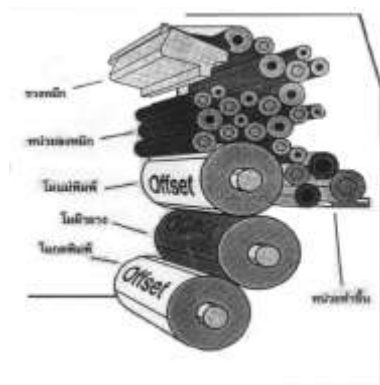


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การพิมพ์ระบบออฟเซต [1]

การพิมพ์ออฟเซต หรือออฟเซตลิโทกราฟี เป็นระบบที่ อลอย ซินีเฟลเดอร์ชาวเยอรมันเริ่มประดิษฐ์ในปี พ.ศ. 2341 แม่พิมพ์มีลักษณะพื้นราบ บริเวณภาพและไม่ใช้ภาพอยู่ระดับเดียวกัน พิมพ์ได้โดยอาศัยสมบัติทางเคมีของน้ำและน้ำมันที่ไม่รวมตัวกันง่ายๆ ใช้วิธีทางเคมีในการทำแม่พิมพ์ เดิมนั้นใช้แม่พิมพ์หิน และใช้หมึกครื่อง บริเวณที่ไม่มีภาพใช้กรดทำความสะอาด หมึกพิมพ์ออฟเซตเป็นหมึกพิมพ์ที่เหนียว และมีสมบัติเป็นน้ำมัน เมื่อทาลงไปบนแม่พิมพ์จะเกาะติดบริเวณภาพซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกัน ส่วนบริเวณที่ไม่มีภาพจะถูกทำให้ชื้นด้วยน้ำ หมึกพิมพ์จึงไม่ติดบริเวณนี้ เดิมนั้นใช้กระดาษกดพิมพ์บนแม่พิมพ์หินโดยตรง ซึ่งเป็นการพิมพ์แบบทางตรง (Direct printing) ต่อมาได้มีการพัฒนาโดยใช้โลหะแผ่นยางเป็นแม่พิมพ์ และพิมพ์ผ่านยาง ซึ่งทำให้เป็นการพิมพ์ทางอ้อม (Indirect printing) โดยวัสดุพิมพ์จะไม่สัมผัสกับแม่พิมพ์ โดยตรงแต่จะอยู่ระหว่างโมฟ้ายางกับโมกดพิมพ์ ข้อดีของการพิมพ์ระบบออฟเซตได้แก่ คุณภาพของการพิมพ์ที่ดีกว่าระบบอื่นๆ ใช้หมึกน้อยกว่าการพิมพ์ระบบอื่น เมื่อเทียบกับเนื้อที่ที่พิมพ์, แม่พิมพ์ของระบบออฟเซตทำให้ง่ายกว่าระบบอื่นๆ มีทั้งพิมพ์ชนิดจำนวนน้อย (Short run) จำนวนพิมพ์ปานกลาง (Medium run) และการพิมพ์ระยะยาว (Long run) เนื่องจากความรวดเร็วในการพิมพ์แม่พิมพ์นี้ ทำให้นิยมใช้ในการพิมพ์หนังสือพิมพ์ การพัฒนาในปัจจุบันคือการบันทึกภาพจากคอมพิวเตอร์ลงบนแม่พิมพ์โดยตรง (Computer to plate) และการบันทึกภาพจากคอมพิวเตอร์ลงเครื่องพิมพ์โดยตรง (Computer to print) จึงสามารถดำเนินการพิมพ์ได้ทันทีในระยะเวลาอันสั้น สิ่งพิมพ์ที่ทำการพิมพ์ด้วยระบบออฟเซตได้แก่ หนังสือ ไปสเตอร์ วารสาร แคตตาล็อก บัตรอวยพร บรรจุภัณฑ์ประเภทโลหะ (Metal decorating) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างหน่วยพิมพ์ออฟเซต[1]

2.2 แหล่งกำเนิดน้ำเสียของโรงพิมพ์ออฟเซต [9]

ในกระบวนการผลิตสิ่งพิมพ์ออฟเซต นั้นสามารถแบ่งกระบวนการพิมพ์ ออกได้เป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ คืองานก่อนพิมพ์ (Pre-press) งานพิมพ์ (Press) และงานหลังพิมพ์ (After-press) ซึ่งแต่ละขั้นตอนก่อให้เกิดน้ำเสียที่แตกต่างกันดังนี้

2.2.1 ของเสียที่เกิดจากขั้นตอนก่อนพิมพ์

กระบวนการก่อนพิมพ์ประกอบด้วยขั้นตอนการผลิตฟิล์ม ขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ และขั้นตอนการรื้อฟ โดยของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการก่อนพิมพ์ที่เป็นของเหลวส่วนมากแล้วก็เป็นน้ำยาที่เสื่อมสภาพหรือน้ำล้างสุดท้ายจากขั้นตอนการผลิตและน้ำยาน้ำล้างเครื่องต่างๆ เป็นต้น ของเสียที่เกิดขึ้นจะมีดังต่อไปนี้ น้ำยาสร้างภาพที่เสื่อมสภาพ น้ำยาคงภาพที่เสื่อมสภาพ และน้ำล้างขั้นสุดท้ายในการผลิตฟิล์ม และของเสียจากการรื้อฟ

2.2.1.1 น้ำยาสร้างภาพ (Developer) ที่เสื่อมสภาพ

ขั้นตอนการผลิตฟิล์ม องค์ประกอบของน้ำยาสร้างภาพ (Developer) โดยส่วนใหญ่เป็นไฮโดรควิโนนเมทอล ซึ่งเป็นสารสร้างภาพจะถูกใช้หมดไป แต่ยังเหลือสารประกอบอื่นๆ เช่น สารเร่งปฏิกิริยาสร้างภาพหรือด่าง (เช่น บอแรกซ์ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น) สารกันเสีย (เช่น โซเดียมซัลไฟท์ โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟท์) และสารกันฟ็อก (เช่น โพแทสเซียมโบรไมด์) น้ำยาสร้างภาพที่เสื่อมสภาพหลังจากการผลิตฟิล์มปล่อยทิ้งลงสู่บ่อพักเพื่อรอการบำบัดต่อไป

2.2.1.2 น้ำยาคงภาพ (Fixer) ที่เสื่อมสภาพ

ขั้นตอนการผลิตฟิล์ม ฟิล์มที่ใช้จะมีการเคลือบสารไวแสงซึ่งเป็นสารประกอบเงินเฮไลด์ (Silver halide) เงินเฮไลด์บริเวณที่ไม่ได้รับแสงจะทำปฏิกิริยากับน้ำยาคงภาพ (Fixer) กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของเงินที่ละลายน้ำได้ และหลุดออกจากผิวฟิล์มไปอยู่ในน้ำยาคงภาพ (Fixer) หรือในน้ำล้างสุดท้าย น้ำยาคงภาพ (Fixer) จะเสื่อมสภาพเมื่อไฮโป (หรือชื่อทางการเคมีว่า โซเดียมไทโอซัลเฟต) ซึ่งเป็นสารคงภาพเป็นองค์ประกอบของน้ำยาคงภาพ (Fixer) ถูกใช้หมดไป แต่จะยังคงมีสารประกอบเชิงซ้อนของเงินเจือปนอยู่ เนื่องจากน้ำยาคงภาพที่เสื่อมสภาพยังมีสารประกอบเชิงซ้อนของเงินเหลืออยู่ ดังนั้นการทิ้งน้ำยาคงภาพต้องแยกทิ้งใส่ภาชนะบรรจุเพื่อจำหน่ายให้หน่วยงานหรือร้านค้านำไปเข้าสู่กระบวนการแยกเงิน เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ต่อไป

2.2.1.3 น้ำล้างสุดท้าย (Washing)

น้ำล้างสุดท้ายจากขั้นตอนการผลิตฟิล์มอาจมีสารประกอบของน้ำยาสร้างภาพและน้ำยาคงภาพ (Fixer) เจือปนอยู่ การทิ้งจึงควรทิ้งลงสู่บ่อพักเพื่อรอการบำบัดต่อไป

2.2.1.4 ของเสียจากขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์

ของเสียจากขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ ได้แก่ น้ำยาสร้างภาพ กัมอาราบิก (Gum) และน้ำล้างสุดท้าย (Washing) ในการผลิตแม่พิมพ์นั้นสารไวแสงที่เคลือบบนแม่พิมพ์ออฟเซตในส่วนที่ไม่ใช่

ภาพ (Non-Image Area) จะต้องออกมาทับน้ำยา (Developer) และน้ำล้าง พอลิเมอร์ไวแสงชนิดเนกาทีฟมักเป็นส่วนผสมระหว่าง Acrylate กับ Styrene monomer ส่วนเรซินที่ใช้มักเป็น Polyvinyl cinnamate สารเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมแข็งในระหว่างการฉายแสง และส่วนที่ไม่ได้รับแสงสามารถละลายได้ในน้ำยาสร้างภาพ ส่วนสารไวแสงชนิดพอซิทีฟเป็นกลุ่มไดเอโซ เช่น Diazo oxide, Quinine diazides, Diazo derivative of naphthalene โดยปกติสามารถละลายน้ำได้ภายหลังการฉายแสงจะสลายตัวและสามารถละลายได้ในน้ำยาสร้างภาพซึ่งเป็นสารละลายเบส

สารละลายกัมอะราบิกทำหน้าที่เคลือบผิวหน้าแม่พิมพ์ โดยสารละลายกัมอะราบิกจะอยู่ในรูปของสารละลายเป็นกรด (pH น้อยกว่า 5.5) กรดที่ใช้ส่วนใหญ่คือ กรดฟอสฟอริก

ดังนั้น ของเสียที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์จะมีทั้งค่า กรด หรือตัวทำละลายเจือปนอยู่ รวมทั้งยังมีสารเคลือบแม่พิมพ์หรือพอลิเมอร์ไวแสงที่จะละลายหลุดออกมาด้วย ในการล้างแม่พิมพ์ด้วยมือในถาดหรือล้างด้วยเครื่องแม่พิมพ์อัตโนมัติจะมีท่อน้ำทิ้งอยู่ ท่อนี้ไม่ควรเดินทางไปสู่ท่อระบายน้ำ แต่ควรเชื่อมต่อกับถังหรือบ่อเก็บน้ำเสีย ซึ่งอาจบำบัดรวมกับน้ำทิ้งจากขั้นตอนการล้างฟิล์มได้

2.2.1.5 ของเสียจากขั้นตอนการบรูฟ

ของเสียจากขั้นตอนการบรูฟ ได้แก่ น้ำจากการล้างทำความสะอาดเครื่องบรูฟที่อาจมีการปนเปื้อนของหมึกพิมพ์และน้ำมัน สารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการบรูฟจะเป็นพวกหมึกพิมพ์ และน้ำมัน สำหรับล้างทำความสะอาดเครื่องบรูฟ ของเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการบรูฟนั้นจะเกิดจากขั้นตอนการล้างเครื่องบรูฟเหมือนการล้างเครื่องพิมพ์ น้ำทิ้งจากการล้างเครื่องบรูฟจะมีหมึกพิมพ์และน้ำมันเจือปนอยู่ซึ่งเป็นสารอันตรายเช่นเดียวกัน

2.2.2 ของเสียที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการพิมพ์

ของเสียที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการพิมพ์นั้นจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับของเสียที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการ บรูฟ แต่จะมีปริมาณของเสียเกิดขึ้นมากกว่าเพราะมีขั้นตอนการปฏิบัติการที่ยุ่งยากและซับซ้อนกว่าขั้นตอนการบรูฟมาก ของเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการพิมพ์ได้แก่ น้ำเสียจากการล้างเครื่องพิมพ์ที่ปนเปื้อนหมึกพิมพ์ น้ำยาฟาว์เทน สารละลายกัมอะราบิก รวมทั้งยังมีของเสียจากการล้างทำความสะอาดฝ้ายาง และของเสียจากการล้างทำความสะอาดแม่พิมพ์ เป็นต้น

2.2.2.1 น้ำยาฟาว์เทน (Fountain solution)

น้ำยาฟาว์เทนที่ใช้ในการพิมพ์นั้นเป็นกรดอ่อนผสมแอลกอฮอล์ รวมทั้งมีโครเมียมเป็นสารประกอบอันตรายเจือปนอยู่ ซึ่งน้ำยานี้จะระเหยได้ และอาจไปรวมอยู่ในรางหมึกพิมพ์ ในขณะเดียวกันก็มีหมึกมาปนอยู่ในรางใส่น้ำยาฟาว์เทน เครื่องพิมพ์อาจมีระบบหมุนเวียนให้น้ำยาฟาว์เทนสะอาดขึ้น แต่เมื่อน้ำยานี้สกปรกเพราะมีหมึก และขุยของกระดาษมาปนแม้เพียง 1% ก็ต้องทิ้งน้ำยาส่วนหนึ่งไปเช่นเดียวกัน โดยทั่วไปประมาณ 5-10 % ของน้ำยาฟาว์เทนที่ใช้จะถูกทิ้งลงสู่บ่อ

เพื่อรอการบำบัดซึ่งในของเสียนั้นจะมี wax เป็นส่วนประกอบอยู่ด้วยการบำบัดของเสียทำได้ยากและต้องมีการล้างระบบลูกน้ำด้วย

2.2.2.2 น้ำและน้ำมันล้างเครื่องพิมพ์

น้ำเสียจากขั้นตอนการพิมพ์นั้นสามารถเกิดได้จากการล้างเครื่องพิมพ์ในแต่ละหน่วยพิมพ์หรือในระหว่างการเปลี่ยนสีหรือเปลี่ยนงานพิมพ์ และมีการใช้น้ำมัน ตัวทำละลาย น้ำยาเคมี และน้ำธรรมดาในการล้างเครื่องพิมพ์และอุปกรณ์ต่างๆ โดยขั้นตอนแรกช่างพิมพ์จะนำหมึกพิมพ์ที่เหลือออกจากรางใส่หมึก แล้วใช้น้ำมันหรือตัวทำละลายฉีดล้างรางหมึกและลูกกลิ้งหมึกเพื่อละลายหมึกออกมา โดยมีรางอีกอันมาทำการรองรับน้ำมันที่ล้างแล้ว เพื่อนำมาใส่ในถังรอการจำหน่าย ดังนั้นของเสียที่เป็นของเหลวที่สำคัญในขั้นตอนการพิมพ์คือ หมึกพิมพ์ที่ปนอยู่ในน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ล้างเครื่องพิมพ์ ซึ่งเป็นของเสียที่เป็นของเหลวที่มีความเป็นพิษสูง น้ำมันซึ่งเป็นของเสียอันตรายควรนำไปทิ้งอย่างถูกวิธี โดยการบรรจุใส่ภาชนะแยกทิ้งเพื่อจำหน่ายแก่โรงงานรับกำจัดของเสียหรือนำไปแยกหมึกออก เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป

2.2.3 ของเสียจากขั้นตอนหลังพิมพ์

ในส่วนของการกระบวนการหลังพิมพ์ไม่ก่อให้เกิดน้ำทิ้งขึ้นโดยตรงในการใช้งานของเครื่องจักรไม่มีการล้างเครื่อง แต่ใช้วิธีการทำความสะอาดโดยการเช็ดถูแทน

2.3 การจัดการของเสียที่เป็นของเหลว [9]

การจัดการของเสียที่เป็นของเหลวสามารถจำแนกได้เป็นการจัดการของเสียที่เป็นของเหลวที่มีการแยกทิ้งซึ่งเป็นของเสียที่เป็นของเหลวที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้หลังจากผ่านกระบวนการต่างๆ และการจัดการของเสียที่เป็นของเหลวโดยการทิ้งลงสู่บ่อเพื่อรอการบำบัดซึ่งเป็นของเสียที่เป็นของเหลวที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 ของเสียที่เป็นของเหลวที่ต้องทำการแยกทิ้งมีดังนี้

- น้ำยาคงภาพ (Fixer) เนื่องจากน้ำยาคงภาพที่เสื่อมสภาพยังมีสารประกอบเชิงซ้อนของเงินเหลืออยู่ ดังนั้นการทิ้งน้ำยาคงภาพต้องแยกทิ้งใส่ภาชนะบรรจุเพื่อจำหน่ายให้หน่วยงานหรือร้านค้านำไปเข้าสู่กระบวนการแยกเงิน เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์
- น้ำมันล้างทำความสะอาดเครื่อง หมึกพิมพ์ที่ปนอยู่ในน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ล้างเครื่องพิมพ์ซึ่งเป็นของเสียที่เป็นของเหลวที่มีความเป็นพิษสูง ต้องบรรจุใส่ภาชนะแยกทิ้งเพื่อจำหน่ายแก่โรงงานรับกำจัดของเสีย หรือนำไปแยกหมึกออกเพื่อนำไปเป็นเชื้อเพลิงต่อไป

2.3.2 ของเสียที่เป็นของเหลวที่ทิ้งลงสู่บ่อเพื่อรอการบำบัดมีดังนี้

- น้ำยาสร้างภาพ (Developer) องค์ประกอบของน้ำยาสร้างภาพโดยส่วนใหญ่เป็นไฮโดรควิโนนเมทอลซึ่งเป็นสารสร้างภาพจะถูกใช้หมดไป แต่ยังคงเหลือองค์ประกอบอื่นๆ เช่น สารเร่งปฏิกิริยาสร้างภาพหรือด่าง (เช่น บอแรกซ์ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น) สารกันเสีย (เช่น โซเดียมซัลไฟท์ โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟท์) และสารกันฟ็อก (เช่น โพแทสเซียมโบรไมด์) น้ำยาสร้างภาพที่เสื่อมสภาพหลังจากผลิตฟิล์มสามารถปล่อยทิ้งลงสู่บ่อพักเพื่อรอการบำบัดได้เลย

- น้ำล้างสุดท้าย (Washing) จากขั้นตอนการผลิตฟิล์มอาจมีสารประกอบของน้ำยาสร้างภาพและน้ำยาคงภาพเจือปนอยู่ การทิ้งจึงควรทิ้งลงสู่บ่อพักเพื่อรอการบำบัดต่อไป

- ของเสียที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ซึ่งมีทั้งด่าง กรด หรือตัวทำละลายเจือปนอยู่ รวมทั้งยังมีสารเคลือบแม่พิมพ์หรือพอลิเมอร์ไวแสงที่จะละลายหลุดออกมาด้วย ในการล้างแม่พิมพ์อาจล้างด้วยมือหรือล้างด้วยเครื่องล้างแม่พิมพ์อัตโนมัติจะมีท่อน้ำทิ้งอยู่ ท่อนี้ไม่ควรเดินทางไปสู่ท่อระบายน้ำ แต่ควรต่อเชื่อมกับถังหรือบ่อเก็บน้ำเสีย ซึ่งอาจบำบัดรวมกับน้ำทิ้งจากขั้นตอนการล้างฟิล์มก็ได้

- น้ำยาฟาว์เทน (Fountain solution) จะมีการปนเปื้อนของหมึกพิมพ์และขุกระดาษ น้ำยาฟาว์เทนที่ใช้แล้วจะทิ้งลงสู่บ่อเพื่อรอการบำบัด

2.4 การบำบัดน้ำเสีย

จากการสำรวจพบว่าโรงพิมพ์ออฟเซตขนาดกลางและขนาดใหญ่มีน้ำทิ้งที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สูงเกินมาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรม หรือกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกำหนดไว้ ถึงแม้ว่าจะเป็นน้ำทิ้งรวม ซึ่งมีการเจือจางสารเคมีไปบ้างแล้วก็ตาม เช่นค่าซีโอดีของน้ำทิ้งรวมจากโรงพิมพ์ออฟเซตขนาดใหญ่แบบครบวงจรที่สำรวจมาได้ อยู่ในช่วง 2,500-3,500 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีค่าไขมันสูงถึง 700 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าของแข็งแขวนลอยโดยเฉลี่ย 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะมีผลกระทบได้ในอนาคต ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาระบบบำบัดให้มีประสิทธิภาพเพื่อที่จะสามารถลดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปแล้วมี 4 วิธีดังนี้

2.4.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical process)

กระบวนการทางกายภาพ (Physical process) เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD_5) ประมาณ 20-30% เท่านั้น วิธีการต่าง ๆ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การคัดด้วยตะแกรง (Screening) เป็นการแยกเศษขยะต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถูพลาสติก กระดาษ ตะแกรงมีหลายขนาด การคัดด้วยตะแกรงจึงเป็นการแยกขั้นตอนแรกในการบำบัดน้ำเสีย การคัดย่อย

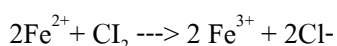
(Combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การกวาด (Skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมันโดยทำการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย การทำให้ลอย (Floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ การตกตะกอน (Sedimentation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

2.4.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical process)

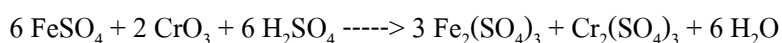
เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด ด่างสูงๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้วทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

การทำให้เกิดการตกตะกอน (Precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้ต่อเมื่อไม่สามารถแยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพ โดยส่วนมากสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนจะละลายน้ำ เช่น เกลือของสารประกอบต่างๆ เช่น เกลืออะลูมิเนียมซัลเฟต หรือสารส้ม ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) เกลือเหล็ก (FeCl_3 , FeSO_4) และเกลือของแคลเซียม ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ส่วนเกลือที่นำมาช่วยในการเกิดตะกอนได้ดียิ่งขึ้นนี้เป็นสารประกอบของกลุ่ม Activated ของ Silica และ Polyelectrolytes โดยกระบวนการทางเคมีมีหลายวิธี

การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของอะตอมให้แก่สารเคมีที่เติมลงไป ในน้ำเสียโดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน Fe^{2+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็นสาร Fe^{3+} ซึ่งมีพิษน้อย ด้วยคลอรีน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



การเกิดรีดักชันทางเคมี เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารพิษไปเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง อะตอมหรือไอออน ของสารพิษจะรับอิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) เช่น การเปลี่ยน Cr^{6+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็น Cr^{3+} ด้วยเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) ในสภาพที่เป็นกรด ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



2.4.3 กระบวนการทางชีววิทยา (Biological process)

กระบวนการทางชีววิทยา (Biological process) เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่าง ๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้เลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายแบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (Aerobic bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นพวกไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic bacteria)

2.4.4 กระบวนการดูดซับทางกายภาพ-เคมี (Physical-chemical process)

เป็นกระบวนการที่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยมากกว่ากระบวนการที่กล่าวมา ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้ขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสีย ที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนอื่นแล้ว เช่น กระบวนการดังต่อไปนี้

2.4.4.1 การดูดซับด้วยถ่าน(Carbon adsorption) วิธีการนี้ใช้ผงถ่านหรือคาร์บอนเป็นตัวดูดซับสารเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง

2.4.4.2 การแลกเปลี่ยนประจุ วิธีการนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียกับตัวกลางที่บรรจุซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบ

ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปการบำบัดน้ำทิ้งแบ่งออกได้เป็นขั้นตอนดังนี้

- การบำบัดขั้นเตรียมการ(Preliminary treatment) เป็นขั้นตอนการแยกสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำโดยการใส่ตะแกรง(Screens)
- การบำบัดขั้นต้น(Primary treatment) น้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนจากข้อที่ 1 แล้ว จะถูกนำมาตกตะกอนในถังตกตะกอน ซึ่ง เรียกว่า Primary sludge การบำบัดในขั้นนี้จะลดค่า BOD ได้ประมาณ 25-40%แล้วแต่คุณลักษณะของน้ำทิ้งและประสิทธิภาพของถังตกตะกอน
- การบำบัดขั้นที่สอง (Secondary treatment) น้ำเสียจากข้อ 2 จะถูกนำเข้าไปสู่ถังเติมอากาศซึ่งจะมีการเติมอากาศให้แก่แบคทีเรียโดยใช้เครื่องเติมอากาศแบคทีเรียจะช่วยย่อยสลายและกำจัดสารอินทรีย์หรือ BOD ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายหรืออนุภาคคอลลอยด์ ออกไปจากน้ำ กลายเป็นตะกอนตกลงไปที่ก้นถังตกตะกอนในส่วนนี้จะถูกนำไปกำจัดต่อไป น้ำในส่วนบนของถังตกตะกอนจะใสขึ้น ในขั้นตอนนี้จะช่วยลดค่า BOD ลงได้ประมาณ 75-95% ซึ่งค่า BOD ของน้ำส่วนนี้จะต่ำกว่า 20 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถปล่อยทิ้งลงสู่แม่น้ำได้แต่ถ้าต้องการความสะอาดเหมาะแก่การนำกลับมาใช้ใหม่เข้าสู่การบำบัดขั้นที่ 3 ต่อไป
- การบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary treatment) ต้องการความบริสุทธิ์สะอาดสามารถนำกลับมาใช้อุปโภคและบริโภคได้ ขบวนการบำบัดนี้จึงเป็นขบวนการเคมีรวมกับฟิสิกส์ เคมี น้ำทิ้งจากการบำบัดขั้นตอนที่สองจะถูกนำมาตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมีแยกสารประกอบฟอสเฟตออกด้วยปูนขาว จากนั้นจึงนำมากำจัดสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ด้วยขบวนการทางฟิสิกส์-เคมีด้วยขบวนการ Ion exchange ซึ่งจะได้น้ำที่สะอาดเมื่อผ่านการฆ่าเชื้อโรคแล้วจะได้ น้ำที่สะอาด

2.5 การใช้กระบวนการดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียจากโรงพิมพ์ออฟเซตสามารถทำได้หลายวิธีแต่ค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียหลายตัวยังสูงอยู่โดยเฉพาะค่าซีโอดีที่ยังสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้เนื่องจากน้ำเสียตั้งต้นมีค่าความสกปรกก่อนการบำบัดสูงมากอยู่แล้ว ดังนั้นจึงได้มีการบำบัดต่อเนื่องโดยใช้กระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้ต้นทุนต่ำแต่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ในการบำบัด สารที่นิยมใช้ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ถ่านกัมมันต์สามารถทำได้จากวัสดุหลายชนิด ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุต่างกันจะมีลักษณะ โครงสร้างและรูพรุนแตกต่างกัน ถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียส่วนมากมักผลิตจากกะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ถ่านไม้ ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite Coal) เป็นต้น ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่มีความพรุนมากซึ่งความพรุนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือทางกายภาพ

2.5.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต [10]

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่มาจากธรรมชาติ เมล็ดหรือเปลือกของพืช วัตถุดิบที่ดีควรมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง วัตถุดิบที่นิยมใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ

2.5.1.1 วัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงกว่า 60 % เป็นวัตถุดิบที่ถูกเผาโดยธรรมชาติหรือเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเผา ได้แก่ ถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) บิทูมินัส (Bituminous) ซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) ลิกไนต์ (Lignite) และถ่านโค้ก (Coke) เป็นต้น วัตถุดิบเหล่านี้สามารถทำการเผากระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์ได้เลยหรืออาจทำการเผาถ่านวัตถุดิบที่อุณหภูมิต่ำเพื่อไล่ความชื้นออก

2.5.1.2 วัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบต่ำส่วนใหญ่เป็นส่วนประกอบของพืช ได้แก่ ไม้ เปลือกไม้ กะลามะพร้าว เมล็ดผลไม้ หรืออาจเป็นพวกเศษพลาสติก หรือหนังสัตว์ วัตถุดิบกลุ่มนี้มีราคาต่ำและมีปริมาณมาก แต่ต้องผ่านกระบวนการเผาให้เป็นถ่านก่อนนำมาเผากระตุ้นจึงจะได้ถ่านกัมมันต์ที่ดี กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตถ่านกัมมันต์เนื่องจากมีราคาถูก หาได้ทุกรัฐบาล และมีองค์ประกอบที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์

2.5.2 กรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ [11, 12, 13]

วิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธีซึ่งขึ้นกับวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัตถุดิบ การทำให้เป็นถ่านคาร์บอน และการกระตุ้น

2.5.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ขี้เลื่อย กะลามะพร้าว แกลบ ถ่านหิน กะลาปาล์ม ชานอ้อย เป็นต้น ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านชาร์แล้วก็ได้ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำมาทำการ คาร์บอนไนซ์ แล้วจึงนำมาบดและคัดขนาดเพื่อนำไปกระตุ้นต่อไป

2.5.2.2 การทำให้เป็นถ่านคาร์บอน (Carbonization)

วัตถุประสงค์ของขั้นตอนนี้เพื่อขจัดธาตุต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนในอินทรีย์วัตถุออกไป ถ่านที่ได้จะมีปริมาณร้อยละของคาร์บอนสูง โดยใช้หลักการของกระบวนการ ไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ด้วยความร้อน โดยการเผาอินทรีย์วัตถุหรือวัตถุดิบในที่อับอากาศ การย่อยสลายนี้จะทำให้ธาตุส่วนใหญ่ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน เกิดการแยกตัวออกกลายเป็นก๊าซ และบางส่วนของคาร์บอนจะกลายเป็น กรดน้ำส้ม น้ำมันดินและเมทานอล เป็นต้น ทำให้ได้ถ่านในระยะแรกวัตถุดิบจะถูกทำให้แห้งโดยการไล่ความชื้นหรือน้ำออกไปจนกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 170 องศาเซลเซียส อินทรีย์วัตถุบางส่วนจะเริ่มสลายตัวเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และกรดน้ำส้ม เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 270-280 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์พร้อมทั้งให้ความร้อนออกมาเป็นจำนวนมาก ระหว่างนี้ก็จะเกิดน้ำมันดิน (Tar) เมทานอลและสารอื่นๆ ออกมาเป็นจำนวนมาก จากนั้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส สีของไม้จะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีดำ โดยปฏิกิริยาคาร์โบไนเซชัน (Carbonization) ของเซลลูโลสและลิกนิน เป็นส่วนใหญ่ ปฏิกิริยานี้เกิดจากอนุมูลอิสระ พบว่าจะมีการสูญเสียเซลลูโลสอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส ในขณะที่การสลายตัวของลิกนินจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส การสูญเสียมวลส่วนใหญ่ยังไม่สามารถขจัดไฮโดรเจนและออกซิเจนออกไปจากวัสดุได้หมด ทำให้ได้ถ่านที่มีคุณภาพไม่ดีหรือ ที่เรียกว่าหัวถ่าน ถ้าทำถ่านที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส จะพบว่า ปริมาณร้อยละของคาร์บอนของถ่านที่ได้เพิ่มขึ้น แต่ถ้าทำถ่านที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ผลผลิตที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสมาก ดังนั้น ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตถ่านเพื่อให้ได้ผลผลิต และประสิทธิภาพในการแปรรูปวัตถุดิบหรืออินทรีย์วัตถุให้เป็นถ่านสูงสุดก็คือ ช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส และควรเผาถ่านให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนที่สิ้นสุดโดยเร็ว เพื่อลดการสูญเสียของสารที่จะสลายตัวเนื่องจากความร้อน และควรควบคุมความสม่ำเสมอของความร้อนและอุณหภูมิของการทำคาร์โบไนเซชัน (Carbonization) ให้คงที่ จึงจะได้ถ่านที่มีคุณภาพดี ซึ่งมีลักษณะดังนี้

- มีสีดำสม่ำเสมอ (Uniformly black)
- มีลักษณะแข็งแรงแรงไม่แตกหักง่าย
- เมื่อหักดู ส่วนที่หักจะมีผิวมันเงา (Shiny surface)
- ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp)

- เมื่อเคาะหรือตกระทบพื้น ต้องมีเสียงดังกังวานคล้ายโลหะ
- ปราศจากผงฝุ่น และไม่มีขี้เถ้าหรือส่วนที่ยังไม่เป็นถ่านติดอยู่
- มีปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่มาก มีความชื้นต่ำ (5-10%)

อย่างไรก็ตาม ถ่านที่ได้จากขั้นตอนนี้มีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำมาก เพราะมีพื้นที่ผิวจำเพาะหรือรูพรุนอยู่น้อยและยังคั่งมีน้ำมันดิน (Tar) บางส่วนตกค้างอยู่ภายในรูพรุน หรือเกาะติดอยู่ตามผิวจึงจำเป็นต้องนำถ่านจากกระบวนการนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับต่อไป

2.5.2.3 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้น หมายถึง การทำให้คาร์บอนหรือถ่านชาร์(Char) มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ถ่านชาร์มีความว่องไวมากขึ้นพิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะ คือ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Active surface area) โดยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางโมเลกุลหลุดออกไป ทำให้เกิดส่วนที่มีอำนาจการดูดซับขึ้นมาแทน
- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้กับผิวสัมผัสของถ่าน หมายถึงทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่เพื่อให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- เป็นการกำจัดสารอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (Active Center)
- การกระตุ้นจึงเป็นขั้นตอนที่ทำให้ถ่านมีความพรุนมากขึ้นและช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะเป็นการกำจัดน้ำมันดินให้หลุดออกจากถ่านทำให้ผิวของถ่านมีอะตอมของคาร์บอนที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่มาก ถ่านกัมมันต์ที่ได้จึงมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น สามารถแบ่งได้ 2 วิธี คือ

2.5.2.3.1 กระบวนการทางกายภาพ (Physical Activation)

กระบวนการนี้ก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) เช่น ไอน้ำ อากาศ หรือคาร์บอนไดออกไซด์ จะไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันดิน และอะตอมของคาร์บอนบางส่วนในผลึกเพิ่มรูพรุนให้กว้างขึ้นและเพิ่มพื้นที่ผิวมากขึ้น

- การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Activation with steam) การใช้ไอน้ำในที่นี้หมายถึง การใช้ไอน้ำยิ่งยวด (Superheated steam) การกระตุ้นด้วยไอน้ำมีข้อดีคือ ราคาถูก และไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่อุณหภูมิต้องสูงพอที่จะทำให้อัตราการออกซิไดซ์เกิดอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับของถ่านที่ได้จะลดลง

- การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Activation with carbon dioxide) วัตถุดิบที่ใช้ควรถูกเผาเป็นถ่านเสียก่อน วิธีการกระตุ้นนั้นคล้ายกับการกระตุ้นด้วยไอน้ำ อุณหภูมิที่ให้อยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับถ่าน

- การกระตุ้นด้วยอากาศ (Activation with air) ปฏิกิริยานี้อาศัยออกซิเจนในอากาศเป็นตัวออกซิไดซ์คาร์บอน ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ การกระตุ้นด้วยอากาศใช้กันน้อยมาก เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการทำได้ยาก นอกจากนี้ออกซิเจนจะทำให้ผิวของถ่านไหม้ เป็นผลให้เกิดการสูญเสียอย่างมาก

โดยทั่วไปข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพนี้คือ หลังจากผ่านกระบวนการกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้ทันที ไม่มีปัญหาในการขจัดสารตกค้างที่อาจเป็นอันตราย แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิในการเผาไหม้ค่อนข้างสูงกว่าการกระตุ้นทางเคมี เช่น ไอน้ำที่ใช้ต้องเป็น Super heated steam จึงเป็นการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง สำหรับรพูนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการทางฟิสิกส์ จะมีรพูนขนาดเล็กกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมี ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ดูดกลิ่น และไอ หรือก๊าซพิษได้ดี

2.5.3.3.2 กระบวนการทางเคมี (Chemical Activation)

กระบวนการนี้ใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น ตัวกระตุ้น (Activation agent) ที่ใช้กันมากที่สุด คือ $ZnCl_2$ เพราะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรพูนขนาดเล็กกว่าการใช้สารเคมีตัวอื่นๆ

- หลังจากที่ได้ถ่านจากการเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิ 500-1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมือนกับกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพแล้ว นำมากระตุ้นด้วยสารเคมีจนกระทั่งได้ถ่านกัมมันต์

- นำวัตถุดิบที่เติมสารเคมีแล้วมาทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 400-1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าการกระตุ้นทางฟิสิกส์ เพราะสารเคมีที่เติมลงไปจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเผាถ่าน แต่มีข้อเสียคือ การล้างสารเคมีออกทำได้ยากมาก

- นอกจากนั้น อาจใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน โดยการใช้สารเคมีกระตุ้นและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400-1,000 องศาเซลเซียส แล้วกระตุ้นด้วยไอน้ำ หรือก๊าซชนิดอื่นที่เป็น Super heated steam และสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์สามารถใช้ได้หลายชนิด ซึ่งมีอยู่ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้เป็น Activated agent[11, 12, 13]

Boric acid	Potassium sulphide
Calcium chloride	Potassium thiocyanate
Calcium hydroxide	Manganese chloride
Calcium phosphate	Manganese sulphate
Dolomite	Sodium hydroxide
Cyanide	Nitric acid
Ferric chloride	Sodium hydroxide
Phosphoric acid	Zinc chloride

2.5.3 ชนิดของรูพรุน [14]

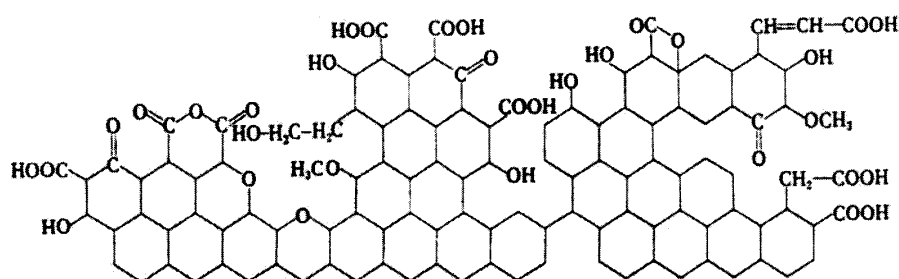
ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนจะมีรูพรุนขนาดต่าง ๆ สามารถจัดจำแนกประเภทของรูพรุนตามระบบ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ได้ดังนี้

ไมโครพอร์ (Micropore) คือ รูพรุนที่มีขนาดรัศมีหรือ Half-width เล็กกว่า 2 นาโนเมตร ($<20 \text{ \AA}$)

เมโซพอร์ (Mesopore) คือ รูพรุนที่มีขนาดรัศมีอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร ($20\text{-}500 \text{ \AA}$)

แมคโครพอร์ (Macropore) คือ รูพรุนที่มีขนาดรัศมีใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ($>500 \text{ \AA}$)

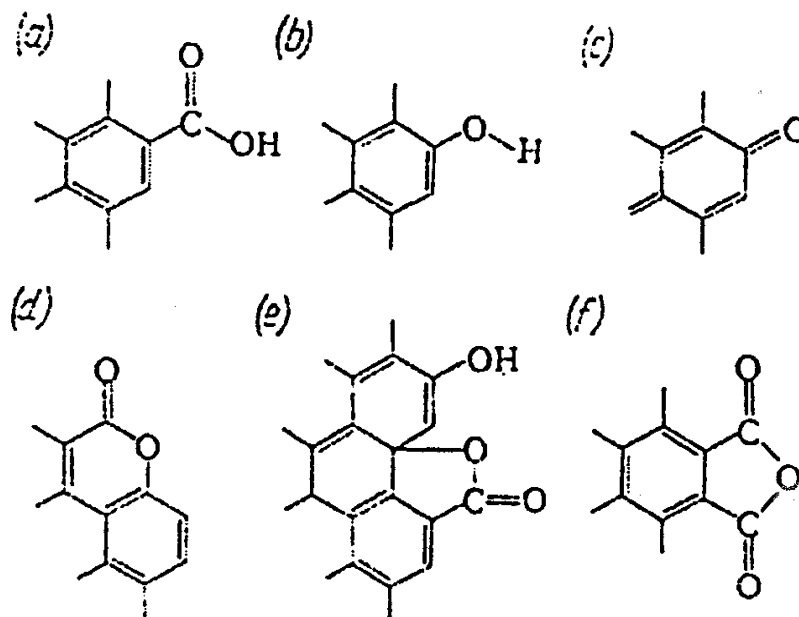
2.5.4 คุณสมบัติทางเคมีที่ผิวของถ่านกัมมันต์ [15]



รูปที่ 2.2 แบบจำลองของหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์ [16]

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิวมากมาย ดังรูปที่ 2.2 แต่ละหมู่ฟังก์ชันมีประโยชน์แตกต่างกัน หมู่ฟังก์ชันที่มีประโยชน์ในการดูดซับสารปนเปื้อนจากสารละลาย คือ หมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

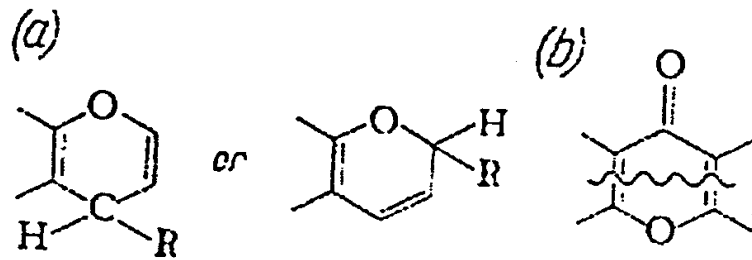
2.5.4.1 หมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นกรด ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็นกรดเมื่ออยู่ในสารละลาย ส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่ฟังก์ชันนี้จะพบในถ่านกัมมันต์ชนิดแอล (L-type activated carbon) ซึ่งเตรียมจากการเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียสในอากาศ และเผากระตุ้นโดยใช้สารกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักผลิตจากวัตถุดิบจำพวกไม้ หรือวัตถุดิบที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสูง ตัวอย่างของหมู่ฟังก์ชันกลุ่มนี้ เช่น หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่ฟีนอลิกคาร์บอกซิล (Phenolic carboxyl) หมู่ควิโนนอยด์ (Quinonoid) หมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid group) หมู่แอนไดไดด์ (Andydrides) หมู่แลคโตน (Lactone) และหมู่ไซคลิกเปอร์ออกไซด์ (Cyclic peroxide) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 หมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด [17]

- | | |
|---------------------------|------------------|
| a) หมู่คาร์บอกซิล | b) หมู่ฟีนอลิก |
| c) หมู่ควิโนนอยด์ | d) หมู่แลคโตน |
| e) หมู่แลคโตนชนิดเรืองแสง | f) หมู่แอนไดไดด์ |

2.5.4.2 หมู่ฟังก์ชันออกไซด์ที่เป็นค่า ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็นค่าเมื่ออยู่ในสารละลาย มักพบใน ถ่านกัมมันต์ชนิดเอช (H-type activated carbon) ซึ่งเตรียมจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำหรือก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงมากประมาณ 1,000-1,200 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มัก ผลิตจากวัตถุดิบจำพวกกะลามะพร้าว ถ่านหิน หรือวัสดุชีวมวลที่มีองค์ประกอบธาตุคาร์บอนไม่สูง มากนัก ได้แก่ หมู่ควินิน (Quinines) หมู่ฟีนอล (Phenols) และหมู่คาร์บอกซิเลต (Carboxylates) เป็นต้น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หมู่ฟังก์ชันที่เป็นค่า [17]

a) หมู่โครมีน

b) หมู่คล้ายไพโรน

2.5.5 ชนิดของถ่านกัมมันต์ [18]

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.5.5.1 ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์แบบผงมีขนาดประมาณ 10-50 ไมครอนหรือน้อยกว่า ข้อดีของถ่านกัมมันต์แบบ ผงคือ มีราคาถูกกว่าถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ประมาณ 2-3 เท่า การเพิ่มหรือลดปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ ใช้ให้สอดคล้องกับคุณภาพน้ำทิ้งที่ต้องการบำบัดสามารถกระทำได้ทันที ต้นทุนต่ำ และการดูดซับ เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ส่วนข้อเสียของถ่านชนิดนี้ คือ ไม่คุ้มทุนในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้ แล้ว และต้องใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณมาก

2.5.5.2 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของเม็ดทรายกรองน้ำ แต่จะแข็งเปราะ และ เบากว่าทราย ข้อดีของถ่านกัมมันต์ชนิดนี้ คือ สามารถทำการฟื้นฟูสภาพถ่านที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ ใหม่ได้ แต่อย่างไรก็ตามในการฟื้นฟูสภาพถ่านแต่ละครั้งจะสูญเสียถ่านไปประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ และ ถ่านที่ได้จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยลง

2.5.6 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

2.5.6.1 ประเภทใช้กับของเหลว (Liquid phase carbon) อุตสาหกรรมที่นำถ่านกัมมันต์ไปใช้ใน สารละลายหรือในของเหลว ได้แก่

- อุตสาหกรรมน้ำตาล ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค นอกจากใช้ในการฟอกสีแล้วยังใช้ในการแยกเอาสบู่และเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันได้ด้วย
- อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นและฟอกสีของผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งดีกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่นเพราะไม่เป็นอันตรายและไม่เกิดปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์อาหาร
- อุตสาหกรรมเครื่องดื่มน้ำอัดลม เช่น ไวน์ วิสกี้ มักใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ต้องการทำให้เครื่องดื่มที่ได้มีรสชาติดีขึ้น
- อุตสาหกรรมเคมีและยา ถ่านกัมมันต์ใช้ในการผลิตสารเคมีและยาหลายชนิด
- อุตสาหกรรมทำน้ำให้บริสุทธิ์ โดยใช้เป็นตัวดูดกลิ่นและฟอกสี
- อุตสาหกรรมแยกสารที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ การแยกไอโอดีนออกจากน้ำเกลือที่เกิดในหลุมน้ำมัน (Petroleum oil - well brines) ตลอดจนการผลิตวิตามินและฮอร์โมนอีกหลายชนิด
- ขบวนการที่มีการใช้สารเร่ง (Catalytic Process) ถ่านจะทำหน้าที่เป็นตัวพาสารเร่ง (catalyst carrier) ในปฏิกิริยาที่มีการใช้สารเร่งหลายชนิด รวมทั้งทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการทำงานของตัวเร่งให้ดีขึ้นด้วย

2.5.6.2 ประเภทที่ใช้ในการดูดแก๊สและไอ (Gas Phase Carbon) ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไปนี้

- อุตสาหกรรมทำน้ำอากาศป้องกันแก๊สพิษ ทั้งที่ใช้กันในการทหารและที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแก๊สพิษและไอของสารอินทรีย์ได้
- การนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และจะคายออกที่ความดันของไอระเหยต่ำๆ
- อุตสาหกรรมปรับอากาศ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดแก๊สพิษในอากาศต่างๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอะเซทิลีน เป็นต้น
- อุตสาหกรรมบุหรี โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นกั้นกรองบุหรี

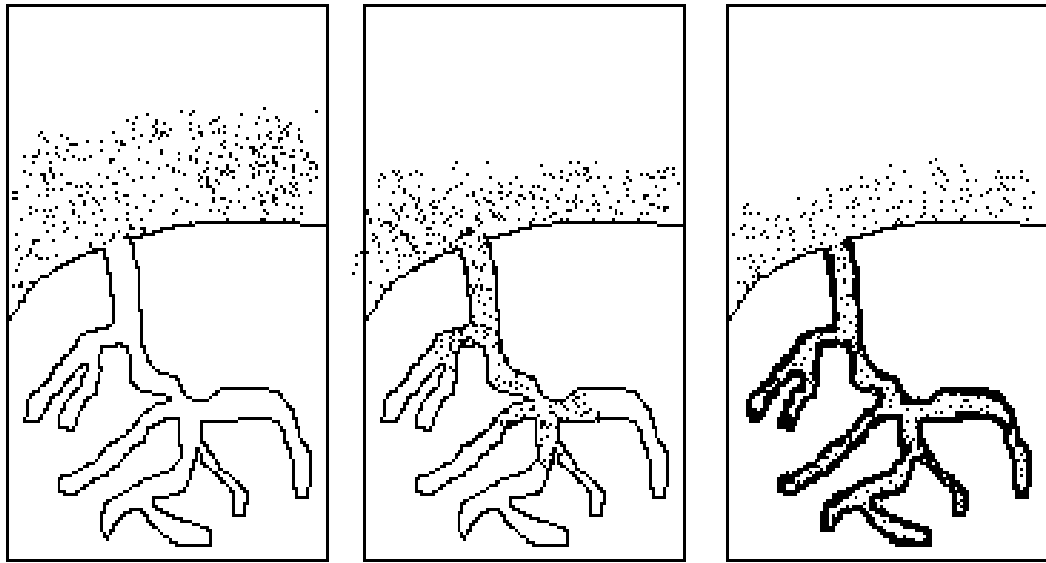
2.6 กลไกการดูดซับ [19]

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าหาตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (Film diffusion) ซึ่งตามปกติตัวดูดซับจะมีฟิล์มของน้ำบาง ๆ ห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อบาง ๆ และเกิดการแพร่เข้าสู่โพรงหรือช่องว่างภายในของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวภายในโพรงหรือช่องว่างภายในของตัวดูดซับ



ขั้นตอนที่ 1: ตัวถูกดูดซับ
แพร่ผ่านพื้นผิวตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2: ตัวถูกดูดซับ
เคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของ
ตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3: เกิดการดูด
ซับของตัวถูกดูดซับบน
พื้นผิวของตัวดูดซับ

รูปที่ 2.5 กลไกการดูดซับ [19]

2.6.1 ประเภทของการดูดซับ [20, 21]

2.6.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เกิดจากแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยตัวที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับ จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีใด ๆ การดูดซับแบบนี้สามารถผันกลับได้ (reversible) การดูดซับทางกายภาพบางทีเรียกว่า การดูดซับด้วยแรงแวลเดอร์วาล (Van der waal's adsorption)

2.6.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

จะเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตำแหน่งดูดซับ (Adsorption site) ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีบางครั้งจะต้องการพลังงานเข้าร่วมด้วย เรียกว่า การดูดซับด้วยการกระตุ้น (Activated adsorption) พันธะที่เกิดขึ้นแข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับในลักษณะชั้นเดียว (Monolayer) ซึ่งต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่การดูดซับเกิดในลักษณะหลายชั้น (Multilayer) จากแรงแวลเดอร์วาล

2.6.1.3 การดูดซับด้วยประจุ (Ionic adsorption)

เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวด้วยแรงของประจุที่ตรงข้ามกัน (Electrical attraction) ทำให้ไอออนของตัวถูกดูดซับติดอยู่ที่พื้นผิวตัวดูดซับในตำแหน่งที่มีประจุตรงข้ามกัน ไอออนที่มีประจุสูงจะถูกดูดซับได้ดีกว่าพวกที่มีประจุต่ำ ๆ และไอออนที่มีขนาดเล็ก

2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [22, 23]

อัตราเร็ว และความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.6.2.1 ความปั่นป่วน (Turbulence)

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.6.2.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาด และพื้นที่ผิว ขนาดของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคืออัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) นั่นคือตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

2.6.2.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (พีเอช)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำ ๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ ซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่นั้น ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวกและตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าพีเอชต่ำ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับของตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ในสารละลาย แต่จะได้ผลในทางตรงกันข้ามกัน เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลงและปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบ ก็จะให้ผลตรงกันข้ามในทำนองเดียวกัน

2.6.2.4 อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด คือ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้นและเพิ่มโอกาสที่ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น

2.6.2.5 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำก่อน แล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ข้างบนไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่า ความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

2.6.2.6 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุล และขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์ จะพบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก และกรดบิวเทอริกได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการละลายด้วยโดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาวมักจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลง จึงส่งผลให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักจะดูดซับได้ดีมากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

2.6.3 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นไปเรื่อย ๆ โดยที่สารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับและคายการดูดซับไปพร้อมๆกัน จนกว่าอัตราการดูดซับ และการคายการดูดซับจะเท่ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดสถานะสมดุลเรียกว่า สมดุลของการดูดซับ ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ที่สมดุลการดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ที่สมดุลการดูดซับไปพล็อตกราฟกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับจะได้เส้นโค้ง

แนวโน้มที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับซึ่งรูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายสมการด้วยกัน แล้วแต่ว่าจะนำเอาสมการแบบไหนมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับ แต่ที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับมาก คือ สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's adsorption isotherm) และ สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's adsorption isotherm)

2.6.3.1 สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ [21, 24]

สมการของแลงเมียร์ ถูกอธิบายโดย Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1918 เพื่ออธิบายการดูดซับโมเลกุลของก๊าซบนพื้นผิว และถูกประยุกต์ใช้กับดินครั้งแรกโดย Fride และ Shapiro ในปี ค.ศ. 1956 และ Olsen และ Watanabe ในปี ค.ศ. 1957 เพื่ออธิบายการดูดซับฟอสเฟตบนดิน ต่อมาจึงมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับบนผิวของคอลลอยด์ สมการของแลงเมียร์ ใช้ได้ดีที่สุดเมื่ออธิบายการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำ

สมมติฐานของสมการแลงเมียร์

1. ที่ทุก ๆ ตำแหน่งผิวสัมผัส สามารถดูดซับโมเลกุลได้
2. การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน และพื้นที่นั้นๆ สามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)
3. จะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของไอออน หรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
4. พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุกๆพื้นที่ของการดูดซับ และไม่มีการทำปฏิกิริยากันระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับที่อยู่ใกล้กัน

หลักการของการดูดซับ สามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับนั้นจะดำเนินเข้าสู่สมดุล เมื่ออัตราการดูดซับ (Adsorption) และอัตราการคาย (Desorption) เท่ากัน [24, 25] โดยที่ความสัมพันธ์ของสมดุลการดูดซับสามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 2.1



โดยที่	M^+	คือ	โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (ตัวถูกละลาย)(ไอออนโลหะ)
	S	คือ	ตำแหน่งดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
	k_a	คือ	ค่าคงที่ของการดูดซับ (ต่อวินาที)

k_d คือ ค่าคงที่ของการคาย (ต่อวินาที)
 ถ้าให้ ϕ คือ สัดส่วนระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายในตัวดูดซับ
 กับความจุสูงสุดของตัวดูดซับ, ($\phi = q_e/Q_{\max}$; $\phi \longrightarrow 1.0$)

ดังนั้น อัตราการดูดซับและอัตราการคายสามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

$$\text{อัตราการดูดซับ} = k_a [M^+][S] = k_a (1-\phi)C_e \quad (2.2)$$

$$\text{อัตราการคาย} = k_d [M^+S] = k_d \phi \quad (2.3)$$

ที่สภาวะสมดุล อัตราการดูดซับและอัตราการคายจะเท่ากันสามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 2.4

$$\phi = \frac{k_a C_e}{(k_d + k_a C_e)} \quad (2.4)$$

และจัดสมการในรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\phi = \frac{C_e}{(k_d/k_a + C_e)} \quad (2.5)$$

เมื่อค่า q_e เป็นสัดส่วนของ ϕ ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$q_e = \frac{Q_{\max} C_e}{(k_d/k_a + C_e)} = \frac{Q_{\max} b C_e}{(1 + b C_e)} \quad (2.6)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบ monolayer
 ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)

$Q_{\max}$ คือ ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบ monolayer
 ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของเหลวที่สภาวะสมดุล
 (มิลลิกรัมต่อลิตร)

b คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดซับ ($b = k_a/k_d$)

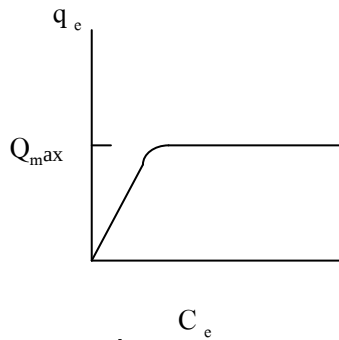
สมการที่ 2.6 เมื่อนำมาเขียนใหม่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_{\max} b} + \frac{C_e}{Q_{\max}} \quad (2.7)$$

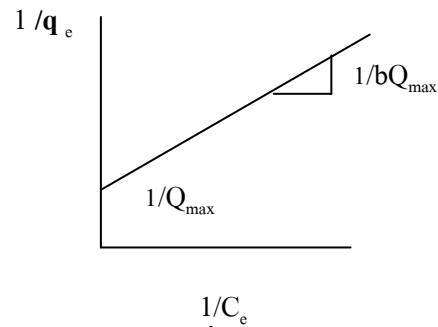
$$q_e = Q_{\max} - \frac{q_e}{b C_e} \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q_{\max}} + \frac{1}{b Q_{\max} C_e} \quad (2.9)$$

เมื่อเขียนกราฟตามสมการที่ 2.8 และ 2.9 จะได้ลักษณะดังรูป 2.6 และ 2.7

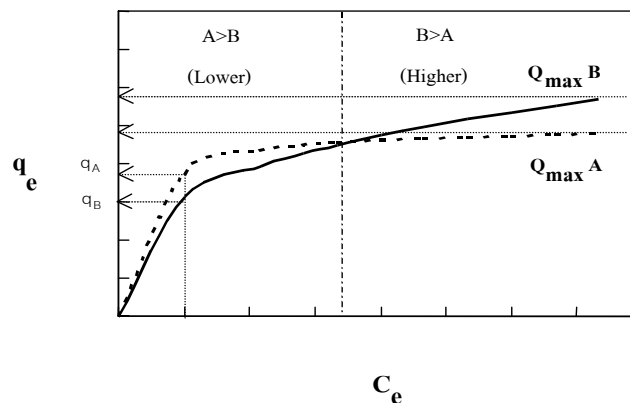


รูปที่ 2.6 ลักษณะกราฟเส้นโค้ง
ตามสมการของแลงเมอว์



รูปที่ 2.7 ลักษณะกราฟเส้นตรง
ตามสมการของแลงเมอว์

การพิจารณาเลือกว่าตัวดูดซับชนิดใดมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่ากัน สามารถพิจารณาจากค่าไอโซเทอม ดังรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าในช่วงที่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบ ณ ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ตัวดูดซับชนิด A มีความจุและมีความจำเพาะ (Affinity) ในการดูดซับกับตัวถูกดูดซับสูงกว่าชนิด B ในขณะที่เมื่อระดับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายสูงตัวดูดซับชนิด B จะมีความเหมาะสมในการถูกเลือกเป็นตัวดูดซับมากกว่าตัวดูดซับชนิด A เนื่องจากถึงแม้ตัวดูดซับชนิด B จะมีความจำเพาะในการจับกับตัวดูดซับต่ำกว่า แต่มีค่าความจุของการดูดซับสูงกว่า A ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าความจุของการดูดซับในการเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมกับช่วงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ต้องการ หรือความเข้มข้นของตัวดูดซับที่มีอยู่



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับสองชนิด พิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับ

จากสมมติฐานของแลงเมอร์ที่ว่าตำแหน่งดูดซับที่เกิดการดูดซับแล้วจะไม่เกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับอื่นที่อยู่ข้างเคียง ดังนั้นพลังงานการดูดซับของระบบจึงคงที่ ทำให้สามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของระบบการดูดซับ (ΔH) โดยที่ค่า b เป็นค่าคงที่ของการดูดซับที่สัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ ได้ตามสมการของ Van't Hoff ดังสมการที่ 2.10 - 2.11 [26]

$$b = e^{-\Delta H / RT} \quad (2.10)$$

$$\ln b = \frac{-\Delta H}{RT} + \text{Constant} \quad (2.11)$$

โดยที่ ΔH คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับ (จูลต่อโมล)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อโมล เคลวิน)

2.6.3.2 สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดลิช [11]

ใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียว ซึ่งฟรอนดลิชได้เสนอความสัมพันธ์สมดุลของการดูดซับอธิบายโดยสมการที่ 2.12

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (2.12)$$

โดยที่ K_f คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ (Sorption capacity)

$1/n$ คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยา (Adsorption intensity)

$$= \frac{RT Q_{\max}}{\sigma_0 - \sigma_1}$$

σ_0 คือ พลังงานอิสระที่ผิวของตัวดูดซับที่สัมผัสกับสารละลายบริสุทธิ์

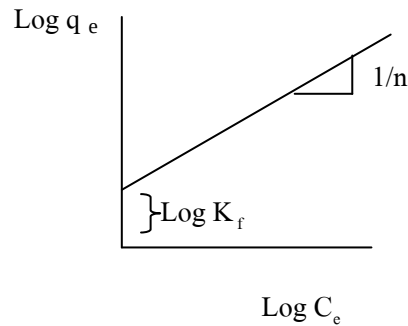
σ_1 คือ พลังงานอิสระที่ผิวของตัวดูดซับที่ถูกยึดเกาะแบบชั้นเดียวด้วยตัวถูกละลาย

เมื่อเขียนสมการในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นจะได้ ดังสมการที่ 2.13

$$\log q_e = \log K_f + (1/n) \log C_e \quad (2.13)$$

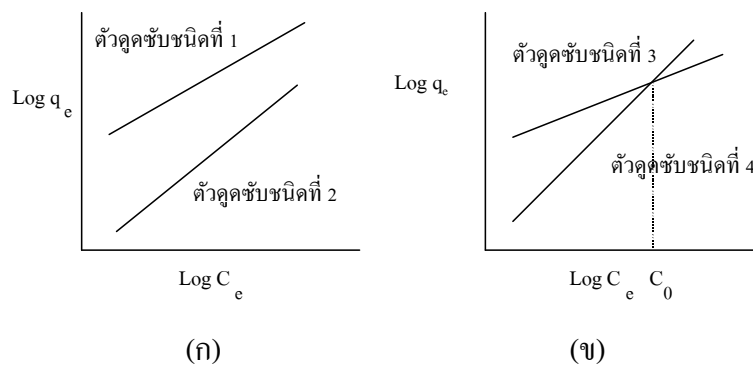
ตามสมการของฟรอนดลิช (2.13) ค่าคงที่ต่าง ๆ (K_f และ n) สามารถหาได้จากการสร้างกราฟระหว่าง $\log q_e$ เป็นแกน y กับ $\log C_e$ เป็นแกน x (รูปที่ 2.9) จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K_f$ เมื่อ $1/n$ มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมาก จะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยจะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือ เมื่อความเข้มข้นต่ำอัตราการดูดซับก็จะต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น แต่เมื่อ $1/n \ll 1$ หรือความชันต่ำมากจน

บางครั้งเกือบจะชิดกับแกน x นั้นแสดงว่า อัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำหรือสูงจะไม่แตกต่างกันนัก หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น จะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ อย่างไรก็ตามจากลักษณะไอโซเทอมของฟรอนคลิช จะสังเกตเห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ トラบเท่าที่ความเข้มข้นของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายมีสูงขึ้น ซึ่งก็เป็นข้อเสียของสมการฟรอนคลิช ที่สำคัญข้อหนึ่งคือ ทำให้ไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดได้



รูปที่ 2.9 ลักษณะกราฟไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนคลิช

ดังนั้นสมการฟรอนคลิช จึงใช้ได้ดีในสารละลายที่มีความเข้มข้นปานกลาง ในการพิจารณาเลือกตัวดูดซับชนิดใดมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่ากัน พิจารณาจากค่าไอโซเทอมได้ ดังรูปที่ 2.10 (ก) จะเห็นว่าไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดที่ 1 สูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 2 ในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน ส่วนรูปที่ 2.10 (ข) ตัวดูดซับชนิดที่ 3 มีไอโซเทอมสูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 4 ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่า C_0 แต่ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะสูงกว่าชนิดที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นที่สูงกว่า C_0 ดังนั้นจึงต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะสมกับช่วงความเข้มข้นที่ต้องการ ในรูปที่ 2.10 (ข) ตัวดูดซับชนิดที่ 4 มีความชันมากกว่าชนิดที่ 3 แสดงว่าถ้าต้องบำบัดแบบต่อเนื่อง (Continuous flow) แล้วตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะมีความเหมาะสมกว่าชนิดที่ 3



รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับต่าง ๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนคลิช

2.7 ตัวดูดซับ

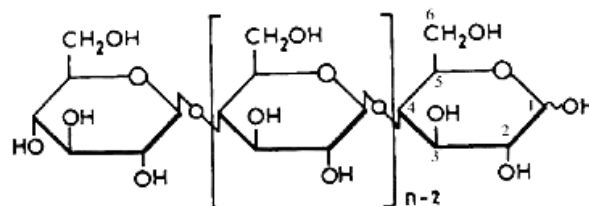
วัสดุดูดซับที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียมีหลายชนิด เช่น ถ่านกัมมันต์ ใช้ในการกำจัดสี กลิ่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โลหะหนัก เป็นต้น วัสดุดูดซับเหล่านี้มีคุณภาพสูง สามารถกำจัดสารปนเปื้อนออกจากน้ำเสียได้ สามารถใช้งานได้ในระยะยาว แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านราคา ซึ่งวัสดุดูดซับเหล่านี้มีราคาสูง ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูง

2.7.1 ขี้เลื่อย (Sawdust)

วัสดุดูดซับจำพวกนี้เป็นวัสดุดูดซับชนิดที่มาจากธรรมชาติเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เปลือกไม้และขี้เลื่อยเป็นเศษวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมทำไม้มีปริมาณเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก เป็นหนึ่งวัสดุดูดซับที่มีราคาถูก หาได้ง่าย สามารถประยุกต์ใช้งานได้กับสารมลพิษได้หลายอย่าง เช่น สีข้อม น้ำมัน เกลือ โลหะหนัก สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ดังนั้นการใช้ขี้เลื่อยนั้นนับเป็นผลดีทั้งสภาพแวดล้อมและอุตสาหกรรมไม้ด้วยเช่นกัน

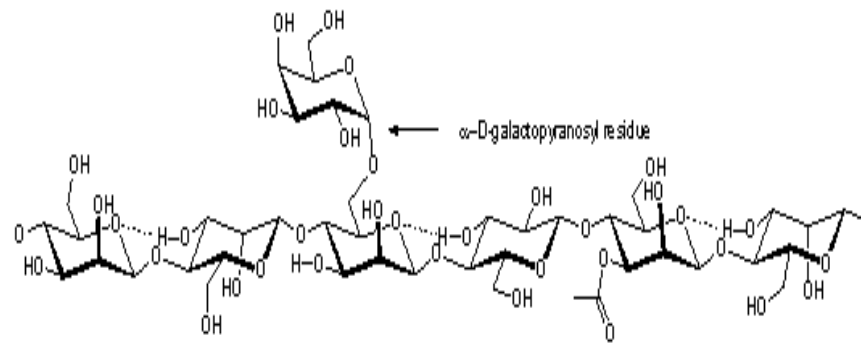
องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยในไม้แบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ [29, 30] คือ

- เซลลูโลส (Cellulose) เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ ของ β -D-glucopyranose ต่อกันเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ มีคุณสมบัติละลายน้ำและตัวทำละลายทั่วไปและสารละลายต่างได้ดี สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กับกรดได้ และที่สำคัญ คือ โครงสร้างมีทั้งที่เรียงตัวเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ รวมกันในส่วนต่างๆ ทำให้เซลลูโลสมีคุณสมบัติในการดูดซับ ยึดหยุ่น และพองตัวได้



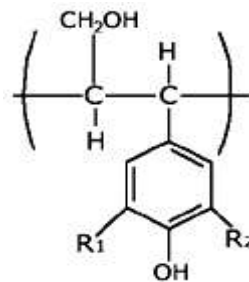
รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [29]

- เฮมิเซลลูโลส (Hemi cellulose) เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตเช่นเดียวกับเซลลูโลส แต่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นจึงสามารถดูดซับน้ำได้จึงมีผลช่วยให้เส้นใยพองตัวได้รวดเร็วต่อการดีเยื่อ และยังช่วยทำให้เส้นใยมีคุณสมบัติยึดหยุ่นเพิ่มขึ้นอีกด้วยและยังสามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารละลายต่างอีกด้วย



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [29]

- ลิกนิน(Lignin) สารจำพวกพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane) โดยมีวงแหวนอะโรมาติกที่มีแขนเป็นคาร์บอนสามอะตอม นอกจากนี้เป็นหน่วยวานิลิน (Vaniline) และ ไซริงกัลดีไฮด์ (Syringaldehyde) ที่เป็นหน่วยพื้นฐานอีกสองกลุ่มของโครงสร้างลิกนินทำหน้าที่เป็นสารยึดให้ติดกับเส้นใยในเนื้อไม้เกาะกัน มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำหรือสารละลายอินทรีย์ทั่วไป แต่ละลายได้บางส่วนในสารละลายด่างหรือสามารถทำปฏิกิริยาได้กับสารละลายกรดเข้มข้น



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของลิกนิน [31]

นอกจากนี้องค์ประกอบหลักเหล่านี้แล้วยังมีองค์ประกอบจำพวกแทนนิน (Tannin) ที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของพอลิไฮดรอกฟีโนล (Polyhydricphenol) ซึ่งไวต่อการแลกเปลี่ยนไอออนและมีคุณสมบัติของโปรตีนที่ตกตะกอนได้ เช่น เจลาติน(Gelatin) และกลายเป็นยางเหนียว มีมากในไม้เนื้อแข็งและพบได้ในเปลือกไม้ของไม้เนื้ออ่อนและอาจพบในใบและผลของต้นไม้บางชนิด ตามธรรมชาติแล้วแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ชนิดที่ละลายน้ำได้ และชนิดที่ข้นเหนียว โดยชนิดที่ละลายน้ำได้นั้นเป็นสารประกอบเอสเทอร์ของน้ำตาลโดยทั่วไปจะเป็นกลูโคสที่เกิดจากกรดโพลีฟีนอลิก (Polyphenolic) มักเป็นกรดแกลลิก (Gallic) ไดแกลลิก (Digllic) หรืออีลากิก (Elagig) ส่วนที่เป็น

ชนิดชั้นเหนียวเป็นจำพวก Catechin ดังนั้นเส้นใยที่มาจากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งจะมีความแตกต่างกันที่สัดส่วนปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีและขนาดของเส้นใยโดยขึ้นกับชนิดของไม้ เช่น ไม้เนื้อแข็งเขตร้อนจะมีลิกนินมากกว่าไม้เนื้ออ่อนเป็นต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ชนิดและปริมาณเส้นใยในเนื้อไม้ [29]

ชนิดเส้นใย	ไม้เนื้ออ่อน (%)	ไม้เนื้อแข็ง (%)
เซลลูโลส	40 - 45	40 - 45
เฮมิเซลลูโลส	25 - 30	25 - 35
ลิกนิน	20 - 25	25 - 30
เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย	ใหญ่	เล็ก
ความยาวของเส้นใย	ยาว	สั้น

ในโครงสร้างขององค์ประกอบต่างๆในชีลื้อยจะเห็นว่ามีหมู่ฟังก์ชันเป็นสารจำพวก Methoxyl, Phenolic Hydroxyl, Benzyl Alcohol, Carbonyl, Carboxyl ซึ่งสารประกอบเหล่านี้สามารถที่จะแตกตัวได้ในช่วงค่า พีเอช (pH) แตกต่างกันดังนี้ Carboxylic acid (RCOOH) แตกตัวที่พีเอช 3 – 8 , Phenolic (Ar-OH) แตกตัวที่พีเอช 7 – 11 , Carbonyl (RCOR) แตกตัวที่พีเอช 3 – 4 และ การแตกตัวนี้จะให้ H^+ ออกมาจึงทำให้ค่า พีเอชของสารละลายลดลง และหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะกลายเป็นลบสามารถที่จับกับไอออนบวกได้ [30]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตัวดูดซับ	สารที่ถูกดูดซับ	ผลการบำบัด/ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	กลไกการดูดซับ	เอกสารอ้างอิง
ขี้เถ้าจากต้นมะพร้าว ซึ่งนำไปเผาคาร์บอน ในถังที่ 700 °C เป็น เวลา 30 นาที	- ถี - COD - BOD - Total solids - Total hardness	- เวลาที่ใช้ในการกวนและ ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลคือ 60 นาที - การเปลี่ยนแปลงพีเอชไม่มี ผลต่อการดูดซับถี - สามารถดูดซับถี COD, BOD, Total solids, Total hardness ได้เท่ากับ 100%, 56%, 35%, 60%, และ 36% ตามลำดับ ที่พีเอช 9.66	-	[5]
- เปลือกถั่วอัลมอนต์ - เปลือกวอลนัท - เปลือกฮาร์เซลนัท - เม็ดแอปปริคอต นำมาเผากระตุ้นด้วย ZnCl ₂	- Phenol - Methylene blue	- ถ่านกัมมันต์ที่มาจากเปลือก ฮาร์เซลนัท และเปลือก วอลนัทพบว่าอุณหภูมิและ เวลาที่ใช้ในการเผากระตุ้น ด้วย ZnCl ₂ มีผลต่อการดูดซับ Phenol และ Methylene blue - ไอโซเทอมที่อธิบายการดูด ซับสามารถใช้ได้ทั้งโมเดล ของแลงเมอร์และฟรุนดลิช - วัสดุที่มีความเหมาะสมต่อ การทำถ่านกัมมันต์เรียงจาก มากไปน้อยคือ เปลือกฮาร์ เซลนัท > เปลือกวอลนัท ≈ เม็ดแอปปริคอต > เปลือก ถั่วอัลมอนต์	ความสามารถใน การดูดซับขึ้นกับ Surface area และ Surface chemistry	[31]

ตัวดูดซับ	สารที่ถูกดูดซับ	ผลการบำบัด/ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	กลไกการดูดซับ	เอกสารอ้างอิง
จีเลื้อยจากไม้สักนำไปเผาให้เป็นถ่านกัมมันต์แบบสุญญากาศและแบบใช้อากาศ	-	- การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผากระตุ้นมีผลต่อโครงสร้างรูพรุน - ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการเผาแบบสุญญากาศ มีพื้นที่ผิวและรูพรุนมากกว่าถ่านกัมมันต์ที่เผาแบบใช้อากาศ โดยพบว่าค่า BET surface area และ pore volume ของถ่านกัมมันต์แบบสุญญากาศที่ได้คือ $1150 \text{ m}^2/\text{g}$ และ $0.43 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ	-	[32]
ถ่านกัมมันต์จากไฟ โดยการเผากระตุ้นด้วย KOH และ CO_2 ที่อุณหภูมิ 850°C , 2 ชม.	Methylene blue	จากไอโซเทอมการดูดซับ Methylene blue ด้วยถ่านกัมมันต์จากไฟสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของแลงเมียร์ ซึ่งความจุในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 454.2 mg/g	-	[33]

ตัวดูดซับ	สารที่ถูกดูดซับ	ผลการบำบัด/ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	กลไกการดูดซับ	เอกสารอ้างอิง
ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดทำมาจากเปลือกไม้ Pecan	ซีโอดีจากน้ำเสียชุมชน	- การเผากระตุ้นเปลือกไม้ Pecan ให้เป็นถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำและการใช้กรดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีได้สูงกว่าการกระตุ้นด้วย CO₂ หรือถ่านกัมมันต์การค้าอย่าง Filtrosorb 200 ในทุกระดับความเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษา - การเพิ่มขึ้นของการดูดซับมีผลเกี่ยวเนื่องกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการการกระตุ้นด้วยไอน้ำและถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นจากกรดมีพื้นที่ผิวสูงสุดและยังดูดซับ ซีโอดีได้สูงสุดอีกด้วย	ความสามารถในการดูดซับเกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ถ้ามีค่าสูงความสามารถในการบำบัดซีโอดีจะสูงตามไปด้วย	[8]
- ถ่านกัมมันต์ทางการค้า (F-300) - กะลามะพร้าวที่กระตุ้นด้วยกรด (CSA) - กะลามะพร้าวที่กระตุ้นด้วยคลอไรด์ (CSB)	ซี โอ ดี จ า ก อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม	- การดูดซับขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น พื้นที่ผิว, ความหนาแน่น, พีเอชและ การนำไฟฟ้า - พบว่า CSA สามารถดูดซับซีโอดีได้มากกว่า CSB และ F-300 ในทุกระดับความเข้มข้น - CSA มีพื้นที่ผิวมากกว่า CAB และ F-300 โดยมีค่าเท่ากับ 668, 632 และ 628 m²/g ตามลำดับ	พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากทำให้ดูดซับซีโอดีมีค่าสูง	[34]

ตัวดูดซับ	สารที่ถูกดูดซับ	ผลการบำบัด/ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	กลไกการดูดซับ	เอกสารอ้างอิง
ขี้เถ้าที่ผ่านการ treat ด้วย Formaldehyde และ กรดซัลฟูริก	สี Malachite green	- ความเข้มข้นของสีตั้งต้นมีผลต่อการดูดซับสี พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีของขี้เถ้าที่ผ่านการ treat ด้วย Formaldehyde และ กรดซัลฟูริก มีค่าต่ำเมื่อทำการดูดซับสีที่มีความเข้มข้นของสีตั้งต้นสูง - ประสิทธิภาพการดูดซับสีจากขี้เถ้าที่ treat ด้วยกรดซัลฟูริกมีค่าสูงกว่าขี้เถ้าที่ treat ด้วย Formaldehyde - พีเอชของสารละลายช่วง 2-5 การดูดซับสีมีค่าต่ำ โดยพบว่าช่วงพีเอชที่มีการดูดซับสีได้ดีที่สุดคือ 6-9	-	[35]

ตัวดูดซับ	สารที่ถูกดูดซับ	ผลการบำบัด/ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	กลไกการดูดซับ	เอกสารอ้างอิง
ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก - Eucalyptus grandis sawdust (PAC) - Commercial PAC (COM PAC) ใช้ในการเตรียม COM GAC	Phenol	- ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขี้เลื่อย PAC มีความสามารถในการดูดซับ Phenol เท่ากับ 64 mg/g - ถ่านกัมมันต์ทางการค้า COM PAC มีความสามารถในการดูดซับ Phenol เท่ากับ 89 mg/g - ถ่านกัมมันต์ GAC - 70 มีความสามารถในการดูดซับ Phenol เท่ากับ 46 mg/g - ถ่านกัมมันต์ COM GAC - 70 มีความสามารถในการดูดซับ Phenol เท่ากับ 68 mg/g - ถ่านกัมมันต์ GAC - 80 มีความสามารถในการดูดซับ Phenol เท่ากับ 46 mg/g - ถ่านกัมมันต์ COM GAC -80 มีความสามารถในการดูดซับ Phenol เท่ากับ 148 mg/g	- อัตราเร็วในการดูดซับของถ่านกัมมันต์แบบผงจะเร็วกว่าแบบเกล็ด - การดูดซับฟิโนลเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physisorption) และบางส่วนเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemisorption)	[36]

ตัวดูดซับ	สารที่ถูกดูดซับ	ผลการบำบัด/ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	กลไกการดูดซับ	เอกสารอ้างอิง
ถ่านกัมมันต์เตรียมจาก - จีเลื้อยเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง - แกลบเผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกระตุ้นที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	สี Acid Dyes (Acid Yellow 36)	- ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากจีเลื้อยมีความสามารถในการดูดซับสีย้อม Acid Yellow 36 เท่ากับ 183.8 mg/g - ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากแกลบ มีความสามารถในการดูดซับสีย้อม Acid Yellow 36 เท่ากับ 86.9 mg/g	- ความสามารถในการดูดซับสีย้อม ขึ้นกับประจุที่ผิวของตัวดูดซับ และค่าความเป็นกรด - ด่าง	[37]
ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จาก Mahogany Sawdust ทำการเผาคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 °C กระตุ้นด้วยไอน้ำอุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	- Direct dyes - Direct blue 2B - Direct green B	- ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จาก Mahogany sawdust มีความสามารถในการดูดซับ Direct Blue 2B เท่ากับ 518 mg/g และ Direct green B เท่ากับ 327.9 mg/g	- ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นกับความเป็น acidity - basicity ที่ผิวของตัวดูดซับโดยการดูดซับจะเป็นแบบ monolayer ที่ผิวด้านนอกของตัวดูดซับ	[38]