

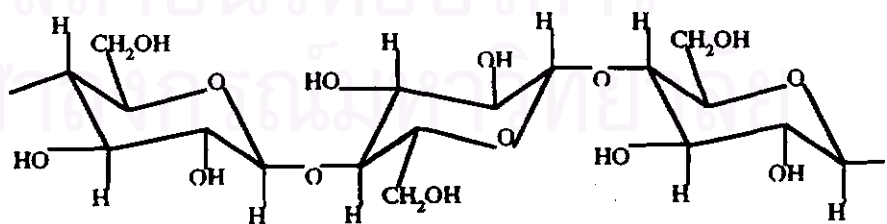
บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

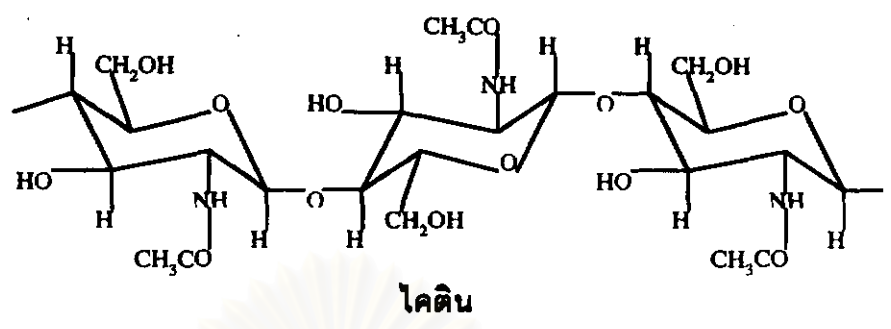
1. ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตแซน

1.1 ไคติน

ไคตินเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลยาวมากโดยไม่มีกิ่งก้าน (Unbranched Polysaccharide) สูตรโครงสร้างของไคตินเป็น Poly- β -(1,4)-2-acetamino-2-deoxy-D-glucose หรือ Poly N-acetyl-glucosamine (Muzzarelli, 1977) ซึ่งแต่ละหน่วยจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(1,4) และมีสูตรทั่วไปคือ $(C_8H_{13}NO_5)_n$ ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 47.29 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.45 ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และออกซิเจนร้อยละ 39.37 (Budavari, 1976) และเมื่อพิจารณาจากสูตรโครงสร้างของไคตินพบว่าไคตินเป็นสารโมเลกุลยาวที่ไม่ประจุ (Non-electrolytic polymer) ไคตินมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคล้ายคลึงกับเซลลูโลส (Cellulose) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



เซลลูโลส

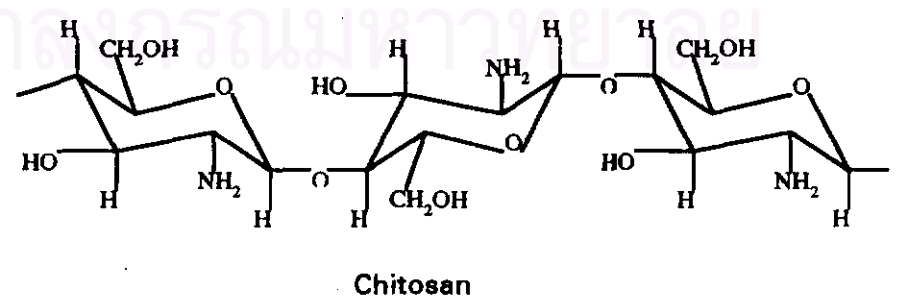


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของไคตินเปรียบเทียบกับเซลลูโลส

โครงสร้างทางเคมีของไคตินมีความคล้ายคลึงกับเซลลูโลสจะต่างกันเพียงแต่หน่วยย่อยของเซลลูโลสเป็น D-glucose ส่วนหน่วยย่อยของไคตินเป็นอนุพันธ์ของกลูโคสคือ N-acetylglucosamine โดยที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ตรงคาร์บอนตำแหน่งที่สองของเซลลูโลสจะถูกแทนที่ด้วย acetylated amino (-NHCOCH₃) (อุดมชัย จินนะดิษฐ์, 2535) ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าแท้จริงแล้วไคตินก็คืออนุพันธ์ของเซลลูโลสนั่นเอง

1.2 ไคโตแซน

ไคโตแซนเป็นอนุพันธ์ของไคติน มีชื่อทางเคมีว่า Poly-β-(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose สูตรทั่วไปคือ (C₈H₁₁O₄N)_n และมีสูตรโครงสร้างทางเคมีของไคโตแซนดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของไคโตแซน

โคโตแซนเกิดจากการกำจัดหมู่แอสเตตในไคตินออก (Deacetylation) โดยที่หมู่แอสเตต (-CO-CH₃) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สองจะถูกตัดออกเหลือเป็นหมู่เอมีน (-NH₂) ซึ่งโคโตแซนสามารถที่จะมีประจุบวกบนหมู่เอมีนได้ ดังนั้นการเพิ่มของหมู่เอมีนนี้จะไปเพิ่มสมบัติการเป็น Polycationic activity บนพอลิเมอร์ การเกิดโคโตแซนนั้นขึ้นอยู่กับการเกิด Deacetylation โดยดูได้จากค่า Degree of Deacetylation ไคตินที่มี Degree of Deacetylation ประมาณร้อยละ 50 จะถูกเรียกว่า ไคโตแซน แต่โดยทั่วไปแล้วโคโตแซนจะมี Degree of Deacetylation อยู่ในช่วงร้อยละ 70 ถึง 90 ซึ่งก็คือยังคงมีหมู่ N-Acetyl เหลืออยู่ในโครงสร้างประมาณ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ถ้าหมู่แอสเตต ถูกกำจัดออกไปประมาณร้อยละ 90 ถึง 100 จะเรียกว่า Full Deacetylation

2. สมบัติของไคตินและโคโตแซน

สมบัติทางเคมีและกายภาพของไคตินและโคโตแซนดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของไคตินและโคโตแซน (Muzzarelli, 1977)

Characteristic parameter	Chitin	Chitosan
Molecular weight (Dalton) ^a	>10 ⁶ (native chitin) (1-5)×10 ⁵ (commercial product)	(1-5)×10 ⁵ (commercial product)
Degree of polymerization (Average no. of the repeating unit in a molecule)	600-1800	600-1800
X-ray diffraction (Peaks)	8° 58' - 10° 26' 19° 58' - 20° 00'	8° 58' - 10° 26' 19° 58' - 20° 00'
Idealized composition (Empirical composition)	C ₈ H ₁₃ O ₆ N	C ₆ H ₁₁ O ₄ N
Nitrogen content (%) (Commercial product)	6-7	7-9.5

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของไคตินและไคโตซาน (Muzzarelli, 1977) (ต่อ)

Characteristic parameter	Chitin	Chitosan
%Moisture (Air dried product)	2-10	2-10
Extent of deacetylated (%)	10	60-80
Viscosity (Cps)	Insoluble	250-2500 (1% in Acetic acid) Non-Newtonian and shear thinning
%Ash at 900 ^o C	<1.0	<1.0
Transition metals ^b , µg/g	<0.5	<0.5 ^c

^a Molecular weight and degree of polymerization (DP) is variable and depend on the source.

The commercial products have low molecular weight and degree of polymerization because of degradation during extraction processes.

^b Excluding Fe which is present but not detrimental to application

^c Crab chitosan contain typically (µg/g) : V=0.12 ; Cr=0.04 ; Mn=0.09 ; Ni=1.3 ; Cu=1.03 ; Ag=0.02 ; Cd=0.22 ; Hg=0.025 and Pb=0.15

2.1 สมบัติทางเคมีและกายภาพของไคติน

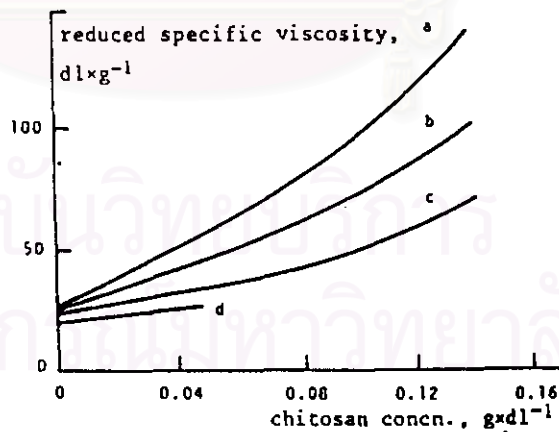
การละลาย (Solubility)

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ที่ไร้ประจุทำให้ไม่สามารถละลายได้ในน้ำ กรดอ่อน และด่าง แต่ไคตินสามารถละลายได้ในกรดแก่ เช่น กรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก กรดฟอสฟอริก ความเข้มข้นร้อยละ 78-79 โดยน้ำหนัก กรดคาร์บอกซิลิก และกรดซัลโฟนิก เช่น กรดฟอร์มิก ไคคลอโรอะซิติก ไตรคลอโรอะซิติก และกรดมีเทนซัลโฟนิก ไคตินจะละลายในกรดฟอร์มิกที่มีความแรงของกรดสูง แต่ระบบตัวทำละลายนี้จะระงับไวต่อน้ำซึ่งทำให้การละลายของไคตินลดลง อย่างไรก็ตามจะปรับปรุงการละลายได้โดยการเติมเกลือที่ละลายน้ำได้ เช่น NaCl, NaBr, CaCl₂, LiCl, KCl และ KSCN การละลายของไคตินในกรดแก่จะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการละลายตัวได้

(Degrade) ในปี 1977 นั้น Austin และ Rutherford พบว่าตัวทำละลายประเภท Tertiary amide ($R-CO-N-R_2$) ที่มี Lithium chloride (LiCl) ในปริมาณอย่างน้อยร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถที่จะละลายไคตินได้ดีโดยเฉพาะ N,N-dimethyl-acetamide และ N-Methyl-2-pyrrolidinone ซึ่งระบบตัวทำละลายนี้ไม่มีผลทำให้ไคตินเกิดการสลายตัว นอกจากนี้แล้วไคตินยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลาย Hexafluoroisopropanol (HFIP) และ Hexafluoroacetone sesquihydrate (HFAS) แต่สาร HFIP จะก่อให้เกิดความระคายเคืองและ HFAS เป็นสารที่มีพิษมากทำให้การใช้งานของตัวทำละลายทั้ง 2 นี้ถูกจำกัดไป

ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายไคตินจะมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear) กับระยะเวลาและความเข้มข้นของสารละลาย ดังแสดงในรูป 2.3 ความหนืดของสารละลายไคตินจะลดลงตามระยะเวลาจนถึงช่วงเวลานึงความหนืดจะคงที่ และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไคตินมากขึ้นจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์เกิดลักษณะ Entangle มากขึ้น



รูปที่ 2.3 ค่าความหนืดของไคตินที่ละลายใน Anhydrous Formic Acid ที่อุณหภูมิ 2^oC ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน การวัดค่าความหนืดทำที่ 25^oC โดยจุดตัดเป็นค่า Intrinsic Viscosities a=วันที่ 4, b=วันที่ 5, c=วันที่ 6, d=วันที่ 14 (Lee, 1974)

นอกจากนี้คุณสมบัติของสารละลายยังมีผลต่อความหนืดซึ่งพบว่าเมื่อสารละลายมีคุณสมบัติสูงขึ้น จะทำให้มีความหนืดลดลง

2.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของโคโตแซน

การละลาย (Solubility)

โคโตแซนจะไม่ละลายน้ำที่มีค่าความเป็นกรดต่างสูงกว่า 6.5, ตัวทำละลายที่เป็นด่าง และ Mineral Acid ที่เข้มข้น เช่นกรดซัลฟูริก โคโตแซนสามารถละลายได้ในสารละลายกรด อินทรีย์เจือจาง ได้แก่สารละลายกรดอะซิติก, สารละลายกรดซิตริก และสารละลายกรดฟอร์มิกที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0.2-100 โดยปริมาตร (Knorr, 1984) และในภาวะที่เป็นกรดนี้หมู่เอมีนอิสระ (NH_2) จะถูกโปรโตเนตไปอยู่ในรูปของหมู่ Cationic Amino ($-\text{NH}_3^+$) (Muzzarelli, 1977) นอกจากนี้โคโตแซนยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายกรดอินทรีย์เจือจาง ได้แก่สารละลายไฮโดรคลอริก, สารละลายกรดไนตริก และละลายได้เล็กน้อยในสารละลายกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร ความสามารถในการละลายของโคโตแซนในสารละลายกรดชนิดต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการละลายของโคโตแซนในสารละลายกรดชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของกรดต่างๆกัน

ชนิดของกรด	ความเข้มข้นของสารละลายกรด (v/v)				
	1%	5%	10%	50%	>50%
Acetic	+	+	+	+	
Adipic	+				
Citric	-				
Formic	+	+	+	+	+
Lactic	+	+	+		
Melic	+	+	+		

ตารางที่ 2.2 ความสามารถในการละลายของโคโคแชนในสารละลายกรดชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นของกรดต่างๆกัน (ต่อ)

ชนิดของกรด	ความเข้มข้นของสารละลายกรด (v/v)				
	1%	5%	10%	50%	>50%
Tartaric	-		+		
Hydrochloric	+	-	-		
Nitric	+	-	-		
H ₃ PO ₄ *	-	-	-		
Sulfuric	-	-	-		

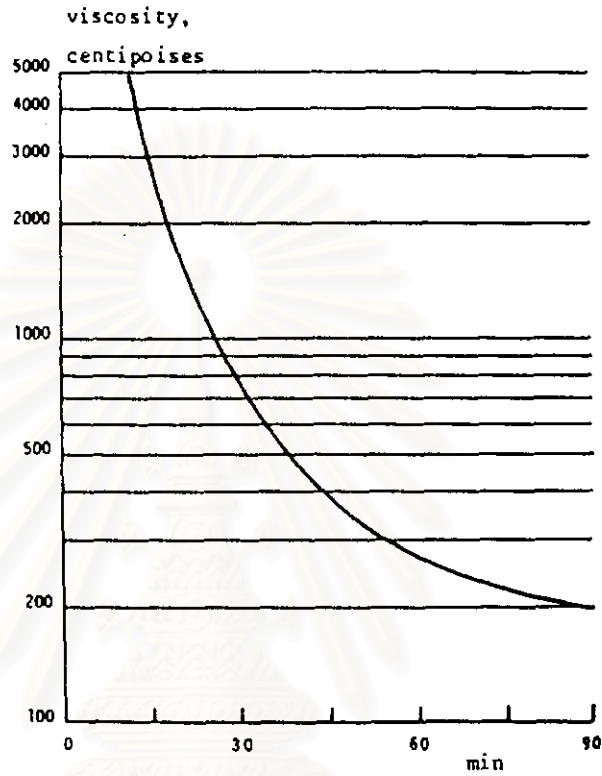
หมายเหตุ + แสดงว่าโคโคแชนสามารถละลายได้

- แสดงว่าโคโคแชนไม่สามารถละลายได้

* แสดงว่าโคโคแชนไม่สามารถละลายได้ในกรดซัลฟูริกและกรดฟอสฟอริก แต่สามารถละลายได้ในกรดฟอสฟอริกที่ความเข้มข้นกรดน้อยกว่า 0.5%

ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายโคโคแชนขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้การกำจัดหมู่แอสเตต (Deacetylation) ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอสเตต ซึ่งพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นมากและเวลานาน จะทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง เนื่องจากภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอสเตตรุนแรงโดยจะมีผลทำให้เกิดการแตกขาดของสายโซ่โมเลกุล เวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอสเตตทำให้ความหนืดของสารละลายโคโคแชนเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งพบว่าทำให้มีปัญหาในการผลิตโคโคแชนที่มีมวลโมเลกุลสูง



รูปที่ 2.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะเซทิล (ในสารละลาย NaOH 50%, อุณหภูมิ 118 °C) ที่มีต่อความหนืดของสารละลายไคโตแซน (Muzzarelli, 1977)

ความหนืดของสารละลายไคโตแซนยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวทำละลาย เช่น ความหนืดของไคโตแซนในกรดอะซิติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนืดของไคโตแซนในกรดไฮโดรคลอริกจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้นเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของไคโตแซนเกิดการแตกขาด

3. แหล่งของไคติน

ในจำพวกพอลิเมอร์ชีวภาพทั้งหมด ไคตินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีอยู่มากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส (Cellulose) ไคตินพบทั่วไปตามผนังเซลล์พืชและสัตว์ ในสัตว์แหล่งที่พบไคตินอยู่เป็นจำนวนมากได้แก่กลุ่ม Arthropoda ซึ่งประกอบด้วย Insecta (พวกแมลงต่างๆ) ได้แก่ ตัวด้วง, แมลงสาบ และกลุ่ม Crustacea ได้แก่ กุ้ง, ปู, กุ้ง และเคย เป็นต้น โดยไคตินจะทำหน้าที่เป็นโมเลกุลโครงร่างแข็งภายนอก (Exoskeleton) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเปลือกกุ้งและแมลงรวมทั้งกระดองของปูและปลาน้ำจืด ในพืชบางชนิดอาจจะมีไคตินแทนเซลลูโลสหรือเกิดร่วมกับเซลลูโลสก็ได้ (Mathur, 1990) นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบผนังเซลล์ของเชื้อรา, เห็ด และยีสต์ รวมทั้งยังพบได้ในสัตว์ชั้นต่ำที่ไม่มีกระดูกสันหลังต่างๆ (Invertebrates) ในแหล่งที่พบไคตินนั้นจะมีโปรตีน ไขมัน เม็ดสีและเกลือแคลเซียมเกิดขึ้นปะปนอยู่ด้วย ดังนั้นถ้าต้องการแยกเฉพาะไคตินจะต้องกำจัดสารประกอบที่ปนอยู่ออก ไคตินที่พบในแหล่งต่างๆจะมีปริมาณแตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณไคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ (Knorr, 1984)

ชนิด	ปริมาณไคติน (%)	ชนิด	ปริมาณไคติน (%)
Crustacea		Insects	
Cancer (Crab)	72.1 ^c	Periplaneta (Cockroach)	2.0 ^a
Carcinus (Crab)	0.4-3.3 ^a	Blattella (Cockroach)	18.4 ^c
	8.29 ^b		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

ตารางที่ 2.3 ปริมาณไคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ (Knorr, 1984) (ต่อ)

ชนิด	ปริมาณไคติน (%)	ชนิด	ปริมาณไคติน (%)
Crustacea		Insects	
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 ^c
Lepas (Barnacles)	58.3 ^c	Bombyx (Silk worm)	20 ^c
		Calleria (Wax worm)	44.2 ^c
Fungi			33.7 ^c
Aspergillus niger	42.0 ^a	Molluscan Organs	
Penicillium notatum	18.5 ^a	Clamshell	6.1 ^b
Penicillium chrysogenum	20.1 ^a	Oyster shell	3.6 ^a
Saccharomyces cerevisiae	2.9 ^a	Squid, skeletalpen	41.0 ^c
Mucor rouxii	44.5 ^a	Krill, deproteinized shell	40.2 ^c
Lactarius vellereus	19.0 ^a	May (Beetle)	16 ^b
Alaskan shrimp	28 ^d		

^a Wet body weight

^b Dry body weight

^c Organ weight of cuticle

^d Total dry weight of cuticle

^e Dry weight of the cell wall

4. การเตรียมไคตินและไคโตแซน

4.1 การเตรียมไคติน

ไคตินที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของสารประกอบ (Complex Form) กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ โดยเฉพาะโปรตีน แร่ธาตุซึ่งส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ไชมัน และเม็ดสีต่างๆ ซึ่งขั้นตอนทั่วไปที่ใช้ในการเตรียมไคตินประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนคือ

: ขั้นตอนกำจัดแร่ธาตุ (Demineralization)

: ขั้นตอนกำจัดโปรตีน (Deproteinization)

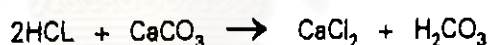
: ขั้นตอนกำจัดไขมันและเม็ดสี (Elimination of Lipids and Pigments)

4.1.1 ขั้นตอนกำจัดแร่ธาตุ (Demineralization)

ขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ Shimahara (1984) รายงานว่ามี 2 วิธี คือ การใช้สารละลายกรดเจือจาง และการใช้ Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA)

วิธีที่ 1 : การกำจัดแร่ธาตุโดยใช้สารละลายกรดเจือจาง

การกำจัดแร่ธาตุโดยใช้สารละลายกรดเจือจางนี้ Hackman (1954), Forter&Hackman (1957) และ Broussignac (1968) ได้ใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจางที่อุณหภูมิห้องในการละลายแร่ธาตุออก ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต กลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



นอกจากนี้ Roseman และคณะ (1966) ได้ใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกในการกำจัดแร่ธาตุ ส่วนในระดับอุตสาหกรรมนั้น Piniston (1978) ได้ใช้กรดซัลฟูริกในการกำจัดแร่ธาตุ ซึ่งสารละลายนี้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก และได้แคลเซียมซัลเฟตและแคลเซียมซัลไฟด์เป็นผลพลอยได้ แต่ในการผลิตจะต้องควบคุมปริมาณกรดซัลฟูริกต่อเกลือแคลเซียมคาร์บอเนตในอัตราส่วนจำนวนโมเลกุลไม่ต่ำกว่า 2:1 เพื่อป้องกันการเกิดเกลือแคลเซียมซัลไฟด์ซึ่งเป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำ และอาจปนอยู่กับไคตินได้ การใช้สารละลายกรดในการกำจัดแร่ธาตุนี้อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสลายตัว (Degradable) และสูญเสียสภาพทางธรรมชาติ นอกจากนี้ยังไปกำจัดหมู่แอสเทติลออกบางเล็กน้อย

วิธีที่ 2 : การกำจัดแร่ธาตุโดยใช้สารละลาย Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA)

ขั้นตอนการเตรียมโคตินโดยวิธีการใช้สารละลายกรดเจ็จจางนั้นจะทำให้ภาวะในการกำจัดแร่ธาตุรุนแรงโดยเฉพาะถ้าต้องใช้อุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้เกิดการแตกขาดของสายโซ่โมเลกุล (Fragmentation) และมีการกำจัดหมู่เอเซติลออกไป ดังนั้นจะทำให้มีผลต่อโครงสร้างของโคติน

Foster & Hackman (1957) และ Takeda & Abe (1962) พบว่าการใช้ EDTA จะทำให้ภาวะในการกำจัดแร่ธาตุอ่อนลง โดย EDTA ที่มีความเป็นกรดต่างมากกว่า 7 จะเข้าไปจับกับโครงสร้างของควิติเคิลในวัตถุบอบอย่างช้าๆ (ประมาณ 2-3 สัปดาห์) นอกจากนี้ยังพบว่าการลดขนาดของวัตถุบอบจะมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการกำจัดแร่ธาตุ โดยการลดขนาดวัตถุบอบเหลือ 1-10 μm จะทำให้เวลาในการกำจัดแร่ธาตุเร็วขึ้นโดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที วิธีการใช้สารละลาย EDTA จะดีกว่าการใช้สารละลายกรดคือ จะทำให้เกิดการสูญเสียธรรมชาติของโคตินน้อยกว่าถึงแม้ว่าจะมีการกำจัดเกลืออนินทรีย์ได้ไม่สมบูรณ์

4.1.2 ขั้นตอนกำจัดโปรตีน (Deproteinization)

ขั้นตอนการกำจัดโปรตีนมีอยู่ 2 วิธี ได้แก่ การใช้สารละลายต่างเจ็จจาง และการใช้แบคทีเรียและเอนไซม์

วิธีที่ 1 : การกำจัดโปรตีนโดยใช้สารละลายต่างเจ็จจาง

สารละลายต่างเจ็จจางที่นิยมใช้ในการกำจัดโปรตีนได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยพบว่าอุณหภูมิของสารละลายจะมีผลต่อเวลาในการกำจัดโปรตีน ซึ่งสารละลายต่าง 1% ที่อุณหภูมิห้องจะใช้เวลาในการกำจัดโปรตีนประมาณ 24 ชั่วโมง แต่ถ้ามีการให้ความร้อนด้วยไอน้ำจะใช้เวลาในการกำจัดโปรตีนประมาณ 30 นาที - 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ Takeda & Abe (1962) และ Takeda & Katsuura (1964) ได้ใช้สารละลาย Sodium dodecylbenzenesulfonate และ Dimethylformamide ในการกำจัดโปรตีน

การใช้สารละลายต่างในการกำจัดโปรตีนนี้อาจมีผลต่อการสูญเสียสภาพทางธรรมชาติ และเกิดการสลายตัวได้ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปฏิกิริยา Depolymerization ด้วยโดยเฉพาะที่ อุณหภูมิสูง

วิธีที่ 2 : การกำจัดโปรตีนโดยการใส่แบคทีเรียและเอนไซม์

วิธีการนี้เป็นการไฮโดรไลซิสโคตินที่มีโปรตีนอยู่ด้วยการใช้เอนไซม์ Protease ที่ได้จากการ เจริญเติบโตของเซลล์แบคทีเรีย Takeda & Abe (1962) และ Takeda & Katsuura (1964) ได้ทำการ กำจัดโปรตีนโดยการใส่เอนไซม์ Tunaproteinase ที่ความเป็นกรดต่าง 8.6 อุณหภูมิ 37.5 องศา เซลเซียส , Papain ที่ความเป็นกรดต่าง 5.5-6.0 อุณหภูมิ 37.5 องศาเซลเซียส และใช้ Bacterial Proteinase ที่ความเป็นกรดต่าง 7.0 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 ชั่วโมง และพบว่า จะเหลือโปรตีนอยู่ในโคติน 5% นอกจากนี้ Broussignac (1968) ได้ทำการกำจัดโปรตีนโดยใช้ เอนไซม์ Papain, Pepsin และ Trypsin พบว่าโคตินที่ได้จะมีหมู่อะมิโนถูกกำจัดออกไปเพียงเล็กน้อย

4.1.3 ขั้นตอนกำจัดไขมันและเม็ดสี (Elimination of Lipids and Pigments)

ขั้นตอนการกำจัดไขมันและเม็ดสีส่วนมากนิยมใช้ตัวทำละลาย คือ เอทานอล, อีเทอร์, อะซิโตน และน้ำร้อน หรืออาจใช้สารพวก Oxidizing Agent ที่รุนแรง เช่น สารละลายโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้ยังมีการใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ หรือกรดซัลฟูริก ขั้นตอนการกำจัดไขมันและเม็ดสีนี้อาจทำในระหว่างขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ และโปรตีนหรือภายหลังจากการกำจัดแร่ธาตุและโปรตีนแล้วก็ได้

ดังนั้น คุณภาพ, ส่วนประกอบ และมวลโมเลกุลของโคตินที่แตกต่างกันนอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบแล้วยังขึ้นอยู่กับขั้นตอนและภาวะที่ใช้ในการเตรียมโคติน

4.2 การเตรียมโคโคแชน

ขั้นตอนการเตรียมโคโคแชนมีขั้นตอนหลักคือ การกำจัดหมู่แอเซทิล (Deacetylation) ในโคโคตินด้วยสารละลายต่างเข้มข้น โดยทั่วไปนิยมใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งในการกำจัดหมู่แอเซทิลนี้จะใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 40 - 60 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิที่ใช้จะค่อนข้างสูงประมาณ 80-150 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ Bough และคณะ รายงานว่าการใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นและอุณหภูมิในการกำจัดหมู่แอเซทิลที่สูงเกินไปจะทำให้ได้โคโคแชนที่มีมวลโมเลกุลลดลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว และโคโคแชนจะสูญเสียสภาพทางธรรมชาติได้ ทั้งนี้เนื่องจากภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอเซทิลนั้นค่อนข้างรุนแรง แต่ถ้าความเข้มข้นของต่างต่ำเกินไปจะมีผลต่อการละลายของโคโคแชนในสารละลายกรด ดังนั้นถ้าใช้ความเข้มข้นของสารละลายต่างที่สูง อุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอเซทิลควรจะลดลงเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอเซทิลรุนแรงเกินไป นอกจากนี้ Bough และคณะ พบว่าเวลาที่ใช้ในการกำจัดหมู่แอเซทิลจะมีผลต่อขนาดของมวลโมเลกุลและปริมาณหมู่แอเซทิล โดยถ้าเวลาที่ใช้มากขึ้นจะทำให้ปริมาณหมู่แอเซทิลในโคโคแชนและขนาดของโมเลกุลลดลง

นอกจากการกำจัดหมู่แอเซทิลในโคโคตินด้วยสารละลายต่างแล้ว Horton และ Lineback (1965) ได้เตรียมโคโคแชนด้วยวิธี Alkali Fusion โดยทำการหลอมโคโคตินกับโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ใน Nickle Crucible ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งวิธีนี้สามารถกำจัดหมู่แอเซทิลได้ 95% แต่ได้โคโคแชนที่มีสายโซ่สั้นซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ในทางโครมาโตกราฟีและใช้ในการตกตะกอนได้

5. การใช้ประโยชน์จากโคโคตินและโคโคแชน

การใช้ประโยชน์จากโคโคตินและโคโคแชนนั้นอาจกล่าวได้อย่างกว้างขวางซึ่งอาศัยสมบัติจำเพาะของพอลิเมอร์ชีวภาพนี้ แนวทางการประยุกต์ใช้สามารถแบ่งเป็นหัวข้อใหญ่ได้ดังนี้

5.1 อุตสาหกรรมกระดาษ

ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษมีการใช้ไคตินและไคโตซานเป็นสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษทั้งในขณะเปียกและแห้ง (Wet and Dry Strength) ไคโตซานสามารถใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียว (Thickener) และ Fixing Agent เพื่อใช้ในงานพิมพ์กระดาษ โดย Viktorov & Maiofis (1940) พบว่าไคโตซานจะทำให้กระดาษมีผิวเรียบดีขึ้นและมีความทนต่อการขูดขีด (Wear Resistance) ดีขึ้น ไคตินและไคโตซานยังมีการนำไปใช้ในการผลิตกระดาษที่ใช้ในงานซึ่งต้องการความสะอาด เช่น กระดาษชำระ กระดาษเช็ดปาก ผ้าอนามัย และผ้าอ้อมเด็ก เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตกระดาษที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle Paper) และกระดาษเพื่อการบรรจุ ส่วนน้ำเสียที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมนี้ยังสามารถบำบัดได้ด้วยการใช้ไคตินและไคโตซานเป็นสารช่วยในการตกตะกอน

5.2 อุตสาหกรรมสิ่งทอ

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้ไคตินและไคโตซานในเส้นใยสิ่งทอที่มีการย้อมติดสีได้ยาก เช่น เส้นใยสังเคราะห์ เส้นใยแก้ว และเส้นใยโพลีฟิน โดยการนำเส้นใยนั้นมาผสมหรือเคลือบผิวด้วยไคตินและไคโตซาน จะทำให้เส้นใยสามารถที่จะรับสีย้อมได้ง่ายขึ้น และช่วยเพิ่มความคงทนของสี (Dry Fastness) นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของเส้นใยและช่วยลดการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ในเส้นใยสังเคราะห์ ในการทำ Sizing ผืนผ้าด้วยเกลือของไคโตซานจะทำให้ได้ผืนผ้าที่มีความเหนียว และปรับปรุงลักษณะปรากฏของผืนผ้าโดยทำให้เกิดความสว่าง (Brightening) และเงามัน (Luster) ของสี ไคตินและไคโตซานยังใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวในงานพิมพ์ผ้าที่ใช้สีย้อมประเภทแอซิดและเบสิก และใช้แทนซีผึ้งในงานพิมพ์ผ้าบาติก

5.3 งานด้านเภสัชกรรมและการแพทย์

5.3.1 ผิวหนังเทียม (Synthetic Skin)

การรักษาบาดแผลที่เกิดจากการติดเชื้อที่ผิวหนัง แผลไฟไหม้ และแผลพุพองเป็นหนองสามารถใช้ผิวหนังเทียมในการรักษาได้ ไคโตแซนอะซิเตต (Chitosan Acetate) สามารถนำมาทำผิวหนังเทียมได้โดยการผสมกับพอลิเมอร์ที่สลายตัวได้อีก 2 ชนิด คือ เกลือแอมโมเนียมของเคราติน (Ammonium Salt of Keratin) ที่ได้จากขนแกะ และคอลลาเจนอะซิเตต (Collagen Acetate) ที่ได้จากหนังสัตว์ ผิวหนังเทียมที่ได้นี้จะสามารถป้องกันบาดแผลจากเชื้อแบคทีเรีย ให้อากาศและความชื้นซึมผ่านได้ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการรักษาบาดแผล ผิวหนังเทียมนี้สามารถเข้าได้ดีกับเนื้อเยื่อร่างกาย และสลายตัวไปได้หลังจากที่บาดแผลได้รับการรักษาจนสร้างผิวหนังใหม่ขึ้นทดแทนแล้ว

5.3.2 ไหมเย็บแผล (Surgical Sutures)

ไคตินและไคโตแซนสามารถนำมา Extrude ให้อยู่ในรูปของเส้นใยที่บางแต่มีความแข็งแรง ซึ่งสามารถนำมาทำเป็นไหมเย็บแผลผ่าตัดได้ และเมื่อแผลหายดีก็ไม่จำเป็นต้องตัดทิ้งเนื่องจากไหมสามารถสลายได้เอง ไหมเย็บแผลที่ได้จากไคตินและไคโตแซนจะเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของร่างกายซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดการอาการแพ้ขึ้น

5.3.3 งานด้านดวงตา (Optical Application)

ไคตินและไคโตแซนสามารถนำมาผลิตคอนแทคเลนส์ (Contact Lenses) ซึ่งเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อร่างกายมากกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ นอกจากนี้ยังให้ความรู้สึกสบายในการสวมใส่เนื่องจากเลนส์มีความสามารถในการดูดน้ำและให้อากาศซึมผ่านได้

5.3.4 Artificial Biomembrane for Encapsulation of Enzyme and Cell

ไคโตแซนเมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับแอลจิน (Algin) จะได้แผ่นฟิล์มที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็น Encapsulate โดยแผ่นฟิล์มจะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารไว้ข้างในและสารสามารถจะซึมผ่านเข้าออกได้ แผ่นฟิล์มที่ได้จะเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของร่างกาย

5.3.5 งานด้านโครมาโตกราฟี

โคตินและโคโตแซนสามารถใช้เป็นตัวกลางในการแยกสารและทำให้ไลโซซิม (Lysosymes) มีความบริสุทธิ์ นอกจากนี้เอนไซม์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เช่น Glucose Isomerase ที่ใช้ในการผลิตฟรุคโตสไซรัป (Fructose Syrup) สามารถนำไปตรึงบนโคตินที่เกิดโครงร่างตาข่ายกับกลูตาไรลไฮด์เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการผลิต

5.4 งานด้านบำบัดน้ำ

สิ่งเจือปนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำส่วนมากเป็นประจุลบ ส่วนโคโตแซนจะมีประจุบวกที่มีหมู่อะมิโนอยู่ จึงสามารถให้ปฏิกิริยาช่วยในการตกตะกอน โดยโคโตแซนจะไปจับกับสิ่งเจือปนทำให้มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นและตกตะกอนลงมา นอกจากนี้โคโตแซนยังสามารถใช้จับกับไอออนของโลหะหนักและโลหะที่มีพิษได้ ในการบำบัดน้ำเสียเมื่อใช้โคโตแซน 5 ppm จะสามารถลดค่า Biological Oxygen Demand (BOD) ได้ถึงร้อยละ 80-85 ลดปริมาณฟอสเฟตให้เหลือน้อยกว่า 0.5 ppm และกำจัดสิ่งสกปรกที่แขวนลอยอยู่ในน้ำได้ดี

5.5 อุตสาหกรรมอาหาร

โคตินและโคโตแซนเป็นสารที่ไม่เป็นพิษจึงมีความปลอดภัยที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โคตินและโคโตแซนสามารถนำมาเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบผิวผลไม้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานออกไปและป้องกันเชื้อรา นอกจากนี้โคตินยังสามารถใช้เป็นสาร Stabilizer และสารเพิ่มความหนืดให้อาหาร ซึ่งพบว่า Micro Crystalline Chitin จะมีสมบัติดีกว่า Micro Crystalline Cellulose คือมีความหนืดมากกว่า 10-20 เท่า ทนต่ออุณหภูมิสำหรับการฆ่าเชื้อและการแช่แข็ง และได้มีการนำไปใช้ใส่ขนมปังเพื่อเพิ่มปริมาตรให้กับขนมปังเนื่องจากมีความสามารถในการจับกับน้ำได้ดี ส่วนโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารนั้นสามารถใช้โคโตแซนในการแยกเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ได้

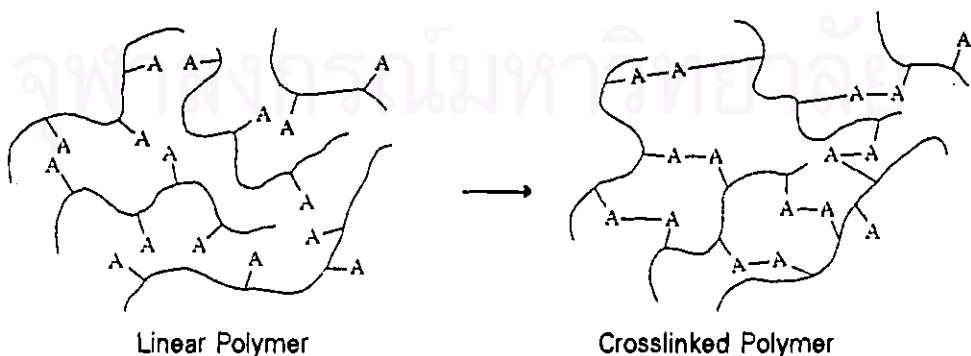
6. การปรับปรุงสมบัติของโคโตน

โคโตนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานหลายด้าน ซึ่งในบางกรณีโคโตนอาจมีสมบัติบางอย่างที่ไม่เป็นไปตามต้องการ เช่น ความทนแรงดึง (Tensile Strength) ความยืดหยุ่น (Flexibility) ความเปราะ (Brittleness) และความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability) เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติของโคโตนเพื่อให้เหมาะสมในการนำไปใช้งาน ซึ่งสามารถทำได้โดยการเติม Additives หรือ Plasticisers นอกจากนี้ยังมีการดัดแปรโครงสร้างทางเคมีของโคโตน เช่น การทำกราฟโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Graft Copolymerisation) บล็อกโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Block Copolymerisation) และการทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) เป็นต้น

6.1 การเกิดโครงร่างตาข่าย (Cross-linking)

ปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดพันธะเคมีระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ ซึ่งโพลีเมอร์จะมีสายโซ่เชื่อมโยงกันด้วยพันธะโควาเลนต์หรือพันธะอิกอนิก เกิดโครงสร้างแบบโครงร่างสามมิติ (Three-Dimensional Network) ลักษณะของการเกิดโครงร่างตาข่ายแบ่งออกได้ดังนี้

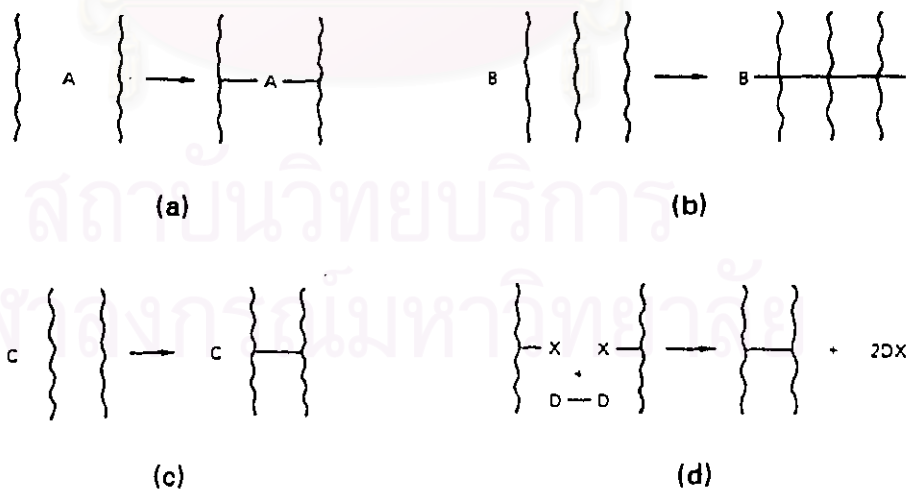
6.1.1. การเกิดโครงร่างตาข่ายเมื่อโพลีเมอร์สายโซ่ตรง (Linear Polymer) หรือโพลีเมอร์กิ่งก้าน (Branched Polymer) นั้นมีหมู่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้หลายหมู่ (Functional Group) ถ้าให้ A แทน Functional Group ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ด้วยตัวเองและเกิดพันธะ A-A



รูปที่ 2.5 การเกิดโครงร่างตาข่ายของโพลีเมอร์ที่มี Functional Groups หลายหมู่

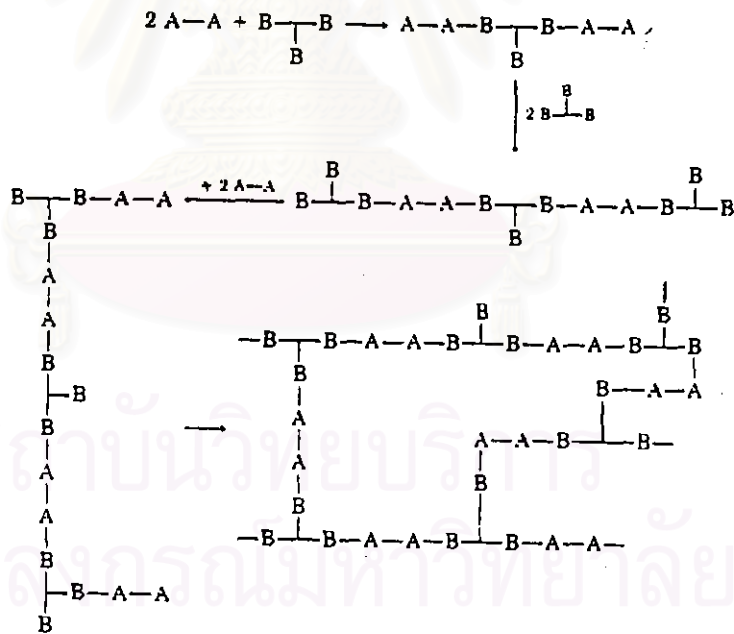
เมื่อพอลิเมอร์เหล่านี้อยู่ในภาวะที่ทำให้ Functional Group เกิดปฏิกิริยาได้จะทำให้สายโซ่ทั้งหมดทำปฏิกิริยากันและเกิดการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะ A-A ดังรูปที่ 2.5 ดังนั้นเมื่อโมเลกุลพอลิเมอร์เหล่านี้เกิดการโครงร่างตาข่ายจะทำให้ได้โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ การเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายนี้เป็นแบบที่ง่ายที่สุด

6.1.2. การเกิดโครงร่างตาข่ายด้วยการใช้สารทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking Agent) การเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายในข้อ 6.1.1 นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลพอลิเมอร์ทำปฏิกิริยาด้วยตัวเอง แต่ปฏิกิริยาแบบนี้ไม่สามารถทำให้เกิดโครงสร้างเป็นแบบโครงร่างสามมิติได้ ดังนั้นจึงมีการใช้สารทำให้เกิดการเชื่อมโยง ซึ่งสมบัติของสารช่วยในการเกิดปฏิกิริยา คือเป็นโมเลกุลที่มีหมู่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับ Functional Group ที่อยู่บนสายโซ่พอลิเมอร์ได้อย่างน้อย 2 หมู่ขึ้นไป สารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงอาจเป็นโมเลกุลที่เชื่อมระหว่างพอลิเมอร์ 2 โมเลกุล (รูป 2.6a) หรือโมเลกุลที่กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย (รูป 2.6b) หรือเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย (รูป 2.6c) หรือเป็นสารที่เข้าไปตั้งโมเลกุลของพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเชื่อมโยง (รูป 2.6d)



รูปที่ 2.6 การเกิดโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์เมื่อมีการใช้สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยา
 (a) Bridging agent. (b) Cross-linking initiators. (c) Catalytic Crosslinking agent.
 (d) Active site generator.

6.1.3. การเกิดโครงร่างตาข่ายในระหว่างการพอลิเมอไรเซชันด้วยการใช้มอนอเมอร์ที่มี Functional Groups เฉลี่ยมากกว่า 2 (Polyfunctional monomers) แทนการใช้มอนอเมอร์ที่มี 2 Functional Groups (Difunctional monomer) ปฏิกริยานี้มักจะเกิดในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัว (Condensation Polymerisation) การเกิดพอลิเมอไรเซชันของ Difunctional monomer กับ Trifunctional monomer เช่น ปฏิกริยาของ Diol กับ Triisocyanate ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ในช่วงแรกของปฏิกิริยานั้นพอลิเมอร์ยังมีมวลโมเลกุลต่ำซึ่งมีหลาย Functional Groups และเกิดกิ่งก้านมาก แต่ยังไม่เกิดพันธะเชื่อมโยง แต่ในช่วงหลังปฏิกิริยาถึงจุดหนึ่งโมเลกุลจะเกิดพันธะเชื่อมโยงได้พอลิเมอร์ที่มีโครงร่างตาข่าย ซึ่งทำให้ความหนืดของสารเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สารที่มีความหนืดมากนี้เรียกว่าเจล (Gel)



รูปที่ 2.7 การเกิดโครงร่างตาข่ายขณะเกิดพอลิเมอไรเซชันด้วยการใช้ polyfunctional monomers

การเกิดโครงร่างตาข่ายในโครงสร้างของโมเลกุลจะทำให้มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ดังต่อไปนี้

1. สมบัติทางด้านความร้อน

การเกิดโครงร่างตาข่ายขึ้นระหว่างสายโซ่ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) จะทำให้มีผลต่อวัสดุในด้านความร้อนคือ ปกติแล้วพอลิเมอร์ที่ไม่เกิดโครงร่างตาข่ายจะเกิดการหลอม และไหลได้ที่อุณหภูมิสูง แต่ในทางตรงกันข้ามพอลิเมอร์ที่เกิดโครงร่างตาข่ายจะไม่สามารถเกิดการหลอมเหลวได้และสูญเสียสมบัติการไหล เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลถูกจำกัดการเคลื่อนไหวจากโครงร่างตาข่ายและเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงๆ พอลิเมอร์จะไม่หลอมแต่เกิดการสลายตัว

2. สมบัติทางเคมี

การเกิดพันธะเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลจะทำให้มีผลต่อสมบัติการละลายของพอลิเมอร์ด้วยซึ่งขึ้นอยู่กับธรรมชาติ และปริมาณของพันธะโควาเลนต์ที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุล ปกติแล้วพอลิเมอร์ที่ไม่เกิดโครงร่างตาข่ายจะเกิดการละลายได้ในตัวทำละลายที่เหมาะสมเนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์และตัวทำละลายสามารถผสมกันได้เป็นอย่างดี โดยแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับพอลิเมอร์มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุล แต่พอลิเมอร์ที่เกิดโครงร่างตาข่ายนั้นจะไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย แต่จะเกิดการพองตัว เนื่องจากตัวทำละลายไม่สามารถเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้ทำให้ตัวทำละลายไม่เข้าไปเกิดผลกระทบต่อพันธะโควาเลนต์ระหว่างโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย (Crosslinking Density) จะมีผลต่อการยอมรับเอาปริมาณตัวทำละลาย ถ้าพอลิเมอร์เกิดโครงร่างตาข่ายน้อยจะทำให้ตัวทำละลายสามารถเข้าไปในโครงสร้างได้ทำให้เกิดการพองตัวมาก แต่พอลิเมอร์ที่เกิดโครงร่างอย่างแท้จริงตัวทำละลายจะไม่สามารถเข้าไปในโครงสร้างได้ทำให้เกิดการพองตัวเลย

3. สมบัติทางกล

การเกิดโครงร่างตาข่ายจะทำให้มีผลต่อสมบัติของวัสดุ โดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย (Crosslink Density) ที่มีอยู่ในโครงสร้างนั้น พอลิเมอร์ที่ไม่เกิดโครงร่างตาข่ายหรือเกิดน้อยจะมี Crosslink Density ต่ำ และทำให้วัสดุนั้นมีสมบัติคล้ายยาง (Elastomer) คือมีความอ่อนนุ่ม (Soft) และยืดหยุ่นได้ (Flexible) แต่พอลิเมอร์ที่เกิดโครงร่างตาข่ายมาก มี Crosslink Density สูง จะทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะแข็ง (Rigid) และเปราะ (Brittle) เนื่องจากพอลิเมอร์มีโครงร่างตามมิติของพันธะโควาเลนต์ ทำให้การเคลื่อนไหวอย่างอิสระของสายโซ่โมเลกุลถูกจำกัด

6.2 การตัดแปรรโคโนแซนด้วยปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย (Cross-linking)

ในช่วงแรกของการตัดแปรรโคโนแซนและโคโนแซนโดยการทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายนั้น เพื่อนำไปใช้งานด้านการกำจัดน้ำเสีย โดยในปี 1986 Kurita และคณะได้ศึกษาปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายของโคโนแซนที่ละลายน้ำได้ (Water-Soluble Chitin) ณ อุณหภูมิห้อง ในภาวะที่เป็นสารละลายเนื้อเดียว (Homogeneous) และใช้สารละลายกลูตาไรลดีไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย ซึ่งจากการทดลองพบว่าโคโนแซนที่เกิดโครงร่างตาข่ายนั้นสามารถนำไปใช้เป็นตัวดูดซับโลหะที่เป็นอออนบวกได้ดี หลังจากนั้น Kurita และคณะได้ทำการทดลองการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายกับโคโนแซนในภาวะเดิม และพบว่าการเกิดโครงร่างตาข่ายนั้นสามารถจะไปลดความเป็นผลึก (Crystallinity) ของโคโนแซนทำให้มีการดูดซับอออนของโลหะได้ดีเช่นกัน

ในปี 1990 Cardinal และ Curatolo ได้จดลิขสิทธิ์ในการผลิตโคโนแซนที่ใช้เป็นตัวควบคุมอัตราการปลดปล่อยสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยมีน้ำหนักโมเลกุลไม่ต่ำกว่า 1000 สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ใช้ในการทดลองเป็นสารโปรตีน, Polypeptide, Enzyme และ Polysaccharides เช่น Growth Hormone, Insulin, Thyroid Stimulating Hormone, Peptidases, Proteases, Heparin และ Dextran เป็นต้น โคโนแซนที่ใช้เป็น Matrix นั้น จะต้องมีลักษณะที่เป็น Network ที่มีช่องว่างหรือรูพรุนที่ได้จากปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย ในการทดลองนี้ได้ใช้สารละลายกลูตาไรลดีไฮด์ใน

สารละลายผสมของเมธานอลและโซเดียมฟอสเฟตเป็นสารช่วยในการเกิดปฏิกิริยา โดยให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง จากการทดลองพบว่าอัตราการปลดปล่อยสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุน ซึ่งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจะเปลี่ยนแปลงไปตามวิธีการเตรียมและการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย การใช้สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นสูง และเวลาในการทำปฏิกิริยามาก จะทำให้ได้โคโตนที่มีรูพรุนมาก ซึ่งทำให้มีระยะเวลาในการปลดปล่อยสารช้า

ในปี 1991 Mayer และ Kaplan ได้จดสิทธิบัตรเกี่ยวกับวิธีการทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของโคโตนโดยให้โคโตนเกิดการสัมผัสกับสารละลายเบสของอีพิคลอโรไฮดรินที่ใช้เป็นสารช่วยในการเกิดปฏิกิริยา และมีการให้ความร้อนกับสารละลาย พร้อมทั้งใช้เวลาที่เหมาะสมในการทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย โคโตนที่เกิดโครงร่างตาข่ายจะมีสมบัติไม่ละลายน้ำ สามารถทนต่อแรงดึงได้ดีขึ้น การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเกิดขึ้นได้ดี และเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดการย่อยสลายได้ นอกจากนี้ในการทดลองยังมีการใช้โพลีแซคคาไรด์ หรือพอลิเมอร์ตัวอื่นมาทำให้เกิดโคพอลิเมอร์ที่มีโครงร่างตาข่าย โดยพอลิเมอร์ตัวที่สองที่ใช้ได้แก่ Pullulan, Levan, Eisinan, Dextran, แป้ง, พอลิเอซิลิน, พอลิโพพิลีน และไนลอน เป็นต้น โคพอลิเมอร์ที่เกิดโครงร่างตาข่ายนี้จะไม่ละลายน้ำ ตัวทำละลายเบสอ่อน กรดอ่อน อัลกอฮอล์ อีเทอร์ และคีโตน แต่สามารถละลายได้ในสารละลายกรดเข้มข้นโดยใช้ความร้อนช่วยในการละลาย สารละลายที่ได้สามารถนำไปผ่านกระบวนการ Wet Spin จะได้เส้นใยที่มีสมบัติทนต่อแรงดึงได้ดี นอกจากนี้สามารถใช้ใน Chelation Process ได้

ในปี 1992 Wet และคณะ ได้ศึกษาการเกิดโครงร่างตาข่ายบนเส้นใยโคโตน โดยการใช้สารละลายอีพิคลอโรไฮดรินเป็นสารช่วยในการเกิดปฏิกิริยา ในการทดลองนี้จะศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณของอีพิคลอโรไฮดรินที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เวลา และแรงดึงที่ให้กับเส้นใยในขณะที่เกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย ซึ่งการทำปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายนั้นจะทำในขณะที่เส้นใยอยู่ในสภาพที่เปียกเท่านั้น โดยการมัดเส้นใยเป็นวงแล้วแช่ลงในสารละลายอีพิคลอ-

ไฮดรินที่อุณหภูมิ 40°C ที่มีการแทนที่ด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นจะให้แรงกับเส้นใยด้วย จากการทดลองพบว่าเส้นใยที่เกิดโครงร่างตาข่ายจะมีสมบัติด้านความแข็งแรงเมื่อเปียกดีขึ้น ซึ่งความเข้มข้นของอีพิกลอไฮดรินและอุณหภูมิจะมีผลต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของเส้นใย โดยความเข้มข้นของอีพิกลอไฮดรินเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Tenacity ของเส้นใยเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจนถึง 40°C จะทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายได้มากขึ้น แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 40°C สายโซ่ของพอลิเมอร์จะเกิดการสลายตัว ในการทดลองนี้เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงในรูปของเส้นใยกับแผ่นฟิล์มพบว่า เส้นใยจะมีความแข็งแรงดีกว่าเนื่องจากเส้นใยจะมีการจัดเรียงตัวของ Fibrous มากกว่าฟิล์ม และความแข็งแรงเมื่อเปียกของเส้นใยจะดีขึ้นมาก

ในปี 1992 Kin และคณะ ได้ศึกษาการผสมโคโตนกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยการใช้สารละลายกอลลูตารัลดีไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งนำมาผลิตเป็นแผ่นฟิล์มด้วยเทคนิคการหล่อ (Solvent-Casting Technique) - แผ่นฟิล์มที่ได้นั้นจะมีความเป็นผลึก และการดูดซึมน้ำลดลง แต่สมบัติด้านการทนต่อความร้อนและสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยเฉพาะความทนแรงดึง (Tensile Strength) จะเพิ่มมากขึ้นทั้งในภาวะที่แห้งและเปียก เนื่องจากเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง $-\text{OH}$ และ $-\text{NH}_2$ ในโคโตนกับ $-\text{OH}$ ในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ นอกจากนี้แผ่นฟิล์มที่ได้จะไม่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นกรดและด่างทำให้เหมาะสมที่จะใช้เป็นแผ่นฟิล์มที่ใช้ควบคุมการปลดปล่อยสาร

และในปีเดียวกันนี้ Nakatsuka และ Andrady ได้ศึกษากลไกการเคลื่อนย้าย (Transport) ของสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กผ่านแผ่นฟิล์มโคโตน ซึ่งการเคลื่อนย้ายของสารนั้นสามารถวัดได้จากค่าอัตราการซึมผ่านของสาร (Permeation) และสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กที่ใช้ได้แก่ วิตามินบี 12 นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของการเกิดโครงร่างตาข่ายและการผสมโคโตนกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ตัวอื่นๆ ที่ทำให้มีผลต่อสมบัติการซึมผ่านของสาร จากการทดลองพบว่าการซึมผ่านของสารนั้นขึ้นอยู่กับกลไกที่สำคัญ 2 กลไก ได้แก่ Pore Mechanism และ Partition Mechanism การซึมผ่านของสารจะลดลงเมื่อโคโตนเกิดโครงร่างตาข่าย และการเกิดโครงร่าง

ตาข่ายนี้ยังไปลดการบวมตัวของแผ่นฟิล์มไคโตแซนด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการเกิดโครงร่างตาข่าย

ในปี 1993 Thacherodi และ Rao ได้ทดลองเตรียมแผ่นฟิล์มไคโตแซนที่เกิดโครงร่างตาข่าย โดยการใช้สารละลายกลูตารัลดีไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดปฏิกิริยา เพื่อใช้เป็นตัวปลดปล่อย Propanolol Hydrochloride ในการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ ซึ่งทำให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีतिकิริของการเกิดโครงร่างตาข่ายที่แตกต่างกัน การเกิดโครงร่างตาข่ายนี้จะมีผลต่อการซึมผ่านของสาร Propanolol Hydrochlorid จากการทดลองเมื่อวิเคราะห์แผ่นฟิล์มไคโตแซนที่เกิดโครงร่างตาข่ายด้วยเทคนิค Thermogravimetric (TG) และ Differential Scanning Calorimetry (DSC) จะพบว่าความสามารถในการทนต่อความร้อนของแผ่นฟิล์มจะลดลง แต่การเกิดโครงร่างตาข่ายนี้ช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงของแผ่นฟิล์ม

6.2.1 สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย (Crosslinking agent)

Cardinal (1990) ได้รายงานว่สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายของสารละลายไคโตแซนแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

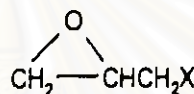
1. สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ได้แก่ กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde), ไกลออกซอล (Glyoxal), Succinaldehyde, 1,10-decanedial, Trichlorotriazine, อีพิฮาโลไฮดริน (Epihalohydrin), Benzoquinone และ Bisepoxiranes ปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายที่ใช้สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กนี้จะเกิดภายในโครงสร้างของไคโตแซน โดยโมเลกุลเหล่านี้จะสามารถแพร่ผ่าน (Penetrate) เข้าไปในโครงสร้างของไคโตแซนได้

2. สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ได้แก่ สารประกอบที่มีหมู่อัลดีไฮด์มากกว่า 1 หมู่ (Polyaldehyde) เช่น Dextran Dialdehyde, Starch dialdehyde, Dialdehyde of Carageenan และ Dialdehyde of Alginic Acid สารประกอบเหล่านี้เป็น Oxidized Polysaccharide Polyaldehyde ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายที่ใช้สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นที่พื้นผิว

ของโคโตนแซน สารเหล่านี้จะมีสายโซ่โมเลกุลยาวทำให้ไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในโครงสร้างของโคโตนแซนได้

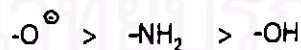
6.2.2 การเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายของโคโตนแซนด้วยการใช้อิพิฮาโลไฮดริน

ในการเกิดโครงร่างตาข่ายของโคโตนแซนด้วยการใช้สารละลายอิพิฮาโลไฮดรินเป็นสารช่วยในการเกิดปฏิกิริยานั้น สามารถทำได้ทั้งในรูปของแผ่นฟิล์ม เส้นใย หรือผง (Powder) อิพิฮาโลไฮดรินมีสูตรทั่วไปดังนี้



เมื่อ X คือ ฮาโลเจน

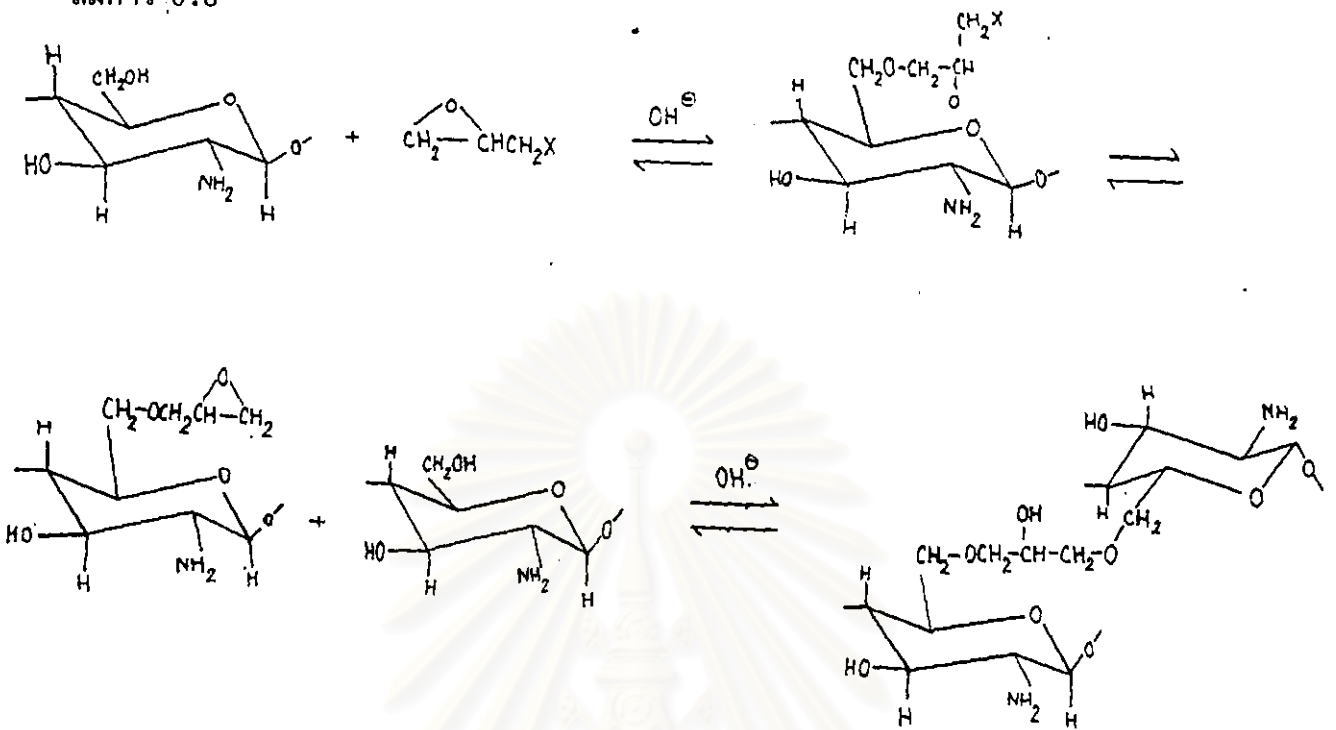
สารละลายเบสอิพิฮาโลไฮดรินที่ใช้สารช่วยในการเกิดปฏิกิริยานี้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาจะไม่มี การกำจัดหมู่เอมีนที่ตำแหน่งคาร์บอนที่ 2 ทำให้โคโตนแซนที่เกิดโครงร่างตาข่ายนั้นยังคงมีสมบัติ เป็น Cationic Polyelectrolyte (Wei, 1992) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) แทนที่จะ เกิดที่หมู่เอมีน (-NH₂) ซึ่งต้องใช้สารละลายเบสเพื่อทำให้โครงสร้างของโคโตนแซนที่ตำแหน่งหมู่ ไฮดรอกซิลเกิดเป็น -O[⊖] และมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหมู่เอมีน ความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาเรียงตามลำดับได้ดังนี้



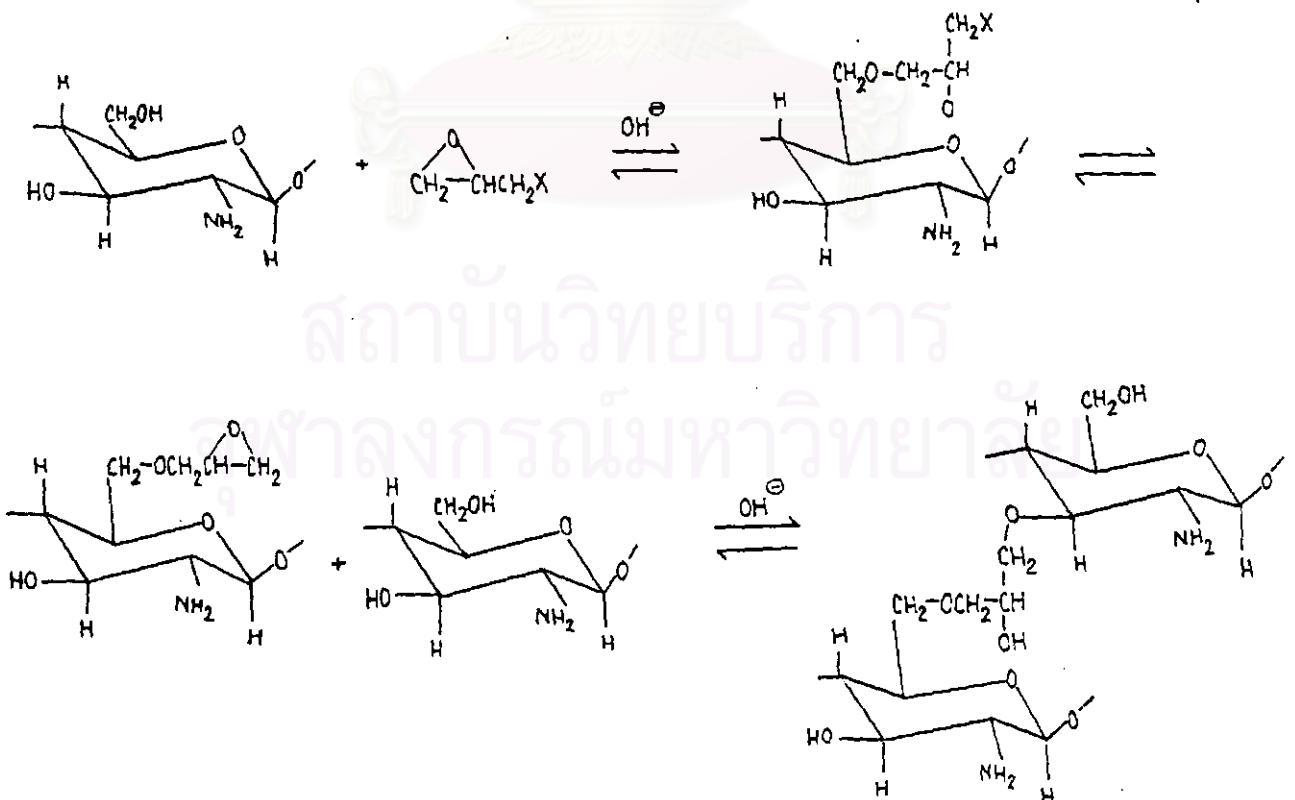
การเกิดโครงร่างตาข่ายจะเกิดที่ตำแหน่งคาร์บอนที่ 3 หรือ 6 แต่ไม่เข้าที่ตำแหน่ง คาร์บอนที่ 2 ดังสมการที่ 6.1 และ 6.2 ซึ่งจะทำให้การเกิดโครงร่างตาข่ายได้ 2 แบบ คือ

1. ที่ตำแหน่งคาร์บอน 6,6 (สมการที่ 6.1)
2. ที่ตำแหน่งคาร์บอน 6,3 (สมการที่ 6.2)

สมการ 6.3



สมการ 6.4



ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายด้วยการใช้อิพิธาไลไฮดริน

1. ความเป็นกรดต่างของสารละลายอิพิธาไลไฮดริน

Mayer และคณะ (1991) ได้ศึกษาผลของความเป็นกรดต่างของสารละลายอิพิธาไลไฮดริน ที่มีต่อการเกิดปฏิกิริยา พบว่าการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายนั้นจะเกิดขึ้นได้ดีถ้าสารละลายมีความเป็นด่างมาก โดยสารละลายควรมีค่าความเป็นกรดต่างมากกว่า 10 นอกจากนี้อาจมีการเติมสารละลายที่เป็นด่างช่วย เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น อิพิธาไลไฮดรินที่เหมาะสมสำหรับเป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย ได้แก่ อีพิคลอโรไฮดริน

2. ความเข้มข้นของสารละลายอิพิธาไลไฮดริน

ปริมาณของอิพิธาไลไฮดรินที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายนั้น ทำให้มีผลต่อการละลายของโคโคเดรนในตัวทำละลายกรด เนื่องจากมีปริมาณความหนาแน่นในการเกิดโครงร่างตาข่ายแตกต่างกัน ปริมาณอิพิธาไลไฮดรินที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.05 - 0.25 โมลต่อโคโคเดรน 1 โมล

3. อุณหภูมิ

ในการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายด้วยการใช้ผงโคโคเดรนในสารละลายอิพิธาไลไฮดริน นั้นพบว่า อุณหภูมิจะมีผลต่อปฏิกิริยาและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 36-40 °C

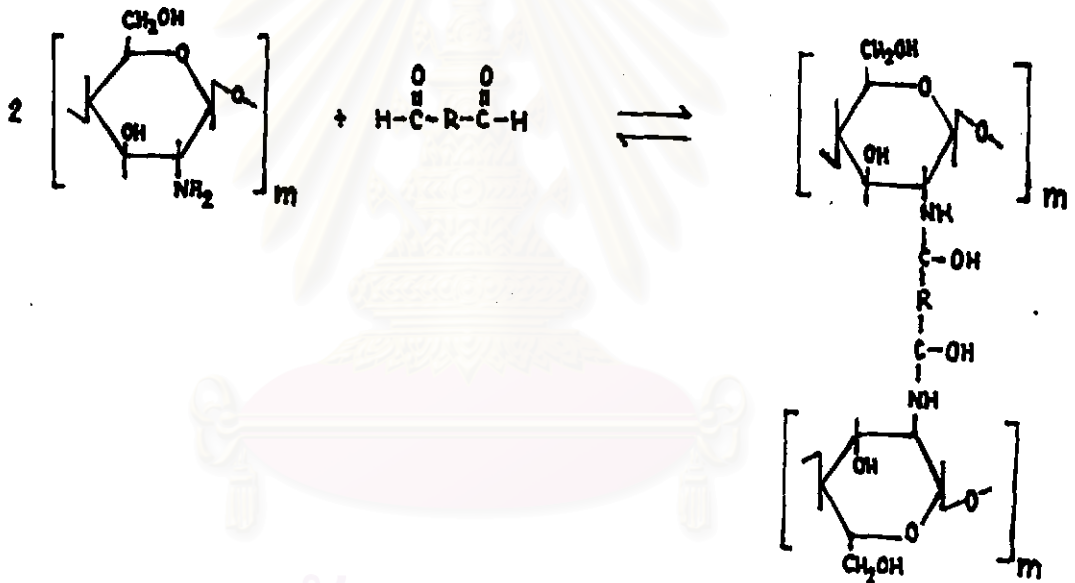
4. เวลา

เวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา Cross-linking นั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นๆ ที่กล่าวมาข้างต้น , ซึ่งจากการทดลองพบว่าปฏิกิริยาที่มีการใช้ความร้อนจะช่วยใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 2 ชั่วโมง สำหรับการเกิดโครงร่างตาข่าย

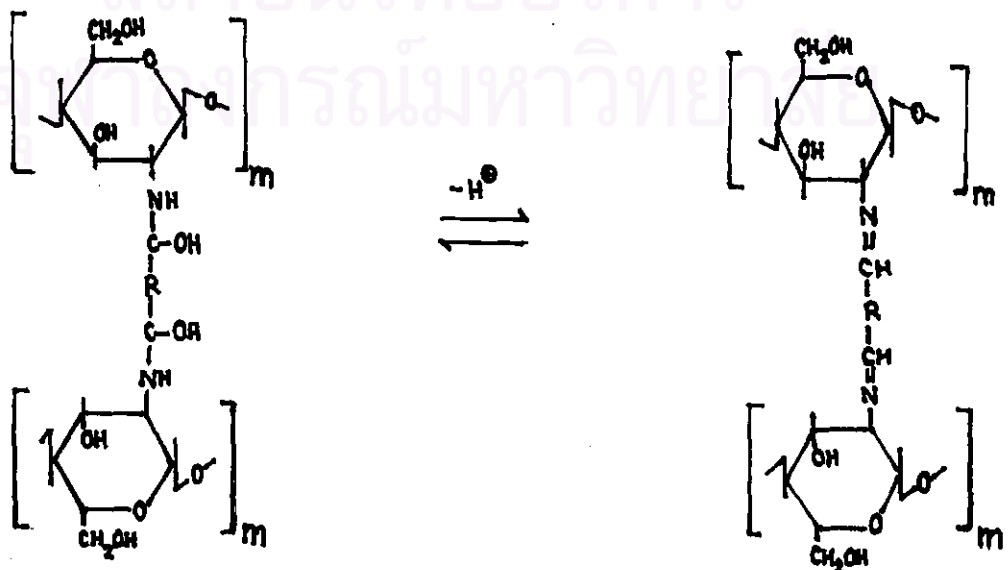
6.2.3 การเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายของโคโตแซนด้วยการใช้ไดอัลดีไฮด์

โคโตแซนสามารถทำปฏิกิริยากับไดอัลดีไฮด์ด้วยปฏิกิริยา Schiff's Base (George A. F Roberts, 1989) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของหมู่เอมีนตรงตำแหน่งคาร์บอนที่ 2 ของโคโตแซน กับหมู่คาร์บอนิลในไดอัลดีไฮด์ ได้สารคาร์บินอลามีนเกิดขึ้น ดังสมการ 6.3 สารประกอบนี้จะมีเสถียรภาพพอสมควรและสามารถแยกออกมาได้ในบางกรณี แต่โดยมากมักเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้เป็น imine ดังสมการ 6.4 สารละลายไดอัลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารช่วยในการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ไกลออกซอล (Glyoxal) และกลูตาอัลดีไฮด์ เป็นต้น

สมการ 6.3



สมการ 6.4



ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายด้วยการใช้ไดอัลดีไฮด์

การเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายของไคโตแซนกับสารละลายไดอัลดีไฮด์ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไคโตแซน ไดอัลดีไฮด์ คุณนภูมิของปฏิกิริยา และความเข้มข้นของกรดที่ใช้เป็นตัวทำละลายไคโตแซน เช่น กรดอะซิติก (Roberts, 1989)

1. ความเข้มข้นของไคโตแซนและไดอัลดีไฮด์

เมื่อสารละลายไคโตแซนเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย โดยมีสารละลายไดอัลดีไฮด์ เป็นสารช่วยในการเกิดปฏิกิริยา เช่น กลูตารัลดีไฮด์ จะทำให้โครงสร้างของไคโตแซนมีลักษณะเป็น Network ซึ่งทำให้สารละลายไคโตแซนมีความหนืดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่สารละลายมีลักษณะเป็นเจล เรียกว่าการเกิด Gelation ซึ่งพบว่าเวลาของการเกิด Gelation นั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไคโตแซน และสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายไคโตแซนและกลูตารัลดีไฮด์ที่มีต่อเวลาการเกิด Gelation (Roberts, 1989)

[Chitosan] (g.dm^{-3})	10^2 [Glutaraldehyde] (mol.dm^{-3})	Gelation Time (min)
	4.48	160
	5.60	112
4.07	6.72	60
	8.96	35.5
	11.20	22
4.54		21
5.22		17.5
5.92	11.2	6
6.52		4.5
7.93		2

จากตารางจะเห็นได้ว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจนถึง Gelation นั้นจะลดลงไปเมื่อความเข้มข้นของกลูตารัลดีไฮด์เพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้นของโคโคแชนคที่ และเมื่อความเข้มข้นของโคโคแชนเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้นของกลูตารัลดีไฮด์คงที่

2. ความเข้มข้นของกรด

จากการศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของกรดที่ใช้เป็นตัวทำละลายของโคโคแชนโดยการใส่กรดอะซิติกนั้น พบว่าเวลาในการเกิด Gelation จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ผลของความเข้มข้นของกรดอะซิติกและความเข้มข้นของโคโคแชน (ตารางที่ 2.4) ที่มีต่อเวลาในการเกิด Gelation นั้นแสดงให้เห็นว่ากลไกของการเกิดปฏิกิริยานั้นจะเกี่ยวข้องกับหมู่เอมีนที่ไม่ถูกโปรโตเนต (Unprotonated Amine Groups)

ตารางที่ 2.5 ผลของความเข้มข้นกรดอะซิติกที่มีต่อเวลาของการเกิด Gelation เมื่อความเข้มข้น

$$\text{โคโคแชน} = 4.07 \text{ g.dm}^{-3} \quad \text{ความเข้มข้นกลูตารัลดีไฮด์} = 11.2 \times 10^{-2} \text{ mol.dm}^{-3}$$

$$\text{อุณหภูมิ} = 25^\circ \text{C (Roberts, 1989)}$$

	[Acetic Acid] (mol.dm ³)			
	0.1	0.2	0.3	0.4
Gelation Time (min)	22	47.5	76.5	102

3. อุณหภูมิ

ในช่วงอุณหภูมิ 25-55 °C พบว่าเวลาของการเกิด Gelation จะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเวลาของการเกิด Gelation เมื่อความเข้มข้นของโคโคแทน = 8.15 g.dm^{-3} ความเข้มข้นกลูตาไรลดีไฮด์ = $6.72 \times 10^{-2} \text{ mol.dm}^{-3}$ และความเข้มข้นกรดอะซิติก 0.1 mol.dm^{-3} (Roberts, 1989)

	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)						
	25	30	35	40	45	50	55
Gelation Time (min)	26	16	11	7	4.5	4	2.5



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย