

บทที่ 2

ทฤษฎีและสรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 มันสำปะหลังในประเทศไทย

มันสำปะหลังเป็นพืชหัวชนิดหนึ่ง มีชื่อเรียกทั่วไปในภาษาอังกฤษว่า แคสซาวา (Cassava) หรือ ทาปิโอก้า (Tapioca) ประเทศแถบแอฟริกาเรียกชื่อภาษาฝรั่งเศสว่า แมนิออค (Manioc) มันสำปะหลังมีประวัติศาสตร์ความเป็นมาที่ยาวนาน เชื่อว่าชนพื้นเมืองในทวีปอเมริกาใต้ (ประเทศเปรู เม็กซิโก กัวเตมาลา ฮอนดูรัส และบราซิล) มีการปลูกมันสำปะหลังและบริโภคมันสำปะหลังเป็นอาหารมานานกว่า 5,000 ปีแล้ว การแพร่กระจายของมันสำปะหลังอยู่ราวศตวรรษที่ 17 ที่ได้ถูกนำเข้ามหาสมุทรแอตแลนติกโดยพวกผู้ค้าทาสชาวโปรตุเกส นำไปปลูกในประเทศอาณานิคมที่อยู่ชายฝั่งทะเลตะวันตกของทวีปแอฟริกา หลังจากนั้นนักเดินเรือชาวสเปนก็ได้้นำมันสำปะหลังจากแอฟริกามาสู่ศรีลังกาและแพร่กระจายในเขตเอเชียในเวลาต่อมา สำหรับประเทศไทยนั้น ไม่มีหลักฐานที่แน่ชัดว่ามีการนำมันสำปะหลังเข้ามาปลูกเมื่อใด แต่คาดว่ามีการนำมันสำปะหลังมาจากประเทศมาเลเซียเมื่อปี 2329 โดยมีชื่อเรียกในระยะต่อมาว่า มันไม้และมันสำโรง คำว่า สำปะหลัง นั้น ภาษามลายูและอินโดนีเซียเรียกว่า Ubikayu แปลว่า พืชที่มีรากขยายใหญ่ และคล้ายกับภาษาชาวตะวันตกว่า "ซัมเปอ (Sampeu)"

มันสำปะหลังเป็นพืชที่ทนต่อสภาพแวดล้อมแห้งแล้งได้ดี ไม่ต้องเอาใจใส่ดูแลมากนัก ผลตอบแทนต่อไร่สูง และมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าพืชหลายๆ ชนิด มันสำปะหลังเป็นพืชที่เก็บสะสมอาหารไว้ในราก เมื่อพืชมีการสร้างอาหารจากใบและส่วนที่เป็นสีเขียวแล้ว จะสะสมในรูปแบบของคาร์โบไฮเดรตคือ แป้งไว้ในราก ความสามารถในการสร้างและสะสมแป้งในรากมีความแตกต่างกัน เนื่องจากพันธุ์ของมันสำปะหลัง อายุเก็บเกี่ยว ปริมาณน้ำฝนในช่วงแรกก่อนการเก็บเกี่ยวและปัจจัยอื่นๆ จึงทำให้ส่วนประกอบของหัวมันอาจจะแตกต่างกันไป โดยทั่วไปหัวมันสำปะหลังที่มีอายุ 12 เดือน ที่ได้รับปริมาณน้ำฝนเพียงพอและไม่มีฝนตกชุกขณะเก็บเกี่ยวจะมีส่วนประกอบแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของมันสำปะหลัง

องค์ประกอบในหัวมัน	ปริมาณ (ต่อ 100 กรัมน้ำหนักหัวมัน)
น้ำ	60.21-75.32
เปลือก	4.08-14.08
เนื้อ (แป้ง)	25.87-41.88
ไซยาไนด์ (ppm)	2.85-39.27
องค์ประกอบในเนื้อมัน	ปริมาณ (ต่อ100 กรัมน้ำหนักแห้งเนื้อมัน)
แป้ง	71.9-85.0
โปรตีน	1.57-5.78
เยื่อใย	1.77-3.98
เถ้า	1.20-2.80
ไขมัน	0.06-0.43
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง	3.59-8.66

ที่มา : (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546)

องค์ประกอบส่วนใหญ่ในราก นอกจากน้ำแล้วคือ แป้ง ซึ่งมีถึงร้อยละ 70-80 ของน้ำหนักแห้ง จึงถือว่ามันสำปะหลังเป็นพืชที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานกับคนและสัตว์ได้ดีที่สุด โดยปกติหัวมันสำปะหลังที่มีปริมาณแป้งสูง ปริมาณน้ำจะน้อยและความหนาแน่นของหัวจะมีสูง ฉะนั้นในการตรวจสอบหรือวัดปริมาณแป้ง (เชื้อแป้ง) อย่างเร็วที่นิยมทำกันคือ การตรวจสอบความหนาแน่นโดยการชั่งน้ำหนักหัวมันในน้ำ ถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำน้อยแสดงว่าหัวมันมีปริมาณน้ำมากและมีแป้งน้อย ในกรณีกลับกันถ้าน้ำหนักหัวมันในน้ำมากก็แสดงว่าหัวมันมีปริมาณน้ำน้อยและมีแป้งมาก

ในส่วนต่างๆ ของต้นมันสำปะหลัง มีสารชนิดหนึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำมัน สารนี้อยู่ในกระเปาะได้ผิว หรือได้เปลือก เมื่อทำให้ต้นหรือหัวมันสำปะหลังเป็นแผลหรือตัดต้น ตัดหัวมันสำปะหลัง จะเห็นของเหลวคล้ายน้ำยางสีขาวไหลออกมา สารนั้นคือ สารไซยาโนจินิกลูโคไซด์ (Cyanogenic glucoside) สารนี้มีอยู่ในต้นและหัว ในปริมาณมากน้อยแตกต่างกัน สารไซยาโนจินิกลูโคไซด์ในมันสำปะหลังมีอยู่ 2 ชนิดคือ ชนิดแรก ได้แก่ ลินามาริน (Linamarin) สารชนิดนี้มีอยู่ 93% ส่วนชนิดที่สองคือ โลทอสตราลิน (Lotaoustralin) ชนิดนี้มีอยู่น้อยเพียง 7% ของไซยาโนจินิกลูโคไซด์ทั้งหมด ดังนั้นเมื่อกกล่าวถึงไซยาโนจินิกลูโคไซด์ มักจะเรียก ลินามาริน สารนี้เองเป็นพิษต่อการบริโภค การเคี้ยว การหัก การตัด ตลอดจนเมื่อทำการเก็บเกี่ยว ขูดหัวมัน

สำปะหลังและทำให้ “น้ำยาง” ในหัวมันสำปะหลังไหลเป็นการทำให้เพิ่มปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแก่สารลินามาริน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีกรดอินทรีย์หรือเอนไซม์ไลเนส (Linase) เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าว เป็นผลทำให้เกิดสาร 3 อย่างคือ (1) กรดไฮโดรไซยานิก (Hydrocyanic acid) เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กรดปรัสซิก (Prussic acid) (2) อะซิโตน และ (3) กลูโคส ต่อจากนั้นกรดไฮโดรไซยานิกก็จะสลายตัวเป็นผลให้ความเป็นพิษลดน้อยลง ความเป็นพิษในหัวมันสำปะหลังจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของไซยาโนจินิกกลูโคไซด์หรือกรดไฮโดรไซยานิก จากการศึกษาพบว่าปริมาณของกรดที่จะเป็นพิษต่อการบริโภคนั้น ประมาณ 50-60 มิลลิกรัมต่อหัวสด 1 กิโลกรัม หรือ 50-60 ppm นั่นคือ ในการรับประทานหัวมันสำปะหลังถ้ามีกรดเกิน 50-60 มิลลิกรัม ข่อมเป็นพิษต่อผู้บริโภค ความเป็นพิษมีขนาดแตกต่างกันตั้งแต่แสดงอาการป่วยเล็กน้อยจนกระทั่งถึงแก่ชีวิตถ้ารับประทานมากเกินไป

สำหรับผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังที่ค้าขายกันในปัจจุบันมีหลายรูปแบบ เช่น มันสำปะหลังเส้น มันอัดเม็ด แป้งมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์อื่นๆ เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปและอาหารสัตว์ ประเทศไทยคือผู้ส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังรายใหญ่ของโลก ในขณะที่ประเทศที่มีปริมาณการใช้มันสำปะหลังรายใหญ่ของโลก ได้แก่ สหภาพยุโรป จีน และญี่ปุ่น

ปัจจุบันประเทศไทยผลิตหัวมันสำปะหลังสดได้ประมาณ 20 กว่าล้านตัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ผลผลิตเหล่านี้ถูกนำไปใช้ในการผลิตมันเส้นและมันอัดเม็ดประมาณ 50% ใช้ภายในประเทศเพียง 20% ส่งออก 80% และอีกประมาณ 50% ถูกนำไปใช้ในการผลิตแป้งมันสำปะหลังใช้ภายในประเทศ 35% และส่งออก 65% จากตารางที่ 2.3 แสดงถึงปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังของไทย ปี พ.ศ. 2548-2551

ตารางที่ 2.2 ปริมาณผลผลิตมันสำปะหลังของโลก ปี พ.ศ.2545-2549 (ปริมาณ:ล้านตัน)

ประเทศ	2545	2546	2547	2548	2549
ผลผลิตทั่วโลก	183.758	192.871	205.598	211.247	226.356
ไทย	16.868	19.717	21.440	16.938	22.584

ที่มา : (วรรณา เสนาคี และคณะ, 2551)

ตารางที่ 2.3 ปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังของไทย ปี พ.ศ.2548-2551 (ปริมาณ:ตัน)

ประเภท	2548	2549	2550	2551 (ถึงเดือน ก.พ.)
มันเส้น	2,765,809	3,967,125	3,130,459	221,341
มันอัดเม็ด	262,562	394,089	1,693,045	639,629
แป้งมันสำปะหลัง	1,605,756	2,308,033	2,208,240	172,893
กากมัน	319,521	315,593	410,748	138,039

ที่มา : (วรรณา เสนาคี และคณะ, 2551)

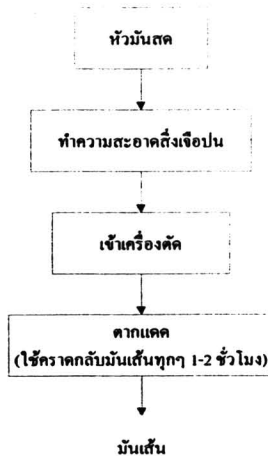
2.2 การแปรรูปและการใช้ประโยชน์มันสำปะหลัง

2.2.1 การบริโภคเป็นอาหารโดยตรง

การบริโภคเป็นอาหารโดยตรง ปกติที่นิยมรับประทานจะเป็นหัวมันสำปะหลังชนิดหวาน หมายถึง ชนิดที่มีกรดไซยานิดน้อย เช่น มันปิ้ง ชุบน้ำเชื่อม มันเชื่อม เป็นต้น ส่วนมันสำปะหลังที่ปลูกกันทั่วไปจะมีปริมาณแป้งสูงจึงคั้นน้ำสุกช้า เมื่อปอกเปลือกแล้วคั้นให้เค็ดและทิ้งไว้ในหม้อคั้นอย่างน้อยครึ่งชั่วโมง และนำมาเชื่อมหวานก็จะมีรสและความอร่อย เช่นเดียวกับมันพันธุ์ห่านาที่ถ้ารับประทานโดยนำหัวมันสดมาปิ้งหรือย่างคองให้แน่ใจว่าสุกดี ถ้าแป้งมีรสขมอยู่ให้หลีกเลี่ยงการบริโภค

2.2.2 อุตสาหกรรมมันเส้น

การแปรรูปที่ใกล้ตัวเกษตรกรมากที่สุดคือ การทำมันเส้น เมื่อเก็บเกี่ยวหัวมันสดแล้วก็จะนำส่งลานมัน ซึ่งเกษตรกรบางรายมีลานของตัวเองก็จะทำการแปรรูปโดยใช้เครื่องคัดหัวมันเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปตากบนลานซีเมนต์เมื่อแห้งดีแล้วก็ทำการเก็บเพื่อส่งขายเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์หรืออุตสาหกรรมมันอัดเม็ดต่อไป ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตมันเส้น

ที่มา : (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546)

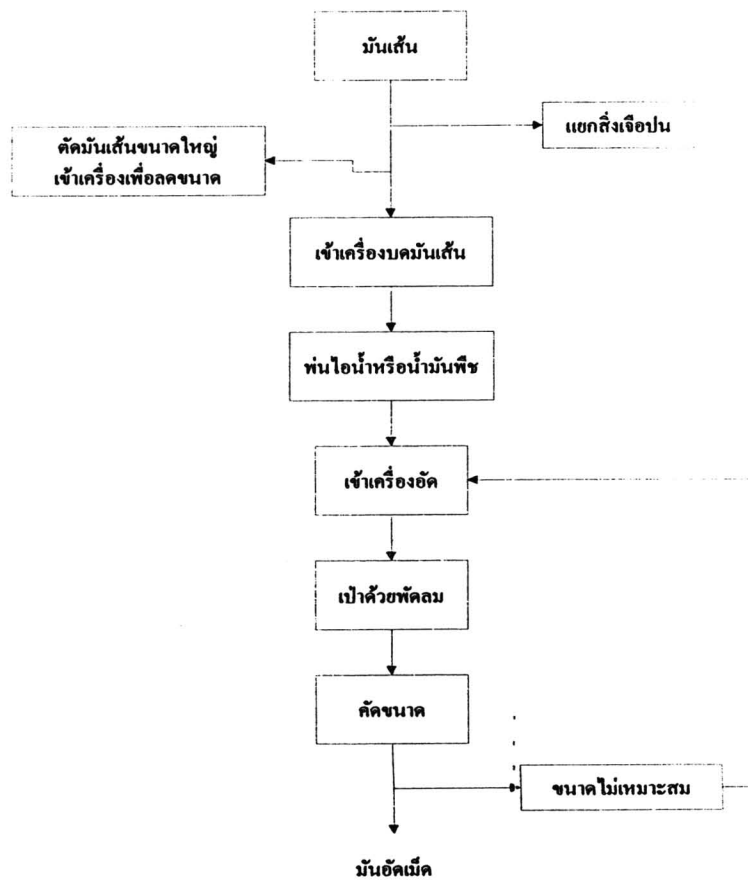
การตากมันเส้น นอกจากจะใช้วิธีตากแดดแล้ว ยังสามารถทำให้แห้งโดยใช้การอบได้อีกด้วย แต่การใช้เตาอบมันให้แห้งนั้นต้องใช้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมันหรือแก๊สซึ่งมีต้นทุนที่สูงกว่าการตากแดด การผลิตมันเส้น 1 กิโลกรัม ต้องใช้หัวมันสด 2.00-2.50 กิโลกรัม ทั้งนี้อัตราการแปรรูปขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการด้วยกัน เช่น ลักษณะการหั่น ลักษณะการตากแห้ง ฤดูที่ทำการแปรรูป เป็นต้น แต่ปัจจัยสำคัญคือ เปอร์เซ็นต์แป้งในหัวมันสำปะหลังสด กล่าวคือ ถ้าหัวมันสดมีเปอร์เซ็นต์แป้งสูงก็จะผลิตมันเส้นได้สูงด้วย

2.2.3 อุตสาหกรรมมันอัดเม็ด

มันอัดเม็ดหรือที่เรียกว่า มันเม็ด ผลิตโดยการอัดมันเส้น โดยเครื่องอัดภายใต้สภาวะความร้อนและความดัน ดังรูปที่ 2.2 มันอัดเม็ดแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด โดยใช้ลักษณะท่งกายภาพเป็นเกณฑ์คือ ชนิดแข็ง (hard pellets) และชนิดนิ่ม (soft pellets) มันอัดเม็ดทั้งชนิดแข็งและชนิดนิ่มจะมีรูปร่างคล้ายดินสอ มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร ยาวประมาณ 2-3 เซนติเมตร ความชื้นประมาณร้อยละ 14 และมีสีขาว ด้วยเหตุนี้บางคนจึงเรียกมันอัดเม็ดว่า มันแท่ง

มันอัดเม็ดแข็งนั้นมีขั้นตอนการผลิตแตกต่างจากมันอัดเม็ดนิ่มตรงที่ก่อนอัดนั้น มันเส้นป่นจะผ่านไอน้ำร้อน ทำให้นุ่มก่อนเข้าเครื่องอัด เวลาอัดออกมาจะได้มันเม็ดที่แข็ง ไม่แตกง่าย มันอัดเม็ดนิ่มนั้น ไม่มีการผ่านไอน้ำร้อนก่อนอัด เม็ดนิ่มจึงมีความแข็งน้อยกว่า ในขณะที่อัดจะมีความร้อนเกิดขึ้น จะต้องผ่านอากาศเย็นลดความชื้น (อัตราการแปรรูปจากมันเส้นเป็นมันอัดเม็ดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกันคือ เครื่องอัดมันอัดเม็ด ความชื้นของมันเส้นและสิ่งเจือปนต่างๆ เป็นต้น อัตรา

การแปรรูปอยู่ในช่วงร้อยละ 90-98 กล่าวคือ มันเส้นที่แปรรูปเป็นมันอัดเม็ดจะสูญเสียกลายเป็น
ฝุ่นผงไปประมาณร้อยละ 2-10)



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตมันอัดเม็ด

ที่มา : (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546)

มันอัดเม็ดนั้นมันจะแตกง่ายในขณะขนส่ง เป็นปัญหาเกิดฝุ่นสีขาวตามท่าเรือขณะขนส่ง ขึ้นและลงเรือในยุโรปเรียกว่า white pollution ปัจจุบันจึงไม่มีการส่งมันสำปะหลังอัดเม็ดชนิดอัดเม็ดนี้ม้ออกขายต่างประเทศ ดังนั้น มันอัดเม็ดแข็งจะถูกส่งออกไปต่างประเทศซึ่งจะใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอาหารสัตว์ เนื่องจากมันเม็ดจะมีปริมาณแป้งสูง (มากกว่าร้อยละ 65) จึงใช้เป็นแหล่งอาหารให้พลังงานสัตว์ เนื่องจากมันอัดเม็ดมีส่งได้ตลอดปี และราคาไม่สูงเมื่อเทียบกับผลิตผลของธัญพืชต่างๆ ดังนั้นหลายประเทศจึงนิยมใช้มันเม็ดของไทยในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ มันเม็ดมีปริมาณการส่งออกประมาณ 5 ล้านตันต่อปี ข้อได้เปรียบที่สำคัญของมันเม็ด คือ สามารถขนส่งได้ง่าย (ไม่มีฝุ่นมากเหมือนมันเส้น) ขนย้ายสะดวก สามารถใช้เครื่องจักรในการขนส่งได้ เช่นเดียวกับเมล็ดธัญพืชต่างๆ

2.2.4 อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

ในบรรดาประเทศที่ปลูกมันสำปะหลังมากๆ เช่น บราซิล ไนจีเรีย อินโดนีเซีย และไทย เป็นต้น ประเทศไทยเป็นประเทศเดียวที่ใช้มันสำปะหลังมาผลิตเป็นแป้งมากที่สุด ถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลก โดยมีกำลังความสามารถในการผลิตมากกว่า 2 ล้านตันมันสำปะหลังต่อปี มีเทคโนโลยีการผลิตแป้งมันสูงที่สุดในบรรดาทุกๆ ประเทศ และได้มีการถ่ายทอดเทคโนโลยีไปสู่ประเทศเพื่อนบ้าน แป้งมันสำปะหลังจึงถือได้ว่าเป็น “แป้งไทย” เป็นแป้งของคนไทยที่สามารถผลิตได้มากที่สุดและมีคุณภาพสูงที่สุด โดยขั้นตอนการผลิตโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.3

ที่มา : (มูลนิธิสถาบันพัฒนามันสำปะหลังแห่งประเทศไทย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546)



นอกจากนี้ในขั้นตอนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ยังมีน้ำทิ้งที่เกิดจากการล้าง การบดไม่ การสกัดและการสลัดแห้ง น้ำล้างพื้น น้ำล้างเครื่องจักร โดยปริมาณน้ำที่ใช้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตของแต่ละโรงงานและความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งน้ำ ในการผลิตโดยเฉลี่ยโรงงานจะใช้น้ำประมาณ 30-50 ลูกบาศก์เมตรต่อตันแป้ง (Yean, 1993) ทั้งนี้เนื่องจากการหมุนเวียนน้ำกลับเข้าไปใช้ในระบบใหม่ทำให้สามารถลดน้ำทิ้งเหลือ 10-20 ลูกบาศก์เมตรต่อตันแป้ง (MIS, 2006) ในปี พ.ศ. 2543 มีน้ำเสียจากโรงงานแป้งมีปริมาณรวมทั้งสิ้นประมาณ 55,005,090 ลูกบาศก์เมตรต่อปี ทั้งนี้ยังมีปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของซีไอดีสูงระหว่าง 5,000 – 45,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้น น้ำเสียจากอุตสาหกรรมแป้งสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงต้องมีการผ่านการบำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

นอกจากน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนต่างๆ แล้ว ในกระบวนการผลิตแป้งมันยังมีของเสียส่วนที่เป็นของแข็งซึ่งแบ่งได้จาก 2 ขั้นตอนการผลิตคือ เปลือกทราย เปลือกดิน เปลือกเปียก และเปลือกแห้ง เปลือกมันสำปะหลังซึ่งได้จากขั้นตอนการทำความสะอาดหัวมัน เศษเปลือกที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุเพาะเห็ดหรือทำปุ๋ย โดยมีราคาอยู่ที่ 50-100 บาทต่อตัน ส่วนที่สองคือ กากมันสำปะหลังซึ่งเป็นผลพลอยได้จากขั้นตอนการแยกแป้ง ซึ่งมักจะถูกนำไปใช้ผสมกับมันเส้นเพื่อทำมันอัดเม็ดและใช้ทำอาหารสัตว์ โดยราคาขายกากมันสด (กากมันเปียกมีความชื้นอยู่ประมาณ 65%) อยู่ที่ประมาณ 200-300 บาทต่อตัน กากแห้งซึ่งผ่านการตากแดดแล้ว (มีความชื้นอยู่ประมาณ 14%) จะมีราคาสูงขึ้นคือราคาประมาณ 2,000 บาทต่อตัน จากการศึกษาพบว่า ในกากมันยังคงมีแป้งตกค้างอยู่ร้อยละ 50-60 ของน้ำหนักกากมันแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ทำให้เกิดการสูญเสียแป้งไปจำนวนมาก การสะสมของกากมันในโรงงานเนื่องจากรอคการเคลื่อนย้าย มักเป็นบ่อเกิดมลภาวะกลิ่นเหม็นภายในโรงงาน จากการสำรวจและรวบรวมข้อมูลจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังพบว่า มีเปลือกมัน กากแป้งมันเป็นผลพลอยได้จำนวน 0.95-2.86 ลูกบาศก์เมตรต่อตันแป้ง (3 แสตันตันและ 1.5 ล้านตัน ตามลำดับ) ดังรูปที่ 2.4



ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางกายภาพและทางเคมีของกากมันสำปะหลัง (สถาบันวิจัยและพัฒนา
พลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)

ส่วนประกอบ กรัมต่อ100 กรัม กากแห้ง	Soccol (1994)	Cereda (1994)	Sterz (1997)	Vandenberghe (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	-	-
ฟิเอช	-	-	-	-	4.99	4.99	4.25	4.11

** หน่วย กรัมต่อน้ำหนัก กากเปียก 100 กรัม

¹ กพ, กำแพงเพชร ชย, ชัยภูมิ

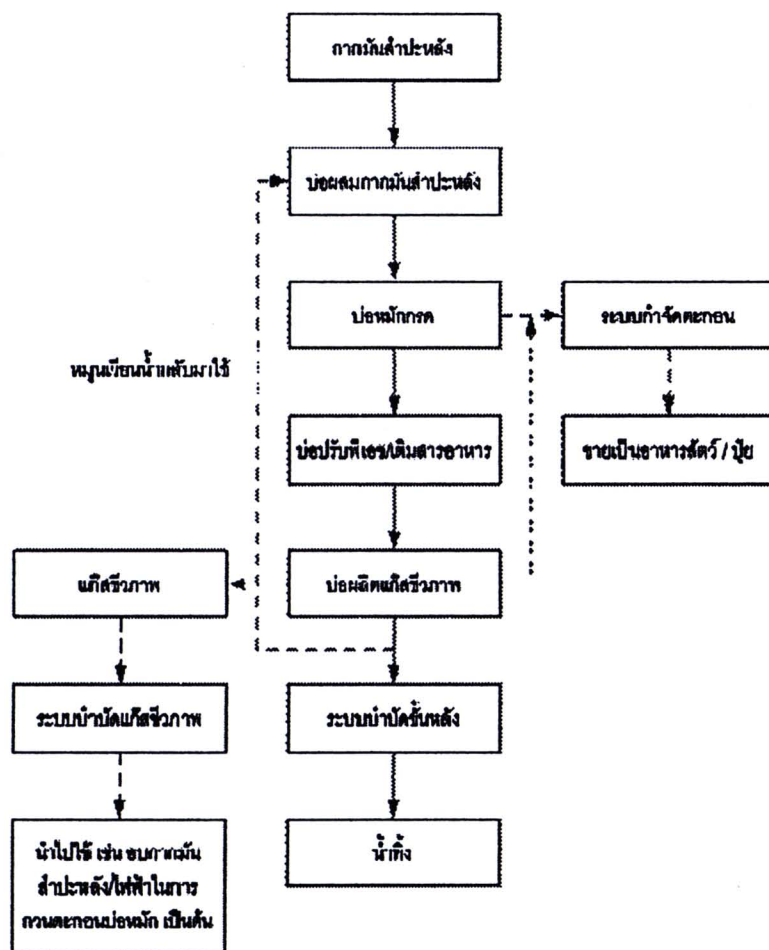
2.4 การผลิตก๊าซชีวภาพในกระบวนการหมักกากมันสำปะหลัง

ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังนั้นก่อให้เกิดของเสียหลายชนิด เช่น น้ำเสีย กากมัน
สำปะหลัง เศษ เหย้า เปลือกและดินทราย ถึงแม้ว่ากากมันสำปะหลังจะขายได้แต่ต้องใช้พื้นที่มาก
และเวลาตากแห้งหลายวัน ซึ่งในช่วงฤดูฝนมักมีปัญหาขายกากออกยากและราคาต่ำ ปัญหาตากไม่
แห้งและปัญหาส่งกลิ่นเหม็นรบกวนในและรอบบริเวณโรงงาน (Sriroth. et al., 2000a)

เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบของแป้งหลงเหลืออยู่สูง (~50% น้ำหนักแห้ง)
และมีเส้นใยเซลลูโลสอยู่ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะใช้กากมันสำปะหลังเป็นสารตั้งต้นใน
การผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักย่อยกากมันสำปะหลังในสภาวะไร้อากาศ ปัจจุบันการเปลี่ยนกาก
มันสำปะหลังเป็นพลังงานก๊าซชีวภาพจึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการ เพื่อการจัดการ



ปัญหาของเสียอย่างยั่งยืนมากขึ้น เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ เทคโนโลยีที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแล้วส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซชีวภาพและนำมาใช้ในการผลิตเป็นพลังงานความร้อนและผลิตกระแสไฟฟ้า ผังแสดงระบบการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง ดังรูปที่ 2.5

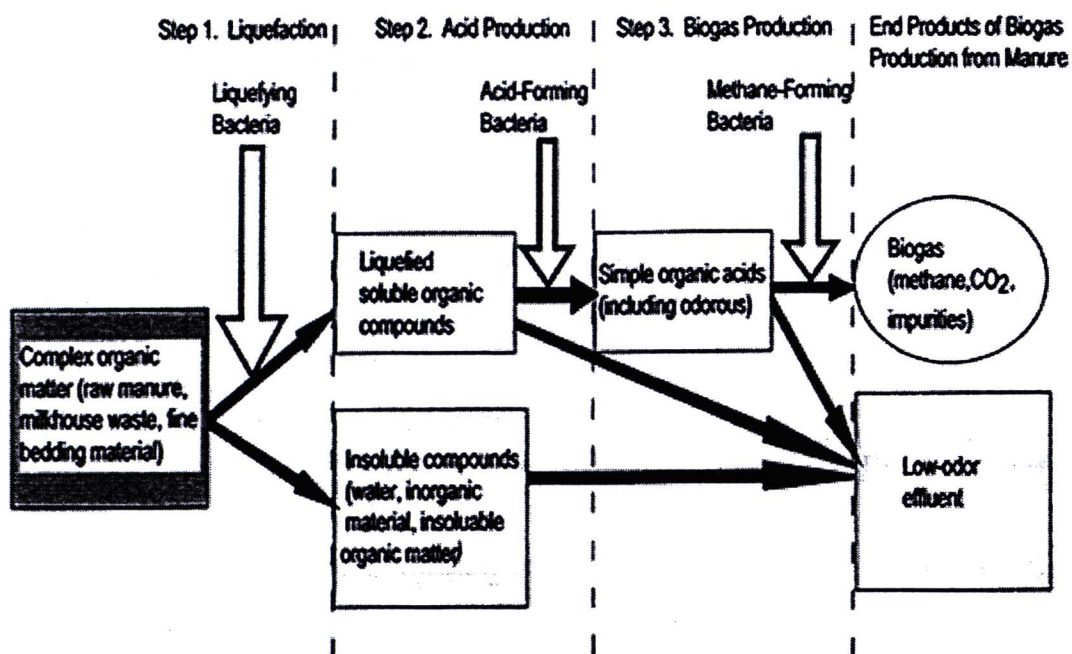


รูปที่ 2.5 ระบบการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง

ที่มา: (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551)

2.5 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ

ก๊าซชีวภาพ (biogas) เป็นก๊าซผสมที่มีก๊าซมีเทน (CH_4) ร้อยละ 50-70 และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 30-50 เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้อาจมีก๊าซอื่นๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ปนอยู่บ้างเล็กน้อย ก๊าซที่เกิดจากกระบวนการหมักมีปริมาณและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้และสภาวะของกระบวนการหมัก ก๊าซชีวภาพเกิดจากกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์สาร ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน ในสภาพที่ไม่ใช้อากาศ เป็นปฏิกิริยาทางชีวภาพที่อาศัยจุลินทรีย์หลายกลุ่มและผ่านกระบวนการทางชีวเคมีหลายขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ โดยปกติการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน เกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิด ดังรูปที่ 2.6



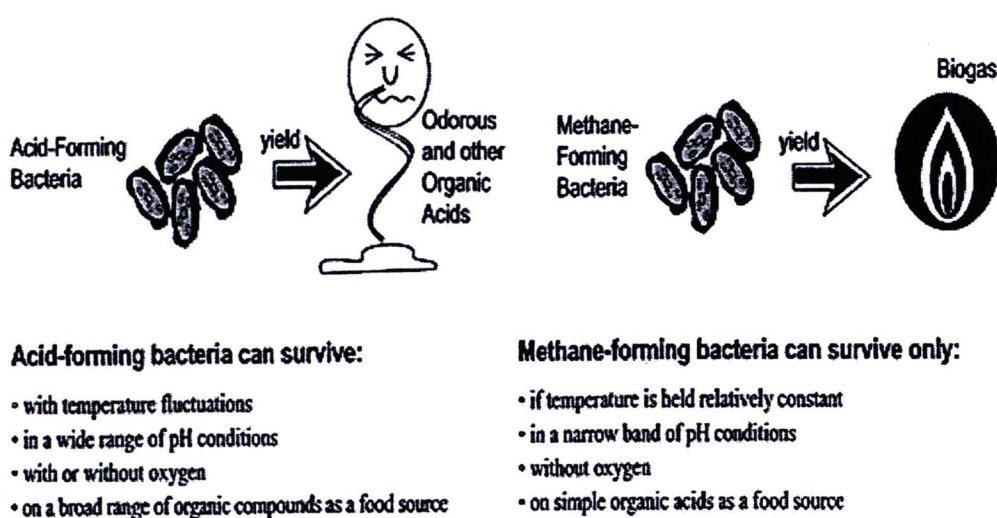
รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ที่มา : (นริศรา อินทรจันทร์, 2546)

ในขั้นตอนแรก liquefaction stage หรือขั้นตอนการไฮโดรไลซิส แบคทีเรียชนิด liquefying ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมา จะทำการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และ โปรตีน ไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำ จากนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพโดยแบคทีเรียสร้างกรดและสร้างมีเทน ดังในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ส่วนสารประกอบไม่ละลายน้ำบางตัวที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ จะถูกสะสมอยู่ในถังบำบัด หรือไหลออกจากถังบำบัด โดยสารพวกนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องกลิ่น

ในขั้นตอนที่ 2 สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจะถูกย่อยไปเป็นกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก โดยแบคทีเรียชนิดสร้างกรด กรดอินทรีย์เหล่านี้มักมีปัญหาเรื่องกลิ่น อย่างไรก็ตาม แบคทีเรียชนิดสร้างมีเทนจะเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งมีมีเทนประมาณ 50-70% และคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 30-50% เป็นองค์ประกอบ อาจมีน้ำไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแอมโมเนียปะปนออกมาเล็กน้อย

โดยปกติแบคทีเรียชนิดสร้างมีเทนจะไม่แข็งแรงและค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมมากกว่าแบคทีเรียชนิดสร้างกรด ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ในสภาวะต่างๆ ได้คงทนกว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทนแสดงดังรูปที่ 2.7 ดังนั้น บางครั้ง กรดที่สร้างขึ้นมา อาจไม่เปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ ถ้าอยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสม และจะถูกสะสมอยู่ในระบบ และในที่สุดอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้



รูปที่ 2.7 สภาวะที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน

ที่มา : (นริศรา อินทรจันทร์, 2546)

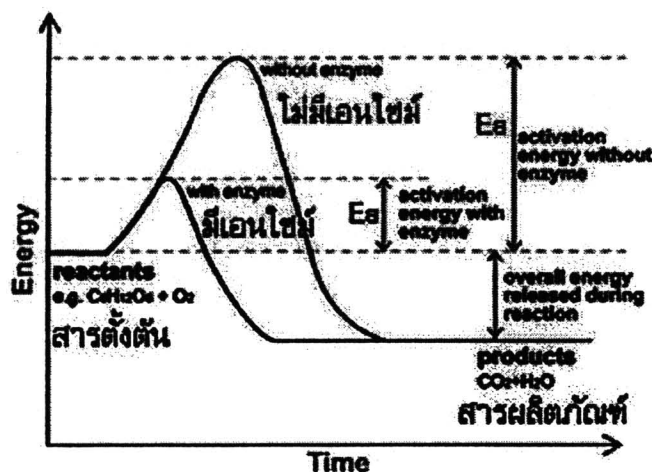
สภาวะที่เหมาะสมกับทั้งแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน คือ สภาวะไร้อากาศ ปริมาณของเสียอินทรีย์ต้องมีมากพอ แต่ไม่มากเกินไปและมีการป้อนอย่างคงที่ตลอดเวลา มีค่าพีเอช 6.5 ถึง 8.0 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และมีค่าอัลคาไลน์ตี 1,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูป CaCO_3 สารป้อนควรจะเป็นสารป้อนควรเป็นของเหลวที่มีปริมาณของแข็งน้อยกว่า 12% และปราศจากสารที่เป็นพิษ เช่น สารเคมี สารเคมีแต่ง

2.6 เอนไซม์ (enzyme)

เอนไซม์เป็นสารประกอบโปรตีนและอาจรวมถึงสารชีวโมเลกุลชนิดอื่นที่สามารถเร่งปฏิกิริยา (Catalytic activity) ในลักษณะค่อนข้างจำเพาะ เอนไซม์ทุกชนิดจะมีส่วนที่เรียกว่า Active site ซึ่งมีความจำเพาะต่อสารตั้งต้นและชนิดของปฏิกิริยา จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ตามที่ต้องการ การเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์มีประสิทธิภาพสูงมาก เร่งปฏิกิริยาได้ในสภาวะที่ไม่รุนแรง ใช้ปริมาณน้อยและไม่สูญเสียไปในระหว่างการเร่งปฏิกิริยา

2.6.1 กลไกการทำงานของเอนไซม์

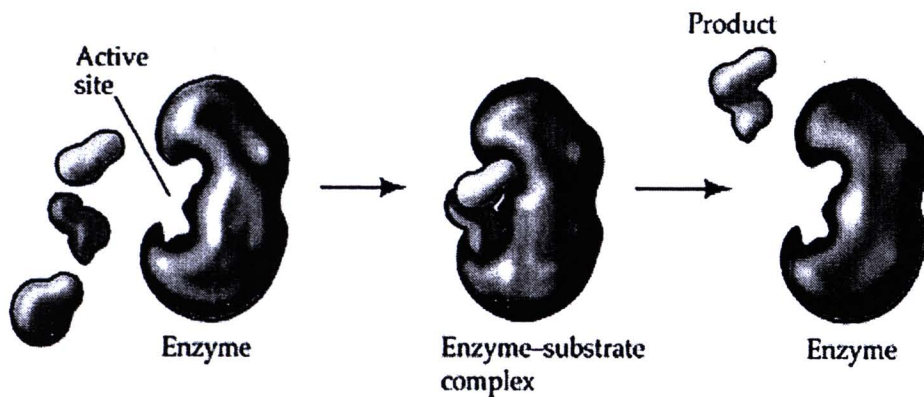
เอนไซม์เป็นโปรตีนชนิดก่อนกลั่นชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิต โดยจะไปลดพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy; E_a) และทำให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นชนกันในทิศทางที่เหมาะสม มีผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟพลังงานก่อกัมมันต์กับการดำเนินไปของปฏิกิริยา

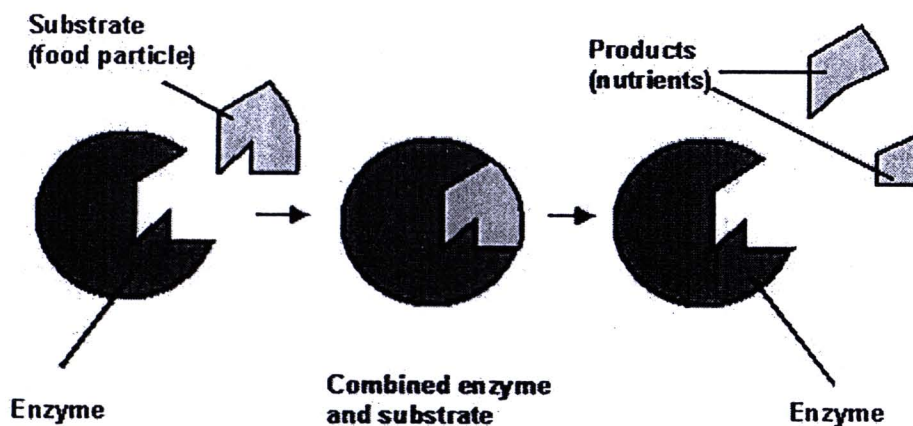
ที่มา : (วัชร หงษ์เวียง, ชีรพงษ์ แสงสิทธิ์, 2551)

จากกราฟ การหาพลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) จากกราฟระหว่างพลังงานกับการดำเนินไปของปฏิกิริยาสามารถหาได้โดยนำเอาพลังงานของสารตั้งต้นไปลบออกจากพลังงานที่จุดสูงสุดของการเกิดปฏิกิริยานั้นๆ ซึ่งเอนไซม์จะมีตำแหน่งกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาและมีขั้นตอนการทำงานของเอนไซม์ ดังรูปที่ 2.9 และ 2.10



รูปที่ 2.9 การทำงานของเอนไซม์ แบบรวมโมเลกุล

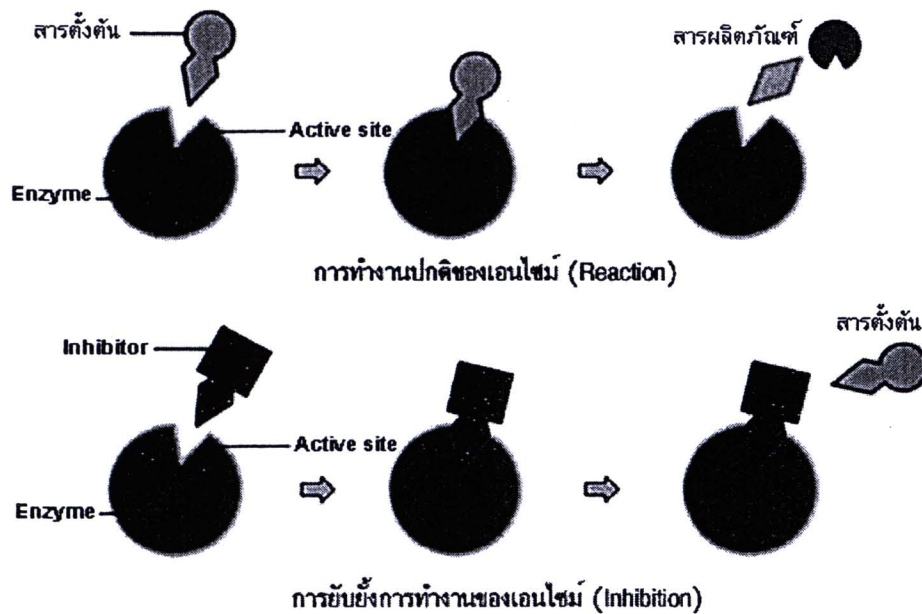
ที่มา: (วัชรฯ หงษ์เวียง, ชีรพงษ์ แสงสิทธิ์, 2551)



รูปที่ 2.10 การทำงานของเอนไซม์ แบบสลายโมเลกุล

ที่มา : (วัชรฯ หงษ์เวียง, ชีรพงษ์ แสงสิทธิ์, 2551)

เอนไซม์สามารถถูกยับยั้งการเข้าทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นได้ หรือเรียกว่า การยับยั้ง (Inhibition) โดยมีตัวยับยั้ง (Inhibitor) เข้าไปทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ ในตำแหน่ง Active site ก่อนสารตั้งต้น จึงทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นไม่ได้ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

ที่มา : (วัชรฯ หงษ์เวียง, ธีรพงษ์ แสงสิทธิ์, 2551)

เอนไซม์จะไปช่วยทำให้โมเลกุลของสารประกอบที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนแตกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยวๆ เอนไซม์แต่ละชนิดทำงานเฉพาะอย่าง ตัวอย่างได้แก่ เอนไซม์เซลล์ูลเลสช่วยให้เซลล์ูลอสซึ่งมีโมเลกุลของน้ำตาลหลายร้อยโมเลกุลมาต่อเชื่อมโยงกันเป็นสาย แตกออกเป็นโมเลกุลของน้ำตาลโคคๆ ทำให้สิ่งมีชีวิตสามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์และนำไปใช้ได้ง่ายขึ้น

2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์

2.6.2.1 ชนิดของสารตั้งต้น

2.6.2.2 ความเข้มข้นของสารตั้งต้น

2.6.2.3 ความเข้มข้นของเอนไซม์

2.6.2.4 ความเป็นกรด เบส ของสารละลาย

2.6.2.5 อุณหภูมิ เอนไซม์แต่ละชนิดจะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับที่มาของเอนไซม์

2.6.2.6 สารยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ สารบางชนิดเมื่อรวมตัวเอนไซม์จะทำให้เอนไซม์ทำงานช้าลงหรือหยุดทำงานได้

2.6.2.7 สารกระตุ้น เอนไซม์บางชนิดต้องการไอออนพวกอนินทรีย์เป็นตัวกระตุ้น จึงจะเกิดการ ทำงานและเกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยา

2.7 การใช้เอนไซม์ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยกากมันสำปะหลัง

เนื่องจากกากมันสำปะหลังมีองค์ประกอบของแป้งหลงเหลืออยู่สูง และมีองค์ประกอบอื่นๆ เช่น โปรตีน เส้นใยเซลลูโลส เป็นต้น ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และเอนไซม์บางตัวสามารถช่วยในการย่อยองค์ประกอบเหล่านี้ได้

แป้ง (starch) สะสมในพืช ไม่ละลายในน้ำเย็น แต่ละลายในน้ำร้อน เม็ดแป้งจะคูดน้ำและพองตัวออกคล้ายกาบ โมเลกุลของแป้งมีโครงสร้างแตกต่างกัน 2 แบบคือ อะไมโลส (Amylose) ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 70-300 หน่วย ต่อเป็นสายยาว บิดเป็นเกลียว (helix) ไม่มีการแตกแขนง ไม่ละลายน้ำ (การทดสอบอะไมโลส ด้วยสารละลายไอโอดีนจะได้สารสีน้ำเงินปนดำ) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin) ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 100,000 หน่วยต่อเป็นสายยาว และแตกแขนงเป็นกิ่งก้าน ละลายน้ำได้ (การทดสอบอะไมโลเพกตินด้วยสารละลายไอโอดีนจะได้สารสีม่วง)

เซลลูโลส (Cellulose) คือ เยื่อใยที่จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตที่พบมากในพืช เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่เชื่อมกันด้วยพันธะบีตา-1,4-ไกลโคไซด์ เป็นสายยาวและตรงไม่แตกกิ่ง เมื่อถูกไฮโดรไลซ์จะได้เป็นน้ำตาลกลูโคสรวมอยู่กับพอลิแซ็กคาไรด์สายสั้นๆ เช่น เซลโลไบโอส เซลโล

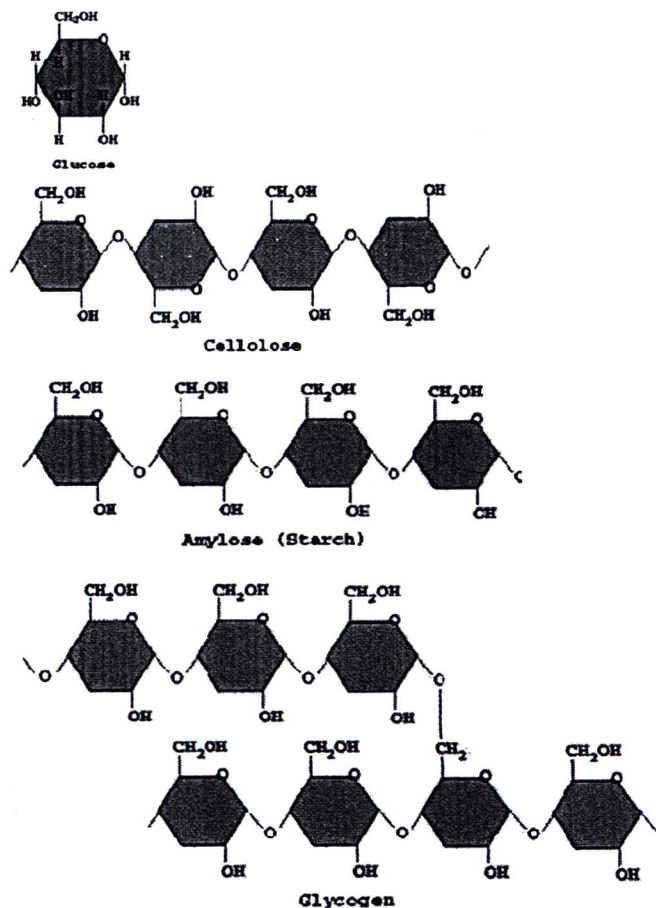


ไทรโอส (cellotriose) เซลโลเตตระโอส (cellotetraose) และเซลโลเพนตะโอส (cellopentaoose) เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วเซลลูโลสละลายน้ำได้น้อย และเนื่องจากการย่อยด้วยเอนไซม์ ในสัตว์เคี้ยวเอื้องด้วยนมไม่สามารถใช้เซลลูโลสเป็นแหล่งของพลังงานเนื่องจากไม่มีเอนไซม์เซลลูเลส น้ำย่อยของสัตว์ทุกชนิดไม่สามารถย่อยเซลลูโลสได้ แต่จุลินทรีย์ที่อยู่ในกระเพาะรูเมนของสัตว์เคี้ยวเอื้อง และถ้าได้ส่วน Caecum ของม้า และกระต่าย สามารถย่อยเซลลูโลสได้ ดังนั้น สัตว์เคี้ยวเอื้อง ม้า และกระต่าย จึงสามารถใช้ประโยชน์ได้ แต่การย่อยได้ของเซลลูโลสจะมากหรือน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับปริมาณลิกนิน แต่เส้นใยที่ย่อยไม่ได้นี้รวมทั้งเส้นใยจำพวกอื่นของพืช เช่น เฮมิเซลลูโลส เพคติน มีประโยชน์ในฐานะเป็นกากอาหาร (fiber) โมเลกุลของเซลลูโลสมีความเสถียรมากแต่สามารถถูกทำลายได้ด้วยกรดแก่หรือโดยการย่อยของเอนไซม์เซลลูเลส

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืช ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลเชิงเดี่ยว (monosaccharide) ชนิดต่างๆ ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปเป็นจำนวน 100 โมเลกุลที่มีคุณสมบัติในการละลายเหมือนกันคือ ละลายได้ในสารละลายด่าง น้ำตาลเชิงเดี่ยวนี้แบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ เพนโทแซนส์ (pentosans) และ เฮกโซแซนส์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส (non cellulose hexosans) น้ำตาลเชิงเดี่ยวที่พบมากในเฮมิเซลลูโลสคือ ดี-ไซแลนส์ (D-xylans) และ ดี-กลูโค-ดีแมนแนนส์ (D-gluco-D-mannans) และมีไซค์แซนส์เป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น แอล-อะราบินโนส (L-arabinoses)

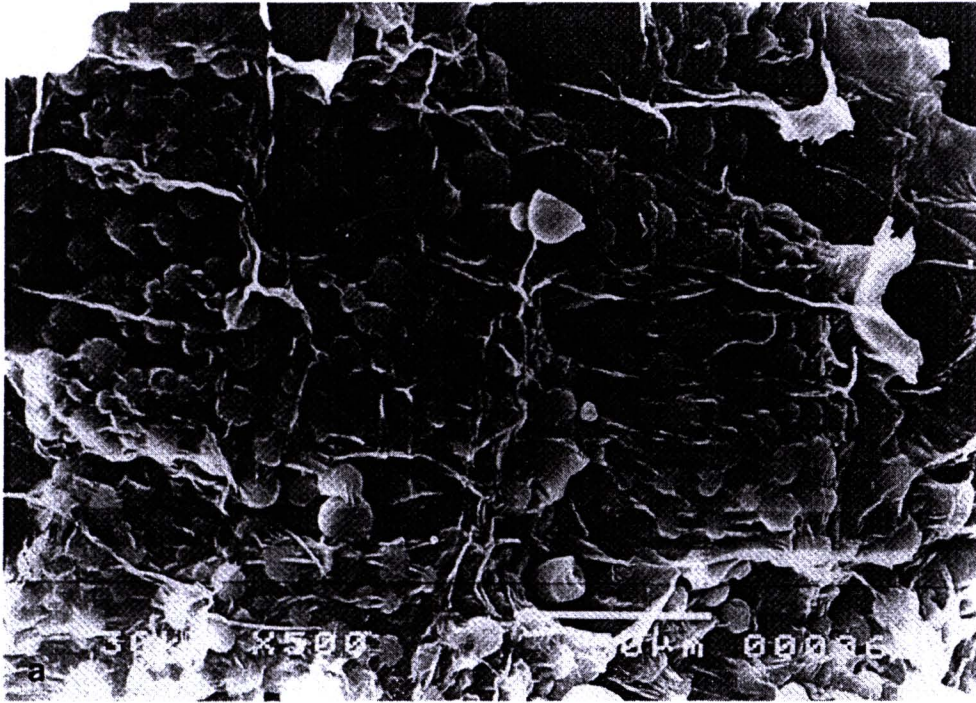
ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของแอลกอฮอล์ที่พืชผลิตเมื่อแก่ขึ้น เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืช ทำให้ผนังเซลล์พืชแข็งแรง จะเป็นส่วนประกอบของเปลือก ชัง หรือส่วนที่เป็นเยื่อใยของราก ลำต้น และจะถูกสร้างจากส่วนโคนต้น ไปสู่ยอด เมื่อพืชมีอายุมากขึ้น ปริมาณลิกนินจะเพิ่มมากขึ้นด้วย จากการที่ลิกนินเป็นสารที่ไม่มีสัตว์ชนิดใดใช้ประโยชน์ได้เลย ในขณะที่เกี่ยวกับการที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้การย่อยได้ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลงด้วย

สำหรับสูตรโครงสร้างของกลูโคส เซลลูโลส แป้ง และไกลโคเจนได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งไกลโคเจน แป้ง และเซลลูโลส ต่างก็เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส หรือเกิดจากการเรียงตัวต่อกันของกลูโคสหลายๆ โมเลกุล แต่มีการเชื่อมต่อพันธะในแบบที่ต่างกันทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของสารที่แตกต่างกัน เอนไซม์ที่ย่อยแป้ง คือ เอนไซม์อะไมเลส (Amylase) ไม่สามารถที่จะย่อยเซลลูโลสได้ และเอนไซม์เซลลูเลสเองก็ไม่สามารถย่อยแป้งได้เช่นกัน สำหรับโครงสร้างของกากมันสำปะหลังที่ส่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน แสดงดังรูปที่ 2.13

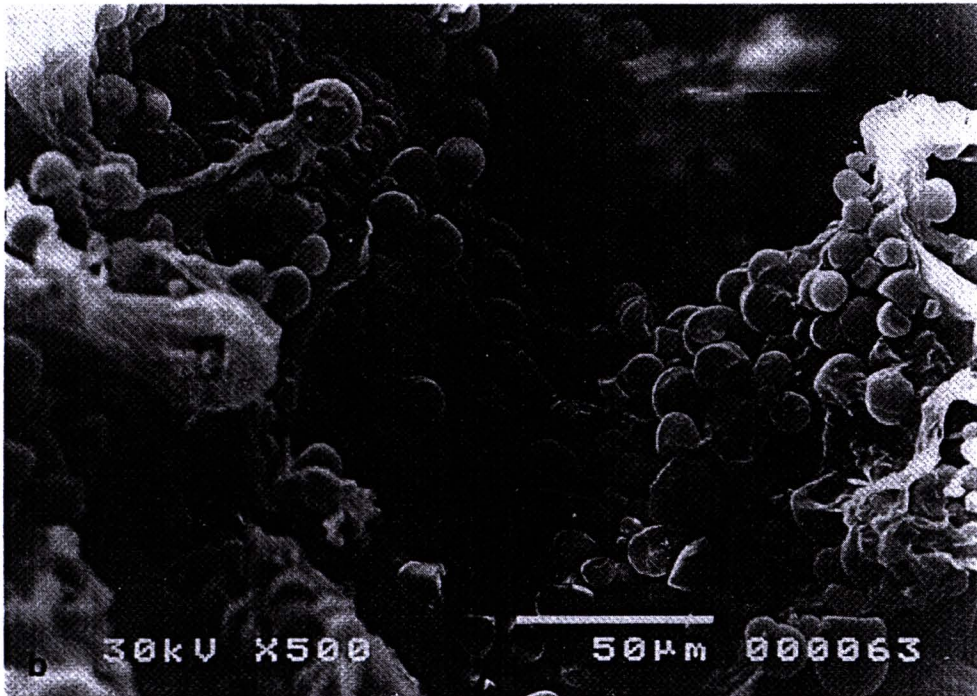


รูปที่ 2.12 สูตร โครงสร้าง โมเลกุลของกลูโคส เซลลูโลส แป้ง และไกลโคเจน

ที่มา : (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553)



(ก) โครงสร้างของกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์



(ข) โครงสร้างของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอส

รูปที่ 2.13 โครงสร้างของกากมันสำปะหลังที่ส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน

ที่มา : (Sritoth et al., 2000b)

เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase or Cellulosic enzymes) ทำหน้าที่ในการย่อยเซลลูโลส เอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลสและอินเทอร์มีเดียต โดยทั่วไปเซลลูเลสที่ใช้เป็น เอนไซม์ผสม (cellulase complex) ซึ่งจะประกอบด้วยเอนไซม์หลัก 3 ชนิด คือ Endo- β -glucanase, Exo- β -glucanase และ β -glucosidase

Endo- β -glucanase (1,4- β -D-glucan glucanohydrolase, EC 3.2.1.4), Cx: จะสลายพันธะ บีตา-ไกลโคไซด์ โดย random hydrolysis ทำให้ความหนืดลดลงอย่างรวดเร็วและมีหนวรีคิวซิง เพิ่มขึ้น ผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะได้เป็นน้ำตาลกลูโคสและโอลิโกเมอร์

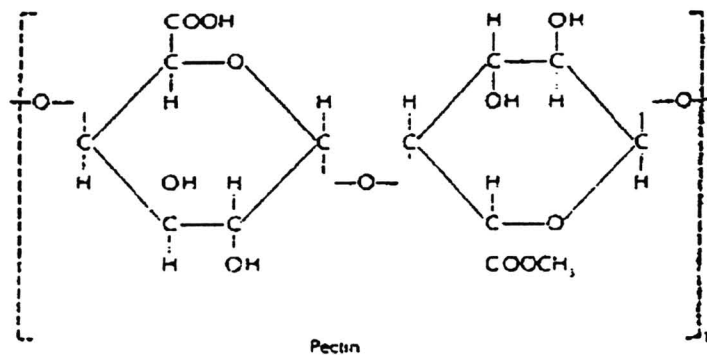
Exo- β -glucanase (1,4- β -D-glucan cellobiohydrolase, EC 3.2.1.91), C1: เป็น exo-splitting enzyme จะไฮโดรไลซ์เซลลูโลสส่วนที่ไม่เป็นผลึก โดยจะตัดพันธะจากปลายด้านที่ไม่มี หนวรีคิวซิง (non-reducing end) ของโมเลกุลเซลลูโลสได้ผลผลิตเป็นเซลโลไบโอส (Cellobiose)

β -glucosidase, (β -D-glucoside glucohydrolase, EC 3.2.1.21), Cellobiase : จะไฮโดรไลซ์ โมเลกุลของเซลโลไบโอสให้เป็นน้ำตาลกลูโคส และไฮโดรไลซ์พันธะจากปลายด้านที่ไม่มีหนวรีคิวซิงของเซลโลเดกซ์ทรินที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก โดยอัตราการไฮโดรไลซิสของเอนไซม์บีตาไกลูโคซิเดสจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของสายสับสเตรตสั้นลง และไฮโดรไลซ์เซลโลไบโอสได้รวดเร็วที่สุด

ค่าพีเอชที่เหมาะสมของเอนไซม์เซลลูเลสประมาณ 5.5-6 เสถียรที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่พีเอช 7 ได้ประมาณ 5 นาที สามารถยับยั้งได้โดย -SH reagent, oxidizing-reducing agent และพวกโลหะหนัก ซึ่งเอนไซม์ผสมนี้สามารถพบทั่วไปในเชื้อรา แบคทีเรีย มะเขือเทศ ใช้ประโยชน์ในการย่อยเซลลูโลสที่ตกค้างจากโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ และอื่นๆ กลูโคสที่เป็นผลิตภัณฑ์จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและการหมักโดยจุลินทรีย์

เพคติน (pectin) เป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่อยู่ส่วนกลางของผนังเซลล์ ทำหน้าที่ยึดเซลล์ให้ติดกัน โครงสร้างของเพคตินไม่ได้เรียงตัวเป็นเส้นใย แต่เรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ ในทางอุตสาหกรรมอาหารใช้เพคตินเป็นตัวทำให้อาหารข้นขึ้นหรือทำให้ผลไม้กรอบขึ้น เพคตินพบในผนังเซลล์ของพืช เนื้อแอปเปิ้ล กระจับ มะดัน ผักและเปลือกส้มชนิดต่างๆ ใช้ในการทำเยลลี่ มีประโยชน์คือ ช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดและลดระดับไขมันในเลือด

โมเลกุลของเพคตินเป็นสารพอลิกลอยด์ชนิดหนึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic group) ประมาณ 75% ที่ถูก esterified ด้วยเมทานอล (Methoxylated polygalacturonic acid) โครงสร้างโมเลกุลเพคติน แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 สูตร โครงสร้าง โมเลกุลของเพคติน (pectin)

ที่มา : (สมพร เกษแก้ว, 2546)

เอนไซม์เพคตินเนส (Pectinase or Pectic enzymes) ประกอบด้วยเอนไซม์ 2 กลุ่มคือ Depolymerizing enzymes และ Deesterifying enzymes

เอนไซม์เพคตินเนสในพวกเชื้อรา *Aspergillus* มักพบเป็นเอนไซม์ผสมระหว่าง Pectin-methyl esterase (deesterifying enzyme) และ Polygalacturonase (depolymerizing) เอนไซม์เพคตินเนสได้จาก *Aspergillus niger*, *Penicillium* spp., *Rhizopus* spp. ใช้ในการย่อยสลายสารเพคตินให้มีขนาดเล็กลงอันจะเป็นประโยชน์ต่อผลิตภัณฑ์อาหารหลายอย่างเช่น ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำผลไม้ ใช้ในการทำให้น้ำผลไม้ใส ไวน์ โกโก้ กาแฟ และย่อยเพคตินเพื่อใช้ในการแช่दनแฟลกซ์เพื่อทำผ้าลินิน

2.8 ทบทวนผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sriroth และคณะ (2000b) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดแป้งออกจากกากมันสำปะหลัง โดยการนำแป้งกลับมาใช้ได้อีกครั้ง (starch recovery) มีการบำบัดด้วยวิธีการทางกายภาพและทางชีวภาพ กากมันสำปะหลังจะถูกบำบัดโดยวิธี sonication หรือวิธี incubation ด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอส โดยการทำให้โครงสร้างที่ซับซ้อนของน้ำตาลหลายโมเลกุล (polysaccharides) แตกตัว รวมทั้งมีการดักจับเม็ดแป้งเล็กๆ ด้วย ในการบำบัดโดยใช้เอนไซม์นี้จะทำการหาปริมาณของเซลลูเลสและเพคตินเอส ที่ทำให้การสกัดแป้งมีประสิทธิภาพสูงสุด การใช้เซลลูโลสหรือเพคตินเอส เพียงตัวใดตัวหนึ่งไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดแป้งดีขึ้น ความเข้มข้นของเซลลูโลสมีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดมากกว่าความเข้มข้นของ เพคตินเอส การบำบัดโดยใช้เอนไซม์เซลลูเลส 15 NCU และเอนไซม์เพคตินเอส 122.5 PGU ต่อกรัมของกากมันแห้งเป็นเวลา 60 นาที ส่งผลให้มีการนำแป้งกลับมาใช้ได้ 40% คุณภาพของลักษณะแป้งที่สกัดออกมาเป็นแป้งที่มีความเหนียวหนืด (วัดโดย Rapid Visco Analysis) และมีสมบัติทางความร้อน (วัดโดย Differential Scanning Calorimetry) ซึ่งจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแป้งในตอนเริ่มต้นที่ได้จากการสกัดหัวมันสำปะหลัง แป้งที่สกัดออกมาได้มีความไวในการถูกย่อยด้วยแอลฟาอะไมเลสมากกว่าแป้งในตอนแรก นอกจากนี้เซลลูเลสและเพคตินเอสทำให้แป้งที่เหลือค้างในกากมันมีความง่ายต่อการถูกย่อยโดยแอลฟา-อะไมเลสเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

Cuzin และคณะ (1992) ได้ทำการศึกษาการผลิตมีเทนจากการย่อยเปลือกมันสำปะหลังโดยใช้ถังหมักย่อยแบบปลั๊กโฟลว์ องค์ประกอบของมันสำปะหลังมีปริมาณแป้งสูง มี C : N ratio สูง มี cyanogenic glucosides ในระหว่างที่ทำการหมักเปลือกมันสำปะหลังเพื่อผลิตก๊าซมีเทนนั้นโดยปกติแล้วจะเกิดการผลิกรดที่มากเกินไป การขาดแคลนไนโตรเจนและการปล่อยไซยาไนด์จะมีความเป็นพิษอย่างมากต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน การใช้ถังหมักแบบปลั๊กโฟลว์สามารถแก้ไขปัญหการสร้างกรดที่มากเกินไป ตลอดจนจำกัดตำแหน่งที่เกิดขึ้นตอนการสร้างกรดในครั้งแรกของถังหมัก โดยของเหลวในถังหมักแบบปลั๊กโฟลว์มีการสะสมไนโตรเจนไว้และไม่มีการรบกวนของไซยาไนด์ (5-6 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งจะตรวจดูได้ในถังหมัก ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการหมักมีค่า 0.661 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3-6 กิโลกรัมของ

ของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และการใช้ถังหมักขนาด 88 ลูกบาศก์เมตร ในการผลิตมีเทน เพื่อนำใช้สำหรับการอบแห้งกากมันสำปะหลัง 1 ตันนั้นจะทำให้ช่วยประหยัดพลังงานได้ด้วย

ธีรภัทร ศรีนรคุตร , เลิศลักษณ์ แก้ววิมล และ ละเอียด แซ่โจ้ว (2549) ได้ทำการศึกษาการย่อยกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลในประเทศไทย ซึ่งสามารถทำได้โดยการผ่านขั้นตอนการ pretreatment โดยการไฮโดรไลซ์โดยการใช้อครหรือเอนไซม์ เพื่อเปลี่ยนแปลงให้เป็นน้ำตาล ในการศึกษาการไฮโดรไลซ์จะใช้อครเซลล์ฟิวริกเข้มข้น 0.6 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนมันสำปะหลังต่อกรดเท่ากับ 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

สุนีย์และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากกากมันสำปะหลังโดยใช้เอนไซม์และอัลตราฟิวเทรชัน ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยกากมันสำปะหลังโดยแอลฟาอะไมเลส และกลูโคอะไมเลส และเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยโดยนำอัลตราฟิวเทรชันมาประยุกต์ใช้ จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่เอนไซม์ทั้งสองทำงานร่วมกันได้ คือ ค่าความเป็นกรดค่า 5.0 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยอัตราส่วนของอัลฟาอะไมเลสต่อกลูโคอะไมเลสที่เหมาะสมคือ แอลฟาอะไมเลส 285.6 MWU ต่อกรัมกากมันสำปะหลัง กลูโคอะไมเลส 0.21 DU ต่อกรัมกากมันสำปะหลัง ทำการย่อยเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้น้ำตาลรีดิวซ์ 24.10 กรัมต่อ 100 กรัมของกากมันสำปะหลัง การใช้อัลตราฟิวเทรชันในกระบวนการย่อยกากมันสำปะหลังที่ความดันเฉลี่ย 98 KPa อัตราไหลผ่านแผ่นกรอง 130 มิลลิลิตรต่อวินาที พื้นที่การกรอง

28.27 ตารางเซนติเมตร พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้เป็น 29 กรัมต่อ 100 กรัมกากมันสำปะหลัง ซึ่งจะให้ผลดีกว่าระบบที่ไม่ใช้อัลตราฟิวเทรชัน

สุภาวดี (2543) ผลิตน้ำตาลกลูโคสโดยการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ผสม ได้แก่ กลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส เซลลูเลส และเพคตินเนส สภาวะที่เหมาะสมต่อการนำเอนไซม์ทั้ง 4 ชนิด มาทำงานร่วมกันคือ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่าง 5 อัตราส่วนของ เอนไซม์ 4 ชนิด ที่เหมาะสมต่อการย่อยกากมันสำปะหลังปริมาณ 8 กรัม คือ กลูโคอะไมเลส 130 PGU ให้ประสิทธิภาพต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยอัตราสูงสุด 8.15 กรัมต่อลิตร.นาที่ และ ประสิทธิภาพการย่อยกากมันสำปะหลังเป็นน้ำตาลกลูโคสมีค่าสูงถึง 64.4% ในขณะที่การย่อยด้วย เอนไซม์ 3 ชนิด ได้แก่ กลูโคอะไมเลส แอลฟาอะไมเลส และเซลลูเลสให้ประสิทธิภาพการย่อยกาก มันสำปะหลังเป็นน้ำตาลกลูโคสมีค่า 59.8% ในการย่อยกากมันสำปะหลังแบบ batch ด้วยอัตราส่วน ระหว่างเอนไซม์และสารตั้งต้นที่เหมาะสมดังกล่าวข้างต้น โดยการกวนด้วยความเร็วรอบ 600 รอบ ต่อนาที สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ 0.61 กรัมต่อกรัมกากมันสำปะหลัง ให้ประสิทธิภาพการย่อย กากมันสำปะหลังเป็นน้ำตาลรีดิวซ์มีค่า 70.11% การย่อยกากมันสำปะหลังแบบ Semicontinuous ในเครื่องปฏิกรณ์อัลตราฟิวเทรชัน สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้มากกว่าการย่อยแบบ Fed-batch ดังนั้นการใช้การกรองแบบอัลตราฟิวเทรชันร่วมกับการย่อยกากมันสำปะหลังจึงเป็นทางเลือกหนึ่ง ที่น่าสนใจในการกักเอนไซม์ไว้ใช้ได้อย่างคุ้มค่า ซึ่งการย่อยกากมันสำปะหลังในเครื่อง ปฏิกรณ์อัลตราฟิวเทรชันที่มีระบบการย่อยเป็น 0.4 ลิตร พื้นที่การกรอง 3.85×10^{-3} ตารางเมตร กวน ด้วยความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ใช้ความดันในการกรอง 200 kPa ความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ ที่เหมาะสมทำให้อัตราการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์สมดุลกับอัตราการดึงเอน้ำตาลรีดิวซ์ออกจากระบบ คือ 115 กรัมต่อลิตร

พิชยา สวสสม และคณะ (2550) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของการผลิตก๊าซชีวภาพจากกาก มันสำปะหลัง โดยใช้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการแบบเดินระบบไม่ต่อเนื่อง โดยได้ทำการหา ร้อยละของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบโดยทำการแปรผันร้อยละของกาก มัน คือ 2,3,5 และ 10% น้ำหนักต่อน้ำหนัก นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการ ผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการให้ความร้อนกับกากมันหรือการใช้เอนไซม์เซลลูเลสและเอนไซม์เพคติ นเนส ก่อนการหมักด้วย ผลการศึกษาพบว่าร้อยละของกากมันสำปะหลังที่เหมาะสมสำหรับการเดิน

ระบบ คือ 2-3 % ซึ่งให้อัตราการผลิตก๊าซคือ 0.034-0.047 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากเปียก การให้ความร้อนกับส่วนผสมกากมันสำปะหลัง 2% ที่อุณหภูมิ 80, 90 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ผลการศึกษพบว่า การให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น ไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่กลับมีผลทำให้เกิดก๊าซชีวภาพน้อย โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่อกิโลกรัมของกากเปียกลดลงอยู่ในช่วง 0.033-0.039 ลูกบาศก์เมตร และในการหมักย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส และเพคตินเอสในปริมาณ 5-20 NCU และ 50-125 PGU ต่อกรัมกากแห้ง ตามลำดับ ที่พีเอช 4.5 ด้วยระยะเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที ก่อนนำมาหมัก ไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการเปลี่ยนกากมันสำปะหลังเป็นก๊าซชีวภาพได้เช่นเดียวกับการให้ความร้อนก่อนการหมัก อย่างไรก็ตาม การใช้เอนไซม์เพคตินเอสที่ปริมาณ 125 PGU ต่อกรัมกากแห้ง และเอนไซม์เซลลูเลสที่ 20 NCU ต่อกรัมกากแห้ง สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด เมื่อเทียบกับการใช้เอนไซม์เซลลูเลสในปริมาณที่ต่ำกว่า และเมื่อทำการศึกษาโดยใช้ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลสที่ 20 NCU ต่อกรัมกากแห้ง และเอนไซม์เพคตินเอสในปริมาณ 50, 80 และ 125 PGU ต่อกรัมกากแห้ง พบว่า ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพไม่มีความแตกต่างกัน และไม่แตกต่างไปจากกรณีที่ใช้เอนไซม์เพคตินเอสที่ปริมาณ 125 PGU ต่อกรัมกากแห้ง อย่างมีนัยสำคัญด้วย อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อจำกัดของเวลา การศึกษานี้ได้ทำการทดลองการเอนไซม์ที่ค่าพีเอชค่าเดียว คือ 4.5 และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 30 นาที ซึ่งอาจจะไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมของการทำงานของเอนไซม์