

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลิตภัณฑ์กลูโคสไซรัป

กลูโคส (glucose) จัดเป็นน้ำตาลประเภทโมโนแซคคาไรด์ (monosaccharide) โดยผลิตภัณฑ์กลูโคสที่ผลิตขึ้นส่วนใหญ่มี 2 ชนิดคือกลูโคสไซรัป (glucose syrup) หรือกลูโคสเหลวและกลูโคสผง

1. กลูโคสไซรัป (glucose syrup)

กลูโคสไซรัป หรือกลูโคสเหลว หรือเบะแซ ทำมาจากแป้งมันสำปะหลังนำมาผสมกับน้ำแล้วนำมาปรับพีเอชแล้วเติมเอนไซม์เช่น อะไมเลสเพื่อช่วยในการย่อยหรือตัดพันธะจากนั้นนำเป็นต้มด้วยระบบ Jet Cooker เพื่อให้แป้งสุกก็จะได้น้ำเชื่อมที่มีลักษณะคล้ายแป้งเปียกแต่จะมีความหนืดน้อยกว่าและจะเข้าสู่กระบวนการหมักเพื่อให้เอนไซม์ได้ทำงานโดยเติมเอนไซม์กลูโคสอะไมเลส (glucose amylase) เพื่อช่วยในการย่อยและตัดพันธะจนได้ DE (Dextrose Equivalent) ตามที่ต้องการขึ้นอยู่กับปริมาณเอนไซม์ที่เราเติมลงไปผ่านการกรองเข้าสู่กระบวนการฟอกสีขั้น 1 และขั้นที่ 2 ด้วยเรซินหรือถ่านกัมมันต์จากนั้นมาทำให้ระเหยหรือต้มเคี่ยวจนกว่าจะได้เปอร์เซ็นต์ Brix ที่เราต้องการมีลักษณะเหนียวใสและมีรสหวานมากส่วนมากจะใช้ในอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการความหวาน เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายเพราะกลูโคสไซรัปจะราคาถูกกว่าน้ำตาล นอกจากใช้เพื่อให้ความหวานแล้วยังมีประโยชน์ในการป้องกันการตกผลึกของน้ำตาลและใช้เพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสอีกด้วย

2. กลูโคสผง

"กลูโคสผง" เป็นการแปรรูปผลิตภัณฑ์กลูโคสไซรัปใช้ประกอบการเคลือบเงาผลิตภัณฑ์ เช่น ขนมเม็ดยีสของเค้กๆ และลูกอมต่างๆ เพื่อเพิ่มเนื้อสัมผัสหรือปรับปรุงลักษณะของผลิตภัณฑ์ แต่เนื่องจากกลูโคสผงได้ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยระบบ "สเปรย์ดราย" ทำให้สามารถเก็บรักษาเพื่อการใช้งานในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิห้องได้นานและยังสะดวกในการนำไปใช้งานในลักษณะ Dry Mix ทั้งยังสามารถปรับ Brix ได้ตามสัดส่วนการละลายในน้ำอุ่นจึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองต่อผู้ใช้งานอุตสาหกรรม ได้เป็นอย่างดี

กระบวนการผลิตกลูโคสไซรัป (พัคตร์ประไพ, 2546)

กระบวนการผลิตกลูโคสไซรัปสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. การเตรียมน้ำแป้ง

การเตรียมน้ำแป้งจะเป็นตัวกำหนดผลิตภัณฑ์ที่ได้และกำลังการผลิต ถ้าเตรียมน้ำแป้งที่มีความเข้มข้นของแป้งมากจะได้ผลผลิตสูงและใช้พลังงานในการต้มระเหยนำน้อย การผสมแป้งกับน้ำมีข้อกำหนดเนื่องจากความยืดหยุ่นของแป้งเมื่อถูกความร้อนถึงอุณหภูมิของการสุก (gelatinization) ฉะนั้นถ้าต้องการให้มีเนื้อแป้งในน้ำแป้งมากๆ ต้องทำการย่อยแป้งขณะที่แป้งกำลังจะสุก เพื่อให้ได้น้ำแป้งที่มีความหนืดต่ำ โดยทั่วไปจะเตรียมน้ำแป้งประมาณ 35 – 40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักปรับความเป็นกรดต่างให้เหมาะสมต่อการย่อยขั้นตอนต่อไป

2. การย่อยแป้งครั้งแรก (liquefaction)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนของการลดความหนืดของแป้งเริ่มต้นเมื่อใช้กรดในการย่อยครั้งแรก เรียกว่า thinning หรือ dextrination ซึ่งการย่อยครั้งแรกเป็นการทำให้แป้งที่สุกมีความหนืดน้อยลง และแป้งบางส่วนถูกย่อยทำให้แป้งมีโมเลกุลเล็กลง ถ้าเป็นการย่อยด้วยเอนไซม์จะใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ซึ่งเป็นเอนไซม์กลุ่มที่ย่อยภายในทำหน้าที่ตัดพันธะน้ำตาลกลูโคสที่จับกันเป็นแป้งจะได้แป้งที่มีโมเลกุลเล็กลงเป็นกลุ่มๆ ที่เท่าๆ กัน วัดค่าสมมูลเดกโทรสได้ 5-20 ในทางปฏิบัติควรรักษาสมมูลเดกโทรสไว้ที่ 10-15 เพื่อป้องกันการรวมตัวกันหรือจับกันใหม่ของแป้งโมเลกุลใหญ่และเกิดตะกอนแขวนลอยที่กรองยาก ลักษณะการเกิดตะกอนเช่นนี้เรียกว่าการเกิดรีโทรเกรเดชัน

3. การย่อยแป้งครั้งแรกด้วยกรด

ปัจจุบันหลังจากมีการพัฒนาการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ การใช้กรดในการย่อยแป้งก็ลดลงไป อย่างไรก็ตามยังมีโรงงานที่ผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสโดยใช้กรดเป็นตัวย่อยล้วนๆ (acid-processing) หรือใช้กรดย่อยแป้งครั้งแรกแล้วใช้เอนไซม์ย่อยครั้งสุดท้าย (acid-enzyme process) กรดที่นิยมใช้คือกรดไฮโดรคลอริกมากกว่ากรดซัลฟิวริก ค่าความเป็นกรดต่างปรับไว้ประมาณ 1.8 จากนั้นจะให้ความร้อนสูงประมาณ 130 – 140 องศาเซลเซียส ความดัน 5 bar ใช้เวลา 10 นาที จะได้ค่าสมมูลเดกโทรสประมาณ 15-20 หลังปฏิกิริยาลิ้นสุด น้ำแป้งที่ถูกย่อยปรับความเป็นกรดต่างเป็น 4.5 - 5.0 โดย Na_2CO_3 สำหรับการย่อยครั้งแรกด้วยกรดต้องปรับเวลาให้

เหมาะสม โดยให้ค่าสมมูลเดกโทรสของน้ำแป้งหลังถูกย่อยมีค่าน้อยกว่า 18 เพื่อป้องกันการคืนตัวของแป้ง

4. การย่อยครั้งแรกด้วยเอนไซม์

เมื่อเตรียมน้ำแป้งได้ความเข้มข้นพอดี ปรับความเป็นกรดต่างให้ถูกต้องคำนวณปริมาณเอนไซม์และเติมถูกต้อง อุณหภูมิประมาณ 100-105 องศาเซลเซียส ซึ่งเอนไซม์ที่ใช้ในช่วงนี้สามารถทนอุณหภูมิสูงและสามารถย่อยสลายแป้งในขณะที่อุณหภูมิสูงได้น้ำแป้งที่ย่อยแล้วในช่วงนี้ควรมีค่าสมมูลเดกโทรส (dextrose equivalent) อยู่ที่ 10-15 หรือต่ำกว่า 20 เรียกผลิตภัณฑ์นี้ว่า maltodextrin ถ้าต้องการผลิต maltodextrin ก็เพียงนำแป้งที่ย่อยระดับนี้แล้วไปผ่านการทำให้บริสุทธิ์คือการกรองด้วยผงถ่านจนใส และนำไประเหยน้ำโดยเครื่องต้มระเหยให้ได้ความเข้มข้นจากเดิม 35-40 เปอร์เซ็นต์ เป็นประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำมาผ่านเครื่องพ่นผงจะได้ผลิตภัณฑ์ maltodextrin

5. การย่อยน้ำแป้งครั้งสุดท้าย (saccharification)

น้ำแป้งหลังจากการย่อยครั้งแรกแล้วจะเป็นน้ำค่อนข้างใส ไม่มีความหนืด มีลักษณะคล้ายน้ำ ซึ่งในการย่อยครั้งสุดท้ายต้องระมัดระวังมากเพราะเป็นการย่อยเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และเป็นการย่อยที่ใช้เวลานานมากคือ 8-72 ชั่วโมงแล้วแต่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

5.1 การผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสชนิด 38-42 DE (Dextrose Equivalent)

การผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสชนิด 38-42 DE หรือต่ำกว่า 42 DE ถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ขนมหวาน ลูกกวาด และยา ลักษณะของผลิตภัณฑ์ต้องเหนียวใส และมีความหวานเล็กน้อย ไม่มีการรีโทรเกรเดชัน

5.2 การผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสชนิด DE สูง

สำหรับการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส DE > 95 เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาลฟรุคโตสหรือซอร์บิทอล หรือทำเดกโทรสต้องใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลสเท่านั้น ซึ่งเอนไซม์ชนิดนี้ทำงานช้าใช้เวลาในการย่อยอย่างสมบูรณ์เป็นเวลานานประมาณ 60-72 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

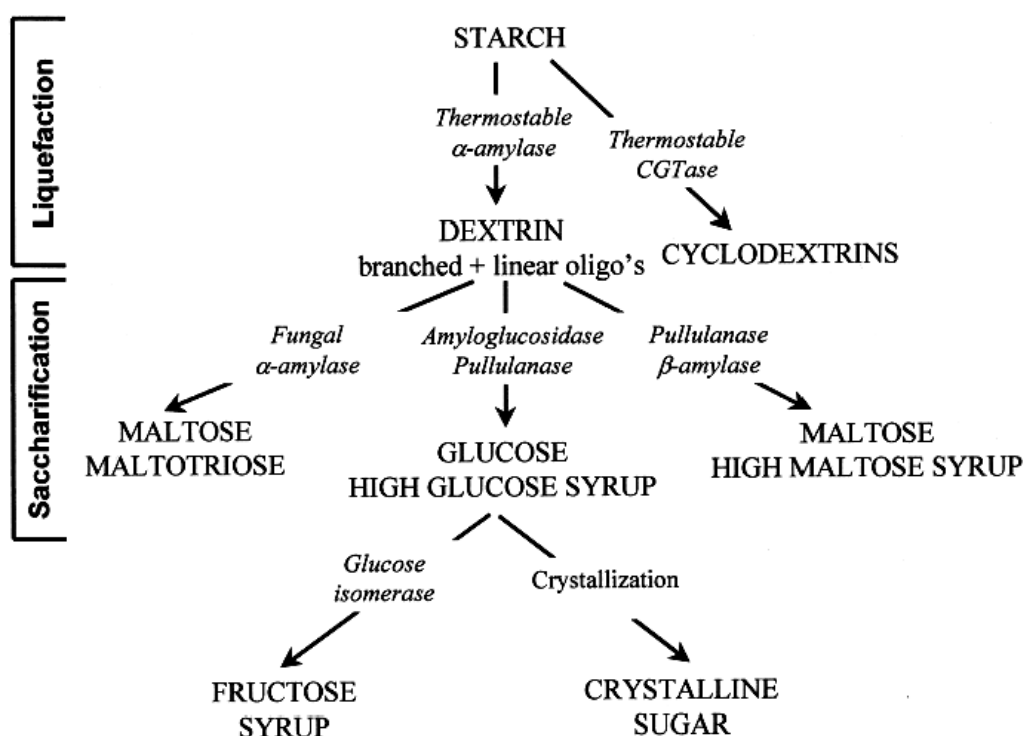
6. การทำให้บริสุทธิ์ (refining) และการกำจัดสี (removal of colorants)

การทำให้บริสุทธิ์ นั้นสะดวกสำหรับแป้งมันสำปะหลัง เพราะมีสารประกอบ เช่น โปรตีนไขมัน น้อยมากสามารถกรองโดยใช้สารช่วยกรองและผงถ่านพร้อมกันได้ ปกติสามารถใช้เครื่อง

กรอง เช่น filter press หรือ vacuum drum filter ได้ หลังจากกรองแล้วควรจะได้สารละลายใส ซึ่งขั้นตอนต่อไปคือการจับประจุด้วยการผ่านเรซิน (ion-exchange resin) เพื่อลดสีของน้ำเชื่อมกลูโคส

7. การต้มระเหย (evaporation)

กระบวนการต้มระเหยเป็นกระบวนการสุดท้ายที่ระเหยน้ำออกไป เพราะน้ำเชื่อมที่กรองและทำให้บริสุทธิ์แล้วจะมีความเข้มข้นของของแข็งประมาณ 40 % จำเป็นต้องระเหยน้ำออกไปจนกระทั่งได้ความเข้มข้นของของแข็งเป็น 80 % จึงจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการในการต้มระเหย ต้องทำในที่อุณหภูมิต่ำโดยการต้มระเหยภายใต้สุญญากาศเพื่อป้องกันการแตกตัวของน้ำตาลกลูโคสเนื่องจากความร้อน



ภาพที่ 2.1 แสดงอุตสาหกรรมการย่อยแป้งเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ (พัคตร์ประไพ, 2546)

การใช้ประโยชน์ของกลูโคสไซรัปในอุตสาหกรรมอาหาร

กลูโคสไซรัป สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารได้หลากหลายชนิดโดยใช้เป็นสารให้ความหวาน สารให้กลิ่น รส ใช้ตกแต่งหน้าผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อดึงดูดใจผู้บริโภค เช่น ในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน ไอศกรีม ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม เป็นต้น และยังสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องดื่มได้ โดยการนำมาเจือจางก่อนดื่ม โดยมีตัวอย่างดังนี้

-ผลิตภัณฑ์ขนมหวาน ใช้เป็นสารให้ความหวานและกลิ่นรสในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน เช่น ลูกอม เยลลี่ มาร์ช เมลโล เป็นต้น

-ไอศกรีม ใช้เป็นสารให้ความหวานและกลิ่นรสในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม ผลิตภัณฑ์เพื่อตกแต่งหน้าไอศกรีม เป็นต้น

-ผลิตภัณฑ์ขนมอบ เค้ก พายชนิดต่างๆ หรือใช้รับประทานกับแพนเค้ก วาฟเฟิล เช่นเดียวกับแยมและมาร์มาเลต เป็นอาหารเข้า

-ผลิตภัณฑ์นม เป็นสารให้ความหวานในนมสด และครีมชนิดต่างๆ

-ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่ม โดยการเจือจางด้วยน้ำ เพื่อใช้เป็นเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ หรือเป็นส่วนประกอบของค็อกเทล ผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น นำไปผลิตแอลกอฮอล์และน้ำส้มสายชูคุณภาพสูง ใช้เป็นสารให้สีในอาหารและยา

ชนิดของสารสีน้ำตาล

สารสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต มีหลายชนิด และประกอบไปด้วยขนาดโมเลกุล ค่าความไวต่อกรด-ด่าง ประจุ และโครงสร้างทางเคมี ที่แตกต่างกันออกไป โดยชนิดของสารสีก่อให้เกิดสีน้ำตาล ได้แก่ phenolic, caramel, alkaline degradation product (ADPs), melanoidin, colorant polysaccharide complex แต่สารสีที่มีบทบาทมากที่สุดได้แก่ melanoidins (Broadhurst, 2002)

1. เมลานอยดิน (melanoidins) (Coca, Garcia, Gonzalez, Pena, & Garcia, 2004)

ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) เป็นปฏิกิริยาที่น้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งมีหมู่ที่เป็นอัลดีไฮด์ และคีโตนทำปฏิกิริยากับสารประกอบไนโตรเจน เช่น เอมีน และโปรตีน ทำให้เกิดสารสีน้ำตาลที่เรียกว่า เมลานอยดิน (melanoidins) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว กลไกการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) นี้มี 3 ช่วง คือ (แสดงดังรูปที่ 2.2)

ช่วงที่ 1 : reducing sugar จะถูก condensate ที่ตำแหน่ง carbonyl กับ amino group ของโปรตีนทำให้เกิดการเคลื่อนของอิเล็กตรอนเป็น N-substituted glycosylamine ภายใต้สภาวะ

กรดเกิด isomerization เป็น ketone เรียกกระบวนการ Amadori arrangement ได้ผลิตผลเป็น 1-amino-1deoxy-2-ketose derivative ซึ่งเป็นสารไม่มีสี

ช่วงที่ 2 : ปฏิกิริยาในช่วงนี้เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนอิเล็กตรอนของ amino group จากการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลครึ่งส่วนประกอบไปด้วยกระบวนการ dehydration, cyclization, fragmentation หรือ amine condensation สามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบหลักคือ

-สภาวะกรด

กระบวนการ dehydration และ cyclization ทำให้ hexose เปลี่ยนเป็น hydroxyfurfural หรือ pentose เป็น furfural ซึ่งยังคงเป็นสารที่ไม่มีสี แต่กระบวนการ oxidation ที่เกิดต่อไป จะทำให้เกิด g-unsaturated decarboxyl compounds ได้ผลิตผลเป็นสารสีเหลือง

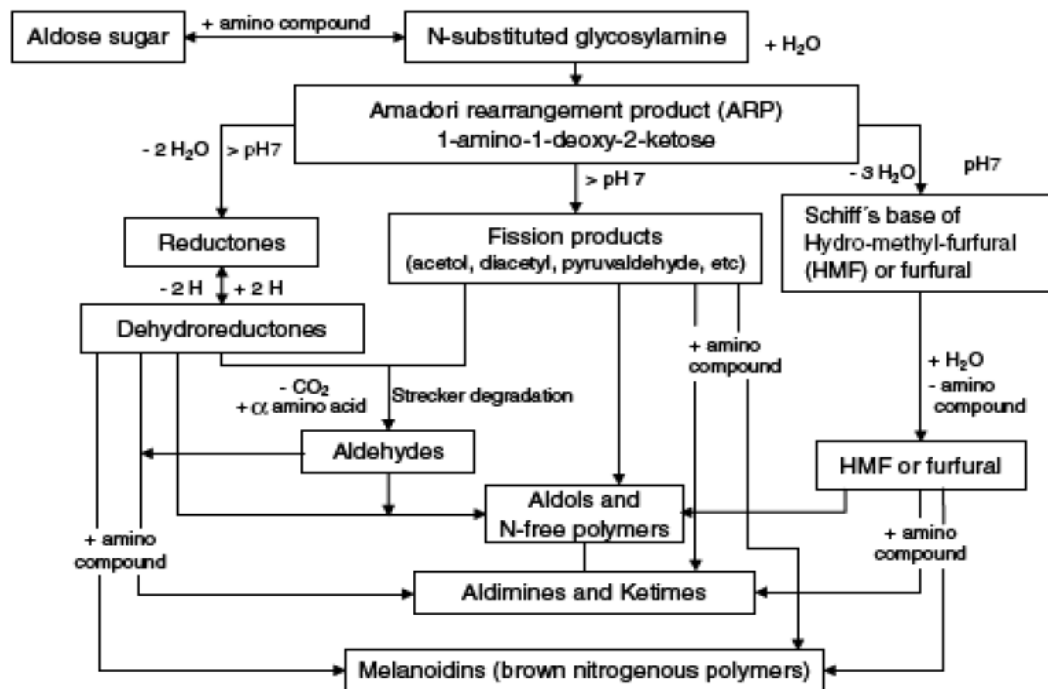
- สภาวะต่าง

2-keto glycosyl form เปลี่ยนเป็น 1, 2-enol glycosyl form และถูกกระบวนการ dehydration และ oxidation เปลี่ยนเป็น 2, 3-enol form ได้ผลิตผลเป็น reductones และ dehydroreductones ซึ่ง dehydroreductones นี้จะไปรวมตัวกับ amino acid ได้ผลิตผลเป็น CO₂, aldehydes และ amino-keto derivatives เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Strecker dehydration

-สภาวะอุณหภูมิสูง

กระบวนการ fragmentation จะเปลี่ยน amadori product ได้ carbon aldehyde 3-4 โมเลกุล alcohols, acids หรือ ketones ซึ่งมีสี และกลั่นเป็นเอกลักษณ์ของ maillard browning โดยเฉพาะ

ช่วงที่ 3 : ปฏิกิริยาในช่วงนี้เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา polymerization ของผลิตผลในช่วงที่ 2 และทำปฏิกิริยา copolymerization กับ amino compound สุดท้ายจะได้ product คือ melanoidins หรือ brown nitrogenous polymers



ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reactions)

(Coca, Garcia, Gonzalez, Pena, & Garcia, 2004)

กระบวนการดูดซับ (adsorption) (Mckey, 1996)

การดูดซับ (adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับหรือดูดติดอยู่บนผิวของของแข็ง การดูดซับหรือ การดูดติดผิวนี้นี้จะเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass Transfer) ระหว่างสถานะต่างๆ ทั้ง 3 สถานะ คือของเหลว ก๊าซ และของแข็ง ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็งและของเหลว-ของแข็ง

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ เข้าหาตัวดูดซับ

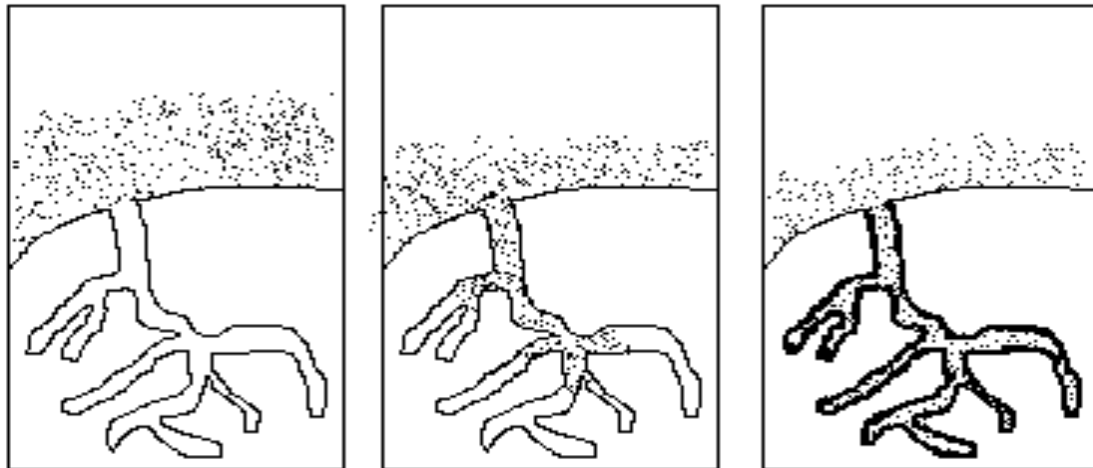
ขั้นตอนที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (film diffusion) ซึ่งตามปกติตัวดูดซับจะมีฟิล์มของน้ำบางๆ ห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อบางๆ และเกิดการแพร่เข้าสู่โพรงหรือช่องว่างภายในของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวภายในโพรงหรือช่องว่างภายในของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 1 : ตัวถูกดูดซับ
แพร่ผ่านพื้นผิวตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 : ตัวถูกดูดซับ
เคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของตัว
ดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 : เกิดการ
ดูดซับของตัวดูดซับบน
พื้นผิวของตัวดูดซับ



ภาพที่ 2.3 กลไกการดูดซับ ((McKey, 1996)

ประเภทของการดูดซับ (Ruthven, 1984 ; Faust & Aly, 1983)

แบ่งประเภทการดูดซับเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เกิดจากแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยตัวที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับ จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีใด ๆ การดูดซับแบบนี้สามารถผันกลับได้ (reversible) การดูดซับทางกายภาพบางที่เรียกว่า การดูดซับด้วยแรงวัลเดอรัวาล (van der waal's adsorption)

2. การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) จะเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตำแหน่งดูดซับ (adsorption site) ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีบางครั้งจะต้องการพลังงานเข้าร่วมด้วยเรียกว่า การดูดซับด้วยการกระตุ้น (activated adsorption) พันธะที่เกิดขึ้นแข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับในลักษณะชั้นเดียว (monolayer) ซึ่งต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่การดูดซับเกิดในลักษณะหลายชั้น (multilayer) จากแรงวัลเดอรัวาล

3. การดูดซับด้วยประจุ (ionic adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวด้วยแรงของประจุที่ตรงข้ามกัน (electrical attraction) ทำให้ไอออนของตัวถูกดูดซับติดอยู่ที่พื้นผิวตัวดูดซับในตำแหน่งที่มีประจุตรงข้ามกัน ไอออนที่มีประจุสูงจะถูกดูดซับได้ดีกว่าพวกที่มีประจุต่ำ ๆ และไอออนที่มีขนาดเล็ก

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (อิริสรา, 2539 ; วไลลักษณ์, 2544)

อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ความปั่นป่วน (turbulence)

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (film diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำ เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2. ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาด และพื้นที่ผิว ขนาดของตัวดูดซับ มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางตรงกันข้ามกล่าวคือ อัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับดีกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นผิวมากย่อมดูดโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงๆ ซึ่งจะมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่นั้น ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ กล่าวคือ ในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวก และตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำๆ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับของตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+)

ในสารละลาย แต่จะได้ผลในทางตรงกันข้ามกัน เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงๆ เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลงและปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน(OH^-) เพิ่มขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบก็จะให้ผลตรงกันข้ามในทำนองเดียวกัน

4. อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด คือถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น

5. ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะถูกดึงดูดออกจากน้ำก่อนแล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ข้างบนไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของตัวถูกดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่าความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

6. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุล และขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์ จะพบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับกรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดไพรอพิอิก และกรดบิวเทอริก ได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการละลายด้วย โดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาวมักจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลงจึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับ โดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมากสารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักจะถูกดูดซับได้ดี มากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่จะดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

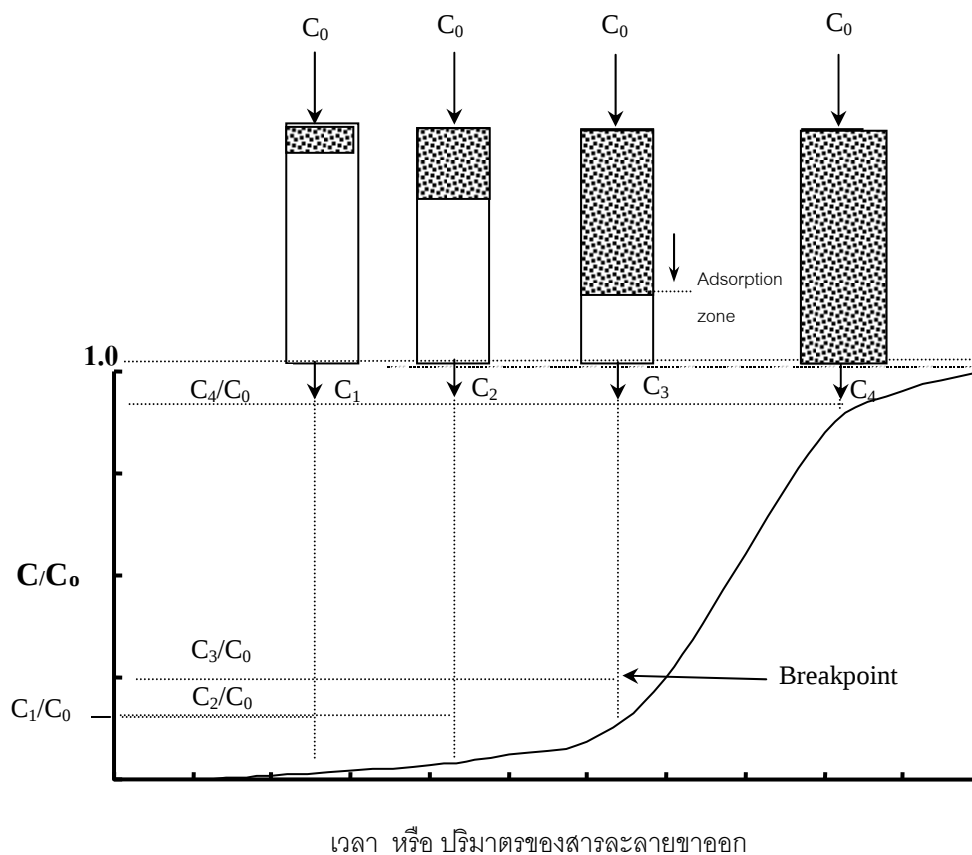
การดูดซับแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ (Mckey, 1996 ; วรรณต์, 2543; Sunstrom & Klie, 1979)

ระบบการดูดซับแบบไหลต่อเนื่องนิยมใช้กับปริมาณน้ำเสียจำนวนมาก ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 แบบ ได้แก่

1. แบบชั้นตรึง (fixed bed) ระบบการดูดซับแบบนี้ น้ำเสียจะไหลลงผ่านชั้นคาร์บอนที่อยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลง fixed Bed เป็นแบบจำลองพื้นฐานสำหรับการดูดซับในระบบคอลัมน์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการหมดสภาพและการฟื้นฟูประสิทธิภาพของตัวดูดซับ การดูดซับแบบ Fixed Bed นี้สามารถออกแบบการไหลผ่านของตัวถูกดูดซับโดยการไหลผ่านจากล่างขึ้นบนหรือการไหลผ่าน จากบนลงล่าง โดยที่การไหลผ่านจากบนลงล่างจะใช้ตัวดูดซับเป็นทั้งตัวดูดซับและตัวกรอง แต่ถ้าการดูดซับไม่ต้องการหน้าที่ในการกรองการออกแบบการดูดซับแบบไหลจากล่างขึ้นบนจะมีความเหมาะสมกว่า เนื่องจากช่วยลดผลของ pressure Drop ทำให้สารละลายไหลผ่านช่องแคบได้ดี ลดการอุดตันของตัวดูดซับ และสามารถควบคุมอัตราการไหลได้ดีขึ้น นอกจากนี้การออกแบบให้มีการไหลผ่านจากล่างขึ้นบนนี้ยังมีความเหมาะสมกับตัวดูดซับที่มีขนาดเล็ก ทำให้สามารถลดขนาด ตัวดูดซับได้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของการดูดซับ

เมื่อมีการป้อนสารละลายเข้าสู่คอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับด้วยอัตราการป้อนสารละลายขาเข้าเท่ากับอัตราการดึงตัวอย่างด้านขาออก ตัวถูกดูดซับจะแพร่เข้าไปในตัวดูดซับและเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำให้การดูดซับมากเกินไปจนตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งแสดง breakthrough curve สำหรับการดูดซับ ส่วน “breakpoint” บนกราฟนี้เป็นจุดบ่งชี้ว่าคอลัมน์ใกล้หมดประสิทธิภาพ หรือเป็นจุดที่ตัวถูกดูดซับหลุดออกมาจากคอลัมน์ถึงระดับที่ควรหยุดการป้อนสารละลาย และเข้าสู่ขั้นตอนการฟื้นฟูประสิทธิภาพตัวดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของกราฟ breakthrough curve ได้แก่ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง อัตราเร็วของการดูดซับ สภาวะสมดุลของการดูดซับ ขนาดของตัวดูดซับ ความลึกหรือความสูงของคอลัมน์หรือ bed และอัตราเร็วของการป้อนสารละลาย แต่โดยส่วนใหญ่ ค่า breakpoint จะขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ คือ ค่า breakpoint จะลดลงเมื่อตัวดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือ ลดระดับความสูงของคอลัมน์ หรือมีการเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของ Breakthrough Curve สำหรับตัวดูดซับแบบ Fixed-Bed column

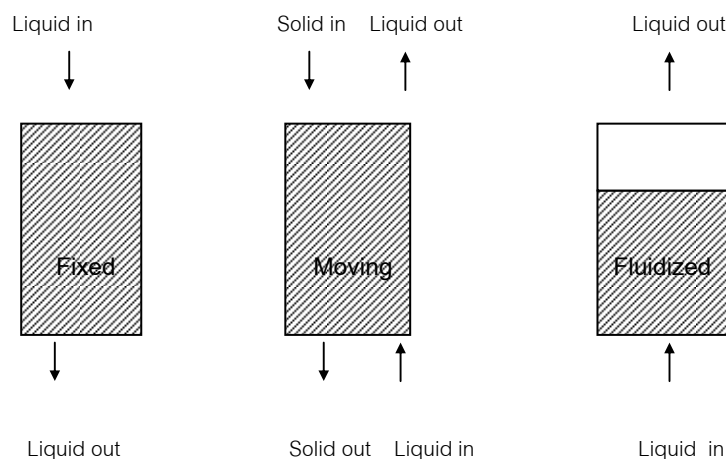
($C_1, C_2, \dots, C_i$ = สารละลายขาออก, C_0 = สารละลายขาเข้า) (Mckey, 1996)

2. แบบชั้นเคลื่อนที่ (moving bed) ระบบนี้ให้น้ำเสียไหลขึ้นพร้อมๆ กัน กับมีการเปลี่ยนสารดูดติดผิวจากบริเวณส่วนล่างของถังซึ่งจะหมดสภาพก่อน ระบบมีประสิทธิภาพสม่ำเสมอแต่ไม่นิยมใช้กับการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากต้องควบคุมการดูแลการเคลื่อนย้ายสารดูดติดผิวออกมาอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอทั่วหน้าตัดของถัง ระบบแบบชั้นเคลื่อนที่ที่มีใช้กันในงานแยกก๊าซไฮโดรคาร์บอนของโรงงานปิโตรเลียม

3. แบบชั้นฟลูอิดไดซ์ (fluidized bed) ระบบให้น้ำเสียไหลขึ้นด้วยความเร็วสูงมากพอให้สารดูดติดผิวเกิดการแขวนลอยในระบบได้ แต่ต้องไม่ทำให้สารดูดติดผิวลอยขึ้นมาจนหลุดออกจากชั้นดูดติดผิว ในการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพอย่างสม่ำเสมอต้องเติมสารดูดติดผิวใหม่

เข้าจากด้านบนของถัง และถ่ายสารดูดติดผิวเก่าออกจากด้านล่างของถัง ระบบนี้มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าระบบแบบชั้นตรึง (fixed bed) แต่มีข้อดีที่สามารถรับปริมาณน้ำเสียไหลเข้าได้มากกว่าและเลือกใช้สารดูดติดผิวที่มีขนาดเล็กกว่าได้ โดยไม่มีปัญหาการสูญเสียความดันสูงเกินไปในระบบ

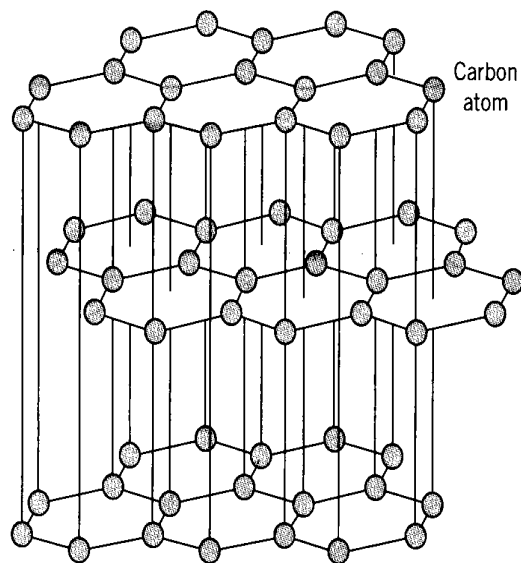
รูปแบบการดูดซับแบบไหลต่อเนื่อง ทั้ง 3 แบบ แสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 รูปแบบการดูดซับในคอลัมน์แบบไหลต่อเนื่อง (Sunstrom & Klie, 1979)

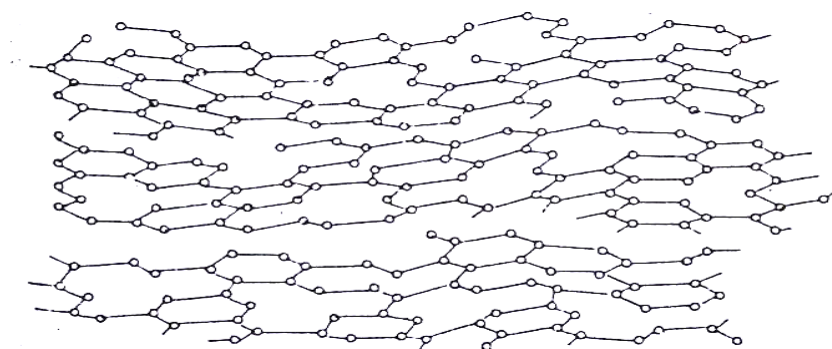
ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ (activated Carbon) มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอน มีลักษณะคล้ายกราฟไฟต์แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีมากมายกราฟไฟต์ประกอบด้วยแผ่นชั้นที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนซึ่งเรียงตัวกันแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า (regular hexagons) ระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอนในแต่ละชั้นมีขนาด 1.42 อังสตรอม (Å) อิเล็กตรอน 3 ใน 4 ตัวของคาร์บอนจะสร้างพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับอะตอมที่ติดกัน ขณะที่อิเล็กตรอนตัวที่ 4 เคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างวาเลนซ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของกราไฟต์ (Faust and Aly,1983)

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แตกต่างจากกราไฟต์ ซึ่งจะมีโครงสร้างเป็นผลึกที่เล็กมาก (microcrystallites) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่าศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็กๆ มีขนาดประมาณ 150 อังสตรอม และระยะทางระหว่างผลึกเล็กๆ นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 อังสตรอม ดังแสดงในภาพที่ 2.7

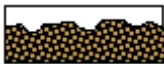
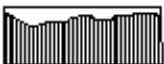
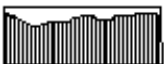
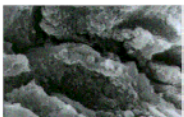
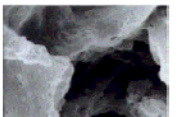
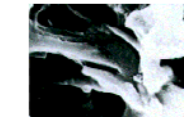
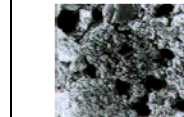


ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ (Faust and Aly,1983)

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ (Faust & Aly, 1983; Hassler, 1974; Smisek, 1970;
สิริกาญจน์, 2548)

ถ่านกัมมันต์สามารถทำได้จากวัสดุหลายชนิด ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุต่างกันจะมีลักษณะโครงสร้างและรูพรุนแตกต่างกัน (ตารางที่ 2.1) ถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียส่วนมากมักผลิตจากกะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ถ่านไม้ ถ่านหินแอนทราไซต์ (anthracite coal) เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุต่างชนิดกัน (สิริกาญจน์, 2548)

	Wood	Coal	Coconut	Palm Shell
Density	Low 	Low 	High 	High 
Hardness	Soft 	Medium 	Very Hard 	Very Hard 
Pore Diameter	Macropore & Mesopore 	Macropore & Mesopore 	Mainly Micropore (< 1 nm pore diameter) 	Mainly Micropore (1-2 nm pore diameter) 
Morphology (x10,000 times magnification)				

กระบวนการทำผลิตถ่านกัมมันต์ มี 2 ขั้นตอนได้แก่ การทำให้เป็นถ่านคาร์บอน (carbonization) และการกระตุ้น (activation)

1. กระบวนการทำให้เป็นถ่านคาร์บอน (carbonization)

การทำให้เป็นถ่านคาร์บอน เป็นกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) รูปแบบหนึ่ง ซึ่งต้องการความร้อนทั้งที่ได้จากการออกซิเดชันหรือเกิดจากปฏิกิริยาอื่นๆที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่ออกซิเจนน้อยหรือในที่มีการถ่ายโอนความร้อนให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วน of ถ่าน

(char) และแก๊ส ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในรูปของ char ที่เป็นของแข็งมากกว่าน้ำมันดิน (tar) และแก๊ส ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้นและทำให้สารปนเปื้อนที่ไม่ใช่คาร์บอนสลายตัว

2. การกระตุ้น (activation)

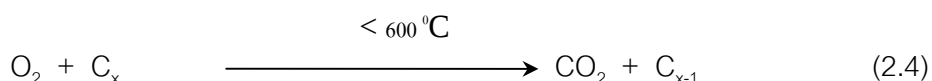
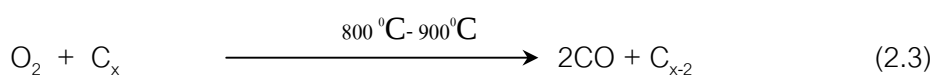
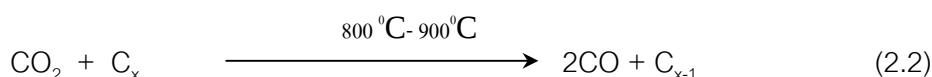
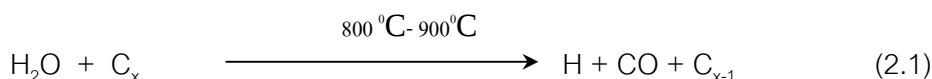
การกระตุ้น คือการทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น ความหมายของการกระตุ้นจะพิจารณาในสามความหมายคือ

ก. การเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (active Surface Area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน

ข. เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้ผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึง ทำให้ะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

ค. เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์ต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active center)

การกระตุ้นจะใช้ก๊าซซึ่งมีคุณสมบัติในการออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูง ก๊าซส่วนใหญ่ที่นิยมใช้คือ ไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ



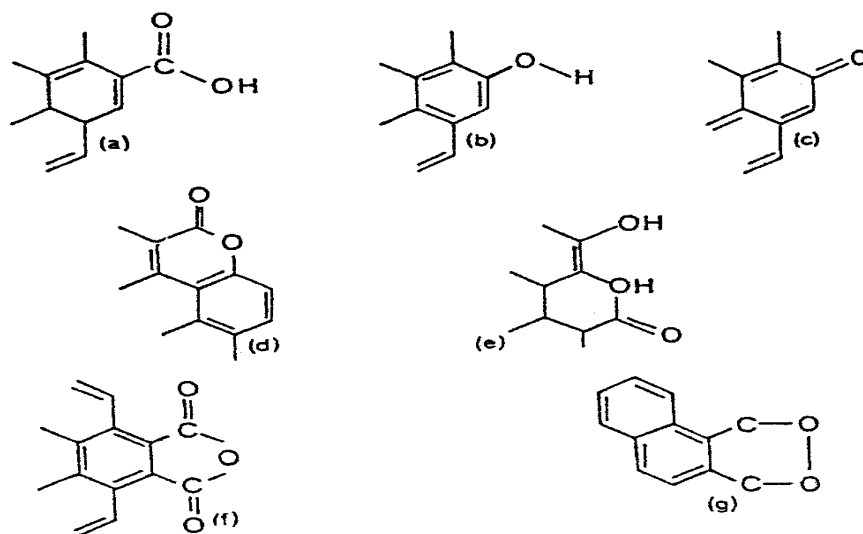
ความสามารถในการดูดซับหรือความจุของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการกระตุ้นคือ คุณสมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ปริมาณและชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุดิบ

นอกจากวิธีกระตุ้นโดยใช้ก๊าซเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ยังมีการกระตุ้นโดยใช้สารเคมี (chemical activation) ซึ่งนี้ทำให้เกิดรูพรุนภายในถ่านมากกว่าการกระตุ้นโดยใช้ก๊าซ ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวภายนอกของถ่านเท่านั้น สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl_2) และ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เป็นต้น

นอกจากนั้นอาจใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน โดยการใส่สารเคมีกระตุ้นและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400-1,000 องศาเซลเซียส แล้วกระตุ้นด้วยไอน้ำ หรือก๊าซชนิดอื่นที่เป็น super heated steam

คุณสมบัติทางเคมีที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (สิริกาญจน์, 2548)

คุณสมบัติทางเคมีที่ผิวของถ่านกัมมันต์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี การเร่งปฏิกิริยาความเป็นกรด-ด่าง ปฏิกิริยารีดอกซ์ ความชอบ-ไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic-Hydrophobic) เป็นต้น หมู่ฟังก์ชันที่ผิวของถ่านกัมมันต์ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ โดยเฉพาะถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มีธาตุออกซิเจนมาก เช่น ไม้ แหะคาโลส และ Phenolformaldehyde Resins ที่เกิดจากกระบวนการคาร์บอนเซชันไม่สมบูรณ์ หรือเกิดจากการกระตุ้นถ่านหินด้วยกระบวนการออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ หรืออากาศ โดยทั่วไปสารประกอบออกซิเจนที่ผิวถ่านกัมมันต์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ หมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติเป็นกรดและด่าง ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างความเป็นกรด-ด่างที่ผิวของถ่านกัมมันต์

- (a) carboxylic acid, (b) phenolic hydroxyl,
 (c) quinone-type carbonyl groups, (d) normal lactone,
 (e) fluorescein-type lactones, (f) carboxylic acid anhydrides,
 and (g) cyclic peroxides

ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบและวิธีการกระตุ้นที่แตกต่างกัน จะมีคุณสมบัติทางเคมีที่พื้นผิวแตกต่างกัน กล่าวคือ อาจมีคุณสมบัติเป็นโปรโตเนต (protonated $(C-OH_2^+)$) เป็นกลาง (Neutral (COH)) หรืออิออนไนซ์ (ionised (CO^-)) อาจจำแนกถ่านกัมมันต์ตามคุณสมบัติของพื้นผิวออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ ได้แก่

1) H-Type

H-Type คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีประจุบวกหรือโปรโตเนตที่พื้นผิว มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ และมีคุณสมบัติเป็นด่างเมื่ออยู่ในสารละลายซึ่งจะดูดซับกรดแก่ได้ดี โดยมากถ่านกัมมันต์ชนิดนี้ได้จากการเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะบรรยากาศหรือในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และนำออกมาในบรรยากาศเปิดที่อุณหภูมิต่ำที่ หมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในถ่านกัมมันต์ชนิดนี้ส่วนใหญ่ ได้แก่ แลคโตน (lactones) ควิโนน (quinones) ฟีนอล (phenols) และคาร์บอกซิเลต (carboxylates)

2) L-Type

L-Type คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีประจุลบหรือไอออนไนซ์ที่พื้นผิวเป็นสารประเภทไฮโดรฟิลลิกหรือชอบน้ำ(hydrophillic) และเป็นกรดเมื่ออยู่ในสารละลายสามารถดูดซับและสะเทินต่างได้ดี ได้จากการเผาวัตถุดิบที่อุณหภูมิประมาณ 200-400 องศาเซลเซียสในอากาศและเผากระตุ้นโดยใช้ สารกระตุ้นที่อุณหภูมิต่ำไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักผลิตจากวัตถุดิบจำพวกไม้หรือวัตถุดิบที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสูง หมู่ฟังก์ชันส่วนใหญ่ ได้แก่ คาร์บอกซิล(carboxyl) ฟีนอลลิก(phenolic) ไฮดรอกซิล(hydroxyl) คาร์บอนิล(carbonyl) คาร์บอกซิลิก(carboxylic acid) แอนไฮไดร(anhydrides) แลคโตน(lactone) และเปอร์ออกไซด์(peroxide)

ชนิดของถ่านกัมมันต์ (กนกวรรณ, 2549 ; สิริกาญจน์, 2548)

1. แบ่งตามชนิดของการกระตุ้น

- Chemical activated carbon คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้น เช่น $ZnCl_2$, H_3PO_4 เป็นถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่
- Physical activated carbon คือ ถ่านที่ใช้ก๊าซออกซิไดซ์เป็นตัวกระตุ้น เช่น ไอน้ำ CO_2 ถ่านที่ได้มีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมใช้ในการดูดก๊าซ และไอระเหย

2. แบ่งตามขนาดของรูพรุน

- Micropores เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 2 นาโนเมตร ใช้ในการดูดซับก๊าซและไอระเหย
- Mesopores เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 2 ถึง 50 นาโนเมตร ใช้ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic reaction)
- Macropores เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร ใช้ในการฟอกสีและผลิตยา

3. แบ่งตามความหนาแน่นของถ่าน

- ความหนาแน่นต่ำ ถ่านประเภทนี้ใช้ประโยชน์ในสถานะที่เป็นของเหลว หรือสารละลาย เช่น ใช้ในการฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำน้ำให้บริสุทธิ์
- ความหนาแน่นสูง ถ่านประเภทนี้ใช้ในการดูดก๊าซหรือไอระเหย

4. แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

- ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับก๊าซ (gas adsorbent activated carbon) ใช้ในการทำก๊าซให้บริสุทธิ์ เช่น การนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ หรือการแยกก๊าซ เป็นต้น
- ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับของเหลว (liquid adsorbent activated carbon) ใช้กับงานฟอกสี หรือทำของเหลวให้บริสุทธิ์ เช่น ขี้ผึ้ง (wax)

5. แบ่งตามลักษณะรูปร่าง

-ถ่านกัมมันต์แบบผง (powder activated carbon) ถ่านกัมมันต์แบบผงมีขนาดประมาณ 10-50 ไมครอนหรือน้อยกว่า ข้อดีของถ่านกัมมันต์แบบผง คือ มีราคาถูกกว่าถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ประมาณ 2-3 เท่า การเพิ่มหรือลดปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ให้สอดคล้องกับคุณภาพน้ำที่ที่ต้องการบำบัดสามารถกระทำได้ที่ ต้นทุนต่ำ และการดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ส่วนข้อเสียของถ่านชนิดนี้ คือ ไม่คุ้มทุนในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว และต้องใช้ถ่านกัมมันต์ในปริมาณมาก

-ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (granular activated carbon) ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของเม็ดทรายกรองน้ำ แต่จะแข็งเปราะ และเบากว่าทราย ข้อดีของถ่านกัมมันต์ชนิดนี้ คือ สามารถทำการฟื้นฟูสภาพถ่านที่ใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่ได้แต่อย่างไรก็ตามในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์แต่ละครั้งจะสูญเสียถ่านกัมมันต์ไปประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ และถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยลง

การประเมินการเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ (Hassler, 1974)

จากการใช้ถ่านกัมมันต์ ในการบำบัดน้ำเสียหรือระบบประปาเพื่อให้เกิดประโยชน์มากที่สุด จึงจำเป็นต้องมีการคัดเลือกถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมและรูปแบบของการดำเนินงาน โดยทำการทดลองวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์ สมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของน้ำ คุณภาพน้ำที่ต้องการ วิธีการบำบัด ตลอดจนความสะดวกในการควบคุมระบบ เป็นปัจจัยที่สำคัญในการเลือกชนิดและรูปแบบการใช้งาน

สมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เป็นตัวกำหนดในการใช้งาน ได้แก่

1. พื้นที่ผิว (surface area) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการเกาะติดผิวถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการเกาะติดผิวมาก
2. ความหนาแน่นก้อน (bulk density) เป็นตัวกำหนดปริมาณของถ่านกัมมันต์ในแต่ละงาน

3. ขนาดใช้งาน (effective size) เส้นผ่านศูนย์กลาง (mean particle diameter) สัมประสิทธิ์ของความเสมอกัน (uniformity coefficient) ใช้ในการกำหนดสภาวะทางชลศาสตร์ (hydraulic conditions) ของคอลัมน์เกาะติดผิว (adsorber column)
4. ปริมาตรรูพรุน (pore volume) เป็นตัวกำหนดการเกาะติดผิวโมเลกุลของน้ำ
5. การหาขนาดของถ่านกัมมันต์ผ่านชั้นตะแกรง (sieve analysis) ใช้เป็นตัวตรวจสอบขนาดของถ่านกัมมันต์ที่จะนำมาใช้งาน
6. ตัวเลขการกัดกร่อน (abrasion number) ใช้ในการประเมินความคงทนต่อการขัดสี
7. ปริมาณร้อยละของเถ้าถ่านกัมมันต์ (percent ash content) แสดงถึงกากของถ่านกัมมันต์ ว่ามีมากหรือน้อยเพียงใด
8. ความชื้น (moisture) แสดงปริมาณน้ำในถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการผลิตและจะนำไปใช้งานต่อไป
9. ไอโอดีนัมเบอร์ (iodine number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการเกาะติดผิวสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
10. โมลาสเสนัมเบอร์ (molasses number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านกัมมันต์ในการเกาะติดผิวสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง
11. ขนาดของรูพรุน (pore site) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการเกาะติดผิวโมเลกุลของสาร

การฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ (สันทัด, 2549)

ข้อดีของการใช้ถ่านกัมมันต์คือสามารถนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่ได้อีกหลังจากมีการปรับปรุงสภาพ ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากร ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ใช้แล้วควรนำไปฟื้นฟูสภาพเพื่อฟื้นความสามารถการดูดติดผิวและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก การฟื้นฟูสภาพมักใช้วิธีเผาที่เตาเผาอุณหภูมิสูงซึ่งควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้นได้ การฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีเคมีและวิธีชีวภาพอาจใช้ได้แต่ไม่ได้ผลเท่าวิธีที่ใช้ความร้อนสูง

วิธีการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์มีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- 1) นำถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่เสื่อมสภาพแล้วไปสะเด็ดน้ำให้แห้งและนำไปอบในระเหยน้ำจนได้ถ่านกัมมันต์แห้ง ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 15 นาทีเป็นอย่างน้อย
- 2) นำถ่านกัมมันต์ที่อบแห้งมาเผาในเตาเผาแบบ multiple heat ที่อุณหภูมิประมาณ 800-950 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้นขั้นตอนนี้เป็น

การสร้างปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolysis) เพื่อกำจัดสารที่ถูกดูดซับที่เกาะติดบนผิวถ่านกัมมันต์และสร้างปฏิกิริยาออกซิเดชันให้กับสารที่เหลือจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสสารที่ถูกดูดซับที่ถูกเผาจะกลายเป็นก๊าซ ซึ่งต้องระบายทิ้งออกจากเตาเผา ปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่ออกซิเดชันใช้เวลา 5 และ 10 นาที

- 3) นำถ่านกัมมันต์ไปทำให้เย็นอย่างรวดเร็วในถังน้ำเย็น
- 4) ล้างถ่านกัมมันต์ที่เย็นแล้วเพื่อกำจัดส่วนที่เป็นฝุ่นผงออกไปจากส่วนที่เป็นเกล็ด
- 5) ถ่านกัมมันต์ที่ล้างแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

เถ้าหนักขานอ้อย (bagasse bottom ash)

เถ้าหนักขานอ้อยเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งของโรงงานผลิตน้ำตาลอันเนื่องมาจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ (boiling) ประมาณ 70% โดย Gupta & Imran (2004) ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักขานอ้อยพบว่ามีส่วนประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าหนักขานอ้อย (Gupta & Imran , 2004)

องค์ประกอบทางเคมีของ เถ้าหนักขานอ้อย	อัตราส่วน (โดยน้ำหนัก)
SiO ₂	60.50
Al ₂ O ₃	15.40
CaO	2.90
Fe ₂ O ₃	4.90
MgO	0.81

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศรีอุบล (2549) ได้ศึกษาการกำจัดสีน้ำเชื่อมโดยใช้เถ้าลอยขาน้อย การศึกษาเวลาและปริมาณที่เหมาะสมในการกำจัดสี โดยใช้เถ้าลอยขาน้อย พบว่าการกำจัดสีในน้ำเชื่อมเสถียรที่เวลาเท่ากับ 1 ชั่วโมง และปริมาณเถ้าลอย ขาย้อยต่อปริมาตรน้ำเชื่อมเท่ากับร้อยละ 10 เมื่อศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีสังเคราะห์เมลานอยดิน (ซึ่งใช้เป็นตัวแทนสีของน้ำเชื่อม) พบว่ากลไกไอโซเทอมการดูดซับสีสังเคราะห์เมลานอยดินเป็นกลไก รวมทั้งกายภาพและเคมี การศึกษาห่มุฟังก์ชันของสีที่ถูกดูดซับด้วยเถ้าลอยขาน้อยโดยใช้เครื่อง FTIR พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกัน และห่มุฟังก์ชันของเถ้าลอยขาน้อยก่อนและหลังดูดซับสีน้ำเชื่อม พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ปรากฏพิกของสีน้ำเชื่อมหลังการดูดซับ ประสิทธิภาพการกำจัดสีโดยใช้เถ้าลอยขาน้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเท่ากับร้อยละ 73 (ค่าสีที่เหลือ ในหน่วย ICUMSA เท่ากับ 272) ขณะที่เรซินมีประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยถ่านกัมมันต์ถ่านซังข้าวโพด ไคตินและไคตินดัดแปลง แต่ถ่านกัมมันต์จากเถ้าลอยขาน้อยที่ผ่านการกระตุ้นที่สภาวะต่างๆ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเชื่อมสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 93-96 (ค่าสีที่เหลือในหน่วย ICUMSA เท่ากับ 67-47) การศึกษาการคายการดูดซับสีน้ำเชื่อมของเถ้าลอยขาน้อยพบว่าสีที่ถูกดูดซับสามารถคายการดูดซับด้วยน้ำ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นมาตรฐาน 0.5 นอร์มัล เท่ากับร้อยละ 13 และ 84 ตามลำดับ ขณะที่ถ่านกัมมันต์จากเถ้าลอยขาน้อยที่ผ่านการกระตุ้นสามารถคายการดูดซับสีน้ำเชื่อมด้วยสารละลาย เมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 80 ได้มากกว่าน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น มาตรฐาน 0.5 นอร์มัล การนำเถ้าลอยขาน้อยที่ดูดซับสีแล้วกลับมาใช้ใหม่ พบว่าหลังการแยกจะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก 2 รอบ คิดเป็นอัตราส่วนของเถ้าลอยขาน้อยต่อน้ำเชื่อมเท่ากับ 50 กิโลกรัมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรส่วนเรซิน สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 4 รอบ คิดเป็นอัตราส่วนของเถ้าลอยขาน้อยต่อน้ำเชื่อมเท่ากับ 12.5 กิโลกรัม ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร และถ่านกัมมันต์จากเถ้าลอยขาน้อยที่ผ่านการกระตุ้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มากกว่า 13 ครั้ง คิดเป็นอัตราส่วนของกัมมันต์จากเถ้าลอยขาน้อยที่ผ่านการกระตุ้นต่อน้ำเชื่อมเท่ากับ 0.77 กิโล- กรัมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งจะช่วยลดปริมาณถ่านกัมมันต์จากเถ้าลอยขาน้อยที่ผ่านการกระตุ้นลงถึง 65 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยขาน้อย

Bostan and Boyacioglu (1997) ได้ศึกษา ไคเนติก (Kinetic) ของการเปลี่ยนสีของกลูโคสไซรัปโดยไม่ใช้เอนไซม์ ระหว่างเก็บตัวอย่าง โดยการทดลองทำการเก็บตัวอย่างของกลูโคสไซรัปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 25 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส และกลูโคสไซรัปที่นำมาทดลองจะมีค่าสมมูลเดกโทรส (Dextrose equivalent, DE) เท่ากับ 38 และ 59 และ มีค่าพีเอช ต่างกันคือ พีเอช 4 4.5

และ 5 จากการทดลองพบว่าการเก็บที่อุณหภูมิ 25 และ 35 การเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาล โดยปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reactions) เกิดขึ้นได้น้อย และจากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 55 องศา อัตราการเกิดขึ้นของสีน้ำตาลอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดเกิดขึ้นสูงสุดและเมื่อค่า DE เท่ากับ 59 มีอัตราการเกิดสีน้ำตาล สูงกว่าที่ DE 38 และจากการทดลองพบว่าพีเอชสูงขึ้น อัตราการเป็นสีน้ำตาลสูงขึ้น จากการทดลองพีเอช 5 จะให้อัตราการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลสูงสุดและการทดลองยังศึกษาระยะเวลาของ shelf life พบว่า กลูโคสไซรัปที่เก็บไว้ที่ 55 องศาเซลเซียส ปรับพีเอชเป็น 4 มี shelf life ที่ 13.9 สัปดาห์ และ 11.5 สัปดาห์เมื่อเก็บไว้ที่พีเอช 5 และสำหรับกลูโคสไซรัปที่ 45 องศาเซลเซียส จะมี shelf life 26.2 สัปดาห์ เมื่อพีเอชเท่ากับ 4 และมี shelf life เท่ากับ 17.3 สัปดาห์ เมื่อพีเอชเท่ากับ 5

Bernardo และ คณะ (1997) ได้ศึกษาการกำจัดสีของน้ำเสียกากส่า (molasses wastewater) โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขาน้อย โดยการทดลองจะใช้ เมลานอยดิน (melanoidin) สังเคราะห์เพื่อเป็นตัวแทนของน้ำเสีย โดยขาน้อยนำมาจากประเทศไทย และบราซิล การเตรียมถ่านกัมมันต์จากขาน้อยทำได้โดยการคาร์บอนไนเซชันที่ 300 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีก๊าซไนโตรเจน จากนั้นทำการเผากระตุ้น (activation) ด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และจากการวิเคราะห์ค่า proximate พบว่า ขาน้อยมีปริมาณเถ้า ต่ำเพียง 1.5-1.7 % ขณะที่เมื่อพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ ปริมาณเถ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 12-15.5 % ผลการทดลองยังพบว่า ถ่านกัมมันต์จากขาน้อยที่ผลิตได้มีความสามารถในการดูดซับเมลานอยดินสูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า และ พบว่า ค่าพื้นที่ผิว (BET) ของถ่านกัมมันต์จากขาน้อยสูงกว่า 400 ตารางเมตร/กรัม

Pendyal และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (granular activated carbons, GACs) ที่ทำจากส่วนผสมของตัวยึดเกาะ 4 ชนิดคือ coal tar การนำตาลจากอ้อย (sugarcane molasses) กากน้ำตาลจากหัวบีท (sugar beet molasses) และน้ำเชื่อมจากข้าวโพด (corn syrup) และ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 3 ชนิด คือ แกลบ (rice hulls) ชังข้าว (rice straw) และขาน้อย (sugarcane bagasse) เพื่อใช้กำจัดสีในน้ำตาล(การกำจัดสี กากน้ำตาลและการกำจัดสีของน้ำตาล) ตัวดูดซับนี้จะถูกเปรียบเทียบกับคาร์บอนทางการค้า 2 ชนิด พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ทำจากขาน้อยสามารถกำจัดสีน้ำตาลได้ดี โดยสามารถกำจัดสีได้ใกล้เคียงกับคาร์บอนทางการค้าและการใช้สารยึดเกาะต่างกันความสามารถในการกำจัดสีไม่ต่างกัน

Mudoga และ คณะ (2008) ได้ศึกษาการกำจัดสีในน้ำเชื่อม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจาก sugar beet pulp เปรียบเทียบกัน โดยการทดลองจะใช้ตัวอย่างของถ่านกัมมันต์ทางการค้า 2 ชนิด และ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจาก sugar beet pulp 6 ตัวอย่าง ซึ่งมีวิธีการเตรียม ต่างๆ กัน โดย 2 ตัวอย่างแรกของ sugar beet pulp จะทำการคาร์บอนไนเซชันและ เผากระตุ้น ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 2 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง (750C2 และ 750C5) และ อีก 4 ตัวอย่าง มีการ impregnate ด้วย กรดฟอสฟอริก และ มีการเผากระตุ้นด้วยก๊าซไนโตรเจน 300 องศาเซลเซียส และ 500 องศาเซลเซียส (300P1.5, 300P3, 300P5, 500P1.5, 500P3, 500P5) ผลการศึกษาพบว่าถ่านกัมมันต์จาก sugar beet pulp ที่เตรียมจาก การคาร์บอนไนเซชันและ เผากระตุ้น ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 5 ชั่วโมง เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดเนื่องจากประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำเชื่อมสูงสุด ซึ่งค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีของ 750C5 ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า และผลการศึกษาพบว่าค่าพื้นที่ผิว (BET) มีค่าสูงกว่า 800 ตารางเมตร/กรัม