

บทที่ 2

ทฤษฎี และสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

มันสำปะหลังถือได้ว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างยิ่งของประเทศไทยทั้งนี้เป็นที่ยอมรับกันในความทนแล้งได้ดีขยายพันธุ์ง่าย ดันทุนการเพาะปลูกไม่สูงจึงเป็นที่นิยมของเกษตรกรโดยทั่วไป ดังนั้นจึงพบเห็นมันสำปะหลังปลูกได้ทั่วไปกระจายอยู่ทั่วทุกภาค จึงถือได้ว่าประเทศไทยเป็นผู้ผลิตรายใหญ่รายหนึ่งของโลก ซึ่งการใช้ประโยชน์หัวมันสดภายในประเทศนั้นมีตั้งแต่การแปรรูปเบื้องต้นในระดับเกษตรกร จนกระทั่งใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

2.1 ความเป็นมาของมันสำปะหลังในประเทศไทย

มันสำปะหลังจัดเป็นพืชหัวชนิดหนึ่ง มีชื่อสามัญเรียกหลายชื่อด้วยกันตามภาษาต่างๆที่ได้ยินมา ได้แก่ cassava, yuca, mandioca, manioc, madioc, tapioca เป็นต้น มันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดในอเมริกาใต้ แถบประเทศเปรู แม็กซิโก, กัวเตมาลา และ ฮอนดูรัส ได้แพร่ขยายไปทั่วทวีปอเมริกาแถบร้อน และขยายไปสู่แหล่งอื่นๆของโลก ประมาณคริสต์ศตวรรษที่ 17 ตามเอกสารที่พบพบว่ามี การนำมันสำปะหลังเข้ามาในเอเชีย โดยนำเข้ามาในประเทศอินเดีย ศรีลังกา มาเลเซีย อินโดนีเซีย สำหรับประเทศไทย ยังไม่มีหลักฐานที่แน่นอนว่ามีการนำมันสำปะหลังเข้ามาปลูกเมื่อใด คาดว่าคงจะเข้ามาในระยะเดียวกับที่เข้าสู่ประเทศศรีลังกา ฟิลิปปินส์ ราวพ.ศ. 2329-2383 เดิมทีเดียวคนไทยเรียกว่า มัน ไม้ มันสำโรง ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียก มันดินเคี้ยว ภาคใต้เรียก มันเทศ(เรียกมันเทศว่ามันหลา) ปัจจุบันคนส่วนใหญ่เรียก มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังจัดเป็นอาหารที่มีความสำคัญเป็นอันดับ 7 ของอาหารมนุษย์ทั่วโลก เป็นอาหารหลักของมนุษย์กว่า 200 ล้านคน โดยรับประทานโดยตรง เลี้ยงสัตว์ กิจกรรมอุตสาหกรรมประมาณ 95% ของผลผลิตมันสำปะหลังของโลก ใช้เป็นอาหารมนุษย์ทั้งในรูปอาหารหลัก อาหารรอง และอาหารเสริม โดยบริโภคในรูปหัวสด ประมาณหนึ่งถึงสามเปอร์เซ็นต์ของผลผลิตมันสำปะหลังของโลกใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ มันสำปะหลังอีกส่วนหนึ่งใช้ในการอุตสาหกรรมต่างๆ อาหารมากมายหลายชนิดที่ทำจากแป้งมันสำปะหลัง และยังมีอุตสาหกรรมอีกหลายชนิดที่ใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ

สำหรับประเทศไทย มันสำปะหลังเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศมาก เป็นพืชที่มีเนื้อที่ปลูกมากเป็นอันดับสามรองจากข้าว ข้าวโพด และผลิตมันสำปะหลังเป็นอันดับที่

สามของทั้งประเทศทั่วโลก ประมาณ 97% ของผลผลิตจากมันสำปะหลัง(หัวมันสด) ถูกส่งเข้าโรงงานทำการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังมากมายหลายชนิด ในจำนวนนี้ประมาณ 70% ของผลผลิตมันสำปะหลังได้ใช้ในการแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ ส่วนที่เหลือนั้นจะใช้อุตสาหกรรมอื่น ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังออกมากที่สุดในโลก นับเป็นสินค้าที่ทำรายได้จากการส่งออกมากเป็นอันดับสองรองจากข้าว (กรมวิชาการเกษตร, 2526)

2.1.1 การปลูกและประเภทของมันสำปะหลังในประเทศไทย

แหล่งปลูกมันสำปะหลังของประเทศไทย เดิมปลูกมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจนกลายเป็นแหล่งปลูกที่มากที่สุดของประเทศ คือ ประมาณ 60% ของเนื้อที่ปลูกทั้งหมดของประเทศ รองลงมาได้แก่ ภาคตะวันออกประมาณ 30% ของเนื้อที่ปลูกของประเทศ ภาคเหนือ 3% และภาคใต้ 7% ของพื้นที่ปลูกของประเทศ (ธีรภัทร ศรีนรคุตร , 2549) สำหรับผลผลิตมันสำปะหลังในปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

มันสำปะหลังที่ปลูกกันอยู่ แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท ได้แก่

ก) ประเภทที่ใช้เป็นอาหารมนุษย์ หรือ “ประเภทหวาน” (Sweet type) เป็นมันสำปะหลังที่ไม่มีมีรสขม เนื้อแน่น เหนียว เมื่อต้มหรือนึ่ง จะมีรสชาติดี ส่วนมากมีอายุสั้นประมาณ 6-8 เดือน ลำต้นเล็ก หัวเล็ก มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิคต่ำ จึงสามารถใช้หัวมันสดทำอาหารได้โดยตรง ในประเทศไทยมีพันธุ์ที่เรียกว่า พันธุ์ห่านาที่ บางทีก็เรียก พันธุ์ยอดแดง หรือ พันธุ์มันฉนวน และพันธุ์ระยอง 2

ข) ประเภทที่ใช้ในการอุตสาหกรรม หรือ “ประเภทขม” (Bitter type) เป็นพวกที่มีปริมาณแป้งมาก อาจมีรสขม ไม่เหมาะในการรับประทาน มันสำปะหลังประเภทนี้ จะมีลำต้นโต หัวโต อายุประมาณ 10-14 เดือน บางพันธุ์ถึง 2 ปี มีผลผลิตที่สูง มีปริมาณกรดไซยานิคสูง ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมทำแป้ง อุตสาหกรรมอื่นๆ และใช้ในการเลี้ยงสัตว์ ได้แก่ พันธุ์ยอดขาว พันธุ์สิงคโปร์ พันธุ์ระยอง และพันธุ์พื้นเมือง

สำหรับมันสำปะหลังที่ปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นชนิดขม โดยพันธุ์ที่ปลูกกันมากคือพันธุ์พื้นเมือง ได้แก่ พันธุ์ระยอง 1, พันธุ์ระยอง 3, พันธุ์ระยอง 5, พันธุ์ระยอง 60, พันธุ์ระยอง 90, พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 และพันธุ์หัวขบง 60 (พิชชา สวสสม, 2550)

ตารางที่ 2.1 พื้นที่เก็บเกี่ยวและผลผลิตมันสำปะหลังเป็นรายภาค ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550-2554

	ปี 2550-2551	ปี 2551-2552	ปี 2552-2553	ปี 2553-2554
ผลผลิต (ล้านตันหัวมันสด)	25.16	30.08	22.01	21.06
พื้นที่ (ล้านไร่)	7.30	8.01	7.73	6.90
ผลผลิตเฉลี่ย (ตัน/ไร่)	3.40	3.64	3.01	3.05

ที่มา : สำนักส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตร กรมการค้าภายใน (2553)

2.2 องค์ประกอบของมันสำปะหลัง

ส่วนของมันสำปะหลังที่ซื้อขายแปรรูปในปัจจุบัน ได้แก่ ส่วนของหัวที่เป็นแหล่งของแป้ง สำหรับใช้ในการแปรรูปทำมันเส้น และมันอัดเม็ด เพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ หรือเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตแอลกอฮอล์ นอกจากนั้นหัวยังเป็นวัตถุดิบเพื่อใช้สกัดแป้งของโรงงานแป้งมัน (พิชชา สวสม, 2550)

2.2.1 ส่วนประกอบของมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่เก็บสะสมอาหารไว้ในราก เมื่อพืชมีการสร้างอาหารจากใบและส่วนที่เป็นสีเขียวแล้ว จะสะสมในรูปของคาร์โบไฮเดรต คือ แป้ง ไว้ในรากความสามารถในการสร้างและสะสมแป้งไว้ในรากมีความแตกต่างกันบ้าง เนื่องจากพันธุ์ของมันสำปะหลัง อายุเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนการเก็บเกี่ยวและปัจจัยอื่นๆ จึงทำให้ส่วนประกอบของหัวมันอาจแตกต่างกันไป โดยทั่วไปหัวมันสำปะหลังที่มีอายุ 12 เดือน ที่ได้รับปริมาณน้ำฝนที่เพียงพอ และไม่มีฝนตกชุกขณะเก็บเกี่ยว จะมีส่วนประกอบ (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย, 2546) แสดงได้ไว้ดังตารางที่ 2.2

จากข้อมูล จะเห็นว่าหัวมันสำปะหลังมี สารไซยาไนด์(กรดไซยานิคอิสระ) ในปริมาณที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 2.85 มิลลิกรัม ถึง 39.27 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของหัวมันสำปะหลัง กรดไซยานิคนี้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต จะมีอยู่ในหัวมันสดที่เพิ่งเก็บมา เมื่อหัวมันถูกเก็บเกี่ยวจากไร่แล้ว ปริมาณกรดไซยานิคจะเริ่มลดลง ถ้าอุณหภูมิร้อน (เช่น ตากแดด เผา คั่ว) กรดไซยานิคก็จะแตกตัวหมดไป

ในส่วนต่างๆ ของต้นมันสำปะหลัง มีสารชนิดหนึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำมัน สารนี้อยู่ในกระเปาะได้ผิว หรือได้เปลือก เมื่อทำให้ดินหรือหัวมันสำปะหลังเป็นแผลหรือตัดต้น ตัดหัวมันสำปะหลัง จะเห็นของเหลวคล้ายน้ำยางสีขาวไหลออกมา สารนั้นคือ สารไซยาโนจินิก กลูโคไซด์ (Cyanogenic Glucoside) ซึ่ง มีอยู่ 2 ชนิด คือ ชนิดแรกได้แก่ ลินามาริน(Linamarin)

สารชนิดนี้มีอยู่ 93% ส่วนชนิดที่สอง คือ โททอสตราลิน (Lotaoustralin) ชนิดนี้มีอยู่น้อยเพียง 7% ของไขมันอินทรีย์ กลูโคไซด์

โดยตามแต่ละส่วนของต้นมันสำปะหลังจะมีสารนี้แตกต่างกันออกไปด้วย เช่น ในเนื้อของหัวจะมีกรดไฮโดรไขมันน้อยกว่าในส่วนเปลือกและใบ โดยเฉพาะที่เปลือกมันสำปะหลังจะมีปริมาณมากที่สุด (กรมวิชาการเกษตร, 2526)

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักในหัวมันสำปะหลัง

องค์ประกอบในหัวมัน	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักหัวมัน)
น้ำ	60.21-75.32
เปลือก	4.08-14.08
เนื้อ (แป้ง)	25.87-41.88
ไขมัน (ppm)	2.85-39.72
องค์ประกอบในเนื้อมัน	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้งเนื้อมัน)
แป้ง	71.9-85.0
โปรตีน	1.57-5.78
เยื่อใย	1.77-3.95
เถ้า	1.20-2.80
ไขมัน	0.06-0.43
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง	3.59-8.66

ที่มา : มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2546)

2.3 การแปรรูปและการใช้ประโยชน์มันสำปะหลัง

สำหรับการใช้ประโยชน์แป้งมันสำปะหลังในปัจจุบันนั้นส่วนใหญ่นิยม คือ การบริโภคในครัวเรือน, อุตสาหกรรมแป้งคัดแปรร, ใช้ทำผงชูรสและไลซีน, ทำสารให้ความหวาน, อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม, อุตสาหกรรมกระดาษ, อุตสาหกรรมสิ่งทอ, อุตสาหกรรมไม้อัดและกาบ และการผลิตแอลกอฮอล์ (เอทานอลไร้น้ำ) เป็นต้น (พิชยา สวยสม, 2550) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ รูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 การใช้ประโยชน์ของมันสำปะหลัง

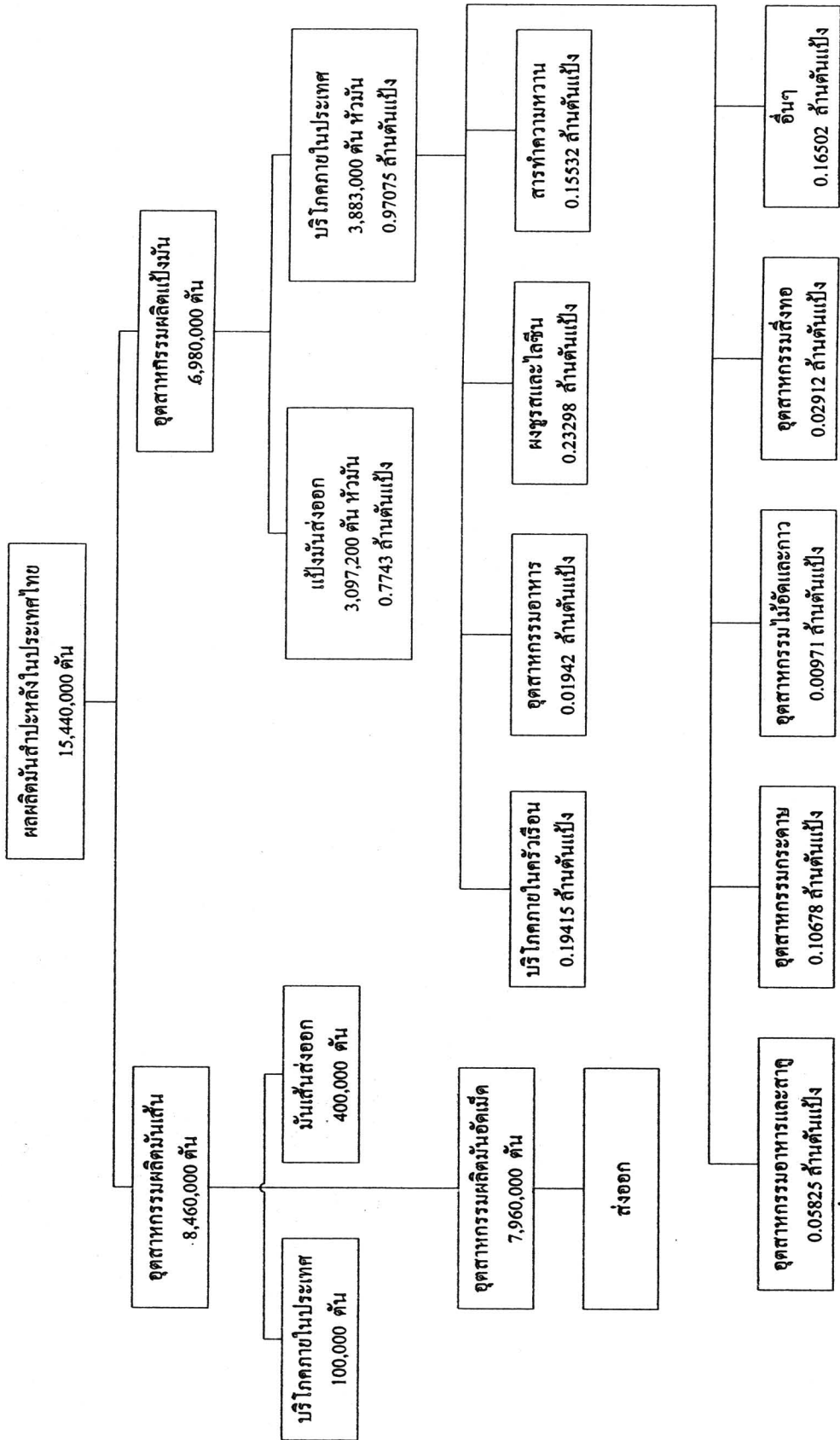
ที่มา : www.farmkaset.com

2.3.1 การบริโภคเป็นอาหารโดยตรง

การบริโภคเป็นอาหารโดยตรง ปกติที่นิยมรับประทานจะเป็นหัวมันสำปะหลังชนิดหวาน หมายถึงชนิดที่มีกรดไซยานิดน้อย เช่น มันปิ้ง ชุบน้ำเชื่อม มันเชื่อม เป็นต้น ส่วนมันสำปะหลังที่ปลูกกันทั่วไปจะมีปริมาณแป้งสูงจึงต้มน้ำสุกซ้า เมื่อปอกเปลือกแล้วต้มให้เดือด และทิ้งไว้ในหม้อต้มอย่างน้อยครึ่งชั่วโมง และนำมาเชื่อมหวานก็จะมรสและความอร่อยเช่นเดียวกับมันพันธุ์ห่านาที่ถ้าแป้งมีรสขมอยู่ให้หลีกเลี่ยงการบริโภค

2.3.2 อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด

มันอัดเม็ดหรือที่เรียกว่า มันเม็ด ผลิต โดยการอัดมันเส้น โดยเครื่องอัดภายใต้สภาวะความร้อนและความดัน มันอัดเม็ดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด โดยใช้ลักษณะทางกายภาพเป็นเกณฑ์คือ ชนิดแข็ง (Hard Pellets) ชนิดนิ่ม (Soft Pellets) มันอัดเม็ดทั้งชนิดแข็งและชนิดนิ่มจะมีรูปร่างคล้ายดินสอ มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2-3 เซนติเมตร ความชื้นประมาณร้อยละ 14 และมีสีขาว ด้วยเหตุนี้บางคนจึงเรียกมันอัดเม็ดว่ามันแท่ง



รูปที่ 2.2 แผนการกระจายผลผลิตหัวมันสำปะหลังสู่อุตสาหกรรมในปี พ.ศ 2541 (ดัดแปลงแก้ไขจาก Siroth et al., 2000a)

ที่มา : สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2551)

2.3.3 อุตสาหกรรมมันเส้น

การแปรรูปที่ใกล้ตัวเกษตรกรมากที่สุดคือ การทำมันเส้น เมื่อเก็บเกี่ยวหัวมันสดแล้ว ก็จะนำส่งลานมัน ซึ่งเกษตรกรบางรายมีลานของตัวเองก็จะทำการแปรรูปโดยใช้เครื่องตัดหัวมันเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปตากบนลานซีเมนต์เมื่อแห้งดีแล้วก็ทำการเก็บเพื่อส่งขายเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์หรืออุตสาหกรรมมันอัดเม็ดต่อไป การตากมันเส้น นอกจากจะใช้วิธีตากแดดแล้วยังสามารถทำให้แห้งโดยใช้การอบได้อีกด้วย แต่การใช้เตาอบมันให้แห้งนั้นต้องใช้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมันหรือแก๊สซึ่งมีต้นทุนที่สูงกว่าการตากแดด การผลิตมันเส้น 1 กิโลกรัมต้องใช้หัวมันสด 2.00-2.50 กิโลกรัม ทั้งนี้อัตราการแปรรูปขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการด้วยกัน เช่น ลักษณะการหั่น ลักษณะการตากแห้ง ฤดูที่ทำการแปรรูป เป็นต้น แต่ปัจจัยสำคัญคือ เปอร์เซ็นต์แป้งในหัวมันสำปะหลังสดกล่าวคือ ถ้าหัวมันสดมีเปอร์เซ็นต์แป้งสูงก็จะผลิตมันเส้นได้สูงด้วย

2.3.4 อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

ในบรรดาประเทศที่ปลูกมันสำปะหลังมากๆ เช่น บราซิล ไนจีเรีย อินโดนีเซีย และไทย เป็นต้น ประเทศไทยเป็นประเทศเดียวที่ใช้มันสำปะหลังมาผลิตเป็นแป้งมากที่สุด ถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลก โดยมีกำลังความสามารถในการผลิตมากกว่า 2 ล้านตันมันสำปะหลังต่อปี มีเทคโนโลยีการผลิตแป้งมันสูงที่สุดในบรรดาทุกๆประเทศ และได้มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีไปสู่ประเทศเพื่อนบ้าน แป้งมันสำปะหลังจึงถือได้ว่าเป็น “แป้งไทย” เป็นแป้งของคนไทย ที่สามารถผลิตได้มากที่สุด และเป็นแป้งที่มีคุณภาพสูงที่สุด ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

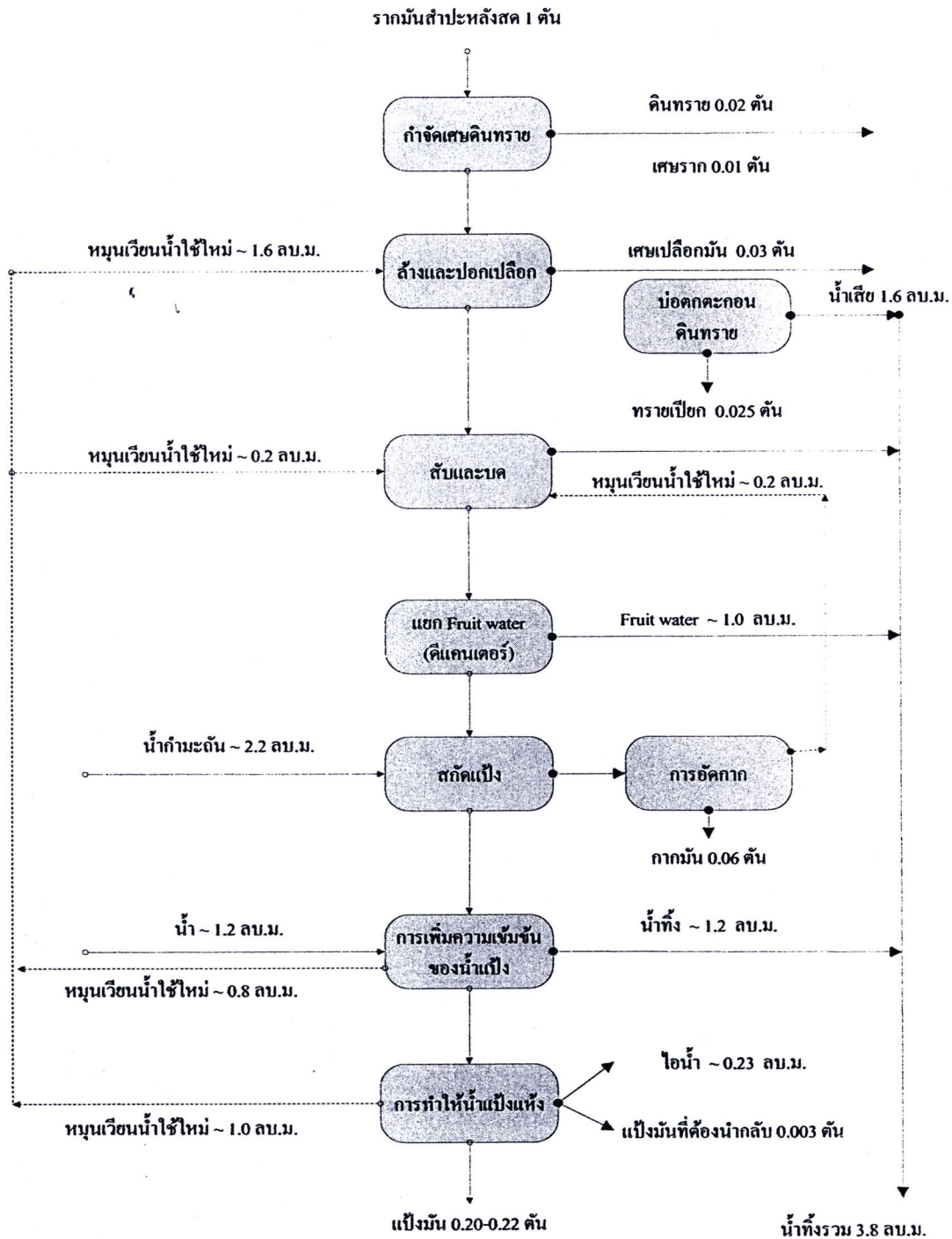
2.4 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งบริโภคที่สำคัญอันดับต้นๆของประเทศไทย และมีอัตราการผลิตที่เพิ่มขึ้นมากตามจำนวนของผลผลิตหัวมันสำปะหลังสด (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540) แสดงดังรูปที่ 2.3

รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการปลุกมันสำปะหลังและอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง
ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2540)

2.4.1 ขั้นตอนกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีขั้นตอนการผลิตมีหลายขั้นตอน ซึ่งจะอธิบายได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2540)



ในการผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540) ประกอบด้วย

- มวลสารที่นำเข้า
- รากมันสำปะหลังสด (รวมทั้งเศษดินและทราย) ที่ประกอบด้วย แป้ง, Fruit water, สารที่ละลายน้ำได้, แร่ธาตุ และโปรตีน
 - น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต และน้ำก่อดิน
 - โรงงานบางแห่งใช้ปูนขาวในการปรับ pH ของน้ำทิ้งจากโรงงาน
 - การกำจัดความกระด้างของน้ำได้ดิน
- มวลสารที่เกิดขึ้น
- แอมโมเนียสำหรับปุ๋ยและกากมันสำปะหลัง
 - น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต รวมทั้ง fruit water
 - เศษดินทราย เศษรากมัน และเปลือกของรากมันสำปะหลัง
 - ตะกอนส่วนเกินจากระบบบำบัดน้ำเสีย (Primary sludge และ Secondary sludge)

วัสดุเศษเหลือที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ย มีดังนี้

1. วัสดุเศษเหลือที่เป็นของแข็ง

	กก./ตันรากมันสำปะหลังสด
• ดินทรายแห้ง	20
• ดินทรายเปียก	25
• เปลือกรากมันสำปะหลัง	30
• กากมันสำปะหลัง	60

2. วัสดุเศษเหลือที่เป็นของเหลว

— ในกรณีที่มีการนำน้ำกลับไปใช้ใหม่ (Recycle)

	ลบ.ม./ตันรากมันสำปะหลังสด
- น้ำเสียจากการล้างรากมันสำปะหลัง	1.6
- น้ำเสียจากดีแคนเตอร์ (Decanter)	1.0
- น้ำเสียจากเครื่องแยก (Separator)	1.2
- รวมปริมาณน้ำเสียทั้งหมด	3.8

แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่.....	21 ส.ค. 2554
เลขทะเบียน.....	242948
เลขเรียกหนังสือ.....	

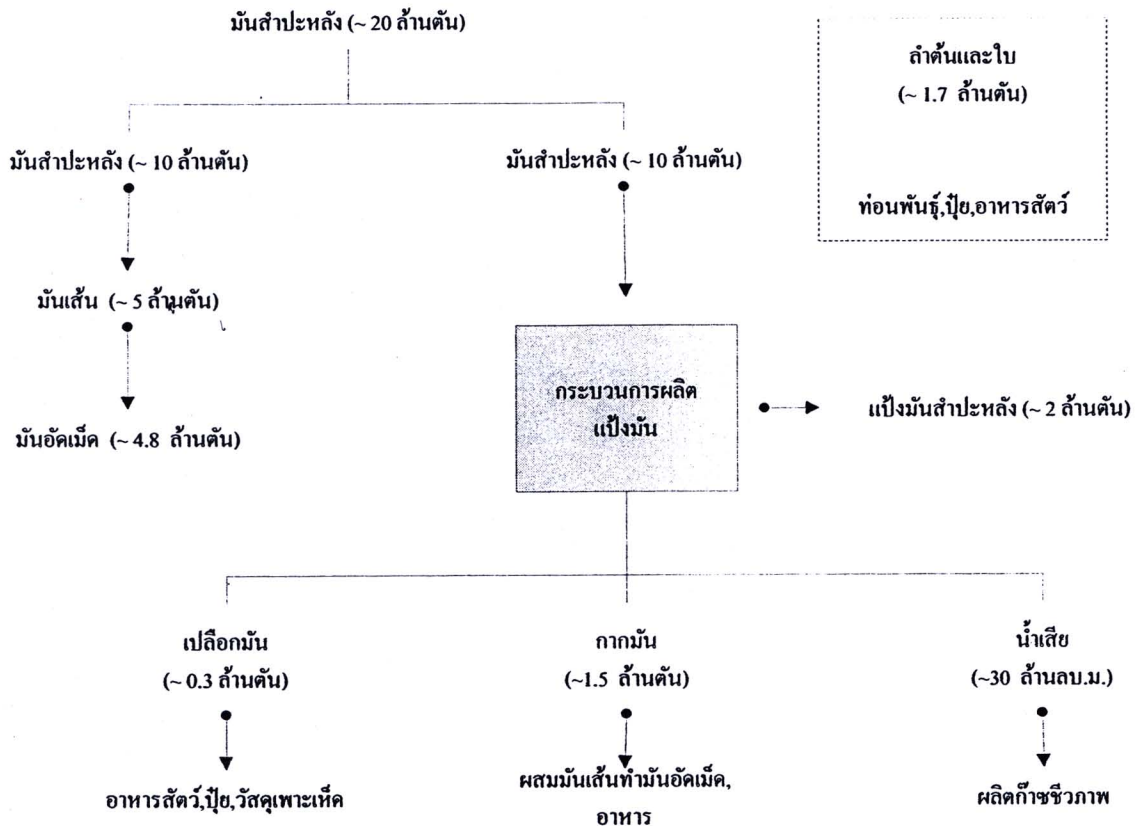
ตารางที่ 2.3 สมดุลของการผลิตแป้งมันสำปะหลังแบบมาตรฐาน

สถานะ	ชนิดของวัสดุ	มวล	ปริมาณแป้งที่สูญเสีย
หน่วย	น้ำหนักต่อรากมันสำปะหลัง	(กก./ตัน)	(กก./ตัน)
ผลผลิตในรูปของแข็ง	กากมันสำปะหลัง	60	5
	แป้งมันสำปะหลัง	200 – 220	-
	รวม	260 – 280	5
ของเสียที่เป็นของแข็ง	เศษดินทราย	20	-
	เศษดินทรายจาก grit chamber	25	-
	เศษรากมันสำปะหลัง	10	-
	เศษเปลือกมันสำปะหลัง	30	2
	รวม	85	2
ของเหลว	น้ำทิ้งจากการล้างรากมันสำปะหลัง	1,600	6
	Fruit-water	1,000	20
	น้ำทิ้งจาก		
	การอัดกาก	-	-
	การอัดกากเพิ่มความเข้มข้นของน้ำ	1,200	2
	และการทำให้น้ำแป้งแห้ง		-
	รวม	3,800	28
ไอน้ำ	ไอน้ำจากการอบแป้ง	230	3
	อากาศร้อน จากการเตรียมซัลเฟอร์ไดออกไซด์	-	-
		2.2	-
	รวม	232.2	3
	รวมทั้งหมด	4,377.2- 4,397.2	38

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2540)

2.4.2 การใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

การใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สมดุลมวลผลพลอยได้และการนำไปใช้ประโยชน์ของมันสำปะหลัง

(พิชยา สวรส คัดแปลงจาก Sriroth, 2006)

ที่มา : สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2551)

2.5 กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลัง คือ วัสดุเศษเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและโรงงานผลิตฟรุคโตสและสารให้ความหวาน โดยปกติกากแป้งมันสำปะหลังที่ออกจากโรงงานจะมีลักษณะเปียก ความชื้นประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ และมีการใช้กากแป้งมันสำปะหลังเปียกนี้เป็นอาหารสัตว์ อาทิ อาหารโค, กระบือ และปลา แต่กากแป้งมันสำปะหลังที่ตากแห้งและใช้เป็นวัสดุเจือปนผสมกับมันเส้นบดหรือมันอัดเม็ด (ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550)

2.5.1 องค์ประกอบของกากมันสำปะหลัง

โดยทั่วไป กากมันสำปะหลังจะมีองค์ประกอบของแป้งที่สูงถึงประมาณ 40-60 % และมีไขมัน โปรตีน เถ้า และเส้นใย รวมถึงไซยาไนด์ และแทนนินที่จะมีปริมาณลดลงเมื่อตากแดดหรือใช้สารเคมี แสดงในตารางที่ 2.4 เป็นการแสดงองค์ประกอบของกากมันสำปะหลังของแต่ละงานวิจัย และรูปที่ 2.6 เป็นภาพสแกนองค์ประกอบของกากมันสำปะหลัง

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง

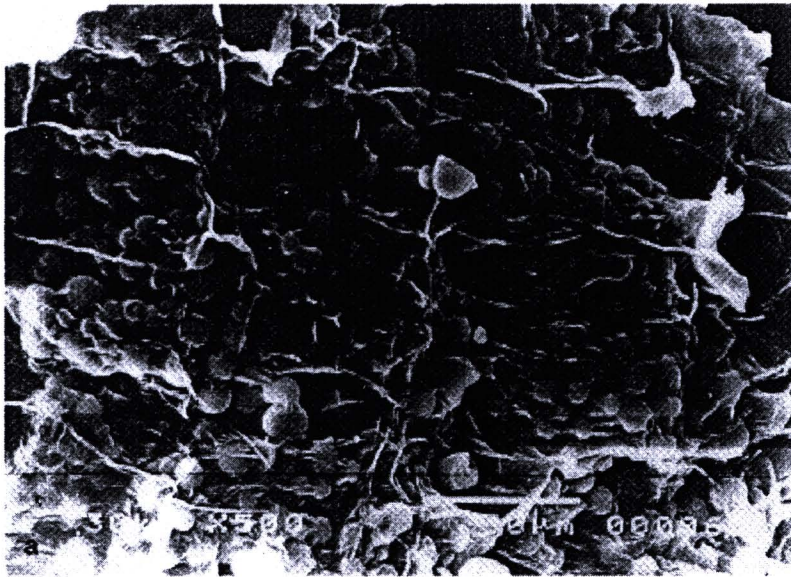
ส่วนประกอบ*	Soccol (1994)	Cereda (1994)	Sterz (1997)	Vanden- berghe (1998b)	Sriroth** (2000b)	Sriroth* (2000b)	สถาบันวิจัยและ พัฒนาพลังงาน ม.เชียงใหม่ ** (2008)	
							กพ ¹	ชย ¹
แป้ง	40.50	63.85	63.4	63.0	17.80	68.89	5.56	10.02
ความชื้น	5.02	9.52	10.70	11.20	72.00	-	87.62	83.1
เถ้า	1.10	0.66	1.50	1.44	0.44	1.70	-	-
โปรตีน	1.57	0.32	1.60	1.61	0.40	1.55	-	-
เยื่อใย	50.55	14.88	22.20	21.10	7.17	27.75	2.38	2.0
ไขมัน	1.06	0.83	0.53	0.54	0.03	0.12	-	-
pH	-	-	-	-	4.99	4.99	4.25	4.11

* หน่วย กรัมต่อน้ำหนัก กากแห้ง 100 กรัม

** หน่วย กรัมต่อน้ำหนัก กากเปียก 100 กรัม

¹ กพ, กำแพงเพชร ชย, ชัยภูมิ

ที่มา : พิชยา สวรส (2550)



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของกากมันสำปะหลังที่สแกนโดยเครื่อง Electron Micrographs
ที่มา : Sriroth et al., (2000b)

จากตารางที่ 2.4 พบว่าองค์ประกอบหลักของกากมันสำปะหลัง คือ แป้ง และเยื่อใย (Cellulose) รายละเอียดแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.5.1.1 แป้ง

แป้งจัดอยู่ในอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรต ซึ่งคาร์โบไฮเดรต หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แซ็กคาไรด์ (Saccharide) เป็นสารประกอบพอลิไฮดรอกซีแอลดีไฮด์ (Polyhydroxy Aldehyde) หรือพอลิไฮดรอกซีคีโตน (Polyhydroxy Ketone) และอนุพันธ์ของสารเหล่านี้ด้วย สารพอลิไฮดรอกซีแอลดีไฮด์ และพอลิไฮดรอกซีคีโตน หมายถึง สารประกอบพอลิแอลดีไฮด์ หรือคีโตน ที่มีหมู่ OH ตั้งแต่สองหมู่ขึ้นไป เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน มีสูตรทั่วไปคือ $C_mH_{2n}O_n$ อัตราส่วนของ H ต่อ O เป็น 2:1 จึงมีสูตรทั่วไปว่า $C_m(H_2O)_n$ คาร์โบไฮเดรตแบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 4 ประเภท (กุลยา จันทร์อรุณ, 2533) คือ

- มอโนแซ็กคาไรด์ (Monosaccharide) ได้แก่ น้ำตาลจำพวก

- น้ำตาลไตรโอส (Triose) เช่น กลีเซอรอลดีไฮด์
- น้ำตาลเตตระโอส (Tetrose) เช่น เอรีโทรส (Erythrose)
- น้ำตาลเฮกโซส (Hexose) เช่น กลูโคส (Glucose) เป็นต้น

- โอลิโกแซ็กคาไรด์ (Oligosaccharide) คือ มอโนแซ็กคาไรด์ตั้งแต่สองโมเลกุลถึงสิบโมเลกุลมาจับรวมกันเป็นลูกโซ่ เป็นพอลิเมอร์ เช่น เป็นไดแซ็กคาไรด์ คือจำพวก ซูโครส (Sucrose) มอลโทส (Maltose)

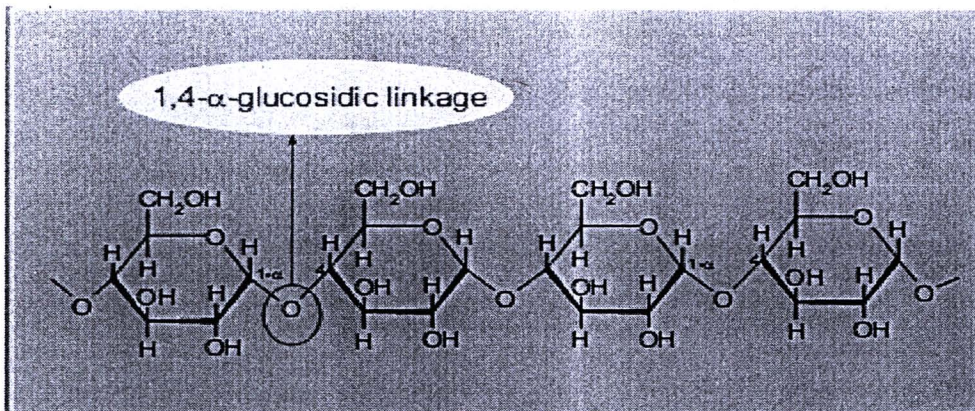
- ไตรแซ็กคาไรด์ (Trisaccharide) เป็นน้ำตาลที่ประกอบด้วยโมเลกุลตั้งแต่มอนแซ็กคาไรด์ 3 โมเลกุลมาต่อกัน เช่น ราฟฟิโนส (Raffinose)
- พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ประกอบด้วยมอนแซ็กคาไรด์มากกว่าสิบหน่วยขึ้นไป เช่น แป้ง (Starch) ไกลโคเจน (glycogen) และ เซลลูโลส (Cellulose)

แป้งพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end group) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือพอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แสดงระดับโครงสร้างของเม็ดแป้ง แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.5 ทำให้คุณสมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน และลักษณะของอะมิโลส และอะมิโลเพกทิน (กล้าณรงค์ ศรีรอด, 2550) แสดงดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8

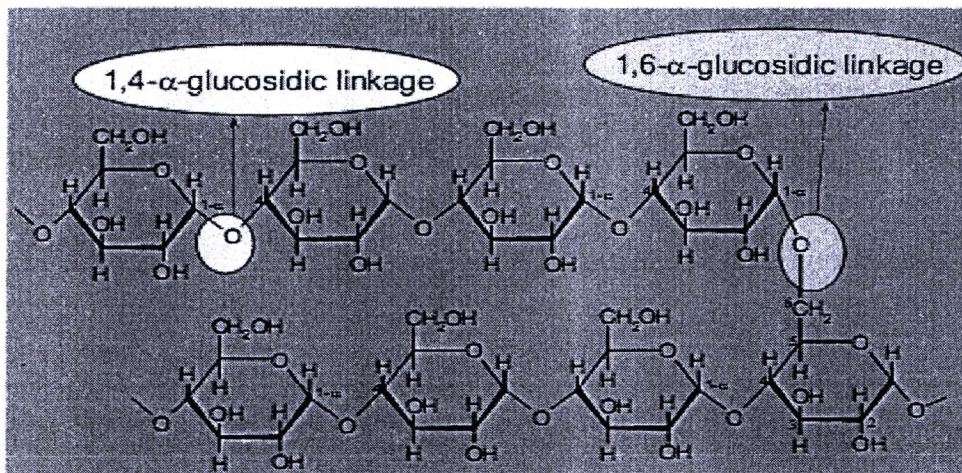
ตารางที่ 2.5 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน

คุณสมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	α -1, 4	α -1, 6
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

ที่มา: กล้าณรงค์ ศรีรอด (2550)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Amylose

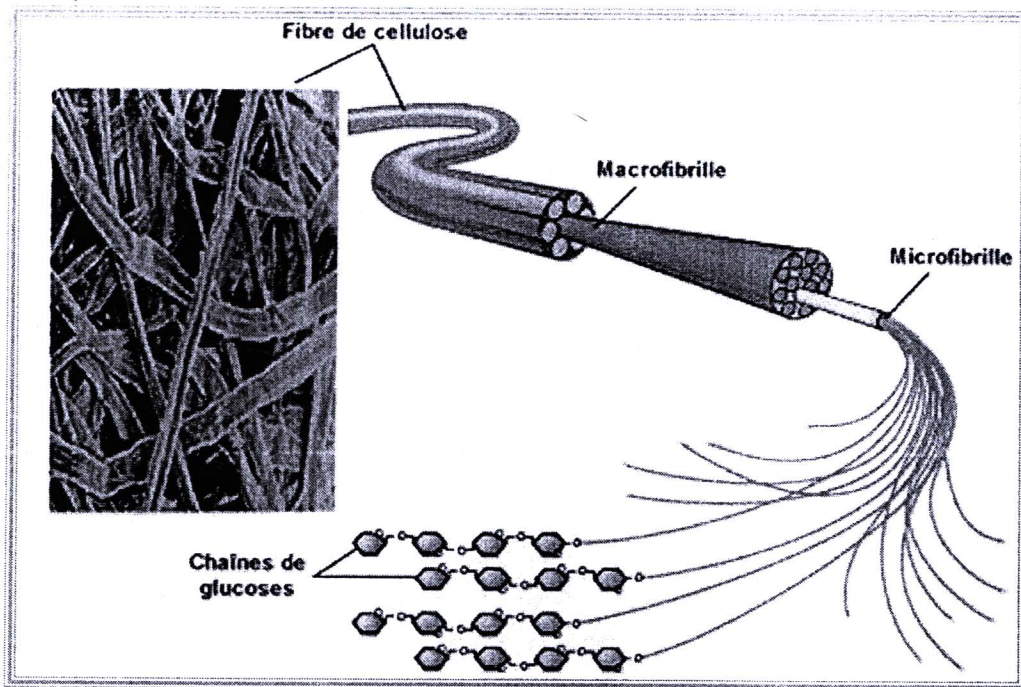
ที่มา : www.pirun.ku.ac.th

รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ Amylopectin

ที่มา : www.pirun.ku.ac.th

2.5.1.2 เซลลูโลส

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีในพืชและเป็นสารประกอบอินทรีย์ และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของพืช เซลลูโลสจัดเป็น พอลิดีสเพิร์ส (polydisperse) เป็นพอลิเมอร์เส้นตรง ชนิด syndiotactic หน่วยโมโนเมอร์พื้นฐานคือ D-glucose ซึ่งยึดติดกันด้วย glucosidic linkage ในรูปแบบ β -configuration ระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยที่อยู่ติดกัน รูปร่างของสายโซ่เป็นแบบ 1,4 glucans (กุลยา จันทรอรุณ, 2533) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: Nutrition Resources (2011)

เนื่องจากการเชื่อมกันระหว่างโมโนเมอร์เป็นแบบ β -configuration ซึ่งส่งผลให้หน่วยกลูโคสสลับขึ้นลงภายในสายโซ่ ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จะพิจารณา cellobiose ในหน่วยของเซลลูโลส ซึ่งโมเลกุลขนาดใหญ่จะจัดรูปโครงสร้างเป็นแบบ syndiotactic ขนาดโมเลกุลของเซลลูโลสที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจะแสดงโดย degree of polymerization (DP) หรือความยาวของสายโซ่ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับแหล่งที่มาเป็นอย่างมาก ในบางกรณี DP อาจจะมีมากกว่า 25,000 แต่เซลลูโลสที่บริสุทธิ์ DP และน้ำหนักโมเลกุลจะลดลงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญต่อขั้นตอนการแยกหรือในขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์เป็นอย่างมาก สำหรับสมบัติของเซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลสซึ่งจะให้ความสำคัญเฉพาะเซลลูโลสที่มี DP และน้ำหนักโมเลกุลสูงๆเท่านั้น การกระจาย DP หรือน้ำหนักโมเลกุลจะส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติทางกล สมบัติเกี่ยวกับการละลาย สมบัติทางชีววิทยาและสมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

2.5.2 ปริมาณกากมันสำปะหลัง

จากรูปที่ 2.2 แสดงการกระจายปริมาณมันสำปะหลังสดสู่อุตสาหกรรมต่อปี ซึ่งในอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังใช้มันสำปะหลังสดประมาณ 6,980,000 ตันในกระบวนการผลิต และกากมันสำปะหลังที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งจะมีประมาณ 60 กิโลกรัมต่อตันรากมัน

ลำปะหลังสด ทำให้มีปริมาณกากมันลำปะหลังที่เกิดขึ้นทั้งหมดประมาณ 418,800,000 กิโลกรัม หรือ 418,800 ตัน ซึ่งปริมาณกากมันลำปะหลังนั้นมีความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับผลผลิตของมันลำปะหลังสด และเศรษฐกิจในช่วงนั้นด้วย

2.5.3 การใช้ประโยชน์จากกากมันลำปะหลัง

เนื่องจากกากมันลำปะหลังยังมีองค์ประกอบของแป้งสูง จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง ดังนี้

- การใช้กากมันลำปะหลังแห้งเป็นอาหารสัตว์

โดยปกติกากแป้งมันลำปะหลังที่ออกจากโรงงานจะมีลักษณะเปียก ความชื้นประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ และมีการใช้กากแป้งมันลำปะหลังเปียกนี้เป็นอาหารสัตว์ อาทิ อาหารโค, กระบือ และปลา แต่กากแป้งมันลำปะหลังที่ตากแห้งและใช้เป็นวัสดุเจือปนผสมกับมันเส้นบดหรือมันอัดเม็ดทำให้มันเส้นบดและมันอัดเม็ดมีคุณภาพต่ำลง อย่างไรก็ตามกากมันลำปะหลังก็ยังคงมีคุณค่าทางอาหารเหลืออยู่โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยง่าย (NFE) ประมาณ 65-70 เปอร์เซ็นต์ สามารถนำมาใช้ในเชิงอาหารสัตว์ได้โดยตรง มีค่าพลังงานที่สามารถให้ประโยชน์ต่อสุกรได้ 3,027 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม แม้ว่ากากแป้งมันลำปะหลังมีระดับเยื่อใยสูง แต่ยังคงมีปริมาณแป้งหลงเหลืออยู่ค่อนข้างมาก กากแป้งมันลำปะหลังแห้งจึงเหมาะสำหรับสุกรอาหารสัตว์ที่ต้องการเยื่อใยสูง เช่น อาหารโค-กระบือ, อาหารสุกรแม่ผู้มท้อง และสุกรขุน (ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550)

- การใช้กากมันลำปะหลังเพื่อผลิตเอทานอล

ศูนย์วิจัยมันลำปะหลังและผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (2551) อธิบายเกี่ยวกับ “เอทานอล” ไว้ว่า เอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งเกิดจากการหมักพืช เศษซากพืช เช่น อ้อย น้ำตาล กากน้ำตาล กากอ้อย กากมันลำปะหลัง บีทรูท แป้งมันลำปะหลัง มันเทศ ธัญพืชต่างๆ เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ ข้าวฟ่าง เพื่อเปลี่ยนแป้งจากพืชให้เป็นน้ำตาล และเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ แอลกอฮอล์ที่ทำให้บริสุทธิ์ตั้งแต่ 95% โดยปริมาตร เรียกว่า “เอทานอล”

- การใช้กากมันเป็นปุ๋ยสำหรับการเพาะเห็ด

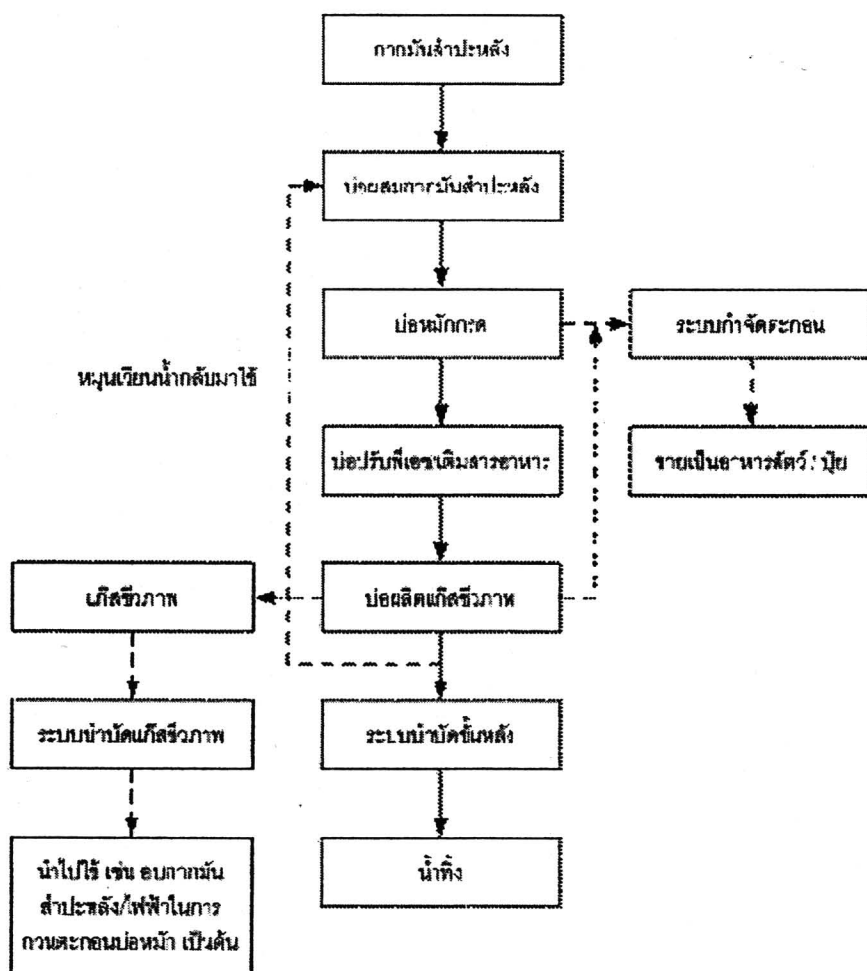
เห็ดฟาง เป็นเห็ดที่คนไทยนิยมบริโภคมานาน ปัจจุบันได้นำมาเพาะเพื่อบริโภคและจำหน่ายเป็นรายได้เสริม ซึ่งยังสามารถเพาะได้ง่ายใช้วัสดุเศษเหลือทางการเกษตรมาเพาะได้ เช่น ฟางข้าว กากเปลือกถั่ว ใสนุ่น ดินกล้วย ผักตบชวา ทลายปาล์ม กากเปลือกมันลำปะหลัง มีวิธีการเพาะหลายรูปแบบ เช่น การเพาะแบบกองสูง การเพาะแบบกองเตี้ยประยุกต์ การเพาะใน

โรงเรียน การเพาะในข่ง (การจัดการความรู้ เครือข่ายทางสังคม แหล่งเรียนรู้ทางการเกษตรวง ใหญ่, 2552)

การใช้กากมันสำปะหลังและการเพาะเห็ดโดยใช้ตอซังฟางข้าว เพื่อเป็นทางเลือกให้ ผู้สนใจได้นำไปเพาะเพื่อเป็นอาหารในครัวเรือน หรือเพาะเพื่อเป็นอาชีพเสริมรายได้ในครัวเรือน ได้ ซึ่งจากงานวิจัยของกำจร วิจิตรกำจร (2534) พบว่า การปลูกเห็ดฟางบนกากมันสำปะหลังที่ผ่าน การหมักเป็นเวลา 1 เดือนที่ผสมกับกากมันใหม่ในอัตราส่วน 3:7 และมีการทำให้ดอกเห็ดเจริญเติบโตดีขึ้น

- การใช้กากมันสำปะหลังสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

การเปลี่ยนกากมันสำปะหลังเป็นแก๊สชีวภาพ แสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผังแสดงระบบการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง

ที่มา: <http://www.erci.or.th>

กากมันสำปะหลัง 1 ตัน (น้ำหนักเปียก) สามารถผลิตแก๊สชีวภาพ (มีเทนร้อยละ 60-65 โดยปริมาตร) ได้ประมาณ 0.05 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม นำไปใช้ในการอบกากมันสำปะหลัง หรือผลิตกระแสไฟฟ้า ตะกอนที่ถูกหมักย่อยโดยสมบูรณ์แล้ว สามารถนำไปตากให้แห้งแล้วขายเป็นปุ๋ยอินทรีย์ ในช่วงฤดูฝน สามารถลดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็น และลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551)

2.6 ขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ คือ ก๊าซที่เกิด จากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจน ในสภาวะไร้อากาศ องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 60-70% และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 28-38% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซชนิดอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ออกซิเจน (O_2) ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551)

ก๊าซชีวภาพ เกิดจากระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อน ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เพื่อใช้เป็นสารอาหารในการดำรงชีพของแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่ใช้อากาศ (EM Group Company Limited, 2546) แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 การย่อยสลายสารอินทรีย์อาศัยการทำงานที่สัมพันธ์กันของแบคทีเรีย 4 กลุ่ม (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551) ดังต่อไปนี้

- Hydrolytic Bacteria แบคทีเรียไม่ใช้อากาศกลุ่มนี้จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน เซลลูโลส ลิกนิน และไขมัน ไปเป็นสารโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน กรดไขมัน กลูโคส และกลีเซอรอล

- Fermentative Acidogenic Bacteria หรือ acid forming bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้ย่อยสลายน้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันไปเป็นกรดอินทรีย์ (เมทานอล เอทานอล กลีเซอรอล และอะซิโตน) อะซิเตท ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน

- Acetogenic Bacteria หรือ Acetate- H_2 Producing Bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้ย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอะซิเตท ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องการสภาวะที่มีความดันย่อยของไฮโดรเจน (H_2 Partial Pressure) ต่ำในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่าย

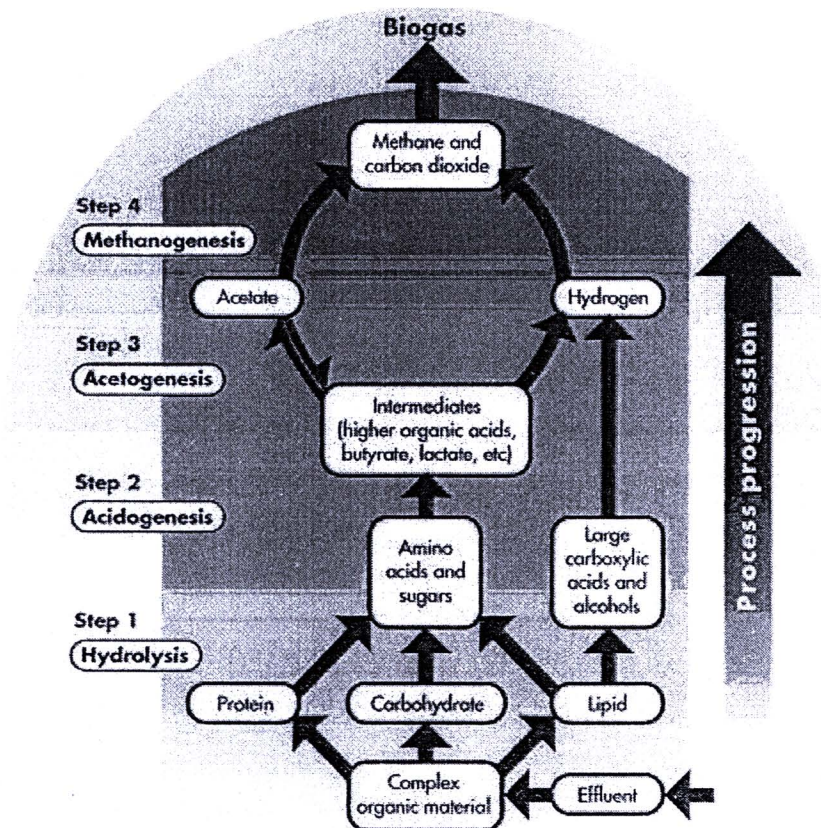
- Methanogenic Bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้จะย่อยสลายอะซิเตทและก๊าซไฮโดรเจนไปเป็น ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก็คือ ก๊าซชีวภาพ

2.6.1 ขั้นตอนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซชีวภาพ

ขั้นตอนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซชีวภาพ มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 2.11 ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การย่อย (Hydrolysis) ในขั้นตอนนี้ สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายให้กลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ความเร็วของกระบวนการย่อยสลายขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแบคทีเรีย รวมถึงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และการสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 2 และ 3 การสร้างกรด (Acidogenesis and Acetogenesis) ในขั้นตอนนี้ สารอินทรีย์โมเลกุลเล็กซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ของการย่อยในขั้นตอนแรก จะถูกเปลี่ยนให้เป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic Acid) กรดวาเลอริก (Valeric Acid) และกรดแลคติก (Lactic Acid) โดยแบคทีเรียสร้างกรด



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนและปฏิกิริยาการเกิดก๊าซชีวภาพ

ที่มา : www.em-group.co.th

โดยกรดที่เกิดขึ้นจะมีกรดอะซิติกสูงที่สุดในปริมาณที่มากที่สุด และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ด้วย แบคทีเรียสร้างกรดจะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน เนื่องจากกระบวนการสร้างมีเทนส่วนใหญ่ต้องการใช้กรดอะซิติกเป็นสารตั้งต้น แต่กรดไขมันระเหยง่ายที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มีหลายชนิด ซึ่งบางชนิดแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการสร้างมีเทนได้ โดยเป็นกรดไขมันระเหยง่ายขนาดใหญ่ เช่น กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก เป็นต้น ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ประเภทนี้ในระบบธรรมชาติจึงได้มีการสร้างกระบวนการในการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายที่มีขนาดใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก (Acetogenesis) ซึ่งช่วยทำให้ไม่เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบ

ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis) ในกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนจะสร้างจาก กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่ได้จากกระบวนการสร้างกรด โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane Former Bacteria) การสร้างก๊าซมีเทนมีได้ 2 แบบ แบบแรกจะเกิดจากการเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทน โดยคิดเป็น 70% ของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นได้ในระบบ อีกแบบหนึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน

2.6.2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดก๊าซชีวภาพ (สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549) ได้แก่

1). อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์หรือระบบบำบัดน้ำจะอยู่ในช่วง 35-37 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสมสำหรับแบคทีเรียในกลุ่ม Mesophilic bacteria และแบคทีเรียในกลุ่ม Thermophilic bacteria ควรควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 50-55 องศาเซลเซียส

2). ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในกระบวนการจะมีแบคทีเรีย คือ กลุ่มสร้างกรด (Acid forming bacteria) และกลุ่มสร้างมีเทน (Methane producing bacteria) แบคทีเรีย 2 กลุ่มนี้จะต้องการสภาวะความเป็นกรด-ด่างในการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน ดังนั้นในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะต้องมีการควบคุมสภาวะความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มให้เจริญเติบโตได้ดี คือ ความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.5-7.8

3). ความเป็นด่าง (Alkalinity) ความเป็นด่างไม่ควรต่ำกว่า 1,000 mg/L ในรูปของ CaCO_3 เพื่อป้องกันไม่ใช้พีเอชต่ำลงจนเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบ

4). กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid :VFA) ในระบบบำบัดน้ำเสียควรจะไม่เกิน 2,000 มก./ล. ในรูปของ CH_3COOH

5). สารพิษ (Toxic substance) นำเสียที่จะบำบัดด้วยกรรมวิธีทางชีววิทยาไม่ควรมีสารที่เป็นพิษอยู่ เช่น พิษของโลหะหนัก, พิษของอื้ออนบวก เป็นต้น ซึ่งสารที่เป็นพิษอาจอยู่ได้ทั้งในรูปของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ ทั้งนี้ผลของสารพิษอาจจะมีตั้งแต่พิษโดยตรง (Toxic) ไปถึงแค่เพียงยับยั้ง (Inhibit) การทำงานของแบคทีเรีย

2.7 การไฮโดรไลซิสด้วยกรด (Acid Hydrolysis)

ไฮโดรไลซิส หมายถึง ปฏิกริยาทางเคมีชนิดหนึ่งที่โมเลกุลของน้ำเข้าไปแทนที่โมเลกุลของสารที่มีอยู่แล้ว ทำให้แตกพันธะออก หรือการแยกสลายด้วยน้ำ (สันต์ เศรษฐะกัมพูช, 2548)

การไฮโดรไลซิสแบ่งและเชลลูโลส สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การไฮโดรไลซิสด้วยกรด (Acid Hydrolysis), การไฮโดรไลซิสด้วยด่าง (Alkaline Hydrolysis) และการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Hydrolysis) เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดแสดงได้ดังต่อไปนี้

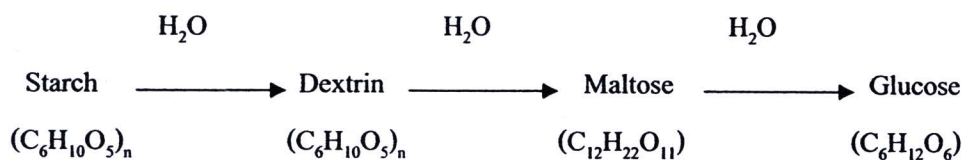
2.7.1 การไฮโดรไลซิสแบ่งด้วยกรด

การไฮโดรไลซิสแบ่งด้วยสารกรด เป็นวิธีการแรกเริ่มที่ใช้กันมานานแล้ว เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนร่วมกับกรดชนิดต่างๆ เช่น กรดเกลือ (Hydrochloric acid) กรดซัลฟูริก (Sulphuric acid) กรดไนตริก (Nitric acid) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) กรดออกซาลิก (Oxalic acid) และกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) การไฮโดรไลซิสแบ่งด้วยกรดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเข้มข้นของแบ่ง ถ้าค่าประมาณร้อยละ 1 กรดสามารถไฮโดรไลซิสเป็นกลูโคสได้อย่างสมบูรณ์ แต่ถ้าความเข้มข้นของแบ่งสูงขึ้น จะได้ปริมาณกลูโคสลดต่ำลง เช่น แบ่งที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 ไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ค่าความเป็นกรด-เบส เวลา และอุณหภูมิที่เหมาะสม จะได้ปริมาณกลูโคสสูงสุดประมาณร้อยละ 88 ถ้าใช้ความเข้มข้นของแบ่งสูงในระดับการผลิตแบบอุตสาหกรรมประมาณร้อยละ 30-40 จะได้ปริมาณกลูโคสจำกัด ทั้งนี้เป็นเพราะ ที่อุณหภูมิ 100-120 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำลดลงทำให้กลูโคสรวมตัวกัน (Reversion) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างกลุ่มแอลดีไฮด์ (Aldehyde) กับกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ที่คาร์บอนตำแหน่ง C₆, C₃ หรือ C₂ ได้พันธะแอลฟา 1,6 แอลฟา 1,3 หรือแอลฟา 1,2 (Fleche, 1985) การใช้กรดความเข้มข้นสูงขึ้น จะมีผลทำให้อัตราการไฮโดรไลซิสเร็วขึ้น และสีของไซรัปจะเปลี่ยนแปลงเป็นสีเทาดำมากขึ้น การไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูง ไซรัปมีแนวโน้มที่จะเกิดสีดำ ที่อุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสีจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิที่สูงขึ้น (อุดมเกียรติ พรพรรณประเทศ, 2536)

การไฮโดรไลซิสแบ่งด้วยกรด เป็นการไฮโดรไลซิสอย่างไม่จำเพาะ และสามารถย่อยพันธะแอลฟา 1, 4 ได้เร็วกว่าพันธะแอลฟา 1,6 การไฮโดรไลซิสด้วยกรดอย่างไม่สมบูรณ์ จะได้



สารละลายผสมของเดกซ์ทริน (Dextrin) ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ แล้วเดกซ์ทรินจึงแตกตัวต่อเป็นน้ำตาลมอลโทส โดยพอลิแซ็กคาไรด์เมื่อถูกไฮโดรไลซิสด้วยกรดหรือเอนไซม์ร่วมกับการต้ม จะได้กลูโคส ในที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการไฮโดรไลซิสแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคส

ที่มา : กุลยา จันทอรุณ ,(2533)

2.7.2 การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยกรด

เซลลูโลสมีสูตรโมเลกุลเป็น $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ เมื่อไฮโดรไลซิสด้วยกรดแตกออกเป็น D-glucose ซึ่งเป็นโมโนแซ็กคาไรด์ชนิดเดียวที่ได้รับ แต่ถ้านำเซลลูโลสไปเมธิเลชันแล้วไฮโดรไลซ์ได้ 2,3,6-tri-o-methyl-D-glucose ได้ผลเหมือนกับในกรณีของแป้ง ดังนั้นเซลลูโลสเกิดจากกลูโคสต่อกันแต่หน่วยต่อกันแบบไกลโคไซด์กับตำแหน่งที่ 4-ของกลูโคสหน่วยถัดไป (โสภณ เรืองสำราญ, 2539)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังจากไฮโดรไลซิสด้วยกรด คือส่วนประกอบโมโนเมอร์ประกอบด้วย ไซโลส, แมนโนส, กลูโคส, กาแลคโทส, อาราบิโนส และส่วนประกอบจำนวนน้อย ได้แก่ แรมโนส, กรดกลูคูโรนิก, กรดเมทิลกลูคูโรนิก และกรดกาแลคทูโรนิก (Taherazdeh, M.J et al, 2007)

2.8 การไฮโดรไลซิสด้วยด่าง (Alkaline Hydrolysis)

การไฮโดรไลซิสแป้งและเซลลูโลสด้วยด่าง เป็นที่นิยมกันมาช้านาน รายละเอียดแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.8.1 การไฮโดรไลซิสแป้งด้วยด่าง

ปฏิกิริยาของด่างที่เกิดกับพอลิแซ็กคาไรด์ ถูกนำเสนอโดยการทดลองของ Whistler, R.L et al., (1958) โดยการทดลองครอบคลุมถึงปฏิกิริยาของอัลคาไลด์ต่อปลายหมู่รีดิวซิงค์ (reducing end-unit) และหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) เพื่อศึกษาผลที่มีต่อพันธะของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และใช้เทคนิคการย่อยสลายด้วยด่างเพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิแซ็กคาไรด์รวมไปถึง

วิเคราะห์พันธะกิ่งก้าน (branching) ที่มาเชื่อมต่อด้วย โดยปกติการย่อยสลายนั้นคือ กระบวนการ peeling (peeling process คือกระบวนการตัดพันธะกิ่งก้านสาขาของสายโซ่พอลิแซ็กคาไรด์ออก) โดย glycosyloxy-anion elimination ซึ่งเริ่มที่หมู่รีดิวซ์และค่อยๆ ไปทำปฏิกิริยาไปตลอดสายโซ่ เพื่อปลดปล่อยโมเลกุลของแซ็กคาไรรีน (saccharinate) ที่มาเชื่อมต่อเป็นพันธะกิ่งก้าน (branch) ออก

โดยในการไฮโดรไลซิสด้วยสภาวะค้างทำได้ทั้งสภาวะที่ไร้ออกซิเจนและสภาวะที่ใช้ ออกซิเจน (Bemiller, J.N et al., 1965) ซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

- การไฮโดรไลซิสด้วยค้างที่สภาวะไร้ออกซิเจน

จากการทดลองของ Bottle, R.T et al., (1953) ได้ทำการไฮโดรไลซิสอะมิโลสด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะไร้ออกซิเจนด้วยความเข้มข้นเท่ากับ N อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 20 ชั่วโมง เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ พบว่า ได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ได้แก่ " α, β " - D - isosaccharinate ประมาณ 23 % , ฟอर्मेट (Formate) ประมาณ 35% , แลคเตต (Lactate) ประมาณ 6% สำหรับกลไกที่ทำให้เกิด D - isosaccharinate จากอะมิโลส คือ ปฏิกิริยา normal beta elimination และตามด้วยปฏิกิริยา benzilic acid type rearrangement หรือเรียกกลไกนี้ว่า "beta-alkoxy carbonyl"

สำหรับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับแป้งและให้ความร้อนไปด้วยจะก่อให้เกิดกรดเกลือที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนน้อยกว่า 6 อะตอม แสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ผลิตภัณฑ์กรดที่ได้จากการไฮโดรไลซิสอะมิโลสและมอลโทสด้วยสารค้าง

สภาวะ	ผลิตภัณฑ์ (เปอร์เซ็นต์ของกรด)				
	D-Isosaccharinic	Formic	Lactic	Glycolic	2-Deoxy-D-tetronolactone ^a
Amylose					
0.04 N Ca(OH) ₂ at 100 °	73	12	3	b	b
0.5 N NaOH at 100 °	24	35	6	b	b
Maltose					
0.04 N Ca(OH) ₂ at 25 °	89	2	0	0	0
0.05 N NaOH at 25 °	13	11	0	23	33

^a Yield of free acid was not determined

^b Yield was not determined

จากการทดลองของ Stacy, C.J et al., (1956) ทำการไฮโดรไลซิสอะมิโนเพกทินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะไร้ออกซิเจนด้วยอุณหภูมิห้องและระยะเวลา 54 วัน โดยโมเลกุลของอะมิโนเพกทินมีความไวต่อการย่อยสลายด้วยด่างโดยกระบวนการ peeling (กระบวนการตัดกิ่งก้านสาขาของโครงสร้างเป็งออก)เริ่มที่หมู่ปลายรีดิวซ์ (reducing end) และจะทำการตัดออกทีละชั้นบนสายโซ่หลัก นั่นก็คือ $(1 \rightarrow 4)$ – linked Diglucopyranose ซึ่งเป็นผลผลิตของโมเลกุล D-isosaccharinate ที่มีขั้วติดแบบพันธะกึ่ง เป็นที่รู้กันดีว่า อะมิโนเพกทิน เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า alkali-stable เนื่องจากโมเลกุลมีความไวในการสลายตัวและเกิดผลิตภัณฑ์กรดน้อย

- การไฮโดรไลซิสด้วยด่างที่สภาวะไร้ออกซิเจน

การย่อยสลายในส่วนนี้อาจเป็นไปได้ว่าผลที่เกิดขึ้นของกระบวนการออกซิเดชันเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยา beta elimination แป้งที่มีกลุ่มไดอัลดีไฮด์ (dialdehyde) จะเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรซ์ (depolymerizes) อย่างรวดเร็วในสารละลายด่าง โดยกระบวนการหลักคือ beta-elimination ที่ตำแหน่ง C-5 ผลผลิตที่เกิดขึ้นแสดงในตารางที่ 2.7 แม้ว่า จะมีไอออนของแคลเซียมผสมอยู่ด้วยในการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตด้วยสภาวะด่าง เนื่องจากเป็นตัวเร่งเฉพาะการจัดเรียงตัวใหม่ของ benzoic acid-type และ โครงสร้างของกรดแซคคารินิก (saccharinic acid)

ตารางที่ 2.7 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส Periodate-oxidized Starch

ผลิตภัณฑ์	ผลผลิต ^{a,b}			
	A	B	C	D
Neutral products	0.32	0.11	0.25	0.10
Total acid	0.63	2.15	0.84	1.80
Volatile acids	0.10	0.39	0.09	0.22
Formic acid	0.08	0.35	0.05	0.20
Glycolic acid	0.31	0.86	0.41	0.75
3-Deoxy-DL-tetronic acid	0.10	0.20	0.19	0.39
Unknown polymeric acid	0.2	0.1	0.2	0.1
Supposed cannizzaro reaction product	0.1	0.1	0.1	0.1

^a Yield of products in equivalents per mole of oxidized D-glucose unit except those marked with asterisk where yields are expressed in grams of periodate-oxidized starch.

^b A, Saturated lime water for 30 min; B, saturated lime water for 40 days ; C, N sodium hydroxide for 30 min; D, N sodium hydroxide for about 5 months. All at room temperature.

2.8.2 การไฮโดรไลซิสเซลลูโลสด้วยด่าง

สำหรับการย่อยสลายเซลลูโลสด้วยด่าง จะได้องค์ประกอบหลักของผลผลิตที่ได้สามารถตรวจพบได้ในช่วงของอุณหภูมิ 20-200 องศาเซลเซียส สิ่งหลักที่สังเกตได้คือ การเปลี่ยนแปลงสภาวะการย่อยสลายมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้

ในกระบวนการย่อยสลายเซลลูโลสโดยใช้สารละลายด่างที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะตรวจพบสารผลิตภัณฑ์จำพวกเกลือของกรดมากกว่า 50 ชนิดแต่กลับมีความเข้มข้นต่ำน้อยกว่า 1% และเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 170-190 องศาเซลเซียส จะตรวจพบผลิตภัณฑ์หลักคือ Straight-chain และ Branch-chain hydroxyl-monocarboxylic และ dicarboxylic acid และที่อุณหภูมิสูงประมาณ 280 องศาเซลเซียส จะตรวจพบ methanoic (formic), ethanoic (acetic), hydroxyethanoic (glycolic) และ 2-hydroxypropanoic (lactic) acid (Knill, C.J et al., 2003)

2.9 สรุปสาระจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

Cuzin N. et al., (1992) ศึกษาการหมักย่อยเปลือกมันสำปะหลังโดยใช้ถังหมักแบบปลั๊กโฟลว์ และทำการเปลี่ยนแปลงอัตราภาระบรรจุเท่ากับ 3.6 kg VS/m³ day และ 4.2 kg VS/m³ day ปกติในระหว่างกระบวนการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทนจากเปลือกมันสำปะหลัง ซึ่งเปลือกมันสำปะหลังมีองค์ประกอบของแป้งสูง มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูง และมีสารไซยาโนเจนิก กลูโคไซด์ ผลที่ได้ คือ มีผลผลิตกรดมากเกิน ขาดแคลนไนโตรเจน และมีการปล่อยสารไซยาไนด์ออกมา ซึ่งเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน ในการใช้ถังหมักย่อยแบบปลั๊กโฟลว์ สามารถแก้ปัญหการเกิดกรด ตลอดจนจำกัดระยะเวลาการสร้างกรดในครั้งแรกของถังหมัก และแก้ปัญหการขาดแคลนไนโตรเจน เนื่องจากของเหลวมีการสะสมของไนโตรเจนไว้ และไม่มี การรบกวนของสารไซยาไนด์ (5-6 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งสังเกตได้ในถังหมัก ในกระบวนการหมักจะมีปริมาตรของก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.661 m³ biogas/kg volatile solid(VS) ซึ่งได้มาจากอัตราภาระบรรจุเท่ากับ 3.6 kg VS/m³ day สำหรับการคำนวณการประหยัดพลังงาน แสดงให้เห็นว่า การหมักย่อยที่ถังหมักขนาด 88 ลูกบาศก์เมตรสามารถสร้างก๊าซมีเทนซึ่งมีความจำเป็นสำหรับการอบแห้งของหัวมันสำปะหลังได้ปริมาณ 1 ตัน ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานไปในตัว

ธีรภัทร ศรีนรคุตร และคณะ (2549) ได้ทำการศึกษาการย่อยกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลในประเทศไทย ซึ่งสามารถทำได้โดยการผ่านขั้นตอนการ pretreatment โดยการไฮโดรไลซ์โดยการใช้กรดหรือเอนไซม์ เพื่อเปลี่ยนแปลงให้เป็นน้ำตาล ในการศึกษาการไฮโดรไลซ์ จะใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.6 M ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนมันสำปะหลังต่อกรด

เท่ากับ 1 : 2 จะได้น้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดร้อยละ 6.1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในขณะที่การใช้วิธีไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ผสม พบว่าการใช้เอนไซม์ผสมระหว่างเซลลูโลสและเพคตินเอส ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช 4.5 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ย่อยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช 5.5 เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเอนไซม์กลูโคอะไมเลส ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช 4.5 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งได้น้ำตาลรีดิวซ์ ร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และการนำน้ำตาลที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ร้อยละ 8.92 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไปหมักกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* TISTR5596 ในถังหมัก *Saccharomyces cerevisiae* ขนาด 10 ลิตร จะได้ปริมาณเอทานอลสูงสุดร้อยละ 3.62 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรในชั่วโมงที่ 24 คิดเป็นประสิทธิภาพการหมักร้อยละ 91

พิชยา สวรส และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง โดยใช้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการแบบเดินระบบไม่ต่อเนื่อง โดยได้ทำการหาร้อยละของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบโดยทำการแปรผันร้อยละของกากมัน คือ 2,3,5 และ 10% น้ำหนักต่อน้ำหนัก นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการให้ความร้อนกับกากมันหรือการใช้เอนไซม์เซลลูเลสและเอนไซม์เพคตินเอส ก่อนการหมักด้วย ผลการศึกษาพบว่าร้อยละของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ คือ 2-3 % ซึ่งให้อัตราการผลิตก๊าซคือ 0.034-0.047 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากเปียก การให้ความร้อนกับส่วนผสมกากมันสำปะหลัง 2% ที่อุณหภูมิ 80, 90 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ผลการศึกษาพบว่า การให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น ไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่กลับมีผลทำให้เกิดก๊าซชีวภาพน้อย โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่อกิโลกรัมของกากเปียกลดลงอยู่ในช่วง 0.033-0.039 ลูกบาศก์เมตร และในการหมักย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอสในปริมาณ 5-20 NCU/g และ 50-125 PUG/g กากมันแห้ง ตามลำดับ ที่พีเอช 4.5 ด้วยระยะเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที ก่อนนำมาหมัก ไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนกากมันสำปะหลังเป็นก๊าซชีวภาพได้เช่นเดียวกับการให้ความร้อนก่อนการหมัก อย่างไรก็ตาม การใช้เอนไซม์เพคตินเอสที่ปริมาณ 125 PUG/g กากมันแห้ง และเอนไซม์เซลลูเลสที่ 20 NCU/g กากมันแห้ง สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด เมื่อเทียบกับการใช้เอนไซม์เซลลูเลสในปริมาณที่ต่ำกว่า และเมื่อทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่ 20 NCU/g กากมันแห้ง และเอนไซม์เพคตินเอสในปริมาณ 50,80 และ 125 PUG/g กากมันแห้ง พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพไม่มีความแตกต่างกัน และไม่แตกต่างไปจากกรณีที่ใช้เอนไซม์เพคตินเอสที่ปริมาณ 125 PUG/g กากมันแห้ง อย่างมีนัยสำคัญด้วย อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดของเวลา การศึกษานี้ได้ทำการทดลองการ

เอนไซม์ที่ค่าพีเอชค่าเดียวคือ 4.5 และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 30 นาที ซึ่งอาจจะไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมของการทำงานของเอนไซม์

Tasic, M.B et al., (2009) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแป้งจากหัวมันฝรั่งบดโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟูริก ที่อัตราส่วนระหว่างหัวมันฝรั่งบดต่อสารละลายกรดแตกต่างกัน อัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองคือ 1:0.75 (w/v), 1:1 (w/v) และ 1:2 (w/v) โดยสารละลายกรดทั้งสองชนิดมีความเข้มข้น 1 M และ 2 M ขั้นตอนการศึกษา คือ นำหัวมันฝรั่งบดผสมกับสารละลายกรดให้มีปริมาตร 200 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนกระทั่งเดือดประมาณ 60 นาที และทำการวิเคราะห์หาค่าน้ำตาลรีดิวซ์, Dextrose Equivalent (DE), Reaction rate Constant และ 5-hydroxymethylfurfural(5-HMF) พบว่า ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของหัวมันฝรั่งแต่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายกรดและอัตราส่วนของหัวมันฝรั่งบดต่อปริมาณสารละลายกรด สำหรับค่า Dextrose Equivalent ที่พบมีค่าสูงสุด เท่ากับ 94% และมีค่า Reaction rate Constant สูงสุด เท่ากับ 0.089 min^{-1} ส่วนค่า 5-HMF เท่ากับ 0.04 g/L ซึ่งได้จากการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้น 1 M และอัตราส่วนหัวมันฝรั่งบดต่อสารละลายกรด เท่ากับ 1:2 (w/v) สำหรับผลของเอทานอลที่ได้ เท่ากับ 31 g/L ได้จากการหมักสารละลายหัวมันฝรั่งบดกับสารละลายกรดภายใต้สภาวะที่เหมาะสมโดยใช้ยีสต์ ควบคุมอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ประมาณ 18 ชั่วโมง

Agu,R.C. et al.,(1997) ได้ทำการศึกษาการร่วมกันระหว่างการบำบัดด้วยความร้อน(Heat Treatment) และการไฮโดรไลซิสด้วยกรด (Acid Hydrolysis) ในการทำปฏิกิริยากับมันเส้น เพื่อผลิตเอทานอล โดยทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้นสูง 1-5 M และ ที่ความเข้มข้นต่ำ 0.3-0.5 M ขั้นตอนการศึกษา คือ นำมันเส้นที่ผ่านการอบแห้ง บด และร้อนให้เหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มิลลิเมตร ผสมกับสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้นต่างๆ ในอัตราส่วน 1: 10 (w/v) ทำการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30, 60 และ 90 นาที ตามลำดับและทำการวิเคราะห์หาน้ำตาลรีดิวซ์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการหมักเป็นเอทานอลในขั้นต่อไป ในการหมักเพื่อหาเอทานอลจะใช้สารละลายมันเส้นที่ผสมกับสารละลายกรดตามสภาวะที่เหมาะสมประมาณ 3 ลิตรหมักกับยีสต์และวิเคราะห์หาปริมาณเอทานอล ผลการศึกษาพบว่า การไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ความเข้มข้นสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาสูญเสีย (Dehydration) และสารละลายมันเส้นเปลี่ยนเป็นสีดำ ส่วนการไฮโดรไลซิสด้วยความเข้มข้นต่ำ จะได้ผลที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.3 M ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ซึ่งที่ความเข้มข้นของกรด 0.3 M มีประสิทธิภาพในการไฮโดรไลซิสสารเซลลูโลสและสารลิกนินประมาณ 60% ดังนั้น การไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ความเข้มข้นต่ำจึงเป็นที่ต้องการ เนื่องจากองค์ประกอบของสาร hydrogen

cyanide ในมันเส้นมีน้อยอยู่แล้ว จึงทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการนำเอาสารพิษ(Detoxification) ออกจากมันสำปะหลังด้วย จากผลการศึกษาการหมักเพื่อให้ได้เอทานอลจากสารละลายมันเส้นที่ได้จากการไฮโดรไลซิสด้วยกรดที่ความเข้มข้น 0.3 M และยีสต์ พบว่าได้ปริมาณเอทานอลเท่ากับ 3.5 (v/v%)