



การสังเคราะห์ไคโตซานไฮโดรเจลโดยการใช้คลื่นไมโครเวฟสำหรับดูดซับไอออนโลหะหนัก

THE SYNTHESIS OF CHITOSAN-BASED HYDROGEL
USING MICROWAVE-ASSISTED IRRADIATION FOR ADSORPTION
OF HEAVY METAL IONS

ยศธเนศ ทศนภักดี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2562

การสังเคราะห์โคโตซานไฮโดรเจลโดยการไ้ค้คลื่นไมโครเวฟสำหรับดูดซับไอออนโลหะหนัก



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

การศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

THE SYNTHESIS OF CHITOSAN-BASED HYDROGEL
USING MICROWAVE-ASSISTED IRRADIATION FOR ADSORPTION
OF HEAVY METAL IONS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF EDUCATION
(Chemistry)

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2019

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การสังเคราะห์โคโตซานไฮโดรเจลโดยการไ้คลื่นไมโครเวฟสำหรับดูดซับไอออนโลหะหนัก
ของ
ยศธเนศ ทศนภักดี

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก	 ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ ส่งศรีโรจน์)	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์ สืบสาย)
	 กรรมการ
	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แพน ทองเรือง)

ชื่อเรื่อง	การสังเคราะห์ไคโตซานไฮโดรเจลโดยใช้คลื่นไมโครเวฟสำหรับดูดซับ ไอออนโลหะหนัก
ผู้วิจัย	ยศธเนศ ทศนภักดี
ปริญญา	การศึกษามหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกรียงศักดิ์ ส่งศรีโรจน์

งานวิจัยนี้เสนอวิธีการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจาก Chitosan/Polyvinyl alcohol/Polyvinylpyrrolidone (CS/PVA/PVP) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานกระตุ้นให้เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติขึ้น เพื่อประยุกต์ใช้ในการดูดซับไอออนของโลหะหนัก โดยอัตราส่วนของ CS:PVA:PVP ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ คือ 0.3:0.6:0.3 กรัม ตามลำดับ โดยใช้ฮิพิคโลโรไฮดรินเป็นสารเชื่อมขวาง และให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และเอกลักษณ์ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลพบว่าประสิทธิภาพในการบวมน้ำ และสัดส่วนความเป็นเจลของไฮโดรเจลมีค่าเท่ากับ 1627.4% และ 22.96% ตามลำดับ รวมถึงภาพถ่าย SEM แสดงโครงร่างตาข่ายและรูพรุนของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาการเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจล ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรเมตรี (Infrared Spectrometry) จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้น พบว่าปริมาณการดูดซับไอออนของโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษาจากมากไปน้อย คือ ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม และ นิกเกิล ตามลำดับ โดยที่ค่า pH ของสารละลายไอออนโลหะดังกล่าวไม่มีนัยสำคัญต่อปริมาณการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล แต่แนวโน้มปริมาณการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลแตกต่างกัน เมื่อทำการศึกษาในสารละลายไอออนโลหะผสม ส่วนผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล พบว่ามีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับการดูดซับแบบแลงเมียร์ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล พบว่าสารละลาย 0.1 M EDTA เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการชะไอออนของโลหะออกจาก CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล เนื่องจากมีร้อยละการชะไอออนของทองแดงเท่ากับ 91.13 % และคงลักษณะทางกายภาพของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลไว้ได้ดี

คำสำคัญ : ไฮโดรเจล ไคโตซาน ไมโครเวฟ ตัวดูดซับ ไอออนของโลหะหนัก

Title	THE SYNTHESIS OF CHITOSAN-BASED HYDROGEL USING MICROWAVE-ASSISTED IRRADIATION FOR ADSORPTION OF HEAVY METAL IONS
Author	YOSTHANASE TASSANAPUKDEE
Degree	MASTER OF EDUCATION
Academic Year	2019
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Kriangsak Songsrirote

This work presents a method for Chitosan/Polyvinyl alcohol/Polyvinylpyrrolidone (CS/PVA/PVP) hydrogel synthesis using microwave-assisted irradiation to initiate and accelerate three-dimensional structure formation for the application of metal ion adsorption. The optimum ratio of CS:PVA:PVP was 0.3:0.6:0.3 g, respectively. Epichlorohydrin was used as cross-linking agent under 600 W of microwave irradiation for 3 minutes. The gel swelling degree and gel fraction of the synthesized hydrogel were 1627.4% and 22.96%, respectively. The SEM images revealed a large number of porous structures in the CS/PVA/PVP hydrogel network. In addition, the reaction mechanism of the hydrogel network formation was elucidated by infrared spectrometry. In the case of individual ion adsorption, the efficiencies of CS/PVA/PVP hydrogel toward different metal ions, including copper, lead, cadmium and nickel in descending order. Furthermore, the different pH values of the metal ion solutions resulted in insignificant differences in terms of the adsorption capacity. However, adsorption capacity was different when applying the hydrogel to a mixed metal ion solution. Adsorption isotherm studies indicated that the adsorption behavior of the synthesized hydrogels could be described following the Langmuir isotherm. Besides, the desorption of CS/PVA/PVP hydrogel were studied and 0.1 M EDTA was considered to be a good candidate for the desorption of metal ions, providing high elution efficiency, approximately 91.13% of copper ion elution.

Keyword : Hydrogel Chitosan Microwave Adsorbent Heavy metal ion

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความกรุณาและการให้คำปรึกษาแนะแนวจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ ส่งศรีโรจน์ ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกทราบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์ สืบสาย ที่ให้ความกรุณาในการเป็นประธานในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แพน ทองเรือง ให้ความกรุณาเป็นกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำต่างๆ เพื่อให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยรัตน์ ตรีบัณฑิต ประธานหลักสูตร ตลอดจนคณาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษาในเรื่องการดำเนินงานวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ คุณสมพร ดิยะศรี นักวิทยาศาสตร์ ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับเครื่องมือต่างๆ ในงานการดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยจาก “ทุนงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปี 2561 เลขที่ 240/2561” และสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่ได้มอบ “ทุนโครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.)” เพื่อเป็นทุนการศึกษาของผู้วิจัย รวมทั้งขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้เอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้ความกรุณาสันนิบาสนด้านการศึกษาและกำลังใจตลอดมา คุณค่าและประโยชน์ของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดามารดา และครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทความรู้ทั้งปวงแก่ผู้วิจัย

ยศธเนศ ทัศนภักดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	5
ความสำคัญของงานวิจัย	5
ขอบเขตของโครงการวิจัย	5
ผลที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
1. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับไฮโดรเจล	7
1.1 สมบัติและลักษณะของไฮโดรเจล	7
1.2 วัสดุในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล	8
1.3 ประเภทของการสังเคราะห์ไฮโดรเจล	13
1.4 ความสำคัญของสารเชื่อมขวางในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล.....	15
1.5 การศึกษาเอกลักษณ์ของไฮโดรเจล.....	17
1.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับของไฮโดรเจล.....	20
1.7 การนำกลับมาใช้ซ้ำของไฮโดรเจลเพื่อการดูดซับ	24

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไมโครเวฟ	26
2.1 หลักการทำงานของคลื่นไมโครเวฟ	26
2.2 กลไกการเกิดความร้อนภายใต้คลื่นไมโครเวฟ	27
2.3 ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่มีการผลิตวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
1. อุปกรณ์ / เครื่องมือ และสารเคมี	33
1.1 วัสดุและสารเคมี	33
1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	33
2. วิธีการทดลอง	34
2.1 การทดลองการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ CS PVA และ PVP โดยใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยเร่งปฏิกิริยา	34
2.2 การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และเอกลักษณ์ ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล	37
2.3 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	43
ตอนที่ 1 การทดลองการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ CS PVA และ PVP โดยใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยเร่งปฏิกิริยา.....	43
1.1 ผลของชนิดของสารเชื่อมขวาง (Crosslinking agent) ต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล ..	43
1.2 ผลของอัตราส่วนระหว่าง PVP และ PVA ต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล	43
1.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไคโตซานและกรดซิตริกต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล	44
1.4 ผลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟในการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล	45

1.5 ผลของระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล	46
ตอนที่ 2 การทดลองเพื่อศึกษาเอกลักษณ์ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล	47
2.1 การศึกษาพรมของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope	47
2.2 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy	48
2.3 กลไกการเกิดโครงสร้างสามมิติของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล	50
ตอนที่ 3 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล	51
3.1 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะทองแดง (Cu^{2+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) แคดเมียม (Cd^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})	51
3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะผสมระหว่างโลหะทองแดง (Cu^{2+}) ตะกั่ว (Pb^{2+}) แคดเมียม (Cd^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})	52
3.3 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล	53
3.4 การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	61
ข้อเสนอแนะ	62
บรรณานุกรม	63
ประวัติผู้เขียน	71

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงและเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ของไฮโดรเจลชนิดต่างๆ.....	3
ตาราง 2 แสดงพอลิเมอร์ตั้งต้นในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลและคุณสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิด9	
ตาราง 3 แสดงตัวอย่างกระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจล	14
ตาราง 4 แสดงตัวอย่างอุตสาหกรรมที่มีการผลิตวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ	29
ตาราง 5 แสดงการเปรียบเทียบค่า gel content ของ CMC-g-AMPS ไฮโดรเจล ที่ได้จากการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีที่แตกต่างกัน	31
ตาราง 6 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm ..	40
ตาราง 7 แสดงค่าร้อยละการบวมได้และค่าร้อยละความเป็นเจล ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลเมื่อใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อการสังเคราะห์แตกต่างกัน	47
ตาราง 8 สัญญาณ FTIR ของไคโตซาน PVA PVP และ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล	49
ตาราง 9 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช จากกราฟความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรงและแบบไม่เป็นเส้นตรง	57
ตาราง 10 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช จากกราฟความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรงและแบบไม่เป็นเส้นตรง	57
ตาราง 11 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับไอออนของทองแดงและเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ของ CS/PVA/PVP hydrogel กับ ไคโตซานไฮโดรเจลชนิดอื่นๆ	58

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 แสดงการเกิดโพลีคีเลตไทเทเนนระหว่างโลหะหนักกับไฮโดรเจล	2
ภาพประกอบ 2 แสดงโครงสร้างของไคโตซานซึ่งมีองค์ประกอบย่อยเป็น glucosamine (x) และ N-acetylated glucosamine (y)	3
ภาพประกอบ 3 วิธีการให้ความร้อน (a) การให้ความร้อนตามปกติ (Conventional heating) (b) การให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ (Microwave).....	4
ภาพประกอบ 4 แสดงโครงสร้างทางเคมีของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์	10
ภาพประกอบ 5 แสดงวิธีการสังเคราะห์ Polyvinylpyrrolidone จาก N-vinylpyrrolidone	11
ภาพประกอบ 6 ปริมาณการดูดซับไอออนของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่สภาวะสมดุล (a) PVP ไฮโดรเจล และ (b) P(VP-co-MA) ไฮโดรเจล	12
ภาพประกอบ 7 โครงสร้างของเซลลูโลส (ก) ไคติน (ข) และไคโตซาน (ค)	12
ภาพประกอบ 8 แสดงลักษณะการเชื่อมขวางของเจลาติน ไคโตซานไฮโดรเจลโดยใช้ กลูตาโรลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง	15
ภาพประกอบ 9 FTIR spectra ของพอลิแซ็กคาไรด์/PVA ไฮโดรเจล และ PVA ไฮโดรเจล	19
ภาพประกอบ 10 แสดง FESEM micrographs ของเซลลูโลส ไฮโดรเจล	20
ภาพประกอบ 11 กราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับโดยพลอตจากสมการแลงเมียร์แบบไม่เป็นเส้นตรงที่อุณหภูมิต่างๆ	21
ภาพประกอบ 12 กราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับโดยพลอตจากสมการ Freundlich ที่อุณหภูมิต่างๆ	23
ภาพประกอบ 13 แสดงกระบวนการเกิด Adsorption Desorption cycle ของ polyampholyte hydrogel.....	24
ภาพประกอบ 14 กระบวนการให้ความร้อนแบบปกติกับการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ .	27
ภาพประกอบ 15 การเคลื่อนที่โมเลกุลของน้ำภายใต้คลื่นไมโครเวฟ	28

ภาพประกอบ 16 อัตราการบวมน้ำของ CMC/PVA ไฮโดรเจล เมื่อใช้กระบวนการให้ความร้อนในการสังเคราะห์แตกต่างกัน.....	31
ภาพประกอบ 17 แสดงค่าร้อยละการบวมได้ของเจลและร้อยละความเป็นเจลของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ที่อัตราส่วนของ PVA: PVP แตกต่างกัน เมื่อใช้โคโตซาน 0.3 กรัม	44
ภาพประกอบ 18 แสดงค่าร้อยละการบวมได้ของเจลและร้อยละความเป็นเจลของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ที่อัตราส่วนของ PVA : PVP แตกต่างกัน.....	45
ภาพประกอบ 19 แสดงค่าร้อยละการบวมได้ของเจลและร้อยละความเป็นเจลของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ด้วยกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่แตกต่างกัน	46
ภาพประกอบ 20 ภาพถ่าย SEM แสดงภาพตัดขวางของ (A) ไฮโดรเจลที่ผ่านการแช่น้ำปราศจากไอออน (B) ไฮโดรเจลที่ผ่านการแช่สารละลายไอออนของทองแดง	47
ภาพประกอบ 21 ATR-FTIR สเปกตรัมของ (ก) CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล (ข) โคโตซาน (ค) PVA (ง) PVP	48
ภาพประกอบ 22 กลไกการเกิดโครงร่างตาข่ายสามมิติของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล	50
ภาพประกอบ 23 ภาพแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับไอออนของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในแต่ละ pH ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล.....	52
ภาพประกอบ 24 ภาพแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับไอออนของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในสารละลายโลหะผสมด้วย (pH 7) CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล	53
ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์(คอลัมน์ ก) และแบบฟรุนดลิช (คอลัมน์ ข) ของไอออนโลหะแต่ละชนิด.....	55
ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรงของสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์(คอลัมน์ ก) และแบบฟรุนดลิช (คอลัมน์ ข) ของไอออนโลหะแต่ละชนิด.....	56
ภาพประกอบ 27 แสดงปริมาณไอออนของโลหะที่ผ่านการชะด้วยตัวชะชนิดต่าง ๆ เป็นเวลา 30 นาที	59
ภาพประกอบ 28 แสดงร้อยละการดูดซับและการชะของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ในแต่ละรอบ 60	

บทที่ 1

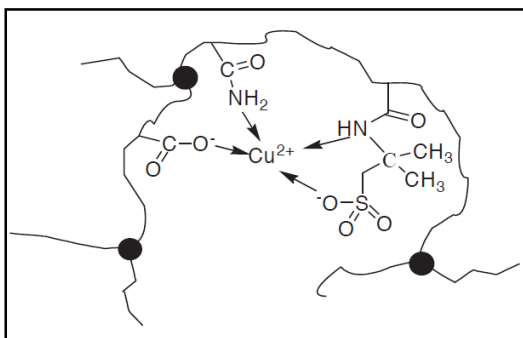
บทนำ

ภูมิหลัง

ปัจจุบันประเทศไทยมีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาของเทคโนโลยีโดยใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มผลผลิตให้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของประชากร จึงทำให้การขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมจนธรรมชาติไม่สามารถจัดการกับของเสียเหล่านั้นได้ จนเกิดเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อม ค่อยๆทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะปัญหาการปล่อยโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ปรอท และ แคดเมียม ในรูปของไอออนของโลหะลงแหล่งน้ำซึ่งเป็นปัญหาอย่างมาก เพราะโลหะกลุ่มนี้ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ดังนั้นจึงสามารถสะสมอยู่ในดินและสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ ซึ่งก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ โดยมีกลไกระดับเซลล์ 5 ชั้น คือ ทำให้เซลล์ตาย เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของเซลล์ เป็นตัวชักนำให้เกิดมะเร็ง เป็นตัวทำให้เกิดความผิดปกติทางพันธุกรรม และทำให้โครโมโซมเกิดความเสียหาย(ลำไย ธีรตันพันธุ์, 2554) นอกจากนั้นมนุษย์เองก็ได้รับผลกระทบจากพิษโลหะหนักผ่านการอุปโภคบริโภคเช่นกัน จากการศึกษาพบว่าแนวโน้มการรายงานผู้ป่วยด้วยโรคพิษจากโลหะหนักทั้งหมดระหว่างปี พ.ศ. 2549 – 2558 อัตราผู้ป่วยต่อประชากรแสนคน อยู่ระหว่าง 0.00-0.18 (กรมควบคุมโรค, 2015) อุตสาหกรรมที่ใช้โลหะหนักเป็นวัตถุดิบในการผลิต เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ การผลิตพลาสติก สี ถ่านไฟฉาย และอุตสาหกรรมการผลิตภาคการเกษตร เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำและส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน

การพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียมีมาอย่างต่อเนื่องแต่ก็ยังไม่สามารถป้องกันการรั่วไหลของโลหะหนักที่ออกสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างสมบูรณ์ จึงมีงานวิจัยมากมายที่ต้องการศึกษาหาวิธีการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำหลากหลายหลายวิธี เช่น การทำให้เกิดตะกอนโดยใช้สารเคมี การสะเทินเปลี่ยนค่าความเป็นกรดด่าง การบำบัดทางชีวภาพ การแลกเปลี่ยนประจุ และที่ได้รับความนิยมไม่น้อยก็คือการใช้สารดูดซับจำพวกไฮโดรเจลมาใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับโลหะหนัก เนื่องจากไฮโดรเจลมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำและไอออนของโลหะหนักที่ละลายในน้ำได้ดี โดยไอออนโลหะหนักจะคีเลตกับอะตอมที่ให้อิเล็กตรอน (electron donor atoms) ของพอลิเมอร์ เช่น ออกซิเจน ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยสร้างพันธะโคออดิเนตโคเวเลนต์

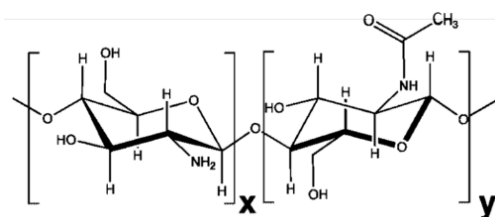
(coordinatecovalent bonds) ดังภาพประกอบ 1 ซึ่งวัสดุที่สามารถนำมาสังเคราะห์เป็นไฮโดรเจลได้นั้นสามารถสังเคราะห์ได้จากทั้งสารเคมีและวัสดุจากธรรมชาติ



ภาพประกอบ 1 แสดงการเกิดฟิสิกส์เลตโทเจนระหว่างโลหะหนักกับไฮโดรเจล

ที่มา: Baur, Holzinger, Gondran, and Cosnier (2010)

วัสดุที่น่าสนใจนำมาใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลนั้นคือไคโตซาน (Chitosan ; CS) อนุพันธ์ของไคตินที่ได้จากการสกัดจากเปลือกกุ้ง กุ้ง และกระดองปู เนื่องจากประเทศไทยมีพื้นที่แนวชายฝั่ง 3,219 กม. อาชีพหลักอย่างหนึ่งของคนในพื้นที่ก็คือการประมงและการแปรรูปอาหารทะเล จึงพบว่ามีผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอาหารทะเลแปรรูปจำนวนมาก โดยแปรรูปสัตว์เศรษฐกิจที่สำคัญ เช่น ปลา กุ้ง ปู เป็นต้น ซึ่งสร้างรายได้ให้กับประเทศเฉลี่ยปีละ 170,000 ล้านบาท และไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตและการส่งออกอาหารทะเลอันดับต้นๆของโลก(สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม, 2551) จึงทำให้ประเทศไทยมีเปลือกของสัตว์เหล่านี้ซึ่งเป็นแหล่งของไคตินจำนวนมาก ดังนั้นไคโตซานจึงมีราคาถูก เหมาะสมที่จะนำมาสังเคราะห์เป็นไฮโดรเจล นอกจากนี้ไคโตซานยังมีความสมบัติในการเป็นตัวดูดซับที่ดี เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันจำพวกไฮดรอกซิลและอะมิโนจำนวนมากบนสายโซ่หลักของโครงสร้างที่สามารถเกิดการคีเลตของไอออนโลหะหนักได้ดีดังภาพประกอบ 2 รวมถึงมีความเป็นพิษต่ำ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติอีกด้วย (Pandey & Mishra, 2011)



ภาพประกอบ 2 แสดงโครงสร้างของไคโตซานซึ่งมีองค์ประกอบย่อยเป็น glucosamine (x) และ N-acetylated glucosamine (y)

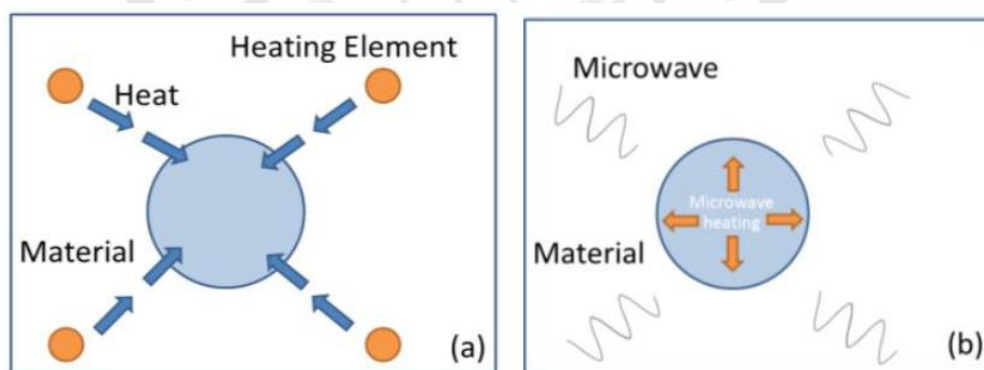
ที่มา: Cathell et al. (2008)

ถึงแม้ว่าไคโตซานจะมีข้อดีในแง่ของหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีของไฮดรอกซิลและอะมิโนได้ แต่จากการศึกษาการนำไคโตซานมาสังเคราะห์เป็นไฮโดรเจลพบว่า ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักของไคโตซานไฮโดรเจล มีความสามารถในการดูดซับน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลชนิดอื่นๆ รวมถึงวิธีการในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลยังใช้เวลานาน ดังตาราง 1

ตาราง 1 ความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงและเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ของไฮโดรเจลชนิดต่างๆ

ชนิดของไฮโดรเจล	ปริมาณการดูดซับไอออนทองแดง (mg/g)	เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ (ชั่วโมง)	กลุ่มผู้วิจัย
Chitosan hydrogel bead	28.86	3.5	(Dai et al., 2011)
Chitosan-cellulose hydrogel	14	6	(N. Li & Bai, 2005)
Magnetic calcium alginate hydrogel bead	159.24	2	(Zhu et al., 2014)
Cellulose-graft polyacrylamide/hydroxyapatite composite hydrogel	175	-	(Saber-Samandari, Saber-Samandari, & Gazi, 2013)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการปรับเปลี่ยนกระบวนการในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับและลดเวลาในการสังเคราะห์หลัง ซึ่งการใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งกระตุ้นให้ความร้อนแทนการให้ความร้อนจากเครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hotplate) มีความน่าสนใจเพราะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและลดเวลาในการสังเคราะห์ของโคโตซานไฮโดรเจลได้ เนื่องจากการให้ความร้อนตามปกติ อุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นโดยความร้อนที่มาจากเส้นลวดให้ความร้อน (Heating element) โดยการพาความร้อน (Convection) หรือการแผ่ความร้อน (Radiation) และการนำความร้อน (Conduction) ที่ได้รับจากเส้นลวดให้ความร้อนจากผิววัสดุไปสู่แกนกลางของวัสดุนั้น สำหรับวิธีการให้ความร้อนแบบนี้นอกจากวัสดุจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นแล้ว อากาศรอบๆ ก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย ซึ่งต่างกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ความร้อนเกิดขึ้นภายในสาร โดยอันตรกิริยาระหว่างสารและไมโครเวฟเท่านั้น โดยไม่จำเป็นต้องทำให้อากาศรอบๆ วัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นดังภาพประกอบ 3 ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟจึงมีสมรรถนะเชิงพลังงาน (Energy efficient) ที่ดีกว่าการให้ความร้อนตามปกติ (ดวงเดือน อาของค์, 2546) โดยมีงานวิจัยที่ทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจลซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นรวมถึงเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ลดลงเมื่อใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนแทนการให้ความร้อนจากเครื่องกวนสารแม่เหล็กให้ความร้อน (Baiya, Nannuan, Tassanapukdee, Chailapakul, & Songsrirote, 2019)



ภาพประกอบ 3 วิธีการให้ความร้อน (a) การให้ความร้อนตามปกติ (Conventional heating)

(b) การให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ (Microwave)

ที่มา: ปริญา ณาจนโรดม (2557)

จากปัญหาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดซับโลหะหนัก โดยทำการศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากไคโตซานร่วมกับโพลีเมอร์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะของวัสดุได้ ด้วยวิธีการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในการเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันให้เป็นไฮโดรเจลที่สามารถนำมาใช้ในการดูดซับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากโลหะหนักได้

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. ศึกษากระบวนการใช้ไมโครเวฟในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจาก Chitosan(CS) Polyvinyl Alcohol (PVA) และ Polyvinyl Pyrrolidone (PVP)
2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และเอกลักษณ์ ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล
3. ศึกษาชนิดไอออนโลหะหนักและปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล
4. ศึกษาไอโซเทอมในการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล
5. ศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ในการดูดซับไอออนโลหะหนัก

ความสำคัญของงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาวิธีการสังเคราะห์ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล โดยใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟเร่งในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เพื่อเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย ซึ่งเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างหนึ่งในประเทศไทย

ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งขอบเขตไว้ดังนี้

1. สังเคราะห์วัสดุดูดซับโลหะหนักชนิดไฮโดรเจลจาก CS PVA และ PVP โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ
2. พิสูจน์คุณสมบัติทางกายภาพโดยพิจารณาจากค่าความเป็นเจล อัตราการบวมน้ำ และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค SEM และ FTIR
3. ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการบวมน้ำและสัดส่วนความเป็นเจลของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ประกอบไปด้วย ชนิดของสารเชื่อมขวาง อัตราส่วนที่เหมาะสมของ PVA

และ PVP อัตราส่วนที่เหมาะสมของไคโตซานและกรดซิตริก การเลือกกำลังไฟฟ้าและระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

4. ตรวจวัดปริมาณการดูดซับชนิดไอออนโลหะหนักชนิดต่างๆ เช่น Ni^{2+} Pb^{2+} Cd^{2+} และ Cu^{2+} ที่ pH ต่างๆของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

5. ตรวจวัดปริมาณการดูดซับสารละลายผสมของไอออนของโลหะ Ni^{2+} Pb^{2+} Cd^{2+} และ Cu^{2+} ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

6. อธิบายลักษณะการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล โดยใช้ Langmuir model หรือ Freundlich model

7. ตรวจสอบความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ในการดูดซับไอออนโลหะหนัก

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถพัฒนาวิธีการสังเคราะห์ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักได้ดี และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เพื่อประยุกต์ใช้ในการดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำเสีย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาวิธีการสังเคราะห์ Chitosan/PVA/PVP ไฮโดรเจล โดยใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟแรงในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเพื่อเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย โดยผู้วิจัยได้นำเสนอความรู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยตามหัวข้อต่อไปนี้

1. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับไฮโดรเจล

- 1.1 สมบัติและลักษณะของไฮโดรเจล
- 1.2 วัสดุในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล
- 1.3 ประเภทของการสังเคราะห์ไฮโดรเจล
- 1.4 สารเชื่อมขวางที่ใช้ในการสังเคราะห์ของไฮโดรเจล
- 1.5 การศึกษาเอกลักษณ์ของไฮโดรเจล
- 1.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับของไฮโดรเจล
- 1.7 การนำกลับมาใช้ซ้ำของไฮโดรเจลเพื่อการดูดซับ

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไมโครเวฟ

- 2.1 ทฤษฎีการให้ความร้อนของคลื่นไมโครเวฟ
- 2.2 กลไกการเกิดความร้อนภายในคลื่นไมโครเวฟ
- 2.3 ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่มีการผลิตวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ

1. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับไฮโดรเจล

1.1 สมบัติและลักษณะของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจล (Hydrogel) เป็นพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic polymers) ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked structure) โดยส่วนใหญ่ไฮโดรเจลจะสังเคราะห์จากพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เช่น หมู่ -OH, -COOH, -CONH-, NH_2 และ -SOH เป็นต้น ประกอบอยู่ในสายโซ่โมเลกุล มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ มีแรงระหว่างโมเลกุลคือพันธะไฮโดรเจน ภายในโครงสร้างมีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูง ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของไฮโดรเจล โดยการดูดน้ำของไฮโดรเจลเกิดขึ้นโดยการเกิดปฏิกิริยาหรือการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลของน้ำกับคู่อิเล็กตรอนโดดเดี่ยว (lone pair electron) ของอะตอมออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชันของไฮโดรเจลในส่วนที่มีขั้ว จากนั้นโมเลกุลของน้ำจะดึงดูดน้ำ

โมเลกุลอื่นๆ เข้ามาเก็บไว้ในโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลโดยการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยตัวเอง สำหรับส่วนที่ไม่มีขั้วในไฮโดรเจลจะเป็นโครงสร้างที่ป้องกันไม่ให้ไฮโดรเจลละลายกับสารละลายที่มีขั้วและป้องกันไม่ให้ไฮโดรเจลเกิดการสลายตัว จึงเป็นส่วนที่ทำให้ไฮโดรเจลคงรูปร่างอยู่ได้ ทั้งนี้การที่ไฮโดรเจลมีโครงสร้างที่แข็งแรง ไม่แยกออกจากกันเมื่อไฮโดรเจลขยายตัวเต็มที่ นอกจากสมบัติการดูดซับน้ำแล้วไฮโดรเจลยังยอมให้โมเลกุลที่เป็นของไหลผ่านโครงร่างไปได้ (วารุณี ตานันต์ & สายันต์ แสงสุวรรณ, 2557) ซึ่งมีการนำไฮโดรเจลมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น

การนำเอาไฮโดรเจลมาสังเคราะห์เป็นแผ่นปิดแผล โดยในงานวิจัยของ Liu และคณะ ได้สังเคราะห์แกมมาพอลิกลูตามีน/เจลาติน ไฮโดรเจล โดยนำเอาเกลือ poly(γ -glutamic acid) ของโซเดียมและแคลเซียมที่สามารถละลายน้ำได้ เพราะมีคุณสมบัติที่เข้ากันได้ทั้งทางชีวภาพ ย่อยสลายได้ดี และดูดซับน้ำได้ดี มาเชื่อมขวางด้วย Oligomeric proanthocyanidins (OPCs) ผลการนำไปทดลองพบว่า การงอกขยายของเซลล์เยื่อบุผิว (re-epithelialization) มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รวมถึงไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ไม่มีความเป็นพิษต่อบาดแผล (Liu, Wang, Lee, & Chung, 2019)

งานวิจัยของฟรานซิสและคณะได้นำไฮโดรเจลมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอาหาร โดยใช้ไฮบริดไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากโซเดียมแอลจีเนตกับเพกตินที่ถูกเชื่อมขวางโดยกรดซิตริก เป็นเนยโกโก้เทียมซึ่งทำหน้าที่เป็นไฮโดรคอลลอยด์ในช็อกโกแลต เนื่องจากต้องการลดปริมาณไขมันในช็อกโกแลตลง โดยเรียกไฮโดรคอลลอยด์ชนิดนี้ว่า สารแทนที่ไขมันในอาหาร (fat replacer) ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากต่อผู้บริโภคที่ต้องควบคุมไขมันในร่างกาย (Francis & Chidambaram, 2019)

การนำไฮโดรเจลมาใช้แก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมก็ได้รับความสนใจจากนักวิจัยเช่นกัน เช่น การสังเคราะห์พอลิอะคริลิกแอซิดไฮโดรเจลเพื่อใช้ในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ดี รวมถึงสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้หลายชนิดอีกด้วย เช่น Cu^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{6+} เป็นต้น (Lv et al., 2019)

1.2 วัสดุในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล

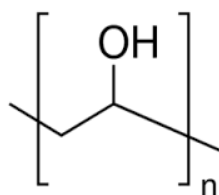
ไฮโดรเจลถูกประยุกต์ใช้ในหลายๆด้าน ดังนั้นการเลือกวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจึงต้องเลือกให้เหมาะสม เนื่องจากวัสดุที่ใช้ส่งผลถึงคุณสมบัติและเอกลักษณ์ของไฮโดรเจลโดยตรง ดังนั้นในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อใช้ในการดูดซับโลหะหนักจำเป็นต้องเลือกวัตถุดิบที่ทำให้วัสดุที่แข็งแรง ไม่เปื่อยยุ่ยง่าย และเพื่อให้ไม่รบกวนสิ่งแวดล้อม จึงต้องสามารถ

ย่อยสลายได้เองในเวลาอันสั้น ตัวอย่างของพอลิเมอร์ตั้งต้นในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 แสดงพอลิเมอร์ตั้งต้นในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลและคุณสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

พอลิเมอร์ที่ใช้	คุณสมบัติของพอลิเมอร์	เอกสารอ้างอิง
โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)	คุณสมบัติเชิงกลที่ดี บวมน้ำได้มาก มีความเสถียรทางเคมี ไม่เป็นพิษ	(Jiang, Liu, & Feng, 2011)
โพลีไวนิลไพโรลิโดน (PVP)	ขึ้นรูปง่าย ไม่เป็นพิษ บวมน้ำได้มาก บวมน้ำได้อย่างรวดเร็ว	(Roy & Saha, 2012)
ไคโตซาน	เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ย่อยสลายง่าย มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถจับกับไอออน ของโลหะได้จำนวนมาก	(Hamed, Moradi, Hudson, & Tonelli, 2018)
แป้ง	ย่อยสลายตามธรรมชาติและขึ้นรูปได้ดี แต่เปราะและแตกหักง่าย	(Van Nieuwenhove et al., 2016)
เจลาติน	เข้าได้ดีกับการประยุกต์ใช้ทางชีวภาพ จึงนิยมใช้ในการทางการแพทย์	

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol: PVA) เป็นไฮโมพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สามารถละลายน้ำได้ โดยมีสูตรในอุดมคติ (idealized formula) คือ $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})]_n$ เนื่องจากมีลักษณะเป็นแป้งสีขาว ไม่มีกลิ่น เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต จึงนิยมใช้ใช้กันอย่างแพร่หลายในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ และการเคลือบต่างๆ นอกจากนี้ยังนิยมประยุกต์ใช้ในวงการแพทย์ เนื่องจากมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) มีแนวโน้มช่วยการเชื่อมต่อกันของโปรตีน ไม่เป็นพิษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับการทำเอ็นเทียม มีความสามารถในการบวมน้ำสูง ละลายน้ำได้ดีที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำที่หมู่ hydroxyl (-OH) ซึ่งแสดงในภาพประกอบที่ 4 โดยสมบัติของ PVA ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและระดับการไฮโดรไลซิส เพราะถ้ายังมีระดับไฮโดรไลซิสสูง PVA จะมีความแข็งแรงมากกว่า เนื่องจากสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้มากกว่า (สุรศักดิ์ ไวยวงษ์สกุล, 2543)



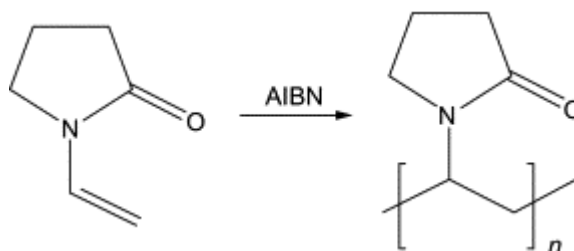
ภาพประกอบ 4 แสดงโครงสร้างทางเคมีของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์

ที่มา: www.sigmaaldrich.com

หลักจากศึกษาการนำเอา PVA มาใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อการดูดซับโลหะหนัก พบว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักที่ดี เช่น (Wang & Wang, 2016) ได้สังเคราะห์ไฮโดรเจลจาก PVA และ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl Cellulose) ด้วยวิธีการ Freeze-Thaw Method ผลการทดลองพบว่าไฮโดรเจลดังกล่าวที่สังเคราะห์ขึ้นนั้น สามารถดูดซับซิลเวอร์ไอออนได้มากถึง 8.4 มิลลิกรัมต่อกรัมของไฮโดรเจล มีอัตราการบวมน้ำอยู่ที่ 1437% และมีต้นทุนในการสังเคราะห์ที่ต่ำ

(Chowdhury, Ismail, Beg, Hegde, & Gohari, 2015) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจาก PVA และ พอลิแซ็กคาไรด์ชนิดต่างๆ ด้วยกระบวนการแผ่รังสีแกมมา เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับสารหนู และไอออนของโลหะหนักชนิดอื่นๆ พบว่า สามารถสังเคราะห์เป็นเจลได้ดี มีค่าสัดส่วนความเป็นเจลสูง (98%) สามารถดูดซับสารหนู (As^{3+}) และเหล็ก (Fe^{3+}) ได้ 22,112 และ 37,075 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัมของไฮโดรเจล ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ทำการศึกษามา

โพลีไวนิลไพโรลิโดน (Polyvinylpyrrolidone: PVP) ชื่อสามัญคือ polyvidone หรือ povidone เป็นพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ดี สามารถสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากมอนอเมอร์ที่มีชื่อว่า N-vinylpyrrolidone ดังภาพประกอบ 5 โดยมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 40,000 ถึง 360,000 ขึ้นอยู่กับคุณภาพของสาร ในโมเลกุลมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ คือกลุ่มของเอไมด์ และในส่วนเมทิลีนจะเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ สามารถขยายตัวจากการดูดซับน้ำได้ถึง 40% ของน้ำหนัก มีการนำโพลีไวนิลไพโรลิโดน ประยุกต์ในงานหลายประเภทโดยเฉพาะทางการแพทย์ การขนส่งยา เครื่องสำอาง เป็นต้น

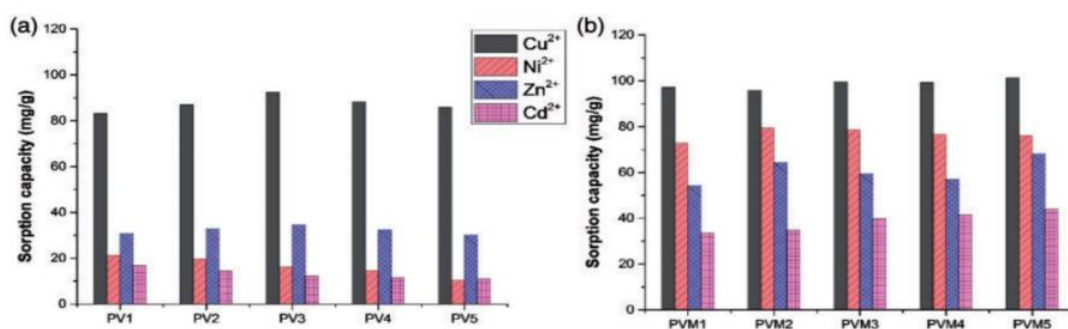


ภาพประกอบ 5 แสดงวิธีการสังเคราะห์ Polyvinylpyrrolidone จาก N-vinylpyrrolidone

ที่มา: Kariduraganavar, Kittur, and Kamble (2014)

จากการศึกษาพบว่า มีนักวิจัยที่สนใจนำเอา PVP ไปประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อใช้เป็นวัสดุในการดูดซับโลหะหนักมากพอสมควร เช่น มีการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจาก PVP ร่วมกับ กรดอะคริลิก (Acrylic acid) โดยใช้รังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 เป็นแหล่งให้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยา พบว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้นั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดี สามารถดูดซับไอออนของเหล็ก (Fe^{3+}) ทองแดง (Cu^{2+}) และแมงกานีส (Mn^{2+}) ได้ 36.23 และ 14 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (El-Hag Ali, Shawky, Abd El Rehim, & Hegazy, 2003)

(Kemik, Ngwabebhoh, & Yildiz, 2016) ได้สังเคราะห์พอลิไวนิลไพโรลิโดนร่วมกับเมทิลอะคริเลต (methylacrylate) หรือ copolymer P(VP-co-MA) ซึ่งสังเคราะห์จาก PVP เมทิลอะคริเลต และแมคโครอินิมเมอร์ (macroinimer) เพื่อใช้ในการดูดซับไอออนของโลหะหนักชนิดต่างๆ โดยทำการเปรียบเทียบกับ PVP ไฮโดรเจล ผลการทดลองพบว่า copolymer P(VP-co-MA) สามารถดูดซับได้ 98.53 มิลลิกรัมต่อกรัม ในสารละลายที่ pH 8 นอกจากนี้ไฮโดรเจلدังกล่าวเหมาะสมต่อการใช้ในการดูดซับไอออนของทองแดงที่สุด เนื่องจากปริมาณในการดูดซับไอออนของโลหะหนักชนิดอื่นๆ น้อยกว่าไอออนของทองแดงพอสมควรในทุกๆ สัดส่วน โดยเฉพาะใน PVP ไฮโดรเจล ดังภาพประกอบ 6

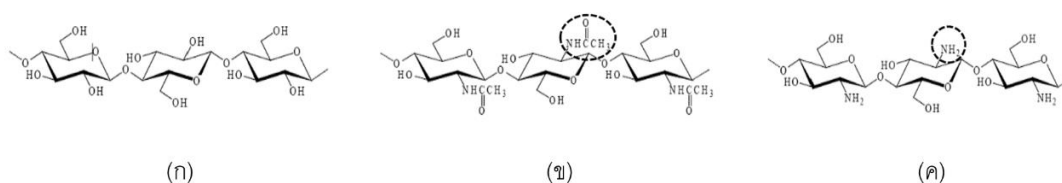


ภาพประกอบ 6 ปริมาณการดูดซับไอออนของโลหะหนักชนิดต่างๆ ที่สภาวะสมดุล (a) PVP ไฮโดรเจล และ (b) P(VP-co-MA) ไฮโดรเจล

ที่มา: Kemik et al. (2016)

ไคโตซาน (Chitosan) หรือ 2 Amino-2 deoxy- β -D-glucopyranan มีสีขาวหรือสีครีม ไม่มีกลิ่น อยู่ในรูปแผ่น ผงหรือเส้นใย ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีความเป็นพิษต่ำ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาขจัดหมู่อะเซทิล (de-acetylation) ออกจากไคติน โดยการใช้ด่างเข้มข้นหรือเอนไซม์ โดยไคตินเป็นองค์ประกอบของเปลือกของสัตว์จำพวกกุ้ง ปู และแกนหมึก เป็นต้น

แกนหลักของโมเลกุลของไคตินและไคโตซานมีโครงสร้างของสายโซ่โครงสร้างหลักที่เหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่หมู่แทนที่ คาร์บอนตำแหน่งที่สองในวงแหวนไพราโนส คือ หน่วยของไคตินมีหมู่แทนที่ คือ หมู่อะเซทาไมด์ (acetamide group, $-\text{NHC}(\text{O})\text{CH}_3$) ขณะที่หน่วยของไคโตซานมีหมู่แทนที่ คือ หมู่อะมิโน (amino group, $-\text{NH}_2$) ดังภาพประกอบ 7 (สุภาวดี บุญทา, 2560)



ภาพประกอบ 7 โครงสร้างของเซลลูโลส (ก) ไคติน (ข) และไคโตซาน (ค)

ที่มา: สุภาวดี บุญทา (2560)

ไคโตซานมีคุณสมบัติที่สามารถละลายได้ในสารละลายของกรดอินทรีย์อ่อน ได้แก่ กรดแลคติก, กรดไพรูวิก, และกรดซิตริก เป็นต้น โดยพบว่าไคตินมีความสามารถในการบวมน้ำต่ำกว่าไคโตซาน เนื่องจากปริมาณโปรตีนทั้งหมด หมู่ที่สามารถเกิดเป็นเกลือกับตัวทำละลาย รวมทั้งความแตกต่างของผลึกไคโตซานกับผลึกไคติน (สุธิดา คงทอง, 2552)

ปัจจุบันนิยมนำไคโตซานมาใช้ประโยชน์มากกว่าไคติน เนื่องจากสามารถประยุกต์ได้หลากหลายด้าน โดยการประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อมนั้น น่าสนใจเพราะด้วยคุณสมบัติของไคโตซานที่สามารถดูดซับ และจับกับสารอินทรีย์จำพวกไขมัน สี รวมถึงสารจำพวกโลหะหนักได้ดีจึงนิยมนำมาประยุกต์ใช้สำหรับเป็นสารกรองหรือตัวดูดซับสารมลพิษในระบบบำบัดน้ำเสีย

งานวิจัยที่ต้องการพัฒนาวัสดุดูดซับจากไคโตซานให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น (L. Li et al., 2015) กล่าวว่าไคโตซานมีข้อด้อยในแง่ของความสามารถในการทนทานต่อสารเคมีต่ำ พื้นที่ผิวน้อย รวมถึงมีคุณสมบัติเชิงกลที่น้อยอีกด้วย จึงเติม PVA และแกรฟีนออกไซด์ เพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องคุณสมบัติเชิงกลและพื้นที่ผิวของไคโตซานตามลำดับ ทำให้คุณสมบัติของ PVA/CS/GO ไฮโดรเจลดีขึ้น โดยไคโตซานไฮโดรเจลที่ไม่ได้เติมแกรฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติในการดูดซับไอออนของทองแดง (Cu^{2+}) 102.32 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เมื่อเติมแกรฟีนออกไซด์ คุณสมบัติในการดูดซับไอออนของทองแดง เพิ่มขึ้นเป็น 162.11 มิลลิกรัมต่อกรัมนั่นเอง

มีการพัฒนาไคโตซานไฮโดรเจลให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวโดยการสังเคราะห์โดยใช้ไคโตซานกับเจลาติน โดยใช้กลูตาโรลดีไฮด์ (glutaraldehyde) เป็นสารเชื่อมขวาง พบว่ามีความจำเพาะในการดูดซับกับไอออนของปรอท (Hg^{2+}) ผลการทดลองพบว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นดูดซับปรอท Hg(II) ได้ดีทั้งในสารละลาย Hg(II) และสารละลายไอออนโลหะหนักผสม รวมถึงไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถบวมตัวได้รวดเร็ว ซึ่งสามารถบวมตัวกลับมา 82% ของขนาดที่อิ่มตัว โดยใช้เวลาเพียง 30 นาที (Lone, Yoon, Lee, & Cheong, 2019)

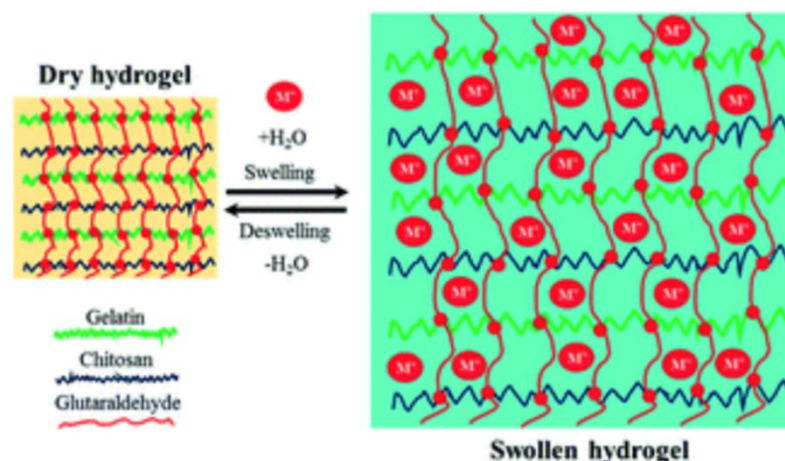
1.3 ประเภทของการสังเคราะห์ไฮโดรเจล

วิธีการเตรียมไฮโดรเจลถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่มีสมบัติตามต้องการ และเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานที่เจาะจง โดยวิธีการที่นิยมในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลมี 3 กระบวนการหลัก คือ การเชื่อมโยงพันธะทางกายภาพ การเชื่อมโยงพันธะทางเคมี และการเชื่อมโยงพันธะโดยรังสี โดยกระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลแบบต่าง ๆ แสดงในตาราง 3 (Gulrez, Al-Assaf, & Phillips, 2011)

ตาราง 3 แสดงตัวอย่างกระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจล

ประเภทของการเชื่อมขวาง	จุดเด่นของวิธี	ตัวอย่างวิธีการ crosslink
Physical crosslink	- ไม่ต้องใช้สารเชื่อมขวาง - ไม่มีสารตกค้าง	Ionic interaction
		H-bonding
		Freeze – thawing
Chemical crosslink	- ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้มีความเสถียร คงรูป - เพิ่มคุณสมบัติที่ต้องการของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้	Chemical cross – linkers
		Grafting
Radiation crosslink	- ไม่ต้องใช้สารเชื่อมขวาง - รักษาความเข้ากันได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์ชีวภาพ - ปราศจากการปนเปื้อนเชื้อโรค เหมาะใช้กับพอลิเมอร์ชีวภาพ	Aqueous state radiation
		Radiation in paste
		Solid state radiation

การสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อดูดซับไอออนของโลหะหนักที่พยายามใช้สารตั้งต้นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ย่อยสลายได้เอง ส่วนใหญ่สารตั้งต้นจะเป็นวัสดุจากธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส ไคโตซาน แอลจีเนต เป็นต้น ซึ่งปัญหาที่พบก็คือคุณสมบัติทางกายภาพของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นจากวัสดุเหล่านั้นไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีการพยายามเติมสารเติมแต่ง เพื่อลดข้อด้อยของวัสดุเหล่านั้น ดังนั้นกระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลแบบ Chemical crosslink จึงเหมาะสมต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อดูดซับไอออนของโลหะหนัก เช่น งานวิจัยของ (Lone et al., 2019) กล่าวว่าเลือกใช้ไคโตซานเป็นสารตั้งต้นในการผลิตร่วมกับเจลาตินโดยใช้กลูตาโรลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) เนื่องจากไคโตซานมีปัญหาในเรื่องการบวมน้ำที่ไม่ดี สมบัติเชิงกลต่ำ และยืดหยุ่นได้ไม่ดี จึงทำการเติมเจลาตินเพื่อลดข้อบกพร่องดังกล่าวของไคโตซาน เพราะเจลาตินมีข้อดีในเรื่องความสามารถในการละลายน้ำที่ดี โดยลักษณะการเชื่อมขวางของไฮโดรเจลแสดงดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 แสดงลักษณะการเชื่อมขวางของเจลาติน ไคโตซานไฮโดรเจลโดยใช้
กลูตาโรลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง

ที่มา: Lone et al. (2019)

1.4 ความสำคัญของสารเชื่อมขวางในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล

การเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์จะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณตำแหน่งที่เกิดการเชื่อมขวางที่ปรากฏในโครงสร้าง

1. ความยืดหยุ่น คือ ความสามารถในการยืดและหดของโครงสร้าง Elastomers ที่มีในโครงสร้างนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณการเกิดการเชื่อมขวาง แต่อย่างไรก็ตามถ้าเพิ่มการเชื่อมขวางมากเกินไป ก็จะทำให้โครงสร้างแข็ง ไม่ยืดหยุ่นและแตกหักได้

2. การลดความเหนียวข้น (การต้านทานการไหล) ของพอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์ไม่สามารถเคลื่อนที่แบบไหลได้จากการเชื่อมขวางภายในโครงสร้าง ทำให้เกิดพฤติกรรมเคลื่อนที่อย่างช้าๆ (Creep behavior)

3. การไม่ละลายน้ำของพอลิเมอร์ เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายอย่างแน่นหนาโดยพันธะโคเวเลนต์ แต่ถึงแม้จะไม่สามารถละลายในตัวทำละลายได้ แต่สามารถดูดซับตัวทำละลายเข้าไปภายในโครงสร้างได้มาก ซึ่งจะเรียกว่าเจล

4. เพิ่มอุณหภูมิในการเปลี่ยนเป็นแก้วของพอลิเมอร์ (glass transition temperature : T_g) ซึ่งหมายถึง ความแข็งแรงและความทนทานของพอลิเมอร์ การเกิดการเชื่อมขวางของพอลิเมอร์จะทำให้การจัดเรียงตัวของสายพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป เช่นการเติม Boric acid ลงใน PVA จะเพิ่มค่า T_g

5. จุดหลอมเหลวต่ำลง สำหรับผลึกของพอลิเมอร์ที่มีปริมาณการเชื่อมขวางต่ำ พอลิเมอร์นั้นจะมีพฤติกรรมการเป็นผลึกลดลง ดังนั้นการเกิดการเชื่อมขวางนั้นเป็นอุปสรรคในการปรับตัวของพอลิเมอร์ เพราะถ้าพอลิเมอร์นั้นมีความอ่อนนุ่ม ก็จะส่งผลต่อจุดหลอมเหลวที่ต่ำลงด้วย

6. การเปลี่ยนรูปจากเทอร์มอพลาสติกเป็นพลาสติกเทอร์มอเซต เพราะพอลิเมอร์ที่มีตำแหน่งที่เกิดการเชื่อมขวางจำนวนมากจะส่งผลทำให้ไม่สามารถนำมาหลอมแล้วเปลี่ยนรูปร่างของพอลิเมอร์นั้นได้

จากการศึกษาพบว่าสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมในการใช้สำหรับสังเคราะห์ไโคโตซานไฮโดรเจลนั้นมีอยู่หลายชนิด เช่น Ethylene glycol ถูกใช้เป็นสารเชื่อมขวางในการสังเคราะห์ไโคโตซานไฮโดรเจล เพื่อสร้างโครงร่างตาข่ายของ chitosan-L- PEG(COOH)₂ ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้โดยการนำไโคโตซานไปให้ความร้อนพร้อมกับสารละลาย PEG600(COOH)₂ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 60°C. โดยการใช้เทคนิค IR spectroscopy แสดงให้เห็นว่าการเกิดพันธะเอไมด์ที่ก่อให้เกิดโครงตาข่ายทางเคมีที่มีส่วนที่เป็น pH-sensitive hydrogels ที่ช่วยเพิ่มความมีขั้วของไฮโดรเจล มากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล (Mincheva, Manolova, Sabov, Kiurkchiev, & Rashkov, 2004)

Trisodium Citrate ถูกนำมาใช้เป็นสารเชื่อมขวางในการสังเคราะห์ไโคโตซานไฮโดรเจลในงานวิจัยของ Soheyla Honary และคณะ เพื่อใช้เป็นตัวนำส่งยาจำพวกที่ไม่ละลายน้ำ (Non-Polar Drug) เนื่องจากไโคโตซานสามารถขยายตัวได้ดีในสภาวะกรด ดังนั้นการเชื่อมขวางจะเกิดจากแรงทางไฟฟ้าระหว่างหมู่ฟังก์ชันเอมีนของไโคโตซานกับแอซิเตทแอนไอออนได้ดี (Soheyla Honary, 2010)

Epichlorohydrin (ECH) นิยมนำมาใช้เป็น crosslinking agent เนื่องจากมีข้อดี คือ การเชื่อมขวางโดยใช้ Epichlorohydrin นั้นจะไม่ก่อให้เกิดการกำจัดหมู่ฟังก์ชันเอมีนของไโคโตซาน อย่างในงานวิจัยของ Yoldas Seki และคณะ มีความต้องการสังเคราะห์ฟิล์มไโคโตซาน-อีพิคลอโรไฮดริน ไฮโดรเจล หรือ (ChitEPI) เพื่อการปลดปล่อย Promethazine Hydrochloride ในหลอดทดลอง โดยใช้ข้อดีของอีพิคลอโรไฮดรินที่รักษามูลค่าหมู่ฟังก์ชันเอมีนเอาไว้ เพื่อที่จะไว้ใช้จับกับ Promethazine Hydrochloride (Seki & Yurdakoc, 2008)

Glutaraldehyde (GA) ถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์ไโคโตซานไฮโดรเจลสำหรับผลิตตัวนำส่งยาและใช้ในงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อ ผลการทดลองพบว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นมี

คุณสมบัติที่ดีในการเป็นสารนำส่งยา และยังได้ผลตอบสนองต่อเซลล์ที่ดีในการใช้โคโคซาน ไฮโดรเจลเป็นเนื้อเยื่อเทียม (Akakuru & Isiuku, 2017)

1.5 การศึกษาเอกลักษณ์ของไฮโดรเจล

การศึกษาเอกลักษณ์และประสิทธิภาพการดูดซับของไฮโดรเจล สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีที่สะดวก เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของไฮโดรเจล โดยมีหัวข้อที่ประเมินได้ดังนี้

1.6.1 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

การสังเคราะห์ไฮโดรเจลสามารถประเมินส่วนที่เป็นเจลได้จากการวัดปริมาณส่วนที่ไม่ละลายน้ำของไฮโดรเจลหลังจากการแช่ในน้ำปราศจากไอออน (deionized water, DI) เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หรือ 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้มั่นใจว่าไฮโดรเจลกระจายตัวในน้ำ โดยสัดส่วนความเป็นเจล (Gel Fraction) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้ (Gulrez et al., 2011)

$$\text{ความเป็นเจล} = \frac{\text{น้ำหนักของไฮโดรเจลแห้งหลังการบวมน้ำ}}{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลแห้งก่อนการบวมน้ำ}} \times 100$$

1.6.2 การวัดการบวมน้ำ

มาตรฐานอุตสาหกรรมประเทศญี่ปุ่น K8150 ได้เสนอวิธีการวัดการบวมน้ำของไฮโดรเจลไว้ โดยการแช่ไฮโดรเจลแห้งในน้ำ DI เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง หลังจากการบวมน้ำให้กรองไฮโดรเจลด้วยตาข่ายสแตนเลสขนาดรู 681 μm และวัดปริมาณการบวมน้ำดังสมการต่อไปนี้

$$\% \text{การบวมน้ำ} = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100$$

เมื่อ W_d หมายถึง น้ำหนักของเจลหลังแช่สารละลายแล้วนำไปอบแห้ง

W_s หมายถึง น้ำหนักของเจลหลังแช่สารละลาย

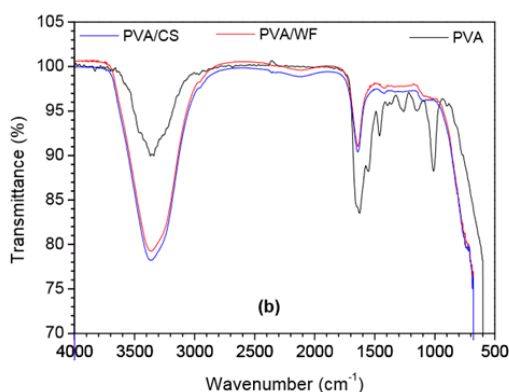
นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่นในการวัดการบวมน้ำของไฮโดรเจล โดยทำการวัดภายใต้ volumetric vial ซึ่งใส่ไฮโดรเจลแห้งประมาณ 0.05-0.1 กรัมลงในน้ำบริสุทธิ์สูง 25-30 มิลลิลิตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อให้ได้ชั้นของวัสดุที่กักเก็บ

น้ำเอาไว้ กับชั้นของน้ำที่ไม่ถูกดูดซับ แล้วดูดชั้นน้ำที่ไม่ถูกดูดซับออก แล้วนำผลที่ได้ไปคำนวณตามสมการการบวมน้ำในข้างต้น (Gulrez et al., 2011)

1.6.3 Fourier Transform Infrared Spectroscopy : FTIR

เราใช้เทคนิค FTIR สำหรับการศึกษามูฟกัซันของโมเลกุล โดยข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างทางโมเลกุลที่ได้เป็นได้ทั้งเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ นิยมใช้วิเคราะห์ทดสอบสารอินทรีย์ ใช้ได้ดีกับสารตัวอย่างที่มีความบริสุทธิ์สูงทั้งที่อยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยเป็นการกระตุ้นสารด้วยพลังงานรังสี ในช่วงของแสงอินฟราเรด ผ่านสู่สารอินทรีย์ พันธะเคมีในโมเลกุลของสารจะดูดกลืนพลังงานที่ค่าความยาวคลื่นหนึ่ง ข้อมูลนี้จะถูกประมวลโดยคอมพิวเตอร์โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ที่เรียกว่า ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม (Fourier Transform) ซึ่งจะคำนวณพลังงานของแต่ละความยาวคลื่นและแปรผลออกมาเป็นสเปกตรัม เนื่องจากสารแต่ละชนิดให้สเปกตรัมที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถนำมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่มีอยู่ในฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการพิสูจน์และบ่งชี้ชนิดของสารตัวอย่างได้ (วรวงคณา อนุชิตโอฬาร, 2546)

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจลมีความจำเป็นต้องพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อยืนยันโครงสร้างของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นว่าเปลี่ยนไปมากน้อยแค่ไหนจากสารตั้งต้นหลัก รวมถึงใช้ข้อมูลจาก FTIR spectra เป็นหลักฐานประกอบการอธิบายต่างๆในงานวิจัย เช่น มูฟกัซันที่ใช้ในกระบวนการดูดซับของไฮโดรเจล เป็นต้น เหมือนกับงานวิจัยของ Md. Najmul Kabir Chowdhury และคณะ ได้ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นจากพอลิแซคคาไรด์ต่างๆกับ PVA เพื่อยืนยันว่าผู้วิจัยสามารถสังเคราะห์ได้สำเร็จตามที่ต้องการจริง เพราะ FTIR spectra เปลี่ยนไปหลังการสังเคราะห์ โดยการอธิบายจากตำแหน่งของพีคสำคัญที่พบ คือ $3000-3600\text{ cm}^{-1}$ (O-H stretch region), $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ (C-H stretch region), $800-1500\text{ cm}^{-1}$ (the fingerprint region) ดังภาพประกอบ 9



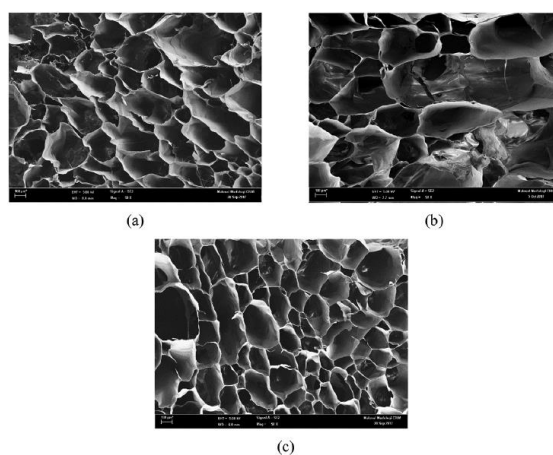
ภาพประกอบ 9 FTIR spectra ของพอลิแซ็กคาไรด์/PVA ไฮโดรเจล และ PVA ไฮโดรเจล

ที่มา: Chowdhury et al. (2015)

1.6.4 Scanning electron microscope (SEM)

การศึกษาลักษณะผิว (topography) เช่น ความเรียบ ความหยาบผิว และรูพรุน จำเป็นต้องใช้เทคนิค SEM ในการวิเคราะห์ ซึ่งสัญญาณต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จะเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างสารตัวอย่างกับลำอิเล็กตรอน (Sample-beam interaction) โดยอิเล็กตรอนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด (electron gun) วิ่งผ่านคอลัมน์ (column) จะถูกเร่งให้เพิ่มพลังงานจนให้สูงขึ้น โดยสนามไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่างกัน แล้วแต่ชนิดของเทคนิควิเคราะห์ จากนั้นอิเล็กตรอนจะกระทบกับชิ้นงานและเกิดอันตรกิริยากัน ทำให้เกิดสัญญาณประเภทต่างๆ ในกรณีที่เป็นการวิเคราะห์ในเทคนิคแบบจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) (จตุพร วุฒิกนกกาญจน์)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อดูดซับไอออนของโลหะหนัก นิยมศึกษาขนาดและจำนวนของรูพรุนของไฮโดรเจล รวมถึงการเกาะตัวของอนุภาคบนผิวของไฮโดรเจล เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบหรืออธิบายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้น เพราะรูพรุนของไฮโดรเจลมีผลต่อปริมาณการดูดซับและการบวมน้ำของไฮโดรเจลนั้นๆ ด้วย ซึ่งงานวิจัยของ (Teow, Kam, & Mohammad, 2018) ก็ได้ใช้ภาพจาก SEM ในภาพประกอบ 10 เพื่อการอธิบายความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ด้วยอัตราส่วนที่ต่างกันของอีพิกลอโรไฮดริน (Epichlorohydrin) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง จากภาพผู้วิจัยอธิบายว่า (c) ใช้ปริมาณของอีพิกลอโรไฮดรินมากที่สุดทำให้รูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก โครงสร้างของไฮโดรเจลจึงไม่ยืดหยุ่น การบวมน้ำจึงไม่ดีการดูดซับจึงมีประสิทธิภาพต่ำกว่า (a) และ (b) ซึ่งทำให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจผลการทดลองมากยิ่งขึ้น



ภาพประกอบ 10 แสดง FESEM micrographs ของเซลล์ไฮโดรเจล

ที่มา: Teow et al. (2018)

1.6 ไอโซเทอर्मการดูดซับของไฮโดรเจล

ไอโซเทอर्मของการดูดซับ (adsorption isotherm) คือ กราฟความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่ภาวะสมดุลของตัวดูดซับบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของเหลว (C_e) โดยไอโซเทอर्मของการดูดซับจะถูกพลอตด้วยสมการที่มีตัวแปรต่างๆ ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปริมาณตัวถูกดูดซับบนของแข็ง และมีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับอยู่ในภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ ได้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่า q_e และ C_e สามารถสอดคล้องกับรูปแบบของไอโซเทอर्मการดูดซับได้มากกว่า 1 แบบ ซึ่งในปัจจุบันมีสมการไอโซเทอर्मที่ใช้วิเคราะห์รูปแบบการดูดซับมากมาย แต่โดยส่วนใหญ่สมการที่ใช้ในการอธิบายรูปแบบการดูดซับของไฮโดรเจล คือ ไอโซเทอर्मแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และ ไอโซเทอर्मแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm)

1.6.1. ไอโซเทอर्मแบบแลงเมียร์

ในปี ค.ศ. 1916 แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอर्मโดยมีสมมติฐาน คือ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) มีจำนวนโมเลกุลและตำแหน่งที่ถูกดูดซับที่แน่นอน และในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับ โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น โดยโมเลกุลที่จะถูกดูดซับจะไม่สามารถย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e}$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{b q_m}$$

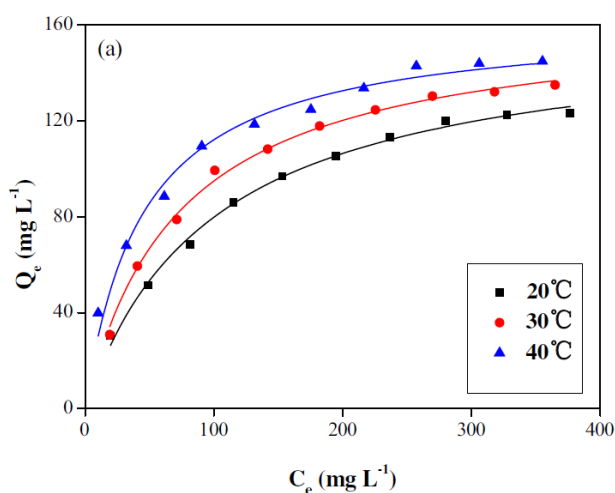
เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ(g) ที่ภาวะสมดุล หรือเรียกว่า ค่าการดูดซับที่ภาวะสมดุล

q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer)

b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

จากสมการข้างต้นสามารถพลอตเพื่อหาความสัมพันธ์ตามกราฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 11 ซึ่งเป็นการหาไอโซเทอรั่มการดูดซับของ PVA/CS/GO composite hydrogel



ภาพประกอบ 11 กราฟแสดงไอโซเทอรั่มการดูดซับโดยพลอตจากสมการแลงเมียร์แบบไม่เป็นเส้นตรงที่อุณหภูมิต่างๆ

ที่มา: L. Li et al. (2015)

1.6.2. ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช

สมการของฟรุนดลิชมีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่า พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบซ้อนทับกัน ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช เป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) ความสัมพันธ์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$q_e = K_f C_e^{1/n}$$

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_f$$

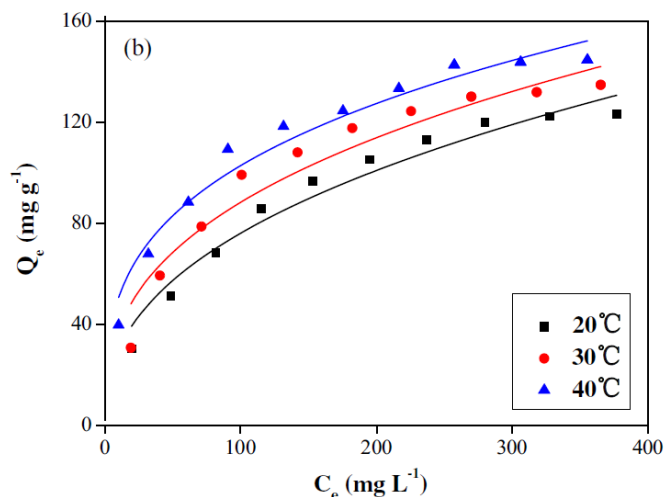
เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

K_f คือค่าคงที่แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

n คือค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e กับ q_e จะได้กราฟความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง (non linear) จากสมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากค่า $1/n$ ถ้ามีค่ามากแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่จะเกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ นอกจากนี้ค่า $1/n$ สามารถอธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับได้อีกด้วย โดยถ้า $1/n$ เท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับมีความสัมพันธ์เป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับที่จะใช้ในการดูดซับมีปริมาณมาก และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ จากสมการข้างต้นสามารถพลอตเพื่อหาความสัมพันธ์ตามกราฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 12 ซึ่งเป็นการหาไอโซเทอร์มเทอร์มการดูดซับของ PVA/CS/GO composite hydrogel



ภาพประกอบ 12 กราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับโดยพลอตจากสมการ Freundlich ที่อุณหภูมิ
ต่างๆ

ที่มา: L. Li et al. (2015)

1.6.3 การใช้สถิติเพื่อประกอบการพิจารณารูปแบบของการดูดซับ

การสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มแบบเส้นตรง อาจไม่เพียงพอ
กับการสรุปได้ว่ารูปแบบการดูดซับของวัสดุนั้นๆ สัมพันธ์กับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบใดมากที่สุด
ดังนั้นจึงมีการนำเอากระบวนการทางสถิติเข้ามาช่วยประกอบการพิจารณารูปแบบของการดูดซับ
โดย Akaike ได้เสนอเกณฑ์การคัดเลือกสมการการทำนายที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด คือ
เกณฑ์เอไอซี หรือ AIC (Akaike's information criterion) ซึ่งใช้ทฤษฎีสารสนเทศ (Information
Theory) ด้านการประมาณข้อมูลที่สูญหายสร้างเป็นเกณฑ์ขึ้นมา โดยการคัดเลือกสมการด้วย
เกณฑ์นี้สามารถใช้ได้ดีกับตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ โดยการประเมินการเลือกตัวแบบโดยใช้เอไอซี
จะเลือกสมการที่ให้ค่าเอไอซีต่ำสุดเป็นสมการที่ดีที่สุด เพราะเป็นสมการที่อธิบายตัวแปรต่างๆ ได้ดี
ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ (Burnham & Anderson, 1998)

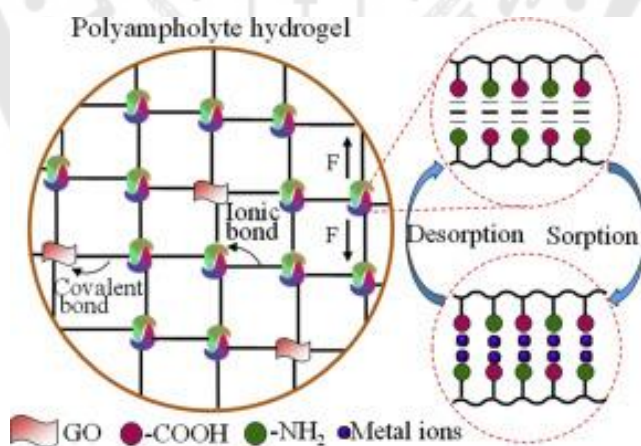
$$SSE = \sum_{i=0}^N (q_{t,cal(i)} - q_{t,exp(i)})^2$$

$$AIC = N \left(\frac{SSE}{N} \right) + 2N_p + \frac{2N_p(N_p+1)}{N - N_p - 1}$$

เมื่อ	SSE	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของตัวแบบการถดถอย
	q_t	คือ ปริมาณของไอออนที่ถูกดูดซับ ณ เวลานั้นๆ
	N	คือ ขนาดของตัวอย่างที่ศึกษา
	N_p	คือ จำนวนของพารามิเตอร์ที่อยู่ในโมเดลการดูดซับนั้นๆ

1.7 การนำกลับมาใช้ซ้ำของไฮโดรเจลเพื่อการดูดซับ

เพื่อให้วัสดุดูดซับคุ้มค่าต่อการสังเคราะห์จึงมีการพยายามในการนำไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาโลหะหนักในแหล่งน้ำ กลับมาใช้งานซ้ำอีกโดยการชะเอาไอออนของโลหะที่ถูกดูดซับในโครงสร้างของไฮโดรเจลออกด้วยสารละลายชนิดต่างๆ เพื่อให้พื้นที่ผิวของไฮโดรเจลสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้อีกครั้ง งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ใช้ 0.1M HNO_3 ในการชะไอออนของโลหะหนักออก โดย H^+ ที่เพิ่มขึ้นมากในสารละลายจะทำให้สมดุลในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไป หมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลเดิมที่เคยสร้างพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์กับไอออนของโลหะ ก็จะถูกโปรตอนเตด้วย H^+ ไอออนของโลหะก็จะถูกผลักออกมาด้วยแรง Electrostatic repulsion นั่นเอง ผลการทดลองพบว่า PVA/CS/GO composite hydrogel สามารถรักษาความสามารถในการดูดซับไว้ได้ถึง 92% เมื่อทำการ Adsorption Desorption cycle 6 ครั้ง (L. Li et al., 2015) โดยกระบวนการ Adsorption Desorption cycle นั้นสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 แสดงกระบวนการเกิด Adsorption Desorption cycle ของ polyampholyte hydrogel

ที่มา: Zhou et al. (2016)

จากการศึกษาพบว่าตัวชะ (Eluent) นอกจากกรดไนตริก ยังมีการเลือกใช้ตัวชะอื่นๆ อีก เช่น ในการสังเคราะห์ supercritical extraction soybean dregs-poly(acrylic acid) hydrogel (SESD-PAA) ผู้วิจัยใช้สารตั้งต้นเป็นกากถั่วเหลืองและกรดพอลิอะคริลิก ในการสังเคราะห์เป็นไฮโดรเจล เพื่อใช้ในการดูดซับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสีย และได้ศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุดูดซับนี้ ด้วยวิธีการชะซึ่งนำไฮโดรเจล 0.1 กรัม ไปแช่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 50 มิลลิลิตร ณ อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เพิ่มขึ้น ค่า Desorption ratio ก็เพิ่มขึ้นไปด้วย และเมื่อทำการกระบวนการ Adsorption Desorption cycle 5 ครั้ง (ใช้ 1 M HCl ในกระบวนการ desorption) พบว่า ความสามารถในการดูดซับสังกะสี (Zn^{2+}) เหลือ 73.4% จากความสามารถในการดูดซับเริ่มต้น โดยการคำนวณค่า Desorption ratio สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (Zhang et al., 2017)

$$\text{desorption ratio } (D_r) = \left(\frac{m_{de}}{m_{ad}} \right) \times 100$$

กำหนดให้ m_{de} คือ น้ำหนักของไอออนที่ถูกชะออกมา (มิลลิกรัม)
 m_{ad} คือ น้ำหนักของไอออนที่ถูกดูดซับก่อนที่จะทำการชะ (มิลลิกรัม)

Ethylene Diamine Tetra Acetic Acid (EDTA) เป็นอีกตัวเลือกหนึ่งที่มีการนำมาใช้เป็นตัวชะ เพื่อชะไอออนของโลหะหนักออกจากวัสดุดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยของ(Baiya et al., 2019) พบว่าจากการใช้ 0.1 M EDTA เป็นตัวชะไอออนของโลหะหนักที่ถูกซับโดย CMC-PVA ไฮโดรเจล พบว่าความสามารถในการชะเมื่อพิจารณาจากค่า desorption ratio สารละลาย EDTA สามารถชะออกมาได้ถึง 89%

จากตัวชะที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เป็นสารที่ค่อนข้างอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและยังทำลายพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเหล่านั้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง จึงมีการนำสารละลายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่ทำลายวัสดุดูดซับมาใช้เป็นตัวชะ โดยงานวิจัยของ (Tang, Lo, & S. H. Mak, 2011) ได้นำสารละลาย 0.5 M NaCl มาใช้ในการชะไอออนของโลหะหนักออกจาก แคตไอออนิก ไฮโดรเจล (dimethylethoxyamine on quaternary ammonium) จากผลการทดลองพบว่าการใช้ 0.5 M NaCl ไม่ทำลายพื้นที่ผิวของไฮโดรเจลและค่า desorption ratio ยังสูงถึง 80% เมื่อผ่านการชะไปแล้ว 3 ครั้ง

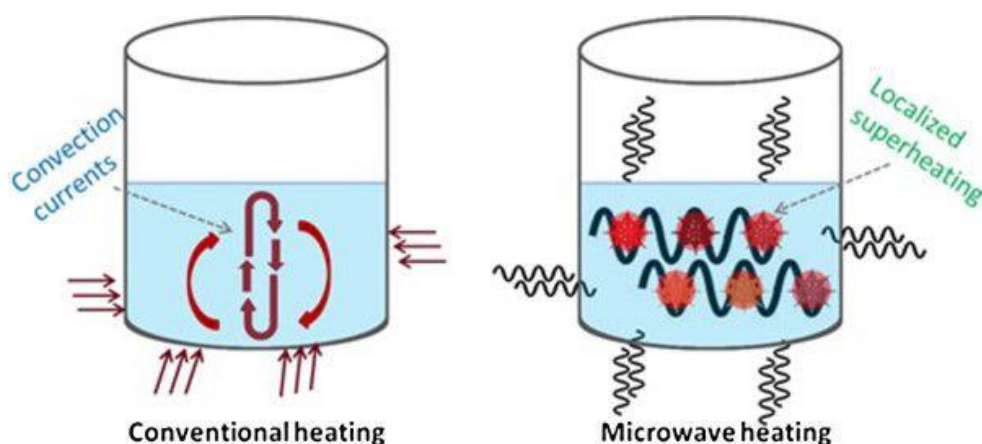
จากการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับไฮโดรเจล พบว่าไฮโดรเจลหลากหลายชนิดนั้น ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับไอออนของโลหะหนักในแหล่งน้ำอย่างกว้างขวาง โดยผู้วิจัยสนใจโคโตซาน ในการนำมาสังเคราะห์ไฮโดรเจล เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาสังเคราะห์ไฮโดรเจล เช่น สามารถย่อยสลายได้เอง และยังมีหมู่ฟังก์ชันที่เกิดการคีเลตกับไอออนของโลหะหนักได้ แต่คุณสมบัติในการดูดซับไอออนของโลหะหนักที่น้อยกว่าไฮโดรเจลชนิดอื่นๆยังเป็นปัญหาหลักของโคโตซานไฮโดรเจล ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงต้องการพัฒนาวิธีการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อให้ได้โคโตซานไฮโดรเจลที่มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยวิธีการที่สนใจคือกระบวนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไมโครเวฟจะรายงานต่อไปในหัวข้อที่ 2

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไมโครเวฟ

2.1 หลักการทำงานของคลื่นไมโครเวฟ

ไมโครเวฟ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความถี่คลื่นอยู่ระหว่าง 300 เมกะเฮิรตซ์ (MHz)-300 จิกะเฮิรตซ์ (GHz) และมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร ความถี่คลื่นที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไป คือ 915 MHz และ 2.45 GHz ซึ่งใช้กับเตาไมโครเวฟอุ่นอาหารในครัวเรือนโดยทั่วไป และยังมีความถี่ 5.8 GHz และ 24.124 GHz ซึ่งใช้กับงานเฉพาะทางด้านวิทยาศาสตร์ และทางการแพทย์อื่นๆ

การให้ความร้อนโดยคลื่นไมโครเวฟมีหลักการที่แตกต่างจากการให้ความร้อนโดยวิธีธรรมดาทั่วไป กล่าวคือ ความร้อนที่วัสดุได้รับคลื่นไมโครเวฟนั้นจะเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นเองภายในวัสดุ แทนที่จะเกิดการได้รับความร้อนถ่ายเทมาจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายนอก เช่น จากหลอดความร้อน (heating element) หรือจากลำแสงเลเซอร์ (laser beam) เป็นต้น ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นโดยไมโครเวฟนี้เราจะเรียกโดยทั่วไปว่า เป็นความร้อนแบบภายในที่เกิดทั่วถึงทั้งชิ้นวัสดุ (Internal and volumetric heating) นอกจากนั้นแล้ว ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชิ้นวัสดุและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับชิ้นวัสดุที่ได้รับความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟนั้น ยังมีลักษณะตรงกันข้ามกับวัสดุที่ได้รับความร้อนโดยวิธีอื่น คือ ความร้อนภายในชิ้นวัสดุจะสูงกว่าที่ผิวนอก ดังนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากภายในออกสู่ผิวนอก ในขณะที่วัสดุที่ได้รับความร้อนโดยวิธีทั่วไปจะมีอุณหภูมิสูงกว่าภายในและจะถ่ายเทความร้อนเข้าไปภายในชิ้นวัสดุ สามารถแสดงกระบวนการให้ความร้อนทั้งสองแบบได้ดังภาพประกอบที่ 14



ภาพประกอบ 14 กระบวนการให้ความร้อนแบบปกติกับการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

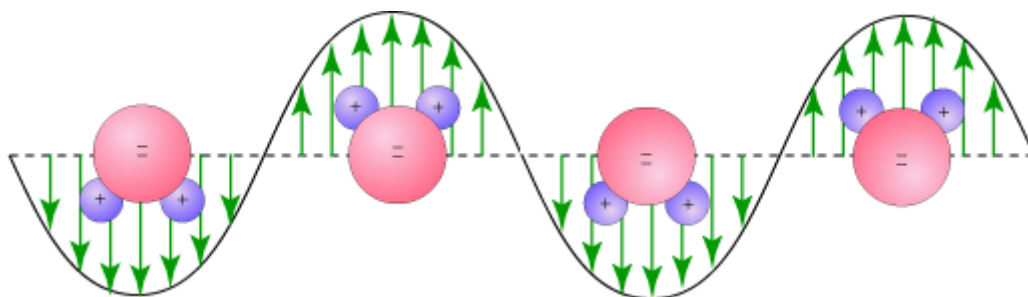
ที่มา: Gude, Patil, Martinez-Guerra, Deng, and Nirmalakhandan (2013)

2.2 กลไกการเกิดความร้อนภายใต้คลื่นไมโครเวฟ

การที่วัสดุร้อนขึ้นได้ภายใต้คลื่นไมโครเวฟนั้น เกิดขึ้นจากกลไก 2 ประการอย่างใดอย่างหนึ่ง คือ กระบวนการโพลาไรเซชันนั้นจะเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวของประจุใหม่ การสั่นหรือการหมุนตัวของไดโพล ภายใต้สนามไฟฟ้าหรือแม่เหล็ก ซึ่งถือเป็นการเคลื่อนที่ของประจุในระยะสั้น (short-range displacement) เมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ของประจุซึ่งจะเกิดจากกระบวนการนำไฟฟ้า

เมื่อคลื่นไมโครเวฟผ่านเข้ามาในเนื้อวัสดุคลื่นจะถูกดูดกลืนและจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายใน และสนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุต่างๆ หรือเกิดกระบวนการโพลาไรเซชันขึ้นภายในวัสดุนั้น แรงต้านการเคลื่อนที่ซึ่งรวมไปถึงแรงเฉื่อย แรงยืดหยุ่น และแรงเสียดทานจากการชนกันของประจุต่างๆ เหล่านี้เอง ทำให้เกิดเป็นความร้อนในที่สุด ซึ่งจะเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นวัสดุ (volumetric heating) อย่างที่ได้กล่าวไปแล้วนั่นเอง

หลังเกิดความร้อนนี้ สามารถนำไปอธิบายได้น้ำภายในเตาไมโครเวฟร้อนขึ้นได้อย่างไร ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำซึ่งไม่เป็นกลางทางไฟฟ้า กลับตัวไปมาจากความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ (2.45 จิกะเฮิร์ตซ์) เป็นจำนวน 2,450 ล้านรอบต่อวินาที ในหนึ่งรอบคลื่นจะประกอบไปด้วยคลื่นช่วงบวกและคลื่นช่วงลบของสนามไฟฟ้า 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที และจะหันขั้วลบของโมเลกุลไปทางขั้วบวกของสนามไฟฟ้าอีก 2,450 ล้านครั้งต่อวินาที รวมแล้วโมเลกุลต้องกลับตัวถึง 4,900 ล้านครั้งต่อวินาทีดังภาพประกอบ 15 ทำให้เกิดการชนและเสียดสี เกิดเป็นความร้อนทำให้อุณหภูมิของน้ำสูงขึ้นในที่สุด



ภาพประกอบ 15 การเคลื่อนที่โมเลกุลของน้ำภายใต้คลื่นไมโครเวฟ

ที่มา: Aashish Loknath Panigrahi (2017)

2.3 ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่มีการผลิตวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ

(ดวงเดือน อางองค์, 2546) จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติได้รวบรวมข้อดีของการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการผลิตวัสดุไว้ทั้งหมด 12 ประการ ดังนี้

1. ประหยัดค่าใช้จ่าย (เวลา พลังงาน พื้นที่วางอุปกรณ์เตา)
2. ความร้อนเกิดขึ้นภายในอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นวัสดุที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟ
3. ควบคุมการให้ความร้อนได้แม่นยำ เนื่องจากสามารถเปิดปิดเตาได้ทันทีทันใด และการส่งคลื่นจะหยุดลงทันที
4. สามารถเลือกให้ความร้อนเฉพาะกับวัสดุที่ต้องการเท่านั้น
5. ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะและคุณภาพที่ดีขึ้น
6. วัสดุบางชนิดสามารถควบคุมให้หยุดรับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟได้ด้วยตัวเอง
7. ความร้อนเกิดขึ้นได้เร็วในเนื้อวัสดุที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟ
8. ใช้เวลาในการผลิตสั้นกว่ากระบวนการผลิตโดยใช้ความร้อนวิธีอื่น
9. ไม่จำเป็นต้องเปิดเตาให้ความร้อนสม่ำเสมอจนจะใส่ชิ้นงานเข้าไปในเตาไมโครเวฟ เหมือนเตาธรรมดาทั่วไป
10. สามารถสังเคราะห์สารชนิดใหม่ๆ ที่วิธีอื่นไม่สามารถทำได้
11. ลดการปล่อยสารอันตรายต่างๆ (pollution free)
12. พลังงานสะอาด ระบบทำงานเงียบและสะอาด ไม่รบกวนสิ่งแวดล้อม

จากประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการผลิตวัสดุในหัวข้อที่แล้ว ทำให้นักวิจัยและพัฒนาในอุตสาหกรรมต่างๆ ดึงเอาจุดเด่นดังกล่าวมาพัฒนาชิ้นงานกันอย่าง

แพร่หลาย ทางศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติได้รวบรวมตัวอย่างอุตสาหกรรมที่นำเอาเทคโนโลยีด้านไมโครเวฟไปพัฒนาชิ้นงาน ดังตาราง 4 (ดวงเดือน อาจองค์, 2546)

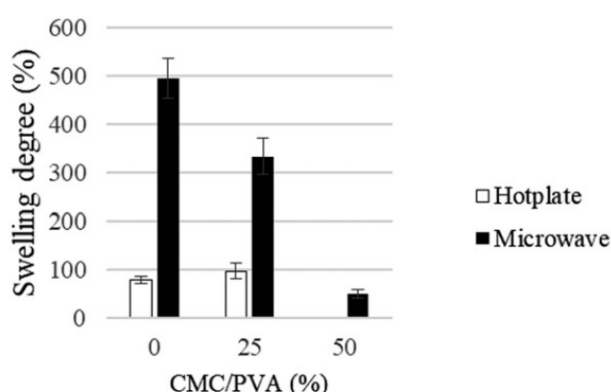
ตาราง 4 แสดงตัวอย่างอุตสาหกรรมที่มีการผลิตวัสดุด้วยคลื่นไมโครเวฟ

ชนิดของวัสดุ	กระบวนการผลิต	อุตสาหกรรม	ประโยชน์ที่ได้รับ
พอลิเมอร์	การบ่มยาง (rubber curing) และการวัลคาไรเซชัน	อุตสาหกรรมยานยนต์	ความร้อนเกิดขึ้นในชิ้นงานอย่างทั่วถึงและรวดเร็ว
เซรามิกซ์	การอบ และการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกซ์	งานก่อสร้าง กระเบื้อง สุขภัณฑ์ วันสตุนไฟ ภาชนะ ใส่อาหาร	- ความร้อนทั่วถึง ชิ้นงาน - ผลิตภัณฑ์มี คุณภาพดี - ไม่ทำลาย สิ่งแวดล้อม
อาหาร และยา	การอุ่น การอบ การปรุง การทำพาสเจอร์ไรเซชัน	อุตสาหกรรมอาหาร และยา	รวดเร็ว ความร้อน สม่ำเสมอ สะอาด
ผลิตภัณฑ์จากไม้	การบ่มผลิตภัณฑ์จากไม้ (parallam process)	งานก่อสร้าง	ความร้อนเกิดขึ้นในชิ้นงานที่หนาอย่างทั่วถึงและรวดเร็ว
สารเคมี แร่ธาตุ	การหาค่าความชื้น และการย่อยสลายของกรด (acid digestion)	การวิเคราะห์ทางเคมี	ประหยัดเวลา
คอมโพสิต	กระบวนการ CVD (chemical vapor deposition)	อุปกรณ์การตัด อิเล็กทรอนิกส์	- เพิ่มอัตราการ สลายตัวของพลาสมา - การจับตัวของสาร (deposition) มีความ บริสุทธิ์สูง

จากการศึกษากระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลพบว่า การสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อใช้ในการดูดซับไอออนของถูกสังเคราะห์ขึ้นจากกระบวนการให้พลังงานในรูปแบบต่างๆ แก่สารตั้งต้นไม่ว่าจะเป็นพลังงานความร้อนหรืออนุภาคพลังงานสูง (เช่น ลำแสงอิเล็กตรอน รังสีแกมมา รังสีเอกซ์) ร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (เช่น กรด หรือ สารก่อเกิดอนุมูลอิสระ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันขึ้น อย่างไรก็ตามแหล่งกำเนิดของอนุภาคพลังงานสูงนั้นมีราคาแพง ในขณะที่การให้ความร้อนด้วยเตาไฟฟ้าต้องใช้เวลามากกว่าในการทำปฏิกิริยา

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับไฮโดรเจลก็มีการนำเอาคลื่นไมโครเวฟมาพัฒนาวัสดุดูดซับมากยิ่งขึ้น เช่น (Cook, Goodall, Khutoryanskaya, & Khutoryanskiy, 2012) พวกเขาได้สังเคราะห์ไฮโดรเจลจาก PVA กับ PAA โดยให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 100–150 °C ซึ่งไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้นั้น ปลอดภัย มีสัดส่วนการบวมน้ำที่ดี (500-1000 กรัมต่อกรัม) และไม่ต้องทำกระบวนการให้บริสุทธิ์

งานวิจัยที่เลือกนำเอาคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล โดยมีความเป็นสารเชื่อมขวาง สรุปว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟในการสังเคราะห์จะช่วยลดระยะเวลาในการสังเคราะห์ลงได้มาก โดยงานวิจัยนี้ใช้เวลาเพียง 5 นาทีในการเชื่อมขวางไฮโดรเจล ต่างจากการใช้วิธีแบบรีฟลักซ์ที่ต้องใช้เวลาอย่างน้อย 6 ชั่วโมงในการเกิดปฏิกิริยา และเป็นวิธีการที่ประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าวิธีแบบรีฟลักซ์อีกด้วย (Abraham, Rajamanickam, & Srinivasan, 2018) นอกจากนี้ข้อดีของไมโครเวฟในแง่การลดเวลาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่เห็นได้ชัดเจนแล้ว ประสิทธิภาพของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นยังดีกว่าการให้ความร้อนแบบธรรมดาอีกด้วย โดย (Baiya et al., 2019) สังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนแทนการให้ความร้อนจากเครื่องกวนสารแม่เหล็กให้ความร้อน สามารถทำให้ความสามารถในการบวมน้ำของ CMC/PVA ไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เตาให้ความร้อน (hotplate) ดังภาพประกอบ 16 รวมถึงเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ก็ลดลง โดยผู้วิจัยได้บอกถึงสาเหตุที่ความสามารถในการบวมน้ำดีขึ้น ว่าเกิดจากการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนจะช่วยเพิ่มขนาดของรูพรุนภายในโครงสร้าง เพราะประสิทธิภาพในการให้ความร้อนที่ดีกว่าการให้ความร้อนจากเครื่องกวนสารแม่เหล็กให้ความร้อน จึงทำให้ CMC/PVA ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น



ภาพประกอบ 16 อัตราการบวมน้ำของ CMC/PVA ไฮโดรเจล เมื่อใช้กระบวนการให้ความร้อนในการสังเคราะห์แตกต่างกัน

ที่มา: (Baiya et al., 2019)

โดยสาเหตุที่การสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่ใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อน มีประสิทธิภาพดีกว่าการให้ความร้อนแบบปกติ (Panchan, Niamnuy, Dittanet, & Devahastin, 2018) ได้ให้เหตุผลไว้ว่า เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพสามารถให้ความร้อนเกิดขึ้นที่ตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาได้โดยตรง ซึ่งต่างจากการให้ความร้อนแบบปกติ (conventional heating) ซึ่งมีอัตราการแผ่ความร้อนไปยังตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาดำ ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้ช้า นำไปสู่การเกิดพอลิเมอร์ที่น้อยกว่าการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ดังตาราง 5

ตาราง 5 แสดงการเปรียบเทียบค่า gel content ของ CMC-g-AMPS ไฮโดรเจล ที่ได้จากการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

Technique	Time (min)	Gel content(%)
Microwave assisted synthesis	14.60	96.78 ± 1.63
Temperature control water bath	14.60	20.28 ± 0.07
(conventional technique)	60.00	75.37 ± 0.99
	120.00	89.32 ± 1.60
	180.00	88.45 ± 0.79

จากการศึกษาและรายงานข้างต้นแสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลชนิดต่างๆ มีงานวิจัยประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเพื่อการดูดซับโลหะหนักในแหล่งน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงไคโตซานเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นหลักเนื่องจากมีคุณสมบัติสามารถจับโลหะหนักได้ เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีความเป็นพิษต่ำ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ผู้วิจัยจึงสนใจในการพัฒนาวัสดุสำหรับการดูดซับโลหะหนักในแหล่งน้ำ โดยเลือกใช้ไคโตซาน PVA และ PVP เป็นสารตั้งต้นหลักในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อการดูดซับโลหะหนักในแหล่งน้ำ โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟเพื่อประหยัดเวลาในการสังเคราะห์ และเพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาวิธีการสังเคราะห์ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ที่มี Epichlorohydrin เป็นสารเชื่อมขวางโดยใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟแรงในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เพื่อเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย โดยผู้วิจัยมีกระบวนการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ศึกษาการสังเคราะห์ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล
2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และเอกลักษณ์ ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

1. อุปกรณ์ / เครื่องมือ และสารเคมี

1.1 วัสดุและสารเคมี

1. Polyvinyl alcohol (PVA) จากบริษัท Kuraray poval
2. Polyvinylpyrrolidone (PVP) จากบริษัท Fluka Analytical
3. Citric acid (CA) จากบริษัท Fisher Chemical
4. Sodium hydrogen carbonate (NaHCO_3) จากบริษัท Analytical Univar reagent Ajax Finechem
5. Epichlorohydrin (ECH) จากบริษัท SIGMA ALORICH
6. Sodium citrate ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$) จากบริษัท CARLO ERBA REAGENT
7. ไคโตซานมาตรฐาน (CS) จากบริษัท Biolife ELAND CORP.
8. Sodium hydroxide (NaOH) จากบริษัท Fluka Analytical
9. Hydrochloric acid (HCl) จากบริษัท RCI Labscan
10. Nitric acid (HNO_3) จากบริษัท J.T. Baker
11. โลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง(Cu^{2+}) ตะกั่ว(Pb^{2+}) แคดเมียม(Cd^{2+}) และนิกเกิล(Ni^{2+}) จากบริษัท ACROS ORGANICS

1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องไมโครเวฟยี่ห้อ ONE TOUCH TECHNOLOGY รุ่น MARS 6 240/50 ประเทศสหรัฐอเมริกา

2. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น ME2002T ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์
3. ตู้อบไล่ความชื้น ยี่ห้อ MEMMERT รุ่น UNB, SNB, INB ประเทศเยอรมัน
4. pH Meter ยี่ห้อ SUNTEX รุ่น SP-2100 ประเทศไต้หวัน
5. Fourier Transform Infrared Spectrophotometer ยี่ห้อ Spectrum GX FTIR System รุ่น Perkin-Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา
6. Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV ประเทศญี่ปุ่น
7. Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS) ยี่ห้อ PERKIN ELMER AAnalyst 300 รุ่น HGA-800

2. วิธีการทดลอง

2.1 การทดลองการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ CS PVA และ PVP โดยการใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยเร่งปฏิกิริยา

การเลือกชนิดของสารเชื่อมขวาง (Crosslinking agent)

1. นำไคโตซาน 0.3 กรัม มาละลายด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้น 6% (กรัม/ปริมาตร) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำมาเติม PVP 0.6 กรัม PVA 0.3 กรัม และ อีพิกลอโรไฮดริน ความเข้มข้น 0.5 M ปริมาตร 40 มิลลิลิตร แล้วคนให้เข้ากัน
3. นำสารละลายที่ได้ไปให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ 600 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที
4. นำมาอบต่อโดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้แผ่นฟิล์มใสๆ เคลือบอยู่ที่ภาชนะ
5. นำมาเติมสารละลาย 0.1 M NaHCO_3 ลงไปแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ฟิล์มเหล่านั้นจะบวมน้ำขึ้นมา
6. นำไปปรับ pH จนเป็นกลาง ด้วยน้ำกลั่น
7. นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการศึกษาคุณสมบัติต่อไป
8. เตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นแต่ปรับเปลี่ยนสารเชื่อมขวางเป็นสารละลาย Trisodium Citrate ความเข้มข้น 4.5% (กรัม/ปริมาตร) ปริมาตร 40 มิลลิลิตร

9. เปรียบเทียบและความเป็นเจล (Gel Fraction) และการบวมได้ของไฮโดรเจล (Gel Swelling) เพื่อเลือกใช้สภาวะที่ดีที่สุดในการทดลองต่อไป

การเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของ PVP และ PVA

1. นำไคโตซาน 0.3 กรัม มาละลายด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้น 6% (กรัม/ปริมาตร) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำมาเติม PVP 0.15 กรัม PVA 0.75 กรัม และสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ แล้วคนให้เข้ากัน

3. นำสารละลายที่ได้ไปให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ 600 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที

4. นำมาอบต่อโดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้แผ่นฟิล์มใสๆ เคลือบอยู่ที่ภาชนะ

5. นำมาเติมสารละลาย 0.1 M NaHCO_3 ลงไปแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ฟิล์มเหล่านั้นจะบวมน้ำขึ้นมา

6. นำไปปรับ pH จนเป็นกลาง ด้วยน้ำกลั่น

7. นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการศึกษาคุณสมบัติต่อไป

8. เตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นแต่ปรับเปลี่ยนสารเชื่อมขวางเป็นอัตราส่วนของ PVP : PVA เป็น 0.30:0.60 0.45:0.45 0.60:0.30 และ 0.75:0.15 (กรัม/กรัม) ตามลำดับ

9. เปรียบเทียบค่าความเป็นเจล และการบวมได้ของไฮโดรเจล เพื่อเลือกใช้สภาวะที่ดีที่สุดในการทดลองต่อไป

การเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมของไคโตซานและกรดซิตริก

1. นำไคโตซาน 0.1 กรัม มาละลายด้วยสารละลายกรดซิตริก ที่เตรียมจากกรดซิตริก 1.8 กรัมแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ 30 มิลลิลิตร จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำมาเติม PVP และ PVA ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ แล้วคนให้เข้ากัน

3. นำสารละลายที่ได้ไปให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ 600 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที

4. นำมาอบต่อโดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้แผ่นฟิล์มใสๆ เคลือบอยู่ที่ภาชนะ

5. นำมาเติมสารละลาย 0.1 M NaHCO_3 ลงไปแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ฟิล์มเหล่านั้นจะบวมน้ำขึ้นมา

6. นำไปปรับ pH จนเป็นกลาง ด้วยน้ำกลั่น

7. นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการศึกษาคุณสมบัติต่อไป

8. เตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นแต่ปรับเปลี่ยนสารเชื่อมขวางเป็นอัตราส่วนไคโตซาน : กรดซิตริก เป็น 0.10:2.40 0.30:1.80 และ 0.30:2.40 (กรัม/กรัม) ตามลำดับ

9. เปรียบเทียบและความเป็นเจล และการบวมได้ของไฮโดรเจล เพื่อเลือกใช้สภาวะที่ดีที่สุดในการทดลองต่อไป

การเลือกกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟในการให้ความร้อน

1. นำไคโตซาน มาละลายด้วยกรดซิตริกในอัตราส่วนที่เหมาะสม จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำมาเติม PVP และ PVA ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ แล้วคนให้เข้ากัน

3. นำสารละลายที่ได้ไปให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่ 500 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที

4. นำมาอบต่อโดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้แผ่นฟิล์มใสๆ เคลือบอยู่ที่ภาชนะ

5. นำมาเติมสารละลาย 0.1 M NaHCO_3 ลงไปแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ฟิล์มเหล่านั้นจะบวมน้ำขึ้นมา

6. นำไปปรับ pH จนเป็นกลาง ด้วยน้ำกลั่น

7. นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการศึกษาคุณสมบัติต่อไป

8. เตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นแต่ปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟในการให้ความร้อนเป็น 600 และ 700 วัตต์ ตามลำดับ

9. เปรียบเทียบความเป็นเจล และการบวมได้ของไฮโดรเจล เพื่อเลือกใช้สภาวะที่ดีที่สุดในการทดลองต่อไป

การเลือกระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

1. นำไคโตซาน มาละลายด้วยกรดซิตริกในอัตราส่วนที่เหมาะสม จากนั้นทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. นำมาเติม PVP และ PVA ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ แล้วคนให้เข้ากัน
3. นำสารละลายที่ได้ไปให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ที่กำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม เป็นเวลา 3 นาที
4. นำมาอบต่อโดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้แผ่นฟิล์มใสๆ เคลือบอยู่ที่ภาชนะ
5. นำมาเติมสารละลาย 0.1 M NaHCO_3 ลงไปแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ฟิล์มเหล่านั้นจะบวมน้ำขึ้นมา
6. นำไปปรับ pH จนเป็นกลาง ด้วยน้ำกลั่น
7. นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการศึกษาคุณสมบัติต่อไป
8. เตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้นแต่ปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็น 5 7 และ 10 นาที ตามลำดับ
9. เปรียบเทียบความเป็นเจล และการบวมได้ของไฮโดรเจล เพื่อเลือกใช้สภาวะที่ดีที่สุดในการทดลองต่อไป

2.2 การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และเอกลักษณ์ ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

การศึกษาโครงสร้างของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy

ในงานวิจัยนี้เทคนิคที่ใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของไฮโดรเจลคือ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) โดยเลือกใช้ transmittance และ attenuated reflection mode ซึ่งช่วง wave numbers ที่เลือกใช้ในการตรวจวัดคือ 400 ถึง 4000 cm^{-1}

การศึกษารูพรุนของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope

Scanning Electron Microscope (SEM) ถูกใช้ในการสังเกตภาพสัณฐานตัดขวางของไฮโดรเจลที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น โดยก่อนนำไปตรวจวัดไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นจะถูกทำให้แห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ แล้วนำไปเคลือบด้วยแพลตตินัม

การตรวจสอบคุณสมบัติความเป็นเจล (Gel fraction)

ความเป็นเจลเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถของการเกิดเป็นเจล สามารถหาค่าได้โดย

1. เตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการสังเคราะห์ในสภาวะที่ดีที่สุด (Optimum condition)
2. คำนวณหาค่าความเป็นเจล (Gel Fraction) โดยการชั่งน้ำหนักแห้งของไฮโดรเจลหลังจากการสังเคราะห์เสร็จแล้วโดยไม่ผ่านการแช่น้ำ แล้วทำให้ไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวโดยนำไฮโดรเจลไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำไฮโดรเจลให้แห้งอีกครั้ง แล้วหาอัตราส่วนน้ำหนักไฮโดรเจลแห้งก่อนและหลังการบวมน้ำอิมมัตว์ดังสมการดังนี้ (Gulrez et al., 2011)

$$\text{ความเป็นเจล} = \frac{\text{น้ำหนักของไฮโดรเจลแห้งหลังการบวมน้ำ}}{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลแห้งก่อนการบวมน้ำ}} \times 100$$

การตรวจสอบคุณสมบัติการบวมได้ของไฮโดรเจล (Swelling degree)

การบวมได้ของไฮโดรเจลบอกถึงความสามารถของไฮโดรเจลในการดูดซับน้ำ สามารถหาค่าได้โดย

1. เตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการสังเคราะห์ในสภาวะที่ดีที่สุด (Optimum condition)
2. คำนวณหาค่าอัตราส่วนน้ำหนักน้ำที่ถูกดูดซับไว้ในไฮโดรเจลจนอิมมัตว์ (ได้จากการนำไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้มาแช่น้ำกลั่น) ต่อน้ำหนักแห้งของไฮโดรเจลหลังการบวมน้ำแล้วไปทำให้แห้ง ตามสมการดังนี้ ดังนี้ (Gulrez et al., 2011)

$$\text{การบวมได้ของไฮโดรเจล} = \frac{\text{น้ำหนักของไฮโดรเจลบวมน้ำอิมมัตว์} - \text{น้ำหนักไฮโดรเจลแห้ง}}{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลแห้ง}} \times 100$$

2.3 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของ โลหะทองแดง(Cu^{2+}) ตะกั่ว(Pb^{2+}) แคดเมียม(Cd^{2+}) และนิกเกิล(Ni^{2+})

เพื่อตรวจสอบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับ pH ของ สารละลายไอออนของโลหะหรือไม่ สามารถทดลองโดย

1. เตรียมสารละลายไอออนของทองแดง ความเข้มข้น 100 ppm ที่ pH 4.0 5.5 7.0 และ 8.0 ซึ่งปรับปริมาตรโดยใช้ 1% HNO_3
2. ชั่ง CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล 1.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร และเปิดสารละลายไอออนของทองแดง ปริมาตร 50 มิลลิลิตรลงไป จากนั้นนำเอาไป แช่ในเครื่องเขย่าสารที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. แยกสารละลายออกจากไฮโดรเจล โดยนำเอาสารละลายหลังจากการแช่ ไปวัดปริมาณไอออนของโลหะที่เหลืออยู่ด้วยเทคนิค Atomic Adsorption Spectroscopy ส่วน ไฮโดรเจลที่ผ่านการดูดซับแล้วให้นำไปย่อยด้วย 16 M HNO_3 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และปรับ ปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร โดยใช้น้ำปราศจากไอออน
4. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค Atomic Adsorption Spectroscopy เพื่อหาปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ CS/PVA/PVP ดูดซับไว้ ในหน่วย (มิลลิกรัม/ กรัม)
5. หาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักอื่นๆ ด้วยวิธีข้างต้นแต่ ปรับเปลี่ยนชนิดของไอออนโลหะเป็น ตะกั่ว แคดเมียม และนิกเกิล ตามลำดับ

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะผสมระหว่าง โลหะทองแดง(Cu^{2+}) ตะกั่ว(Pb^{2+}) แคดเมียม(Cd^{2+}) และนิกเกิล(Ni^{2+})

เพื่อตรวจสอบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับจำนวนชนิดของ ไอออนของสารละลายหรือไม่ สามารถทดลองโดย

1. เตรียมสารละลายผสมระหว่างไอออนของโลหะทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม และนิกเกิล ความเข้มข้น 100 ppm
2. ชั่ง CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล 1.0 กรัม ใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 มิลลิลิตร และเปิดสารละลายไอออนของโลหะ ปริมาตร 50 มิลลิลิตรลงไป จากนั้นนำเอาไปแช่ใน เครื่องเขย่าสารที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. แยกสารละลายออกจากไฮโดรเจล โดยนำเอาสารละลายหลังจากการแช่ไปวัดปริมาณไอออนของโลหะที่เหลือยู่ด้วยเทคนิค Atomic Adsorption Spectroscopy ส่วนไฮโดรเจลที่ผ่านการดูดซับแล้วให้นำไปย่อยด้วย 16 M HNO₃ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร โดยใช้ น้ำปราศจากไอออน

4. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค Atomic Adsorption Spectroscopy เพื่อหาปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ CS/PVA/PVP ดูดซับไว้ในหน่วย (มิลลิกรัม/กรัม)

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

1. ทำการทดลองเพื่อหาไอโซเทอร์มการดูดซับของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล โดยเลือกสภาวะที่ให้ผลการดูดซับโลหะหนักที่ดีที่สุด มาใช้ในการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ จากนั้นประเมินความเหมาะสมในการอธิบายด้วยสมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิชจากค่า Correlation coefficient (R^2) ซึ่งสามารถหาค่า R^2 ได้จากสมการความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรงและแบบไม่เป็นเส้นตรงในตาราง 6 ดังแสดงต่อไปนี้

ตาราง 6 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm

หัวข้อเปรียบเทียบ	Langmuir isotherm	Freundlich isotherm
รูปแบบการดูดซับ	ดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)	ดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)
ความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรง	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{bq_m}$	$\log q_e = \log k_f + \frac{1}{n} \log C_e$
ความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง	$Q_e = \frac{Q_{\max} b C_e}{b C_e + 1}$	$Q_e = K_f C_e^{1/n}$

Q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ(กรัม) ที่ภาวะสมดุล หรือเรียกว่า ค่าการดูดซับที่ภาวะสมดุล

q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (มิลลิกรัม/กรัม) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer)

b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (ลิตร/มิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

K_f คือค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (มิลลิกรัม/กรัม)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

2. ใช้เกณฑ์เอไอซี หรือ AIC (Akaike's information criterion) เพื่อยืนยันการเลือกรูปแบบของไอโซเทอร์มการดูดซับ โดยการคัดเลือกรูปแบบการดูดซับโดยใช้เกณฑ์เอไอซีจะเลือกสมการไอโซเทอร์มที่ให้ค่าเอไอซีต่ำสุด โดยการคำนวณหาค่าเอไอซีจะใช้สมการดังต่อไปนี้

$$SSE = \sum_{i=0}^N (q_{t,cal(i)} - q_{t,exp(i)})^2$$

$$AIC = N \left(\frac{SSE}{N} \right) + 2N_p + \frac{2N_p(N_p + 1)}{N - N_p - 1}$$

เมื่อ SSE คือ ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองของสมการการถดถอย

q_t คือ ปริมาณของไอออนที่ถูกดูดซับ ณ เวลานั้นๆ

N คือ ขนาดของตัวอย่างที่ศึกษา

N_p คือ จำนวนของพารามิเตอร์ที่อยู่ในโมเดลการดูดซับนั้นๆ

การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

เพื่อศึกษาว่า CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร เมื่อนำ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลมาใช้ซ้ำ สามารถทดลองได้โดย

1. เตรียมสารละลายไอออนของโลหะที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนโลหะสูงสุด ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. นำ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลมาแช่เพื่อทำการดูดซับไอออนของโลหะ โดยนำเอาไปแช่ในเครื่องเขย่าสารที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. นำไฮโดรเจลแยกกับสารละลายไอออนของโลหะ โดยนำไฮโดรเจลไปทำการชะเอาไอออนของโลหะออกด้วย 0.1 M HNO_3 สารละลายกรดไนตริก ส่วนสารละลายไอออนของโลหะหลังการดูดซับนั้น นำไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนของโลหะที่ยังเหลืออยู่ด้วยเทคนิค Atomic Adsorption Spectroscopy
4. นำข้อมูลไปวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพในการดูดซับหลังการนำกลับมาใช้ซ้ำจากค่า Desorption ratio ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\text{desorption ratio } (D_r) = \left(\frac{m_{de}}{m_{ad}} \right) \times 100$$

กำหนดให้ m_{de} คือ น้ำหนักของไอออนที่ถูกชะออกมา (มิลลิกรัม)
 m_{ad} คือ น้ำหนักของไอออนที่ถูกดูดซับก่อนที่จะทำการชะ (มิลลิกรัม)

5. ศึกษาการชะไอออนของโลหะหนักออกจาก CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลอีกครั้ง โดยเปลี่ยนชนิดของตัวชะที่ใช้เป็น 0.1 M EDTA และ 0.5 M NaCl. เพื่อหาชนิดของตัวชะที่เหมาะสมต่อกระบวนการนำไฮโดรเจลกลับมาใช้ใหม่

6. ศึกษาจำนวนรอบการนำกลับไปใช้ซ้ำของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ของตัวชะที่เหมาะสม



บทที่ 4

ผลการทดลอง

สำหรับในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยเสนอผลการทดลองตามลำดับดังนี้

1. การทดลองการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ CS PVA และ PVP โดยการใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยเร่งปฏิกิริยา
2. การทดลองเพื่อศึกษาเอกลักษณ์ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล
3. การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

ตอนที่ 1 การทดลองการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ CS PVA และ PVP โดยการใช้คลื่นไมโครเวฟช่วยเร่งปฏิกิริยา

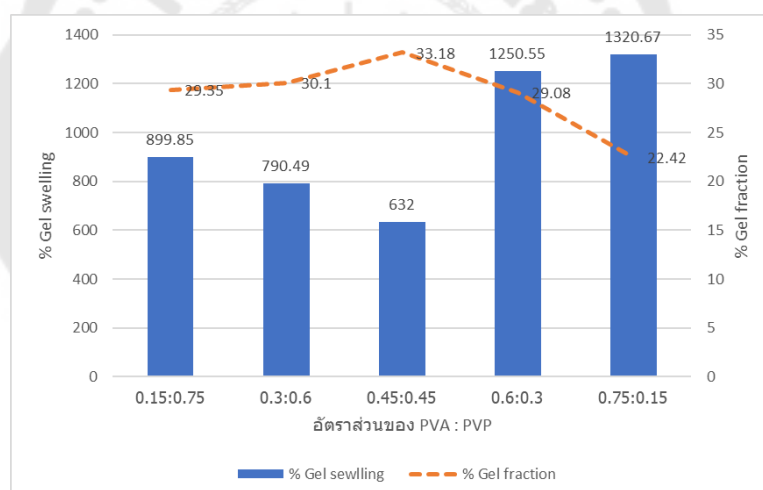
1.1 ผลของชนิดของสารเชื่อมขวาง (Crosslinking agent) ต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล

จากการศึกษาการสังเคราะห์ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล โดยทำการศึกษาชนิดของสารเชื่อมขวาง 2 ชนิด ได้แก่ อีพิกลอโรไฮดรินและไตรโซเดียมซีเตรท ซึ่งพบว่าผลิตภัณฑ์จากการใช้ไตรโซเดียมซีเตรทเป็นสารเชื่อมขวางไม่สามารถขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลได้ ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายไตรโซเดียมซีเตรทมีฤทธิ์เป็นเบส ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของไคโตซานลดลง เนื่องจากไคโตซานจะสามารถละลายได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด ในขณะที่การใช้อีพิกลอโรไฮดรินเป็นสารเชื่อมขวางไม่มีผลทำให้การละลายของไคโตซานลดลง และยังสามารถขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลได้ดี ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้อีพิกลอโรไฮดรินเป็นสารเชื่อมขวางในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล เพื่อการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ต่อไป

1.2 ผลของอัตราส่วนระหว่าง PVP และ PVA ต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล

จากการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของ PVA:PVP ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลพบว่าจากภาพประกอบที่ 17 อัตราส่วนของ PVA:PVP ที่มีสัดส่วนของ PVP มากจะให้ค่าความเป็นเจลที่สูง เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่ของ PVP จะขัดขวางการเกิดผลึกที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันภายในสายโซ่ของ PVA ด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสให้ PVA สามารถเกิดการเชื่อมขวางกับไคโตซานได้มากขึ้น (Lakouraj, Tajbakhsh, & Mokhtary, 2005) ส่วนแนวโน้มของค่าการบวมได้ของเจล พบว่ามีสองแนวโน้มโดยอัตราส่วน 0.15:0.75 0.3:0.6 และ 0.45:0.45 มีแนวโน้มค่าการบวมได้ของเจลลดลงตามลำดับ เนื่องจาก PVP มีความมีขั้วของโมเลกุลที่สูงกว่า PVA จึง

สามารถยืดเหนียวโมเลกุลของน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดีกว่า ทำให้เมื่อลดสัดส่วนของ PVP ลง จึงทำให้ไฮโดรเจลสามารถบวมน้ำได้น้อยลงด้วย (Lakouraj et al., 2005) แต่ที่อัตราส่วน 0.6:0.3 และ 0.75:0.15 พบว่ามีค่าการบวมได้ที่สูง อาจเนื่องจากสัดส่วนของ PVP ที่ลดลงอย่างมาก ทำให้ PVA เป็นผลึกมากขึ้น ส่งผลให้การเชื่อมขวางระหว่างไคโตซานกับ PVA เกิดได้น้อยลง เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA ถูกใช้ในการยืดเหนียวภายในสายโซ่ของ PVA ดังนั้นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จึงมีการเชื่อมขวางน้อยลง ขนาดของรูพรุนจึงใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ไฮโดรเจลสามารถบวมน้ำได้มากขึ้น โดยอัตราส่วนของ PVA:PVP เท่ากับ 0.75 : 0.15 มีค่าร้อยละการบวมน้ำที่สูงที่สุด (1320.67%) แต่มีลักษณะทางกายภาพที่เปราะบางและฉีกขาดง่าย ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกอัตราส่วน 0.6:0.3 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล เนื่องจากมีค่าการบวมน้ำและค่าความเป็นเจลที่สูง รวมถึงลักษณะทางกายภาพของเจลที่สังเคราะห์ได้ เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานได้จริง



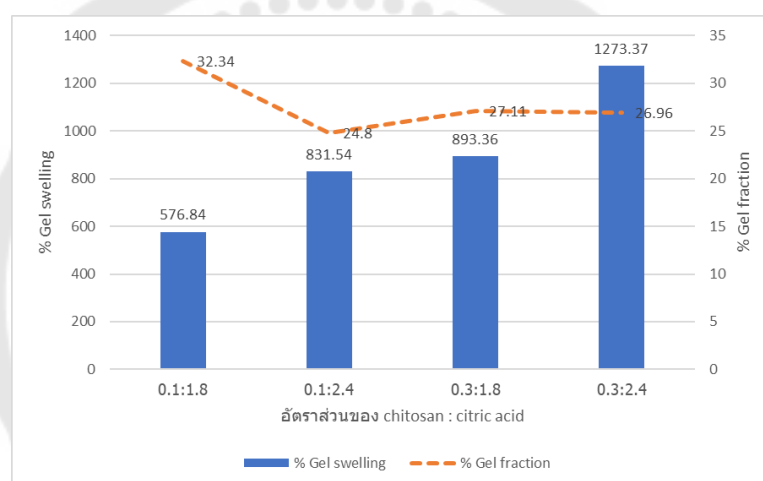
ภาพประกอบ 17 แสดงค่าร้อยละการบวมได้ของเจลและร้อยละความเป็นเจลของ CS/PVA/PVP

ไฮโดรเจล ที่อัตราส่วนของ PVA: PVP แตกต่างกัน เมื่อใช้ไคโตซาน 0.3 กรัม

1.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างไคโตซานและกรดซิตริกต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล

จากการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างไคโตซานกับกรดซิตริก พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของไคโตซานจะทำให้ค่าการบวมได้ของเจลเพิ่มขึ้น เนื่องจากไคโตซานมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำจึงทำให้ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถบวมน้ำได้ดี เช่นเดียวกับการเพิ่มสัดส่วนของกรดซิตริก ก็ทำให้ค่าการบวมได้ของเจลเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ดังแสดงตามภาพประกอบ 18 แต่ผลจากการเพิ่มขึ้นของไคโตซานและกรดซิตริกไม่ได้ส่งผลต่อสัดส่วนความเป็นเจลอย่างมีนัยสำคัญ นั่น

อาจเป็นเพราะว่าการเพิ่มขึ้นของไคโตซานและกรดซิตริกส่งผลต่อขนาดของรูพรุนของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้น จึงทำให้ค่าการบวมได้ของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้น ซึ่งไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้จากอัตราส่วนของ ไคโตซาน:กรดซิตริก เท่ากับ 0.30 : 2.40 ทำให้ได้ไฮโดรเจลที่มีค่าร้อยละการบวมน้ำสูงสุด (1273.37%) แต่มีลักษณะทางกายภาพที่อ่อนและฉีกขาดง่าย ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน ส่วนที่อัตราส่วน 0.10:1.80 ถึงแม้จะมีค่าความเป็นเจลที่สูง แต่พบว่ามีค่าการบวมน้ำที่น้อย ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกอัตราส่วนของไคโตซาน : กรดซิตริก ที่ 0.30:1.80 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล เนื่องจากมีค่าการบวมน้ำและค่าความเป็นเจลที่สูง รวมถึงลักษณะทางกายภาพของเจลที่สังเคราะห์ได้ เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานได้จริง



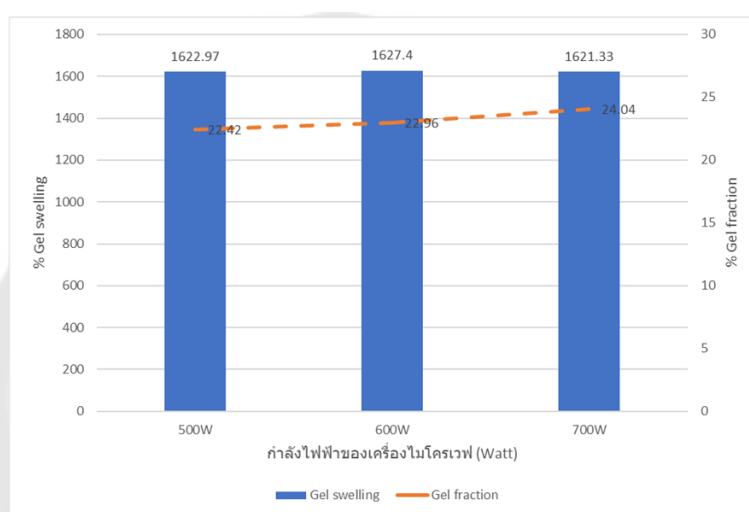
ภาพประกอบ 18 แสดงค่าร้อยละการบวมได้ของเจลและร้อยละความเป็นเจลของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ที่อัตราส่วนของ PVA : PVP แตกต่างกัน

1.4 ผลของกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟในการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล

จากการศึกษาหาพลังงานไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่เหมาะสมต่อการให้ความร้อนในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล จากภาพประกอบ 19 พบว่าค่าความเป็นเจลของไฮโดรเจลมีค่าสูงขึ้นเมื่อกำลังวัตต์ของเครื่องไมโครเวฟสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์เมื่อได้รับพลังงานมากขึ้น การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดได้มากและรวดเร็วขึ้น ซึ่งอาจทำให้ตำแหน่งที่เกิดการเชื่อมขวางมีมากขึ้นด้วย ส่งผลทำให้ค่าความเป็นเจลสูงขึ้น โดยเมื่อมีค่าความเป็นเจลสูงขึ้น แต่จากงานวิจัยของ (Teow et al., 2018) พบว่าหากมีการเชื่อมขวางมากจะส่งผลทำให้ค่าการบวมได้ของเจล

ลดลงได้ เนื่องจากขนาดรูพรุนมีขนาดเล็กทำให้ช่องว่างภายในโครงสร้างมีพื้นที่ในกักเก็บสารละลายที่น้อยตามไปด้วย

จากภาพประกอบที่ 19 ค่าการบวมได้และค่าความเป็นเจลในแต่ละชุดการทดลองพบว่าค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องมาจากช่วงในการศึกษาแคบเกินไป จึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างกันของผลการทดลอง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่ 600 W เป็นตัวแทนของการทดลองทั้ง 3 ชุด เพื่อใช้ในการศึกษาปัจจัยในการสังเคราะห์ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลต่อไป



ภาพประกอบ 19 แสดงค่าร้อยละการบวมได้ของเจลและร้อยละความเป็นเจลของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ด้วยกำลังไฟฟ้าของเครื่องไมโครเวฟที่แตกต่างกัน

1.5 ผลของระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล

จากการศึกษาผลของระยะเวลาในการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล ตามตารางที่ 7 พบว่าระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพและค่าการบวมได้กับค่าความเป็นเจลของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล โดยการเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ทำให้แนวโน้มร้อยละการบวมได้ของไฮโดรเจลมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้าม ร้อยละความเป็นเจลจะมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยในการให้ความร้อนมากกว่า 5 นาทีขึ้นไป ไฮโดรเจลจะเกิดการไหม้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้เวลาในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นเวลา 3 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเนื่องจากให้ค่าการบวมได้ของเจลที่สูงกว่าเมื่อใช้เวลา 5 นาที โดยที่ให้ค่าความเป็นเจลที่ใกล้เคียงกัน

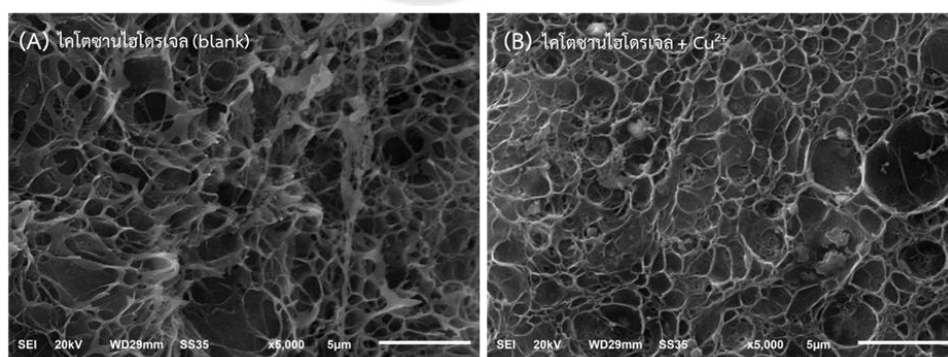
ตาราง 7 แสดงค่าร้อยละการบวมได้และค่าร้อยละความเป็นเจล ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล เมื่อใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเพื่อการสังเคราะห์แตกต่างกัน

ชุดการทดลอง	เวลา (นาท)	ร้อยละการบวมได้ของเจล	ร้อยละความเป็นเจล	หมายเหตุ
1	3	1160	31.75	
2	5	921.82	34.38	
3	7	-	-	ไฮโดรเจลไหม้
4	10	-	-	ไฮโดรเจลไหม้

ตอนที่ 2 การทดลองเพื่อศึกษาเอกลักษณ์ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

2.1 การศึกษารูพรุนของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลโดยใช้เทคนิค SEM ในการตรวจสอบความเป็นรูพรุนภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล ซึ่งมีความสำคัญในการอธิบายถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของเหลวเข้าสู่ไฮโดรเจลได้ และจากภาพประกอบ 20 (A) แสดงให้เห็นลักษณะของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ที่เป็นโครงร่างตาข่ายประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยระหว่าง 1-3 μm ทำให้สามารถดูดซับของเหลวได้ปริมาณมาก ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสในการที่ไอออนของโลหะจะถูกดูดซับเข้าไปและเกิดอันตรกิริยากับหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล ทั้งนี้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลที่ผ่านการดูดซับไอออนของทองแดง ดังภาพประกอบ 20 (B) ไม่มีความแตกต่างทางกายภาพที่สังเกตได้จากไฮโดรเจลที่ปราศจากการดูดซับไอออน

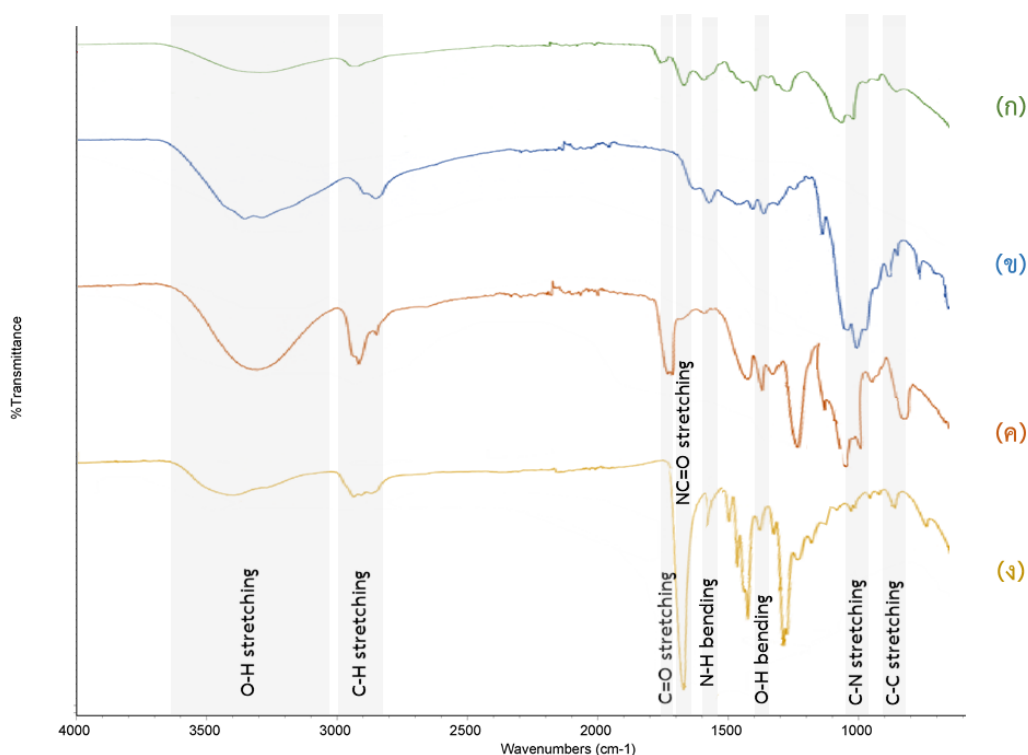


ภาพประกอบ 20 ภาพถ่าย SEM แสดงภาพตัดขวางของ (A) ไฮโดรเจลที่ผ่านการแช่น้ำปราศจากไอออน (B) ไฮโดรเจลที่ผ่านการแช่สารละลายไอออนของทองแดง

2.2 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Fourier Transform

Infrared Spectroscopy

จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์โครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้โดยใช้ FTIR โหมด ATR เพื่อระบุหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างสามมิติของวัสดุ พบว่าได้สเปกตรัมของไฮโดรเจลมีลักษณะดังแสดงในภาพประกอบ 21(ก) ซึ่งแตกต่างจากสเปกตรัมของพอลิเมอร์ทั้งสามชนิด ได้แก่ ไคโตซาน PVA และ PVP ดังภาพประกอบ 21(ข-ง) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 21 ATR-FTIR สเปกตรัมของ (ก) CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล (ข) ไคโตซาน (ค) PVA (ง) PVP

ตาราง 8 สัญญาณ FTIR ของไคโตซาน PVA PVP และ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

เลขคลื่น (cm ⁻¹)				ผลการวิเคราะห์
CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล	ไคโตซาน	PVA	PVP	
3278.90	3359.75	3293.13	3428.60	O-H stretching
-	3284.00	-	-	N-H stretching
2942.00	2917.90	2917.4	2950.55	C-H stretching
2913.00	2876.80	2850.40		
1732.10	-	1714.45	-	C=O stretching
1654.39	-	-	1651.53	NC=O stretching
1571.40	1589.40	-	-	N-H bending
1419.60	1420.30	1424.10	1422.09	CH ₂ scissoring
-	1323.70	1321.40	-	O-H bending
-	-	1088.37	-	C-O stretching
1070.63	1065.20	-	1071.40	C-N stretching
1022.3	1027.74		1017.90	
834.82	891.30	841.52	843.75	C-C stretching

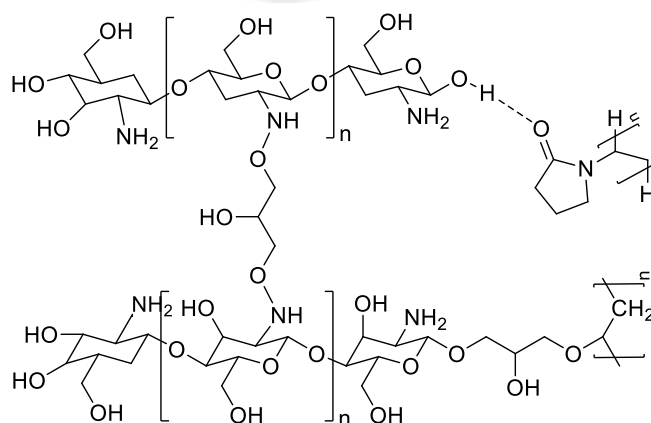
จากตาราง 8 ซึ่งแสดงตำแหน่งสัญญาณเลขคลื่นในการสั่นของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ พบว่า CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ปรากฏสัญญาณที่ตำแหน่งร่วมกับพอลิเมอร์ตั้งต้นทั้งสามชนิดที่ เลขคลื่นในช่วง 2378.90 - 3428.60 cm⁻¹ 2850.40 – 2942.00 cm⁻¹ 1419 – 1424.10 cm⁻¹ และ 834.82 – 891.30 cm⁻¹ ซึ่งแสดงถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน O-H stretching C-H stretching CH₂ scissoring และ C-C stretching ตามลำดับ

ทั้งนี้สัญญาณที่ระบุสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ได้เกิดปฏิกิริยาแล้วเป็นส่วนหนึ่งในโครงสร้างของไฮโดรเจลคือสัญญาณที่ปรากฏ ณ ตำแหน่งเฉพาะของพอลิเมอร์เริ่มต้นแต่ละชนิด ดังนี้ C=O stretching ที่ตำแหน่ง 1714.45 cm⁻¹ ซึ่งพบได้เฉพาะใน PVA โดยเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ไม่สมบูรณ์ของพอลิไวนิลแอซิเตท (poly vinyl acetate) (Mansur, Sadahira, Souza, & Mansur, 2008) และ C=O stretching ก็มาปรากฏอยู่ในสัญญาณของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลที่ตำแหน่ง 1732.10 cm⁻¹ เช่นเดียวกับสัญญาณของ NC=O stretching ที่พบได้แค่ใน PVP ที่ตำแหน่ง 1651.53 cm⁻¹ ก็มาปรากฏในสัญญาณของ CS/PVA/PVP ไฮโดร

เจลด้วย ที่ตำแหน่ง 1654.39 cm^{-1} นอกจากนี้ในสเปกตรัมของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ยังปรากฏสัญญาณที่ 1571.40 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของ N-H bending ที่ระบุถึงหมู่ฟังก์ชันเอมีน ซึ่งตรงกับสัญญาณ N-H bending ของไคโตซาน ที่ตำแหน่ง 1589.40 cm^{-1}

2.3 กลไกการเกิดโครงสร้างสามมิติของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

จากการศึกษาโครงสร้างของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค FTIR Spectroscopy และเปรียบเทียบกับสัญญาณของสารตั้งต้น พบว่าไม่ปรากฏสัญญาณ ณ ตำแหน่ง N-H stretching ของไฮโดรเจล แต่ปรากฏสัญญาณที่ชัดเจนในโครงสร้างของไคโตซานตั้งต้น นั้นอาจเกิดจากหมู่ฟังก์ชันเอมีนของไคโตซานถูกใช้ในการเชื่อมขวางระหว่างสายพอลิเมอร์ของไคโตซานเอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Yong, Shrivastava, Srivastava, Kunhikrishnan, & Bolan, 2015) ที่อธิบายกลไกการเกิดไคโตซานไฮโดรเจลที่สภาวะกรดโดยใช้อิพิคลอโรไฮดรินเป็นสารเชื่อมขวาง ดังนั้นจึงทำให้สัญญาณของ N-H stretching อ่อนลง และถูกสัญญาณของ O-H stretching บดบัง จึงทำให้ไม่สามารถสังเกตสัญญาณ N-H stretching ในสเปกตรัมของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้หมู่เอมีนและหมู่ไฮดรอกซิลของไคโตซานอาจเกิดการเชื่อมขวางกับหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA ได้เช่นเดียวกัน ดังภาพประกอบ 22 ส่วนโมเลกุลของ PVP นั้นคาดว่าไม่ได้เกิดปฏิกิริยาในการสร้างพันธะโคเวเลนต์กับไคโตซาน PVA หรือ ECH เนื่องจาก PVP เป็นสารที่เสถียรและพบสัญญาณของ NC=O stretching ที่ชัดเจนในโครงสร้างของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ซึ่งเป็นการยืนยันว่าไม่มีการสลายพันธะในโครงสร้างของ PVP ดังนั้นผู้วิจัยเชื่อว่า PVP ยึดเหนี่ยวกับโครงสร้างของ CS/PVA ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA และไคโตซานกับหมู่คาร์บอนิลของ PVP ดังภาพประกอบ 22 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ (Thomas, Lowman, & Marcolongo, 2003)

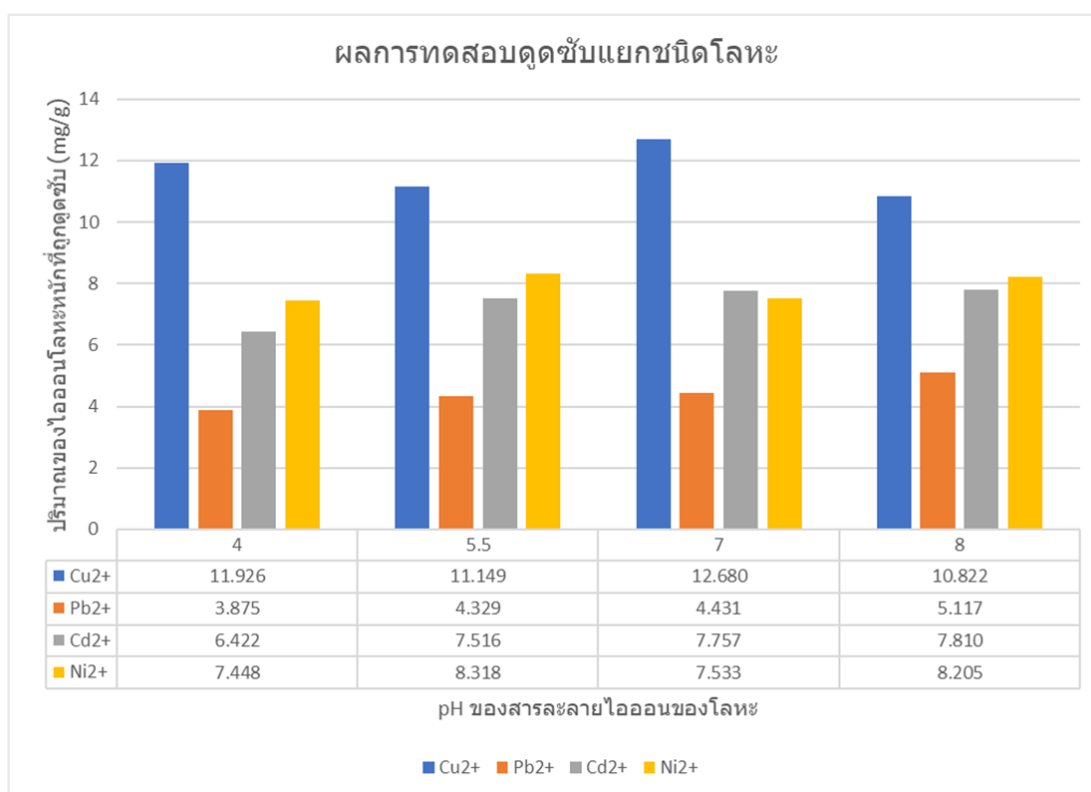


ภาพประกอบ 22 กลไกการเกิดโครงร่างตาข่ายสามมิติของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

ตอนที่ 3 การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

3.1 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของ โลหะทองแดง(Cu^{2+}) ตะกั่ว(Pb^{2+}) แคดเมียม(Cd^{2+}) และนิกเกิล(Ni^{2+})

โดยทั่วไปพบว่าค่า pH ของสารละลาย จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักของวัสดุไฮโดรเจล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของค่า pH ของสารละลาย ในช่วงระหว่าง 4-8 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้งานของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล และจากผลการทดลองพบว่าปริมาณการดูดซับของไอออนของโลหะที่ pH ต่างๆ ในช่วงที่ทำการศึกษา ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสำหรับการดูดซับไอออนชนิดเดียวกัน แต่ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักแต่ละชนิดได้แตกต่างกันอย่างชัดเจนดังภาพประกอบที่ 23 โดยไอออนของทองแดงมีปริมาณการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 12.68 mg/g ซึ่งมีปริมาณการดูดซับสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะชนิดอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Yildiz, Kemik, & Hazer, 2010) ซึ่งได้อธิบายไว้ว่า ไอออนของทองแดงสามารถเกิดสารประกอบรูปร่างทรงแปดหน้าที่เกิดบิดเบี้ยวแบบจาห์น-เทลเลอร์ (Jahn-Teller distortion) โดยการบิดเบี้ยวดังกล่าวส่งผลทำให้สารประกอบที่เกิดขึ้นมีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณไอออนของทองแดงถูกดูดซับมากกว่าไอออนของโลหะชนิดอื่นๆ ที่นำมาศึกษา ส่วนไอออนของตะกั่ว แคดเมียม และนิกเกิล มีปริมาณการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 5.12, 7.8, และ 8.32 mg/g ตามลำดับ โดยที่สภาวะแวดล้อมในการดูดซับเดียวกันแนวโน้มดังกล่าวเป็นผลมาจากปัจจัยด้านขนาดไอออน (ขนาดไอออนของตะกั่ว แคดเมียม และนิกเกิล ที่เกิดการสร้างพันธะแบบ six-coordination คือ 1.19 0.95 และ 0.70 อังสตรอม ตามลำดับ (Nardelli, 1976)) เนื่องจากขนาดไอออนของโลหะที่มีขนาดเล็กจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนของโลหะกับหมู่ฟังก์ชันของไฮโดรเจลสูงกว่าไอออนของโลหะที่มีขนาดใหญ่กว่า



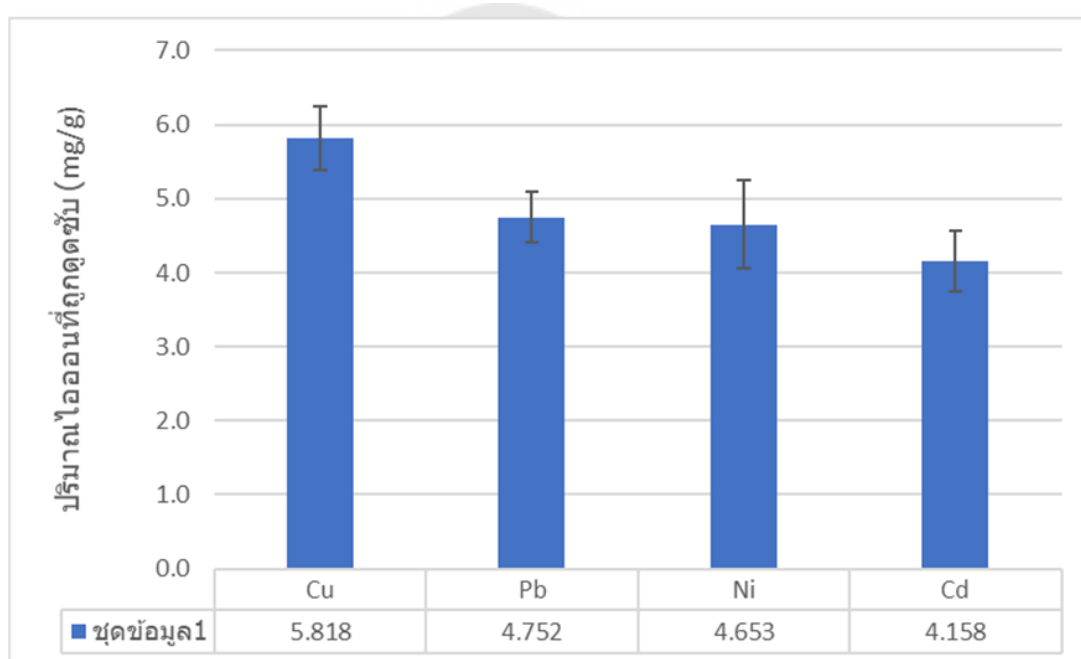
ภาพประกอบ 23 ภาพแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับไอออนของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในแต่ละ pH ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะผสมระหว่างโลหะทองแดง(Cu^{2+}) ตะกั่ว(Pb^{2+}) แคดเมียม(Cd^{2+}) และนิกเกิล(Ni^{2+})

จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะผสมของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล พบว่าภายใต้สภาวะที่มีไอออนของโลหะหลายชนิดผสมกันอยู่ ส่งผลให้เกิดการแข่งขันของไอออนต่างชนิดกันในการเกิดอัตรากิริยาและถูกดูดซับโดย CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ได้แตกต่างกัน โดยมีลำดับการถูกดูดซับจากมากไปน้อย ดังนี้ ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว และแคดเมียม ซึ่งมีปริมาณการดูดซับเท่ากับ 5.82 4.75 4.65 และ 4.16 mg/g ตามลำดับ ดังภาพประกอบที่ 24 โดยสาเหตุที่ไอออนของโลหะทองแดงสามารถดูดซับได้สูงที่สุด เนื่องจากเกิดสารประกอบรูปร่างทรงแปดหน้าที่ยึดเบี่ยงแบบจาห์น-เทลเลอร์ (Jahn-Teller distortion) เช่นเดียวกับผลการศึกษาในข้อ 3.1

ส่วนปริมาณไอออนของโลหะ นิกเกิล ตะกั่ว แคดเมียม ที่ถูกดูดซับพบว่ามีแนวโน้มที่แตกต่างไปจากผลของการดูดซับไอออนของโลหะแบบเดี่ยว การศึกษา pH ที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณการดูดซับไอออนของโลหะแต่ละชนิดในโลหะผสมนั้นมีค่าลดลงจากการดูดซับ

ไอออนเดี่ยว ซึ่งเกิดการแข่งขันกันระหว่างไอออนของโลหะต่างชนิดกันในการจับกับหมู่ฟังก์ชันของไฮโดรเจล ซึ่งการมีอยู่ของไอออนอื่นๆทำให้ปริมาณการดูดซับของแต่ละไอออนนั้นลดลง โดยผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Rathinam & Meenakshi, 2014) ซึ่ง polyaniline grafted chitosan hydrogel ก็มีปริมาณและแนวโน้มการดูดซับไอออนของตะกั่ว และแคดเมียมที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเติมไอออนของนิกเกิล โดยส่งผลต่อปริมาณการดูดซับที่ลดลงของไอออนแคดเมียมมากกว่าการลดลงของไอออนตะกั่ว จึงทำแนวโน้มปริมาณการดูดซับของไอออนตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพประกอบ 24 ภาพแสดงการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับไอออนของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในสารละลายโลหะผสมด้วย (pH 7) CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

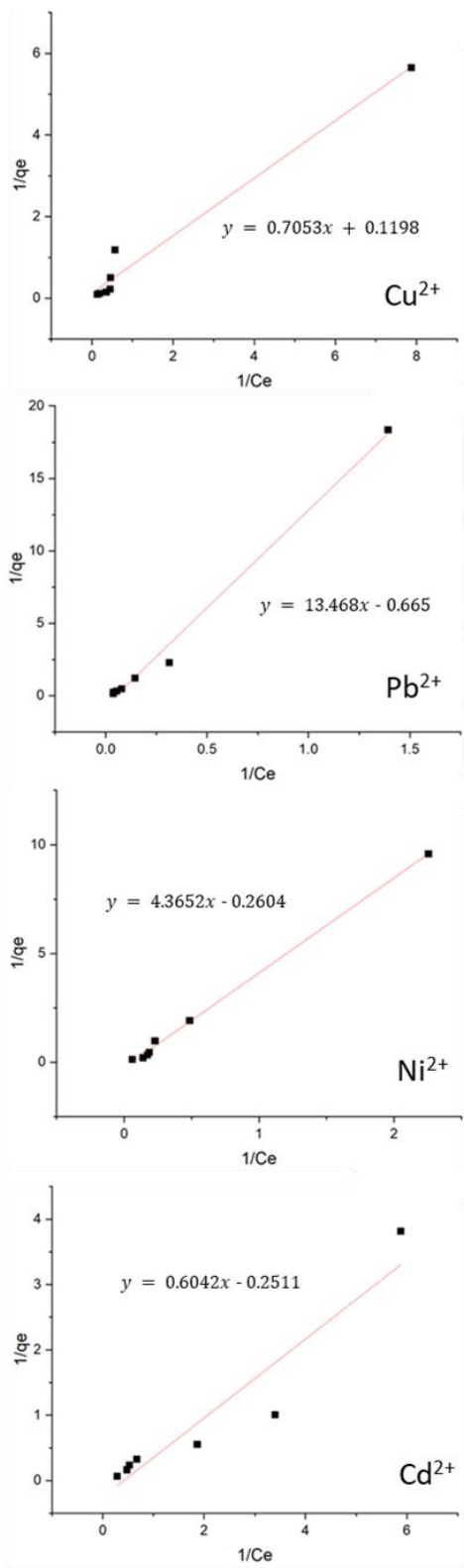
3.3 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับมีความจำเป็น เนื่องจากสามารถให้ข้อมูลด้านประสิทธิภาพในการดูดซับและสมบัติทางพื้นผิวของวัสดุดูดซับนั้น ๆ โดยนำพารามิเตอร์ตามสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังแสดงในบทที่ 3 หัวข้อการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ทั้งแบบเป็นเส้นตรง (linear relationships) และแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear relationships) ดังภาพประกอบที่ 25 และ 26 ตามลำดับ เพื่อต้องการระบุว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

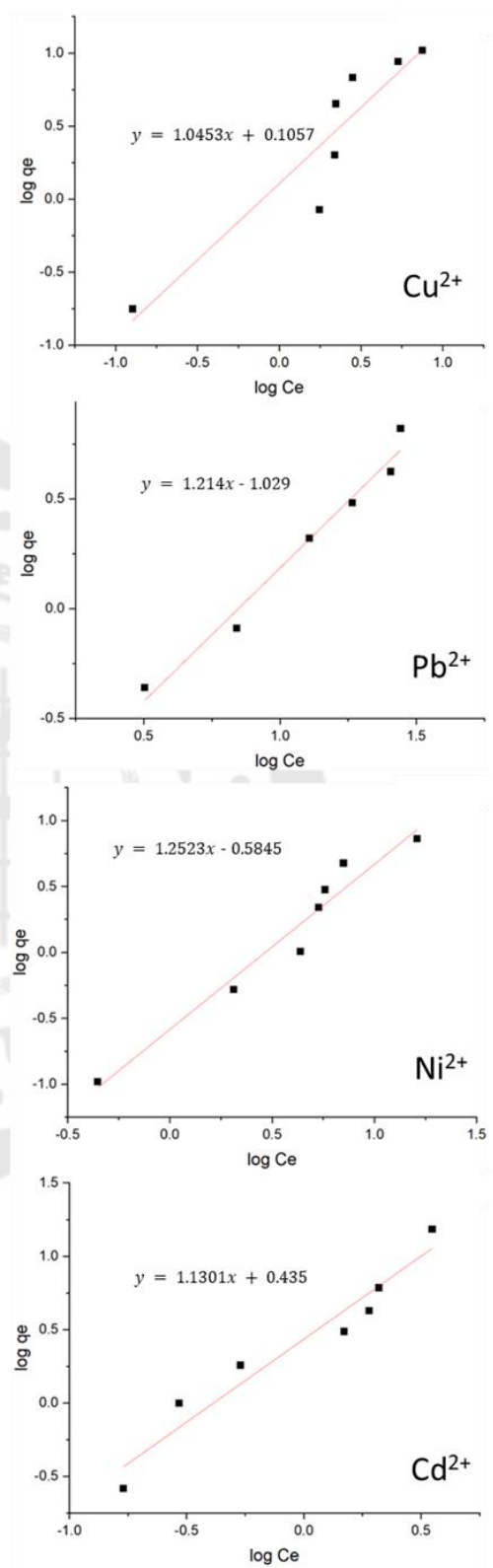
เหมาะสมกับการอธิบายด้วยไอโซเทอรั่มการดูดซับรูปแบบใด โดยจะสังเกตจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient : R^2) ของกราฟความสัมพันธ์ทั้งสองรูปแบบ แต่จากผลการศึกษาพบว่า R^2 ที่ได้จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 9 และตารางที่ 10 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงยังไม่สามารถยืนยันได้ว่ารูปแบบการดูดซับของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล เหมาะสมกับไอโซเทอรั่มแบบใด จึงต้องมีการคำนวณหาค่าเกณฑ์การคัดเลือกสมการโดยข้อสนเทศของอาไคเคะหรือ AIC (Akaike's information criterion) ประกอบการพิจารณารูปแบบของการดูดซับด้วย (แสดงในตาราง 9 และ 10) โดยรูปแบบการดูดซับของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล จะเหมาะสมกับไอโซเทอรั่มที่มีค่า AIC น้อยที่สุด (El-Khaiary & Malash, 2011) ดังนั้นไอโซเทอรั่มการดูดซับของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดแบบแลงเมียร์มากกว่าแบบฟรอนดลิช ซึ่งสมมติฐานการดูดซับของแลงเมียร์ กล่าวว่า เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน (Langmuir, 1918)

พารามิเตอร์ต่างๆในสมการความสัมพันธ์ของไอโซเทอรั่มการดูดซับของแลงเมียร์ดังตารางที่ 9 สามารถอธิบายสมบัติการดูดซับเพิ่มเติมได้ เช่น ค่า b คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ โดยความแข็งแรงในการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนกับไฮโดรเจลจะมากขึ้น เมื่อมีค่า b ที่น้อย โดยสอดคล้องกับค่า Q_{max} ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณการดูดซับสูงสุดของวัสดุดูดซับ เนื่องด้วยการยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงของไอออนกับวัสดุดูดซับ จะส่งผลทำให้ปริมาณการดูดซับสูงสุดเพิ่มมากขึ้น (Langmuir, 1918)

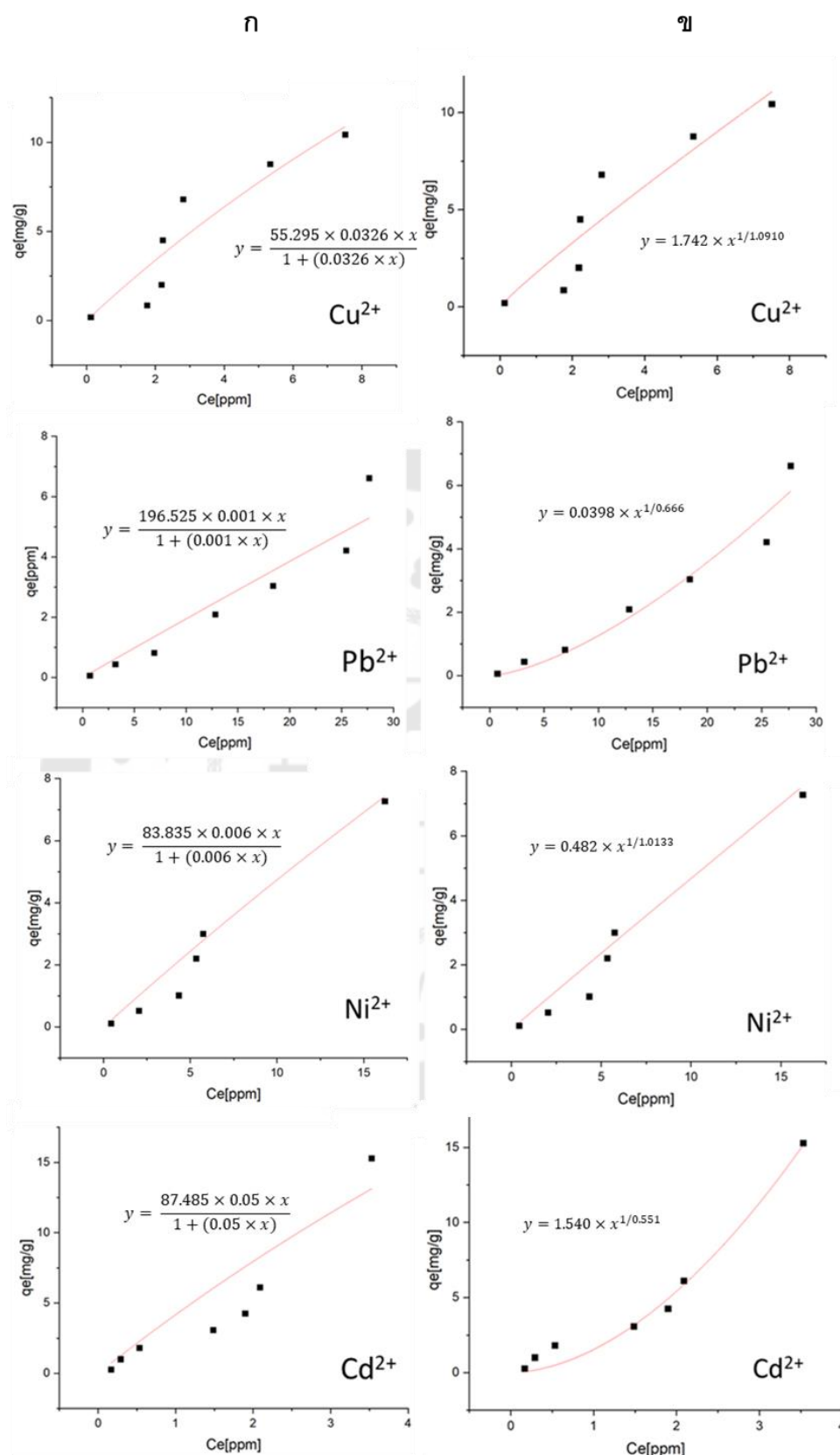
ก



ข



ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์(คอลัมน์ ก) และแบบฟรุนดลิช (คอลัมน์ ข) ของไอออนโลหะแต่ละชนิด



ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรงของสมการไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์(คอลัมน์ ก) และแบบฟรุนดลิช (คอลัมน์ ข) ของไอออนโลหะแต่ละชนิด

ตาราง 9 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช จากกราฟความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรงและแบบไม่เป็นเส้นตรง

ชนิดของไอออน	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช				
	K_f	n	R^2 จากสมการเส้นตรง	R^2 จากสมการไม่เป็นเส้นตรง	AIC
Cu^{2+}	1.742	1.0910	0.869	0.858	59.785
Pb^{2+}	0.0398	0.666	0.977	0.952	27.136
Ni^{2+}	0.482	1.013	0.955	0.909	41.125
Cd^{2+}	1.540	0.551	0.940	0.981	114.117

ตาราง 10 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ จากกราฟความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรงและแบบไม่เป็นเส้นตรง

ชนิดของไอออน	ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์				
	$Q_{\max}$	b	R^2 จากสมการเส้นตรง	R^2 จากสมการไม่เป็นเส้นตรง	AIC
Cu^{2+}	55.295	0.0326	0.977	0.863	50.507
Pb^{2+}	196.524	0.00100	0.993	0.912	17.161
Ni^{2+}	83.835	0.00599	0.998	0.911	38.411
Cd^{2+}	87.485	0.0500	0.896	0.812	63.426

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่า $Q_{\max}$ ที่คำนวณได้กับงานวิจัยอื่นๆ พบว่า CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะหนักที่ดี รวมถึงใช้ระยะเวลาในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่สั้นอีกด้วย ดังตารางที่ 11

ตาราง 11 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับไอออนของทองแดงและเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ของ CS/PVA/PVP hydrogel กับ ไคโตซานไฮโดรเจลชนิดอื่นๆ

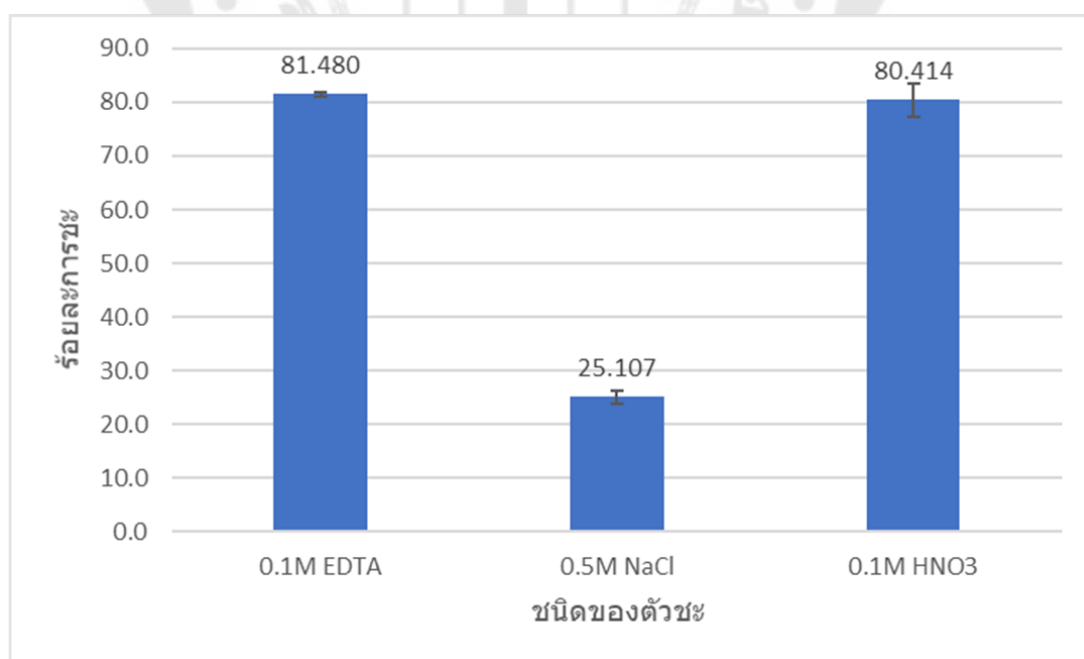
ชนิดของไฮโดรเจล	ปริมาณการดูดซับสูงสุด ของไอออนทองแดง (mg/g)	เวลาที่ใช้ใน การสังเคราะห์ (นาทีก)	กลุ่มผู้วิจัย
N-Aminorhodanine modified chitosan hydrogel	67.57	120	(Zidan, Abdelhami d, & Zaki, 2020)
Chitosan beads hydrogel	48.31	180	(Bal, Özkahrama n, Acar, Özyürek, & Güçlü, 2014)
Crotonic acid grafted crosslinked chitosan beads	15.90	180	(N. Li & Bai, 2005)
Chitosan-cellulose hydrogel beads	53.20	360	งานวิจัยนี้
CS/PVA/PVP hydrogel	55.30	3	

3.4 การศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล

เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการประยุกต์ใช้ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล การศึกษาความสามารถของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลในการนำกลับมาใช้ใหม่จึงมีความสำคัญ โดยในการทดลองได้ใช้ไอออนของทองแดงเป็นตัวแทนของไอออนโลหะชนิดอื่น ๆ ในการศึกษา เนื่องจากสามารถเกิดอันตรกิริยาได้ดีกับหมู่ฟังก์ชันภายใน CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล โดยนำ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล มาแช่ด้วยสารละลายไอออนของทองแดงจนอิ่มตัว แล้วนำไฮโดรเจลมาชะไอออนของโลหะออกด้วยสารละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ 0.1 M EDTA 0.5 M NaCl และ 0.1 M HNO₃ พบว่า 0.1 M EDTA และ 0.1 M HNO₃ มีประสิทธิภาพในการชะไอออนของทองแดงออกจากโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลได้ดีและมีปริมาณการชะที่ใกล้เคียงกัน คือ 81.48% และ 80.41% ตามลำดับ

ในขณะที่สารละลาย 0.5 M NaCl สามารถชะไอออนของทองแดงจากไฮโดรเจลได้เพียง 25.11% ดังภาพประกอบ 27 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก EDTA เป็นตัวคีเลต (Chelating agent) ที่สามารถจับกับไอออนของทองแดงได้ดี ส่วน HNO_3 เป็นกรดแก่ (Strong acid) สามารถแตกตัวแล้วให้ H^+ จำนวนมาก ซึ่งเป็นไอออนบวกที่มีรัศมีไอออนขนาดเล็ก จึงสามารถเข้าไปแทนที่ไอออนของโลหะที่จับกับหมู่ฟังก์ชันของไฮโดรเจลได้ดี ต่างจากไอออนของ NaCl ที่ไอออนของโซเดียมมีขนาดใหญ่ ดังนั้นการเข้าไปแทนที่ไอออนของโลหะที่จับกับหมู่ฟังก์ชันของไฮโดรเจลจึงเกิดได้ไม่ดี เนื่องจากแรงยึดระหว่างไอออนขนาดเล็กจะสูงกว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Baiya et al., 2019)

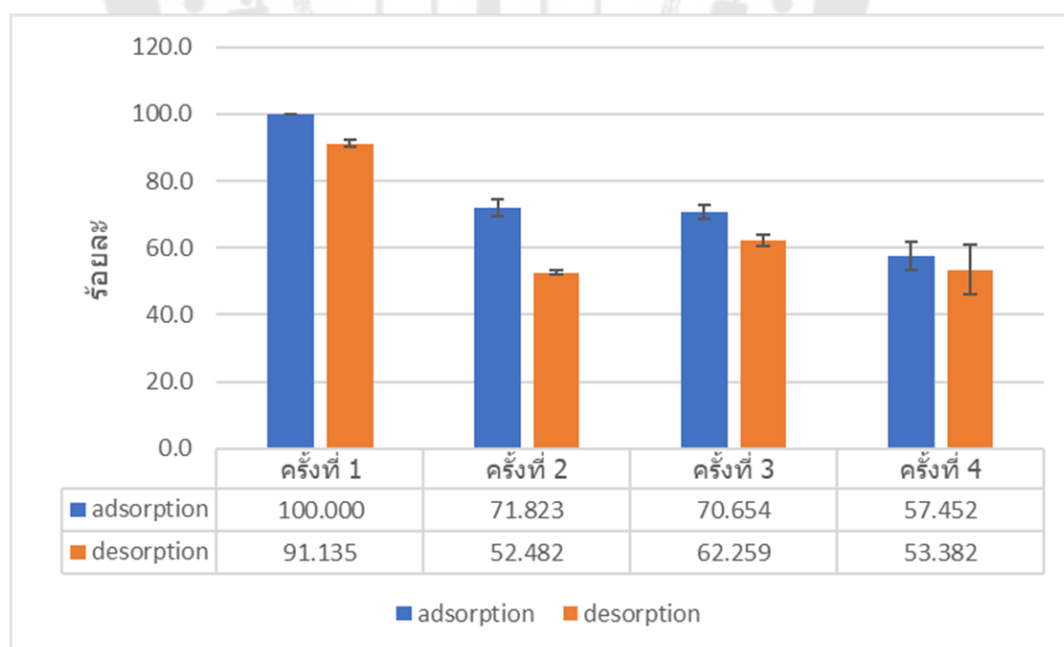
จากการทดลองพบว่า 0.1 M EDTA และ 0.1 M HNO_3 มีประสิทธิภาพในการชะไอออนที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าการใช้สารละลาย 0.1 M HNO_3 ในการชะไอออนส่งผลต่อโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจล ทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่ายในระหว่างกระบวนการชะ เนื่องจากกรด HNO_3 ทำให้เกิดการสลายพันธะภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล ซึ่งจากผลกระทบบดังกล่าวอาจมีผลต่อความสามารถในการบวมได้และการดูดซับไอออนโลหะของไฮโดรเจล ดังนั้นสารละลาย 0.1 M EDTA จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการชะไอออนของโลหะออกจากไฮโดรเจล



ภาพประกอบ 27 แสดงปริมาณไอออนของโลหะที่ผ่านการชะด้วยตัวชะชนิดต่าง ๆ เป็นเวลา 30 นาที

หลังจากที่ผู้วิจัยเลือกชนิดของตัวจะเป็น 0.1 M EDTA แล้ว จึงนำ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล มาศึกษาความสามารถในการใช้ซ้ำ โดยผลการทดลองพบว่า การนำ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล มาใช้งานซ้ำในครั้งที่ 2 และ 3 มีค่าการดูดซับลดลงเหลือ 70% และในครั้งที่ 4 มีค่าลดลงไปเหลือน้อยกว่า 60% ของปริมาณไอออนทองแดงที่ดูดซับได้ในครั้งแรก โดยความสามารถในการดูดซับของไฮโดรเจลนั้นลดลงเมื่อผ่านการกระบวนการชะแล้ว เนื่องจากกระบวนการชะอาจทำให้ไฮโดรเจลสูญเสียบางส่วนของชั้นเจล ซึ่งส่งผลต่อพื้นที่ผิวของไฮโดรเจลที่ลดลงด้วย และจากภาพประกอบที่ 28 พบว่าปริมาณไอออนของโลหะที่ถูกชะออกมาจะสัมพันธ์กับปริมาณไอออนของโลหะที่ไฮโดรเจลดูดซับได้ โดยปริมาณไอออนของโลหะที่ถูกชะออกมานั้นอาจมีปริมาณมากกว่าปริมาณไอออนโลหะที่ได้จากการชะก่อนหน้า เนื่องจากอาจมีไอออนของโลหะที่ค้างอยู่ภายในไฮโดรเจล แล้วถูกชะออกมาในรอบถัดไป แล้วด้วยสาเหตุนี้อาจส่งผลให้ไฮโดรเจลมีความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะลดลงอีกด้วย เนื่องจากมีจำนวนของหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ได้จับกับไอออนของโลหะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ (L. Li et al., 2015)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล มีคุณสมบัติที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยที่ประสิทธิภาพในการดูดซับจะลดลงตามจำนวนรอบของการใช้ซ้ำ



ภาพประกอบ 28 แสดงร้อยละการดูดซับและการชะของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ในแต่ละรอบ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเพื่อพัฒนาวิธีการสังเคราะห์ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลสำหรับดูดซับไอออนของโลหะหนัก โดยการให้ความร้อนในการสังเคราะห์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ รวมทั้งศึกษาเอกลักษณ์และประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะหนักของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้น ผู้วิจัยสามารถสรุปผลการทดลองเป็น 7 หัวข้อดังต่อไปนี้

1. สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด CS/PVA/PVP คือใช้อัตราส่วนของ CS:PVA:PVP เป็น 0.30:0.60:0.30 กรัม และให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 600W เป็นเวลา 3 นาที โดยมีฟิโคลไรไฮดรินเป็นสารเชื่อมขวาง ซึ่งวิธีการสังเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถทำได้ง่าย ใช้ระยะเวลาสั้น และได้วัสดุไฮโดรเจลที่สามารถดูดซับน้ำได้ปริมาณมาก มีแนวโน้มในการพัฒนาต่อยอดเป็นวัสดุสำหรับดูดซับไอออนโลหะหนักที่มีประสิทธิภาพต่อไปได้

2. ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ปรากฏสัญญาณหมู่ฟังก์ชันในตำแหน่งเดียวกันกับสัญญาณของสารตั้งต้นในหลายตำแหน่ง นั่นแสดงถึงประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นเกิดเป็น CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล ด้วยวิธีการสังเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

3. โครงสร้างร่างแห 3 มิติของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ เกิดจากปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างหมู่เอมีนและไฮดรอกซิลของไคโตซานกับหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA และเกิดเกิดแรงยึดเหนี่ยวแบบพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของ PVP

4. ผลการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนโลหะหนักของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล พบว่าสารละลายไอออนของโลหะหนักที่ pH ต่าง ๆ ไม่ส่งผลที่ชัดเจนต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของไฮโดรเจล แต่ชนิดของโลหะส่งผลต่อปริมาณการดูดซับ โดยสามารถเรียงลำดับปริมาณการดูดซับของไอออนแต่ละชนิดจากมากไปน้อย คือ ทองแดง นิกเกิล แคลเซียม และ ตะกั่ว ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของไอออนและปรากฏการณ์จำหนั-เทลเลอร์

5. การดูดซับไอออนโลหะผสมของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล มีแนวโน้มที่แตกต่างไปจากการดูดซับไอออนของโลหะแบบแยกชนิด เนื่องจากการรบกวนและแข่งขันกันจับระหว่างไอออนของโลหะกับไฮโดรเจล โดยที่โลหะทองแดงยังคงถูกดูดซับปริมาณมากที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดสารประกอบรูปร่างทรงแปดหน้าทีปิดเบี้ยวแบบจำหนั-เทลเลอร์

6. การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ พบว่า CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล มีรูปแบบการดูดซับแบบแลงเมียร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน

7. สารละลาย EDTA ความเข้มข้น 0.1 M เป็นตัวชะที่เหมาะสมในการชะไอออนของโลหะที่ถูกดูดซับโดย CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล เนื่องจากให้ค่าร้อยละของปริมาณการชะสูงและยังคงประสิทธิภาพในการดูดซับของไฮโดรเจลได้ดี จึงทำให้ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจล สามารถที่จะนำกลับมาใช้ในการดูดซับไอออนของโลหะหนักซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเอกลักษณ์ของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลเพิ่มเติม เพื่อให้ยืนยันผลการทดลอง เช่น การศึกษาหาพื้นที่ผิวของไฮโดรเจล และการศึกษาความเสถียรของวัสดุ เป็นต้น
2. การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับพลังงานจลน์ในการดูดซับ (Adsorption kinetics) จะทำให้เข้าใจเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของไอออนที่ส่งผลต่อการดูดซับมากยิ่งขึ้น และสามารถใช้ในการทำนายอัตราการดูดซับของ CS/PVA/PVP ไฮโดรเจลได้
3. ควรมีการศึกษาพารามิเตอร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานอิสระกิบส์ (Gibbs free energy change) การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน (Enthalpy change) และการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอนโทรปี (Entropy change) เพื่อศึกษาว่าอุณหภูมิส่งผลอย่างไรต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

บรรณานุกรม

- Aashish Loknath Panigrahi. (2017). Microwave Oven and Microwave radiation: VoPhysics.
- Abraham, S., Rajamanickam, D., & Srinivasan, B. (2018). Preparation, characterization and cross-linking of chitosan by microwave assisted synthesis. *Sci. Int.*, 6(1), 18-30. doi:10.17311/sciintl.2018.18.30
- Akakuru, O., & Isiuku, B. (2017). Chitosan Hydrogels and their Glutaraldehyde-Crosslinked Counterparts as Potential Drug Release and Tissue Engineering Systems - Synthesis, Characterization, Swelling Kinetics and Mechanism. *Journal of Physical Chemistry & Biophysics*, 07. doi:10.4172/2161-0398.1000256
- Baiya, C., Nannuan, L., Tassanapukdee, Y., Chailapakul, O., & Songsrirote, K. (2019). The Synthesis of Carboxymethyl Cellulose-Based Hydrogel from Sugarcane Bagasse Using Microwave-Assisted Irradiation for Selective Adsorption of Copper(II) Ions. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(s1), S157-S165. doi:10.1002/ep.12950
- Bal, A., Özkahraman, B., Acar, I., Özyürek, M., & Güçlü, G. (2014). Study on Adsorption, Regeneration and Reuse of Crosslinked Chitosan Graft Copolymers for Cu(II) Ion Removal from Aqueous Solutions. *Desalination and water treatment*, 52, 3246–3255. doi:10.1080/19443994.2013.800276
- Baur, J., Holzinger, M., Gondran, C., & Cosnier, S. (2010). Immobilization of biotinylated biomolecules onto electropolymerized poly(pyrrole-nitrilotriacetic acid)-Cu²⁺ film. *Electrochem. Commun.*, 12(10), 1287-1290. doi:10.1016/j.elecom.2010.07.001
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (1998). *Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach* (2nd ed.). New York: Springer-Verlag.
- Cathell, M. D., Szewczyk, J. C., Bui, F. A., Weber, C. A., Wolever, J. D., Kang, J., & Schauer, C. L. (2008). Structurally Colored Thiol Chitosan Thin Films as a Platform for Aqueous Heavy Metal Ion Detection. *Biomacromolecules*, 9(1), 289-295. doi:10.1021/bm700845z
- Chowdhury, M. N. K., Ismail, A. F., Beg, M. D. H., Hegde, G., & Gohari, R. J. (2015).

Polyvinyl alcohol/polysaccharide hydrogel graft materials for arsenic and heavy metal removal. *New Journal of Chemistry*, 39(7), 5823-5832.

doi:10.1039/C5NJ00509D

Cook, J. P., Goodall, G. W., Khutoryanskaya, O. V., & Khutoryanskiy, V. V. (2012).

Microwave-Assisted Hydrogel Synthesis: A New Method for Crosslinking Polymers in Aqueous Solutions. *Macromolecular Rapid Communications*, 33(4), 332-336.

doi:10.1002/marc.201100742

Dai, J., Yang, H., Yan, H., Shangguan, Y., Zheng, Q., & Cheng, R. (2011). Phosphate

adsorption from aqueous solutions by disused adsorbents: Chitosan hydrogel

beads after the removal of copper(II). *Chemical Engineering Journal*, 166(3), 970-

977. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.085>

El-Hag Ali, A., Shawky, H. A., Abd El Rehim, H. A., & Hegazy, E. A. (2003). Synthesis and

characterization of PVP/AAC copolymer hydrogel and its applications in the

removal of heavy metals from aqueous solution. *European Polymer Journal*,

39(12), 2337-2344. doi:[https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(03\)00150-2](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(03)00150-2)

El-Khaiary, M. I., & Malash, G. F. (2011). Common data analysis errors in batch adsorption

studies. *Hydrometallurgy*, 105(3), 314-320.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.11.005>

Francis, F. P., & Chidambaram, R. (2019). Hybrid hydrogel dispersed low fat and heat

resistant chocolate. *Journal of Food Engineering*, 256, 9-17.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.012>

Gude, V. G., Patil, P., Martinez-Guerra, E., Deng, S., & Nirmalakhandan, N. (2013).

Microwave energy potential for biodiesel production. *Sustainable Chemical*

Processes, 1(1), 5. doi:10.1186/2043-7129-1-5

Gulrez, S., Al-Assaf, S., & Phillips, G. (2011). Hydrogels: Methods of Preparation,

Characterisation and Applications in Molecular and Environmental Bioengineering.

Hamed, H., Moradi, S., Hudson, S. M., & Tonelli, A. E. (2018). Chitosan based hydrogels

and their applications for drug delivery in wound dressings: A review.

Carbohydrate Polymers, 199, 445-460.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.114>

Jiang, S., Liu, S., & Feng, W. (2011). PVA hydrogel properties for biomedical application.

Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 4(7), 1228-1233.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.04.005>

Kariduraganavar, M. Y., Kittur, A. A., & Kamble, R. R. (2014). Chapter 1 - Polymer

Synthesis and Processing. In S. G. Kumbar, C. T. Laurencin, & M. Deng (Eds.),

Natural and Synthetic Biomedical Polymers (pp. 1-31). Oxford: Elsevier.

Kemik, Ö. F., Ngwabebhoh, F. A., & Yildiz, U. (2016). A response surface modelling study

for sorption of Cu²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺ and Cd²⁺ using chemically modified poly(vinylpyrrolidone) and poly(vinylpyrrolidone-co-methylacrylate) hydrogels.

Adsorption Science & Technology, 35(3-4), 263-283.

doi:10.1177/0263617416674950

Lakouraj, M., Tajbakhsh, M., & Mokhtary, M. (2005). Synthesis and swelling

characterization of cross-linked PVP/PVA hydrogels. *Iranian Polymer Journal*

(English Edition), 14, 1022-1030.

Langmuir, I. (1918). THE ADSORPTION OF GASES ON PLANE SURFACES OF GLASS,

MICA AND PLATINUM. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361-

1403. doi:10.1021/ja02242a004

Li, L., Wang, Z., Ma, P., Bai, H., Dong, W., & Chen, M. (2015). Preparation of polyvinyl

alcohol/chitosan hydrogel compounded with graphene oxide to enhance the

adsorption properties for Cu(II) in aqueous solution. *J. Polym. Res.*, 22(8), 1-10.

doi:10.1007/s10965-015-0794-3

Li, N., & Bai, R. (2005). Copper adsorption on chitosan–cellulose hydrogel beads:

behaviors and mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 42(3), 237-

247. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.08.002>

Liu, W.-C., Wang, H.-Y., Lee, T.-H., & Chung, R.-J. (2019). Gamma-poly glutamate/gelatin

composite hydrogels crosslinked by proanthocyanidins for wound healing.

Materials Science and Engineering: C, 101, 630-639.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.04.018>

- Lone, S., Yoon, D. H., Lee, H., & Cheong, I. W. (2019). Gelatin–chitosan hydrogel particles for efficient removal of Hg(II) from wastewater. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 5(1), 83-90. doi:10.1039/C8EW00678D
- Lv, Q., Hu, X., Zhang, X., Huang, L., Liu, Z., & Sun, G. (2019). Highly efficient removal of trace metal ions by using poly(acrylic acid) hydrogel adsorbent. *Materials & Design*, 181, 107934. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107934>
- Mansur, H., Sadahira, C., Souza, A., & Mansur, A. (2008). FTIR spectroscopy characterization of poly (vinyl alcohol) hydrogel with different hydrolysis degree and chemically crosslinked with glutaraldehyde. *Materials Science and Engineering: C*, 28, 539-548. doi:10.1016/j.msec.2007.10.088
- Mincheva, R., Manolova, N., Sabov, R., Kiurkchiev, G., & Rashkov, I. (2004). Hydrogels from chitosan crosslinked with poly(ethylene glycol)diacid as bone regeneration materials. *E-Polymers*, 058. doi:10.1515/epoly.2004.4.1.643
- Nardelli, M. (1976). Structural inorganic chemistry by A. F. Wells. *Acta Crystallographica Section B*, 32(3), 985-986. doi:10.1107/S0567740876004470
- Panchan, N., Niamnuy, C., Dittanet, P., & Devahastin, S. (2018). Optimization of synthesis condition for carboxymethyl cellulose-based hydrogel from rice straw by microwave-assisted method and its application in heavy metal ions removal. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93(2), 413-425. doi:10.1002/jctb.5370
- Pandey, S., & Mishra, S. B. (2011). Organic-inorganic hybrid of chitosan/organoclay bionanocomposites for hexavalent chromium uptake. *J. Colloid Interface Sci.*, 361(2), 509-520. doi:10.1016/j.jcis.2011.05.031
- Rathinam, K., & Meenakshi, S. (2014). Removal of Pb(II) and Cd(II) ions from aqueous solution using polyaniline grafted chitosan. *Chemical Engineering Journal*, 263, 168-177. doi:10.1016/j.cej.2014.11.015
- Roy, N., & Saha, N. (2012). *PVP-based hydrogels: Synthesis, properties and applications*.
- Saber-Samandari, S., Saber-Samandari, S., & Gazi, M. (2013). Cellulose-graft-polyacrylamide/hydroxyapatite composite hydrogel with possible application in

- removal of Cu (II) ions. *Reactive and Functional Polymers*, 73(11), 1523-1530.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2013.07.007>
- Seki, Y., & Yurdakoc, K. (2008). Synthesis of pH dependent chitosan-EPI hydrogel films and their application for in vitro release of promethazine hydrochloride. *Journal of Applied Polymer Science*, 109, 683-690. doi:10.1002/app.28127
- Soheyly Honary, B. H. a. P. S. (2010). The Effect of Polymer Molecular Weight on Citrate Crosslinked Chitosan Films for Site-Specific Delivery of a Non-Polar Drug. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 9(6), 525-531.
- Tang, S., Lo, I., & S. H. Mak, M. (2011). Comparative Study of the Adsorption Selectivity of Cr(VI) onto Cationic Hydrogels with Different Functional Groups. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223. doi:10.1007/s11270-011-0977-4
- Teow, Y. H., Kam, L. M., & Mohammad, A. W. (2018). Synthesis of cellulose hydrogel for copper (II) ions adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4588-4597. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.010>
- Thomas, J., Lowman, A., & Marcolongo, M. (2003). Novel associated hydrogels for nucleus pulposus replacement. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 67A(4), 1329-1337. doi:10.1002/jbm.a.10119
- Van Nieuwenhove, I., Salamon, A., Peters, K., Graulus, G.-J., Martins, J. C., Frankel, D., . . . Dubruel, P. (2016). Gelatin- and starch-based hydrogels. Part A: Hydrogel development, characterization and coating. *Carbohydrate Polymers*, 152, 129-139. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.098>
- Wang, L. Y., & Wang, M. J. (2016). Removal of Heavy Metal Ions by Poly(vinyl alcohol) and Carboxymethyl Cellulose Composite Hydrogels Prepared by a Freeze-Thaw Method. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4, 2830-2837.
doi:10.1021/acssuschemeng.6b00336
- Yildiz, U., Kemik, Ö. F., & Hazer, B. (2010). The removal of heavy metal ions from aqueous solutions by novel pH-sensitive hydrogels. *Journal of Hazardous Materials*, 183(1), 521-532. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.055>
- Yong, S. K., Shrivastava, M., Srivastava, P., Kunhikrishnan, A., & Bolan, N. (2015).

- Environmental Applications of Chitosan and Its Derivatives. *Reviews of environmental contamination and toxicology*, 233, 1-43. doi:10.1007/978-3-319-10479-9_1
- Zhang, M., Song, L., Jiang, H., Li, S., Shao, Y., Yang, J., & Li, J. (2017). Biomass based hydrogel as an adsorbent for the fast removal of heavy metal ions from aqueous solutions. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(7), 3434-3446. doi:10.1039/C6TA10513K
- Zhou, G., Luo, J., Liu, C., Chu, L., Ma, J., Tang, Y., . . . Luo, S. (2016). A highly efficient polyampholyte hydrogel sorbent based fixed-bed process for heavy metal removal in actual industrial effluent. *Water Research*, 89, 151-160. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.053>
- Zhu, H., Fu, Y., Jiang, R., Yao, J., Xiao, L., & Zeng, G. (2014). Optimization of Copper(II) Adsorption onto Novel Magnetic Calcium Alginate/Maghemite Hydrogel Beads Using Response Surface Methodology. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53(10), 4059-4066. doi:10.1021/ie4031677
- Zidan, T. A., Abdelhamid, A. E., & Zaki, E. G. (2020). N-Aminorhodanine modified chitosan hydrogel for antibacterial and copper ions removal from aqueous solutions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 158, 32-42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.180>
- กรมควบคุมโรค. (2015). พิษจากโลหะหนัก. Retrieved from http://envocc.ddc.moph.go.th/uploads/situation/4_6_situation.pdf
- จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. เอกสารประกอบการสอน วิชา MTT656 *Polymer Characterization and Analysis*: คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ดวงเดือน อจวงศ์. (2546). วัสดุจากคลื่นไมโครเวฟ. *M.T.E.C*, 13-17.
- ปริญญา อากาจนโรตม. (2557). การให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟและการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปวัสดุ. *วิศวกรรมสาร มก.*, 87, 57-67.
- ลำไย ธีรัตน์พันธุ์. (2554). ผลของโลหะหนักต่อสัตว์หน้าดินจำพวกหอย. *KKU Science Journal*, 39(3), 375-386.
- วรารณา อนุชิตโอฬาร. (2546, ตุลาคม 2546). FT-IR Imaging. *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*, 67-70.

วารุณี ตานันต์, & สายันต์ แสงสุวรรณ. (2557). พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก: การสังเคราะห์ การวิเคราะห์ และการประยุกต์ใช้. วารสารวิทยาสาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2, 63-78.

สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม. (2551). รายงานการศึกษาเครือข่ายวิสาหกิจเครือข่ายวิสาหกิจอาหารทะเลแปรรูปจังหวัดสมุทรปราการ ชลบุรี ระยอง จันทบุรี. *Cluster SMEs*, 1-2.

สุธิดา คงทอง. (2552). ไคติน-ไคโตซาน. วารสารวิชาการ อุตสาหกรรมศึกษา, 3(1), 1-7.

สุภาวดี บุญทา. (2560). ไคโตซานและไทรเมทิลไคโตซานกับการใช้ประโยชน์ทางเภสัชกรรม.

Retrieved from คณะเภสัชศาสตร์:

สุรศักดิ์ ไททองวงศ์สกุล. (2543). โพลีไวนิลแอลกอฮอล์: ตัวประสานในอุตสาหกรรมเซรามิกซ์. *MTEC*, 14-18.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายยศธเนศ ทศนภักดี
วัน เดือน ปี เกิด	4 มีนาคม 2538
สถานที่เกิด	จ.นครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี : เคมี (กศ.บ.) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มัธยมศึกษาตอนต้น-ปลาย : ร.ร. ราชนครินทร์ จ.นครราชสีมา ประถมศึกษา : โรงเรียนรวมมิตรวิทยา จ.นครราชสีมา
ที่อยู่ปัจจุบัน	110 ม.7 ต.หนองกระทุ่ม อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
ผลงานตีพิมพ์	Baiya, C., Nannuan, L., Tassanapukdee, Y., Chailapakul, O., & Songsrirote, K. (2019). The Synthesis of Carboxymethyl Cellulose-Based Hydrogel from Sugarcane Bagasse Using Microwave-Assisted Irradiation for Selective Adsorption of Copper(II) Ions. Environmental Progress & Sustainable Energy, 38(s1), S157-S165.