การเตรียมเส้นใยขนาดนาโนของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับท่อนาโนคาร์บอน

Preparation of Electrospun Poly(vinyl alcohol)/Multi-walled carbon nanotubes

เจษฎา วงษ์อ่อน*[1], สุภาภรณ์ ทุมสอน[2], สุเนตร มูลทา[1] , เกียรติชัย อ่ำคลองธรรม[1] และ พิทักษ์ พนาวัน[1]

Jessada Wong on*[1], Supaphorn Thumsorn[2], Sunate Moontha[1] , Kiatchai Umchrongtum[1] and Pitak Panawan[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

[2] ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญญบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมเส้นใยขนาดนาโนจากวัสดุผสมระหว่างPVA/MWCNT ด้วยเทคนิคอิเลคโตรสปิ่นนิ่ง จากการทดลองพบว่าการทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวใน PVA นั้นค่อนข้างยาก เนื่องจากการจับตัวกันเองของท่อนาโนคาร์บอน (Aggregation) ที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุมาจากแรงวัลเดอวาล์ที่เกิดระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกันเอง ทำให้สมบัติของวัสดุผสมที่ได้จึงมีแนวโน้มต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ในงานวิจัยนี้จึงใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดTritron X 100 และกระบวนการอัลตร้าโซนิคช่วยในการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน เมื่อสารละลายผ่านกระบวนการอัลตร้าโซนิคท่อนาโนคาร์บอนจะแตกตัวออกจากกัน สารลดแรงตึงผิวจะเข้าจับตัวกับท่อนาโนคาร์บอน ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนไม่สามารถกลับเข้ามารวมตัวกันใหม่ได้ เนื่องจากโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปแทรกระหว่างท่อนาโนคาร์บอน ทำให้เมื่อเติมสารละลาย PVA สามารถเข้าแทรกตัวในช่องของท่อนาโนคาร์บอนได้ดี จากการขึ้นรูปด้วยอิเลคโตรสปิ่นนิ่งพบว่าได้เส้นใยที่เตรียมได้มีขนาดระหว่าง 200-300 นาโนเมตร โดยขนาดของเส้นใยจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอน

คำสำคัญ : อิเลค โตรสปิ่นนิ่ง / ท่อนาโนคาร์บอน / สารลดแรงตึงผิว / การกระจายตัว

Abstract

Composite nanofibers from poly(vinyl alcohol)(PVA) and multiwall carbon nanotube (MWCNT) were prepared by electrospinning technique. The contents of MWCNT were varied from 2-10 wt%. Since MWCNT aggregation has been easily occurred, surfactant was introduced for good dispersion of MWCNT in PVA/MWCNT composite nanofibers. MWCNT was dispersed in Tritron X-100 via ultrasonic technique in order to improve dispersion and prevent the aggregation of MWCNT in PVA solution. The effects of the surfactant, Tritron X-100, and MWCNT contents on morphology of the composite nanofibers were investigated. From the results, it could be seen that Tritron X-100 improved the ability of MWCNT dispersion in the PVA solution. SEM photographs showed that the PVA/MWCNT composite nanofibers were smooth, which no bead was found in the composite nanofibers. The size of composite nanofibers was in the range 200-300 nm, it was decreased with increasing MWCNT contents.

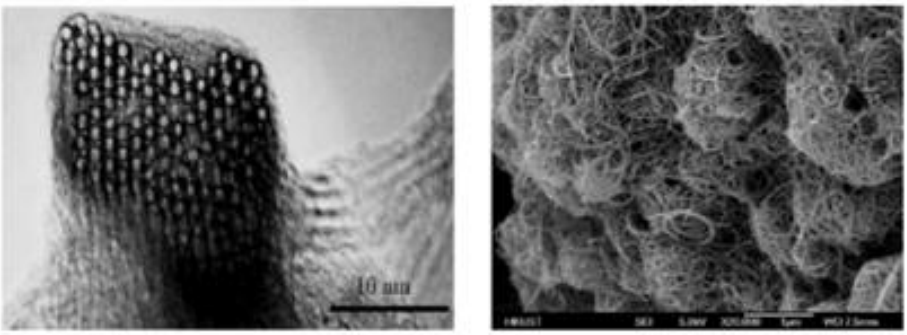
Keywords : electrospinning / carbon nanotube / surfactant / dispersion

*Corresponding author. E-mail : Jadzila@gmail.com

1. บทนำ

กระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electro spinning) เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงทางไฟฟ้าที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้ากำลังสูง เป็นระบบที่มีความซับซ้อนน้อย ต้นทุนต่ำ สามารถควบคุมขนาดและปริมาณการเกิดเส้นใยได้ต่อเนื่อง การผลิตเส้นใยนาโนโดยกระบวนการไฟฟ้าสถิตต่างจากวิธีผลิตเส้นใยอื่นคือ กระบวนการนี้จะใช้แรงทางไฟฟ้าแทนแรงทางกล โดยใช้พอลิเมอร์ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปสารละลาย หรือ สารหลอมเหลวที่อยู่ในรูขนาดเล็ก จะถูกทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวหน้าโดยใช้สนามไฟฟ้าความแรงสูง เนื่องจากประจุที่เกิดขึ้นมีขั้วเหมือนกันจึงมีแรงผลักระหว่างประจุเกิดขึ้น แรงผลักนี้เรียกว่า Repulsive Coulombic Force เมื่อมีมากพอถึงขั้นหนึ่งก็จะไปเอาชนะแรงตึงผิวของพอลิเมอร์เหลวได้ เส้นพอลิเมอร์เหลวก็จะถูกฉีดออกมาและจะเปลี่ยนเป็นเส้นใย โดยการระเหยออกของตัวทำละลาย หรือโดยการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม.[Kenawy, E.R. 2002] สามารถเตรียมเส้นใยขนาดนาโนได้จากวัสดุหลากหลาย โดยเฉพาะพลาสติก ซึ่งมีแนวโน้มการนำมาใช้มากขึ้นในปัจจุบัน แต่ ส่วนใหญ่มีปัญหาเรื่องสมบัติที่ยังไม่หลากหลายเมื่อต้องนำไปใช้งาน จึงมีการเติมสารลงไปผสมเพื่อเสริมสมบัติด้านต่างๆ เช่น เสริมความแข็งแรงเป็นต้น การเติมสารลงไปจะทำให้กลายเป็นวัสดุผสม เช่น วัสดุผสมที่เติมท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งมีสมบัติเด่นหลายประการเช่น แข็งแรง นำไฟฟ้า เป็นต้น [Breuer, O., Sundararaj, U.,2004]

ถึงแม้ว่าวัสดุผสมที่เตรียมจากท่อนาโนคาร์บอนจะมีสมบัติที่ดีทั้งในแง่ของสมบัติเชิงกล สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติการนำความร้อน ฯลฯ โดยมีการนำไปใช้งานค่อนข้างกว้างขวาง แต่ปัญหาสำคัญในกระบวนการเตรียมวัสดุผสมจากท่อนาโนคาร์บอน คือการจับตัวกันเองของท่อนาโนคาร์บอน (Aggregation) ที่เป็นเช่นนี้มีสาเหตุมาจากแรงวัลเดอวาลที่เกิดระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกันเอง โดยในการจับตัวดังกล่าวจะเกิดขึ้นทั้งใน SWCNT และ MWCNT ในรูปที่ 1 แสดงการจับตัวของท่อนาโนคาร์บอน ในรูปที่ 1 ก แสดงการจับตัวของ SWCNT ที่มีลักษณะเป็นมัดดินสอ (bundle) ในขณะที่ MWCNT จะจับตัวเป็นก้อน (agglomerate) ในรูปที่ 1 ข



ก ข

รูปที่ 1 แสดงการจับตัวของท่อนาโนคาร์บอน ก) SWCNT ข) MWCNT [Breuer, O., Sundararaj, U.,2004]

นอกจากนั้นในการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมท่อนาโนคาร์บอน ยังพบปัญหาการยึดเกาะระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีแรงยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ไม่ดี ทั้งการจับตัวเป็นก้อนและแรงยึดเกาะกับพอลิเมอร์ที่ต่ำ ส่งผลเสียเมื่อนำท่อนาโนคาร์บอนไปทำการขึ้นรูปวัสดุผสม ทำให้สมบัติของวัสดุผสมที่ได้จึงมีแนวโน้มต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ทั้งในแง่ของสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้า ดังนั้นในก่อนการขึ้นรูปวัสดุผสมที่มาจากท่อนาโนคาร์บอนจำเป็นต้องมีกระบวนการที่ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยไม่จับตัวเป็นก้อน และเสริมสร้างแรงยึดเกาะระหว่างเฟสของท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์ โดยในงานวิจัยนี้จะทดลองโดยการเติมสารที่เรียกว่า สารลดแรงตึงผิวลงไปผสมกับท่อนาโนคาร์บอน โดยสารดังกล่าวจะทำหน้าที่ช่วยลดค่า Surface tension ของท่อนาโนคาร์บอนลง ซึ่งจะส่งผลให้ลดการจับตัวกันเองของท่อนาโนคาร์บอน

ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขึ้นรูปเส้นใยนาโนโดยกระบวนการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต (Electro Spinning) และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเส้นใยนาโนผสมท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต และศึกษาอิทธิพลของการใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อช่วยการกระจายของท่อนาโนคาร์บอน

2. วิธีการทดลองและสารเคมี

ในงานวิจัยนี้ใช้ท่อนาโนคาร์บอนแบบ Multiwall carbon nanotube จากบริษัท Arkema สารลดแรงตึงผิวใช้สารTriton X 100 และ PVA(Mw=146000-186000) จากบริษัท central supply 2548 ในงานวิจัยนี้แบ่งการเตรียมสารออกเป็น 2 ขั้น คือ

2.1 เตรียมสารละลาย PVA/Triton X 100 / MWCNT

2.1.1 เตรียมสารละลายตัวอย่างโดยการละลาย Triton X 100 ใน DI water ความเข้มข้น 1 % โดยน้ำหนัก จากนั้นใช้ปั่นด้วย Magnetic stirring เป็นเวลา 20 นาที

2.1.2 ทำการเติม MWCNT ลงไปตามน้ำหนักในตารางที่ 1 ซึ่ง MWCNT จะถูกทำให้แตกตัวในสารละลายด้วยกระบวนการอัลตร้าโซนิคแรงสูง เป็นเวลา 5 นาที

2.1.3 นำ PVA เติมลงไปตามน้ำหนักในตารางที่ 1 จากนั้นใช้กระบวนการอัลตร้าโซนิคแรงสูง เป็นเวลา 5 นาที

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

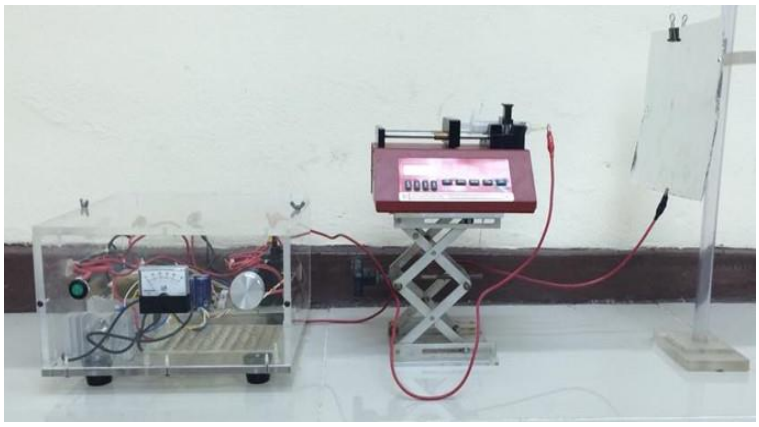
รหัส	ปริมาณน้ำ 100 มิลลิลิตร		MWCNT
	PVA (g)	Triton X 100 (g)	(g)
MWCNT-0	98.93	1.07	0
MWCNT-2	98.93	1.07	2
MWCNT-5	98.93	1.07	5
MWCNT-10	98.93	1.07	10

2.2 การขึ้นรูปเส้นใยนาโนผสมท่อนาโนคาร์บอนด้วยเทคนิคการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

2.2.1.จัดเตรียมเครื่องปั่นเส้นใยด้วยฟ้าสถิตตามรูปที่ 2

2.2.2.ทำการผสมสารละลาย PVAกับ MWCNT ตามอัตราส่วน 0% 2%, 5%, 10% ตามลำดับ

2.2.3.ในการขึ้นรูปทุกอัตราส่วนจะปรับศักย์ไฟฟ้าเป็น 20 kV โดยที่ปรับระยะห่างระหว่างปลายเข็มกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยเป็น 15 เซนติเมตรและใช้อัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เวลาที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างเส้นใยเป็นเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที



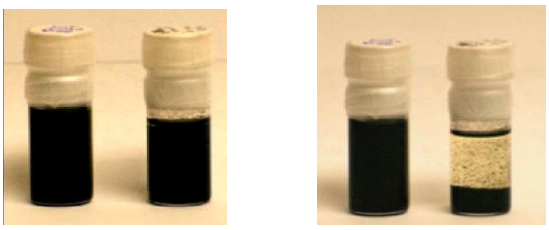
รูปที่ 2 การจัดเตรียมอุปกรณ์เครื่องปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิต

2.3 ศึกษาสัณฐานวิทยาของชิ้นงานตัวอย่างที่ผลิตด้วยเงื่อนไขข้างต้น ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM: Scanning Electron Microscope)ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510 ใช้กระแสไฟฟ้า 20KV และกำลังขยาย 10000 เท่าและใช้โปรแกรมโปรแกรม Image Analazer PT1002 ในการวัดขนาดเส้นใยที่เตรียมขึ้น

3. ผลและอภิปราย

3.1 อิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวต่อการรวมตัวของ MWCNT

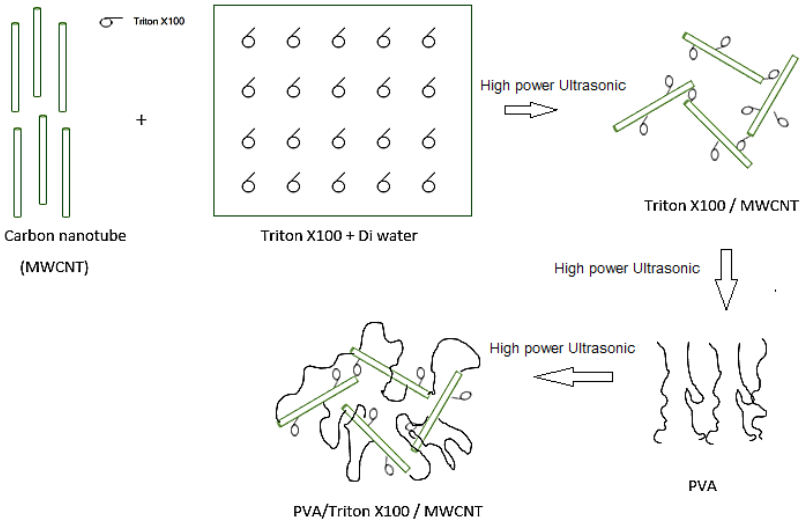
การนำ MWCNT มาใช้นั้นต้องทำให้เกิดการแตกตัวอย่างสมบูรณ์ก่อนจึงจะนำมาใช้งาน เนื่องจากสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนนั้นมีค่าแรงตึงผิวสูงจึงส่งผลให้มีแรงวัลเดอวาล์ที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของ MWCNT มีมาก [Chiang, I. W., Brinson B. E., Smalley, R. E.,(2001)] ซึ่งการจับตัวกันเองของ MWCNT จะทำให้สมบัติของวัสดุผสมที่ได้จึงมีแนวโน้มต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ทั้งในแง่ของสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางไฟฟ้า ดังนั้นก่อนการขึ้นรูปวัสดุผสมที่มาจากท่อนาโนคาร์บอนจำเป็นต้องมีกระบวนการที่ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยไม่จับตัวเป็นก้อน จากการศึกษาพบว่าการใช้อัลตร้าโซนิคนั้นสามารถช่วยในการแตกตัวของ MWCNT ให้แยกออกจากกัน แต่กระบวนการดังกล่าวยังไม่สามารถทำให้ MWCNT นั้นแตกตัวได้อย่างสมบูรณ์ พบว่าภายหลัง MWCNT ผ่านกระบวนการดังกล่าว จะเกิดการตกตะกอนกลับมารวมตัวกันอีกเมื่อปล่อยทิ้งไว้ [Kearns, J. C., Shambaugh, R. L. 2002] จึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยจะทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวและป้องกันการกลับมารวมตัวของ MWCNT [Saito, T., Matsushige, K., Tanaka, K. 2002] สารลดแรงตึงผิวที่ใช้คือ Triton X 100 ซึ่งสารดังกล่าวจะทำให้ MWCNT นั้นไม่กลับมารวมตัวกันอีกแม้ผ่านไป 12 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3



ก ข

รูปที่ 3 การเตรียมสารละลายPVA/MWCNT/Triton x100 / H_2O และ PVA/MWCNT/H_2O ด้วยกระบวนการอัลตร้าโซนิค ก) แสดงสารละลายหลังผ่าน 30 นาที ข). แสดงสารละลายหลังผ่านไป 12 ชั่วโมง

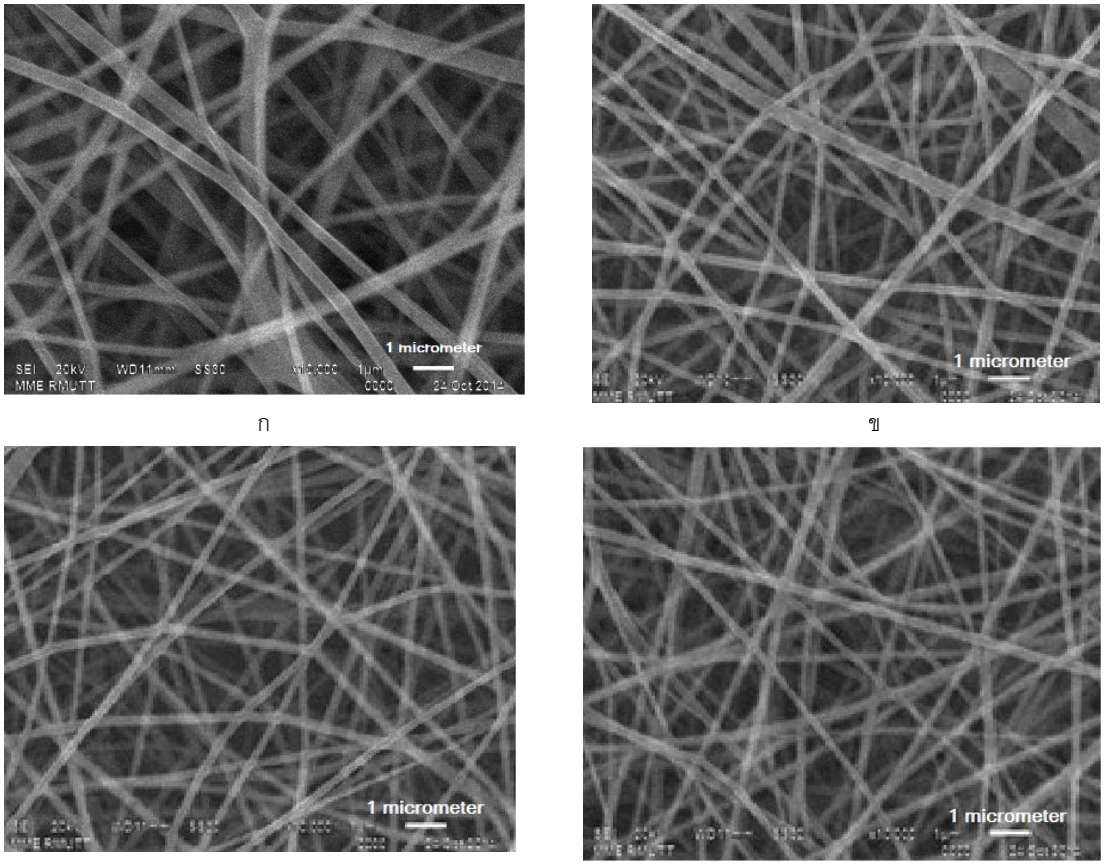
ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวนั้นมีส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) [O'Connell, M. J., Boul, P., Ericson, L. M., Huffman, C., Wang, Y., Haroz,(2001)] โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะเข้าจับกับ MWCNT และส่วนที่ชอบน้ำจะเข้ากับน้ำได้ดี ส่งผลในกระบวนการอัลตร้าโซนิคเมื่อ MWCNT แตกตัวออกจากกัน สารลดแรงตึงผิวจะจับตัวกับ MWCNT ทำให้ไม่สามารถกลับเข้ามารวมตัวกันใหม่ได้ เนื่องจากโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเข้าไปแทรกระหว่าง MWCNT จึงเกิดช่องว่างระหว่าง MWCNT ทำให้เมื่อเติมสารละลาย PVA สามารถเข้าแทรกตัวในช่องของ MWCNT ได้ดี ดังแสดงกลไกการทำงานของสารลดแรงตึงผิวในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงกลไกการทำงานของสารลดแรงตึงผิว

3.2. โครงสร้างของเส้นใย PVAผสมMWCNT

ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ได้จากสารละลาย PVA ผสม MWCNT โดยการปั่นเส้นใยด้วยไฟฟ้าสถิตโดยใช้สารละลายตัวอย่างตามตารางที่1 โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ ระยะห่างระหว่างหัวเข็มกับฐานรอง 15 เซนติเมตร อัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตร/ชั่วโมง ทั้งหมด 4 ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 5 ดังนี้



ก ข

ค ง

รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างของเส้นใย PVA / MWCNT ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

ก). สูตร MWCNT-0 ข). สูตร MWCNT-2

ค). สูตร MWCNT-5 ง). สูตร MWCNT-10

ลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวอย่างMWCNT-0 ที่เตรียมได้มีลักษณะกายภาพคือ มีลักษณะผิวเรียบเส้นกลมยาวอย่างสม่ำเสมอทั้งเส้น พบปมตรงกลางของเส้นบ้างอาจเกิดจากการหยดของสารละลายที่มีความหนืดต่ำและตัวอย่าง MWCNT-2 มองเห็นเส้นมีขนาดเล็กลงและเห็นปมมากขึ้น อาจเกิดจากการแตกตัว MWCNT และการแทรกตัวของสารละลายPVAซึ่งผสมเข้ากันได้ไม่ดีนัก ซึ่งสอดคล้องกับเส้นใยที่ได้จากสูตร MWCNT-5 และ MWCNT-10 ซึ่งมีลักษณะผิวของเส้นใยไม่ค่อยเรียบและสามารถมองเห็นปมตรงกลางของเส้นแสดงว่า MWCNT เกิดการรวมตัวกันเอง ทำให้เส้นใยไม่เรียบอย่างสม่ำเสมอ [Bhattacharyya, S., Sinturel, C., Salvetat, J. P., Saboungi, M. L. (2005)]

3.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

จากตารางที่2 พบว่าตัวอย่าง MWCNT-0 ที่ไม่ได้เติม MWCNT จะมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ที่สุด รองลงมาที่ตัวอย่าง MWCNT-2 และอื่นๆ ตามลำดับ และพบว่าเส้นใยจะมีขนาดลดลงเมื่อปริมาณของ MWCNTเพิ่มขึ้น ซึ่งการเติม MWCNT ทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเป็นการลดปริมาณสายละลายพอลิเมอร์ ส่งผลต่อแรงยึดตัวจากความหนืด(viscoelastic force)ของสารละลายลดลง เมื่อเทียบกับแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic -force) ซึ่งทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยมีขนาดเล็กลง [Hohman MM, Shin M, Rutledge G, Brenner MP.(2001)] เมื่อพิจารณาเฉพาะในกลุ่มที่เติมMWCNT ด้วยกันในสูตร MWCNT-2, MWCNT-5และสูตร MWCNT-10 พบว่าค่าเฉลี่ยขนาดของเส้นใยลดลงตามปริมาณการเติม MWCNT แต่เมื่อพิจารณาค่าของส่วนเบี่ยงแบนมาตราฐานพบว่ามีขนาดเส้นใย

เฉลี่ยแทบไม่แตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งแสดงว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเส้นใยทั้ง 3 สูตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ไม่ต่างกัน แสดงว่าปริมาณ MWCNT ที่เติมลงไปปริมาณ 2, 5และ 10 wt.% ไม่ส่งผลต่อขนาดของเส้นใยในการทดลองนี้ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่2 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย PVA ผสม MWCNT ในปริมาณต่างๆ

ศักย์ไฟฟ้า (kV)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ย (nm)
MWCNT-0	295 ± 6
MWCNT-2	220 ± 10
MWCNT-5	208 ± 5
MWCNT-10	201 ± 3

4. บทสรุป

ในการเตรียมเส้นใยนาโนของสารละลายระหว่างPVA/MWCNT นั้น การนำPVAผสมMWCNT โดยตรงมาผสมกัน จะเกิดการตกตะกอนแยกตัวระหว่างPVAและMWCNT เมื่อนำมาฉีดพบว่าไม่สามารถฉีดได้เนื่องจากเกิดการอุดตันที่รูเข็ม ซึ่งเกิดจากสาเหตุการจับตัวของ MWCNT เมื่อทำการเติมสารลดแรงตึงผิวจะไปช่วยลดการจับตัวกันเองระหว่าง MWCNT และป้องกันการกลับมารวมตัวของ MWCNT ทำให้เมื่อนำสารละลายดังกล่าวมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยขนาดนาโนด้วยกระบวนการ Electrospining เส้นใยที่ได้มีขนาดค่อนข้างเล็กและสามารถขึ้นรูปได้ยาวอย่างต่อเนื่อง

5.เอกสารอ้างอิง

Kenawy, E.R. (2002). Electrospinning of poly (ethylene-co-vinyl alcohol) fibers. *Journal of Biomaterails*. 24, 907-913.

Breuer, O., Sundararaj, U.,(2004), Big return from small fibres: a review of polymer/carbon nanotubes composites. *Polymer composites* 2004, 25, 630-644.

Chiang, I. W., Brinson B. E., Smalley, R. E.,(2001). Purification and characterization of single-wall carbon nanotubes. *Journal of Physical Chemistry B*, 105, 1157–1161.

Kearns, J. C., Shambaugh, R. L. (2002), Polypropylene fibres reinforced with carbon nanotubes. *Journal of Applied Polymer Science,* 86, 2079-2084.

Saito, T., Matsushige, K., Tanaka, K. (2002), Chemical treatment and modification of multi-walled carbon nanotubes. *Physical B*., 323, 280-283.

O'Connell, M. J., Boul, P., Ericson, L. M., Huffman, C., Wang, Y., Haroz,(2001), Reversiblewater-solubilization of single-walled carbon nanotubes by polymer wrapping.*Chemical Physics Letters*. 42, 265-271.

Bhattacharyya, S., Sinturel, C., Salvetat, J. P., Saboungi, M. L. (2005), Protein-functionalized carbon nanotube-polymer composites. *Applied PhysicsLetters*, 86, 113-118

Hohman MM, Shin M, Rutledge G, Brenner MP.(2001), Electrospinning and electrically forced jets. II. Applications. *Physics of Fluids*. 13(8), 102-108