

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 อ้อย (Sugarcane) [16]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะของต้นอ้อย

อ้อยมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Saccharum officinarum* L. มีถิ่นกำเนิดในทวีปเอเชีย โดยเชื่อกันว่าคำว่า *Saccharum* อาจมาจากภาษาสันสกฤตคำว่า *สาคารา* (*Sarkara*) และแพร่กระจายจากเอเชียไปยังหมู่เกาะเมลานีเซีย (*Melanesia*) ตะวันออกกลาง และแอฟริกาเหนือ อ้อยเป็นพืชอยู่ในสกุล *Saccharum* ซึ่งพืชในสกุลนี้มีอยู่ด้วยกัน 6 species คือ

1. *S. spontaneum* เป็นอ้อยป่า มีเปอร์เซ็นต์น้ำตาลต่ำมาก มีเชื้อไขสูง ลำต้นเล็ก ใบแคบ ทนทานต่อความแห้งแล้ง อุณหภูมิต่ำ ด้านทานโรคและแมลงศัตรูอ้อย มีถิ่นกำเนิดอยู่บริเวณที่หนาวของเขตกึ่งร้อนในอินเดีย

2. *S. robustum* เป็นอ้อยป่า มีเปอร์เซ็นต์น้ำตาลต่ำ เชื้อไขสูง ลำต้นยาว และใหญ่ มีถิ่นกำเนิดในหมู่เกาะนิวกินี และ หมู่เกาะเมลานีเซีย

3. *S. sinense* เรียกกันว่า อ้อยจีน เป็นอ้อยขนาดเล็ก และแข็ง มีเปอร์เซ็นต์น้ำตาลปานกลางแต่เชื้อไขสูง ปล้องยาว แต่ลำเล็ก ใบยาวแคบ มีถิ่นกำเนิดในประเทศจีน

4. *S. barberi* Jesw. เรียกว่าอ้อยอินเดีย เป็นอ้อยที่มีขนาดเล็ก และแข็งเช่นเดียวกับอ้อยจีนมีเปอร์เซ็นต์น้ำตาลปานกลาง แต่เชื้อไขสูง ปล้องยาวปานกลาง แต่ลำเล็ก ใบสั้นแคบ มีถิ่นกำเนิดทางเหนือของประเทศอินเดีย

5. *S. edule* เป็นลูกผสมระหว่าง *S. robustum* และ *Miscanthus floridulus* มีถิ่นกำเนิดอยู่ในหมู่เกาะนิวกินี ซึ่งคนพื้นเมืองของหมู่เกาะเมลานีเซียใช้ช่อดอกเป็นอาหาร

6. *S. officinarum* L. เป็นอ้อยที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลในปัจจุบัน มีเปอร์เซ็นต์น้ำตาลสูง แต่เยื่อใยต่ำ ปล้องยาว ลำใหญ่ มีใบยาวและกว้าง สำหรับถิ่นกำเนิดอยู่ที่เขตแดนของ อินโด-เมียนมาร์-จีน

### ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

อ้อยเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจัดอยู่ใน วงศ์ (family): Gramineae สกุล (genus): *Saccharum* ชนิด (species): *officinarum* อ้อยเป็นพืชที่มีการแตกกอ กอหนึ่งจะมีอ้อย 5-7 ลำ เรียกว่า กออ้อย (stool) เมื่อเก็บเกี่ยวส่วนที่อยู่บนดินแล้ว ส่วนที่เหลืออยู่ เรียกว่า ตออ้อย (stubble หรือ root stock) อ้อยที่ปลูกส่วนใหญ่จะใช้ท่อนพันธุ์ปลูก เมื่อเก็บเกี่ยวครั้งแรกเรียกว่า อ้อยปลูก (planting cane) หลังจากเก็บเกี่ยว ตออ้อยจะแตกหน่ออ้อย และเจริญเติบโตต่อไป เรียกว่า อ้อยตอ (ratoon cane) การไว้ตออ้อย (ratooning) นั้นสามารถไว้ได้ 3 ปี หรือเก็บเกี่ยวได้ 3 ครั้งหรืออาจมากกว่าขึ้นอยู่กับ การดูแลรักษาอ้อยปลูก วิธีการบำรุงรักษาตอ และความสามารถของพันธุ์อ้อย ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ โดยทั่วไปของอ้อยมีส่วนต่างๆ ที่สำคัญดังนี้

1. ราก อ้อยมีระบบรากแบบ fibrous root system แผ่กระจาย โดยรอบลำต้น เมื่อปลูกอ้อยด้วยท่อนพันธุ์จะมีรากเกิดขึ้น 2 ลักษณะ คือ

1.1 รากที่เกิดจากท่อนพันธุ์ จะเกิดจากราก (root primordia) อยู่บริเวณวงราก (root band) ที่ข้อของอ้อย (node) ทำหน้าที่ดูดน้ำและอาหารเพื่อเลี้ยงหน่ออ้อยที่งอกในระยะแรก รากชนิดนี้จะมีอายุประมาณ 2 - 3 เดือน จนกระทั่งรากที่เกิดจากหน่ออ้อยจะสามารถทำหน้าที่ต่างๆแทนได้ รากเหล่านี้ก็จะตายไป รากชนิดนี้ถือได้ว่าเป็น รากรุ่นแรก (primary root)

1.2 รากที่เกิดจากหน่ออ้อย เกิดจากราก (root primordia) บริเวณข้อที่โคนของหน่ออ้อย (shoot) รากชนิดนี้มีสีขาว และมีขนาดใหญ่กว่ารากที่เกิดจากท่อนพันธุ์ แต่มีการแตกแขนงน้อยกว่าในระยะแรก ส่วนรากที่เกิดจากอ้อยตอจะคล้ายกับรากของอ้อยปลูก คือ เกิดจาก โคนคั่นอ้อยของอ้อยตอ แต่จะเจริญได้ไม่ดีเท่ารากของอ้อยปลูก ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวอ้อยปลูก รากของอ้อยปลูกจะทำหน้าที่อยู่ระยะหนึ่ง จนกระทั่งระบบรากใหม่จะเจริญเติบโตอย่างสมบูรณ์ รากเก่าจะลดหน้าที่ลง และเน่าเปื่อยไป

2. ลำต้น อ้อยเป็นพืชที่มีลักษณะลำต้นเป็นลำเดี่ยวๆมีข้อและปล้องเห็นได้ชัดเจน ไม่มีกิ่งก้าน ถ้าผ่าตามขวางจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม หรือเป็นรูปไข่ ลำต้นจะมีสีต่างๆกัน ตั้งแต่โทนสีเหลือง เขียว แดงจนถึงสีม่วง สามารถใช้ประกอบ ในการจำแนกพันธุ์ได้ ลำต้นประกอบด้วย ปล้อง (internode) และข้อ (node) โดยมีความยาวจากรอยกาบใบหนึ่ง (leaf scar) ถึงรอยกาบใบอีกอันหนึ่งเรียกว่า joint ลำต้นของอ้อยจะมีเปลือกแข็ง และจะมีไข (wax) เกาะ โดยรอบเปลือกบริเวณปล้อง ยกเว้นตรงส่วนของวงเจริญ ปริมาณของไข ขึ้นกับพันธุ์ และจะพบมากตรงส่วนบนของปล้อง

### 3. ใบ ใบอ้อยเกิดที่ข้อมี 2 ส่วน คือ กาบใบ และ แผ่นใบ

3.1 กาบใบ (leaf sheath) เกิดที่ข้อเป็นส่วนที่หุ้มลำต้นไว้ และเชื่อมต่อกับแผ่นใบ บริเวณส่วนนอกของกาบใบอาจมีขน (hair) ปริมาณมากน้อยแตกต่างกันไปตามพันธุ์อ้อย บางพันธุ์อาจมีขนมาก และแข็งเป็นอุปสรรคในการเก็บเกี่ยว แต่บางพันธุ์ไม่มีขนเลย

3.2 แผ่นใบ (leaf lamina or blade) จะเรียงตัวสลับกันเป็น 2 แถว ในใบที่เจริญเติบโตเต็มที่แล้ว จะมีเส้นกลางใบ (midrib) ที่แข็งแรงสีขาว

4. ช่อดอก เมื่ออ้อยเจริญเติบโตเต็มที่ และมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมจะเกิดการสร้างดอก โดยพัฒนาเป็นช่อดอกอ่อน (inflorescence primordia) มีดอกขนาดเล็ก (spikelet) เกิดรวมกัน ช่อดอกหนึ่งๆ จะประกอบด้วยดอกเล็กๆ จำนวนนับแสนดอก เมื่อช่อดอกบานเต็มที่จะมีลักษณะเหมือนลูกศร (arrow) การผสมเกสรจะเกิดขึ้นโดยอาศัยลม หลังจากผสมใช้เวลา 21-25 วัน เมล็ดก็จะแก่ การสร้างเมล็ดจะหยุด การสร้างผลผลิตของใบนั้นคือ หยุดการสร้างแป้งและน้ำตาล (sugar content) ภายในลำต้น จึงมักจะมี การทำให้ออกดอกช้า เพื่อรักษาผลผลิตน้ำตาล

5. เมล็ด เมล็ดอ้อย คือผลที่มีเมล็ดเดี่ยว มีส่วนของเปลือกและเยื่อหุ้มเมล็ดติดกันหมด เรียกว่า คาโรออปซิส (caryopsis) รูปร่างของเมล็ดเป็นรูปไข่ สีน้ำตาลออกเหลืองอ่อน ยอดเกสรตัวเมียที่แห้ง ยังคงติดอยู่ที่ปลายเมล็ด และที่ฐานเมล็ดจะเป็นวงของขน สำหรับช่วยในการปลิวลม

## 2.2 กระบวนการผลิตน้ำตาลอ้อย [17]

การผลิตน้ำตาลจากอ้อย (รูปที่ 2.2) โดยทั่วไปแล้วจะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนหลัก

### 2.2.1 ขั้นตอนการผลิตน้ำตาลทรายดิบจากอ้อย (processing raw sugar from sugarcane) รูปที่ 2.3

- ขั้นตอนการเก็บเกี่ยว (Harvesting)
- กระบวนการสกัดน้ำอ้อย (Juice Extraction)

ทำการสกัดน้ำอ้อยโดยผ่านอ้อยเข้าไปในชุดลูกหีบ (4-5 ชุด) และกากอ้อยที่ผ่านการสกัดน้ำอ้อยจากลูกหีบชุดสุดท้าย จะถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ภายในเตาหม้อไอน้ำ เพื่อผลิตไอน้ำมาใช้ในกระบวนการผลิต และกระบวนการทำน้ำตาลทราย

- ขั้นตอนการทำความสะอาดหรือทำใส่น้ำอ้อย (Juice Purification)

น้ำอ้อยที่สกัดได้ทั้งหมดเหล่านี้จะถูกนำออกโดยผ่านวิธีการกล เช่น ผ่านเครื่องกรองต่างๆ และวิธีการเคมี เช่น โดยให้ความร้อน และผสมปูนขาว

- การต้ม (Evaporation)

น้ำอ้อยที่ผ่านการทำให้ใสแล้วจะถูกนำเข้าสู่ชุดหม้อต้ม (Multiple Evaporation) เพื่อระเหยเอาน้ำออก (ประมาณ 70%) โดยน้ำอ้อยชั้นที่ออกมาจากหม้อต้มลูกสุดท้าย เรียกว่า น้ำเชื่อม (Syrup)

- การเคี้ยว (Crystallization)

น้ำเชื่อมที่ได้จากการต้มจะถูกนำเข้ามาห้อยเคี้ยวระบบสุญญากาศ (Vacuum Pan) เพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัว ที่จุดนี้ผลึกน้ำตาลจะเกิดขึ้นมา โดยที่ผลึกน้ำตาล และกากน้ำตาลที่ได้จากการเคี้ยวนี้รวมเรียกว่า เมสเสคิวท (Messecuite)

- การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (Centrifugation)

เมสเสคิวท (Messecuite) ที่ได้จากการเคี้ยวจะถูกนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาล โดยใช้เครื่องปั่น (Centrifugals) ผลึกน้ำตาลที่ได้นี้จะเป็นน้ำตาลดิบ

## 2.2.2 ขั้นตอนการทำน้ำตาลให้บริสุทธิ์ (sugar refining) ดังรูปที่ 2.4

การผลิตน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลรีไฟน์ โดยน้ำตาลทรายดิบจะถูกนำไปละลายน้ำ แล้วถูกผ่านเข้า 5 ขั้นตอนการผลิตดังนี้

- การปั่นละลาย (Affinated Centrifugaling )

นำน้ำตาลดิบมาผสมกับน้ำร้อน หรือน้ำเหลืองจากการปั่นละลาย (Green Molasses) น้ำตาลดิบที่ผสมนี้เรียกว่าแมกมา (Magma) และแมกมานี้จะถูกนำไปปั่นละลายเพื่อล้างคราบ น้ำเหลือง หรือกากน้ำตาลออก

- การทำความสะอาด และฟอกสี (Clarification)

น้ำเชื่อมที่ได้จากหม้อปั่นละลาย (Affinated Syrup) จะถูกนำไปละลายอีกครั้ง เพื่อละลายผลึกน้ำตาลบางส่วนที่ยังละลายไม่หมดจากการปั่น และผ่านตะแกรงกรองเข้าผสมกับปูนขาว เข้าฟอกสีโดยผ่านเข้าไปในหม้อฟอก (ปัจจุบันนิยมใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวฟอก) จากนั้นจะผ่านเข้าสู่การกรองโดยหม้อกรองแบบใช้แรงดัน (Pressure Filter) เพื่อแยกตะกอนออก และน้ำเชื่อมที่ได้จะผ่านไปฟอกเป็นครั้งสุดท้ายโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange Resin) จะได้น้ำเชื่อมรีไฟน์ (Fine Liquor)

- การเคี้ยว (Crystallization)

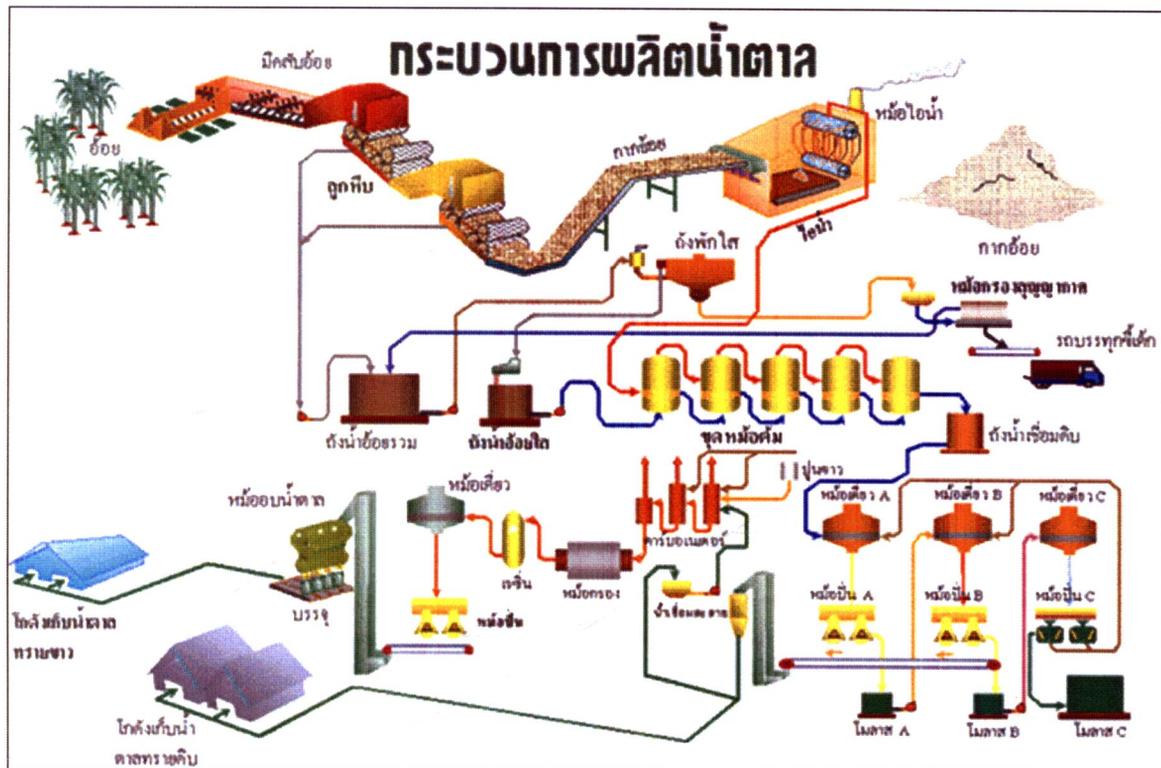
น้ำเชื่อมรีไฟน์ที่ได้จะถูกนำเข้ามาห้อยเคี้ยวระบบสุญญากาศ (Vacuum Pan) เพื่อระเหยน้ำออกจนน้ำเชื่อมถึงจุดอิ่มตัว

- การปั่นแยกผลึกน้ำตาล (Centrifugaling)

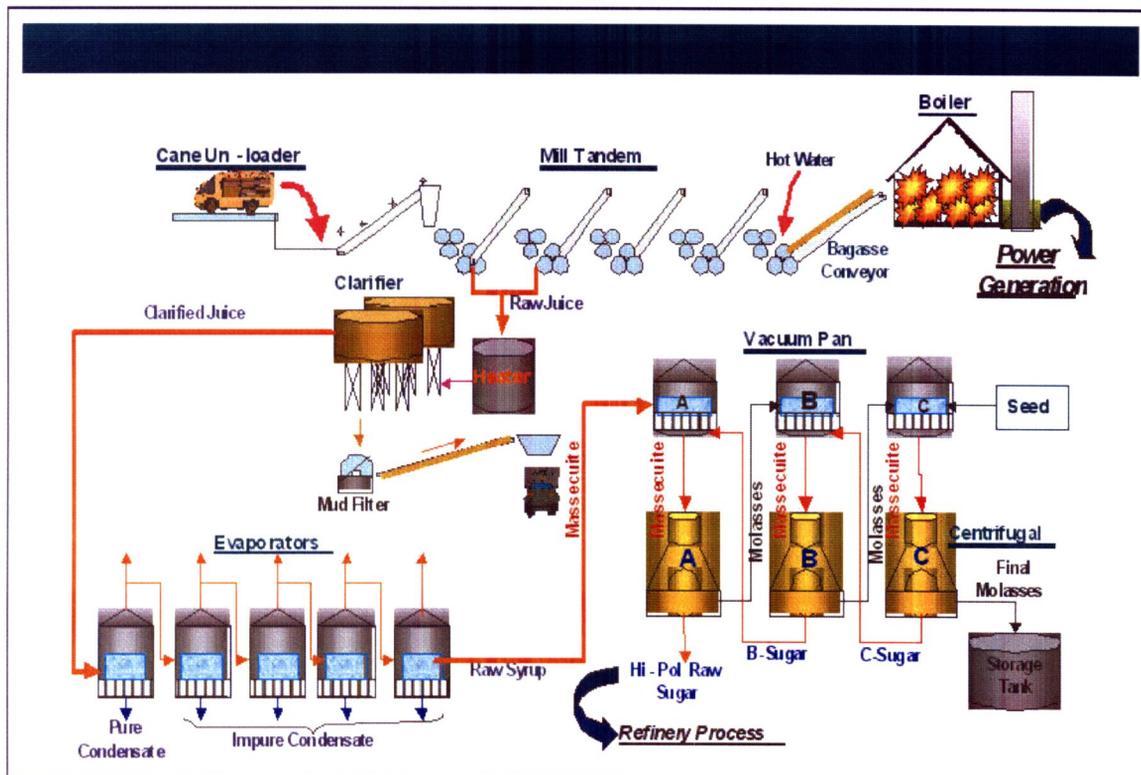
เมสเสคิวทที่ได้จากการเคี้ยวจะถูกนำไปปั่นแยกผลึกน้ำตาลออกจากกากน้ำตาล โดยใช้เครื่องปั่น (Centrifugals) ผลึกน้ำตาลที่ได้นี้จะเป็นน้ำตาลรีไฟน์ และน้ำตาลทรายขาว

- การอบ (Drying)

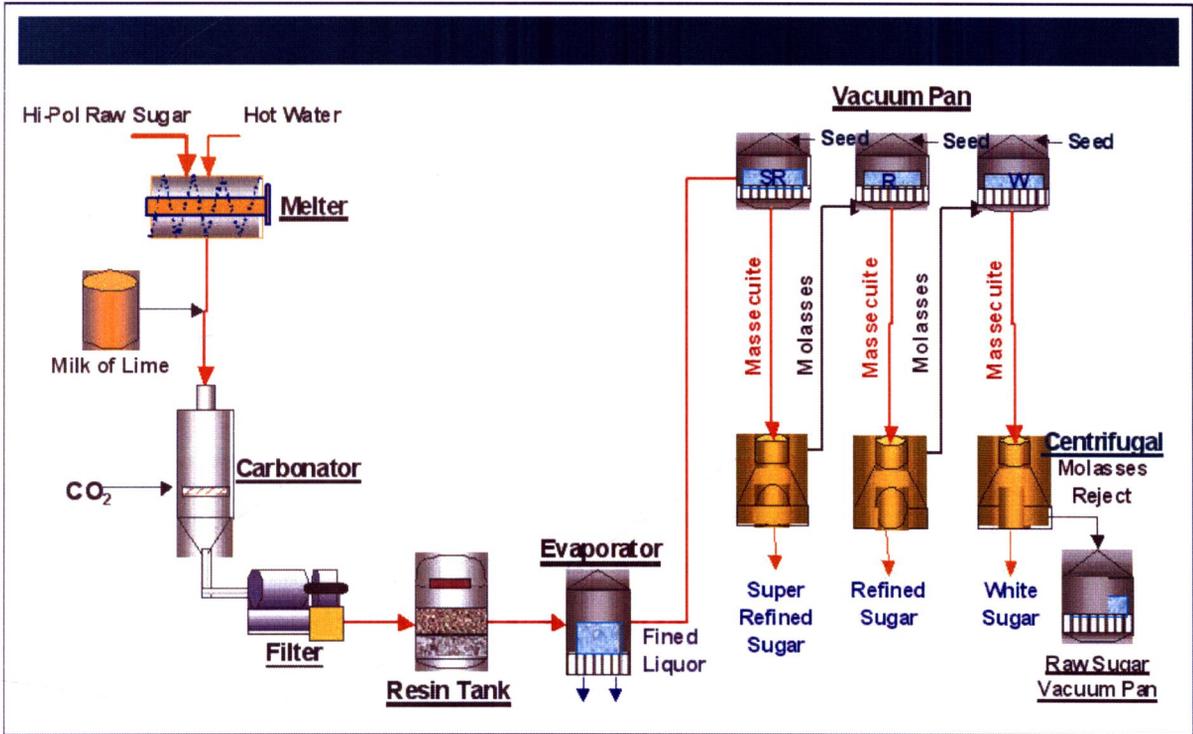
ผลึกน้ำตาลรีไฟน์ และน้ำตาลทรายขาวที่ได้จากการปั่นก็จะเข้าหม้ออบ (Dryer) เพื่อไล่ความชื้นออก แล้วบรรจุกระสอบเพื่อจำหน่าย



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตน้ำตาล [17]



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการผลิตน้ำตาลดิบ [18]



รูปที่ 2.4 แสดงการผลิตน้ำตาลทรายขาวและน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ [19]

## 2.3 สารสีในน้ำตาลอ้อย

### 2.3.1 สีในอุตสาหกรรมน้ำตาล

เป้าหมายหลักในกระบวนการผลิตคือ การผลิต ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ และปริมาณมาก และ สี เป็นเรื่องสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล ไม่ว่าจะเป็นน้ำตาลทรายดิบ หรือน้ำตาลทรายขาว ทั้งนี้เป็นเพราะ การผลิตต้องให้ได้สินค้าที่เป็นที่พึงพอใจของผู้บริโภค และ ผู้ใช้น้ำตาล เช่น ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม นั้นย่อมต้องการน้ำตาลที่มีลักษณะสีขาว

ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลนั้น เมื่อก้าวถึงสารสี นั้นหมายถึงสารที่เป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดสีในน้ำตาล[1].

### 2.3.2 ชนิดของสารสีในน้ำตาล

สารสีในน้ำตาลมีหลายชนิด และประกอบไปด้วยขนาดโมเลกุล ค่าความไวต่อกรด-ด่าง ประจุ และโครงสร้างทางเคมี ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งการวิจัยค้นคว้าเพื่อที่จะเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ของสีในน้ำตาลนี้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการศึกษาเทคนิคในการแยกสารที่ก่อให้เกิดสีเหล่านี้ออกจากน้ำตาลให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด [12] โดยชนิดของสารที่ก่อให้เกิดสีในน้ำตาลแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของสารสีในน้ำตาล [12]

Colorant Type	General Characteristics
Phenolic	Low MW colorless to light yellow precursors; darken at high pH; oxidize to form yellow and brown polymers; react with polyphenol oxidase to form light yellow to dark brown colorants. Darken in presence of iron.
Caramel	The result of thermal degradation of sucrose; low net charge; wide color range from yellow to brown; MW 500 to about 1,000; MW and color increases as thermal destruction proceeds.
Alkaline Degradation Products (ADPs)	Similar to caramels, but much darker in color; form at high pH.
Melanoidin	Maillard reaction – reaction products of amino acids with reducing sugars; reaction occurs rapidly at alkaline pH; products are dark brown.
Colorant Polysaccharide Complex	Polysaccharides formed in cane have phenolic groups and dicarboxylic acid functionalized lipids that can bind with colorant to make a very high MW product. Occludes preferentially into the crystal.

## Melanoidins [20]

ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) เป็นปฏิกิริยาที่น้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งมีหมู่ที่เป็นอัลดีไฮด์ และคีโตนทำปฏิกิริยากับสารประกอบไนโตรเจน เช่น เอมีน ไพรดีน ทำให้เกิดสารสีน้ำตาลที่เรียกว่า เมลานอยดีน (melanoidins) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว กลไกการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) นี้มี 3 ช่วง คือ (แสดงดังรูปที่ 5)

**ช่วงที่ 1 :** reducing sugar จะถูก condensate ที่ตำแหน่ง carbonyl กับ amino group ของ ไพรดีนทำให้เกิด การเคลื่อนของอิเล็กตรอนเป็น N-substituted glycosylamine ภายใต้สภาวะกรดเกิด isomerization เป็น ketone เรียกกระบวนการ Amadori arrangement ได้ผลิตผลเป็น 1-amino-1-deoxy-2-ketose derivative ซึ่งเป็นสาร ไม่มีสี

**ช่วงที่ 2 :** ปฏิกิริยาในช่วงนี้เกี่ยวข้องกับ การเคลื่อนอิเล็กตรอนของ amino group จากการเปลี่ยนแปลง ของน้ำตาลครึ่งส่วน ประกอบไปด้วยกระบวนการ dehydration, cyclization, fragmentation หรือ amine condensation สามารถแบ่งได้ 3 รูปแบบหลักคือ

### 1 สภาวะกรด

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

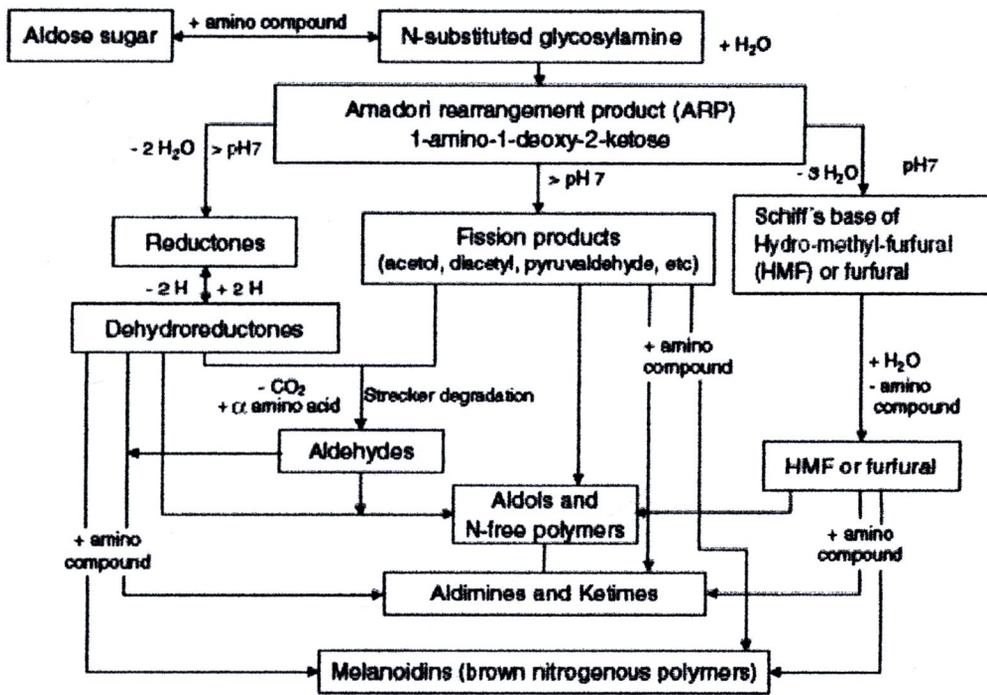
### 2 สภาวะด่าง

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 นี้จะ ไปรวมตัวกับ amino acid ได้ผลิตผลเป็น CO<sub>2</sub>, aldehydes และ amino-keto derivatives เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Strecker dehydration

### 3 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 และทำ ปฏิกิริยา copolymerization กับ amino compound สุดท้ายจะได้ product ที่มีสีเป็น คือ melanoidins หรือ brown nitrogenous polymers



รูปที่ 2.5 Maillard reactions

## 2.4 Quantifying colorant

การวัดปริมาณสีในน้ำตาลที่เป็นมาตรฐานทางอุตสาหกรรมนั้นจะวิเคราะห์ปริมาณสีในหน่วย ICUMSA (Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis) [21]. ความเข้มข้นของสีจากน้ำตาลสามารถวิเคราะห์โดยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นแสง 420 นาโนเมตร และปริมาณสีของน้ำตาลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 คัดแปลงโดย Chen [22]

$$\text{ICUMSA color} = \frac{\text{Abs} \cdot 100,000}{B \cdot C} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$Abs$  = absorbance value

$C$  = the concentration of dissolved product (g/100 ml)

$B$  = the cell width (cm)

การวิเคราะห์ปริมาณสีในหน่วย ICUMSA นี้จะให้ค่าที่เป็นตัวแทนของสีทั้งหมดที่มีอยู่ในสารละลายน้ำตาล ซึ่งเป็นประโยชน์ในการคำนวณค่าปริมาณสีที่ถูกกำจัดในขั้นตอนการกำจัดสีในน้ำตาล

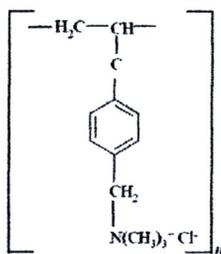
ยังไม่มีข้อมูลที่แน่ชัดที่เกี่ยวกับชนิดหรือประเภทของสารสีในน้ำตาล แต่การที่สามารถรู้ชนิด และประเภทของสารสีในน้ำตาลนั้นจะเกิดประโยชน์มากในการหาประเภทของตัวดูดซับที่จะนำมาใช้ในการกำจัดสีน้ำตาล

## 2.5 สารที่ใช้ในการกำจัดสีน้ำตาล (Decolorizing agents)

สารที่นิยมใช้ในการกำจัดสีในน้ำตาล ได้แก่ [1]

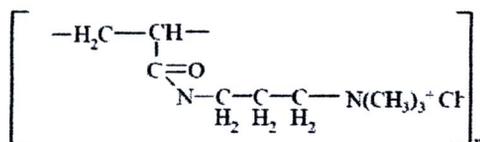
### 2.5.1 Ion exchange resin

#### 2.5.1.1 Polystyrenic resin



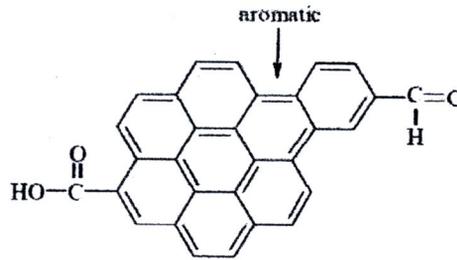
ธรรมชาติของสารที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่เป็นอโรมาติกของวงเบนซีนสามารถที่จะกำจัดสีได้โดยกลไกการดูดซับ และการแลกเปลี่ยนประจุ

#### 2.5.1.2 Polyacrylic resin



การดูดซับโดยสารประเภท aliphatic ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะเกิดได้น้อย การกำจัดสีส่วนใหญ่เกิดขึ้นโดยกลไกการแลกเปลี่ยนประจุ

### 2.5.2 Granular and powder carbon



สารประเภทนี้สามารถกำจัดสีได้ด้วยการดูดซับได้ดีที่สุด โดยธรรมชาติของวงอโรมาติกและการจับกันที่พันธะคู่

### 2.5.3 Bone char

นอกจากนี้ การกำจัดสีน้ำตาลยังสามารถใช้คาร์บอนของ bone char, hydroxyapatite สามารถใช้ในการดูดซับสีน้ำตาลได้ ทั้งนี้เพราะประจุของสีสามารถจับกับแคลเซียมไอออน ที่มีอยู่ใน bone char แล้วเกิดการตกตะกอนได้

### 2.5.4 Carbonation

กลไกในการกำจัดสีสามารถทำได้ตามทฤษฎีของการตกตะกอนแล้วตามด้วยการดูดซับ ซึ่งการดูดซับสีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ก็สามารถเกิดได้ในลักษณะคล้ายกัน

### 2.5.5 Phosphatation with or without Quaternary Ammonium Salts (QAS)

โดยทั่วไปแล้วการกำจัดสีสามารถทำได้โดยการตกตะกอนแล้วตามด้วยการดูดซับ แต่จะใช้วิธี QAS เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีประเภทที่มีความเป็นกรดสูง

### 2.6 การดูดซับ (Adsorption)

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ เข้าหาตัวดูดซับ

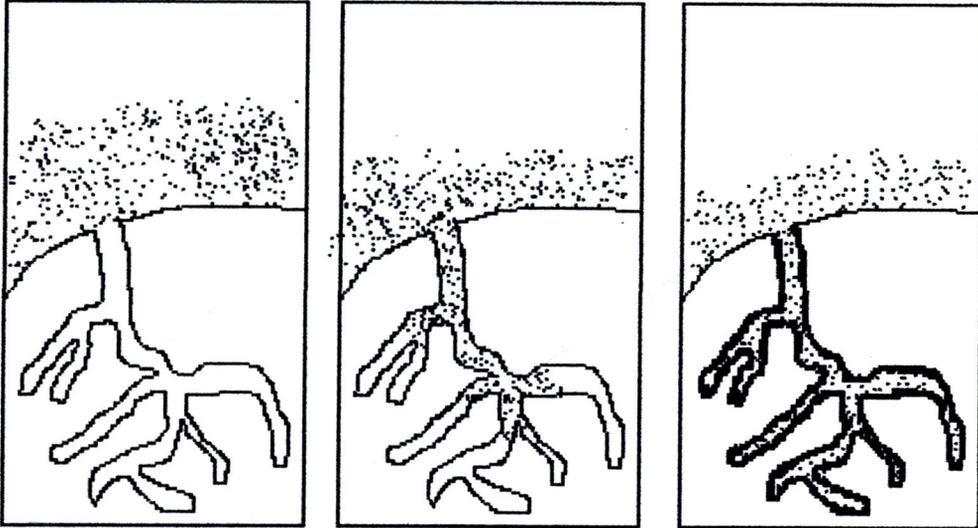
ขั้นตอนที่ 2 โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำ (Film Diffusion) ซึ่งตามปกติ ตัวดูดซับจะมีฟิล์มของน้ำบาง ๆ ห่อหุ้มอยู่โดยรอบคล้ายเยื่อบาง ๆ และเกิดการแพร่เข้าสู่โพรงหรือช่องว่างภายในของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 เกิดการดูดซับระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวภายในโพรงหรือช่องว่างภายในของ ตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 1 : ตัวถูกดูดซับ  
แพร่ผ่านพื้นผิวตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 : ตัวถูกดูดซับ  
เคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของ  
ตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 : เกิดการดูดซับ  
ของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิว  
ของตัวดูดซับ



รูปที่ 2.6 กลไกการดูดซับ

ประเภทของการดูดซับ [23, 24]

กระบวนการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ประเภท

#### 1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่าง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยตัวที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีใด ๆ การดูดซับแบบนี้สามารถผันกลับได้ (Reversible) การดูดซับทางกายภาพ บางที่เรียกว่า การดูดซับด้วยแรงแวลเดอร์วาล (Van Der Waal's Adsorption)

#### 2. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

การดูดซับทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีระหว่าง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตำแหน่งดูดซับ (Adsorption Site) ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีบางครั้งจะต้องการพลังงานเข้าร่วมด้วย เรียกว่า การดูดซับด้วยการกระตุ้น (Activated Adsorption) พันธะที่เกิดขึ้นแข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับ ในลักษณะชั้นเดียว (Monolayer) ซึ่งต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่การดูดซับเกิดในลักษณะหลายชั้น (Multilayer) จากแรงแวลเดอร์วาล

### 3. การดูดซับด้วยประจุ (Ionic Adsorption)

การดูดซับด้วยประจุเป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวด้วยแรงของประจุที่ตรงข้ามกัน (Electrical Attraction) ทำให้ไอออนของตัวถูกดูดซับติดอยู่ที่พื้นผิวตัวดูดซับในตำแหน่งที่มีประจุตรงข้ามกัน ไอออนที่มีประจุสูงจะถูกดูดซับได้ดีกว่าพวกที่มีประจุต่ำ ๆ และ ไอออนที่มีขนาดเล็ก

#### ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [25, 26]

อัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

##### 1. ความปั่นป่วน (Turbulence)

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film Diffusion) หรือการแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก (เพราะ ไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุล เข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

##### 2. ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาดและพื้นที่ผิว ขนาดของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในทางลบ กล่าวคืออัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของ ตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) นั่นคือตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูด โมเลกุลตัวถูกดูดซับ ได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

##### 3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) เนื่องจากที่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำ ๆ จะมีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวกและตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ๆ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งกันที่จะถูกดูดซับของตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) ในสารละลาย แต่จะ ได้ผลในทางตรงกันข้ามกัน เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ๆ เนื่องจากไฮโดรเนียม

ไอออนมีปริมาณน้อยลงและปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH) เพิ่มขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบก็จะให้ผลตรงกันข้ามในทำนองเดียวกัน

#### 4. อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด คือ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลงหรือลงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วยซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนจะช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น

#### 5. ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ

เมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำก่อนแล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ข้างบนไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่าความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

#### 6. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

ขนาดของสารหรือ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ จะมีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์ จะพบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับ กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวเทอริกได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการละลายด้วย โดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาวมักจะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลงจึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักจะถูกดูดซับได้ดีมากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้

### สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium) [24, 27, 28]

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นไปเรื่อย ๆ โดยที่สารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับและคายการดูดซับไปพร้อม ๆ กัน จนกว่าอัตราการดูดซับและการคายการดูดซับจะเท่ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะสมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ที่สมดุลการดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ที่สมดุลการดูดซับ ไปพล็อตกราฟกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ จะได้เส้นโค้งแนวโน้มที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ รูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายสมการด้วยกัน ซึ่งแล้วแต่ว่าจะนำเอาสมการแบบไหนมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับ แต่ที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับมาก คือ สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมอว์ (Langmuir's Adsorption Isotherm) และสมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's Adsorption Isotherm)

### สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมอว์ (Langmuir's Adsorption Isotherm)

สมการของแลงเมอว์ 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 สมการของแลงเมอว์ใช้ได้ดีที่สุดเมื่ออธิบายการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำ

#### สมมติฐานของสมการแลงเมอว์

1. ที่ทุก ๆ ตำแหน่งผิวสัมผัส สามารถดูดซับ โมเลกุล ได้
2. การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน และพื้นที่นั้น ๆ สามารถดูดซับ โมเลกุล ได้เพียงชั้นเดียว เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)
3. จะ ไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของ ไอออนหรือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของ ตัวดูดซับ
4. พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุก ๆ พื้นที่ของการดูดซับ และ ไม่มีการทำปฏิกิริยากันระหว่าง โมเลกุลของตัวดูดซับที่อยู่ใกล้กัน

สำหรับการดูดซับจากสารละลายไปยังผิวของของแข็ง สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$q = \frac{(C_0 - C_f) * V}{1,000 * (g)} \quad (2.2)$$

โดยที่  $q$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)

$C_0$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_f$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$V$  คือ ปริมาตรของสารละลาย (มิลลิลิตร)

$g$  คือ น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)

$$q_e = \frac{q_{max} C_e}{(1 + bC_e)} \quad (2.3)$$

โดยที่  $q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบ monolayer ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)

$q_{max}$  คือ ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบ monolayer ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของเหลวที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$b$  คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดซับ

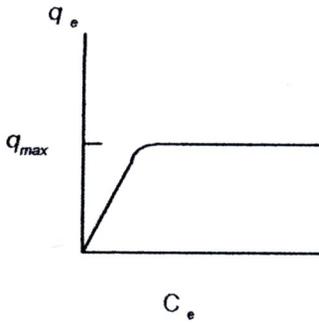
สมการที่ 2.3 เมื่อนำมาเขียนใหม่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} b} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (2.4)$$

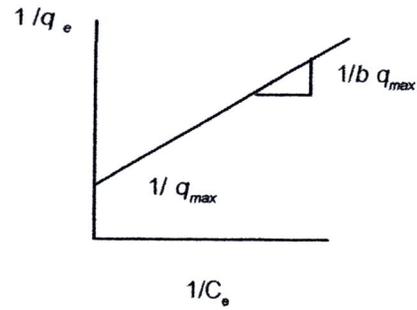
$$q_e = \frac{q_{max} - q_e}{bC_e} \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max}} + \frac{1}{b q_{max} C_e} \quad (2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟตามสมการที่ 2.5 และ 2.6 จะได้ลักษณะดังรูป 2.7 และ 2.8



รูปที่ 2.7 ลักษณะกราฟเส้นโค้ง  
ตามสมการของแลงเมอว์



รูปที่ 2.8 ลักษณะกราฟเส้นตรง  
ตามสมการของแลงเมอว์

ลักษณะของรูปไอโซเทอม สามารถบอกได้ว่าการดูดซับในการทดลองได้ผลดีหรือไม่ ซึ่งจะใช้ การคำนวณจากค่าคงที่ของแลงเมอว์ไอโซเทอม โดยจะแสดงให้อยู่ในรูปค่าคงที่ของการแยกตัว ( $R_L$ , Separation factor) ซึ่งจะหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.7 และผลของค่า  $R_L$  ที่มีต่อการดูดซับได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 [29]

$$R_L = \frac{1}{(1 + bC_0)} \quad (2.7)$$

โดยที่  $R_L$  คือ Separation factor

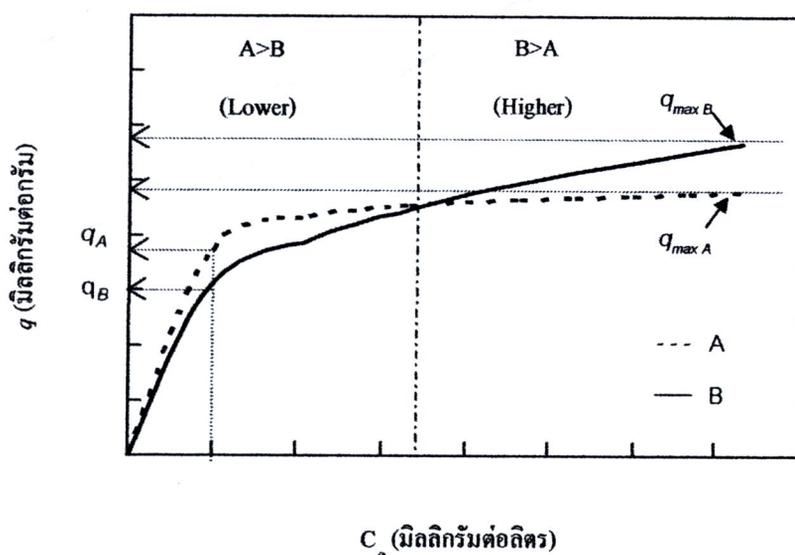
$b$  คือ สัมประสิทธิ์ของการดูดซับ

$C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 2.2 ผลของ Separation Factor จากลักษณะของรูปไอโซเทอม

$R_L$	ลักษณะไอโซเทอม
$R_L > 1$	การดูดซับไม่ดี
$R_L = 1$	การดูดซับคงที่
$0 < R_L < 1$	การดูดซับดี
$R_L = 0$	ปฏิกิริยาย้อนกลับได้

การพิจารณาเลือกว่าตัวดูดซับชนิดใดมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่ากัน สามารถพิจารณาจากค่าไอโซเทอม ดังรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าในช่วงที่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่มีค่าน้อย โดยเปรียบเทียบ ณ ระดับความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าตัวดูดซับชนิด A มีความจุและมีความจำเพาะ (Affinity) ในการดูดซับกับตัวถูกดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับชนิด B ในขณะที่ระดับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายสูง ตัวดูดซับชนิด B จะมีความเหมาะสมในการถูกเลือกเป็นตัวดูดซับมากกว่าตัวดูดซับชนิด A เนื่องจากถึงแม้ตัวดูดซับชนิด B จะมีความจำเพาะในการจับกับตัวดูดซับต่ำกว่า แต่มีค่าความจุของการดูดซับสูงกว่า A ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าความจุของการดูดซับในการเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมกับช่วงความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ต้องการหรือความเข้มข้นของตัวดูดซับที่มีอยู่



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับสองชนิด โดยพิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมอว์

จากสมมุติฐานของแลงเมอว์ที่ว่า ตำแหน่งดูดซับที่เกิดการดูดซับแล้วจะไม่เกิดอันตกริยากับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับอื่นที่อยู่ข้างเคียง ดังนั้นพลังงานการดูดซับของระบบจึงคงที่ ทำให้สามารถคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของระบบการดูดซับ ( $\Delta H$ ) โดยที่ค่า  $b$  เป็นค่าคงที่ของการดูดซับที่สัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับได้ตามสมการของ Van't Hoff ดังสมการที่ 2.8 – 2.9 [30] สำหรับการหาค่าพลังงานอิสระกิบส์ ( $\Delta G$ ) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ( $\Delta S$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.10 – 2.11 [31]

$$b = e^{\frac{\Delta H}{RT}} \quad (2.8)$$

$$\ln b = \frac{-\Delta H}{RT} + \text{Constant} \quad (2.9)$$

$$\Delta G = -RT \ln(b) \quad (2.10)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.11)$$

- โดยที่  $\Delta H$  คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับ (จูลต่อ โมล)  
 $\Delta S$  คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (จูลต่อ โมลต่อเคลวิน)  
 $\Delta G$  คือ ค่าพลังงานอิสระกิบส์ (จูลต่อ โมล)  
 $T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)  
 $R$  คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 จูลต่อ โมล เคลวิน)

#### สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich's Adsorption Isotherm) [32]

ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิชใช้กับกรณีการถ่ายเทพลังงานผ่านพื้นผิวแบบไม่เป็นชั้นเดียว ซึ่งฟรอนด์ลิชได้เสนอความสัมพันธ์ว่าสมดุลของการดูดซับอธิบายโดยสมการที่ 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)

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

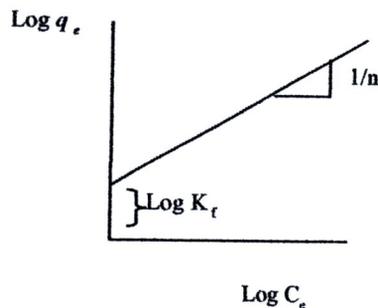
$\sigma_0$  คือ พลังงานอิสระที่ผิวของตัวดูดซับที่สัมผัสกับสารละลายบริสุทธิ์

$\sigma_1$  คือ พลังงานอิสระที่ผิวของตัวดูดซับที่ถูกยึดเกาะแบบชั้นเดียวด้วยตัวถูกละลาย

เมื่อเขียนสมการในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นจะได้สมการที่ 2.13

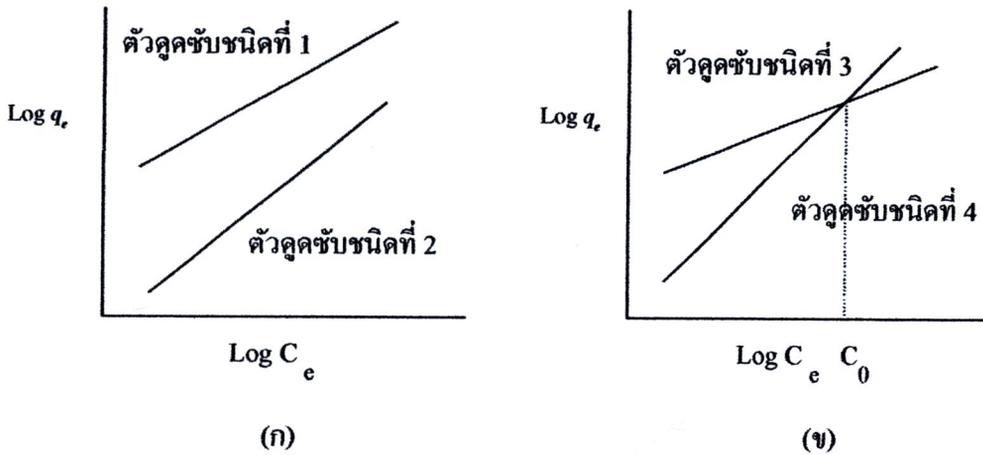
$$\log q_e = \log K_f + (1/n) \log C_e \quad (2.13)$$

ตามสมการของฟรุนคลิช (13) ค่าคงที่ต่าง ๆ ( $K_r$  และ  $n$ ) คำนวณหาได้จากการสร้างกราฟระหว่าง  $\log q_c$  เป็นแกน  $y$  กับ  $\log C_c$  เป็นแกน  $x$  (รูปที่ 2.10) จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log K_r$  เมื่อ  $1/n$  มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมาก จะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็จะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือ เมื่อความเข้มข้นต่ำอัตราการดูดซับก็จะต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น แต่เมื่อ  $1/n \ll 1$  หรือความชันต่ำมากจนบางครั้งเกือบจะชิดกับแกน  $x$  นั้น แสดงว่า อัตรา การดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำหรือสูงจะไม่แตกต่างกันนัก หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ อย่างไรก็ตามจากลักษณะ ไอโซเทอมของฟรุนคลิช จะสังเกตเห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ トラบเท่าที่ความเข้มข้นของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายมีสูงขึ้น ซึ่งก็เป็นข้อเสียของสมการ ฟรุนคลิชที่สำคัญข้อหนึ่งคือ ทำให้ไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดได้



รูปที่ 2.10 ลักษณะกราฟไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนคลิช

ดังนั้นสมการฟรุนคลิช จึงใช้ได้ดีในสารละลายที่มีความเข้มข้นปานกลาง ในการพิจารณาเลือกว่าตัวดูดซับชนิดใดมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่ากัน พิจารณาจากค่าไอโซเทอมได้ ดังรูปที่ 2.11 (ก) จะเห็นว่า ไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดที่ 1 สูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 2 ในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน ส่วนรูปที่ 2.11 (ข) ตัวดูดซับชนิดที่ 3 มีไอโซเทอมสูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 4 ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่า  $C_0$  แต่ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะสูงกว่าชนิดที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นที่สูงกว่า  $C_0$  ดังนั้นจึงต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะสมกับช่วง ความเข้มข้นที่ต้องการ ในรูปที่ 2.11 (ข) ตัวดูดซับชนิดที่ 4 มีความชันมากกว่าชนิดที่ 3 แสดงว่าถ้าต้องบำบัดแบบต่อเนื่อง (Continuous Flow) แล้วตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะมีความเหมาะสมกว่าชนิดที่ 3



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดของตัวดูดซับต่างๆ โดยพิจารณาจากรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนคลิซซ์

## 2.7 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

Gupta และ Ali [14] ได้ทำการศึกษา และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ่านลอยขานอ้อย พบว่าถ่านลอยขานอ้อยประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  60.5%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  15.4%,  $\text{CaO}$  3.0%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  4.90% และ  $\text{MgO}$  0.81% และมีค่าความหนาแน่น (density) เท่ากับ 1.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g cm}^{-3}$ ) มีความพรุน (Porosity) 0.36% มีพื้นที่ผิว (Surface Area) สูงถึง 450 ตารางเมตรต่อกรัม ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) ที่ขนาดอนุภาค เท่ากับ 200-250 ไมโครเมตร และมีค่า LOI (Loss on Ignition) ประมาณ 18 % (โดยน้ำหนัก)

ถ่านลอยขานอ้อยได้ถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อศึกษาการกำจัดของเสียเป็นพิษหลายชนิดในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น phenol [13], แคดเมียม และนิกเกิล [33], โครเมียม(VI) และ นิกเกิล(II) [33], lindane และ malathion [34], ตะกั่ว และ โครเมียม [14] และพวกสารสีต่างๆ [35-37]

หลายวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาถ่านลอยขานอ้อย เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีขึ้น เช่นการ treat ด้วย hydrogen peroxide ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดพวกสารอินทรีย์ที่แทรกอยู่ตามรูพรุนของตัวดูดซับเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับตัวดูดซับ [13, 14, 33, 34] หรือการนำถ่านลอยขานอ้อยมาล้างด้วยน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส [37 และ 38]

Pendyal และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับ granular activated carbons (GACs) ที่ทำจากส่วนผสมของตัวยึดเกาะ 4 ชนิดคือ coal tar, sugarcane molasses, sugar beet molasses และ corn syrup และ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 3 ชนิด คือ rice hulls, rice straw และ ขานอ้อย (sugarcane bagasse) เพื่อใช้กำจัดสีในน้ำตาล (การกำจัดสีจากน้ำตาล และ การกำจัดสีน้ำตาล) ตัวดูดซับนี้จะถูกเปรียบเทียบกับคาร์บอนทางการค้า 2 ชนิด พบว่า GACs ที่ทำจากขานอ้อย (sugarcane bagasse) สามารถกำจัดสีน้ำตาลได้ดี โดยสามารถกำจัดสีได้ใกล้เคียงกับคาร์บอนทางการค้า ซึ่งมีนักวิจัยมากมายที่พยายามศึกษา

และผลิตถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (sugarcane bagasse)[39-46] โดยถ่านกัมมันต์ชานอ้อยนี้ได้มีรายงานการนำมาใช้ในขั้นตอนการทำน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ [39-42] เช่นกัน

Bernardo และคณะ [47] ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีสังเคราะห์เมลานอยดิน (melanoidin) และสีจากน้ำทิ้งกากน้ำตาล โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากชานอ้อยที่ได้จากประเทศไทย และประเทศบราซิล พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์การค้า