

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการศึกษาในขั้นต้น จนถึงลำดับขั้นการทดลองโดยนำค่าของปัจจัยที่ได้จากการกำหนด มาสู่การทดลองจริงตามขั้นตอนเพื่อที่จะหาค่าหรือผลตอบที่ได้รับจากกระบวนการหมักซึ่งอยู่ ภายใต้ภาวะควบคุมปัจจัย ในขั้นตอนนี้สามารถที่จะวิเคราะห์ผลดำเนินการได้เป็นลำดับ คือ

4.1 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยจากแบบจำลอง

4.1.1 การทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปัจจัย ในกระบวนการนี้เริ่มจากการนำผลที่ได้รับ ของค่าระดับปัจจัยแต่ละตัวที่กำหนด ไปทำการทดลองด้วยกระบวนการผลิตจริง และกำหนด ปริมาณของข้าวเริ่มต้นในแต่ละการทดลองที่ 3 กิโลกรัม จากนั้นทำการบันทึกผลการทดลอง หรือ ผลตอบที่ได้รับในแต่ละครั้ง ซึ่งในขั้นนี้ จะกำหนดความหมายต่างๆที่เกี่ยวข้องในการดำเนินงาน คือ

StdOrder	หมายถึง ลำดับมาตรฐานที่โปรแกรมเตรียมไว้ให้
RunOrder	หมายถึง ลำดับของการทดลอง
Type	หมายถึง ชนิดของข้าวที่นำมาใช้ในการทดลอง
Hydrolysis	หมายถึง วิธีย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล
Temperature	หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก
Time	หมายถึง เวลาที่ใช้ในการหมัก
Ethanol	หมายถึง ความเข้มข้นของเอทานอล
Sanpahtawng	หมายถึง ข้าวเหนียวสันป่าตอง (Sanpahtawng Glutinous Rice)
Black	หมายถึง ข้าวเหนียวดำหรือดอย (Black Glutinous Rice)
Fungi	หมายถึง วิธีย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล โดย เชื้อรา <i>Aspergillus oryzae</i> และ <i>Aspergillus sake</i>
enzyme	หมายถึง วิธีย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล โดย เอนไซม์ α -Amylase และ <i>Amyloglucosidase</i>

โดยค่าเริ่มต้นของการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial Design สำหรับการวิจัยนี้จากโปรแกรม คือ

Factors : 4 Base Design : 4, 16
 Runs : 48 Replicates : 3
 Blocks : 1 Center pts (total) : 0

ตาราง 4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองแต่ละ Treatment

StdOrder	RunOrder	Type	Hydrolysis	Temperature (°C)	Time (Day)	Ethanol (%)
37	1	Sanpahtawng	Fungi	37	7	7.0
42	2	Black	Fungi	20	14	11.3
44	3	Black	enzyme	20	14	7.7
43	4	Sanpahtawng	enzyme	20	14	3.0
38	5	Black	Fungi	37	7	8.8
36	6	Black	enzyme	20	7	5.5
47	7	Sanpahtawng	enzyme	37	14	5.8
41	8	Sanpahtawng	Fungi	20	14	9.4
35	9	Sanpahtawng	enzyme	20	7	2.8
45	10	Sanpahtawng	Fungi	37	14	8.1
39	11	Sanpahtawng	enzyme	37	7	5.6
48	12	Black	enzyme	37	14	8.1
34	13	Black	Fungi	20	7	10.5
33	14	Sanpahtawng	Fungi	20	7	8.3
40	15	Black	enzyme	37	7	7.5
46	16	Black	Fungi	37	14	10.2
5	17	Sanpahtawng	Fungi	37	7	9.0
14	18	Black	Fungi	37	14	14.7
8	19	Black	enzyme	37	7	9.6
13	20	Sanpahtawng	Fungi	37	14	9.7
10	21	Black	Fungi	20	14	11.6



ตาราง 4.1 ตารางบันทึกผลการทดลองแต่ละ Treatment (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Type	Hydrolysis	Temperature (°C)	Time (Day)	Ethanol (%)
3	22	Sanpahtawng	enzyme	20	7	2.2
6	23	Black	Fungi	37	7	9.5
1	24	Sanpahtawng	Fungi	20	7	6.4
15	25	Sanpahtawng	enzyme	37	14	11.5
12	26	Black	enzyme	20	14	12.4
2	27	Black	Fungi	20	7	5.4
7	28	Sanpahtawng	enzyme	37	7	5.3
4	29	Black	enzyme	20	7	8.6
9	30	Sanpahtawng	Fungi	20	14	13.0
11	31	Sanpahtawng	enzyme	20	14	10.0
16	32	Black	enzyme	37	14	13.5
19	33	Sanpahtawng	enzyme	20	7	3.7
24	34	Black	enzyme	37	7	7.2
23	35	Sanpahtawng	enzyme	37	7	5.5
30	36	Black	Fungi	37	14	14
17	37	Sanpahtawng	Fungi	20	7	8.0
22	38	Black	Fungi	37	7	9.1
26	39	Black	Fungi	20	14	10.8
20	40	Black	enzyme	20	7	5.8
18	41	Black	Fungi	20	7	9.6
32	42	Black	enzyme	37	14	8.2
21	43	Sanpahtawng	Fungi	37	7	6.9
28	44	Black	enzyme	20	14	6.2
25	45	Sanpahtawng	Fungi	20	14	9.0
31	46	Sanpahtawng	enzyme	37	14	6.6
29	47	Sanpahtawng	Fungi	37	14	8.6
27	48	Sanpahtawng	enzyme	20	14	3.5

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ Full factorial

ตาราง 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ Full Factorial

Source	DF	SS	MS	F	P
type	1	67.450	67.450	15.09	0.000
Hydrolysis	1	82.950	82.950	18.55	0.000
temp	1	13.335	13.335	2.98	0.094
time	1	72.767	72.767	16.28	0.000
type*Hydrolysis	1	3.360	3.360	0.75	0.392
type*temp	1	0.460	0.460	0.10	0.750
type*time	1	0.350	0.350	0.08	0.781
Hydrolysis*temp	1	8.927	8.927	2.00	0.167
Hydrolysis*time	1	0.460	0.460	0.10	0.750
temp*time	1	0.200	0.200	0.04	0.834
type*Hydrolysis*temp	1	7.600	7.600	1.70	0.202
type*Hydrolysis*time	1	2.475	2.475	0.55	0.462
type*temp*time	1	1.300	1.300	0.29	0.593
Hydrolysis*temp*time	1	0.010	0.010	0.00	0.962
type*Hydrolysis*temp*time	1	1.725	1.725	0.39	0.539
Error	32	143.073	4.471		
Total	47	406.445			
S = 2.11448 R-Sq = 64.80% R-Sq(adj) = 48.30%					

จากข้อมูลในตาราง สามารถแปลผลที่เกิดขึ้นได้ดังนี้ คือ

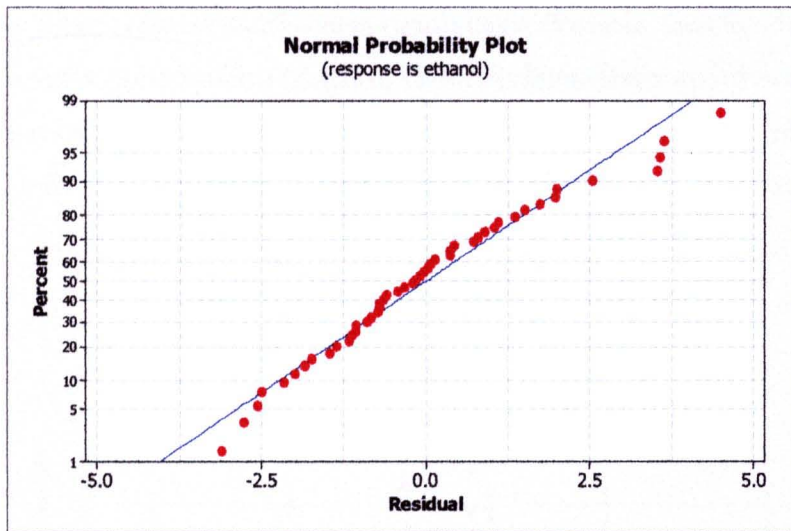
- 1) ปัจจัยชนิดของข้าวที่นำมาใช้ในการทดลองมีผลต่อระดับความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha=0.05$
- 2) ปัจจัยวิธีการย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาลมีผลต่อระดับความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha=0.05$
- 3) ปัจจัยเวลาที่ใช้ในการหมักมีผลต่อระดับความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการหมัก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha=0.05$

4) ปัจจัยทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวถึง ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดคือ ชนิดของข้าวและวิธีการย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล

4.1.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ก่อนที่จะวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ANOVA จะต้องเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ด้วยการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง หลังจากนั้นจึงทดสอบด้วย R-square และวิเคราะห์ด้วย ANOVA ได้ โดยต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลดังนี้

1.) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) เป็นการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ ซึ่งจากรูป 4.1 แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างจากการทดลอง ไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็นแต่อย่างใด

จากการพิจารณาส่วนตกค้างของข้อมูลในรูป 4.1 เห็นได้ว่าแนวโน้มของข้อมูลที่ได้เป็นแนวเส้นตรงไม่มีแนวโน้มกระจายตัวหรือแตกกลุ่มเกิดขึ้น ถือได้ว่าแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบเหมาะสม

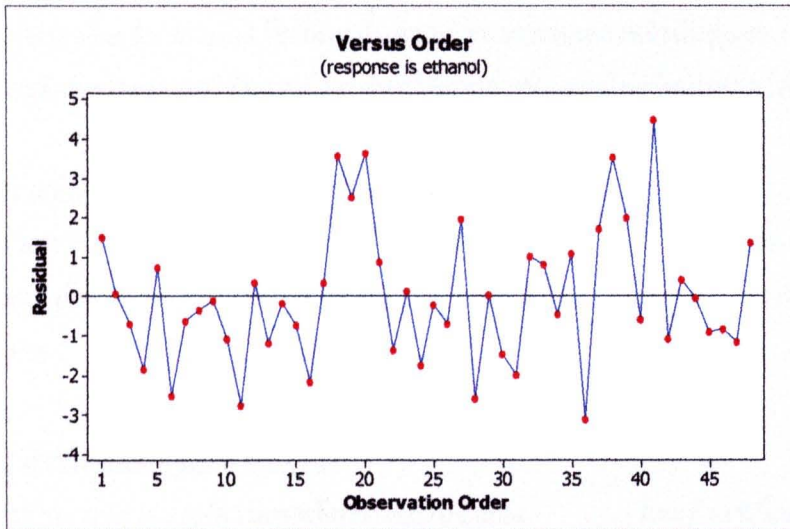


รูป 4.1 กราฟส่วนตกค้างจากการทดลอง

2.) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (ScatterPlot) แล้วดูลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิว่าเป็นรูปแบบอิสระหรือไม่ จากรูป 4.2

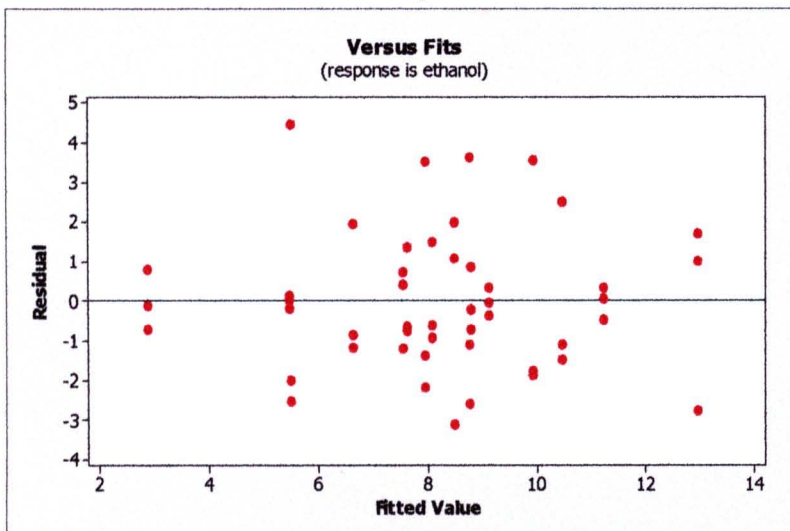
ส่วนตกค้างของผลการทดลองการผลิตเอทานอลจากข้าว
สม่่าเสมอ แสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

พบว่ามีการกระจายของข้อมูลอย่าง



รูป 4.2 กราฟส่วนตกค้างกับลำดับของข้อมูล

3.) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ในแต่ละระดับของปัจจัย พบว่าส่วนตกค้างของผลการทดลองของค่าผลตอบ หรือระดับความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการหมักมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางบวกและทางลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



รูป 4.3 กราฟส่วนตกค้างกับค่าที่ได้รับจากการคำนวณ

4.1.4 การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-square)

หลังจากได้ทำการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง ว่ามีความเหมาะสมตามแผนการทดลองแล้วจะทำการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ซึ่งจากตาราง Estimated Effects and Coefficients for Ethanol ที่ผ่านมานั้นค่า R^2 ของการทดลองครั้งนี้มีค่า 48.30% ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจะบอกให้ทราบถึงระดับที่ได้จากการทดลองโดยวัดเป็นเปอร์เซ็นต์

4.1.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

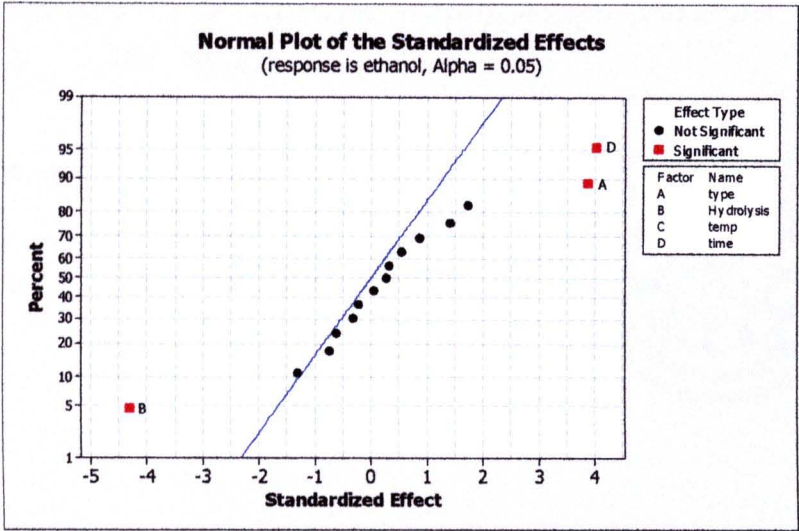
การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง พบว่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลองมีผลตอบต่อ ปัจจัยหลัก (Main effect) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha = 0.05$

4.1.6 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง

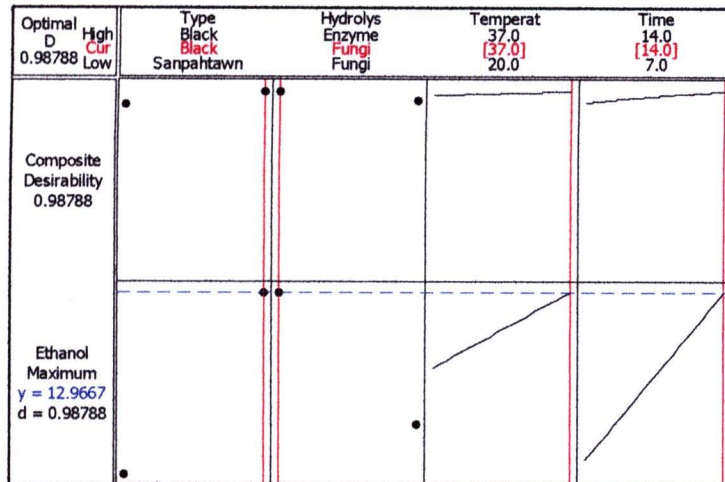
หลังจากการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง และทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในขั้นตอนต่อไปจะทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลในการทดลอง จากรูป 4.4 พบว่าผลที่อยู่บนเส้นตรงจะถือว่าตัดทิ้งได้ ในขณะที่ผลที่มีผลมากมายจะอยู่ห่างจากเส้นนี้ ซึ่งพบว่าผล A, B และ D มีผลอย่างมากต่อผลตอบของการทดลองนี้ และจากตาราง 4.2 พบว่ามี 3 ปัจจัยที่มีค่า Estimated Coefficients มากคือ Type, Hydrolysis, Time ดังนั้นสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลในการทดลองมี 3 ปัจจัย คือ ชนิดของข้าวที่นำมาใช้ในการทดลอง (Type of rice), วิธีย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล (Hydrolysis) และ เวลาที่ใช้ในการหมัก (Fermentation Time)

ตาราง 4.3 ค่า Estimated Coefficients ของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการผลิตเอทานอลจากข้าว

Terms	Estimated Coefficients
Type	2.25637
Hydrolysis	-2.32010
Temperature	0.084804
Time	0.413655
Type*Hydrolysis	0.37304
Type*Temperture	-0.046569
Type*Time	-0.133263
Hydrolysis*Temperture	0.045588
Hydrolysis*Time	-0.041947
Temperture*Time	-0.0021709
Type*Hydrolysis*Temperture	0.020098
Type*Hydrolysis*Time	0.116737
Type*Temperture*Time	0.0055322
Hydrolysis*Temperture*Time	0.0004902
Type*Hydrolysis*Temperture*Time	-0.0063725



รูป 4.4 การพล็อตความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยต่างๆในการผลิตเอทานอลจากข้าว



รูป 4.5 กราฟแสดงจุดที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย โดยฟังก์ชัน Response Optimizer

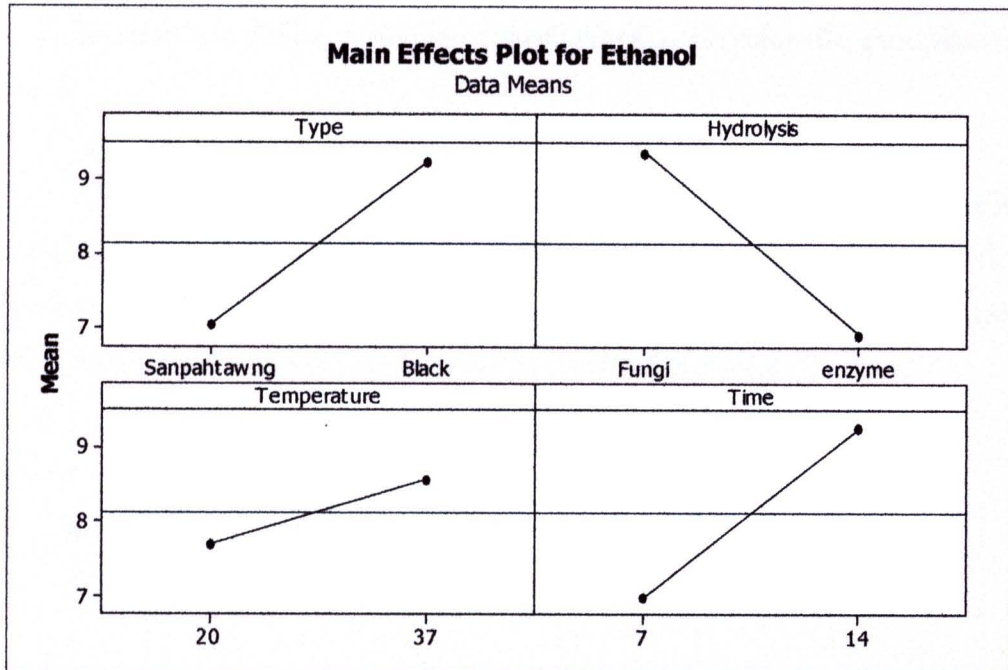
เมื่อวิเคราะห์ผลโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดของการผลิตเอทานอลจากข้าวเมื่อดังเป้าหมายให้สามารถผลิตเอทานอลได้มากที่สุด(Maximum) พบว่าใช้ข้าวเหนียวดำหรือคอย (Black Glutinous Rice) นำมาย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล (Hydrolysis) ด้วยเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* อุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก (Fermentation Temperature) 37 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการหมัก (Fermentation Time) 14 วัน ให้ผลลัพธ์ค่าความเข้มข้นของเอทานอลเท่ากับ 12.96 โดยได้ค่าความพึงพอใจรวม (Composite Desirability) เท่ากับ 0.98

จากผลการวิเคราะห์สามารถสร้างสมการทำนายผลสำหรับค่าความเข้มข้นของเอทานอลได้ดังนี้

$$\text{Ethanol Concentration} = 2.112 + 2.256(\text{Type}) - 2.320 (\text{Hydrolysis}) + 0.413(\text{Time}) \quad (4.1)$$

เมื่อ Type คือ Black Glutinous rice = 1
 คือ Sanpahtawng Glutinous rice = -1
 Hydrolysis คือ Enzyme = 1
 คือ Fungi = -1
 Time คือ เวลาที่ใช้ในการหมัก (วัน)





รูป 4.6 ผลหลักของการผลิตเอทานอลจากข้าว

กราฟของผลหลักที่แสดงในรูป 4.6 สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

- ชนิดของข้าวที่นำมาใช้ในการทดลอง (Type of rice) พบว่า ผลมีค่าเป็นบวกดังนั้นเราควรตั้งเงื่อนไขในการผลิตเอทานอลโดยใช้ข้าวเหนียวดำหรือดอย (Black Glutinous Rice) เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของเอทานอลมากที่สุด
- วิธีย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล (Hydrolysis) พบว่าผลมีค่าเป็นลบดังนั้นเราควรตั้งเงื่อนไขในการผลิตเอทานอลจากข้าวโดยใช้วิธีการย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาลโดยวิธีใช้เชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake*
- อุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก (Fermentation Temperature) เนื่องจากไม่มีความสำคัญจึงไม่นำมาพิจารณาต่อ
- เวลาที่ใช้ในการหมัก (Fermentation Time) พบว่าผลมีค่าเป็นบวกดังนั้นจึงทำการศึกษาโดยการเพิ่มจำนวนวันในการหมักเพื่อให้ได้เอทานอลมากที่สุด

4.2 การวิเคราะห์หาเวลาที่ใช้ในการหมักเมื่อกำหนดชนิดของข้าว, วิธีการย่อยแป้ง, อุณหภูมิในการหมักคงที่

4.2.1 ผลการทดลองหมักเอทานอล

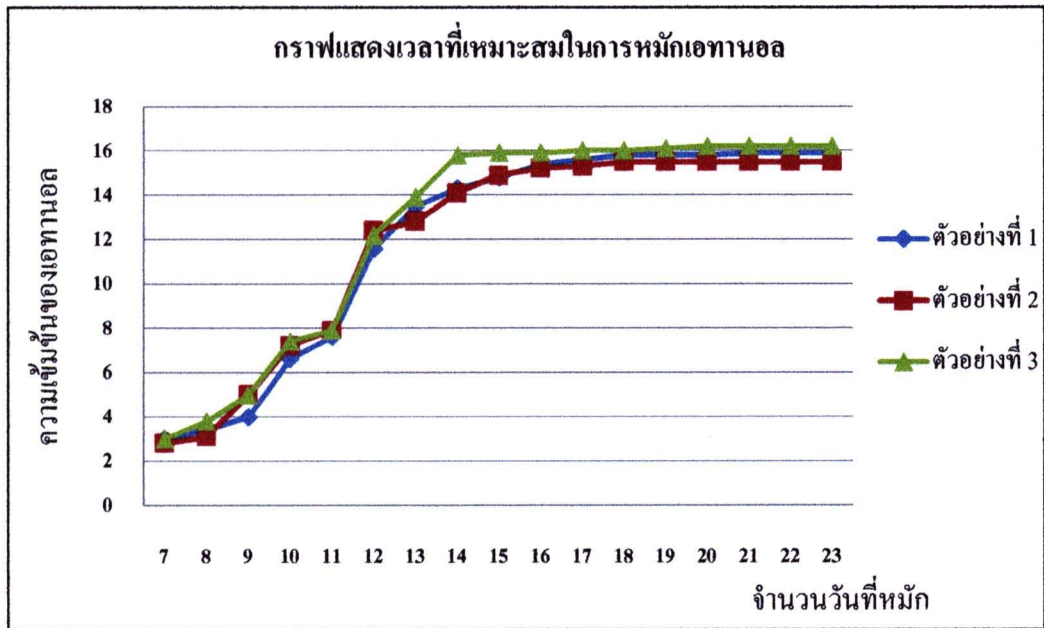
จากการทดลองที่ผ่านมาสามารถกำหนด ชนิดของข้าว คือ ข้าวเหนียวดำหรือดอย และวิธีย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาล คือ เชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* ทดลองหมักในสถานะที่ 37 องศาเซลเซียส ทดลอง 3 ชั่วโมง เพื่อนำมาทดสอบหาเวลาที่เหมาะสมในการหมักเอทานอล โดยวิเคราะห์ความเข้มข้นของเอทานอลตั้งแต่วันที่ 7 – 23 ได้ผลดังตาราง 4.3

ตาราง 4.4 ตารางบันทึกผลการทดลองเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการหมักเอทานอล

วัน	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3
7	3.0	2.8	3.0
8	3.4	3.1	3.8
9	4.0	5.0	5.0
10	6.6	7.2	7.4
11	7.6	7.9	7.9
12	11.6	12.4	12.2
13	13.5	12.8	13.9
14	14.3	14.1	15.8
15	14.8	14.9	15.9
16	15.4	15.2	15.9
17	15.6	15.3	16.0
18	15.8	15.5	16.0
19	15.8	15.5	16.1
20	15.8	15.5	16.2
21	15.9	15.5	16.2
22	15.9	15.5	16.2
23	15.9	15.5	16.2

4.2.2 วิเคราะห์ปัจจัยเวลาที่ใช้ในการหมัก

จากรูป 4.7 เห็นได้ว่าเมื่อเวลาในการหมักมากขึ้น ความเข้มข้นของเอทานอลจะเพิ่มขึ้น จนถึงจุดหนึ่ง จากนั้นความเข้มข้นของเอทานอลจะคงที่ ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการหมักเอทานอลคือ 18 วัน เนื่องจากใช้เวลาหมักนานเกินไปอาจจะทำให้มีจุลินทรีย์ชนิดอื่นที่ไม่ต้องการปนเปื้อนได้



รูป 4.7 กราฟแสดงเวลาที่เหมาะสมในการหมักเอทานอล

4.3 การวิเคราะห์ต้นทุน

ในการทดลองการผลิตเอทานอลจากข้าว เพื่อหาระดับของความเข้มข้นของเอทานอลที่มากที่สุด หรือผลตอบที่ได้รับจากกระบวนการหมักเอทานอลซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมปัจจัยแล้ว จากผลการทดลองนี้ยังสามารถนำมาวิเคราะห์ในแง่มุมของเศรษฐศาสตร์ที่สนใจได้อีกด้วย ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์นี้ จะเป็นข้อมูลส่วนหนึ่งซึ่งจะสามารถใช้ประกอบการตัดสินใจ ในการพิจารณาเลือกชนิดของข้าวที่ใช้ในการผลิตเอทานอล และวิธีในการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล ในแง่มุมที่เราสนใจ ซึ่งในที่นี้ได้ทำการวิเคราะห์ในเรื่องต่อไปนี้

ต้นทุนการผลิตเอทานอลจากข้าว โดยคิดจากเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตร การคำนวณต้นทุนการผลิตเอทานอลจากข้าว สามารถคำนวณได้ดังนี้



4.3.1 คัดต้นทุนของเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวสันป่าตอง และหมักด้วยเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake*

1.) คัดปริมาณของข้าวที่ใช้หมักเพื่อให้ได้เอทานอล 10 ลิตร

จากการทดลองผลิตเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวสันป่าตอง และหมักด้วยเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* ที่อุณหภูมิ 20 °C เป็นเวลา 14 วันเป็นจำนวน 3 ซ้ำดังแสดงในตารางที่ 3ก และ 4ก พบว่า มีความเข้มข้นของเอทานอลเฉลี่ยคือ 10.5% ได้ปริมาณน้ำทั้งหมด 14.5 ลิตร

จากสมการ

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (4.2)$$

$$95\% \times 10 \text{ ลิตร} = 10.5\% \times V_2$$

$$V_2 = 90.4 \text{ ลิตร}$$

เอทานอลมีความเข้มข้น 95% ปริมาตร 10 ลิตร จึงเท่ากับเอทานอลที่มีความเข้มข้น 10.5% ปริมาตร 90.4 ลิตร

ปริมาณน้ำทั้งหมดที่หมักได้เท่ากับ 14.5 ลิตร จากข้าว 9 กิโลกรัม ดังนั้น ถ้าต้องการปริมาณน้ำ 90.4 ลิตร ต้องหมักจากข้าวจำนวน 56.1 กิโลกรัม เพราะฉะนั้นราคาข้าวเหนียวสันป่าตอง 56.1 กิโลกรัม เท่ากับ 1,620.6 บาท

2.) คัดต้นทุนของเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake*

โดยคิดเทียบจากปริมาณเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตร ต้องใช้ข้าวจำนวน 56.1 กิโลกรัม ดังนั้น ต้องใช้เชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* ทั้งหมด 561 กรัม ราคา 280 บาท

3.) คัดต้นทุนของยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae*

โดยคิดเทียบจากปริมาณเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตรต้องใช้ข้าวจำนวน 56.1 กิโลกรัม ดังนั้น ต้องใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ทั้งหมด 5.61 กรัม ราคา 39.27 บาท

4.) ค่าจ้างผลิตตลอดกระบวนการ คิรราคาตัวอย่างละ 150 บาท

4.3.2 คัดต้นทุนของเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวดำ/คอย และหมักด้วยเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake*

1.) คัดปริมาณของข้าวที่ใช้หมักเพื่อให้ได้เอทานอล 10 ลิตร

จากการทดลองผลิตเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวดำ/คอยและหมักด้วยเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 14 วันเป็นจำนวน 3 ซ้ำดังแสดงในตารางที่ 3ก และ 4ก พบว่า มีความเข้มข้นของเอทานอลเฉลี่ยคือ 13% ได้ปริมาณน้ำทั้งหมด 14.3 ลิตร

จากสมการ

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$95\% \times 10 \text{ ลิตร} = 13\% \times V_2$$

$$V_2 = 73 \text{ ลิตร}$$

เอทานอลมีความเข้มข้น 95% ปริมาตร 10 ลิตร จึงเท่ากับเอทานอลที่มีความเข้มข้น 13% ปริมาตร 73 ลิตร

ปริมาณน้ำทั้งหมดที่หมักได้เท่ากับ 14.3 ลิตร จากข้าว 9 กิโลกรัม ดังนั้น ถ้าต้องการ ปริมาตรน้ำ 73 ลิตร ต้องหมักจากข้าวจำนวน 45.9 กิโลกรัม เพราะฉะนั้นราคาข้าวเหนียวดำ/คอย 45.9 กิโลกรัม เท่ากับ 1530 บาท

2.) คัดต้นทุนของเชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake*

โดยคิดเทียบจากปริมาณเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตร ต้องใช้ข้าวจำนวน 45.9 กิโลกรัม ดังนั้น ต้องใช้เชื้อรา *Aspergillus oryzae* และ *Aspergillus sake* ทั้งหมด 459 กรัม ราคา 229.5 บาท

3.) คัดต้นทุนของยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae*

โดยคิดเทียบจากปริมาณเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตรต้องใช้ข้าวจำนวน 45.9 กิโลกรัม ดังนั้น ต้องใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ทั้งหมด 4.59 กรัม ราคา 32.13 บาท

4.) ค่าจ้างผลิตตลอดกระบวนการ คิรราคาตัวอย่างละ 150 บาท

4.3.3 คัดต้นทุนของเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวสันป่าตอง และหมักด้วยเอนไซม์ *α -Amylase* และ *Amyloglucosidase*

1.) คัดปริมาณของข้าวที่ใช้หมักเพื่อให้ได้เอทานอล 10 ลิตร

จากการทดลองผลิตเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวสันป่าตองและหมักด้วยเอนไซม์ *α -Amylase* และ *Amyloglucosidase* ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 14 วันเป็นจำนวน 3 ซ้ำดังแสดงในตารางที่ 3ก และ 4ก พบว่า มีความเข้มข้นของเอทานอลเฉลี่ยคือ 8% ได้ปริมาณน้ำทั้งหมด 13.6 ลิตร

จากสมการ

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$95\% \times 10 \text{ ลิตร} = 8\% \times V_2$$

$$V_2 = 118.75 \text{ ลิตร}$$

เอทานอลมีความเข้มข้น 95% ปริมาตร 10 ลิตร จึงเท่ากับเอทานอลที่มีความเข้มข้น 8% ปริมาตร 118.75 ลิตร

ปริมาณน้ำทั้งหมดที่หมักได้เท่ากับ 13.6 ลิตร จากข้าว 9 กิโลกรัม ดังนั้น ถ้าต้องการปริมาณน้ำ 118.75 ลิตร ต้องหมักจากข้าวจำนวน 78.5 กิโลกรัม เพราะฉะนั้นราคาข้าวเหนียวสันป่าตอง 78.5 กิโลกรัม เท่ากับ 2267.7 บาท

2.) คัดต้นทุนของเอนไซม์ *α -Amylase*

โดยคิดเทียบจากปริมาณเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตรต้องใช้ข้าวจำนวน 78.5 กิโลกรัม ดังนั้น ต้องใช้เอนไซม์ *α -Amylase* ทั้งหมด 117.75 มิลลิลิตร ราคา 196.25 บาท

3.) คัดต้นทุนของเอนไซม์ *Amyloglucosidase*

โดยคิดเทียบจากปริมาณเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตรต้องใช้ข้าวจำนวน 78.5 กิโลกรัม ดังนั้น ต้องใช้เอนไซม์ *Amyloglucosidase* ทั้งหมด 235.5 มิลลิลิตร ราคา 298.3 บาท

4.) คัดต้นทุนของยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae*

โดยคิดเทียบจากปริมาณเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตรต้องใช้ข้าวจำนวน 78.5 กิโลกรัม ดังนั้น ต้องใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ทั้งหมด 7.85 กรัม ราคา 54.95 บาท

5.) ค่าจ้างผลิตตลอดกระบวนการ คัดราคาตัวอย่างละ 150 บาท

4.3.4 คัดต้นทุนของเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวดำ/คอย และหมักด้วยเอนไซม์ *α -Amylase* และ *Amyloglucosidase*

1.) คัดปริมาณของข้าวที่ใช้หมักเพื่อให้ได้เอทานอล 10 ลิตร

จากการทดลองผลิตเอทานอลที่ผลิตจากข้าวเหนียวดำ/คอย และหมักด้วยเอนไซม์ *α -Amylase* และ *Amyloglucosidase* ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 14 วันเป็นจำนวน 3 ซ้ำดังแสดงในตารางที่ 3ก และ 4ก พบว่า มีความเข้มข้นของเอทานอลเฉลี่ยคือ 9.9% ได้ปริมาณน้ำทั้งหมด 13.4 ลิตร

จากสมการ

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$95\% \times 10 \text{ ลิตร} = 9.9\% \times V_2$$

$$V_2 = 95.95 \text{ ลิตร}$$

เอทานอลมีความเข้มข้น 95% ปริมาตร 10 ลิตร จึงเท่ากับเอทานอลที่มีความเข้มข้น 9.9% ปริมาตร 95.95 ลิตร

ปริมาณน้ำทั้งหมดที่หมักได้เท่ากับ 13.4 ลิตร จากข้าว 9 กิโลกรัม ดังนั้น ถ้าต้องการปริมาณน้ำ 95.95 ลิตร ต้องหมักจากข้าวจำนวน 64.4 กิโลกรัม เพราะฉะนั้นราคาข้าวเหนียวดำ/คอย 64.4 กิโลกรัม เท่ากับ 2146.6 บาท

2.) คัดต้นทุนของเอนไซม์ *α -Amylase*

โดยคิดเทียบจากปริมาณเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตรต้องใช้ข้าวจำนวน 64.4 กิโลกรัม ดังนั้น ต้องใช้เอนไซม์ *α -Amylase* ทั้งหมด 96.6 มิลลิลิตร ราคา 161 บาท

3.) คัดต้นทุนของเอนไซม์ *Amyloglucosidase*

โดยคิดเทียบจากปริมาณเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตรต้องใช้ข้าวจำนวน 64.4 กิโลกรัม ดังนั้น ต้องใช้เอนไซม์ *Amyloglucosidase* ทั้งหมด 193.2 มิลลิลิตร ราคา 244.72 บาท

4.) คัดต้นทุนของยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae*

โดยคิดเทียบจากปริมาณเอทานอลเข้มข้น 95% จำนวน 10 ลิตรต้องใช้ข้าวจำนวน 64.4 กิโลกรัม ดังนั้น ต้องใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ทั้งหมด 6.44 กรัม ราคา 45 บาท

5.) ค่าจ้างผลิตตลอดกระบวนการ คัดราคาตัวอย่างละ 150 บาท

ตาราง 4.5 การคิดหาต้นทุนในการผลิตเอทานอลจากข้าวความเข้มข้น 95% ปริมาตร 10 ลิตร (ราคา ณ วันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2554)

ต้นทุนการกลั่นเอทานอล	ข้าวเหนียวสันป่าตอง (Sanpahtawng Glutinous Rice)				ข้าวเหนียวคำพรือดอย (Black Glutinous Rice)			
	เชื้อรา <i>Aspergillus oryzae</i> และ <i>Aspergillus sake</i>		เอนไซม์ α -Amylase และ Amyloglucosidase		เชื้อรา <i>Aspergillus oryzae</i> และ <i>Aspergillus sake</i>		เอนไซม์ α -Amylase และ Amyloglucosidase	
	ต้นทุนผันแปร (VC)	ต้นทุนคงที่ (FC)	ต้นทุนผันแปร (VC)	ต้นทุนคงที่ (FC)	ต้นทุนผันแปร (VC)	ต้นทุนคงที่ (FC)	ต้นทุนผันแปร (VC)	ต้นทุนคงที่ (FC)
วัตถุดิบในการกลั่น								
	- ข้าวเหนียว	1,620.60	-	2,267.70	-	1,530.00	2,146.60	-
	- เชื้อรา	280.00	-	-	-	229.50	-	-
	- เอนไซม์ α -Amylase	-	-	196.25	-	-	161.00	-
	- เอนไซม์ Amyloglucosidase	-	-	298.30	-	-	244.72	-
ค่าจ้างผลิตตลอดกระบวนการ	- ยีสต์	39.27	-	54.95	-	32.13	45.00	-
		-	150.00	-	-	150.00	-	150.00
	TC = TVC + TFC	TVC = 1,939.87	TFC = 150.00	TVC = 2,817.20	TFC = 150.00	TVC = 1,791.63	TVC = 2,597.32	TFC = 150.00
รวม (TC)		2,089.87		2,967.2		1,941.63	2,747.32	