2.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomize Design) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธี analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลอง (Multiple comparison) ด้วยวิธี Ducan T- test ที่ $P < 0.05$ โดยใช้โปรแกรม SPSS

3. ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกและกากมันสำปะหลัง

ลักษณะโดยทั่วไปของเปลือกมันสำปะหลังมีสีน้ำตาล ส่วนกากมันสำปะหลังมีสีขาวเหลืองและมีความละเอียด โดยทั้งเปลือกและกากมันสำปะหลังสามารถจัดเก็บและรักษาได้ง่ายเมื่อทำให้แห้ง จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง พบว่า ในเปลือกและกากมันสำปะหลังมีปริมาณความชื้นอยู่สูงในปริมาณร้อยละ 80 มีปริมาณแป้งอยู่ร้อยละ 28.9 ± 6.44 และ 60.39 ± 6.44 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และมีปริมาณเซลลูโลสอยู่ร้อยละ 35.01 ± 5.99 และ 16.56 ± 0.82 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งค่าที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับการศึกษาของกัลยา อยู่นาน(2546) โดยที่เปลือกและกากมันสำปะหลังมีปริมาณแป้งอยู่ร้อยละ 33.56 ± 2.23 และ 58.02 ± 3.20 โดยน้ำหนักแห้ง และมีปริมาณเซลลูโลสอยู่ร้อยละ 35.86 ± 0.92 และ14.35 ± 2.26โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เปลือกและกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษานี้ยังมีปริมาณแป้งและเซลลูโลสเหลืออยู่ในปริมาณมาก ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้ประโยชน์ โดยการนำแป้งและเซลลูโลสที่เหลือค้างอยู่ในเปลือกและกากมันสำปะหลังซึ่งเป็นแหล่งของน้ำตาลเพื่อใช้ในการผลิตเอทานอลโดยใช้เอนไซม์ ที่สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนแหล่งหนึ่งที่น่าสนใจในปัจจุบันและในสถานการณ์วิกฤตการณ์พลังงานของโลก

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกและกากมันสำปะหลัง

วัตถุดิบ	องค์ประกอบ (% น้ำหนักแห้ง)		ความชื้น (%)
	แป้ง	เซลลูโลส	
กากมันสำปะหลัง	60.39 ± 6.44	16.56 ± 0.82	78.19 ± 0.25
เปลือกมันสำปะหลัง	28.09 ± 6.44	35.01 ± 5.99	80.85 ± 0.22

ทั้งนี้เนื่องจากเปลือกและกากมันสำปะหลังเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรมการเกษตรที่มีปริมาณสูง อีกทั้งยังมีองค์ประกอบและปริมาณของแป้งและเซลลูโลส ที่เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญที่แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาด้วยการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งทั้ง 2 ประเภท คือ เปลือกและกากมันสำปะหลังมาใช้ประโยชน์พื่อผลิตเอทานอล โดยศึกษาถึงอัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังต่อผลผลิตของน้ำตาลและเอทานอลที่ได้ ด้วยเอนไซม์เซลลูเลส แอลฟาอะไมเลส อะไมโลกลูโคซิเดส และยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5343 ตามลำดับ อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษาได้แสดงในตารางที่ 5 โดยที่อัตราส่วนผสมระหว่างเปลือกและกากมันสำหลังที่ 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 โดยน้ำหนักมีปริมาณแป้งเริ่มต้นร้อยละ 60.39 ± 6.44, 54.78 ± 4.21, 50.57 ± 4.21 และ 44.9 ± 2.43 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และมีปริมาณเซลลูโลสร่วมอยู่ด้วยร้อยละ 16.56 ± 0.82, 19.63 ± 1.10, 22.65 ± 1.95 และ 25.75 ± 2.92 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เพื่อนำอัตราส่วนผสมระหว่างเปลือกและกากมันสำปะหลังดังกล่าวไปศึกษาในขั้นตอนการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์ โดยการที่ใช้เอนไซม์ในการไฮโดรไลซีสเป็นวิธีทางชีวภาพที่จะสามารถใช้เอนไซม์เข้าไปไฮโดรไล

ซีสองค์ประกอบที่เป็นเซลลูโลสและแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังในทั้ง 4 อัตราส่วนให้เกิดประสิทธิผลเพื่อผลิตน้ำตาลที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอลต่อไป

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของอัตราส่วนการผสมระหว่างเปลือกและกากมันสำปะหลัง

อัตราส่วนการผสม (โดยน้ำหนัก) (เปลือกมันสำปะหลัง : กากมันสำปะหลัง)	องค์ประกอบ (%น้ำหนักแห้ง)		ความชื้น (%)
	แป้ง	เซลลูโลส	
0 : 1	60.39 ± 6.44	16.56 ± 0.82	78.19 ± 0.25
1 : 5	54.78 ± 4.21	19.63 ± 1.10	80.55 ± 0.17
1 : 2	50.57 ± 4.21	22.65 ± 1.95	80.28 ± 0.28
1: 1	44.95 ± 2.43	25.75 ± 2.92	79.25 ± 0.23

3.2 ปริมาณเอนไซม์ที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสและแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลัง

การหาปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ในการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสและแป้งในการศึกษาเบื้องต้นได้ใช้อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ 0:1 และ 1:1 โดยน้ำหนัก ใช้เป็นตัวแทนในการหาปริมาณเอนไซม์ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการศึกษาต่อไปที่อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังต่างๆ ในการหาปริมาณเอนไซม์ที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสและแป้งเพื่อเป็นน้ำตาลในการเลือกส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 และ 1:1 เพื่อใช้เป็นตัวแทนในอัตราส่วนผสมอื่นๆ โดยที่ส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 แสดงถึงปริมาณแป้งที่อยู่ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ปริมาณสูงที่สุด และมีปริมาณเซลลูโลสต่ำ เมื่อเทียบกับส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:5, 1:2 และ 1:1 ในขณะที่ส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 แสดงถึงปริมาณแป้งที่อยู่ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่มีค่าน้อยที่สุด แต่มีปริมาณเซลลูโลสสูง เมื่อเทียบกับส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:5, 1:2 และ 1:1 (ตารางที่ 5) เพื่อแสดงให้เห็นถึงการทำงานของเอนไซม์ที่เหมาะสม

เอนไซม์ที่ใช้ในการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสในเปลือกและกากมันสำปะหลังคือ เอนไซม์เซลลูเลส โดยที่เซลลูโลสจัดว่าเป็นโพลิเมอร์ที่มีการต่อกันเป็นเส้นตรงของกลูโคส 8,000-12,000 ยูนิต ต่อกันด้วยพันธะ ß -1,4-glycosidic linkage ดังนั้นหน้าที่ของเซลลูเลสคือเข้าไปตัดพันธะ ß -1,4-glycosidic linkage ส่งผลให้เกิดผลผลิตของน้ำตาล ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะการไฮโดรไลซีสที่ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 4.5 ถึง 6 (เบญจวรรณ ชิตมณี, 2534)เอนไซม์ที่ใช้ในการไฮโดรไลซีสแป้ง เอนไซม์ตัวแรกที่ใช้ คือ แอลฟาอะไมเลสโดยจะเข้าไปตัดพันธะ∝-1, 4 glycosidic linkage แต่ไม่สามารถเข้าไปไฮโดรไลซีสพันธะ∝ -1, 6 glycosidic linkages ผลผลิตที่ได้จากการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้ คือ โอลิโกแซกคาไรด์ และตามด้วยเอนไซม์ตัวที่สอง คือ เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสเป็นเอนไซม์ที่สามารถเข้าไปไฮโดรไลซีสพันธะที่เหลือจากการไฮโดรไลซีสแอลฟาอะไมเลส โดยสามารถตัดทั้งพันธะ∝-1, 4 glycosidic linkage และ พันธะ ∝ -1, 6 glycosidic linkages เพื่อไฮโดรไลซีสแป้งจนได้เป็นกลูโคสที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งการใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ในไฮโดรไลซีแป้งจะใช้อุณหภูมิประมาณ 95-100 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด ด่างที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 5.0 ถึง 6.0 และใช้เวลาในการไฮโดรซีสสั้น (Slott และคณะ, 1974) ส่วนการใช้เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส เพื่อไฮโดรไลซีสให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 4.0 ถึง 5.0 (กล้าณรงค์ ศรีรอต, 2543) ซึ่งการหาปริมาณเอนไซม์ที่เหมาะสมต่อเซลลูโลสและแป้งที่มีอยู่ในเปลือกและกากมันสำปะหลังนั้น จะช่วยให้ใช้เอนไซม์อย่างมีประสิทธิภาพและก่อให้เกิดผลผลิตของน้ำตาลที่สูง

3.2.1 ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซีสเซลลูโลส

3.2.1.1 ที่อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลัง 0:1

การไฮโดรไลซีสเซลลูโลสในองค์ประกอบของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนผสมเปลือกต่อกากมันสำปะหลังที่ 0:1 ที่ใช้กากมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียว โดยมีปริมาณเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 17 เอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง 5-40 ยูนิต โดยทำการไฮโดรไลซีสที่ความเป็นกรดด่าง 5.0 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลการศึกษา พบว่า เมื่อทำการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสในกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่ความเข้มข้นน้อยที่ 5, 10, 15, 20 และ25 ยูนิต พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ คือ 0.28 ± 0.09, 0.91 ± 0.08, 1.03 ± 0.06, 1.38 ± 0.05 และ 1.73 ± 0.05 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของเอนไซม์เซลลูเลสที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์เซลลูเลสสูงขึ้นเป็น 30, 35 และ 40 ยูนิต พบว่าการเพิ่มปริมาณของเอนไซม์เซลลูเลสที่ 30 ยูนิต ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงขึ้น และเริ่มคงที่โดยเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของเอนไซม์เซลลูเลสเป็น 35 และ 40 ยูนิต ค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ คือ 3.27 ± 0.05, 3.23 ± 0.03 และ3.21 ± 0.04 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงผลผลิตน้ำตาลที่ได้ทั้งหมดจากการหาปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 พบว่า การใช้เอนไซม์เซลลูเลสที่ 30 ยูนิต จะทำให้ส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 มีปริมาณน้ำตาลที่ได้ทั้งหมดมีค่าที่สูงเช่นเดียวกัน โดยผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่ได้ทั้งหมด คือ 0.326 ± 0.004 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 ด้วยเอนไซม์เซลลูเลสในปริมาณต่าง ๆ

เอนไซม์เซลลูเลส (ยูนิต)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัม/ลิตร)	ผลผลิตน้ำตาลที่ได้ (กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง)
5	$0.28^{a} \pm 0.09$	$0.027^{a} \pm 0.009$
10	$0.91^{b} \pm 0.08$	$0.090^{b} \pm 0.008$
15	$1.03^{c} \pm 0.06$	$0.102^{c} \pm 0.005$
20	$1.38^{d} \pm 0.05$	$0.137^{d} \pm 0.005$
25	$1.78^{e} \pm 0.05$	$0.172^{e} \pm 0.004$
30	$3.27^{f} \pm 0.05$	$0.326^{f} \pm 0.004$
35	$3.23^{f} \pm 0.03$	$0.322^{f} \pm 0.003$
40	$3.21^{f} \pm 0.04$	$0.320^{f} \pm 0.004$

a, b,..., f แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

3.2.1.2 ที่อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลัง 1:1

ส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังในอัตราส่วนที่ 1:1 ที่มีองค์ประกอบเซลลูโลสร้อยละ 26 โดยนำมาหาปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่เหมาะสมในการไฮโดรซีสเซลลูโลสโดยใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์เซลลูเลสอยู่ในช่วง 20 -40 ยูนิต ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 7 จากการศึกษาพบว่า เอนไซม์เซลลูเลสที่ 20 และ 25 ยูนิต ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ คือ 1.62 ± 0.06 และ 2.80 ± 0.55 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของเอนไซม์เซลลูเลส

ที่เพิ่มขึ้น โดยในปริมาณของเอนไซม์เซลลูเลสที่ 30 ยูนิต ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงขึ้น และเริ่มคงที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์เซลลูเลสเป็น 35 และ 40 ยูนิต ซึ่งค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ คือ 3.69 ± 0.04, 3.62 ± 0.06 และ 3.56 ± 0.04 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงผลผลิตน้ำตาลที่ได้ทั้งหมดจากการหาปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 พบว่าการใช้เอนไซม์เซลลูเลสที่ 30 ยูนิต จะทำให้ส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 มีปริมาณน้ำตาลที่ได้ทั้งหมดมีค่าสูงดังแสดงในตารางที่ 7 โดยผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่ได้ทั้งหมด คือ 0.367±0.004 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

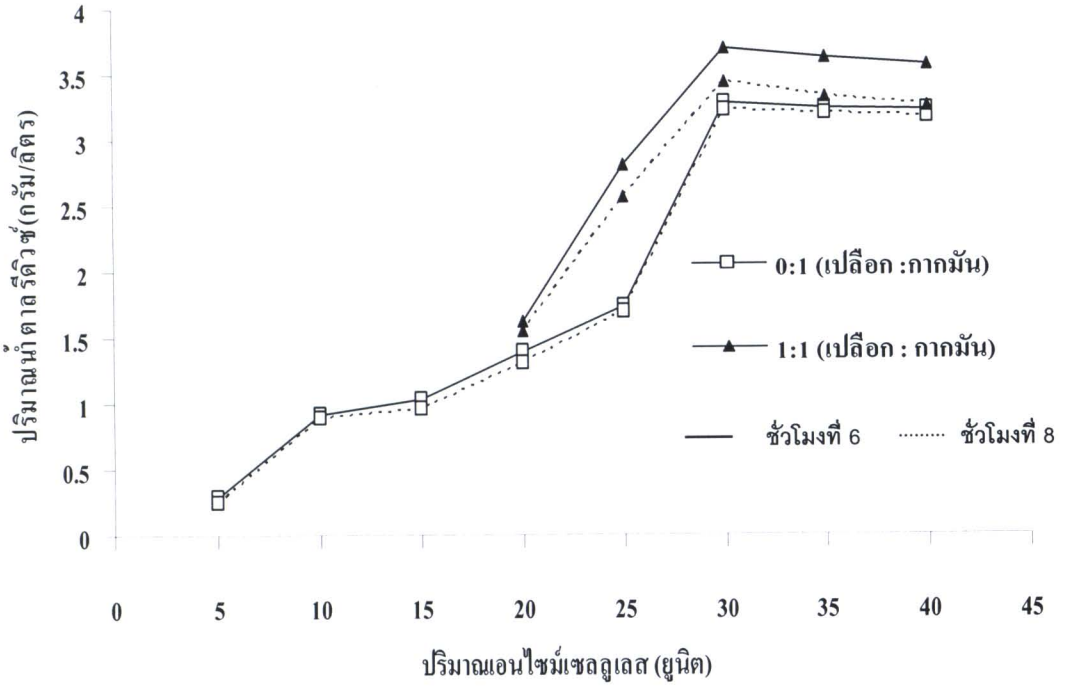
ตารางที่ 7 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 ด้วยเอนไซม์เซลลูเลสในปริมาณต่าง ๆ

เอนไซม์เซลลูเลส (ยูนิต)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัม/ลิตร)	ผลผลิตน้ำตาลที่ได้ (กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง)
20	$1.62^{a} \pm 0.06$	$0.161^{a} \pm 0.006$
25	$2.80^{b} \pm 0.55$	$0.278^{b} \pm 0.055$
30	$3.69^{c} \pm 0.04$	$0.367^{c} \pm 0.004$
35	$3.62^{c} \pm 0.06$	$0.361^{c} \pm 0.006$
40	$3.56^{c} \pm 0.04$	$0.354^{c} \pm 0.003$

a, b และ c แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

เมื่อทำการไฮโดรซีสต่อไปในชั่วโมงที่ 8 ของการไฮโดรไลซีสในทั้ง 2 อัตราส่วน คือ 0:1 และ 1:1 พบว่าค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ไม่มีการเพิ่มขึ้นและมีค่าใกล้เคียงกับการไฮโดรซีสในชั่วโมงที่ 6 ดังรูปที่ 4 ทั้งนี้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังในอัตราส่วน 1:1 ที่มีองค์ประกอบเซลลูโลสร้อยละ 26 ได้ปริมาณน้ำตาลจากการไฮโดรซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสสูงกว่าอัตราส่วนผสมที่ 0:1 ที่มีองค์ประกอบเซลลูโลสร้อยละ 17 เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้มีองค์ประกอบของเซลลูโลสในปริมาณมากกว่าทำให้ได้น้ำตาลสูงขึ้น ดังนั้นปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่เหมาะสม คือ 30 ยูนิต ที่จะนำไปใช้ในการไฮโดรไลซีสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ คือ 0:1, 1:1, 1:2 และ1:5 ภายในเวลา 6 ชั่วโมง ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 5.0 ใช้อุณหภูมิในการไฮโดรไลซีสที่ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเอนไซม์เซลลูเลสจะทำหน้าที่ในการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสที่มีอยู่ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ให้เกิดผลิตภัณฑ์น้ำตาลเหมาะแก่การนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



รูปที่ 4 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 และ 1:1 ด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมื่อไฮโดรไลซีสที่ 6 และ 8 ชั่วโมง

3.2.2 ปริมาณเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซีสแป้ง

3.2.2.1 ที่อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลัง 0:1

การไฮโดรไลซีสแป้งที่เป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ60 น้ำหนักแห้ง ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนผสมของเปลือกต่อกากมันสำปะหลังที่ 0:1 ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ปริมาณต่าง ๆ กัน โดยที่ไม่มีการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสก่อน ซึ่งปริมาณเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ใช้ศึกษาอยู่ในช่วง 3-15 ยูนิต โดยควบคุม ค่าความเป็นกรด ด่างที่ 6.0 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ในการไฮโดรไลซีสกากมันสำปะหลังอย่างเดียวที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 เมื่อเพิ่มปริมาณหรือความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจาก 3 ยูนิต ไปจนถึง 9 ยูนิต ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเอนไซม์ที่เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 8) ความสามารถของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ 9 ยูนิต สามารถไฮโดรไลซีสแป้งและได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ไม่แตกต่างกันกับการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ความเข้มข้น 12 ยูนิต อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ได้ 0.25±0.03 และ0.24± 0.02 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจนถึง 15 ยูนิต พบว่าจะทำให้ค่าปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าไม่สูงขึ้น คือ 0.2 ± 0.02 กรัมต่อลิตร การที่ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าลดลงทั้งนี้เพราะการใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่มีความเข้มข้นของยูนิตที่สูงขึ้น จะมีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ทำให้ลักษณะที่ได้ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 มีลักษณะข้นหนืดหลังจากผ่านการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ในระดับความแตกต่างกันที่ความเข้มข้นของยูนิตเอนไซม์ที่ใช้ และเมื่อทำการไฮโดรซีสต่อด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่ทำหน้าในการไฮโดรไลซีสแป้งให้ได้โมเลกุลที่เล็กลงจนได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว นั่นคือ น้ำตาลกลูโคสเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ความหนืดที่ได้จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และมีการใช้ความเข้มข้นที่สูงของเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสไปไฮโดรไลซีสต่อในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 ส่งผลให้ความหนืดเป็นตัวขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ย่อยแป้ง โดยไม่ให้เอนไซม์เข้าไปจับตัวกับสับเสตรทที่ อยู่ในเปลือกและกากมันสำปะหลัง จึงทำให้เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ชลดา ชื่อสัตย์, 2546) จึงทำให้เมื่อใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ความเข้มข้น 12 – 15 ยูนิต มีค่าของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ลดลง อีกทั้งการใช้ปริมาณเอนไซม์ในการไฮโดรไลซีสแป้งที่มากเกินพอ ทำให้น้ำตาล

กลูโคสที่เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาการไฮโดรไลซีสแป้ง เข้าไปจับกับเอนไซม์และทำให้โครงรูปของเอนไซม์เปลี่ยนแปลงจนไม่สามารถจับกับสับเสตรทได้ ดังนั้นประสิทธิภาพในการไฮโดรไลซีสแป้งให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์จึงลดลงไปด้วย (พัชรา วีระกะลัส, 2543)

หลังจากนั้นนำน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ทำการไฮโดรไลซีสต่อด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่ปริมาณต่างๆ โดยปริมาณเอนไซม์ใช้ศึกษาอยู่ในช่วง 2-10 ยูนิต โดยควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง 4.0 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลผลิตน้ำตาลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.5 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์อะไมกลูโคซิเดสจาก 2 ยูนิต ไปจนถึง 6 ยูนิต ความสามารถของเอนไซม์ในการไฮโดรไลซีสแป้งเป็นน้ำตาลได้เพิ่มขึ้น เมื่อไฮโดรไลซีสแป้งด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่มีความเข้มข้น 6 ยูนิต ได้มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 12.33 ± 0.08 กรัมต่อลิตร ซึ่งในช่วงแรกส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังถูกไฮโดรซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ความเข้มข้น 9 ยูนิตก่อนและตามด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่ 6 ยูนิตได้ผลผลิตน้ำตาลสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ทั้งสองชนิดสูงขึ้น ปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้มีค่าลดลง และมีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 การที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงในช่วงการใช้เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่ความเข้มข้น 8 -10 ยูนิตเป็นเพราะลักษณะที่ได้จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมีลักษณะที่หนืดข้นและยากต่อการที่เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสเข้าไฮโดรไลซีสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 ได้เท่าที่ควร ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าที่ลดลงไป และเมื่อพิจารณาถึงผลผลิตน้ำตาลที่ได้ทั้งหมดจากการหาปริมาณเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซีสแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 พบว่า การใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ 9 ยูนิต และทำการไฮโดรไลซีสต่อด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่ 6 ยูนิต จะทำให้ส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 มีปริมาณน้ำตาลที่ได้ทั้งหมดมีค่าที่สูง และมีค่าที่แตกต่างกับความเข้มข้นในปริมาณเอนไซม์ที่ยูนิตอื่นแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงในตารางที่ 9 โดยผลผลิตน้ำตาลที่ได้ทั้งหมด คือ 1.257 ± 0.007 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

ตารางที่ 8 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 ด้วยเอนไซม์แต่ละชนิดแอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสที่ปริมาณต่าง ๆ

เอนไซม์ (ยูนิต)		ปริมาณน้ำตาลที่ได้ (กรัม/ลิตร) จาก	
แอลฟาอะไมเลส	อะไมโลกลูโคซิเดส	แอลฟาอะไมเลส	อะไมโลกลูโคซิเดส
3	2	$0.10^{a} \pm 0.03$	$2.05^{a} \pm 0.15$
6	4	$0.12^{a} \pm 0.02$	$7.64^{b} \pm 0.11$
9	6	$0.25^{b} \pm 0.03$	$12.33^{c} \pm 0.08$
12	8	$0.24^{bc} \pm 0.02$	$8.55^{d} \pm 0.27$
15	10	$0.20^{c} \pm 0.02$	$6.85^{e} \pm 0.33$

a, b,..., e แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

ตารางที่ 9 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซีสแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสร่วมกับอะไมโลกลูโคซิเดสที่ปริมาณต่าง ๆ

เอนไซม์ (ยูนิต)		ปริมาณน้ำตาลที่ได้ทั้งหมด (กรัม/ลิตร)	ผลผลิตน้ำตาลที่ได้ (กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง)
แอลฟาอะไมเลส	อะไมโลกลูโคซิเดส		
3	2	$2.15^{a} \pm 0.14$	$0.200^{a} \pm 0.014$
6	4	$7.76^{b} \pm 0.12$	$0.775^{b} \pm 0.012$
9	6	$12.58^{c} \pm 0.08$	$1.257^{c} \pm 0.007$
12	8	$8.79^{d} \pm 0.33$	$0.877^{d} \pm 0.026$
15	10	$7.05^{e} \pm 0.37$	$0.704^{e} \pm 0.033$

a, b,..., e แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

3.2.2.2 ที่อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลัง 1:1

การนำส่วนผสมระหว่างเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 ที่มีปริมาณแป้งอยู่ร้อยละ 45 น้ำหนักแห้ง เพื่อหาปริมาณเอนไซม์ที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซีสแป้ง โดยใช้ปริมาณเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ปริมาณต่าง ๆ กัน โดยปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ศึกษาอยู่ในช่วง 6-15 ยูนิต และอะไมโลกลูโคซิเดสที่ปริมาณต่างๆ ที่ใช้อยู่ในช่วง 4-10 ยูนิต และการควบคุมค่าความเป็นกรด ด่าง อุณหภูมิ และเวลาในการไฮโดรไลซีสเช่นเดียวกันกับส่วนผสมระหว่างเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 ผลการไฮโดรไลซีสของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ 6 , 9, 12 และ 15 ยูนิต แสดงในตารางที่ 10 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ คือ 0.39 ± 0.08, 0.40 ± 0.06, 0.35 ± 0.07 และ 0.30 ± 0.16 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และหลังจากนั้นนำปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ไฮโดรไลซีสต่อด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส ที่ค่าความเป็นกรดด่าง 4.0 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 10 พบว่า ความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ 9 ยูนิต และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่ 6 ยูนิต ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่สูง คือ 11.45 ± 0.36 กรัมต่อลิตร แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส ที่มีปริมาณความเข้มข้นของเอนไซม์ที่สูงขึ้น ปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้มีค่าลดลง และมีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเมื่อพิจารณาถึงผลผลิตน้ำตาลที่ได้ทั้งหมดจากการหาปริมาณเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซีสแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 พบว่า การใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ 9 ยูนิต และทำการไฮโดรไลซีสต่อด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่ 6 ยูนิต จะทำให้ส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 ทำให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดมีค่าสูง และมีค่าที่แตกต่างกับความเข้มข้นในปริมาณเอนไซม์ที่ยูนิตอื่นแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงในตารางที่ 11 โดยผลผลิตน้ำตาลที่ได้ทั้งหมด คือ 1.048 ± 0.004 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

ตารางที่ 10 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 ด้วยเอนไซม์แต่ละชนิดแอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสที่ปริมาณต่าง ๆ

เอนไซม์ (ยูนิต)		ปริมาณน้ำตาลที่ได้ (กรัม/ลิตร) จาก	
แอลฟาอะไมเลส	อะไมโลกลูโคซิเดส	แอลฟาอะไมเลส	อะไมโลกลูโคซิเดส
6	4	0.39 ± 0.08^{ns}	$8.16^{ab} \pm 0.08$
9	6	0.40 ± 0.06^{ns}	$11.45^{c} \pm 0.36$
12	8	0.35 ± 0.07^{ns}	$8.37^{b} \pm 0.14$
15	10	0.30 ± 0.16^{ns}	$7.85^{a} \pm 0.19$

ns แสดงความไม่แตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

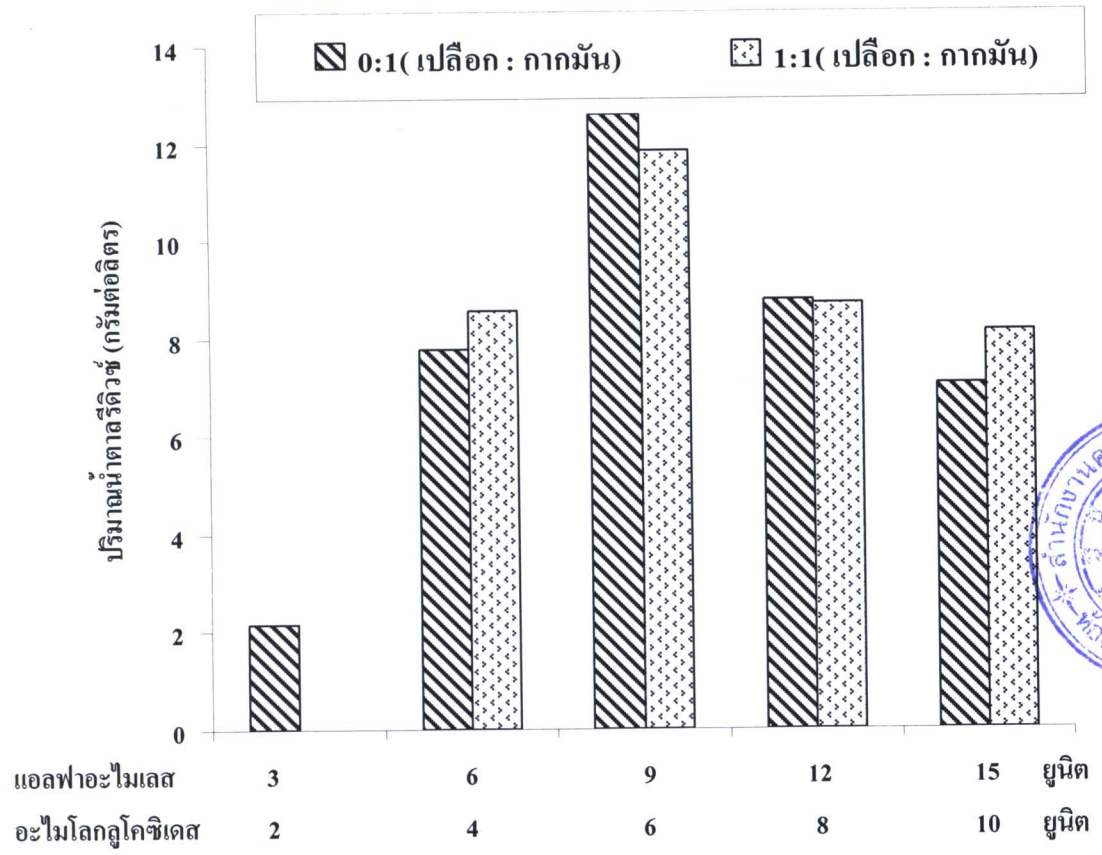
a, b และ c แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

ตารางที่ 11 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซีสแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสร่วมกับอะไมโลกลูโคซิเดสที่ปริมาณต่าง ๆ

เอนไซม์ (ยูนิต)		ปริมาณน้ำตาลที่ได้ทั้งหมด (กรัม/ลิตร)	ผลผลิตน้ำตาลที่ได้ (กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง)
แอลฟาอะไมเลส	อะไมโลกลูโคซิเดส		
6	4	$8.56^{ab} \pm 0.04$	$0.836^{a} \pm 0.006$
9	6	$11.85^{c} \pm 0.39$	$1.048^{c} \pm 0.004$
12	8	$8.72^{b} \pm 0.33$	$0.838^{b} \pm 0.001$
15	10	$8.15^{a} \pm 0.37$	$0.729^{a} \pm 0.010$

a, b และ c แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียว

การนำส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 และ 1:1 มาไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิด เพื่อหาปริมาณยูนิตของเอนไซม์ที่เหมาะสมในการไฮโดรไลซีสแป้งที่มีอยู่ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลัง จากรูปที่ 5 พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นในการใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ 9 ยูนิต และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่ 6 ยูนิต มีค่าปริมาณน้ำตาลรีดิซ์ที่สูงเมื่อเทียบกับผลผลิตกับวัตถุดิบตั้งต้นทั้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 และ 1:1ไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์สูงขึ้น ไม่ส่งผลให้การไฮโดรไลซีสแป้งให้เป็นน้ำตาลได้สูงขึ้น เนื่องจากลักษณะความข้นหนืด เพราะในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 มีปริมาณแป้งที่มากและความหนืดอาจจะเป็นตัวขัดขวางการทำงานของเอนไซม์จากที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นในปริมาณเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ 9 ยูนิต และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่ 6 ยูนิต เป็นปริมาณเอนไซม์เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการไฮโดรไลซีสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ คือ 0:1, 1:1, 1:2 และ1:5 โดยเอนไซม์จะใช้แป้งที่มีอยู่ในเปลือกและกากมันสำปะหลังเพื่อเปลี่ยนให้เกิดผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่สูงเหมาะแก่นำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตเอทานอล



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 5 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 และ 1:1 ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสที่มีความเข้มข้นต่างกัน

3.3 การไฮโดรไลซีสเซลลูโลสและแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆด้วยเอนไซม์

เปลือกและกากมันสำปะหลังเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีปริมาณแป้งและเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ยังคงเหลือในปริมาณสูง เมื่อมีการนำเปลือกและกากมันสำปะหลังผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม ทำให้มีปริมาณของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เหมาะแก่การนำไปใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทน ดังนั้นการใช้เอนไซม์ในปริมาณที่เหมาะสมแก่การไฮโดรไลซีสจะช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่มากพอ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลต่อไปในงานวิจัย ได้มีการศึกษาการนำส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ที่อัตราส่วน 0:1, 1:1, 1:2 และ 1:5 (น้ำหนักแห้ง)โดยแต่ละอัตราส่วนพิจารณาถึงองค์ประกอบของเซลลูโลสและแป้งเป็นหลัก โดยปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ในการไฮโดรไลซีสของการศึกษาครั้งนี้ คือ เอนไซม์เซลลูเลส 30 ยูนิต แอลฟาอะไมเลส 6 ยูนิต และอะไมโลกลูโคซิเดส 9 ยูนิต ผลจากการศึกษาในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งเอนไซม์ทั้ง 3 สามารถทำหน้าที่ในการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสและแป้งที่คงเหลืออยู่ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลัง และการไฮโดรไลซีสได้คำนึงถึงอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดด่าง และเวลา ที่เหมาะกับเอนไซม์แต่ละชนิดที่ใช้ เพื่อจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่สูง เหมาะการแก่ไปใช้ประโยชน์

3.3.1 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากไฮโดรไลซีสเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ

เปลือกและกากมันสำปะหลังนอกจากมีองค์ประกอบของแป้งที่เหลืออยู่สูงหลังจากผ่านกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแล้ว ยังมีอีกหนึ่งองค์ประกอบที่น่าสนใจและนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ นั่นคือ เซลลูโลส โดยพบอยู่ในเปลือกมันสำปะหลังที่มีปริมาณสูงกว่าที่พบในกากมันสำปะหลัง ทั้งนี้เพราะเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์พืชที่ให้ความแข็งแรง โดยที่เซลลูโลสมีลักษณะเป็นโพลีเมอร์สายตรง ไม่มีกิ่งก้านสาขา ที่เชื่อมต่อด้วยพันธะ ß-1,4-glycosidic linkage มา

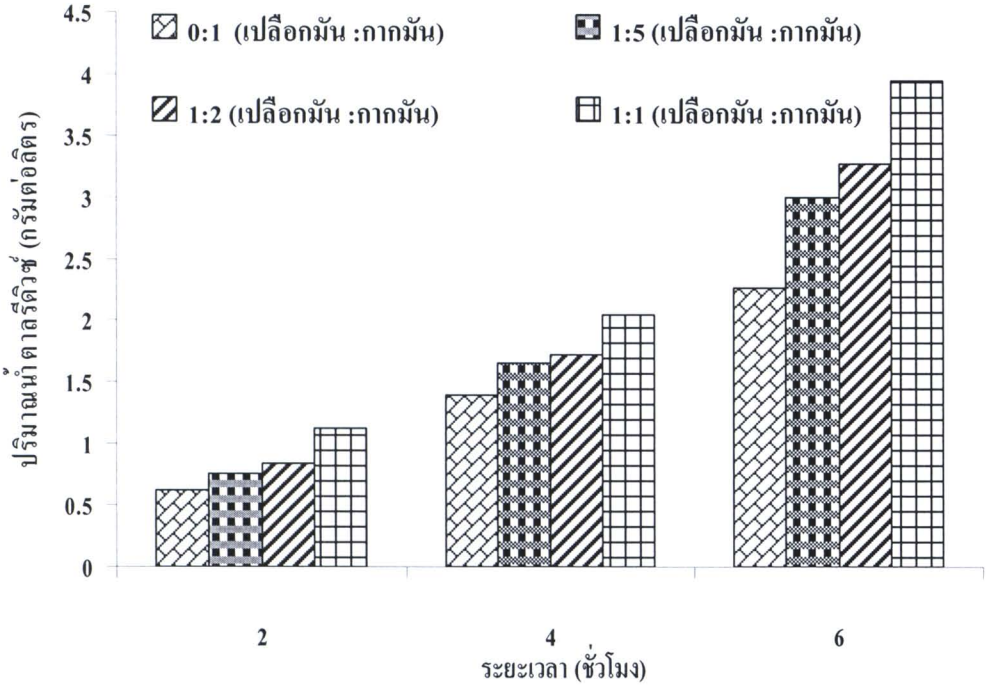
เชื่อมต่อกัน หรือที่เรียกว่าเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสมาต่อกันเป็นสายยาว (Beldman และคณะ, 1984) ดังนั้นในการนำเซลลูโลสมาใช้ให้เกิดประโยชน์ จำเป็นต้องหาวิธีที่เหมาะสมโดยเลือกใช้การไฮโดรไลซีสเซลลูโลสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเอนไซม์เซลลูเลส เพื่อได้ผลผลิตน้ำตาลที่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นและแหล่งพลังงานทดแทนสำหรับผลิตเอทานอล ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่เหมาะสมจากผลการศึกษาในหัวข้อ 3.2.1 ต่อการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสที่มีอยู่ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ คือ 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 ของน้ำหนักแห้ง ด้วยปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่ 30 ยูนิต ค่าความเป็นกรดด่าง 5 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ทำการไฮโดรไลซีสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่เป็นสารตั้งต้นเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์

จากการไฮโดรไลซีสส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 อัตราส่วนต่าง ๆ คือ 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 ตามลำดับ ด้วยเอนไซม์เซลลูเลส และแต่ละอัตราส่วนจะมีปริมาณแป้งและเซลลูโลสในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าปริมาณน้ำตาลที่เกิดขึ้นในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังในอัตราส่วนที่ 1:1 จะได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในปริมาณที่สูงและสูงกว่าส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังในอัตราส่วนที่ 1:2, 1:5, และ 0:1 แสดงในรูปที่ 6 โดยค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้คือ 3.94 ± 0.03, 3.26 ± 0.07, 3.00 ± 0.04 และ 2.27 ± 0.02 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ในแต่ละอัตราส่วนมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อัตราการผลิตน้ำตาลจากการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อทำการเก็บตัวอย่างที่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าอัตราการผลิตน้ำตาลที่ได้จากส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 มีอัตราการผลิตที่ 0.0377 ± 0.0003, 0.0497 ± 0.0005, 0.0541 ± 0.0011 และ 0.0654 ± 0.0004 กรัมต่อลิตร.ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเซลลูโลสในแต่ลอัตราส่วนผสม และค่าอัตราการผลิตน้ำตาลที่ได้ในแต่ละอัตราส่วนมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

เมื่อวิเคราะห์ถึงการใช้ปริมาณเซลลูโลสที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำตาลจากส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ1:1 แสดงได้ในตารางที่ 12 พบว่า ปริมาณเซลลูโลสที่ถูกใช้ไปมีอยู่ร้อยละ 91.01 ± 0.98, 93.12 ± 1.25, 92.57 ± 0.96 และ 93.24 ± 1.75 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และปริมาณแป้งได้มีการถูกใช้ไปบ้างเพียงเล็กน้อยในสภาวะการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสด้วยเซลลูเลส โดยปริมาณแป้งที่ถูกใช้ไปในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 อยู่ร้อยละ1.03 ± 0.11, 0.92 ± 0.07, 1.12 ± 0.21 และ 0.88 ± 0.19 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยที่แต่ละอัตราส่วนของเปลือกและกากมันสำปะหลังมีปริมาณเซลลูโลสและแป้งที่ถูกใช้ไปในการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และการที่ปริมาณแป้งที่ถูกใช้ได้บางส่วน (partial hydrolysis)ในแต่ละอัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลัง อาจเป็นเพราะในการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่ 50 องศาเซลเซียส และสภาวะความเป็นกรดด่างที่ 5.0 ที่มีความเป็นกรดอ่อนสามารถไฮโดรไลซีสแป้งได้เพียงบางส่วน และเมื่อพิจารณาถึงผลผลิตน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซีสส่วนของเปลือกและกามันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ1:1 ด้วยเอนไซม์เซลลูเลส พบว่า ผลผลิตน้ำตาลที่เกิดขึ้นมีปริมาณ 0.226 ± 0.002, 0.298 ± 0.004, 0.325 ± 0.007 และ 0.393 ± 0.002 กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ในแต่ละอัตราส่วนมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเมื่อนำปริมาณเซลลูโลสที่ถูกใช้ไปในการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส พบว่าผลผลิตของน้ำตาลที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.51 ± 0.11, 1.68 ± 0.07, 1.68 ± 0.07 และ 1.63 ± 0.04 กรัมต่อกรัมเซลลูโลสที่ถูกใช้ ตามลำดับ โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากเซลลูโลสที่ถูกใช้ไปในการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสในแต่ละอัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังไม่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของธีรภัทร ศรีนรคุตร และคณะ (2549) ได้มีการศึกษาการไฮโดรไลซีสกากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นร้อยละ 8, 10 และ12 ของน้ำหนักแห้ง และทำการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด ด่าง 4.8 พบว่ามีค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ คือ 1.30,

2.10 และ 2.50 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนในงานวิจัยของกัลยา อยู่นาน (2546) นำเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ร้อยละ 0.15 ทำการไฮโดรไซไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่ความเข้มข้น 3.78 และ 1.89 ยูนิต ตามลำดับ พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณร้อยละ 38.45 และ 20.78 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

จากผลการศึกษาในตารางที่ 12 พบว่า ค่าปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสยังมีปริมาณที่น้อยไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอล และการใช้เอนไซม์เซลลูเลสในการไฮโดรไลซีสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ นั้น ถือได้ว่าเป็นการเตรียมตัวอย่าง (pre-treatment) ก่อนการนำไปใช้ และในวัตถุดิบที่ใช้ยังคงมีปริมาณแป้งเป็นองค์ประกอบหลักด้วย ดังนั้นหลักการสำคัญคือการนำปริมาณน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสทำการไฮโดรไลซีสต่อด้วยเอนไซม์ในกลุ่มย่อยแป้ง นั่นคือ เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดส ทั้งนี้การใช้เอนไซม์เซลลูเลสในการไฮโดรไลซีสเพื่อต้องช่วยในเรื่องการเพิ่มผลผลิตของน้ำตาลที่เกิดขึ้น รวมไปถึงจะช่วยลดความข้นหนืดของวัตถุดิบเมื่อใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสในการไฮโดรไลซีสในแป้งของส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ อีกด้วย



รูปที่ 6 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่ระยะเวลาต่าง ๆ ในส่วนผสมระหว่างเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 12 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตาราส่วนต่างๆ ภายในเวลา 6 ชั่วโมง

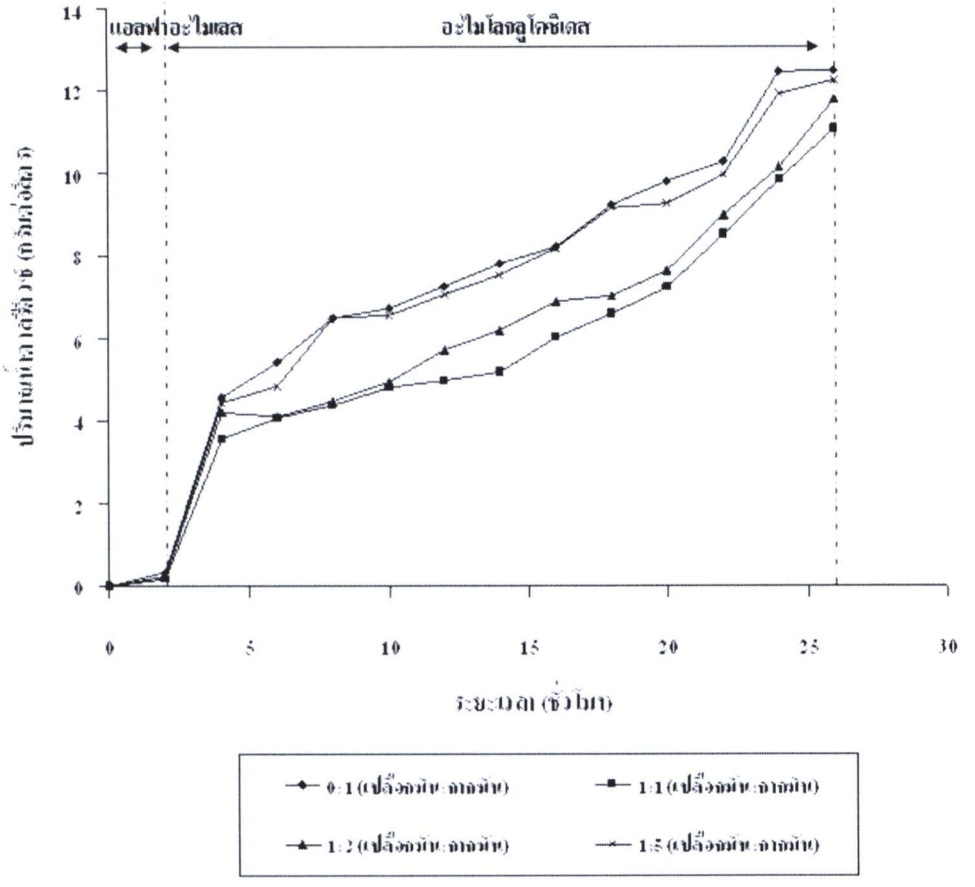
อัตราส่วน เปลือกมัน : กากมัน	การใช้วัตถุดิบ (%)		ผลผลิตของน้ำตาลที่ได้	
	เซลลูโลส^{ns}	แป้ง^{ns}	กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง	กรัม/กรัมเซลลูโลสที่ถูกใช้ไป
0 : 1	91.01 ± 0.98	1.03 ± 0.11	0.226^{a} ± 0.002	1.51 ± 0.11^{ns}
1 : 5	93.12 ± 1.25	0.92 ± 0.07	0.298^{b} ± 0.004	1.68 ± 0.07^{ns}
1 : 2	92.57 ± 0.96	1.12 ± 0.21	0.325^{c} ± 0.007	1.54 ± 0.03^{ns}
1 : 1	93.24 ± 1.75	0.88 ± 0.19	0.393^{d} ± 0.002	1.63 ± 0.04^{ns}

ns แสดงความไม่แตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน a, b,..., d แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

3.3.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสแป้งด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและกลูโคอะไมเลสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ

การไฮโดรไลซีสแป้งที่มีอยู่ในเปลือกและกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ ทั้งนี้เพื่อจะศึกษาการทำงานการไฮโดรไลซีสแป้งในเปลือกและกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่เกิดขึ้น โดยจะทำการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์ 2 ชนิด นั่นคือ เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดส ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ซึ่งไม่ได้ทำการไฮโดรไลซีสต่อจากเอนไซม์เซลลูเลส ทั้งนี้แป้งจัดเป็นสารประกอบประเภทโพลีแซคคาไรด์ ที่พบในพืช ดังนั้นกระบวนการในการย่อยแป้งเพื่อเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาล จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์กลุ่มอะไมเลส โดยจะมีขั้นตอนการย่อยอยู่ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกเป็นการไฮโดรไลซีสครั้งแรก เรียกว่าขั้นนี้ว่า liquefaction ซึ่งในขั้นตอนหรือจะใช้เอนไซม์กลุ่มแอลฟาอะไมเลส (alpha-amylase) ไฮโดรไลซีสแป้งที่อุณหภูมิประมาณ 90-100 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการไฮโดรซีสสั้น ทำให้ได้โมเลกุลของแป้งมีขนาดเล็กลงและมีความหนืดลดลง และในขั้นตอนที่สองเป็นการไฮโดรไลซีสครั้งสุดท้าย Saccharification ได้สารละลายน้ำตาลจากการไฮโดรไลซีสแป้ง ขั้นตอนนี้ใช้เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส เข้าไปไฮโดรไลซีสให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวสามารถทำงานได้ดีที่ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (กล้าณรงค์ ศรีรอต และคณะ,2543) เมื่อสิ้นสุดการย่อยจะให้ความร้อนเพื่อหยุดกิจกรรม ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซีสแป้งในเปลือกและกากมันสำปะหลัง

จากงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาหาปริมาณเอนไซม์ที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลซีสแป้งที่มีอยู่ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ 2 ชนิด (ผลการศึกษาในหัวข้อ 3.2.2) คือ แอลฟาอะไมเลส 9 ยูนิต ค่าความเป็นกรดด่าง 6 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และตามด้วยอะไมโลกลูโคซิเดส 6 ยูนิต ค่าความเป็นกรดด่าง 4 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเอทานอล ผลการผลิตน้ำตาลจากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์ โดยเอนไซม์ในแต่ละตัวมีหน้าที่ในการทำงานที่แตกต่างกันและสุดท้ายเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลเกิดขึ้นพบว่า ค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ทั้งหมดจากการไฮโดรไลซีสส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตรา 0:1, 1:1, 1:2 และ1:5 ด้วยเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิด คือ 12.48 ± 0.06, 12.26 ± 0.06, 11.79 ± 0.03 และ 11.08 ± 0.08 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (รูปที่ 7) และปริมาณค่าของน้ำตาลเริ่มเข้าสู่สภาวะที่คงที่ เนื่องจากสารตั้งต้นที่มีอยู่ในเปลือกและกากมันสำปะหลังถูกใช้ไปและทำให้มีปริมาณลงลดอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความเข้มข้นของน้ำตาลที่จะผลิตได้เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และเมื่อปริมาณของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ถูกใช้ลดลงจนถึงระดับที่ไม่สามารผลิตน้ำตาลอีกต่อไป ความเข้มข้นของน้ำตาลจะเข้าสู่สภาวะที่คงที่ (สุภาวดี ดีสโร, 2543) ดังนั้น ในการทดลองนี้ได้ใช้เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่เวลา 24 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าตั้งแต่ชั่วโมงที่ 20 ถึงชั่วโมงที่ 24 ในการไฮโดรไลซีสปริมาณน้ำตาลที่เกิดขึ้นเริ่มคงที่ โดยแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และตามด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของเอนไซม์ ผลผลิตของน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 แสดงผลดังตารางที่ 13 โดยผลผลิตน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซีสแอลฟาอะไมเลสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 0.032 ± 0.003, 0.025 ± 0.003, 0.022 ± 0.002 และ 0.016 ± 0.001 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งตามลำดับ ทั้งนี้ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:5 และ 1:2 เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบแป้งที่มีอยู่ มีค่าใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 5) และผลผลิตน้ำตาลที่ได้จึงมีค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากนั้นนำไปไฮโดรไลซีสต่อด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส พบว่าผลผลิตน้ำตาลที่ได้มีค่าเท่ากับ 1.209 ± 0.006, 1.195 ± 0.007, 1.155 ± 0.001 และ 1.092 ± 0.006 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 และ 1:5 ค่าผลผลิตน้ำตาลที่ได้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เช่นเดียวกัน อาจเป็นเพราะในอัตราส่วนทั้ง 2 มีองค์ประกอบของแป้งที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าผลผลิตน้ำตาลที่ได้จากเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิด เทียบจากผลผลิตของวัตถุดิบทั้งต้น แต่เมื่อนำปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตได้ทั้งหมดจากการไฮโดรไลซีสส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ1:1 ด้วยเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงผลในตารางที่ 14 พบว่าผลผลิตน้ำตาลที่ผลิตได้ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ1.27 ± 0.009, 1.224 ± 0.001, 1.175 ± 0.003 และ 1.106 ± 0.008 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยในแต่ละอัตราส่วนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะเห็นได้ว่าผลผลิตที่เกิดขึ้นในอัตราส่วนที่ 0:1 มีการเกิดของผลผลิตน้ำตาลที่สูงกว่าในอัตราส่วนอื่น ๆ ทั้งนี้เพราะในอัตราส่วนที่

0:1 ที่มีปริมาณแป้งเป็นองค์ประกอบที่สูง และเมื่อมีการผสมเปลือกมันสำปะหลังลงไปก็จะทำให้องค์ประกอบของแป้งลดลงไปตามปริมาณเปลือกและกากมันสำปะหลังที่เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่ 1:5, 1:2 และ 1:1 แสดงได้ดังตารางที่ 5 ส่งผลให้ผลผลิตน้ำตาลที่เกิดขึ้นในอัตราส่วนดังกล่าวจากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์มีค่าน้อยกว่าอัตราส่วนที่ 0:1 เช่นเดียวกับงานวิจัยของชลดา ซื่อสัตย์ (2546) โดยทำการไฮโดรไลซีสกากมันสำปะหลังที่ร้อยละ10 ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด ด่าง 5.5 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และการไฮโดรไลซีสต่อด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซีย ความเป็นกรด ด่าง 4.5 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้น 31.6 กรัมต่อลิตร น้ำหนักแห้ง ส่วนในงานวิจัยของกัลยา อยู่นาน (2548) โดยทำการไฮโดรไลซีสกากมันสำปะหลังที่ร้อยละ 0.15 ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส 0.17 ยูนิต ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดด่าง 6 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และการไฮโดรไลซีสต่อด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส 0.33 ยูนิต ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเป็นกรด ด่าง 4.5 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดร้อยละ 52.85 โดยน้ำหนักแห้ง

ตารางที่ 13 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสแป้งด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดส ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนผสม เปลือกมัน : กากมัน	ผลผลิตน้ำตาลที่ได้ (กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง) จาก	
	แอลฟาอะไมเลส	อะไมโลกลูโคซิเดส
0 : 1	$0.032^{a} \pm 0.003$	$1.209^{a} \pm 0.006$
1 : 5	$0.025^{b} \pm 0.003$	$1.195^{a} \pm 0.007$
1 : 2	$0.022^{b} \pm 0.002$	$1.155^{b} \pm 0.001$
1 : 1	$0.016^{c} \pm 0.001$	$1.092^{c} \pm 0.006$

a, b และ c แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

ตารางที่ 14 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซีสแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยแอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดส

อัตราส่วน เปลือกมัน : กากมัน	การใช้วัตถุดิบ (%)		ผลผลิตน้ำตาลที่ได้ทั้งหมด	
	แป้ง	เซลลูโลส	กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง	กรัม/กรัมแป้งที่ถูกใช้
0 : 1	$91.53^{a} \pm 1.19$	$1.66^{ns} \pm 0.07$	$1.247^{a} \pm 0.009$	$2.26^{a} \pm 0.22$
1 : 5	$81.48^{b} \pm 1.48$	$1.54^{ns} \pm 0.22$	$1.224^{b} \pm 0.001$	$2.76^{b} \pm 0.17$
1 : 2	$81.78^{b} \pm 2.04$	$1.32^{ns} \pm 0.59$	$1.175^{c} \pm 0.003$	$2.87^{b} \pm 0.32$
1 : 1	$89.71^{a} \pm 1.15$	$1.95^{ns} \pm 0.63$	$1.106^{d} \pm 0.008$	$2.76^{b} \pm 0.26$

ns แสดงความไม่แตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

a, b,..., d แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

เมื่อวิเคราะห์ถึงการใช้ปริมาณแป้งที่เริ่มต้นที่จะถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตผลน้ำตาลของส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ1:1 แสดงผลในตารางที่ 14 พบว่า ในปริมาณที่ถูกใช้โดยเฉพาะในอัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 มีปริมาณที่ถูกใช้ไปสูงกว่าอัตาส่วน 1:5, 1:1 และ1:2 โดยถูกใช้ไปร้อยละ

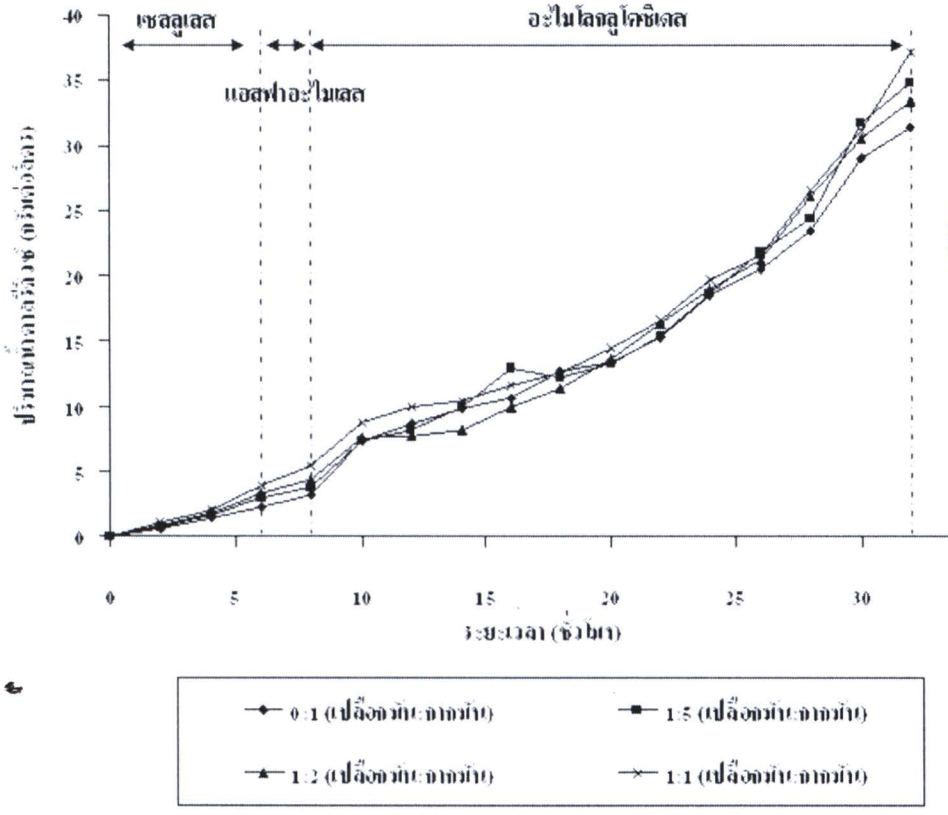
91.53 ± 1.19, 81.48 ± 1.48, 89.71 ± 1.15 และ 81.78 ± 2.04 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ พบว่าปริมาณแป้งที่ถูกใช้ไปการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนที่ 1:5 1:2 และ 1:1 ซึ่งในทั้ง 3 อัตราส่วนนี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างนันสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนอัตราส่วนส่วนผสมของเปลือกและกากมันสะปะหลังที่ 0:1 ปริมาณแป้งที่ถูกใช้ไปในการไฮโดรไลซีสมีค่าที่แตกต่างกับอัตราส่วนผสมอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ลักษณะที่เกิดขึ้นจะมีความหนืด โดยส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ไฮโดรไลซีสแป้งได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ อีกทั้งความร้อนในช่วงแรกของการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ใช้อุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียส และเวลาจะมีผลให้ต่อการทำลายพันธะและโครงสร้างในแป้งโดยการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) เป็นการเปลี่ยนโดยเม็ดแป้งมีลักษณะของการพองตัวเกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่เหมาะสม และถ้าอุณหภูมิเกินไปจะเกิดการสูญเสียของแป้งเกิดขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอต และอกูล , 2543) เลยส่งผลให้ปริมาณบางส่วนหายไปในระหว่างการใช้อุณหภูมิในการไฮโดรไลซีสด้วย 2 เอนไซม์ ส่วนในปริมาณเซลลูโลสที่ถูกใช้ไปในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ1:1 โดยถูกใช้ไปร้อยละ1.66 ± 0.07, 1.54 ± 0.22, 1.32 ± 0.59 และ 1.95 ± 0.63 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งในส่วนผสมของเปลือกละกากมันสำปะหลังในอัตราส่วนต่าง ๆ ปริมาณเซลลูโลสที่ถูกใช้ไปในการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และการที่ปริมาณเซลลูโลสที่ถูกใช้ไปบางส่วนในแต่ละอัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลัง อาจเป็นเพราะขนาดของตัวอย่างที่ 25 ไมครอนของส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ร่วมด้วยการใช้ความร้อนที่สูงถึง 90 องศาเซลเซียส ในการไฮโดรไลซีสแป้งด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสในช่วงแรก ส่งผลให้โครงสร้างของผนังพืชที่เป็นเซลลูโลสถูกทำลาย จึงทำให้เซลลูโลสถูกใช้ไปบางส่วนในระหว่างการไฮโดรไลซีสแป้ง และเมื่อนำปริมาณแป้งที่ถูกใช้ไปในการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ1:1 พบว่าผลผลิตของน้ำตาลที่เกิดขึ้น คือ2.26 ± 0.22, 2.76 ± 0.17, 2.87 ± 0.32 และ 2.76 ± 0.26 กรัมต่อกรัมแป้งที่ถูกใช้ ตามลำดับ พบว่าผลผลิตน้ำตาลที่ได้ในการไฮโดรไลซีสแป้งที่มีอยู่ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนที่ 1:5, 1:2 และ 1:1 ซึ่งในทั้ง 3 อัตราส่วนนี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างนันสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ 0:1 ผลผลิตน้ำตาลที่ได้จากปริมาณแป้งที่ถูกใช้ในการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์ค่าที่ได้มีความแตกต่างจากอัตราส่วนผสมอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้เพราะในอัตราส่วนผสมที่ 0:1 มีปริมาณแป้งอยู่สูงกว่าในอัตราส่วนอื่น ๆ ซึ่งในอัตราผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ 1:5, 1:2 และ 1:1 ปริมาณแป้งที่ได้มีปริมาณใกล้เคียงกันหลังจากได้มีการผสมเปลือกมันสำปะหลังลงไป โดยที่ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้มาจากผลผลิตน้ำตาลของการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่ถูกใช้ไปในการไฮโดรไลซีสด้วยแอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดส นั้นต้องคำนึงถึงองค์ประกอบในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง โดยที่แต่ละอัตราส่วนมีปริมาณของแป้งแตกต่างกัน (ตารางที่ 5)

3.3.3 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสและแป้งด้วยเอนไซม์เซลลูเลส แอลฟาอะไมเลส และกลูโคอะไมเลสในส่วนผสมของเปลือก และกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ

การผลิตน้ำตาลสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบประเภทแป้งและเส้นใยที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลสด้วยวิธีการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์และในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งในเปลือกและกากมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบที่มีทั้งองค์ประกอบของเซลลูโลสและแป้ง โดยที่ในเปลือกมันสำปะหลังมีปริมาณเซลลูโลสและแป้งอยู่ร้อยละ 35.01 ± 5.99 และ 28.09 ± 6.44 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนในกากมันสำปะหลังมีปริมาณเซลลูโลสและแป้งอยู่ร้อยละ 16.56 ± 0.82 และ 60.39 ± 6.44 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งสามารถนำเซลลูโลสและแป้งในเปลือกและกากมันสำปะหลังมาใช้ให้เกิดประโยชน์ทั้งคู่ จากการศึกษาในหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 เป็นการศึกษาการทำงานของเอนไซม์แต่ชนิด คือ เอนไซม์เซลลูเลสใช้ในการไฮโดรไลซีสเซลลูโลส

และเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสกับเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสใช้ในการไฮโดรไลซีสแป้ง โดยที่ผลผลิตของน้ำตาลที่ได้มีสารตั้งต้นที่เป็นแหล่งอาหารของยีตส์ที่จะนำไปหมักเพื่อผลิตเอทานอลมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการให้พลังงานแก่ยีสต์ที่จะผลิตเอทานอล ทั้งนี้เนื่องจากในองค์ประกอบของเปลือกและกากมันสำปะหลังมีเซลลูโลสและแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ในการศึกษานี้จึงได้ใช้เอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง และศึกษาผลของการทำงานร่วมกันของเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิดในการไฮโดรไลซีสเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 ให้เกิดประสิทธิผลในการผลิตผลิตภัณฑ์น้ำตาลเพื่อใช้ในการนำไปหมักเป็นเอทานอลเพื่อเป็นพลังงานทดแทน

จากการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสและแป้งที่มีอยู่ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 ด้วยเอนไซม์ 3 ชนิด คือ เซลลูเลส 30 ยูนิต ที่ความเป็นกรดด่าง 5.0 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีค่าของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ คือ 2.27 ± 0.02 , 3.00 ± 0.04, 3.26 ± 0.07 และ 3.94 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทำการไฮโดรไลซีสต่อด้วยแอลฟาอะไมเลส 9 ยูนิต ที่ความเป็นกรดด่าง 6.0 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้เพิ่มขึ้น 3.21 ± 0.08, 3.83 ± 0.04, 4.37 ± 0.05 และ 5.44 ± 0.05 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ สุดท้ายนำมาไฮโดรไลซีสด้วยอะไมโลกลูโคซิเดส 6 ยูนิต ที่ความเป็นกรดด่าง 4.0 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ทั้งหมดจากการไฮโดรไลซีส คือ 31.38 ± 0.95, 33.41 ± 0.37, 34.75 ± 0.08 และ 37.17 ± 0.26 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิด โดยที่ค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ในแต่ละอัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (รูปที่ 8)



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

รูปที่ 8 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส แอลฟาอะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสที่ระยะเวลาต่าง ๆ ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ

ผลการศึกษาในผลิตผลน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซีสในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 ด้วยเอนไซม์แต่ละชนิดได้แสดงในตารางที่ 15 โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสเอนไซม์เซลลูเลส ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 พบว่า ผลผลิตน้ำตาลที่ได้มีค่าที่สูงกว่า อัตราส่วนที่ 1:2, 1:5 และ0:1 ตามลำดับโดยค่าที่ได้เท่ากับ 0.393 ± 0.002, 0.325 ± 0.007, 0.298 ± 0.004 และ0.226 ± 0.002 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และในทุกอัตราส่วนผลผลิตน้ำตาลที่ได้มีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยคำสัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้เพราะในแต่ละอัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังมีปริมาณเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกัน (ตารางที่ 5) และทำการไฮโดรโดรไลซีสส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 ต่อด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส พบว่า ผลผลิตน้ำตาลที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.09 ± 0.009, 0.08 ± 0.007, 0.11 ± 0.008 และ 0.15 ± 0.002 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยอัตราส่วนที่ 0:1 และ 1:5 ค่าผลผลิตน้ำตาลที่ได้ไม่มีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่าผลผลิตน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมีค่าผลผลิตน้ำตาลที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับผลผลิตน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซีสแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในตารางที่ 13 ทั้งนี้เพราะเอนไซม์ในแต่ละตัวมีหน้าที่ในการทำงานที่แตกต่างกัน โดยเอนไซม์เซลลูเลสมีหน้าที่ไฮโดรไลซีสเซลลูโลส ทำให้แป้งที่ยึดเกาะกับลิกโนเซลลูโลสในเปลือกและกากมันสำปะหลังหลุดออก และง่ายต่อการทำงานของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสในการไฮโดรไลซีสแป้งเป็นน้ำตาล เป็นผลทำให้การไฮโดรไลซีสเพื่อเปลี่ยนแป้งในกากมันสำปะหลังให้เป็นน้ำตาลจึงสูงขึ้น โดยที่เซลลูโลสจะถูกย่อยได้เป็นน้ำตาลกลูโคสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส อีกทั้งช่วยลดความหนืดของกากมันสำปะหลัง ทำให้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสไฮโดรไลซีสแป้งให้ได้โมเลกลุขนาดเล็กลงและมีความหนืดลดลงโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 90 – 100 องศาเซลเซียส ส่วนการใช้เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสจะเข้าไปช่วยย่อยให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และช่วยให้จับกับโมเลกุลของแป้งได้มากขึ้น (พรรณทิพย์ พูนไพโรจน์, 2539) และสุดท้ายนำส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 มาไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส พบว่าผลผลิตน้ำตาลที่ได้มีค่าเท่ากับ 2.81 ± 0.08, 3.08 ± 0.03, 2.89 ± 0.01 และ 3.16 ± 0.02 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตน้ำตาลที่ได้ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 กับ 1:2 และอัตราส่วนที่ 1:5 กับ 1:1 ค่าผลผลิตน้ำตาลที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้ค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสกันในแต่ละอัตราส่วนที่ 1:5 มีค่าสูงกว่าอัตราส่วนที่ 1:2 อาจมีผลมาจากสารตั้งต้นในช่วงแรกที่ทำการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและแอลฟาอะไมเลสการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสและแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:5 ได้ดี รวมถึงการกระจายตัวของตัวอย่างและเมื่อทำการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส ส่งผลให้ผลผลิตของน้ำตาลที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่าส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:2 แต่เมื่อพิจารณาถึงผลผลิตของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ทั้งหมดในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 จากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิด ผลผลิตน้ำตาลที่ได้ทั้งหมดจากการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์มีค่าเท่ากับ 3.13 ± 0.08, 3.46 ± 0.04, 3.33 ± 0.01 และ 3.70 ± 0.02 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ตารางที่ 16) และในทุกอัตราส่วนผลผลิตน้ำตาลที่ได้มีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยคำสัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่าผลผลิตน้ำตาลที่ได้ทั้งหมดในการใช้เอนไซม์ทั้ง 3 ชนิด ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 พบว่ามีค่าผลผลิตน้ำตาลที่สูงกว่าอัตราส่วนผสมอื่น ๆ คือ 3.70 ± 0.02 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

ตารางที่ 15 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสและแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเอนไซม์แต่ละชนิด

อัตราส่วนผสม เปลือกมัน : กากมัน	ผลผลิตน้ำตาลที่ได้ (กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง) จาก		
	เซลลูเลส	แอลฟาอะไมเลส	อะไมโลกลูโคซิเดส
0 : 1	$0.226^{a} \pm 0.002$	$0.09^{a} \pm 0.009$	$2.81^{a} \pm 0.08$
1 : 5	$0.298^{b} \pm 0.004$	$0.08^{a} \pm 0.007$	$3.08^{b} \pm 0.03$
1 : 2	$0.325^{c} \pm 0.007$	$0.11^{b} \pm 0.008$	$2.89^{a} \pm 0.01$
1 : 1	$0.393^{d} \pm 0.002$	$0.15^{c} \pm 0.002$	$3.16^{b} \pm 0.02$

a, b,..., d แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

ตารางที่ 16 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ทั้งหมดที่ได้จากการไฮโดรไลซีสเซลลูโลสและแป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเอนไซม์

อัตราส่วน เปลือกมัน : กากมัน	การใช้วัตถุดิบ (%)		ปริมาณน้ำตาลที่ได้ทั้งหมด (กรัม/ลิตร)	ผลผลิตน้ำตาลที่ได้ (กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง)
	เซลลูโลส	แป้ง		
0 : 1	$91.44^{ns} \pm 0.94$	$92.37^{a} \pm 0.59$	$31.38^{a} \pm 0.95$	$3.13^{a} \pm 0.08$
1 : 5	$93.31^{ns} \pm 4.30$	$91.25^{a} \pm 0.44$	$33.41^{b} \pm 0.37$	$3.46^{b} \pm 0.04$
1 : 2	$93.59^{ns} \pm 2.04$	$92.45^{a} \pm 0.72$	$34.75^{c} \pm 0.08$	$3.33^{c} \pm 0.01$
1 : 1	$93.63^{ns} \pm 2.15$	$95.18^{b} \pm 1.07$	$37.17^{d} \pm 0.26$	$3.70^{d} \pm 0.02$

ns แสดงความไม่แตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

a, b,..., d แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของธีรภัทร และคณะ (2549) ได้มีการศึกษาการไฮโดรไลซีส กากมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นร้อยละ 8, 10 และ12 ของน้ำหนักแห้ง และทำการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดด่าง 4.8 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ต่อด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดด่าง 5.5 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสุดท้ายทำการไฮโดรซีสด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด ด่าง 4.5 เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง พบว่ามีค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ 31.1, 36.8 และ 47.4 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และสุนีย์ โชตินีรนาท (2539) ทำการไฮโดรไลซีสแป้งในกากมันสำปะหลังที่มีคาร์โบไฮเดรทและเยื่อใยร้อยละ 66.2 และ 15.26 โดยน้ำหนักที่เป็นองค์ประกอบ พบว่าการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส แอลฟาอะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดส ค่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ คือ 39.02 กรัมต่อ 100 กรัมกากมันสำปะหลัง และเมื่อวิเคราะห์ถึงปริมาณการใช้แป้งในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 โดยค่าที่เริ่มต้นของแป้งจะถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตผลน้ำตาลของส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ1:1 แสดงได้ในตารางที่ 16 พบว่า ในปริมาณแป้งที่ถูกใช้โดยเฉพาะในอัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 มีปริมาณที่ถูกใช้ไปสูงกว่าอัตราส่วน 1:2, 0:1 และ1:5 โดยปริมาณที่แป้งถูกใช้ไปร้อยละ 95.18 ± 1.07, 92.45 ± 0.72, 92.37 ± 0.59 และ 91.25 ± 0.44 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ทำให้ในส่วนผสมของเปลือกและกามันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 1:5 และ 1:2 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่ในอัตราส่วนที่ 1:1 ปริมาณแป้งที่ถูกใช้มีความแตกต่างกับ

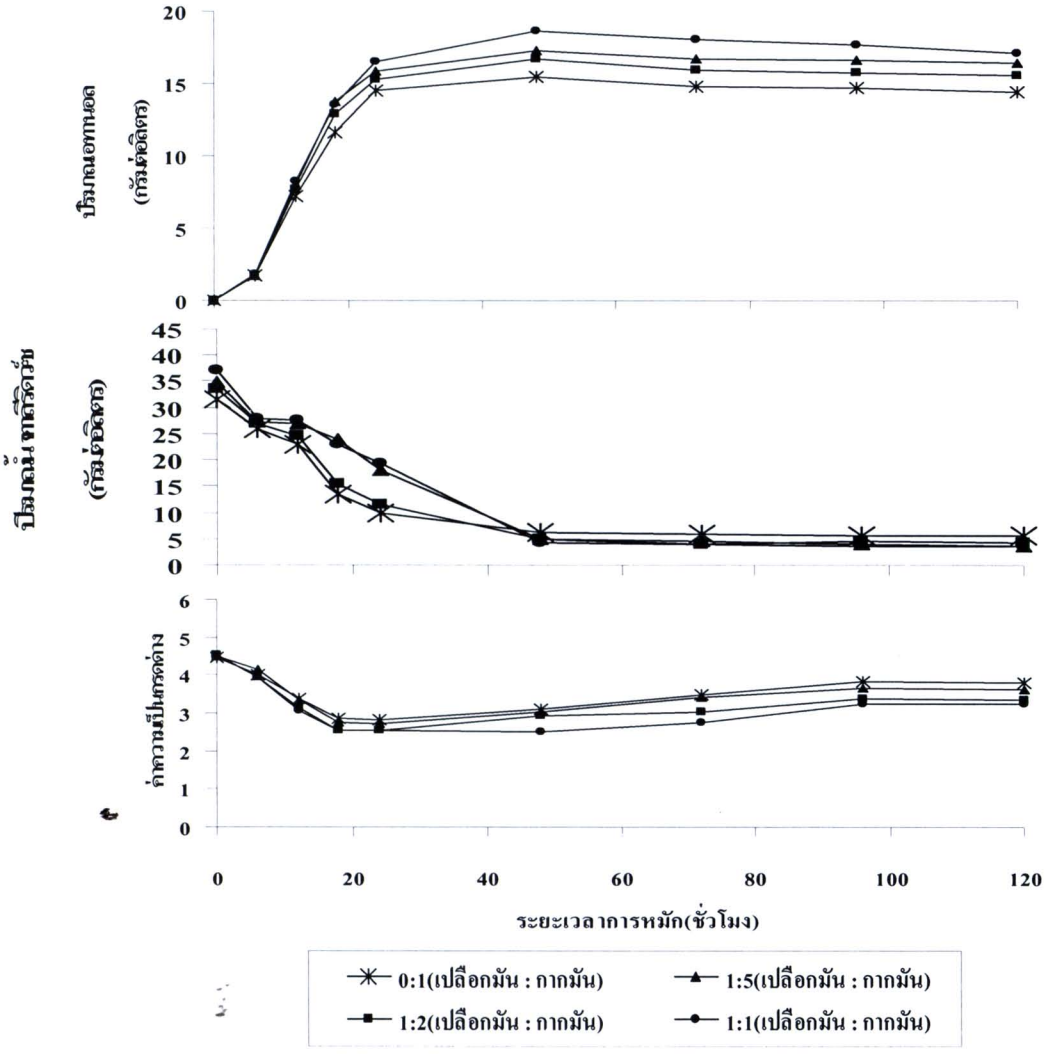
อัตราส่วนผสมเปลือกและกากมันที่อัตราส่วนอื่น ๆ โดยที่ค่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเช่นเดียวกันในปริมาณเซลลูโลสที่ถูกใช้ไปในการไฮโดรไลซีสมีอยู่ร้อยละ 91.44 ± 0.94, 93.31 ± 4.30, 93.59 ± 2.04 และ 93.63 ± 2.15 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยปริมาณเซลลูโลสที่ถูกใช้ไปในแต่ละอัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังไม่มีค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้ในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 มีองค์ประกอบของเซลลูโลสที่มีปริมาณแตกต่างกันออกไปตามอัตราส่วนการเพิ่มปริมาณของเปลือกมันสำปะหลัง และเมื่อทำการให้ไฮโดรไลซีสเซลลูโลสด้วยเอ็นไซม์ซลลูเลสส่งผลให้แป้งที่ยึดเกาะตามผนังของลิกโนเซลลูโลสหลุดออกมา แล้วเมื่อทำการไฮโดรไลซีสแป้งต่อด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสส่งผลให้ปริมาณแป้งมีการถูกใช้ในปริมาณที่สูงขึ้นตามสัดส่วนของอัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลัง

การทำงานร่วมกันของเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิด คือ เอนไซม์เซลลูเลส แอลฟาอะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดส มีผลมาจากเปลือกและกากมันสำปะหลังมีคุณสมบัติของเส้นใยพวกโพลีแซคคาไรด์ ได้แก่ เซลลูโลส และเส้นใยต่าง ๆ เป็นองค์ประกอบที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำ และการพองตัว ทำให้เกิดลักษณะของความหนืดสูงมาก จับตัวเป็นก้อนและยากต่อการกวนส่งผลต่อกระบวนการให้ความร้อน และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลจากเปลือกและกากมันสำปะหลังต่ำ ดังนั้นในกระบวนการให้ความร้อนแก่เปลือกและกากมันสำปะหลังแล้วเติมเอนไซม์ลงไป เพื่อช่วยในการไฮโดรไลซีสโพลีแซคคาไรด์เพื่อที่จะเพิ่มผลผลิตของน้ำตาล แต่การใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสในการไฮโดรซีสจะส่งผลให้ลักษณะที่ได้จากเปลือกและกากมันสำปะหลังมีความหนืดจะมีต่อการทำงานของเอนไซม์ การเติมเอนไซม์เซลลูเลสลงไปไฮโดรไลซีสก่อนจะเป็นการปรับสภาพของเปลือกและกากมันสำปะหลังเพื่อลดความหนืด และการทำงานของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสได้มีประสิทธิภาพดีขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอต และคณะ, 2548)อีกทั้งการนำเซลลูโลสมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเอทานอลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ช่วยเพิ่มผลผลิตของน้ำตาลได้ อีกทั้งการนำเปลือกมันสำปะหลังที่มีปริมาณเซลลูโลสที่สูงกว่าในกากมันสำปะหลังมาผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อช่วยในเพิ่มศักยภาพของวัตถุดิบประเภทเส้นใยในการเปลี่ยนเป็นปริมาณน้ำตาลเพื่อใช้ในผลิตเอทานอลต่อไป

3.4 ผลการผลิตเอทานอลจากน้ำตาลที่ได้จากการไฮโดรไลซีสส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเอนไซม์

เมื่อนำสารละลายน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนผสมต่างๆ คือ 0:1, 1:5, 1:2 และ1:1 โดยมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์คือ 31.38 ± 0.95, 33.41 ± 0.37, 34.75 ± 0.08 และ 37.17 ± 0.26 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการหมักเอทานอล ด้วยยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5343 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส บนเครื่องเขย่าโดยใช้ความเร็ว 150 รอบต่อนาที พบว่าน้ำตาลถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วภายในเวลา 48 ชั่วโมง จากระยะเวลาการหมัก 120 ชั่วโมง จากปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เริ่มต้นของส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ 1:1 สามารถผลิตเอทานอลได้ดีที่สุดจากระยะเวลาการหมักทั้งหมด ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 17 โดยมีปริมาณเอทานอลอยู่ร้อยละ1.55 ± 0.03, 1.73 ± 0.02, 1.67 ± 0.02 และ 1.87 ± 0.05 (w/v) ตามลำดับ และมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เหลือจากการหมักที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง คือ 6.24 ± 0.23, 5.02 ± 0.50, 4.89 ± 0.29 และ 4.35 ± 0.28 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยที่ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เหลือในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ นั้นค่าที่ได้พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเมื่อระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้นปริมาณน้ำตาลจะถูกใช้ไปน้อยมากหรือเกือบไม่ใช้เลย ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 9 ขณะที่เอทานอลถูกผลิตขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง และค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นจนคงที่ภายใน 48 ชั่วโมง โดยปริมาณความเข้มข้นของเอทานอลที่ผลิตได้ คือ 15.48 ± 0.29, 17.29 ± 0.20, 16.73 ± 0.25 และ 18.64 ± 0.38 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยที่ค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วงประมาณ 3-4 ในช่วงระยะเวลการหมักเอทานอลและเมื่อในระยะเวลาในการหมักที่ 60 ชั่วโมงปริมาณน้ำตาลจะลดลงเริ่มเข้าสู่สภาวะที่คงที่ทั้งนี้เพราะเชื้อ *Saccharomyces*

cerevisiae TISTR 5343 ได้มีการใช้สารอาหารที่เป็นแหล่งคาร์บอนส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ไป เช่นเดียวกันกับถ้าสับเสรตของสารตั้งต้นถูกใช้ไปผลผลิตที่ได้ก็จะมีปริมาณที่น้อยลงไปด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เป็นเพราะปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเอานอลที่สำคัญ คือ ธาตุอาหารหลักที่ใช้เป็นแหล่งอาหารให้กับยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ทุกสายพันธุ์ นั่นคือสารประกอบคาร์บอน เช่น น้ำตาลและแป้ง (Nagadawithaha และคณะ, 1974) ส่วนความเข้มข้นของน้ำตาล อุณหภูมิ รวมไปถึงความเป็นกรดด่าง ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้มีผลเกี่ยวเนื่องกันซึ่งจำเป็นต้องมีการควบคุมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการหมักสูงสุด (Jones และคณะ, 1981) ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวัจัยของจิรศักดิ์ คงเกียรติขจร(2546) ได้นำเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ร้อยละ1.5 ทำการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส แล้วต่อด้วยอะไมโลกลูโคซิเดส ปริมาณน้ำตาลรีดิซ์ที่ได้ 6.37 และ 7.59 กรัมต่อลิตร ทำการหมักด้วยเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5049 บ่มบนเครื่องเขย่าโดยใช้ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 ชั่วโมง พบว่าปริมาณเอทานอลที่ได้จากเปลือกและกากมันสำปะหลัง คือ 2.94 ± 0.25 และ 3.27 ± 0.41 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ และงานวิจัยของ Srinorakutara และคณะ (2004) ได้ผลิตเอทานอลจากของเสียของโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยขั้นตอนแรกทำการไฮโดรไลซีสด้วยเอนไซม์ได้ปริมาณน้ำตาล 122.4 กรัมต่อลิตร ต่อจากนั้นหมักด้วยเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5596 10% (v/v) ใช้อัตราการเขย่า 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตเอทานอลได้มากที่สุดคือ ร้อยละ 3.84 (w/v) ในเวลา 36 ชั่วโมง



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเป็นกรดด่าง ปริมาณเอทานอล และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่แต่ละอัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 17 ผลการหมักเอทานอลในส่วนผสมเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่ 48 ชั่วโมง

อัตราส่วนการผสม (เปลือก : กากมัน)	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมต่อลิตร)		ค่าความเป็นกรดด่าง		เอทานอล % (w/v)
	0 ชั่วโมง	48 ชั่วโมง	0 ชั่วโมง	48 ชั่วโมง	
0 : 1	31.38[a] ± 0.95	6.24[a] ± 0.23	4.54 ± 0.03	3.09 ± 0.02	1.55[a] ± 0.03
1 : 5	33.41[b] ± 0.37	5.02[b] ± 0.50	4.51 ± 0.01	3.05 ± 0.03	1.73[b] ± 0.02
1 : 2	34.75[c] ± 0.08	4.89[b] ± 0.29	4.54 ± 0.03	2.93 ± 0.03	1.67[c] ± 0.02
1: 1	37.17[d] ± 0.26	4.35[b] ± 0.28	4.52 ± 0.01	2.57 ± 0.02	1.87[d] ± 0.05

a, b,..., d แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 18 ในการวิเคราะห์ถึงผลผลิตที่ได้ในการหมักเอทานอลจากส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1, 1:5, 1:2 และ11 พบว่า ผลผลิตน้ำตาลของส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ สามารถให้ผลผลิตเอทานอล คือ 1.55 ± 0.03, 1.72 ± 0.02, 1.67 ± 0.02 และ 1.86 ± 0.03 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งในอัตราส่วนผสมเปลือกต่อกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 ให้ผลผลิตเอทานอลสูงกว่าอัตราส่วน 1:5 1:2 และ 0:1 ตามผลผลิตน้ำตาลที่ผลิตได้สูงเช่นกัน ในผลผลิตเอทานอลที่ได้จากผลผลิตน้ำตาลในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:5 และ 1:2 ผลผลิตเอทานอลที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 18 ผลผลิตน้ำตาลเริ่มต้นก่อนการหมักเอทานอลและผลผลิตเอทานอลที่ผลิตได้

อัตราส่วนการผสม (เปลือกมัน : กากมัน)	ผลผลิตน้ำตาลเริ่มต้น (กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง)	ผลผลิตเอทานอล (กรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง)
0 : 1	3.13[a] ± 0.08	1.55[a] ± 0.03
1 : 5	3.46[b] ± 0.04	1.72[b] ± 0.02
1 : 2	3.33[c] ± 0.01	1.67[b] ± 0.02
1: 1	3.70[d] ± 0.02	1.86[c] ± 0.03

a,b,...,d แสดงความแตกต่างในคอลัมน์เดียวกัน

โดยจะสอดคล้องกับงานวิจัยของกล้าณรงค์ และคณะ (2548) ได้ทำการผลิตเอทานอลด้วยการใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสทำการไฮโดรไลซีสในกากมันสำปะหลังที่ร้อยละ20 แล้วทำการหมักด้วยด้วยยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่ 32 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า สามารถผลิตเอทานอลได้ 0.407 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และถ้านำมากากของเสียทางอุตสหกรรมหรือวัสดุทางการเกษตณอื่นที่มีองค์ประกอบของแป้งและเซลลูโลสเหลืออยู่เป็นองค์ประกอบมาทำการผลิตเอทานอล ดังเช่นในงานวิจัยของระวีวรรณ ขวัญเมือง (2538) ได้ทำการศึกษาผลิตเอทานอลจากฟางข้าว โดยใช้เชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5013 พบว่าเมื่อใช้น้ำตาลรีดิวส์ที่ได้จากการย่อยสลายฟางข้าวด้วยเอนไซม์เซลลูเลสเป็นแหล่งคาร์บอนในการเลี้ยงเชื้อ ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 วัน จะได้เอทานอลเข้มข้นร้อยละ1.3 โดยปริมาตร และเมื่อเทียบกับการนำเปลือกมันสำปะหลังมาผสมในกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตเอทานอล พบว่าในการหมักเอทานอล ค่าที่ได้จะสูงกว่ากากของเสียประเภทอื่น ทั้งนี้เพราะส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบของเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นอีกทั้งยังคงมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ และเช่นเดียวกัน

กับการนำกากมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวมาผลิตเอทานอลปริมาณเอทานอลที่ได้ก็มีปริมาณที่ต่ำกว่าการมีเปลือกมันสำปะหลังผสมลงไป ดั้งนั้นในงานวิจัยนี้ที่มีการนำเปลือกมันสำปะหลังมาผสมกับกากมันสำปะหลังจะช่วยให้เอนไซม์สามารถทำงานได้ดีและมีประสิทธิผลมากขึ้นจากการใช้เซลลูโลสและแป้งที่เป็นองค์ประกอบหลักในวัตถุดิบ อีกทั้งส่งผลให้การผลิตเอทานอลได้เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เพื่อจะใช้เป็นแนวทางทางเลือกหนึ่งของพลังงานทดแทนในอนาคต

3.5 ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ความสำคัญในการผลิตเอทานอล คือการช่วยลดวิกฤตการณ์ราคาน้ำมันที่เพิ่มสูงขึ้น และเป็นทางเลือกหนึ่งให้แก่พลังงานทดแทน พร้อมทั้งช่วยลดต้นทุนราคาน้ำมัน (E10 และE20) และเพิ่มศักยภาพให้แก่วัสดุเหลือใช้จากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรที่นำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานทดแทน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเห็นถึงความสำคัญการนำเปลือกและกากมันสำปะหลังที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในโรงงานงานอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้านพลังงานทดแทน โดยจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 3.4 คือการนำสารละลายน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซีสส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนผสมต่างๆ คือ 0:1, 1:5, 1:2 และ1:1 มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการหมักเอทานอล ด้วยยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5343 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส บนเครื่องเขย่าโดยใช้ความเร็ว 150 รอบต่อนาที โดยระยะเวลาการหมักที่ 48 ชั่วโมง พบว่า มีปริมาณความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 1.55 ± 0.03, 1.73 ± 0.02, 1.67 ± 0.02 และ 1.87 ± 0.05 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ หรือร้อยละ 1.96 ± 0.04, 2.19 ± 0.03, 2.12 ± 0.03 และ 2.36 ± 0.05 โดยปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งการประมาณการต้นทุนการผลิตเอทานอลในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ คือ 0:1, 1:5, 1:2 และ1:1 ทั้งนี้เพื่อให้เป็นแนวทางการใช้ประโยชน์เกี่ยวกับต้นทุนการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือใช้ประเภทอื่น ๆ ได้ โดยจากข้อมูลราคาของวัตุดิบในการผลิตเอทานอลสามารถแสดงได้จากตารางที่ 19 พบว่า ราคาของเปลือกและกากมันสำปะหลัง 0.25 และ 0.40 บาทต่อกิโลกรัม ส่วนเอนไซม์เซลลูเลส แอลฟาอะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสมีราคาต้นทุนที่ 0.80, 0.18 และ 0.2 บาทต่อกรัม ตามลำดับ แล้วนำไปใช้ในการประมาณต้นทุนในการผลิตเอทานอล

ตารางที่ 19 ราคาของวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ

วัตถุดิบ	หน่วย	ราคาวัตถุดิบ (บาทต่อหน่วย)
เปลือกมันสำปะหลัง*	กิโลกรัม	0.25
กากมันสำปะหลัง*	กิโลกรัม	0.40
เอนไซม์เซลลูเลส**	กรัม	0.80
เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส**	กรัม	0.18
เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส**	กรัม	0.2

* ราคาเปลือกและกากมันสำปะหลัง ณ วันที่ 18 กันยายน 2548 จากโรงงานชลเจริญ จังหวัดชลบุรี

** กล้าณรงค์ ศรีรอต และคณะ (2548)

จากต้นทุนในการผลิตเอทานอล ประกอบไปด้วยต้นทุน 3 ส่วน คือ ส่วนแรกต้นทุนของหน่วยการผลิต ส่วนที่สองต้นทุนพลังงาน คือ การไฮโดรไลซีส กระบวนการหมัก และการกลั่น ซึ่งจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าและน้ำในการผลิตเอทานอล และ ส่วนสุดท้ายเป็นค่าใช้จ่ายอื่นๆ ในการผลิตเอทานอล เช่น ค่าแรงงาน ค่าบำรุงรักษา จากการศึกษาของกล้าณรงค์ ศรีรอต และคณะ (2548) มีการใช้ต้นทุนด้านพลังงานและค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ในการผลิตเอทานอล คือ 1.76 และ 1.69 บาทต่อลิตร ตามลำดับ ดังนั้น ต้นทุนการผลิตเอทานอลในการศึกษานี้ได้ใช้ต้นทุนของหน่วยการผลิตหรือวัตถุดิบจากข้อมูลในตารางที่ 19

ส่วนต้นทุนพลังงานและน้ำ รวมถึงค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ใช้เกณฑ์การศึกษาของสุวิทย์ เตีย และคณะ (2548) เป็นเกณฑ์ที่ได้มีการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในคิดคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานผลิตเอทานอลจากหัวมันสำปะหลังสด และหัวมันเส้นเป็นวัตถุดิบ โดยที่ต้นทุนการผลิตเอทานอลทางด้านพลังงาน และต้นทุนในส่วนของค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ในกระบวนการผลิต คือ 1.42 และ 1.29 บาทต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งต้นทุนพลังงานไฟฟ้า และค่าดำเนินการผลิตมีค่าต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกล้าณรงค์ ศรีรอต และคณะ (2548) และได้มีการนำมาใช้คิดคำนวณค่าใช้จ่ายในผลิตเอทานอลจากส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ คือ 0:1, 1:5, 1:2 และ1:1 ในงานวิจัยนี้ โดยที่มีปริมาณความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 1.96 ± 0.04, 2.19 ± 0.03, 2.12 ± 0.03 และ 2.36 ± 0.05 โดยปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ต้นทุนทางด้านวัตถุดิบ (เปลือกและกากมันสำปะหลัง) เอนไซม์ พลังงานไฟฟ้าและน้ำ และรวมไปถึงค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ของกระบวนการผลิต แสดงผลในตารางที่ 20 พบว่า การผลิตเอทานอลในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ คือ 0:1, 1:5, 1:2 และ1:1 ได้ราคาต้นทุนผลิตเอทานอล คือ 13.11, 12.95, 12.82 และ 12.70 บาทต่อลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการผสมเปลือกมันสำปะหลังลงไปทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงไป โดยที่ราคาการซื้อขายเอทานอลอยู่ที่16.84 -18.54 บาทต่อลิตร ซึ่งมีการปรับราคาเอทานอล ณ วันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2549 (กระทรวงพลังงาน , 2550) แต่เมื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบศักยภาพในการผลิตเอทานอลร้อยละ 99.5 จากวัสดุอื่น ๆ ที่แสดงในตารางที่ 21 พบว่า ในอัตราส่วนของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 สามารถผลิตเอทานอลได้ในปริมาณถึง 236 ลิตรต่อวัตถุดิบ 1 ตัน ซึ่งผลผลิตเอทานอลที่ได้มีปริมาณที่สูงกว่าส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนอื่น ๆ และมีศักยภาพที่ใกล้เคียงกับกากน้ำตาล และจากต้นทุนการผลิตเอทานอลที่มีความแตกต่างกันไม่มากนักในแต่ละอัตราส่วน แต่เมื่อพิจารณาถึงศักยภาพการผลิตเอทานอลแล้วการใช้ส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 โดยมีต้นทุนการผลิตที่ 12.70 บาทต่อลิตร และมีศักยภาพการผลิตเอทานอลที่ 236 ลิตรต่อตัน จะเห็นได้ว่ามีการใช้ต้นทุนที่ต่ำ และได้ผลผลิตที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้ส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0:1 ที่มีเพียงกากมันสำปะหลัง (ตารางที่ 20 และตารางที่ 21)

ตารางที่ 20 การประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอลจากส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่กำลังผลิตเอทานอล 1 ลิตร

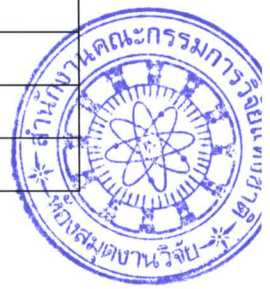
รายการ	หน่วย	การประมาณการต้นทุนการผลิตเอทานอลจากส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน			
		0:1	1:5	1:2	1:1
เปลือกและกากมันสำปะหลัง	บาท/ลิตร	2.04	1.88	1.75	1.63
เอนไซม์	บาท/ลิตร	8.36	8.36	8.36	8.36
พลังงานไฟฟ้า และไอน้ำ	บาท/ลิตร	1.42	1.42	1.42	1.42
ค่าดำเนินการ และอื่น ๆ	บาท/ลิตร	1.29	1.29	1.29	1.29
ต้นทุนเอทานอล 1 ลิตร	**บาท**	13.11	12.95	12.82	12.70

ตารางที่ 21 ปริมาณเอทานอลร้อยละ 99.5 ที่ผลิตได้จากวัตถุดิบต่างชนิดที่มีปริมาณน้ำหนัก 1 ตัน

วัตถุดิบ	ปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ (ลิตร)
กากน้ำตาล	260
อ้อย	70
หัวมันสำปะหลัง	180
ข้าวฟ่าง	70
น้ำมันมะพร้าว	83
อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ 0:1	196*
อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ 1:5	219*
อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ 1:2	212*
อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ 1:1	236*

ที่มา ; คณะกรรมาธิการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร (2545)

* คำนวณจากผลการทดลอง



จากตารางที่ 22 พบว่า ต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 99.5 ในปริมาณ 1 ลิตรในวัสดุต่าง ๆ ที่เป็นวัสดุเหลือใช้และวัตถุดิบที่จำเป็นต่อการผลิตอื่น ๆ มีราคาต้นทุนที่สูง เมื่อนำมาเทียบกับต้นทุนราคาวัตถุดิบในส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 1:1 พบว่า ต้นทุนราคาวัตถุดิบและต้นทุนในการผลิตเอทานอลต่ำกว่ากากน้ำตาล มันสำปะหลัง มันเส้นปลายข้าว และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ แต่ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเอทานอลสำหรับเปลือกและกากมันสำปะหลังใช้ในปริมาณที่ต่ำเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมันสำปะหลัง มันเส้น และอ้อย ที่เป็นวัสดุทางการเกษตรที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่เกิดประโยชน์ แต่ในเปลือกและกากมันสำปะหลังเป็นกากของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำหลังที่สามารถนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการผลิตเป็นพลังงานทดแทน ทั้งนี้อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ 1:1 มีต้นทุนด้านวัตถุดิบน้อยกว่าอัตราส่วน 1:2, 1:5 และ 0:1 คือ 0.33, 0.38, 0.37 และ 0.40 บาทต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 20) ทั้งนี้เห็นได้ว่าการใช้เปลือกมันสำปะหลังผสมลงไปในการกากมันสำปะหลังช่วยลดต้นทุนการผลิตลงไป การที่นำเปลือกและกากมันสำปะหลังมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเอทานอลเป็นการใช้เซลลูโลสและแป้งให้เกิดประโยชน์มากที่สุด และจากการสำรวจในประเทศ มีกำลังการผลิตแป้งมันสำปะหลังโดยเฉลี่ย 2.5 ถึง 3 ล้านตันต่อปี (กล้ารงณงค์ ศรีรอต และคณะ, 2548) จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังส่งผลให้เกิดของเสีย คือ เปลือกและกากมันสำปะหลัง นอกจากน้ำเสีย ซึ่งพบในปริมาณ 2 แสนตันต่อปี และ 1.5 ล้านตันต่อปี ตามลำดับ (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2546) ด้วยกากของเสียในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณสูงจะส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมโดยการส่งกลิ่นเหม็น ดังนั้นการผลิตเอทานอลจึงเป็นพลังงานที่สามารถพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลังงานสะอาดได้ โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศ ลดปริมาณกากของเสียลงไป และยังลดการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศ ช่วยลดการขาดดุลทางการค้าของประเทศ โดยมุ่งพัฒนาเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพการผลิตสูง ต้นทุนการผลิตต่ำ เพิ่มมูลค่าในกากของเสีย ตลอดจนสามารถพัฒนาการใช้ประโยชน์จากของเสียและเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสหกรรม นอกจากการนำเปลือกมันสำปะหลังที่มีปริมาณเซลลูโลสอยู่สูงถึงร้อยละ 35.01 ± 5.99 ของน้ำหนักแห้ง ยังมีวัตถุดิบอื่นที่มีปริมาณเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบอยู่มาก เช่น ข้าวฟ่าง ฟางข้าว หญ้า เป็นต้นถ้ามีการใช้วิธีการไฮโดรไลซีสที่เหมาะสมต่อวัตถุดิบเพื่อให้เกิดน้ำตาลที่ใช้เป็นแหล่งอาหารและสารตั้งต้นในการหมักเอทานอลจะช่วยให้ลดต้นทุนการผลิตไปอีก และให้ผลผลิตที่มีประสิทธิภาพอีกด้วย ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำไปสู่การพัฒนาการใช้เป็นพลังงานทดแทนทางเลือกหนึ่งในอนาคตที่