

## บทที่ 4

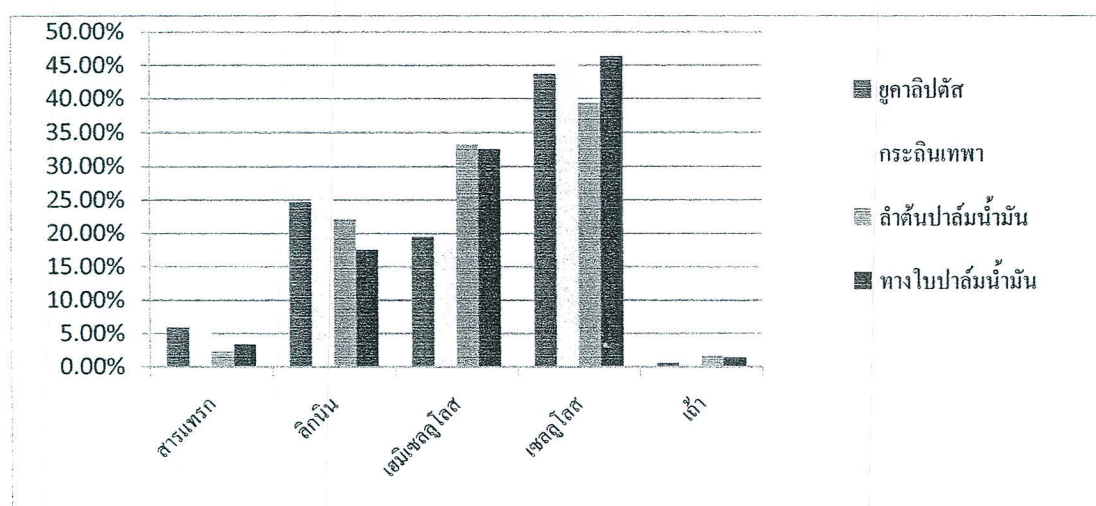
### ผลและการอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1 การหาค่าประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา ลำต้นปาล์มน้ำมัน และทางใบปาล์มก่อน ฟritritเมนต์

ผลการทดลองหาค่าประกอบทางเคมีของชีวมวลทั้ง 4 ชนิดก่อนฟritritเมนต์โดยการระบิดด้วยไอน้ำ ได้ผลดังตารางที่ 10 และภาพที่ 9

ตารางที่ 10 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา ลำต้นปาล์มน้ำมัน และทางใบปาล์มก่อนฟritritเมนต์

| องค์ประกอบทางเคมี<br>(เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง) | ยูคาลิปตัส | กระถินเทพา | ลำต้นปาล์ม<br>น้ำมัน | ทางใบปาล์ม<br>น้ำมัน |
|-----------------------------------------------|------------|------------|----------------------|----------------------|
| สารแทรก                                       | 5.91%      | 5.54%      | 2.31%                | 3.46%                |
| ลิกนิน                                        | 24.69%     | 26.44%     | 22.15%               | 17.60%               |
| เฮมิเซลลูโลส                                  | 19.55%     | 18.28%     | 33.22%               | 32.57%               |
| เซลลูโลส                                      | 43.75%     | 46.47%     | 39.41%               | 46.35%               |
| เถ้า                                          | 0.57%      | 0.76%      | 1.66%                | 1.46%                |



ภาพที่ 9 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ตัวอย่าง 4 ชนิดก่อนฟritritเมนต์

## 4.2 การหาสถานะที่เหมาะสมในการพรีทรีตเมนต์ โดยการระเบิดไอน้ำ (steam explosion) ของไม้ยูคาลิปตัส กระดาษเทพา ลำต้นปาล์มน้ำมัน และทางใบปาล์ม

โดยสภาวะการระเบิดด้วยไอน้ำ จะแสดงอยู่ในรูปค่า severity factor ( $\log Ro$ ) ซึ่งเป็นตัวแปรที่รวมตัวแปรอุณหภูมิและเวลาเป็นตัวแปรเดียวกัน ดังตารางที่ 11

จากสูตร  $\log Ro = \log \{t \exp [(T-100)/14.75] \}$

เมื่อ  $t$  คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการระเบิด (นาทีก)

$T$  คือ อุณหภูมิของไอน้ำ (องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 11 ค่า severity factor ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลาของการระเบิดด้วยไอน้ำ

| อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาทีก) | $\log Ro$ |
|-------------------------|--------------|-----------|
| 200                     | 2            | 3.24      |
|                         | 4            | 3.55      |
|                         | 6            | 3.72      |
| 210                     | 2            | 3.54      |
|                         | 4            | 3.84      |
|                         | 6            | 4.02      |

### 4.2.1 การหาสถานะที่เหมาะสมในการพรีทรีตเมนต์โดยการระเบิดไอน้ำไม้ยูคาลิปตัส

นำตัวอย่างไม้ที่ได้ซึ่งแบ่งไว้ ถุงละ 200 กรัม น้ำหนักแห้ง ทำการระเบิดด้วยไอน้ำแต่ละสภาวะ สภาวะละ 3 ชั่วโมง แล้วรวบรวมตัวอย่างที่ผ่านการระเบิดโดยไม่ผ่านการล้างเชื้อด้วยน้ำลงถุงมัดปาก เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C จากนั้นแบ่งน้ำเชื้อบางส่วนไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี หลังจากผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำ โดยได้ผลองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 12



ตารางที่ 12 ค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ของตัวอย่างไม้ยูคาลิปตัสหลังระเบิดด้วยไอน้ำ (SE) ตามลำดับ

| logRo | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักแห้ง) |        |              |      |        |
|-------|---------------------------------------------|--------|--------------|------|--------|
|       | เซลลูโลส                                    | ลิกนิน | เฮมิเซลลูโลส | เถ้า | อื่น ๆ |
| 3.24  | 42.17                                       | 26.47  | 20.19        | 0.46 | 10.71  |
| 3.54  | 44.36                                       | 28.25  | 14.33        | 0.45 | 12.61  |
| 3.55  | 42.31                                       | 27.59  | 20.91        | 0.4  | 8.79   |
| 3.72  | 44.87                                       | 27.94  | 17.28        | 0.57 | 9.34   |
| 3.84  | 44.86                                       | 29.91  | 15.27        | 0.43 | 9.53   |
| 4.02  | 41.53                                       | 30.91  | 11.69        | 0.56 | 15.31  |

จากวัตถุประสงค์ในการพริทรีตเมนต์โดยการระเบิดด้วยไอน้ำ เพื่อทำลายโครงสร้างและกำจัด เฮมิเซลลูโลสออก จะพบว่าผลจากตารางที่ 12 เมื่อสภาวะที่รุนแรงขึ้นทำให้สัดส่วนค่าของเฮมิเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด และสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีตัวอื่นค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

เมื่อนำเชื้อไม้ที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำแบ่งออกมา 100 กรัม น้ำหนักแห้ง มาทำการล้างด้วยน้ำร้อนดังสภาวะที่ได้กำหนด แล้วนำตัวอย่างมากรอง เอาแต่เชื้อไว้ และแบ่งน้ำเชื้อบางส่วนไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีหลังจากผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว จะได้ผลองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ของตัวอย่างไม้ยูคาลิปตัสหลังระเบิดด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อน (WE) ตามลำดับ

| logRo | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักแห้ง) |                     |                    |                   |        |
|-------|---------------------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--------|
|       | เซลลูโลส                                    | ลิกนิน              | เฮมิเซลลูโลส       | เถ้า              | อื่น ๆ |
| 3.24  | 45.20 <sup>c</sup>                          | 27.93 <sup>c</sup>  | 17.31 <sup>a</sup> | 0.20 <sup>a</sup> | 9.36   |
| 3.54  | 53.08 <sup>a</sup>                          | 32.27 <sup>ab</sup> | 8.69 <sup>b</sup>  | 0.22 <sup>a</sup> | 5.74   |
| 3.55  | 48.83 <sup>b</sup>                          | 31.09 <sup>b</sup>  | 9.59 <sup>b</sup>  | 0.19 <sup>a</sup> | 10.3   |
| 3.72  | 49.07 <sup>b</sup>                          | 32.79 <sup>a</sup>  | 7.80 <sup>b</sup>  | 0.21 <sup>a</sup> | 10.13  |
| 3.84  | 53.94 <sup>a</sup>                          | 33.16 <sup>a</sup>  | 3.64 <sup>c</sup>  | 0.16 <sup>a</sup> | 9.1    |
| 4.02  | 53.34 <sup>a</sup>                          | 33.35 <sup>a</sup>  | 2.62 <sup>c</sup>  | 0.18 <sup>a</sup> | 10.51  |

หมายเหตุ –<sup>a,b,c</sup> เป็นกลุ่มของตัวอย่างทดลองที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 เปอร์เซ็นต์ระดับความเชื่อมั่น

จากตารางที่ 13 จะพบว่า เมื่อหลังการระเบิดด้วยไอน้ำ ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว สภาวะที่รุนแรงขึ้น มีแนวโน้มสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลงได้มากกว่า เมื่อเทียบกับก่อนล้างด้วยน้ำร้อน ทำให้สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีอื่นมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมของการระเบิดด้วยไอน้ำ จึงทำการเลือกสภาวะหลังจากที่ผ่านการล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว เนื่องจากเยื่อที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำ อาจยังมีน้ำตาล สารพิษหรือกรดเกิดขึ้นระหว่างการระเบิด สังเกตได้ว่า ค่าเฮมิเซลลูโลสลดลงไปมากขึ้น เมื่อผ่านการล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว โดยค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลส สูงสุดที่เหลืออยู่คือ 17.31 เปอร์เซ็นต์ และต่ำสุดคือ 2.62 เปอร์เซ็นต์ เมื่อสภาวะที่รุนแรงขึ้น

การทดลองนี้เป็นการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) โดยเป็นกรณีที่มีปัจจัยที่ต้องการเปรียบเทียบเพียงปัจจัยเดียวในการทดลอง คือ logRo ซึ่งในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมของการระเบิดด้วยไอน้ำ ข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง จะถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยแบบจำลองเชิงเส้นตรง (General linear model หรือ GLM) ในรูปแบบแผนการทดลองแบบ CRD และมีการทดสอบความแตกต่างแบบ least significant difference หรือ LSD ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SAS รุ่น 8.01 (SAS, 2000)

หลังจากใช้โปรแกรม SAS คำนวณทางสถิติเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมแล้ว จากตารางที่ 8 พบว่าในเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ เลือกที่สถานะ  $\log Ro$  3.84 ให้สัดส่วนเซลลูโลสคงเหลือมากที่สุด คือ 53.94 เปอร์เซนต์ ซึ่งอยู่ในกลุ่ม a และคงเหลือสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสน้อย ซึ่งอยู่ในกลุ่ม c คือเหลือ 3.64 เปอร์เซนต์ โดยมองในแง่สัดส่วนเฮมิเซลลูโลสคงเหลือ กลุ่ม c มี 2 สถานะ จะเป็นกลุ่มที่คงเหลือสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ต่ำที่สุด ซึ่งจากผลทางสถิติ รวมทั้งปัจจัยทางด้านพลังงาน ความคุ้มทุน โดยที่สถานะ  $\log Ro$  4.02 สิ้นเปลืองพลังงานในการระเบิดมากกว่า เนื่องจากใช้เวลาในการระเบิดนานกว่า เมื่อเทียบกับสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลงไม่แตกต่างกันกับสถานะ  $\log Ro$  3.84 อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ดังนั้นจึงเลือกที่สถานะ  $\log Ro$  3.84 คือที่อุณหภูมิ 210 °C เวลา 4 นาที เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดเฮมิเซลลูโลส ในไม้อยู่คาบิปลัดตัวอย่าง

**ตารางที่ 14** สรุปค่าสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีและประสิทธิภาพการลดลงของเฮมิเซลลูโลสในแต่ละขั้นตอนของการพรีทรีตเมนต์ ที่สถานะการระเบิดด้วยไอน้ำ 210 °C เวลา 4 นาที และการล้างด้วยน้ำร้อน 80 °C เวลา 30 นาที ของไม้อยู่คาบิปลัด

| ขั้นตอน            | ประสิทธิภาพ<br>(เปอร์เซนต์) | องค์ประกอบทางเคมี<br>(เปอร์เซนต์น้ำหนักแห้ง) |        |          |      |        |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|--------|----------|------|--------|
|                    |                             | เซลลูโลส                                     | ลิกนิน | เพนโตแซน | เถ้า | อื่น ๆ |
|                    |                             |                                              |        |          |      |        |
| วัตถุดิบเริ่มต้น   | 0                           | 43.75                                        | 24.69  | 19.55    | 0.57 | 11.44  |
| การระเบิดด้วยไอน้ำ | 21.89                       | 44.86                                        | 29.91  | 15.27    | 0.43 | 9.53   |
| การล้างด้วยน้ำร้อน | 81.38                       | 53.94                                        | 33.16  | 3.64     | 0.16 | 9.1    |

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 14 องค์ประกอบทางเคมีของไม้อยู่คาบิปลัด เมื่อผ่านทุกขั้นตอนการพรีทรีตเมนต์ โดยสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่คงเหลืออยู่ลดลงอย่างชัดเจนจาก 19.55 เหลือ 3.64 เปอร์เซนต์น้ำหนักแห้ง ทำให้ส่วนของเซลลูโลสและลิกนินมีสัดส่วนที่เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณเซลลูโลสและลิกนินส่วนใหญ่แทบจะไม่หายไปในช่วงขั้นตอนการระเบิดด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อน และในแต่ละขั้นตอนจะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดเฮมิเซลลูโลสออกจากเยื่อได้เพิ่มขึ้น คือ หลังจากผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ 21.89 เปอร์เซนต์ แต่พอนำมาล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว จะพบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเป็น 81.38 เปอร์เซนต์



เนื่องจากน้ำร้อนจะชะล้างและสกัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่ถูกย่อยแล้วในขั้นตอนการระเบิดด้วยไอน้ำ บางส่วนที่เคลือบอยู่ที่ผิวเชื้อออกไป

#### 4.2.2 การหาสถานะที่เหมาะสมในการพรีทรีตเมนต์ โดยการระเบิดไอน้ำไม้กระถินเทพา

เมื่อนำตัวอย่างไม้ที่ได้ซังแบ่งไว้ ถูกละ 200 กรัม น้ำหนักแห้ง ทำการระเบิดด้วยไอน้ำแต่ละสถานะ สถานะละ 3 ชั่วโมง แล้วรวบรวมตัวอย่างที่ผ่านการระเบิดโดยไม่ผ่านการล้างเชื้อด้วยน้ำลงถุงมัดปาก เก็บไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 °C จากนั้นแบ่งนำเชื้อบางส่วนไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี หลังจากผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำ โดยได้ผลองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 15

**ตารางที่ 15** ค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ของตัวอย่างไม้กระถินเทพาหลังระเบิดด้วยไอน้ำ (SE) ตามลำดับ

| logRo | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักแห้ง) |        |              |      |        |
|-------|---------------------------------------------|--------|--------------|------|--------|
|       | เซลลูโลส                                    | ลิกนิน | เฮมิเซลลูโลส | เถ้า | อื่น ๆ |
| 3.24  | 45.14                                       | 28.44  | 19.32        | 0.76 | 6.34   |
| 3.54  | 44.44                                       | 29.33  | 17.92        | 0.68 | 7.63   |
| 3.55  | 45.15                                       | 29.72  | 16.37        | 0.64 | 8.12   |
| 3.72  | 45.35                                       | 31.03  | 15.49        | 0.71 | 7.42   |
| 3.84  | 43.71                                       | 31.49  | 16.09        | 0.79 | 7.92   |
| 4.02  | 43.2                                        | 32.34  | 13.07        | 0.72 | 10.67  |

จากวัตถุประสงค์ในการพรีทรีตเมนต์โดยการระเบิดด้วยไอน้ำ เพื่อทำลายโครงสร้างและกำจัด เฮมิเซลลูโลสออก จะพบว่า ผลจากตารางที่ 15 เมื่อสถานะที่รุนแรงขึ้น จะทำให้สัดส่วนค่าของเฮมิเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด และสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีตัวอื่นค่าแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

เมื่อนำเชื้อไม้ที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำแบ่งออกมา 100 กรัม น้ำหนักแห้ง มาทำการล้างด้วยน้ำร้อนดังสถานะที่ได้กำหนด แล้วนำตัวอย่างมากรอง เอาแต่เชื้อไว้ และแบ่งนำเชื้อบางส่วนไป



วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีหลังจากผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว จะได้ผล  
องค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ของตัวอย่างไม้กระถินเทพาหลังระเบิด  
ด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อน (WE) ตามลำดับ

| logRo | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักแห้ง) |                     |                    |                   |        |
|-------|---------------------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--------|
|       | เซลลูโลส                                    | ลิกนิน              | เฮมิเซลลูโลส       | เถ้า              | อื่น ๆ |
| 3.24  | 49.27 <sup>c</sup>                          | 31.02 <sup>c</sup>  | 14.26 <sup>a</sup> | 0.53 <sup>a</sup> | 4.92   |
| 3.54  | 51.05 <sup>a</sup>                          | 33.80 <sup>ab</sup> | 8.00 <sup>bc</sup> | 0.40 <sup>a</sup> | 6.75   |
| 3.55  | 51.21 <sup>a</sup>                          | 32.71 <sup>bc</sup> | 11.84 <sup>a</sup> | 0.44 <sup>a</sup> | 3.8    |
| 3.72  | 50.37 <sup>ab</sup>                         | 34.00 <sup>ab</sup> | 9.19 <sup>b</sup>  | 0.43 <sup>a</sup> | 6.01   |
| 3.84  | 50.75 <sup>a</sup>                          | 34.02 <sup>ab</sup> | 8.36 <sup>bc</sup> | 0.57 <sup>a</sup> | 6.3    |
| 4.02  | 49.49 <sup>bc</sup>                         | 35.34 <sup>a</sup>  | 6.01 <sup>c</sup>  | 0.57 <sup>a</sup> | 8.59   |

หมายเหตุ – <sup>a,b,c</sup> เป็นกลุ่มของตัวอย่างทดลองที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 เปอร์เซ็นต์  
ระดับความเชื่อมั่น

จากตารางที่ 16 จะพบว่า เยื่อหลังการระเบิดด้วยไอน้ำที่ผ่านการล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว โดย  
สถานะที่รุนแรงขึ้น มีแนวโน้มสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลงได้มากกว่า เมื่อเทียบ  
กับก่อนล้างด้วยน้ำร้อน ทำให้สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีอื่นมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการ  
เลือกสถานะที่เหมาะสมของการระเบิดด้วยไอน้ำ จึงทำการเลือกสถานะหลังจากที่ผ่านการล้างด้วย  
น้ำร้อนแล้ว เนื่องจากเยื่อที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำ อาจยังมีน้ำตาล สารพิษหรือกรดเกิดขึ้นระหว่าง  
การระเบิด สังเกตได้ว่า ค่าเฮมิเซลลูโลสลดลงไปมากขึ้น เมื่อผ่านการล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว โดยค่า  
สัดส่วนเฮมิเซลลูโลสสูงสุดที่เหลืออยู่คือ 14.26 เปอร์เซ็นต์ และต่ำสุดคือ 6.01 เปอร์เซ็นต์ เมื่อ  
สถานะที่รุนแรงขึ้น

การทดลองนี้เป็นการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized  
Design, CRD) โดยเป็นกรณีที่มีปัจจัยที่ต้องการเปรียบเทียบเพียงปัจจัยเดียวในการทดลอง คือ  
logRo ซึ่งในการเลือกสถานะที่เหมาะสมของการระเบิดด้วยไอน้ำ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จะ  
ถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยแบบจำลองเชิงเส้นตรง (General linear model หรือ GLM)

ในรูปแบบแผนการทดลองแบบ CRD และมีการทดสอบความแตกต่างแบบ least significant difference หรือ LSD ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SAS รุ่น 8.01 (SAS, 2000)

หลังจากใช้โปรแกรม SAS คำนวณทางสถิติเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมแล้ว จากตารางที่ 11 พบว่าในเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เลือกที่สภาวะ  $\log R_o$  3.54 ให้สัดส่วนเซลลูโลส คงเหลือมากที่สุด คือ 51.05 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในกลุ่ม a และคงเหลือสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสน้อย อยู่ใน กลุ่ม c คือเหลือ 8.00 เปอร์เซ็นต์ ที่เลือกสภาวะนี้ เนื่องจากภายในกลุ่ม c ที่สภาวะ  $\log R_o$  4.02 ให้ค่า สัดส่วนเฮมิเซลลูโลสคงเหลือน้อยที่สุดก็จริง แต่เมื่อเทียบกับสภาวะ  $\log R_o$  3.54 และ 3.84 ซึ่ง ในทางสถิติ ถือว่าค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสไม่แตกต่างกันในกลุ่ม ( $p < 0.05$ ) ดังนั้นจึงตัดสภาวะ  $\log R_o$  4.02 ทิ้งเนื่องจากปัจจัยทางด้านพลังงานและความคุ้มค่า เหลือสภาวะ  $\log R_o$  3.54 และ 3.84 ในการ เลือกสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งเลือกที่สภาวะ  $\log R_o$  3.54 คือที่อุณหภูมิ 210 °C เวลา 2 นาที เป็นสภาวะ ที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดเฮมิเซลลูโลส ในไม้ตัวอย่างกระถินเทพา เนื่องจากใช้พลังงานที่ต่ำกว่า (เวลาในการระเบิดที่สั้นกว่า) และทำให้สัดส่วนเฮมิเซลลูโลสคงเหลืออยู่น้อยกว่าที่สภาวะ  $\log R_o$  3.84 คืออุณหภูมิที่ 210 °C เวลา 4 นาที

ตารางที่ 17 สรุปค่าสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีและประสิทธิภาพการลดลงของเฮมิเซลลูโลส ในแต่ละขั้นตอนของการพรีทรีตเมนต์ ที่สภาวะการระเบิดด้วยไอน้ำที่เหมาะสม คือ 210 °C เวลา 2 นาที และการล้างด้วยน้ำร้อน 80 °C เวลา 30 นาที ของไม้กระถินเทพา

| ขั้นตอน            | ประสิทธิภาพ<br>การลดลงของ<br>เพนโตแซน<br>(เปอร์เซ็นต์) | องค์ประกอบทางเคมี<br>(เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง) |        |          |      |      |
|--------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------|----------|------|------|
|                    |                                                        | เซลลูโลส                                      | ลิกนิน | เพนโตแซน | เถ้า | อื่น |
| วัตถุดิบเริ่มต้น   | 0                                                      | 46.47                                         | 26.44  | 18.28    | 0.76 | 8.0  |
| การระเบิดด้วยไอน้ำ | 1.97                                                   | 44.44                                         | 29.33  | 17.92    | 0.68 | 7.63 |
| การล้างด้วยน้ำร้อน | 56.24                                                  | 51.05                                         | 33.8   | 8        | 0.4  | 6.7  |

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 17 องค์ประกอบทางเคมีของไม้กระถินเทพา เมื่อผ่าน ทุกขั้นตอนการพรีทรีตเมนต์ โดยสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่คงเหลืออยู่ ลดลงอย่างชัดเจน จาก 18.28 เหลือ 8.00 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ทำให้ส่วนของเซลลูโลสและลิกนินมีสัดส่วนที่เพิ่มสูงขึ้น

เล็กน้อย เนื่องจากปริมาณเซลล์โลสและลิกนินส่วนใหญ่แทบจะไม่หายไปในช่วงขั้นตอนการระเบิดด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อน และในแต่ละขั้นตอนจะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดเฮมิเซลลูโลสออกจากเชื้อได้เพิ่มขึ้น คือ หลังจากผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ 1.97 เปอร์เซ็นต์ แต่พอนำมาล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว จะพบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเป็น 56.24 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากน้ำร้อนจะชะล้างและสกัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่ถูกย่อยแล้วในช่วงขั้นตอนการระเบิดด้วยไอน้ำ บางส่วนที่เคลือบอยู่ที่ผิวเชื้อออกไป

#### 4.2.3 การหาสถานะที่เหมาะสมในการพรีทรีตเมนต์ โดยการระเบิดไอน้ำไม้ลำต้นปาล์ม

นำตัวอย่างไม้ที่ได้ซึ่งแบ่งไว้ ถุงละ 150 กรัม น้ำหนักแห้ง ทำการระเบิดด้วยไอน้ำแต่ละสถานะ สถานะละ 3 ชั่วโมง แล้วรวบรวมตัวอย่างที่ผ่านการระเบิดโดยไม่ผ่านการล้างเชื้อด้วยน้ำลงถุงมัดปาก เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C จากนั้นแบ่งนำเชื้อบางส่วนไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี หลังจากผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำ โดยได้ผลองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ของตัวอย่างไม้ลำต้นปาล์มหลังระเบิดด้วยไอน้ำ (SE) ตามลำดับ

| logRo | องค์ประกอบทางเคมี (% น้ำหนักแห้ง) |        |          |      |        |
|-------|-----------------------------------|--------|----------|------|--------|
|       | แอลฟาเซลลูโลส                     | ลิกนิน | เพนโตแซน | เถ้า | อื่น ๆ |
| 3.24  | 38.45                             | 21.12  | 18.45    | 3.38 | 18.6   |
| 3.54  | 38.29                             | 23.74  | 17.12    | 3.59 | 17.26  |
| 3.55  | 39.02                             | 26.74  | 15.77    | 3.39 | 15.08  |
| 3.72  | 39.44                             | 29.07  | 10.49    | 3.9  | 17.1   |
| 3.84  | 38.14                             | 28.94  | 9.16     | 3.99 | 19.77  |
| 4.02  | 37.02                             | 34.5   | 5.29     | 4.28 | 18.91  |

จากผลการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าเมื่อใช้สถานะของการระเบิดด้วยไอน้ำที่รุนแรงขึ้นทำให้ปริมาณของเพนโตแซนลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับปริมาณเพนโตแซนในชิ้นไม้ก่อนการระเบิด ส่วนองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย



เมื่อนำเชื้อไม้ที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำแบ่งออกมา 50 กรัม น้ำหนักแห้ง มาทำการล้างด้วยน้ำร้อนดังสภาวะที่ได้กำหนด แล้วนำมากรองเชื้อ และแบ่งน้ำเชื้อบางส่วนไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีหลังจากผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว จะได้ผลองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ของตัวอย่างไม้ลำต้นปาล์มหลังระเบิดด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อน (WE) ตามลำดับ

| logRo | องค์ประกอบทางเคมี (% น้ำหนักแห้ง) |                    |                    |      |        |
|-------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|------|--------|
|       | แอลฟาเซลลูโลส                     | ลิกนิน             | เพนโตแซน           | เถ้า | อื่น ๆ |
| 3.24  | 50.69 <sup>c</sup>                | 24.41 <sup>c</sup> | 15.73 <sup>a</sup> | 0.68 | 8.49   |
| 3.54  | 55.51 <sup>b</sup>                | 26.28 <sup>b</sup> | 9.81 <sup>b</sup>  | 0.4  | 8      |
| 3.55  | 56.03 <sup>b</sup>                | 26.74 <sup>b</sup> | 8.17 <sup>b</sup>  | 0.52 | 8.54   |
| 3.72  | 57.04 <sup>a,b</sup>              | 28.80 <sup>a</sup> | 4.48 <sup>c</sup>  | 0.39 | 9.29   |
| 3.84  | 58.83 <sup>a</sup>                | 27.12 <sup>b</sup> | 4.03 <sup>c</sup>  | 0.34 | 9.68   |
| 4.02  | 56.53 <sup>b</sup>                | 26.47 <sup>b</sup> | 2.84 <sup>c</sup>  | 0.27 | 13.89  |

หมายเหตุ – <sup>a,b,c</sup> เป็นกลุ่มของตัวอย่างทดลองที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 เปอร์เซนต์ระดับความเชื่อมั่น

จากตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่า เชื้อหลังระเบิดด้วยไอน้ำที่ผ่านการล้างด้วยน้ำร้อนทำให้ปริมาณเพนโตแซนลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณเพนโตแซนก่อนล้างด้วยน้ำร้อน เนื่องจากน้ำร้อนได้ชะเอาน้ำตาลที่เกาะบริเวณเชื้อออก โดยปริมาณเพนโตแซนสูงสุดคือ 15.73% ปริมาณเพนโตแซนต่ำสุดคือ 2.84% ส่วนปริมาณแอลฟาเซลลูโลสมีปริมาณเพิ่มขึ้นหลังการล้างด้วยน้ำร้อน โดยปริมาณแอลฟาเซลลูโลสสูงสุดคือ 58.83% ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสต่ำสุดคือ 50.69%

การทดลองนี้เป็นการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) โดยเป็นกรณีที่มีปัจจัยที่ต้องการเปรียบเทียบเพียงปัจจัยเดียวในการทดลอง คือ logRo ซึ่งในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมของการระเบิดด้วยไอน้ำ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จะถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยแบบจำลองเชิงเส้นตรง (General linear model หรือ GLM)

ในรูปแบบแผนการทดลองแบบ CRD และมีการทดสอบความแตกต่างแบบ least significant difference หรือ LSD ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SAS รุ่น 8.01 (SAS, 2000)

หลังจากใช้โปรแกรม SAS คำนวณทางสถิติเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมแล้ว จากตารางที่ 19 พบว่าในเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เลือกที่สภาวะ logRo 3.72 และ 3.84 ให้สัดส่วนเซลลูโลสคงเหลือในกลุ่มทดลองมากคือ 57.83 และ 58.83 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในกลุ่ม a,b และ a ตามลำดับ กลุ่ม a เป็นกลุ่มที่มีสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด สัดส่วนเพนโตแซนที่น้อยอยู่ในกลุ่ม c คือเหลือ 4.48 และ 4.03 เปอร์เซ็นต์ โดยมองในแง่สัดส่วนเพนโตแซนคงเหลือ กลุ่ม c เป็นกลุ่มที่คงเหลือสัดส่วนเพนโตแซนที่ต่ำที่สุด ซึ่งจากผลทางสถิติพบว่าที่สภาวะ logRo 3.72 กับสภาวะ logRo 3.84 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) แต่เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนของเซลลูโลส และเพนโตแซนจากความต้องการให้มีสัดส่วนของเซลลูโลสมากที่สุด และมีสัดส่วนของเพนโตแซนน้อยที่สุดจึงเลือกที่สภาวะ logRo 3.84 คือที่อุณหภูมิ 210 °C เวลา 4 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดเฮมิเซลลูโลส ในไม้ลำต้นปาล์มน้ำมันตัวอย่าง

ตารางที่ 20 สรุปค่าสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีและประสิทธิภาพการลดลงของเฮมิเซลลูโลส ในแต่ละขั้นตอนของการพรีทรีตเมนต์ ที่สภาวะการระเบิดด้วยไอน้ำที่เหมาะสม คือ 210 °C เวลา 4 นาที และการล้างด้วยน้ำร้อน 80 °C เวลา 30 นาที ของไม้ลำต้นปาล์มน้ำมัน

| ขั้นตอน            | ประสิทธิภาพ                             | องค์ประกอบทางเคมี        |        |          |      |        |
|--------------------|-----------------------------------------|--------------------------|--------|----------|------|--------|
|                    |                                         | (เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง) |        |          |      |        |
| การพรีทรีตเมนต์    | การลดลงของ<br>เพนโตแซน<br>(เปอร์เซ็นต์) | เซลลูโลส                 | ลิกนิน | เพนโตแซน | เถ้า | อื่น ๆ |
| วัตถุดิบเริ่มต้น   | 0                                       | 40.83                    | 21.64  | 29.53    | 2.4  | 5.6    |
| การระเบิดด้วยไอน้ำ | 68.98                                   | 38.14                    | 28.94  | 9.16     | 3.99 | 19.77  |
| การล้างด้วยน้ำร้อน | 86.35                                   | 58.83                    | 27.12  | 4.03     | 0.34 | 9.68   |

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 20 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ลำต้นปาล์ม เมื่อผ่านทุกขั้นตอนการพรีทรีตเมนต์ โดยสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่คงเหลืออยู่ลดลงอย่างชัดเจน จาก 29.53 เหลือ 4.03 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ทำให้ส่วนของเซลลูโลสและลิกนินมีสัดส่วนที่เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณเซลลูโลสและลิกนินส่วนใหญ่แทบจะไม่หายไปในช่วงขั้นตอนการระเบิด

ด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อน และในแต่ละขั้นตอนจะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดเฮมิเซลลูโลสออกจากเยื่อได้เพิ่มขึ้น คือ หลังจากผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ 68.98 เปอร์เซ็นต์ แต่พอนำมาล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว จะพบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเป็น 86.35 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากน้ำร้อนจะชะล้างและสกัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่ถูกย่อยแล้วในขั้นตอนการระเบิดด้วยไอน้ำ บางส่วนที่เคลือบอยู่ที่ผิวเยื่อ ออกไป

#### 4.2.4 การหาสถานะที่เหมาะสมในการพรีทรีตเมนต์ โดยการระเบิดไอน้ำในถังใบปาล์ม

นำชิ้นไม้สับทางใบปาล์ม 200 กรัม น้ำหนักแห้ง ทำการระเบิดไอน้ำด้วยสถานะที่ต่างๆ ดังตารางที่ 2 สถานะละ 3 ชั่วโมง โดยวัตถุประสงค์ของการทำพรีทรีตเมนต์โดยการระเบิดด้วยไอน้ำคือ เพื่อทำลายหรือกำจัดโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสออกจากส่วนของเซลลูโลสและลิกนิน จากนั้นนำเยื่อที่ได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี จะเห็นได้ว่าเมื่อสถานะที่ใช้ในการระเบิดไอน้ำรุนแรงขึ้นจะส่งผลทำให้สัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสลดลงอย่างเห็นได้ชัด และสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีของตัวอื่นๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ของตัวอย่างไม้ทางใบปาล์มหลังระเบิดด้วยไอน้ำ (SE) ตามลำดับ

| logRo | องค์ประกอบทางเคมี (% น้ำหนักแห้ง) |        |          |      |        |
|-------|-----------------------------------|--------|----------|------|--------|
|       | แอลฟาเซลลูโลส                     | ลิกนิน | เพนโตแซน | เถ้า | อื่น ๆ |
| 3.24  | 36.86                             | 21.07  | 20.71    | 4.95 | 16.41  |
| 3.54  | 35.77                             | 26.33  | 16.3     | 4.91 | 16.69  |
| 3.55  | 35.76                             | 26.22  | 15.85    | 5.87 | 16.3   |
| 3.72  | 37.04                             | 28.6   | 12.67    | 5.76 | 15.93  |
| 3.84  | 36.17                             | 30.2   | 7.36     | 5.48 | 20.79  |
| 4.02  | 36.52                             | 33.44  | 6.72     | 5.87 | 17.45  |

จากนั้นนำเยื่อที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำตามสถานะต่างๆข้างต้นแล้ว มาทำการสกัดด้วยน้ำที่สถานะที่กำหนดไว้คือ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ทำการกรองเยื่อที่ได้จากนั้นนำเยื่อไป



วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีหลังจากผ่านการระบิดด้วยไอน้ำแล้วตามด้วยการสกัดด้วยน้ำ ซึ่งได้ผลองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 22

**ตารางที่ 22** ค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ของตัวอย่างไม้ทางใบปาล์มหลังระบิดด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อน (WE) ตามลำดับ

| logRo | องค์ประกอบทางเคมี (% น้ำหนักแห้ง) |                      |                      |                     |        |
|-------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|--------|
|       | แอลฟาเซลลูโลส                     | ลิกนิน               | เพนโตแซน             | เถ้า                | อื่น ๆ |
| 3.24  | 46.11 <sup>b</sup>                | 27.2 <sup>d</sup>    | 18.59 <sup>a</sup>   | 1.44 <sup>a,b</sup> | 6.66   |
| 3.54  | 48.42 <sup>a,b</sup>              | 31.52 <sup>c</sup>   | 11.78 <sup>b</sup>   | 1.39 <sup>b</sup>   | 6.89   |
| 3.55  | 51.08 <sup>a</sup>                | 33.32 <sup>b,c</sup> | 10.17 <sup>b,c</sup> | 1.56 <sup>a,b</sup> | 3.87   |
| 3.72  | 48.62 <sup>a,b</sup>              | 34.95 <sup>b</sup>   | 8.02 <sup>c,d</sup>  | 1.64 <sup>a,b</sup> | 6.77   |
| 3.84  | 47.87 <sup>a,b</sup>              | 35.28 <sup>a,b</sup> | 6.02 <sup>d,e</sup>  | 1.44 <sup>a,b</sup> | 9.39   |
| 4.02  | 46.01 <sup>b</sup>                | 37.91 <sup>a</sup>   | 4 <sup>e</sup>       | 1.7 <sup>a</sup>    | 10.38  |

หมายเหตุ – <sup>a,b,c,d,e</sup> เป็นกลุ่มของตัวอย่างทดลองที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 95 เปอร์เซ็นต์ระดับความเชื่อมั่น

จากตารางที่ 22 จะเห็นได้ว่าเชื้อหลังการระบิดด้วยไอน้ำที่สภาวะรุนแรงขึ้น เมื่อผ่านการสกัดด้วยน้ำจะมีแนวโน้มสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่เหลืออยู่ในเชื้อลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับก่อนสกัดด้วยน้ำ มีผลทำให้สัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีอื่นๆเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเช่นกัน อาจเนื่องจากยังมีสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสเหลืออยู่ในเชื้อหลังการสกัดด้วยน้ำ

การเลือกสภาวะที่เหมาะสมของการระบิดด้วยไอน้ำ จะทำการเลือกสภาวะหลังจากกระบวนการสกัดด้วยน้ำ เนื่องจากเชื้อที่ผ่านการระบิดด้วยไอน้ำผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในสารละลายเฮมิเซลลูโลสคือ ไซโลส โอลิโกไซโลส เพอร์ฟูรอล 5-ไฮดรอกซีเพอร์ฟูรอล กลูโคส และสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งสารบางตัวจะเป็นพิษส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ดังนั้นการสกัดด้วยน้ำจะไปกำจัดหรือลดสารพิษที่ได้จากสภาวะการระบิดด้วยไอน้ำที่รุนแรง จากการคำนวณทางสถิติเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการฟัรติเมนต์โดยการระบิดด้วยไอน้ำดังตารางที่ 17 พบว่าสภาวะที่ logR<sub>0</sub> 3.55 มีสัดส่วนของเซลลูโลสสูงที่สุด ซึ่งให้ผลสัดส่วนของเซลลูโลสทางสถิติไม่แตกต่างจากสภาวะที่ logR<sub>0</sub> 3.54, logR<sub>0</sub> 3.72 และ logR<sub>0</sub> 3.84 แต่แ่งในสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลส

พบว่าสถานะที่  $\log R_0 3.84$  มีสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาต่อจะพบว่าสถานะที่  $\log R_0 3.84$  และ  $\log R_0 4.02$  มีสัดส่วนของทั้งเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่เมื่อคำนึงถึงปัจจัยในด้านอื่นเช่น พลังงานและค่าใช้จ่ายสถานะที่  $\log R_0 4.02$  จะใช้เวลาในการระเบิดนานกว่าซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายมากกว่าเมื่อเทียบกับสถานะที่  $\log R_0 3.84$  ดังนั้นสถานะที่  $\log R_0 3.84$  จึงเป็นสถานะที่เหมาะสมในการทำพรีทรีตเมนต์โดยระเบิดด้วยไอน้ำ คือที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เวลา 4 นาที

**ตารางที่ 23** สรุปค่าสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีและประสิทธิภาพการลดลงของเฮมิเซลลูโลสในแต่ละขั้นตอนของการพรีทรีตเมนต์ ที่สภาวะการระเบิดด้วยไอน้ำที่เหมาะสม คือ 210 °C เวลา 4 นาที และการล้างด้วยน้ำร้อน 80 °C เวลา 30 นาที ของไม้ทางใบปาล์ม

| ขั้นตอน<br>การพรีทรีตเมนต์ | ประสิทธิภาพ<br>การลดลงของ<br>เพนโตแซน<br>(เปอร์เซ็นต์) | องค์ประกอบทางเคมี<br>(เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง) |        |          |      |        |
|----------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------|----------|------|--------|
|                            |                                                        | เซลลูโลส                                      | ลิกนิน | เพนโตแซน | เถ้า | อื่น ๆ |
| วัตถุดิบเริ่มต้น           | 0                                                      | 42.46                                         | 15.63  | 28.27    | 1.82 | 11.82  |
| การระเบิดด้วยไอน้ำ         | 73.97                                                  | 36.17                                         | 30.2   | 7.36     | 5.48 | 20.79  |
| การล้างด้วยน้ำร้อน         | 78.71                                                  | 47.87                                         | 35.28  | 6.02     | 1.44 | 9.39   |

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 23 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ทางใบปาล์ม เมื่อผ่านทุกขั้นตอนการพรีทรีตเมนต์ โดยสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่คงเหลืออยู่ ลดลงอย่างชัดเจน จาก 28.27 เหลือ 6.02 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ทำให้ส่วนของเซลลูโลสและลิกนินมีสัดส่วนที่เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณเซลลูโลสและลิกนินส่วนใหญ่แทบจะไม่หายไปในช่วงขั้นตอนการระเบิดด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อน และในแต่ละขั้นตอนจะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดเฮมิเซลลูโลสออกจากเชื้อได้เพิ่มขึ้น คือ หลังจากผ่านกระบวนการระเบิดด้วยไอน้ำจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ 73.97 เปอร์เซ็นต์ แต่พอนำมาล้างด้วยน้ำร้อนแล้ว จะพบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเป็น 78.71 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากน้ำร้อนจะชะล้างและสกัดส่วนของ เฮมิเซลลูโลสที่ถูกย่อยแล้วในช่วงขั้นตอนการระเบิดด้วยไอน้ำ บางส่วนที่เคลือบอยู่ที่ผิวเชื้อออกไป

#### 4.3 การหาสถานะที่เหมาะสมของการสกัดด้วยด่าง (alkaline extraction) ที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลที่ผ่านขั้นตอนการระเบิดไอน้ำตามด้วยการสกัดด้วยน้ำ โดยใช้วิธีทะกุกิ

##### 4.3.1 การหาสถานะที่เหมาะสมของการสกัดด้วยด่าง ที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ

##### ยูคาลิปตัสที่ผ่านขั้นตอนการระเบิดไอน้ำตามด้วยการสกัดด้วยน้ำ โดยใช้วิธีทะกุกิ

หลังจากเยื่อถูกนำมาสกัดด้วยด่าง ณ สถานะต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลองทั้ง 9 ชุด การทดลอง ออกแบบการทดลองโดยวิธีทะกุกิ เมื่อนำเยื่อยูคาลิปตัสสกัดด้วยด่างวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้ผลดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 ค่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสที่สกัดด้วยด่าง ณ สถานะที่แตกต่างกัน

| ชุดการทดลอง | องค์ประกอบทางเคมี (%) |        |          |              |      |
|-------------|-----------------------|--------|----------|--------------|------|
|             | ไฮโดรเซลลูโลส         | ลิกนิน | เซลลูโลส | เฮมิเซลลูโลส | เถ้า |
| 1           | 79.14                 | 18.74  | 72.33    | 2.29         | 1.11 |
| 2           | 77.72                 | 20.4   | 71.54    | 1.81         | 0.93 |
| 3           | 73.4                  | 22.24  | 70.39    | 1.5          | 1.52 |
| 4           | 80.17                 | 18.32  | 74.7     | 2.15         | 0.96 |
| 5           | 77.76                 | 20.47  | 72.01    | 1.32         | 0.86 |
| 6           | 75.34                 | 22.37  | 70.3     | 1.55         | 1.72 |
| 7           | 81.41                 | 16.79  | 76.84    | 2.11         | 1.24 |
| 8           | 78.5                  | 19.89  | 72.73    | 1.85         | 1.11 |
| 9           | 75.89                 | 21.3   | 71.84    | 1.38         | 1.64 |

การวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ทั้ง 9 ชุดการทดลอง จะอาศัย ค่าสัดส่วนเซลลูโลส สัดส่วนลิกนิน เป็นพารามิเตอร์หลัก เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการสกัดด้วยด่าง ต้องการกำจัดลิกนินออก



จากเชื้อเพื่อให้มีสัดส่วนลิกนินต่ำที่สุด และเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสให้มากที่สุด ส่วนค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสและเถ้า เป็นพารามิเตอร์รอง ซึ่งการวิเคราะห์แบ่งออกเป็นหัวข้อหลักได้ดังนี้ การหาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนเซลลูโลสและลิกนิน การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยด่าง การประมาณค่าสัดส่วนเซลลูโลส และลิกนิน ที่ได้จากการสกัดด้วยด่างที่สภาวะที่เหมาะสม

#### 4.3.1.1 การหาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนเซลลูโลส และลิกนินของเยื่อคุณภาพดี

การหาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยจะแสดงถึงร้อยละอิทธิพลของปัจจัยการทดลอง (Percent contribution) ที่มีผลต่อการสกัดด้วยด่างเพื่อเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลส ลดสัดส่วนลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเถ้า ซึ่งเป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลองใดมีผลต่อการสกัดด้วยด่างบ้าง และมีอิทธิพลมากหรือน้อย นอกจากนี้การวิเคราะห์ความแปรปรวนยังสามารถบอกได้ถึงระดับความเชื่อมั่นของปัจจัยการทดลองที่มีต่อการสกัดด้วยด่าง ได้ผลการวิเคราะห์สรุปดังตารางที่ 25, 26 และ 27

ตารางที่ 25 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าสัดส่วนเซลลูโลส

| Factor      | DOF <sup>A</sup>                              | SS <sup>A</sup> | V <sup>A</sup> | F <sup>A</sup> | S'    | Percent          | Confidence <sup>A</sup> | Significant |
|-------------|-----------------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------|------------------|-------------------------|-------------|
|             |                                               |                 |                |                |       | contribution (%) | (%)                     |             |
| N           | 2                                             | 26.17           | 13.1           | 10.83          | 23.75 | 19.225           | 99.93                   | ***         |
| T           | 2                                             | 65.38           | 32.7           | 27.058         | 62.97 | 50.961           | 100                     | ***         |
| t           | 2                                             | 7.839           | 3.92           | 3.244          | 5.423 | 4.389            | 93.98                   | *           |
| Other Error | 20                                            | 24.16           | 1.21           |                |       |                  |                         |             |
| Total       | 26                                            | 123.6           |                |                |       | 100              |                         |             |
| หมายเหตุ    | N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) |                 |                |                |       | P<0.001          | ***                     |             |
|             | T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             |                 |                |                |       | P<0.01           | **                      |             |
|             | t: เวลาการสกัด (นาที)                         |                 |                |                |       | P<0.05           | *                       |             |

ตารางที่ 26 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าสัดส่วนลิกนิน

| Factor      | DOF <sup>A</sup>                              | SS <sup>A</sup> | V <sup>A</sup> | F <sup>A</sup> | S'    | Percent          | Confidence <sup>A</sup> | Significant |
|-------------|-----------------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------|------------------|-------------------------|-------------|
|             |                                               |                 |                |                |       | contribution (%) | (%)                     |             |
| N           | 2                                             | 7.235           | 3.62           | 10.226         | 6.527 | 7.36             | 99.91                   | ***         |
| T           | 2                                             | 73.23           | 36.6           | 103.501        | 72.52 | 81.768           | 100                     | ***         |
| t           | 2                                             | 1.151           | 0.58           | 1.628          | 0.444 | 0.501            | 77.87                   | -           |
| Other Error | 20                                            | 7.074           | 0.35           |                |       | 93.446           |                         |             |
| Total       | 26                                            | 88.69           |                |                |       | 100              |                         |             |
| หมายเหตุ    | N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) |                 |                |                |       | P<0.001          | ***                     |             |
|             | T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             |                 |                |                |       | P<0.01           | **                      |             |
|             | t: เวลาการสกัด (นาทีก)                        |                 |                |                |       | P<0.05           | *                       |             |

ตารางที่ 27 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลส

| Factor      | DOF <sup>A</sup>                              | SS <sup>A</sup> | V <sup>A</sup> | F <sup>A</sup> | S'    | Percent          | Confidence <sup>A</sup> | Significant |
|-------------|-----------------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------|------------------|-------------------------|-------------|
|             |                                               |                 |                |                |       | contribution (%) | (%)                     |             |
| N           | 2                                             | 0.168           | 0.08           | 1.635          | 0.065 | 1.685            | 78                      | -           |
| T           | 2                                             | 2.413           | 1.21           | 23.358         | 2.309 | 59.273           | 100                     | ***         |
| t           | 2                                             | 0.281           | 0.14           | 2.726          | 0.178 | 4.576            | 91.02                   | *           |
| Other Error | 20                                            | 1.032           | 0.05           |                |       | 34.466           |                         |             |
| Total       | 26                                            | 3.896           |                |                |       | 100              |                         |             |
| หมายเหตุ    | N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) |                 |                |                |       | P<0.001          | ***                     |             |
|             | T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             |                 |                |                |       | P<0.01           | **                      |             |
|             | t: เวลาการสกัด (นาทีก)                        |                 |                |                |       | P<0.05           | *                       |             |

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยอาศัยค่าสัดส่วนเซลลูโลส จากตารางที่ 25 พบว่า ร้อยละอิทธิพล (Percent contribution) ของอุณหภูมิการสกัดมีค่ามากที่สุด เท่ากับ 50.961 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 19.225 ส่วนเวลาการสกัดเป็นปัจจัยที่มีค่าร้อยละอิทธิพลน้อยที่สุด เท่ากับ 4.389 และเมื่อพิจารณาจากระดับความเชื่อมั่นจะเห็นว่า อุณหภูมิ

การสกัด และความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่  $p < 0.001$  ส่วนปัจจัยด้านเวลาการสกัดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่  $p < 0.05$

ด้านผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยพิจารณาค่าสัดส่วนลิกนิน จากตารางที่ 26 พบว่าร้อยละอิทธิพล (Percent contribution) ของอุณหภูมิการสกัด มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 81.768 รองลงมาคือ ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 7.36 ส่วนเวลาการสกัดเป็นปัจจัยที่มีค่าร้อยละอิทธิพลน้อยที่สุด เท่ากับ 0.501 และเมื่อพิจารณาจากระดับความเชื่อมั่นจะเห็นว่า ปัจจัย ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิการสกัด ไซด์ มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่  $p < 0.001$  ส่วนเวลาการสกัด เป็นปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยพิจารณาค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลส จากตารางที่ 27 พบว่าร้อยละอิทธิพล (Percent contribution) ของอุณหภูมิการสกัด มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 59.273 รองลงมาคือ เวลาการสกัด เท่ากับ 4.576 ส่วนความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นปัจจัยที่มีค่าร้อยละอิทธิพลน้อยที่สุด เท่ากับ 1.685 และเมื่อพิจารณาจากระดับความเชื่อมั่นจะเห็นว่า ปัจจัยอุณหภูมิการสกัด มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $p < 0.001$  และ เวลาการสกัด มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $p < 0.05$  ส่วนความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถสรุปได้ว่า เมื่อพิจารณาจากค่าสัดส่วนเซลลูโลส พบว่า อุณหภูมิการสกัด มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีอิทธิพลมากที่สุดต่อการสกัดด้วยค่าเพื่อเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลส รองลงมาคือความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเวลาการสกัด ที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ด้านค่าสัดส่วนลิกนิน ก็เช่นเดียวกัน คือปัจจัย อุณหภูมิการสกัด มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าเพื่อลดสัดส่วนลิกนินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รองลงมาคือ ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนปัจจัยเวลาการสกัด ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าเพื่อลดสัดส่วนลิกนินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลส ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดเมื่อพิจารณาเฮมิเซลลูโลส คืออุณหภูมิการสกัด และรองลงมาคือเวลาการสกัดทั้งสาม ส่วนปัจจัยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลส ไม่ใช่พารามิเตอร์หลักในการหาสถานะที่เหมาะสมของการสกัดด้วยค่า จึงไม่นำผลการวิเคราะห์ของค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสมาใช้



พิจารณา เช่นเดียวกับค่าสัดส่วนเก่า ถึงแม้ อนุกรมการสักระยะจะมีอิทธิพลต่อการสักระยะอย่างมีนัยสำคัญเพื่อลดสัดส่วนเก่า แต่เนื่องจากค่าสัดส่วนเก่าที่มีค่าน้อยมาก จึงไม่นำไปใช้พิจารณาสถานะที่เหมาะสม เช่นเดียวกับค่าสัดส่วนเฮมิเซลล์โลส ดังนั้น จึงใช้เพียงค่าสัดส่วนเซลล์โลสและลิกนินในการพิจารณาหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการสักระยะด้วยค่า ในขั้นต่อไป

#### 4.3.1.2 การหาสถานะที่เหมาะสมในการสักระยะด้วยค่า เชื้อยูคาลิปตัส

หลักในการหาสถานะที่เหมาะสมโดยวิธีทฤษฎีแบ่งประเภทของการทดลองออกเป็น 3 ประเภท คือ The Smaller is better, The Nominal is better และ The Bigger is better ซึ่งการทดลองนี้จัดอยู่ในทั้งประเภท The Bigger is better (B) และ The Smaller is better (S) โดยต้องการสัดส่วนเซลล์โลสสูงสุดจึงใช้ประเภท The Bigger is better อีกด้าน ต้องการสัดส่วนลิกนิน เฮมิเซลล์โลส และเก่า ต่ำสุด จึงใช้ประเภท The Smaller is better การทดลองครั้งนี้สนใจที่ค่าสัดส่วนเซลล์โลสสูงสุด และสัดส่วนลิกนินต่ำสุด จึงต้องหาสถานะที่ให้ค่าสัดส่วนดังกล่าว

นำค่าสัดส่วนเซลล์โลส และสัดส่วนลิกนิน ของทั้ง 9 ชุดการทดลอง การทดลองละ 3 ซ้ำ หาค่าอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N-Ratio) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมต่อการทดลอง ซึ่งสูตรการคำนวณหาค่า S/N-Ratio แสดงในภาคผนวก และสรุปผลได้ดังตารางที่ 28 โดยนำ S/N-Ratio มาคำนวณร้อยละอิทธิพลหลักของปัจจัยของการทดลองในแต่ละระดับการทดลอง ซึ่งสรุปผลดังตารางที่ 29

ตารางที่ 28 สรุปค่าสัดส่วน S/N ของค่าสัดส่วนเซลล์โลส ลิกนินและเฮมิเซลล์โลส จากการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง ของเยื่อคาลิปัส

| ชุดการทดลอง | สัดส่วนเซลล์โลส (เปอร์เซ็นต์) |            |            |                         | สัดส่วนลิกนิน (เปอร์เซ็นต์) |            |            |                         | สัดส่วนเฮมิเซลล์โลส (เปอร์เซ็นต์) |            |            |                         |
|-------------|-------------------------------|------------|------------|-------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------------------------|-----------------------------------|------------|------------|-------------------------|
|             | ครั้งที่ 1                    | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | อัตราส่วน S/N (เดซิเบล) | ครั้งที่ 1                  | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | อัตราส่วน S/N (เดซิเบล) | ครั้งที่ 1                        | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | อัตราส่วน S/N (เดซิเบล) |
| 1           | 71.86                         | 71.89      | 73.23      | 37.185                  | 18.36                       | 18.35      | 19.51      | 25.445                  | 2.51                              | 2.15       | 2.2        | 7.124                   |
| 2           | 72.16                         | 71.17      | 71.29      | 37.090                  | 20.55                       | 19.39      | 21.25      | 26.172                  | 1.51                              | 1.71       | 2.22       | 4.844                   |
| 3           | 70.68                         | 69.33      | 71.15      | 36.948                  | 22.10                       | 21.64      | 22.99      | 26.936                  | 1.69                              | 1.47       | 1.34       | 3.405                   |
| 4           | 74.84                         | 74.49      | 74.76      | 37.466                  | 18.24                       | 18.81      | 17.91      | 25.253                  | 2.01                              | 2.06       | 2.37       | 6.568                   |
| 5           | 72.02                         | 70.63      | 73.39      | 37.145                  | 20.11                       | 20.04      | 21.25      | 26.212                  | 1.35                              | 1.29       | 1.33       | 2.429                   |
| 6           | 69.28                         | 69.69      | 71.94      | 36.936                  | 22.34                       | 22.71      | 22.06      | 26.991                  | 1.82                              | 1.44       | 1.39       | 3.626                   |
| 7           | 76.92                         | 77.84      | 75.76      | 37.710                  | 17.32                       | 16.68      | 16.38      | 24.496                  | 1.99                              | 2.49       | 1.86       | 6.303                   |
| 8           | 73.74                         | 71.82      | 72.62      | 37.232                  | 19.33                       | 20.61      | 19.72      | 25.962                  | 1.86                              | 2.00       | 1.69       | 5.281                   |
| 9           | 69.97                         | 72.98      | 72.58      | 37.123                  | 21.44                       | 21.15      | 21.31      | 26.567                  | 1.38                              | 1.35       | 1.40       | 2.774                   |

ตารางที่ 29 อิทธิพลหลักของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อไม้ยูคาลิปตัสที่สกัดด้วยด่างแล้ว

| สัดส่วนเซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์)              |        |        |        |                |                      |
|--------------------------------------------|--------|--------|--------|----------------|----------------------|
| ปัจจัย                                     | ระดับ  |        |        | ค่าอิทธิพลหลัก | ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก |
|                                            | 1      | 2      | 3      |                |                      |
| ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | 37.075 | 37.182 | 37.355 | 0.281          | 31.822               |
| อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | 37.454 | 37.156 | 37.002 | 0.451          | 51.164               |
| เวลาการสกัด (นาทีก)                        | 37.118 | 37.227 | 37.268 | 0.15           | 17.014               |
| สัดส่วนลิกนิน (เปอร์เซ็นต์)                |        |        |        |                |                      |
| ปัจจัย                                     | ระดับ  |        |        | ค่าอิทธิพลหลัก | ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก |
|                                            | 1      | 2      | 3      |                |                      |
| ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | 26.184 | 26.152 | 25.675 | 0.509          | 20.15                |
| อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | 25.065 | 26.115 | 26.831 | 1.767          | 69.896               |
| เวลาการสกัด (นาทีก)                        | 26.133 | 25.998 | 25.881 | 0.252          | 9.954                |
| สัดส่วนเฮมิเซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์)          |        |        |        |                |                      |
| ปัจจัย                                     | ระดับ  |        |        | ค่าอิทธิพลหลัก | ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก |
|                                            | 1      | 2      | 3      |                |                      |
| ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | 5.124  | 4.208  | 4.786  | 0.917          | 16.334               |
| อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | 6.665  | 4.185  | 3.268  | 3.397          | 60.527               |
| เวลาการสกัด (นาทีก)                        | 5.344  | 4.728  | 4.045  | 1.299          | 23.14                |

จากผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก โดยอาศัยค่าสัดส่วนเซลลูโลส ดังแสดงในตารางที่ 29 พบว่าค่าร้อยละอิทธิพลหลักของอุณหภูมิการสกัด มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 51.164 ส่วน



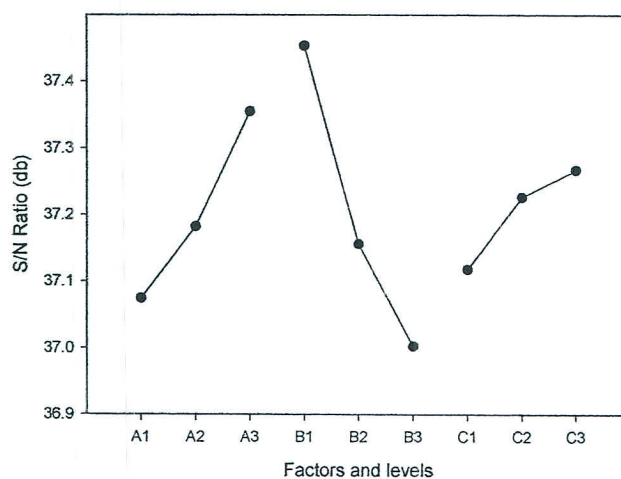
ความเข้มข้น โซเดียม ไฮดรอกไซด์ และเวลาการสกัด มีค่าร้อยละอิทธิพลหลักถัดลงมา เท่ากับ 31.822 และ 17.014 ตามลำดับ และจากค่าดังกล่าวสามารถบอกได้ว่า อุณหภูมิการสกัด เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าเพื่อเพิ่มค่าสัดส่วนเซลลูโลส มากที่สุด ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

การวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก โดยอาศัยค่าสัดส่วนลิกนิน จากตารางที่ 29 พบว่าค่าร้อยละอิทธิพลหลักของอุณหภูมิการสกัด มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 69.896 ส่วนความเข้มข้น โซเดียม ไฮดรอกไซด์ และเวลาการสกัด มีค่าร้อยละอิทธิพลหลักถัดลงมา เท่ากับ 20.150 และ 9.954 ตามลำดับ และจากค่าดังกล่าวสามารถบอกได้ว่า อุณหภูมิการสกัด เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าเพื่อลดค่าสัดส่วนลิกนิน มากที่สุด ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

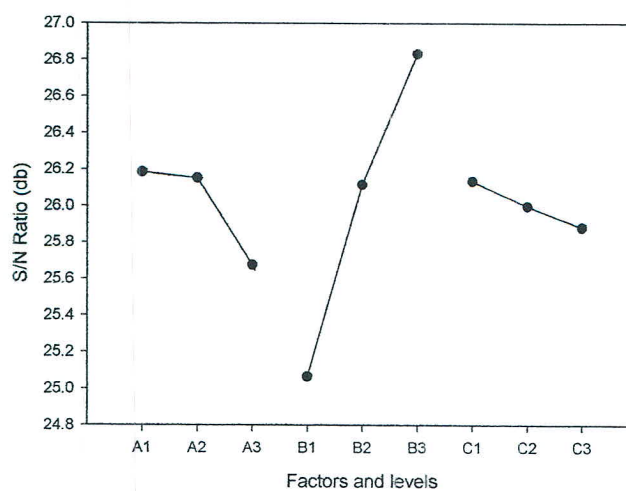
ส่วนผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก โดยอาศัยค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลส ดังแสดงในตารางที่ 29 พบว่า ค่าร้อยละอิทธิพลหลักของอุณหภูมิการสกัด มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 60.527 ส่วนเวลาการสกัด และความเข้มข้น โซเดียม ไฮดรอกไซด์ มีค่าร้อยละอิทธิพลหลักถัดลงมา เท่ากับ 23.140 และ 16.334 ตามลำดับ และจากค่าดังกล่าวสามารถบอกได้ว่า อุณหภูมิการสกัด เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าเพื่อลดค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลส มากที่สุด ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

จากผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก เมื่อพิจารณาที่พารามิเตอร์หลัก คือ ค่าสัดส่วนเซลลูโลสและลิกนิน พบว่าอุณหภูมิการสกัด เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ความเข้มข้น โซเดียม ไฮดรอกไซด์ และถัดมา คือเวลาการสกัด ซึ่งสอดคล้องกับให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

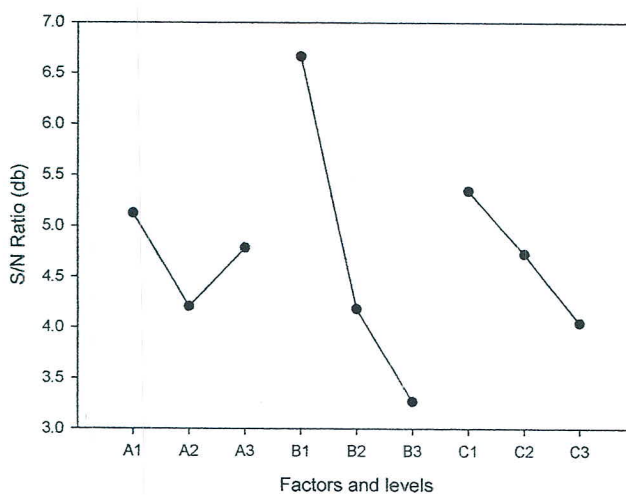
นำอัตราส่วน S/N ตามตารางที่ 28 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน S/N กับปัจจัยของการทดลองในแต่ละระดับของปัจจัยของการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดด้วยค่า เพื่อเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลส และลดสัดส่วนลิกนิน ในเยื่อไม้ยูคาลิปตัส ได้ผลดังภาพที่ 10, 11 และ 12



ภาพที่ 10 ค่าอัตราส่วน S/N ของปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละระดับที่มีผลต่อสัดส่วนเซลล์โลส



ภาพที่ 11 ค่าอัตราส่วน S/N ของปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละระดับที่มีผลต่อสัดส่วนลิกนิน



ภาพที่ 12 ค่าอัตราส่วน S/N ของปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละระดับที่มีผลต่อสัดส่วนเฮมิเซลลูโลส

จากภาพที่ 10-12 สามารถพิจารณาอันดับของแต่ละปัจจัยที่ให้อัตราส่วน S/N สูงสุด ซึ่งสรุปเป็นสถานะที่เหมาะสม 3สถานะที่แตกต่างกัน คือ สถานะที่ให้ค่าสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด สถานะที่ให้ค่าสัดส่วนลิกนินต่ำสุด และสถานะที่ให้ค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสต่ำสุด แต่เนื่องจากเยื่อไม้ที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำยังคงมีค่าสัดส่วนลิกนินที่สูง ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของการสกัดด้วยด่าง เพื่อกำจัดลิกนินและเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสในเยื่อไม้ ที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำและสกัดด้วยน้ำร้อนแล้ว การหาสถานะการสกัดด้วยด่างที่ดีที่สุด จึงควรมีเพียงสถานะเดียว ดังนั้นในการพิจารณา จึงใช้พารามิเตอร์หลักคือ ค่าสัดส่วนเซลลูโลส และค่าสัดส่วนลิกนิน

**ตารางที่ 30** สรุปสถานะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยด่าง เพื่อเพิ่มค่าสัดส่วนเซลลูโลสและลดค่าสัดส่วนลิกนินในเยื่อไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำและสกัดด้วยน้ำร้อนแล้ว ผ่านการคำนวณโดยวิธีทะกุจิ

| ปัจจัยการทดลอง                                | ระดับการทดลอง | สถานะ |
|-----------------------------------------------|---------------|-------|
| ชุดการทดลอง C                                 |               |       |
| N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | 3             | 25    |
| T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | 1             | 70    |
| t: เวลาการสกัด (นาที)                         | 3             | 90    |

**หมายเหตุ:** ชุดการทดลอง C คือ สถานะการสกัดด่างที่ให้ค่าสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด และสัดส่วนลิกนินต่ำสุด ของไม้ยูคาลิปตัส

จากตารางที่ 30 สรุปสถานะเหมาะสมการสกัดด่างของไม้ยูคาลิปตัส ที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีทะกุจิ พิจารณาสถานะการสกัดด่างที่ให้ค่าสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด และให้ค่าสัดส่วนลิกนินต่ำสุด เป็นสถานะเดียวกัน กับชุดการทดลองที่ 7 ในตารางที่ 24 (ชุดการทดลอง C ในตารางที่ 30) โดยวิธีทะกุจิ ใช้หาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดด่าง และสามารถนำค่าสถานะที่เหมาะสมมาประมาณค่าสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด และลิกนินต่ำสุด ของชุดการทดลอง C ตามลำดับ ต่อมานำค่าองค์ประกอบที่ได้จากสถานะการสกัดด่างเหมาะสมที่คำนวณได้โดยวิธีทะกุจิมาแสดง โดยไม่ต้องทำการทดลองยืนยันซ้ำ เนื่องจากสถานะที่เหมาะสมดังกล่าว เป็นสถานะเดียวกับชุดการทดลองที่ 7 ในตารางที่ 24 ดังตารางที่ 31 และตารางที่ 32 ค่าสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด และลิกนินต่ำสุด เปรียบเทียบระหว่างที่ได้จากการทดลอง กับการประมาณค่าโดยวิธีทะกุจิ



ตารางที่ 31 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากการทดลอง ของสภาวะเหมาะสมการ สกัดค่าที่ได้จากวิธีหะกจิ ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที

| สภาวะ         | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์) |        |              |      |
|---------------|---------------------------------|--------|--------------|------|
|               | เซลลูโลส                        | ลิกนิน | เฮมิเซลลูโลส | เถ้า |
| ชุดการทดลอง C | 76.84                           | 16.79  | 2.11         | 1.24 |

หมายเหตุ : สภาวะที่เหมาะสมของชุดการทดลอง C เป็นสภาวะเดียวกับการทดลองที่ 7 ในตาราง 19 จึงใช้ค่าองค์ประกอบในตาราง เป็นตัวแทนของชุดการทดลองนี้

ตารางที่ 32 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริง และที่ได้จากการประมาณค่า ซึ่งคำนวณโดยวิธี หะกจิ ของสภาวะการสกัดค่าเหมาะสม ของไม้ยูคาลิปตัส ที่ความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที

|                    | ค่าจากการทดลอง (เปอร์เซ็นต์) |        | ค่าประมาณ (เปอร์เซ็นต์) |        |
|--------------------|------------------------------|--------|-------------------------|--------|
|                    | เซลลูโลส                     | ลิกนิน | เซลลูโลส                | ลิกนิน |
| ชุดการทดลองเหมาะสม |                              |        |                         |        |
| ชุดการทดลอง C      | 76.84                        | 16.79  | 76.452                  | 16.995 |

จากตารางที่ 31 จะเห็นว่า สภาวะการสกัดค่าที่ให้ค่าสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด เป็นสภาวะเดียวกับที่ให้ค่าสัดส่วนลิกนินต่ำสุด เท่ากับ 76.84 และ 16.79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เห็นได้จาก ตารางที่ 32 โดยเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ประมาณจากการคำนวณโดยวิธี หะกจิ มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังตารางที่ 32

ตารางที่ 33 สรุปค่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส ที่ผ่านการพรีทรีตเมนต์ สภาวะที่เหมาะสมในแต่ละขั้นตอน

| ขั้นตอนการพรีทรีตเมนต์ | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์) |        |              |      |
|------------------------|---------------------------------|--------|--------------|------|
|                        | เซลลูโลส                        | ลิกนิน | เฮมิเซลลูโลส | เถ้า |
| วัตถุดิบเริ่มต้น       | 43.75                           | 24.69  | 19.55        | 0.76 |
| การระเบิดด้วยไอน้ำ     | 44.86                           | 29.91  | 15.27        | 0.43 |
| การล้างด้วยน้ำร้อน     | 53.94                           | 33.16  | 3.64         | 0.16 |
| การสกัดด้วยด่าง        | 76.84                           | 16.79  | 2.11         | 1.24 |

จากตารางที่ 33 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัส เมื่อผ่านขั้นตอนการสกัดด้วยค่าสภาวะเหมาะสมที่หาได้โดยวิธีทฤษฎี จากวัตถุดิบเริ่มต้นมีสัดส่วนเซลลูโลส 43.75 เพิ่มขึ้นเป็น 76.84 เปอร์เซนต์ และ สัดส่วนลิกนินของวัตถุดิบเริ่มต้น 24.69 ลดลงเหลือ 16.79 เปอร์เซนต์ เมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลส เท่ากับ 43.06 เปอร์เซนต์ และประสิทธิภาพการลดลงของสัดส่วนลิกนิน เท่ากับ 32 เปอร์เซนต์ เนื่องจากค่าเข้าไปทำการแยกโครงสร้างระหว่างลิกนิน และคาร์โบไฮเดรต และเข้าไปทำลายโครงสร้างลิกนิน (Fan และคณะ, 1987) ทำให้ลิกนินหลุดออกมากับสารละลายต่างได้ง่าย สัดส่วนลิกนินจึงลดลง อีกทั้งสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสซึ่งไม่เสถียร ก็ถูกทำลายเพิ่ม ทำให้สัดส่วนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

#### 4.3.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดด้วยค่า ที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อกระดาษที่ผ่านขั้นตอนการระเบิดไอน้ำตามด้วยการสกัดด้วยน้ำ โดยใช้วิธีทฤษฎี

หลังจากเยื่อ ถูกนำมาสกัดด้วยค่า ณ สภาวะต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง ซึ่งออกแบบการทดลองโดยวิธีทฤษฎี เมื่อนำเยื่อยูคาลิปตัสสกัดด้วยค่าวิเคราะห์ห่องค์ประกอบทางเคมี ได้ผลดังตารางที่ 34

ตารางที่ 34 ค่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีเยื่อกระดาษที่สกัดด้วยค่า ณ สภาวะที่แตกต่างกัน

| ชุดการทดลอง | องค์ประกอบทางเคมี (%) |        |          |              |      |
|-------------|-----------------------|--------|----------|--------------|------|
|             | ไฮโดรเซลลูโลส         | ลิกนิน | เซลลูโลส | เฮมิเซลลูโลส | เถ้า |
| 1           | 67.75                 | 29.59  | 59.12    | 4.36         | 1.58 |
| 2           | 67.79                 | 29.59  | 59.52    | 4.02         | 3.04 |
| 3           | 66.37                 | 30.05  | 59.37    | 3.39         | 2.82 |
| 4           | 68.25                 | 30.04  | 60.61    | 3.65         | 1.88 |
| 5           | 67.39                 | 30.55  | 60.05    | 3.68         | 2.4  |
| 6           | 66.37                 | 30.69  | 58.71    | 3.72         | 2.68 |
| 7           | 68.26                 | 29.86  | 61.45    | 3.77         | 2.15 |
| 8           | 67.76                 | 30.24  | 61.58    | 3.25         | 1.63 |
| 9           | 66.61                 | 30.98  | 59.84    | 3.29         | 3.25 |





ตารางที่ 36 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าสัดส่วนลิกนิน

| Factor      | DOF <sup>A</sup>                              | SS <sup>A</sup> | V <sup>A</sup> | F <sup>A</sup> | S'    | Percent<br>contribution | Confidence <sup>A</sup> | Significant |
|-------------|-----------------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------|-------------------------|-------------------------|-------------|
|             |                                               |                 |                |                |       | (%)                     | (%)                     |             |
| N           | 2                                             | 2.549           | 1.27           | 1.425          | 0.761 | 3.314                   | 73.61                   | -           |
| T           | 2                                             | 2.532           | 1.27           | 1.416          | 0.744 | 3.24                    | 73.401                  | -           |
| t           | 2                                             | 0.012           | 0.01           | 0.006          | 0     | 0                       | 0.598                   | -           |
| Other Error | 20                                            | 17.88           | 0.89           |                |       | 93.446                  |                         |             |
| Total       | 26                                            | 22.97           |                |                |       | 100                     |                         |             |
| หมายเหตุ    | N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) |                 |                |                |       | P<0.001                 | ***                     |             |
|             | T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             |                 |                |                |       | P<0.01                  | **                      |             |
|             | t: เวลาการสกัด (นาที)                         |                 |                |                |       | P<0.05                  | *                       |             |

ตารางที่ 37 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลส

| Factor      | DOF <sup>A</sup>                              | SS <sup>A</sup> | V <sup>A</sup> | F <sup>A</sup> | S'    | Percent<br>contribution | Confidence <sup>A</sup> | Significant |
|-------------|-----------------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------|-------------------------|-------------------------|-------------|
|             |                                               |                 |                |                |       | (%)                     | (%)                     |             |
| N           | 2                                             | 1.075           | 0.54           | 1.228          | 0.2   | 1.828                   | 68.597                  | -           |
| T           | 2                                             | 0.979           | 0.49           | 1.119          | 0.104 | 0.955                   | 65.379                  | -           |
| t           | 2                                             | 0.133           | 0.66           | 0.152          | 0     | 0                       | 14.003                  | -           |
| Other Error | 20                                            | 8.75            | 0.44           |                |       | 97.217                  |                         |             |
| Total       | 26                                            | 10.94           |                |                |       | 100                     |                         |             |
| หมายเหตุ    | N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) |                 |                |                |       | P<0.001                 | ***                     |             |
|             | T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             |                 |                |                |       | P<0.01                  | **                      |             |
|             | t: เวลาการสกัด (นาที)                         |                 |                |                |       | P<0.05                  | *                       |             |

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยอาศัยค่าสัดส่วนเซลลูโลส จากตารางที่ 35 พบว่าร้อยละอิทธิพล (Percent contribution) ของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ามากที่สุด เท่ากับ

22.927 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ อุณหภูมิการสกัด เท่ากับ 9.91 ส่วนเวลาการสกัดเป็นปัจจัยที่ไม่มีค่าร้อยละอิทธิพลเลย เท่ากับ 0 และเมื่อพิจารณาจากระดับความเชื่อมั่นจะเห็นว่า ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $p < 0.01$  และอุณหภูมิการสกัด มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $p < 0.05$  ส่วนปัจจัยด้านเวลาการสกัดเป็นปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ด้านผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยพิจารณาค่าสัดส่วนลักษณะ จากตารางที่ 36 พบว่า ร้อยละอิทธิพล (Percent contribution) ของความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 3.314 รองลงมาคือ อุณหภูมิการสกัด เท่ากับ 3.240 ส่วนเวลาการสกัดเป็นปัจจัยที่ไม่มีค่าร้อยละอิทธิพล เท่ากับ 0 และเมื่อพิจารณาจากระดับความเชื่อมั่นจะเห็นว่า ทั้งสามปัจจัยคือ ความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการสกัด และเวลาการสกัด เป็นปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยพิจารณาค่าสัดส่วนสมาชิกเฉลี่ย จากตารางที่ 37 พบว่า ร้อยละอิทธิพล (Percent contribution) ของความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 1.828 รองลงมาคือ อุณหภูมิการสกัด เท่ากับ 0.955 ส่วนเวลาการสกัดเป็นปัจจัยที่ไม่มีค่าร้อยละอิทธิพล เท่ากับ 0 และเมื่อพิจารณาจากระดับความเชื่อมั่นจะเห็นว่า ทั้งสามปัจจัยคือ ความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการสกัด และเวลาการสกัด เป็นปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เหมือนกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยพิจารณาค่าสัดส่วนลักษณะ

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถสรุปได้ว่า เมื่อพิจารณาจากค่าสัดส่วนสมาชิกเฉลี่ย พบว่า ความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีอิทธิพลมากที่สุดต่อการสกัดด้วยด่างเพื่อเพิ่มสัดส่วนสมาชิกเฉลี่ย รองลงมาคืออุณหภูมิการสกัดที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยด่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน ส่วนเวลาการสกัด ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยด่างอย่างมีนัยสำคัญ ด้านค่าสัดส่วนลักษณะ พบว่า ปัจจัยทั้งสาม คือความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการสกัด และเวลาการสกัด ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยด่างเพื่อลดสัดส่วนลักษณะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนค่าสัดส่วนสมาชิกเฉลี่ย ปัจจัยทั้งสาม ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยด่างอย่างมีนัยสำคัญ และไม่ใช่ว่าพารามิเตอร์หลักในการหาสถานะที่เหมาะสมของการสกัดด้วยด่าง จึงไม่นำผลการวิเคราะห์ของค่าสัดส่วนสมาชิกเฉลี่ยมาพิจารณา เช่นเดียวกับค่าสัดส่วนเฉลี่ย ถึงแม้จะมีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญ แต่เนื่องจากค่าสัดส่วนที่มีค่าน้อยมาก จึงไม่

นำไปใช้พิจารณาสถานะที่เหมาะสม เช่นเดียวกับค่าสัดส่วนเฮมิเซลล์โลส ดังนั้น จึงใช้เพียงค่าสัดส่วนเซลล์โลสและลิกนินในการพิจารณาหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดด้วยด่าง ในขั้นต่อไป

#### 4.3.2.2 การหาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยด่าง ไม่กระฉินเทา

หลักในการหาสถานะที่เหมาะสมโดยวิธีทะลุแบ่งประเภทของการทดลองออกเป็น 3 ประเภท คือ The Smaller is better, The Nominal is better และ The Bigger is better ซึ่งการทดลองนี้จัดอยู่ในทั้งประเภท The Bigger is better (B) และ The Smaller is better (S) โดยต้องการสัดส่วนเซลล์โลสสูงสุดจึงใช้ประเภท The Bigger is better อีกด้าน ต้องการสัดส่วนลิกนิน เฮมิเซลล์โลส และเถ้า ต่ำสุด จึงใช้ประเภท The Smaller is better การทดลองครั้งนี้สนใจที่ค่าสัดส่วนเซลล์โลสสูงสุด และสัดส่วนลิกนินต่ำสุด จึงต้องหาสถานะที่ให้ค่าสัดส่วนดังกล่าว

นำค่าสัดส่วนเซลล์โลส และสัดส่วนลิกนิน ของทั้ง 9 ชุดการทดลอง การทดลองละ 3 ชั่วโมง ค่าอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N-Ratio) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมต่อการทดลอง ซึ่งสูตรการคำนวณค่า S/N-Ratio แสดงในภาคผนวก และสรุปผลได้ดังตารางที่ 38 โดยนำ S/N-Ratio มาคำนวณร้อยละอิทธิพลหลักของปัจจัยของการทดลองในแต่ละระดับการทดลอง ซึ่งสรุปผลดังตารางที่ 39



ตารางที่ 38 สรุปค่าสัดส่วน S/N ของค่าสัดส่วนเซลล์โลส ลิกนินและเฮมิเซลล์โลส จากการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง ของไม้กระถินเทพา

| ชุดการทดลอง | สัดส่วนเซลล์โลส (เปอร์เซ็นต์) |            |            |                         | สัดส่วนลิกนิน (เปอร์เซ็นต์) |            |            |                         | สัดส่วนเฮมิเซลล์โลส (เปอร์เซ็นต์) |            |            |                         |
|-------------|-------------------------------|------------|------------|-------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------------------------|-----------------------------------|------------|------------|-------------------------|
|             | ครั้งที่ 1                    | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | อัตราส่วน S/N (เดซิเบล) | ครั้งที่ 1                  | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | อัตราส่วน S/N (เดซิเบล) | ครั้งที่ 1                        | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | อัตราส่วน S/N (เดซิเบล) |
| 1           | 59.82                         | 59.82      | 58.7       | 35.482                  | 30.04                       | 28.23      | 30.49      | 29.407                  | 4.41                              | 4.02       | 4.66       | 12.745                  |
| 2           | 57.76                         | 57.76      | 61.60      | 35.411                  | 28.45                       | 29.29      | 31.04      | 29.407                  | 3.88                              | 3.37       | 4.81       | 11.808                  |
| 3           | 59.57                         | 59.57      | 59.57      | 35.501                  | 29.70                       | 28.80      | 31.65      | 29.536                  | 2.89                              | 3.01       | 4.27       | 10.227                  |
| 4           | 60.49                         | 60.49      | 59.94      | 35.607                  | 29.74                       | 30.47      | 29.91      | 29.553                  | 3.32                              | 3.77       | 3.87       | 11.198                  |
| 5           | 60.34                         | 60.34      | 60.11      | 35.601                  | 30.58                       | 30.43      | 30.64      | 29.700                  | 2.92                              | 4.22       | 3.89       | 10.975                  |
| 6           | 58.85                         | 58.85      | 59.34      | 35.419                  | 29.84                       | 30.90      | 31.34      | 29.735                  | 3.33                              | 3.37       | 4.46       | 11.182                  |
| 7           | 61.68                         | 61.68      | 59.87      | 35.715                  | 29.97                       | 30.80      | 28.80      | 29.491                  | 2.87                              | 5.15       | 3.29       | 10.764                  |
| 8           | 60.57                         | 60.57      | 60.65      | 35.649                  | 30.53                       | 29.61      | 30.57      | 29.608                  | 3.12                              | 3.45       | 3.18       | 10.212                  |
| 9           | 59.23                         | 59.23      | 59.82      | 35.479                  | 29.94                       | 30.78      | 32.21      | 29.809                  | 3.04                              | 3.88       | 2.94       | 10.141                  |

ตารางที่ 39 อิทธิพลหลักของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อไม้กระถิน  
เทพาที่สกัดด้วยคางแล้ว

| สัดส่วนเซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์)                 |        |        |        |                    |                          |
|-----------------------------------------------|--------|--------|--------|--------------------|--------------------------|
| ปัจจัย                                        | ระดับ  |        |        | ค่าอิทธิพล<br>หลัก | ค่าร้อยละ<br>อิทธิพลหลัก |
|                                               | 1      | 2      | 3      |                    |                          |
| ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์<br>(เปอร์เซ็นต์) | 35.464 | 35.542 | 35.614 | 0.150              | 38.343                   |
| อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)                | 35.601 | 35.554 | 35.466 | 0.135              | 34.480                   |
| เวลาการสกัด (นาที)                            | 35.516 | 35.499 | 35.606 | 0.106              | 27.177                   |
| สัดส่วนลิกนิน (เปอร์เซ็นต์)                   |        |        |        |                    |                          |
| ปัจจัย                                        | ระดับ  |        |        | ค่าอิทธิพล<br>หลัก | ค่าร้อยละ<br>อิทธิพลหลัก |
|                                               | 1      | 2      | 3      |                    |                          |
| ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์<br>(เปอร์เซ็นต์) | 29.450 | 29.663 | 29.636 | 0.213              | 48.775                   |
| อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)                | 29.484 | 29.572 | 29.693 | 0.209              | 48.068                   |
| เวลา (นาที)                                   | 29.584 | 29.589 | 29.576 | 0.014              | 3.157                    |
| สัดส่วนเฮมิเซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์)             |        |        |        |                    |                          |
| ปัจจัย                                        | ระดับ  |        |        | ค่าอิทธิพล<br>หลัก | ค่าร้อยละ<br>อิทธิพลหลัก |
|                                               | 1      | 2      | 3      |                    |                          |
| ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์<br>(เปอร์เซ็นต์) | 11.593 | 11.119 | 10.372 | 1.221              | 40.739                   |
| อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)                | 11.569 | 10.999 | 10.517 | 1.052              | 35.092                   |
| เวลา (นาที)                                   | 11.380 | 11.049 | 10.655 | 0.724              | 24.169                   |

จากผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก โดยอาศัยค่าสัดส่วนเซลล์โลส ดังแสดงในตารางที่ 39 พบว่า ค่าร้อยละอิทธิพลหลักของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 38.343 ส่วนอนุกรมการสกัด และเวลาการสกัด มีค่าร้อยละอิทธิพลหลักถัดลงมา เท่ากับ 34.480 และ 27.177 ตามลำดับ และจากค่าดังกล่าวสามารถบอกได้ว่า ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าสัดส่วนเซลล์โลส มากที่สุด ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

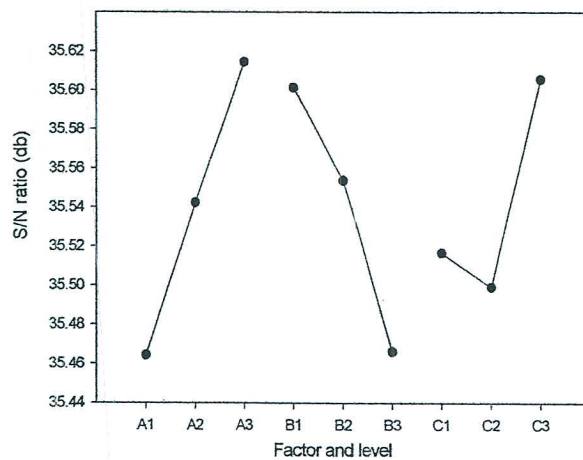
การวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก โดยอาศัยค่าสัดส่วนลิกนิน จากตารางที่ 39 พบว่าค่าร้อยละอิทธิพลหลักของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 48.775 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอนุกรมการสกัด เท่ากับ 48.068 ส่วนปัจจัยด้านเวลาการสกัดมีค่าร้อยละอิทธิพลหลักน้อยที่สุด เท่ากับ 3.157 และจากค่าดังกล่าวสามารถบอกได้ว่า ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าสัดส่วนลิกนิน มากที่สุด ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

ส่วนผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก โดยอาศัยค่าสัดส่วนเฮมิเซลล์โลส ดังแสดงในตารางที่ 39 พบว่า ค่าร้อยละอิทธิพลหลักของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 40.739 ส่วนอนุกรมการสกัด และเวลาการสกัด มีค่าร้อยละอิทธิพลหลักถัดลงมา เท่ากับ 35.092 และ 24.169 ตามลำดับ และจากค่าดังกล่าวสามารถบอกได้ว่า ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าสัดส่วนเฮมิเซลล์โลส มากที่สุด ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

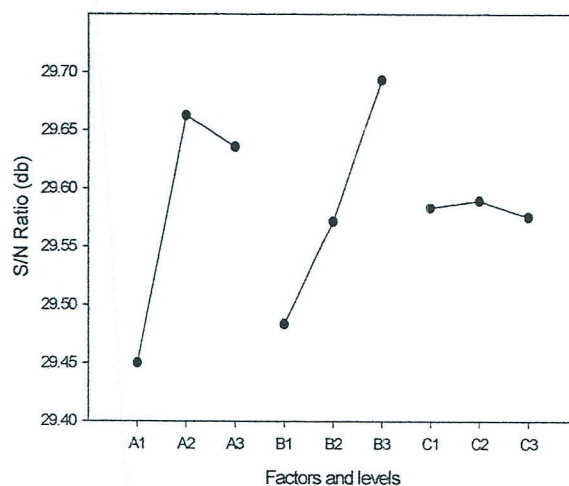
จากผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก เมื่อพิจารณาที่พารามิเตอร์หลัก คือ ค่าสัดส่วนเซลล์โลสและลิกนิน พบว่าความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่ามากที่สุด รองลงมาคือ อนุกรมการสกัด และถัดมา คือเวลาการสกัด ซึ่งสอดคล้องกับให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

นำอัตราส่วน S/N ตามตารางที่ 38 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน S/N กับปัจจัยของการทดลองในแต่ละระดับของปัจจัยของการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดด้วยค่า เพื่อเพิ่มสัดส่วนเซลล์โลส และลดสัดส่วนลิกนินในเยื่อไม้กระถินเทพา ได้ผลดังภาพที่ 13, 14, และ 15

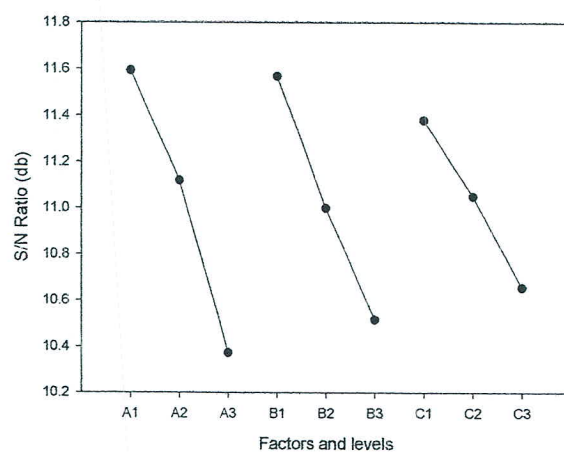




ภาพที่ 13 ค่าอัตราส่วน S/N ของปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละระดับที่มีผลต่อสัดส่วนเซลล์โลส



ภาพที่ 14 ค่าอัตราส่วน S/N ของปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละระดับที่มีผลต่อสัดส่วนลิกนิน



ภาพที่ 15 ค่าอัตราส่วน S/N ของปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละระดับที่มีผลต่อสัดส่วนเฮมิเซลลูโลส

จากภาพที่ 13-15 สามารถพิจารณาอันดับของแต่ละปัจจัยที่ให้อัตราส่วน S/N สูงสุด ซึ่งสรุปเป็นสภาวะที่เหมาะสม 3 สภาวะที่แตกต่างกัน คือ สภาวะที่ให้ค่าสัดส่วนเซลล์โลสสูงสุด สภาวะที่ให้ค่าสัดส่วนลิกนินต่ำสุด และสภาวะที่ให้ค่าสัดส่วนเฮมิเซลล์โลสต่ำสุด แต่เนื่องจากเยื่อไม้ที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำยังคงมีค่าสัดส่วนลิกนินที่สูง ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของการสกัดด้วยด่าง เพื่อกำจัดลิกนินและเพิ่มสัดส่วนเซลล์โลสในเยื่อไม้ ที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำและสกัดด้วยน้ำร้อนแล้ว การหาสภาวะการสกัดด้วยด่างที่ดีที่สุด จึงควรมีเพียงสภาวะเดียว ดังนั้นในการพิจารณา จึงใช้พารามิเตอร์หลักคือ ค่าสัดส่วนเซลล์โลส และค่าสัดส่วนลิกนิน

**ตารางที่ 40** สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยด่าง เพื่อเพิ่มค่าสัดส่วนเซลล์โลสและลดค่าสัดส่วนลิกนินในเยื่อไม้กระถินเทพาที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำและสกัดด้วยน้ำร้อนแล้ว ผ่านการคำนวณโดยวิธีทะกุจิ

| ปัจจัยการทดลอง                                | ระดับการทดลอง | สภาวะ |
|-----------------------------------------------|---------------|-------|
| <b>ชุดการทดลอง A</b>                          |               |       |
| N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | 3             | 25    |
| T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | 1             | 70    |
| t: เวลาการสกัด (นาที)                         | 3             | 90    |
| <b>ชุดการทดลอง B</b>                          |               |       |
| N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | 1             | 15    |
| T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | 1             | 70    |
| t: เวลาการสกัด (นาที)                         | 3             | 90    |

หมายเหตุ: ชุดการทดลอง A คือ สภาวะการสกัดด่างที่ให้ค่าสัดส่วนเซลล์โลสสูงสุดของไม้กระถินเทพา

ชุดการทดลอง B คือ สภาวะการสกัดด่างที่ให้ค่าสัดส่วนลิกนินต่ำสุดของไม้กระถินเทพา

จากตารางที่ 40 สรุปสภาวะเหมาะสมการสกัดด่างที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีทะกุจิ พิจารณาสภาวะการสกัดด่างที่ให้ค่าสัดส่วนเซลล์โลสสูงสุด เป็นสภาวะเดียวกับชุดการทดลองที่ 7 ในตารางที่ 34 (ชุดการทดลอง A ในตารางที่ 40) ขณะที่สภาวะที่ให้ค่าสัดส่วนลิกนินต่ำสุด ไม่ได้อยู่ในชุดการทดลองใด ในตารางที่ 29 (ชุดการทดลอง B ในตารางที่ 40) โดยวิธีทะกุจิ ใช้หาสภาวะที่เหมาะสมใน

การสกัดค่า และสามารถนำค่าสถานะที่เหมาะสมมาประมาณค่าสัดส่วนเซลล์โลสสูงสุด และลิกนินต่ำสุด ของชุดการทดลอง A และ B ตามลำดับ ต่อมานำสถานะการสกัดค่าที่เหมาะสมที่คำนวณได้โดยวิธีทฤษฎี ทำการทดลองยืนยันผล เพื่อหาค่าองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จริงจากสถานะดังกล่าว ดังตารางที่ 41 และตารางที่ 42 ค่าสัดส่วนเซลล์โลสสูงสุด และลิกนินต่ำสุด เปรียบเทียบระหว่างที่ได้จากการทดลอง (รวมถึงการทำการทดลองยืนยันผล) กับการประมาณค่าโดยวิธีทฤษฎี

ในตารางที่ 41 ชุดการทดลอง A สถานะที่ได้จากการคำนวณวิธีทฤษฎี เป็นสถานะเดียวกับชุดการทดลองที่ 7 (ตารางที่ 34) ดังนั้น จึงใช้ค่าองค์ประกอบที่ได้จากการทดลองของชุดการทดลองที่ 7 แต่ชุดการทดลอง B สถานะที่ได้จากการคำนวณวิธีทฤษฎี ไม่ได้อยู่ในชุดการทดลองใด ดังนั้น จึงต้องทำการทดลองยืนยันผล ซึ่งจุดแตกต่างของสถานะทั้งสองคือ ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยชุดการทดลอง A ใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้ค่าสัดส่วนลิกนินต่ำสุด ส่วนชุดการทดลอง B ใช้ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้ค่าสัดส่วนเซลล์โลสสูงสุด

ตารางที่ 41 องค์ประกอบทางเคมีของไม้กระถินเทพา ที่ได้จากการทดลองยืนยันผล ของสถานะที่เหมาะสมการสกัดค่าที่ได้จากวิธีทฤษฎี

| สถานะ            | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์) |        |          |      |
|------------------|---------------------------------|--------|----------|------|
|                  | เซลล์โลส                        | ลิกนิน | เพนโตแซน | เถ้า |
| ชุดการทดลอง A *  | 61.45                           | 29.86  | 3.77     | 2.15 |
| ชุดการทดลอง B ** | 57.77                           | 29.59  | 3.76     | 6.67 |

หมายเหตุ : \* หมายถึง ชุดการทดลอง B เท่านั้นที่ทำการทดลองใหม่ เพื่อยืนยันผล

\*\* หมายถึง สถานะที่เหมาะสมของชุดการทดลอง A เป็นสถานะเดียวกับการทดลองที่ 7 ในตาราง 5 จึงใช้ค่าองค์ประกอบในตาราง เป็นตัวแทนของชุดการทดลองนี้



ตารางที่ 42 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริง และที่ได้จากการประมาณค่าซึ่งคำนวณโดยวิธี  
ทฤษฎี ของสภาวะการสกัดค้างที่เหมาะสมของไม้กระถินเทพา

| ชุดการทดลองเหมาะสม | ค่าจากการทดลอง (เปอร์เซ็นต์) |        | ค่าประมาณ (เปอร์เซ็นต์) |        |
|--------------------|------------------------------|--------|-------------------------|--------|
|                    | เซลลูโลส                     | ลิกนิน | เซลลูโลส                | ลิกนิน |
| ชุดการทดลอง A      | 61.45                        | 29.86  | 61.59                   | -      |
| ชุดการทดลอง B      | 57.77                        | 29.59  | -                       | 29.37  |

จากตารางที่ 41 และ 42 จะเห็นว่า ค่าสัดส่วนเซลลูโลสที่ได้จากชุดการทดลอง A เท่ากับ 61.54 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่า ชุดการทดลอง B ที่มีค่าเท่ากับ 57.77 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าสัดส่วนลิกนินใกล้เคียงกันมาก คือ 29.86 และ 29.59 ของชุดการทดลอง A และ B ตามลำดับ เห็นได้จากตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าสัดส่วนลิกนินที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทุกพารามิเตอร์ ดังนั้น จึงพิจารณาที่สัดส่วนเซลลูโลส ดังนั้นจึงเลือกที่ชุดการทดลอง A เป็นสภาวะการสกัดค้างในเชื้อไม้กระถินเทพา ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด

ตารางที่ 43 สรุปค่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของไม้กระถินเทพา ที่ผ่านการพรีทรีตเมนต์สภาวะเหมาะสมแต่ละขั้นตอน

| ขั้นตอนการพรีทรีตเมนต์ | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์) |        |              |      |
|------------------------|---------------------------------|--------|--------------|------|
|                        | เซลลูโลส                        | ลิกนิน | เฮมิเซลลูโลส | เถ้า |
| วัตถุดิบเริ่มต้น       | 46.47                           | 26.44  | 18.28        | 0.76 |
| การระเบิดด้วยไอน้ำ     | 44.44                           | 29.33  | 17.92        | 0.68 |
| การล้างด้วยน้ำร้อน     | 51.05                           | 33.8   | 8            | 0.4  |
| การสกัดด้วยด่าง        | 61.45                           | 29.86  | 3.77         | 2.15 |

จากตารางที่ 43 องค์ประกอบทางเคมีของไม้กระถินเทพา เมื่อผ่านขั้นตอนการสกัดด้วยด่างสภาวะเหมาะสมที่หาได้โดยวิธีทฤษฎี จากวัตถุดิบเริ่มต้นมีสัดส่วนเซลลูโลส 46.47 เพิ่มขึ้นเป็น 61.45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลส เท่ากับ 24.38 เปอร์เซ็นต์

ด้านสัดส่วนลิกนิน ควรมีค่าลดลง เมื่อผ่านการสกัดด้วยค่าต่าง เทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้น กลับพบว่ามีความ สัดส่วนที่เพิ่มขึ้น คือ จาก 26.44 เป็น 29.86 แต่เมื่อเทียบกับหลังขั้นตอนการล้างด้วยน้ำร้อน ซึ่ง พบว่ามีค่าลดลงบ้างเล็กน้อย คือ จาก 33.80 เป็น 29.86 เปอร์เซ็นต์ โดยสัดส่วนลิกนินหลังสกัดด้วย ค่าต่าง เมื่อเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้น เพิ่มขึ้นนั้น อาจเนื่องมาจาก สัดส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ลดลงมาก หลัง ระเบิดด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อน ทำให้ไปเพิ่มสัดส่วนของลิกนิน อีกทั้งยังไปเพิ่มตรงส่วน เซลลูโลส ซึ่งลิกนินและเซลลูโลสหลังระเบิดด้วยไอน้ำ แทบจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง หรือสูญหาย น้อยมาก จึงทำให้สัดส่วนลิกนิน และเซลลูโลสมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ขั้นตอนแรก แต่หลังจากสกัดด้วย ค่าต่าง ซึ่งค่าจะเข้าไปทำการแยกโครงสร้างระหว่างลิกนิน และคาร์โบไฮเดรต และเข้าไปทำลาย โครงสร้างลิกนิน (Fan และคณะ, 1987) ทำให้ลิกนินหลุดออกมากับสารละลายค่าได้ง่าย สัดส่วน ลิกนินจึงลดลง แต่ที่ลดลงเพียงเล็กน้อยหลังสกัดด้วยค่าต่าง เมื่อเทียบกับสัดส่วนลิกนินหลังระเบิดด้วย ไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อน อาจเนื่องมาจาก ไม้กระถินเทพาเป็นไม้เนื้อแข็งที่มีเส้นใยยาว มีความ แข็งและความหนาแน่นค่อนข้างสูงเทียบเท่ากับ ไม้ที่นิยมทำตู้มากที่สุด ในแถบอเมริกาเหนือ อาจ เนื่องจากการจัดเรียง โครงสร้างองค์ประกอบทางเคมีมีความซับซ้อน และแน่นหนา มาก ค่าจึงเข้าไป ทำปฏิกิริยากับ โครงสร้างลิกนิน ได้ยากกว่า

#### 4.3.3 การหาสถานะที่เหมาะสมของการสกัดด้วยค่าต่าง ที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อลำต้น ปลายที่ผ่านขั้นตอนการระเบิดไอน้ำตามด้วยการสกัดด้วยน้ำ โดยใช้วิธีทะกุกิ

หลังจากเยื่อถูกนำมาสกัดด้วยค่าต่าง ณ สถานะต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลองทั้ง 9 ชุดการ ทดลอง ออกแบบการทดลองโดยวิธีทะกุกิ เมื่อนำเยื่อคุณภาพดีสกัดด้วยค่าต่างวิเคราะห์องค์ประกอบ ทางเคมี ได้ผลดังตารางที่ 44

การวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ทั้ง 9 ชุดการทดลอง จะอาศัย ค่าสัดส่วนเซลลูโลส สัดส่วน ลิกนิน เป็นพารามิเตอร์หลัก เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการสกัดด้วยค่าต่าง ต้องการกำจัดลิกนินออก จากเยื่อเพื่อให้มีสัดส่วนลิกนินต่ำที่สุด และเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสให้มากที่สุด ส่วนค่าสัดส่วนเฮมิ เซลลูโลสและเถ้า เป็นพารามิเตอร์รอง ซึ่งการวิเคราะห์แบ่งออกเป็นหัวข้อหลักได้ ดังนี้ การหา อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนเซลลูโลสและลิกนิน การหาสถานะที่เหมาะสมในการ

สกัดด้วยค่า การประมาณค่าสัดส่วนเซลลูโลส และลิกนิน ที่ได้จากการสกัดด้วยค่าที่สถานะที่เหมาะสม

ตารางที่ 44 ค่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของไม้ลำต้นปาล์มที่สกัดด้วยค่า ณ สถานะที่แตกต่างกัน

| ชุดการทดลอง | องค์ประกอบทางเคมี (%) |          |          |      |       |
|-------------|-----------------------|----------|----------|------|-------|
|             | ลิกนิน                | เซลลูโลส | เพนโตแซน | เถ้า | อื่นๆ |
| 1           | 7.03                  | 79.92    | 3.04     | 0.74 | 9.27  |
| 2           | 7.34                  | 86.67    | 3        | 0.62 | 2.37  |
| 3           | 6.63                  | 87.61    | 3        | 0.64 | 2.12  |
| 4           | 8.82                  | 81.21    | 2.19     | 0.89 | 6.89  |
| 5           | 9.36                  | 84.18    | 2.27     | 0.69 | 4.19  |
| 6           | 8.89                  | 82.31    | 2.28     | 0.78 | 5.74  |
| 7           | 9.68                  | 83.28    | 1.91     | 1.06 | 4.07  |
| 8           | 11.03                 | 84.24    | 2.08     | 0.84 | 1.81  |
| 9           | 9.25                  | 83.08    | 1.72     | 0.83 | 5.01  |

#### 4.3.3.1 การหาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนเซลลูโลส และลิกนินของเยื่อลำต้นปาล์ม

การหาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยจะแสดงถึงร้อยละอิทธิพลของปัจจัยการทดลอง (Percent contribution) ที่มีผลต่อการสกัดด้วยค่าเพื่อเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลส ลดสัดส่วนลิกนิน เหมิเซลลูโลส และเถ้า ซึ่งเป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลองใดมีผลต่อการสกัดด้วยค่าบ้าง และมีอิทธิพลมากหรือน้อย นอกจากนี้การวิเคราะห์ความแปรปรวนยังสามารถบอกได้ถึงระดับความเชื่อมั่นของปัจจัยการทดลองที่มีต่อการสกัดด้วยค่า ได้ผลการวิเคราะห์สรุปดังตารางที่ 45 46 และ 47



ตารางที่ 45 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าสัดส่วนเซลล์โลส

| Factor      | DOF                                           | SS    | V    | F     | S'    | Percent          | Confidence | Significant |
|-------------|-----------------------------------------------|-------|------|-------|-------|------------------|------------|-------------|
|             |                                               |       |      |       |       | contribution (%) | (%)        |             |
| N           | 2                                             | 0.048 | 0.02 | 1.076 | 0.003 | 0.633            | 51.83      | -           |
| T           | 2                                             | 0.272 | 0.14 | 6.08  | 0.227 | 42.122           | 85.88      | -           |
| t           | 2                                             | 0.175 | 0.09 | 3.904 | 0.13  | 33.164           | 79.61      | -           |
| Other Error | 2                                             | 0.044 | 0.02 |       |       | 33.164           |            |             |
| Total       | 8                                             | 0.54  |      |       |       | 100              |            |             |
| หมายเหตุ    | N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) |       |      |       |       | P<0.001          | ***        |             |
|             | T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             |       |      |       |       | P<0.01           | **         |             |
|             | t: เวลาการสกัด (นาที)                         |       |      |       |       | P<0.05           | *          |             |

ตารางที่ 46 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าสัดส่วนลิกนิน

| Factor      | DOF                                           | SS    | V    | F       | S'    | Percent          | Confidence | Significant |
|-------------|-----------------------------------------------|-------|------|---------|-------|------------------|------------|-------------|
|             |                                               |       |      |         |       | contribution (%) | (%)        |             |
| N           | 2                                             | 15.03 | 7.51 | 359.184 | 14.99 | 89.037           | 99.72      | **          |
| T           | 2                                             | 1.431 | 0.72 | 34.211  | 1.389 | 8.255            | 97.16      | *           |
| t           | 2                                             | 0.33  | 0.17 | 7.89    | 0.288 | 1.712            | 88.75      | -           |
| Other Error | 2                                             | 0.041 | 0.02 |         |       | 0.996            |            |             |
| Total       | 8                                             | 16.83 |      |         |       | 100              |            |             |
| หมายเหตุ    | N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) |       |      |         |       | P<0.001          | ***        |             |
|             | T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             |       |      |         |       | P<0.01           | **         |             |
|             | t: เวลาการสกัด (นาที)                         |       |      |         |       | P<0.05           | *          |             |

ตารางที่ 47 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของเพน โดแซน

| Factor      | DOF                                           | SS    | V    | F      | S'    | Percent<br>contribution | Confidence | Significant |
|-------------|-----------------------------------------------|-------|------|--------|-------|-------------------------|------------|-------------|
|             |                                               |       |      |        |       | (%)                     | (%)        |             |
| N           | 2                                             | 21.39 | 10.7 | 35.136 | 20.78 | 85.702                  | 97.23      | *           |
| T           | 2                                             | 0.966 | 0.48 | 1.588  | 0.358 | 1.477                   | 61.36      | -           |
| t           | 2                                             | 0.282 | 0.64 | 2.106  | 0.673 | 2.777                   | 67.8       | -           |
| Other Error | 2                                             | 0.608 | 0.3  |        |       | 10.044                  |            |             |
| Total       | 8                                             | 24.25 |      |        |       | 100                     |            |             |
| หมายเหตุ    | N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) |       |      |        |       | P<0.001                 | ***        |             |
|             | T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             |       |      |        |       | P<0.01                  | **         |             |
|             | t: เวลาการสกัด (นาที)                         |       |      |        |       | P<0.05                  | *          |             |

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากสัดส่วนเซลล์ูโลสในตารางที่ 45 พบว่าร้อยละอิทธิพล (percent contribution) ของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา คือ 0.633, 42.122 และ 24.081% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากระดับความเชื่อมั่นเห็นว่าทั้งความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากสัดส่วนลิกนินในตารางที่ 46 พบว่าร้อยละอิทธิพล (percent contribution) ของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา คือ 89.037, 8.255 และ 1.712% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากระดับความเชื่อมั่นพบว่าปัจจัยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิ มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าอย่างมีนัยสำคัญที่  $p < 0.001$  และ  $p < 0.05$  ตามลำดับ เวลาไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากสัดส่วนเพน โดแซนในตารางที่ 47 พบว่าร้อยละอิทธิพล (percent contribution) ของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา คือ 85.702, 1.47 และ 2.777% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากระดับความเชื่อมั่นพบว่าปัจจัยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าอย่างมีนัยสำคัญที่  $p < 0.05$  อุณหภูมิ และเวลาไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากปัจจัยในการสกัดด้วยค่า คือความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา ที่มีผลต่อสัดส่วนของเซลลูโลส และลิกนิน เป็นพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการพิจารณาภาวะที่ดีที่สุดของการสกัดด้วยค่า พิจารณาจากค่าสัดส่วนเซลลูโลสพบว่าปัจจัยในการสกัดด้วยค่า ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาจากค่าสัดส่วนลิกนินพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามลำดับ

#### 4.3.3.2 การหาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยค่าไม่ลำดับค่า

หลักในการหาสถานะที่เหมาะสมโดยวิธีทะลุแบ่งประเภทของการทดลองออกเป็น 3 ประเภท คือ The Smaller is better, The Nominal is better และ The Bigger is better ซึ่งการทดลองนี้จัดอยู่ในทั้งประเภท The Bigger is better (B) และ The Smaller is better (S) โดยต้องการสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุดจึงใช้ประเภท The Bigger is better อีกด้าน ต้องการสัดส่วนลิกนิน เหมิเซลลูโลสต่ำสุด จึงใช้ประเภท The Smaller is better การทดลองครั้งนี้สนใจที่ค่าสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด และสัดส่วนลิกนินต่ำสุด จึงต้องหาสถานะที่ให้ค่าสัดส่วนดังกล่าว

นำค่าสัดส่วนเซลลูโลส และสัดส่วนลิกนิน ของทั้ง 9 ชุดการทดลอง การทดลองละ 3 ซ้ำ หาค่าอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N-Ratio) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมต่อการทดลอง ซึ่งสรุปผลได้ดังตารางที่ 48 โดยนำ S/N-Ratio มาคำนวณร้อยละอิทธิพลหลักของปัจจัยของการทดลองในแต่ละระดับการทดลอง ซึ่งสรุปผลดังตารางที่ 49



ตารางที่ 48 สรุปค่าสัดส่วน S/N ของค่าสัดส่วนเซลลูลอส ลิกนิน และเพนโตแซน จากการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง ของลำต้นปาล์มน้ำมัน

| ชุดการทดลอง | สัดส่วนเซลลูลอส (เปอร์เซ็นต์) |            |            |                         | สัดส่วนลิกนิน (เปอร์เซ็นต์) |            |            |                         | สัดส่วนเพนโตแซน (เปอร์เซ็นต์) |            |            |                         |
|-------------|-------------------------------|------------|------------|-------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------------------------|-------------------------------|------------|------------|-------------------------|
|             | ครั้งที่ 1                    | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | อัตราส่วน S/N (เดซิเบล) | ครั้งที่ 1                  | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | อัตราส่วน S/N (เดซิเบล) | ครั้งที่ 1                    | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | อัตราส่วน S/N (เดซิเบล) |
| 1           | 80.64                         | 79.99      | 79.13      | 38.052                  | 6.40                        | 7.11       | 7.58       | -16.96                  | 3.13                          | 2.96       | 3.02       | -9.650                  |
| 2           | 86.5                          | 86.73      | 86.78      | 38.757                  | 7.46                        | 7.20       | 7.35       | -17.311                 | 2.94                          | 3.03       | 3.02       | -9.534                  |
| 3           | 87.99                         | 87.63      | 87.22      | 38.851                  | 6.75                        | 6.55       | 6.60       | -16.436                 | 2.96                          | 3.03       | 3.01       | -9.543                  |
| 4           | 81.84                         | 80.78      | 81.01      | 38.191                  | 8.17                        | 8.80       | 9.48       | -18.923                 | 2.12                          | 2.23       | 2.23       | -6.825                  |
| 5           | 85.6                          | 85.74      | 84.87      | 38.629                  | 9.44                        | 9.15       | 9.50       | -19.43                  | 2.36                          | 2.08       | 2.38       | -7.149                  |
| 6           | 82.31                         | 82.67      | 81.96      | 38.309                  | 9.00                        | 8.82       | 8.85       | -18.979                 | 2.33                          | 2.17       | 2.33       | -7.151                  |
| 7           | 83.2                          | 83.65      | 82.99      | 38.41                   | 9.50                        | 9.22       | 10.33      | -19.731                 | 1.95                          | 1.95       | 1.82       | -5.610                  |
| 8           | 83.85                         | 84.4       | 84.47      | 38.51                   | 11.65                       | 10.72      | 10.71      | -20.856                 | 2.26                          | 2.21       | 2.38       | -7.176                  |
| 9           | 82.63                         | 83.31      | 83.29      | 38.389                  | 9.18                        | 9.36       | 9.21       | -19.324                 | 2.16                          | 1.63       | 1.37       | -4.866                  |

**ตารางที่ 49** อิทธิพลหลักของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อลำต้นปาล์มน้ำมันที่สกัดด้วยค้างแล้ว

| สัดส่วนเซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์)              |         |         |        |                |                      |
|--------------------------------------------|---------|---------|--------|----------------|----------------------|
| ปัจจัย                                     | ระดับ   |         |        | ค่าอิทธิพลหลัก | ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก |
|                                            | 1       | 2       | 3      |                |                      |
| ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | 38.553  | 38.376  | 38.436 | 0.176          | 18.945               |
| อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | 38.218  | 38.632  | 38.516 | 0.414          | 44.564               |
| เวลาการสกัด (นาทีก)                        | 37.118  | 38.446  | 38.63  | 0.339          | 36.491               |
| สัดส่วนลิกนิน (เปอร์เซ็นต์)                |         |         |        |                |                      |
| ปัจจัย                                     | ระดับ   |         |        | ค่าอิทธิพลหลัก | ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก |
|                                            | 1       | 2       | 3      |                |                      |
| ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | -16.902 | -19.11  | -19.97 | 3.068          | 69.208               |
| อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | -18.538 | -19.199 | -18.25 | 0.953          | 21.498               |
| เวลาการสกัด (นาทีก)                        | -18.931 | -18.519 | -18.53 | 0.412          | 9.294                |
| สัดส่วนเฮมิเซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์)          |         |         |        |                |                      |
| ปัจจัย                                     | ระดับ   |         |        | ค่าอิทธิพลหลัก | ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก |
|                                            | 1       | 2       | 3      |                |                      |
| ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | -9.576  | -7.041  | -5.884 | 3.692          | 68.688               |
| อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | -7.362  | -7.953  | -7.187 | 0.766          | 14.251               |
| เวลาการสกัด (นาทีก)                        | -7.992  | -7.075  | -7.434 | 0.917          | 17.06                |

จากผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก โดยอาศัยค่าสัดส่วนเซลลูโลส ดังแสดงในตารางที่ 49 พบว่าค่าร้อยละอิทธิพลหลักของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา

คือ 18.945, 44.564 และ 36.491 ตามลำดับ จากค่าร้อยละอิทธิพลหลักพบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าสัดส่วนของเซลล์ลอสสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ค่าอิทธิพลหลักที่มีผลมากที่สุดคือ อุณหภูมิในการสกัดแต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

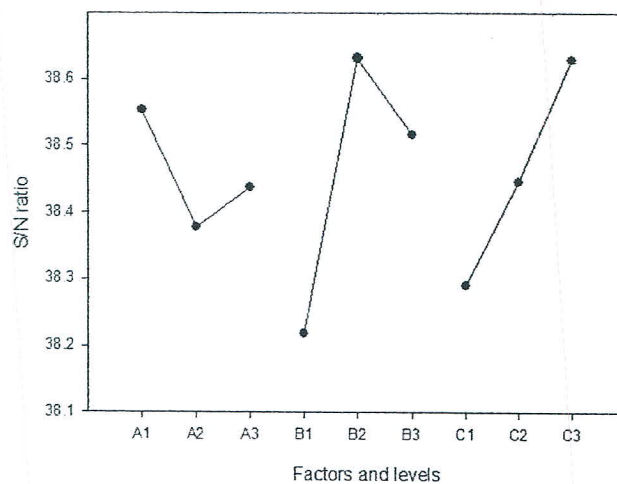
จากผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก โดยอาศัยค่าสัดส่วนหลักนิน ดังแสดงในตารางที่ 49 พบว่าค่าร้อยละอิทธิพลหลักของความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา คือ 69.208, 21.498 และ 9.294 ตามลำดับ จากร้อยละอิทธิพลหลักพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าสัดส่วนหลักนินมากที่สุดสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

จากผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก โดยอาศัยค่าสัดส่วนเพนโตแซน ดังแสดงในตารางที่ 49 พบว่าค่าร้อยละอิทธิพลหลักของความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา คือ 68.688, 14.251 และ 17.060 ตามลำดับ จากร้อยละอิทธิพลหลักพบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าสัดส่วนเพนโตแซนมากที่สุดสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

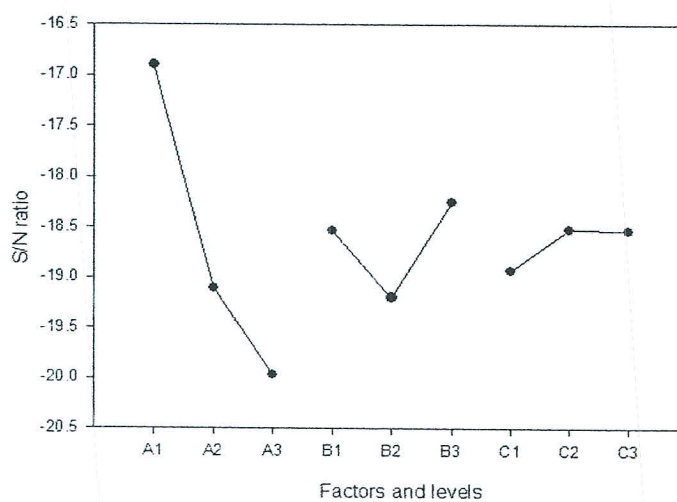
จากผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก เมื่อพิจารณาที่พารามิเตอร์หลัก คือ ค่าสัดส่วนเซลล์ลอสและหลักนิน พบว่า ความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยต่างมากที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิการสกัด และเวลาการสกัด ซึ่งสอดคล้องกับให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

นำอัตราส่วน S/N ตามตารางที่ 48 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน S/N กับปัจจัยของการทดลองในแต่ละระดับของปัจจัยของการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดด้วยค่า เพื่อเพิ่มสัดส่วนเซลล์ลอส และลดสัดส่วนหลักนินในเชื้อไม้ลำต้นปาล์ม ได้ผลดังภาพ 16, 17, และ 18

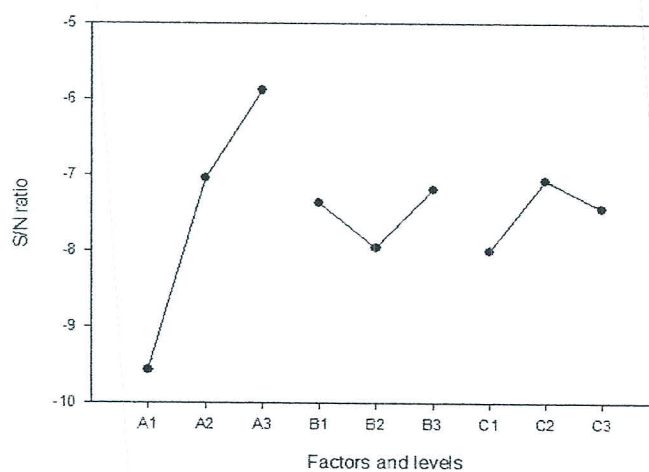




ภาพที่ 16 ค่าอัตราส่วนของปัจจัยต่างๆ ในแต่ละระดับที่มีผลต่อสัดส่วนเซลล์โลส



ภาพที่ 17 ค่าอัตราส่วนของปัจจัยต่างๆ ในแต่ละระดับที่มีผลต่อสัดส่วนลิกนิน



ภาพที่ 18 ค่าอัตราส่วนของปัจจัยต่างๆ ในแต่ละระดับที่มีผลต่อสัดส่วนเพนโดแซน

ตารางที่ 50 สรุปสถานะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยค่าที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำและสกัดด้วยน้ำร้อนคำนวณโดยวิธีทฤษฎี

| ปัจจัยการทดลอง                                | ระดับการทดลอง | สถานะ |
|-----------------------------------------------|---------------|-------|
| ชุดการทดลอง A                                 |               |       |
| N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | 1             | 15    |
| T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | 2             | 80    |
| t: เวลาการสกัด (นาที)                         | 3             | 90    |
| ชุดการทดลอง B                                 |               |       |
| N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | 1             | 15    |
| T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | 3             | 90    |
| t: เวลาการสกัด (นาที)                         | 2             | 60    |

หมายเหตุ: ชุดการทดลอง A คือ สถานะการสกัดด้วยค่าที่ให้ค่าสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุดของลำต้นปาล์มน้ำมัน

ชุดการทดลอง B คือ สถานะการสกัดด้วยค่าที่ให้ค่าสัดส่วนลิกนินต่ำสุดของลำต้นปาล์มน้ำมัน

จากตารางที่ 50 สรุปสถานะที่ดีที่สุดโดยการคำนวณด้วยวิธีทฤษฎีชุดการทดลอง A ให้ค่าสัดส่วนเซลลูโลสที่มากที่สุด คือ 88.125 % โดยใช้สถานะในการสกัดด้วยค่าความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์, อุณหภูมิ และเวลา คือ 15%, 80 องศาเซลเซียส และ 90 นาที ตามลำดับ ชุดการทดลอง B ให้ค่าสัดส่วนลิกนินน้อยที่สุด คือ 6.567 % โดยใช้สถานะในการสกัดด้วยค่าความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์, อุณหภูมิ และเวลา คือ 15%, 90 องศาเซลเซียส และ 60 นาที ตามลำดับ โดยทำยืนยันผลการทดลองดังตารางที่ 51

ตารางที่ 51 องค์ประกอบทางเคมีของลำต้นปาล์มน้ำมันจากการทดลองยืนยันผลของชุดการทดลอง A และ B โดยวิธีหะกุจิ

| สถานะ            | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์) |        |              |      |
|------------------|---------------------------------|--------|--------------|------|
|                  | เซลลูโลส                        | ลิกนิน | เฮมิเซลลูโลส | เถ้า |
| ชุดการทดลอง A *  | 87.89                           | 7.53   | 1.29         | 1.29 |
| ชุดการทดลอง B ** | 87.14                           | 6.13   | 1.4          | 1.4  |

ตารางที่ 52 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและจากการประมาณค่าโดยวิธีหะกุจิ

| ชุดการทดลอง   | ค่าจากการทดลอง (เปอร์เซ็นต์) |        | ค่าประมาณ (เปอร์เซ็นต์) |        |
|---------------|------------------------------|--------|-------------------------|--------|
|               | เซลลูโลส                     | ลิกนิน | เซลลูโลส                | ลิกนิน |
| ชุดการทดลอง A | 87.89                        | 7.53   | 88.12                   | -      |
| ชุดการทดลอง B | 87.14                        | 6.13   | -                       | 6.57   |

จากตารางที่ 51 พบว่าสัดส่วนของเซลลูโลสในชุดการทดลอง A และ B คือ 87.89 และ 87.14 %ตามลำดับ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในตารางที่ 49 พบว่าทั้งความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยด่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และสัดส่วนของลิกนินในชุดการทดลอง A และ B คือ 7.53 และ 6.13% ตามลำดับ โดยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยด่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นจึงเลือกชุดการทดลอง B เป็นสถานะที่ใช้ในการสกัดด้วยด่างในการเพิ่มสัดส่วนของเซลลูโลสและลดสัดส่วนของลิกนินเพื่อการผลิตเอทานอล



ตารางที่ 53 สรุปค่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของลำต้นปาล์มน้ำมันที่ผ่านการพรีทรีตเมนต์ในสถานะที่เหมาะสม

| ขั้นตอน            | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์) |        |          |      |
|--------------------|---------------------------------|--------|----------|------|
|                    | เซลลูโลส                        | ลิกนิน | เพนโตแซน | เถ้า |
| การพรีทรีตเมนต์    |                                 |        |          |      |
| วัตถุดิบเริ่มต้น   | 40.83                           | 21.64  | 29.53    | 2.40 |
| การระเบิดด้วยไอน้ำ | 38.14                           | 28.94  | 9.16     | 3.99 |
| การล้างด้วยน้ำร้อน | 58.83                           | 27.12  | 4.03     | 0.34 |
| การสกัดด้วยด่าง    | 87.14                           | 6.13   | 1.40     | 1.40 |

จากตารางที่ 53 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของลำต้นปาล์มน้ำมันมีการเปลี่ยนแปลงจากวัตถุดิบ เมื่อผ่านการพรีทรีตเมนต์ในขั้นตอนการระเบิดด้วยไอน้ำ การล้างด้วยน้ำร้อน และการสกัดด้วยด่าง โดยสัดส่วนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจาก 40.83 เป็น 87.14% สัดส่วนลิกนินลดลงจาก 21.64 เป็น 6.13% เพนโตแซนลดลงจาก 29.53 เป็น 1.40% คิดเป็นประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลส การลดลงของสัดส่วนลิกนินและเพนโตแซนเท่ากับ 53.14, 71.67 และ 95.26% ตามลำดับ จากสัดส่วนเซลลูโลส 87.14% แสดงให้เห็นว่าลำต้นปาล์มน้ำมันจัดเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการใช้เป็นสับสเตรทสำหรับการผลิตเอทานอลจากลิกโนเซลลูโลส

#### 4.3.4 การหาสถานะที่เหมาะสมของการสกัดด้วยด่าง ที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อทางใบปาล์มที่ผ่านขั้นตอนการระเบิดไอน้ำตามด้วยการสกัดด้วยน้ำ โดยใช้วิธีทะกุกิ

หลังจากเยื่อถูกนำมาสกัดด้วยด่าง ณ สถานะต่าง ๆ ภายใต้สภาวะการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง ออกแบบการทดลองโดยวิธีทะกุกิ เมื่อนำเยื่อคุณภาพดีสกัดด้วยด่างวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้ผลดังตารางที่ 54

ตารางที่ 54 ค่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของไม้ทางใบปาล์มที่สกัดด้วยค่า  $\eta$  สภาวะที่แตกต่างกัน

| ชุดการทดลอง | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์) |        |          |      |       |
|-------------|---------------------------------|--------|----------|------|-------|
|             | เซลลูโลส                        | ลิกนิน | เพนโตแซน | เถ้า | อื่นๆ |
| 1           | 78.8                            | 16.21  | 3.59     | 1.29 | 0.11  |
| 2           | 80.74                           | 17.07  | 3.13     | 1.21 | -     |
| 3           | 77.79                           | 16.31  | 3.83     | 1.24 | 0.83  |
| 4           | 74.88                           | 20.4   | 2.8      | 1.7  | 0.22  |
| 5           | 74.16                           | 20.07  | 2.9      | 1.59 | 1.28  |
| 6           | 79.58                           | 19.97  | 2.8      | 1.3  | -     |
| 7           | 68.45                           | 19.55  | 2.58     | 1.77 | 7.65  |
| 8           | 56.8                            | 21.46  | 2.76     | 1.59 | 17.39 |
| 9           | 71.07                           | 21.13  | 1.99     | 1.51 | 4.3   |

การวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ทั้ง 9 ชุดการทดลอง จะอาศัย ค่าสัดส่วนเซลลูโลส สัดส่วนลิกนิน เป็นพารามิเตอร์หลัก เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการสกัดด้วยค่า  $\eta$  ต้องการกำจัดลิกนินออกจากเยื่อเพื่อให้มีสัดส่วนลิกนินต่ำที่สุด และเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสให้มากที่สุด ส่วนค่าสัดส่วนเฮมิเซลลูโลสและเถ้า เป็นพารามิเตอร์รอง ซึ่งการวิเคราะห์แบ่งออกเป็นหัวข้อหลักได้ ดังนี้ การหาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนเซลลูโลสและลิกนิน การหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยค่า  $\eta$  การประมาณค่าสัดส่วนเซลลูโลส และลิกนิน ที่ได้จากการสกัดด้วยค่า  $\eta$  ที่สภาวะที่เหมาะสม

#### 4.3.4.1 การหาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อสัดส่วนเซลลูโลส และลิกนินของเยื่อทางใบปาล์ม

การหาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยจะแสดงถึงร้อยละอิทธิพลของปัจจัยการทดลอง (Percent contribution) ที่มีผลต่อการสกัดด้วยค่า  $\eta$  เพื่อเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลส ลดสัดส่วนลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นค่าที่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยที่ใช้ในการทดลองใดมีผลต่อการสกัดด้วยค่า  $\eta$  บ้าง และมีอิทธิพลมากหรือน้อย นอกจากนี้การวิเคราะห์ความแปรปรวนยังสามารถบอกได้ถึงระดับ

ความเชื่อมั่นของปัจจัยการทดลองที่มีต่อการสกัดด้วยค่าต่าง ได้ผลการวิเคราะห์สรุปดังตารางที่ 55, 56 และ 57

ตารางที่ 55 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าสัดส่วนเซลล์โลส

| Factor      | DOF                                           | SS    | V    | F     | S'    | Percent      | Confidence | Significant |
|-------------|-----------------------------------------------|-------|------|-------|-------|--------------|------------|-------------|
|             |                                               |       |      |       |       | contribution |            |             |
|             |                                               |       |      |       |       | (%)          | (%)        |             |
| N           | 2                                             | 5.333 | 2.67 | 3.779 | 3.921 | 50.706       | 79.0751    | -           |
| T           | 2                                             | 0.451 | 0.23 | 0.32  | 0     | 0            | 24.2424    | -           |
| t           | 2                                             | 0.538 | 0.27 | 0.381 | 0     | 0            | 27.5887    | -           |
| Other Error | 2                                             | 1.41  | 0.71 |       |       | 49.294       |            |             |
| Total       | 8                                             | 7.734 |      |       |       | 100          |            |             |
| หมายเหตุ    | N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) |       |      |       |       | P<0.001      | ***        |             |
|             | T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             |       |      |       |       | P<0.01       | **         |             |
|             | t: เวลาการสกัด (นาทีก)                        |       |      |       |       | P<0.05       | *          |             |

ตารางที่ 56 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าสัดส่วนลิกนิน

| Factor      | DOF                                           | SS    | V    | F       | S'    | Percent      | Confidence | Significant |
|-------------|-----------------------------------------------|-------|------|---------|-------|--------------|------------|-------------|
|             |                                               |       |      |         |       | contribution |            |             |
|             |                                               |       |      |         |       | (%)          | (%)        |             |
| N           | 2                                             | 6.924 | 3.46 | 136.542 | 6.874 | 92.301       | 99.273     | **          |
| T           | 2                                             | 0.238 | 0.12 | 4.703   | 0.187 | 2.522        | 82.465     | -           |
| t           | 2                                             | 0.233 | 0.12 | 4.601   | 0.182 | 2.452        | 82.146     | -           |
| Other Error | 2                                             | 0.05  | 0.03 |         |       | 2.725        |            |             |
| Total       | 8                                             | 7.447 |      |         |       | 100          |            |             |
| หมายเหตุ    | N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) |       |      |         |       | P<0.001      | ***        |             |
|             | T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             |       |      |         |       | P<0.01       | **         |             |
|             | t: เวลาการสกัด (นาทีก)                        |       |      |         |       | P<0.05       | *          |             |



ตารางที่ 57 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของเพนโดแซน

| Factor      | DOF                                           | SS    | V    | F     | S'    | Percent      | Confidence | Significant |
|-------------|-----------------------------------------------|-------|------|-------|-------|--------------|------------|-------------|
|             |                                               |       |      |       |       | contribution | (%)        |             |
| N           | 2                                             | 15.71 | 7.85 | 8.624 | 13.88 | 63.469       | 89.6093    | -           |
| T           | 2                                             | 0.547 | 0.27 | 0.3   | 0     | 0            | 23.0769    | -           |
| t           | 2                                             | 3.801 | 1.9  | 2.087 | 1.98  | 9.052        | 67.6061    | -           |
| Other Error | 2                                             | 1.82  | 0.91 |       |       | 27.479       |            |             |
| Total       | 8                                             | 21.88 |      |       |       | 100          |            |             |
| หมายเหตุ    | N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) |       |      |       |       | P<0.001      | ***        |             |
|             | T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             |       |      |       |       | P<0.01       | **         |             |
|             | t: เวลาการสกัด (นาที)                         |       |      |       |       | P<0.05       | *          |             |

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยอาศัยค่าสัดส่วนเซลล์โลส จากตารางที่ 55 พบว่า ร้อยละอิทธิพล (Percent contribution) ของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 50.706 ส่วนอุณหภูมิการสกัดและเวลาการสกัดเป็นปัจจัยที่ไม่มีค่าร้อยละอิทธิพลเลย เท่ากับ 0 และเมื่อพิจารณาจากระดับความเชื่อมั่นจะเห็นว่าปัจจัยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการสกัด และเวลาการสกัดเป็นปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ด้านผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยพิจารณาค่าสัดส่วนลูกนิน จากตารางที่ 56 พบว่า ร้อยละอิทธิพล (Percent contribution) ของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 92.301 รองลงมาคือ อุณหภูมิการสกัด เท่ากับ 2.522 ส่วนเวลาการสกัดเป็นปัจจัยมีค่าร้อยละอิทธิพล น้อยสุด เท่ากับ 2.452 และเมื่อพิจารณาจากระดับความเชื่อมั่นจะเห็นว่าปัจจัยความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีอิทธิพลต่อการสกัดต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่  $p<0.01$  ส่วนอุณหภูมิ และเวลาในการสกัดเป็นปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สุดท้ายผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยพิจารณาค่าสัดส่วนเพนโดแซน จากตารางที่ 57 พบว่า ร้อยละอิทธิพล (Percent contribution) ของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่า มากที่สุด เท่ากับ 63.469 รองลงมาคือ เวลาการสกัด เท่ากับ 9.052 ส่วนอุณหภูมิการสกัดเป็นปัจจัยที่

ไม่มีค่าร้อยละอิทธิพล เท่ากับ 0 และเมื่อพิจารณาจากระดับความเชื่อมั่นจะเห็นว่า ทั้งสามปัจจัยคือ ความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการสกัด และเวลาการสกัด เป็นปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เหมือนกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยพิจารณาค่าสัดส่วนเซลล์โลส

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน สามารถสรุปได้ว่า เมื่อพิจารณาจากค่าสัดส่วนเซลล์โลสพบว่าปัจจัยทั้งสาม คือความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการสกัด และเวลาการสกัด ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าเพื่อเพิ่มสัดส่วนเซลล์โลสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ด้านค่าสัดส่วนของลิกนิน พบว่า ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีอิทธิพลมากที่สุดต่อการสกัดด้วยค่าเพื่อลดสัดส่วนลิกนิน ส่วนอุณหภูมิและเวลาในการสกัด ไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าอย่างมีนัยสำคัญ สุดท้ายค่าสัดส่วนเพนโตแซน ปัจจัยทั้งสามไม่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยค่าอย่างมีนัยสำคัญ และไม่ใช้พารามิเตอร์หลักในการหาสถานะที่เหมาะสมของการสกัดด้วยค่า จึงไม่นำผลการวิเคราะห์ของค่าสัดส่วนเพนโตแซนมาใช้พิจารณา ดังนั้น จึงใช้เพียงค่าสัดส่วนเซลล์โลสและลิกนินในการพิจารณาหาสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดด้วยค่า ในขั้นต่อไป

#### 4.3.4.2 การหาสถานะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยค่า ไม้ทางใบปาล์ม

หลักในการหาสถานะที่เหมาะสมโดยวิธีทฤษฎีแบ่งประเภทของการทดลองออกเป็น 3 ประเภท คือ The Smaller is better, The Nominal is better และ The Bigger is better ซึ่งการทดลองนี้จัดอยู่ในทั้งประเภท The Bigger is better (B) และ The Smaller is better (S) โดยต้องการสัดส่วนเซลล์โลสสูงที่สุดจึงใช้ประเภท The Bigger is better อีกด้าน ต้องการสัดส่วนลิกนิน เหมิเซลล์โลสต่ำสุด จึงใช้ประเภท The Smaller is better การทดลองครั้งนี้สนใจที่ค่าสัดส่วนเซลล์โลสสูงที่สุด และสัดส่วนลิกนินต่ำสุด จึงต้องหาสถานะที่ทำให้ได้สัดส่วนดังกล่าว

นำค่าสัดส่วนเซลล์โลส และสัดส่วนลิกนิน ของทั้ง 9 ชุดการทดลอง การทดลองละ 3 ซ้ำ หาค่าอัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N-Ratio) เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมต่อการทดลอง ซึ่งสรุปผลได้ดังตารางที่ 53 โดยนำ S/N-Ratio มาคำนวณร้อยละอิทธิพลหลักของปัจจัยของการทดลองในแต่ละระดับการทดลอง ซึ่งสรุปผลดังตารางที่ 58

ตารางที่ 58 สรุปค่าสัดส่วน S/N ของค่าสัดส่วนเซลล์โลต ลิกนิน และเพนโทแซน จากการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง ของทางใบปาล์ม

| ชุดการทดลอง | สัดส่วนเซลล์โลต (เปอร์เซ็นต์) |            |            |               | สัดส่วนลิกนิน (เปอร์เซ็นต์) |            |            |               | สัดส่วนเพนโทแซน (เปอร์เซ็นต์) |            |            |               |
|-------------|-------------------------------|------------|------------|---------------|-----------------------------|------------|------------|---------------|-------------------------------|------------|------------|---------------|
|             | ครั้งที่ 1                    | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | อัตราส่วน S/N | ครั้งที่ 1                  | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | อัตราส่วน S/N | ครั้งที่ 1                    | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | อัตราส่วน S/N |
| 1           | 78.549                        | 78.939     | 79.026     | 37.934        | 16.083                      | 16.071     | 16.463     | -24.194       | 3.697                         | 3.372      | 3.718      | -11.125       |
| 2           | 81.103                        | 80.365     | 80.752     | 38.141        | 18.69                       | 16.441     | 16.09      | -24.667       | 3.126                         | 3.107      | 3.164      | -9.918        |
| 3           | 76.393                        | 78.824     | 78.16      | 37.816        | 16.262                      | 16.431     | 16.249     | -24.252       | 3.433                         | 3.636      | 4.405      | -11.704       |
| 4           | 75.074                        | 74.703     | 74.849     | 37.486        | 20.64                       | 21.681     | 18.872     | -24.206       | 2.934                         | 2.642      | 2.882      | -9.012        |
| 5           | 74.58                         | 94.114     | 73.733     | 37.989        | 20.815                      | 22.688     | 16.719     | -26.12        | 2.871                         | 2.816      | 3.014      | -9.253        |
| 6           | 79.247                        | 78.885     | 80.596     | 38.014        | 18.468                      | 18.8888    | 22.55      | -26.044       | 2.909                         | 2.647      | 2.85       | -8.957        |
| 7           | 68.094                        | 67.54      | 69.708     | 36.704        | 19.379                      | 18.863     | 20.412     | -25.829       | 2.575                         | 2.496      | 2.682      | -8.251        |
| 8           | 57.454                        | 54.863     | 58.094     | 35.079        | 21.252                      | 20.724     | 22.405     | -26.638       | 2.791                         | 2.686      | 2.805      | -8.822        |
| 9           | 72.851                        | 68.053     | 72.297     | 37.021        | 19.836                      | 21.983     | 21.56      | -26.505       | 1.991                         | 1.95       | 2.042      | -5.998        |



ตารางที่ 59 อิทธิพลหลักของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อทางใบ  
ปาล์มที่สกัดด้วยค่างแล้ว

| สัดส่วนเซลลูโลส (เปอร์เซ็นต์)              |         |         |        |                |                      |
|--------------------------------------------|---------|---------|--------|----------------|----------------------|
| ปัจจัย                                     | ระดับ   |         |        | ค่าอิทธิพลหลัก | ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก |
|                                            | 1       | 2       | 3      |                |                      |
| ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | 37.964  | 37.83   | 36.268 | 1.696          | 60.941               |
| อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | 37.375  | 37.07   | 37.617 | 0.547          | 19.655               |
| เวลาการสกัด (นาที)                         | 37.009  | 37.549  | 37.503 | 0.54           | 19.404               |
| สัดส่วนลิกนิน (เปอร์เซ็นต์)                |         |         |        |                |                      |
| ปัจจัย                                     | ระดับ   |         |        | ค่าอิทธิพลหลัก | ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก |
|                                            | 1       | 2       | 3      |                |                      |
| ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | -24.371 | -26.123 | 26.324 | 1.953          | 71.173               |
| อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | -25.41  | -25.808 | -25.6  | 0.398          | 14.503               |
| เวลาการสกัด (นาที)                         | -25.625 | -25.793 | -25.4  | 0.393          | 14.322               |
| สัดส่วนเพนโตแซน (เปอร์เซ็นต์)              |         |         |        |                |                      |
| ปัจจัย                                     | ระดับ   |         |        | ค่าอิทธิพลหลัก | ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก |
|                                            | 1       | 2       | 3      |                |                      |
| ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | -10.916 | -9.074  | -7.691 | 3.225          | 61.675               |
| อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | -9.463  | -9.331  | -8.886 | 0.577          | 11.035               |
| เวลาการสกัด (นาที)                         | -9.635  | -8.309  | -9.736 | 1.427          | 27.29                |

จากผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก โดยอาศัยค่าสัดส่วนเซลลูโลส จากตารางที่ 59 พบว่าค่าร้อยละอิทธิพลหลักของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา คือ 60.941,

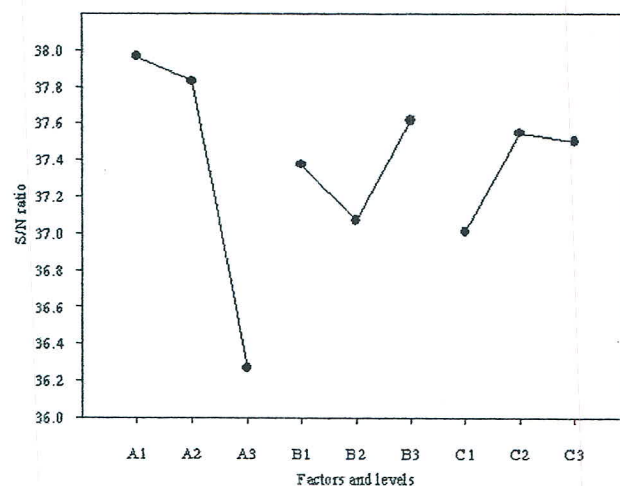
19.655 และ 19.404 ตามลำดับ จากค่าร้อยละอิทธิพลหลักพบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าสัดส่วนของเซลล์โลสสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แต่ค่าอิทธิพลหลักที่มีผลมากที่สุดคือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก โดยอาศัยค่าสัดส่วนลิกนิน จากตารางที่ 59 พบว่าค่าร้อยละอิทธิพลหลักของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา คือ 71.173, 14.503 และ 14.322 ตามลำดับจากค่าร้อยละอิทธิพลดังกล่าวสามารถบอกได้ว่า ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยด่างเพื่อลดค่าสัดส่วนลิกนิน มากที่สุด ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

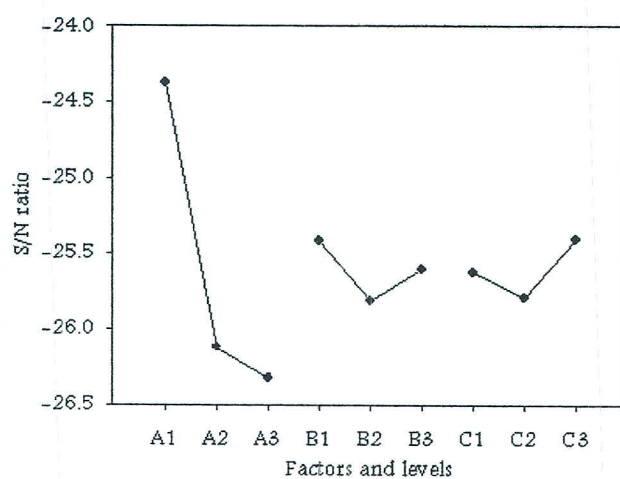
ผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก โดยอาศัยค่าสัดส่วนเพนโตแซน จากตารางที่ 59 พบว่าค่าร้อยละอิทธิพลหลักของความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา คือ 61.675, 11.035 และ 27.29 ตามลำดับ จากค่าร้อยละอิทธิพลหลักพบว่าไม่มีปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าสัดส่วนของเพนโตแซนซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แต่ค่าอิทธิพลหลักที่มีผลมากที่สุดคือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละอิทธิพลหลัก เมื่อพิจารณาที่พารามิเตอร์หลัก คือ ค่าสัดส่วนเซลล์โลสและลิกนิน พบว่าความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด้วยด่างมากที่สุด ส่วนอุณหภูมิและเวลาการสกัดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสกัดด่างไม่แตกต่างกัน

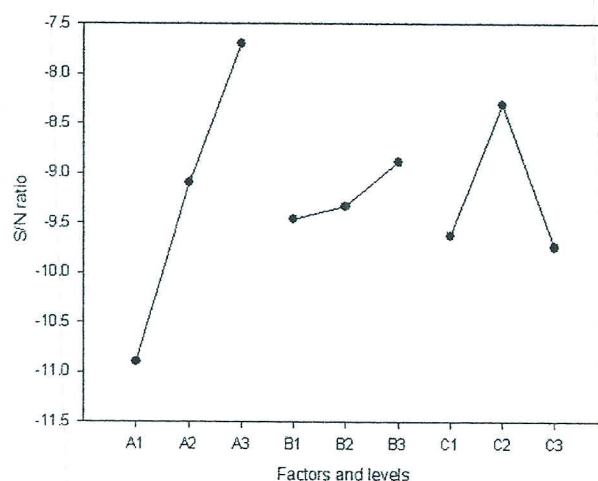
นำอัตราส่วน S/N ตามตารางที่ 58 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน S/N กับปัจจัยของการทดลองในแต่ละระดับของปัจจัยของการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดด้วยด่าง เพื่อเพิ่มสัดส่วนเซลล์โลส และลดสัดส่วนลิกนินในเชื้อไม้ลำต้นปาล์ม ได้ผลดังภาพที่ 19, 20, และ 21



ภาพที่ 19 ค่าอัตราส่วน S/N ของปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละระดับที่มีผลต่อสัดส่วนเซลล์โลส



ภาพที่ 20 ค่าอัตราส่วน S/N ของปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละระดับที่มีผลต่อสัดส่วนลิกนิน



ภาพที่ 21 ค่าอัตราส่วน S/N ของปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละระดับที่มีผลต่อสัดส่วนเพนโตแซน



จากภาพที่ 19-21 สามารถพิจารณาระดับของแต่ละปัจจัยที่ให้อัตราส่วน S/N สูงสุด ซึ่งสรุปเป็นสภาวะที่เหมาะสม 3 สภาวะที่แตกต่างกัน คือ สภาวะที่ให้ค่าสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด สภาวะที่ให้ค่าสัดส่วนลิกนินต่ำสุด และสภาวะที่ให้ค่าสัดส่วนเพนโตแซนต่ำสุด แต่เนื่องจากเยื่อไม้ที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำยังคงมีค่าสัดส่วนลิกนินที่สูง ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของการสกัดด้วยด่างเพื่อกำจัดลิกนินและเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสในเยื่อไม้ ที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำและสกัดด้วยน้ำร้อนแล้ว การหาสภาวะการสกัดด้วยด่างที่ดีที่สุด จึงควรมีเพียงสภาวะเดียว ดังนั้นในการพิจารณา จึงใช้พารามิเตอร์หลักคือ ค่าสัดส่วนเซลลูโลส และค่าสัดส่วนลิกนิน

ตารางที่ 60 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยด่าง เพื่อเพิ่มค่าสัดส่วนเซลลูโลสและลดค่าสัดส่วนลิกนินในเยื่อทางใบปาล์มที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำและสกัดด้วยน้ำร้อนแล้ว ผ่านการคำนวณโดยวิธีทะกุจิ

| ปัจจัยการทดลอง                                | ระดับการทดลอง | สภาวะ |
|-----------------------------------------------|---------------|-------|
| ชุดการทดลอง A                                 |               |       |
| N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | 1             | 15    |
| T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | 3             | 90    |
| t: เวลาการสกัด (นาท)                          | 2             | 60    |
| ชุดการทดลอง B                                 |               |       |
| N: ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เปอร์เซ็นต์) | 1             | 15    |
| T: อุณหภูมิการสกัด (องศาเซลเซียส)             | 1             | 70    |
| t: เวลาการสกัด (นาท)                          | 3             | 90    |

หมายเหตุ: ชุดการทดลอง A คือ สภาวะการสกัดด้วยด่างที่ให้ค่าสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุดของทางใบปาล์ม ชุดการทดลอง

B คือ สภาวะการสกัดด้วยด่างที่ให้ค่าสัดส่วนลิกนินต่ำสุดของทางใบปาล์ม

จากตารางที่ 60 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยด่างที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีทะกุจิ ชุดการทดลอง A ให้ค่าสัดส่วนเซลลูโลสที่มากที่สุด โดยใช้สภาวะในการสกัดด้วยด่าง ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์, อุณหภูมิ และเวลา คือ 15%, 90 องศาเซลเซียส และ 60 นาที ตามลำดับ ส่วนชุดการทดลอง B ให้ค่าสัดส่วนลิกนินน้อยที่สุด โดยใช้สภาวะในการสกัดด้วยด่าง ความเข้มข้น

โซเดียมไฮดรอกไซด์, อุณหภูมิ และเวลา คือ 15%, 70 องศาเซลเซียส และ 90 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำสภาวะการสกัดที่ได้จากการคำนวณ โดยวิธีทะกุกิมาทำการทดลองขึ้นชั้นผลเพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จริงจากสภาวะข้างต้นดังแสดงในตารางที่ 61

ตารางที่ 61 องค์ประกอบทางเคมีทางใบปาล์มจากการทดลองขึ้นชั้นผลของชุดการทดลอง A และ B ในการสกัดที่ได้จากวิธีทะกุกิ

| สภาวะ            | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์) |        |          |        |
|------------------|---------------------------------|--------|----------|--------|
|                  | เซลลูโลส                        | ลิกนิน | เพนโตแซน | เถ้า   |
| ชุดการทดลอง A *  | 80.74                           | 15.99  | 3.17     | 1.0507 |
| ชุดการทดลอง B ** | 74.57                           | 15.14  | 3.65     | 1.6293 |

ตารางที่ 62 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริง และที่ได้จากการประมาณค่าซึ่งคำนวณโดยวิธีทะกุกิ ของสภาวะการสกัดที่เหมาะสมของทางใบปาล์ม

| ชุดการทดลองเหมาะสม | ค่าจากการทดลอง (เปอร์เซ็นต์) |        | ค่าประมาณ (เปอร์เซ็นต์) |        |
|--------------------|------------------------------|--------|-------------------------|--------|
|                    | เซลลูโลส                     | ลิกนิน | เซลลูโลส                | ลิกนิน |
| ชุดการทดลอง A      | 80.74                        | 15.99  | 83.378                  | -      |
| ชุดการทดลอง B      | 74.57                        | 15.14  | -                       | 15.792 |

จากตารางที่ 62 จะเห็นว่า ค่าสัดส่วนเซลลูโลสที่ได้จากชุดการทดลอง A เท่ากับ 80.74 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่า ชุดการทดลอง B ที่มีค่าเท่ากับ 74.57 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าสัดส่วนลิกนินมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าสัดส่วนของเซลลูโลส คือ 15.99 เปอร์เซ็นต์ และ 15.14 เปอร์เซ็นต์ของชุดการทดลอง A และ B ตามลำดับ จากผลการทดลองจึงพิจารณาค่าสัดส่วนเซลลูโลส เนื่องจากชุดการทดลอง A ให้ค่าสัดส่วนเซลลูโลสสูงกว่าชุดการทดลอง B แต่ให้ค่าสัดส่วนลิกนินแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชุดการทดลอง B ดังนั้นจึงเลือกชุดการทดลอง A (ความเข้มข้นโซเดียม 15 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที) เป็นสภาวะการสกัดค่า ในเชื้อทางใบปาล์ม ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มสัดส่วนเซลลูโลสสูงสุด

ตารางที่ 63 สรุปค่าสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของทางใบปาล์ม ที่ผ่านการพรีทรีตเมนต์สภาวะเหมาะสมแต่ละขั้นตอน

| ขั้นตอนการพรีทรีตเมนต์ | องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์) |        |              |      |
|------------------------|---------------------------------|--------|--------------|------|
|                        | เซลลูโลส                        | ลิกนิน | เฮมิเซลลูโลส | เถ้า |
| วัตถุดิบเริ่มต้น       | 42.46                           | 15.63  | 28.27        | 1.82 |
| การระเบิดด้วยไอน้ำ     | 36.17                           | 30.2   | 7.36         | 5.48 |
| การล้างด้วยน้ำร้อน     | 47.87                           | 35.28  | 6.02         | 1.44 |
| การสกัดด้วยด่าง        | 80.74                           | 15.99  | 3.47         | 1.05 |

จากตารางที่ 63 องค์ประกอบทางเคมีของทางใบปาล์ม เมื่อผ่านขั้นตอนการสกัดด้วยด่าง สภาวะเหมาะสมที่หาได้โดยวิธีทะกุกิ จากวัตถุดิบเริ่มต้นมีสัดส่วนเซลลูโลส 42.46 เพิ่มขึ้นเป็น 80.74 เปอร์เซ็นต์ เมื่อคิดเปรี๊ประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนเซลลูโลส เท่ากับ 48.79 เปอร์เซ็นต์ ด้านสัดส่วนลิกนิน ควรมีค่าลดลง เมื่อผ่านการสกัดด้วยด่างเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้น กลับพบว่ามีค่าสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น คือ จาก 15.63 เป็น 15.99 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเทียบกับหลังขั้นตอนการล้างด้วยน้ำร้อนพบว่ามีค่าสัดส่วนลดลง คือ จาก 35.28 เป็น 15.99 เปอร์เซ็นต์ โดยสัดส่วนลิกนินหลังสกัดด้วยด่าง เมื่อเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้น เพิ่มขึ้นนั้น อาจเนื่องมาจาก สัดส่วนเพนโตแซนที่ลดลงมาก หลังระเบิดด้วยไอน้ำและล้างด้วยน้ำร้อน ทำให้ไปเพิ่มสัดส่วนของลิกนิน

**4.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของอุณหภูมิ และปริมาณเชื้อไมยคาลิปัส ลำต้นปาล์ม และทางใบปาล์ม ในการผลิตเอทานอล ด้วยการย่อยเป็นน้ำตาลและการหมักพร้อมกัน (Simultaneous saccharification and fermentation, SSF)**

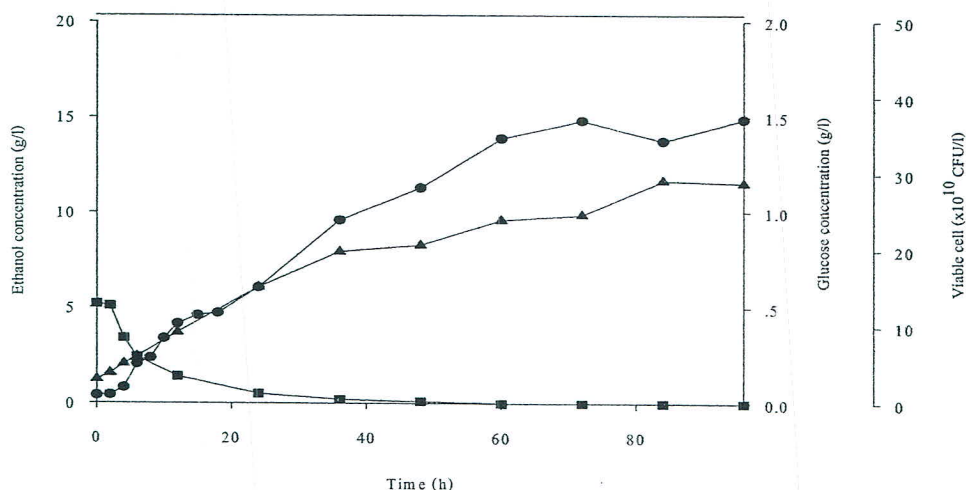
**4.4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลด้วยการย่อยเป็นน้ำตาล และหมักพร้อมกัน (Simultaneous saccharification and fermentation, SSF) ของเชื้อไมยคาลิปัส**

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไมยคาลิปัสที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส นาน 4 นาที สกัดด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน



30 นาที และสกัดด้วยค่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าสัดส่วนเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเท่ากับ 60.91, 1.24 และ 20.66 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งตามลำดับ

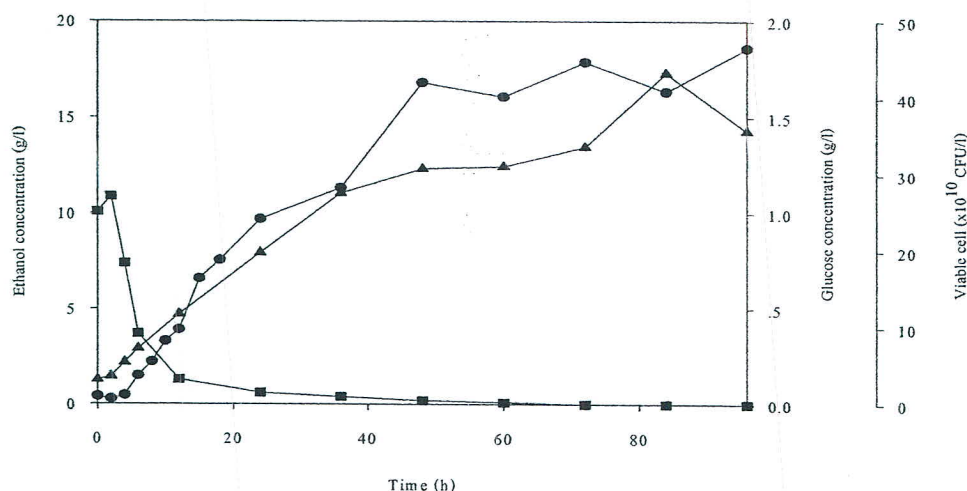
การผลิตเอทานอลจากไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว โดยใช้เอนไซม์ Celluclast 1.5L และ Novozym 188 กับยีสต์ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยเป็นน้ำตาลและหมักพร้อมกัน โดยแปรผันอุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร สามารถสรุปผลแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเอทานอล กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิต กับเวลาของการหมัก ดังภาพที่ 22 ถึง 30



ภาพที่ 22 การผลิตเอทานอลจากเชื้อไม้ยูคาลิปตัสโดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และปริมาณเชื้อ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร (สัญลักษณ์ ▲ , ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอล กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิต ตามลำดับ)

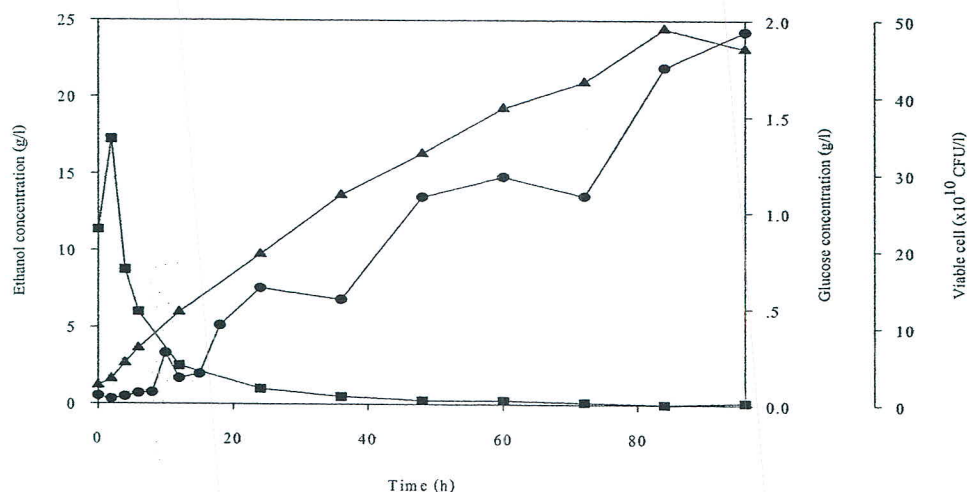
จากการผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณเชื้อ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ดังภาพที่ 22 เมื่อเริ่มการหมักภายใน 2 ชั่วโมงแรกเซลล์อยู่ในช่วงระยะของการปรับตัว โดยมีการเพิ่มขึ้นของเซลล์ และเอทานอลเล็กน้อย ขณะเดียวกันเอนไซม์สามารถทำงานได้น้อยที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากมีอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 50 องศาเซลเซียส ประกอบกับเซลล์นำกลูโคสที่มีอยู่ไปใช้ ส่งผลให้ความเข้มข้นกลูโคสไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 4 เซลล์และเอทานอลเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำตาลกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่เซลล์เริ่มเข้าสู่

สภาวะคงตัวที่ชั่วโมงที่ 60 และน้ำตาลกลูโคสลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อสิ้นสุดการหมักที่เวลา 96 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นกลูโคส เอทานอล และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเท่ากับ 0, 11.52 กรัมต่อลิตร และ  $3.72 \times 10^{11}$  เซลล์ต่อลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 23 การผลิตเอทานอลจากเชื้อไมยคาลิปดัส โดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันที่ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และปริมาณเชื้อ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร (สัญลักษณ์ ▲ , ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอล กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตตามลำดับ)

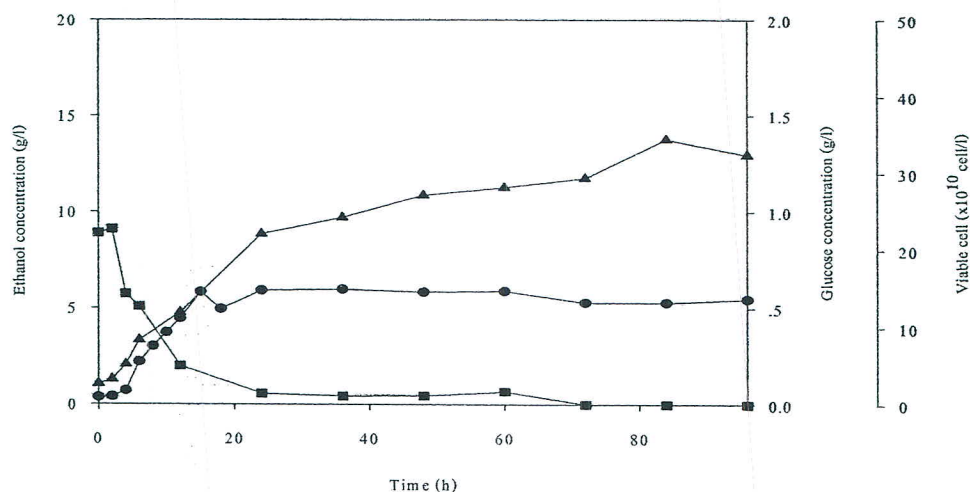
การผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณเชื้อ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ดังภาพที่ 23 เมื่อเริ่มการหมักภายใน 2 ชั่วโมงแรกเซลล์อยู่ในช่วงระยะของการปรับตัว โดยมีการเพิ่มขึ้นของเซลล์ และเอทานอลเล็กน้อย ขณะเดียวกันเอนไซม์สามารถทำงานได้น้อยที่อุณหภูมิต่ำ ประกอบกับเซลล์น้ำกลูโคสที่มีอยู่ไปใช้ ส่งผลให้ความเข้มข้นกลูโคสเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 4 เซลล์และเอทานอลเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำตาลกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่เซลล์เริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ชั่วโมงที่ 48 และไม่พบน้ำตาลกลูโคสในชั่วโมงที่ 60 เมื่อสิ้นสุดการหมักที่เวลา 96 ชั่วโมง พบว่ามีความเข้มข้นกลูโคส เอทานอล และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเท่ากับ 0.01, 23.14 กรัมต่อลิตร และ  $4.65 \times 10^{11}$  เซลล์ต่อลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 24 การผลิตเอทานอลจากเชื้อไมยคาลิปัสโดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร (สัญลักษณ์ ▲ , ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอล กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตตามลำดับ)

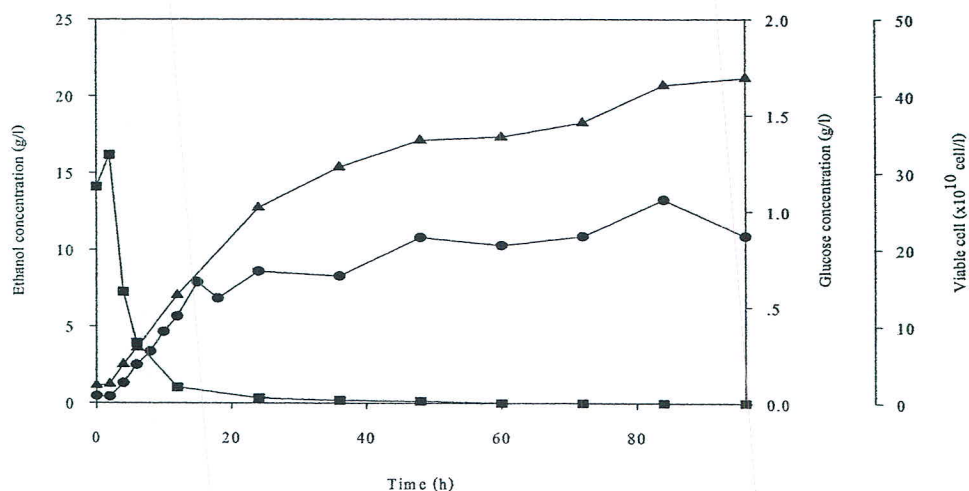
จากการผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ดังภาพที่ 24 เมื่อเริ่มต้นการหมักเซลล์อยู่ในช่วงระยะปรับตัว ขณะเดียวกันเอนไซม์ย่อยเซลลูโลสส่งผลให้มีความเข้มข้นกลูโคสเพิ่มขึ้น เมื่อเข้าสู่ช่วงที่ 4 กลูโคสเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว และเอทานอลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจำนวนเซลล์มีการเปลี่ยนแปลงมาก เนื่องจากการใช้ปริมาณเชื้อสูง ทำให้มีส่วนที่เป็นของเหลวน้อย และยากต่อการเขย่า รวมทั้งการหมักที่อุณหภูมิต่ำ เอนไซม์มีกิจกรรมต่ำด้วย ส่งผลให้ย่อยเซลลูโลสได้น้อย ขึ้นส่วนของเชื้อจึงลดขนาดลงได้น้อย ยากต่อการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยความเข้มข้นเอทานอลที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และกลูโคสที่ลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงถึงเซลล์ยังคงมีการใช้กลูโคสในการเจริญเติบโต และผลิตเอทานอลอย่างต่อเนื่อง เมื่อสิ้นสุดการหมักที่เวลา 96 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นกลูโคส เอทานอล และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเท่ากับ 0.01, 23.14 กรัมต่อลิตร และ  $4.85 \times 10^{11}$  เซลล์ต่อลิตร ตามลำดับ





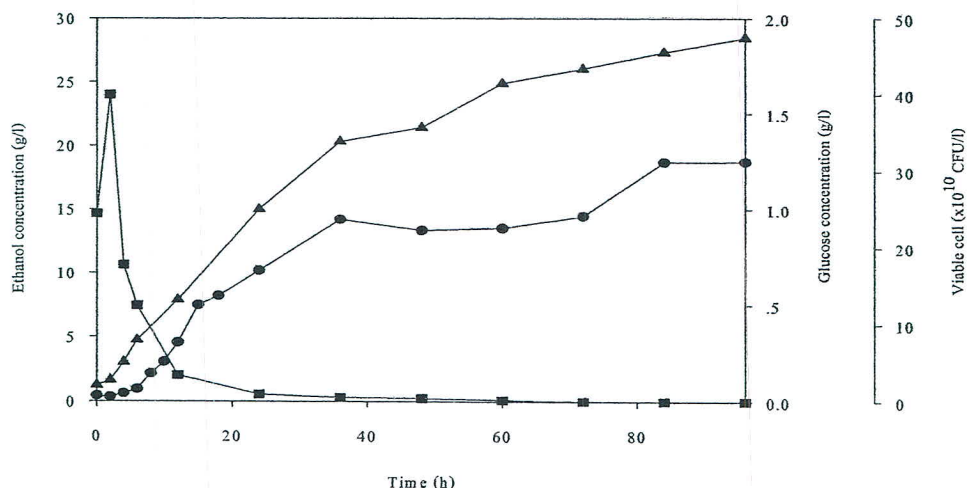
ภาพที่ 25 การผลิตเอทานอลจากเชื้อไมยคาลิปัสโดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อย และหมักพร้อมกันที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และปริมาณเชื้อ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อ ปริมาตร (สัญลักษณ์ ▲ , ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอล กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตตามลำดับ)

ภาพที่ 25 แสดงการผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณเชื้อ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ใน 2 ชั่วโมงเซลล์อยู่ในช่วงระยะของการปรับตัว โดยมีการเพิ่มขึ้นของเซลล์ และเอทานอลเล็กน้อย ขณะเดียวกันเอนไซม์ย่อยเซลลูโลสเป็นกลูโคส และเซลล์นำไปใช้ ส่งผลให้ความกลูโคสเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 4 เซลล์และเอทานอลเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำตาลกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่เซลล์เริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ ชั่วโมงที่ 24 และไม่พบน้ำตาลกลูโคสในชั่วโมงที่ 72 เมื่อสิ้นสุดการหมักที่เวลา 96 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นกลูโคส เอทานอล และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเท่ากับ 0, 12.95 กรัมต่อลิตร และ  $1.37 \times 10^{11}$  เซลล์ต่อลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 26 การผลิตเอทานอลจากเชื้อไมยคาลิปัสโดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อย และหมักพร้อมกันที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และปริมาณเชื้อ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อ ปริมาตร (สัญลักษณ์ ▲ , ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอล กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มี ชีวิตตามลำดับ)

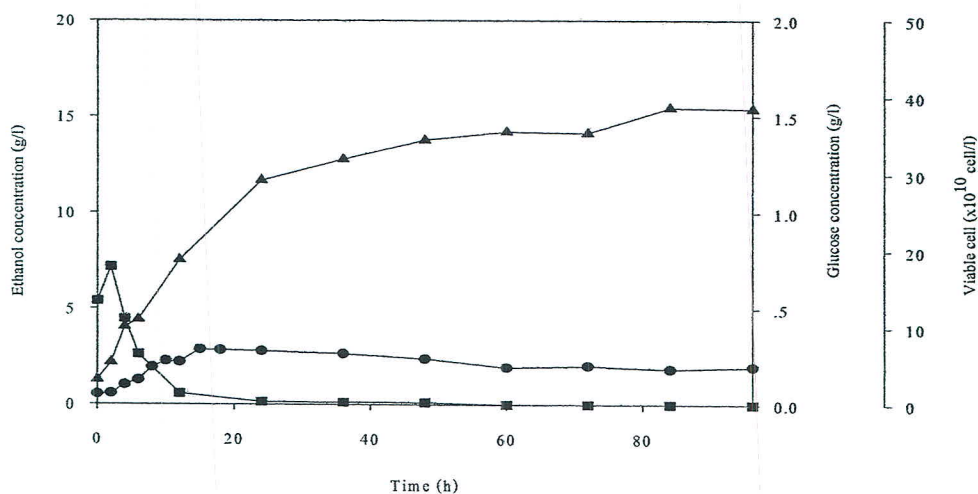
จากการผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณเชื้อ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ดังภาพที่ 26 เมื่อเริ่มการหมักภายใน 2 ชั่วโมงเซลล์อยู่ในช่วงระยะของการ ปรับตัว โดยมีการเพิ่มขึ้นของเซลล์ และเอทานอลเล็กน้อย ขณะเดียวกันเอนไซม์ย่อยเซลลูโลสเป็น กลูโคส และเซลล์นำไปใช้ ส่งผลให้ความกลูโคสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 4 เซลล์และเอทานอลเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำตาลกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่เซลล์เริ่มเข้าสู่ สภาวะคงตัวที่ชั่วโมงที่ 18 และไม่พบน้ำตาลกลูโคสในชั่วโมงที่ 60 เมื่อสิ้นสุดการหมักที่เวลา 96 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นกลูโคส เอทานอล และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเท่ากับ 0, 21.18 กรัมต่อลิตร และ  $2.18 \times 10^{11}$  เซลล์ต่อลิตรตามลำดับ



ภาพที่ 27 การผลิตเอทานอลจากเยื่อไม้ยูคาลิปตัสโดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และปริมาณเยื่อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร (สัญลักษณ์ ▲, ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอล กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตตามลำดับ)

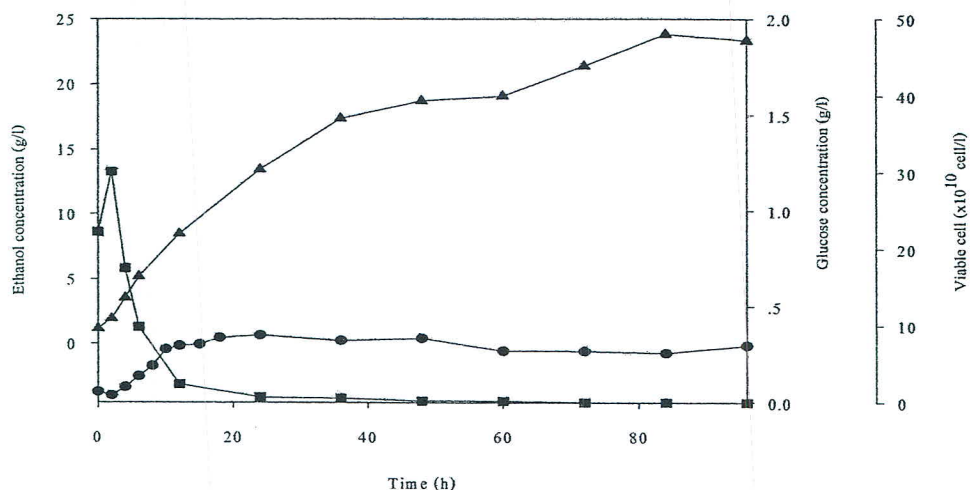
จากการผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณเยื่อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ดังภาพที่ 27 เมื่อเริ่มการหมักภายใน 2 ชั่วโมงเซลล์อยู่ในช่วงระยะของการปรับตัว โดยมีการเพิ่มขึ้นของเซลล์ และเอทานอลเล็กน้อย ขณะเดียวกันเอนไซม์ย่อยเซลลูโลสเป็นกลูโคส และเซลล์นำไปใช้ ส่งผลให้ความกลูโคสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 4 เอทานอลเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำตาลกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่เซลล์เริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ชั่วโมงที่ 24 และไม่พบน้ำตาลกลูโคสในชั่วโมงที่ 60 แสดงถึงเอนไซม์ยังคงมีกิจกรรมอยู่ เมื่อสิ้นสุดการหมักที่เวลา 96 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นกลูโคส เอทานอล และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเท่ากับ 0, 28.47 กรัมต่อลิตร และ  $3.12 \times 10^{11}$  เซลล์ต่อลิตร ตามลำดับ





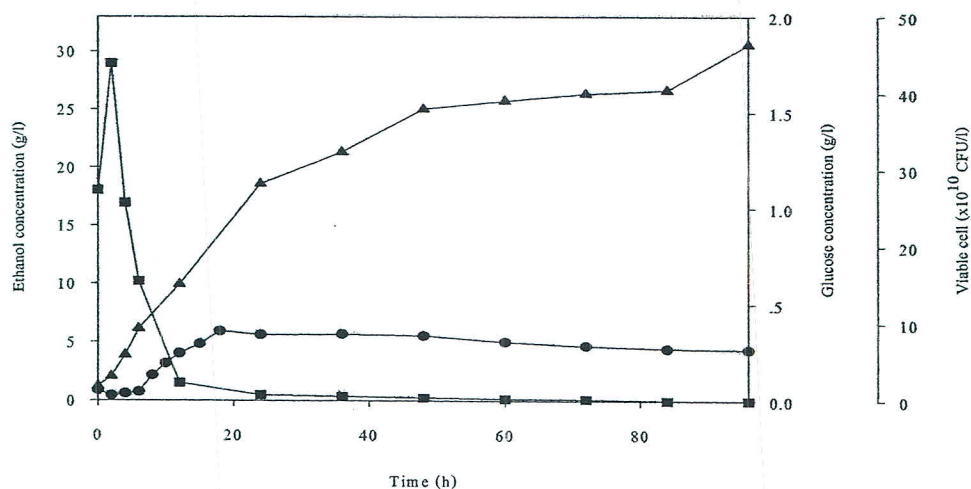
ภาพที่ 28 การผลิตเอทานอลจากเชื้อไม้อยูคาลิปัสโดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณเชื้อ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร (สัญลักษณ์ ▲, ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอล กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตตามลำดับ)

จากการผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณเชื้อ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ดังภาพที่ 28 เมื่อเริ่มการหมักภายใน 2 ชั่วโมงเซลล์อยู่ในช่วงระยะของการปรับตัว โดยมีการเพิ่มขึ้นของเซลล์ และเอทานอลเล็กน้อย ขณะเดียวกันเอนไซม์ย่อยเซลลูโลสเป็นกลูโคส และเซลล์นำไปใช้ ส่งผลให้ความเข้มข้นกลูโคสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 4 เอทานอลเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำตาลกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่เซลล์เริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ชั่วโมงที่ 10 และไม่พบน้ำตาลกลูโคสในชั่วโมงที่ 60 เมื่อสิ้นสุดการหมักที่เวลา 96 ชั่วโมงพบว่าความเข้มข้นกลูโคส เอทานอล และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเท่ากับ 0, 15.39 กรัมต่อลิตร และ  $4.9 \times 10^{10}$  เซลล์ต่อลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 29 การผลิตเอทานอลจากเชื้อไมยคาลิปัสโดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณเชื้อ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักแห้งต่อปริมาตร (สัญลักษณ์ ▲ ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอล และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตตามลำดับ)

จากการผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณเชื้อ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ดังภาพที่ 29 เมื่อเริ่มการหมักภายใน 2 ชั่วโมงมีการลดลงของเซลล์เล็กน้อยเนื่องจากมีปริมาณเชื้อสูงขึ้น ทำให้ยากต่อการเขย่า และความเข้มข้นเอทานอลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงถึงเซลล์มีการผลิตเอทานอล ขณะเดียวกันเอนไซม์ย่อยเซลลูโลสเป็นกลูโคส และเซลล์นำไปใช้ส่งผลให้ความเข้มข้นกลูโคสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 4 เอทานอลเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำตาลกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่เซลล์เริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวในชั่วโมงที่ 18 และไม่พบน้ำตาลกลูโคสในชั่วโมงที่ 72 เมื่อสิ้นสุดการหมักที่เวลา 96 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นกลูโคส เอทานอล และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเท่ากับ 0, 23.34 กรัมต่อลิตร และ  $7.39 \times 10^{10}$  เซลล์ต่อลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 30 การผลิตเอทานอลจากเยื่อไม้ยูคาลิปตัส โดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณเยื่อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร (สัญลักษณ์ ▲ , ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอล กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตตามลำดับ)

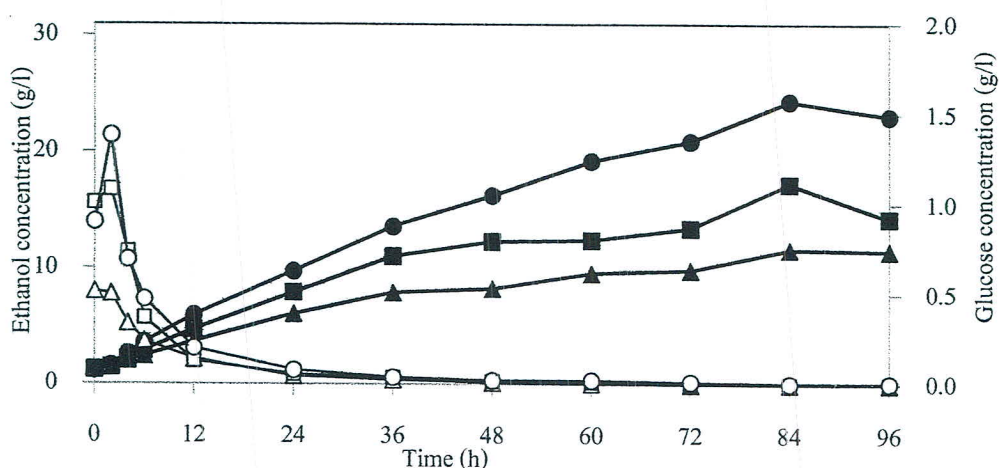
จากการผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณเยื่อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ดังภาพที่ 30 เมื่อเริ่มการหมักภายใน 2 ชั่วโมงมีการลดลงของเซลล์เล็กน้อย เนื่องจากมีปริมาณเยื่อสูงขึ้น ทำให้ยากต่อการเข้า และความเข้มข้นเอทานอลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงถึงเซลล์มีการผลิตเอทานอล ขณะเดียวกันเอนไซม์ย่อยเซลลูโลสเป็นกลูโคส และเซลล์นำไปใช้ ส่งผลให้ความเข้มข้นกลูโคสเพิ่มขึ้น เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 4 เอทานอลเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และน้ำตาลกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่เซลล์เริ่มเข้าสู่ภาวะคงตัวในชั่วโมงที่ 18 และไม่พบน้ำตาลกลูโคสในชั่วโมงที่ 84 เมื่อสิ้นสุดการหมักที่เวลา 96 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นกลูโคส เอทานอล และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเท่ากับ 0, 30.60 กรัมต่อลิตร และ  $6.62 \times 10^{10}$  เซลล์ต่อลิตร ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณเยื่อต่อการผลิตเอทานอล ณ อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถสรุปผลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเอทานอล และกลูโคส กับเวลาในการหมัก ดังในภาพที่ 31 ถึง 33

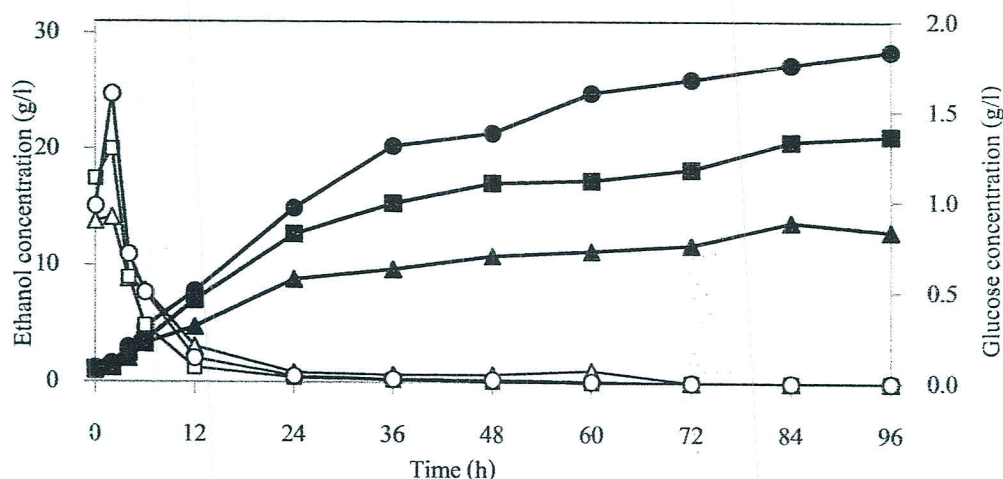
การผลิตเอทานอลจากไม้ยูคาลิปตัส โดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกัน เมื่อใช้ปริมาณเยื่อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร และอุณหภูมิเดียวกันในการหมัก พบว่าใน 2 ชั่วโมงแรกความเข้มข้นกลูโคส และเอทานอลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



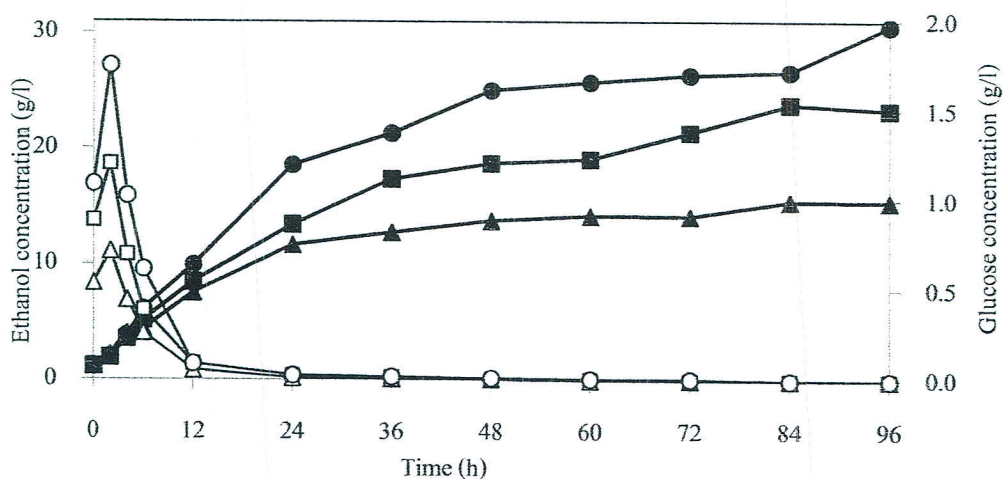
เนื่องจากเอนไซม์มีกิจกรรมในการย่อยเซลลูโลสเป็นน้ำตาลกลูโคส ในขณะที่เซลล์อยู่ในระหว่างการปรับตัว เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 4 เอนไซม์ย่อยเซลลูโลสเป็นน้ำตาลกลูโคส และเซลล์นำมาใช้ในการเจริญเติบโตได้เลย ส่งผลให้ความเข้มข้นกลูโคสในน้ำหมักลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อสิ้นสุดการหมัก ส่วนความเข้มข้นเอทานอลเพิ่มขึ้นเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งในการหมักโดยใช้ปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร โดยการใช้ปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ในการหมักมีความเข้มข้นเอทานอลสูงสุด รองลงมาเป็นปริมาณเชื้อ 7.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ตามลำดับ (ภาพที่ 31 ถึง 33)



ภาพที่ 31 การผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* Sc90 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกัน (สัญลักษณ์ ▲, ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอลที่ ปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรตามลำดับ และ △, □ และ ○ แสดงความเข้มข้นกลูโคสที่ปริมาณ-เชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรตามลำดับ)



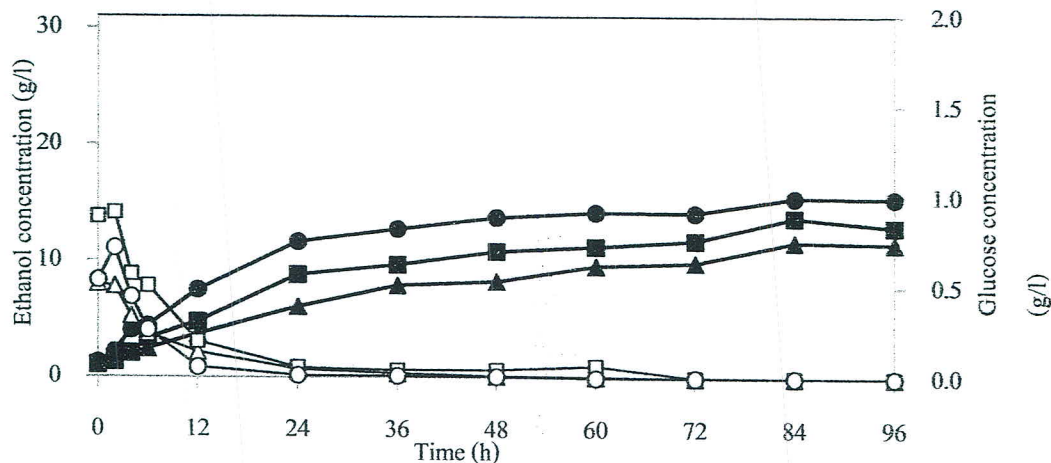
ภาพที่ 32 การผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* Sc90 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกัน (สัญลักษณ์ ▲, ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอลที่ปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรตามลำดับ และ △, □ และ ○ แสดงความเข้มข้นกลูโคสที่ปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรตามลำดับ)



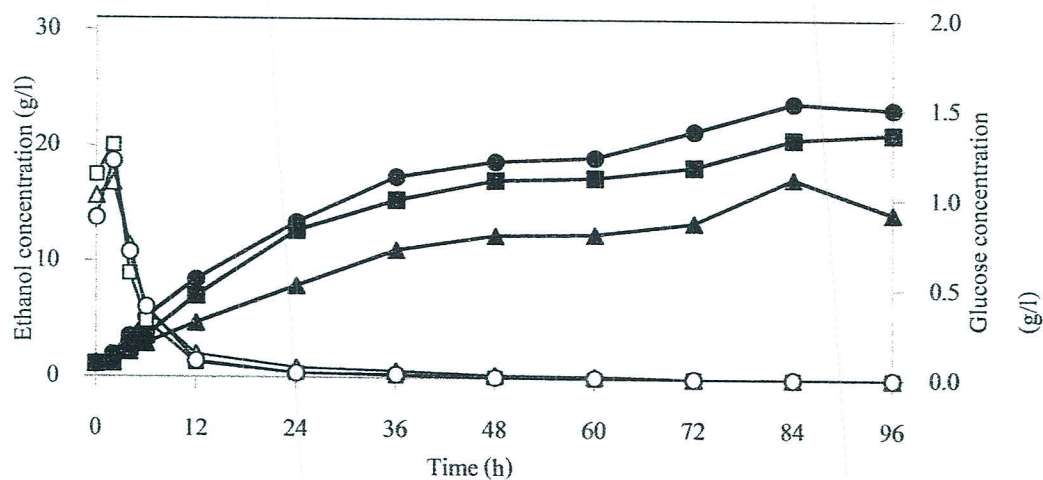
ภาพที่ 33 การผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* Sc90 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกัน (สัญลักษณ์ ▲, ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอลที่ปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรตามลำดับ และ △, □ และ ○ แสดงความเข้มข้นกลูโคสที่ปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรตามลำดับ)

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อการผลิตเอทานอล ณ ปริมาณเชื้อต่าง ๆ สามารถสรุปผลความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเอทานอล และกลูโคส กับเวลาในการหมัก ดังในภาพที่ 34 ถึง 36 การผลิตเอทานอลจากไม้อยูคาลิปตัส โดย *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยเป็นน้ำตาลและหมักพร้อมกัน เมื่อใช้อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณเชื้อเท่ากันในการหมักพบว่าใน 2 ชั่วโมงแรกความเข้มข้นกลูโคส และเอทานอลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากเอนไซม์มีกิจกรรมในการย่อยเซลลูโลสเป็นน้ำตาลกลูโคส ในขณะที่เชลล์อยู่ในระยะเวลาการปรับตัว เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 4 เอนไซม์ย่อยเซลลูโลสเป็นน้ำตาลกลูโคส และเชลล์นำมาใช้ในการเจริญเติบโตได้โดยส่งผลให้ความเข้มข้นกลูโคสในน้ำหมักลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อสิ้นสุดการหมัก ส่วนความเข้มข้น เอทานอลเพิ่มขึ้นเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งในการหมักที่อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส เมื่อใช้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสในการหมัก มีความเข้มข้นเอทานอลสูงสุด รองลงมาเป็นอุณหภูมิ 35 และ 30 องศาเซลเซียสตามลำดับ (ภาพที่ 34 ถึง 36) โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมของเอนไซม์ในการย่อยเซลลูโลสเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิต่ำลงส่งผลให้อัตราการย่อยลดลงและใช้เวลานานขึ้น (Kádár *et al.*, 2004) ดังนั้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการหมัก 40 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อัตราการย่อยเซลลูโลสด้วยเอนไซม์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 35 และ 30 องศาเซลเซียส ทำให้มีความเข้มข้นเอทานอลสูงสุดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ขณะที่ยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces* sp. มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงาน 35 องศาเซลเซียส (Kádár *et al.*, 2004) จากผลการทดลองมีเอทานอลเกิดขึ้น และมีการเจริญเติบโตของเชลล์ (ภาพที่ 28-30) ที่อุณหภูมิสูง 40 องศาเซลเซียส แสดงถึงยีสต์ *S. cerevisiae* Sc90 สามารถทนอุณหภูมิสูง 40 องศาเซลเซียสได้ โดยการใช้ปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรมีจำนวนเชลล์ที่มีชีวิตเท่ากับ  $4.9$ ,  $7.39$  และ  $6.62 \times 10^7$  เซลล์ต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ยีสต์ *Kluyveromyces marxianus* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ทนอุณหภูมิสูง ในการผลิตเอทานอลจากเซลลูโลสบริสุทธิ์ (Sigmacell 50) ภายใต้สภาวะการหมักแบบ SSF ที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อใช้ปริมาณเซลลูโลสบริสุทธิ์ 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร มีจำนวนเชลล์ที่มีชีวิตเท่ากับ  $2.9$ ,  $2.0$ ,  $1.7$ ,  $1.3$  และ  $1.2 \times 10^8$  เซลล์ต่อมิลลิลิตรตามลำดับ และความเข้มข้นเอทานอลเท่ากับ 17.9, 26.1, 33.7, 41.4 และ 43.5 กรัมต่อลิตร (Tomás-Pejó *et al.*, 2009) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองเมื่อใช้ปริมาณ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

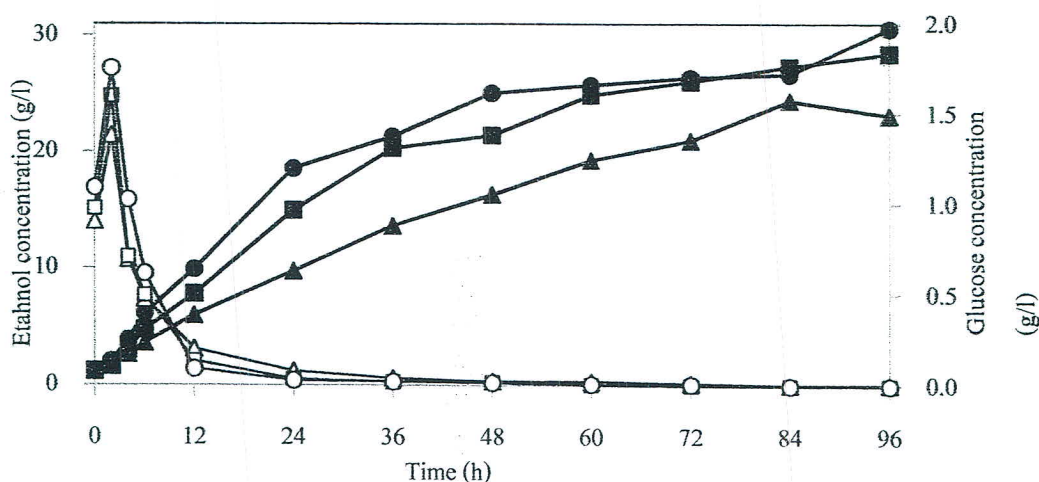




ภาพที่ 34 การผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* Sc90 และปริมาณเชื้อ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ต่อปริมาตรด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกัน (สัญลักษณ์ ▲ , ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอลที่อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสตามลำดับ และ △ , □ และ ○ แสดงความเข้มข้นกลูโคสที่อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสตามลำดับ)



ภาพที่ 35 การผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* Sc90 และปริมาณเชื้อ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกัน (สัญลักษณ์ ▲ , ■ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอลที่อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสตามลำดับ และ △ , □ และ ○ แสดงความเข้มข้นกลูโคสที่อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสตามลำดับ)



ภาพที่ 36 การผลิตเอทานอลโดย *S. cerevisiae* Sc90 และปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกัน (สัญลักษณ์ ▲, ■ และ● แสดงความเข้มข้นเอทานอลที่อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสตามลำดับ และ △, □ และ○ แสดงความเข้มข้นกลูโคสที่อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสตามลำดับ)

จากผลการผลิตเอทานอลโดยใช้ไมยกุลิปดัสในกระบวนการย่อยเป็นน้ำตาลและหมักพร้อมกัน สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ได้ดังตารางที่ 64 เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ต่าง ๆ พบว่าการใช้ปริมาณเชื้อ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสในการหมัก มีการเจริญเติบโตของยีสต์ *S. cerevisiae* Sc90 ดีที่สุด โดยมีอัตราการเจริญจำเพาะ ( $\mu$ ) เท่ากับ 0.413 ต่อชั่วโมง เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของยีสต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการเพาะเลี้ยงยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* Sc90 โดยใช้อาหาร YPD ภายใต้สภาวะการหมักที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และอุณหภูมิห้องเพื่อผลิตเอทานอล พบว่ามีอัตราการเจริญจำเพาะ 0.3 ต่อชั่วโมง ความเข้มข้นเอทานอลสูงสุด 7.42 กรัมต่อลิตร และอัตราการผลิตเอทานอล 3.09 กรัมต่อลิตร ชั่วโมง (Limtong *et al.*, 2000) การใช้ปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ซึ่งมีปริมาณเชื้อสูงจึงมีแนวโน้มในการเปลี่ยนเป็นน้ำตาลกลูโคสได้เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสในการหมักส่งผลให้เอนไซม์มีกิจกรรมมากขึ้น พบว่ามีความเข้มข้นเอทานอลสูงสุด ( $C_p$ ) เท่ากับ 30.69 กรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็นอัตราการผลิตเอทานอล ( $Q_p$ ) เท่ากับ 0.32 กรัมต่อ-ลิตร ชั่วโมง ส่วนผลได้ของเอทานอล ( $Y_{p/s}$ ) มีค่าสูงสุดเมื่อใช้ปริมาณเชื้อ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.457 กรัมเอทานอลต่อกรัมเชตูลูโลส ซึ่งเปรียบเทียบกับผลได้ของ

เอทานอลเทียบกับทางทฤษฎี (Theoretical ethanol yield) เท่ากับ 89.67 เปอร์เซ็นต์ การใช้ปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ให้ค่าพารามิเตอร์สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเอทานอลจากไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำ โดยใช้เอนไซม์ Celluclast 1.5L กับยีสต์ *K. marxianus* CECT 10875 ในกระบวนการย่อยเป็นน้ำตาลและหมักพร้อมกัน ที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร มีความเข้มข้นเอทานอลสูงสุด 17 กรัมต่อลิตร ผลได้ของเอทานอล 0.32 กรัมเอทานอลต่อกรัมกลูโคสจากการคำนวณ และผลได้ของเอทานอลเทียบกับทางทฤษฎี 62.5 เปอร์เซ็นต์ (Ballesteros *et al.*, 2004)

ตารางที่ 64 ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากเชื้อไม้ยูคาลิปตัส โดยแปรผันปริมาณเชื้อ และอุณหภูมิในการหมักด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกัน ในระยะเวลา 96 ชั่วโมง

| ปริมาณเชื้อ<br>(%w/v) | อุณหภูมิ<br>(°C) | $\mu^1$<br>(h <sup>-1</sup> ) | $C_p^2$<br>(g/l) | $Q_p$<br>g/l h <sup>-1</sup> | $Y_{P/S}^3$<br>g/g | Theoretical ethanol<br>yield <sup>4</sup><br>(%) |
|-----------------------|------------------|-------------------------------|------------------|------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------|
|                       |                  |                               |                  |                              |                    |                                                  |
| 5                     | 30               | 0.275                         | 12.13            | 0.12                         | 0.323              | 63.26                                            |
| 5                     | 35               | 0.413                         | 13.84            | 0.16                         | 0.378              | 74.2                                             |
| 5                     | 40               | 0.193                         | 15.54            | 0.16                         | 0.422              | 82.77                                            |
| 7.5                   | 30               | 0.362                         | 17.31            | 0.19                         | 0.316              | 62.03                                            |
| 7.5                   | 35               | 0.313                         | 21.59            | 0.22                         | 0.404              | 79.13                                            |
| 7.5                   | 40               | 0.271                         | 24.36            | 0.25                         | 0.457              | 89.67                                            |
| 10                    | 30               | 0.231                         | 25.13            | 0.29                         | 0.354              | 69.44                                            |
| 10                    | 35               | 0.289                         | 28.64            | 0.3                          | 0.405              | 79.5                                             |
| 10                    | 40               | 0.304                         | 30.69            | 0.32                         | 0.436              | 85.46                                            |

หมายเหตุ <sup>1</sup> การคำนวณโดยใช้ช่วงระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงดังนี้ ปริมาณเชื้อ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิการหมัก 30 องศาเซลเซียส: 2-10 ชั่วโมง, อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส: 4-10 ชั่วโมง, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส: 2-8 ชั่วโมง, ปริมาณเชื้อ 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิการหมัก 30 องศาเซลเซียส: 2-10 ชั่วโมง, อุณหภูมิ 35 องศา-



เซลเซียส: 2-10 ชั่วโมง, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส: 2-8 ชั่วโมง, ปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิการหมัก 30 องศาเซลเซียส: 2-10 ชั่วโมง, อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส: 2-10 ชั่วโมง, อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส: 4-10 ชั่วโมง

<sup>2</sup> ความเข้มข้นเอทานอลเฉลี่ยสูงสุด

<sup>3</sup> ผลได้ของเอทานอลต่อเซลล์ในไมยคาบิปลัสที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว (โดยแทนเซลล์โดยใช้น้ำตาลกลูโคสเริ่มต้นจากการคำนวณ)

<sup>4</sup> ผลได้ของเอทานอลเทียบกับทางทฤษฎีสูงสุด (เอทานอล 0.51 กรัมต่อกลูโคส 1 กรัม)

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs) วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยแบบจำลองเชิงเส้นตรง (General linear model; GLM) และทดสอบความแตกต่างแบบ least significant difference (LSD) ด้วยโปรแกรม SAS รุ่น 8.01 (SAS, 2000)

ตารางที่ 65 ผลลัพธ์ ANOVA การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเข้มข้นเอทานอลสำหรับปริมาณเชื้อและอุณหภูมิในแผนการทดลองแฟคทอเรียล

| Source     | DF | SS     | MS     | F     | Pr > F |
|------------|----|--------|--------|-------|--------|
| fiber      | 2  | 921.97 | 460.99 | 62.95 | <.0001 |
| temp       | 2  | 129.86 | 64.93  | 8.87  | 0.0021 |
| fiber*temp | 4  | 10.84  | 2.71   | 0.37  | 0.8269 |

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ความเข้มข้นเอทานอล ( $C_p$ ) เมื่อศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย คือ ปริมาณเชื้อและอุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณเชื้อ และอุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก ( $p \geq 0.05$ ) ดังในตารางที่ 65 ดังนั้นจึงทำการทดสอบความแตกต่างในแต่ละปัจจัยหลักดังนี้ เมื่อพิจารณาปัจจัยของปริมาณเชื้อที่ใช้ แสดงว่าปริมาณเชื้อมีอิทธิพลต่อความเข้มข้นเอทานอลเฉลี่ย ( $p < 0.05$ ) ดังในตารางที่ 65 และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มข้นเอทานอลที่แต่ละค่าของปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร โดยวิธี LSD ดังตารางที่ 66 พบว่าการใช้ปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

แห้งต่อปริมาตรส่งผลให้ค่าความเข้มข้นเอทานอลแตกต่างกัน โดยการใช้ปริมาณเชื้อเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความเข้มข้นเอทานอลเพิ่มขึ้น และการใช้ปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรมีค่าความเข้มข้นเอทานอลสูงสุด เมื่อพิจารณาปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ แสดงว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อความเข้มข้นเอทานอลเฉลี่ย ( $p < 0.05$ ) ดังในตารางที่ 65 และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มข้นเอทานอลทีละคู่ของอุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสโดยวิธี LSD ดังตารางที่ 65 พบว่าการใช้อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสในการหมักส่งผลให้ค่าความเข้มข้นเอทานอลแตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิในการหมัก 30 องศาเซลเซียสให้ค่าความเข้มข้นเอทานอลน้อยที่สุด และการใช้อุณหภูมิ 35 และ 40 องศาเซลเซียสให้ค่าความเข้มข้นเอทานอลไม่แตกต่างกัน

**ตารางที่ 66** ผลลัพธ์ ANOVA การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลได้ของเอทานอลสำหรับปริมาณเชื้อและอุณหภูมิใน แผนการทดลองแฟคทอเรียล

| Source     | DF | SS     | MS     | F     | Pr > F |
|------------|----|--------|--------|-------|--------|
| fiber      | 2  | 0.0029 | 0.0014 | 0.63  | 0.5434 |
| temp       | 2  | 0.0528 | 0.0264 | 11.55 | 0.0006 |
| fiber*temp | 4  | 0.0029 | 0.0007 | 0.31  | 0.8652 |

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ผลได้ของเอทานอล ( $Y_{ps}$ ) เมื่อศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณเชื้อ และอุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณเชื้อ และอุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก ( $p \geq 0.05$ ) ดังในตารางที่ 66 ดังนั้นจึงทำการทดสอบความแตกต่างในแต่ละปัจจัยหลักดังนี้ เมื่อพิจารณาปัจจัยของปริมาณเชื้อ แสดงว่าปริมาณเชื้อไม่มีอิทธิพลต่อค่าผลได้ของเอทานอลเฉลี่ย ( $p \geq 0.05$ ) ดังในตารางที่ 66 และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยผลได้ของเอทานอล ทีละคู่ของปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร โดยวิธี LSD ดังตารางที่ 66 พบว่าการใช้ปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรส่งผลให้อัตราการผลิตเอทานอลไม่แตกต่างกัน โดยการใช้ปริมาณเชื้อในการหมักแตกต่างกันไม่ทำให้ค่าผลได้ของเอทานอลต่างกัน เมื่อพิจารณาปัจจัยของอุณหภูมิ แสดงว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อผลได้ของเอทานอลเฉลี่ย ( $p < 0.05$ ) ดังในตารางที่ 66 และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยผลได้ของเอทานอลทีละคู่ของอุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสโดยวิธี LSD ดังตารางที่ 10 พบว่าการใช้



อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสในการหมักส่งผลให้ค่าผลได้ของเอทานอลแตกต่างกัน โดยการใช้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสในการหมักให้ค่าผลได้ของเอทานอลล้น้อยที่สุด และการใช้อุณหภูมิ 35 และ 40 องศาเซลเซียสในการหมักให้ค่าผลได้ของเอทานอลไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 67 ผลลัพธ์ ANOVA การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลได้ของเอทานอลเทียบกับทางทฤษฎีสำหรับปริมาณเชื้อและอุณหภูมิในแผนการทดลองแฟกทอเรียล

| Source     | DF | SS      | MS      | F     | Pr > F |
|------------|----|---------|---------|-------|--------|
| fiber      | 2  | 108.71  | 54.35   | 0.62  | 0.5489 |
| temp       | 2  | 2023.94 | 1011.97 | 11.55 | 0.0006 |
| fiber*temp | 4  | 111.27  | 27.82   | 0.32  | 0.8626 |

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าผลได้ของเอทานอลเทียบกับทางทฤษฎี (Theoretical ethanol yield) เมื่อศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณเชื้อ และอุณหภูมิที่ใช้ในการหมักพบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณเชื้อ และอุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก ( $p \geq 0.05$ ) ดังในตารางที่ 67 ดังนั้นจึงทำการทดสอบความแตกต่างในแต่ละปัจจัยหลักดังนี้ เมื่อพิจารณาปัจจัยของปริมาณเชื้อ แสดงว่าปริมาณเชื้อไม่มีอิทธิพลต่อค่าผลได้ของเอทานอลเทียบกับทางทฤษฎีเฉลี่ย ( $p \geq 0.05$ ) ดังในตารางที่ 67 และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยผลได้ของเอทานอลเทียบกับทางทฤษฎีที่ละคู่ของปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรโดยวิธี LSD ดังตารางที่ 68 พบว่าปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรส่งผลให้ค่าผลได้ของเอทานอลเทียบกับทางทฤษฎีไม่แตกต่างกัน โดยการใช้ปริมาณเชื้อในการหมักแตกต่างกันไม่ทำให้ค่าผลได้ของเอทานอลเทียบกับทางทฤษฎีต่างกัน เมื่อพิจารณาปัจจัยของอุณหภูมิ แสดงว่าอุณหภูมามีอิทธิพลต่อผลได้ของเอทานอลเฉลี่ย ( $p < 0.05$ ) ดังในตารางที่ 63 และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยผลได้ของเอทานอลที่ละคู่ของอุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสโดยวิธี LSD ดังตารางที่ 10 พบว่าการใช้อุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสในการหมักส่งผลให้ค่าผลได้ของเอทานอลเทียบกับทางทฤษฎีแตกต่างกัน โดยการใช้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสในการหมักให้ค่าผลได้ของเอทานอลเทียบกับทางทฤษฎีน้อยที่สุด และการใช้อุณหภูมิ 35 และ 40 องศาเซลเซียสในการหมักให้ค่าผลได้ของเอทานอลเทียบกับทางทฤษฎีไม่แตกต่างกัน



ตารางที่ 68 ผลลัพธ์ทางสถิติของการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของปริมาณเชื้อ 5, 7.5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร และอุณหภูมิ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส

|                         | $C_p$              | $Q_p$               | $Y_{p/s}$          | Theoretical ethanol yield |
|-------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|
| สถานะ                   | (g/l)              | (g/l h)             | (g/g)              | (%)                       |
| ปริมาณเชื้อ (%w/v)      |                    |                     |                    |                           |
| 5                       | 13.84 <sup>a</sup> | 0.144 <sup>a</sup>  | 0.374 <sup>a</sup> | 73.41 <sup>a</sup>        |
| 7.5                     | 21.09 <sup>b</sup> | 0.224 <sup>b</sup>  | 0.392 <sup>a</sup> | 76.95 <sup>a</sup>        |
| 10                      | 28.15 <sup>c</sup> | 0.303 <sup>c</sup>  | 0.399 <sup>a</sup> | 78.13 <sup>a</sup>        |
| อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) |                    |                     |                    |                           |
| 30                      | 18.20 <sup>d</sup> | 0.199 <sup>d</sup>  | 0.331 <sup>b</sup> | 64.91 <sup>b</sup>        |
| 35                      | 21.36 <sup>e</sup> | 0.229 <sup>de</sup> | 0.396 <sup>c</sup> | 77.61 <sup>c</sup>        |
| 40                      | 23.53 <sup>c</sup> | 0.244 <sup>c</sup>  | 0.438 <sup>c</sup> | 85.97 <sup>c</sup>        |

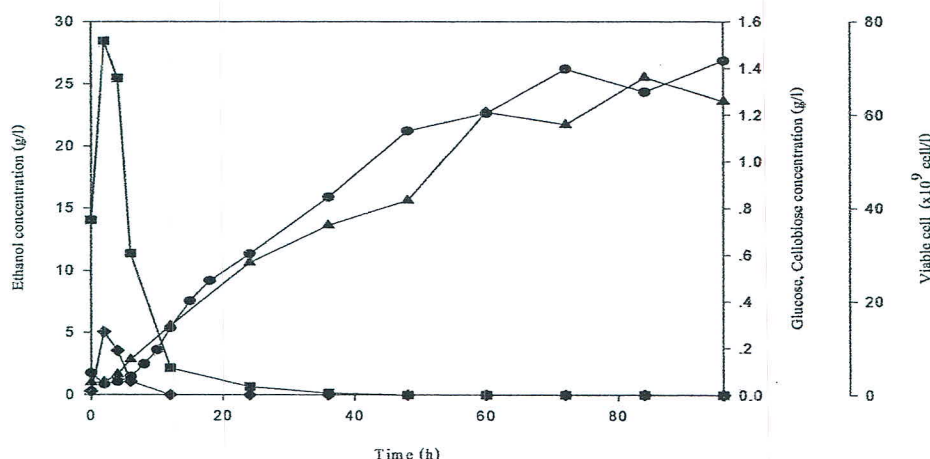
หมายเหตุ <sup>a,b,c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ จึงเลือกการใช้ปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตรเป็นสถานะที่เหมาะสมเนื่องจากมีความเข้มข้นเอทานอล และอัตราการผลิตเอทานอลสูงสุด และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสในการหมักมีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานของเอนไซม์ คือ 50 องศาเซลเซียส ดังนั้นในขั้นตอนการผลิตเอทานอลจากชีวมวลจึงใช้ปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร และอุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียสเพื่อให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานของเอนไซม์มากขึ้น

#### 4.4.2 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลด้วยการย่อยเป็นน้ำตาล และหมักพร้อมกัน (Simultaneous saccharification and fermentation, SSF) ของเยื่อกระถินเทพา

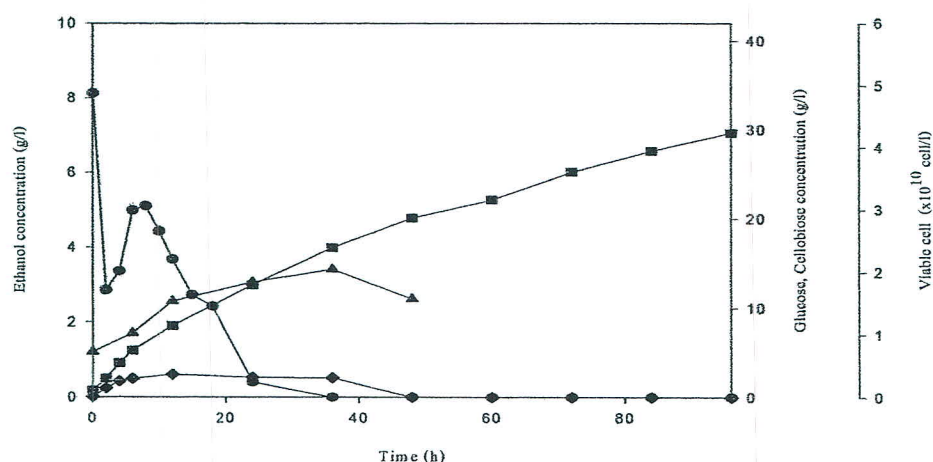
การผลิตเอทานอลจากไม้กระถินเทพาที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว โดยใช้เอนไซม์ Celluclast 1.5L และ Novozym 188 กับยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกัน สามารถสรุปถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเอทานอล กลูโคส เซลโลไบโอส และ

จำนวนเซลล์ที่มีชีวิต กับเวลาของการหมักโดยใช้ปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร และอุณหภูมิการหมักที่ 40 และ 45 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 37 และ 38



ภาพที่ 37 การผลิตเอทานอลจากเชื้อไม้กระถินเทพาโดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันที่ปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร และ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (สัญลักษณ์ ▲, ■, ◆ และ ● แสดงความเข้มข้นเอทานอล กลูโคส เซลโลไบโอสจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตตามลำดับ)

จากการผลิตเอทานอลจากไม้กระถินเทพาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ดังภาพที่ 37 เมื่อเริ่มการหมักภายใน 2 ชั่วโมงมีการลดลงของเซลล์เล็กน้อย เนื่องจากมีปริมาณเชื้อสูงเกินไป ทำให้ยากต่อการเขย่า และความเข้มข้นเอทานอลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงถึงเซลล์มีการผลิตเอทานอล ขณะเดียวกันเอนไซม์เซลลูเลสย่อยเซลลูโลสเป็นกลูโคส และเซลโลไบโอส พร้อมกับเอนไซม์เบต้า-กลูโคซิเดสย่อยเซลโลไบโอสเป็นกลูโคส ส่วนเซลล์นำกลูโคสไปใช้ในการผลิตเอทานอล เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 6 เอทานอลเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนน้ำตาลกลูโคส และเซลโลไบโอสลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่เซลล์เริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ชั่วโมงที่ 72 และไม่พบน้ำตาลกลูโคส และเซลโลไบโอสในชั่วโมงที่ 48 และ 12 ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการหมักที่เวลา 96 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นกลูโคส เซลโลไบโอส เอทานอล และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตเท่ากับ 0, 0, 23.61 กรัมต่อลิตร และ  $16.81 \times 10^9$  เซลล์ต่อลิตร ตามลำดับ



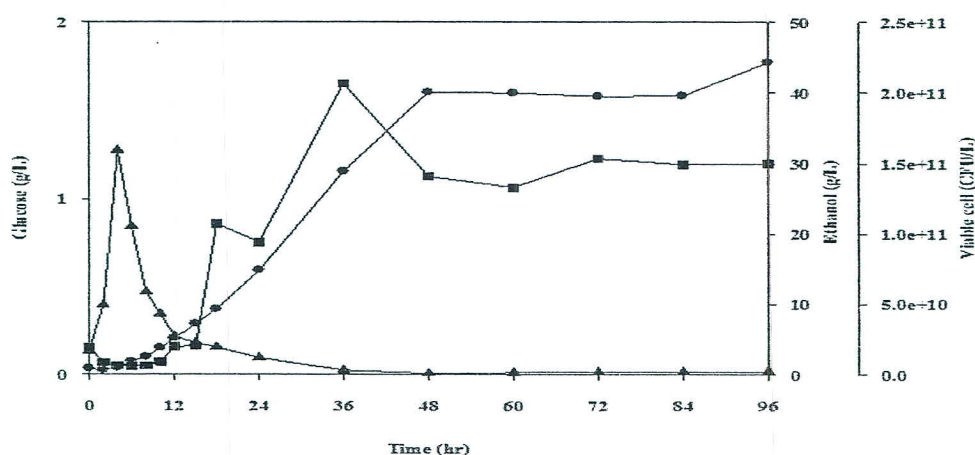
ภาพที่ 38 การผลิตเอทานอลจากเอื่อไม้กระถินเทพาโดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันที่ปริมาณเอื่อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร และ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส(สัญลักษณ์▲ ,■,◆ และ● แสดงความเข้มข้นเอทานอล กลูโคส เซลโลไบโอสจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตตามลำดับ)

จากการผลิตเอทานอลจากเอื่อไม้กระถินเทพาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และใช้ปริมาณเอื่อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ดังภาพที่ 38 เมื่อเริ่มการหมักภายใน 4 ชั่วโมงมีการลดลงของเซลล์เล็กน้อย เนื่องจากมีปริมาณเอื่อสูงเกินไป ทำให้ยากต่อการเขย่า รวมทั้งยังเป็นอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมในการเจริญของยีสต์ หลังจากนั้นเซลล์การเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสูงสุดในชั่วโมงที่ 8 ของการหมัก และลดลงจนเป็นศูนย์ในชั่วโมงที่ 36 เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของยีสต์ คือ 30 องศาเซลเซียส จึงสามารถทนอุณหภูมิสูง 45 องศาเซลเซียสได้ในระยะเวลาเพียง 24 ชั่วโมง ส่วนความเข้มข้นเอทานอลมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลส และเบต้า-กลูโคซิเดส นั้น พบว่าความเข้มข้นกลูโคสเพิ่มขึ้นจนกระทั่งยุติการหมัก ส่วนความเข้มข้นเซลโลไบโอสเพิ่มขึ้นในช่วง 36 ชั่วโมงแรกของการหมัก หลังจากนั้นมีความเป็นศูนย์ แสดงถึงเอนไซม์เซลลูเลส และเบต้า-กลูโคซิเดสมีกิจกรรมอยู่ เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานของเอนไซม์



#### 4.4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลด้วยการย่อยเป็นน้ำตาล และหมักพร้อมกัน (Simultaneous saccharification and fermentation,SSF) ของเยื่อลำต้นปาล์ม

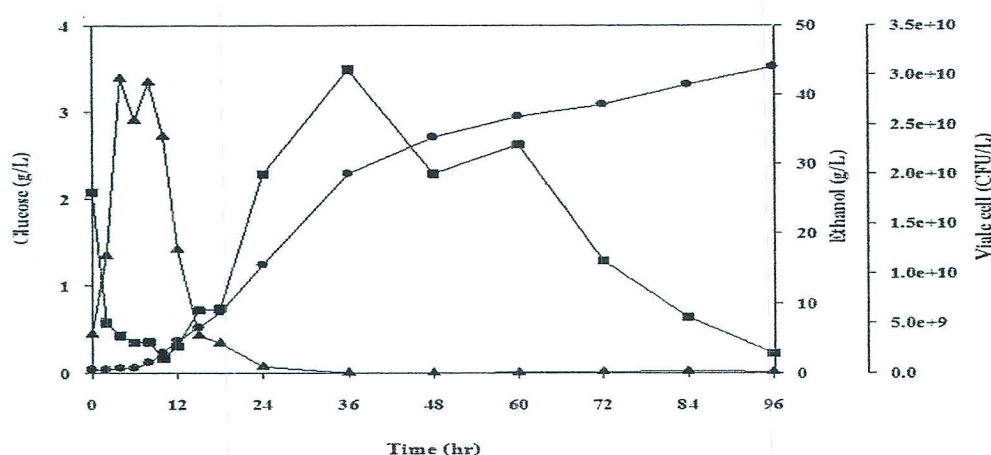
นำเยื่อลำต้นปาล์มน้ำมันที่ผ่านการสกัดด้วยคางมาทำการหมักแบบ SSF เพื่อผลิตเอทานอล โดยใช้เยื่อลำต้นปาล์มน้ำมัน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร ด้วยยีสต์ *S. cerevisiae* Sc90 ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส พบว่ามีปริมาณเอทานอลสุดท้ายของการหมักเท่ากับ 44.25 และ 44.00 กรัมต่อลิตรตามลำดับ ดังภาพที่ 37 และ 38



ภาพที่ 39 การผลิตเอทานอลจากเยื่อลำต้นปาล์ม โดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณเยื่อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร (สัญลักษณ์ ●, ▲ และ ■ แสดงความเข้มข้นเอทานอล, กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิต ตามลำดับ)

จากภาพที่ 39 และ 40 พบว่าการผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกัน ทำให้เกิดการหยุดชะงักของยีสต์ขึ้นในช่วง 10 ชั่วโมงแรก เพราะช่วงแรกของการหมักมีน้ำตาลกลูโคสต่ำ และอุณหภูมิสูงซึ่งไม่เหมาะกับการเจริญของยีสต์ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การเจริญของยีสต์คือ 30 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป 10 ชั่วโมงพบว่าการทำงานของเอนไซม์ดีขึ้น ทำให้เกิดสารละลายได้มากขึ้น ส่วนของ ของแข็งลดลง เอนไซม์เซลลูเลส และเบต้ากลูโคซิเดส สามารถทำงานได้โดยไม่เกิดสภาวะขังยั้งเพราะยีสต์สามารถนำกลูโคสที่ได้รับการย่อยโดยเอนไซม์ไปใช้ได้ทันที จึงเป็นข้อดีของการหมักด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกัน ช่วงหลังจาก 10 ชั่วโมง ยีสต์สามารถเจริญได้ดีขึ้นและเริ่มผลิตเอทานอลออกมาบางส่วน และเริ่มที่จะไม่เห็นการเปลี่ยน

เปลี่ยนแปลงของกลูโคสหลังจากชั่วโมงที่ 15 เนื่องจากกลูโคสไม่พอใช้ก็จำนวนเซลล์ยีสต์ที่เพิ่มจำนวนขึ้นจากสภาวะการหมักที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสพบว่าเมื่อมีเซลล์ยีสต์คงเหลือต่ำกว่าที่สภาวะหมักที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เพราะอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมแก่การเจริญและสารพิษต่างๆ ที่ถูกขับออกมาจากเซลล์ยีสต์เองในระหว่างการหมัก ที่เวลา 96 ชั่วโมง พบว่า ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ให้ความเข้มข้นเอทานอลสุดท้าย 44.25 กรัมต่อลิตร คิดเป็นผลได้เอทานอลเทียบกับทางทฤษฎี 90.34 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ให้ความเข้มข้นเอทานอลสุดท้าย 44.00 กรัมต่อลิตร คิดเป็นผลได้เอทานอลเทียบกับทางทฤษฎี 90.61 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 69



ภาพที่ 40 การผลิตเอทานอลจากเยื่อลำตันปาล์ม โดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันที่ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาณ (สัญลักษณ์ ●, ▲ และ ■ แสดงความเข้มข้นเอทานอล, กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิต ตามลำดับ)

ตารางที่ 69 ความเข้มข้นเอทานอลสูงสุด และผลได้เอทานอลของกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันของเยื่อลำตันปาล์ม

| สภาวะการหมัก                       | ความเข้มข้นเอทานอล<br>(กรัมต่อลิตร) | ผลได้เอทานอลเทียบกับ<br>ทางทฤษฎี (%) |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 10% เชื้อ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส | 44.25                               | 90.34                                |
| 10% เชื้อ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส | 44                                  | 90.61                                |

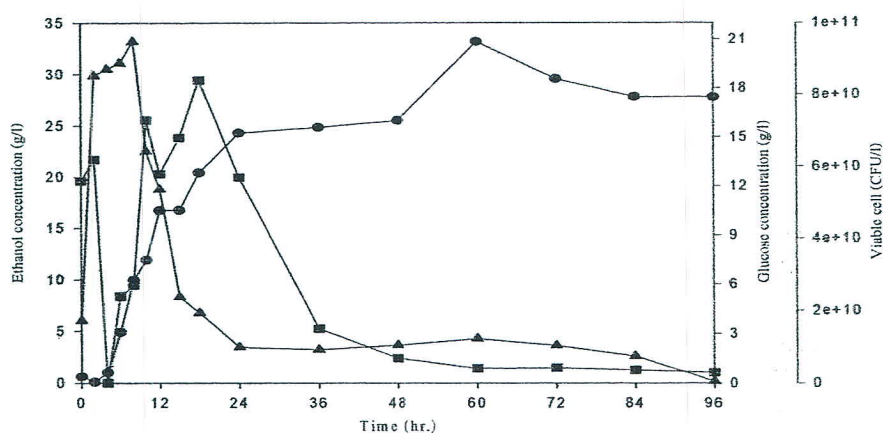
จากผลประสิทธิภาพการย่อยด้วยเอนไซม์ในการหมักด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกัน พบว่าที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสมีประสิทธิภาพในการย่อยสูงกว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากเหลือปริมาณเชื้อล้าต้นปาล์มน้ำมันหลังจากการหมักน้อยกว่า ( 4.03 และ 5.84 กรัม/น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ) แต่ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเอทานอลต่ำกว่าเนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมกับการเจริญของยีสต์ ทำให้หลังจากชั่วโมงที่ 24 ยีสต์ได้ลดจำนวนลงอย่างมาก เป็นผลให้ความสามารถในการผลิตเอทานอลต่ำลงเช่นกัน เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตเอทานอล พบว่าที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส ให้ความเข้มข้นของเอทานอลไม่แตกต่างกันทางสถิติ จึงเลือกใช้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ความเข้มข้นเอทานอลสูงและต้นทุนในการหมักที่ต่ำกว่า

#### 4.4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลด้วยการย่อยเป็นน้ำตาล และหมักพร้อมกัน (Simultaneous saccharification and fermentation, SSF) ของเยื่อทางใบปาล์ม

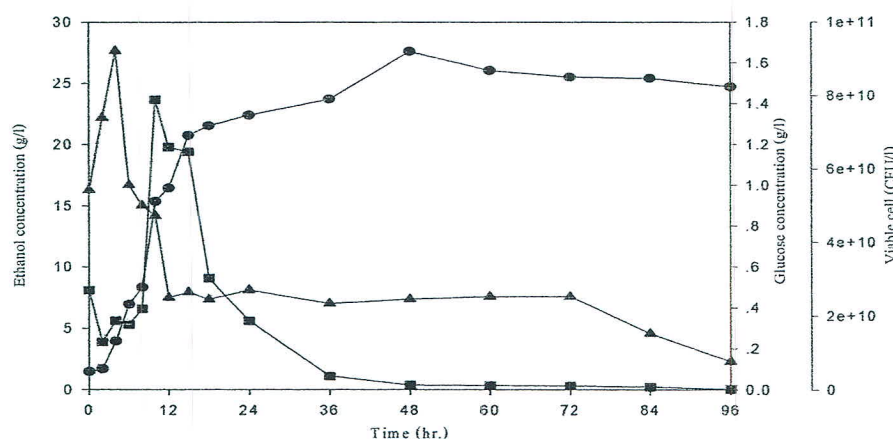
การผลิตเอทานอลจากเยื่อทางใบปาล์มที่ผ่านกระบวนการฟิสิกส์เคมีในสภาวะที่เหมาะสมแล้ว โดยใช้เยื่อทางใบปาล์มน้ำมัน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อปริมาตร เอนไซม์ Celluclast 1.5L และ novozyme 188 กับยีสต์ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อยเป็นน้ำตาล และหมักพร้อมกัน สามารถสรุปผลถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเอทานอล กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มีชีวิต กับเวลาของการหมักที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส

การผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 41 พบว่าในชั่วโมงแรกของการหมักจะมีความเข้มข้นของเอทานอลต่ำ เนื่องจากเซลล์อยู่ในระยะการปรับตัว และเอนไซม์ทำการย่อยเซลลูโลสเป็นกลูโคส เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 2 พบว่ามีกลูโคสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงชั่วโมงที่ 8 จากนั้นกลูโคสจะลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่ความเข้มข้นเอทานอลค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในชั่วโมงที่ 6 และเริ่มคงที่เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 36 ในขณะที่เซลล์สามารถเจริญเติบโตได้ดีในชั่วโมงที่ 6 จากนั้นเซลล์จะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากเซลล์นำกลูโคสไปใช้ในการผลิตเอทานอลแทนการเจริญของเซลล์ เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 48 เซลล์จะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อสิ้นสุดการหมัก พบว่า ชั่วโมงที่ 60 สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุด 33.16 กรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็นผลได้เอทานอลเทียบกับทางทฤษฎี 72.42 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 66





ภาพที่ 41 การผลิตเอทานอลจากเชื้อทางใบปาล์มโดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อย และหมักพร้อมกันที่ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อ ปริมาตร (สัญลักษณ์ ●, ▲ และ ■ แสดงความเข้มข้นเอทานอล, กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มี ชีวิต ตามลำดับ)



ภาพที่ 42 การผลิตเอทานอลจากเชื้อทางใบปาล์มโดยใช้ *S. cerevisiae* Sc90 ด้วยกระบวนการย่อย และหมักพร้อมกันที่ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และปริมาณเชื้อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งต่อ ปริมาตร (สัญลักษณ์ ●, ▲ และ ■ แสดงความเข้มข้นเอทานอล, กลูโคส และจำนวนเซลล์ที่มี ชีวิต ตามลำดับ)

การผลิตเอทานอลที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 42 พบว่าในช่วงแรกของ การหมักจะมีความเข้มข้นของเอทานอลต่ำ เนื่องจากเซลล์อยู่ในระยะการปรับตัว และเอนไซม์ทำการ ย่อยเซลลโลสเป็นกลูโคส เมื่อเข้าสู่การหมักช่วงเวลาที่ 2 พบว่ามีกลูโคสเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนถึง

ชั่วโมงที่ 6 จากนั้นกลูโคสจะลดลงเรื่อยๆ ในขณะที่ความเข้มข้นเอทานอลค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในชั่วโมงที่ 4 และเริ่มคงที่เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 24 ในขณะที่เซลล์สามารถเจริญเติบโตได้ดีในชั่วโมงที่ 8 จากนั้นเซลล์จะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากเซลล์นำกลูโคสไปใช้ในการผลิตเอทานอลแทนการเจริญของเซลล์ เมื่อเข้าสู่การหมักชั่วโมงที่ 36 เซลล์จะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อสิ้นสุดการหมัก พบว่า ชั่วโมงที่ 48 สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุด 27.62 กรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็นผลได้เอทานอลเทียบกับทางทฤษฎี 57.61 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 70

**ตารางที่ 70** ความเข้มข้นเอทานอลสูงสุด และผลได้เอทานอลของกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันของเชื้อทางไบโพลัม

| สภาวะการหมัก                       | ความเข้มข้นเอทานอล<br>(กรัมต่อลิตร) | ผลได้เอทานอลเทียบกับ<br>ทางทฤษฎี (%) |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 10% เยื่อ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส | 33.16                               | 72.42                                |
| 10% เยื่อ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส | 27.62                               | 57.61                                |

จากตารางที่ 70 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการย่อยและหมักพร้อมกันของเชื้อทางไบโพลัม พบว่าการใช้เชื้อที่ 10 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สามารถผลิตเอทานอลได้สูงกว่าที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเหมาะสมในการย่อยของเอนไซม์ และเหมาะสมต่อการเจริญของยีสต์มากกว่า