

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มาของงานวิจัย

อุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารทะเลจัดเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทย ทั้งในแง่ของการผลิตเพื่อบริโภคภายในประเทศหรือการผลิตเพื่อส่งออกนอกประเทศ โดยสามารถนำเงินเข้าประเทศได้จำนวนมหาศาลในแต่ละปี โดยประเทศไทยมีความได้เปรียบกว่าประเทศอื่นในเขตภูมิภาคเดียวกัน เนื่องจากการได้รับการสนับสนุนอย่างสม่ำเสมอจากภาครัฐ และมีทรัพยากรที่อุดมสมบูรณ์ โดยเฉพาะชายฝั่งทะเลยาวกว่า 3000 กิโลเมตร ซึ่งเอื้อต่อการทำฟาร์มเพาะเลี้ยงสัตว์ทะเลที่มีคุณภาพ แม้การทำประมงในหลายพื้นที่เริ่มลดลงเนื่องจากความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำธรรมชาติ แต่อุตสาหกรรมอาหารทะเลในประเทศไทยยังสามารถเติบโตได้อย่างไม่ติดขัด เนื่องจากมีการเพาะเลี้ยงเข้ามาทดแทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟาร์มเพาะเลี้ยงกุ้งที่มีคุณภาพกว่า 2000 แห่ง ทำให้ประเทศไทยกลายเป็นผู้ส่งออกกุ้งรายใหญ่ของโลก [1] อย่างไรก็ตามการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมประเภทนี้ทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดกากของเสียเหลือทิ้งจำนวนมหาศาลเช่น หัวกุ้ง เปลือกกุ้ง โดยการจัดการที่เหมาะสมที่สุดคือการนำของเสียเหล่านั้นมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น แปรรูปเป็นอาหารสัตว์ ปุ๋ย หรือนำมาสร้างมูลค่าเพิ่มโดยใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารหรือวัสดุชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติน่าสนใจเช่นสารไคตินและไคซานซึ่งได้ถูกศึกษาอย่างมาในปัจจุบัน

โดยไคติน (Chitin) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีมากในธรรมชาติเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส ซึ่งถูกพบมากที่สุดในส่วนเปลือกแข็งภายนอกของสัตว์ทะเลเช่น กุ้ง ปู กุ้ง และแมลงที่มีปีก เช่น ตั๊กแตน ค้างคาว ผีเสื้อของพืชบางชนิด และในจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ เช่น เห็ด รา และ ยีสต์ โดยทั้งไคตินและเซลลูโลสถูกจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดเส้นใย จึงสามารถให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงสูง ส่วนไคโตซาน (Chitosan) นั้นเกิดจากการสูญเสียหมู่อะเซทิล (deacetylation) ของไคติน ทำให้โครงสร้างของไคโตซานเป็นพอลิแซ็กคาไรด์แบบเส้นตรงที่ประกอบไปด้วย β -(1,4)-linked D-glucosamine (หน่วย deacetylated) และ N-acetyl-D-glucosamine (หน่วย acetylated) โดยทั้งสองหน่วยนั้นเรียงตัวกันอย่างกระจัดกระจายตามสายโซ่ ซึ่งหมู่อะมิโนที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ไคโตซานมีสมบัติที่สามารถละลายได้ในสารละลายหลายชนิดที่มี pH น้อยกว่า 5.5 และเป็นอนุพันธ์ที่สามารถมีประจุบวกบนหมู่อะมิโนได้

เนื่องจากพอลิเมอร์ชีวภาพทั้งสองชนิดนี้มีความเป็นไปได้ทางโครงสร้างที่หลากหลาย จึงเอื้ออย่างยิ่งต่อการถูกดัดแปลงทางเคมีและทางฟิสิกส์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติใหม่ๆ ทำให้ได้รับความสนใจและถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางหลากหลายประเภท [2] และเนื่องจากไคโตซานมีสมบัติทางชีวภาพที่เหมาะสม เช่น มีสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) สามารถย่อย

สลายในทางชีวภาพ (biodegradable) ไม่เป็นพิษ (non-toxic) ด้านเชื้อโรค (antimicrobial activity) และมี immunogenicity ที่ต่ำ จึงมักถูกนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านการแพทย์ เช่น ในอุตสาหกรรมยา การปลดปล่อยยา [3] ไหมเย็บละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ [4] โดยถูกใช้เป็น tissue scaffold หรือเป็นเจลสมานแผลหรือบรรเทาแผล (wound dressing and wound healing) ชนิด ไฮโดรเจล (hydrogel) [5]

โดยปกติแล้วการเลือกวัสดุที่นำเข้ามาเตรียมไฮโดรเจลนั้นสามารถเป็นได้ทั้งพอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymer) ที่ได้จากปิโตรเคมี หรือพอลิเมอร์ได้จากธรรมชาติ (natural polymer) โดยการใช้พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ นั้น มีข้อดีคือไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตและสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยมากพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาเตรียมไฮโดรเจลเพื่อใช้เป็นเจลสมานแผลนั้นควรมีโครงสร้างเป็นเส้นใย เช่น ไคโตซาน อัลจินेट แป้ง เจลาติน เป็นต้น เนื่องจากมีข้อได้เปรียบ คือ มีค่าพื้นที่ผิวสูง มีความนุ่ม (softness) อุ่มน้ำและสามารถดูดซับเลือดหรือน้ำหนองได้ดี

จากงานวิจัยหลายชิ้นพบว่าไฮโดรเจลซึ่งทำมาจากไคโตซานนั้นสามารถถูกนำมาใช้เป็นวัสดุปิดแผลเพื่อช่วยในการสมานแผลที่มีประสิทธิภาพดี [6] กล่าวคือมีคุณสมบัติในการรักษาความชุ่มชื้นบริเวณบาดแผล อากาศสามารถถ่ายเทเข้าออกได้ สามารถดูดซับของเหลวหรือสารพิษจากบาดแผลได้ดี และไม่เป็นพิษหรือทำปฏิกิริยากับบาดแผล สามารถแยกออกจากบาดแผลได้ง่ายโดยไม่ทำให้บาดแผลได้รับการบาดเจ็บเพิ่ม และลักษณะที่ยืดหยุ่นได้ดี [7] จึงสามารถถูกนำมาทดแทนวัสดุสมานบาดแผลที่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ เช่น พอลิเมอร์ประเภทยูรีเทนที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการรักษาแต่มีราคาสูง โดยเฉพาะการรักษาบาดแผลที่เกิดจากน้ำร้อนลวกหรือแผลไฟไหม้ แผลลักษณะนี้เป็นแผลที่มีพื้นที่กว้างจะต้องใช้เวลาในการรักษานาน ทำให้ผู้ป่วยเสียค่าใช้จ่ายในการรักษาสูง

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่า ผลิตภัณฑ์จากไคโตซานบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียวไม่น่าคุ้มค่าในแง่การตลาด เนื่องจากต้องผ่านกระบวนการต่างๆเสียก่อน เช่น กระบวนการ deproteination demineralisation และ deacetylation ซึ่งมีราคาสูง และปริมาณของไคโตซานที่มีความบริสุทธิ์สูงนี้ยังคงจำกัดและไม่เพียงพอต่อการผลิต และที่สำคัญที่สุดคือ สมบัติทางกายภาพของเส้นใยที่ได้ยังเป็นปัญหาหลักของการนำมาประยุกต์ใช้จริง [8] ปัญหาเหล่านี้จึงเป็นที่มาของการเตรียมไฮโดรเจลโดยการผสม (blend) ไคโตซานร่วมกับพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่น เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของไฮโดรเจล เช่นผสมกับเจลาตินซึ่งช่วยในการห้ามเลือด (haemostatic effect) และผสมกับ อัลจินेट ซึ่งมีสมบัติช่วยสมานแผล นอกจากนี้ อัลจินेटยังช่วยในด้านเสริมความแข็งแรงของไฮโดรเจลอีกด้วย อนึ่ง โครงสร้างแบบร่างแหสามมิติที่แข็งแรงของไฮโดรเจลนั้นเอื้ออย่างยิ่งต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจลคอมโพสิต (hydrogel composite) ระหว่างไคโตซานกับอนุภาคที่มีขนาดระดับไมโครและ

นาโนเมตร เช่น การนำ silver nanocrystalline ซึ่งมีสมบัติในการป้องกันและรักษาการติดเชื้อของบาดแผลมาเตรียมไฮโดรเจลร่วมกับไคโตซาน [9] ซึ่งการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตลักษณะนี้ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ที่มีคุณภาพสูงและหลากหลายมากยิ่งขึ้น โดยสามารถเพิ่มสมบัติด้านอื่นที่ขาดไปโดยการเปลี่ยนชนิดของสารที่นำมาผสมกับไฮโดรเจล

งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งไปที่การเตรียม พัฒนา และศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลคอมโพสิตของ chitin/chitosan และ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ส่งเสริมและทดแทนกัน โดย ถ่านกัมมันต์ นั้นเป็นที่รู้จักกันดีในคุณสมบัติด้านการดูดซับที่สูงมาก สามารถช่วยดูดซับกลิ่นไม่พึงประสงค์ซึ่งถูกปล่อยออกจากแผลหรือสารออร์แกนิกอื่นได้ดี ไฮโดรเจล คอมโพสิตชนิดนี้เป็น hybrid adsorbent ที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน นอกจากการนำไปใช้ในด้านดูดซับโลหะหนักหรือสารพิษจากน้ำในอุตสาหกรรมซึ่งพบมากแล้ว [10] จากการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำไฮโดรเจลคอมโพสิตชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ อย่างไรก็ตามปัญหาหลักคือการกระจายตัวของถ่านกัมมันต์ ในเนื้อเจลมักเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทำให้ความแข็งแรงและความเป็นเนื้อเดียวกันของของเจลลดลง งานวิจัยชิ้นนี้จึงศึกษาการผสมพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่นลงไปเช่น อัลจิเนต เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านกายภาพ เช่น ความแข็งแรง และการคงตัวของเจลคอมโพสิต ซึ่งจะช่วยในการกระจายตัวของอนุภาคถ่านกัมมันต์ให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพมากที่สุด

1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chung และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาและการสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้ pluronic และ chitosan ชนิดกราฟโคพอลิเมอร์ ในการเตรียม chitosan โคพอลิเมอร์ เตรียมได้จากการเชื่อมพันธะระหว่าง pluronic กับ chitosan และใช้ 1-ethyl-3(3-dim – ethylaminopropyl)-Carbodiimide (EDC) และ N-hydroxysuccinimide (NHS) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเชื่อมพันธะ ทำการศึกษาสมบัติทั้งทางด้านเคมีและทางกายภาพของ โดยการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี FT-IR และ $^1\text{H-NMR}$ spectroscopy พบว่าการวิเคราะห์ด้วย FT-IR ให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 1635 cm^{-1} , 1530 cm^{-1} จะเป็นกลุ่มของ amide ส่วนการวิเคราะห์ด้วย $^1\text{H-NMR}$ พบโครงสร้างของหมู่ acetylated chitosan (212 ppm), pluronic (ที่ 3.65 ppm) การทดสอบทางกายภาพพบว่า chitosan โคพอลิเมอร์ สามารถใช้ในกระบวนการทางการแพทย์ได้เช่น เป็นตัวนำพาไปยังเซลล์

Chun-Mai Deng และคณะ [12] ทำการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของ Chitosan-gelatin โดยการใช้รีเอเจนต์เป็นตัวเชื่อมต่อพันธะ เพื่อช่วยในการสมานบาดแผล ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบในเรื่องความปลอดภัยของการใช้เจล คุณสมบัติในการต่อต้านแบคทีเรียและการประยุกต์ใช้ Chitosan-gelatin เพื่อใช้สมานบาดแผล Chitosan-gelatin sponge wound dressings (CGSWD) ส่วนการทดลองจะแบ่งออกเป็น 1) ทดสอบความเป็นพิษของ CGSWD 2) คุณสมบัติในการต่อต้านแบคทีเรีย ในที่นี้จะทำการทดสอบโดยใช้ยา cefradine ciprofloxacin และ penicillin 3) ทดสอบกับบาดแผลสัตว์โดยใช้กระต่ายพันธุ์นิวซีแลนด์ ใช้ Vaseline 0.2%(v/v) ethacridine และ CGSWD ตามลำดับ ทำการทดสอบกับบาดแผลโดยใช้ระยะเวลา 3, 5, 7, 10 และ 14 วัน พบว่าที่เวลา 14 วันหลังจากมีบาดแผล ผิวหนังของกระต่ายหายเป็นปกติ

Long zhao และคณะ [13] ได้ทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจาก dihydroxypropyl chitosan ด้วยเทคนิคทำให้เกิดการเชื่อมต่อพันธะของพอลิเมอร์ด้วยรังสี โดยใช้สารละลาย DHP-chitosan ที่มีความเข้มข้นสูง (มากกว่า 10%) ในงานวิจัยนี้ใช้ความเข้มข้นที่ 20, 25, 30 และ 40% ทำการเตรียมตัวอย่างเป็นเวลา 2 วัน เมื่อสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันหมดให้นำสารที่เตรียมได้มาทำให้เป็นแผ่นบางๆ หนาประมาณ 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปสังเคราะห์ด้วยการใช้รังสี การศึกษางานวิจัยนี้จะวิจัยถึงการเชื่อมพันธะของโครงสร้าง สมบัติของการดูดซับน้ำ และทางด้านชีววิทยา พบว่าที่ความเข้มข้นของ DHP-chitosan 40% จะทำให้ผลของการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลได้น้อยเมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่ต่ำกว่าและการทดสอบการย่อยสลายได้โดยใช้เอนไซม์สามารถยืนยันได้ว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์สามารถย่อยได้เองตามธรรมชาติ

Hou-feng zhang และคณะ [14] ได้ทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจาก N-isopropylacrylamide กับ Carboxymethylchitosan แบบกราฟโคพอลิเมอร์และศึกษาเกี่ยวกับ thermosensitive จากงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบทางด้านต่างๆ เช่นการตรวจสอบทางด้านสัณฐานวิทยาโดยใช้เครื่อง scanning electron microscope (SEM) ศึกษาสมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) และ thermogravimetric analyzer (TGA) และทดสอบกลไกการดูดซับน้ำเมื่ออุณหภูมิภายนอกเปลี่ยนแปลงว่า ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้นั้นอัตราการดูดซับน้ำนั้นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเวลาและชนิดของไฮโดรเจล เมื่อเวลาเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้อัตราการดูดซับน้ำได้มากในทางตรงข้ามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้กลไกการดูดซับของไฮโดรเจลได้น้อยลง

Huaping Tan และคณะ [15] ได้ทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจาก chitosan – hyaluronic acid เพื่อใช้ในทางวิศวกรรมเนื้อเยื่อและใช้เป็นตัวนำพา ยา ไฮโดรเจลที่ได้จาก polysaccharides จะมีโครงสร้างของภายนอกเซลล์คล้ายคลึงกับเนื้อเยื่อแต่จะมีส่วนที่แตกต่างคือ glycosaminoglycans (GAGS)

งานวิจัยนี้จะสังเคราะห์ไฮโดรเจล โดยใช้วัสดุที่นำมาสังเคราะห์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือน้ำตาลละลาย chitosan และ hyaluronic acid ผสมกันจนเข้ากันดี จากนั้นเติมสารเคมีที่ใช้ในการเชื่อมพันธะโดยจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ amino และ aldehyde groups ของ polysaccharide ในงานวิจัยนี้จะใช้ N-succinyl-chitosan (S-CS) และ aldehyde hyaluronic acid (A-HA) เพื่อใช้ในการเตรียมองค์ประกอบของไฮโดรเจล โดยเจลที่ได้จะทำการศึกษาลักษณะด้วย FT-IR spectroscopy และทำการศึกษาคูณสมบัติของเจลด้วยการหา อัตราส่วนของ S-CS และ A-HA และเวลาในการเกิดเจล โครงสร้างของเจล พื้นที่ผิวของโครงสร้าง สมดุลของการบวมน้ำและการสลายตัวได้เองตามธรรมชาติ จากงานวิจัยนี้พบว่าผลของไฮโดรเจลที่ได้สามารถนำไปพัฒนาในการใช้ทางวิศวกรรมเนื้อเยื่อได้

Costa Jr และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจาก Chitosan และ poly(vinyl alcohol) ด้วยวิธีการเชื่อมโยงโมเลกุล PVA โดยใช้สารเคมี glutaraldehyde ทำการกำหนดอัตราส่วนของ Chitosan และ PVA ที่ (0:1), (1:3), (1:1), (3:1) และ (1:0) โดยปรับ pH ให้อยู่ในช่วง (4.00 ± 0.05) ด้วย 1.0 NaOH จากนั้นกวนเป็นเวลา 5 นาที จนน้ำตาลละลายเข้ากันดีค่อยๆ เติม glutaraldehyde ซ้ำๆ ที่ความเข้มข้น 1% และ 5% ทำให้เจลที่ได้แห้งใน dessicator นำเจลที่ได้ไปทดสอบด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) และ Scanning electron microscopy (SEM) พบว่าที่อัตราส่วน (1:3) ลักษณะของไฮโดรเจลที่ได้ดีกว่าอัตราส่วนอื่นๆ ทำการทดสอบการดูดซับน้ำโดยใช้ Chitosan และ PVA ที่อัตราส่วน 25% และ 75% (1:3) ตามลำดับ กรอสลิงค์โดยใช้สารเคมี glutaraldehyde ที่ความเข้มข้น 1% และ 5% พบว่าเมื่อทำการเติมสาร glutaraldehyde แล้วเจลที่ได้จะมีการดูดซับน้ำได้ น้อยลงตามความเข้มข้นของ glutaraldehyde ตามลำดับ

Lu และคณะ [17] ได้ทำการประยุกต์วิธีการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่จากไคโตซานร่วมกับ silver nanocrystalline เพื่อใช้ในการสมานบาดแผล ในการทดสอบจะถือข้อกำหนดทาง Biosafety คือนำเจลที่ได้มาทดสอบการติดเชื้อหรือต่อต้านเชื้อที่ทำให้เกิดโรค และประสิทธิภาพในการรักษาบาดแผลที่ลึกโดยใช้ Sprague-Dawley rate ในการทดสอบ โดยใช้เจลของไคโตซานร่วมกับ silver sulfadiazine เป็นเจลที่ใช้ในการรักษา ซึ่งจะควบคุมการทดสอบโดยการวัดบริเวณบาดแผล การทดสอบเนื้อเยื่อของบาดแผลและตัวอย่างเลือดเมื่อทำการเปรียบเทียบเจลทั้ง 2 ชนิดพบว่า silver nanocrystalline chitosan ให้อัตราการรักษาที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะขึ้นอยู่กับ silver ในเลือดและเนื้อเยื่อ แต่จะต่ำกว่าระดับการรักษาของ silver sulfadiazine chitosan ส่วนการทดสอบการต่อต้านเชื้อของ silver nanocrystalline chitosan พบว่าให้ผลได้เป็นลบ

Jiang และคณะ [18] ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของ nano-hydroxyapatite/Chitosan/carboxymethyl cellulose composite (n-HA/CS/CMC) ซึ่งจะใช้ carboxymethyl cellulose รวมตัวกับ nano-hydroxyapatite/Chitosan ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย ด้วยกระบวนการ Freeze – drying และทำการศึกษาคูณสมบัติของเจลด้วย Infrared absorption spectra (IR), X-ray diffraction (XRD), Scanning electron microscope (SEM) และทดสอบทางด้าน Soaking in Simulated body fluids (SBF) จากการทดสอบพบว่าพันธะทางเคมีภายในโครงสร้าง แต่ละองค์ประกอบมีความแข็งแรง อย่างไรก็ตามในการเตรียม n-H/CS/CMS composite ที่ใช้ 30 wt% CMC พบรูพรุนในโครงสร้าง ที่มีขนาด 100 ถึง 500 μm และมีรูพรุนถึง 77.8 % สามารถทนต่อแรงกดได้ 3.54 MPa ส่วนการทดสอบ SBF Soaking ที่ใช้ 30 wt% CMC เป็นที่ยอมรับได้ในทางชีวภาพ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรมเนื้อเยื่อได้

Sangjun และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาผลของไฮโดรเจลที่มีคาร์บอกซีเมธิลไคโตซานเป็นองค์ประกอบพื้นฐานต่อการรักษาแผลลึกระดับดีพาร์เซิลติกเนสในหนูตะเภา ไฮโดรเจลสองชนิดที่มีคาร์บอกซีเมธิลไคโตซาน (ซีเอ็ม-ไคโตซาน) เป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (ไฮโดรเจลของซีเอ็ม-ไคโตซานและของพอลิเมอร์ผสมระหว่างซีเอ็ม-ไคโตซานและซีเอ็ม-เซลลูโลส) ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุตกแต่งแผลในงานวิจัยนี้ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของวัสดุตกแต่งแผลต่อการรักษาแผลระหว่างไฮโดรเจลทั้งสองชนิดและวัสดุทางการค้า (Cutinova hydro[®]) (ตัวควบคุม) แผลสมมาตรสองแผลขนาด 1.0 x 1.0 ตร.ซม. ลึกระดับดีพาร์เซิลติกเนสบนหลังหนูตะเภาแต่ละตัวจะถูกปิดรักษาด้วยซีเอ็ม-ไคโตซานและวัสดุทางการค้า เพื่อการเปรียบเทียบ การรักษาแผลบนหลังหนูตะเภาทุกๆ จะใช้เวลาช่วงหนึ่งๆ เมื่อถึงเวลาตามกำหนดแผลจะถูกเปิดออกเพื่อวัดขนาดของแผลที่เหลือด้วยเทคนิค image analysis ก่อนที่จะนำขึ้นเนื้อไปวิเคราะห์ทางจุลกายวิภาคศาสตร์ จากผลการทดลองพบว่าแผลที่ปิดรักษาด้วยไฮโดรเจลที่มีซีเอ็ม-ไคโตซานเป็นองค์ประกอบพื้นฐานไม่มีอาการติดเชื้อและหายได้เร็วกว่าแผลที่ปิดรักษาด้วยวัสดุทางการค้า ผลที่ได้จะสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ทางจุลกายวิภาคศาสตร์ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลของซีเอ็ม-ไคโตซานและพอลิเมอร์ผสมระหว่างซีเอ็ม-ไคโตซานและซีเอ็ม-เซลลูโลสต่อการหายของแผลทำโดยวิธีที่คล้ายกับวิธีข้างต้น วัสดุจากพอลิเมอร์ผสมรักษาแผลได้หายไวกว่าวัสดุซีเอ็ม-ไคโตซานเล็กน้อย

Sakchai Wittaya – areekul และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาและพัฒนาไฮโดรเจลที่ได้จาก chitosan – polysaccharides composite เพื่อการสมานบาดแผล ในงานวิจัยนี้จะสนใจในการประยุกต์การเตรียมเจลจากไคโตซานคอมโพสิตในการสมานบาดแผล ซึ่งจะพัฒนาและปรับปรุงโดยการเติม corn starch และ dextrin และศึกษาผลกระทบของ propylene glycol ต่อความยืดหยุ่นของเจลไคโตซานโดยเติม poly propylene glycol ที่ความเข้มข้น 0.5 , 1.0 และ 1.5 % (W/V) ซึ่งจะคำนึงถึง

คุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการสมานบาดแผล เช่น การดูดซับของเหลว การยอมให้อากาศผ่านเข้าออกจากเจลได้ การยึดเกาะที่ผิวหนัง และความยืดหยุ่น พบว่าเจลของไคโตซานสามารถดูดซับน้ำได้มากและลดลงเมื่อทำการเติม corn starch และ dextran ความชื้นและอากาศสามารถทะลุผ่านเจลได้ และเมื่อเติม corn starch และ dextran อัตราการผ่านเข้าออกของอากาศเพิ่มขึ้น การทดสอบด้านการยึดเกาะผิวหนังนั้นพบว่าได้ทำการทดสอบกับแบบจำลอง pig gut เมื่อทำการเติม corn starch และ dextran ก็ไม่พบความแตกต่างกับเจลของไคโตซาน และการทดสอบความยืดหยุ่นพบว่าไคโตซานทนต่อแรงยืดต่ำสุดที่ 2 N แต่เมื่อเติม corn starch และ dextran พบว่าสามารถทนแรงยืดได้ดี จากการทดสอบพบว่า เจลของไคโตซานที่ใช้รักษาบาดแผลนั้นสามารถเติม corn starch และ dextran ได้

จากการทบทวนวรรณกรรม จะเห็นได้ว่าการนำไฮโดรเจลซึ่งทำมาจากไคโตซานนั้นถูกนำมาใช้เป็นวัสดุปิดแผลเพื่อช่วยในการสมานแผลที่มีประสิทธิภาพอย่างแพร่หลาย แต่ไฮโดรเจลจากไคโตซานบริสุทธิ์เพียงอย่างเดียวนั้นไม่คุ้มค่านักทางด้านการตลาด เนื่องจากมีราคาสูง ภาวู่วิจัยจึงศึกษาการผสมพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่นลงไปเช่น อัลจิเนต เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านกายภาพ เช่น ความแข็งแรง และการคงตัวของเจลคอมโพสิต และถ่านกัมมันต์สามารถช่วยดูดซับกลิ่นไม่พึงประสงค์ซึ่งถูกปล่อยออกจากแผลหรือสารออร์แกนิกส์อื่นได้ดี

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาและพัฒนาวิธีการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตที่ได้จากไคโตซานกับถ่านกัมมันต์ ร่วมกับพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่น เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของเจล
2. ศึกษาปัจจัยและตัวแปรต่างๆของการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของเจล
3. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไฮโดรเจลคอมโพสิตที่เตรียมได้ไปพัฒนาและประยุกต์ใช้เพื่อเป็นเจลสมานบาดแผลที่ใช้ได้จริง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการพัฒนาในไฮโดรเจลคอมโพสิตเพื่อให้มีคุณสมบัติดีขึ้น โดยเน้นไปที่การหาส่วนผสมและสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตจากไคโตซาน ถ่านกัมมันต์และอัลจิเนต ทั้งนี้รวมไปถึงชนิดของวัตถุดิบ อัตราส่วนของวัตถุดิบที่สำคัญทั้งสามชนิด วิธีการเตรียมเจล อุณหภูมิ และระยะเวลาของการเกิด gelification

2. ศึกษาคุณสมบัติของไฮโดรเจลคอมโพสิตทั้งทางกายภาพ ทางกล และทางเคมี เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้จริง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

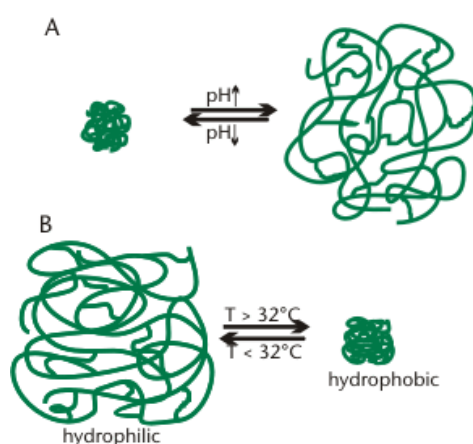
1. ลดการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ ที่นำมาใช้ในการเตรียมไฮโดรเจล
2. หากงานวิจัยให้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพดี ทำให้ได้วัสดุตกแต่งบาดแผลชนิดใหม่ที่มีสมบัติดีสามารถนำไปทำประโยชน์ในเชิงการค้าได้
3. เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์เหลือทิ้งที่ได้จากอุตสาหกรรมหัตถเลซึ่งเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศ
4. สามารถเป็นองค์ความรู้พื้นฐานเพื่อต่อยอดในงานวิจัยทางด้านการแพทย์ต่อไป

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels)

2.1.1 ความหมายของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลเป็นกลุ่มของพอลิเมอร์ชนิดที่ชอบน้ำ (hydrophilie) มีลักษณะโครงสร้างตาข่ายหลายมิติ (three-dimensional network) โดยสายของพอลิเมอร์ของไฮโดรเจลจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะทางเคมี ซึ่งส่วนใหญ่การเชื่อมพันธะลักษณะนี้จะเชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent) แต่ก็จะขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะของเจลชนิดนั้นด้วย ปกติแล้วไฮโดรเจลจะดูดซับน้ำได้น้อยกว่า 20 % ของน้ำหนักรวม แต่ถ้าดูดซับน้ำได้มากกว่า 95 % ของน้ำหนักรวม จะเรียกไฮโดรเจลชนิดนี้ว่า ซุปเปอร์แอบซอร์เบนต์ (superabsorbent) ไฮโดรเจลจะมีคุณสมบัติพิเศษคือเมื่ออยู่ในน้ำปริมาณที่มากพอจะมีการพองตัวโดยการดูดซับน้ำเข้าไปในโครงสร้างตาข่าย แต่ถ้ามีการระเหยน้ำออกจนได้ไฮโดรเจลที่มีลักษณะแห้งจะเรียกว่า ซีโรเจล (xerogel) หรือ dry gel ซึ่งในกระบวนการการระเหยน้ำออกโดยไม่มีการควบคุมโครงสร้างของเจลจะได้เจลที่มีลักษณะรูพรุนจะเรียกไฮโดรเจลที่มีลักษณะแห้งนี้ว่า แอร์โรเจล (aerogel) หรือ สปอนจ์ (sponge) ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่มีผลคือการเปลี่ยนแปลงต่อปริมาณการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล เช่น pH, อุณหภูมิ, Ionic strength, electric field solvent, pressure, salt type โดยปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเจลจะเรียกว่า volume collapse หรือ volume phase transition แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ผลของสภาวะแวดล้อมต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของไฮโดรเจล

2.1.2 สมบัติของไฮโดรเจล (Properties of hydrogels) [21]

การบวมน้ำ (Swelling)

การบวมน้ำของไฮโดรเจลในสารละลายเป็นคุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งที่ส่งผลให้ไฮโดรเจลถูกนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์เพื่อใช้เป็นเจลสมานบาดแผลและเพื่อรักษาความชุ่มชื้นของแผลโดยไม่เกิดการหมักหมม และช่วยในการดูดซับส่วนของเลือดและน้ำหนองอันเกิดจากแผลด้วย โดยทั่วไปคุณสมบัติของการบวมจะสามารถวัดได้จากความจุ (capacity) ของการดูดซับน้ำหรือสารละลาย วิธีที่ใช้ในการหาน้ำหนักของไฮโดรเจลคือการนำไฮโดรเจลแห้งมาชั่งน้ำหนักจากนั้นนำเจลที่ชั่งแล้วไปแช่ในน้ำกลั่นตามสภาวะแวดล้อมที่กำหนดและชั่งน้ำหนักของเจลหลังการบวมน้ำ น้ำหนักของเจลหลังการบวมน้ำ และน้ำหนักแห้งของเจลที่ได้มาคำนวณหาค่า Equilibrium fluid content (%) ตามสมการที่ 2.1 คือ

$$\text{Equilibrium fluid content (\%)} = \frac{[W_s - W_d]}{W_d} \times 100 \quad (2.1)$$

โดยค่า W_s และค่า W_d คือค่าน้ำหนักของเจลหลังการบวมน้ำ และน้ำหนักแห้งของเจลตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งสองได้จากการทดสอบการบวมน้ำของเจล (Water swelling test)

การบวมน้ำของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยซึ่งประกอบไปด้วย ประเภทและองค์ประกอบของโมโนเมอร์ ความหนาแน่นของพันธะ และปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ pH และความแข็งแรงของพันธะไอออน

ความหนาแน่นของพันธะร่างแห (cross-linking density)

ความหนาแน่นของพันธะร่างแหของไฮโดรเจลจะมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติอื่นๆ เช่น การบวมน้ำของไฮโดรเจล โดยความหนาแน่นของพันธะร่างแหนี้จะมีคุณสมบัติที่สำคัญ เช่น ความแข็งแรงของโครงสร้างและการให้อากาศและของเหลวซึมผ่านได้ ซึ่งความแข็งแรงของโครงสร้างไฮโดรเจลจะมีพื้นฐานที่สำคัญมาจากองค์ประกอบและโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่จะนำมาเตรียมไฮโดรเจลทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะตาข่าย (network) ทำให้เจลสามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณที่มาก แต่ถ้าความหนาแน่นของพันธะร่างแหน้อย สามารถปรับปรุงโดยการเพิ่มความหนาแน่นของพันธะเช่น การเติมพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งด้วยการทำให้เกิด copolymerization

การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradation)

ไฮโดรเจลสามารถย่อยสลายตัวมันเองได้อย่างช้าๆ และสลายตัวได้ในร่างกาย ทำให้มีการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านการนำส่งยา (drug delivery) โดยมีการพัฒนาไฮโดรเจลนี้เพื่อควบคุมการปลดปล่อยยา (drug release) และใช้ทางด้าน tissue-engineering ซึ่งการย่อยสลายนี้สามารถย่อยสลายด้วยการ hydrolysis อย่างง่ายหรือการใช้ enzyme เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการ hydrolysis พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น สารจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์ ไคโตซาน อัลจินेट หรือ Poly(lactic acid), Poly(glycolic acid) เป็นต้น

ความยืดหยุ่น (Elasticity)

ในขณะที่การยืดหยุ่นของวัสดุจะมีปัญหาคือ กลไกของแรงดึงซึ่งอาจจะทำให้เจลเปลี่ยนรูปหรือขยายตัวมากเกินไป โดยพื้นฐานส่วนใหญ่แล้วค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุจะเป็นอัตราส่วนต่อแรงกด ซึ่งจะได้ผลต่อการขยายตัวของเจล ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของการยืดหยุ่นนั้นจะอ้างถึงการกลับคืนตัวของเจล หรือกล่าวคือเมื่อมีการดึงแล้วเจลที่ได้สามารถกลับคืนตัวได้ ซึ่งการบวมตัวของไฮโดรเจลจะมีความสำคัญต่อความยืดหยุ่นของเจลและจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลด้วย

2.1.3 ชนิดของไฮโดรเจล [22]

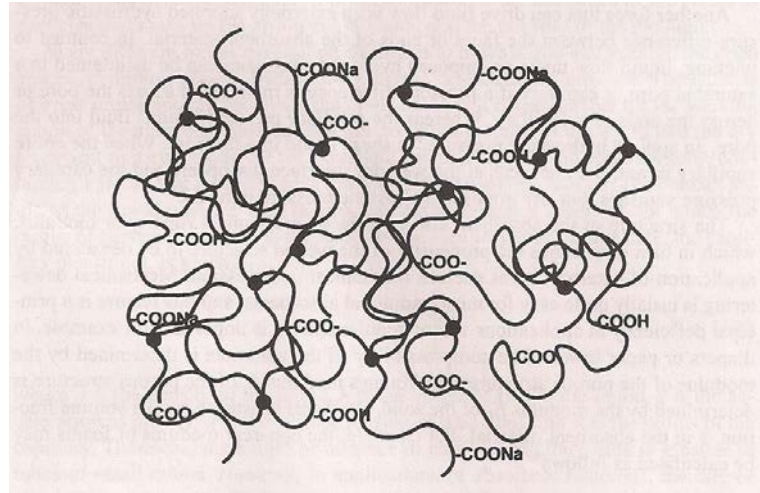
2.1.3.1 การแบ่งชนิดของไฮโดรเจลตามลักษณะการเกิดประจุในโครงสร้าง

ไฮโดรเจลที่มีลักษณะการเกิดประจุในโครงสร้างจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ นอนไอออนิก และ ไอออนิกพอลิเมอร์ (non-ionic หรือ ionic polymer) โดยที่ไอออนิกพอลิเมอร์ยังแบ่งเป็น แอนไอออนิกและแคตไอออนิกพอลิเมอร์ (anionic และ cationic polymer)

นอนไอออนิกพอลิเมอร์ (non-ionic polymer) จะมีการดูดซับน้ำหรือของเหลวเข้าไปภายในโครงสร้างโดยอาศัยความแตกต่างของโครงสร้างไฮโดรเจลซึ่งมีส่วนที่มีระเบียบและไม่ระเบียบ (entropic interactions) และส่วนที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ที่อยู่ตามความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยหมู่ที่ชอบน้ำจะทำการเชื่อมต่อพันธะกับโมเลกุลของน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ซึ่งการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างโครงสร้างของโมเลกุลกับพอลิเมอร์ของการดูดซับเมื่อทำการเชื่อมต่อโมเลกุลแล้วจะทำให้สายของพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่ ไม่ละลายน้ำแต่ก็สามารถที่จะเปลี่ยนรูปร่างหรือปริมาณได้ จะทำให้เจลชนิดนี้มีการพองตัวและเป็นเจลที่นุ่ม (soft gel)

ส่วนไอออนิกพอลิเมอร์ (ionic polymer) นั้นจะมีการดูดซับน้ำได้มากกว่าแบบนอนไอออนิกพอลิเมอร์เนื่องจากมีจำนวนไอออนมากกว่า และมีแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นเป็นแบบไอออนไดโพล (ion-dipole interaction) โดยโครงสร้างของไอออนิกพอลิเมอร์จะมีหมู่ที่มีประจุลบหรือบวก บนสายโซ่

ของพอลิเมอร์ที่เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย ดังนั้นเจลจึงสามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำเข้ามาล้อมรอบตัวเองได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างตาข่ายของพอลิเมอร์แบบมีประจุ

2.1.3.2 การแบ่งชนิดของไฮโดรเจลตามชนิดพันธะภายในโครงสร้าง

การเตรียมไฮโดรเจลโดยการทำให้เกิดพันธะภายในโครงสร้างนั้นจะมีการครอสลิงค์ของพอลิเมอร์จึงทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะ เป็น โครงสร้างตาข่ายหลายมิติซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของไฮโดรเจล โดยชนิดของพันธะที่เชื่อมระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์นั้น แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ พันธะโควาเลนต์ (covalent bonds) พันธะไอออนิก (ionic bonds) และ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonds)

- พันธะโควาเลนต์ จะเป็นการครอสลิงค์ภายในของโครงสร้างของสายพอลิเมอร์หลักซึ่งทำปฏิกิริยากับสารที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (2 หรือ 3 หมู่) โดยอาจจะเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งแบบควบแน่น (condensation reaction) หรือแบบเติม (addition reaction) ทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่ายได้ เช่นการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบควบแน่น เป็นต้น ในการเลือกวิธีการครอสลิงค์แบบพันธะโควาเลนต์สามารถเลือกชนิดของสารที่นำมาเป็นสารครอสลิงค์ สภาวะที่ใช้ในการเตรียมและควบคุมกระบวนการเตรียมได้เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

- การครอสลิงค์แบบไอออนิกเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ไอออน (polyvalent ion) กับสายโซ่พอลิเมอร์หลักจะเกิดการจับพันธะกันของประจุที่ต่างชนิดกัน สารครอสลิงค์จึงมีผลต่อโครงสร้างของไฮโดรเจนน้อยกว่าการครอสลิงค์แบบโควาเลนต์ในการดูดซับของเหลวอาจจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกันของพอลิเมอร์โดยการเตรียมไฮโดรเจลตามลักษณะ

พันธะอ็อกซิเจนนี้จะทำได้ยากเนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วมากทำให้การควบคุมการเตรียมเป็นไปได้ยาก

- การครอสลิงค์แบบกายภาพเป็นการสร้างพันธะไฮโดรเจนของสารโซ่พอลิเมอร์หลักกับสารพอลิเมอร์อีกเส้นหนึ่ง ทำให้พันธะที่เกิดขึ้นมีลักษณะแข็งแรงจึงเกิดการรวมตัวของพอลิเมอร์ ซึ่งการครอสลิงค์ชนิดนี้มีข้อเสียคือ พันธะไฮโดรเจนที่มีการครอสลิงค์ระหว่างสารโซ่ พอลิเมอร์เมื่อถูกความร้อนจะทำให้โครงสร้างนั้นถูกทำลายไป และเมื่อเกิดการดูดซับเจลที่ได้จะขยายเฉพาะส่วนที่ครอสลิงค์มากกว่าส่วนที่เป็นสายโซ่พอลิเมอร์

2.1.4 ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจล [23]

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์จากปิโตรเคมีและที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาตินั้นจะไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต (non-toxic) โดยส่วนใหญ่พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติจะเป็นจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) และพอลิเมอร์ชนิดที่นำมาเตรียมไฮโดรเจลนั้นจะมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และน้ำหนักโมเลกุลต่างกันขึ้นอยู่กับนำมาใช้งาน ในปัจจุบันได้มีการนำพอลิเมอร์ชนิดนี้มาประยุกต์ใช้ในการทางการแพทย์มากขึ้น ดังนั้นจำเป็นต้องไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม เช่น ไคโตซาน (chitosan), อัลจิเนต (Alginate), ไกลโคซามิโนไกลแคน (Glycosaminoglycans(GAGs)), เดรกแทน (Dextran)

อัลจิเนต (Alginate)

อัลจิเนตหรืออัลจินเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (Phaeophyceae) ในการผลิตอัลจิเนตเป็นอุตสาหกรรมสาหร่ายทะเลที่ใช้ได้แก่ *Macrocystis pyrifera* มีอัลจินประมาณ 14-19 % *Laminaria cloustoni* และ *Laminaria digitata* มีอัลจินประมาณ 15-40 % ปริมาณที่พบจะขึ้นกับชนิดของสาหร่าย ฤดูกาล และแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต สาหร่ายเหล่านี้พบได้ทั่วไปในโลก ประเทศที่ผลิตอัลจิเนตมาก คือ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนาดา และญี่ปุ่น

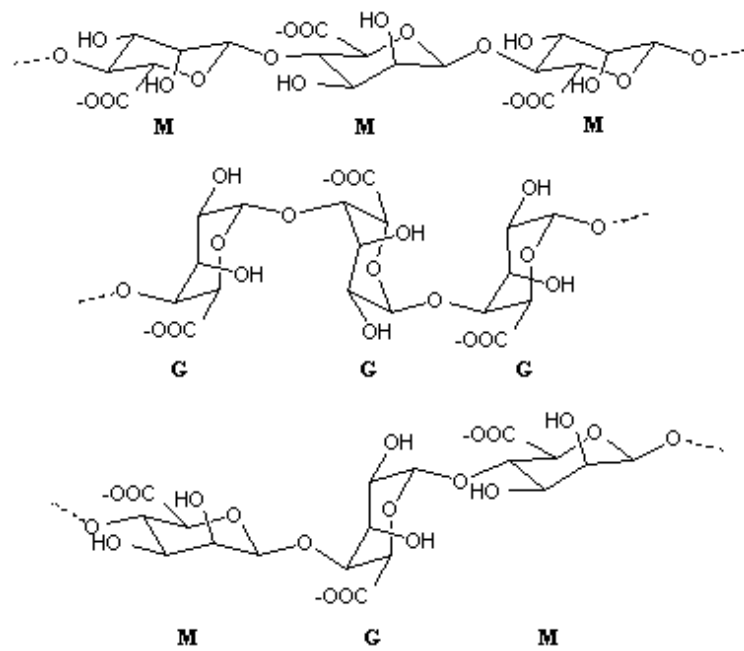
อัลจิเนตเป็น unbranched binary copolymer ของ 1,4-b-D-manuronic acid (M) และ L-guluronic acid (G) ในโมเลกุลประกอบด้วย homopolymeric regions ของ G และ M ที่เรียกว่า G- และ M-blocks ตามลำดับและยังมีบางส่วนของโมเลกุลเป็น MG-blocks สัดส่วนของ copolymer และโครงสร้างเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของอัลจิเนตเช่น ถ้าพอลิเมอร์มี G ในปริมาณที่สูงจะมีสมบัติเป็นเจลที่แข็งที่ความเข้มข้นของโลหะประจุบวกเฉพาะ (polyvalent metal cation) แต่ถ้าพอลิเมอร์มี M ปริมาณสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดเจลที่อ่อนนุ่ม และมีสถานะในการเกิดเจลที่กว้าง อัลจิเนตที่ผลิตจำหน่ายเป็นการค้ามีหลายอนุพันธ์จึงมีสมบัติการละลายในน้ำที่แตกต่างกัน เช่น อนุพันธ์ของเกลือ Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ และยังผลิตในรูปของ Propylene glycol alginate ซึ่งได้จาก

ปฏิกิริยาของ alginic acid กับ propylene oxide ภายใต้อุณหภูมิและความดัน อนุพันธ์เหล่านี้จะละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น ความหนืดของสารละลายอัลจิเนตที่ได้ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุลและการมีโลหะประจุบวก

อัลจิเนตไม่มีคุณสมบัติเป็นเจลทุกชนิดและจะสามารถเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} โครงสร้างของเจลที่มีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (egg box) โดยมี Ca^{2+} เกาะอยู่ระหว่างสายพอลิเมอร์ คุณสมบัติที่คิของอัลจิเนตคือ ทำให้เกิด Irreversible gel ในน้ำเย็นเมื่อมี Ca^{2+} รวมอยู่ด้วย ซึ่งคุณสมบัติในการเกิดเจลที่อุณหภูมิตำนี้ทำให้อัลจิเนต แตกต่างจากไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากสาหร่ายสีแดง

อัลจิเนตถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 โดยเดิมในอาหารกระป๋อง บางชนิด ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว ทำให้อิมัลชันคงตัว สารทำให้เกิดเจล และสาร ชัยยั้งการเกิด syneresis ตัวอย่างเช่น

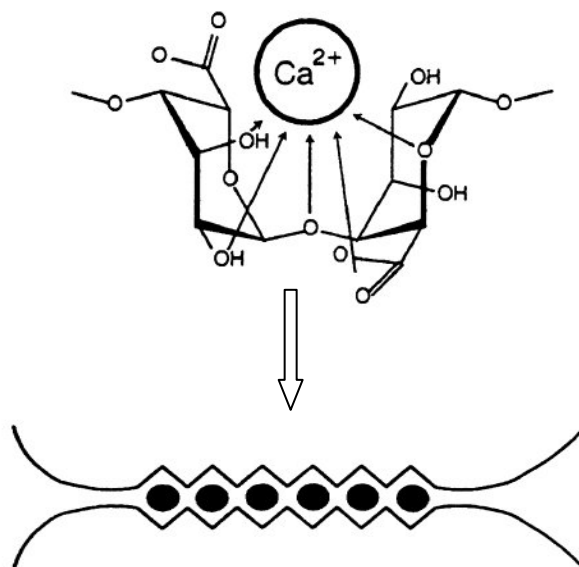
- มีการนำ Alginate มาผลิตเป็นไฮโดรเจลเพื่อใช้ในการทางการแพทย์เนื่องจากเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติและไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต
- propylene glycol alginate ใช้ในน้ำสลัด (salad dressing) และเบียร์ เพราะมีความสามารถละลายได้สูงที่ pH ต่ำ
- โซเดียมอัลจิเนตใช้เป็นส่วนผสมในไส้พายมะนาวที่แช่เย็นเพื่อให้เกิดความคงตัวระหว่าง freeze-thaw
- ใช้เคลือบผิวชิ้นเนื้อปลา ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด freeze burn กับชิ้นเนื้อปลา
- ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับไอศกรีม, frozen dessert, sherbet, processed cheese และใช้เป็น Alginate gel restructured products เช่น Onion rings และ Shrimp-like fish products



M = 1,4-b-D-manuronic acid

G = L-guluronic acid

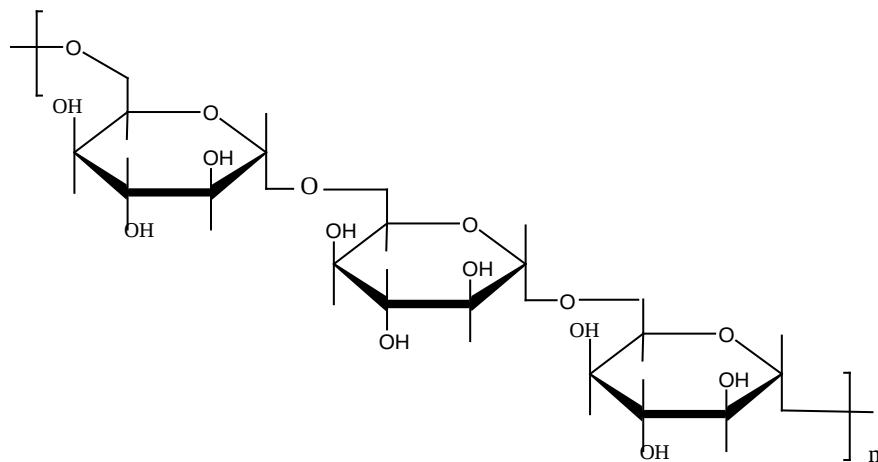
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอัลจิเนต (Alginate) ชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate (Egg-box model)

เดกซเทรน (Dextran)

เดกซเทรน (Dextran) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์สะสมในยีสต์และแบคทีเรีย ประกอบด้วยหน่วยย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคส (glucose) เท่านั้นเหมือนกับแป้งและไกลโคเจน แต่วางที่กลูโคสต่อกันด้วยพันธะ (1 →6) และมีการแตกกิ่งก้านด้วยพันธะ (1 →2) พันธะ (1 → 3) หรือพันธะ (1 → 6) ขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งมีชีวิต



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของ Dextran

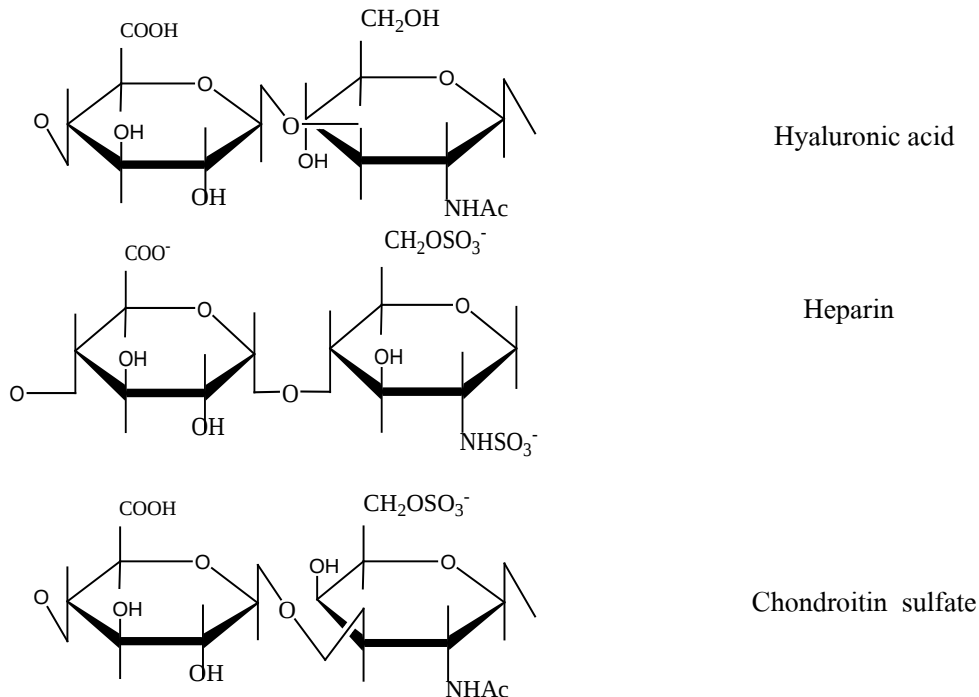
Glycosaminoglycan (GAGs)

เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วย โมโนแซ็กคาไรด์หลายๆ ชนิดมาต่อกัน และมักจะพบน้ำตาลอะมิโนรวมอยู่ด้วย จึงอาจเรียกว่าเป็น mucopolysaccharides ซึ่งประกอบด้วยอนุพันธ์ของน้ำตาล 2 ชนิด สลับกันเป็น repeating disaccharide units ที่ส่วนมากจะเป็น amino sugar (อาจจะมีหมู่ sulfate หรือไม่มีก็ได้) และ uronic acids เช่น chondroitin sulfate, dermatan sulfate, heparin, heparan sulfate, keratan sulfate และ hyaluronic acid

พวก chondroitin sulfate, Keratan sulfate, hyaluronic acid ทำหน้าที่เป็นสารประกอบพื้นฐาน (ground substance) ของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน และส่วนที่เป็นโครงร่างของร่างกาย เช่น กระดูก กระดูกอ่อน และฟัน เนื่องจาก glycosaminoglycan มีลักษณะคล้ายวุ้น มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดี และต้องใช้พื้นที่มากในการวางตัว ทำให้มีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นสารช่วยหล่อลื่น และบรรเทาแรงกระแทก จึงพบได้มากที่น้ำหล่อข้อ (synovial fluid of joints)

Heparin แตกต่างจาก glycosaminoglycan ชนิดอื่น ตรงที่พบเป็นส่วนประกอบอยู่ภายในเซลล์ โดยถูกเก็บสะสมอยู่ใน granules ของ mast cells ที่บุผนังหลอดเลือดของตับ ปอด และผิวหนัง มีฤทธิ์เป็นสารกันเลือดแข็ง (anticoagulate) และกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ lipoprotein lipase ที่เร่ง

การสลาย cholomicron จำนวนหมู่ซัลเฟตในโมเลกุลมีความสำคัญต่อการทำหน้าที่กั้นเลือดแข็งของ heparin ส่วน heparine sulfate มีหมู่ sulfate น้อยกว่า จึงมีฤทธิ์กั้นเลือดแข็งน้อยกว่า พบเป็นส่วนประกอบของ basement membrane ของผิวเซลล์ทั่วไป โดยเฉพาะที่ผนังหลอดเลือด



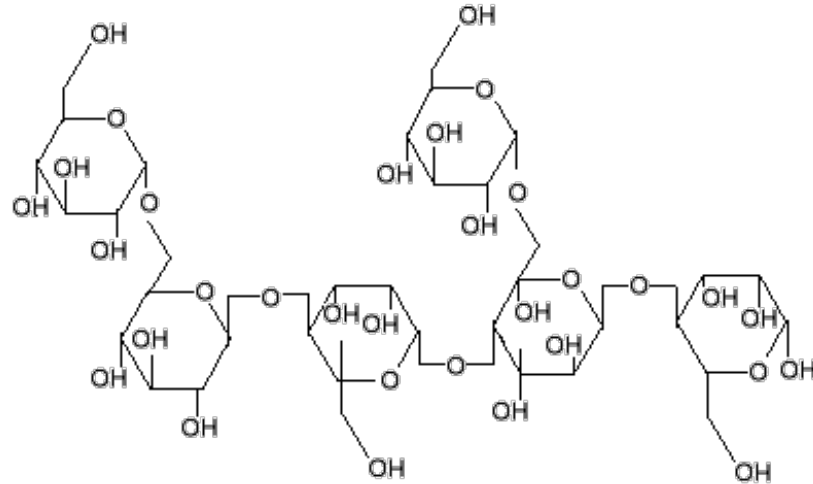
รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของ Hyaluronic acid Heparin และ Chondroitin sulfate

กัวกัม (Guar gum) [24]

Guar gum ได้จาก endosperm ของเมล็ดต้น guar (*Cyamopsis tetragonolobus*) มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและปากีสถาน ปัจจุบันมีปลูกในรัฐเท็กซัส สหรัฐอเมริกา โครงสร้างของ Guar gum เป็น โพลีเมอร์สายยาวของ mannose ที่ต่อกันด้วยพันธะ 1,4 และมีกิ่งแขนงของ galactose โดยทุก ๆ 2 โมเลกุลของ mannose ต่อกับ 1 โมเลกุลของ galactose ด้วยพันธะ 1,6 ทำให้อัตราส่วนของ mannose ต่อ galactose เป็น 2:1 ซึ่งแสดงว่า Guar gum มีกิ่งแขนงของ galactose มากกว่า locust bean gum

Guar gum มีสมบัติเป็น non-gelling แต่กระจายตัวและอุ้มน้ำได้ดีในน้ำเย็น จึงใช้ทำหน้าที่หลักเป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัวและอุ้มน้ำ สามารถเกิด interact กับ Xanthan gum ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลาย Guar gum ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ pH เวลา ความเข้มข้น และขนาดของอนุภาคด้วย Guar gum เป็น non-ionic และทนต่อ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 4-10 ทำให้สามารถเติมอิเล็กโทรไลต์ได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูงกว่า 5 % จะมีผลต่อการอุ้มน้ำและเกิดเจล Guar gum มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูงสุดที่ pH 7.5-9.0

ผลิตภัณฑ์อาหารที่นำ Guar gum ไปใช้ได้แก่ ขนมหวาน ซอส ชุป ไอศกรีม น้ำสลัด ชุปผง และใช้เป็นส่วนผสมของน้ำเกรวี่



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของ Guar gum

2.1.5 วิธีการเตรียมไฮโดรเจล

2.1.5.1 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมขวางโดยใช้สารเคมีหลายหมู่ฟังก์ชัน

(Chemical crosslinking of complementary groups) [25]

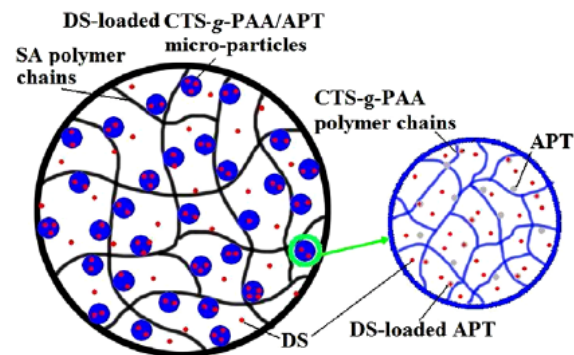
การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้เป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีความนิยมใช้เตรียมในกลุ่มของโพลิเมอร์เป็นการเชื่อมขวางวิธีนี้สามารถใช้กับกลุ่มของพอลิแซ็กไคด์เพื่อทำให้เกิดการรวมตัวกันของโครงสร้างให้มีขนาดใหญ่หรือการเตรียมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะมีลักษณะการพองตัวขึ้นของเจล โดยที่พอลิเมอร์จะทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ (reagents) ในตำแหน่งที่ 2 หรือ 3 ของหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับชนิดของกลุ่มพอลิเมอร์และสารรีเอเจนต์

ปัจจุบันได้มีการนำวิธีการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมขวางโดยใช้สารเคมีหลายหมู่ฟังก์ชัน เพื่อผลิตเป็นไฮโดรเจล เช่น

Junping Zhang และคณะ [25] ได้ทำการเตรียมและศึกษาของสารชุบเปอร์แอปซอร์-แบนด์คอมโพสิตที่ได้จาก chitosan-g-poly(acrylic acid)/attapulgit โดยการเตรียมนี้สามารถดูดซับน้ำได้ 159.6 g.g^{-1} ในน้ำกลั่นและ 42.3 g.g^{-1} ใน 0.9 wt% สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งการเตรียมนี้จะใช้ chitosan, acrylic acid และ attapulgit ในสารละลาย ใช้ $\text{N,N}'$ -methylenebisacrylamide เป็นตัวเชื่อมพันธะและใช้ ammonium persulfate เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการดูดซับน้ำของเจลชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของ chitosan อัตราส่วนของน้ำหนัก acrylic acid กับ chitosan และจำนวนสารเชื่อมขวางและ Attapulgit จะนำมาวัดผลด้วยเครื่อง FTIR spectra จะใช้ตำแหน่ง OH ของ Attapulgit ลงไปแล้ว

พบว่า Attapulgitite มีผลต่อการดูดซับของเจล คือ เมื่อทำการผสม Attapulgitite ในปริมาณที่น้อย จะทำให้ เจล สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณที่มากขึ้น

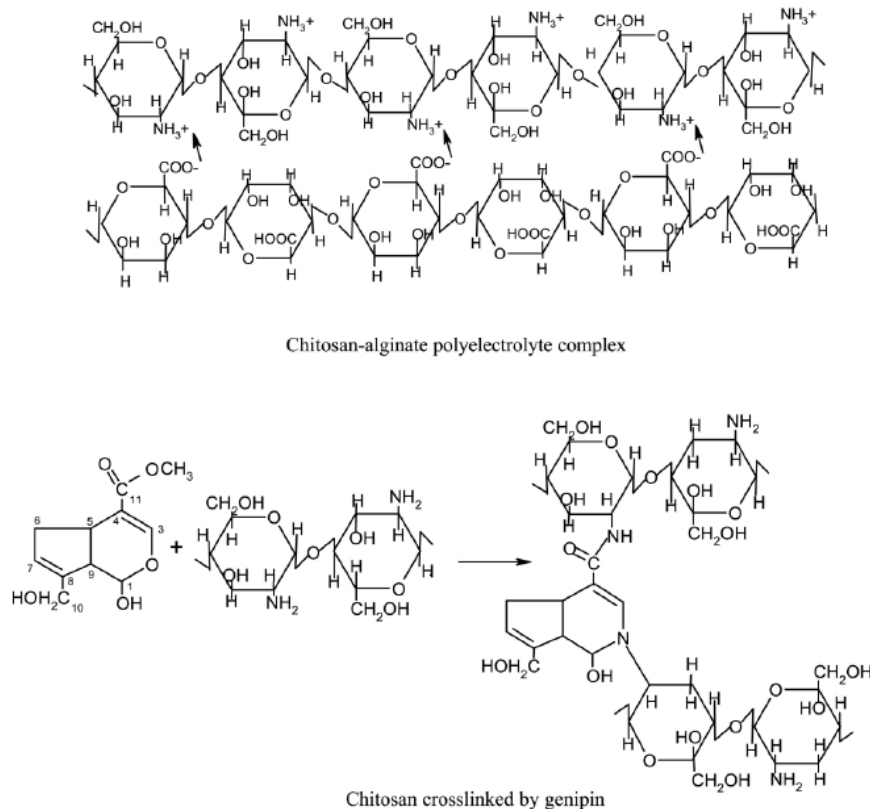
Qin Wang และคณะ [26] ได้ทำการเตรียมและศึกษาพัฒนาวิธีการทดสอบ chitosan – g – poly (acrylic acid) / attapulgitite / sodium alginate composite เพื่อให้ได้ ไฮโดรเจล และควบคุมการปลดปล่อย diclofenac sodium ในการเตรียมนี้จะควบคุม pH เพื่อเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต (CTS – g – PAA / APT / SA) โดยจะครอสลิงค์ด้วย Ca^{2+} เนื่องจากการเป็น ionic gelation ของ SA โครงสร้างและลักษณะทางชีวภาพ ของ ไฮโดรเจลคอมโพสิต สามารถศึกษาได้โดยใช้ FTIR และ SEM ตามลำดับ ส่วนค่า pH ที่ใช้ในการเตรียม ไฮโดรเจลคอมโพสิต และการปลดปล่อยยา พบว่าจากการทดสอบการเตรียม ไฮโดรเจลคอมโพสิต นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า pH ด้วย และอัตราการปลดปล่อย diclofenac sodium (DS) จะเพิ่มขึ้นจาก ไฮโดรเจลคอมโพสิต ที่ 3.76 เปอร์เซ็นต์ ในสารละลาย pH ที่ 2.1 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ในสารละลาย pH ที่ 6.8 ที่เวลา 24 ชั่วโมง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามอัตราการปลดปล่อยของ DS จะเพิ่มขึ้นเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ ที่สารละลาย pH ที่ 7.4 ที่เวลา 2 ชั่วโมง พบว่าอัตราการปลดปล่อย DS จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะขึ้นอยู่กับ ART ที่ 0-50 wt ดังนั้นการปลดปล่อยด้วยยาจาก เจล นี้จะใช้ pH ที่ 6.8



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของไฮโดรเจลที่ได้จาก CTS-g-PAA/APT/SA

FWU-Long Mi และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยยาจาก chitosan- alginate และทำให้โครงสร้างของสารประกอบแข็งแรงโดยใช้สารครอสลิงค์ที่ได้จากธรรมชาติในที่นี่จะใช้ genipin ซึ่งเป็นสารที่สกัดได้จาก Gardenia fruits ที่ใช้ในการรักษาทางการแพทย์ของจีนเพื่อใช้ในการบำบัดรักษาโรคดีซ่าน และการอักเสบของแผล แต่จะทำให้เกิดผลต่อต้าน การเกิดเป็นเจลของไคโตซานนั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม การหยดไคโตซานในสารละลาย alginate – genipin โดยจะเกิดเป็น chitosan – alginate แบบ polyelectrolyte และ แบบการครอสลิงค์กันด้วย genipin Chitosan – alginate แบบ complex นี้จะเกิดปฏิกิริยาบนชั้นของผิวรอบนอกของเจล แต่ถ้า

สาร Croslinker Chitosan ด้วย genipin แล้วจะเกิดปฏิกิริยาด้านในของเจล ส่วนอัตราการบวมตัวของ chitosan – alginate complex จะขึ้นอยู่กับค่า pH หรือความเข้มข้นของสารละลาย alginate จากการทดลองพบว่าอัตราการบวมตัวของ chitosan – alginate complex จะขึ้นอยู่กับค่า pH และเจลสามารถเข้ากับเซลล์ได้ดี ไม่เป็นพิษต่อเซลล์



รูปที่ 2.9 กลไกเกิดเจลของ chitosan ในสารละลายผสม alginate-genipin

2.1.5.2 การเตรียมไฮโดรเจลโดยการเหนี่ยวนำให้เกิดพอลิเมอร์เรซชันด้วยรังสี

(hydrogel preparation by irradiation)

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่มีการพัฒนาเพื่อทำการเตรียมไฮโดรเจล จะทำให้มีการปนเปื้อนของสารที่นำมาใช้ในการครอสลิงค์น้อย โดยวิธีการเตรียมชนิดนี้จะเกิดการครอสลิงค์นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีของชนิดพอลิเมอร์ที่นำมาเตรียมซึ่งเทคนิคที่ใช้การเหนี่ยวนำให้เกิดพอลิเมอร์เรซชันด้วยรังสีได้มีการนำมาใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลกันมาก เช่น

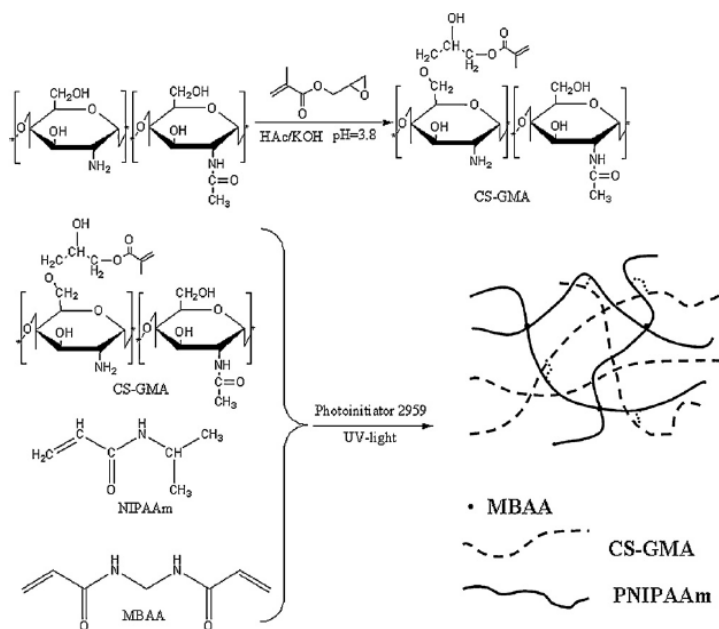
Sergey A. และคณะ [28] ได้ทำการเตรียมไฮโดรเจลจาก chitosan – polyvinyl pyrrolidone ด้วยการใช่วัสดุเชื่อมขวาง (γ) เพื่อใช้ในการขนส่งโปรตีน โดยที่ pH และองค์ประกอบของไฮโดรเจล จะมีผลต่อการดูดซับ bovine serum albumin (BSA) เข้าไปใน chitosan (CS) – polyvinyl pyrrolidone (PVP) (CSPVP) และการปลดปล่อย BSA, CSPVP จะเตรียมได้จากสารผสมระหว่าง CS / PVP / Water ด้วยการใช่วัสดุเชื่อมขวาง (γ) ที่อุณหภูมิห้อง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายนอกของเจล พบว่าถ้าดูดซับ BSA ของ CSPVP เพิ่มขึ้น CS ในไฮโดรเจลก็จะเพิ่มขึ้นด้วยแต่ถ้าใช้วัสดุเชื่อมขวางมากขึ้นจะทำให้การดูดซับ BSA ลดน้อยลงเนื่องจากการกีดกันของพันธะมากขึ้นทำให้เจลมีลักษณะแข็งตัวมากขึ้น และที่ pH เท่ากับ 5 เจลสามารถดูดซับ BSA ได้มากที่สุด

อัษฎา สุวรรณวงศ์ [29] ได้ทดลองเตรียมไฮโดรเจลที่ประกอบด้วยชั้นของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (พีวีเอ) และชั้นของไคโตซานโดยการฉายรังสีแกมมาเพื่อใช้เป็นเจลปิดรักษาบาดแผล ชั้นบนของไฮโดรเจลเป็นไคโตซานไฮโดรเจล มีจุดประสงค์เพื่อให้มีความสามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้ ไฮโดรเจลชั้นล่างเป็นพีวีเอไฮโดรเจล มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มการดูดซับน้ำ ไฮโดรเจลทั้งสองใช้เทคนิคการแช่แข็งและปล่อยให้ละลายก่อนนำไปฉายรังสีแกมมาเพื่อช่วยให้โพลิเมอร์ทั้งสองเกิดการเชื่อมขวางที่ดีขึ้น ในการใช้ไฮโดรเจลนี้ปิดรักษาแผลจะใช้ส่วนที่สัมผัสกับแผลเป็นชั้นของไคโตซานไฮโดรเจล ผลการทดลองได้ส่วนประกอบที่เหมาะสมของไฮโดรเจลจากไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุล 100,000 คอลตัน มีความเข้มข้นในกรดอะซิติก 1% เป็น 60% และ พีวีเอไฮโดรเจลจาก 30% (w/v) พีวีเอในน้ำ ที่ปริมาณรังสี 25 กิโลเกรย์ ไคโตซานและพีวีเอมีความต้านทานแรงกดของไฮโดรเจลรวมเท่ากับ 1.1 นิวตัน โดยไคโตซานมีความเป็นเจลและมีค่าการบวมในน้ำเท่ากับ 38.8% และ 260% ตามลำดับ ส่วนพีวีเอเท่ากับ 81.5% และ 2748% ตามลำดับ ผลการทดสอบการต้านทานการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์โดยวัดจากจำนวนโคโลนีของเชื้อ *E.coli*, เชื้อ *S.aureus* และเชื้อ *C.albicans* ที่เจริญเติบโตในไฮโดรเจล พบว่าชั้นของไคโตซานมีความสามารถในการต้านทานเชื้อ *E.coli*, เชื้อ *S.aureus* และเชื้อ *C.albicans* ได้ 100% ส่วนชั้นของ พีวีเอมีความสามารถในการต้านทานเชื้อ *E.coli*, เชื้อ *S.aureus* และเชื้อ *C.albicans* เท่ากับ 10.61%, 42.45% และ 100% ตามลำดับ ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีความนุ่ม มีความสามารถฆ่าเชื้อโรค และดูดซับของเหลวจากแผลได้ดีมาก ในการวิจัยได้ทำการศึกษาโครงสร้างของไคโตซานไฮโดรเจลโดย FT-IR และพบว่าการเกิดเชื่อมขวางในไคโตซานด้วยรังสีแกมมามีความเป็นไปได้ที่จะเกิดที่หมู่อะเซตาไมด์

2.1.5.3 การเตรียมไฮโดรเจลแบบปฏิกิริยาโฟโตโพลิเมอร์ไรเซชัน (Synthesis by photopolymerization)

การเกิดพอลิเมอร์โดยแสงเป็นเทคนิคการเชื่อมพันธะระหว่างโมโนเมอร์แบบเหลว (monomer liquid) หรือ macromer โดยใช้ UV เป็นตัวช่วยในการเชื่อมพันธะเพื่อให้เกิดเป็นลักษณะของเจลที่มีโครงสร้างหลายมิติขึ้นมา โดยจะแบ่งกระบวนการเตรียมชนิดนี้เป็น 3 ขั้นตอน คือ photoinitiation, propagation และ termination โดยการเตรียมแบบนี้จะอาศัยหลักการของอนุมูลอิสระ (Free radical) หรือ แคตไอออนิก เป็นตัวริเริ่ม (initiation)

Jing Han และคณะ [30] ทำการเตรียมไฮโดรเจลด้วย methacrylated chitosan / PNIPAm N-isopropylacrylamide (NIPAAm) ด้วยเทคนิคโฟโตโพลิเมอร์ไรเซชันได้ทำการศึกษาไฮโดรเจลด้วยเครื่อง Fourier transform infrared (FT-IR), Differential scanning calorimetry (DSC) และ Optical transmittance ส่วน scanning electro microscopy (SEM) จะศึกษาเจลทางด้าน morphology จากการทดสอบทางด้านการบวมพบว่าการบวมของไฮโดรเจลจะขึ้นอยู่กับค่า pH และอุณหภูมิและใช้ Acidorange 8 (AOR) และ 5 - fluouracil (5 - FU) เป็นรูปแบบของยาที่ใช้ในการทดสอบการปลดปล่อยของไฮโดรเจลพบว่าสามารถปลดปล่อยยาได้ดี



รูปที่ 2.10 การเตรียมไฮโดรเจลด้วย methacrylated chitosan / PNIPAm N-isopropylacrylamide (NIPAAm)

2.1.6 กลไกและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล [31]

ไฮโดรเจลหรือสารซูเปอร์แอบซอร์เบนต์เมื่อดูดซับน้ำเข้าภายในโครงสร้างแล้วจะพองตัวได้มาก ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับ การแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้าง ปัจจัยที่มีผลในการดูดซับของพอลิเมอร์คือ แรงดันออสโมติก (osmotic pressure) การเคลื่อนที่ของ counter-ion และความชอบ (affinity) ของพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) กับน้ำ และความยืดหยุ่นของโครงสร้างตาข่ายพอลิเมอร์

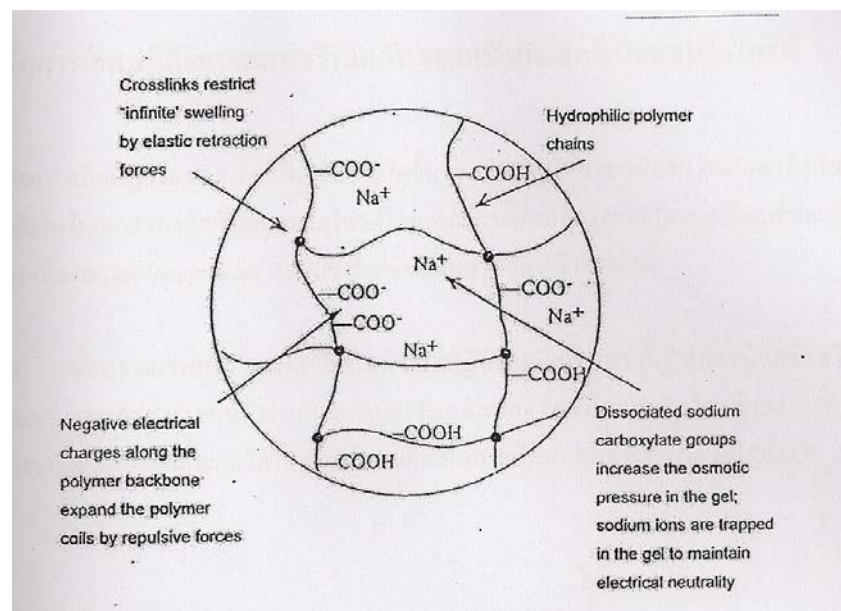
กลไกการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลแสดงดังรูปที่ 2.11 จากรูปจะเห็นว่ากลไกการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเกิดได้หลายแบบ และความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลก็เป็นผลโดยรวมจากกลไกต่างๆ เหล่านี้ ส่วนใหญ่ไฮโดรเจลจะเตรียมมาจากพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารโพลีอิเล็กโทรไลต์คือ มีหมู่ที่มีประจุบวกหรือลบอยู่ภายในโมเลกุลจำนวนมาก พอลิเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิล (COO⁻) ซึ่งจะดึงดูดน้ำเข้ามาได้ดี การดึงน้ำเข้ามาทำให้โครงสร้างภายในเกิดการพองตัวคือสายโซ่พอลิเมอร์มีการกระจายตัวมากขึ้น นอกจากนี้สายพอลิเมอร์อาจมีหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำอยู่ด้วย การนำพาน้ำเข้ามาภายในโครงสร้างไฮโดรเจลด้วยหมู่ที่มีประจุ จะทำให้โอกาสที่หมู่ชอบน้ำอื่นที่มีอยู่เกิดพันธะกับน้ำ (เช่น พันธะไฮโดรเจน) ก็เพิ่มมากขึ้นด้วย

หมู่คาร์บอกซิเลตในพอลิเมอร์จะจับอยู่กับโซเดียมไอออนเพื่อให้มีสภาพประจุเป็นกลาง เมื่อพอลิเมอร์ดูดซับน้ำเข้าในโครงสร้างตาข่าย โดยโมเลกุลของน้ำซึ่งมีค่า dielectric constant สูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโซเดียมไอออนกับหมู่คาร์บอกซิเลต จะทำให้โซเดียมไอออนหลุดเป็นอิสระและกระจายอยู่ภายในโครงสร้างไฮโดรเจล ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) ภายในและภายนอกโครงสร้างไฮโดรเจล แรงดันออสโมติกทำให้มีการเคลื่อนที่ของน้ำเข้าไปสู่ภายในไฮโดรเจลเพื่อให้เกิดสภาพที่สมดุล เมื่อไฮโดรเจลอยู่ในสารละลายเกลือความแตกต่างของแรงดันออสโมติกภายในและภายนอกโครงสร้างไฮโดรเจลจะมีค่าลดลง ทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำลดลง

อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการพองตัวของไฮโดรเจลคือ ระดับการครอสลิงค์ของสารพอลิเมอร์ บริเวณที่เกิดการครอสลิงค์จะมีการยึดตัวที่จำกัด ทำให้พอลิเมอร์บริเวณนั้นแยกออกจากส่วนอื่นและมีลักษณะขดเป็นวง (coiled polymer) มีความแข็งแรงมากและความไม่เป็นระเบียบ (entropy) ของสายโซ่ลดลง ในขั้นตอนสุดท้ายของการดูดซับน้ำเป็นการเข้าสู่ภาวะสมดุลระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการละลายได้ดีและแรงในการหดตัว (retrective forces) เนื่องจากการครอสลิงค์ พบว่าโครงตาข่ายมีปริมาณการครอสลิงค์สูง จะมีความหนาแน่นและเกิดแรงหดตัวมาก ทำให้ไฮโดรเจลมีระดับการพองตัวลดลงที่สภาวะสมดุล

จากกลไกการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของไฮโดรเจลได้ดังนี้

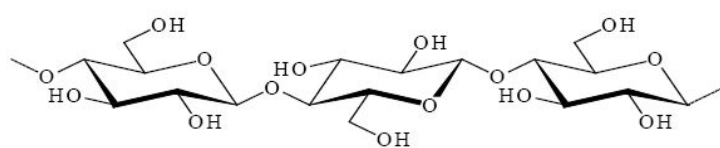
1. แรงดันออสโมติก ถ้าความเข้มข้นของ solute ภายในไฮโดรเจลสูงกว่าสารละลายภายนอกจะทำให้เกิดแรงดันออสโมติก น้ำจากภายนอกจะแพร่เข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจลได้ ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมากน้ำจะเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลมากทำให้เกิดการพองตัวได้ดี
2. แรงกระทำระหว่างน้ำกับไฮโดรเจล ถ้าโพลิเมอร์นั้นมีโครงสร้างทางเคมีเหมาะสมจะสามารถเกิดแรงกระทำน้ำได้มาก เช่น เมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นจะให้น้ำแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้มากเกิดการพองตัวได้ดี
3. ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าไฮโดรเจลมีช่องว่างหรือรูพรุนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มากน้ำก็จะแพร่เข้าไปได้มากเกิดการพองตัวได้ดี
4. ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าสายโซ่มีความยืดหยุ่นสูง แรงต้านการแพร่ของน้ำเพื่อเข้าสู่สมดุลจะต่ำ ทำให้น้ำเข้าสู่ไฮโดรเจลได้มากเกิดการพองตัวได้ดี
5. ความหนาแน่นของการครอสลิงค์ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้ามีความหนาแน่นของการครอสลิงค์มากจะเป็นการเพิ่มแรงต้านทานในการขยายตัวของไฮโดรเจลทำให้เกิดการพองตัวได้ไม่ดี



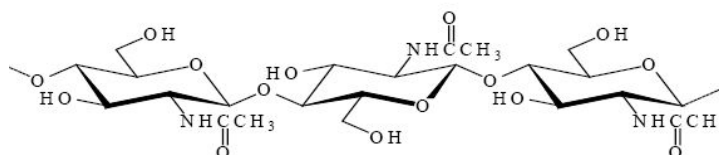
รูปที่ 2.11 กลไกที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล

2.2 ไคโตซาน (Chitosan) [32]

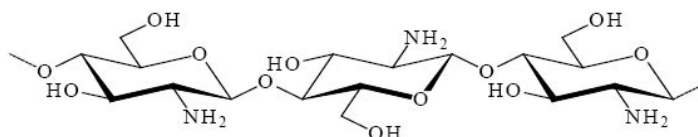
ไคโตซานเป็นไบโอพอลิเมอร์ที่พบมากในสัตว์ทะเลที่มีเปลือกแข็งภายนอกเช่น กุ้ง ปู กุ้ง และแมลงที่มีปีก เช่น ตั๊กแตน ค้างคาว ผนังเซลล์ของพืชบางชนิด และยังพบอีกมากในจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ เช่น เห็ด รา และ ยีสต์ โดยไคโตซานจัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่มีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส



(ก) โครงสร้างของเซลลูโลส



(ข) โครงสร้างของไคติน



(ค) โครงสร้างของไคโตซาน

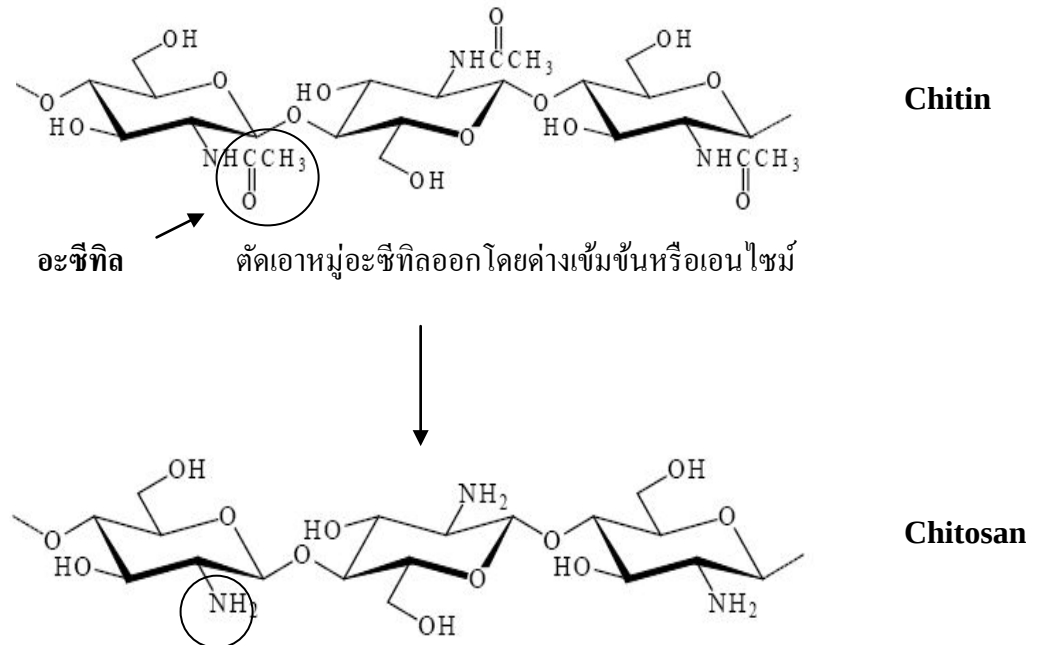
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของ เซลลูโลส ไคตินและไคโตซาน

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมไคโตซาน คือ ไคติน โดยที่ไคโตซานเป็นสารโพลิเมอร์ และเป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ได้จากการทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิติล (deacetylation) ออกจากสารไคติน ผลจากการเกิดปฏิกิริยาอะซิติลเลชันจะทำให้หมู่อะซิติลที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 ในวงแหวนไพราโนส (pyranose ring) ของไคตินเป็นเป็นหมู่อะมิโน ไคโตซานนั้นค้นพบครั้งแรกโดย Rouget ในปี 1859 ซึ่งเตรียมในสภาวะที่เป็นด่าง โดยการนำเอาไคตินมาต้มในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากจนเดือด และพบว่าไคตินที่นำมาต้มนั้นสามารถละลายในกรดอินทรีย์ได้ จึงเรียกสารที่ได้ว่า modified chitin และเมื่อนำมาทดสอบสี โดยการผสมด้วยสารละลายไอโอดีนและกรด พบว่าให้สีม่วง ในขณะที่ไคตินให้สีน้ำตาล ต่อมาในปี 1984 Hoppe Seyler ได้ให้คำนิยามของ modified chitin ว่า chitosan การดึงหรือตัดเอาหมู่อะซิติลออกจากไคตินนั้น สามารถดึงออกได้เพียงบางส่วนหรือเกือบทั้งหมดซึ่งจะทำให้สมบัติหลายประการของไคตินนั้นเปลี่ยนแปลงไป และพบว่า

เมื่อดึงหมู่อะซิทธิลของไคตินออกเกินครึ่งหนึ่งหรือคิดเป็นร้อยละ 50 ขึ้นไปจะทำให้ได้สารที่มีสมบัติในการละลายได้ในกรดอินทรีย์อ่อนๆ เช่น กรดอะซิติก กรดแลกติก หรือกรดซิตริก เป็นต้น ถ้าต้องการไคโตซานที่มีค่าระดับของการเกิดอะซิทธิลสูงๆ ก็ให้ทำปฏิกิริยากับด่างซ้ำหลายๆ ครั้ง

จากลักษณะโครงสร้างโคพอลิเมอร์ของไคตินและไคโตซาน จึงทำให้มีการกำหนดค่าดัชนีที่จะใช้บอกระดับของการเกิดอะซิทธิล โดยเรียกค่าดัชนีนี้ว่า ค่าระดับของการเกิดอะซิทธิล (degree of deacetylation) ซึ่งค่านี้จะบอกถึงสัดส่วนของจำนวน D-glucosamine ที่มีอยู่ในสายพอลิเมอร์ของไคตินและไคโตซาน โดยทั่วไปร้อยละของการเกิดอะซิทธิลของไคตินในสารละลายต่างจะมีค่าประมาณร้อยละ 75-85 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากโครงสร้างของไคตินที่ทำให้หมู่อะซิทธิลที่เหลือไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับด่างได้ง่าย ถ้าไม่ใช่สภาวะในการทำปฏิกิริยาที่รุนแรง ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาทางหนึ่งในการเตรียมไคโตซานที่มีค่าร้อยละของการเกิด อะซิทธิลสูงกว่าร้อยละ 90 ก็คือการทำปฏิกิริยาซ้ำแทนที่จะทำเพียงครั้งเดียว โดยก่อนที่จะทำปฏิกิริยาอะซิทธิลซ้ำจะต้องทำการล้างไคโตซานที่ได้ก่อน ทั้งนี้อาจจะเนื่องจากการล้างก่อนที่จะเติมสารละลายต่างใหม่เข้าไปจะทำให้การซึมผ่านของสารละลายเข้าไปในไคโตซานได้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นไคตินหรือไคโตซานที่ผลิตได้ จะอยู่ในรูปสายโซ่ที่มีหน่วยของไคตินและไคโตซานผสมกันอยู่สลับหน่วยปะปนกันไปเป็นโคพอลิเมอร์ ดังนั้นสารไคตินที่สกัดได้จากเปลือกกุ้งหรือเปลือกปู แม้ว่าจะมีหน่วยไคตินเป็นหลักอยู่ในสายโซ่ก็ตาม ก็จะมีหน่วยของไคโตซานปะปนอยู่จำนวนหนึ่งประมาณร้อยละ 5-10 หรือแม้ว่าเราจะนำไคตินมาผ่านกระบวนการปรับโครงสร้างทางเคมีด้วยการเปลี่ยนหมู่อะซิทธิลเป็นหมู่อะมิโน เพื่อผลิตไคโตซาน ก็จะไม่สามารได้ไคโตซาน 100 เปอร์เซ็นต์ เกณฑ์ที่เป็นที่เข้าใจในกลุ่มนักวิจัย คือ ในกรณีที่สายโซ่มีหน่วยของไคโตซานเกินกว่าร้อยละ 70-75 ขึ้นไป เราจึงเรียกว่าไคโตซาน



รูปที่ 2.13 การเตรียมไคโตซานจาก ปฏิกิริยา Deacetylation ของไคติน

2.2.1 สมบัติของไคโตซาน

ไคโตซานมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูง และมีความหนาแน่นของประจุสูงทำให้มีคุณสมบัติมากมาย ดังนี้

- (ก) Cationic properties ไคโตซานมีคุณสมบัติเป็น Linear polyelectrolyte มีความหนาแน่นทางประจุสูงใช้เป็น flocculants ที่มีประสิทธิภาพสูงได้เป็นอย่างดี สามารถยึดจับกับประจุลบที่ผิวได้ดีและยังสามารถจับโลหะพวก chelated metal
- (ข) Chemical properties ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงและเป็นพอลิเมอร์สายตรงที่เป็นของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน มีหมู่เอมิโนที่พร้อมจะละลายในกรดอินทรีย์อ่อน เช่น กรดอะซิติก เป็นต้น การละลายของไคโตซานมีคุณสมบัติสำคัญหลายอย่าง เช่น อยู่ในรูป free amino จะไม่ละลายน้ำที่ pH เป็นกลาง และที่ pH เป็นกรด free amino group ($-NH_2$) จะถูก protonated ได้เป็น cationic amine group ($-NH_3^+$)
- (ค) Chitosan solution properties สารละลายไคโตซานในกรดอินทรีย์เกิดเป็นสายของ polyamine ที่อยู่ในรูปของ protonated form ซึ่งมีความเข้มข้นของประจุบวกและมีสมบัติที่พร้อมจะทำปฏิกิริยากับชีวโมเลกุลที่มีประจุลบได้เป็นอย่างดี ไคโตซานไม่สามารถละลายได้ที่ pH มากกว่า 6.5 ความสามารถในการละลายของไคโตซานจะถูกจำกัดใน H_3PO_4 ไคโตซานไม่

สามารถละลายในสารละลายอินทรีย์หลายชนิดแต่จะละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิด

2.2.2 การประยุกต์ใช้ไคโตซาน

ในระยะสองทศวรรษที่ผ่านมาได้มีผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่เกิดจากพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดนี้ออกมาอย่างแพร่หลายทั้งในและนอกประเทศ โดยปกติแล้วไคติน-ไคโตซานมีสมบัติคล้ายคลึงกัน แต่การนำไคตินไปใช้ประโยชน์มีน้อยมาก เนื่องจากข้อจำกัดในตัวเอง คือ การที่ไคตินไม่สามารถละลายในตัวละลายต่างๆ ได้เนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นผลึก แม้ว่าจะมีนักวิทยาศาสตร์ได้ทดลองหาระบบของตัวทำละลายที่เหมาะสมต่อการละลายได้แล้วก็ตาม แต่ตัวทำละลายเหล่านั้นก็ยังไม่สามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นความสนใจที่จะนำไคตินไปใช้ประโยชน์จึงมีน้อยมาก เมื่อเทียบกับไคโตซานที่สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่เป็นกรดเจือจาง ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาจึงมีเป็นจำนวนมาก

ไคติน-ไคโตซาน เป็นสารที่มีลักษณะเป็นเอกลักษณะโคโคเด่นเฉพาะตัวก็จะเป็นสารธรรมชาติที่เป็นวัสดุทางชีวภาพ (biomaterials) ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) อีกทั้งยังย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (biodegradable) ดังนั้นจึงมีความปลอดภัยในการนำมาใช้กับมนุษย์และไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ไคโตซาน ยังสามารถขึ้นรูปได้หลายแบบ เช่น เจลเม็ด เส้นใย และคอลลอยด์ ไคโตซานมีหมู่อะมิโน ($-NH_2$) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเปลี่ยนให้เป็นอนุพันธ์ (Derivatives) ได้มากมาย โดยที่ในปัจจุบันได้มีการค้นคว้าวิจัยและนำไคติน-ไคโตซาน ไปใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย เช่น

2.2.2.1 ด้านการแพทย์และเภสัช

ไคโตซานมีประโยชน์อย่างมากทางการแพทย์ ที่สำคัญที่สุดคือการรักษาบาดแผล การปลูกถ่ายอวัยวะ ขาดไข่ม้วนและคอเลสเตอรอล

- การตกแต่งบาดแผล : เส้นไหมไคโตซานสามารถนำมาถักทอเป็นแผ่น เพื่อตกแต่งบาดแผล โดยทำให้เกิดการสมานแผลและลดความเจ็บปวด โดยที่การรักษาแผลผ่าตัดด้วยไคโตซานไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง
- สารห้ามเลือดและรักษาแผล : ไคโตซานทำให้เลือดเกิดการแข็งตัวโดยทำหน้าที่เป็นสารห้ามเลือด และสามารถผสมในจีลิ่งเพื่อช่วยในการรักษาบาดแผล
- สารจับไข่ม้วนและสารด้านการสร้างคอเลสเตอรอล : ไคโตซานทำหน้าที่เป็นตัวย่อยสลายไข่ม้วน โดยจะจับกับไข่ม้วนที่กระเพาะอาหารซึ่งมากเกินไป

- การปลูกถ่ายเซลล์: การปลูกถ่ายเซลล์จะพบปัญหาหลายด้าน เช่น การแพร่ผ่านของอากาศในระหว่างการปลูกถ่าย การไม่ยอมรับอวัยวะในการปลูกถ่าย ดังนั้นจึงมีการพัฒนานำเชื้อโคตินและโคโตซานมาใช้ในการปลูกถ่ายอวัยวะ

-

2.2.2.2 ด้านการบำบัดน้ำดีและน้ำเสีย

คุณสมบัติในการตกตะกอน และการจับโลหะหนักของโคโตซานเป็นประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย สระว่ายน้ำและบ่อน้ำแร่ รวมทั้งน้ำเสียชนิดต่างๆ

- การบำบัดน้ำดื่ม การนำโคโตซานและอนุพันธ์ของโคโตซานมาผสมกับถ่านกัมมันต์สามารถทำให้น้ำดื่มบริสุทธิ์ได้ โคโตซานมีหน้าที่ 2 ประการ คือ กำจัดสารประกอบอินทรีย์และกำจัดโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว พรอท แคดเมียม และสังกะสี เป็นต้น
- การบำบัดน้ำในสระว่ายน้ำและบ่อน้ำแร่ โคโตซานและอนุพันธ์ สามารถตกตะกอนสาร เช่น น้ำมัน สบู่ สิ่งสกปรก ฟูนที่ปะปนอยู่ในน้ำ ทำให้น้ำใสขึ้น
- การบำบัดของเสียประเภทอาหาร โคโตซานจะจับกับอนุภาคที่เป็นคอลลอยด์ ซึ่งแพร่กระจายอยู่ในน้ำเสียโดยจะดึงโปรตีนกลับคืนมาเพื่อใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ กระบวนการนำเอาโปรตีนกลับมาใช้วิธีการนี้ลดสารละลายโคโตซานร้อยละ 0.25-1.0 ลงในน้ำเสีย

2.2.2.3 ด้านเครื่องสำอาง

โคตินและโคโตซาน รวมถึงอนุพันธ์ต่างๆ มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นเครื่องสำอาง ดูแลรักษาผผ หนอมผิวและรักษากลิ่นปาก

- ดูแลรักษาเส้นผม เนื่องจากอนุภาพของโคโตซานมีอนุภาพเป็นประจุบวก และเส้นผมมีประจุลบ ทำให้โคโตซานจับกับเส้นผมเป็นอย่างดี โดยที่โคโตซานจะใช้เคลือบเส้นผมเป็นการเพิ่มความแข็งแรงและอ่อนนุ่มให้กับเส้นผม
- หนอมผิว โคโตซานมีคุณสมบัติในการให้ความชุ่มชื้นแก่ผิวหนัง (Moisturizer) เนื่องจากโคโตซานมีประจุบวกจึงเข้ากันได้ดีกับผิวหนัง
- ขจัดกลิ่นปาก โคตินและโคโตซานสามารถใช้เป็นส่วนผสมในยาสีฟัน น้ำยาบ้วนปาก และหมากฝรั่งเพื่อให้ลมหายใจสดชื่น ป้องกันการก่อตัวของหินปูน

2.2.2.4 ด้านอาหารและเครื่องดื่ม

โคโตซานและโคตินสามารถใช้ประโยชน์โดยเติมลงในอาหารเป็นสารยืดยอายุการเก็บรักษาเป็นตัวส่งเสริมรสชาติของเครื่องดื่ม

- สารป้องกันคอเลสเทอรอลและการจับไขมัน ไคโตซานจะเข้าจับกับไขมันซึ่งอยู่ในกระเพาะอาหาร และสามารถลดการเกิดมะเร็งในลำไส้ใหญ่ได้
- การผลิตสารปรุงรสและสารแต่งกลิ่น ไคตินที่ถูกทำให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กจะเรียกว่า ไมโครคริสทาลไลน์ไคติน (Microcrystalline chitin) เมื่อถูกความร้อนจากการหุงต้มจะเกิดเป็น ไพรารซิน ซึ่งใช้ปรุงแต่งกลิ่นและรสชาติในอาหารประเภทยางและอาหารต่างๆ นอกจากนี้ ไคโตซานมีความสามารถในการเก็บรักษาสีของอาหารทะเลหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนด้วยไอน้ำสารให้ความหวาน สารกันเสียอีกด้วย
- การบรรจุอาหาร การขึ้นรูปฟิล์มไคโตซานสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับการห่ออาหารได้ นอกจากนี้ยังมีศักยภาพในการเป็นสารเคลือบผิวผลไม้ได้

2.2.2.5 ด้านการเกษตร

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมาช้านาน เป็นแหล่งอาหารที่สมบูรณ์ของโลกแห่งหนึ่ง อีกทั้งรายได้หลักของประเทศก็มาจากผลิตผลทางการเกษตรในปัจจุบันด้วยวิทยาการและเทคโนโลยีสมัยใหม่ มีส่วนส่งเสริมเพิ่มพูนมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร แต่การใช้สารเคมีในการกำจัดศัตรูพืชก็มีปริมาณมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อตัวเกษตรกร ผู้บริโภคผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม แนวโน้มของเทคโนโลยีการเกษตรในอนาคตนั้นจะมีการมุ่งเน้นการเกษตรอินทรีย์ ไคติน-ไคโตซานก็เป็นสารธรรมชาติอีกตัวหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ในด้านนี้ได้อย่างมาก

- การเคลือบเมล็ดพันธุ์พืช (Seed Coating)

การเคลือบเมล็ดพันธุ์พืชนั้นจะมีประโยชน์หลายประการ เช่น ป้องกันการปลอมปนของเมล็ดพันธุ์ (โดยใช้สีเคลือบเป็นเอกลักษณ์) ป้องกันเมล็ดพันธุ์จากโรคและแมลงศัตรูพืช และยืดอายุการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ เป็นต้น ไคติน-ไคโตซานมีบทบาทในการเป็นสารเคลือบเมล็ดพันธุ์ดังต่อไปนี้

- ตัวเชื่อม (Binder) ในสารเคลือบเมล็ดพันธุ์

Hydroxypropylchitosan เป็นอนุพันธ์ของไคโตซานที่ใช้เป็นตัวเชื่อมในสารเคลือบเมล็ดพันธุ์ เพื่อช่วยในการยับยั้งเชื้อรา ปกป้องพืชทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น

- สารเคลือบเมล็ดพันธุ์ป้องกันการชุกขีด (Seed Incrusting Agents)

ถึงแม้ว่าการใช้สารเคมีเคลือบเมล็ดพันธุ์พืชจะสามารถป้องกันรักษาเมล็ดพันธุ์จากโรค และแมลงในระหว่างการเก็บและหลังการหว่านได้ แต่ก็มีข้อเสีย คือ 30-60 เปอร์เซ็นต์ ของสารเคมีที่ใช้ในการป้องกันโรคและแมลงสูญเสียไปกับการขุดสี การบรรจุ และการหว่านของเมล็ดพืช สิ่งนี้ไม่เพียงเป็นการสูญเสียเงินไปกับสารเคมีที่มีราคาแพง แต่สารเคมีที่สูญหายไปนั้นยังเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

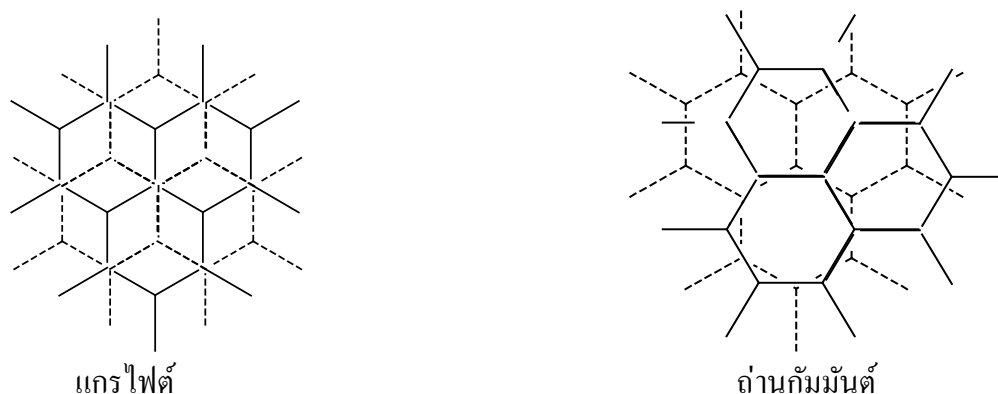
2.3 ถ่านกัมมันต์ (Active carbon หรือ Activated carbon)[33]

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับประเภทหนึ่งที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ อาจอยู่ในรูปของผงหรือเม็ดก็ได้ โดยมีการสังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ เทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถทำให้ถ่านกัมมันต์ 1 กรัม มีพื้นที่ผิวได้ประมาณ 600-1000 ตารางกิโลเมตร การที่คาร์บอนต้องมีพื้นที่ผิวสูงก็เพื่อให้สามารถดูดโมเลกุลจำนวนมากๆ มาเกาะติดที่ผิวได้ พื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดสมรรถนะของคาร์บอนด้วยเหตุนี้คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวจำนวนมากจึงมีอำนาจหรือขีดความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorptive capacity) สูงตามไปด้วย พื้นที่ผิวหาได้โดยการวิเคราะห์ปริมาณไอโอดีนที่ถูกคาร์บอนดูดซับไว้โดยการวัดค่าไอโอดีนนัมเบอร์ซึ่งเป็นค่าเทียบเคียงกับพื้นที่ผิวของคาร์บอน โดยที่ไอโอดีนนัมเบอร์แสดงถึงสมรรถนะของคาร์บอนในการกำจัดสารโมเลกุลต่างๆ

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ได้ให้ความหมายของถ่านกัมมันต์ไว้ว่า ถ่านกัมมันต์หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีถ่านกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

2.3.1 โครงสร้างทั่วไปของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอนมีลักษณะคล้ายกับแกรไฟต์ (Graphite – like Crystalline) แต่จะมีโครงสร้างแตกต่างจากแกรไฟต์ซึ่งเป็นผลึกที่เล็กมาก (Microcrystallite) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็กๆ มีขนาดประมาณ 150 อังสตรอม และระยะห่างระหว่างผลึกเล็กๆ นี้มีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 อังสตรอม ดังแสดงในรูป 2.14



รูป 2.14 การจัดเรียงตัวของแนวระนาบของแกรไฟต์และถ่านกัมมันต์

2.3.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกโดยอาศัยหลักการต่างๆ มากมาย ขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้ โดยได้แบ่งชนิดของกัมมันต์ ดังนี้

2.3.2.1. ถ่านกัมมันต์แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

- 1) Chemical Activated Carbon คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น เช่น ZnCl_2 , H_3PO_4 เป็นถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่
- 2) Physical Activated Carbon คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ก๊าซออกซิไดซ์เป็นตัวกระตุ้น เช่น ไอน้ำ, CO_2 ถ่านที่ได้มีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดก๊าซ และไอระเหย

2.3.2.2 ถ่านกัมมันต์แบ่งตามขนาดของรูพรุน

- 1) Micropores เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1.5 นาโนเมตร มักนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวกับการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย
- 2) Mesopores เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1-100 นาโนเมตร มักนำมาใช้ประโยชน์สำหรับดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น การฟอกสี
- 3) Mesopores เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 100 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่จะเป็นตัวช่วยให้สารที่ดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้น

2.3.2.3 ถ่านกัมมันต์แบ่งตามความหนาแน่น

- 1) ความหนาแน่นต่ำ ถ่านประเภทนี้มักใช้ประโยชน์ในสถานะที่เป็นของเหลวหรือสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาลดิบ การทำน้ำให้บริสุทธิ์ เป็นต้น
- 2) ความหนาแน่นสูง ถ่านประเภทนี้ใช้ในการดูดซับก๊าซหรือสารระเหย

2.3.2.4. ถ่านกัมมันต์แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- 1) Gas Adsorbents หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซพิษ กลิ่น และไอของสารอินทรีย์ ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นถ่านประเภท Hard Artificial Char
- 2) Colour Adsorbents หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวฟอกสี ส่วนมากเป็นถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการเผาถ่านประเภท Soft Artificial Char
- 3) Metal Adsorbents หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นตัวแยกพวกโลหะต่างๆ เช่น ถ่านที่ใช้ในการแยกทอง เงิน แพลทินัม จากแร่
- 4) Gas Adsorbents Carbon หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับก๊าซ
- 5) Liquid Adsorbents Carbon หมายถึง ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ดูดซับของเหลว

2.3.2.5 ถ่านกัมมันต์แบ่งตามสถานะที่ใช้

- 1) Gas Adsorbents Carbon โดยมากมักถูกใช้ในการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ เช่น การนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ การแยกก๊าซ หรือการนำไปใส่ในกันกรอง
- 2) Liquid Adsorbents Carbon ถูกนำมาใช้กับงานฟอกสี และสารที่มีลักษณะเหลว

2.3.2.6 ถ่านกัมมันต์แบ่งตามรูปร่างและขนาดของอนุภาค

- 1) Powdered Activated Carbon ลักษณะเป็นเม็ดเล็กละเอียด ขนาดเล็กกว่า 100 ไมโครเมตร โดยเฉลี่ย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15-20 ไมโครเมตร ด้วยเหตุนี้จึงมีพื้นที่ผิวภายนอกมากและระยะทางการแพร่กระจายน้อย อัตราการดูดซับจึงมีมาก ผลิตมาจากข้อเสีย
- 2) Granulated Activated Carbon ลักษณะเป็นเม็ดเล็กแต่มีขนาดใหญ่กว่า Powdered Activated Carbon ทำให้ผิวภายนอกน้อยกว่า การแพร่ของตัวถูกดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ ส่วนใหญ่นิยมใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย เตรียมจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เช่น บิทูเมน ถ่านหินลิกไนต์

2.3.3 สมบัติทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์

นอกจากอะตอมคาร์บอนแล้วยังมีอะตอมอื่นๆ อีก (Heteroatoms) ที่ยึดกับด้านนอก (Edge) ของโครงสร้างผลึกคาร์บอนได้แก่ ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส อะตอมเหล่านี้มักพบในรูปของหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ (Organic Functional Group) หรือหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจน เป็นองค์ประกอบ หมู่ฟังก์ชันนี้มีความสำคัญเกี่ยวกับสมบัติเฉพาะตัวของถ่านกัมมันต์ เช่น ลักษณะความเป็นกรด-เบสที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ความมีขี้-ไม่มีขี้ เป็นต้น ลักษณะความเป็นกรด-เบส ที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในสารตั้งต้นของถ่านกัมมันต์และวิธีการกระตุ้น

1. ความเป็นกรดที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (Acidic Surface)

ลักษณะความเป็นกรดที่ผิวของถ่านกัมมันต์ เกิดจากหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีผลทำให้ผิวของถ่านกัมมันต์แสดงความเป็นกรด การผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อให้ได้ผิวที่มีความเป็นกรดสามารถทำได้โดยนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 473-973 องศาเซลวิน ที่สถานะมีออกซิเจนหรือใช้สารมาออกซิไดซ์หรือกระตุ้น เช่น ใช้น้ำ กรดไนตริก กรดผสมของไนตริกและซัลฟูริก โอโซน คาร์บอนไดออกไซด์ หรือกระตุ้นด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น

2. ความเป็นเบสที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (Basidic Surface)

สมบัติความเป็นเบสที่ผิวของถ่านกัมมันต์นั้น ยังไม่สามารถระบุให้แน่ชัดว่าเกิดจากหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวแล้วข้างต้น แต่มีรายงานผลการศึกษาว่า ผิวของถ่านกัมมันต์ถ้ามีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxygen-Containing Functiona Groups) เช่น Pyrones, Chromenes, Ethers, Carbonyls จะทำให้มีสมบัติเป็นเบส การผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อให้ได้ผิวที่มีความเป็นเบสสามารถทำได้โดยให้ความร้อนในสภาวะที่มีอากาศที่อุณหภูมิสูงกว่า 973 องศาเซลวิน แล้วลดความร้อนให้ต่ำกว่า 473 องศาเซลวิน วิธีการอื่นๆ เช่น ให้ความร้อนในสภาวะที่มีแอมโมเนียหรือไฮโดรเจน ซึ่งวิธีการนี้ต้องให้อุณหภูมิสูงกว่า 1173 องศาเซลวิน อย่างไรก็ตามสามารถใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 773 องศาเซลวินได้เมื่อมีเพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.4 วัสดุตกแต่งบาดแผล [34]

ในการดำรงชีวิตประจำวันมนุษย์ทุกคนไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดอุบัติเหตุที่จู่โจมโดยไม่คาดคิดอันเนื่องมาจากความประมาทหรือความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ หรือ จากการได้รับการรักษาได้แก่อุบัติเหตุบนท้องถนน อักเสบ บาดแผลผ่าตัด เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วก่อให้เกิดบาดแผลขนาดใหญ่ที่อาจก่อให้เกิดแผลเป็นต่อไปได้ถ้าไม่ได้รับการรักษาที่ถูกต้องและเหมาะสม แต่เนื่องจากวิวัฒนาการทางการแพทย์ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วทั้งในด้านองค์ความรู้ใหม่ เทคโนโลยีการรักษา และอุปกรณ์ในการรักษา ซึ่งได้นำพาให้เกิดการพัฒนา “วัสดุตกแต่งบาดแผล” ที่ดูจะมีบทบาทสำคัญยิ่งในการรักษาแผลชนิดต่างๆ

วัสดุตกแต่งบาดแผลทั่วไปมีหลายชนิด ซึ่งได้แก่ วัสดุตกแต่งบาดแผลอัลจินेट (Alginate dressing) วัสดุตกแต่งบาดแผลคอลลาเจน (Collagen dressing) วัสดุตกแต่งบาดแผลไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids dressing) ไฮโดรเจล (hydrogel) แผ่นฟิล์มใส (Transparent films) และโฟม (foam) เป็นต้น ซึ่งเป็นการนำเอาโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งๆ ที่ไม่เป็นพิษและสามารถเข้ากันได้ทางชีวภาพมาผลิตมาเป็นวัสดุตกแต่งบาดแผลชนิดผสมที่สามารถถูกดูดซับได้อีกด้วย (Hybrid bioabsorbable wound dressing) ทั้งนี้การรักษาบาดแผลนั้นแพทย์จะเป็นผู้พิจารณาวัสดุตกแต่งบาดแผลที่เหมาะสมต่อบาดแผลชนิดต่างๆ ร่วมกับการใช้ยาเพื่อรักษาบาดแผลอย่างมีประสิทธิภาพ

กระบวนการการรักษาบาดแผล

โดยปกติแล้วเมื่อเกิดบาดแผลขึ้นมา ร่างกายสามารถที่จะรักษาเย็บแผลได้โดยตัวเอง โดยเริ่มจากร่างกายจะพยายามล้างบริเวณบาดแผลให้สะอาดด้วยการผลิตเลือดที่ประกอบด้วยเม็ดเลือดขาว (white blood cell) ออกมาในปริมาณมาก เม็ดเลือดขาวจะทำหน้าที่ต่อสู้กับแบคทีเรียและกินซากเซลล์ที่ตายแล้ว ในระหว่างนั้นเซลล์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (fibroblast) จะแบ่งตัวและสร้างเส้นใยใหม่ รวมทั้งมาทริกซ์ที่มีลักษณะคล้ายเจล (extracellular matrix) ขึ้นมาเชื่อมปิดปากแผลในกรณีที่แผลไม่เกิดการติดเชื้อ จะเริ่มมีเส้นเลือดมาหล่อเลี้ยงบริเวณแผลเพื่อสร้างเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) ขึ้นใหม่ แต่ถ้าบริเวณแผลเกิดการสูญเสียความชื้น จะส่งผลให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อใหม่ไม่ต่อเนื่องเกิดเป็นกลุ่มๆ ของเนื้อเยื่อซึ่งจะก่อให้เกิดเป็นตุ่มเล็กๆ และเป็นสะเก็ดแผลในเวลาต่อมา ซึ่งสะเก็ดแผลที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการผลัดผิวชั้นนอกข้างลงและทำให้แผลหายข้างลง ดังนั้นการใช้วัสดุตกแต่งบาดแผลควรใช้วัสดุตกแต่งบาดแผลที่มีความชุ่มชื้นเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดสะเก็ดแผล หากใช้วัสดุตกแต่งบาดแผลที่แห้ง เวลาที่ดึงวัสดุตกแต่งบาดแผลออกอาจทำให้สะเก็ดแผลหลุดและทำให้แผลเปิดอีกครั้ง ส่วนในกรณีที่แผลเกิดการติดเชื้อจากแบคทีเรีย แบคทีเรียจะสร้างสารเคมีขึ้นมาทำลายเนื้อเยื่อที่ตายแล้วซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดหนอง รวมทั้งทำลายเซลล์ที่จะสร้างเนื้อเยื่อผิวหน้าขึ้นมาใหม่อีกด้วย

บาดแผล (wound) ซึ่งอาจเกิดจากการผ่าตัด หรือได้รับบาดเจ็บ หรือ แผลไฟไหม้ นั้นต้องการ dressing เพื่อป้องกันการติดเชื้อและช่วยเย็บแผลให้แผลหายเป็นปกติเร็วขึ้น วัสดุตกแต่งบาดแผลที่ดีควรที่จะช่วยป้องกันแผลจากสิ่งแปลกปลอมที่มาทำลายเนื้อเยื่อ พร้อมทั้งช่วยลดความเจ็บปวด และสามารถดูดซึมของเหลวที่ไหลออกจากบริเวณแผล (exudates) อีกทั้งสามารถห้ามเลือดได้

วัสดุตกแต่งบาดแผลทั่วไป

วัสดุตกแต่งบาดแผลอัลจินต

วัสดุตกแต่งบาดแผลอัลจินต คือ วัสดุตกแต่งบาดแผลของแคลเซียมอัลจินต ที่สกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล อัลจินตจะประกอบด้วยหน่วยซ้ำย่อยๆ ของกรดแมนนูโรนิก (mannuronic acid) และกรดกลูโรนิก (guluronic acid) ซึ่งเมื่อสัมผัสกับของเหลวที่บริเวณแผลที่มีส่วนประกอบของโซเดียมไอออน จะทำให้แคลเซียมอัลจินต ที่ไม่ละลายน้ำเปลี่ยนไปเป็นเจลโซเดียมอัลจินตบางส่วน โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) จากกระบวนการนี้แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่ถูกแลกเปลี่ยนออกมาเป็นอิสระยังมีสมบัติในการห้ามเลือด คือ ทำให้เลือดเกาะตัวกันเป็นก้อน (blood coagulation) อัลจินตที่มีหน่วยซ้ำของกรดแมนนูโรนิกมาก จะสร้างเจลที่อ่อนนุ่มและยืดหยุ่น ส่วน อัลจินตที่มีหน่วยซ้ำของกรดกลูโรนิกมากจะสร้างเจลที่แข็งมาก เจลอัลจินตสามารถที่จะดูดซับความชื้นได้ดีช่วยป้องกันการเกิดกลุ่มก้อนเล็กๆ ของเนื้อเยื่อที่ทำให้เกิดเป็นสะเก็ดแผล ใช้ได้

กับแผลหลายรูปแบบตั้งแต่แผลที่ผิวหนังนอกจนกระทั่งแผลลักษณะหลุมลึก เหมาะกับแผลที่มีของเหลวไหลออกจากแผลปริมาณปานกลางถึงมาก

วัสดุตกแต่งบาดแผลคอลลาเจน

คอลลาเจนเป็นโปรตีนที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสามารถพบได้ที่ผิวหนัง กล้ามเนื้อ กระดูก เส้นเอ็น และกระดูกอ่อน เป็นโปรตีนที่พบมากที่สุดในร่างกาย คอลลาเจนมีหลายชนิด โดยเฉพาะคอลลาเจนชนิดที่หนึ่งและคอลลาเจนชนิดที่สาม จะพบมากที่ผิวหนังและเอ็น

วัสดุตกแต่งบาดแผลคอลลาเจนสามารถผลิตได้ในหลายรูปแบบ เช่น แบบผง แบบเจล แบบแผ่นลอก แบบสายรัด หรือแบบแผ่นนุ่ม คอลลาเจนสามารถสกัดได้จากหนังวัวหรือหมูแล้วมาทำความสะอาด จากนั้นเชื่อมโยงให้มีโครงสร้างร่างแหด้วยสารเชื่อมขวางแล้วทำแห้งเยือกแข็ง จากนั้นตัดเป็นรูปตามต้องการจะได้แผ่นวัสดุตกแต่งบาดแผลคอลลาเจนมีลักษณะคล้ายฟองน้ำสมบัติของวัสดุตกแต่งบาดแผลคอลลาเจน คือ สามารถดูดซับของเหลวบริเวณบาดแผลได้ดี และ คอลลาเจนสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ อัตราเร็วในการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ สามารถควบคุมได้จากปริมาณการเชื่อมขวางซึ่งถ้ามีการเชื่อมขวางมากจะทำให้อัตราเร็วในการย่อยสลายช้าลง

วัสดุตกแต่งบาดแผลไฮโดรคอลลอยด์

ไฮโดรคอลลอยด์เป็นสารแขวนลอยของเม็ดโพลิเมอร์เล็กๆ (granule) แขวนลอยอยู่ในมาทริกซ์ของตัวยึดเกาะ (adhesive matrix) เม็ดโพลิเมอร์แกรนูลส่วนใหญ่เป็นโพลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic polymer) ได้แก่ เจลาติน หรือ เพคติน โดยมีมาทริกซ์เป็นโพลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymer) ได้แก่ ยางสังเคราะห์ ไฮโดรคอลลอยด์จะกักดูดซับของเหลวอย่างช้าๆ และเปลี่ยนสภาพไปเป็นเจลไฮโดรคอลลอยด์เหมาะกับบาดแผลที่ไม่ลึกมากนัก ไม่สามารถใช้กับบาดแผลที่มีของเหลวไหลออกมาจากบริเวณบาดแผลเป็นปริมาณมากๆ หรือบาดแผลติดเชื้อ

ไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลคือวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี มักใช้เพื่อการรักษาความชุ่มชื้นของแผล และทำให้รู้สึกเย็นส่วนใหญ่ผลิตมาจากการเชื่อมขวางโพลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ ได้แก่ อะคริลิกพอลิไวนิลไพโรลิโดน พอลิเอทิลีนออกไซด์ คาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส หรือ โพลิเมอร์ผสมกับการเลือกใช้ชนิดของโพลิเมอร์ไฮโดรเจลต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับบาดแผลว่าต้องการความชุ่มชื้นมากน้อยแค่ไหนในบางครั้งจะมีการเติมสารสำคัญหรือยาในการรักษาบาดแผลหุ้มอยู่ภายในไฮโดรเจลด้วยเพื่อช่วยในการรักษาบาดแผลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นเหมาะสมกับบาดแผลที่เนื้อเยื่อแห้งตายและใช้ได้กับบาดแผลทุกระดับความลึก

แผ่นฟิล์มใส

วัสดุตกแต่งบาดแผลเช่นแผ่นฟิล์มใส ทำมาจากแผ่นฟิล์มยูรีเทนเคลือบด้วยสารช่วยในการยึดเกาะ (adhesives) ได้แก่ โพลีเอเทอร์และโพลีเอครีเลต แผ่นฟิล์มใสจะช่วยป้องกันบาดแผลจากการถูกน้ำ แต่ยอมให้อากาศและความชื้นแพร่เข้าสู่บาดแผลได้ เนื่องจากวัสดุตกแต่งบาดแผลชนิดนี้เป็นแผ่นฟิล์มที่มีความโปร่งใสจึงสามารถทำให้มองเห็นแผลได้โดยไม่ต้องนำวัสดุตกแต่งบาดแผลออก จึงช่วยลดความเสี่ยงในการติดเชื้อแบคทีเรีย เหมาะกับการปิดบาดแผลที่ผิวหนังชั้นนอกหรือแผลที่ไม่มีความลึกและไม่มีของเหลวไหลออกมาจากบาดแผลหรือมีของเหลวในปริมาณที่เล็กน้อยเท่านั้น ไม่สามารถใช้กับบาดแผลที่เกิดการติดเชื้อ นิยมใช้ควบคู่กับผ้าก๊อชโดยที่ฟิล์มใสปิดทับบนผ้าก๊อชที่วางบนบาดแผล

โฟม

วัสดุตกแต่งบาดแผลชนิดโฟมส่วนใหญ่ผลิตจากพอลิยูรีเทน เนื่องจากโฟมพอลิยูรีเทนสามารถเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ (biocompatibility) และสามารถควบคุมความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำ (hydrophilic or hydrophobic) ได้จากการสังเคราะห์โดยควบคุมอัตราส่วนของสารตั้งต้นระหว่างพอลิแอลกอฮอล์ไอโซไซยานเนตการใช้โฟมพอลิยูรีเทนที่มีความชอบน้ำมาก (hydrophilic) มักนำมาใช้เป็นวัสดุตกแต่งบาดแผลที่ต้องการดูดซับของเหลวที่ไหลออกมาจากบาดแผลได้ดี ส่วนโฟมพอลิยูรีเทนที่มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะมีแรงดูดติดกับผิวของแผลได้น้อยกว่าทำให้ลอกออกง่าย นำมาใช้กับแผลเปื่อยที่ไม่ต้องการให้วัสดุตกแต่งบาดแผลติดกับบาดแผล ในบางครั้งจะมีการเติมสารสำคัญหรือยาในการรักษาบาดแผลหุ้มอยู่ภายในโฟมด้วยเพื่อช่วยในการรักษาบาดแผลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โฟมเหมาะสำหรับแผลที่มีความลึกปานกลางหรือลึกมากและเหมาะกับแผลในปริมาณน้อยหรือปานกลาง

วัสดุตกแต่งบาดแผลแบบผสมที่สามารถดูดซับได้

จุดประสงค์หลักของวัสดุตกแต่งบาดแผลแบบผสมที่สามารถดูดซับได้คือ สามารถที่จะย่อยสลายได้โดยไม่ต้องกำจัดออก โพลีเมอร์ที่นำมาใช้ส่วนใหญ่เป็นโพลีเมอร์ที่ได้นำมาใช้จนเป็นไหมละลาย (bioabsorbable suture) ซึ่งโดยปกติแล้วไหมละลายจะละลายหายไปภายใน 2-6 สัปดาห์

วัสดุตกแต่งบาดแผลแบบผสมที่สามารถดูดซับได้ ประกอบไปด้วยชั้นของพอลิเมอร์ 3 ชั้น ชั้นแรกเป็นชั้นของไคโตซาน ซึ่งไคโตซานมีคุณสมบัติต่อต้านเชื้อจุลินทรีย์ ป้องกันการติดเชื้อแบคทีเรียฟิล์มของไคโตซานจะดูดซับของเหลวที่ไหลออกจากแผล และฟิล์มสามารถย่อยสลายได้เองในระหว่างการรักษา หลังจากฟิล์มไคโตซานย่อยสลายแล้ว อาจทำให้แบคทีเรียสามารถเข้าสู่แผลได้ จึงต้องซ้อนชั้นที่ 2 ด้วยโพลีเมอร์ที่สลายตัวได้ช้ากว่าไคโตซานซึ่งได้แก่ พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิคาร์โพรแลคโตน (poly(ϵ -caprolactone)) และพอลิแลคติกแอซิด (poly(D,L-lactic acid)) ชั้นนี้ก็

สามารถย่อยสลายได้ จึงไม่จำเป็นต้องกำจัดออกในระหว่างทำการรักษา ทั้งนี้อัตราเร็วในการสลายตัวขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมนี้ ถ้ามีการผสมโดยใช้อัตราส่วนของ พอลิคาร์โพรแลกโตน มากกว่าพอลิแลคติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมนี้จะใช้เวลาในการถูกย่อยสลายนานกว่า การใช้พอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนการผสมของพอลิแลคติกแอซิดมากกว่าพอลิคาร์โพรแลกโตน เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดมากกว่าพอลิคาร์โพรแลกโตนมาก อัตราส่วนที่เหมาะสมเมื่อคำนึงถึงเรื่องความแข็งแรง ความสามารถในการขึ้นรูป และความสามารถในการถูกย่อยสลายแล้วอยู่ที่อัตราส่วนโดยประมาณของพอลิคาร์โพรแลกโตนต่อพอลิแลคติกแอซิด ที่ 70 : 30 ส่วนชั้นที่สาม เป็นชั้นของผ้าก๊อซ (gauze) ซึ่งเป็นผ้าโปร่งสีขาวทอด้วยฝ้าย เฉพาะชั้นที่สามนี้เท่านั้นที่ต้องนำออกและเปลี่ยนแผ่นใหม่เสมอ

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 Chitosan (high polymer)
- 3.1.2 Sodium alginate (Medium viscosity of 2 % solution 3500 cps at 25 °C)
- 3.1.3 Activated carbon
- 3.1.4 Calcium chloride
- 3.1.5 Acetic acid
- 3.1.6 Deionized water
- 3.1.7 Sodium hydroxide
- 3.1.8 Isopropyl alcohol
- 3.1.9 Monochloroacetic acid
- 3.1.10 Methanol

3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องแก้ว
- 3.2.2 เครื่อง LLOYD Instrument (LR 50k Serial No 20872)
- 3.2.3 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- 3.2.4 โถดูดความชื้น (Desiccator)
- 3.2.5 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Incubator)
- 3.2.6 เครื่องกวนความเร็วรอบสูง (Homogenizer)
- 3.2.7 ตู้อบสุญญากาศ (Oven vacuum)
- 3.2.8 เครื่องวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

3.3 วิธีการดำเนินการ

งานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็นส่วนหลักๆ 5 ส่วนด้วยกัน คือ

3.3.1 การเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตของไคโตซาน อัลจิเนตและถ่านกัมมันต์

1. เตรียมสารละลายไคโตซานที่มีความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 1.5% ในสารละลายกรดอะซิติก ความเข้มข้น 1% ปริมาตร 100 มิลลิลิตร และทำการกวนด้วย magnetic stirrer เป็นเวลา 3 วัน
2. เตรียมสารละลายอัลจิเนตที่มีความเข้มข้น 1% ในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร
3. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 1 และ 2 ผสมให้เข้ากันในแต่ละความเข้มข้นที่ต้องการระหว่างไคโตซาน (ตารางที่ 3.1) กับอัลจิเนตโดยใช้เครื่อง homogenizer
4. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ปริมาตร 0.03, 0.045 และ 0.06 กรัม และนำถ่านกัมมันต์ที่ชั่งใส่ในสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ 3 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันค่อยๆ เทลงในแม่พิมพ์พลาสติก และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. เติมสารละลาย Calcium chloride ที่ความเข้มข้น 1% ในข้อ 4 ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น
6. นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเจลที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

3.3.2 การสังเคราะห์ NOCC

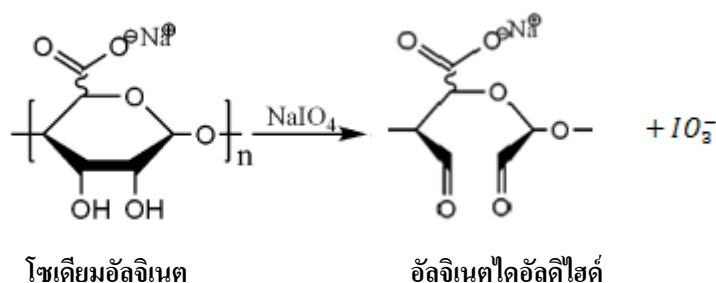
1. ชั่งผงไคโตซาน 10 กรัม เติม isopropyl alcohol 100 มิลลิลิตร กวนที่อุณหภูมิห้อง
2. เติม NaOH 10 N ปริมาตร 25 มิลลิลิตร (โดยแบ่งเติมเป็น 5 ครั้งๆ ละ 1 นาที) กวนตลอดเวลาในการสังเคราะห์เมื่อเติมแล้วกวน ต่ออีก 30 นาที
3. เติม monochloroacetic acid 60 กรัม (โดยแบ่งเติมเป็น 5 ครั้งๆ ละ 5 นาที) ให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส กวนต่ออีก 3 ชั่วโมง
4. นำ NOCC ที่ได้จากข้อ 3 มากรองและล้างตะกอนด้วย Methanol อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
5. นำ NOCC ไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

3.3.3 การเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตของ NOCC อัลจิเนตและถ่านกัมมันต์

1. เตรียมสารละลาย NOCC ที่มีความเข้มข้น 0.5 1.0 และ 1.5% ในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. เตรียมสารละลายอัลจิเนตที่มีความเข้มข้น 1% ในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร
3. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 1 และ 2 ผสมให้เข้ากันในความเข้มข้นที่ต้องการระหว่าง NOCC กับอัลจิเนต (ตารางที่ 3.2) โดยใช้เครื่อง homogenizer
4. ชั่งถ่านกัมมันต์ที่ปริมาตร 0.03, 0.045 และ 0.06 กรัม และนำถ่านกัมมันต์ที่ชั่งใส่ในสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ 3 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันค่อยๆ เทลงในแม่พิมพ์พลาสติก และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. เติมสารละลาย Calcium chloride ที่ความเข้มข้น 1% ในข้อ 4 ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น
6. นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเจลที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

3.3.4 การสังเคราะห์อัลจิเนตไดอัลดีไฮด์ (ADA)

การเตรียมอัลจิเนตไดอัลดีไฮด์โดยปฏิกิริยา Periodate oxidation จากโซเดียมอัลจิเนต



1. นำโซเดียมอัลจิเนตปริมาณ 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 400 มิลลิลิตร แล้วผสมกับโซเดียมเพอร์ไอโอดेट 10.8 กรัม
2. นำสารละลายที่ได้กวนให้เข้ากันโดยใช้เครื่อง magnetic stirrer ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เติมอิทิลีนไกลคอลปริมาตร 20 มิลลิลิตร ลงในสารละลายที่ได้จากข้อ 2 ในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้เป็นกลาง
4. เติมโซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 5 กรัม และ เอทานอลปริมาตร 600 มิลลิลิตรลงในสารละลาย จนเกิดการตกตะกอนของอัลจิเนตไดอัลดีไฮด์ที่บริสุทธิ์

5. นำอัลจินเตไดอัลดีไฮด์ที่ได้ไปละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 200 มิลลิลิตร อีกครั้งแล้วทำให้ตกตะกอนอีกครั้งโดยเติมเอทานอลปริมาตร 400 มิลลิลิตร
6. ทำซ้ำตามข้อ 5 อีก 3 ครั้งเพื่อให้ได้ผลึกอัลจินเตไดอัลดีไฮด์
7. นำอัลจินเตไดอัลดีไฮด์ไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนในการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตของไคโตซาน อัลจินเต และถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	ไคโตซาน (g)	อัลจินเต (g)	ถ่านกัมมันต์ (g)	อัตราส่วน
CC 1	0.075	0.15	0.03	0.5:1:0.2
CC 2	0.075	0.15	0.045	0.5:1:0.3
CC 3	0.075	0.15	0.06	0.5:1:0.4
CC 4	0.15	0.15	0.03	1:1:0.2
CC 5	0.15	0.15	0.045	1:1:0.3
CC 6	0.15	0.15	0.06	1:1:0.4
CC 7	0.225	0.15	0.03	1.5:1:0.2
CC 8	0.225	0.15	0.045	1.5:1:0.3
CC 9	0.225	0.15	0.06	1.5:1:0.4
CC 10	0.075	0.15	-	0.5:1:0
CC 11	0.225	0.15	-	1.5:1:0
CC 12	0.15	0.15	-	1:1:0
CC 13	0.075	-	-	0.5:0:0
CC 14	0.15	-	-	1:0:0
CC 15	0.225	-	-	1.5:0:0

หมายเหตุ อัตราส่วนการเตรียมไฮโดรเจลเป็นการเตรียมที่ปริมาตร 30 มิลลิลิตร

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนในการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตของ NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	ไคโตซาน (g)	อัลจิเนต (g)	ถ่านกัมมันต์ (g)	อัตราส่วน
WW 1	0.075	0.15	0.03	0.5:1:0.2
WW 2	0.075	0.15	0.045	0.5:1:0.3
WW 3	0.075	0.15	0.06	0.5:1:0.4
WW 4	0.15	0.15	0.03	1:1:0.2
WW 5	0.15	0.15	0.045	1:1:0.3
WW 6	0.15	0.15	0.06	1:1:0.4
WW 7	0.225	0.15	0.03	1.5:1:0.2
WW 8	0.225	0.15	0.045	1.5:1:0.3
WW 9	0.225	0.15	0.06	1.5:1:0.4
WW 10	0.075	0.15	-	0.5:1:0
WW 11	0.225	0.15	-	1.5:1:0
WW12	0.15	0.15	-	1:1:0
WW13	0.075	-	-	0.5:0:0
WW 14	0.15	-	-	1:0:0
WW 15	0.225	-	-	1.5:0:0

หมายเหตุ อัตราส่วนการเตรียมไฮโดรเจลเป็นการเตรียมที่ปริมาตร 30 มิลลิลิตร

3.3.5 การศึกษาสมบัติสำคัญต่างๆ ของไฮโดรเจลคอมโพสิต

ในส่วนนี้จะเน้นไปที่การศึกษาสมบัติของเจลที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้เป็น เจลสมานแผล ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. สมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล (Swelling ratio) [20]

วัสดุที่นำมาใช้ในการปิดบาดแผลหรือสมานแผลนั้นควรมีความสามารถในการรักษาความชุ่มชื้นของแผลโดยไม่เกิดการหมักหมม และช่วยในการดูดซับของเลือดและน้ำหนองอันเกิดจากแผล โดยสมบัติข้อนี้ของไฮโดรเจลสามารถศึกษาได้จากค่า Swelling ratio (สมการที่ 3.1)

$$\text{Swelling ratio (\%)} = \frac{[W_s - W_d]}{W_d} \times 100 \quad (3.1)$$

ค่า W_s คือ น้ำหนักของเจลหลังการบวมน้ำ (กรัม)

W_d คือ น้ำหนักแห้งของเจล (กรัม)

ซึ่งค่า W_s และ W_d จะได้จากการทดสอบการบวมน้ำของเจล (water swelling test)

สามารถทำการทดสอบได้โดย

- 1) นำแผ่นฟิล์มโพลีเอทิลีน/อัลจินต-ถ่านกัมมันต์ มาชั่งน้ำหนักแผ่นเจลแห้ง
- 2) นำไปแช่ในน้ำกลั่น ที่ 37 องศาเซลเซียส ในตู้ควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3) นำเจลที่บวมน้ำออกมาอย่างระมัดระวังและวางไว้บนกระดาษกรองเพื่อซับน้ำที่อยู่รอบนอกของเจลออก จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของ Swelling ratio ต่อไป ซึ่งในครั้งนี้จะเป็นการบวมน้ำครั้งที่ 1
- 4) จากแผ่นเจลที่บวมน้ำในข้อ 3 (บวมน้ำครั้งที่ 1) นำมาอบให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและบันทึกน้ำหนักแผ่นเจลแห้งนำไปแช่ในน้ำกลั่น ที่ 37 องศาเซลเซียส ในตู้ควบคุมอุณหภูมิเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 5) นำเจลที่บวมน้ำออกมาอย่างระมัดระวังและวางไว้บนกระดาษกรองเพื่อซับน้ำที่อยู่รอบนอกของเจลออก จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของ Swelling ratio ต่อไป ซึ่งในครั้งนี้จะเป็นการบวมน้ำครั้งที่ 2
- 6) ทำซ้ำเหมือนข้อ 4-5 อีกครั้งเพื่อเป็นการบวมน้ำครั้งที่ 3

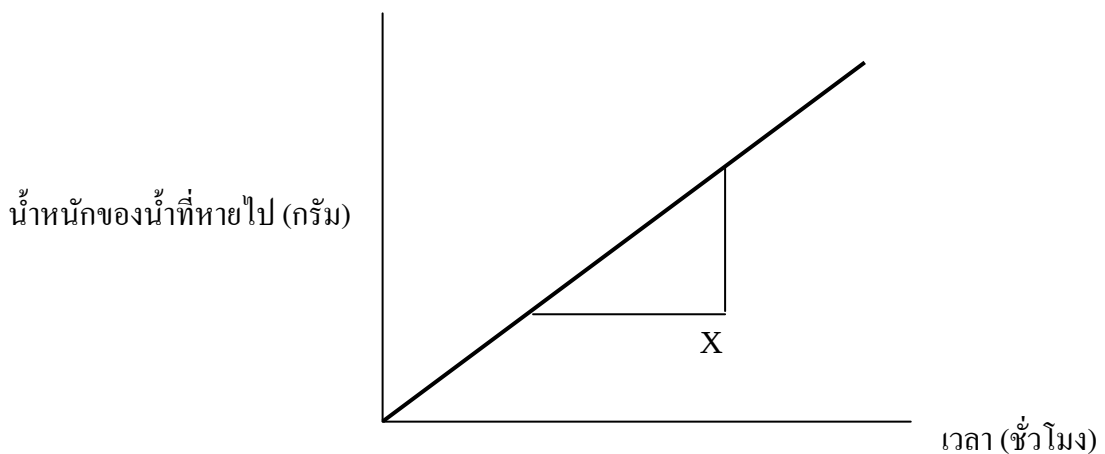
2. อัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) [35]

สมบัติการปล่อยผ่านไอน้ำของไฮโดรเจลนี้สามารถศึกษาได้โดยการคำนวณค่า water vapour transmission rate (WVTR) ตามมาตรฐาน ASTM E-96 โดยทำการทดสอบได้ดังนี้

- 1) นำไฮโดรเจลคอมโพสิตที่เตรียมได้วางไว้บนปากขวด (Cylindrical plastic cups 34 mm diameter) ซึ่งบรรจุน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร
- 2) ปิดด้านข้างปากขวดด้วยพาราฟิล์มให้สนิทเพื่อป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำที่ด้านปากขวด
- 3) เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 35 % ในตู้ควบคุมอุณหภูมิตามระยะเวลาที่กำหนด และชั่งน้ำหนักตัวอย่าง ทุกๆ 1 ชั่วโมง
- 4) ทำการคำนวณเพื่อหาอัตราการซึมผ่านไอน้ำตามสมการ ดังต่อไปนี้

$$WVTR = \frac{[Slope \times 24g / m^2 / day]}{Area} \times 100 \quad (3.2)$$

ความชันที่นำมาคำนวณ คือค่าความชันของกราฟระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไปกับเวลา โดย A คือค่าพื้นที่ของชันตัวอย่าง



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของน้ำที่หายไป (กรัม) กับเวลา (ชั่วโมง)

3. สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

สมบัติความแข็งแรง การคงตัว และความยืดหยุ่นของเจลนั้นสามารถหาได้จากการทดสอบ Tensile test โดยเครื่อง LLOYD Instrument ซึ่งวัดการยืดออกของชิ้นงานเมื่อได้รับความเค้น จนขาด โดยชิ้นงานถูกตัดให้มีลักษณะเป็นริบบิ้นขนาด กว้าง 25 mm ตามมาตรฐาน ASTM D-882 [36]

สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

ระยะ Gauge length 75 mm

4. การทดสอบการผ่านของเชื้อแบคทีเรีย (Microbial penetration)[20]

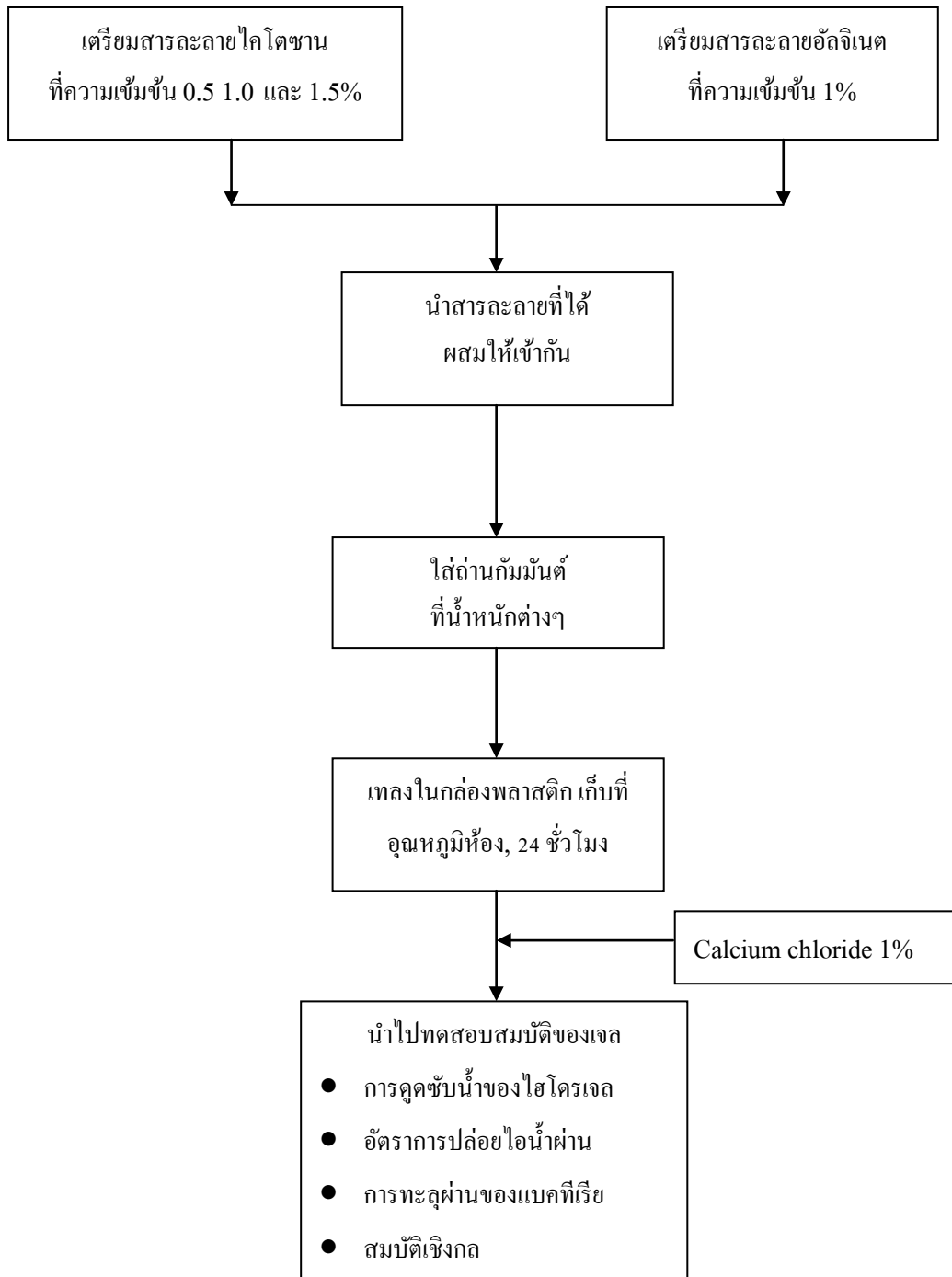
วัสดุที่นำมาใช้ในการปิดบาดแผลหรือสมานแผลควรมีความสามารถในการป้องกันแผลจากเชื้อแบคทีเรียและป้องกันการติดเชื้อเพื่อไม่ให้แผลเกิดการอักเสบขึ้นมา เนื่องจากหากบาดแผลเกิดการติดเชื้อจะทำให้กระบวนการสมานแผลเป็นไปได้ยาก โดยสมบัติข้อนี้ของไฮโดรเจลสามารถศึกษาได้จาก การทดสอบการผ่านเชื้อแบคทีเรียดังนี้

1. นำไฮโดรเจลคอมโพสิตที่เตรียมได้วางไว้บนหลอดทดลองที่ใส่อาหารเลี้ยงเชื้อเหลวปริมาตร 10 มิลลิลิตร
2. นำหลอดทดลองที่ใส่อาหารเลี้ยงเชื้อเหลวปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดปากหลอดทดลองด้วยจุกสำลี (Positive Control) และเปิดปากหลอดทดลองไว้ (Negative Control) เพื่อเป็นตัวควบคุม
3. ปิดด้านข้างปากหลอดทดลองในข้อ 1 และ 2 ด้วยกระดาษกาวให้สนิทเพื่อป้องกันการผ่านของเชื้อแบคทีเรียและเก็บหลอดทดลองไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 สัปดาห์
4. เมื่อครบ 1 สัปดาห์ ทำการบันทึกผลการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรีย

5. ลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ NOCC

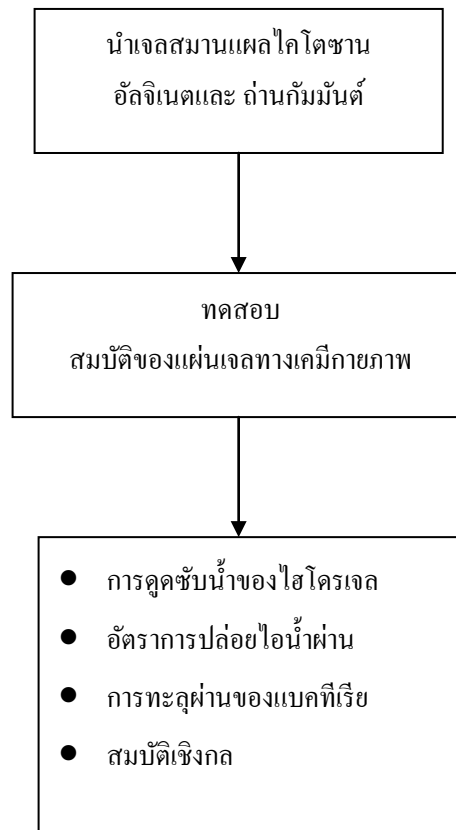
การวิเคราะห์โครงสร้างของ NOCC สามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) โดยการนำ NOCC มาบดกับ KBr อัดเป็นแผ่นและนำไปวิเคราะห์ต่อไป

แผนผังวิธีการทดลอง



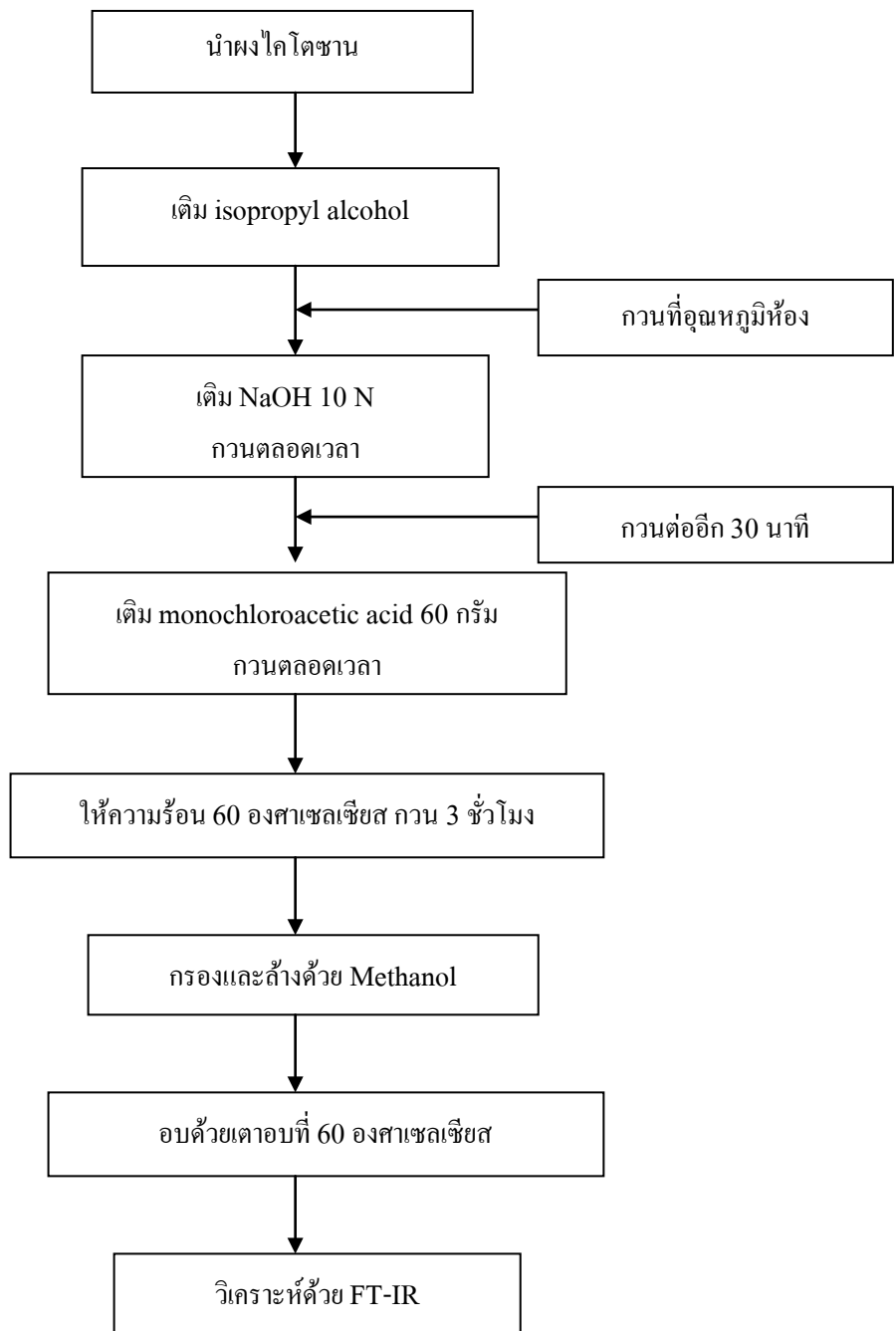
รูปที่ 3.2 แผนผังวิธีการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตจากไคโตซาน อัลจิเนตและถ่านกัมมันต์

แผนผังวิธีการทดลอง



รูปที่ 3.3 แผนผังวิธีการทดสอบสมบัติของไฮโดรเจลคอมโพสิตจากไคโตซาน
อัลจินตและถ่านกัมมันต์

แผนผังวิธีการทดลอง



รูปที่ 3.4 แผนผังวิธีการสังเคราะห์ N,O-carboxymethyl chitosan

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตของไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ และนำแผ่นเจลที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติต่างๆ กล่าวคือ สมบัติทางกายภาพเบื้องต้น อัตราการบวมน้ำ อัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ ลักษณะความเป็นรูพรุนของเจล สมบัติเชิงกล ซึ่งในผลการทดลองที่แสดงไว้ได้แสดงค่าโดยใช้อักษรย่อแทนอัตราส่วนของตัวอย่าง โดยรายละเอียดผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองมีดังนี้

4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางเคมีของ N,O-carboxymethyl chitosan (NOCC) และ Alginate dialdehyde (ADA)

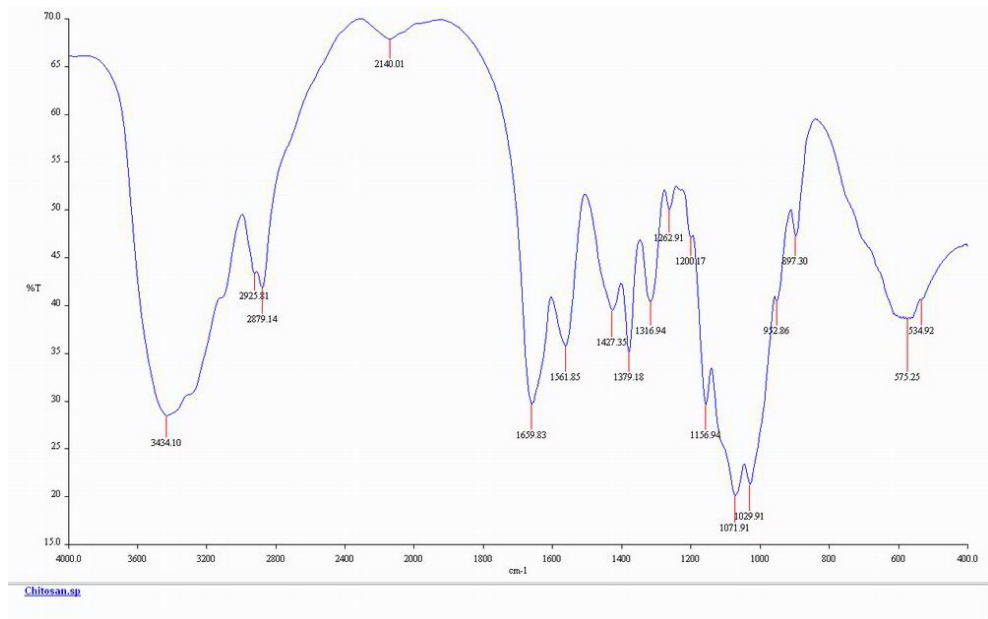
4.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นและโครงสร้างทางเคมีของ N,O-carboxymethyl chitosan (NOCC)

เมื่อทำการสังเคราะห์ไคโตซานที่ 10.0040 กรัมจะได้ NOCC ที่น้ำหนัก 11.5822 กรัมพบว่าพอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของ $-\text{COO}^-$ และลักษณะเป็นผงสีขาว เมื่อทำการทดสอบการละลายพบว่า NOCC สามารถละลายได้ในน้ำ และทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ NOCC ด้วย FT-IR

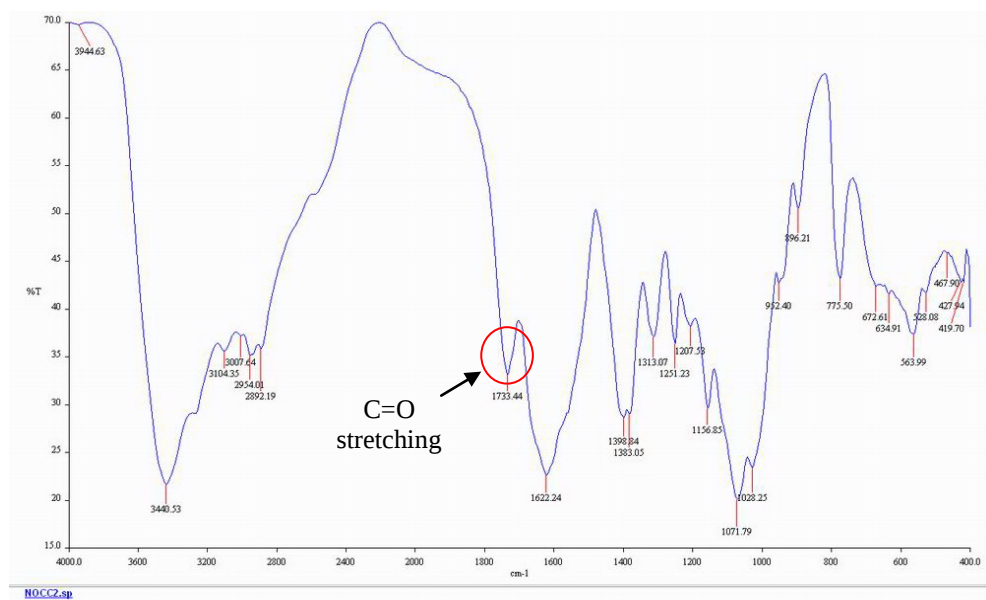
จาก Infrared Spectrum ของ ไคโตซาน และ NOCC ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าไคโตซานให้แถบการดูดกลืนแสงที่สำคัญ ได้แก่ แถบการดูดกลืนแสงของหมู่ amino (NH_2 deformation) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1659 cm^{-1} แถบการดูดกลืนแสงตำแหน่งที่สองของหมู่ Hydroxy ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1071 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะของฟิสิกส์ $-\text{CH}-\text{OH}$ ใน cyclic alcohols โดยเป็นการสั่นแบบ C-O stretching และแถบการดูดกลืนแสง ของ O-H deformation ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3434 cm^{-1} และ 1029 cm^{-1} รวมทั้งแถบการดูดกลืนแสงของ Acetyl carbonyl group ($\text{CH}_2\text{C}=\text{O}$)

ส่วน Infrared Spectrum ของ NOCC เมื่อเปรียบเทียบกับ Infrared Spectrum ของไคโตซาน และพบว่ามีตำแหน่งหมู่ amino (NH_2 deformation) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1659 cm^{-1} และจะพบ แถบการดูดกลืนแสงของหมู่ Carboxylic acid salt ($\text{C}=\text{O}$ stretching) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1733 cm^{-1} เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ spectrum ของไคโตซานในช่วงเลขคลื่นเดียวกันเป็นแถบการดูดกลืนแสง ที่เกิดขึ้นใหม่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไคโตซานได้ถูกเปลี่ยนเป็น N,O-carboxymethyl chitosan (NOCC)

ในการสังเคราะห์ NOCC จะมีการเพิ่มของหมู่ Carboxylic acid salt ที่มาแทนที่หมู่ amino แต่จะไม่สามารถแทนได้ทั้งหมด

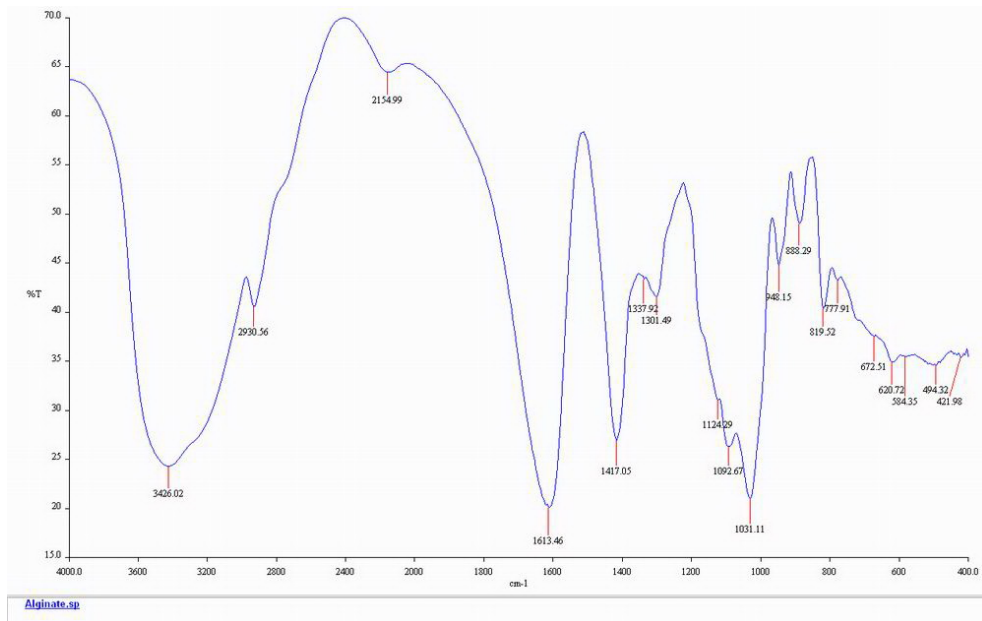


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ Chitosan โดย FT-IR

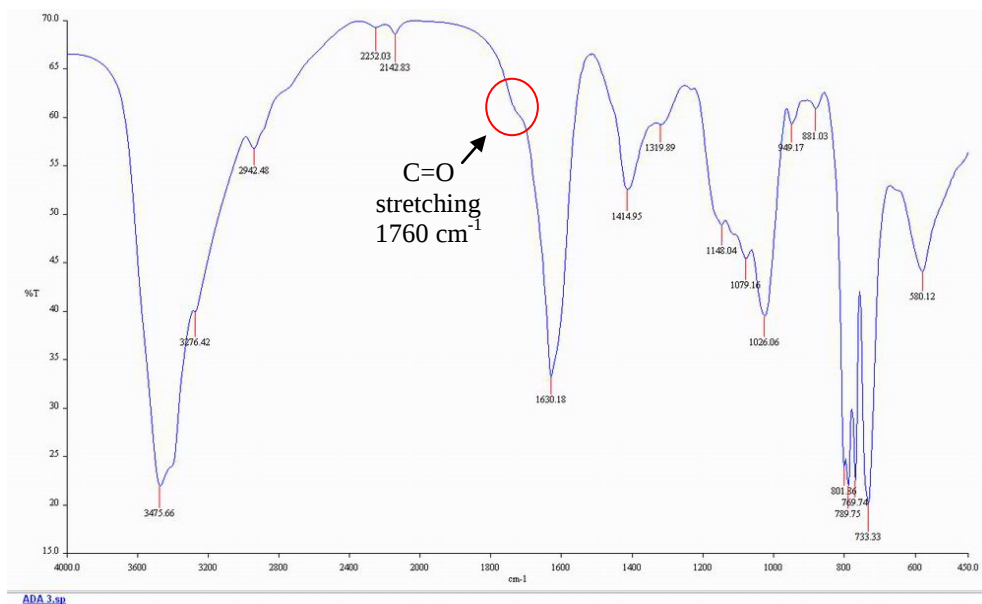


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ NOCC โดย FT-IR

4.1.2 การศึกษาโครงสร้างของ Alginate dialdehyde (ADA) โดย FT-IR



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ Alginate โดย FT-IR



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ ADA โดย FT-IR

การวิเคราะห์โครงสร้างของอัลจินตก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงเป็น ADA สามารถตรวจหาการเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลของอัลจินตเป็นหมู่ไดอัลดีไฮด์ได้ โดยพบว่าเกิดแถบการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 1760 cm^{-1} (รูปที่ 4.4) ซึ่งตรงกับ C=O stretching เมื่อเปรียบเทียบกับอัลจินต (รูปที่ 4.3) ในช่วงเลขคลื่นเป็นแถบการดูดกลืนแสงใหม่ที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัลจินตบางส่วนได้เปลี่ยนไปเป็นอัลจินตไดอัลดีไฮด์ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงนี้ไม่ชัดเจน ส่งผลให้ความเข้มของแถบต่ำอาจเนื่องมาจากจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิลของอัลจินตที่ถูกเปลี่ยนเป็นไดอัลดีไฮด์มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ไฮโดรเจลจากไคโตซานและ ADA จึงไม่มีความคงตัวและไม่สามารถขึ้นรูปได้ (หัวข้อ 4.2.1)

4.2 ผลการทดสอบสมบัติกายภาพ (Physical properties) ของไฮโดรเจลคอมโพสิตแต่ละกรณี

4.2.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของแผ่นฟิล์มจากไคโตซานและ ADA



รูปที่ 4.5 ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจลที่เตรียมจากไคโตซานและ ADA

จากรูปที่ 4.5 สังเกตได้ว่าเมื่อผสมสารละลายไคโตซานกับสารละลาย ADA โพลีเมอร์ทั้งสองชนิดจะไม่จับกันเป็นไฮโดรเจล โดยเมื่อทดสอบแล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงพบว่าเนื้อของโพลีเมอร์แต่ละชนิดแยกกันอยู่อย่างชัดเจน เนื่องจากจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิลของอัลจินต์ที่ถูกเปลี่ยนเป็นไดอัลไคไฮด์มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ไฮโดรเจลจากไคโตซานและ ADA จึงไม่มีความคงตัวและไม่สามารถขึ้นรูปได้

4.2.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์



a) ตัวอย่างที่ CC 12

ไคโตซาน/อัลจิเนต (1.5:1:0)
(แผ่นฟิล์มแห้ง)



b) ตัวอย่างที่ CC 7

ไคโตซาน/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ (1.5:1:0.2)
(แผ่นฟิล์มแห้ง)

รูปที่ 4.6 ลักษณะของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลจากไคโตซาน/อัลจิเนต และไคโตซาน/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ a) ตัวอย่างที่ CC 12 ไคโตซาน/อัลจิเนต (1.5:1:0) และ b) ตัวอย่างที่ CC 7 ไคโตซาน/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ (1.5:1:0.2)

ลักษณะทั่วไปของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลแห้งที่เตรียมจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ มีลักษณะใกล้เคียงกันคือ เป็นแผ่นฟิล์มบาง พื้นผิวของแผ่นฟิล์มที่ไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะเรียบ และแผ่นฟิล์มที่มีการเติมถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะขรุขระ แข็ง เมื่อสัมผัสกับแผ่นฟิล์มพบว่ามีการดูดซับน้ำได้ดี มีรูพรุนบางส่วน สามารถพับหรืองอได้ โดยจะเห็นถ่านกัมมันต์กระจายอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบตามเนื้อของแผ่นฟิล์ม แผ่นฟิล์มมีความคงตัวเนื่องจากเกิดการครอสลิงก์ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่เอมีนของไคโตซานและหมู่คาร์บอกซิเลต (COO^-) ของอัลจิเนตบางส่วน กับไอออน Ca^{2+} ที่ทำให้อัลจิเนตแข็งตัว ทำให้เกิดลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มขึ้นมา

4.2.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของแผ่นฟิล์ม NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์



a) ตัวอย่างที่ WW 12
NOCC/อัลจิเนต (1.5:1.0)
(แผ่นฟิล์มแห้ง)



b) ตัวอย่างที่ WW 7
NOCC/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ (1.5:1:0.2)
(แผ่นฟิล์มแห้ง)

รูปที่ 4.7 ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจลจาก NOCC/อัลจิเนต และ NOCC/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์
a) ตัวอย่างที่ WW 12 NOCC/อัลจิเนต (1.5:1:0) และ b) ตัวอย่างที่ WW 7 NOCC/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ (1.5:1:0.2)

ลักษณะของแผ่นฟิล์มแห้งที่เตรียมจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะใกล้เคียงกันคือ เป็นแผ่นฟิล์มบาง พื้นผิวของแผ่นฟิล์มที่ไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะเรียบ และแผ่นฟิล์มที่มีการเติมถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะขรุขระ แข็ง เมื่อสัมผัสกับแผ่นฟิล์มพบว่าจะมีถ่านกัมมันต์หลุดติดมือออกมาส่วน สามารถพับหรืองอได้ โดยจะเห็นถ่านกัมมันต์กระจายอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบตามเนื้อของแผ่นฟิล์ม

จากลักษณะของแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากไคโตซานและ NOCC พบว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จาก NOCC จะมีความคงตัวและแข็งแรงกว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากไคโตซาน โดยสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มจากไคโตซานและ NOCC ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แสดงอย่างละเอียดในตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	CS:ALG:AC	ลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพ
CC 1	0.5:1:0.2	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำสามารถพับหรืองอได้ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปของแผ่นฟิล์ม เมื่อสัมผัสพบว่ามิถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน
CC 2	0.5:1:0.3	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำสามารถพับหรืองอได้ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปเมื่อสัมผัสพบว่ามิถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัว
CC 3	0.5:1:0.4	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ แข็งกว่า 2 ตัวอย่างแรก ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปเมื่อสัมผัสพบว่ามิถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัวมาก
CC 4	1:1:0.2	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปของแผ่นฟิล์ม เมื่อสัมผัสพบว่ามิถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัวมาก
CC 5	1:1:0.3	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ แข็งแต่สามารถพับหรืองอได้ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปเมื่อสัมผัสพบว่ามิถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัว
CC 6	1:1:0.4	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ แข็งแต่สามารถพับหรืองอได้ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปเมื่อสัมผัสพบว่ามิถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัว
CC 7	1.5:1:0.2	แผ่นฟิล์มตรงกลางจะหนากว่าด้านข้าง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ แข็งแต่สามารถพับหรืองอได้ เมื่อสัมผัสพบว่ามิถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัว
CC 8	1.5:1:0.3	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ แข็งแต่สามารถพับหรืองอได้ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปเมื่อสัมผัสพบว่ามิถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัว
CC 9	1.5:1:0.4	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ แข็งแต่สามารถพับหรืองอได้ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปเมื่อสัมผัสพบว่ามิถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัว

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	CS:ALG:AC	ลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพ
CC 10	0.5:1:0	แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะบางมาก ผิวเรียบ มีสีขาวขุ่น สามารถพับหรืองอได้
CC 11	1.5:1:0	แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะบางแต่หนากว่า CC10 ผิวเรียบ มีสีขาวขุ่นสามารถพับหรืองอได้
CC 12	1:1:0	แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะบางแต่ตรงกลางจะหนากว่าด้านข้าง ผิวเรียบ มีสีขาวขุ่น สามารถพับหรืองอได้
CC 13	0.5:0:0	แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะบาง ผิวค่อนข้างเรียบ มีสีขาวขุ่น สามารถพับหรืองอได้
CC 14	1:0:0	แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะบาง ผิวค่อนข้างเรียบ มีสีขาวขุ่นสามารถพับหรืองอได้
CC 15	1.5:0:0	แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะบางแต่หนากว่าตัวอย่าง CC 13-14 ผิวค่อนข้างเรียบ มีสีขาวขุ่น สามารถพับหรืองอได้

ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มจาก NOCC อัลจินต และถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	NOCC:ALG:AC	ลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพ
WW 1	0.5:1:0.2	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำสามารถพับหรือองได้ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปของแผ่นฟิล์ม เมื่อสัมผัสพบว่ามีถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน
WW 2	0.5:1:0.3	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำสามารถพับหรือองได้ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปเมื่อสัมผัสพบว่ามีถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัว
WW 3	0.5:1:0.4	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปเมื่อสัมผัสพบว่า มีถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัวมาก
WW 4	1:1:0.2	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปของแผ่นฟิล์ม เมื่อสัมผัสพบว่ามีถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัวมาก
WW 5	1:1:0.3	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ สามารถพับหรือองได้ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปเมื่อสัมผัสพบว่ามีถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัว
WW 6	1:1:0.4	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ สามารถพับหรือองได้ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปเมื่อสัมผัสพบว่ามีถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัว
WW 7	1.5:1:0.2	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ สามารถพับหรือองได้ เมื่อสัมผัสพบว่า มีถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัว
WW 8	1.5:1:0.3	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ สามารถพับหรือองได้ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปเมื่อสัมผัสพบว่ามีถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัว
WW 9	1.5:1:0.4	แผ่นฟิล์มบาง ผิวไม่เรียบ มีสีดำ สามารถพับหรือองได้ ถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่วไปเมื่อสัมผัสพบว่ามีถ่านกัมมันต์หลุดออกมาบางส่วน ด้านข้างของฟิล์มมีลักษณะหดตัว

ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มจาก NOCC อัลจินेट และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	NOCC:ALG:AC	ลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพ
WW 10	0.5:1:0	แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะบางมาก ผิวเรียบ มีสีขาวขุ่น สามารถพับหรืองอได้
WW 11	1.5:1:0	แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะบาง ผิวเรียบ มีสีขาวขุ่น สามารถพับหรืองอได้
WW 12	1:1:0	แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะบางแต่ตรงกลางจะหนากว่าด้านข้าง ผิวเรียบ มีสีขาว ขุ่นสามารถพับหรืองอได้
WW 13	0.5:0:0	แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะบาง ผิวเรียบ มีสีขาวขุ่น สามารถพับหรืองอได้
WW 14	1:0:0	แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะบาง ผิวเรียบ มีสีขาวขุ่น สามารถพับหรืองอได้
WW 15	1.5:0:0	แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะบางแต่หนากว่าตัวอย่าง WW 13-14 ผิวเรียบ มีสีขาวขุ่น สามารถพับหรืองอได้

4.2.4 ความหนาของแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน อัลจิเนต และ ถ่านกัมมันต์

ในการทดลองนี้จะวัดความหนาของแผ่นฟิล์มก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ โดยใช้ Thickness gauge ในการวัดความหนาของแผ่นฟิล์ม

การวัดความหนาของแผ่นฟิล์มทั้งสองชนิดนั้นจะวัดโดยใช้ Thickness gauge วัดความหนาของแผ่นฟิล์ม โดยวัดสามตำแหน่งก่อนหาค่าเฉลี่ยและค่า % CV พบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะไม่ราบเรียบตลอดทั้งแผ่น ในตัวอย่างที่มีอัตราส่วนของไคโตซานและ NOCC สูงมากขึ้นแผ่นฟิล์มจะมีความหนามากขึ้นตามลำดับ และตรงกลางของแผ่นฟิล์มจะหนากว่าด้านขอบทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะความหนาไม่สม่ำเสมอ ส่วนตัวอย่างของไคโตซานและ NOCC ที่มีการเติมถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนมากขึ้นแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จะมีความหนามากขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 4.3 แสดงความหนาของแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	CS:ALG:AC	Thickness (mm)	% CV
CC 1	0.5:1:0.2	0.11	0.14
CC 2	0.5:1:0.3	0.12	0.16
CC 3	0.5:1:0.4	0.14	0.13
CC 4	1.0:1:0.2	0.17	0.12
CC 5	1.0:1:0.3	0.19	0.16
CC 6	1.0:1:0.4	0.20	0.08
CC 7	1.5:1:0.2	0.20	0.16
CC 8	1.5:1:0.3	0.22	0.21
CC 9	1.5:1:0.4	0.20	0.05
CC 10	0.5:1:0	0.04	0.93
CC 11	1.0:1:0	0.10	0.15
CC 12	1.5:1:0	0.17	0.18
CC 13	0.5:0:0	0.04	0.35
CC 14	1:0:0	0.07	0.25
CC 15	1.5:0:0	0.09	0.00

ตารางที่ 4.4 แสดงความหนาของแผ่นฟิล์มจาก NOCC อัลจินต และถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	NOCC:ALG:AC	Thickness (mm)	% CV
WW 1	0.5:1:0.2	0.13	0.13
WW 2	0.5:1:0.3	0.13	0.13
WW 3	0.5:1:0.4	0.14	0.08
WW 4	1.0:1:0.2	0.14	0.08
WW 5	1.0:1:0.3	0.17	0.16
WW 6	1.0:1:0.4	0.14	0.08
WW 7	1.5:1:0.2	0.12	0.18
WW 8	1.5:1:0.3	0.16	0.10
WW 9	1.5:1:0.4	0.17	0.03
WW 10	0.5:1:0	0.14	0.22
WW 11	1.0:1:0	0.09	0.22
WW 12	1.5:1:0	0.17	0.18
WW 13	0.5:0:0	0.02	0.13
WW 14	1:0:0	0.05	0.13
WW 15	1.5:0:0	0.08	0.08

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ (physico-chemical properties) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลคอมโพสิต

4.3.1 การศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำ (Swelling ratio) ของแผ่นฟิล์มไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปวัสดุที่นำมาใช้ในการปิดบาดแผลหรือสมานแผลนั้นควรมีความสามารถในการรักษาความชุ่มชื้นของแผลโดยไม่เกิดการหมักหมม และช่วยในการดูดซับของเลือดและน้ำหนองอันเกิดจากแผล โดยสมบัติข้อนี้ของไฮโดรเจลสามารถศึกษาเบื้องต้นได้จากค่า Swelling ratio

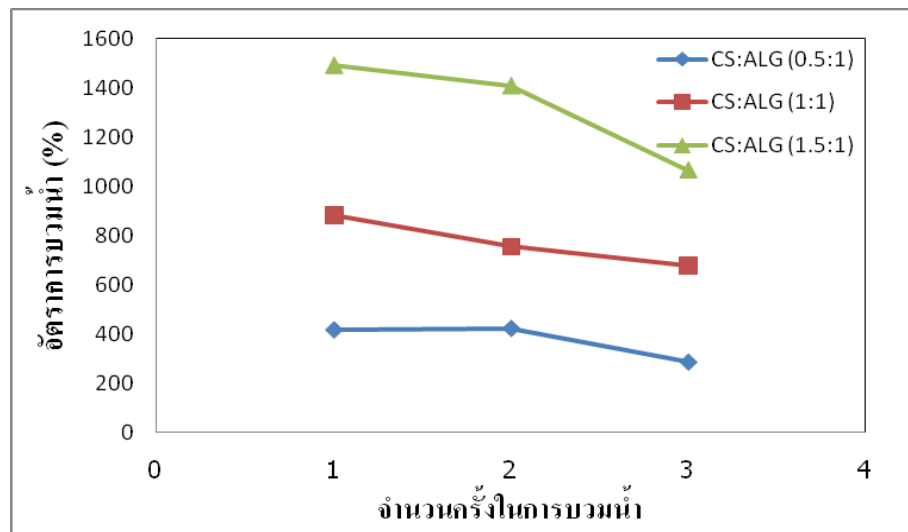


a) ตัวอย่างที่ CC 12
ไคโตซาน/อัลจิเนต (1.5:1.0)
(แผ่นเจลที่บวมน้ำ)



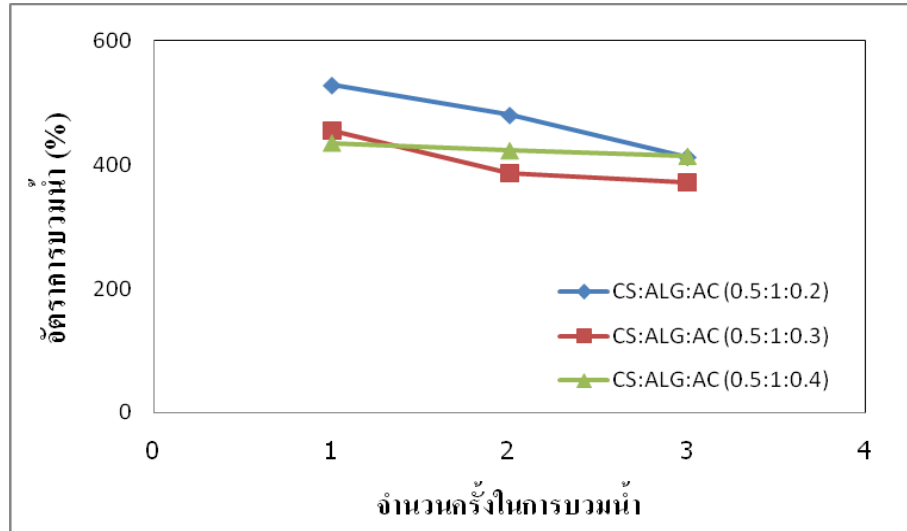
b) ตัวอย่างที่ CC 7
ไคโตซาน/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ (1.5:1:0.2)
(แผ่นเจลที่บวมน้ำ)

รูปที่ 4.8 ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจลจากไคโตซาน/อัลจิเนต และไคโตซาน/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ขณะบวมน้ำ a) ตัวอย่างที่ CC 12 ไคโตซาน/อัลจิเนต (1.5:1:0) และ b) ตัวอย่างที่ CC 7 ไคโตซาน/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ (1.5:1:0.2)

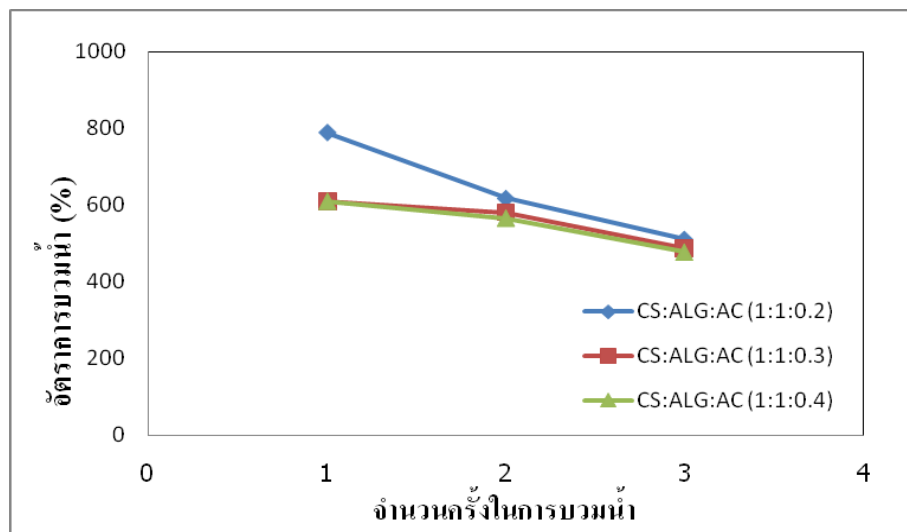


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมน้ำ (Swelling ratio) และจำนวนครั้งในการบวมน้ำกรณีไม่เติมถ่านกัมมันต์

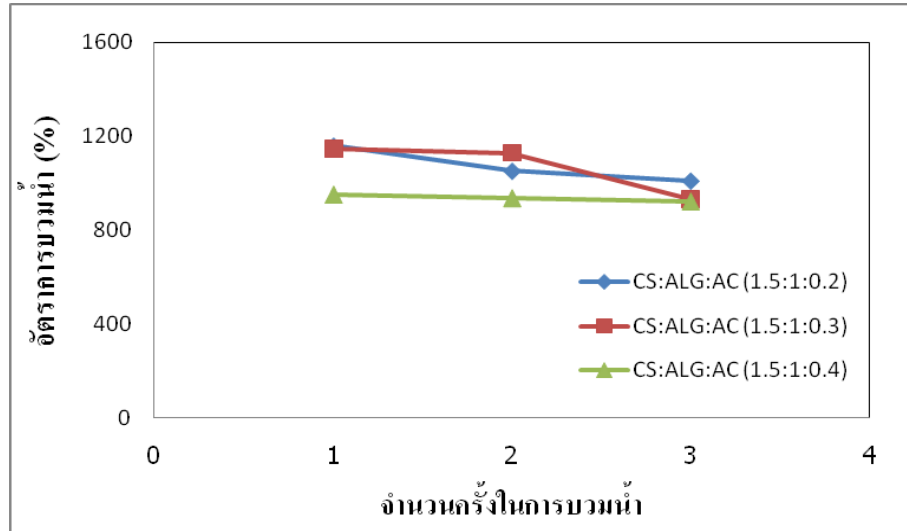
จากกราฟรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงอัตราการบวมน้ำของแผ่นฟิล์มไคโตซานและอัลจินต กรณีไม่เติมถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่อปริมาณไคโตซานที่อัตราส่วนเพิ่มขึ้นต่อปริมาณอัลจินตที่อัตราส่วน 1 ให้ค่าการบวมน้ำครั้งที่ 1 ของแผ่นฟิล์มมากขึ้นตามลำดับ เมื่อเทียบกับไคโตซานในอัตราส่วนที่น้อยกว่า เนื่องจากไคโตซานที่มีอัตราส่วนน้อยนั้นจะมีอัตราส่วนของอัลจินตมากกว่าเมื่อทำให้เจลเกิดการคงรูป อัลจินตบางส่วนที่ไม่เกิดการครอสลิงก์กับไคโตซาน แต่จะคงรูปด้วย Ca^{2+} ซึ่งอัลจินตบางส่วนที่คงรูปด้วย Ca^{2+} มีลักษณะของโครงสร้างของอัลจินตใกล้ชิดกันมากทำให้แผ่นฟิล์มมีการบวมน้ำได้น้อย เมื่อทำการบวมน้ำครั้งที่ 2 และ 3 ในทุกอัตราส่วนค่าการบวมน้ำที่ได้มีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อทำการบวมน้ำหลายครั้งจะทำให้ความสามารถในการบวมน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากมีการสูญเสียสภาพของแผ่นเจลส่งผลให้ความสามารถในการบวมน้ำลดลง



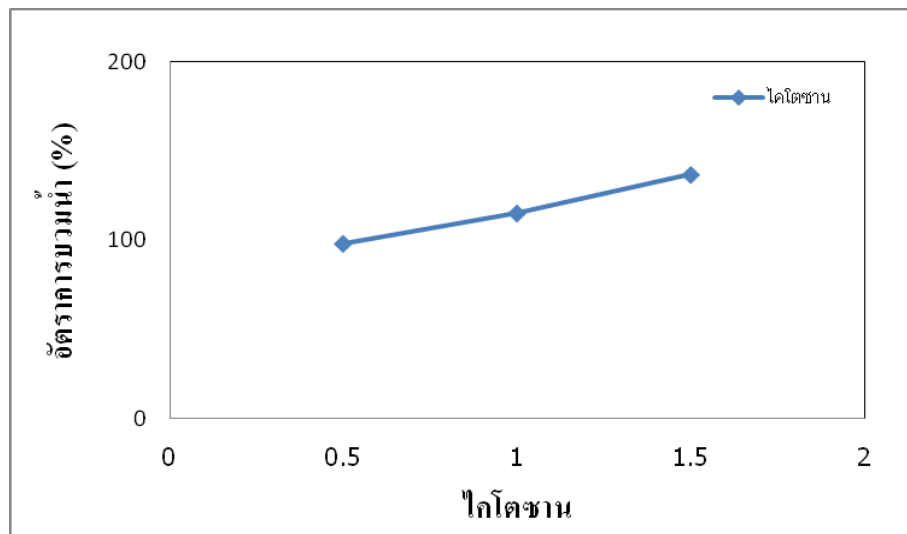
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมน้ำ (Swelling ratio) และจำนวนครั้งในการบวมน้ำกรณีเติมถ่านกัมมันต์ต่างปริมาณ (0.2, 0.3 และ 0.4) และสัดส่วนของ CS:ALG อยู่ที่ (0.5:1.0)



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมน้ำ (Swelling ratio) และจำนวนครั้งในการบวมน้ำกรณีเติมถ่านกัมมันต์ต่างปริมาณ (0.2, 0.3 และ 0.4) และสัดส่วนของ CS:ALG อยู่ที่ (1.0:1.0)



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมน้ำ (Swelling ratio) และจำนวนครั้งในการบวมน้ำกรณีเติมถ่านกัมมันต์ต่างปริมาณ (0.2, 0.3 และ 0.4) และสัดส่วนของ CS:ALG อยู่ที่ (1.5:1.0)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมน้ำ (Swelling ratio) และอัตราส่วนไคโตซาน

จากการศึกษาความสามารถในการบวมน้ำของแผ่นฟิล์มไคโตซานและอัลจิเนตในกรณีมีการเติมถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าการเติมถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่ 0.2 0.3 และ 0.4 (กราฟรูปที่ 4.10 - 4.12) นั้นไม่มีผลมากต่อการบวมน้ำ ซึ่งในกรณีนี้สามารถอธิบายได้จากกราฟ 4.13

กราฟรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าในแผ่นฟิล์มจากไคโตซานที่ไม่มีการเติมอัลจิเนตและถ่านกัมมันต์จะให้ค่าอัตราการบวมน้ำสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการบวมน้ำของไฮโดรเจลขึ้นกับปริมาณเนื้อสารซึ่งแผ่นฟิล์มที่มีเนื้อสารมากจะทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีความหนาเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มที่มีอัตราส่วนของไคโตซานต่ำกว่า

4.3.2 การศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำ (Swelling ratio) ของแผ่นฟิล์ม NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์



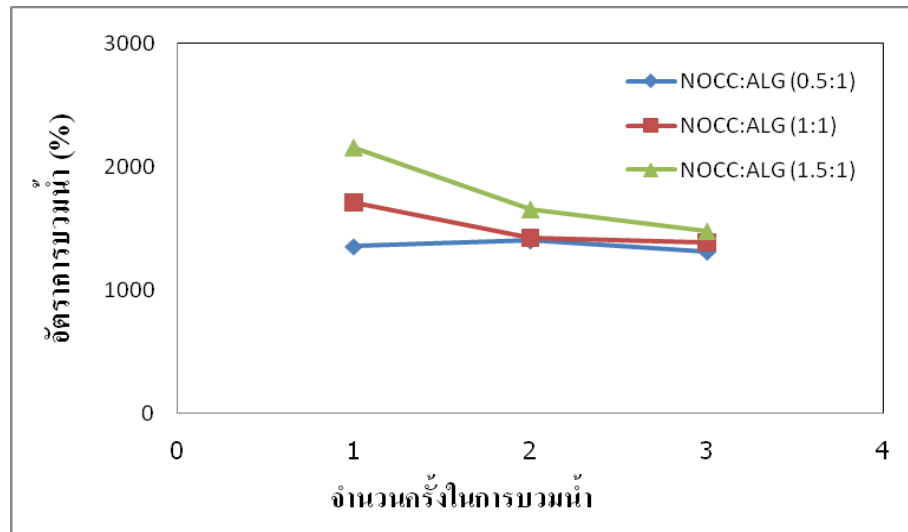
a) ตัวอย่างที่ WW 12
NOCC/อัลจิเนต (1.5:1.0)
(แผ่นเจลที่บวมน้ำ)



b) ตัวอย่างที่ WW 7
NOCC/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ (1.5:1:0.2)
(แผ่นเจลที่บวมน้ำ)

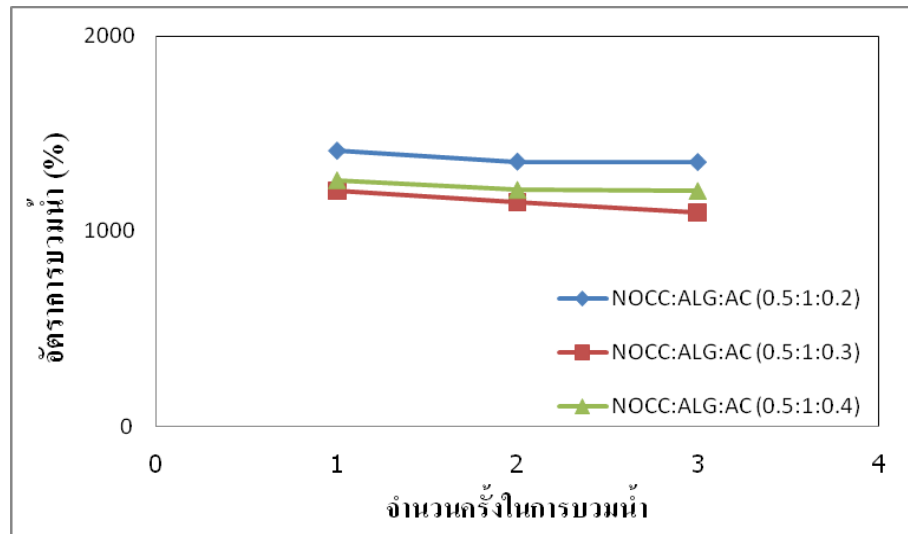
รูปที่ 4.14 ลักษณะของแผ่นไฮโดรเจลจาก NOCC/อัลจิเนต และ NOCC/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ขณะที่บวมน้ำ a) ตัวอย่างที่ CC 12 NOCC/อัลจิเนต (1.5:1:0) และ b) ตัวอย่างที่ CC 7 NOCC/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ (1.5:1:0.2)

ตัวอย่าง WW13 ถึง WW15 นั้น ไม่สามารถศึกษาอัตราการบวมน้ำได้ เนื่องจากเมื่อนำไปทดสอบการบวมน้ำทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะไม่เป็นแผ่นฟิล์มเนื่องจากแผ่นฟิล์มจาก NOCC เพียงอย่างเดียวไม่สามารถคงรูปได้

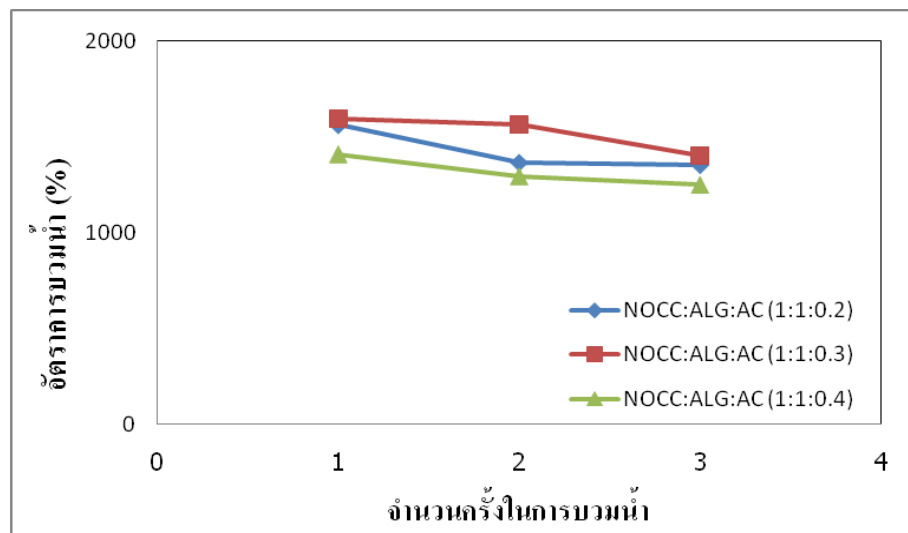


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมน้ำ (Swelling ratio) และจำนวนครั้งในการบวมน้ำกรณีไม่เติมถ่านกัมมันต์

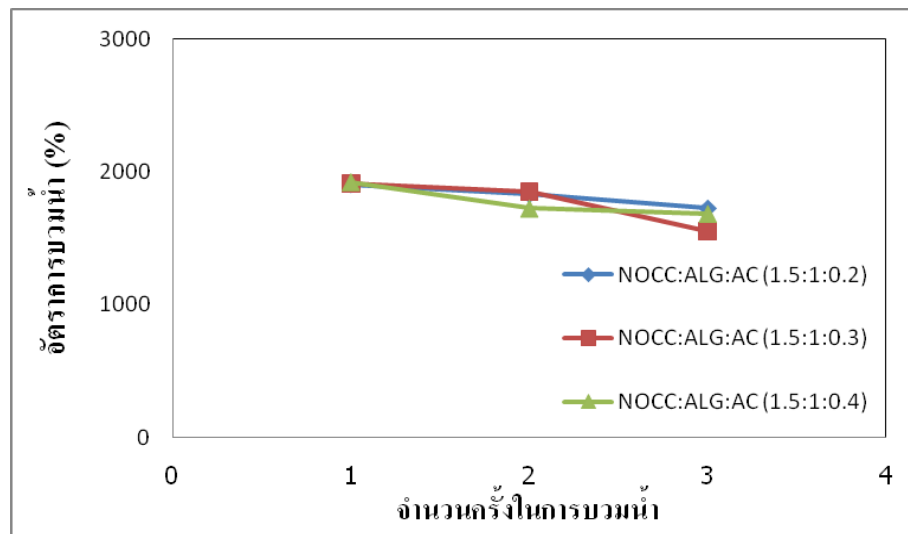
ในทำนองเดียวกันกับการศึกษาแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากไคโตซานและอัลจิเนต (รูปที่ 4.9) พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ NOCC มากขึ้นให้ค่าการบวมน้ำของแผ่นฟิล์มสูงขึ้น และจากการศึกษาความสามารถในการบวมน้ำของแผ่นฟิล์ม NOCC และอัลจิเนต กรณีไม่เติมถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่อปริมาณ NOCC ที่อัตราส่วนเพิ่มขึ้นต่อปริมาณอัลจิเนตที่อัตราส่วน 1 ให้ค่าการบวมน้ำครั้งที่ 1 ของแผ่นฟิล์มมากขึ้นตามลำดับ เมื่อทำการบวมน้ำครั้งที่ 2 และ 3 ในทุกอัตราส่วนค่าการบวมน้ำที่ได้มีค่าลดลงตามลำดับเช่นกัน (รูปที่ 4.15) และเมื่อทำการบวมน้ำหลายครั้งจะทำให้ความสามารถในการบวมน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากการสูญเสียสภาพของแผ่นฟิล์มส่งผลให้ค่าการบวมน้ำลดลง



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมน้ำ (Swelling ratio) และจำนวนครั้งในการบวมน้ำกรณีเติมถ่านกัมมันต์ต่างปริมาณ (0.2, 0.3 และ 0.4) และสัดส่วนของ NOCC:ALG อยู่ที่ (0.5:1.0)



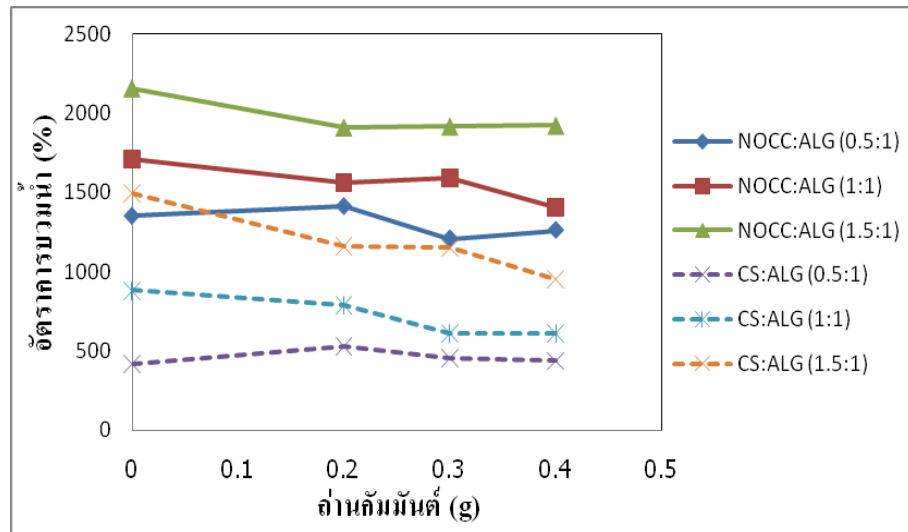
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมน้ำ (Swelling ratio) และจำนวนครั้งในการบวมน้ำกรณีเติมถ่านกัมมันต์ต่างปริมาณ (0.2, 0.3 และ 0.4) และสัดส่วนของ NOCC:ALG อยู่ที่ (1.0:1.0)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมน้ำ (Swelling ratio) และจำนวนครั้งในการบวมน้ำกรณีเติมถ่านกัมมันต์ต่างปริมาณ (0.2, 0.3 และ 0.4) และสัดส่วนของ NOCC:ALG อยู่ที่ (1.5:1.0)

จากกราฟรูปที่ 4.16 - 4.18 ซึ่งแสดงความสามารถในการบวมน้ำของแผ่นฟิล์ม NOCC และอัลจินตในอัตราส่วนต่างๆ กรณีเติมถ่านกัมมันต์ พบว่าการเติมถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่ 0.2 0.3 และ 0.4 นั้น ไม่มีผลมากต่อการบวมน้ำของแผ่นฟิล์ม NOCC/อัลจินต-ถ่านกัมมันต์แต่อย่างใด

กราฟรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าในแผ่นฟิล์มจากไคโตซานที่ไม่มีการเติมอัลจินตและถ่านกัมมันต์ อัตราการบวมน้ำสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าการบวมน้ำของไฮโดรเจลขึ้นกับปริมาณเนื้อสารซึ่งแผ่นฟิล์มที่มีเนื้อสารมากจะทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีความหนาเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มที่มีอัตราส่วนของไคโตซานต่ำกว่า

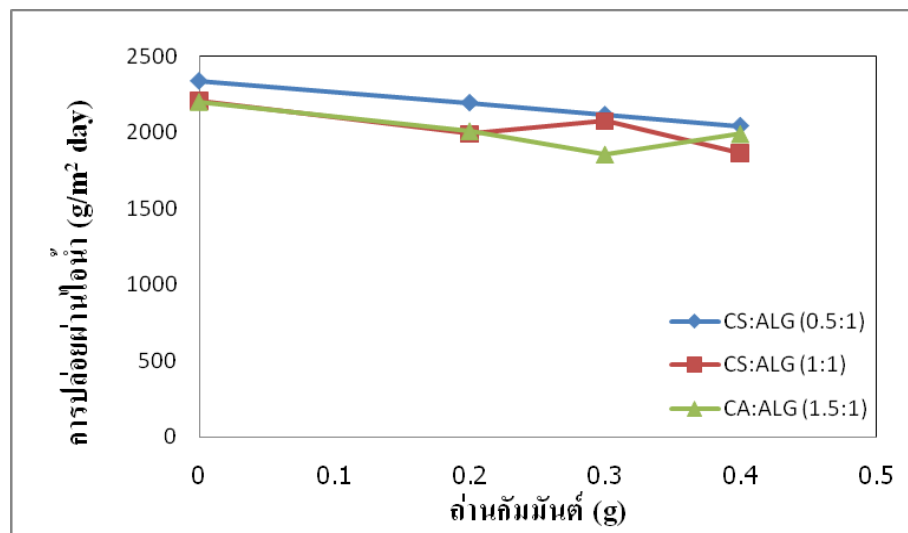


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการบวมน้ำ (Swelling ratio) และอัตราส่วนน้ำมันกัญของแผ่นฟิล์มไคโตซาน/อัลจิเนต-น้ำมันกัญและ NOCC/อัลจิเนต-น้ำมันกัญ

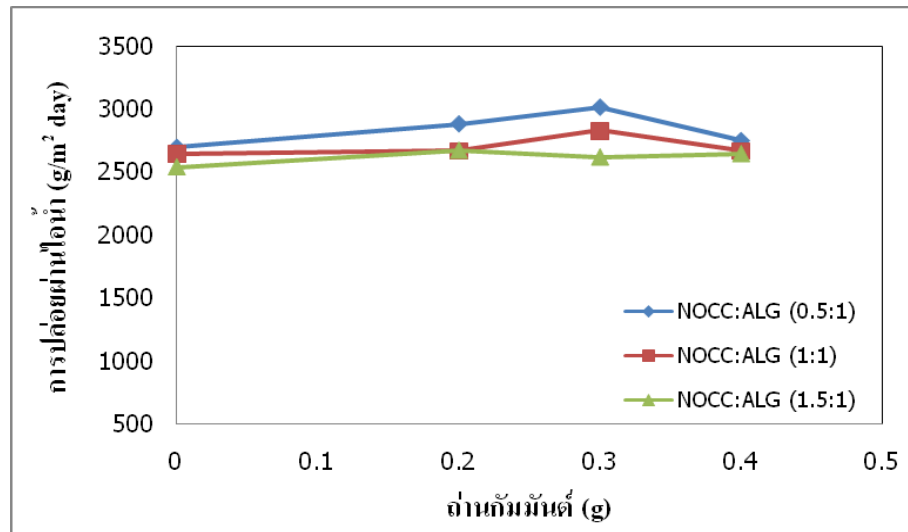
จากการเปรียบเทียบแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากไคโตซานและ NOCC พบว่าแผ่นฟิล์ม NOCC มีค่าการบวมน้ำสูงกว่าแผ่นฟิล์มไคโตซาน เนื่องจาก NOCC มีสมบัติคล้ายไคโตซานแต่จะมีหมู่ของคาร์บอกซิเลต (COO) เพิ่มขึ้นบางส่วน ซึ่งเมื่อนำมาครอสลิงก์กับอัลจิเนตพบว่าจะเกิดการปลั๊กกันของประจุ แต่จะคงรูปได้ด้วย Ca^{2+} บางส่วนและบริเวณที่เกิดการปลั๊กกันจะทำให้มีการดูดน้ำเข้ามาส่งผลให้ค่าการบวมน้ำมากขึ้น [37] ส่วนกรณีเติมน้ำมันกัญ พบว่าการเติมน้ำมันกัญในอัตราส่วนที่ 0.2 0.3 และ 0.4 นั้นไม่มีผลมากต่อการบวมน้ำของแผ่นฟิล์ม NOCC/อัลจิเนต-น้ำมันกัญ และแผ่นฟิล์ม ไคโตซาน/อัลจิเนต-น้ำมันกัญ

4.3.3 การศึกษาอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของแผ่นฟิล์ม ไคโตซาน อัลจิเนต และ ถ่านกัมมันต์

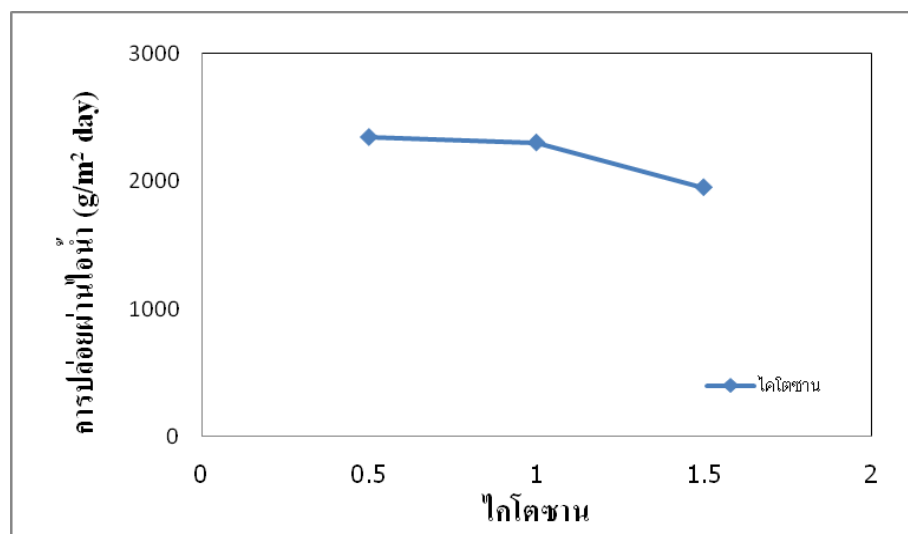
อัตราการปล่อยผ่านไอน้ำของวัสดุปิดบาดแผลนั้นจะต้องมีค่าที่เหมาะสม เนื่องจากบาดแผลแต่ละชนิดจะมีกระบวนการรักษาที่แตกต่างกัน ถ้าสามารถปล่อยผ่านไอน้ำมากเกินไปก็จะทำให้แผลสูญเสียน้ำทำให้แผ่นเจลติดบาดแผลได้ แต่ถ้าสามารถปล่อยผ่านไอน้ำน้อยเกินไปจะทำให้แผลเกิดการหมักหมมได้



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (WVTR) ของไคโตซาน และอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (WVTR) ของ NOCC และอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์



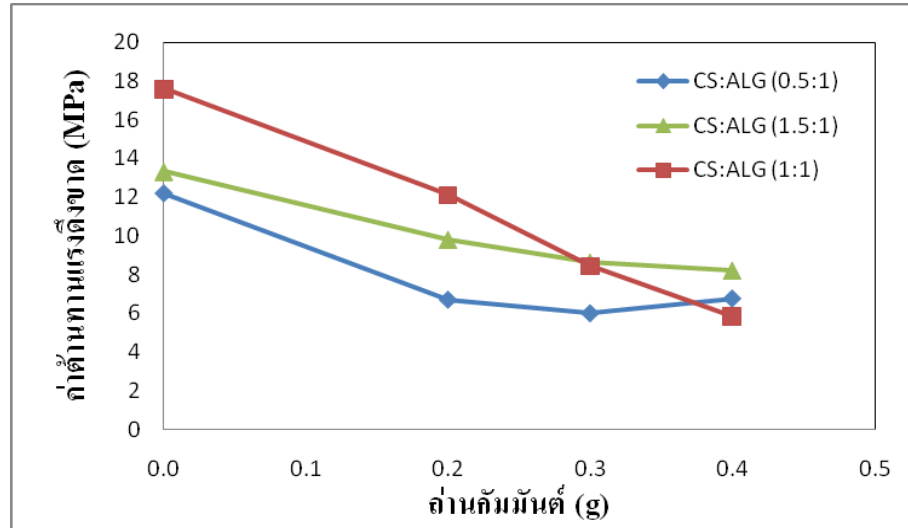
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (WVTR) และอัตราส่วนของไคโตซาน

จากกราฟรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (WVTR) และอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ของไคโตซาน พบว่าเมื่อไคโตซานปริมาณน้อย ไฮโดรเจลจะมีอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำได้ดีกว่าเมื่อไคโตซานอัตราส่วนสูง เนื่องมาจากอัตราส่วนของไคโตซานมากขึ้น ทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีความหนาขึ้นจึงมีการขัดขวางการปล่อยผ่านไอน้ำส่งผลให้ค่าอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำลดลง และเมื่อมีการเติมถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าไม่ส่งผลต่ออัตราการปล่อยผ่านไอน้ำมากนัก ซึ่งจะให้ค่าการปล่อยผ่านไอน้ำที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ในทำนองเดียวกัน แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จาก NOCC ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.21 พบว่าปริมาณ NOCC ที่อัตราส่วนต่ำ จะมีอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำได้ดีกว่า NOCC ที่อัตราส่วนสูง และในกรณีที่มีการเติมถ่านกัมมันต์นั้นจะให้ค่าการปล่อยผ่านไอน้ำที่สูงด้วยเช่นกัน เนื่องจากถ่านกัมมันต์กระจายตัวในแผ่นฟิล์มส่งผลให้แผ่นฟิล์มมีช่องว่างมาก ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนที่ 0.3 จะให้ค่าการปล่อยผ่านไอน้ำลดลง ซึ่งเป็นผลจากความหนาแน่นของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้นและการเติมถ่านกัมมันต์

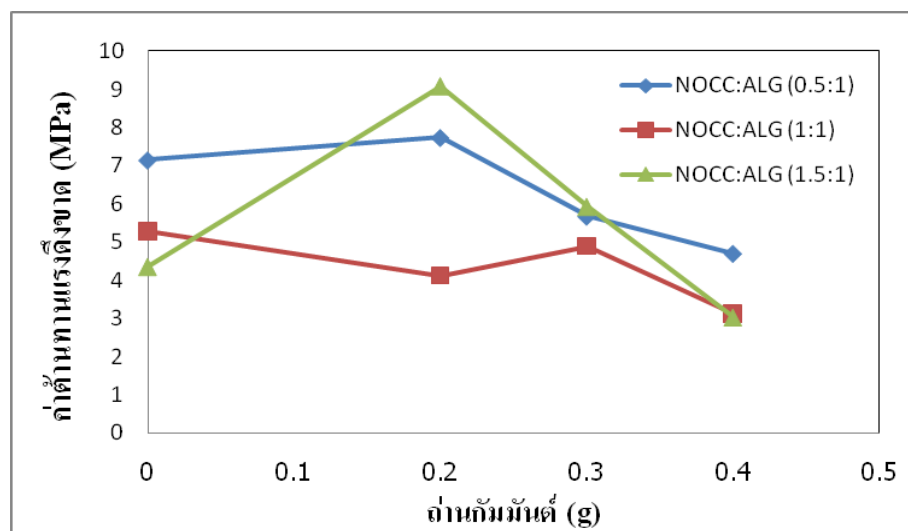
กราฟรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าในแผ่นฟิล์มจากไคโตซานที่ไม่มีการเติมอัลจินตและถ่านกัมมันต์ ให้ค่าอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำลดลงเมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากค่า อัตราการปล่อยผ่านไอน้ำของไฮโดรเจลขึ้นกับปริมาณเนื้อสารซึ่งไฮโดรเจลที่มีเนื้อสารน้อยจะทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีความบางเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มที่มีอัตราส่วนของไคโตซานสูง

4.4 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ของแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน และ NOCC

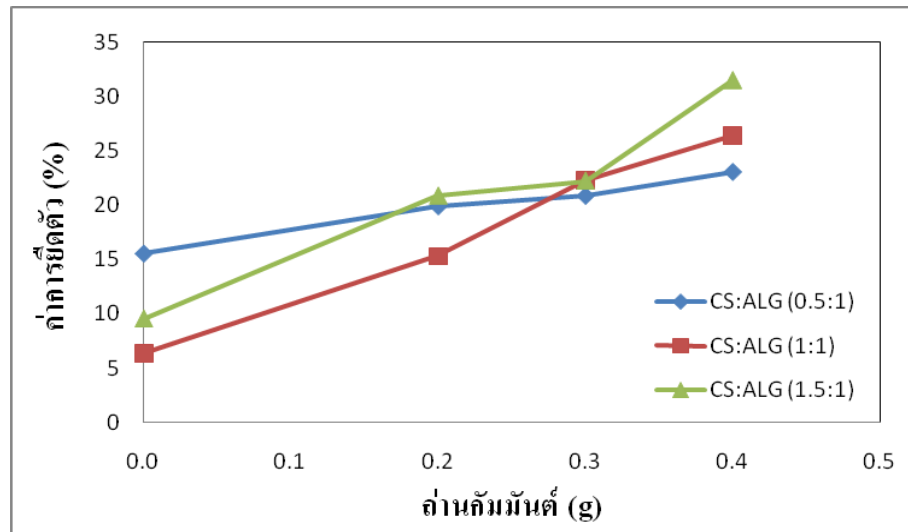
ความแข็งแรง การคงตัว และความยืดหยุ่นของเจลนั้นสามารถหาได้จากการทดสอบโดย Tensile test โดยเครื่อง LLOYD Instrument



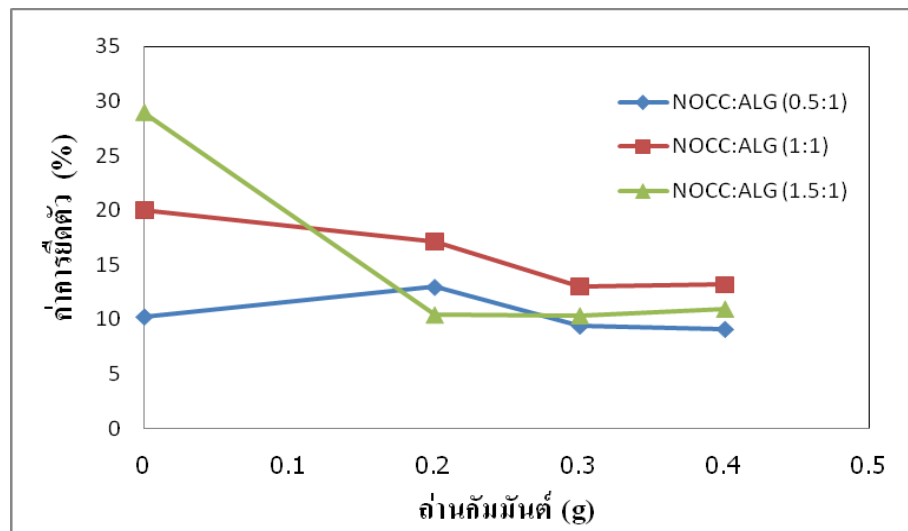
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) ของไคโตซานและอัตราส่วนของกลีเซอริน



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) ของ NOCC และอัตราส่วนของกลีเซอริน



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบการยืดตัว (% Elongation) ของไคโตซานและอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบการยืดตัว (% Elongation) ของ NOCC และอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์

จากกราฟรูปที่ 4.23 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) และอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ ในกรณีที่ไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์ จะสังเกตได้ว่าเมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) สูงขึ้นเนื่องมาจากเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างไคโตซานและอัลจินเตมากขึ้นทำให้สามารถทนแรงดึงได้ ยกเว้นที่อัตราส่วนของไคโตซานที่ 1.5 มีค่าการทนแรงดึงได้น้อยกว่าอัตราส่วนที่ 1 นั้นอาจเป็นผลเนื่องมาจากแผ่นฟิล์มตัวอย่างเกิดการบิดงอขณะทำการตัดตัวอย่าง เมื่อมีการเติมถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่มากขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) จะลดลงตามลำดับ เนื่องมาจากการเติมถ่านกัมมันต์ลงในตัวอย่างจะทำให้ตัวอย่างที่ได้จะมีลักษณะเปราะและแข็ง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์ ในทำนองเดียวกันแผ่นฟิล์มของ NOCC ดังแสดงในรูปที่ 4.24 พบว่าในกรณีที่ไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์ เมื่ออัตราส่วนของ NOCC เพิ่มมากขึ้น จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) ต่ำ แต่เมื่อมีการเติมถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วน 0.2 จะให้ค่าความต้านทานแรงดึงขาดที่สูงขึ้นและจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของถ่านกัมมันต์มากขึ้น เนื่องมาจากการเติมถ่านกัมมันต์ลงในตัวอย่างจะทำให้ตัวอย่างที่ได้จะมีลักษณะเปราะและแข็ง

จากรูปที่ 4.25 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยืดตัว (% Elongation) และอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ พบว่าอัตราส่วนของไคโตซานที่มีค่าน้อยจะให้ค่าการยืดตัวสูงกว่าเมื่ออัตราส่วนของไคโตซานสูง เนื่องมาจากเมื่ออัตราส่วนของไคโตซานมีค่าสูงนั้น จะมีไคโตซานที่ไม่เกิดพันธะกับอัลจินเตแต่จะเกี่ยวพันกันเองระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ ทำให้มีความหนาแน่นของสายโซ่มากขึ้น ส่งผลให้ตัวอย่างมีการยืดตัวที่ดี [38] ในกรณีที่มีการเติมถ่านกัมมันต์ พบว่าเมื่อมีการเติมถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่มากขึ้นจะให้ค่าการยืดตัวของแผ่นฟิล์มดีขึ้น เนื่องมาจากถ่านกัมมันต์ที่กระจายตัวอยู่ทั่วไปจะช่วยลดความหนาแน่นของสายโซ่ของไคโตซานที่เกี่ยวข้องกันเอง และจากรูปที่ 4.26 กรณีที่ไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์แผ่นฟิล์มของ NOCC ในอัตราส่วนที่สูงจะให้ค่าการยืดตัวได้ดีกว่าอัตราส่วนของ NOCC ที่ต่ำ เนื่องมาจากอัตราส่วนของ NOCC ที่สูงจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับ อัลจินเตทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะของการยืดตัวสูง ถ้ามีการเติมถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนต่างๆ จะให้ค่าการยืดตัวลดน้อยลงเนื่องจากแผ่นฟิล์มที่ได้มีลักษณะแข็งและเปราะ

4.5 การศึกษาลักษณะทางชีวภาพเบื้องต้นของไฮโดรเจลที่มีสมบัติในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากไคโตซานและ NOCC

วัสดุที่นำมาใช้ในการปิดบาดแผลหรือสมานแผลนั้นควรมีความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียและป้องกันการติดเชื้อเพื่อไม่ให้แผลเกิดการอักเสบขึ้นมา เนื่องจากถ้าบาดแผลเกิดการติดเชื้อจะทำให้กระบวนการสมานแผลเป็นไปได้อย่างยาก โดยสมบัติข้อนี้ของไฮโดรเจลสามารถศึกษาได้จากการทดสอบการผ่านเชื้อแบคทีเรียดังนี้

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียในไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินตและ ถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	CS:ALG:AC	การปนเปื้อน
CC1	0.5:1:0.2	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 2	0.5:1:0.3	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 3	0.5:1:0.4	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 4	1:1:0.2	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 5	1:1:0.3	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 6	1:1:0.4	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 7	1.5:1:0.2	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 8	1.5:1:0.3	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 9	1.5:1:0.4	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 10	0.5:1:0	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 11	1.5:1:0	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 12	1:1:0	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 13	0.5:0:0	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 14	1:0:0	ไม่มีการปนเปื้อน
CC 15	1.5:0:0	ไม่มีการปนเปื้อน
Positive control	-	ไม่มีการปนเปื้อน
Negative control	-	เกิดการปนเปื้อน

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียในไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจินตและ ถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	NOCC:ALG:AC	การปนเปื้อน
WW 1	0.5:1:0.2	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 2	0.5:1:0.3	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 3	0.5:1:0.4	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 4	1:1:0.2	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 5	1:1:0.3	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 6	1:1:0.4	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 7	1.5:1:0.2	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 8	1.5:1:0.3	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 9	1.5:1:0.4	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 10	0.5:1:0	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 11	1.5:1:0	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 12	1:1:0	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 13	0.5:0:0	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 14	1:0:0	ไม่มีการปนเปื้อน
WW 15	1.5:0:0	ไม่มีการปนเปื้อน
Positive control	-	ไม่มีการปนเปื้อน
Negative control	-	เกิดการปนเปื้อน

จากการทดสอบทางด้านชีวภาพของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้จากไคโตซานและ NOCC พบว่าไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งเป็นผลมาจากที่ไคโตซานมีคุณสมบัติต่อต้านเชื้อแบคทีเรียจากลักษณะเฉพาะนี้ทำให้แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้เหมาะสมในการนำไปใช้สมานแผล และหลอดทดลองที่เป็น Positive control ไม่มีการปนเปื้อนเช่นเดียวกัน ยกเว้นที่ Negative control เกิดการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรีย

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงกระบวนการเตรียมแผ่นเจลสมานแผลที่ได้จากไคโตซาน อัลจินต และถ่านกัมมันต์ และจาก NOCC อัลจินต และถ่านกัมมันต์ โดยทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานทั้งทางกายภาพ ทางเคมีและทางชีวภาพเบื้องต้น จากการทดลองสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม

5.1.1.1 แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากไคโตซาน อัลจินต และถ่านกัมมันต์

แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จะมีความหนาใกล้เคียงกันเมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเท่ากัน เมื่ออัตราส่วนของไคโตซานสูงขึ้นแผ่นฟิล์มที่ได้จะมีความหนาขึ้นตามอัตราส่วนของไคโตซาน ซึ่งตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มคงรูป พื้นผิวของฟิล์มมีลักษณะเรียบ เมื่อมีการเติมถ่านกัมมันต์พบว่าแผ่นฟิล์มแข็งแต่สามารถพับหรืออได้ โดยจะเห็นถ่านกัมมันต์กระจายอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบตามเนื้อเจล

5.1.1.2 แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จาก NOCC อัลจินต และถ่านกัมมันต์

แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จาก NOCC จะมีลักษณะคล้ายแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากไคโตซาน คือตัวอย่างที่ได้มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มคงรูป พื้นผิวของฟิล์มมีลักษณะเรียบ เมื่อมีการเติมถ่านกัมมันต์พบว่าแผ่นฟิล์มแข็ง สามารถพับหรืออได้ โดยจะเห็นถ่านกัมมันต์กระจายอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบตามเนื้อเจล และมีความยืดหยุ่นมากกว่าไคโตซาน

5.1.2 การศึกษาการบวมน้ำ (Swelling ratio) ของแผ่นฟิล์ม

5.1.2.1 การบวมน้ำของแผ่นฟิล์มที่เตรียมจากไคโตซาน อัลจินต และถ่านกัมมันต์

ค่าการบวมน้ำของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้จากไคโตซานในกรณีที่ไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์ ซึ่งเมื่ออัตราส่วนของไคโตซานมากจะมีการบวมน้ำที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับไคโตซานในอัตราส่วนที่น้อยกว่า เมื่อทำการบวมน้ำ 3 ครั้งในทุกอัตราส่วนค่าการบวมน้ำที่ได้มีค่าลดลงตามลำดับเนื่องจากการสูญเสียสภาพของแผ่นฟิล์มส่งผลให้ค่าการบวมน้ำลดลง กรณีเติมถ่านกัมมันต์ พบว่าการเติมถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนต่างๆ นั้นไม่มีผลต่อการบวมน้ำมากนัก

5.1.2.2 อัตราการบวมน้ำของแผ่นฟิล์มที่เตรียมจาก NOCC อัลจินต และถ่านกัมมันต์

ค่าการบวมตัวของแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้จาก NOCC ในกรณีที่ไม่มีการเติม ถ่านกัมมันต์ และกรณีที่ไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์ พบว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จาก NOCC จะให้ค่าการบวมน้ำที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มไคโตซาน การเติมถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนต่างๆ นั้นไม่มีผลต่อการบวมน้ำมากนัก

5.1.3 การศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate) ของแผ่นฟิล์ม

5.1.3.1 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate) ของแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์

ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) จะขึ้นกับอัตราส่วนไคโตซานและอัตราส่วนของ ถ่านกัมมันต์ พบว่าปริมาณไคโตซานที่อัตราส่วนสูงขึ้น จะให้ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำได้ต่ำกว่า ไคโตซานที่อัตราส่วนน้อยกว่า เนื่องมาจากอัตราส่วนของไคโตซานมากขึ้นทำให้แผ่นฟิล์มที่ได้มีความหนาขึ้นจึงมีการขัดขวางการปล่อยไอน้ำผ่าน ส่งผลให้ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำน้อยลงด้วย และเมื่อมีการเติมถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนต่างๆ แล้วนั้น พบว่าในการเติมถ่านกัมมันต์จะทำให้การซึมผ่านของไอน้ำมีแนวโน้มที่น้อยลง เนื่องมาจากโมเลกุลของถ่านกัมมันต์ที่กระจายอยู่ในเนื้อของแผ่นฟิล์มของไคโตซานและอัลจิเนต จะไปขัดขวางการซึมผ่านของไอน้ำ

5.1.3.2 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate) ของแผ่นฟิล์มจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์

อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จาก NOCC จะให้ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำได้สูงกว่าแผ่นฟิล์มไคโตซาน เนื่องมาจากแผ่นฟิล์ม NOCC มีหมู่ของ COO^- ที่ไม่เกิดการครอสลิงค์ด้วย Ca^{2+} ซึ่งการที่มีหมู่ COO^- นี้จะทำให้ดึงไอน้ำที่ระเหยได้ดี และเมื่อมีการเติม ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนต่างๆ แล้วนั้น พบว่าในการเติมถ่านกัมมันต์จะทำให้การซึมผ่านของไอน้ำมีแนวโน้มที่สูงขึ้น แต่เมื่ออัตราส่วนของถ่านกัมมันต์มากเกินไปทำให้การซึมผ่านของไอน้ำมีแนวโน้มที่น้อยลง เนื่องมาจากโมเลกุลของถ่านกัมมันต์ที่กระจายอยู่ในเนื้อของแผ่นฟิล์มของไคโตซานและอัลจิเนต จะไปขัดขวางการซึมผ่านของไอน้ำ

5.1.4 สมบัติทางกล (Mechanical properties)

5.1.4.1 สมบัติทางกล (Mechanical properties) ของแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน อัลจิเนต และ ถ่านกัมมันต์ และแผ่นฟิล์มจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์

จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) และการยืดตัว (%Elongation) ของแผ่นฟิล์มทั้งสองชนิด พบว่าในกรณีที่ไม่มี การเติมถ่านกัมมันต์แผ่นฟิล์มจากไคโตซาน จะมี แนวโน้มของความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าและค่าการยืดตัวจะต่ำกว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จาก NOCC ส่วนในกรณีที่มีการเติมถ่านกัมมันต์ พบว่าแผ่นฟิล์มทั้งสองชนิดมีลักษณะเปราะและแข็ง

5.1.5 การศึกษาการผ่านของแบคทีเรีย (Microbial penetration) ของแผ่นฟิล์ม ทั้งสองชนิด

จากการทดลองการผ่านของแบคทีเรีย พบว่าแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน อัลจิเนต และ ถ่านกัมมันต์ และแผ่นฟิล์มจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ สามารถป้องกันการผ่านของ แบคทีเรียได้ โดยที่อาหารเลี้ยงเชื้อในหลอดทดลองไม่มีการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้

5.1.6 การเปรียบเทียบระหว่างแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน อัลจิเนต และ ถ่านกัมมันต์ และแผ่นฟิล์มจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์

จากการเปรียบเทียบสมบัติเบื้องต้นของแผ่นฟิล์มจากไคโตซาน อัลจิเนต และ ถ่านกัมมันต์ และแผ่นฟิล์มจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ พบว่าแผ่นฟิล์มของ NOCC ให้ค่าอัตราการบวม น้ำ การปล่อยผ่านไอน้ำ การยืดตัวได้ดีกว่าแผ่นฟิล์มของไคโตซาน แต่ในการทดสอบทางด้านการผ่าน ของแบคทีเรียแผ่นฟิล์มทั้งสองชนิดสามารถป้องกันการผ่านของแบคทีเรียได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเก็บแผ่นฟิล์มที่ได้จากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ นั้นจะต้องเก็บไว้ในที่สะอาด และแห้งเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อรา
2. การเติมถ่านกัมมันต์ลงในสารละลายไคโตซาน และ อัลจิเนต จะต้องผสมให้เข้ากันให้ดี ถ้าผสม ถ่านกัมมันต์ไม่ดีจะทำให้โมเลกุลของถ่านกัมมันต์ กระจายตัวได้อย่างไม่ทั่วตลอดแผ่นเจล

1. Bawornluk, 2007, **อุตสาหกรรมอาหารทะเลในมุมมองของราโบแบงค์ ไทยยังได้เปรียบหลายด้าน** [Online], Available: <http://www.nicaonline.com> [30/07/2009]
2. Prashanth, KVH. Tharanathan, RN. (2007) “Chitin/chitosan : modification and their unlimited application potential an overview”, **Trends Food Sci Technol**, vol 18, pp. 117–131
3. Skjak-Bræk, G., Anthonsen, T., & Sandford, P. (Eds.), (1989). Chitin and chitosan: sources, chemistry, biochemistry, physical properties and applications. New York: **Elsevier Science Publishers Ltd.**
4. Kim I.Y., Seo S-J. , Moon H-S., Yoo M-K., Park I-Y., Kim B-C., Cho C-S., (2008), “Chitosan and its derivative for tissue engineering application” **Biotechnology Advances**, vol 26, pp. 1–21
5. Pittermann, W., Horner, V., & Wachter, R. (1997). Efficiency of high molecular weight chitosan in skin care applications. In R. A. A. Muzzarelli, & M. G. Peter (Eds.), **Chitin handbook** (pp. 361–372). Grottammare: Atec Edizioni.
6. Riccardo A.A., (2009), “ Chitins and chitosans for the repair of wounded skin, nerve, cartilage and bone”, **Carbohydrate Polymers**, vol 76, pp. 167–182
7. Stashak Ted S., DVM, MS, Diplomate ACVS, Ellis Farstvedt, DVM, and Ashlee Othic, (2004), **Update on Wound Dressings: Indications and Best Use, Clinical Techniques in Equine Practice**, pp. 148-163
8. Knill C.J., Kennedy J.F., Mistry J., Mirafteb M., Smart G., Groocock M.R., Williams H.J., (2004), “ Alginate fibres modified with unhydrolysed and hydrolysed chitosans for wound dressings” **Carbohydrate Polymers**, vol 55, pp. 65–76

9. Lu S., Gao W., Gu H. Y., (2 0 0 8), Construction, application and biosafety of silver nanocrystalline chitosan wound dressing, **Burns**, vol 3 4 , pp. 6 2 3 – 6 2 8
10. Wu F.C., Tseng, R.L., Juang, R.S., (2002), Adsorption of dyes and humic acid from water using chitosan-encapsulated activated carbon. **J. Chem. Technol. Biotechnol.** vol 77 (11), pp. 1269–1279
11. Ho J.C., Dong H.G., Jin W.B., Ki D.P., (2005), Synthesis and characterization of Pluronic grafted chitosan copolymer as a novel injectable biomaterial, **Current Applied Physics**, vol 5, pp. 485-488
12. Chun M.D., Lan Z.H., Ming Z., Dan Y., Yi L., (2007), Biological properties of the chitosan-gelatin sponge wound dressing, **Carbohydrate Polymer**, vol 69, pp. 583-589
13. Long Z., Hiroshi M., (2009), Hydrogels of dihydroxypropyl chitosan crosslinked with irradiation at paste-like condition, **Carbohydrate Polymer**, vol 76, pp. 314-319
14. Hou F.Z., Hui Z., Li Z., Sai C., Yi Z., Yu Z., (2009), synthesis and characterization of thermosensitive graft copolymer of N-isopropylacrylamide with biodegradable carboxymethylchitosan, **Carbohydrate Polymer**, vol 77, pp. 785-790
15. Huaping T., Constance R. Chu, Karin A. Payne, Kacey G. Marra, (2009), Injectable in situ forming biodegradable chitosan-hyaluronic acid based hydrogels for cartilage tissue engineering, **Biomaterials**, vol 30, pp. 2499-2506
16. Ezequiel S. Costa-junior, Edel F. Barbosa-Stancioli, Alexandra A.P. Mansur, Wander L. Vasconcelos, Herman S. Mansur, (2009), Preparation an characterization of chitosan-poly(vinyl alcohol) chemically crosslinked blends for biomedical applications, **Carbohydrate Polymer**, vol. 76, pp. 472-481
17. Shuangyun Lu, Wenjuan Gao, Hai Ying Gu, (2008), Construction, application and biosafety of silvernanocrystalline chitosan wound dressing, **Burns**, vol. 34, pp. 623-628

18. Liuyun J., Yubao L., Xuejiang W., Li Z., Jiqui W., Mei G., (2008), Preparation and properties of nano-hydroxyapatite/chitosan/carboxymethyl cellulose composite scaffold, **Carbohydrate Polymers**, vol. 74, pp. 680–684

19. N. Sangjun, K. Pilakasiri, J. Muensoongnoen, B. Thavornyutikarn³ and W. Janvikul, 2008, Study of effect of carboxymethylchitosan-based hydrogels on healing of deep partial thickness wound in guinea-pigs., **National Metal and Materials Technology Center**, Thailand

20. Sakchai W., Chureerat P., (2006), Development and in vitro evaluation of chitosan–polysaccharides composite wound dressings, **International Journal of Pharmaceutics** , vol 313, pp. 123–128

21. Ijeoma F. Uchebu, Andreas G. Schatzlein, (2006), **Polymer in Drug Delivery**, Taylor & Francis Group.

22. Fredric L. Buchholz, Andrew T. Graham, (1998), **Modern Superabsorbent Polymer Technology**, John Wiley & Sons Inc. American

23. Peter X. Ma, Jennifer Elisseeff , (2006), **Scaffolding in Tissue Engineering**, Taylor & Francis Group, pp. 27-39, 71-87

24. Severian D., (1996), **Polysaccharides in Medicinal Applications**, Marcel Dekker, Inc. New York, pp. 125-217

25. Junping Z., Qin W., Aiqin W., (2007), Synthesis and characterization of chitosan-g-poly(acrylic acid)/attapulgite superabsorbent composites, **Carbohydrate polymer**, vol 68, pp. 367-374

26. Qin W., Junping Z., Aiqin W., (2009), Preparation and characterization of a novel pH-sensitive chitosan-g-poly(acrylic acid)/attapulgit/sodium alginate composite hydrogel bend for controlled release of diclofenac sodium, **Carbohydrate polymer** vol 78, pp. 731-737
27. FWU L. Mi, Hsing W. Sung, Shin S. Shyu, (2002), Drug release from chitosan-alginate complex bends reinforced by a naturally occurring cross-linking agent, **Carbohydrate polymer**, vol. 48, pp. 61-72
28. Sergey A. Dergunow, Grigoriy A. Mun, (2009), γ -irradiated chitosan-polyvinyl pyrrolidone hydrogels as pH-sensitive protein delivery system, **Radiation physics and chemistry**, vol. 78, pp. 65-68
29. อัทธ์ สุวรรณวงศ์, 2547, การเตรียมไฮโดรเจลที่ประกอบด้วยชั้นของโพลีไวนิล แอลกอฮอล์ และชั้นของไคโตซานโดยการฉายรังสีแกมมาเพื่อใช้เป็นเจลปิดรักษาบาดแผล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
30. Jing H., Kemin W., Dongzhi Y., Jun N., (2009), Photopolymerization of methacrylated chitosan/PNIPAAm hybrid dual-sensitive hydrogels as carrier for drug delivery, **International Journal of Biological Macromolecules**, vol. 44, pp. 229-235.
31. ยิ่งศักดิ์ ไกรพินิจ, 2550, ผลของการเตรียมเจลแปงต่อสมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลจาก แป้งมันสำปะหลังและแป้งพุทธรักษา, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
32. C.K.S. Pillai, Willi P., Chandra P. Sharma, (2009), **Chitin and chitosan polymers: Chemistry, solubility and fiber formation**, vol. 34, pp. 641-678
33. โสธิญา มุ้ยแก้ว, 2551, การศึกษาการดูดซับ VOCs ด้วยถ่านกัมมันต์, วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

34. วันเพ็ญ เตชะบุญเกียรติ, 2008, วัสดุตกแต่งบาดแผล, **Colourway Thailand's Leading Textile Journal**, July-August, vol 14, No77, pp. 23-26

35. Biji B., Mohanty M., Umashankar P.R., Jayakrishnan A., (2005), Evaluation of an in situ forming hydrogel wound dressing based on oxidized alginate and gelatin, **Biomaterials**, vol. 26, pp. 6335–6342

36. Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting, Designation, **ASTM (D882 – 10)**.

37. Yu-Hsin L., Hsiang-Fa L., Ching-Kuang C.,(2005), Physically crosslinked alginate/N,O-carboxymethyl chitosan hydrogels with calcium for oral delivery of protein drugs **Biomaterials**, vol 26, pp. 2105–2113

38. กิตติกร ฤกษ์มงคล, 2547, การเตรียมและศึกษาสมบัติพื้นฐานและความสามารถของแผ่นปิดแผลห้ามเลือดไคโตซานและไคโตซานเติมแต่ง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง

1. ข้อมูลการวัดความหนาของแผ่นเจลแต่ละกรณี (Thickness)

ตารางที่ ก.1 แสดงความหนาของไฮโดรเจล (Thickness) จากโคโคซาน อัลจินต และ ถ่านกัมมันต์

โดยใช้ Thickness gauge โดยในการวัดแต่ละกรณีจะวัด 3 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

ตัวอย่าง	ความหนาของเจล (จุดที่ 1)	ความหนาของเจล (จุดที่ 2)	ความหนาของเจล (จุดที่ 3)	Thickness (mm)	% CV
CC 1	0.11	0.09	0.12	0.11	0.14
CC 2	0.12	0.12	0.09	0.11	0.16
CC 3	0.1	0.13	0.12	0.12	0.13
CC 4	0.16	0.15	0.19	0.17	0.12
CC 5	0.17	0.19	0.23	0.20	0.16
CC 6	0.19	0.21	0.18	0.19	0.08
CC 7	0.15	0.12	0.11	0.13	0.16
CC 8	0.13	0.17	0.2	0.17	0.21
CC 9	0.18	0.19	0.2	0.19	0.05
CC 10	0.02	0.02	0.09	0.04	0.93
CC 11	0.12	0.1	0.09	0.10	0.15
CC 12	0.2	0.14	0.17	0.17	0.18
CC 13	0.06	0.03	0.04	0.04	0.35
CC 14	0.06	0.06	0.09	0.07	0.25
CC 15	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00

ตารางที่ ก.2 แสดงความหนาของไฮโดรเจล (Thickness) จาก NOCC อัลจินต และ ถ่านกัมมันต์
โดยใช้ Thickness gauge โดยในการวัดแต่ละกรณีจะวัด 3 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

ตัวอย่าง	ความหนาของเจล (จุดที่ 1)	ความหนาของเจล (จุดที่ 2)	ความหนาของ เจล (จุดที่ 3)	Thickness (mm)	% CV
ww 1	0.14	0.14	0.11	0.13	0.13
ww 2	0.15	0.12	0.12	0.13	0.13
ww 3	0.15	0.15	0.13	0.14	0.08
ww 4	0.13	0.15	0.13	0.14	0.08
ww 5	0.14	0.18	0.19	0.17	0.16
ww 6	0.15	0.13	0.13	0.14	0.08
ww 7	0.11	0.1	0.14	0.12	0.18
ww 8	0.14	0.16	0.17	0.16	0.10
ww 9	0.17	0.18	0.17	0.17	0.03
ww 10	0.12	0.18	0.13	0.14	0.22
ww 11	0.07	0.11	0.1	0.09	0.22
ww 12	0.2	0.14	0.17	0.17	0.18
ww 13	-	-	-		
ww 14	-	-	-		
ww 15	-	-	-		

2. ข้อมูลการทดลองการบวมน้ำของแผ่นฟิล์มในแต่ละกรณี

ตารางที่ ก.3 แสดงอัตราการบวมน้ำของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ครั้งที่1)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักเจลที่แห้ง (g)	น้ำหนักเจลที่บวมน้ำ (g)	Equilibrium fluid content (%)	% CV
CC 1	1	0.4498	3.0389	575.61	0.08
	2	0.4663	2.8289	506.67	
	3	0.4914	2.962	502.77	
CC 2	1	0.8592	3.4631	303.06	0.29
	2	0.4946	3.21	549.01	
	3	0.4508	2.7708	514.64	
CC 3	1	0.9616	3.6236	276.83	0.36
	2	0.5085	2.7532	441.44	
	3	0.4515	3.1013	586.89	
CC 4	1	0.3024	2.8148	830.82	0.08
	2	0.2564	2.1065	721.57	
	3	0.2759	2.529	816.64	
CC 5	1	0.2846	2.1738	663.81	0.09
	2	0.2904	1.9085	557.20	
	3	0.2955	2.0998	610.59	
CC 6	1	0.7897	3.7307	372.42	0.38
	2	0.323	3.0209	835.26	
	3	0.327	2.3654	623.36	
CC 7	1	0.7532	9.9501	1221.04	0.22
	2	0.6293	6.1887	883.43	
	3	0.6954	10.2634	1375.90	
CC 8	1	0.6685	8.87	1226.85	0.11
	2	0.5559	6.106	998.40	
	3	0.628	8.2915	1220.30	

ตารางที่ ก.3 แสดงอัตราการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์
(ครั้งที่ 1) ต่อ

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักเจลที่แห้ง (g)	น้ำหนักเจลที่บวมน้ำ (g)	Equilibrium fluid content (%)	% CV
CC 9	1	0.7115	9.7112	1264.89	0.31
	2	0.6717	6.6855	895.31	
	3	0.9972	7.8915	691.37	
CC 10	1	0.3813	1.6531	333.54	0.18
	2	0.3999	2.2888	472.34	
	3	0.3911	2.1244	443.19	
CC 11	1	1.0658	9.511	792.38	0.21
	2	0.6313	5.4487	763.09	
	3	0.4852	5.7758	1090.40	
CC 12	1	0.6036	8.9418	1381.41	0.13
	2	0.8877	13.1801	1384.75	
	3	0.5524	10.0203	1713.96	
CC 13	1	0.1536	0.3185	107.36	-
CC 14	1	0.2883	0.6536	126.71	-
CC 15	1	0.4456	1.1516	158.44	-

ตารางที่ ก.4 แสดงอัตราการบวมน้ำของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ครั้งที่2)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักเจลที่แห้ง (g)	น้ำหนักเจลที่บวมน้ำ (g)	Equilibrium fluid content (%)	% CV
CC 1	1	0.255	1.5083	491.49	0.03
	2	0.2483	1.4011	464.28	
	3	0.2437	1.4236	484.16	
CC 2	1	0.2782	1.112	299.71	0.42
	2	0.2857	1.1054	286.91	
	3	0.2509	1.6906	573.81	
CC 3	1	0.4299	1.8129	321.70	0.21
	2	0.2982	1.717	475.79	
	3	0.2643	1.5064	469.96	
CC 4	1	0.326	1.9191	488.68	0.34
	2	0.2667	2.5526	857.11	
	3	0.2996	1.8215	507.98	
CC 5	1	0.305	2.1694	611.28	0.05
	2	0.3075	2.0029	551.35	
	3	0.3088	2.1112	583.68	
CC 6	1	0.4783	2.8615	498.26	0.62
	2	0.3515	3.678	946.37	
	3	0.6997	2.4788	254.27	
CC 7	1	0.5025	5.6837	1031.08	0.33
	2	0.3824	5.7878	1413.55	
	3	0.5769	4.6907	713.09	
CC 8	1	0.3875	5.65	1358.06	0.20
	2	0.3826	4.6527	1126.01	
	3	0.5609	7.8397	907.31	

ตารางที่ ก.4 แสดงอัตราการบวมน้ำของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์
(ครั้งที่ 2) ต่อ

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักเจลที่แห้ง (g)	น้ำหนักเจลที่บวมน้ำ (g)	Equilibrium fluid content (%)	% CV
CC 9	1	0.5938	4.5025	683.55	0.64
	2	0.4063	4.6462	1829.53	
	3	0.4347	5.2138	935.77	
CC 10	1	0.2005	1.0001	398.80	0.05
	2	0.2042	1.0729	425.42	
	3	0.1898	1.0302	442.78	
CC 11	1	0.638	3.1363	391.58	0.43
	2	0.275	2.6047	847.16	
	3	0.3034	3.4082	1023.34	
CC 12	1	0.3602	4.1707	1057.88	0.31
	2	0.3001	4.1226	1273.74	
	3	0.2997	5.9857	1897.23	
CC 13	1	0.0997	0.2039	104.51	-
CC 14	1	0.1549	0.3378	118.08	-
CC 15	1	0.2796	0.7078	153.15	-

ตารางที่ ก.5 แสดงอัตราการบวมน้ำของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ครั้งที่3)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักเจลที่แห้ง (g)	น้ำหนักเจลที่บวมน้ำ (g)	Equilibrium fluid content (%)	% CV
CC 1	1	0.2438	1.106	353.65	0.15
	2	0.2373	1.3682	476.57	
	3	0.2328	1.1795	406.66	
CC 2	1	0.2676	1.421	431.02	0.22
	2	0.2739	1.3827	404.82	
	3	0.2409	0.912	278.58	
CC 3	1	0.2873	1.4749	413.37	0.08
	2	0.2759	1.3279	381.30	
	3	0.2555	1.3951	446.03	
CC 4	1	0.5689	3.6121	534.93	0.33
	2	0.4674	3.5761	665.10	
	3	0.4912	2.1305	333.73	
CC 5	1	0.529	3.2143	507.62	0.17
	2	0.5855	2.9248	399.54	
	3	0.4857	3.1926	557.32	
CC 6	1	0.637	3.7722	492.18	0.15
	2	0.5496	2.7581	401.84	
	3	0.6641	4.2389	538.29	
CC 7	1	0.4324	5.5641	1186.79	0.15
	2	0.3586	3.5832	899.22	
	3	0.4783	5.0027	945.93	
CC 8	1	0.348	4.5186	1198.45	0.33
	2	0.3593	3.9801	1007.74	
	3	0.7449	5.1391	589.90	

ตารางที่ ก.5 แสดงอัตราการบวมน้ำของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์
(ครั้งที่ 3) ต่อ

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักเจลที่แห้ง (g)	น้ำหนักเจลที่บวมน้ำ (g)	Equilibrium fluid content (%)	% CV
CC 9	1	0.388	3.9048	906.39	0.04
	2	0.3779	3.7622	895.55	
	3	0.3968	4.2196	963.41	
CC 10	1	0.1985	0.8995	353.15	0.23
	2	0.1924	0.6241	224.38	
	3	0.1877	0.7053	275.76	
CC 11	1	0.3582	2.2638	531.99	0.21
	2	0.2562	1.9978	679.78	
	3	0.2806	2.5742	817.39	
CC 12	1	0.3259	3.8081	1068.49	0.11
	2	0.2981	3.11	943.27	
	3	0.2712	3.4879	1186.10	
CC 13	1	0.1545	0.3055	97.73	-
CC 14	1	0.1878	0.4036	114.91	-
CC 15	1	0.2656	0.6287	136.71	-

ตารางที่ ก.6 แสดงอัตราการบวมน้ำของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจินต และถ่านกัมมันต์ (ครั้งที่1)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักเจลที่แห้ง (g)	น้ำหนักเจลที่บวมน้ำ (g)	Equilibrium fluid content (%)	% CV
ww 1	1	0.3936	5.8843	1394.99	0.01
	2	0.3936	6.0407	1434.73	
	3	0.416	6.2586	1404.47	
ww 2	1	0.3953	5.4109	1268.81	0.10
	2	0.4068	4.7527	1068.31	
	3	0.4097	5.6712	1284.23	
ww 3	1	0.4365	5.5558	1172.81	0.32
	2	0.5248	5.3277	915.19	
	3	0.2003	3.595	1694.81	
ww 4	1	0.5482	8.4012	1432.51	0.10
	2	0.469	8.6173	1737.38	
	3	0.48	7.7398	1512.46	
ww 5	1	0.4413	7.2172	1535.44	0.03
	2	0.4695	8.1252	1630.61	
	3	0.4827	8.244	1607.89	
ww 6	1	0.4765	7.5046	1474.94	0.05
	2	0.5883	8.4787	1341.22	
	3	0.5355	8.063	1405.70	
ww 7	1	0.5758	8.7966	1427.72	0.23
	2	0.5558	11.6074	1988.41	
	3	0.4664	11.2441	2310.83	
ww 8	1	0.5938	11.1133	1771.56	0.09
	2	0.5826	12.8502	2105.66	
	3	0.5393	10.6153	1868.35	

ตารางที่ ก.6 แสดงอัตราการบวมน้ำของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจินต และถ่านกัมมันต์
(ครั้งที่ 1) ต่อ

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักเจลที่แห้ง (g)	น้ำหนักเจลที่บวมน้ำ (g)	Equilibrium fluid content (%)	% CV
ww 9	1	0.5364	10.0548	1774.50	0.07
	2	0.5097	10.8732	2033.25	
	3	0.5982	12.2856	1953.76	
ww 10	1	0.3573	5.5016	1439.77	0.14
	2	0.3734	4.5833	1127.45	
	3	0.3824	6.0472	1481.38	
ww 11	1	0.4471	6.6511	1387.61	0.28
	2	0.4283	10.0895	2255.71	
	3	0.4352	6.9029	1486.14	
ww 12	1	0.5477	12.6826	2215.61	0.03
	2	0.5454	11.9708	2094.87	
	3	0.5602	12.629	2154.37	
ww 13	1	-	-	-	-
ww 14	1	-	-	-	-
ww 15	1	-	-	-	-

ตารางที่ ก.7 แสดงอัตราการบวมน้ำของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจินต และถ่านกัมมันต์ (ครั้งที่2)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักเจลที่แห้ง (g)	น้ำหนักเจลที่บวมน้ำ (g)	Equilibrium fluid content (%)	% CV
ww 1	1	0.2484	3.8956	1468.28	0.14
	2	0.2455	3.8516	1468.88	
	3	0.2663	3.2878	1134.62	
ww 2	1	0.2633	3.682	1298.40	0.13
	2	0.2621	3.2802	1151.51	
	3	0.3018	3.2968	992.38	
ww 3	1	0.291	4.1716	1333.54	0.21
	2	0.2938	3.0038	922.40	
	3	0.2462	3.6443	1380.22	
ww 4	1	0.3322	4.4589	1242.23	0.14
	2	0.3156	4.2988	1262.10	
	3	0.3191	5.3926	1589.94	
ww 5	1	0.3075	4.9097	1496.65	0.05
	2	0.3387	5.5643	1542.84	
	3	0.3292	5.7358	1642.35	
ww 6	1	0.3416	5.4026	1481.56	0.17
	2	0.4014	4.6316	1053.86	
	3	0.3878	5.5741	1337.36	
ww 7	1	0.3613	6.2236	1622.56	0.11
	2	0.4009	7.8586	1860.24	
	3	0.3629	7.6718	2014.03	
ww 8	1	0.38	7.0291	1749.76	0.08
	2	0.4018	7.5986	1791.14	
	3	0.3621	7.6718	2018.70	

ตารางที่ ก.7 แสดงอัตราการบวมน้ำของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจินต และถ่านกัมมันต์
(ครั้งที่ 2) ต่อ

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักเจลที่แห้ง (g)	น้ำหนักเจลที่บวมน้ำ (g)	Equilibrium fluid content (%)	% CV
ww 9	1	0.4221	7.6472	1711.70	0.04
	2	0.3943	7.5019	1802.59	
	3	0.4264	7.4849	1655.37	
ww 10	1	0.2228	2.9053	1203.99	0.17
	2	0.2206	3.8939	1665.14	
	3	0.2479	3.5392	1327.67	
ww 11	1	0.2659	3.8875	1362.02	0.07
	2	0.2973	4.8793	1541.20	
	3	0.3295	4.8491	1371.65	
ww 12	1	0.4038	7.963	1872.02	0.25
	2	0.6703	8.5826	1180.41	
	3	0.4133	8.2721	1901.48	
ww 13	1	-	-	-	-
ww 14	1	-	-	-	-
ww 15	1	-	-	-	-

ตารางที่ ก.8 แสดงอัตราการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจินต และถ่านกัมมันต์ (ครั้งที่3)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักเจลที่แห้ง (g)	น้ำหนักเจลที่บวมน้ำ (g)	Equilibrium fluid content (%)	% CV
ww 1	1	0.2098	3.115	1384.75	0.04
	2	0.2049	3.0502	1388.63	
	3	0.2228	3.1008	1291.74	
ww 2	1	0.2221	2.987	1244.89	0.16
	2	0.22	2.1972	898.73	
	3	0.2412	3.0036	1145.27	
ww 3	1	0.2474	3.076	1143.33	0.11
	2	0.2546	3.1002	1117.67	
	3	0.2055	2.9955	1357.66	
ww 4	1	0.2702	4.3696	1517.17	0.11
	2	0.2489	3.4201	1274.09	
	3	0.2465	3.3566	1261.70	
ww 5	1	0.2516	4.4309	1661.09	0.20
	2	0.2779	3.379	1115.91	
	3	0.2634	4.019	1425.82	
ww 6	1	0.2659	4.4312	1566.49	0.30
	2	0.3194	4.6061	1342.11	
	3	0.3842	3.5793	831.62	
ww 7	1	0.2792	4.483	1505.66	0.11
	2	0.2986	5.755	1827.33	
	3	0.2863	5.5646	1843.63	
ww 8	1	0.2925	4.944	1590.26	0.06
	2	0.3049	5.2658	1627.06	
	3	0.2823	4.375	1449.77	

ตารางที่ ก.8 แสดงอัตราการบวมน้ำของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจินต และถ่านกัมมันต์
(ครั้งที่ 2) ต่อ

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักเจลที่แห้ง (g)	น้ำหนักเจลที่บวมน้ำ (g)	Equilibrium fluid content (%)	% CV
ww 9	1	0.3266	6.6973	1950.61	0.16
	2	0.3101	4.6989	1415.29	
	3	0.3344	5.9657	1684.00	
ww 10	1	0.1893	2.1008	1009.77	0.20
	2	0.184	2.893	1472.28	
	3	0.2009	3.0856	1435.89	
ww 11	1	0.2164	3.6772	1599.26	0.19
	2	0.2325	2.7666	1089.94	
	3	0.2564	4.0219	1468.60	
ww 12	1	0.2659	4.1884	1475.18	0.11
	2	0.4503	6.3755	1315.83	
	3	0.2706	4.676	1628.01	
ww 13	1	-	-	-	-
ww 14	1	-	-	-	-
ww 15	1	-	-	-	-

3. ข้อมูลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ ของแผ่นฟิล์มในแต่ละกรณี

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	Slop (g/hr)	time (day)	Area (m ²)	WVTR(g/m ² day)
CC 1	0.083	24	0.000907	2196.25
CC 2	0.08	24	0.000907	2116.87
CC 3	0.077	24	0.000907	2042.78
CC 4	0.075	24	0.000907	1992.50
CC 5	0.079	24	0.000907	2077.18
CC 6	0.07	24	0.000907	1862.84
CC 7	0.076	24	0.000907	2011.03
CC 8	0.07	24	0.000907	1857.55
CC 9	0.075	24	0.000907	1992.50
CC 10	0.089	24	0.000907	2341.79
CC 11	0.084	24	0.000907	2212.13
CC 12	0.083	24	0.000907	2204.19
CC 13	0.089	24	0.000907	2341.79
CC 14	0.087	24	0.000907	2299.45
CC 15	0.074	24	0.000907	1950.17

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินต์ และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
CC 1	1		19.1933	19.1933	0	
	2	0	18.7203	18.7203	0	0
	3		17.7878	17.7878	0	
	1		19.1933	19.1071	0.0862	
	2	1	18.7203	18.6484	0.0719	0.0772
	3		17.7878	17.7143	0.0735	
	1		19.1933	19.0097	0.1836	
	2	2	18.7203	18.5653	0.155	0.1639
	3		17.7878	17.6347	0.1531	
	1		19.1933	18.9099	0.2834	
	2	3	18.7203	18.4897	0.2306	0.2504
	3		17.7878	17.5505	0.2373	
	1		19.1933	18.8382	0.3551	
	2	4	18.7203	18.4245	0.2958	0.3186
	3		17.7878	17.4828	0.305	
	1		19.1933	18.7463	0.447	
	2	5	18.7203	18.3438	0.3765	0.4027
	3		17.7878	17.4032	0.3846	
	1		19.1933	18.6636	0.5297	
	2	6	18.7203	18.264	0.4563	0.4848
	3		17.7878	17.3193	0.4685	
	1		19.1933	18.5862	0.6071	
	2	7	18.7203	18.1881	0.5322	0.5602
	3		17.7878	17.2464	0.5414	

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินต์ และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
CC 2	1		18.7294	18.7294	0	
	2	0	19.8757	19.8757	0	0
	3		19.212	19.212	0	
	1		18.7294	18.655	0.0744	
	2	1	19.8757	19.7917	0.084	0.0791
	3		19.212	19.133	0.079	
	1		18.7294	18.5689	0.1605	
	2	2	19.8757	19.699	0.1767	0.1661
	3		19.212	19.051	0.161	
	1		18.7294	18.4885	0.2409	
	2	3	19.8757	19.6159	0.2598	0.25
	3		19.212	18.9627	0.2493	
	1		18.7294	18.4204	0.309	
	2	4	19.8757	19.547	0.3287	0.3191
	3		19.212	18.8924	0.3196	
	1		18.7294	18.3425	0.3869	
	2	5	19.8757	19.4657	0.41	0.3990
	3		19.212	18.8119	0.4001	
	1		18.7294	18.2583	0.4711	
	2	6	19.8757	19.3781	0.4976	0.4851
	3		19.212	18.7255	0.4865	
	1		18.7294	18.1872	0.5422	
	2	7	19.8757	19.3039	0.5718	0.5598
	3		17.7878	17.2464	0.5414	

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินต์ และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
CC 3	1		19.0289	19.0289	0	
	2	0	20.0383	20.0383	0	0
	3		19.6494	19.6494	0	
	1		19.0289	18.9418	0.0871	
	2	1	20.0383	19.9609	0.0774	0.0843
	3		19.6494	19.5609	0.0885	
	1		19.0289	18.8356	0.1933	
	2	2	20.0383	19.869	0.1693	0.1781
	3		19.6494	19.4777	0.1717	
	1		19.0289	18.7438	0.2851	
	2	3	20.0383	19.7873	0.251	0.2618
	3		19.6494	19.4002	0.2492	
	1		19.0289	18.6677	0.3612	
	2	4	20.0383	19.7204	0.3179	0.3308
	3		19.6494	19.336	0.3134	
	1		19.0289	18.5798	0.4491	
	2	5	20.0383	19.6439	0.3944	0.4093
	3		19.6494	19.265	0.3844	
	1		19.0289	18.4961	0.5328	
	2	6	20.0383	19.5673	0.471	0.4877
	3		19.6494	19.1902	0.4592	
	1		19.0289	18.4169	0.612	
	2	7	20.0383	19.4992	0.5391	0.5608
	3		19.6494	19.1181	0.5313	

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินต์ และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
CC 4	1		18.8357	18.8357	0	
	2	0	18.8741	18.8741	0	0
	3		19.7786	19.7786	0	
	1		18.8357	18.7612	0.0745	
	2	1	18.8741	18.7925	0.0816	0.0783
	3		19.7786	19.6999	0.0787	
	1		18.8357	18.6735	0.1622	
	2	2	18.8741	18.7039	0.1702	0.1654
	3		19.7786	19.6149	0.1637	
	1		18.8357	18.5962	0.2395	
	2	3	18.8741	18.6252	0.2489	0.2467
	3		19.7786	19.5269	0.2517	
	1		18.8357	18.5373	0.2984	
	2	4	18.8741	18.5663	0.3078	0.3096
	3		19.7786	19.456	0.3226	
	1		18.8357	18.4707	0.365	
	2	5	18.8741	18.491	0.3831	0.3834
	3		19.7786	19.3765	0.4021	
	1		18.8357	18.3955	0.4402	
	2	6	18.8741	18.4139	0.4602	0.4640
	3		19.7786	19.2871	0.4915	
	1		18.8357	18.3293	0.5064	
	2	7	18.8741	18.34	0.5341	0.5377
	3		19.7786	19.2061	0.5725	

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินต์ และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
CC 5	1		18.6646	18.6646	0	
	2	0	18.2269	18.2269	0	0
	3		19.3971	19.3971	0	
	1		18.6646	18.5579	0.1067	
	2	1	18.2269	18.1439	0.083	0.0903
	3		19.3971	19.3159	0.0812	
	1		18.6646	18.4543	0.2103	
	2	2	18.2269	18.0574	0.1695	0.1815
	3		19.3971	19.2323	0.1648	
	1		18.6646	18.3479	0.3167	
	2	3	18.2269	17.9717	0.2552	0.2708
	3		19.3971	19.1565	0.2406	
	1		18.6646	18.2734	0.3912	
	2	4	18.2269	17.9077	0.3192	0.3365
	3		19.3971	19.0979	0.2992	
	1		18.6646	18.1918	0.4728	
	2	5	18.2269	17.8255	0.4014	0.4145
	3		19.3971	19.0277	0.3694	
	1		18.6646	18.1124	0.5522	
	2	6	18.2269	17.7478	0.4791	0.4905
	3		19.3971	18.957	0.4401	
	1		18.6646	17.7391	0.9255	
	2	7	18.2269	17.6761	0.5508	0.6620
	3		19.3971	18.8873	0.5098	

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินต์ และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
CC 6	1		19.4201	19.4201	0	
	2	0	18.8632	18.8632	0	0
	3		19.4824	19.4824	0	
	1		19.4201	19.3423	0.0778	
	2	1	18.8632	18.7955	0.0677	0.0720
	3		19.4824	19.4119	0.0705	
	1		19.4201	19.2524	0.1677	
	2	2	18.8632	18.7164	0.1468	0.1558
	3		19.4824	19.3295	0.1529	
	1		19.4201	19.1797	0.2404	
	2	3	18.8632	18.6421	0.2211	0.2317
	3		19.4824	19.2487	0.2337	
	1		19.4201	19.1194	0.3007	
	2	4	18.8632	18.5828	0.2804	0.2937
	3		19.4824	19.1824	0.3	
	1		19.4201	19.0473	0.3728	
	2	5	18.8632	18.5136	0.3496	0.3663
	3		19.4824	19.1059	0.3765	
	1		19.4201	18.9769	0.4432	
	2	6	18.8632	18.4385	0.4247	0.4416
	3		19.4824	19.0255	0.4569	
	1		19.4201	18.9104	0.5097	
	2	7	18.8632	18.3689	0.4943	0.5108
	3		19.4824	18.9541	0.5283	

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินต์ และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
CC 7	1		19.9833	19.9833	0	
	2	0	19.7569	19.7569	0	0
	3		19.6633	19.6633	0	
	1		19.9833	19.9124	0.0709	
	2	1	19.7569	19.6684	0.0885	0.0839
	3		19.6633	19.5709	0.0924	
	1		19.9833	19.8294	0.1539	
	2	2	19.7569	19.5824	0.1745	0.1709
	3		19.6633	19.4789	0.1844	
	1		19.9833	19.7488	0.2345	
	2	3	19.7569	19.4987	0.2582	0.2518
	3		19.6633	19.4006	0.2627	
	1		19.9833	19.6762	0.3071	
	2	4	19.7569	19.4322	0.3247	0.3185
	3		19.6633	19.3396	0.3237	
	1		19.9833	19.5981	0.3852	
	2	5	19.7569	19.3575	0.3994	0.3931
	3		19.6633	19.2686	0.3947	
	1		19.9833	19.5193	0.464	
	2	6	19.7569	19.29	0.4669	0.4657
	3		19.6633	19.1972	0.4661	
	1		19.9833	19.4463	0.537	
	2	7	19.7569	19.2248	0.5321	0.5346
	3		19.6633	19.1285	0.5348	

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินต์ และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
CC 8	1		19.3403	19.3403	0	
	2	0	19.5998	19.5998	0	0
	3		18.8407	18.8407	0	
	1		19.3403	19.2732	0.0671	
	2	1	19.5998	19.5331	0.0667	0.0715
	3		18.8407	18.7601	0.0806	
	1		19.3403	19.1939	0.1464	
	2	2	19.5998	19.4551	0.1447	0.1550
	3		18.8407	18.6668	0.1739	
	1		19.3403	19.1156	0.2247	
	2	3	19.5998	19.3842	0.2156	0.2324
	3		18.8407	18.5838	0.2569	
	1		19.3403	19.0567	0.2836	
	2	4	19.5998	19.3247	0.2751	0.2681
	3		18.8407	18.5951	0.2456	
	1		19.3403	18.9859	0.3544	
	2	5	19.5998	19.2488	0.351	0.3709
	3		18.8407	18.4333	0.4074	
	1		19.3403	18.9138	0.4265	
	2	6	19.5998	19.1888	0.411	0.4288
	3		18.8407	18.3918	0.4489	
	1		19.3403	18.7451	0.5952	
	2	7	19.5998	19.1003	0.4995	0.5454
	3		18.8407	18.2993	0.5414	

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินต์ และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
CC 9	1		19.9545	19.9545	0	
	2	0	20.1867	20.1867	0	0
	3		19.0808	19.0808	0	
	1		19.9545	19.8786	0.0759	
	2	1	20.1867	20.1105	0.0762	0.0734
	3		19.0808	19.0127	0.0681	
	1		19.9545	19.7935	0.161	
	2	2	20.1867	20.0255	0.1612	0.1554
	3		19.0808	18.9369	0.1439	
	1		19.9545	19.7068	0.2477	
	2	3	20.1867	19.9435	0.2432	0.2385
	3		19.0808	18.8561	0.2247	
	1		19.9545	19.6329	0.3216	
	2	4	20.1867	19.8726	0.3141	0.3097
	3		19.0808	18.7873	0.2935	
	1		19.9545	19.4527	0.5018	
	2	5	20.1867	19.7925	0.3942	0.4212
	3		19.0808	18.7132	0.3676	
	1		19.9545	19.4707	0.4838	
	2	6	20.1867	19.7227	0.464	0.4427
	3		19.0808	18.7004	0.3804	
	1		19.9545	19.4042	0.5503	
	2	7	20.1867	19.7038	0.4829	0.5157
	3		19.0808	18.5669	0.5139	

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินต์ และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
CC 10	1		19.2767	19.2767	0	
	2	0	19.3146	19.3146	0	0
	3		19.4773	19.4773	0	
	1		19.2767	19.2107	0.066	
	2	1	19.3146	19.2464	0.0682	0.0733
	3		19.4773	19.3915	0.0858	
	1		19.2767	19.1286	0.1481	
	2	2	19.3146	19.16	0.1546	0.1933
	3		19.4773	19.2001	0.2772	
	1		19.2767	19.0447	0.232	
	2	3	19.3146	19.0789	0.2357	0.2808
	3		19.4773	19.1027	0.3746	
	1		19.2767	18.9758	0.3009	
	2	4	19.3146	19.0091	0.3055	0.3507
	3		19.4773	19.0317	0.4456	
	1		19.2767	18.8964	0.3803	
	2	5	19.3146	18.9281	0.3865	0.4142
	3		19.4773	19.0016	0.4757	
	1		19.2767	18.8208	0.4559	
	2	6	19.3146	18.8521	0.4625	0.4652
	3		19.4773	19.0001	0.4772	
	1		19.2767	18.749	0.5277	
	2	7	19.3146	18.6801	0.6345	0.5817
	3		19.4773	18.8945	0.5828	

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินต์ และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
CC 11	1		19.386	19.386	0	
	2	0	19.6249	19.6249	0	0
	3		19.3295	19.3295	0	
	1		19.386	19.296	0.09	
	2	1	19.6249	19.5553	0.0696	0.0806
	3		19.3295	19.2472	0.0823	
	1		19.386	19.2088	0.1772	
	2	2	19.6249	19.4641	0.1608	0.1679
	3		19.3295	19.1638	0.1657	
	1		19.386	19.1183	0.2677	
	2	3	19.6249	19.3701	0.2548	0.2601
	3		19.3295	19.0718	0.2577	
	1		19.386	19.0491	0.3369	
	2	4	19.6249	19.2926	0.3323	0.3345
	3		19.3295	18.9953	0.3342	
	1		19.386	18.9626	0.4234	
	2	5	19.6249	19.2047	0.4202	0.4205
	3		19.3295	18.9117	0.4178	
	1		19.386	18.8786	0.5074	
	2	6	19.6249	19.1172	0.5077	0.5052
	3		19.3295	18.8289	0.5006	
	1		19.386	18.8091	0.5769	
	2	7	19.6249	19.0354	0.5895	0.5807
	3		19.3295	18.7538	0.5757	

ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจากไคโตซาน อัลจินต์ และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
CC 12	1		18.466	18.466	0	
	2	0	19.4737	19.4737	0	0
	3		18.8517	18.8517	0	
	1		18.466	18.3863	0.0797	
	2	1	19.4737	19.4021	0.0716	0.0783
	3		18.8517	18.768	0.0837	
	1		18.466	18.2882	0.1778	
	2	2	19.4737	19.2905	0.1832	0.1818
	3		18.8517	18.6673	0.1844	
	1		18.466	18.1977	0.2683	
	2	3	19.4737	19.2072	0.2665	0.3037
	3		18.8517	18.4755	0.3762	
	1		18.466	18.1213	0.3447	
	2	4	19.4737	19.1325	0.3412	0.3463
	3		18.8517	18.4988	0.3529	
	1		18.466	18.0333	0.4327	
	2	5	19.4737	19.1525	0.3212	0.4003
	3		18.8517	18.4047	0.447	
	1		18.466	17.9458	0.5202	
	2	6	19.4737	18.9589	0.5148	0.5090
	3		18.8517	18.3596	0.4921	
	1		18.466	17.8677	0.5983	
	2	7	19.4737	18.9097	0.564	0.5917
	3		18.8517	18.2389	0.6128	

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	Slop (g/hr)	time (day)	Area (m ²)	WVTR(g/m ² day)
ww 1	0.109	24	0.000907	2884.23
ww 2	0.114	24	0.000907	3016.54
ww 3	0.104	24	0.000907	2751.93
ww4	0.101	24	0.000907	2672.55
ww 5	0.107	24	0.000907	2831.31
ww 6	0.101	24	0.000907	2672.55
ww 7	0.101	24	0.000907	2672.55
ww 8	0.099	24	0.000907	2619.63
ww 9	0.1	24	0.000907	2646.09
ww 10	0.102	24	0.000907	2699.01
ww 11	0.1	24	0.000907	2646.09
ww 12	0.096	24	0.000907	2540.24

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
ww 1	1		20.7451	20.7451	0	
	2	0	20.7451	20.7451	0	0
	3		20.7451	20.7451	0	
	1		20.7451	20.6264	0.1187	
	2	1	20.7451	20.3686	0.3765	0.2172
	3		20.7451	20.5887	0.1564	
	1		20.7451	20.5318	0.2133	
	2	2	20.7451	20.2255	0.5196	0.2631
	3		20.7451	20.6886	0.0565	
	1		20.7451	20.4325	0.3126	
	2	3	20.7451	20.1057	0.6394	0.3679
	3		20.7451	20.5934	0.1517	
	1		20.7451	20.3083	0.4368	
	2	4	20.7451	19.9365	0.8086	0.5019
	3		20.7451	20.4848	0.2603	
	1		20.7451	20.2181	0.527	
	2	5	20.7451	19.8142	0.9309	0.6043
	3		20.7451	20.39	0.3551	
	1		20.7451	20.1365	0.6086	
	2	6	20.7451	19.7211	1.024	0.6965
	3		20.7451	20.2883	0.4568	
	1		20.7451	20.0295	0.7156	
	2	7	20.7451	19.6061	1.139	0.8072
	3		20.7451	20.178	0.5671	

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
ww 2	1		17.8351	17.8351	0	
	2	0	18.5176	18.5176	0	0
	3		20.3948	20.3948	0	
	1		17.8351	17.6665	0.1686	
	2	1	18.5176	18.3538	0.1638	0.1561
	3		20.3948	20.2588	0.136	
	1		17.8351	17.5164	0.3187	
	2	2	18.5176	18.2115	0.3061	0.2942
	3		20.3948	20.1369	0.2579	
	1		17.8351	17.4106	0.4245	
	2	3	18.5176	18.1083	0.4093	0.3976
	3		20.3948	20.0358	0.359	
	1		17.8351	17.2875	0.5476	
	2	4	18.5176	17.9984	0.5192	0.5125
	3		20.3948	19.9242	0.4706	
	1		17.8351	17.1917	0.6434	
	2	5	18.5176	17.9019	0.6157	0.6090
	3		20.3948	19.8268	0.568	
	1		17.8351	17.0819	0.7532	
	2	6	18.5176	17.797	0.7206	0.7166
	3		20.3948	19.7189	0.6759	
	1		17.8351	16.9744	0.8607	
	2	7	18.5176	17.6806	0.837	0.8267
	3		20.3948	19.6124	0.7824	

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
ww 3	1		19.4607	19.4607	0	
	2	0	20.2599	20.2599	0	0
	3		20.53	20.53	0	
	1		19.4607	19.3781	0.0826	
	2	1	20.2599	20.1299	0.13	0.1159
	3		20.53	20.395	0.135	
	1		19.4607	19.2969	0.1638	
	2	2	20.2599	20.0319	0.228	0.2152
	3		20.53	20.2763	0.2537	
	1		19.4607	19.2111	0.2496	
	2	3	20.2599	19.9413	0.3186	0.3101
	3		20.53	20.1679	0.3621	
	1		19.4607	19.0823	0.3784	
	2	4	20.2599	19.8099	0.45	0.4338
	3		20.53	20.057	0.473	
	1		19.4607	19.0058	0.4549	
	2	5	20.2599	19.7308	0.5291	0.5246
	3		20.53	19.9402	0.5898	
	1		19.4607	18.9227	0.538	
	2	6	20.2599	19.6352	0.6247	0.6214
	3		20.53	19.8286	0.7014	
	1		19.4607	18.8002	0.6605	
	2	7	20.2599	19.5187	0.7412	0.7382
	3		20.53	19.7172	0.8128	

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
ww 4	1		20.4036	20.4036	0	
	2	0	20.1041	20.1041	0	0
	3		20.311	20.311	0	
	1		20.4036	20.2553	0.1483	
	2	1	20.1041	20.0045	0.0996	0.1219
	3		20.311	20.1932	0.1178	
	1		20.4036	20.1471	0.2565	
	2	2	20.1041	19.9045	0.1996	0.2233
	3		20.311	20.0971	0.2139	
	1		20.4036	20.0519	0.3517	
	2	3	20.1041	19.8642	0.2399	0.2980
	3		20.311	20.0085	0.3025	
	1		20.4036	19.9231	0.4805	
	2	4	20.1041	19.7615	0.3426	0.4170
	3		20.311	19.883	0.428	
	1		20.4036	19.837	0.5666	
	2	5	20.1041	19.6519	0.4522	0.5077
	3		20.311	19.8068	0.5042	
	1		20.4036	19.7537	0.6499	
	2	6	20.1041	19.5549	0.5492	0.6344333
	3		20.311	19.6068	0.7042	
	1		20.4036	19.6512	0.7524	
	2	7	20.1041	19.4347	0.6694	0.7140
	3		20.311	19.5908	0.7202	

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
ww 5	1		20.4211	20.4211	0	
	2	0	19.3228	19.3228	0	0
	3		20.1151	20.1151	0	
	1		20.4211	20.2649	0.1562	
	2	1	19.3228	19.1825	0.1403	0.1426
	3		20.1151	19.9837	0.1314	
	1		20.4211	20.1502	0.2709	
	2	2	19.3228	19.0599	0.2629	0.2548
	3		20.1151	19.8844	0.2307	
	1		20.4211	20.0505	0.3706	
	2	3	19.3228	18.9681	0.3547	0.3502
	3		20.1151	19.7898	0.3253	
	1		20.4211	19.9296	0.4915	
	2	4	19.3228	18.8548	0.468	0.4667
	3		20.1151	19.6744	0.4407	
	1		20.4211	19.8485	0.5726	
	2	5	19.3228	18.7479	0.5749	0.5604
	3		20.1151	19.5815	0.5336	
	1		20.4211	19.7648	0.6563	
	2	6	19.3228	18.6488	0.674	0.6583
	3		20.1151	19.4704	0.6447	
	1		20.4211	19.6533	0.7678	
	2	7	19.3228	18.5286	0.7942	0.7733
	3		20.1151	19.3572	0.7579	

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
ww 6	1		20.1533	20.1533	0	
	2	0	19.1471	19.1471	0	0
	3		19.5306	19.5306	0	
	1		20.1533	20.0072	0.1461	
	2	1	19.1471	19.0506	0.0965	0.1112
	3		19.5306	19.4397	0.0909	
	1		20.1533	19.9696	0.1837	
	2	2	19.1471	18.9629	0.1842	0.1787
	3		19.5306	19.3625	0.1681	
	1		20.1533	19.7625	0.3908	
	2	3	19.1471	18.8693	0.2778	0.3683
	3		19.5306	19.0943	0.4363	
	1		20.1533	19.6528	0.5005	
	2	4	19.1471	18.7689	0.3782	0.4792
	3		19.5306	18.9718	0.5588	
	1		20.1533	19.5409	0.6124	
	2	5	19.1471	18.6632	0.4839	0.6514
	3		19.5306	18.6727	0.8579	
	1		20.1533	19.4323	0.721	
	2	6	19.1471	18.5705	0.5766	0.7880
	3		19.5306	18.4643	1.0663	
	1		20.1533	19.3116	0.8417	
	2	7	19.1471	18.4658	0.6813	0.9317
	3		19.5306	18.2584	1.2722	

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
ww 7	1		20.1668	20.1668	0	
	2	0	19.7045	19.7045	0	0
	3		19.7267	19.7267	0	
	1		20.1668	20.0764	0.0904	
	2	1	19.7045	19.583	0.1215	0.0983
	3		19.7267	19.6436	0.0831	
	1		20.1668	19.9891	0.1777	
	2	2	19.7045	19.4825	0.222	0.1878
	3		19.7267	19.5631	0.1636	
	1		20.1668	19.9024	0.2644	
	2	3	19.7045	19.3659	0.3386	0.2849
	3		19.7267	19.4751	0.2516	
	1		20.1668	19.7698	0.397	
	2	4	19.7045	19.2472	0.4573	0.4057
	3		19.7267	19.3638	0.3629	
	1		20.1668	19.6839	0.4829	
	2	5	19.7045	19.1496	0.5549	0.4954
	3		19.7267	19.2783	0.4484	
	1		20.1668	19.5679	0.5989	
	2	6	19.7045	19.0623	0.6422	0.5977
	3		19.7267	19.1748	0.5519	
	1		20.1668	19.4435	0.7233	
	2	7	19.7045	18.9551	0.7494	0.7140
	3		19.7267	19.0575	0.6692	

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
ww 8	1		20.1109	20.1109	0	
	2	0	19.5688	19.5688	0	0
	3		20.2466	20.2466	0	
	1		20.1109	20.0118	0.0991	
	2	1	19.5688	19.4779	0.0909	0.1010
	3		20.2466	20.1337	0.1129	
	1		20.1109	19.9218	0.1891	
	2	2	19.5688	19.3791	0.1897	0.2029
	3		20.2466	20.0168	0.2298	
	1		20.1109	19.824	0.2869	
	2	3	19.5688	19.2911	0.2777	0.2933
	3		20.2466	19.9314	0.3152	
	1		20.1109	19.7166	0.3943	
	2	4	19.5688	19.1902	0.3786	0.3966
	3		20.2466	19.8297	0.4169	
	1		20.1109	19.6214	0.4895	
	2	5	19.5688	19.0873	0.4815	0.4966
	3		20.2466	19.7278	0.5188	
	1		20.1109	19.5342	0.5767	
	2	6	19.5688	18.9872	0.5816	0.5946
	3		20.2466	19.6211	0.6255	
	1		20.1109	19.4281	0.6828	
	2	7	19.5688	18.8772	0.6916	0.7012
	3		20.2466	19.5173	0.7293	

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
ww 9	1		20.2319	20.2319	0	
	2	0	19.1089	19.1089	0	0
	3		19.0287	19.0287	0	
	1		20.2319	20.1279	0.104	
	2	1	19.1089	19.0051	0.1038	0.1100
	3		19.0287	18.9065	0.1222	
	1		20.2319	20.0494	0.1825	
	2	2	19.1089	18.9078	0.2011	0.1934
	3		19.0287	18.8322	0.1965	
	1		20.2319	19.9635	0.2684	
	2	3	19.1089	18.8151	0.2938	0.2862
	3		19.0287	18.7324	0.2963	
	1		20.2319	19.8375	0.3944	
	2	4	19.1089	18.7076	0.4013	0.3982
	3		19.0287	18.6298	0.3989	
	1		20.2319	19.7544	0.4775	
	2	5	19.1089	18.5827	0.5262	0.4959
	3		19.0287	18.5447	0.484	
	1		20.2319	19.671	0.5609	
	2	6	19.1089	18.4604	0.6485	0.5959
	3		19.0287	18.4504	0.5783	
	1		20.2319	19.5628	0.6691	
	2	7	19.1089	18.3436	0.7653	0.7075
	3		19.0287	18.3406	0.6881	

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
ww 10	1		19.4404	19.4404	0	
	2	0	19.9126	19.9126	0	0
	3		19.3715	19.3715	0	
	1		19.4404	19.2985	0.1419	
	2	1	19.9126	19.8256	0.087	0.1060
	3		19.3715	19.2823	0.0892	
	1		19.4404	19.1945	0.2459	
	2	2	19.9126	19.739	0.1736	0.1931
	3		19.3715	19.2116	0.1599	
	1		19.4404	19.1034	0.337	
	2	3	19.9126	19.6514	0.2612	0.2788
	3		19.3715	19.1332	0.2383	
	1		19.4404	19.0034	0.437	
	2	4	19.9126	19.5456	0.367	0.3802
	3		19.3715	19.035	0.3365	
	1		19.4404	18.9028	0.5376	
	2	5	19.9126	19.4395	0.4731	0.4804
	3		19.3715	18.941	0.4305	
	1		19.4404	18.8788	0.5616	
	2	6	19.9126	19.3462	0.5664	0.5988
	3		19.3715	18.703	0.6685	
	1		19.4404	18.705	0.7354	
	2	7	19.9126	19.137	0.7756	0.7433
	3		19.3715	18.6526	0.7189	

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
ww 11	1		19.4314	19.4314	0	
	2	0	19.4032	19.4032	0	0
	3		18.9073	18.9073	0	
	1		19.4314	19.3179	0.1135	
	2	1	19.4032	19.3	0.1032	0.1001
	3		18.9073	18.8236	0.0837	
	1		19.4314	19.2297	0.2017	
	2	2	19.4032	19.218	0.1852	0.1858
	3		18.9073	18.7368	0.1705	
	1		19.4314	19.1402	0.2912	
	2	3	19.4032	19.1261	0.2771	0.2748
	3		18.9073	18.6512	0.2561	
	1		19.4314	19.0157	0.4157	
	2	4	19.4032	19.0057	0.3975	0.3932
	3		18.9073	18.5409	0.3664	
	1		19.4314	18.9318	0.4996	
	2	5	19.4032	18.9203	0.4829	0.4800
	3		18.9073	18.4498	0.4575	
	1		19.4314	18.8159	0.6155	
	2	6	19.4032	18.8106	0.5926	0.5938
	3		18.9073	18.3339	0.5734	
	1		19.4314	18.6938	0.7376	
	2	7	19.4032	18.69	0.7132	0.7142
	3		18.9073	18.2155	0.6918	

ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงการบันทึกผลการทดลองของอัตราการปล่อยผ่านไอน้ำ (Water vapour transmission rate) ของไฮโดรเจลจาก NOCC อัลจิเนต และถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง ก่อนการทดลอง (g)	น้ำหนักขวดตัวอย่าง หลังการทดลอง (g)	น้ำหนักของน้ำ ที่หายไป	ค่าเฉลี่ย
ww 12	1		19.9837	19.9837	0	
	2	0	19.801	19.801	0	0
	3		20.1468	20.1468	0	
	1		19.9837	19.8863	0.0974	
	2	1	19.801	19.7246	0.0764	0.0923
	3		20.1468	20.0438	0.103	
	1		19.9837	19.8081	0.1756	
	2	2	19.801	19.627	0.174	0.1756
	3		20.1468	19.9695	0.1773	
	1		19.9837	19.714	0.2697	
	2	3	19.801	19.5299	0.2711	0.2727
	3		20.1468	19.8695	0.2773	
	1		19.9837	19.6122	0.3715	
	2	4	19.801	19.421	0.38	0.3783
	3		20.1468	19.7634	0.3834	
	1		19.9837	19.5247	0.459	
	2	5	19.801	19.3193	0.4817	0.4697
	3		20.1468	19.6785	0.4683	
	1		19.9837	19.4412	0.5425	
	2	6	19.801	19.2126	0.5884	0.5698
	3		20.1468	19.5682	0.5786	
	1		19.9837	19.3468	0.6369	
	2	7	19.801	19.1059	0.6951	0.6743
	3		20.1468	19.4559	0.6909	

ตารางที่ ก.11 ตารางแสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงขาด (Tensile strength) ของแผ่นฟิล์ม ไคโตซาน/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ (ทำการดึงชิ้นงาน 3 ชิ้น)

ตัวอย่าง	CS:ALG:AC	Tensile strength at break (MPa)	%CV
CC1	0.5:1:0.2	6.70	0.30
CC2	0.5:1:0.3	6.00	0.30
CC3	0.5:1:0.4	6.76	0.30
CC4	1:1:0.2	12.10	0.34
CC5	1:1:0.3	8.43	0.30
CC6	1:1:0.4	5.81	0.28
CC7	1.5:1:0.2	9.81	0.30
CC8	1.5:1:0.3	8.64	0.32
CC9	1.5:1:0.4	8.22	0.27
CC10	0.5:1:0	12.18	0.32
CC11	1:1:0	17.60	0.38
CC12	1.5:1:0	13.32	0.37

ตารางที่ 12 ตารางแสดงผลการทดสอบการยืดตัว (% Elongation) ของแผ่นฟิล์ม ไคโตซาน/อัลจิเนต-ถ่านกัมมันต์ (ทำการดึงขึ้นงาน 3 ชั่วโมง)

ตัวอย่าง	CS:ALG:AC	Elongation at break (%)	%CV
CC1	0.5:1:0.2	19.89	0.32
CC2	0.5:1:0.3	20.83	0.32
CC 3	0.5:1:0.4	23.03	0.31
CC 4	1:1:0.2	15.31	0.31
CC 5	1:1:0.3	22.27	0.31
CC 6	1:1:0.4	26.40	0.31
CC 7	1.5:1:0.2	20.84	0.31
CC 8	1.5:1:0.3	22.22	0.31
CC 9	1.5:1:0.4	31.47	0.31
CC 10	0.5:1:0	15.54	0.32
CC 11	1.5:1:0	6.37	0.33
CC 12	1:1:0	9.53	0.33

ตารางที่ ก.13 ตารางแสดงผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงขาด (Tensile strength) ของแผ่นฟิล์ม NOCC/อัลจินต-ถ่านกัมมันต์ (ทำการดึงขึ้นงาน 3 ชั่วโมง)

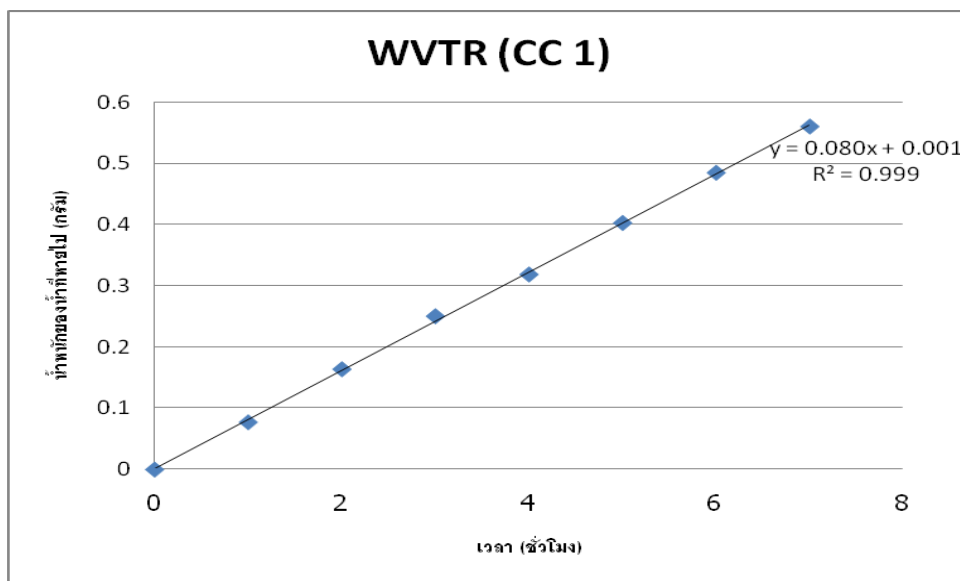
ตัวอย่าง	NOCC:ALG:AC	Tensile strength at break (MPa)	%CV
ww 1	0.5:1:0.2	7.74	0.36
ww 2	0.5:1:0.3	5.67	0.28
ww 3	0.5:1:0.4	4.70	0.52
ww 4	1:1:0.2	4.12	0.26
ww 5	1:1:0.3	4.90	0.45
ww 6	1:1:0.4	3.12	0.42
ww 7	1.5:1:0.2	9.09	0.55
ww 8	1.5:1:0.3	5.92	0.56
ww 9	1.5:1:0.4	3.02	0.43
ww 10	0.5:1:0	7.15	0.32
ww 11	1:1:0	5.29	0.28
ww 12	1.5:1:0	4.34	0.28

ตารางที่ 14 ตารางแสดงผลการทดสอบการยืดตัว (% Elongation) ของแผ่นฟิล์ม NOCC/อัลจินต-ถ่านกัมมันต์ (ทำการดึงขึ้นงาน 3 ชั่วโมง)

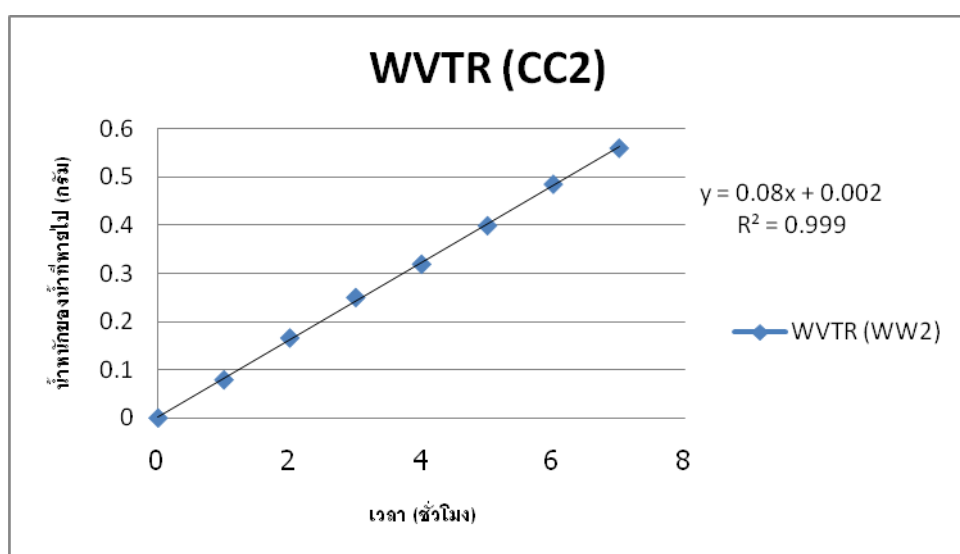
ตัวอย่าง	NOCC:ALG:AC	Elongation at break (%)	%CV
ww 1	0.5:1:0.2	12.98	0.51
ww 2	0.5:1:0.3	9.43	0.24
ww 3	0.5:1:0.4	9.12	0.42
ww 4	1:1:0.2	17.13	0.38
ww 5	1:1:0.3	12.97	0.43
ww 6	1:1:0.4	13.14	0.32
ww 7	1.5:1:0.2	10.43	0.32
ww 8	1.5:1:0.3	10.35	0.32
ww 9	1.5:1:0.4	10.97	0.32
ww 10	0.5:1:0	28.53	0.30
ww 11	1.5:1:0	21.46	0.31
ww 12	1:1:0	19.72	0.31

ภาคผนวก ข

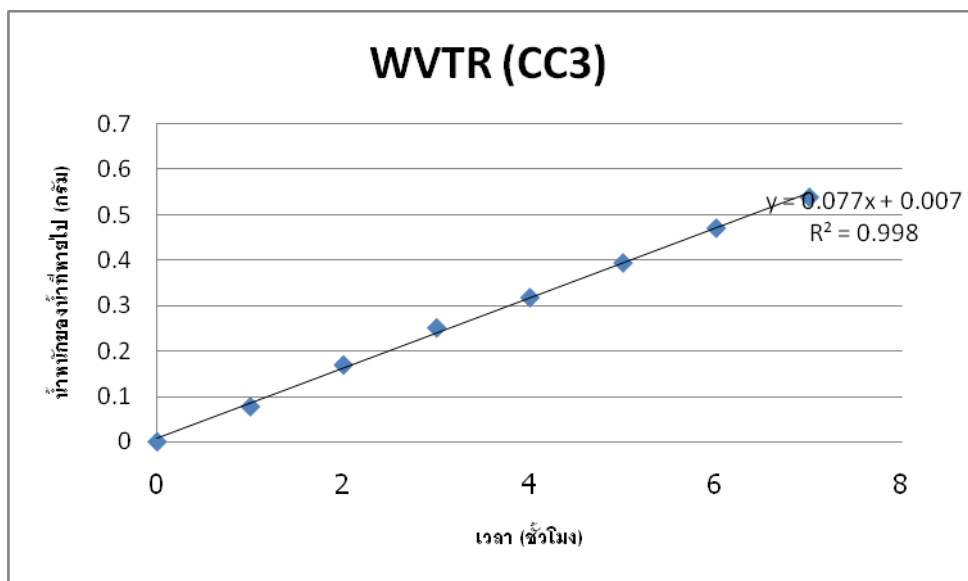
กราฟแสดงผลการทดลองการวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ



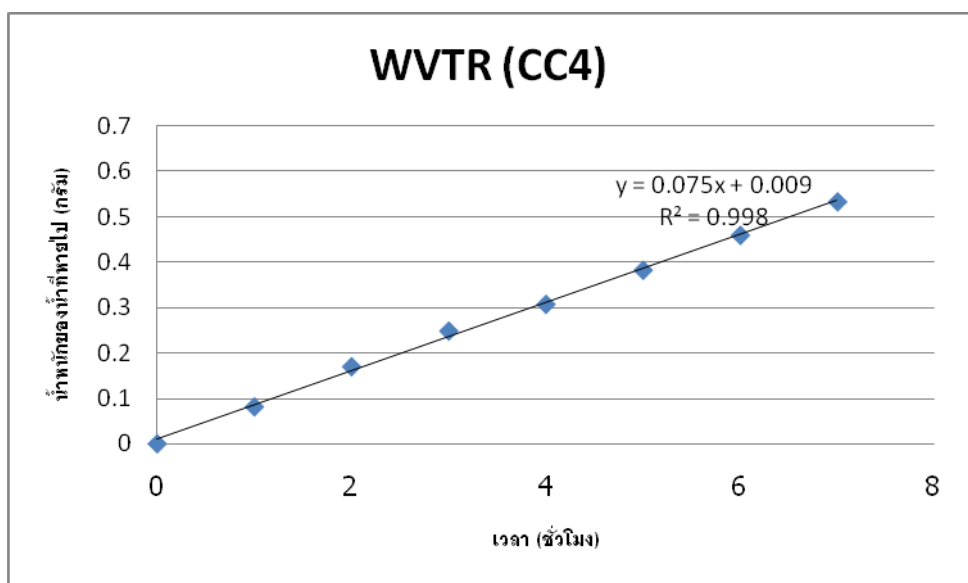
รูปที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC1)



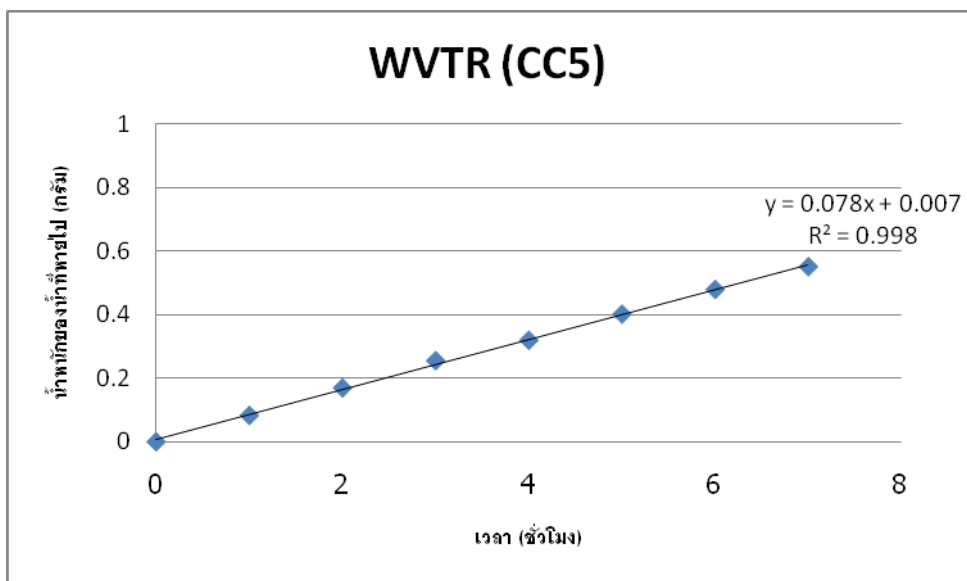
รูปที่ ข.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC2)



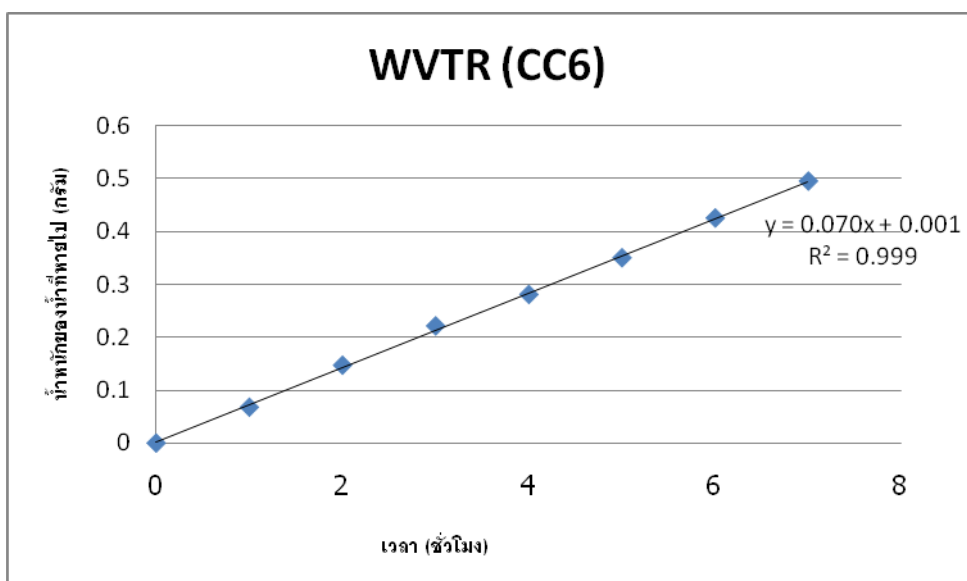
รูปที่ ข.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC3)



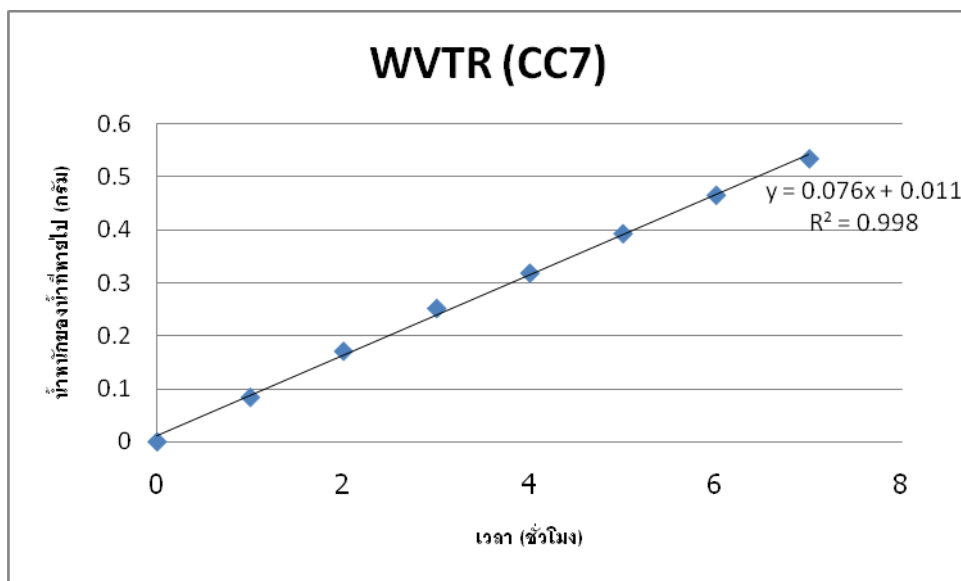
รูปที่ ข.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC4)



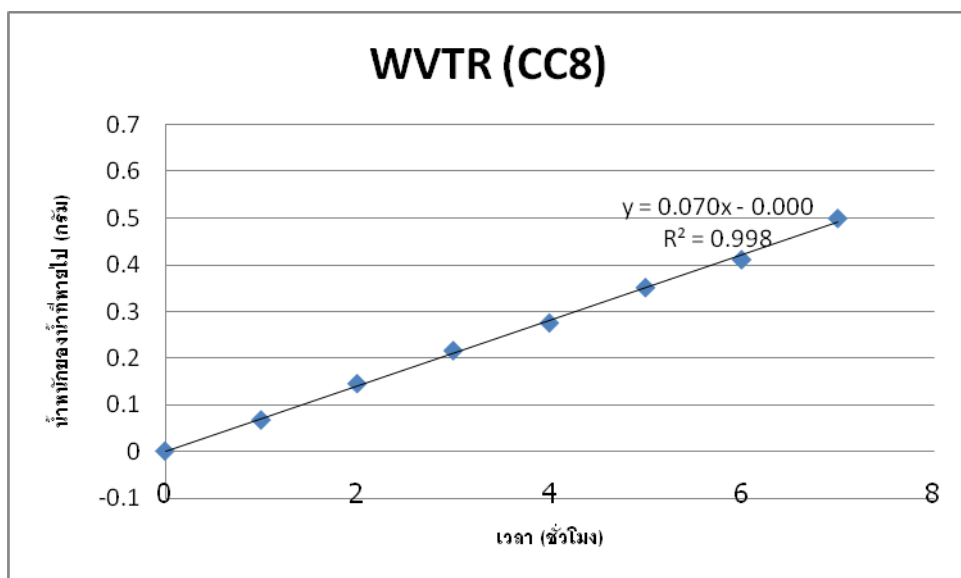
รูปที่ ข.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC5)



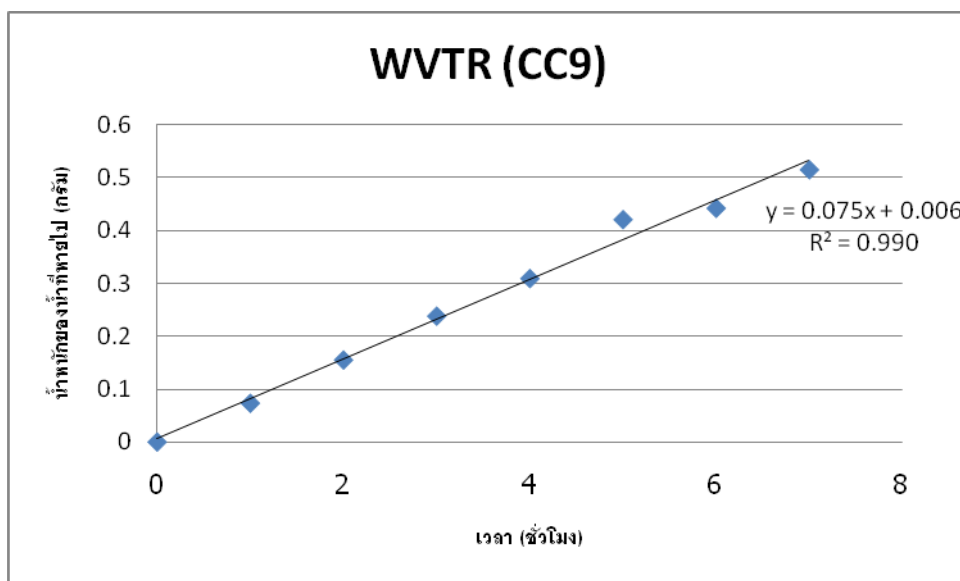
รูปที่ ข.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC6)



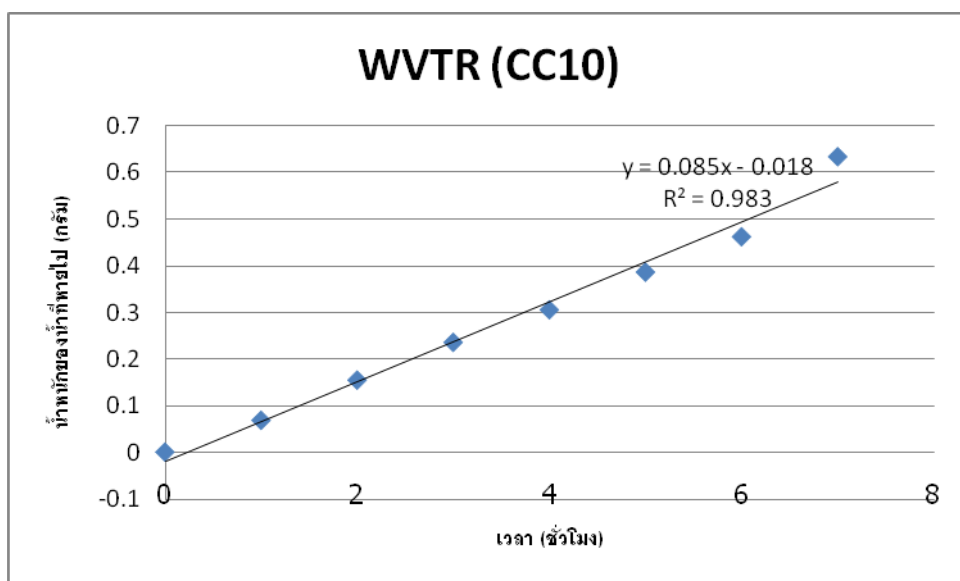
รูปที่ ข.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC7)



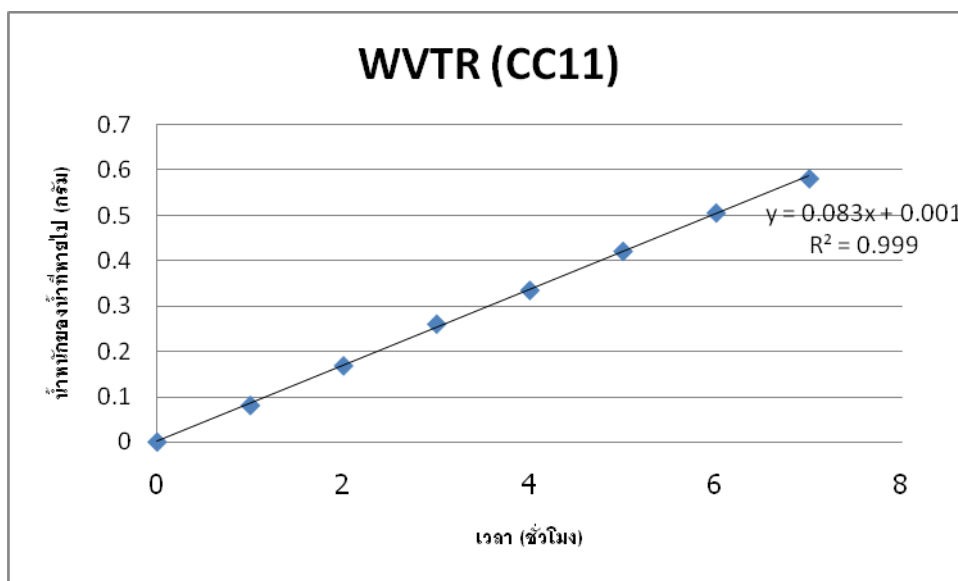
รูปที่ ข.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC8)



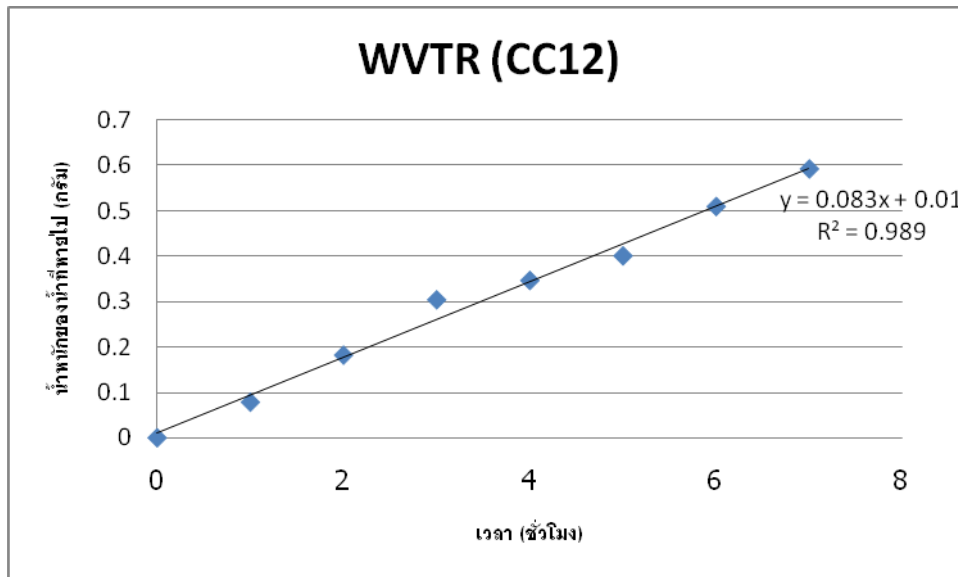
รูปที่ ข.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC9)



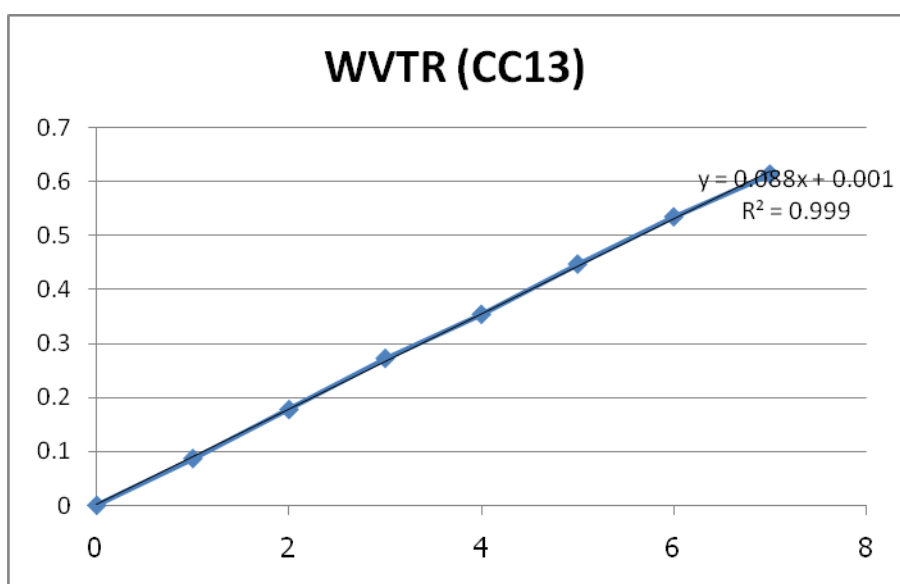
รูปที่ ข.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC10)



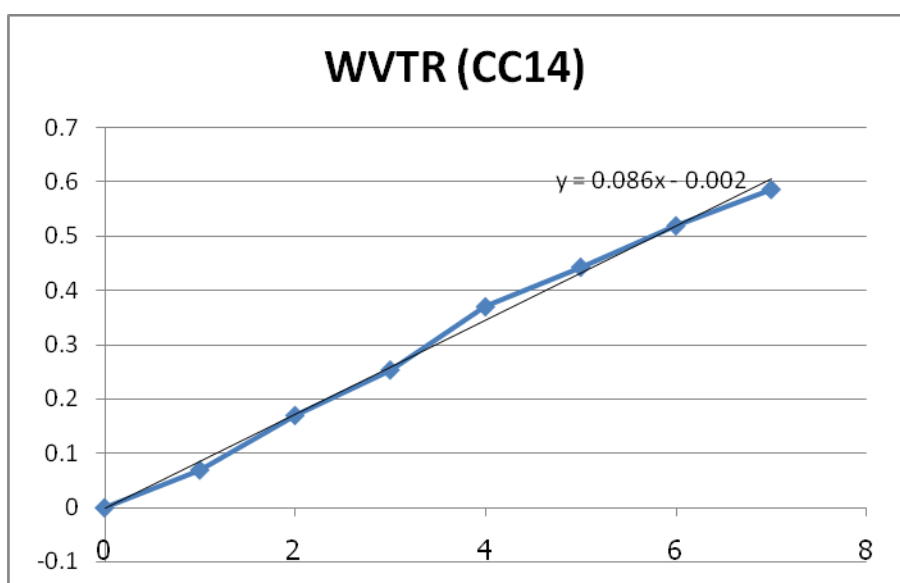
รูปที่ ข.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา CC11



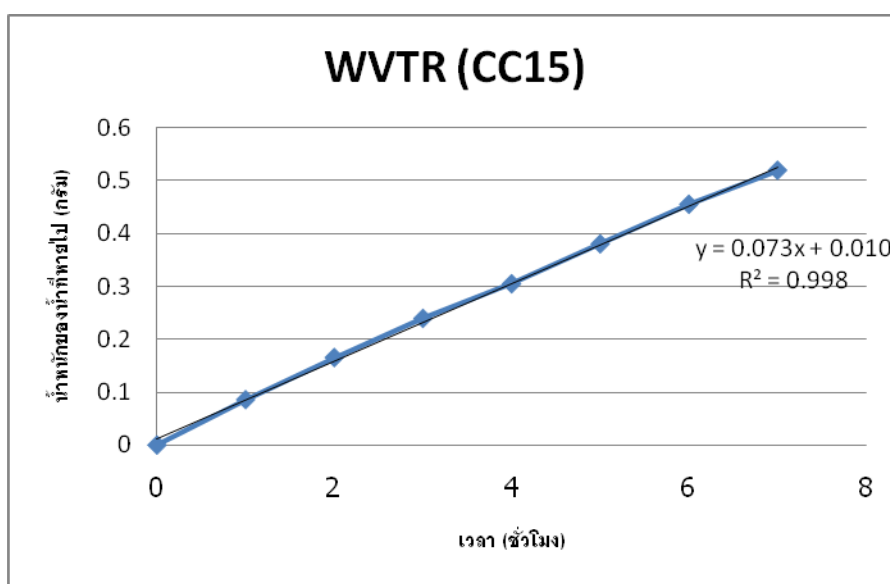
รูปที่ ข.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC12)



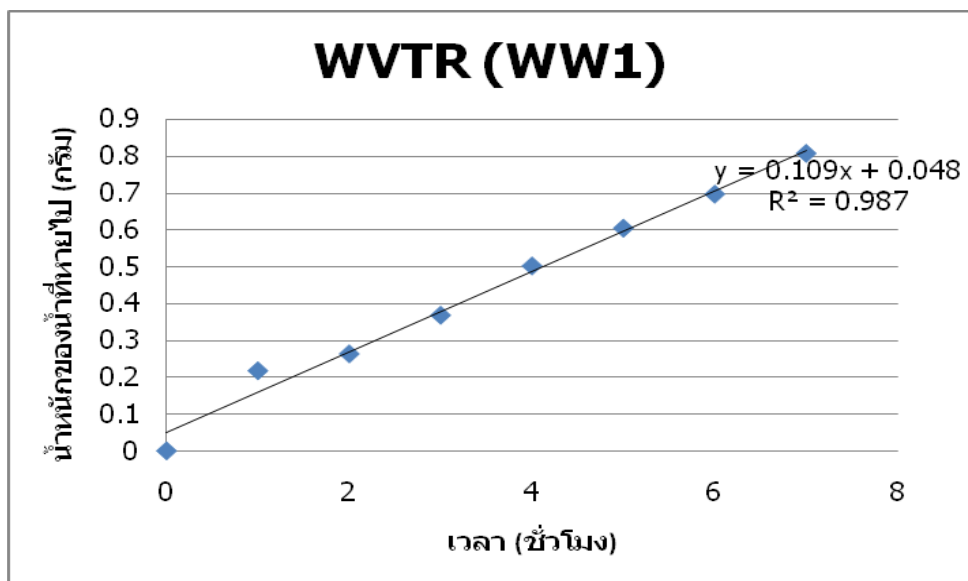
รูปที่ ข.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC13)



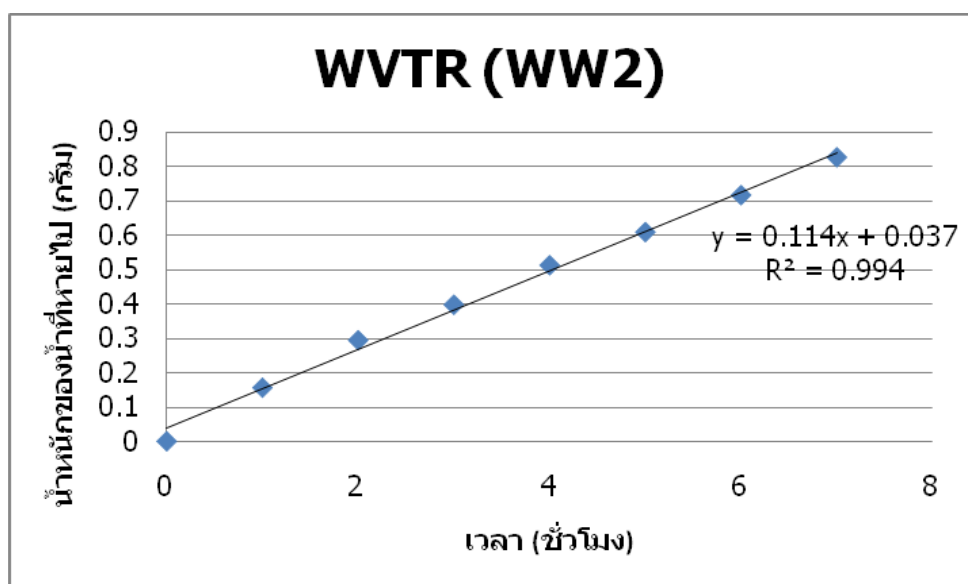
รูปที่ ข.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC14)



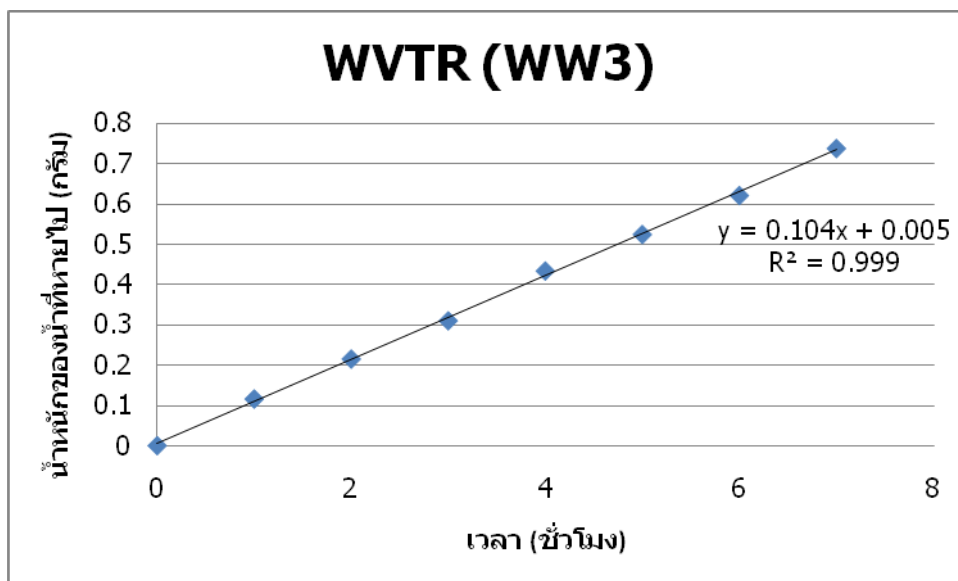
รูปที่ ข.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (CC15)



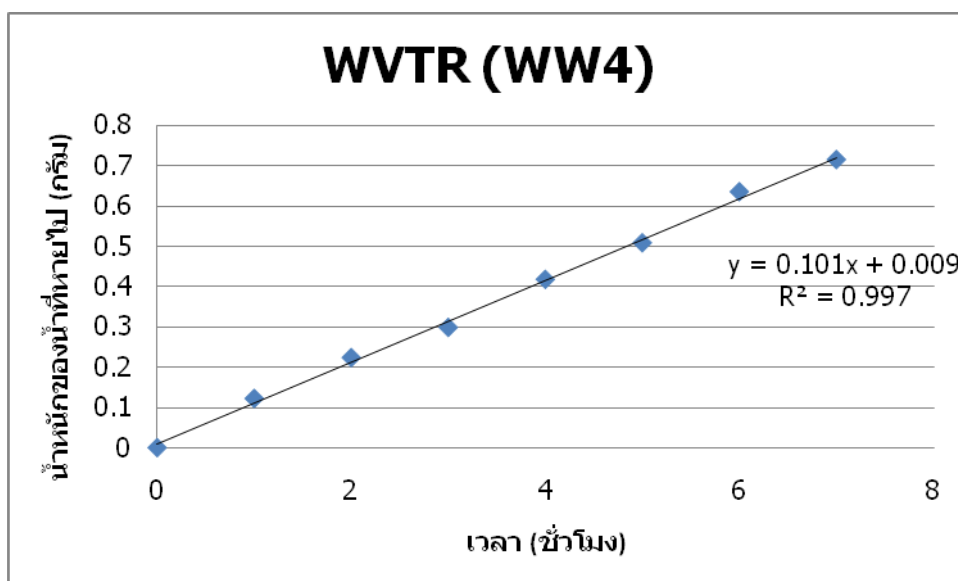
รูปที่ ข.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (WW1)



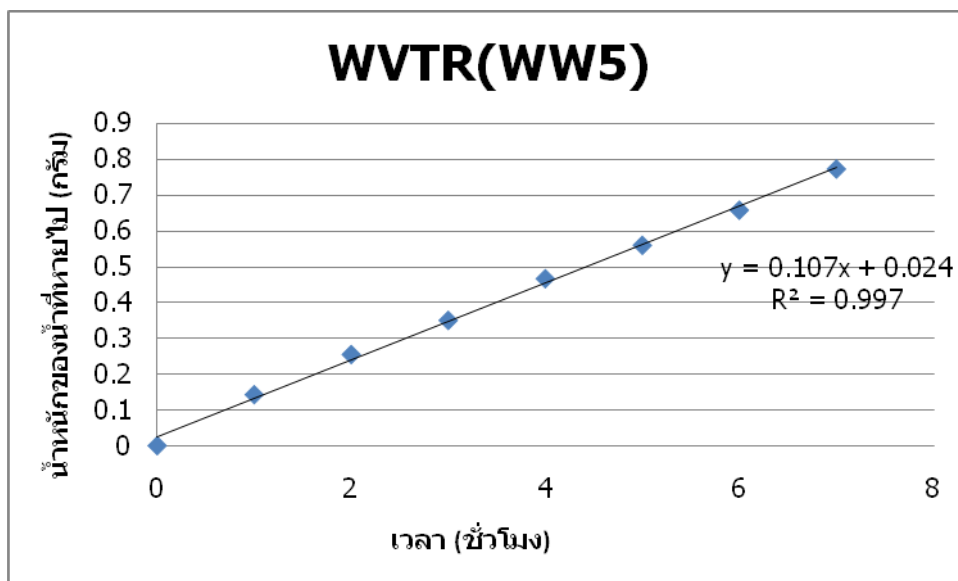
รูปที่ ข.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (WW2)



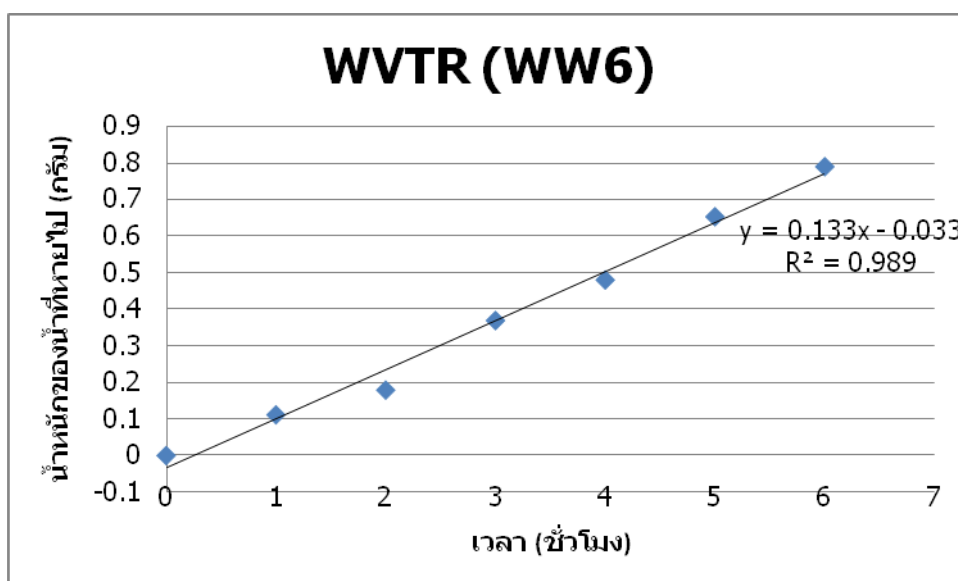
รูปที่ ข.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (WW3)



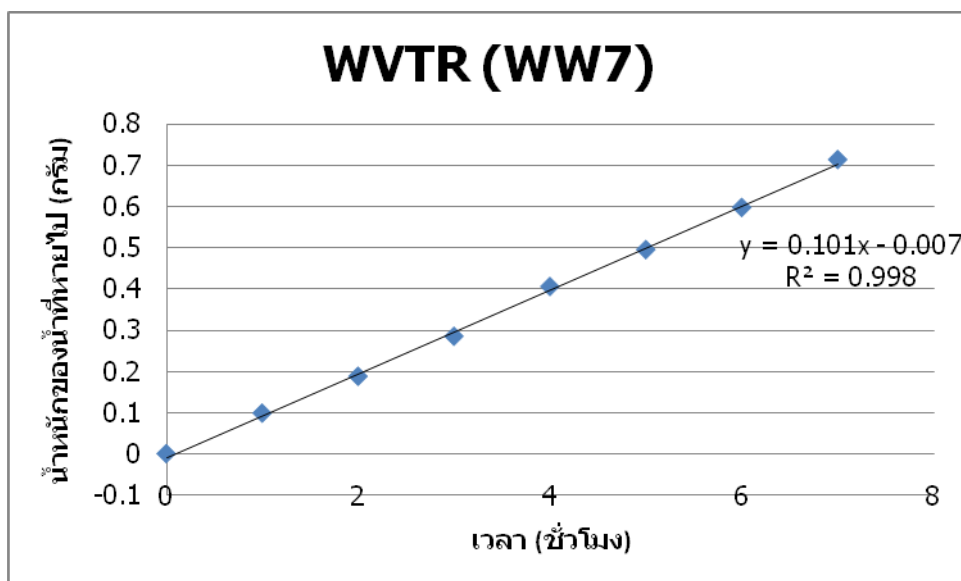
รูปที่ ข.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (WW4)



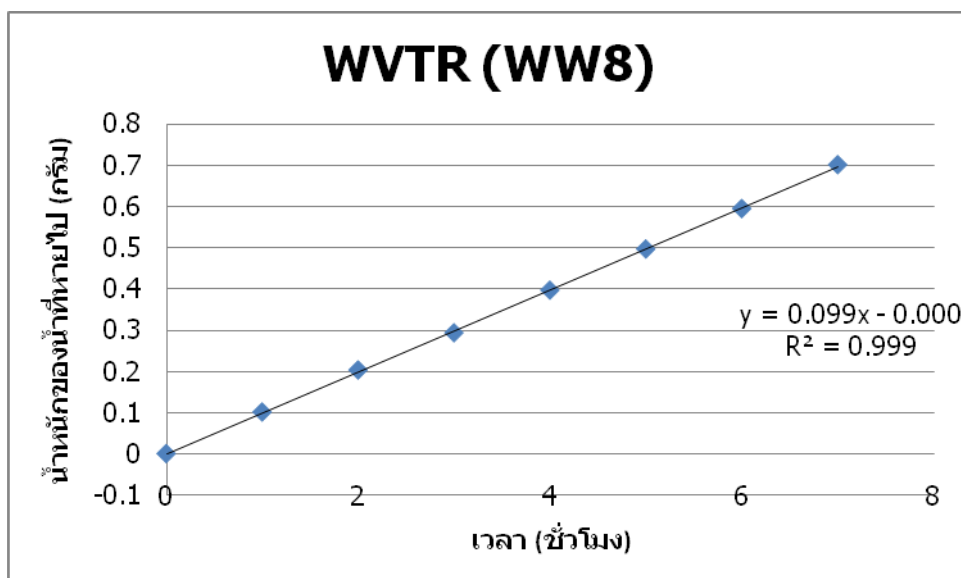
รูปที่ ข.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (WW5)



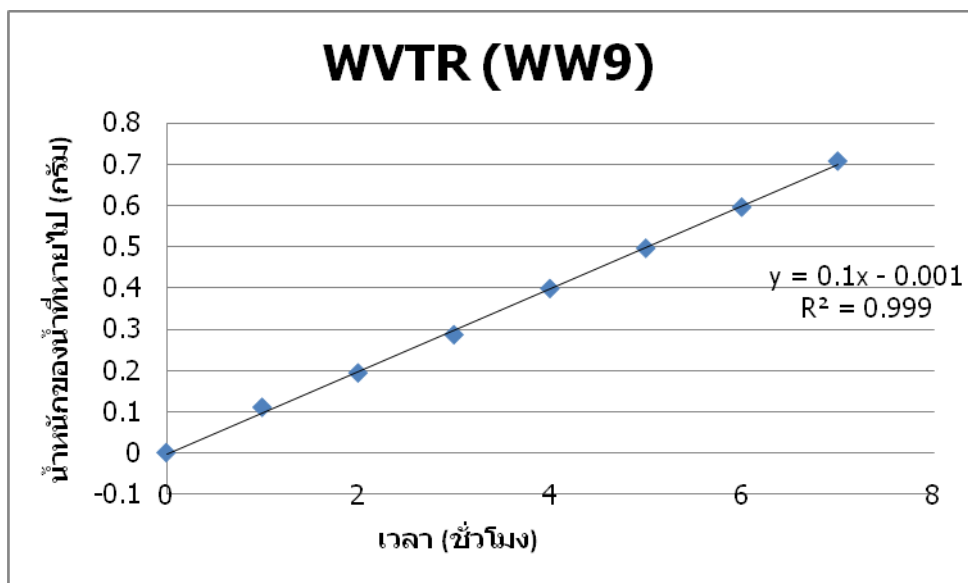
รูปที่ ข.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (WW6)



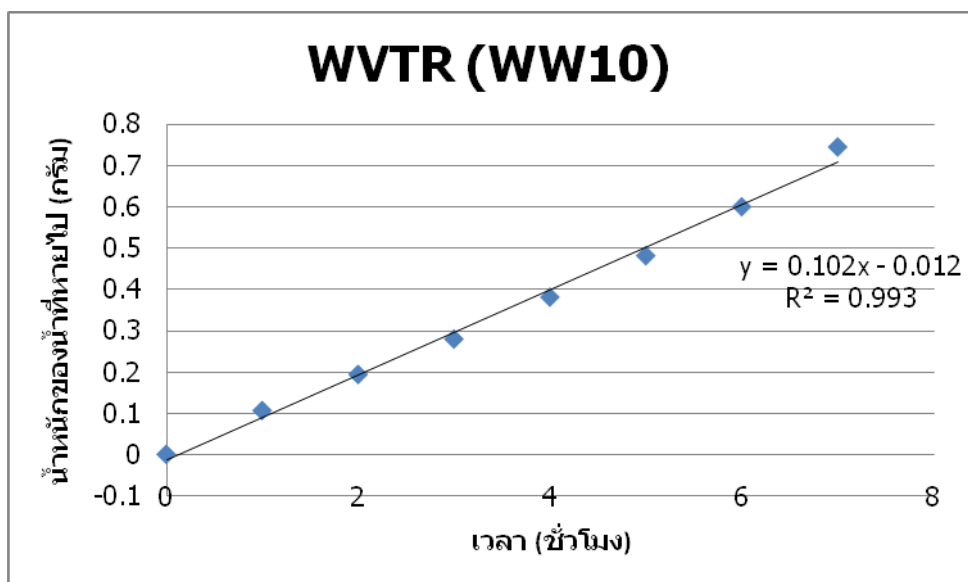
รูปที่ ข.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (WW7)



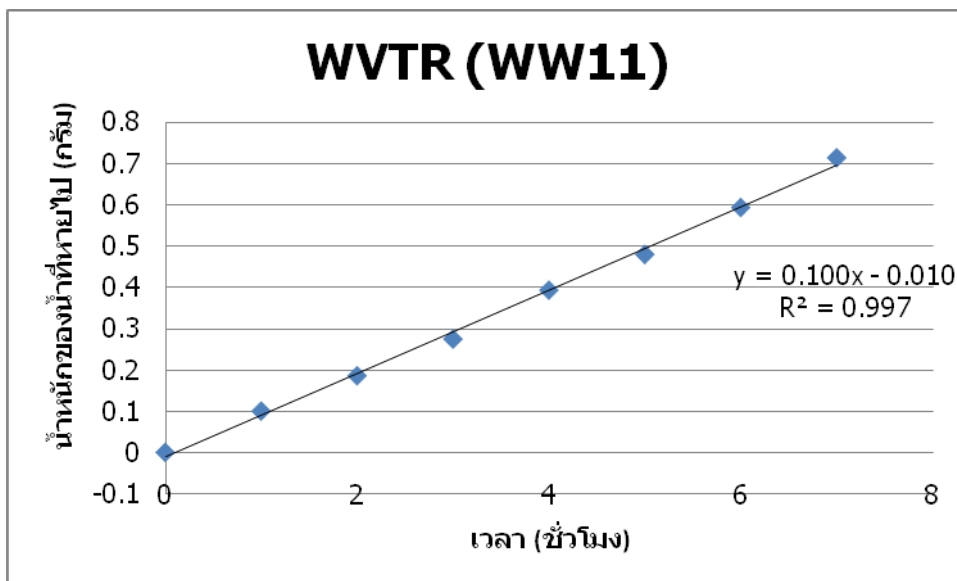
รูปที่ ข.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (WW8)



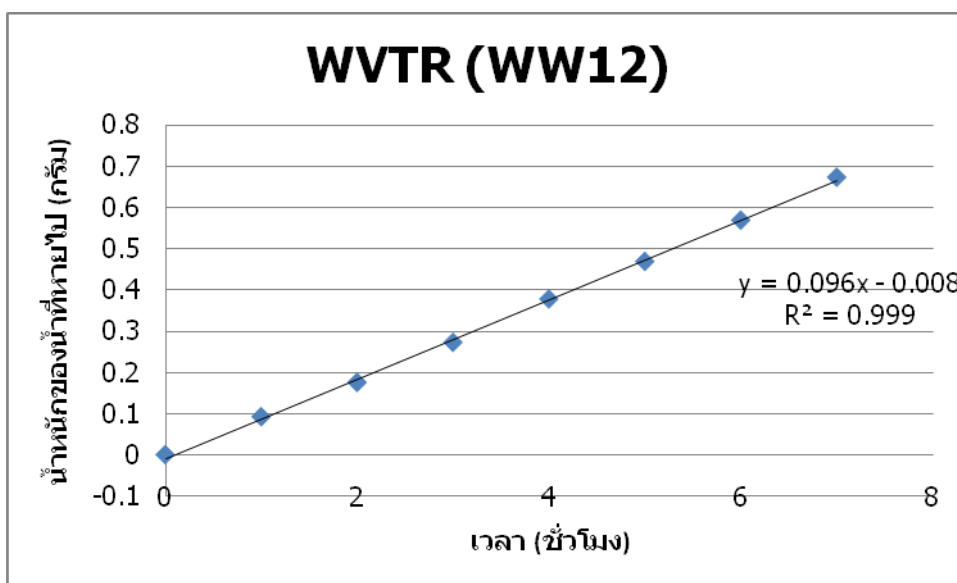
รูปที่ ข.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (WW9)



รูปที่ ข.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (WW10)



รูปที่ ข.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (WW11)



รูปที่ ข.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักน้ำที่หายไปและเวลา (WW12)

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล

นางสาววรินดา วราพันธ์

วัน เดือน ปีเกิด

21 มิถุนายน 2527

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา

ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนสวนอนันต์ พ.ศ. 2545

ระดับปริญญาตรี

วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต พ.ศ. 2549

ระดับปริญญาโท

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2553

ทุนวิจัย

โครงการสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่ (ว.1) ประจำปี 2553

ผลงานตีพิมพ์ที่ได้รับการเผยแพร่

Wainda Warapan and Saiwan Buathong, "Preparation and properties of novelchitosan/alginate-activated carbon hydrogel composite for wound dressing", **The Second International on Applied Science (2nd ICAS) and The Third International Conference on Science and Technology for Sustainable Development of the Greater Mekong Sub-region (3rd STGMS)**, March 24-25, 2011, Souphanouvong University, Luang Prabang, Lao People's Democratic Republic.