

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ [15]

กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษที่สำคัญแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการย่อยประกอบด้วย กระบวนการผลิตเยื่อ (Pulp Mill Process) กระบวนการทำแผ่นเยื่อ (Sheeting Process) และกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recovery Process)

2.1.1 กระบวนการผลิตเยื่อ (Pulp Mill Process)

1. หน่วยสับชิ้นไม้และคัดขนาดชิ้นไม้ (Chipping)

เป็นการเตรียมวัตถุดิบเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในการผลิตเยื่อกระดาษในขั้นตอนต่อไปคือ การแยกสิ่งที่ไม่ต้องการออก และการแปรรูปหรือลดขนาดวัตถุดิบให้เป็นชิ้นไม้ที่มีขนาดตามความต้องการ ขั้นตอนนี้จะใช้เครื่องจักรกลเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการใช้สารเคมีร่วมด้วย

2. หน่วยต้มเยื่อ (Cooking)

ชิ้นไม้ที่สับและคัดขนาดจากขั้นตอนของหน่วยสับชิ้นไม้และคัดขนาดชิ้นไม้จะถูกส่งไปยังขั้นตอนการต้มเยื่อด้วยกระบวนการทางเคมีแบบซัลเฟตหรือคราฟท์ (Sulphate or Kraft Process) ด้วยหม้อต้มที่เรียกว่า Kamyr อย่างต่อเนื่อง และจะใช้สารเคมีจำพวกโซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na₂S) เป็นน้ำยาเริ่มต้นในการต้มเยื่อภายใต้อุณหภูมิและความดันที่กำหนด เพื่อทำการย่อยสลายสารลิกนินและสารประกอบอื่นๆ ในกระบวนการจะมีการเติมสารเคมีโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) จึงเรียกกระบวนการแบบซัลเฟต และเยื่อที่ได้หากไม่นำไปฟอกจะนำไปทำกระดาษห่อหรือกระดาษผิวกล่อง (Kraft Paper and Kraft Linerboard) จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Kraft Process โดยกระบวนการแยกเส้นใยเริ่มต้นจากการต้มเยื่อโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ เป็นน้ำยาต้มเยื่อหรือที่เรียกว่า White Liquor ซึ่งจะทำการต้มในหม้อต้ม (Digester) 2 แบบคือ หม้อต้มเยื่อแบบ Batch digester โดยการใช้ถังต้มขนาดใหญ่เพียงถังเดียวควบคุมอุณหภูมิและความดันภายในถังด้วยไอน้ำ หลังจากที่ได้ต้มชิ้นไม้สับ (Chip) และน้ำยาต้มเยื่อ (White Liquor) โดยควบคุมระยะเวลาในการต้มตามกำหนด เมื่อต้มเยื่อจนสุกแล้วจะทำการลดความดันและอุณหภูมิเพื่อปล่อยเยื่อออกสู่ถังแยกเยื่อ แล้วจึงเริ่มทำการต้มเยื่อครั้งใหม่ หม้อต้มเยื่อแบบ Continuous digester เป็นวิธีการต้มเยื่อด้วยการผสมชิ้นไม้สับ (Chip) และน้ำยาต้มเยื่อ (White Liquor) โดยส่งเข้าไปที่ด้านบนของถังต้มเยื่อ ขณะที่ Chip ไหลลงในถังต้มเยื่อจะให้ความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิของ Chip ในขณะที่

ต้มทำปฏิกิริยากับน้ำยาต้มเชื้อได้ดี ส่วน Chip จะค่อยๆจมลงในถังน้ำยาต้มเชื้อที่เป็นท่อในถัง (Digester) โดยจะควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และเวลา ที่ขึ้นไม้สับ (Chip) จะผ่านการต้มตามกำหนด ขึ้นไม้สับที่ผ่านการต้มแล้วจะเป็นเชื้อซึ่งจะถูกส่งออกจากด้านล่างของถังต้มเชื้อ โดยขั้นตอนในการต้มเชื้อแบบต่อเนื่องสามารถทำการต้มเชื้อได้ปริมาณมาก โดยไม่ต้องหยุดพักการเติมขึ้นไม้สับเหมือนในระบบ Batch digester

3. การแยกเชื้อ

เป็นขั้นตอนการแยกเชื้อและน้ำยาต้มเชื้อที่ผ่านออกจากถังต้มเชื้อ (Digester) เมื่อปรับความดันลดลงจะทำให้ไอน้ำถูกดันเข้าสู่ถังปล่อยลม (Blow Tank) และไอน้ำจะทำการควบแน่นที่ Condensor เชื้อจะถูกแยกใน Blow Tank โดยเชื้อจะถูกส่งต่อไปยังหน่วยล้างเชื้อและน้ำยาต้มเชื้อที่ใช้แล้ว

4. การล้างและทำความสะอาดเชื้อ

ขั้นตอนการล้างเชื้อจะผ่านการแยกวัตถุดิบที่ต้ม ไม่สุกและพวกที่มีขนาดใหญ่เกินไปออก โดยใช้ตะแกรงหยาย (Johnson Knotter Screen) เชื้อที่ผ่านการคัดแล้วจะส่งต่อไปยังหน่วยล้างเชื้อซึ่งประกอบไปด้วยหน่วยล้าง 3 ขั้นตอน (Brown Stack Washer) หรือชนิด Drum Washer และทำการล้างด้วยวิธี Counter Current โดยใช้น้ำร้อนในการล้างเอา Black Liquor ออก น้ำยาต้มเชื้อ (Black Liquor) และน้ำล้างเชื้อจะไปเก็บในถัง Seal Tank ซึ่งจะนำกลับไปปรับปรุงให้เป็นน้ำยาต้มเชื้อสะอาดใหม่ การทำความสะอาดเชื้อเป็นขั้นตอนที่เชื้อผ่านการล้างเอาน้ำยาต้มเชื้อออก โดยยังมีสิ่งเจือปนอื่น เช่น เปลือกไม้ ตาไม้ เลียนไม้ กรวดทราย เป็นต้น เชื้อจะถูกส่งไปยังตะแกรงร้อน เชื้อลักษณะดังกล่าวได้แก่ Hopper Screen, Primary Centricleaner Vibration Screen และ Centricleaner จะทำหน้าที่แยก กรวด ดิน ทราย ออกจากเชื้อ เชื้อที่ทำความสะอาดแล้ว จะส่งต่อไปยังหน่วยสกัดลิกนิน

5. การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (O₂ Delignification)

เชื้อจะถูกรวมเข้ากับออกซิเจน โซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำ ควบคุมอุณหภูมิที่ 90 – 130 องศาเซลเซียส โดยเชื้อก่อนการสกัดมีค่า Kappa Number 10 – 12 โดยมีอัตราการใช้ออกซิเจนปริมาณ 2% ของน้ำหนักเชื้อแห้ง เมื่อเชื้อผ่านการสกัดลิกนินแล้วจะถูกนำไปล้างด้วยเครื่อง Wash Pass เพื่อส่งต่อไปยังหน่วยฟอกเชื้อ

6. การฟอกเยื่อ (Bleaching)

ขั้นตอนการฟอกเยื่อเป็นการเพิ่มความขาวสว่าง (Brightness) ของเยื่อกระดาษ สำหรับขั้นตอนการฟอกเยื่อนี้จะขึ้นอยู่กับความต้องการลักษณะความขาวสว่างของเยื่อ โดยสามารถทำการฟอกแบบขั้นตอนเดียวและแบบหลายขั้นตอน ซึ่งการฟอกเยื่อโดยใช้ก๊าซคลอรีนหรือสารประกอบคลอรีนสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 (Chlorination : C) เป็นขั้นตอนการละลายสารลิกนินออกจากเยื่อให้มากที่สุด โดยจะไม่ได้ทำการฟอกสี แต่จะทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสาร Chlorolignin ซึ่งจะเกิดในช่วงที่มีค่า pH 1 – 2

ขั้นตอนที่ 2 (Caustic Extraction and Oxygen : E) เป็นการล้างหรือละลาย Chlorolignin ที่เกิดจากปฏิกิริยา Chlorination ออก โดยคุณสมบัติของ Chlorolignin จะละลายได้ดีในน้ำร้อนที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ขั้นตอนที่ 3 (Hypochlorite Bleaching : H or Chlorinedioxide : D) เป็นการปรับปรุงสีของเยื่อที่มีลิกนินตกค้างให้ลดลงตามความต้องการ โดยเยื่อที่ผ่านการฟอกยังคงมีสีคล้ำ สารเคมีที่ใช้คือ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ และคลอรีนไดออกไซด์

ขั้นตอนที่ 4 (Chlorine Dioxide Bleaching : C) เป็นการฟอกสีเยื่อให้ขาวสว่างและแข็งแรง โดยใช้สารเคมีคลอรีนไดออกไซด์ โดยในทุกขั้นตอนของการฟอกเยื่อ เมื่อผ่านการฟอกด้วยสารเคมีจะทำการล้างเยื่อด้วยน้ำร้อน

7. การทำความสะอาดเยื่อภายหลังการฟอกเยื่อ (Bleached Stock Screening)

เป็นการทำความสะอาดเยื่อเพื่อดึงเอาส่วนของสิ่งสกปรกที่ตกค้างอยู่ออก เป็นการปรับปรุงเยื่อให้มีคุณภาพสูง โดยผ่านการ Centrifugal Cleaner เยื่อที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วจะผ่านเข้า Decker เพื่อเพิ่มความเข้มข้นก่อนส่งต่อไปยังหน่วยทำแผ่น (Sheeting Plant)

2.1.2 ขั้นตอนการเดินแผ่น (Sheeting) และการอบแห้ง (Dryer)

เยื่อที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วจะมีความเข้มข้นของเยื่อประมาณ 3% และจะส่งไปสู่ Head Box ซึ่งจะเจือจางเยื่อให้สามารถป้อนกระจายออกสู่ตะแกรงลวดเดินแผ่น น้ำถูกซึมผ่านตะแกรงลงด้านล่างและนำกลับไปใช้ใน Head Box อีกเยื่อที่ผ่านตะแกรงลวดจะถูกชุดลูกกด (Press) บีบน้ำออกและ

ผ่านเข้าไปยังชุดลูกอบ (Cylinder Dryer) โดยมีไอน้ำเป็นตัวให้พลังงานความร้อน ซึ่งแผ่นเยื่อที่ผ่านเครื่องเดินแผ่นแล้วจะมีความชื้น 10% จากนั้นจะถูกส่งไปเก็บที่เก็บผลิตภัณฑ์ (Warehouse)

2.1.3 กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่

1. โรงระเหย (Evaporator)

จุดมุ่งหมายพื้นฐานของโรงระเหยคือ การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำดำเจือจาง ที่ได้จากการล้างในกระบวนการผลิตเยื่อ ซึ่งมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบเพื่อให้ได้น้ำดำที่มีความเข้มข้นสูงก่อนนำไปเตาเผา นำสารเคมีกลับคืน (Recovery Boiler) ในระหว่างการระเหยเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำดำนี้ น้ำจะถูกกำจัดออกและนำกลับมาใช้ยังหน่วยผลิต Caustic Soda (Causticizing)

2. เตาเผา นำสารเคมีกลับคืน (Recovery Boiler)

หน้าที่ของเตาเผา นำสารเคมีกลับคืน คือการเผาน้ำดำเข้มข้น (Black Liquor) สำหรับความร้อนที่จะได้นำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า และไอน้ำเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป ส่วนน้ำเขียว (Green Liquor) อันเป็นผลพลอยได้จากหน่วยผลิตนี้จะใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตน้ำขาว (White Liquor) ในหน่วยผลิต Caustic Soda อย่างไรก็ตามจะต้องควบคุมความเข้มข้นของกำมะถันในน้ำขาวด้วย ดังนั้นจึงมีการผลิตโซเดียมซัลเฟตและได้จากเครื่องบำบัดมลพิษทางอากาศในเตาเผา นำสารเคมีกลับคืน

3. หน่วยการผลิต Caustic Soda (Causticizing)

น้ำเขียวที่ได้จากเตาเผา นำสารเคมีกลับคืนเป็นสารผสมระหว่าง Smelt และ Weak Liquor (โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เป็นองค์ประกอบเป็นส่วนใหญ่) ในหน่วยผลิตนี้จะนำปูนขาวไปผสมกับน้ำเขียว (Green Liquor) ก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูป เนื่องจากกระบวนการทางเคมีกลายเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และนำกลับมาใช้ใหม่ในการต้มเยื่อ

2.2 ลักษณะของสีและลิกนินในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ [15]

สีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษส่วนใหญ่เกิดจากลิกนินรวมทั้งอนุพันธ์ของลิกนิน และ โพลีเมอร์ของแทนนิน ซึ่งเกือบทั้งหมดจะถูกปล่อยจากกระบวนการต้มเยื่อ ล้างเยื่อ ฟอกเยื่อ และส่วนการนำสารเคมีกลับคืน โดยลิกนินจะถูกเปลี่ยนเป็น thio - และ alkali - lignin ในกระบวนการ Kraft Process และเปลี่ยนเป็น Lignosulfates ในกระบวนการ Sulfite Process กระบวนการฟอกเยื่อที่ใช้ Chlorine สารที่

เกิดขึ้นคือ Chlorolignin องค์ประกอบของลิกนินรวมทั้งอนุพันธ์ของลิกนินเหล่านี้จะต้านทานการย่อยสลายโดยทางชีววิทยา ส่งผลให้ค่า COD : BOD หลังจากผ่านระบบบำบัดทางชีววิทยาในขั้นที่ 2 ยังคงมีค่าสูง และค่า COD มักจะมีค่าที่สูงกว่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ ซึ่งอัตราส่วนนี้บ่งบอกว่า น้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษนั้นถูกบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพได้ยาก เนื่องจากมีการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมาก และนอกจากนี้สารประกอบลิกนินก็เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้น้ำเสียบำบัดได้ยากด้วยวิธีการทางชีวภาพอีกด้วย เนื่องจากลิกนินเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ อีกทั้งลิกนินยังเป็นปัจจัยทำให้เกิดสีในน้ำเสีย

ตารางที่ 1 ลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษประเภทต่างๆ [15]

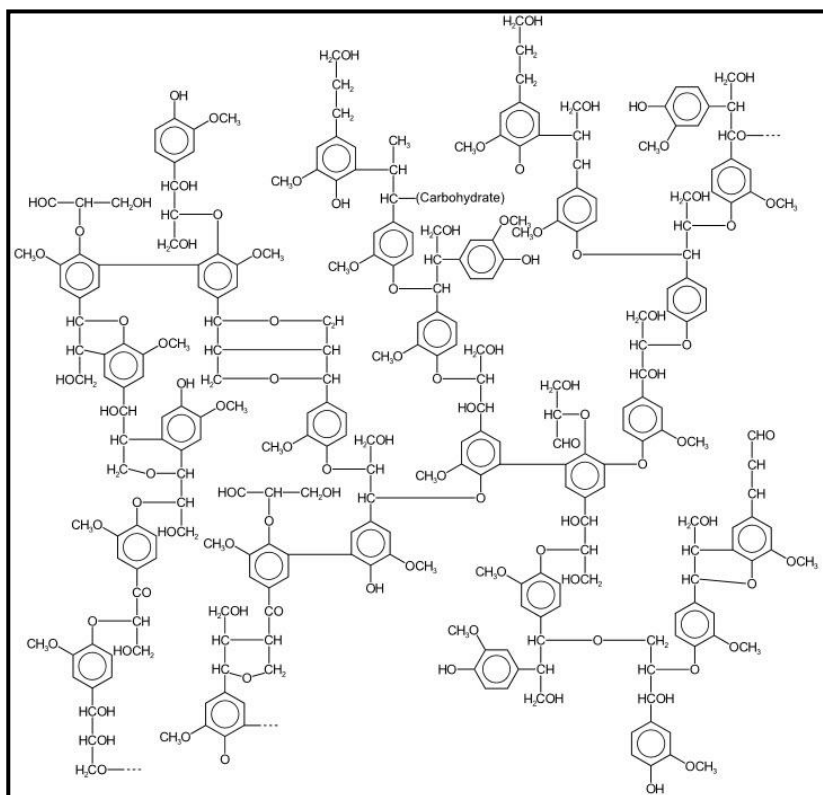
กระบวนการผลิต	ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./ตันเยื่อ)	ซีโอดี (มก./ล.)	บีโอดี (มก./ล.)	ระดับสี (Pt-Co)	ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)
1. กระบวนการผลิตเยื่อ ซานอ้อยฟอกขาวกึ่งเคมี	27.37	5,180.0	2,060.0	456.0	2,190.0
2. กระบวนการผลิตเยื่อ เคมีฟอกขาวแบบซัลเฟต	40.0	2,058.0	460.0	958.0	340.0
3. กระบวนการผลิตเยื่อ เคมีฟอกขาวแบบโซดา	53.9	1,300.0	400.0	535.0	400.0

ตารางที่ 2 ข้อมูลการใช้น้ำโรงงานผลิตเชื้อกระดาษประเภทต่างๆ [15]

กระบวนการผลิต	วัตถุดิบ	ปริมาณการใช้น้ำ (ลบ.ม./ตันเชื้อ)
1. กระบวนการผลิตเชื้อเคมีฟอกขาวแบบซัลเฟต	ไม้ยูคาลิปตัส	50
2. กระบวนการผลิตเชื้อเคมีฟอกขาวแบบโซดา	ไม้ยูคาลิปตัส	55
3. กระบวนการผลิตเชื้อเคมีฟอกขาวแบบโซดาและเยื่อกิ่งเคมี	ไม้ยูคาลิปตัส, ชานอ้อย	34.2
4. กระบวนการผลิตเชื้อเคมีฟอกและผลิตกระดาษพิมพ์เขียน	ไม้ยูคาลิปตัส	22
5. กระบวนการผลิตเชื้อเคมีแบบไม่ฟอก	ไม้ยูคาลิปตัส	50
6. กระบวนการผลิตเชื้อเคมีที่ใช้ทำกระดาษสา	ปอสา	225-1000
7. กระบวนการผลิตเชื้อเชิงกลที่ใช้ทำกระดาษไหว้เจ้า	ไม้ไผ่	30-47

2.3 ลิกนิน [15]

หน้าที่ทางกายภาพของลิกนิน เป็นเหมือนสารเสริมความแข็งแรงให้โครงสร้างของเนื้อไม้ ซึ่งลิกนินเป็นสารอสัณฐาน โมเลกุลใหญ่เป็น โครงสร้างโพลีเมอร์ที่ยาวค้งแสดงในภาพที่ 1 ไม่สามารถจับตัวเป็นผลึกได้ ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้ลิกนินสามารถแทรกตัวได้ในทุกส่วนของไม้ แม้กระทั่งในผนังเส้นใยชั้นต่างๆก็จะมีลิกนินแทรกอยู่ทุกชั้นมากน้อยไม่เท่ากัน สารลิกนินพบมากในผนังเซลล์ชั้นที่สองของพืช เนื้อไม้โดยทั่วไปจะมีลิกนิน ประมาณร้อยละ 20-30 ของน้ำหนักไม้แห้ง ขึ้นอยู่กับชนิดของไม้



ภาพที่ 1 โครงสร้างของสารประกอบลิกนิน [15]

2.4 ผลกระทบของสีและลิกนินต่อสิ่งแวดล้อม [15]

1. หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรงในปริมาณมาก จะทำให้มีการบดบังการส่งผ่านของแสงอาทิตย์ในน้ำ ทำให้แหล่งผลิตปฐมภูมิไม่สามารถสังเคราะห์แสงและทำให้ขาดแคลนออกซิเจนในน้ำ
2. สารประกอบของลิกนินบางประเภทจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ เช่น ปลานิลได้รับน้ำเสียจากกระบวนการฟอกสีเยื่อกระดาษ พบว่ามีผลทำให้กระดุกปลาเสียรูปร่าง และมีผลทำให้เกิดแผลในตับ ไต ม้าม และทางเดินอาหาร ท้ายที่สุดอาจถึงแก่ชีวิตได้

2.5 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ [16]

น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ มีความเป็นพิษเนื่องจาก สีและสารเคมีที่ตกค้าง ดังนั้น จึงต้องมีการบำบัดก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ในปัจจุบันวิธีการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษที่นิยมใช้กันทั่วไป แบ่งได้ 2 กระบวนการ คือ กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (biological treatment) และกระบวนการบำบัดทางเคมี (chemical treatment)

2.5.1 กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (biological treatment)

กระบวนการบำบัดทางชีววิทยาที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์มีหลายระบบ แต่ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ คือ ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge System) โดยระบบตะกอนเร่งนั้น มีหลักการคือให้น้ำเสีย และจุลินทรีย์ที่อยู่ในสภาวะใช้อากาศ ซึ่งจะให้เกิดปฏิกิริยาในถังเติมอากาศ (aerated tank) และให้มีการกวนผสมกับอากาศอย่างสมบูรณ์ อัตราการทำลายสารอินทรีย์จะถูกร่งให้เร็วขึ้น โดยการเพิ่มทั้งปริมาณออกซิเจนและปริมาณจุลินทรีย์โดยเฉพาะแบคทีเรียทำการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อการดำรงชีพ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอีกส่วนจะถูกเปลี่ยนเป็นเซลล์ใหม่ของแบคทีเรีย แบคทีเรียในถังเติมอากาศเมื่อถูกทำให้ตกตะกอนในถังตกตะกอนจะเรียกว่า สลัดจ์ (sludge) ส่วนน้ำผสมระหว่างน้ำเสียกับตะกอนแบคทีเรียในถังเติมอากาศเรียกว่า มิกส์ลิควอร์ (mix liquor) ในถังเติมอากาศจะมีระบบเติมอากาศ เพื่อทำหน้าที่ให้ออกซิเจนแก่แบคทีเรียแล้วกวนผสม เพื่อให้ตะกอนแบคทีเรียอยู่ในลักษณะแขวนลอยกระจายไปทั่วทั้งถังเติมอากาศ เมื่อกระบวนการดำเนินถึงขั้นตอนที่ต้องการแล้ว มิกส์ลิควอร์จะไหลจากถังเติมอากาศมาเข้าถังตกตะกอน พวกสารชีวภาพที่เกาะตัวกันเป็นก้อนหรือสลัดจ์ก็จะถูกแยกออกมาจากน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดโดยวิธีตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งบางส่วนของสลัดจ์อาจถูกส่งกลับเข้าไปในระบบบำบัดใหม่ในขั้นตอนการเติมอากาศ เพื่อรักษาความเข้มข้นของสลัดจ์ในถังเติมอากาศให้อยู่ในระดับที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากที่สุด และยังช่วยในการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์อีกด้วย อย่างไรก็ตาม การบำบัดแบบตะกอนเร่งยังต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการดูแลระบบให้สามารถทำงานได้ และยังมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และค่าใช้จ่ายในส่วนพลังงานสำหรับการเดินระบบ

2.5.2 กระบวนการบำบัดทางเคมี (chemical treatment)

กระบวนการบำบัดทางเคมีเป็นกระบวนการที่อาศัยการเติมสารเคมีหรือการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเพื่อกำจัดสารที่ไม่ต้องการในน้ำเสีย ซึ่งวิธีทางเคมีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษในปัจจุบัน ได้แก่ การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical precipitation) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon adsorption) การออกซิไดซ์ด้วยสารเคมี (chemical oxidation)

1. การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical precipitation)

การตกตะกอนด้วยสารเคมี เป็นกระบวนการกำจัดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยมักจะใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการกำจัดขั้นต้นก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เฟอร์รัสคลอไรด์หรือเฟอร์รัสซัลเฟต เป็น

ต้น การกำจัดสีโดยการตกตะกอนด้วยสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีแยกออกจากน้ำเสีย กระบวนการดังกล่าวสามารถทำให้กำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามชนิดโมเลกุลของสีย้อม ถ้าสีย้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีเอซิด การเกิดตะกอนของสีดังกล่าวจะไม่สามารถทำได้โดยการใช้สารส้ม ดังนั้น จำเป็นต้องใช้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น polyelectrolyte ในปริมาณที่มากพอ แต่ความเข้มข้นของ polyelectrolyte ที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการดังกล่าว จะกลายเป็นสารเคมีที่ปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว

2. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon adsorption)

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดของการบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์คือความเป็นพิษของสารเคมีไม่ได้ถูกบำบัดให้หายไป แต่เป็นการถูกดูดซับบนผิวถ่านกัมมันต์ซึ่งจะต้องมีกระบวนการกำจัดถ่านกัมมันต์ที่เสื่อมสภาพแล้ว

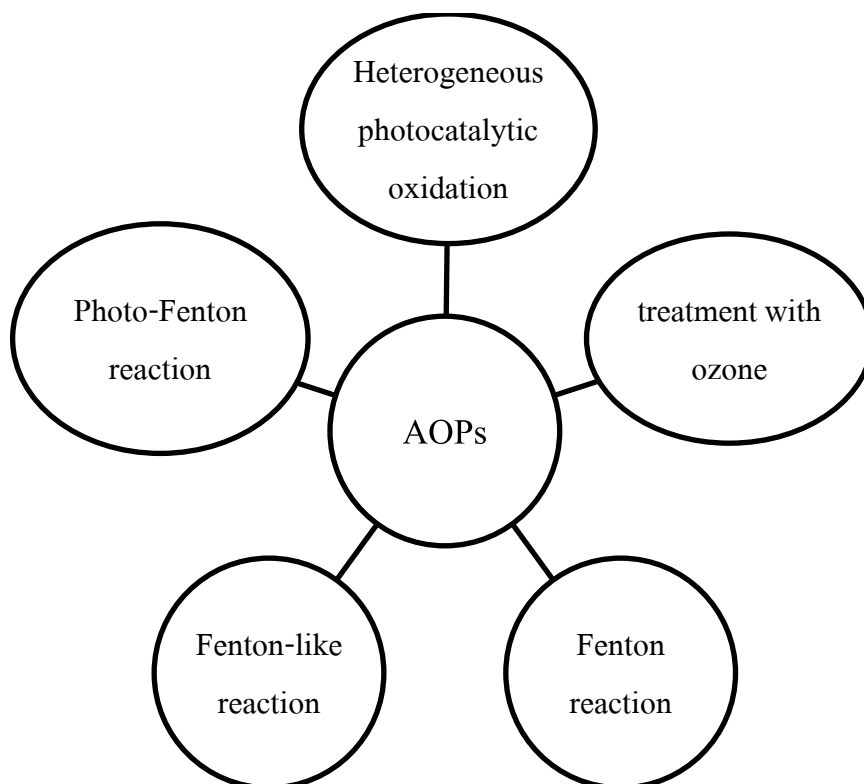
3. การออกซิไดซ์ด้วยสารเคมี (chemical oxidation)

การออกซิไดซ์ด้วยสารเคมีเป็นการบำบัดสารพิษในน้ำเสียโดยกำจัดความเป็นพิษให้หมดไป โดยการย่อยสลายสารเคมีที่มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิแดนท์โดยทั่วไป ได้แก่ โอโซน (Ozone, O_3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide, H_2O_2) คลอรีน (Chlorine, Cl_2) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium Permanganate, $KmnO_4$) สารละลายเฟนตอน (Fenton's Reagent) ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide, H_2O_2) กับ เฟอร์รัสไอออน (Ferrous Ion, Fe^{2+}) ได้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH^\bullet) ซึ่งตัวออกซิแดนท์ต่างๆจะให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารพิษแตกต่างกัน [16]

2.6 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง [17-18]

กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน (Advance Oxidation Processes, AOPs) เป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำเสียทางเคมี โดยขั้นตอนที่สำคัญของ AOPs คือ เป็นกระบวนการที่สามารถทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical, OH^\bullet) ซึ่งมีความไวในการทำปฏิกิริยาสูงสามารถออกซิไดซ์โมเลกุลของมลสารที่เป็นสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว โดยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดได้จากปฏิกิริยาเคมีที่มีการใช้แสงหรือไม่มีการใช้แสงก็ได้ ดังนั้นกระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชัน จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาในการลดสารที่มีความเป็นพิษ ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

กระบวนการ AOPs ได้ถูกนำมาใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียกันอย่างแพร่หลาย กระบวนการนี้เป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยอาศัยสารประกอบที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน 2.8 V [5] มาออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย กระบวนการแอดวานซ์ออกซิเดชันแบ่งได้ตามภาพที่ 2

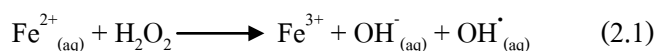


ภาพที่ 2 กระบวนการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs) [17-18]

2.7 ปฏิกิริยาโฟโตเฟนตอนในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย [19-23]

กระบวนการโฟโตเฟนตอน เป็นปฏิกิริยาที่ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1894 ได้มีการศึกษากลไกของปฏิกิริยานี้อย่างสมบูรณ์ พบว่าปฏิกิริยาโฟโตเฟนตอน จะทำให้เกิดไฮดรอกซิลแรดิคัล ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระ มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง และได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปะปนอยู่ เช่น ฟีนอล ฟอรั้มัลดีไฮด์ สารประกอบอะโรมาติก เบนซีน โทลูอิน และสารเคมีต่างๆ ที่ได้มาจากวัสดุสีย้อม ยามาแมลง สารกันบูด พลาสติก และยาง รวมทั้งกระบวนการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพวกน้ำเสีย ตะกอนหรือดินที่มีสิ่งปนเปื้อน โดยมีผลดังนี้ คือ ทำลายสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษ (Organic pollutant destruction), ช่วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability improvement), ลดค่าบีโอดี (BOD) และซีโอดี (COD), ลดกลิ่นและสี

ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับไอออนของเฟอร์รัส ซึ่งจะก่อให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals) ดังนี้

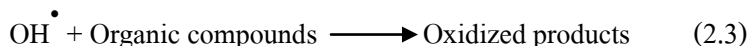


เมื่อปฏิกิริยา (1) เกิดขึ้นในน้ำเสีย ซึ่งมีสารประกอบอินทรีย์หลายประเภท พลังงานของการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเริ่มแรกที่อนุมูลไฮดรอกซิล สามารถที่จะเหนี่ยวนำให้มีการย่อยสลายของสารประกอบอินทรีย์ได้ อนึ่งปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลของสารละลายในปฏิกิริยา (1) สามารถกระตุ้นให้เกิดได้มากขึ้น เมื่อมีแสงเหนือม่วง (Ultraviolet) หรือ ก๊าซโอโซน (O_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

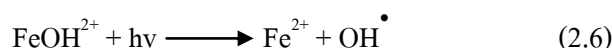
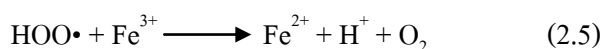
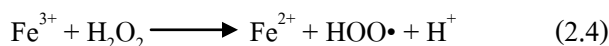
ปฏิกิริยาต่อมาก็คืออนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) แล้วให้ไอออนของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ดังนี้



หรือในเวลาเดียวกันอนุมูลไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารประกอบอินทรีย์ในสารละลาย ดังนี้



ต่อมาปฏิกิริยาจะมีการทำซ้ำโดยไอออนเฟอร์รัส (Fe^{2+}) จะช่วยเร่งให้มีการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไปเป็นแก๊สออกซิเจนและอนุมูลของเปอร์ไฮดรอกซิล (Perhydroxyl radicals) โดยที่ความเข้มข้นของไอออนของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในขณะที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะลดลงเรื่อยๆ ดังนี้



อนุมูลเปอร์ไฮดรอกซิลเป็นตัวยออกซิไดซ์ที่อ่อน (ระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเปอร์แมงกาเนต) แต่มีความสำคัญในกระบวนการเกิดไอออนเฟอร์รัส (Fe^{2+}) โดยเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้อนุมูลไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์เกือบทั้งหมด และให้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในขั้นสุดท้าย ปัญหา

โดยตรงของปฏิกิริยานี้ คือ การควบคุมสารเคมี และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ซึ่งหากมีการควบคุมองค์ประกอบเหล่านี้ไม่ดีพอ จะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดปฏิกิริยาเป็นเพียงน้ำและออกซิเจนเท่านั้น สมการที่ 6 คือ สมการปฏิกิริยาโฟโต ที่รวมกันกับปฏิกิริยาเฟนตอน

ผลิตภัณฑ์จากการออกซิเดชัน (Oxidized products) ที่ต้องการอย่างยิ่งในการบำบัดน้ำเสียก็คือ คาร์บอนไดออกไซด์จนหมดสภาพการเป็นสารพิษ และในแง่ของการตรวจสอบสมบัติของน้ำเสียก่อนการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ด้วยการตรวจสอบค่าซีโอดี (COD) หรือสารอินทรีย์ทั้งหมด (TOC) ถ้าผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เกิดปฏิกิริยาแล้วได้คาร์บอนไดออกไซด์ ค่าซีโอดี (COD) หรือค่าทีโอซี (TOC) ที่ตรวจสอบหลังปฏิกิริยาข้อมมีค่าน้อยจนสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้

2.8 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตเฟนตอน

2.8.1 อิทธิพลของปริมาณความเข้มข้นของเหล็ก

ในสภาวะที่ไม่มีปริมาณความเข้มข้นของเหล็กเข้าทำปฏิกิริยา จะไม่มีการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical) เช่น เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ลงไปในน้ำเสียที่มีฟีนอลเป็นองค์ประกอบ เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเหล็ก ทำให้การกำจัดฟีนอล (Phenol) เกิดขึ้น เนื่องจากเหล็กเป็นตัวทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลจนกระทั่งถึงจุดหนึ่ง เมื่อเติมเหล็กลงไปจะไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอล (Phenol) ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของเหล็กจะเป็นปริมาณที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาเฟนตอน ซึ่งมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

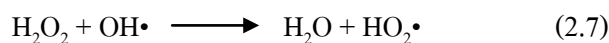
1. ปริมาณความเข้มข้นต่ำที่สุดของเหล็ก คือ 3-5 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปภายในเวลาที่เหมาะสมโดยไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ที่ปนอยู่ในน้ำเสีย
2. อัตราส่วนคั่งของเหล็กต่อสารตั้งต้นภายใต้ความเข้มข้นตามข้อ 1 โดยทั่วไป ควรจะเท่ากับ 1:10 ถึง 1:50 โดยน้ำหนัก เพื่อได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ซึ่งอัตราส่วนของสารนี้อาจจะมีผลต่อการกระจายตัวในการทำปฏิกิริยาการสร้างสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจออกมาในรูปของอัตราส่วนของปริมาณความเข้มข้นของเหล็กกับปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยทั่วไปคือเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1:5 ถึง 1:25 โดยน้ำหนัก [24]

O.B. Ayodele และคณะ ได้ศึกษาการย่อยสลาย amoxicillin ด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตอน โดยใช้ Pillared montmorillonite supported ferric oxalate (PMFeOx) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา PMFeOx 0 1 1.5 2 และ 2.5 กรัม ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา PMFeOx จาก 1 กรัม ไปจนถึง 2 กรัม สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลาย amoxicillin เนื่องจากเกิดพลังงานกระตุ้นสูงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา PMFeOx ทำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตอนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ที่เวลา 30 นาที และ 60 นาที เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา PMFeOx 2 กรัม สามารถย่อยสลาย amoxicillin 97.75% และ 99% ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 2 กรัม จะทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลาย amoxicillin ลดลง เนื่องจากมีปริมาณความเข้มข้นของเหล็กมากเกินไป จึงทำให้เกิดความขุ่น และไปยับยั้งการดูดซับของแสงในปฏิกิริยาโฟโตเฟนตอน [25]

2.8.2 อิทธิพลของปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารตั้งต้นหลักในการแตกตัวให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล แต่เมื่อถึงความเข้มข้นที่เหมาะสมระดับหนึ่ง จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากไฮดรอกซิลเรดิคัลจะทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นน้ำ และออกซิเจน

J. Herney และคณะ ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายสีย้อม Orange II ด้วยปฏิกิริยา Fenton-like oxidation ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ เมื่อเติมปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 6 12 และ 24 มิลลิโมล โดยให้ปริมาณความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงขึ้น ในที่นี้คือ 24 มิลลิโมล จะทำให้การย่อยสลายของสีย้อมลดลงตามสมการดังนี้



ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไป จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดน้ำและเปอร์ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Perhydroxyl radicals) ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการย่อยสลายสีย้อมลดลง [26]

2.8.3 อิทธิพลของค่า pH

Yao-Hui และคณะ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลด้วยปฏิกิริยาโฟโตเฟนตอน ที่ pH=3 เมื่อใช้ความเข้มข้นของ Fe^{3+} 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1080 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้หลอดรังสียูวี 3 ตัว ที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร พบว่าสามารถลดค่าซีโอดีได้ถึง 98% ในขณะที่ ปฏิกิริยาเฟนตอนซึ่งไม่มีแสงยูวีร่วมด้วยในปฏิกิริยา สามารถลดค่าซีโอดีได้ 63% และเปรียบเทียบกับ ปฏิกิริยาที่มีเฉพาะ แสงยูวีกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สามารถลดค่าซีโอดีได้เพียง 25% ดังนั้น ปฏิกิริยาโฟโตเฟนตอนสามารถสลายสารประกอบฟีนอลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในระบบที่มีค่า pH เป็นกรด [27]

2.9 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา [28]

2.9.1 นิยามของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกัน กับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจมีสถานะของเหลวหรือแก๊สก็ได้ ปฏิกิริยาเอกพันธ์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่มีความสามารถในการเลือกทำปฏิกิริยาสูง และว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะปฏิกิริยาที่คายความร้อน เนื่องจากสามารถกำจัดความร้อนที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าในระบบปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในรูปของของแข็ง แต่มีข้อเสียคือการแยกสารผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากกัน ซึ่งทำได้ยาก

2.9.2 นิยามของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม ซึ่งโดยทั่วไปมีสถานะเป็นของแข็ง ใช้เร่งปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นเป็นของเหลวหรือแก๊ส เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งนั้นมีความแข็งแรงเชิงกล ทนทานต่อความดันและอุณหภูมิสูง สามารถแยกออกจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นได้ง่าย

2.10 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

กลไกของการถ่ายเทมวลสารซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยามี 7 ขั้นตอน ได้แก่การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน การดูดซับของสารตั้งต้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา การเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยากลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ การคายออกจากผิวหน้าของสารผลิตภัณฑ์ การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา และขั้นตอนสุดท้าย คือการแพร่ภายนอกของสารผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.10.1 การแพร่จากภายนอกของสารตั้งต้น เป็นความสามารถของสารขณะไหลผ่านผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่จะแพร่ไปยังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาของสารตั้งต้นจากกระแสของสารตั้งต้น ไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้ยังไม่มีเปลี่ยนแปลงทางเคมี

2.10.2 การแพร่ของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน เป็นการแพร่ของสารตั้งต้นที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา เข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากรูพรุนมีขนาดเล็กมาก และไม่มีรูปร่างที่ชัดเจนแน่นอนตลอดรูพรุน ทำให้ระหว่างการแพร่แบบนี้จะมีการชนกันเองระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น หรือการชนของโมเลกุลกับผนังของรูพรุน ขั้นตอนนี้ยังไม่มีเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้นเช่นกัน

2.10.3 การดูดซับ เป็นการดูดซับของสารตั้งต้นบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ในขั้นตอนนี้โมเลกุลของสารตั้งต้นแพร่ไปถึงตำแหน่งกระตุ้นซึ่งอยู่ในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วเกิดการดูดซับ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในการเร่งปฏิกิริยานี้การดูดซับจะเป็นการดูดซับในเชิงเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) เสมอ นั่นคือเกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น ในที่นี้เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และผิวหน้าของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในที่นี้เรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent)

2.10.4 ปฏิกิริยาพื้นผิว หลังจากเกิดการดูดซับแล้ว สารตั้งต้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ ปฏิกิริยาส่วนใหญ่ อะตอมหรือโมเลกุลของสารตั้งต้นซึ่งถูกดูดซับอยู่บนตำแหน่งกัมมันต์ที่อยู่ติดกันเคลื่อนที่มาพบกันและรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหม่ ซึ่งการจะเกิดปฏิกิริยาได้ดี การดูดซับต้องไม่แข็งแรงเกินไป เพราะถ้าการดูดซับแข็งแรงมาก การเคลื่อนที่ของสารไปพบกันจะเกิดขึ้นยาก ซึ่งจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าน้อย

2.10.5 การคาย เป็นการหลุดออกของสารผลิตภัณฑ์จากผิวหนังตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากเสร็จสิ้นปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขั้นสุดท้าย การคายออกถือว่าเป็นกระบวนการย้อนกลับของการดูดซับ ถ้าเป็นการดูดซับในระบบปิดจะมีสมดุลเกิดขึ้นระหว่างการดูดซับและการคาย

2.10.6 การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้เสมือนเป็นกระบวนการย้อนกลับของขั้นตอนที่ 2.10.2 ยกเว้นเพียงสารที่แพร่ออกมาเป็นสารผลิตภัณฑ์ ไม่ใช่สารตั้งต้น อย่างไรก็ตามถ้าปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ก็จะมีสารตั้งต้นแพร่ออกมาด้วยเช่นกัน

2.10.7 การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์จากผิวหนังด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้ก็เป็นเสมือนการย้อนกลับของขั้นตอนที่ 2.10.1 ยกเว้นเพียงสารที่แพร่ออกไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ และอาจมีสารตั้งต้นแพร่ออกมาด้วยเช่นกันในกรณีที่ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์

