



ทุนส่งเสริม
การผลิตตำรา

การประยุกต์ใช้จุลินทรีย์

ในด้านอุตสาหกรรม สิ่งแวดล้อม และการเกษตร

Microbial Applications

in Industry, Environment and Agriculture



รองศาสตราจารย์ ดร.ชีวาพัฒน์ แซ่จิ่ง



การประยุกต์ใช้จุลินทรีย์ ในด้านอุตสาหกรรม สิ่งแวดล้อมและการเกษตร

รองศาสตราจารย์ ดร.ชีวาพัฒน์ แซ่จิ่ง
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ได้รับทุนสนับสนุนการผลิตตำรา มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ลำดับที่ 227

โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ.2567

ISBN (e-book) 978-616-438-914-4

ชีวาพัฒน์ แซ่จิ่ง.

การประยุกต์ใช้จุลินทรีย์ในด้านอุตสาหกรรม สิ่งแวดล้อมและการเกษตร /ชีวาพัฒน์ แซ่จิ่ง.-- พิมพ์ครั้งที่ 1. --
ขอนแก่น : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2567.

265 หน้า : ภาพประกอบ

1. จุลินทรีย์. 2. จุลินทรีย์อุตสาหกรรม. (1) ชื่อเรื่อง.

QR53ซ583 2567

ISBN (e-book) 978-616-438-914-4

จัดทำโดย ศูนย์นวัตกรรมการเรียนการสอน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ราคา 350 บาท

สงวนลิขสิทธิ์ โดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2567

คำนำ

หากกล่าวถึงจุลินทรีย์คนส่วนใหญ่มักนึกถึงสิ่งที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ สัตว์ และพืช เพราะเป็นสาเหตุของโรคระบาดและยังทำให้เกิดการเน่าเสียของอาหาร ถึงแม้จุลินทรีย์บางชนิดก่อให้เกิดโทษแต่ยังมีจุลินทรีย์อีกหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ หนังสือเล่มนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประมวลความรู้เกี่ยวกับการนำจุลินทรีย์มาประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรม สิ่งแวดล้อม และการเกษตร โดยอธิบายถึงประเภท บทบาท และหน้าที่ของจุลินทรีย์ต่อการนำมาประยุกต์ใช้ รวมทั้งยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้ที่สำคัญในแต่ละด้าน หนังสือเล่มนี้ยังได้รวบรวมความรู้และผลงานวิจัยจากหนังสือภาษาอังกฤษและวารสารต่างประเทศเพิ่มเติมที่จะทำให้มีเนื้อหาครบถ้วนมากขึ้น เพื่อให้นักศึกษาทางสาขาจุลชีววิทยา สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ และสาขาอื่นที่เกี่ยวข้องทั้งในระดับปริญญาตรีและระดับบัณฑิตศึกษา รวมทั้งผู้ที่สนใจสามารถใช้เป็นแหล่งค้นคว้า อ้างอิงและศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการประยุกต์ใช้จุลินทรีย์

เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้แบ่งเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย 9 บท เนื่องจากจุลินทรีย์แบ่งเป็นหลายประเภทเนื้อหาในส่วนแรกจึงกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับจุลินทรีย์ประเภทต่างๆ และลักษณะการเจริญพอสั่งขบเพื่อให้ผู้อ่านมีความเข้าใจเกี่ยวกับประเภทของจุลินทรีย์และการเจริญเบื้องต้นก่อนเข้าสู่เนื้อหาของการประยุกต์ใช้ ในส่วนที่สองกล่าวถึงการนำจุลินทรีย์มาประยุกต์ใช้ในด้านอุตสาหกรรม แต่เนื่องจากการใช้จุลินทรีย์ในด้านนี้มีขอบเขตกว้างมากจึงไม่สามารถลงรายละเอียดให้ครบถ้วนได้ทุกอุตสาหกรรมในหนังสือเล่มเดียว ผู้เขียนจึงยกตัวอย่างเฉพาะอุตสาหกรรมหลักที่เห็นว่ามีสำคัญมากในปัจจุบัน ได้แก่ อาหาร พลังงาน และเอนไซม์ รวมทั้งได้รวบรวมแนวคิดหรือเทคโนโลยีใหม่ๆ ในอนาคตที่อาจมีการนำจุลินทรีย์มาใช้ ส่วนที่สามกล่าวถึงการประยุกต์ใช้จุลินทรีย์ในด้านสิ่งแวดล้อมโดยเน้นการนำจุลินทรีย์มาบำบัดสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การบำบัดน้ำเสียและการบำบัดสารมลพิษ พร้อมทั้งยกตัวอย่างกรณีศึกษาเกี่ยวกับเหตุการณ์จริงที่ใช้จุลินทรีย์บำบัดสิ่งแวดล้อม ตลอดจนผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ที่จำหน่ายในทางการค้า และในส่วนสุดท้ายกล่าวถึงการประยุกต์ใช้จุลินทรีย์ในการเกษตรซึ่งกล่าวถึงบทบาทของจุลินทรีย์ในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชและการควบคุมศัตรูพืชด้วยจุลินทรีย์ประเภทต่างๆ เนื้อหาในบางหัวข้อผู้เขียนได้สอดแทรกและยกตัวอย่างงานวิจัยของตนเอง รวมทั้งภาพประกอบ

จากงานวิจัยของผู้เขียนที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อนั้นเข้าไปด้วย งานวิจัยที่ผู้เขียนสอดแทรกในหนังสือส่วนใหญ่เป็นการประยุกต์ใช้แบบที่เรียลสังเคราะห์แสงสีม่วงในด้านต่างๆ ซึ่งเป็นงานวิจัยหลักที่ได้รับทุนสนับสนุนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558 จนถึงปัจจุบันจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปัจจุบันคือสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) และมีจุลินทรีย์ชนิดอื่นอีกเล็กน้อยซึ่งเป็นงานวิจัยที่ผู้เขียนทำร่วมกับบริษัทเอกชนเพื่อให้ผู้อ่านได้เห็นตัวอย่างการประยุกต์ใช้จุลินทรีย์และประโยชน์ของผลิตภัณฑ์จากจุลินทรีย์ที่ชัดเจนมากขึ้น

ในการจัดทำหนังสือเล่มนี้ผู้เขียนได้พยายามใช้ภาษาไทยให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ คำศัพท์วิทยาศาสตร์ทั่วไปผู้เขียนใช้ภาษาไทยและมีวงเล็บภาษาอังกฤษในการเขียนครั้งแรก ยกเว้นคำศัพท์วิทยาศาสตร์ที่เป็นคำศัพท์เฉพาะบางคำใช้ภาษาอังกฤษเพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจได้ง่ายและชัดเจนมากกว่า หากเขียนเป็นภาษาไทยอาจทำให้ผู้อ่านเกิดความสับสน เพื่อให้หนังสือเล่มนี้เป็นไปตามมาตรฐานทางวิชาการในการเขียนศัพท์บัญญัติทางวิทยาศาสตร์ ผู้เขียนได้พยายามตรวจสอบให้ถูกต้องตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน (พ.ศ. 2554) ศัพท์วิทยาศาสตร์ฉบับราชบัณฑิตยสถาน (พ.ศ. 2559) และพจนานุกรมศัพท์วิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ และเทคโนโลยี ฉบับอิเล็กทรอนิกส์ของสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.)

ในการเขียนชื่อย่อ สปีชีส์ และสายพันธุ์จุลินทรีย์จะเขียนชื่อเต็มทุกครั้งเมื่อกล่าวถึงครั้งแรกในแต่ละบท และหากกล่าวถึงชื่อเดิมซ้ำในบทนั้นจะเขียนแบบย่อตามหลักการเขียนชื่อวิทยาศาสตร์ ส่วนการอ้างถึงชื่อสปีชีส์จุลินทรีย์ในตารางและภาพเขียนชื่อเต็ม เนื่องจากชื่อจุลินทรีย์ที่กล่าวถึงในหนังสือเล่มนี้มีหลายประเภทและกฎการเขียนชื่อวิทยาศาสตร์ของจุลินทรีย์แต่ละประเภทแตกต่างกันรวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงบ่อยครั้ง ดังนั้นผู้เขียนจึงเขียนชื่อวิทยาศาสตร์และหน่วยอนุกรมวิธานของแบคทีเรียและอาร์เคียตามกฎของ International Code of Nomenclature of Prokaryotes ปี 2019 ชื่อวิทยาศาสตร์และหน่วยอนุกรมวิธานของฟังไจและสาหร่ายตามกฎของ International Code of Nomenclature for Algae, Fungi, and Plants ปี 2018 และไวรัสเขียนชื่อวิทยาศาสตร์ตามกฎของ International Committee on Taxonomy of Viruses ปี 2018 นอกจากนั้นการเขียนชื่อหน่วยอนุกรมวิธานของแมลงในหนังสือเล่มนี้ใช้ตามกฎของ International Code of Zoological Nomenclature ปี 1999 ซึ่งมีความแตกต่างจากของจุลินทรีย์

ในการจัดทำหนังสือเล่มนี้ผู้เขียนได้ใช้โปรแกรมฟรีแวร์ XeLaTeX ภาพประกอบในหนังสือทั้งหมดผู้เขียนได้จัดทำขึ้นเองและมีบางส่วนที่วาดเองแต่ดัดแปลงจากตำราซึ่งได้อ้างอิงไว้ได้ภาพแล้ว โดยภาพวาดและวิธีเมแทบอลิซึมได้จัดทำด้วยโปรแกรมฟรีแวร์ draw.io ภาพถ่ายจุลินทรีย์ผู้เขียนได้รวบรวมจากการทำงานวิจัยและการสอนของตนเองในระยะเวลา 8 ปี ที่ได้เป็นอาจารย์จนถึงปัจจุบัน เนื่องจากผู้เขียนเกรงว่าภาพถ่ายเมื่อพิมพ์ลงในหนังสืออาจไม่ชัดมากนัก ดังนั้นจึงใส่ QR code ที่ด้านข้างของภาพถ่ายลงไปเพื่อให้ผู้อ่านสามารถสแกน QR code เพื่อดูภาพ รวมทั้งขยายให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะอำนวยประโยชน์ในเชิงวิชาการและทำให้ผู้อ่านทุกท่านได้รับบรรณรสและความรู้จากการนำจุลินทรีย์มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้

ชีวาพัฒน์ แซ่จิ่ง

กิตติกรรมประกาศ

หนังสือเล่มนี้เขียนเสร็จสมบูรณ์ได้เนื่องจากการสนับสนุนด้านกำลังใจและกำลังใจจากผู้มีพระคุณหลายท่าน ซึ่งผู้เขียนต้องขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อชัยมงคล อรรถพลไพศาล และคุณแม่ฉัตรณกานท์ อรรถพลไพศาล ที่เคารพยิ่งของผู้เขียน ที่ท่านทั้งสองเป็นแรงบันดาลใจและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนในการเขียนหนังสือเล่มนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และคณาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้แก่ผู้เขียน ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยอย่างต่อเนื่องที่ทำให้ผู้เขียนได้ทำวิจัยและต่อยอดงานวิจัยของตนเองจนมีความรู้เพื่อจัดทำหนังสือเล่มนี้ ขอขอบพระคุณ บริษัท ชิตโต้ (ประเทศไทย) จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการถ่ายภาพหลังหมักระดับอุตสาหกรรม และขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยรุ่งเรืองอุตสาหกรรม จำกัด ที่สนับสนุนความร่วมมือและทุนวิจัยจึงทำให้ผู้เขียนมีความรู้และประสบการณ์บางส่วนที่สามารถถ่ายทอดลงในหนังสือเล่มนี้ อีกทั้งขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ช่วยในการตรวจสอบจีนัสของโปรโตซัวที่ใช้อ้างอิงในหนังสือเล่มนี้ ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานสาขาวิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งเป็นที่ทำงานปัจจุบันของผู้เขียน รวมทั้งขอขอบพระคุณกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้คำแนะนำในการปรับปรุงหนังสือเล่มนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณสมาชิกผู้ใกล้ชิดในครอบครัว ได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร.สาธิต แซ่จิ้ง ที่ช่วยเหลือในการวาดภาพ ตลอดจนกำลังใจและกำลังใจที่สนับสนุนและแบ่งเบาภาระในครอบครัวในช่วงที่จัดทำหนังสือเล่มนี้ จึงทำให้ผู้เขียนสามารถทุ่มเทเวลากับการเขียนจนเสร็จสิ้น และขอใจบุญตรัสว่า เด็กหญิงธัญธิดา แซ่จิ้ง ที่เป็นกำลังใจให้เสมอมา ขอขอบพระคุณพระเจ้าที่ประทานสติปัญญาและกำลังใจในการจัดทำหนังสือจนกระทั่งหนังสือเล่มนี้สำเร็จเป็นรูปเล่ม

ชีวาพัฒน์ แซ่จิ้ง

สารบัญ

ส่วนที่ 1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับจุลินทรีย์	1
1 ประเภทของจุลินทรีย์	3
1. แบคทีเรีย	3
2. อาร์เคีย	5
3. ยูคารีเรีย	6
4. ไวรัส ไวรอยด์ และพรีออน	12
5. จุลินทรีย์ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์	14
สรุป	15
บรรณานุกรม	16
2 การเจริญของจุลินทรีย์และหลักการเพาะเลี้ยง	17
1. วัฏจักรการเจริญ	18
2. การคำนวณการเจริญของจุลินทรีย์	23
3. การเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์แบบต่อเนื่อง	26
สรุป	29
บรรณานุกรม	30
ส่วนที่ 2 การประยุกต์ใช้จุลินทรีย์ในด้านอุตสาหกรรม	31
3 การผลิตอาหารและสารเพิ่มกลิ่นรสชีวภาพ	33
1. การใช้จุลินทรีย์ผลิตอาหาร	33
2. การใช้จุลินทรีย์ผลิตอาหารฟังก์ชัน	49
3. การใช้จุลินทรีย์ผลิตสารเพิ่มกลิ่นรสชีวภาพ	53

สรุป	61
บรรณานุกรม	63
4 การผลิตเอนไซม์	67
1. การจัดกลุ่มเอนไซม์และเอนไซม์ที่สำคัญ	68
2. การผลิตเอนไซม์จากจุลินทรีย์	73
3. การตรึงเซลล์จุลินทรีย์	79
4. การประยุกต์ใช้เอนไซม์จากจุลินทรีย์	82
สรุป	87
บรรณานุกรม	89
5 การผลิตพลังงานชีวภาพ	93
1. ก๊าซชีวภาพ	95
2. ไฮโดรเจน	104
3. ไบโอดีทานอล	115
4. ไบโอดีเซล	126
สรุป	135
บรรณานุกรม	138
ส่วนที่ 3 การประยุกต์ใช้จุลินทรีย์ในด้านสิ่งแวดล้อม	143
6 การบำบัดน้ำเสีย	145
1. กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	145
2. จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการบำบัดน้ำเสีย	151
3. การบำบัดน้ำเสียโดยใช้แบคทีเรียสังเคราะห์แสง	159
4. ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์บำบัดน้ำเสียในทางการค้า	164
สรุป	165
บรรณานุกรม	167
7 การบำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม	171
1. จุลินทรีย์ที่ใช้บำบัดสารมลพิษในสิ่งแวดล้อม	172
2. กลไกที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารมลพิษในจุลินทรีย์	174

3. สารมลพิษที่สำคัญและนิยามบำบัดด้วย bioremediation	178
4. ประเภทของ bioremediation	182
5. วิธีการใน bioremediation	186
6. การนำโอมิกส์มาประยุกต์ใช้บำบัดสารมลพิษ	188
สรุป	192
บรรณานุกรม	194
ส่วนที่ 4 การประยุกต์ใช้จุลินทรีย์ในการเกษตร	199
8 การเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช	201
1. วัฏจักรในดินที่เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์	202
2. การกระตุ้นการเจริญของพืชด้วยจุลินทรีย์	206
สรุป	227
บรรณานุกรม	229
9 การควบคุมศัตรูพืช	235
1. การควบคุมศัตรูพืชด้วยฟังไจ	236
2. การควบคุมศัตรูพืชด้วยแบคทีเรีย	239
3. การควบคุมศัตรูพืชด้วยไวรัส	245
สรุป	249
บรรณานุกรม	251
ดรชนี	255
Index	259

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1	ลักษณะโครงสร้างต่างๆ ที่พบทั้งในแบคทีเรียและอาร์เคีย	6
ตารางที่ 1.2	เปรียบเทียบลักษณะของจุลินทรีย์ยูแคริโอต	10
ตารางที่ 1.3	สรุปลักษณะที่สำคัญของจุลินทรีย์ในโดเมนแบคทีเรีย อาร์เคีย และยูคารี	11
ตารางที่ 1.4	ลักษณะสำคัญของไวรัส ไวรอยด์ และพรีออน	13
ตารางที่ 2.1	ตัวอย่างการเจริญของจุลินทรีย์ใน log phase	24
ตารางที่ 3.1	เครื่องมือแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ และจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง	40
ตารางที่ 3.2	ตัวอย่างสารเพิ่มกลิ่นรสชีวภาพที่ผลิตด้วยการสังเคราะห์ใหม่และจุลินทรีย์ ที่สังเคราะห์	54
ตารางที่ 3.3	ตัวอย่างสารเพิ่มกลิ่นรสชีวภาพที่ผลิตด้วยวิธีการเปลี่ยนทางชีวภาพ สารตั้ง ต้นที่ใช้ และจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง	56
ตารางที่ 4.1	ชนิดของเอนไซม์ จุลินทรีย์ที่ใช้ผลิต และวิธีการผลิต	76
ตารางที่ 5.1	พอลิแซ็กคาไรด์และน้ำตาลในเซลล์สาหร่ายขนาดเล็ก	120
ตารางที่ 5.2	พอลิแซ็กคาไรด์ภายในผนังเซลล์และคาร์โบไฮเดรตที่สะสม ในเซลล์ของสาหร่ายขนาดใหญ่	122
ตารางที่ 5.3	ตัวอย่างสาหร่ายขนาดใหญ่แต่ละกลุ่มที่มีคาร์โบไฮเดรตสูงและนิยมใช้เป็น ซับสเตรตในการผลิตไบโอเอทานอล	122
ตารางที่ 6.1	ลิโทโทรฟิกแบคทีเรียที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสีย	153
ตารางที่ 6.2	แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงที่ใช้บำบัดน้ำเสียและผลผลิตที่มีมูลค่าหลังจาก การบำบัด	162
ตารางที่ 7.1	สารมลพิษที่เหมาะสมแก่การบำบัดด้วย bioremediation	181

ตารางที่ 8.1	ตัวอย่าง PGPR และพืชที่ใช้	209
ตารางที่ 8.2	ฮอร์โมนพืชที่สำคัญซึ่งผลิตจาก PGPR	211
ตารางที่ 8.3	PGPR ที่ใช้เป็นเชื้อปฏิบัติต่อจุลินทรีย์ก่อโรคพืชและโรคพืชที่ถูกยับยั้ง	213
ตารางที่ 8.4	จุลินทรีย์ตรึงไนโตรเจน	215
ตารางที่ 8.5	ตัวอย่างจุลินทรีย์กลุ่มต่างๆ ที่สามารถละลายฟอสเฟต	221
ตารางที่ 8.6	ตัวอย่างเชื้อราไมคอร์ไรซาที่ใช้ทำปุ๋ยชีวภาพและพืชที่ใช้เชื้อราดังกล่าว	226
ตารางที่ 9.1	Nucleopolyhedrovirus และ granulovirus ที่สำคัญและนิยมใช้ในทางการค้า	247

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1.1	แบคทีเรีย <i>Staphylococcus aureus</i> และไซยาโนแบคทีเรีย <i>Microcystis</i> sp. . .	4
ภาพที่ 1.2	สาหร่าย <i>Chlorella</i> sp. และ <i>Phacus</i> sp.	7
ภาพที่ 1.3	ไดอะตอม <i>Navicula</i> sp.	8
ภาพที่ 1.4	รา <i>Aspergillus</i> sp.	9
ภาพที่ 1.5	โพรโทซัว <i>Loxodes</i> sp.	10
ภาพที่ 1.6	แผนภาพแสดงจุลินทรีย์ประเภทต่างๆ ในแต่ละโดเมน	11
ภาพที่ 1.7	<i>Taura syndrome virus</i> ที่อยู่ในเนื้อเยื่อของสัตว์น้ำ	13
ภาพที่ 1.8	แผนภาพสรุปประเภทจุลินทรีย์ทั้งหมด	14
ภาพที่ 2.1	กราฟการเจริญของแบคทีเรีย	19
ภาพที่ 2.2	การผลิตสารเมแทบอลิต์ปฐมภูมิและเมแทบอลิต์ทุติยภูมิในแบคทีเรีย . . .	23
ภาพที่ 2.3	ถังหมักระดับอุตสาหกรรมขนาด 1,500 ลิตร	27
ภาพที่ 2.4	กราฟแสดงค่า dilution rate และการเจริญของจุลินทรีย์ในการเลี้ยงแบบ chemostat	28
ภาพที่ 3.1	แผนภาพการผลิตโยเกิร์ต	36
ภาพที่ 3.2	การหมักไวน์องุ่นซึ่งมี airlock ต่ออยู่ด้านบนของภาชนะที่ใช้หมัก	38
ภาพที่ 3.3	แผ่นเซลล์ูโลสที่ผลิตจากแบคทีเรีย <i>Komagataeibacter nataicola</i> และเซลล์ูโลสที่มีลักษณะเป็นก้อนกลม	48
ภาพที่ 3.4	การทำ microencapsulation จุลินทรีย์โพรไบโอติกด้วยเทคนิคการพ่นแห้ง . .	51
ภาพที่ 4.1	การผลิตเอนไซม์ไลเปสจากแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วง <i>Rhodospseudomonas faecalis</i> CDA3 เพื่อย่อยสลายและทำให้ไขมันแตกตัว โดยเลี้ยงในสภาวะตั้งนิ่งและเขย่าขวดเพียงวันละ 1 ครั้ง	71

ภาพที่ 4.2	ขั้นตอนในการหมักบนอาหารแข็งเพื่อผลิตเอนไซม์	75
ภาพที่ 4.3	เม็ดอัลจินตจากการทำ gel entrapment ที่มีแบคทีเรียสังเคราะห์แสง <i>Rhodospseudomonas faecalis</i> PA2 ผสมอยู่ใน	80
ภาพที่ 4.4	การดูดซับระหว่างแบคทีเรียสังเคราะห์แสง <i>Rhodospseudomonas faecalis</i> PA2 กับเซลล์โลสจากแบคทีเรียด้วยการทำ adsorption	81
ภาพที่ 5.1	แผนผังการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารอินทรีย์	97
ภาพที่ 5.2	การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียด้วยระบบ Upflow anaerobic sludge blanket (UASB)	101
ภาพที่ 5.3	การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียด้วยระบบ Upflow anaerobic filter process (UAFP)	102
ภาพที่ 5.4	การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียด้วยระบบ Anaerobic fluidized-bed reactor (AFBR)	103
ภาพที่ 5.5	วิธีการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักแบบมิดที่ใช้กลูโคสเป็นซับสเตรต	109
ภาพที่ 5.6	จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจนแบบมิดและแบบใช้แสง	111
ภาพที่ 5.7	ลักษณะเซลล์ของ <i>Nostoc</i> sp. แสดงเฮเทอโรซิสต์	113
ภาพที่ 5.8	วิธีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฮโดรเจนของไซยาโนแบคทีเรียที่มีลักษณะเซลล์ ต่อกันเป็นสายยาว	113
ภาพที่ 5.9	วิธีไกลโคไลซิสในการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสให้เป็นไพรูเวตและการหมักเพื่อ เปลี่ยนไพรูเวตให้เป็นเอทานอล	125
ภาพที่ 5.10	แผนผังการผลิตไบโอเอทานอล	126
ภาพที่ 5.11	แผนผังการผลิตไบโอดีเซลจากสาหร่าย	134
ภาพที่ 5.12	แผนผังการผลิตกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ (fatty acid methyl ester; FAME) และไฮดรอกซีอัลคานอยด์เมทิลเอสเทอร์ (hydroxyalkanoate methyl ester; HAME) จากแบคทีเรีย	135
ภาพที่ 6.1	หลักการของการบำบัดน้ำเสียแบบบ่อผึ่ง	147
ภาพที่ 6.2	หลักการของการบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์	148
ภาพที่ 6.3	หลักการของการบำบัดน้ำเสียแบบปฏิกิริยา	149
ภาพที่ 6.4	ดีไนทริฟิเคชันโดยดีไนทริไฟอิงแบคทีเรีย	154

ภาพที่ 6.5	ลักษณะโคโลนีของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงและแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีเขียว	160
ภาพที่ 6.6	รูปร่างเซลล์และสีเซลล์ของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง <i>Rhodobacter sphaeroides</i>	161
ภาพที่ 6.7	รูปร่างเซลล์และสีเซลล์ของแบคทีเรียสังเคราะห์แสง <i>Rhodopseudomonas faecalis</i> PA2 เมื่อเลี้ยงในน้ำเสีย	161
ภาพที่ 6.8	หลักการของ membrane bioreactor (MBR) ในการบำบัดน้ำเสียด้วยแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วง	163
ภาพที่ 7.1	แผนภาพแสดงการใช้สารมลพิษเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งอิเล็กตรอนในจุลินทรีย์	175
ภาพที่ 7.2	หลักการของ biostimulation	183
ภาพที่ 7.3	หลักการของ bioaugmentation	185
ภาพที่ 8.1	ลักษณะต้นข้าวและรากข้าวที่ใช้แบคทีเรียสังเคราะห์แสง <i>Rhodobacter sphaeroides</i> และชุดควบคุม	207
ภาพที่ 8.2	ลักษณะการผลิต <i>Rhodobacter sphaeroides</i> ในถังหมักระดับห้องปฏิบัติการ .	208
ภาพที่ 8.3	เซลล์แบคทีเรีย <i>Bacillus</i> B16K ที่สามารถละลายฟอสเฟตได้	223
ภาพที่ 8.4	ซีโอไลท์ที่ผสมกับแบคทีเรียละลายฟอสเฟต <i>Bacillus</i> B16K และทำแห้งแล้ว	223
ภาพที่ 9.1	เซลล์แบคทีเรีย <i>Bacillus thuringiensis</i> ในระยะเซลล์ปกติ	240
ภาพที่ 9.2	เซลล์แบคทีเรีย <i>Bacillus thuringiensis</i> ในระยะมีเอนโดสปอร์และโปรตีนคริสตัล	240



วิดีโอ: คำอธิบายก่อนเข้าสู่เนื้อหา ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับจุลินทรีย์

ส่วนที่ 1

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับจุลินทรีย์

ก่อนกล่าวถึงรายละเอียดของการประยุกต์ใช้จุลินทรีย์ในแต่ละด้านนั้น ส่วนแรกของหนังสือเล่มนี้ผู้เขียนต้องการอธิบายให้ผู้อ่านได้ทราบพอสังเขปก่อนว่าจุลินทรีย์มีกี่ประเภท แต่ละประเภทมีคุณสมบัติเบื้องต้นอย่างไรบ้าง และจำแนกโดยใช้คุณลักษณะใด (บทที่ 1) รวมทั้งอธิบายถึงระยะการเจริญและการเพาะเลี้ยง (บทที่ 2) เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจเกี่ยวกับจุลินทรีย์มากขึ้นและทราบว่าเพราะเหตุใดจุลินทรีย์จึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในปัจจุบัน เพราะในส่วนอื่นของหนังสือเล่มนี้ที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้จุลินทรีย์ได้กล่าวถึงประเภทของจุลินทรีย์ที่นำมาประยุกต์ใช้ วิธีการเพาะเลี้ยงเพื่อผลิตสารที่สำคัญ และระยะการเจริญเข้าไปเกี่ยวข้องด้วย รวมถึงคำว่าเมแทบอลิต์ปฐมภูมิ (primary metabolite) และเมแทบอลิต์ทุติยภูมิ (secondary metabolite) ได้อธิบายในส่วนนี้ด้วย เพราะสารเหล่านี้จัดเป็นผลผลิตจากจุลินทรีย์เช่นเดียวกัน

ประเภทของจุลินทรีย์



วิดีโอ: คำอธิบายก่อนเข้าสู่เนื้อหา ประเภทของจุลินทรีย์

บทที่ 1

ประเภทของจุลินทรีย์

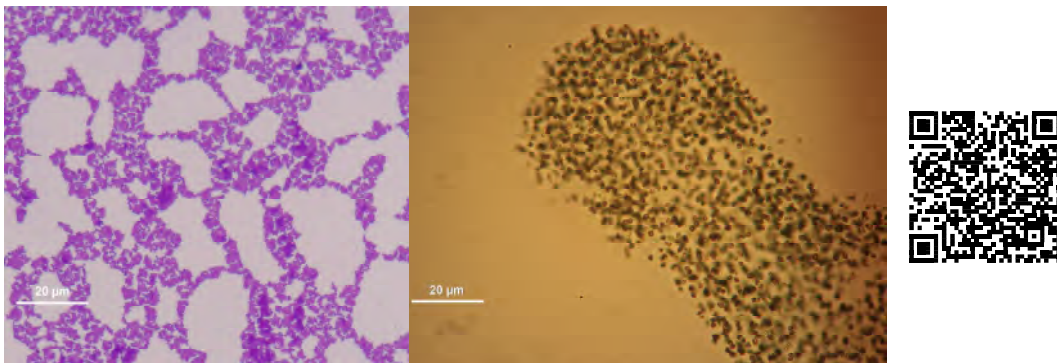
สิ่งมีชีวิตบนโลกถูกจำแนกตามระบบสามโดเมน (The three-domain system) โดยนักจุลชีววิทยา และนักชีวฟิสิกส์ชาวอเมริกันชื่อ คาร์ล ริชาร์ด วอส (Carl Richard Woese) ในปี ค.ศ. 1990 โดเมนทั้งสามนั้นประกอบด้วยแบคทีเรีย (*Bacteria*) อาร์เคีย (*Archaea*) และยูคารีเรีย (*Eukarya*) การจำแนกสิ่งมีชีวิตในระบบนี้พิจารณาจากความแตกต่างของไรโบโซมอลอาร์เอ็นเอ (ribosomal RNA; rRNA) และการมีหรือไม่มีนิวเคลียส (nucleus) กล่าวคือ ยูคารีเรียมีนิวเคลียส ในขณะที่ทั้งแบคทีเรียและอาร์เคียไม่มีนิวเคลียสและไม่มีออร์แกเนลล์ที่มีเยื่อหุ้ม (membrane-bound organelle) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากลักษณะทางชีวเคมีและยีน (gene) จึงทำให้อาร์เคียถูกแยกออกจากแบคทีเรีย

จุลินทรีย์ (microorganisms) หมายถึง สิ่งมีชีวิต (organism) ที่เป็นเซลล์ (cellular) และสิ่งที่ไม่เป็นเซลล์ (acellular) ซึ่งมีขนาดเล็กอาจไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (ยกเว้นเห็ดและสาหร่ายบางสปีชีส์) จุลินทรีย์แบ่งเป็น 6 ประเภทหลัก ได้แก่ แบคทีเรีย อาร์เคีย ฟังไจ สาหร่าย โพรทิสต์ และไวรัส แบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์เซลล์เดียว มีขนาดเล็กและมักสืบพันธุ์ (reproduction) ด้วยวิธีแบ่งเซลล์แบบ binary fission อาร์เคียเป็นจุลินทรีย์เซลล์เดียวเช่นกัน แต่มีคุณสมบัติทางชีวเคมีและลักษณะทางสรีรวิทยาบางประการที่แตกต่างจากแบคทีเรีย ฟังไจประกอบด้วยเห็ด รา และยีสต์ สาหร่ายเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถสังเคราะห์แสงได้และมีคลอโรพลาสต์ (chloroplast) โพรทิสต์เป็นจุลินทรีย์เซลล์เดียว ไม่มีผนังเซลล์ (cell wall) ดำรงชีวิตทั้งแบบอิสระและแบบปรสิตที่ต้องอาศัยอาหารจากสิ่งมีชีวิตอื่น (ในตำราบางเล่มจัดสาหร่ายและโพรทิสต์อยู่ในกลุ่มโพรทิสต์ (protist)) ส่วนไวรัสไม่จัดเป็นเซลล์แต่เป็นปรสิต (parasite) อาศัยอยู่ในสิ่งมีชีวิตอื่นและก่อให้เกิดโรค

1. แบคทีเรีย

จุลินทรีย์ในโดเมนนี้มักเป็นจุลินทรีย์ที่มีเซลล์เดียว มีรูปร่างเป็นท่อน กลม เกลียว โค้ง หรือมีรูปร่างไม่แน่นอน จัดเป็นสิ่งมีชีวิตพวกโพรแคริโอต (prokaryote) ประกอบด้วยออร์แกเนลล์ (organelle)

ที่ไม่มีเยื่อหุ้มและไม่มีนิวเคลียส ดีเอ็นเอ (DNA) เป็นรูปร่างแหวนพันอยู่กับโปรตีนอยู่ในไซโทพลาซึม (cytoplasm) เรียกว่านิวคลีอยด์ (nucleoid) ด้านนอกของเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) มีผนังเซลล์ที่แข็งแรงเพื่อรักษารูปร่างของเซลล์ โดยผนังเซลล์ประกอบด้วยเพปติโดไกลแคน (peptidoglycan) ซึ่งไม่พบในสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในโดเมนอื่น แบคทีเรียแกรมลบมีเยื่อหุ้มด้านนอก (outer membrane) อีกชั้น แต่แบคทีเรียแกรมบวกไม่มี ส่วนประกอบภายในเซลล์แบคทีเรีย ได้แก่ โปรตีน ดีเอ็นเอ และสารเมแทบอลิต์ (metabolite) ต่างๆ รวมอยู่ด้านในเยื่อหุ้มเซลล์ แบคทีเรียมีการเพิ่มจำนวนโดยการแบ่งเซลล์แบบ binary fission คือ จากหนึ่งเซลล์แบ่งออกเป็นสองเซลล์โดยที่เซลล์ใหม่มีลักษณะเหมือนเซลล์เดิม แบคทีเรียหลายชนิดมีรยางค์ (appendage) หรือส่วนที่ยื่นออกจากเซลล์ซึ่งเรียกว่า แฟลกเจลลา (flagella) เพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ แบคทีเรียจัดเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีออร์แกเนลล์แบบโบราณ อย่างไรก็ตามในวงจรชีวิต (life cycle) ของแบคทีเรียบางชนิดยังมีลักษณะที่เป็นหลายเซลล์ (multicellular stage) เช่น พวกริเชียแบคทีเรีย (myxobacteria) และไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) บางชนิด นอกจากนั้นแบคทีเรียบางชนิดยังสามารถสังเคราะห์แสงได้ ปัจจุบันมีแบคทีเรียหลายสปีชีส์ที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ซึ่งครอบคลุมในหลายอุตสาหกรรมและการเกษตรรวมถึงการนำไปบำบัดสิ่งแวดล้อม ภาพของแบคทีเรียและไซยาโนแบคทีเรียแสดงในภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 แบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* (ซ้าย) และไซยาโนแบคทีเรีย *Microcystis* sp. (ขวา)

ที่มา: จัดทำโดยผู้เขียน

2. อาร์เคีย

อาร์เคียจัดเป็นโพรแคริโอตซึ่งเป็นจุลินทรีย์เซลล์เดี่ยวประกอบด้วยออร์แกเนลล์ที่ไม่มีเยื่อหุ้มและไม่มีนิวเคลียส มีรูปร่าง ขนาด และลักษณะภายนอกคล้ายสิ่งมีชีวิตในโดเมนแบคทีเรีย เพิ่มจำนวนโดยการแบ่งเซลล์แบบ binary fission สามารถเคลื่อนที่โดยใช้แฟลกเจลลา อาร์เคียมีผนังเซลล์เช่นกันแต่ผนังเซลล์ของอาร์เคียไม่มีเพปทิโดไกลแคน ถึงแม้ลักษณะภายนอกของอาร์เคียคล้ายกับแบคทีเรีย แต่ยีนและเมแทบอลิซึม (metabolism) คล้ายกับสิ่งมีชีวิตยูแคริโอต (eukaryote) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับทรานสคริปชัน (transcription) และทรานสเลชัน (translation) ตัวอย่างของอาร์เคีย เช่น *Methanocaldococcus jannaschii* และ *Halobacterium* เป็นต้น อาร์เคียและแบคทีเรียมีโครงสร้างหลายอย่างที่มีลักษณะคล้ายกันและทำหน้าที่เหมือนกันซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 1.1

ลักษณะเด่นของอาร์เคียคือสามารถเจริญในสภาพแวดล้อมที่ผิดปกติ ซึ่งสิ่งมีชีวิตในโดเมนอื่นไม่สามารถเจริญได้ เช่น ทะเลสาบน้ำเค็มที่มีความเค็มสูง บางชนิดเจริญในบริเวณที่มีเกลือเข้มข้นสูงกว่าน้ำทะเลถึง 10 เท่า ที่พบใน Great Salt Lake ประเทศสหรัฐอเมริกา และ Dead Sea ประเทศอิสราเอล จึงมักเรียกอาร์เคียที่ชอบเจริญในบริเวณที่มีความเค็มได้ชื่อว่าพวกฮาลโอฟิล (halophile) อาร์เคียบางชนิดสามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิสูง เช่น 105 องศาเซลเซียส และมีการพบอาร์เคียที่บ่อน้ำพุร้อน Yellowstone National Park ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งอาร์เคียที่ชอบเจริญบริเวณอุณหภูมิสูงเรียกว่าพวกเทอร์โมฟิล (thermophile) อาร์เคียบางชนิดยังพบในบริเวณที่หนาวเย็นของทวีปแอนตาร์กติกาแถบขั้วโลกใต้และบริเวณรัฐอลาสก้าประเทศสหรัฐอเมริกา อาร์เคียที่ชอบเจริญในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำเรียกว่าไซโครฟิล (psychrophile) นอกจากนั้นยังพบในมหาสมุทรและใต้ทะเลลึกที่มีความดันสูง อาร์เคียที่ชอบเจริญในบริเวณที่มีความดันสูงเรียกว่าพวกบาร์โอฟิล (barophile) เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของอาร์เคียที่แตกต่างจากสิ่งมีชีวิตอื่นจึงมีการนำอาร์เคียมาใช้ประโยชน์มากโดยเฉพาะในด้านอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทนความร้อนสูงและการใช้ประโยชน์หลักของจุลินทรีย์ในโดเมนนี้ที่รู้จักมากคือการนำมาผลิตพลังงานทดแทน เช่น ไฮโดรเจน นอกจากนั้นยังถูกนำมาใช้ในด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ตารางที่ 1.1 ลักษณะโครงสร้างต่างๆ ที่พบทั้งในแบคทีเรียและอาร์เคีย

โครงสร้าง	หน้าที่
ผนังเซลล์	ทำให้เซลล์คงรูปและปกป้องเซลล์จากแรงดันออสโมติก
เยื่อหุ้มเซลล์	ห่อหุ้มเซลล์ ทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่านควบคุมการเข้า-ออกของสารอาหารผ่านเซลล์ เป็นบริเวณที่เกิดการหายใจระดับเซลล์ (cellular respiration) และเกี่ยวข้องกับการเกิดเคโมแทกซิส (chemotaxis)
ไรโบโซม	สังเคราะห์โปรตีน
นิวคลีออยด์	เป็นบริเวณที่พบสารพันธุกรรม เช่น ดีเอ็นเอ
แคปซูล (capsule) และเมือก (slime layer)	ป้องกันเซลล์จากการถูกจับด้วยวิธีฟาโกไซโทซิส (phagocytosis) และมีหน้าที่ยึดเกาะกับพื้นผิวอื่นๆ แต่มักไม่พบในอาร์เคีย
แฟลกเจลลา	ช่วยในการเคลื่อนที่
พริมเบรีย (frimbriae) และไฟไล (pili)	ช่วยเกาะกับพื้นผิวและวัตถุ ช่วยในการจับคู่ (conjugation) และทรานสเฟอร์เมชัน (transformation) และช่วยในการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไปมา (gliding)
ก๊าซแควคิวโอล (gas vacuole)	ช่วยในการลอยตัวเมื่ออยู่ในน้ำ
อินคลูชัน (inclusion)	เป็นที่เก็บคาร์บอน ฟอสเฟต และสารอื่นๆ

ที่มา: Willey et al. (2011) หน้า 51

3. ยูคารีีย

จุลินทรีย์ในโดเมนนี้เป็นสิ่งมีชีวิตยูแคริโอต (eukaryote) มีทั้งพวกที่เป็นเซลล์เดียวและหลายเซลล์ มีออร์แกเนลล์ที่มีเยื่อหุ้มและมีนิวเคลียสซึ่งภายในมีสารพันธุกรรม นอกจากนั้นยังมีไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ประเภทของจุลินทรีย์ที่จัดอยู่ในโดเมนนี้ ได้แก่ ฟังไจ สาหร่าย และโพรทิสต์ โดยจุลินทรีย์ในประเภทฟังไจประกอบด้วยรา เห็ด และยีสต์

3.1 สาหร่าย

สาหร่ายมีรูปร่างหลายแบบแต่มีลักษณะที่เหมือนกันคือสามารถสังเคราะห์แสงได้และมีรงควัตถุสีเขียวที่เรียกว่า คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) และบางชนิดอาจมีรงควัตถุอื่นๆ ที่ทำให้สาหร่ายชนิดนั้นมีสีที่เป็นลักษณะเฉพาะ รงควัตถุมีหน้าที่ดูดซับแสงเพื่อใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน ในสาหร่ายมีคลอโรพลาสต์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง สาหร่ายพบได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม มีลักษณะคล้ายแบคทีเรียคือมีผนังเซลล์ที่แข็งแรง แต่องค์ประกอบทางเคมีภายในเซลล์แตกต่างจากจุลินทรีย์ในโดเมนแบคทีเรียและอาร์เคีย สามารถเคลื่อนที่โดยใช้แฟลกเจลลา แต่ลักษณะแฟลกเจลลาของสาหร่ายมีความซับซ้อนและไม่เหมือนกับแฟลกเจลลาของโพรแคริโอต ตัวอย่างของสาหร่ายแสดงในภาพที่ 1.2

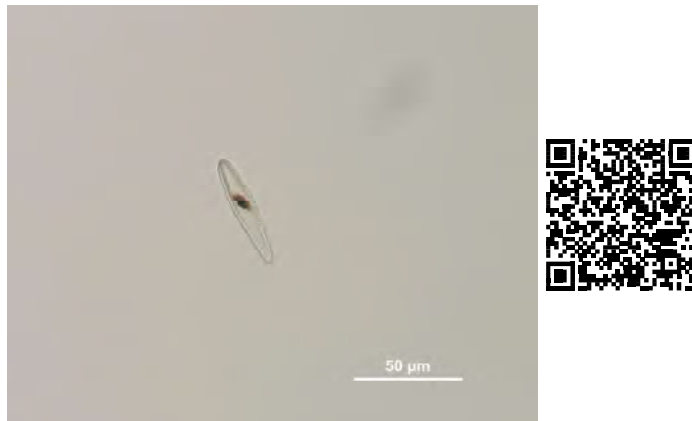


ภาพที่ 1.2 สาหร่าย *Chlorella* sp. (ซ้าย) และ *Phacus* sp. (ขวา)

ที่มา: จัดทำโดยผู้เขียน

สาหร่ายและสารที่ผลิตจากสาหร่ายหลายชนิดถูกนำมาประยุกต์ใช้หลายด้าน ทั้งผลิตอาหารพลังงาน และวัสดุต่างๆ สิ่งมีชีวิตที่เรียกว่า ไดอะตอม (diatom) จัดเป็นสาหร่ายเช่นเดียวกัน แต่มีลักษณะพิเศษคือผนังเซลล์ประกอบด้วยซิลิกาที่เรียกว่า ฟรอสทูล (frustule) จึงทำให้มีลักษณะคล้ายอัญมณี และนักวิทยาศาสตร์พบว่าผนังเซลล์ของไดอะตอมประกอบด้วยซิลิกาที่มีโครงสร้างซับซ้อนและเป็นโครงสร้างสามมิติขนาดเล็กระดับนาโนเมตรมีพื้นที่ผิวมากจึงง่ายต่อการดัดแปลง สามารถใช้ทำวัสดุใยแก้ว วัสดุเร่งปฏิกิริยา และวัสดุเกี่ยวกับไฟฟ้าได้ ปัจจุบันมีการนำไดอะตอมมาเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตไบโอเซนเซอร์ (biosensor) แบตเตอรี่ โซลาร์เซลล์ ตลอดจนวัสดุที่ใช้ในระบบนำส่งยา (drug-delivery system) นอกจากนั้นผนังเซลล์ของไดอะตอมยังทนความร้อนได้ถึง 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหลาย

ชั่วโมงในสถานะที่มีแมกนีเซียม ซึ่งแมกนีเซียมจะเข้าแทนที่ซิลิกอนโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างสามมิติ ดังนั้นจึงเป็นการเปลี่ยนซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide) ที่ใช้ประโยชน์น้อยให้กลายเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide) ที่มีการใช้ประโยชน์มาก ตัวอย่างของไดอะตอมแสดงในภาพที่ 1.3



ภาพที่ 1.3 ไดอะตอม *Navicula* sp.

ที่มา: จัดทำโดยผู้เขียน

3.2 ฟังไจ

ฟังไจบางกลุ่มมีเซลล์เดียวเรียกว่ายีสต์ (yeast) มีรูปร่างกลมหรือรี แต่ฟังไจบางกลุ่มจัดเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีหลายเซลล์ ได้แก่ ราและเห็ด ซึ่งมีระยะที่เป็นเส้นใยโดยเฉพาะราซึ่งมองเห็นเส้นใยชัดเจนและสปอร์มีสีต่างๆ ส่วนเห็ดที่รู้จักและนำมารับประทานมีระยะที่เป็นเส้นใยเช่นเดียวกันแต่มีความพิเศษ คือมีการเจริญที่เป็นหมวกเห็ดและมีสีส่นหรือรูปร่างสวยงาม ฟังไจได้รับพลังงานจากสารอินทรีย์จึงพบฟังไจได้ทุกบริเวณที่มีสารอินทรีย์ ตัวอย่างเช่น การพบเห็ดเจริญอยู่ตามขอนไม้เพราะสามารถใช้สารอินทรีย์จากขอนไม้เพื่อการเจริญและสร้างพลังงานได้ หรือการพบเชื้อราบนขนมปังเพราะเชื้อราสามารถใช้คาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานได้ เป็นต้น ฟังไจส่วนใหญ่พบบนบก แต่มีบางกลุ่มที่พบในน้ำ ฟังไจที่พบในน้ำคือกลุ่มราน้ำ (water mold) ที่ทำให้เกิดโรคในสัตว์น้ำ เช่น จีนิส *Saprolegnia* spp. และ *Achlya* spp. เป็นต้น โดยทั่วไปฟังไจที่เป็นเชื้อราและเห็ดมีการสร้างสปอร์ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เกี่ยวข้องกับการสืบพันธุ์ ฟังไจในกลุ่มเห็ดสามารถใช้เป็นอาหารและยารักษาโรค ฟังไจในกลุ่มยีสต์ใช้มากในอุตสาหกรรม

อาหารและพลังงาน และเชื้อราหลายชนิดยังนำมาประยุกต์ใช้ทั้งด้านการเกษตรและสิ่งแวดล้อม ภาพของราแสดงดังภาพที่ 1.4



ภาพที่ 1.4 รา *Aspergillus* sp.

ที่มา: จัดทำโดยผู้เขียน

3.3 โพรโทซัว

โพรโทซัวจัดเป็นสิ่งมีชีวิตยูแคริโอตที่มีเซลล์เดียวพบทั้งในน้ำและบนบก สมัยก่อนถูกจัดเป็นสัตว์เซลล์เดียวแต่ปัจจุบันจัดอยู่ในกลุ่มของจุลินทรีย์ ถึงแม้มีขนาดเล็กแต่มีความซับซ้อนและขนาดใหญ่กว่าโพรแคริโอต โพรโทซัวแตกต่างจากสาหร่ายและฟังไจคือไม่มีผนังเซลล์แต่มีเฉพาะเยื่อหุ้มชั้นนอก (outer membrane) โพรโทซัวส่วนใหญ่ต้องการสารอินทรีย์เป็นแหล่งอาหารและเคลื่อนที่ได้ซึ่งการเคลื่อนที่เป็น

ลักษณะเฉพาะสำหรับใช้จำแนกโพรโทซัว (ภาพที่ 1.5) ลักษณะสำคัญของจุลินทรีย์ทั้ง 3 ประเภทที่จัดเป็นสิ่งมีชีวิตยูแคริโอตแสดงในตารางที่ 1.2



ภาพที่ 1.5 โพรโทซัว *Loxodes* sp.

ที่มา: จัดทำโดยผู้เขียน

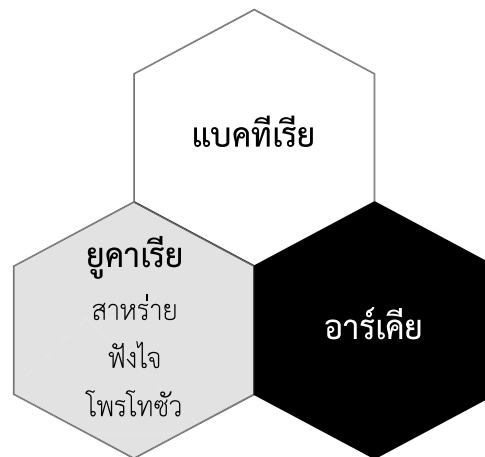
ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบลักษณะของจุลินทรีย์ยูแคริโอต

คุณลักษณะ	สาหร่าย	ฟังไจ	โพรโทซัว
ลักษณะเซลล์	เซลล์เดียวหรือหลายเซลล์	เซลล์เดียวหรือหลายเซลล์	เซลล์เดียว
แหล่งพลังงาน	แสง	สารอินทรีย์	สารอินทรีย์
ขนาด	ขนาดเล็กมากหรือขนาดใหญ่	ขนาดเล็กมากหรือขนาดใหญ่	ขนาดเล็กมาก

ที่มา: ดัดแปลงจาก Nester et al. (2004) หน้า 11

จากที่กล่าวไปข้างต้น จุลินทรีย์ในโดเมนแบคทีเรียและอาร์เคียจัดเป็นสิ่งมีชีวิตโพรแคริโอต ส่วนจุลินทรีย์ที่อยู่ในโดเมนยูคารียจัดเป็นสิ่งมีชีวิตยูแคริโอต ซึ่งสรุปเป็นแผนภาพได้ดังภาพที่ 1.6 และลักษณะ

สำคัญของจุลินทรีย์ทั้ง 3 โดเมน สรุปในตารางที่ 1.3



ภาพที่ 1.6 แผนภาพแสดงจุลินทรีย์ประเภทต่างๆ ในแต่ละโดเมน
ที่มา: จัดทำโดยผู้เขียน

ตารางที่ 1.3 สรุปลักษณะที่สำคัญของจุลินทรีย์ในโดเมนแบคทีเรีย อาร์เคีย และยูคาเรีย

ลักษณะที่สำคัญ	แบคทีเรีย	อาร์เคีย	ยูคาเรีย
ขนาด	0.3-2 ไมโครเมตร	0.3-2 ไมโครเมตร	5-50 ไมโครเมตร
เยื่อหุ้มนิวเคลียส	ไม่มี	ไม่มี	มี
ผนังเซลล์	มีเพปทิโดไกลแคน	ไม่มีเพปทิโดไกลแคน	ไม่มีเพปทิโดไกลแคน
โครงสร้างภายในเซลล์			
- ไมโทคอนเดรีย	ไม่มี	ไม่มี	มี
- คลอโรพลาสต์	ไม่มี	ไม่มี	มี (ในสาหร่าย)
แหล่งที่พบ	ทุกแห่ง	มักพบในสภาพแวดล้อมที่ผิดปกติ	สภาพแวดล้อมปกติ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Anderson et al. (2016) หน้า 258