บทที่ 3
เอทานอล

3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเอทานอล

เอทานอล (Ethanol) เป็นชื่อเรียกแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 2 อะตอมในโมเลกุล นิยมเรียกกันในชื่อของเอทานอล (Ethanol) หรือเอทิลแอลกอฮอล (Ethyl alcohol) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี จุดติดไฟ และระเหยง่าย มีสูตรทางเคมีคือ C_2H_5OH สามารถละลายได้ในน้ำและอีเทอร์ มีความหนาแน่น 0.7939 กรัม/มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส มีจุดเดือดที่ 78.32 องศาเซลเซียส (ที่ 760 มิลลิเมตรปรอท) มีความดันไอ 43.9 มิลลิเมตรปรอท (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) และค่าความร้อนจำเพาะ 2.43 J/g (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) ค่าความร้อนแฝง 920.3 J/g (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) มีจุดเดือด 78.32 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลว -114.3 องศาเซลเซียส

เอทานอลเป็นแอลกอฮอลที่สามารถนำมาบริโภคได้ (Beverage alcohol) เช่น ในเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอลประเภทต่างๆ ได้แก่ สุรา สุรากลั่น บรั่นดี วิสกี้ และเบียร์ นอกจากนี้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์สูง ที่เรียกว่าเอทานอลไร้น้ำ (Anhydrous ethanol) หรือแอลกอฮอล์ไร้น้ำ (Anhydrous alcohol) ซึ่งมีค่าออกเทนสูง สามารถนำมาผสมกับน้ำมันเบนซินเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ (Fuel alcohol) หากเปรียบเทียบเอทานอลกับน้ำมันดิบซึ่งเป็นแหล่งพลังงานจากซากพืช ซากสัตว์ หรือที่เรียกว่าพลังงานฟอสซิล (Fossil fuel) เอทานอลมีข้อดีกว่าหลายประการแต่ที่สำคัญ ได้แก่ เป็นพลังงานทดแทนที่มีการเผาไหม้สะอาด และไม่สร้างก๊าซพิษที่มีผลต่อการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) การใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงสามารถใช้ในรูปของเอทานอลไร้น้ำ (Anhydrous ethanol) ที่มีความบริสุทธิ์สูง (เข้มข้นร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร) หรืออาจใช้ในรูปของ เอทานอลที่มีน้ำ (Hydrous ethanol) ก็สามารถทำได้ การนำเอทานอลมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงมี 3 รูปแบบ ได้แก่

(1) ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงเพื่อทดแทนน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล
(2) ใช้ผสมกับน้ำมันเบนซิน เรียกว่า แกโซฮอล (Gasohol) หรือผสมกับน้ำมันดีเซล เรียกว่า ดีโซฮอล์ (Diesohol) เพื่อเป็นสารเพิ่มค่าออกเทน โดยจะผสมกับน้ำมันเบนซิน (Gasoline) ได้ในสัดส่วนร้อยละ 5 ถึง 30 โดยปริมาตร โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ หรือดัดแปลงเล็กน้อย

(3) ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้กับเครื่องยนต์ในรูปของ Ethyl Tertiary Butyl Ether (ETBE)

การใช้เอทานอลเพื่อผลิตเป็นแกโซฮอล คือการนำเอทานอลมาผสมกับน้ำมันเบนซิน ซึ่งสามารถผสมได้ในอัตราส่วนต่างๆ เช่น 10% (E10) 20% (E20) หรือ 85% (E85) เป็นต้น ใช้กับรถเครื่องยนต์เบนซินที่มีการปรับสภาพให้รองรับกับแกโซฮอลในอัตราส่วนดังกล่าวได้ อัตราการใช้น้ำมันเบนซินของประเทศไทยในปัจจุบันมีประมาณ 20 ล้านลิตรต่อวัน หากนำเอทานอลมาทำแกโซฮอล E10 ไปจนถึง E85 จะทดแทนน้ำมันเบนซินได้ 2-17 ล้านลิตรต่อวัน ทำให้ประหยัดเงินประเทศชาติได้ประมาณ 14,600-124,100 ล้านบาทต่อปี (คำนวณราคาเอทานอลและน้ำมันเบนซินที่ 20 และ 40 บาท/ลิตร ตามลำดับ)

เอทานอลสามารถผลิตได้ทั้งจากวิธีการทางเคมีและวิธีการหมัก แต่ในปัจจุบันการผลิตเอทานอลใช้วิธีการหมักเกือบทั้งหมด (ร้อยละ 95) โดยสามารถใช้วัตถุดิบทางการเกษตรที่มีอยู่มากมายหลายชนิดในประเทศไทย เช่น อ้อย กากน้ำตาล มันสำปะหลัง และข้าวฟ่างหวาน สามารถปลูกทดแทนขึ้นได้ใหม่ (Renewable resources) โดยใช้เวลาไม่นาน วัตถุดิบในประเทศมีเพียงพอต่อความต้องการใช้งาน อีกทั้งยังมีเทคโนโลยีการผลิตเอทานอลที่ทันสมัยรองรับ จึงทำให้ประเทศไทยสามารถพึ่งพาตนเองได้ ช่วยส่งเสริมอาชีพของประชากร เพิ่มอัตราการจ้างงาน ส่งผลดีต่อเศรษฐกิจและการพัฒนาสังคมของประเทศ

3.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการหมักเอทานอล

การผลิตเอทานอลด้วยการหมัก เป็นวิธีการผลิตโดยอาศัยกิจกรรมของเชื้อยีสต์ โดยยีสต์สามารถใช้น้ำตาลเฮกโซส (Hexose) ทั้งในรูปเชิงเดี่ยวและเชิงซ้อน เช่น น้ำตาลกลูโคส (Glucose) น้ำตาลฟรุกโทส (Fructose) น้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) น้ำตาลแมนโนส (Mannose) น้ำตาลซูโครส (Sucrose) และน้ำตาลแรฟฟิโนส (Raffinose) กลไกการผลิตเอทานอลของยีสต์เกิดขึ้นโดยยีสต์จะใช้น้ำตาลเป็นอาหารและเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอล โดยผ่านกระบวนการที่เรียกว่าไกลโคไลซิส (Glycolysis) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งตามทฤษฎีแล้ว พบว่าในกระบวนการหมักน้ำตาลกลูโคสของยีสต์นั้น น้ำตาลกลูโคสทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และเอทานอลเท่ากับร้อยละ 48.89 และ 51.11 โดยน้ำหนักตามลำดับ (ภาพที่ 3.1) แต่ในทางปฏิบัติจะเกิดการสูญเสียได้เป็นสารประกอบอื่นๆ หรือใช้ในการสร้างเซลล์ของยีสต์ได้ โดยน้ำตาลเพียงร้อยละ 95 เท่านั้นที่จะสามารถถูกเปลี่ยนไปเป็นเอทานอล ส่วนที่เหลือยีสต์จะใช้สำหรับการเจริญเติบโตและเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ซึ่งในการหมักน้ำตาลด้วยเชื้อยีสต์จะได้ผลิตภัณฑ์อื่นๆ นอกเหนือจากเอทานอล (ร้อยละ 48.4) ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 46.5) อะซิทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) กรดอะซิติก (Acetic acid) กลีเซอรีน (Glycerine) กรดแลกติก (Lactic acid) กรดซักซินิก (Succinic acid) ฟูเซลออยล์ (Fusel oil) และเฟอฟิวรัล (Furfural) ซึ่งปริมาณของสารเหล่านี้ที่ได้จะขึ้นอยู่กับ

ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์และในสภาวะที่ใช้ในการหมักด้วย ปริมาณสารอื่นที่เกิดขึ้นนี้จะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการทำเอทานอลบริสุทธิ์ และจะมีผลต่อคุณภาพของเอทานอลบริสุทธิ์ที่ได้ด้วย

$$C_6H_{12}O_6 + \text{ยีสต์} \longrightarrow 2CO_2 + 2C_2H_5OH + 28.7\ \text{kcal}$$

(กลูโคส)	(คาร์บอนไดออกไซด์)	(เอทานอล)
180 กรัม	(2 x 44 กรัม)	(2 x 46 กรัม)
คิดเป็นร้อยละ 100	48.89	51.11

ภาพที่ 3.1 การเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลโดยการหมักของยีสต์

ดังนั้นวัตถุดิบที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบสามารถนำมาใช้ในการหมักเอทานอล โดยวัตถุดิบที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัตถุดิบประเภทน้ำตาล เช่น กากน้ำตาล และน้ำอ้อย วัตถุดิบประเภทแป้ง เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด และอื่นๆ และประเภทสุดท้ายคือวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic material) ที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เช่น ฟางข้าว กากอ้อย และซังข้าวโพด (Murphy and McCarthy, 2005)

3.2.1 การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทน้ำตาล

วัตถุดิบประเภทน้ำตาลที่ใช้ในการผลิตเอทานอล ได้แก่ อ้อย กากน้ำตาล และบีทน้ำตาล ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลซูโครสที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิด คือ น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโทส ในการหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครสนั้น มีขั้นตอนดังนี้ คือ ขั้นแรกน้ำตาลซูโครสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ได้น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสอย่างละโมเลกุลจากนั้นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสจะถูกยีสต์เปลี่ยนไปเป็นเอทานอลและคาร์บอนไดออกไซด์อย่างละ 4 โมเลกุล ดังสมการที่แสดงในภาพที่ 3.2

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{ยีสต์}} 4C_2H_5OH + 4CO_2$$

(ซูโครส)	(น้ำ)	(กลูโคส)	(ฟรุกโทส)	(เอทานอล)	(คาร์บอนไดออกไซด์)
342 กรัม	18 กรัม	180 กรัม	180 กรัม	4x46 กรัม	4x44 กรัม
คิดเป็นผลได้ของเอทานอลเทียบกับน้ำตาลซูโครส				0.5380กรัม	0.5146 กรัม

ภาพที่ 3.2 การหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครส

ที่มา : ดัดแปลงจาก Murphy and McCarthy (2005)

3.2.2 ตัวอย่างกระบวนการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทน้ำตาล (กากน้ำตาล)

กากน้ำตาลเป็นผลิตผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลในโรงงานน้ำตาล โดยในการผลิตน้ำตาล 1 ตัน จะได้กากน้ำตาล 50 กิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 5 ของปริมาณอ้อยที่เข้าหีบ ประเทศไทยมีโรงงานน้ำตาลทั้งหมด 46 โรงงาน มีกำลังการผลิตน้ำตาลซึ่งมีความต้องการอ้อยรวมเท่ากับ 75 ล้านตัน ซึ่งหากมีการผลิตเต็มกำลังการผลิตจะทำให้ได้ปริมาณกากน้ำตาลเท่ากับ 3.75 ล้านตัน แต่ไม่สามารถผลิตได้อย่างเต็มประสิทธิภาพของโรงงาน เนื่องจากในแต่ละปีสามารถผลิตได้เพียง 2 ล้านตันต่อปี เนื่องจากกากน้ำตาลเป็นผลพลอยได้ที่สามารถส่งออกขายต่างประเทศได้ โดยปัจจุบันใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอลหรือสุราเป็นหลักในการนำกากน้ำตาลมาใช้ในการผลิต เอทานอลนั้นสามารถนำมาใช้ได้โดยตรง โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเตรียมวัตถุดิบที่ยุ่งยาก ดังนั้นกากน้ำตาลนับเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอล (สมบัติ, 2546) สำหรับกระบวนการผลิตเอทานอลจะประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้ (ภาพที่ 3.3) คือ

กากน้ำตาล (Molasses)

เตรียมวัตถุดิบ (Pre-treatment)

ยีสต์ (Yeast)

เจือจาง (Dilution)

น้ำ

การเตรียมกล้าเชื้อ (Yeast Proliferation)

กระบวนการหมัก (Fermentation)

คาร์บอนไดออกไซด์

ยีสต์

เครื่องแยกยีสต์

กระบวนการกลั่น (Distillation)

น้ำกากส่า (Slop)
- ยีสต์
- น้ำเสีย

ฟูเซลออยล์ (Fusel oil)

กระบวนการแยกน้ำ (Dehydration)

เอทานอล (Ethanol) 99.5%

ภาพที่ 3.3 กระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล

ที่มา : ดัดแปลงจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน

http://www.epcethanol.com/ethanol.htm

ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การกำจัดสิ่งปนเปื้อน (Pre-treatment) กากน้ำตาลมีองค์ประกอบที่เป็นของแข็ง คือ แคลเซียม ถ้ามีปริมาณมากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพการหมักเอทานอลลดลง ปริมาณแคลเซียมที่แตกต่างกันนั้นขึ้นกับ แหล่งที่มาของกากน้ำตาล ดังนั้นจึงต้องมีการแยกแคลเซียมออกก่อน ทำได้โดยการใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โดยกรดซัลฟิวริกจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมเกิดเป็นตะกอนของแคลเซียมซัลเฟต ($CaSo_4$) จากนั้นจึงทำการแยกตะกอนออก แล้วนำส่วนใสเข้าสู่กระบวนการต่อไป

2) การเจือจาง (Dilution) กากน้ำตาลที่ผ่านขั้นตอนแรกจะถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำร้อนเพื่อลดโอกาสการปนเปื้อนจากเชื้ออื่น เพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเชื้อยีสต์ โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมประมาณ 20-25 ° บริกซ์ จากนั้นกากน้ำตาลที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมก็จะเข้าสู่กระบวนการหมักต่อไป

3) การเตรียมกล้าเชื้อยีสต์ (Yeast propagation) โดยส่วนใหญ่ใช้เชื้อยีสต์ในสกุล *Saccharomyces* sp. ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาสายพันธุ์ให้มีความสามารถในการหมักสูง สายพันธุ์ของยีสต์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเอทานอล คือ *Saccharomyces cerevisiae* ยีสต์ในสายพันธุ์นี้มีหลากหลาย บางสายพันธุ์มีคุณสมบัติสามารถทนต่อเอทานอลเข้มข้นสูง ให้อัตราการผลิตเอทานอลสูง (Wilkie *et al.*, 2000) สำหรับขั้นตอนการเตรียมกล้าเชื้อนั้นจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อยีสต์ที่ใช้ (Stock yeast) ได้แก่ เชื้อยีสต์สด (Fresh yeast) และเชื้อผง (Active dry yeast) โดยถ้าใช้เชื้อสดปกติจะเก็บรักษาอยู่ในอาหารแข็ง การนำมาใช้ต้องทำการเลี้ยงเชื้อก่อน (Refresh) โดยเขี่ยเชื้อยีสต์ที่อยู่บนอาหารแข็ง ลงในหลอดแก้วขนาดเล็กที่มีอาหารเหลว จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเชื้อยีสต์ที่ได้ไปเลี้ยงเพื่อขยายปริมาตรต่อจนได้ปริมาตรกล้าเชื้อที่ต้องการ (คิดเป็นร้อยละ 5-10 โดยปริมาตร ของปริมาตรการทำงานของถังหมักที่ใช้ ซึ่งต้องใช้เวลานาน ส่วนการใช้ยีสต์ผงนั้นการเตรียมกล้าเชื้อจะทำได้ง่ายกว่า โดยใช้ปริมาณเชื้อยีสต์ที่เหมาะสม แล้วนำมาเลี้ยงเชื้อ (Refresh) โดยใช้เวลาประมาณ 4-6 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการใช้เชื้อสดเป็นอย่างมาก แต่มีข้อเสียคือราคาแพง

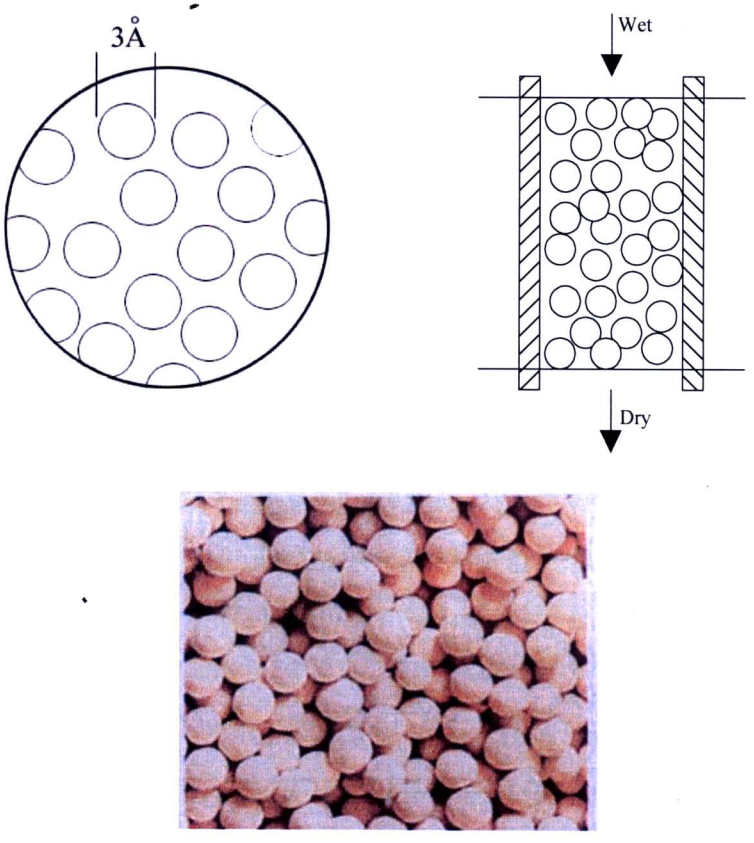
4) การหมัก (Fermentation) สำหรับกระบวนการหมักเอทานอลนั้น สามารถทำได้หลายแบบ ได้แก่ การหมักแบบเบ็ดเสร็จ (Batch) การหมักแบบครั้งคราว (Fed-batch) และการหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous) แต่โดยส่วนใหญ่แล้วการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลนั้นจะใช้กระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีข้อดีคือค่าต้นทุนในการลงทุนสำหรับอุปกรณ์จะต่ำกว่าการหมักแบบเบ็ดเสร็จและไม่ต้องเสียเวลาในการทำความสะอาดระบบการหมัก แต่ก็มีข้อเสียคือโอกาสปนเปื้อนจากเชื้ออื่นมีสูง (Roehr,

2001) นอกจากนั้นในระบบการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องยังสามารถแยกเอาเชื้อยีสต์ที่ออกมานอกระบบหมุนเวียนกลับเข้าไปในถังหมักใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหมักให้ดีขึ้น หลังจากผ่านกระบวนการหมักจะได้ความเข้มข้นเอทานอลในน้ำหมักประมาณร้อยละ 9-12 ในขั้นตอนการหมักนี้ นอกจากจะได้เอทานอลเป็นผลผลิตแล้ว ยังมีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นผลิตผลพลอยได้ด้วยโดยน้ำตาลกลูโคส 100 กรัม จะผลิตเอทานอลได้ 51.1 กรัม และได้คาร์บอนไดออกไซด์ 48.9 กรัม

5) การกลั่น (Distillation) เป็นกระบวนการทำให้เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยมีหลักการทำงานคือการให้ความร้อนแก่น้ำส่า (มีเอทานอลเริ่มต้นประมาณร้อยละ 7-11) ด้วยไอน้ำ ทำให้เอทานอลในน้ำส่าระเหยกลายเป็นไอ แต่ก็จะมีน้ำระเหยขึ้นมาพร้อมกับไอเอทานอลด้วย ซึ่งความเข้มข้นของ เอทานอลในไอจะเข้มข้นกว่าในของเหลว การที่จะกลั่นให้ได้เอทานอลที่ความเข้มข้นสูงๆ นั้น ต้องทำให้เอทานอลระเหยและควบแน่นหลายๆ ครั้ง ภายในหอกลั่นจึงทำเป็นหลายชั้น แต่ละชั้นเหมือนกับการทำให้ระเหยและควบแน่น 1 ครั้ง เมื่อผ่านการระเหยและควบแน่นหลายๆ ครั้ง ความเข้มข้นของเอทานอลจึงสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่ก็ไม่สามารถกลั่นให้ได้ความเข้มข้นถึงร้อยละ 100 เพราะเมื่อกลั่นจนเอทานอลมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 96 ความเข้มข้นของไอเอทานอลที่ระเหยออกมาจากของเหลว จะเท่ากับความเข้มข้นของเอทานอลในของเหลว จึงทำให้ไม่สามารถกลั่นแยกเอทานอลให้ได้ความเข้มข้นถึงร้อยละ 100 ได้ ดังนั้นเอทานอลที่ได้จากการกลั่นด้วยหอกลั่นจะกำหนดความบริสุทธิ์ไว้ที่ร้อยละ 95 และในกระบวนการกลั่นนั้นจะได้ฟูเซลออยล์ (Fusel oil) เป็นผลิตผลพลอยได้ โดยในการผลิตเอทานอล 1,000 ลิตร จะได้ฟูเซลออยล์ 5 ลิตร และมีน้ำกากส่าเป็นน้ำเสียด้วยโดยการผลิตเอทานอล 1 ลิตร จะมีน้ำกากส่า (น้ำเสีย) 10-15 ลิตร

6) การแยกน้ำ (Dehydration) เอทานอลที่ผ่านขั้นตอนการกลั่นจะได้ความเข้มข้นเอทานอลสูงสุดเพียงร้อยละ 95 เท่านั้น แต่เอทานอลที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์นั้น ต้องมีความเข้มข้นอย่างน้อยร้อยละ 99.5 โดยวิธีการทำให้ได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 99.5 ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Molecular Sieve Dehydrators (MSDH) ซึ่งมีลักษณะการทำงานดังนี้ เม็ดบีด (Bead) ของสารจำพวกซีโอไลท์ (Zeolytes) เช่น โพแทสเซียมอลูมิ-ซิลิเกท (Potassium alumi-silicates) จะมีลักษณะกลมและมีรูพรุนอยู่บนผิว รูพรุน (pore) เหล่านี้จะมีขนาด 3 อังสตรอม (Angstroms; Å, 1Å = 10^{-8} เซนติเมตร) ซึ่งโมเลกุลของน้ำมีขนาด 2.8 Å จะมีความชอบ (Affinity) กับรูพรุน และจะถูกจับเข้าไว้ในรูพรุนเหล่านี้ ส่วนเอทานอลจะมีขนาดของโมเลกุล 4.4 Å ไม่มี Affinity กับรูพรุนและไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนเหล่านี้ได้ ลักษณะการทำงานของ MSDH แสดงดังภาพที่ 3.3 (Bibb Swain, 1999) โดยมีรายละเอียดการทำงานดังต่อไปนี้ การดูดซับน้ำเกิดขึ้นเมื่อมีการป้อนไอ (เปียก) ของเอทานอลที่มีน้ำ (Hydrous Ethanol) เข้าไปในเครื่อง Dehydrator ที่บรรจุเม็ดซีโอไลท์ (Zeolytes) เหล่านี้อยู่ โมเลกุลของน้ำจะถูกดูดซับอยู่ในเม็ดบีด (Bead) และไอของเอทานอลที่ถูกดูดซับน้ำออกไปแล้ว (Anhydrous ethanol) ก็จะผ่านออกมาจาก Dehydrator ในการดูดซับน้ำ

ของซีโอไลท์ (Zeolytes) นั้น จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) กล่าวคือ ทุกๆ 1 ปอนด์ ที่น้ำถูกดูดซับจะมีการคายความร้อนออกมา 1,800 BTU ปกติซีโอไลท์ (Zeolytes) เหล่านี้สามารถดูดซับน้ำได้มากถึงร้อยละ 22 ของน้ำหนักตัวเอง เมื่อซีโอไลท์ (Zeolytes) เหล่านี้ดูดซับน้ำไว้มากพอแล้วก็จะต้องทำการถ่ายเทน้ำออก (Regeneration) ทั้งนี้ทำได้โดยการผ่านไอร้อนของก๊าซเข้าไปเพื่อระเหยน้ำออกมา (Bibb Swan, 1999)



ภาพที่ 3.4 ลักษณะของเม็ดบีด (Bead) ที่ใช้เป็น Molecular Sieve Dehydrators Hydrous

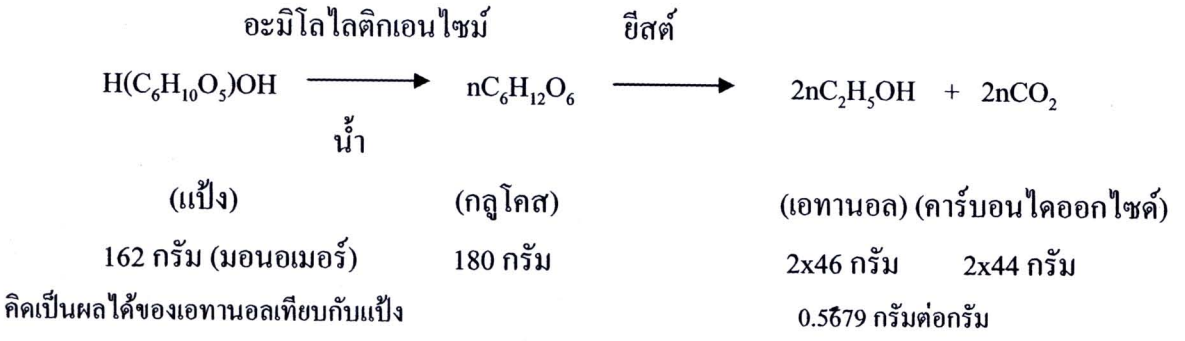
ที่มา : ดัดแปลงจากกล้าณรงค์และคณะ (2544)

3.2.3 การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้ง

วัตถุดิบประเภทแป้งที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ มันสำปะหลัง (ทั้งหัวมันสดและมันเส้น) ข้าวโพด ข้าว และเมล็ดข้าวฟ่าง เป็นต้น โดยแป้งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส เมื่อนำแป้งมาผ่านกระบวนการย่อย (Hydrolysis) ด้วยกรดหรือเอนไซม์จะได้น้ำตาลกลูโคสที่สามารถเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอลได้ โดยในปัจจุบันจะนิยมย่อยแป้งด้วยเอนไซม์มากกว่ากรด เนื่องจากสามารถควบคุมการย่อยได้ง่ายกว่า และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์มีความบริสุทธิ์มากกว่า การย่อยแป้งด้วยเอนไซม์จะประกอบด้วยการย่อย 2 ครั้ง คือ

- การย่อยแป้งครั้งแรกหรือการทำให้แป้งเหลว (Liquefaction) ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์แอลฟาอะมิเลส (α-amylase) ย่อยแป้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าเด็กทรินซ์ (Dextrin)

- การย่อยแป้งครั้งสุดท้ายหรือการเปลี่ยนเป็นน้ำตาล (Saccharification) ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์กลูโคอะมิเลส (Glucoamylase) ย่อยเด็กทรินซ์ที่อุณหภูมิ 55-65 องศาเซลเซียส ให้ได้น้ำตาลกลูโคส ซึ่งยีสต์สามารถใช้หมักเป็นเอทานอลได้ โดยกระบวนการหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้งสามารถแสดงได้ดังสมการในภาพที่ 3.5

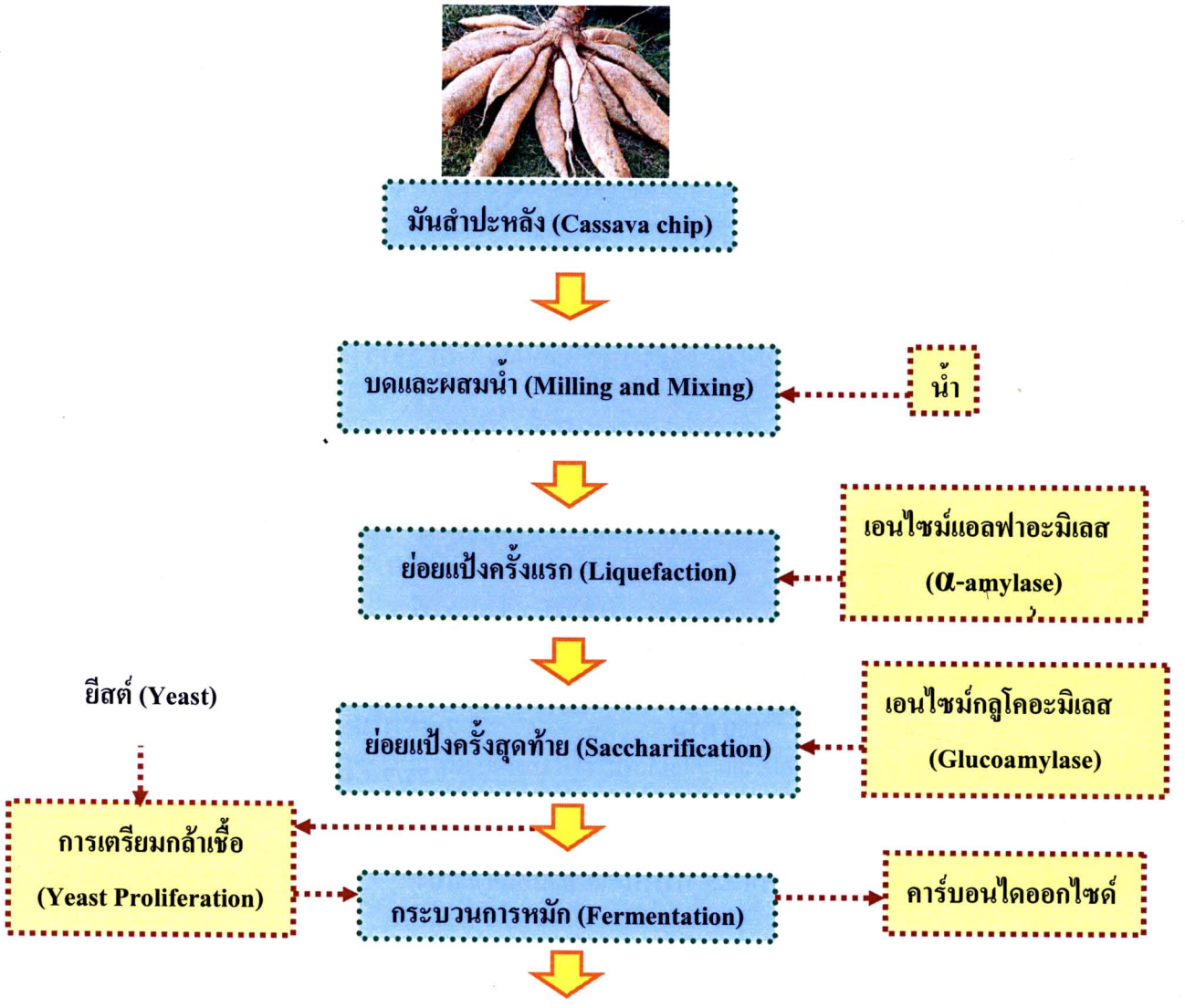


ภาพที่ 3.5 การหมักเอทานอลจากแป้ง

ที่มา : ดัดแปลงจาก Ingledew (1999)

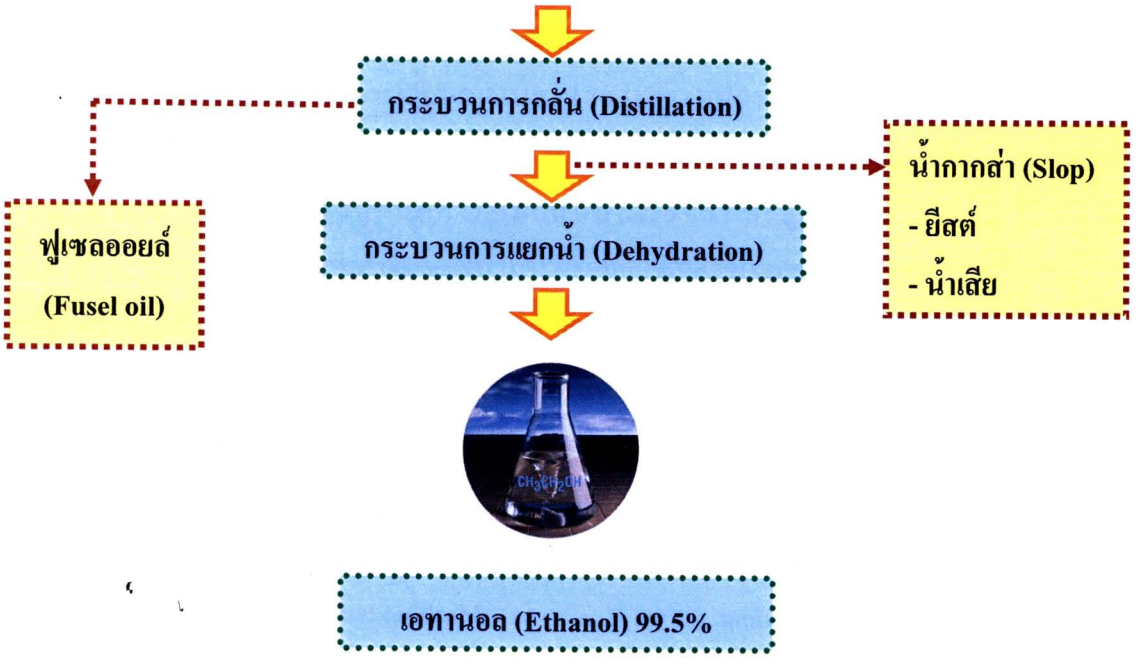
3.2.4 ตัวอย่างกระบวนการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้ง (มันสำปะหลัง)

มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบที่ประกอบด้วยแป้ง ดังนั้นในการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังจะต้องนำมันสำปะหลังมาย่อยให้เป็นน้ำตาลก่อน แล้วจึงใช้เชื้อยีสต์เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทานอล โดยขั้นตอนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังทั้งที่อยู่ในรูปหัวมันสดและมันเส้นมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ การเตรียมวัตถุดิบ (Raw material preparation) การย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล (Liquefaction and Saccharification) การเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทานอล (Fermentation) การกลั่น (Distillation) และการแยกน้ำ (Dehydration) ขั้นตอนการทำงานโดยรวมสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 กระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง

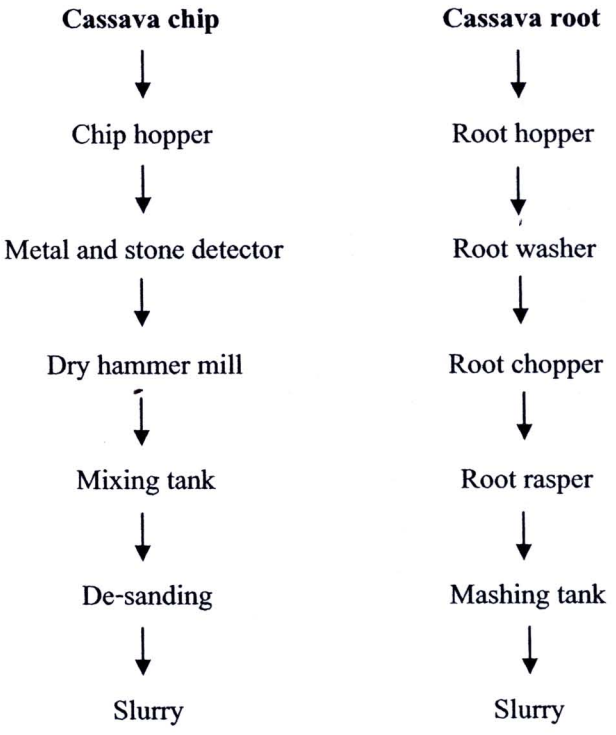
ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน



ภาพที่ 3.6 กระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง (ต่อ)

ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การเตรียมวัตถุดิบ ในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบจากหัวมันสดและมันเส้นมีขั้นตอนการเตรียมแตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 3.7 ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังนี้ สำหรับมันเส้นนั้นจะผ่านเครื่องแยกโลหะและหินออกจากมันเส้น (Metal and stone detector) จากนั้นก็ผ่านเครื่องบดแบบแห้ง (Dry hammer mill) แล้วก็ทำการผสมกับน้ำ (Mixing) จะได้ของผสมที่เรียกว่า Slurry จากนั้น Slurry ก็จะผ่านระบบการแยกทราย (De-sanding) ก็จะได้ Slurry ที่พร้อมจะเข้าสู่ระบบการย่อยแป้งต่อไป ในกรณีของของหัวมันสดจะมีความแตกต่างกับกับมันเส้น โดยหัวมันสดจะเข้าสู่เครื่องรับหัวมัน (Hopper) จากนั้นก็เข้าเครื่องล้าง (Washer) แล้วเข้าสู่เครื่องสับ (Chopper) ให้มีชิ้นเล็กลง จากนั้นเข้าสู่เครื่องบด (Rasper) แล้วเข้าสู่ถังเตรียม Slurry (Mashing tank) จะได้ Slurry ที่พร้อมจะเข้าสู่กระบวนการย่อยต่อไป



ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบจากหัวมันสดและมันเส้น

2) การย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล (Liquefaction and Saccharification) ในขั้นตอนการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือการย่อยครั้งแรก (Liquefaction) ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลส และการย่อยครั้งสุดท้าย (Saccharification) ด้วยเอนไซม์กลูโคอะมิเลส ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังต่อไปนี้

(ก) การย่อยครั้งแรก (Liquefaction) ขั้นตอนนี้จะใช้กรดหรือเอนไซม์กลุ่มแอลฟาอะมิเลส (α-amylase) ย่อยแป้งที่อุณหภูมิประมาณ 95-105 องศาเซลเซียส ให้ได้โมเลกุลขนาดเล็กลงและมีความหนืดลดลง ของเหลวที่ได้จะมีค่าสมมูลเด็กโทรส (Dextrose equivalent, DE) อยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 เรียกว่าเด็กซ์ทริน (Dextrin)

(ข) การย่อยครั้งสุดท้าย (Saccharification) สารละลายน้ำตาลที่ได้จากการย่อยแป้งควรมีสมมูลเด็กซ์โทรส (Dextrose equivalent, DE) สูง ยีสต์จึงจะทำงานได้ดี ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์กลูโคอะมิเลส (Glucoamylase) เข้าไปย่อยให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งจะใช้เวลาในการย่อยระหว่าง 15-18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อสิ้นสุดการย่อยจะให้ความร้อนเพื่อหยุดกิจกรรมเอนไซม์และฆ่าเชื้อที่อาจปนเปื้อนก่อนที่จะเข้ากระบวนการหมักต่อไป

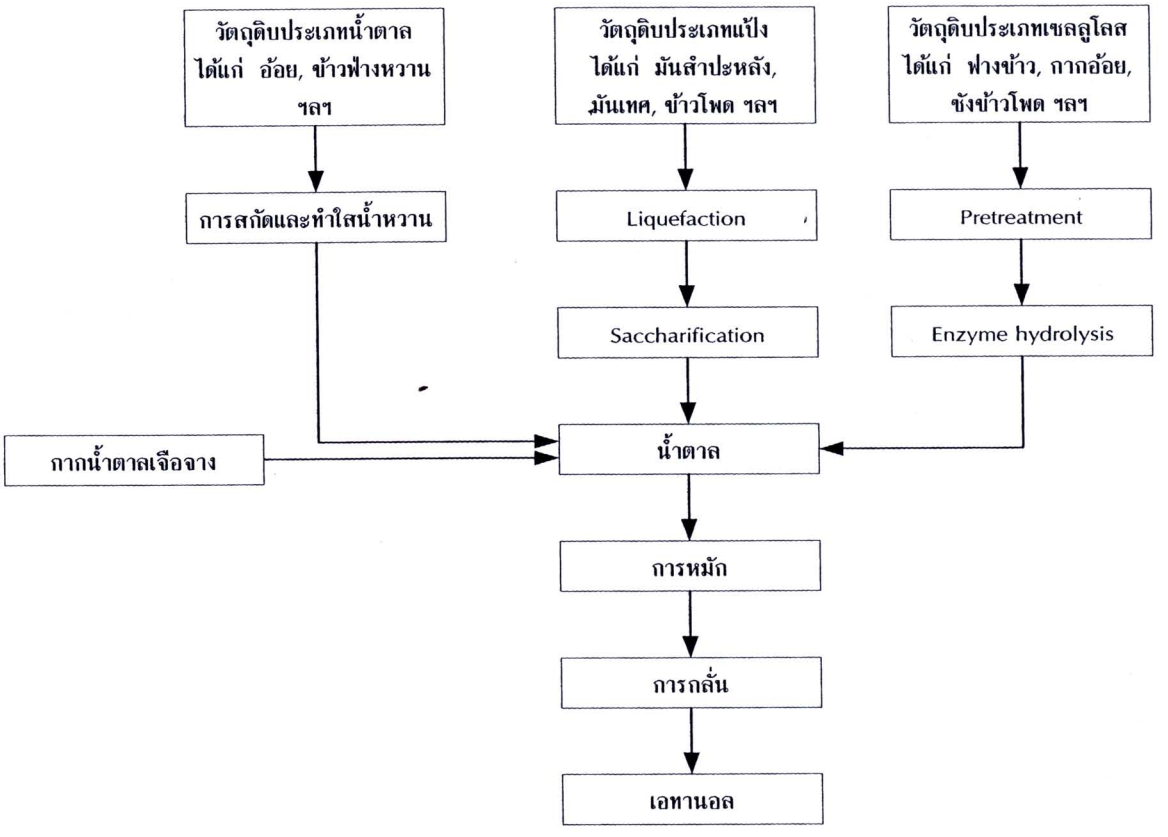
3) การหมักเอทานอล หลังจากผ่านกระบวนการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลแล้ว จึงเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอลด้วยเชื้อยีสต์ ซึ่งการผลิตเอทานอลด้วยวิธีการหมักจากวัตถุดิบประเภทแป้งนั้นนอกจากจะต้องผ่านการย่อยให้เป็นน้ำตาลก่อน (ผ่านกระบวนการ Liquefaction และSaccharification) แล้วค่อยเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอล เทคนิคการหมักแบบนี้เรียกว่า การหมักแบบดั้งเดิม (Conventional Fermentation; CF) ยังมีกระบวนการผลิตที่สามารถรวมเอาขั้นตอนการย่อยครั้งสุดท้าย (Saccharification) และการหมัก (Fermentation) ทำในขั้นตอนเดียวกันเรียกว่า Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) ดังแสดงในภาพที่ 2.12 ซึ่งเทคนิคการหมักแบบนี้จะทำให้ประหยัดพลังงานและเวลา สำหรับรูปแบบการหมักเอทานอลจากมันสำปะหลังจะเป็นการหมักแบบเบ็ดเสร็จ (Batch fermentation) จะแตกต่างกับการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลที่ส่วนใหญ่จะใช้การหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous fermentation) ในกระบวนการหมักนี้นอกจากจะได้เอทานอลแล้วยังได้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตผลพลอยได้ด้วย

4) การกลั่น (Distillation) และการแยกน้ำ (Dehydration) ขั้นตอนการกลั่นและการแยกน้ำของการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังจะเหมือนกับการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล แต่อาจจะมีความแตกต่างกันเพียงลักษณะน้ำหมักก่อนเข้าหอกลั่น คือน้ำหมักที่ได้จากการใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบจะข้นและมีกากมากกว่ากากน้ำตาลแต่ผู้ประกอบการก็ไม่นิยมแยกกากออกก่อนเนื่องจากจะทำให้สูญเสียเอทานอลไปบางส่วนได้ จึงทำให้ผู้ประกอบการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังต้องดูแลเอาใจใส่หอกลั่นมากกว่าเพื่อป้องกันการอุดตัน แต่หลังจากที่กลั่นออกมาได้แล้ว เอทานอลที่ได้จะมีคุณสมบัติไม่แตกต่างกันนำไปผ่านการแยกน้ำโดยใช้กระบวนการเดียวกัน

3.2.5 การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส

วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ ฟางข้าว กากอ้อย ซังข้าวโพด และเศษไม้ เป็นต้น วัตถุดิบประเภทนี้มีองค์ประกอบ ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) โดยเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวและอยู่ในรูปผลึก มีลักษณะเป็นเส้นใยเหนียวและไม่ละลายน้ำ เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโทส (Pentose) หลายชนิด เช่น ไซโลส (Xylose) แมนโนส (Mannose) และอะราบิโนส (Arabinose) เป็นต้น ส่วนลิกนินเป็นพอลิเมอร์ของฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane) ซึ่งทนต่อการย่อยสลายอย่างมาก

กระบวนการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตรทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ วัตถุดิบประเภทน้ำตาล วัตถุดิบประเภทแป้ง และวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 การผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตร

ที่มา : กล้าณรงค์ และคณะ (2548)

ทั้งนี้ปริมาณของเอทานอลที่ได้จากการใช้วัตถุดิบชนิดต่างๆ ในการหมัก หรือปริมาณวัตถุดิบที่ต้องใช้เพื่อให้ได้เอทานอลตามที่ต้องการจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำตาลหรือแป้งที่มีในวัตถุดิบเป็นสำคัญ