

การผลิตเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา

บทนำ

เส้นใยนาโนเซลลูโลส (nano-cellulose fiber) ผลิตจากเนื้อไม้หรือผลไม้อื่นๆ เช่น ไม้ยางพารา สับปะรดและกล้วย มีขนาดระดับนาโนเมตรและมีความแข็งแรงมาก เส้นใยเซลลูโลสขนาดปกติที่ใช้ในการทำกระดาษสามารถเตรียมได้จากการสกัดจากพืช โดยนักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบกระบวนการเตรียมเส้นใยเซลลูโลสที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร เช่นเดียวกับเส้นใยที่ผลิตจากวัสดุอื่นๆ เช่น แก้ว คาร์บอน การนำเส้นใยนาโนเซลลูโลสไปใช้งานสามารถใช้เสริมแรงวัสดุให้มีความแข็งแรงและทนทานขึ้นได้

ลักษณะทั่วไปของนาโนเซลลูโลส [1]

เส้นใยพืชจัดเป็นเส้นใยที่พบเห็นได้ง่าย เช่น ใบไม้ ผลไม้ ลำต้นที่ประกอบขึ้นจากเส้นใยเล็กๆ (elementary fibrils) ที่ยึดประสานกันอยู่ด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งเรียกว่า เพคติน (pectinous gums) ที่พบอยู่มากทั้งในส่วนผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary wall) และ มิดเดิลลามেলা (middle lamella) ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นผนังร่วมของเซลล์สองเซลล์ที่อยู่ติดกัน ในระหว่างที่พืชเจริญเติบโต ผนังเซลล์ปฐมภูมิจะเติบโตและเมื่อหยุดการเจริญเติบโตไซโตพลาสซึม (cytoplasm)¹ ที่อยู่ภายในเนื้อเยื่อ sclerenchyma² จะแห้ง ทำให้ผนังเซลล์เริ่มหนาขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของผนังเซลล์ทุติยภูมิที่หนาและแข็ง ซึ่งเกิดขึ้นภายในของผนังเซลล์ปฐมภูมิและสร้างเส้นใยเซลลูโลส³ ผนังเซลล์ทุติยภูมิจะเกิดขึ้นจากการทับถมต่อเนื่องของชั้นเซลลูโลส ซึ่งแบ่งออกเป็นสามชั้นย่อย (S1, S2 และ S3) ชั้นที่อยู่ตรงกลางเป็นชั้นที่สำคัญที่สุดเพราะมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของเส้นใย ประกอบด้วย ไมโครไฟบริล (microfibrils)⁴ ที่จัดเรียงตัวกันเป็นมัด เส้นผ่าศูนย์กลางของไมโครไฟบริล อยู่ระหว่าง 10-30 นาโนเมตร ลักษณะที่สำคัญของโครงสร้างผนังเซลล์ทุติยภูมิคือมุมของการจัดเรียงตัวของเซลลูโลสไมโครไฟบริล (cellulose microfibrils) กับทิศทางหลักของเส้นใย ในความเป็นจริงแต่ละชั้นย่อยทั้งสามชั้นของเส้นใยมีการเรียงตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเส้นใยแต่ละชนิด และจากความหนาของผนังเซลล์ทุติยภูมิทำให้ช่องว่างระหว่างเซลล์หรือลูเมน (lumen) มีขนาดเล็กกลวง (ดังรูปที่ 1 และ 2) ผนังของเซลล์พืช (ทั้งส่วนของ



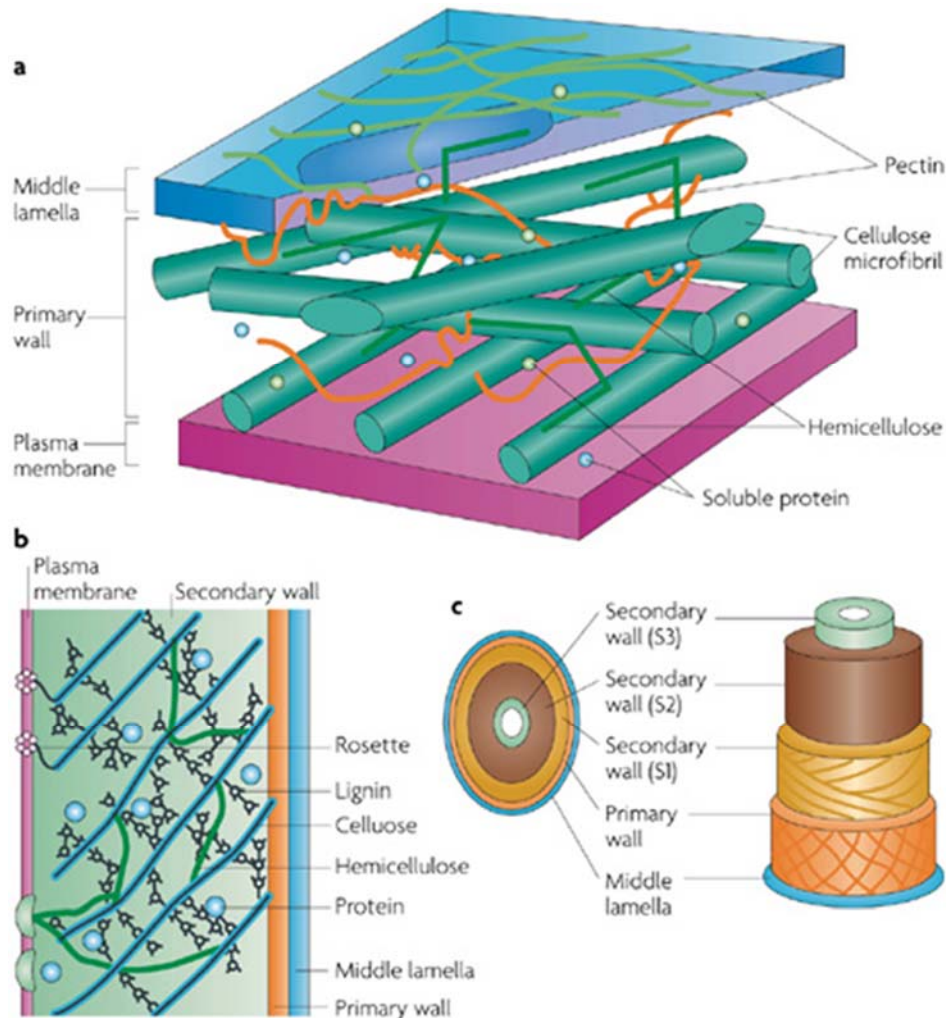
¹ ไซโตพลาสซึม คือ ส่วนที่ล้อมนิวเคลียสอยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์

² เนื้อเยื่อส่วน sclerenchyma เป็นเนื้อเยื่อที่สร้างความแข็งแรงและแข็งแกร่งให้กับพืช และยังทำหน้าที่ในการช่วยพยุงลำต้นของพืช

³ เส้นใยเซลลูโลสหนึ่งเส้นประกอบขึ้นจากการห่อหุ้มเส้นใยเซลลูโลสขนาดเล็กๆ ที่โยงใยกันไปมาด้วยเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน

⁴ ไมโครไฟบริล ประกอบด้วยส่วนของโครงสร้างที่เป็นผลึกและอสัณฐาน

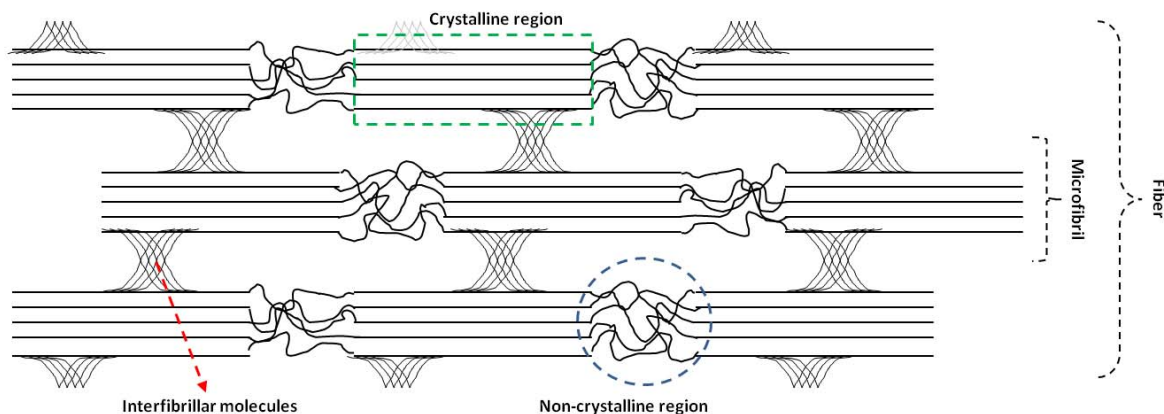
ผนังเซลล์ปฐมภูมิและผนังเซลล์ทุติยภูมิ จัดเป็นวัสดุผสม (composite) ประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลสไฟบริล (cellulose fibrils) ฝังตัวอยู่ในเนื้อ (matrix) ที่เป็นลิกนิน (lignin)⁵ และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)⁶



รูปที่ 1 ภาพการจำลองเส้นใย (elementary fibrils) หน่วยเล็กๆ ของเส้นใยฝังตัวอยู่ในเนื้อของลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส โดย A) ผนังเซลล์ที่ไม่มีโครไฟบริลเซลลูโลสเฮมิเซลลูโลส, เพคติน, ลิกนินและโปรตีนที่ละลายน้ำได้ B) เอนไซม์เซลลูโลส synthase ที่อยู่ในรูปของดอกกุหลาบเชิงซ้อน (rosette) ซึ่งลอยในเยื่อหุ้มพลาสมาเมมเบรน C) lignification เกิดขึ้นในชั้น S1, S2 และ S3 ของผนังเซลล์ [2]

⁵ ลิกนินมีโครงสร้างแบบอสัณฐานเกิดจากพันธะของโคพอลิเมอร์ของพินิลโพรเพน (p-coumaryl, coniferyl and sinapyl alcohol) ทำหน้าที่เป็นเสมือนกาวที่ติดเส้นใยเซลลูโลสไว้กับส่วนประกอบอื่นๆ ทำให้มีสมบัติไม่ละลายน้ำ การกำจัดหรือการแยกเส้นใยออกจากลิกนินทำได้โดยใช้สารเคมีเป็นตัวทำละลาย ซึ่งภายหลังการทำปฏิกิริยากับสารเคมี เมื่อลิกนินถูกกำจัดออกไป เส้นใยจะมีพื้นที่ภายในโครงสร้างเพิ่มขึ้นมีโอกาสในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการต่างๆ มากขึ้น

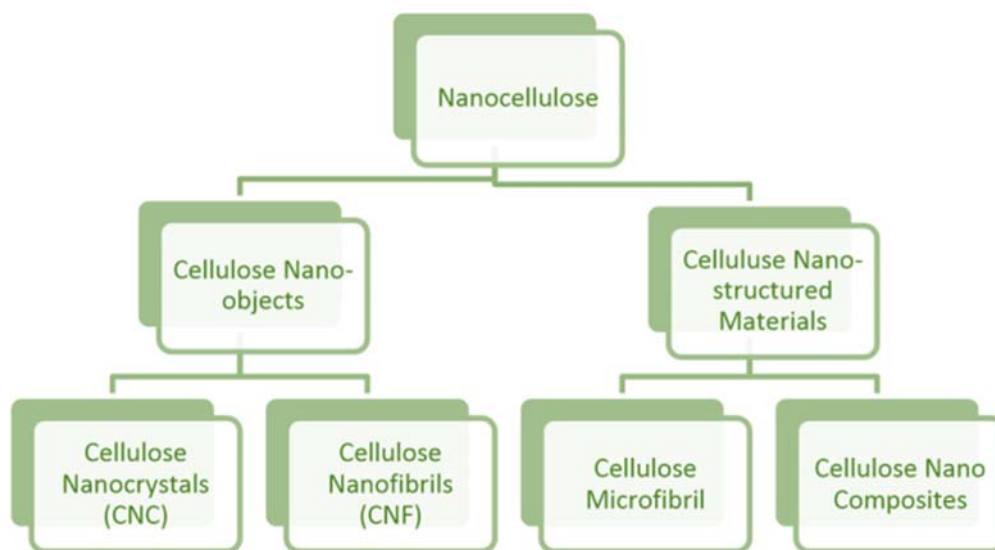
⁶ เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) คือ เซลลูโลสที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้านไม่ไซสายตรงเหมือนเซลลูโลสที่เป็นเส้นใย มีรูปร่างแบบอสัณฐาน และมีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ (amorphous and un-oriented) อยู่ตรงที่ว่างระหว่างเส้นใยเล็กๆ ตรงส่วนผนังเซลล์ปฐมภูมิและทุติยภูมิ ไม่ละลายในน้ำแม้ในสถานะที่ให้ความร้อน สร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างตัวมันเองกับเส้นใยเซลลูโลส



รูปที่ 2 องค์ประกอบของไมโครไฟบริลที่อยู่ภายในเส้นใย [3]

การแบ่งประเภทของนาโนเซลลูโลส

นาโนเซลลูโลสเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10-200 นาโนเมตร ซึ่งนาโนเซลลูโลสหรือเป็นที่รู้จักในชื่อ นาโนคริสตัล วิสเกอร์ (whiskers) นาโนไฟบริล หรือ นาโนไฟเบอร์ นาโนเซลลูโลสจัดแบ่งเป็น 2 ชนิดหลัก คือ 1. cellulose nanocrystal (CNC) และ 2. cellulose microfibrils (CMFs) หรือที่รู้จักในชื่อ cellulose nanofibrils (CNFs) ดังที่ Habibi และคณะ, 2010 ระบุไว้ หรือในกรณีตามหลักของ TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) (2011) ได้มีการแบ่งนาโนเซลลูโลสออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ (รูปที่ 3) คือ แบ่งตามประเภทและตามโครงสร้าง ในแต่ละวิธียังสามารถแบ่งแยกย่อยได้อีก 2 แบบ เพื่อให้ง่ายต่อการจดจำ โดยนาโนเซลลูโลสสามารถสกัดได้จากผนังเซลล์ของวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลส (lignocellulosic materials) ด้วยวิธีต่างๆ เช่น วิธีเชิงกล (mechanical) วิธีเคมีเชิงกล (chemo-mechanical) และ เทคนิคเอนไซม์ (enzymatic techniques) เป็นต้น



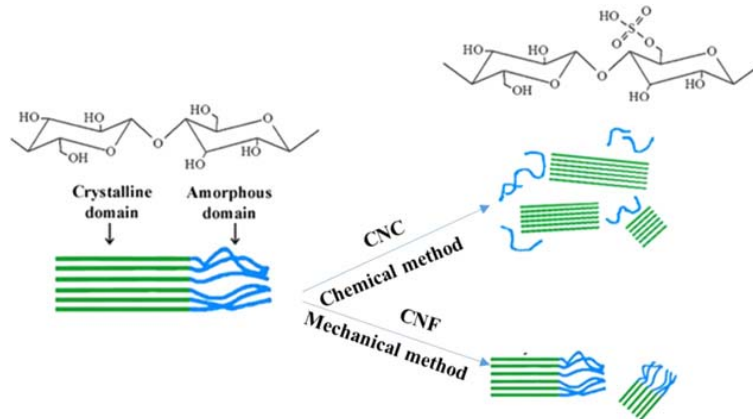
รูปที่ 3 ชื่อลำดับชั้นของนาโนเซลลูโลส ตามการประชุมเชิงปฏิบัติการของ TAPPI จัดขึ้นที่เมืองอาร์ลิงตัน เมื่อวันที่ 9 มิถุนายน 2554 [4]

จากรูปที่ 3 การแบ่งตาม TAPPI สามารถแบ่งได้ดังนี้

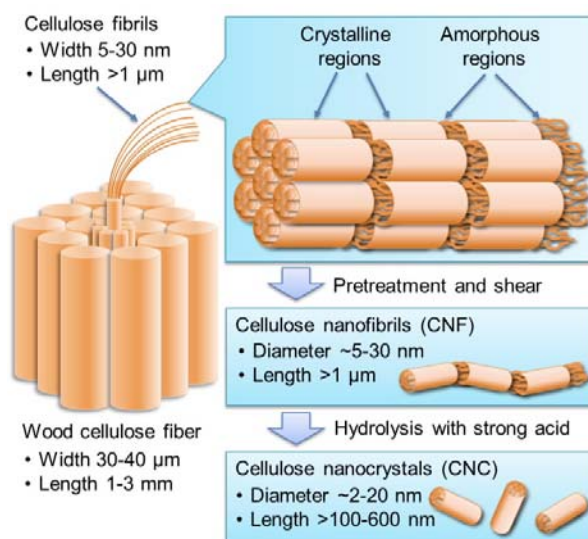
1. Cellulose nano-objects เป็นการแบ่งนาโนเซลลูโลสตามวิธีการผลิต โดยแบ่งเป็น 2 แบบ คือ cellulose nanocrystals (CNC) และ cellulose nanofibrils (CNF) [5, 6] จากรูปที่ 4 และ 5 บ่งบอกถึงความแตกต่างระหว่าง cellulose nanocrystals (CNC) และ cellulose nanofibrils (CNF)

- cellulose nanocrystals (CNC) เป็นเซลลูโลสที่ได้จากการใช้สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อทำการตัดสายโซ่โมเลกุลระหว่างโครงสร้างที่เป็นผลึก (crystals) และโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) โดยสารเคมีที่ใช้จะเป็นเอนไซม์ กรดหรือด่าง เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ NaOH เป็นต้น CNC จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2-20 นาโนเมตร ความยาวของเซลลูโลสมากกว่า 100-600 นาโนเมตร

- cellulose nanofibrils (CNF) หรือ cellulose nanofibrils, nanofibrillar cellulose, nanofibrillated cellulose, microfibrillar cellulose, microfibrillated cellulose เป็นต้น ซึ่ง CNF เป็นนาโนเซลลูโลสที่เกิดจากการอาศัยปฏิกิริยาเชิงกล (mechanical method) ในการทำให้โครงสร้างเกิดการแตกหักระหว่างโครงสร้างที่เป็นผลึกกับผลึก ทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ CNF อยู่ที่ 5-30 นาโนเมตร ความยาวของเซลลูโลสมากกว่า 1 ไมโครเมตร



รูปที่ 4 ความแตกต่างระหว่าง CNC และ CNF [5]



รูปที่ 5 ความแตกต่างระหว่าง CNC และ CNF [6]

2. Cellulose nano-structured materials เป็นการแบ่งนาโนเซลลูโลสตามสมบัติของวัสดุ

- cellulose microfibril (CMF) หรือมีชื่อเรียกอีกชื่อว่า cellulose nanofibrils (CNF) ซึ่งโครงสร้างของ CMF เกิดจากการรวมตัวของไฟบริลแบบปฐมภูมิ (elementary fibrils) จำนวนมาก โดยเซลลูโลสไมโครไฟบริลมีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมโดยมีค้ำยโมดูลัส (Young's Modulus) สูง 138 GPa และมีความต้านทานแรงดึงสูงถึง 2 GPa และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายความร้อนที่ต่ำมาก [7]
- cellulose nanocomposites เป็นการนำเอานาโนเซลลูโลสมาทำปฏิกิริยาร่วมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymer matrix) ด้วยการเอ็กซ์ทรูด, ทำแผ่นเรียบ (casting) เป็นต้น เพื่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเตรียมนาโนเซลลูโลสในนาโนคอมโพสิต [8]

Type of modification	Functionalization method	NC	Polymer matrix	Composite processing method
Non-covalent	Anionic surfactant	CNC	PLA	Extrusion
	Nonionic surfactant	CNC	PS	Solvent casting
	Ionic exchange	CNF	PLA	Solvent casting
Covalent	Silylation	CNC	PLA	Solvent casting
	Acetylation	CNF	PLA	Extrusion
	Acetylation	TOC-CNF	PLA	Casting
	Acetylation	BC	Acrylic	Impregnation
	Pol. grafting	CNC-PEG	PS	Extrusion
	Esterification	BC	PLA	Extrusion
	Alkylation	MCC	PLA	Solvent casting
	Silanization	CNF	PLA	Solvent casting
	Pol. grafting	CNC-PCL	PCL	Extrusion
	Glyoxalization	BC	PLA	Impregnation
	Silylation	CNC, CNF	PLA	Extrusion
	Esterification	CNC, CNF	PLA	Extrusion

การผลิตนาโนเซลลูโลสจากไม้ยาง

นาโนเซลลูโลสเป็นวัสดุเสริมแรงในงานนาโนคอมโพสิต เนื่องจากประสิทธิภาพในการขยายตัวด้วยความร้อนต่ำและมีค้ำยโมดูลัส (Young's Modulus) สูงในบริเวณผลึก ทำให้วัสดุนาโนเซลลูโลสมีความแข็งแรงมากกว่าเหล็ก จึงทำให้มีนักวิจัยสนใจนำไม้ยางพาราที่เป็นพืชที่มีมากในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มาทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการสกัดเป็นเส้นใยนาโนเซลลูโลส

ในปี ค.ศ. 2011 Mehdi J. และคณะ ได้ศึกษาการสกัดเส้นใยนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา (RW) และเส้นใยทะเลลายปาล์มเปล่า (empty fruit bunch, EFB) ด้วยกระบวนการทางเคมีเชิงกล โดยสารเคมีที่ใช้คือ โซเดียมคลอไรด์และกรดอะซิติก ทำปฏิกิริยาในเครื่อง High pressure homogenization ที่ความดัน 500 บาร์ เป็นเวลา 30 นาที พบว่า เส้นใยทะเลลายปาล์มเปล่า (empty fruit bunch, EFB) และไม้ยางพารา (RW) มีผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อเส้นใยผ่านกระบวนการทางเคมีเชิงกล จะมีปริมาณของเฮมิเซลลูโลสและสารลิกนินในเส้นใยลดลงอย่างชัดเจน ในขณะที่ปริมาณของเซลลูโลสกลับเพิ่มขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลสถูกกำจัดออกจากโครงสร้างด้วยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์แอนทราควิโนน (sodium anthraquinone, NaOH-AQ)

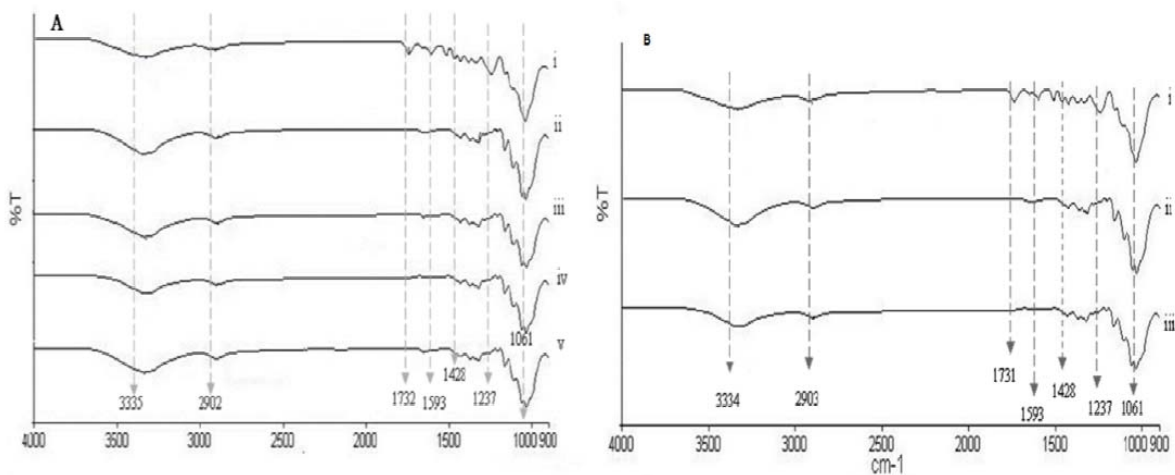
ตารางที่ 2 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่ได้จากการสกัด [9]

Materials	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)	Extractive (%)
EFB fibers				
Untreated fibers	40 ± 2	23 ± 2	21 ± 1	2.0 ± 0.2
Bleached pulp	90 ± 1	4 ± 1	2.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1
Nanofibers	91 ± 1	4 ± 1	1.0 ± 0.5	0.5 ± 0.1
RW fibers				
Untreated fibers	45 ± 3	20 ± 2	29 ± 2	2.5 ± 0.5
Bleached pulp	91 ± 1	5 ± 1	4 ± 1	0.5 ± 0.1
Nanofibers	92 ± 1	4 ± 1	3 ± 1	0.5 ± 0.1

ในงานวิจัยของ Stephanie Maxine Gomez และคณะ (2014) ได้ทำการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากไม้ยางด้วยวิธีเคมี-ความร้อน-เชิงกล (chemo-thermo-mechanical treatment) [9] พบว่าการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากเส้นใยยางพารา *Hevea brasiliensis* หรือเส้นใยไม้ยาง ด้วยการนำเส้นใยมาทำปฏิกิริยาเบื้องต้นกับโซเดียมแอนทราควิโนน (sodium anthraquinone) จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยากับโซเดียมคลอไรต์ (sodium chlorite) กรดอะซิติก (acetic acid) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) โดยเยื่อไม้ (bleached pulps) ที่ได้จะถูกนำไปอบแห้งและแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำมาผสมในเครื่องผสม (mechanical blender) เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งสารละลายเยื่อไม้ (0.3%) ที่เตรียมได้จะถูกนำไปผ่านเครื่องเขย่าสาร (Sonicator) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เส้นใยที่ได้สามารถนำมาตรวจสอบโดยเครื่อง Mastersizer เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างขนาดของเส้นใยไม้ โดยขนาดของเส้นใยที่ได้หลังจากผ่านเครื่องเขย่าสารในช่วงความถี่ 158.49 - 181.97 เฮิร์ตซ์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านเครื่อง homogenizer 10, 20, 30 และ 40 ครั้ง โดยเส้นใยที่ผ่านการทำ homogenizer จำนวน 40 ครั้ง ปริมาณเส้นใยที่ได้อยู่ที่ 0.142-0.200 กรัม เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ได้จะถูกนำมาทดสอบด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น (wave number) 1730.28 และ 1234 cm^{-1} เลขคลื่นหายไปในช่วง 1730.28 cm^{-1} ซึ่งเป็นช่วงของหมู่ C=O ของกลุ่มอะซิทิล (acetyl) และยูโรนิกเอสเทอร์ (uronic ester) ของเฮมิเซลลูโลสหรือกลุ่มเอสเทอร์คาร์บอนิลของสารลิกนิน และช่วง 1234 cm^{-1} เป็นสเปกตรัมของ C-O ของหมู่แอริลกรุป (aryl group) ในสารลิกนิน แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบที่เป็นเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้หลุดหายจากเส้นใยที่ผ่านการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ ยังได้มีการนำเส้นใยนาโนเซลลูโลสมาทดสอบด้วยเครื่อง Field emission scanning electron microscopy (FESEM) พบว่า การทำปฏิกิริยาเคมี มีผลทำให้ผิวของเส้นใยมีความขรุขระและมีลวดลายมากขึ้น นอกจากนี้ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเคมีเชิงกล (chemo - mechanical treatment) อยู่ที่ 160 นาโนเมตร

งานวิจัยของ Pradeep Kumar Poddar และคณะ (2015) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ การสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) ด้วยวิธีอัลตราโซนิคร่วมกับการใช้เอนไซม์และปฏิกิริยาเคมี ซึ่งเส้นใยนาโนเซลลูโลส (cellulose nanofibers) ที่แยกสกัดจากไม้ยางได้ใน 3 ขั้นตอน ในขั้นแรก เส้นใยไม้ยางจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 2 ชนิด คือ เอนไซม์แลคเคส (laccase) และเอนไซม์ไซลานเนส (xylanase) ในขั้นที่ 2 เส้นใยจะถูกนำมาทำปฏิกิริยาเคมีเบื้องต้น (pre-treatments) ด้วยโซเดียมคลอไรต์ (sodium chlorite) เพื่อกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออก ในขั้นที่สาม เส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยเคมี

สามารถแยกเส้นใยนาโน (nanofibers) ด้วยการใช้อัลตราโซนิก (Ultrasonication) โดยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยนาโนขึ้นอยู่กับกำลังการผลิต (output power) ของเครื่องอัลตราโซนิก ซึ่งการกระจายตัวของเส้นใยนาโนเพิ่มมากขึ้นตามกำลังการผลิตของอัลตราโซนิกทำปฏิกิริยา เมื่อทำการศึกษากับกล้องจุลทรรศน์ (Microscopy) จะเห็นว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยนาโนอยู่ในช่วง 8.7 ถึง 20 μm นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาถึงผลของเอนไซม์แลคเตส (laccase) และเอนไซม์ไซลานเนส (xylanase) ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR และ TGA (Thermo gravimetric analyzer) พบว่า ความเสถียรทางความร้อนหรือโครงสร้างทางเคมีของการใช้เอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดมีความสอดคล้องกัน เมื่อทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง FTIR พบว่า ยอดของเส้นกราฟมีความโดดเด่นเป็นตัวอย่างชี้ว่า สารลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้ถูกกำจัดออกในระหว่างการทำปฏิกิริยาเคมีดังสเปกตรัม ในรูปที่ 6 นอกจากนี้ค่า FTIR ชี้ให้เห็นว่า เส้นใยเซลลูโลสที่ผลิตโดยเครื่องอัลตราโซนิกกำลังการผลิต 80 วัตต์, 100 วัตต์ และ 200 วัตต์ มีความแตกต่างกันและการทำเส้นใยเซลลูโลสให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมีมีผลคล้ายคลึงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสไม่ได้รับผลกระทบใดๆ จากการทำอัลตราโซนิกทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ ผลการทดสอบค่า TGA พบว่าสมบัติทางความร้อนของเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิในการย่อยสลายด้วยความร้อนมีเพิ่มขึ้นอยู่ที่ประมาณ 310 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับ 240 องศาเซลเซียสของเส้นใยไม้ยางพาราที่ไม่ผ่านกรรมวิธีใดๆ ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น งานชีวนาโนคอมโพสิต (bio-nanocomposites), บรรจุภัณฑ์แผ่นกรอง (filtration media packaging) และวิศวกรรมโครงเนื้อเยื่อสังเคราะห์ (tissue engineering scaffolds) เป็นต้น

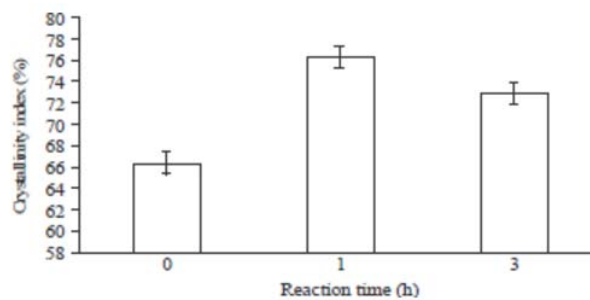


รูปที่ 6 สเปกตรัม FTIR ที่ทำการทำปฏิกิริยาด้วยเคมีเชิงกล โดย a) เอนไซม์แลคเตส (laccase) ที่ i) เส้นใยไม้ที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยา, ii) ไฟเบอร์บริสุทธิ์, iii) เซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ที่กำลังการผลิต 80 วัตต์, (iv) 100 วัตต์ และ 200 วัตต์ และ b) เอนไซม์ไซลานเนส (xylanase) i) เส้นใยไม้ที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยา, ii) ไฟเบอร์บริสุทธิ์, iii) เซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ที่กำลังการผลิต 200 วัตต์ [11]

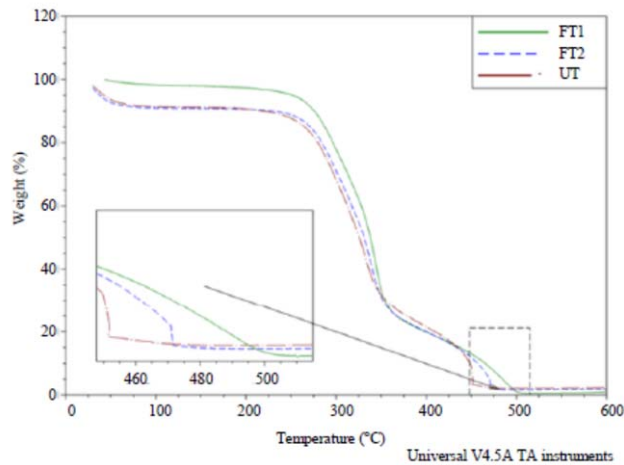
ต่อมาในปี ค.ศ. 2016 Pradeep Kumar Podder และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์นาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพาราด้วยการทำปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์แลคเตสและสารโซเดียมคลอไรด์ ที่ใช้กระบวนการเขย่าด้วยเครื่องไฮโมจีเนเซอร์แรงดันสูง (Sonication and high pressure homogenization treatment) ซึ่งทำให้การ

กระจายตัวของเส้นใยเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่ผ่านการโฮโมจีไนเซชันทำปฏิกิริยา เมื่อตรวจสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของนาโนไฟเบอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะอยู่ในช่วง 37-85 นาโนเมตร และมีความยาวหลายขนาดในระดับไมโครเมตร เมื่อทำการส่องผ่านด้วยเครื่อง FTIR spectroscopy เพื่อดูโครงสร้างทางเคมีของไฟเบอร์ระหว่างก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาด้วย enzyme-chemo-mechanical treatment พบว่า สเปกตรัมของ FTIR บ่งชี้ชัดว่า สารลิกนินและสารเฮมิเซลลูโลสได้ถูกกำจัดออกจากเส้นใยไม้อย่างหลังจากผ่านการทำปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์แลคเคสและสารเคมีที่เป็นโซเดียมคลอไรด์ ทำให้เส้นใยไม้อย่างที่ผ่านวิธีการสกัดด้วยวิธีเหล่านี้สามารถนำมาใช้กับ polyethylene oxide (PEO) ด้วยการทำเป็นแผ่น ซึ่งแผ่นฟิล์มที่ได้นี้สามารถนำมาใช้งานได้หลากหลายในกลุ่มงานทางการแพทย์หรืองานชีวนาโนคอมพอสิต [12]

ด้าน Modanned Nasir และคณะ (2015) [13] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเคมีของไม้อย่างโดยใช้เอนไซม์แลคเคส (laccase) เนื่องจากเอนไซม์แลคเคสเป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน (oxido-reductase enzyme) ทำให้การพอลิเมอไรส์ (polymerize) และดีพอลิเมอไรส์ (depolymerize) ลิกนินคอมพาวด์ผ่านปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระ (free radical) ได้ง่าย เมื่อเทียบกันระหว่างเส้นใยที่ไม่ทำปฏิกิริยา (UT) เส้นใยที่ผ่านการทำปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ (FT1) และเส้นใยทำปฏิกิริยาที่เวลา 60 และ 120 นาที (FT2) พบว่า การทำปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์แลคเคสมีผลต่อผิวโครงสร้างของเส้นใยและทำให้ทนต่อความร้อนได้ดี เนื่องจากมีความเป็นผลึกสูงขึ้นและทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงเชิงกลมากขึ้น และเมื่อทำการศึกษาผลของเวลา ความเข้มข้นและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ดังในรูปที่ 7 พบว่า อัตราส่วนการเกิดผลึกของเส้นใยจะเกิดได้มากที่สุดที่เวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมงและเมื่อเพิ่มเวลาการทำปฏิกิริยาเป็น 3 ชั่วโมง ปริมาณการเกิดผลึกจะลดลง นอกจากนั้นปริมาณการเกิดผลึกของ FT1 มีมากที่สุดคือ 76.4% รองมาคือ FT2 72.87% และ UT 65.5% เมื่อนำเส้นใยมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA พบว่า FT1 ที่มีความเป็นผลึกสูงจะสามารถทนต่อความร้อนได้สูงสุดที่ 344 °C รองลงมาคือ FT2 340 °C และ UT 331 °C ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 อัตราส่วนการเกิดผลึกของเส้นใยที่ผ่านการทำปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ที่มีความเข้มข้น 7 unit/gram ที่ pH 5 ที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่างกัน



รูปที่ 8 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของเส้นใยที่ไม่ทำปฏิกิริยา (UT), เส้นใยทำปฏิกิริยา (FT1) และเส้นใยทำปฏิกิริยาที่เวลา 60 และ 120 นาที (FT2)

การผลิตนาโนเซลลูโลสจากไม้ยางพาราถือเป็นการนำไม้ยางพารามาเพิ่มประโยชน์ได้อย่างมาก แต่เนื่องจากยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนาเพื่อหากระบวนการผลิตที่ดีที่สุด เพื่อให้สามารถผลิตได้ง่ายและมีสมบัติที่ดี เมื่อนำมาใช้งานกับผลิตภัณฑ์ยาง เช่น วัสดุเยื่อเลือกผ่านที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ วัสดุที่ต้องการความแข็งแรงสูง หรือการใช้งานร่วมกับคอนกรีต เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

1. <http://www.thaitextile.org/index.php/blog/2016/05/eco.plant1>
2. www.nature.com/nrg/journal/v9/n6/full/nrg2336.html
3. <https://www.intechopen.com/books/cellulose-fundamental-aspects-and-current-trends/crystalline-nanocellulose-preparation-modification-and-properties>
4. Ashok K.B., Suresh P.D., Prashant G.P. and Nadanathangam V., "Energy Efficient Manufacturing of Nanocellulose by Chemo- and Bio-Mechanical Processes: A Review", World Journal of Nano Science and Engineering, 5, p 204-212 (2015)
5. Rahimi Kord Sofla M., Brown R.J., Tsuzuki T. and Rainey T.J., "A comparison of cellulose nanocrystals and cellulose nanofibres extracted from bagasse using acid and ball milling methods", Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, Volume 7 (3). (2016)
6. <http://www.tut.fi/en/about-tut/news-and-events/X157407C4>
7. Shashi D.B. "BIODEGRADABLE POLYMER: THE PROMISES AND THE PROBLEMS", Science and Culture, Vol 77 (11-12), November – December, p 466-470 (2011)
8. Kristiina O., Yvonne A., Aji P.M., Gilberto S., Qi Z., Svetlana B., Supachok T., Xiaojian Z. and Saleh H., "Review of the recent developments in cellulose nanocomposite processing", Composites: Part A, 83, p 2-18 (2016)

9. Mehdi J., Abolghasem K., Paridah Md. T., Syeed S.A. and Kristiina Oksman “Characteristics of cellulose nanofibers isolated from rubberwood and empty fruit bunches of oil palm using chemo-mechanical process”, *Cellulose* 18, p 1085–1095. (2011)
10. <http://umpir.ump.edu.my/12447/>
11. Pradeep K.P., Arun G., Shima S.J., Ng Siew K., Tanveer A.K., Swati S. and Mohd Aizudin A.A, “SYNTHESIS OF NANOCELLULOSE FROM RUBBERWOOD FIBERS VIA ULTRASONICATION COMBINED WITH ENZYMATIC AND CHEMICAL PRETREATMENTS”, *Asian Journal of Applied Sciences*, Vol 3(5), October 2015
12. Pradeep K.P., Arun G., Shima S.J., Shah S.R., Swati S. Malini S. and Jayshree T., “Isolation of Nano Cellulose from Rubber Wood Fibre and Fibrillation Effects on Nano Cellulose Reinforced Poly (Ethylene Oxide)”, *The National Conference for Postgraduate Research, Universiti Malaysia Pahang* (2016)
13. Mohammed N., Othman S., Rokiah H., Noor A.N. and Mohd A., “Improved Physical and Chemical Properties of Rubber Wood (*Hevea brasiliensis*) Fiber by Laccase”, *Asian Journal of Agricultural Research*, 9, p 166-172 (2015)
14. http://www2.mtec.or.th/th/research/textile/textile_sci.html
15. <http://www.thaitextile.org/index.php/blog/2016/05/eco.plant1>
16. <http://people.forestry.oregonstate.edu/john-simonsen/sites/default7.forestry.oregonstate.edu/john-simonsen/files/Intro%20plus%20expts.pdf>
17. <https://en.wikipedia.org/wiki/Nanocellulose>
18. <https://nanoscalereslett.springeropen.com/articles/10.1186/1556-276X-6-417>
19. <http://puu.aalto.fi/en/midcom-serveattachmentguid-1e44f95a778f77c4f9511e4a12b01d1437b57775777/nanocelluloses.pdf>
20. <http://www.tappinano.org/media/1070/2011-roadmapfornanocellulosestandards.pdf>
21. <http://www.mdpi.com/1996-1944/9/8/618/htm>
22. https://www.bgrci.de/fileadmin/BGRCI/Veranstaltungen/Schlema_VII_2012/Nanocellulose_Possible_products_Tiemo_Armdt.pdf