



## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

อุตสาหกรรมผลิตเยื่อและกระดาษของประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ดังจะเห็นอย่างชัดเจนจากจำนวนโรงงานที่มีมากกว่า 90 แห่งในปัจจุบัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) ทั้งนี้เนื่องจากผู้ผลิตไทยมีความได้เปรียบผู้ผลิตต่างชาติทั้งทางด้านคุณภาพของสินค้าและภาพลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ที่ใช้วัตถุดิบจากป่าปลูก

อย่างไรก็ดีกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษเป็นกระบวนการที่ต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมากถึงประมาณ 40-60 ลูกบาศก์เมตรต่อตันกระดาษ และเชื่อกันว่าในอนาคตจะเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำสูงที่สุด จากปริมาณการใช้ที่มากดังกล่าวส่งผลให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการสูงด้วยเช่นกัน โดยในปัจจุบันอุตสาหกรรมกระดาษเป็นอุตสาหกรรมที่ปล่อยน้ำเสียออกมามากเป็นอันดับ 5 ของอุตสาหกรรมทั้งหมด ซึ่งน้ำเสียเหล่านี้จะมีสีเข้มเป็นที่น่ารังเกียจ และมีความเข้มข้นของสารมลพิษซึ่ง ได้แก่ ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ความเป็นกรด-เบส และค่าของแข็งแขวนลอยที่สูงเกินมาตรฐาน โดยสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษของแต่ละแห่งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของวัตถุดิบ ปริมาณการผลิต รวมถึงกระบวนการผลิตและสารเคมีที่ใช้

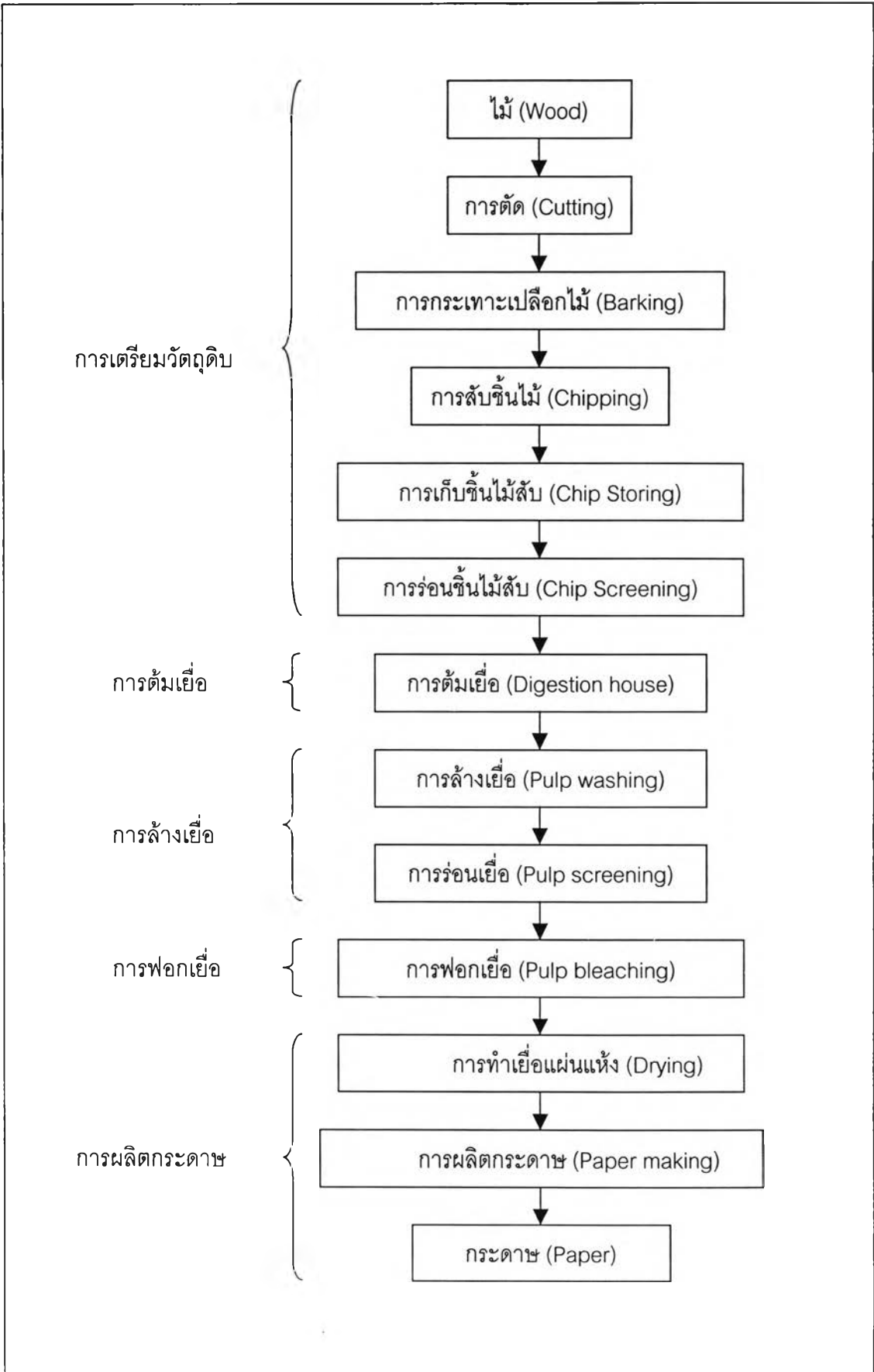
#### 2.1 กรรมวิธีการผลิตเยื่อและกระดาษ (James, 1980 และ Loras, 1980)

กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ สามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การผลิตเยื่อ และการผลิตกระดาษ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

##### 2.1.1 การผลิตเยื่อ (Pulping process)

การผลิตเยื่อคือกระบวนการแยกเส้นใย (Fiber) ซึ่งเกาะติดกันอยู่ในเนื้อไม้หรือพีชวัตถุดิบออกจากกัน การผลิตเยื่อมีอยู่หลายวิธี การที่จะเลือกวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับว่าเยื่อที่ผลิตได้นั้นจะนำไปใช้ผลิตกระดาษชนิดใดเป็นสำคัญ นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาผลิต โดยทั่วไปสมบัติของเยื่อกระดาษขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัตถุดิบเป็นสำคัญ เยื่อกระดาษเป็นวัตถุดิบประเภทเส้นใย (Fibrous Raw Materials) การจำแนกเยื่อสามารถทำได้ 2 ชนิดได้แก่

- การจำแนกตามชนิดของวัตถุดิบ
- ไม้ยืนต้น แบ่งตามลักษณะของการใช้เส้นใยออกเป็น 2 ประเภท คือ ไม้สน (Soft Wood) หรือไม้เนื้ออ่อน และไม้ใบกว้าง (Hard Wood) หรือไม้เนื้อแข็ง



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

- พืชล้มลุกหรือพืชปลูกหมุนเวียนเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตกระดาษชนิดพิเศษ โดยทั่วไปแบ่งเป็น 3 แหล่ง คือ ผลิตผลพลอยได้จากการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย พืชล้มลุกขึ้นตามธรรมชาติ เช่น ไม้ไผ่ หญ้าขจรจบ อ้อ กก และพืชหมุนเวียนในรอบปี เช่น เส้นใยจากใบปศุนนารายณ์ ใบสับปะรด เส้นใยจากเปลือกและลำต้น เช่น ปอแก้ว ปอกระเจา เส้นใยจากฝ้าย เช่น เศษผ้าฝ้าย

- การจำแนกตามความยาวของเส้นใย จะแบ่งได้เป็น

- เยื่อใยยาว (Long Fiber) ได้มาจากจำพวก ไม้สน มีความยาวประมาณ 3-5 มิลลิเมตร
- เยื่อใยสั้น (Short Fiber) ได้มาจากจำพวก ไม้ใบกว้างและไม้ล้มลุกมีความยาวประมาณ 1.5 มิลลิเมตร

ขั้นตอนการผลิตเยื่อสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การเตรียมวัตถุดิบ การต้มเยื่อ การล้างเยื่อ และการฟอกเยื่อ

- การเตรียมวัตถุดิบ (Raw material preparation)

วัตถุดิบหลักในการผลิตกระดาษ คือ เซลลูโลสซึ่งเป็นเส้นใยที่ได้มาจากไม้ยืนต้นประเภทไม้เนื้ออ่อน เช่น ต้นสน ยูคาลิปตัส หรือไม้เนื้อแข็ง รวมทั้งพืชอื่นๆ เช่น ฝ้าย ฟางข้าว มาตัด บดหรือสับให้มีขนาดตามความต้องการ โดยเฉลี่ยแล้วเส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนจะมีความยาวประมาณ 3 มิลลิเมตร และเส้นใยที่มาจากไม้เนื้อแข็งจะมีความยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร ความแตกต่างของโครงสร้างและความยาวของเส้นใยจะส่งผลต่อคุณสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้ เช่น ความเหนียว ความขาว การยืดหรือการหดตัวของกระดาษ เป็นต้น

- การต้มเยื่อ (Digestion house)

เป็นการใช้ความร้อนและโซดาไฟ (NaOH) เพื่อทำการละลายลิกนินและส่วนประกอบของต้นไม้ที่ไม่ใช่เซลลูโลสออกจากเซลลูโลส ซึ่งลิกนินในพืชจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานเส้นใยเซลลูโลสของพืชเข้าด้วยกัน กระบวนการต้มเยื่อเริ่มจากชิ้นไม้สับที่ถูกลำเลียงเข้าสู่หม้อต้มเยื่อภายในหม้อต้มเยื่อนี้ชิ้นไม้สับถูกต้มด้วยไอน้ำ และสารเคมีอย่างต่อเนื่อง ภายใต้อุณหภูมิประมาณ 165-175 องศาเซลเซียสและความดันประมาณ 7-8 บาร์ ใช้เวลาในการต้ม 2-5 ชั่วโมง หลังจากผ่านการต้มแล้วชิ้นไม้สับกลายเป็นเยื่อซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำดำเจือจาง (Black liquor) จากนั้นน้ำเยื่อถูกส่งเข้าถังลดความดัน (Blow tank) เพื่อลดความดันลงให้เท่ากับบรรยากาศ จาก

นั้นร่อนผ่านเข้าเครื่องกรองเพื่อแยกเอาสิ่งเจือปนออก เช่น ข้อที่ต้มไม่สุก เส้น หิน ทราย และเศษพลาสติก

- การล้างเยื่อ (Pulp washing)

กระบวนการล้างเยื่อที่ผ่านการต้มแล้วด้วยน้ำ เพื่อแยกเยื่อออกสิ่งสกปรกและสิ่งเจือปนออกจากเยื่อกระดาษ เยื่อที่ผ่านการแยกสิ่งสกปรกออกแล้วถูกล้างให้สะอาดด้วยระบบการใช้น้ำหมุนเวียนแบบย้อนกลับ (Counter Current) น้ำที่ได้จากการล้างเยื่อซึ่งมีสารเคมีปนอยู่ก็ถูกส่งไปเข้าระบบการนำน้ำยาเคมีกลับคืนต่อไป

- การฟอกเยื่อ (Pulp bleaching)

เป็นการทำให้เยื่อมีสีขาวเหมาะกับการใช้เป็นกระดาษเพื่อการสื่อสารต่างๆ แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การฟอกเยื่อเพื่อขจัดลิกนินออก (Removing lignin) และการฟอกเยื่อเพื่อเปลี่ยนสีของลิกนินให้อยู่ในรูปไม่มีสี (Bleaching lignin) โดยการฟอกเยื่อชนิดหลังนี้เยื่อเคมีจะถูกฟอกโดยใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับลิกนินแล้วกำจัดลิกนินออก การฟอกแบบนี้มีหลายขั้นตอน โดยทั่วไปจะมีตั้งแต่ 3-6 ขั้นตอน ดังตารางที่ 2.1 เยื่อที่ได้มีความขาวสว่างสูงประมาณร้อยละ 80-95 เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดแบบ Elrepho ขั้นตอนในการฟอกจะมีชื่อเรียกตามสารเคมีที่ใช้ฟอก และขั้นตอนการฟอกจะเรียงลำดับตัวอักษรที่ใช้เรียก เช่น การฟอกแบบ CEDED

กรรมวิธีในการผลิตเยื่อ กรรมวิธีในการผลิตเยื่อกระดาษสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ (James, 1980)

- กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล (Mechanical Pulping)

เป็นการใช้พลังงานกลในการแยกเส้นใยออกจากกัน กระบวนการนี้เน้นที่การบด (Grinding) โดยการนำไม้มาบดกับหินโดยตรง เส้นใยจะถูกหินบดจนหลุดออกมา ความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้ลิกนินอ่อนตัว เส้นใยจึงแยกออกจากกันง่าย เยื่อไม้บดที่ได้จะมีลักษณะเป็นไม้แท้อยู่มากและมีสมบัติไม่ดีเพราะไม่ใช่เยื่อเซลลูโลสบริสุทธิ์ เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้มีปริมาณสูงที่สุดคือร้อยละ 85-95 และเยื่อที่ได้จะมีความทึบแสงสูง ราคาถูก จึงนิยมใช้ทำกระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษอนามัยบางชนิด และกระดาษกันสำหรับบรรจุสิ่งของกันแตกภายในกล่อง

- กระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมี (Semi - Chemical Pulping)

กระบวนการนี้จะคล้ายกับกระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลแต่มีการใช้สารเคมีร่วมด้วยและมีการใช้พลังงานในการบดเยื่อน้อยกว่า ไม้ดิบจะถูกต้มด้วยสารเคมีโดยสภาพกึ่งดิบกึ่งสุก แล้ว

จึงนำไปบำบัดด้วยเครื่องบดเยื่อ คุณภาพของเยื่อที่ได้อยู่ระหว่างเยื่อเชิงกลและเยื่อเคมี เยื่อกระดาษที่ผลิตด้วยกระบวนการนี้นิยมใช้ทำกระดาษลูกฟูก

ตารางที่ 2.1 ขั้นตอนการฟอกเยื่อ (Bleaching sequences)

สารเคมี	สัญลักษณ์	เรียกชื่อขั้นตอนการฟอก
คลอรีน (Chlorine)	C	ขั้นคลอรีนชัน (Chlorination stage)
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)	E	ขั้นแเอ็กแทรกชัน (Extraction stage)
แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Calciumhypochlorite)	H	ขั้นไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite stage)
คลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide)	D	ขั้นคลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide stage)
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)	P	ขั้นเปอร์ออกไซด์ (Peroxide stage)
ออกซิเจน (Oxygen)	O	ขั้นออกซิเจน (Oxygen stage)
โอโซน (Ozone)	Z	ขั้นโอโซน (Ozone stage)
แอซิด (Acid)	A	ขั้นแอซิด (Acid stage)

- กระบวนการผลิตเยื่อเคมี (Chemical Pulping)

กระบวนการนี้จะให้เยื่อที่มีปริมาณลิกนินเจือปนอยู่น้อยมากจึงเหมาะสำหรับทำกระดาษคุณภาพดีหรือมีความเหนียว แต่เยื่อที่ได้จะมีปริมาณน้อยกว่ากระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ตามสารเคมีที่ใช้ดังนี้

- กระบวนการซัลไฟต์ (Sulphite process) เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการทำเยื่อจากพันธุ์ไม้เนื้อแข็ง และพันธุ์ไม้จำพวกหญ้า น้ำยาต้มเยื่อที่ใช้มีฤทธิ์เป็นกรดซึ่งมักใช้กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid,  $H_2SO_4$ ) และสารประกอบไบซัลไฟต์ เยื่อที่ได้เรียกว่าเยื่อซัลไฟต์ มีสมบัติเป็นกรด เส้นใยที่ได้มีความแข็งแรงต่ำ ใช้ได้กับไม้บางชนิดเท่านั้น แต่ข้อดีคือน้ำยาต้มเยื่อมีราคาถูก

กระบวนการซัลไฟด์ค้นพบครั้งแรกโดย Tilghman ชาวสหรัฐอเมริกา ซึ่งพบว่าเยื่อจะมีสีขาวขึ้นเมื่อนำเยื่อมาต้มกับกรดซัลเฟอร์ริกและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิและความดันสูง แต่เครื่องมือที่ Tilghman ประดิษฐ์ขึ้นไม่สามารถทนต่อการกัดกร่อนของกระบวนการได้ จึงไม่ประสบความสำเร็จในการผลิตเยื่อด้วยวิธีซัลไฟด์เพื่อทำการการค้า

เหตุผลหลักที่ทำให้กระบวนการซัลไฟด์เติบโตทางการค้าอย่างรวดเร็วเพราะให้ผลผลิตสูง ค่าใช้จ่ายเรื่องสารเคมีที่ใช้ต้มเยื่อต่ำกว่ากระบวนการแอลคาไลน์ ให้เส้นใยที่มีความขาวสูงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งที่ยังไม่ได้ฟอกเยื่อ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการซัลไฟด์ก็มีข้อเสียที่ไม่สามารถแก้ไขได้ 2 ประการคือ สามารถผลิตเยื่อได้จากไม้เพียงไม่กี่ชนิด และเส้นใยที่ผลิตได้ไม่แข็งแรงเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการแอลคาไลน์

- กระบวนการแอลคาไลน์ (Alkaline process) กระบวนการนี้แบ่งย่อยได้เป็น 2 กระบวนการ คือ

*กระบวนการโซดา (Soda process)* ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวทำละลายสารลิกนินในการต้มเยื่อ กระบวนการโซดาใช้สำหรับการทำเยื่อแบบง่ายๆ เช่น ฟางข้าวและไม้เนื้อแข็งบางชนิด ซึ่งบางครั้งอาจเติม Anthraquinone เพื่อลดการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต เยื่อกระดาษที่ได้เมื่อนำไปฟอกขาวแล้วจะเหมาะสำหรับทำกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษจดหมาย และกระดาษที่ต้องการความนุ่ม

สารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยาในกระบวนการโซดามีองค์ประกอบหลัก คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งโซเดียมคาร์บอเนตที่มีในกระบวนการนี้มาจากการทำปฏิกิริยากับปูนขาวเพื่อจะผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในสมการ



ที่จุดสมดุลปฏิกิริยาจะเกิดไปทางขวาเพราะความสามารถในการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตต่ำ อย่างไรก็ตามปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก็มีข้อจำกัดเรื่องความสามารถการละลายและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นก็ไม่สมบูรณ์พบว่า 80-85 เปอร์เซ็นต์ ของโซเดียมเกิดในรูปไฮดรอกไซด์ ส่วนอีก 15-20 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดในรูปคาร์บอเนต

*กระบวนการแบบคราฟท์ (Kraft process)* หรือเรียกว่า กระบวนการแบบซัลเฟต (Sulfate process) เป็นกระบวนการที่พัฒนาต่อมาจากกระบวนการโซดาโดยใช้โซเดียม

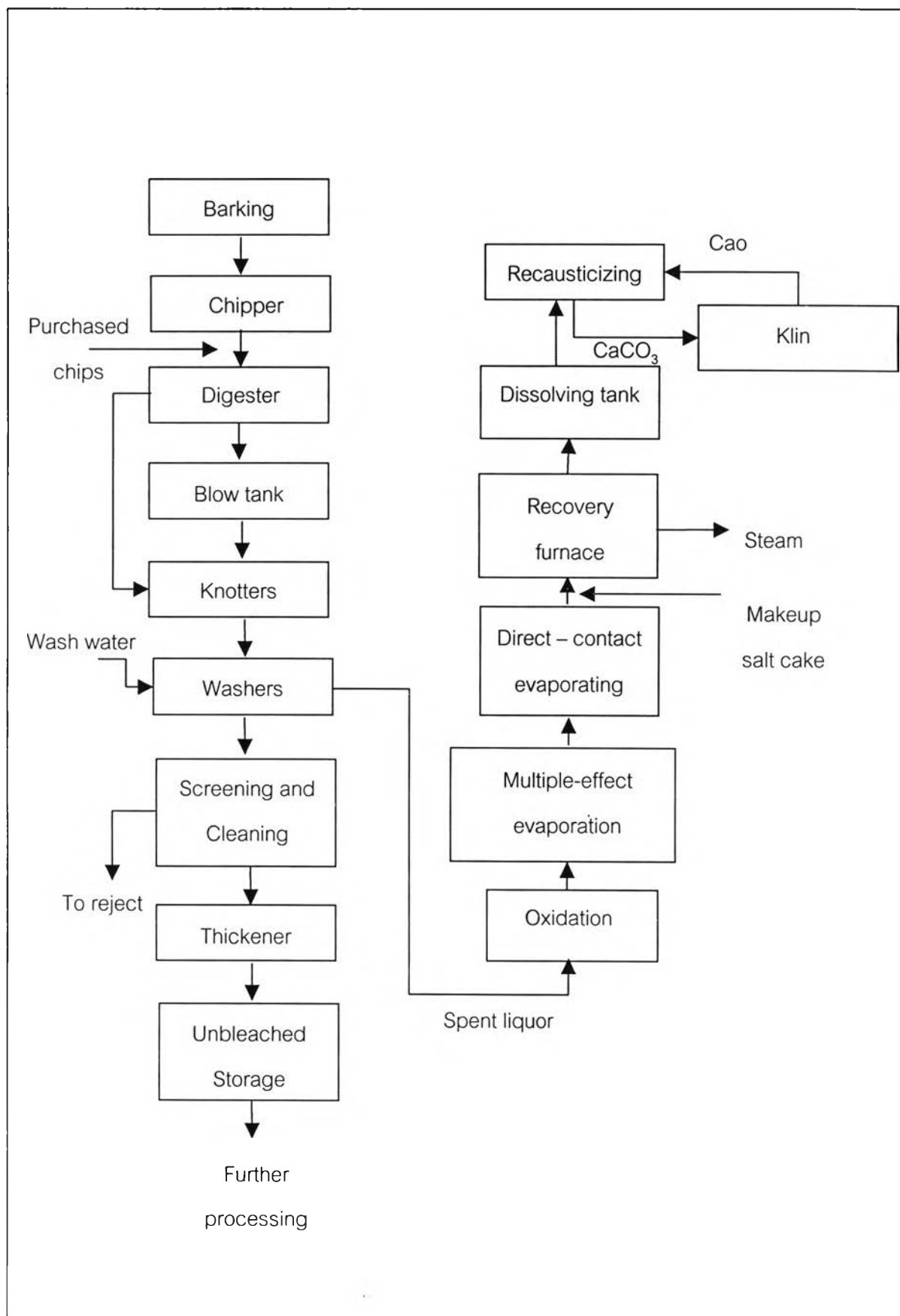
ไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีความแข็งแรงกว่ากระบวนการแบบโซดา เยื่อที่ได้ชนิดที่ไม่ผ่านการฟอกสีมักใช้ทำถุงกระดาษ กระดาษห่อของ และกระดาษผิวกล่อง ส่วนเยื่อที่ใช้แบบผ่านการฟอกขาว ใช้ทำกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษหนังสือคุณภาพดี

กระบวนการแบบคราฟท์ถูกค้นพบโดย Dahl นักเคมีชาวเยอรมันในปี ค.ศ. 1879 ซึ่ง Dahl พบว่ากระบวนการโซดาจะเกิดโซเดียมซัลเฟตแทนที่จะเกิดโซเดียมคาร์บอเนต จากนั้นซัลเฟตจะถูกรีดิวซ์เป็นซัลไฟด์ระหว่างการเผาสารเคมีที่เหลืออยู่ (Spent liquor) การเรียกชื่อกระบวนการว่า กระบวนการซัลเฟตทำให้เกิดการเข้าใจผิดคิดว่าซัลเฟตเป็นสารเคมีหลักที่เข้าทำปฏิกิริยา ทั้งที่แท้จริงแล้วเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นจึงเรียกกระบวนการนี้ใหม่ว่า กระบวนการคราฟท์

กระบวนการแบบคราฟท์มีข้อได้เปรียบกระบวนการซัลไฟด์ดังต่อไปนี้

1. สามารถใช้ได้กับไม้หลากหลายชนิด
2. ยอมให้มีเปลือกไม้ปนมาในเนื้อไม้ได้ในปริมาณมาก
3. ใช้เวลาในการต้มเยื่อสั้น
4. ปัญหาที่เกิดจากแก่นไม้มีน้อย
5. เยื่อมีความแข็งแรงดีเยี่ยม
6. กระบวนการผลิตสารเคมีกลับคืนเป็นที่ยอมรับ
7. ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นเป็นสารมีราคาซึ่งอยู่ในรูป เทอร์เพนทิน (Turpentine) และ ทอลออยล์ (Tall oil)

รูปที่ 2.2 แสดงแผนผังกระบวนการคราฟท์ จะเห็นว่าการใส่ชิ้นไม้และสารต้มเยื่อเข้าไปในหม้อต้มเยื่อสามารถทำได้ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบกะ โดยต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 160-180 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนนี้สามารถกำจัดลิกนินออกได้ 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อต้มเยื่อเสร็จแล้วชิ้นไม้และสารเคมีถูกปล่อยสู่ถังเพื่อล้างเยื่อ สำหรับไม้ชิ้นใหญ่ที่ไม่สามารถต้มได้จะถูกกรองด้วยตะแกรงแล้วนำกลับเข้าหม้อต้มอีกครั้ง การล้างเยื่อใช้การล้างแบบสวนทาง (Countercurrent) สารละลายที่ได้จากการกรองจะผ่านเข้าสู่หอระเหยและผ่านเตาเผาเพื่อให้ได้องค์ประกอบของแข็งร้อยละ 60 หรือมากกว่า และเพื่อลดปัญหาด้านกลิ่นที่เกิดจากการปนเปื้อนของไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงต้องเติมสารบางตัวเพื่อออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้อยู่ในรูปอื่นก่อน หรือเติมโซเดียมซัลเฟต ลงไปแล้วนำไปเผาในเตาเพื่อนำสารกลับคืน การเผาทำให้เกิดโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมซัลไฟด์ซึ่งเกาะติดอยู่ที่เตาเผาและก่อให้เกิดกลิ่นเหม็น



รูป 2.2 กระบวนการแบบกราฟท์ (James, 1980)



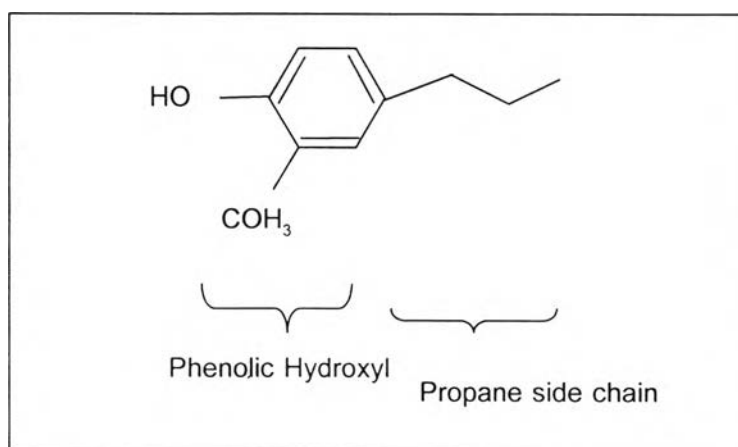
### 2.1.2 การผลิตกระดาษ (Paper making process)

ขั้นตอนนี้จะขั้นตอนที่เยื่อถูกส่งเข้าเครื่องจักรผลิตกระดาษเพื่อทำเป็นแผ่นกระดาษที่ยาวต่อเนื่องกัน ซึ่งเรียกว่า เว็บบเปเปอร์ (Web paper) เครื่องจักรที่ใช้ผลิตกระดาษมีหลายแบบ ส่วนใหญ่เป็นแบบโฟร์ดรีเนียร์ (Fourdrinier) และแบบทรงกระบอก (Cylinder) เครื่องจักรผลิตกระดาษทุกแบบจะมีส่วนประกอบต่างๆ เพื่อทำหน้าที่หลัก 3 ประการ คือ

- การแยกน้ำออก (Draining) ทำหน้าที่เป็นตะแกรงรองรับน้ำเยื่อ น้ำจะลอดผ่านตะแกรง ทำให้เยื่อก่อตัวเป็นแผ่นเปียก (Wet sheet forming)
- การกดน้ำออก (Dressing) ทำหน้าที่กดหรือบีบน้ำออกจากแผ่นเปียก ทำให้เกิดการยึดติดแน่นระหว่างเส้นใยภายในกระดาษ (Consolidation of wet)
- การอบกระดาษ (Drying) แผ่นกระดาษจะถูกอบให้แห้งเพื่อไล่น้ำออกจนกระดาษแห้งเหลือความชื้นประมาณร้อยละ 4-6

### 2.2 ลิกนิน (Lignin) (Hammel,1995)

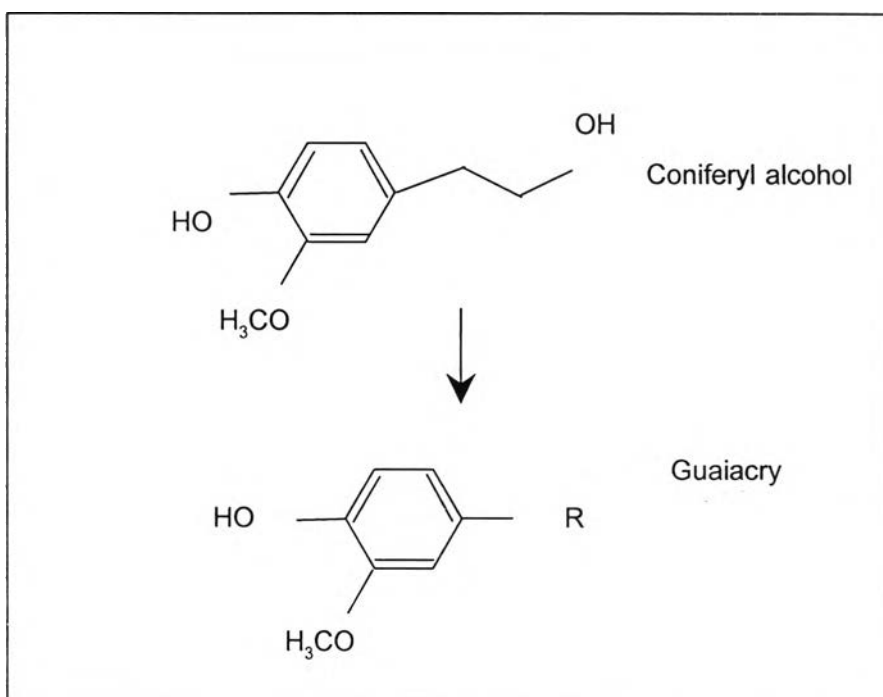
สารลิกนินเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในเนื้อไม้ พบมากในผนังเซลล์ของพืชที่มีระบบลำเลียงจริง โดยทั่วไปในเนื้อไม้จะประกอบไปด้วย เซลลูโลสร้อยละ 30-40 ลิกนินร้อยละ 18-30 และเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 30 โดยลิกนินจะรวมกันอยู่หนาแน่นระหว่างและภายในของชั้นนอกของเส้นใย ลิกนินทำหน้าที่เป็นตัวให้ความแข็งแรงของโครงสร้างเนื้อไม้ โดยการทำให้เส้นใยแข็งตึงและเกาะตัวกันแน่น ลิกนินเป็นสารประกอบจำพวกพอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมพลาสติกโดยธรรมชาติ โครงสร้างโมเลกุลส่วนใหญ่เป็นวงแหวนประกอบด้วย Phenylpropane unit ไม่มีโครงสร้างโมเลกุลที่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการรวมตัวของ Phenylpropane unit โครงสร้างของ phenylpropane unit มีสมบัติคือ ไม่ละลายน้ำ และมีความสามารถในการดูดซึ่มสูง โครงสร้างของ Phenylpropane unit แสดงดังรูป 2.3



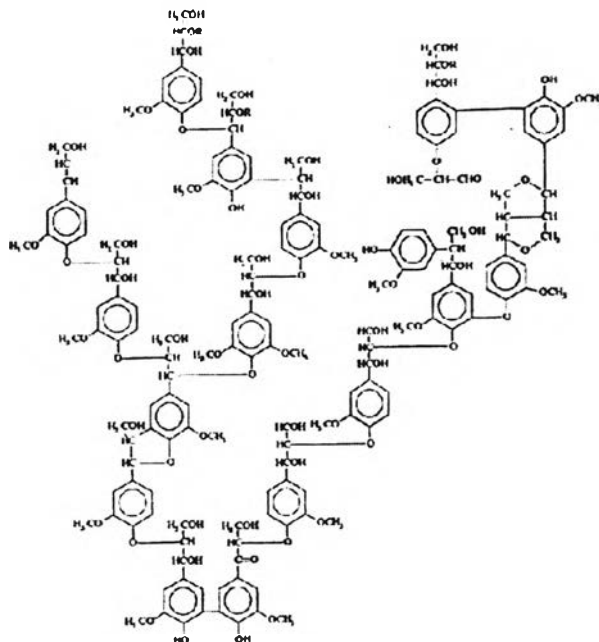
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ phenylpropane unit (Hammel,1995)

สารประกอบลิกนินสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ซึ่งแสดงในรูป 2.4 โดยพิจารณาจากสัดส่วนของสารตั้งต้น (Precursors) แต่ละชนิดที่ถูกนำมาสร้างได้แก่

- ลิกนินจากไม้เนื้อแข็ง มีสารตั้งต้นเป็น Coniferyl alcohol ประมาณร้อยละ 50-75 และ Sinapyl alcohol ประมาณร้อยละ 25-50 ซึ่งให้ Quaiacry unit และ Syringyl unit ตามลำดับโครงสร้างในพอลิเมอร์
- ลิกนินจากไม้เนื้ออ่อนมีสารตั้งต้นเป็น Coniferyl alcohol เพียงอย่างเดียว
- ลิกนินจากพืชล้มลุกมีสารตั้งต้นเป็น Coniferyl alcohol, Sinapyl alcohol และ Coumaryl alcohol ซึ่ง Coumaryl alcohol นี้ให้ *p*-hydroxyphenyl unit ในโครงสร้างของพอลิเมอร์



รูป 2.4 สารตั้งต้นของโครงสร้างลิกนิน



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน (Kirk,1988)

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของลิกนิน (Kirk,1988) ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ 3 มิติที่เป็น Phenylpropane unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอน (C-C) และพันธะอีเธอร์ (C-O-C) เนื่องจากความซับซ้อนของโครงสร้างโมเลกุลของลิกนินที่ประกอบไปด้วยพันธะระหว่างคาร์บอน-คาร์บอนอะตอม ซึ่งมีความต้านทานต่อสารเคมีและการย่อยสลายทางชีวภาพสูง ทำให้ลิกนินย่อยสลายได้ยากในธรรมชาติ ในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ ลิกนินจัดเป็นอุปสรรคสำคัญที่สุดที่ต้องกำจัดออกไป เพื่อให้เยื่อกระดาษที่ขาว สามารถนำไปผลิตกระดาษที่มีคุณภาพดีต่อไป ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษและการฟอกเยื่อกระดาษนั้น พันธะระหว่าง สายโซ่ของโพรเพน (Propane side chain) และวงแหวนเบนซีนถูกทำลายไปและเกิดเป็นพันธะใหม่ขึ้นเป็นสารอนุพันธ์ของลิกนินที่สามารถละลายน้ำได้ ชนิดของสารอนุพันธ์ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อ เช่น ในการฟอกเยื่อโดยใช้สารเคมีพวกคลอรีน เช่น คลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide) หรือสารประกอบคลอรีนชนิดอื่นๆ น้ำทิ้งจากการฟอกเยื่อนี้มีสารพวก คลอรีเนตโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated polycyclic aromatic hydrocarbon) ตัวอย่างคือ คลอรีเนตไดออกซิน (Chlorinated dioxin), คลอรีเนต ฟีนอล (Chlorinated phenol) ที่เกิดจากการออกซิชั่นลิกนินด้วยสารประกอบคลอรีน ทำให้น้ำทิ้งมีสีน้ำตาลเข้มและเป็นพิษด้วย สารอนุพันธ์ของลิกนินที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อแสดงดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 สารอนุพันธ์ของลิกนินจากกระบวนการผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อ (Kirk,1988)

กระบวนการผลิตเยื่อ/ฟอกเยื่อ	สารเคมี	สารอนุพันธ์ของลิกนิน
การผลิตเยื่อแบบโซดา	NaOH	Alkaline lignin
การผลิตเยื่อแบบคราฟท์	NaOH + Na <sub>2</sub> S	Kraft lignin (Thio – lignin, Sulfate lignin)
การผลิตเยื่อแบบซัลไฟด์	H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> + HSO <sub>3</sub>	Ligno - sulphonate
การฟอกเยื่อด้วยคลอรีน	Cl <sub>2</sub>	Chlorinated lignin

### 2.3 มลพิษจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

การผลิตเยื่อและกระดาษเป็นกระบวนการที่มีการใช้น้ำและสารเคมีเป็นจำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทั้งทางน้ำ ทางเสียง ทางอากาศ และกากของเสีย ในการผลิตเยื่อและกระดาษการปล่อยสารมลพิษสู่น้ำขึ้นอยู่กับกระบวนการและมาตรฐานในการผลิต ทุกขั้นตอนของการผลิตเยื่อและกระดาษจะมีสารอินทรีย์ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งเกิดขึ้นจากเส้นใยของวัตถุดิบ สารอินทรีย์จะมีผลต่อความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายของแหล่งน้ำที่รองรับ ซึ่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับลักษณะของแหล่งน้ำ สารมลพิษที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆดังนี้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

#### ● สารที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายและสลายตัวอย่างช้าๆ

โดยวัดในรูปของค่าบีโอดี ส่วนใหญ่ที่พบคือส่วนประกอบของไม้ที่ละลายน้ำได้ หรือส่วนประกอบที่เกิดจากกระบวนการทำเยื่อและการฟอก เช่น เฮมิเซลลูโลสที่มีโมเลกุลเล็ก เมทานอล กรดแอซิติค และกรดฟอร์มิก ในการย่อยสลายสารเหล่านี้ต้องใช้ออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved oxygen) ดังนั้นทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายในแหล่งน้ำลดลง อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ ส่วนสารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างช้าๆ ในน้ำทิ้งจากโรงงาน ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารลิกนิน และคาร์โบไฮเดรต ปริมาณสารเหล่านี้ จะวัดอยู่ในรูปของอัตราบีโอดีต่อซีโอดี อัตราส่วนที่ต่ำแสดงถึงปริมาณสารที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ช้ามีปริมาณสูง สารประกอบเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมีสีและลดการส่องผ่านของแสง จึงลดกิจกรรมทางชีววิทยาของสิ่งมีชีวิตในน้ำ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำดื่มได้ สำหรับการนำน้ำในแหล่งนั้นไปผลิตเป็นน้ำดื่ม

● สารประกอบที่มีสี (Colored compound)

สีของน้ำเสียเกิดจากสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ได้แก่ ลิกนิน ที่ออกมาจากวัตถุดิบโดยการต้มและการฟอกเยื่อด้วยวิธีทางเคมี ผลกระทบของสีคือความสามารถในการส่องผ่านของแสงในแหล่งน้ำลดลง ทำให้ลดผลผลิตในแหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำด้วย แหล่งของน้ำเสียที่มีลิกนินเจือปนอยู่ได้แก่

- น้ำทิ้งจากการย่อยเยื่อและล้างเยื่อ (Digester and water) น้ำทิ้งชนิดนี้จะเรียกว่า น้ำดำ (Black liquor) เพราะว่ามีลักษณะสีคล้ำดำหรือมีสีน้ำตาลเข้มมากซึ่งเกิดจาก (กลุ่มอะมอฟริก (Amophoric group) ของลิกนิน

- น้ำขาว (White water) เกิดขึ้นจากการแยกเยื่อ การทำความสะอาดเยื่อ และการทำเยื่อให้ชื้น (Screening, cleaning and thickening) น้ำจากแหล่งนี้มีปริมาณมาก ในกระบวนการผลิตเยื่อแบบคราฟท์ น้ำทิ้งส่วนใหญ่เป็นส่วนใหญ่ที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารแขวนลอยซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกเส้นใย

- น้ำทิ้งจากเครื่องล้างเยื่อในระบบฟอกเยื่อ (Bleach plant washer) น้ำทิ้งจากการฟอกเยื่อจะมีปริมาณสารอินทรีย์ประเภท สารประกอบคลอรีเนตอะโรมาติก (Chlorinated aromatic) อยู่มาก ซึ่งแหล่งที่ก่อให้เกิดสารอินทรีย์เหล่านี้ส่วนใหญ่มาจากขั้นตอนคลอรีเนชัน (Chlorination) และการสกัดด้วยสารแอลคาไลด์ (Alkaline extraction) น้ำทิ้งจากขั้นตอนทั้งสองนี้จะมีค่าซีไอดี ค่าบีไอดี และความเข้มข้นของสีสูงมาก

● สารที่เป็นพิษ (Toxic material)

สารประกอบที่มีพิษจากการปล่อยน้ำเสียออกจากโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ คือสารประกอบที่มาจากการฟอกเยื่อ ได้แก่ สารประกอบประเภทคลอรีน เช่น พอลิคลอรีเนตฟีนอล (Polychlorinated phenols) และ ไดออกซิน (Dioxin) ซึ่งเป็นสารชนิดหนึ่งที่มีผลข้างเคียงอันตรายที่สุด เนื่องจากการใช้สารดังกล่าวจะก่อให้เกิดสารประกอบ พอลิคลอรีเนต (Polychlorinated) ซึ่งมีความเป็นพิษและสามารถตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้หลายปี ทำให้เกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดการเป็นมะเร็งได้

● เกลืออนินทรีย์ (Inorganic salt)

เกลืออนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ในน้ำทิ้งส่วนใหญ่มาจากกระบวนการ ต้มเยื่อ (Cooking) และฟอกเยื่อ (Bleaching liquor) คือเกลือที่ประกอบไปด้วยไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งไม่ค่อยมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากนัก แต่จะเป็นเหมือนปุ๋ยในแหล่งน้ำซึ่งอาจทำให้เกิดการเจริญเติบโตที่มากเกินไปของพืชน้ำในแหล่งน้ำนั้น



ตารางที่ 2.3 มลภาวะทางน้ำที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษแบบกราฟท์

ขั้นตอน	มลพิษที่เกิดขึ้น
การเตรียมวัตถุดิบ	เศษดิน เปลือกไม้ และน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีและแข็งแขวนลอยสูง
การต้มเยื่อ	น้ำเสียที่เรียกว่าน้ำดำ ประกอบด้วยสารเคมี ลิกนิน เรซิน กรด ไซมันน์ สี บีโอดี ซีโอดี และสารจำพวกที่ระเหยได้ เช่น แอลกอฮอล์ ฟีนอลส์ แอซีโตน เมทานอล เป็นต้น
การล้างเยื่อ	น้ำเสียที่มีความเป็นกรด-เบส บีโอดี ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย และสีใน ปริมาณที่สูง
การฟอกเยื่อ	น้ำเสียที่มีส่วนประกอบของลิกนิน คาร์โบไฮเดรต สี ซีโอดี สารประกอบ อินทรีย์และอนินทรีย์ของคลอรีน สารระเหยได้ เช่น แอซีโตน เมทิลคลอไรด์ คาร์บอนไดซัลไฟด์ คลอโรฟอร์ม เป็นต้น
การผลิตกระดาษ	น้ำเสียที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ สอนินทรีย์ ซีโอดี แอซีโตน และ เศษเยื่อ

#### ● ของแข็งในน้ำทิ้ง

ของแข็งในน้ำทิ้งประกอบไปด้วยไฟเบอร์ต่างๆ เปลือกไม้ เศษไม้ และเกลืออนินทรีย์ เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จะวัดอยู่ในรูปสารแขวนลอย (Suspended solid)

ตารางที่ 2.3 แสดงสารมลพิษในน้ำเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการผลิตเยื่อ และกระดาษ พบว่าเกือบทุกขั้นตอนการผลิตจะมีการปลดปล่อยน้ำเสียออกมา

#### 2.4 วิธีการจัดการน้ำเสีย

น้ำเสียมักประกอบด้วยสิ่งเจือปนหรือความสกปรกหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา น้ำเสีย จากบ้านเรือนอาจมีเศษวัสดุขนาดใหญ่ กรวดทราย ไซมันต์ลวดจนสารอินทรีย์ในรูปของ สารแขวนลอยและสารอนินทรีย์ปะปนอยู่ ขณะที่น้ำเสียอุตสาหกรรมจะมีสิ่งปนเปื้อนหลากหลาย ขึ้นอยู่กับประเภทของโรงงาน วัตถุประสงค์ตลอดจนกระบวนการผลิตที่ใช้ การจัดการน้ำเสียเหล่านี้ส่วนใหญ่ มักต้องการวิธีการจัดการมากกว่าหนึ่งอย่าง เช่น

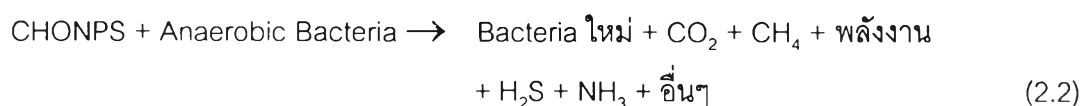
#### 2.4.1 กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment Process) (Song, 2000)

วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยแรงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย โดยมากจะใช้เป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การตกตะกอน (Sedimentation) การทำให้ลอย (Flotation) การกรอง (Filtration) เป็นต้น และมีการบำบัดโดยวิธีทางกายภาพอีกขั้นตอนหนึ่ง เพื่อทำการแยกตะกอนออกจากน้ำที่ผ่านขั้นตอนการบำบัดทางชีวภาพ อย่างไรก็ตามการบำบัดทางกายภาพเป็นเพียงขั้นเริ่มต้นในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถลดความเข้มข้นของสารมลพิษได้ในระดับหนึ่ง และน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดนี้จะต้องมีการบำบัดขั้นตอนต่อไปอีกจนกระทั่งได้น้ำทิ้งที่มีสมบัติผ่านมาตรฐาน

#### 2.4.2 กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological Process) (Ahn, 1996; Vijayaraghvan, 1997)

การบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมีวัตถุประสงค์เพื่อขจัดสารอินทรีย์ คือ บีโอดีและซีโอดีเป็นหลัก นอกจากนี้ยังสามารถขจัดสารอนินทรีย์บางชนิด เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ออกจากน้ำเสีย โดยอาศัยจุลินทรีย์ซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติจะเปลี่ยนสารอินทรีย์หรือสิ่งสกปรกให้อยู่ในรูปของแก๊ส และของแข็ง (เซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์) เพื่อแยกออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการทางกายภาพในขั้นตอนต่อไป ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์หรือความสกปรกในน้ำลดลงหรือหมดไป ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพจะเป็นการควบคุมปริมาณน้ำเสียให้สัมพันธ์กับปริมาณจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายให้เหมาะสม การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบ่งตามลักษณะการใช้ออกซิเจนได้เป็น 2 ประเภทหลัก

- การบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Treatment Process) เป็นการอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดที่ดำรงชีพโดยไม่ใช้แก๊สออกซิเจน ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ (CHONPS นิยมเรียก บีโอดี หรือ ซีโอดี) ให้เปลี่ยนเป็นเซลล์ใหม่และแก๊สบางชนิด ส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และ มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) โดยมี ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) และอื่นๆ ปะปนมาด้วย โดยมีสารประกอบอินทรีย์บางชนิดเกิดขึ้นมาด้วย เช่น แอมโมเนีย เป็นต้น ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



- การบำบัดแบบใช้อากาศ (Aerobic Treatment Process) เป็นการอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดที่ดำรงชีพโดยใช้แก๊สออกซิเจน โดยจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็น

เซลล์ใหม่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบบางชนิด เช่น แอมโมเนีย หรือไนเตรท ฟอสเฟต ซัลเฟต เป็นต้น ดังปฏิกิริยา



การบำบัดทางชีวภาพจะไม่สามารถลดปริมาณของอนุพันธ์ของไนโตรเจน (แอมโมเนีย และเกลือแอมโมเนีย) และสารอนินทรีย์ต่างๆ เช่น ซัลไฟด์ และโครเมียม ให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง

#### 2.4.3 กระบวนการบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment Process) (Song, 2004)

กระบวนการนี้ต้องพึ่งพาสารเคมีเพื่อให้เกิดผลตามที่ต้องการ โดยมักจะใช้กระบวนการนี้ กำจัดสารเคมีหรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่ไม่สามารถใช้กระบวนการอื่นได้หรือได้ผลแต่สิ้นเปลือง ค่าใช้จ่ายสูง เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด-เบสสูงๆ การฆ่าเชื้อโรค เป็นต้น กระบวนการทางเคมีที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้แก่ การสร้างและการรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation) การตกตะกอน (Precipitation) การออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction) และการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) ซึ่งกระบวนการบำบัดทางเคมีสามารถลดปริมาณของสารมลพิษได้ในระดับหนึ่ง แต่ระบบจะมีหลายชั้นและมีการใช้สารเคมีเป็นจำนวนมาก และต้องอาศัยพื้นที่เป็นบริเวณกว้างซึ่งจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดนี้จะต้องมีการบำบัดขั้นต่อไปอีกหลายระบบ

#### 2.5 กระบวนการที่ใช้กำจัดสี (จิรภรณ์, 2542)

- การรวมตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางโดยมักจะใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-เบส และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เฟอร์รัสคลอไรด์ หรือ เฟอร์ซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการรวมตะกอนเป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารตกตะกอนทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง ในบางกรณีอาจต้องใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น พอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้ เป็นไปอย่างสมบูรณ์

ในการรวมตะกอนด้วยสารเคมีช่วยรวมตะกอนนั้น ในบางครั้งจะพบปัญหาในเรื่องตะกอน ตกช้า ปุยมี่ลักษณะเปื่อยยุ่ยแตกง่ายเมื่อถูกน้ำพัดพาในถังตะกอน หรือบางครั้งถ้า น้ำดิบมีความขุ่นมากกว่าปกติเกินกำลังของอุปกรณ์ที่จะรับความขุ่นได้ จึงต้องใส่สารเคมีที่เป็นพวกพอลิเมอร์





- **กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment)**

กระบวนการนี้จะลดสีโดยอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กิน ดูดซับหรือเปลี่ยนแปลงรูปของมวลสารต่างๆ รวมทั้งสีที่มีอยู่ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกลดลง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) และระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon)

- **การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์**

การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของเสียที่จะถูกดูดซับจะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรมสีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1200 ดังนั้น ก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาดของโมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อนโดยการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ด้วยปูนขาว

- **การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment)**

เป็นการทำลายโมเลกุลของสี โดยการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมีของหมู่โครโมฟอร์ด้วยโอโซน เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก จะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำทิ้งอย่างรวดเร็ว

- **กระบวนการเมมเบรน (Membrane Processes)**

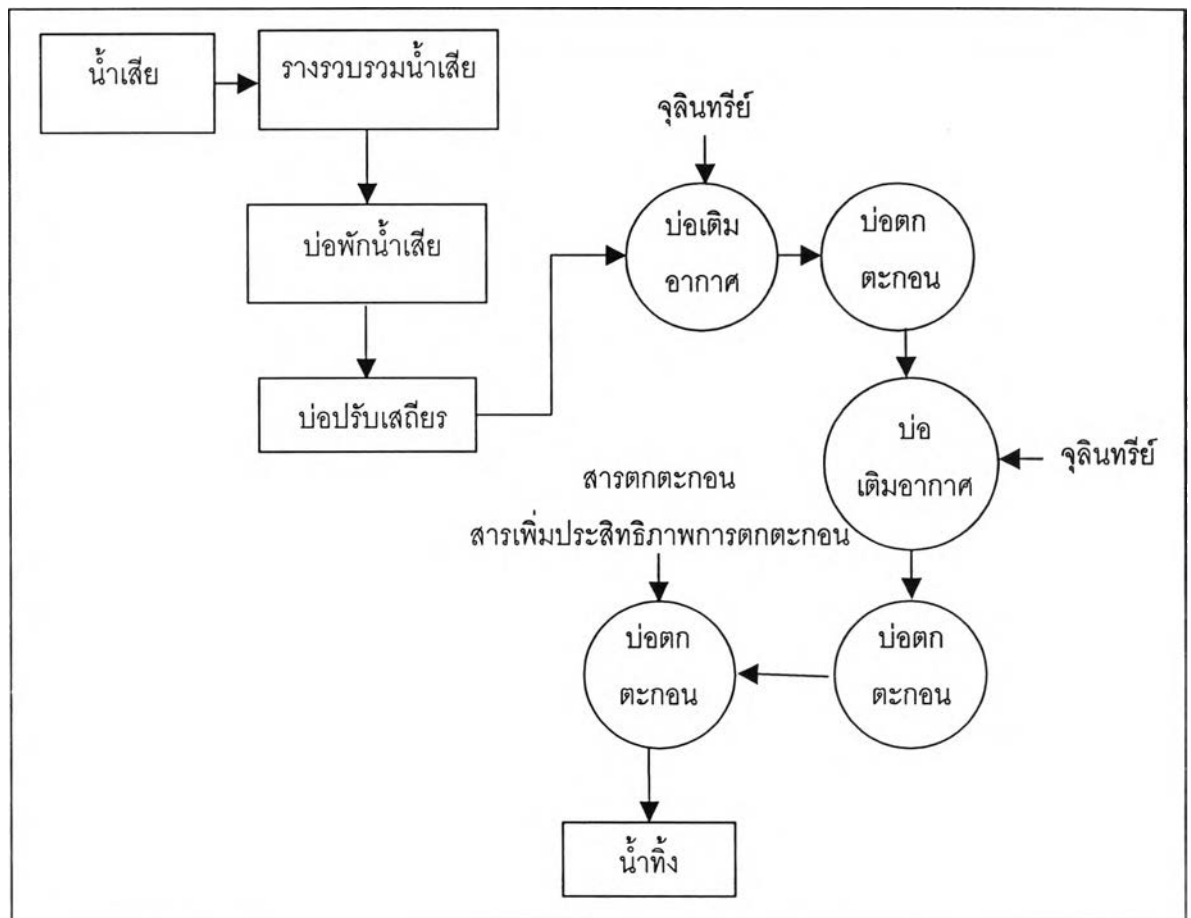
เป็นกระบวนการต่างๆ ที่อาศัยเยื่อเมมเบรนแบบเลือกผ่าน (Semi-permeable membrane) ในการแยกสารละลายออกจากน้ำ หรือของเหลว กระบวนการที่สำคัญมี 3 แบบ คือ อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis; ED) จะใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการแยกสารประกอบซึ่งแตกตัวเป็นไอออนได้ แต่ไม่สามารถแยกสารอินทรีย์ กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis; RO) สามารถแยกสารอินทรีย์ขนาดใหญ่และสารอนินทรีย์ชนิดต่างๆ เกือบทุกชนิดออกมาได้ และกระบวนการอัลตราฟิวเทชัน (Ultrafiltration) ซึ่งสามารถแยกสารอินทรีย์ขนาดใหญ่เท่านั้น

## 2.6 การบำบัดน้ำเสียของโรงงานเยื่อและกระดาษในประเทศไทย

ระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดยทั่วไปนิยมใช้กระบวนการตกตะกอนเร่ง (Activated sludge process) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 โดยการบำบัดน้ำเสียจะเริ่มจากการรวบรวมน้ำเสียทั้งหมดลงรางน้ำ ส่งไปยังบ่อพักน้ำเสียที่มีการตกตะกอนขั้นต้น น้ำใสส่วนบนจะเข้าสู่บ่อปรับเสถียรเพื่อปรับให้มีความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมจากนั้นจะถูกส่งไปยังบ่อเติมอากาศขั้นที่ 1 ที่มีการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ น้ำใสส่วนบนจะเข้าสู่ถังคอกกรีดกลมเพื่อตกตะกอนครั้งที่สอง แล้วจะเข้าสู่บ่อเติมอากาศขั้นที่ 2 ที่มีการใส่จุลินทรีย์ในการย่อย

กลมเพื่อตกตะกอนครั้งที่สอง แล้วจะเข้าสู่บ่อเติมอากาศชั้นที่ 2 ที่มีการใส่จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ส่วนที่ใสจะเข้าสู่ถังคอนกรีตกลมเพื่อตกตะกอนครั้งที่สาม จากนั้นจะเข้าสู่บ่อตกตะกอน ที่มีการเติมสารช่วยในการตกตะกอนได้แก่ สารตกตะกอน และสารเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน เพื่อเป็นการรวมตะกอนให้มีขนาดใหญ่ แล้วน้ำใสจะถูกสูบออกลงสู่รางระบายน้ำ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบตกตะกอนแรงนี้มีประสิทธิภาพดีในการลดค่าบีโอดี ค่าซีโอดี แต่กระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพต่ำมากในการลดสี ซึ่งเกิดขึ้นจากสารจำพวก ลิกนิน ส่งผลให้ต้องมีการบำบัดต่อเนื่อง เป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและพลังงานเป็นอย่างมาก



รูปที่ 2.8 แผนผังการบำบัดน้ำเสียของกลุ่มอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษในประเทศไทย

## 2.7 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า

เคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของวิชาเคมีซึ่งว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หลักการของเคมีไฟฟ้าได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาต่างๆ ของเคมีมากมาย เช่น การศึกษากลไกและจลศาสตร์ของปฏิกิริยาสังเคราะห์ทางสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้า

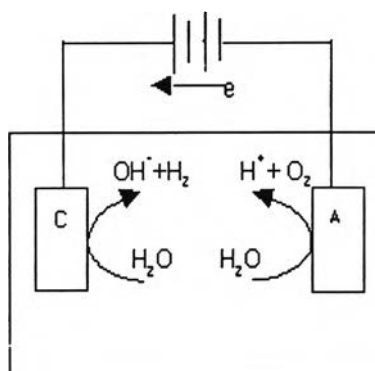
### 2.7.1 กระบวนการเคมีไฟฟ้า

กระบวนการเคมีไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) และผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า (Electrode) การเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้เกิดขึ้นได้โดยการอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก กระแสไฟฟ้าไหลจะผ่านขั้วไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าจะทำหน้าที่เป็นตัวนำในการรับหรือส่งอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่วนประกอบที่สำคัญของการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้ามีทั้งหมด 3 ส่วน คือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ตรวจวัดไฟฟ้า โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้ามักถูกเรียกเป็นเซลล์เคมีไฟฟ้า (Prentice, 1991)

- ขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าในระบบ โดยเชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก ขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) หรือ ขั้วไฟฟ้าชี้บอก (Indicating electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) หรือขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) โดยขั้วไฟฟ้าใช้งานจะทำหน้าที่เป็นขั้วทดลองของเซลล์ ขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน ส่วนขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำหน้าที่ช่วยให้วงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้า สำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าใช้งานหรือขั้วไฟฟ้าช่วย และมักนิยมใช้ในระบบที่มีการวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้าเท่านั้น ลักษณะเฉพาะของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงคือ ให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ไม่มีปฏิกิริยาตอบสนองต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ ไม่แปรตามปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร และไม่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ จัดเป็นขั้วไฟฟ้าแบบนอนโพลาริไซในอุดมคติ (Ideal nonpolarization)

ในการใช้งานทั่วไป ระบบเซลล์เคมีไฟฟ้าจะต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าช่วย ซึ่งในระบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าใช้งานจะทำหน้าที่เป็นขั้วลบซึ่งมักเรียกว่าขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าช่วยจะทำหน้าที่เป็นขั้วบวกซึ่งมักเรียกว่าขั้วแอโนด

- สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) หน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าโดยผ่านทางไอออนต่าง ๆ ที่อยู่ในสารละลาย ไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งกระแสไฟฟ้าผ่านไปยังขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ในกระบวนการเคมีไฟฟ้าสมบัติของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาและกระบวนการ เช่น ความเข้มข้น องค์ประกอบ ค่าความเป็นกรด-เบส และอุณหภูมิ สำหรับการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอก และจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในอิเล็กโทรไลติกเซลล์ ดังรูปที่ 2.9

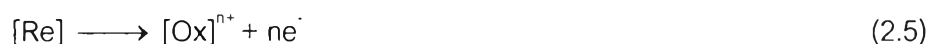


รูปที่ 2.9 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์กระบวนการเคมีไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าภายนอกจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าผลักดันให้อิเล็กตรอนในสายไฟฟ้าเคลื่อนไปยังขั้วแคโทด ส่วนโมเลกุลหรือไอออนของสารออกซิไดส์ในสารละลายจะถ่ายโอนเข้าสู่ผิวหน้าของขั้วโดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอิเล็กตรอน



สำหรับปฏิกิริยารีดักชัน ส่วนโมเลกุลหรือไอออนของสารรีดิวซ์ในสารละลายจะถูกออกซิไดส์ซึ่งจะให้อิเล็กตรอนออกสู่ระบบ



• ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ( $E^\circ$ ) ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าเป็นสมบัติทางกายภาพและเป็นสมบัติเฉพาะตัวของระบบออกซิเดชัน-รีดักชัน ค่า  $E^\circ$  ได้จากการวัดค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วของเซลล์ ซึ่งเกิดจากครึ่งเซลล์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้างดกล่าวกับครึ่งเซลล์มาตรฐานของไฮโดรเจน และสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีแอกทิวิตี (Activity) เป็นหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ถือเป็นศักย์ขั้วไฟฟ้า (เพราะศักย์ไฟฟ้าไฮโดรเจนเป็นศูนย์โวลต์) โดยศักย์ขั้วไฟฟ้านี้คือศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า โดยลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน มีดังนี้ (Hunsom, 2001)

• ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ เพราะเป็นค่าที่ได้เมื่อขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งของเซลล์ต้องเป็นขั้วไฮโดรเจนเสมอ

- ตามสัจนิยมของเคมีไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าต้องได้จากการเขียนปฏิกิริยาครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจึงอาจถือได้ว่าเป็นค่าศักย์รีดักชันสัมพันธ์ (Relative Reduction Potential)
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเป็นค่าที่ไม่แปรผันตามจำนวนโมลที่ใช้ในการปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
- ค่าศักย์ไฟฟ้าจะผันแปรไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะเป็นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
- ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะเป็นค่าบ่งชี้ถึงความแรงของการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน คือเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าสูงกว่า จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่า

● ศักย์ขั้วไฟฟ้า (Electrode potential) ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าหนึ่งๆ เป็นค่าศักย์สัมพันธ์ซึ่งนำมาหาศักย์ของขั้วไฟฟ้าได้ก็ต่อ เมื่อรู้ค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงหรือเมื่อศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเป็นศูนย์ การที่ต้องมีการกำหนดหน้าที่ของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนไว้อย่างชัดเจนก็เพื่อจะให้สามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ ในความหมายเดียวกันโดยสัจนิยมของการกำหนดเครื่องหมายศักย์ขั้วไฟฟ้าตาม IUPAC กำหนดไว้ว่า "ในวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ ผลลัพธ์ศักย์ของวงจรถือเป็นค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น" โดยเครื่องหมายของค่าศักย์ที่ได้ถ้าเป็นบวกแสดงว่าวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้างกล่าวเป็นการต่อเซลล์แบบกัลวานิก การดำเนินไปของปฏิกิริยารีดักชันเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยมีขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางกลับกันถ้าผลลัพธ์ของวงจรเป็นลบแสดงว่าเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนแทน และขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นแอโนด

### 2.7.2 หลักการอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างขั้วไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ การผลักดันให้ประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในวงจรจะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าขึ้นงานที่เกิดขึ้นเป็นการลดค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) ที่อยู่ในเซลล์ไฟฟ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เป็นแบบผันกลับได้ (Reversible reaction) ดังนั้นจึงมีค่าพลังงานอิสระของกิบส์คือ

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[Re]^b}{[Ox]^a} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\Delta G$  คือค่าพลังงานอิสระของกิบส์หน่วย (จูลต่อโมล)

$\Delta G^\circ$  คือพลังงานอิสระของกิบส์ของสารที่ภาวะมาตรฐาน (จูลต่อโมล)

T คืออุณหภูมิ (องศาเคลวิน)

R คือค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมล)

$\frac{[Re]^b}{[Ox]^a}$  คืออัตราส่วนแอคติวิตีของสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้น

และจากความสัมพันธ์ของค่าพลังงานอิสระของกิบส์กับค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับงานที่ได้

$$\Delta G = -nF\Delta E \quad (2.7)$$

$$\Delta G^\circ = -nF\Delta E^\circ \quad (2.8)$$

เมื่อ  $-nF\Delta E$  คืองานไฟฟ้าที่เกิดที่เซลล์ไฟฟ้า (จูล)

n คือจำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการปฏิกิริยา (กรัมสมมูลต่อโมล)

F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์ต่อกรัมสมมูล)

$\Delta E$  คือค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

$\Delta E^\circ$  คือค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (โวลต์)

สมการที่ (2.6) เป็นสมการที่มีความสำคัญมาก เพราะเป็นสมการที่เชื่อมระหว่างความรู้ทางเทอร์โมไดนามิกส์เข้ากับไฟฟ้าเคมี ดังนั้น ถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์แล้ว ก็จะหาสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ต่างๆ เช่น  $\Delta G$ ,  $\Delta H$  และ  $\Delta S$  ได้ สำหรับการหา  $\Delta H$  และ  $\Delta S$  นั้นจะต้องทำการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ กัน แล้วนำมาเขียนกราฟ

เครื่องหมายของ  $\Delta G$  ว่าในปฏิกิริยาพวกเกิดได้เอง ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันหนึ่งๆ  $\Delta G$  จะมีเครื่องหมายลบ แต่ถ้าเป็นพวกที่เกิดไม่ได้เอง เครื่องหมายหน้า  $\Delta G$  จะเป็นบวก ถ้าปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล  $\Delta G$  จะเท่ากับศูนย์ แต่  $\Delta G$  และแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันดังสมการ (2.6) เครื่องหมายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย่อมจะระบุให้ทราบว่าปฏิกิริยาในเซลล์นั้นเป็นแบบเกิดได้เอง หรือเกิดไม่ได้เอง หรืออยู่ในภาวะสมดุล ดังตารางที่ 2.4

## ตารางที่ 2.4 ความหมายของเครื่องหมายของ $\Delta G$ และ E

ประเภทของปฏิกิริยา	เครื่องหมายของ $\Delta G$	เครื่องหมายของ E
เกิดได้เอง	-	+
เกิดไม่ได้เอง	+	-
ที่ภาวะสมดุล	0	0

### 2.7.3 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า (เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับระยะเวลาที่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึงปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปโดยสารละลายของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้อิเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือคือ ผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

$$1 \text{ F (Faraday)} = eN = (1.6022 \times 10^{-19} \text{ C})(6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \\ = 96487 \text{ C mol}^{-1} \text{ (C = coulomb)}$$

$$\text{จะได้ } \text{C coulomb} = I \text{ (ampere)} \times t \text{ (second)}$$

หรือ 1 ฟาราเดย์ คือไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วไฟฟ้าจำนวน 1 โมลเท่ากัน เช่น

- ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ ลงใน  $\text{Al}^{3+}$  จะได้  $\text{Al}_{(s)}$  1 โมล = น้ำหนักกรัมโมล/ประจุ  
=  $26.98/3 = 9$  กรัม
- ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน  $\text{Fe}^{2+}$  จะได้  $\text{Fe}_{(s)}$  1 โมล = น้ำหนักกรัมโมล/ประจุ  
=  $55.85/2 = 27.9$  กรัม

ซึ่งกฎของฟาราเดย์มี 2 ข้อ คือ

กฎข้อที่ 1 ปริมาณของสาร (m) ที่เกิดที่อิเล็กโทรดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณประจุของกระแสไฟฟ้า (Q) ที่ผ่านเข้าไปในสารละลาย

กฎข้อที่ 2 ถ้าผ่านปริมาณไฟฟ้าจำนวนเท่าๆ กันลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกัน ปริมาณของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารเหล่านั้น จากกฎข้อที่สองของฟาราเดย์สามารถเขียน สมการได้ดังนี้

$$m = \frac{sM_w \cdot it}{nF} \quad (2.9)$$



- เมื่อ  $m$  คือ มวลของสารนั้น (กรัม)  
 $s$  คือสัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของชนิดสารเคมี  
 $M_w$  คือน้ำหนักอะตอมหรือน้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)  
 $i$  คือกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)  
 $t$  คือเวลาที่ใช้ (วินาที)  
 $n$  คือจำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในการปฏิกิริยา(กรัมสมมูลต่อโมล)  
 $F$  คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,487 คูลอมบ์ต่อกรัมสมมูล)

#### 2.7.4 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ในการบำบัดน้ำเสีย และมีผลต่อปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยาการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า ตามกฎของฟาราเดย์ที่ว่า 1 ฟาราเดย์ของประจุที่ผ่านเข้าวงจรจะชะเหล็กออกมา 27.9 กรัม ซึ่งถ้าจำนวนประจุมากขึ้น ก็จะทำให้มีเหล็กหรืออะลูมิเนียม หลุดออกมาจากขั้วไฟฟ้าเพียงพอที่จะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ ตกตะกอนได้มากขึ้น จากกฎของโอห์ม ซึ่งกล่าวว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในวงจรได้จะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้าและความต้านทานกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.10)

$$V = IR \quad (2.10)$$

และมีความสัมพันธ์กับงานทางไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.10)

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ}(W_{\text{elec}}) = \text{coulomb} \times \text{volt} = nE \times 96,487 \quad (2.11)$$

#### 2.7.5 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ

การเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งวัดได้ในหน่วยแอมแปร์ จำนวนกระแสไฟฟ้าที่ผ่านไปหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดจะวัดในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current intensity,  $I$ ) การวัดของกระแสไฟฟ้าซึ่งผ่านเข้าไปในวัสดุเรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ ในโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้กฎของโอห์ม ซึ่งสามารถเขียนในรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า ( $E$ ) มีหน่วยเป็น โวลต์/เซนติเมตร ได้คือ

$$E_r = \frac{I}{\sigma} = \frac{V}{R \cdot \sigma} \quad (2.12)$$

- เมื่อ  $I$  คือค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในหน่วยแอมแปร์  
 $\sigma$  คือค่าการนำไฟฟ้าในหน่วยโมห์/เซนติเมตร  
 $V$  คือความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดในหน่วยโวลต์  
 $R$  คือความต้านทานระหว่างจุดสองจุดในหน่วยโอห์ม

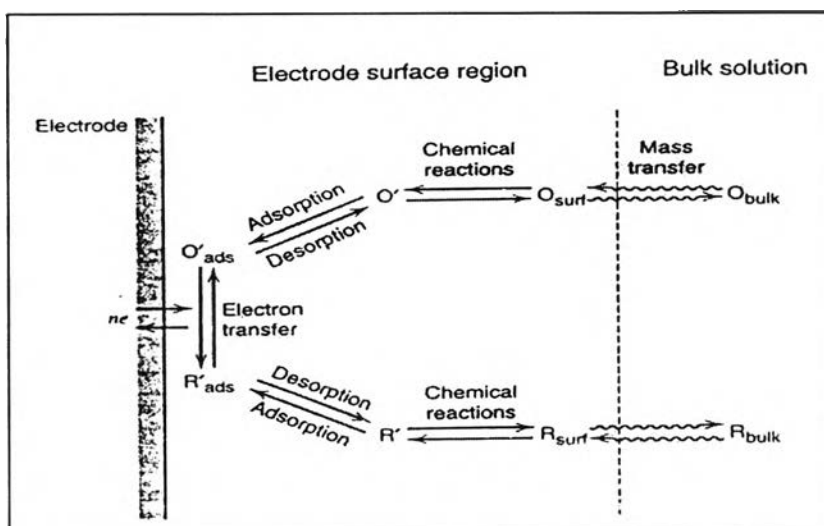
### 2.7.6 การถ่ายโอนมวลสารในระบบเคมีไฟฟ้า (Bard, 2001)

การถ่ายโอนมวลสารในระบบเคมีไฟฟ้าในสารละลายประกอบด้วย 3 กลไกด้วยกัน คือ ไมเกรชัน (Migration) การแพร่ (Diffusion) และการพา (Convection) ซึ่งสามารถอธิบายแต่ละกระบวนการดังนี้ (รูปที่ 2.10)

- ไมเกรชันเป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด และไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าหาแอโนดสำหรับเซลล์อิเล็กโทรไลติก ความเร็วของการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าหาหรือเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้าอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความต่างศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น ซึ่งมีผลให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรนั้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนที่ประจุเท่ากันจำนวนมากอยู่รวมกันจะเกิดการแย่งการเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้มีการสูญเสียกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งไปในการเคลื่อนที่ของไอออนที่ไม่ต้องการในการเกิดปฏิกิริยา

- การแพร่เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณความเข้มข้นต่ำจนกว่าจะไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลาย อัตราเร็วในการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น

- การพาเป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของสารละลาย ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในหลายรูปแบบ เช่น การถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า การเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอน การเกิดปฏิกิริยาอื่นๆ ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เช่น ปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption) การเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า



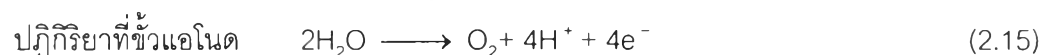
รูปที่ 2.10 การถ่ายโอนมวลสารในสารละลาย (Bard, 2001)

## 2.8 การประยุกต์ใช้หลักการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสีย (Feng และคณะ, 2003)

กระบวนการเคมีไฟฟ้าได้รับความสนใจมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี

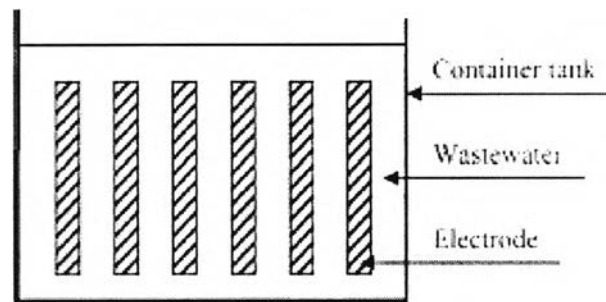
### 2.8.1 กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition) (Hunsom และคณะ, 2005)

กระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าจะเหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักผสมอยู่ การนำโลหะหนักกลับคืนโดยกระบวนการนี้มีความรวดเร็วและแม่นยำ เพราะมีค่าในการเลือกเกิดปฏิกิริยาสูง และข้อได้เปรียบในกระบวนการนี้คือไอออนโลหะสามารถนำกลับคืนได้ในรูปของโลหะบริสุทธิ์ หลักการทำงานของกระบวนการมีดังนี้ เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบ ก่อให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของขั้วไฟฟ้ามีดังนี้

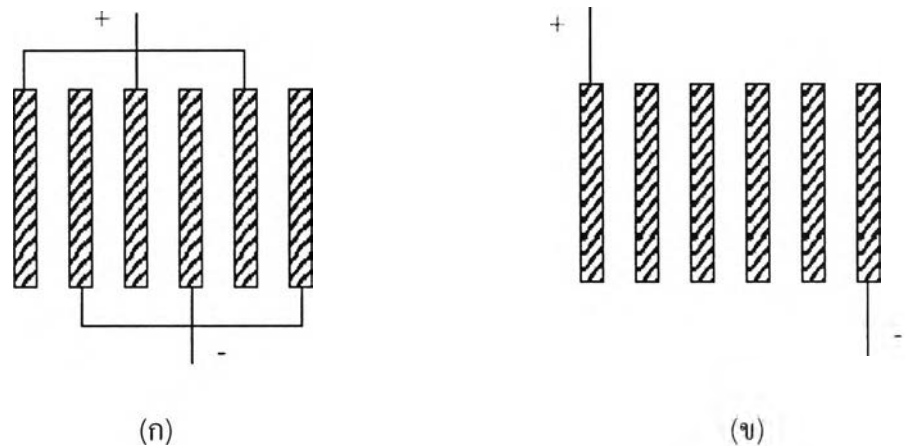


• ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้ (Typical reactors application) เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าสำหรับการนำโลหะหนักกลับคืนในน้ำเสียมีหลายรูปแบบเช่น

- แทงค์เซลล์ (Tank cell) (รูปที่ 2.11) เป็นรูปที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับสำหรับการออกแบบ เนื่องจากเป็นรูปแบบที่สะดวกต่อการขยายหรือลดขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อนำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย สำหรับการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าสามารถทำได้ 2 แบบ คือแบบ มอนอโพลาร์ (Mono-polar configuration) และแบบไบโพลาร์ (Bi-polar configuration) แสดงในรูปที่ 2.12

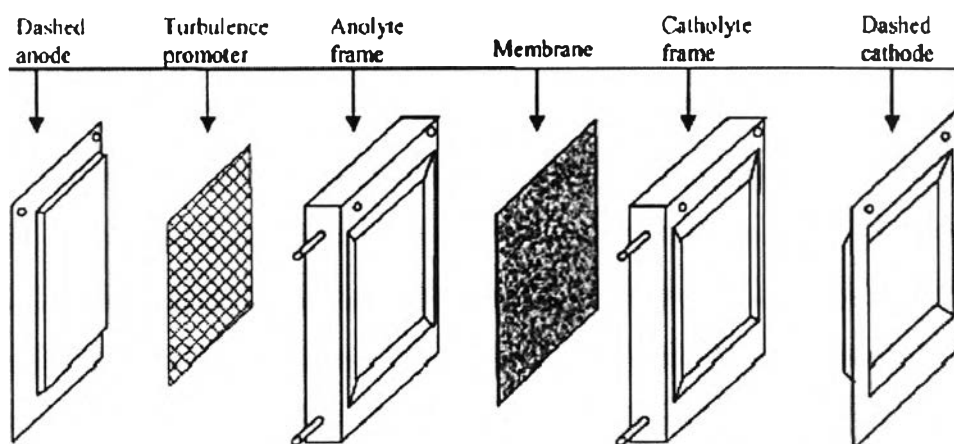


รูปที่ 2.11 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Tank cell (Chen, 2004)



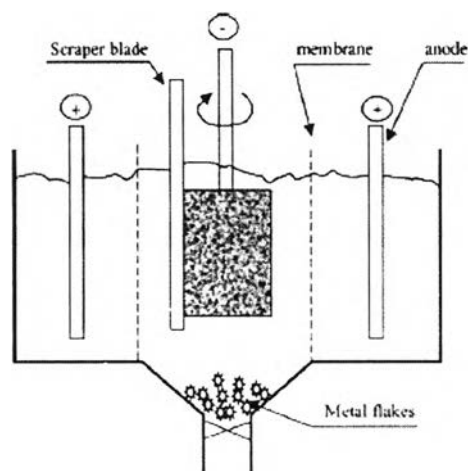
รูปที่ 2.12 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้า (ก) แบบมอนอโพลาร์และ (ข) แบบไบโพลาร์ (Chen, 2004)

- ฟิวเตอร์เพรส (Filter press) (รูปที่ 2.13) เป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยขั้วแอโนด ขั้วแคโทด และเยื่อเลือกผ่าน (ถ้าจำเป็น) โดยขนาดของเครื่องปฏิกรณ์จะขึ้นอยู่กับปริมาณของเสียที่จะดำเนินการ



รูปที่ 2.13 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Filter press (Chen, 2004)

ถ้าระบบต้องการการถ่ายเทมวลสารระหว่างผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย (Bulk solution) ให้มีค่าเพิ่มขึ้น สามารถทำได้โดยการออกแบบให้ขั้วแคโทดหมุนได้ ซึ่งจะทำให้การกำจัดโลหะหนักมีประสิทธิภาพมากขึ้น เครื่องปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Rotating cylinder electrode (Chen, 2004)

● **วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า (Electrode materials)**

- ขั้วแอโนด วัสดุที่นำมาใช้จะต้องไม่แตกตัวให้โลหะไอออน ( $M^+$ ) หรือทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ เรียกขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ว่า Insoluble electrode ขั้วไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้จะทำมาจากโลหะออกไซด์เคลือบบนผิวของไทเทเนียม เช่น  $Ti/RuO_2$
- ขั้วแคโทด ในการบำบัดน้ำเสียจะนิยมใช้แกรไฟต์ (Graphite) หรือคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นเส้น (Carbon fiber) เนื่องจากมีราคาถูก

2.8.2 กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้า (Electroprecipitation) (Hunsom, 2001)

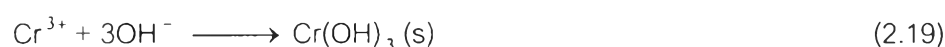
กระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดมีเยื่อเลือกผ่าน ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนดวางคร่อมแผ่นเยื่อเลือกผ่าน โดยเยื่อเลือกผ่านใช้ในการบำบัดน้ำเสียมี 2 ชนิด คือ เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ (Anion-exchange membrane) และเยื่อเลือกผ่านไอออนบวก (Cation-exchange membrane) แสดงดังรูปที่ 2.15 และรูปที่ 2.16 ตามลำดับ

เยื่อเลือกผ่านไอออนลบจะยอมให้ไอออนลบในสารอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านเนื้อเยื่อเลือกผ่านได้ แต่ไอออนบวกจะผ่านไม่ได้ สำหรับเยื่อเลือกผ่านไอออนบวกจะมีลักษณะตรงกันข้าม คือไอออนบวกในสารอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่ผ่านเนื้อเยื่อเลือกผ่านได้ แต่ไอออนลบจะผ่านไม่ได้

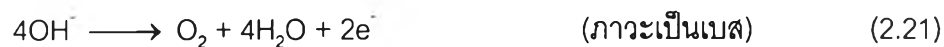
สำหรับน้ำเสียประกอบด้วยโครเมียมหรือโลหะอื่นๆ โลหะหนักจะถูกขจัดออกมาในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาของกระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้าในการขจัดออกจากน้ำเสีย แสดงตามสมการที่ (2.16) - (2.21) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด



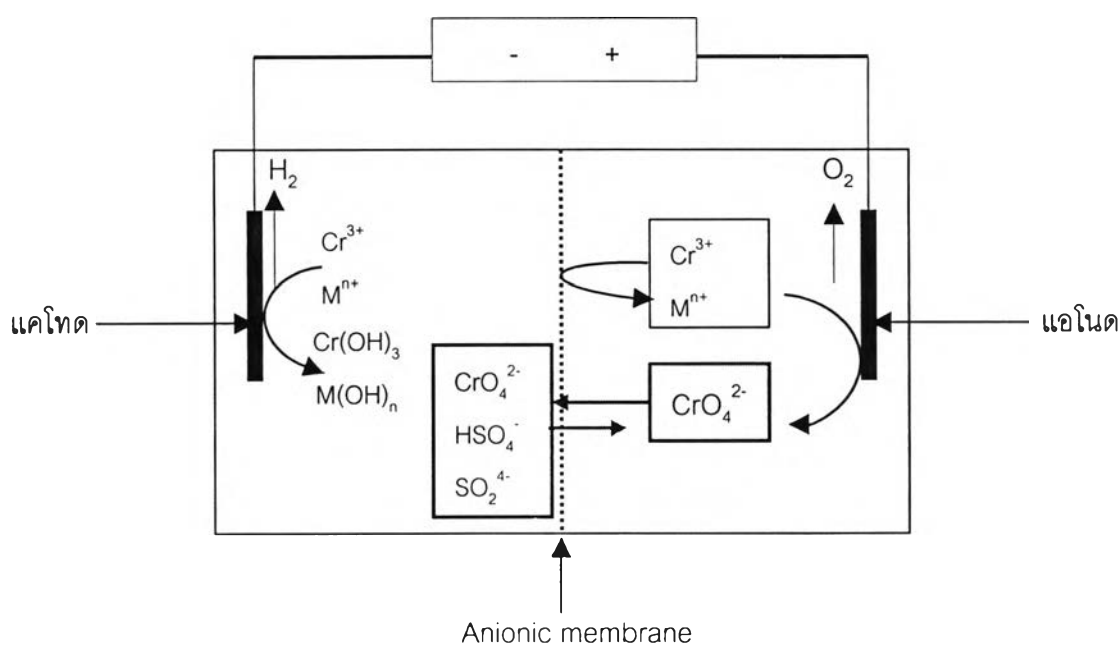
และจะเกิดการตกตะกอนของไฮดรอกไซด์ของโลหะตามมา



ส่วนที่ฝั่งแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ  $H_2O$

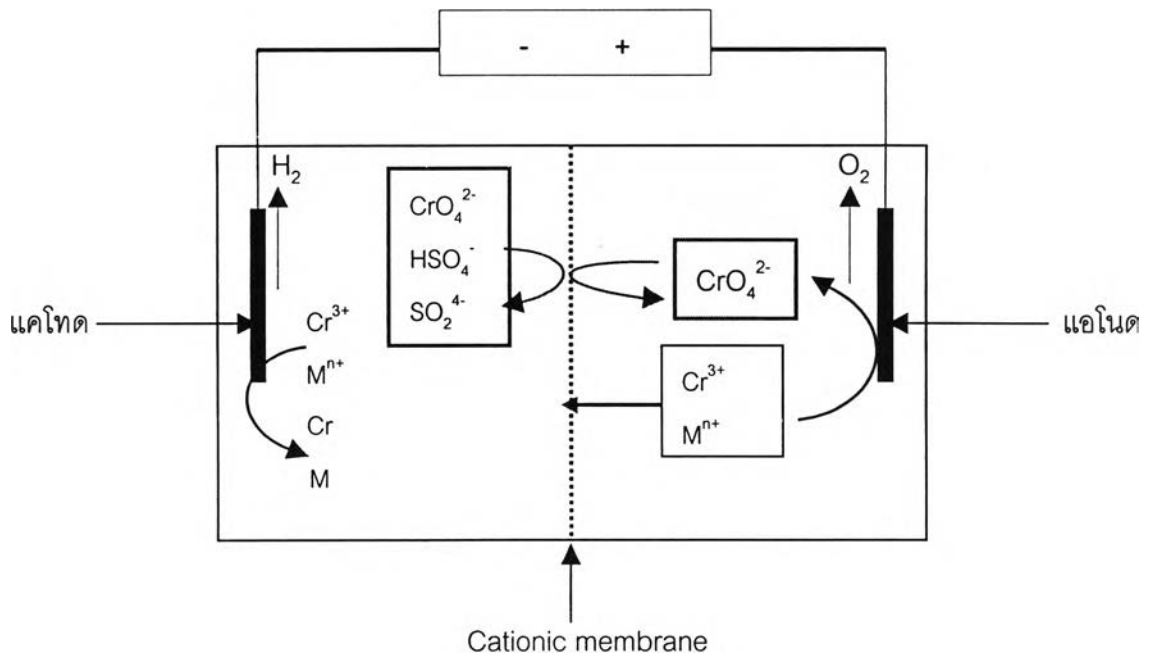


จากปฏิกิริยาข้างต้นพบว่าที่ฝั่งแคโทดจะมีความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ ) ไอออนเกิดขึ้นตลอดเวลาและไฮดรอกไซด์ไอออนก็เกิดปฏิกิริยากับโลหะและตกตะกอนในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของโลหะที่ฝั่งแคโทดลดลง



รูปที่ 2.15 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเยื่อเลือกผ่านไอออนลบ

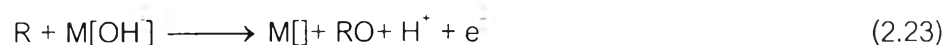
(Hunsom, 2001)



รูปที่ 2.16 กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าชนิดที่มีเยื่อเลือกผ่านไอออนบวก  
(Hunsom, 2001)

### 2.8.3 กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้า (Electro-oxidation: EO) (Israilides, 1997)

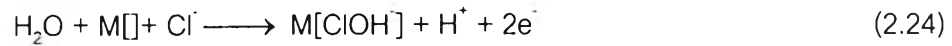
กระบวนการออกซิเดชันด้วยกระแสไฟฟ้าสามารถลดปริมาณของสารอินทรีย์และสารมลพิษในน้ำเสียได้ โดยสารอินทรีย์และสารมลพิษจะถูกทำลายด้วยอนุพันธ์ของ  $\text{OH}^\bullet$  (Hydroxyl radicals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง (Strong oxidizing agent) เรียกกระบวนการนี้ว่า Direct anodic process โดยสารอินทรีย์จะถูกออกซิไดส์โดยอนุพันธ์ของ  $\text{OH}^\bullet$  (Hydroxyl radicals) ทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังปฏิกิริยา (2.22 – 2.23) และศักยภาพของตัวออกซิไดส์แสดงตามตาราง 2.5



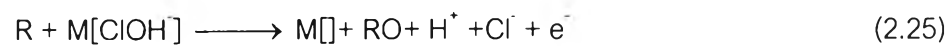
- เมื่อ
- M[ ] คือ พื้นผิวของขั้วแอโนดที่เกิดปฏิกิริยา
  - M[OH] คือ  $\text{OH}^\bullet$  ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด
  - R คือ สารอินทรีย์
  - RO คือ ผลิตภัณฑ์ของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดส์



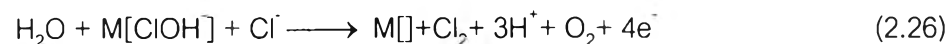
ถ้าในสารละลายมีคลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) ผสมอยู่ คลอไรด์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับโลหะของขั้วไฟฟ้าเกิด  $\text{ClOH}^\bullet$  (Chlorohydroxyl radicals) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Indirect oxidation ดังปฏิกิริยา (2.24)



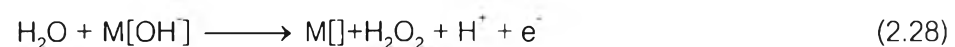
เมื่อ  $\text{M}[\text{ClOH}]$  คือ  $\text{ClOH}^\bullet$  ที่ดูดซับบนผิวของขั้วแอโนด ซึ่งสามารถออกซิไดส์สารอินทรีย์ได้ ตามปฏิกิริยา (2.25)



และ  $\text{ClOH}^\bullet$  สามารถทำปฏิกิริยากับ  $\text{Cl}^-$  เกิดแก๊สคลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) ตามปฏิกิริยา (2.26) ซึ่งจะช่วยลดปริมาณของเชื้อโรคในน้ำเสียได้



นอกจากนี้อนุพันธ์ของ  $\text{OH}^\bullet$  จะสลายตัวเป็นโอโซน ( $\text{O}_3$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์ได้เช่นกัน ตามปฏิกิริยา (2.27) และ (2.28) ประสิทธิภาพในการออกซิไดส์สารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วแอโนดและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบศักยภาพของตัวออกซิไดส์ตามสารตั้งต้น จะเห็นได้ว่าอนุพันธ์ของ  $\text{OH}^\bullet$  จะมีศักยภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวออกซิไดส์อื่นๆ และสามารถเตรียมได้โดยใช้น้ำเป็นสารตั้งต้น

ตารางที่ 2.5 ศักยภาพของตัวออกซิไดส์ตามสารตั้งต้น (Chen, 2004)

Oxidant	Formation potential
$\text{H}_2\text{O}/\cdot\text{OH}$ (hydroxyl radical)	2.80
$\text{O}_2/\text{O}_3$ (ozone)	2.07
$\text{SO}_4^{2-}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ (peroxodisulfate)	2.01
$\text{MnO}_2/\text{MnO}_4^{2-}$ (permanganate ion)	1.77
$\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2$ (hydrogen peroxide)	1.77
$\text{Cl}^-/\text{ClO}_2^-$ (chlorine dioxide)	1.57
$\text{Ag}^+/\text{Ag}^{2+}$ (silver (II) ion)	1.5
$\text{Cl}^-/\text{Cl}_2$ (chlorine)	1.36
$\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (dichromate)	1.23
$\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ (oxygen)	1.23

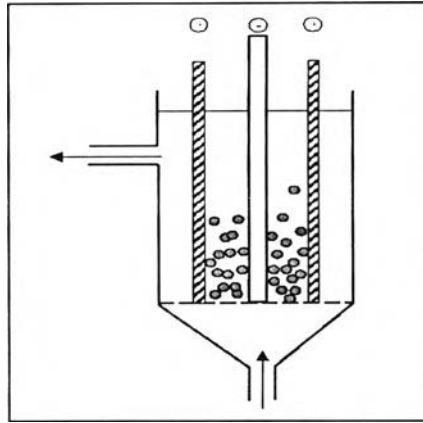
#### ● ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้

เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าสำหรับการออกซิเดชันสารมลพิษในน้ำเสียจะมีลักษณะคล้ายกับเครื่องปฏิกรณ์สำหรับนำโลหะหนักกลับคืน การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์จะพิจารณาถึงค่าประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า (Current efficiency) และระยะเวลา (Space time) โดยส่วนใหญ่จะออกแบบเป็น Bi-polar cell เครื่องปฏิกรณ์มีหลายแบบ เช่น

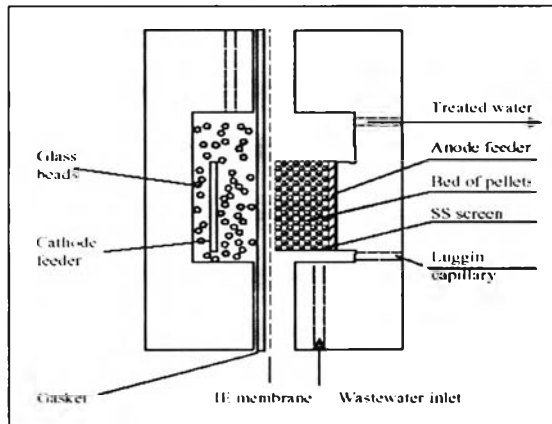
- ขั้วไฟฟ้าแบบทรงกระบอก (Cylindrical electrode) (รูปที่ 2.17) เครื่องปฏิกรณ์จะประกอบด้วยขั้วแอโนดที่เป็นทรงกระบอก และมีอนุภาคทรงกลมของ Boron-doped diamond (BDD) อยู่ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ซึ่งทำให้เครื่องปฏิกรณ์มีคุณสมบัติเป็นแบบ Bi-polar cell

- แพคเบด (Packed bed) (รูปที่ 2.18) มีอนุภาคของเม็ดเบดขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร ถูกบรรจุไว้ที่ฝั่งของขั้วแอโนด

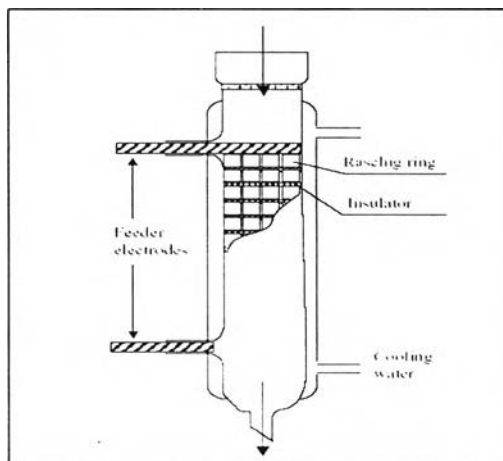
- ไบโพลาร์ทริกเกิลทาวเวอร์ (Bi-polar trickle tower) (รูปที่ 2.19) จะมีแผ่นกรองอยู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อควบคุมการถ่ายโอนมวลสารที่ผิวของขั้วแอโนด หรือบางครั้งใช้ไบโอฟิล์ม (Biofilm) ที่หนาๆ จะทำให้สารตัวอย่างหยุดนิ่งบนผิวของขั้วไฟฟ้าเรียกเครื่องปฏิกรณ์นี้ว่า ไบโอบิโวลต์ (Bio electro) ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพของสารจำพวกอนุพันธ์ไนโตรเจนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน เมื่อมี ไมโครออร์กานิซึม (Microorganisms) ที่อยู่บนผิวของขั้วแอโนด



รูปที่ 2.17 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Cylinder electrode (Chen, 2004)



รูปที่ 2.18 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Packed bed (Chen, 2004)



รูปที่ 2.19 เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าแบบ Bi-polar trickle tower (Chen, 2004)

### ● ผลของขั้วแอโนดต่อการออกซิเดชัน

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบผลของขั้วแอโนดชนิดต่างๆ ต่อการออกซิเดชันสารมลพิษที่ภาวะต่างๆ และตัวแปรที่สำคัญต่อการพิจารณาประสิทธิภาพของขั้วแอโนดจะมี 2 ตัวแปร คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า บางครั้งอาจพิจารณาชนิดของสารมลพิษและความเข้มข้นของสารมลพิษควบคู่ไปด้วย

#### 2.8.4 กระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrocoagulation: EC)

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าหรือ EC ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้กันอยู่แพร่หลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สะดวกและมีประสิทธิภาพสูงในการลดสารมลพิษในน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการ EC สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของไขมัน น้ำมัน สีย้อม สารแขวนลอย สารอินทรีย์และโลหะหนัก เป็นต้น โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกับการตกตะกอนด้วยสารเคมี คือ การทำให้อนุภาคของคอลลอยด์หรือสารมลพิษในน้ำเสียที่มีอนุภาคเล็กๆ มารวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้นจนหนักพอที่จะตกตะกอนลงมาโดยอาศัยสารสร้างตะกอน สารสร้างตะกอนสำหรับการตกตะกอนด้วยสารเคมีนิยมใช้อลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) หรือเฟอริกคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) แต่สำหรับกระบวนการ EC จะใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดที่กัดกร่อนได้ (Sacrificial electrode) เช่น เหล็กหรืออะลูมิเนียมในการสร้างสารตกตะกอน โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้า โลหะที่เป็นขั้วแอโนดจะมีการสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นโลหะไอออนละลายอยู่ในน้ำเสียดังปฏิกิริยา (2.22) และ (2.25) โลหะไอออนเหล่านี้จะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear metal hydroxyl complexes ซึ่งมีสมบัติเป็นสารสร้างตะกอน

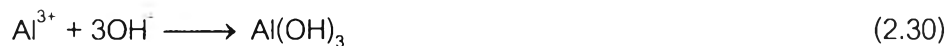
ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบผลของขั้วแอโนดชนิดต่างๆ ต่อการออกซิเดชัน (Chen, 2004)

Anode	Pollutant	Current density (A/m <sup>2</sup> )	CE (%)	Removal efficiency	Comment
Granular graphite	Phenol	0.03-0.32	70	70, 50% mineralization	5-month stable operation
Planar graphite	Phenol	10-100	24.6-63.5	6-17%, COD	NaOH as electrolyte
Pt or Ti/Pt	Phenol	300		30%, TOC	pH 12, initial concentration 1000 mg/l, in 0.25 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
	Ammonia	8.5	53	95%	pH 8.2 using phosphate buffer, poor performance for organics
	Glucose 15 organics	100-900	15-20 5	30%	1 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
PbO <sub>2</sub>	Aniline	<i>I</i> = 2 A	15-40	>90% in 1h	Initial concentration 2.7 mM, pH 2, packed bed of PbO <sub>2</sub>
	Phenol	<i>I</i> = 1, 2, 3 A		46-80%	Anodic cell: initial concentration 14-56 mM, in 1.0 sulfuric acid, packed bed of PbO <sub>2</sub>
Ti/PbO <sub>2</sub>	Phenol	300		40%, TOC	pH 12, initial concentration 1000 mg/l, in 0.25 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
	Landfill leachate	50-150	30% for COD 10% for NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	90% for COD 100% for NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	
	Glucose 2-Chlorophenol	100-900 80-160	30-40 35-40	100% 80-95%, COD	1 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Pb <sup>2+</sup> formation, initial COD = 1000 mg/l, 25 °C
IrO <sub>2</sub>	Organic 1,4-Benzoquinone	Low	17		Rupture of rings only
	Chlorinated phenols	0.6 50	54 1.8		Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-Chlorophenol	80-160	35-40	80-95%, COD	Oxalic acid as intermediates
	Glucose	100-900	<20	30%	1 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
	Phenol	300		100%	pH 12, initial concentration 1000 mg/l, in 0.25 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
		500	58		70 °C, 10 mM CV method, similar to PbO <sub>2</sub>
Ebonex <sup>®</sup>	Trichloroethylene	Fixed potential 2.5-4.3 V	<32	10-70%	Similar to PbO <sub>2</sub> Stable in aqueous media, Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> to TiO <sub>2</sub>

กรณีของอะลูมิเนียมเมื่อใช้เป็นขั้วแอโนด อะลูมิเนียมจะแตกตัวให้ Al<sup>3+</sup> ไอออนในสารละลาย (2.29) และ Al<sup>3+</sup> ไอออนรวมตัวกับ OH<sup>-</sup> หรือ H<sub>2</sub>O ขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบสของระบบ และตกตะกอนออกมาในรูปของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)<sub>3</sub>) ดังปฏิกิริยา (2.30) และ (2.31) (Koby, 2003)



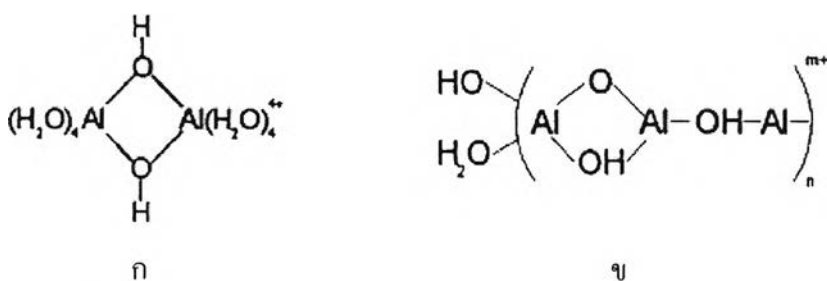
ภาวะสารละลายที่เป็นเบส



ภาวะสารละลายที่เป็นกรด



นอกจากนี้  $\text{Al}^{3+}$  ไฮดรอกไซด์ในสารละลายรวมตัวกับ พอลิไฮดรอกไซด์ (Polyhydroxides) กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่าพอลินิวเคลียร์ไฮดรอกไซด์อลูมิเนียม (Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes) ซึ่งอาจจะเป็น มอนอเมอร์ (Monomeric) และ พอลิเมอร์ (Polymeric) แต่สุดท้ายสารประกอบเชิงซ้อนของ  $\text{Al}^{3+}$  ไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนในรูปของ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  สำหรับตัวอย่างของ Monomeric ได้แก่  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  เป็นต้น ส่วนตัวอย่างของ polymeric ได้แก่  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ,  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ,  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$  และ  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$  ซึ่ง โครงสร้างของ ไดเมอร์ (Dimeric) และ สารประกอบเชิงซ้อนพอลิเมอร์ (Polymeric aluminum (III) hydroxo complexes) แสดงดังรูปด้านล่าง (Mollah, 2001)



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของ Poly-nuclear hydroxyl aluminum (III) complexes (Mollah, 2001)

(ก) Dimeric  $\text{Al}^{3+}$  hydroxo complexes

(ข) Polymeric  $\text{Al}^{3+}$  hydroxo complexes

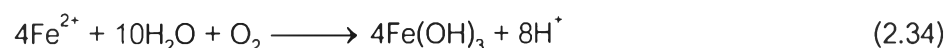
สำหรับกรณีของเหล็กเมื่อใช้เป็นขั้วแอโนดจะแตกตัวให้  $Fe^{2+}$  ในสารละลาย (2.32) และตกตะกอนออกมาในรูปของ  $(Fe(OH)_n)$  เมื่อ  $n = 2$  หรือ  $3$  ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงสมการที่ (2.33) และ (2.34) (Laure, 2003)



ภาวะสารละลายที่เป็นเบส



ภาวะสารละลายที่เป็นกรด



$Fe^{2+}$  ในสารละลายสามารถรวมตัวกับ Polyhydroxides กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Poly-nuclear hydroxyl iron (III) complexes ซึ่งอาจจะเป็น Monomeric และ Ferric hydroxo complexes ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-เบส แต่สุดท้ายสารประกอบเชิงซ้อนของ  $Fe^{2+}$  จะตกตะกอนในรูปของ  $Fe(OH)_3$  สำหรับตัวอย่างของ Monomeric และ Ferric hydroxo complexes ได้แก่  $Fe(OH)^{2+}$   $Fe(OH)_2^+$   $Fe(OH)_4^-$   $Fe(H_2O)_5OH^{2+}$   $Fe(H_2O)_4(OH)_2^+$  เป็นต้น (Murugunathan, 2004)

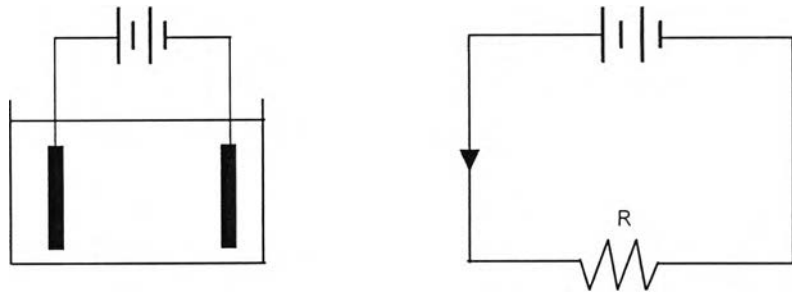
การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าของกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมี 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการขจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเป็นตัวพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้น แต่ถ้าระบบต้องการขจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีการตกตะกอนควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอน โดยให้ขั้วแอโนดอยู่ด้านล่าง (Mollah, 2004)

การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด คือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทดดังรูปที่ 2.21 ซึ่งการวางแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยามาก ทำให้ต้องมีการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้าแบบต่างๆ ขึ้น ในกรณีที่ต้องใช้ขั้วไฟฟ้ามามากกว่า 1 คู่ สามารถเลือกวิธีต่อทางไฟฟ้าได้ 2 แบบ คือ

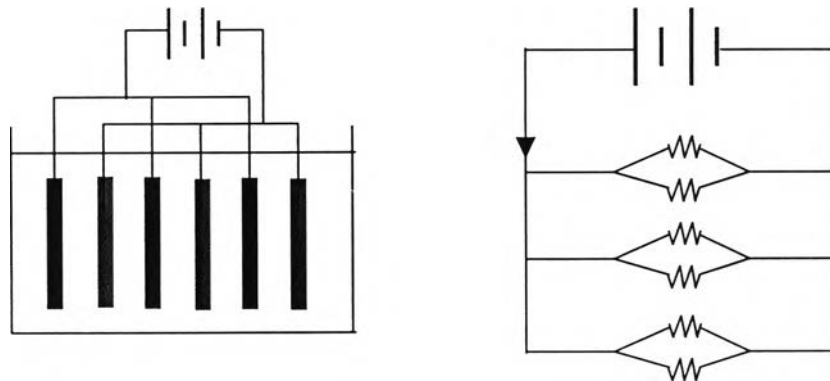
● มอนอโพลาร์ (Monopolar electrode) มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าแต่ละแผ่นทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ซึ่งวางสลับกันขั้วละแผ่นโดยที่ผิวหน้าทั้งของด้านของขั้วไฟฟ้าแผ่นเดียวกันจะมีขั้วเดียวกัน ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์ได้ 2 แบบคือ

- แบบขนาน (Parallel connections) กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งให้แต่ละเซลล์ขึ้นอยู่กับความต้านภายในของเซลล์นั้นๆ โดยที่ค่าความต่างศักย์ของระบบจะเท่ากับดังรูปที่ 2.22

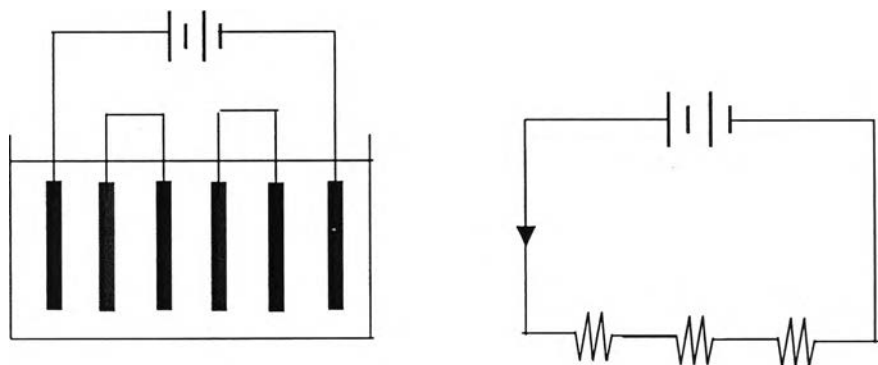
- แบบอนุกรม (Series connections) มีการจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าคล้ายเซลล์เดียวหลาย ๆ เซลล์มาต่อกัน โดยมีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้างดรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.21 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบมอนอโพลาร์ – เซลล์เดียว (Mollah, 2004)



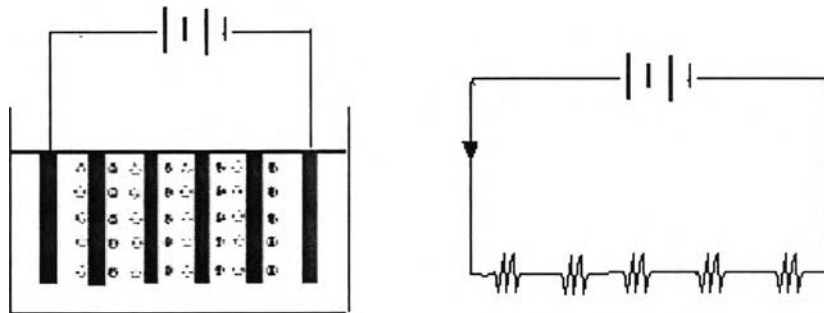
รูปที่ 2.22 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้ามอนอโพลาร์แบบขนาน (Mollah, 2004)



รูปที่ 2.23 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้ามอนอโพลาร์แบบอนุกรม (Mollah, 2004)



● ไบโพลาร์ (Bipolar electrodes) มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้นเฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุดดังรูปที่ 2.24 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านหนึ่งเป็นขั้วบวกซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ซึ่งต่อแบบอนุกรม แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะที่ทำการใช้งาน



รูปที่ 2.24 การจัดเรียงของขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์ (Mollah, 2004)

## 2.9 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในการกำจัดสีด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า

จากปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะพบว่าเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะทำให้เกิดปฏิกริยาหลายอย่างดังต่อไปนี้ (จลวรรณ์, 2542 และอานนท์, 2538)

### ● กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation)

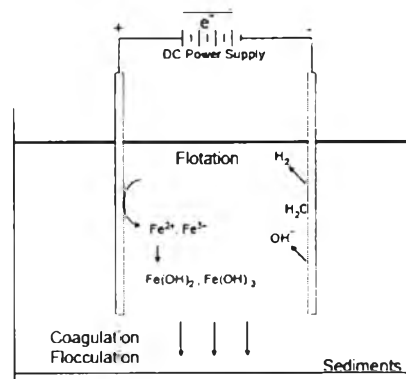
เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านน้ำ จะเกิดปฏิกริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) จะได้แก๊สออกซิเจนซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง ไอออนของโลหะที่ละลายน้ำได้ (วาเลนซ์ 2 ขึ้นไป) จะตกตะกอนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ (Organic contaminant) เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความพร้อมที่จะรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex)

### ● กระบวนการลอยตัว (Flotation)

โดยจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนซึ่งเป็นฟองเล็กมากที่อีกขั้วไฟฟ้าจะลอยตัวขึ้นสู่น้ำ เกิดเป็นชั้นของสารแขวนลอย

● กระบวนการรวมตัวเป็นสารเชิงซ้อน

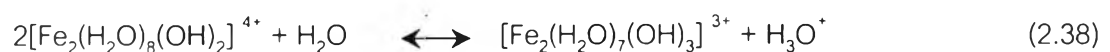
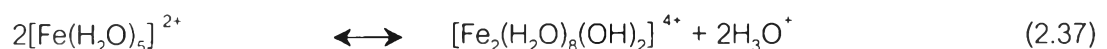
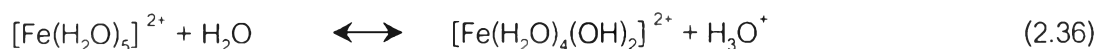
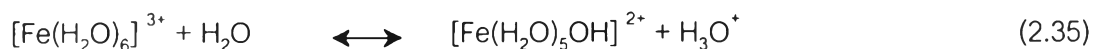
ที่ขั้วบวกไอออน ของ  $Fe^{3+}$  และ  $Al^{3+}$  จะทำปฏิกิริยารวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ออแกนอเมทัลลิก (Organometallic complex) กับสารอินทรีย์พวก แอโรแมติก (Aromatic) และ แอลเคน (Alkanes) สารเชิงซ้อนเหล่านี้ ไม่ละลายในน้ำ จะลอยสู่น้ำเสียโดยการลอยตัว (Flotation) จึงเกิดการพองโดยฟองแก๊ส และบางส่วนจมลง (Precipitation) ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 กลไกการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า (จูลวรรณ์, 2542)

● การกำจัดสีโดยกระบวนการออกซิเดชัน

กระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าจะใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการกำจัดสีโดยจะเกิดปฏิกิริยาของโลหะไฮดรอกไซด์เกาะจับอนุภาคของสีตกตะกอนลงมา ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาโคแอกกูเลชันก็จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซีที่คอมเพลกซ์ของเหล็กในเวลาเดียวกัน ดังสมการที่ (2.35 – 2.39) (Szpyrkowicz, 2001)



### ● การกำจัดสีโดยการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์

ในการบำบัดน้ำเสียที่สารปนเปื้อน เช่น สีและสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารประเภทคอลลอยด์นั้นถือว่ามีเสถียรภาพเมื่อสามารถดำรงสถานะแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนภายในเวลาสั้น เมื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์ตกตะกอนและแยกตัวจากน้ำก็ถือว่า เสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกทำลายและไม่มีเสถียรภาพอีกต่อไป เราสามารถใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอลลอยด์ คือชั้นประจุเชิงคู่ (Electric Double Layer) มาอธิบายได้ว่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว (Nernst Potential) และน้อยลงเมื่อห่างออกไป (ดังรูปที่ 2.26) ณ ตำแหน่งที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์แสดงว่าไม่อยู่ภายใต้อำนาจไฟฟ้าคอลลอยด์ ทำให้การกระจายตัวของอิออนบวกและลบเป็นไปตามปกติ ตามทฤษฎีชั้นคู่ (Double Layer) เชื่อว่าอิออนบวกชั้นในที่สุดไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทั้งนี้เพราะอิออนบวก มักมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ ระยะห่างระหว่างผิวของอนุภาคคอลลอยด์และจุดศูนย์กลางของอิออนที่อยู่ใกล้ที่สุด (ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอิออน) คล้ายมีเปลือกทรงกลมบางซึ่งมีความหนาเท่ากับ  $\Omega$  กันขวางอยู่เปลือกหรือชั้นบางนี้เรียกว่า ชั้นเสติน (Stern Layer) และถือว่าเป็นชั้นในของทฤษฎีนี้ ศักย์ไฟฟ้าที่เปลือกในมีค่าเท่ากับ ศักย์ไฟฟ้าของเสติน (Stern Potential) ส่วนเปลือกชั้นนอกเรียกว่า ชั้นการแพร่ (Diffuse Layer) คลอบคลุมจากเปลือกชั้นในไปถึงตำแหน่งที่อนุภาคคอลลอยด์หมดอำนาจไฟฟ้าพอดี (ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์)

นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าที่จุดอื่นซึ่งไม่ใช่ที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทั้งนี้โดยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้า (Electrophoretic Mobility) และคำนวณศักย์ไฟฟ้าจากค่าที่วัดได้ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้นี้เรียกว่า ซีตาโพเทนเชียล ( $Z_p$ ) หมายถึงศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหรือเปลือกนอกสุดของน้ำที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาคคอลลอยด์ ผิววนอกที่สุดนี้เรียกว่า ชั้นของเชียร์ (Plane of shear)

บทบาทของซีตาโพเทนเชียล มีมากกว่าศักย์ไฟฟ้าตัวอื่นๆ เนื่องจากซีตาโพเทนเชียลใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงระดับของเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพต่ำ จะมีซีตาโพเทนเชียลต่ำจะทำให้รวมตัวกันเป็นปฏิตะกอนได้ง่าย (มันสิน, 2538) ด้วยเหตุนี้ เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงขึ้นอยู่กับแรงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงผลักระหว่างอนุภาคต้องสูงกว่าแรงดูดจึงจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดูดมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆสามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือปฏิตะกอนได้ ทำให้คอลลอยด์ไม่มีเสถียรภาพ แรงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า Van-der-waals Force เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาค หรือซีตาโพเทนเชียล ทั้งนี้เป็นไปตามศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของคอลลอยด์ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว (Nernst Potential) และน้อยลง

เมื่อห่างออกไป ดังนั้นถ้าค่าซีตาโพเทนเชียลสูงจะเกิดการผลัดดี ซึ่งเกิดจากประจุลบของคอลลอยด์เสถียรภาพก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 2.26

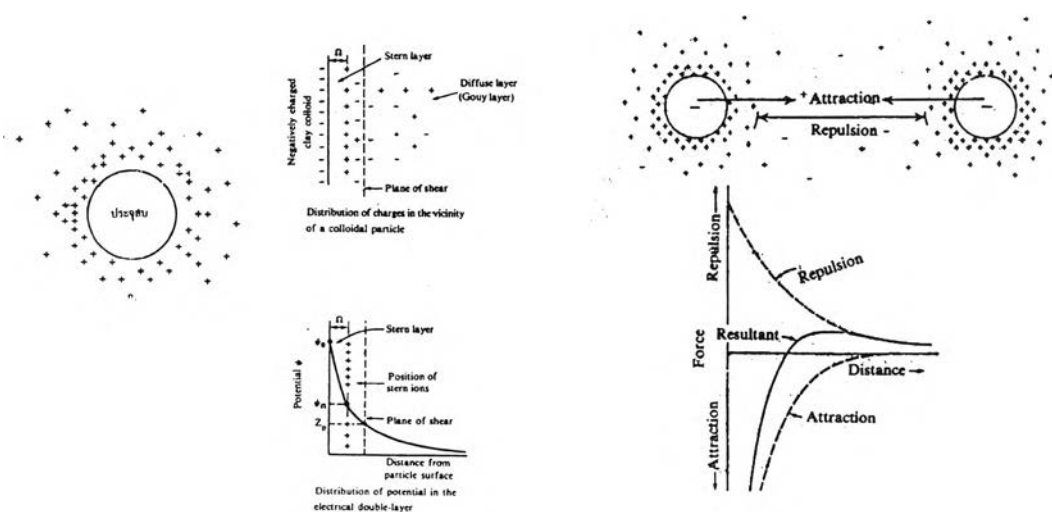
ดังนั้นการกำจัดสีโดยการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จะอาศัยกลไก 2 แบบ ในการทำลายเสถียรภาพของสีและสารอินทรีย์ ดังนี้

### 1. กลไกแอกกูเลชันแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ

กลไกแบบดูดติดผิว/ทำลายประจุ โดยการแตกตัวเป็นอออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่างๆ เช่น  $Al(OH)^{+2}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{+4}$  ซึ่งสามารถดูดติดบนผิว ของอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุลบของคอลลอยด์ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพ และพร้อมที่จะรวมตัวกันหลายๆอนุภาคจนกลายเป็นฟล็อก คุณสมบัติที่ดีของกลไกนี้คืออัดตัวได้แน่นและทำให้แห้งหรือดึงเอาน้ำออกจากสลัดจ์ได้ง่าย ถึงแม้ว่ากลไกแบบดูดติดผิว/ทำลายประจุจะมีข้อดีดังกล่าว แต่ในทางปฏิบัติ พบว่าโคแอกกูเลชันส่วนใหญ่มีกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (Sweep Coagulation) ซึ่งเกิดได้ง่ายกว่ามาก เนื่องจากกลไกนี้ต้องเกิดขึ้นและเสร็จสิ้นภายในเวลา  $10^{-4}$  ถึง 1 วินาที มิฉะนั้นแล้ว อออนคอมเพล็กซ์จะไฮโดรไลซ์ต่อไปจนเกิดผลึก  $Al(OH)_3$  ทำให้เกิด กลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก

### 2. กลไกแอกกูเลชันแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก

กลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก หรือ Sweep Coagulation โดยการสร้างผลึก  $Al(OH)_3$  ซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นปุย เมื่ออนุภาคคอลลอยด์สัมผัสกับผลึก  $Al(OH)_3$  ก็จะเกาะตัวจับอยู่บนผลึกนั้นเมื่อเกิดขึ้นมากๆ จะได้ปุยขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย กลไกแบบนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าแบบแรกแต่มีข้อเสียคือ เปลืองสารส้มและให้ตกตะกอนจำนวนมากที่มีคุณภาพต่ำ คืออัดตัวไม่แน่นและดึงน้ำออกยาก



รูปที่ 2.26 ทฤษฎี Electrical Double Layer (มันสิน, 2538)

## 2.10 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า (Mollah, 2001)

### ข้อดี

1. ใช้อุปกรณ์ไม่ยุ่งยาก และง่ายต่อการเดินระบบ เพราะควบคุมที่กระแสไฟฟ้าจึงต้องการการดูแลรักษาน้อย
2. ระบบนี้ไม่ใช้สารเคมี จึงไม่มีการปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด
3. ตะกอนที่เกิดขึ้นค่อนข้างคงตัวและแยกน้ำออกได้ง่าย เพราะประกอบด้วยโลหะออกไซด์/ไฮดรอกไซด์
4. ปุ๋ยที่เกิดขึ้นคล้ายกับปุ๋ยตะกอนทางเคมี แต่มีขนาดใหญ่กว่า สามารถแยกโดยการกรองได้เร็วกว่า
5. ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นขณะทำปฏิกิริยาจะพาของเสียลอยสู่ด้านบนทำให้ง่ายต่อการรวบรวมและเก็บออก

### ข้อเสีย

1. ชั่วที่เกิดจากการละลายทำให้ต้องเปลี่ยนบ่อยๆ
2. ในหลายๆ พื้นที่การใช้ไฟฟ้าอาจมีค่าใช้จ่ายสูง
3. การเกิดฟิล์มออกไซด์ที่ขั้วบวกทำให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพ
4. ต้องการน้ำเสียที่มีค่าความนำไฟฟ้าค่อนข้างสูง

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nagarathnamma และคณะ (1999) ศึกษาการลดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดยใช้เชื้อรา *Ceriporiopsis subvermispora* CZ-3 พบว่าเมื่อมีการใส่น้ำตาลกลูโคส ปริมาณ 1 กรัม/ลิตรในน้ำเสีย ที่มีระดับค่าความเป็นกรดเบส 4-4.5 อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เชื้อราจะสามารถลดสีได้ร้อยละ 98 ลดค่า ซีไอดีได้ร้อยละ 62 แต่ถ้าไม่มีการใส่กลูโคส เชื้อราจะทำการลดสีได้เพียงร้อยละ 62

Zhang และคณะ (2001) ศึกษากระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) และเรซิน (Resin) พบว่าเรซินมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำทิ้งของโรงงานเยื่อกระดาษมากกว่าถ่านกัมมันต์ โดยสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 95 เมื่อใช้จำนวนเรซินในปริมาณ 6 กรัมต่อน้ำทิ้ง 1 กิโลกรัม แต่จะกำจัดสีได้ร้อยละ 95 โดยใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ จำนวน 30 กรัมต่อน้ำทิ้ง 1 กิโลกรัม

Chandra และคณะ (2005) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษด้วยสารเคมีพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC) และบารักส์ฟายต์แอต (BFA) พบว่าภาวะที่

เหมาะสมสำหรับน้ำเสียที่ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 3 คือ ปริมาณ PAC เท่ากับ 3 กรัม/ลิตร โดยที่ภาวะดังกล่าวสามารถลดค่าซีโอดีได้ประมาณร้อยละ 80 และลดสีได้ปริมาณร้อยละ 90 และที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 4 ภาวะที่เหมาะสมคือใช้ BFA ที่ 2 กรัม/ลิตร โดยสามารถลดค่าซีโอดีได้ประมาณร้อยละ 50 และลดสีได้ปริมาณร้อยละ 55

Amat และคณะ (2005) ศึกษาการลดมลพิษในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและแสง พบว่าสามารถลดสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษในน้ำเสียจากโรงงานลงได้ โดยการวิเคราะห์โดยใช้แสง Fenton ( $1.8 \times 10^{-4}$  M  $\text{Fe}^{3+}$  และ 0.1 M  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) สามารถลดค่าซีโอดีและบีโอดีได้มากกว่าร้อยละ 50 และการวิเคราะห์โดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ 2 กรัม/ลิตร ค่าบีโอดีจะลดลงมากกว่าร้อยละ 30 และค่าซีโอดีจะลดลงประมาณร้อยละ 20

Buzzinu และคณะ (2005) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษโดยวิธีทำให้เกิดการตกตะกอนด้วยจุลินทรีย์ในเครื่องปฏิกรณ์ UASB พบว่าสามารถกำจัดค่าบีโอดีได้ถึงร้อยละ 80-86 เมื่อไม่มีกวน และใช้เวลาในการทดลอง 36 ชั่วโมง และค่าซีโอดีลดลงร้อยละ 75-78 เมื่อมีการกวนตลอดเวลาและใช้เวลาในการทดลอง 24 และ 30 ชั่วโมง

Wong และคณะ (2005) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษแบบการตกตะกอนเร่งโดยใช้ พอลิอะครีลาไมด์ (PAM) ที่มีมวลโมเลกุลและความหนาแน่นต่างกันพบว่าเมื่อใส่พอลิอะครีลาไมด์ที่แสดงประจุบวกจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีกว่าพอลิอะครีลาไมด์ที่แสดงประจุลบ และพอลิอะครีลาไมด์ที่มีมวลโมเลกุลมากที่สุดและมีความหนาแน่นน้อยที่สุดจะมีประสิทธิภาพทำให้เกิดการตกตะกอนมากที่สุด โดยเมื่อใส่ในปริมาณ 0.5 มิลลิกรัม/ลิตรจะทำให้มีการลดความขุ่นของน้ำได้ร้อยละ 95 ลดค่าของแข็งแขวนลอยรวมได้ร้อยละ 98 และลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 93 และมีดัชนีของตะกอนอยู่ที่ 14 มิลลิลิตร/กรัม