

วิศวกรรมกระบวนการหมัก

วิศวกรรมกระบวนการหมัก

สาโรจน์ ศิริตันสนียกุล



สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2556

600.-

สาโรจน์ ศิริคันสนียกุล

วิศวกรรมกระบวนการหมัก / สาโรจน์ ศิริคันสนียกุล

1. การหมัก. 2. วิศวกรรมชีวเคมี.

660.28449

ISBN 978-974-03-3107-0

สพจ. 1739



สรรคุณคำวิชาการ ผู้สืบทอด

www.ChulaPress.com

Knowledge to All

ลิขสิทธิ์ของสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ครั้งที่ 1 จำนวน 1,000 เล่ม พ.ศ. 2556

การผลิตและการลอกเลียนหนังสือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้น

ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้จัดทำนาย ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

สาขา

ศาลาพระเกี้ยว โทร. 0-2218-7000-3 โทรสาร 0-2255-4441

สยามสแควร์ โทร. 0-2218-9881-2 โทรสาร 0-2254-9495

ม.นเรศวร จ.พิษณุโลก โทร. 0-5526-0162-4 โทรสาร 0-5526-0165

ม.เทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา โทร. 0-4421-6131-4 โทรสาร 0-4421-6135

ม.บูรพา จ.ชลบุรี โทร. 0-3839-4855-9 โทรสาร 0-3839-3239

โรงเรียนนายร้อย จปร. จ.นครนายก โทร. 0-3739-3023 โทรสาร 0-3739-3023

จัตุรัสจามจุรี (CHAMCHURI SQUARE) ชั้น 4 โทร. 0-2160-5301-2 โทรสาร 0-2160-5304

รัตนนิเบศร์ (แยกแคราย) โทร. 0-2950-5408-9 โทรสาร 0-2950-5405

Call Center (จัดส่งทั่วประเทศ) โทร. 0-2255-4433 <http://www.chulabook.com>

เครือข่าย

ศูนย์หนังสือ ม.แม่ฟ้าหลวง จ.เชียงราย โทร. 0-5391-7020-4 โทรสาร 0-5391-7025

ศูนย์หนังสือ ม.วลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช โทร. 0-7567-3648-51 โทรสาร 0-7567-3652

ร้านหนังสือบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) รามคำแหง 43/1 โทร. 0-2538-2573 โทรสาร 0-2539-7091

ศูนย์หนังสือ ม.ราชภัฏเชียงราย จ.เชียงราย โทร. 0-5377-6000

ศูนย์หนังสือ ม.อุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี โทร. 0-4535-3140, 0-4528-8400-3 ต่อ 1803

โทรสาร 0-4535-3145

ศูนย์หนังสือ ม.ราชภัฏสุราษฎร์ธานี จ.สุราษฎร์ธานี โทร. 0-7735-5466, 0-7791-3333

โทรสาร 0-7735-5468

ศูนย์หนังสือเทคโนโลยีโออาร์พีซี จ.ระยอง โทร. 0-3889-9130-2 ต่อ 331 โทรสาร 0-3889-9130

ต่อ 301

ศูนย์หนังสือ ม.ราชภัฏเทพสตรี จ.ลพบุรี โทร. 0-3642-7485-93

ร้านค้า, หนังสือเข้าชั้นเรียน ติดต่อแผนกขายส่ง สาขารัตนนิเบศร์ (แยกแคราย) โทร. 0-2950-5408-9

โทรสาร 0-2950-5405

กองบรรณาธิการ : กนิษฐา กิตติคุณ

พิสูจน์อักษร : ปุณณิศา บุญเปี่ยม

ออกแบบปกและรูปเล่ม : I Can Do

พิมพ์ที่ :

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของหนังสือวิศวกรรมกระบวนการหมักเล่มนี้ ล้วนได้ก็เพราะแรงบันดาลใจจากการเรียนการสอนในรายวิชาวิศวกรรมเคมีชีวภาพในระดับอุดมศึกษา ที่ผู้เขียนได้รับจากทั้งนิสิตระดับปริญญาตรีและบัณฑิตศึกษาระดับปริญญาโท-เอกทั้งหลาย ในสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ ณ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตั้งแต่พุทธศักราช 2528 เป็นต้นมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาโท-เอก) ในความดูแลรับผิดชอบของผู้เขียนตลอดระยะเวลาทำงาน 28 ปี ทั้งในฐานะประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และกรรมการร่วม ซึ่งได้ผ่านเหตุการณ์มากมายที่ทั้งร่วมสุข-ร่วมทุกข์กันมา นับว่ามีอิทธิพลต่อความก้าวหน้าของผลงานวิจัยตลอดชีวิตของผู้เขียนโดยตรง และยังส่งผลกระทบทางอ้อมต่อวงการเทคโนโลยีการหมักเชิงอุตสาหกรรมของประเทศได้ไม่น้อยทีเดียว รายงานที่ไม่ได้เอ่ยถึงปวงเหล่านั้นเป็นหลักฐานปรากฏชัดอยู่แล้วในเอกสารอ้างอิงและนิรนามอีกมากมายของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่ไม่ได้ปรากฏ ณ ที่นี้

ตลอดจนแรงผลักดันชั้นเลิศจากงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีการหมักที่ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัยจากหลายหน่วยงาน อาทิ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (สวพ.มก.), บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บว.มก.), สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.), สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), กองทุนเพื่อการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.), สำนักงานความร่วมมือเพื่อการพัฒนาระหว่างประเทศ (สพร.) กระทรวงต่างประเทศ ประเทศไทย, Department of International Cooperation, Ministry of Science and Technology (MOST) ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน และ New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) ประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น จึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกประการที่ผู้เขียนได้รับโอกาสเหล่านี้ จึงสามารถสร้างสรรค์ผลงานทางวิชาการเชิงประยุกต์ระดับปฏิบัติการแบบเบ็ดเสร็จในภาคภาษาไทย เพื่อคนไทยในการเข้าถึงสังคมแห่งการเรียนรู้ในการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของตนเอง และเพื่อชาติให้แผ่นดินสามารถตอบแทนคุณแห่งประเทศไทยนี้ได้ สุดท้ายนี้ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณบิดามารดาผู้ล่วงลับไปแล้วที่เป็นผู้ให้กำเนิด ครูและคณาจารย์ทั้งหลายผู้สั่งสอนประสาทวิทยาการทั้งมวลแก่ผู้เขียน และเพื่อนร่วมงานทางวิชาการทั้งที่เป็นคนไทยและชาวต่างประเทศทั้งหมด ที่ได้ช่วยเหลือปรับปรุงคุณภาพผลงานทางวิชาการของผู้เขียนให้ได้มาตรฐานสู่ระดับชาติและนานาชาติได้ในที่สุด

ขอบคุณงานด้านอาร์ตเวิร์กที่ได้รับการช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากคุณธีราพร ชังปาน
ตลอดจนนิสิตบัณฑิตศึกษาในความดูแล ณ ปัจจุบันของผู้เขียนที่ช่วยเหลือตรวจพิสูจน์
อักษร จึงทำให้นักหนังสือเล่มนี้สามารถปรากฏออกมดั่งที่เห็นได้ และขอพระคุณมหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ที่เป็นแหล่งศึกษาเริ่มต้นและเป็นสถานที่ทำงานแห่งแรกและแห่งเดียว
ตลอดชีวิตราชการของผู้เขียนที่เปรียบเสมือนบ้านที่พำนักตลอดกาล และวิกฤตการณ์
มหาอุทกภัย พ.ศ. 2554 ก็ช่วยทำให้นักหนังสือที่ผ่านวสันตฤดูอันยาวนานปิดเล่มลงได้
ตามมุ่งหมาย

คำนำ

วิศวกรรมกระบวนการหมัก เป็นหนังสือที่รวบรวมเนื้อหาเพื่อใช้ประกอบการสอนวิชาที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการหมักและวิศวกรรมเคมีชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วยรายวิชา 01051463 วิศวกรรมกระบวนการหมัก (Fermentation Process Engineering) ซึ่งเป็นวิชาเลือกของนิสิตปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ และรายวิชา 01051531 วิศวกรรมเคมีชีวภาพขั้นสูง (Advanced Biochemical Engineering) และ 01051562 การหมักอุตสาหกรรมขั้นสูง (Advanced Industrial Fermentation) ซึ่งเป็นวิชาบังคับและวิชาเลือกตามลำดับ ของบัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการสอนภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติทางด้านเทคโนโลยีการหมักเป็นหลัก โดยมีสาระสำคัญเชิงปฏิบัติทางด้านการวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีการหมักดั้งเดิมและสมัยใหม่ของผู้เขียนและคณะวิจัย คาดว่าจะเป็นหนังสือวิศวกรรมกระบวนการหมักที่เน้นกรณีศึกษาฉบับภาษาไทยที่สมบูรณ์เล่มหนึ่ง เพื่อใช้เป็นหนังสืออ่านประกอบที่มีมาตรฐานเกี่ยวกับเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมกระบวนการหมัก ที่จำเพาะทางสาขาเทคโนโลยีชีวภาพอุตสาหกรรม ซึ่งเหมาะสมสำหรับนักศึกษาและนักวิจัยในสาขาดังกล่าวโดยตรง ตลอดจนภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหมักที่อาศัยประโยชน์จากระบบจุลินทรีย์และเอนไซม์ในกระบวนการผลิต จะได้ใช้เป็นฐานข้อมูลและกรณีศึกษาที่ดีในการพัฒนาและวิจัยของตนเองต่อไป สำหรับความไม่สมบูรณ์ของเนื้อหาและความบกพร่องที่ยังคงมีอยู่ในหนังสือวิศวกรรมกระบวนการหมักนี้ ผู้เขียนยินดีรับข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นเพื่อใช้ในการปรับปรุงและเพิ่มเติมเนื้อหาเข้มข้นที่ทันสมัยทางด้านวิศวกรรมระบบชีวภาพ (Biosystems Engineering) และชีววิทยาสังเคราะห์ (Synthetic Biology) ตลอดจนกรณีศึกษาอื่น ๆ ที่น่าสนใจ อาทิ พอลิเมอร์ชีวภาพ โปรตีนรีคอมบิแนนต์ เชื้อเพลิงเหลว/ไบโอเอทานอล และไบโอดีเซลจากสาหร่าย เป็นต้น ซึ่งอยู่ในบริบทของการพัฒนาเทคโนโลยีการหมักอุตสาหกรรมของประเทศไทย สำหรับการจัดพิมพ์ครั้งต่อไป

สารอจน์ ศิริคันสนียกุล

มิถุนายน 2556

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการหมัก (Fermentation Technology Research Center, FTRC)

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

E-mail: sarote.s@ku.ac.th, ssarote@hotmail.com, fermenttechresearchcenter@gmail.com

URL: <http://pirun.ku.ac.th/~fagissi> Facebook: <http://www.facebook.com/fermenttechresearchcenter>

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
คำนำ.....	(7)
สารบัญ.....	(9)
บทที่ 1 อันตรกิริยาของจุลินทรีย์.....	1
บทนำ	2
อันตรกิริยาของจุลินทรีย์.....	3
ภาวะแข่งขัน.....	8
การแข่งขันในการเพาะเลี้ยงแบบต่อเนื่อง.....	10
การคัดเลือกและการแข่งขันในการเพาะเลี้ยงแบบต่อเนื่อง	15
ภาวะแข่งขันในสารอาหารจำกัดสองชนิด.....	17
การล่าเหยื่อ.....	21
แบบจำลองของอันตรกิริยาระหว่างผู้ล่าเหยื่อและเหยื่อ.....	22
ประชากรจุลินทรีย์ในอันตรกิริยาระหว่างผู้ล่าเหยื่อและเหยื่อ	25
กรณีศึกษาเชิงประยุกต์	30
จุลินทรีย์เชื้อผสมระหว่างแบคทีเรียกรดแลกติกและ	
แบคทีเรียกรดพรอพิโอนิก	30
แบบจำลองของการผลิตไนซินด้วยแบคทีเรียกรดแลกติกและ	
แบคทีเรียกรดพรอพิโอนิก	35
จุลินทรีย์เชื้อผสมระหว่างแบคทีเรียกรดแลกติกและยีสต์.....	42
สัญลักษณ์	54
เอกสารอ้างอิง	56
บทที่ 2 การวิเคราะห์การควบคุมฟลักซ์.....	65
บทนำ	66
การวิเคราะห์การควบคุมฟลักซ์	67
สัมประสิทธิ์การควบคุมฟลักซ์.....	68
ทฤษฎีบทของผลรวม.....	71
สภาพยืดหยุ่น.....	73
ทฤษฎีบทของความสัมพันธ์กัน.....	74

หน้า

สัมประสิทธิ์การตอบสนอง	74
กรณีศึกษา	75
แบบจำลองโครงร่าง	77
การวิเคราะห์การควบคุมกระบวนการสร้างและสลายด้วย	
โปรแกรมสำเร็จรูป	86
กรณีศึกษาเชิงประยุกต์ (1)	95
การวิเคราะห์การควบคุมกระบวนการสร้างและสลายออนไลน์	103
กรณีศึกษาเชิงประยุกต์ (2)	107
สัญลักษณ์	118
เอกสารอ้างอิง	120
บทที่ 3 กรรมวิธีการผลิตกรดแลกติก	131
บทนำ	132
การผลิตกรดแลกติกในอุตสาหกรรม	133
การพัฒนากรรมวิธีการผลิตกรดแลกติก	150
การย่อยแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์เทอร์มามิลและเด็กซ์โทรไซม์	153
การย่อยแป้งสาชูด้วยเอนไซม์โคเลสเทสและกลูโคไซม์	154
การผลิตกรดแลกติกแบบต่อเนื่องขั้นตอนเดียว	156
การเตรียมกล้าเชื้อในฟลาสก์	156
การผลิตกรดแลกติกในถังหมักขนาด 2 ลิตร	156
การผลิตกรดแลกติกแบบต่อเนื่องหนึ่งขั้นตอนที่มีระบบหมุนเวียนเซลล์	158
การติดตั้งระบบหมุนเวียนเซลล์	158
การผลิตกรดแลกติกในถังหมักขนาด 2 ลิตร	159
การผลิตกรดแลกติกแบบต่อเนื่องสองขั้นตอน	161
การผลิตกรดแลกติกแบบต่อเนื่องสองขั้นตอนที่มีระบบหมุนเวียนเซลล์	163
การผลิตกรดแลกติกด้วยเซลล์ตรึง	168
การเตรียมเซลล์ตรึง	168
การผลิตกรดแลกติกด้วยถังปฏิกรณ์เซลล์ตรึง	170
การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการผลิตกรดแลกติก	173

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการหมักกรดแลกติกแบบต่อเนื่อง	
สองขั้นตอน	186
สัญลักษณ์	190
เอกสารอ้างอิง	193
บทที่ 4 กรรมวิธีการผลิตไซลิทอล	211
บทนำ	212
กระบวนการผลิตไซลิทอล	214
การผลิตไซลิทอลโดยยีสต์	218
อิทธิพลของออกซิเจน	222
อิทธิพลของไซโลส	223
กรณีศึกษาของยีสต์สายพันธุ์ <i>Candida mogii</i> ATCC 18364	224
การสร้างและสลายไซโลสโดยยีสต์ <i>Candida mogii</i> ATCC 18364	224
การสร้างและสลายไซโลสและกลูโคสโดยยีสต์ <i>Candida mogii</i>	
ATCC 18364	233
อิทธิพลของกรดเบนโซอิกต่อการสลายไซโลสโดยยีสต์ <i>Candida mogii</i>	
ATCC 18364	239
งานวิจัยด้านการหมักไซลิทอลจากไซโลสและไฮโดรไลเสต	241
การพัฒนากรรมวิธีการผลิตไซลิทอล	255
อิทธิพลของพีเอชต่อการเจริญและการผลิตไซลิทอลของยีสต์	255
อิทธิพลของเบนโซอิกต่อผลได้ของการผลิตไซลิทอล	259
การผลิตไซลิทอลแบบครั้งคราวด้วยซับสเตรตผสมระหว่างไซโลสและ	
กลูโคส	266
การผลิตไซลิทอลด้วยเซลล์ตรึงเยื่อเมมเบรนเหลว	269
สิทธิบัตรกรรมวิธีการผลิตไซลิทอล	275
การจำลองแบบการผลิตไซลิทอล	285
การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	286
การเลียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	294
สัญลักษณ์	299
เอกสารอ้างอิง	302

บทที่ 5 กรรมวิธีการผลิตโพลิโกแซ็กคาไรด์	321
บทนำ	322
อินูลินและอินูโลลิโกแซ็กคาไรด์	334
ไซโคลเดกซ์ทริน	348
เอนไซม์ไซโคลเดกซ์ทรินไกลโคซิลทรานสเฟอเรส	351
กระบวนการผลิตไซโคลเดกซ์ทริน	352
กรรมวิธีการผลิตโดยใช้ตัวทำละลาย	352
กรรมวิธีการผลิตโดยไม่ใช้ตัวทำละลาย	353
กระบวนการเปลี่ยนด้วยเอนไซม์	354
การทำผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์	358
การพัฒนากรรมวิธีการผลิตโพลิโกแซ็กคาไรด์	360
การผลิตฟรักโทโอลิโกแซ็กคาไรด์	365
การผลิตอินูโลลิโกแซ็กคาไรด์	370
การผลิตน้ำตาลผสมฟรักโทสและโพลิโกแซ็กคาไรด์	378
การเตรียมเอนไซม์ดิบจากเชื้อรา <i>Aspergillus niger</i> TISTR 3570	379
การเตรียมเอนไซม์ดิบจากยีสต์ <i>Candida guilliermondii</i> TISTR 5844	380
การผลิตน้ำตาลผสมฟรักโทสและโพลิโกแซ็กคาไรด์แบบเบ็ดเสร็จ	384
การผลิตไซโคลเดกซ์ทรินจากแป้งสาคูและมันสำปะหลัง	391
การผลิตเอนไซม์ไซโคลเดกซ์ทรินไกลโคซิลทรานสเฟอเรส	391
การผลิตบีตาไซโคลเดกซ์ทรินจากแป้งสาคู	395
การผลิตกาแล็กโทโอลิโกแซ็กคาไรด์	400
การผลิตกาแล็กโทโอลิโกแซ็กคาไรด์จากยีสต์ <i>Trichosporon mucoides</i> TISTR 5755	403
การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการผลิตโพลิโกแซ็กคาไรด์	405
อินูลินเป็นข้อบ่งชี้	405
แบบจำลองการย่อยสลายอินูลินด้วยเอนไซม์เอนโดอินูลิเอส	407
แบบจำลองการย่อยสลายอินูลินด้วยเอนไซม์เอนโดอินูลิเอสและเอกโซอินูลิเนส	410

	หน้า
ซูโครสเป็นชั้นสเตเรต.....	417
แล็กโทสเป็นชั้นสเตเรต.....	424
กลไกปฏิกิริยาของการผลิตกาแล็กโทโอลิโกแซ็กคาไรด์.....	425
แบบจำลองการผลิตกาแล็กโทโอลิโกแซ็กคาไรด์.....	426
แบ่งเป็นชั้นสเตเรต.....	430
สัญลักษณ์.....	433
เอกสารอ้างอิง.....	436
บทที่ 6 กรรมวิธีการผลิตพอลิปีตาไฮดรอกซีบิวทิเรต.....	459
บทนำ.....	460
การพัฒนากรรมวิธีการผลิตพอลิปีตาไฮดรอกซีบิวทิเรต.....	462
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตพอลิปีตาไฮดรอกซีบิวทิเรต.....	481
การเพาะเลี้ยงแบบเบ็ดเสร็จ.....	481
ผลของอัตราส่วนของแอมโมเนียมซัลเฟตต่อกลูโคสต่ออัตราการเจริญ และการผลิต PHB.....	482
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแอมโมเนียมซัลเฟตต่อกลูโคสและ อัตราการเจริญจำเพาะ.....	484
การจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการเจริญและการผลิต PHB.....	485
ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของกลูโคสต่ออัตราการเจริญและ การผลิต PHB.....	486
การเพาะเลี้ยงแบบครั้งคราว.....	488
การเลียนแบบการเพาะเลี้ยงแบบครั้งคราวภายใต้ภาวะไม่จำกัดและ จำกัดไนโตรเจน.....	489
การเลียนแบบการเพาะเลี้ยงแบบครั้งคราวโดยการเติมสารอาหาร แบบควบคุมพีเอชและเป็นระยะ.....	490
การพัฒนากรรมวิธีการผลิตพอลิไฮดรอกซีแอลคานอยด์.....	492
กรรมวิธีการแยกพอลิไฮดรอกซีแอลคานอยด์.....	494
การเตรียมเบื้องต้น.....	495
การใช้ต่าง, การใช้เกลือ, การแช่แข็ง.....	501

หน้า

การสกัดพอลิไฮดรอกซีแอลคานอเอต	501
วิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย	502
วิธีการย่อยด้วยสารเคมีและเอนไซม์	504
การย่อยด้วยสารเคมี.....	504
สารลดแรงตึงผิว	504
โซเดียมไฮโปคลอไรต์	505
โซเดียมไฮโปคลอไรต์และคลอโรฟอร์ม	505
สารลดแรงตึงผิวและโซเดียมไฮโปคลอไรต์.....	506
สารลดแรงตึงผิวและสารขจัดไขมัน.....	507
สารขจัดไขมันและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	507
การละลายเซลล์ด้วยโปรตอน.....	508
การย่อยด้วยเอนไซม์.....	508
วิธีการทำให้เซลล์แตกเชิงกล	509
การบดด้วยลูกแก้ว	509
การโฮโมจีไนเซชันความดันสูง	509
อัลตราโซนิเคชัน	510
การเหวี่ยงและสารเคมี.....	510
วิธีการทางเลือก	511
ของไหลเหนือวิกฤต	511
ความเปราะของเซลล์.....	511
การจำแนกด้วยอากาศ.....	512
การลอยตัวด้วยอากาศละลาย	512
การปลดปล่อยเกิดเอง.....	513
การทำให้บริสุทธิ์.....	513
การแยกพอลิไฮดรอกซีแอลคานอเอตระดับขยายขนาด.....	514
ตัวอย่างสิทธิบัตร กรรมวิธีการผลิตพอลิพีตาไฮดรอกซีบิวทิเรต	520
การวิเคราะห์กระบวนการผลิตพอลิพีตาไฮดรอกซีบิวทิเรตเชิงเศรษฐศาสตร์.....	530

หน้า

การวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของกระบวนการผลิตพอลิไฮดรอกซีแอลคานอยด์....	544
ดุลของพลังงานและคาร์บอนไดออกไซด์	545
การวิเคราะห์กระบวนการผลิตเชิงเศรษฐศาสตร์	546
การวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตของพลังงานและคาร์บอนไดออกไซด์	549
ความก้าวหน้าและอนาคตของพอลิปีตาไฮดรอกซีบีวทีเรต	557
สัญลักษณ์	559
เอกสารอ้างอิง	562
ดรชนีไทย	585
ดรชนีอังกฤษ	601
ประวัติผู้เขียน	607

