

การปั่นเส้นใยแก้ว เส้นใยอะรามิดและเส้นใยนาโน สมบัติ และการนำไปใช้ประโยชน์

Glass fibres, Aramid fibres spinning and Nanofibres electrospinning; properties and applications

ณัฐกมลวรรณ ศรีจันเพชร^{1*}

¹มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

*ผู้เขียนหลัก (Corresponding Author) E-mail: nathakamolwan@vru.ac.th

บทคัดย่อ

เส้นใยสมรรถนะสูงแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ เส้นใยที่มีมอดูลัสและความแข็งแรงสูง เส้นใยทนความร้อน เส้นใยทนทานต่อสารเคมี เส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงและมีมอดูลัสสูงที่นำมาใช้วัสดุคอมโพสิต แบ่งเป็นเส้นใย พอลิเมอร์ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยอินทรีย์ต่างๆ ในบทความนี้จะกล่าวถึงเส้นใยที่สามารถนำมาเสริมแรงในพอลิเมอร์คอมโพสิตสามชนิด คือ เส้นใยแก้ว เส้นใยอะรามิด และเส้นใยนาโน และการปั่นขึ้นรูปเส้นใยแก้ว เส้นใยอะรามิด การปั่นขึ้นรูปเส้นใยนาโนด้วยไฟฟ้าสถิต รวมถึงการนำเส้นใยไปใช้ประโยชน์ในงานต่าง ๆ เช่น มีการใช้เส้นใยนาโนในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ การขนส่งยา ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ ตัวตรวจจับเชิงแสง และตัวกรองอากาศ

คำสำคัญ: เส้นใยแก้ว, เส้นใยอะรามิด, เส้นใยนาโน, การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

Abstract

High performance fibres can be classified into 3 groups; high strength and high modulus fibres, high thermal resistance fibres and chemical resistance fibres. The fibres used in polymer composites are polymer fibres, carbon fibres and inorganic fibres. This work includes classification of glass fibres, aramid fibres and nanofibres. It is also composed of fibre spinnings, electrospinning of nanofibres, their properties and applications, such as the uses of nanofibres in tissue engineering, batteries, optical sensor and air filtration.

Keywords: Glass fibres, Aramid fibres, Nanofibres, Electrospinning

เส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้วคือวัสดุที่เป็นเส้นใยผลิตจากแก้วโดยการหลอมวัตถุดิบที่ประกอบด้วยทรายและอาจประกอบด้วย หินปูน โซดาแอช โบรอกซ์ โซเดียมซัลเฟต กรดบอริก และอื่นๆ วัตถุดิบจะถูกให้ความร้อนในเตาที่มีอุณหภูมิ 1500-1700 °C และปั่นผ่านสปินเนอร์ (spinneret) หลังจากนั้นจึงเคลือบด้วยสารตกแต่งเส้นใย และสารประสาน สารเคลือบเส้นใยจะป้องกันพื้นผิวเส้นใยไม่ให้ถูกขูดขีด สารประสานจะเพิ่มการยึดเกาะของเส้นใยแก้วกับเมทริกซ์ของคอมโพสิต เส้นใยแก้วมีหลายประเภทได้แก่

E-glass คือเส้นใยแก้วอลูมิเนียมโบโรซิลิเกต ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้า (E= electrical)

C-glass คือเส้นใยที่มีโครงสร้างทางเคมีใกล้เคียงกับ E-glass แต่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน (C= corrosion)

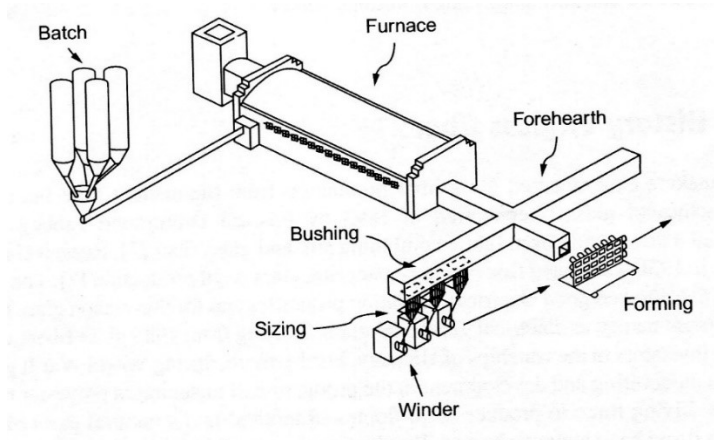
S-glass คือเส้นใยแก้วอลูมิเนียมซิลิเกต ที่มีความทนทานต่อแรงดึงสูง (S=strength)

AR-glass คือเส้นใยแก้วที่ทนทานต่อต่าง ประกอบด้วย ZrO₂ (1-18%) และ แอลคาไลน์ออกไซด์ปริมาณมาก (Na₂O + K₂O 11-21%) และ TiO₂ (0-12%) ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทั่วไปของเส้นใยแก้ว

ตารางที่ 1 สมบัติทั่วไปของเส้นใยแก้ว

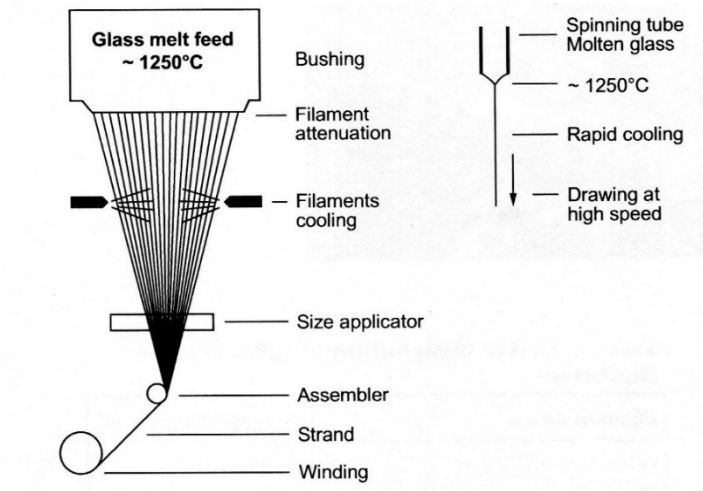
	Tensile modulus (GPa)	Tensile strength (GPa)	Poisson's ratio	Density (g/cm ³)	Strain to failure (%)
E-glass	72	3.5	0.22	2.55	1.8-3.2
C-glass	69	3.3	-	2.49	-
S-glass	87	3.5	0.23	2.5	4

ที่มา: (Gowayed, 2014, p 358)



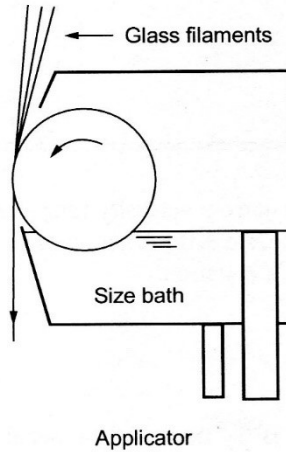
ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตเส้นใยแก้ว

ที่มา: (Cevahir, 2017)



ภาพที่ 2 กระบวนการปั่นเส้นใยแก้ว

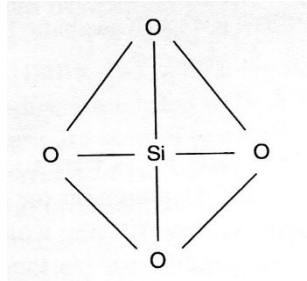
ที่มา: (Cevahir, 2017)



ภาพที่ 3 กระบวนการเคลือบผิวเส้นใยแก้ว

ที่มา: (Cevahir, 2017)

ความหนืดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการผลิตเส้นใยแก้วเหมือนกับพลังงานและอุณหภูมิในการปั่นเส้นใย ถ้ามีปริมาณโบรอนในสูตรผลิตเส้นใยลดลง จะทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น และทำให้พลังงานในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นประมาณ 90 °C ในการผลิตเส้นใยแก้ว



ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยแก้ว

ที่มา: (Gowayed, 2014)

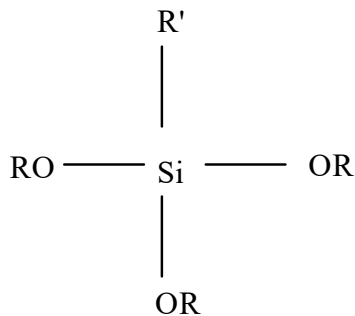
ภาพที่ 4 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยแก้ว ซึ่งเป็นรูปทรงสี่หน้าของซิลิกา (SiO₄) มีอะตอมออกซิเจนล้อมรอบอะตอม Si ตรงกลาง การมีอะตอมแคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียม จะทำให้โครงข่ายซิลิกาแตกออก ทำให้เส้นใยแข็งแรงลดลง แต่ทำให้ขึ้นรูปเป็นเส้นใยได้ง่ายขึ้น โครงสร้างของเส้นใยแก้วเป็นแบบ อัญฐาน แต่สามารถทำให้เกิดเป็นผลึกได้ เมื่อมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน

สารเคลือบเส้นใยแก้ว

สารที่ใช้เคลือบเส้นใยแก้วประกอบด้วย สารทำให้เกิดฟิล์ม สารประสาน สารหล่อลื่น สารลดแรงตึงผิว สารป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตและสารป้องกันการเกิดออกซิไดส์

1. สารทำให้เกิดฟิล์ม คือวัสดุพอลิเมอร์ชนิดละลายน้ำทำหน้าที่ป้องกันเส้นใยไม่ให้เสียหายขณะทำการผลิต และทำให้เส้นใยเกาะอยู่ด้วยกัน สารทำให้เกิดฟิล์มเป็นสารอิมัลชัน ตัวอย่างสารทำให้เกิดฟิล์ม เช่น พอลิไวนิลเอซิเตต (PVAc) พอลิยูรีเทน พอลิเอสเทอร์ อีพอกซี พอลิฟอสฟีน แปรสภาพ การมีสารทำให้เกิดฟิล์ม จะป้องกันการสูญเสียสารเคมีตกแต่งเส้นใยระหว่างที่มีการม้วนเส้นใยแก้ว

2. สารประสาน คือสารเคมีที่ทำให้เกิดการยึดเกาะ หรือเกิดพันธะระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ เมทริกซ์ ในคอมโพสิต ส่วนใหญ่สารประสานจะเป็นพวกสารประกอบไฮแลน ที่มีหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ โครงสร้างทั่วไปของไฮแลนคือ



R' คือหมู่อินทรีย์ที่เข้ากันได้กับพอลิเมอร์

R คือหมู่เอทิลหรือเมทิล

3. สารหล่อลื่น การเติมสารหล่อลื่นในสารเคลือบเส้นใย เป็นจำพวกแว็กซ์ มีหมู่แอลคิลสายยาว หรือ สารเคมีกลุ่มพอลิเอทิลีนไกลคอลแอลกอฮอล์ การเติมสารหล่อลื่นมีวัตถุประสงค์เพื่อไม่ให้เส้นใยแตกหักในระหว่างกระบวนการผลิต

4. สารป้องกันไฟฟ้าสถิต มีการเติมสารป้องกันไฟฟ้าสถิตจำพวกอนุพันธ์ของเกลือควอเทอร์นารี แอมโมเนียม เกลืออิมิดาโซเลียมอออน และพอลิเอทิลีนไกลคอลแอลกอฮอล์หรือพอลิออกซีเอทิลีน สารป้องกันไฟฟ้าสถิตควรต้องเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ในคอมโพสิต ถ้าไม่เติมสารป้องกันไฟฟ้าสถิตจะมีการสะสมของประจุไฟฟ้า อาจทำให้เกิดไฟช็อตได้

5. สารป้องกันการเกิดออกซิไดส์ สารเคลือบเส้นใยเป็นกลุ่มสารอินทรีย์ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างกระบวนการผลิตที่มีอุณหภูมิมากกว่า 100 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ออบ เส้นใยให้แห้ง การเกิดออกซิเดชันจะทำให้เส้นใยเปลี่ยนสี มีการสลายตัวของสารทำให้เกิดฟิล์ม สารหล่อลื่น และสารต่างๆที่ใช้เคลือบเส้นใย สารป้องกันการเกิดออกซิเดชันเป็นสารกลุ่มอินเตอร์ฟินอล, อินเตอร์เอมีน, สารประกอบโซเดียมฟอสไฟเนต

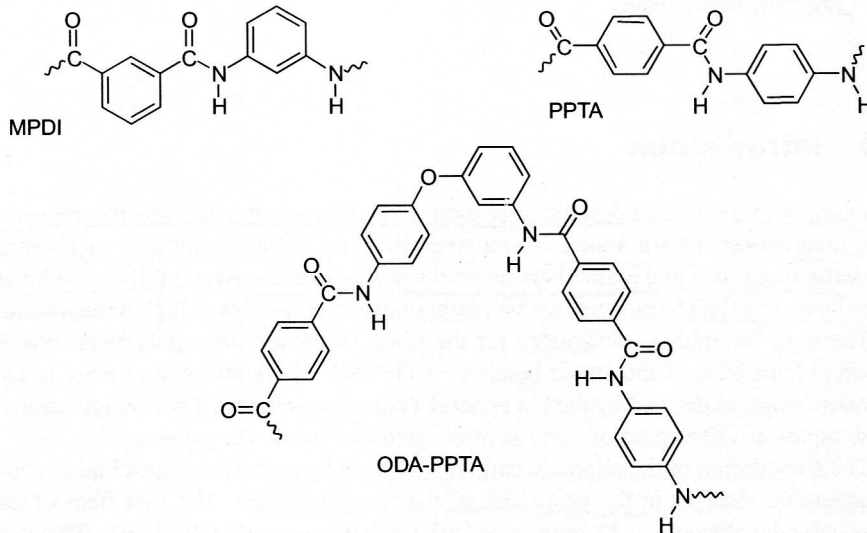
6. สารเพิ่มความอ่อนนุ่ม เป็นสารที่ใช้เคลือบเส้นใยแก้วเพื่อเพิ่มความอ่อนนุ่ม เพิ่มความยืดหยุ่น เป็นสารกลุ่มแอลคิลเบนโซเอตและอนุพันธ์ของพธาเลต

7. สารฆ่าหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและฟังไจ (Biocides) สารเคลือบเส้นใยแก้วประกอบด้วยสารจำพวกพอลิเมอร์และสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งอาจมีการเติบโตของแบคทีเรียและฟังไจทำให้สารเคมีต่างๆ ตกตะกอน ทำให้สารเคลือบผิวเสีย จึงต้องมีการเติมสาร Biocides ซึ่งเป็นสารจำพวกเกลือของกรดอินทรีย์ เช่น โซเดียมซิเตรต หรือ ควอเทอร์นารีเอมีน

เส้นใยอะรามิด

เส้นใยอะรามิด คือเส้นใยที่ 85% ของพันธะเอไมด์เชื่อมต่อกับวงแหวนอะโรมาติก 2 วง ภาพที่ 5 แสดงโครงสร้างของเส้นใยอะรามิด เส้นใยอะรามิดเป็นเส้นใยที่มีมอดูลัสและความแข็งแรงสูง มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเหล็กและดีกว่าเส้นใยแก้วเมื่อมีน้ำหนักเท่ากัน นอกจากนี้เส้นใยอะรามิดยังมีความทนทานต่อความร้อนและเปลวไฟที่สูงด้วย เส้นใยอะรามิดนำมาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุเสริมแรงในคอมโพสิต ทำเชือก พาราอะรามิดผลิตโดยบริษัท Dupont มีชื่อเรียกว่า เคฟลาร์ (Kevlar) ถ้าผลิตโดยบริษัท Akzo Nobel มีชื่อว่า ทวารอน(Twaron) เส้นใยพาราอะรามิด (poly(p-phenylene terephthalamide, PPTA) สลายตัวด้วยรังสียูวีเมื่อมีออกซิเจน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสีจากเหลืองทองมันเงา กลายเป็นสีน้ำตาล และมีสมบัติเชิงกลลดลง ความทนทานต่อแรงอัดของเส้นใยพาราอะรามิดลดลงเนื่องจากมันเกิดการงอของเส้นใยขนาดเล็กๆ เส้นใยอะรามิดอีกชนิดหนึ่งคือ poly(m-phenylene isophthalamide)(MPDI) มีชื่อทางการค้าว่า โนเม็กซ์ (Nomex) ผลิตโดยบริษัท Dupont เทคโนโลยี

(Technora) คือ copoly(p-phenylene-3-4-diphenyl ether terephthalamide)(ODA-PPTA)



ภาพที่ 5 โครงสร้างของ MPDI, PPTA และ ODA-PPTA

ที่มา: (Ertekin, 2017)

MPDI เตรียมจากปฏิกิริยาควบแน่นโดยใช้อนุมูลต่ำของ m-phenylenediamine และไอโซพทาโลอิลคลอไรด์ในตัวทำละลายเอไมด์ และสามารถใช้ในการปั่นเส้นใยแบบแห้งหรือแบบเปียกก็ได้

เทคโนโลยีผลิตโดยบริษัท Teijin โดยใช้มอนอเมอร์ 3 ชนิดคือ กรดเทเรพทาสิก, พาราเฟนิลีนไดเอมีน และ 3,4-ไดอะมิโนไดเฟนิล ทำให้เกิดเป็นโคพอลิเมอร์ ที่สายโซ่หลัก มีความยืดหยุ่น ทำให้ PPTA มีสมบัติความทนทานต่อแรงอัดดีขึ้น

PPTA ผลิตโดยการปั่นเส้นใยแบบสารละลายของ 1,4-phenylenediamine และเทเรพทาโลอิลคลอไรด์ โดยปฏิกิริยาควบแน่น ให้กรดไฮโดรคลอริกเป็นผลพลอยได้ของปฏิกิริยา แล้วจึงปั่นเส้นใยออกโดยใช้สปินเนอร์ พร้อมกับใช้แรงดึง เพื่อให้เกิดการจัดเรียงโมเลกุลในทิศทางของเส้นใย มีวงแหวนเฟนิลีนที่ถูกต่ออยู่ในตำแหน่งพาราทำให้มีโครงสร้างของสายโซ่หลักที่แข็ง นอกจากนั้นยังมีหมู่เอไมด์เป็นช่วงๆ บนสายโซ่ จึงมีพันธะไฮโดรเจนในแนวด้านข้างระหว่างอีกสายโซ่หนึ่ง PPTA มีความแข็งแรงและมีโมดูลัสสูงตามแนวยาวของเส้นใย ตามแนวด้านข้างจะมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีเพราะมีพันธะไฮโดรเจนที่อ่อน นอกจากนั้น PPTA ยังมีความทนทานต่อแรงอัดต่ำ ตารางที่ 2 แสดงสมบัติเชิงกลของเส้นใยอะรามิดในเชิงพาณิชย์

m-aramid วงแหวนเฟนิลีนถูกต่ออยู่ในตำแหน่งเมตา จึงมีสมบัติทางกายภาพคล้ายกับสิ่งทอ และมีความทนทานต่อแรงดึงต่ำกว่าพาราอะรามิด แต่มีความเสถียรเชิงความร้อนที่ยอดเยี่ยม มีอุณหภูมิกลาส-แทรนสิชัน (T_g) เท่ากับ $340\text{ }^{\circ}\text{C}$ เริ่มสลายตัวที่ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ m-aramid เมื่อเรานำออกจากเปลวไฟ สามารถ

ดับไฟได้เอง ลักษณะเด่นอย่างหนึ่งคือ เมื่อถูกเผาไหม้ จะเกิดควันได้ต่ำ การสลายตัวเชิงความร้อนเริ่มต้นที่ 375 °C เส้นใยอะรามิดสลายตัวและมีสมบัติเชิงกลที่ลดลงเมื่อถูกแสงยูวีเป็นเวลานาน แต่ไม่ใช่ปัญหาที่สำคัญสำหรับคอมโพสิตของเส้นใยอะรามิด เพราะเส้นใยฝังอยู่ในเมทริกซ์ เส้นใยอะรามิดนำความร้อนต่ำ จึงเป็นฉนวนความร้อนที่ดีและมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อนที่เป็นลบ เมื่อทำเป็นวัสดุคอมโพสิต จึงไม่เปลี่ยนแปลงมิติเมื่อโดนความร้อน แต่เส้นใยอะรามิดมีแนวโน้มดูดความชื้นมากกว่าเส้นใยอนินทรีย์ เคพลาร์ 49 ดูดความชื้น 4% ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60% เคพลาร์ 49 ดูดความชื้นที่ 1.5% เส้นใยอะรามิดค่อนข้างเสถียรในเชิงเคมีแต่กรดแก่ เบสแก่ หรือไฮโปคลอไรต์ สามารถทำให้สลายตัวได้ที่อุณหภูมิสูง

เส้นใยอะรามิดโดยทั่วไปมีสีเหลืองทอง แต่เมื่อถูกแสงยูวี จะเกิดการเปลี่ยนสี เนื่องจากธรรมชาติของวงแหวนอะโรมาติกที่ดูดกลืนแสงยูวี นำไปสู่การเปลี่ยนสีกลายเป็นสีส้มและน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน แล้วทำให้สมบัติเชิงกลของเส้นใยลดลง

การใช้งานเส้นใยอะรามิด

เส้นใย m-aramid มีความทนทานต่อความร้อนสูง ทนทานต่อเปลวไฟ มีสมบัติคล้ายสิ่งทอ แต่ค่อนข้างมีสมบัติเชิงกลต่ำเกินที่จะเป็นเส้นใยสมรรถนะสูงได้ ส่วนใหญ่ใช้ในงานสิ่งทอกันกระสุน ใช้กับนักดับเพลิง ใช้ในงานที่เกี่ยวกับไฟฟ้าและแก๊ส ใช้ทำที่นั่งในยานพาหนะ และใช้ในงานที่ต้องการวัสดุทนความร้อน ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในยาง วัสดุสำหรับกรอง และใช้ทำเส้นด้ายเย็บผ้า

เส้นใย p-aramid ใช้เป็นวัสดุคอมโพสิตในงานบนเครื่องบิน เนื่องจากมันมีน้ำหนักเบา โดยเบากว่าคอมโพสิตของเส้นใยแก้ว 30% เรซินที่ใช้ทำ p-aramid คอมโพสิตเมทริกซ์ได้แก่ อีพอกซี พอลิเอสเตอร์ ไวนิลเอสเตอร์ เทอร์โมพลาสติกเมทริกซ์ มีการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใย เพื่อให้ยึดเกาะกับเรซินเมทริกซ์ได้ดี โดยวิธีการทางเคมีหรือโดยการใช้พลาสติก ทดสอบการยึดเกาะทำโดยการให้แรงกระทำกับคอมโพสิต แล้ววัดความทนทานต่อแรงเฉือนที่ผิวระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ อาจใช้รามานสเปกโทรสโกปี ใช้แสงเลเซอร์ฉายโฟกัสไปที่ผิวเส้นใยที่ฝังอยู่ในเมทริกซ์แล้ววัดการเลือนของพิกที่โดดเด่นบางพิกเมื่อให้แรงกระทำแล้ววัดค่าภาระ (load) ที่ใช้ แล้วนำมาคำนวณความทนทานต่อแรงเฉือนที่ผิวระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ นอกจากนี้ p-aramid ยังใช้ทำวัสดุกันกระสุน หมวกกันน็อก วัสดุบังนิวเคลียร์ วัสดุป้องกันการตัด วัสดุต้องการความทนทานต่อความร้อน สิ่งทอกันเปลวไฟ ถุงมือ ถุงแขนสำหรับผู้ที่ทำงานเกี่ยวกับแก้ว เหล็ก และโลหะ ถุงมือจาก p-aramid จะใช้ p-aramid 100% หรือผสมกับเส้นใยชนิดอื่น เช่น ไนลอน พอลิเอสเตอร์ เพื่อทำให้ราคาถูกลงและยังช่วยให้สวมใส่แล้วรู้สึกสบายหรือช่วยให้ทนทานต่อการขีดถูก็ได้

มีเส้นใยที่นำมาใช้ในงานกันกระสุนได้หลายชนิดได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงยิ่งยวด (UHMWPE) พอลิเพนิลีน-2,6-เบนโซพิรอนออกซาโซล (PBO) และอะรามิด โดยจะใช้ทำเป็นผ้ากันกระสุน 20-50 ชั้น ซึ่งทออย่างแน่น

ตารางที่ 2 สมบัติของเส้นใยอะรามิด

ชื่อทางการ ค้า	Kevlar®		Twaron®		Technora®	Teijin conex®		Nomex®
พอลิเมอร์	PPTA		PPTA		ODA/PPTA	MPDI		MPDI
ชนิดเส้นใย	K-29	K-49	Std	HM	Std	Std	HT	MPDI
ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.44	1.44	1.44	1.45	1.39	1.38	1.38	1.38
ความแข็งแรง (GPa)						0.61-	0.73-	0.59
						0.68	0.86	
การยืดออก(%)	3.6	2.4	3.6	2.5	4.6	35-45	20-30	31
มอดูลัส (GPa)	71	112	70	110	72	7.9-	11.6-	11.5
						9.8	12.1	

ที่มา: (Ertekin, 2017)

เส้นใยนาโนสำหรับวัสดุเสริมแรง

เส้นใยที่มีความหนาแน่นเชิงเส้นต่ำกว่า 1 dtex จัดว่าเป็นไมโครไฟเบอร์ เส้นใยไมโครไฟเบอร์ เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นใยเคฟลาร์ ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในคอมโพสิต ให้สมบัติมอดูลัสความยืดหยุ่นสูง และทำให้วัสดุมีความแข็งแรง เส้นใยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า 0.5 ไมโครเมตร จัดว่าเป็นนาโนไฟเบอร์ ใช้สำหรับนาโนคอมโพสิต ซึ่งให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าคอมโพสิตจากเส้นใยไมโครไฟเบอร์

ตั้งแต่ปี 1990s มีการปั่นเส้นใยนาโนไฟเบอร์ด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งผลิตจากพอลิเมอร์หลอมเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์ ทำให้ได้เส้นใยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางจาก 40 nm. – 2 μm การผลิตเส้นใยแบบหลอมเป่า (melt blow) ใช้ผลิตเส้นใยไม่ถักไม่ทอ(nonwoven) โดยจะมีการอัดหลอม แล้วมีการเป่าลมร้อน วิธีนี้ใช้ผลิตเส้นใยเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-50 μm การปั่นเส้นใยแบบ Solution Blow Spinning (SBS) เป็นการรวมการปั่นเส้นใยแบบไฟฟ้าสถิตและการปั่นแบบหลอมเป่า เส้นใยไมโครและนาโนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2/10 ไมครอน หรือหลายๆ ไมครอนสามารถผลิตวิธีนี้ได้

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

เส้นใยนาโนนำมาใช้ในงานหลายๆงานประกอบด้วย เป็นวัสดุเสริมแรงในคอมโพสิต เป็นตัวกรอง วิศวกรรมเนื้อเยื่อ แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุ การขนส่งยา สิ่งทอฉลาด (Smart textile) เสื้อเกราะ ตัวเร่ง

ปฏิบัติการ การตกแต่งบาดแผล ตัวตรวจวัด เครื่องสำอาง

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ใช้ผลิตเส้นใยที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่าไมครอนจนถึงนาโน-เมตรที่มีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งแบ่งเป็นการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจากสารละลายพอลิเมอร์ และการปั่นเส้นใยจากพอลิเมอร์หลอม

การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตจากสารละลาย จะมีการเตรียมสารละลายพอลิเมอร์และสารเติมแต่งต่างๆ ละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสมและความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการปั่นเส้นใย ในกรณีของการปั่นเส้นใยจากพอลิเมอร์หลอมจะมีการให้ความร้อนกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้หลอมเหลว

ในแต่ละวิธีข้างต้น จะมีการให้สนามไฟฟ้าขนาดสูงกับหยดพอลิเมอร์ที่ออกมาจากปลายหัวปั่น เส้นใย (Die หรือ spinneret) ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดตัวหนึ่ง เมื่อสนามไฟฟ้าที่ให้มากเพียงพอ จะนำไปสู่การเกิดหยดพอลิเมอร์ และเกิดการฉีก/ปล่อยประจุจากปลายโค่นที่ถูกแรงตรงไปยังอิเล็กโทรด อีกอันหนึ่งนำไปสู่การเกิดเป็นเส้นใย ขณะที่การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตที่เตรียมจากสารละลาย เกี่ยวข้องกับการระเหยของตัวทำละลายในการทำให้เกิดเป็นเส้นใย ส่วนการปั่นแบบหลอมต้องมีการทำให้เส้นใยเย็นตัวลง

สารเติมแต่งหรือพอลิเมอร์ผสมสองชนิดหรือมากกว่าสามารถเตรียมโดยละลายในตัวทำละลายหรือตัวทำละลายผสมแล้วปั่นออกมาจากสปินเนอร์อันเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีการปั่นเส้นใยที่เตรียมเกิดเป็นเส้นใยนาโนที่มีแกนกลางและเปลือก (Core-shell nanofibres) ใช้ผลิตเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงกว่าส่วนที่แข็งแรงเป็นแกนกลาง วัสดุสังเคราะห์โดยวิธีนี้ จะสามารถสลายตัวโดยอัตราเร็วที่ต่างกัน

มีการเติมสารที่ว่องไวและสารเติมแต่ง เช่น ยาในนาโนไฟเบอร์โดยการผสมกับสารละลายพอลิเมอร์ก่อนการปั่นเส้นใย หรือมีการเติมสารเติมแต่งที่ติดไว้บนวัสดุที่เป็นตัวจับ เพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุมการปลดปล่อยสาร มีวิธีการเติมหมู่ฟังก์ชันบนนาโนไฟเบอร์โดยการเคลือบผิวเส้นใยนาโนด้วยสารต่างๆ เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติทางเคมีบนผิวเส้นใย

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเป็นเส้นใย

ปัจจัยที่มีผลต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตมี 2 ประเภท ประเภทแรกคือ ตัวแปรเกี่ยวกับวัสดุเกี่ยวกับพอลิเมอร์ ชนิดของตัวทำละลาย และตัวแปรของกระบวนการผลิต ตารางที่ 3 แสดงตัวแปรวัสดุและกระบวนการผลิต ที่ส่งผลต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ ส่งผลต่อความสามารถในการผลิตเส้นใยนาโนและส่งผลต่อคุณภาพของเส้นใยนาโนที่ได้ ระหว่างการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต ความเข้มข้นของพอลิเมอร์เป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดเป็นเส้นใย แรงตึงผิวและความหนืดเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดช่วงความเข้มข้นซึ่งสามารถผลิตเส้นใยพอลิเมอร์ที่ยาวต่อเนื่องได้ ถ้าสารละลายพอลิเมอร์เข้มข้นต่ำเกินไป electrospraying จะเกิดในรูป แมคโคร/อนุภาคนาโน แทนที่จะเกิดเป็นเส้นใยเนื่องจากความหนืดต่ำและแรงตึงผิวที่มากของสารละลาย ถ้าความเข้มข้นของสารละลายไม่มากพอจะได้เส้นใยที่มีโครงสร้างเป็นเม็ด สำหรับสารละลายที่มีความหนืดต่ำ ($\eta < 1$ poise) แรงตึงผิวจะมีผลอย่างมากกับโครงสร้างของเส้นใยที่มีความหนืดมากๆ ($\eta < 20$ poise) การฉีดสารละลายพอลิเมอร์ออกมาจะยาก ถ้า

เตรียมสารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นเหมาะสมและมีความหนืดเหมาะสม จะได้เส้นใยนาโนที่ยาวต่อเนื่อง ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ไม่เพียงแต่มีผลต่อความสามารถในการปั่นเส้นใย ยังส่งผลต่อเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเส้นใย โดยทั่วไปการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ จะส่งผลให้เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเส้นใยเพิ่มขึ้น (Horzum, Arik, & Truong, 2017)

ตารางที่ 3 ตัวแปรวัสดุและกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

ตัวแปรวัสดุ	ตัวแปรกระบวนการผลิต
สารละลายพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์หลอมเหลว <ul style="list-style-type: none"> ● ความเข้มข้น ● ตัวทำละลาย ● สารเติมแต่ง 	<ul style="list-style-type: none"> ● ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ● อัตราการปั่น ● สมบัติของสปินเนอร์ ● ระยะห่างระหว่างหัวปั่นเส้นใยและอุปกรณ์เก็บรับเส้นใย
สิ่งแวดล้อม <ul style="list-style-type: none"> ● อุณหภูมิ ● ความชื้น 	
ตัวเก็บเส้นใย <ul style="list-style-type: none"> ● เรขาคณิต (Geometry) ● สมบัติไดอิเล็กตริก 	

ที่มา: (Horzum et al., 2017)

อีกปัจจัยหนึ่งคือการเลือกตัวทำละลายในเทอมของความหนืด แรงตึงผิว ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และความดันไอ พบว่าพอลิस्टาโรลที่มีพื้นผิวเส้นใยเรียบ ขึ้นรูปจากสารละลายที่มีความเข้มข้น นำไฟฟ้า จุดเดือดสูง ความหนืดและแรงตึงผิวต่ำ ผลของระบบตัวทำละลายต่อโครงสร้างของเส้นใย มีผู้ทำการศึกษา สำหรับสารละลายพอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) เส้นใยยาวต่อเนื่องผลิตจากสารละลาย PVP ที่ละลายในเอทานอล เนื่องจากมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงกว่าและมีแรงตึงผิวต่ำกว่าของตัวทำละลาย ผลของการเติมสารเติมแต่ง เช่น เกลืออนินทรีย์และสารลดแรงตึงผิวมีผู้ศึกษาและเน้นผลของโครงสร้างเส้นใยและเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเส้นใย โดยการเปลี่ยนค่าการนำไฟฟ้าและแรงตึงผิวของสารละลาย สามารถกำจัดโครงสร้างที่เป็นเม็ดที่เกิดบนเส้นใยได้ การเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า ทำให้ความหนาแน่นของประจุสุทธิเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ที่ฉีดออกมาถูกดึงยึดได้มากขึ้นภายใต้แรงวิสโคอิลาสติก ทำให้พอลิเมอร์ไม่เกิดเป็นเม็ดบนผิวเส้นใย (Supaphol, Mit-uppatham, Nithitanakul, & Engineering, 2005); (Horzum et al., 2017)

การผลิตพอลิस्टาโรลโดยการเติมเกลือ LiCl และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (polyether modified polysiloxane) พบว่าการเพิ่มปริมาณสารลดแรงตึงผิว ส่งผลให้เม็ดบนเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น

และเส้นใยมีขนาดพอมบางลง ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นใย พบเมื่อมีการเติมเกลือลงในสารละลายพอลิเมอร์ การเติมเกลือ NaCl และ LiCl ในสารละลายพอลิเอไมด์-6 ในกรดฟอร์มิก ทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางเส้นใยเพิ่มขึ้น เพราะมีการเพิ่มแรงวิสโคอิลาสติก และการไหลของมวล (Horzum et al., 2017)

อุณหภูมิและความชื้นส่งผลต่อการปั่นเส้นใย ที่อุณหภูมิสูงทำให้อัตราการระเหยของตัวทำละลายมากขึ้น แต่ทำให้ความหนืดของสารละลายลดลงส่งผลให้เส้นใยที่ได้บางลง ซึ่งเป็นกรณีของเส้นใยนาโน PVP

ที่อุณหภูมิสูงขึ้นกระบวนการเกิดเส้นใยโดยการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของกระแสพอลิเมอร์ที่ปล่อยออกมาเพราะมีอัตราการระเหยตัวทำละลายมากขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่อย่างอิสระ นำไปสู่การมีความหนืดของสารละลายที่ต่ำลง ทำให้อัตราการตั้งยืดเพิ่มมากขึ้นและเส้นใยมีขนาดพอมบางลง ความสัมพันธ์ในเชิงตรงกันข้ามของอัตราการระเหยของตัวทำละลายและความหนืดของสารละลายศึกษาในเส้นใยพอลิเอไมด์-6 ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ

ความชื้นมีผลต่อการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยส่งผลต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย ซึ่งขึ้นกับสมบัติทางเคมีของพอลิเมอร์ มีผู้ศึกษาพบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยนาโนเซลลูโลสออกซิเทตเพิ่มขึ้น ขณะที่เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย PVP ลดลง ความแตกต่างนี้อธิบายโดยการแปรผันของสมบัติทางเคมีและอันตรกิริยาเชิงโมเลกุล

เมื่อมีความชื้น น้ำจะควบแน่นบนผิวเส้นใย ทำให้พอลิเมอร์แห้งยากขึ้นระหว่างการฉีดพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างของเส้นใย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายที่ระเหยได้ ในทางตรงข้าม ความชื้นต่ำ อัตราการระเหยเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดเป็นเส้นใยได้ เมื่อมีการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ถึงจุดวิกฤติ (73%RH) จะทำให้มีการจัดตัวของเส้นใยนาโน มีโครงสร้างคล้ายรวงผึ้งในสามมิติ ที่เหนือจุดวิกฤติไม่พบโครงสร้างแบบใดๆ และได้เส้นใยนาโนจำนวนเล็กน้อยเพราะอัตราการระเหยของตัวทำละลายต่ำ

ในส่วนของเกี่ยวข้องกับตัวแปรในกระบวนการปั่นเส้นใย จะเกี่ยวกับโวลเทจวิกฤติ ถ้าเกินค่านี้ จะได้พอลิเมอร์ที่ฉีดออกมาเสถียร แต่การเพิ่มโวลเทจส่งผลให้ความไม่เสถียรเพิ่มขึ้นและพอลิเมอร์ยืดออกได้มากขึ้น ทำให้ได้พอลิเมอร์เส้นบางมากขึ้น การลดระยะห่างระหว่างปลายเข็มปั่นเส้นใยกับตัวเก็บรับเส้นใย เพิ่มสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดสภาพกึ่งของแข็งและเกิดโครงสร้างที่เป็นเม็ดบนเส้นใย เมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้าคงที่และระยะห่างระหว่างปลายเข็มปั่นเส้นใยกับตัวเก็บรับเส้นใยคงที่ เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนของสารละลายพอลิเมอร์ ถ้าอัตราการป้อนต่ำเกินไปจะได้เส้นใยที่เส้นผ่าศูนย์กลางไม่คงที่ มีการกระจายของเส้นผ่าศูนย์กลางมาก อาจกล่าวได้ว่า เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความยาวของเข็มมีผลต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นใย มีการขึ้นรูป พอลิ(เมทิลเมตอะครีเลต)ไฟเบอร์ โดยใช้เข็มที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกัน ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเข็มกับเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใย แต่เส้นใยที่ได้จากเข็มขนาดเล็กมีช่วงเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยกว้างกว่า

เส้นใยนาโนประกอบด้วยอนุภาคนาโน

องค์ประกอบของเส้นใยนาโนรวมกับอนุภาคนาโนอินทรีย์เรียกว่าวัสดุไฮบริด (Hybrid materials) ซึ่งมีความพรุนภายในมีความเสถียรเชิงเคมีและเชิงความร้อน เส้นใยนาโนใช้เป็นวัสดุค้ำจุนโดยการใส่อนุภาคนาโนอินทรีย์ในแม่แบบโครงสร้าง กลยุทธ์ในการผลิตเส้นใยนาโนไฮบริดที่ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตคือ 1. การปั่นเส้นใยเริ่มต้นและใช้ความร้อนอบ 2. การปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตของการสังเคราะห์แบบ ex situ ของวัสดุอินทรีย์ 3. การทำให้ผิวเส้นใยที่ปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตเกิดผลึก 4. ใช้วิธีการทั้งสามวิธีข้างต้นรวมกัน มีผู้ศึกษานาโนไฟเบอร์/อนุภาคนาโนคอมโพสิตหลายประเภทเพื่อนำมาใช้ในงานต่างๆ เช่น เส้นใยพอลิคาโพรแลคโตน/พลูออเรสเซนต์พอลิสไตรีนใช้ในงานการยึดเกาะของเซลล์, เส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์/แมกนีเซียมออกไซด์นาโนไฟเบอร์ใช้เป็นวัสดุกรองอากาศ, เส้นใยพอลิอะคริโลไนไตรล์/SnO_x และ ZnO ใช้ทำลิเทียมไอออนแบตเตอรี่แอโนด พอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP)/Fe₂O₃ ใช้ในงานดูดซับโครเมตจากน้ำเสีย เป็นต้น (Horzum et al., 2017)

คาร์บอนนาโนทิวป์/เส้นใยนาโน

สารตัวเติมนาโนที่นำไฟฟ้า/เส้นใยพอลิเมอร์มีสมบัติเชิงไฟฟ้า สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกลที่โดดเด่น ความทนทานต่อแรงดึงและมอดูลัสความยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับเมทริกซ์พอลิเมอร์ ชนิดของคาร์บอนนาโนฟิลเลอร์และวิธีการสังเคราะห์ นอกจากนี้ยังขึ้นกับการกระจายและความเข้มข้นของคาร์บอนนาโนฟิลเลอร์ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ การเตรียมสารละลายคาร์บอนนาโนทิวป์/พอลิเมอร์ จะต้องทำให้คาร์บอนนาโนทิวป์กระจายตัวได้ดีในเส้นใยนาโนที่ปั่นได้ ได้มีผู้ใช้คาร์บอนนาโนทิวป์ในเมทริกซ์ต่างๆ เช่น ไคโตซาน อีพอกซี ไนลอน พอลิอะคริโลไนไตรล์ พอลิเอนิลีน พอลิคาโพรแลคโตน พอลิสไตรีน เป็นต้น

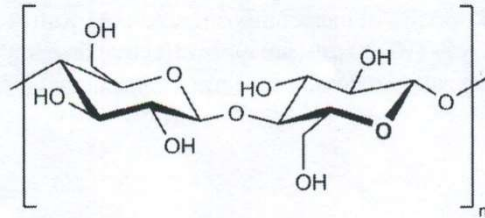
ในการเตรียมคอมโพสิต การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและการจัดเรียงตัวของวัสดุนาโนในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เป็นปัจจัยสำคัญ เพราะคาร์บอนนาโนทิวป์มีแนวโน้มในการติดกัน ทำให้การกระจายตัวในเรซินไม่ดี ทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของคอมโพสิตไม่ดี

การปรับปรุงการกระจายตัวของวัสดุนาโนทำได้หลายวิธี เช่น วิธีระเหยสารละลายด้วยการแยกด้วยการสันสะเทือนอัลตราโซนิคพลังงานสูงและมีการใช้สารลดแรงดึงผิวช่วยในการขึ้นรูป การหล่อขึ้นรูป หลอมขึ้นรูป และพอลิเมอร์เรซินในแหล่งกำเนิด เป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไป (Horzum et al., 2017)

เซลลูโลสนาโนไฟเบอร์

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่มีการเข้ากันได้ทางชีวภาพ สลายตัวได้ หาได้ง่าย ภาพที่ 6 แสดงโครงสร้างของหน่วยซ้ำของเซลลูโลส พันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล และอะตอมออกซิเจนของโมเลกุลที่อยู่ติดกันทำให้ glycosidic linkage เสถียร เป็นผลให้สายโซ่เซลลูโลสมีคอนฟิกูเรชันเชิงเส้น พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล และแรงแวนเดอร์วาลส์ ทำให้สายโซ่เซลลูโลสเรียงตัวขนานเป็นชั้นๆ และมีโครงสร้างที่เป็นผลึก เกิดเส้นใยขนาดเล็กเส้นผ่าศูนย์กลาง 5-50 นาโนเมตร และยาวหลายไมครอนอยู่ในผนังเซลล์พืช เส้นใยเซลลูโลสมีโครงสร้างนาโน ประกอบขึ้นจากวัสดุลิกโนเซลลูโลส เส้นใยนาโนเซลลูโลสมี

พื้นที่ผิวมากประมาณ $800 \text{ m}^2/\text{g}$ มีความแข็งแรงสูง 2-3 GPa โมดูลัสความยืดหยุ่นสูงประมาณ 140 GPa น้ำหนักเบา สลายตัวได้ทางชีวภาพ และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ โครงสร้างนาโนเซลลูโลสธรรมชาตินำมาใช้งาน เช่น วัสดุชีวภาพทางการแพทย์ การใช้งานเกี่ยวกับยา มีการใช้เส้นใยนาโนเซลลูโลสในการเสริมแรงคอมโพสิต ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์อาหาร กระดาษ อุปกรณ์ไฟฟ้า



ภาพที่ 6 หน่วยซ้ำของเซลลูโลส คอนฟอร์เมชันแบบเก้าอี้

เส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ใช้เสริมแรงในคอมโพสิต เนื่องจากมันมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความโปร่งใส มีสมบัติเกี่ยวกับการป้องกันการซึมผ่าน มีความเสถียรเชิงมิติ มีการใช้งานเส้นใยนาโนเซลลูโลสกับพอลิเมอร์หลายชนิดเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์นาโนคอมโพสิต เช่นอีพอกซี พบว่ามีสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อนที่ดี มีการใช้อีพอกซีมาปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยนาโนเซลลูโลสเป็นวัสดุเสริมแรงในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เมทริกซ์ พบว่าให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ไม่มีการดัดแปรสภาพพื้นผิว ในนาโนคอมโพสิตจะมีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลสน้อยกว่า 10% มีปัญหาในการเตรียมคอมโพสิตคือการกระจายและการชอบน้ำของนาโนเซลลูโลสในเมทริกซ์ที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์ที่ไม่ดีเนื่องจากมันมีพลังงานพื้นผิวสูง มีพันธะไฮโดรเจนสูง จึงมีการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยเพื่อแก้ปัญหา การกระจายตัวของเส้นใยนาโนในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้ดีขึ้นโดยอะซีเทิลชัน ทำให้พื้นผิวเซลลูโลสไม่ชอบน้ำ กระบวนการอื่นคือ topochemical trimethyl silylation มีผู้พบว่าเส้นใยนาโนที่ไม่มีการดัดแปรพื้นผิวให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีกว่าการใช้เส้นใยนาโนที่มีการดัดแปรพื้นผิว (Horzum et al., 2017)

บทสรุป

การมีวัสดุหลากหลายชนิด เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน เส้นใยพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ รวมถึงเส้นใยนาโนที่ปั่นจากพอลิเมอร์หลากหลายชนิด ทำให้มีทางเลือกในการนำมาทำเป็นคอมโพสิตหรือใช้งานในด้านอื่นๆ ได้หลากหลายขึ้นอยู่กับสมบัติของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการ เส้นใยนาโนให้สมบัติที่แข็งแรงกว่าเส้นใยชนิดดั้งเดิม แต่ยังคงต้องมีการพัฒนาเพื่อให้ผลิตได้ปริมาณมากในเชิงพาณิชย์และต้องศึกษาผลของมันต่อสุขภาพร่างกายมนุษย์ในกรณีที่น่ามาประยุกต์ใช้กับร่างกาย เช่น การใช้งานวิศวกรรมเนื้อเยื่อ การขนส่งยา การทำแผ่นตกแต่งบาดแผล การทำหน้ากากกรองฝุ่น กรองเชื้อโรค มีแนวโน้มในการนำเส้นใยนาโนมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มนำไฟฟ้า ชนิดโปร่งแสง

เอกสารอ้างอิง

- Cevahir, A. (2017). Glass fibers. In *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites* (pp. 99-121): Elsevier.
- Ertekin, M. (2017). Aramid fibers. In *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites* (pp. 153-167): Elsevier.
- Gowayed, Y. (2014). High performance fibers and fabrics for civil engineering applications. In *High Performance Textiles and their Applications* (pp. 351-365): Elsevier.
- Horzum, N., Arik, N., & Truong, Y. B. (2017). Nanofibers for fiber-reinforced composites. In *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites* (pp. 251-275): Elsevier.
- Supaphol, P., Mit-uppatham, C., Nithitanakul, M. J. M. M., & Engineering. (2005). Ultrafine Electrospun Polyamide-6 Fibers: Effects of Solvent System and Emitting Electrode Polarity on Morphology and Average Fiber Diameter. *29(9)*, 933-942.