

## บทที่ 2

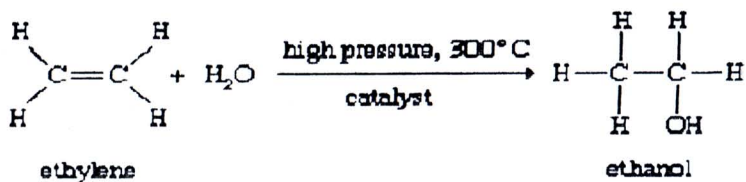
### วารสารปริทัศน์

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเอทานอล ของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตเอทานอล ระบบการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ และการประเมินต้นทุนภายนอกจากผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการผลิตเอทานอล

เอทานอล (Ethanol) หรือที่เรียกว่าเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) หรือแอลกอฮอล์ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี จุดติดไฟ และระเหยง่าย มีสูตรทางเคมีคือ  $C_2H_5OH$  สามารถละลายได้ในน้ำและสารละลายอื่น ๆ มีจุดเดือด 78.32 องศาเซลเซียส จุดเยือกแข็ง 243.1 องศาเซลเซียส เอทานอลผลิตได้ 2 วิธี คือ การสังเคราะห์ทางเคมี และการหมักโดยจุลินทรีย์

2.1.1 การผลิตเอทานอลด้วยการสังเคราะห์ทางเคมี เป็นการผลิตจากอนุพันธ์สารปิโตรเลียม เช่น เอทิลีน เป็นต้น เริ่มผลิตครั้งแรกในปี พ.ศ. 2404 โดยในระยะแรกเป็นการผลิตจากปฏิกิริยาทางอ้อมของเอทิลีน (Ethylene,  $C_2H_4$ ) ซึ่งทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกได้เอทิลซัลเฟต (Ethyl Sulphate) จากนั้นจึงให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ได้เอทานอล แสดงปฏิกิริยาดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์เอทานอลจากเอทิลีน

ที่มา: <http://www.britannica.com/eb/article-79648>

การผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมโดยการสังเคราะห์ทางเคมีได้มีขึ้นในปี พ.ศ. 2473 โดยบริษัท Carbide and Chemical Corporation หรือบริษัท Union Carbide ในปัจจุบัน ต่อมาบริษัท Shell Chemical ได้คิดค้นกระบวนการผลิตเอทานอลจากเอทิลีนโดยตรงโดยปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ได้สำเร็จในปี พ.ศ. 2491 และได้มีบริษัทที่คิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ บริษัท Sasol Dow และบริษัท British Petroleum แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทคโนโลยีการหมักเอทานอลได้รับการพัฒนามากขึ้น ประกอบกับกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีมีราคาต้นทุนวัตถุดิบที่สูง และกระบวนการผลิตค่อนข้างยุ่งยาก ทำให้ในปัจจุบันปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้จากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีมีปริมาณน้อยมาก โดยคิดเป็นประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ทั้งหมดในโลก

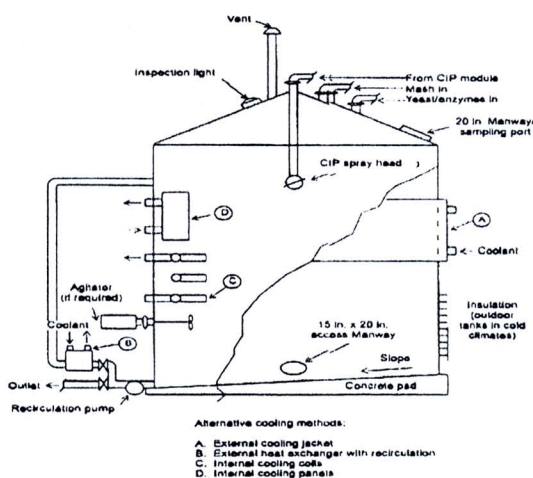
**2.1.2 การผลิตเอทานอลด้วยวิธีการหมัก** เอทานอลที่ผลิตด้วยการหมักจากจุลินทรีย์ มีการผลิตมานานแล้วตั้งแต่ในอดีตโดยชาวอียิปต์เป็นชนชาติแรกที่รู้จักการผลิตเอทานอลด้วยการหมักน้ำองุ่น เอทานอลที่ถูกเรียกว่า เกรนแอลกอฮอล์ (Grain alcohol) เนื่องจากผลิตมาจากเมล็ดธัญพืช (Grain) เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวไรย์ และข้าวบาร์เลย์ ในการหมักจะได้เอทานอลในน้ำหมักเพียงร้อยละ 12-15 เพราะเอทานอลที่ระดับความเข้มข้นสูงเป็นพิษต่อเซลล์ยีสต์ โดยประสิทธิภาพหรือความสามารถในการการผลิตเอทานอลด้วยวิธีการหมัก ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ ทั้งวัตถุดิบที่มีมากมายหลากหลายชนิด ชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ ที่ปัจจุบันมีการพัฒนาสายพันธุ์ให้เหมาะกับการผลิตเอทานอลระดับอุตสาหกรรมหลายสายพันธุ์ และระบบการหมัก ซึ่งในการผลิตเอทานอลระดับโรงงานต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบทั้งหมด เพื่อใช้ในการประเมินความเสี่ยงของการลงทุน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549)

กลไกการผลิตเอทานอลของยีสต์เกิดขึ้นโดยยีสต์จะใช้น้ำตาลเป็นอาหาร และเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอล โดยผ่านกระบวนการที่เรียกว่าไกลโคไลซิส (Glycolysis) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ตามทฤษฎี ในกระบวนการหมักน้ำตาลกลูโคสของยีสต์นั้น น้ำตาลกลูโคสทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และเอทานอลเท่ากับร้อยละ 48.89 และ 51.11 โดยน้ำหนักตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติจะเกิดการสูญเสียได้เป็นสารประกอบอื่น ๆ หรือใช้ในการสร้างเซลล์ของยีสต์ โดยน้ำตาลเพียงร้อยละ 95 เท่านั้นที่จะสามารถถูกเปลี่ยนไปเป็นเอทานอล ส่วนที่เหลือยีสต์จะใช้สำหรับการเจริญเติบโตและเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ซึ่งในการหมักน้ำตาลด้วยเชื้อยีสต์จะได้ผลิตภัณฑ์อื่น นอกเหนือจากเอทานอล (ร้อยละ 48.4) ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ

ละ 46.5) อะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) กรดอะซิติก (Acetic acid) กลีเซอริน (Glycerine) กรดแลกติก (Lactic acid) กรดซัคซินิก (Succinic acid) ฟูเซลอยล์ (Fusel oil) และเฟอิวรัล (Furfural) ซึ่งปริมาณของสารเหล่านี้ ที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อจุลินทรีย์และในสภาวะที่ใช้ในการหมักด้วย ปริมาณสารอื่นที่เกิดขึ้นนี้จะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการทำเอทานอลบริสุทธิ์

โดยวัตถุดิบที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ วัตถุดิบประเภทน้ำตาล เช่น กากน้ำตาล และน้ำอ้อย วัตถุดิบประเภทแป้ง เช่น มันสำปะหลัง ข้าว และข้าวโพด และประเภทสุดท้ายคือวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส ที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เช่น ฟางข้าว กากอ้อย และชังข้าวโพด เป็นต้น (Murphy and McCarthy, 2005)

เทคโนโลยีระบบการหมักมี 2 แบบ คือ การหมักแบบเบ็ดเสร็จ (Batch) หมายถึงการผสมหัวเชื้อลงในน้ำหมัก และการหมักเกิดขึ้นในถังหมักใบเดียวจนเสร็จสิ้นการหมักใน 72 ชั่วโมง (แสดงดังภาพที่ 2.2) และการหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous) หมายถึงมีการผสมหัวเชื้อและน้ำหมักในถังใบแรก และปล่อยให้มีการไหลของน้ำหมักไปสู่ถังใบที่ 2, 3, 4 หรือ 5 จนกระทั่งได้ความเข้มข้นของเอทานอลที่ต้องการ น้ำหมักจะผ่านเครื่องแยกเซลล์ นำเซลล์ยีสต์มาล้างด้วยกรดและบางส่วนนำกลับเข้าสู่ถังหมักถังแรกกับน้ำหมักใหม่ และเกิดกระบวนการหมักต่อไปเรื่อย ๆ โดยไม่พักระบบ แสดงดังภาพที่ 2.3

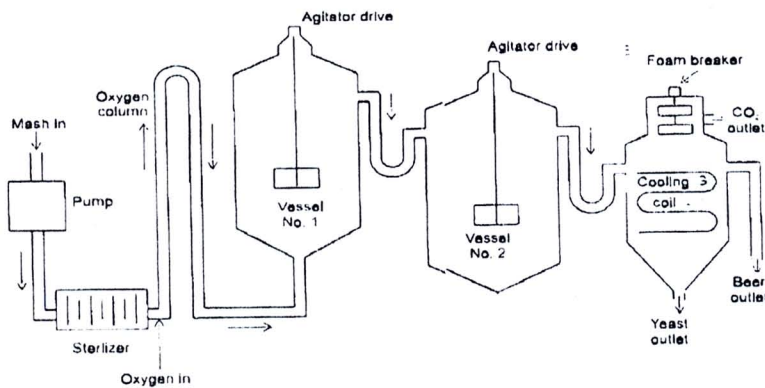


ภาพที่ 2.2

ถังหมักแบบเบ็ดเสร็จ (Batch fermentation)

ที่มา: Kelsall and Lyons (1999)





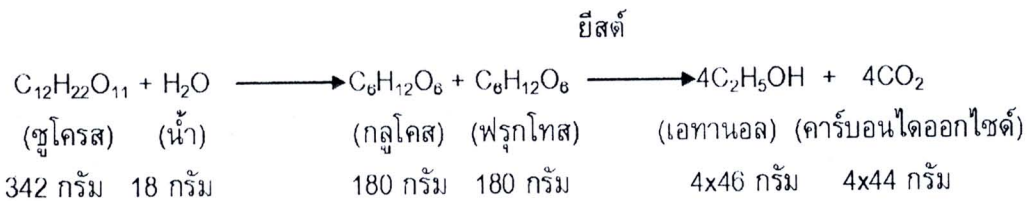
ภาพที่ 2.3

ถังหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous) แสดงรูปแบบเพียง 2 ถัง  
ที่มา: Kelsall and Lyons (1999)

2.2 ขั้นตอนการผลิตเอทานอลด้วยวิธีการหมัก

2.2.1 วัตถุดิบประเภทน้ำตาล วัตถุดิบประเภทน้ำตาลที่ใช้ในการผลิตเอทานอล ได้แก่ อ้อย กากน้ำตาล และบีทน้ำตาล ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลซูโครส ที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิด คือ น้ำตาลกลูโคส และน้ำตาลฟรุกโทส

ในการหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครสนั้นมีขั้นตอน คือ ขั้นแรกน้ำตาลซูโครสจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ได้น้ำตาลกลูโคส และฟรุกโทส จากนั้นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโทสจะถูกยีสต์เปลี่ยนไปเป็นเอทานอล และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังที่แสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4

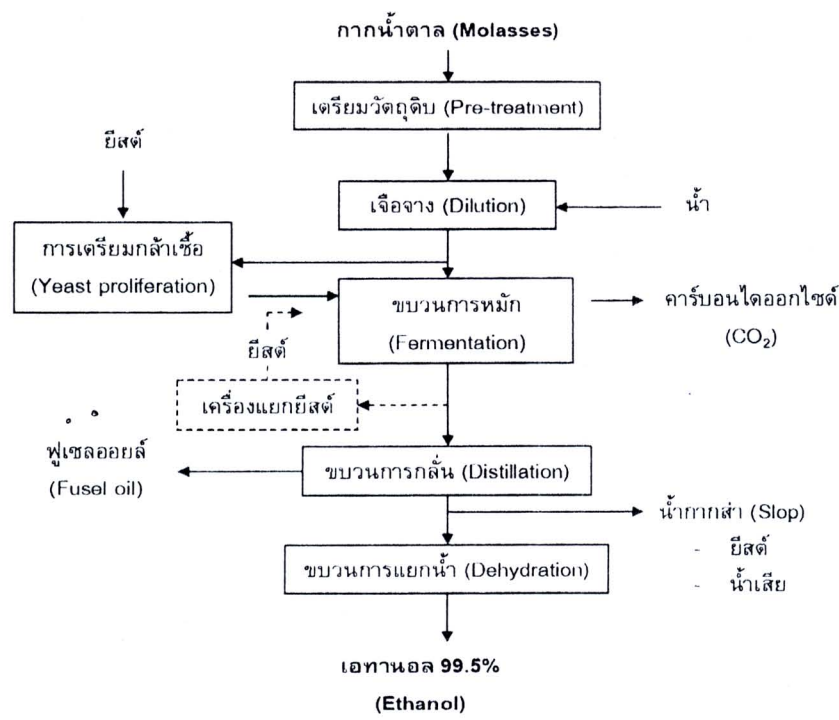
ปฏิกิริยาการหมักเอทานอลจากน้ำตาลซูโครส

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549)



โดยกากน้ำตาลเป็นผลิตภัณฑ์ได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลในโรงงานน้ำตาล โดยในการผลิตน้ำตาล 1 ตัน จะได้กากน้ำตาล 50 กิโลกรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 5 ของปริมาณอ้อยที่เข้าหีบ และกากน้ำตาลยังเป็นผลพลอยได้ที่สามารถส่งออกขายต่างประเทศ รวมถึงสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อเนื่องได้มากมาย โดยในปัจจุบันมีการนำกากน้ำตาลไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอลหรือสุราเป็นหลัก นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตผงชูรส และน้ำดื่มสายชู เป็นต้น ในการนำกากน้ำตาลมาใช้ในการผลิตเอทานอลนั้นสามารถนำไปใช้ได้โดยตรง โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเตรียมวัตถุดิบที่ยุ่งยากมากนัก จึงทำให้กากน้ำตาลเป็นทางเลือกที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเอทานอล

ขั้นตอนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ ขั้นตอนการกำจัดสิ่งปนเปื้อน (Pre-treatment), ขั้นตอนการเจือจาง (Dilution), ขั้นตอนการเตรียมกล้ายเชื้อและการหมัก (Fermentation), ขั้นตอนการกลั่น (Distillation) และขั้นตอนการแยกน้ำ (Dehydration) โดยแสดงได้ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5

กระบวนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549)

**ขั้นตอนการกำจัดสิ่งปนเปื้อน (Pre-treatment)** ในขั้นตอนนี้กากน้ำตาลที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบจะมีองค์ประกอบที่เป็นของแข็งคือ แคลเซียม ถ้ามีปริมาณมากเกินไปก็จะทำให้ประสิทธิภาพการหมักเอทานอลลดลง โดยทั่วไปกากน้ำตาลจะประกอบด้วยแคลเซียมปริมาณแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของกากน้ำตาล ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องแยกแคลเซียมออกก่อน การแยกแคลเซียมนั้นทำได้โดยการใช้กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) โดยกรดซัลฟิวริกจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียม เกิดเป็นตะกอนของแคลเซียมซัลเฟต ( $CaSO_4$ ) จากนั้นจึงทำการแยกตะกอนออกแล้วนำส่วนใสเข้าสู่ขั้นตอนการเจือจางต่อไป แต่อย่างไรก็ตามบางเทคโนโลยีก็ไม่มีขั้นตอนการกำจัดสิ่งปนเปื้อน (Pre-treatment)

**ขั้นตอนการเจือจาง (Dilution)** กากน้ำตาลที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดสิ่งปนเปื้อน (Pre-treatment) จะถูกนำมาเจือจางด้วยน้ำร้อน เพื่อลดโอกาสการปนเปื้อนจากเชื้ออื่น และให้ความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเชื้อยีสต์ จากนั้นกากน้ำตาลที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมก็จะเข้าสู่กระบวนการหมักต่อไป

**ขั้นตอนการเตรียมกล้าเชื้อยีสต์ (Yeast propagation)** สายพันธุ์ของยีสต์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตเอทานอล คือ *S. cerevisiae* ยีสต์ในสายพันธุ์นี้มีหลากหลาย บางสายพันธุ์มีคุณสมบัติสามารถทนต่อเอทานอลเข้มข้นสูง ให้อัตราการผลิตเอทานอลสูง (Wilkie et.al., 2000) สำหรับขั้นตอนการเตรียมกล้าเชื่อนั้นจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อยีสต์ที่ใช้ ได้แก่ เชื้อยีสต์สด (Fresh yeast) และเชื้อผง (Active dry yeast) โดยถ้าใช้เชื้อสดการเก็บรักษาอยู่ในอาหารแข็ง การนำมาใช้ต้องทำการเลี้ยงเชื้อก่อน (Refresh) โดยเชื้อยีสต์ที่อยู่บนอาหารแข็งลงในหลอดแก้วขนาดเล็กที่มีอาหารเหลว จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเชื้อยีสต์ที่ได้ไปเลี้ยงเพื่อขยายปริมาตรต่อจนได้ปริมาตรกล้าเชื้อที่ต้องการ (คิดเป็นร้อยละ 5-10 โดยปริมาตร ของปริมาตรการทำงานของถังหมักที่ใช้) ซึ่งต้องใช้เวลานาน ส่วนการใช้ยีสต์ผงนั้นการเตรียมกล้าเชื้อจะทำได้ง่ายกว่า โดยใช้ปริมาณเชื้อยีสต์ที่เหมาะสม แล้วนำมาเลี้ยงเชื้อ โดยใช้เวลาประมาณ 4-6 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการใช้เชื้อสด แต่มีข้อเสีย คือราคาแพง

**ขั้นตอนการหมัก (Fermentation)** สำหรับกระบวนการหมักเอทานอลนั้น สามารถทำได้หลายแบบ ทั้งการหมักแบบเบ็ดเสร็จ (Batch) และการหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous) แต่โดยส่วนใหญ่แล้วการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาลนั้นจะใช้กระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง ซึ่งมี



ข้อดีคือค่าต้นทุนในการลงทุนสำหรับอุปกรณ์จะต่ำกว่าการหมักแบบเบ็ดเสร็จ และไม่ต้องเสียเวลาในการทำความสะดวกระบบการหมัก แต่ก็มีข้อเสียคือโอกาสปนเปื้อนจากเชื้ออื่นมีสูง (Roehr, 2001) นอกจากนั้นในระบบการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องยังสามารถแยกเอาเชื้อยีสต์ที่ออกมาจากระบบหมักเวียนกลับเข้าไปในถังหมักใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหมักให้ดีขึ้น

หลังจากผ่านกระบวนการหมักจะได้รับความเข้มข้นเอทานอลในน้ำหมักประมาณร้อยละ 9-12 ในขั้นตอนการหมักนี้ นอกจากจะได้เอทานอลเป็นผลผลิตแล้ว ยังมีคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เป็นผลผลิตพลอยได้ด้วย โดยน้ำตาลกลูโคส 100 กรัม จะผลิตเอทานอลได้ 51.1 กรัม และได้คาร์บอนไดออกไซด์ 48.9 กรัม

**ขั้นตอนการกลั่น (Distillation)** เป็นกระบวนการทำให้เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยหลักการทำงานนั้นจะมีการให้ความร้อนแก่น้ำสา (มีเอทานอลเริ่มต้นประมาณร้อยละ 7-11) ด้วยไอน้ำ ทำให้เอทานอลในน้ำสาระเหยกลายเป็นไอ แต่ก็จะมีน้ำระเหยขึ้นมาพร้อมกับเอทานอลด้วย ซึ่งความเข้มข้นของเอทานอลในไอจะเข้มข้นกว่าในของเหลว การที่จะกลั่นให้ได้เอทานอลที่ความเข้มข้นสูงๆ นั้น ต้องทำให้เอทานอลระเหย และควบแน่นหลายๆ ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งความเข้มข้นของเอทานอลจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ภายในหอกลั่น แต่ก็ไม่สามารถกลั่นให้ได้ความเข้มข้นถึงร้อยละ 100 เพราะเมื่อกลั่นจนเอทานอลมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 96 ความเข้มข้นของเอทานอลที่ระเหยออกมาจากของเหลว จะเท่ากับความเข้มข้นของเอทานอลในของเหลว จึงทำให้ไม่สามารถกลั่นแยกเอทานอลให้ได้ความเข้มข้นถึงร้อยละ 100 ได้ ดังนั้นเอทานอลที่ได้จากการกลั่นด้วยหอกลั่นจะกำหนดมีความบริสุทธิ์ที่ร้อยละ 95 สำหรับในกระบวนการกลั่นนั้นจะได้ฟิวเซลอยล์ (Fusel oil) เป็นผลผลิตพลอยได้ โดยในการผลิตเอทานอล 1,000 ลิตร จะได้ฟิวเซลอยล์ 5 ลิตร และมีน้ำกากสาเป็นน้ำเสียด้วย โดยการผลิตเอทานอล 1 ลิตร จะมีน้ำกากสา 10-15 ลิตร

**ขั้นตอนการแยกน้ำ (Dehydration)** เอทานอลที่ผ่านขั้นตอนการกลั่นจะได้รับความเข้มข้นเอทานอลสูงสุดเพียงร้อยละ 95 เท่านั้น แต่เอทานอลที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์นั้น ต้องมีความเข้มข้นอย่างน้อยร้อยละ 99.5 โดยวิธีการทำให้ได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 99.5 ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Molecular Sieve Dehydrators (MSDH) ซึ่งมีลักษณะการทำงานดังนี้ เม็ดปัด (Bead) ของสารจำพวกซีโอไลท์ (Zeolites) เช่น โพแทสเซียมอลูมิ-ซิลิเกต (Potassium alumi-silicates) จะมีลักษณะกลมและมีรูพรุนอยู่บนผิว รูพรุน (pore) เหล่านี้จะมีขนาด 3 อังสตรอม (Angstroms; Å,  $1\text{Å} = 10^{-10}$  เซนติเมตร) ซึ่งโมเลกุลของน้ำมีขนาด 2.8 Å จะมีความชอบ

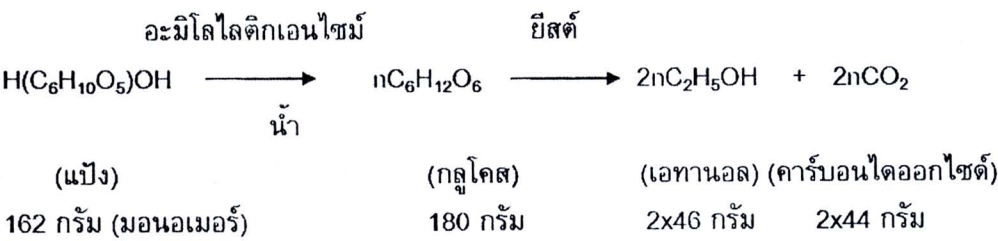
|                                    |
|------------------------------------|
| สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ |
| ห้องสมุดงานวิจัย                   |
| วันที่... 7... ก.ย. 2555           |
| เลขทะเบียน..... 249213             |
| เลขเรียกหนังสือ.....               |



(Affinity) กับรูพรุน และจะถูกจับเข้าไปในรูพรุนเหล่านี้ ส่วนเอทานอลจะมีขนาดของโมเลกุล 4.4 Å ไม่มี Affinity กับรูพรุนและไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนเหล่านี้ได้

ซึ่งการดูดซับน้ำเกิดขึ้นเมื่อมีการป้อนไฮโดร (เปียก) ของเอทานอลที่มีน้ำ (Hydrous Ethanol) เข้าไปในเครื่อง Dehydrator ที่บรรจุเม็ดซีโอไลต์ (Zeolites) เหล่านี้ อยู่ โมเลกุลของน้ำ จะถูกดูดซับอยู่ในเม็ดบีด (Bead) และไฮดรอกซีเอทานอลที่ถูกดูดซับน้ำออกไปแล้ว (Anhydrous ethanol) ก็จะผ่านออกมาจาก Dehydrator ในการดูดซับน้ำของซีโอไลต์ (Zeolites) นั้น จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) เมื่อซีโอไลต์ (Zeolites) เหล่านี้ดูดซับน้ำไว้มากพอแล้ว ก็จะต้องทำการถ่ายเทน้ำออก (Regeneration) ทั้งนี้ทำได้โดยการผ่านไอร้อนของก๊าซเข้าไปเพื่อระเหยน้ำออกมา (Bibb Swan, 1999)

2.2.2 วัตถุดิบประเภทแป้ง วัตถุดิบประเภทแป้งที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ มันสำปะหลัง (ทั้งหัวมันสดและมันเส้น) ข้าวโพด ข้าว และเมล็ดข้าวฟ่าง เป็นต้น โดยแป้งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส เมื่อนำแป้งมาผ่านกระบวนการย่อยด้วยกรด หรือเอนไซม์จะได้น้ำตาลกลูโคสที่สามารถเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอลได้ โดยในปัจจุบันจะนิยมย่อยแป้งด้วยเอนไซม์มากกว่ากรด เนื่องจากสามารถควบคุมการย่อยได้ง่ายกว่า และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์มีความบริสุทธิ์มากกว่า การย่อยแป้งด้วยเอนไซม์จะประกอบด้วยการย่อย 2 ครั้ง คือ การย่อยแป้งครั้งแรก หรือการทำให้แป้งเหลว (Liquefaction) ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าเดกทริน (Dextrin) และการย่อยแป้งครั้งสุดท้าย หรือการเปลี่ยนเป็นน้ำตาล (Saccharification) ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์ย่อยเดกทริน ให้ได้น้ำตาลกลูโคส โดยกระบวนการหมักเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทแป้งสามารถแสดงได้ดังสมการในภาพที่ 2.6

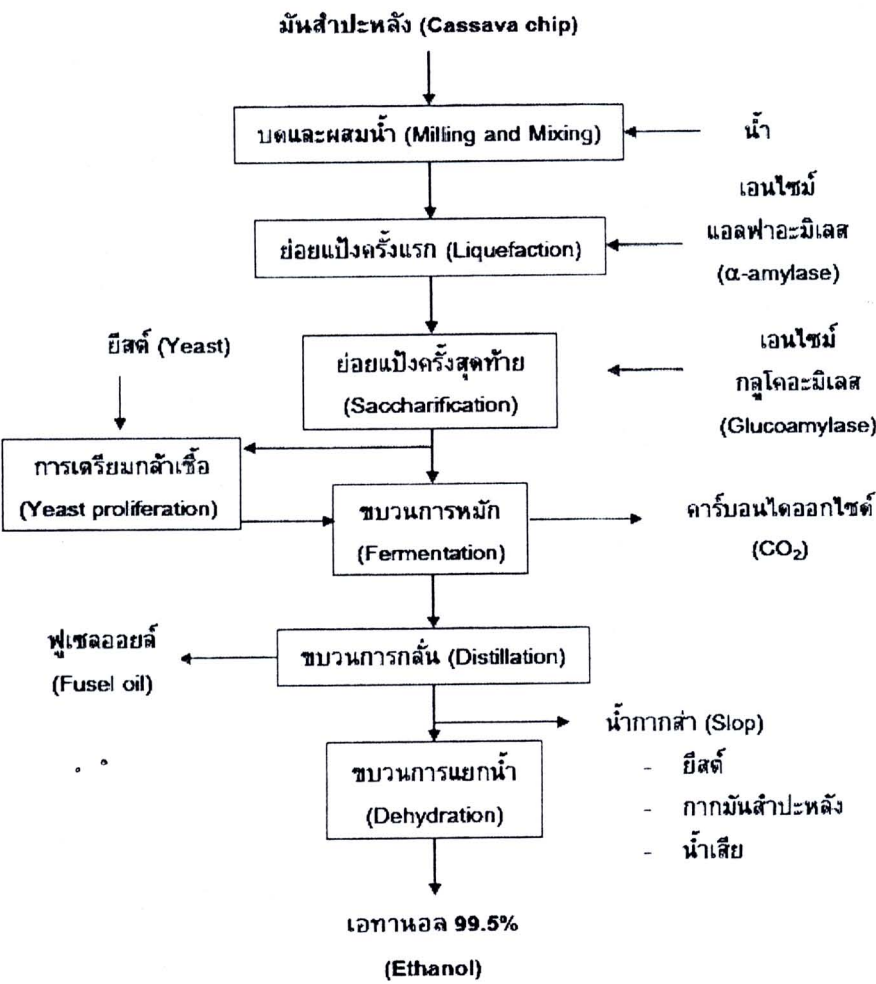


ภาพที่ 2.6

ปฏิกิริยาการหมักเอทานอลจากแป้ง

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549)

มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบที่ประกอบด้วยแป้ง ดังนั้นในการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง จะต้องนำมันสำปะหลังมาย่อยให้เป็นน้ำตาล แล้วจึงใช้เชื้อยีสต์เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทานอล โดยขั้นตอนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังทั้งที่อยู่ในรูปหัวมันสดและมันเส้นมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้คือ การเตรียมวัตถุดิบ (Raw material preparation), การย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล (Liquefaction and Saccharification), การเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทานอล (Fermentation), การกลั่น (Distillation) และการแยกน้ำ (Dehydration) ขั้นตอนการทำงานสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7

กระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549)

**ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ** ในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบจากหัวมันสดและมันเส้น มีขั้นตอนการเตรียมแตกต่างกัน คือ มันเส้น จะผ่านเครื่องแยกโลหะ และหินออกจากมันเส้น (Metal and stone detector) จากนั้นก็ผ่านเครื่องบดแบบแห้ง (Dry hammer mill) แล้วก็ทำการผสมกับน้ำ (Mixing) จะได้ของผสมที่เรียกว่า Slurry จากนั้น Slurry ก็将通过ระบบการแยกทราย (De-sanding) ก็จะได้ Slurry ที่พร้อมจะเข้าสู่ระบบการย่อยแบ่งต่อไป

ในกรณีของหัวมันสด จะเข้าสู่เครื่องรับหัวมัน (Hopper) จากนั้นก็เข้าเครื่องล้าง (Washer) แล้วเข้าสู่เครื่องสับ (Chopper) ให้มีชิ้นเล็กลง จากนั้นเข้าสู่เครื่องบด (Rasper) แล้วเข้าสู่ถังเตรียม Slurry (Mashing tank) จะได้ Slurry ที่พร้อมจะเข้าสู่กระบวนการย่อยต่อไป

**ขั้นตอนการย่อยแบ่งให้เป็นน้ำตาล (Liquefaction and Saccharification)** ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือการย่อยครั้งแรก (Liquefaction) ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และการย่อยครั้งสุดท้าย (Saccharification) ด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังต่อไปนี้

การย่อยครั้งแรก (Liquefaction) ขั้นตอนนี้จะใช้กรดหรือเอนไซม์กลุ่มแอลฟาอะไมเลส ( $\alpha$ -amylase) ย่อยแบ่งที่อุณหภูมิประมาณ 95-105 องศาเซลเซียส ให้ได้โมเลกุลขนาดเล็ก และมีความหนืดลดลง ของเหลวที่ได้ เรียกว่าเดกซ์ทริน (Dextrin)

การย่อยครั้งสุดท้าย (Saccharification) ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลส (Glucoamylase) เข้าไปย่อยให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งจะใช้เวลาในการย่อยระหว่าง 15-18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อสิ้นสุดการย่อยจะให้ความร้อนเพื่อหยุดกิจกรรมเอนไซม์ และฆ่าเชื้อที่อาจปนเปื้อนก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการหมักต่อไป

**ขั้นตอนการหมัก (Fermentation)** หลังจากผ่านกระบวนการย่อยแบ่งให้เป็นน้ำตาลแล้ว จึงเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอลด้วยเชื้อยีสต์ ซึ่งการผลิตเอทานอลด้วยวิธีการหมักจากวัตถุดิบประเภทแป้งนั้นนอกจากจะต้องผ่านการย่อยให้เป็นน้ำตาลก่อน แล้วค่อยเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอล เทคนิคการหมักแบบนี้เรียกว่า การหมักแบบดั้งเดิม (Conventional Fermentation; CF) ยังมีกระบวนการผลิตที่สามารถรวมเอาขั้นตอนการย่อยครั้งสุดท้าย (Saccharification) และการหมัก (Fermentation) ทำในขั้นตอนเดียวกันเรียกว่า Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) ซึ่งเทคนิคการหมักแบบนี้จะทำให้ประหยัดพลังงานและเวลา สำหรับรูปแบบการหมักเอทานอลจากมันสำปะหลังจะเป็นการหมักแบบเบ็ดเสร็จ



(Batch fermentation) จะแตกต่างกับการหมักเอทานอลจากกากน้ำตาล ที่ส่วนใหญ่จะทำการหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous fermentation) ในกระบวนการหมักนั้นนอกจากจะได้เอทานอลแล้วยังได้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ด้วย

**ขั้นตอนการกลั่น (Distillation) และการแยกน้ำ (Dehydration)** การกลั่น (Distillation) และการแยกน้ำ (Dehydration) เอทานอลจากมันสำปะหลังนั้น มีหลักการทำงานเหมือนกับการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล แต่แตกต่างกันที่ผลิตภัณฑ์พลอยได้ และลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้น โดยการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังนั้น ในขั้นตอนการกลั่น น้ำกากส่าที่ได้สามารถนำไปแยกด้วยเครื่อง Decanter จะได้ส่วนของตะกอน คือกากมันสำปะหลัง ซึ่งสามารถนำไปทำเป็นอาหารสัตว์ได้ และส่วนที่เป็นน้ำก็คือน้ำเสียที่จะต้องผ่านการบำบัดต่อไป

## 2.3 ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเอทานอล

ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเอทานอล ได้แก่ น้ำกากส่า น้ำเสียจากส่วนอื่นๆ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการหมัก และกากของเสีย เป็นต้น รวมไปถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการผลิตไอน้ำ และกระแสไฟฟ้า โดยของเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตเอทานอล สามารถแบ่งตามขั้นตอนการผลิตเอทานอลได้ดังนี้

**ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ** มลภาวะจากโรงงานเอทานอลที่ใช้หัวมันสด และมันเส้นที่เห็นได้ชัด เป็นมลภาวะทางอากาศภายในโรงงานในเรื่องของฝุ่น ควัน ทั้งในขั้นตอนการขนส่ง การจัดกองในลาน หรือโกดังเก็บ การตักวัตถุดิบใส่ Hopper การร่อนทราย เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีมลภาวะทางเสียงจากการทำงานของเครื่องร่อนทราย สับ และม่หัวมัน อีกด้วย

สำหรับโรงงานเอทานอลที่ใช้กากน้ำตาล เมื่อรถบรรทุกมาถึงโรงงาน จะมีการจัดเก็บในถังขนาดใหญ่ และมีขอบบ่อรอบบริเวณถัง เพื่อป้องกันกรณีถังรั่ว และกากน้ำตาลไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หรือแหล่งน้ำใต้ดิน เมื่อต้องการใช้กากน้ำตาลจึงจะปั๊มแล้วนำมาเจือจางด้วยน้ำ ในบางเทคโนโลยีจะมีการทำให้ใส หรือกำจัดสิ่งปนเปื้อนพวกแคลเซียมก่อน โดยใช้กรดซัลฟิวริก เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมซัลเฟต แล้วแยกตะกอนออกไป

**ขั้นตอนการหมัก** การหมักน้ำตาลโดยเชื้อยีสต์แบบไร้อากาศจะได้เอทานอล และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยที่กำลังการผลิตเอทานอล 150,000 ลิตร/วัน จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 100-120 ตัน/วัน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีรส และกลิ่น เบากว่าอากาศทั่วไปเล็กน้อย เมื่อหายใจเข้าไปก๊าซนี้จะรวมกับ ฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ในเม็ดเลือดแดงได้มากกว่าออกซิเจนถึง 200-250 เท่า ซึ่งลดความสามารถของเลือดในการเป็นตัวนำออกซิเจนจากปอดไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ

นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยังเป็นก๊าซที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ก๊าซเรือนกระจกตามธรรมชาติที่สำคัญประกอบด้วยไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) โอโซน ( $\text{O}_3$ ) มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และไนตรัสออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) ซึ่งก๊าซมีเทน และไนตรัสออกไซด์มีศักยภาพในการก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนเป็น 21 และ 310 เท่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซเรือนกระจกตามธรรมชาติมีอยู่ในบรรยากาศเพียงร้อยละ 0.01 ของก๊าซทั้งหมดในบรรยากาศ มีคุณสมบัติสำคัญในการช่วยดักจับและดูดซับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์เอาไว้ ทำให้โลกของเราอบอุ่นขึ้น แต่หากมีก๊าซเรือนกระจกในปริมาณที่มาก ก็จะทำให้ความสามารถในการดักจับความร้อนจากดวงอาทิตย์มีมากขึ้นด้วย ทำให้ความร้อนยังคงอยู่ภายในโลก โลกเราจะร้อนขึ้น และส่งผลต่อเนื่องมากมาย

**ขั้นตอนการกลั่นและกำจัดน้ำ** อุปกรณ์ที่สำคัญในขั้นตอนนี้คือ แหล่งกำเนิดพลังงานไอน้ำ หรือหม้อไอน้ำ (Boiler) ซึ่งโรงงานที่ใช้ถ้อยเป็นวัตถุดิบ หรือสร้างโรงงานต่อจากโรงงานน้ำตาลเดิม จะใช้กากถ้อยเป็นแหล่งพลังงานผลิตไอน้ำ ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงสำหรับผลิตไอน้ำนั้น ในระหว่างการเผาไหม้สารคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำให้เกิดการคายพลังงานความร้อนออกมาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำได้ และนอกจากนั้นยังมีไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งไอเสียที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศ โดยมีพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของเชื้อเพลิง ชนิดของอุปกรณ์การเผาไหม้ และอุณหภูมิและสภาพของการเผาไหม้ เป็นต้น

น้ำมันเตาเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่ได้จากขบวนการกลั่นน้ำมันดิบในหอกลั่น และเป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญในอุตสาหกรรม เพราะมีราคาถูก ใช้งานง่าย ให้ความร้อนสูง

ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้จากการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Digestion) และเนื่องจากมีก๊าซมีเทน (Methane) เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ประมาณร้อยละ 60-70 ที่เหลือเป็นส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ร้อยละ 23-38 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) ก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) และส่วนประกอบอื่น ๆ อีกประมาณร้อยละ 2 จึงสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในรูปแบบต่าง ๆ ได้ โดยข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้ร้อยละ 80-90 ที่อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ 0.4-0.5 ลบ.ม./กก.COD ที่ย่อยสลาย

การเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งสองข้างต้นจะปลดปล่อยมลพิษออกมาในรูปของก๊าซเสีย โดยสามารถประเมินเป็นปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Emission Factor for Stationary Combustion) ได้ตามตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1

ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

| Fuel              | Unit           | Net Calorific Value<br>(MJ/Unit) | CO <sub>2</sub> (kg of GHG per TJ on a Net Calorific Basis) |        |        | CO <sub>2</sub> (kg per Unit) |
|-------------------|----------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------|--------|-------------------------------|
|                   |                |                                  | Default Emission Factor                                     | Lower  | Upper  |                               |
| Residual Fuel Oil | kg             | 40.19                            | 77,400                                                      | 75,500 | 78,800 | 3.111                         |
| Biogas            | m <sup>3</sup> | 21.5 **                          | 54,800                                                      | 46,200 | 66,000 | 1.174                         |

ที่มา: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

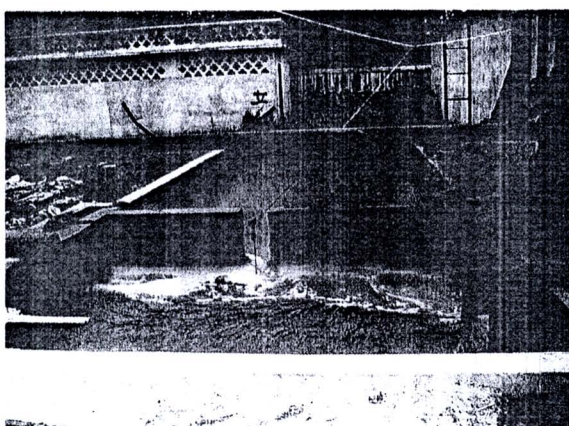
([http://www.dairyfarmenergy.com/DLtech\\_Publications/Heating\\_Value\\_of\\_Biogas.pdf](http://www.dairyfarmenergy.com/DLtech_Publications/Heating_Value_of_Biogas.pdf))

นอกจากนั้นในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตเอทานอล ยังมีผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วย จากรายงานสรุปผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก ประจำปี 2552 โดยใช้วิธีคำนวณตาม Annex 14 Methodological Tools (Version 02) “Tool to calculate the emission factor for an electricity system” สรุปค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำหรับโครงการ CDM ประเภททั่วไป มีค่าเท่ากับ 0.5812 tCO<sub>2</sub>/ MW-Hr.

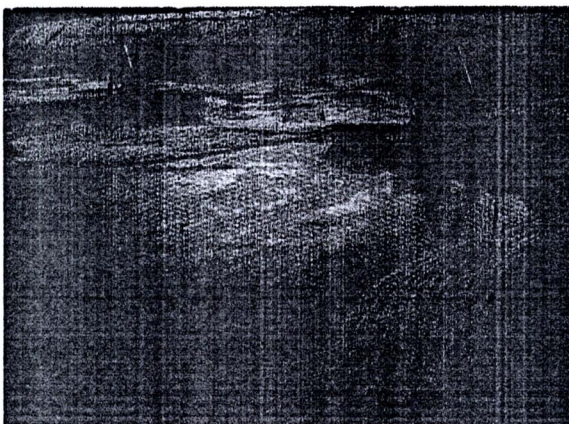
ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย สำหรับการปล่อยมลสารทางน้ำของโรงงานเอทานอลปัจจุบัน พบว่า ส่วนใหญ่ไม่มีการปล่อยสู่ภายนอกโรงงาน แต่เป็นการกักเก็บและบำบัดไว้ในภายในพื้นที่และบ่อเก็บน้ำของโรงงาน ยกเว้นบางแห่งที่มีการนำน้ำเสียไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นต่อไป



น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการกลั่นที่เรียกว่าน้ำกากส่า โดยน้ำกากส่าจากกระบวนการผลิตเอทานอลมีประมาณ 10-15 เท่า ของปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ผลิต เทคโนโลยีการหมัก และการหมุนเวียนน้ำ รวมถึงคุณภาพของน้ำกากส่า ก็จะแตกต่างกันไปตามชนิด สภาพของวัตถุดิบ และวิธีการผลิต ด้วยเช่นกัน ดังแสดงภาพน้ำกากส่าจากโรงงานเอทานอลจากวัตถุดิบมันสำปะหลัง และกากน้ำตาล ดังภาพที่ 2.8 และค่าคุณภาพน้ำกากส่าจากโรงงานเอทานอลจากวัตถุดิบมันสำปะหลัง และกากน้ำตาลในประเทศไทย ตามตารางที่ 2.2



ก.



ข.

ภาพที่ 2.8

น้ำกากส่าจากกระบวนการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบ ก.มันสำปะหลัง ข.กากน้ำตาล  
ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549)

ตารางที่ 2.2  
คุณภาพน้ำกากส่าจากโรงงานเอทานอลในประเทศไทย

| คุณภาพที่วิเคราะห์               | น้ำกากส่า<br>จากมันเส้น        | น้ำกากส่า<br>จากกากน้ำตาล |
|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 1. COD (mg/L)                    | 40,000-60,000                  | 100,000-150,000           |
| 2. BOD (mg/L)                    | 15,000-35,000                  | 40,000-70,000             |
| 3. TKN (mg/L)                    | 350-500                        | 1,500-2,000               |
| 4. Total Solids (mg/L)           | 60,000-65,000                  | 100,000-120,000           |
| 5. Total Suspended Solid (mg/L)  | 3,000-20,000                   | 14,000-18,000             |
| 6. Total Volatile Solids (mg/L)  | 20,000-40,000                  | ไม่มีข้อมูล               |
| 7. Total Dissolved Solids (mg/L) | 50,000                         | 105,000-130,000           |
| 8. pH                            | 3.5-4.3                        | 4.1-4.6                   |
| 9. ลักษณะปรากฏ                   | สีน้ำตาลอ่อน<br>มีเส้นใยกากมัน | สีน้ำตาลเข้ม-ดำ           |

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549)

แนวทางหนึ่งในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และมลภาวะของน้ำกากส่า รวมถึงยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลพลอยได้จากการผลิตเอทานอลด้วย คือการทำปุ๋ยของน้ำกากส่าจากกากน้ำตาล การทำอาหารสัตว์ของน้ำกากส่าจากมันสำปะหลัง และการผลิตก๊าซชีวภาพ

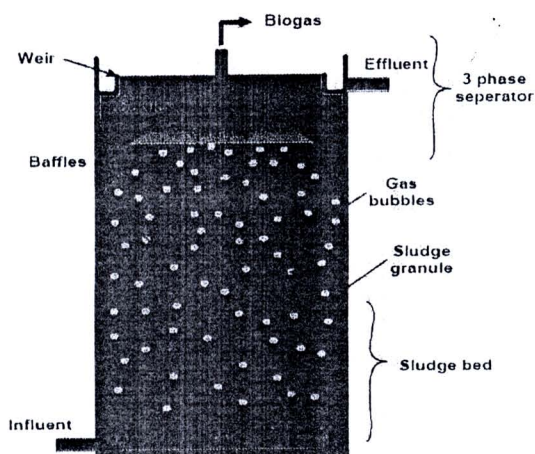
น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการกลั่นที่เรียกว่าน้ำกากส่า มีค่าความสกปรกสูงมาก ดังนั้นระบบที่ใช้บำบัดสำหรับน้ำกากส่าคือการเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ ซึ่งสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีค่าความสกปรกสูงได้ดี ในแต่ละโรงงานมีระบบการจัดการน้ำเสียที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการบำบัด ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียแต่ละชนิดจะมีข้อดีและข้อเสีย รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นไม่เหมือนกัน

2.4 ระบบการบำบัดน้ำเสีย แบบไร้อากาศ

โดยหากกล่าวถึงเทคโนโลยีการบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic treatment technology) สามารถแบ่งตามรูปแบบการเจริญของจุลินทรีย์ได้เป็น 3 แบบ คือ กลุ่มจุลินทรีย์ที่

แขวนลอยในระบบ (Suspended growth) จุลินทรีย์ที่ยึดเกาะกับวัสดุในระบบ (Supported growth) และแบบลูกผสม (Hybrid) เป็นต้น

2.4.1 ระบบ Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) (ภาพที่ 2.9) เป็นระบบ ที่ได้รับความนิยมมากถึงร้อยละ 70 ของระบบไร้อากาศที่ใช้งานในปัจจุบัน ป่อหมักเร็วแบบนี้ใช้ ตะกอนของสารอินทรีย์ (Sludge) ที่เคลื่อนไหวภายในป่อหมักเป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์เกาะในถัง ปฏิกริยา ซึ่งสูงประมาณ 4-7.5 เมตร จนเกิดเป็นเม็ดตะกอน (Granular sludge) ขนาด 1-5 มม. ซึ่งจะมีน้ำหนักมากลอยอยู่ส่วนล่าง โดยมีความเข้มข้น 20-100 กก. / ลบ.ม. เมื่อจ่ายน้ำเสียเข้า ทางด้านล่างถึง น้ำเสียจะค่อย ๆ ไหลผ่านชั้นเม็ดตะกอนขึ้นมา ทำให้มวลสารต่าง ๆ ถูกกำจัด ออกไป เนื่องจากเป็นปฏิกริยาแบบไร้ออกซิเจนจึงทำให้เกิดก๊าซชีวภาพขึ้น ซึ่งจะช่วยในการกวนน้ำ เสียให้สัมผัสกับตะกอนแบคทีเรียได้อย่างสมบูรณ์ ด้านบนของถังปฏิกริยาจะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า Gas Solid Separator (GSS) ซึ่งจะทำหน้าที่แยกก๊าซ ตะกอนแบคทีเรีย และน้ำทิ้งออกจากกัน น้ำ ทิ้งจะระบายไปยังระบบบำบัดขั้นที่ 2 (Secondary Treatment) ก๊าซชีวภาพจะถูกรวบรวมส่งไปใช้ เป็นเชื้อเพลิง ตะกอนแบคทีเรียจะตกกลับลงไปส่วนล่างของถังปฏิกริยา ข้อดีของถังหมักแบบ UASB คือเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่สูง แต่มีข้อเสียคือ มีความยุ่งยากในการ เลี้ยงตะกอนเม็ดจากตะกอนเบา



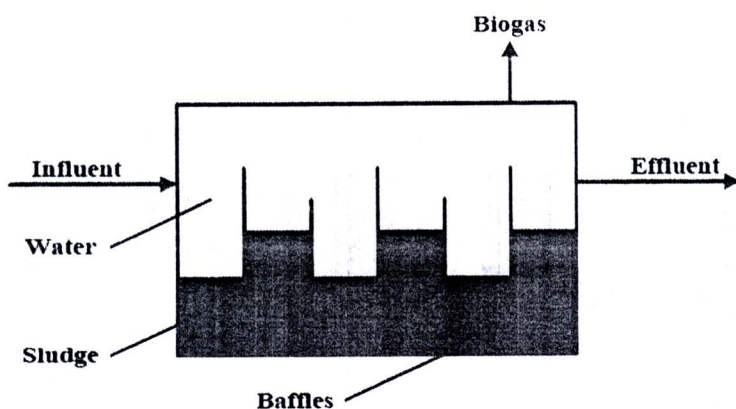
ภาพที่ 2.9

ถังหมักน้ำเสียแบบ Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor

ที่มา: <http://www.sut.ac.th/engineering/envi/004-2.pdf>



2.4.2 ระบบ Anaerobic Baffle Reactor (ABR) บ่อหมักแบบนี้จะใช้ถังปฏิกรณ์แบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีแผงกั้นแบ่งส่วน (ABR) ปกคลุมด้วยแผ่นกักก๊าซที่แน่นหนา (ภาพที่ 2.10) ระหว่างทางก่อนถึงบ่อน้ำ จะผ่านชุดแผงกั้นเพื่อเพิ่มเวลากักเก็บของของแข็ง และเพื่อช่วยให้เกิดการสัมผัสที่ดีระหว่างของแข็งกับสารอินทรีย์ละลายในน้ำเสีย ระบบนี้สามารถก่อสร้างได้ง่ายโดยการดัดแปลงบ่อเดิมที่มีอยู่แล้ว และใช้เงินลงทุนต่ำ แต่ระบบนี้หากตะกอนจำนวนมากจะหลุดปะปนไปกับน้ำบำบัด ทำให้ต้องมีขั้นตอนบำบัดเพิ่มเติม



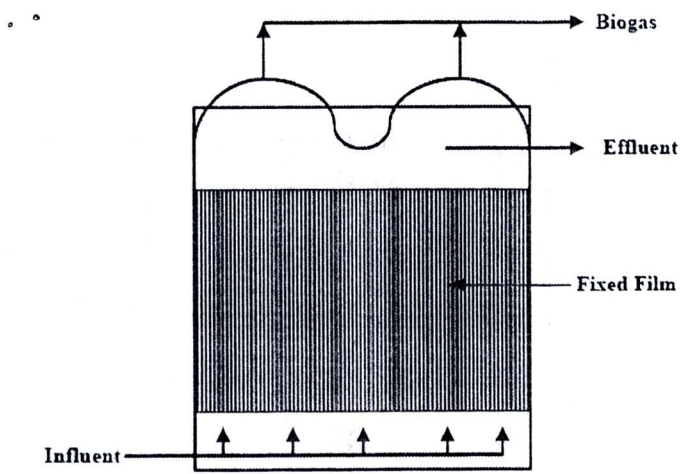
ภาพที่ 2.10

ถังหมักน้ำเสียแบบ Anaerobic Baffle Reactor (ABR)

ที่มา : Daniel and Amrebn (2549)

2.4.3 ระบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film Reactor, AFFR) เป็นถังปฏิกรณ์ประสิทธิภาพสูงที่กักเก็บจุลินทรีย์อยู่ในระบบ (ภาพที่ 2.11) โดยการให้จุลินทรีย์เกาะบนวัสดุตัวกลางถูกจัดวางอย่างเป็นระเบียบภายในถังปฏิกรณ์ในลักษณะของฟิล์ม ซึ่งสามารถลดการสูญเสียจุลินทรีย์ที่หลุดออกไปจากระบบบำบัดพร้อมกับน้ำเสียได้ ระบบมีประสิทธิภาพสูงในการผลิตก๊าซชีวภาพ และกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถฟื้นตัวกลับเข้าสู่สภาวะทำงานปกติได้อย่างรวดเร็ว หากเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำเสียที่ไหลเข้าระบบ หรือเกิดการสะสมสารอินทรีย์สูงเกินไป (shock loading) สำหรับน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ระบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์จะสามารถรับภาระสารอินทรีย์ (Organic loading) ได้ 6-8 กก.COD/ ลบ.ม.- วัน ที่ระยะเวลาการกักเก็บของเหลว (HRT) 3-4 วัน ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น 0.4-0.5 ลบ.ม./กก.COD ที่กำจัด ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ประมาณร้อยละ

80-90 ข้อดีของระบบนี้คือ เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตก๊าซชีวภาพ และสามารถรับการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสียได้ดี (Shock loading) การดูแลและควบคุมระบบง่าย ข้อเสียคือวัสดุตัวกลางมีราคาแพง และมีปัญหาอุดตันได้ง่าย ดังนั้นในการใช้งานจะต้องใช้ตัวกลางที่มีพื้นที่ผิวและรูพรุนสูง



ภาพที่ 2.11

ถังหมักน้ำเสียแบบ Anaerobic Fixed Film Reactor (AFFR)

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2549)

2.4.4 ระบบ Anaerobic Fluidized Bed (AFB) เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงมาก โดยแบคทีเรียจะคลุมผิวตัวกลางที่เป็นเม็ดขนาดเล็ก (เล็กกว่า 1 มม.) น้ำเสียจะถูกสูบเข้าก้นถังหมักที่มีทรงสูงด้วยความเร็วสูงพอที่จะยกเม็ดตัวกลางให้ลอย เม็ดตัวกลางนี้จะเคลื่อนที่ไปทุกทิศทาง จึงทำให้การถ่ายเทมวลทั้งอาหาร และของเสียต่างๆจากปฏิกิริยาจะสูงมาก ส่วนบนของถังหมักมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นความเร็วของน้ำจะต่ำลง จึงทำให้เม็ดตัวกลางที่มีแบคทีเรียเกาะอยู่ตกลงมา ส่วนที่เป็นน้ำจะล้นออกจากถัง และเม็ดตัวกลางที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาจะเกิดการขัดสีและชนกัน ทำให้แบคทีเรียหลุดออก จึงควบคุมความหนาของแบคทีเรียได้ ถึงแม้ว่าระบบนี้จะมีประสิทธิภาพที่สูง แต่ก็มีคามยุ่งยากในการควบคุมระบบ (Operate) และมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง

**2.4.5 ระบบ Completely Stirred Tank Reactor (CSTR)** ดังหมักในระบบนี้อาศัยหลักการทำงานของจุลินทรีย์เป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในถัง และมีการกวนผสมภายในถังอย่างทั่วถึง (Mixing System) วิธีการกวนผสมอาจใช้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตขึ้นวนกลับในถัง หรือการกวนโดยใช้เครื่องกวนผสม ทำให้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูง สามารถรับภาระปริมาณการเติมสารอินทรีย์สูง ช่วยลดระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสีย (HRT) ในถังหมัก

**2.4.6 ระบบ Anaerobic Constant (AC)** ประกอบด้วยถังหมักและถังตกตะกอน โดยภายในถังหมักจะมีการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพหรือใช้ตัวกวน จากนั้นน้ำจะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อให้ตะกอนแบคทีเรียจมตัวลง แล้วสูบกลับมาถังหมัก ระบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูงและค่าก่อสร้างต่ำกว่าระบบ AF แต่มีข้อเสียคือต้องการการกวนผสม และต้องมีถังตกตะกอน รวมถึงต้องควบคุมความเข้มข้นของแบคทีเรียให้เหมาะสมในถังหมักด้วย และมักจะมีปัญหาเรื่องของตะกอนของแบคทีเรียจมตัวยาก เนื่องจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น จะยกตะกอนแบคทีเรียขึ้นมาด้วย

จะเห็นได้ว่าในกระบวนการผลิตเอทานอลมีปัจจัยอยู่หลายประการที่อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่หากมีการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการนำผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในระบบมาประโยชน์ นอกจากจะสามารถลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้แล้ว ยังสามารถลดการใช้ทรัพยากรและต้นทุนในการผลิตได้อีกทางด้วย

## 2.5 การประเมินต้นทุนภายนอก จากผลกระทบสิ่งแวดล้อม

ปัญหาการเสื่อมโทรมลงของทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม อันเป็นผลมาจากการดำเนินกิจกรรมทางเศรษฐกิจต่างๆ ทั้งกิจกรรมด้านการผลิต และการบริโภค นับวันจะทวีความรุนแรงและแพร่กระจายไปทั่ว สร้างความเสียหายทั้งแก่ผู้ก่อมลพิษ และต่อเพื่อนมนุษย์รอบข้าง สำหรับนักเศรษฐศาสตร์ได้มีการวิเคราะห์ และสรุปว่าปัญหานี้เกิดขึ้นเพราะกลไกตลาดไม่ทำงาน หรือเกิดความล้มเหลวของตลาด (Market failure) ซึ่งหมายความว่าลำพังของกลไกตลาด หรือระบบราคาจะไม่สามารถชักนำให้หน่วยเศรษฐกิจต่างๆ ใช้ทรัพยากรเพื่อกิจกรรมทั้งหลายอย่างมีประสิทธิภาพ หรือเกิดสวัสดิการสูงสุดแก่สังคมได้นั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจากกิจกรรมหนึ่งๆ ได้ก่อให้เกิดผลกระทบภายนอก (Externalities) ขึ้นในสังคม



ผลกระทบภายนอก หมายถึงผลของการดำเนินกิจกรรมทางเศรษฐกิจของหน่วยเศรษฐกิจหนึ่งที่กระทบไปยังหน่วยเศรษฐกิจอื่นๆ โดยที่มิได้มีเป็นผู้ดำเนินกิจกรรมทางเศรษฐกิจนั้นโดยตรง ซึ่งผลกระทบภายนอกที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นต้นทุน หรือผลประโยชน์ ทั้งที่อยู่ในรูปของตัวเงิน และไม่ใชตัวเงิน

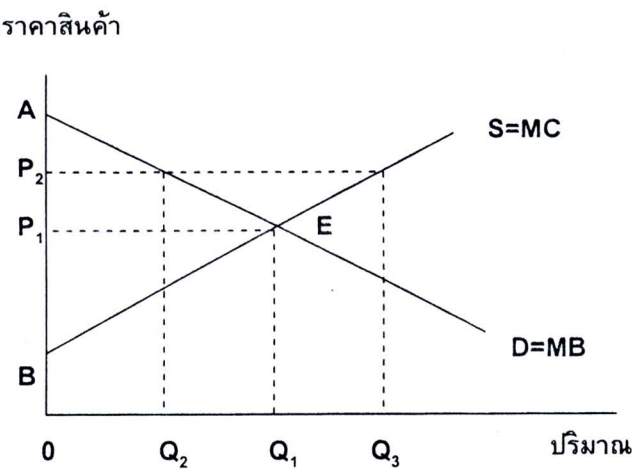
ต้นทุนภายนอก (External Cost) หมายถึง ต้นทุนที่ผู้ประกอบการไม่นำมารวมกับต้นทุนในบัญชี แต่การมองผลกระทบที่มีต่อบุคคลอื่นในลักษณะต้นทุน ที่เป็นผลมาจากการผลิตสินค้าและบริการ

ผลกระทบภายนอกที่เป็นความเสียหาย เรียกว่า ผลกระทบภายนอกเชิงลบ (Negative Externality) ตัวอย่างเช่น โรงงานผลิตน้ำตาลปล่อยกากของเสียลงในแม่น้ำลำคลองยังผลให้น้ำเน่าเสีย ชาวบ้านที่อาศัยอยู่ริมฝั่งแม่น้ำได้รับความเสียหายเนื่องจากความสกปรกของน้ำ ต้องหันไปใช้น้ำจากแหล่งอื่น ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายหรือลงทุนลงแรงเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันก็อาจจะต้องทนทุกข์ กับการดูดกลิ่นเหม็นของน้ำเน่า หรืออพยพย้ายหนีไปอยู่ที่อื่น ส่วนคนที่เคยเลี้ยงชีพด้วยการจับปลา หรือเลี้ยงสัตว์น้ำในแหล่งน้ำแหล่งนั้นอาจจะจับปลาและเลี้ยงปลาได้น้อยลง ซึ่งผลกระทบภายนอกเหล่านี้เป็นผลกระทบภายนอกเชิงลบจากการผลิต นอกจากนี้ผลกระทบภายนอกเชิงลบอาจเกิดขึ้นจากการบริโภคก็ได้ เรียกว่าผลกระทบภายนอกเชิงลบจากการบริโภค เช่น กรณีที่เพื่อนบ้านของท่านเปิดเครื่องรับวิทยุ หรือส่งเสียงดังจนรบกวนการอ่านหนังสือของท่าน ทำให้อ่านหนังสือไม่เข้าใจ ต้องใช้เวลาอ่านหลายเที่ยว หรืออาจจะอ่านไม่ได้เลย หรือกรณีที่สูบบุหรี่ แล้วเผื่อแผ่ควันบุหรี่ให้ท่านได้สูดดมโดยไม่ต้องสูบ เป็นต้น จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าแม้ผู้ที่ก่อผลกระทบจะมองไม่เห็นว่าเป็นปัญหากก็ตาม แต่อย่างน้อยก็เป็นปัญหาต่อผู้ที่ได้รับผลกระทบนั้นๆ ส่วนผลกระทบภายนอกที่อยู่ในรูปของผลประโยชน์ เรียกว่าผลกระทบภายนอกเชิงบวก (Positive externality) ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งจากการผลิต และการบริโภค เช่นกัน ตัวอย่างที่เกิดจากการผลิตได้แก่กรณีฟาร์มเลี้ยงผึ้งที่ตั้งอยู่ใกล้สวนผลไม้ได้รับประโยชน์จากเจ้าของสวนผลไม้เพราะผึ้งได้ดูดน้ำหวานจากเกสรของดอกไม้ ในขณะเดียวกันเจ้าของสวนผลไม้ก็ได้ประโยชน์จากการเลี้ยงผึ้ง เพราะผึ้งจะช่วยผสมเกสรทำให้ได้ผลไม้มากขึ้น ส่วนตัวอย่างของผลกระทบภายนอกเชิงบวกจากการบริโภคได้แก่ การที่เพื่อนบ้านปลูกต้นไม้ไว้ในบริเวณบ้านของเขา แต่ได้ช่วยให้บ้านของเราพลอยได้รับความร่มรื่นไปด้วย เป็นต้น

ตามหลักเบื้องต้นของเศรษฐศาสตร์จุลภาค ปริมาณการผลิตที่แสดงถึงการได้รับกำไรสูงสุดจะอยู่ที่ระดับการผลิตที่ทำให้ต้นทุนเพิ่มและรายรับเพิ่มเท่ากัน ( $MC=MR$ ) ในที่นี้ขอเรียกรายรับเพิ่มว่าผลประโยชน์เพิ่ม (Marginal Benefits: MB) เส้นอุปทานและเส้นต้นทุนเพิ่มใน

ตลาดแข่งขันสมบูรณ์เป็นเส้นเดียวกันมีค่าความชันเป็นบวกลาดขึ้นจากซ้ายไปขวา แสดงถึงความสัมพันธ์การใช้ต้นทุนที่มากขึ้นไปในทิศทางเดียวกับปริมาณผลผลิต เส้นอุปสงค์หรือเส้นผลประโยชน์เพิ่มมีค่าความชันเป็นลบแสดงถึงความสัมพันธ์ไปในทิศทางตรงข้ามของระดับราคาสินค้ากับความต้องการจ่ายหน่วยที่เพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วย การกำหนดดุลยภาพเป็นไปในทำนองเดียวกันกับที่อุปสงค์เท่ากับอุปทาน คือดุลยภาพจะเกิดขึ้นเมื่อต้นทุนเพิ่ม (Marginal Cost) เท่ากับความต้องการจ่ายหน่วยเพิ่ม (Marginal Willingness to Pay) อุปสงค์หรือความต้องการจ่ายหน่วยเพิ่ม มีค่าเท่ากับมูลค่าผลประโยชน์เพิ่ม (Marginal Benefit) ของรายบุคคล ดุลยภาพของสินค้าชนิดใดชนิดหนึ่งจึงอยู่ที่ระดับการผลิตที่ทำให้ต้นทุนเพิ่ม เท่ากับผลประโยชน์เพิ่ม ( $MC=MB$ ) ของสินค้านั้น ๆ

การปรับตัวเข้าสู่ดุลยภาพอธิบายด้วย ที่ระดับการผลิต  $Q_1$  เป็นจุดดุลยภาพเพราะระดับการผลิตอยู่ที่  $Q_3$  จะเป็นระดับการผลิตที่มีต้นทุนเพิ่มมากกว่าผลประโยชน์เพิ่ม การลดระดับปริมาณจะทำให้ต้นทุนลดลงมากกว่าผลประโยชน์ลดลง ดังนั้นผลประโยชน์รวมจะเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้ามถ้าระดับปริมาณอยู่ที่  $Q_2$  จะเป็นระดับที่มีผลประโยชน์เพิ่มมากกว่าต้นทุนเพิ่ม เมื่อเพิ่มการผลิตจะทำให้ผลประโยชน์เพิ่มมากกว่าต้นทุนเพิ่ม ซึ่งมีผลทำให้ผลประโยชน์รวมเพิ่มขึ้น เพียงที่ระดับปริมาณ  $Q_1$  ที่ผลประโยชน์เพิ่มเท่ากับต้นทุนเพิ่ม การเพิ่มหรือลดปริมาณการผลิตไปจากระดับนี้ไม่ทำให้ผลประโยชน์เพิ่มเพิ่มขึ้น ระดับปริมาณนี้จึงเป็นจุดดุลยภาพ แสดงดังภาพที่ 2.12



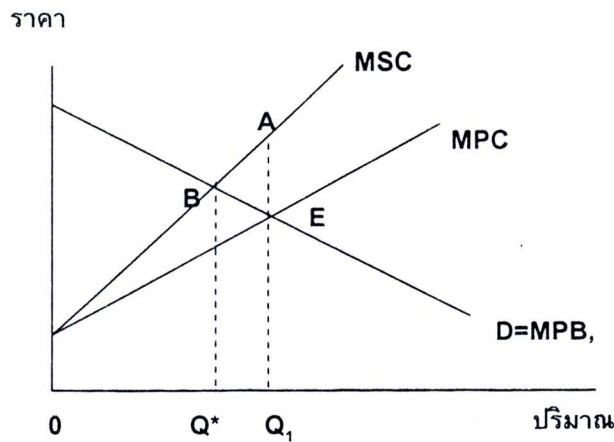
ภาพที่ 2.12

จุดดุลยภาพของสินค้า

ความล้มเหลวของตลาดสร้างความแตกต่างในต้นทุนส่วนบุคคล (Private Cost) และต้นทุนของสังคม (Social Cost) เพราะว่าทั้งต้นทุนส่วนบุคคล และต้นทุนของสังคม ประกอบขึ้นด้วยปัจจัยการผลิตเช่นเดียวกัน ตัวอย่างโรงงานผลิตกระดาษ มีปัจจัยการผลิตประกอบด้วยเช่น แรงงาน ที่ดิน ทุน และปัจจัยการผลิตอื่น ๆ ที่เป็นต้นทุนการผลิต และนับว่าเป็นต้นทุนของสังคมด้วย แต่เมื่อโรงงานปล่อยน้ำเสียสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านโรงงานบำบัดน้ำเสียทำให้น้ำเน่าเสียสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ โดยเฉพาะปลาต้องตาย ประชาชนผู้ใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำดังกล่าวไม่สามารถนำน้ำและสัตว์น้ำต่าง ๆ มาอุปโภคบริโภคได้ พบว่าประชาชนหรือบุคคลที่สามที่ไม่ได้รับผลประโยชน์จากการผลิตและขายกระดาษ แต่ต้องมารับภาระมลพิษที่โรงงานก่อขึ้น จากภาพที่ 2.13 แสดงถึงดุลยภาพเริ่มแรกในตลาดกระดาษ ที่ระดับปริมาณดุลยภาพเท่ากับ  $Q_1$  ที่เกิดจากการเท่ากันของอุปสงค์ และอุปทานที่มีต่อกระดาษ ถือว่าอุปสงค์และอุปทานนี้เป็นของส่วนบุคคลของกลุ่มผู้ผลิต และผู้ซื้อกระดาษ แต่โรงงานไม่ยอมลงทุนสร้างโรงงานบำบัดน้ำเสีย เพราะเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตกระดาษ ประชาชนหรือสังคมจึงเป็นผู้รับภาระนี้แทนทั้ง ๆ ที่ไม่ได้รับผลประโยชน์จากการขายหรือผลิตกระดาษเลย อุปทานจึงแสดงถึงต้นทุนเพิ่มส่วนบุคคล (Marginal Private Cost: MPC) และอุปสงค์แสดงถึงผลประโยชน์เพิ่มส่วนบุคคล (Marginal Private Benefits: MPB)

ที่ปริมาณการผลิตระดับ  $Q_1$  จะสูงกว่าระดับการผลิตสูงสุดของสังคมซึ่งเท่ากับ  $Q^*$  ที่เป็นจุดต้นทุนทางสังคม (Marginal Social Cost: MSC) เท่ากับผลประโยชน์ทางสังคม (Marginal Social Benefit: MSB) ปริมาณระหว่าง  $Q^*$  ถึง  $Q_1$  ผลประโยชน์เพิ่มจะน้อยกว่าต้นทุนเพิ่มของสังคมของโรงงานกระดาษ ต้นทุนส่วนเกินนี้แสดงโดยพื้นที่สามเหลี่ยม ABE ที่แสดงถึงต้นทุนที่สังคมต้องรับภาระ หรือเป็นส่วนที่ทำให้ประสิทธิภาพ (Efficiency) ของสังคมลดลง





รูปที่ 2.13

จุดดุลยภาพ และต้นทุนภายนอกที่สังคมต้องรับภาระ

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม โดยใช้ข้อมูลการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของระบบผลิตภัณฑ์จาก EPS 2000 (Environment Priority Strategies in Product Design, Version 2000) โดยได้รับการพัฒนาขึ้นในประเทศสวีเดน ที่ CPM (Centre for the environmental assessment of Products and Material systems) ซึ่งเป็นการศึกษาวิจัยด้านสิ่งแวดล้อมร่วมกันระหว่าง Chalmers University of Technology กับภาคอุตสาหกรรม ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการออกแบบ และพัฒนาผลิตภัณฑ์จากทางเลือกที่มีอยู่ ให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ซึ่งพื้นฐานมาจากการประเมินทั้งวัฏจักรชีวิต (LCA: Life Cycle Assessment) โดยใช้หลักการถ่วงน้ำหนัก ซึ่งสามารถทำให้ตัดสินใจได้อย่างรวดเร็ว และทำให้ผู้บริโภคเห็นได้ชัดว่าผลิตภัณฑ์ใดดีกว่า เป็นลักษณะการประเมินที่จุดสุดท้ายของผลกระทบ (End Point Effect) ใน 5 กลุ่มหลัก คือ

1. Human health impact indicators : ผลกระทบต่อสุขภาพ และการเจ็บป่วยของมนุษย์
2. Production capacity of ecosystems : ผลกระทบต่อกำลังการผลิตของระบบนิเวศ
3. Abiotic stock resource indicators: ผลกระทบต่อปริมาณทรัพยากร
4. Bio-diversity impact indicators: ผลกระทบต่อความหลากหลายทางชีวภาพ
5. Cultural and recreation value indicators: ผลกระทบทางวัฒนธรรม และนันทนาการ

จากการเปรียบเทียบวิธีการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม ตามตารางที่ 2.3 พบว่า ระบบการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของ EPS 2000 มีข้อมูลการศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อม จากข้อมูลครอบคลุมทั่วทั้งโลก และเป็นการประเมินในลักษณะที่เป็นมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น ในจุดสุดท้าย ได้แก่ ผลกระทบต่อสุขภาพและการเจ็บป่วยของมนุษย์ ผลกระทบต่อความ หลากหลายทางชีวภาพ เป็นต้น โดยใช้ข้อมูลมูลค่าความเต็มใจที่จะจ่าย (WTP: willingness to pay) ในการหลีกเลี่ยงผลกระทบนั้นๆ เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก สำหรับเป็นตัวแทนในแต่ละท้องถิ่น

ตารางที่ 2.3  
หลักการถ่วงน้ำหนักในแต่ละวิธีการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม

| วิธีการประเมิน<br>ผลกระทบสิ่งแวดล้อม | หลักการถ่วงน้ำหนัก                                                                     | ขอบเขตการศึกษา                         | ประเภทของตัวชี้วัดผลกระทบ                                                      |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Eco-Scarcity*                        | การลดผลกระทบเทียบกับเป้าหมาย                                                           | สวิสเซอร์แลนด์<br>เนเธอร์แลนด์, ลวีเดน | การปลดปล่อย<br>(Eco-points)                                                    |
| Eco-Indicator 98                     | ถ่วงน้ำหนักสองขั้นตอน<br>ขั้นตอนที่1: แยกหมวดหมู่ผลกระทบ<br>ขั้นตอนที่2: คำนวณดัชนีภาพ | ยุโรป                                  | ความเสียหายขั้นสุดท้าย เช่น การเสียชีวิต,<br>ด้านสุขภาพ, ด้านระบบนิเวศ เป็นต้น |
| EDIP                                 | สัดส่วนการปลดปล่อย<br>ในแต่ละดัชนีภาพผลกระทบ                                           | ทั่วโลก                                | ผลกระทบชั้นกลาง เช่น ดัชนีภาพให้เกิด<br>ภาวะโลกร้อน (เทียบเท่าจำนวนบุคคล)      |
| Environmental themes                 | การลดผลกระทบเทียบกับเป้าหมาย                                                           | สวิสเซอร์แลนด์<br>เนเธอร์แลนด์, ลวีเดน | ดัชนีภาพผลกระทบ ตามคุณสมบัติทางเคมี<br>กายภาพ ชีวภาพ                           |
| EPS-default                          | มูลค่าความเต็มใจที่จะจ่าย<br>สำหรับการหลีกเลี่ยงผลกระทบ                                | ทั่วโลก                                | ผลกระทบขั้นสุดท้าย เช่น<br>ด้านสุขภาพ, ด้านระบบนิเวศ เป็นต้น                   |
| Tellus                               | มูลค่าความเต็มใจที่จะจ่าย<br>สำหรับการบำบัดก๊าซ                                        | อเมริกา                                | การปลดปล่อย                                                                    |

ที่มา: Steen (1999a)

จากลักษณะการประเมินที่จุดสุดท้ายของผลกระทบ (End Point Effect) ใน 5 กลุ่มหลักที่กล่าวมาข้างต้น สามารถระบุประเภทผลกระทบ และตัวชี้วัด ในแต่ละกลุ่มผลกระทบได้ ตามตารางที่ 2.4, 2.5, 2.6 และตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.4

ประเภทผลกระทบ และตัวชี้วัด ในกลุ่มผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์

| ประเภทผลกระทบสิ่งแวดล้อม | ตัวชี้วัดผลกระทบ     | หน่วยของตัวชี้วัด | หมายเหตุ                                 |
|--------------------------|----------------------|-------------------|------------------------------------------|
| อายุขัยเฉลี่ย            | อายุขัยสั้นลง (YOLL) | คน-ปี             | ทดแทนการใช้อัตราการตายในการศึกษาก่อนหน้า |
| การเจ็บป่วยขั้นรุนแรง    | การเจ็บป่วยรุนแรง    | คน-ปี             | รวมถึงความอดอยาก                         |
| การเจ็บป่วย              | การเจ็บป่วย          | คน-ปี             | เช่น การป่วยไข้ เป็นต้น                  |
| ความรำคาญขั้นรุนแรง      | ความรำคาญขั้นรุนแรง  | คน-ปี             | เกิดปฏิกิริยา เพื่อหลีกเลี่ยงความรำคาญ   |
| ความรำคาญ                | ความรำคาญ            | คน-ปี             | ก่อให้เกิดความรำคาญ แต่ไม่ถูกระงับโดยตรง |

ที่มา: Steen (1999a)

ตารางที่ 2.5

ประเภทผลกระทบ และตัวชี้วัด ในกลุ่มผลกระทบต่อกำลังการผลิตของระบบนิเวศ

| ประเภทผลกระทบสิ่งแวดล้อม      | ตัวชี้วัดผลกระทบ              | หน่วยของตัวชี้วัด | หมายเหตุ                                   |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|
| กำลังการผลิตพืชอาหาร          | กำลังการผลิตพืชอาหาร (Crop)   | กิโลกรัม          | น้ำหนักที่เก็บเกี่ยว                       |
| กำลังการผลิตไม้               | กำลังการผลิตไม้(Wood)         | กิโลกรัม          | โดยน้ำหนักแห้ง                             |
| กำลังการผลิตปลา และเนื้อสัตว์ | กำลังการผลิตปลา และเนื้อสัตว์ | กิโลกรัม          | น้ำหนักรวมของสัตว์                         |
| กำลังการผลิตน้ำ               | กำลังการผลิตน้ำชลประทาน       | กิโลกรัม          | การยอมรับเรื่องชลประทาน เช่น เรื่องสารพิษ  |
| กำลังการผลิตน้ำ               | กำลังการผลิตน้ำดื่ม           | กิโลกรัม          | มาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก (ปี1997) |

ที่มา: Steen (1999a)

ตารางที่ 2.6

ประเภทผลกระทบ และตัวชี้วัด ในกลุ่มผลกระทบต่อปริมาณทรัพยากร

| ประเภทผลกระทบสิ่งแวดล้อม  | ตัวชี้วัดผลกระทบ               | หน่วยของตัวชี้วัด   | หมายเหตุ                  |
|---------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------|
| การหมดไปของทรัพยากร       | = ปริมาณสำรองทรัพยากรที่ลดลง   | กิโลกรัม (ทรัพยากร) | เช่น ปริมาณทองแดง เป็นต้น |
| การหมดไปของทรัพยากรฟอสซิล | ปริมาณสำรองก๊าซธรรมชาติที่ลดลง | กิโลกรัม            |                           |
| การหมดไปของทรัพยากรฟอสซิล | ปริมาณสำรองน้ำมันที่ลดลง       | กิโลกรัม            |                           |
| การหมดไปของทรัพยากรฟอสซิล | ปริมาณสำรองถ่านหินที่ลดลง      | กิโลกรัม            |                           |

ที่มา: Steen (1999a)



ตารางที่ 2.7

ประเภทผลกระทบ และตัวชี้วัด ในกลุ่มผลกระทบต่อความหลากหลายทางชีวภาพ

| ประเภทผลกระทบสิ่งแวดล้อม   | ตัวชี้วัดผลกระทบ           | หน่วยของตัวชี้วัด | หมายเหตุ                                      |
|----------------------------|----------------------------|-------------------|-----------------------------------------------|
| การสูญพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต | การสูญพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต | จำนวนที่ลดลง      | เกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตที่สูญพันธุ์ ในช่วงปี1990 |

ที่มา: Steen (1999a)

ส่วนประเภทผลกระทบ และตัวชี้วัด ในกลุ่มผลกระทบทางวัฒนธรรม และนันทนาการ (Cultural and recreation value indicators) เป็นการยากที่จะใช้ตัวชี้วัดโดยทั่วไปอธิบายได้ จึงมีการกำหนดตัวชี้วัดเท่าที่จำเป็น

สำหรับหลักการถ่วงน้ำหนัก โดยมูลค่าความเต็มใจที่จะการจ่าย (WTP: willingness to pay) เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบ ซึ่งอาจมีวิธีการประเมินที่แตกต่างกันไป รวมถึงความแตกต่างกันระหว่างภูมิภาค พฤติกรรม ซึ่งมีค่าความไม่แน่นอนในการถ่วงน้ำหนัก ตามวิธีการสมมุติเหตุการณ์ และให้ประเมินค่า (Contingent Valuation Method: CVM)

Contingent Valuation Method: CVM เป็นวิธีการประเมินมูลค่าสิ่งแวดล้อมที่ไม่ผ่านตลาด เป็นวิธีการประเมินมูลค่าความเต็มใจที่จะจ่าย (WTP) เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณภาพสิ่งแวดล้อมให้ดีขึ้นภายใต้ตลาดสมมุติ และเป็นวิธีการศึกษาโดยการสำรวจของกลุ่มตัวอย่าง เพื่อประเมินมูลค่าความเต็มใจที่จะจ่ายเพื่อพัฒนาสิ่งแวดล้อม โดยวิธีการสัมภาษณ์โดยตรง เหมาะสำหรับการประเมินมูลค่าสิ่งแวดล้อมทุกประเภท

ระบบผลิตภัณฑ์จาก EPS 2000 (Environment Priority Strategies in Product Design, Version 2000) ได้ศึกษาผลกระทบต่อหน่วยปริมาณรายการสิ่งแวดล้อม และได้สรุปขนาดผลกระทบต่อหน่วยรายการสิ่งแวดล้อมที่สนใจศึกษาในงานวิจัยนี้ คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>), ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) และ น้ำเสียภายหลังกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงาน (BOD และ COD) ไว้ในตารางที่ 2.8 รวมถึงค่าการถ่วงน้ำหนัก โดยมูลค่าความต้องการจ่าย (WTP: willingness to pay) สำหรับผลกระทบที่ศึกษาของประเทศสวีเดน ในแต่ละกลุ่มผลกระทบหลัก ตามตารางที่ 2.9

ข้อมูลการศึกษาขนาดผลกระทบ ต่อหน่วยตัวปริมาณรายการสิ่งแวดล้อม ตามการศึกษา จาก EPS 2000 สำหรับงานวิจัยนี้ ได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าการพิจารณาปัญหาจากก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ในเส้นทางของผลกระทบจากปัญหาภาวะโลกร้อนในช่วง 100 ปี (GWP100) จากค่า

เดิมซึ่งอ้างอิงข้อมูลจาก IPCC1994 ว่ามีผลกระทบจากภาวะโลกร้อนเท่ากับ 24 เท่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในการศึกษานี้ได้เปลี่ยนมาอ้างอิงข้อมูลผลกระทบจากภาวะโลกร้อนในช่วง 100 ปี (GWP100) เท่ากับ 21 เท่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (IPCC: 1995) แทน

ตารางที่ 2.8  
ขนาดผลกระทบต่อหน่วยปริมาณรายการสิ่งแวดล้อมที่สนใจศึกษา

| Environmental Flows | Impact category name     | Pathway              | Specific impact | Impact unit                     |
|---------------------|--------------------------|----------------------|-----------------|---------------------------------|
| CO <sub>2</sub>     | Life expectancy          | heat stress          | 7.43E-08        | person-year/ kg CO <sub>2</sub> |
|                     |                          | starvation           | 6.80E-07        | person-year/ kg CO <sub>2</sub> |
|                     |                          | flooding             | 5.70E-09        | person-year/ kg CO <sub>2</sub> |
|                     |                          | malaria              | 3.30E-08        | person-year/ kg CO <sub>2</sub> |
|                     |                          | Total                | 7.93E-07        | person-year/ kg CO <sub>2</sub> |
|                     | Severe morbidity         | starvation           | 3.15E-07        | person-year/ kg CO <sub>2</sub> |
|                     |                          | malaria              | 3.78E-08        | person-year/ kg CO <sub>2</sub> |
|                     |                          | Total                | 3.53E-07        | person-year/ kg CO <sub>2</sub> |
|                     | Morbidity                | starvation           | 3.15E-07        | person-year/ kg CO <sub>2</sub> |
|                     |                          | malaria              | 3.40E-07        | person-year/ kg CO <sub>2</sub> |
|                     |                          | Total                | 6.55E-07        | person-year/ kg CO <sub>2</sub> |
|                     | Crop production capacity | global warming       | 7.56E-04        | kg crop/ kg CO <sub>2</sub>     |
|                     |                          | Total                | 7.56E-04        | kg crop/ kg CO <sub>2</sub>     |
|                     | Wood production capacity | elevated temperature | -1.16E-03       | kg wood/ kg CO <sub>2</sub>     |
|                     |                          | fertilization        | -3.93E-02       | kg wood/ kg CO <sub>2</sub>     |
|                     |                          | Total                | -4.05E-02       | kg wood/ kg CO <sub>2</sub>     |
|                     | Extinction of species    | global warming       | 1.26E-14        | NEX/ kg CO <sub>2</sub>         |
|                     |                          | Total                | 1.26E-14        | NEX/ kg CO <sub>2</sub>         |

ตารางที่ 2.8 (ต่อ)  
ขนาดผลกระทบต่อหน่วยปริมาณรายการสิ่งแวดล้อมที่สนใจศึกษา

| Environmental Flows | Impact category name     | Pathway        | Specific impact | Impact unit                     |
|---------------------|--------------------------|----------------|-----------------|---------------------------------|
| CH <sub>4</sub>     | Life expectancy          | oxidant        | 8.40E-08        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     |                          | heat stress    | 1.56E-06        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     |                          | starvation     | 1.43E-05        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     |                          | flooding       | 1.20E-07        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     |                          | malaria        | 6.93E-07        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     |                          | Total          | 1.67E-05        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     | Severe morbidity         | oxidant        | 4.73E-09        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     |                          | starvation     | 6.62E-06        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     |                          | malaria        | 7.94E-07        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     |                          | Total          | 7.41E-06        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     | Morbidity                | starvation     | 6.62E-06        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     |                          | malaria        | 7.14E-06        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     |                          | Total          | 1.38E-05        | person-year/ kg CH <sub>4</sub> |
|                     | Crop production capacity | oxidant        | 3.40E-02        | kg crop/ kg CH <sub>4</sub>     |
|                     |                          | global warming | 1.59E-02        | kg crop/ kg CH <sub>4</sub>     |
|                     |                          | Total          | 4.99E-02        | kg crop/ kg CH <sub>4</sub>     |
|                     | Wood production capacity | fertilization  | -1.08E-01       | kg wood/ kg CH <sub>4</sub>     |
|                     |                          | Total          | -1.08E-01       | kg wood/ kg CH <sub>4</sub>     |
|                     | Extinction of species    | global warming | 2.65E-13        | NEX/ kg CH <sub>4</sub>         |
|                     |                          | Total          | 2.65E-13        | NEX/ kg CH <sub>4</sub>         |
| BOD                 | Extinction of species    | N-total        | 1.83E-14        | NEX/ kg CH <sub>4</sub>         |
|                     |                          | Total          | 1.83E-14        | NEX/ kg CH <sub>4</sub>         |
| COD                 | Extinction of species    | N-total        | 9.18E-15        | NEX/ kg CH <sub>4</sub>         |
|                     |                          | Total          | 9.18E-15        | NEX/ kg CH <sub>4</sub>         |

ที่มา: จาก <http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se>.

แก้ไขค่าคำนวณของ GWP100 จาก 24.5 (IPCC1994) เป็น 21 (IPCC 1995)



ตารางที่ 2.9  
มูลค่าความเต็มใจที่จะจ่าย (WTP) ในการหลีกเลี่ยงผลกระทบ ในแต่ละกลุ่มผลกระทบหลัก  
สำหรับประเทศสวีเดน

| End Point Effect                  | Impact category name          | Category indicator name               | Indicator unit                 | WTP(ELU/unit)        |
|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Human health impact indicators    | Life expectancy               | YOLL: Year of Lost Life               | person-year                    | 85,000               |
|                                   | Severe morbidity              | Severe morbidity                      | person-year                    | 100,000              |
|                                   | Morbidity                     | Morbidity                             | person-year                    | 10,000               |
|                                   | Severe nuisance               | Severe nuisance                       | person-year                    | 10,000               |
|                                   | Nuisance                      | Nuisance                              | person-year                    | 100                  |
| Production capacity of ecosystems | Crop production capacity      | Crop                                  | kg                             | 0.15                 |
|                                   | Wood production capacity      | Wood                                  | kg                             | 0.04                 |
|                                   | Fish&meat production capacity | Fish & meat                           | kg                             | 1                    |
|                                   | Bastcation capacity           | Bastcation capacity                   | H <sup>+</sup> mole equivalent | 0.01                 |
|                                   | Production capacity for water | for irrigation water                  | kg                             | 0.003                |
|                                   | Production capacity for water | for drinking water                    | kg                             | 0.03                 |
| Abiotic stock resource indicators | Depletion of fossil reserves  | Natural gas reserves                  | kg                             | 1.1                  |
|                                   | Depletion of fossil reserves  | Oil reserves                          | kg                             | 0.506                |
|                                   | Depletion of fossil reserves  | Coal reserves                         | kg                             | 0.0498               |
|                                   | Depletion of mineral reserves | Al-ore (Bauxite)                      | kg                             | 0.439                |
|                                   | Depletion of mineral reserves | Fe-ore                                | kg                             | 0.961                |
| Bio-diversity impact indicators   | Extinction of species         | NEX: Normalised extinction of species | Dimensionless                  | 1.1x10 <sup>11</sup> |

ที่มา: Steen (1999b)

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มูลนิธิสิ่งแวดล้อมไทย (2550) ได้ศึกษาประเมินวงจรชีวิตการผลิต และการใช้เอทานอลจากมันสำปะหลัง และอ้อย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณพลังงาน และศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากทั้งวงจรกิจกรรมของการผลิต และการใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิง เปรียบเทียบกับการผลิต และการใช้น้ำมันเบนซิน

การจัดทำรายการบัญชีด้านสิ่งแวดล้อม ของผลิตภัณฑ์ที่ศึกษาดำเนินการโดยการตรวจวัด และเก็บข้อมูลจากแหล่งปฐมภูมิ ตั้งแต่ขั้นตอนการเกษตร การแปรรูปวัตถุดิบ การผลิตเอทานอลในโรงงานผลิตเอทานอล โรงกลั่นน้ำมัน คลังผสมน้ำมัน และการขนส่งที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วง ประกอบกับแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ เช่น ฐานข้อมูล LCI ของต่างประเทศ รวมถึงเอกสารวิชาการอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เพื่อวิเคราะห์คำนวณหาปริมาณสารเข้า-ออกของแต่ละกิจกรรม ทั้งปริมาณการใช้วัตถุดิบ สารเคมี พลังงาน ปริมาณของเสีย ผลิตภัณฑ์พลอยได้ ปริมาณมลพิษที่ปล่อยออกสู่อากาศ และปริมาณมลสารทางน้ำเสียที่เกิดขึ้น เป็นต้น

โดยผลการศึกษาเปรียบเทียบการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมผลิตภัณฑ์เอทานอลจากกากน้ำตาล และมันสำปะหลัง ที่ปริมาณ 1,000 ลิตรเท่ากัน เมื่อจำแนกสัดส่วนของการเกิดผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนตามกระบวนการย่อยที่เกี่ยวกับการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาล พบว่า กิจกรรมการเผาใบอ้อย และการเผาซากพืชการเกษตร ก่อให้เกิดผลกระทบด้านภาวะโลกร้อนมากที่สุด ขณะที่การผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังพบว่า ช่วงของกระบวนการผลิตเอทานอลซึ่งมีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลสำหรับผลิตไอน้ำ เป็นช่วงที่ก่อให้เกิดผลกระทบสูงสุด นอกจากนี้ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลยังก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ด้านการเพิ่มธาตุอาหารพืชในน้ำ (Eutrophication) ซึ่งมีผลต่อระบบนิเวศได้ หากไม่ได้รับการจัดการด้านการจัดการน้ำเสียที่เหมาะสม เพื่อรองรับการขยายตัวของการผลิตของโรงงานในอนาคต

นุชนาถ (2550) เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของระบบผลิตเอทานอลสำหรับเชื้อเพลิงแก๊สโซฮอล์ในประเทศไทย โดยทำศึกษาเอทานอลที่ได้จากกากน้ำตาล หรือโมลาส และอาศัยหลักการการประเมินผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) มาวิเคราะห์ระบบผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% ซึ่งแบ่งได้ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเกษตร ขั้นตอนการขนส่ง และขั้นตอนการผลิตเอทานอล 99.5%

ขอบเขตงานวิจัย คือข้อมูลในการนำมาวิเคราะห์ได้จากการเก็บข้อมูลจาก แหล่งข้อมูล คือ (1) ไร่ของนางสายฝน คำศิลา บ้านเลขที่ 153 หมู่ 4 ตำบลหนองหิน อำเภอหนอง

กรุงเทพฯ (2) โรงงานขอนแก่นแอลกอฮอล์ เลขที่ 43 หมู่ 10 ตำบลน้ำพอง อำเภอ น้ำพอง จังหวัดขอนแก่น ซึ่งการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ จะดำเนินการตามอนุกรมมาตรฐานของ ISO 14040 - 14043 และประเมินค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต โดยใช้ข้อมูลจากโปรแกรม SimaPro Version 7.1 ด้วยวิธี EDIP/UMIP 97 (Environmental Design of Industrial Products) เนื่องจากการศึกษา LCA จำเป็นต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นจำนวนมาก และต้องนำข้อมูลหรือตัวเลขเหล่านั้นมาทำการคำนวณค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อความสะดวกจึงได้นำโปรแกรมสำเร็จรูปมาช่วยในการคำนวณ

ผลจากการศึกษา พบว่ากระบวนการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์ 99.5% ทำให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมมากที่สุด รองลงมาคือกระบวนการเกษตร และกระบวนการขนส่งตามลำดับ นอกจากนี้ การวิเคราะห์การเกิดภาวะโลกร้อนจะเกิดขึ้นมากที่สุดในขั้นตอนการผลิตเอทานอล บริสุทธิ์ 99.5% รองลงมา คือ ขั้นตอนการขนส่ง และขั้นตอนการเกษตรน้อยที่สุด

วรยุทธ และธำรงรัตน์ (2550) โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบพลังงานเพิ่มสุทธิ และผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตเอทานอล ทั้งนี้วัตถุดิบที่ศึกษาได้แก่ มันสำปะหลัง และอ้อย (กากน้ำตาลและน้ำอ้อย) โดยการศึกษาจะศึกษาตลอดวัฏจักรชีวิต โดยจะดำเนินการตามอนุกรมมาตรฐาน ISO14040 และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 7.0 วิธี Eco-indicator 95 สำหรับประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม โดยขอบเขตการศึกษาจะทำการศึกษาดังแต่การเพาะปลูกวัตถุดิบ การขนส่ง การแปรรูป วัตถุดิบ จนกระทั่งกระบวนการผลิตเอทานอล ซึ่งหน่วยการทำงาน (Functional Unit) ของงานวิจัยนี้ คือ พื้นที่การเพาะปลูกวัตถุดิบ 1 ไร่ และ เอทานอลที่ กำลังการผลิต 100,000 ลิตร

จากการศึกษาพบว่า อ้อยเป็นวัตถุดิบที่มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุด รองลงมาคือมันสำปะหลัง และกากน้ำตาลตามลำดับ ส่วนผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมพบว่าการใช้กากน้ำตาล ส่งผลกระทบสิ่งแวดล้อมสูงสุดในทุกด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่ศึกษา โดยผลกระทบส่วนใหญ่มาจากขั้นตอนการเพาะปลูก และการขนส่ง ซึ่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการเพาะปลูก ส่วนใหญ่มาจากกระบวนการผลิตปุ๋ย และจากการศึกษาขนาดผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการผลิตเอทานอล ตลอดวัฏจักรชีวิตที่มีต่อมนุษย์พบว่า ผลกระทบด้านการปล่อยสารมะเร็ง มีผลกระทบที่มีต่อมนุษย์สูงสุด รองลงมาคือการปล่อยโลหะหนัก และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ตามลำดับ



เสกสรร และปมทอง (2551) เป็นการประเมินความคุ้มค่าเชิงพลังงาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังโดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความคุ้มค่าเชิงพลังงาน และประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง โดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิต สำหรับใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์สาเหตุและพัฒนาแนวทางการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยศึกษาครอบคลุมถึงการเพาะปลูก การขนส่ง และกระบวนการผลิต โดยรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิจากเกษตรกร และโรงงานเอทานอลที่ใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ รวมถึงรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซึ่งผลการประเมินพลังงานป้อนเข้าและพลังงานที่ได้รับตลอดขอบเขตการศึกษา พบว่า การใช้พลังงานมาจาก 3 ส่วนสำคัญ คือการใช้ถ่านหิน การใช้ไฟฟ้า และการใช้ปุ๋ยเคมี ตามลำดับ และอัตราส่วนพลังงานที่ได้รับ (Net Energy Ratio) คิดเป็น 0.86 เท่า ของพลังงานป้อนเข้า

ส่วนการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิตพบว่า ช่วงการผลิตเอทานอลผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรวมมากที่สุดในเกือบทุกกลุ่มผลกระทบ ได้แก่ การเกิดภาวะโลกร้อน การเกิดฝนกรด การเพิ่มธาตุอาหารในน้ำเกินสมดุล การเกิดโลหะหนัก การเกิดสารอินทรีย์ระเหยง่าย และการใช้พลังงาน เนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินในกระบวนการผลิต เมื่อพิจารณาผลกระทบการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน พบว่า มีการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงการเพาะปลูก การขนส่ง และการแปรรูป คิดเป็น 0.25, 0.004 และ 1.24 kg-CO<sub>2</sub> eq. ต่อลิตรเอทานอล ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่า ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของระบบการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง ส่งผลกระทบสูงสุดในช่วงของการผลิตเอทานอล รองลงมา คือช่วงการเพาะปลูก และเก็บเกี่ยว อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาในช่วงการผลิตเอทานอล พบว่าการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า และไอน้ำสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ดังนั้น การปรับปรุงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมที่ควรเร่งดำเนินการ คือ การนำก๊าซชีวภาพที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงถ่านหิน ซึ่งจะช่วยลดภาระการจัดหาพลังงานจากแหล่งภายนอกได้ อีกทั้งยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและก๊าซที่ก่อให้เกิดภาวะฝนกรด

Nguyen, Gheewala (2008) ทำการศึกษาวิเคราะห์การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนวัฏจักรชีวิตของการใช้เอทานอลเป็นทางเลือกด้านการขนส่งในรูปของน้ำมันโซฮอลล์ E10 จากวัตถุดิบมันสำปะหลัง เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงก๊าซโซลีนในประเทศไทย โดยเฉพาะในแง่ของการปลดปล่อยทางอากาศ และต้นทุนทางสังคม โดยใช้เทคนิคการประเมินวัฏจักรชีวิต นอกจากนั้นยังใช้ข้อมูลจาก EPS (Environment Priority Strategies in Product Design, Version 2000) ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นในประเทศสวีเดน และสมมติฐานของแบบจำลองในการปรับค่า เพื่อใช้ในการประเมินมูลค่าผลกระทบสำหรับประเทศไทย โดยประเมินข้อมูล WTP (Willingness to Pay: ความเต็มใจที่จะจ่าย) สำหรับประเทศไทย จากความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเต็มใจที่จะจ่าย (WTP) กับสัดส่วนรายได้ต่อหัว (GDP) ของประเทศสวีเดน และประเทศไทย มาช่วยในการประเมินมูลค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งวงจรชีวิตของน้ำมันโซฮอลล์ E10 และก๊าซโซลีน

ผลการศึกษาพบว่า ทั้งวงจรชีวิตของน้ำมันโซฮอลล์ E10 ในประเทศไทยใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลน้อยกว่าเชื้อเพลิงก๊าซโซลีน 6.3% ปลดปล่อย CO<sub>2</sub> (6.4%), CH<sub>4</sub> (6.2%), CO (15.4%) และ NO<sub>x</sub> (15.8%) ซึ่งน้อยกว่าเชื้อเพลิงก๊าซโซลีนทั่วไป แต่เพิ่มการปลดปล่อยของ NO<sub>2</sub> (25.9%), SO<sub>2</sub> (16.9%), VOC (7.6%) และ PM<sub>10</sub> 2.4% นอกจากนั้นยังพบว่า สามารถลดต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อมลงได้ 5.9%