลที่สามารถเตรียม และขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปสูตรไฮโดรเจลเรืองแสง

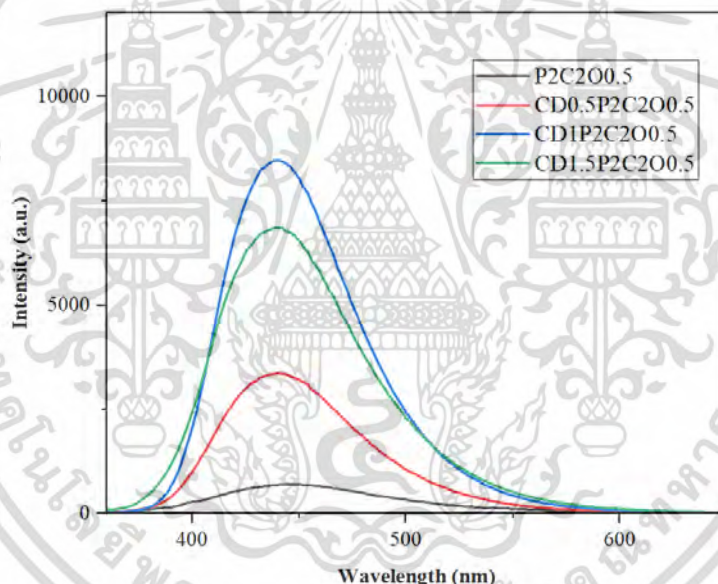
ลำดับที่	ชื่อสูตร	ความเข้มข้นสุดท้าย (%w/v) ของสารต่าง ๆ ในสารละลาย 10 มิลลิลิตร			ความเข้มข้นออกซิไดซ์อัลจินेट (%w/v) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
		CDs	PVA	CECS	
1	CD1P4C2O0.5	1	4	2	0.5
2	CD1P3C2O0.5	1	3	2	0.5
3	CD1P3C2O1				1
4	CD1P2C2O0.5	1	2	2	0.5
5	CD1P2C2O1				1
6	CD1P1C2O0.5	1	1	2	0.5
7	CD1P1C2O1				1
8	CD1P1C3O0.5	1	1	3	0.5
9	CD1P1C3O1				1

หมายเหตุ : CD = คาร์บอนดอท, P = PVA, C = CECS, O = OSA

จากตารางที่ 4.2 ไฮโดรเจลทั้ง 9 สูตร เป็นไฮโดรเจลที่สามารถขึ้นรูปได้ แต่ทั้งนี้ไฮโดรเจลสูตร CD1P4C2O0.5, CD1P3C2O0.5, CD1P3C2O1 และ CD1P2C2O1 เป็นไฮโดรเจลสูตรที่เกิดการเชื่อมโยงเป็นเจลเร็วการทดลองในหลอดฉีดยาเพื่อขึ้นรูปจึงทำได้ยาก และในส่วนของ CD1P1C2O0.5, CD1P1C2O1, CD1P1C3O0.5 และ CD1P1C3O1 สามารถขึ้นรูปได้ง่าย แต่เมื่อขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลแล้ว ลักษณะไฮโดรเจลที่ได้มีลักษณะที่นิ่มจนเกินไป ทำให้การนำไฮโดรเจลออกจากหลอดฉีดยาเนื่องจากไฮโดรเจลคงรูปได้ไม่ดี ดังนั้น CD1P2C2O0.5 จึงเป็นสูตรไฮโดรเจลที่มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นสูตรที่สามารถผสมได้ดี ขึ้นรูปได้ง่าย และมีความนิ่มที่เหมาะสมสามารถคงรูปได้เมื่อนำออกจากหลอดฉีดยา

4.2.1 การศึกษาสมบัติการเรืองแสงของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณคาร์บอนดอทไม่เท่ากัน ได้แก่ สูตร P2C2O0.5, CD0.5P2C2O0.5, CD1P2C2O0.5 และ CD1.5P2C2O0.5 ถูกเลือกเพื่อนำมาศึกษาสมบัติการเรืองแสงของไฮโดรเจล โดยใช้เทคนิค Fluorescent spectroscopy พบว่าไฮโดรเจลที่มีคาร์บอนดอทในโครงสร้างจะสามารถเรืองแสงได้ และเมื่อมีปริมาณคาร์บอนดอทมากขึ้นความเข้มในการเรืองแสงจะมากขึ้นด้วย แต่ทั้งนี้ถ้าปริมาณคาร์บอนดอทมากเกินไปจะทำให้ความเข้มในการเรืองแสงของไฮโดรเจลลดลง เนื่องจากการมีคาร์บอนดอทปริมาณมากทำให้เกิดการเชื่อมโยงเร็วส่งผลให้การผสมไฮโดรเจลไม่ดี เกิดการเกาะกลุ่มกันของคาร์บอนดอท เมื่อคาร์บอนดอทอยู่ใกล้กันจะทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอน ในระดับพลังงานของคาร์บอนดอทด้วยตัวเอง และเกิดการดูดซับพลังงานที่ปลดปล่อยออกมา ทำให้ความเข้มในการเรืองแสงลดลง [121] จากผลการทดสอบพบว่า ไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2O0.5 มีความเข้มแสงมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 Fluorescent spectra ของไฮโดรเจลสูตร P2C2O0.5, CD0.5P2C2O0.5, CD1P2C2O0.5 และ CD1.5P2C2O0.5

4.2.2 การศึกษาสมบัติการเป็นสารเชื่อมโยงของคาร์บอนดอท

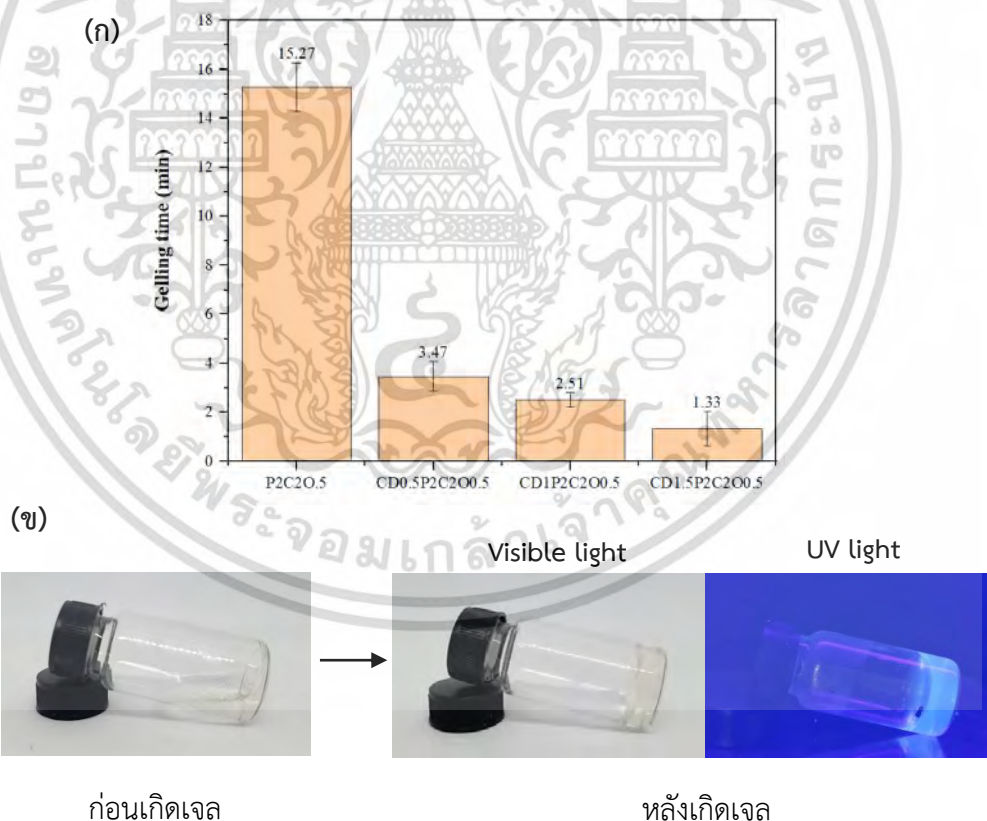
ไฮโดรเจลสูตร P2C2O0.5, CD0.5P2C2O0.5, CD1P2C2O0.5 และ CD1.5P2C2O0.5 ถูกเลือกเพื่อนำมาศึกษาสมบัติการเป็นสารเชื่อมโยงของคาร์บอนดอท โดยจากการศึกษาพบว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณคาร์บอนดอทมากจะมีระยะเวลาการเกิดเจลน้อย เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันบริเวณพื้นผิวของคาร์บอนดอทสามารถเชื่อมโยงกับสารอื่น ๆ ได้ ดังนั้นเมื่อปริมาณคาร์บอนดอทมากขึ้น ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณหมู่ฟังก์ชันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงมาก ระยะเวลาในการเกิดเจลสั้นลง แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาการเกิดเจลของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ลำดับที่	ชื่อสูตร	ความเข้มข้นสุดท้าย (%w/v) ของสารต่าง ๆ ในสารละลาย 10 มิลลิลิตร			ความเข้มข้น ออกซิไดซ์อัลจินเต (%w/v) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร	ระยะเวลาการเกิดเจล (นาที)
		CDs	PVA	CECS		
1	P2C2O0.5	-	2	2	1	15.27
2	CD0.5P2C2O0.5	0.5	2	2	1	3.47
3	CD1P2C2O0.5	1	2	2	1	2.51
4	CD1.5P2C2O0.5	1.5	2	2	1	1.33



รูปที่ 4.20 การเกิดเจลของไฮโดรเจลเรืองแสงสูตรต่าง ๆ (ก) กราฟแท่งแสดงระยะเวลาการเกิดเจลของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ และ (ข) ตัวอย่างการทดลองการเกิดเจลของไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2O0.5

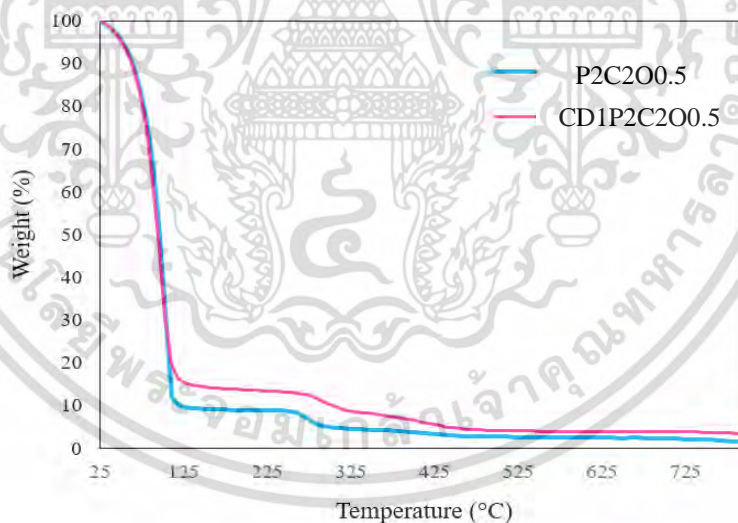
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจล [122-123]

สมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับปัจจัย ได้แก่ องค์ประกอบของไฮโดรเจล ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในโครงสร้าง เป็นต้น ไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ ถูกนำมาศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจล ดังนี้

4.2.3.1 คาร์บอนดอทกับสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจล

P2CE2O0.5 และ CD1P2C2O0.5 ถูกเลือกนำมาทดสอบสมบัติทางความร้อนเนื่องจากผลของคาร์บอนดอท เมื่อพิจารณารูปกราฟพบว่าไฮโดรเจลทั้ง 2 สูตร มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกเหมือนกัน (25-200 °C) ซึ่งเป็นการสูญเสียน้ำในโครงสร้างของไฮโดรเจล แต่แตกต่างกันในช่วงที่ 2 (200-500 °C) ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดจากการเสถียรภาพโดยการหลุดออกของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ โดยไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2O0.5 ซึ่งเป็นสูตรที่มีคาร์บอนดอทเป็นองค์ประกอบจะมีช่วงอุณหภูมิสูงกว่า P2C2O0.5 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่ไม่มีคาร์บอนดอทเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากการเชื่อมโยงของคาร์บอนดอททำให้ไฮโดรเจลมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นจึงเกิดการเสถียรภาพโดยการหลุดออกของหมู่ฟังก์ชันที่อุณหภูมิสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.21

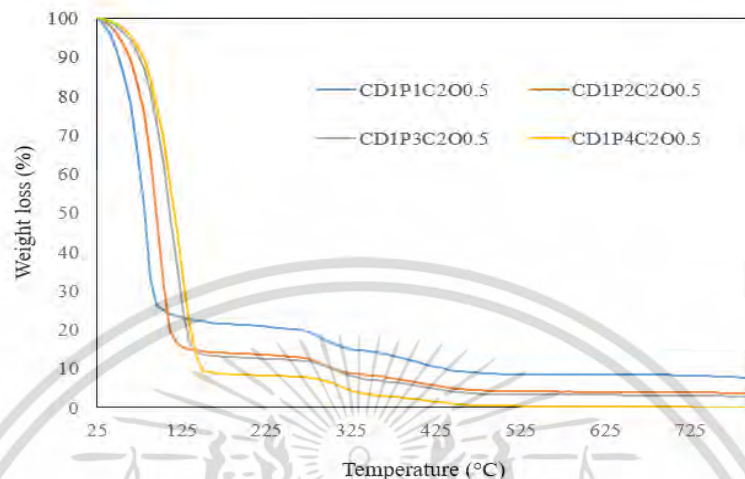


รูปที่ 4.21 TGA thermogram ของไฮโดรเจลสูตร P2C2O0.5 และ CD1P2C2O0.5

4.2.3.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจล

CD1P4C2O0.5, CD1P3C2O0.5, CD1P2C2O0.5 และ CD1P1C2O0.5 ถูกเลือกนำมาทดสอบสมบัติทางความร้อนเนื่องจากผลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เมื่อพิจารณารูปกราฟในรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไฮโดรเจลจะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

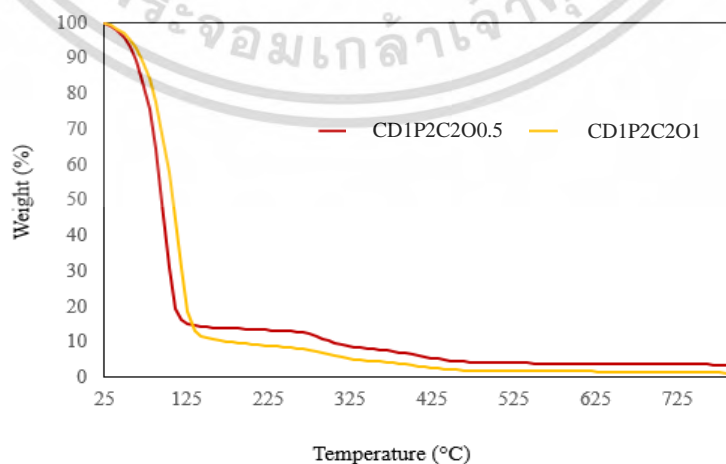
ช่วงแรก (25-200 °C) และช่วงที่ 2 (200-500 °C) แตกต่างกัน โดยไฮโดรเจลที่มีปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาก (CD1P4C2O0.5) จะมีการสูญเสียน้ำในโครงสร้าง และการหลุดออกของหมู่ฟังก์ชันที่อุณหภูมิสูงกว่า เนื่องมาจากเกิดการเชื่อมโยงภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลมากกว่าสูตรอื่น ๆ



รูปที่ 4.22 TGA thermogram ของไฮโดรเจลสูตร CD1P4C2O0.5, CD1P3C2O0.5, CD1P2C2O0.5 และ CD1P1C2O0.5

4.2.3.3 ออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนตกับสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจล

CD1P2C2O1 และ CD1P2C2O0.5 ถูกเลือกนำมาทดสอบสมบัติทางความร้อน เนื่องจากผลของออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนต เมื่อพิจารณากราฟในรูปที่ 4.23 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ OSA ไฮโดรเจลจะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 2 (200-500 °C) ที่แตกต่างกัน โดยไฮโดรเจลที่มีความเข้มข้นของออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนตมาก จะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงกว่า เนื่องมาจากการเกิดการเชื่อมโยงในโครงสร้างไฮโดรเจลที่มากกว่า

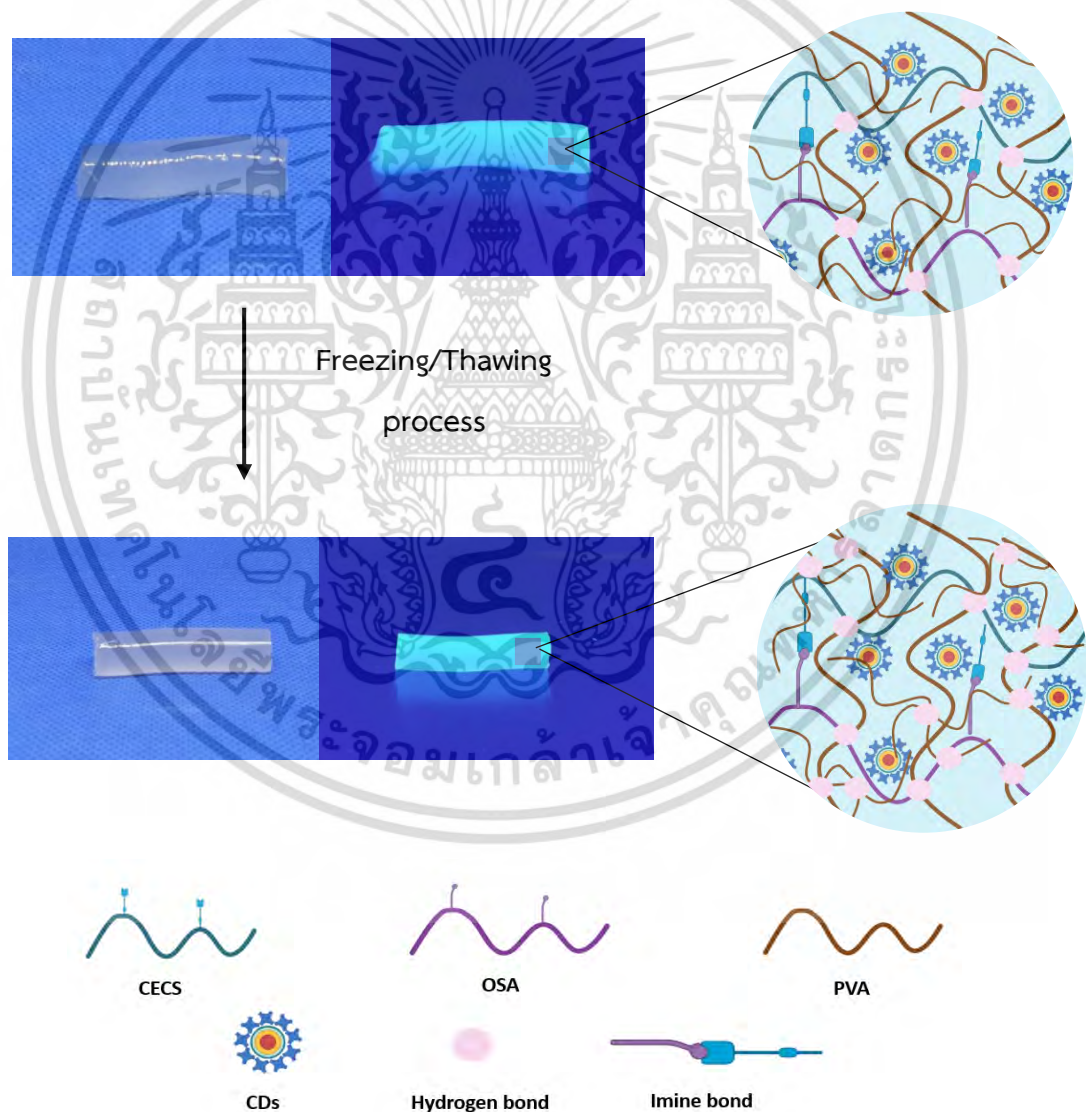


รูปที่ 4.23 TGA thermogram ของไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2O0.5 และ CD1P2C2O1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 การเพิ่มความแข็งแรงให้กับไฮโดรเจล

การเพิ่มความแข็งแรงให้กับไฮโดรเจลนอกจากจะใช้สารเชื่อมโยง (Chemical crosslink) แล้ว ยังสามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยกระบวนการ Freezing/Thawing เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslink) ได้อีกด้วย ดังนั้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับไฮโดรเจลมากขึ้น ไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2O0.5 ถูกนำมาออกแบบให้มีการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น โดยขั้นตอนแรก CD1P2C2O0.5 จะถูกเชื่อมโยงโดยใช้คาร์บอนดอท และออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนตเป็นสารเชื่อมโยงทางเคมี จากนั้นไฮโดรเจลจะถูกนำมาผ่านกระบวนการทำให้แข็งและปล่อยให้ละลาย (Freezing/Thawing) จำนวนหลาย ๆ ครั้ง เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางกายภาพ โดยการเกิดผลึกของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทำให้เกิดเป็นจุดเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีความแข็งแรงมากขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แผนภาพการเพิ่มความแข็งแรงให้กับไฮโดรเจลด้วยกระบวนการ Freezing/Thawing

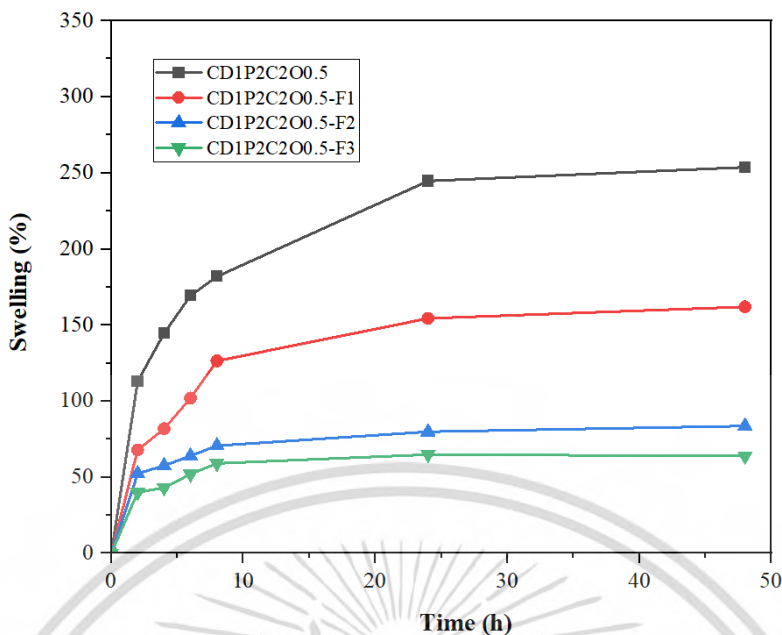
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 การศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว (Swelling test)

พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลเป็นสมบัติสำคัญของไฮโดรเจลที่ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น การปลดปล่อยยา วิศวกรรมเนื้อเยื่อ เป็นต้น โดยการบวมตัวของไฮโดรเจลคือการที่ไฮโดรเจลดูดซับและกักเก็บน้ำหรือสารละลายอื่น ๆ เข้าไปในรูพรุนภายในโครงสร้าง ในขณะที่ยังคงรักษาโครงสร้างสามมิติไว้ได้ ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรเจล [124]

4.2.5.1 จำนวนรอบกระบวนการ Freezing/Thawing และพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2O0.5 ถูกนำไปเพิ่มความแข็งแรงโดยให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลด้วยกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 3 รอบ ได้แก่ CD1P2C2O0.5-F1 (1 รอบ), CD1P2C2O0.5-F2 (2 รอบ) และ CD1P2C2O0.5-F3 (3 รอบ) จากนั้นนำมาศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เพื่อจำลองระบบของเหลวในร่างกายมนุษย์ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยจากการศึกษาพบว่าไฮโดรเจลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing (CD1P2C2O0.5) จะมีการบวมตัวมากเนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) ที่ไม่ได้ถูกเชื่อมโยงในโครงสร้างของไฮโดรเจลมาก จึงสามารถดูดซับสารละลายเข้าไปในโครงสร้างได้ดี ส่งผลให้ไฮโดรเจลเกิดการบวมตัว และเมื่อจำนวนรอบในการ Freezing/Thawing มากขึ้นจะส่งผลให้พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลลดลง แสดงดังรูปที่ 4.25 เนื่องจากเมื่อมีการ Freezing/Thawing มากขึ้น PVA จะมีความเป็นผลึกมากขึ้น สามารถสังเกตได้จากไฮโดรเจลมีลักษณะขุ่นขึ้นเมื่อจำนวนครั้งในการ Freezing/Thawing มากขึ้น โดยผลึกที่เกิดขึ้นมาจากการเชื่อมโยงของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ด้วยพันธะไฮโดรเจน บนโครงสร้างของ PVA เกิดการก่อตัวเป็นผลึกซึ่งทำหน้าที่เป็นเหมือนเงื่อนที่เชื่อมสายโซ่พอลิเมอร์ไว้ด้วยกันในโครงสร้างของไฮโดรเจล (Physical crosslink) ส่งผลให้สารละลายภายนอกไม่สามารถทำลายผลึกที่เกิดขึ้นได้ ไฮโดรเจลจึงมีพฤติกรรมการบวมตัวลดลง [87]



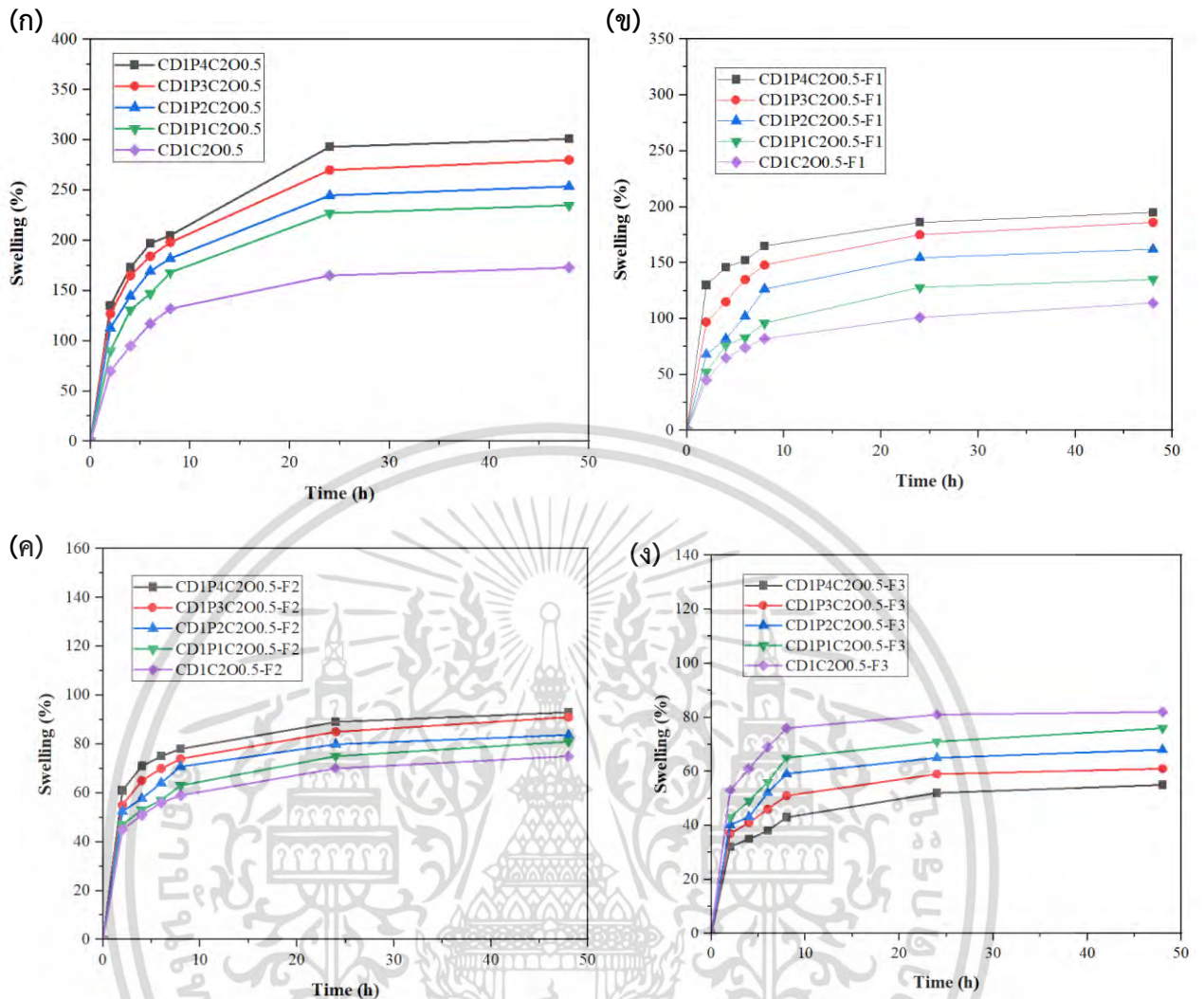
รูปที่ 4.25 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตร CD1P2C2O0.5-F1, CD1P2C2O0.5-F2 และ CD1P2C2O0.5-F3 ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

4.2.5.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจล

จากการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ ได้แก่ ไฮโดรเจลสูตรที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing ได้แก่ CD1P4C2O0.5, CD1P3C2O0.5, CD1P2C2O0.5, CD1P1C2O0.5 และ CD1C2O0.5 ไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 1 รอบ ได้แก่ CD1P4C2O0.5-F1, CD1P3C2O0.5-F1, CD1P2C2O0.5-F1, CD1P1C2O0.5-F1 และ CD1C2O0.5-F1 ไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 2 รอบ ได้แก่ CD1P4C2O0.5-F2, CD1P3C2O0.5-F2, CD1P2C2O0.5-F2, CD1P1C2O0.5-F2 และ CD1C2O0.5-F2 และไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 3 รอบ ได้แก่ CD1P4C2O0.5-F3, CD1P3C2O0.5-F3, CD1P2C2O0.5-F3, CD1P1C2O0.5-F3 และ CD1C2O0.5-F3 ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยจากการศึกษาพบว่าไฮโดรเจลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing ไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 1 รอบ และไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 2 รอบ มีพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เป็นไปในแนวโน้มเดียวกันกล่าวคือ ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มี PVA เป็นองค์ประกอบจะเกิดการบวมตัวน้อยที่สุด เนื่องจาก PVA มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เมื่อไฮโดรเจลไม่มี PVA เป็นองค์ประกอบ ความหนาแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลจึงลดลง ไฮโดรเจลจึงดูดซับสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าไปได้น้อยส่งผลให้การบวมตัวของไฮโดรเจลต่ำกว่าสูตรที่มี PVA แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PVA จาก 1-3 %w/v พบว่า ไฮโดรเจลสูตรที่มีความเข้มข้นของ PVA มากจะเกิดการบวมตัวมาก เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่ไม่ได้ถูกเชื่อมโยงระหว่างกันด้วยพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของไฮโดรเจลจำนวนมาก ทำให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับสารละลายได้ดี ส่งผลให้เกิดการบวมตัวมาก แสดงดังรูปที่ 4.26 (ก)-(ค) แต่เมื่อเพิ่มกระบวนการ Freezing/Thawing มากขึ้น พบว่า ไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 3 รอบ มีแนวโน้มที่แตกต่างออกไป กล่าวคือ ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มี PVA เป็นองค์ประกอบจะมีการบวมตัวมาก ในขณะที่ไฮโดรเจลสูตรที่มี PVA เป็นองค์ประกอบจะมีการบวมตัวน้อย โดยที่ไฮโดรเจลที่มีความเข้มข้นของ PVA มากจะมีการบวมตัวน้อยที่สุด เนื่องมาจากกระบวนการ Freezing/Thawing ที่มากขึ้นทำให้ PVA มีความเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งการเกิดผลึกของ PVA สามารถอธิบายกลไกจากกระบวนการ Freezing/Thawing คือ ในระหว่างขั้นตอน Freezing น้ำในโครงสร้างของไฮโดรเจลจะเปลี่ยนเป็นผลึกน้ำแข็ง และดันสายโซ่ PVA ให้ห่างออกจากกัน ในระหว่างนี้หมู่ไฮดรอกซิลอิสระของ PVA จะสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีผลให้บางส่วนของสายโซ่โมเลกุลเข้ามาใกล้กันและเกิดการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ เกิดเป็นผลึกขึ้น ซึ่งเป็นจุดเชื่อมโยงทางกายภาพของไฮโดรเจล เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนของการ Thawing ผลึกน้ำแข็งเกิดการละลายออกทำให้โครงสร้างภายในไฮโดรเจลมีลักษณะเป็นรูพรุน โดยขนาดของผลึกจะใหญ่ขึ้นเมื่อจำนวนครั้งในการ Freezing/Thawing มากขึ้น เมื่อผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น สารละลายภายนอกจะไม่สามารถทำลายผลึกได้ ส่งผลให้สารละลายภายนอกไม่สามารถเข้าสู่โครงสร้างของไฮโดรเจลได้ส่งผลให้พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลลดลง [125-126] ผลแสดงดังรูปที่ 4.26 (ง)

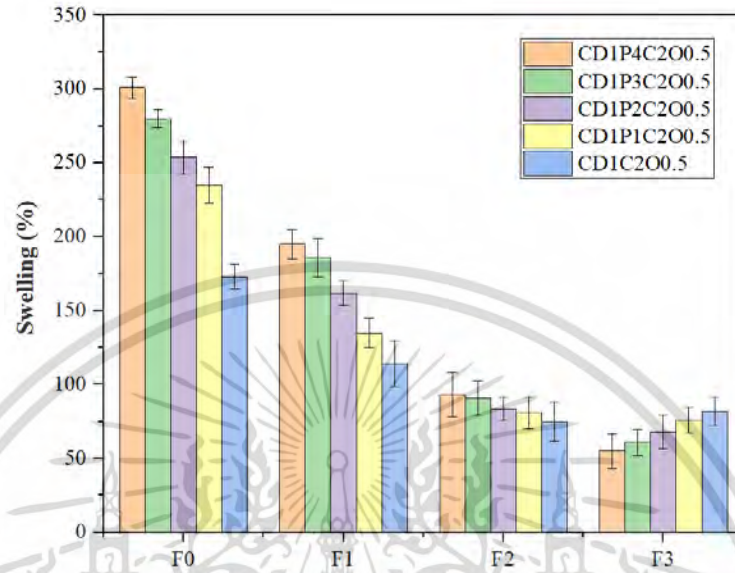


รูปที่ 4.26 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ก) ไฮโดรเจลสูตรที่ไม่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing (ข) ไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 1 รอบ (ค) ไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 2 รอบ และ (ง) ไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing จำนวน 3 รอบ

จากการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลสามารถสรุปได้ว่าจำนวนรอบของกระบวนการ Freezing/Thawing และปริมาณของ PVA มีผลต่อพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจล ยิ่งมีปริมาณของ PVA มาก ไฮโดรเจลจะเกิดการบวมตัวมากเนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่ไม่ได้เชื่อมโยงในโครงสร้างมาก ส่งผลให้สามารถดูดซับสารละลายได้ดี แต่ทั้งนี้แม้ไฮโดรเจลจะมีความปริมาณของ PVA มาก แต่เมื่อผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing หลายครั้ง จะทำให้พฤติกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบวมตัวลดลง เนื่องจากการเกิดผลึกของ PVA ในโครงสร้างของไฮโดรเจลซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมโยงทางกายภาพระหว่างสายโซ่ของ PVA ส่งผลให้ไฮโดรเจลดูดซับสารละลายได้น้อยการบวมตัวจึงลดลง แสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ ที่เวลา 48 ชั่วโมง ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาไฮโดรเจลเรืองแสงจากคาร์บอนดอท, คาร์บอนซีโอทีลโคโตซาน, พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และออกซิไดส์อัลจินต เพื่อเตรียมเป็นไฮโดรเจลสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ใน งานทางการแพทย์ โดยเริ่มจากการสังเคราะห์คาร์บอนดอทเพื่อใช้เป็นสารเรืองแสง และสารเชื่อมโยง ในไฮโดรเจล คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope : TEM) เพื่อศึกษารูปร่าง ขนาด และการกระจายตัว หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนดอทถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) และ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) สมบัติทางแสงวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy และสมบัติการเรืองแสงวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fluorescent spectroscopy นอกจากนี้ยังศึกษาการตอบสนองต่อค่าพีเอชของคาร์บอนดอทจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นการเรืองแสงในสภาวะกรดและเบส จากนั้น คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลเรืองแสง ซึ่งนอกจาก คาร์บอนดอทจะทำหน้าที่เป็นสารเรืองแสงในไฮโดรเจลแล้ว ยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงใน ไฮโดรเจลได้อีกด้วย โดยไฮโดรเจลที่เตรียมได้จะถูกนำไปวิเคราะห์สมบัติการเรืองแสงด้วยเทคนิค Fluorescent spectroscopy สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ระยะเวลาการเกิดเจล และพฤติกรรมการบวมตัว

การสังเคราะห์คาร์บอนดอท

จากการสังเคราะห์คาร์บอนดอทชนิดต่าง ๆ ได้แก่ CU-CDs, BCU-CDs, CU/Ag-CDs และ BCU/Ag-CDs พบว่า เวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คาร์บอนดอทด้วยวิธีการแบบไมโครเวฟให้มีความเข้มข้นการเรืองแสงมากที่สุด คือ 3 นาที โดยคาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ทุกชนิดมีลักษณะเป็น สารละลายใสภายใต้แสงวิสิเบิล และเรืองแสงเป็นสีฟ้าภายใต้แสงยูวี

คาร์บอนดอทที่สังเคราะห์ได้ทุกชนิดมีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิกสามารถละลายน้ำได้ดี เนื่องจาก มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เช่น หมู่ -OH และ -COOH บนพื้นผิวของคาร์บอนดอท

คาร์บอนดอททุกชนิดมีสมบัติทางแสงที่เป็นเอกลักษณ์ 2 ช่วง ได้แก่ ในช่วง 225-230 และ ช่วง 335-340 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการดูดกลืนพลังงานเพื่อใช้ในการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\pi \rightarrow \pi^*$ ในพันธะ $-C=C$ และการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $n \rightarrow \pi^*$ ในพันธะ $-C=O$, $-C-N$ และ $-C-OH$ ตามลำดับ

คาร์บอนดอทแต่ละชนิดมีความยาวคลื่นในการกระตุ้นที่เหมาะสมแตกต่างกัน และมีความเข้มในการเรืองแสงที่ต่างกันด้วย เมื่อกระตุ้นคาร์บอนดอทด้วยความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับคาร์บอนดอทแต่ละประเภทพบว่า คาร์บอนดอทที่มีทั้งโบรอน ไนโตรเจน และซิลเวอร์เป็นองค์ประกอบ (BCU/Ag-CDs) จะมีความเข้มในการเรืองแสง และค่า Quantum yield มากที่สุด (26%)

BCU/Ag-CDs มีรูปร่างค่อนข้างกลมกระจายตัวดีไม่เกาะเป็นกลุ่มก้อน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.9 ± 1 นาโนเมตร และมี interplanar spacing มีค่าเท่ากับ 0.22 นาโนเมตร สอดคล้องกับระนาบผลึก 100 ของแกรไฟต์

ความเข้มในการเรืองแสงของ BCU/Ag-CDs ขึ้นกับปริมาณของคาร์บอนดอทในสารละลาย โดยถ้าปริมาณของคาร์บอนดอทในสารละลายมากการเรืองแสงจะมากตามด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มการเรืองแสงของ BCU/Ag-CDs ในสภาวะกรดเบส ทำให้ BCU/Ag-CDs สามารถใช้เป็นตัวตอบสนองต่อค่าพีเอชได้ โดยคาร์บอนดอทที่มีความเข้มการเรืองแสงมากในสภาวะเบส และมีความเข้มการเรืองแสงน้อยในสภาวะกรด

การเตรียมไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสูตรที่สามารถเตรียม และขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลได้ดี คือสูตร CD1P2C2O0.5 ซึ่งเป็นสูตรที่ทำให้เกิดการผสมได้ดี และเนื้อไฮโดรเจลไม่นิ่มจนเกินไป จึงถูกเลือกเพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

ไฮโดรเจลสูตร CD1.5P2C2O0.5 มีระยะเวลาการเกิดเจลสั้นที่สุด แต่ไม่เหมาะสำหรับการเตรียมไฮโดรเจลเนื่องจากระยะเวลาการเกิดเจลสั้น ทำให้การผสมไม่ดี และไม่สามารถขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลได้ทันที

ไฮโดรเจลสูตรที่มีคาร์บอนดอท PVA และ OSA เป็นองค์ประกอบมากจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงในโครงสร้างของไฮโดรเจลมาก ส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำในโครงสร้าง และการหลุดออกของหมู่ฟังก์ชันที่อ่อนนุ่มสูงกว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณคาร์บอนดอท PVA และ OSA น้อย

ไฮโดรเจลที่มีปริมาณ PVA ในโครงสร้างมากจะมีพฤติกรรมการบวมตัวมาก แต่เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการ Freezing/Thawing พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลจะลดลงเนื่องจากมีการเชื่อมโยงทางกายภาพเกิดขึ้นในโครงสร้างของไฮโดรเจล

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนดอทในรูปแบบไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เพื่อให้สามารถเพิ่มการสังเคราะห์คาร์บอนดอทให้ได้ปริมาณมากต่อการสังเคราะห์หนึ่งครั้ง
- 2) ศึกษาการเพิ่ม Quantum yield ของคาร์บอนดอท โดยการเพิ่มอะตอมทอง (Au) หรือสังกะสี (Zn)
- 3) ศึกษาการตอบสนองต่อสิ่งเร้าอื่น ๆ ของคาร์บอนดอท คือ การตอบสนองต่อโลหะ และการตอบสนองต่ออุณหภูมิ
- 4) ทดสอบการตอบสนองต่อค่าพีเอชของไฮโดรเจลเรืองแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Li, Y. Young, D J. and Loh, X J. 2019. "Fluorescent gels: a review of synthesis, properties, applications and challenges." *Materials Chemistry Frontiers*. 3(8): 1489-1502.
- [2] Sagbas, S. and Sahiner, N. 2019. "Carbon dots: preparation, properties, and application." *Nanocarbon and its Composites*. 12: 651-676.
- [3] Liu, M. L. Chen, B. B. Li, C. M. and Huang, C. Z. 2019. "Carbon dots: synthesis, formation mechanism, fluorescence origin and sensing applications." *Green Chemistry*. 21(3): 449-71.
- [4] Zhu, S. Song, Y. Zhao, X. Shao, J. Zhang, J. and Yang, B. 2015. "The photoluminescence mechanism in carbon dots (graphene quantum dots, carbon nanodots, and polymer dots): current state and future perspective." *Nano research*. 8(2): 355-381.
- [5] Cheng, C. Xing, M. and Wu, Q. 2019. "Green synthesis of fluorescent carbon dots/hydrogel nanocomposite with stable Fe³⁺ sensing capability." *Journal of Alloys and Compounds*. 790: 221-227.
- [6] Cayuela, A. Soriano, M. L. Kennedy, S. R. Steed, J. and Valcárcel, M. 2016. "Fluorescent carbon quantum dot hydrogels for direct determination of silver ions." *Talanta*. 151: 100-105.
- [7] Sharma, A K. Kaith, B S. Chandel, K. and Singh, A. 2020. "Chemically modified chitosan-sodium alginate as chemo-sensor adsorbent for the detection of picric acid and removal of bieberich scarlet." *International Journal of Biological Macromolecules*. 147: 582-594.
- [8] Bhattacharya, S. Nandi, S. and Jelinek, R. 2017. "Carbon-dot-hydrogel for enzyme-mediated bacterial detection." *RSC advances*. 7(2): 588-594.
- [9] Omid, M. Yadegari, A. and Tayebi, L. 2017. "Wound dressing application of pH-sensitive carbon dots/chitosan hydrogel." *RSC advances*. 7(18): 10638-10649.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Hu, M. Gu, X. Hu, Y. Deng, Y. and Wang, C. 2016. "PVA/carbon dot nanocomposite hydrogels for simple introduction of ag nanoparticles with enhanced antibacterial activity." *Macromolecular Materials and Engineering*. 301(11): 1352-1362.
- [11] Konwar, A. Gogoi, N. Majumdar, G. and Chowdhury, D. 2015. "Green chitosan-carbon dots nanocomposite hydrogel film with superior properties." *Carbohydrate polymers*. 115: 238-245.
- [12] Islam, S. Bhuiyan, M. R. and Islam, M. N. 2016. "Chitin and Chitosan: Structure, Properties and Applications in Biomedical Engineering." *Journal of Polymers and the Environment*. 25(3): 854-66.
- [13] Loo, S. L. Vásquez, L. Athanassiou, A. and Fragouli, D. 2021. "Polymeric Hydrogels A promising platform in enhancing water security for a sustainable future." *Advanced Materials Interfaces*. 8(24): 2100-580.
- [14] Kahya, N. 2019. "Water Soluble Chitosan Derivatives and their Biological Activities: A Review" *iMedPub Journals*. 5: 1-11.
- [15] Sashiwa, H. Yamamori, N. Ichinose, Y. Sunamoto, J. and Aiba, S. 2003. "Chemical Modification of Chitosan, 17a Michael Reaction of Chitosan with Acrylic Acid in Water." *Macromolecular Bioscience*. 3: 231-233.
- [16] Shao, K. Han, B. Gao, J. Song, F. Yang, Y. and Liu, W. 2015. "Synthesis and characterization of a hydroxyethyl derivative of chitosan and evaluation of its biosafety." *Journal of Ocean University of China*. 14(4): 703-9.
- [17] Tzaneva, D. Simitchive, A. Petkova, N. Nenov, V. Stoyanova, A. and Denev, P. 2017. "Synthesis of Carboxymethyl Chitosan and its Rheological Behaviour in Pharmaceutical and Cosmetic Emulsions." *Journal of Applied Pharmaceutical Science*. 7(10): 070-078.
- [18] Xu, J. Xu, B. Shou, D. Xia, X. and Hu, Y. 2015. "Preparation and Evaluation of Vancomycin-Loaded N-trimethyl Chitosan Nanoparticles." *Polymers*. 7(9): 1850-70.
- [19] Lee, K. Y. and Mooney, D. J. 2012. "Alginate: properties and biomedical applications." *Progress in Polymer Science*. 37: 106-26.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [20] Wei, Z. Yang, J. H. Liu, Z. Q. Xu, F. and Zhou, J. X. 2015. “**Novel Biocompatible Polysaccharide-Based Self-Healing Hydrogel.**” *Advanced Functional Materials*. 25(9): 1352-9.
- [21] Wei, Z. Zhao, J. Chen, Y.M. Zhang, P. and Zhang, Q. 2016. “**Self-healing polysaccharide-based hydrogels as injectable carriers for neural stem cells.**” *Scientific Reports*. 6: 378-41.
- [22] Chen, X. Fan, M. Tan, H. Ren, B. and Yuan, G. 2019. “**Magnetic and self-healing chitosan-alginate hydrogel encapsulated gelatin microspheres via covalent cross-linking for drug delivery.**” *Materials Science Engineering Carbon*. 101: 619-629.
- [23] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้อหวิทยาลัยมหิดล. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. **นวัตกรรมนาโนเทคโนโลยี.** [Online]. Available : <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit3-9.html>
- [24] Jhonsi, MA. 2018. “**Carbon Quantum Dots for Bioimaging.**” [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/state-of-the-art-in-nano-bioimaging/carbon-quantum-dots-for-bioimaging>
- [25] Wang, X. Feng, Y. Dong, P. and Huang, J. 2019. “**A Mini Review on Carbon Quantum Dots: Preparation, Properties, and Electrocatalytic Application.**” *Frontiers in Chemistry*. 7: 1-9.
- [26] Sciortino, A. Cannizzo, A. and Messina, F. 2018. “**Carbon Nanodots: A Review—From the Current Understanding of the Fundamental Photophysics to the Full Control of the Optical Response.**” *Carbon research*. 4(4): 1-35.
- [27] Meng, W. Bai, X. Wang, B. Liu, Z. Lu, S. and Yang, B. 2019. “**Biomass-Derived Carbon Dots and Their Applications.**” *Energy & Environmental Materials*. 2(3): 172-92.
- [28] Liang, Q. Ma, W. Shi, Y. Li, Z. and Yang, X. 2013. “**Easy synthesis of highly fluorescent carbon quantum dots from gelatin and their luminescent properties and applications.**” *Carbon*. 60: 421-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] Liu, Y. and Zhou, Q. 2017. "Sensitive pH probe developed with water-soluble fluorescent carbon dots from chocolate by one-step hydrothermal method." *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 97(12): 1119-1131.
- [30] Wang, L. and Zhou, HS. 2014. "Green Synthesis of Luminescent Nitrogen-Doped Carbon Dots from Milk and Its Imaging Application." *Analytical Chemistry*. 86(18): 8902-8905.
- [31] Xie, Y. Cheng, D. Liu, X. and Han, A. 2019. "Green Hydrothermal Synthesis of N-doped Carbon Dots from Biomass Highland Barley for the Detection of Hg²⁺." *Sensors (Basel)*. 19(14): 1-10.
- [32] Zhao, S. Lan, M. Zhu, X. Xue, H. Ng, TW. Meng, Z. Lee, CS. Wang, P. and Zhang, W. 2015. "Green Synthesis of Bifunctional Fluorescent Carbon Dots from Garlic for Cellular Imaging and Free Radical Scavenging." *ACS Applied Material Interfaces*. 7(31): 17054-17060.
- [33] Baruah, U. Gogoi, N. Konwar, A. Jyoti Deka, M. Chowdhury, D. and Majumdar, G. 2014. "Carbon Dot Based Sensing of Dopamine and Ascorbic Acid." *Journal of Nanoparticles*. 2014: 1-8.
- [34] Sahu, S. Behera, B. Maiti, TK. And Mohapatra, S. 2012. "Simple one-step synthesis of highly luminescent carbon dots from orange juice: application as excellent bio-imaging agents." *Chemical Communications (Camb)*. 48(70): 8835-8837.
- [35] Gogoi, N. Barooah, M. Majumdar, G. and Chowdhury, D. 2015. "Carbon dots rooted agarose hydrogel hybrid platform for optical detection and separation of heavy metal ions." *ACS Applied Materials Interfaces*. 7: 3058-3067.
- [36] Cayuela, A. Soriano, ML. Kennedy, SR. Steed, JW. and Valcarcel, M. 2016. "Fluorescent carbon quantum dot hydrogels for direct determination of silver ions." *Talanta*. 151: 100-105.
- [37] Sun, Y. Wang, S. Li, C. Luo, P. Tao, L. Wei, Y. and Shi, G. 2013. "Large scale preparation of graphene quantum dots from graphite with tunable fluorescence properties." *Physical Chemistry Chemical Physic*. 15(24): 9907-9913.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [38] Emam, A. N. Loutfy, S. A. Mostafa, A. A., Awad, H. and Mohamed, M. B. 2017. "Cyto-toxicity, biocompatibility and cellular response of carbon dots-plasmonic based nano-hybrids for bioimaging." *RSC Advances*. 7(38): 23502-23514.
- [39] Zhu, S. Song, Y. Zhao, X. Shao, J. Zhang, J. and Yang, B. 2015. "The photoluminescence mechanism in carbon dots (graphene quantum dots, carbon nanodots, and polymer dots): Current state and future perspective." *Nano research*. 8(2): 355-381.
- [40] Wang, Y. and Hu, A. 2014. "Carbon quantum dots: synthesis, properties and applications." *Journal of Materials Chemistry*. 2(34): 6921-6939.
- [41] Kandasamy, G. 2019. "Recent Advancements in Doped/Co-Doped Carbon Quantum Dots for Multi-Potential Applications." *Carbon research*. 5(2): 1-40.
- [42] Yan, F. Sun, Z. Zhang, H. Sun, X. Jiang, Y. and Bai, Z. 2019. "The fluorescence mechanism of carbon dots, and methods for tuning their emission color: a review." *Microchimica Acta*. 186(8): 1-37.
- [43] Liu, M. L. Chen, B. B. Li, C. M. and Huang, C. Z. 2019. "Carbon dots: synthesis, formation mechanism, fluorescence origin and sensing applications." *Green Chemistry*. 21(3): 449-471.
- [44] Gude, V. Das, A. Chatterjee, T. and Mandal, P. K. 2016. "Molecular origin of photoluminescence of carbon dots: aggregation-induced orange-red emission." *Physical Chemistry Chemical Physic*. 18(40): 28274-28280.
- [45] Sun, X. and Lei, Y. 2017. "Fluorescent carbon dots and their sensing applications." *Trends in Analytical Chemistry*. 89: 163-80.
- [46] Culzoni, M. J. Muñoz de la Peña, A. Machuca, A. Goicoechea, H. C. and Babiano, R. 2013. "Rhodamine and BODIPY chemodosimeters and chemosensors for the detection of Hg²⁺, based on fluorescence enhancement effects." *Analytical Methods*. 5(1): 30-49.
- [47] Molaei, MJ. 2020. "Principles, mechanisms, and application of carbon quantum dots in sensors: a review." *Analytical Methods*. 12(10) : 1266-1287.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [48] Mao, M. Tian, T. He, Y. Ge, Y. Zhou, J. and Song, G. 2017. "Inner filter effect based fluorometric determination of the activity of alkaline phosphatase by using carbon dots codoped with boron and nitrogen." *Microchimica Acta*. 185(1): 1-6.
- [49] Li, Y. Liu, Y. Shang, X. Chao, D. Zhou, L. and Zhang, H. 2018. "Highly sensitive and selective detection of Fe³⁺ by utilizing carbon quantum dots as fluorescent probes." *Chemical Physics Letters*. 705: 1-6.
- [50] Wang, Y. Zhu, Y. Yu, S. and Jiang, C. 2017. "Fluorescent carbon dots: rational synthesis, tunable optical properties and analytical applications." *RSC Advances*. 7(65): 40973-40989.
- [51] Sharma, A. and Das, J. 2019. "Small molecules derived carbon dots: synthesis and applications in sensing, catalysis, imaging, and biomedicine." *Journal of Nanobiotechnology*. 17(1): 1-24.
- [52] Lu, W. Qin, X. Liu, S. Chang, G. Zhang, Y. Luo, Y. Asiri, A. M. and Sun, X. 2012. "Economical, green synthesis of fluorescent carbon nanoparticles and their use as probes for sensitive and selective detection of mercury (II) ions." *Analytical Chemistry*. 84: 5351-5357.
- [53] Thakur, M. Pandey, S. Mewada, A. Patil, V. Khade, M. Goshi, E. and Sharon, M. 2014. "Antibiotic conjugated fluorescent carbon dots as a theranostic agent for controlled drug release, bioimaging, and enhanced antimicrobial activity." *Journal of Drug Delivery*. 2014: 1-10.
- [54] Singh, S. Mishra, A. Kumari, R. Sinha, K. K. Singh, M. K. and Das, P. 2017. "Carbon dots assisted formation of DNA hydrogel for sustained release of drug." *Carbon*. 114: 169-176.
- [55] Zhang, J. Zhang, X. Dong, S. Zhou, X. and Dong, S. 2016. "N-doped carbon quantum dots/TiO₂ hybrid composites with enhanced visible light driven photocatalytic activity toward dye wastewater degradation and mechanism insight." *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 325: 104-110.
- [56] Sharma, S. and Tiwari, S. 2020. "A review on biomacromolecular hydrogel classification and its applications." *International journal of biological macromolecules*. 162: 737-747.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [57] Deligkaris, K. Tadele, T. S. Olthuis, W. and Berg, A. 2010. "Hydrogel-based devices for biomedical applications." *Sensors and Actuators Chemical*. 147(2): 765-774.
- [58] Chang, C. Duan, B. Cai, J. and Zhang, L. 2010. "Superabsorbent hydrogels based on cellulose for smart swelling and controllable delivery." *European Polymer Journal*. 46(1): 92-100.
- [59] วารุณี ตานันท์ และ สายันต์ แสงสุวรรณ. 2557. "พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก: การสังเคราะห์ การวิเคราะห์ และการประยุกต์ใช้" ห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์และยางขั้นสูง (APRM) ภาควิชาเคมีและศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี (PERCH-CIC) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [60] Li, J. and Mooney, DJ. 2016. "Designing hydrogels for controlled drug delivery." *Nature Reviews Materials*. 1(12): 1-17.
- [61] ประภัศสร จันทรรนาร, ประภาภรณ์ พันธุ์ไพโรจน์ และพิชชาภา เดชวรรคณีย์. 2559. "การพัฒนาวัสดุปิดแผลไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีส่วนผสมของขมิ้นชัน." ปริญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [62] ภัทธารุช มนต์วิเศษ. 2561. "การพัฒนาวัสดุไฮโดรเจลซ่อมแซมตัวเองจากไคโตซานดัดแปร." รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [63] Talebian, S. Mehrali, M. Taebnia, N. Pennisi, CP. Kadumudi, FB. Foroughi, J. Hasany, M. Nikkhah, M. Akbari, M. and Orive, G. 2019. "Self-Healing Hydrogels: The Next Paradigm Shift in Tissue Engineering" *Advance Science*. 6(16): 1-47.
- [64] Cui, J. and Campo, A. 2012. "Multivalent H-bonds for self-healing hydrogels." *Chemical Communication (Camb)*. 48(74): 9302-9304.
- [65] Muroi, R. Sugane, K. and Shibata, M. 2019. "Self-healing thiol-ene networks based on cyclodextrin-adamantane host-guest interactions." *Polymer*. 185: 1-33.
- [66] Cui, J. Nie, F. M. Yang, J. X. Pan, L. Ma, Z. and Li, Y. S. 2017. "Novel imidazolium-based poly(ionic liquid)s with different counterions for self-healing." *Journal of Materials Chemistry A*. 5(48): 25220-25229.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [67] Deng, Z. Wang, H. Ma, PX. and Guo, B. 2020. "Self-healing conductive hydrogels: preparation, properties and applications." *Nanoscale*. 12(3): 1224-1246.
- [68] Weng L, Romanov A, Rooney and J, Chen W. 2008. "Non-cytotoxic, in situ gelable hydrogels composed of N-carboxyethyl chitosan and oxidized dextran." *Biomaterials*. 29(29): 3905-3913.
- [69] Milosavljević, N. B. Ristić, M. Đ. Perić-Grujić, A. A. Filipović, J. M. Štrbac, S. B. Rakočević, Z. L. and Krušić, M. T. 2011. "Removal of Cu²⁺ ions using hydrogels of chitosan, itaconic and methacrylic acid: FTIR, SEM/EDX, AFM, kinetic and equilibrium study." *Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 388 (13): 59-69.
- [70] ภัทธารุช มนต์วิเศษ. 2561. "เอกสารการสอนวิชาพอลิเมอร์ชีวภาพ". กรุงเทพฯ : สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [71] Roberts, GAF. 1992. "Structure of Chitin and Chitosan." *Chitin chemistry*. 22: 1-53.
- [72] ณัฐพล ขาวสวน. 2558. "การศึกษาประสิทธิภาพของสารไคโตซานและสารสกัดจากฟางข้าวในการยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย *Microcystis spp.*" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [73] กันตวัฒน์ หมาดสุเรน. 2555. "การเตรียมและการทดสอบของฟิล์มนาโนคอมพอสิตชีวภาพจากไคโตซานและไฮดรอกซีอะพาไทต์." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [74] Chen, J. Zheng, L. Chen, X. Wang, Z. Li, C. Xiao, Y. Guan, G. and Zhu, W. 2015. "Synthesis and characterization of water-soluble chitosan grafted with hydrophilic aliphatic polyester." *International Journal Biological Macromolecules*. 74: 433-438.
- [75] นวลใจ โคตรแสง, กชพรรณ วงศ์เจริญ และคมสัน นามตะคุ. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์ "การประยุกต์ใช้ประโยชน์ไคตินและไคโตซานในด้านการเกษตร". กาลสินธุ์ : ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [76] Wang, J. Wang, L. Yu, H. Chen, Y. Chen, Q. Zhou, W. and Chen, X. 2016. **“Recent progress on synthesis, property and application of modified chitosan: an overview.”** *International Journal of Biological Macromolecules*. 88: 333-344.
- [77] Lee, K. Y. and Mooney, D. J. 2012. **“Alginate: properties and biomedical applications.”** *Progress in polymer science*. 37(1): 106-126.
- [78] Gomez, C. G. Rinaudo, M. and Villar, M. A. 2007. **“Oxidation of sodium alginate and characterization of the oxidized derivatives.”** *Carbohydrate Polymers*. 67(3): 296-304.
- [79] Reakasame, S. and Boccaccini, A. R. 2018. **“Oxidized Alginate-Based Hydrogels for Tissue Engineering Applications: A Review.”** *Biomacromolecules*. 19(1): 3-21.
- [80] TCS-MART. 2020. **โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate)**. [Online]. Available : <https://www.tcs-mart.com/product/sodium-alginate>
- [81] Donati, I. and Paoletti, S. 2009. **“Material Properties of Alginates.”** *Progress in Polymer Science*. 37 (1): 1-53.
- [82] Ding, W. Zhou, J. Zeng, Y. Wang, YN. and Shi, B. 2017. **“Preparation of oxidized sodium alginate with different molecular weights and its application for crosslinking collagen fiber.”** *Carbohydrate Polymer*. 157: 1650-1656.
- [83] Nguyen, K. G. Baragau, I. Gromicova, R. Nicolaev, A. Thomson, S. A. Rennie, A. Power, N. P. Sajjad, M. T. and Kellici, S. 2022. **“Investigating the effect of N-doping on carbon quantum dots structure, optical properties and metal ion screening.”** *Science Report*. 12: 1-53.
- [84] Niu, Q. Gao, K. Lin, Z. and Wu, W. 2013. **“Amine-capped carbon dots as a nanosensor for sensitive and selective detection of picric acid in aqueous solution via electrostatic interaction.”** *Analytical Methods*. 5(21): 1-7.
- [85] Xu, J. Guo, Y. Gong, T. Cui, K. Hou, L. and Yuan, C. 2022. **“B, N co-doped carbon dots based fluorescent test paper and hydrogel for visual and efficient dual ion detection.”** *Inorganic chemistry communication*. 145: 1-9.
- [86] Wang, J. Zhu, Y. Xie, X. He, X. Fan, J. and Chen, A. 2022. **“Effect of ultra-trace Ag doping on the antibacterial performance of carbon quantum dots.”** *Environmental Chemical Engineering*. 10: 107-112.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [87] Wang, Y. Xue, Y. Wang, J. Zhu, Y. Wang, X. Xuehui, Z. Yu, L. and Jingwen, L. 2019. "Biocompatible and photoluminescent carbon dots/hydroxyapatite/PVA dual-network composite hydrogel scaffold and their properties." *Journal of Polymer Research*. 26: 1-6.
- [88] Ding, F. Shi, Wu. Liu, H. and Deng, H. 2017. "Flexible Polysaccharide Hydrogel with pH-Regulated Recovery of Self-Healing and Mechanical Properties." *Macromolecular Materials and Engineering*. 302(11): 1700-221.
- [89] Balakrishnan, T. Ang, W. L. Mahmoudi, E. Mohammad, A. W. and Sambudi, N. S. 2022. "Formation mechanism and application potential of carbon dots synthesized from palm kernel shell via microwave assisted method." *Carbon Resources Conversion*. 5: 150-166.
- [90] Liu, Y. Li, W. Wu, P. Ma, C. Wu, X. Xu, M. Luo, S. Xu, Z. and Liu, S. 2019. "Hydrothermal synthesis of nitrogen and boron co-doped carbon quantum dots for application in acetone and dopamine sensors and multicolor cellular imaging." *Sensors & Actuators, B: Chemical*. 281: 34-43.
- [91] Tian, B. Fu, T. Wan, Y. Ma, Y. Wang, Y. Feng, Z. and Jiang, Z. 2021. "B-and N-doped carbon dots by one-step microwave hydrothermal synthesis: tracking yeast status and imaging mechanism." *Journal of Nanobiotechnology*. 19: 1-12.
- [92] Fouda, A. Abdel-Maksoud, G. Saad, H. A. Gobouri, A. A. Mohammedsaleh, Z. M. and Abdel-Haleem El-Sadany, M. 2021. "The efficacy of silver nitrate (AgNO₃) as a coating agent to protect paper against high deteriorating microbes." *Catalysts*. 11(3): 1-18.
- [93] Mohammed, L. J. and Omer, K. M. 2020. "Dual functional highly luminescence B, N Co-doped carbon nanodots as nanothermometer and Fe³⁺/Fe²⁺ sensor." *Scientific Reports*. 10: 1-12.
- [94] Wang, H. Sun, P. Cong, S. Wu, J. Gao, L. Wang, Y. Dai, X. Yi, Q. and Zou, G. 2016. "Nitrogen-doped carbon dots for "green" quantum dot solar cells." *Nanoscale Research Letters*. 11: 1-6.

- [95] Ye, Q. Yan, F. Shi, D. Zheng, T. Wang, Y. Zhou, X. and Chen, L. 2016. “**N, B-doped carbon dots as a sensitive fluorescence probe for Hg²⁺ ions and 2, 4, 6-trinitrophenol detection for bioimaging.**” *Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 162: 1-13.
- [96] Shi, L. Zhu, C. He, H. Zhu, D. Zhang, Z. Pang, D. and Tian, Z. 2016. “**Near-infrared Ag₂Se quantum dots with distinct absorption features and high fluorescence quantum yields.**” *RSC advance*. 6: 38183-38186.
- [97] Sharma, R. Dhillon, A. and Kumar, D. 2018. “**Mentha-stabilized silver nanoparticles for high-performance colorimetric detection of Al (III) in aqueous systems.**” *Scientific Report*. 8: 1-13.
- [98] Mohamedkhair, A. K. Drmsh, Q. and Yamani, Z. H. 2019. “**Silver nanoparticle-decorated tin oxide thin films: synthesis, characterization, and hydrogen gas sensing.**” *Frontiers in Materials*. 6: 1-10.
- [99] Emam, A. Loutfy, S. A. Mostafa, A. A. Awad, H. and Mohamed, M. B. 2017. “**Cytotoxicity, biocompatibility and cellular response of carbon dots-plasmonic based nano-hybrids for bioimaging.**” *RSC advance*. 7: 23502-23514.
- [100] Liu, M. 2020. “**Optical properties of carbon dots: a review.**” *Nanoarchitectonics*. 1(1): 1-12.
- [101] Dutta, A. Dutta, R. R. and Gogoi, S. 2022. “**Optical properties of carbon dots and their applications.**” *Carbon Dots in Agricultural Systems*. 4: 135-153.
- [102] Pale, V. Giedraityte, Z. Chen, X. Lopez-Acevedo, O. Tittonen, I. and Karppinen, M. 2017. “**Excitation-dependent fluorescence from atomic/molecular layer deposited sodium-uracil thin films.**” *Scientific Reports*. 7(1): 1-7.
- [103] Bhunia, S. K. Zeiri, L. Manna, J. Nandi, S. and Jelinek, R. 2016. “**Carbon-dot/silver-nanoparticle flexible SERS-active films.**” *ACS applied materials & interfaces*. 8(38): 25637-25643.
- [104] Ye, C. Xu, L. Chen, S. Wang, C. Su, M. Dai, G. and Song, Y. 2021. “**Controllable excitation-dependent fluorescence triggered by the increasing graphitic nitrogen in carbon dots and its application in multi-analyte detection.**” *Dyes and Pigments*. 184: 108-772.

- [105] Zhang, Q. Wang, R. Feng, B. Zhong, X. and Ostrikov, K. 2021. "Photoluminescence mechanism of carbon dots: triggering high-color-purity red fluorescence emission through edge amino protonation." *Nature Communications*. 12(1): 56-68.
- [106] Andrade, P. F. Nakazato, G. and Durán, N. 2017. "Additive interaction of carbon dots extracted from soluble coffee and biogenic silver nanoparticles against bacteria." *Conference Series*. 838(1): 20-28.
- [107] Zou, W. S. Kong, W. L. Zhao, Q. C. Zhang, J. Zhao, X. Zhao, D. and Wang, Y. Q. 2019. "A composite consisting of bromine-doped carbon dots and ferric ions as a fluorescent probe for determination and intracellular imaging of phosphate." *Microchimica Acta*. 186: 1-9.
- [108] Bano, D. Kumar, V. Singh, V. K. and Hasan, S. H. 2018. "Green synthesis of fluorescent carbon quantum dots for the detection of mercury (II) and glutathione." *Chemistry*. 42(8): 5814-5821.
- [109] Kandasamy, G. 2019. "Recent advancements in doped/co-doped carbon quantum dots for multi-potential applications." *Carbon*. 5(2): 1-40.
- [110] Atabaev, T. S. 2018. "Doped carbon dots for sensing and bioimaging applications: A minireview." *Nanomaterials*. 8(5): 1-10.
- [111] Van Nguyen, C. Lee, S. Chung, Y. G. Chiang, W. and Wu, K. C. 2019. "Synergistic effect of metal-organic framework-derived boron and nitrogen heteroatom-doped three-dimensional porous carbons for precious-metal-free catalytic reduction of nitroarenes." *Applied Catalysis B: Environmental*. 257: 117-888.
- [112] Xu, Q. Su, R. Chen, Y. Sreenivasan, S. Li, N. Zheng, X. Zhu, J. Pan, H. Li, W. and Xu, C. 2018. "Metal charge transfer doped carbon dots with reversibly switchable, ultra-high quantum yield photoluminescence." *ACS Applied Nano Materials*. 1: 1886-1893.
- [113] Dang, D. K. and Pham, T. T. 2022. "Metal Ions Doped-Carbon Dots: Synthetic Approaches, Physicochemical Properties and Their Applications." *Research in Science & Technological Education*. 73: 54-63.

- [114] Tang, X. D. Yu, H. M. Nguyen, W. Amador, E. Cui, S. P. Ma, K. and Chen, W. 2023. **“New Observations on Concentration-Regulated Carbon Dots.”** *Advanced Photonics Research*. 4(3): 220-314.
- [115] Zhuo, S. J. Fang, J. Wang, J. and Zhu, C. Q. 2019. **“One-step hydrothermal synthesis of silver-doped carbon quantum dots for highly selective detection of uric acid.”** *Methods and Applications in Fluorescence*. 8: 1-9.
- [116] Singh, I. Arora, R. Dhiman, H. and Pahwa, R. 2018. **“Carbon quantum dots: Synthesis, characterization and biomedical applications.”** *Pharmaceutical Sciences*. 15(2): 219-30.
- [117] Yang, Y. Z. Xiao, N. Liu, S. G. Han, L. Li, N. B. and Luo, H. Q. 2020. **“pH-induced aggregation of hydrophilic carbon dots for fluorescence detection of acidic amino acid and intracellular pH imaging.”** *Material Science and Engineering*. 108: 110-401.
- [118] Bayati, M. Dai, J. Zambrana, A. Rees, C. and Cortalezzi, M. F. 2018. **“Effect of water chemistry on the aggregation and photoluminescence behavior of carbon dots.”** *Environmental Science*. 65: 223-235.
- [119] Chen, Y. Li, J. Lu, J. Ding, M. and Chen, Y. 2022. **“Synthesis and properties of poly (vinyl alcohol) hydrogels with high strength and toughness.”** *Polymer Testing*. 108: 107-516.
- [120] Li, J. and Gong, X. 2022. **“One-step large-scale fabricating aggregation-induced emission carbon dots with strong solid-state fluorescence emission.”** *Materials Today Chemistry*. 26: 101-255.
- [121] Dua, S. Kumar, P. Pani, B. Kaur, A. Khanna, M. and Bhatt, G. 2023. **“Stability of carbon quantum dots: a critical review.”** *RSC advances*. 13(20): 13845-13861.
- [122] Kanungo, S. Gupta, N. Rawat, R. Jain, B. Solanki, A. Panday, A. and Ganguly, S. 2023. **“Doped Carbon Quantum Dots Reinforced Hydrogels for Sustained Delivery of Molecular Cargo.”** *Functional Biomaterials*. 14(3): 1-25.

- [123] Zhang, Z. Li, T. Chen, B. Wang, S. and Guo, Z. 2017. “Self-healing supramolecular hydrogel of poly (vinyl alcohol)/chitosan carbon dots.” *Materials Science*. 52: 10614-10623.
- [124] Figueroa-Pizano, M. D. Vélaz, I. and Martínez-Barbosa, M. E. 2020. “A freeze-thawing method to prepare chitosan-poly (vinyl alcohol) hydrogels without crosslinking agents and diflunisal release studies.” *Visualized Experiments*. 155: 1-9.
- [125] Adelnia, H. Ensandoost, R. Moonshi, S. S. Gavgani, J. N. Vasafi, E. I. and Ta, H. T. 2022. “Freeze/thawed polyvinyl alcohol hydrogels: Present, past and future.” *European Polymer*. 164: 110-974.
- [126] Ricciardi, R. Auriemma, F. De Rosa, C. and Lauprêtre, F. 2004. “X-ray diffraction analysis of poly (vinyl alcohol) hydrogels, obtained by freezing and thawing techniques.” *Macromolecules*. 37(5): 1921-1927.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



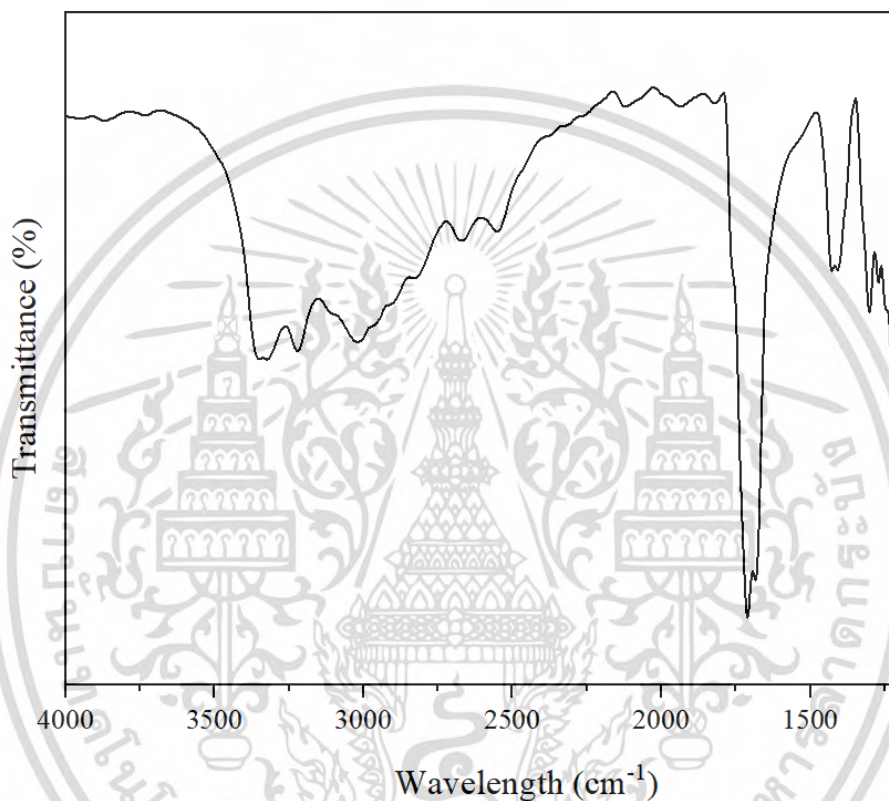
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

FT-IR spectrum ของสารตั้งต้นคาร์บอนดอท

1. กรดซิตริก (Citric acid)

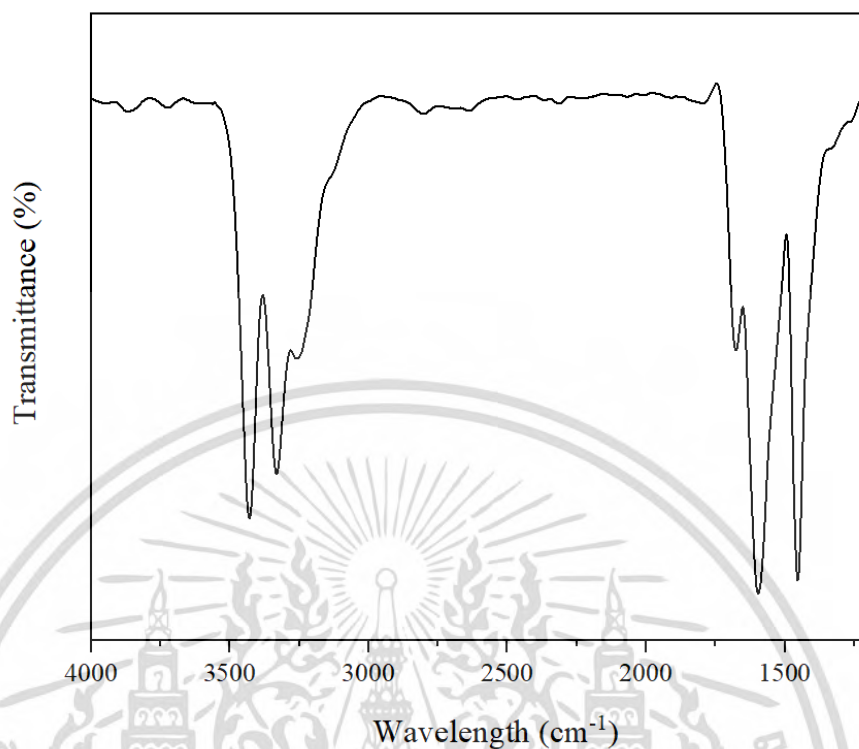


ตารางที่ ก-1 เลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชัน

เลขคลื่น (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
3392-3197	O-H stretching
2980	C-H stretching
1666	C=O stretching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ยูเรีย (Urea)

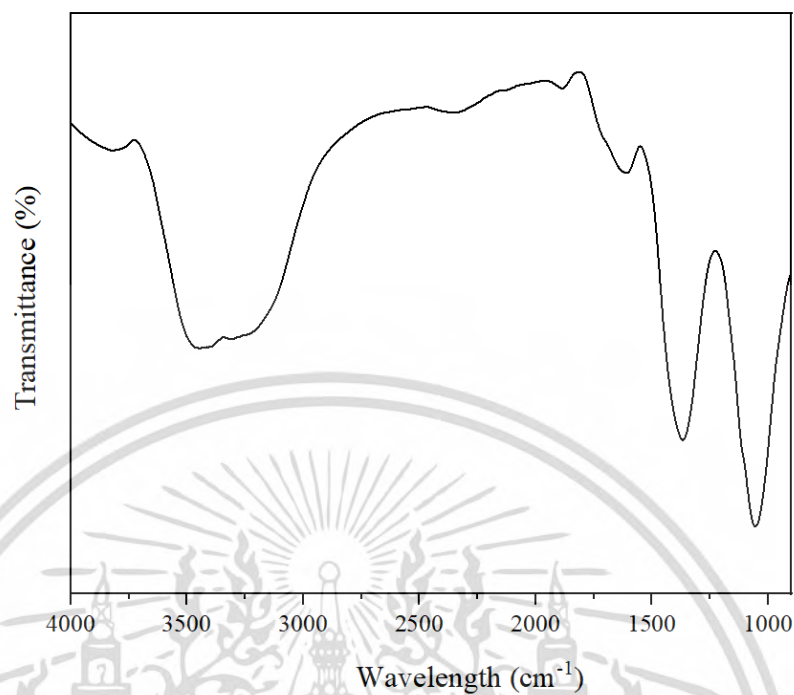


ตารางที่ ก-2 เลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชัน

เลขคลื่น (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
1453	C-N stretching
1666	C=O stretching
3405 - 3500	N-H stretching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. บอแรกซ์ (Borax)

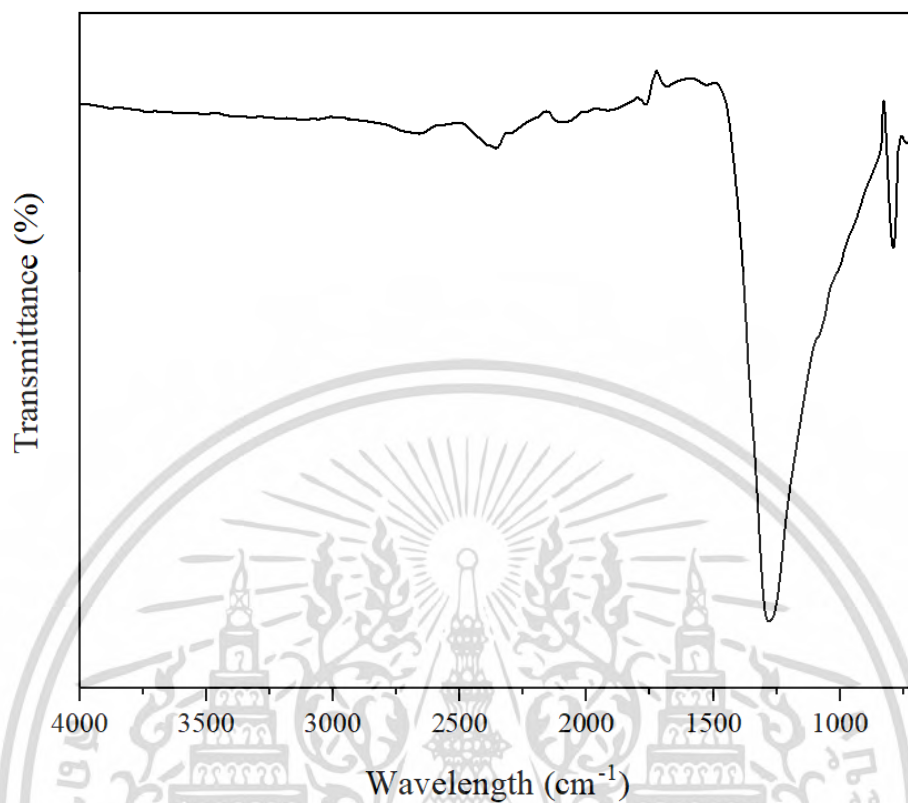


ตารางที่ ก-3 เลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชัน

เลขคลื่น (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
3435	O-H stretching
1382	B-O stretching
1031	B-O-C stretching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate)



ตารางที่ ก-4 เลขคลื่นและหมู่ฟังก์ชัน

เลขคลื่น (cm ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน
1280	N-O stretching
500-700	Ag-O stretching

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่าเฉลี่ยร้อยละการบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์
พีเอช 7.4 ที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ข 1 ค่าเฉลี่ยร้อยละการบวมตัวของไฮโดรเจลที่ไม่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing ใน
สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 ที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ				
	CD1P4C2O0.5	CD1P3C2O0.5	CD1P2C2O0.5	CD1P1C2O0.5	CD1C2O0.5
2	135.0±15.1	127.2±8.3	112.9±13.2	90.3±10.2	70.1±5.4
4	173.0±21.2	165.0±10.6	144.7±18.5	131.2±7.6	95.4±7.3
6	197.2±10.7	184.1±4.9	169.4±10.7	147.5±5.7	117.1±6.5
8	205.2±11.5	198.2±3.5	182.0±9.8	168.4±10.1	132.4±6.7
24	293.1±9.8	270.2±4.2	244.7±10.2	227.6±8.6	165.6±10.3
48	301.3±7.0	280.0±6.1	253.1±11.1	235.0±12.1	173.2±15.2

ตารางที่ ข 2 ค่าเฉลี่ยร้อยละการบวมตัวของไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing
จำนวน 1 รอบ ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 ที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ				
	CD1P4C2O0.5	CD1P3C2O0.5	CD1P2C2O0.5	CD1P1C2O0.5	CD1C2O0.5
2	130.2±10.2	97.0±13.2	68.0±10.1	52.3±15.1	45.4±13.2
4	146.2±11.4	115.2±11.7	81.9±9.2	76.4±14.1	65.3±14.1
6	152.4±15.3	135.3±10.1	102.0±14.3	83.1±9.5	74.1±10.2
8	165.5±9.6	148.5±9.8	126.5±15.1	96.5±8.7	82.0±13.5
24	186.3±8.4	175.1±9.5	154.4±8.6	128.6±13.1	101.0±11.7
48	195.0±5.6	186.4±13.2	162.0±8.5	135.4±9.8	114.1±15.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 3 ค่าเฉลี่ยร้อยละการบวมตัวของไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing
จำนวน 2 รอบ ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 ที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ				
	CD1P4C2O0.5	CD1P3C2O0.5	CD1P2C2O0.5	CD1P1C2O0.5	CD1C2O0.5
2	61.3±15.2	55.1±14.7	52.4±9.8	47.3±9.5	45.3±8.4
4	71.1±14.3	65.2±15.2	57.7±10.0	53.2±7.6	51.2±6.9
6	75.0±11.7	70.0±10.7	64.1±11.2	57.1±11.3	56.3±11.1
8	78.1±10.6	74.1±9.8	70.8±16.7	63.0±10.6	59.1±12.3
24	89.2±13.4	85.3±10.3	79.9±8.5	75.4±9.7	70.0±9.4
48	93.4±10.4	91.2±11.1	83.7±7.9	81.4±12.5	75.3±13.2

ตารางที่ ข 4 ค่าเฉลี่ยร้อยละการบวมตัวของไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freezing/Thawing
จำนวน 3 รอบ ในสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 7.4 ที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ				
	CD1P4C2O0.5	CD1P3C2O0.5	CD1P2C2O0.5	CD1P1C2O0.5	CD1C2O0.5
2	32.3±11.2	37.2±15.0	40.2±16.1	43.4±6.7	53.2±13.1
4	35.2±10.7	41.1±14.1	43.1±15.2	49.1±14.1	61.3±9.6
6	38.4±8.3	46.0±12.5	52.1±14.3	56.2±10.6	69.0±14.3
8	43.1±16.5	51.3±10.7	59.1±10.7	65.1±9.3	76.0±15.1
24	52.6±10.4	59.4±9.8	65.0±9.8	71.3±10.2	81.1±10.3
48	55.1±12.0	61.0±8.9	68.3±11.6	76.0±5.7	82.2±9.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวญานิกา ศักดิ์บริบูรณ์
วัน เดือน ปีเกิด	7 มีนาคม 2540
ที่อยู่ปัจจุบัน	27 ซ.พร้อมจิต ถ.เทอดไท 49 แขวงบางค้อ เขตจอมทอง กทม. 10150
ประวัติการศึกษา	(2562) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกردเฉลี่ย 3.63 (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนผู้ช่วยวิจัยและทุนผู้ช่วยสอน
ผลงานทางวิชาการ	ได้รับการตอบรับการตีพิมพ์ใน Biointerface Research in Applied Chemistry งานวิจัยเรื่อง Improving the Fluorescent of Carbon Dots Through Boron and Silver Doping: A single-Step Microwave Synthesis Approach



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้