

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ประวัติความเป็นมาของลำไย

ชื่อภาษาไทย	ลำไย
ชื่อภาษาอังกฤษ	Longan
ชื่อวิทยาศาสตร์	Euphoria Iongana Lam.
วงศ์ตระกูล	Family Sapindaceae
ชื่อเรียกพื้นบ้าน	“บ่าลำไย”

ลำไยมีถิ่นกำเนิดที่ประเทศจีนตอนใต้ ปลูกกันอย่างแพร่หลายในมณฑลกว่างตุง ฟุเจี้ยน และ กวางสี และแพร่กระจายเข้าไปสู่อินเดีย ศรีลังกา พม่า ฟิลิปปินส์ ยุโรป สหรัฐอเมริกา (มลรัฐฮาวาย และฟลอริดา) คิวบา หมู่เกาะอินดีสตะวันออก เกาะมาดากัสกา และไทย แหล่งปลูกลำไยในไทยที่สำคัญคือ จังหวัดที่อยู่ในเขตภาคเหนือ ได้แก่ เชียงใหม่ ลำพูน เชียงราย แพร่ น่าน และพะเยา นอกจากนี้ยังมีการปลูกในภาคกลาง เช่น จังหวัดสมุทรสาคร สมุทรสงคราม ปัจจุบันลำไยได้แพร่กระจายไปในจังหวัดต่าง ๆ ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือบางจังหวัด เช่น จังหวัดเลย หนองคาย ภาคใต้ เช่น จังหวัด พัทลุง สงขลา และนครศรีธรรมราช และภาคตะวันออก เช่น จันทบุรี และตราด

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของลำไย

- 1) ลำต้น ลำไยเป็นไม้ยืนต้นมีขนาดลำต้นสูงปานกลางจนถึงขนาดใหญ่ ต้นที่ขยายพันธุ์ด้วยเมล็ดจะมีลำต้นตรงเมื่อเจริญเติบโตเต็มที่มีความสูงประมาณ 12.15 เมตร ขนาดทรงพุ่มประมาณ 4.5–6 เมตร และถ้าหากเป็นต้นที่ขยายพันธุ์ด้วยการตอนกิ่งจะแตกกิ่งก้านสาขาใกล้กับพื้น และถ้าได้รับการตัดแต่งกิ่งในขณะที่ต้นยังเล็กมักจะเกิดการแตกกิ่ง และลำต้นไม่ค่อยเหยียดตรง มักเอนหรือโค้งงอ เปลือกของลำต้นมีลักษณะขรุขระ สีเทาหรือสีเทาปนน้ำตาลแดงเป็นสะเก็ด

- 2) กิ่งก้าน จะแตกออกรอบ ๆ ต้น แตกสาขามากมาย ทำให้เบียดกันแน่น ถ้าไม่ได้รับการตัดแต่งกิ่ง
- 3) ใบ เป็นใบประกอบใบรวม (Compound Leaf) โดยมีก้านใบรวม (Rachis) ยาวประมาณ 15 - 30 เซนติเมตร และยาวประมาณ 7-15 เซนติเมตร มีทั้งสีเขียวอ่อนไปจนถึงสีเขียวเข้ม ด้านบนใบมีลักษณะเรียบเป็นมัน ด้านล่างมีลักษณะหยาบสากเล็กน้อย ขอบใบเรียบเป็นคลื่นมีเส้นแตกออกจากเส้นกลางใบ (Mid Rib) เป็นจำนวนมาก
- 4) ดอก ออกดอกเป็นช่อ ดอกมีขนาดใหญ่ รูปทรงกรวย ก้านของช่อดอกอวบแข็งแรงเหยียดตรง ดอกมีสีขาวนวล ในช่อหนึ่ง ๆ อาจมีดอก 3 ชนิด คือ ดอกตัวผู้ (Staminate) ดอกตัวเมีย (Pistillate Flower) และ ดอกสมบูรณ์เพศ (Perfect Flower)
- 5) ผล มีลักษณะของผลทั้งกลมหรือทรงเบี้ยว เปลือกผลมีสีเขียวปนน้ำตาล เขียวปนเหลือง หรือน้ำตาลแดง แล้วแต่ชนิดของพันธุ์ (Variety) เปลือกผลเมื่อยังไม่แก่เต็มที่ จะขรุขระเล็กน้อย เมื่อแก่จัดจะมีผิวค่อนข้างเรียบ ลักษณะผลพองโต ส่วนเนื้อมีภายในจะมีเมล็ดมีลักษณะสีน้ำตาลดำเป็นมันเรียบ ด้านบนของเมล็ดมีจุดขาวคล้ายกับตาเรียกว่า Dragon's eye
- 6) เมล็ด มีลักษณะกลมหรือกลมแป้น เมื่อยังไม่แก่เปลือกหุ้มเมล็ด (Seed Coat) จะมีสีขาวแล้ว ค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลดำ เมื่อผลแก่จัดเต็มที่แล้ว ขนาดของเมล็ดตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่แล้วแต่พันธุ์หรือบางผลเมล็ดอาจไม่เจริญมีแต่เนื้อเท่านั้น

2.1.2 ส่วนประกอบและองค์ประกอบทางเคมีของลำไยสดและลำไยอบแห้ง

สถาบันอาหารได้รายงานองค์ประกอบทางเคมีของลำไยไว้ดังนี้

- 1) Soluble solids มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ 3 อย่างคือ กลูโคส, ฟรุคโตส และ ซูโครส ในส่วนของลำไยอบแห้งจะมีน้ำตาลอยู่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์
- 2) Organic acids ลำไยจะมีกรดอินทรีย์ คือ กรดกลูโคนิก, กรดมาลิก และ กรดซิตริก เป็นส่วนประกอบ

- 3) Amino acids ลำไยจะมีกรดอะมิโน 8 ชนิดที่เป็นองค์ประกอบดังต่อไปนี้ คือ alanine, glutamic acid, glycine, leucine, aspartic acid, arginine, methionine และ valine
- 4) Vitamin ลำไยมีวิตามินเป็นองค์ประกอบอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ Riboflavin (B2) และ Ascorbic acid (C) จะพบมากในลำไยสด

ตาราง 2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของลำไย (กรมวิชาการเกษตร, 2548)

ส่วนประกอบ	น้ำหนัก (%)	โปรตีน (%)	ไขมัน (%)	เส้นใย (%)	เถ้า (%)	ความชื้น (%)	คาร์โบไฮเดรต (%)
เนื้อลำไย	75.59	4.89	0.04	0.05	0.79	81.00	16.23
เปลือกลำไย	8.98	7.86	0.85	18.70	5.83	21.61	31.15
เมล็ดลำไย	15.43	9.76	1.77	3.26	1.40	34.74	49.07
ลำไยทั้งผล	-	2.39	0.38	3.12	1.34	68.53	24.24

2.2 การแปรรูปลำไย

ลำไยสดนอกจากใช้เป็นผลไม้รับประทานสดแล้ว ลำไยสดยังสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้อีก หรือเพื่อการถนอมอาหาร เพราะลำไยเป็นผลไม้ที่เน่าเสียเร็ว อาจจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องได้ไม่นาน ดังนั้นเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาลำไยสด ใช้การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไปสามารถทำได้โดย การแช่เย็น การอบลมร้อน การแช่แข็ง การทำลำไยกวน การทำลำไยกระป๋องในน้ำเชื่อม การทำลำไยผง การทำลำไยอบแห้ง ฯลฯ ส่วนใหญ่ลำไยที่ใช้เป็นสินค้าส่งออกจะเป็นการทำลำไยอบแห้ง ซึ่งจะใช้ลำไยสดที่ผ่านการอบลมร้อน แล้วคัดแยกลำไยที่เปลือกแตกหรือบุบ ไปแปรรูปเป็นลำไยอบแห้งแบบเนื้อ ส่วนลำไยที่สมบูรณ์จะนำไปแปรรูปเป็นลำไยอบแห้งทั้งเปลือก

ลำไยสดมีความชื้นประมาณ 70% ของน้ำหนักผลสด การนำลำไยไปอบแห้งเพื่อเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เกิดปัญหาเชื้อราจะต้องลดความชื้นให้เหลือต่ำกว่า 18% ของน้ำหนัก ลำไยสด 1 กิโลกรัม เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิช่วง 70–80 °C ใช้ระยะเวลาในการอบ 12-15 ชั่วโมงติดต่อกัน จะมีความชื้นประมาณ 17% และจะได้ลำไยอบแห้งอยู่ประมาณ 361 กรัม หรือผลลำไยทั้งเปลือกประมาณ 1 ส่วน

จากนั้นนำเนื้อลำไยที่อบแห้งแล้วบรรจุถุงพลาสติกหนาปิดปากถุงให้แน่น บรรจุลงกล่องกระดาษเก็บไว้ในห้องเย็น อุณหภูมิ 4-10 °C จะสามารถเก็บไว้ได้นาน 6 – 9 เดือน และลำไยอบแห้งทั้งเปลือกจะเก็บไว้ได้นาน 1 ปี (กรมวิชาการเกษตร)

ตาราง 2.2 แสดงส่วนประกอบของลำไยสดและลำไยอบแห้ง (นวลศรี, 2543)

ส่วนประกอบ	เนื้อลำไยสด (ร้อยละ)	เนื้อลำไยอบแห้ง (ร้อยละ)
Moisture	81.1	17.8
Lipid	0.11	0.4
Protein	0.97	4.6
Fiber	0.28	1.6
Ashes	0.56	2.86
Carbohydrate	16.98	31.18
Thermal Energy (kcal/100g)	72.79	27.7
Calcium	5.7	2.39
Iron	0.35	15.95
Phosphorus	35.3	13.78
Vitamin C	69.2	4.5
Sodium	-	20.12
Potassium	-	3.03
Niacin	-	0.57
Pantothenic Acid	-	0.375
Vitamin B2	-	0.37

2.3 เอทานอล (Ethanol)

เอทานอล (Ethanol) หรือ เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) หรือ เกรนแอลกอฮอล์ (Grain alcohol) หรือแอลกอฮอล์ (Alcohol) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ต่ออยู่กับสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอน มีสูตรทางเคมี คือ C_2H_5OH

2.3.1 คุณสมบัติของเอทานอล

- 1) เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ระเหยได้ จุดไฟติด มี pH เป็นกลาง

- 2) มีจุดเดือดที่ 78 องศาเซลเซียส แต่สามารถระเหยได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำ
- 3) สามารถผสมเข้ากันได้ดีกับน้ำ
- 4) ให้พลังงานความร้อนประมาณ 23.4 MJ/L

ตาราง 2.3 คุณสมบัติของเอทิลแอลกอฮอล์

คุณสมบัติ	Ethanol	Units
Liquid density	0.789	g/mL
Molecular weight	46.0634	g/mol
Liquid Heat Capacity	107.4	J/mol K
Vapour Viscosity @727 C	264.43	micropoise
Liquid Viscosity @25 C	1.057	c.St
Surface Tension @20 C	22.39	mN/m
Vapour Diffusivity in air	102×10^{-7}	m^2/s
Liquid Diffusivity in water	128×10^{-11}	m^2/s
Enthalpy of combustion	1235.5	KJ/mol
Flash poin	55	°F
Autoignition Temperature	793	°F

ที่มา: สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.)

2.3.2 ประโยชน์จากเอทานอล

- 1) ใช้เป็นตัวทำละลาย (Solvent) ในอุตสาหกรรมยา เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์หอม ฯลฯ
- 2) ใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรค เช่น น้ำยาฆ่าเชื้อ
- 3) ใช้ผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ชนิดต่าง ๆ
- 4) ใช้เป็นน้ำเชื้อเพลิงทดแทน โดยนำเอทานอลไปผสมกับน้ำมันเบนซิน

2.3.3 เอทานอลกับสิ่งแวดล้อม

จากสถานการณ์วิกฤติด้านราคาน้ำมันของโลกสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ส่งผลกระทบต่อการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจของประเทศไทยเนื่องจากต้นทุนการขนส่งที่เพิ่มสูงขึ้นรัฐบาลจึงได้มีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทน ซึ่งหนึ่งในนโยบายของรัฐบาลคือ การผสมระหว่างน้ำมันเบนซินกับเอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% อย่างไรก็ตาม การได้มาของเอทานอลบริสุทธิ์นี้จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เมื่อวิเคราะห์ระบบการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเกษตรขั้นตอนการขนส่ง และขั้นตอนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% พบว่าเมื่อวิเคราะห์ค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์พบว่า กระบวนการผลิตเอทานอล บริสุทธิ์ 99.5% มีการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด รองลงมาคือ กระบวนการเกษตรและกระบวนการขนส่ง ตามลำดับ เพื่อให้กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด จึงทำการทดลองโดยหาสภาวะเหมาะสมที่คุ้มค่ากับพลังงาน ค่าใช้จ่าย และสิ่งแวดล้อมที่สูญเสียไปในกระบวนการผลิต โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองสามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 3 รูปแบบ ได้แก่

- 1) ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงเพื่อทดแทนน้ำมันก๊าดโซลีน และน้ำมันดีเซล
- 2) ใช้ผสมกับน้ำมันเบนซินเรียกว่า แก๊สโซฮอล์ (Gasohol) หรือ ผสมน้ำมันดีเซลเรียกว่า ดีโซฮอล์ (Diesohol)
- 3) ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันให้กับเครื่องยนต์ เพื่อทดแทนสารเมทิลเทียทอะรีบิวทิลอีเธอร์ (MTBE) หรือสารเอทิลเทียทอะรีบิวทิลอีเธอร์ (ETBE)

การใช้เอทานอลบริสุทธิ์เป็นเชื้อเพลิงที่สะดวกในขณะนี้ ต้องมีการดัดแปลงเครื่องยนต์ คือ การใช้ในรูปของการผสมน้ำมัน โดยเอทานอลที่ผสมในสัดส่วน 5-30% โดยปริมาตร จะสามารถใช้ทดแทนสาร (MTBE) ที่เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนและซีเทนในน้ำมันได้ ดังตัวอย่างการใช้เอทานอลผสมน้ำมันเบนซินและดีเซล



รูป 2.1 ตัวอย่างการใช้แอลกอฮอล์ผสมน้ำมันดีเซลและเบนซิน

เอทานอลเป็นสาร Oxygenated ชนิดหนึ่งซึ่งสามารถใช้ทดแทนสาร (MTBE) ได้ ในปัจจุบัน น้ำมันเบนซินออกเทน 95 มีสาร (MTBE) ผสมอยู่ในปริมาณร้อยละ 5.5 - 11.0 โดยปริมาตร การนำเอทานอลผสมในน้ำมันเบนซิน จะทำให้คุณสมบัติของน้ำมันเบนซินเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมคือ ความดันไอสูงขึ้นประมาณ 1 psi หรือ 6.9 kpa เมื่อใช้เอทานอลร้อยละ 10 จะทำให้ค่าอุณหภูมิการกลั่นที่ปริมาตรร้อยละ 50 ลดลง คุณสมบัติในการรวมตัวกับน้ำลดต่ำลง และจะทำให้การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงสิ้นเปลืองมากขึ้น 1-2% เนื่องจากมีค่า Heating Value ต่ำ

2.4 การผลิตเอทานอล

เอทานอลสามารถผลิตได้ 2 วิธี คือ

1) การสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical Synthesis)

การสังเคราะห์โดยใช้วัตถุดิบซึ่งเป็นสารเคมี คือ เอทิลีน (Ethylene) ที่เป็นผลพลอยได้จากปิโตรเลียมเป็นวัตถุดิบ เอทานอลที่ผลิตโดยวิธีนี้จะเรียกว่า เอทานอลสังเคราะห์ ไม่สามารถนำมาบริโภคได้

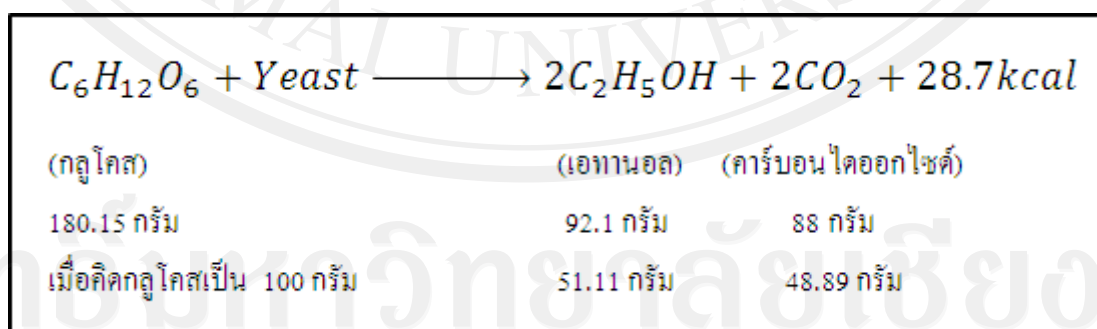
2) การหมักโดยจุลินทรีย์ (Yeast Fermentation)

เป็นกระบวนการทางชีวเคมี โดยใช้พืชผลหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลสูงเป็นวัตถุดิบ วิธีการผลิตนี้ได้รับความนิยมและมีวัตถุดิบที่สามารถเลือกใช้ได้หลากหลายชนิด

สำหรับการผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการหมัก จะอาศัยกระบวนการ การทำงานของเชื้อยีสต์ส่วนใหญ่ใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* หรือ (*S. cerevisiae*) ซึ่งเป็นยีสต์ที่ทนต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี *S. cerevisiae* ใดๆ ก็ตามการหมักเอทานอลที่มีอัตราการหมักสูงจะมีความร้อนเกิดขึ้นสูง

การหมักด้วยยีสต์ที่ใช้ทั่วไปมักเป็นสายพันธุ์ที่ชอบอุณหภูมิปานกลาง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประสิทธิภาพการหมักเอทานอลจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากเกิดการยับยั้งความเป็นพิษของเอทานอลที่มีมากขึ้นเมื่อความร้อนสูงขึ้น แนวทางการแก้ไขปัญหานี้ อย่างหนึ่ง คือ การใช้ยีสต์ทนอุณหภูมิสูง ซึ่งจะเจริญและหมักเอทานอลได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ และหมักเอทานอลได้ถึงแม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ประโยชน์ของการใช้ยีสต์อุณหภูมิสูงสำหรับการผลิตเอทานอลในอุตสาหกรรม คือ ลดการใช้ระบบหล่อเย็น (Cooling System) ทำให้ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ลดลง เป็นผลให้ต้นทุนการผลิตลดลง ซึ่งการหมักในอุณหภูมิที่สูงจะส่งเสริมให้ยีสต์มีอัตราการหมักสูงขึ้น ทำให้สามารถผลิตเอทานอลได้เร็วขึ้น ยิ่งกว่านั้น ยังช่วยลดปัญหาการปนเปื้อนของเชื้ออื่น ๆ ถึงแม้ว่ายีสต์สายพันธุ์ที่ทนอุณหภูมิสูงนั้นมีหลายชนิด แต่สายพันธุ์ที่มีการศึกษากันส่วนใหญ่นั้นอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถเจริญได้คือ 40 – 42 °c และสามารถหมักเอทานอลได้ดีที่ 33 - 35 °c (Shuler,1992; Kargi.,1992) โดยเชื้อยีสต์นั้น จะใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นอาหาร และเปลี่ยนน้ำตาลไปเป็นเอทานอล โดยผ่านกระบวนการ ที่เรียกว่า ไกลโคไลซิส (Glycolysis) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งตามทฤษฎีแล้วในกระบวนการหมักน้ำตาลกลูโคสของยีสต์นั้น น้ำตาลกลูโคส 100 กรัม จะถูกเปลี่ยนเป็นเอทานอล 51.11 กรัม และคาร์บอนไดออกไซด์ 48.89 กรัม นอกจากนั้นยังมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นอีกประมาณ 28.7 กิโลแคลอรี (Kcal) ดังแสดงในรูป 2.2 (สมคิด สมณักพงษ์, 2549)

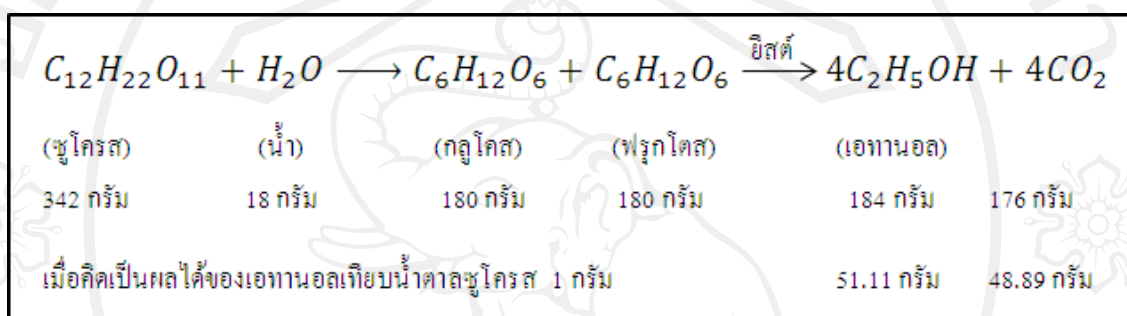
ดังนั้นวัตถุดิบที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ สามารถนำมาใช้ในการหมักเอทานอล โดยวัตถุดิบที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) วัตถุดิบประเภทน้ำตาล เช่น อ้อย และกากน้ำตาล 2) วัตถุดิบประเภทแป้ง เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด และอื่น ๆ 3) วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic Material) ที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เช่น ฟางข้าว กากอ้อย และซังข้าวโพด เป็นต้น



รูป 2.2 สมการการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลโดยการหมักของยีสต์

1) การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทน้ำตาล

วัตถุดิบประเภทน้ำตาลที่ใช้ในการผลิตเอทานอล ได้แก่ อ้อย กากน้ำตาล และบีทน้ำตาล ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลซูโครส น้ำตาลโมเลกุลคู่ที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิด คือ น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโตส ในการหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครสนั้น มีขั้นตอนดังนี้ คือ 1) น้ำตาลซูโครสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ได้น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสอย่างละโมเลกุล 2) น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสจะถูกยีสต์เปลี่ยนไปเป็นเอทานอลและคาร์บอนไดออกไซด์อย่างละ 4 โมเลกุล ดังรูป 2.3

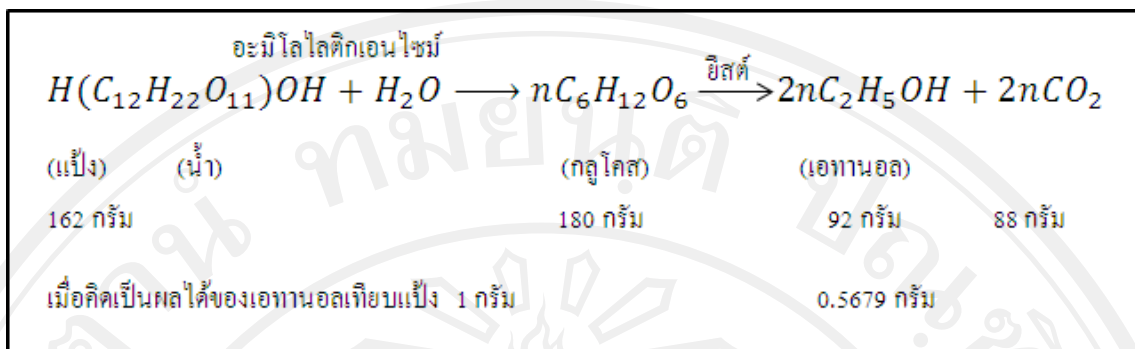


รูป 2.3 สมการการหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครส

2) การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้ง

วัตถุดิบประเภทแป้งที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด และเมล็ดข้าวฟ่าง เป็นต้น โดยแป้งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส เมื่อนำแป้งมาผ่านกระบวนการย่อย (Hydrolysis) ด้วยกรดหรือเอนไซม์จะได้น้ำตาลกลูโคสที่สามารถเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอลได้ โดยปัจจุบันจะนิยมย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า การย่อยแป้งด้วยเอนไซม์จะประกอบด้วยการย่อย 2 ครั้ง คือ

- การย่อยแป้งครั้งแรกหรือการทำให้แป้งเหลว (Liquefaction) ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (α -amylase) ย่อยแป้งที่อุณหภูมิ 90-100°C ใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า เดกซ์ทริน (Dextrin)
- การย่อยแป้งครั้งสุดท้ายหรือการเปลี่ยนแป้งไปเป็นน้ำตาล (Saccharification) ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลส (Glucoamylase) ย่อยเดกซ์ทรินที่อุณหภูมิ 55-65°C จะได้น้ำตาลกลูโคส ซึ่งยีสต์สามารถใช้หมักเป็นเอทานอลได้ โดยกระบวนการหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้งสามารถแสดงได้ดังรูป 2.4



รูป 2.4 สมการการหมักเอทานอลจากแป้ง

- 3) การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส
 วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ ฟางข้าว กากอ้อย ชังข้าวโพด และเศษไม้ เป็นต้น
 วัตถุดิบประเภทนี้มีองค์ประกอบที่เป็นเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และ ลิกนิน (Lignin) โดยเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส
 ต่อกันเป็นสายยาวและอยู่ในรูปผลึก มีลักษณะเป็นเส้นใยเหนียวและไม่ละลายน้ำ
 เฮมิแมนโนส (Mannose) อะราบินโนส (Arabinose) เป็นต้น ส่วนลิกนินเป็นพอลิเมอร์
 ของฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane) ซึ่งทนต่อการย่อยสลายอย่างมาก

2.4.1 ปัจจัยที่จำเป็นต่อการทำงานของยีสต์

ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวกับการเจริญของยีสต์ ซึ่งจำเป็นต่อการทำงานของยีสต์ใน
 กระบวนการหมัก เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการหมักสูงสุดและได้ปริมาณเอทานอลสูง
 จำเป็นต้องมีปัจจัยแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการทำงานของยีสต์ ในการหมักเอทานอล
 มีองค์ประกอบที่เป็นปัจจัยสำคัญคือ ธาตุอาหาร เกลือแร่ วิตามิน และองค์ประกอบด้าน
 สภาพแวดล้อมอื่นๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ค่า pH ความเข้มข้นของน้ำตาล ความเข้มข้นของ
 เอทานอล และสารบางอย่างที่มีผลต่อการเจริญของยีสต์ และมีผลต่อการหมักเอทานอล
 องค์ประกอบที่เป็นส่วนสำคัญ

- 1) ปริมาณคาร์บอนในการหมักยีสต์จะใช้คาร์บอนจาก
 - น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสใช้หมักได้ดีเท่ากัน โดยปกติแหล่งน้ำตาลที่หาได้ง่ายได้จาก กากน้ำตาล น้ำอ้อย ข้าวฟ่างหวาน และชูการ์บีท
 - เป็นน้ำตาลที่ได้จากการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ เช่น จากแป้งมันชนิดต่าง ๆ รวมทั้งมันสำปะหลัง ข้าวโพด และธัญพืชต่างๆ

- เป็นน้ำตาลที่ได้จากการย่อยซูโครสด้วยขบวนการจุลชีวเคมีหรือขบวนการเคมี เช่น จากกระดาศใยจากต้นพืชและขี้เลื่อย ซึ่งปัจจุบันยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนาให้มีต้นทุนต่ำลง

2) ปริมาณไนโตรเจนในการหมัก

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของยีสต์ และเป็นสับสเตรทสำหรับการสังเคราะห์โปรตีนทำให้จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น นับว่าเป็นส่วนสำคัญที่กระตุ้นการหมักหรือการผลิตแอลกอฮอล์ โดยในตัวยีสต์จะให้ปริมาณไนโตรเจนราว 10% ของน้ำหนักแห้ง โดยส่วนใหญ่ยีสต์จะสามารถใช้ในโตรเจนในรูป แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ในอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล นิยมใช้เกลือแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นแหล่งให้ธาตุไนโตรเจนและให้ซัลเฟอร์ไปพร้อมกัน

3) ปริมาณซัลเฟอร์ในการหมัก

ซัลเฟอร์เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญของเซลล์ ซึ่งยีสต์มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ 0.4% แหล่งซัลเฟอร์ที่ยีสต์ใช้ได้คือกรดแอมมोनียมไทโอไนต์และ เกลือซัลเฟอร์ในรูปแอมโมเนียมซัลเฟต ที่มีราคาถูกและเป็นแหล่งไนโตรเจนพร้อมกัน

4) ปริมาณธาตุอื่นๆ ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญและการทำงานของยีสต์ คือ

- แมกนีเซียม
- แคลเซียม
- วิตามินในการเจริญเติบโตได้แก่ ไบโอติน กรดแพนโทเทนิก ไทเทนิก ไทอะมีน กรดนิโคตินิก และไพริดอกซิน

องค์ประกอบด้านสภาพแวดล้อมอื่นๆ

5) ความเข้มข้นของน้ำตาล

ในสภาพการหมักที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลสูงจะช่วยลดการปนเปื้อนของเชื้ออื่นได้ดีแต่น้ำตาลสูงจะยับยั้งการเจริญและการหมักเอทานอล ซึ่งคุณลักษณะนี้เป็นลักษณะประจำสายพันธุ์ของยีสต์ เมื่อเทียบกับกับกรณีความเข้มข้นเอทานอล

จะมีผลยับยั้งการหมักรุนแรงกว่า แต่หากมีภาวะน้ำตาลเข้มข้นและเอทานอลสูง
จะยิ่งเสริมกันให้มีลักษณะยับยั้งการหมักรุนแรงขึ้น

6) ระดับอุณหภูมิ

ในการหมักยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* สามารถเจริญเติบโตได้ที่
อุณหภูมิปานกลางในช่วง 25 - 30°C และอุณหภูมิต่ำสุดที่จะทนได้คือ 5-10°C ใน
สภาพที่อาหารอุดมสมบูรณ์ ยีสต์จะทนอุณหภูมิสูงได้ดี และจะหยุดเจริญเมื่อ
อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C และเกินกว่า 40°C การควบคุมอุณหภูมิในการหมักเชิง
อุตสาหกรรมเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหมักที่ดีต้องมีระบบหล่อเย็น
เพื่อควบคุมอุณหภูมิในถังหมัก

7) ค่าพีเอช (pH)

ยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* สามารถเจริญได้ดี ในสภาพการหมัก
เอทานอลจากน้ำตาลที่ค่า pH อยู่ในช่วง 2.4 - 8.6 โคนมีค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง
4.5 และในสภาพเป็นกรดอ่อน ๆ นี้ สามารถช่วยควบคุมการปนเปื้อนแบคทีเรีย
ได้ดี การหมักเอทานอลจากซูโครสมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชมากกว่า
การใช้กลูโคส

8) ความเข้มข้นของเอทานอล

ในสภาพที่มีเอทานอลสูงการเจริญและการหมักของยีสต์ จะถูกยับยั้งเพราะ
เอทานอลมีผลต่อเอนไซม์ และสรีรวิทยาของเซลล์ เมื่อเปอร์เซ็นต์เอทานอล
มากกว่า 1 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้การเจริญลดลงและจะหยุดลงเมื่อมีเอทานอลได้
4.7-7.8% โดยน้ำหนัก ต่อจากนั้นจะเป็นการหมักเอทานอลจนได้เอทานอลที่มี
ความเข้มข้น 14% โดยน้ำหนัก การที่ยีสต์ไม่เจริญทำให้อัตราการหมักลดลงด้วย
เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เป็นยีสต์ที่ทนเอทานอลมากที่สุด และใน
สภาพที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเกี่ยวข้องกับสถานะฟอสโฟไลปิดที่เชื่อมหุ้มเซลล์

9) ปริมาณออกซิเจน

ในขั้นตอนการเตรียมหัวเชื้อ ออกซิเจนมีความสำคัญมาก เนื่องจากยีสต์มีการ
เจริญสูงในสภาพที่มีออกซิเจนมาก แต่จะมีผลให้การหมักลดลง ออกซิเจน
ส่งเสริมการออกซิเดชันสมบูรณ์ และมีการสร้างคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ใน
ออกซิเจนยังเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่มี

ความสำคัญที่ทำให้ยีสต์ทนเอทานอลได้มากขึ้น ดังนั้นในสภาวะที่ขาดออกซิเจน ยีสต์ไม่สามารถสังเคราะห์กรดไขมันอิ่มตัวได้ จึงต้องมีการเติมกรดไขมันไม่อิ่มตัว เพื่อให้ยีสต์สามารถอยู่รอดได้ ยีสต์ใช้ออกซิเจนในการหายใจเพื่อการเจริญเติบโต ดังนั้น ในกระบวนการหมักอย่างต่อเนื่องควรมีการให้อากาศบ้างในระหว่างการหมัก เพื่อเพิ่มจำนวนทดแทนเซลล์ที่ตายลง และยังพบว่า การให้อากาศปริมาณเล็กน้อย ทำให้ได้การใช้กลูโคสมากขึ้น และช่วยให้ยีสต์มีความทนทานต่อเอทานอลได้ดี

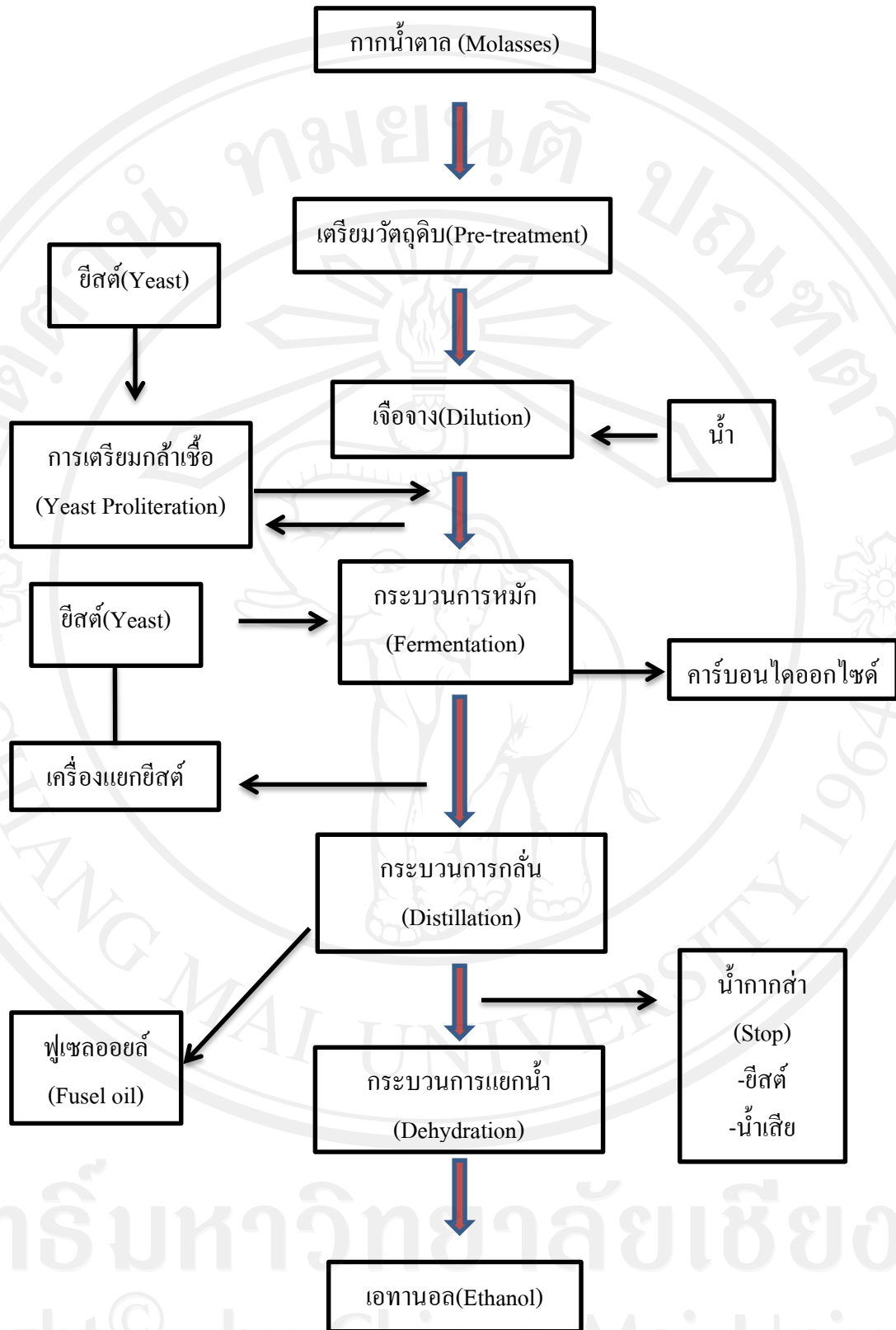
10) ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์มีผลยับยั้งการเติบโตของยีสต์ ทั้งในภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน ที่ความดันบรรยากาศปกติ หากมีคาร์บอนไดออกไซด์สูงจะเกิดการยับยั้งการเจริญและการหมักอย่างรุนแรง โดยคาร์บอนไดออกไซด์มีผลยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา คาร์บอกซิเลชัน (Carboxylation) และคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีผลต่อเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้การขนส่งสารเข้าออกเซลล์เปลี่ยนไป

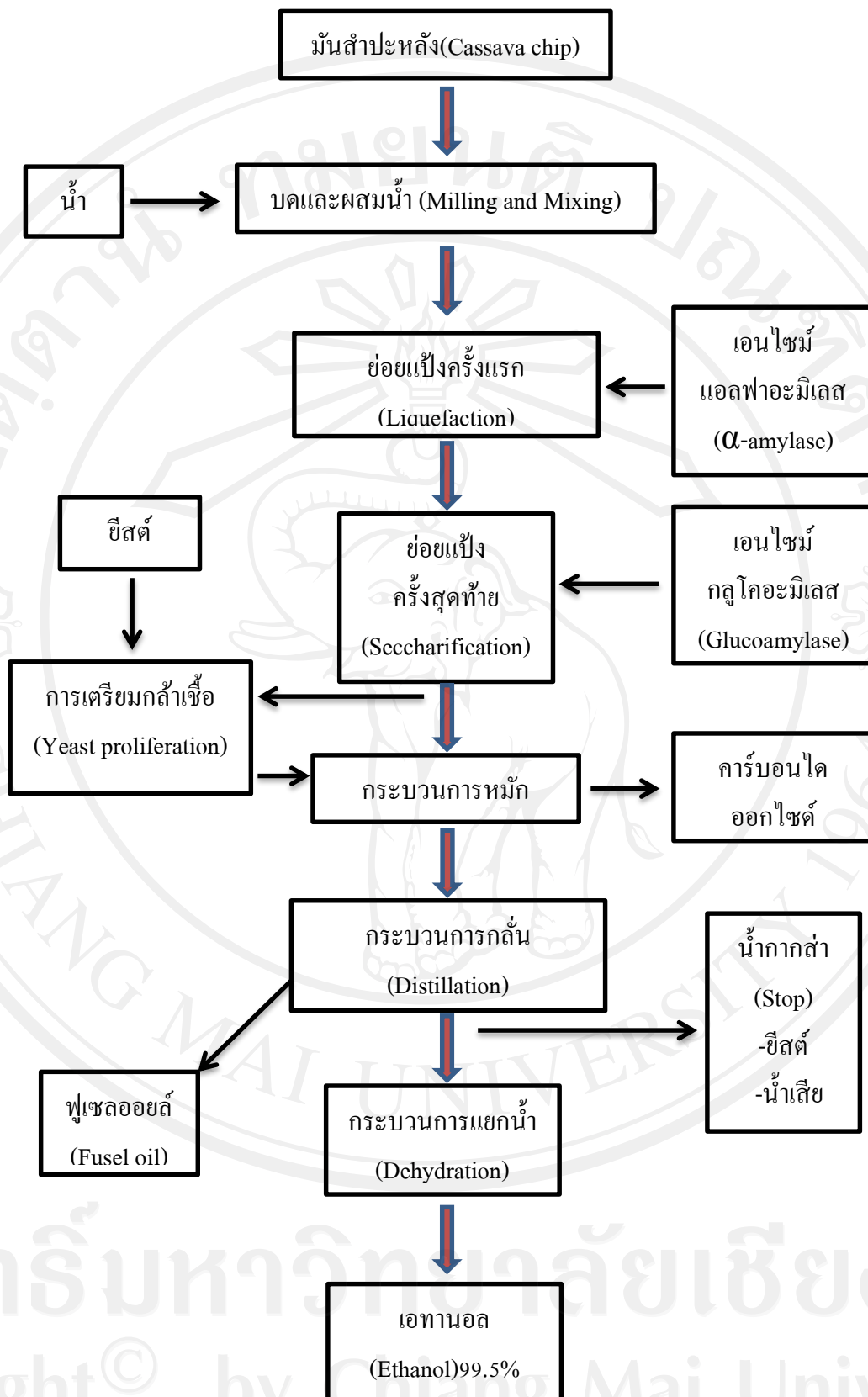
จากการศึกษาพบว่าปัจจัยสำคัญในกระบวนการหมักที่ส่งผลถึงความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้มีหลายปัจจัย เช่น ชนิดของข้าวที่นำมาผลิตเอทานอล วิธีการย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล (Hydrolysis) อุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก เวลาที่ใช้ในการหมัก pH

2.4.2 ขั้นตอนการผลิตเอทานอล

โดยทั่วไปจะประกอบด้วยการเตรียมวัตถุดิบ (Raw material preparation) การหมัก (Fermentation) การกลั่น (Distillation) และการกำจัดน้ำ (Dehydration) ซึ่งในกรณีที่วัตถุดิบเป็นแป้งหรือวัตถุดิบประเภทกลีโคไลโนเซลลูโลส จะต้องมีขั้นตอนการย่อยเพื่อเปลี่ยนเป็นน้ำตาลก่อนการหมัก (Hydrolysis) แผนภาพการผลิตเอทานอลโดยใช้กากน้ำตาลและมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบโดยกระบวนการโดยทั่วไปสำหรับการผลิตเอทานอลดังแผนผังรูป 2.5 และ 2.6



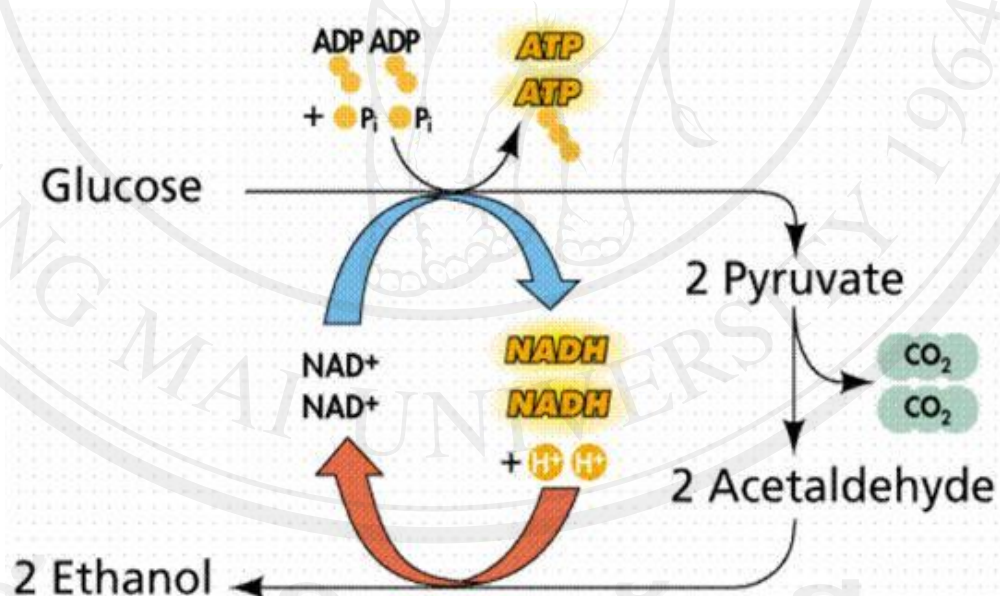
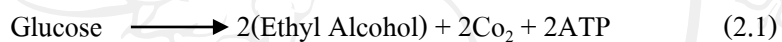
รูป 2.5 แสดงแผนผังการผลิตเอทานอลโดยใช้กากน้ำตาล



รูป 2.6 แสดงแผนผังการผลิตเอทานอลโดยใช้มันสำปะหลัง

2.5 เทคโนโลยีการหมัก

การหมัก (Fermentation) เป็นคำที่มีรากศัพท์มาจากภาษาละติน *Fervere* แปลว่า เดือด แต่ในที่นี้หมายถึง กระบวนการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน โดยที่จุลินทรีย์หลายชนิดยังคงสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ และสารอาหารที่เป็นแหล่งพลังงานจะถูกทำให้เปลี่ยนไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จุลินทรีย์ที่กล่าวถึงในที่นี้คือ ยีสต์ ซึ่งยีสต์สามารถที่จะย่อยสลายน้ำตาลในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนได้ ซึ่งผลผลิตที่ได้ออกมาจากการย่อยสลายนั้นมีหลายชนิด เช่น แอลกอฮอล์ กรดแลคติก เป็นต้น กระบวนการหมักเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสภาพที่ไม่มีอากาศ การเปลี่ยนแปลงน้ำตาลให้เป็นเอทานอลสามารถเกิดขึ้นได้หลายวิธีทาง (Partway) ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในกระบวนการหมัก โดยทั่วไปแล้วการหมัก มักจะใช้ยีสต์ในสกุล *Saccharomyces* sp. ซึ่งเอทานอลจะถูกสร้างขึ้นมาโดยอาศัย Embden Meyerhof Parnas Pathway โดยการเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลที่ได้จากการหมักยีสต์คือ เอทิลแอลกอฮอล์และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ



รูป 2.7 แผนภาพแสดง Alcoholic fermentation (www.emc.maricopa.edu)

ATP คือ พลังงานที่ได้จากกระบวนการหมัก

ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เป็นยีสต์ตัวหนึ่งที่ใช้กันมากในระบบอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับยีสต์ ในอุตสาหกรรมการหมักนั้น ยีสต์ตัวนี้จะย่อยน้ำตาลได้ดีจึงสามารถให้ปริมาณของแอลกอฮอล์ที่สูงและสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไป โดยทั่วไปแล้ว การผลิตเอทานอลจากน้ำตาล เช่นกลูโคส จำนวน 45 กิโลกรัม จะผลิตเอทานอลได้ 18-23 กิโลกรัม หรือ 23-28 ลิตร ในกรณีที่ใช้แป้งเป็นวัตถุดิบจะได้เอทานอล 40-45% ขึ้นอยู่กับน้ำหนักแห้งของคาร์โบไฮเดรตจากแป้ง 45 กิโลกรัม เกิดการย่อยสลายเพียง 90 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ถ้าวัตถุดิบที่ใช้เป็นเซลลูโลส จะขัดขวางการเข้าเกาะของเอนไซม์ การย่อยสลายเซลลูโลสจะได้ผลผลิตเป็นน้ำตาลที่สามารถหมักได้ประมาณ 50% และมีรายงานว่าผลผลิตที่ได้จะสูงถึง 90% ในสถานะของการทดลองที่แตกต่างกัน แต่ก็ยังไม่มีการนำเซลลูโลสไปใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม

ซึ่งการเตรียมวัตถุดิบก่อนการหมักจำเป็นต้องทำอย่างยั้งที่เราจะต้องทราบเสียก่อนว่าวัตถุดิบที่ต้องการใช้มีสารประกอบใดเป็นองค์ประกอบหลักของวัตถุดิบนั้น เช่น ถ้าใช้แป้งเป็นวัตถุดิบ เราจำเป็นต้องทราบก่อนว่าแป้งที่ใช้มีปริมาณอะไมโลส ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงซ้อนที่ประกอบด้วย กลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α (1, 4) glycosidic linkage และ อะไมโลเพกติน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส โดยเส้นตรงกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α (1, 6) glycosidic linkage นั้นมีมากหรือน้อยเพียงใด ซึ่งสารประกอบหลักทั้งสองมีผลต่อการนำไปใช้ประโยชน์ กล่าวคือ ถ้าแป้งมีปริมาณอะไมโลสในระดับสูง จะทำให้แป้งนั้นถูกย่อยสลายได้ง่าย ทั้งนี้เพราะโครงสร้างของอะไมโลสประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสที่ต่อกันเป็นลูกโซ่ยาวๆ แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าแป้งนั้นมีปริมาณอะไมโลเพกตินสูง การย่อยสลายแป้งดังกล่าวจะทำให้ยากขึ้น เพราะโครงสร้างของอะไมโลเพกติน นอกจากจะมีโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสต่อกันแล้ว ยังมีการแตกแขนงของลูกโซ่อีกด้วย อย่างไรก็ตามปริมาณของสารประกอบทั้งสองนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้งเป็นหลัก เช่น ในแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลสเท่ากับ 16-18% ในขณะที่แป้งข้าวโพดมีสูงกว่า 20% เป็นต้น ซึ่งเมื่อทราบถึงส่วนประกอบหลักของวัตถุดิบแล้ว ก็ต้องพิจารณาว่าส่วนประกอบดังกล่าวจุลินทรีย์จะสามารถนำมาใช้ได้โดยตรงหรือไม่ ถ้าจุลินทรีย์สามารถใช้ได้ช้าหรือค่อนข้างยาก จำเป็นต้องนำวัตถุดิบนั้นมาผ่านการแปรสภาพเสียก่อน ทั้งนี้เพื่อให้วัตถุดิบนั้นอยู่สภาพที่เหมาะสมที่จุลินทรีย์จะนำไปใช้ในการหมักต่อไป หลังจากทำการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาลแล้ว ยีสต์ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สำคัญต่อกระบวนการหมักโดยเฉพาะสายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* โดยจะทำการหมักให้เกิดแอลกอฮอล์จากสารละลายน้ำตาลที่มีสารอาหาร ซึ่งเป็นแหล่งน้ำตาลในของเหลวขึ้นอยู่กับธรรมชาติของเครื่องดื่มนั้น โดยต้องมีน้ำตาลอิสระสำหรับการหมักแอลกอฮอล์ซึ่งจำเป็นต่อเชื้อ *S. cerevisiae* นั้นเป็นข้อดีของเชื้อ *S. cerevisiae* ต่อกระบวนการหมัก เนื่องจากมีความสามารถในการเจริญได้อย่างรวดเร็ว มีความทนต่อแอลกอฮอล์ได้ในปริมาณสูง

ซึ่งตามทฤษฎีจะได้เอทิลแอลกอฮอล์ 51.1% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 48.9% โดยน้ำหนัก แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะได้ปริมาณแอลกอฮอล์ประมาณ 48% และมีสารอื่นปะปนมาด้วย นอกจากนี้ยังมีการใช้น้ำตาลประมาณ 1% ในการสร้างเซลล์ยีสต์ ซึ่งในการหมักยีสต์จะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในช่วง 2 - 3 วันแรก หลังจากนั้นการเจริญเติบโตจะช้าลงจนถึงช่วงที่ไม่เพิ่มจำนวนขึ้น แต่ในช่วงนี้ก็ยังมีการเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และปริมาณน้ำตาลก็จะลดลง นอกจากนั้นในกระบวนการหมักจะมีผลพลอยของการหมักเกิดขึ้น ได้แก่ กลีเซอรอล ประมาณ 2.5-3.0% เป็นผลพลอยได้ที่มีมากที่สุด เกิดจากการเพิ่มไฮโดรเจนให้กับสาร Dihydroxyacetone phosphate ซึ่งเป็นสารที่เป็นตัวกลางในกระบวนการหมัก และมีกรดอินทรีย์ประมาณ 0.02-0.05% กรดอินทรีย์ที่เป็นผลพลอยได้ ได้แก่ succinic acid, acetic acid, lactic acid, Scotch Whisky, palmitoleic acid, Aldehyde and Ketone มีประมาณ 0.01 - 0.04% ที่พบมากคือ Acetaldehyde

สภาพแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อราตลอดจนคุณภาพของผลการผลิต เช่น ชนิดของสารตั้งต้น ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ สารตั้งต้น หรือวัตถุดิบที่ใช้สำหรับการหมักบนอาหารแข็ง ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุเหลือทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ฯลฯ ว่าจะเจริญได้แตกต่างกันบนวัตถุดิบแต่ละชนิดสำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิก็มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา รวมทั้งมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์ โดยทั่วไปพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมต่อการสร้างไมซีเลียม (Mycelium) คือ 5.5 - 6.0 สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 28-30°C

ตาราง 2.4 ตัวอย่างยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* สายพันธุ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

สายพันธุ์	คุณสมบัติ
Prise de Mousse	ยีสต์จาก Institute Pasteur Champagne สายพันธุ์ Bayanus
Lalvin K1-V1116	แยกจาก Montpellier ฝรั่งเศส เหมาะสำหรับหมักไวน์แดง เป็น killer ทนแอลกอฮอล์ได้ถึง 14% หมักได้ดีที่อุณหภูมิสูง เริ่มการหมักได้เร็ว เหมาะในการเริ่มการหมักที่หยุดชะงัก
Lalvin-EC-1118 (Champagne)	สำหรับไวน์ขาวและแดงที่ต้องการหมักอย่างรวดเร็วและรสชาติกลางๆ เป็น Killer และหมักได้ระหว่าง 8-30 °C และแอลกอฮอล์ 16%
Red star Montrachet	หมักอย่างรวดเร็ว ทนต่อซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้กลิ่นรสที่ดีเป็นยีสต์สำหรับไวน์ทั่วไป
Enoferm BDX	ยีสต์จากฝรั่งเศสที่ใช้กันทั่วโลกสำหรับหมักไวน์แดงที่จะเก็บนาน ๆ ไม่ทน Killer หมักได้ระหว่าง 18-30 °C ถึง แอลกอฮอล์ 16%

ที่มา: Network of Thai Alcoholic Beverage Producers

2.6 การกลั่น (Distillation)

การกลั่นเป็นกรรมวิธีที่ใช้แยกองค์ประกอบตามจุดเดือดที่แตกต่างกัน เมื่อองค์ประกอบที่มีจุดเดือดต่ำได้รับปริมาณความร้อนที่เพียงพอจะระเหยออกไปเป็นปริมาณที่มากกว่าสารที่มีจุดเดือดสูง ทำให้สารละลายที่กลั่นได้มีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งการกลั่นทั้งสองแบบนี้ต้องใช้พลังงานความร้อนที่แปรสภาพมาจากฟืน น้ำมันเตา ถ่านหิน แสงอาทิตย์ เป็นต้น เพื่อให้ความร้อนในการระเหยสารละลายจนมีความเข้มข้นของสารละลายที่ 95 เปอร์เซ็นต์ การกลั่นสามารถแยกได้ตามลักษณะการเติมสารละลายเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ การกลั่นแบบเติมสารละลายครั้งเดียว (Batch Distillation) และการกลั่นแบบเติมสารละลายแบบต่อเนื่อง (Continuous Distillation)

2.6.1 การกลั่นแบบเติมสารละลายครั้งเดียว (Batch Distillation)

เป็นกระบวนการกลั่นขั้นพื้นฐานโดยมีอ่างหรือหม้อบรรจุของเหลวที่ต้องการกลั่นแยก โดยมีการให้ความร้อนแก่ของเหลวผ่านอ่างบรรจุ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งจะเกิดการระเหยตัวของสารที่มีผลสมอยู่และไหลผ่านไปยังชุดควบแน่น เพื่อทำให้เกิดการกลั่นแยกเป็นของเหลว โดยที่ปริมาณความเข้มข้นของของเหลวที่กลั่นได้จะลดลงตลอดเวลา เช่นเดียวกับความเข้มข้นของสารละลายในอ่าง หรือหม้อต้มก็จะลด

2.6.2 การกลั่นแบบเติมสารละลายแบบต่อเนื่อง (Continuous Distillation)

วิธีการนี้จะคล้ายกับวิธีแรก แต่จะมีการป้อนสารที่ทำการกลั่นเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง โดยอาจแบ่งแยกชนิดของสารที่ป้อนเข้าสู่ส่วนของกลั่นได้เป็น 3 ลักษณะ คือ เป็นของเหลวทั้งหมด เป็นของเหลวบางส่วน และเป็นไอทั้งหมด โดยมีหลักการคือ ในขณะที่ทำการกลั่นในระบบให้ความร้อนเมื่อมีการกลั่นตัวของไอ เกิดเป็นหยดของเหลว ขึ้นจะมีอยู่ส่วนหนึ่งของสารละลายที่ได้จากการกลั่น หรือ ไอที่ได้จากการระเหยหรืออาจเป็นทั้ง 2 ส่วนร่วมกัน ป้อนกลับมายังหม้อกลั่นเพื่อทำหน้าที่กลั่นใหม่อีกครั้ง ซึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ได้ ให้มีค่าสูงกว่าเดิม

พรประสิทธิ์ คงบุญ (2546) ได้ทำการศึกษาและพบว่า เมื่อทำการกลั่นสารละลายเอทานอล ความเข้มข้นตั้งแต่ 10 เปอร์เซ็นต์ ระบบที่ใช้เทคนิคการกลั่นแบบเติมสารอย่างต่อเนื่องมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบที่ใช้เทคนิคการกลั่นแบบเติมสารครั้งเดียว ซึ่งการกลั่นทั้งสองแบบนี้ต้องใช้พลังงานความร้อนที่แปรสภาพมาจากเชื้อเพลิง เช่น ฟืน น้ำมันเตา ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซ LPG และแสงอาทิตย์

จิตติ พานิชกุล (2548) ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการกลั่นเอทานอลและหาต้นทุนในการกลั่นเอทานอลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการกลั่นแบบต่อเนื่อง พบว่าควมมีการใช้ความร้อนเสริมชนิดอื่นแก่ระบบ เช่น แก๊สหุงต้ม ฟืน เพื่อหาพลังงานที่ทำให้การกลั่นมีต้นทุนที่ต่ำลง

จากการศึกษาเลือกใช้วิธีการกลั่นที่มีประสิทธิภาพสูง คือ การกลั่นแบบต่อเนื่องปัจจัยในการกลั่นที่ส่งผลต่อปริมาณเอทานอลที่กลั่นได้ มีหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิในการกลั่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย อัตราการกลั่น ปริมาณสารละลายในถังกลั่น ขนาดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน จารุวัฒน์ เจริญจิต และคณะ (2548) พบว่า อัตราการกลั่นแปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย และอุณหภูมิ โดยที่แปรผกผันกับความเข้มข้นของเอทานอลที่กลั่นได้ ยกเว้นระบบกลั่นมีปริมาณของสารละลายในถังกลั่นที่เหมาะสม พลวิชย์ จิตตะยโสธร (2551) ได้ศึกษาสมรรถนะการกลั่นเอทานอลของเครื่องกลั่นแบบปั๊มฟอง จากการทดสอบพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น ระดับสารละลายที่สูงขึ้นและขนาดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการกลั่นและความเข้มข้นที่กลั่นได้สูงขึ้นด้วย

2.6.3 กระบวนการแยกน้ำ (Dehydration)

การแยกน้ำออกจากเอทานอลจนได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% มีกระบวนการแยก 3 วิธี คือ

- 1) การดูดซับด้วย Molecular sieve (โครงการส่วนพระองค์ฯ ใช้วิธีการนี้) Molecular Sieve เป็นสารประเภทซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยทั่วไปจะเป็นชนิด 3A $[(K_2O, Na_2O), Al_2O_3, 2SiO_2 \cdot xH_2O]$ ซึ่งมีสมบัติพิเศษคือ สามารถดูดน้ำในสถานะที่เย็นและคายน้ำออกเมื่อได้รับความร้อน หลักการของเทคโนโลยีชนิดนี้ จะใช้สมบัติพิเศษนี้ในการกำจัดน้ำออกจากเอทานอล โดยยอมให้โมเลกุลน้ำผ่านเข้าไปในโมเลกุล ขณะที่โมเลกุลของเอทานอลที่มีขนาดใหญ่กว่าจะผ่านไปไม่ได้ กระบวนการแยกน้ำนี้เริ่มจากการใช้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ในช่วง 92 - 96% ผ่านไปยังปฏิกรณ์ที่บรรจุ Molecular Sieve ภายในเป็นชั้นๆ ประมาณ 2-3 ชั้นในแนวนาน โมเลกุลน้ำจะถูกจับไว้ในขณะที่เอทานอลบริสุทธิ์ถึง 99.8 - 99.9% จะผ่านลงมา และถูกนำไปยังถังเก็บหลังจากเสร็จสิ้นจากกระบวนการแยกน้ำ ชั้นของ Molecular Sieve แต่ละชั้นจะชุ่มไปด้วยน้ำ ซึ่งสามารถทำให้แห้งทำได้โดยผ่านไอน้ำ (Steam) เพื่อไล่น้ำที่ถูกดูดซับใน Molecular Sieve ออก ข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือเป็นเทคโนโลยีที่ง่าย ใช้ไอน้ำและพลังงานที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการกลั่น (วิธีที่ 2) นอกจากนี้ยังไม่ต้องใช้สารเคมี

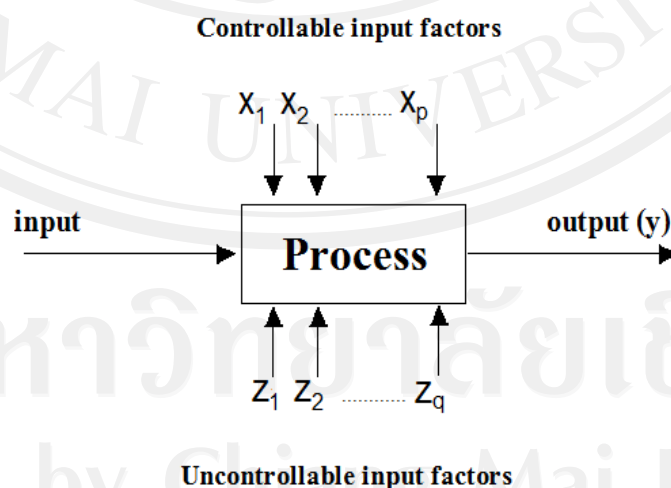
อื่นๆ มาช่วยในการแยกน้ำ การกำจัดของเสียจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง แต่เทคโนโลยีนี้มีข้อเสียตรงที่ อัตราการสึกกร่อน หรือเกิดการเน่า (Fouling of Media) ของ Molecular Sieve มีค่อนข้างสูง เมื่อมีการใช้งานมากกว่า 5 ปี จำเป็นต้องเปลี่ยนใหม่ทำให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตค่อนข้างสูง

- 2) การกลั่นอะซีโอโทรป (Azeotropic Distillation) ตามหลักทฤษฎี การกลั่นเอทานอลเพื่อให้มีความบริสุทธิ์สูง จะพบปัญหาของการแยกออกจากกันไม่ได้ของน้ำและเอทานอล จุดนี้เรียกว่า จุดอะซีโอโทรป การกลั่นเอทานอลจึงจำเป็นต้องเติมสารประกอบที่ 3 เพื่อให้ น้ำแยกออกจากเอทานอลได้ดียิ่งขึ้น สารประกอบนี้เรียกว่า Entrainer ได้แก่ ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) อีเทอร์ (Ether) หรือคีโตน (Ketone) วิธีนี้เป็นวิธีที่คิดค้นกันมานาน และเป็นที่นิยมใช้กันอย่างมากถึงแม้มีข้อเสียอยู่มากมาย ข้อเสียที่สำคัญมากที่สุด คือ ต้องใช้พลังงานมหาศาลในการกลั่นเพื่อให้ได้เอทานอลที่บริสุทธิ์มาก ๆ และ สารที่ใช้เป็น Entrainer เป็นสารมีพิษ บางตัวเป็นสารก่อโรคมะเร็งอีกด้วย
- 3) เทคโนโลยีแผ่นเยื่อบาง (Membrane Technology) เทคโนโลยีนี้ นอกจากจะเป็นเทคโนโลยีใหม่ล่าสุด ยังเป็นเทคโนโลยีที่ง่ายและใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในการแยกสารละลายผสมผ่านเยื่อแผ่น (Membrane) โดยใช้เทคนิคการซึมผ่าน (Permeation) ของน้ำผ่านแผ่นเยื่อบางในรูปของไอน้ำ ด้วยแรงดึงดูดจากภายนอกที่มีความดันต่ำกว่า (Evaporation) สารที่ผ่านเยื่อแผ่น เรียกว่า เพอมีเอท (Permeate) การแยกเกิดขึ้นได้เนื่องจากองค์ประกอบของสารในสารผสมมีความเป็นขั้ว (Hydrophilicity) ต่างกัน เช่น กรณีของน้ำในเอทานอล น้ำมีความเป็นขั้วที่สูงกว่าเอทานอล ความสามารถในการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นของน้ำจึงมีค่าสูงกว่า ขณะที่มีการซึมผ่านของน้ำความดันต่ำจากภายนอกจะช่วยดึงน้ำออกมาในรูปของไอน้ำ เมื่อทำการลดอุณหภูมิเพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวเป็นของเหลวเยื่อแผ่นที่นำมาใช้แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือชนิดที่เป็นพอลิเมอร์ และชนิดที่เป็นเซรามิกชนิดที่เป็นเยื่อแผ่นเซรามิกได้รับความสนใจมากกว่า เนื่องจากสามารถทนต่ออุณหภูมิ สารเคมี และจุลินทรีย์ได้ดี เยื่อแผ่นเซรามิกที่นิยมใช้ในการแยกน้ำออกจากเอทานอล คือ ซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ (NaA Zeolite) ซึ่งมีสมบัติของความมีขั้วสูงกว่าซีโอไลต์ชนิดอื่น ๆ ทำให้เป็นปัจจัยสำคัญในการคัดสรรโมเลกุลที่ถูกดูดซับ โดยอาศัยความเข้ากันได้ระหว่างความมีขั้วของโมเลกุลน้ำกับเยื่อแผ่น นอกจากนี้

ปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งในการเลือกใช้ซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ คือ ความแตกต่างของขนาดโมเลกุลที่ผ่านรูเปิดของซีโอไลต์เนื่องจาก ซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นผลึกที่มีรูพรุน และมีรูเปิดขนาดเล็ก (4 อังสตรอม) เหมาะสำหรับการคัดสรรโมเลกุลน้ำที่มีขนาดเล็ก การขึ้นรูปซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดของผลึกให้เป็นเยื่อเลือกผ่านโดยตรงนั้นไม่สามารถกระทำได้ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการ การสังเคราะห์จากสารตั้งต้นที่มีส่วนประกอบของซิลิกา และอลูมินามาทำปฏิกิริยากัน บนแผ่นของแฉังรองรับที่มีรูพรุน เช่น อลูมินา เป็นต้น เมื่อเกิดผลึก ซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอขึ้น ผลึกเหล่านั้นจะมารวมตัวกันเป็นแผ่นต่อเนื่อง (Polycrystalline) เกิดเป็นฟิล์มบางขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพและพลังงานที่ต้องใช้ระหว่างการกลั่นแบบอะซีโอโทรป และเทคโนโลยีแผ่นเยื่อบางแล้ว จะพบว่าเทคโนโลยีแผ่นเยื่อบางใช้พลังงานต่ำกว่า เนื่องจากความสามารถในการแยกโดยใช้แผ่นเยื่อบางขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างสารที่แยกกับเยื่อแผ่น ไม่ถูกจำกัดด้วยความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์

2.7 การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม

การออกแบบการทดลองถูกนำมาใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่าง ๆ มากมายโดยเริ่มจาก Sir Ronald A. Fisher ได้นำการออกแบบการทดลองทางสถิติมาใช้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่อตัวอย่างผลผลิตทางการเกษตรเป็นครั้งแรกในช่วงต้นทศวรรษที่ 20 ตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองในรูป 2.8



รูป 2.8 หุ่นจำลองทั่วไปของกระบวนการ (เอกรัฐ เมนะจินดา, 2541)

2.7.1 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design)

กระบวนการที่มีปัจจัย (Factor) หรือ Input (X_1, X_2, X_3, X_4) ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (Quality Characteristic) ของกระบวนการ ในการออกแบบการทดลองเราต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบ เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X ต่าง ๆ โดยที่พยายามใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จะทำให้เรามี ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ (Process Knowledge) เพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการต่อไป การออกแบบการทดลองวิธีนี้เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยยึดหลักว่าผลรวมปริมาณของปัจจัยทั้งหมดจะต้องเป็น 1.0 (หรือ 100%) เสมอ กล่าวคือ เมื่อปัจจัยหนึ่งมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ย่อมทำให้ปัจจัยอื่น ๆ มีสัดส่วนลดลง ซึ่งแตกต่างจากการออกแบบย่อยแบ่งได้เป็น 4 แบบ ดังนี้

- 1) การออกแบบ แบบเซฟเฟอซิมเพล็กซ์แลตทิซ (Scheffe' Simplex-Lattice) พิกัด (Coordinate) ซึ่งเป็นส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง โดยแต่ละตัวแปรสามารถคำนวณระดับ ได้ดังนี้

$$X_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad (2.2)$$

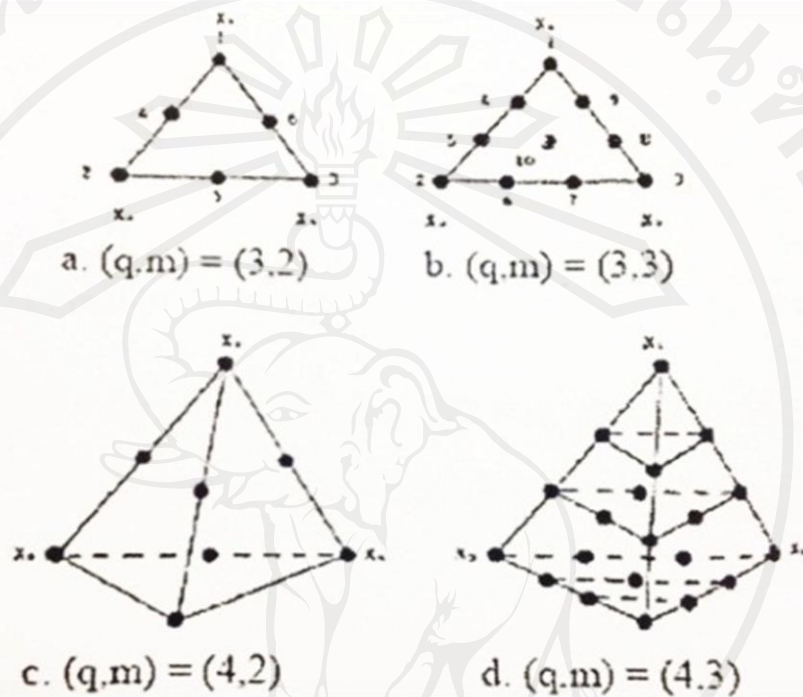
$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } i &= 1, 2, 3, \dots, q \\ m &= \text{เป็นสัดส่วนของแต่ละปัจจัยจาก } 0-1 \end{aligned}$$

สำหรับในกรณีที่มีจำนวนส่วนผสม (q) เท่ากับ 3 หรือมี 3 ปัจจัยเป็นตัวอย่างที่นิยมใช้แสดงให้เห็นถึงการออกแบบดังกล่าว หาก $m = 3$ พิกัดที่ได้เป็นส่วนประกอบของ x_1, x_2 และ x_3 จะเป็น 0, $1/3$ และ $2/3$ ตามลำดับ จำนวนของจุดในการทดลองทั้งหมดคำนวณจาก

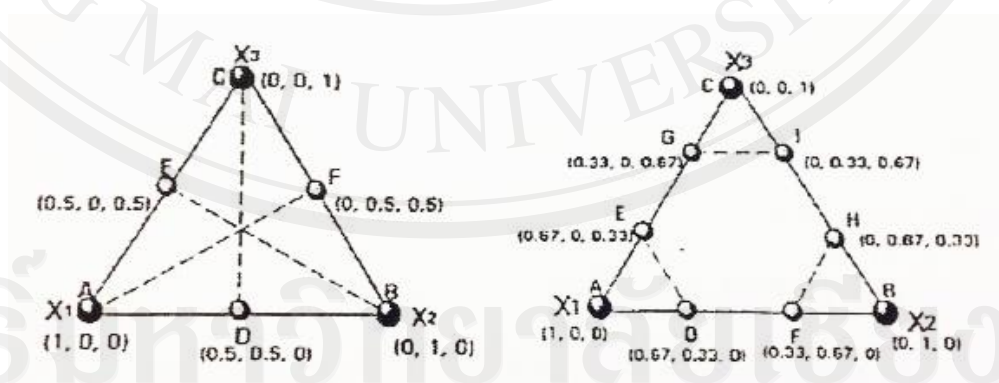
$$\begin{aligned} M &= \frac{(m + q - 1)!}{m! (q - 1)!} \\ &= \frac{q(q+1) \dots (q+m-1)}{(1)(2) \dots (m)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$M = \frac{3 \times 4 \times 5}{1 \times 2 \times 3} = 10$$

ซึ่งตัวอย่างของสิ่งทดลองที่มีจำนวน q และ m ต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.9 และ 2.10

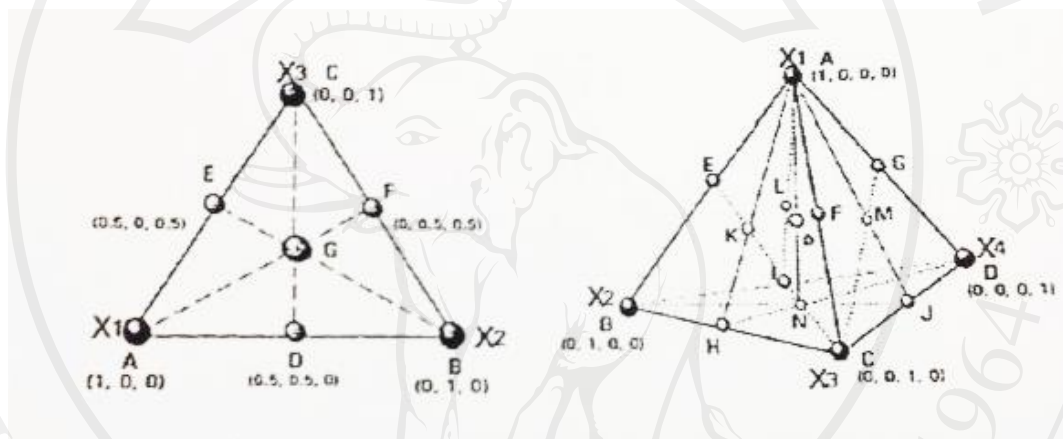


รูป 2.9 แสดงสิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเซฟเฟิมเพล็กซ์เล็กทิส (อิศรพงษ์, 2544)



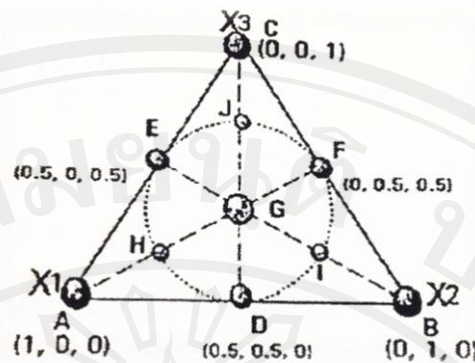
รูป 2.10 แสดงสิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเซฟเฟิมเพล็กซ์เล็กทิส ที่มี 3 ตัวแปร
แต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ และ 3 ระดับ (ไม่รวม 0)

- 2) การออกแบบ แบบเซฟเฟอซิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe' Simplex-Centroid) เป็นการออกแบบการทดลองที่มีสิ่งทดลองเท่ากับ $2^q - 1$ แต่ละปัจจัยมีสัดส่วนที่เท่ากันทุกปัจจัย สิ่งทดลองประกอบด้วยจุดที่เป็นส่วนผสมเดี่ยว (Pure Component) ต่างๆ หมายถึง สิ่งทดลองที่มีปัจจัยนั้นเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ หรือเท่ากับ 1.0 และ 0.5, 0.5, 0, ..., 0 เป็นส่วนผสมคู่ (Binary mixtures) และ $1/3, 1/3, 1/3, 0, \dots, 0$ สำหรับส่วนผสม 3 ชนิด และ $1/q, 1/q, 0, \dots, 0$ สำหรับส่วนผสมแบบ q-นารี (q-nary Mixtures; Centroid) และจุดกึ่งกลาง ($1/q, 1/q, \dots, 1/q$) ตัวอย่างของสิ่งทดลองต่าง ๆ สำหรับ 3 และ 4 ปัจจัย ดังแสดงดังรูป 2.11



รูป 2.11 แสดงสิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเซฟเฟอซิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe' Simplex-Centroid)

- 3) การออกแบบแบบซิมเพล็กซ์แอคเซียล (Simplex-Axial) เป็นการออกแบบการทดลองโดยเน้นจุดที่เป็นส่วนประกอบต่างๆ ของทุกปัจจัย สืบเนื่องจากจุด H, I และ J โดยจุดทั้ง 3 ดังกล่าว มาจากจุดกึ่งกลางของแต่ละส่วนย่อย จากภาพที่ 2.12 หากพิจารณาจุด A, D และ E จะมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมย่อย โดยมีจุด H เป็นจุดกึ่งกลางสามเหลี่ยมดังกล่าว ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับจุด I และ J



รูป 2.12 แสดงสิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบซิมเพล็กซ์เอกเซียล

- 4) การออกแบบแบบเอ็กซ์ทรีมเวอร์ทิส (Extrem Vertices) เป็นการออกแบบการทดลองแบบที่มีข้อจำกัดสัดส่วน (Design with Constraints on Proportion) หรือ แบบที่มีข้อจำกัด (Constrained Mixture Design) กล่าวคือ แผนการทดลองนี้ระดับในแต่ละปัจจัยไม่จำเป็นต้องเป็น 0 - 100% โดยอาจเป็น 30 - 40% (0.30-0.40) หรือ 15 - 25% (0.15 - 0.25) เป็นต้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากความจำเป็นโดยพื้นฐานในการทดลองบางอย่าง เช่น ในการผลิตอาหารบางชนิดที่มีส่วนผสมของกลูเตน (Gluten) โปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (Soy Protein Isolated) และน้ำ พบว่าต้องมีส่วนผสมของกลูเตนและโปรตีน สกัดจากถั่วเหลืองรวมกันอย่างน้อย 50% (ใช้ในปริมาณเท่ากันชนิดละ 25%) จึงสามารถจับเป็นก้อนเพื่อทำการรีดเป็นแผ่นได้ ดังนั้นส่วนผสมของกลูเตนและโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองที่ต่ำกว่า 50% จึงไม่เป็นที่สนใจ ขณะเดียวกันพบว่าหากมีน้ำต่ำกว่า 30% จะไม่สามารถปั่นให้เป็นก้อนได้ ดังนั้นจึงอาจกำหนดเฉพาะปริมาณขั้นต่ำของส่วนผสมแต่ละชนิดเป็น 25%, 25% และ 30% ตามลำดับ โดยให้สังเกตว่าปริมาณขั้นต่ำของส่วนผสมทั้งสามรวมกันต้องไม่เกินหรือเท่ากับ 100% อย่างเด็ดขาด ไม่เช่นนั้นจะมีเพียงส่วนผสมเดียวที่เป็นไปได้ หรือไม่มีส่วนผสมใดที่เป็นไปได้เลย

นอกจากนี้แม้ว่าการวางแผนจำเป็นต้องให้ปัจจัยที่การศึกษาในแต่ละสิ่งทดลองรวมกันเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่จำเป็นต้องนำทุกปัจจัยมาศึกษาพร้อมกัน ในส่วนผสมของแต่ละสิ่งทดลองอาจมีปัจจัยจำนวนมาก แต่สนใจศึกษาเพียง 3 ปัจจัย สามารถใช้แผนการทดลองแบบผสมได้ เช่น มีส่วนในผลิตภัณฑ์จำนวน 10 ปัจจัย คือ A - J แต่สนใจเฉพาะปัจจัย B, C และ D ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยดังกล่าว มีสัดส่วนคิดเป็น 18 เปอร์เซ็นต์ ของส่วนผสมทั้งหมด สามารถ

นำปัจจัย B, C และ D มากำหนดเป็นสิ่งทดลองต่าง ๆ ซึ่งมีส่วนผสมที่ต่างกัน และในส่วนผสมแต่ละสิ่ง ทดลองที่ได้ให้คิดเป็น 18 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอีก 82 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือกำหนดให้ใช้ในปริมาณ คงที่หรือเป็นปัจจัยคงที่ (Fixed Variables) ในทุกสิ่งทดลอง

2.7.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ๆ

อิทธิพลของปัจจัยในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เมื่อในการทดลองมีปัจจัยที่สนใจศึกษาหลายปัจจัย และอยากทราบว่าปัจจัยเหล่านั้นเป็นอิสระกันหรือ มีปฏิสัมพันธ์กัน การตอบปัญหานี้ต้องดูว่าคอมบินเชันของระดับของปัจจัยใดที่ให้ผลดี และที่ให้ผลไม่ดี ตัวอย่างเช่น การใช้ปุ๋ยในการทดลองทางการเกษตร เราต้องการหาคำตอบคือปุ๋ยชนิดใดที่จะให้ผลผลิตสูง เช่น ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโปแตสเซียม (K) ซึ่งเราไม่ทราบว่าควรใช้ปุ๋ยต่าง ๆ เหล่านี้อัตราส่วนเท่าใดจึงจะได้ผลผลิตดีในพื้นที่แปลงใหม่ สมมติให้องค์ประกอบของปุ๋ยเหล่านี้เป็นปัจจัย ทริทเมนต์ของการทดลองเกิดจากการคอมบินเชันระดับของปัจจัยเหล่านี้ แต่ดูเหมือนว่าปัจจัยเหล่านี้ไม่เป็นอิสระกัน

ตัวอย่างเช่น ถ้ามีปัจจัย 2 ปัจจัยคือ N และ P แต่ละปัจจัยใช้เพียง 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ แทนด้วย 0 และระดับสูง แทนด้วย 1 เราสามารถเขียนเป็นทริทเมนต์คอมบินเชันได้คือ N_0P_0 , N_0P_1 , N_1P_0 , N_1P_1 สมมติว่าถ้าทริทเมนต์ N_0P_0 ให้ผลผลิต 5 หน่วย และทริทเมนต์ N_1P_0 ให้ผลผลิต 20 หน่วย จะเห็นว่าได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 15 หน่วย เมื่อเพิ่มระดับของปัจจัย N โดยที่ปัจจัย P คงที่ในทำนองเดียวกัน สมมติว่า N_0P_1 ให้ผลผลิต 12 หน่วย จะเห็นว่าได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 7 หน่วย เมื่อเพิ่มระดับของปัจจัย P โดยที่ปัจจัย N คงที่ ทำให้สงสัยว่า ภายใต้ทริทเมนต์ N_1P_1 จะได้ผลอย่างไร ถ้า N และ P เป็นอิสระกัน จะได้ผลผลิต เท่ากับผลของ N_0P_0 + ผลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก N อย่างเดียว + ผลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก P อย่างเดียว = $5 + 15 + 7 = 27$ หน่วย

แต่ถ้าสมมติว่าจากการทดลองทริทเมนต์ N_1P_1 ได้ผลผลิตเท่ากับ 40 หน่วย ดังนั้นจะได้ว่า มีปฏิสัมพันธ์เท่ากับ 13 หน่วย จากการเพิ่มอิทธิพลของทั้ง 2 ปัจจัยนั้น เราอาจเรียกว่าปฏิสัมพันธ์เชิงบวก แต่ก็เป็นไปได้ที่อาจจะเกิดปฏิสัมพันธ์เชิงลบ เมื่อระดับสูงของปัจจัยหนึ่งทำให้อีกปัจจัยหนึ่งผลผลิตตกต่ำลง

การทดลองแฟกทอเรียลจะทำให้สามารถหาอิทธิพลของปัจจัยแต่ละตัว และความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยซึ่งการทดลองที่มีปัจจัยเดียวไม่สามารถหาได้ และนักวิจัยจะพบว่าการอธิบายผลของการทดลองแฟกทอเรียลทำได้ยาก เมื่อมีปัจจัยหลายตัวในการทดลองทำให้มีอิทธิพลของปัจจัย 3 ประเภท คือ

1. อิทธิพลอย่างง่าย (Simple Effect)
2. อิทธิพลหลัก (Main Effect)
3. อิทธิพลร่วมหรือปฏิสัมพันธ์ (Interaction Effect)

2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

เป็นวิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง ตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between – group variance) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within - group variance) ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม เป็นค่าที่เกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ ถ้าค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่าง ๆ แตกต่างกันมาก ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มก็จะมากตามไปด้วย สำหรับความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า คะแนนแต่ละตัวที่รวบรวมมานั้นภายในแต่ละกลุ่มมีการกระจายมากหรือน้อย ค่าที่คำนวณได้เรียกว่าความคลาดเคลื่อน