



การนำของเสียจากการผลิตเอทานอลมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่า

รายงานบทสรุปผู้บริหาร

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

จัดทำโดย

**สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

ตุลาคม 2549

การนำของเสียจากการผลิตเอทานอลมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่า

1. บทนำ

น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ โดยเฉพาะในภาคการคมนาคมขนส่งที่มีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณสูง โดยคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 37.1 ในขณะที่สัดส่วนการใช้พลังงานในสาขาอุตสาหกรรมเท่ากับร้อยละ 36.6 สาขาบ้านอยู่อาศัยและธุรกิจการค้า ร้อยละ 5.6 และภาคเกษตรกรรมร้อยละ 5.6 จากสถานการณ์พลังงานของประเทศที่มีอุปสงค์สูงและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่มีอุปทานที่ต้องพึ่งพาแหล่งน้ำมันดิบนำเข้าจากต่างประเทศที่มีราคาสูงส่งผลทำให้เกิดวิกฤตด้านพลังงานของประเทศ รัฐบาลจึงมีความจำเป็นอย่างเร่งด่วน ที่จะต้องพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนอื่นที่สามารถผลิตขึ้นได้เองภายในประเทศ แหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีศักยภาพที่จะนำมาใช้กับประเทศไทยมีหลายแหล่ง เช่น พลังงานจากชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ และพลังงานลม เป็นต้น แต่แหล่งพลังงานหลาย ๆ แหล่ง เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม มีข้อจำกัดที่ต้องนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง การพัฒนาแหล่งพลังงานดังกล่าวจึงทำได้ยาก แม้ประเทศจะมีความได้เปรียบมากที่จะนำแหล่งพลังงานดังกล่าวมาใช้ แหล่งพลังงานที่เหมาะสมกับประเทศไทยในขณะนี้จึงเป็นพลังงานชีวมวล (Bioenergy) เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ที่มีแหล่งชีวมวลจากภาคการเกษตรมากมาย เช่น มันสำปะหลัง อ้อย แกลบ ชานอ้อย ฯลฯ จึงมีความได้เปรียบทางวัตถุดิบ ปัจจุบันหลายฝ่ายที่มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและเอกชนต่างให้ความสนใจกับการพัฒนาพลังงานทดแทนจากชีวมวล เช่น ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ไบโอดีเซล (Bioethanol) และไบโอดีเซล (Biodiesel)

แก๊สโซฮอลล์ (Gasohol) เป็นชื่อเรียกของน้ำมันเบนซิน (Gasoline) ไร้สารตะกั่วที่ผสมเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) หรือเอทานอล (Ethanol) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 เมื่อสัดส่วนของน้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วต่อเอทานอลเท่ากับ 90:10 จะเรียกส่วนผสมของแก๊สโซฮอลล์นี้ว่า E10 ซึ่งสัดส่วนของเอทานอลในแก๊สโซฮอลล์ในน้ำมันเบนซินสามารถมีได้ตั้งแต่ร้อยละ 5-30 แต่การใช้ไม่เกินร้อยละ 10 นั้นไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ก่อนใช้แก๊สโซฮอลล์ เอทานอลที่ใช้ผสมในน้ำมันเบนซินไร้สารตะกั่วทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งค่าออกซิจีเนต (Oxygenates) และค่าออกเทน (Octane) ของน้ำมันเบนซิน ซึ่งแต่ก่อนจะใช้สาร MTBE หรือ Methyl Tertiary Butyl Ether เป็นสารเติมแต่งค่าออกซิจีเนต และค่าออกเทน เอทานอลในแก๊สโซฮอลล์นอกจากจะเป็นสารเพิ่มค่าออกเทนแล้ว ยังมีประโยชน์อื่น ๆ อีก กล่าวคือโมเลกุลของเอทานอลไม่มีสารประกอบซัลเฟอร์ เบนซิน หรือสารประกอบอะโรมาติกส์ (Aromatics) หรือโอเลฟินส์ (Olefins) ซึ่งเป็นสารประกอบที่สร้างมลพิษทางอากาศและมีผลต่อสุขภาพ ดังนั้นการใช้เอทานอลจึงมีส่วนช่วยลดปัญหามลภาวะที่เกิดขึ้นได้

จากความจำเป็นในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนที่หมุนเวียน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถผลิตได้เองภายในประเทศ ส่งผลให้อุตสาหกรรมการผลิตเอทานอล เพื่อใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงในรูปแบบของแก๊สโซฮอล์ของประเทศไทยขยายตัวอย่างมาก โดยปัจจุบันนี้ประเทศไทยมีกำลังการผลิตเอทานอลประมาณ 0.550 ล้านลิตรต่อวัน และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 3 ล้านลิตรต่อวัน ภายในปี 2554 ตามแผนยุทธศาสตร์ด้านพลังงานของประเทศ

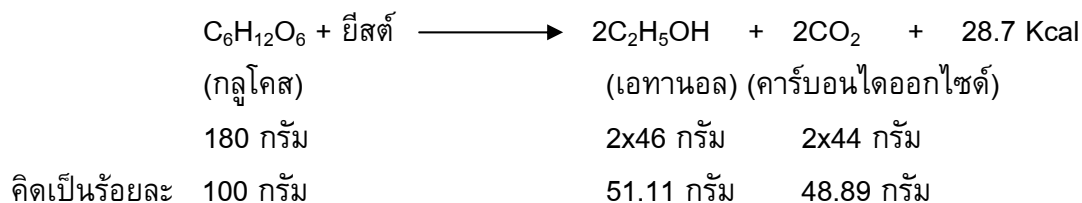
ถึงแม้ว่าอุตสาหกรรมไบโอเอทานอลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่จะมีการขยายตัวอย่างมาก แต่ยังมีรายละเอียดส่วนปลีกย่อยต่างๆ ของอุตสาหกรรมนี้ที่ควรคำนึงถึง เพื่อให้อุตสาหกรรมนี้มีการพัฒนาอย่างครบวงจรและเป็นระบบ และเป็นอุตสาหกรรมตัวอย่างแก่อุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป การจัดการอุตสาหกรรมไบโอเอทานอลเพื่อเป็นเชื้อเพลิงจึงมีข้อพิจารณาหลายประการ อันได้แก่ การจัดการวัตถุดิบ การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต การจัดการด้านการขนส่ง การตลาด รวมถึงการจัดการของเสียและผลพลอยได้จากการกระบวนการผลิตเอทานอล ซึ่งเป็นสิ่งหนึ่งที่ต้องมีดำเนินการพร้อมๆ กับการผลัดกันอุตสาหกรรมเอทานอล เช่นเดียวกับอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลจากข้าวโพดในประเทศสหรัฐอเมริกา หรืออุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลจากอ้อยในประเทศบราซิลที่มีการจัดการของเสียและผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต จนสามารถสร้างมูลค่าจากผลิตภัณฑ์ที่มาจากของเสียและผลพลอยได้ รวมถึงสามารถลดปริมาณของเสียที่อาจจะเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยลงได้ด้วย

จากเหตุผลดังกล่าวกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงานจึงได้มอบให้มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นผู้ศึกษาวิจัยการนำของเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่า เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอุตสาหกรรมเอทานอลของประเทศต่อไป

2. เทคโนโลยีการผลิตเอทานอล

เอทานอล (Ethanol) หรือที่เรียกว่าเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) หรือเกรนแอลกอฮอล์ (Grain alcohol) หรือแอลกอฮอล์ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี จุดติดไฟ และระเหยง่าย มีสูตรทางเคมีคือ C_2H_5OH สามารถละลายได้ในน้ำและสารละลายอื่นๆ มีจุดเดือด 78.32 องศาเซลเซียส จุดเยือกแข็ง - 243.1 องศาเซลเซียส เอทานอลสามารถผลิตได้ 2 วิธี คือ การสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical Synthesis) และการหมักโดยจุลินทรีย์ (Yeast Fermentation) ปัจจุบันเอทานอลที่ผลิตส่วนใหญ่จะได้จากกระบวนการทางชีวภาพที่หมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์ เอทานอลที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีมีปริมาณน้อยมาก โดยคิดเป็นประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ทั้งหมดในโลก

สำหรับการผลิตเอทานอลด้วยกระบวนการหมัก จะอาศัยกระบวนการทำงานของเชื้อยีสต์ โดยเชื้อยีสต์นั้นจะใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นอาหารและเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอล โดยผ่านกระบวนการที่เรียกว่าไกลโคไลซิส (Glycolysis) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งตามทฤษฎีแล้วในกระบวนการหมักน้ำตาลกลูโคสของยีสต์นั้น น้ำตาลกลูโคส 100 กรัม จะถูกเปลี่ยนเป็นเอทานอล 51.11 กรัม และคาร์บอนไดออกไซด์ 48.89 กรัม นอกจากนี้ยังมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นอีก 28.7 กิโลแคลอรี (Kcal) ดังแสดงได้ดังภาพที่ 1

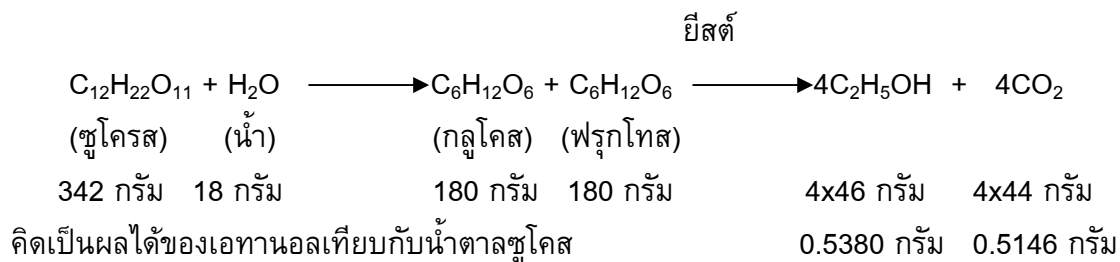


ภาพที่ 1 การเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลโดยการหมักของยีสต์

ดังนั้นวัตถุดิบที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบสามารถนำมาใช้ในการหมักเอทานอล โดยวัตถุดิบที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัตถุดิบประเภทน้ำตาล เช่น อ้อย และกากน้ำตาล วัตถุดิบประเภทแป้ง เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด และอื่นๆ และประเภทสุดท้ายคือวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic material) ที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เช่น ฟางข้าว กากอ้อย และชังข้าวโพด เป็นต้น

การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทน้ำตาล

วัตถุดิบประเภทน้ำตาลที่ใช้การผลิตเอทานอล ได้แก่ อ้อย กากน้ำตาล และบีบน้ำตาล ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลซูโครส ที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ประกอบด้วย น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิด คือ น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโทส ในการหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครสนั้นมีขั้นตอนดังนี้ คือ ขั้นแรกน้ำตาลซูโครสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ใต้น้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสอย่างละโมเลกุล จากนั้นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสจะถูกยีสต์เปลี่ยนไปเป็นเอทานอลและคาร์บอนไดออกไซด์อย่างละ 4 โมเลกุล



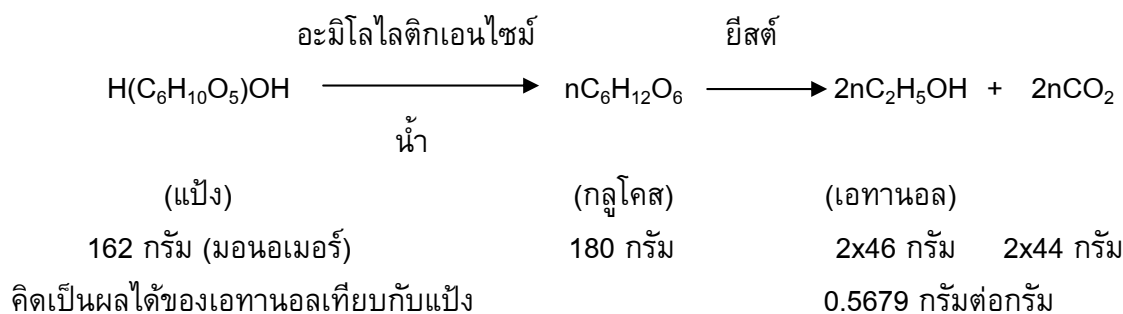
ภาพที่ 2 การหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครส

การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้ง

วัตถุดิบประเภทแป้งที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ มันสำปะหลัง (ทั้งหัวมันสด และมันเส้น) ข้าวโพด ข้าว และเมล็ดข้าวฟ่าง เป็นต้น โดยแป้งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส เมื่อนำแป้งมาผ่านกระบวนการย่อย (Hydrolysis) ด้วยกรดหรือเอนไซม์จะได้น้ำตาลกลูโคสที่สามารถเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอลได้ โดยปัจจุบันจะนิยมย่อยแป้งด้วยเอนไซม์มากกว่ากรด เนื่องจากสามารถควบคุมการย่อยได้ง่ายกว่าและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์มีความบริสุทธิ์มากกว่า การย่อยแป้งด้วยเอนไซม์จะประกอบด้วยการย่อย 2 ครั้ง คือ

- การย่อยแป้งครั้งแรกหรือการทำให้แป้งเหลว (Liquefaction) ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (α -amylase) ย่อยแป้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าเดกทริน (Dextrin)

- การย่อยแป้งครั้งสุดท้ายหรือการเปลี่ยนเป็นน้ำตาล (Saccharification) ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลส (Glucoamylase) ย่อยเดกทรินที่อุณหภูมิ 55-65 องศาเซลเซียส ให้ได้น้ำตาลกลูโคส ซึ่งยีสต์สามารถใช้หมักเป็นเอทานอลได้ โดยกระบวนการหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3

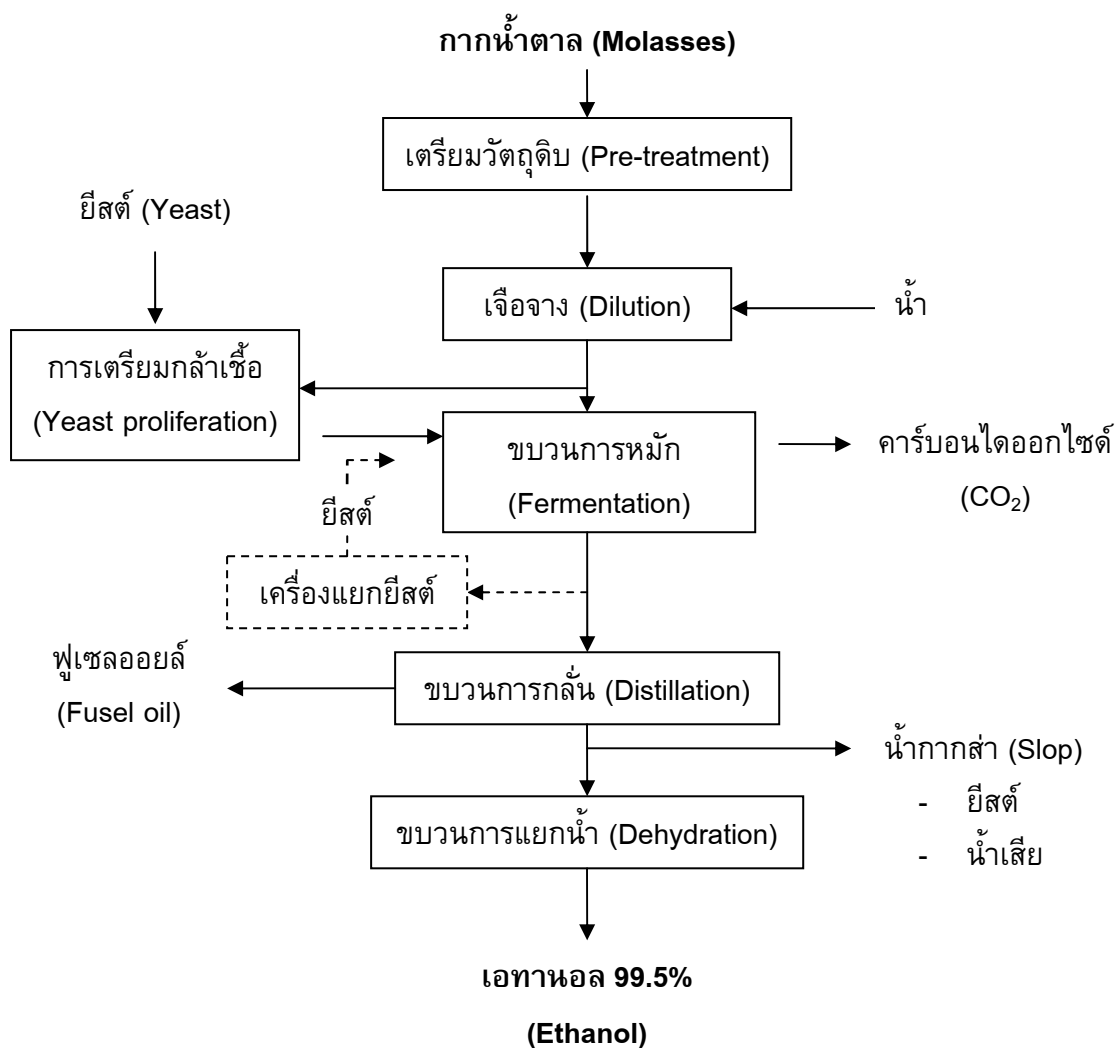


ภาพที่ 3 การหมักเอทานอลจากแป้ง

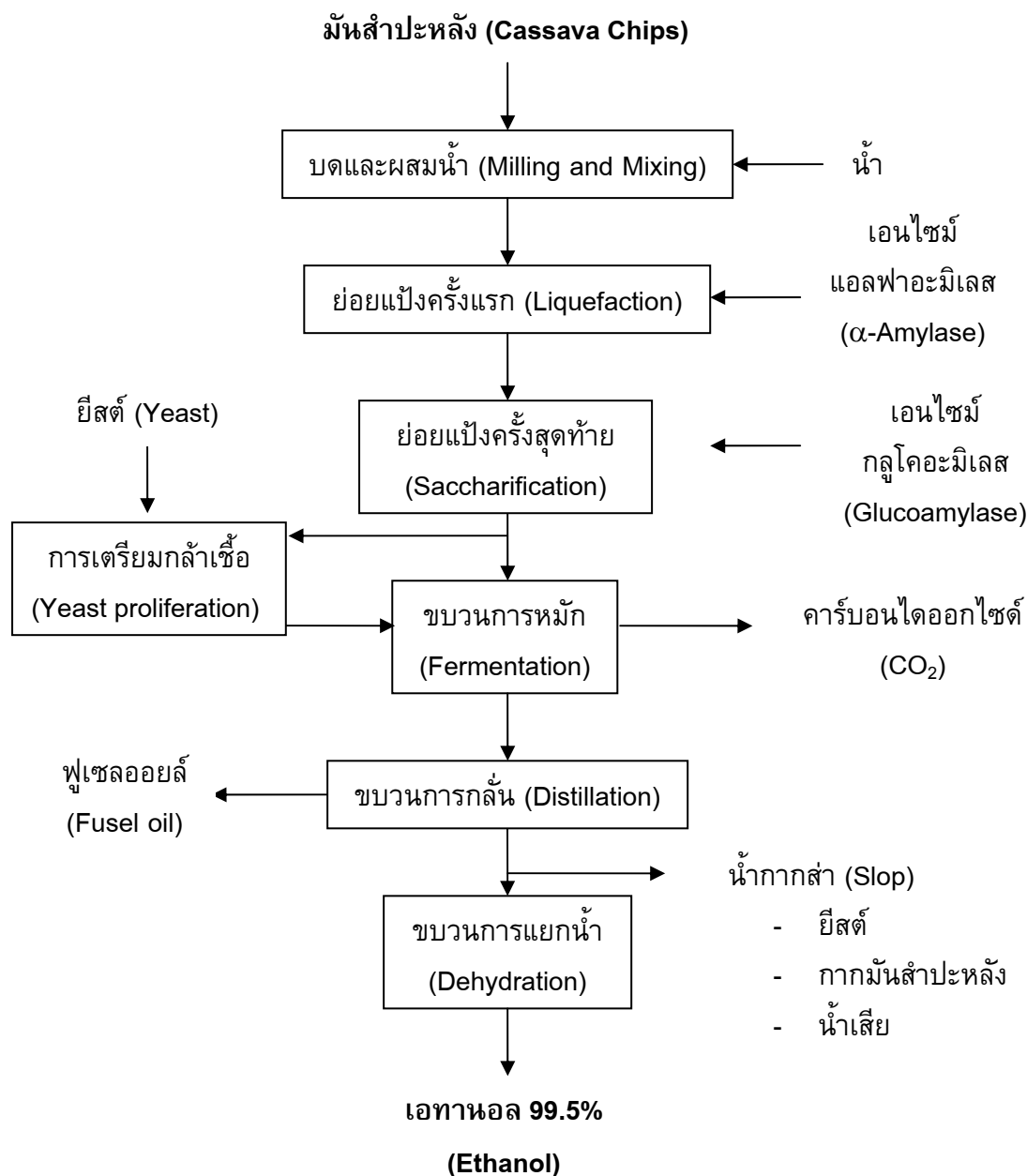
การหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส

วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ ฟางข้าว กากอ้อย ชังข้าวโพด และเศษไม้ เป็นต้น วัตถุดิบประเภทนี้มีองค์ประกอบที่เป็น เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และ ลิกนิน (Lignin) โดยเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวและอยู่ในรูปผลึก มีลักษณะเป็นเส้นใยเหนียวและไม่ละลายน้ำ เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโทส (Pentose) หลายชนิด เช่น ไซโลส (Xylose) แมนโนส (Mannose) และอะราบินอส (Arabinose) เป็นต้น ส่วนลิกนินเป็นพอลิเมอร์ของฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane) ซึ่งทนต่อการย่อยสลายอย่างมาก

ขั้นตอนในการผลิตเอทานอล โดยทั่วไปจะประกอบด้วยการเตรียมวัตถุดิบ (Raw material preparation) การหมัก (Fermentation) การกลั่น (Distillation) และการกำจัดน้ำ (Dehydration) ซึ่งในกรณีที่วัตถุดิบเป็นแป้งหรือวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส จะต้องมีขั้นตอนการย่อยเพื่อ เปลี่ยนเป็นน้ำตาลก่อนการหมัก (Hydrolysis) แผนภาพการผลิตเอทานอลโดยใช้กากน้ำตาลและ มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบแสดงดังภาพที่ 4 และ 5 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 กระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล



ภาพที่ 5 กระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง

3. สถานภาพโรงงานการผลิตเอทานอลในประเทศไทย

3.1 สถานภาพกระบวนการผลิตของโรงงานเอทานอล

จากการสำรวจสถานภาพการผลิตเอทานอลของโรงงานผลิตเอทานอลในประเทศไทย พบว่าโรงงานผลิตเอทานอลจะใช้วัตถุดิบหลัก 2 ประเภท คือ วัตถุดิบที่เป็นน้ำตาล ได้แก่ กากน้ำตาล และวัตถุดิบที่เป็นแป้ง ได้แก่ มันสำปะหลัง ทั้งนี้เทคโนโลยีที่ใช้ผลิตเอทานอลใน

ประเทศไทยจะมีหลากหลาย เช่น เทคโนโลยีของ Praj จากประเทศอินเดีย (www.praj.com) เทคโนโลยีของ Katzen ประเทศสหรัฐอเมริกา (www.katzen.com) เทคโนโลยีของ Maguin Interis ประเทศฝรั่งเศส (www.maguin.com) เทคโนโลยีของ Alfa Laval ประเทศอินเดีย (www.alfalaval.com) และเทคโนโลยีของ Shandong ประเทศจีน (www.sdmecho.com) เป็นต้น โดยแต่ละเทคโนโลยีจะมีขั้นตอนการผลิตที่คล้ายคลึงกัน แต่แตกต่างกันในรายละเอียดของกระบวนการผลิต โดยขั้นตอนในการผลิตทั่วไปจะประกอบด้วย การเตรียมวัตถุดิบ (Raw material preparation) การหมัก (Fermentation) การกลั่น (Distillation) และการกำจัดน้ำ (Dehydration) ในกรณีที่วัตถุดิบเป็นมันสำปะหลัง จะต้อง มีขั้นตอนการย่อยเพื่อเปลี่ยนเป็นน้ำตาลก่อนการหมัก (Hydrolysis) รายละเอียดของกระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลและมันสำปะหลังในรูปของ มันเส้นแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขั้นตอนกระบวนการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบมันสำปะหลังในรูปมันเส้นและ กากน้ำตาล

วัตถุดิบและ ขั้นตอนการผลิต	กระบวนการผลิต	
	มันเส้น	กากน้ำตาล
1. การเตรียมวัตถุดิบ	- โม่ ผสมน้ำร้อนให้ได้ความเข้มข้นประมาณ 17-25% Total Solid	- การกำจัดสิ่งปนเปื้อน (Calcium) ด้วย H_2SO_4 และแยกตะกอนออก (อาจไม่มีการทำในบางเทคโนโลยี) - เจือจางความเข้มข้นประมาณ 25% Total Solid
2. การย่อยแบ่งเป็น น้ำตาล	- ส่วนใหญ่ใช้ระบบการย่อยและหมักแบบ SSF (Simultaneous Saccharification and Fermentation) โดยย่อย Liquefaction ด้วย เอนไซม์ α -Amylase $100-105^{\circ}C$ 1-2 ชั่วโมง และ Presaccharification ด้วยเอนไซม์ Glucoamylase $50-55^{\circ}C$ 1-2 ชั่วโมง	- ไม่มี
3. การหมัก	- ย่อยและหมักแบบ SSF โดยระบบการหมักจะเป็นแบบ Batch Fermentation ที่ละถัง - ประสิทธิภาพการหมักประมาณ 90-91% (น้อยกว่ากากน้ำตาลเนื่องจากสูญเสีย ประสิทธิภาพในขั้นตอนการย่อยด้วย)	- แบบ Continuous Fermentation, Fed Batch และ Batch - ประสิทธิภาพการหมักประมาณ 92%
4. การกลั่นและทำให้ บริสุทธิ์	- Distillation และ Molecular Sieve Dehydration - ประสิทธิภาพการกลั่นประมาณ 98.5%	- Distillation และ Molecular Sieve Dehydration - ประสิทธิภาพการกลั่นประมาณ 98.5%

ที่มา : ข้อมูลที่ได้จากแหล่งอ้างอิง และการสำรวจโรงงาน

3.2 สถานภาพการจัดการของเสียและผลพลอยได้ของกระบวนการผลิตเอทานอลของโรงงานในประเทศไทย

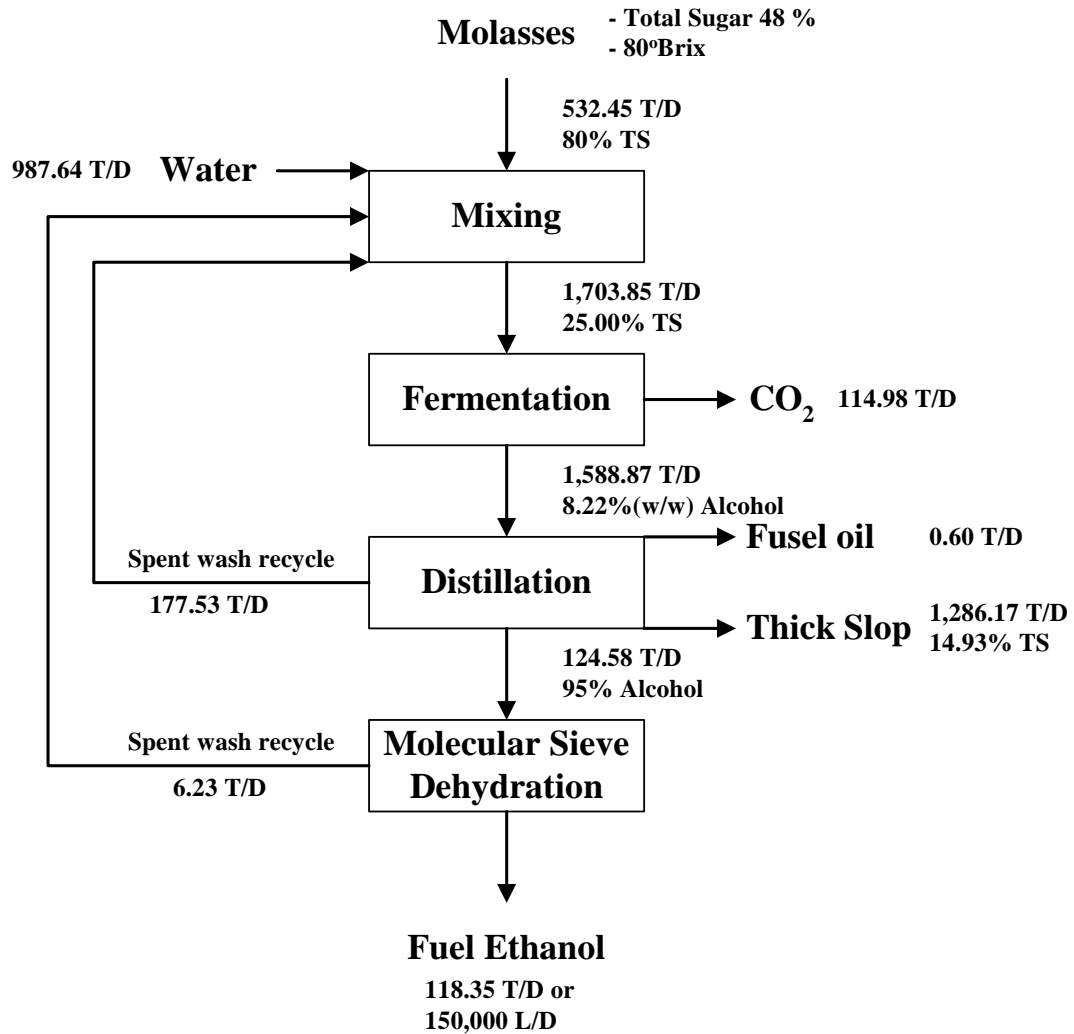
ในกระบวนการผลิตเอทานอลนอกจากเอทานอลแล้ว ยังมีผลพลอยได้อื่น ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมัก และฟูเซลอยล์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกลั่น รวมถึงของเสียจากกระบวนการผลิตคือน้ำเสีย หรือน้ำกากส่า ซึ่งมีเซลล์ยีสต์ปนอยู่เกิดขึ้นด้วย ทั้งนี้คุณภาพของน้ำกากส่าจะแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้และผลได้รวมถึงของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตเอทานอลทั้งหมด (ตารางที่ 2) สามารถนำมาเขียนสมดุลมวลของกระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลและมันเส้น แสดงดังภาพที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

จากการสำรวจสถานภาพการจัดการของเสียและผลพลอยได้ของโรงงานผลิตเอทานอลที่มีในปัจจุบัน พบว่า โรงงานยังไม่มีติดตั้งระบบการเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และฟูเซลอยล์ ซึ่งเป็นส่วนผสมของแอลกอฮอล์ชนิดอื่นที่มีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอล ในส่วนของน้ำกากส่าจะยังไม่มีแยกเซลล์ยีสต์มาใช้ประโยชน์ แต่จะนำน้ำกากส่าไปผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อใช้ภายในโรงงาน ในบางโรงงานที่มีการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลจะมีการนำน้ำกากส่ามาใช้ในการผลิตปุ๋ย โดยผสมกับกากที่เหลือทิ้งจากการกรองน้ำเชื่อมของโรงงานน้ำตาล หรือขานอ้อย เป็นต้น

ตารางที่ 2 ข้อมูลการสำรวจโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังในรูปมันเส้นและกากน้ำตาล
 จำนวนที่กำลังการผลิต 150,000 ลิตรต่อวัน

วัตถุดิบและผลได้	ปริมาณและคุณภาพ			
	มันเส้น		กากน้ำตาล	
	ปริมาณ	คุณภาพ	ปริมาณ	คุณภาพ
วัตถุดิบ (INPUT)				
1. วัตถุดิบ (ตันต่อวัน)	350-370	- ความชื้น 12-16% - ปริมาณแป้ง 64%	540-550	- น้ำตาลทั้งหมด 48-50% - ของแข็งที่ละลายได้ 80 บริกซ์
2. น้ำ (ลบ.ม.ต่อวัน)	1,200-1,500	-	1,000-1,300	-
3. สารเคมี				
- ยีสต์ผง (กิโลกรัมต่อวัน)	20-80	-	20-80	-
- เอนไซม์ (กิโลกรัมต่อวัน)	20-800	-	-	-
- สารเคมีอื่นๆ (กิโลกรัมต่อวัน)	1,000-5,000	-	1,000-5,000	-
4. พลังงาน				
- ไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง/วัน)	25,000-47,000	380 V 50 Hz	22,000-44,000	380 V 50 Hz
- ไอน้ำ (ตันต่อวัน)	300-500	ความดัน 3-10 บาร์	200-400	ความดัน 3-10 บาร์
ผลได้ (OUTPUT)				
1. เอทานอล (ลิตร/วัน)	150,000	- ตามมอก. (640-2533)	150,000	- ตามมอก. (640-2533)
2. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ตัน/วัน)	100-120	-	100-120	-
3. Fusel oil (ลิตร/วัน)	300-600	-	300-600	-
4. น้ำกากส่า (ลบ.ม.ต่อวัน)	1,400-1,600	- TS 5-7% - COD 40,000-60,000 mg/l - BOD 15,000-35,000 mg/l	1,000-1,300	- TS 15% - COD 100,000-150,000 mg/l - BOD 40,000-70,000 mg/l
4.1 ตะกอนเปียก (ตันต่อวัน)	100-200	20-30% TS	-	-
4.2 น้ำเสีย (ลบ.ม.ต่อวัน)	1,200-1,400	- 2-4% TS - COD 20,000-40,000 ppm - BOD 10,000-30,000 ppm	1,000-1,300	- 10-12% TS - COD 120,000-150,000 ppm - BOD 40,000-70,000 ppm

ที่มา : ข้อมูลจากแหล่งอ้างอิงและการสำรวจโรงงาน

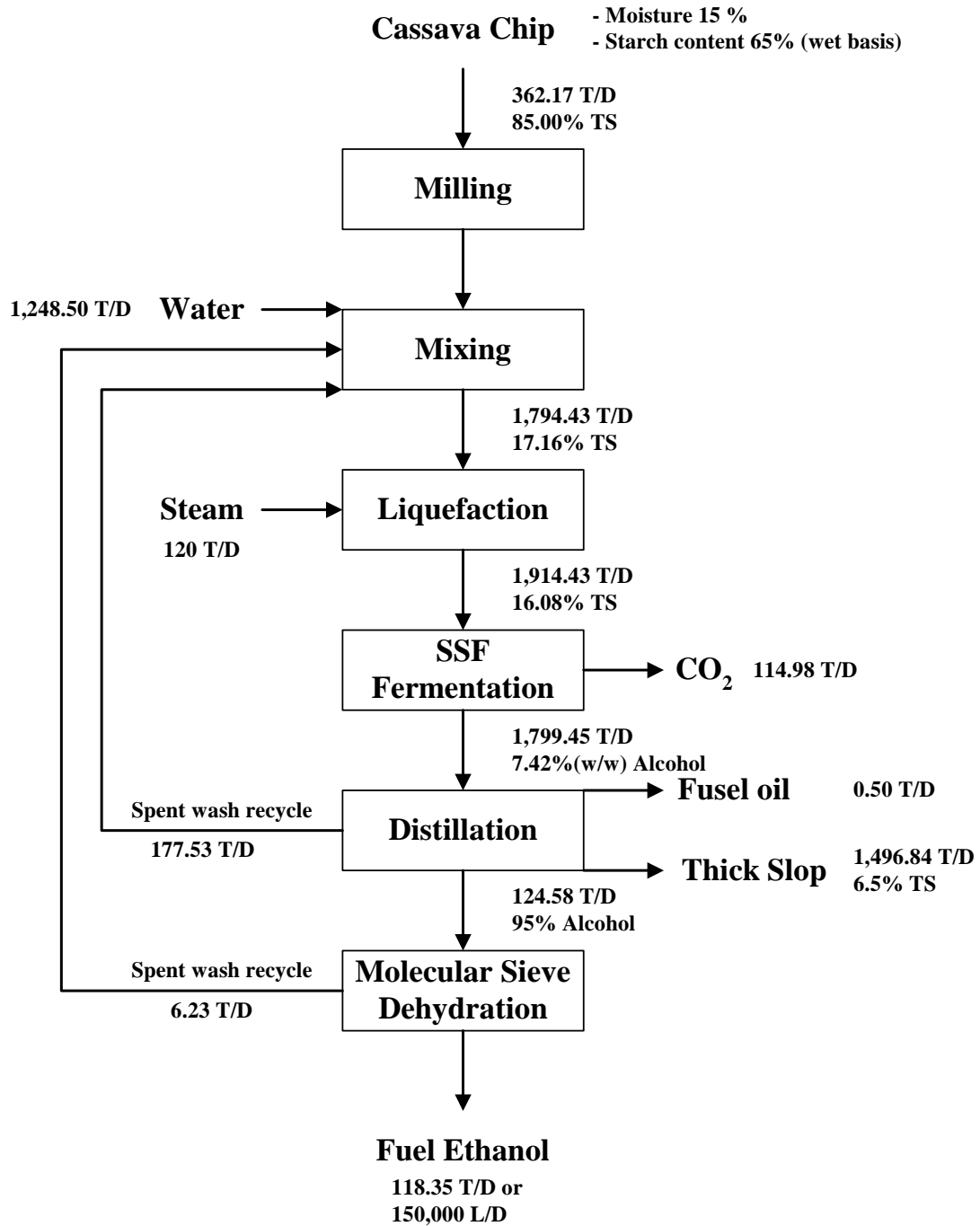


ภาพที่ 6 สมดุลมวลการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล

หมายเหตุ - T/D = Ton/Day, TS = Total Solid และ L/D = ลิตร/วัน

- ประสิทธิภาพการหมัก 92%, ประสิทธิภาพการกลั่น 98.5%

ที่มา : ข้อมูลจากแหล่งอ้างอิงและการสำรวจโรงงาน



ภาพที่ 7 สมดุลมวลการผลิตเอทานอลจากมันเส้น

หมายเหตุ - T/D = Ton/Day, TS = Total Solid และ L/D = ลิตร/วัน
- ประสิทธิภาพการหมัก 90%, ประสิทธิภาพการกลั่น 98.5%

ที่มา : ข้อมูลจากแหล่งอ้างอิงและการสำรวจโรงงาน

4. การใช้ประโยชน์จากเอทานอลและผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเอทานอล

4.1 การใช้ประโยชน์จากเอทานอล

4.1.1 กรดอะซิติก (Acetic acid)

กรดอะซิติกหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กรดเอทานอิก (Ethanoic acid) มีสูตรทางเคมี คือ CH_3COOH เป็นกรดอินทรีย์ (Organic acid) ชนิดหนึ่งที่เป็นส่วนผสมของน้ำส้มสายชู และยังเป็นสารเคมีที่สำคัญในการทำปฏิกิริยาเคมี เพื่อผลิตสารอนุพันธ์ของกรดอะซิติก เช่น ไวนิลอะซิเตท (Vinyl acetate) กรดเทเรพทาลิก (Terephthalic acid, TPA) อะซิเตทเอสเทอร์ (Acetate ester) และอะซิติกแอนไฮไดรด์ (Acetic anhydride) รวมถึง เซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose acetate) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น กรดอะซิติกสามารถผลิตได้จากกระบวนการทางเคมี ได้แก่ วิธีเมทานอลคาร์บอนิลเลชัน (Methanol carbonylation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรม วิธีเอทิลีนออกซิเดชัน (Ethylene oxidation) และวิธีอะซีทัลดีไฮด์ออกซิเดชัน (Acetaldehyde oxidation) และกระบวนการทางชีวภาพโดยการหมัก (Fermentation) โดยสองวิธีหลังนี้สามารถใช้เอทานอลเป็นสารตั้งต้นได้

สำหรับปริมาณการผลิตกรดอะซิติกในประเทศไทย พบว่า ยังมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ ทำให้ประเทศไทยต้องนำเข้ากรดอะซิติกจากต่างประเทศ โดยในปี 2548 มีปริมาณนำเข้า 90,761 ตัน มีมูลค่าประมาณ 2,500 ล้านบาท โดยกรดอะซิติกจะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกรดเทเรพทาลิก (TPA) สำหรับใช้ในการผลิตพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลท (Polyethylene terephthalate; PET) ที่ใช้ทำขวดพลาสติก ซึ่งมีความต้องการกรดอะซิติกประมาณ 157,200 ตันต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 80 ของปริมาณการใช้ทั้งหมด รองลงมาเป็นการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมสีและยา เป็นต้น

4.1.2 เอทิลอะซิเตท (Ethyl acetate)

เอทิลอะซิเตท หรือเอทิลเอทานอเอต (Ethyl ethanoate) หรืออะซิติกเอสเทอร์ (Acetic ester) หรืออะซิติกอีเทอร์ (Acetic ether) มีสูตรทางเคมีคือ $\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3$ จัดเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ในกลุ่มของเอสเทอร์ เอทิลอะซิเตทมีการใช้งานที่หลากหลายทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมที่ไม่ใช่อาหาร ได้แก่ ใช้เป็นสารปรุงแต่งกลิ่นสังเคราะห์ในผลิตภัณฑ์ขนมหวาน ลูกกวาด ไอศกรีม และเค้ก รวมถึงใช้สกัดสารคาเฟอีนออกจากชาและกาแฟ ใช้เป็นตัวทำละลายสำหรับยางไม้ น้ำมัน ไขมัน และเซลลูโลส ใช้ในทางการแพทย์ ใช้

ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ใช้ทำแลคเกอร์ สี วานิช สารเคลือบผิว น้ำยาขัดเงา และใช้ในการผลิตหมึกพิมพ์และน้ำหอม เป็นต้น เอทิลอะซิเตทผลิตได้หลายวิธี แต่ส่วนใหญ่ผลิตโดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างเอทานอลและกรดอะซิติก นอกจากนี้ยังสามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) ของเอทานอล

ในด้านการตลาด พบว่าประเทศไทยมีผู้ผลิตภายในประเทศเพียงรายเดียว ทำให้ต้องนำเข้าเอทิลอะซิเตทจากต่างประเทศ โดยในปี 2548 มีการนำเข้าปริมาณกว่า 24,000 ตัน คิดเป็นมูลค่า 950 ล้านบาท โดยมีราคาผลิตภัณฑ์ประมาณ 39 บาทต่อกิโลกรัม

4.2 การใช้ประโยชน์ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตเอทานอล

4.2.1 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นในระหว่างการหมักน้ำตาลเป็นเอทานอลด้วยเชื้อยีสต์ ซึ่งจะมีปริมาณประมาณครึ่งหนึ่งโดยน้ำหนักของน้ำตาลกลูโคสที่ใช้ในการหมัก จากการผลิตเอทานอล 150,000 ลิตร/วัน จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 100-120 ตัน/วัน การใช้ประโยชน์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถใช้ได้ทั้งสถานะที่เป็นก๊าซ (Gas) ของเหลว (Liquid CO₂) และของแข็ง (Solid CO₂) โดยจะใช้มากในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้เป็นสารทำความเย็น และอุตสาหกรรมเครื่องดื่มประเภทที่มีการอัดก๊าซ นอกจากนี้ยังมีการใช้ในอุตสาหกรรมอื่นบ้าง ได้แก่ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมการเชื่อมโลหะ พลาสติกและยาง และกลีเซอรอล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถผลิตได้จากหลายกระบวนการด้วยกัน ได้แก่ กระบวนการเผาไหม้ (Combustion) ของเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และผลพลอยได้จากกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ กระบวนการสังเคราะห์แอมโมเนีย การอบปูนขาว (CaCO₃) ในเตาเผาการผลิตโซเดียมฟอสเฟตจากไบโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) และกระบวนการหมักเอทานอล

4.2.2 ฟิวเซลอยล์ (Fusel oil)

ฟิวเซลอยล์ หรือที่บางครั้งเรียกว่าฟิวเซลแอลกอฮอล์ (Fusel alcohol) ใช้เรียกส่วนผสมของแอลกอฮอล์อื่นที่มีจุดเดือดสูงกว่าเอทานอล ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกลั่นเอทานอล ฟิวเซลอยล์ประกอบด้วยแอลกอฮอล์หลายชนิด ส่วนมากเป็นองค์ประกอบที่มีคาร์บอน 3, 4 หรือ 5 อะตอม ได้แก่ ไอโซเอมิลแอลกอฮอล์ (Isoamyl alcohol) และแอคทีฟเอมิลแอลกอฮอล์ (Active amyl alcohol) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีมูลค่าสูง นอกจากนี้ยังมีบิวทานอล (Butanol) และโพรพานอล (Propanol) อยู่ด้วย การใช้ฟิวเซลอยล์จะต้องมีการแยกแอลกอฮอล์ออกโดยวิธีการกลั่น วิธีทางโครมาโตกราฟี หรือวิธีทางเคมี และผ่าน

กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ แล้วจึงนำไปแอลกอฮอล์ที่ได้ไปใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมจำพวกเรซินและพลาสติก อุตสาหกรรมแล็คเกอร์ และหมึกพิมพ์

4.2.3 DDGS (Dry distillers grains with solubles)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรวมกันของกากที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งเป็นส่วนของกากสำที่เป็นของแข็ง กับส่วนของของแข็งที่ละลายน้ำได้ในน้ำสำหลังการกลั่นแยกเอทานอล แล้วทำแห้ง เพื่อให้มีความชื้นเหลือประมาณร้อยละ 10 ถึง 12 ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีการใช้ข้าวโพดเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล จะมีการผลิต DDGS ที่ได้จากการนำกากแห้งที่เป็นของแข็งผสมกับส่วนของแข็งที่ละลายน้ำได้ เพื่อใช้เลี้ยงสัตว์ โดย DDGS จะเป็นแหล่งของโปรตีนและพลังงานที่สำคัญสำหรับโคนมและโคเนื้อ อีกทั้งเป็นแหล่งของไฟเบอร์และฟอสฟอรัสของสัตว์จำพวกที่ไม่ใช่สัตว์เคี้ยวเอื้อง รวมทั้งสัตว์ปีกและสัตว์น้ำ ขั้นตอนการผลิต DDGS จะประกอบด้วย การแยกส่วนที่เป็นของเหลวและของแข็งออกจากกัน (Separation) โดยเครื่องปั่นเหวี่ยง นำส่วนที่เป็นของเหลวที่เหลือหลังจากกลั่นแยกเอทานอลไประเหย เพื่อทำให้เข้มข้นขึ้น (Evaporation) นำไปผสมกับส่วนของแข็งแล้วทำให้แห้ง (Drying) และเย็นตัวลง (Cooling) โดยรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกจำหน่ายออกสู่ท้องตลาดมีทั้งในรูปของผงแห้ง และในรูปของ DDGS อัดเม็ด DDGS ที่ผลิตจากมันสำปะหลังจะมีปริมาณโปรตีนประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งต่ำกว่า DDGS ที่ได้จากข้าวโพด ซึ่งมีโปรตีนประมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนักแห้ง

4.2.4 ยีสต์ (Yeast)

ยีสต์ (*Saccharomyces cerevisiae*) ที่แยกได้จากการหมักเป็นแหล่งโภชนาการที่สำคัญ โดยในเซลล์ยีสต์จะประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแห้ง คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 34 โดยน้ำหนักแห้ง ไขมันร้อยละ 4 โดยน้ำหนักแห้ง และวิตามินบี จึงสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนทดแทน และอาหารเสริมสำหรับการเจริญเติบโตของทั้งมนุษย์และสัตว์ หรือสกัดแยกเป็นยีสต์สกัด (Yeast extract) และผนังเซลล์ยีสต์ (Yeast cell wall) ยีสต์สกัดสามารถนำมาใช้ประโยชน์สำหรับอาหารสัตว์ โดยจัดเป็นสารเสริมอาหารสัตว์ที่มีคุณภาพสูง สามารถใช้เป็นสารปรุงแต่งกลิ่นในอาหารสัตว์ได้เป็นอย่างดีเนื่องจากมีกลิ่นคาวคล้ายกลิ่นเนื้อสัตว์ ส่วนผนังเซลล์ยีสต์มีองค์ประกอบของเบต้า 1,3 และ 1,6 กลูแคน ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายมนุษย์และสัตว์ สามารถใช้ในการเลี้ยงสัตว์แบบไม่ใช้ยาปฏิชีวนะ เช่น ใช้ในการเลี้ยงกุ้งกุลาดำ เป็นต้น สารสกัดจากเซลล์ยีสต์ที่แยกได้จากน้ำกากสำจากมันสำปะหลังมีปริมาณกรดอะมิโนส่วนใหญ่ทั้งที่จำเป็นและไม่จำเป็นสูงกว่าสารสกัดจากเซลล์ยีสต์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์ แต่สารสกัดจากเซลล์ยีสต์ที่แยกได้จากน้ำกากสำจากกากน้ำตาลจะมีปริมาณกรดอะมิโนทั้งหมดน้อยกว่ายักเว็นแอสพาร์ติค

4.2.5 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ใช้เป็นพลังงานทดแทนซึ่งสามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือทิ้งและน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเกษตร ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน (Methane; CH_4) ประมาณร้อยละ 50-70 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณร้อยละ 30-50 ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซชนิดอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ ก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ให้ค่าความร้อนประมาณ 35,800 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร (kJ/m^3) ส่วนก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนร้อยละ 65 ให้ค่าความร้อน 22,400 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีส่วนประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทน จึงทำให้มีคุณสมบัติจุดติดไฟได้ดีและสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ ได้ เช่น การเผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง จะได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง จึงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มไอน้ำ (Steam boiler) ของโรงงานซึ่งโดยทั่วไปจะใช้น้ำมันเตาเป็นแหล่งพลังงาน ก๊าซชีวภาพปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตรสามารถทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.55 ลิตร ซึ่งนำมาใช้กับ Boiler เพื่อผลิตไอน้ำสำหรับกลั่นเอทานอลได้ โดยทั่วไปกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น ไขมัน แป้ง และโปรตีน ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายจนกลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile acids) โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (Acid-producing bacteria) และขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methane-producing bacteria) ในโรงงานเอทานอลส่วนใหญ่จะเลือกใช้ระบบถังหมักก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการหมักแบบไร้อากาศ (Anaerobic treatment technology) สามารถแบ่งตามรูปแบบการเจริญของจุลินทรีย์ได้เป็น 3 แบบ คือ กลุ่มจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในระบบ (Suspended growth) จุลินทรีย์ที่ยึดเกาะกับวัสดุในระบบ (Supported growth) และแบบลูกผสม (Hybrid) ได้แก่ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), Anaerobic Lagoons (AL) และ Upflow Sludge Blanket/Fixed Bed Reactor (USB/FBR)

4.2.6 ปุ๋ยอินทรีย์

น้ำกากส่ามีอินทรีย์วัตถุและและประกอบด้วยเกลือที่ละลายได้เป็นจำนวนมาก โดยพบว่าธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช คือ โพแทสเซียม (K) จะพบในปริมาณที่สูงมากที่สุด รองลงมาคือไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) ตามลำดับ และประกอบด้วยธาตุอาหารรองและธาตุอาหารเสริมต่าง ๆ อีกมากมาย ที่สามารถใช้เป็นปุ๋ยได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้โดยตรงหรือทำเป็นปุ๋ยน้ำเข้มข้น หรือปุ๋ยแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดของการขนส่งในกรณีที่ใช้กากส่าโดยตรง โดยในการทำปุ๋ยน้ำเข้มข้น จะนำกากส่าที่ได้ผ่านเครื่องต้มระเหย (Evaporator) ทำให้

มีความเข้มข้นมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปน้ำกากส่าจะมีความเข้มข้นของของแข็งประมาณร้อยละ 10-15 สามารถทำให้เข้มข้นเป็นร้อยละ 30 ได้ แล้วนำไปใช้ในไรต่อไป โดยเวลาใช้จะต้องเครื่องฉีดพ่น ซึ่งอาจใช้แรงคน หรือเป็นเครื่องจักรก็ได้ ในกรณีที่ต้องการทำเป็นปุ๋ยแห้งจะต้องมีการนำของแข็ง เช่น กากหม้อกรองของโรงงานน้ำตาลหรือชานอ้อย มาผสมกับน้ำกากส่าที่เข้มข้น

ตารางที่ 3 การประเมินผลได้จากการจัดการผลพลอยได้ของกระบวนการผลิตเอทานอลจาก
มันสำปะหลังในรูปมันเส้นและกากน้ำตาลที่อัตราการผลิตเอทานอล 150,000 ลิตร/วัน

ปัจจัย	มันเส้น (Cassava Chips)		กากน้ำตาล (Molasses)	
	ปริมาณ	คุณภาพ	ปริมาณ	คุณภาพ
1. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂) (ตันต่อวัน)	100-120	99.5%	100-120	99.5%
2. ฟิวเซลล์ออยล์ (Fusel Oil) (ลิตรต่อวัน)	300-600	-	300-600	-
3. DDGS (ตัน)	30-40	โปรตีน 10 % เยื่อใย 10 %	-	-
4. ยีสต์				
5.1 เซลล์ยีสต์ (ตันต่อวัน)	7.0	โปรตีน 30-45 % *	5.0	โปรตีน 30-40 % *
5.2 Yeast extract (ตันต่อวัน)	2.0	โปรตีน 45-55 % *	1.0	โปรตีน 25-35 % *
5.3 Yeast cell wall (ตันต่อวัน)	4.0	-	3.0	-
5. ปุ๋ยน้ำ (ลบ.ม.ต่อวัน)	-	-	600	ของแข็งที่ละลายได้ 30 บริกซ์
6. ก๊าซชีวภาพ (ลบ.ม.ต่อวัน)	7,000-17,000	CH ₄ 65%	20,000-30,000	CH ₄ 65%

หมายเหตุ: *ปริมาณกรดอะมิโนทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟี สำหรับปริมาณโปรตีนทั้งหมดคำนวณจากการหาปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธี Kjeldhal

ที่มา: ข้อมูลที่ได้จากแหล่งอ้างอิง การสำรวจโรงงาน และการทดลอง

5. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการลงทุน

เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของการลงทุนการผลิตเอทานอลโดยใช้มันสำปะหลังและกากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ พบว่า จะมีอัตราการผลตอบแทนการลงทุนในอัตราที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4) ทั้งนี้เนื่องมาจากปัจจัยด้านราคาวัตถุดิบเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามหากโรงงานมีการพิจารณาจัดการผลพลอยได้ควบคู่ไปกับการผลิตเอทานอลด้วย จะช่วยลดภาระด้านการลงทุนของโรงงานได้บางส่วน ขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตด้วย (ตารางที่ 5)

- **กรดอะซิติก (Acetic acid)** มีความพร้อมของเทคโนโลยีที่สามารถนำมาใช้ได้ ด้านการตลาด พบว่า ปริมาณการผลิตกรดอะซิติกในประเทศไทยไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ ทำให้ประเทศไทยต้องนำเข้ากรดอะซิติกจากต่างประเทศ ดังนั้นโอกาสทางการตลาดมีสูง ทำให้ความเป็นไปได้ในการลงทุนสูง

- **เอทิลอะซิเตท (Ethyl acetate)** มีความพร้อมของเทคโนโลยีที่สามารถนำมาใช้ได้ ด้านการตลาด พบว่า ประเทศไทยมีผู้ผลิตภายในประเทศน้อย ทำให้ต้องนำเข้าเอทิลอะซิเตทจากต่างประเทศ โอกาสทางการตลาดและความเป็นไปได้ในการลงทุนจึงสูง

- **คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)** พบว่ามีความพร้อมของเทคโนโลยีที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการหมักเอทานอลได้ มีความต้องการทางการตลาด แต่มีข้อจำกัดในด้านการขนส่ง ทำให้ความเป็นไปได้ในการลงทุนไม่แน่นอน

- **ฟูเซลอยล์ (Fusel oil)** มีข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีการทำให้บริสุทธิ์ จึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้ประโยชน์ที่ต้องเป็นลักษณะของผสม

- **DDGS (Dry distillers grains with solubles)** เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเทคโนโลยีในการผลิตขั้นสูง และมีการสร้างตลาดภายในประเทศสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ โอกาสทางการตลาดจึงมีสูง ทำให้ความเป็นไปได้ในการลงทุนสูง ในกรณีที่โรงงานมีการลงทุนผลิต DDGS ร่วมกับการผลิตเอทานอลจะทำให้อัตราผลตอบแทนการลงทุนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับราคาของ DDGS ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่

- **ยีสต์ (Yeast)** สามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มได้หลายชนิด และมีความต้องการของตลาดทั้งภายในและภายนอกประเทศ รวมทั้งมีความพร้อมทางด้านเทคโนโลยี จึงทำให้โอกาสทางการตลาดมีมาก และความเป็นไปได้ในการลงทุนสูง จะทำให้อัตราผลตอบแทนการลงทุนเพิ่มขึ้น และระยะเวลาคืนทุนลดลง

- **ก๊าซชีวภาพ (Biogas)** เป็นการจัดการที่ควรดำเนินการ เพื่อช่วยตอบสนองอุปสงค์ด้านพลังงานของโรงงาน

- **ปุ๋ยอินทรีย์** เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเทคโนโลยีในการผลิตขั้นสูง และมีตลาดภายในประเทศอย่างชัดเจน แต่มีข้อจำกัดในด้านการขนส่ง ทำให้ความเป็นไปได้ในการลงทุนต่ำ

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์การลงทุน (Investment Analysis) ของโรงงานผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบต่าง ๆ

สมมติฐาน / ค่าที่ประเมิน	ชนิดของวัตถุดิบ	
	กากน้ำตาล	มันสำปะหลัง
กำลังการผลิตเอทานอล (ลิตรต่อวัน)	150,000	150,000
อายุโครงการ (ปี)	15	15
ดอกเบี้ยของเงินลงทุน (%)	8	8
มูลค่าการลงทุนรวม (บาท)	1,146,700,000	1,217,400,000
ราคาวัตถุดิบ (บาท / ตัน)	4,000	3,800
ราคาขายเอทานอล (บาท / ลิตร)	25	25
มูลค่าโครงการปัจจุบัน (Net Present Value; บาท)	822,318,136	1,842,077,989
อัตราผลตอบแทนการลงทุน (Internal Rate of Return, IRR; %)	16.6	21.9
ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period; ปี)	5	4

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์การลงทุน (Investment Analysis) ของโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังที่มีการจัดการผลพลอยได้ในรูปแบบต่าง ๆ

สมมติฐาน / ค่าที่ประเมิน	รูปแบบของโรงงาน		
	เอทานอล	เอทานอลและ DDGS	เอทานอลและผลิตภัณฑ์ยีสต์
กำลังการผลิตเอทานอล (ลิตร/วัน)	150,000	150,000	150,000
อายุโครงการ (ปี)	15	15	15
ดอกเบี้ยของเงินลงทุน (ร้อยละ)	8	8	8
มูลค่าการลงทุนรวม (บาท)	1,217,400,000	1,353,400,000	1,408,400,000
ราคาขาย (บาทต่อหน่วย)			
- เอทานอล (ต่อลิตร)	25	25	25
- ผลิตผลพลอยได้ชนิดที่ 1 (ต่อกิโลกรัม)	-	5 [*]	200 ^{**}
- ผลิตผลพลอยได้ชนิดที่ 2 (ต่อกิโลกรัม)	-	-	80 ^{***}
มูลค่าโครงการปัจจุบัน (บาท) (Net Present Value)	1,842,077,989	2,025,084,109	3,071,599,515
อัตราผลตอบแทนการลงทุน (ร้อยละ) (Internal Rate of Return, IRR)	21.9	22.2	28.0
ระยะเวลาคืนทุน (ปี) (Payback Period)	4	4	3.5

หมายเหตุ : ^{*} DDGS, ^{**} Yeast Extract, ^{***} Yeast Cell Wall

6. ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาการนำของเสียจากการผลิตเอทานอลมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้เป็นรูปธรรมมากยิ่งขึ้น ควรมีการพัฒนาในด้านต่าง ๆ เพิ่มเติม ดังนี้

- การพัฒนาเทคโนโลยีการแยกฟูเซลอยล์ที่มีประสิทธิภาพ
- การพัฒนาสูตรอาหารสัตว์ชนิดต่าง ๆ ที่มีส่วนผสมของ DDGS

ซึ่งการใช้ประโยชน์ของเสียอย่างมีประสิทธิภาพนี้ จะเป็นทั้งการสร้างรายได้ให้กับโรงงาน ในขณะที่เดียวกันจะเป็นการลดภาระค่าใช้จ่ายในการจัดการของเสียของโรงงาน ซึ่งจะช่วยให้โรงงานมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง