บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักคือ การผลิตเอทานอล, เอทานอลกับสิ่งแวดล้อม, การออกแบบการทดลอง และทฤษฎีต้นทุนที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตเอทานอล

เอทานอล (Ethanol) หรือที่เรียกกันว่าเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี จุดติดไฟ และระเหยง่าย มีสูตรทางเคมีคือ C_2H_5OH สามารถละลายได้ในน้ำและสารละลายอื่นๆ มีจุดเดือด 78.32 องศาเซลเซียส จุดเยือกแข็ง -243.1 องศาเซลเซียส เอทานอลสามารถผลิตได้สองวิธีคือ

1. การสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical Synthesis)
2. การหมักโดยจุลินทรีย์ (Yeast Fermentation)

สำหรับการผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการหมัก จะอาศัยกระบวนการทำงานของเชื้อยีสต์ โดยเชื้อยีสต์นั้นจะใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นอาหารและเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอล โดยผ่านกระบวนการที่เรียกว่า ไกลโคไลซิส (Glycolysis) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งตามทฤษฎีแล้วในกระบวนการหมักน้ำตาลกลูโคสของยีสต์นั้น น้ำตาลกลูโคส 100 กรัม จะถูกเปลี่ยนเป็นเอทานอล 51.11 กรัม และคาร์บอนไดออกไซด์ 48.89 กรัม นอกจากนั้นยังมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นอีก 28.7 กิโลแคลอรี่ (Kcal) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

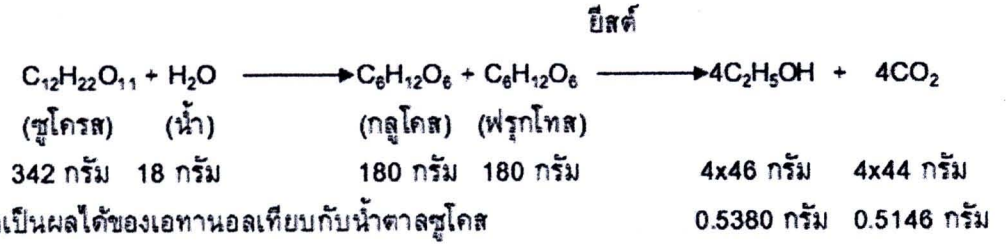
	$C_6H_{12}O_6$ + ยีสต์	⟶	$2C_2H_5OH$	+	$2CO_2$	+ 28.7 Kcal
	(กลูโคส)		(เอทานอล)		(คาร์บอนไดออกไซด์)	
	180 กรัม		2x46 กรัม		2x44 กรัม	
คิดเป็นร้อยละ	100 กรัม		51.11 กรัม		48.89 กรัม	

รูป 2.1 การเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลโดยการหมักของยีสต์ (สมคิด สมนักพงษ์, 2549)

ดังนั้นวัตถุดิบที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบ สามารถนำมาใช้ในการหมักเอทานอล โดยวัตถุดิบที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัตถุดิบประเภทน้ำตาล เช่น อ้อย และกากน้ำตาล วัตถุดิบประเภทแป้ง เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด และอื่นๆ ประเภทสุดท้ายคือ วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic material) ที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เช่น ฟางข้าว กากอ้อย และซังข้าวโพด เป็น

การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทน้ำตาล

วัตถุดิบประเภทน้ำตาลที่ใช้ในการผลิตเอทานอล ได้แก่ อ้อย กากน้ำตาล และบีทน้ำตาล ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลซูโครส ที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดียว 2 ชนิด คือ น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโทส ในการหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครสนั้นมีขั้นตอนดังนี้ คือ ขั้นแรกน้ำตาลซูโครสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ได้น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสอย่างละโมเลกุล จากนั้นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสจะถูกยีสต์เปลี่ยนไปเป็นเอทานอลและคาร์บอนไดออกไซด์อย่างละ 4 โมเลกุล



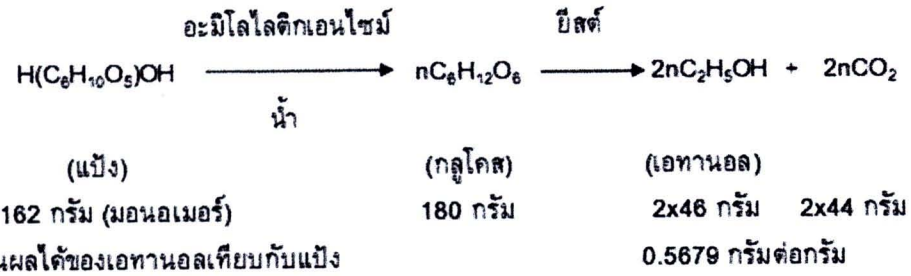
รูป 2.2 การหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครส (สมคิด สมนักพงษ์, 2549)

การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้ง

วัตถุดิบประเภทแป้งที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด และเมล็ดข้าวฟ่าง เป็นต้น โดยแป้งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส เมื่อนำแป้งมาผ่านกระบวนการย่อย (Hydrolysis) ด้วยกรดหรือเอนไซม์จะได้น้ำตาลกลูโคสที่สามารถเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอลได้ โดยปัจจุบันจะนิยมย่อยแป้งด้วยเอนไซม์มากกว่ากรด เนื่องจากสามารถควบคุมการย่อยได้ง่ายกว่าและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์มีความบริสุทธิ์มากกว่า 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 โดยกระบวนการหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้งสามารถแสดงได้ดังรูป 2.3



รูป 2.3 การหมักเอทานอลจากแป้ง (สมคิด สมนักพงษ์, 2549)

<u>การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส</u>

วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ ฟางข้าว กากอ้อย ซังข้าวโพด และเศษไม้ เป็นต้น วัตถุดิบประเภทนี้มีองค์ประกอบที่เป็นเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และ ลิกนิน (Lignin) โดยเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวและอยู่ในรูปผลึกมีลักษณะเป็นเส้นใยเหนียวและไม่ละลายน้ำ เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโทส (Pentose) หลายชนิด เช่น ไซโลส (Xylose) แมนโนส (Mannose) และอะราบิโนส (Arabinose) เป็นต้น ส่วนลิกนินเป็นพอลิเมอร์ของฟีนิลโพรเพน (Phenelypropane) ซึ่งทนต่อการย่อยสลายอย่างมาก

<u>ปัจจัยที่จำเป็นต่อการทำงานของยีสต์ในกระบวนการหมัก</u>

เพื่อให้มีประสิทธิภาพการหมักสูงสุดและได้ปริมาณเอทานอลสูง จำเป็นจะต้องมีปัจจัยแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการทำงานของยีสต์ ในการหมักเอทานอลมีองค์ประกอบที่เป็นปัจจัยสำคัญและองค์ประกอบด้านสภาพแวดล้อมอื่นๆ

องค์ประกอบส่วนที่เป็นส่วนสำคัญ

1. ปริมาณคาร์บอน ในการหมักยีสต์จะใช้คาร์บอนจาก
   - น้ำตาลกลูโคสและฟรักโตสใช้หมักได้ดีเท่ากัน โดยปกติแหล่งน้ำตาลที่หาได้ง่ายได้จากกากน้ำตาล น้ำอ้อย ข้าวฟ่างหวาน และชูการ์บีท

- เป็นน้ำตาลที่ได้จากการย่อยแป้งด้วยเอ็นไซม์ เช่น จากแป้งมันชนิดต่างๆ รวมทั้งมันสำปะหลัง ข้าวโพด และธัญพืชต่างๆ
- เป็นน้ำตาลที่ได้จากการย่อยซูโคสด้วยขบวนการจุลชีวเคมีหรือขบวนการเคมี เช่น จากกระดาษใยจากต้นพืชและขี้เลื่อย ซึ่งปัจจุบันยังอยู่ในขั้นพัฒนาให้มีต้นทุนต่ำลง

2. ปริมาณไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญของยีสต์ และเป็นสับสเตรทสำหรับการสังเคราะห์โปรตีนทำให้จำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น นับว่าเป็นส่วนสำคัญที่กระตุ้นการหมักหรือการผลิตแอลกอฮอล์ (เอทานอล) โดยในตัวของยีสต์จะมีปริมาณไนโตรเจน ราว 10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง โดยส่วนใหญ่ยีสต์จะสามารถใช้ไนโตรเจนในรูป แอมโมเนียมอิออนได้ ในอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลนิยมใช้เกลือแอมโมเนียมซัลเฟต ที่เป็นแหล่งให้ธาตุไนโตรเจนและให้ซัลเฟอร์ไปพร้อมกัน

3. ปริมาณซัลเฟอร์

ซัลเฟอร์เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเซลล์ ยีสต์มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ 0.4% แหล่งซัลเฟอร์ที่ยีสต์ใช้ได้ดีคือ

- กรดแอมมอโนเมทไทโอนีน
- เกลือซัลเฟต ในรูปแอมโมเนียมซัลเฟต ที่มีราคาถูกและเป็นแหล่งไนโตรเจนพร้อมกัน

4. ปริมาณธาตุอื่นๆ ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญและการทำงานของยีสต์ คือ

- แมกนิเซียม
- แคลซียม
- ไวตามินในการเจริญเติบโต ได้แก่ ไบโอติน กรดแพนโทแทนนิต ไทอะมีน กรดนิโคตินิค และไพริดอกซิน
-

องค์ประกอบด้านสภาพแวดล้อมอื่นๆ

1. ความเข้มข้นของน้ำตาล

ในสภาพการหมักที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลสูงจะช่วยลดการปนเปื้อนของเชื้ออื่นได้ดี แต่น้ำตาลสูงจะยับยั้งการเจริญและการหมักเอทานอล และคุณลักษณะนี้เป็นลักษณะประจำสายพันธุ์ของยีสต์ เมื่อเทียบกันกับกรณีความเข้มข้นเอทานอลจะมีผลยับยั้งการหมักรุนแรงกว่า แต่หากมีภาวะทั้งน้ำตาลเข้มข้นและเอทานอลสูงจะยิ่งเสริมกันให้มีลักษณะยับยั้งการหมักรุนแรงขึ้น

2. ระดับอุณหภูมิ

ในการหมักยีสต์สายพันธุ์ *S. cerevisiae* สามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิปานกลาง ในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิต่ำสุดที่จะทนได้คือ 5-10 องศาเซลเซียส ในสภาพที่อาหารอุดมสมบูรณ์ ยีสต์จะทนอุณหภูมิสูงได้ดี จะหยุดเจริญเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 0 และเกินกว่า 40 องศาเซลเซียส การควบคุมอุณหภูมิในการหมักเชิงอุตสาหกรรมเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหมักที่ดี และจำเป็นต้องมีระบบหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิในถังหมัก

3. ค่าพีเอช pH

ยีสต์สายพันธุ์ *S. cerevisiae* สามารถเจริญได้ดีในสภาพการหมักเอทานอลจากน้ำตาลที่ค่าพีเอช อยู่ในช่วง 2.4-8.6 โดนมีค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4.5 ซึ่งในสภาพเป็นกรดอ่อนนี้สามารถช่วยควบคุมการปนเปื้อนแบคทีเรียได้ดี การหมักเอทานอลจากซูโครสมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชมากกว่าการใช้กลูโคส

4. ความเข้มข้นของเอทานอล

ในสภาพที่มีเอทานอลสูงการเจริญและการหมักของยีสต์จะถูกยับยั้งเพราะเอทานอลมีผลต่อเอนไซม์ และสรีรวิทยาของเซลล์ เมื่อเปอร์เซ็นต์เอทานอลมากกว่า 1 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้การเจริญลดลงและจะหยุดลงเมื่อมีเอทานอล 4.7-7.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยต่อจากนั้นจะเป็นการหมักเอทานอลจนถึงเอทานอลความเข้มข้น 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การที่ยีสต์ไม่เจริญทำให้อัตราการหมักลดลงด้วย เชื้อ *S. cerevisiae* เป็นยีสต์ที่ทนเอทานอลมากที่สุด และในสภาพที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเกี่ยวข้องกับสภาวะฟอสโฟไลปิดที่เยื่อหุ้มเซลล์

5. ปริมาณออกซิเจน

ในขั้นตอนการเตรียมหัวเชื้อ ออกซิเจนมีความสำคัญมาก เนื่องจากยีสต์มีการเจริญสูงในสภาวะที่มีออกซิเจนมาก แต่จะมีผลให้การหมักลดลง ออกซิเจนส่งเสริมการออกซิเดชั่นสมบูรณ์และมีการสร้างคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ในออกซิเจนยังเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์กรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่มีความสำคัญที่ทำให้ยีสต์ทนเอทานอลได้มากขึ้น ดังนั้นในสภาวะที่ขาดออกซิเจน ยีสต์ไม่สามารถสังเคราะห์กรดไขมันอิ่มตัวได้ จึงต้องมีการเติมกรดไขมันไม่อิ่มตัวเพื่อให้ยีสต์สามารถอยู่รอดได้ ยีสต์ใช้ออกซิเจนในการหายใจเพื่อการเจริญเติบโต ดังนั้น ในกระบวนการหมักอย่างต่อเนื่องควรมีการให้อากาศบ้างในระหว่างการหมัก เพื่อเพิ่มจำนวนทดแทนเซลล์ที่ตายลง และยังพบว่าการให้อากาศปริมาณเล็กน้อย ทำให้การใช้กลูโคสได้มากขึ้น และช่วยให้ยีสต์มีความทนทานต่อเอทานอลได้ดี

6. ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์มีผลยับยั้งการเติบโตของยีสต์ ทั้งในภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน ที่ความดันบรรยากาศปกติ หากมีคาร์บอนไดออกไซด์สูงจะเกิดการยับยั้งการเจริญและการหมักอย่างรุนแรงโดยคาร์บอนไดออกไซด์มีผลยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชั่น และคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีผลต่อเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้การขนถ่ายสารเข้าออกเซลล์เปลี่ยนไป

จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยสำคัญในกระบวนการหมักที่ส่งผลถึงความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้มีหลายปัจจัย เช่น ชนิดของข้าวที่นำมาผลิตเอทานอล, วิธีการย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล (Hydrolysis), อุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก, เวลาที่ใช้ในการหมัก, pH

Suresh *et al.*(1998) ศึกษาผลิตเอทานอลจากข้าวโดย Hydrolysis ด้วย เชื้อรา *Aspergillus niger* จากนั้นหมักด้วยยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* สามารถเจริญเติบโตได้ที่อุณหภูมิ 25-37 °C ในสภาพที่อาหารอุดมสมบูรณ์ ยีสต์จะหยุดเจริญเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 0 และ เกินกว่า 40 °C พบว่าอุณหภูมิ 30 °C เวลาในการหมัก 5 วัน pH 5 ได้ปริมาณเอทานอลมากที่สุดคือ 1.82 g/ 100ml

Bandaru *et al.* (2006) หาสภาวะที่เหมาะสมในการหมักเอทานอลจากแป้งมันสำปะหลังเมื่อใช้แบคทีเรียสายพันธุ์ *Zymomonas mobilis* พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการหมักคือ 32.4 °C ที่ pH 4.93 ได้ความเข้มข้นของเอทานอล 55.3g/l

Cazetta *et al.*(2007) ทำการผลิตเอทานอลจากโมลาส โดยใช้แบคทีเรียสายพันธุ์ *Zymomonas mobilis* อุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ระหว่าง 25-37 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 30 °C มีความเข้มข้นของเอทานอล 55.8 g/L

Verma *et al.*(2000) ศึกษาการผลิตเอทานอลจากแป้งโดย Hydrolysis ด้วย เอนไซม์ *α-amylase* และ *glucoamylase* จากนั้นหมักด้วย ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* อุณหภูมิในการหมักอยู่ในช่วง 25-40 °C พบว่า ที่อุณหภูมิ 37 °C มีเอทานอลมากที่สุด คือ 22 g/l

Wang *et al.*(2007) ผลิตเอทานอลจากข้าวสาลี โดย Hydrolysis ด้วย เชื้อรา *Aspergillus awamori* และ *Aspergillus oryzae* จากนั้นหมักด้วยยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่ 30°C นาน 7 วัน พบว่าได้ เอทานอล 296.1 g/ ข้าวสาลี 1 kg

สัมพันธ์ ไชยเทพ และคณะ(2551) ได้ผลิตเอทานอลจากข้าวโดยใช้เอนไซม์อัลฟาอะไมเลสและ ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* หมักให้เกิดแอกอฮอลที่อุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อสิ้นสุดการหมัก พบว่าได้เอทานอลเข้มขัน 7 % โดยปริมาตร

ตาราง 2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเอทานอล

งานวิจัย	วัตถุดิบ	วิธีย่อยแป้ง (Hydrolysis)	การหมัก				ปริมาณเอทานอลที่ได้
			จุลินทรีย์	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (วัน)	pH	
Suresh (1998)	ข้าว	เชื้อรา (*Aspergillus niger*)	ยีสต์ *S. cerevisiae*	30	5	5	1.82 g/100 ml
Bandaru (2006)	มันสำปะหลัง	-	แบคทีเรีย *Zymomonas mobilis*	32.4	-	4.9	55.3 g/l
Cazetta (2007)	โมลาส	-	แบคทีเรีย *Zymomonas mobilis*	30	-	-	55.8 g/l
Verma (2000)	แป้ง	เอนไซม์ (*α-amylase*) และ *glucoamylase*	ยีสต์ *S. cerevisiae*	37	-	-	22 g/l
Wang (2007)	ข้าวสาลี	เชื้อรา *Aspergillus awamori*, *Aspergillus oryzae*	ยีสต์ *S. cerevisiae*	30	7	-	296.1 g/1 kg
สัมพันธ์ (2009)	ข้าว	เอนไซม์ (*α-amylase*)	ยีสต์ *S. cerevisiae*	20 -35	7	-	7 % โดยปริมาตร

Yoosin and Sorapipatana (2007) วิธีการ Hydrolysis มี 2 วิธี คือ Enzymatic hydrolysis และ Acid hydrolysis ปัจจุบันกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549) พบว่า วิธี Enzymatic hydrolysis นิยมมากกว่า เนื่องจากสามารถควบคุมการย่อยได้ง่ายและผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ชนิดของข้าวที่นำมาผลิตเอทานอล, วิธีการย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล (Hydrolysis) คือ เชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* , เอนไซม์ *α-amylase* และ *glucoamylase* อุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก อยู่ในช่วง 20-37 °C และเวลาที่ใช้ในการหมัก 7-14 วัน เนื่องจาก จากการศึกษาเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลจากข้าว และ Suresh *et al.*(1998) ผลิตเอทานอลจากข้าวพบว่า pH 5 ให้ความเข้มข้นของเอทานอลที่มากที่สุด จึงใช้ค่า pH 5 เหมือนกันทุกการทดลอง

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักน้ำตาลให้เปลี่ยนเป็นเอทานอล

จุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอทานอลได้มีหลายชนิดแต่ ยีสต์ (Yeast) สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* ถูกนำมาใช้ผลิตเอทานอลอย่างแพร่หลายเพราะสามารถเจริญเติบโตได้เร็วและมีปริมาณมาก (Suresh *et al.*, 1998) แต่ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์พบว่าแบคทีเรีย (Bacteria) สายพันธุ์ *Zymomonas mobilis* มีความสามารถในการผลิตเอทานอลได้ดีกว่ายีสต์ สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* เช่น ระยะเวลาในการหมักสั้นกว่า 3-4 เท่าเมื่อใช้น้ำตาลเท่ากัน ให้ผลเอทานอลใกล้เคียงกับทฤษฎี แต่ข้อดีกว่าของยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* คือยีสต์จะสามารถใช้น้ำตาลได้หลากหลายกว่าแบคทีเรีย แบคทีเรียใช้น้ำตาลได้เพียง 3 ชนิดคือ กลูโคส ฟรุกโตส ซูโครสเท่านั้น เพื่อให้แบคทีเรียสามารถใช้ประโยชน์ได้เยอะขึ้นจึงมีการแก้ไขทางพันธุ์วิศวกรรม (genetic engineering) ปรับปรุงสายพันธุ์ให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นคือ สามารถใช้น้ำตาลได้หลากหลาย, ทนต่อสภาวะที่ไม่เหมาะสมได้ดีขึ้น แม้ว่าได้แบคทีเรีย (Bacteria) สายพันธุ์ *Zymomonas mobilis* ที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นแต่การนำแบคทีเรียมาใช้ค่อนข้างที่จะยาก เพราะโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่คุ้นเคยกับยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* มากกว่า (Bai *et al.*, 2008) และพบว่านิยมนำยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* มาผลิตเอทานอลจากข้าว (Suresh *et al.*, 1998)

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตเอทานอล

การผลิตเอทานอลส่วนใหญ่ของโลกใช้วัตถุดิบหลัก 3 ประเภท คือ วัตถุดิบประเภทน้ำตาล เช่น อ้อย (Yoosin and Sorapipatana, 2007) กากน้ำตาล ข้าวฟ่างหวาน (Suresh *et al.*, 1998) วัตถุดิบประเภทแป้ง เช่น มันสำปะหลัง (Nguyen *et al.*, 2006) (Dai *et al.*, 2006) ข้าว ข้าวโพด (Pimentel and Patzek, 2005) และวัตถุดิบประเภทเส้นใย เช่น ชานอ้อย(Teixeira *et al.*, 1999) ซังข้าวโพด ฟางข้าว (Sankh and Arvindekar, 2004) รำข้าว (Baig and Brunner, 2005) เป็นต้น ปัจจุบันได้มีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทต่างๆ โดย

Yoosin and Sorapipatana (2007) ได้ศึกษาราคาในการผลิตเอทานอลสำหรับใช้ผลิตเป็นน้ำมันทดแทนในประเทศไทยโดยมีการศึกษาจากวัตถุดิบ 4 ชนิด ได้แก่ มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าว และกากน้ำตาล นำมาเปรียบเทียบกัน พบว่าราคาของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต (feedstock cost) เป็นอัตราส่วนที่มากที่สุดในการผลิตเอทานอลซึ่งราคาของวัตถุดิบที่นำมาผลิตเอทานอลมีค่าถึง 50% ของราคารวมการผลิต เอทานอลทั้งหมด ราคาเฉลี่ยของเอทานอลที่ออกจากโรงงานมีค่าอยู่ในช่วง 15.69-26.99 บาทต่อลิตร (ไม่รวมภาษี) ในปัจจุบันมีการแข่งขันในการผลิตเอทานอลสูงขึ้น ดังนั้นราคาต้นทุนของวัตถุดิบที่นำมาผลิตจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการเลือกวัตถุดิบที่นำมาผลิต

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการปลูกข้าวเป็นจำนวนมาก และข้าวเป็นวัตถุดิบที่สามารถผลิตเอทานอลได้ในปริมาณสูงถึง 375 ลิตรต่อตัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน , 2552) Suresh *et al.*(1998) ได้ทำการศึกษาโดยนำข้าวที่มีคุณภาพต่ำ (ข้าวหัก, สีไม่ได้มาตรฐาน) มาทำการผลิตเอทานอล พบว่า ได้ปริมาณเอทานอล 1.82 g/100 ml

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ตาราง 2.2 เปรียบเทียบปริมาณเอทานอลที่ได้จากวัตถุดิบแต่ละชนิด

ชนิดของวัตถุดิบ	ปริมาณที่ผลิตได้ต่อตัน (ลิตร)
กากน้ำตาล	280
มันสำปะหลัง	180
อ้อย	70
ข้าวฟ่าง	70
ข้าว	375
น้ำมะพร้าว	83

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2553

ตาราง 2.3 ราคาต้นทุนของวัตถุดิบชนิดต่างๆในหน่วยของ บาท/วัตถุดิบ 1 ตัน และบาท/เอทานอล 1 ลิตร

วัตถุดิบ	ราคาสูงสุด		ราคาต่ำสุด		ราคาเฉลี่ย	
	$B/ton_{feedback}$	B/l_{EtOH}	$B/ton_{feedback}$	B/l_{EtOH}	$B/ton_{feedback}$	B/l_{EtOH}
มันสำปะหลัง	1,370	8.56	920	5.75	1,096	6.85
ข้าวโพด	4,800	12.80	4,472	11.92	4,668	12.45
ข้าว	5,698	15.19	4,106	10.95	4,728	12.61
อ้อย	577	8.24	440	6.29	494	7.06
โมลาส	4,800	20	3000	12.5	3,800	15.83

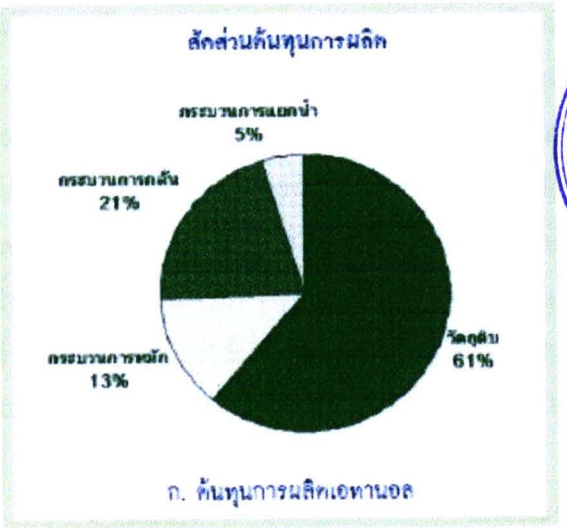
ที่มา : Yoosin and Sorapipatana, 2007

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 2 2 พ.ย. 2555
เลขทะเบียน 190739
เลขเรียกหนังสือ

ตาราง 2.4 โครงสร้างของราคาในแต่ละส่วนของการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ

วัตถุดิบ	มันสำปะหลัง			ข้าวโพด			ข้าว			อ้อย			โมลาส		
	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย
ราคาวัตถุดิบ (baht/l)	8.56	5.75	6.85	12.8	11.9	12.4	15.2	10.9	12.6	8.24	6.29	7.06	20	12.5	15.8
ราคาการผลิต (Baht/l)	2.58			2.34			2.45			0.78			1.44		
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Baht/l)	2.13			2.13			2.13			2.13			2.13		
ราคาเอทานอลต่อ 1 ลิตร (Baht)	13.2	10.5	11.5	17.3	16.4	16.9	19.7	15.5	17.2	11.2	9.2	9.9	23.5	16.1	19.4
ราคาเอทานอลต่อ 1 ลิตร เทียบเท่าน้ำมันเบนซิน (Baht)	20.8	16.4	18.2	27.1	25.7	26.6	31.1	24.4	26.9	17.5	14.4	15.6	37.0	25.2	30.4

ที่มา : Yoosin and Sorapipatana, 2007



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย

รูป 2.4 กราฟต้นทุนการผลิตเอทานอล (จิรวรรณ เตียรถ์สุวรรณ, 2551)

สำหรับพืชพลังงานชนิดอื่น จากการเสวนาทางวิชาการของสถาบันยุทธศาสตร์การค้า พบว่า ข้าวโพด แม้จะมีความเหมาะสมต่อการผลิตเป็นเอทานอล แต่ ไทยมีปริมาณผลผลิตปีละ 3.8 ล้านตัน (รวมกับที่นำเข้าจากต่างประเทศ 2 แสนตัน) ในขณะที่มีความต้องการใช้ภายในประเทศ 3.3 ล้านตัน เหลือสำหรับส่งออก 5 แสนตัน ซึ่งตัวเลขการส่งออกดังกล่าวเป็นเพียงระบบการจัดการสต็อกเท่านั้น จึงถือว่าอุตสาหกรรมข้าวโพดของไทยอยู่ในภาวะสมดุล ไม่ควรนำมาผลิตเอทานอล ส่วนข้าวฟ่างหวาน แม้จะมีความเหมาะสมสำหรับผลิตเอทานอล แต่ยังมีจำนวนน้อย ไม่คุ้มสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบของโรงงานผลิตเอทานอลที่มีอยู่ในปัจจุบัน

อย่างไรก็ตาม เพียงนำเอากากน้ำตาล อ้อย และมันสำปะหลังทั้งหมด ที่โดยปกติถูกนำไปแปรรูปเพื่อส่งออก มาผลิตเป็นเอทานอล ก็จะได้เอทานอลประมาณ 6,300 ล้านลิตร หรือประมาณ 87.53% ของการใช้น้ำมันเบนซินภายในประเทศ จึงเป็นปริมาณที่เพียงพอสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนภายในประเทศอย่างแน่นอน แต่ในอนาคตมิอาจทราบได้ว่า ราคาจะสูงขึ้น และผลผลิตมีเพียงพอต่อความต้องการหรือไม่ ดังนั้นจึงสนใจทำการศึกษาพืชพลังงานชนิดอื่นที่มีผลผลิตมากในประเทศไทย ได้แก่ ข้าว ซึ่งเป็นพืชเกษตรกรรมที่มีการปลูกมากในประเทศไทย

เมื่อนำพืชมาผลิตเป็นเอทานอลมากขึ้น อาจทำให้พืชอาหารชนิดอื่น เช่น ข้าวโพด ข้าว เป็นต้น ซึ่งผลผลิตอาจออกสู่ตลาดน้อย เพราะเกษตรกรจะหันไปปลูกพืชพลังงานมากขึ้น อาจส่งผลให้ราคาสินค้าเกษตรปรับตัวสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีธุรกิจเกี่ยวเนื่องที่อาจได้รับผลกระทบตามมา เช่น โรงสีข้าว อาหารสัตว์ รวมถึงเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์ เป็นต้น ดังนั้น จึงต้องวางแผนรองรับให้ดี เพื่อไม่ให้กระทบกับผู้บริโภคขั้นสุดท้าย คือประชาชนอย่างเรา

เมื่อมีการศึกษาที่มาของข้าว สามารถจำแนกตามลักษณะของข้าวและแหล่งปลูกได้ คือ ข้าวเหนียว (Glutinous rice) และข้าวเจ้า (Nonglutinous rice) โดยข้าวเหนียวจะนิยมปลูกกันมากในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนข้าวเจ้า จะนิยมปลูกกันมากในภาคกลาง และกระจายกันทั่วๆไป (อภินันท์ กาวิโล, 2545) และมีการศึกษาถึงองค์ประกอบที่มีอยู่ในข้าวทั้งสองชนิด พบว่า ข้าวเจ้าและข้าวเหนียว มีองค์ประกอบภายในคล้ายกันต่างกันที่ลักษณะทางเคมีของแป้งที่เกิดขึ้นภายในเมล็ดข้าวนั้น ซึ่งแบ่งได้ 2 ประเภท คือ amylase และ amylopectin ซึ่งในข้าวเหนียวจะมี amylase ต่ำกว่าข้าวเจ้าคือมีเพียง 1-8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งขึ้นกับสายพันธุ์ จากลักษณะความแตกต่างของ amylose ที่มีในข้าวแต่ละชนิด ทำให้เห็นข้อแตกต่างของข้าวทั้งสองประเภท คือ

ปริมาณ %amylose	ชนิดข้าว	ลักษณะข้าว
1-2	ข้าวเหนียว	เหนียวมาก
3-9	ข้าวเจ้า amylose ต่ำมาก	เหนียวนุ่ม
10-20	ข้าวเจ้า amylose ต่ำ	เหนียวนุ่ม
21-25	ข้าวเจ้า amylose ปานกลาง	นุ่ม ค่อนข้างเหนียว
26-33	ข้าวเจ้า amylose สูง	ร่วนแข็ง

ที่มา : อภินันท์ กาวิโล, 2545

เมื่อมีการนำข้าวทั้งสองประเภทไปบริโภคในรูปแบบต่างๆและหากจำแนกโดยมีการวิเคราะห์จากปริมาณของ amylose สามารถจำแนกได้ดังนี้

ปริมาณ %amylose	ประเภท	การใช้ประโยชน์
2%	ข้าวเหนียว	แปรรูปผลิตภัณฑ์ รสหวานต่างๆ
12-19%	ข้าว amylose ต่ำ	อาหารเด็ก ขนมปัง
20-25%	ข้าว amylose ปานกลาง	ขนมเด็ก
มากกว่า 25%	ข้าว amylose สูง	ก๋วยเตี๋ยว ผลิตภัณฑ์เส้นต่างๆ

ที่มา : อภินันท์ กาวิโล, 2545

โดยทั่วๆไป ข้าวเหนียวจะเป็นข้าวที่มีปริมาณของน้ำตาลอิสระภายในเนื้อมากกว่าข้าวเจ้า และนิยมนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตแอลกอฮอล์ เนื่องจากคุณสมบัติที่มีดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น

ดังนั้นจึงทำการศึกษาข้าวเหนียวหลากหลายพันธุ์พบว่าข้าวเหนียวสันป่าตอง ให้ผลผลิตสูงและปลูกได้ตลอดทั้งปี ราคาประมาณ 1,300 บาทต่อ 45 kg และข้าวเหนียวดำ/ดอย ปลูกได้เฉพาะฤดูนาปี ทนแล้ง ราคา 1,500 บาทต่อ 45 kg จึงสนใจในการนำข้าวทั้งสองชนิดนี้มาผลิตเอทานอล เนื่องจากเป็นข้าวพื้นเมืองที่ปลูกมากในบริเวณภาคเหนือตอนบน

การกลั่น (Distillation)

การกลั่นเป็นกรรมวิธีที่ใช้แยกองค์ประกอบตามจุดเดือดที่แตกต่างกัน เมื่อองค์ประกอบที่มีจุดเดือดต่ำได้รับปริมาณความร้อนที่เพียงพอจะระเหยออกไปเป็นปริมาณที่มากกว่าสารที่มีจุดเดือดสูง ทำให้สารละลายที่กลั่นได้มีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งการกลั่นทั้งสองแบบนั้นต้องใช้พลังงานความร้อนที่แปรสภาพมาจากฟืน น้ำมันเตา ถ่านหิน แสงอาทิตย์ เป็นต้น เพื่อให้ความร้อนในการระเหยสารละลายจนมีความเข้มข้นของสารละลายที่ 95 เปอร์เซ็นต์การกลั่นสามารถแยกได้ตามลักษณะการเติมสารละลายเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ การกลั่นแบบเติมสารละลายครั้งเดียว (Batch Distrillation) และการกลั่นแบบเติมสารละลายแบบต่อเนื่อง (Continuous Distrillation)

1. การกลั่นแบบเติมสารละลายครั้งเดียว (Batch Distillation)

เป็นกระบวนการกลั่นขั้นพื้นฐานโดยมีอ่างหรือหม้อบรรจุของเหลวที่ต้องการกลั่นแยก โดยมีการให้ความร้อนแก่ของเหลวผ่านอ่างบรรจุ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิ เพิ่มสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งจะเกิดการระเหยตัวของสารที่มีผสมอยู่และไหลผ่านไปยังชุดควบแน่น เพื่อทำให้เกิดการกลั่นแยกเป็นของเหลว โดยที่ปริมาณความเข้มข้นของของเหลวที่กลั่นได้จะลดลงตลอดเวลา เช่นเดียวกับความเข้มข้นของสารละลายในอ่าง หรือหม้อต้มก็จะลดลงเช่นกัน

2. การกลั่นแบบเติมสารละลายแบบต่อเนื่อง (Continuous Distiallation)

วิธีการนี้จะคล้ายกับวิธีแรกแต่จะมีการป้อนสารที่ทำการกลั่นเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง โดยอาจแบ่งแยก ชนิดของสารที่ป้อนเข้าสู่ส่วนของการกลั่นได้เป็น 3 ลักษณะ คือ เป็นของเหลวทั้งหมด เป็นของเหลวบางส่วน และเป็นไอทั้งหมด โดยมีหลักการคือ ในขณะที่ทำการกลั่นในระบบให้ความร้อนเมื่อมีการกลั่นตัวของไอเกิดเป็นหยดของเหลวขึ้น จะมีอยู่ส่วนหนึ่งของสารละลายที่ได้จากการกลั่น หรือ ไอที่ได้จากการระเหยหรืออาจเป็นทั้ง 2 ส่วนร่วมกัน ป้อนกลับมายังหอกลั่นเพื่อทำหน้าที่กลั่นใหม่อีกครั้ง ซึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ได้ ให้มีค่าสูงกว่าเดิม

พรประสิทธิ์ คงบุญ(2546) พบว่า เมื่อทำการกลั่นสารละลายเอทานอลความเข้มข้นตั้งแต่ 10 เปอร์เซ็นต์ ระบบที่ใช้เทคนิคการกลั่นแบบเติมสารอย่างต่อเนื่องมีสมรรถนะสูงกว่าระบบที่ใช้เทคนิคการกลั่นแบบเติมสารครั้งเดียว ซึ่งการกลั่นทั้งสองแบบนั้นต้องใช้พลังงานความร้อนที่แปรสภาพมาจากเชื้อเพลิง เช่น ฟืน น้ำมันเตา ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซ LPG (พณิชย์ จิตตะยโศธร, 2551) และแสงอาทิตย์ (จารุวัฒน์ เจริญจิต และคณะ, 2548) ด้วยเหตุนี้ จิตติ พานิชกุล (2548) ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการกลั่นเอทานอลและหาต้นทุนในการกลั่นเอทานอลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้เทคนิคการกลั่นแบบต่อเนื่อง พบว่าควรมีการใช้ความร้อนเสริมชนิดอื่นแก่ระบบ เช่น แก๊ส หุงต้ม ฟืน เพื่อหาพลังงานที่ทำให้การกลั่นมีต้นทุนที่ต่ำลง จากการศึกษาเลือกใช้วิธีการกลั่นที่มีประสิทธิภาพสูงคือการกลั่นแบบต่อเนื่อง

ปัจจัยในการกลั่นที่ส่งผลต่อปริมาณเอทานอลที่กลั่นได้ มีหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิในการกลั่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย อัตราการกลั่น ปริมาณสารละลายในถังกลั่น ขนาดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน จารุวัฒน์ เจริญจิต และคณะ (2548) พบว่า อัตราการกลั่นแปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย และอุณหภูมิ โดยที่แปรผกผันกับความเข้มข้นของเอทานอลที่กลั่นได้ ยกเว้นระบบกลั่นมีปริมาณของสารละลายในถังกลั่นที่เหมาะสม พณิชย์ จิตตะยโศธร (2551) ศึกษาสมรรถนะการกลั่นเอทานอลของเครื่องกลั่นแบบปั๊มฟอง จากการทดสอบพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายตั้งต้นที่เพิ่มขึ้น ระดับสารละลายที่สูงขึ้นและขนาดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการกลั่นและความเข้มข้นที่กลั่นได้สูงขึ้นด้วย

<u>กระบวนการแยกน้ำ (Dehydration)</u>

การแยกน้ำออกจากเอทานอลจนได้เอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.5 เปอร์เซนต์ ปัจจุบันมีกระบวนการแยก 3 วิธี คือ

1. การดูดซับด้วย Molecular sieve (โครงการส่วนพระองค์ฯ จะใช้วิธีการนี้)
2. การกลั่นอะซีโอโทรป (Azeotropic distillation)
3. เทคโนโลยีแผ่นเยื่อบาง (Membrane technology)

1. การดูดซับด้วย Molecular sieve

Molecular sieve เป็นสารประเภทซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น โดยทั่วไปจะเป็นชนิด 3A [$(K_2O.Na_2O).Al_2O_3.\ 2SiO_2.xH_2O$] ซึ่งมีสมบัติพิเศษคือ สามารถดูดน้ำในสภาวะที่เย็นและคายน้ำออกเมื่อได้รับความร้อน หลักการของเทคโนโลยีชนิดนี้ จะใช้สมบัติพิเศษนี้ในการกำจัดน้ำออกจากเอทานอล โดยยอมให้โมเลกุลน้ำผ่านเข้าไปในโมเลกุล ขณะที่โมเลกุลของเอทานอลที่มีขนาดใหญ่

กว่าจะผ่านไปไม่ได้ กระบวนการแยกน้ำนี้ เริ่มจากการใช้เอทานอลที่มีความบริสุทธ์ในช่วง 92-96% ผ่านไปยังปฏิกรณ์ที่บรรจุ molecular sieve ภายในเป็นชั้นๆ ประมาณ 2-3 ชั้นในแนวขนาน โมเลกุลน้ำจะถูกจับไว้ ในขณะที่เอทานอลบริสุทธ์ถึง 99.8-99.9% จะผ่านลงมา และถูกนำไปยังถังเก็บ หลังจากเสร็จสิ้นจากกระบวนการแยกน้ำ ขั้นของ molecular sieve แต่ละชั้นจะชุ่มไปด้วยน้ำ ซึ่งสามารถทำให้แห้งทำได้โดยผ่านไอน้ำ (steam) เพื่อไล่น้ำที่ถูกดูดซับใน molecular sieve ออก ข้อดีของเทคโนโลยีนี้ คือ เป็นเทคโนโลยีที่ง่าย ใช้ไอน้ำและพลังงานที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการกลั่น (วิธีที่ 2) นอกจากนี้ยังไม่ต้องใช้สารเคมีอื่นๆ มาช่วยในการแยกน้ำ การกำจัดของเสียจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึง แต่เทคโนโลยีนี้มีข้อเสียตรงที่ อัตราการสึกกร่อน หรือเกิดการเน่า (fouling of media) ของ Molecular sieve มีค่อนข้างสูง เมื่อมีการใช้งานมากกว่า 5 ปี จำเป็นต้องเปลี่ยนใหม่ ทำให้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตค่อนข้างสูง

2. การกลั่นอะซีโอโทรป (Azeotropic distillation)

ตามหลักทฤษฎี การกลั่นเอทานอลเพื่อให้มีความบริสุทธ์สูง จะพบปัญหาของการแยกออกจากกันไม่ได้ของน้ำและเอทานอล จุดนี้เรียกว่า จุดอะซีโอโทรป การกลั่นเอทานอลจึงจำเป็นต้องเติมสารประกอบที่ 3 เพื่อทำให้น้ำแยกออกจากเอทานอลได้ดียิ่งขึ้น สารประกอบนี้เรียกว่า entrainer ได้แก่ ไซโคลเฮกเซน (cyclohexane), เบนซีน (benzene), โทลูอีน (toluene), อีเทอร์ (ether) หรือคีโตน (ketone) วิธีนี้เป็นวิธีที่คิดค้นกันมานานและเป็นที่นิยมใช้กันอย่างมาก ถึงแม้มีข้อเสียอยู่มากมาย ข้อเสียที่สำคัญมากที่สุดคือ ต้องใช้พลังงานมหาศาลในการกลั่นเพื่อให้ได้เอทานอลที่บริสุทธ์มากๆ และ สารที่ใช้เป็น entrainer เป็นสารมีพิษ บางตัวเป็นสารก่อโรคมะเร็งอีกด้วย

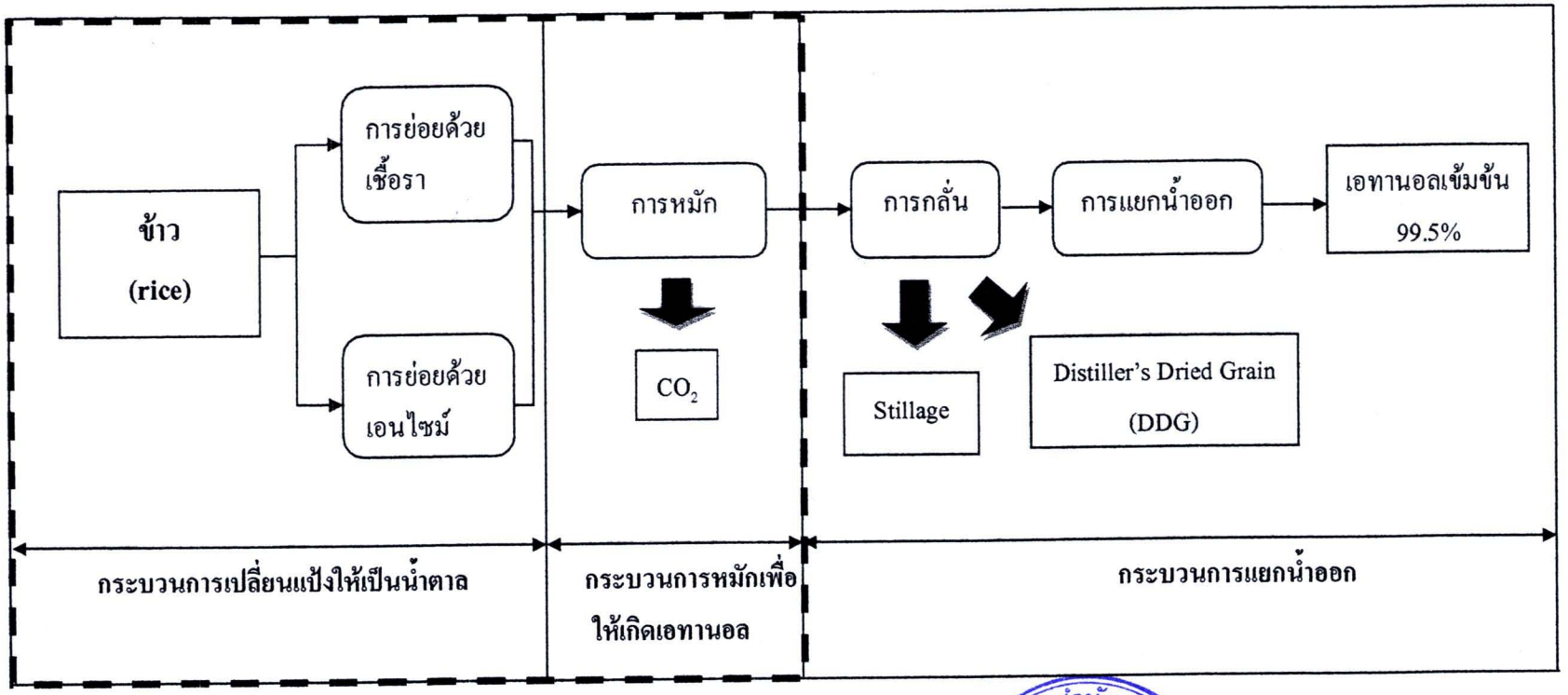
3. เทคโนโลยีแผ่นเยื่อบาง (Membrane technology)

เทคโนโลยีนี้ นอกจากจะเป็นเทคโนโลยีใหม่ล่าสุด ยังเป็นเทคโนโลยีที่ง่ายและใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ในการแยกสารละลายผสมผ่านเยื่อแผ่น (membrane) โดยใช้เทคนิคการซึมผ่าน (permeation) ของน้ำผ่านแผ่นเยื่อบางในรูปของไอน้ำ ด้วยแรงดึงดูดจากภายนอกที่มีความดันต่ำกว่า (evaporation) สารที่ผ่านเยื่อแผ่น เรียกว่า เพอมีเอท (permeate) การแยกเกิดขึ้นได้เนื่องจากองค์ประกอบของสารในสารผสมมีความเป็นขั้ว (hydrophilicity) ต่างกัน เช่นในกรณีของน้ำในเอทานอล น้ำมีความเป็นขั้วที่สูงกว่าเอทานอล ความสามารถในการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นของน้ำจึงมีค่าสูงกว่า ขณะที่มีการซึมผ่านของน้ำ ความดันต่ำจากภายนอกจะช่วยดึงน้ำออกมาในรูปของไอน้ำ เมื่อทำการลดอุณหภูมิเพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวเป็นของเหลว

เยื่อแผ่นที่นำมาใช้แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิดที่เป็นพอลิเมอร์และชนิดที่เป็นเซรามิก ชนิดที่เป็นเยื่อแผ่นเซรามิกได้รับความสนใจมากกว่า เนื่องจากสามารถทนต่ออุณหภูมิ สารเคมี และจุลินทรีย์ได้ดี เยื่อแผ่นเซรามิกที่นิยมใช้ในการแยกน้ำออกจากเอทานอลคือ ซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ (NaA zeolite) ซึ่งมีสมบัติของความมีขั้วสูงกว่าซีโอไลต์ชนิดอื่นๆ ทำให้เป็นปัจจัยสำคัญในการคัดสรรโมเลกุลที่ถูกดูดซับ โดยอาศัยความเข้ากันได้ของระหว่างความมีขั้วของโมเลกุลน้ำกับเยื่อแผ่น นอกจากนี้ ปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งในการเลือกใช้ซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ คือ ความแตกต่างของขนาดโมเลกุลที่ผ่านรูเปิดของซีโอไลต์ เนื่องจากซีโอไลต์มีโครงร่างเป็นผลึกที่มีรุพรุน และมีรูเปิดขนาดเล็ก (4 อังสตรอม) เหมาะสำหรับการคัดสรรโมเลกุลน้ำที่มีขนาดเล็ก

การขึ้นรูปซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดของผลึกให้เป็นเยื่อเลือกผ่านโดยตรงนั้นไม่สามารถกระทำได้ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการการสังเคราะห์จากสารตั้งต้นที่มีส่วนประกอบของซิลิกาและอลูมินา มาทำปฏิกิริยากันบนแผ่นของแข็งรองรับที่มีรูพรุน เช่น อลูมินา เป็นต้น เมื่อเกิดผลึกซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอขึ้น ผลึกเหล่านั้นจะมารวมตัวกันเป็นแผ่นต่อเนื่อง (polycrystalline) เกิดเป็นฟิล์มบางขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและพลังงานที่ต้องใช้ ระหว่างกับการกลั่นแบบอะซีโอโทรปและเทคโนโลยีแผ่นเยื่อบางแล้ว จะพบว่าเทคโนโลยีแผ่นเยื่อบางใช้พลังงานต่ำกว่าเนื่องจากความสามารถในการแยกโดยใช้แผ่นเยื่อบางขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างสารที่แยกกับเยื่อแผ่น ไม่ถูกจำกัดด้วยความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์



รูป 2.5 แผนภาพขั้นตอนการผลิตเอทานอล

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย

2.2 เอทานอลกับสิ่งแวดล้อม

จากสถานการณ์วิกฤติด้านราคาน้ำมันของโลกสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจของประเทศไทยเนื่องจากต้นทุนการขนส่งที่เพิ่มสูงขึ้น รัฐบาลจึงได้มีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทน ซึ่งหนึ่งในนโยบายของรัฐบาลคือ การผสมระหว่างน้ำมันเบนซินกับเอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% อย่างไรก็ตามการได้มาของเอทานอลบริสุทธิ์นี้จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เมื่อวิเคราะห์ระบบการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% แบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเกษตร ขั้นตอนการขนส่ง และขั้นตอนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% พบว่าเมื่อวิเคราะห์ค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตลอดวัฏจักรชีวิตของการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ พบว่า กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% มีการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด รองลงมาคือ กระบวนการเกษตรและกระบวนการขนส่ง ตามลำดับ (นุชนาถ ลอยจิ๋ว, 2551) เพื่อให้กระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด จึงทำการทดลองโดยหาสภาวะเหมาะสมที่คุ้มค่ากับพลังงาน ค่าใช่จ่าย และสิ่งแวดล้อมที่สูญเสียไปในกระบวนการผลิต โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

2.3 การออกแบบการทดลอง

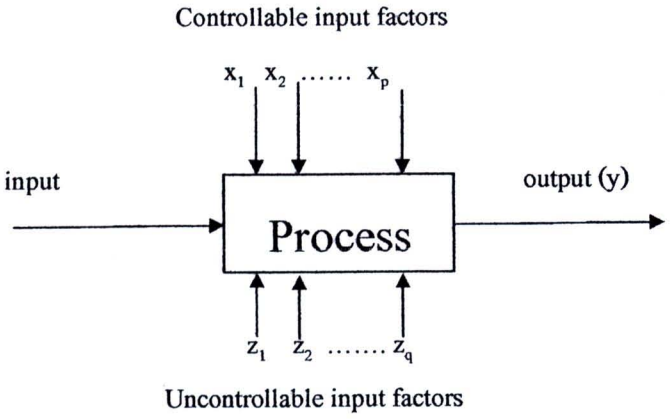
การออกแบบการทดลอง (Design of experiment) คือ การทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนปัจจัย (Factor) นำเข้าของกระบวนการ และสังเกตการการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยนำออก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า ผลตอบ (Response) ตามภาพที่ 2.5 โดยกำหนดให้ตัวแปร $x_1, x_2, \ldots\ldots x_p$ เป็นตัวแปรที่สามรถควบคุมได้ (Controllable Factor) ขณะที่ $z_1, z_2, \ldots\ldots z_q$ เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable Factor) และบางครั้งเรียกว่าปัจจัยรบกวน (Noise Factor) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองจึงเกี่ยวกับ

1.) การหาตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ y

2.) การหาวิธีการตั้งค่า x ที่จะทำให้ค่า y ได้ค่าตามที่ต้องการ

3.) การหาวิธีการตั้งค่า x เพื่อที่จะให้เกิดความแปรปรวนในค่า y น้อยที่สุด

4.) การหาวิธีการตั้งค่า x เพื่อที่จะให้ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ z มีค่าต่ำสุด



รูป 2.6 หุ่นจำลองทั่วไปของกระบวนการ (เอกรัฐ เมนะจินดา, 2541)

จากวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ดังกล่าวจึงต้องมีการกำหนดแนวทางการทดลองที่เหมาะสม ซึ่งสามารถเรียงลำดับขั้นตอนที่สมควรตามลำดับขั้นตอนได้ คือ

1. ทำความเข้าใจปัญหา

ต้องมีความเข้าใจต่อสภาพปัญหาและแนวคิดการทดลองอีกทั้งต้องมีความเข้าใจต่อคำตอบที่จะได้จากปัญหาเหล่านั้นซึ่งอาจจำเป็นต้องอาศัยการทำงานเป็นหมู่คณะ

2. การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต

เนื่องจากการทดลองต้องมีการคัดเลือกปัจจัยที่จะต้องนำมาทดลอง ซึ่งควรที่จะต้องมีการกำหนดขอบเขตของปัจจัยดังกล่าวและยังต้องกำหนด ระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นจากการทดลอง และยิ่งกว่านั้นต้องควบคุมระดับปัจจัยเหล่านี้ไว้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการตรวจสอบถึงความสำคัญของปัจจัย และเลือกระดับปัจจัยให้เหมาะสมต่อสภาพการทดลองที่จะมีเกิดขึ้น

3. เลือกตัวแปรผลตอบ

เป็นไปได้ว่าในการทดลองแต่ละครั้ง อาจจะมีผลตอบหลายตัว ดังนั้นจึงควรต้องกำหนดขั้นต้นให้ได้ว่าอะไรคือตัวแปรผลตอบและจะวัดค่าตัวแปรนี้ได้อย่างไรก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

4. เลือกการออกแบบการทดลอง

โดยพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลิเคต) โดยการเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลและการตัดสินใจ ว่าจะใช้วิธีการบล็อก (Blocking) หรือการแรนดอมไมเซชั่น (Ramdomization) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่

5. ทำการทดลอง

เมื่อมีการวางแผนที่ดีแล้วการทดลองจะดำเนินการไปตามขั้นตอนที่ได้วางไว้อย่างเป็นลำดับขั้นตอน อย่างระมัดระวัง

6. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้นั้น จะเป็นการสรุปว่าผลลัพธ์ที่เกิดจากการทดลองเป็นไปอย่างไร โดยที่ข้อสรุปที่ได้จะต้องมีเหตุผลที่จะสนับสนุนการทดลองนั้นๆอย่างถูกต้องทุกประการ

7. สรุปผลและเสนอแนะ

โดยนำแนวทางการนำเสนอและอาจต้องมีการทดลองเพื่อที่จะยืนยันผลที่ได้ (Confirmation Testing) เพื่อความมั่นใจในข้อสรุปอีกครั้ง

การออกแบบการทดลองถูกนำมาใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมต่างๆมากมายโดยเริ่มจาก Sir Ronald A. Fisher ได้นำการออกแบบการทดลองทางสถิติมาใช้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่อตัวอย่างผลผลิตทางการเกษตรเป็นครั้งแรกในช่วงต้นทศวรรษที่ 20 ได้มีการเสนอวิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology : RSM) เป็นวิธีการทางสถิติและคณิตศาสตร์ที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการ และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ ซึ่งในระหว่างนี้การออกแบบการทดลอง เช่น การทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็ม, การทดลองเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล (Fractional Factorial Design), การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD), การออกแบบบ็อกซ์ - เบ็นเกน (Box-Behnken Design : BBD), ออโธโกนอลอาร์เรย์ (Orthogonal Arrays), Plackett-Burman Design และ Taguchi ฯลฯ ถูกออกแบบให้ใช้จำนวนการทดลองที่น้อยเพื่อหาความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย และมีการประยุกต์นำไปใช้เป็นที่แพร่หลาย

Bandaru *et al.* (2006) ศึกษาการผลิตเอทานอลจากแป้งมันสำปะหลังมีการนำเทคนิคด้านพื้นผิวผลตอบ มาใช้ในการออกแบบการทดลอง พบว่าปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ, pH, เวลาที่ใช้ในการหมัก ได้ใช้วิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^3 และออกแบบส่วนประสมกลางและ 6 axial point พบว่าอุณหภูมิ 32.4 °C pH 4.93 และ เวลา 17.24 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการหมักเอทานอล

Cazetta *et al.* (2007) ศึกษาผลของอุณหภูมิและความเข้มข้นของน้ำตาลในการผลิตเอทานอลโดยใช้กากน้ำตาล ศึกษาปัจจัย 4 คือ ความเข้มข้นของน้ำตาล, อุณหภูมิ, การกวน, เวลาในการหมัก โดยใช้ วิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^4, การออกแบบส่วนประสมกลาง 2^3, การออกแบบส่วนประสมกลาง 2^2 และการออกแบบ star พบว่า ความเข้มข้นของน้ำตาล 200 gl^{-1}, อุณหภูมิ 30 °C, การกวน, เวลาในการหมัก 48 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสม

Lee *et al.* (2010) ศึกษาการผลิตเอทานอลจากซังข้าวโพดใช้เทคนิคพื้นผิวผลตอบ ในการออกแบบการทดลองโดยปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ, กรด Oxalic, เวลาการทำปฏิกิริยา และได้ใช้วิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็ม 2^3 และ 6 axial points.

Wang *et al.* (2007) ศึกษาการผลิตเอทานอลจากข้าวสาลีมีการนำเทคนิคด้านพื้นผิวผลตอบ มาใช้ในการออกแบบการทดลองในกระบวนการหมัก พบว่าปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเข้มข้นของเอทานอล, ความเข้มข้นของ อะมิโน-ไนโตรเจนอิสระ และ อุณหภูมิ และได้ใช้วิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3^3 และ การออกแบบส่วนประสมกลาง พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่ 150 gl^{-1} ความเข้มข้นของ อะมิโน-ไนโตรเจนอิสระ 310 mgl^{-1} และ อุณหภูมิ 72 ชั่วโมงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการหมักเอทานอล

Dragone *et al.* (2004) ผลิตเบียร์โดยใช้เทคนิคพื้นผิวผลตอบ พบว่าปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัยและได้ใช้วิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^3 และ 2 axial points พบว่ามีอัตราการผลิตเอทานอลมากสุด 0.694 g/lh

จากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมา พบว่างานวิจัยนี้จึงเลือกการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรีย 2^4 มาใช้ในการออกแบบการทดลอง เนื่องจากปัจจัยที่ศึกษามี 4 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของข้าว, วิธีย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล (Hydrolysis), อุณหภูมิในการหมักและ เวลาที่ใช้ในการหมัก ซึ่งการพิจารณาเลือกแผนการทดลองที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับลักษณะข้อมูล ปัจจัยที่ศึกษา ประสิทธิภาพและจำนวนครั้งการทดลอง

ตาราง 2.5 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง

งานวิจัย	ปัจจัย		เทคนิคการออกแบบการทดลอง	จำนวนครั้ง
	จำนวน	ชนิด		
Bandaru et al. (2006)	3	-Temperature -pH -Fermentation temperature	2^3 Factorial central composite experiment design with six axial points	20
Cazetta et al. (2007)	4	-Molasses -Temperature -Agitation rate -Time of cultivation	2^4 Factorial experimental design	16
	3	-Molasses -Temperature -Time of cultivation	2^3 Central composite design	
	2	-Molasses -Temperature	2^2 Central composite design and star design	11
Lee et al. (2010)	3	-Temperatue -Oxalic acid -Reaction time	2^3 Full factorial design with six axial points	17
Wang et al. (2007)	3	-Glucose -FAN -Temperature	3^3 Experiment design with two centerpoint	16
Dragone et al. (2004)	3	-Initial wort gravity -Fermentation Temperature -Nutrient supplementation	2^3 Full factorial design with two axial Points	10

ตาราง 2.5 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง (ต่อ)

งานวิจัย	ปัจจัย		เทคนิคการออกแบบการทดลอง	จำนวนครั้ง
	จำนวน	ชนิด		
Wang et al. (2008)	3	-Time -pH -Temperature	2^3 Central composite design	20
Kalil et al. (2000)	4	-residence time -temperature -Fraction of fresh medium -cell recycling concentration	Plackett-Burman design and factorial design to dertermine	20 43
Chen et al. (2005)	4	-GDL -peptide -IMO -Soybean concentration	Box-behnken design	28
Ozkal et al. (2005)	4	-Flow rate -Pressure -Temperature -Ethanol concentration	Box-behnken design	27
Lee et al. (2005)	3	-enzyme concentration -Temperature -time	Box-Willson design	19

2.3.1 คำศัพท์เกี่ยวกับการทดลอง

คำศัพท์ที่ควรรู้เกี่ยวกับการทดลอง คำนิยามความหมายคำศัพท์เกี่ยวกับการทดลองมีดังต่อไปนี้

1.) การทดลอง (Experiment) หมายถึงกระบวนการค้นคว้าหาความจริงแบบหนึ่งโดยจัดกระทำการอย่างใดอย่างหนึ่งกับตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ที่ศึกษาหรืออาจเรียกว่าตัวแปรทดลอง (Experimental Variable) เพื่อดูตัวแปรตามซึ่งเป็นผลที่จะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากผลของตัวแปรอิสระนั้น

2.) การออกแบบการทดลอง (Experiment Design) เป็นการออกแบบทั่วไปของการทดลอง ซึ่งเกี่ยวข้องกับจำนวนและการจัดการตัวแปรอิสระ รวมทั้งการสุ่มหรือการเลือกตัวอย่างและการกำหนดเงื่อนไขในการทดลองเพื่อควบคุมตัวแปรแทรกซ้อน หรือตัวแปรเกินมิให้มีผลต่อตัวแปรตาม การออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องดำเนินการได้ง่าย และให้คำตอบที่ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา

3.) ตัวแปร (Variable) หมายถึง ลักษณะของสิ่งที่สนใจศึกษา ซึ่งอาจเป็นคน พืช สัตว์หรือสิ่งของที่สามารถแปรเปลี่ยนค่าได้ตามเวลา การเปลี่ยยแปลงค่าของตัวแปรนั้น เรียกว่าระดับของตัวแปร เช่น เพศ แบ่งเป็นเพศชาย เพศหญิง ดังนั้นเพศเป็นตัวแปรที่มี 2 ระดับ

4.) ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) บางครั้งเรียกว่า ปัจจัย (Factor) หมายถึงตัวแปรที่เกิดขึ้นก่อน และเป็นตัวแปรเหตุที่ทำให้ผลหรือสิ่งที่เกี่ยวข้องเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะหรือแปรสภาพไป

5.) ตัวแปรตาม (Dependent Variable) หมายถึงตัวแปรที่เกิดขึ้นทีหลัง หรือต้องเปลี่ยนแปรสภาพหรือคุณลักษณะไปตามอิทธิพลของของตัวแปรอิสระ ตัวอย่างของตัวแปรอิสระระดับของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม เช่น การศึกษาผลของอาหาร 3 สูตร ต่อการเจริญเตบโตของไก่ ตัวแปรอิสระคือ อาหาร ระดับของตัวแปรอิสระมี 3 ระดับ (3 สูตร) และตัวแปรตาม คือ น้ำหนักไก่ที่เพิ่มขึ้น

6.) ตัวแปรแทรกซ้อนหรือตัวแปรเกิน (Extraneous Variable) หมายถึงตัวแปรที่ไม่ต้องการศึกษาในขณะนั้น ซึ่งตัวแปรเกินจะมีลักษณะเหมือนตัวแปรอิสระที่มีผลหรืออาจจะมีผลต่อตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา ทำให้การวัดค่าตัวแปรตามคลาดเคลื่อนไปได้ ดังนั้น ในการทดลองจึงต้องพยายามควบคุมหรือขจัดอิทธิพลของตัวแปรเกินที่มีผลต่อตัวแปรตามให้หมดไปหรือให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด

7.) ปัจจัย (Factor) หมายถึง ตัวแปรอิสระที่ต้องการศึกษาว่ามีผลกระทบกับตัวแปรตามหรือไม่ เช่น ในการศึกษาเกี่ยวกับอาหาร 3 สูตร ที่ใช้ในการเลี้ยงไก่ ปัจจัยที่ต้องการศึกษา คือ อาหาร (ตัวแปรอิสระ)

8.) ระดับของปัจจัย (Factor levels) หมายถึงชนิดย่อยๆ หรือประเภทต่างๆ ของปัจจัย บางครั้งเรียกว่า ทรีทเมนต์ (treatment) เช่น การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการใช้ปุ๋ย 2 ชนิด คือ ปุ๋ยคลอ

ไรด์ กับ ปุ๋ยซัลเฟตต่อการเจริญเติบโตของหอมแดง ปัจจัยที่ต้องการศึกษาคือ ปุ๋ย ส่วนระดับของปัจจัยหรือทรีทเมนต์ที่ต้องการศึกษาคือ ปุ๋ยคลอไรด์และปุ๋ยซัลเฟต

9.) ปัจจัยเดี่ยวและปัจจัยพหุ (Single factor and Multiple Factor) ปัจจัยเดี่ยวเป็นการศึกษาตัวแปรอิสระเพียงตัวแปรเดียวส่วนปัจจัยพหุเป็นการศึกษาตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว

10.) ทรีทเมนต์ (treatment) หมายถึงระดับต่างๆของปัจจัยหรือวิธีการต่างๆที่ใช้ปฏิบัติต่อหน่วยทดลอง แล้วหน่วยทดลองจะส่งผลตอบสนองออกมาเป็นข้อมูล เพื่อนำไปเปรียบเทียบอิทธิพลของทรีทเมนต์ตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยที่ทรีทเมนต์อาจมาจากปัจจัยเดี่ยวหรือหลายปัจจัยร่วมกัน (Treatment Combination) ก็ได้

11.) หน่วยทดลอง (Experiment Unit) หมายถึงหน่วยหรือกลุ่มของสิ่งทดลองที่ใช้ในการทดลองโดยได้รับอิทธิพลของทรีทเมนต์เดียวกันในการกระทำครั้งใดครั้งหนึ่ง โดยหน่วยทดลองอาจจะเป็นต้นไม้ 1 ต้น พืช 1 แปลง สัตว์ทดลอง 1 ตัว จะเป็น 1 หน่วยทดลอง

12.) หน่วยตัวอย่าง (Sampling Unit) หมายถึงส่วนหนึ่งของหน่วยทดลองหรือทั้งหน่วยของหน่วยทดลอง ซึ่งใช้วัดอิทธิพลของทรีทเมนต์ตามจุดประสงค์ของการทดลอง

13.) ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (Experiment error) ความคลาดเคลื่อนหรือความผันแปรของการทดลอง หมายถึงความแตกต่างระหว่างหน่วยทดลองที่ได้รับทรีทเมนต์เดียวกัน การที่หน่วยทดลองหลายๆหน่วยได้รับทรีทเมนต์เดียวกันแต่ให้ผลตอบสนองต่อทรีทเมนต์แตกต่างกันอาจเกิดได้จาก 2 สาเหตุ

13.1 ความผันแปรที่เกิดขึ้นภายในหน่วยทดลอง (Inherent Variability) เป็นความผันแปรที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของหน่วยทดลอง เช่น ในการทดลองเกี่ยวกับสัตว์อาจมีความแตกต่างที่เกิดจาก อายุ เพศ หรือน้ำหนักเริ่มต้นของหน่วยทดลองก่อนทำการทดลอง

13.2 ความผันแปรที่เกิดขึ้นภายนอกหน่วยทดลอง (Extraneous Variability) เป็นความผันแปรที่เกิดขึ้นในขณะทำการทดลอง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นจากความผิดพลาดของผู้ทดลอง โดยอาจเกิดจากการปฏิบัติที่ไม่สม่ำเสมอหรือไม่เหมือนกัน เช่น การให้อาหารหรือน้ำไม่เท่ากัน การใส่ปุ๋ยหรือปราบวัชพืชแตกต่างกัน หรืออาจเกิดจากการใช้เครื่องมือที่ไม่ได้มาตรฐาน การขาดความละเอียดรอบคอบในการบันทึกข้อมูล

14.) การทำซ้ำ (Replication) หมายถึงการทำซ้ำต่อหน่วยทดลองในการทดลองครั้งหนึ่งๆ นั่นคือจะมีหน่วยทดลองมากกว่า 1 หน่วย ที่ได้รับทรีทเมนต์เดียวกัน

15.) การบล็อก (Blocking) การบล็อกเป็นการรวมกลุ่มลักษณะที่คล้ายๆ กันของหน่วยทดลอง โดยให้หน่วยทดลองมีความคล้ายคลึงกันภายในบล็อก และมีความแตกต่างกันระหว่างบล็อก ทำให้สามารถลดความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

2.3.2 หลักการทางสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล

<u>การนิยามประชากร</u>

ในการตัดสินใจในทางสถิติ จะเรียกการรวบรวม (Collection) ของสิ่งที่ต้องการจะตัดสินใจนั้นว่า ประชากร (Population) และเรียกส่วนหนึ่งของประชากรที่ทำการศึกษาว่า สิ่งตัวอย่าง (Sample) โดยจะเรียกลักษณะสมบัติเชิงตัวเลข (Numerical Characteristic) ของประชากรนั้นว่า พารามิเตอร์ (Parameter) ซึ่งโดยปกติให้แทนด้วยอักษรกรีก อาทิ μ, σ และเรียกลักษณะเชิงตัวเลขของสิ่งตัวอย่างว่า ตัวสถิติ (Statistic) ซึ่งโดยปกติให้แทนด้วยตัวอักษรละตินอาทิ $\bar{x}$, SD

พารามิเตอร์มี 2 ประเภท คือ แบบแอตทริบิวส์ (Attributes) ที่หมายถึงคุณลักษณะที่ไม่สามารถวัดได้ เช่น ความสวยงาม ความเรียบร้อย สี ฯลฯ และแบบผันแปร (Variable) ที่หมายถึงคุณลักษณะที่สามารถวัดได้และมีค่าผันแปรไปแม้ว่าจะวัดได้อย่างถูกต้องเช่นเส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าใช้จ่าย แรงดึง ฯลฯ

ในทางวิศวกรรมอาจนิยาม "ประชากร" ได้ว่าเป็นการรวบรวมสิ่งที่สนใจที่เป็นไปได้ทั้งหมด ทั้งกรณีอาจมีรูปร่าง (Tangible) หรือไม่มีรูปร่าง (Intangible) ก็ได้เช่นกระบวนการผลิตเครื่องจักร วัตถุดิบ หรือกระบวนการบริการ เป็นต้น

ในการนิยามประชากรเพื่อการศึกษาและตัดสินใจ จึงควรเริ่มต้นจากการกำหนดวัตถุประสงค์ให้ชัดเจน แล้วอาศัยกลวิธีของการศึกษาวิธีการของวิศวกรรมอุตสาหการในการจัดการมาตรฐานการปฏิบัติการดังกล่าวโดยการนิยามประชากรนี้ทำให้การระบุด้วยว่ามีตัวแปรอะไรที่สามารถควบคุมได้ และมีตัวแปรอะไรที่ไม่สามารถควบคุมได้ทั้งนี้การนิยามประชากรดังกล่าวจะต้องได้จากการศึกษาและสังเกตจากสถานที่จริง และภายใต้สภาพแวดล้อมจริงหรืออาจเรียกกว่าหลัก 3 จริง โดยไม่ควรนิยามจากความเข้าใจทางทฤษฎีหรือจากแบบจำลอง (Model) หรือจากแบบเขียน (Drawing) เท่านั้น เพราะจะทำให้การนิยามประชากรเป็นไปอย่างไม่ถูกต้อง อาทิ อุณภูมิห้องอาจจะหมายถึงสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้สำหรับกระบวนการทั่ว ๆ ไป แต่สำหรับอุตสาหกรรมในห้องสะอาด (Clean Room) แล้วจะถือว่าอุณหภูมิห้องเป็นสิ่งที่สามารถควบคุมได้ เป็นต้น

ในการนิยามตัวแบบของประชากรที่ไม่ถูกต้อง จากกการขาดทำให้เป็นมาตรฐาน (Standardization) เนื่องจากการขาดการสังเกตหรือการขาดความรู้ ความเข้าใจทางด้านวิศวกรรมเทคโนโลยี และวิศวกรรรมการบริหารนั้น จะมีผลทำให้ได้ข้อมูลที่เกิดจากภาวะที่มิได้ควบคุมตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ ทำให้ข้อมูลมีความผันแปรผิดธรรมชาติไป ไม่สามารถวิเคราะห์ทางสถิติได้ โดย Dr.Walter A. Shewhart เรียกความผันแปรเนื่องจากสาเหตุที่มิได้ควบคุมสิ่งที่สามารถควบคุมนี้ได้ว่า สาเหตุจากความผิดพลาด (Assignable Cause) และ Dr. Edwards Deming เรียกสาเหตุของความของความผันแปรประเภทนี้ว่า สาเหตุไม่ธรรมดา (Special Cause) อาจสรุปได้ว่า

ความผันแปรจากสาเหตุธรรมชาติจะทำให้ได้ตัวแบบที่สามารถคาดการณ์ได้ ในขณะที่ความผันแปรจากสาเหตุผิดพลาด จะทำให้ได้ตัวแบบที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้

ดังนั้นในการนิยามประชากรทางสถิติ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจาณาข้อมูลของประชากรมีค่าไม่เท่ากันอย่างอิสระ และมี่ตัวแบบที่คงที่ที่สามารถคาดการณ์ได้หรือไม่ มิฉะนั้นมีความจำเป็นต้องนิยามใหม่ ทั้งนี้เนื่องจากว่ากลวิธีต่างๆทางสถิติจะไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความผันแปรจากสาเหตุความผิดพลาดได้ โดยการทวนสอบความถูกต้องของการนิยามประชากรอาจจะอาศัยเครื่องมือเบื้องต้นทางสถิติ อาทิ แผนภูมิควบคุม สำหรับการทวนสอบ ความมีเสถียรภาพของตัวแบบข้อมูล

<u>การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square)</u>

เป็นการวิเคราะห์ว่า การออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้ในการทดลองครั้งนี้มีความเหมาะสมเพียงใด ซึ่งในการทดลองทุกครั้ง จะต้องมีความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ (Unexplained Variable) หรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอการออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องทำให้เกิดความผันแปรที่อธิบายไม่ได้น้อยที่สุด ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำ สามารถแก้ไขได้โดย

1.) เพิ่มจำนวนซ้ำในการทดลอง

2.) ตรวจสอบหาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง และออกแบบการทดลองใหม่

3.) ถ้าทำการเพิ่มปัจจัยอื่นแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจยังต่ำอยู่ แสดงว่า ผลจากปัจจัยรบกวน (Noise Factor) มีมากต้องทำการบล๊อก (Blocking) เพื่อลดปัจจัยรบกวน

<u>การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)</u>

จากสมการ

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \qquad (2.1)$$

โดยที่ μ คือ ค่าเฉลี่ย

τ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

ε คือ ความคลาดเคลื่อน

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่ มักจะตั้งสมมุติฐานในการวิเคราะห์จากการที่ y (ตัวแปร) มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น y จะมีการกระจายแบบนี้ได้ต้องให้ ε มีการกระจายแบบปกติด้วย และต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระ $\varepsilon_{ij} \sim NID\ (0, \sigma^2)$

การตรวจสอบ ε_{ij} มี 3 ขั้นตอนคือ

1.) การตรวจสอบการกระจายเป็นแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยใช้

ก) การทดสอบไคร์สแควร์ (X^2 Goodness of Fit Test)

ข) การทดสอบแบบโคโกโมรอฟขสเมอร์นอฟ (Kolomorov-Sminov Test)

ค) การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ (NOPP)

2.) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) แล้วดูลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิ ว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่

3.) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Rasidual) ในแต่ละระดับของปัจจัย ถ้ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ออกมาไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของความแปรปรวน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability)

<u>การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design)</u>

การออกแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) ใช้ในการออกแบบการทดลองที่มีหลาย ๆ ปัจจัย (Factor) เพื่อที่จะหาผลของปัจจัยที่มีต่อตัวแปรผลตอบ (Response Variable) ที่เป็นทั้งผลหลักและอันตรกิริยา (Interaction) กรณีพิเศษของ Factorial Design ที่มีความสำคัญมากคือ ในแต่ละ k ปัจจัยที่เราสนใจมี 2 ระดับ (Levels) ซึ่งเรียกว่า 2^k Factorial Designs โดยที่การออกแบบการทดลองแบบนี้มีความสำคัญมากต่อการหาพื้นผิวผลตอบ (Response Surface) โดยเฉพาะเมื่อนำไปใช้ใน 3 ส่วนคือ

1.) เป็นจุดเริ่มต้นของการหาพื้นผิวผลตอบที่มีกระบวนการกรอง (Screening) เพื่อกำหนดตัวแปรของระบบหรือตัวแปรของกระบวนการที่สำคัญ

2.) ใช้สำหรับฟิตแบบจำลองพื้นผิวผลตอบลำดับหนึ่ง (FitaFirst-order Response Surface Model) ใช้ในการประมาณผลของปัจจัยที่ต้องการสำหรับวิธีการ Steepest Ascent

3.) เป็นการออกแบบพื้นฐานในการสร้าง บล๊อก เพื่อการสร้างพื้นผิวผลตอบอื่นๆ ตัวอย่างเช่น ถ้าเพิ่มการออกแบบ 2^2 ด้วย Axial Runs แล้วจะให้ผลลัพธ์เป็น Central Composite Design ซึ่งเป็นหนึ่งในการออกแบบที่สำคัญมากของแบบจำลองพื้นผิวผลตอบกำลังสอง (Secound-Order Response Surface Model)

การหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัย ในการทดลองแบบแฟกทอเรียลเป็นการศึกษาเพื่อประมาณหารูปแบบความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ ที่นักสถิติหรือ

ผู้วิจัยสนใจศึกษา โดยนักสถิติหรือผู้วิจัยสามารถนำผลการทดลองนี้ไปใช้เป็นแนวทางเพื่อที่จะกำหนดเป็นแผนการทดลองและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งทำให้การทดลองเกิดประโยชน์สูงสุด การหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ใช้ในกรทดลองแบบแฟกทอเรียลมีขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอนคือ

1. การทดลองเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมบนขอบเขตของระดับปัจจัยเริ่มต้น
2. การหาขอบเขตของระดับปัจจัยที่ทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยวิธี Steepest of Ascent or Descent
3. การทดลองเพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมบนขอบเขตของระดับปัจจัยที่ทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยใช้เทคนิคการวางแผนการทดลองจุดศูนย์กลาง
4. การหาระดับของปัจจัยที่ทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด

<u>การออกแบบชนิด 2^2 Factorial Design</u>

การออกแบบที่ง่ายที่สุดของ 2^k คือ ที่มีปัจจัยเพียง 2 ปัจจัยสมมุติเป็น A และ B โดยในแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จึงเรียกว่า 2^2 Factorial Design ระดับของปัจจัยอาจจะกำหนดเป็นระดับต่ำ (Low) และสูง (High) ซึ่งทั้งสองระดับอาจจะเป็นเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิหรือความดัน หรืออาจจะเป็นเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักรสองเครื่อง คนงานสองคน แต่โดยส่วนใหญ่แล้วในการหาพื้นผิวผลตอบปัจจัยและระดับจะกำหนดเป็นเชิงปริมาณ เช่น Anderson and Kraber (No Date) ได้ศึกษาเรื่อง ปัจจัยไปสู่ความสำเร็จของการออกแบบการทดลอง โดยในกรณีศึกษาปัจจัยสู่ความสำเร็จนี้มีอยู่ 2กรณี คือ การเพิ่มขึ้นของอายุการใช้งานของแบริ่ง และการหดตัวที่ลดลงของชิ้นส่วนที่เป็นพลาสติกในกระบวนการฉีดพลาสติก โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่ 2 ระดับ กำหนดให้ตัวแปรนำเข้าแปรเป็นระดับสูง (+) และระดับต่ำ (-) โดยปัจจัยสู่ความสำเร็จในการออกแบบการทดลองประกอบด้วย 8 ปัจจัย ดังนี้

1.) กำหนดวัตถุประสงค์ที่ดีก่อนที่จะทำการออกแบบการทดลอง ต้องตั้งคำถามก่อนว่าเป้าหมายหรือวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษาคืออะไร ซึ่งจะทำให้ทรายว่าปัจจัยใดที่ไม่วิกฤตกับสิ่งที่กำลังศึกษาก็สามารถกลั่นกรองออกได้ อาจจะเหลือปัจจัยไม่กี่ปัจจัยที่มีผลต่อสิ่งที่กำลังศึกษา ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบการทดลองที่ดี

2.) ผลตอบต้องสามารถวัดได้ในเชิงปริมาณ ในการออกแบบการทดลองในหลายกรณีไม่ประสบผลสำเร็จเพราะเหตุว่าผลตอบที่ได้นั้นไม่สามารถวัดออกมาได้ในเชิงปริมาณ

3.) จำนวนซ้ำเพื่อทำให้ทราบตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ จำนวนซ้ำของการทดลองจะทำให้มีโอกาสที่จะพบผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (Signal) ในขอบเขตของความแปรปรวนในกระบวนการทางธรรมชาติ (Noise)

4.) ลำดับการทดลองแบบสุ่ม ในการจัดอันดับการทดลองควรจะทำเป็นแบบสุ่มเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงอิทธิพลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้เช่น การสึกหรอของเครื่องมือ หรือการเปลี่ยนวัตถุดิบ เป็นต้น

5.) การจัดทำเป็นบล็อกจะทำให้ทราบแหล่งของความแปรปรวน โดยการแบ่งอันดับการทดลองให้อยู่ในบล็อกเดียวกันที่มีความคล้ายกันและใช้หลักการทางพีชคณิตแยกความแตกต่างออกมาจะทำให้เพิ่มความไวต่อการออกแบบการทดลอง

6.) ทราบผลที่จะเป็นอันตรกิริยา ซึ่งจะแสดงให้เห็นได้เมื่อมีการเปลี่ยนสิ่งของตั้งแต่ 2 สิ่งขึ้นไปในเวลาเดียวกันและในทิศทางเดียวกัน เช่น ถ้าพยายามศึกษา 3 ปัจจัย โดยถ้าหากกำหนดให้มีเพียงแค่ 4 อันดับการทดลอง โดยการใช้การทดลองแบบ Half-Fraction แล้วจะทำให้ผลหลักกลายเป็นอันตรกิริยา ของ 2 ปัจจัย ที่สัมพันธ์กัน นั่นคือ จะทำให้เกิดปัญหาความสับสนต่อปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กัน (เช่น AB) กับปัจจัยเดี่ยว (เช่น C)

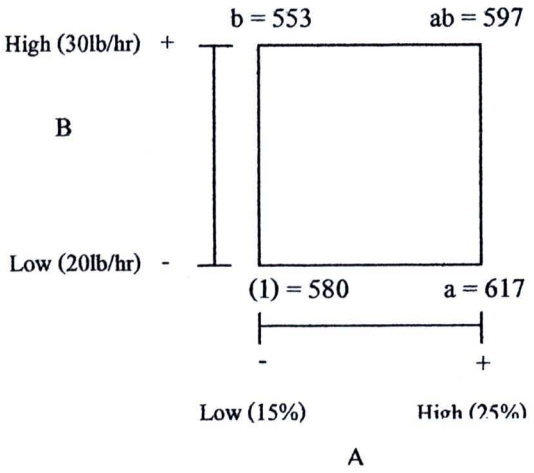
7.) การจัดลำดับขั้นของการทดลอง ลำดับขั้นทดลองหลักๆ ประกอบด้วยการกรองปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง เช่น Fractional Factorial เพื่อที่ จะหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญจากนั้นจะออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial หรือ Response Surface หรือสร้างแบบจำลองของผลตอบและทำการตรวจสอบซ้ำเพื่อยืนยันผล ดังนั้นถ้าเกิดการผิดพลาดของการเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองจะทำให้การทดลองมีขนาดใหญ่มากนั่นหมายความว่าค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจะสูงขึ้น

8.) ต้องมีการตรวจสอบค่าวิกฤตที่ได้จากการทดลองเสมอ โดยการเลือกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการยืนยันผลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง

การออกแบบชนิด 2^2 Factorial Design แสดงตามรูป 2.6 ซึ่งประกอบด้วยทรีทเมนต์คอมบิเนชั่น (Treatment Combination) ของปัจจัยเท่ากับ 4 โดยกำหนดให้ผลของปัจจัยเป็นอักษรลาตินตัวใหญ่คือ A อ้างถึงผลของปัจจัย A, B คือผลของปัจจัย B ส่วน AB เรียกว่า AB Interaction ในการออกแบบชนิด 2^2 ระดับต่ำและสูงของ A และ B จะกำหนดเป็นเครื่องหมาย – และ + บนแกน A และแกน B ดังนั้น –บนแกน A แสดงถึงระดับต่ำ และ + แสดงถึงระดับสูง ในทำนองเดียวกัน – บนแกน B แสดงถึงระดับต่ำ และ + แสดงถึงระดับสูง

ทรีทเมนต์คอมบิเนชั่นทั้ง 4 ปกติจะแสดงโดยใช้อักษรตัวเล็กและระดับต่ำของปัจจัยที่จุดในการออกแบบจะไม่มีอักษรแสดง ดังนั้น a ตามรูป 2.6 แสดงถึงคอมบิเนชั่นของ A ที่ระดับสูงและ B ที่ระดับต่ำ, ส่วน b แสดงถึง A ที่ระดับต่ำและ B ที่ระดับสูง ส่วน ab แสดงถึงปัจจัยทั้งสองที่

ระดับสูง โดยปกติ (1) หมายถึง Run ของทั้งสองปัจจัยที่ระดับต่ำ โดยการกำหนดลักษณะนี้จะใช้เป็นหลักในการออกแบบ 2^k ทั้งหมด



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูป 2.7 2^3 Factorial Design

การกำหนดค่าเฉลี่ยของปัจจัยจะทำให้ผลตอบเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนในระดับของปัจจัยที่ถูกเฉลี่ยกับปัจจัยอื่นๆ สัญลักษณ์ ตามรูป 2.6 คือ (1), a, b และ ab แสดงถึงผลรวมทั้งหมดของ n ซ้ำ ที่กระทำที่จุดต่างๆ ของการออกแบบ ดังนั้นผลของ A สามารถหาได้จากความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของผลตอบของสองจุดในด้านขวามือของสี่เหลี่ยมจัตุรัส (เรียกว่า ค่าเฉลี่ย $\bar{Y}_{A+}$) เพราะว่าเป็นค่าเฉลี่ยผลตอบที่จุดที่ A อยู่ในระดับสูง) และสองจุดที่อยู่ทางซ้ายมือ นั่นคือ

$$A = \bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-}$$

$$= \frac{ab+a}{2n} - \frac{b+(1)}{2n}$$

$$= \frac{1}{2n}[ab + a - b - (1)] \qquad (2.2)$$

ส่วนผลของปัจจัย B หาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบที่สองจุดบนด้ายบนของสี่เหลี่ยม ($\bar{Y}_{B+}$) และค่าเฉลี่ยของผลตอบของสองจุดที่ด้านล่างของสี่เหลี่ยม ($\bar{Y}_{B-}$)

หรือ

$$B = \bar{Y}_{B+} - \bar{Y}_{B-}$$

$$= \frac{ab+b}{2n} - \frac{a+(1)}{2n}$$

$$= \frac{1}{2n}[\mathrm{ab} + \mathrm{b} - \mathrm{a} - (1)] \quad (2.3)$$

สุดท้ายหาผลของอันตรกิริยา AB คือค่าเฉลี่ยของผลตอบบนจุดทะแยงมุมขวาและซ้ายของสี่เหลี่ยม [ab และ (1)] ลบด้วยค่าเฉลี่ยของผลตอบจุดทะแยงมุมจากซ้ายและขวา (a และ b) หรือ

$$\mathrm{AB} = \frac{ab+(1)}{2n} - \frac{a+b}{2n}$$

$$= \frac{1}{2n}[\mathrm{ab} + (1) - \mathrm{a} - \mathrm{b}] \quad (2.4)$$

การออกแบบชนิด 2^k Factorial Design สามารถตรวจสอบทั้งขนาดและทิศทางของผลลัพธ์ของปัจจัยที่ต้องการทราบ โดยใช้หลักของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) พิจารณา Sum of squares ของ A, B และ AB จากสมการ (2.3) จะได้ Contrast ที่ใช้ในการประมาณค่า A นั่นคือ

$$Contrast_A = \mathrm{ab} + \mathrm{a} - \mathrm{b} \quad (2.5)$$

โดยปกติจะเรียก Contrast นี้ว่าผลลัพธ์รวมของ A และจากสมการ (2.3) และ (2.4) จึงได้ Contrast ที่ใช้ในการประมาณค่า B และ AB โดยทั้ง 3 Contrast นี้เรียกว่า Orthogonal ซึ่งค่า Sums of Squares ใดๆ จะเท่ากับ Contrast ยกกำลังสองหารด้วยจำนวนของค่าสังเกตในแต่ละจำนวนครั้งของ Contrast จะได้ว่า

$$\mathrm{SS_A} = \frac{[ab+a-b(1)]^2}{n4} \quad (2.6)$$

$$\mathrm{SS_B} = \frac{[ab+b-a(1)]^2}{n4} \quad (2.7)$$

$$\mathrm{SS_{AB}} = \frac{[ab+(1)-a-b]^2}{n4} \quad (2.8)$$

และสามารถที่จะหาผลรวมของ Sum of squares ได้ดังนี้

$$SS_T = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\sum_{k=1}^{n} Y_{ijk}{}^2 - \frac{Y_{...}{}^2}{4n} \qquad (2.9)$$

โดยทั่วๆไป SS_T จะมี Degrees of Freedom เท่ากับ 4n-1 และมีค่า Error Sum of Squares เท่ากับ 4(n-1) ซึ่งสามารถคำนวนในรูปสมการลบได้ดังนี้

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \qquad (2.10)$$

ในการเขียนระดับของปัจจัยหรือทรีทเมนต์คอมบิเนชั่นในลำดับของ (1), a, b, ab จะนิยมเขียนเป็นเครื่องหมายตามตาราง 2.6 ซึ่งจะอ้างถึงเป็นลำดับมาตรฐาน (standard order) โดยประกอบด้วยเครื่องหมาย + และ – จากรูป 2.6 ซึ่งมี 4 Runs ตามมุมของสี่เหลี่ยม นั่นหมายความว่าค่า Contrast Coefficients สำหรับประมาณค่าผลลัพธ์ของอันตรกิริยา จะเป็นไปตามสัมประสิทธิ์ของผลหลักทั้งสอง (A และ B) เครื่องหมายที่อยู่ในแนวตั้ง I ในตาราง 2.6 แสดงถึงผลรวมหรือค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมดในการทดลอง โดยเครื่องหมายในช่อง I นี้มีเฉพาะเครื่องหมาย + ส่วนในแนวนอนเป็นทรีทเมนต์คอมบิเนชั่น ในการหา Contrast สำหรับการประมาณค่าใดๆ ทำได้โดยการคูณเครื่องหมายที่เกี่ยวข้องในแต่ละ Column ของตารางของแต่ละทรีทเมนต์คอมบิเนชั่น และนำมาบวกกัน เช่น ประมาณค่า A จะได้ว่า Contrast คือ –(1) + a – b + ab ตามสมการ 2.4

ตาราง 2.6 เครื่องหมายที่ใช้สำหรับคำนวนผลลัพธ์ของการออกแบบการทดลองแบบ 2^2

Treatment Combination	Factorial Effect			
	I	A	B	AB
(1)	+	-	-	+
a	+	+	-	-
b	+	-	+	-
ab	+	+	+	+

<u>แบบจำลองการถดถอย</u>

จะเป็นการง่ายมากในการแปลงผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณการในการออกแบบชนิด 2^k Factorial Design ไปเป็นแบบจำลองถดถอย (Regression Model) ซึ่งจะทำให้สามารถหาผลตอบที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัย (Space Spanned) ของปัจจัยที่ได้ออกแบบ สำหรับแบบจำลองการถดถอยกำลังหนึ่ง (First-Order Regression Model) หาได้ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \qquad (2.11)$$

โดยที่ X_1 และ X_2 คือตัวแปรรหัสที่แสดงถึงตัวแปรธรรมชาติ (Natural Variables) และ β คือค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรธรรมชาติและตัวแปรรหัส คือ

$$X_1 = \frac{\delta_1 - (\delta_{low} + \delta_{high})/2}{(\delta_{high} - \delta_{low})/2} \qquad (2.12)$$

$$X_2 = \frac{\delta_2 - (\delta_{low} + \delta_{high})/2}{(\delta_{high} - \delta_{low})/2} \qquad (2.13)$$

โดยที่จุดตัด (β_0) คือค่าเฉลี่ยทั้งหมดของการสังเกต และสัมประสิทธิ์การถดถอย b_1 และ b_2 คือครึ่งหนึ่งของค่าประมาณผลลัพธ์ของปัจจัย เนื่องจากว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยคือครึ่งหนึ่งของค่าประมาณนั่นคือจะวัดเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าของ X ในหนึ่งหน่วยต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของ y และการประมาณผลลัพธ์จะตั้งอยู่บนหลักการของการเปลี่ยนแปลงของ 2 หน่วย (จาก -1 ถึง +1) แบบจำลองการถดถอยนี้เป็นแบบจำลองพื้นผิวผลตอบกำลังหนึ่งอย่างแท้จริง และถ้าพิจารณาในเทอมอันตรกิริยาสามารถเขียนแบบจำลองการถดถอยได้ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \qquad (2.14)$$

และในการประเมินสัมประสิทธิ์การถดถอยของ β_{12} จะเป็นครึ่งหนึ่งของผลอันตรกิริยา AB หรือ $b_{12}/2$ การประเมินสัมประสิทธิ์การถดถอยอาจจะประมาณโดยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Squares Estimates) การตรวจสอบความถูกต้องนี้สามารถนำสมการที่ 2.11 มาเขียนในรูป Matrix ได้ดังนี้

$$Y = X\beta + \varepsilon \qquad (2.15)$$

ค่าประมาณกำลังสองน้อยสุดของ β_0, β_1 และ β_2 หาได้จาก

$$b = (X'X)^{-1} X'Y \qquad (2.16)$$

การออกแบบ 2^K Factorial Design

การศึกษาในการวิจัยนี้จะใช้การทดลองกรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลในช่วงแรก ซึ่งมีปัจจัยจำนวนมากที่ต้องการตรวจสอบ และทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ กรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบไปด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน เวลา เป็นต้น หรือ อาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักรหรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้ จะแทนระดับ "สูง" หรือ "ต่ำ" ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ "มี" หรือ "ไม่มี" ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 แรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2x2x2x.....x2 = 2^k$ ข้อมูล

การออกแบบ 2^K นั่นคือ การออกแบบที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบ 2^K จะประกอบด้วยผลหลัก k ชนิด, $\binom{k}{2}$ อันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย, $\binom{k}{3}$ อันตรกิริยาของ 3 ปัจจัย, ..., และ 1 อันตรกิริยาของ k ปัจจัย นั่นคือ แบบจำลองบริบูรณ์สำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบไปด้วยผลทั้งสิ้น $2^k - 1$ ชนิด เครื่องหมายสำหรับการทดลองร่วมปัจจัยที่กำหนดให้ก่อนหน้านี้ยังใช้ในรูปแบบทั่วไปได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น ลำดับมาตรฐานของการออกแบบ 2^4 คือ (1), a, b, c, d, ab, ac, ad, bc, bd, cd, abc, abd, acd, bcd, abcd วิธีการทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ 2k ได้สรุปไว้ในตาราง 2.7

ตาราง 2.7 ขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบ 2^k

1. Estimate factor effects
2. Form initial model
3. Perform statistical testing
4. Refine model
5 Analyze residual
6. Interpret results

ที่มา : เอกรัฐ เมนะจินดา, 2541

จากตาราง 2.7 ในขั้นแรกเราจะต้องประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลที่เกิดขึ้น ข้อมูลเช่นนี้จะทำให้ผู้ทดลองทราบเบื้องต้นว่า ปัจจัยและอันตรกิริยาตัวใดที่มีความสำคัญ และปัจจัยเหล่านี้ควรจะถูกปรับปรุงให้อยู่ในทิศทางใดเพื่อที่จะปรับปรุงผลตอบ ในการสร้างแบบจำลองเริ่มต้น เราควรจะเลือกแบบจำลองเต็มรูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยผลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมด ในขั้นตอนที่ 3 เราจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อที่จะทดสอบความมีนัยสำคัญของผลหลักและอันตรกิริยา ตาราง 2.7 แสดงรูปแบบทั่วไปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ที่มี n เรพลิเคต ขั้นตอนที่ 4 จะเป็นการขัดเกลาแบบจำลอง ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกี่ยวกับการดึงเอาตัวแปรที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ ขั้นตอนที่ 5 จะเป็นการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง และตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การขัดเกลาแบบจำลองเกิดขึ้นหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ทั้งนี้เนื่องจากเราพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอ หรือสมมติฐานที่กำหนดให้นั้นไม่ถูกต้องอย่างรุนแรง ในขั้นตอนสุดท้ายเราจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟ โดยจะสร้างกราฟของผลหลักและอันตรกิริยาขึ้น

ตาราง 2.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ 2^k

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom
k main effects		
A	SS_A	1
B	SS_B	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
K	SS_K	1
$\binom{k}{2}$ two-factor interactions		
AB	SS_{AB}	1
AC	SS_{AC}	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
JK	SS_{JK}	1
$\binom{k}{3}$ three-factor interactions		
ABC	SS_{ABC}	1
ABD	SS_{ABD}	1
.	.	.
.	.	.
.	.	.
IJK	SS_{IJK}	1
.	.	.
.	.	.
$\binom{k}{k}$ = 1 k-factor interaction		
ABC...K	$SS_{ABC...K}$	1
Error	SS_E	$2^k(n-1)$
Total	SS_T	$n2^k-1$

ตาราง 2.9 ตารางการออกแบบการทดลองแบบ 2^4 Factorial Design

Run Number	Factor				Run Label	Response
	A	B	C	D		
1	-	-	-	-	(1)	
2	+	-	-	-	a	
3	-	+	-	-	b	
4	+	+	-	-	ab	
5	-	-	+	-	c	
6	+	-	+	-	ac	
7	-	+	+	-	bc	
8	+	+	+	-	abc	
9	-	-	-	+	d	
10	+	-	-	+	ad	
11	-	+	-	+	bd	
12	+	+	-	+	abd	
13	-	-	+	+	cd	
14	+	-	+	+	acd	
15	-	+	+	+	bcd	
16	+	+	+	+	abcd	

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

<u>การเพิ่มจุดศูนย์กลางให้แก่การออกแบบ 2^k</u>

ประการสำคัญในการใช้งานการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ คือ สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ แน่นอนว่าความเป็นเชิงเส้นอย่างบริบูรณ์แบบไม่ได้เป็นสิ่งจำเป็นมากมายนัก และระบบ 2^k ยังคงทำงานได้ค่อนข้างดีแม้ในกรณีที่สมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นเชิงเส้นจะได้เป็นเพียงโดยประมาณเท่านั้น ในความเป็นจริงแล้วเราจะสังเกตเห็นว่า ถ้าพจน์ของอันตรกิริยาถูกเติมเข้าไปในผลหลักหรือแบบจำลองขั้นแรก (First-Order Model) นั่นคือ

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j + \sum_{i<j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad (2.17)$$

ดังนั้นเราจะมีแบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งบางประการในฟังก์ชั่นของผลตอบ ส่วนโค้งนี้เกิดจากการบิดเบี้ยวของระนาบ (Plane) ที่ถูกทำให้เกิดขึ้นจากผลของอันตรกิริยา $\beta_{ij}x_ix_j$ นั่นเอง

มีบางกรณีเช่นกันที่ส่วนโค้งในฟังก์ชั่นผลตอบไม่เพียงพอที่จะสร้างสมการของแบบจำลองตามแบบข้างบนนี้ได้ ในกรณีเช่นนี้แบบจำลองที่เหมาะสมกว่า คือ

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k}\beta_j x_j + \sum_{i<j}\sum\beta_{ij}x_ix_j + \sum_{j=1}^{k}\beta_{ij}x_j^2 + \varepsilon \qquad (2.18)$$

โดยที่ β_{ij} จะแสดงถึงผลขั้นที่สอง (Second-Order Effect) หรือผลแบบควอดราติก (Quadratic Effect) และสมการ 2.18 นี้เรียกว่า แบบจำลองพื้นผิวของผลตอบขั้นที่สอง (Second-Order Response Surface Model)

ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ เรามักใช้สมการของแบบจำลองขั้นแรกมากกว่า แต่ก็เป็นไปได้เช่นกันที่บางครั้งพบว่าแบบจำลองขั้นที่สองดูจะเหมาะสมกว่า ในกรณีเช่นนี้มีวิธีการเรพลิเคตการทดลองบางจุดในแฟกทอเรียล 2^k ที่จะให้การป้องกันส่วนโค้งที่เกิดจากผลขั้นที่สองนี้และนอกจากนั้นยังทำให้เราสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดได้อย่างอิสระอีกด้วย วิธีการเช่นนี้เกิดจากการเติมจุดศูนย์กลางให้แก่การออกแบบ 2^k และเราจะทำการทดลองจำนวน n เรพลิเคตที่จุด $x_i = 0$ (i = 1, 2,..., k) เหตุผลของการเติมการทดลองเช่นนี้เข้าไปก็คือ จุดศูนย์กลางที่เติมเข้าไปนี้ไม่ได้ส่งผลต่อการประมาณค่าผลตามปกติของการออกแบบ 2^k แต่ประการใด เมื่อเราเติมจุดศูนย์กลางเข้าไปเช่นนี้ เราจะสมมติให้ปัจจัยทั้ง k ตัวนี้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ

เพื่อแสดงวิธีการดังกล่าว พิจารณาการออกแบบ 2^2 ที่มีข้อมูล 1 ตัวที่แต่ละจุดของแฟคทอเรียล (-,-), (+,-), (-,+), (+,+) และมีข้อมูลอยู่ที่จุดศูนย์กลาง (0,0) อยู่ n_c ตัว กำหนดให้ $\bar{y}_F$ เป็นค่าเฉลี่ยของการทดลอง 4 ค่าที่จุดทั้ง 4 ของแฟกทอเรียล และกำหนดให้ $\bar{y}_C$ เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูล n_c ที่จุดกึ่งกลาง ถ้าผลต่างระหว่าง $\bar{y}_F - \bar{y}_C$ มีค่าน้อย จุดศูนย์กลางจะอยู่บนหรือใกล้ระนาบที่ผ่านจุดของแฟกทอเรียล และจะไม่มีส่วนโค้งแบบควอดราติก ค่าผลรวมของกำลังสองสำหรับส่วนโค้งแบบควอดราติกบริสุทธิ์ (Pure Quadratic Curvature) ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 1 หาได้จาก

$$SS_{\text{Pure quadratic}} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} \quad (2.19)$$

โดยที่ n_F คือจำนวนของจุดในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ค่านี้อาจจะถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบกับค่าผิดพลาดของกำลังสองเฉลี่ย เพื่อที่จะทดสอบความเป็นส่วนโค้งแบบบริสุทธิ์ ยิ่งกว่านั้นเมื่อเราเติมจุดเข้าไปที่จุดศูนย์กลางของการออกแบบ 2^k การทดสอบส่วนโค้งดังสมการที่ 2.19 ก็คือ การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ

$$H_o: \sum_{j=1}^{k} \beta_{ij} = 0 \quad .$$

$$H_1: \sum_{j=1}^{k} \beta_{ij} \neq 0$$

ยิ่งกว่านั้นถ้าจุดของแฟกทอเรียลในการออกแบบเป็นแบบไม่มีเรพลิเคต เรายังสามารถใช้จุดศูนย์กลาง n_c นี้ในการสร้างตัวประมาณของความผิดพลาดซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $n_c - 1$ ขึ้นได้อีกด้วย

2.4 ทฤษฎีต้นทุนที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 ส่วนประกอบของต้นทุนของการผลิตสินค้าหรือบริการ มีดังนี้

1) วัตถุดิบ (Material) วัตถุดิบนับว่าเป็นส่วนประกอบสำคัญของการผลิตสินค้าหรือบริการ ซึ่งต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัตถุดิบในการผลิตสินค้าอาจถูกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1.1) วัตถุดิบทางตรง (Direct Materials) หมายถึง วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตและสามารถทราบได้อย่างชัดเจนว่าใช้ในการผลิตสินค้าชนิดใดชนิดหนึ่งในปริมาณและต้นทุนเท่าใด รวมทั้งจัดเป็นวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตสินค้าชนิดนั้นๆ ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในเรื่องข้าว

1.2) วัตถุดิบทางอ้อม (Indirect Materials) หมายถึง วัตถุดิบต่างๆที่เกี่ยวข้องโดยทางอ้อมกับการผลิตสินค้า แต่ไม่ใช่วัตถุดิบหลักหรือวัตถุดิบส่วนใหญ่ และยากที่จะคำนวณเป็นต้นทุนของสินค้าหน่วยหนึ่งหน่วยใดได้โดยตรง

2) ค่าแรงงาน (Labor) หมายถึง ค่าจ้างหรือผลตอบแทนที่จ่ายให้แก่ลูกจ้างหรือคนงานที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสินค้าหรือบริการ การจ่ายค่าแรงมีหลายลักษณะ เช่น ค่าแรงงานรายเดือน ค่าแรงงานรายชั่วโมง ค่าแรงงานหน่วยสินค้า ซึ่งโดยปกติจะแยกค่าแรงงานออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.1) ค่าแรงงานทางตรง (Direct Labor) หมายถึง ค่าแรงงานต่างๆ ที่จ่ายให้แก่คนงานหรือลูกจ้างที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการผลิตสินค้าสำเร็จรูปโดยตรง รวมทั้งเป็นค่าแรงงานที่มีจำนวนมากเมื่อเทียบกับค่าแรงทางอ้อมในการผลิตสินค้าหน่วยหนึ่งๆ จัดเป็นแรงงานส่วนสำคัญในการแปรรูปวัตถุดิบให้สำเร็จรูปและสามารถคำนวณเป็นต้นทุนของสินค้าหน่วยหนึ่งหน่วยใดได้โดยตรง

2.2) ค่าแรงงานทางอ้อม (Indirect Labor) หมายถึง ค่าแรงงานที่ไม่เกี่ยวข้องกับค่าแรงงานทางตรงที่ใช้ในการผลิตสินค้า ซึ่งยากที่จะติดตามมาคำนวณเป็นต้นทุนของสินค้าหน่วยหนึ่งหน่วยใดได้แน่นอนและชัดเจน

3) ค่าใช้จ่ายการผลิต หรือค่าใช้จ่ายโรงงาน หรือโสหุ้ยการผลิต หรือต้นทุนผลิตทางอ้อม (Manufacturing Overhead หรือ Factory Overhead หรือ Manufacturing Burden หรือ Indirect Cost) หมายถึง แหล่งรวบรวมค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตสินค้าซึ่งนอกเหนือจากวัตถุดิบทางตรง หรือค่าแรงทางตรงได้ อันเป็นการจ่ายเพื่อให้การผลิตเป็นไปได้ หรือเป็นไปด้วยความสะดวกขึ้น ดังนั้นภายใต้หัวข้อค่าใช้จ่ายการผลิตจึงประกอบด้วย รายการที่มีลักษณะเป็นต้นทุนทางอ้อมของสินค้าซึ่งไม่สามารถจัดเป็นต้นทุนของสินค้าหน่วยหนึ่งหน่วยใดได้อย่างแน่นอนชัดเจน

ต้นทุนนี้เป็นองค์ประกอบหนึ่งของต้นทุนรวมของผลิตภัณฑ์ การปันส่วนค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการคำนวณต้นทุนรวม การประมาณค่าใช้จ่ายที่ไม่ถูกต้อง จะมีผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจเกี่ยวกับการบริหารกิจการอย่างมาก เช่น ทำให้กำหนดราคาสูงหรือต่ำเกินไป ทำให้การลงทุนผิดพลาด ทำให้การประมาณและการคิดค่าใช้จ่ายไม่ถูกต้อง นอกจากนี้การวิเคราะห์ต้นทุนทางอ้อมอย่างละเอียดยังมีผลต่อการพิจารณาการลดต้นทุนได้อีกด้วย

ภายหลังจากที่ทราบค่าใช้จ่ายในการผลิตทั้งหมด สิ่งที่ต้องพิจารณาต่อไปนี้คือการจัดสรรหรือการปันส่วนค่าใช้จ่ายเหล่านี้ไปให้แผนกผลิตหรือบริการอย่างไรจึงเหมาะสม เนื่องจากเรื่องนี้ค่อนข้างยุ่งยาก มีหลายขั้นตอนและมีหลายวิธีที่ใช้ในการปันส่วนค่าใช้จ่ายนี้ ดังนั้นการเลือกว่าวิธีใดเหมาะสมนั้น ยังต้องพิจารณาในเรื่องประเภทของการผลิต ลักษณะของงาน และสัดส่วนของการทำงานระหว่างคนกับเครื่องจักรด้วย วิธีการนี้นิยมใช้ในการปันส่วนค่าใช้จ่ายในการผลิตไปแผนกผลิตและแผนกบริการ ซึ่งเป็นไปตามขั้นตอน โดยแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

1) การใช้เกณฑ์เปอร์เซ็นต์ (By Percentage) วิธีนี้จะแบ่งย่อยออกไปได้อีกได้แก่

1.1) การใช้เกณฑ์เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนขั้นต้น (By Percentage on Prime Cost) ซึ่งประกอบด้วยค่าแรงงานทางตรงและค่าวัตถุดิบทางตรง แล้วนำอัตราเปอร์เซ็นต์นี้ไปใช้ในการ

คำนวณหาค่าใช้จ่ายโรงงานที่คิดเข้าเป็นต้นทุนของงานแต่ละงาน วิธีนี้จะใช้เมื่อสัดส่วนการใช้วัสดุและแรงงานของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทอยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะหาได้จากสูตร ดังนี้

$$\text{อัตราค่าใช้จ่ายการผลิต} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายโรงงานทั้งหมด}}{\text{ยอดรวมต้นทุนขั้นต้น}} \qquad (2.20)$$

วิธีการนี้ถึงแม้ว่าคำนวณง่าย แต่มีข้อเสีย คือ

ก) ไม่คำนึงถึงข้อเท็จจริงในเรื่องอัตราต่าแรงงาน อัตราค่าวัตถุดิบ และความแตกต่างในเรื่องขนาดและประสิทธิภาพของเครื่องจักรที่ใช้ในงานแต่ละงานซึ่งไม่เหมือนกัน

ข) ค่าใช้จ่ายโรงงานที่เกิดขึ้นไม่ควรจะเกี่ยวพันกับค่าวัตถุดิบทางตรงที่ใช้

1.2) การใช้เปอร์เซ็นต์ของค่าแรงทางตรง (By Percentage on Direct labor) วิธีการนี้คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่าใช้จ่ายโรงงานทั้งหมดกับค่าแรงงานทางตรงทั้งหมด ซึ่งหาได้จากสูตรดังนี้

$$\text{อัตราค่าใช้จ่ายการผลิต} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายโรงงานทั้งหมด}}{\text{ยอดรวมค่าแรงงานทางตรง}} \qquad (2.21)$$

วิธีการนี้จะให้ความถูกต้องมากกว่าวิธีการแรก ซึ่งใช้กับงานผลิตที่การปฏิบัติงานต่างๆ ทำด้วยมือเป็นส่วนใหญ่ และการจ่ายค่าแรงงานทางตรงจะต้องเป็นแบบเดียวกันหรือเหมือนกัน เช่น การสร้างทางหรือการสร้างอาคาร เป็นต้น

1.3) การใช้เปอร์เซ็นต์ของวัตถุดิบทางตรง (By Percentage on Direct Material) วิธีการนี้จะใช้เมื่อพิจารณาเห็นว่า ค่าใช้จ่ายการผลิตสัมพันธ์กับค่าวัตถุทางตรง ซึ่งหาจากสูตรดังนี้

$$\text{อัตราค่าใช้จ่ายการผลิต} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายโรงงานทั้งหมด}}{\text{ยอดรวมค่าวัตถุดิบทางตรง}} \qquad (2.22)$$

วิธีการนี้มีข้อบกพร่องคือ ในทางปฏิบัติแม้การผลิตจะใช้กรรมวิธีที่เหมือนกัน แต่วัตถุดิบที่ใช้จะมีทั้งวัตถุดิบที่มีคุณภาพดีราคาสูง และวัตถุดิบคุณภาพต่ำราคาถูก ดังนั้นการใช้อัตรานี้ในงานที่ใช้วัตถุดิบที่มีราคาสูงย่อมต้องมีค่าใช้จ่ายในการผลิตราคาสูงตาม ส่วนงานที่ใช้วัตถุดิบราคาต่ำก็จะมีค่าใช้จ่ายการผลิตต่ำ หากจะนำไปใช้ควรใช้กับหน่วยงานที่รับผิดชอบวัตถุดิบ เช่น แผนกรับส่งวัตถุดิบ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

2) การใช้เกณฑ์อัตราชั่วโมง (By Hourly Rate) วิธีนี้แบ่งเป็น 3 ประเภทย่อย คือ

2.1) ใช้อัตราชั่วโมงแรงงาน (By Man Hourly Rate) วิธีการนี้ถือว่าค่าใช้จ่ายการผลิตจะสัมพันธ์กับเวลาการปฏิบัติงาน โดยจะหาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าใช้จ่ายโรงงานทั้งหมด กับจำนวนชั่วโมงการปฏิบัติงานของแรงงานของหน่วยงานนั้น หลักการนี้จะช่วยแก้ไขข้อบกพร่องของการคิดอัตราค่าใช้จ่ายโรงงานโดยคำนวนจากแรงงานทางตรง เพราะงานที่ใช้ชั่วโมงแรงงานเท่ากันควรจะคิดค่าใช้จ่ายการผลิตเท่ากัน แม้ว่าผู้ปฏิบัติงานนั้นจะได้รับอัตราค่าจ้างต่างกัน ซึ่งหาได้จากสูตรดังนี้

$$\text{อัตราค่าใช้จ่ายโรงงาน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายโรงงานทั้งหมด}}{\text{ยอดจำนวนชั่วโมงการปฏิบัติงานของแรงงาน}} \qquad (2.23)$$

ข้อบกพร่องของวิธีการนี้คือ ไม่พิจารณาความแตกต่างของอุปกรณ์การผลิตที่ต่างกัน อัตราค่าใช้จ่ายโรงงานประเภทนี้นิยมใช้มากในเรื่องงานเกี่ยวกับการบรรจุ การประกอบรวมและงานช่างฝีมือ

2.2) การใช้อัตราชั่วโมงเครื่องจักร (Machine Hour Rate) เกณฑ์นี้เหมาะสมกับงานที่ใช้เครื่องจักรผลิตส่วนมาก ทั้งนี้เพราะชั่วโมงเครื่องจักรมักจะสัมพันธ์กับค่าเสื่อมราคา ของใช้สิ้นเปลืองและแรงงานทางอ้อมมากกว่าการใช้แรงงานทางตรง ดังนั้นชั่วโมงการใช้เครื่องจักรจึงเหมาะสมมากกับโรงงานที่ใช้แรงงานเพื่อควบคุม หรือกำกับดูแลการปฏิบัติงานวิธีนี้จะหาได้จากอัตราส่วนค่าใช้จ่ายของเครื่องจักรต่อชั่วโมงการใช้เครื่องจักร วิธีการนี้ได้ผลดีมาก ถ้าหากลักษณะการผลิตนั้นส่วนใหญ่ใช้เครื่องจักรผลิตโดยใช้มือทำน้อยมาก วิธีนี้จะขจัดปัญหาในด้านความแตกต่างเรื่องขนาดและประเภทของเครื่องจักร พลังงานที่ใช้ ขนาด และประเภทของผลิตภัณฑ์

2.3) การใช้อัตราส่วน (Combination of Man-hour and Machine Hour Method) หลักการนี้จะใช้เมื่อโรงงานอุตสาหกรรมแห่งนั้นมีบางแผนกต้องปฏิบัติงานโดยใช้แรงงานทำงาน และบางแผนกก็ต้องใช้เครื่องจักรทำงาน ในกรณีนี้ เพื่อให้การคิดค่าใช้จ่ายโรงงานตรงกับความจริงมากที่สุด ค่าใช้จ่ายโรงงานของแผนกที่ใช้แรงงานทำก็ควรใช้อัตราชั่วโมงแรงงาน และแผนกที่ใช้เครื่องจักรก็ควรจะใช้อัตราชั่วโมงเครื่องจักร วิธีการนี้อาจใช้ไม่ได้ผลในแผนกที่มีการปฏิบัติงานที่คนงานจะต้องทำงานร่วมกับเครื่องจักร

3) การใช้เกณฑ์อัตราผลผลิต (Unit Rate)

วิธีการนี้ค่าใช้จ่ายโรงงานจะจัดสรรโดยการหาอัตราส่วนระหว่างค่าใช้จ่ายโรงงานทั้งหมดต่อผลผลิต ที่คาดว่าจะผลิตได้ หลักการนี้ใช้เมื่อโรงงานนั้นทำผลิตภัณฑ์ประเภทเดียว หรือทำ

ผลิตภัณฑ์ลักษณะเดียว ซึ่งจะให้ผลดีที่ว่าผลผลิตได้ทั้งหมดจะใช้อัตรามาตรฐานการคิดค่าใช้จ่ายโรงงานที่เหมือนกัน สูตรที่ใช้คำนวณมีดังนี้

$$\text{อัตราค่าใช้จ่ายโรงงานต่อหน่วยผลผลิต} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายโรงงานทั้งหมด}}{\text{จำนวนผลผลิตที่คาดว่าจะผลิต}} \qquad (2.24)$$

2.4.2 การจำแนกต้นทุนสามารถจำแนกตามพฤติกรรมต้นทุน ดังนี้

การจำแนกต้นทุนโดยวิธีนี้เป็นการจำแนกประเภท โดยพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงต้นทุนเมื่อระดับกิจกรรมเปลี่ยนไป ได้แก่ ต้นทุน ผันแปร และต้นทุนคงที่

1) ต้นทุนผันแปร หรือต้นทุนแปรได้ (Variable Cost)

หมายถึง ต้นทุนซึ่งมีจำนวนรวมเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับปริมาณกิจกรรม จึงมีผล ทำให้ต้นทุนผับแปรต่อหน่วยคงที่ไม่ว่าปริมาณกิจกรรมจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง ซึ่งติดตามได้ง่ายกว่าเป็นต้นทุนของแผนกใดและสามารถคำนวนต้นทุนเข้าในหน่วยคิดต้นทุน (Cost Object)

2) ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost)

หมายถึง ต้นทุนที่มีจำนวนรวมไม่เปลี่ยนแปลงภายในช่วงที่พิจารณา (Relevant Range) แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณกิจกรรมไปในทางเพิ่มขึ้นหรือลดลง ต้นทุนคงที่ต่อหน่วยเปลี่ยนแปลงตามปริมาณกิจกรรมดังกล่าว คือ ต้นทุนคงที่ต่อหน่วยจะลดลงเมื่อปริมาณกิจกรรมสูงขึ้น และต้นทุนคงที่ต่อหน่วยจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกิจกรรมลดลง ซึ่งต้นทุนคงที่ไม่ได้คงที่ตลอดไป เพราะในระยะยาวต้นทุนทุกประเภทจะเปลี่ยนแปลงขึ้นลงได้ อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมทางเศรษฐกิจ เทคโนโลยี และระบบการผลิต

2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนการผลิต

ต้นทุนรวม (Total Cost) หมายถึง ต้นทุนที่ประกอบด้วยต้นทุนคงที่รวม (Total Fixed Cost: TFC) และต้นทุนแปรผันรวม (Total Variable Cost: TVC)

$$\mathbf{TC = TVC + TFC} \qquad (2.25)$$

โดยที่ TC = ต้นทุนรวม (Total Costs)

TVC = ต้นทุนผันแปรรวม (Total Variable Costs)

TFC = ต้นทุนคงที่รวม (Total Fixed Costs)