

บทที่ 22 รายละเอียดข้อมูลเชื้อเพลิงชีวภาพประเภท บิวทานอลชีวภาพ (Bio-butanol)

1. ข้อมูลทั่วไป

บิวทานอลชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งซึ่งจัดเป็นเชื้อเพลิงหมุนเวียนที่ดีกว่าเอทานอลชีวภาพ เนื่องจากบิวทานอลชีวภาพมีค่าออกเทนใกล้เคียงน้ำมันทำให้สามารถผสมเข้ากับน้ำมันได้ดีกว่า มีค่าพลังงานและจุดเดือดสูงกว่าจึงสามารถขนส่งตามท่อน้ำมันและไม่มีปัญหากับเครื่องยนต์เนื่องจากไม่มีการกัดกร่อน แต่บิวทานอลชีวภาพยังไม่เป็นที่นิยมเพราะความเป็นพิษ อีกทั้งยังยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทำให้มีความเข้มข้นที่ผลิตได้ต่ำ^[1] และมีปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อในเชิงเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตบิวทานอลชีวภาพ ได้แก่ ต้นทุนของวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิต ชนิดของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ เทคนิคในการเก็บเกี่ยวผลผลิต การเกิดผลผลิตอื่นๆในระหว่างการหมักบิวทานอลชีวภาพและความสามารถในการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ของแบคทีเรีย เป็นต้น^[2]

คุณสมบัติทั่วไปของบิวทานอลชีวภาพเป็นแอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอน 4 อะตอม (Primary alcohol) มีสูตรโมเลกุล C_4H_9OH และสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 1 มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 74.12 g/mol ไม่มีสี ไร้ไฟ ละลายน้ำได้เล็กน้อย มีกลิ่น เฉพาะตัว ซึ่งคล้ายๆ กลิ่นของกล้วย แต่มีกลิ่นแอลกอฮอล์ที่ชัดเจน อย่างไรก็ตาม บิวทานอลชีวภาพสามารถทำให้เกิดการระคายเคืองเมื่อสัมผัสโดยตรงทางดวงตาและผิวหนัง และไอระเหยของบิวทานอลชีวภาพก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อปอดจมูกได้ และอาจก่อให้เกิดการเสพติดได้เมื่อสูดดมที่มีความเข้มข้นสูงๆ บิวทานอลชีวภาพสามารถละลายเข้ากับตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆได้ดี แต่มีความสามารถละลายน้ำได้ค่อนข้างต่ำ^[2] ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของบิวทานอลชีวภาพแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของบิวทานอลชีวภาพ

Properties	Value
Melting point (°C)	-89.3
Specific gravity	0.810-0.812
Ignition temperature (°C)	35-37
Auto-ignition temperature (°C)	343-345
Flash point (°C)	25-29
Relative density (water:1.0)	0.81
Critical pressure (hPa)	48.4
Critical temperature (°C)	287
Explosive limits (vol.% in air)	1.4-11.3
Water solubility 9.0 mL/100mL	7.7 g/100 mL at 20 °C
Relative vapor density (air:1.0)	2.6
Vapor pressure (kPa at 20 °C)	0.58

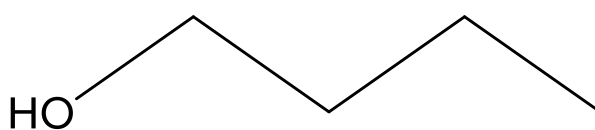
บิวทานอลชีวภาพมีสมบัติที่ดีกว่าเอทานอลชีวภาพ คือ สามารถระเหยเป็นไอได้ต่ำกว่า โดยมีค่าเรด (Reid value) ต่ำกว่าเอทานอลชีวภาพถึง 7 เท่า และบิวทานอลชีวภาพยังมีความสามารถในการกัดกร่อนต่ำ จึงทำให้ปลอดภัยต่อการขนส่งลำเลียง และมีความดันไอต่ำ ค่าออกเทนสูงจึงสามารถผสมเข้ากับแก๊สโซลีนและ

บทที่ 22 บิวทานอลชีวภาพ (Bio-butanol)

น้ำมันดีเซลได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยเหตุดังกล่าวนี้นี้จึงทำให้บิวทานอลชีวภาพสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงที่มีความปลอดภัยสูง และสามารถส่งลำเลียงด้วยระบบท่อไปยังสถานีจ่ายได้ ในขณะที่เอทานอลชีวภาพไม่สามารถเก็บไว้เป็นเวลานานได้ เนื่องจากมีค่าความดันไอสูง นอกจากนี้บิวทานอลชีวภาพยังมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สามารถผสมเข้ากับแก๊สโซลีนได้ดีกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ มีความหนืดเป็น 2 เท่าของเอทานอลชีวภาพ และประมาณ 5-7 เท่าของแก๊สโซลีน ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ ของบิวทานอลชีวภาพ เช่น ความหนาแน่นและความจุความร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกับเอทานอลชีวภาพดังแสดงในตารางที่ 2^[1]

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของบิวทานอลชีวภาพ

Properties	Butanol	Gasoline	Ethanol	Methanol
Boiling point (°C)	117-118	27-221	78	64.7
Density at 20 (°C)(g/mL)	0.8098	0.7-0.8	0.7851	0.7866
Solubility in 100 g of water	immiscible	immiscible	immiscible	immiscible
Energy density (MJ.l ⁻¹)	27-29.2	32	19.6	16
Energy content/value (BTU/gal)	110000	115000	84000	76000
Air-fuel ratio	11.2	14.6	9	6.5
Heat of vaporization (MJ/kg)	0.43	0.36	0.92	1.2
Liquid Heat capacity (Cp) at STP (kJ/k-mol.°K)	178	160-300	112.3	81.14
Research octane number	96	91-99	129	136
Motor octane number	78	81-89	102	104
Octano/Water Partition Coefficient (as logP _{o/w})	0.88	3.52±0.62	-0.31	-0.77
Dipole moment (Polarity)	1.66	n.a.	1.7	1.6
Viscosity (10 ⁻³ Pa.s)	2.593	0.24-0.32	1.078	0.5445



ภาพที่ 1 โครงสร้างของ Bio-butanol

ชื่อทางเคมีของบิวทานอลชีวภาพ คือ Butyl alcohol, n-Butanol หรือ Methylolpropane และชื่อทางการค้าของบิวทานอลชีวภาพจะขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ชื่อทางการค้าของ Bio-butanol ตามบริษัทผู้ผลิต

Company	Trade name
Butamax® Advanced Biofuels LLC	Butamax®
Green Biologics Inc.	BioPure™

Company	Trade name
Gevo, Inc	GEVO®
Eastman Chemical Company	Eastman(TM) n-Butanol
OLTCHIM S.A.	n-Butanol
amyris	Biofene®

2. กระบวนการสังเคราะห์

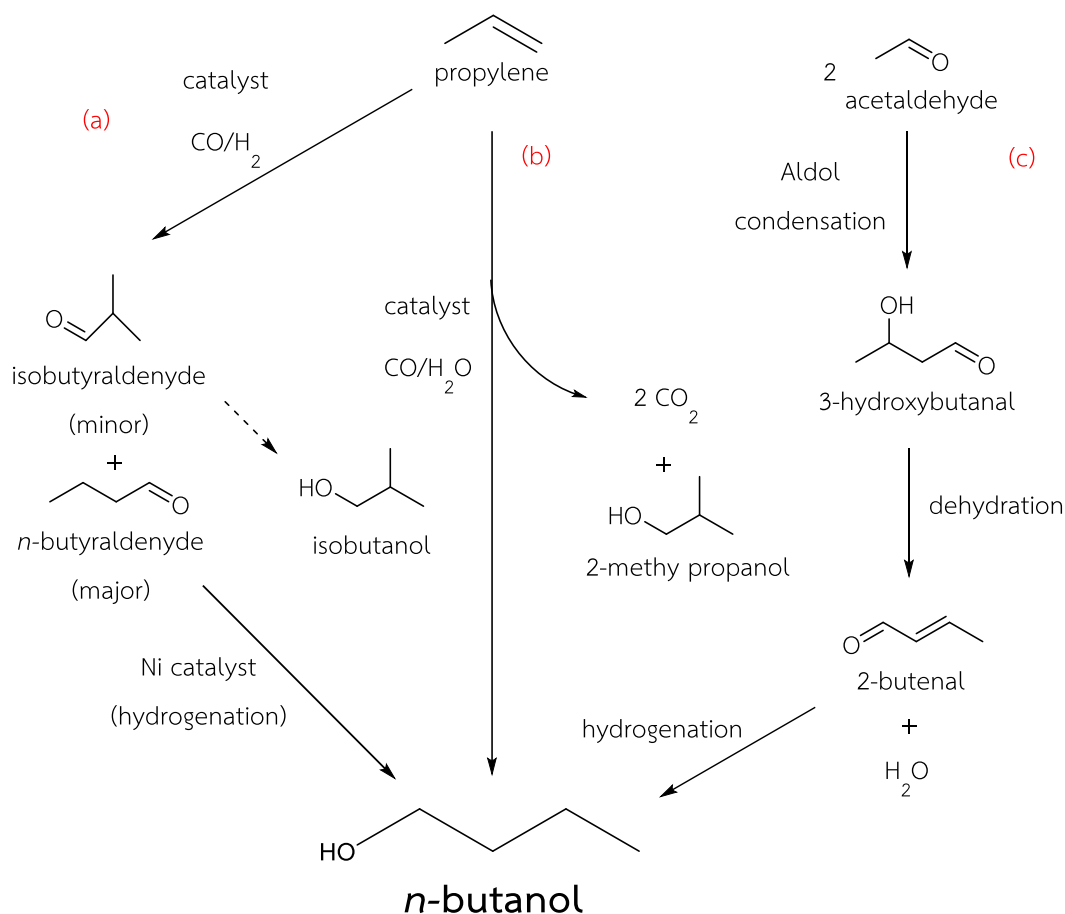
2.1 การสังเคราะห์บิวทานอลชีวภาพด้วยวิธีทางเคมี

การผลิตบิวทานอลชีวภาพในระดับอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ผลิตจากกระบวนการทางเคมี แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ ได้แก่ Oxo process, Reppe process และ Crotonaldehyde hydrogenation (ภาพที่ 2) การสังเคราะห์บิวทานอลชีวภาพด้วยวิธี Oxo (Hydroformylation) ต้องเติมคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) และไฮโดรเจน (Hydrogen) เพื่อเข้าไปแทนที่หมู่ไฮโดรคาร์บอนิล (Hydrocarbonyl) อย่างต่อเนื่อง โดยมีโลหะจำพวกโคบอลต์ โรเดียม หรือ รูเทเนียม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งอัลดีไฮด์ (Aldehyde) ที่เกิดขึ้นในระยะแรกถูกเปลี่ยนให้กลายเป็นบิวทานอลชีวภาพในกระบวนการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) ทั้งนี้ความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยบิวทานอลชีวภาพที่ได้จากปฏิกิริยานี้จะได้ไอโซเมอร์ (Isomer) ที่แตกต่างกันหลายชนิดส่วนการสังเคราะห์บิวทานอลชีวภาพผ่าน Reppe process อาศัยการเกิดปฏิกิริยาร่วมกันของคาร์บอนมอนอกไซด์ และพรอพิลีน (Propylene) ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมอยู่ทำให้เกิดของผสม n-butanaldehyde และ Isobutanaldehyde ต่อมาจะถูกดัดแปลงให้เปลี่ยนเป็นบิวทานอลชีวภาพ การสังเคราะห์บิวทานอลชีวภาพด้วย Reppe process จะทำให้ได้บิวทานอลชีวภาพโดยตรงไม่ผ่านตัวกลางภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิและความดันต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม การผลิตบิวทานอลชีวภาพด้วยวิธีนี้ไม่สามารถผลิตได้ในเชิงการค้า เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือและเทคโนโลยีที่ทันสมัยซึ่งมีราคาแพง เมื่อสิบปีที่ผ่านมาได้มีการผลิตบิวทานอลชีวภาพจากอะเซทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) ผ่านกระบวนการ Crotonaldehyde hydrogenation ที่ประกอบไปด้วยขั้นตอน Aldol condensation, Dehydration และ Hydrogenation แม้ว่าการใช้วิธีนี้ผลิตบิวทานอลชีวภาพยังมีไม่มากนักแต่ในอนาคตอันใกล้การผลิตบิวทานอลชีวภาพจากกระบวนการ Crotonaldehyde hydrogenation อาจเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีความสำคัญเพราะสามารถผลิตได้จากเอทานอลชีวภาพจากกระบวนการ Dehydrogenation ซึ่งเอทานอลชีวภาพสามารถผลิตได้จากสารชีวมวลโดยกระบวนการทางชีวภาพ ในขณะที่การผลิตบิวทานอลชีวภาพโดยการสังเคราะห์ทางเคมีด้วยวิธีอื่นๆ ต้องอาศัยวัตถุดิบหรือสารตั้งต้นที่ทำจากอนุพันธ์ของสารปิโตรเลียม^[2,3]

2.2 การสังเคราะห์บิวทานอลชีวภาพด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

บิวทานอลชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากกระบวนการหมักของแบคทีเรียในกลุ่ม Clostridia จากกระบวนการเอบีอี (ABE fermentation) ซึ่งประกอบด้วยอะซิโตน บิวทานอล และเอทานอล ทั้งนี้ Clostridium sp. ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียแกรมบวก (Gram-positive) ที่สามารถสร้างสปอร์และเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยสภาพธรรมชาติแล้วแบคทีเรียกลุ่มนี้มีวิถีในการเปลี่ยน น้ำตาลให้เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ (อะซิโตน บิวทานอล และเอทานอล) แบคทีเรีย Clostridium sp. ได้ถูกจำแนกออกเป็นสายพันธุ์ต่างๆ เป็นจำนวนมากเพื่อใช้ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตบิวทานอลชีวภาพแต่แบคทีเรีย Clostridium acetobutylicum เป็นสายพันธุ์ที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตบิวทานอลชีวภาพในระดับอุตสาหกรรมซึ่งบิวทานอลชีวภาพสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่เหลือใช้ทางการเกษตร เช่น กากน้ำตาล (Molasses) สารชีวมวลทางการเกษตร (Agricultural biomass) ไม้ชนิดต่างๆ (Wood) และ

วัตถุดิบประเภทที่ให้แป้ง (Starchy material) (ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวเจ้า ข้าวไรย์ และมันสำปะหลัง) ของเสียจากอุตสาหกรรมนม (Dairy industry waste) เป็นต้น^[4]



ภาพที่ 2 วิธีการสังเคราะห์บิวทานอลด้วยวิธีทางเคมี (a) Oxo synthesis, (b) Reppe process, และ (c) Crotonaldehyde hydrogenation^[2]

ประวัติของกระบวนการหมัก ABE

กระบวนการหมัก ABE สามารถผลิตบิวทานอลชีวภาพได้โดยการหมัก โดยใช้แบคทีเรียในการผลิต ABE จากสารชีวมวล ซึ่งเป็นกระบวนการหมักที่ไม่ต้องการออกซิเจนจึงต้องมีการไล่อากาศด้วยแก๊สไนโตรเจน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้แบคทีเรีย *Clostridium* sp. ในการผลิต โดยเฉพาะ *Cl. acetobutylicum* ที่เป็นสายพันธุ์ที่นิยมใช้มากที่สุด และสายพันธุ์ *Cl. beijerinckii* สามารถใช้ในกระบวนการหมัก ABE ซึ่งให้ผลผลิตที่ดีเช่นกัน การผลิตบิวทานอลชีวภาพโดยเชื้อจุลินทรีย์ได้ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1861 โดยหลุยส์ ปาสเตอร์ ต่อมาในปี ค.ศ. 1905 ชาร์ดินเจอร์ ค้นพบอะซิโตนจากกระบวนการเดียวกันกับหลุยส์ ปาสเตอร์ โดยกระบวนการหมักถูกพัฒนาขึ้นเนื่องมาจากปัญหาการขาดแคลนยางธรรมชาติใช้บิวทานอลชีวภาพเป็นสารตั้งต้นของการผลิตปิตาไดอินซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักของการผลิตยางสังเคราะห์ ส่วนอะซิโตนนั้นมีความสำคัญในการนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตตัวถูกระเบิดในสงครามโลกครั้งที่ 1 ในยุคเวลาสงครามโลกครั้งที่ 1 อุตสาหกรรมการผลิต ABE โดยใช้จุลินทรีย์ *Clostridium* sp. ประสบความสำเร็จอย่างยิ่งในช่วงแรกของศตวรรษที่ 20 การผลิตอะซิโตน-บิวทานอล โดยจุลินทรีย์ชนิดเดียวแบบบริสุทธิ์ (Pure culture) นับเป็นการผลิตสารเคมีระดับ

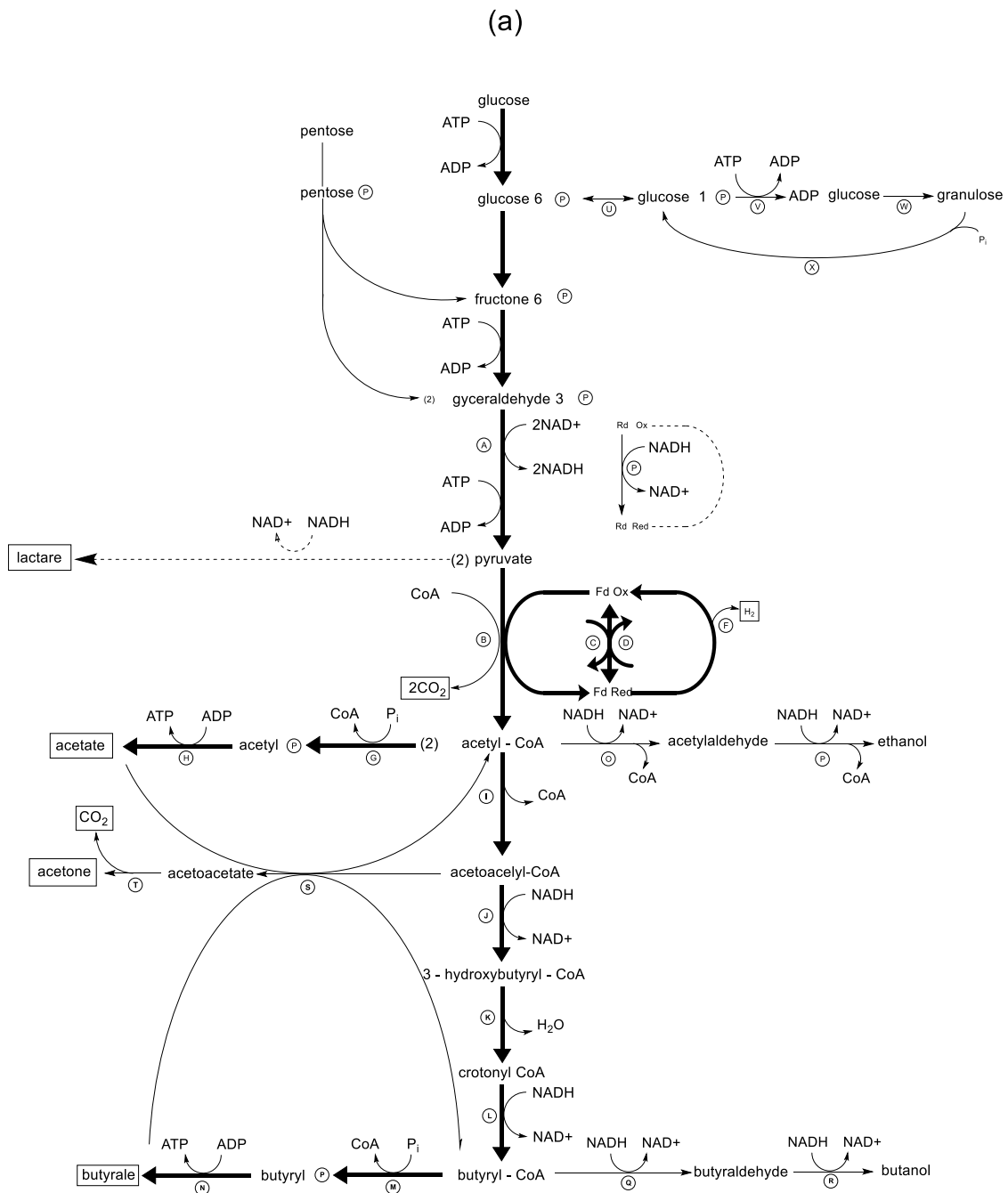
อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ด้วยจุลินทรีย์เช่นเดียวกับกระบวนการหมักขนาดใหญ่ภายใต้ภาวะปลอดเชื้อ ดังนั้นจึงเห็นความสำคัญการพัฒนาต่อไปสู่กระบวนการหมักสมัยใหม่ ในระยะแรกการผลิตอะซิโตนเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการเพื่อใช้ในการผลิตชนวนระเบิดที่ประกอบด้วยไนโตรกลีเซอรินและเซลลูโลสไนเตรท ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตระเบิดจึงมีโรงงานผลิตอะซิโตนจากจุลินทรีย์นี้แพร่หลายไปในอเมริกาและแคนาดา และโรงงานเหล่านี้ได้ปิดลงหลังสิ้นสุดสงครามเนื่องจากความต้องการอะซิโตนลดน้อยลง โรงงานการผลิตของวิทแมนน์ (Weizmann) ได้สิ้นสุดลงจึงมีโรงงานใหม่ๆเกิดขึ้นมากมายเพื่อการผลิตอะซิโตน และบิวทานอลทั้งในญี่ปุ่น อินเดียออสเตรเลียและอเมริกาใต้โดยใช้ *C. acetobutylicum* เป็นหลักในการผลิต ในยุคปี 1950-1960 กระบวนการหมักเพื่อให้ ได้ ABE หยุดชะงักทั้งหมดทั้งในยุโรปและอเมริกาเหนือ เนื่องจากไม่สามารถแข่งขันได้กับวิธีการสังเคราะห์ทางปิโตรเคมีในประเทศจีน^[5] ความสำคัญของกระบวนการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ดังกล่าว โดยกระบวนการหมักเริ่มลดลงภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 แต่กลับมาเริ่มได้รับความสนใจมากขึ้นในปี ค.ศ. 1973 และปี ค.ศ.1979 เป็นต้น เนื่องจากราคาน้ำมันดิบของโลกเริ่มมีราคาสูงขึ้น แต่ถึงอย่างไรก็ตาม กระบวนการหมักดังกล่าวก็ยังมียุทธศาสตร์ในการผลิตที่ค่อนข้างสูงอยู่เมื่อเทียบกับกระบวนการสังเคราะห์จากปิโตรเลียม^[4]

ชีวเคมีของกระบวนการหมัก ABE

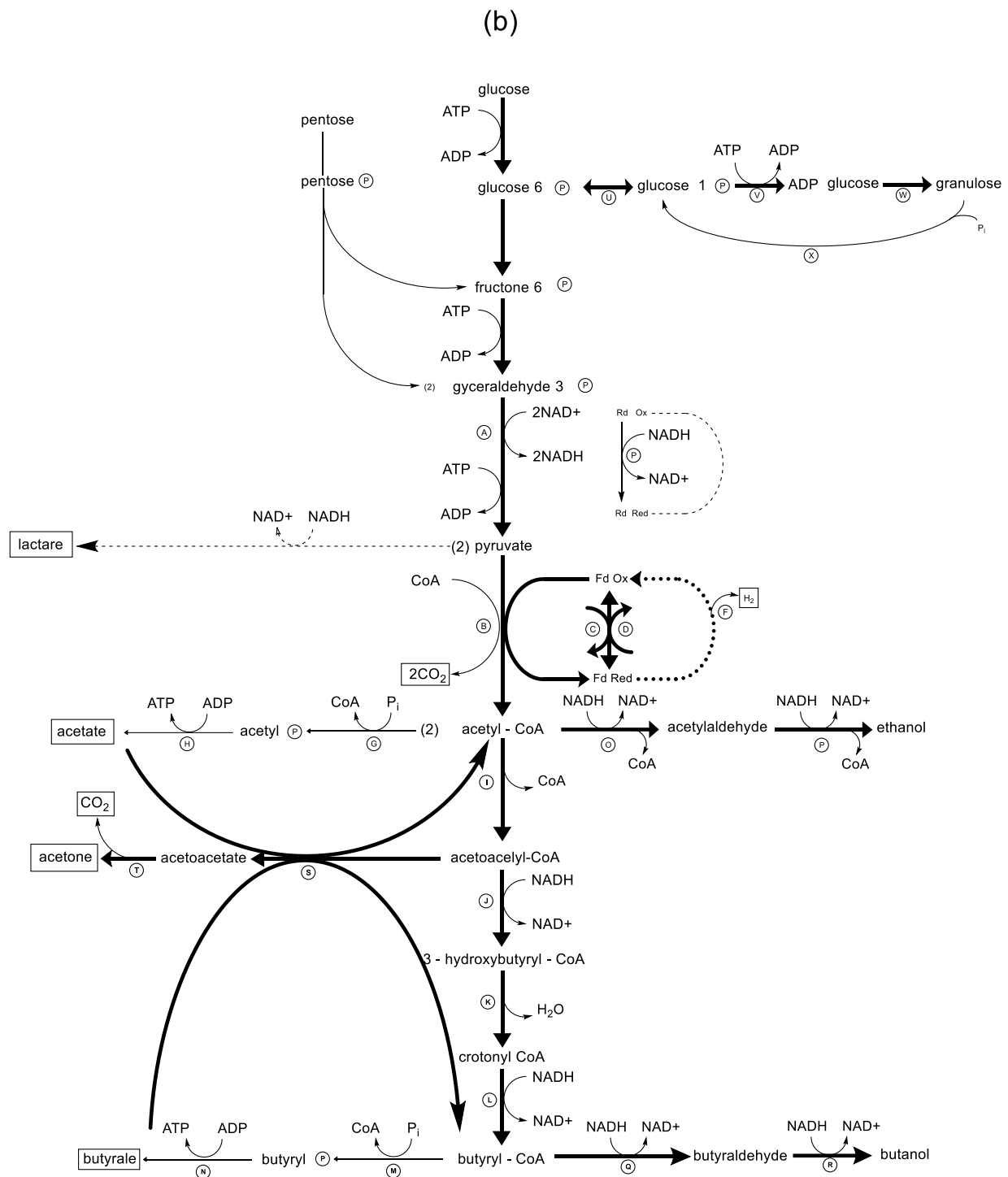
การหมัก ABE เป็นปฏิกิริยาที่ผลิตได้จากน้ำตาลกลูโคส โดยใช้ *Clostridium* ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นพิษคือไม่สามารถเจริญได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน นอกจากนี้ยังสามารถผลิตเอทานอลได้ ดังนั้นการหมัก ABE แบคทีเรีย *Clostridium* จะพบได้ในดินและจะหลั่งอะไมเลส ไซลาลเนส โปรเตเอส และไลเปส ออกจากเซลล์ โดยแบคทีเรียนี้มีสองสายพันธุ์ที่ใช้ในการหมักอะซิโตน-บิวทานอล ได้แก่ *Weizmann* จะผลิตบิวทานอลชีวภาพจากแป้งและ *Saccaro* ผลิตบิวทานอลจากซูโครส^[6]

การหมักของแบคทีเรียในกลุ่ม *Clostridium* sp. สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะของการสร้างกรดอินทรีย์ (Acidogenic phase) และระยะของการสร้างตัวทำละลายอินทรีย์ (Solventogenic phase) วิถีทางชีวเคมีของแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนอนุพันธ์ของสารประกอบประเภทคาร์โบไฮเดรต ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ และตัวทำละลายอินทรีย์ รวมทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน แสดงดังภาพที่ 3a และ 3b ทั้งนี้น้ำตาลในกลุ่ม Hexose (C6) จะถูกดึงเข้าสู่วิถีของ Embden-Meyerhof glycolytic pathway (EMP) ในระหว่างเกิดเมแทบอลิซึมของแบคทีเรียเพื่อเปลี่ยนเป็นกรดไพรูวิก โดยน้ำตาล 1 โมเลกุล จะสามารถเปลี่ยนเป็นกรดไพรูวิกได้ 2 โมเลกุล พร้อมกับปล่อยพลังงาน ATP อีก 2 โมเลกุล และ $\text{NADH}^+ \text{H}^+$ จำนวน 2 โมเลกุลด้วย ส่วนน้ำตาล Pentose (C5) จะถูก Metabolized ด้วย วิถี Pentose phosphate เกิด Fructose-6-phosphate และ Glyceraldehyde-3-phosphate ตามลำดับก่อนจะเข้าสู่วิถี Embden-Meyerhof glycolytic ต่อไป กรดไพรูวิกที่สร้างขึ้นจากวิถี EMP จะถูกเปลี่ยนเป็น Acetyl-CoA และคาร์บอนไดออกไซด์ ลด Ferredoxin โดยเอนไซม์ Pyruvate-ferredoxin oxidoreductase ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น Coenzyme A (CoA) ทั้งนี้ Acetyl-CoA ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าวจะถูกใช้เป็นสารตั้งต้นของทุกการสร้างผลผลิตในกระบวนการหมัก โดย Acetyl-CoA 2 โมเลกุลจะถูกเปลี่ยนเป็น Acetoacetyl-CoA ต่อมาจะถูกใช้ในการสร้างกรดบิวทิริกโดยจะทำให้ค่า pH ของน้ำหมักลดลงในช่วงนี้

นอกจากนี้ Acetoacetyl-CoA ยังถูกใช้เพื่อสร้างอะซิเตท ต่อมาอะซิเตทจะถูกเปลี่ยนเป็นอะซิโตนและคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยเอนไซม์ในระบบ Acetoacetate decarboxylase ปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้ ทั้งนี้กลไกการผลิตอะซิโตนนั้น เพื่อป้องกันการผลิตกรดบิวทิริกในปริมาณที่เป็นพิษและช่วยกำจัด 2 ปฏิกิริยาที่สร้าง NAD^+ ด้วย ซึ่งถ้าต้องการสร้าง NAD^+ แบคทีเรียจะมีกลไกในการเปลี่ยน Butyrate กลับไปเป็น Butyryl-CoA แล้ว Butyryl-CoA จะถูกลดรูปเป็นบิวทานอลชีวภาพต่อไป นอกจากนี้การผลิตบิวทานอลชีวภาพจะมากกว่าการผลิตเอทานอลชีวภาพและแก๊สไฮโดรเจน^[2]



ภาพที่ 3(a) วิถีทางชีวเคมีของแบคทีเรีย *Cl. Acetobutylicum*



ภาพที่ 3(b) วิธีทางชีวเคมีของแบคทีเรีย *Cl. Acetobutylicum*

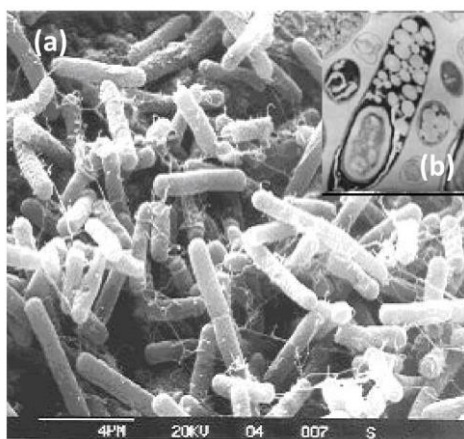
ชนิดของเอนไซม์แสดงตามตัวอักษร ดังนี้ (A) glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase (B) pyruvate-ferredoxin oxidoreductase (C) NADH-ferredoxin oxidoreductase (D) NADPH-ferredoxin oxidoreductase (E) NADH rubredoxin oxidoreductase (F) hydrogenase (G) phosphate acetyltransferase (phosphotransacetylase) (H) acetate kinase (I) thiolase (acetyl-CoA acetyltransferase) (J) 3-hydroxybutyryl-CoA dehydrogenase (K) crotonase (L) butyryl-CoA

dehydrogenase (M) phosphate butyltransferase (phosphotransbutyrylase) (N) butyrate kinase (O) acetaldehyde dehydrogenase (P) ethanol dehydrogenase (Q) butyraldehyde dehydrogenase (R) butanol dehydrogenase (S) acetoacetyl- CoA: acetate/ butyrate: CoA transferase (T) acetoacetate decarboxylase (U) phosphoglucomutase (V) ADP-glucose pyrophosphorylase (W) granulose (glycogen) synthase (X) granulose phosphorylase

จุลินทรีย์

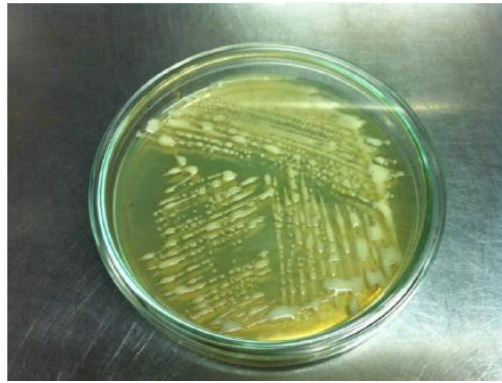
แบคทีเรีย *Clostridia* เป็นแบคทีเรียแกรมบวกสามารถสร้างสปอร์ได้ เจริญในสภาวะไร้ออกซิเจน และสามารถเคลื่อนที่ได้ ทั้งนี้บางสายพันธุ์สามารถสร้างสารพิษ (Exotoxin) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคต่างๆ ได้ เช่น *Cl. tetanus* sp., *Cl. botulum* sp. เป็นต้น ช่วงศตวรรษที่ 20 แบคทีเรีย *Clostridia* ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีความสามารถในการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ โดยเฉพาะสายพันธุ์ *Cl. Acetobutylicum* sp. และ *Cl. beijerinckii* sp. ซึ่งแบคทีเรียดังกล่าวสามารถเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตหลายชนิดให้เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย เช่น อะซิโตน บิวทานอล และเอทานอล ด้วยกระบวนการหมัก ABE ในสภาวะที่เหมาะสมแบคทีเรียในกลุ่มนี้จะผลิตผลิตภัณฑ์หลักเป็นบิวทานอลและอะซิโตน แต่ถ้าสภาวะที่ไม่เหมาะสมแบคทีเรียในกลุ่มนี้จะผลิตอะซิโตนและเอทานอลเป็นผลผลิตหลัก ต่อมาแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์นี้ถูกนำไปพัฒนาเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตตัวทำละลาย อินทรีย์ (อะซิโตน บิวทานอล และเอทานอล) ซึ่งแบคทีเรียดังกล่าวสามารถผลิตตัวทำละลายบิวทานอล อะซิโตน และเอทานอลจากแป้ง และน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม (Hexose) หรือน้ำตาลที่มี คาร์บอน 5 อะตอม (Pentose) ได้ในอัตราส่วน 6:3:1 ตามลำดับ [2,7]

Cl. acetobutylicum เป็นแบคทีเรียที่เจริญได้ 20-47 °C เจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 37 °C และเป็นแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต (Obligate anaerobic bacteria) ย้อมติดสีแกรมบวก (Gram positive) มีรูปร่างเป็นแท่ง (Rods shape) (ภาพที่ 4(b)) ขนาด 0.6 – 0.9 x 2.4-4.7 µm เคลื่อนที่โดยแฟลกเจลลา (Peritrichous flagella) สร้างเอนโดสปอร์รูปไข่ (Oval) มีตำแหน่งเอนโดสปอร์ค่อนข้างไปทางปลายเซลล์ข้างใดข้างหนึ่ง (Subterminal) ดังภาพที่ 4(b) ไม่มีเอกโซสปอเรียม (Exosporium) ไม่มียางค์ (Appendage) ผนังเซลล์ประกอบด้วย DL-diaminopimelic acid ลักษณะโคโลนีเป็นแบบกลม (Circular) ขอบไม่เรียบ (Irregular) เส้นผ่าศูนย์กลาง 3-5 µm สีของโคโลนีเป็นสีครีมผิวเป็นมันและโปร่งแสง^[8]



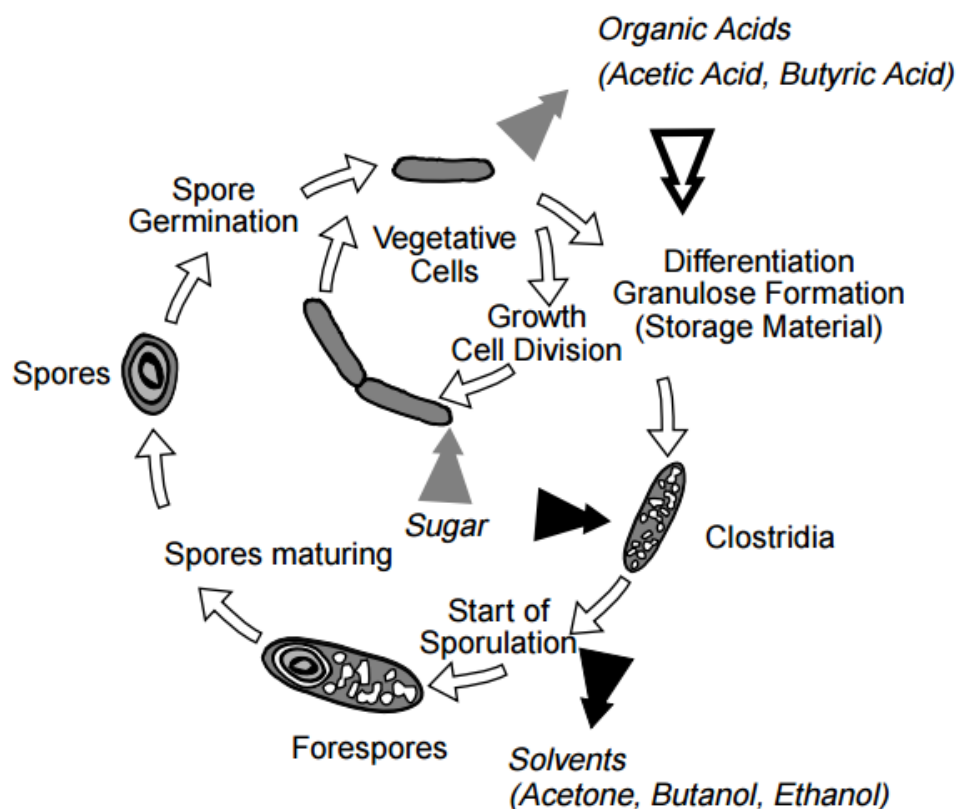
ภาพที่ 4 ลักษณะรูปร่างของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

a) เซลล์ปกติ (Vegetative cells) และ b) สปอร์ (Spore formed cells)



ภาพที่ 5 ลักษณะโคโลนีของแบคทีเรีย *Clostridium acetobutylicum*^[9]

วงจรชีวิตและการเจริญของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* สามารถแบ่งได้ 4 รูปแบบ ซึ่งมีลักษณะการเจริญที่ต่างกันอย่างชัดเจนและสอดคล้องกับการสร้างผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 6 ได้แก่ 1) การเจริญในสภาวะปกติ (Vegetative cell) จะพบเซลล์ที่มีรูปร่างเป็นท่อน (Rods-shaped) ซึ่งอาจจะพบในลักษณะที่เป็นเซลล์เดี่ยว (Single cell) หรืออยู่กันเป็นคู่ (Pair) ตลอดจนอยู่เรียงกัน เป็นสายโซ่ยาวก็ได้ 2) รูปร่างแบบคลอสตริเดีย (Clostridia) เซลล์จะมีลักษณะคล้ายกระบอกยาสูบ (Cigar-shape) การเจริญในขั้นนี้เซลล์จะมีการสร้างสารพวก Granulose สะสมภายในเซลล์ทำให้เซลล์ เกิดการพองขึ้น 3) Forespores จะเกิดขึ้นในกรณีที่สภาวะแวดล้อมเริ่มไม่เหมาะสมต่อการ เจริญเติบโตส่งผลให้เซลล์เริ่มมีการสร้าง Forespores และจะถูกพัฒนาเป็นสปอร์ต่อไป 4) รูปแบบสปอร์ (Spore) เป็นขั้นที่เซลล์สร้างโครงสร้างที่เรียกว่าสปอร์เพื่อให้สามารถดำรงชีวิตอยู่ต่อไปในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม^[2]



ภาพที่ 6 วงจรชีวิตของแบคทีเรีย *Cl. acetobutylicum* sp.^[10]

ปัจจัยที่มีผลต่อการหมัก^[2,4]

ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนสภาพจากการผลิตกรดอินทรีย์ไปเป็นการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ มีความยุ่งยากและซับซ้อน จึงมีการวิจัยเพื่อวิเคราะห์สาเหตุของปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหมัก เช่น ชีวมวลที่ใช้การหมัก อุณหภูมิ และชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ เป็นต้น

- แหล่งของสารตั้งต้นและความเข้มข้น

ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตาลเป็นสิ่งสำคัญในการหมักอะซิโตน บิวทานอล และเอทานอล ถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำตาลต่ำ (ต่ำกว่า 20 g/L) การหมักจะมุ่งไปสู่ Acidogenesis phase จะผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ได้เพียงเล็กน้อย ถ้าความเข้มข้นสูงๆ (สูงกว่า 60 g/L) กระบวนการจะผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ได้มากกว่า และที่ความเข้มข้นสูงกว่า 80 g/L น้ำตาลจะไม่ถูกหมักซึ่งเป็นผลมาจากการยับยั้งของผลิตภัณฑ์ (Product inhibition) ขณะที่ความเข้มข้นสูงถึง 120 g/L การหมักจะเกิดขึ้นได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นเพราะการยับยั้งของวัตถุดิบ (Substrate inhibition) กลไกการส่งผ่านน้ำตาลจึงยังไม่เป็นที่เข้าใจชัดเจน การใช้วัตถุดิบอย่างอื่นของ *Cl. Acetobutylicum* เกิดขึ้นผ่าน Symport mechanism เกิดการส่งโปรตอนผ่านเมมเบรน สำหรับน้ำตาลโมเลกุลคู่ เช่น น้ำตาลซูโคส และน้ำตาลมอลโตสจะถูกย่อยโดย Phosphorylase และ Free glucose ที่ได้สามารถเปลี่ยนไปเป็น Glucose-6-phosphate โดย Hexokinase

- อุณหภูมิ

อุณหภูมิในการหมักมีผลต่อการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งอัตราการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการหมักโดยใช้น้ำตาลเป็นวัตถุดิบนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง 30 °C และ 33 °C แต่จะลดลงที่อุณหภูมิ 37 °C ผลที่คล้ายกันนี้ถูกพบในการหมักโดยใช้อาหารสังเคราะห์ (Synthetic medium) โดย Mcneil และ Kristiansen (1985) ทำการทดลอง Mcneil และ Kristiansen พบว่าผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเจริญ และการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ในการหมักของ *Cl. acetobutylicum* คือผลผลิตตัวทำละลายอินทรีย์รวม (Total solvent yield) มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเพราะผลิตอะซิโตนลดลง และพบว่าบิวทานอลชีวภาพไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิในรูปของผลผลิตตัวทำละลายอินทรีย์รวมและอัตราการผลิต ทั้งนี้อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์คือ 35°C

- ออกซิเจน

Cl. acetobutylicum ดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะที่ไร้อากาศ (Obligate anaerobe) การเจริญที่เหมาะสมเกิดขึ้นในน้ำหมักที่มีความต่างศักย์ของรีดอกซ์ในช่วงระหว่าง -250 mV ถึง -400 mV การสัมผัสกับออกซิเจนในการหมักแบบไร้อากาศไม่เป็นอันตรายถ้าเกิดขึ้นเพียงระยะสั้นๆ แต่ถ้าน้ำหมักสัมผัสกับออกซิเจนในปริมาณมากๆ (40-60 μM) การใช้น้ำตาลกลูโคสของจุลินทรีย์จะลดลง การเจริญ การสังเคราะห์ ดีเอ็นเอ (DNA) อาร์เอ็นเอ (RNA) และโปรตีน (Protein) จะหยุดชะงักภายใต้สภาวะที่มีอากาศ (Aerobic condition) จุลินทรีย์จะมีการผลิตบิวไทเรต (Butylate) แต่ไม่ผลิตอะซิเตท (Acetate) หรือมีการผลิตลดลงรวมถึงมีการลดลงของ ATP ในเซลล์ ซึ่งผลของออกซิเจนคือมีการย้อนกลับของปฏิกิริยาทั้งหมดการเจริญและเมแทบอลิซึม (Metabolism) จะกลับคืนสู่สภาพเดิมเมื่อเข้าสู่สภาวะไร้อากาศอีกครั้ง

- ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และผลิตภัณฑ์กรดในขั้นตอนสุดท้าย

น้ำหมักจะใช้ค่า pH เป็นตัวกำหนดการย่อยสลายของน้ำตาล มีหลายงานวิจัยรายงานว่าถ้ารักษาค่า pH ของน้ำหมักไว้ที่ค่าสูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ของการหมักเป็นกรดอินทรีย์ ในทางตรงกันข้ามถ้ารักษา

ค่า pH ไว้ที่ค่าต่ำ ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ ช่วงของ pH ที่จะส่งผลให้มีการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์จะอยู่ในช่วงกว้างมากขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของจุลินทรีย์และสภาวะของการหมัก ช่วงของการหมักที่มีการสร้างตัว ทำละลายอินทรีย์มักอยู่ในช่วง pH 3.8 ถึง 5.5 แต่แบคทีเรียที่ใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรมอย่าง *Cl. acetobutylicum* P262 สามารถผลิตตัวทำละลายอินทรีย์ได้ดีในช่วง pH 6.5 กรดอินทรีย์อย่างอ่อน (Weak organic acid) เช่น กรดอะซิติกและกรดบิวทิริก ถูกสร้างเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย (End-product) ของปฏิกิริยาโดยธรรมชาติแล้วจะเป็นพิษต่อเซลล์และสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) ในรูปที่ไม่แตกตัวที่ความเข้มข้นของกรด สูงๆ ค่า pH ที่ผิวของเยื่อหุ้มเซลล์จะลดลงซึ่งเป็นสาเหตุในการยับยั้งปฏิกิริยาเมแทบอลิซึมทั้งหมดของเซลล์ภายในตัวเซลล์ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าจะมีการสะสมของกรดและการลดลงของค่า pH จึงทำให้อัตราการเจริญลดลงจนกระทั่งหยุดชะงักในที่สุด ถึงแม้ว่าการใช้วัตถุดิบและเมแทบอลิซึมของเซลล์ยังดำเนินต่อไป ดังนั้นจึงมีข้อเสนอว่าจุดที่เปลี่ยนเป็น Solventogenesis ก็คือกลไก Detoxification ของเซลล์เพื่อกำจัดผลที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการยับยั้งเมื่อกรดในขั้นตอนสุดท้ายมาถึงระดับช่วงที่มีพิษ โดยทั่วไปการเริ่มต้นของ Solventogenesis จะเกิดขึ้นร่วมกันขณะที่ pH ของสารอาหารมีค่าต่ำและมีกรดในรูปที่ไม่แตกตัวอยู่ในช่วงวิกฤต ดังนั้นความเข้มข้นของบิวไทเรต จะต่ำที่ค่า pH ต่ำ ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายว่าผลของ pH เป็นผลจากความเข้มข้นของกรดบิวทิริกที่ไม่แตกตัวและสิ่งนี้เป็นปัจจัยควบคุมการผลิตตัวทำละลายอินทรีย์

ปัญหาในด้านความเป็นพิษของบิวทานอลชีวภาพที่มีผลต่อเซลล์แบคทีเรีย ^[11]

ในเชิงเทคนิคที่สำคัญในการทำให้ผลผลิตของบิวทานอลชีวภาพต่ำเกิดจากเชื้อแบคทีเรียซึ่งจะอ่อนไหวต่อความเป็นพิษของบิวทานอลชีวภาพ โดยที่บิวทานอลชีวภาพความเข้มข้นเพียงร้อยละ 2 โดยน้ำหนักก็จะเพียงพอที่จะทำให้เชื้อแบคทีเรียตายลง ซึ่งจะส่งผลในด้านลบต่อการพัฒนาการผลิตบิวทานอลชีวภาพในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งบิวทานอลชีวภาพจะถูกดูดซับที่เยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย และจะทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ในส่วนที่เป็นฟอสโฟลิปิด (Phospholipid) และกรดไขมันชนิดต่างๆ ส่งผลทำให้ความสามารถในการคัดเลือกผ่านสารของเยื่อหุ้มเซลล์สูญเสียไปทำให้เซลล์แบคทีเรียตายไปในที่สุด จากปัญหาหลักในการหมัก ABE คือ การยับยั้งปฏิกิริยาของเชื้อแบคทีเรีย ดังนั้นจึงมีการพัฒนาแนวความคิดที่จะทำการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากกระบวนการควบคู่กับกระบวนการหมัก (Extractive fermentation หรือ In situ product removal) ซึ่งจะเป็นการพัฒนากระบวนการหมักไปพร้อมกับการแยกผลิตภัณฑ์ซึ่งจะส่งผลดีในด้านต่างๆ ได้แก่ ลดความเป็นพิษที่มีต่อเชื้อแบคทีเรียลงจะทำให้เชื้อแบคทีเรียสามารถผลิตบิวทานอลชีวภาพได้มากขึ้น สมดุลของสมการจะไปข้างหน้าเนื่องจากการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากกระบวนการอยู่ตลอดเวลา การสูญเสียผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลง และเป็นการลดขั้นตอนของการผลิตโดยรวมซึ่งข้อได้เปรียบต่างๆ เหล่านี้จะนำไปสู่การลดขนาดของการหมักลง (เมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตของบิวทานอลชีวภาพที่เท่ากัน) ทำให้สามารถลดต้นทุนทั้งต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรต่างๆ ลงได้

3. บริษัทผู้ผลิตและจัดจำหน่าย

3.1 บริษัทผู้ผลิต Bio-butanol

3.1.1 ภายในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 รายชื่อบริษัทผู้ผลิต Bio-butanol ภายในประเทศไทย

บริษัทผู้ผลิต	ที่อยู่	เบอร์โทร	ประเทศ	เว็บไซต์
บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน)	เลขที่ 8 ถนน ไอ-แปด ตำบลมาบตาพุด อำเภอ เมืองระยอง จังหวัด ระยอง 21150	038-971191	ไทย	http://www.pttgcgroup.com
ไทยออยล์	42/1 หมู่ที่ 1 ถนน สุขุมวิท กิโลเมตรที่ 124 ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสครี ราชรา จังหวัดชลบุรี 20230	0-38408500, 0-38359000, 0-38351555	ไทย	https://www.thaioilgroup.com

3.1.2 ต่างประเทศ แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 รายชื่อบริษัทผู้ผลิต Bio-butanol ในต่างประเทศ

Manufacturers	Address	Contact	Country	Website
BASF , MALAYSIA	No. 2, Jalan Astaka U8/87 Bukit Jelutong, Seksyen U8 40150 Shah Alam, Selangor	+603 5628 3888	Malaysia	https://www.basf.com/th/en.html
S.C. OLTCHIM S.A.	1 Uzinei Street, Ramnicu Valcea, postal code 240050	0250-701200	Romania	http://www.oltchim.ro/
Eastman Chemical	347 Business Park Dr.sun Prairie, WI 53590 USA	6088377771	United States	http://www.eastman.com
Gevo, Inc	345 Inverness Drive South, Building C, Suite 310 Englewood, CO 80112	303.858.8358	United States	http://www.gevo.com
Green Biologics Limited – H.Q	80F Park Drive Milton Park Abingdon, Oxon United Kingdom OX14 4RY	+44 1235 435710	United Kingdom	http://www.greenbiologics.com

Manufacturers	Address	Contact	Country	Website
Butamax® Advanced Biofuels LLC	Experimental Station / 356200 Powder Mill Road P.O. Box 8352 Wilmington, DE 19803	+1 302-695- 3216	United States	http://www.butamax.com
Abengoa	C/ Energía Solar nº 1 Palmas Altas 41014-Seville	(+34) 954 93 70 00	Kingdom of Spain	http://www.abengoa.com/
amyris	Rua John Dalton, 301 - Bloco B - Edifício 3 Condominio Techno Plaza	+55 (19) 3783-9450	Brazil	https://amyris.com/

3.2 บริษัทผู้จัดจำหน่าย

3.2.1 ภายในประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 รายชื่อบริษัทผู้จัดจำหน่าย Bio-butanol ภายในประเทศ

บริษัทผู้จำหน่าย	ที่อยู่	เบอร์โทร	ประเทศ	เว็บไซต์
ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด	36/5 ม.9 ต.นาดี อ.เมือง สมุทรสาคร จ.สมุทรสาคร 74000	034854888, 034496284	ไทย	http://www.thaipolychemicals.com/
เคทีซี เคมีคอล จำกัด	1/1 ซอย ทับยาว 1, แขวงทับยาว เขต ลาดกระบัง, กรุงเทพฯ 10520	0 2988 5201-4	ไทย	http://www.ktc-chemical.com/
โกลบอล เคมีเทรดดิ้ง จำกัด	140/31 ซ.กิ่งแก้ว9/1 ม. 12 ต.ราชาเทวะอ.บาง พลีจ.สมุทรปราการ	02 763 7782-4	ไทย	www.globalchemie.co.th
TAS SOLVENT AND COMMODITY COMPANY LIMITED	ซอย ชินเขต 1 แขวง ทุ่ง สองห้อง เขต หลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210	02-954-1229	ไทย	http://www.taspetro.com/

บริษัทผู้จำหน่าย	ที่อยู่	เบอร์โทร	ประเทศ	เว็บไซต์
PRIMITY COMPANY LIMITED	89 ซอย เทศบาลรังสรรค์ ใต้ แขวง ลาดยาว เขต จตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900	093 614 5 560	ไทย	http://www.primity.co.th/

3.2.2 ต่างประเทศ แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 รายชื่อบริษัทผู้จัดจำหน่าย Bio-butanol ในต่างประเทศ

Manufacturers	Address	Contact	Country	Website
Shaanxi TOP Pharm Chemical Co., Ltd.	No. 108 west sector, south erhuan, Xi'an China Zip : 710065	86-29- 85733402	China	http://www.top-pharmchem.com/
supreme globe exports Pvt. Ltd	Banashankari Stage II, Yellappa Garden, Yellappa Chetty Layout, Sivanchetti Gardens	+91 80 6999 9974	India	http://www.supremeglobe.com
SKY PETRO- CHEM PTE. LTD.	No. 1 North Bridge Road # 18-09, High Street Centre, Singapore	+65 6238 5502	Singapore	http://www.skypetro-chem.com
Beckmann- Kenko GmbH	Auf dem Scheunenbrink 10, 27211 Bassum	+49 4241 9308 0	Germany	https://www.beckmann-kenko.com/
Parchem	415 Huguenot Street New Rochelle, New York 10801	(914) 654- 6800	United states	http://www.parchem.com/

4. การประยุกต์ใช้ Bio-butanol ในอุตสาหกรรม

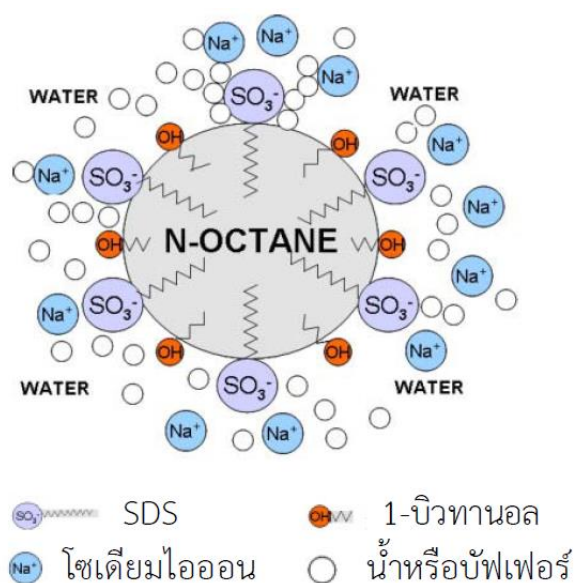
4.1 การนำไปประยุกต์ใช้ในการแพทย์

บิวทานอลชีวภาพมีประโยชน์มากมายในการแพทย์ เช่น บิวทานอลชีวภาพได้ถูกดัดแปลงมาเป็นบิวทิลเมทาคริเลตเพื่อนำมาทำเป็นเรซินเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ด้านทันตกรรม^[12] รวมทั้งใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมเภสัชภัณฑ์ วิตามิน และฮอร์โมนได้อีกด้วย^[2] นอกจากนี้ยังมีการนำบิวทานอลชีวภาพมาใช้เป็นตัวสกัดสมุนไพรเพื่อศึกษาประโยชน์ของสมุนไพรต่างๆ เพื่อนำไปใช้รักษาโรคหรืออาการเจ็บป่วย เช่น

สารที่สกัดจากบิวทานอลชีวภาพของใบเสลดพังพอนตัวเมีย มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อไวรัส *Varicella zoster* ซึ่งเป็นเชื้อไวรัสชนิดที่ทำให้เกิดโรคและอีสุกอีใส^[13]

จากการทดสอบความสามารถการยืดอายุของหนอน *Caenorhaditis elegans* ใช้สารสกัดบิวทานอลชีวภาพที่ได้จากเมล็ดสนหางสิงห์ พบว่าสนหางสิงห์สามารถช่วยยืดอายุการมีชีวิตของหนอนได้ ทั้งในสภาวะปกติและในสภาวะเครียด โดยไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร และยังพบว่าสนหางสิงห์มีฤทธิ์ลดอนุมูลอิสระ ช่วยควบคุมการเพิ่มโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการทนต่อสภาวะเครียดมากขึ้น และยังมีฤทธิ์ลดแรงตึงผิวที่เกิดจากความเสื่อมของไขมัน Lipofuscin ในหนอน *Caenorhaditis elegans* ได้ จึงสรุปได้ว่าสารสกัดบิวทานอลชีวภาพ ที่ได้จากเมล็ดสนหางสิงห์ มีฤทธิ์ช่วยยืดอายุ โดยไปทำลายอนุมูลอิสระ ลดปริมาณของ Lipofuscin และเพิ่มความสามารถในการทนต่อสภาวะความเครียด จึงเป็นผลการทดสอบที่มีประโยชน์ต่อการแพทย์ในการศึกษาเกี่ยวกับยาบำรุงร่างกายต่อไป^[14]

นอกจากนี้บิวทานอลชีวภาพสามารถประยุกต์ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของยาต่อความสามารถการแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ในระบบต่างๆของร่างกาย ด้วยเทคนิคไมโครอิมัลชันอิเล็กโตรโคโนติกโครมาโทกราฟี หลักการของเทคนิคนี้คือ ใช้หยดน้ำมันขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรที่นิยมใช้ ได้แก่ เฮกเซน เฮปเทน และออกเทน เป็นต้น โดยมีการเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เช่น SDS และสารร่วมลดแรงตึงผิว (Co-surfactant) เช่น บิวทานอลชีวภาพลงไปเพื่อช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างหยดน้ำมันซึ่งทำหน้าที่เหมือนเฟสหนึ่งกับเฟสเคลื่อนที่ซึ่งเป็นสารละลายยาตัวเฟส ทำให้หยดน้ำมันมีความเสถียรเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวยังทำให้สภาพผิวของหยดน้ำมันเป็นลบ ลักษณะไมโครอิมัลชันแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ลักษณะไมโครอิมัลชันโดยมีออกเทนเป็นหยดน้ำมัน โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิว และ บิวทานอลชีวภาพเป็นสารร่วมลดแรงตึงผิว^[15]

4.2 การนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์

จุดเด่นของบิวทานอลชีวภาพที่เหนือกว่าเอทานอลชีวภาพ คือสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ได้โดยตรง ในขณะที่เอทานอลจะต้องมีการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการ เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง ทั้งนี้บิวทานอลสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านการ

ดัดแปลง และไม่ส่งผลต่อเครื่องยนต์ เนื่องจากมีคุณสมบัติเฉพาะทางกายภาพและเคมีรวมทั้งให้ค่าพลังงานที่ดีกว่าเอทานอลชีวภาพ เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานระหว่างบิวทานอลชีวภาพกับเอทานอลชีวภาพ ตามตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าบิวทานอลชีวภาพมีค่าพลังงานใกล้เคียงกับแก๊สโซลีนบริสุทธิ์ ในขณะที่สารผสมของเอทานอลชีวภาพกับแก๊สโซลีน ต้องใช้ปริมาณมากกว่าจึงจะให้ค่าพลังงานที่เท่ากัน นอกจากนี้บิวทานอลชีวภาพสามารถผสมกับแก๊สโซลีน ได้ในอัตราส่วนต่างๆ ได้ ในทางตรงกันข้ามเอทานอลชีวภาพสามารถนำไปผสมกับแก๊สโซลีนได้บางส่วนเท่านั้น เช่น ในประเทศบราซิลได้มีการใช้สารผสมระหว่างเอทานอลชีวภาพและแก๊สโซลีนแค่ 23% นอกจากนี้ ในแถบทวีปยุโรปบางประเทศรวมทั้งประเทศสหรัฐอเมริกาจะใช้สารผสมระหว่างเอทานอลชีวภาพและแก๊สโซลีนเพียง 10% เท่านั้น นอกจากนี้การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่มีบิวทานอลชีวภาพเป็นส่วนผสมพบว่าไอเสียที่ออกมาปราศจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน และอนุพันธ์ของไนโตรสออกไซด์ที่เป็นพิษ แสดงว่าบิวทานอลชีวภาพเป็นมิตรต่อสภาพแวดล้อมเมื่อเทียบกับการใช้เอทานอลชีวภาพ^[2]

4.3 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการแต่งกลิ่นอาหาร

ในปัจจุบันสารเติมแต่งกลิ่นอาหารมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อรสชาติ และความอร่อยของผลิตภัณฑ์อาหาร สารเติมแต่งกลิ่นอาหารสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลิ่นผลไม้ กลิ่นอาหาร และกลิ่นหลากหลายประเภท บิวทานอลชีวภาพเป็นหนึ่งในส่วนประกอบดังกล่าวเพื่อนำมาทำให้เป็นสารเติมแต่งกลิ่นอาหาร เช่น นำกรดอะซิติกทำปฏิกิริยากับบิวทานอลชีวภาพซึ่งเป็นปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจะได้กลิ่นคล้ายกล้วยหอม^[16] กลิ่นมะม่วง ได้จากการแปรรูปโดยผ่านกระบวนการให้ความร้อนทำให้สารหอมระเหยออกไปหมด และได้มีการศึกษาสารหอมระเหยในมะม่วงมากกว่า 20 งานวิจัย เพื่อแยกโครงสร้างและส่วนประกอบของมะม่วง และพบว่า "กลิ่นมะม่วง" ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน 49 ชนิด เช่น cis-Ocimene, trans-Ocimene, Limonene และ b-caryophellene เป็นต้น แอลกอฮอล์ 28 ชนิด เช่น 1-Butanol, 1-Hexanol, trans-2-Hexanol, cis-3-Hexanol, Linalool และ b-phenylethyl Alcohol เป็นต้น อัลดีไฮด์ 14 ชนิด เช่น trans-2-hexenal และ trans-2-cis-6-Nonadienol เป็นต้น คีโตน 10 ชนิด เช่น 3-Hydroxy-2-Butanone และ b-Ionone เป็นต้น กรดทั้งหมด 4 ชนิด คือ Acetic acid, Octanoic acid และ 3-Hydroxy octanoic acid เป็นต้น เอสเทอร์ 43 ชนิด เช่น Ethyl Acetate, cis-Hexenyl Acetate (Propionate, Butyrate, Valerate, Hexanoate) Methyl (Ethyl, Butyl Iso-butyl, Isoamyl, Hexyl) Butyrate Methyl (Ethyl, Butyl) Hexanoate เป็นต้น แลคโตน 8 ชนิด เช่น g-Decalactone และ d-Decalactone เป็นต้น สารประกอบซัลเฟอร์ 15 ชนิดเช่น Ether, Halogen, Nitrite, phenol, furan และ epoxide เช่น Dimethyl Sulfide, Benzothiazole, 2,5-Dimethyl-4-Hydroxy-2H-Furanone, 3-Acetyl Furan เป็นต้น^[17]

4.4 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมสิ่งทอนิยมนำบิวทานอลชีวภาพประยุกต์ใช้เพื่อเป็นตัวทำละลาย เช่น การนำบิวทานอลชีวภาพมาทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัส ออกซิคลอไรด์ (Phosphorus oxychloride) จะได้ ไตรบิวทิลฟอสเฟตเอสเทอร์ (Tributyl phosphate; TBP) ซึ่งเป็นสารที่นำมาใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ^[18]

4.5 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร

นำบิวทานอลชีวภาพมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร เช่น นำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวทำละลายในการกำจัดแมลงและศัตรูพืช สารเคมีที่นำมาใช้ในการกำจัดแมลงและศัตรูพืช เช่น พาราไทออน (Parathion) ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ละลายน้ำได้ แต่ละลายได้ดีในเอทานอล ไดเอทิลอีเทอร์ ไซลีน และบิวทานอล^[19]

4.6 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสารเคลือบ

นำบิวทานอลมาผลิตเป็นสารเมทิลเอทิลคีโตนเพื่อใช้เป็นตัวทำละลายสี แล็กเกอร์ และกาว เพื่อใช้ในการเคลือบ รักษา หรือยึดติด^[20]

4.7 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางมีการนำบิวทานอลชีวภาพมาใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวร่วมในระบบไมโครอิมัลชันซึ่งเป็นรูปแบบผลิตภัณฑ์จากนาโนเทคโนโลยีรูปแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการศึกษาวิจัย เพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางสำหรับผิวพรรณและเส้นผม^[21]

5. ความรู้และข่าวสารใหม่ๆ

บริษัท บีพี ซึ่งเป็นบริษัทยักษ์ใหญ่ในวงการอุตสาหกรรมน้ำมันของยุโรป ลงทุนร่วมกับบริษัท ดูปองต์ ซึ่งเป็นเจ้าฟ่องการอุตสาหกรรมเคมีในสหรัฐอเมริกา เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ อันจะเป็นเชื้อเพลิงพลังงานชีวภาพรุ่นใหม่ ที่มีชื่อว่า ไบโอบิวทานอล (Biobutanol) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เป็นพลังงานทางเลือกใหม่แก่ผู้บริโภค^[22] ซึ่งในปัจจุบันมีคนจำนวนไม่น้อยที่สนใจในการผลิตบิวทานอลมากขึ้น เช่น กลุ่มนักวิจัยนำโดยวิศวกรสิ่งแวดล้อมที่มหาวิทยาลัยกรุงวอชิงตันได้คิดค้นเทคนิคใหม่ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีคุณภาพเหนือกว่าเอทานอล เชื้อเพลิงชนิดนี้เรียกว่า บิวทานอล ซึ่งได้มาจากวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติเป็นเยื่อไม้ ตั้งแต่จำพวกก้านไม้และฟางข้าวรวมทั้งเศษตักข้างของการเกษตรที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส บิวทานอลได้ถูกพิจารณาว่าเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่ดีกว่าเอทานอลเพราะถูกกักต่อน้อยกว่าและมีค่าพลังงานสูงกว่า ผู้ช่วยศาสตราจารย์ลาร์ส แอนจีแนน วิศวกรด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมได้ร่วมมือกับแผนกวิจัยการเกษตรของสหรัฐอเมริกานำเส้นใยข้าวโพดที่เหลือจากการผลิตเอทานอล มาผสมในเครื่องย่อยที่เต็มไปด้วยเชื้อจุลินทรีย์จำนวนหลายสายพันธุ์ที่ได้ถูกคัดเลือกมาเพื่อที่จะเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นบิวเทอเรท จากนั้นส่วนผสมของบิวเทอเรทก็จะถูกส่งให้ศาสตราจารย์ นาซิบ คูเรซี เพื่อที่จะเปลี่ยนบิวเทอเรทให้เป็น เอทานอลในเครื่องหมักบรูซ ดิน และไมเคิล คอตต้า สองนักวิจัยที่ USDA ได้ใช้เทคนิคเชิงฟิสิกส์และเคมีเพื่อที่จะทำให้วัตถุดิบที่ย่อยยากตอบสนองต่อการย่อยมากขึ้น ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ทำให้ส่วนผสมจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพ ผู้ช่วยศาสตราจารย์แอนจีแนนทดลองหาสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมที่สุดในการใช้จุลินทรีย์จำนวนที่หลายพันชนิดเปลี่ยนแปลงเส้นใยข้าวโพดเป็นบิวเทอเรทเชื้อจุลินทรีย์เพาะผสมคือหัวใจของการทดลองนี้ ข้อดีคือเราสามารถเปลี่ยนของเสียเกือบทุกชนิดให้เป็นสิ่งมีค่าได้ โดยควบคุมสภาพแวดล้อมของเชื้อจุลินทรีย์เพาะผสม ตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนค่าความเป็นกรดเบส (pH) ของส่วนผสมเชื้อนี้ จะได้ผลผลิตเป็นก๊าซมีเทนถ้าปรับค่า pH ให้เป็นกลาง แต่ถ้าปรับค่า pH ให้ต่ำลงจะได้บิวเทอเรท ถ้าเกิดเชื้อเพาะมีความบริสุทธิ์ต้องระวังสิ่งปนเปื้อนที่จะเปลี่ยนสภาพแวดล้อมของเชื้อชีวมวลที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลสกับลิกนิน มีอยู่มากมายและสามารถปลูกทดแทนได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ดีในการจัดการของเสียที่มีอยู่เยอะ การนำมาใช้ประโยชน์จะช่วยเปิดประตูสู่เศรษฐกิจที่ดีกว่าสำหรับเกษตรกรและชนบท นอกจากนั้นชีวมวลชนิดนี้ไม่ผลิตก๊าซที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน จึงไม่ต้องกังวลเรื่องก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยไปยังชั้นบรรยากาศ ในอีกไม่กี่ปีการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ใช้หลักการของเชื้อจุลินทรีย์เพาะผสมจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือก๊าซไฮโดรเจนในขบวนการรักษาน้ำเสียได้ การขยายตัวของบิวทานอลชีวภาพถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยการร่วมมือกันระหว่างบริษัท DuPont ผู้ผลิตสารเคมีรายใหญ่และบริษัทน้ำมันของอังกฤษร่วมมือกับบริษัท British Sugar ผลิตบิวทานอลชีวภาพจากต้น sugar beets ให้สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันเบนซินในประเทศอังกฤษได้^[23]

เอกสารอ้างอิง

- [1] อินทรา พุกฤษา, อธิพงษ์ สนามโพธิ์, อลิสา วังโน และธัญญารัตน์ พงศ์ทรงกูร. (2010). การคัดแยกและศึกษาคุณสมบัติของแบคทีเรียที่ทนต่อบิวทานอลเพื่อใช้ในการผลิตไบโอบิวทานอล. นิทรรศการโครงการวิทยาศาสตร์ ครั้งที่ 11
- [2] สุนทร กาญจบุรี (2555). การศึกษาผลิตเอซิโตน-บิวทานอล-เอทานอล (เอบีอี) จากมันสำปะหลังโดยกระบวนการหมัก
- [3] Bochman, M. (1999). Advanced Inorganic Chemistry. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Jones, D. T., and Woods, D. R. (1986). Acetone-butanol fermentation revisited. Microbiological Reviews 50, 484–524.
- [5] ชนิกา อื้อพานิช, ชมกฤษ วิรุณานนท์ และ วรุฒิ จุฬาลักษณ์านุกูล (2555). ไบโอบิวทานอล: เชื้อเพลิงเหลวที่กำลังจะมาทดแทนเอทานอล. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 22, 703-709
- [6] Shinya Yokoyama. (2008). แนวทางสำหรับการใช้สารชีวมวล. คู่มือสารชีวมวลเอเชีย
- [7] Lee, S.-M., Cho, M. O., Park, C. H., Chung, Y.-C., Kim, J. H., Sang, B.-I., and Um, Y. (2008a). Continuous butanol production using suspended and immobilized *Clostridium beijerinckii* NCIMB 8052 with supplementary butyrate. Energy and Fuels 22, 3459-3464.
- [8] Jones, D. T., Westhuizen, A. V. D., Long, S., Allcock, E. R., Reid, S. J., and Woods, D. R. (1982). Solvent production and morphological changes in *Clostridium acetobutylicum*. Applied and Environmental Microbiology 43, 1434-1439.
- [9] นางสาวชมพูนุช ล้ออิสระตระกูล. (2555). การผลิตน้ำตาลรีดิวซ์จากผักตบชวาด้วย *Clostridium acetobutylicum* โดยการออกแบบการทดลองตามวิธี Box-Behnken
- [10] Schuster, K. C., van den Heuvel, R., Gutierrez, N. A., and Maddox, I. S. (1998). Development of markers for product formation and cell cycle in batch cultivation of *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824. Applied Microbiology and Biotechnology 49, 669-676.
- [11] ดร. อภิชาติ บุญทาวัน และคณะผู้วิจัย. (2555). การพัฒนาท่อใยกลวงเชิงประกอบสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตเอซิโตน-บิวทานอล-เอทานอลจากมันสำปะหลังโดยใช้ระบบเพอร์แวกเพอร์เรชั่น
- [12] P. Dürre, "Fermentative butanol production—bulkchemical and biofuel," Annals of the New York Academy of Sciences, vol.1125, pp.353-362, 2008.
- [13] <https://medthai.com/เสลดพังพอยตัวเมีย>
- [14] <https://medthai.com/สันทาลิงห้>
- [15] เสาวภาคย์ ธีราทรง. (2557). วิถีวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของยา วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 23 ฉบับที่ 1
- [16] <http://ninlawanta.weebly.com>
- [17] <http://www.flavorseasoning.com>
- [18] Kevin Brigden , Iryna Labunska & David Santillo. (2010). การตรวจสอบสารเคมีอันตรายใน

น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสองแห่งและการปนเปื้อนของสารเคมีในคลองบริเวณ
ใกล้เคียงซึ่งเชื่อมต่อกับแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง ประเทศไทย พ.ศ. 2553. Greenpeace Research
Laboratories Technical Note 06

[19] <http://oldweb.pharm.su.ac.th/>

[20] Barbara SMERKOWSKA. (2011). Biobutanol – production and application in diesel
Engines. science technique CHEMIK 65, 549-556

[21] ณัฐธิดา ภัคพยัต, ทรงวุฒิ ยศวิมลวัฒน์ และ ประภาพร บุญมี. (2554). กรีนไมโครอิมัลชันสำหรับ
เครื่องสำอาง. วารสารไทยเภสัชศาสตร์และวิทยาการสุขภาพ 2554;6(4): 290-298.

[22] <http://www.manager.co.th/>

[23] <http://www.vcharkarn.com/vnews/137692>