บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญคือเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลไซโลสสามารถแปรสภาพให้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงไบโอเอทานอลได้ นับว่าเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพืชที่สามารถให้ผลผลิตได้ตลอดทั้งปีและพบทั่วทุกภาคของประเทศไทยคือ หน่อไม้และไม้ไผ่ การทดลองใช้เทคนิคการออกแบบทางวิศวกรรมที่เรียกว่าการออกแบบพื้นผิวผลตอบสนอง เพื่อลดจำนวนการทดลองและประหยัดค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการอีกด้วย

กระบวนการปรับสภาพหน่อไม้และไม้ไผ่ด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจางโดยมีการปรับสภาพที่สภาวะแตกต่างกันทั้งความเข้มข้นกรดและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ส่วนอุณหภูมิจะกำหนดที่ 140 °C ซึ่งทั้งนี้จะวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของหน่อไม้และไม้ไผ่ก่อน เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลของปริมาณน้ำตาลที่ได้หลังจากกระบวนการปรับสภาพด้วยกรดเจือจางและกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ ว่าทั้ง 2 กระบวนการมีผลต่อการสลายหรือแตกตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน มากน้อยเพียงใด ซึ่งขั้นตอนการเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวทำโดยการปรับสภาพด้วยการใช้กรดซัลฟิวริกเจือจางและปรับสภาพให้เหมาะสมเพื่อที่เอนไซม์จะสามารถทำปฏิกิริยาย่อยสลายได้ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่ได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์เทคนิคโครมาโทกราฟีสมรรถนะชั้นสูงและเปรียบเทียบผลผลิตที่ได้ของการปรับสภาพและการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ของหน่อไม้และไม้ไผ่ที่สภาวะแตกต่างกันกับงานวิจัยที่ศึกษาการแปรสภาพให้เป็นน้ำตาลของวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสชนิดอื่นที่สภาวะใกล้เคียงกัน

4.1 ผลขององค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

จากการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบด้วยวิธีการทางเคมีทั้งหมดของหน่อไม้และไม้ไผ่ พบว่าหน่อไม้และไม้ไผ่มีปริมาณองค์ประกอบทางเคมีที่พบมากที่สุดคือเซลลูโลส (กลูแคน)

รองลงมาเป็นเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ตามลำดับ วัตถุดิบที่มีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุดคือ หน่อไม้ 61.2 % รองลงมาคือไม้ไผ่อ่อน 45.1 % และไม้ไผ่แก่ 41.4 % ตามลำดับ ปริมาณลิกนินที่พบมากที่สุดคือไม้ไผ่แก่ 31.9 % ไม้ไผ่อ่อน 28.1 % และหน่อไม้ 21.1 % ตามลำดับ ในส่วนของเฮมิเซลลูโลสที่มีมากที่สุดคือไซแลน โดยที่ปริมาณไซแลนของหน่อไม้เท่ากับ 15.4 % ไม้ไผ่อ่อนเท่ากับ 23.8 % และไม้ไผ่แก่เท่ากับ 22.6 % ตามลำดับ แสดงดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของหน่อไม้และไม้ไผ่

องค์ประกอบทางเคมี	เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อน้ำหนักเปียก (wt%)		
	หน่อไม้	ไม้ไผ่อ่อน	ไม้ไผ่แก่
เซลลูโลส-กลูแคน	61.2	45.1	41.4
เฮมิเซลลูโลส	18.2	26.8	25.5
-ไซแลน	15.4	23.8	22.6
-แมนแนน	0.6	0.6	0.6
-อะราบิแนน	1.1	1.2	1.1
-กาแลกแตน	1.1	1.2	1.2
ขี้เถ้า	0.7	1.1	1.2
ลิกนิน	21.1	28.1	31.9

การที่วัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสมีส่วนประกอบของเซลลูโลสมากที่สุด จึงนับว่ามีผลดีต่อการปรับสภาพ เนื่องจากส่วนของน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบหลักของเซลลูโลสและมีศักยภาพสำคัญในการผลิตเป็นเอทานอลได้ องค์ประกอบที่มีปริมาณสูงรองลงมาคือลิกนินและเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีน้ำตาลไซโลสที่สามารถแปรสภาพเป็นเอทานอลได้จะอยู่ในส่วนของเฮมิเซลลูโลส ซึ่งน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดจะขึ้นอยู่กับชนิดของพืชนั้นๆ ด้วย ได้แก่ อะราบิแนน กาแลกแตน แมนแนนและไซแลนที่เป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในเฮมิเซลลูโลส ไม้ไผ่เป็นวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสที่มีน้ำตาลไซโลสเป็นองค์ประกอบหลักในเฮมิเซลลูโลส จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการมีองค์ประกอบของลิกนินในปริมาณที่สูงพบว่าจะมีผลทำให้เกิดปริมาณน้ำตาลที่น้อยโดยเฉพาะขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มระดับการปรับสภาพที่รุนแรงมากขึ้น เพื่อทำลายโครงสร้างที่มีความแข็งแรงของลิกนิน แต่ทั้งนี้การ

เพิ่มระดับความรุนแรงในการปรับสภาพที่มากเกินไปอาจจะส่งผลเสียต่อองค์ประกอบอื่นในโครงสร้างของสารตั้งต้นได้ ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณน้ำตาลบางส่วนได้เช่นเดียวกัน

4.2 ผลการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยกรดเจือจาง

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการปรับสภาพที่สภาวะต่างๆ ทั้งความเข้มข้นกรดและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ โดยใช้การวิเคราะห์ผลจากการออกแบบส่วนประสมกลาง และจากการศึกษาทำให้ทราบถึงปัจจัยการส่งผลต่ออัตราการแปรสภาพเป็นน้ำตาลทั้งหน่อไม้และไม้ไผ่ คือ วัตถุดิบสารตั้งต้นที่สภาวะเวลาเท่ากัน ความเข้มข้นมากจะได้ปริมาณผลผลิตน้ำตาลที่มากกว่า เช่น ไม้ไผ่แก่ที่ปรับสภาพที่เวลา 60 นาที ใช้ความเข้มข้นกรดระหว่าง 0.6 %w/w กับ 1.4 %w/w พบว่าความเข้มข้นกรดที่ 0.6 %w/w มีค่าเท่ากับ 9.84 mg/ml และที่ความเข้มข้นกรด 1.4 %w/w มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 13.94 mg/ml นอกจากนี้ที่สภาวะความเข้มข้นเดียวกัน เวลาที่มากก็ได้ผลที่มากขึ้นเช่นเดียวกัน เช่น ไม้ไผ่แก่ที่ความเข้มข้นของกรด 1.0 %w/w ปรับสภาพที่เวลา 45 นาที กับ 90 นาที พบว่าที่เวลา 45 นาที มีค่าเท่ากับ 10.87 mg/ml กับที่เวลา 90 นาที มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 17.72 mg/ml แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นกรดและเวลามีความสัมพันธ์กัน แต่ทั้งนี้หากเพิ่มความเข้มข้นของกรดที่มากขึ้นไปอีก การเพิ่มความเข้มข้นของกรดที่มากเกินไปที่เวลาใดเวลาหนึ่งจะทำให้ได้ปริมาณผลผลิตที่ลดลง เพราะว่ากรดเจือจางสามารถทำลายโครงสร้างของวัตถุดิบได้สูงสุดที่สภาวะนั้น การเพิ่มความเข้มข้นของกรดจึงไม่เป็นผลและอาจจะทำให้ไปทำลายน้ำตาลบางส่วนที่อยู่ภายในโครงสร้างได้ ทำให้สูญเสียน้ำตาลบางส่วนไปด้วย

4.2.1 วิเคราะห์ผลของน้ำตาลหลังการปรับสภาพของหน่อไม้

การวิเคราะห์ผลของปริมาณน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลไซโลสจากการออกแบบส่วนประสมกลางของหน่อไม้ จากเงื่อนไขการปรับสภาพที่ความเข้มข้นกรดช่วง 0.4-1.6 %w/w ที่เวลาการปรับสภาพ 45-135 นาที และกำหนดอุณหภูมิคงที่ 140 °C ดังนั้นปัจจัยที่เป็นตัวแปรอิสระมี 2 ปัจจัยคือความเข้มข้นกรดและเวลาในการใช้ในการปรับสภาพ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ แสดงดังตาราง 4.2

ตาราง 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำตาลกลูโคสของหน่อไม้

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	235.913	235.913	47.183	20.25	0.000
Linear	2	129.932	129.932	64.966	27.88	0.000
Square	2	102.482	102.482	51.241	21.99	0.000
Interaction	1	3.499	3.499	3.499	1.50	0.230
Residual Error	30	69.916	69.916	2.331		
Lack-of-Fit	3	13.215	13.215	4.405	2.10	0.124
Pure Error	27	56.702	56.702	2.100		
Total	35	305.829				

การวิเคราะห์ความแปรปรวนจากตาราง 4.2 ได้แสดงค่าต่างๆที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานดังนี้

ตรวจสอบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่

H_0 : All $\beta_i = 0$

H_1 : At least one $\beta_i \neq 0$

ได้ค่าสถิติ F = 20.25 และ p = 0.000 < 0.05 นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์ทุกตัวไม่เท่ากับศูนย์

ตรวจสอบว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล (lack of fit) หรือไม่

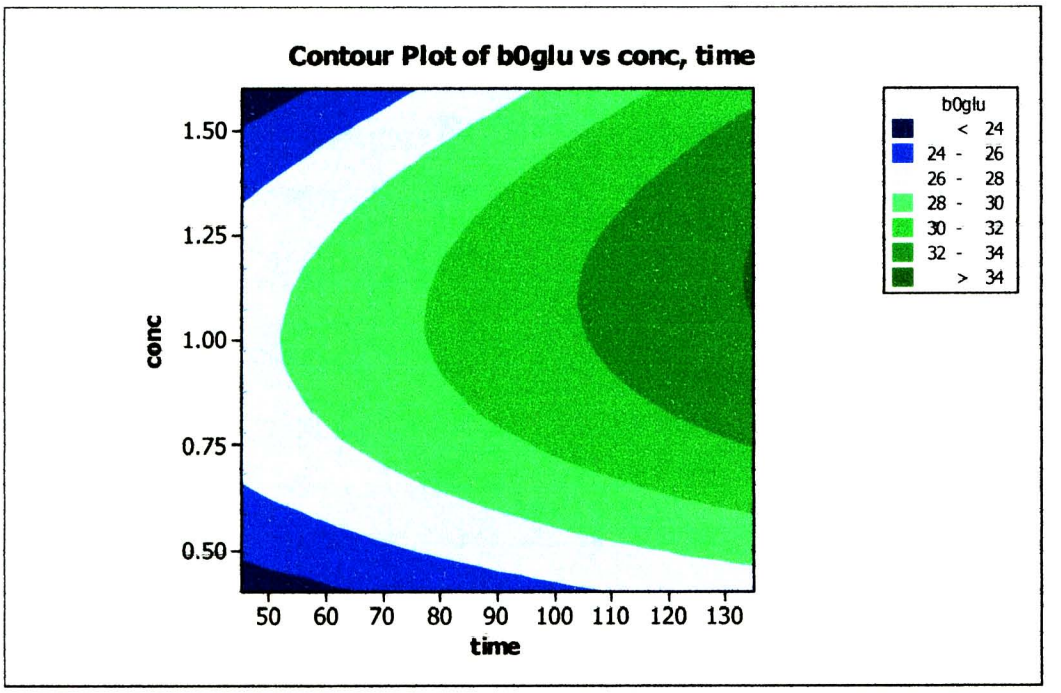
H_0 : ตัวแบบมีความเหมาะสมกับข้อมูล

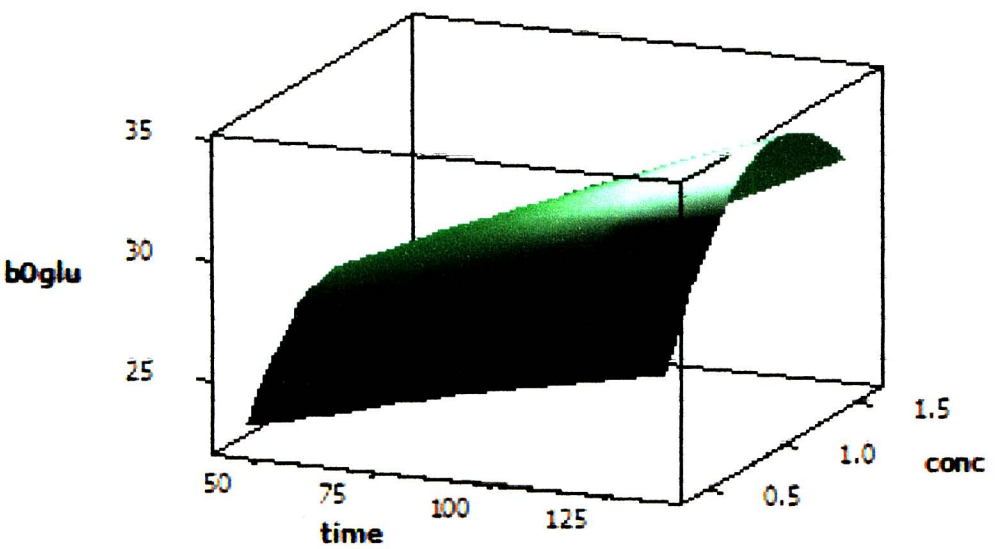
H_1 : ตัวแบบไม่เหมาะสมกับข้อมูล

ค่าสถิติ F = 2.10 และค่า p = 0.124 > 0.05 สามารถกล่าวได้ว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสม ดังนั้นสมการพยากรณ์ที่ได้คือ

$$\hat{y} = 30.8936 + 2.1367x_1 + 0.7280x_2 + 0.54x_1x_2 - 0.1215x_1^2 - 2.08x_2^2$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าของ y มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าตัวแปรอิสระทั้งสองเพิ่มขึ้น แต่พิจารณาเฉพาะค่าของตัวแปรตอบสนองที่อยู่ในขอบเขตของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจากกราฟเส้นโครงร่าง (contour plot) จะเห็นว่า ระดับของปัจจัยที่ให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากที่สุดคือ 34.50 mg/ml ที่สภาวะความเข้มข้นกรด 1.0 %w/w และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 135 นาที แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปัจจัยทั้งความเข้มข้นกรดและเวลาแสดงดังรูป 4.1 (ก)





รูป 4.1 (ก) ปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังการปรับสภาพด้วยกรดเจือจางของหน่อไม้

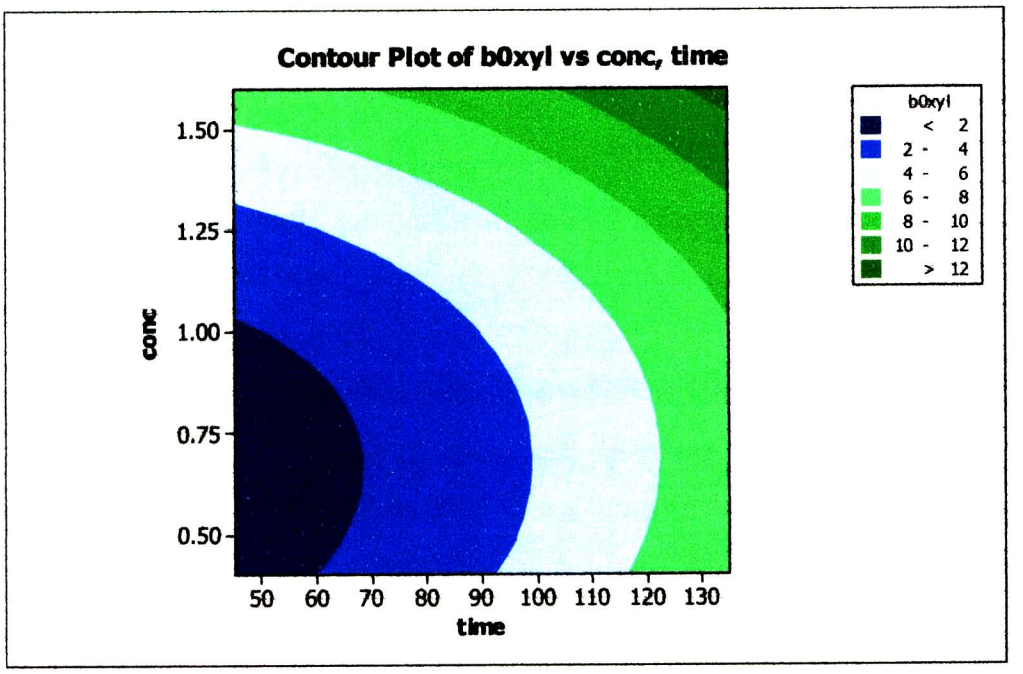
ตาราง 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำตาลไซโลสของหน่อไม้

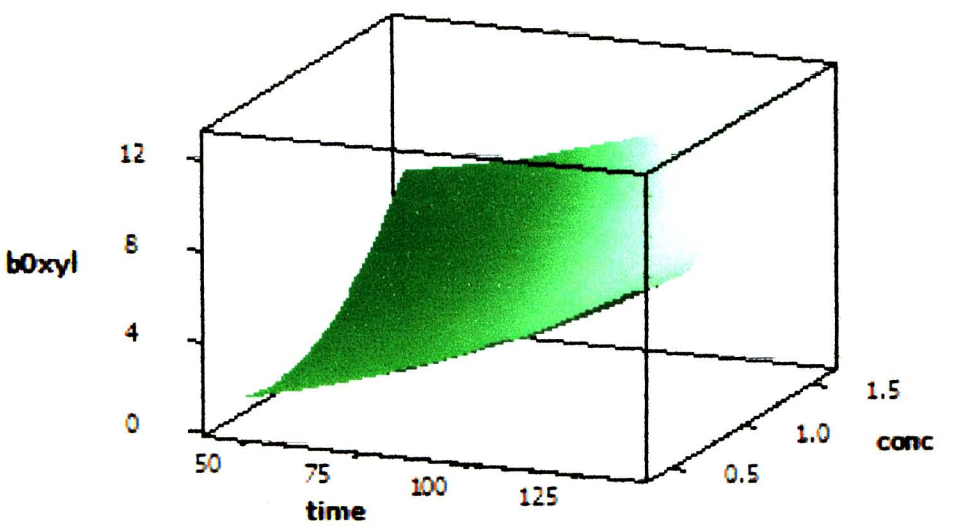
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	208.697	208.697	41.7394	121.35	0.000
Linear	2	182.294	182.293	91.1467	264.99	0.000
Square	2	26.306	26.306	13.1531	38.24	0.000
Interaction	1	0.097	0.097	0.0972	0.28	0.599
Residual Error	30	10.319	10.319	0.3440		
Lack-of-Fit	3	1.658	1.658	0.5526	1.72	0.186
Pure Error	27	8.661	8.661	0.3208		
Total	35	219.016				

จากตาราง 4.3 ได้ค่าสถิติ F = 1.72 และค่า p = 0.186 > 0.05 สามารถกล่าวได้ว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสม ดังนั้นสมการพยากรณ์ที่ได้คือ

$$\hat{y} = 4.02942 + 2.01941x_1 + 1.75235x_2 - 0.09x_1x_2 + 0.35745x_1^2 + 1.07x_2^2$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าของ y มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าตัวแปรอิสระทั้งสองเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และพิจารณาเฉพาะค่าของตัวแปรตอบสนองที่อยู่ในขอบเขตของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจากกราฟเส้นโครงร่าง (contour plot) จะเห็นว่า ระดับของปัจจัยที่ให้ปริมาณน้ำตาลไซโลสมากที่สุดคือ 9.42 mg/ml ที่สภาวะความเข้มข้นกรด 1.6 %w/w และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 90 นาที แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปัจจัยทั้งความเข้มข้นกรดและเวลาแสดงดังรูป 4.1 (ข)





รูป 4.1 (ข) ปริมาณน้ำตาลไซโลสหลังการปรับสภาพด้วยกรดเจือจางของหน่อไม้

การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการปรับสภาพ

- ความเข้มข้นกรด

การเพิ่มความเข้มข้นกรด พบว่าปริมาณการสลายเซลลูโลสมีค่าสูง ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น แสดงว่ากรดเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนที่เป็นเซลลูโลสในหน่อไม้เกิดการแตกตัวเป็นกลูโคสมากขึ้น เช่น ที่สภาวะเวลาเดียวกัน 120 นาที ความเข้มข้นกรด 0.6 % w/w และ 1.4 %w/w พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นจาก 29.33 mg/ml เป็น 31.51 mg/ml แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความเข้มข้นของกรดที่มากเกินไป ปริมาณน้ำตาลที่ได้ก็มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน เช่น ที่สภาวะเวลาเดียวกัน 90 นาที ความเข้มข้นกรด 1.0 %w/w และ 1.6 %w/w พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสลดลงจาก 31.14 mg/ml เป็น 27.30 mg/ml แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นกรดดังกล่าวไม่มีผลต่อการสลายเซลลูโลสต่อไป เนื่องจากโครงสร้างของเซลลูโลสเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกทำให้ยากต่อการเข้าไปทำลายพันธะภายใน ซึ่งความเข้มข้นของกรดที่ใช้ที่ปริมาณพอดีเท่านั้นที่จะสามารถทำลายโครงสร้างของเซลลูโลสได้ และในอีกทางหนึ่งจะทำให้เกิดการทำลายน้ำตาลบางส่วนในเซลลูโลสอีกด้วย ดังนั้นการปรับสภาพที่มีระดับความรุนแรงที่เหมาะสมกับวัตถุดิบดังกล่าวจึงจะส่งผลดีต่ออัตราการเกิดปริมาณน้ำตาลได้

- เวลา

เวลาในการปรับสภาพเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ ซึ่งเวลาจะมีผลต่อดีกับการทำงานของกรดที่เข้าไปทำลายโครงสร้างเซลลูโลสของหน่อไม้ กลายเป็นน้ำตาลกลูโคสที่เพิ่มมากขึ้น กล่าวคือเมื่อให้เวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นทำให้กรดมีเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการสลายเซลลูโลสมากขึ้นด้วย ถึงแม้ว่าเซลลูโลสจะมีความเป็นผลึกสูงก็ตาม เช่น ที่ความเข้มข้นกรดเดียวกัน 0.6 %w/w เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 60 นาที และ 120 นาที พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 27.52 mg/ml เป็น 29.33 mg/ml

4.2.2 วิเคราะห์ผลของน้ำตาลหลังการปรับสภาพของไม้ไผ่อ่อน

การวิเคราะห์ผลของปริมาณน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลไซโลสจากการออกแบบส่วนประสมกลางของไม้ไผ่อ่อน จากเงื่อนไขการปรับสภาพที่ความเข้มข้นกรดช่วง 0.4-1.6 %w/w ที่เวลาการปรับสภาพ 45-135 นาที และกำหนดอุณหภูมิคงที่ 140 °C ดังนั้นปัจจัยที่เป็นตัวแปรอิสระมี 2 ปัจจัยคือความเข้มข้นกรดและเวลาในการใช้ในการปรับสภาพ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ แสดงดังตาราง 4.4

ตาราง 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำตาลกลูโคสของไม้ไผ่อ่อน

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	295.185	295.185	59.037	76.37	0.000
Linear	2	261.366	261.366	130.683	169.05	0.000
Square	2	6.094	6.094	3.047	3.94	0.030
Interaction	1	27.725	27.725	27.725	35.86	0.000
Residual Error	30	23.192	23.192	0.773		
Lack-of-Fit	3	3.928	3.928	1.309	1.84	0.165
Pure Error	27	19.264	19.264	0.713		
Total	35	318.376				

การวิเคราะห์ความแปรปรวนตาราง 4.4 แสดงค่าต่างๆที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานดังนี้

ตรวจสอบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่

H_0 : All $\beta_i = 0$

H_1 : At least one $\beta_i \neq 0$

ได้ค่าสถิติ F = 76.37 และ p = 0.000 < 0.05 นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์ทุกตัวไม่เท่ากับศูนย์

ตรวจสอบว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล (lack of fit) หรือไม่

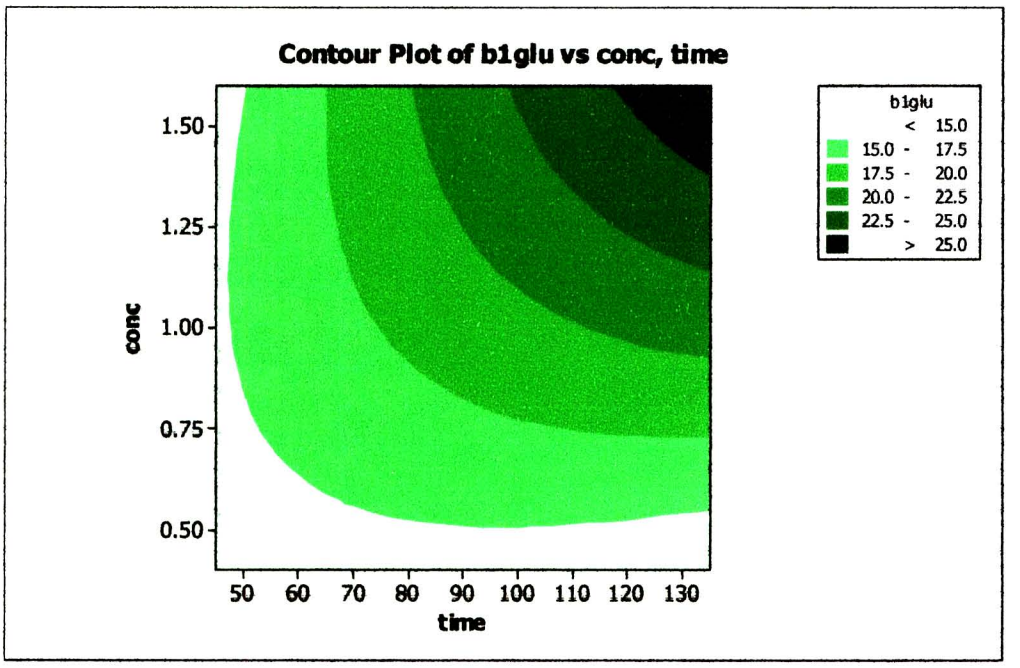
H_0 : ตัวแบบมีความเหมาะสมกับข้อมูล

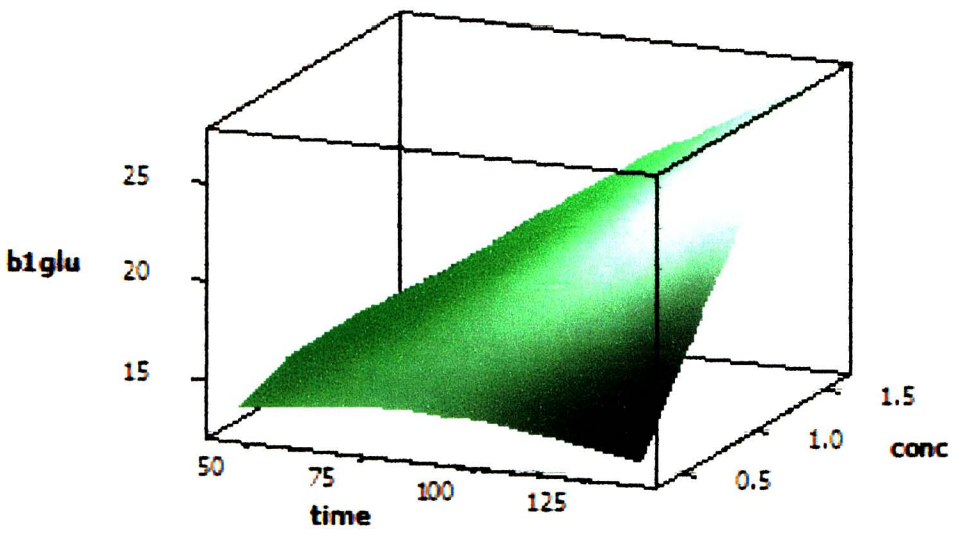
H_1 : ตัวแบบไม่เหมาะสมกับข้อมูล

ได้ค่าสถิติ F = 1.84 และค่า p = 0.165 > 0.05 สามารถกล่าวได้ว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสม ดังนั้นสมการพยากรณ์ที่ได้คือ

$$\hat{y} = 18.6518 + 2.06x_1 + 2.45x_2 + 1.52x_1x_2 - 0.3825x_1^2 - 0.4322x_2^2$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าของ y มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าตัวแปรอิสระทั้งสองเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และพิจารณาเฉพาะค่าของตัวแปรตอบสนองที่อยู่ในขอบเขตของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจากกราฟเส้นโครงร่าง (contour plot) จะเห็นว่า ระดับของปัจจัยที่ให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากที่สุดคือ 25.83 mg/ml ที่สภาวะความเข้มข้นกรด 1.4 %w/w และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 120 นาที แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปัจจัยทั้งความเข้มข้นกรดและเวลาแสดงดังรูป 4.2 (ก)





รูป 4.2 (ก) ปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังการปรับสภาพด้วยกรดเจือจางของไม้ไผ่อ่อน

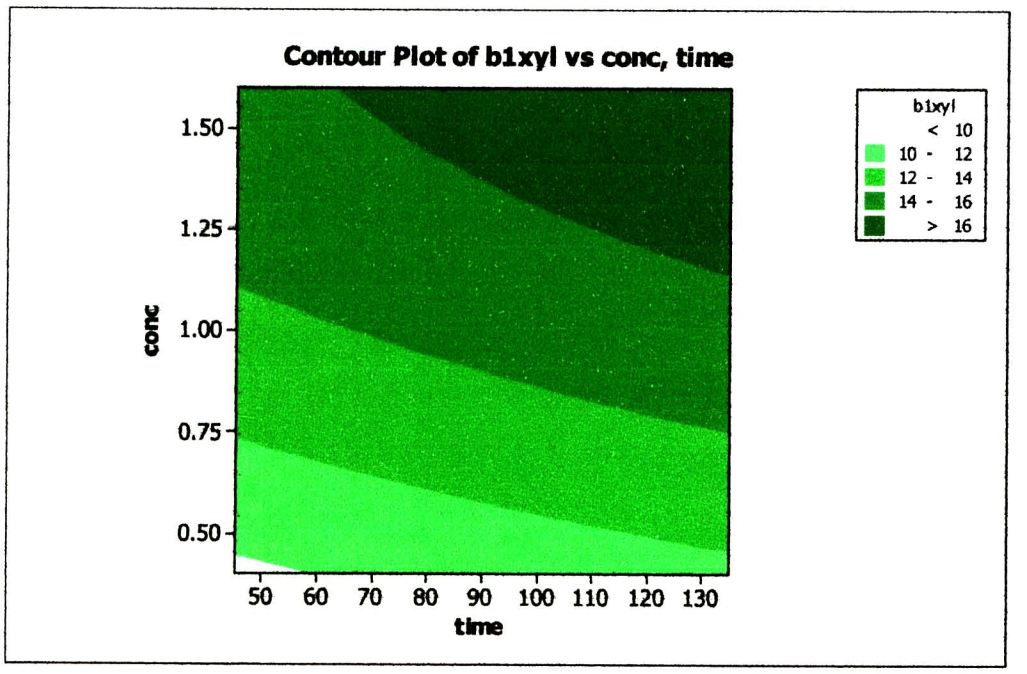
ตาราง 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำตาลไซโลสของไม้ไผ่อ่อน

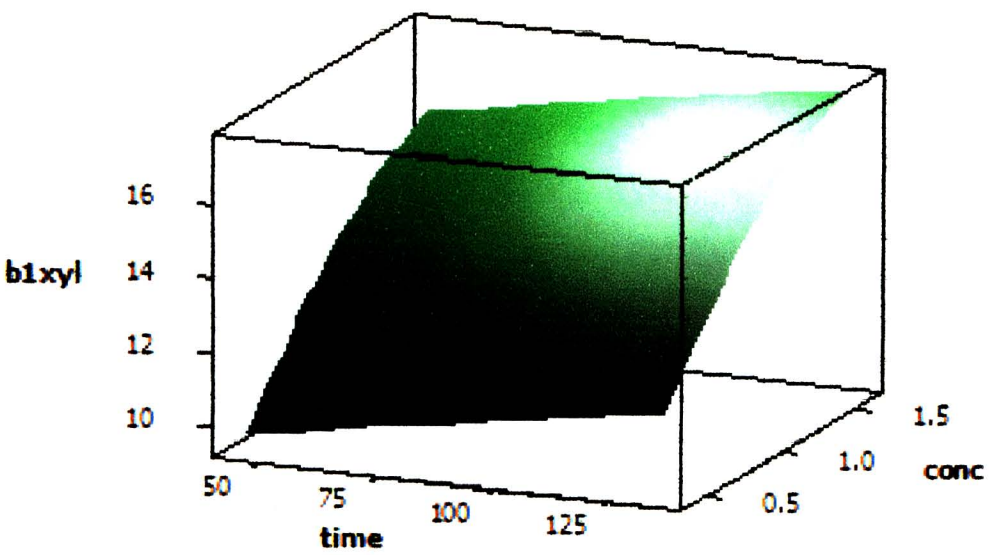
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	112.395	112.395	22.4789	23.40	0.000
Linear	2	108.839	108.839	54.4196	56.64	0.000
Square	2	3.555	3.555	1.7774	1.85	0.175
Interaction	1	0.000	0.000	0.0004	0.00	0.984
Residual Error	30	28.824	28.824	0.9608		
Lack-of-Fit	3	2.962	2.962	0.9873	1.03	0.395
Pure Error	27	25.862	25.862	0.9579		
Total	35	141.219				

จากตาราง 4.5 ได้ค่าสถิติ F = 1.03 และค่า p = 0.395 > 0.05 สามารถกล่าวได้ว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมดังนั้นสมการพยากรณ์ที่ได้คือ

$$\hat{y} = 14.0571 + 0.6267x_1 + 1.9686x_2 - 0.0058x_1x_2 - 0.0356x_1^2 - 0.3897x_2^2$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าของ y มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าตัวแปรอิสระทั้งสองเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และพิจารณาเฉพาะค่าของตัวแปรตอบสนองที่อยู่ในขอบเขตของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจากกราฟเส้นโครงร่าง (contour plot) จะเห็นว่า ระดับของปัจจัยที่ให้ปริมาณน้ำตาลไซโลสมากที่สุดคือ 16.91 mg/ml ที่สภาวะความเข้มข้นกรด 1.6 %w/w และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 90 นาที แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปัจจัยทั้งความเข้มข้นกรดและเวลาแสดงดังรูป 4.2 (ข)





รูป 4.2 (ข) ปริมาณน้ำตาลไซโลสหลังการปรับสภาพด้วยกรดเจือจางของไม้ไผ่อ่อน

การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการปรับสภาพ

- ความเข้มข้นกรด

การเพิ่มความเข้มข้นกรด พบว่าปริมาณการสลายเซลลูโลสมีค่าสูงขึ้น กล่าวคือน้ำตาลกลูโคสถูกสลายตัวได้มากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นกรดและเวลาที่ใช้ ดังจะเห็นได้จากเมื่อทำการปรับสภาพที่สภาวะเวลาเดียวกัน 120 นาที ความเข้มข้นกรด 0.6 % w/w และ 1.4 %w/w พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นจาก 16.25 mg/ml เป็น 25.83 mg/ml และสภาวะนี้เป็นสภาวะที่ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากที่สุด และในส่วนของปริมาณน้ำตาลที่ลดลงในสภาวะความเข้มข้นกรดที่เพิ่มขึ้น 1.6 %w/w เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 90 นาที พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสมีค่าลดลงจาก 21.24 mg/ml

- เวลา

เวลาการปรับสภาพที่ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสภายใต้สภาวะเดียวกัน พบว่าที่เวลามากขึ้นค่าการสลายตัวของเซลลูโลสจะมีค่ามากและมีแนวโน้มในการสลายตัวเพิ่มขึ้น คือการปรับสภาพในเวลาระหว่าง 45-120 นาที และความเข้มข้นกรดระหว่าง 0.4-1.4 %w/w ได้ปริมาณกลูโคสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 15.24-25.83 mg/ml แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีเวลาเพิ่มขึ้นการเข้าทำปฏิกิริยาของกรดต่อไม้ไผ่โดยจะเข้าไปสลายในส่วนที่เป็นองค์ประกอบเซลลูโลสจะมีมากขึ้น แสดงว่าที่สภาวะดังกล่าวไม่เกิดการสลายของกลูโคสที่กลายไปเป็นสารยับยั้งต่อการย่อยสลายเซลลูโลส จึงได้ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และในทางตรงกันข้ามที่สภาวะที่เกิดสารยับยั้งที่มีผลทำให้กลูโคสเกิดการสลายเซลลูโลส ประกอบกับการมีเวลาปรับสภาพที่นานมากขึ้น เช่น ที่ความเข้มข้นกรด 1.6 %w/w เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 90 นาที พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสมีค่าลดลง 21.21 mg/ml แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นกรดดังกล่าวเริ่มมีการสลายน้ำตาลบางส่วนของเซลลูโลสออกไป เพราะน้ำตาลที่ได้มีปริมาณลดน้อยลง หากยังมีการใช้เวลาที่นานขึ้นก็ยิ่งจะทำให้ปริมาณน้ำตาลที่ได้มีค่าลดลงไปด้วย

4.2.3 วิเคราะห์ผลของน้ำตาลหลังการปรับสภาพของไม้ไผ่แก่

การวิเคราะห์ผลของปริมาณน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลไซโลสจากการออกแบบส่วนประสมกลางของไม้ไผ่แก่ จากเงื่อนไขการปรับสภาพที่ความเข้มข้นกรดช่วง 0.4-1.6 %w/w ที่เวลาการปรับสภาพ 45-135 นาที และกำหนดอุณหภูมิคงที่ 140 °C ดังนั้นปัจจัยที่เป็นตัวแปรอิสระมี 2 ปัจจัยคือความเข้มข้นกรดและเวลาในการใช้ในการปรับสภาพ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ แสดงดังตาราง 4.6

ตาราง 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำตาลกลูโคสของไม้ไผ่แก่

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	315.680	315.680	63.136	88.84	0.000
Linear	2	246.188	246.188	123.094	173.21	0.000
Square	2	69.138	69.138	34.569	48.64	0.000
Interaction	1	0.354	0.354	0.354	0.50	0.486
Residual Error	30	21.321	21.321	0.711		
Lack-of-Fit	3	4.023	4.023	1.341	2.09	0.125
Pure Error	27	17.298	17.298	0.641		
Total	35	337.000				

การวิเคราะห์ความแปรปรวนตาราง 4.6 แสดงค่าต่างๆที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานดังนี้

ตรวจสอบว่าค่าสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าเป็นศูนย์หรือไม่

H_0 : All $\beta_i = 0$

H_1 : At least one $\beta_i \neq 0$

ได้ค่าสถิติ F = 76.37 และ p = 0.000 < 0.05 นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์ทุกตัวไม่เท่ากับศูนย์

ตรวจสอบว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล (lack of fit) หรือไม่

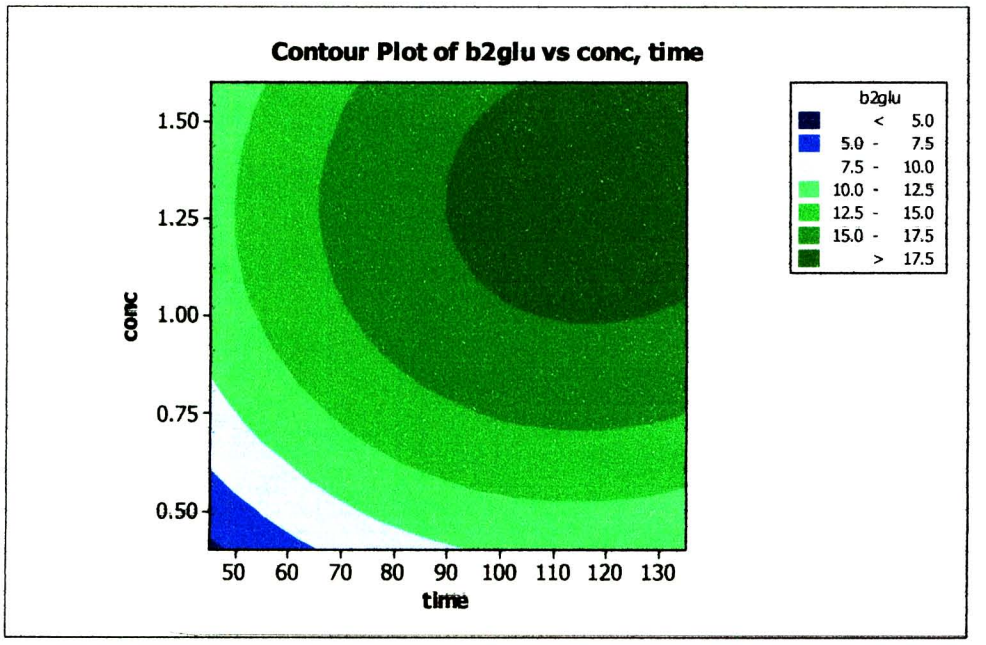
H_0 : ตัวแบบมีความเหมาะสมกับข้อมูล

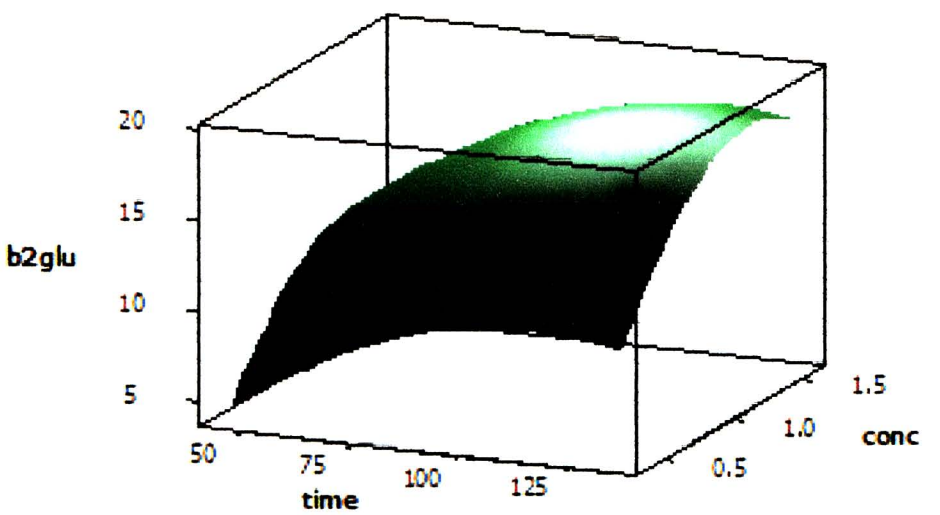
H_1 : ตัวแบบไม่เหมาะสมกับข้อมูล

ได้ค่าสถิติ F = 2.09 และค่า p = 0.125>0.05 สามารถกล่าวได้ว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสม ดังนั้นสมการพยากรณ์ที่ได้คือ

$$\hat{y} = 16.6733 + 2.0778x_1 + 2.31x_2 + 0.1717x_1x_2 - 1.14x_1^2 - 1.5583x_2^2$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าของ y มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าตัวแปรอิสระทั้งสองเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และพิจารณาเฉพาะค่าของตัวแปรตอบสนองที่อยู่ในขอบเขตของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจากกราฟเส้นโครงร่าง (contour plot) จะเห็นว่า ระดับของปัจจัยที่ให้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากที่สุดคือ 17.88 mg/ml ที่สภาวะความเข้มข้นกรด 1.0 %w/w และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 135 นาที แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปัจจัยทั้งความเข้มข้นกรดและเวลาแสดงดังรูป 4.3 (ก)





รูป 4.3 (ก) ปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังการปรับสภาพด้วยกรดเจือจางของไม้ไผ่แก่

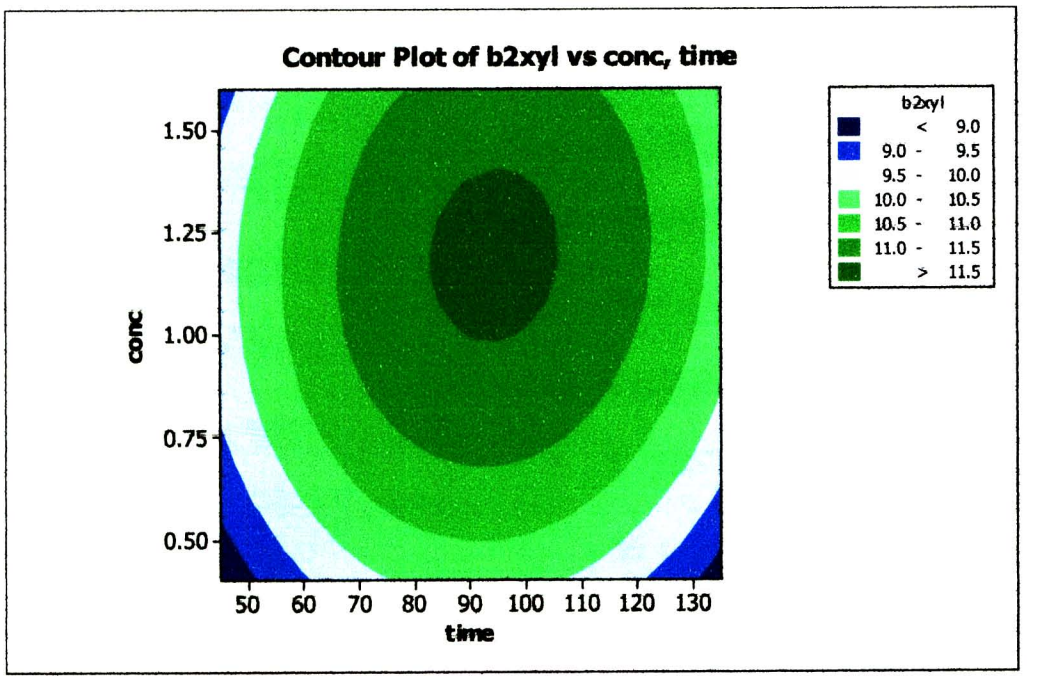
ตาราง 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณน้ำตาลไซโลสของไม้แก่

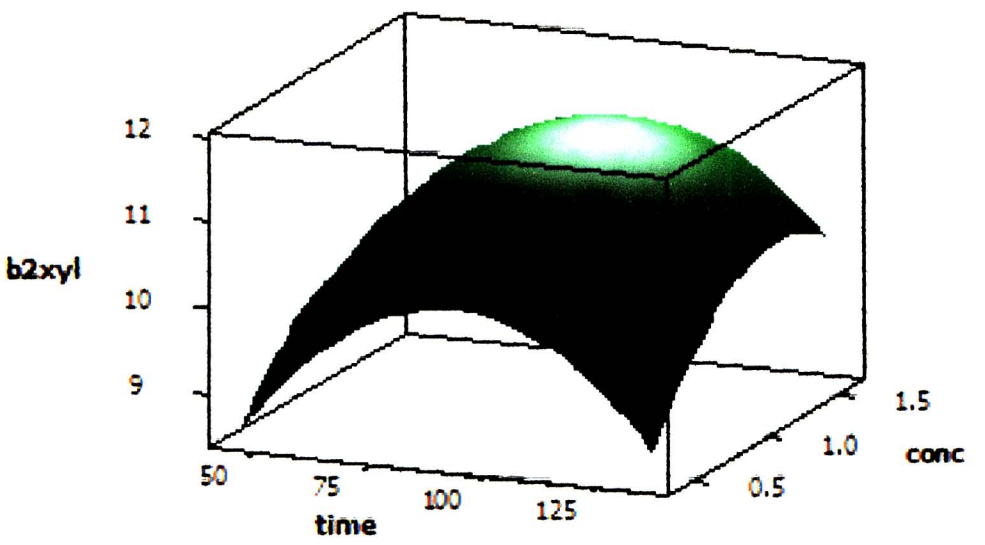
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	15.2333	15.2333	3.04665	18.93	0.000
Linear	2	3.6695	3.6695	1.83474	11.40	0.000
Square	2	11.5077	11.5077	5.75387	35.75	0.000
Interaction	1	0.0560	0.0560	0.05603	0.35	0.560
Residual Error	30	4.8286	4.8286	0.16095		
Lack-of-Fit	3	0.3510	0.3510	0.11701	0.71	0.557
Pure Error	27	4.4776	4.4776	0.16584		
Total	35	20.0619				

จากตาราง 4.7 ได้ค่าสถิติ F = 0.71 และค่า p = 0.557 >0.05 สามารถกล่าวได้ว่าตัวแบบที่ได้มีความเหมาะสมดังนั้นสมการพยากรณ์ที่ได้คือ

$$\hat{y} = 11.5042 + 0.169x_1 + 0.3396x_2 + 0.0683x_1x_2 - 0.6818x_1^2 - 3633x_2^2$$

จากสมการจะเห็นว่าค่าของ y มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าตัวแปรอิสระทั้งสองเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และพิจารณาเฉพาะค่าของตัวแปรตอบสนองที่อยู่ในขอบเขตของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจากกราฟเส้นโครงร่าง (contour plot) จะเห็นว่า ระดับของปัจจัยที่ให้ปริมาณน้ำตาลไซโลสมากที่สุดคือ 11.66 mg/ml ที่สภาวะความเข้มข้นกรด 1.0 %w/w และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 90 นาที แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปัจจัยทั้งความเข้มข้นกรดและเวลาแสดงดังรูป 4.3 (ข)





รูป 4.3 (ข) ปริมาณน้ำตาลไซโลสหลังการปรับสภาพด้วยกรดเจือจางของไม้ไผ่แก่

การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการปรับสภาพ

- ความเข้มข้นกรด

ความเข้มข้นกรดที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เซลลูโลสถูกสลายตัวได้มากขึ้น ส่งผลให้ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากเมื่อทำการปรับสภาพที่สภาวะเวลาเดียวกัน 120 นาที ความเข้มข้นกรด 0.6 % w/w และ 1.4 %w/w พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสเพิ่มขึ้นจาก 9.84 mg/ml เป็น

13.94 mg/ml และพิจารณาในส่วนของการเพิ่มความเข้มข้นของกรดมากขึ้น แต่ส่งผลให้ได้ปริมาณน้ำตาลที่ลดน้อยลง เช่น ที่ความเข้มข้นกรด 1.6 %w/w เวลา 90 นาที พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสลดลง 17.02 mg/ml และทั้งนี้ความเข้มข้นกรดที่ส่งผลทำให้เซลลูโลสถูกสลายตัวของไม้ไผ่แก่มีค่าลดลงกว่าไม้ไผ่อ่อน เนื่องจากไม้ไผ่แก่มีความพรุนมากกว่า สังเกตได้จากเมื่อเติมสารละลายกรดเจือจางผสมกับวัตถุดิบแล้ว พบว่าไม้ไผ่แก่จะมีการลอยตัวอยู่บนสารละลายก่อนจึงจะจมลงไปตกตะตอนอย่างช้าๆ แต่ในส่วนของไม้ไผ่อ่อนจะสามารถรวมกันกับสารละลายได้อย่างรวดเร็ว แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นกรดดังกล่าวมีความรุนแรงจนทำให้เกิดสภาวะความเครียดในกระบวนการ ส่งผลทำให้น้ำตาลกลูโคสเกิดการสลายตัวต่อไปเป็น hydroxyflurfura ซึ่งเป็นสารยับยั้งการสลายเซลลูโลส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วิไลวรรณ ลีนะกุล ที่ศึกษาการปรับสภาพไม้ไผ่ด้วยกรดเจือจางเช่นกัน กล่าวคือการปรับสภาพมากเกินไปหรืออยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมการสลายตัวของกลูโคสจะเกิดเป็นสารพิษขึ้นเพราะเกิดการปรับสภาพที่มีความรุนแรงต่อวัตถุดิบที่มากจนเกินไปนั้นเอง ดังนั้นควรมีการปรับสภาพวัตถุดิบในระดับความรุนแรงที่เหมาะสมต่อวัตถุดิบตั้งต้น

- เวลา

เวลาการปรับสภาพที่มากขึ้นค่าการสลายตัวของเซลลูโลสจะมีค่ามากและมีแนวโน้มในการสลายตัวเพิ่มขึ้น เช่น ที่สภาวะความเข้มข้นกรดเดียวกัน 1.0 %w/w ได้ เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 90 นาที และ 135 นาที พบว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 17.51 mg/ml เป็น 17.88 mg/ml ซึ่งเป็นสภาวะที่ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเวลาในการปรับสภาพทำให้เซลลูโลสมีเวลาในการสลายตัวกลายเป็นน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับไม้ไผ่อ่อน แต่ปริมาณน้ำตาลของไม้ไผ่อ่อนจะได้ค่ามากกว่าไม้ไผ่แก่ เนื่องจากมีปริมาณเซลลูโลสจำนวนมากกว่าไม้ไผ่แก่นั้นเอง

จากการทดลองจึงแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นกรดและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพล้วนมีความสำคัญและส่งผลต่ออัตราการเกิดปริมาณน้ำตาลได้ทั้งสิ้น กล่าวคือความเข้มข้นกรดน้อย แต่หากใช้เวลาที่นานมากขึ้น อาจจะทำให้กรดเจือจางเข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสได้จนถึงสภาวะที่ไม่สามารถทำงานต่อไปได้อีก แต่ปริมาณน้ำตาลที่ได้จะยังคงมีเหลืออยู่ในวัตถุดิบจำนวนมากเมื่อเทียบกับการใช้กรดที่มีความเข้มข้นมากกว่า ข้อดีของการใช้ความเข้มข้นน้อยคือไม่ส่งผลจนทำให้ทำลายโครงสร้างของเซลลูโลสหรือทำลายน้ำตาลบางส่วนของวัตถุดิบได้ แต่ข้อเสียก็คือความเข้มข้นของกรดน้อยและใช้เวลาที่นานเกินไป จะทำสูญเสียพลังงานในกระบวนการปรับสภาพของหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

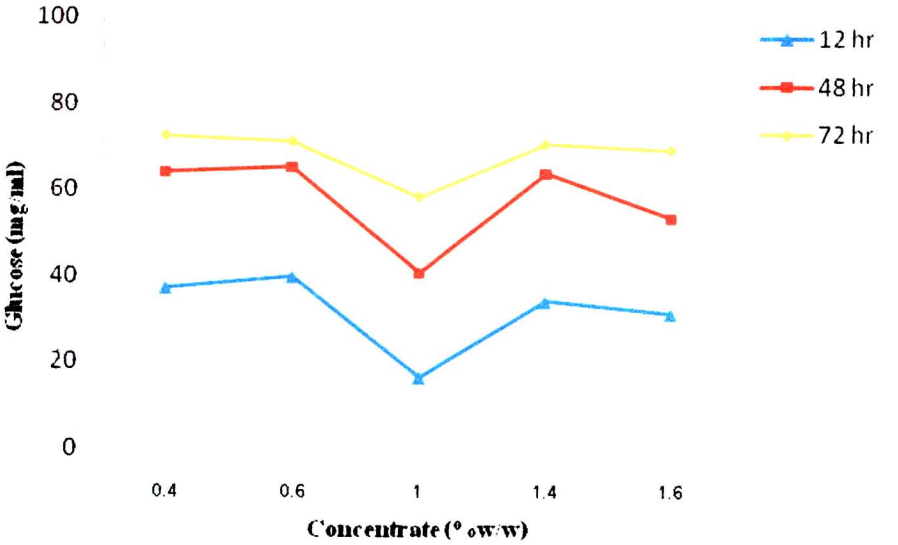
4.3 ผลการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์หลังจากที่ได้ผ่านกระบวนการปรับสภาพที่สภาวะเงื่อนไขต่างๆ ของหน่อไม้และไม้ไผ่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการไฮโดรไลซีสส่วนที่เป็นของแข็งโดยใช้เอนไซม์เซลลูโลสคอมเพล็กซ์ (Celluclast 1.5 L) และมี β-glucosidase (Novozyme 188) เป็นตัวเพิ่มเติมปฏิกิริยาเพื่อช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วยิ่งขึ้น จากการทดลองพบว่าการไฮโดรไลซิสที่เวลา 72 ชั่วโมง ให้ปริมาณน้ำตาลที่มากที่สุด รองลงมาคือเวลา 48 และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ เช่น จากเงื่อนไขการปรับสภาพเดียวกันของไม้ไผ่อ่อนที่ความเข้มข้นกรด 0.6 %w/w และเวลา 60 นาที เมื่อทำการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ที่เวลา 72 ชั่วโมง ได้ปริมาณน้ำตาลเท่ากับ 62.89 mg/ml และเวลา 48 และ 12 ชั่วโมง ได้ปริมาณน้ำตาลเท่ากับ 55.21 mg/ml และ 35.28 mg/ml ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเวลาเป็นปัจจัยสำคัญของการไฮโดรไลซิส กล่าวคือการใช้เวลาไฮโดรไลซิสมากทำให้เอนไซม์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากในโครงสร้างของวัตถุดิบหรือสามารถย่อยสลายได้มากขึ้น

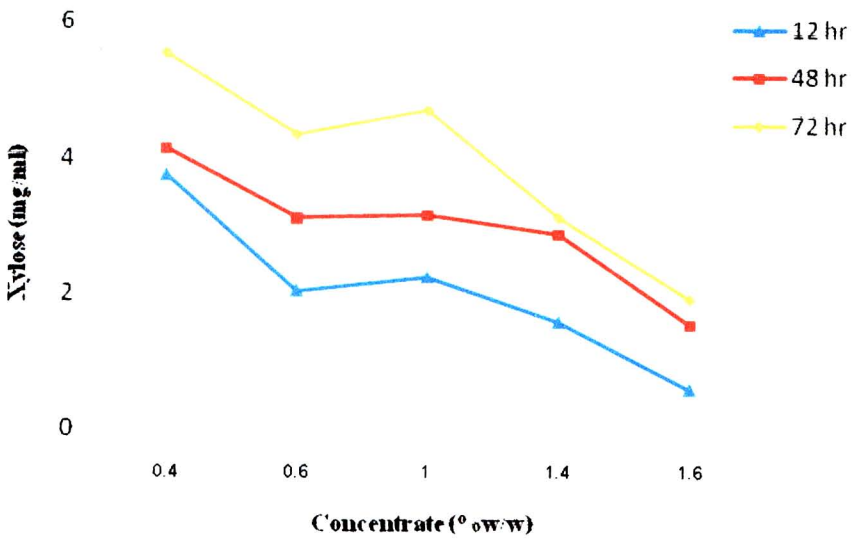
4.3.1 วิเคราะห์ผลของน้ำตาลหลังการไฮโดรไลซิสของหน่อไม้

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลไซโลสของหน่อไม้จากกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ โซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์ pH 4.8 ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที พบว่าได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมากที่สุดคือ 72.40 mg/ml ที่สภาวะความเข้มข้นกรด 0.4 %w/w และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 90 นาที จากกราฟรูป 4.4 (ก) ที่สภาวะความเข้มข้นกรด 0.6 %w/w ที่เวลาของการไฮโดรไลซิส 12 และ 48 ชั่วโมงพบว่าได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่มากกว่าเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งมีความสอดคล้องกับกระบวนการปรับสภาพ เพราะผลจากกระบวนการปรับสภาพได้ปริมาณน้ำตาลที่น้อย แสดงให้เห็นว่าน้ำตาลยังไม่เกิดการแตกตัวออกมาได้ จนกระทั่งผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์จึงสามารถเกิดการสลายเซลลูโลสและแตกตัวกลายเป็นน้ำตาลที่เพิ่มมากขึ้น

ปริมาณน้ำตาลไซโลสได้ปริมาณมากที่สุดคือ 5.54 mg/ml ที่สภาวะความเข้มข้นกรด 0.4 %w/w และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ 90 นาที เช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการปรับสภาพที่ผ่านมา พบว่าน้ำตาลไซโลสมีปริมาณที่ลดลง เนื่องจากว่าเอนไซม์มีผลต่อการทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลูโคส ดังนั้นปริมาณน้ำตาลไซโลสจึงไม่มีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำตาลกลูโคส แต่จะมีค่าลดน้อยลง เพราะว่าจากกระบวนการปรับสภาพได้ถูกกรองออกมาแล้ว เช่น ที่สภาวะความเข้มข้นกรด 1.6 %w/w และเวลา เวลา 90 นาที จากกระบวนการปรับสภาพมีปริมาณน้ำตาลไซโลสมากที่สุดเท่ากับ 9.42 mg/ml เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์จึงได้ปริมาณที่ลดน้อยลงคือ 1.91 mg/ml ความสัมพันธ์ของการเกิดปริมาณน้ำตาลทั้งสองแสดงดังรูป 4.4 (ก) และ 4.4 (ข)



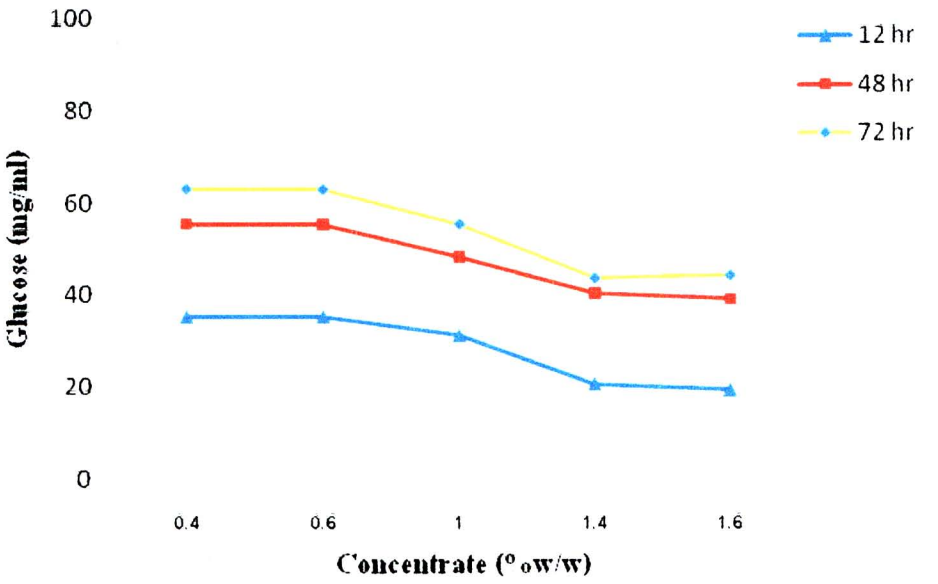
รูป 4.4 (ก) ปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังการไฮโดรไลซิสของหน่อไม้



รูป 4.4 (ข) ปริมาณน้ำตาลไซโลสหลังการไฮโดรไลซิสของหน่อไม้

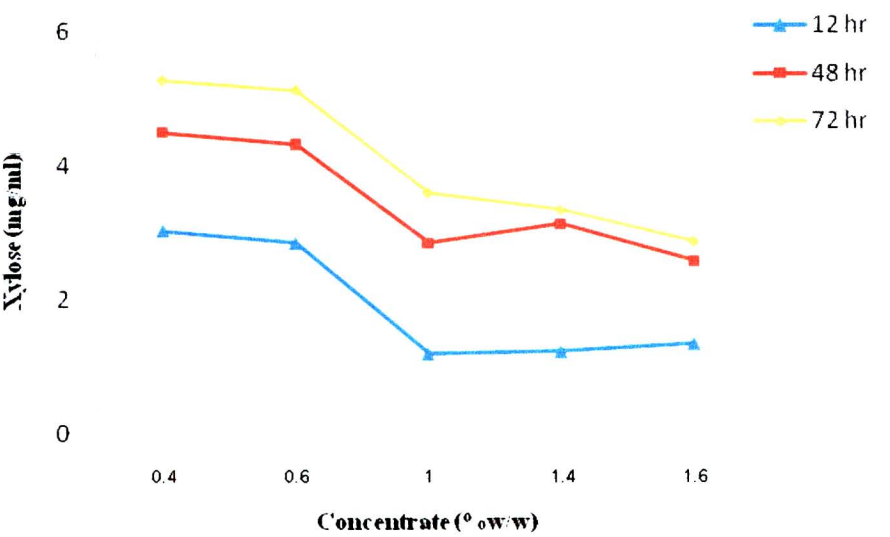
4.3.2 วิเคราะห์ผลของน้ำตาลหลังการไฮโดรไลซิสของไม้ไผ่อ่อน

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลไซโลสของไม้ไผ่อ่อนจากกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ โซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์ pH 4.8 ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที พบว่ามีความสอดคล้องกับกระบวนการปรับสภาพ เพราะผลจากกระบวนการปรับสภาพได้ปริมาณน้ำตาลที่น้อย แสดงให้เห็นว่าน้ำตาลยังไม่เกิดการแตกตัวออกมาได้ จนกระทั่งผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์จึงสามารถเกิดการสลายเซลลูโลสและแตกตัวกลายเป็นน้ำตาลที่เพิ่มมากขึ้น เช่น ที่สภาวะเข้มข้นกรด 0.4 %w/w และเวลา 90 นาที จากกระบวนการปรับสภาพมีปริมาณน้ำตาลกลูโคสน้อยที่สุดเท่ากับ 14.11 mg/ml เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์จึงได้ปริมาณที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 63.01 mg/ml ซึ่งเป็นสภาวะที่ได้ปริมาณน้ำตาลกลูโคสมาก ความสัมพันธ์ของการเกิดปริมาณน้ำตาลแสดงดังรูป 4.5 (ก)



รูป 4.5 (ก) ปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังการไฮโดรไลซิสของไม้ไผ่อ่อน

ปริมาณน้ำตาลไซโลสจากกระบวนการไฮโดรไลซิสพบว่ามีความสอดคล้องกับกระบวนการปรับสภาพเช่นกัน แต่ตรงกันข้ามกับปริมาณของน้ำตาลกลูโคสและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการปรับสภาพที่ผ่านมา พบว่าน้ำตาลไซโลสมีปริมาณที่ลดลง เนื่องจากว่าเอนไซม์มีผลต่อการทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลูโคสเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นปริมาณน้ำตาลไซโลสจึงไม่มีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำตาลกลูโคส แต่จะมีค่าลดน้อยลงเพราะว่าจากกระบวนการปรับสภาพได้ถูกกรองออกมาแล้ว แต่ที่ตรวจพบปริมาณไซโลส อาจเนื่องมาจากการล้างส่วนที่เป็นของแข็งได้ไม่หมดทำให้น้ำตาลไซโลสยังคงค้างอยู่กับส่วนที่เป็นของแข็งที่นำมาทำปฏิกิริยา แต่เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลไซโลสที่ได้ถือว่ามีปริมาณน้อยมาก เช่น ที่สภาวะความเข้มข้นกรด 1.6 %w/w และเวลา เวลา 90 นาที จากกระบวนการปรับสภาพมีปริมาณน้ำตาลไซโลสมากที่สุดเท่ากับ 16.91 mg/ml เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์จึงได้ปริมาณที่ลดน้อยลงคือ 2.86 mg/ml แสดงดังรูป 4.5 (ข)

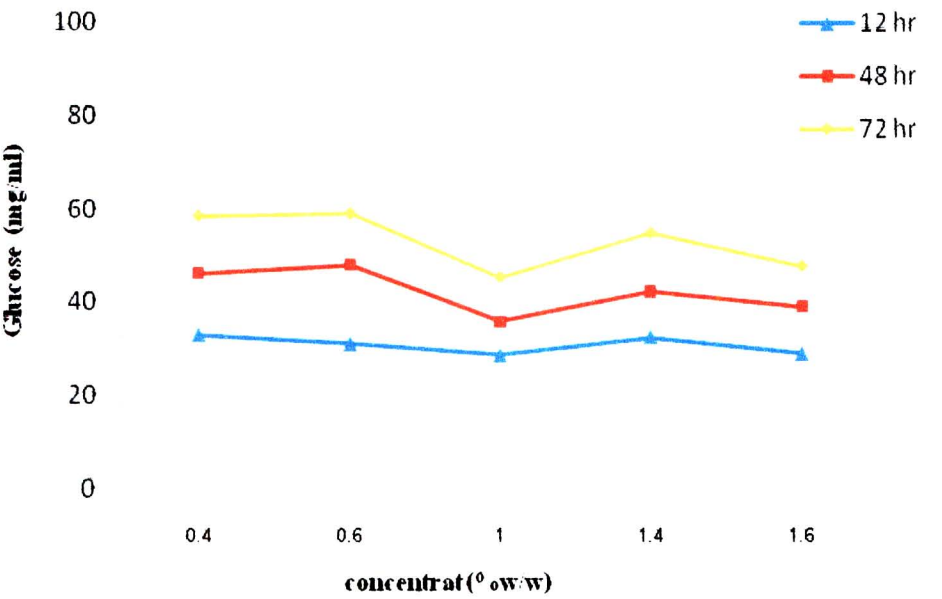


รูป 4.5 (ข) ปริมาณน้ำตาลไซโลสหลังการไฮโดรไลซิสของไม้ไผ่อ่อน

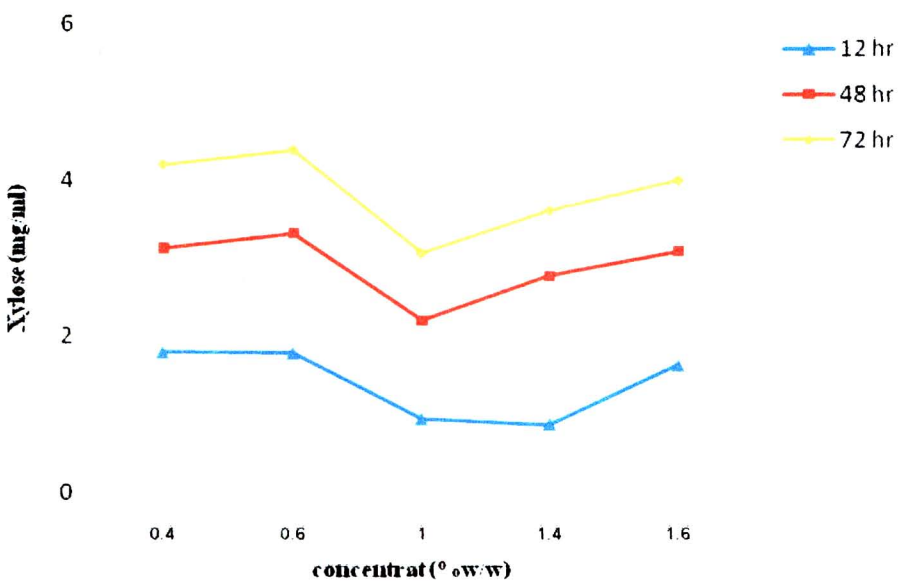
4.2.3 วิเคราะห์ผลของน้ำตาลหลังการไฮโดรไลซิสของไม้ไผ่แก่

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลไซโลสของไม้ไผ่อ่อนจากกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ โซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์ pH 4.8 ที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที พบว่ามีความสอดคล้องกับกระบวนการปรับสภาพ เพราะผลจากกระบวนการปรับสภาพได้ปริมาณน้ำตาลที่น้อย แสดงให้เห็นว่าน้ำตาลยังไม่เกิดการแตกตัวออกมาได้ จนกระทั่งผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์จึงสามารถเกิดการสลายเซลลูโลสและแตกตัวกลายเป็น

น้ำตาลที่เพิ่มมากขึ้น เช่น ที่สภาวะเข้มข้นกรด 0.6 %w/w และเวลา 60 นาที จากกระบวนการปรับสภาพมีปริมาณน้ำตาลกลูโคสน้อยที่สุดเท่ากับ 9.84 mg/ml เมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์จึงได้ปริมาณที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 59.03 mg/ml ซึ่งเป็นสภาวะที่ได้ปริมาณน้ำตาลมากที่สุด ความสัมพันธ์ของการเกิดปริมาณน้ำตาลแสดงดังรูป 4.6 (ก)



รูป 4.6 (ก) ปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังการไฮโดรไลซิสของไม้ไผ่แก่



รูป 4.6 (ข) ปริมาณน้ำตาลกลูโคสหลังการไฮโดรไลซิสของไม้ไผ่แก่

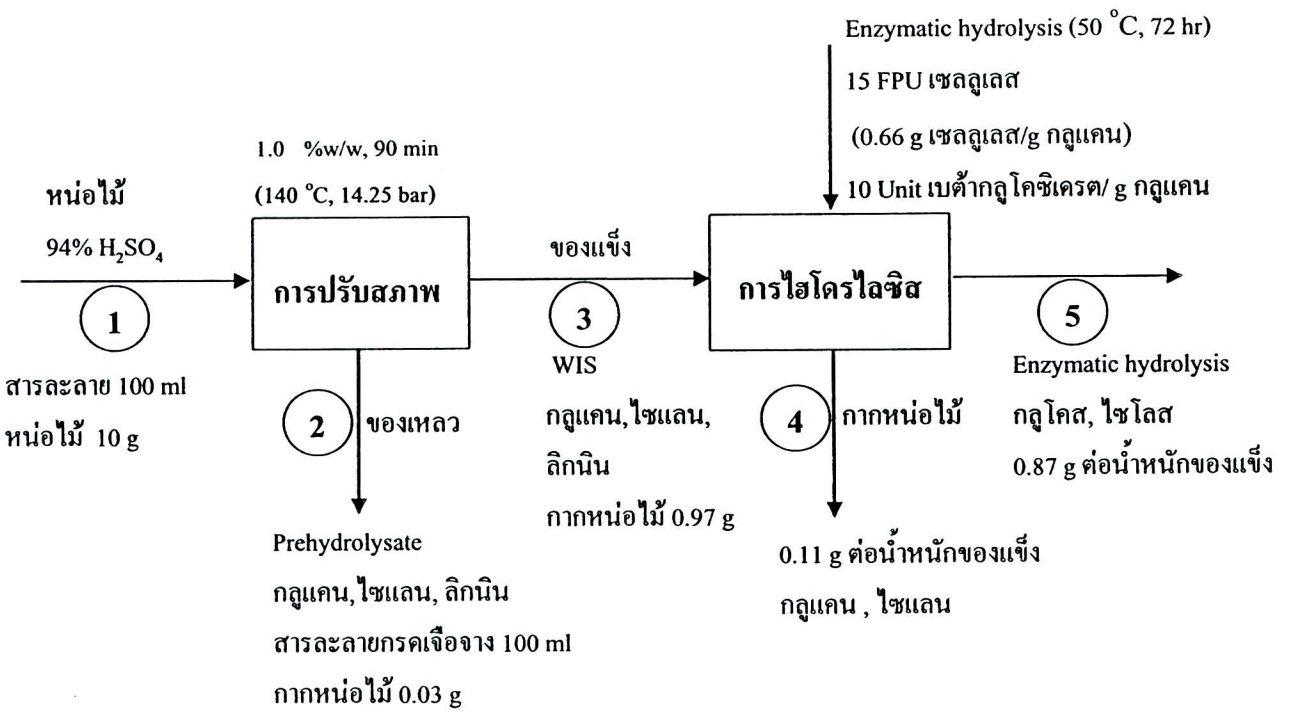
ปริมาณน้ำตาลไซโลส จากกระบวนการไฮโดรไลซิสพบว่ามีความสอดคล้องกับกระบวนการปรับสภาพเช่นกัน แต่ตรงกันข้ามกับปริมาณของน้ำตาลกลูโคสและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการปรับสภาพที่ผ่านมา พบว่าน้ำตาลไซโลสมีปริมาณที่ลดลง เนื่องจากว่าเอนไซม์มีผลต่อการทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลูโคสเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นปริมาณน้ำตาลไซโลสจึงไม่มีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำตาลกลูโคส แต่จะมีค่าลดน้อยลงเพราะว่าจากกระบวนการปรับสภาพได้ถูกกรองออกมาแล้ว แต่ที่ตรวจพบปริมาณไซโลส อาจเนื่องมาจากการล้างส่วนที่เป็นของแข็งได้ไม่หมดทำให้น้ำตาลไซโลสยังคงค้างอยู่กับส่วนที่เป็นของแข็งที่นำมาทำปฏิกิริยา แต่เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลไซโลสที่ได้ถือว่ามีปริมาณน้อยมาก

ผลของปริมาณน้ำตาลที่ได้จากกระบวนการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์ มีความสอดคล้องกับกระบวนการปรับสภาพ Noppadon และคณะ (2009) พบว่าเมื่อเวลาในการไฮโดรไลซิสมากขึ้นประกอบกับความเข้มข้นของเอนไซม์ที่มีปริมาณมากจะสามารถทำให้ย่อยสลายน้ำตาลออกมาได้มากขึ้น shimokhawa และคณะ (2009) พบว่าวัตถุดิบที่มีอายุน้อยจะมีปริมาณเซลลูโลสที่มากกว่าวัตถุดิบที่มีอายุแก่กว่า ทำให้การสลายตัวกลายเป็นน้ำตาลกลูโคสได้มากกว่านั้นเอง

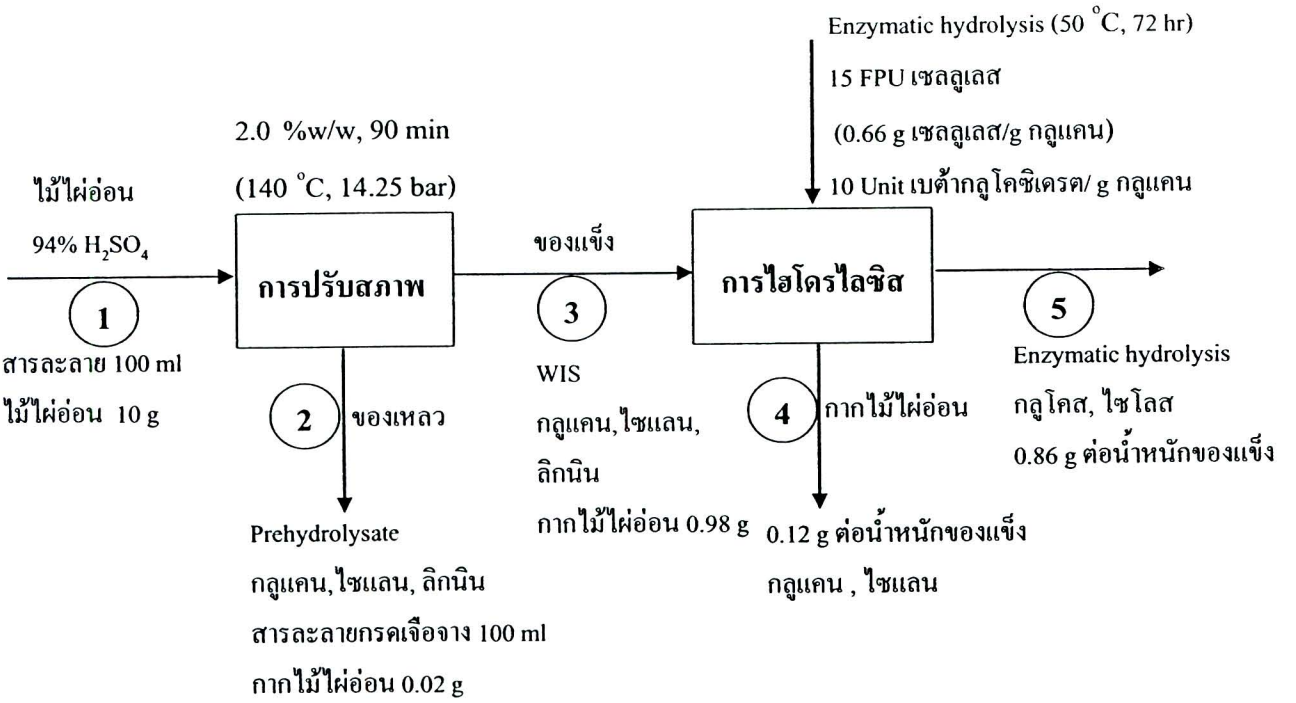
4.5 แผนภูมิของกระบวนการทั้งหมด

การวิเคราะห์พลังงานที่ป้อนเข้าและออกของวัตถุดิบ ยกตัวอย่างการปรับสภาพที่สภาวะความเข้มข้นกรด 1.0 %w/w และเวลา 90 นาที และการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ใช้เวลาที่ 72 ชั่วโมง แสดงดังนี้

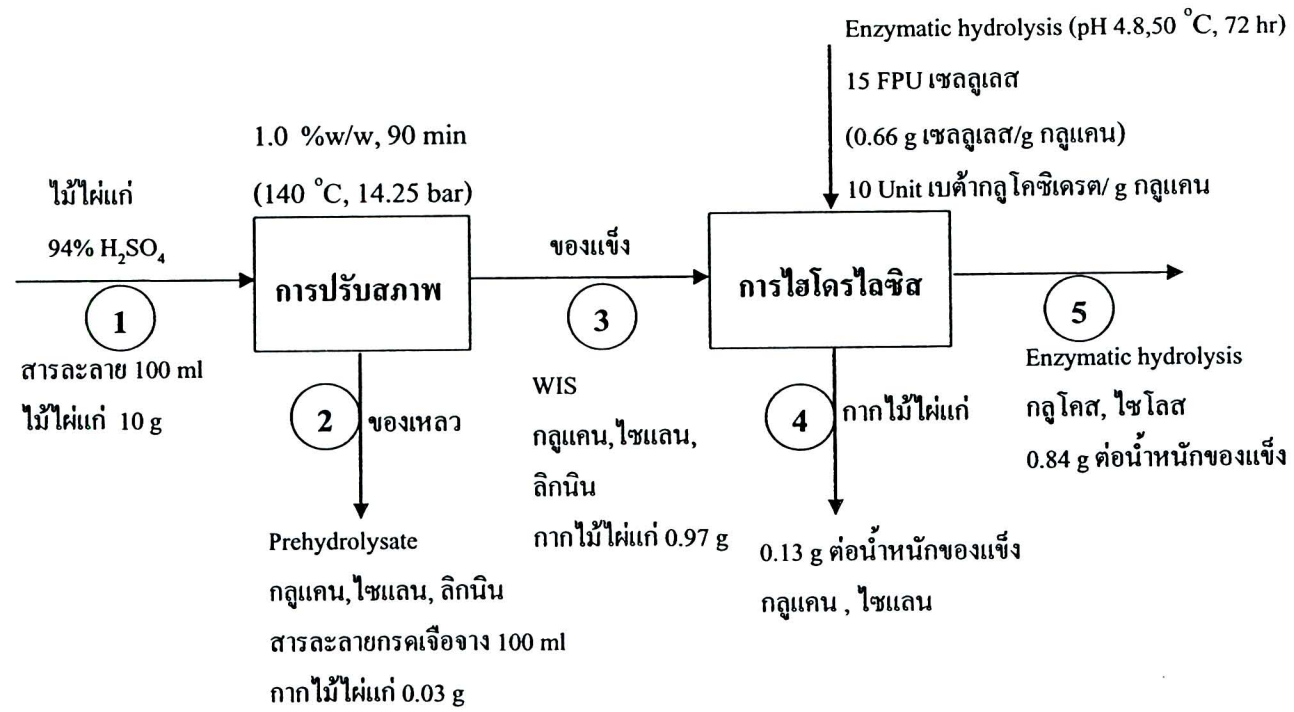
4.5.1 แผนภูมิกระบวนการของหน่อไม้



4.5.2 แผนภูมิกระบวนการของไม้ไผ่อ่อน



4.5.3 แผนภูมิกระบวนการของไม้ไผ่แก่



4.6 เปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลทั้งหมดกับวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสประเภทอื่น

ตาราง 4.8 เปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลที่ได้กับวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสชนิดอื่นที่สภาวะแตกต่างกัน

วัตถุดิบลิกโนเซลลูโลส	สารเคมี	ความเข้มข้นกรด (%w/w)	เวลา (min)	อุณหภูมิ (^{o}C)	ปริมาณน้ำตาลทั้หมด (mg/ml)	อ้างอิง
หน่อไม้	H_2SO_4	0.4-1.6	45-135	140	34.50	This study
ไม้ไผ่อ่อน	H_2SO_4	0.4-1.6	45-135	140	25.83	This study
ไม้ไผ่แก่	H_2SO_4	0.4-1.6	45-135	140	17.88	This study
เศษไม้ไผ่	H_2SO_4	0.6-1.2	30-90	120-140	15.89	วิไลวรรณ (2552)
ต้นมะกอก	H_2SO_4	0.2-1.4	10	170-210	13.6-28.33	Cara และคณะ(2007)
ต้นสน	H_2SO_4	2.21	15-30	180	39.4	Zhu และคณะ (2010)
ต้น cardoon	H_2SO_4	0.1-0.2	60	160-200	25.5-80.2	Ballesterosและคณะ (2008)
ต้นหญ้า Bermuda grass	H_2SO_4	0.6-1.5	30-90	121	19.5-22.9	Sun และคณะ (2005)
ฟางข้าว	H_2SO_4	0.6-1.5	30-90	121	12.5-19.7	Sun และคณะ (2005)
ยูคาลิปตัส	H_2SO_4	0.92-1.84	30	180	34.9	Wang และคณะ (2009)
ซังข้าวโพด	H_2SO_4	0.5-2	100-140	100-120	29.84	Chen และคณะ (2010)
Saline biomass	H_2SO_4	1.4	8	165	36.35	Lloyd และคณะ (2005)