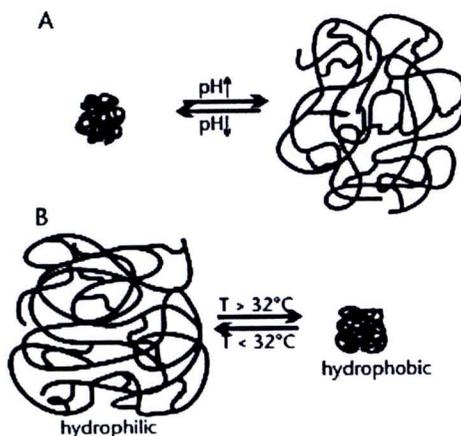


บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels)

2.1.1 ความหมายของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลเป็นกลุ่มของพอลิเมอร์ชนิดที่ชอบน้ำ (hydrophilic) มีลักษณะโครงสร้างตาข่ายหลายมิติ (three-dimensional network) โดยสายของพอลิเมอร์ของไฮโดรเจลจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะทางเคมี ซึ่งส่วนใหญ่การเชื่อมพันธะลักษณะนี้จะเชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent) แต่ก็ขึ้นอยู่กับรูปร่างและลักษณะของเจลชนิดนั้นด้วย ปกติแล้วไฮโดรเจลจะดูดซับน้ำได้น้อยกว่า 20 % ของน้ำหนักรวม แต่ถ้าดูดซับน้ำได้มากกว่า 95 % ของน้ำหนักรวม จะเรียกไฮโดรเจลชนิดนี้ว่า ซูเปอร์แอบซอร์เบนต์ (superabsorbent) ไฮโดรเจลจะมีคุณสมบัติพิเศษคือเมื่ออยู่ในน้ำปริมาณที่มากพอจะมีการพองตัวโดยการดูดซับน้ำเข้าไปในโครงสร้างตาข่าย แต่ถ้ามีการระเหยน้ำออกจนได้ไฮโดรเจลที่มีลักษณะแห้งจะเรียกว่า ซีโรเจล (xerogel) หรือ dry gel ซึ่งในกระบวนการการระเหยน้ำออกโดยไม่มีการควบคุมต่อโครงสร้างของเจลจะได้เจลที่มีลักษณะรูพรุนจะเรียกไฮโดรเจลที่มีลักษณะแห้งนี้ว่า 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 นำน้ำหนักของเจลหลังการบวมน้ำ 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 เช่นการบวมน้ำของไฮโดรเจล โดยความหนาแน่นของพันธะร่างแหนี้จะมีคุณสมบัติที่สำคัญ เช่น ความแข็งแรงของโครงสร้างและการให้อากาศและของเหลวซึมผ่านได้ ซึ่งความแข็งแรงของโครงสร้างไฮโดรเจลจะมีพื้นฐานที่สำคัญมาจากองค์ประกอบและโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่จะนำมาเตรียมไฮโดรเจลทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะตาข่าย (network) ทำให้เจลสามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณที่มาก แต่ถ้าความหนาแน่นของพันธะร่างแหน้อย สามารถปรับปรุงโดยการเพิ่มความหนาแน่นของพันธะเช่น การเติมพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งด้วยการทำให้เกิด copolymerization

การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradation)

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

ความยืดหยุ่น (Elasticity)

ในขณะที่การยืดหยุ่นของวัสดุจะมีปัญหาคือ กลไกของแรงดึงซึ่งอาจจะทำให้เจลเปลี่ยนรูปหรือขยายตัวมากเกินไป โดยพื้นฐานส่วนใหญ่แล้วค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุจะเป็นอัตราส่วนต่อแรงกด ซึ่งจะได้ผลต่อการขยายตัวของเจล ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของการยืดหยุ่นนั้นจะอ้างถึงการกลับคืนตัวของเจล หรือกล่าวคือเมื่อมีการดึงแล้วเจลที่ได้สามารถกลับคืนตัวได้ ซึ่งการบวมตัวของไฮโดรเจลจะมีความสำคัญต่อความยืดหยุ่นของเจลและจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของ โมเลกุลด้วย

2.1.3 ชนิดของไฮโดรเจล [22]

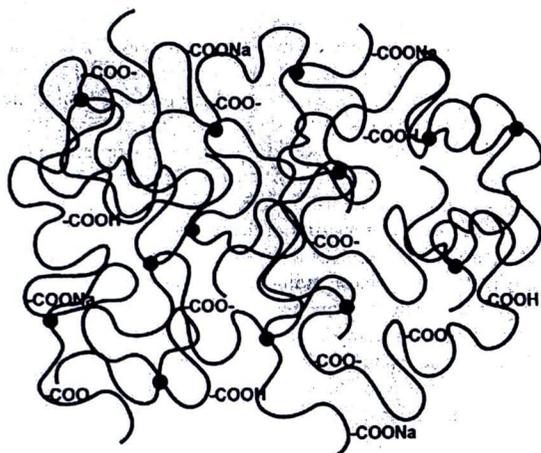
2.1.3.1 การแบ่งชนิดของไฮโดรเจลตามลักษณะการเกิดประจุในโครงสร้าง

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 โดยหมู่ที่ชอบน้ำจะทำการเชื่อมต่อน้ำกับ โมเลกุลของน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ซึ่งการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับ การเชื่อมพันธะระหว่างโครงสร้างของโมเลกุลกับพอลิเมอร์ของการดูดซับเมื่อทำการเชื่อมต่อน้ำแล้วจะทำให้สายของพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่ ไม่ละลายน้ำแต่ก็สามารถที่จะเปลี่ยนรูปร่างหรือปริมาณได้ จะทำให้เจลชนิดนี้มีการพองตัวและเป็นเจลที่นุ่ม (soft gel)

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

ของพอลิเมอร์ที่เกิดเป็น โครงสร้างตาข่าย ดังนั้นจึงสามารถดึงคุณสมบัติของน้ำเข้ามามีล้อมรอบตัวเองได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะ โครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์แบบมีประจุ

2.1.3.2 การแบ่งชนิดของไฮโดรเจลตามชนิดพันธะภายในโครงสร้าง

การเตรียมไฮโดรเจลโดยการทำให้เกิดพันธะภายในโครงสร้างนั้นจะมีการครอสลิงค์ของพอลิเมอร์จึงทำให้เกิด โครงสร้างที่มีลักษณะ 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) ทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะเป็น โครงสร้างตาข่ายได้ เช่นการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบควบแน่น เป็นต้น ในการเลือกวิธีการครอสลิงค์แบบพันธะโควาเลนต์สามารถเลือกชนิดของสารที่นำมาเป็นสารครอสลิงค์ สภาวะที่ใช้ในการเตรียมและควบคุมกระบวนการเตรียมได้เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

- การครอสลิงค์แบบไอออนิกเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิวาเลนต์ไอออน (polyvalention) กับสายโซ่พอลิเมอร์หลักจะเกิดการจับพันธะกันของประจุที่ต่างชนิดกัน สารครอสลิงค์จึงมีผลต่อ โครงสร้างของไฮโดรเจลด้อยกว่าการครอสลิงค์แบบโควาเลนต์ในการดูดซับของเหลวอาจจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกันของพอลิเมอร์โดยการเตรียมไฮโดรเจลตามลักษณะ



พันธะอ็อกซิเจนนี้จะทำให้ยากเนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วมากทำให้การควบคุมอัตราเตรียมเป็นได้ยาก

- การครอสลิงค์แบบกายภาพเป็นการสร้างพันธะไฮโดรเจนของสารโซ่พอลิเมอร์หลักกับสารพอลิเมอร์อีกเส้นหนึ่ง ทำให้พันธะที่เกิดขึ้นมีลักษณะแข็งแรงจึงเกิดการรวมตัวของพอลิเมอร์ ซึ่งการครอสลิงค์ชนิดนี้มีข้อเสียคือ พันธะไฮโดรเจนที่มีการครอสลิงค์ระหว่างสารโซ่ พอลิเมอร์เมื่อถูกความร้อนจะทำให้โครงสร้างนั้นถูกทำลายไป และเมื่อเกิดการดูดซับเจลที่ได้จะขยายเฉพาะส่วนที่ครอสลิงค์มากกว่าส่วนที่เป็นสายโซ่พอลิเมอร์

2.1.4 ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจล [23]

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่ได้จากการสังเคราะห์จากปิโตรเคมีและที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาตินั้นจะไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต (non-toxic) โดยส่วนใหญ่พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติจะเป็นจำพวกพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) และพอลิเมอร์ชนิดที่นำมาเตรียมไฮโดรเจลนั้นจะมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และน้ำหนักโมเลกุลต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน ในปัจจุบันได้มีการนำพอลิเมอร์ชนิดนี้มาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์มากขึ้น 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 ประเทศที่ผลิตอัลจินตมาก 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 ถ้าโพลีเมอร์มี G ในปริมาณที่สูงจะมีสมบัติเป็นเจลที่แข็งที่ความเข้มข้นของโลหะประจุบวกเฉพาะ (polyvalent metal cation) แต่ถ้าพอลิเมอร์มี M ปริมาณสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดเจลที่อ่อนนุ่ม และมีสภาวะในการเกิดเจลที่กว้าง อัลจิเนตที่ผลิตจำหน่ายเป็นการค้ามีหลายอนุพันธ์จึงมีสมบัติการละลายในน้ำที่แตกต่างกัน เช่น อนุพันธ์ของเกลือ Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ และยังผลิตในรูปของ Propylene glycol alginate ซึ่งได้จาก

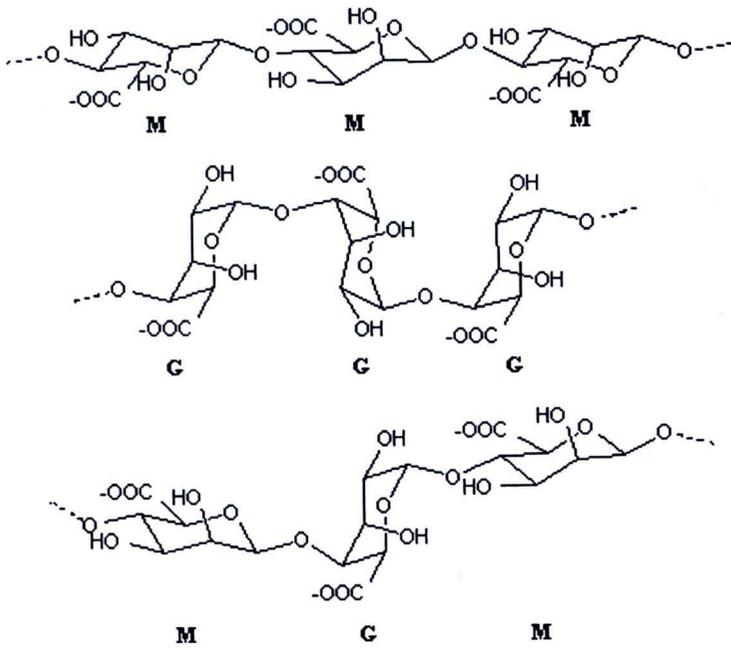


ปฏิกิริยาของ alginic acid กับ propylene oxide ภายใต้อุณหภูมิและความดัน อนุพันธ์เหล่านี้จะละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น ความหนืดของสารละลายอัลจิเนตที่ได้ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุลและการมีโลหะประจุบวก

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

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

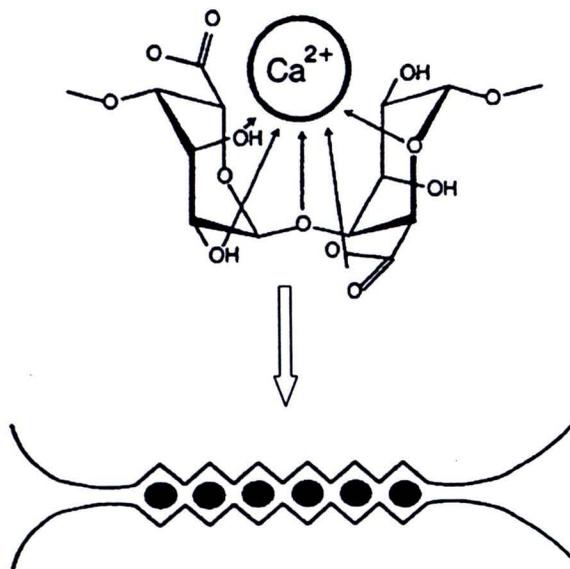
- มีการนำ Alginate มาผลิตเป็นไฮโดรเจลเพื่อใช้ในทางการแพทย์เนื่องจากเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติและไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต
- propylene glycol alginate ใช้ในน้ำสลัด (salad dressing) และเบียร์ เพราะมีความสามารถละลายได้สูงที่ pH ต่ำ
- โซเดียมอัลจิเนตใช้เป็นส่วนผสมในไส้พายมะนาวที่แช่เย็นเพื่อให้เกิดความคงตัวระหว่าง 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

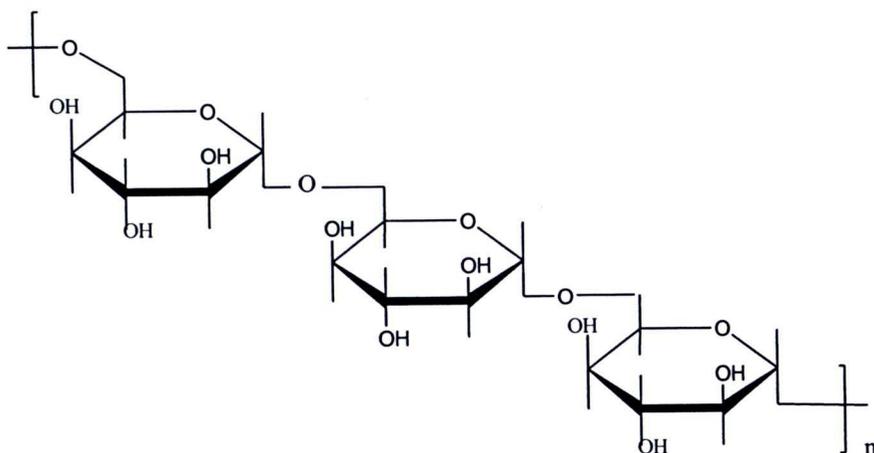
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอัลจิเนต (Alginate) ชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate (Egg-box model)

เดกซเตรน (Dextran)

เดกซเตรน (Dextran) เป็นพอลิแซคคาไรด์สะสมในยีสต์และแบคทีเรีย ประกอบด้วยหน่วยย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคส (glucose) เท่านั้นเหมือนกับแป้งและไกลโคเจน แต่ต่างที่กลูโคสต่อกันด้วยพันธะ (1 → 6) และมีการแตกกิ่งก้านด้วยพันธะ (1 → 2) พันธะ (1 → 3) หรือพันธะ (1 → 6) ขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งมีชีวิต



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของ Dextran

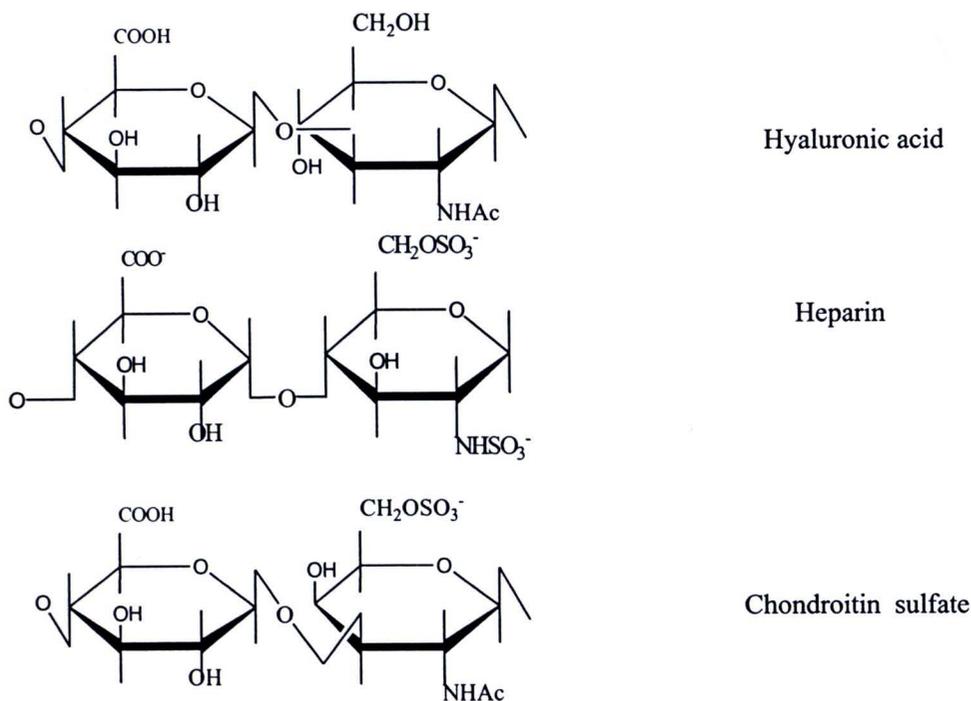
Glycosaminoglycan (GAGs)

เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วย โมโนแซคคาไรด์หลายๆ ชนิดมาต่อกัน และมักจะพบน้ำตาลอะมิโนรวมอยู่ด้วย จึงอาจเรียกว่าเป็น mucopolysaccharides ซึ่งประกอบด้วยอนุพันธะของน้ำตาล 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 และส่วนที่เป็นโครงสร้างของร่างกาย เช่น กระดูกกระดูกอ่อน และฟัน เนื่องจาก glycosaminoglycan มีลักษณะคล้ายวุ้น มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดี และต้องใช้พื้นที่มากในการวางตัว ทำให้มีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นสารหล่อลื่น และบรรเทาแรงกระแทก จึงพบได้มากที่น้ำหล่อข้อ (synovial fluid of joints)

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

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



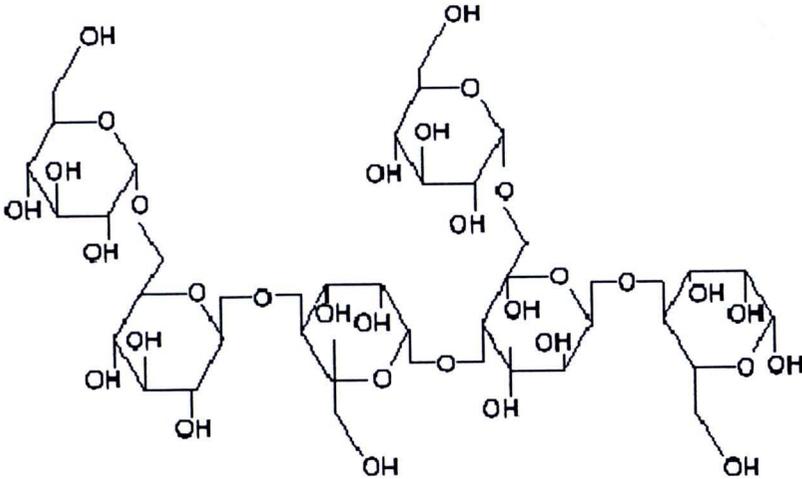
รูปที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของ Hyaluronic acid Heparin และ Chondroitin sulfate

กัวกัม (Guar gum) [24]

Guar gum ได้จาก endosperm ของเมล็ดคีน 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 และใช้เป็นส่วนผสมของน้ำเกรวี



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของ Guar gum

2.1.5 วิธีการเตรียมไฮโดรเจล

2.1.5.1 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการครอสลิงค์โดยใช้สารเคมีหลายหมู่ฟังก์ชัน

(Chemical crosslinking of complementary groups) [25]

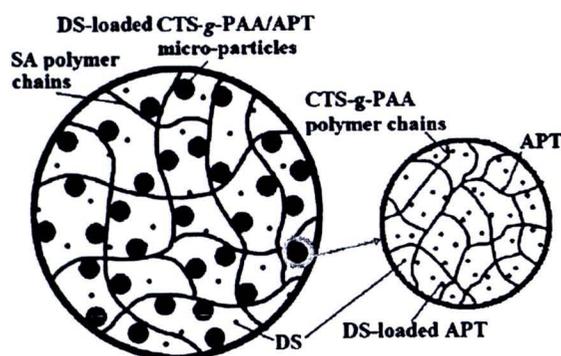
การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้เป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีความนิยมใช้เตรียมในกลุ่มของโพลิเมอร์เป็นการครอสลิงค์วิธีนี้สามารถใช้กับกลุ่มของพอลิแซ็กไนด์เพื่อทำให้เกิดการรวมตัวกันของโครงสร้างให้มีขนาดใหญ่หรือการเตรียมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะมีลักษณะการพองตัวขึ้นของเจล โดยที่พอลิเมอร์จะทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์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

ปัจจุบันได้มีการนำวิธีการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการครอสลิงค์โดยใช้สารเคมีหลายหมู่ฟังก์ชัน เพื่อผลิตเป็นไฮโดรเจล เช่น

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

พบว่า Attapulgitite มีผลต่อการดูดซับของเจล คือ เมื่อทำการผสม Attapulgitite ในปริมาณที่น้อย จะทำให้ เจล สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณที่มากขึ้น

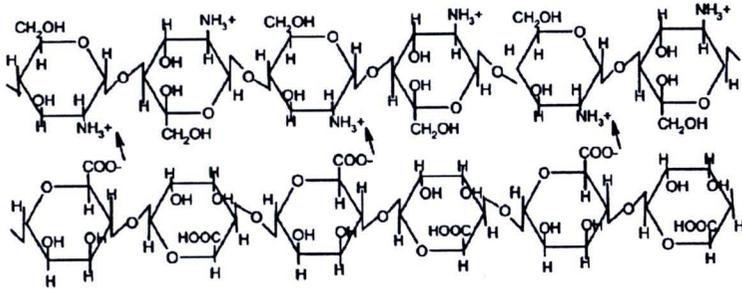
Qin Wang และคณะ [26] ได้ทำการเตรียมและศึกษาพัฒนาวิธีการทดสอบ chitosan – g – poly (acrylic acid) / attapulgitite / sodium alginate composite เพื่อให้ได้ ไฮโดรเจล และควบคุมการปลดปล่อย diclofenac sodium ในการเตรียมนี้อาจควบคุม pH เพื่อเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิต (CTS – g – PAA / APT / SA) โดยจะครอสลิงค์ด้วย 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 เฟอร์เซ็นต์ ในสารละลาย pH ที่ 2.1 และ 100 เฟอร์เซ็นต์ ในสารละลาย pH ที่ 6.8 ที่เวลา 24 ชั่วโมง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามอัตราการปลดปล่อยของ DS จะเพิ่มขึ้นเป็น 100 เฟอร์เซ็นต์ ที่สารละลาย pH ที่ 7.4 ที่เวลา 2 ชั่วโมง พบว่าอัตราการปลดปล่อย DS จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะขึ้นอยู่กับ ART ที่ 0-50 wt ดังนั้นการปลดปล่อยด้วยยาจาก เจล นี้จะใช้ pH ที่ 6.8



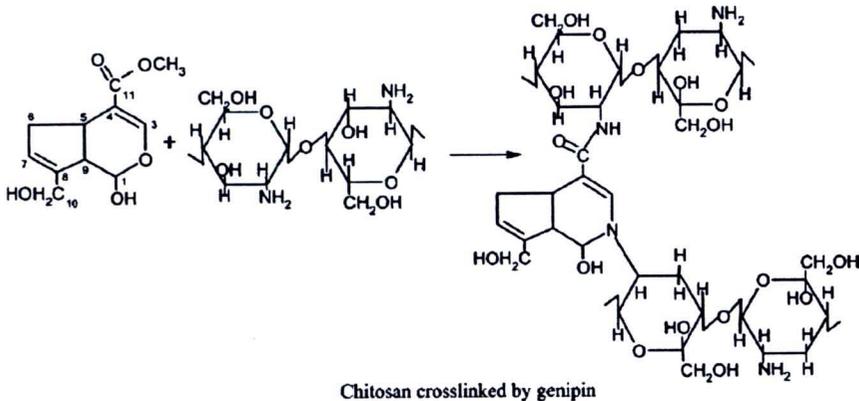
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของไฮโดรเจลที่ได้จาก CTS-g-PAA/APT/SA

FWU-Long Mi และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยยาจาก chitosan- alginate และทำให้โครงสร้างของสารประกอบแข็งแรงโดยใช้สารครอสลิงค์ที่ได้จากธรรมชาติในที่นี้จะใช้ genipin ซึ่งเป็นสารที่สกัดได้จาก Gardenia fruits ที่ใช้ในการรักษาทางการแพทย์ของจีนเพื่อใช้ในการบำบัดรักษาโรคผิวหนัง และการอักเสบของแผล แต่จะทำให้เกิดผลต่อตับ การเกิดเป็นเจลของไคโตซานนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าการควบคุม การหยดไคโตซานในสารละลาย alginate – genipin โดยจะเกิดเป็น chitosan – alginate แบบ polyelectrolyte และ แบบการครอสลิงค์กันด้วย genipin Chitosan – alginate แบบ complex นี้จะเกิดปฏิกิริยาบนชั้นของผิวรอบนอกของเจล แต่ถ้า

สารครอสลิงค์ Chitosan ด้วย genipin แล้วจะเกิดปฏิกิริยาด้านในของเจล ส่วนอัตราการบวมน้ำของ chitosan – alginate complex จะขึ้นอยู่กับค่า pH หรือความเข้มข้นของสารละลาย alginate จากการทดลองพบว่าอัตราการบวมน้ำของ chitosan – alginate complex จะขึ้นอยู่กับค่า pH และเจลสามารถเข้ากับเซลล์ได้ดี ไม่เป็นพิษต่อเซลล์



Chitosan-alginate polyelectrolyte complex



Chitosan crosslinked by genipin

รูปที่ 2.9 กลไกเกิดเจลของ chitosan ในสารละลายผสม alginate-genipin

2.1.5.2 การเตรียมไฮโดรเจลโดยการเหนี่ยวนำให้เกิดพอลิเมอร์เรซันด้วยรังสี

(hydrogel preparation by irradiation)

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่มีการพัฒนาเพื่อทำการเตรียมไฮโดรเจล จะทำให้มีการปนเปื้อนของสารที่นำมาใช้ในการครอสลิงค์น้อย โดยวิธีการเตรียมชนิดนี้จะเกิดการครอสลิงค์นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีของชนิดพอลิเมอร์ที่นำมาเตรียมซึ่งเทคนิคที่ใช้การเหนี่ยวนำให้เกิดพอลิเมอร์เรซันด้วยรังสีได้มีการนำมาใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลกันมาก เช่น

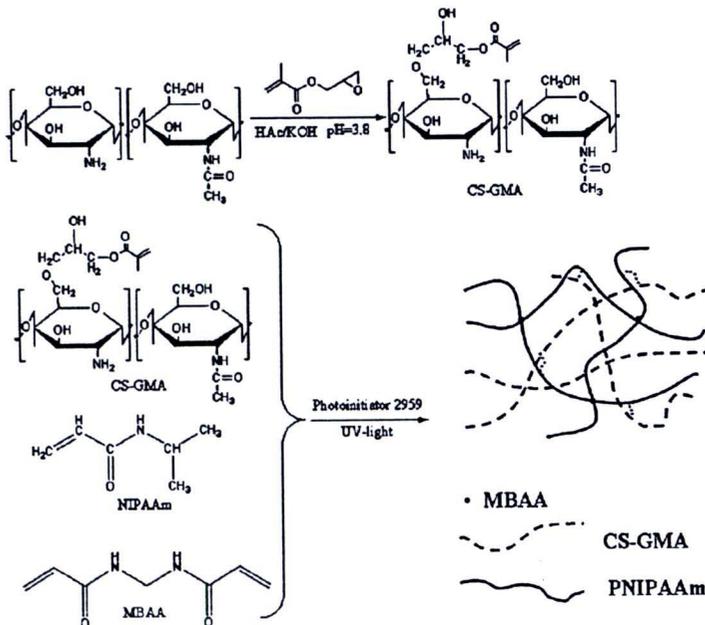
Sergey A. และคณะ [28] ได้ทำการเตรียมไฮโดรเจลจาก chitosan – polyvinyl pyrrolidone ด้วยการใช่วัสดุเชื่อมขวาง (γ) เพื่อใช้ในการขนส่งโปรตีน โดยที่ pH และองค์ประกอบของไฮโดรเจล จะมีผลต่อการดูดซับ bovine serum albumin (BSA) เข้าไปใน chitosan (CS) – polyvinyl pyrrolidone (PVP) (CSPVP) และการปลดปล่อย BSA, CSPVP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

อัทธ์ สุวรรณวงศ์ [29] ได้ทดลองเตรียมไฮโดรเจลที่ประกอบด้วยชั้นของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (พีวีเอ) และชั้นของไคโตซานโดยการฉายรังสีแกมมาเพื่อใช้เป็นเจลปิดรักษาบาดแผล ชั้นบนของไฮโดรเจลเป็นไคโตซานไฮโดรเจล มีจุดประสงค์เพื่อให้มีความสามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้ ไฮโดรเจลชั้นล่างเป็นพีวีเอไฮโดรเจล มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มการดูดซับน้ำ ไฮโดรเจลทั้งสองใช้เทคนิคการแช่แข็งและปล่อยให้ละลายก่อนนำไปฉายรังสีแกมมาเพื่อช่วยให้โพลิเมอร์ทั้งสองเกิดการครอสลิงค์ดีขึ้น 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 ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีความนิ่ม มีความสามารถฆ่าเชื้อโรค และดูดซับของเหลวจากแผลได้ดีมาก ในการวิจัยได้ทำการศึกษาโครงสร้างของไคโตซานไฮโดรเจลโดย FT-IR และพบว่าการเกิดครอสลิงค์ในไคโตซานด้วยรังสีแกมมามีความเป็นไปได้ที่จะเกิดที่หมู่อะเซตาไมด์

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) ด้วยเทคนิคโฟโตพอลิเมอร์ไรเซชันได้ทำการศึกษาไฮโดรเจลด้วยเครื่อง Fourier transform infrared (FT-IR), Differential scanning calorimetry (DSC) และ Optical transmittance ส่วน scanning electro microscopy (SEM) จะศึกษาเจลทางด้าน morphology จากการทดสอบทางด้านการบวมน้ำพบว่าการบวมน้ำของไฮโดรเจลจะขึ้นอยู่กับค่า 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

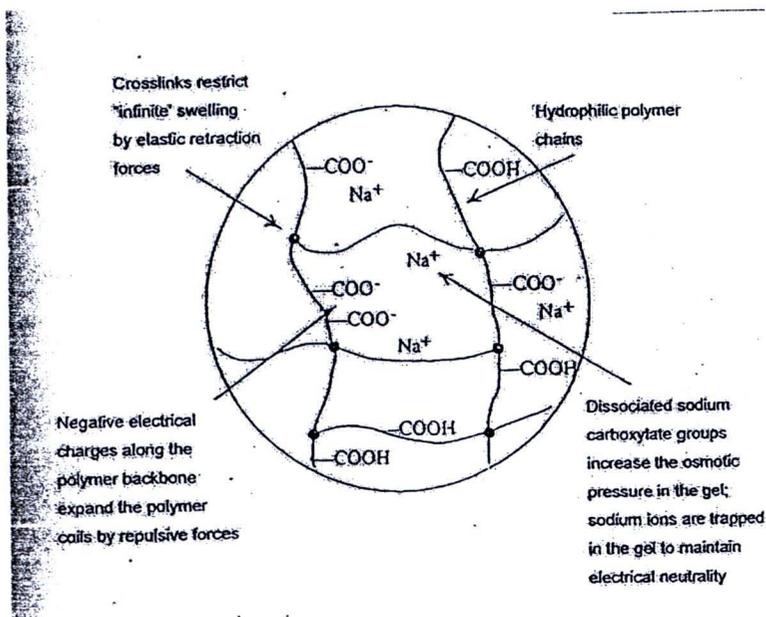
กลไกการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลแสดงดังรูปที่ 2.11 จากรูปจะเห็นได้ว่ากลไกการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเกิดได้หลายแบบ และความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลก็เป็นผลโดยรวมจากกลไกต่างๆ เหล่านี้ ส่วนใหญ่ไฮโดรเจลจะเตรียมมาจากพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารโพลีอิเล็กโทรไลต์คือ มีหมู่ที่มีประจุบวกหรือลบอยู่ภายในโมเลกุลจำนวนมาก พอลิเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิล (COO^-) ซึ่งจะดึงดูดน้ำเข้ามาได้ดี การดึงน้ำเข้ามาทำให้โครงสร้างภายในเกิดการพองตัวคือสายโซ่พอลิเมอร์มีการกระจายตัวมากขึ้น นอกจากนี้สายพอลิเมอร์อาจมีหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำอยู่ด้วย การนำพาน้ำเข้ามาภายในโครงสร้างไฮโดรเจลด้วยหมู่ที่มีประจุ จะทำให้โอกาสที่หมู่ชอบน้ำอื่นที่มีอยู่เกิดพันธะกับน้ำ (เช่น พันธะไฮโดรเจน) ก็เพิ่มมากขึ้นด้วย

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

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

จากกลไกการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของไฮโดรเจลได้ดังนี้

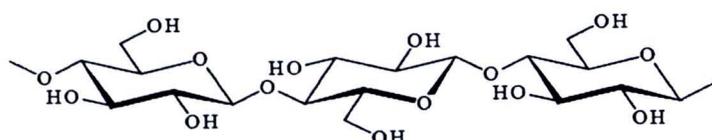
1. แรงดันออสโมติก ถ้าความเข้มข้นของ solute ภายในไฮโดรเจลสูงกว่าสารละลายภายนอกจะทำให้เกิดแรงดันออสโมติก น้ำจากภายนอกจะแพร่เข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจลได้ ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมากน้ำจะเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลมากทำให้เกิดการพองตัวได้ดี
2. แรงกระทำระหว่างน้ำกับไฮโดรเจล ถ้าโพลิเมอร์นั้นมีโครงสร้างทางเคมีเหมาะสมจะสามารถเกิดแรงกระทำน้ำได้มาก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



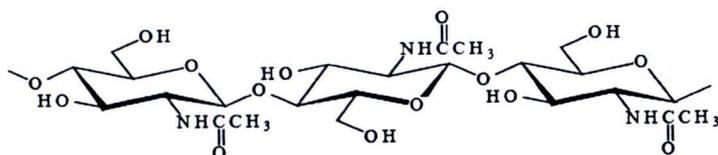
รูปที่ 2.11 กลไกที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล

2.2 ไคโตซาน (Chitosan) [32]

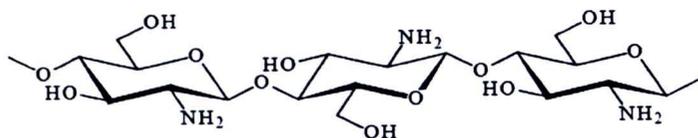
ไคโตซานเป็นไบโอพอลิเมอร์ที่พบมากในสัตว์ทะเลที่มีเปลือกแข็งภายนอกเช่น กุ้ง ปู กุ้ง และแมลงที่มีปีก เช่น ตั๊กแตน ค้างคาว ผึ้ง เซลล์ของพืชบางชนิด และยังพบอีกมากในจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ เช่น เห็ด รา และ ยีสต์ โดยไคโตซานจัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่มีมากเป็นอันดับสองรองจาก เซลลูโลส



(ก) โครงสร้างของเซลลูโลส



(ข) โครงสร้างของไคติน



(ค) โครงสร้างของไคโตซาน

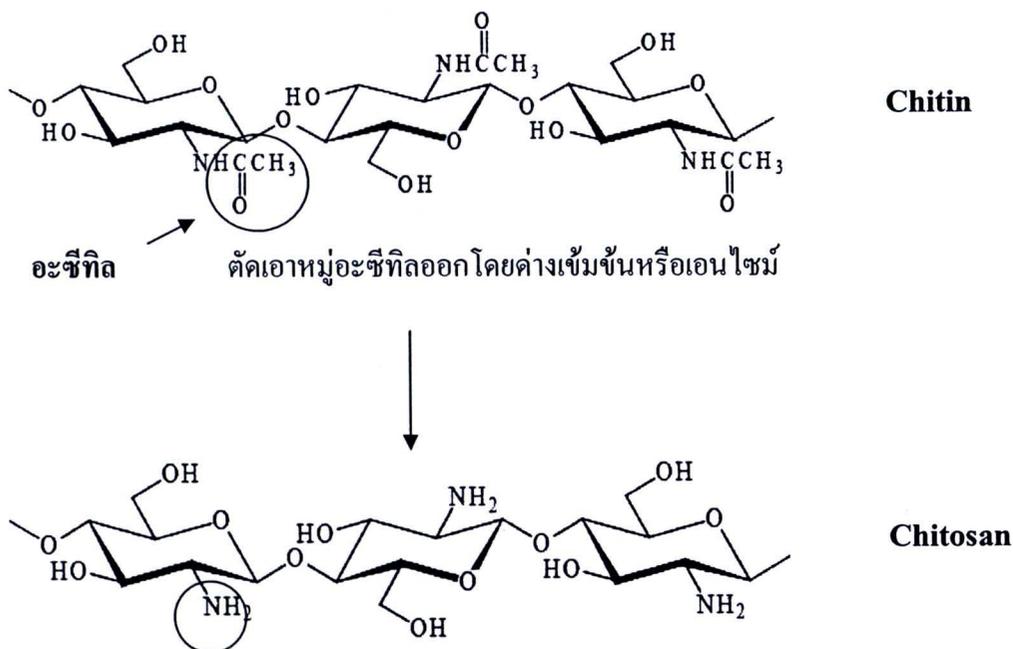
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของ เซลลูโลส ไคตินและไคโตซาน

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมไคโตซาน คือ ไคติน โดยที่ไคโตซานเป็นสารพอลิเมอร์ และเป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ได้จากการทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิทิล (deacetylation) ออกจากสารไคติน ผลจากการเกิดปฏิกิริยาอะซิทิลเลชันจะทำให้หมู่อะซิทิลที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 ในวงแหวนไพราโนส (pyranose ring) ของไคตินเป็นเป็นหมู่อะมิโน ไคโตซานนั้นค้นพบครั้งแรกโดย Rouget ในปี 1859 ซึ่งเตรียมในสถานะที่เป็นค่าง โดยการนำเอาไคตินมาต้มในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากจนเดือด และพบว่าไคตินที่นำมาต้มนั้นสามารถละลายในกรดอินทรีย์ได้ จึงเรียกสารที่ได้ว่า modified chitin และเมื่อนำมาทดสอบสี โดยการผสมด้วยสารละลายไอโอดีนและกรด พบว่าให้สีม่วง ในขณะที่ไคตินให้สีน้ำตาล ต่อมาในปี 1984 Hoppe Seyler ได้ให้คำนิยามของ modified chitin ว่า chitosan การดึงหรือตัดเอาหมู่อะซิทิลออกจากไคตินนั้น 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 ทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุเนื่องจากโครงสร้างของไคตินที่ทำให้หมู่อะซิทธิลที่เหลือไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับด่างได้ง่าย ถ้าไม่ใช่สภาวะในการทำปฏิกิริยาที่รุนแรง ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาทางหนึ่งในการเตรียมไคโตซานที่มีค่าร้อยละของการเกิดอะซิทธิลสูงกว่าร้อยละ 90 ก็คือการทำปฏิกิริยาซ้ำแทนที่จะทำเพียงครั้งเดียว โดยก่อนที่จะทำปฏิกิริยาอะซิทธิลซ้ำจะต้องทำการล้างไคโตซานที่ได้ก่อน ทั้งนี้อาจจะเนื่องจากการล้างก่อนที่จะเติมสารละลายต่างใหม่เข้าไปจะทำให้การซึมผ่านของสารละลายเข้าไปในไคโตซานได้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นไคตินหรือไคโตซานที่ผลิตได้ จะอยู่ในรูปสายโซ่ที่มีหน่วยของไคตินและไคโตซานผสมกันอยู่สลับหน่วยปะปนกันไปเป็นโคพอลิเมอร์ดังนั้นสารไคตินที่สกัดได้จากเปลือกกุ้งหรือเปลือกปู แม้ว่าจะมีหน่วยไคตินเป็นหลักอยู่ในสายโซ่ก็ตาม ก็จะมีหน่วยของไคโตซานปะปนอยู่จำนวนหนึ่งประมาณร้อยละ 5-10 หรือแม้ว่าเราจะนำไคตินมาผ่านกระบวนการปรับโครงสร้างทางเคมีด้วยการเปลี่ยนหมู่อะซิทธิลเป็นหมู่อะมิโน เพื่อผลิตไคโตซาน ก็จะไม่สามารถได้ไคโตซาน 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 สามารถยึดจับกับประจุลบที่ผิวได้ดีและยังสามารถจับ โลหะพวก chelated metal
- (ข) Chemical properties ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงและเป็นพอลิเมอร์สายตรงที่เป็นของแข็งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน มีหมู่อะมิโนที่พร้อมจะละลายในกรดอินทรีย์อ่อน 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 ความสามารถในการละลายของไคโตซานจะถูกกำจัดใน 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 เป็นสารที่มีลักษณะเป็นเอกลักษณ์โดดเด่นเฉพาะตัวคือจะเป็นสารธรรมชาติที่เป็นวัสดุทางชีวภาพ (biomaterials) ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) อีกทั้งยังย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (biodegradable) ดังนั้นจึงมีความปลอดภัยในการนำมาใช้กับมนุษย์และไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ไคโตซาน ยังสามารถขึ้นรูปได้หลายแบบ เช่น เจลเม็ด เส้นใย และคอลลอยด์ ไคโตซานมีหมู่อะมิโน(-NH₂) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเปลี่ยนให้เป็นอนุพันธ์ (Derivatives) ได้มากมาย โดยที่ในปัจจุบันได้มีการค้นคว้าวิจัยและนำไคติน-ไคโตซาน ไปใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย เช่น

2.2.2.1 ด้านการแพทย์และเภสัช

ไคโตซานมีประโยชน์อย่างมากทางการแพทย์ ที่สำคัญที่สุดคือการรักษาบาดแผล การปลูกถ่ายอวัยวะ ขาลดไขมันและคอเลสเตอรอล

- การตกแต่งบาดแผล : เส้นไหมไคโตซานสามารถนำมาถักทอเป็นแผ่น เพื่อตกแต่งบาดแผล โดยทำให้เกิดการสมานแผลและลดความเจ็บปวด โดยที่การรักษาแผลผ่าตัดด้วยไคโตซานไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง
- สารห้ามเลือดและรักษาแผล : ไคโตซานทำให้เลือดเกิดการแข็งตัวโดยทำหน้าที่เป็นสารห้ามเลือด และสามารถผสมในซีรัมเพื่อช่วยในการรักษาบาดแผล
- สารจับไขมันและสารด้านการสร้างคอเลสเตอรอล : ไคโตซานทำหน้าที่เป็นตัวย่อยสลายไขมัน โดยจะจับกับไขมันที่เกาะพื้ออาหารซึ่งมากเกินไป

- การปลูกถ่ายเซลล์ : การปลูกถ่ายเซลล์จะพบปัญหาหลายด้าน เช่น การแพร่ผ่านของอากาศในระหว่างการปลูกถ่าย การไม่ยอมรับอวัยวะในการปลูกถ่าย ดังนั้นจึงมีการพัฒนานำเยื่อไคตินและไคโตซานมาใช้ในการปลูกถ่ายอวัยวะ

2.2.2.2 ด้านการบำบัดน้ำดีและน้ำเสีย

คุณสมบัติในการตกตะกอน และการจับโลหะหนักของไคโตซานเป็นประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย สระว่ายน้ำและบ่อน้ำแร่ รวมทั้งน้ำเสียชนิดต่างๆ

- การบำบัดน้ำดื่ม การนำไคโตซานและอนุพันธ์ของไคโตซานมาผสมกับถ่านกัมมันต์สามารถทำให้น้ำดื่มบริสุทธิ์ได้ ไคโตซานมีหน้าที่ 2 ประการ คือ กำจัดสารประกอบอินทรีย์และกำจัดโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม และสังกะสี เป็นต้น
- การบำบัดน้ำในสระว่ายน้ำและบ่อน้ำแร่ ไคโตซานและอนุพันธ์ สามารถตกตะกอนสาร เช่น น้ำมัน สบู่ สิ่งสกปรก ฟันที่ปะปนอยู่ในน้ำ ทำให้น้ำใสขึ้น
- การบำบัดของเสียประเภทอาหาร ไคโตซานจะจับกับอนุภาคที่เป็นคอลลอยด์ ซึ่งแพร่กระจายอยู่ในน้ำเสีย โดยจะดึง โปรตีนกลับคืนมาเพื่อใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ กระบวนการนำเอาโปรตีนกลับมาใช้วิธีการฉีดสารละลายไคโตซานร้อยละ 0.25-1.0 ลงในน้ำเสีย

2.2.2.3 ด้านเครื่องสำอาง

ไคตินและไคโตซาน รวมถึงอนุพันธ์ต่างๆ มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นเครื่องสำอาง ดูแลรักษาผผ ถอนผมและรักษากลิ่นปาก

- ดูแลรักษาเส้นผม เนื่องจากอนุภาคของไคโตซานมีอนุภาคเป็นประจุบวก และเส้นผมมีประจุลบ ทำให้ไคโตซานจับกับเส้นผมเป็นอย่างดี โดยที่ไคโตซานจะใช้เคลือบเส้นผมเป็นการเพิ่มความแข็งแรงและอ่อนนุ่มให้กับเส้นผม
- ถอนผม ไคโตซานมีคุณสมบัติในการให้ความชุ่มชื้นแก่ผิวหนัง (Moisturizer) เนื่องจากไคโตซานมีประจุบวกจึงเข้ากันได้ดีกับผิวหนัง
- ขจัดกลิ่นปาก ไคตินและไคโตซานสามารถใช้เป็นส่วนผสมในยาสีฟัน น้ำยาบ้วนปาก และหมากฝรั่งเพื่อให้ลมหายใจสดชื่น ป้องกันการก่อตัวของหินปูน

2.2.2.4 ด้านอาหารและเครื่องดื่ม

ไคโตซานและไคตินสามารถใช้ประโยชน์โดยเติมลงในอาหารเป็นสารยึดอายุการเก็บรักษาเป็นตัวส่งเสริมรสชาติของเครื่องดื่ม

- สารป้องกันคอเลสเทอรอลและการจับไขมัน ไคโตซานจะเข้าจับกับไขมันซึ่งอยู่ในกระเพาะอาหาร และสามารถลดการเกิดมะเร็งในลำไส้ใหญ่ได้
- การผลิตสารปรุงรสและสารแต่งกลิ่น ไคตินที่ถูกทำให้เป็น โมเลกุลขนาดเล็กจะเรียกว่า ไมโครคริสทาลไลน์ไคติน (Microcrystalline chitin) เมื่อถูกความร้อนจากการหุงต้มจะเกิดเป็น ไพรอซิน ซึ่งใช้ปรุงแต่งกลิ่นและรสชาติในอาหารประเภทข่างและอาหารต่างๆ นอกจากนี้ ไคโตซานมีความสามารถในการเก็บรักษาสีของอาหารทะเลหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนด้วยไอน้ำสารให้ความหวาน สารกันเสียอีกด้วย
- การบรรจุอาหาร การขึ้นรูปฟิล์ม ไคโตซานสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับการห่ออาหารได้ นอกจากนี้ยังมีศักยภาพในการเป็นสารเคลือบผิวผลไม้ได้

2.2.2.5 ด้านการเกษตร

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมาช้านาน เป็นแหล่งอาหารที่สมบูรณ์ของโลกแห่งหนึ่ง อีกทั้งรายได้หลักของประเทศก็มาจากผลิตผลทางการเกษตรในปัจจุบันด้วยวิทยาการและเทคโนโลยีสมัยใหม่ มีส่วนส่งเสริมเพิ่มพูนมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร แต่การใช้สารเคมีในการกำจัดศัตรูพืชก็มีปริมาณมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อตัวเกษตรกร ผู้บริโภคผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและสิ่งแวดล้อม ทั้งทางตรงและทางอ้อม แนวโน้มของเทคโนโลยีการเกษตรในอนาคตนั้นจะมีการมุ่งเน้นการเกษตรอินทรีย์ ไคติน-ไคโตซานก็เป็นสารธรรมชาติอีกตัวหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ในด้านนี้ได้อย่างมากมาย

- การเคลือบเมล็ดพันธุ์พืช (Seed Coating)

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

- ตัวเชื่อม (Binder) ในสารเคลือบเมล็ดพันธุ์

Hydroxypropylchitosan เป็นอนุพันธ์ของไคโตซานที่ใช้เป็นตัวเชื่อมในสารเคลือบเมล็ดพันธุ์ เพื่อช่วยในการยับยั้งเชื้อรา ปกป้องพืชทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น

- สารเคลือบเมล็ดพันธุ์ป้องกันการซูดซิด (Seed Incrusting Agents)

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

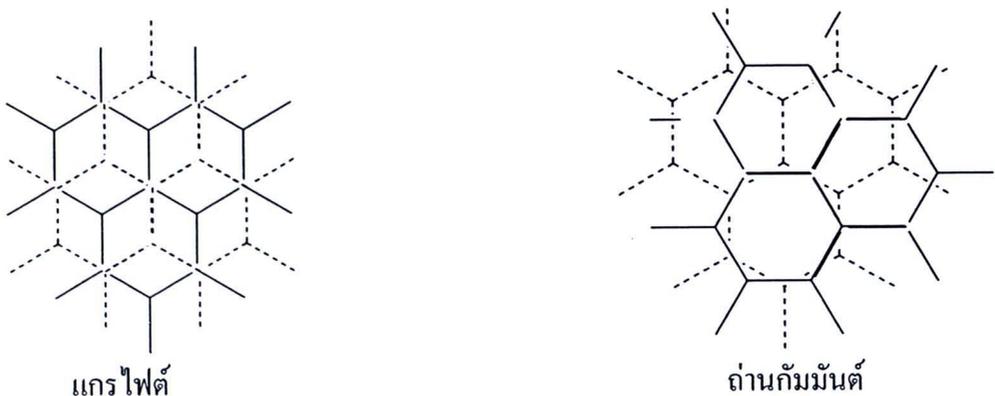
2.3 ถ่านกัมมันต์ (Active carbon หรือ Activated carbon)[33]

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับประเภทหนึ่งที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ อาจอยู่ในรูปของผงหรือเม็ดก็ได้ โดยมีการสังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ เทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถทำให้ถ่านกัมมันต์ 1 กรัม มีพื้นที่ผิวได้ประมาณ 600-1000 ตารางกิโลเมตร การที่คาร์บอนต้องมีพื้นที่ผิวสูงก็เพื่อให้สามารถดูดโมเลกุลจำนวนมากๆ มาเกาะติดที่ผิวได้ พื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดสมรรถนะของคาร์บอนด้วยเหตุนี้คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวจำนวนมากจึงมีอำนาจหรือขีดความสามารถในการดูดซับ (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 โดยได้แบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์ 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 ไออน้ำ, 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) Macropores เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 100 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่างๆ แต่จะเป็นตัวช่วยให้สารที่ดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนเล็กได้ง่ายขึ้น

2.3.2.3 ถ่านกัมมันต์แบ่งตามความหนาแน่น

- 1) ความหนาแน่นต่ำ ถ่านประเภทนี้มักใช้ประโยชน์ในสภาวะที่เป็นของเหลวหรือสารละลาย 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 ผลิตมาจากจี้เลื่อย
- 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) หรือหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ หมู่ฟังก์ชันนี้มีความสำคัญเกี่ยวกับสมบัติเฉพาะตัวของถ่านกัมมันต์ เช่น ลักษณะความเป็นกรด-เบสที่ผิวของถ่านกัมมันต์ ความมีขั้ว-ไม่มีขั้ว เป็นต้น ลักษณะความเป็นกรด-เบส ที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในสารตั้งต้นของถ่านกัมมันต์และวิธีการกระตุ้น

1. ความเป็นกรดที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (Acidic Surface)

ลักษณะความเป็นกรดที่ผิวของถ่านกัมมันต์ เกิดจากหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีผลทำให้ผิวของถ่านกัมมันต์แสดงความเป็นกรด การผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อให้ได้ผิวที่มีความเป็นกรดสามารถทำได้โดยนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 473-973 องศาเซลเซียส ที่สภาวะมีออกซิเจนหรือใช้สารมาออกซิไดซ์หรือกระตุ้น เช่น ไออน 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 องศาเซลวินได้เมื่อมีเพลาททินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.4 วัสดุตกแต่งบาดแผล [34]

ในการดำรงชีวิตประจำวันมนุษย์ทุกคนไม่สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดอุบัติเหตุที่มุ่งโจมตีโดยไม่คาดคิดอันเนื่องมาจากความประมาทหรือความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ หรือ จากการรับการรักษาได้แก่ อุบัติเหตุบนท้องถนน อัคคีภัย บาดแผลผ่าตัด เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วก่อให้เกิดบาดแผลขนาดใหญ่ที่อาจก่อให้เกิดแผลเป็นต่อไปได้ถ้าไม่ได้รับการรักษาที่ถูกต้องและเหมาะสม แต่เนื่องจากวิวัฒนาการทางการแพทย์ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วทั้งในด้านองค์ความรู้ใหม่ เทคโนโลยีการรักษา และอุปกรณ์ในการรักษา ซึ่งได้นำพาให้เกิดการพัฒนา “วัสดุตกแต่งบาดแผล” ที่จะมีบทบาทสำคัญยิ่งในการรักษาแผลชนิดต่างๆ

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

กระบวนการการรักษาบาดแผล

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

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

วัสดุตกแต่งบาดแผลทั่วไป

วัสดุตกแต่งบาดแผลอัลจินेट

วัสดุตกแต่งบาดแผลอัลจินेट คือ วัสดุตกแต่งบาดแผลของแคลเซียมอัลจินेट ที่สกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล อัลจินेटจะประกอบด้วยหน่วยซ้ำย่อยๆ ของกรดแมนนูโรนิก (mannuronic acid) และกรดกลูคูโรนิก (guluronic acid) ซึ่งเมื่อสัมผัสกับของเหลวที่บริเวณแผลที่มีส่วนประกอบของโซเดียมไอออน จะทำให้แคลเซียมอัลจินेट ที่ไม่ละลายน้ำเปลี่ยนไปเป็นเจลโซเดียมอัลจินेटบางส่วน โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) จากกระบวนการนี้แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่ถูกแลกเปลี่ยนออกมาเป็นอิสระยังมีสมบัติในการห้ามเลือด คือ ทำให้เลือดเกาะตัวกันเป็นก้อน (blood coagulation) อัลจินेटที่มีหน่วยซ้ำของกรดแมนนูโรนิกมาก จะสร้างเจลที่อ่อนนุ่มและยืดหยุ่น ส่วน อัลจินेटที่มีหน่วยซ้ำของกรดกลูคูโรนิกมากจะสร้างเจลที่แข็งมาก เจลอัลจินेटสามารถที่จะดูดซับความชื้นได้ดีช่วยป้องกันการเกิดกลุ่มก้อนเล็กๆ ของเนื้อเยื่อที่ทำให้เกิดเป็นสะเก็ดแผล ใช้ได้

กับแผลหลายรูปแบบตั้งแต่แผลที่ผิวหนังนอกรจนกระทั่งแผลลักษณะหลุมลึก เหมาะกับแผลที่มีของเหลวไหลออกจากแผลปริมาณปานกลางถึงมาก

วัสดุตกแต่งบาดแผลคอลลาเจน

คอลลาเจนเป็นโปรตีนที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสามารถพบได้ที่ผิวหนัง กล้ามเนื้อ กระดูก เส้นเอ็น และกระดูกอ่อน เป็นโปรตีนที่พบมากที่สุดในร่างกาย คอลลาเจนมีหลายชนิด โดยเฉพาะคอลลาเจนชนิดที่หนึ่งและคอลลาเจนชนิดที่สาม จะพบมากที่สุดที่ผิวหนังและเอ็น

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

วัสดุตกแต่งบาดแผลไฮโดรคอลลอยด์

ไฮโดรคอลลอยด์เป็นสารแขวนลอยของเม็ดโพลิเมอร์เล็กๆ (granule) แขวนลอยอยู่ในมาทริกซ์ของตัวยึดเกาะ (adhesive matrix) เม็ดโพลิเมอร์แกรนูลส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic polymer) ได้แก่ เจลาติน หรือ เพคติน โดยมีมาทริกซ์เป็นโพลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymer) ได้แก่ ขางสังเคราะห์ ไฮโดรคอลลอยด์จะกักดูดซับของเหลวอย่างช้าๆ และเปลี่ยนสภาพไปเป็นเจล ไฮโดรคอลลอยด์เหมาะกับบาดแผลที่ไม่ลึกมากนัก ไม่สามารถใช้กับบาดแผลที่มีของเหลวไหลออกมาจากบริเวณบาดแผลเป็นปริมาณมากๆ หรือบาดแผลติดเชื้อ

ไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลคือวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี มักใช้เพื่อการรักษาความชุ่มชื้นของแผล และทำให้รู้สึกเย็นส่วนใหญ่ผลิตมาจากการเชื่อมขวางพอลิเมอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ ได้แก่ อะคริลิกพอลิไวนิลไพโรลิโดน พอลิเอทิลีนออกไซด์ คาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส หรือ พอลิเมอร์ผสมกับการเลือกใช้ชนิดของพอลิเมอร์ ไฮโดรเจลต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับบาดแผลที่ต้องการความชุ่มชื้นมากน้อยแค่ไหนในบางครั้งจะมีการเติมสารสำคัญหรือยาในการรักษาบาดแผลหุ้มอยู่ภายในไฮโดรเจลด้วยเพื่อช่วยในการรักษาบาดแผลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นเหมาะสมกับบาดแผลที่เนื้อเยื่อแห้งตายและใช้ได้กับบาดแผลทุกระดับความลึก

แผ่นฟิล์มใส

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

โฟม

วัสดุตกแต่งบาดแผลชนิดโฟมส่วนใหญ่ผลิตจากพอลิยูรีเทน เนื่องจากโฟมพอลิยูรีเทนสามารถเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ (biocompatibility) และสามารถควบคุมความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำ (hydrophilic or hydrophobic) ได้จากการสังเคราะห์โดยควบคุมอัตราส่วนของสารตั้งต้นระหว่างพอลิออกซีโพลีเอทานอลกับไดไอโซไซยานาตการใช้โฟมพอลิยูรีเทนที่มีความชอบน้ำมาก (hydrophilic) มักนำมาใช้เป็นวัสดุตกแต่งบาดแผลที่ต้องการดูดซับของเหลวที่ไหลออกมาจากบาดแผลได้ดี ส่วนโฟมพอลิยูรีเทนที่มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะมีแรงดูดติดกับผิวของแผลได้น้อยกว่าทำให้ลอกออกง่าย นำมาใช้กับแผลเปื่อยที่ไม่ต้องการให้วัสดุตกแต่งบาดแผลดูดติดกับบาดแผล ในบางครั้งจะมีการเติมสารสำคัญหรือยาในการรักษาบาดแผลหุ้มอยู่ในโฟมด้วยเพื่อช่วยในการรักษาบาดแผลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โฟมเหมาะสำหรับแผลที่มีความลึกปานกลางหรือลึกมากและเหมาะกับแผลในปริมาณน้อยหรือปานกลาง

วัสดุตกแต่งบาดแผลแบบผสมที่สามารถดูดซับได้

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

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

สามารถย่อยสลายได้ จึงไม่จำเป็นต้องกำจัดออกในระหว่างทำการรักษา ทั้งนี้อัตราเร็วในการสลายตัวขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมนี้ ถ้ามีการผสมโดยใช้อัตราส่วนของ พอลิคาร์โพรแลคโตนมากกว่าพอลิแลคติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมนี้จะใช้เวลาในการถูกย่อยสลายนานกว่า การใช้พอลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนการผสมของพอลิแลคติกแอซิดมากกว่าพอลิคาร์โพรแลคโตน เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดมากกว่าพอลิคาร์โพรแลคโตนมาก อัตราส่วนที่เหมาะสมเมื่อคำนึงถึงเรื่องความแข็งแรง ความสามารถในการขึ้นรูป และความสามารถในการถูกย่อยสลายแล้วอยู่ที่อัตราส่วนโดยประมาณของพอลิคาร์โพรแลคโตนต่อพอลิแลคติกแอซิด ที่ 70 : 30 ส่วนชั้นที่สาม เป็นชั้นของผ้าก๊อซ (gauze) ซึ่งเป็นผ้าโปร่งใสทอด้วยฝ้าย เฉพาะชั้นที่สามนี้เท่านั้นที่ต้องนำออกและเปลี่ยนแผ่นใหม่เสมอ