อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องมือ

1.1 เครื่องระเบิดด้วยไอน้ำของบริษัท Kitto Koatsu ประเทศญี่ปุ่น ชนิดทำงานเป็นครั้ง (batch) ขนาดความจุ 2.5 ลิตร

1.2 เครื่อง High Performance Liquid Chromatograph (HPLC) ของบริษัท Shimadzu (class LC10A) ประเทศญี่ปุ่น

1.3 เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (Cyberscan 500 ^{pH})

1.4 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (V-530 UV/VIS Spectrophotometer) ของบริษัท Jasco

1.5 เครื่องหมุนเหวี่ยงความเร็วสูง (GRX-220 High Speed Refrigerated Centrifuge) ของบริษัท TOMY

1.6 เครื่องชั่งชนิดละเอียด (METTLER รุ่น AE200)

1.7 เครื่องชั่งชนิดหยาบ (METTLER TOLEDO รุ่น PB 3002)

1.8 หม้อนึ่งความดันไอน้ำ (HICLTVE^{TM} HVE-50 Autoclave) ของบริษัท HIRAYAMA

1.9 เครื่องกลั่นแบบสุญญากาศ (Buchi Rotavapor R-114)

1.10 อ่างน้ำร้อน Buchi waterbath B-480

1.11 เครื่องเขย่า (Innova ^{TM} 2100 Plateform Shaker)

1.12 เครื่องแก้วอุปกรณ์อื่นๆสำหรับการทดลองและวิเคราะห์

2. วัตถุดิบ

1.1 ต้นปาล์มน้ำมันอายุ 27 ปี จากพื้นที่ สหกรณ์อ่าวลึก อำเภออ่าวลึก จังหวัดกระบี่ โดยใช้ส่วนของลำต้นปาล์มน้ำมันมาทำเป็นชิ้นไม้หนา 5 มิลลิเมตร มีความกว้างและความยาวของชิ้นไม้สับไม่เกิน 1 นิ้ว และตากแห้ง

1.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ที่ทำจากไม้ยูคาลิปตัส จากบริษัท ซี.ไจแกนติค คาร์บอน จำกัด (คุณสมบัติ ภาคผนวก ค)

3. <u>สารเคมี</u>

1.1 น้ำตาลไซโลส (D-Xylose) ของ Fluka 95731 เกรด HPLC

1.2 น้ำตาลไซลิทอล (Xylitol) ของ Fluka 95650 เกรด HPLC

1.3 น้ำตาลกลูโคส (D-glucose) ของ UNIVAR เกรด Analytical Reagent

1.4 แคลเซียมออกไซด์ (Cacium oxide, powder) ของ UNIVAR เกรด Laboratory Reagent

3. <u>จุลินทรีย์</u>

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา คือ *Candida magnolia* TISTR 5664 จากศูนย์จุลินทรีย์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย และ *Candida guilliermondii* FTI 20037 บริษัท ATCC จากประเทศสหรัฐอเมริกา

4. <u>อาหารเพาะเชื้อที่ใช้ในกระบวนการหมัก</u>

อาหาร X-YNB broth ประกอบด้วย yeast nitrogen base ที่ปราศจากกรดอะมิโนและแอมโมเนียมซัลเฟต (W/O amino acid และ $(NH_4)_2SO_4$) 1.7 กรัมต่อลิตร แอมโมเนียมซัลเฟต 5.0 กรัมต่อลิตร Yeast extract 1.0 กรัมต่อลิตร และน้ำตาลไซโลส 30 กรัมต่อลิตร

<u>วิธีการ</u>

1. <u>การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของต้นปาล์มน้ำมัน</u>

สับลำต้นของต้นปาล์มน้ำมันเป็นชิ้นไม้สับหนา 5 มิลลิเมตร มีความกว้างและความยาวของชิ้นไม้สับไม่เกิน 1 นิ้ว ที่ตากแห้ง ทำการบดและร่อนผ่านตระแกรงขนาดรู 40 เมช (mesh) แต่ไม่ผ่านขนาด 60 เมช ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไม้ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI (1996-1997)

1.1 ศึกษาปริมาณแอลฟาเซลลูโลส โดยวิธีตามมาตรฐาน TAPPI T203 om-88

1.2 ศึกษาปริมาณเพนโตแซน โดยวิธีตามมาตรฐาน TAPPI T223 om-84

1.3 ศึกษาปริมาณโฮโลเซลลูโลส โดยวิธีของ Browing (1967)

1.4 ศึกษาปริมาณลิกนินโดยวิธีตามมาตรฐาน TAPPI T222 om-98

1.5 ศึกษาปริมาณสารแทรก โดยวิธีตามมาตรฐาน TAPPI T204 om-88

1.6 ศึกษาปริมาณเถ้าโดยวิธีมาตรฐาน TAPPI T211 om-93

1.7 ศึกษาปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ได้แก่ กลูโคส, ไซโลส, อะรามิโนส, กาแลกโตส และแมนโนส โดยใช้ เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) สภาวะตามภาคผนวก ข

2. <u>การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกน้ำตาลไซโลสจากต้นปาล์มน้ำมันโดยเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำ</u>

ในการทดลองนำตัวอย่างต้นปาล์มน้ำมันที่เป็นชิ้นไม้สับหนา 5 มิลลิเมตร มีความกว้างและความยาวของชิ้นไม้สับไม่เกิน 1 นิ้ว นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง 100 กรัม มาเข้าเครื่องระเบิดด้วยไอน้ำที่มีขนาดความจุ 2.5 ลิตร ภายใต้สภาวะต่างๆ ดังนี้

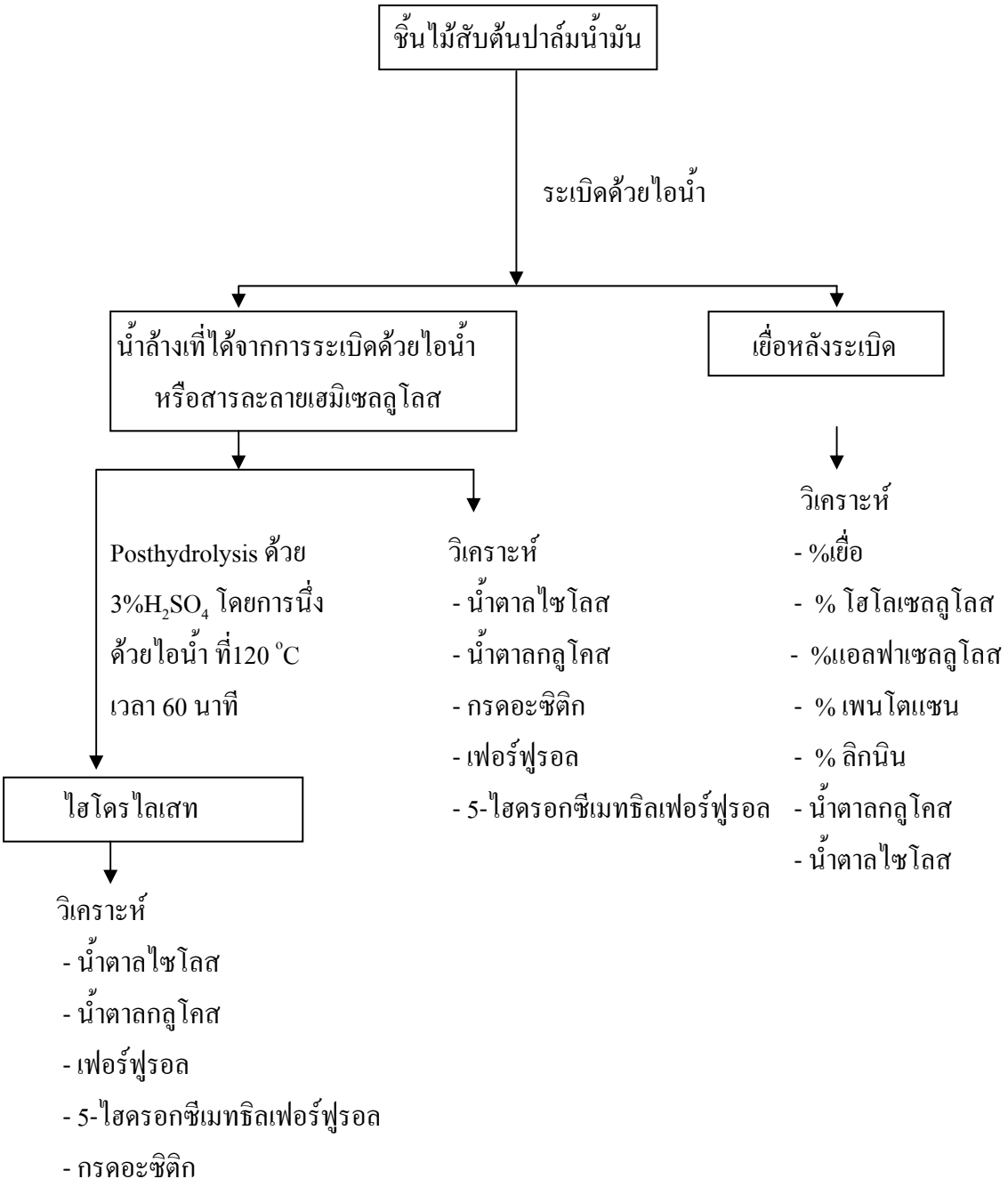
- ความดัน 17 kg/cm^2 (203 ^{o}C) ที่ระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำ 2, 5 และ 10 นาที
- ความดัน 19 kg/cm^2 (209 ^{o}C) ที่ระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำ 2, 5 และ 10 นาที
- ความดัน 21 kg/cm^2 (214 ^{o}C) ที่ระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำ 2, 5 และ 10 นาที
- ความดัน 23 kg/cm^2 (219 ^{o}C) ที่ระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำ 2, 5 และ 10 นาที
- ความดัน 25 kg/cm^2 (223 ^{o}C) ที่ระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำ 2, 5 และ 10 นาที

นำส่วนที่ได้หลังการระเบิดด้วยไอน้ำปรับให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร ทำการต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ทำการกรองแยกน้ำล้างออกจากเยื่อหลังระเบิด นำน้ำล้างและเยื่อหลังระเบิดมาวิเคราะห์ค่าต่างๆ (ภาพที่12) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยกองค์ประกอบทางเคมีของต้นปาล์มน้ำมันด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำ

นำน้ำล้างที่ได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำมาวัดค่าพีเอชและวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น ไซโลส กลูโคส และผลพลอยได้ที่เกิดขึ้น ได้แก่ เฟอร์ฟูรอล, 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล สารประกอบฟีนอลิก และกรดอะซิติก ทำการย่อยโอลิโกเมอร์ของไซโลสในน้ำล้างที่ได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำด้วยกรด (posthydrolysis) โดยการใช้น้ำล้างมาทำการเจือจางกรดซัลฟุริกที่

เข้มข้นให้มีความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 3% w/v H_2SO_4 แล้วนำไปนึ่งด้วยความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคส ไซโลส อะราบิโนส กาแลกโตส และแมนโนส และผลพลอยได้ที่เกิดขึ้น

หลังการระเบิดด้วยไอน้ำ นำเยื่อหลังการระเบิดมาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์เยื่อหลังระเบิดและองค์ประกอบทางเคมีไม้ที่เหลือหลังการระเบิดด้วยไอน้ำ ซึ่งสามารถสรุปแผนการทดลองและการวิเคราะห์ได้ดังภาพที่ 12



<u>ภาพที่ 12</u> แสดงแผนผังการทดลองในการระเบิดชิ้นไม้สับต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำและสารที่ต้องวิเคราะห์ในน้ำล้างและเยื่อหลังระเบิด

3. <u>การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยโอลิโกเมอร์ของไซโลสในน้ำล้างที่ได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำ</u>

เนื่องจากในน้ำล้างที่ได้หลังการระเบิดด้วยไอน้ำมีโอลิโกเมอร์ไซโลสเป็นส่วนใหญ่ จึงต้องนำน้ำล้างไปย่อยต่อด้วยกรดซัลฟุริก เพื่อให้ได้น้ำตาลไซโลสโมเลกุลเดี่ยวเพิ่มขึ้น โดยการใช้น้ำล้างมาเจือจางกรดซัลฟุริกให้มีความเข้มข้นต่างๆ คือ 1, 2, 3 และ 4% w/v ก่อนนำไปนึ่งด้วยความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ คือ 15, 30, 45 และ 60 นาที ทำการปรับพีเอชให้เป็นกลางด้วยแคลเซียมออกไซด์ ก่อนนำไปวิเคราะห์หาน้ำตาลไซโลส กลูโลส และผลพลอยได้ที่มีผลยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

4. <u>การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำไฮโดรไลเสทให้บริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)</u>

นำไฮโดรไลเสทหรือน้ำล้างที่ได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำที่ผ่านการย่อยด้วยกรดที่ความเข้มข้นและเวลาที่เหมาะสมที่ได้ มาศึกษาการดูดซับสารผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ที่เกิดขึ้น คือ เฟอร์ฟูรอล 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล สารประกอบฟีนอลิก และความเข้มสี ด้วยถ่านกัมมันต์ในสภาวะการดูดซับ คือ ปรับไฮโดรไลเสทให้มีพีเอช 7.0-8.0 ด้วยแคลเซียมออกไซด์แล้วเขย่าบนเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยการดูดซับครั้งที่ 1 ศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างๆ คือ 3, 5, 7 และ 10 % w/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมนำไปทำการทดลองต่อเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับครั้งที่ 1 ที่เวลาต่างๆ คือ 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 18, 24 และ 48 ชั่วโมง และศึกษาการดูดซับสารปนเปื้อนครั้งที่ 2 ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างๆ คือ 1, 2, และ 3 % w/v เป็นเวลา 1ชั่วโมง แล้วหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับครั้งที่ 2 ที่เวลาต่างๆ คือ 15, 30, 45 และ 60 นาที

5. <u>การทำไฮโดรไลเสทภายหลังการทำให้บริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ให้เข้มข้น</u>

นำไฮโดรไลเสทที่ได้จากข้อ 4 มาทำให้ไซโลสเข้มข้นโดยการระเหยน้ำออกด้วย เครื่องกลั่นภายใต้สุญญากาศที่อุณหภูมิ 60 ^{o}C เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของน้ำตาลไซโลสตามที่ต้องการแล้ววิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ และนำไปศึกษาการผลิตไซลิทอลโดยกระบวนการหมักด้วยยีสต์

6. <u>การศึกษาการผลิตน้ำตาลไซลิทอลโดยกระบวนการหมักด้วยยีสต์แบบเบ็ดเสร็จ (Batch culture)</u>

6.1 การเตรียมกล้าเชื้อ

นำเชื้อยีสต์ *Candida magnolia* TISTR 5664 หรือ *Candida guilliermondii* FTI 20037 มาเลี้ยงบนอาหาร YPD agar slant และบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเชื้อ 1-2 ลูป ใส่ลงในอาหาร X-YNB broth ที่บรรจุในฟลาสก์ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร และบ่มบนเครื่องเขย่าแบบ Rotary ความเร็วรอบเท่ากับ 170 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแยกเซลล์ออกโดยใช้เครื่องเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที เทส่วนใสทิ้ง ล้างเซลล์ด้วยน้ำกลั่นปราศจากเชื้อ แล้วเตรียมซัสเพนชั่นของเซลล์ในน้ำกลั่น เจือจางซัสเพนชั่นให้มีความขุ่นที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเริ่มต้น

6.2 การเพาะเลี้ยงด้วยน้ำตาลไซโลสบริสุทธิ์

เพาะเลี้ยงเซลล์ยีสต์ *Candida magnolia* TISTR 5664 หรือ *Candida guilliermondii* FTI 20037 ในอาหาร basal medium ที่ประกอบด้วย yeast nitrogen base (ชนิดไม่มีกรดอะมิโนและแอม โมเนียมซัลเฟต) 1.7 กรัมต่อลิตร ที่มียูเรีย 2.27 กรัมต่อลิตร สำหรับ *Candida magnolia* TISTR 5664 และมียูเรีย 5.00 กรัมต่อลิตร สำหรับ *Candida guilliermondii* FTI 20037 เป็นแหล่งไนโตรเจน และน้ำตาลไซโลสเป็นแหล่งคาร์บอน และสำหรับ *Candida guilliermondii* FTI 20037 มีการเติม Yeast extract 1.0 กรัมต่อลิตร ทำการดูดกล้าเชื้อที่เตรียมในข้อ 6.1 ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุในฟลาสก์ขนาด 250 มิลลิลิตร ให้มีความขุ่นเชื้อเริ่มต้นที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร สำหรับ *Candida magnolia* TISTR 5664 และความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร สำหรับ *Candida guilliermondii* FTI 20037 ให้เท่ากับ 1.0 โดยการคำนวณเชื้อเริ่มต้นตามสูตร

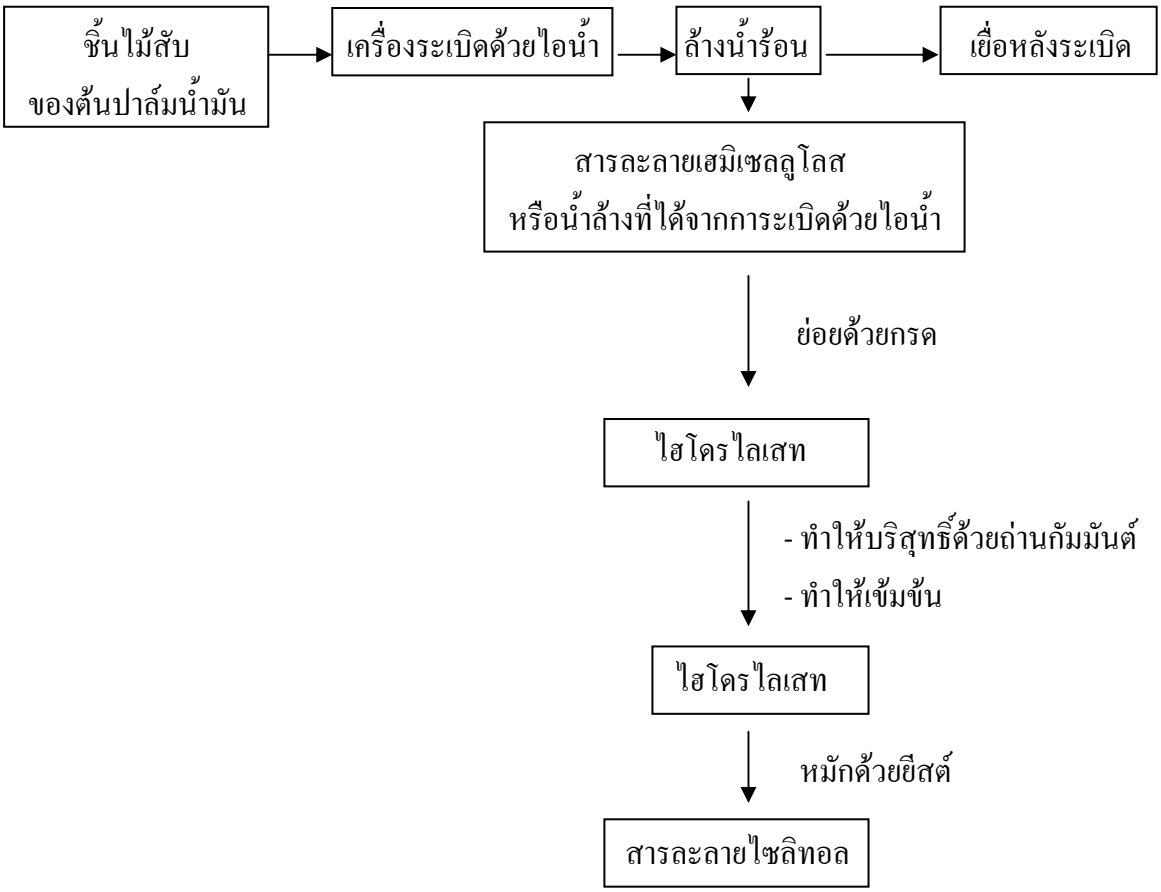
$$V_1 = (N_2V_2) / N_1$$

บ่มอาหารเลี้ยงเชื้อบนเครื่องเขย่า ที่มีความเร็วรอบ 170 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง เพื่อนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำตาลไซโลสที่เหลือและน้ำตาลไซลิทอลที่เกิดขึ้น น้ำหนักเซลล์แห้ง และ ค่าพีเอช

6.3 การเพาะเลี้ยงด้วยไฮโดรไลเสทที่ได้จากการระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำ

ทำเช่นเดียวกับข้อ 6.2 แต่เปลี่ยนน้ำตาลไซโลสบริสุทธิ์เป็นไฮโดรไลเสทที่ได้จากการระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำที่ได้จากข้อ 5 แล้วคำนวณเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของการเจริญในรูปการสร้างเซลล์จากอาหารไซโลสและกลูโคส (Yx/s) และการผลิตไซลิทอลในเทอมของการสร้างผลิตภัณฑ์จากอาหารไซโลส (Yp/s) และอัตราการผลิตไซลิทอลที่เกิดขึ้นต่อเวลา (Qp)

การทดลองการผลิตไซลิทอลจากสารละลายเฮมิเซลลูโลสของต้นปาล์มน้ำมันสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 สรุปแผนผังการทดลองการผลิตไซลิทอลจากต้นปาล์มน้ำมัน

7. <u>สถานที่ทดลอง</u>

1. ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเอนไซม์และการจัดการของเสีย สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

2. ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

8. <u>ระยะเวลาในการทดลอง</u>

การทดลองครั้งนี้เริ่มตั้งแต่เดือน มีนาคม 2547 สิ้นสุดเมื่อเดือน พฤศจิกายน 2549

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. องค์ประกอบทางเคมีของต้นปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 2 แสดงผลขององค์ประกอบทางเคมีของต้นปาล์มน้ำมัน จากการวิเคราะห์ พบว่าต้นปาล์มน้ำมันมีปริมาณ โฮโลเซลลูโลส 68.87% ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณเซลลูโลสที่วิเคราะห์ได้มีค่าประมาณ 37.14% เป็นปริมาณสูงจึงเหมาะในการนำไปใช้ในการผลิตเอทานอล และเพนโตแซนประมาณ 30.59% เนื่องจากเพนโตแซนคือ ปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่อยู่ในรูปของพอลิเมอร์ของน้ำตาลไซโลสเป็นองค์ประกอบหลัก เพนโตแซนที่ประกอบอยู่นี้มีปริมาณสูงเหมาะสมในการนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตเฟอร์ฟูรอลหรือใช้ผลิตน้ำตาลไซโลสไซรับ หรือน้ำตาลไซลิทอล หรือน้ำตาลที่อยู่ในรูปของโอลิโกเมอร์ของน้ำตาลไซโลส หรือผลิตเป็นเอทานอล นอกจากนี้ในต้นปาล์มน้ำมันยังประกอบด้วย ลิกนิน 22.32% สารแทรกที่ละลายในเอทานอล/เบนซิน 8.07% และเถ้า 8.56% เมื่ออ้างอิงกับน้ำหนักแห้งของไม้ต้นปาล์มน้ำมัน ข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์ในการแยกองค์ประกอบทางเคมีของต้นปาล์มน้ำมันออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาการแยกองค์ประกอบของต้นปาล์มน้ำมันโดยเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบของต้นปาล์มน้ำมันโดยอ้างอิงน้ำหนักแห้งของไม้

องค์ประกอบ	**ร้อยละ**
โฮโลเซลลูโลส	68.87
- แอลฟาเซลลูโลส	37.14
- เพนโตแซน	30.59
ลิกนิน	22.32
สารแทรกที่ละลายในเอทานอล/เบนซิน	8.07
เถ้า	8.56

2. <u>สภาวะที่เหมาะสมในการแยกองค์ประกอบทางเคมีของต้นปาล์มน้ำมันโดยการระเบิดด้วยไอน้ำ</u>

จากการศึกษาการแยกองค์ประกอบทางเคมีของต้นปาล์มน้ำมันโดยเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำที่สภาวะรุนแรงต่างๆ 15 สภาวะ เพื่อแยกเฮมิเซลลูโลสออกจากเซลลูโลสและลิกนิน เฮมิเซลลูโลสจะอยู่ในน้ำล้างหลังระเบิดและมีโมโนเมอร์และโอลิโกเมอร์ของไซโลสเป็นองค์ประกอบหลัก เยื่อหลังระเบิดจะมีเซลลูโลสและลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อนำน้ำล้างและเยื่อหลังการระเบิดมาวิเคราะห์ค่าต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการนำน้ำล้างและเยื่อหลังระเบิดมาสร้างเป็นสารมูลค่าเพิ่ม เช่น นำน้ำล้างมาผลิตน้ำตาลไซโลสหรือไซลิทอล และนำเยื่อหลังระเบิดมาผลิตเอทานอล เป็นต้น การทดลองนี้เป็นไปเพื่อให้เกิดความเข้าใจในสภาวะความรุนแรงของไอน้ำที่ใช้ในการระเบิดโดยเทอมที่ใช้ระบุสภาวะความรุนแรงคือค่า Severity, Ro ซึ่งเป็นเทอมที่รวมอุณหภูมิและระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำเข้าไว้ด้วยกันดังสมการ (Overend and Chornet., 1987)

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

เมื่อ Ro คือ ค่า severity factor

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการระเบิด (นาที)

T คือ อุณหภูมิของไอน้ำ (^{0}C)

สภาวะการระเบิดต้นปาล์มน้ำมันที่ศึกษาอยู่ในช่วง 17-25 kg/cm^2 หรือในช่วงอุณหภูมิ 203-219 ^{o}C เป็นเวลา 2, 5 และ 10 นาที และผลในการเปลี่ยนอุณหภูมิและระยะเวลาในการระเบิดชิ้นไม้สับต้นปาล์มน้ำมันรายงานอยู่ในรูป LogRo ดังตารางที่ 3

2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหลังการระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำ

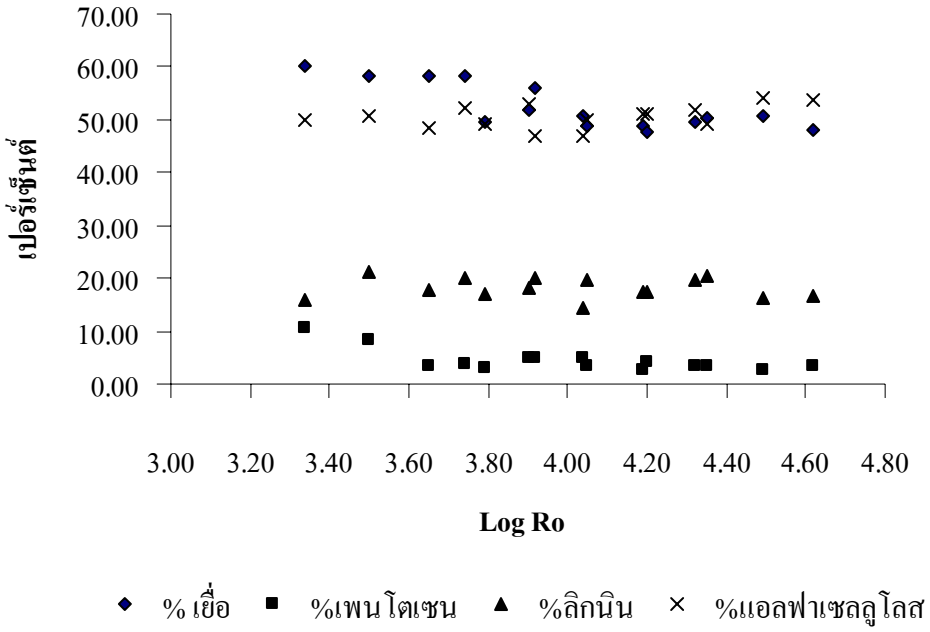
เมื่อนำเยื่อที่ได้หลังการระเบิดด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ 15 สภาวะ นำมาหาเปอร์เซ็นต์เยื่อหลังการระเบิด และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี คือ เพนโตเซน ลิกนิน โฮโลเซลลูโลส และแอลฟาเซลลูโลส ได้ผลดังตารางที่ 4 และ ภาพที่ 14 พบว่า จากการระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำที่สภาวะ LogRo เท่ากับ 3.34–4.62 ทำให้ปริมาณเยื่อมีค่าอยู่ในช่วง 47.68 – 60.18 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้งชิ้นไม้สับต้นปาล์มน้ำมันที่ทำการระเบิด สภาวะที่ให้ปริมาณเยื่อมากที่สุด คือ LogRo เท่ากับ 3.34, 3.5, 3.65 และ 3.74

ตารางที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของความดัน และเวลาในรูปของ LogRo

สภาวะ			Log Ro
ความดัน (Kg/cm^2)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (^oC)	
17	2	203	3.34
19	2	203	3.50
21	2	214	3.65
17	5	203	3.74
23	2	219	3.79
19	5	208	3.90
25	2	223	3.92
17	10	203	4.04
21	5	214	4.05
23	5	219	4.19
19	10	208	4.20
25	5	223	4.32
21	10	214	4.35
23	10	219	4.49
25	10	219	4.62

ตารางที่4 แสดงความสัมพันธ์ของสภาวะที่ใช้ในการระเบิดด้วยไอน้ำในรูป LogRo กับค่าองค์ประกอบเยื่อภายหลังการระเบิดเทียบชิ้นไม้สับต้นปาล์มน้ำมัน 100 กรัม

LogRo	**% เยื่อ**	**%เพนโตเซน**	**%ลิกนิน**	**%โฮโลเซลลูโลส**	**%แอลฟาเซลลูโลส**
3.34	60.18	10.57	15.74	60.66	50.09
3.50	58.38	8.16	21.28	59.00	50.84
3.65	58.39	3.56	17.87	52.17	48.61
3.74	58.40	3.81	19.89	55.96	52.15
3.79	49.74	3.15	16.99	52.25	49.10
3.90	51.78	4.91	18.16	57.92	53.01
3.92	55.94	5.07	20.21	52.15	47.08
4.04	50.78	4.89	14.56	51.95	47.06
4.05	48.85	3.55	19.62	53.57	50.02
4.19	48.91	2.68	17.39	53.73	51.05
4.20	47.68	4.05	17.34	55.18	51.13
4.32	49.47	3.50	19.83	55.35	51.85
4.35	50.40	3.39	20.26	52.28	49.19
4.49	50.54	2.65	16.34	56.76	54.11
4.62	48.06	3.52	16.80	57.41	53.89



ภาพที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของสภาวะที่ใช้ระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำในรูป LogRo กับองค์ประกอบทางเคมีในเยื่อหลังระเบิด

ก. ชิ้นไม้สับต้นปาล์มน้ำมันก่อนการระเบิดด้วยไอน้ำ

ข. เยื่อหลังระเบิดต้นปาล์มน้ำมันที่สภาวะไม่รุนแรง เช่น สภาวะที่ LogRo เท่ากับ 3.34, 3.50 และ 3.74

ค. เยื่อหลังระเบิดต้นปาล์มน้ำมันที่สภาวะรุนแรงปานกลาง เช่น สภาวะที่ LogRo เท่ากับ 3.65, 3.79, 3.90, 3.92, 4.04, 4.05 และ 4.20

ง. เยื่อหลังระเบิดต้นปาล์มน้ำมันที่สภาวะรุนแรง เช่น สภาวะที่ LogRo เท่ากับ 4.19, 4.32, 4.35, 4.49 และ 4.62

ภาพที่ 15 แสดงชิ้นไม้สับและเยื่อหลังการระเบิดของต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ

โดยให้ปริมาณเยื่อเป็น 60.18, 58.38, 58.39 และ 58.40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่สภาวะ LogRo เท่ากับ 3.34, 3.74 และ 3.50 ซึ่งเป็นสภาวะการระเบิดที่ความดัน 17 Kg/cm^2 เป็นเวลา 2, 5 นาที และ ความดัน 19 Kg/cm^2 เป็นเวลา 2 นาที ตามลำดับ มีลักษณะของเยื่อหลังระเบิดเป็นเส้นใหญ่และหยาบ ดังภาพที่ 15 ข ซึ่งไม่เหมาะต่อการนำไปย่อยและหมักเป็นเอทานอล และภาพที่ 15ค คือสภาวะที่ LogRo เท่ากับ 3.65, 3.79, 3.90, 4.04 4.05 และ 4.20 พบว่า เยื่อหลังระเบิดมีลักษณะเส้นใยสั้นปนยาวเหมาะในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ง่าย ส่วนสภาวะที่ความดันสูงและเวลาในการระเบิดนาน คือ ค่า Log Ro มีเท่ากับ 4.19, 4.32, 4.35 4.49 และ 4.62 จะได้เยื่อหลังระเบิดมีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นละเอียด ดังภาพที่ 15 ง แต่ให้ค่าเปอร์เซ็นต์เยื่อหลังระเบิดน้อย นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ LogRo เท่ากับ 3.65, 4.05, 4.19, 4.32, 4.35, 4.49 และ 4.62 มีปริมาณเพนโตแซนในเยื่อหลังระเบิดต่ำ คือ มีค่า เท่ากับ 3.56, 3.55, 2.68, 3.50, 3.39, 2.65 และ 3.52 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งเยื่อหลังระเบิด ตามลำดับ กล่าวคือ เพนโตแซนที่เหลืออยู่ในเยื่อหลังระเบิดจะลดลงเมื่อสภาวะความรุนแรงในการระเบิดเพิ่มมากขึ้นเพนโตแซนที่เหลืออยู่ในเยื่อมีปริมาณน้อย แสดงว่ามีปริมาณเฮมิเซลลูโลสถูกแยกออกจากเยื่อปาล์มน้ำมันในปริมาณสูง โดยไปอยู่ในส่วนที่เป็นน้ำล้างปริมาณมาก ดังนั้นถ้าต้องการแยกส่วนเพนโตแซนออกมามากที่สุดควรใช้สภาวะการระเบิดที่รุนแรง

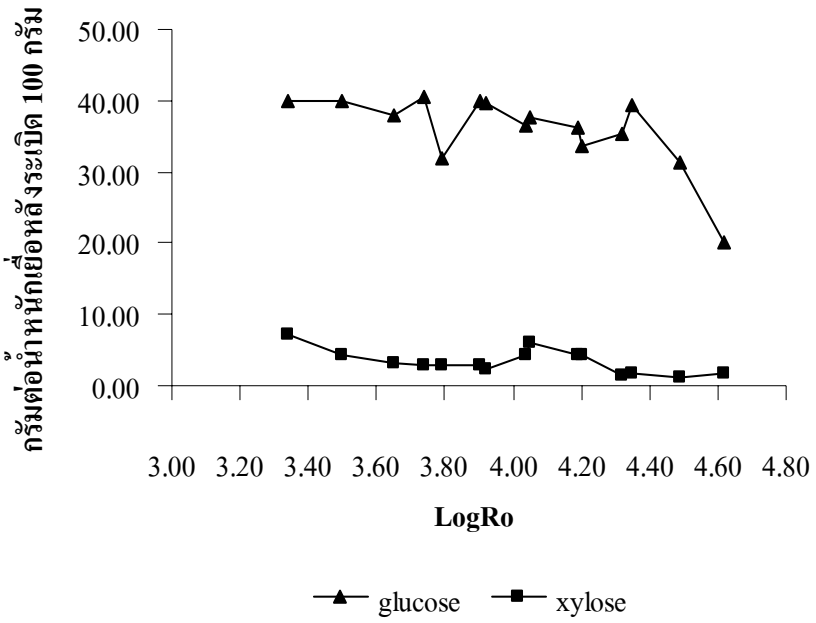
สำหรับเซลลูโลสจากการทดลอง พบว่า ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วง 47.06–53.89 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งเยื่อหลังระเบิด กล่าวคือ สภาวะความรุนแรงในการระเบิดไม่มีผลต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลสปริมาณเซลลูโลสในทำนองเดียวกันกับลิกนิน พบว่า มีปริมาณอยู่ในช่วง 15.74-21.28 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งเยื่อหลังระเบิด

2.2 ปริมาณน้ำตาลในน้ำล้างและเยื่อหลังระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำ

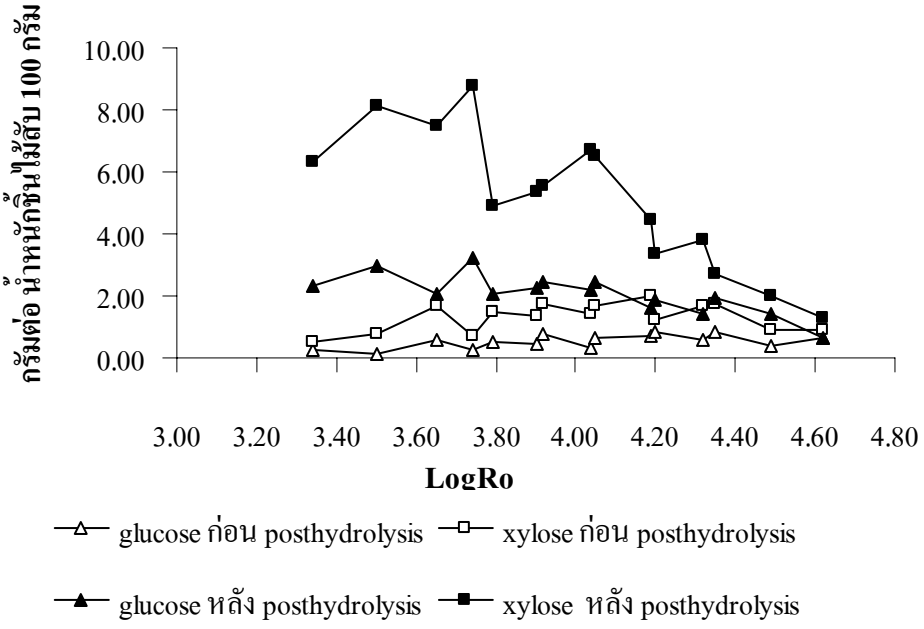
ก่อนการระเบิดเมื่อนำต้นปาล์มน้ำมันมาวิเคราะห์ค่าปริมาณน้ำตาลในไม้ พบว่า มีปริมาณไซโลส 18.47 และกลูโคส 31.80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักไม้แห้ง และเมื่อนำชิ้นไม้สับต้นปาล์มน้ำมันมาระเบิดด้วยไอน้ำแล้วทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในน้ำล้างและเยื่อหลังระเบิดด้วยไอน้ำแสดงผลดังตารางที่ 5 พบว่า ในน้ำล้างจากการระเบิดด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ 15 สภาวะดังข้างต้นแสดงดังภาพที่ 16 และในเยื่อหลังระเบิดแสดงดังภาพที่ 17 จะเห็นได้ว่าในเยื่อหลังระเบิด มีปริมาณน้ำตาลไซโลสเหลืออยู่น้อยในช่วง 1.14-7.19 กรัมต่อเยื่อหลังระเบิด 100 กรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะความรุนแรงในการระเบิดด้วยไอน้ำโดยสภาวะความรุนแรงของการระเบิดที่สูงขึ้นจะมี

ตารางที่ 5 แสดงปริมาณน้ำตาล (กรัม) ในเยื่อหลังระเบิดและในน้ำล้างที่ได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำของต้นปาล์ม 100 กรัม ก่อนและหลัง posthydrolysis ด้วย 3%H_2SO_4 โดยการ autoclave เป็นเวลา 60 นาที

Log Ro	สารละลายในน้ำล้างเยื่อ				เยื่อหลังระเบิด	
	ก่อน posthydrolysis		หลัง posthydrolysis			
	กลูโคส	ไซโลส	กลูโคส	ไซโลส	กลูโคส	ไซโลส
3.34	0.24	0.52	2.32	6.31	40.03	7.19
3.50	0.16	0.76	3.00	8.12	39.95	4.25
3.65	0.56	1.68	2.07	7.50	38.07	3.02
3.74	0.29	0.73	3.24	8.78	40.47	3.00
3.79	0.51	1.46	2.08	4.90	32.00	2.93
3.90	0.43	1.35	2.27	5.37	39.98	2.73
3.92	0.75	1.73	2.43	5.56	39.64	2.39
4.04	0.33	1.43	2.20	6.74	36.42	4.34
4.05	0.62	1.69	2.47	6.51	37.61	5.91
4.19	0.72	2.00	1.64	4.46	36.11	4.43
4.20	0.85	1.23	1.88	3.34	33.74	4.42
4.32	0.55	1.66	1.40	3.81	35.48	1.34
4.35	0.86	1.73	1.91	2.74	39.42	1.81
4.49	0.37	0.93	1.45	2.02	31.25	1.14
4.62	0.65	0.88	0.65	1.29	20.12	1.82



ภาพที่ 16 แสดงปริมาณน้ำตาล (กรัม) ในเยื่อหลังระเบิด100 กรัม



ภาพที่ 17 แสดงปริมาณน้ำตาล (กรัม) ในน้ำล้างจากการระเบิดด้วยไอน้ำก่อนและหลัง posthydrolysis น้ำตาลโอลิโกเมอร์เทียบกับชิ้นไม้สับต้นปาล์มน้ำมัน 100 กรัม หลังการระเบิดด้วยไอน้ำที่สภาวะต่างๆ

น้ำตาลไซโลสเหลืออยู่ในเยื่อน้อยลง ส่วนกลูโคสในเยื่อหลังระเบิดด้วยไอน้ำยังคงมีปริมาณลดลงเพียงเล็กน้อยจากปริมาณกลูโคสที่มีอยู่เดิมในต้นปาล์มน้ำมัน คือ อยู่ในช่วง 20.12- 40.47 กรัมต่อเยื่อหลังระเบิด 100 กรัม โดยก่อนระเบิดมีค่ากลูโคส 45.93 กรัมต่อชิ้นไม้ต้นปาล์มน้ำมัน 100 กรัม ส่วนในน้ำล้างหลังระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำมีปริมาณน้ำตาลไซโลสอยู่ในช่วง 0.52-2.00 กรัมต่อการระเบิดต้นปาล์ม 100 กรัม และปริมาณกลูโคสอยู่ในช่วง 0.16-0.86 กรัมต่อการระเบิดต้นปาล์ม 100 กรัม และเมื่อทำการย่อยน้ำล้าง (posthydrolysis) ด้วย 3% H_2SO_4 โดยการนึ่งความดันไอน้ำ 120 ^{o}C (autoclave) เป็นเวลา 60 นาที พบว่า ได้ปริมาณน้ำตาลไซโลสเพิ่มขึ้นอย่างมากอยู่ในช่วง 1.29-8.78 กรัมต่อการระเบิดต้นปาล์ม 100 กรัม และปริมาณกลูโคสเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอยู่ในช่วง 0.65-3.24 กรัมต่อการระเบิดต้นปาล์ม 100 กรัม และที่สภาวะ LogRo เท่ากับ 3.34, 3.50, 3.65, 3.74, 4.04 และ 4.05 ให้ปริมาณน้ำตาลไซโลสสูง คือ มีค่าเท่ากับ 6.31, 8.12, 5.92, 8.78, 6.74 และ 6.51 กรัมต่อการระเบิดต้นปาล์ม 100 กรัม ตามลำดับ แต่เนื่องจากที่สภาวะการระเบิดต้นปาล์มที่ LogRo เท่ากับ 3.34, 3.50 และ 3.74 เป็นสภาวะที่เยื่อหลังระเบิดมีลักษณะใหญ่และหยาบไม่เหมาะต่อการนำไปย่อยและหมักเป็นเอทานอล ส่วนสภาวะการระเบิดที่ LogRo เท่ากับ 4.04 และ 4.05 ให้ปริมาณเปอร์เซ็นต์เยื่อหลังระเบิดน้อย และน้อยกว่าที่สภาวะ LogRo เท่ากับ 3.65 ดังนั้นจะได้ว่าที่สภาวะการระเบิดที่ LogRo เท่ากับ 3.65 หรือสภาวะการระเบิดที่ความดัน 21 Kg/cm^2 (อุณหภูมิ 214 ^{o}C) เป็นเวลา 2 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะในการแยกองค์ประกอบทางเคมีของต้นปาล์มน้ำมันโดยเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำ ในการให้ผลิตผลิตภัณฑ์ คือ น้ำตาลไซโลสในน้ำล้างสูงพร้อมทั้งให้เยื่อหลังระเบิดมีปริมาณกลูโคสสูงด้วย ซึ่งจะได้ปริมาณน้ำตาลไซโลสในน้ำล้างเมื่อใช้สภาวะการย่อยน้ำตาลโอลิโกเมอร์ด้วย 3%w/v H_2SO_4 โดยการนึ่งด้วยความดันไอน้ำ 120 ^{o}C เป็นเวลา 60 นาที เท่ากับ 7.50 กรัมต่อการระเบิดต้นปาล์ม 100 กรัม และมีปริมาณเยื่อหลังระเบิดสูงเท่ากับ 58.39 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งในการระเบิดต้นปาล์ม 100 กรัม ซึ่งมีกลูโคสเป็นองค์ประกอบอยู่ในเยื่อหลังระเบิด เท่ากับ 38.07 กรัมต่อเยื่อหลังระเบิด 100 กรัม

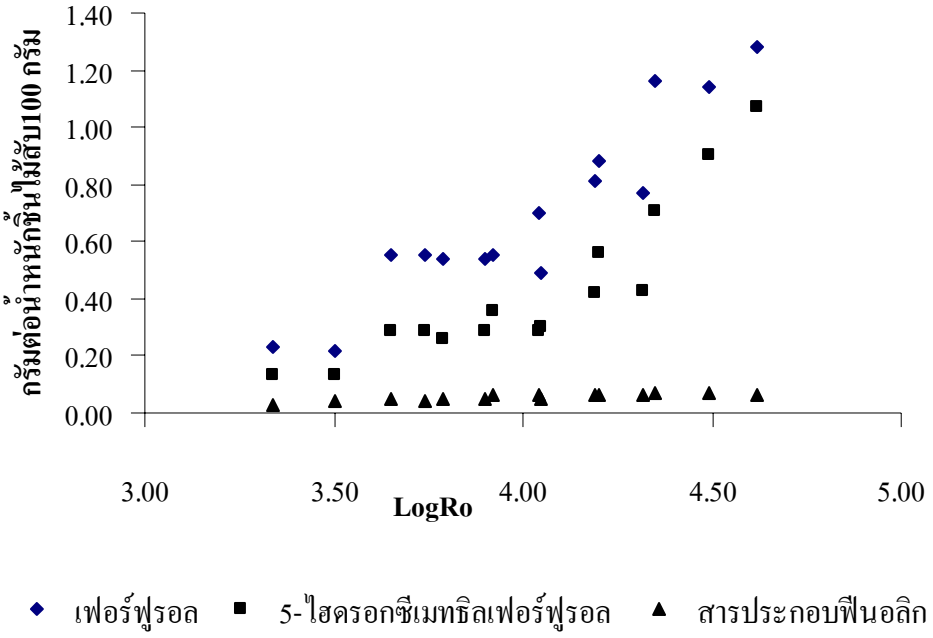
2.3 ผลพลอยได้ในน้ำล้างที่ได้จากการระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำ

จากการศึกษาผลพลอยได้ในน้ำล้างและค่าพีเอชของน้ำล้างแสดงดังตารางที่ 6 และภาพที่ 18 และ 19 พบว่า เมื่อค่า LogRo เพิ่มขึ้นหรือสภาวะการระเบิดรุนแรงขึ้นแนวโน้มค่าความเป็นกรดของน้ำล้างจะเพิ่มขึ้น คือ ค่าพีเอชจะลดลงตามสภาวะความรุนแรงที่ใช้ในการระเบิดต้นปาล์มน้ำมัน ดังนั้นสารละลายเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการล้างเยื่อหลังการระเบิดด้วยไอน้ำในน้ำล้าง

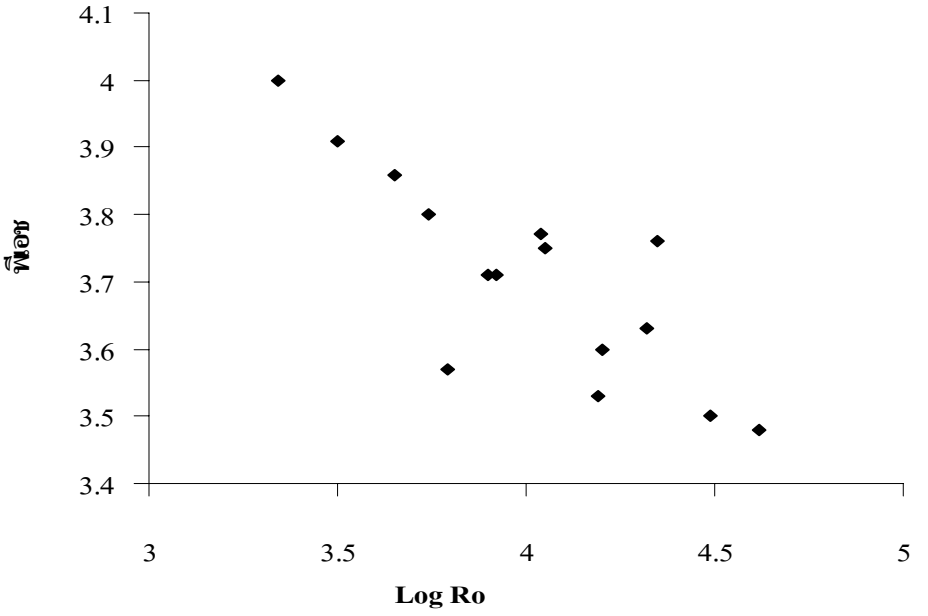
จึงมีคุณสมบัติเป็นกรดมีค่าพีเอช อยู่ในช่วง 3.48-4.00 ส่วนผลพลอยได้ในน้ำล้าง ได้แก่ เฟอร์ฟูรอล 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล กรดอะซิติก และสารประกอบฟีนอลิก มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตาม

ตารางที่ 6 แสดงผลพลอยได้ (กรัม) และพีเอชในน้ำล้างจากการระเบิดด้วยไอน้ำของต้นปาล์ม 100 กรัม ที่สภาวะต่างๆ

Log Ro	เฟอร์ฟูรอล	5-ไฮดรอกซีเมททิล เฟอร์ฟูรอล	สารประกอบ ฟีนอลิก	pH
3.34	0.23	0.14	0.03	4.00
3.50	0.22	0.13	0.04	3.91
3.65	0.55	0.29	0.05	3.86
3.74	0.55	0.29	0.04	3.80
3.79	0.54	0.26	0.05	3.57
3.90	0.54	0.29	0.05	3.71
3.92	0.55	0.36	0.06	3.71
4.04	0.70	0.29	0.06	3.77
4.05	0.49	0.30	0.05	3.75
4.19	0.81	0.42	0.06	3.53
4.20	0.88	0.56	0.06	3.60
4.32	0.77	0.43	0.06	3.63
4.35	1.16	0.71	0.07	3.76
4.49	1.14	0.90	0.07	3.50
4.62	1.28	1.07	0.06	3.48



ภาพที่ 18 แสดงความสัมพันธ์ของสภาวะที่ใช้ระเบิดเยื่อต้นปาล์มน้ำมันในรูป LogRo กับ ปริมาณผลพลอยได้ในน้ำล้างจากการระเบิดด้วยไอน้ำ



ภาพที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ของสภาวะที่ใช้ระเบิดเยื่อต้นปาล์มน้ำมันในรูป LogRo กับ ค่าพีเอชในน้ำล้างจากการระเบิดด้วยไอน้ำ

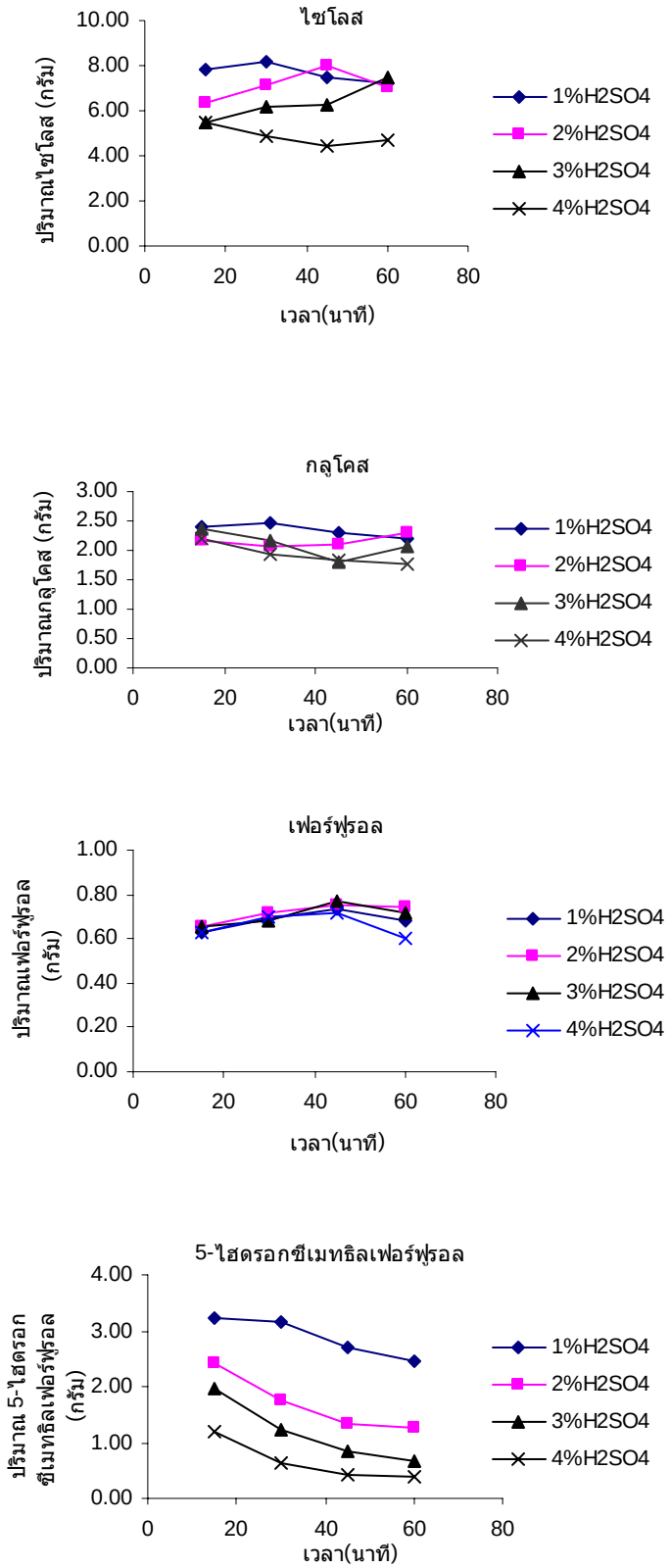
สภาวะความรุนแรงที่เพิ่มขึ้นในการระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำ คือ ที่สภาวะความรุนแรงเพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคสเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันกลายเป็นเฟอร์ฟูรอล และ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอลได้มากขึ้นด้วยตามลำดับ เฟอร์ฟูรอลอยู่ในช่วง 0.22-1.28 กรัมต่อการระเบิดต้นปาล์ม 100 กรัม และ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอลอยู่ในช่วง 0.13-1.07 กรัมต่อการระเบิดต้นปาล์ม 100 กรัม ส่วนปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่มีอยู่ในน้ำล้างเกิดจากการสลายตัวของลิกนินอยู่ในช่วง 0.03-0.07 กรัมต่อการระเบิดต้นปาล์ม 100 กรัม ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมากขึ้นตามความรุนแรงของสภาวะที่ใช้ในการระเบิด ดังนั้นจากการศึกษาจึงเลือกสภาวะการระเบิดที่เหมาะสมในการศึกษาต่อไป คือ LogRo เท่ากับ 3.65 โดยในน้ำล้างจากการระเบิดต้นปาล์ม 100 กรัม พบว่า มีปริมาณเฟอร์ฟูรอล 0.55 กรัม 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล 0.29 กรัม สารประกอบฟีนอลิก 0.05 กรัม และกรดอะซิติก 1.14 กรัม และหลังการย่อยน้ำล้างด้วยกรด 3% H_2SO_4 โดยการนึ่งด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียล เป็นเวลา 60 นาที ที่สภาวะ LogRo เท่ากับ 3.65 ในน้ำล้างจากการระเบิดด้วยไอน้ำของต้นปาล์มน้ำมัน 100 กรัม พบว่า มีปริมาณเฟอร์ฟูรอล 0.72 กรัม 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล 0.67 กรัม และสารประกอบฟีนอลิก 0.06 กรัม

3. <u>สภาวะที่เหมาะสมในการย่อย (posthydrolysis) น้ำตาลโอลิโกเมอร์ของน้ำตาลไซโลสในน้ำล้างด้วยความเข้มข้นกรดและเวลาต่างๆ</u>

จากการแยกองค์ประกอบในต้นปาล์มน้ำมันด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำ พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ LogRo เท่ากับ 3.65 หรือที่ความดัน 21 kg/cm^2 เป็นเวลา 2 นาที เมื่อนำน้ำล้างที่มีน้ำตาลโอลิโกเมอร์เป็นองค์ประกอบหลักมาทำการย่อยต่อไปให้เป็นน้ำตาลไซโลสโมเลกุลเดี่ยว โดยศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นกรดและเวลาต่างๆ ที่มีผลต่อการย่อยน้ำตาลโอลิโกเมอร์ของไซโลสได้ผลดังตารางที่ 7 และภาพที่ 20 ซึ่งแสดงผลของสภาวะการศึกษาการย่อยน้ำตาลโอลิโกเมอร์ของไซโลสในน้ำล้างที่ได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำของต้นปาล์มน้ำมัน 100 กรัม ด้วยกรดที่ความเข้มข้น H_2SO_4 1, 2, 3, 4% w/v เป็นเวลา 15, 30, 45, และ 60 นาที พบว่า ที่สภาวะ 1% H_2SO_4 เป็นเวลา 30 นาที ให้ปริมาณน้ำตาลไซโลสจากน้ำล้างสูงที่สุด เท่ากับ 8.15 กรัม กลูโคส เท่ากับ 2.46 กรัม เฟอร์ฟูรอล เท่ากับ 0.69 กรัม 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล 3.17 กรัม และกรดอะซิติก 2.33 กรัม

ตารางที่ 7 แสดงปริมาณน้ำตาลไซโลส กลูโคส เฟอร์ฟูรอล และไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล (กรัมจากการระเบิดต้นปาล์ม 100 กรัม) จากสภาวะการย่อยน้ำตาลโอลิโกเมอร์ในน้ำล้างด้วยความเข้มข้นกรดและเวลาต่างๆ ของสภาวะ LogRo =3.65

ความเข้มข้น $\%H_2SO_4$	เวลา (นาที)	ไซโลส	กลูโคส	เฟอร์ฟูรอล	5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล
1	15	7.84	2.41	0.62	3.22
1	30	8.15	2.46	0.69	3.17
1	45	7.44	2.31	0.74	2.71
1	60	7.19	2.21	0.68	2.47
2	15	6.37	2.17	0.65	2.42
2	30	7.15	2.07	0.71	1.75
2	45	7.97	2.09	0.75	1.34
2	60	7.06	2.31	0.74	1.26
3	15	5.46	2.37	0.66	1.97
3	30	6.15	2.15	0.68	1.23
3	45	6.26	1.81	0.77	0.83
3	60	7.50	2.07	0.72	0.67
4	15	5.51	2.21	0.62	1.21
4	30	4.88	1.95	0.70	0.64
4	45	4.48	1.83	0.72	0.43
4	60	4.68	1.77	0.60	0.39



ภาพที่ 20 แสดงกราฟของปริมาณค่าต่างๆ หลังการย่อยน้ำล้างที่ได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำด้วยกรดที่สภาวะต่างๆ หน่วย กรัมต่อการระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำ 100 กรัม

4. <u>การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำไฮโดรไลเสทให้บริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)</u>

เมื่อนำน้ำล้างที่ได้จากการระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำที่สภาวะที่เหมาะสม (ที่ความดัน 21 kg/cm^2 หรือ 214 ^{o}C เวลา 2 นาที) มาผ่านการย่อยน้ำตาลโอลิโกเมอร์ไซโลสด้วยกรดที่เหมาะสม (สภาวะ 1%w/v H_2SO_4 แล้วทำการนึ่งด้วยความดันไอน้ำเป็นเวลา 30 นาที) ทำการปรับพีเอชให้เท่ากับ 7.0-8.0 ด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) หลังจากนั้นจึงทำการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณและเวลาต่างๆ ณ อุณหภูมิห้องโดยทำการเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

4.1 ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับครั้งที่ 1

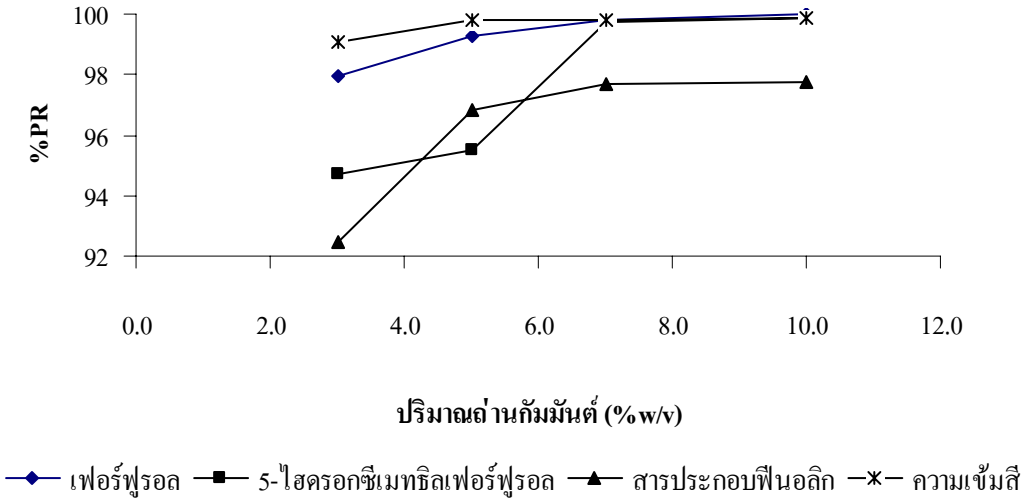
เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ คือ ปริมาณความเข้มสี สารประกอบฟีนอลิก เฟอร์ฟูรอล และ 5-ไฮดรอกซิลเมทธิลเฟอร์ฟูรอล จากการศึกษาการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่า ไฮโดรไลเสทที่ไม่ผ่านการดูดซับ จะมีค่าปริมาณความเข้มสี เท่ากับ 24300 Pt-Co สารประกอบฟีนอลิก 30.72 มิลลิกรัมต่อลิตร เฟอร์ฟูรอล 350.00 มิลลิกรัมต่อลิตร 5-ไฮดรอกซิลเมทธิลเฟอร์ฟูรอล 1580.00 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เมื่อผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณ 3, 5, 7 และ 10 % w/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในสภาวะที่กำหนด พบว่า มีค่าความเข้มสี 29.5-233.0 Pt-Co สารประกอบฟีนอลิก 0.70-2.32 มิลลิกรัมต่อลิตร เฟอร์ฟูรอล 0-7.16 มิลลิกรัมต่อลิตร 5-ไฮดรอกซิลเมทธิลเฟอร์ฟูรอล 1.79-64.11 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เนื่องจากสารที่เกิดจากการสลายตัวของลิกนิน คือ สีและปริมาณสารประกอบฟีนอลิก มีผลยับยั้งต่อการเจริญจุลินทรีย์มากกว่าเฟอร์ฟูรอลและไฮดรอกซิลเมทธิลเฟอร์ฟูรอล (Clark and Mackie., 1984) จึงพิจารณาค่าความเข้มสีและสารประกอบฟีนอลิกเป็นหลัก ในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการทำให้บริสุทธิ์ด้วยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ภาพที่ 21 และตารางที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูซับและเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารต่างๆ ดังกล่าวจากการทดลอง พบว่า ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 % w/v ให้ผลในการลดลงของความเข้มสีและสารประกอบฟีนอลิกและเฟอร์ฟูรอลสูงกว่าการใช้ที่ปริมาณ 3 % w/v อย่างเห็นได้ชัด และให้ผลไม่แตกต่างกันกับการใช้ถ่านกัมมันต์ 7 และ 10 % w/v คือ ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 % w/v มีค่าปริมาณสี เท่ากับ 54.25 Pt-Co คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีเท่ากับ 99.78 และค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 0.98 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น

ตารางที่ 8 แสดงผลการดูดซับสารยับยั้งจุลินทรีย์ในไฮโดรไลเสทในครั้งที่ 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างๆ คือ 0, 3, 5, 7 และ 10 % w/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การดูดซับครั้งที่1		เฟอร์ฟูรอล		5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล		สารประกอบฟีนอลิก		สี	
AC* %w/v	เวลา (ชม)	mg/l	%PR**	mg/l	%PR**	mg/l	%PR**	Pt-Co	%PR**
0	-	350.00	0.00	1580	0.00	30.72	0.00	24300	0.00
3	1	7.16	97.95	84.11	94.68	2.32	92.45	226.50	99.07
5	1	2.60	99.26	71.15	95.50	0.98	96.81	54.00	99.78
7	1	0.60	99.83	3.89	99.75	0.72	97.66	45.17	99.81
10	1	0.00	100.00	1.79	99.89	0.70	97.72	29.50	99.88

หมายเหตุ: AC* คือ Activated Carbon

PR** คือ Percent Remove



ภาพที่ 21 แสดงการดูดซับความเข้มสี สารประกอบฟีนอลิก เฟอร์ฟูรอล และ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอลจากกการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในครั้งที่1 ที่ปริมาณ 3, 5, 7 และ 10% w/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เปอร์เซนต์การกำจัดสารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 96.80 ค่าปริมาณเฟอร์ฟูรอล เท่ากับ 2.60 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดเฟอร์ฟูรอล เท่ากับ 99.26 และปริมาณ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล เท่ากับ 71.15 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดปริมาณ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล เท่ากับ 95.50 ดังนั้นจึงเลือกใช้สภาวะที่ 5 % w/v ในการทดลองต่อไป

4.2 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสารด้วย ถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 1

จากการศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมได้จากผลข้อ 4.1 คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 % w/v มาทำการศึกษาต่อในการดูดซับสารที่มีผลยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะเดิมโดยการแปรผันระยะเวลาในการดูดซับต่างๆ คือ 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 18, 24 และ 48 ชั่วโมง ได้ผลดังภาพที่ 22 และตารางที่ 9 พบว่า ค่าปริมาณความเข้มสี สารประกอบฟีนอลิก เฟอร์ฟูรอล และไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล มีแนวโน้มลดลงตามลำดับเวลาที่เพิ่มขึ้นและมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลามากขึ้นในช่วงหลังเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อสังเกตระยะเวลาในการดูดซับสาร พบว่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดความเข้มสี สารประกอบฟีนอลิก เฟอร์ฟูรอลและไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล ที่เวลา 0.5 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงหรือไม่แตกต่างกันมากนักกับที่เวลา 1-48 ชั่วโมง คือ มีค่าเปอร์เซ็นต์กำจัดความเข้มสีอยู่ในช่วง 99.78-99.90 เปอร์เซ็นต์ การกำจัดสารประกอบฟีนอลิกอยู่ในช่วง 96.81-98.50 เปอร์เซ็นต์ การกำจัดเฟอร์ฟูรอลอยู่ในช่วง 99.20-100 เปอร์เซ็นต์ และการกำจัด 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอลอยู่ในช่วง 95.40-96.60เปอร์เซ็นต์ โดยที่เวลาในการดูดซับสาร 0.5 ชั่วโมง ให้ผลค่าปริมาณความเข้มสีลดลงเหลือ 72.00 Pt-Co หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดความเข้มสีเท่ากับ 99.70 เปอร์เซ็นต์ ค่าปริมาณฟีนอลิก เท่ากับ 0.98 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นการกำจัดสารประกอบฟีนอลิก 96.81 เปอร์เซ็นต์ ค่าปริมาณเฟอร์ฟูรอล 2.60 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นการกำจัดเฟอร์ฟูรอล 99.26 เปอร์เซ็นต์ และ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล เท่ากับ 71.15 มิลลิกรัมต่อลิตร และคิดเป็นการกำจัดไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล เท่ากับ 95.50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นสภาวะเหมาะสมที่สุด

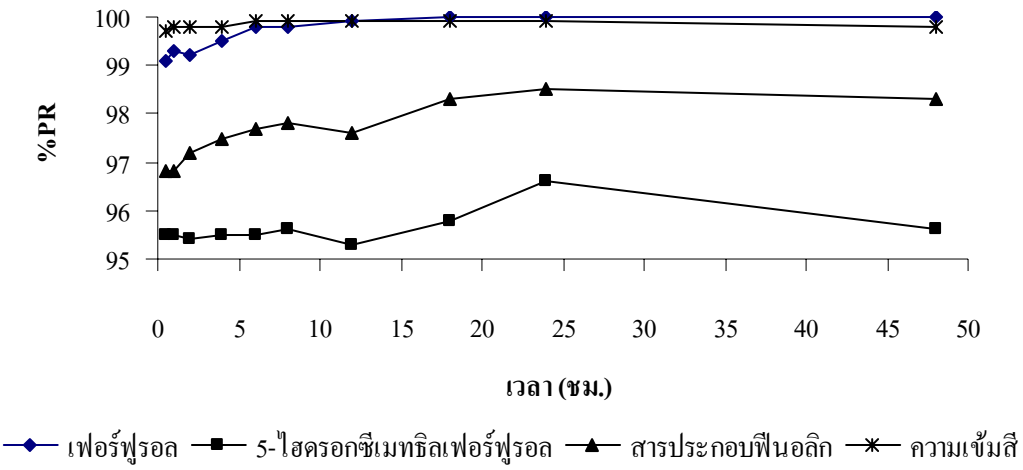
อย่างไรก็ตามความเข้มสีที่เท่ากับ 72.00 Pt-Co ยังให้สารละลายที่มีลักษณะเป็นสีเหลืองอยู่ดังแสดงในภาพที่ 25 ค ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารที่ปริมาณ 5 กรัม เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง ในการดูดซับครั้งที่ 1 เพื่อใช้ศึกษาการทดลองการดูดซับสารครั้งที่2 ต่อไป

ตารางที่ 9 แสดงผลการดูดซับสารยับยั้งจุลินทรีย์ในไฮโดรไลเสทในครั้งที่ 1 ด้วยถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 5 % w/v ที่เวลาต่างๆ คือ 0, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 18, 24 และ48 ชั่วโมง

การดูดซับครั้งที่1		เฟอร์ฟูรอล		5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล		สารประกอบฟีนอลิก		สี	
AC* %w/v	เวลา (ชม)	mg/l	%PR**	mg/l	%PR**	mg/l	%PR**	Pt-Co	%PR**
5	0.5	3.10	99.10	71.50	95.50	0.98	96.80	72.00	99.70
5	1	2.60	99.26	71.15	95.50	0.98	96.81	54.00	99.78
5	2	2.70	99.20	73.50	95.40	0.87	97.20	44.75	99.80
5	4	1.90	99.50	71.20	95.50	0.76	97.50	38.75	99.80
5	6	0.80	99.80	71.00	95.50	0.71	97.70	36.00	99.90
5	8	0.60	99.80	70.10	95.60	0.68	97.80	33.75	99.90
5	12	0.40	99.90	74.90	95.30	0.74	97.60	35.25	99.90
5	18	0.00	100	65.90	95.80	0.51	98.30	32.75	99.90
5	24	0.00	100	53.60	96.60	0.47	98.50	35.50	99.90
5	48	0.00	100	69.60	95.60	0.51	98.30	46.75	99.80

หมายเหตุ: AC* คือ Activated Carbon

PR** คือ Percent Remove



ภาพที่ 22 แสดงการดูดซับความเข้มสี สารประกอบฟีนอลิก เฟอร์ฟูรอล และ5-ไฮดรอกซีเมทธิล เฟอร์ฟูรอลจากกการดูดซับสารด้วยถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณ 5 % w/v เป็นเวลา 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 12, 18, 24 และ 48 ชั่วโมง ในครั้งที่1

เช่นเดียวกับการทดลองของวิทยา ปั้นสุวรรณ (2542) ที่มีการดูดซับสารด้วยถ่านกัมมันต์ 2 ครั้ง คือ ในการดูดซับครั้งที่ 1 ใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 3 %w/v เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า สามารถกำจัดสีได้ 99.71 เปอร์เซ็นต์แต่ยังคงพบว่าสารละลายที่ได้ยังคงเป็นสีเหลืองอ่อนอยู่ จึงนำไปดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างๆ อีกครั้ง พบว่า ที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 1.5%w/v ในการดูดซับครั้งที่ 2 เป็นเวลา 15 นาที สามารถกำจัดสีได้ 99.43 เปอร์เซ็นต์ และกำจัดสารประกอบฟีนอลิก เท่ากับ 96.56 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นสีและความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกก่อนดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

4.3 การศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมในการดูดซับสารครั้งที่2

จากผลการทดลองข้อที่ 4.1 และ 4.2 จะได้สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารครั้งที่ 1 คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ 5 %w/v เวลา 0.5 ชั่วโมง ซึ่งนำมาทำการศึกษาต่อในการดูดซับครั้งที่ 2 โดยทำการศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างๆ คือ 1, 2 และ 3 % w/v ที่เวลา 1 ชั่งโมง ภายใต้สภาวะเดิม ได้ผลดังภาพที่ 23 และ ตารางที่ 10 พบว่าที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 2 % w/v สามารถลดสีได้สูงสุดซึ่งปริมาณความเข้มสีเท่ากับ 10.50 Pt-Co คิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์กำจัดความเข้มสีเท่ากับ 99.95

เปอร์เซ็นต์เทียบกับความเข้มสีก่อนดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การลดลงของสารประกอบฟีนอลิกที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่างๆ คือ 1, 2 และ 3 % w/v มีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก คือ อยู่ในช่วง 0.23-0.31 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นการกำจัดสารประกอบฟีนอลิก ในช่วง 98.99-99.25 เปอร์เซ็นต์เทียบกับความเข้มข้นสารประกอบฟีนอลิกก่อนดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การลดลงของเฟอร์ฟูรอลสามารถลดลงเทียบเท่าได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์เทียบกับความเข้มข้นเฟอร์ฟูรอลก่อนดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และการลดลงของ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล พบว่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดของ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอลอยู่ในช่วง 99.89-99.97 เปอร์เซ็นต์เทียบกับความเข้มข้น 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอลก่อนดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ และที่ปริมาณ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอลที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 3 % w/v สามารถดูดซับไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอลได้สูงสุดแต่ไม่แตกต่างมากนักกับที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 2 % w/v ดังนั้น จึงเลือกปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 2 % w/v ในการดูดซับสารครั้งที่ 2

4.4 ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสารด้วยถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 2

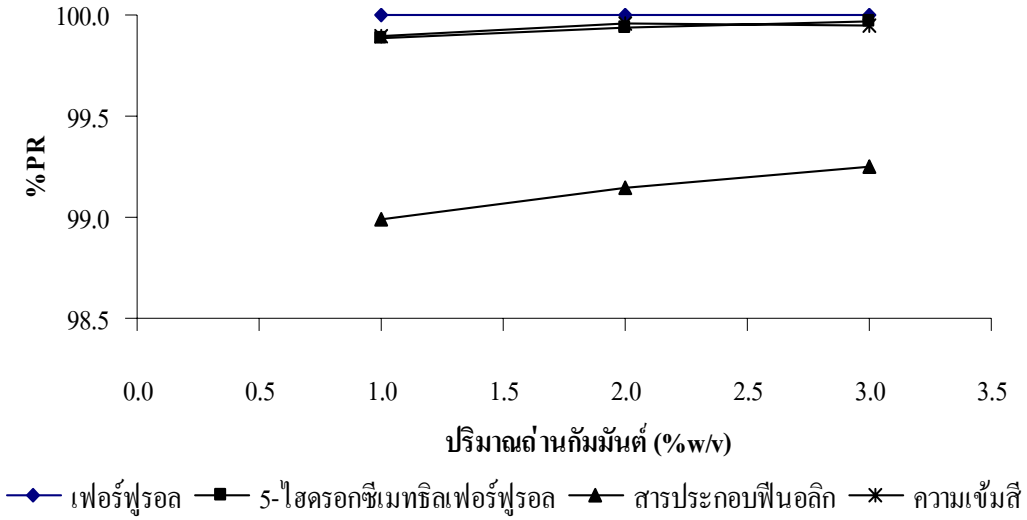
จากผลที่ได้ข้อ 4.3 ในการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารครั้งที่ 2 ที่ปริมาณ 2 % w/v มาศึกษาต่อภายใต้สภาวะเดิมในการดูดซับที่เวลาต่างๆ คือ 15, 30, 45 และ 60 ชั่งโมง ได้ผลดังภาพที่ 24 ตารางที่ 11 และ พบว่าค่าปริมาณความเข้มสีมีค่าใกล้เคียงกันในเวลาต่างๆ ซึ่งคิดอยู่ในช่วงความเข้มสี 10.50-15.12 Pt-Co หรือคิดเป็นค่าเปอร์เซ็นกำจัดความเข้มสี 99.94-99.96% เทียบกับความเข้มสีเริ่มก่อนดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ การลดลงของสารประกอบฟีนอลิกลดลงเหลืออยู่ในช่วง 0.26-0.65 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นการกำจัดสารประกอบฟีนอลิก ในช่วง 97.88-99.15% ซึ่งเวลาที่ 15 และ 30 นาที ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันแต่ในผลการกำจัดสารประกอบฟีนอลิกสูงสุดที่เวลา 60 นาที การลดลงของเฟอร์ฟูรอลสามารถลดลงเทียบเท่าได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ก่อนดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่เวลาต่างๆ และการลดลงของ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล พบว่า ลดลงอยู่ในช่วง 0.77-0.88 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดของ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอลอยู่ในช่วง 99.94-99.95 เปอร์เซ็นต์ก่อนดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งให้ผลมีค่าใกล้เคียงกันในเวลาต่างๆ ดังนั้น จึงเลือกใช้เวลาในการดูดซับสารครั้งที่ 2 ที่ปริมาณ ถ่านกัมมันต์ 2 % w/v ที่เวลา 60 นาที เนื่องจากสามารถกำจัดสารประกอบฟีนอลิกได้สูงสุด คือ สามารถดูดซับได้เท่ากับ 99.15 เปอร์เซ็นต์ก่อนดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 10 แสดงผลการดูดซับสารยับยั้งจุลินทรีย์ในไฮโดรไลเสทในครั้งที่2 ด้วย ถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่างๆ คือ 1, 2, และ 3 % w/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การดูดซับครั้งที่2		เฟอร์ฟูรอล		5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล		สารประกอบฟีนอลิก		สี	
AC* %w/v	เวลา (นาที)	mg/l	%PR**	mg/l	%PR**	mg/l	%PR**	Pt-Co	%PR**
1	60	0	100	1.81	99.89	0.31	98.99	24.75	99.90
2	60	0	100	0.88	99.94	0.26	99.15	10.50	99.96
3	60	0	100	0.48	99.97	0.23	99.25	12.50	99.95

หมายเหตุ: AC* คือ Activated Carbon

PR** คือ Percent Remove



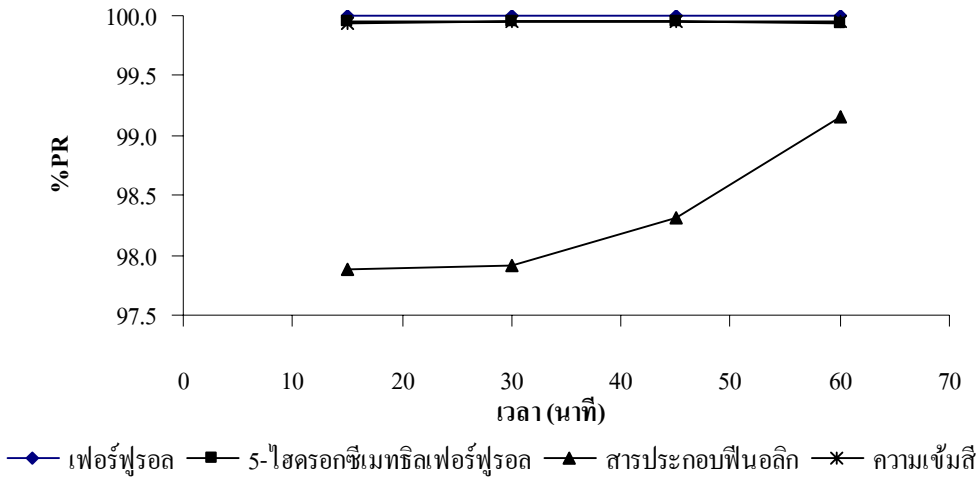
ภาพที่ 23 แสดงการดูดซับความเข้มสี สารประกอบฟีนอลิก เฟอร์ฟูรอล และ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอลจากการดูดซับสารด้วยถ่านกัมมันต์ครั้งที่2 ที่ปริมาณ 1, 2,และ 3 %w/v เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 11 แสดงผลการดูดซับสารยับยั้งจุลินทรีย์ในไฮโดรไลเสทในครั้งที่2 ด้วย ถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 2 % w/v ที่เวลาต่างๆ คือ 15, 30, 45 และ 60 ชั่วโมง

การดูดซับครั้งที่2		เฟอร์ฟูรอล		5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอล		สารประกอบฟีนอลิก		สี	
AC* %w/v	เวลา (นาที)	mg/l	%PR**	mg/l	%PR**	mg/l	%PR**	Pt-Co	%PR**
2	15	0	100	0.81	99.95	0.65	97.88	15.12	99.94
2	30	0	100	0.77	99.95	0.64	97.92	13	99.95
2	45	0	100	0.8	99.95	0.52	98.31	10.5	99.96
2	60	0	100	0.88	99.94	0.26	99.15	10.5	99.96

หมายเหตุ: AC* คือ Activated Carbon

PR** คือ Percent Remove



ภาพที่ 24 แสดงการดูดซับความเข้มสี สารประกอบฟีนอลิก เฟอร์ฟูรอล และ 5-ไฮดรอกซีเมทธิลเฟอร์ฟูรอลจากการดูดซับสารด้วยถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณ 2% w/v เป็นเวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที ในครั้งที่2