บทที่ 1

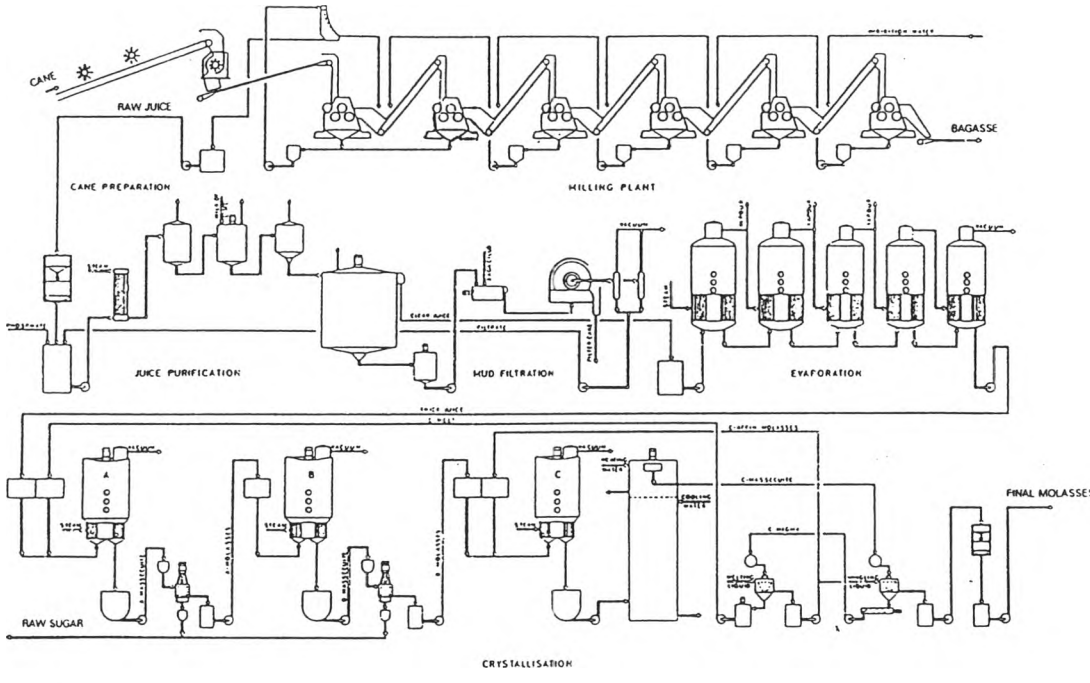
บทนำ

1.1 กากน้ำตาลอ้อย

กากน้ำตาลอ้อย (cane molasses) หมายถึงผลิตผลพลอยได้ในการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อย หลังจากตกผลึก และแยกน้ำตาลทรายออกแล้ว โดยมีลักษณะทั่วไปเป็นของเหลว ซึ่งมีลักษณะข้นเหนียว สีน้ำตาลปนดำ มีกลิ่นเฉพาะตัวไม่บูดหรือมีกลิ่นเหม็น (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2524)

กากน้ำตาลอ้อย หรือน้ำเหลือง เป็นผลิตผลพลอยได้ (by product) จากกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อยในโรงงานน้ำตาล เริ่มต้นจากรถบรรทุกอ้อยเข้ามาในโรงงาน จะผ่านการชั่งน้ำหนักและทดสอบคุณภาพความหวาน จากนั้นไปจอดเทียบที่บริเวณลงอ้อย ซึ่งแท่นเทอ้อย (cane unloader) จะเทอ้อยลงสู่รางลำเลียง (cane carrier) ผ่านชุดใบมีด (cane knives) 3 - 4 ชุด สับอ้อยให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ และผ่านเครื่องย่อยอ้อย (shredder) อ้อยที่ถูกตีย่อยแล้วก็จะถูกป้อนเข้าสู่ชุดลูกหีบ (mill tandem) ที่จัดเรียงกันรวม 5 - 6 ชุด เพื่อกดสกัดน้ำอ้อยออกมาตั้งแต่ชุดแรกผ่านไปยังชุดสุดท้าย จนเหลือกากอ้อย (bagasse) จะลำเลียงไปเป็นเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ (boiler) หรือใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษ ไม้อัดชานอ้อย ต่อไป น้ำอ้อยที่สกัดได้จะถูกส่งผ่านหม้อให้ความร้อน (heater) ที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส แล้วเติมปูนขาวให้มีความเป็นด่างอ่อน ๆ ทำให้สิ่งสกปรกตกตะกอนในถังพักใส (clarifier) หลังจากนั้นจะส่งน้ำอ้อยเข้าหม้อต้มระเหย (evaporators) ทำการต้มเคี่ยวน้ำอ้อยให้เป็นน้ำเชื่อม และน้ำเชื่อมที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังหม้อเคี่ยว (vacuum pan) เพื่อเคี่ยวให้เข้มข้นและตกผลึก แล้วจึงส่งต่อไปยังหม้อปั่นแยกเม็ดน้ำตาลออกมา และส่วนที่เหลือที่ไม่สามารถตกผลึกน้ำตาลในกระบวนการของโรงงานได้ก็จะเป็นกากน้ำตาล หรือโมลาส (molasses) ดังแสดงในรูปที่ 1

กากน้ำตาล (molasses) เป็นคำมาจากภาษาลาตินว่า mel หมายถึงน้ำผึ้ง แล้ววิวัฒนาการทางภาษาผ่านไปยังภาษาสเปนเป็นคำว่า melaza หมายถึง crude-honey-like-subtance หรือคำว่า molasses ซึ่งใช้ในภาษาเยอรมันและดัชท์ด้วย สุดท้ายมาเป็นคำว่า molasses (Paturau, 1989)



รูปที่ 1 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อยในโรงงานน้ำตาล

ที่มา: Chen and Chou, 1993.

ปัจจุบันประเทศไทยมีโรงงานน้ำตาลทั้งหมด 46 โรงงาน ตั้งอยู่ที่ภาคเหนือ 10 โรงงาน ภาคกลาง 20 โรงงาน ภาคตะวันออก 8 โรงงาน และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 8 โรงงาน โดยจะเปิดหีบอ้อยในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน หรือพฤษภาคม (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2540) มีปริมาณการผลิตกากน้ำตาลดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งประเทศไทยมีการส่งออกกากน้ำตาลไปขายยังต่างประเทศในปริมาณค่อนข้างสูงในแต่ละปี (ตารางที่ 2) แต่นำรายได้เข้าสู่ประเทศได้ไม่มากนัก เนื่องจากกากน้ำตาลมีราคาถูก (ตารางที่ 3) ส่วนตลาดภายในประเทศจะมีการนำกากน้ำตาลไปใช้ในอุตสาหกรรมการหมัก เพื่อผลิตสุราและแอลกอฮอล์มากที่สุดคิดเป็น 79.18 เปอร์เซ็นต์ของกากน้ำตาลที่ใช้ในประเทศทั้งหมด (กาญจนวรรณ สารโชค, 2527)

ตารางที่ 1 ปริมาณการผลิตกากน้ำตาลของประเทศไทย

ปีการผลิต	อ้อย (ตัน)	กากน้ำตาล (ตัน)	เฉลี่ยต่ออ้อย 1 ตัน กากน้ำตาล (ก.ก)
2531/32	36,695,915	1,746,038	47.62
2532/33	33,560,079	1,718,822	51.22
2533/34	40,562,636	2,168,132	53.61
2534/35	47,504,935	2,401,577	50.63
2535/36	34,711,661	1,623,409	46.76
2536/37	37,569,053	1,918,048	51.05
2537/38	50,458,891	2,636,442	52.25
2538/39	57,693,351	2,853,343	49.46
2539/40	56,243,175	2,594,364	46.17

ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม, 2540

ตารางที่ 2 การส่งออกกากน้ำตาลของประเทศไทย

ปี	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)	ราคาเฉลี่ย (บาท/ตัน)
2532	603,907	727.00	1,203.83
2533	910,111	1,137.19	1,249.51
2534	1,046,978	1,473.04	1,406.96
2535	1,113,326	1,136.75	1,021.04
2536	569,179	556.65	977.99
2537	838,190	1,108.00	1,321.89
2538	1,194,210	1,713.09	1,434.50
2539	1,043,701	1,976.61	1,893.85

ที่มา: กรมศุลกากร กระทรวงการคลัง, 2539

ตารางที่ 3 ราคาจำหน่ายกากน้ำตาลภายในประเทศ และต่างประเทศ

ปี	ราคาตลาดภายในประเทศ บาท/หาบ (60 ก.ก)	ราคาตลาดต่างประเทศ US$ ตัน (F.O.B.)
2532	50 - 60	48
2533	55 - 68	50 - 51
2534	60 - 75	50 - 55
2535	30 - 45	30 - 36
2536	40 - 48	40 - 45
2537	47 - 60	45 -58
2538	70 - 100	50 -75

ที่มา: ธนาคารแห่งประเทศไทย ฝ่ายวิชาการ หน่วยอุตสาหกรรม, 2538

1.2 องค์ประกอบ และคุณสมบัติทางเคมีของกากน้ำตาล

กากน้ำตาลสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด

1. blackstrap molasses หรือ final molasses คือกากน้ำตาลที่ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายขาว มีปริมาณน้ำตาลประมาณ 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในอุตสาหกรรมหมักจะใช้กากน้ำตาลชนิดนี้เป็นวัตถุดิบ

2. refinery molasses คือกากน้ำตาลที่ได้จากการผลิตน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ มีปริมาณน้ำตาลประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์

3. hightest molasses หรือ invert molasses คือกากน้ำตาลที่ผลิตขึ้นโดยการนำน้ำอ้อยมาเคี่ยว จนข้นเป็นน้ำเชื่อม มีปริมาณน้ำตาลประมาณ 77 เปอร์เซ็นต์ (ภัทรา มณีธวัช, 2520; Paturau, 1989)

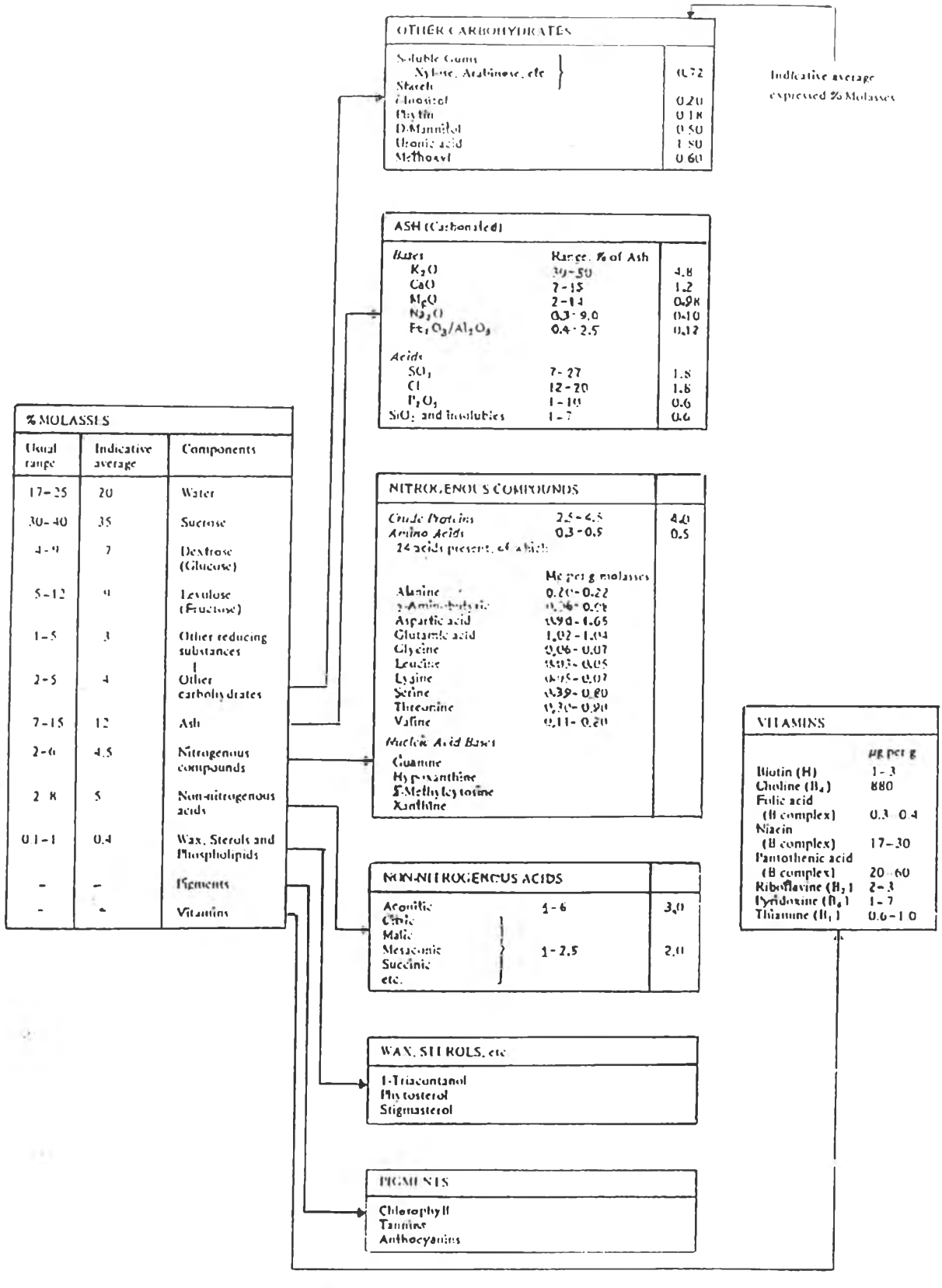
กากน้ำตาลมีองค์ประกอบซับซ้อน ประกอบด้วยส่วนที่เป็นน้ำตาลต่าง ๆ เช่น ซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส ราฟฟีโนส และเกลือแร่ต่าง ๆ ส่วนที่เหลือจะประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ใช่น้ำตาลซึ่งละลายได้ในด่าง (alkali soluble nonsugar ingradient) สารประกอบอนินทรีย์และน้ำ กากน้ำตาลต่างชนิดก็จะมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันตามลักษณะพันธุ์อ้อย ฤดูกาล สภาพดิน การเก็บรักษา และกรรมวิธีการผลิตของโรงงาน รวมทั้งสารที่เติมในกระบวนการผลิต

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

น้ำตาลในโรงงานก็มีผลทำให้องค์ประกอบของกากน้ำตาลมีความแตกต่างกัน (Underkofler and Hickley, 1954; Eero and Merrja, 1983)

Paturau (1989) ศึกษาส่วนประกอบต่าง ๆ ของกากน้ำตาลที่มีค่าความถ่วงจำเพาะของกากน้ำตาล 1.39 - 1.49 หรือเฉลี่ย 1.43 ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับในประเทศไทย ภัทรา มณีธวัช (2520) ได้ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบต่าง ๆ ของกากน้ำตาลในประเทศ (ตารางที่ 4) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดมาตรฐาน เพื่อใช้ในการซื้อขายกากน้ำตาลภายในประเทศ (ตารางที่ 5)

ในการผลิตแอลกอฮอล์ในระดับอุตสาหกรรมภายในประเทศ มักนิยมใช้กากน้ำตาล black strap molasses เป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งในกากน้ำตาล blackstrap molasses นอกจากจะมีน้ำตาลซูโครส กลูโคส ฟรุคโตส และราฟฟิโนส ซึ่งเป็น copper reducing substance ที่ยีสต์สามารถใช้ในการหมักได้ แล้วยังมี copper reducing substance อื่น ๆ ที่ยีสต์ไม่สามารถใช้ในการหมักแอลกอฮอล์ได้ เช่น คาราเมล (caramel) ของน้ำตาลต่าง ๆ ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีธาตุไนโตรเจนที่เกิดจากการที่น้ำตาลได้รับความร้อนมากเกินไปในกระบวนการผลิต และเมลลานอยดิน (mellanoidin) เป็นสารที่มีธาตุไนโตรเจนซึ่งเกิดจากการควบแน่นของน้ำตาลต่าง ๆ กับกรดอะมิโน (Underkofler and Hickley, 1954) การนำกากน้ำตาลไปใช้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงคุณภาพพบว่าก่อปัญหาในการใช้ เนื่องจากในกากน้ำตาลมีสารประกอบบางอย่างที่มีผลยับยั้งการเจริญและการหมักแอลกอฮอล์ของยีสต์เจือปนอยู่ เช่น sulferdioxide, hydroxymethylfurfural, fatty acid, potassium imidodisulphonate และธาตุโลหะ (Rose and Harrison, 1970) ซึ่งธาตุโลหะบางชนิดที่พบในกากน้ำตาลก็มีความจำเป็นต่อการเจริญของยีสต์ เช่น ทองแดง สังกะสี และแมงกานีส เป็นต้น แต่หากพบเป็นปริมาณมากก็จะมีผลยับยั้งกระบวนการหมัก โดยจะแสดงความเป็นพิษในรูปของแคทไอออน (cation) เช่น Cu^{2+}, Zn^{2+} และ Mn^{2+} (Rose and Harrison, 1971) สารที่ยับยั้งการเจริญและการหมักของยีสต์เหล่านี้จะก่อให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการหมักเป็นเหตุให้อัตราการหมักต่ำมาก เช่น การหมักแอลกอฮอล์ของโรงงานสุราทั่วไปใช้เวลาหมักถึง 50 ชั่วโมง กล่าวได้ว่าปริมาณการหมักต่ำ จึงทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการผลิตมาก (คนอง ศรีนรคุตร, 2532)



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของกากน้ำตาลอ้อย

ที่มา: Paturau (1989)

ตารางที่ 4 ส่วนประกอบส่วนใหญ่ของกากน้ำตาลในประเทศไทย

ส่วนประกอบ	ร้อยละ
น้ำ (water)	17 - 25
น้ำตาลซูโครส (sucrose)	30 - 40
น้ำตาลอินเวอร์ท (invert sugar)	10 - 25
เถ้า (ash)	7 - 15
สารอินทรีย์ซึ่งมิใช่น้ำตาล	10 - 20
นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุต่าง ๆ อีก คือ	
ไนโตรเจน	0.86
ฟอสฟอรัส	0.18
โปแตสเซียม	3.00
แคลเซียม	0.50
เหล็ก	0.045
ทองแดง	0.45
โซเดียม	0.38

ที่มา: ภัทรา มณีธวัช, 2520

ตารางที่ 5 คุณลักษณะทางเคมีของกากน้ำตาล ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ลำดับที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด
1	สารที่ละลายทั้งหมด (Brix solid) วัดที่ 20 องศาเซลเซียส องศาบริกซ์ ไม่น้อยกว่า	79
2	น้ำตาลทั้งหมด (Total sugar expressed as invert sugar) ร้อยละของน้ำหนัก ไม่น้อยกว่า	50
3	เถ้าซัลเฟต (Sulphated ash) ร้อยละของน้ำหนักไม่เกิน	11
4	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5 - 6

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2524

1.3 จุลินทรีย์ที่สำคัญในกระบวนการหมัก

จุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตแอลกอฮอล์ คือ ยีสต์ *Saccharomyces* sp. ซึ่งเป็นพวกราแท้ (true fungi) ชนิดหนึ่ง จัดอยู่ในชั้นแอสโคไมซีติส (Class Ascomycetes) ไม่มีคลอโรฟิลล์ มีนิวเคลียส เคลื่อนไหวไม่ได้ รูปร่างกลมรี หรือรูปไข่ มีขนาดโตกว่าแบคทีเรีย คือกว้างประมาณ 1 - 5 ไมโครเมตร ยาวประมาณ 5 - 30 ไมโครเมตร (Paturau, 1989) โดยทั่วไป ยีสต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมหมักแบ่งเป็นสองพวก คือ พวกที่มีความสามารถในการใช้น้ำตาล เพื่อการสร้างเซลล์ใหม่ได้ดีกว่าการหมักแอลกอฮอล์และอีกพวกที่ใช้น้ำตาลไปในการหมักแอลกอฮอล์ได้ดีกว่าการสร้างเซลล์ใหม่ หรือสารประกอบอื่น ๆ (White, 1954) ซึ่งชนิดของสายพันธุ์ยีสต์ที่นิยมใช้ในการหมักแอลกอกฮอล์ ได้แก่ *Saccharomyces cerevisiae* และ *Saccharomyces uvarum* (*carlsbergensis*) เนื่องจากยีสต์ทั้งสองชนิดมีลักษณะทนทานต่อแอลกอฮอล์ ทนทานต่อแกสคาร์บอนไดออกไซด์ osmosensitivity และสามารถหมักแอลกอฮอล์ได้รวดเร็ว โดยยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* จะทนทานต่อสภาวะแวดล้อมในการหมักได้ดีกว่า (Jones, Pamment and Greenfield, 1981)

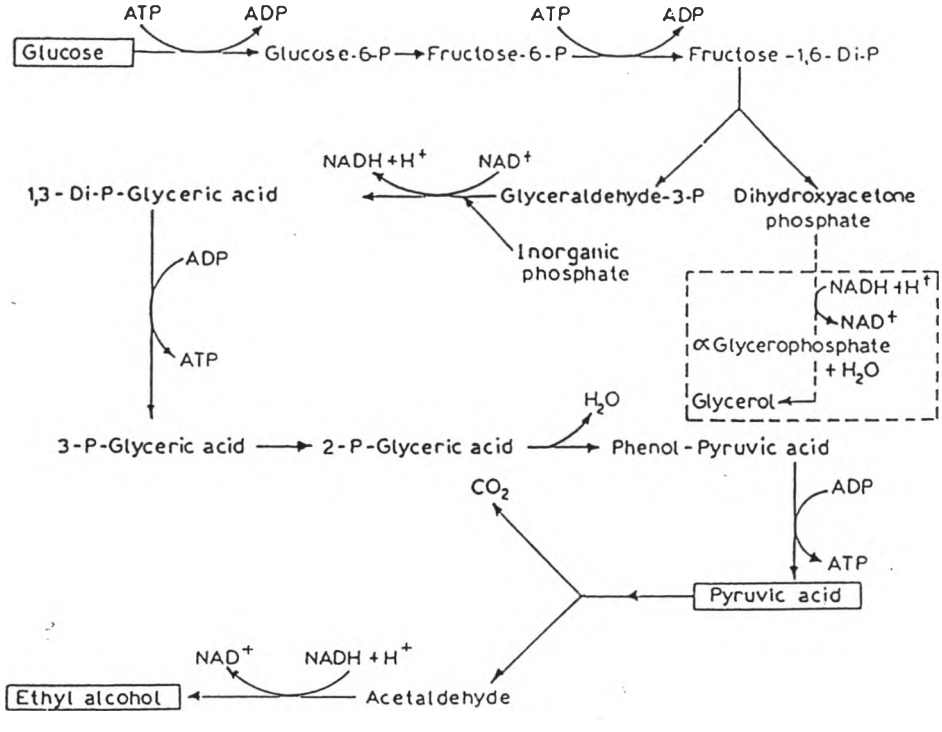
การหมักแอลกอฮอล์ เป็นกระบวนการหมักที่เกิดขึ้นในไซโทพลาซึมของเซลล์ยีสต์ โดยอาศัยปฏิกิริยาของเอนไซม์ในการเปลี่ยนสับสเตรทกลูโคส ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ให้เป็นแอลกอฮอล์กับแกสคาร์บอนไดออกไซด์ ในขั้นแรกกลูโคสจะเปลี่ยนแปลงไปตามวิถีไกลโคไลซีส (glycolysis) หรือ Embden-Meyerhof-Parnas pathway จนได้ pyruvate และเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์ต่อไป (Paturau, 1989) ดังแสดงในรูปที่ 3 หรืออาจเขียนเป็นสมการ ดังนี้

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O + \text{invertase} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + C_6H_{12}O_6$$

$$C_6H_{12}O_5 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$

จากทฤษฎีค่าคำนวณกลูโคสแต่ละกรัม จะได้แอลกอฮอล์ 0.51 กรัม และคาร์บอนไดออกไซด์ 0.49 กรัม ในสภาพปกติแอลกอฮอล์ที่ผลิตได้จริงจากการหมักไม่เกิน 90 - 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าทฤษฎี (Prescott and Dunn, 1959; Spencer and Meade, 1963) ถ้าน้ำตาลเริ่มต้นในการหมัก 16 - 18 เปอร์เซ็นต์ เมื่อสิ้นสุดการหมักจะได้แอลกอฮอล์ 7 - 8 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเหลือน้ำตาลตกค้างที่ยีสต์ไม่สามารถหมักได้ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ (Casida, 1968) ซึ่งปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นที่เหมาะสมในการหมักเพื่อผลิตแอลกอฮอล์ของยีสต์อยู่ในช่วง 14 - 18 เปอร์เซ็นต์ ถ้าสูงกว่านี้จะไปยับยั้งการเจริญ (Jones et al., 1981) และถ้าในการหมักมีน้ำตาลเหลืออยู่มากก็จะก่อให้

เกิดปัญหาในการบำบัดน้ำเสีย แต่ถ้าปริมาณน้ำตาลต่ำเกินไปแอลกอฮอล์ที่ได้ก็จะต่ำ ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกลั่นสูง และในการหมักยังต้องมีการเติมธาตุอาหารเสริม ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ (Prescott and Dunn, 1959; Casida, 1968) ในการหมักแอลกอฮอล์ยังนิยมใช้แบบแบทช์ (batch) ปริมาณหัวเชื้อที่ใช้หมักเริ่มต้นควรมีจำนวนเซลล์ทั้งหมดเท่ากับ 10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมัก โดยทั่วไปใช้ระยะเวลาไม่แน่นอนส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 36 - 72 ชั่วโมง และจะมีจำนวนเซลล์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นประมาณ 1.5×10^8 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และได้ปริมาณแอลกอฮอล์ประมาณ 6 - 9 เปอร์เซนต์ (Jones et al., 1981) ในปี ค.ศ. 1916 Cruess and others (Rose and Harrison, 1971) รายงานว่า ปริมาณแอลกอฮอล์สูงสุดที่ยีสต์สามารถจะหมักได้มีค่าประมาณ 19 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 3 วิถีไกลโคไลซีส หรือ Embden-Meyerhof-Parnas pathway ของกระบวนการหมัก

ที่มา: Paturau, 1989

1.4 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการหมักยีสต์เพื่อผลิตแอลกอฮอล์

1.4.1 ไนโตรเจน ในกากน้ำตาลอ้อยมีสารไนโตรเจน แต่ยังมีปริมาณไม่เพียงพอต่อยีสต์ในการใช้เพื่อการเจริญเติบโต จึงต้องมีการเติมแอมโมเนียมซัลเฟตหรือแอมโมเนียมฟอสเฟต เพื่อเพิ่มสารอาหารไนโตรเจน ยีสต์ทุกชนิดสามารถใช้แอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจน และยีสต์ใช้แอมโมเนียมอิออนเป็นแหล่งไนโตรเจนได้เร็วกว่าสารไนโตรเจนอื่น (Jones et al., 1981) ส่วนแอมโมเนียมฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต แอมโมเนียมคาร์บอเนต แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต แอมโมเนียมทาร์เทรท และยูเรีย ยีสต์หลายชนิดสามารถนำไปใช้ได้ (Rose and Harrison, 1971)

1.4.2 ฟอสฟอรัส กากน้ำตาลทุกชนิดมีไนโตรเจนและฟอสเฟต แต่มีปริมาณไม่เพียงพอ และฟอสเฟตบางส่วนเป็นสารประกอบอินทรีย์ทำให้ยีสต์ใช้ไม่ได้ ในอุตสาหกรรมการหมักจึงมีการเติมฟอสเฟตในรูปแอมโมเนียมฟอสเฟต หรือเกลืออัลคาไลน์ฟอสเฟต (White, 1954; Reed and Nagodawithana, 1991) ฟอสฟอรัสจำเป็นต่อการเจริญ และกระบวนการหมักแอลกอฮอล์ของยีสต์ อาจเติมฟอสฟอรัสในรูปแคลเซียมซูเปอร์ฟอสเฟต ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต หรือ กรดฟอสฟอริค (Rosen, 1977) ยีสต์ทุกชนิดจะใช้โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตได้ดีกว่าไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Rose and Harrison, 1971) ยีสต์จะใช้ฟอสฟอรัสในการสร้าง ATP สังเคราะห์นิวคลีโอโปรตีนและสารอื่น ๆ ในเซลล์ และฟอสฟอรัสยังช่วยเป็นบัฟเฟอร์รักษาค่าความเป็นกรด-ด่างในอาหารเลี้ยงเชื้อ (Frey, Kirby and Schultz, 1936)

1.4.3 แมกนีเซียม แมกนีเซียมจำเป็นต่อกระบวนการหมักแอลกอฮอล์ โดยแมกนีเซียมไอออนเป็นโคแฟคเตอร์ของเอนไซม์หลายชนิดใน Embden-Meyerhof-Parnas pathway (Conn and Stumpf, 1976) และเนื่องจากในกากน้ำตาลมีแมกนีเซียมน้อย จึงต้องมีการเติมเกลือแมกนีเซียมลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ (Rose and Harrison, 1970)

1.4.4 วิตามิน วิตามินมีบทบาทสำคัญในการควบคุมเมตาบอลิสมของยีสต์ โดยจะเป็นโคเอนไซม์ หรือสารตั้งต้น (precursors) ที่สำคัญในการทำงานของเอนไซม์ (Jones et al., 1981) ยีสต์ทุกชนิดต้องการไบโอดิน กรดแพนโตทีนิค และอินโนซิทอล สำหรับการเจริญเติบโต ซึ่งโดยทั่วไปกากน้ำตาลมีวิตามินเหล่านี้อยู่เพียงพอ (Rose and Harrison, 1971; Rosen, 1977)

1.4.5 ธาตุอาหารอื่น ๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญของยีสต์ ได้แก่ โพแทสเซียม แคลเซียม นอกจากนี้ยีสต์ยังต้องการธาตุอาหารที่จำเป็นในปริมาณน้อยบางชนิด เช่น เหล็ก สังกะสี และทองแดง ซึ่งธาตุเหล่านี้มีเพียงพอในกากน้ำตาล (Paturau, 1989; Reed and Nagodawithama, 1991)

1.4.6 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ยีสต์ส่วนใหญ่เจริญได้ดีในช่วงความเป็นกรด-ด่าง 3.5 - 7.0 (Rose and Harrison, 1971) ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการเจริญของ *Saccharomyces cerevisiae* คือ 4.5 (Jones et al., 1981) ในอุตสาหกรรมหมัก จะมีการปรับความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 3.5 - 4.5 เพื่อให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม และเป็นการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่ปะปนมาด้วย ความสามารถในการรักษาระดับความเป็นกรด-ด่างในอาหาร (buffering capacity) เป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ยีสต์สามารถเกิดการหมักได้ตลอดกระบวนการหมัก (Prescott and Dunn, 1959)

1.4.7 อุณหภูมิ อุณหภูมิที่เหมาะแก่การเจริญของยีสต์ส่วนใหญ่ อยู่ระหว่าง 25 - 30 องศาเซลเซียส (Rose and Harrison, 1971) ซึ่งในอุตสาหกรรมหมักส่วนใหญ่จะใช้อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยาการหมักแอลกอฮอล์จะเกิดความร้อนทำให้อุณหภูมิในถังหมักสูงขึ้น โดยน้ำตาลกลูโคส 1 กรัมโมล จะให้ปริมาณความร้อน 26 กิโลแคลลอรี่ ดังนั้นจึงต้องควบคุมอุณหภูมิของถังหมัก และรักษาให้อยู่ในช่วงไม่เกิน 32 - 33 องศาเซลเซียส (Underkofler and Hickley, 1954)

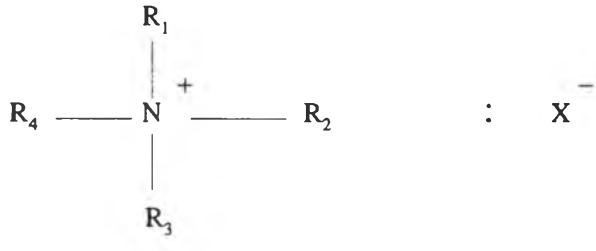
1.5 ผลของสารประกอบควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (Quaternary Ammonium Compounds)

ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อยมักมีปัญหาการปนเปื้อนของแบคทีเรีย เนื่องจากในน้ำอ้อยจะประกอบด้วย น้ำตาลซูโครส และธาตุอาหารต่าง ๆ ซึ่งเพียงพอต่อการเจริญของแบคทีเรีย และแบคทีเรียที่ปะปนมากับน้ำอ้อย จะก่อให้เกิดผลเสียต่าง ๆ เช่น ปริมาณน้ำตาลลดลง เกิดสารเมือก ความหนืดของน้ำอ้อยเพิ่มขึ้น เกิดการอุดตันของท่อและรางส่งน้ำอ้อย รูปผลึกของน้ำตาลทรายยาวผิดปกติ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ทำให้ผลผลิตน้ำตาลทรายลดลง (sucrose losses) (บุญส่ง แสงอ่อน และ วิวัฒน์ แดงสุภา, 2528; Upadhiaya, 1987; Carvalho , 1994) และทำให้ต้องมีการปิดเครื่อง หยุดการหีบอ้อย เพื่อที่จะล้างทำความสะอาดลูกหีบ (mill sanitation) ดังนั้นในอุตสาหกรรมน้ำตาลส่วนใหญ่ เช่น Sicca, Olin, Hoday, Rohm and Haas, Tate and Lyle จึงมีการใช้สารฆ่าเชื้อ (biocide) เพื่อควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ในโรงงาน (Hugot and Jenkins, 1986) โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย *Leuconostoc* sp. สารฆ่าเชื้อที่ใช้สามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้คือ สารเคมีในประเภท carbamate และ quaternary ammonium compounds สารเคมีเหล่านี้จะไปฆ่าหรือยับยั้งการเจริญของเชื้อ *Leuconostoc* sp. และป้องกัน *Leuconostoc* sp. เปลี่ยนน้ำตาลซูโครสเป็นเดร็กเทรน (Chen and Rauh, 1991) Rodolfo A. Pisigan Jr. และ Ma. Veneranda S. Gonzales (2515) ทดลองใช้สารฆ่าเชื้อแบคทีเรีย CMA (cane milling aid) ในการ

ควบคุมการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *Leuconostoc mesenteroides* พบว่าได้ผลดี เมื่อใช้ความเข้มข้น 5 ส่วนในล้าน (ppm) ซึ่งสาร CMA ที่ใช้นี้เป็นสารเคมีพวก quaternary ammonium compound

สาร quaternary ammonium compounds (QAC) หรือ quats เป็นสารประกอบเคมีที่ใช้ทำลายเชื้อ (disinfectant) ในอุตสาหกรรมนม และอาหาร (Troller, 1993) โดยมีสูตรโครงสร้างทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 4 สาร QAC เป็นสารที่เสถียร สามารถละลายน้ำได้ดี และมีประจุบวก มีคุณสมบัติเป็นทั้ง lipophilic และ hydropholic (Rose, Barron, and Macmillan, 1983) จึงมีสูตรโครงสร้างที่หลากหลาย และมีหลายสูตรที่เป็นความลับทางการค้า (Pelczar, Chan, and Krieg, 1986; Roth, Eger, and Troschütz, 1991)

รูปที่ 4 สูตรโครงสร้างทั่วไปของ quaternary ammonium compounds (QAC)



โดย R_1 , R_2 , R_3 และ R_4 แทนหมู่อัลคิล (alkyl groups) ต่อกับไนโตรเจน (N) ด้วยพันธะโคเวเลนต์สร้างเป็นรูปแคทไอออน (cation) ส่วนแอนไอออน (anion) แทนด้วย X^- อาจเป็น Cl^- หรือ Br^- ที่จับกับ N ด้วยพันธะเชิงไอออน (Sykes, 1965; Branen and Davidson, 1983; Pelczar et al., 1986; Sax and Lewis, 1987)

สารพวก QAC เป็นสารเคมีประเภท surface active agents เป็นสารประกอบ cationic detergents ซึ่งออกฤทธิ์เป็น germicidal agents (Jacobs, 1958; Sykes, 1965) มีผลต่อแบคทีเรีย รา ยีสต์ โปรโตซัว และไวรัส (Branen and Davidson, 1983; Pelczar et al., 1986; Tortora, Funke and Case, 1986) Marriott (1994) สรุปสาระสำคัญของสารพวก QAC ดังนี้เช่น คงความเสถียรได้ดีในสารอินทรีย์ (organic matter) ช่วยต้านทานการกัดกร่อนของโลหะ ไม่ระคายเคืองต่อผิวหนังสามารถทำปฏิกิริยาได้ในช่วงความเป็นกรด-ด่างกว้าง ๆ และมีผลต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น

นอกจากนี้ปฏิกิริยาการออกฤทธิ์ของสารพวก QAC ยังทนต่อน้ำที่มีความกระด้างได้ดี และสาร QAC มีคุณสมบัติในการกำจัดแบคทีเรียรูปร่างกลมแกรมบวกได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมลบ (Rose et al., 1983) สำหรับกิจกรรมของสารพวก QAC จะมีผลต่อจุลินทรีย์ในแง่ต่าง ๆ ดังนี้คือ ทำให้โปรตีนเสียสภาพ (denature) ทำให้เอนไซม์ไม่ทำงาน (inactivated) รบกวนวิถีไกลโคไลซีส (Pelczar et al., 1986) และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเยื่อหุ้มเซลล์ เช่น การทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ให้ฉีกขาด หรือสลายองค์ประกอบที่จำเป็นของ cytoplasmic และทำให้ขอบผนังเซลล์สูญเสียความคงทน และความต้านทานต่อแรงตึง (tensile strength) ทำให้น้ำซึมเข้าไปในเซลล์ได้ (Rodolfo A. Pisigan Jr. และ Ma. Veneranda S. Gonzales, 2515; Tortora et al., 1986) Hugo (Branen and Davidson, 1983) สรุปกิจกรรมของสาร QAC ได้ดังนี้ เช่น จะเข้าจับกับโปรตีนโดยตรง มีผลต่อปฏิกิริยาเมตาบอลิสม มีผลต่อปฏิกิริยาในวิถีไกลโคไลซีส มีผลต่อการยอมให้ผ่านของเซลล์ (cell permeability) และมีผลต่อเอนไซม์ที่รักษาสมดุลของเยื่อหุ้ม cytoplasmic

ในประเทศไทยโรงงานน้ำตาลมีการใช้สารฆ่าเชื้อพวก QAC เติมลงในกระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อย อาทิเช่น Hexemine X-100®, Talocide Q®, Well-Q®, Qemiquat®, CMA® Lutensit-KLC® และ M-quat1416® เป็นต้น โดยทำการฉีดพ่นหรือพรมลงบนลูกหีบนำ (Crusher) และลูกหีบชุดที่ 1 ในระหว่างที่หีบอ้อย รวมทั้งสามารถเติมในน้ำอ้อยรวมระหว่างพักใส ความเข้มข้นที่ใช้มีหน่วยเป็นส่วนในล้านต่อน้ำหนักอ้อย (Food and Drug Administration, 1985) สาเหตุที่นิยมใช้สารพวก QAC เนื่องจากความเป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ซึ่งจะแทรกซึมเข้าไปตามรอยลึก ๆ ได้ดี แม้แต่บริเวณที่มีเมือกหนาแน่นของแบคทีเรียก็จะถูกทำลายให้กระจายออก เพื่อให้สารฆ่าเชื้อทำงานอย่างทั่วถึง โดยไม่ต้องหยุดการหีบอ้อย หรือปิดเครื่อง (Rodolfo A. Pisigam Jr. และ Ma. Veneranda S. Gonzales, 2515; Chen and Chou, 1993) สำหรับความเป็นพิษของสาร QAC มีความเป็นพิษต่ำ ไม่ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นเหม็น ไม่มีรส และสามารถชะล้างได้ (Branen and Davidson, 1983; Rose et al., 1983) ในปี ค.ศ. 1985 Food and Drug Administration ได้กำหนดความเข้มข้นที่ปลอดภัยต่อการใช้สารพวก QAC ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อย และสารพวก QAC ดังกล่าวได้รับการรับรองมาตรฐานความปลอดภัย (Food Safety) แบบ generally recognized as safe (GRAS) จาก Food and Drug Administration "Code of Federal Regulations (CFR)", title 21, part 172 (Chen and Chou, 1993) และมีการศึกษาในประเทศแอฟริกาใต้ พบว่าสาร QAC จะสลายไปด้วยความร้อน และตรวจไม่พบแม้แต่เล็กน้อย หลังจากผ่านกระบวนการต้มระเหยของน้ำอ้อย (Hugot, 1972 อ้างถึงใน บุญส่ง แสงอ่อน, 2527; Hugot and Jenkins, 1986)

Food and Drug Administration (1974) รายงานการพบสารพวก QAC ที่ใช้เป็นสารกำจัดศัตรูพืช (2-chloroethyl) trimethylammonium chloride ในการปลูกอ้อยปนเปื้อนในกากน้ำตาลอ้อยประมาณ 6 ส่วนในล้าน ต่อมาในปี ค.ศ. 1985 Food and Drug Administration ได้กำหนดความเข้มข้นปลอดภัยเพิ่มเติมในการใช้สารพวก QAC เติมในกระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อย เพื่อยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์และห้ามไม่ให้นำกากน้ำตาลที่มีเกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium salt) ตกค้างเหลืออยู่มาใช้เป็นอาหารสัตว์

Spencer and Meade (1963) กล่าวถึงการใช้สารพวก QAC เพื่อลดการสร้างเดร็กเทรนในถังพักใส ซึ่งอาจทำให้มีสาร QAC หลงเหลือในกากน้ำตาล แต่ก็ไม่มีผลที่ชัดเจนในการนำกากน้ำตาลดังกล่าวไปใช้ในการหมัก Nickisch-Hartfiel (1984) ศึกษาการใช้สารฆ่าเชื้อในกระบวนการผลิตน้ำตาลจากหัวบีท (beet) ซึ่งคาดว่าอาจมีสาร QAC ตกค้างในกากน้ำตาล โดยการถูกดูดซับไว้ในเศษชิ้นส่วนของหัวบีท (cossettes) หรือตะกอน (precipitated) ในช่วงทำน้ำเชื่อมให้บริสุทธิ์ (Juice purification) และคาดว่าปริมาณสาร QAC ที่ตกค้างในกากน้ำตาล ไม่น่ามีผลต่อการเจริญของยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในปี ค.ศ. 1970 Nikolov, Kibarska and Luchev ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้เกลือควอเทอร์นารีแอมโมเนียมเติมลงในกากน้ำตาลอ้อยเพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในกากน้ำตาล และจะนำกากน้ำตาลที่ปลอดเชื้อนี้ไปใช้ในการหมักแอลกอฮอล์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1971 Vitukevich ศึกษาการใช้ cetyloctadecylpyridinium chloride และ cetypyridinium chloride ซึ่งเป็นสารพวก QAC เพื่อทำให้กากน้ำตาลปลอดเชื้อปนเปื้อน และพบว่า สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และเพิ่มผลผลิตแอลกอฮอล์ได้ Jones, Johnson and Herd (1991) ศึกษาผลของสาร dimethyldialkyl ammonium chloride กับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* พบว่า ในช่วง stationnary phase ของยีสต์จะมีความต้านทานต่อสาร QAC มากกว่าช่วง mid-exponential phase.

1.6 จลนพลศาสตร์เคมี (Chemical Kinetics)

จลนพลศาสตร์เคมี เป็นการศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีในเชิงปริมาณวิเคราะห์ และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยอัตราเร็วของปฏิกิริยา (rate of reaction) หมายถึงอัตราเร็วของการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาหรือสารผลิตผล (ชูชาติ ธรรมเจริญ, 2524) สำหรับสารที่อยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะแสดงในเทอมของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา เช่น ในปฏิกิริยาที่ง่ายที่สุด

$$aA + bB \longrightarrow cC + dD \qquad (1)$$

$$\text{อัตราเร็วของปฏิกิริยา} = \frac{1}{c}\frac{d[C]}{dt} = \frac{1}{d}\frac{d[D]}{dt} = -\frac{1}{a}\frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{b}\frac{d[B]}{dt} \qquad (2)$$

โดยที่เทอมในวงเล็บ หมายถึงความเข้มข้นของสาร เครื่องหมายลบแสดงว่า ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาจะลดลง หน่วยของความเข้มข้นอาจจะเป็นจำนวนโมลต่อปริมาตร หรือจำนวนโมเลกุลต่อปริมาตรก็ได้ ดังนั้นหน่วยของอัตราเร็วของปฏิกิริยาคือ [(ความเข้มข้น)$^{\text{1- overall order}}$ (เวลา)$^{-1}$]

จากสมการที่ 1 อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา 1 ตัว หรือหลายตัว ดังนั้นอัตราเร็วจึงเปลี่ยนเป็นการดำเนินไปของปฏิกิริยา เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากดังกล่าว จึงกระทำการศึกษาความเร็วเริ่มต้น (initial rate) ซึ่งเป็นอัตราเร็วของปฏิกิริยาในช่วงเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยายังไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก

ในทางปฏิบัติอัตราเร็วมักอยู่ในรูปของความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาตัวหนึ่งหรือหลายตัวดังสมการที่ 2 แต่ในบางกรณีการที่มีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น ปริมาณผลิตภัณฑ์มักจะเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีที่สุดของการดำเนินไปของปฏิกิริยา (Barrow, 1988)

1.6.1 สมการอินทิเกรตของอัตราเร็วของปฏิกิริยา (Integrated rate equations)

มีปฏิกิริยาจำนวนมากที่มีอัตราเร็ว ณ อุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา 1 หรือ 2 ชนิด ซึ่งสารที่เข้าทำปฏิกิริยาแต่ละตัวจะมีผลต่อกันเล็กน้อย (integal power) โดยพิจารณาปฏิกิริยาที่มี A และ B เป็นสารที่เข้าทำปฏิกิริยาแล้วสมการอัตราเร็วกับความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาจะมีผลลัพธ์

อัตราเร็วของปฏิกิริยา	=	$k[A]$	ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (first order)
อัตราเร็วของปฏิกิริยา	=	$k[A]^2$ หรือ $k[A][B]$	ปฏิกิริยาลำดับที่สอง (second order)

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยา (reaction rate constant) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์มูลฐาน (fundamental kinetic parameter) ถ้าค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยามีค่าสูง แสดงว่าปฏิกิริยาจะเกิดเร็ว และถ้าค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยามีค่าต่ำแสดงว่า ปฏิกิริยาจะเกิดช้า ค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะแปรผันตามอุณหภูมิ เพื่อเป็นการเน้นอาจเขียนเป็น k(T)

1.6.2 ปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง (first-order reactions)

ปฏิกิริยาโดยรวมจะอยู่ในลักษณะ $a\,A \rightarrow c\,C$ โดยที่สมการดิฟเฟอเรนเชียลของอัตราเร็วของปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง คือ

$$\text{อัตราเร็วของปฏิกิริยา} \qquad -\frac{dc_A}{dt} = kc_A \qquad (3)$$

สมการอินทิเกรตของอัตราเร็วของปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง ในการทดลองทางจลนพลศาสตร์นั้นวัดความเข้มข้นของสาร ณ เวลาต่าง ๆ ดังนั้นจากสมการที่ 3 อินทิเกรตสมการดิฟเฟอเรนเชียล

$$-\ln c = kt + \text{ค่าคงที่ของการอินทิเกรต} \qquad (4)$$

ดังนั้น

$$\ln c = \ln c_0 - kt \qquad (5)$$

สำหรับปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln c กับ เวลา จะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งมีความชัน (slope) เท่ากับ -k หน่วยของค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่งคือ (หน่วยเวลา)$^{-1}$ และระยะตัดแกน (intercept) เท่ากับ $\ln c_0$

1.6.3 เวลาครึ่งหนึ่งของปฏิกิริยา (half-life; $t_{1/2}$)

เวลาครึ่งหนึ่งของปฏิกิริยา หมายถึงเวลาที่ความเข้มข้นหรือปริมาณของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาลดลงเหลือเป็นครึ่งหนึ่งของค่าเริ่มต้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา สำหรับปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง จะสัมพันธ์กันระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยากับค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยา ซึ่งหาได้จากสมการอินทิเกรต

โดยการแทนค่าที่ต้องการด้วย $t = t_{1/2}$ และความเข้มข้นเป็น $c = \frac{1}{2} c_0$ จะได้ว่า

$$\ln \frac{c_0}{\frac{1}{2} c_0} = \ln 2 = kt_{1/2} \qquad (6)$$

หรือ

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0.693}{k} \qquad (7)$$

ในปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง $t = t_{1/2}$ จะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มแรกของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาของปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง จะลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล

ช่วงหนึ่งของปฏิกิริยาที่น่าสนใจคือ ค่า τ ซึ่งเป็นเวลาที่ทำให้ความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาลดลงเป็น 1/e ของความเข้มข้นเริ่มต้น ในการศึกษาเวลาของการผ่อนคลาย (relaxation) โดย τ และ $t_{1/2}$ ใช้แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบสมการจะได้

$$t_{1/2} = (\ln 2)\,\tau = 0.693\,\tau \qquad (8)$$

1.6.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ออัตราเร็วปฏิกิริยา

ในปี ค.ศ. 1889 Arrhenius ได้อธิบายว่าการที่ความเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่างมากนั้นเป็นผลเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ โดยแสดงความสัมพันธ์แบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential) ระหว่างอัตราเร็ว หรือค่าคงที่ของอัตราเร็ว (k) และอุณหภูมิ (T) จากการทดลองของ Arrhenius:

$$k = Ae^{-Ea/RT} \qquad (9)$$

เมื่อ k = ค่าคงที่ของอัตราเร็ว (rate constant)

A = Arrhenius factor

e = 2.718 (base of natural logarithms)

R = ค่าคงที่ของแกส (gas constant) = 1.986 Cal/°K-mol

T = อุณหภูมิในองศาสัมบูรณ์หน่วยเป็นเคลวิน (absolute temperature)

Ea = ค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)

Arrhenius factor หรือ pre-exponential factor เป็นผลรวมของ collision frequency และ probability factor เป็นตัววัดโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาในส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงาน ส่วนที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน $e^{-Ea/RT}$ คือ energy factor ซึ่งก็คือ fraction ที่ชนกัน แล้วมีพลังงานเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยา ($\geq$ Ea)

จากสมการที่ (9) สามารถเขียนใหม่ในรูปของสมการลอกการิทึม คือ

$$\ln k = \ln A - \frac{Ea}{RT} \qquad (10)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอกการิทึมของอัตราเร็วของปฏิกิริยากับ 1/T จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ -Ea/R และระยะตัดแกนเท่ากับ ln A

1.7 มูลเหตุจูงใจ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการหมักในประเทศไทย ต่างมีความต้องการที่จะลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลงแต่ให้ผลผลิตสูงและมีคุณภาพดี วิธีการหนึ่งที่สามารถกระทำได้ง่ายก็คือ การใช้วัตถุดิบในการผลิตที่มีราคาถูก ซื้อหาได้ง่ายโดยเฉพาะกากน้ำตาล ซึ่งเป็นผลิตผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อย และเป็นแหล่งคาร์บอนสำคัญในการหมัก อาทิเช่น แอลกอฮอล์ กรดมะนาว ผงชูรส เอลไลซีน ยีสต์ขนมปัง เป็นต้น กากน้ำตาลในประเทศส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการหมักเอธานอลด้วยยีสต์ เนื่องจากกากน้ำตาลสามารถนำไปใช้ได้ทันทีโดยไม่ต้องปรับปรุง หรือเปลี่ยนแปลงสภาพก่อน แต่ในกากน้ำตาลก็มีสารเจือปนมากมาย บางอย่างก็มีผลยับยั้งการเจริญและการหมักแอลกอฮอล์ สารประกอบควอเทอร์นารีแอมโมเนียมเป็นสารเคมีที่ถูกนำมาเติมใส่ในลูกหีบและน้ำอ้อยรวม เพื่อควบคุมเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบควอเทอร์นารีแอมโมเนียมที่อาจตกค้างในกากน้ำตาลอ้อย และปริมาณสารประกอบควอเทอร์นารีแอมโมเนียมเท่าไรจึงจะมีผลต่อการหมักเอธานอล ซึ่งจากการตรวจเอกสารในเบื้องต้นยังไม่พบผู้ใดทำการศึกษาในเรื่องนี้ แล้วนำสถิติมาวิเคราะห์และบอกค่าความเชื่อมั่น

1.8 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อวิเคราะห์หาสารประกอบควอเทอร์นารีแอมโมเนียมในกากน้ำตาลอ้อย และประเมินผลของสารประกอบควอเทอร์นารีแอมโมเนียม ในการเพาะเลี้ยงยีสต์ *Saccharomyces* sp. สำหรับการหมักเอธานอล

1.9 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบควอเทอร์นารีแอมโมเนียมในกากน้ำตาลอ้อย
2. ประเมินผลยับยั้งของสารประกอบควอเทอร์นารีแอมโมเนียมในกากน้ำตาลอ้อยต่อการเจริญ และการหมักเอธานอลด้วยยีสต์ *Saccharomyces* sp.