การผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสสายพันธุ์ *Acetobacter xylinum* และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

The Production of Bacterial Cellulose from *Acetobacter xylinum* and Application in Industry

จุฬาลักษณ์ เขมาชีวะกุล[1]*
Julaluk Khemacheewakul[1]*

บทคัดย่อ

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรงที่ประกอบด้วยกลูโคสมาต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่งบีต้า-1,4 ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์ของพืช อย่างไรก็ตาม เซลลูโลสที่ได้จากพืชมักมีพอลิแซคคาไรด์ชนิดอื่นๆ ปนเปื้อนมาด้วย เช่น ลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ดังนั้น เซลลูโลสจากแบคทีเรียสายพันธุ์ *Acetobacter xylinum* จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเป็นแหล่งของเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งโครงสร้างของพอลิเมอร์ประกอบไปด้วยกลูโคสเพียงชนิดเดียว จึงทำให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายโดยเฉพาะในทางการแพทย์และการแปรรูปอาหาร ตลอดจนการประยุกต์ใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม บทความเผยแพร่นี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายเกี่ยวกับกระบวนการสังเคราะห์สารชีวโมเลกุลเพื่อนำไปสู่การผลิตเซลลูโลสปริมาณสูง โครงสร้างของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย และนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียไปประยุกต์ใช้ รวมทั้งการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

คำสำคัญ: *Acetobacter xylinum*; เซลลูโลส; การประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม

[1] โปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร 62000
[1] Division of Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Kamphaeng Phet, 62000.
* Corresponding author: E-mail: Looktarn005@hotmail.com

Abstract

Cellulose is a linear glucose polymer of β-1,4-glycosidic bond, which is the main component of plant cells walls. However, cellulose from plant is still contaminated with polysaccharides, such as lignin and hemicellulose. Thus, bacterial cellulose from *Acetobacter xylinum* is alternative sources of high purity cellulose that consist only glucose monomer, it exhibits numerous great properties. This microbial cellulose could be applied in various areas especially medical and food processing, including application in the production of environmentally-friendly bioplastic packaging. The purpose of this review is to describe the biosynthetic process to achieve high cellulose production, bacterial cellulose structure, and potential application of bacterial cellulose including its application in food industry.

Keywords: *Acetobacter xylinum*; cellulose; Industrial applications

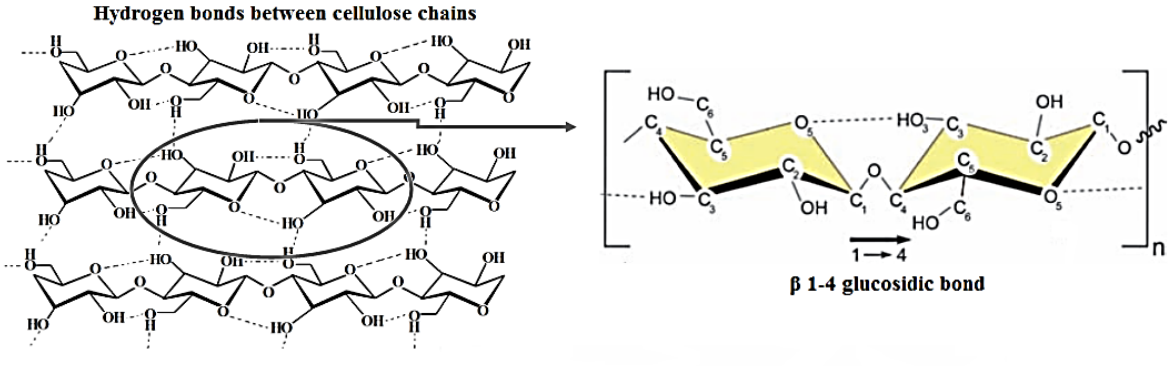
บทนำ

การค้นพบเซลลูโลสจากแบคทีเรีย (bacterial cellulose) ครั้งแรกโดย Brown (1988) ซึ่งรายงานผลการวิเคราะห์เส้นใยที่ผลิตได้ว่ามีความบริสุทธิ์สูง โครงสร้างปราศจากกิ่งสาขาดังที่พบในโครงสร้างเซลลูโลสที่สกัดได้จากพืช รูปแบบโครงสร้างของเซลลูโลสที่ได้จากแบคทีเรียนี้จึงทำให้มีสมบัติเฉพาะคือ ความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูง เส้นใยมีลักษณะใส และเส้นใยทนต่อแรงดึง (Saibuatong and Phisalaphong, 2010) เซลลูโลสจากแบคทีเรียเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการหมักด้วยแบคทีเรียสกุล *Acetobacter* โดยสายพันธุ์ที่นิยมใช้คือ *Acetobacter xylinum* เป็นแบคทีเรียแกรมลบ รูปร่างมีทั้งแบบกลมและแบบแท่ง อยู่เป็นเซลล์เดี่ยว เซลล์คู่ หรือเรียงต่อกันเป็นสาย ต้องการอากาศในการเจริญ โดยเจริญได้ดีที่สภาวะอุณหภูมิช่วง 25-30 องศาเซลเซียส และพีเอชอยู่ในช่วง 3-7 ใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโต และสังเคราะห์เซลลูโลสออกมาภายนอกเซลล์ (บุปผาชาติ และคณะ, 2555) เนื่องจากเซลลูโลสที่ผลิตได้จากการหมักของแบคทีเรียสายพันธุ์ดังกล่าวมีคุณสมบัติเฉพาะ คือ มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับเซลลูโลสจากพืช มีความบริสุทธิ์สูง ความสามารถอุ้มน้ำได้ปริมาณมาก แข็งแรง ทนต่อแรงดึงได้สูง (Klemm *et al*., 2006) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกชีวภาพ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมการผลิตยาและทางการแพทย์ เป็นต้น ทางด้านโภชนาการพบว่าเซลลูโลสที่ผลิตได้จากแบคทีเรียไม่สามารถย่อยได้ในลำไส้ของมนุษย์ มีปริมาณเส้นใยอาหารสูงจึงเหมาะสมต่อผู้บริโภคที่มีความต้องการควบคุมน้ำหนัก (Chawla *et al.,* 2009) นอกจากนี้เซลลูโลสยังถูกนำมาใช้เป็นวัตถุเจือปนในอาหารเพื่อปรับปรุงลักษณะสมบัติของอาหาร เช่น นำมาเป็นสารให้ความข้นหนืด (thickening agent) และสารให้ความคงตัว (stabilizing agent) ในผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป เป็นต้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของเซลลูโลสจากแบคทีเรีย กระบวนการทางชีวเคมีในการสังเคราะห์เซลลูโลสของแบคทีเรีย และการประยุกต์ใช้เซลลูโลสจากแบคทีเรียในด้านต่างๆ

โครงสร้างเซลลูโลสที่ผลิตได้จากแบคทีเรีย

เซลลูโลสเป็นสารชีวโมเลกุลประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ผลิตได้จากแบคทีเรีย โดยมีโครงสร้างประกอบด้วยสายพอลิเมอร์ขนาดเล็กที่มีหน่วยย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิ-ดิกชนิดบีตา (1,4) ที่มีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_{10}O_5)n$ (Ul-Islam *et al*., 2012) ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยเส้นใยที่ผลิตได้นี้ มีขนาดเล็กกว่าเซลลูโลสที่สกัดได้จากพืชถึง 100 เท่า และจัดเรียงตัวคล้ายกับโครงสร้างของไฮโดรเจลที่มีพื้นที่ผิวมากและระดับความพรุนสูง (Gayathry and Gopal-aswamy, 2014) *Acetobacter* sp. ผลิตเส้นใยเซลลูโลส

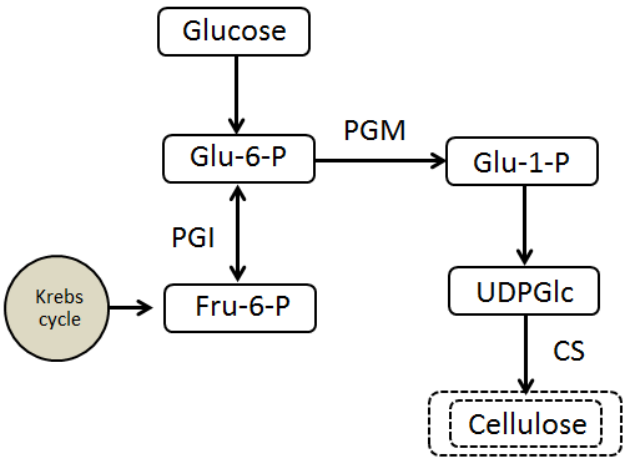
สองชนิดได้แก่ ชนิดแรกคือโครงสร้าง พอลิเมอร์คล้ายริบบิ้น และแบบที่สองโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มีความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Chawla *et al*., 2009) จุลินทรีย์ในกลุ่ม *Acetobacter* sp. โดยเฉพาะสายพันธุ์ *A. xylinum* สามารถผลิตเส้นใยเซลลูโลสขนาดเล็กๆ จำนวนมากซึ่งขับออกมาจากผนังเซลล์แล้วเชื่อมต่อกันเป็นร่างแห โดยรวมตัวกันคล้ายริบบิ้นที่บริเวณผิวหน้าของอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหลว (liquid culture) โครงสร้างระดับโมเลกุลของเซลลูโลสพบว่ามีหมู่ไฮดรอกซิล จำนวนมากที่ผิวของโครงสร้างเส้นใย จึงทำให้เซลลูโลสจากกระบวนการดังกล่าวนี้ละลายน้ำได้ ย่อยสลายได้ง่ายจากการเร่งปฏิกิริยาด้วยสารชีวโมเลกุล และเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างได้ง่าย (Klemm *et al*., 2005)



ภาพที่ 1: โครงสร้างโมเลกุลของหน่วยเซลลูโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา (1,4) ในแต่ละหน่วยย่อย และเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนในแต่ละสายของเซลลูโลส (Poletto *et al*., 2010)

กระบวนการสังเคราะห์เส้นใยเซลลูโลสของแบคทีเรีย

เส้นใยเซลลูโลสที่ผลิตได้จากกระบวนการหมักด้วย *A. xylinum* จะเกิดขึ้นบริเวณเยื่อหุ้มไซโตพลาสมิกที่มีเอนไซม์เซลลูโลสซินเตส (cellulose synthase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยกระบวนการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลสประกอบด้วยหลายขั้นตอนซึ่งเกี่ยวข้องกับกลไกหลัก 2 ขั้นตอน คือ การสังเคราะห์สารยูริดีน ไดฟอสโฟกลูโคส (Uridine diphosphate-glucose, UDPGlc) แล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการเชื่อมต่อสายยาวของกลูแคนชนิดบีต้า (1,4) ที่ไม่มีกิ่งก้านสาขา ทั้งนี้การสังเคราะห์ UDPGlc เริ่มจากการใช้แหล่งอาหารคาร์บอนในวัฏจักรเครป เช่น เฮกโซส (hexose) กลีเซอรอล (glycerol) ไดไฮดรอกซีแอซีโตน (dihydroxyacetone) ไพรูเวต (pyruvate) และกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) เป็นต้น จากนั้นจึงเข้าสู่วัฏจักรฟอสโฟรีเลชั่น (phosphorylation) เพื่อสังเคราะห์ ATP (adenosine triphosphate) จาก ADP (adenosine diphosphate) และหมู่ฟอสเฟต ตามด้วยกระบวนการไอโซเมอไรเซชั่น (isomerization) ผ่านสารตัวกลางทำให้ได้สารตั้งต้นสำหรับสังเคราะห์เซลลูโลสคือ UDPGlc (ภาพที่ 2) โดยพบว่าจุลินทรีย์สายพันธุ์ *A. xylinum* มีประสิทธิภาพสูงในการสังเคราะห์เซลลูโลส โดยสามารถเปลี่ยนสารตั้งต้นที่เป็นแหล่งคาร์บอนได้เป็นสารผลิตภัณฑ์เซลลูโลสได้มากถึงร้อยละ 50 (De Lannino *et al*., 1998) ประสิทธิภาพในการผลิตเส้นใยเซลลูโลสของจุลินทรีย์แต่ละสายพันธุ์ ดังแสดงในตารางที่ 1 ในกระบวนการสร้างสายของกลูแคนชนิดบีต้า (1,4) ยังเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์กลูโคซิลทรานเฟอเรส (glucosyltransferase) ซึ่งอยู่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งมี cyclic dimeric guanosine monophosphate (c-di-GMP) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการสังเคราะห์และทำให้เอนไซม์ดังกล่าวทำงานได้เป็นปกติ การยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์สายเซลลูโลสสามารถทำได้โดยการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ 2 ชนิด คือ ฟอสโฟไดเอสเทอร์เรส (phosphodiesterase, PDE) ชนิดเอและบี (PDE A, PDE B)



ภาพที่ 2: กระบวนการทางชีวเคมีในการสังเคราะห์เซลลูโลส (PGI: ฟอสโฟกลูโคไอโซเมอเรส, PGM: ฟอสโฟกลูโคมิวเตส, และ CS: เซลลูโลสซินเตส)

ตารางที่ 1: ปริมาณการผลิตเซลลูโลสของจุลินทรีย์แต่ละสายพันธุ์

สายพันธุ์จุลินทรีย์	ชนิดของแหล่งคาร์บอน	สารเสริมในกระบวนการหมัก	ระยะเวลาในการหมัก	ปริมาณเซลลูโลส (กรัมต่อมิลลิลิตรของแหล่งคาร์บอน)
Acetobacter xylinum	กลูโคส	เอทานอลและออกซิเจน	50 ชั่วโมง	15.30
Acetobacter sp.	กลูโคส	เอทานอล	8 วัน	4.16
Gluconacetobacter hansenii	กลูโคส	ออกซิเจน	72 ชั่วโมง	2.50
G. xylinus	แมนนิทอล	ชาเขียว	7 วัน	3.34
Lactobacillus mali	ซูโครส	ไม่มี	72 ชั่วโมง	4.20

(ที่มา: Bajaj *et al*., 2009)

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเซลลูโลสที่ได้จากกระบวนการหมักด้วยแบคทีเรียเ

เซลลูโลสที่ได้จากการหมักด้วย *A. xylinum* เป็นพอลิเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์ ปราศจากเพคติน ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ประกอบด้วยหน่วยย่อยของกลูโคสประมาณ 2,000- 18,000 หน่วย มีค่า crystallinity และ degree of polymerization สูง ค่า water holding capacity อยู่ในช่วงระหว่าง 60 -700 เท่าของน้ำหนักแห้ง ซึ่งสมบัติของเซลลูโลสจากแบคทีเรียในด้านต่างๆ เหล่านี้ จึงเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับเซลลูโลสที่ได้จากพืช ดังแสดงในตารางที่ 2 และจากการทดลองหาปริมาณความชื้นของวุ้นที่ได้จากการหมักด้วย *A. xylinum* โดยนำวุ้นไปอบแห้งที่ระดับอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักก่อนจะนำไปคำนวณหาปริมาณความชื้น ซึ่งพบว่าวุ้นมีน้ำเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก (วิจิตรา และคณะ, 2555) เซลลูโลสจากแบคทีเรียยังมีค่า shape retention และ tear resistance ที่สูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์หลายชนิด ทนต่อแรงดึงได้ดีกว่าเส้นใยสังเคราะห์ ค่า tensile strength ของเซลลูโลสจากแบคทีเรียสูงกว่าฟิล์มพอลิเอทิลีน (polyethylene film) หรือไวนิลคลอไรด์ (vinyl chloride) ถึง 5 เท่า ค่า Young's modulus มีค่า 30,000 เมกกะปาสคาล (MPa) ซึ่งสูงกว่าพอลิเมอร์อินทรีย์ (organic polymers) ทั่วไปถึง 4 เท่า ลักษณะโครงสร้างเส้นใยมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยของพืชชั้นสูงและเส้นใยสังเคราะห์ประมาณ 10-1,000 เท่า และ 100 เท่า ตามลำดับ โดยมีความหนาประมาณ 3 - 4 นาโนเมตร กว้างประมาณ 60-80 นาโนเมตร และยาวประมาณ 180 - 960 นาโนเมตร สามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่างๆ ได้ดี เส้นใยมีลักษณะใส ไม่ละลายในตัวทำละลายต่างๆ เช่น

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) เมทานอล (methanol) และอะซิโตน (acetone) แต่ละลายได้ในคิวปรีเอทิลีนไดอะมีน (cupriethylenediamine) ซึ่งมีผลทำให้เซลลูโลสพองตัวโดยทำลายพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลส (Halib *et al*., 2012)

ตารางที่ 2: การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างและสมบัติต่างๆ ระหว่างเซลลูโลสที่ได้จากพืชกับเซลลูโลสที่ได้จากแบคทีเรีย (Esa *et al*., 2014)

ลักษณะโครงสร้าง / สมบัติของเส้นใยเซลลูโลส	เซลลูโลสจากพืช	เซลลูโลสจากแบคทีเรีย
1. ความบริสุทธิ์	พอลิเมอร์ประกอบไปด้วยสารอื่นๆ หลายชนิด	พอลิเมอร์มีความบริสุทธิ์
2. ส่วนประกอบภายในพอลิเมอร์	ประกอบไปด้วยเซลลูโลสที่อยู่รวมกับเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และเพคตินในสัดส่วนที่แตกต่างกันตามชนิดของพืช	ประกอบไปด้วยโมเลกุลกลูโคสเพียงชนิดเดียว
3. การจัดเรียงตัวของโครงสร้างเส้นใย	โครงสร้างมีกิ่งสาขามักไม่เป็นระเบียบ	การจัดเรียงตัวของเส้นใยอย่างเป็นระเบียบ
4. ขนาดของเส้นใยเซลลูโลส	ขนาดของเส้นใยมีขนาดใหญ่	ขนาดของเส้นใยเล็กกว่าเส้นใยจากพืช 100 เท่า
5. สีของเส้นใยเซลลูโลส	เส้นใยมีสีขาวหรือค่อนข้างขาว	เส้นใยมีลักษณะใส
6. ความแข็งแรงของเส้นใยเซลลูโลส	เส้นใยทนต่อแรงดึงต่ำ	เส้นใยมีความแข็งแรง ทนต่อแรงดึงสูง
7. ความสามารถในการอุ้มน้ำของเส้นใยเซลลูโลส	ความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ (ค่า water holding capacity อยู่ในช่วงระหว่าง 10-20 เท่าของน้ำหนักเซลลูโลสแห้ง)	ความสามารถในการอุ้มน้ำสูง (ค่า water holding capacity อยู่ในช่วงระหว่าง 60-700 เท่าของน้ำหนักเซลลูโลสแห้ง)

การประยุกต์ใช้เซลลูโลสจากแบคทีเรียในอุตสาหกรรม

การประยุกต์ใช้เซลลูโลสที่ผลิตได้จากแบคทีเรียพบในอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ อย่างหลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ อุตสาหกรรมอาหาร การผลิตยา และการบำบัดของเสีย เป็นต้น (Shah *et al*., 2005) ตัวอย่างการนำเซลลูโลสที่ผลิตได้จากแบคทีเรียมาดัดแปลงใช้เป็นส่วนประกอบของเยื่อเมมเบรนต่างๆ เช่น เป็นส่วนประกอบของลำโพงและกระดาษที่ต้องการความเหนียวสูง ในทางการแพทย์ได้มีการนำเซลลูโลสที่ผลิตได้จากแบคทีเรียมาพัฒนาเพื่อปรับใช้เป็นผลิตภัณฑ์รักษาบาดแผลเนื่องจากมีความเหนียวในสภาวะที่มีความชื้นสูง โดยไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง นอกจากนี้เซลลูโลสชนิดนี้ยังถูกนำมาปรับใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารและเครื่องสำอางอีกด้วย

การประยุกต์ใช้เซลลูโลสในอุตสาหกรรมอาหาร

จากสมบัติทางเคมีที่พบว่าเซลลูโลสที่ได้จากการหมักด้วยแบคทีเรียมีความบริสุทธิ์สูง จึงนำเซลลูโลสชนิดนี้มาประยุกต์ใช้เป็นส่วนประกอบอาหาร ทั้งการเป็นวัตถุเจือปนช่วยเพิ่มเนื้อสัมผัสและความคงตัว ดังแสดงในตารางที่ 3 เซลลูโลสที่ผลิตได้จากแบคทีเรียนิยมนำมาบริโภคเช่นเดียวกับการบริโภควุ้นซึ่งมีเนื้อสัมผัสนิ่มผิวหน้าเรียบ ฉ่ำน้ำ ไม่มีคลอเรสเตอรอล มีปริมาณไขมันและให้พลังงานต่ำ (Jagannath *et al*., 2008) โดยในปี 1992 ประเทศญี่ปุ่นได้ผลิตวุ้นจากแบคทีเรียเซลลูโลสเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องดื่มลดน้ำหนักเพื่อตอบสนองผู้บริโภคที่ให้ความสำคัญกับสุขภาพ ในกระบวนการผลิตวุ้นมะพร้าวที่หมักด้วยแบคทีเรียสายพันธุ์ *A. xylinum* จะใช้น้ำมะพร้าวเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับจุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนไปเป็นเซลลูโลส โดยมีชื่อเรียกในประเทศฟิลิปปินส์ว่า Nata de coco วุ้นเซลลูโลสที่ได้จากการหมักจะถูกนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด ต้มจนเดือดเพื่อล้างกรด ก่อนจะ

นำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารเช่น อาหารทานเล่น เครื่องดื่มน้ำผลไม้ค็อกเทล และเจลลี่ เป็นต้น (Montealegre *et al*., 2012)

เซลลูโลสที่ได้จากกระบวนการหมักด้วย *A. xylinum* ยังถูกนำมาใช้ในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ชีวภาพที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายได้ง่าย ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และป้องกันความชื้นได้ดี (Arrieta *et al*., 2014) บุษกร (2555) ได้ศึกษาการผลิตฟิล์มที่มีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ และนำไปประยุกต์ใช้ในการบรรจุอาหารที่มักมีการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ โดยการผลิตเซลลูโลสฟิล์ม (bacterial cellulose film) ที่สามารถควบคุมหรือลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอาหารในระหว่างการวางจำหน่ายผลิตภัณฑ์อาหารได้ โดยหมัก *A. xylinum* ในน้ำมะพร้าว จากนั้นนำเซลลูโลสที่ได้มาล้างไล่กรดและอบให้แห้ง ทำการเคลือบเซลลูโลสด้วยสารที่มีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ ได้แก่ เซทิลไพริดิเนียมคลอไรด์ (Cetylpyridinium chloride, CPC) ซึ่งมีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์และยังเป็นสารที่มีความปลอดภัยสูง นิยมนำมาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ในช่องปาก เช่น ยาสีฟันและน้ำยาบ้วนปากเพื่อการลดปริมาณจุลินทรีย์ โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคในอาหาร 4 ชนิด ได้แก่ *Salmonella*, *E. coli*, *Staphylococcus*, และ *Bacillus* พบว่าฟิล์มที่เคลือบสาร CPC สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบได้ทั้ง 4 ชนิด และเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการห่อเนื้อไก่ที่ผ่านการล้างด้วยกรดฟูมาริก ร้อยละ 0.5 แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน พบว่าสามารถชะลอการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ปนเปื้อนจากเนื้อไก่ได้ดีกว่าชุดควบคุมที่บรรจุที่ไม่ได้เคลือบ CPC โดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 3: การประยุกต์ใช้เซลลูโลสจากการหมักด้วยแบคทีเรียในอาหารชนิดต่างๆ

ลำดับที่	ชนิดของเซลลูโลส	หน้าที่ในการเป็นส่วนประกอบ	ประเภทอาหาร
1	แบคทีเรียเซลลูโลส (ไนซีน)	ยับยั้งจุลินทรีย์ในบรรจุภัณฑ์อาหาร	เนื้อสัตว์
2	แบคทีเรียเซลลูโลส (พอลิไลซีน)	ขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์อาหาร	ไส้กรอก
3	แบคทีเรียเซลลูโลส	อิมัลซิไฟเออร์	ซูริมิ
4	คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	ควบคุมการไหล	แป้งโด
5	ไฮดรอกซีโพรพิล เมทิล เซลลูโลส	เพิ่มลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัส	วิปครีม
6	เมทิลเซลลูโลส	ยืดอายุการเก็บรักษา	ไข่
7	เมทิลเซลลูโลส	ช่วยในการดูซึมเข้าสู่ร่างกาย	วิตามินซี

(ที่มา: Esa *et al*., 2014)

การประยุกต์ใช้เซลลูโลสในอุตสาหกรรมยาและทางการแพทย์

ปัจจุบันชีววัสดุอย่างเซลลูโลสที่ได้จากกระบวนการหมักด้วย *A. xylinum* มีบทบาทในทางการแพทย์เป็นอย่างมาก เนื่องจากวัสดุธรรมชาตินี้เป็นมิตรกับร่างกาย (biocompatibility) และกระตุ้นการซ่อมแซมเนื้อเยื่อได้ดีกว่าชีววัสดุสังเคราะห์ การนำชีววัสดุมาใช้ในทางการแพทย์และเภสัชกรรมมีความแพร่หลายมากขึ้น เช่น การนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียไปผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) เพื่อช่วยให้เส้นใยผสมที่ได้มีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้น และนำมาใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดและความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหาร ยา และเครื่องสำอาง ตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม เช่น ไฮดรอกซีเมทิลเซลลูโลส (hydroxymethyl cellulose, HMC) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxymethyl cellulose, CMC) และเซลลูโลสอะซีเตต (cellulose acetate, CA) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการผลิตเซลลูโลสที่เคลือบสารปฏิชีวนะหรืออนุภาคของเงินลงไป เพื่อใช้ในการผลิตหนังเทียมหรือผ้าพันแผลสำหรับรักษาแผลติดเชื้อ ตลอดจนการพัฒนาเซลลูโลสสำหรับการผลิตอวัยวะเทียมต่างๆ เช่น หลอดเลือดเทียมและเยื่อเลือกผ่าน เป็นต้น (Klemm *et al*., 2006) การประยุกต์ใช้เซลลูโลสในการทำวัสดุปิดแผลมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความถี่ในการทำแผลและคงความชุ่มชื้นโดยไม่ต้องทายาที่แผลบ่อย นอกจากนี้แผ่นเซลลูโลสยังช่วยลดการสร้างเนื้อเยื่อที่มากเกินไป ช่วยลดเนื้อตาย รักษาความชื้นที่เหมาะสมจึงทำให้วัสดุปิดแผลไม่ติดกับผิวหนังภายหลังการเปลี่ยนวัสดุปิดแผล รวมทั้งยังเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ปิดแผลที่มีสารคัดหลั่งมาก ทั้งนี้แผ่นเซลลูโลสที่

นำเข้าจากต่างประเทศยังมีราคาค่อนข้างแพงจึงมีการใช้ในวงจำกัด ศรัณยูและชนัญ (2555) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เซลลูโลสที่ได้จากการหมักด้วย *Gluconobacter nataicola* LMG 1536(T) ในการนำมาใช้เป็นวัสดุปิดแผลโดยผสมเซลลูโลสกับพอลิเมอร์ธรรมชาติอื่น เช่น ไคโตซาน อัลจิเนต และแป้ง ผลการศึกษาพบว่าการผสมเซลลูโลสกับอัลจิเนตทำให้แผ่นฟิล์มลอกออกได้ง่าย และมีความแข็งเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มเซลลูโลสชนิดอื่นๆ โดยวิเคราะห์ค่า Young's modulus เท่ากับ 10335.20±1050.28 MPa

การประยุกต์ใช้เซลลูโลสในด้านอื่นๆ

ปัจจุบันมีการนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียไปประยุกต์ใช้ในงานวัสดุอย่างแพร่หลาย โดยอาศัยเทคโนโลยีและเทคนิคจำเพาะในการดัดแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมี เช่น การนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียผงไปผสมกับเส้นใยคาร์บอน เพื่อช่วยให้เส้นใยขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ง่ายขึ้น หรือนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียไปผสมกับซีตไพเบอร์คาร์บอนกัมมันต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารพิษ นอกจากนี้ยังมีการนำเซลลูโลสจากแบคทีเรียไปผลิตเป็นกระดาษลำโพง ซึ่งทำให้คุณภาพของเสียงดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุชนิดอื่น เป็นต้น บุปผาชาติ และคณะ (2555) ศึกษาการผลิตแผ่นเซลลูโลสสำหรับขึ้นรูปเป็นกระถางที่ย่อยสลายได้ จากการหมักด้วย *A. xylinum* ในน้ำมะพร้าว โดยศึกษาระดับอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมในการอบแผ่นเซลลูโลสที่มีความหนา 0.5 1.0 และ 1.5 เซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าแผ่นเซลลูโลสที่เหมาะสมในการขึ้นรูปมากที่สุดคือ แผ่นที่มีความหนา 1.0 เซนติเมตร อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง รับแรงกดได้ที่ 148.60 นิวตัน มีระยะยืดอยู่ที่ 35 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปกดลงแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปโดยใช้เครื่องกดไฮดรอลิกด้วยแรง 120 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร บนพื้นที่ 17×17 ตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 2 นาที ภายหลังการนำกระถางที่ขึ้นรูปสมบูรณ์แล้วไปอบซ้ำด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่ากระถางมีอัตราการคืนสภาพน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 5.06

โกวิทและชัยศรี (2555) ได้ศึกษาการผลิตพลาสติกชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยการนำวัชพืชที่ผ่านการการย่อยสลายเป็นสารโมเลกุลขนาดเล็กได้แก่ ไซโลส ซูโครส กลูโคส และอะราบิโนส มาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการหมักด้วย *A. xylinum* เพื่อผลิตเซลลูโลส ผลการทดลองพบว่าแหล่งคาร์บอนชนิดกลูโคสมีประสิทธิภาพในการผลิตพลาสติกชีวภาพสูงสุด โดยสังเคราะห์เซลลูโลสได้ ร้อยละ 16 รองลงมาคือ ไซโลส-ซูโครส และอะราบิโนส ร้อยละ 12 10 และ 6 ตามลำดับ ภายหลังการหมักเป็นเวลา 6 วัน และจากการศึกษาดังกล่าวยังพบว่ากลูโคสถือเป็นแหล่งคาร์บอนเหมาะสมที่สุดสำหรับนำไปพัฒนาเป็นพลาสติกชีวภาพต่อไป นอกจากนี้ Surma *et al*. (2008) พบว่าการหมักด้วย *A. xylinum* เพื่อผลิตเซลลูโลสสำหรับนำไปปรับปรุงการผลิตกระดาษ พบว่าการใช้แหล่งอาหารกลูโคสในการหมักเป็นเวลา 7-8 วัน มีประสิทธิภาพมากที่สุด

สรุป

การหมักอาหารด้วย *A. xylinum* ถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้ผลิตเซลลูโลส ซึ่งทำให้ได้เซลลูโลสที่มีคุณสมบัติเฉพาะแตกต่างจากเซลลูโลสที่ได้จากพืช โดยในปัจจุบันมีการนำเซลลูโลสที่ผลิตได้จากกระบวนการหมักนี้มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอย่างหลากหลาย อาทิเช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมยา และทางการแพทย์ ซึ่งพบว่าก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในเชิงกระบวนการผลิต คุณค่าทางโภชนาการ และเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์

เอกสารอ้างอิง

โกวิท สุวรรณหงส์ และชัยศรี ธาราสวัสดิ์พิพัฒน์. 2555. รายงานการวิจัยเรื่องศักยภาพการผลิตพลาสติกชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้จากเกษตรกรรม. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.

บุปผาชาติ ยศคันโท คมกฤต เล็กสกุล มลทิรา ตัะบุญธง และ วลัยลักษณ์ ไชยสกูล. 2555. การศึกษาคุณสมบัติของเซลลูโลสแบคทีเรียเพื่อการผลิตกระถางย่อยสลายได้. ใน: การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2555. 17-19 ตุลาคม 2555. โรงแรมเมธาวลัย จังหวัดเพชรบุรี.

บุษกร ทองใบ. 2555. การผลิตฟิล์มที่มีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ จากน้ำ มะพร้าว. สารวิจัยเพื่อชุมชน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 1(2), 76-83.

วิจิตรา ใหม่จันทร์ พิชามญชุ์ กำมังละการ สุวรรณา สุดปรึก กุลนันท์ ปุ๊ดพรหม ชุติมา อันชนะจันทร์ทิมา พงษ์พานิช และ สุรศักดิ์ ละลอก-

น้ำ. 2555. การผลิตเซลลูโลสจากแบคทีเรีย *Acetobacter xylinum* TISTR 086 โดยใช้ผลผลิตทางการเกษตรเป็นแหล่งคาร์บอน. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้. 3(2), 3-4.

ศรัณยู อุ่นทวี และ ชนัญ ผลประไพ. 2555. การประยุกต์ใช้สารประกอบเซลลูโลสจากแบคทีเรียกับพอลิเมอร์ธรรมชาติเพื่อผลิตแผ่นฟิล์ม. การประชุมเครือข่ายวิชาบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 1. 18ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

Arrieta, M.P., E. Fortunati, F. Dominici, E. Rayón, J. López, and J.M. Kenny. 2014. PLA-PHB/cellulose based films: Mechanical, barrier and disintegration properties. Polymer Degradation and Stability. 107, 139–149.

Bajaj, I., P. Chawla, R. Singhal, and S. Survase. 2009. Microbial cellulose: fermentative production and applications. Food Technology and Biotechnology. 47(2), 107-124.

Brown, A.J., 1988. An Acetic Ferment which forms Cellulose. Chemical Society 49, 432-439.

Chawla, P.R., I.B. Bajaj, S.A. Survase, and R.S. Singhal. 2009. Microbial cellulose: fermentative production and applications. Food Technology Biotechnology. 47(2), 107-124.

Esa, F., S.M. Tasirin, and N.A. Rahman. 2014. Overview of bacterial cellulose production and application. Agriculture and Agricultural Science Procedia. 2, 113–119.

Gayathry, G. and G. Gopalaswamy. 2014. Production and characterization of microbial cellulosic fibre from *Acetobacter xylinum*. Indian Journal of Fibre and Textile Research. 39, 93-96.

Halib, N., M.C.I.M. Amin, and I. Ahmad. 2012. Physicochemical properties and characterization of *nata de coco* from local food industries as a source of cellulose. Sains Malaysiana. 41(2), 205-211.

Jagannath, A., A. Kalaiselvan, S.S. Manjunatha, P.S. Raju, and A.S. Bawa. 2008. The effect of pH, sucrose and ammonium sulphate concentrations on the production of bacterial cellulose (nata de coco) by *Acetobacter xylinum*. World Journal of Microbiology and Biotechnology. 24(11), 2593-2599.

Klemm, D., B. Heublein, H.-P. Fink, and A. Bohn. 2005. Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material. Angewandte Chemie International Edition. 44(22), 3358–3393.

Klemm, D., D. Schumann, F. Kramer, N. Heßler, M. Hornung, H.-P. Schmauder, and S. Marsch. 2006. Nanocelluloses as Innovative Polymers in Research and Application. In Klemm, D. Polysaccharides II. Advances in Polymer Science. Berlin Heidelberg: Springer.

De Iannino, N.I., R.O. Couso, and M.A. Dankert. 1988. Lipid-linked intermediates and the synthesis of acetan in *Acetobacter xylinum*. Microbiology. 134(6), 1731–1736.

Montealegre, C.M., E.R. Dionisio, L.V. Sumera, J.R.T. Adolacion, and R.L. De Leon. 2012. Continuous bioethanol production using Saccharomyces cerevisiae cells immobilized in nata de coco (biocellulose). *In* 2nd International Conference on Environment and Industrial Innovation IPCBEE. Singapore: LACSIT Press.

Poletto, M., J. Dettenborn, V. Pistor, M. Zeni, and A.J. Zattera. 2010. Materials produced from plant biomass: Part I: evaluation of thermal stability and pyrolysis of wood. Materials Research. 13(3), 375–379.

Saibuatong, O., and M. Phisalaphong. 2010. Novo aloe vera–bacterial cellulose composite film from biosynthesis. Carbohydrate Polymers. 79(2), 455–460.

Shah, J. and R.M.J.R. Brown. 2005. Towards electronic paper displays made from microbial cellulose. Applied Microbiology and Biotechnology. 66, 352-355.

Surma-slusarska, B., S. Presler, and D. Danielewicz. 2008. Characteristics of bacterial cellulose obtained from *Acetobacter xylinum* culture for application in papermaking. Fibres and Textile in Eastern Europe. 16(4), 108-111

Ul-Islam, M., T. Khan, and J.K. Park. 2012. Water holding and release properties of bacterial cellulose obtained by in situ and ex situ modification. Carbohydrate Polymers. 88(2), 596–603.