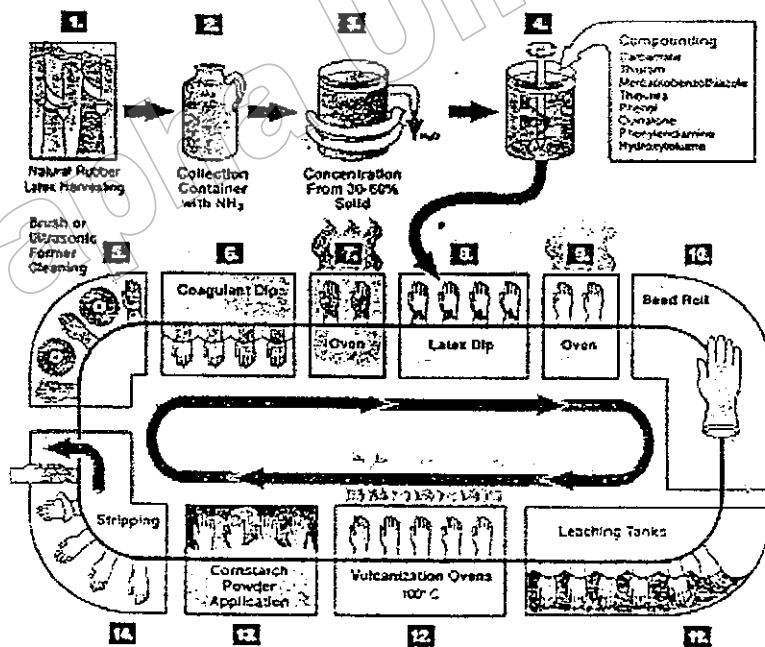


บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตถุงมือยาง

ถุงมือยางเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากน้ำยาง โดยกระบวนการจุ่มแบบพิมพ์ (latex dipping process) กระบวนการที่สำคัญในการผลิตถุงมือยาง เริ่มต้นจากการเตรียมน้ำยางผสมกับสารเคมีซึ่งได้ทำให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสมแล้วในอัตราส่วนและลำดับการผสมที่ถูกต้อง จุ่มแบบพิมพ์ (former) ลงในน้ำยางผสมสารเคมี (compounded latex) ทำให้ฟิล์มยางที่จับแบบพิมพ์แห้งและคงรูป (vulcanise) นำไปคลุกแป้งและถอดออกจากแบบพิมพ์ ดังภาพที่ 2 การผลิตถุงมือยางประกอบด้วยขั้นตอนรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตถุงมือยาง (บุรุษานุกุล วรรณอง, 2541)

การออกสูตรและเตรียมน้ำยางผสมสารเคมี การออกสูตรผลิตถุงมืออย่างจำเป็นต้องมีข้อพิจารณาต่าง ๆ เพื่อความสอดคล้องเกี่ยวกับชนิดของถุงมือ ข้อกำหนดสมบัติต่าง ๆ หรือคุณภาพของถุงมือ อายุการใช้งาน ความต้องการของผู้บริโภค ตลอดจนความสามารถและการทำงานของเครื่องจักรของโรงงาน

1. วัตถุดิบและสารเคมีหลักที่ต้องใช้

1.1 น้ำยางข้น (concentrated latex) ในการผลิตถุงมือยางโดยทั่วไปใช้น้ำยางธรรมชาติ นิยมใช้น้ำยางข้น 60% DRC ที่ผลิตโดยวิธีการปั่นเพราะหาซื้อได้ง่าย มีราคาถูกและมีความหนืดต่ำ (วราภรณ์ ขจรไชยกูล, 2531) น้ำยางข้นที่จะใช้ผลิตถุงมือใช้ได้ทั้งน้ำยางข้นปกติที่ยังไม่ได้ทำให้คงรูป (unvulcanised latex) และน้ำยางที่ทำให้คงรูปแล้ว (pre-vulcanised latex หรือ vulcanised latex) หรือเรียกว่าน้ำยางคงรูป คือน้ำยางที่ได้ทำให้โมเลกุลเกิดพันธะเคมีโดยการให้ความร้อนกับน้ำยาง ซึ่งได้ผสมสารเคมีที่จำเป็นประเภทสารช่วยความคงตัว (stabiliser) และสารในระบบทำให้ยางคงรูป (vulcanising system) ไว้แล้ว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะตลอดจนสมบัติของถุงมือที่จะผลิต ชนิดของน้ำยางข้นที่จะใช้ผลิตถุงมือสามารถใช้ได้ทั้งสองชนิดคือชนิดรักษาด้วยแอมโมเนียมาก (HA, high ammonia) และชนิดที่รักษาด้วยแอมโมเนียน้อย (LA, low ammonia) ร่วมกับสารช่วย น้ำยางข้นชนิดรักษาด้วยแอมโมเนียมาก จะเป็นที่ยอมรับใช้กันมากกว่า ซึ่งจะมีสมบัติต่าง ๆ มากมาย ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติของน้ำยางข้นชนิดรักษาด้วยแอมโมเนียมาก (วราภรณ์ ขจรไชยกูล, ม.ป.ป.)

สมบัติ	% (โดยน้ำหนัก) ในน้ำยาง
สารของแข็งทั้งหมด (TSC, total solid content)	61.31
เนื้อยางแห้ง (DRC, dry rubber content)	59.67
สารที่ไม่ใช่ยาง (NRC, non rubber content)	1.64
ฟิเอช	10.65
ความเป็นด่าง (% aqueous phase)	1.76
ความคงตัวต่อเครื่องกล, วินาที (MST, mechanical stability time)	1,168
จำนวนกรดไขมันระเหยได้ (VFA No., volatile fatty acid No.)	0.07
จำนวนโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH No.)	0.65

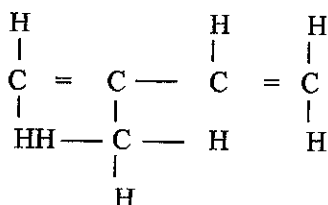
1.1.1 สมบัติและส่วนประกอบของน้ำยาง น้ำยางสดจากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวหรือสีครีม ในทางเคมีจัดอยู่ในลักษณะคอลลอยด์ที่มีส่วนของอนุภาคละเอียดยาง หรือเรียกทางเคมีว่า ซิสวันโพรีโพลิไอโซพรีน (Cis 1, 4 polyisoprene) ไม่น้อยกว่า 60 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก กระจัดกระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นน้ำ (Chen, 1992) มีความหนาแน่น 0.975 – 0.980 กรัม/มิลลิลิตร มีพีเอชประมาณ 6.5 – 7.0 ความหนืดไม่แน่นอน (ผลขีด บัวแก้ว, 2531) มีส่วนประกอบของสารต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4 นอกจากนี้ยังมีโลหะธาตุบางอย่าง เช่น แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดงติดอยู่กับผิวประมาณ 0.05% (สุรศักดิ์ สุทธิสงค์, 2533)

ตารางที่ 4 ตัวอย่างส่วนประกอบของน้ำยางสด (Brydson, 1978)

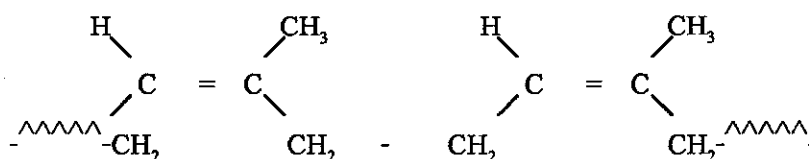
ส่วนประกอบ	เปอร์เซนต์ (โดยน้ำหนัก)
สารที่เป็นของแข็งทั้งหมด	36 (เป็นเนื้อยางแห้ง 33% ส่วนอื่นๆ 67%)
สารโปรตีน	1.0 - 1.5
สารประกอบพวกเรซิน	1.0 - 2.5
เถ้า	น้อยกว่า 1
น้ำตาล	1
น้ำ	ประมาณ 60

สารประกอบของน้ำยางสดแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่เป็นยาง (dry rubber content) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอมและไฮโดรเจน 8 อะตอม เขียนเป็นสูตรเคมี C_5H_8 ซึ่งเรียกว่า ไอโซพรีน (isoprene) มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลดังภาพที่ 3 แต่ละหน่วยย่อยของไอโซพรีนต่อกันเป็นโพลิไอโซพรีน (polyisoprene) ในลักษณะของซิสคอนฟิเจอรัชัน (cis-configuration) ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 3 สูตรโครงสร้างโมเลกุลยาง (Nemorow, 1978)



ภาพที่ 4 ลักษณะของซิสคอนฟิเจอร์ชัน

มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 300,000 รูปร่างของอนุภาคยางเป็นรูปกลม หรือรูปลูกแพร์ขนาด 0.05-5 ไมครอน มีประจุไฟฟ้าที่ผิวเป็นลบ เคลื่อนที่แบบบราวเนียน (brownian movement) ไปมาตลอดเวลา (สุรศักดิ์ สุทธิสงค์, 2533)

ส่วนประกอบที่ไม่ใช่ยาง (non rubber content) เป็นส่วนประกอบอื่น ๆ ทั้งหมดที่ไม่ใช่ยางมีสารประกอบต่าง ๆ หลายชนิดได้แก่

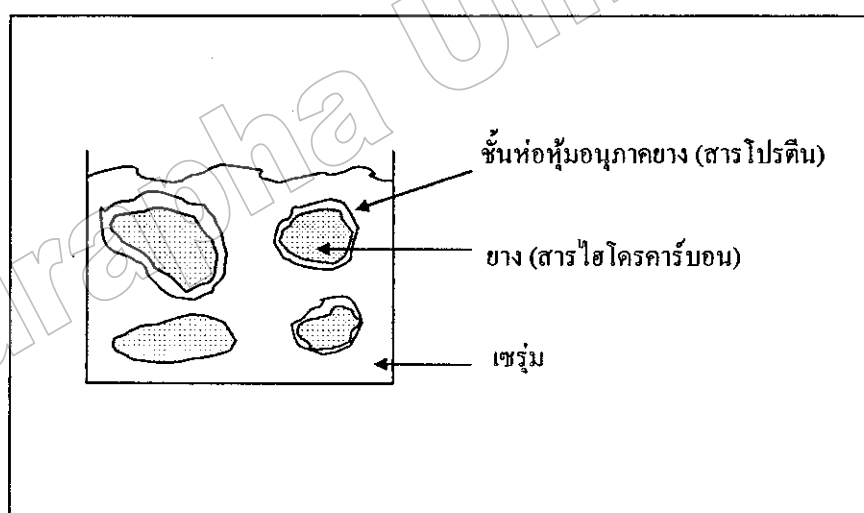
คาร์โบไฮเดรต ส่วนใหญ่เป็นแอลเมซิลโลโนซิทอล (l-methylinositol) ส่วนคาร์โบไฮเดรตอื่น ๆ มีอยู่จำนวนน้อย ได้แก่ กลูโคส ซูโครส ฟรุกโตส และกาแลคโตส น้ำตาลเหล่านี้เมื่อถูกออกซิไดซ์โดยจุลินทรีย์จะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดไขมันระเหยได้เช่น กรดฟอร์มิก, อะซิติกและโพรไพโอนิก (วราภรณ์ ขจรไชยกูล, พลชิด บัวแก้ว, และภัทรา กานตศิลป์, 2533)

โปรตีนและกรดอะมิโน ส่วนใหญ่เป็นแอลฟา โกลบูลิน (α - Globulin) และเฮวาลิน (hevelin) สำหรับแอลฟา โกลบูลิน เป็นโปรตีนที่มีสมบัติเป็นเซอเฟสแอคทีฟ (surface-active) จะอยู่บนรอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศ และน้ำมันกับน้ำได้ดี ไม่ละลายน้ำ และจะละลายในกรด ค้างและเกลือที่มีค่าพีเอชห่างจากจุดไอโซอิเล็กทริกพอยต์ (isoelectric point) ที่พีเอช เท่ากับ 4.8 (Chen, 1992) เฮวาลินจะอยู่ที่อนุภาคของเม็ดยางและละลายอยู่ในชั้นน้ำที่ช่วงพีเอชค่อนข้างกว้าง รวมทั้งจุดที่มีไอโซอิเล็กทริกพอยต์ที่พีเอช เท่ากับ 4.5 มีกัมมันต์เป็นส่วนประกอบอยู่ 5% ที่ผิวของอนุภาคยางนั้นมีชั้นของโปรตีนเคลือบอยู่ เป็นโปรตีนชนิดที่ไม่ละลายน้ำ แต่ก็ยังมีโปรตีนที่ละลายน้ำได้อยู่บ้างประมาณ 1 มิลลิกรัม / กรัมยางแห้งเท่านั้น และส่วนใหญ่จะเป็นชนิดประจุลบ (anionic) โปรตีนที่ละลายน้ำได้ส่วนใหญ่จะเป็นโปรตีนแบบประจุลบที่มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 14.0-66.0 kD โปรตีนที่เคลือบอยู่ที่ผิวของอนุภาคยางนี้เป็นตัวทำให้ยางคงตัวอยู่ได้ไม่จับกันเป็นก้อน (นุชนาฏ ณ ระนอง, 2541) ในโปรตีนประกอบด้วยอะมิโน, คาร์บอกซิล และกลุ่มอื่น ๆ ที่มีขั้ว (Abramson, Moyer, and Gonn, 1964) ประจุที่ผิวของโปรตีนที่ละลายน้ำจะมีประจุบวกหรือลบขึ้นอยู่กับกลุ่มของอะมิโน และกลุ่มของคาร์บอกซิล (Johnson & Firitz, 1987) คาร์บอกซิลจะอยู่ในรูปที่มีประจุเป็นลบที่พีเอชมากกว่า 4.7 ในขณะที่เอมีนจะอยู่ในรูปที่มีประจุเป็นบวก ที่พีเอชน้อยกว่า 10.6 โดยทั่วไปพบว่าโปรตีนมีไอโซอิเล็กทริกพอยต์ที่ค่าพีเอช ประมาณ 5 (Abramson, Moyer, and Gonn,

1964) ที่ผิวของอนุภาคยาง ในน้ำยางมีพีเอช 6.5-7.0 จะแสดงประจุไฟฟ้าเป็นลบทำให้มีแรงผลักระหว่างประจุที่เหมือนกัน ยางจึงไม่จับตัวเป็นก้อน

องค์ประกอบอื่น ๆ มีพวกฟรีไนโตรจีนัสเบส (free nitrogenous base) เช่น เมทิลลามีน (methylamine), กรดอินทรีย์ (organic acid), กรดอนินทรีย์ (inorganic acid), ฟอสเฟต และคาร์บอนเนต และมีไอออนของโลหะ ของโพแทสเซียม ส่วนใหญ่เป็นพวกแมกนีเซียม, เหล็ก, แกลเลียม, และทองแดง (Chen, 1992) นอกจากนี้มีโซดาในค้ประมาณ 0.25% ด้วย

1.1.2 การรักษาสภาพและการเสีสภาพของน้ำยาง ในทางเคมีจัดน้ำยางสดเป็นสารแขวนลอยที่มีส่วนของอนุภาคยางแขวนลอยกระจัดกระจายอยู่ในตัวกลางที่เรียกว่าเซรัม (serum) มีสารโปรตีนเคลือบอยู่รอบผิวของอนุภาคยางและห่อหุ้มอนุภาคยางไว้ (hydrate protein envelope) (ดูภาพที่ 5) ชั้นห่อหุ้มนี้มีความสำคัญต่อสถานะความคงตัวของเหลวของน้ำยาง เพราะชั้นโปรตีนนี้จะป้องกันไม่ให้เกิดอนุภาคยางรวมตัวกัน อนึ่งเมื่อมีการสูญเสีย น้ำ (dehydrated) ในชั้นของโปรตีนที่ห่อหุ้มอนุภาคยางอยู่ซึ่งอาจเกิดขึ้นโดยการเติมแอลกอฮอล์หรือสารบางอย่างลงในน้ำยาง น้ำยางจะสูญเสียความคงตัวและเกิดการรวมของอนุภาคยางจับกันเป็นก้อนโคแอกกูลัม (coagulum) แยกจากส่วนของเซรัม



ภาพที่ 5 สถานะการเป็นสารแขวนลอยของน้ำยางสด (วรากรณ์ ขจรไชยกุล, 2536)

นอกจากชั้นของโปรตีนจะทำหน้าที่รักษาความคงสถานะเป็นของเหลวให้น้ำยางแล้ว ความคงสถานะของเหลวของน้ำยางยังเนื่องมาจากประจุไฟฟ้าลบบอบ ๆ อนุภาคยางซึ่งจะก่อให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค และเป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยรักษาสถานะการกระจายของอนุภาคยาง (dispersion) ทำให้น้ำยางเป็นของเหลวอยู่ได้ ถ้าหากเกิดผลกระทบกระเทือนที่ทำให้ประจุไฟฟ้า

ลบลดลง อนุภาคยางก็จะรวมกันได้ ขนาดอนุภาคจะใหญ่ขึ้น การเคลื่อนย้ายการจัดกระจายของอนุภาคก็จะค่อย ๆ ลดลงจนในที่สุดจะเกิดเป็นก้อนโคแอกกูล์ม ในทางตรงกันข้าม ถ้าหากประจุไฟฟ้าที่อนุภาคยางเพิ่มขึ้นความคงสถานะเป็นน้ำยางก็จะเพิ่มขึ้น ความคงสถานะของเหลวของน้ำยางเกิดจากปัจจัยสำคัญสองประการ คือ ประการแรก ประจุไฟฟ้า และประการที่สอง ชั้นโพรตีนที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคยาง ถ้าหากทั้งสองปัจจัยนี้ถูกทำให้ลดลงน้ำยางก็จะสูญเสียสถานะเป็นของเหลวและจับเป็นก้อนยางแยกตัวออกจากเซรุ่มในที่สุด

1.2 สารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) สารเพิ่มความคงตัวที่ใช้โดยทั่วไปเป็นด่างและสบู่ของกรดไขมันโดยใช้ด่างโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในการช่วยรักษาความเป็นด่างของน้ำยางเพราะแอมโมเนียอาจจะหายไปบ้าง ส่วนสารพวกสบู่ของกรดไขมันจะใช้ชนิดที่โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน 8-12 อะตอม เช่น โปแตสเซียมแคปริเลต (potassium caprylate, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOK}$) และโปแตสเซียมลอเรต (potassium laurate, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOK}$)

1.3 สารในระบบการคงรูป (vulcanising system) ใช้ระบบการคงรูปที่ประกอบด้วยซัลเฟอร์เป็นสารทำให้ยางคงรูป (vulcanising agent) คือ ทำให้ยางเปลี่ยนคุณสมบัติจากการมีพลาสติกซิตี (plasticity) สูงไปเป็นยางที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น (elasticity) สูงขึ้น ด้วยการเชื่อมต่อของโมเลกุลยางเป็นลักษณะสามมิติ จึงใช้ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารกระตุ้น (activator) และใช้สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (accelerator) ชนิดเดียวหรือสองชนิดขึ้นไป เช่น ซิงค์ไดเอทิลไดไธโอคาร์บาเมต (ZEDC)

1.4 สารป้องกันยางเสื่อมเนื่องจากออกซิเดชัน (antioxidant) สารที่ใช้ป้องกันยางเสื่อมเพื่อชะลออายุการใช้งานหรือการเก็บรักษามีสองกลุ่ม คือ เอมีน/อนุพันธ์ของเอมีน (amine/amine derivative) และฟีนอล/อนุพันธ์ของฟีนอล (phenol/phenol derivative) ความนิยมในการผลิตถุงมือยางนิยมใช้สารกลุ่มอนุพันธ์ของฟีนอลเนื่องจากมีประสิทธิภาพดีกว่า

1.5 สารอื่น ๆ อาจเติมสารอื่น ๆ ในการทำถุงมือยาง เช่น ดีตาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) เพื่อช่วยให้ยางมีสีขาวหรือสีอื่น ๆ ที่สดใส หรืออาจใช้ลิโทโปน (lithopone) ซึ่งเป็นสารผสมระหว่างสังกะสีซัลไฟด์ (zinc sulphide) กับ แบเรียมซัลเฟต (barium sulphate)

2. ตัวอย่างสูตร ใช้ผลิตถุงมือชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 5

3. การผสมสารเคมีกับน้ำยาง จะมีการตรวจสอบสถานะของน้ำยางและสารเคมีก่อนการผสมและหลังจากการผสมเสร็จแล้ว นอกจากนั้นยังต้องเรียงลำดับการผสมสารกลุ่มต่าง ๆ อย่างถูกต้องอีกด้วย เพราะข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์มากในการควบคุมกระบวนการผลิตตลอดจนคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับ ลำดับการเติมสารเคมีผสมกับน้ำยางคือ เติมน้ำให้ได้ความเข้มข้นของเนื้อยางที่ต้องการ, เติมสารกลุ่มช่วยให้ยางคงตัว, เติมสารกลุ่มทำหน้าที่ให้ยางคงรูป, เติมสารป้อง

กันยางเสื่อม และเคมิสสารสี (pigment) (ถ้าต้องการ) ตามลำดับ (Rubber Research Institute of Malaysia, 1992)

ตารางที่ 5 ตัวอย่างสูตรใช้ผลิตถุงมือชนิดต่าง ๆ (จำนง คงศิลป์, 2532)

สารเคมี	ถุงมือใช้งานทางการแพทย์		ถุงมือใช้งานบ้าน
	ใช้ครั้งเดียว	ใช้ซ้ำ	
	(ส่วนโดยน้ำหนักเปียก)		
60% น้ำยางชั้น	167	167	167
20% สารละลายโปแตสเซียมลอเรต	1.0	1.0	1.0
10% สารละลาย KOH	3.0	3.0	5.0
50% คิสเพิสชั้นซัลเฟอร์	1.0	0.4	3.0
50% คิสเพิสชั้น TMTD ^{1/}	-	1.0	-
50% คิสเพิสชั้น ZBDC ^{2/}	1.5	2.0	-
50% คิสเพิสชั้น ZDC ^{3/}	-	-	2.0
41% คิสเพิสชั้น Antioxidant 2246	1.0	2.0	2.0
50% คิสเพิสชั้น ZnO	0.5	0.5	2.0

1/ TMTD, Tetramethyl thiuram disulphide

2/ ZBDC, Zinc dibutyl dithiocarbamate

3/ ZDC, Zinc diethyl dithiocarbamate

(สูตรเหล่านี้ ไม่จำเป็นต้องให้ผลผลิตที่ดีเสมอไป เพราะผลผลิตที่ดีนั้นมาจากปัจจัยประกอบหลายประการ)

4. การบ่มน้ำยางผสม (maturation) เมื่อผสมน้ำยางกับสารเคมีต่าง ๆ แล้วจะต้องเก็บไว้สักระยะหนึ่งหรือเรียกว่า บ่มก่อนที่จะนำไปใช้ ทั้งนี้เพื่อให้โอกาสสารต่าง ๆ ที่ผสมลงไปได้กระจายอย่างทั่วถึงเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำยางโดยตลอด การบ่มมีข้อดีคือทำให้น้ำยางผสมมีความเหนียวสม่ำเสมอ ได้ยางจับตัวที่แข็งแรงและทำให้ได้ผลผลิตสุดท้ายที่มีการคงรูปร่างอย่างทั่วถึง (uniform vulcanisation) (Brydson, 1978) สำหรับระยะเวลาการบ่มจะนานเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับระบบสารคงรูปที่ใช้ อุณหภูมิของการบ่มและองศาของการคงรูปที่ต้องการ

พื้นฐานขั้นตอนการบ่ม เมื่อบ่มน้ำยางผสมจนได้อายุที่เหมาะสมแล้ว ต่อไปก็จะเป็นการเตรียมแบบพิมพ์ การบ่ม อบแห้ง ทำให้อย่างคงรูป นำถุงมือออกจากพิมพ์ ตรวจสอบและหีบห่อจำหน่าย

1. การเตรียมพิมพ์ พิมพ์ที่ใช้ในงานทำผลิตภัณฑ์ด้วยกรรมวิธีจุ่มทำได้จากวัสดุต่าง ๆ เช่น แก้วอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมอัลลอย, ไม้, ปูนปลาสเตอร์ และกระเบื้อง (porcelain) เป็นต้น วัสดุนิคมทุกตัวจะเป็นที่นิยมทำเป็นพิมพ์สำหรับการผลิตถุงมือต่าง ๆ พิมพ์ที่ใช้จะต้องมีการทำความสะอาดอย่างดี เพราะพิมพ์สกปรกไม่ว่าจะด้วยสิ่งแปลกปลอมใดๆก็ตามจะส่งผลให้เกิดจุดบกพร่องหรือตำหนิต่าง ๆ กับถุงมือได้ ในการทำความสะอาดพิมพ์อาจจะมีการทำความสะอาดก่อนนำเข้ากระบวนการผลิตและทำความสะอาดในระหว่างกระบวนการผลิต (ภาพที่ 6)

2. การจุ่ม (dipping technique) เทคนิคการจุ่มเพื่อทำผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ นั้นมีหลายวิธี ได้แก่ การจุ่มน้ำยางโดยตรง (straight dipping), การจุ่มโดยใช้สารช่วยจับตัว (coagulant dipping), การจุ่มโดยใช้พิมพ์ร้อน (heat sensitive dipping) และการจุ่มโดยใช้ขั้วไฟฟ้าช่วย (electrode dipping) เทคนิคการจุ่มโดยใช้สารช่วยจับตัว (ภาพที่ 7) จะเป็นที่ยอมรับและเหมาะสำหรับการผลิตถุงมือโดยทั่วไป (Verhaar, 1973) สารช่วยจับตัวที่นิยมใช้ คือ สารละลายของเกลือแคลเซียม เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2), แคลเซียมไนเตรด (CaNO_3) จะทำให้ผิวยางเรียบสม่ำเสมอและหนาพอสมควร แคลเซียมคลอไรด์จะให้ยางสีเข้มกว่าแคลเซียมไนเตรด อาจใช้ไซโคลเฮกซิลอะไมน์ อะซิเตท (cyclohexylamine acetate, CHA) เป็นสารช่วยจับตัวเมื่อต้องการความโปร่งแสง ซึ่งได้จากการผสมไซโคลเฮกซิลอะไมน์กับกรดอะซิติก ใช้สัดส่วนโมลต่อโมล

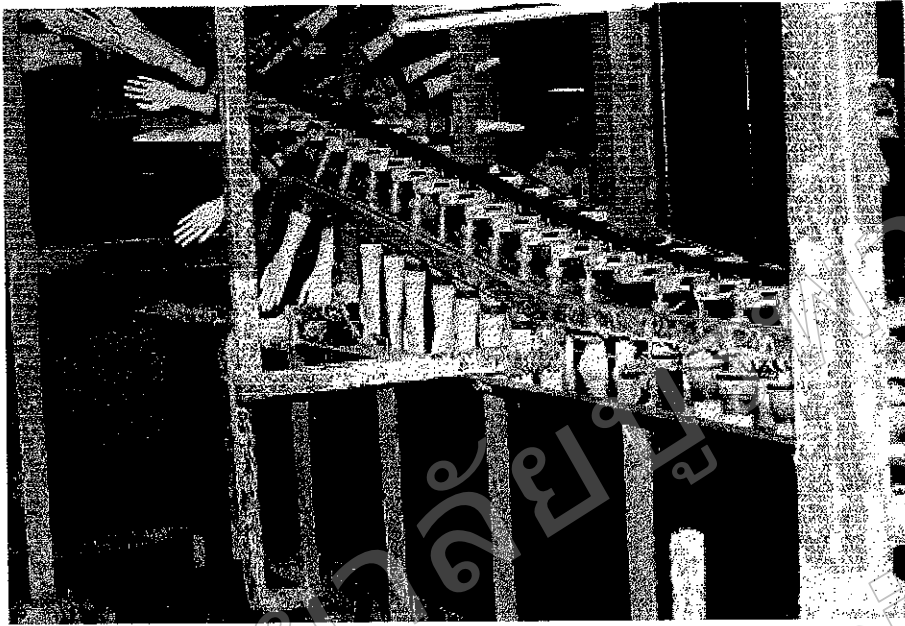
3. การล้าง (leaching) การล้างหมายถึงล้างฟิล์มยางที่จับอยู่บนพิมพ์ซึ่งอาจทำได้สองวิธี คือ ล้างขณะอยู่ในระหว่างกระบวนการผลิต (on-line) หรือล้างหลังจากแกะถุงมือออกจากพิมพ์แล้ว (off-line) การล้างนี้เพื่อกำจัดสารที่ละลายน้ำได้ออก ซึ่งได้แก่พวกเกลือที่มีอยู่ในน้ำยางแต่แรก หรือที่เติมลงไปในการรวมทั้งสารเซอพอสแอคทีฟ (Rubber Research Institute of Malaysia, 1992) และโปรตีน (บุชนาญ ณ ระนอง, 2541) เหตุผลจำเป็นที่ต้องมีการล้างยาง คือ

- 3.1 เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำโดยสารชนิดที่มีความสามารถดูดซึมน้ำหรือชอบน้ำ (hydrophilic materials) ที่ตกค้างอยู่ในยาง
- 3.2 เพื่อป้องกันผิวหนังอักเสบเนื่องจากสารที่ตกค้างอยู่
- 3.3 เพื่อไม่ให้สารตกค้างอยู่ในยางเพราะอาจมีผลต่อการสัมผัสกับเนื้อเยื่อของผิวหนังขณะใช้งาน (ถุงมือแพทย์)
- 3.4 เพื่อลดการระคายเคืองต่อผิวหนังเมื่อใส่ถุงมือ
- 3.5 เพื่อลดการเปลี่ยนสีของถุงมือเมื่อถูกกับแสง
- 3.6 เพื่อให้ถุงมือมีความแข็งแรงมากขึ้น (โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ใช้ยางพรีวัลคาไนซ์)
- 3.7 เพื่อลดปริมาณแป้งที่ติดบนถุงมือ

การล้างมือในระหว่างกระบวนการผลิตโดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะที่ยางอยู่ในสถานะฟิล์มเปียก (wet gel) จะสามารถชะล้างสารต่าง ๆ ในเนื้อยางขณะที่เปียกอยู่ได้อย่างรวดเร็วและง่าย การใช้น้ำอุ่นล้างจะทำให้การชะล้างมีประสิทธิภาพดีขึ้น (Chen, 1992) ในการล้างมือภายหลังจากแกะออกจากพิมพ์จะต้องจุ่มถุงมือล้างเป็นเวลาหลายชั่วโมงและใช้น้ำในปริมาณมาก และต้องเปลี่ยนน้ำล้างบ่อยเพราะเกลือที่ถูกชะล้างออกมาสะสมอยู่ในน้ำ เมื่อมากเข้าอาจทำให้น้ำนั้นขัดขวางต่อความสามารถของการชะล้างสิ่งต่าง ๆ ออกจากยาง น้ำที่ใช้ล้างยังเป็นน้ำที่ไม่มีไอออน เช่น พวกน้ำกลั่น หรืออาจใช้น้ำก๊อกได้ถ้าหากน้ำก๊อกนั้นมีปริมาณธาตุทองแดงต่ำ เนื่องจากธาตุทองแดงจะมีผลทำให้เกิดปัญหาเรื่องเปลี่ยนสีและเสื่อมสภาพได้ (Hofmann, 1989)



ภาพที่ 6 การทำความสะอาดแม่พิมพ์ในระหว่างกระบวนการผลิต



ภาพที่ 7 การจุ่มพิมพ์ลงในน้ำยางผสมสารเคมี

4. การอบแห้งและการทำให้ยางคงรูป (drying and vulcanising) ปกติมักจะอบแห้งและทำให้ยางคงรูปในตู้อบร้อน โดยอบเพื่อให้ยางที่จับพิมพ์แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ $70-80^{\circ}\text{C}$. ก่อนที่จะอบให้คงรูปในขั้นต่อไป โดยใช้อุณหภูมิประมาณ $100-140^{\circ}\text{C}$. ในการอบให้ยางคงรูประยะเวลาอบขึ้นอยู่กับระบบของสารทำให้ยางคงรูปที่ใช้ (ดังภาพที่ 8)

5. การม้วนขอบ (beading) การม้วนขอบถุงมือเพื่อให้มีความแข็งแรง จะม้วนขอบขณะที่ยางเกาะบนพิมพ์แห้งแล้วแต่ยังไม่ได้ทำให้คงรูป ถ้าในขั้นตอนของการอบแห้งแยกกับการอบให้ยางคงรูปก็จะทำการม้วนขอบระหว่างสองขั้นตอนของการอบนี้และการม้วนขอบสามารถทำได้โดยใช้มือหรือใช้เครื่อง

6. การถอดถุงมือจากพิมพ์ (ภาพที่ 9) การถอดถุงมือจากพิมพ์จะเป็นขั้นสุดท้ายของกระบวนการผลิตโดยทั่วไปมักใช้มือถอด และอาศัยแปรงช่วยเพื่อป้องกันยางติด เช่น แปรงข้าวโพด, แปรงทาลัก และเคลย์

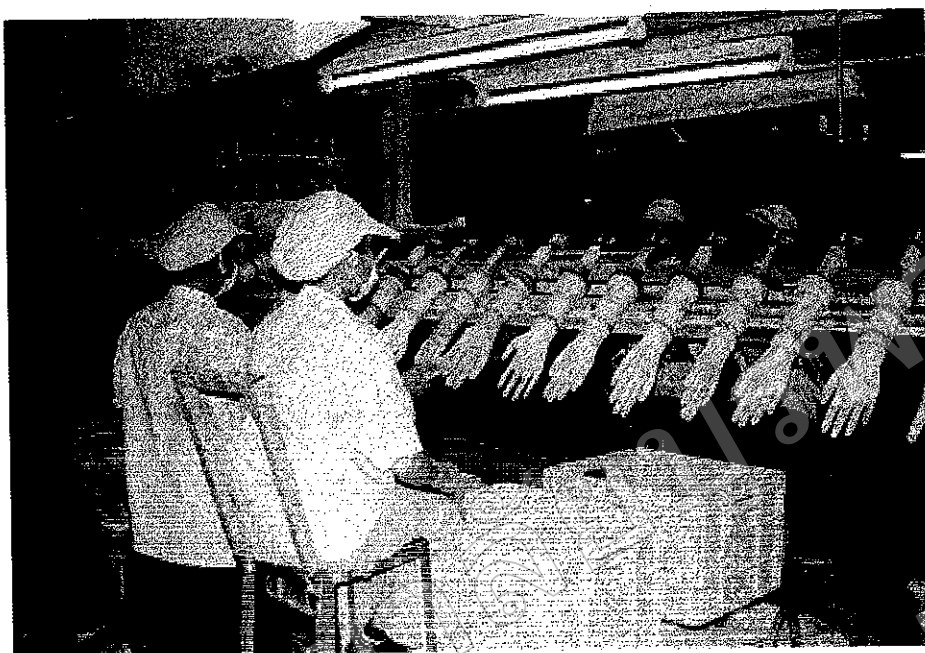
7. ขั้นตอนอื่นๆ นอกจากขั้นตอนพื้นฐานดังกล่าวข้างต้นแล้ว การผลิตถุงมือบางชนิดยังต้องการขั้นตอนอื่นอีก เช่น การทำฟลอคกิ้ง, คลอรีนชัน และการทำให้ผิวลื่น

7.1 ฟลอคกิ้ง (flocking) หมายถึงการนำปุ๋ยขนของฝ้ายหรือสิ่งอื่น ๆ มาติดผิวด้านในของถุงมือ เพื่อให้เกิดความรู้สึกสบายขณะสวมใส่ และง่ายต่อการถอดออกด้วย

7.2 คลอรีนชัน เป็นการทำให้ถุงมือมีผิวที่ลื่นสวมใส่ง่ายและถอดออกได้ง่าย โดยทั่วไปทำให้ผิวยางไม่ติดกันโดยการพ่นแป้ง แต่ผงแป้งที่ติดอย่างถูกวิธีหรือล้างหลุดไปได้ การใช้คลอรีนชันเป็นการทำให้ผิวถุงมือยางลื่นอยู่อย่างถาวรมีวิธีการทำ คือ หลังจากได้ถุงมือที่คงรูปแล้วนำไปจุ่มในน้ำคลอรีนเจือจาง (ประมาณ 0.3% ในระยะเวลาสั้น ๆ เช่น 2-5 นาที) แล้วนำไปล้างในน้ำแอมโมเนีย 2 % ตามด้วยล้างในน้ำและอบให้แห้งใช้อุณหภูมิต่ำ 40-60 °ซ. คลอรีนที่ใส่ลงไปจะทำให้ยางเกิดไฮโดรไลซิสแบบสมบูรณ์ (complete hydrolysis) หรือทำให้ยางคงรูปมากขึ้นรวมทั้งคุณสมบัติยืดหยุ่นก็ลดลง (Chen, 1992) เนื่องจากความต้องการถุงมือไร้แป้งมีมากขึ้น เป็นผลให้น้ำที่ใช้ในขั้นตอนนี้มีปริมาณเกือบครึ่งหนึ่งของน้ำทั้งทั้งหมด



ภาพที่ 8 การอบถุงมือให้คงรูป (curing)



ภาพที่ 9 การถอดถุงมือออกจากพิมพ์

7.3 การทำให้ผิวลื่น (lubrication) การทำคลอรีนชันเป็นการทำให้ผิวยางลื่นถาวร ส่วนการทำให้ลื่นชั่วคราวทำโดยใช้สารบางอย่าง เช่น ทาลค์, ไมกา, แป้ง, โกลโคโพลีเอทิลีนและน้ำมัน ซิลิโคน เป็นต้น ซึ่งสารนี้เช็ดหรือล้างออกได้ การทำให้ผิวลื่นแบบนี้ทำในขั้นตอนการถอดยางออกจากพิมพ์ เหมาะสำหรับการผลิตถุงมือที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง

8. การตรวจสอบ การตรวจสอบขึ้นกับชนิดของถุงมือ เช่น ถุงมือยาง จะมีการตรวจสอบความต้านแรงดึงและความยืดเมื่อขาด (ภาพที่ 10) ความสม่ำเสมอของความหนาของเนื้อยาง และปราศจากรูรั่วเป็นต้น

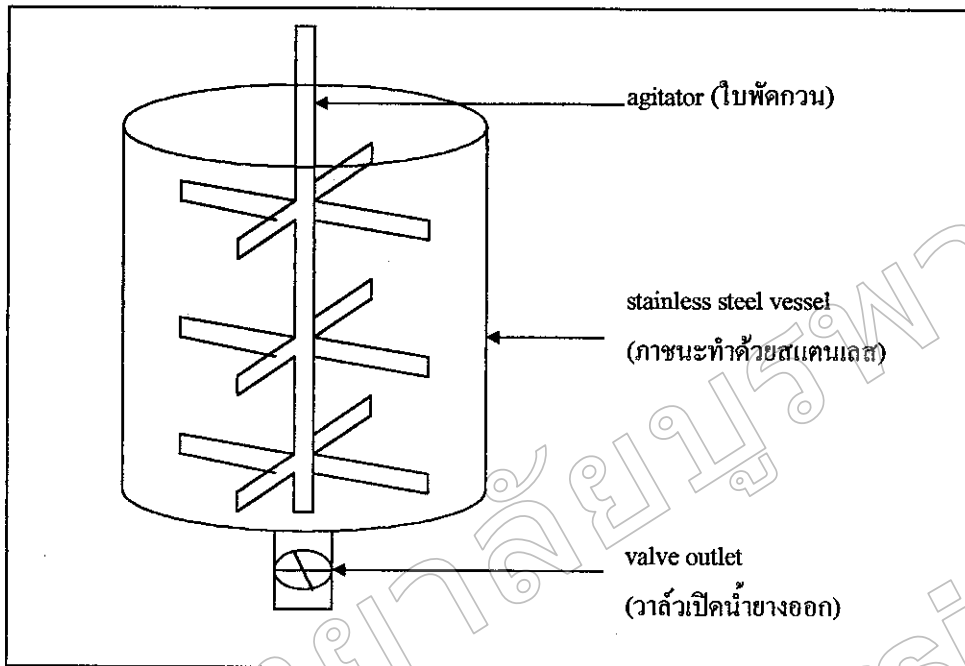


ภาพที่ 10 การตรวจสอบคุณภาพขั้นแรก

อุปกรณ์และเครื่องจักรที่เป็นแหล่งของน้ำเสีย

1. ถังเก็บน้ำยางข้น น้ำยางข้นที่รอการผสมสารเคมีจะถูกเก็บในถังขนาดใหญ่หรือถังขนาดเล็ก เนื่องจากอนุภาคยางเบากว่าส่วนของเซรัมที่อนุภาคแขวนลอยอยู่ ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่อนุภาคยางจะแยกจากเซรัมลอยสู่ผิวหน้าเกิดเป็นครีม จึงติดตั้งอุปกรณ์กวนน้ำยางภายในถังขนาดใหญ่ ส่วนถังเล็กใช้วิธีการกวนถึงวันละครั้ง การทำความสะอาดถังน้ำยาง โดยเฉพาะถังขนาดใหญ่ จะมีการทำความสะอาดและฆ่าเชื้ออยู่เสมอ วิธีการที่ใช้คือ ถ่าน้ำยางออกจากถังโดยปล่อยให้น้ำยางเหลืออยู่บ้าง เมื่อยางแห้งแล้วจึงลอกออกล้างถังด้วยน้ำยาฆ่าเชื้อ เช่น ฟอรัมาลดีไฮด์ หรือ คลอรีนไตรโซเดียมฟอสเฟต (chlorinated tri-sodium phosphate)

2. ถังผสม ถังผสมเพื่อใช้ในการกวนผสมน้ำยางกับสารเคมี มีลักษณะเป็นถังทรงกลมวางแนวตั้งส่วนกันถังเป็นรูปโคงมีทางปล่อยน้ำยางออก วัสดุที่ใช้ทำถังอาจเป็นไมล์สตีล (mild steel) ที่เคลือบบุผนังด้วยสารที่ทนการถูกกัดกร่อนด้วยสารเคมี หรือใช้สแตนเลสและติดตั้งใบพัดกวน (ภาพที่ 11) ถังผสมตั้งอยู่ในที่ยกระดับสูงจากพื้นพอที่จะปล่อยน้ำยางหลังผสมสารเคมีแล้วลงถังพักหรือถังสำหรับจุ่มแบบพิมพ์โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง การทำความสะอาดถังผสม จะทำความสะอาดเมื่อใช้น้ำยางกับสารเคมีผสมชุดเดิมถูกใช้จนหมด มีการทำความสะอาดและฆ่าเชื้อโรคเช่นเดียวกับถังเก็บน้ำยาง



ภาพที่ 11 ภาชนะกวนผสมน้ำยางกับสารเคมี

3. ถังสำหรับจุ่มพิมพ์ (dipping tank) ถังบรรจุน้ำยางผสมเพื่อจุ่มพิมพ์ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ช่วยกวนน้ำยางอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการเกิดฟิล์มลอยเป็นฝ้าที่ผิวหน้า และเพื่อป้องกันการตกตะกอนของสารต่าง ๆ ลงก้นถัง เมื่อใช้น้ำยางผสมไปได้ระยะหนึ่ง น้ำยางผสมจะมีการจับตัวเป็นครีมหนาทำให้ต้องมีการล้างถัง จึงทำให้น้ำเสียที่ได้มีสารอินทรีย์ค่อนข้างสูง
4. ถังสำหรับสารช่วยน้ำยางจับตัว (coagulating tank) หากใช้สารที่เป็นฝุ่นผงในสารช่วยจับตัว เช่น ทาลค์ชนิดละเอียดอาจตกตะกอนลงก้นถังได้ หรือเมื่อใช้สารไปนาน ๆ ทำให้ความเข้มข้นแปรเปลี่ยน หรือมีสารปนเปื้อนสูง ก็ต้องมีการล้างถัง
5. ถังล้างทำความสะอาดพิมพ์ จะมีลักษณะเป็นถังสี่เหลี่ยมทรงถิก มีน้ำไหลเข้าออกตลอดเวลา เพื่อล้างพิมพ์ให้สะอาด อาจมีการติดแปรงล้างพิมพ์อยู่บริเวณเหนือถังเพื่อขัดพิมพ์เอาสิ่งสกปรกออก
6. ถังสำหรับล้าง (leaching tanks) จะอยู่ในส่วนของกระบวนการผลิตด้วยหากใช้วิธีการล้างยางจับตัวขณะยังเปียกแต่ถ้าใช้วิธีล้างฟิล์มยางแห้งหลังการอบยางให้คงรูปถังสำหรับล้างก็อยู่นอกส่วนกระบวนการผลิต ถังล้างที่อยู่ในกระบวนการผลิตจะมีลักษณะเป็นถังรูปสี่เหลี่ยมแนวราบ และมีท่อปล่อยความร้อนเพื่อทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนถังล้างที่อยู่นอกส่วนกระบวนการผลิตจะเป็นถังขนาดใหญ่หมุนได้ สำหรับใช้ปั่นถุงมือไปมาขณะล้าง ในการล้างแต่ละครั้งใช้น้ำ

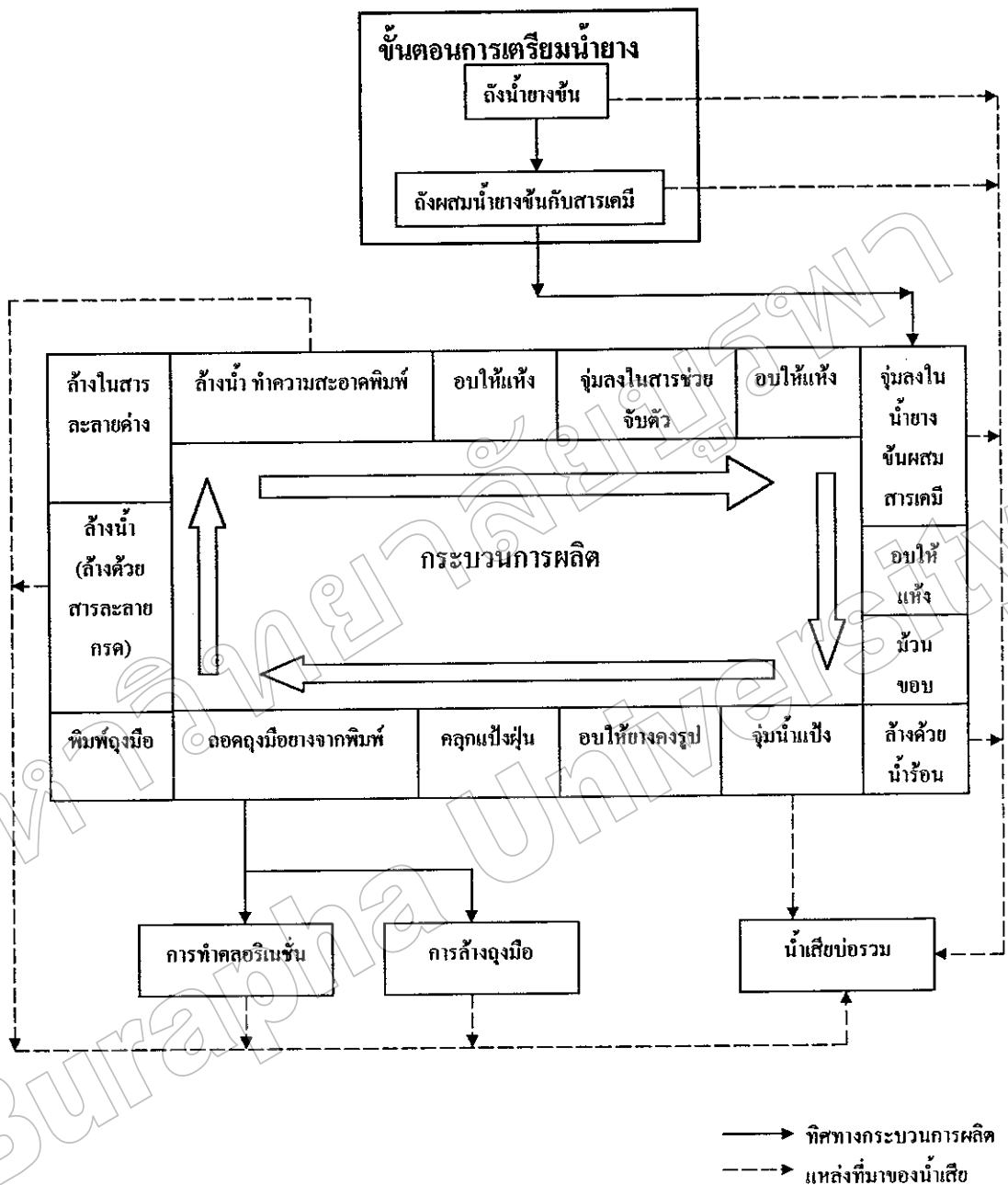
ประมาณหนึ่งลูกบาศก์เมตรสามารถล้างถุงมือได้ 3,000 ชิ้น น้ำล้างที่ปล่อยออกจากถังจะมีปริมาณสารเคมีที่ละลายน้ำได้สูง เช่น ล้างกะดี่ (Rubber Research Institute of Malaysia, 1992)

7. ถังทำคลอรีนชั้น เป็นถังซีเมนต์หรือถังไฟเบอร์ทรงสี่เหลี่ยมหรือกระบอก มีแกนใบพัดหมุนตรงกลางถัง เพื่อปั่นถุงมือให้กระจายจนทั่ว มีฝาปิดเพื่อกันสารเคมีระเหย น้ำที่ใช้ในชั้นตอนนี้จะมีปริมาณคลอรีนและแอมโมเนียสูง นอกจากนี้ยังมีการปล่อยทิ้งทุกวัน

กระบวนการผลิตถุงมือยางและแหล่งที่มาของน้ำเสียบริษัท เอ็ม.อาร์.ไอ. จำกัด

บริษัทมีการผลิตถุงมือยางซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากน้ำยาง โดยกระบวนการจุ่มแบบพิมพ์ ผลิตจำหน่ายเป็นชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ถุงมือตรวจโรค (examination glove), ถุงมือผ่าตัด (surgical glove) เป็นต้น กระบวนการที่สำคัญในการผลิตถุงมือยางเริ่มต้นจากเตรียมน้ำยางขึ้นโดยมีการเก็บน้ำยางขึ้นที่รอการผสมสารเคมีในถังขนาดใหญ่ เมื่อใช้น้ำยางขึ้นไปหมักชุดหนึ่งหรือประมาณหกเดือนจะมีการล้างถังทำให้เกิดน้ำเสียที่มีน้ำยางปนออกมามากยังผลให้น้ำทิ้งมีค่าซีโอดีสูง (แน่นน้อย ศรีสุวรรณ, 2529) หลังจากนั้นจะถายน้ำยางขึ้นไปสู่ถังผสมกับสารเคมีซึ่งได้ทำให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสมแล้วในอัตราส่วนและลำดับการผสมที่ถูกต้อง ถังผสมนี้ก็จะเกิดน้ำเสียจากการล้างถังในทุก ๆ สองวันโดยมีส่วนประกอบของน้ำยางและสารเคมีปนออกมาด้วย ต่อจากนั้นจะถายน้ำยางผสมสารเคมีไปสู่ถังสำหรับจุ่มพิมพ์ในกระบวนการผลิต ในถังนี้จะมีการล้างประมาณเดือนละหนึ่งครั้ง ซึ่งน้ำเสียที่ได้จะมีน้ำยางผสมสารเคมีที่ตกตะกอนเป็นครีมหืนคอกันถัง สามารถดักใส่ถุงไปกำจัดได้ ในการผลิตถุงมือยางใช้เครื่องระบบอัตโนมัติแบบสมบูรณ์แบบ คือ มีกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยมีการเคลื่อนพิมพ์ผ่านไปยังขั้นตอนต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มล้างพิมพ์ถุงมือจนกระทั่งถอดถุงมือออกจากพิมพ์ (ภาพที่ 12)

ในกระบวนการผลิตจะมีแหล่งน้ำเสียที่สำคัญ คือ จากขั้นตอนการล้างพิมพ์ด้วยน้ำ ซึ่งมี การถายน้ำทิ้งและการล้างพิมพ์ด้วยสารละลายกรดและด่างซึ่งน้ำเสียจะมีส่วนผสมของสารละลายกรดหรือน้ำยาล้างทำความสะอาดปนอยู่ด้วย (Nordin, n.d.) จากขั้นตอนจุ่มลงในสารช่วยจับตัว ซึ่งจะถลายเคมีทิ้งทุกเดือน และจากขั้นตอนล้างฟิล์มยางที่จับแบบพิมพ์ โดยจะมีการถายน้ำทิ้งทุกเดือนหรือทุกวันสำหรับถุงมือผ่าตัด การล้างนี้จะทำให้สารที่ละลายน้ำได้ออกมาปนอยู่ในน้ำเสียและจากขั้นตอนการจุ่มแป้ง เมื่อน้ำแป้งมีคุณภาพไม่เป็นไปตามที่ต้องการหรือประมาณสองสัปดาห์ก็จะมีการถายทิ้ง



ภาพที่ 12 กระบวนการผลิตถุงมือยางและแหล่งที่มาของน้ำเสียบริษัท เอ็ม.อาร์.ไอ. จำกัด

นอกจากนี้ยังมีน้ำเสียจากการล้างบริเวณกระบวนการผลิตที่มีน้ำยางหกเลอะพื้นเป็นประจำเกือบทุกวัน เมื่อเสร็จกระบวนการผลิตก็จะมีการนำถุงมือไปสู่ขั้นตอนการทำคลอรีนชั้น ทำให้เกิดน้ำทิ้งที่มีส่วนผสมของคลอรีนและแอมโมเนียเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีการล้างถุงมือด้วยน้ำ เพื่อกำจัดสารตกค้างและปริมาณแป้งที่เกาะบนถุงมือออก ทำให้น้ำทิ้ง ณ จุดนี้มีส่วนผสม

178227

628.162

ท 156 ก

๑

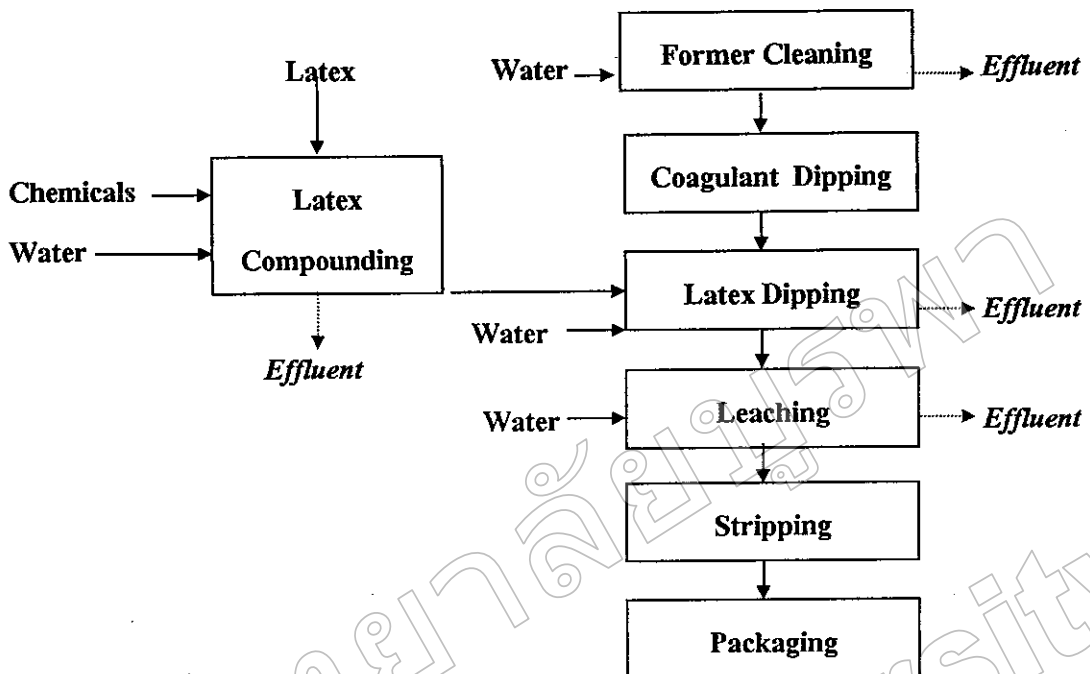
ของแปรงเป็นส่วนใหญ่ น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทั้งหมดจะไหลไปรวมกันที่บ่อกักเก็บบ่อเดียวเพื่อเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป

การบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมการผลิตถุงมือยาง

น้ำเสียที่เกิดจากการผลิตถุงมือยางเกิดได้จากสองจุดใหญ่ ๆ คือน้ำเสียที่เกิดจากน้ำล้างภาชนะที่ใช้บรรจุน้ำยางผสมกับสารเคมี และน้ำเสียซึ่งเกิดจากขั้นตอนการผลิตโดยตรง (เน่งน้อยศรีสุวรรณ, 2529) (ดังภาพที่ 13) เนื่องจากถุงมือแพทย์ในระหว่างที่เริ่มมีการใช้เพิ่มมากขึ้นเมื่อช่วงการค้นคว้าวิจัยอันตรายจากโรคเอดส์นั้น ความต้องการส่วนใหญ่จะไม่ค่อยได้เน้นลักษณะความพิเศษของถุงมือมากนัก แต่เมื่อเริ่มมีการผลิตมากขึ้นจนเป็นภาวะการผลิตเกินความต้องการของตลาด ผู้ใช้ก็เริ่มเพิ่มเงื่อนไขความต้องการลักษณะต่าง ๆ ที่พิเศษเพิ่มมากขึ้น และหนึ่งในความต้องการของผู้ใช้ก็คือ ถุงมือชนิดไม่ใช้แปรงในการหล่อลื่นให้สะดวกต่อการสวมใส่ และเชื่อว่าช่วยลดปัญหาการระคายเคืองกับผู้ใช้ได้ จึงได้มีการนำขั้นตอนคลอรีนชัน ซึ่งเป็นการทำให้ถุงมือยางมีชีวิตที่ทนการสวมใส่ได้ง่ายและถอดออกได้ง่าย เป็นผลให้เกิดน้ำเสียเพิ่มจากกระบวนการนี้ด้วย

ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานถุงมือยางส่วนใหญ่จะประกอบด้วยปริมาณสารอินทรีย์ค่อนข้างสูง ซึ่งสังเกตได้จากค่าซีโอดีที่สูงเช่นกัน สำหรับค่าบีโอดีจะมีความสำคัญน้อยกว่าค่าซีโอดี เนื่องจากน้ำเสียสามารถย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable) ในปริมาณที่ไม่สูงนัก (Nordin, n.d.)

โดยทั่วไปน้ำเสียจะถูกบำบัดได้โดยสามขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการบำบัดทางกายภาพ (physical treatment) ซึ่งเป็นกระบวนการแรกที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การคัดด้วยตะแกรง (screening), การกวน (mixing), การรวมตัวกันของตะกอน (flocculation) ขั้นตอนที่สองเป็นการบำบัดทางเคมี (chemical treatment) เป็นการเปลี่ยนสภาพของที่ไม่ต้องการในน้ำเสียโดยการเติมสารเคมีลงไป หรือ โดยปฏิกิริยาของเคมีอื่น ๆ ได้แก่ การตกตะกอน (precipitation), การดูดซับ (adsorption) และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการบำบัดทางชีววิทยา (biological treatment) ซึ่งเป็นการกำจัดพวกสารอินทรีย์ละลาย ซึ่งสามารถย่อยสลายได้โดยพวกจุลินทรีย์ การบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมการผลิตถุงมือยางส่วนใหญ่จะใช้การบำบัดทางชีววิทยาแทบทั้งสิ้น (Zaid, 2001) เป็นระบบที่มีการสร้างตะกอนด้วยสารเคมีก่อนแล้วจึงบำบัดด้วยระบบเอเอส (activated sludge) และมีระบบการลอยตะกอนบ้างเล็กน้อย สำหรับประเทศไทยนิยมใช้การบำบัดทางชีวภาพเช่นกันแต่เป็นแบบ



ภาพที่ 13 แสดงที่มาของน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตถุงมือตรวจโรค (Nordin, n.d.)

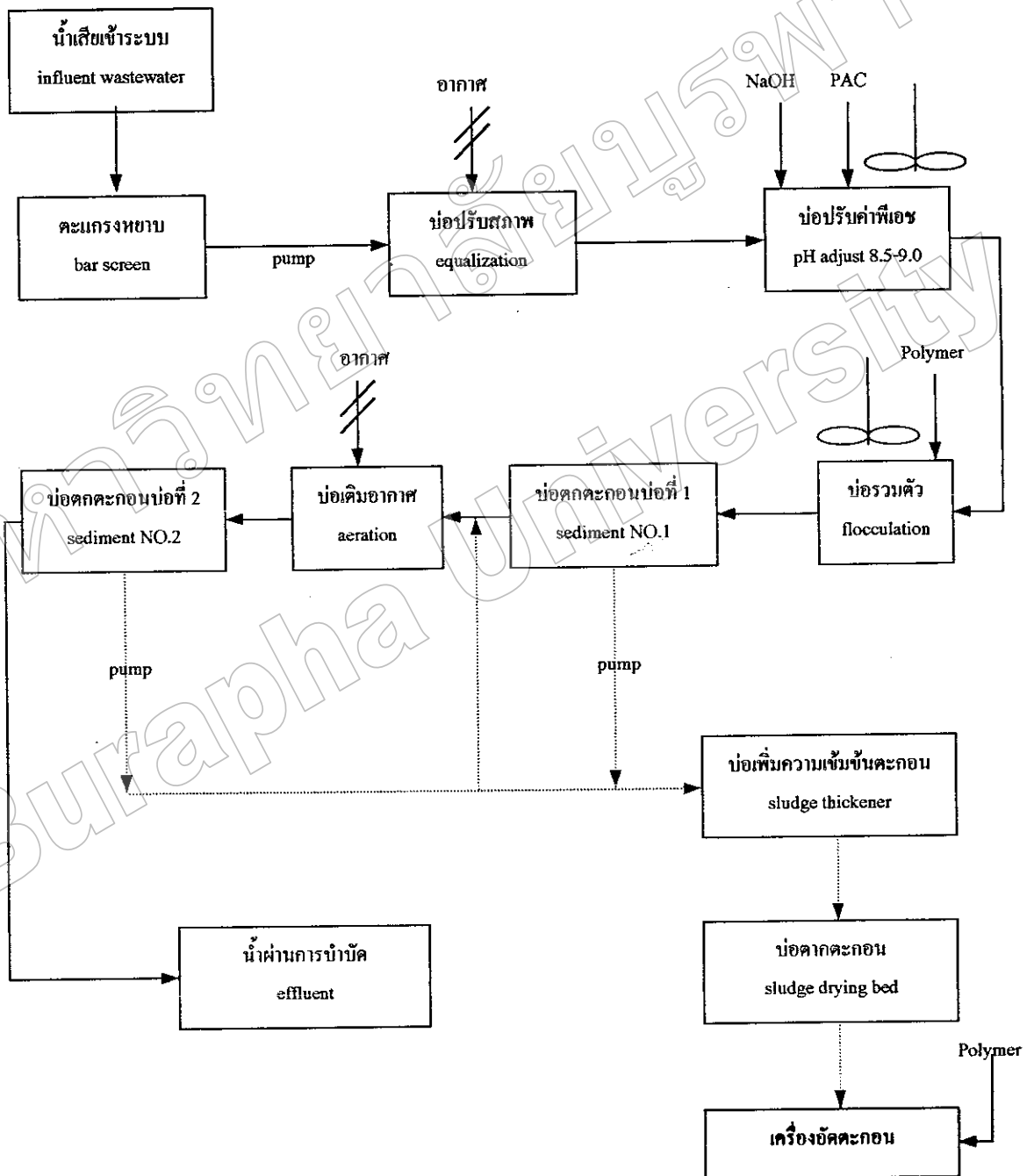
ที่ไม่อาศัยเทคโนโลยีมากนัก (อุตสาหกรรมจังหวัดสงขลา, 2536) เช่น บ่อกักเก็บ มีลักษณะเป็นบ่อดินกักน้ำทิ้ง ความลึกของบ่อไม่มากนัก ใช้บำบัดสารอินทรีย์ละลายและอนุภาค มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเชื้อโรค การทำงานของบ่อดังกล่าวอาศัยธรรมชาติ (ธีระ เกรอด, 2539) สำหรับการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตถุงมือยาง บริษัท เอ็ม.อาร์.ไอ. จำกัด ใช้ระบบเอส เป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางชีววิทยา โดยอาศัยจุลินทรีย์ที่มีปริมาณมากพอสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย จุลินทรีย์เหล่านี้จะลอยผสมกับน้ำเสียในถังเดิมอากาศ ซึ่งจุลินทรีย์จะขยายพันธุ์เพิ่มปริมาณขึ้นในลักษณะที่เรียกว่า การเติบโตแบบแขวนลอย (suspended growth) (Cox, 1969) ภายในถังเดิมอากาศจะมีระบบกวน โดยใช้เครื่องจักรกลทำหน้าที่ให้จุลินทรีย์หรือน้ำสลัดจ์แขวนลอยอยู่ในถังเดิมอากาศตลอดเวลาเพื่อที่สามารถควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ภายในระบบเอสได้เป็นที่ต้องการ มีระบบแยกน้ำสลัดจ์ออกจากน้ำทิ้ง ซึ่งใช้ถังตกตะกอนทำหน้าที่แยกน้ำทิ้งออกจากน้ำสลัดจ์ เพื่อปล่อยน้ำทิ้งที่ใสไหลลงจากถังตกตะกอน ส่วนบริเวณก้นถังตกตะกอนจะมีปริมาณน้ำสลัดจ์มาก ซึ่งมักจะนำกลับสู่ถังเดิมอากาศเพื่อช่วยในการควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ในถังเดิมอากาศได้ ถ้าพบว่าระบบมีน้ำสลัดจ์มากเกินไปเกินความต้องการก็อาจสูบถ่ายจากก้นถังตกตะกอน หรือจากถังเดิมอากาศโดยตรงก็ได้ และจะนำน้ำสลัดจ์ส่วนเกินนี้ไปบำบัดและกำจัดทิ้งต่อไป ระบบเดิมอากาศที่ใช้เป็นระบบเดิมอากาศแบบฟุ้ง (diffused-air aeration system) โดยอาศัยเครื่องอัดอากาศ (air compressor) เป็นตัวเป่า

อากาศเข้าไปในระบบท่อจ่ายอากาศ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียได้ดังนี้

1. น้ำเสียหรือน้ำดิบ (influent wastewater) จะเข้าสู่ระบบโดยผ่านตะแกรงหยาบ (bar screen) แล้วจะไหลเข้าสู่บ่อปรับสภาพ (equalization tank) เพื่อให้ น้ำเสียแต่ละแห่งและน้ำเสียที่ไหลเข้าไปใหม่มีการผสมกัน เพื่อมีค่าต่าง ๆ ในน้ำเสียมีค่าสูงหรือต่ำมากเกินไป จะมีการเติมอากาศ เพื่อเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นการลดค่าซีโอดีลงระดับหนึ่ง
2. น้ำจะไหลเข้าสู่บ่อปรับค่าพีเอช เพื่อปรับให้ได้ค่าพีเอชตามที่ต้องการ ประมาณ 8.5-9.0 โดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และพีเอช (poly aluminium chloride) เพื่อให้เกิดตะกอน ฟล็อกขึ้น
3. น้ำจะไหลเข้าสู่บ่อรวมตัวของตะกอน (flocculation tank) และมีการเติมโพลิเมอร์เพื่อให้ ฟล็อกเกาะตัวกัน และพีเอชจะมีค่าคงอยู่ที่ 6.5-7.5
4. น้ำจะไหลเข้าสู่บ่อตกตะกอนบ่อที่ 1 (sedimentation NO.1) โดยตะกอนภายในบ่อจะต้องถูกออกมายังบ่อเพิ่มความเข้มข้นตะกอน (sludge thickener) เพื่อมิให้สลัดจ์ดันออกมาจากบ่อตกตะกอน ค่าพีเอชของน้ำควรอยู่ที่ 6.5-7.5
5. น้ำที่ผ่านบ่อตกตะกอนบ่อที่ 1 แล้วจะไหลเข้าบ่อเติมอากาศ (aeration tank) เพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำ หลังจากนั้นจะส่งน้ำไปสู่อบ่ตกตะกอนบ่อที่ 2 (sedimentation NO.2) เพื่อปล่อยให้ตกตะกอน โดยที่ตะกอนส่วนหนึ่งจะส่งกลับมายังบ่อเติมอากาศใหม่ และตะกอนชีวภาพ (ส่วนผสมของจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ที่เป็นอนุภาคที่ยังไม่ได้ย่อยสลาย) ที่เกินความต้องการในถังปฏิกรณ์ (mixed liquor suspended solids, MLSS) จะทำการทิ้งโดยจะส่งไปบ่อเพิ่มความเข้มข้นตะกอน, บ่อตากตะกอน และเครื่องอัดตะกอน ซึ่งจะมีการเติมโพลิเมอร์เพื่อเพิ่มการเกาะกันของตะกอน
6. น้ำที่ผ่านบ่อตกตะกอนบ่อที่ 2 จะเป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว (effluent) แสดงขั้นตอนการทำงานดังภาพที่ 14

ระบบเอเอสทีใช้นี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีออกจากน้ำเสียได้ประมาณ 87% (ค่าเฉลี่ยระหว่างเดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2544) แต่ต้องใช้ปริมาณสารเคมีในการบำบัดค่อนข้างมาก คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 170 มก./ล., พีเอช (Al_2O_3) 16 มก./ล. และโพลิเมอร์ 6.11 มก./ล. รวมเป็นค่าใช้จ่ายสารเคมีทั้งสิ้นประมาณ 4.29 บาท/ลบ.ม. ซึ่งถือว่าเป็นจำนวนเงินที่สูงมากและปริมาณพีเอชที่ใช้อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสภาพแวดล้อมได้ เมื่อเทียบกับการวิจัยของนางน้อย ศรีสุวรรณ (2539, หน้า69) โดยปริมาณของสารสร้างตะกอนที่ทำให้น้ำเสียที่เกิดจากน้ำล้างภาชนะที่ใช้บรรจุน้ำยาสารเคมี ซึ่งได้ผ่านกระบวนการรวมตัวและลอยตัวของตะกอน จะใช้

สารส้มเป็นสารสร้างตะกอนตัวแรก ตามด้วยโพลิเมอร์ในปริมาณ 5 มก./ลิตร และ 4 มก./ลิตร ตามลำดับ สามารถลดค่าซีโอดีได้ถึงร้อยละ 94.6 ± 2.2 นอกจากนี้ฟารามิเตอร์บางตัว เช่น ของแข็งละลายน้ำได้ทั้งหมด (total dissolved solids) มีประสิทธิภาพในการกำจัดเพียง 15% ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วอาจมีคุณภาพไม่ดีพอที่จะผ่านมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม (ภาคผนวก ค)



ภาพที่ 14 แผนผังของโรงงานบำบัดน้ำเสียระบบเอเอส บริษัท เอ็ม.อาร์.ไอ. จำกัด

กระบวนการโคแอกกูเลชัน

น้ำมีความขุ่นเนื่องจากมีอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ (colloidal particle) โดยทั่วไปอนุภาคคอลลอยด์ มีขนาดอยู่ในช่วง 10^{-6} มม. (1 นาโนเมตร) จนถึง 10^{-3} มม. (1 ไมโครเมตร) เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีขนาดเล็กมาก จึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาจำกัด ความเร็วในการจมตัวของอนุภาคเป็นไปตามกฎของสโตค (Stoke's Law) (Stokes, 1891) ดังนี้

$$V_t = \frac{g(\rho_s - \rho) d^2}{18\mu}$$

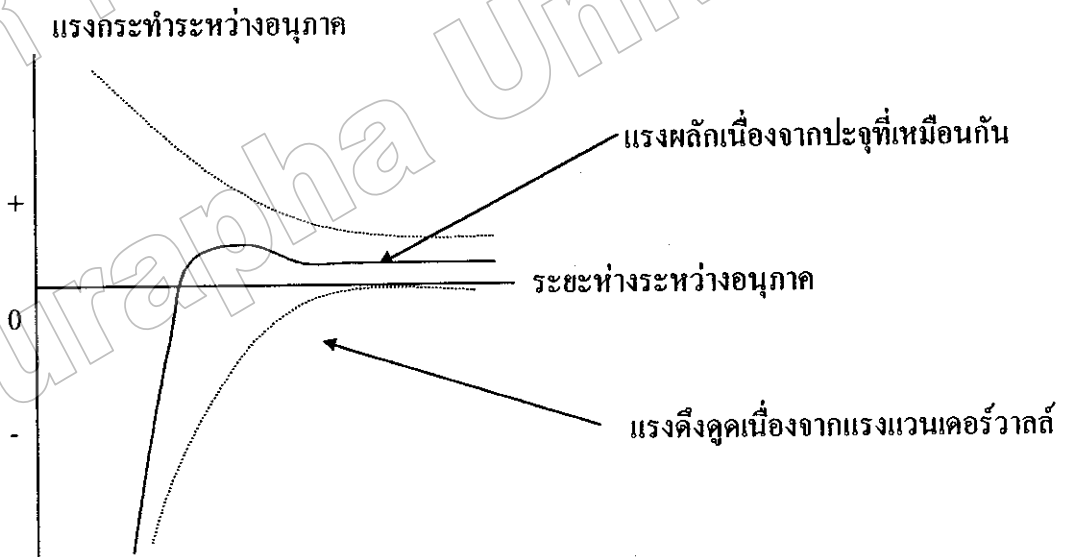
เมื่อ	V_t	คือ	ความเร็วในการจมตัวของอนุภาค (ชม./วินาที)
	g	คือ	ความเร่งของแรงดึงดูดของโลก (ชม./วินาที ²)
	ρ_s	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาค (กรัม/ชม. ³)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ (กรัม/ชม. ³)
	μ	คือ	ความหนืดของน้ำ (กรัม/ชม./วินาที)
	d	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (ชม.)

จากสมการจะเห็นว่าความเร็วในการจมตัวของอนุภาคขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคกับน้ำ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะจมตัวได้อย่างรวดเร็วกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นในการทำให้เกิดการจับกลุ่มของอนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ จนเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้น หรือฟล็อก ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ง่ายและเรียกการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ซึ่งอาจถูกทำลายเสถียรภาพหรือยังก็ได้ ที่เกิดการสัมผัสและเกาะติดกันเป็นฟล็อกว่า ฟล็อกคูเลชัน (flocculation) ส่วนกระบวนการในการทำให้คอลลอยด์หลาย ๆ อนุภาคจับตัวกันเป็นฟล็อก เรียกว่า โคแอกกูเลชัน (coagulation) กระบวนการนี้มีสองขั้นตอน (Frederick, n.d.) คือ การทำลายเสถียรภาพ (destabilization) ของคอลลอยด์ เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาค และการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันมากที่สุด เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว การสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคย่อมเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเดิม นอกจากนี้ เมื่ออนุภาคต่าง ๆ สัมผัสกันแล้ว ควรเกาะติดกันแน่นและหลุดออกจากกันได้น้อยที่สุด

สมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ อนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยในน้ำจะมีชั้นของไอออนเคลือบอยู่รอบ ๆ ผิวของอนุภาค (electrical double layer) ถ้าหากอนุภาคชนิดหนึ่งมีไอออน

บวกมากกว่าไอออนลบ อนุภาคนั้นจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ถ้ามีไอออนลบมากกว่าไอออนบวก อนุภาคนั้นก็จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของไอออนบวก และไอออนลบ (H^+ และ OH^-) ที่ปะปนอยู่ในน้ำ หรือค่าพีเอชนั่นเองที่เป็นตัวเปลี่ยนแปลงค่า และเครื่องหมายของศักย์ไฟฟ้า

เสถียรภาพของคอลลอยด์ คอลลอยด์นั้นถือว่ามีเสถียรภาพเมื่อสามารถดำรงสถานะแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนภายในเวลาสั้น เมื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์ตกตะกอนและแยกตัวจากน้ำก็ถือว่า เสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกทำลายและไม่มีเสถียรภาพอีกต่อไป ด้วยเหตุนี้เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค (Frederick, n.d.) แรงผลักระหว่างอนุภาคต้องสูงกว่าแรงดึงดูดจึงจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดึงดูดมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆสามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อกได้ ทำให้คอลลอยด์ไม่มีเสถียรภาพ แรงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals force) เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาค ผลลัพธ์ของแรงระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิด ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาค ดังแสดงในภาพที่ 15 จะเห็นได้ว่าแรงดูดมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมาก ๆ (Frederick, n.d.)



ภาพที่ 15 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่าง ๆ (Frederick, n.d.)

กลศาสตร์การรวมตัวของตะกอน การรวมตัวของตะกอนเกิดขึ้นได้จากการที่อนุภาควิ่งชนกันแล้วเกาะติดกันเนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคที่มาจากประจุไฟฟ้ารอบ ๆ อนุภาค อนุภาคคอลลอยด์จะไม่มีเสถียรภาพและไม่สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้

การทำให้เกิดการรวมตัวของตะกอนมีหลายวิธีดังนี้ (พิชญ์ บุญนวล และก้องสกล หนูวารี, 2536)

1. ปรับสภาพ พีเอช ของน้ำให้ได้ค่า พีเอช ที่อนุภาคมีศักย์ทางไฟฟ้าที่ผิวน้อยที่สุดหรือ ไม่มีเลย (Point of Zero Charge – PZC) ทั้งนี้เพื่อลดแรงผลักกันระหว่างอนุภาค อนุภาคจึงถูกดูดเข้า ใกล้และเกาะติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ในที่สุด

2. กรณีที่มีอนุภาคต่างชนิดกันและมีค่าพีเอชที่สัมพันธ์กับอนุภาค มีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ต่างกัน การปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงกลาง ๆ จะทำให้อนุภาคต่างชนิดกันนั้นมีประจุต่างกันและเกาะ กันเป็น ฟล็อกได้

3. การทำลายอำนาจประจุของอนุภาคคอลลอยด์โดยการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้า ของอนุภาค (adsorption - charge neutralization) มีผลในทางลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและแรงผลัก ระหว่างอนุภาค ทั้งนี้ทำได้โดยการเติมเกลือของโลหะลงไป เช่น ปูนขาว (Ca^{2+}) และสารส้ม (Al^{3+}) (Deraquin & Landau, 1941; Verwey & Overbeek, 1948; Kruyt, 1952; Van, 1963; Michaels & Bolger, 1964) สารเคมีบางหมู่สามารถดูดติด (adsorbed) บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ถ้าสาร เหล่านี้มีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับของคอลลอยด์

4. ห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น การเติมสารประกอบเกลือ ของโลหะบางชนิดลงไปในน้ำในปริมาณที่พอเพียง จะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาค คอลลอยด์จะเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวเพื่อทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรือจับตัวรวมกับผลึก ถือได้ ว่าเป็นการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ เป็นผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพ และสามารถตกตะกอนได้

5. ใช้สารอินทรีย์โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (polymer bridging) โมเลกุลของสาร โพลิเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง (ภาพที่ 16) การ เกาะติดอาจเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของโพลิเมอร์และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงของ ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของโพลิเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลิเมอร์ เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว อนุภาคดังกล่าวนี้สามารถจับตัวกับอนุภาคอื่น ๆ โดยมีโพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อม

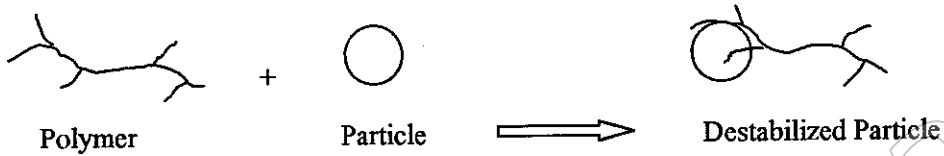
ประสิทธิภาพของการรวมตัวของตะกอนขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านเคมีและฟิสิกส์ดังนี้

1. ปัจจัยทางเคมี

1.1 สารสร้างตะกอนโรงงานผลิตดองมีอชานนิคมใช้สารสร้างตะกอน คือ สารประกอบ อะลูมิเนียม เช่น อะลูมิเนียมซัลเฟตและอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Nordin, 1999) ส่วนสารสร้างตะกอน ชนิดอื่นคือสารประกอบของเหล็ก เช่น เฟอริกคลอไรด์และเฟอริซัลเฟต แต่ประสิทธิภาพจะดีกว่า

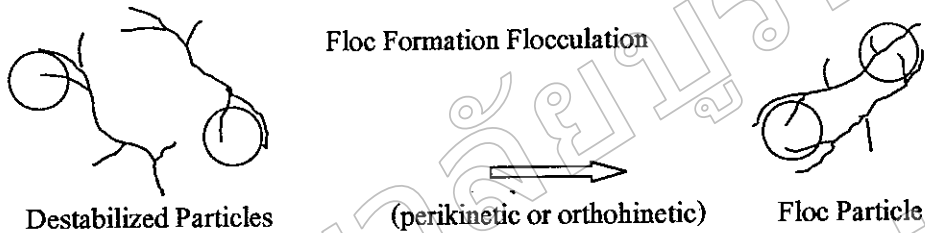
Reaction 1

Initial Adsorption at Optimum Polymer Dosage



Reaction 2

Floc Formation Flocculation



ภาพที่ 16 กลไกของการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบต่อเชื่อมด้วยโพลิเมอร์ (มันสัน ดันทุลเวสม์, 2537)

การเลือกชนิดของสารเคมีต้องมีการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหาชนิดและปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการรวมตัวของตะกอนได้ดีที่สุด วิธีที่นิยมใช้คือ วิธีจาร์เทสต์ (jar test) ซึ่งเป็นวิธีทดสอบในบีกเกอร์ เครื่องมือทดสอบเป็นเครื่องกวนที่ปรับความเร็วรอบได้ ซึ่งส่วนมากมักมีใบพัดกวนน้ำ 6 ใบ

1.2 พีเอช ค่าพีเอชในน้ำเสียจะมีผลต่อการรวมตัวของตะกอนเพราะค่าพีเอชในน้ำจะเป็นตัวเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคให้เป็นบวกหรือเป็นลบขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนบวกและไอออนลบที่ปะปนอยู่ในน้ำ การปรับสภาพความเป็นกรดด่างของน้ำให้ได้ค่าพีเอชที่อนุภาคค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวที่น้อยที่สุดหรือไม่มีเลย ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคมีน้อยที่สุด อนุภาคจึงถูกดึงดูดเข้ามาใกล้และเกาะติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ในที่สุด พีเอชของน้ำเสียโรงงานถุงมืออย่างมีค่าประมาณ 7.1-7.7 (Nordin, n.d.) และเป็นค่าที่ค่อนข้างจะคงที่ ทำให้ง่ายในการปรับค่าพีเอช พีเอชที่สูงขึ้นทำให้ยางแสดงความเปราะบางมากขึ้น ดังนั้นการใช้เกลือของอะลูมิเนียมที่มีวาเลนซ์ 3⁺ เป็นสารสร้างตะกอนจึงไปกดดันให้ความหนาของชั้นประจุที่ผิวของยางบางลงทำให้แรงผลักระหว่างกันลดลงจนสามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Deraquin & Landau, 1941; Verwey & Overbeek, 1948; Krut, 1952; Van, 1963; Michaels & Bolger, 1964)

1.3 อุณหภูมิ อุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมี อุณหภูมิต่ำทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีและฟิสิกส์เคมีต่ำลง และระยะเวลาในการเกิดฟล็อกนานขึ้น หรือต้องใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนเพิ่ม

ขึ้น (Cox, 1969) อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้อนุภาคมีการแพร่หรือเดินได้มากขึ้น อนุภาคจึงมีโอกาสชนกันมากขึ้น ประสิทธิภาพของการรวมตัวของตะกอนจึงดีขึ้นด้วย กระบวนการผลิตถุงมือยางมีการปรับอุณหภูมิให้น้ำน้อยมากทำให้น้ำเสียอุณหภูมิค่อนข้างคงที่ คือ ประมาณ 30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของน้ำที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงนี้จึงไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาทางเคมี, ฟิสิกส์ และต่อการรวมตัวของตะกอนมากมายนัก

2. ปัจจัยทางด้านฟิสิกส์

2.1 การชนกันระหว่างอนุภาค (collision) ปกติอนุภาคเล็ก ๆ (10 ไมครอนลงไป เช่น อนุภาคยางที่มีขนาด 0.05-5 ไมครอน) ในน้ำจะสั่นโดยตัวเองเนื่องจากการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งทำให้มีโอกาสชนกันเองได้ แต่ถ้าอนุภาคเล็กมาก (เล็กกว่า 1 ไมครอน) โอกาสในการชนกันมีน้อย อัตราการชดัดกันมีน้อยมาก จึงต้องอาศัยการกวนเพื่อเร่งให้อนุภาควิ่งชนกันบ่อยและแรงขึ้น จึงเป็นผลให้มีการชดัดกันระหว่างอนุภาคเร็วขึ้น การกวนที่แรงเกินไป แรงน้ำจะดึงอนุภาคที่เกาะติดกันแล้วออกจากกันทำให้อัตราการเกิดการรวมตัวของตะกอนน้อยลง (Cheremisinoff, n.d.) การกวนที่มีความแรงน้อยเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้น้ำขุ่นจากการแตกของฟล็อก (Keys & Hogg, 1979)

2.2 ความเข้มข้นของอนุภาคในสารแขวนลอย มีความสำคัญต่อการรวมตัวของตะกอน และการจมตัวของตะกอน (Hogg, Bunnaul & Suharyono, 1993) ในน้ำที่มีความเข้มข้นของอนุภาคมากจะทำให้เกิดการรวมตัวของตะกอนได้ดี เพราะอนุภาคจะอยู่ชิดกันมีโอกาสในการชนกันและเกาะติดกันเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจึงมีความขุ่นน้อย ในขณะที่เดียวกันในน้ำที่มีอนุภาคแขวนลอยอยู่น้อย ขนาดของฟล็อกและอัตราการจมตัวของฟล็อกจะต่ำไปด้วยเนื่องจากโอกาสในการชนกันและเกาะติดกันของอนุภาคมีน้อย

น้ำเสียจากโรงงานผลิตถุงมือยางไม่สามารถกำหนดความเข้มข้นของอนุภาคให้มากได้ ความเข้มข้นของอนุภาคจะเป็นไปตามกลไกของกระบวนการผลิต ดังนั้นการแก้ไขในกรณีที่มีน้ำมีความขุ่นน้อยหรือมีจำนวนอนุภาคน้อย โดยการนำตะกอนที่ได้ป้อนกลับไปในถังกวนใหม่เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคทำให้เกิดการรวมตัวของตะกอนได้ดีขึ้น (Bachik & Hassan, 1999)

2.3 ความเร็วในการจมตัวของอนุภาค (floc settling rate) การไหลของน้ำขึ้นสู่ปากถังมีความสำคัญต่อคุณภาพน้ำล้น (overflow) มาก โดยที่อนุภาคต้องมีขนาดโตพอที่จะจมตัวได้เร็วกว่าน้ำที่ไหลสวนขึ้นไป มิฉะนั้นอนุภาคนั้นจะถูกน้ำพัดพาขึ้นไปกับน้ำล้นด้วย ยังผลให้น้ำล้นกลับขุ่นขึ้นมาอีก

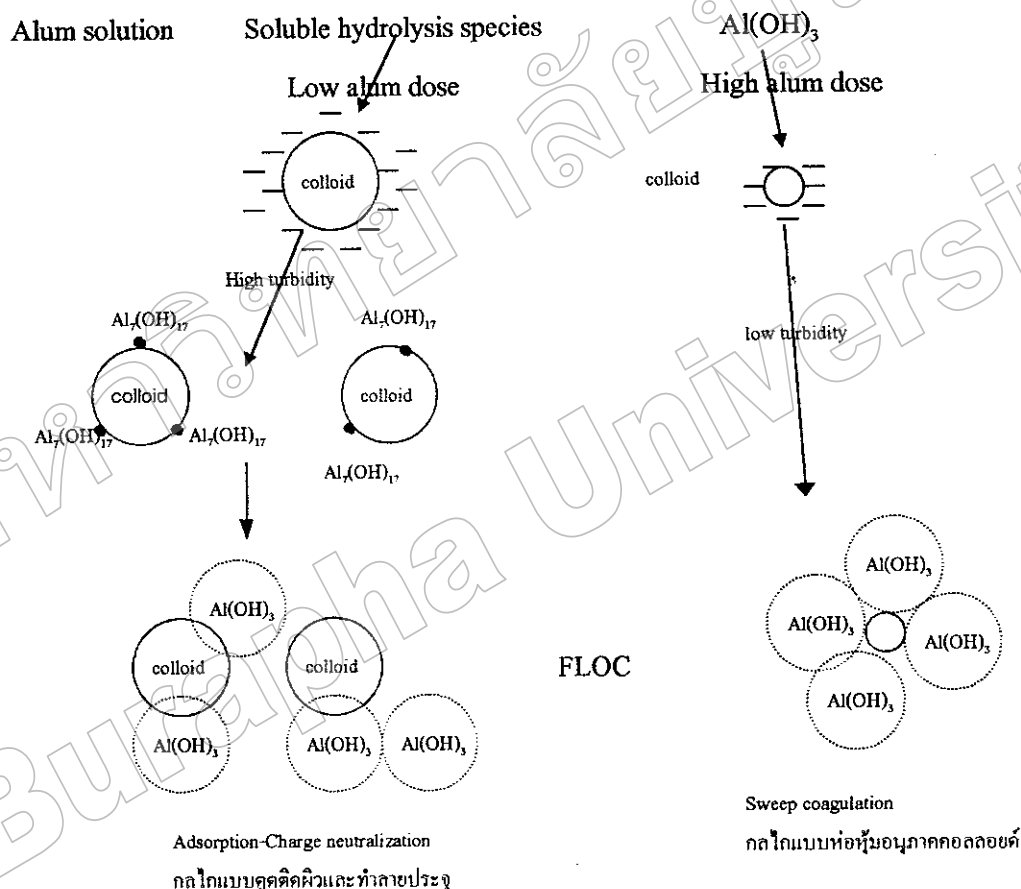
2.4 อัตราการเติมสารสร้างตะกอน มีความสำคัญต่อคุณภาพน้ำล้น โดยเฉพาะการเติมสาร โพลีเมอร์ หากเติมสาร โพลีเมอร์ในอัตราที่เร็วขึ้นจะได้กลุ่มอนุภาคตะกอนที่ใหญ่ขึ้นและจมตัว

ได้เร็วมากแต่น้ำล้นที่ได้ใส่น้อยลง นอกจากนี้อัตราการเติมสารโพลิเมอร์กับการกวนควรจะมีความสัมพันธ์กัน เพราะการกวนต่อไปอีกหลังหยุดป้อนโพลิเมอร์ ทำให้อนุภาคตามขอบฟลอคแตกหลุดออกมาทำให้น้ำที่ใสแล้วพุ่งขึ้นมาอีก (Hogg et al., 1993)

สารสร้างตะกอน เป็นสารเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน เรียกว่า โคแอกกูแลนต์ ส่วนสารช่วยสร้างตะกอนที่ทำให้โคแอกกูแลนต์สร้างโคแอกกูเลชันได้ดียิ่งขึ้น เรียกว่า โคแอกกูแลนต์เอ็ด (coagulant aid) เมื่อเติมสารโคแอกกูแลนต์ลงไปใต้น้ำจะแตกตัวกลายเป็นอออนบวกและลบที่มี วาเลนซ์ (valance) สูง อออนบวกสามารถทำปฏิกิริยากับ OH⁻ ทำให้เกิดคอลลอยด์ของสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งมีประจุบวก สารไฮดรอกไซด์นี้สามารถจับตัวกับอนุภาคความขุ่นซึ่งมีประจุลบ ทำให้ความขุ่นกลายเป็นกลางซึ่งเท่ากับเป็นการทำลายเสถียรภาพให้กับความขุ่น (Cheremisinoff, n.d.) แต่กระบวนการโคแอกกูเลชันไม่สามารถลดค่าซีโอดีในน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูงได้มากนัก (Wayne, Shewfelt & Salter, 1974)

สารสร้างตะกอนที่นิยมใช้ ได้แก่ สารประกอบของอะลูมิเนียม หรือสารส้ม (alum) มีสีน้ำตาลอ่อนหรือสีเทาเขียว สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดีที่สุด ณ พีเอช 4.0-7.0 (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โจนัน, 2535) มีสูตรเคมีดังนี้ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3H_2O$ หรือ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (aluminium sulfate) ในประเทศไทยสารส้มเป็นที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่าง ๆ เช่น สามารถลดปริมาณฮิวมิกในบึงและน้ำผิวดินได้ดีที่ค่าพีเอชประมาณ 5.0-7.0 (Xiaoqiao, Zulian & Xinhao, 1999) และหาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพง แต่อะลูมิเนียมทำให้เกิดปัญหาสุขภาพและหาคะสมในปริมาณมากอาจเป็นสาเหตุให้เป็นโรคอัลไซเมอร์ (Chihpin, Shuchuan & Jill, 2000) ในกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มส่วนใหญ่มักมีกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์เป็นกลไกหลัก (Amirtharaja & Mills, 1982) โดยอาจมีกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุเป็นกลไกร่วมซึ่งมีบทบาทน้อยกว่าเนื่องมาจากการสัมผัสระหว่างอออนคอมเพล็กซ์และอนุภาคคอลลอยด์ยากที่จะทำให้เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 10^{-4} - 1 วินาที และความสามารถในการละลายของ $Al_2(OH)_3$ อยู่ในระดับต่ำ (ดังภาพที่ 17) จากการวิจัย อะมิตารากา และ มิล (Amirtharaja & Mills, 1982) ได้เสนอหลักการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม แสดงให้เห็นว่าโคแอกกูเลชันด้วยกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์จะได้ผลดีที่สุดที่พีเอช 6.8-8.2 และใช้สารส้ม 20-50 มก./ล. กลไกแบบเกาะติดผิว/ทำลายประจุและแบบผสมทำให้เกิดโคแอกกูเลชันได้ด้วยสารส้มน้อยกว่า 10 มก./ล. สารประกอบอะลูมิเนียมอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้คือ พีเอซี (polyaluminium chloride) มีสูตรเคมีดังนี้ $[Al(OH)_xCl_x(SO_4)_{3-x}]_n$ พีเอซีสามารถจัดแบ่งตามความเข้มข้นของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ได้เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มแรกมีองค์ประกอบเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ 8-10% , แคลเซียม 0.2% และซัลเฟต 2.7% (โดยน้ำหนัก) แต่ไม่มีโซเดียม กลุ่มนี้เป็นที่ได้รับความนิยมมากในการ

บำบัดน้ำเสียเนื่องจากมีอัตราส่วนของโมโนเมอร์และโพลิเมอร์ที่ทำให้เกิดการรวมตัวของตะกอนได้ดี (Cheremisinoff, n.d.) กลุ่มที่สองมีอะลูมิเนียมออกไซด์ 16.5-17.5% (โดยน้ำหนัก) แต่ไม่มีแคลเซียม, ซัลเฟตและโซเดียมผสม ทำให้ไม่มีไอออนร่วม เช่น Ca^{2+} และ Fe^{3+} จึงขาดไอออนที่ช่วยในการรวมตัวของตะกอน (Dorst & Seetz, 1991) เพื่อทำให้เกิดการรวมตัวของตะกอนโดยมีผลให้สารสัมผัสระหว่างไอออนคอมเพล็กซ์ที่เกิดขึ้นมีอะลูมิเนียมมากกว่าหนึ่งอะตอมหรือเป็นโพลิเมอร์ (polymeric) ซึ่งจะต่างจากสารสัมผัสที่มีอะลูมิเนียมเพียงอะตอมเดียว (monomeric) (Dorst & Seetz, 1991)



ภาพที่ 17 กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (Frederick, n.d.)

สารช่วยสร้างตะกอนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสารสร้างตะกอนได้หลายทาง เช่น การเติมแอคทิเวตเต็ดซิลิกา (activated silica) ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ที่มีประจุลบก่อนการเติมสารส้ม ทำให้เกิดเป่าสัมผัสเพิ่มเติมให้กับน้ำเป็นการลดปริมาณสารส้มที่ต้องใช้ หากเติมแอคทิเวตเต็ดซิลิกาลง การเกิดโคแอกกูเลชันของสารส้ม ก็จะช่วยให้ฟล็อกมีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนได้ง่าย (Amirtharaja & Mills, 1982) และการบำบัดน้ำเสียจากน้ำทิ้งในครัวเรือนด้วย 100 มก./ล.

อะลูมิเนียมซัลเฟตผสมกับ 10 มก./ล. โพลีเมอร์ประจุลบ (H-1018) สามารถลดค่าซีไอดีและสารแขวนลอยได้ 98.5% และ 98.1% ตามลำดับ โดยหากผสม 10 มก./ล. โคโคซานกับโพลีเมอร์ประจุลบ (P-A23) ทำให้ฟล็อกที่ได้มีขนาดเล็ก สำหรับฟล็อกขนาดใหญ่จะเกิดจาก 350 มก./ล.

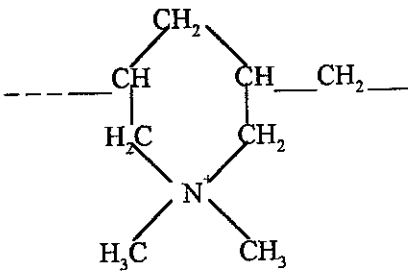
อะลูมิเนียมซัลเฟตกับ 40 มก./ล. โพลีเมอร์ประจุลบ (P-A23) (Etemad, 1984) สารช่วยสร้างตะกอนสามารถนำมาใช้เป็นสารสร้างตะกอนได้เช่นกัน แต่เนื่องจากมีราคาแพงกว่าสารส้มหรือสารสร้างตะกอนสามัญอื่น ๆ เป็นอันมาก จึงใช้เป็นเพียงตัวช่วยเหลือหรือสนับสนุนสารอื่นในการสร้างโคแอกกูเลชัน

สารช่วยสร้างตะกอนที่นิยมใช้ได้แก่ โพลีเมอร์ (polymer) หรือโพลีอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) ป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (มากกว่า 10 ล้าน) มีลักษณะเป็นโซ่ยาว อาจมีกิ่งก้านสาขาบ้างแล้วแต่ชนิดของโพลีเมอร์ ในทางปฏิบัติจึงใช้โพลีเมอร์เป็นตัวช่วยเหลือหรือสนับสนุนสารสร้างตะกอนในการสร้างโคแอกกูเลชัน โพลีเมอร์ทำให้เกิดโคแอกกูเลชันโดยทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคคอลลอยด์หลายอนุภาค (Smillie & Lamer, 1985) ทำให้เกิดฟล็อกเกาะกันอย่างหลวม ๆ ด้วยโครงสร้างแบบสามมิติ (Ruerwin & Ward, 1952) ประจุของโพลีเมอร์ไม่เกี่ยวข้องกับกลไกนี้ เพราะไม่จำเป็นต้องทำให้คอลลอยด์เป็นกลาง แต่สิ่งที่สำคัญคือ โพลีเมอร์ต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถใช้เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคความขุ่นต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง สะพานดังกล่าวต้องแข็งแรงและสามารถต้านทานแรงผลักระหว่างอนุภาคและความปั่นป่วนที่เกิดจากการกวนน้ำ ถ่ายเทหรือขนส่งผ่านท่อ ยกเว้นบางอนุภาคที่จับยึดกันอย่างหลวม ๆ ในส่วนนอกของกลุ่มอนุภาคเท่านั้น ด้วยเหตุนี้โพลีเมอร์จึงควรที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ (Rudoff, 1992) ประจุของโพลีเมอร์มาจากฟังก์ชันกรุปต่าง ๆ ในโมเลกุลของโพลีเมอร์ เช่น คาร์บอกซิลและซัลโฟเนต ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของน้ำ (Frederick, n.d.) (ดังภาพที่ 18) เนื่องจากอนุภาคยงมีส่วนประกอบของสารโปรตีนซึ่งมีอนุโมเลกุลของคาร์บ็อกซิเลตดูคล้ายอยู่รอบ ๆ ผิวและห่อหุ้มอนุภาคยงไว้ (Rubber Research Institute of Malaysia, 1992) ทำให้น้ำยงมีประจุไฟฟ้าเป็นลบจึงต้องใส่โพลีเมอร์ประจุบวกลงไปเพื่อจับกับประจุลบที่ผิวของอนุภาค (แน่นน้อย ศรีสุวรรณ, 2539) การเกิดฟล็อกโดยการใส่สารโพลีเมอร์นั้นจะได้ฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างรวดเร็วในระหว่างการกวน (Ray, 1985) ขนาดของฟล็อกจะถูกควบคุมโดยสมดุลระหว่างอัตราการเพิ่มขนาดกับความต้านทานการแตกจากแรงเฉือนเนื่องจากการกวน, อัตราการจมตัวของตะกอนซึ่งขึ้นอยู่กับความแรงในการกวนและปริมาณโพลีเมอร์รวมทั้งอัตราในการใส่สารโพลีเมอร์ ตัวอย่างเช่น ขนาดของฟล็อกและอัตราการจมตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มปริมาณโพลีเมอร์ แต่จะลดลงเมื่อเพิ่มความแรงในการกวน (Ray, 1985) ปริมาณโพลีเมอร์ที่จับกับฟล็อกขนาดใหญ่จะมีน้อยกว่า ฟล็อกขนาดเล็กเนื่องจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของขนาดฟล็อกจะลดโอกาสในการจับ

โพลิเมอร์กับผิวของฟลอคเพราะฟลอคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้พื้นที่ผิวลดลง (Ray, 1985) สามารถแบ่งโพลิเมอร์ตามที่มาจากแหล่งวัตถุดิบได้เป็นสองชนิด คือ

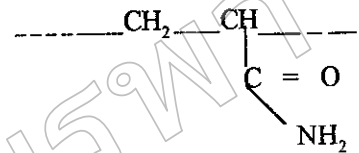
A. Cationic polyelectrolytes

Polydiallyldimethylammonium

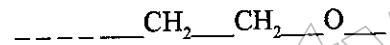


C. Nonionic polymers

1) Polyacrylamide

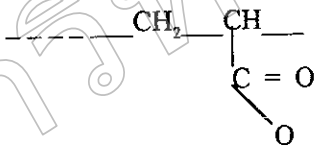


2) Polyethylene oxide



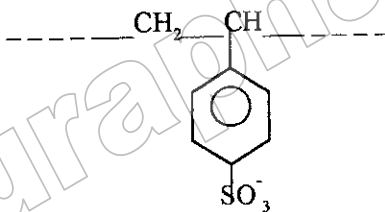
B. Anionic polyelectrolytes

1) Polyacrylic acid



2) Hydrolyzed polyacrylamide : A mixture of subunits B 1 and C 1.

3) Polystyrene sulphonate



ภาพที่ 18 โพลิเมอร์ชนิดต่างๆ (Frederick, n.d.)

1. สารอินทรีย์โพลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นโพลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากการรวมตัวทางเคมีของหน่วยเล็ก ๆ หลายๆ หน่วยที่เรียกว่าโมโนเมอร์ (monomers) หรือหน่วยเดี่ยว (single parts) ซึ่งหน่วยเล็ก ๆ ซ้ำ ๆ กัน (repeating units) ในโมเลกุลของโพลิเมอร์นี้ อาจจะเป็นอะตอมเดี่ยว (single atoms) หรือกลุ่มของอะตอม มักมีขนาดโมเลกุลใหญ่ โพลิเมอร์สังเคราะห์สามารถจำแนกตามชนิดของประจุที่อยู่บนสายโพลิเมอร์ (Cheremisinoff, n.d.) เนื่องจากโพลิเมอร์เกิดจากวัตถุดิบตั้งต้นที่มีโมโนเมอร์ต่างกันและมีการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุล, ความหนาแน่นของประจุและอิออนกลุ่มต่าง ๆ ทำ

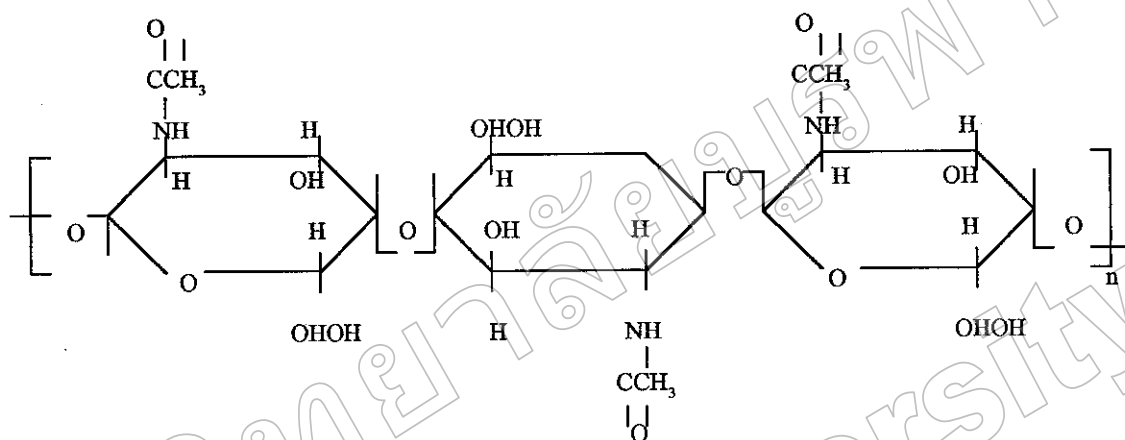
ให้สามารถเกิดโพลิเมอร์สังเคราะห์ได้หลายชนิด เช่น COSMOFLOC CM-8118, COSMOFLOC CF-114C และ M.266 เป็นต้น ในการเลือกใช้โพลิเมอร์จึงต้องพิจารณาถึงขนาด, ความหนาแน่นและประจุไอออนของอนุภาคคอลลอยด์ด้วย

2. สารอินทรีย์โพลิเมอร์ชีวภาพ เป็นโพลิเมอร์ที่สกัดมาจากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น เปลือกนอกของกุ้งและปู จึงสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ตัวอย่างของโพลิเมอร์ชีวภาพ เช่น เซลลูโลส, ไคติน, ไคโตซาน และโปรตีนบางชนิด

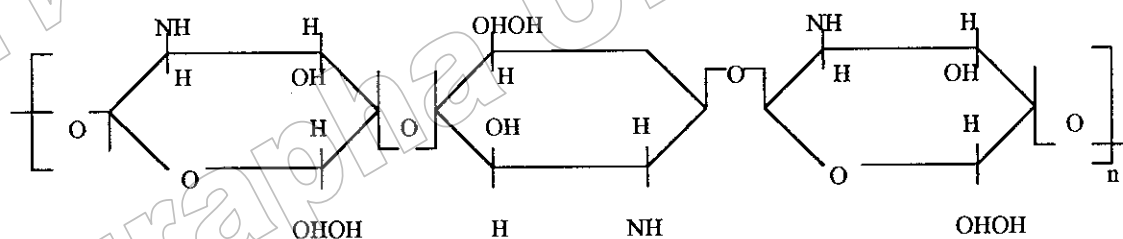
ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ (derivative) ของไคติน ซึ่งไคตินเป็นโพลิเมอร์ชีวภาพที่มีมากในธรรมชาติเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส (cellulose) โพลิเมอร์ทั้งสองนี้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างป้องกันและสร้างความแข็งแรงให้แก่ผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิต โดยไคตินจะพบในโครงสร้างเปลือกนอกของสัตว์จำพวกกุ้ง ปู และแกนหมึก นอกจากนี้ยังพบในผนังเซลล์ของเห็ดราและสาหร่ายบางสายพันธุ์ (ภาวดี เมธะคานนท์, อสิรา เทืองฟูชาติ, และก้องเกียรติ คงสุวรรณ, 2543) ไคโตซานได้จากปฏิกิริยาดีอะซีติลเลชัน (deacetylation) ของไคตินด้วยด่างเข้มข้น ทำให้โครงสร้างทางเคมีของไคตินเปลี่ยนไปโดยหมู่อะซิตาไมด์ ($-NHCOCH_3$) เปลี่ยนเป็นหมู่เอมิโน ($-NH_2$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซานส่วนใหญ่จะประกอบด้วย poly(β -(1-4)-2- amino-D-glucose) ซึ่งจะมีความคล้ายคลึงกันกับโครงสร้างทางเคมีของไคติน โดยแตกต่างกันที่หมู่แทนที่ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 ในวงแหวนไพราโนส (pyranose ring) ซึ่งเป็นหน่วยย่อยของไคโตซานและไคติน โดยที่หมู่แทนที่ตำแหน่งดังกล่าวของไคโตซานจะเป็นหมู่เอมิโน ($-NH_2$) ส่วนในไคตินเป็นหมู่อะซิตาไมด์ ($-NHCOCH_3$) ดังภาพที่ 19 ดังนั้นชื่อทางเคมีของไคโตซานคือ poly(β -(1-4)-2- amino-2-deoxy-D-glucose) (สุวรรณ, 2544)

การนำไคตินที่พบในธรรมชาติมาผ่านกระบวนการปรับโครงสร้างทางเคมีด้วยปฏิกิริยาดีอะซีติลเลชัน ไม่สามารถได้สายโซ่ในรูปของไคโตซาน 100% ในขณะที่เดียวกันไคตินที่พบอยู่ในธรรมชาติแม้จะมีหน่วยหลักเป็นไคตินในสายโซ่ แต่จะมีหน่วยของไคโตซานปะปนอยู่จำนวนหนึ่งประมาณ 5-10% ซึ่งสายโซ่ที่มีหน่วยของไคตินและไคโตซานอยู่ในรูปที่ผสมอยู่สลับหน่วยปะปนกันไป เรียกว่าไคติน-ไคโตซานโคโพลิเมอร์ (copolymer) จะประกอบด้วยโมโนเมอร์ (monomer) สองชนิด คือ *N*-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine (สุวรรณ, 2544) เกณฑ์ที่ใช้จำแนกในกรณีที่สายโซ่มีหน่วยของไคโตซาน (D-glucosamine) เกินกว่า 70-75% ขึ้นไป จะเรียกว่าไคโตซาน (สุวรรณ, 2544) วิธีการตรวจสอบโครงสร้างของไคติน-ไคโตซานเพื่อหาหน่วยไคติน หรือไคโตซานเป็นเปอร์เซ็นต์สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีการวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจน (CHN analysis หรือ elemental analysis) (สุวรรณ, 2544) วิธีการวิเคราะห์ปริมาณหมู่เอมิโนจาก Quantitative FTIR ซึ่งโดยทั่วไปจะอ้างถึงปริมาณเปอร์เซ็นต์ของหมู่เอมิโนและเรียกว่า

ระดับของการถอดหมู่อะซีติล (degree of deacetylation, %DD) หรือระดับของการเกิดดิวีซีลเลชัน ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ของหน่วยไคโตซานที่มีอยู่ในสายโพลิเมอร์ของไคติน-ไคโตซาน เช่น %DD 80 หมายถึงสายโพลิเมอร์ไคติน-ไคโตซานนี้มีหน่วยที่เป็นไคโตซานเป็นสัดส่วน 80 ในทั้งหมด (สุวบุญ, 2544)



1. สูตรโครงสร้างทางเคมีของไคติน ($C_8H_{13}NO_5$)



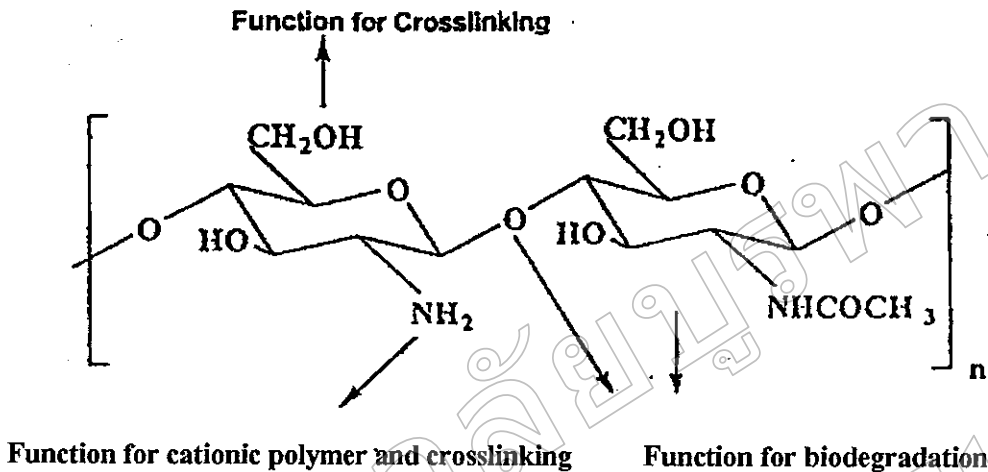
2. สูตรโครงสร้างทางเคมีของอนุพันธ์ไคโตซาน ($C_6H_{11}NO_4$)

ภาพที่ 19 โครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซาน (ลิลา เรื่องเป็น, 2544)

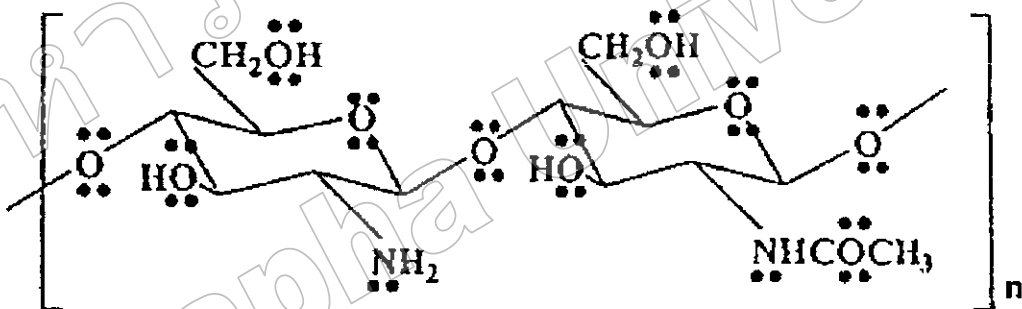
ไคโตซานเป็นโพลิเมอร์แบบเส้นตรง ไม่ละลายน้ำ ค้างและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีพีเอชน้อยกว่า 6 กรดอะซีติกและกรดฟอร์มิกเป็นกรดที่นิยมใช้ในการละลายเนื่องจากสามารถสร้างพันธะไฮออนกับไอออนลบที่แตกตัวอยู่ในกรด (สุวบุญ, 2544) นอกจากนี้กรดทั้งสองประเภทยังไม่ทำลายโครงสร้างของไคโตซาน หากรู้ได้ง่ายและราคาถูก แต่การเตรียมไคโตซานที่ดิวีซีลเลชัน 45% alkali ที่ 60 นาที

ละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1% พีเอช 1.0 เป็นการเตรียมที่ดีที่สุดเพราะไม่มีการรบกวนด้วยสารอินทรีย์เลย (Chihpin et al., 2000)

ตามปกติไคโตซานเป็นสารที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง เช่น ไคโตซานที่สกัดจากกระดองปู (crab shell) เป็นสารช่วยในการดูดซึม (biosorbent) ที่ดีสำหรับการกำจัดโลหะหนักพวกแคดเมียมและคอปเปอร์ โดยมีประสิทธิภาพดีกว่าเรซิน ซีโอไลท์และผงคาร์บอนตามลำดับ (An, Park, & Kim, 2001) นอกจากนี้สารดูดซับที่มีกลุ่มคาร์บอกซิเลตจะมีความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ปรอทและแคดเมียมได้ดีอีกด้วย (Shubha, Raji & Anirudhan, 2000) หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของไคโตซานคือ หมู่อะมิโนที่ตำแหน่ง C-2 และหมู่ไฮดรอกซิลที่ตำแหน่ง C-3 (secondary alcohol) และ C-6 (primary alcohol) โดยที่หมู่ไฮดรอกซิลจะสามารถพบได้ทั้งในหน่วยย่อยของไคโตซานและหน่วยย่อยของไคติน ดังภาพที่ 20 ซึ่งสมบัติพิเศษของไคโตซานจากหมู่อะมิโนและหมู่ไฮดรอกซิล คือ หมู่อะมิโนในมุมมองของอะตอมไนโตรเจนซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวประกอบอยู่ ดังภาพที่ 21 การที่อะตอมของไนโตรเจนมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวนี้ ทำให้ไคโตซานสามารถที่จะสร้างพันธะกับไอออนกับโลหะโดยเฉพาะโลหะหมู่หนึ่ง, สอง และยังรวมถึงโลหะทรานซิชัน ซึ่ง Muzzarelli (1974) ได้พิสูจน์ว่าไอออนของโลหะถูกดูดซับเข้าสู่โมเลกุลของไคโตซาน โดยการสังเคราะห์เซลลูโลสที่หมู่อะมิโนเสริมในโมเลกุลในระดับต่าง ๆ กัน (diethylaminohydroxypropyl cellulose) และพบว่าปริมาณหมู่อะมิโนที่มากขึ้น ทำให้เกิดการดูดซับของไอออนได้มากขึ้น จึงทำให้ไคโตซานที่มีปริมาณหมู่อะมิโนมากจะมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้มาก (ภาวนันท์, อสิรา เพ็ญฟูชาติ, และก้องเกียรติ คงสุวรรณ, 2543) (Xiaoqiao et al., 1999) จากพื้นฐานนี้ Muzzarelli จึงได้เสนอการประยุกต์การใช้งานไคโตซานในรูปแบบต่าง ๆ กัน เช่น ในรูปแบบผง หรือเรซินใช้เร่งการตกตะกอนของโลหะในการบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ยังมีผู้ศึกษาถึงการทำให้ Montmorillonite ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ตกตะกอนได้ดีโดยไคโตซาน นำไปสู่การใช้ไคโตซานเป็นสารเร่งการตกตะกอนของสารอนินทรีย์ ดิน และโคลน และยังสามารถใช้ไคโตซานในการเคลื่อนย้ายโลหะหนักออกจากสัณฐานด้วยการทำระบบคอลัมน์และรีเวอร์ออสโมซิส (Yang, 1984)



ภาพที่ 20 กลไกโดยรวมของหมู่เคมีในหน่วยไคติน-ไคโตซาน (สุวนัญ จิราญชัย, 2544)



ภาพที่ 21 อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวโดยรวมของหน่วยไคติน-ไคโตซาน (สุวนัญ จิราญชัย, 2544)

หมู่อะมิโนในมุมมองของหมู่ที่สามารถทำให้ไคโตซานเป็นโพลิเมอร์ที่มีประจุบวก (cationic polymer) เมื่อไคโตซานถูกละลายในสารละลายกรดจำพวกกรดอะซิติกหรือกรดคลอริก หมู่อะมิโนในสายโซ่โมเลกุลจะรับโปรตอน แล้วอยู่ในรูป $-NH_3^+$ การที่มีหมู่อะมิโนจำนวนมากจึงสามารถแตกตัวเป็นประจุบวกและจับกับสารที่มีประจุลบได้ แต่ก็ยังมีความสามารถพิเศษในการจับตัวกับสารที่มีประจุทั้งลบและบวกด้วย (สุวนัญ จิราญชัย, 2544) ไคโตซานในรูปของโพลิเมอร์ประจุบวกนี้จึงสามารถที่จะสร้างพันธะไฮโดรเจนและก่อตัวเป็นชั้นบาง ๆ ของไคโตซานได้ติดบนผิวของเซลล์ต่าง ๆ เนื่องจากเซลล์หรือเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่จะเป็นโพลิเมอร์ที่มีประจุลบอยู่ เช่น โปรตีน กรดนิวคลีอิก การทำปฏิกิริยาโดยไคโตซานเริ่มแรกจะมีการดูดซึมประจุบวกของกรด

อินทรีย์จากไคโดซานโดยตรงและจะมีการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เกิดขึ้นภายหลัง (Ivo, Illia & Milka, 2000)

เนื่องจากไคโดซานมีคุณสมบัติเป็นโพลิเมอร์ประจุบวกและมีน้ำหนักโมเลกุลสูงอยู่ในช่วง 1×10^5 ถึง 1.2×10^6 มีผลทำให้เป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอนที่ดี เพราะเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคความขุ่นที่แข็งแรงและทนทานต่อแรงผลัก ประสิทธิภาพของการเกิดฟล็อกโดยไคโดซานจะมีการรวมตัวเป็นฟล็อกเร็วที่ความเข้มข้นของตะกอนสูง รวมทั้งได้ฟล็อกขนาดใหญ่และตกตะกอนได้เร็ว (Ravi & Sivasankara Pillai, 2001) จึงนิยมใช้เป็นสารสร้างตะกอนและสารช่วยสร้างตะกอนในการบำบัดน้ำเสีย เช่น ใช้ไคโดซานที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และใช้เวลาสัมผัส 30 นาที สามารถทำให้ค่าซีโอดีของน้ำทิ้งจากโรงต้มกลั่นบริสุทรีขึ้นที่ค่าซีโอดี 2800 มก./ล. (Ivo et al., 2000) , ในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอาหารทะเลด้วยไคโดซาน 150 มก./ล. ที่พีเอช 6.0 สามารถลดสารแขวนลอยทั้งหมด, ความขุ่นและซีโอดีได้ 97%, 83% และ 45% ตามลำดับ (No, 1987) , การบำบัดน้ำทิ้งรวมจากกระบวนการผลิตสัตว์ปีกด้วยไคโดซาน พบว่าที่ความเข้มข้น 5-10 มก./ล. สามารถลดตะกอนได้ถึง 74-94 % และความขุ่นจาก 140 มาเป็น 10 FTU แต่ค่าซีโอดีลดเพียง 13 % นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นและสารแขวนลอยได้ดีกว่าโพลิเมอร์สังเคราะห์ตัวอื่น ๆ และระบบเป่าฟองอากาศจะกำจัดความเข้มข้นของไขมันในตะกอนได้มากกว่าโปรตีน แต่ระบบทิ้งให้ตกตะกอนจะกำจัดโปรตีนได้ดีกว่า (Wayne et al., 1974) , สำหรับน้ำเสียจากโรงงานผักกระป๋องใช้ไคโดซาน 40 มก./ล. เพียงตัวเดียวให้ผลการกำจัดสารแขวนลอยได้ดีกว่าผสมกับอะลูมิเนียม ซึ่งไม่ทำให้ค่าตะกอนต่างไปจากเดิม (Wayne, 1975) , โรงงานผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับไข่ สามารถบำบัดน้ำเสียรวมด้วย 100-200 มก./ล. ไคโดซานและ 2-20 มก./ล. โพลิเมอร์ประจุลบ Betz 1100 โดยสามารถลดสารแขวนลอยได้ 70-90 % และซีโอดีได้ 55-75% (Bough, 1975) Manuela และ Patrick (1997) ได้นำไคโดซานซึ่งมีคุณสมบัติในการสร้างพันธะกับโมเลกุลประจุลบและทำให้ตกตะกอนนั้น มาใช้ในการเลือกตกตะกอนเปปไทด์ในเนยแข็ง พบว่าที่พีเอช 4.0 ไคโดซานสามารถเลือกตกตะกอนเปปไทด์ในเนยแข็งที่ละลายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ , สุวดีและปิยะบุตร (2542) ได้ทำการทดลองใช้สารไคโดซานตกตะกอนโปรตีนออกจากหางนมโดยเปรียบเทียบกับสารตกตะกอนตัวอื่น ๆ เช่น สารส้ม , ฟิเอซีและคาร์ราจีแนน โดยทดสอบในสภาพความเป็นกรดต่างต่าง ๆ กัน และด้วยปริมาณต่าง ๆ กันของตัวตกตะกอน พบว่าประสิทธิภาพของการใช้สารไคโดซานเป็นตัวตกตะกอนดีกว่าสารอื่น ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบ ซึ่งไคโดซานสามารถตกตะกอนแยกโปรตีนออกมาได้สูงสุดถึง 77.8% ที่ค่าพีเอช 7.0 และสามารถลดค่าความขุ่นของสารละลายลงได้ถึง 72.5% โดยใช้ปริมาณของสารไคโดซานน้อยกว่าสารตกตะกอนตัวอื่นทั้งหมด ,

วราภรณ์ ขจรไชยกุล (2541) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์ของไคโตซานในการดักจับตะกั่วในน้ำเสีย โดยศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้น และรูปแบบของไคโตซานที่ใช้เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการจับตะกั่วสูงสุด โดยใช้รูปแบบของสารละลายตะกั่วที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการในการทดลอง และนำผลที่ได้ไปทดลองใช้ดักจับตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าไคโตซานสามารถลดระดับตะกั่วในน้ำได้ มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการดักจับตะกั่วคือ 6.0 และ 7.0 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไคโตซานสูงขึ้นประสิทธิภาพในการดักจับตะกั่วจะสูงขึ้นด้วย และพบว่าไคโตซานผงมีประสิทธิภาพในการดักจับตะกั่วได้ดีกว่าสารละลายไคโตซาน และไคโตซานผงสามารถดักจับตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้น้อยกว่าน้ำเสียที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ อาจเป็นเพราะในน้ำเสียมีอิออนของโลหะอื่นๆ ที่สามารถแย่งจับกับไคโตซานได้ ไคโตซานยังใช้ตกตะกอนน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของสารอนินทรีย์ เช่น โรงงานน้ำยาปรับผ้านุ่ม โรงงานทำกระดาษและโรงงานสกัดเคมีจากถ่านกรวด เป็นต้น

ไคโตซานไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและไม่มีปัญหาเรื่องความเป็นพิษ (Dongshen & Hongxiao, 2001) ทั้งนี้เพราะสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ, ไม่มีพิษอันตรายต่อสุขภาพและไม่มีโพลิเมอร์สังเคราะห์ที่ก่อให้เกิดค้าง (Chihpin et al., 2000) นอกจากนี้ไคโตซานสามารถเปลี่ยนเป็นรูปสารประกอบโดยไลโซไซม์ในน้ำเหลืองมนุษย์ได้ (Nordtveit, 1996) ไคโตซานยังมีคุณสมบัติยับยั้งแบคทีเรียที่เป็นพิษและเป็นสาเหตุการเน่าเสียในอาหารได้ โดยให้จุ่มอาหารในไคโตซาน 1 และ 2% (w/v) (Gagne, 1994)

รูปแบบของไคโตซานที่ผลิตขึ้นมาจำหน่ายในขณะนี้มีสี่รูปแบบ ได้แก่ ไคโตซานที่เป็นเกล็ด หรือแผ่นบาง ๆ เล็ก ๆ (flake), ที่เป็นผงละเอียดคล้ายแป้ง (micromilled powder), ในรูปแบบสารละลายเป็นของเหลวหนืด (solutions) ซึ่งความเข้มข้นอาจจะแตกต่างกันไปตามความต้องการของผู้สั่งซื้อ และไคโตซานที่อยู่ในรูปเม็ด (bead) ขนาดประมาณ 300-500 ไมโครเมตร