

1. บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ประเทศไทยจัดว่าเป็นแหล่งหนึ่งที่มีศักยภาพในการผลิตเอทานอล ซึ่งมีวัตถุดิบทั้งประเภทน้ำตาลและแป้ง เช่น มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวโพด เป็นต้น ทั้งนี้ จากสภาวะปัจจุบันประเทศไทยต้องประสบปัญหาเกี่ยวกับความเสียหายเปรียบด้านพลังงาน เนื่องจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เพื่อการขนส่งในปริมาณสูง และปัญหาเรื่องน้ำมันในตลาดโลกมีราคาแพงและประเทศไทยต้องเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าน้ำมัน ประกอบกับอัตราการใช้น้ำมันของประเทศไทย โดยเฉพาะน้ำมันดีเซลมีอัตราเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว กล่าวคือ ความต้องการน้ำมันดีเซลเป็นปริมาณ 9,928 ล้านลิตร ในปี พ.ศ.2533 และเพิ่มเป็น 18,273 ล้านลิตร ในปี พ.ศ. 2547 หรือเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ยร้อยละ 4.5 ต่อปี (<http://www.energy.go.th>) การที่ราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกเพิ่มสูงขึ้นตลอดเวลาส่งผลให้ประเทศไทยต้องเผชิญกับความเสียหายเปรียบทางด้านเศรษฐกิจอีกด้วย การพิจารณาหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ เพื่อใช้ทดแทนน้ำมันจึงเป็นสิ่งที่สำคัญและได้รับการผลักดันจากหลายๆ ฝ่ายอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนจากวัตถุดิบทางการเกษตรที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและสามารถผลิตได้เองภายในประเทศ สำหรับแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญแหล่งหนึ่งคือ พลังงานชีวมวล ซึ่งหมายถึงพลังงานที่ได้จากสิ่งมีชีวิต ทั้งพืชและสัตว์ รวมถึงผลพลอยได้และของเสียที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิต จุดเด่นของพลังชีวมวลคือ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก และช่วยลดการเกิดมลภาวะของสิ่งแวดล้อม พลังงานชีวมวลที่สำคัญที่สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์มีอยู่ 2 ประเภทหลักคือ เอทานอล และไบโอดีเซล ซึ่งวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้มาเป็นพลังงานทดแทนได้ เช่น อ้อย น้ำตาล กากน้ำตาล ข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนมาก ได้แก่ แป้งและเซลลูโลส ซึ่งสามารถนำไปใช้ในกระบวนการหมักเพื่อเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ให้เป็นน้ำตาล แล้วตามด้วยกระบวนการหมักให้เป็นเอทานอลได้ซึ่งใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ นอกจากวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรแล้ว ยังมีของเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมที่ออกมาจากการกระบวนการผลิตที่สามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์ในด้านของพลังงานได้เช่นกัน เช่น กากน้ำตาล กากมันสำปะหลัง เป็นต้น

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศชนิดหนึ่ง ซึ่งผลผลิตหัวมันสำปะหลังมีปริมาณเฉลี่ย 18 ล้านตันต่อปี ที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งรูปแบบของอาหารคน และอาหารสัตว์ นอกจากนี้ยังนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ซึ่งโดยส่วนมากจะนำไปผลิตในอุตสาหกรรมมันเส้น มันอัดเม็ด ซึ่งใช้เป็นอาหารสัตว์ และอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่เป็นอุตสาหกรรมโดยหลัก ซึ่งกำลังการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณเฉลี่ย 2.5 ถึง 3 ล้านตันต่อปี (กล้าณรงค์, 2549) จากกระบวนการผลิตแป้งมันส่งผลให้เกิดของเสีย คือ เปลือกและกากมันสำปะหลัง ซึ่งจะพบในปริมาณ 2 แสนตันต่อปี และ 1.5 ล้านตันต่อปี ตามลำดับ (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2546) ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรที่มีปริมาณสูง และโดยคุณสมบัติของเปลือกและกากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบทางเคมีที่มีปริมาณของคาร์โบไฮเดรตที่สูง จึงน่าจะเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มขึ้น เช่น การใช้เป็นอาหารสัตว์ การเพาะปลูกเห็ด ปู๋ย นอกจากนี้จะใช้ประโยชน์ได้มากมายดังกล่าวแล้ว ยังมีการศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์ในรูปแบบของพลังงานทดแทน นั่นก็คือ เอทานอล โดยกระทรวงอุตสาหกรรมคาดการณ์ความต้องการใช้เอทานอลในประเทศไทยว่ามีปริมาณ 1 ล้านลิตรต่อวัน หรือ 330 ล้านลิตรต่อปี ซึ่งในการวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงศักยภาพของการนำเปลือกและกากมันสำปะหลังมาผลิตเอทานอล โดยผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสและ การผลิตเอทานอล เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการช่วยลดพลังงานทดแทน ลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรม ช่วยลดปัญหาการขาดแคลนด้านพลังงาน และยังเป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิต อีกทั้งจะทำให้ประเทศไทยสามารถผลิตเชื้อเพลิงพลังงานได้เอง นอกจากนี้เป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่กากมันสำปะหลัง ที่เป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม

การศึกษานี้จึงมุ่งที่จะพัฒนาการใช้ประโยชน์จากเปลือกและกากมันสำปะหลังที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสและแป้งเป็นหลัก โดยจะศึกษาถึงในส่วนการนำเปลือกมันสำปะหลังเมื่อผสมในกาก

มันสำปะหลัง โดยใช้วิธีการย่อยสลายในขั้นตอนไฮโดรไลซิสให้เป็นน้ำตาลด้วยเอนไซม์ และตามด้วยกระบวนการผลิตเอทานอลด้วย *Saccharomyces cerevisiae* รวมถึงศึกษาค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอล

1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.2.1 เพื่อสามารถใช้เป็นแนวทางในการบำบัดและใช้ประโยชน์จากของเสียที่เกิดจากภาคอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง หรืออุตสาหกรรมที่มีของเสียที่มีแป้งและเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ
- 1.2.2 เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำเปลือกและกากมันสำปะหลังมาใช้เป็นพลังงานทดแทน และสามารถเพิ่มศักยภาพของพลังงาน
- 1.2.3 สามารถลดพลังงานในการนำมาใช้เพื่อขจัดมลภาวะที่เกิดจากเปลือกและกากมันสำปะหลังที่เหลือใช้จากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง
- 1.2.3 สามารถลดต้นทุนการผลิตพลังงานทดแทน เนื่องจากเปลือกและกากมันสำปะหลังมีราคาถูก

1.3 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

โรงงานผลิตเอทานอล

1.4 ทฤษฎี สมมติฐานหรือกรอบแนวความคิดของงานวิจัย

กรอบแนวความคิด: ในกากและเปลือกมันสำปะหลังยังมีเม็ดแป้งกักเก็บอยู่ในเส้นใย ถ้านำแป้งออกมาได้โดยใช้เอนไซม์สามารถใช้แป้งที่แยกได้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลที่เป็นพลังงานหมุนเวียนได้

ทฤษฎี

1.4.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบสไลด์แห้ง เป็นกระบวนการผลิตแบบใหม่ และเป็นกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่โรงงานโดยทั่วไปใช้กันอยู่ในปัจจุบัน มีขั้นตอนการผลิตดังนี้ โดยจะเริ่มต้นด้วยการเตรียมวัตถุดิบ ซึ่งหัวมันสำปะหลังจะถูกล้างเสียผ่านระบบสายพานไปสู่อุปกรณ์ร่อนดินทรายเพื่อทำการแยก และยังมีเศษเปลือกหรือรากไม้ที่ปนมาออกจากหัวมันสำปะหลัง จากนั้นหัวมันจะถูกล้างโดยผ่านเครื่องล้างหัวมัน และจะถูกล้างด้วยสายพานเพื่อที่จะป้อนเข้าสู่เครื่องสับหัวมัน หัวมันที่ขนาดเล็กจะผ่านท่อลงสู่เครื่องไม่ โดยจะมีลักษณะเป็นลูกกลิ้งที่มีใบมีดขนาดเล็กจำนวนมาก ในระหว่างไม่จะมีการเติมน้ำเพื่อให้การไม่ทำได้สะดวกขึ้น โดยส่วนมากน้ำที่ใช้เป็นน้ำหมุนเวียนเพื่อเป็นการประหยัดน้ำและช่วยลดการสูญเสียแป้งไปกับน้ำทิ้ง ของเหลวขึ้นจากเครื่องไม่จะถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องดีแคนเตอร์เพื่อแยกน้ำทิ้งที่มีโปรตีนและไขมันออกจากเนื้อแป้ง โดยอาศัยหลักของแรงหนีศูนย์กลาง ส่วนแป้ง เส้นใย และกากจะถูกเหวี่ยงแยกออกเป็นน้ำแป้งความเข้มข้นสูง ซึ่งบางโรงงานอาจไม่ใช้เครื่องนี้ ดังนั้นน้ำแป้งที่ได้จากเครื่องไม่จะเข้าหน่วยสกัดแป้งเลย น้ำแป้งจากเครื่องดีแคนเตอร์(หรือเครื่องไม่สำหรับโรงงานที่ไม่ใช้เครื่องดีแคนเตอร์) จะถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องสกัดแป้งเพื่อแยกน้ำแป้งออกจากกากและเส้นใย โดยน้ำแป้งจะผ่านเข้าสู่ชุดสกัดหยากก่อนเพื่อแยกกากหยากออก แล้วจึงเข้าสู่ชุดสกัดละเอียด โดยอาศัยแรงเหวี่ยงในการสกัดทำให้กากและเส้นใยติดอยู่บนแผ่นกรอง จากนั้นจะถูกใบมีดของเครื่องปาดเข้าสู่เครื่องอัดกากมันเพื่อรีดน้ำออก สำหรับน้ำแป้งที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นใยและกาก จะผ่านแผ่นกรองไปรวมกันด้านล่างเพื่อที่จะทำให้บริสุทธิ์ขึ้น โดยผ้ากรองที่มีขนาดเล็กของเครื่องสกัดละเอียดที่มีเป็นชุด ๆ จากนั้นน้ำแป้งจะถูกทำให้บริสุทธิ์และเข้มข้นขึ้นโดยเครื่องแยกแป้ง สารคอลลอยด์จะถูกแยกออกจากน้ำแป้ง ในขณะที่เดียวกันจะใช้น้ำสะอาดป้อนเข้าไปแทนสิ่งเจือปนในน้ำแป้ง สิ่งเจือปนในน้ำแป้งจะถูกแยกเหวี่ยงและไหลขึ้นด้านบนของเครื่อง น้ำแป้งที่เข้มข้นกว่าจะไหลออกด้านล่าง ในโรงงานมักใช้เครื่องแยกแป้ง 2 ชุด เพื่อให้ได้น้ำแป้งที่มีความเข้มข้นสูง ส่วนน้ำทิ้งที่ได้จากเครื่องจะถูกหมุนเวียนนำไปใช้ประโยชน์ใหม่ซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละโรงงาน น้ำแป้งจะถูกลดความชื้นด้วยเครื่องสไลด์แห้งซึ่งเป็นเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำออกจากน้ำแป้งเข้มข้น ได้เป็นน้ำแป้งหมาดที่มีความชื้น ประมาณ

35-40 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นแบ่งขนาดจะถูกเป่าด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 180-200 องศาเซลเซียส ในหน่วยอบแห้ง แล้วตกลงเข้าสู่ไซโคลนร้อน ทำให้แบ่งมีความชื้นลดลงตามต้องการ แล้วถูกดูดเข้าสู่เครื่องไซโคลนเย็นอีกชุดหนึ่ง แล้วผ่านเข้าเครื่องร่อนแบ่งได้เป็นแบ่งละเอียดเพื่อนำไปบรรจุถุงต่อไปโดยผลจากกระบวนการผลิตแบ่งมันสำปะหลังอย่างต่อเนื่อง กากมันสำปะหลังจากโรงงาน จะกลายเป็นวัสดุที่เหลือใช้ในปริมาณมาก ซึ่งมีอยู่ประมาณ 1.5 ล้านตันต่อปี ทั่วประเทศ (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ , 2546) หากไม่มีการนำกากมันสำปะหลังที่เหลือไปใช้ประโยชน์ จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น มลพิษทางอากาศจากกลิ่นไม่พึงประสงค์ เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในกากมันสำปะหลัง จึงเป็นที่น่าสนใจโดยการนำกากมันสำปะหลังมาใช้ประโยชน์ โดยผ่านกระบวนการย่อยสลายทางเอนไซม์หรือทางเคมี ให้ได้เป็นชนิดต่าง ๆ เพื่อเพิ่มมูลค่าเพิ่มขึ้น

1.4.2 วัสดุเหลือจากกระบวนการผลิตแบ่งมันสำปะหลัง

1.4.2.1 เปลือกมันสำปะหลัง

เปลือกมันสำปะหลังเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตแบ่งมันสำปะหลัง จากขั้นตอนการล้าง และปอกเปลือกหัวมันสำปะหลัง ก่อนที่จะสับเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อนำไปเข้าเครื่องโม่บดให้ละเอียดเปลือกมันสำปะหลังมีปริมาณเยื่อใยที่สูงสามารถแสดงได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกและกากมันสำปะหลัง

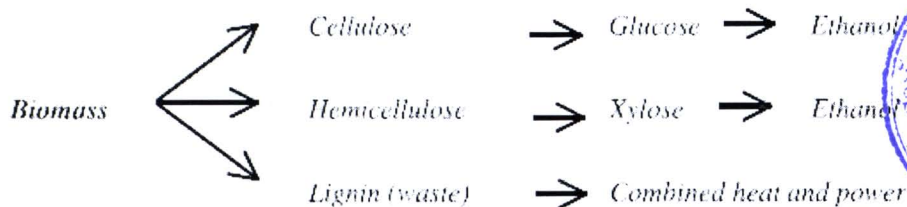
Parameter	เปลือกมันสำปะหลัง (Areghore, 2000)	กากมันสำปะหลัง (Agu et al., 1997)
ไขมัน(%)	0.19	1.00
โปรตีน (%)	3.34	2.30
คาร์โบไฮเดรต (%)	15.14	58.02
เถ้า (%)	3.34	1.50
เส้นใย (%)	11.98	13.53
เซลลูโลส (%)	38.68	14.35
ความชื้น(%)	53.48	71.70

1.4.2.2 กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังเป็นผลพลอยได้จากการผลิตแบ่งมันสำปะหลัง และจัดได้ว่าเป็นวัสดุเหลือใช้ ที่เป็นของแข็งที่มีปริมาณมากที่สุดจากกระบวนการผลิตแบ่งมันสำปะหลัง โดยลักษณะทั่วไปของกากมันสำปะหลังมีลักษณะที่ละเอียด สีขาว และมีความชื้นสูงประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะพบปริมาณกากมันสำปะหลังเฉลี่ย 308.64 ตัน/วัน โดยจะมีปริมาณหัวมันสำปะหลังสดที่ป้อนเข้าสู่โรงงานในปริมาณเฉลี่ย 1,171.2 ตัน/วัน องค์ประกอบทางเคมีได้แสดงดังตารางที่ 1 โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของกากมันสำปะหลังเป็นพวกคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า และแร่ธาตุในปริมาณที่ต่ำ

1.4.3 กระบวนการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลส

โดยส่วนมากวัตถุดิบที่เหลือใช้ทางการเกษตรจะมีองค์ประกอบพวกลิกโนเซลลูโลส จะประกอบด้วย ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของผนังพืช เช่น ฟางข้าว อ้อย มันสำปะหลัง เป็น ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบแต่ละประเภท ดังตารางที่ 2 ลิกโนเซลลูโลสมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงหรือการย่อยสลายจะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงเป็นเอทานอลได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของลิกโนเซลลูโลสเป็นเอทานอล (Murphy และ McCarthy, 2004)

ตารางที่ 2 ปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในวัสดุทางการเกษตร

ชนิดของวัสดุเศษเหลือ	ส่วนประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์)		
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
เศษไม้เหลือทิ้ง	45-56	10-25	18-30
ฟางข้าว	32.1	24	12.5
ฟางข้าวสาลี	30.5	28.4	18.0
ชานอ้อย	33.4	30.0	18.9
ขี้ข้าวโพด	45	35	15
ต้นมันสำปะหลัง	32.2	13.85	26.96

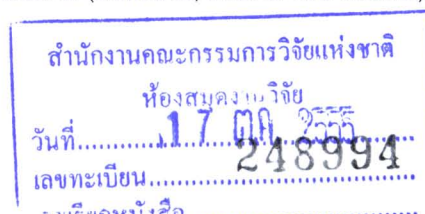
1.4.3.1 การเตรียมลิกโนเซลลูโลส (Pretreatment)

การเตรียมลิกโนเซลลูโลสเป็นที่รู้จักกันมานานแล้ว จุดประสงค์ของการเตรียม เพื่อแยกลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ลดการเป็นผลึกของเซลลูโลส และเพิ่มการเป็นรูปพรุนของวัตถุดิบ สำหรับสิ่งที่ต้องการในการเตรียมลิกโนเซลลูโลสคือ เพิ่มปริมาณการผลิตน้ำตาล ลดการสูญเสียคาร์โบไฮเดรต หลีกเลี่ยงการเกิดตัวยับยั้ง ในขั้นตอนการ hydrolysis และการหมัก และลดต้นทุนในการผลิต สำหรับการผลิตเอทานอลจากลิกโนเซลลูโลส เนื่องจากสารพวกลิกโนเซลลูโลสเป็นสารที่มีความแข็งแรงต่อการย่อยสลาย จึงต้องมีการเตรียมเพื่อให้อ่อนนุ่ม ให้เอนไซม์เข้าถึงและทำปฏิกิริยาได้ดี ในการเตรียมลิกโนเซลลูโลสอาจทำได้โดยใช้วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวภาพ

สำหรับขั้นตอนในการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบในกลุ่มลิกโนเซลลูโลสจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ การปรับสภาพวัตถุดิบก่อนการย่อย (Pretreatment) เป็นการทำลายโครงสร้างที่แข็งแรงของลิกโนเซลลูโลสเพื่อให้เอนไซม์ กรดสามารถเข้าถึงและย่อยได้ง่ายขึ้น และเป็นการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการย่อยโดยจะทำให้วัตถุดิบมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ปริมาณลิกนินลดลง (Ramos, 2003) จะแบ่งได้ดังนี้

ก) **วิธีทางชีววิทยา (Biological pretreatment)** วิธีนี้จะลดปริมาณของลิกนินไปบางส่วน โดยใช้จุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายลิกนินได้ (lignin degrading microorganism) เช่น เชื้อรา และแบคทีเรีย อย่างไรก็ตามวิธีใช้เวลาในการย่อยสลายลิกนินนาน

ข) **วิธีทางเคมี (Chemical pretreatment)** วิธีนี้จะละลายส่วนที่เป็นเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เพื่อแยกส่วนที่เป็นเซลลูโลสเพื่อเตรียมสู่ขั้นตอน acid hydrolysis หรือ enzymatic hydrolysis สารเคมีที่นิยมใช้มีดังนี้ คือ sodium hydroxide, sulfur hydroxide, aqueous ammonia, calcium hydroxide, calcium carbonate, phosphoric acid, alkaline hydrogen peroxide, salt, acetic acid, formic acid, *n*-butylamine และ alcohol (methanol, ethanol หรือ butanol)



ค) **วิธีทางกายภาพ (Physical pretreatment)** เป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลาย lignocellulosic materials ตัวอย่างเช่น milling และ microwave irradiation อย่างไรก็ตามข้อเสียหลักของวิธีนี้ก็คือ ต้องการพลังงานสูง Milling เป็นวิธีที่ลดขนาดของตัวอย่าง เพื่อใช้เพิ่มพื้นที่ผิวและลดส่วนที่เป็น cellulose crystalline และ degree of polymerization โดยเครื่องมือที่ใช้ในการ mill มีหลายแบบ คือ ball mills, hammer mills และ two-roll mills

ง) **วิธีปรับสภาพโดยใช้ไอน้ำร่วมกับความร้อน (Steam pretreatment)** วิธีนี้เป็นการรวมกันระหว่าง Physical และ Chemical pretreatment เป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงร่วมความดัน การปรับสภาพโดยใช้ไอน้ำเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการย่อยคาร์โบไฮเดรตที่มีอยู่ในวัตถุดิบด้วยเอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยาย่อยสลายที่เป็นเซลลูโลส และละลายส่วนที่เป็นเฮมิเซลลูโลส ไปในน้ำ (Shevchenko, 2000) โดยทำลายพันธะ glycosidic linkage แล้วปล่อยเฮมิเซลลูโลสไปในสารละลายโดยไม่ส่งผลต่อส่วนเซลลูโลส ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อย (Wu และคณะ, 1999) การปรับสภาพสามารถใช้ในการประเมินค่าการละลายเฮมิเซลลูโลส และความสามารถของเอนไซม์ในการย่อยเซลลูโลส ซึ่งการปรับสภาพจะไม่เปลี่ยนแปลงทั้งองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ แต่จะช่วยให้อัตราการย่อยมีเพิ่มมากขึ้น (Negro และคณะ, 2003)

1.4.4 กระบวนการย่อยแบ่งและเซลลูโลส ไปเป็นน้ำตาล (Hydrolysis)

1.4.4.1 **การย่อยแบ่งด้วยเอนไซม์** เอนไซม์ที่มีคุณสมบัติในการย่อยแบ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะการทำงานในการย่อยแบ่ง (กล้านรงค์ ศรีวรรต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

ก) **เอนไซม์ย่อยภายนอก (exo-enzyme)**

กลูโคซิเดส (glucoamylase) หรือ เรียกว่าอะไมโลกลูโคซิเดส (amylglucosidase) เป็นเอนไซม์ที่สามารถพบได้ในเชื้อราบางชนิด เช่น *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae* และ *Rhizopus spp.* เอนไซม์นี้จัดเป็นแอลฟาอะไมเลส (α -amylase) ชนิดหนึ่งที่ย่อยจากด้านปลายโมเลกุล (exo-hydrolase) ทั้งพันธะแอลฟา (1,4) และแอลฟา (1,6) โดยจะตัดพันธะแอลฟา (1,4) ได้เร็วกว่าแอลฟา (1,6) เอนไซม์นี้ไม่ต้องการโคแฟกเตอร์ (cofactor) ส่วนเอนไซม์เบต้าอะไมเลส (β -amylase) ย่อยจากด้านปลายโมเลกุล (exo-hydrolase) ครั้งละ 2 โมเลกุลกลูโคส ทำให้ได้น้ำตาลมอลโตสเป็นผลผลิต ส่งผลต่อพันธะแอลฟา (1,4) และเมื่อย่อยมาถึงพันธะแอลฟา (1,6) กิจกรรมของเอนไซม์จะหยุดลง เอนไซม์จะหยุดลง เอนไซม์นี้ต้องการแคลเซียมไอออน (Ca^{++}) เป็นโคแฟกเตอร์

ข) **เอนไซม์ย่อยภายใน (endo-enzyme)**

แอลฟาอะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ย่อยจากภายในโมเลกุล (endo-hydrolase) ที่พันธะแอลฟา (1,4) แต่ไม่สามารถย่อยพันธะแอลฟา (1,6) ผลผลิตที่ได้จากการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้เป็นสารผสมของโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) เอนไซม์นี้ต้องการแคลเซียมไอออน (Ca^{++}) เป็นโคแฟกเตอร์พบเอนไซม์ชนิดนี้ใน *Aspergillus oryzae*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis* และ *Bacillus amyloliquefaciens* เป็นต้น

ค) **เอนไซม์ย่อยพันธะกิ่ง (debranching enzyme)**

พูลูลาเนส (pullulanase) เป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะแอลฟา (1,6) บริเวณกิ่ง เป็นเอนไซม์ที่ย่อยจากปลายโมเลกุลสามารถย่อยจนได้สายกลูโคสที่มีความยาว 2 - 3 หน่วย แต่ไม่สามารถย่อยจนได้กลูโคส 1 หน่วย ส่วนไอโซอะไมเลส (isoamylase) เป็นเอนไซม์ที่สามารถย่อยจุดที่เป็นกิ่งของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินได้ดี ไม่ต้องการโคแฟกเตอร์

1.4.4.2 การย่อยเซลลูโลสในพืชด้วยเอนไซม์

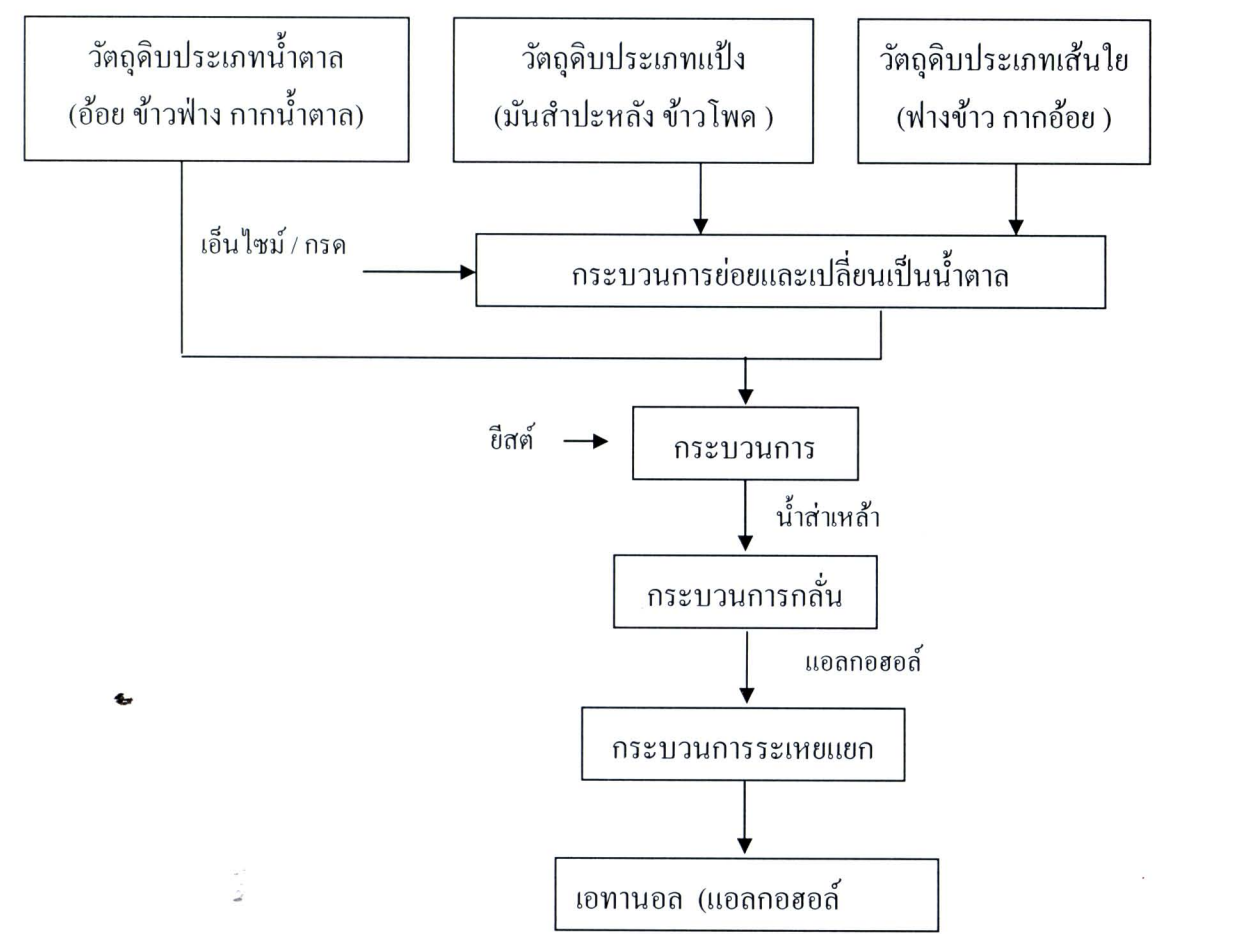
เซลลูโลสจะมีโครงสร้างที่เป็น กลูโคส ต่อกันด้วยพันธะ β -1,4-Glucosidic linkage เพราะฉะนั้นในการย่อยสลายเซลลูโลส จึงต้องใช้เอนไซม์กลุ่มเซลลูเลส ซึ่งจะประกอบด้วยเอนไซม์เชิงซ้อน 3 ส่วนดังนี้

- ก. Endoglucanase (1, 4- β -D-glucan-4-glucanohydrolase; EC 3.2.1.4) ทำหน้าที่ย่อย β -1,4-glycosidic linkage โดยจะตัดแบบสุ่มภายในสายจะได้ Cello-oligosaccharide, Glucose, Cellobiose
- ข. Exoglucanase (1, 4- β -D-glucan cellobiohydrolase; EC 3.2.1.91) ทำหน้าที่ร่วมกับ Endoglucanase ในการย่อยเซลลูโลสจากปลายด้าน non-reducing ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายส่วนใหญ่คือ Cellobiose
- ค. β -Glucosidase (β -D-glucosylhydrolase; EC 3.2.1.21) ทำหน้าที่ย่อย Cellobiose และ Cello-oligosaccharide ได้เป็นกลูโคส

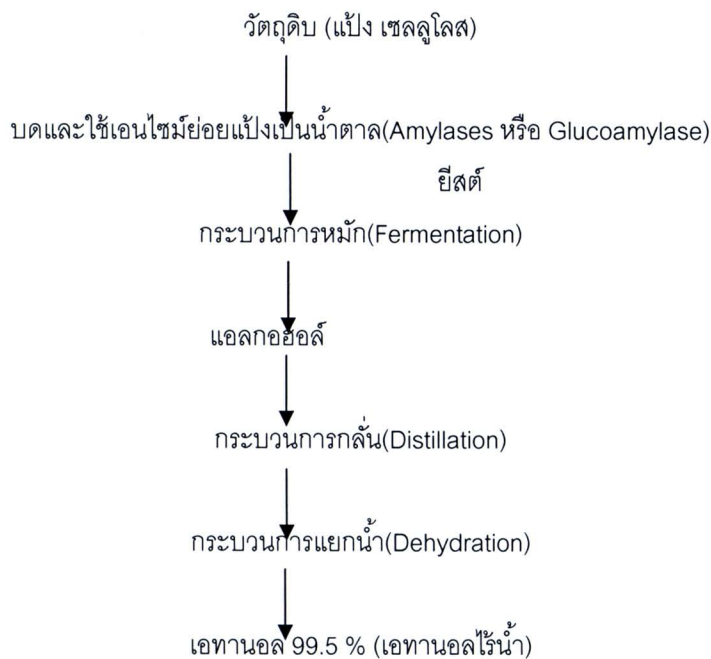
เอนไซม์เซลลูเลสเป็นเอนไซม์พวกไกลโคโปรตีนที่มีอัตราส่วนของคาร์โบไฮเดรตต่อโปรตีนเท่ากับ 1: 1 ละลายน้ำได้ โดยทั่วไปเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตจากจุลินทรีย์มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานคือ 50 องศาเซลเซียส แต่อาจจะต่ำหรือสูงกว่า 50 องศาเซลเซียสขึ้นกับสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่นำมาผลิต (เบญจวรรณ ชิตมณี, 2534)

1.4.5 การผลิตเอทานอล

เอทานอลผลิตได้จากวัตถุดิบหลายชนิดแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือวัตถุดิบประเภทเซลลูโลส วัตถุดิบประเภทแป้ง และวัตถุดิบประเภทน้ำตาล โดยที่วัตถุดิบประเภทน้ำตาลสามารถที่จะหมักเป็นเอทานอลได้เลย ส่วนวัตถุดิบประเภทแป้งและเซลลูโลส จะต้องย่อยเพื่อให้เป็นน้ำตาลก่อนแล้วจึงหมักเป็นเอทานอลได้ วัตถุดิบประเภทเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาได้ง่ายๆมีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ โดยส่วนมากจะเป็นผลพลอยได้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมอย่าง เช่น ฟางข้าว กากอ้อย ชังข้าวโพด เส้นใยปาล์ม ซึ่งวัตถุดิบประเภทนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนที่สำคัญคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารอื่นๆ การผลิตเอทานอลโดยทั่วไปที่นิยมใช้มีกระบวนการดังรูปที่ 2 และ รูปที่ 3



รูปที่ 2 การผลิตเอทานอลโดยกระบวนการหมักจากวัตถุดิบทางการเกษตรต่างๆ
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน , 2549)



รูปที่ 3 กระบวนการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้งและเซลลูโลส
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน , 2549)

Murphy และ McCarthy (2005) ได้รายงานการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลเป็นเอทานอล จากน้ำตาลแต่ละประเภทว่า น้ำตาลแต่ละประเภทเมื่อนำมาหมักเป็นเอทานอลจะได้ปริมาณเอทานอล และผลผลิตอื่นๆที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น กลูโคส 1 โมเลกุล เมื่อนำมาหมักเป็นเอทานอล จะได้เอทานอล 2โมเลกุล และคาร์บอนไดออกไซด์ 2 โมเลกุล

การผลิตเอทานอลโดยยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* กระบวนการหมักเอทานอลโดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ เกิดขึ้นในสภาวะที่ไม่มีอากาศ ยีสต์จะทำการหมักเอทานอลโดยเปลี่ยนกลูโคสเป็นเอทานอลโดยผ่านวิถี Glycolysis หรือวิถี Embden-Meyerhof-Parnas เทพปัญญา (2544) รายงานว่าในกระบวนการหมักจริง น้ำตาล 95 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้นที่สามารถเปลี่ยนเป็นเอทานอล ส่วนที่เหลือ ยีสต์จะใช้สำหรับการบำรุงรักษาเซลล์ และปฏิกิริยาจากการหมัก จะได้ผลิตภัณฑ์ดังนี้ เอทานอล 48.4 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนไดออกไซด์ 46.5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังได้ผลพลอยได้อื่นๆ คือ อะซิโตน 0-0.03 เปอร์เซ็นต์ กรดอะซิติก 0.05-0.25 เปอร์เซ็นต์ กลีเซอรอล 2.5-3.6 เปอร์เซ็นต์ กรดแลกติก 0-0.2 เปอร์เซ็นต์ กรดซัคซินิก 0.5-0.77 เปอร์เซ็นต์ fusel oil 0.25-0.5 เปอร์เซ็นต์ และเฟอฟูรัลเล็กน้อย

โดยกระบวนการหมักเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสภาวะที่ไม่มีอากาศ การเปลี่ยนแปลงน้ำตาลให้เป็นเอทานอล เกิดขึ้นหลายวิธีทาง (pathway) ซึ่งขึ้นอยู่กับเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในกระบวนการหมัก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการหมักมักจะใช้เชื้อจุลินทรีย์ในสกุล *Saccharomyces* sp. และยีสต์สกุลอื่นๆ ซึ่งเอทานอลจะถูกสร้างขึ้นโดยอาศัย Glycolysis หรือ Embden-Meyerhof-Panmas Pathway

1.4.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตเอทานอลจากชีวมวล

ประศาสตร์ พุดระกุล (2540) ทดลองหมักแอลกอฮอล์จากมันเส้นโดยใช้ระบบต่อเนื่อง พบว่า เมื่อย่อยมันเส้นร้อยละ 35 ด้วยเอนไซม์แอฟาอะไมเลส และกลูโคอะไมเลส ได้น้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 23.89 และนำมาหมักด้วยยีสต์

Saccharomyces cerevisiae M 30 ในถังหมักทรงสูงขนาด 100 ลิตร ใช้ระบบหมุนเวียนเซลล์กลับ อัตราการเจือจาง 0.20 ต่อชั่วโมง หมักแอลกอฮอล์ได้ร้อยละ 4.29 คิดเป็นอัตราการผลิต 8.58 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง

กัลยา อยู่นาน (2546) ได้ทำการผลิตเอทานอลจากสารละลายกากมันสำปะหลังร้อยละ 1.50 โดยน้ำหนัก ที่ผ่านการย่อยที่ได้จากการย่อยด้วยกรดซัลฟูริก 0.1 โมลาร์ อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และสารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์แอฟลาอะไมเลส 0.17 ยูนิต ที่ค่าความเป็นกรดต่าง 6.0 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส 0.33 ยูนิต ที่ค่าความเป็นกรดต่าง 4.0 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วย *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5049 จากนั้นนำไปหมักบนเครื่องเขย่าโดยใช้ความเร็ว 159 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง พบว่าสามารถผลิตเอทานอลจากสารละลายกากมันสำปะหลังที่ได้จากการย่อยที่ได้จากการย่อยด้วยกรดซัลฟูริก 0.1 โมลาร์ และสารละลายที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์แอฟลาอะไมเลสกับเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส 0.33 ยูนิต ที่ค่า คือ 0.62 ± 0.01 และ 0.13 ± 0.03 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

Srinorakutara และคณะ (2004) ได้ผลิตเอทานอลจากของเสียของโรงงานแปรงมันสำปะหลัง ซึ่งในขั้นตอนแรกทำการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ได้ปริมาณน้ำตาล 122.4 กรัมต่อลิตร ต่อจากนั้นหมักด้วยเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5596 ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ของความเข้มข้นเชื้อ 1×10^7 CFU/mL ใช้อัตราการเขย่า 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าผลิตเอทานอลได้มากที่สุดร้อยละ 3.84 โดยน้ำหนัก ในเวลา 36 ชั่วโมง แต่มีประสิทธิภาพดีที่สุดที่ 24 ชั่วโมง ได้เอทานอลร้อยละ 3.62 โดยน้ำหนัก

มุกดา คูหิรัญ และคณะ (2546) ได้มีมีแนวทางในการพัฒนาการใช้เซลล์ulos จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อการผลิตเอทานอล โดยได้แบ่งชนิดของวัตถุดิบออกเป็น 3 ประเภท ประเภทที่หนึ่ง คือ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ข้าวโพด (ต้น แปลือกและซัง) และยอดอ้อย ประเภทที่สอง คือ วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมทางการเกษตร เช่น กากอ้อย เศษเยื่อกระดาษและเศษป่าน ส่วนในประเภทสุดท้าย คือ วัสดุเหลือทิ้งประเภทขยะ เช่น เศษกระดาษและเศษไม้ โดยพิจารณาจากองค์ประกอบแล้ว พบว่า ส่วนต่าง ๆ ของข้าวโพด ยอดอ้อยและเศษเยื่อกระดาษจากโรงงานเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงในการนำไปผลิตเอทานอล โดยให้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 99.5 สูงถึง 1.37×10^9 , 9.60×10^8 และ 5.98×10^7 ลิตรต่อปี ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยการเปลี่ยนแปลงเป็นสิ่งที่มูลค่าเพิ่มขึ้น และลดการนำเข้าพลังงานเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ

1.5 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาการผลิตเอทานอลจากเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ได้จากกระบวนการผลิตแปรงมันสำปะหลังที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสและแป้งสูง โดยพิจารณาถึงปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสเซลลูโลสและแป้ง อัตราส่วนผสมของเปลือกและกากมันสำปะหลังต่อผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่ได้ จนถึงการผลิตเอทานอล และค่าใช้จ่ายในการผลิตเอทานอล

1.6 ขอบเขตของการวิจัย

1.6.1 นำเปลือกและกากมันสำปะหลังที่ได้จากโรงงานผลิตแปรงมันสำปะหลัง มาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี คือ ปริมาณแป้งและเซลลูโลส รวมถึงความชื้น

1.6.2 ศึกษาอัตราส่วนปริมาณการผสมระหว่างเปลือกมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมด้วยการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ และการศึกษาการทำงานร่วมของเอนไซม์ในการย่อยเปลือกและกากมันสำปะหลัง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล ปริมาณน้ำตาลกลูโคส และชนิดของน้ำตาลหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์