บทที่ 4
ผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้ศึกษาเรื่องการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาผสมกับกากเบียร์ร่วมกับเชื้อจุลินทรีย์ จากระบบยูเอเอสบีของโรงงานผลิตเบียร์ บริษัทขอนแก่นบริวเวอรี่ จำกัด โดยใช้ถังหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอน ซึ่งผู้วิจัยได้สรุปผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ในการวิจัย ดังนี้

4.1 ผลการศึกษาการคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์โดยใช้หลักการทางสถิติ

4.1.1 ผลการศึกษาการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยวิธีของ Plackett-Burman

เมื่อทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีของ Plackett-Burman พบว่า มีจำนวนชุดการทดลองรวมทั้งสิ้น 12 ชุดการทดลอง โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลองและผลการทดลองแสดงตารางที่ 4.1 เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณการก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) มี 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนผักตบชวา : กากเบียร์ ($P=0.0240$) ปริมาณมูลวัว ($P=0.0239$) และ ระยะเวลาในการหมัก ($P=0.0020$) ส่วนจำนวนครั้งในการกวนผสมไม่มีนัยสำคัญ ($P=0.2980$) ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลแสดงดังตารางที่ 4 จากนั้นทำการทดสอบข้อกำหนดทางสถิติ โดยพล็อตค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal plot of % probability) กับค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) พบว่าจุดของข้อมูลบนกราฟ มีการเรียงตัวในลักษณะเป็นเส้นตรง (ภาพที่ 4.1) ดังนั้นข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ เมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับค่าผลตอบสนองจากการทำนาย (Predicted) พบว่า การกระจายตัวของข้อมูลไม่มีรูปแบบที่แน่นอน (ภาพที่ 4.2) ดังนั้นข้อมูลไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนคงที่ (constant error) เมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับหมายเลขชุดการทดลอง (run number) พบว่า ไม่มีชุดข้อมูลที่มีค่าส่วนเหลือมาตรฐานต่ำหรือสูงผิดปกติและข้อมูลกระจายตัวไม่มีรูปแบบแน่นอน (ภาพที่ 4.3) ดังนั้นข้อมูลที่วิเคราะห์เป็นข้อมูลแบบสุ่ม มีความเป็นอิสระต่อกัน และเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลได้

ตารางที่ 4.1 สภาวะที่ใช้ในการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลและปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วยวิธีของ Plackett-Burman

ชุดการทดลอง	ปัจจัยที่ศึกษา				ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)
	ผักตบชวา:กากเบียร์	ปริมาณมูลวัว (กิโลกรัม/วัน)	การกวน	ระยะเวลาในการหมัก (วัน)	
1	3	1	1	5	5
2	3	3	1	5	15
3	3	3	3	5	12
4	1	1	1	15	800
5	1	3	1	15	1800
6	1	1	1	5	10
7	3	1	3	15	165
8	1	3	3	15	1762
9	1	1	3	5	15
10	3	1	3	15	175
11	1	3	3	5	30
12	3	3	1	15	800

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยวิธีของ Plackett-Burman

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	9.95	4	2.49	311.98	<0.0001
X_1	0.63	1	0.63	78.46	<0.0001
X_2	0.70	1	0.70	87.79	<0.0001
X_3	0.021	1	0.021	2.59	0.1517
X_4	8.60	1	8.60	1079.08	<0.0001
Residual	0.056	7	7.939×10^{-3}		
Cor. Total	10	11			

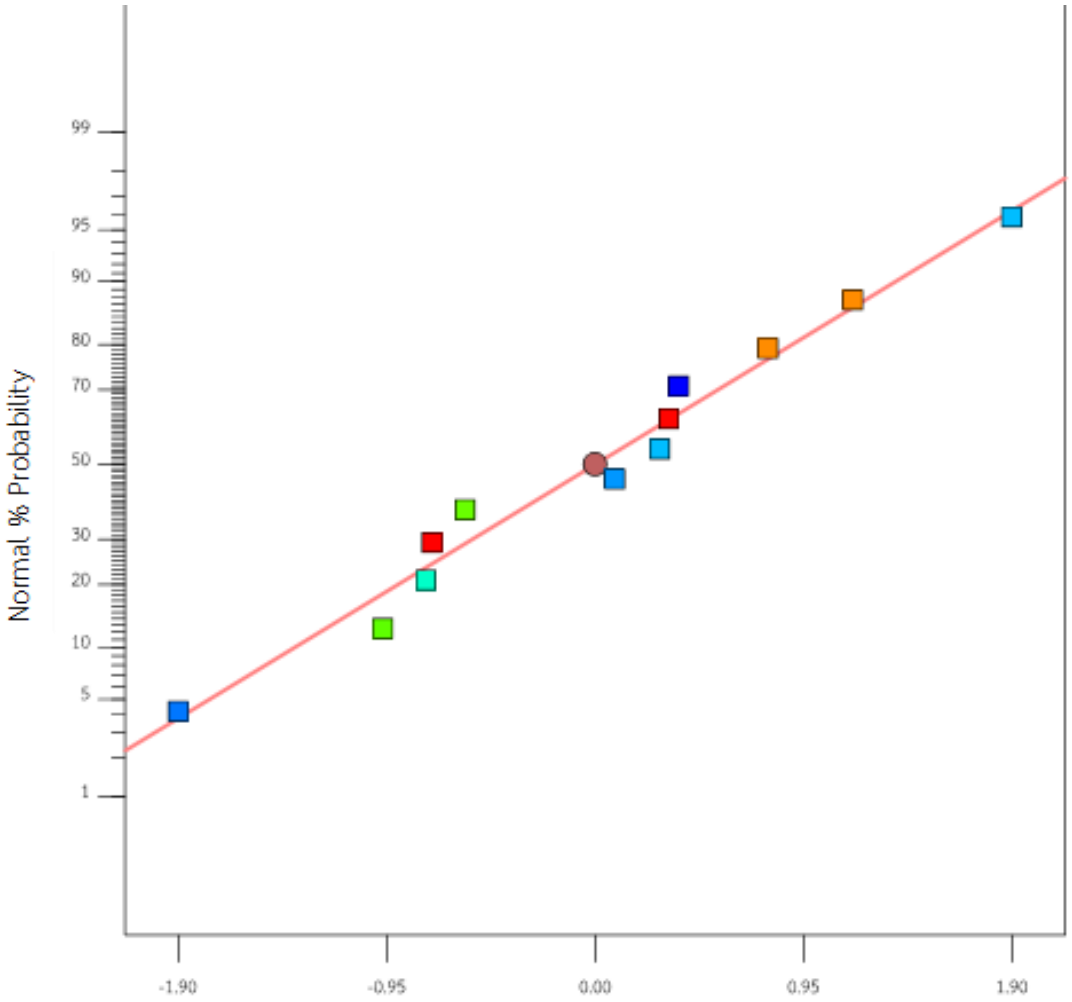
หมายเหตุ :

X_1 คือ อัตราส่วนของผักตบชวาต่อกากเบียร์

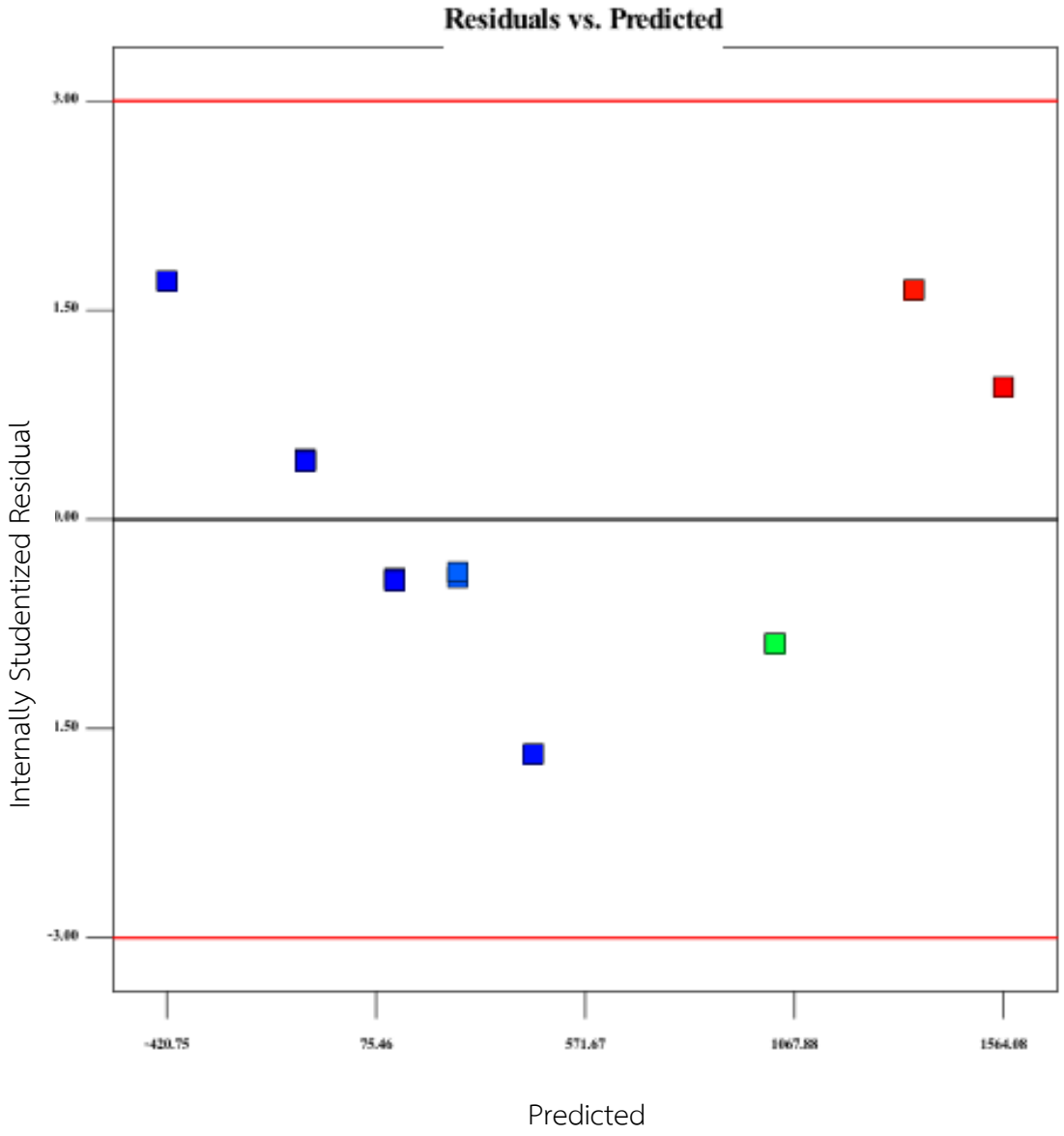
X_2 คือ ปริมาณมูลวัว (กิโลกรัม/วัน)

X_3 คือ การกวนผสม (ครั้ง/วัน)

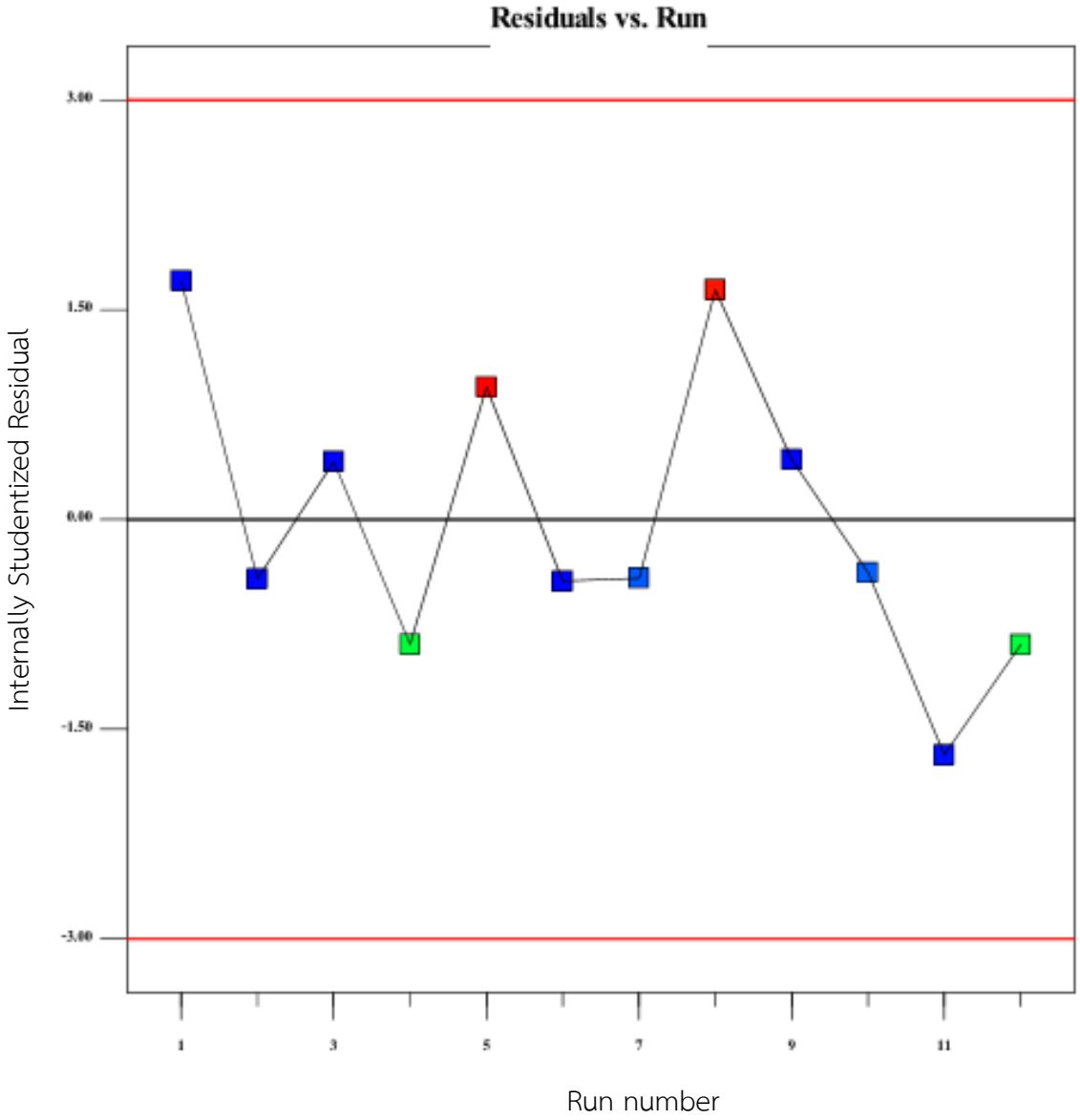
X_4 คือ ระยะเวลาในการหมัก (วัน)



ภาพที่ 4.1 ค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal plot of % probability) กับค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals)



ภาพที่ 4.2 ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับผลตอบสนองจากการทำนาย (Predicted)



ภาพที่ 4.3 ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับหมายเลขชุดการทดลอง (Run number)

4.2 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์โดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface method) และการออกแบบการทดลองด้วยวิธีของ Box-Behnken

4.2.1 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface method)

หลังจากคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยวิธี placklett-Burman แล้ว จะนำปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ มาทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบ โดยปัจจัยที่คัดกรองแล้วมีจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนผักตบชวา : กากเบียร์ ปริมาณมูลวัว และระยะเวลาในการหมัก เมื่อนำปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยนี้มาออกแบบการทดลองอีกครั้งด้วยวิธีของ Box-Behnken พบว่ามีจำนวนชุดการทดลองทั้งสิ้น 17 ชุดการทดลอง โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลองและผลการทดลองแสดงตารางที่ 4.3 เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยแต่ละปัจจัยกับปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) อีกครั้ง พบว่า ปัจจัยเดี่ยวที่มีอิทธิพลต่อปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ มีเพียง ระยะเวลาในการหมัก (P=0.0020) เท่านั้น ส่วนอัตราส่วนผักตบชวาต่อกากเบียร์ และปริมาณมูลวัว ไม่มีนัยสำคัญแบบปัจจัยเดี่ยว แต่ปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยนี้ จะมีสหสัมพันธ์ (interaction) ต่อกันแบบหักล้างกันและจะมีอิทธิพลต่อปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ (P=0.0313) โดยเมื่ออัตราส่วนของผักตบชวาต่อกากเบียร์เท่ากับ 2 ต่อ 1 และปริมาณมูลวัว เท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อวัน จะส่งผลให้เกิดก๊าซชีวภาพในปริมาณน้อยที่สุด ที่ระยะเวลาการหมัก 13 วัน เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น คือมีค่าเท่ากับประมาณ 612 มิลลิลิตร โดยผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแสดงดังตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาการหมัก แสดงดังภาพที่ 4.4 และภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นกับอัตราส่วนผักตบชวาต่อกากเบียร์และปริมาณมูลวัวที่เติม แสดงดังภาพที่ 4.6

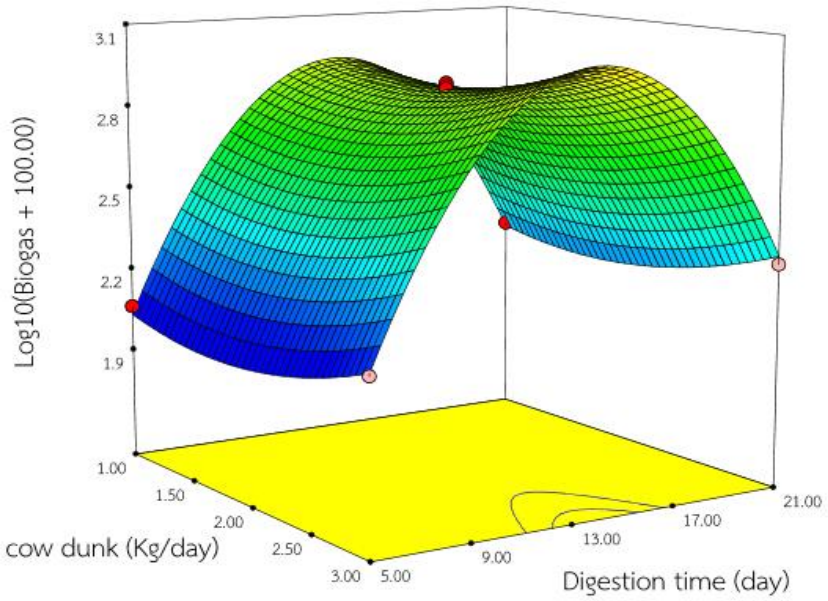
ตารางที่ 4.3 สภาวะที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลและปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วยวิธีของ Box-Behnken

ชุดการทดลอง	ปัจจัยที่ศึกษา			ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)
	ผักตบชวา:กากเบียร์	ปริมาณมูลวัว (กิโลกรัม/วัน)	ระยะเวลาในการหมัก (วัน)	
1	2	2	13	612
2	2	2	13	658
3	2	3	5	27
4	2	2	13	677
5	1	1	13	900
6	2	2	13	695
7	1	2	21	80
8	2	2	13	715
9	2	1	5	15

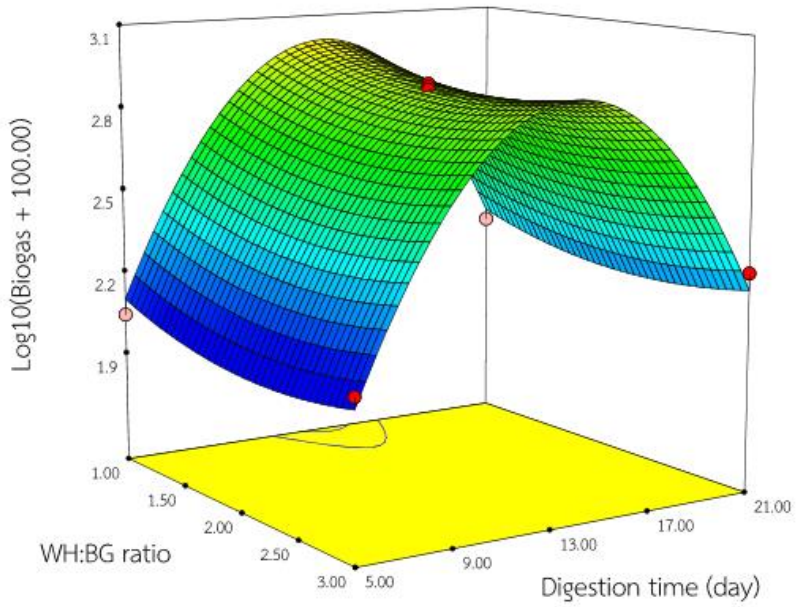
ชุดการทดลอง	ปัจจัยที่ศึกษา			ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)
	ผักตบชวา:กากเบียร์	ปริมาณมูลวัว (กิโลกรัม/วัน)	ระยะเวลาในการหมัก (วัน)	
10	3	2	21	90
11	2	3	21	100
12	3	2	5	12
13	2	1	21	70
14	3	3	13	800
15	1	3	13	1880
16	1	2	5	10
17	3	1	13	855

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่มีอิทธิพลด้วยวิธีของ Box-Behnken

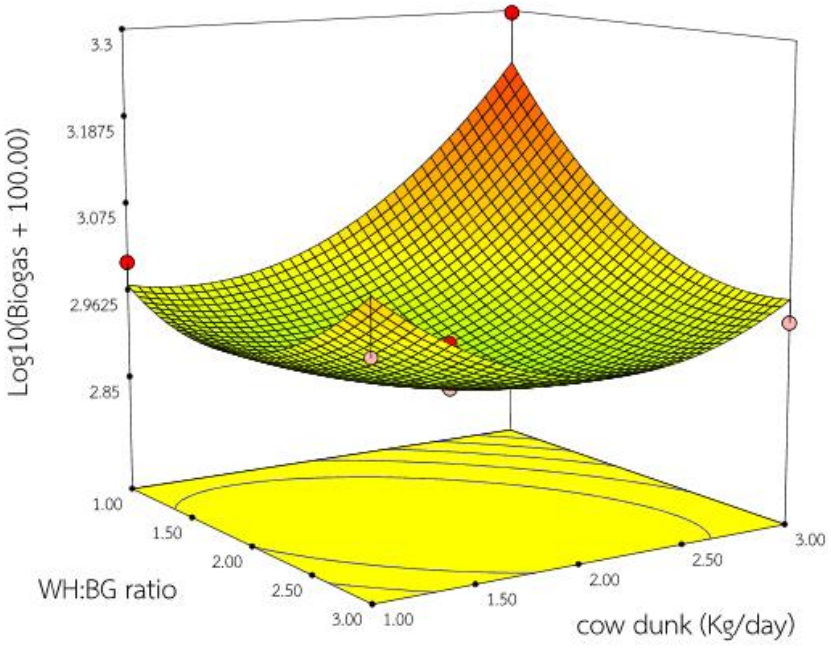
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	2.9	9	0.32	89.48	<0.0001
X_1	0.014	1	0.014	3.8	0.0921
X_2	0.018	1	0.018	5.13	0.0579
X_3	0.082	1	0.082	22.79	0.0020
$X_1 X_2$	0.026	1	0.026	7.21	0.0313
$X_1 X_3$	6.128×10^{-5}	1	6.128×10^{-5}	0.017	0.8999
$X_2 X_3$	1.887×10^{-4}	1	1.887×10^{-4}	0.052	0.8255
X_1^2	0.025	1	0.025	6.85	0.0346
X_2^2	0.037	1	0.037	10.41	0.0145
X_3^2	2.74	1	2.74	761.56	<0.0001
Residual	0.025	7	3.602×10^{-3}		
Lack of Fit	0.023	3	7.733×10^{-3}	15.32	0.0117
Pure Error	2.019×10^{-3}	4	5.048×10^{-4}		
Cor. Total	2.93	16			



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาการหมักและปริมาณมูลวัวที่เติมที่อัตราส่วนของผักตบชวาต่อกากเบียร์ เท่ากับ 2 ต่อ 1



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาการหมักและอัตราส่วนของผักตบชวาต่อกากเบียร์ เมื่อปริมาณมูลวัวที่เติม เท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อวัน

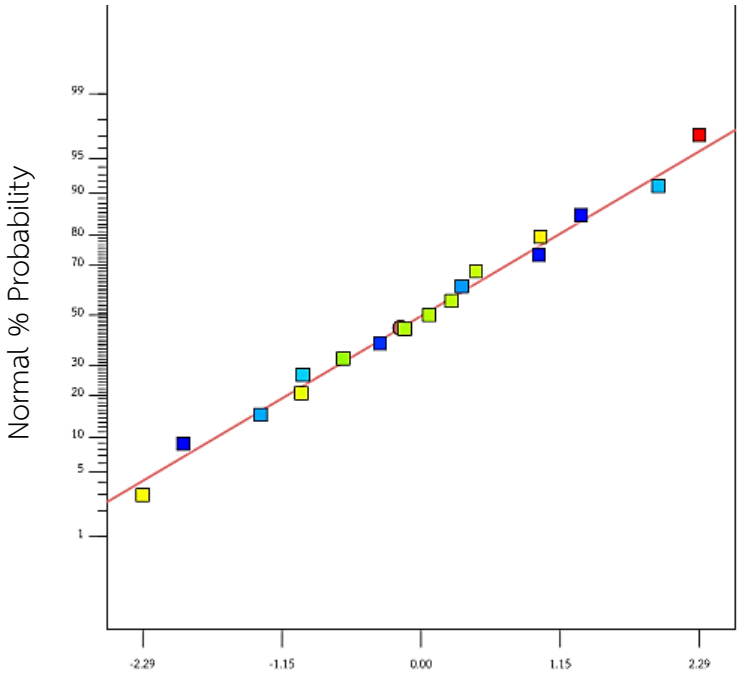


ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นกับอัตราส่วนของผักตบชวาต่อกากเบียร์และปริมาณมูลวัวที่เติม เมื่อระยะเวลาการหมักเท่ากับ 13 วัน

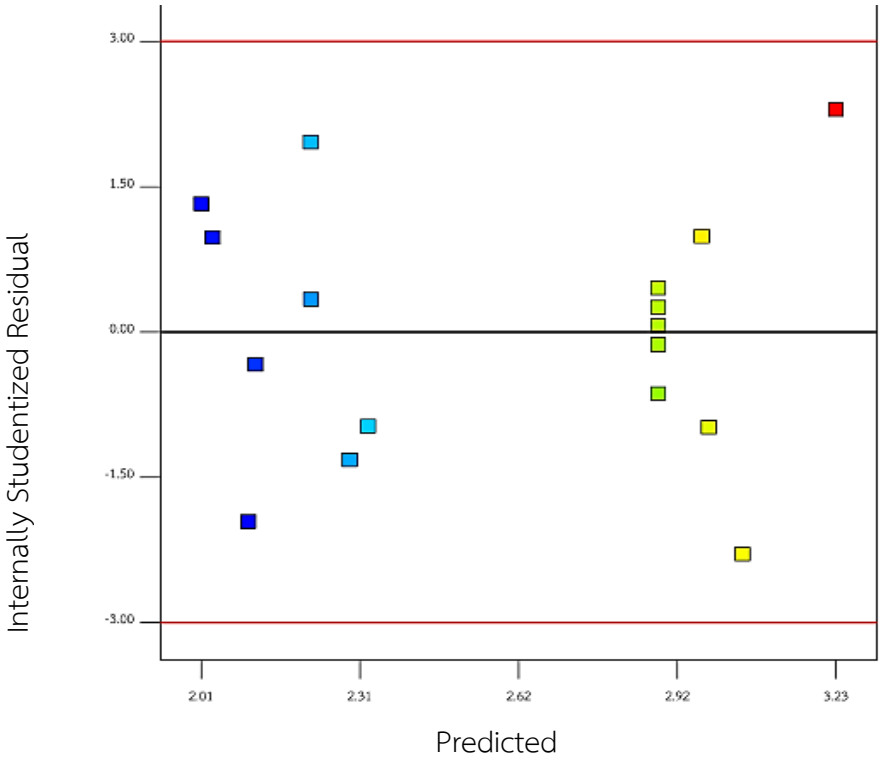
ทำการทดสอบข้อกำหนดทางสถิติของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยพล็อตค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal plot of % probability) กับค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) พบว่า จุดของข้อมูลบนกราฟ มีการเรียงตัวในลักษณะเป็นเส้นตรง (ภาพที่ 4.7) ดังนั้นข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ เมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับค่าผลตอบสนองจากการทำนาย (Predicted) พบว่า การกระจายตัวของข้อมูลไม่มีรูปแบบที่แน่นอน (ภาพที่ 4.8) ดังนั้นข้อมูลไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนคงที่ (constant error) เมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับหมายเลขชุดการทดลอง (run number) พบว่า ไม่มีชุดข้อมูลที่มีค่าส่วนเหลือมาตรฐานต่ำหรือสูงผิดปกติ (ภาพที่ 4.9) ประกอบกับเมื่อพล็อตค่าส่วนเหลือมาตรฐานกับปัจจัยแต่ละปัจจัย พบว่า ข้อมูลกระจายตัวไม่มีรูปแบบแน่นอน (ภาพที่ 4.10 ถึง ภาพที่ 4.12) ดังนั้นข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลแบบสุ่มและมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นสามารถที่จะนำข้อมูลทั้งหมดมาใช้ในการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองต่อไปได้

ทำการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมในการหมักก๊าซชีวภาพด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง โดยกำหนดเงื่อนไขคือ อัตราส่วนของผักตบชวาต่อกากเบียร์มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ต่อ 1 ถึง 3 ต่อ 1 ปริมาณมูลวัวที่เติมมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 กิโลกรัมต่อวัน ระยะเวลาการหมักมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 21 วัน และต้องให้ปริมาณก๊าซชีวภาพในระดับสูงสุด ผลการวิเคราะห์ พบว่า สภาวะที่จะก่อให้เกิดก๊าซชีวภาพสูงที่สุด คือ อัตราส่วนของผักตบชวาต่อกากเบียร์ เท่ากับ 1 ต่อ 1 ปริมาณมูลวัวที่เติมมีค่าเท่ากับ 3 กิโลกรัมต่อวัน และระยะเวลาการหมักมีค่าเท่ากับ 13.51 วัน โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 1602.79 มิลลิลิตร

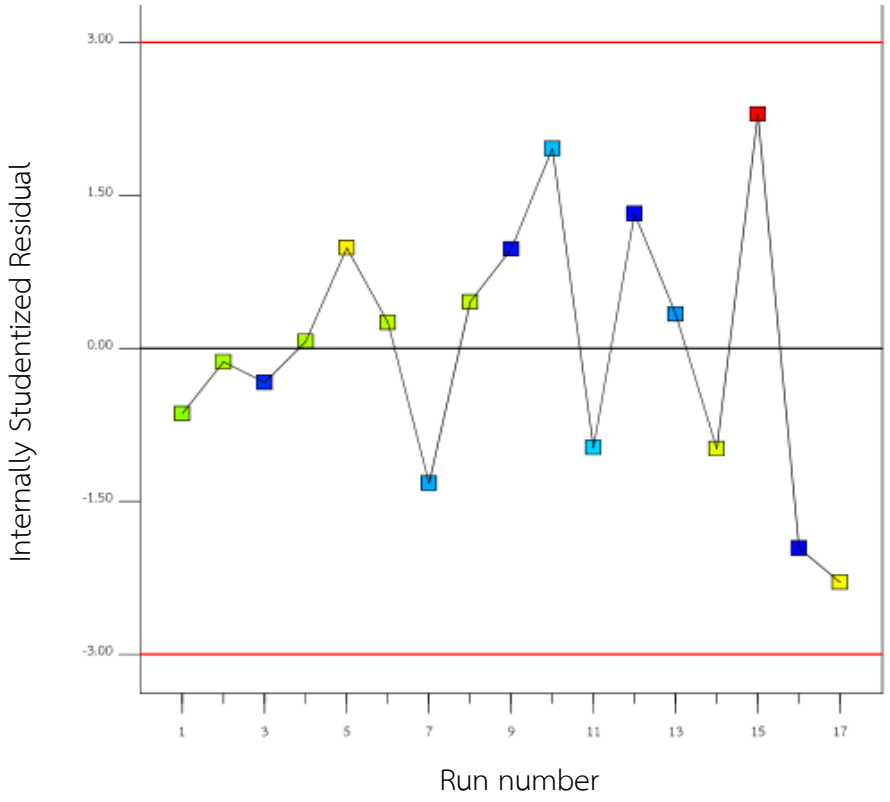
โดยภาพจำลองความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซชีวภาพที่คาดว่าจะเกิดขึ้นสูงสุดกับค่าปัจจัยที่เหมาะสม แสดงดังภาพที่ 4.13 ถึง รูปที่ ภาพที่ 4.15



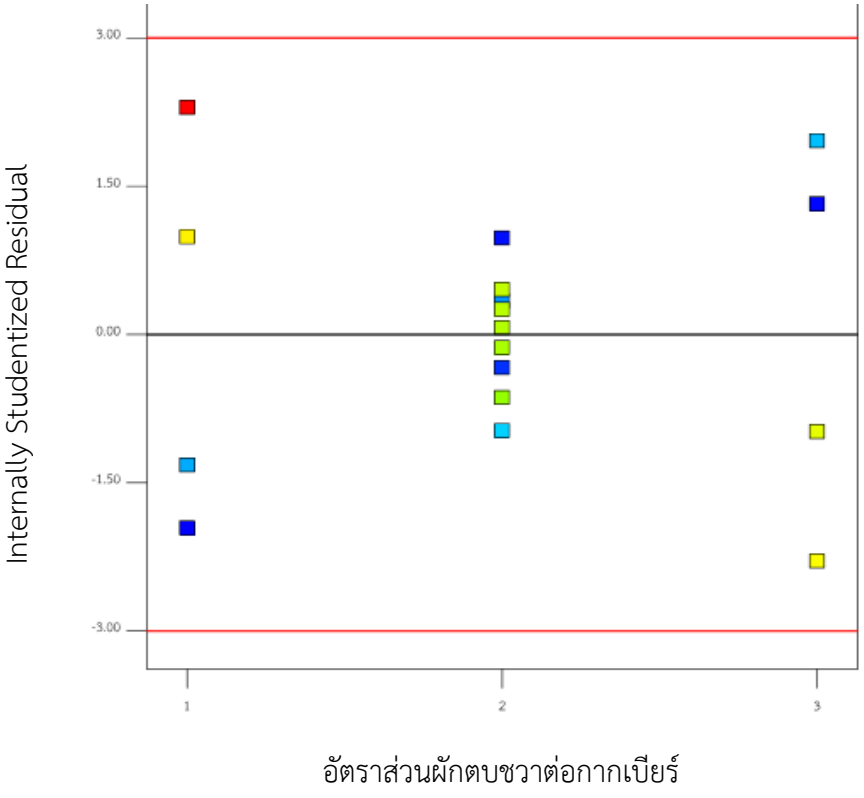
ภาพที่ 4.7 ค่าร้อยละความน่าจะเป็นปกติ (normal plot of % probability) กับค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals)



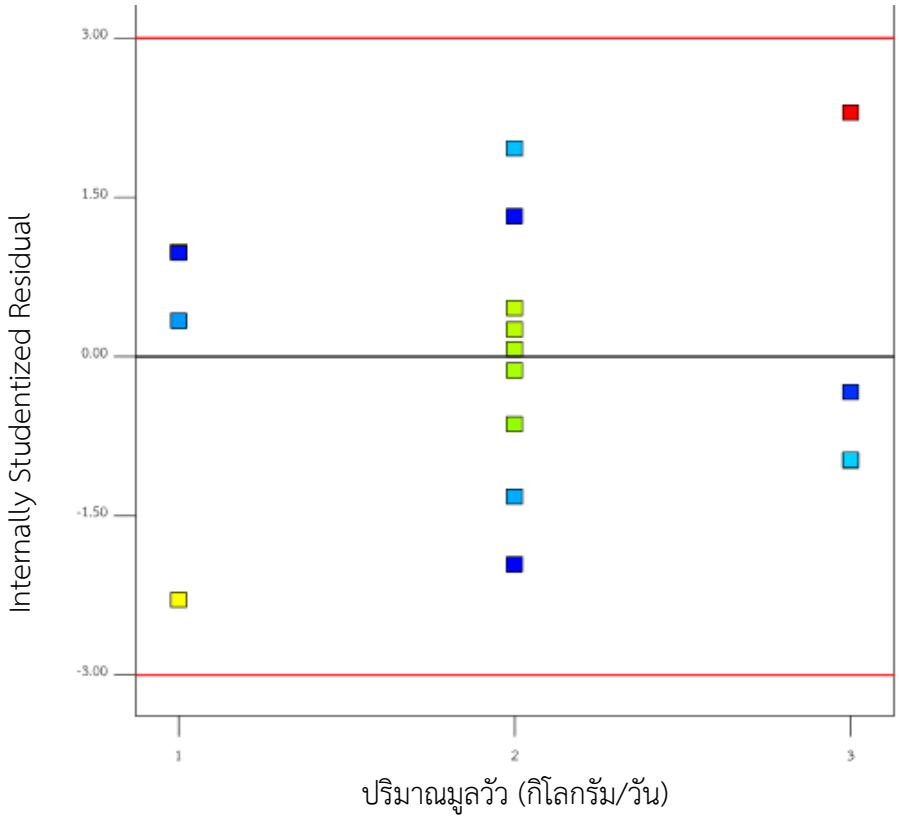
ภาพที่ 4.8 ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับผลตอบสนองจากการทำนาย (Predicted)



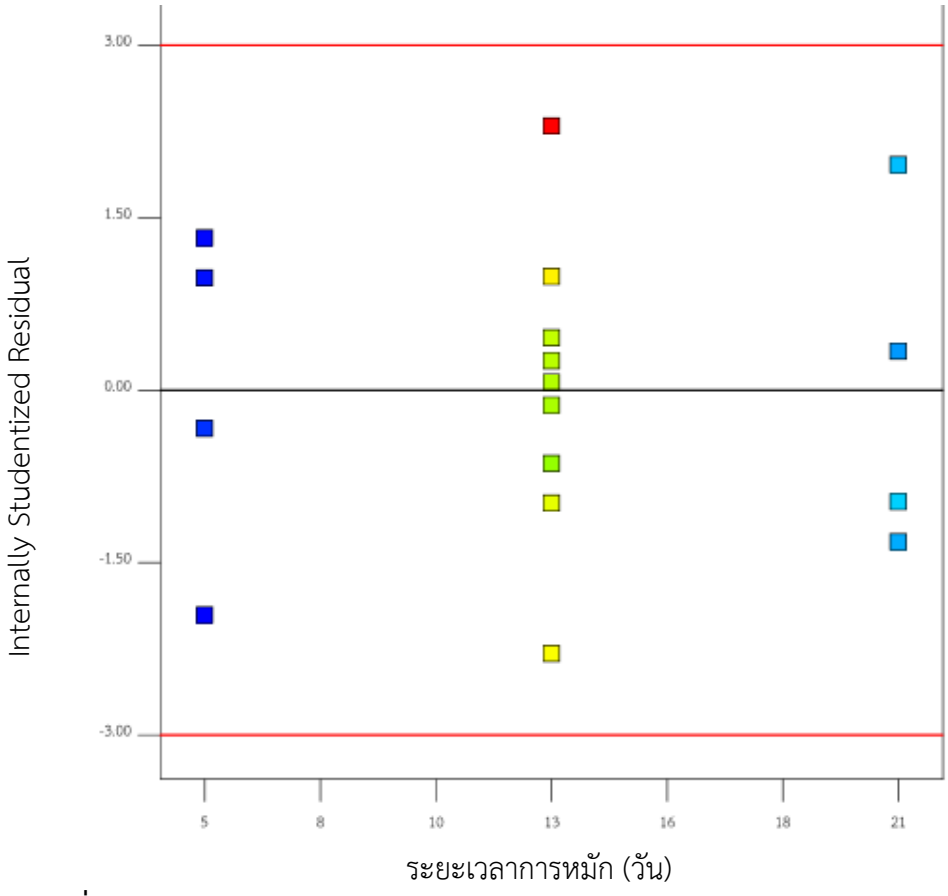
ภาพที่ 4.9 ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับหมายเลขชุดการทดลอง (Run number)



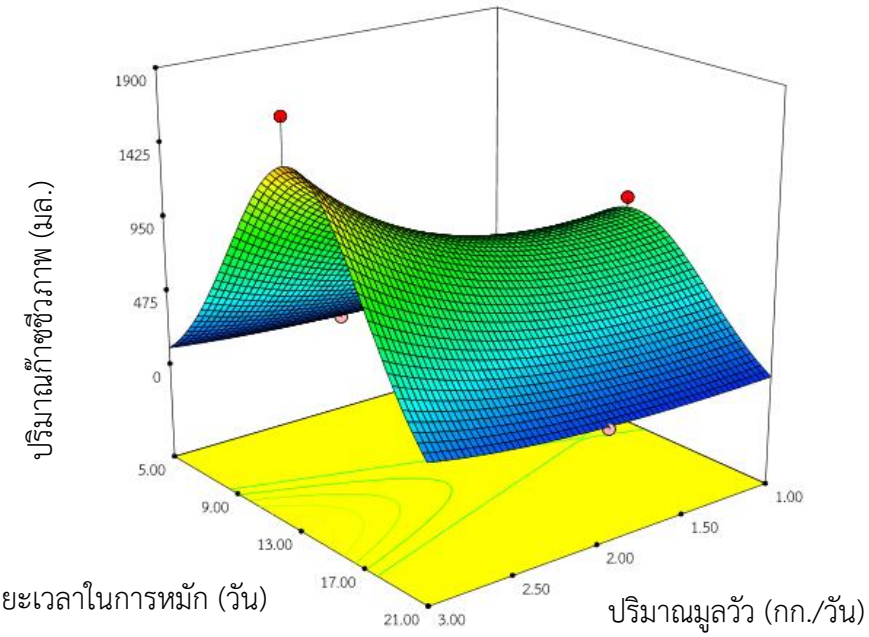
ภาพที่ 4.10 ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับอัตราส่วนผักตบชวาต่อกากเบียร์



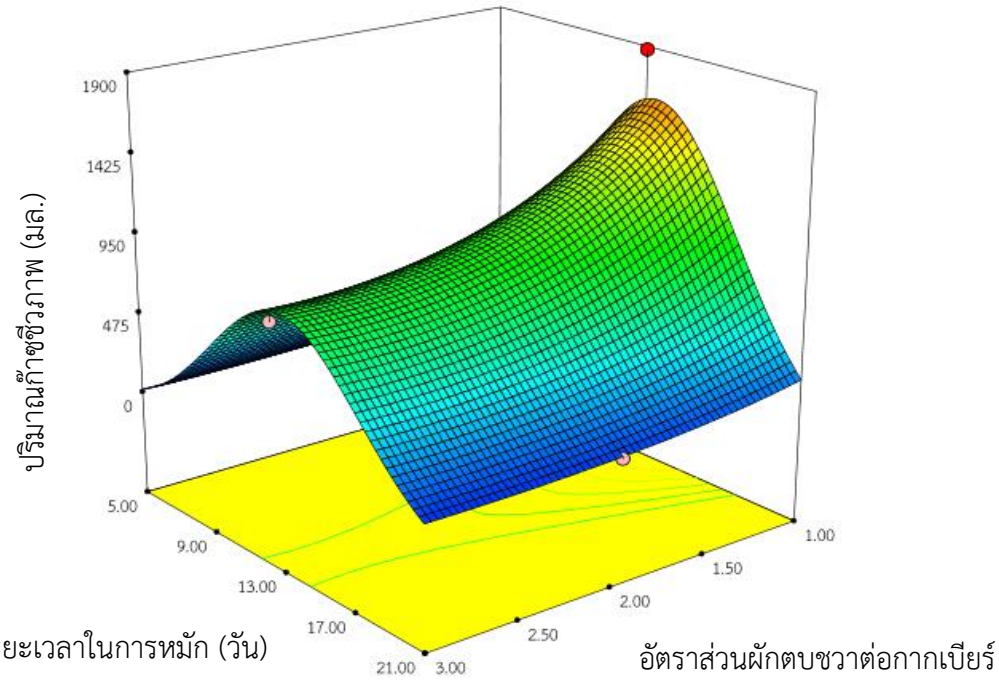
ภาพที่ 4.11 ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับปริมาณมูลวัว (กิโลกรัม/วัน)



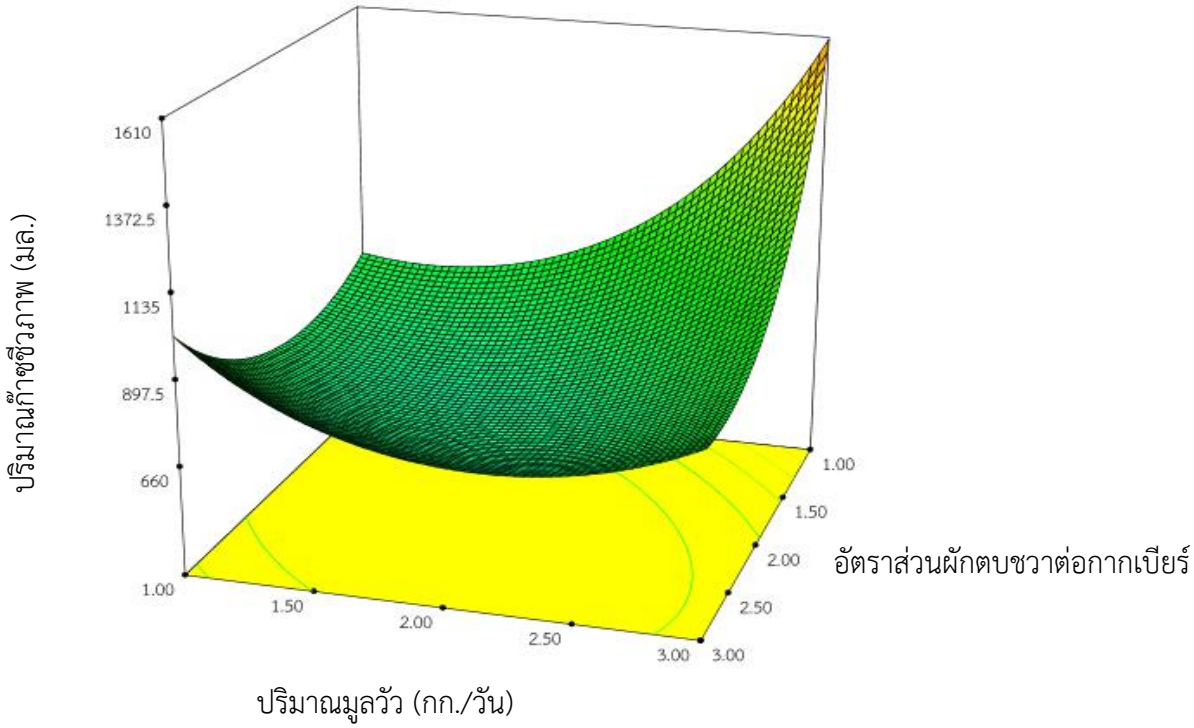
ภาพที่ 4.12 ค่าส่วนเหลือมาตรฐาน (standardized residuals) กับระยะเวลาการหมัก (วัน)



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาการหมักและปริมาณมูลวัวที่เติม ที่อัตราส่วนของผักตบชวาต่อกากเบียร์ เท่ากับ 1 ต่อ 1



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นกับระยะเวลาการหมักและอัตราส่วนของผักตบชวาต่อกากเบียร์ เมื่อปริมาณมูลวัวที่เติม เท่ากับ 3 กิโลกรัมต่อวัน



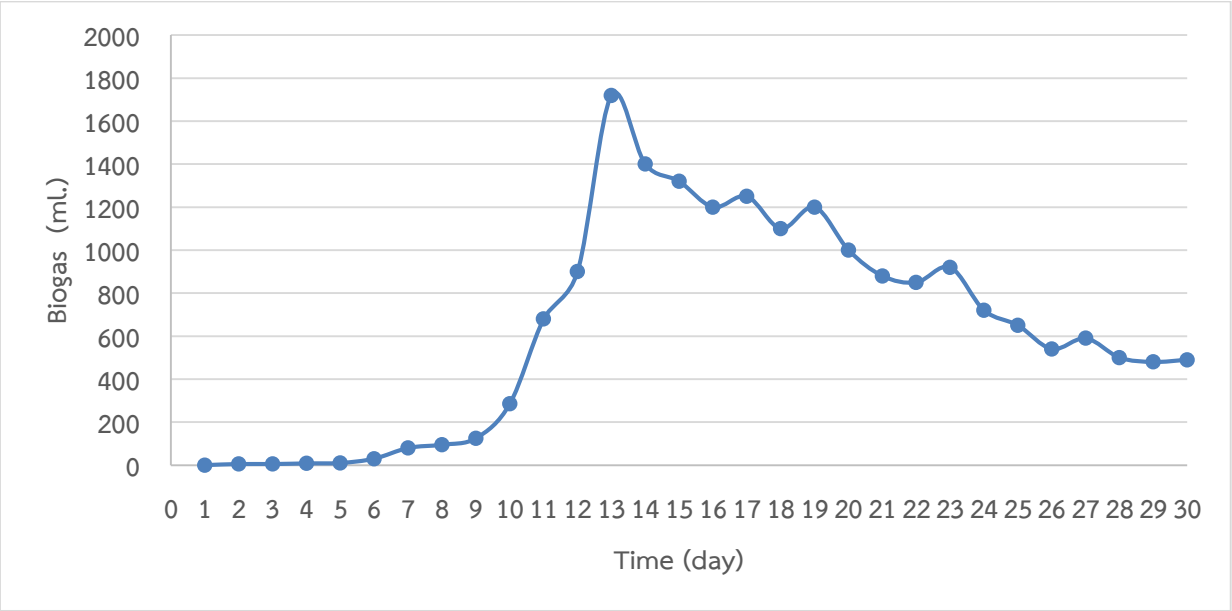
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นกับอัตราส่วนของผักตบชวาต่อกากเบียร์และปริมาณมูลวัวที่เติม เมื่อระยะเวลาการหมักเท่ากับ 13.51 วัน

4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์

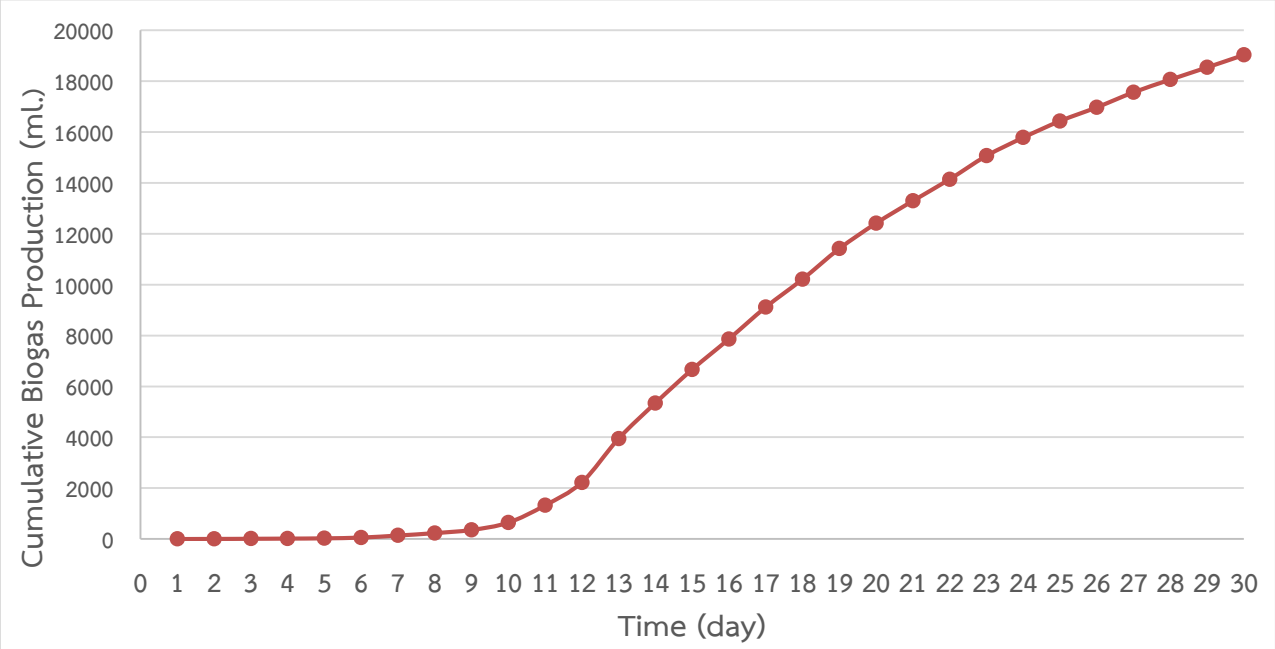
จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมผลการวิเคราะห์ เมื่อทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่คัดกรองแล้ว พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่จะก่อให้เกิดก๊าซชีวภาพสูงที่สุด คือ อัตราส่วนของผักตบชวาต่อกากเบียร์ เท่ากับ 1 ต่อ 1 ปริมาณมูลวัวที่เติมมีค่าเท่ากับ 3 กิโลกรัมต่อวัน และระยะเวลาการหมักมีค่าเท่ากับ 13.51 วัน โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 1,602.79 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงได้นำค่าสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวมาใช้ทำการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพด้วยสภาวะไร้อากาศแบบถังหมักสองขั้นตอนเพื่อหาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์

4.3.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ระบบผลิตและองค์ประกอบก๊าซมีเทน

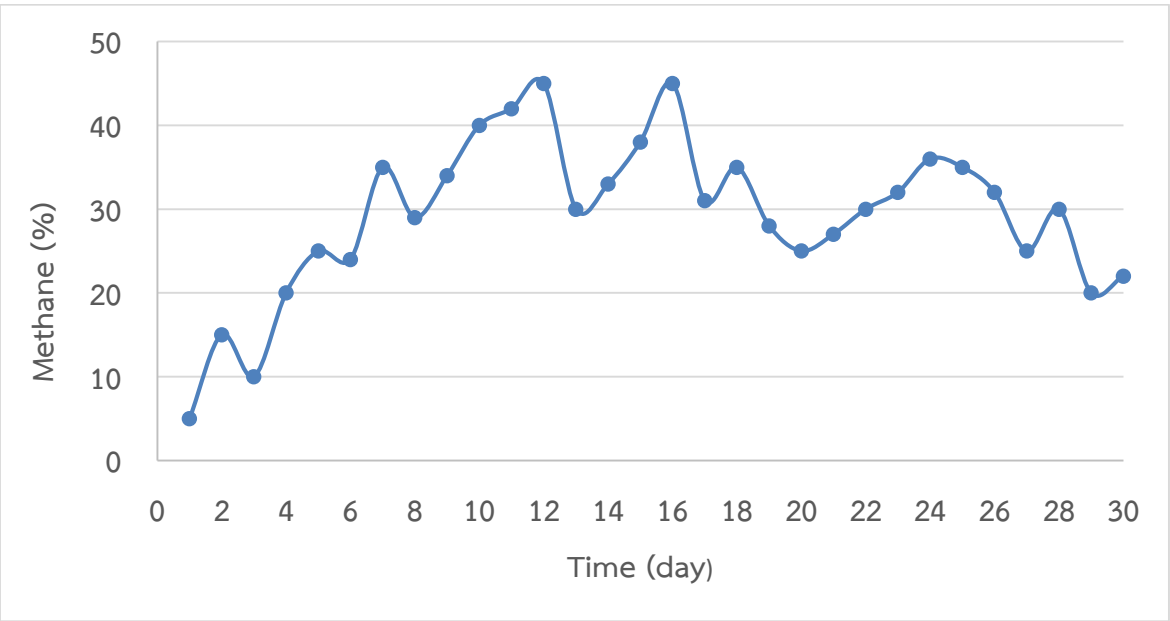
ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพจากการหมักผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์และมูลวัวโดยใช้จุลินทรีย์จะระบบ UASB ในการเริ่มเดินระบบในถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอน ในอัตราส่วนผักตบชวาต่อกากเบียร์ต่อมูลวัว 1:1:3 โดยใช้ระยะเวลา 30 วัน เมื่อตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพได้ผลการศึกษาดังภาพที่ 4.16 – 4.22 พบว่าช่วง 6 วันแรกระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่า pH ของระบบช่วงเริ่มต้นค่อนข้างต่ำอยู่ในสภาะที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรีย ต่อมาเมื่อมีการเติมวัตถุดิบเพิ่มเข้าระบบทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น ระดับค่า pH เริ่มปรับสูงขึ้นค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีการปรับลดลง ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้น และมีค่าปริมาณก๊าซชีวภาพสูงที่สุด คือ 1,720 มิลลิลิตร ที่เวลา 13 วัน ค่า pH 6.4 มีค่าองค์ประกอบก๊าซมีเทนร้อยละ 30 ค่า Alklinity 1,175 mg/ l as $Ca(CO_3)_2$ ค่า VFA เท่ากับ 470 mg/ l as CH_3COOH และอัตราส่วนความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพด่างเท่ากับ 0.4 มีความเหมาะสมในการเดินระบบแบบไร้ออกซิเจนซึ่งปกติจะอยู่ในช่วง 0.4 – 0.8 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่ามีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ



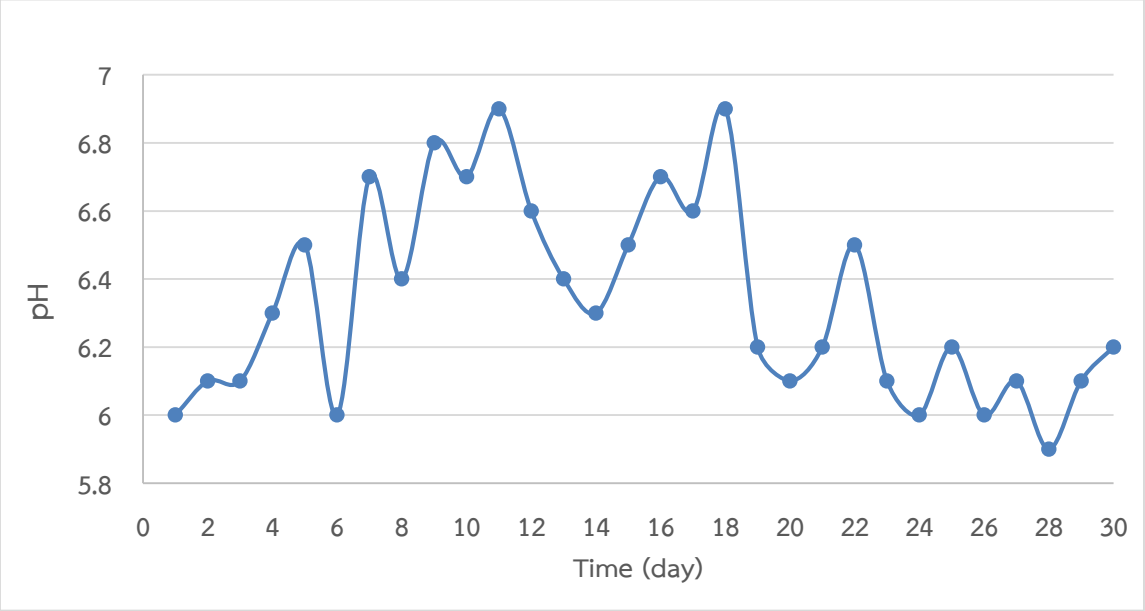
ภาพที่ 4.16 ปริมาณก๊าซชีวภาพจากการหมักผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์และมูลวัวในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1:3 (ผักตบชวา:กากเบียร์:มูลวัว) จากการใช้หลักสถิติวิเคราะห์



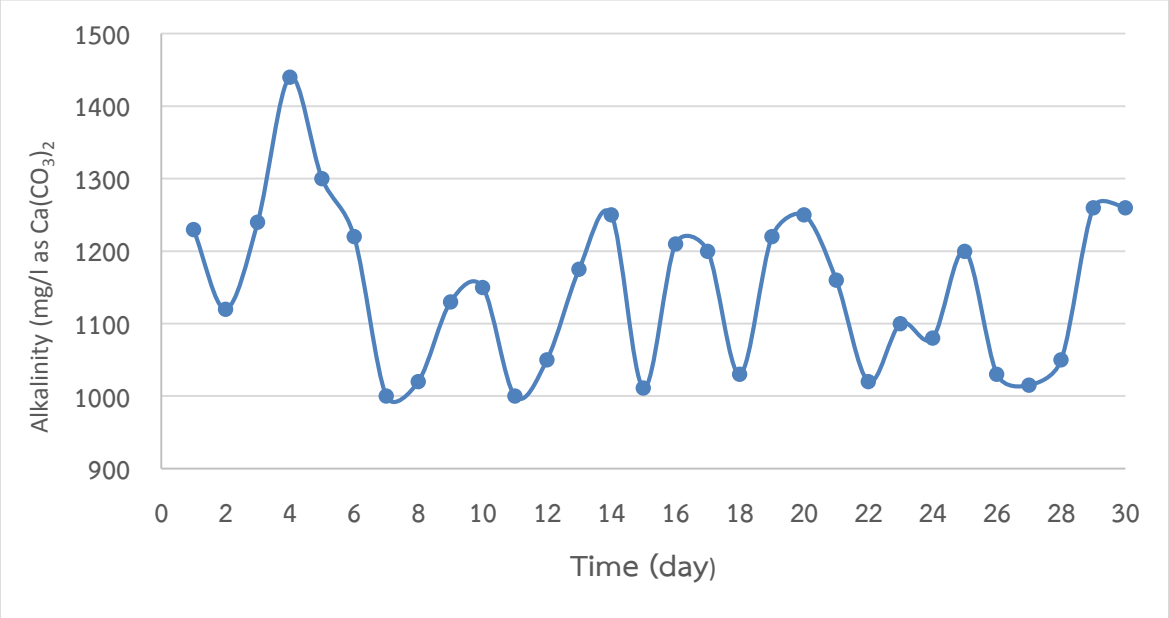
ภาพที่ 4.17 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากการหมักผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์และมูลวัวในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1:3 (ผักตบชวา:กากเบียร์:มูลวัว) จากการใช้หลักสถิติวิเคราะห์



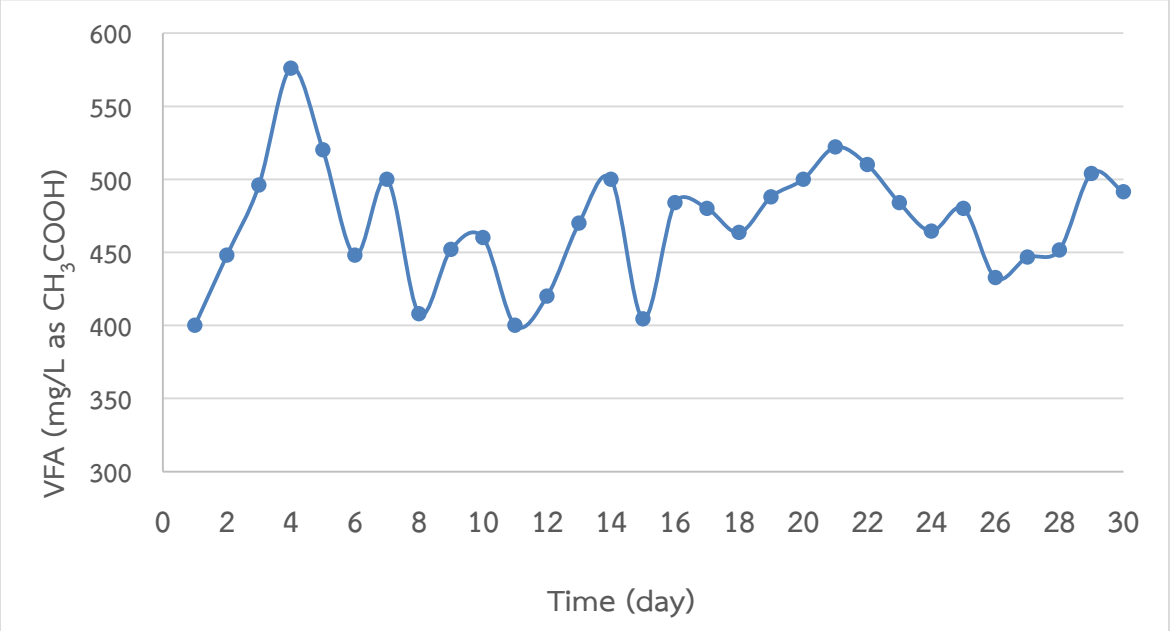
ภาพที่ 4.18 ร้อยละของปริมาณองค์ประกอบก๊าซมีเทนจากการหมักผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์และมูลวัวในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1:3 (ผักตบชวา:กากเบียร์:มูลวัว)จากการใช้หลักสถิติวิเคราะห์



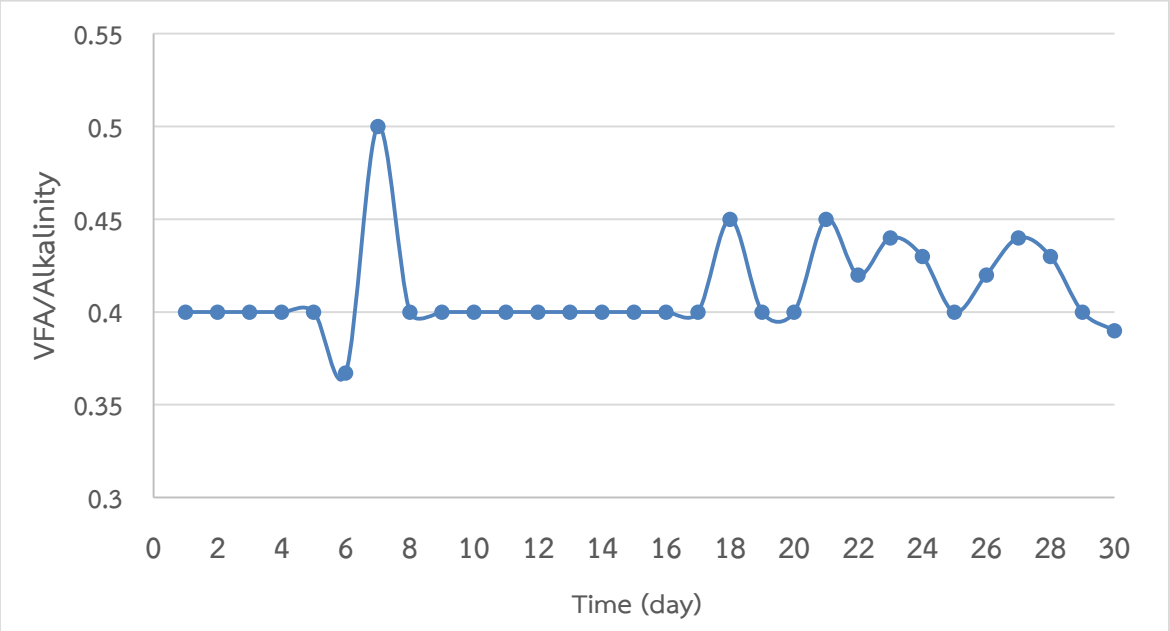
ภาพที่ 4.19 ค่าพีเอชจากการหมักผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์และมูลวัวในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1:3 (ผักตบชวา:กากเบียร์:มูลวัว) จากการใช้หลักสถิติวิเคราะห์



ภาพที่ 4.20 ค่าความเป็นด่างจากการหมักผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์และมูลวัวในอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ 1:1:3 (ผักตบชวา:กากเบียร์:มูลวัว) จากการใช้หลักสถิติวิเคราะห์



ภาพที่ 4.21 กรดอินทรีระเหยง่ายจากการหมักผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์และมูลวัวในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1:3 (ผักตบชวา:กากเบียร์:มูลวัว) จากการใช้หลักสถิติวิเคราะห์



ภาพที่ 4.22 อัตราส่วนความเข้มข้นของกรดอินทรีระเหยง่ายต่อสภาพด่างจากการหมักผักตบชวาร่วมกับกากเบียร์และมูลวัวในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1:3 (ผักตบชวา:กากเบียร์:มูลวัว) จากการใช้หลักสถิติวิเคราะห์