

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

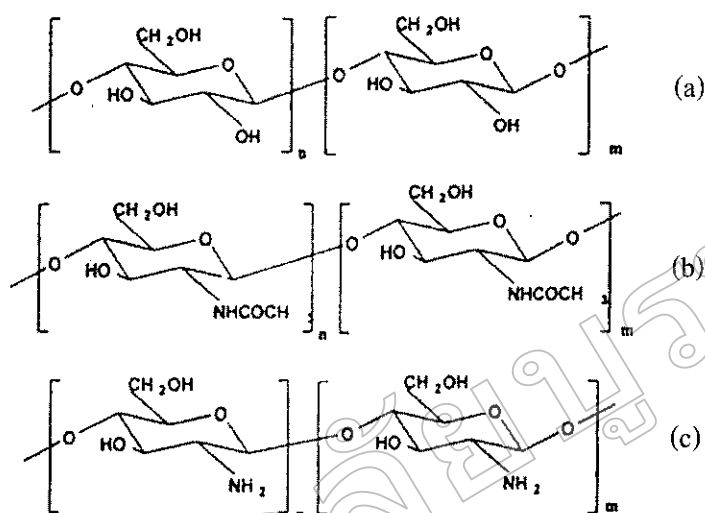
ไคตินและไคโตซาน

ไคตินเป็นสารพอลิเมอร์ชีวภาพที่สกัดได้จากของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหารทะเล เช่น ปลีอกกุ้ง และกระดองปู อนุพันธ์ของไคตินที่มีศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ คือ ไคโตซาน การผลิตไคโตซานจัดเป็นการเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้งอันเป็นประโยชน์ทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ ปัจจุบันมีการค้นคว้าวิจัยในการนำไคโตซานไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น การแพทย์ การเกษตร อุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

ไคติน (Chitin)

ไคตินเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่มีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส ไคตินมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับเซลลูโลส แต่หน่วยย่อยของเซลลูโลสเป็น D-Glucose ส่วนหน่วยย่อยของไคติน คือ N-Acetyl-D-Glucosamine ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกลูโคส โดยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ตรงคาร์บอนตำแหน่งที่สองของเซลลูโลสจะเป็นหมู่อะซิตามิโด (-NHCOCH₃) ในไคติน (โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสและไคตินแสดงได้ดังภาพที่ 2-1) ไคติน หรือ Poly β-(1→4)-2-Acetamido-2-Deoxy-D-Glucose มีสูตรทั่วไปเป็น (C₈H₁₃NO₅)_n ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 47.29 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.45 ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และออกซิเจนร้อยละ 39.97 (Budavari, 1976 อ้างถึงใน รัดเกล้า ภูติวรนาถ, 2539, หน้า 4) ไคตินเป็นสารพอลิเมอร์ที่ไม่มีประจุ (Non-Electrolytic Polymer) ทำให้ไคตินไม่สามารถละลายได้ในน้ำ กรดเจือจาง ด่างทั้งเจือจางและเข้มข้น แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic Solvent) อื่น ๆ (จิราภรณ์ เชาวลิตสุขุมาวาสี, 2544; กาวดี เมธะคานนท์ และคณะ, 2543)

ไคตินพบได้ในโครงสร้างเปลือกนอกของสัตว์ทะเลจำพวกกุ้ง ปู และแกนหมึก นอกจากนี้ยังพบในผนังเซลล์ของเห็ดรา และสาหร่ายบางสายพันธุ์ เนื่องจากไคตินเป็นสารธรรมชาติจึงพบอยู่ในรูปของสารประกอบที่ปนอยู่กับสารอื่น เช่น ในเปลือกหุ้มแข็งของแมลง ประกอบด้วยไคตินในรูปไคติน-โปรตีน (Chitin-Protein Complex) ในเปลือกนอกของสัตว์จำพวกกุ้ง ปู พบหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) นอกเหนือจากโปรตีน และในผนังเซลล์ของสัตว์จำพวกเห็ดราไคตินจะอยู่ร่วมกับสารอินทรีย์อื่น ๆ (กาวดี เมธะคานนท์ และคณะ, 2543)



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างทางเคมีของ (a) เซลลูโลส (b) ไคติน และ (c) ไคโตซาน (จิราภรณ์ เชาวลิขุมาวาสี, 2544)

ไคตินมีโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งที่พบ รูปแบบผลึกของไคตินมี 3 ลักษณะ คือ อัลฟาไคติน (α -Chitin) เบตาไคติน (β -Chitin) และแกมมาไคติน (γ -Chitin) ซึ่งแต่ละลักษณะมีความแข็งแรงต่างกัน อัลฟาไคตินมีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะสวนทางกัน สายโซ่โมเลกุลมีการเรียงตัวกันแน่นและมีความแข็งแรงสูงสุด พบในเปลือกกุ้งและกระดองปู เบตาไคตินมีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในทิศทางเดียวกัน สายโซ่โมเลกุลเรียงตัวได้ไม่แน่นมาก พบในแกนหมึก ส่วนแกมมาไคตินเกิดจากการเรียงตัวสลับกันระหว่างอัลฟาไคตินและเบตาไคติน โดยธรรมชาติพบอัลฟาไคตินมากกว่าเบตาไคติน ทั้งนี้เพราะมีการเกิดพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างสายโซ่ของโมเลกุล (Intramolecular and Intermolecular Chain) มากกว่าจึงมีเสถียรภาพทางเคมี (Chemical stability) มากกว่าแบบอื่น (จิราภรณ์ เชาวลิขุมาวาสี, 2544; ภาวดี เมระคานนท์ และคณะ, 2543)

ไคตินสามารถพบได้ทั่วไปในสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสัตว์ แหล่งที่พบไคตินอยู่เป็นจำนวนมาก ได้แก่ สัตว์ใน Phylum Arthropoda โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน Class Crustacean ได้แก่ กุ้ง ปู และกั้ง และ Class Insecta ได้แก่ ตัวด้วง และแมลงสาบ เป็นต้น โดยไคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างแข็งภายนอก (Exoskeleton) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของเปลือกกุ้งและแมลง รวมทั้งกระดองของปูและแกนหมึก ปริมาณไคตินในสัตว์ต่าง ๆ มีปริมาณต่ำตั้งแต่ร้อยละ 0.01 จนกระทั่งสูงถึงร้อยละ 40 นอกจากนี้ยังพบไคตินได้ตามผนังเซลล์ของเห็ดราและยีสต์ รวมทั้งสัตว์ชั้นต่ำที่ไม่

มีกระดูกสันหลัง (Invertebrates) ไคตินที่พบจะมีปริมาณแตกต่างกันออกไปตามสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2-1 นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าในสัตว์ใน Class Crustacean มีปริมาณไคตินแตกต่างกันไปตามฤดูกาล (จิราภรณ์ เชาวลิขุมวาที, 2544; สุวดี จันทร์กระจำ, 2539; Green & Mattick, 1979 cited in Cho et al., 1998, p. 3839)

ไคโตซาน (Chitosan)

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ได้จากการกำจัดหมู่อะซีติลของไคตินด้วยด่างเข้มข้น ทำให้โครงสร้างทางเคมีของไคตินเปลี่ยนไป โดยหมู่อะซีติลของไคตินถูกแทนที่ด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกลายเป็นหมู่เอมิโน ($-NH_2$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 (โครงสร้างทางเคมีของไคโตซานแสดงได้ดังภาพที่ 2-1) ดังนั้นไคโตซาน คือ พอลิเมอร์ของ D-Glucosamine (2-Amino-2-Deoxy-D-Glucose) หรือ Poly β -(1 $\rightarrow$ 4)-2-Amino-2-Deoxy-D-Glucose มีสูตรทั่วไปเป็น $(C_6H_{11}NO_4)_n$ (ภาวดี เมธะคานนท์ และคณะ, 2543; ลีลา เรืองแป้น, 2542) ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 44.7 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.8 และไนโตรเจนร้อยละ 8.7 (Muzzarelli, 1977)

กระบวนการกำจัดหมู่อะซีติลเป็นการเพิ่มหมู่เอมิโนบนสายโซ่ของไคติน หมู่เอมิโนนี้มีความสามารถในการรับโปรตอนจากสารละลายแล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปประจุบวก (NH_3^+) สารละลายไคโตซานจึงมีสมบัติเป็นแคทไอออนิกพอลิเมอร์ (Cationic Polymer) ซึ่งช่วยให้ละลายได้ดีขึ้น ส่วนใหญ่เมื่อหมู่อะซีติลถูกกำจัดไปมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ผลิตภัณฑ์ไคโตซานที่ได้สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) และกรดแลกติก ($CH_3CHOHCOOH$) เป็นต้น ดังนั้นระดับการกำจัดหมู่อะซีติลจึงเป็นตัวบ่งชี้ความเป็นไคตินและไคโตซาน (ภาวดี เมธะคานนท์ และคณะ, 2543; สุวดี จันทร์กระจำ, 2542 ข) ไคโตซานมีสมบัติพิเศษในการดูดซับทั้งไอออนบวกและไอออนลบ จึงถูกนำมาใช้ในการจับไอออนต่าง ๆ ในสารละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำทิ้งต่าง ๆ (สุวดี จันทร์กระจำ, 2539)

โดยปกติแล้วไคตินและไคโตซานมีสมบัติคล้ายคลึงกัน แต่การนำไคตินไปใช้ประโยชน์มีน้อยมาก เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องความสามารถในการละลายของไคติน แม้ว่าจะมีนักวิทยาศาสตร์ได้ทดลองหาตัวทำละลายที่เหมาะสมต่อการละลายได้แล้วก็ตาม แต่ตัวทำละลายเหล่านั้นก็ยังไม่สามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นความสนใจที่จะนำไคตินไปใช้ประโยชน์จึงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับไคโตซานที่สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายที่เป็นกรดเจือจาง

ตารางที่ 2-1 ปริมาณไคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ (Knorr, 1984 อ้างถึงใน รัตเกล้า
ภูติวรรณ, 2539, หน้า 12-13)

ชนิด	ปริมาณไคติน (ร้อยละ)	ชนิด	ปริมาณไคติน (ร้อยละ)
<u>Crustacea</u>		<u>Insects</u>	
Cancer (Crab)	72.1 ^c	Periplaneta (Cockroach)	2.0 ^a
Carcinus (Crab)	0.4-3.3 ^a	Blatella (Cockroach)	18.4 ^c
	8.29 ^a		10 ^b
	64.2 ^b		35 ^c
Paralithodes (King Crab)	35 ^b	Colcoptera (Beetle)	5-15 ^b
Callinectes (Blue Crab)	14 ^a		27-35 ^c
Pleuroncodes (Red Crab)	1.3-1.8 ^b	Tenebrio (Beetle)	2.1 ^a
Crangon (Shrimp)	5.8 ^b		4.9 ^b
	69.1 ^c		31.3 ^c
Alaskan Shrimp	28 ^d	May (Beetle)	16 ^b
Nephropes (Lobster)	69.8 ^c	Diptera (True Fly)	54.8 ^c
	6.7 ^b	Pieris (Sulfur Butterfly)	64 ^c
Homarus (Lobster)	60.8-77.0 ^c	Grasshopper	2-4 ^a
Lepas (Barnacles)	58.3 ^c		20 ^c
		Bombyx (Silk Worm)	44.2 ^c
		Calleria (Wax Worm)	33.7 ^c
<u>Fungi</u>		<u>Molluscan Organs</u>	
<i>Aspergillus niger</i>	42.0 ^c	Clamshell	6.1 ^b
<i>Penicillium notatum</i>	18.5 ^c	Oyster Shell	3.6 ^a
<i>Penicillium chrysogenum</i>	20.1 ^c	Squid, Skeletalpen	41.0 ^c
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	2.9 ^c	Krill, Deproteinized Shell	40.2 ^c
<i>Mucor rouxii</i>	44.5 ^c		
<i>Lactarius vellereus</i>	19.0 ^c		

^a Wet Body Weight

^b Dry Body Weight

^c Organic Weight of Cuticle

^d Total Dry Weight of Cuticle

^e Dry Weight of the Cell Wall

การประยุกต์ใช้ไคโตซาน

เนื่องจากไคตินมีโครงสร้างเป็นผลึก (Crystal Structure) ที่แข็งแรง การนำไคตินไปใช้ประโยชน์จึงมีข้อจำกัดในเรื่องของการละลาย ส่งผลให้มีการค้นคว้าวิจัยและนำไคโตซานไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ อย่างแพร่หลายมากกว่า ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ มีสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย (Anti-Bacterial Properties) และมีความชอบน้ำ (Hydrophilicity) (Juang, Tseng, Wu, & Lee, 1997) นอกจากนี้ไคโตซานมีหมู่อะมิโน และหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเปลี่ยนให้เป็นอนุพันธ์ได้มากมาย จึงมีการนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

ด้านสิ่งทอและกระดาษ

การผลิตเส้นใยจากไคโตซานเกิดขึ้นครั้งแรกในปี 1981 เส้นใยที่ได้จากไคตินและไคโตซานมีสมบัติทนทานต่อความร้อน ไขมัน และสารเคมีหลายชนิด ดัดสีและสารอื่น ๆ ได้ดี เมื่อเทียบกับเส้นใยเซลลูโลส เช่น ฝ้าย บริษัทในประเทศญี่ปุ่นหลายแห่งได้ทำการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยอะคริลิก เส้นใยโพลียูรีเทน ที่เคลือบด้วยไคตินและไคโตซาน และผ้าทอใยสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยชั้นของไคโตซาน ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีคุณสมบัติในการดูดซับเหงื่อได้ดี ทำให้สวมใส่สบาย ทนต่อการซักล้าง สีดกทนนาน และยังป้องกันแบคทีเรียและเชื้อรา นอกจากนี้เส้นใยสังเคราะห์แล้ว ไคโตซานยังถูกนำมาใช้กับเส้นใยธรรมชาติ (ฝ้าย) เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ เช่น ช่วยให้ย้วยยาก ง่ายต่อการดูแลรักษาและดัดสีอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้มีการใช้ไคโตซานเป็นตัวเชื่อม (Binder) ในหมึกพิมพ์ (Anionic Ink) และสีย้อม (Dye) เพื่อให้สีติดดี แข็งแรง ทนต่อน้ำและตัวทำละลาย

ไคโตซานช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษ และช่วยให้ได้งานพิมพ์ที่สวยงาม กมชัด เมื่อใช้ร่วมกับหมึกพิมพ์ที่มีประจุลบ (ภาวดี เมธะคานนท์ และคณะ, 2543)

การบำบัดน้ำ

ไคโตซานถูกนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียเพื่อแยกโลหะหนัก และโลหะมีพิษ เนื่องจากไคโตซานสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะหลายชนิด ความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะของไคโตซานขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น เวลาในการดูดซับ ขนาดหรือพื้นที่ผิวของไคโตซาน ความเข้มข้นของไอออนเริ่มต้น และสมบัติของไคโตซาน เป็นต้น ไคโตซานจัดได้ว่าเป็นตัวตกตะกอนและตัวสร้างตะกอนที่ดี เนื่องจากประกอบด้วยหมู่อะมิโน (ในรูปประจุบวก) จำนวนมากบนสายโพลิเมอร์ที่สามารถจับกับสารที่มีประจุลบ เช่น โปรตีน พอลิเมอร์ที่มีประจุลบ กรดนิวคลีอิก และสีย้อม ทำให้สารดังกล่าวเกิดการตกตะกอน (ภาวดี เมธะคานนท์ และคณะ, 2543) ในกระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์มีการนำ

ไคโตซานมาใช้แยกน้ำมัน ไขมัน และ โลหะหนักออกจากน้ำ (Hennen, 1996) นอกจากนี้ไคโตซานยังถูกใช้เป็นตัวตกตะกอนของแข็งแขวนลอยที่อยู่ในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะโปรตีนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ต่อไปได้ (เยาวภา ไหวพริบ, 2536)

สีย้อมที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอและฟอกย้อมมักก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อม หากถูกปล่อยออกจากโรงงานโดยปราศจากการบำบัด เนื่องจากสีย้อมเหล่านี้ยากต่อการย่อยสลาย จึงมีการค้นคว้าวิจัยนำไคโตซานมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อม ด้วยโครงสร้างที่เหมาะสมทำให้ไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้หลายประเภท เช่น สีแอซิด (Acid Dye) สีไดเรกต์ (Direct Dye) สีดีสเพอร์ส (Disperse Dye) สีรีแอกทีฟ (Reactive Dye) สีซัลเฟอร์ (Sulphur Dye) และสีแวท (Vat Dye) เป็นต้น (ภาวดี เมระคานนท์ และคณะ, 2543)

การเกษตร

ไคตินและไคโตซานมีสมบัติพิเศษที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในทางเกษตรกรรม เช่น การเคลือบเมล็ดพันธุ์พืช เพื่อป้องกันการปลอมปนพันธุ์ ป้องกันเมล็ดพันธุ์จากโรคและแมลงศัตรูพืช ป้องกันการชุกชุม และยืดอายุการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ รวมทั้งใช้เป็นส่วนผสมในยาฆ่าแมลงและวัชพืชเพื่อเป็นตัวควบคุมให้เกิดการปล่อยยาอย่างช้าๆ

ไคโตซานสามารถใช้เป็นตัวเชื่อมในอาหารสัตว์ ทำให้อาหารที่ได้มีความปลอดภัย ประหยัด สามารถย่อยและดูดซึมได้ดี นอกจากนี้ไคโตซานยังเป็นตัวนำสีในอาหารสัตว์ (Dietary Dye Carrier) และเป็นเส้นใยอาหาร (Food Fiber) ของสัตว์ปีกจำพวกไก่ ทำให้ไข่ไก่ที่ได้มีสีแดงขึ้น

ไคโตซานสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว โดยใช้เคลือบผิวผลผลิตทางการเกษตร เนื่องจากไคโตซานมีประสิทธิภาพในการลดอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อราบางชนิด และกระตุ้นกระบวนการต่าง ๆ ในเนื้อเยื่อพืชให้เกิดภูมิต้านทานเชื้อรา ซึ่งมีประสิทธิภาพดี และปลอดภัยต่อการบริโภคเนื่องจากเป็นฟิล์มที่รับประทานได้ (Edible Film) นอกจากนี้ผลไม้มิเกิดการทดลองใช้ไคโตซานในการเคลือบผิวของผักจำพวกมะเขือเทศ แดงกวา และพริกหยวก พบว่าสามารถลดอัตราการหายใจ การสูญเสียน้ำจากการคายน้ำ และอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีนที่ทำให้ผลไม้สุกเร็ว นอกจากนี้ไคโตซานฟิล์มยังเป็นตัวกั้นการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ผักผลไม้คงความกรอบ ผิวไม่เหี่ยวแห้ง และสีผิวไม่เปลี่ยนแปลง (ภาวดี เมระคานนท์ และคณะ, 2543)

การแพทย์

ในด้านวัสดุทางการแพทย์ไคตินและไคโตซานรวมทั้งอนุพันธ์ต่าง ๆ สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุรักษาหรือตกแต่งแผลในรูปของแผ่นฟิล์ม ฟองน้ำ เส้นใย (Non-Woven Fabrics) และไฮโดรเจล (Hydrogel) ซึ่งพบว่าเป็นตัวเร่งกระบวนการรักษาแผล และลดการเกิดรอยแผลเนื่องจากป้องกันแผลไม่ให้ติดเชื้อและสามารถดูดน้ำเหลืองจากแผลได้ ไคตินและไคโตซานสามารถใช้ใน

การผลิตไหมละลาย ผิวน้ำเทียม คอนแทกเลนส์ (Contact Lenses) เมมเบรนกรองแยกสำหรับการฟอกเลือด (Blood Dialysis Membrane) หลอดเลือดเทียม และใช้เป็นตัวต้านเชื้อแบคทีเรียและไวรัส (ภาวดี เมธะกานนท์ และคณะ, 2543)

ไคตินและไคโตซานซัลเฟตมีความสามารถในการยับยั้งการแข็งตัวของเลือด จึงมีแนวโน้มในการนำมาใช้เป็นสารป้องกันการแข็งตัวของเลือด นอกจากนี้อนุพันธ์อื่น ๆ เช่น N-Hexanoyl และ N-Octanoyl-Chitosan สามารถทำเป็นเส้นใยสำหรับปิดแผลห้ามเลือดได้ (Hirano, 1999 อ้างถึงใน ภาวดี เมธะกานนท์ และคณะ, 2543)

ด้านอาหาร ยา และเครื่องสำอาง

อนุพันธ์ของไคโตซาน คือ N-Carboxymethyl-Chitosan สามารถยับยั้งการเกิดกลิ่นที่ไม่ต้องการในผลิตภัณฑ์เนื้อที่ไม่ผ่านการต้มได้ ซึ่งจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ไคโตซานและอนุพันธ์ยังสามารถใช้เป็นวัตถุกันเสียในอาหารอื่น ๆ ได้อีก เช่น อาหารหมักดอง วุ้นบะหมี่ ผักสด และเนื้อมีชีส เป็นต้น (เขวภา ไหวพริบ, 2536) ไคโตซานเป็นสารยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial) ที่สามารถละลายและมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีกว่าไคติน เมื่อค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 6 กลไกในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของไคติน ไคโตซาน และอนุพันธ์ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด อย่างไรก็ตามมีการเสนอแนะกลไกต่าง ๆ ที่เป็นไปได้หลายประการ เช่น การที่ไคโตซานเป็นโมเลกุลที่มีประจุบวกจึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับเซลล์เมมเบรน (Cell Membrane) ของจุลินทรีย์ซึ่งมีประจุลบ ทำให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีน และสารอื่น ๆ ออกจากเซลล์ หรือการที่ไคโตซานเป็นสารคีเลต (Chelating Agent) ซึ่งสามารถเลือกจับโลหะหนักแม้จะมีปริมาณน้อย ทำให้เกิดการยับยั้งการผลิตสารพิษ และยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Shahidi, Arachchi, & Jeon, 1999)

ไคโตซานเป็นเส้นใยอาหารหรือไฟเบอร์จากสัตว์ เป็นสารคาร์โบไฮเดรตที่ไม่มีรสหวาน ไม่ละลายน้ำ ไม่ย่อยในกระเพาะอาหารของคน ไม่ให้พลังงานหรือสารอาหารแก่ร่างกาย แต่มีประโยชน์ต่อระบบขับถ่ายจึงช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อโรกระบบทางเดินอาหาร เช่น มะเร็งลำไส้ ท้องผูก และริดสีดวงทวาร ไคโตซานเป็นที่รู้จักในแง่ของการลดความอ้วน เนื่องจากไคโตซานสามารถจับกับไขมันและคอเลสเตอรอลในอาหารช่วยลดการดูดซึมคอเลสเตอรอลเข้าสู่ร่างกาย นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถป้องกันหรือลดความเสี่ยงของการเป็นโรคหัวใจ และไขมันอุดตันในเส้นเลือดได้ ปัจจุบันมีการนำไคโตซานมาใช้ในระบบควบคุมการปล่อยยา (Drug Delivery and Controlled Release Systems) ให้ออกฤทธิ์อย่างช้า ๆ รวมทั้งใช้ในการรักษาเหงือกและป้องกันฟันผุ เนื่องจากความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในช่องปาก

ไคโตซานเป็นส่วนผสมสำคัญอย่างหนึ่งในผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องสำอาง รวมทั้งสบู่ ยาสีฟัน ยาสระผม และครีมบำรุงผิว เนื่องจากไคโตซานเป็นตัวให้ความชุ่มชื้นและสามารถติดผิวได้ดี โดยไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสามารถทำหน้าที่เป็นฟิล์มบาง ๆ เคลือบบนผิวหนังช่วยลดการระเหยของน้ำ เพิ่มความสามารถการจับตัวของน้ำทำให้ผิวหนังกระชับขึ้น (ภาวดี เมธะคานนท์ และคณะ, 2543)

การเตรียมไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้ง

การเตรียมไคตินและไคโตซานประกอบด้วยหลักการที่สำคัญ 3 ขั้นตอน คือ การกำจัดโปรตีน (Deproteination) การกำจัดแร่ธาตุ (Demineralization) และการกำจัดหรือลดหมู่อะซีทิล (Deacetylation) การสกัดไคตินและไคโตซานสามารถทำได้โดยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ ปัจจุบันการเตรียมไคตินและไคโตซานนิยมใช้สารเคมีได้แก่ กรด และด่าง โดยมีหลักการที่สำคัญดังนี้

การเตรียมไคติน

ในเปลือกของสัตว์ทะเลจำพวกกุ้ง และปู มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ไคติน (ร้อยละ 20-30) โปรตีน (ร้อยละ 30-40) แคลเซียมคาร์บอเนต (ร้อยละ 30-50) แมกนีเซียมและฟอสฟอรัส (ร้อยละ 1-2) และสารอื่น ๆ ในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ สารรงควัตถุ เช่น คาโรทีนอยด์ และไขมัน เนื่องจากไคตินไม่สามารถละลายในตัวทำละลายที่ใช้กันโดยทั่วไป ดังนั้นการเตรียมไคตินจากเปลือกกุ้ง และเปลือกปู จึงทำได้โดยการใช้ตัวทำละลายสกัดแยกส่วนประกอบอื่นออก ส่วนที่เหลือจะได้เป็นไคติน กระบวนการเตรียมไคตินมี 3 ขั้นตอน คือ การกำจัดแร่ธาตุ การกำจัดโปรตีน และการกำจัดรงควัตถุ (Decoloration) โดยปกติการเตรียมไคโตซานจะเรียงลำดับตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตามขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุและขั้นตอนการกำจัดโปรตีนอาจสลับลำดับก่อนหลังกันได้ หากต้องการนำโปรตีนที่สกัดแยกออกมาไปใช้ประโยชน์ เช่น นำไปเป็นอาหารสัตว์ก็ควรกำจัดโปรตีนออกก่อนเพื่อให้ได้ปริมาณโปรตีนสูง เนื่องจากในขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุมักใช้กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเป็นกรดที่สามารถย่อยสลายโปรตีนได้ ทำให้สูญเสียโปรตีนไปโดยไม่เกิดประโยชน์ (จิราภรณ์ เชาวลิขูขุมวาสิ, 2544; Shimahara, Takiguchi, Ohkouchi, Kitamura, & Okada, 1984 cited in Shimahara & Yasuyuki, 1988, p. 417)

1. การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมเปลือกกุ้งเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมไคตินมีขั้นตอนดังนี้

1.1 นำเปลือกกุ้งมาล้างด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้งให้สะอาด จากนั้นนำมาตากแดดให้แห้ง และเก็บในภาชนะที่แห้งและสะอาดเพื่อป้องกันการเน่าเสียและส่งกลิ่นเหม็น นอกจากนี้การตาก

แดดจัดเป็นเวลา 1-2 วัน ยังช่วยทำให้รังควัตถุบางส่วนสลายตัวไป ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการกำจัดรังควัตถุด้วยตัวทำลายอินทรีย์

1.2 คัดแยกเอาส่วนที่เป็นเนื้อ หัว หาง และขาุ้งออก โดยใช้เฉพาะเปลือกส่วนที่เป็นลำตัวกุ้ง นำมาล้างน้ำสะอาดและตากให้แห้งก่อนที่จะบดให้มีขนาดประมาณ 2-3 มิลลิเมตร (จิราภรณ์ เชาวลิขุมาวาสี, 2544; รัตนา รุจิรวนิช, 2544)

2. การกำจัดแร่ธาตุ

การกำจัดแร่ธาตุออกจากเปลือกกุ้งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก และการใช้สารละลาย EDTA (Ethylenediaminetetraacetic Acid) แต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้ (จิราภรณ์ เชาวลิขุมาวาสี, 2544)

2.1 การกำจัดแร่ธาตุโดยใช้สารละลายกรด

แร่ธาตุส่วนใหญ่ที่พบเป็นส่วนประกอบในเปลือกกุ้งหรือเปลือกปู คือ แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งสามารถสกัดแยกออกโดยใช้สารละลายกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และกรดอะซิติก เป็นต้น กรดที่นิยมใช้ คือ กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งจะเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ กลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงได้ดังสมการที่ (2-1)



การใช้กรดไฮโดรคลอริกในการกำจัดแร่ธาตุมักทำที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหลีกเลี่ยงการเสื่อมสลาย (Degradation) ของไคตินเนื่องจากกรด

2.2 การกำจัดแร่ธาตุโดยใช้สารละลาย EDTA

เนื่องจากการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกอาจทำให้เกิดการเสื่อมสลายของไคติน ทำให้ไคตินที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง การใช้สารละลาย EDTA จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดแร่ธาตุออกจากเปลือกกุ้ง โดย EDTA จะเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมที่ละลายน้ำได้ อย่างไรก็ตามการสกัดไคตินด้วยวิธีนี้ไม่สามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ออกจากเปลือกกุ้งได้ทั้งหมด

3. การกำจัดโปรตีน

การกำจัดโปรตีนสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การใช้ด่าง (Alkaline) และการใช้เอนไซม์โปรติเอส (Protease) แต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การกำจัดโปรตีนโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สารละลายต่างที่มีการใช้กันมากในการกำจัดโปรตีน คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 3-5 โดยต้มเปลือกกุ้งกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง ในขบวนการนี้โปรตีนส่วนใหญ่จะถูกกำจัดออกพร้อมกับไขมันและรงควัตถุบางส่วน อย่างไรก็ตามการใช้ภาวะที่รุนแรงในการกำจัดโปรตีนอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) ซึ่งทำให้ไคตินที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง และเกิดปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีติล ซึ่งทำให้ไคตินที่ได้มีค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีติลสูงขึ้น (จิราภรณ์ เชาวลิขุมวาที, 2544; ภาวดี เมธะกานนท์ และคณะ, 2543)

3.2 การกำจัดโปรตีนโดยใช้เอนไซม์ที่ย่อยสลายโปรตีน

การใช้เอนไซม์โปรติเอส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลายโปรตีน เช่น เปปซิน (Pepsin) หรือทริปซิน (Trypsin) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถใช้กำจัดโปรตีนออกได้ โดยมีข้อดี คือ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลและระดับการกำจัดหมู่อะซีติลของไคตินน้อย อย่างไรก็ตามการใช้เอนไซม์อาจไม่สามารถกำจัดโปรตีนออกจากเปลือกกุ้งได้หมด และใช้เวลาในการย่อยนานกว่า คือ ใช้เวลาเกินกว่า 1 วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเอนไซม์

4. การแยกรงควัตถุ

รงควัตถุที่พบส่วนใหญ่เป็นสารจำพวกคาโรทีนอยด์ เช่น แอสทาแซนทีน และเบต้า-คาโรทีน ไคตินที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุและโปรตีนแล้วยังคงมีรงควัตถุหลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ สามารถกำจัดออกได้โดยการล้างด้วยเอทานอล หรืออะซิโตน นอกจากนี้ยังอาจใช้สารฟอกขาวอื่น ๆ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรด์ โพแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (จิราภรณ์ เชาวลิขุมวาที, 2544)

การเตรียมไคโตซาน

สารตั้งต้นในการเตรียมไคโตซาน คือ ไคติน และปฏิกิริยาที่ใช้ในการเตรียมไคโตซานจากไคตินในภาวะที่เป็นด่างเข้มข้น คือ ปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีติล ผลของปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซีติลจะทำให้หมู่อะซีตามิโดที่คาร์บอนอะตอม ตำแหน่งที่สองในวงแหวนไพราโนส (Pyranoose Ring) ของไคตินถูกเปลี่ยนเป็นหมู่เอมิโน ปฏิกิริยานี้สามารถกำจัดหมู่อะซีติลออกจากไคตินได้เพียงบางส่วนหรือเกือบทั้งหมด

ถ้าต้องการให้ไคโตซานที่ได้มีค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีติลสูงขึ้นก็ให้ทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซีติลในภาวะที่รุนแรง คือ เพิ่มความเข้มข้นของสารละลายต่าง และใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยา หรือทำปฏิกิริยากับด่างซ้ำหลาย ๆ ครั้ง อย่างไรก็ตามภาวะที่รุนแรงอาจทำให้ไคโตซานที่

ได้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลงเนื่องจากการสูญเสียสภาพทางธรรมชาติของไคโตซาน สำหรับวิธีการที่ใช้ในการเตรียมไคโตซานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีดังนี้ (จิราภรณ์ เชาวลิขุมมาวสี, 2544)

1. การทำปฏิกิริยาของไคตินกับด่างที่หลอมละลาย (Alkali Fusion)

วิธีนี้เป็นการทำปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซิติลในภาวะที่รุนแรง โดยการใช้ละลายด่างซึ่งถูกหลอมละลายที่อุณหภูมิสูง เช่น การหลอมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และทำปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน แม้ว่าไคโตซานที่เตรียมได้จากวิธีนี้จะมีระดับการกำจัดหมู่อะซิติลสูงถึงร้อยละ 95 แต่ผลจากภาวะที่รุนแรงทำให้เกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันไคโตซานที่ได้จึงมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

2. การทำปฏิกิริยาของไคตินในสารละลายด่าง

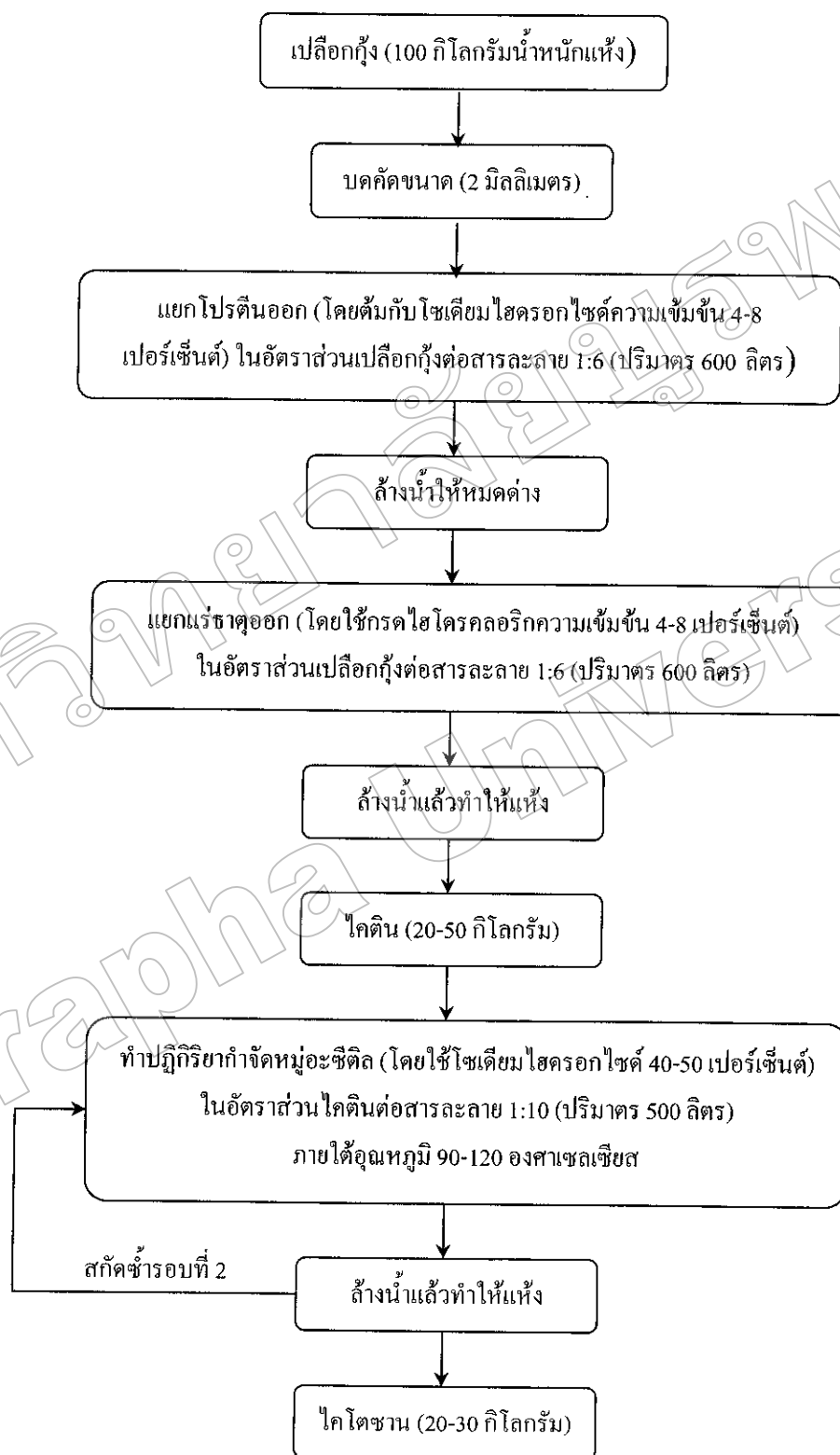
วิธีนี้เป็นวิธีที่มีการใช้และศึกษากันมากกว่าวิธีแรก สารละลายด่างที่นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่ก็มีการใช้สารละลายด่างชนิดอื่น ๆ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ลิเทียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติลของไคโตซานที่ได้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายด่าง อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าใช้ค่าความเข้มข้นสูง ควรใช้อุณหภูมิต่ำ และช่วงเวลาสั้น ตัวอย่างของภาวะที่อาจเลือกใช้ในการเตรียมไคโตซาน เช่น

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยานาน 24 ชั่วโมง

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยานาน 18 ชั่วโมง

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยานาน 1 ชั่วโมง

นอกจากการทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิติลภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนแล้วการเติม Reducing Agents เช่น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดการเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันซึ่งทำให้ไคโตซานที่ได้มีความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง โดยสรุปแล้วกระบวนการเตรียมไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งแสดงได้ดังภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 ขั้นตอนในการเตรียมไคตินและไคโตซาน (ภาวดี เมระคานนท์ และคณะ, 2543)

สมบัติทางเคมีกายภาพของไคตินและไคโตซาน

สมบัติทางเคมีกายภาพของไคตินและไคโตซานแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบ และ ภาวะที่ใช้ในการผลิต ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการนำไคตินและไคโตซานไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ สมบัติทางเคมีกายภาพของไคตินและไคโตซานสามารถสรุปดังนี้

การละลาย (Solubility)

ไคตินไม่ละลายในน้ำ กรดเจือจาง ต่างทั้งเจือจางและเข้มข้น แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์อื่น ๆ แต่สามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น กรดซัลฟูริกเข้มข้น กรดฟอสฟอริก (ร้อยละ 78-97) กรดฟอร์มิก (Anhydrous Formic Acid) และ DMAc-LiCl (*N,N*-Dimethylacetamide-Lithium Chloride) สาเหตุที่ทำให้ไคตินละลายได้ยากในตัวทำละลายต่าง ๆ เป็นผลมาจากสายโซ่โมเลกุลที่อยู่กันอย่างหนาแน่น มีพันธะเกิดขึ้นทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกัน (หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อะซีตามิโด) การที่ไคตินละลายได้ยากนี้จัดว่าเป็นอุปสรรคสำคัญที่สุดในการนำไคตินมาใช้ประโยชน์

ไคโตซานไม่ละลายน้ำ ต่างและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 6 กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก เป็นกรดที่นิยมใช้ในการละลายไคโตซาน กรดอินทรีย์บางชนิด เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก และกรดฟอสฟอริก สามารถละลายไคโตซานได้ภายใต้การคนที่อุณหภูมิปานกลาง อย่างไรก็ตามบางครั้งอาจมีตะกอนขาวขุ่นคล้ายเจลเกิดขึ้น

ความสามารถในการละลายของไคโตซานในสารละลายกรดขึ้นอยู่กับหมู่อะมิโนอิสระบนสายโซ่โมเลกุลไคโตซาน หมู่อะมิโนนี้จะมีรับโปรตอนจากสารละลายแล้วอยู่ในรูปประจุบวก ซึ่งช่วยให้ไคโตซานละลายได้ดีขึ้น ดังนั้นระดับการกำจัดหมู่อะซีติลจึงมีผลต่อการละลายของไคโตซาน โดยพบว่าเมื่อหมู่อะซีติลถูกกำจัดไปมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ไคโตซานจะสามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์หลายชนิด (ภาวดี เมธะกานนท์ และคณะ, 2543; สุวลี จันทรกระจ่าง, 2542 ข) และมีการละลายอย่างสมบูรณ์ (Robert, 1992)

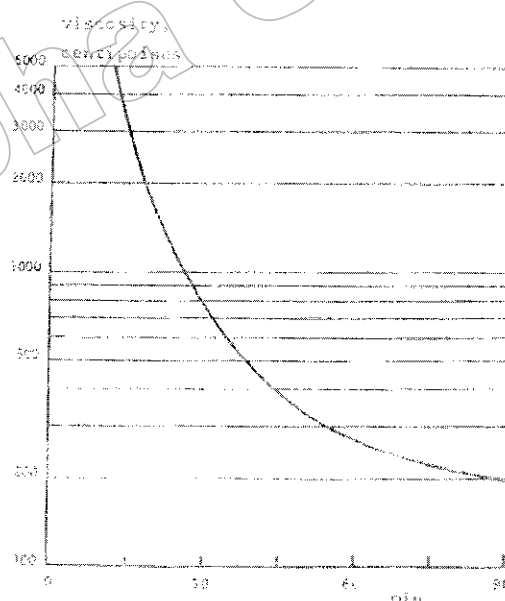
ระดับการกำจัดหมู่อะซีติล (Degree of Deacetylation, %DD)

ระดับการกำจัดหมู่อะซีติล และระดับอะซีทิลเลชัน (Degree of Acetylation, %DA) เป็นปัจจัยพื้นฐานทางโครงสร้างที่มีความสำคัญต่อสมบัติของไคโตซาน เช่น การละลาย ความหนืด การดูดความชื้น การดูดซับไขมัน และความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการนำไปประยุกต์ใช้ การหาค่าระดับอะซีทิลเลชันสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การไตเตรทหาสารแขวนลอย (Colloid Titration) การใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกตรัม (IR-Spectroscopy) การใช้เทคนิค H-NMR (NMR-Spectroscopy) และการใช้เอนไซม์ (มงคล สุขวัฒนาสินธิ์, 2544)

เนื่องจากไคตินและไคโตซานเป็น โกลิโพลิเมอร์ระหว่างสองโมโนเมอร์ของ *N*-Acetyl-D-Glucosamine และ D-Glucosamine ระดับการกำจัดหมู่อะซีติลจึงเป็นตัวบ่งชี้ความเป็นไคตินและไคโตซาน ถ้าสัดส่วนที่อยู่ร่วมกันของโมโนเมอร์แรกมากกว่า คือมีค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีติลต่ำ จะแสดงสมบัติเด่นของไคติน แต่ถ้าสัดส่วนของโมโนเมอร์ที่สองมากกว่า คือมีค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีติลสูงจะแสดงสมบัติเด่นของไคโตซาน (ภาวดี เมธะกานนท์ และคณะ, 2543)

ความหนืด (Viscosity)

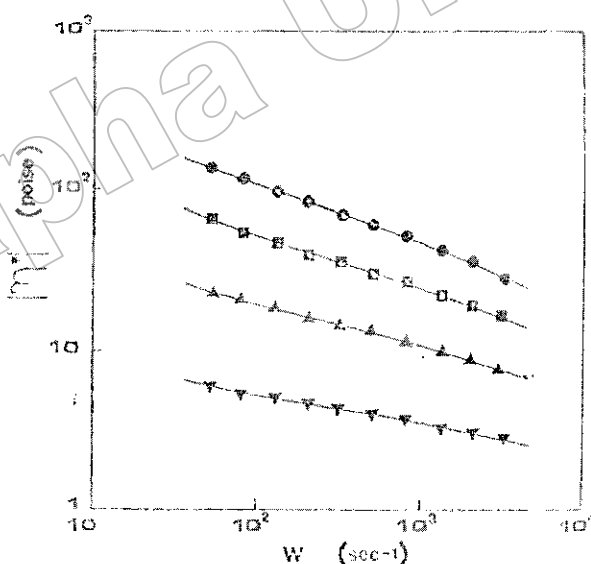
การไหลของพอลิเมอร์เป็นตัวชี้วัดขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี กล่าวคือ หากสายโซ่พอลิเมอร์มีความยาวมากจะแสดงสมบัติการไหลที่ช้า เมื่อเตรียมสารละลายพอลิเมอร์ ความหนืดของสารละลายจะแปรผันตามน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้น ๆ ทั้งนี้ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซีติล ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ค่า และเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซีติล โดยพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงและใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานาน ทำให้ความหนืดของสารละลายไคโตซานลดลง เนื่องจากภาวะที่รุนแรงจะทำให้เกิดการดีพอลิเมอร์ไรเซชันของสายโซ่โมเลกุล และเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ความหนืดของสารละลายไคโตซานลดลงอย่างรวดเร็ว (Muzzarelli, 1977) แสดงได้ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ผลของเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซีติล (ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 118 องศาเซลเซียส) ต่อความหนืดของสารละลายไคโตซาน (Muzzarelli, 1977)

นอกจากน้ำหนักโมเลกุล และภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะซีติลแล้ว ความหนืดของสารละลายไคโตซานยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีกหลายประการ เช่น ระดับการกำจัดหมู่อะซีติล ความเป็นกรดและด่าง และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้ และการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายพอลิเมอร์ให้ค่าความหนืดแตกต่างกัน เช่น ความหนืดของไคโตซานในกรดอะซีติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรดต่ำลง ในขณะที่ความหนืดของไคโตซานในกรดไฮโดรคลอริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายสูงขึ้น (ภาวดี เมษะคานนท์ และคณะ, 2543)

สมบัติของของไหลประเภท Non-Newtonian Fluids ค่าความหนืดจะเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนอัตราเฉือน (Shear Rate) โดยปัจจัยที่มีผลต่อการวัดค่าความหนืดของของไหลประเภทนี้ได้แก่ รุ่นของเครื่องมือวัดความหนืด ขนาดหัวเข็ม และความเร็วยกที่ใช้ในการวัด Kienzle (1983 cited in Hein, 2003, p. 39) ศึกษาสมบัติการไหลของสารละลายไคโตซานความเข้มข้น 1.5-3.0 กรัมต่อเดซิลิตรในกรดอะซีติก ที่อัตราเฉือน 50-3,300 หนึ่งต่อวินาที พบว่ามีพฤติกรรมการไหลแบบ Shear Thinning หรือเรียกว่า Pseudoplastic (ค่าความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน) แสดงได้ดังภาพที่ 2-4 โดย Degree of Pseudoplasticity เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไคโตซาน



ภาพที่ 2-4 สมบัติแบบ Non-Newtonian และพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic ของสารละลายไคโตซานความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ค่าความเป็นกรดต่าง 3 และ Ionic Strength 0.2 โมลาร์, ความเข้มข้นของสารละลายไคโตซาน (∇ = 1.5 $\blacktriangle$ = 2.0 $\blacksquare$ = 2.5 $\bullet$ = 3.0 กรัมต่อเดซิลิตร) (Kienzle, 1983 cited in Hein, 2003, p. 40)

ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานที่มีสมบัติเป็น Non-Newtonian Shear Thinning Fluids จะอยู่ในช่วงกว้าง แต่ที่ค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีติลสูง และความเข้มข้นของสารละลายต่ำ สารละลายไคโตซานจะแสดงสมบัติการไหลแบบ Newtonian เนื่องจากโมเลกุลของไคโตซานมีการสร้างร่างแหที่แข็งแรงขึ้น โครงสร้างที่เป็นร่างแหนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย ระดับการกำจัดหมู่อะซีติล น้ำหนักโมเลกุล อัตราเฉือนที่ใช้ และการสร้างพันธะกับพอลิเมอร์อื่น การลดพลังงานกระตุ้นของการไหลด้วยการเพิ่มอัตราเฉือน ค่าความเป็นกรดต่าง และความเข้มข้นของสารละลายช่วยให้โครงสร้างที่เป็นร่างแหถูกทำลาย (Mucha, 1998 cited in Hein, 2003, pp. 40-41)

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight)

น้ำหนักโมเลกุลเป็นสมบัติทางเคมีกายภาพที่สำคัญของไคโตซาน การหาน้ำหนักโมเลกุลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การศึกษาสมบัติความหนืด (Viscometry) การศึกษาสมบัติการกระเจิงแสง (Light Scattering) และการใช้วิธีทางโครมาโตกราฟี (Chromatography) การศึกษาสมบัติความหนืดเป็นเทคนิคที่ทำได้ค่อนข้างสะดวก ไม่ต้องใช้เครื่องมือราคาแพง และให้ผลที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามการหาน้ำหนักโมเลกุลด้วยวิธีนี้จะให้ผลแม่นยำ (Accuracy) เมื่อแต่ละโมเลกุลมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากันหมด หรือมีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับหนึ่ง (Monodisperse) ถ้ามีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 1 (Polydisperse) ค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ได้จะไม่แม่นยำนัก (วิภาวี โฮวัน, 2544)

ไคตินในธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1.0×10^6 ในขณะที่น้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยของไคโตซานที่ผลิตในเชิงการค้า คือ 1.2×10^5 อย่างไรก็ตามน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ในการผลิต หากภาวะที่ใช้ในการกำจัดแร่ธาตุและโปรตีนไม่รุนแรงมากเท่าใด น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานก็จะสูงขึ้นเท่านั้น Muzzarelli (1977) พบว่าเมื่อทำปฏิกิริยากำจัดแร่ธาตุออกจากไคตินโดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่อุณหภูมิห้อง และทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซีติลโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยานาน 1 ชั่วโมง ได้ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 1.0×10^6

ความหนาแน่น (Bulk Density)

โดยทั่วไปความหนาแน่นของไคตินที่ผลิตจากเปลือกกุ้ง และเปลือกปูมีค่า 0.06 และ 0.17 กรัมต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ (Shahidi & Synowiecki, 1991 cited in Kim, 1991, p. 13) แสดงให้เห็นว่าไคตินจากเปลือกกุ้งมีน้ำหนักมากกว่าไคตินจากเปลือกปู Rout (2001 cited in Kim, 1991, p. 13) ศึกษาผลของกระบวนการเตรียมไคติน และไคโตซานจากเปลือกกุ้งน้ำจืด (Crawfish) ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติการใช้งานของไคตินและไคโตซาน พบว่าความหนาแน่นของไคตินและ

ไคโตซานที่ผลิตจากเปลือกกุ้งน้ำจืดมีค่าสูงมาก (0.39 กรัมต่อมิลลิลิตร) ค่าความหนาแน่นนี้ได้จากการวัดปริมาตรของไคโตซานขนาดอนุภาค 0.5 มิลลิเมตร ที่อัดตัวอยู่ในกระบอกตวงขนาด 25 มิลลิลิตร Rout สรุปว่าความหนาแน่นที่มีค่าสูงนี้อาจเกิดจากรูพรุนของวัตถุดิบที่นำมาสกัด แต่หลังจากผ่านกระบวนการกำจัดแร่ธาตุ หรือ โปรตีน หรือทั้ง 2 กระบวนการแล้วค่าความหนาแน่นของไคตินกับไคโตซานมีความแตกต่างกันน้อย จากการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของไคตินและไคโตซานที่ผลิตจากเปลือกกุ้งน้ำจืด และที่ผลิตเชิงการค้า แสดงให้เห็นความแตกต่างของค่าความหนาแน่น ซึ่งอาจเกิดจากชนิดและแหล่งของวัตถุดิบ รวมทั้งกระบวนการผลิต

ปริมาณเถ้าและแร่ธาตุ (Ash and Mineral Contents)

เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไคติน และไคโตซานส่วนใหญ่ คือ เปลือกสัตว์ทะเลซึ่งสัมผัสใกล้ชิดกับน้ำทะเลที่มีแร่ธาตุหลายชนิดปะปนอยู่ นอกจากนี้สมบัติการคีเลต (Chelating) ของไคติน และไคโตซานทำให้โลหะหนักที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม และโลหะหนักที่มาจากขั้นตอนการผลิตมีโอกาสเข้ามาปนเปื้อน ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณโลหะที่มีอยู่ในไคติน และไคโตซานจึงมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำมาใช้บริโภคหรือใช้เป็นอาหารสัตว์

ไคโตซานที่ผลิตเชิงการค้ามักอยู่ในรูปผง (Power) และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมาจากของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหารทะเล ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าจึงถือเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของการวิเคราะห์ตัวอย่าง การวิเคราะห์ปริมาณเถ้าของไคโตซานนิยมเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ปริมาณเถ้าของไคโตซานขึ้นอยู่กับชนิด และแหล่งของวัตถุดิบ รวมทั้งวิธีการวิเคราะห์ (Hein, 2003)

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของไคโตซานที่เตรียมได้จากเปลือกกุ้ง 5 พันธุ์ ได้แก่ กุ้งกุลาดำ กุ้งโอคัก กุ้งลายน้ำตาล กุ้งขาว และกุ้งลายหิน ของเยาวภา ไหวพริบ (2534) พบว่าปริมาณเถ้าของไคโตซานจากเปลือกกุ้ง 5 พันธุ์ (เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง) ไม่มีความแตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) กล่าวคือ มีค่าเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 0.1

ปริมาณไนโตรเจน และโปรตีน (Nitrogen and Protein Contents)

เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไคโตซานส่วนใหญ่คือเปลือกสัตว์ทะเล ดังนั้นการปนเปื้อนของโปรตีนจากสัตว์ทะเลจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ มีคนจำนวนมากที่มีอาการแพ้อาหารทะเล การใช้ไคโตซานเป็นส่วนประกอบของอาหาร ยา หรือเครื่องสำอางจึงอาจส่งผลให้เกิดอาการแพ้กับคนที่มีความไวเกินปกติ (Hypersensitive) การผลิตไคโตซานให้มีปริมาณโปรตีนน้อยหรือการสกัดไคโตซานจากสาหร่ายจึงสามารถลดปัญหาดังกล่าว (Nwe & Stevens, 2002 cited in Hein, 2003, p. 42) สำหรับกรณีแรกการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนที่แม่นยำจึงถือเป็นสิ่งสำคัญ

จากเหตุผลดังกล่าวปริมาณโปรตีนจึงจัดเป็นสมบัติอีกประการหนึ่งซึ่งมีความสำคัญต่อคุณภาพของไคโตซาน การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยวิธี Micro-Kjeldahl แม้จะมีความเที่ยงตรง (Precision) ในการหาปริมาณไนโตรเจนสูง แต่ยังคงขาดข้อมูลที่แน่นอนในการคำนวณหาปริมาณโปรตีน ทั้งนี้ค่า Conversion Factor ที่ใช้กันโดยทั่วไปในการคำนวณหาปริมาณโปรตีนในเปลือกกุ้งไคตินและไคโตซาน คือ 6.25

Muzzarelli (1985) รายงานว่าไคโตซานเป็นสารที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงกว่าร้อยละ 7 และโดยทั่วไปไคตินมีปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 6.0-7.0 ในขณะที่ไคโตซานมีปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 7.0-8.4 นอกจากนี้ Peniston and Johnson (1970 อ้างถึงใน เยาวภา ไหวพริบ, 2534 หน้า 45) รายงานว่าหากไคตินมีหมู่อะซีติลครบทุกหน่วยในพอลิเมอร์ ไคตินจะมีปริมาณไนโตรเจนโดยเฉลี่ยร้อยละ 6.9 ในขณะที่หากไคโตซานไม่มีหมู่อะซีติลเหลืออยู่ในสายพอลิเมอร์เลย ไคโตซานจะมีปริมาณไนโตรเจนโดยเฉลี่ยร้อยละ 8.7

ความสามารถในการตกตะกอน (Coagulating Ability)

ไคโตซานเป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอน (Flocculant and Coagulating Agent) ที่ดี เนื่องจากการมีหมู่เอมีโนจำนวนมากซึ่งสามารถแตกตัวเป็นประจุบวกได้ จึงสามารถจับกับประจุลบ เช่น โปรตีน สีย้อม และพอลิเมอร์อื่น ๆ จากการศึกษาประสิทธิภาพของไคโตซานในการแยกโปรตีนออกจากเนย (Cheese Whey) พบว่าความสามารถการจับโปรตีนมีความสัมพันธ์เชิงลบกับน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถจับกับโลหะหนักได้ โดยในโตรเจนในหมู่เอมีโนของไคโตซานทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ทำให้ไอออนของโลหะหนักสามารถสร้างพันธะเชิงซ้อน (Coordinate) กับหมู่เอมีโนได้ และยังพบว่าหมู่เอมีโนในไคโตซานมีประสิทธิภาพในการจับกับไอออนของโลหะได้ดีกว่าหมู่อะซีติลในไคติน ดังนั้นไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่อะซีติลสูงจะมีอัตราการดูดซับหรือความสามารถการจับไอออนของโลหะหนักสูง ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของไคโตซานยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายประการ เช่น ความเป็นผลึก และความสามารถในการดึงดูดน้ำของไคโตซาน เป็นต้น (ภาวดี เมธะกานนท์ และคณะ, 2543)

ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา

ไคโตซานประกอบด้วย 3 หมู่ฟังก์ชันที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ หมู่เอมีโนที่คาร์บอนตำแหน่งที่สอง หมู่ไฮดรอกซิล 2 ประเภท คือ ประเภทปฐมภูมิ (Primary Alcohol, $-CH_2OH$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 และประเภททุติยภูมิ (Secondary Alcohol, $-CHOH$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 การปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของหมู่ฟังก์ชันทั้งสามนี้เป็นผลให้เกิดวัสดุต่าง ๆ ในการใช้งานที่แตกต่างกันมากมาย (ภาวดี เมธะกานนท์ และคณะ, 2543)

สมบัติการใช้งานของไคตินและไคโตซาน

สมบัติการใช้งานของไคตินและไคโตซาน หมายถึง พฤติกรรมของไคตินและไคโตซาน อันเป็นผลจากสมบัติทางเคมีกายภาพ การศึกษาสมบัติการใช้งานของไคตินและไคโตซานอาจแบ่งออกเป็น การจับสีย้อม การจับไขมัน การจับน้ำ และการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ ปัจจุบันสมบัติการใช้งานเหล่านี้เป็นเรื่องที่มีผู้สนใจศึกษากันอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการนำไคตินและไคโตซานไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ต่อไป เช่น การบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม ฟอกย้อม การแยกโปรตีนออกจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้เป็นยาลดความอ้วน และใช้เป็น ส่วนผสมในเครื่องสำอาง เป็นต้น

ความสามารถการจับสีย้อม (Dye Binding Capacity)

เนื่องจากโครงสร้างของไคโตซานประกอบด้วยหมู่อะมิโนจำนวนมากในสายโซ่โมเลกุล ซึ่งสามารถรับโปรตอนแล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปประจุบวก ทำให้ไคโตซานสามารถจับกับโมเลกุลของสีย้อมที่มีประจุลบ (หมู่ซัลโฟเนต, $-SO_3^-$) ได้ กลไกการจับ หรือการดูดซับสีย้อมของไคโตซาน เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างประจุ (Ionic Attraction) (Wong, Szeto, Cheung, & McKay, 2004)

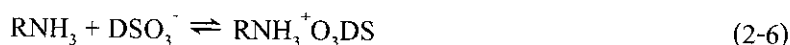
กลไกการดูดซับสีย้อมของไคโตซานกับสีย้อมที่มีประจุลบ เช่น สีย้อมสีแดง สามารถอธิบายได้กล่าวคือ เมื่อสีย้อมถูกละลายในหมู่ซัลโฟเนตในสีย้อม (D- SO_3Na) จะแตกตัวเป็นไอออนลบ แสดงได้ดังสมการที่ (2-4)



ในสารละลายกรดหมู่อะมิโนของไคโตซานจะถูกโปรตอนเตต (Protonate) แสดงได้ดังสมการที่ (2-5)



กลไกการเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของไคโตซาน กับประจุลบของสีย้อม แสดงได้ดังสมการที่ (2-6)



1. ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถการดูดซับสีย้อม

การนำไคโตซานมาใช้ในการดูดซับสีย้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบำบัดน้ำทิ้งจาก

กระบวนการฟอกย้อมจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ เช่น ชนิดของสีย้อม ขนาดและพื้นที่ผิวของไคโตซาน ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม เป็นต้น

1.1 ชนิดและขนาดของสีย้อม

กลไกการดูดซับ และความสามารถการดูดซับสีย้อมของไคโตซานขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อม (แสดงได้ดังตารางที่ 2-2) เนื่องจากไคโตซานมีสมบัติเป็นแคตไอออนิกพอลิเมอร์จึงสามารถดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบได้ดีกว่าสีย้อมที่มีประจุบวก นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของสีย้อมก็เป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งซึ่งมีผลต่อความสามารถการดูดซับของไคโตซาน เนื่องจากไคโตซานมีรูพรุนจำนวนมาก สีย้อมที่มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่ารูพรุนของไคโตซานจึงถูกดูดซับได้ดีกว่าสีย้อมที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เพราะสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะถูกดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน National Textile Center (1993) รายงานว่าไคโตซานสามารถดูดซับสีย้อมที่มีขนาดเล็ก หรือมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้ดี ทั้งนี้โลหะที่เป็นส่วนประกอบของสีย้อมบางชนิดไม่มีส่วนช่วยในการดูดซับสีย้อมของไคโตซาน

Wong et al. (2004) ศึกษาความสามารถการดูดซับสีแอซิดของไคโตซาน โดยใช้สีแอซิด 5 ชนิด ได้แก่ Acid Green 25 (AG25) Acid Orange 10 (AO10) Acid Orange 12 (AO12) Acid Red 18 (AR18) และ Acid Red 73 (AR73) (ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 2-2) พบว่าสี AO12 ซึ่งเป็นสีย้อมที่มีหมู่ซัลโฟเนต 1 หมู่ (Monovalent) และมีโมเลกุลขนาดเล็กที่สุด (F.W. = 350.3 กรัมต่อโมล) ในจำนวนสีย้อมที่ใช้ศึกษาทั้ง 5 ชนิด ทำให้สีย้อมสามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างภายในของไคโตซานซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุนได้ดี ไคโตซานจึงมีความสามารถในการดูดซับสี AO12 สูงที่สุด ในกรณีของสี AO10 และ AR73 (Divalent) พบว่าไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสี AO10 (F.W. = 452.4 กรัมต่อโมล) สูงกว่า AR73 (F.W. = 566.5 กรัมต่อโมล) จึงคาดว่าสีย้อมที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถแทรกซึมสู่โครงสร้างภายในของไคโตซานได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนสี AG25 และ AR18 (Trivalent) พบว่าไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดนี้ต่ำที่สุด เนื่องจากโมเลกุลของสีมีขนาดใหญ่ (F.W. = 622.6 และ 604.5 กรัมต่อโมล ตามลำดับ)

ตารางที่ 2-2 การเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับสูงสุด (Maximum Monolayer Adsorption Capacities) ของสีย้อมบางชนิดของไคโตซาน

ชนิดของสีย้อม	ความสามารถการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)	เอกสารอ้างอิง
Acid Red 1	2426	National Textile Center (1993)
Reactive Red 222	299-380	
Reactive Black 222	54-87	Juang et al. (1997)
Reactive Yellow 145	117-179	
Reactive Red 222	1,026-1,106	Wu, Tseng, & Juang (2000 cited in Chiou, Ho, & Li, 2004, p. 76)
Acid Green 25	645	
Acid Orange 10	923	
Acid Orange 12	973	Wong et al. (2004)
Acid Red 18	693	
Acid Red 73	728	
Indigo Carmine	72	Prado, Torres, Faria, & Dias (2004)

1.2 ขนาด และพื้นที่ผิวของไคโตซาน

ขนาด และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในเชิงลบ กล่าวคืออัตราเร็วของการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย (วไลลักษณ์ เจริญสุข, 2544) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปริมาณการดูดซับสีย้อมจะลดลงเมื่ออนุภาคของไคโตซานมีขนาดใหญ่ขึ้น (Chamnanmanoontham, 1999; Juang et al., 1997)

1.3 ความเป็นกรดด่าง

ความสามารถการดูดซับของไคโตซานขึ้นอยู่กับความเป็นกรดของสารละลายสีย้อม เนื่องจากการดูดซับของสีย้อมที่มีประจุลบบนไคโตซานเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่าง

สีย้อมกับไคโตซานที่ถูกโปรโตเนต โดยค่า pK_a ของหมู่อะมิโนในโครงสร้างของไคโตซานเท่ากับ 6.3 (Muzzarelli, 1985)

Chamnanmanoontham (1999) ศึกษาความสามารถการดูดซับสีย้อมประเภทละลายน้ำ ได้แก่ เบิล็อกกิ่ง ไคติน และไคโตซาน พบว่าตัวดูดซับทุกชนิดสามารถดูดซับสีย้อม สิริแอคทีฟ และสีย้อมเร็ค (ประจุลบ) ได้ดีในสารละลายสีย้อมที่มีค่าความเป็นกรดต่าง 5 หรือต่ำกว่า โดยไคโตซานสามารถดูดซับสีย้อมดังกล่าวได้ในปริมาณสูงกว่าไคติน และเบิล็อกกิ่ง แต่สีย้อมเบสิก (Basic Dye) (ประจุบวก) ถูกดูดซับได้ดีในสารละลายสีย้อมที่มีค่าความเป็นกรดต่าง 10 หรือสูงกว่า โดยเบิล็อกกิ่งดูดซับสีย้อมเบสิกได้ในปริมาณสูงกว่าไคติน และไคโตซาน

1.4 อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับขึ้นอยู่กับประเภทของการดูดซับ หากการดูดซับในระบบเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปทางลดลงหรือคงที่ หากระบบเป็นการดูดซับทางเคมี อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสู่สัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น (วไลลักษณ์ เชตสุข, 2544)

Uzun and Guzel (2005) ศึกษาผลของอุณหภูมิ (293 313 และ 333 เคลวิน) ต่อไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม Orange II (O-II) Crystal Violet (CV) และ Reactive Blue 5 (RB5) บนไคโตซาน พบว่าการดูดซับสีย้อม O-II เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่มีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น Uzun and Guzel จึงกล่าวว่าการดูดซับในระบบน่าจะมีทั้งการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมีร่วมกัน โดยที่อุณหภูมิสูงการดูดซับทางเคมีทำให้การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การดูดซับทางกายภาพทำให้เกิดการคายสีย้อม ในกรณีของสีย้อม CV ปริมาณการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คาดว่าเกิดจากการดูดซับทางกายภาพระหว่างสารละลายสีย้อม CV ซึ่งมีประบวกกับหมู่อะมิโนของไคโตซาน ส่วนสีย้อม RB5 ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คาดว่าเกิดจากการดูดซับทางเคมีระหว่างประจุลบของสารละลายสีย้อม RB5 กับประจุบวกของไคโตซาน ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับสีย้อม O-II และ CV ของไคโตซาน แสดงได้ดังตารางที่ 2-3

Cho et al. (1998) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการจับสีย้อมของไคโตซานที่ผลิตเชิงการค้า 4 ตัวอย่าง โดยใช้สารละลายสีย้อมที่มีปริมาณสีย้อมอยู่ 10 มิลลิกรัม และใช้ไคโตซานตัวอย่าง 0.2 กรัม เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการจับสีย้อมที่อุณหภูมิ 20 และ 80 องศาเซลเซียส (ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 2-4) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิไม่มีผลต่อความสามารถ

การจับสีย้อมของไคโตซานตัวอย่างที่ 1 และ 4 แต่ส่งผลให้ความสามารถการจับสีย้อมของไคโตซานตัวอย่างที่ 2 ลดลง ($p < 0.05$) Cho et al. จึงสรุปผลการทดลองโดยอ้างถึง McKay, Blair, and Gardner (1982 cited in Cho et al., 1998) ซึ่งพบว่าการลดลงของความสามารถการดูดซับสีย้อมของไคโตซานเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาย้อนกลับของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มอุณหภูมิอาจส่งผลให้ความสามารถการดูดซับสีย้อมของไคโตซานสูงขึ้นได้เช่นกันเนื่องจากการเพิ่มการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสีย้อม ขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดการพองตัวของไคโตซานช่วยให้โมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่สามารถแทรกเข้าไปอยู่ภายในอนุภาคของไคโตซานได้ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่มีผลต่อความสามารถการดูดซับของสีย้อมบางชนิด

ตารางที่ 2-3 ปริมาณการดูดซับสีย้อมสูงสุด ($q_{\max}$) และค่าคงที่ของแลงเมียร์ (b) ของไคโตซาน (UZun & Guzel, 2005)

อุณหภูมิ (เคลวิน)	O-II		CV	
	$q_{\max}$ (มิลลิโมลต่อกรัม)	b (ลิตรต่อมิลลิโมล)	$q_{\max}$ (มิลลิโมลต่อกรัม)	b (ลิตรต่อมิลลิโมล)
293	0.330	3.96	1.546	74.88
333	0.322	2.99	0.745	70.94

1.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี

Knorr (1983) ศึกษาสมบัติการจับสีย้อมของไคตินและไคโตซานกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่ระดับ 0.2-1.6 มิลลิกรัมสีต่อกรัมไคตินหรือไคโตซาน โดยใช้สี FD&C Red No. 40 พบว่าความสามารถการจับสีย้อมของไคตินและไคโตซานมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ($p < 0.01$) สอดคล้องกับการศึกษาของ Chammanmanoontham (1999) และ Cho et al. (1998) ซึ่งพบว่าปริมาณการดูดซับสีย้อมของไคตินและไคโตซานจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมสูงขึ้น

ตารางที่ 2-4 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการจับสีย้อม (DBC) ของไคโตซาน (Cho et al., 1998)

ตัวอย่างของไคโตซาน	DBC ^a (ร้อยละ)	
	20 (องศาเซลเซียส)	80 (องศาเซลเซียส)
1	100 ± 0	100 ± 0
2	93 ± 1 ^a	88 ± 1 ^b
3	84 ± 1	75 ± 3
4	100 ± 0	99 ± 0

^{a,b} ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทำซ้ำ ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อ 0.2 กรัมของไคโตซาน ค่าเฉลี่ยที่มีตัวกกำลังต่างกันตามแนวนอนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2. การดูดซับ สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การศึกษาความสามารถในการดูดซับสาร และไอโซเทอร์มของการดูดซับ จัดว่าเป็นการศึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพิจารณาเลือกใช้ตัวดูดซับอย่างมีประสิทธิภาพ โดยตัวดูดซับที่มีรูพรุนสูง และมีพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมากจะมีความจุในการดูดซับมาก นอกจากนี้โครงสร้างทางเคมีที่เหมาะสมยังช่วยให้ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับสูงขึ้นด้วย

2.1 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ หมายถึง กระบวนการสะสมโมเลกุลของสารที่ผิวสัมผัส (Interface) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างระบบ 2 ระบบ ได้แก่ ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง ก๊าซและของแข็งหรือของเหลวและของเหลว โมเลกุลที่มาสะสมหรือถูกดูดซับไว้ที่ผิวสัมผัส เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และ โมเลกุลซึ่งมีผิวเป็นที่สะสมของสาร เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ระหว่างระบบที่เป็นของแข็งและของเหลวนั้นตัวถูกละลายจากของเหลวจะถูกจับไว้ที่ผิวของของแข็ง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

2.1.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 3 ระยะติดต่อกัน กล่าวคือ ระยะที่ 1 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ ระยะที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจาย (Diffusion) เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ และระยะที่ 3 เกิดการดูดติดผิวในรูพรุน

ระหว่างตัวดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ (กรองกาญจน์ ภูระรัตน์, 2530 อ้างถึงใน ศิริรัตน์ ศรีเกษเพ็ชร, 2543, หน้า 27)

2.1.2 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับอาจเกิดจากแรงทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาล (Van Der Waal's Forces) หรือจากพันธะทางเคมี เช่น พันธะไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Bonding) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) หรือทั้งสองอย่างรวมกัน (Perry, Green, & Maloney, 1984) การดูดซับจึงแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้ (วไลลักษณ์ เชิดสุข, 2544)

2.1.2.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวดูดซับ โดยที่ตัวดูดซับและตัวดูดซับไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีใดๆ การดูดซับแบบนี้สามารถผันกลับได้ (Reversible) อาจเรียกการดูดซับทางกายภาพว่า การดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาล (Van Der Waal's Adsorption) การกำจัดตัวดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับทำได้ง่าย

2.1.2.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

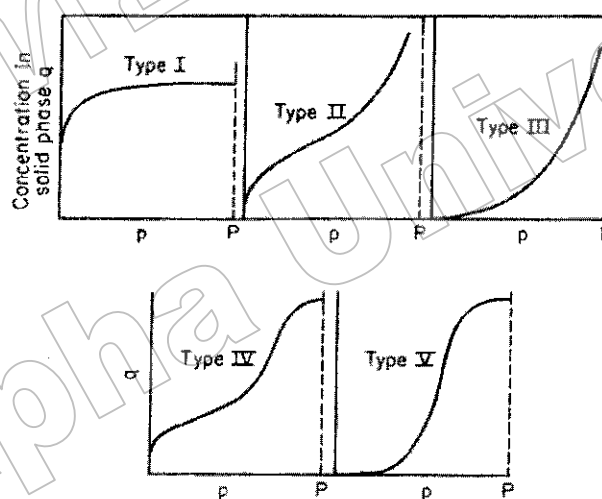
การดูดซับทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและตำแหน่งดูดซับ (Adsorption Site) ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับบางครั้งต้องการพลังงานเข้าร่วมด้วย เรียกว่า การดูดซับด้วยการกระตุ้น (Activated Adsorption) พันธะที่เกิดขึ้นแข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับในลักษณะชั้นเดียว (Monolayer) ซึ่งต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่เกิดการดูดซับในลักษณะหลายชั้น (Multilayer) จากแรงแวนเดอร์วาล

2.2 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

การดูดซับด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย (Liquid-Solid Adsorption) มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินไประยะหนึ่ง จะมีการคายการดูดซับ (Desorption) เกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน จนกระทั่งจำนวนของตัวดูดซับที่ถูกดูดไว้ที่ผิวกับจำนวนของตัวดูดซับที่คายออกมาเท่ากัน ส่งผลให้อัตราการดูดซับและอัตราการคายการดูดซับเท่ากัน หรือระบบเข้าสู่สมดุล (Adsorption Equilibrium) ที่ภาวะสมดุลความเข้มข้นของตัวดูดซับบนผิวของของแข็งจะไม่เปลี่ยนแปลง สมดุลของการดูดซับเป็นสมบัติเฉพาะของแต่ละระบบขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย ตัวดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความเป็นกรดต่าง ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น ทั้งนี้ความสมดุลที่เกิดขึ้น

ของระบบสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Samuel & Osman, 1987 อ้างถึงใน ศิริรัตน์ ศรีเกษเพ็ชร, 2543, หน้า 33-34)

ไอโซเทอร์มของการดูดซับระหว่าง 2 ระบบ คือ เส้น โค้งเส้นเดียวของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสาร ณ จุดสมดุลที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง ในกรณีที่แต่ละระบบมีอุณหภูมิต่างกันต้องเขียนเส้นกราฟแยกกัน (Perry et al., 1984) ดังนั้นแนวทางในการศึกษาไอโซเทอร์มจึงต้องทำการทดลองเพื่อหาปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ เพื่อนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นที่จุดสมดุลของตัวดูดซับที่อุณหภูมิหนึ่ง Brunauer (1940 cited in Perry et al., 1984, pp. 16-12) เสนอไอโซเทอร์มระหว่างตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง และตัวดูดซับที่เป็นก๊าซโดยแบ่งลักษณะการดูดซับออกเป็น 5 ชนิด แสดงได้ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับทางกายภาพชนิดต่าง ๆ ของ Brunauer, 1940 cited in Perry et al., 1984, pp. 16-12)

ไอโซเทอร์มชนิดที่ I: ไอโซเทอร์มชนิดนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันเพิ่มจำนวนโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นจนถึงที่ความดันหนึ่งจำนวนโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับจะคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการอึดตัวเมื่อผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมทั้งหมด ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของการดูดซับแบบชั้นเดียว

ไอโซเทอร์มชนิดที่ II: ไอโซเทอร์มชนิดนี้แสดงให้เห็นว่าจำนวน โมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน จากนั้นจะเริ่มคงที่และเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันสูงขึ้นอีก ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการดูดซับแบบหลายชั้น อันเป็นผลมาจากการควบแน่นเป็นของเหลว

ไอโซเทอร์มชนิดที่ III: ไอโซเทอร์มชนิดนี้แสดงให้เห็นว่า โมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับได้น้อย ณ จุดเริ่มต้นของการดูดซับ แต่จำนวน โมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพื้นผิวของตัวดูดซับได้ถูกปกคลุมจนเต็มแล้ว ทั้งนี้เนื่องจาก โมเลกุลของก๊าซมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน

ไอโซเทอร์มชนิดที่ IV และ V: ไอโซเทอร์มชนิดนี้มีลักษณะคล้ายไอโซเทอร์มชนิดที่ II และ III แต่ชั้นที่มีการดูดซับจะมีความหนาแน่นมากกว่าที่ดูดซับเมื่อเพิ่มความดัน จากนั้นจะเริ่มลดลงและเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันสูงขึ้นทั้งนี้เนื่องจากผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของก๊าซแบบหลายชั้นทำให้เกิดการควบแน่นเป็นของเหลว แล้วเกิดการอิมตัวอีกครั้งซึ่งเป็นจุดที่แตกต่างจากไอโซเทอร์มชนิดที่ I (นิสากิ, 2541)

ลักษณะเส้นโค้งที่ขึ้นขึ้นของไอโซเทอร์มชนิดที่ I แสดงถึงความเหมาะสมต่อการดูดซับของตัวดูดซับซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุน และมีขนาดรูมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลของตัวดูดซับไม่มากนัก และเนื่องจากมีจุดอิมตัวเกิดขึ้นจากการดูดซับอย่างสมบูรณ์ในรูพรุนของตัวดูดซับ ดังนั้น เส้นโค้งที่มีลักษณะเว้าเข้า (ไอโซเทอร์มชนิดที่ III) จึงเป็นเส้นโค้งที่ไม่เหมาะสมต่อการดูดซับตัวดูดซับ ส่วนไอโซเทอร์มชนิดที่ IV และ V จะมีอิทธิพลที่เกี่ยวข้องมากกว่า 1 อย่าง เช่น การดูดซับที่เกิดขึ้นบนผิวสองชั้น หรือผิวที่มีรูพรุนขนาดกว้างกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับมาก รูปร่างของไอโซเทอร์มสามารถบอกถึงลักษณะการดูดซับได้ ตัวอย่างเช่น ไอโซเทอร์มที่เริ่มต้นด้วยเส้นโค้งที่สูงชันเกือบเป็นเส้นตรงจะบ่งบอกถึงลักษณะของตัวดูดซับว่ามีสัมพรรคภาพ (Affinity) ต่อตัวดูดซับสูง (สุพรรณวิภา ศรีกระจิบ, 2541)

ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด (Loading Capacity) ไม่สามารถบอกได้ด้วยรูปร่างของไอโซเทอร์มเพียงอย่างเดียว จำเป็นต้องมีแบบจำลองหรือสมการมาทำนายค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดนี้ สำหรับแบบจำลองการดูดซับที่เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างกว้างขวางในการทำนายลักษณะการดูดซับ คือ แบบจำลองที่เขียนขึ้นโดยแลงเมอร์ และฟรอยด์ลิก (Volesky, 1990 อ้างถึงใน สุพรรณวิภา ศรีกระจิบ, 2541, หน้า 26)

สมการแบบจำลองแลงเมอร์ (Langmuir Adsorption Equation) เป็นสมการที่แสดงการดูดซับบนพื้นผิวที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์ (Homogeneous) โดยไม่มีอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ (Perry et al., 1984) แบบจำลองของแลงเมอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากการดูดซับโมเลกุลของก๊าซบนตัวดูดซับของแข็ง โดยมีสมมติฐานว่าพลังงานของ

การดูดซับของสารแต่ละโมเลกุลจะมีค่าคงที่ และไม่มีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่แน่นนอนของพื้นที่ผิว เรียกว่า ตำแหน่งดูดซับ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สามารถดูดซับสารไว้ได้เพียงหนึ่งอะตอมหรือหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ดังนั้นเมื่อตำแหน่งดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวดูดซับแล้วจะไม่สามารถดูดซับสารเพิ่มได้อีก เรียกการดูดซับแบบนี้ว่า การดูดซับแบบชั้นเดียว (นิสากิ แสงนิล, 2541) รูปแบบทั่วไปของสมการแบบจำลองแลงเมียร์ในระบบที่มีตัวถูกละลายชนิดเดียว แสดงได้ดังสมการที่ (2-2)

$$q = \frac{q_{\max} b C_f}{1 + b C_f} \quad (2-2)$$

- เมื่อ b คือ Langmuir Adsorption Equilibrium Constant (ลิตรต่อมิลลิกรัม)
 $q_{\max}$ คือ ปริมาณการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกละลายสูงสุด หรือความจุของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
 q คือ ปริมาณการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกละลายในตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_f คือ ปริมาณโมเลกุลของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

สมการแบบจำลองฟรอยด์ลิค (Freudlich Adsorption Equation) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ด้วยการกระจายแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential Distribution) (Perry et al., 1984) แบบจำลองนี้ไม่แสดงแนวโน้มเป็นเส้นตรงจากจุดเริ่มต้นที่ความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำ ๆ แต่จะเข้าสู่อำนาจของความเข้มข้นจึงไม่แสดงถึงจุดอิ่มตัวหรือสมดุลของการดูดซับ สมการแบบจำลองฟรอยด์ลิคใช้ได้กับสารละลายที่มีความเข้มข้นปานกลาง ในการพิจารณาเลือกตัวดูดซับใดมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่ากัน รูปแบบทั่วไปของสมการแบบจำลองฟรอยด์ลิคแสดงได้ดังสมการที่ (2-3)

$$q = K_f C_f^\beta \quad (2-3)$$

- เมื่อ K_f คือ ค่าคงที่ของสมดุล

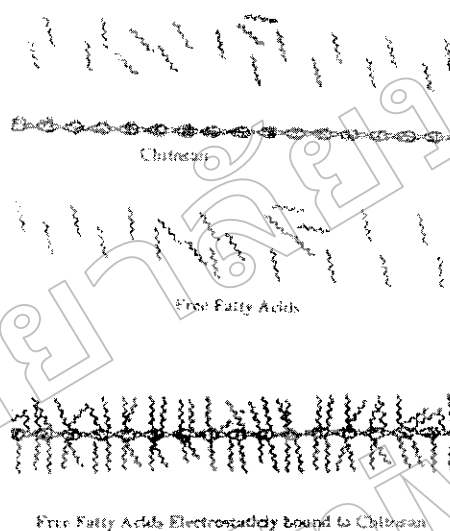
ความสามารถการจับไขมัน (Fat Binding Capacity)

เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของไคโตซานประกอบด้วยหมู่อะมิโนจำนวนมากบนสายพอลิเมอร์ ทำให้ไคโตซานมีสมบัติการจับกับไขมัน และโคเลสเตอรอล (Cholesterol) จากผลการวิจัยพบว่าไคโตซานสามารถดูดซับกรดไขมันและโคเลสเตอรอลได้ดี จึงช่วยป้องกันการดูดซึมโคเลสเตอรอลเข้าสู่กระแสเลือด (Duoxian, Feng, & Qiang, 1996) นอกจากนี้ไคโตซานยังเป็นเส้นใยอาหารหรือไฟเบอร์จากสัตว์ที่ไม่มีรสหวาน ไม่ละลายน้ำ ไม่ย่อยในกระเพาะอาหารของคน และไม่ให้พลังงาน ดังนั้นไคโตซานจึงถูกนำมาใช้ในอาหารเสริมเพื่อการลดน้ำหนัก (ภาวดี เมระคานนท์ และคณะ, 2543; เยาวภา ไหวพริบ, 2536)

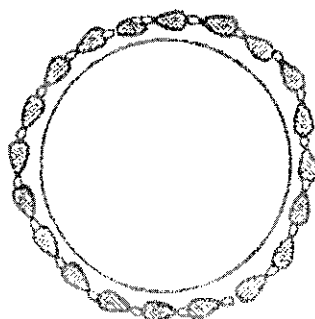
ไคโตซานมีสมบัติการจับโคเลสเตอรอลเช่นเดียวกับยา Cholestyramine แต่ยา Cholestyramine มักก่อให้เกิดอาการข้างเคียงต่อระบบทางเดินอาหารได้มากเนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยเกลือคลอไรด์ (Chloride Salt) แต่ไคโตซานมีข้อเด่นกว่ายา Cholestyramine เนื่องจากเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ ไคโตซานจะทำหน้าที่เป็นตัวจับไขมันในกระเพาะอาหารซึ่งมีภาวะเป็นกรด โดยหมู่อะมิโนในโครงสร้างของไคโตซานจะเปลี่ยนไปเป็นประจุบวก และจะสร้างพันธะที่แข็งแรงกับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นประจุลบ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ของกรดไขมันอิสระที่อยู่ในอาหาร ไคโตซานที่อยู่ในรูปประจุบวกจะทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ของไขมันซึ่งมีประจุลบ โดยอิมัลชันนี้จะเกิดขึ้นตลอดช่วงเวลาไคโตซานสัมผัสกับอาหาร จากนั้นอิมัลชันจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ลำไส้เล็กแล้วจับตัวกับกรดไขมันและโคเลสเตอรอล ในลำไส้เล็กไคโตซานที่อยู่ในอิมัลชันนี้จะไม่ละลายน้ำเนื่องจากมีค่าความเป็นกรดต่างสูงขึ้น หลังจากนั้นอิมัลชันจะเกิดการตกตะกอนบริเวณดูโอดีนัม (Duodenum) ในที่สุดจะถูกขับถ่ายออกไปพร้อมกับอุจจาระ ทำให้กรดไขมันไม่ถูกดูดซึม จึงช่วยรักษาระดับไขมันในเลือด นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถจับกับไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) โคเลสเตอรอล และสเตอรอล (Dietary Sterol) อื่น ๆ ได้อีกด้วย ในภาวะที่เหมาะสมไคโตซานสามารถจับไขมันได้ประมาณ 4-5 เท่าของน้ำหนักตัวมันเอง (Hennen, 1996; Wilke Resource Inc., 2002)

กลไกการจับไขมันของไคโตซานยังไม่มีที่ทราบแน่ชัด แต่มีการทดลองที่ได้รับการยืนยัน 2 กลไก คือ กลไกการจับกันของประจุตรงข้ามแบบขั้วแม่เหล็ก และกลไกแบบสร้างตาข่าย กลไกแรกเกิดจากประจุบวกของไคโตซานจับกับประจุลบของกรดไขมัน และกรดน้ำดีแล้วรวมกันเป็นสายใยของไคโตซานซึ่งไม่สามารถย่อยได้ สามารถอธิบายการลดลงของโคเลสเตอรอลชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Lipoprotein, LDL) ได้ว่าร่างกายของมนุษย์สร้างกรดน้ำดีภายในตับโดยใช้โคเลสเตอรอลจาก LDL ดังนั้นเมื่อไคโตซานจับกับกรดน้ำดีจึงเพิ่มอัตราการสลาย LDL ทำให้อัตราส่วนระหว่างโคเลสเตอรอลชนิดความหนาแน่นต่ำกับ โคเลสเตอรอลชนิดความ

หนาแน่นสูง (High Density Lipoprotein, HDL) มีความเหมาะสมมากขึ้น ถ้ากรดน้ำดีถูกจับมากพอ ไขมันจะไม่สลายเป็นผลให้เกิดการยับยั้งการย่อยและการดูดซึมไขมันได้ กลไกที่สองโคโคซานทำหน้าที่ห่อหุ้มไขมันและป้องกันไม่ให้หยดไขมันสัมผัสกับเอนไซม์ที่ย่อยไขมัน กลไกการจับไขมันแบบขั้วแม่เหล็ก และแบบสร้างตาข่ายของโคโคซานแสดงได้ดังภาพที่ 2-6 และ 2-7 ตามลำดับ



ภาพที่ 2-6 กลไกการจับไขมันแบบขั้วแม่เหล็กของโคโคซาน (Hennen, 1996)



ภาพที่ 2-7 กลไกการจับไขมันแบบสร้างตาข่ายของโคโคซาน (Hennen, 1996)

ไคโตซานมีสมบัติการจับไขมัน และการเกิดอิมัลชันสูงกว่าไฟเบอร์ธรรมชาติชนิดอื่น ๆ ลักษณะพิเศษนี้เป็นผลเนื่องมาจากหมู่อะมิโนบนโครงสร้างของไคโตซานซึ่งสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปประจุบวกภายใต้ภาวะที่เป็นกรดอ่อน ในขณะที่ไฟเบอร์ธรรมชาติอื่น ๆ เช่น เซลลูโลส และ แป้งมีประจุลบ ส่วนคาราจีแนน (Carrageenan) และวุ้น (Agar) ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุลบ (หมู่ซัลเฟต) (Steven, 1996; Wilke Resource Inc., 2002) ทั้งนี้ผลของไฟเบอร์ชนิดต่าง ๆ ต่อความสามารถในการจับไขมันออกทางอุจจาระซึ่งทำการทดสอบในสัตว์ทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 2-5 จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าไคโตซานช่วยจับไขมันออกจากร่างกายได้สูงกว่าไฟเบอร์ชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลอง 5-10 เท่า (Hennen, 1996)

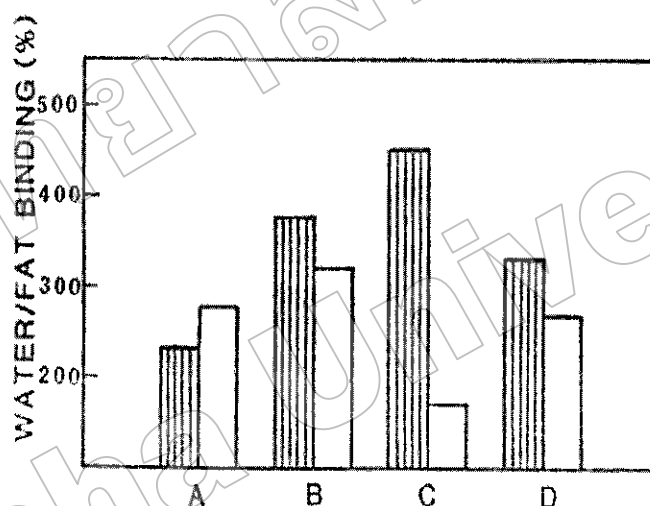
ตารางที่ 2-5 ผลของไฟเบอร์ทางอาหารชนิดต่าง ๆ ต่อความสามารถการจับไขมันออกทางอุจจาระ (Hennen, 1996)

ชนิดของไฟเบอร์	การจับไขมัน (ร้อยละ)	ชนิดของไฟเบอร์	การจับไขมัน (ร้อยละ)
Chitosan	50.8 + 21.6	Carrageenan	9.6 + 1.9
Kapok	8.3 + 1.1	Sodium Alginate	8.1 + 2.2
Pectin	7.4 + 1.9	Locust Bean	6.0 + 1.8
Guar	6.0 + 1.7	Konjak	5.2 + 0.6
Cellulose	5.1 + 2.1	Karaya	4.9 + 1.5
Acacia	4.6 + 0.9	Furcellaran	4.4 + 0.9
Chitin	4.3 + 1.0	Agar	2.8 + 0.4

Knorr (1982) ศึกษาสมบัติการใช้งาน ได้แก่ ความสามารถในการจับน้ำ ความสามารถในการจับไขมัน และการเกิดอิมัลชันของไคติน ไคโตซาน Microcrystalline Chitin และ Microcrystalline Cellulose พบว่าไคตินมีความสามารถในการจับไขมันสูงกว่าไคโตซาน Microcrystalline Chitin และ Microcrystalline Cellulose (ผลการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 2-8) ต่อมา Cho et al. (1998) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีกายภาพกับสมบัติการใช้งานของไคตินและไคโตซานที่ผลิตเชิงการค้าอย่างละ 5 ตัวอย่าง จากบริษัทต่าง ๆ พบว่าความสามารถการจับไขมันเฉลี่ยของไคติน (ร้อยละ 368) ต่ำกว่าไคโตซาน (ร้อยละ 417) เนื่องจากผลการทดลองของ Cho et al. ขัดแย้งกับผลการทดลองที่ Knorr รายงานไว้ ดังนั้น Cho et al. จึงสรุปว่าความสามารถการจับไขมันของไคตินและไคโตซานมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการศึกษา ข้อสรุปดังกล่าวสอดคล้อง

กับผลการศึกษาลักษณะสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพเคมีกับสมบัติการใช้งานของไคโตซาน 6 ตัวอย่าง ซึ่งผลิตเชิงการค้าในประเทศเกาหลีของ No et al. (2000) ซึ่งพบว่าไคโตซานทั้ง 6 ตัวอย่าง มีความสามารถในการจับไขมันแตกต่างกัน ($p < 0.05$) ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 2-6

Sathirakul (1998) รายงานว่า ไคโตซานสามารถจับไขมันได้โดยอาศัย 2 กลไกหลัก ประกอบด้วย การจับไขมันโดยอาศัยการแลกเปลี่ยนประจุ (Anionic Exchange) และการห่อหุ้มไขมัน (Oil Holding) และพบว่าความสามารถในการจับไขมัน และความสามารถการห่อหุ้มไขมันของ ไคโตซานที่นำเข้า 2 ตัวอย่าง และไคโตซานที่ผลิตภายในประเทศ 2 ตัวอย่าง มีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$) ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 2-8 ความสามารถในการจับไขมันและน้ำของ (A) Microcrystalline Cellulose (B) ไคติน (C) ไคโตซาน และ (D) Microcrystalline Chitin (▨ = ความสามารถในการจับน้ำ □ = ความสามารถในการจับไขมัน) (Knorr, 1982)

ตารางที่ 2-6 ความสามารถในการจับน้ำ (WBC) ไขมัน (FBC) และสีย้อม (DBC) ของไคโตซาน (No et al., 2000)

ตัวอย่างของ ไคโตซาน	WBC ¹ (ร้อยละ)	FBC ¹ (ร้อยละ)	DBC (ร้อยละ) ^{1,2}		
			แดง	เหลือง	น้ำเงิน
1	610 ± 0 ^c	306 ± 1 ^{cd}	95.0 ± 0.6 ^d	76.0 ± 0.2 ^c	87.3 ± 2.2 ^c
2	581 ± 3 ^c	323 ± 16 ^d	100.0 ± 0.0 ^e	99.8 ± 0.1 ^e	96.9 ± 0.0 ^d
3	611 ± 2 ^c	403 ± 6 ^e	67.4 ± 4.1 ^b	55.5 ± 0.4 ^b	71.0 ± 0.1 ^b
4	535 ± 0 ^b	296 ± 4 ^c	83.1 ± 0.3 ^c	54.2 ± 4.2 ^b	74.7 ± 1.0 ^b
5	372 ± 3 ^a	237 ± 3 ^b	21.3 ± 1.6 ^a	7.4 ± 0.4 ^a	14.9 ± 7.3 ^a
6	355 ± 6 ^a	217 ± 7 ^a	99.8 ± 0.0 ^e	96.7 ± 0.1 ^d	98.0 ± 0.1 ^d

¹ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทำซ้ำ

^{a-e} มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เฉพาะในแนวดิ่ง (p<0.05)

² ที่ปริมาณสีย้อม 5 มิลลิกรัมต่อ 0.25 กรัมของไคโตซาน

ความสามารถการจับน้ำ (Water Binding Capacity)

จากโครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซาน ดังแสดงในภาพที่ 2-1 เห็นได้ว่าทุกหน่วยของวงไพราโนสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลทั้งประเภทปฐมภูมิ และประเภททุติยภูมิ การที่มีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นฐานโครงสร้างเช่นเดียวกับเซลลูโลส ทำให้ไคตินและไคโตซานแสดงโครงสร้างจำเพาะที่เป็นไฮดรอฟิลิก (Hydrophilic) ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งเกี่ยวกับการรักษาความชุ่มชื้น การเป็นเจลหรือเมมเบรน อย่างไรก็ตาม หมู่ไฮดรอกซิลนี้เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนทั้งแบบภายในและระหว่างสายโซ่ นำมาสู่สมบัติการไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป (สุวนุญ จิราญชัย, รังรอง ยกसान, และโกสุน สมักรรัตน์, 2544)

ไคโตซานเป็นสารที่มีประจุบวกสูง มีโครงสร้างคล้ายตาข่ายหรือฟองน้ำเล็ก ๆ จึงสามารถดูดซับน้ำและสะท้อนรังสียูวีจากแสงแดดได้ จากสมบัติดังกล่าวทำให้มีการนำไคโตซานมาใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง ไคโตซานเป็นตัวรักษาความชุ่มชื้นและสามารถติดผิวหนังได้ดี นอกจากนี้ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ ยังทำหน้าที่เป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ เคลือบบนผิวหนัง ช่วยลดการระเหยของน้ำจากผิวหนัง เพิ่มความสามารถการจับตัวของน้ำ ทำให้ผิวหนังกระชับขึ้น การที่ไคโตซานมีประจุบวกมากทำให้สามารถเกาะกับส่วนที่เป็นประจุลบของผิวหนังและเส้นผมเป็นอย่างดี จึงถูกนำมาไปใช้ในเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของกรดแอลฟาไฮดรอกซีหรือ AHA กรด

พวกนี้จะกระตุ้นให้เซลล์ผิวหนังเก่าหลุดออกเพื่อสร้างเซลล์ใหม่ สำหรับการบำรุงเส้นผมไคโตซานจะก่อตัวเป็นฟิล์มเคลือบเส้นผมไว้ทำให้เส้นผมคงสภาพ ไม่เสียง่าย (เป๊ว อุ่นใจ, 2544; ภาวดี เมระกานนท์ และคณะ, 2543)

Knorr (1982) ศึกษาสมบัติการใช้งาน ได้แก่ ความสามารถในการจับน้ำ ความสามารถในการจับไขมัน และการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของไคติน ไคโตซาน Microcrystalline Chitin และ Microcrystalline Cellulose พบว่าไคโตซานมีความสามารถในการจับน้ำสูงกว่าไคติน Microcrystalline Chitin และ Microcrystalline Cellulose (ผลการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 2-6) ต่อมา No et al. (2000) ศึกษาสมบัติการใช้งานของไคโตซานซึ่งผลิตเชิงการค้าในประเทศเกาหลี 6 ตัวอย่าง พบว่าไคโตซานทั้ง 6 ตัวอย่าง มีความสามารถในการจับน้ำแตกต่างกัน ($p < 0.05$) (ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 2-3) อย่างไรก็ตามค่าที่ได้ต่ำกว่าค่าที่เคยรายงานไว้โดย Cho et al. (1998) ซึ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีกายภาพกับสมบัติการใช้งานของไคโตซานที่ผลิตภายในประเทศเกาหลี 1 ตัวอย่าง และผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศอีก 4 ตัวอย่าง ทั้งนี้ No et al. คาดว่าอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากเหตุผลหลายประการตามที่ Knorr รายงานไว้ กล่าวคือ อาจเกิดจากความแตกต่างของความเป็นผลึก (Crystallinity) ความแตกต่างของจำนวนหมู่ที่ใช้สร้างเกลือ (Salt Forming Group) และปริมาณโปรตีนที่เหลืออยู่ในไคโตซาน

ความสามารถเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifying Capacity)

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าไคโตซานมีสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) การใช้ไคโตซานเป็นอิมัลซิไฟเออร์ทำให้เกิดอิมัลชันเชิงซ้อน (Multiple Emulsion) ชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (W/O/W) โดยไม่ต้องเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ใด ๆ เนื่องจากไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีโมเลกุลที่มีระดับการกำจัดหมู่อะซิดแตกต่างกันอยู่ร่วมกัน โมเลกุลที่มีระดับการกำจัดหมู่อะซิดสูงจึงทำให้เกิดอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W) ในขณะที่โมเลกุลที่มีระดับการกำจัดหมู่อะซิดต่ำทำให้เกิดอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (W/O/W) ด้วยเหตุนี้จึงเปรียบได้ว่าไคโตซานเป็นสารลดแรงตึงผิวซึ่งมีค่าสัดส่วนของส่วนที่ชอบน้ำต่อสัดส่วนที่ชอบน้ำมัน (Hydrophilic-Lipophilic Balance, HLB) ที่แตกต่างกัน (Schulz, Rodriguez, Del Blanco, Pistonesi & Agullo, 1998) ผสมกันอยู่

โครงสร้างของไคโตซานมีส่วนหนึ่งของโมเลกุลที่ชอบน้ำ และอีกส่วนหนึ่งชอบน้ำมัน เรียกว่า แอมฟิฟิลิก (Amphiphilic) ช่วยให้เกิดการคงตัวของอิมัลชันทั้ง Electrosteric Stabilization และ Viscosifying Stabilization ซึ่งมีผลต่อความคงตัวของสารละลายอิมัลชันโดยช่วยลดอัตราการแยกครีม (Creaming) (Del Blanco, Rodriguez, Schulz & Agullo, 1999; Rodriguez, Albertengo & Agullo, 2005)

Schulz et al. (1998) ศึกษาความสามารถการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของโคโคซาน (ระดับการกำจัดหมู่อะซีติลร้อยละ 89) โดยใช้โคโคซานความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดอะซีติกความเข้มข้นร้อยละ 1 และใช้สัดส่วนของสารละลายโคโคซาน 80 กรัมต่อน้ำมัน 20-120 กรัม พบว่าเกิดอิมัลชันเชิงซ้อนชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ เมื่อใช้สัดส่วนของน้ำมันมากสารละลายอิมัลชันเกิดการแยกชั้นเป็น 3 ชั้น คือ อิมัลชันน้ำมัน (Oil Emulsion) อิมัลชันขาว (White Emulsion) และอิมัลชันเจือจาง (Dilute Emulsion) ภายในเวลา 3 ชั่วโมง แต่เมื่อใช้สัดส่วนของสารละลายโคโคซานต่อน้ำมันเท่ากับ 80 ต่อ 20 สารละลายอิมัลชันจะคงสภาพโดยไม่เกิดการแยกชั้นนาน 2 เดือน นอกจากนี้จากการศึกษาค่า HLB สรุปได้ว่าโคโคซานเป็นอิมัลซิไฟเออร์ซึ่งทำให้เกิดอิมัลชันเชิงซ้อนในชั้นตอนเดียว เนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneity) ขององค์ประกอบ กล่าวคือ องค์ประกอบหลักของโคโคซานมีสมบัติชอบน้ำทำให้เกิดอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W) ในขณะที่ยังคงมีหมู่อะซีติลบางส่วนเหลืออยู่ภายในโมเลกุลจึงมีสมบัติไม่ชอบน้ำทำให้เกิดอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำ (W/O/W)

Del Blanco et al. (1999) ศึกษาอิทธิพลของระดับการกำจัดหมู่อะซีติล (ระดับการกำจัดหมู่อะซีติลระหว่างร้อยละ 73-95) ต่อสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ในน้ำมันดอกทานตะวันของโคโคซาน โดยใช้โคโคซานความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในกรดอะซีติกความเข้มข้นร้อยละ 1 และใช้สัดส่วนของสารละลายโคโคซาน 80 กรัมต่อน้ำมัน 20 กรัม พบว่าทุกค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีติลทำให้เกิดอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันในน้ำซึ่งมีค่าความหนืดแตกต่างกัน สารละลายอิมัลชันที่ได้มีความคงตัวเมื่อให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียส กล่าวคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (Droplet Size Distribution) ไขมันไม่มีการเปลี่ยนแปลง และไม่เกิดการตกตะกอน ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Conductivity) ของสารละลายอิมัลชันเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระดับการกำจัดหมู่อะซีติลสูงขึ้น ความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการเส้นตรง K (มิลลิเซกัลต่อเซนติเมตร) $= 4.1_3 \times (\%DD) + 1.3_2 \times 10^3$ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เท่ากับ 0.157 ค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีติลที่ทำให้การเกิดอิมัลชันสมบูรณ์ (Complete Emulsification) คือ ร้อยละ 81 และ 88 กล่าวคือไม่ทำให้เหลือไขมันอิสระหรือเกิดการตกตะกอนของสารละลายอิมัลชัน ส่วนโคโคซานที่มีระดับการกำจัดหมู่อะซีติลสูงมีสมบัติในการเกิดอิมัลชันต่ำ (Poor Emulsification)

สหสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติการใช้งานของไคติน และ ไคโตซาน

การประยุกต์ใช้ไคโตซานอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องควบคุมการเตรียมผลิตภัณฑ์ให้มีสมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติการใช้งานที่เหมาะสม Cho et al. (1998) ศึกษา สหสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณแอมิโน ระดับการกำจัด หมู่อะซีติล ความหนาแน่น ความหนืด กับสมบัติการใช้งาน ได้แก่ ความสามารถในการดูดซับสีย้อม น้ำ และไขมันของไคตินและไคโตซานที่ผลิตเชิงการค้า อย่างละ 5 ตัวอย่าง จากบริษัทต่าง ๆ ได้แก่ Sigma Chemical Co., DuPont Keumho Chemical Co., Pronova Biopolymer และ Chungmo Co. โดยเป็นไคตินและไคโตซานที่เตรียมจากกระดองปู 8 ตัวอย่าง และเตรียมจากเปลือกกุ้ง 2 ตัวอย่าง พบว่าความสามารถการจับน้ำของไคตินมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความหนาแน่น ($r=-0.89$; $p<0.01$) ความสามารถในการจับไขมันของไคตินมีความสัมพันธ์กับความหนืด ($r=0.72$; $p<0.05$) ความสามารถในการจับน้ำและไขมันของไคโตซานมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณแอมิโน ($r=0.81, 0.80$; $p<0.05$) และมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความหนาแน่น ($r=-0.98, -0.95$; $p<0.01$) ในขณะที่การวิเคราะห์ สหสัมพันธ์เมื่อใช้ไคตินและไคโตซานรวมกัน พบว่าความสามารถการจับน้ำของไคตินและไคโตซานมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความหนาแน่น ($r=-0.88$; $p<0.01$) ส่วนความสามารถการจับ ไขมันมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความหนาแน่น ($r=-0.61$; $p<0.05$) และมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ ความหนืด ($r=0.51$; $p<0.05$) ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 2-7

No et al. (2000) ศึกษาสหสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีกายภาพ ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณแอมิโน ระดับการกำจัดหมู่อะซีติล ความหนาแน่น ความหนืด ชนิดและ ปริมาณกรดอะมิโน กับสมบัติการใช้งาน ได้แก่ ความสามารถในการจับน้ำ ไขมัน และสีย้อม ของ ไคโตซานที่ผลิตเชิงการค้าในประเทศเกาหลี 6 ตัวอย่าง จากบริษัท Biotech Keumho Co. และ Kitto Life และไคโตซานที่ผลิตจากกระดองปู (*Chionoecetes opilio*) โดยการศึกษาสหสัมพันธ์ในกลุ่ม สมบัติทางเคมีกายภาพ พบว่าน้ำหนักโมเลกุลมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความหนืด ($r=0.903$; $p<0.05$) และปริมาณไนโตรเจนมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับระดับการกำจัดหมู่อะซีติล ($r=0.942$; $p<0.01$) (ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 2-8) และการศึกษาสหสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมี กายภาพกับสมบัติการใช้งาน พบว่าความสามารถการจับน้ำ และไขมันมีความสัมพันธ์เชิงลบกับ ความหนาแน่น ($r=-0.939, -0.968$; $p<0.01$) ความสามารถในการจับไขมันมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ ความหนืด ($r=0.834$; $p<0.05$) และความสามารถการจับสีย้อมทั้ง 3 สี (สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน) มีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณแอมิโน ($r=-0.919, -0.993, -0.949$; $p<0.01$) ผลการทดลองแสดงได้ดัง ตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-7 สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างสมบัติทางเคมีกายภาพ กับสมบัติการใช้งานของไคตินและไคโตซาน (ความสามารถการจับซับสีย้อม (DBC) น้ำ (WBC) และไขมัน (FBC)) (Cho et al., 1998)

สมบัติการใช้งาน (ร้อยละ)		สมบัติทางเคมีกายภาพ				
		ไนโตรเจน (ร้อยละ)	เถ้า ^a (ร้อยละ)	DD ^a (ร้อยละ)	ความหนาแน่น ^a (กรัมต่อมิลลิกรัม)	ความหนืด ^a (เซนติพอยต์)
ไคติน	DBC	-0.71	-0.55	-0.52	-0.23	0.27
	WBC	0.37	-0.33	0.38	-0.89**	0.29
	FBC	0.09	-0.39	0.33	-0.33	0.72*
ไคโตซาน	DBC	-0.53	0.02	-0.38	-0.22	-0.62
	WBC	0.02	0.81*	0.28	-0.98**	0.34
	FBC	-0.09	0.80*	0.28	-0.95**	0.35
ไคติน+	DBC	-0.34	-0.39	0.10	-0.22	-0.10
ไคโตซาน	WBC	0.45	0.08	0.44	-0.88**	0.35
	FBC	0.22	-0.01	0.29	-0.61*	0.51*

* มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

** มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

ตารางที่ 2-8 สหสัมพันธ์ (r) ในกลุ่มสมบัติทางเคมีกายภาพของไคโตซาน (No et al., 2000)

	น้ำหนัก โมเลกุล (กิโลดาลตัน)	ไนโตรเจน (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	DD (ร้อยละ)	ความหนาแน่น (กรัมต่อ มิลลิกรัม)	ความหนืด (เซนติพอยต์)	กรดอะมิโน (มิลลิกรัม ต่อกรัม)
น้ำหนักโมเลกุล (กิโลดาลตัน)	1.000	-0.315	-0.286	0.025	-0.731	0.903*	-0.038
ไนโตรเจน (ร้อยละ)		1.000	-0.346	0.942**	0.014	-0.216	-0.379
เถ้า (ร้อยละ)			1.000	-0.431	0.161	0.054	-0.440
DD (ร้อยละ)				1.000	-0.116	0.065	-0.389
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิกรัม)					1.000	-0.696	0.205
ความหนืด (เซนติพอยต์)						1.000	-0.408
กรดอะมิโน (มิลลิกรัมต่อกรัม)							1.000

* มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

** มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

ตารางที่ 2-9 สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างสมบัติทางเคมีกายภาพ กับสมบัติการใช้งานของไคโตซาน
(ความสามารถการจับน้ำ (WBC) ไขมัน (FBC) และสีข้อม (DBC)) (No et al., 2000)

	WBC (ร้อยละ)	FBC (ร้อยละ)	DBC (ร้อยละ)		
			แดง	เหลือง	น้ำเงิน
น้ำหนักโมเลกุล (กิโลดาลตัน)	0.739	0.802 ¹	0.406	0.279	0.466
ไนโตรเจน (ร้อยละ)	-0.186	0.020	-0.033	0.262	0.055
เถ้า (ร้อยละ)	-0.239	-0.100	-0.919**	-0.993**	-0.949**
DD (ร้อยละ)	-0.045	0.207	0.053	0.330	0.168
ความหนืด (กรัมต่อมิลลิลิตร)	-0.939**	-0.968**	-0.230	-0.167	-0.277
ความหนืด (เซนติพอยต์)	0.601	0.834*	-0.005	-0.089	0.082
กรดอะมิโน (มิลลิกรัมต่อกรัม)	0.128	-0.335	0.625	0.509	0.524

* มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

** มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

¹ มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.055$)