

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะทั่วไปของสารหนู





2.1.1 ประเภทของสารหนู

สารหนู (Arsenic) มีน้ำหนักอะตอม 74.9216 เลขอะตอม 33 มีเลขรหัสสารซึ่งใช้ประกอบใน Material Safety Data Sheet (MSDS) คือ CAS-No. 7440-38-2 และ UN 1588 สารหนูมีสมบัติเป็นทั้งโลหะและอโลหะ พบในรูปธาตุหรือโลหะ (Element or Metallic arsenic) ส่วนในรูปของสารประกอบ (Arsenic compounds) พบทั้งสารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic arsenic) และสารประกอบอินทรีย์ (Organic arsenic) ซึ่งสารประกอบอนินทรีย์ที่พบมากจะมีอยู่ 2 รูป คือ อนุมูลประจุ +3 หรือ อาร์ซีไนต์ (arsenite) และ +5 หรือ อาร์ซีเนต (arsenate) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทของสารหนูและสารประกอบของสารหนู

Name	Synonyms	Formula
<u>Element or Metallic arsenic</u>		
arsenic	metallic arsenic	As ₄
<u>Inorganic arsenic . trivalent</u>		
arsenic(III) oxide	arsenic trioxide arsenous oxide	As ₂ O ₃ (or As ₄ O ₆)
arsenous acid	-	H ₃ AsO ₃
arsenenous acid	arsenious acid	HAsO ₂
arsenites , salt of arsenous acid		H ₂ AsO ₃ ⁻ , HAsO ₃ ²⁻ or AsO ₃ ³⁻
arsenic(III) chloride	arsenic trichloride arsenous trichloride	AsCl ₃
arsenic(III) sulfide	arsenic trisulfide	As ₂ S ₃

ตารางที่ 2.1 ประเภทของสารหนูและสารประกอบของสารหนู (ต่อ)

Name	Synonyms	Formula
<u>Inorganic arsenic . pentavalent</u>		
arsenic(V) oxide	arsenic pentoxide	As ₂ O ₅
arsenic acid	orthoarsenic acid	H ₃ AsO ₄
arsenenic acid	metaarsenic acid	HAsO ₃
arsenates , salt of arsenic acid		H ₂ AsO ₄ ⁻ , HAsO ₄ ²⁻ , AsO ₄ ³⁻
<u>Organic arsenic</u>		
methylarsonic acid	methanearsonic acid	CH ₃ AsO(OH) ₂
dimethylarsinic acid	cacodylic acid	(CH ₃) ₂ AsO(OH)
trimethylarsine oxide	-	(CH ₃) ₃ AsO
methylarsine	-	CH ₃ AsH ₂
dimethylarsine	-	(CH ₃) ₂ AsH
trimethylarsine	-	(CH ₃) ₃ As
arsenillic	p-aminobenzene-arsenic acid	H ₂ N-  -AsO(OH) ₂
carbasone	[4-[aminocarbonyl-amino]phenyl]-arsonic acid : N-carbamonylarsanilic acid	(OH) ₂ OAs-  -NHCH ₂ CN ^O H ₂
3-nitro-4-hydroxy-phenylarsonic acid	-	O ₂ N-  -AsO(OH) ₂
4-nitrophenylarsonic acid	p-nitrophenylarsonic acid	O ₂ N-  -AsO(OH) ₂
arsenobetaine	-	(CH ₃) ₃ As + CH ₂ COOH
aesenocholeline	-	(CH ₃) ₃ As + CH ₂ CH ₂ OH
dialkylchloroarsenine	-	R ₂ AsCl
Alkyldichoroarsine	-	RAsCl ₂

ที่มา : World Health Organization (1981)

2.1.2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี

สารหนูในรูปอิสระเป็นสารที่พบได้ยากในธรรมชาติ ส่วนใหญ่พบในส่วนประกอบของแร่ต่างๆ ในรูปอาร์ซีนไนด์ (arsenide) ของโลหะเช่น ทองแดง นิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ เป็นต้น และพบในรูปอาร์ซีนิกซัลไฟด์ (arsenic sulfide) ได้แก่ เรียวกา (realgar, AsS) หรือ เตตาอาร์ซีนิกเตตาซัลไฟด์ (tetraarsenic tetrasulfide, As₄S₄) อาร์ซีนโนไพไรต์ (arsenopyrite, FeAsS) และออพิเมนต์ (orpiment, As₂S₃) หรืออาจพบในรูปออกไซด์ สารหนูมีจุดเดือด 616 องศาเซลเซียส และระเหยได้เร็วมากที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมเหลว 817 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศ 760 มิลลิเมตรปรอท เมื่อไอของสารหนูมีการเย็นตัวทันทีที่ทันใดจะเปลี่ยนสีเป็นสีเหลือง แต่จะไม่มีสมบัติทางโลหะอีกต่อไป สารหนูสีเหลืองนี้จะเปลี่ยนสีกลับไปเป็นสีน้ำเงินเทาหรือสีดำ เมื่อได้รับแสงอุลตราไวโอเลตในระยะเวลาอันสั้น โดยสมบัติของสารหนูแต่ละประเภทมีดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2541 ; Fergusson, 1989 ; Norman, 1998 และ WHO, 1981)

(1) ประเภทโลหะ (Element or Metallic arsenic, As₄) เกิดจากการหลอมของอาร์ซีนโนไพไรต์ (arsenopyrite, FeAsS) หรือ โอลิงไนด์ (lollingite, FeAs₂) ที่อุณหภูมิ 650-700 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีออกซิเจน ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2



ซึ่งจะได้โลหะสารหนู (As₄) ที่มีลักษณะเป็นของแข็ง หรือ ผง ไม่ละลายน้ำ มี 3 ชนิด คือ

(1.1) ของแข็งสีเทา (metallic arsenic) มีจุดหลอมละลาย 817 องศาเซลเซียส (ในภาวะปิดสนิท ภายใต้ความดัน 36 บรรยากาศ) เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกหรือกรดไฮโดรคลอริกที่เย็น แต่ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกหรือกรดซัลฟูริกที่ร้อน เมื่อเผาจะให้เปลวไฟสีน้ำเงิน และควันทึขาวของอาร์ซีนิกไตรออกไซด์ (arsenic trioxide, As₂O₃) พร้อมกลิ่นคล้ายกระเทียม

(1.2) ของแข็งสีเหลือง (yellow arsenic) เกิดจากการหลอมอาร์ซีนิกไตรออกไซด์ (arsenic trioxide, As₂O₃) ร่วมกับซัลไฟต์ ซึ่งจะได้สารหนูมีลักษณะเป็นผงสีเหลือง มีความถ่วงจำเพาะ 1.97 และเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งสีเทาได้ง่ายเมื่อถูกแสงหรือความร้อน

(1.3) แอมมอฟฟัสอาร์เซนิก (amorphous arsenic) มีสีดำ ความถ่วงจำเพาะ 3.7 และสามารถเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งสีเทาได้ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส

(2) ประเภทสารประกอบอนินทรีย์ของสารหนู (Inorganic arsenic compounds)

(2.1) อาร์เซนิกไตรออกไซด์ (arsenic trioxide, As_2O_3) ซึ่งได้จากการถลุงโลหะอาร์ซีนิด (arsenide) หรือแร่กำมะถันที่มีสารหนูประกอบอยู่ เช่น อาร์ซีนโนไฟไรต์ (arsenopyrite, $FeAsS$) เมื่อโลหะหรือแร่ดังกล่าวถูกเผาที่อุณหภูมิ 650-670 องศาเซลเซียส ไอระเหยจากการเผาจะจับตัวตามผนังของปล่องไฟมีลักษณะเป็นผงสีขาวที่เรียกกันว่า อาร์เซนิกไตรออกไซด์ และหากผงสีขาวของอาร์เซนิกไตรออกไซด์ละลายน้ำจะได้กรดอาร์เซนัส (arsenous acid, H_3AsO_3) นอกจากนี้ยังละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริกและในด่าง ซึ่งสารหนูจะละลายอยู่ในรูปของอาร์ซีนิด (arsenite : $As(III)$)

(2.2) อาร์เซนิกเพนทอกไซด์ (arsenic pentoxide) หรือ อาร์เซนิกแอนไฮไดรด์ (arsenic anhydride, As_2O_5) เป็นสารเคมีที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของอาร์เซนิกไตรออกไซด์กับกรดไนตริก เมื่อนำสารละลายนี้ไประเหย นำส่วนที่เหลือจัดน้ำออกไปจะได้ผลึกหรือผงสีขาวของอาร์เซนิกเพนทอกไซด์และจะถูกเปลี่ยนไปเป็นอาร์เซนิกไตรออกไซด์ได้ด้วยความร้อน

(2.3) กรดอาร์เซนัส (arsenous acid, H_3AsO_3) เกิดจากการละลายของอาร์เซนิกไตรออกไซด์

(2.4) กรดอาร์เซนิก (arsenic acid, H_3AsO_4) สังเคราะห์ได้จากการนำอาร์เซนิกไตรออกไซด์ละลายในกรดไนตริก แล้วนำสารนี้ไประเหยจะได้ผลึกสีขาว และสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นอาร์เซนิกเพนทอกไซด์ (arsenic pentoxide) โดยการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส

(2.5) อาร์ซีนิด (arsenites) เมื่อรวมตัวกับโลหะหมู่ 1 จะได้เกลืออาร์ซีนิด (arsenite) คือ MH_2AsO_3 , M_2HAsO_3 และ M_3AsO_3 โดยที่ M คือ ไอออนของโลหะวาเลนซ์ 1 หรือกลุ่มของไอออนที่มีวาเลนซ์ 1 สมบัติการละลายน้ำของพวกเกลืออาร์ซีนิดจัดแบ่งได้ดังนี้ โลหะหมู่ 1 ของเกลืออาร์ซีนิด (alkaline-metal arsenites) ละลายน้ำได้ดี โลหะหมู่ 2 ของเกลืออาร์ซีนิด (alkaline-earth arsenites) ละลายน้ำได้เล็กน้อย และ โลหะหนักของอาร์ซีนิด (heavy-metal arsenites) ไม่ละลายน้ำ

(2.6) อาร์ซีเนต (arsenates) เป็นเกลือของกรดอาร์ซีนิกที่สำคัญ คือ แคลเซียมอาร์ซีเนต (calcium arsenate, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$) มีลักษณะเป็นผงสีขาว ละลายน้ำได้เล็กน้อย ละลายในกรดเจือจาง และเลทอาร์ซีเนต (lead arsenate, PbHAsO_4) มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในด่างและกรดไนตริกเจือจาง

(2.7) อาร์ซีนิกเฮไลด์ (halides of arsenic) โดยทั่วไปจะไม่พบในธรรมชาติ แต่จะพบในการวิเคราะห์ทางเคมี อาทิ อาร์ซีนิกคลอไรด์ (AsCl_3) อาร์ซีนิกโบรไมด์ (AsBr_3) และ อาร์ซีนิกฟลูออไรด์ (AsF_3)

(2.8) อาร์ซีนิกซัลไฟด์ (arsenic sulfides) เป็นสารที่มีสมบัติในการละลาย น้ำดำ เมื่ออยู่ในน้ำที่ไม่มีออกซิเจน และ ตัวกลางที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) สารประกอบนี้จะสะสมและตกตะกอนลงมา

(3) ประเภทสารประกอบอินทรีย์ของสารหนู (Organic arsenic compounds) ที่สำคัญและใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ กรดมีเทนอาร์โซนิค (methanearsonic acid) ไดอัลคิลคลอโรอาร์เซนไนน์ (dialkylchloroarsenine) ไตรเมททิวอาร์ซีน (trimethylarsine) และไตรเมททิวอาร์ซีนออกไซด์ (trimethylarsine oxide) ส่วนกลุ่มของอนุพันธ์ของสารหนูประเภทสารอะโรมาติกต่างๆ (aromatic arsenic derivatives) ใช้เป็นสารที่เติมในอาหารสัตว์และยารักษาโรคสัตว์ที่สำคัญ เช่น กรดอาร์ซีนิลิก (arsenilic acid) 3-ไนโตร-4-ไฮดรอกซี-เพนนิวอาร์โซนิคเอซิก (3-nitro-4-hydroxyphenylarsonic acid) และ 4-ไนโตรเพนนิวอาร์โซนิคเอซิก (4-nitrophenylarsonic acid) เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้สารหนูเป็นยารักษาโรคสำหรับมนุษย์ด้วย อาทิ กรดอาร์ซีนิลิก (*p*-arsanilic acid) ใช้เป็นยานอนหลับ และคาร์บาโซน (carbasone) เป็นยารักษาโรคเรื้อรัง เป็นต้น

(4) ประเภทก๊าซ สารหนูที่อยู่ในรูปก๊าซ คือ อาร์ซีน (arsine) หรือ อาร์ซีนิกไฮไดรด์ (arsenic hydride, AsH_3) และไตรเมททิวอาร์ซีน (trimethyl arsine, $(\text{CH}_3)_3\text{As}$) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีความเป็นพิษสูง ไม่มีสี ละลายได้ในน้ำ ละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์และด่าง (Pontius, Brown และ Chen, 1994)

2.2 การแพร่กระจายสารหนูในสิ่งแวดล้อม

การแพร่กระจายสารหนูในสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติ อีกทั้งกิจกรรมของมนุษย์ทั้งการเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ดังต่อไปนี้

(1) โดยธรรมชาติ เกิดจากการสีกกร่อนของพื้นผิวโลกและก๊าซภูเขาไฟ ซึ่งสารหนูจะเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของอาร์ซีนีอัสออกไซด์ (arsenious oxide)

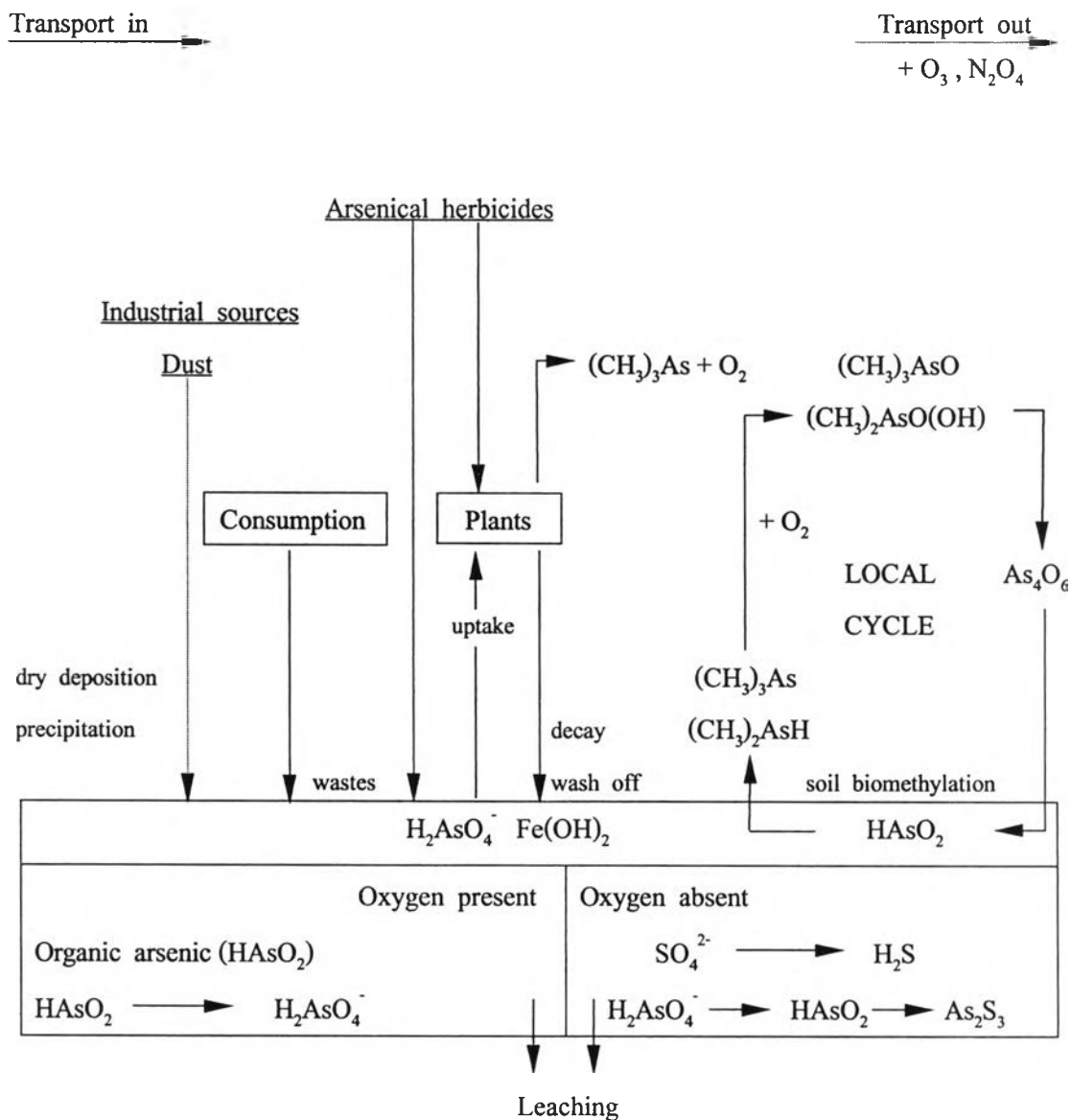
(2) ทางเกษตรกรรม นำสารหนูมาใช้ในการกำจัดศัตรูพืช (herbicide) ได้แก่ โมโนโซเดียมมีเทนอาร์โซเนต (monosodium methanearsonate, MSMA) และไดโซเดียมมีเทนอาร์โซเนต (disodium methanearsonate, DAMA) สำหรับกำจัดวัชพืชในแปลงเพาะปลูกหลังจากที่พืชเจริญแล้ว ปัจจุบันสารทั้งสองชนิดนี้ใช้แพร่หลายในไร่ฝ้าย ใช้สารหนูเป็นสารเคมีป้องกันและกำจัดแมลง (insecticides) เช่น ซิงอาร์ซีนีต (zinc arsenate) เพื่อกำจัดด้วง แคลเซียมอาร์ซีนีต (calcium arsenate, CaHAsO_4 และ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{AsO}_4)_2$) กำจัดแมลงในไร่ฝ้ายและสวนผลไม้ โซเดียมอาร์ซีนีต (sodium arsenite) กำจัดหมัดเห็บไรและเหาของปศุสัตว์ ส่วนโซเดียมอาร์ซีนีต (sodium arsenite) กำจัดหมัดเห็บไรและเหาของปศุสัตว์ ส่วนโซเดียมอาร์ซีนีต (sodium arsenite) และคอปเปอร์อะซิโตอาร์ซีนีต (copper acetoarsenite, $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Cu}(\text{AsO}_2)_2$) นำมากำจัดแมลงในบ้าน ใช้สารหนูผสมกับสารอื่นก็ได้เพื่อป้องกันและรักษาสภาพเนื้อไม้ นอกจากนี้ใช้ผสมในอาหารสัตว์ (food additives) เพื่อเร่งการเจริญเติบโตของสัตว์ปีก เป็นต้น

(3) ทางอุตสาหกรรม ใช้สารหนูในรูปของแข็ง (metallic arsenic) ผสมกับโลหะอื่น เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นโลหะอัลลอยด์เพื่อให้ทนต่อการกัดกร่อน ใช้เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor) ในเครื่องมือทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ทรานซิสเตอร์ (transistors) ดีเทคเตอร์ (detector) และโซลาร์แบตเตอรี่ (solar batteries) ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก โดยใช้สารหนูในรูปอาร์ซีนิกไตรออกไซด์ (arsenic trioxide, As_2O_3) เพื่อขจัดสีออกจากแก้ว ทำให้เนื้อแก้วใส ใช้ในอุตสาหกรรมกระจกเงา (Fergusson, 1989) อีกทั้งใช้สารหนูในอุตสาหกรรมฟอกหนังเพื่อรักษาสภาพหนัง อุตสาหกรรมยารักษาโรคทั้งในคนและสัตว์ ได้แก่ ไตรเพนโนโซโมซิส (trypanosomiasis) และอะมีบีซิส (amebiasis) รักษาโรคที่เกิดจากโปรโตซัว

จากกิจกรรมต่างๆ ทำให้สารหนูและสารประกอบของสารหนูแพร่กระจายอยู่ในอากาศ ดิน ตะกอน แหล่งน้ำ อีกทั้งสะสมในพืชและสิ่งมีชีวิต ซึ่งสามารถอธิบายการแพร่กระจายสารหนูได้ดังนี้

2.2.1 การแพร่กระจายสารหนูจากอากาศเข้าสู่พื้นดิน

ในอากาศสารหนูอยู่ในรูปของฝุ่นอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (arsenic trioxide) ซึ่งเกิดจากกิจกรรมทางอุตสาหกรรม หากมีฝนตกจะละลายลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และปนเปื้อนในดิน ทั้งการนำสารประกอบสารหนูมาใช้เป็นสารเคมีกำจัดศัตรูพืช เป็นผลทำให้มีสารหนูปนเปื้อนอยู่ในดินเป็นจำนวนมาก การแพร่กระจายสารหนูในดินและพืชเกิดขึ้นโดยสารหนูในรูปของไอออนอาร์ซิเนต ($H_2AsO_4^-$) ถูกดูดซับด้วยไฮดรอกไซด์ (hydrous oxides) ของเหล็ก ($Fe(OH)_2$) และอะลูมิเนียม ($Al(OH)_3$) ดังนั้นการชะ (Leaching) อาร์ซิเนตออกจากดินจึงเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากถูกดูดซับไว้ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญทำให้มีสารหนูปนเปื้อนอยู่ในดิน พืชบางชนิดสามารถดูดซับสารหนูออกจากดินได้ โดยเปลี่ยนสารหนูให้อยู่ในรูปไอระเหยของไตรเมททิวอาร์ซีน (trimethylarsine, $(CH_3)_3As$) ซึ่งไอระเหยดังกล่าวจะถูกออกซิไดซ์ (oxidize) ด้วย โอโซน (O_3) และ ไนโตรเจนออกไซด์ (nitrogen oxide, N_2O_4) ในระยะ 2 เมตรเหนือพื้นดิน นอกจากนี้กระบวนการไบโอเมทิลเลชัน (biomethylation) ของเชื้อราและแบคทีเรียในดิน โดยแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนสามารถเปลี่ยนสารหนูให้อยู่ในรูปไอระเหยของไดเมททิวอาร์ซีน (dimethylarsine, $(CH_3)_2AsH$) และแบคทีเรียที่ใช้ ออกซิเจนจะเปลี่ยนสารหนูให้อยู่ในรูปไอระเหยของไตรเมททิวอาร์ซีน (trimethylarsine, $(CH_3)_3As$) เมื่อไอระเหยของสารหนูรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ สารหนูจะอยู่ในรูปสารหนูอินทรีย์ของกรดไดเมททิวอาร์ซีนิก (dimethylarsinic acid, $(CH_3)_2AsO(OH)$) และอยู่ในรูปสารหนูอนินทรีย์ของอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (arsenic trioxide, As_2O_3) ซึ่งสามารถกลับเข้าสู่พื้นดินได้เป็นวัฏจักร โดยภายในดินสารหนูอินทรีย์จะสามารถเปลี่ยนอยู่ในรูปสารอนินทรีย์ได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน ส่วนในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนสารหนูอินทรีย์จะอยู่ในรูปอาร์เซนิกซัลไฟด์ (arsenic (III) sulfide) (WHO, 1981) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแพร่กระจายสารหนูจากอากาศเข้าสู่พื้นดิน
ที่มา : WHO (1981)

2.2.2 การแพร่กระจายสารหนูในแหล่งน้ำ

ในแหล่งน้ำจะพบสารหนูในรูปสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งในน้ำที่มีออกซิเจนมักพบสารหนูในรูปของอาร์ซีเนต [As(V)] เป็นส่วนใหญ่ โดยอยู่ในรูปประจุลบ (anionic) ของ H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} และ AsO_4^{3-} ในช่วงพีเอช 5-12 นอกจากนี้ยังพบสารหนูในรูปอาร์ซีไนด์ [As(III)] เพียงเล็กน้อย เนื่องจากอาร์ซีไนด์ [As(III)] ถูกออกซิไดซ์ไปเป็นอาร์ซีเนต [As(V)] ในช่วงพีเอชของน้ำ มีความเป็นด่าง ส่วนในน้ำที่มีออกซิเจนน้อย เช่น ในบ่อน้ำบาดาลมักพบสารหนูในรูปของอาร์ซีไนด์ โดยอยู่ในรูปไม่มีประจุ (nonionic, H_3AsO_3) และในรูปประจุลบ (anionic, H_2AsO_3^-) เป็นส่วนใหญ่ ในช่วงพีเอชต่ำกว่าและมากกว่า 9.22 ตามลำดับ ในขณะที่สารหนูอินทรีย์ในรูปเมทิลเลทอาร์ซีนิค (methylated arsenic) มีในแหล่งน้ำน้อยกว่า 1 ไมโครกรัมต่อลิตร ($\mu\text{g/L}$) ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับสารหนูอนินทรีย์ ดังนั้นในกระบวนการบำบัดน้ำส่วนใหญ่จึงมุ่งศึกษาวิธีการกำจัดสารหนูอนินทรีย์ (Marc, 1994)

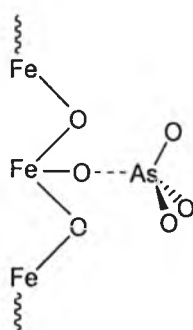
ค่าพีเอชของน้ำมีผลต่อประเภทของอาร์ซีเนต [As(V)] และ อาร์ซีไนด์ [As(III)] โดยอาร์ซีเนต [As(V)] จะอยู่ในรูป H_3AsO_4 , H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} และ AsO_4^{3-} ในช่วงพีเอช < 2, 3-6, 8-10 และ > 12 ตามลำดับ (Lackovic, 2000 ; Namasisvayam, 1998 และ Raven, 1998) ส่วนอาร์ซีไนด์ [As(III)] จะอยู่ในรูป H_3AsO_3^0 ($\text{pK}_{a,1} = 9.20$), H_2AsO_3^- ($\text{pK}_{a,2} = 12.13$) และ HAsO_3^{2-} ($\text{pK}_{a,3} = 13.4$) ในช่วงพีเอช 7-8, 10-11 และ 12-13 ตามลำดับ (Wasay *et al.*, 1996) ซึ่งการแตกตัวของ H_3AsO_4 แสดงดังสมการที่ 2.3 ถึง 2.5



อาร์ซีเนต [As(V)] เคลื่อนที่อย่างช้าๆทั้งในน้ำและดิน เนื่องจากการมีประจุของอาร์ซีเนตทำให้เกิดการยึดติดอยู่ที่ผิวของแร่ธาตุ (mineral surfaces) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างอาร์ซีเนตและอาร์ซีไนด์ไม่ค่อยพบในสิ่งแวดล้อม (Marc, 1994)

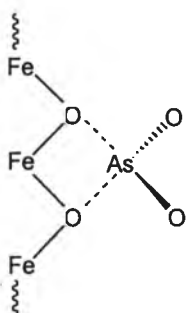
นอกจากนี้ค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล (Redox potential : E_h) มีความสัมพันธ์ต่อค่าพีเอช โดยน้ำในสถานะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ค่า E_h จะสูง ซึ่งพบสารหนูในรูปอาร์ซีเนต [As(V)] 2 รูป

คือ H_2AsO_4^- และ HAsO_4^{2-} ในช่วงพีเอช 4-7 และ 7-9 ตามลำดับ ค่า E_h จะลดลงในสภาวะที่น้ำไม่มีออกซิเจน โดยจะพบสารหนูในรูป H_3AsO_3 เมื่อค่า E_h ลดลงในช่วง -0.1 ถึง -0.3 โวลต์ (V) สารหนูจะอยู่ในรูปของแข็ง $[\text{As}(s)]$ นอกจากนี้ยังพบสารหนูที่ไม่ละลายน้ำในรูปสารประกอบอาร์ซีเนตของเหล็ก $[\text{Fe}(\text{III})]$ และโครเมียม $[\text{Cr}(\text{III})]$ อีกทั้งยังพบตะกอนของออปิเมนต์ (orpiment, As_2S_3) และแบเรียมอาร์ซีเนต (barium arsenate : $\text{Ba}_3(\text{AsO}_4)_2(s)$) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

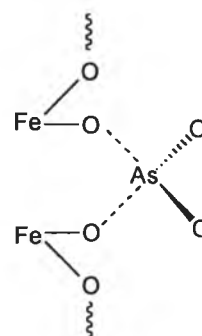


As-Fe 3.59 Å

monodentate complex



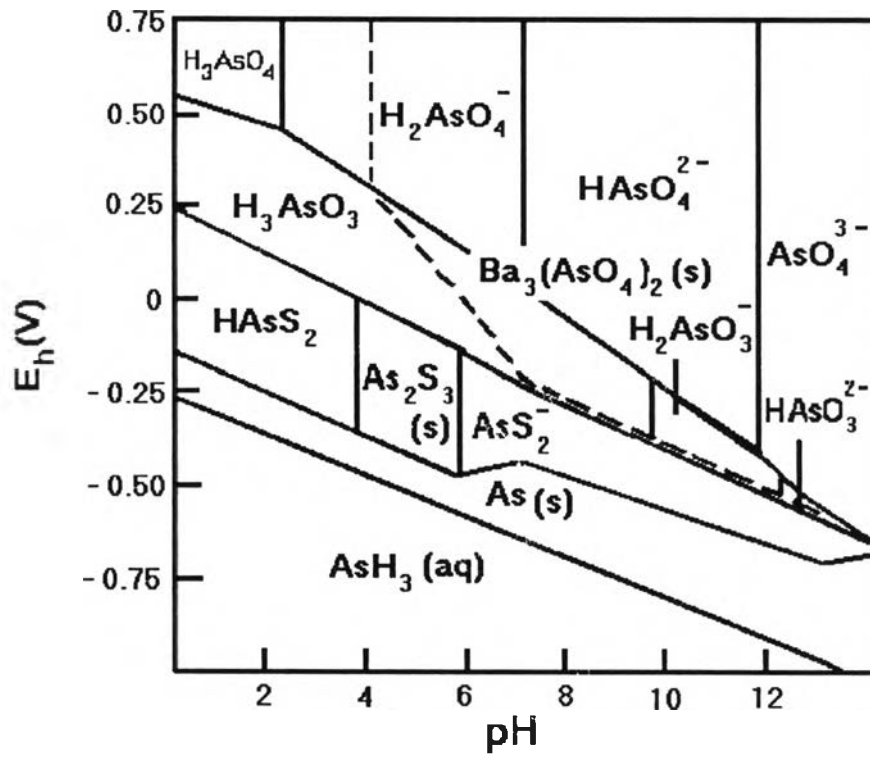
As-Fe 2.85 Å



As-Fe 3.24 Å

bidentate complex

รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นผิวของอาร์ซีเนต $[\text{As}(\text{V})]$ ที่ถูกดูดซับบนจีโอไทต์ (goethite) ที่มา : Fendorf, Eick และ Grossl (1997)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_h และ พีเอช
ที่มา : Fergusson (1989)

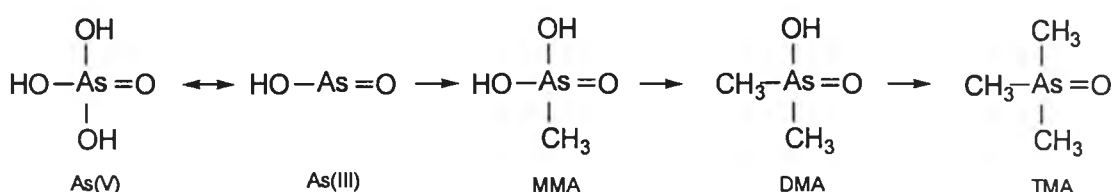
2.3 ความเป็นพิษของสารหนู

กลไกการเกิดพิษสารหนูในร่างกายขึ้นกับหลายปัจจัย อาทิ โครงสร้างทางกายภาพ และทางเคมีของสารประกอบสารหนู สารหนูสามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยการหายใจ (Inhalation) เอาฝุ่น ไอ หรือหมอกที่มีสารหนูปนเปื้อน การรับประทานอาหารและน้ำ (Ingestion) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีการใช้สารหนูเป็นสารเคมีในการกำจัดศัตรูพืช สารหนูจะปนเปื้อนทั้งในน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน รวมถึงพืชที่ปลูกในบริเวณนั้น การซึมผ่านทางผิวหนัง (Skin absorption) โดยสัมผัสเมื่อทำงานหรือทำกิจกรรมอื่น และสัมผัสเพื่อการรักษา เช่น ยาที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ อาทิ Fowler's solution ซึ่งเป็นยารักษาโรคเม็ดโลหิตขาวมากและผิดปกติ (leukaemia) ยารักษาโรคหอบ (asthma) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณและระยะเวลาที่ได้รับ อายุและเพศ เป็นต้น โดยส่วนใหญ่แล้วสารหนูอนินทรีย์มีความเป็นพิษมากกว่าสารหนูอินทรีย์ และ สารหนูที่อยู่ในรูปสารละลายมีความเป็นพิษมากกว่าสารหนูในรูปของแข็ง (Saha, Dikshit และ Bandyopadhyay, 1999) สารละลายสารหนูที่มีวาเลนซ์ 3 [As(III)] จะมีความเป็นพิษมากกว่าสารหนูที่มีวาเลนซ์ 5 [As(V)] เนื่องจากการที่สารหนูในรูปอาร์ซีนีต [As(III)] เคลื่อนที่ในน้ำได้มากกว่าสารหนูในรูปอาร์ซิเนต [As(V)] มีผลทำให้อาร์ซีนีตมีความเป็นพิษสูงกว่าอาร์ซิเนต 25-60 เท่า (Fendorf *et al.*, 1997 และ Raven, 1998)

สารหนูเป็นสารที่ออกฤทธิ์แบบเฉียบพลัน (Acute poisoning) และมีพิษเรื้อรัง (Chronic poisoning) อาการของพิษเฉียบพลันมักจะเกี่ยวข้องกับเลือด สมอ หัวใจ ไต และระบบทางเดินอาหาร ได้แก่ ระบายท้อง อักเสบ มีแผลพุพองที่เนื้อเยื่อและผิวหนัง อาเจียน ระบายน้ำมาก ปวดท้อง ท้องเสีย ไตถูกทำลาย ชักกระตุกและตายได้ ส่วนการเกิดพิษแบบเรื้อรังมักจะเกี่ยวข้องกับไขกระดูก ผิวหนังและระบบประสาทส่วนปลาย ได้แก่ อาการเมื่อยล้า อ่อนเพลีย ปากอักเสบ ระบบทางเดินอาหารปั่นป่วน บวมแดงเป็นแห่งๆ ผิวหนังส่วนข้อพับพุพอง มีจุดสีดำเพิ่มขึ้นเห็นได้ชัดเจน บริเวณท้องแขนและท้องขา ผิวหนังตกสะเก็ด เส้นผมหยาบ กล้ามเนื้อเป็นอัมพาตและหดลีบ มองเห็นไม่ชัดอาจรุนแรงถึงตาบอด มีความผิดปกติทางสมอง (Encephalopathy) หากสัมผัสสารหนูเป็นเวลานานติดต่อกัน จะก่อให้เกิดอาการระคายเคืองตรงบริเวณที่สัมผัส เกิดเป็นตุ่มแข็งใสพอง เป็นสาเหตุของมะเร็งผิวหนัง หากหายใจเอาสารหนูเข้าไปจะเกิดการสะสมสารหนูที่ปอด ในกรณีที่สารหนูเข้าสู่ระบบการไหลเวียนโลหิตจะก่อให้เกิดอาการเบื่ออาหาร โลหิตจาง เกิดเป็นมะเร็งในตับและไตได้

สำหรับอาการแสดงพิษจากก๊าซอาร์ซีน (AsH_3) จะมีอาการแสดงแตกต่างจากพิษของสารหนูที่ได้กล่าวมาแล้ว กล่าวคือ หลังจากรับก๊าซอาร์ซีน 2-24 ชั่วโมงจะแสดงทันที โดยมีอาการคลื่นไส้ ปวดท้องบริเวณลำไส้ใหญ่ อาเจียน หายใจติดขัด มีการแตกตัวของเม็ดเลือด หากได้รับก๊าซอาร์ซีนในปริมาณมากจะทำให้ตายในทันทีโดยไม่มีอาการแสดงพิษอื่นๆ อาการแสดงร่วมของความเป็นพิษทั้งชนิดเฉียบพลันและเรื้อรัง คือ จะพบเส้นลายขวางสีขาวที่เล็บ (Mee's lines) พบเซลล์ผิวหนังหนาบริเวณฝ่ามือ หน้าแดงและเหงื่อออก (Pontius *et al.*, 1994)

สารหนูเมื่อเข้าสู่ร่างกาย ประมาณครึ่งหนึ่งจะแพร่กระจายอยู่ในกระแสโลหิต โดยเฉพาะในเม็ดเลือดแดงและกระจายอยู่ตามเนื้อเยื่อต่างๆ ระยะเวลาชีวิตสารหนู (half time) ในร่างกาย ประมาณ 60 วัน เนื่องจากไปสะสมอยู่ในเม็ดเลือดแดง สารหนูจะทำปฏิกิริยาต่อหมู่ซัลไฟดริล (sulfhydryl groups : -SH) ของเซลล์ เอนไซม์ภายในเซลล์ที่มีหมู่ซัลไฟดริล และเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับระบบการหายใจ ทำให้การทำงานของเซลล์ผิดปกติ มีผลทำให้รบกวนการสร้าง DNA ที่เกี่ยวกับการสร้างเซลล์ใหม่ของร่างกาย ซึ่งอาจเป็นผลให้เซลล์แบ่งตัวผิดปกติ และก่อให้เกิดเป็นมะเร็ง กระบวนการเมตาโบลิซึมสารหนูในร่างกายของมนุษย์ มี 2 กระบวนการ โดยจะเปลี่ยนสารหนูในรูปอาร์ซีนิต $[\text{As(V)}]$ ให้อยู่ในรูปอาร์ซีนิต $[\text{As(III)}]$ และ เปลี่ยนให้อยู่ในรูป monomethylarsonic acid (MMA) และ dimethylarsinic acid (DMA) ตามลำดับ ซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นในตับ ส่วนกระบวนการที่สองสารหนูจะเปลี่ยนรูปจาก DMA เป็น trimethylarsine oxide (TMA) ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดขึ้นที่ส่วนใดของร่างกาย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (Pontius *et al.*, 1994)



รูปที่ 2.4 กระบวนการเมตาโบลิซึมสารหนูในร่างกายของมนุษย์

ที่มา : Pontius *et al.*, 1994

องค์การอนามัยโลก (World Health Organization : WHO) กำหนดปริมาณการได้รับสารหนูตลอดทั้งวันไม่เกิน 2 ไมโครกรัม (μg) ของสารหนูอนินทรีย์ต่อน้ำหนักของร่างกาย โดยปกติร่างกายมีระบบเมตาโบลิซึมซึ่งจะสามารถลดความเป็นพิษของสารหนูให้น้อยลงได้ โดยร่างกายจะขับสารหนูออกมาทางปัสสาวะ อุจจาระ หลุดลอกออกมาพร้อมผิวหนัง (Desquamation of skin) เส้นผม เล็บ และทางเหงื่อ ซึ่งอัตราการขับออกจากร่างกายค่อนข้างช้า (Saha *et al.*, 1999)

2.4 วิธีการกำจัดสารหนู

การกำจัดสารหนูในน้ำเสียมีความสำคัญ เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของแต่ละวัตถุประสงค์ของการใช้น้ำ ดังแสดงค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประเภทต่างๆ ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประเภทต่างๆ

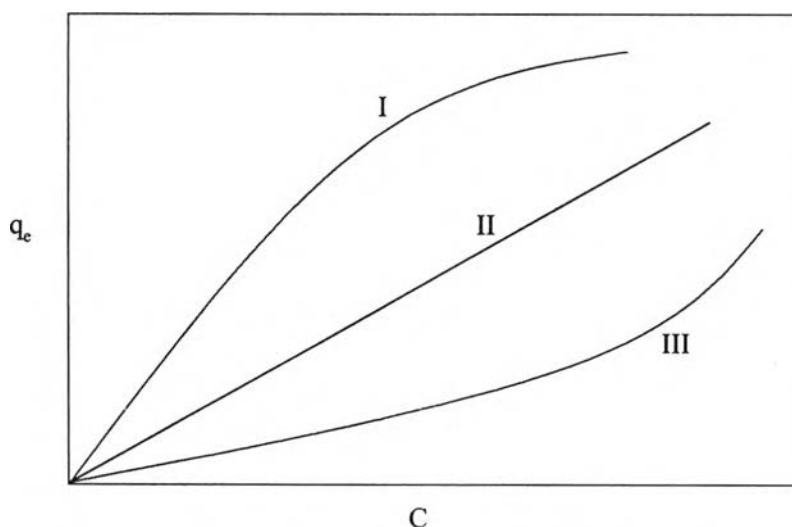
หน่วยงานที่กำหนด	มาตรฐาน	ปริมาณสารหนูที่ยอมให้มีได้ (ppm)
กระทรวงสาธารณสุข	น้ำดื่ม	0.05
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม	น้ำดื่ม	0.05
อุตสาหกรรม		
กรมทรัพยากรธรณี	น้ำดื่ม	0.05
การประปานครหลวง	น้ำดื่ม	0.01 - 0.05
กรมโยธาธิการ	น้ำดื่ม	0.05
องค์การอนามัยโลก (WHO)	น้ำดื่ม	0.05
กรมโรงงานอุตสาหกรรม	น้ำทิ้ง	0.25
กระทรวงวิทยาศาสตร์	น้ำผิวดิน	0.01
เทคโนโลยีและการพลังงาน	ที่ไม่ใช้น้ำทะเล	

ที่มา : กรมควบคุมมลพิษ (2541)

วิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดสารหนูมีหลายวิธี อาทิ วิธีดูดซับร่วมกับการตกตะกอน (Adsorption-Coprecipitation) โดยใช้ ปูนขาว สารส้มและเฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) การดูดซับด้วย แอคติเวตเตดอลูมินา (Activated alumina) หรือ แอคติเวตเตดคาร์บอน (Activated carbon) วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) และ วิธี Reverse Osmosis (Joshi และ Chaudhuri, 1996 และ Wasay *et al.*, 1996)

2.4.1 วิธีการดูดซับ หรือ การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใดๆ อาทิ ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) การดูดซับขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของของแข็ง และ ความเข้มข้นของสารที่ละลายอยู่ในของเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของของแข็ง
ที่มา : Eckenfelder (1981)

รูปที่ 2.5 แสดงการกระจายโมเลกุลระหว่างของเหลวและพื้นผิวของของแข็ง ซึ่งเส้นโค้ง I หมายถึง เกิดการดูดซับที่ผิวของแข็งได้ดี (Favorable Adsorption) เส้นโค้ง III หมายถึง เกิดการดูดซับที่ผิวของแข็งได้ไม่ดี (Unfavorable Adsorption) และเส้นโค้ง II หมายถึง การดูดซับที่ผิวแบบเส้นตรง (Linear Adsorption and Absorption) ซึ่งจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวของของแข็ง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่ละลายอยู่ในของเหลว

2.4.1.1 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)

การดูดซับสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลในชั้นของเหลว เข้าใกล้และยึดติดที่ผิวของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจาก แรงแวนเดอวาล์ว (Van der Waals Force) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayered) โดยในแต่ละชั้นของโมเลกุลจะอยู่บนชั้นของโมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ หรือ จำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น

การดูดซับทางเคมี เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ ซึ่งจะก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดซับทางเคมีแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ เนื่องจากการดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayered) และไม่สามารถผันกลับได้ ส่วนการดูดซับทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ (reversible) ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดนี้อ่อนจะเป็นผลให้เกิดการคายสารที่ดูดซับออก (Desorption)

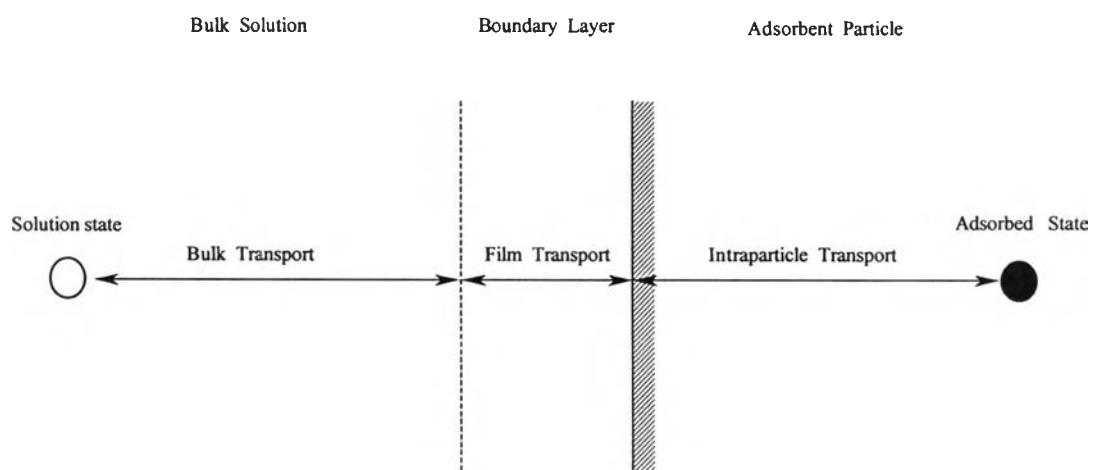
2.4.1.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer)

อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลมีความสำคัญต่อการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับที่มีรูพรุน มี 3 ขั้นตอน (ดังแสดงในรูปที่ 2.6) คือ

(1) การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลว จะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของสารดูดซับ

(2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ที่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับที่ผิวขั้นตอนหนึ่ง

(3) การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายที่อยู่ผิวหน้าของสารดูดซับเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับภายใน ซึ่งขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นกัน



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนในการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับที่มีรูพรุน
ที่มา : Eckenfelder (1981)

วิธีดูดซับสารหนูโดยตัวดูดซับชนิดต่างๆ อาทิ งานวิจัยของ Diamadopoulos , Ioannidis และ Sakellaropoulos (1993) พบว่าเถ้าลอย (fly ash) สามารถกำจัดสารหนู [As(V)] ในน้ำได้ โดยใช้เถ้าลอย 1 กรัม มากำจัดสารหนูที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสภาวะการดูดซับที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับสารหนูได้ 80 % ที่พีเอช 4 มีปริมาณการดูดซับมากกว่าที่พีเอช 10 และ 7 ตามลำดับ Dikshit (2000) นำหางแร่ (kimberlite tailing) มาดูดซับสารหนูในน้ำได้ดิน พบว่าสามารถดูดซับสารหนูได้ 0.25 มิลลิกรัมต่อกรัมของสารดูดซับ ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูจะเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นกลางและนำหางแร่ไปใช้บำบัดน้ำตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนสารหนู พบว่าหางแร่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนู 90-94 % ทั้งยัง

มีการนำหางแร่ที่ใช้แล้วมาละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง จะสามารถนำหางแร่กลับมาใช้ใหม่ได้ และ Singh (1988) ศึกษาการกำจัดสารละลายของสารหนู [As(III)] ที่ความเข้มข้นพีเอช และอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยใช้ฮีมาไทต์ (haematite) เป็นสารดูดซับ ผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดสารหนูได้สูงสุด 96 % ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีการนำสารดูดซับชนิดต่างๆมาดูดซับสารหนู ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารดูดซับชนิดต่างๆในการดูดซับสารหนูต่อความจุของสารดูดซับ

Adsorbents	Adsorbent capacity (mg/g)
hydrous Fe oxide with polyacrylamine	43.00
molybdate-impregnates chitosan beads (MICB) *	37.47
chemviron F-400 GAC	20.22
Cu ²⁺ - impregnated Chemviron F-400 GAC	17.23
activated alumina	11.24-23.97
Y(III) – impregnated alumina	14.45
alumina	13.64
La(III) – impregnated alumina	12.88
waste Fe(III)/Cr(III) hydroxide	11.02
La(III) – impregnated silica gel	8.85
activated bauxite	3.89
activated carbon darco	3.75
Ag ⁺ - impregnated Chemviron F-400 GAC	2.24
activated carbon	1.05
Al ₂ O ₃ /Fe(OH) ₃	0.09

ที่มา : Namasivayam (1998)

* Guibal *et al.* (1999)

2.4.2 วิธีการตกตะกอน (Precipitation)

การตกตะกอนด้วยเกลือของเหล็ก (iron salts) เหมาะสำหรับระบบบำบัดขนาดกลาง และขนาดใหญ่ โดยพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูในรูปอาร์ซีเนต [As(V)] ดีกว่าสารหนูในรูปอาร์ซีไนต์ [As(III)] เนื่องจากในแหล่งน้ำอาร์ซีเนตอยู่ในรูปของไอออนประจุลบ (monovalent, H_2AsO_4^- และ divalent anions, HAsO_4^{2-}) ส่วนอาร์ซีไนต์จะอยู่ในรูปไม่มีประจุ (H_3AsO_3) ทำให้อาร์ซีเนตสามารถเกิดปฏิกิริยากับเกลือของเหล็กได้ดีกว่า ดังนั้นก่อนที่จะทำการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสารหนูจึงควรทำออกซิไดซ์ [As(III)] เป็น [As(V)] โดยใช้คลอรีน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารหนู (Joshi, 1996) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Karen (1995) พบว่าเมื่อทำการออกซิไดซ์ [As(III)] เป็น [As(V)] โดยใช้คลอรีนก่อน จากนั้นใช้เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ปริมาณ 3-10 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดสารหนูได้มากถึง 81-96 % และใช้ปูนขาว 20 มิลลิกรัมต่อลิตรกำจัดสารหนูได้ 23-71 % ซึ่งที่พีเอช 7.18-7.8 เฟอร์ริกคลอไรด์สามารถกำจัดสารหนูได้มากกว่าการใช้ปูนขาว และการใช้สารส้มที่พีเอชน้อยกว่า 7 จะสามารถกำจัดสารหนูในน้ำได้มากกว่า 90 %

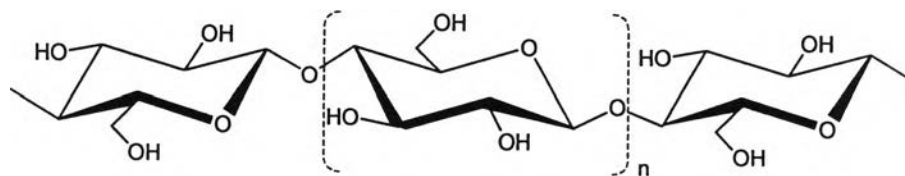
แต่อย่างไรก็ตามวิธีการตกตะกอนจะมีปัญหาในการกำจัดสัลไฟด์และไม่สามารถใช้กับระบบที่มีอัตราการไหลต่ำหรือมีการเดินระบบเป็นช่วงได้ วิธีการดูดซับด้วยแอกติเวตเตดอลูมินา เหมาะสำหรับระบบบำบัดน้ำขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพสูง แต่การฟื้นฟูสภาพแต่ละครั้งจะมีผลทำให้สารดูดซับมีความสามารถในการดูดซับลดลง วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนเหมาะสำหรับระบบบำบัดขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพดีในตอนเริ่มต้น แต่เรซินประจุลบสามารถดูดซับไอออนประจุลบอื่นๆ ในน้ำได้อีกด้วย จึงทำให้อายุการใช้งานสั้นลงและมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะลดลง (กรมควบคุมมลพิษ, 2541)

2.5 ลักษณะทั่วไปของไคโตแซน

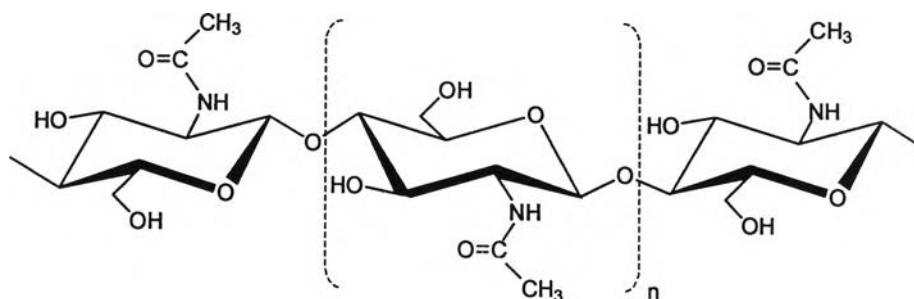
ไคโตแซน (Chitosan) เป็นพอลิเมอร์ที่มีมากในธรรมชาติเป็นอันดับสองรองจาก เซลลูโลส พบมากในส่วนประกอบเปลือกแข็งของสัตว์จำพวกแมลง และ สัตว์ทะเล เช่น กุ้ง ปู และแครงหมึก นอกจากนี้ยังพบในผนังเซลล์ของเห็ดรา (Bassi *et al.*, 2000 และ Shigehiro, 1999) ไคโตแซนเป็นอนุพันธ์ของไคติน (Chitin) ซึ่งไคตินมีชื่อทางเคมีว่า พอลิ-เบต้า(1,4)-2-อะซิตามิโด-2-ดีออกซี-ดี-กลูโคส (poly- β (1,4)-2-acetamido-2-deoxy-D-glucose) มีสูตรทั่วไป คือ $(C_8H_{13}NO_5)_n$ ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 47.29 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.45 ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และออกซิเจนร้อยละ 39.37 เมื่อนำไคตินมากำจัดหมู่อะซิติดิล (Deacetylation) ด้วยด่างเข้มข้นเป็นผลให้โครงสร้างทางเคมีของไคตินเปลี่ยนไป โดยหมู่อะซิตามิโด (-NHCOCH₃) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ถูกเปลี่ยนเป็นหมู่เอมิโนอิสระ (-NH₂) ทำให้ได้ไคโตแซนซึ่งมีชื่อทางเคมีว่า พอลิ-เบต้า(1,4)-2-อะมิโน-2-ดีออกซี-ดี-กลูโคส (poly- β (1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose) มีสูตรทั่วไปคือ $(C_8H_{11}NO_4)_n$

ดังนั้นโครงสร้างของ เซลลูโลส ไคติน และไคโตแซน จึงมีความคล้ายคลึงกัน โดยหน่วยย่อยของเซลลูโลสเป็น ดี-กลูโคส (D-glucose) ส่วนหน่วยย่อยของไคตินคือ เอ็น-อะซิติดิล-ดี-กลูโคซามีน (N-acetyl-D-glucosamine) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกลูโคส และหน่วยย่อยของไคโตแซนคือ ดี-กลูโคซามีน (D-glucosamine) ทำให้ไคโตแซนเป็นสารพอลิเมอร์ผสม (heteropolymer) ของ ดี-กลูโคซามีน (D-glucosamine) และมี เอ็น-อะซิติดิล-ดี-กลูโคซามีน (N-acetyl-D-glucosamine) ประกอบอยู่เล็กน้อย ขณะที่ไคตินเป็นสารพอลิเมอร์ผสมของ ดี-กลูโคซามีน (D-glucosamine) และมี เอ็น-อะซิติดิล-ดี-กลูโคซามีน (N-acetyl-D-glucosamine) ประกอบอยู่เล็กน้อย (Wan Ngah, 1999) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยทั่วไปไคโตแซนที่เตรียมในทางการค้ามีปริมาณการกำจัดหมู่อะซิติดิล 75-95 % ทำให้มีความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะของไคโตแซนมากกว่าไคติน เนื่องจากมีปริมาณหมู่เอมิโนอิสระอยู่มากกว่า (Bassi *et al.*, 2000)

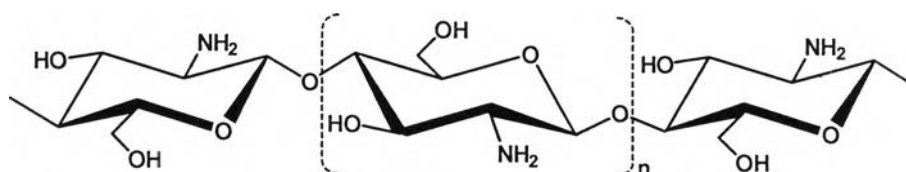
ปัจจุบันได้มีการนำไคโตแซนไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องไคโตแซนมีคุณสมบัติหลายประการ อาทิ เป็นวัสดุทางชีวภาพ (biomaterials) ที่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ (biodegradable) มีสมบัติด้านการชอบน้ำ (hydrophilicity) ด้านต้านแบคทีเรีย (antibacterial) ไม่มีความเป็นพิษ (nontoxic) เป็นสารเติมแต่งในอาหาร (food additive) ดังนั้นจึงปลอดภัยในการนำมาใช้กับมนุษย์ และไม่เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม (Bassi *et al.*, 2000)



เซลลูโลส



ไคติน



ไคโตแซน

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเซลลูโลส ไคติน และไคโตแซน
ที่มา : Okuyama และ Noguchi (2000)

2.6 กระบวนการผลิตไคโตแซน

ปริมาณและชนิดของไคตินที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตต่างๆ มีผลต่อคุณภาพของไคโตแซนที่ผลิตได้ (Rhazi *et al.*, 2000) เนื่องจากไคตินเป็นสารธรรมชาติจึงพบอยู่ในรูปของสารประกอบที่ปนอยู่กับสารอื่น อาทิ เปลือกหุ้มแข็งของแมลงจะประกอบด้วยไคตินในรูปของ ไคติน-โปรตีน (chitin-protein complex) ขณะที่เปลือกนอกของสัตว์พวกกุ้ง ปู จะพบหินปูน หรือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) นอกเหนือจาก โปรตีน และในผนังเซลล์ของพวกเห็ดรา ไคตินจะอยู่ร่วมกับสารอินทรีย์อื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แหล่งและองค์ประกอบของไคตินในสิ่งมีชีวิต

ชนิด	ปริมาณไคติน		ส่วนประกอบอื่นๆ	
	% ไคติน	Crystal type	สารอนินทรีย์	สารอินทรีย์
Algae				
<i>Chlorphyceae</i> (cell wall)		-	-	cellulose
Arthropoda				
<i>Crustacea</i>	58.0-85.0	α	CaCO ₃	arthropodins 10-32 %
<i>Diplopoda</i>	48.0-80.0	α	-	arthropodins 23-51 %
<i>Insecta</i>	20.0-60.0	α	-	arthropodins 40-76 %
<i>Arachnida Chilopoda</i>	20.0-60.0	α	-	arthropodins + resilin
Fungi				
<i>Ascomyceta</i> (cell wall)	Traces-45		-	polysaccharides
<i>Basidiomyceta</i> (mycelia)				glucans or mannana
Mollusca				
<i>Polyplacophora</i>	12.0		CaCO ₃	proteins
<i>Gastropoda</i> (shell)	3.0-70.0		CaCO ₃	tanned proteins
<i>Cephalopoda</i>	3.5-26.0	β	CaCO ₃	
<i>Squid , Skeletalpen</i>	41.0	β		

ที่มา : Sanford (1989)

ไคตินมีโครงสร้างผลึก (crystal structure) 3 ลักษณะคือ อัลฟาไคติน (α -chitin) เบต้าไคติน (β -chitin) และ แกรมมาไคติน (γ -chitin) แต่ละลักษณะแตกต่างกันที่การเกิดระบบของผลึก (crystal system) และปัจจัยของการเกิดแลตติซผลึก (crystal lattice) ของหน่วยเซลล์ (unit cell) ภายในโครงสร้างผลึก ความแตกต่างนั้นเป็นผลมาจากรูปแบบการเรียงตัวของโมเลกุลในแลตติซผลึก สายโซ่โมเลกุลที่ยาวของไคตินจะมีการเรียงตัวเป็นแผ่นซ้อนทับกัน (pleated sheet) ในแต่ละแลตติซผลึกของหน่วยเซลล์ ซึ่งอาจเรียงตัวกันได้ 2 แบบ คือ แบบขนานที่มุ่งไปในทิศทางเดียวกัน (parallel pattern) และแบบที่โครงสร้างเรียงตัวแบบสวนทางกัน (anti-parallel pattern) อัลฟาไคตินมีโครงสร้างการเรียงตัวแบบสวนทางกันพบในไคตินของเปลือกกุ้ง และ ปู ส่วนเบต้าไคตินมีโครงสร้างที่เรียงตัวมุ่งไปในทิศทางเดียวกันพบในแกนปลาหมึก และ แกรมมาไคตินจะเป็นโครงสร้างที่สลับกันระหว่างสองแบบที่กล่าวมาแล้ว

โดยธรรมชาติจะพบอัลฟาไคตินของไคตินมากกว่าเบต้าไคติน และแกรมมาไคติน ทั้งนี้เพราะมีการเกิดพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างสายโซ่ของโมเลกุล (Intramolecular and Intermolecular chain) มากกว่าจึงทำให้มีเสถียรภาพทางเคมี (chemical stability) มากกว่าแบบอื่น รวมทั้งพันธะระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลมีความแข็งแรงมาก ส่วนเบต้าไคตินมีเสถียรภาพทางเคมีรองลงมาจากอัลฟาไคติน ทั้งนี้เนื่องจากมีปริมาณของพันธะไฮโดรเจนน้อยกว่า และ พันธะระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลมีความแข็งแรงน้อย การมีเสถียรภาพน้อยทำให้มีโอกาสเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโครงสร้างจากเบต้าไคตินเป็นอัลฟาไคตินในสารละลายกรดแก่ แต่อย่างไรก็ตามเบต้าไคตินที่ได้จากแกนหมึกมีความน่าสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากมีคุณสมบัติเฉพาะตัว อาทิ สามารถละลายได้ดีและเกิดการพองตัว (swelling) ได้ดีกว่าอัลฟาไคตินซึ่งเป็นผลมาจากพันธะระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลยึดกันอย่างหลวมๆ (Rhazi *et al.*, 2000)

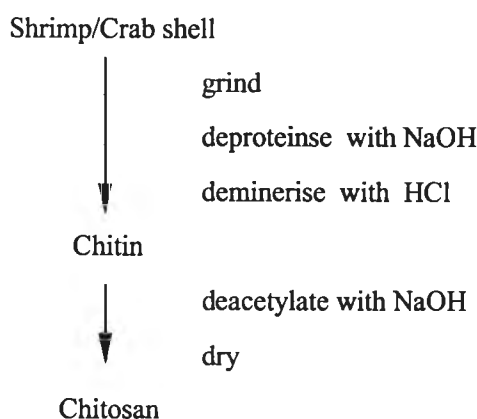
ไคโตแซนที่ผลิตจากอัลฟาไคตินสามารถนำไปใช้ในงานด้านบำบัดน้ำเสีย ผสมในกระดาษ สิ่งทอ และใช้ในการเกษตร ส่วนไคโตแซนที่ผลิตจากเบต้าไคติน (จากแกนหมึก) นิยมใช้ในทางด้านการแพทย์ ซึ่งการผลิตไคโตแซนประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 3 ขั้นตอน คือ

- (1) การกำจัดโปรตีน (Deproteination)
- (2) การกำจัดเกลือแร่ (Deminerlization)
- (3) การกำจัดหรือลดหมู่อะซิติล (Deacetylation)

โดยทั้ง 3 ขั้นตอนนี้สามารถทำให้ทั้งกระบวนการทางเคมี และ กระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ ดังนี้

2.6.1 กระบวนการทางเคมี

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตไคโตแซนจะใช้กระบวนการทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การผลิตไคโตแซนโดยใช้กระบวนการทางเคมี

ที่มา : Sanford (1989)

กระบวนการผลิตโดยย่อมีดังนี้ : นำวัตถุดิบมาบดให้มีขนาดเล็ก จากนั้นนำไปทำการกำจัดโปรตีน โดยทำปฏิกิริยากับด่างซึ่งนิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 3-5 % ที่อุณหภูมิประมาณ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง ในกระบวนการกำจัดโปรตีนออกจากวัตถุดิบ ไขมันและรงค์วัตถุบางชนิดจะถูกขจัดออกด้วย

วัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการกำจัดโปรตีนมาแล้ว จะทำปฏิกิริยากับกรดในกระบวนการกำจัดเกลือแร่ ซึ่งใช้กรดไฮดรอกลอริก (HCl) ความเข้มข้น 3-5 % ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 คืน ทำให้เกลือแร่ส่วนใหญ่เช่น หินปูน (CaCO_3) ถูกขจัดออก โดยเปลี่ยนเป็นเกลือแคลเซียมที่ละลายน้ำ (CaCl_2) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งในขั้นนี้โปรตีนและรงค์วัตถุที่ละลายในกรดจะถูกกำจัดออกไปด้วย ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากกระบวนการนี้ คือ ไคติน (chitin)

กระบวนการกำจัดหรือลดหมู่อะซิติก เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในการลดหรือกำจัดหมู่อะซิติก ($\text{CH}_3\text{CO}-$) ที่อยู่บนสายพอลิเมอร์ของไคติน เพื่อให้เกิดเป็นไคโตแซน ซึ่งเป็นการเพิ่มหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) บนสายพอลิเมอร์ของไคติน หมู่อะมิโนนี้มีความสามารถในการรับโปรตรอนจากสารละลาย แล้วทำให้สายพอลิเมอร์มีสมบัติเป็นประจุบวก และช่วยทำให้ละลายได้ดีขึ้น ส่วนใหญ่เมื่อหมู่อะซิติกถูกกำจัดออกไปมากกว่า 60 % ทำให้ไคโตแซนที่ได้สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์หลายชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าเบต้าไคตินสามารถกำจัดหมู่อะซิติก (Deacetylation) ได้ดีกว่าอัลฟาไคติน

2.6.2 กระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ

การผลิตไคโตแซนโดยกระบวนการทางเคมีต้องสิ้นเปลืองพลังงานมาก อีกทั้งก่อให้เกิดสารละลายค้างเข้มข้นจำนวนมากที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และยากที่จะแยกเอาสารจำพวก โปรตีน สารสีแดงจำพวกคาร์โรทีน (carotene) และสารอินทรีย์อื่นๆออกมา ในอนาคตกระบวนการผลิตไคโตแซนมีแนวโน้มที่จะใช้เทคโนโลยีชีวภาพ ซึ่งสามารถควบคุมกระบวนการและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น อีกทั้งยังสามารถหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีที่รุนแรงได้

กระบวนการผลิตโดยใช้ทางเทคโนโลยีชีวภาพ โดยย่อมีดังนี้ : การกำจัดโปรตีนและแคลเซียมคาร์บอเนต โดยนำเปลือกกุ้งและกระดองปูมาหมักกับแบคทีเรียที่มีเอนไซม์โปรตีเอส (protease) ทำหน้าที่ย่อยโปรตีนและให้กรดแลคติกเป็นผลพลอยได้ในการสลายแคลเซียมคาร์บอเนตในเวลาเดียวกัน จากนั้นใช้เอนไซม์ไคติน-เอ็น-ดีอะซิติกเลส (chitin-N-deacetylase) ในการกำจัดหมู่อะซิติกของไคติน (Shigehiro, 1996)

2.7 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตแซน

2.7.1 สมบัติทางกายภาพของไคโตแซน

2.7.1.1 การละลาย (Solubility)

ไคโตแซนสามารถละลายได้ในสารละลายกรดอินทรีย์เจือจางหลายชนิดที่มีพีเอชน้อยกว่า 6 โดยเฉพาะกรดฟอร์มิกและกรดอะซิติกจะสามารถละลายได้ดีมาก และละลายได้ในกรดแลคตริก กรดซิตริก กรดทาทาริก กรดไฮโดรคลอริกเจือจาง และกรดชนิดอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 แต่ไม่ละลายในน้ำ กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ค่างทั้งเจือจางและเข้มข้น แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ ยกเว้นนำไคโตแซนมาบดแห้ง (dry blending) กับกรดอินทรีย์ จะได้ไคโตแซนที่ละลายน้ำได้

ตารางที่ 2.5 การละลายของไคโตแซนในสารละลายกรดอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ชนิดของกรด	ความเข้มข้นของสารละลายกรด (w/w)				
	1 %	5 %	10 %	50 %	> 50 %
formic acid	+	+	+	+	+
acetic acid	+	+	+	+	
lactic acid	+	+	+		
citric acid	+	+	+		
tartaric acid	+	+	+		
malic acid	+	+	+		
oxalic acid	+	+	+		
hydrochloric acid	+				
adipic acid	+				
nitric acid	+				
malonic acid	+				
propionic acid	+				
pyruvic acid	+				
succinic acid	+				

หมายเหตุ + หมายถึง ละลายได้

ที่มา : Onsøyen และ Skaugrud (1990) และ Okuyama (2000)

2.7.1.2 น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

ไคโตแซนมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1×10^5 ถึง 1.2×10^6 ขึ้นอยู่กับขั้นตอนผลิต

2.7.1.3 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายไคโตแซนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น การกำจัดหมู่ อะเซทิล (degree of deacetylation) น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้น ionic strength พีเอช และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้ว ความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้ และการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายพอลิเมอร์จะให้ผลความหนืดที่แตกต่างกัน เช่น ความหนืดของไคโตแซนในกรดอะซิติกจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชลดลง ในขณะที่ความหนืดของไคโตแซนในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น

2.7.1.4 ความสามารถในการรวมตะกอนและตกตะกอน (Flocculation and Coagulation ability)

ไคโตแซนเป็นสารรวมตะกอนและสารตกตะกอน (flocculation and coagulation agent) ที่ดี เนื่องจากมีหมู่อะมิโนจำนวนมากที่สามารถแตกตัวเป็นประจุบวก และจับกับสารที่มีประจุลบได้ เช่น สีย้อม (dye) กรดนิวคลีอิก พอลิเมอร์ที่มีประจุลบ และโปรตีน โดยที่ความสามารถในการจับโปรตีนเป็นส่วนพหุคูณกับน้ำหนักโมเลกุลของไคโตแซน ทำให้เกิดการตกตะกอนซึ่งเป็นวิธีบำบัดน้ำให้ใสขึ้น

2.7.2 การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของไคโตแซน

ไคโตแซนมีสมบัติเป็นพอลิเมอร์ประจุบวก ซึ่งหมู่อะมิโน ($-NH_2$) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) เป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมี โดยที่ Juang และ Wu (1999) อธิบายถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมีของไคโตแซนมีดังสมการที่ 2.6

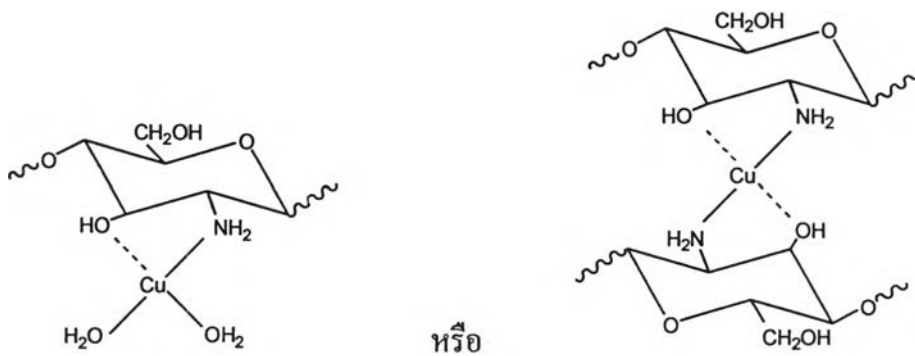


หมู่อะมิโนในไคโตแซน มีสมบัติเป็นด่างอ่อน มีอิเล็กตรอนคู่ว่าง (unshared pair of electron) อยู่ในรูปไม่มีประจุ (unprotonated, $-NH_2$) จึงสามารถสร้างพันธะกับโปรตรอน และสามารถสร้างพันธะกับโลหะทรานซิชันหมู่ III ได้ดีกว่าโลหะหมู่ I และ II ซึ่งสอดคล้องกับ Rorer และ Hsien (1995) ได้อธิบายถึงไอออนของแคดเมียม (Cd^{2+}) สร้างพันธะกับหมู่อะมิโนบนสายไคโตแซนได้ เนื่องจากโลหะทรานซิชันของ Cd^{2+} มี s, p และ unsaturated d electron orbital ใน outer shell ดังนั้นจึงเกิดการคีเลชัน (chelation) ใน d electron orbital ที่ยังว่างอยู่ร่วมกับ p orbital ของหมู่อะมิโนที่อยู่บนไคโตแซน ในขณะที่โลหะหมู่ I เช่น โซเดียม (Na^+) มี electron orbital configuration ของโลหะหมู่ I เฉพาะ s และ p electron orbital ใน outer shell ทำให้ไม่บังคับการคีเลชันของไคโตแซนกับไอออนแคดเมียม

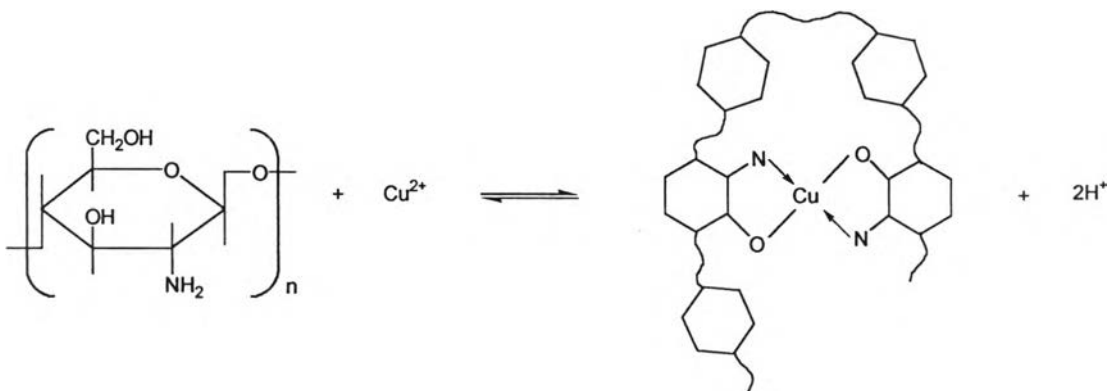
Lasko และ Huest (1999) อธิบายว่าหมู่อะมิโนบนกลูโคซามีน (glucosamine) เป็นบริเวณที่เกิดการสร้างพันธะกับเงิน (Ag^+) และไอออนของโลหะตัวอื่นๆ โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งที่พีเอชเป็นด่างหมู่อะมิโนจะอยู่ในรูปไม่มีประจุ (unprotonated, $-NH_2$) และมีอิเล็กตรอนอิสระของไนโตรเจนที่อยู่ในหมู่อะมิโน จึงทำให้สามารถสร้างพันธะกับไอออนของเงินได้ ในทางตรงกันข้ามหากไคโตแซนอยู่ในรูปมีประจุบวก (protonated, $-NH_3^+$) ทำให้ไคโตแซนสามารถดูดซับไอออนโลหะหนักที่มีประจุเป็นลบ ในช่วงที่พีเอชของสารละลายมีค่าเป็นกรดได้ ซึ่งสอดคล้องกับ Guibal, Milot และ Tobin (1998) อธิบายถึงในสภาวะที่สารละลายมีความเป็นกรด พีเอชของสารละลายมีค่าน้อยกว่าค่า pKa ของไคโตแซน (pKa = 6.2) หมู่อะมิโนในสายโมเลกุลจะรับโปรตรอนแล้วอยู่ในประจุบวก (protonated, $-NH_3^+$) ทำให้ไคโตแซนสามารถดึงดูดหมู่แอนไอออนได้ดี

Bassi *et al.* (2000) อธิบายว่าการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนโลหะกับไคโตแซน มีความสัมพันธ์กับความเป็นพอลิเมอร์ (degree of polymerization) การลดหมู่อะซิติล (deacetylation) และการกระจายตัวของหมู่อะซิติลอิสระบนสายพอลิเมอร์ของไคโตแซน เหตุผลที่สนับสนุนแนวคิดนี้เป็นเพราะการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไคโตแซนและไอออนโลหะจะเพิ่มขึ้น หากมีการเพิ่มหมู่อะมิโนเข้าไปในสารพอลิเมอร์ของไคโตแซนเป็นจำนวนมากๆ และพบว่าหมู่อะมิโนบนไคโตแซนเป็นบริเวณที่เกิดโคออร์ดิเนชัน (coordination) กับไอออนของโลหะ เนื่องจากมีอิเล็กตรอนคู่ว่าง (lone pair of electron) ที่ตำแหน่งไนโตรเจน นอกจากนี้หมู่อะมิโนยังสามารถสร้างพันธะร่วมกับไอออนโลหะทรานซิชันชนิดอื่นๆ ได้ เช่น ไอออนสังกะสี (Zn^{2+}) และ ทองแดง (Cu^{2+}) เป็นต้น

Oyrton , Monteiro และ Claudio (1999) พบว่าโคโคแซนสามารถเกิดคีเลชัน (chelation) กับไอออนของทองแดงผ่านไนโตรเจนในหมู่อะมิโน (NH_2)และ ผ่านออกซิเจนจากหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 อีกทั้ง Kaminski และ Modrzejewska (1997) อธิบายการเกิดคีเลชันของสายพอลิเมอร์โคโคแซนกับไอออนของทองแดง ซึ่งการดูดซับไอออนจะขึ้นกับพีเอชของสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 การเกิดคีเลชันระหว่างโคโคแซนกับไอออนของทองแดง
ที่มา : Oyrton *et al.* (1999)



รูปที่ 2.10 การเกิดคีเลชันระหว่างสายพอลิเมอร์โคโคแซนกับไอออนของทองแดง
ที่มา : Kaminski และ Modrzejewska (1997)

2.8 การนำไคโตเซนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียและใช้งานด้านอื่นๆ

ไคโตเซนมีลักษณะของพอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural chelating polymer) ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะทรานซิชันหมู่ III ได้ดี ดังนั้นจึงมีการนำไคโตเซนมาใช้ในการบวกรับบำบัดน้ำเสีย ทั้งการกำจัดโลหะหนักและใช้เป็นสารรวมตะกอนเพื่อทำให้น้ำใสขึ้น (Bassi *et al.*, 2000) อีกทั้งไคโตเซนยังสามารถขึ้นรูปได้หลายแบบ เช่น เจล เม็ด เส้นใยและแผ่นกรอง (membrane) เพื่อความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ส่วนการนำไคโตเซนมาทำให้อยู่ในรูปเม็ดกลมเล็กๆ (beads) มีวิธีการเตรียมไม่ยุ่งยากและจากการศึกษาพบว่าไคโตเซนแบบเม็ดมีคุณสมบัติที่ดีสะดวกในการนำไปใช้บำบัดน้ำ (Rorrer *et al.*, 1993) นอกจากนี้ไคโตเซนสามารถนำมาเตรียมให้อยู่ในรูปสารอนุพันธ์ (derivatives) ได้มากมาย และเชื่อมสายไคโตเซนเป็นโครงร่างตาข่าย (crosslink) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนโลหะต่างๆ อาทิ เตรียมโครงร่างตาข่ายของพอลิเอทิลีนไอมิน (poly(ethylene imine)) เชื่อมกับสายพอลิเมอร์ไคโตเซนเพื่อนำมาใช้กำจัดกรดอินทรีย์จากเหล้าองุ่น หรือนำมาดูดซับกรดกลูตามิก (glutamic acid) และไอออนโลหะในน้ำเสีย (Kawamura, Yoshida และ Asai, 1997) ปัจจุบันได้มีการค้นคว้าวิจัยนำไคติน-ไคโตเซนและอนุพันธ์ต่างๆ ไปใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย (ดังแสดงในตารางที่ 2.6) อาทิ การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย สิ่งทอและกระดาษ การเกษตร ใช้เป็นวัสดุทางทางแพทย รวมทั้งเป็นอาหารและยา ดังนี้

2.8.1 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

งานวิจัยต่างๆ ได้นำไคโตเซนและอนุพันธ์ของไคโตเซนมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.7 เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาไคโตเซนมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้หลายชนิด อาทิ แคลเซียม ทองแดง โครเมียม ตะกั่ว และปรอท มากกว่าตัวดูดซับชนิดอื่น (Bailey *et al.*, 1999) ทั้งยังสามารถดูดซับ วานาเดียม นิกเกิล (Bassi *et al.*, 2000) นอกจากนี้ไคโตเซนยังใช้เป็นตัวดูดซับในการแยกสารกัมมันตรังสีจากน้ำเสีย ดักจับยูเรเนียมและ โมลิบดีนัม (Guibal *et al.*, 2000)

สุมาลัย ศรีกำไลทอง, พรศ วิจารย์รัฐจันทร์ และ ปาริชาติ หลายชูไทย (2540) ศึกษาการใช้ไคโตเซนที่ผลิตได้เป็นสารดูดซับโลหะหนักในน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยไคโตเซนมีประสิทธิภาพดูดซับทองแดงในน้ำทิ้งที่พีเอช 5 ได้สูงถึง 81.29 % แต่ดูดซับนิกเกิล

และสังกะสีได้เพียง 17.87 % และ 18.85 % ตามลำดับ อนุพันธ์ไคโตแซนที่สังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยากับไพริดอกซอลไฮดรอกลอไรด์ (pyridoxal hydrochloride) และ กรดเมอร์แคปโตซซินิก (mercaptosuccinic acid) ให้ผลการดูดซับไอออนของทองแดง นิกเกิล สังกะสีและเหล็กเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอนุพันธ์จากไพริดอกซอลไฮดรอกลอไรด์มีการดูดซับสูงที่สุด

Bassi *et al.* (2000) ศึกษาความเป็นไปได้ของไคโตแซนแบบเกล็ดในการดูดซับโลหะหนัก อาทิ สังกะสี ทองแดง แคลเซียมและตะกั่วในสารละลายที่สภาวะต่าง ๆ กัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก โดยสามารถดูดซับทองแดงได้ 95 % ตะกั่ว 84 % แคลเซียม 48 % และ สังกะสี 44 % ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับอยู่ที่ 6.0 และ 7.0

Guibal *et al.* (1998) ได้อธิบายถึงการมีหมู่อะมิโนบนสายพอลิเมอร์ของไคโตแซน ทำให้มีคุณสมบัติในการเชื่อมพันธะกับไอออนของโลหะหนักต่างๆ อาทิ แคลเซียม ทองแดง ตะกั่วปรอทและโครเมียม จากทดลองใช้ไคโตแซนแบบเกล็ด 20-200 มิลลิกรัมดูดซับโมลิบเดต (molybdate) และวานาเดต (vanadate) 50-200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 2-9 เขย่าด้วยเครื่องเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าไคโตแซนสามารถดูดซับแอนไอออนของโมลิบเดต และวานาเดตได้ 7-8 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับอยู่ที่ 3-3.5 ซึ่งในสภาวะที่เป็นกรดหมู่อะมิโนบนไคโตแซนจะอยู่ในรูปประจุบวก ทำให้สามารถดึงดูดหมู่แอนไอออนได้ดี

Guibal *et al.* (1999) พบว่าการนำไคโตแซนแบบเม็ดมาเชื่อมเป็นโครงร่างตาข่าย (crosslink) โดยใช้ กลูตาอัลดีไฮด์ (glutaraldehyde) ทำให้ไคโตแซนมีความคงทนในสารละลายที่มีความเป็นกรดได้ดี และสามารถใช้ในการบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนแอนไอออนของโมลิบดินัมได้ โดยใช้ไคโตแซนแบบเม็ดน้ำหนักแห้ง 20-200 มิลลิกรัม มาดูดซับสารละลายของแอมโมเนียมโมลิบดินัม (ammonium molybdate) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นต่างๆ ควบคุมพีเอชให้คงที่ ที่อุณหภูมิห้อง นำมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ความเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที และวัดไอออนโลหะที่เหลือนด้วยเครื่อง ICP spectrometry ผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดโมลิบดินัมได้ถึง 600 มิลลิกรัมของไคโตแซน ซึ่งความสามารถในการดูดซับพบว่าขึ้นอยู่กับความเป็นผลึก (crystallinity) น้ำหนักโมเลกุล และการกำจัดหมู่อะซิติก (degree of deacetylation) นอกจากนี้ Guibal อธิบายเพิ่มเติมว่าโมลิบดินัมสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารหนู [As(V)] ได้ ดังนั้นจึงนำไคโตแซนแบบเม็ดที่ผ่านการดูดซับโมลิบดินัม (Molybdate - impregnated chitosan

beads : MICB) ซึ่งทราบปริมาณและความเข้มข้นที่แน่นอนของโมลิบดีนัมที่อยู่ในเม็ดไคโตแซน มาดูดซับสารหนูในรูปของอาร์ซีนิต[As(V)] พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูพบว่า พีเอช ที่เหมาะสมอยู่ที่พีเอช 3 ซึ่งสายพอลิเมอร์ไคโตแซนจะอยู่ในรูปประจุบวก (cationic biopolymer) และอาร์ซีนิตอยู่ในรูปของ $H_2AsO_4^-$ ทำให้สามารถกำจัดสารหนูได้ถึง 0.5 มิลลิโมลต่อกรัมของ ไคโตแซน (37.46 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตแซน)

Kawamura *et al.* (1997) พบว่าไคโตแซนแบบเกล็ดที่ผ่านกระบวนการกำจัดหมู่ อะเซทิล (deacetylation) 80 % จากกระดองปู นำมาละลายในกรดอะซิติก และหยดลงในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเตรียมเป็นไคโตแซนแบบเม็ดที่มีรูพรุน ต่อจากนั้นเติมสารเอทิลีนไกลคอล ไดกลูซิไดลอีเทอร์ (ethylene glycol diglycidyl ether) เพื่อให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายของไคโตแซน แบบเม็ด (crosslinked chitosan beads : CRCS) ซึ่งนำไปดูดซับสารปรอท [Hg(II)] ทองแดง [Cu(II)] นิกเกิล [Ni(II)] แคดเมียม [Cd(II)] และ สังกะสี [Zn(II)] พบว่า CRCS มีความสามารถในการดูดซับ สูงและยังสามารถเลือกดูดซับชนิดไอออนโลหะต่างๆ อาทิ ดูดซับ $Hg > Cu > Ni \cong Cd \cong Zn$ ตามลำดับ

Rorrer *et al.* (1993) นำไคโตแซนมาทำให้อยู่ในรูปแบบเม็ดและเชื่อมสายพอลิเมอร์ ด้วยกลูตาอัลดีไฮด์ (glutaraldehyde) เพื่อทำให้โครงร่างของไคโตแซนที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งใช้ในการกำจัดแคดเมียมออกจากน้ำเสีย ผลการทดลองพบว่าไคโตแซนแบบเม็ดสามารถดูดซับ แคดเมียมได้ 518 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตแซน

Tomoyo (1992) ทดลองใช้เม็ดไคโตแซนที่พองตัวในการดูดซับโลหะหนักชนิด ต่างๆ โดยเม็ดไคโตแซนมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.5 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดโลหะหนัก อาทิ ทองแดงได้ 98 % นิกเกิล 82 % สังกะสี 70 % โคบอลต์ 36 % และแมงกานีส 13 %

Wan Nagh (1999) นำไคโตแซนแบบเม็ดมาดูดซับทอง โดยดูดซับได้ 30.95 มิลลิกรัม ต่อกรัมของตัวดูดซับ และทำการสังเคราะห์อนุพันธ์ไคโตแซนเป็นเอ็นคาร์บอกซิเมทิลไคโตแซน (N-Carboxymethyl chitosan) ซึ่งการเพิ่มกรดอินทรีย์ลงในไคโตแซนทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับ เพิ่มขึ้น โดยพบว่าสามารถดูดซับทองได้ 33.90 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ

2.8.2 สิ่งทอและกระดาษ

เส้นใยที่ทำจากไคตินและไคโตแซนมีสมบัติทนทานต่อความร้อน ไขมัน และสารเคมีหลายชนิด ดัดสีและสารอื่นได้ดี เมื่อเทียบกับเส้นใยจากเซลลูโลส เช่น ฝ้าย บริษัทในประเทศญี่ปุ่นหลายแห่งได้ทำการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยอะคริลิก เส้นใยพอลิยูรีเทนที่เคลือบด้วยไคตินและไคโตแซน รวมทั้งผ้าทอใยสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยชั้นของไคโตแซน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการควบคุมความชื้น ชับเหงื่อได้ดี ทนต่อการซักล้าง สีติดทนนานและยังป้องกันแบคทีเรียและเชื้อรา (Shigehiro, 1999) นอกจากนี้ไคโตแซนสามารถนำมาผสมกับเส้นใยธรรมชาติ(ฝ้าย) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ อาทิ ให้ยับยาก ง่ายต่อการดูแลรักษาและสีย้อมติดอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ไคโตแซนมาใช้ประโยชน์เป็นเส้นใยโดยตรงแล้ว ยังถูกใช้เป็นตัวเชื่อม(binder) ในหมึกพิมพ์ (anion ink) และสีย้อม (dye) เพื่อให้สีติดดี แห้งเร็ว ทนต่อน้ำ และใช้เป็นตัวทำละลาย (thickening agent และ dispersing agent) ที่สามารถใช้ร่วมกับสารอื่นได้ดี

Shigehiro (1996) พบว่าการนำไคโตแซนไปผสมกับกระดาษ ทำให้กระดาษมีความคงทนเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ใช้งานพิมพ์ที่สวยงาม คมชัด เมื่อใช้ร่วมกับหมึกพิมพ์ที่มีประจุลบ (anionic inks) อนุพันธ์ของไคติน-ไคโตแซน เช่น ไฮดรอกซีเมทิลไคติน (hydroxymethylchitin) และอนุพันธ์ที่สามารถละลายน้ำได้ ยังเป็นสารเติมแต่งที่ดีในอุตสาหกรรมกระดาษ

ปราณี เลิศสุทธิวงศ์, สุวดี จันทร์กระจ่าง และ Steven (2543) เปรียบเทียบคุณภาพกระดาษระหว่างการฉาบผิวกระดาษด้วยไคโตแซน กับ ฉาบด้วยแป้ง (oxidized starch) ด้วยปริมาณที่เท่ากัน ที่ระดับการบดที่ 0 รอบ พบว่ากระดาษที่ฉาบผิวด้วยไคโตแซนสามารถเพิ่มดัชนีการต้านแรงฉีกขาด ดัชนีการต้านทานแรงดึงขาด และดัชนีการต้านทานแรงคั้นทะลุ ได้มากกว่ากระดาษที่ฉาบด้วยแป้ง (oxidized starch) นอกจากนี้ยังพบว่ากระดาษที่ฉาบด้วยไคโตแซนมีสมบัติในการซึมน้ำได้ดีกว่าด้วย

2.8.3 การเกษตร

2.8.3.1 ใช้เป็นสารเคลือบป้องกันแมลงศัตรูพืช

การเคลือบแมลงศัตรูพืชมีประโยชน์หลายประการ อาทิ ป้องกันการปลอมปนพันธุ์ (โดยใช้สีเคลือบเป็นสัญลักษณ์) ป้องกันแมลงศัตรูพืชจากโรคและศัตรูพืช และยืดอายุการเก็บรักษาแมลงศัตรูพืช โดยไคโตแซนที่ใช้ในรูปแบบฟิล์ม มีความยืดหยุ่น ยึดเกาะบนผิวแมลงได้ดี มีสมบัติเป็นสารปลอดภัย ไม่ทำให้เกิดการแพ้ ไม่ไวไฟ และไม่เป็นพิษ (non-phytotoxic) ต่อพืช

2.8.3.2 ใช้เป็นปุ๋ย

ไคโตแซนถูกผสมในปุ๋ยน้ำสำหรับพืชไม้ดอก ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถยึดติดกับผิวของพืชได้ดี และทนต่อการถูกชะล้าง ช่วยลดการระเหยของน้ำ สามารถเป็นตัวควบคุมการปลดปล่อยสารอาหารและยาให้แก่พืช

2.8.3.3 ใช้ยืดอายุผลผลิตทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว

ไคโตแซนมีประสิทธิภาพในการลดอัตราการเจริญเติบโตของเชื้อราบางชนิด โดยการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราโดยตรง และกระตุ้นกระบวนการต่างๆ ในเนื้อเยื่อพืชให้เกิดภูมิคุ้มกันต้านเชื้อราบางชนิด ซึ่งการนำไคโตแซนมาใช้เคลือบผลผลิตทางการเกษตรมีความปลอดภัยมากกว่ายาฆ่าเชื้อราบางชนิด เนื่องจากการสารเคมีที่ตกค้างอาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค โดยการนำไคโตแซนมาละลายในกรดอะซิติกเจือจาง และนำไปเคลือบผิวส้มด้วยความหนาประมาณ 30-35 ไมครอน พบว่าสามารถเก็บรักษาส้มได้ถึง 35-40 วัน โดยสีของเปลือกนอกไม่เปลี่ยนแปลง อีกทั้งนำไปเคลือบผลไม้อื่น อาทิ ลูกพีช ลูกแพร์ และสตอเบอรี่ ทำให้สามารถยืดอายุและควบคุมการเน่าเสียได้ และลดการสูญเสียจากการคายน้ำได้ด้วย (Shahidi *et al.*, 1999)

2.8.4 วัสดุทางการแพทย์

เนื่องจากไคตินและไคโตแซนเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ ดังนั้นร่างกายของมนุษย์จึงไม่ต่อต้าน ทั้งยังสามารถป้องกันการติดเชื้อบางชนิดได้ ซึ่งข้อดีเหล่านี้ทำให้มีการนำไคตินและไคโตแซน อีกทั้งอนุพันธ์ต่างๆมาใช้งานทางด้านการแพทย์ได้มากมาย ซึ่งรวมถึงการนำมาใช้เป็นวัสดุรักษาหรือตกแต่งแผล ทั้งในรูปของแผ่นฟิล์ม ฟองน้ำ เส้นใย (non-woven fabrics) และไฮโดรเจล (hydrogel) จากการวิจัยในหลายปีที่ผ่านมาพบว่า ไคตินและไคโตแซนเป็นตัวเร่งกระบวนการรักษาแผล นอกจากนั้นยังลดการเกิดรอยแผล เนื่องจากป้องกันแผลไม่ให้ติดเชื้อและยังสามารถดูดซับน้ำเหลืองจากแผลได้ นำมาทำเป็นเมมเบรนกรองแยกสำหรับการฟอกเลือด (blood dialysis membrane) ทำหลอดเลือดเทียม และยังเป็นสารป้องกันการแข็งตัวของเลือด (blood anti-coagulant) ได้ รวมทั้งใช้เป็นสารต้านทางเชื้อโรค (antibacterials, antiviral และ antitumor) นอกจากนี้ยังผลิตใหม่ละลายผิวหนังเทียมที่ทำจากไคโตแซน (chitosan-collagen) แผ่นใยสำหรับปิดแผลห้ามเลือดหรือนำไคโตแซนบริสุทธิ์ที่สกัดได้จากแกนหมึกมาทำคอนแทคเลนส์ (contact lenses) เป็นต้น (Shigehiro, 1999)

2.8.5 อาหารและยา

เส้นใยอาหารแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เส้นใยอาหารจากพืชและเส้นใยอาหารจากสัตว์ ทั้งสองอย่างนี้มีบทบาทสำคัญในการทำงานของลำไส้ รวมทั้งช่วยจับไขมันและคอเลสเตอรอล (cholesterol) ในอาหาร ทำให้การดูดซึมคอเลสเตอรอลเข้าสู่ร่างกายน้อยลง จึงช่วยรักษาระดับไขมันในเลือด และยังช่วยป้องกันหรือลดความเสี่ยงของการเป็นโรคหัวใจอีกด้วย

ไคโตแซนเป็นเส้นใยอาหารหรือไฟเบอร์จากสัตว์ ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์โพลีไฮดรอกซีชนิดหนึ่ง ที่ไม่มีรสหวาน ไม่ละลายน้ำ ไม่ย่อยในกระเพาะอาหารของคน ไม่ให้พลังงานหรือสารอาหารแก่ร่างกาย แต่มีประโยชน์ต่อระบบขับถ่าย ช่วยลดอัตราการเสี่ยงต่อโรกระบบทางเดินอาหาร อาทิ มะเร็งลำไส้ ท้องผูก โรคอ้วน และไขมันอุดตันเส้นเลือด เนื่องจากไคโตแซนเลือกจับกับกรดไขมันได้ (Shahidi *et al.*, 1999) อีกทั้งได้มีการใช้ไคโตแซนในระบบการควบคุมการปลดปล่อยยา (drug delivery and controlled release systems) เนื่องจากไคโตแซนมีประจุบวกที่สามารถยึดติดกับพื้นผิวต่างๆซึ่งมักมีประจุลบได้ดี นอกจากนั้นแล้วยังมีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อปฏิกิริยา มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และสามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Gupta และ Kumar, 2000)

ตารางที่ 2.6 การนำไคติน-ไคโตแซนและอนุพันธ์ต่างๆไปใช้ประโยชน์

Material	Compound	Properties and applications
Absorbable material	<i>N</i> -acylchitosan	Controlled releasing drugs ; absorbable surgical suture
Cationic flocculating agent	Chitosan	Polyelectrolyte complexes , metal chelates , and wastewater treatment
Cosmetic ingredients	CM-, HE-chitin	Moisture retention , anti-electrostatic , and hair and skin protecting functions
Food and feed additives	Chitin and chitosan	
Hypocholesterolaemic agent	Chitosan	Lowering of blood cholesterol level
Media for immobilizing cells and enzymes	Chitosan	Bioreactor reactions
Media for chromatography	Chitosan and <i>N</i> -acylchitosan	Hydrogels and beads for cationic and affinity column chromatographies
Paper additive	Chitosan	Increase in paper strength and clear printing
Supports for mineralizing CO ₃ ²⁻ and HCO ₃ ⁻ ions	Chitin and chitosan	Prevention of the greenhouse effect
Textile material	Chitin	Chitin-cellulose blend fibers

ที่มา : Shigehiro (1999)

ตารางที่ 2.7 ประสิทธิภาพการดูดซับของไคโตแซนและอนุพันธ์ไคโตแซนต่อโลหะชนิดต่างๆ

NO.	Material	Source	Adsorption Capacity (mg/g) for Chitosan													
			Ag ⁺	Au ³⁺	Cd ²⁺	Cr ³⁺	Cr ⁶⁺	Cu ²⁺	Hg ²⁺	Mo	Pb ²⁺	Pt ⁴⁺	V ⁴⁺	Zn ²⁺	As ⁵⁺	
1.	Chitin	Masri (1974) *							100							
2.	Chitosan	Udaybhaskar (1990) *			558	92	27		815		796					
3.	Chitosan	Peniche-Covas(1992) *							430							
4.	Chitosan beads	Rorrer <i>et al.</i> (1993)			518											
5.	N-acylated chitosan beads	Rorrer and Hsien (1995)			216											
6.	N-carboxymethyl chitosan bead	Wan Ngah, W.S. (1999)		33.9												
7.	Chitosan bead	Wan Ngah, W.S. (1999)		30.9												
8.	Powder chitosan resin	Caihua and Yuwu (1996)	481	957				56	523			364			6	
9.	Chitosan powder	Caihua and Yuwu (1996)	321	252				92	675			95			8	
10.	Chitosan powder	Mckay(1989)**						222	815						75	
11.	Chitosan beads	Guibal (1999)										300				
12.	Glutaraldehyde crosslinked chitosan beads	Guibal <i>et al.</i> (1998)								669			356			
13.	Molybdate-impregnates chitosan beads (MICB)	Guibal <i>et al.</i> (1999)														37

หมายเหตุ * อ้างจาก Bailey *et al.* (1999) ** อ้างจาก Rorrer *et al.* (1993)