เส้นใยสอององค์ประกอบ: ชนิด การผลิต และการนำไปใช้
Bicomponent Fiber: Types, Processing and Applications

นที ศรีสวัสดิ์*

ห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์และเส้นใย สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอและเส้นใย
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

บทคัดย่อ

เส้นใยสององค์ประกอบ คือเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งประกอบจากพอลิเมอร์สองชนิดหรือชนิดเดียวกัน ที่มีสมบัติแตกต่างกัน รวมอยู่ในเส้นใยเดียวกัน ทำให้สมบัติของเส้นใยสององค์ประกอบมีสมบัติที่แตกต่างไปจากสมบัติของเส้นใยเดิมที่มีองค์ประกอบเดียว สมบัติของเส้นใยจะขึ้นอยู่กับลักษณะของภาคตัดขวางของเส้นใย ตามชุดประกอบแผ่นอัดรีดเส้นใยที่ใช้ สมบัติของพอลิเมอร์ที่ใช้ร่วมกัน สภาวะในการขึ้นรูป และการผลิตหลังจากการขึ้นรูปเส้นใย โดยเส้นใย สององค์ประกอบได้ถูกนำไปใช้งานต่าง ๆ เช่น การผลิตเส้นใยที่หยิกงอหรือพองฟูได้ด้วยตัวเอง เส้นใยที่นำไปใช้เป็นเส้นใยประสาน การผลิตเส้นใยขนาดเล็ก และการผลิตเส้นใยเพื่อให้มีสมบัติพิเศษด้วยการเติมสารที่ต้องการในผิว ด้านนอกของเส้นใย เป็นต้น โดยบทความนี้ได้สรุปรายละเอียดในการขึ้นรูป ลักษณะของภาคตัดขวาง และการใช้งานของเส้นใยสององค์ประกอบ

Abstract

Bicomponent fiber is a specific type of synthetic fibers with two different properties of polymers joined together in the same filament during spinning process. Bicomponent fibers have distinctive properties from monocomponent fibers. The properties of fibers are outcomes of type of cross section, properties of composed polymers, fiber spinning process condition, and after-treatment process. The primary applications of bicomponent fibers are self-crimping (or self-bulkiness) fibers, thermal binder fibers, microfibers and special property fibers, which can be added into the shealth of fiber. The fiber processing, types and applications of bicomponent fibers are summerised and stated in this paper.

คำสำคัญ : เส้นใยสององค์ประกอบ เส้นใยสิ่งทอ เครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ
Keywords : Bicomponent Fiber; Textile Fiber; Bicomponent Fiber Spinning Machine

* *ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ natee.s@en.rmutt.ac.th โทร. 0 2549 2451*

1. บทนำ

เส้นใยเป็นวัสดุหนึ่งที่มีความสำคัญ ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ด้วยสมบัติที่มีขนาดเล็ก มีความละเอียด ความสามารถในการโค้งงอ (Hatch, K.L., 1993) จึงทำให้มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ไม่เพียงแต่เป็นผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ยังสามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ทั้งที่เป็นส่วนหนึ่งในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เชิงประกอบ (Composite Materials) ชั้นหรือแผ่นกันความร้อน (Thermal Insulator) และที่สำคัญอย่างยิ่งในปัจจุบัน คือ ใช้เป็นชั้นกรอง (Filter Media)

การใช้งานเส้นใยที่นำเส้นใยสองชนิดมาผสมกัน เพื่อให้ได้เส้นด้ายและผืนผ้าที่มีสมบัติตามต้องการ ดังตัวอย่างที่สำคัญ คือ การใช้เส้นใยฝ้ายผสมกับเส้นใยพอลิเอสเทอร์ เพื่อให้ได้ผืนผ้าที่มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน ด้วยการได้สมบัติที่ดูดซึมความชื้นที่ดีจากเส้นใยฝ้าย การยับยากและราคาที่ถูกกว่าจากเส้นใยพอลิเอสเทอร์ ที่ถูกเรียกว่าเป็น ผ้าที/ซี (T/C) ซึ่ง มักใช้อัตราส่วนการผสมเส้นใยพอลิเอสเทอร์ร้อยละ 65 และเส้นใยฝ้ายร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก

จากสมบัติพื้นฐานของเส้นใยปัจจุบัน จนได้รับการพัฒนาทั้งทางด้านชนิดของพอลิเมอร์ในการผลิตเส้นใย การผลิตเส้นใยให้มีขนาดที่หลากหลาย มีลักษณะทั้งผิวและภาคตัดขวางที่แตกต่าง ทำให้มีการนำเส้นใยไปใช้กว้างขวางมากขึ้น รวมถึงการผลิตเส้นใยที่มีลักษณะพิเศษ โดยขึ้นรูปเส้นใยจากพอลิเมอร์ 2 ชนิด หรือเป็นชนิดเดียวกัน ที่มีสมบัติแตกต่างกัน ทำให้เส้นใยที่ผลิตได้นั้น มีสมบัติที่แตกต่างจากเส้นใยเดิมที่มีพอลิเมอร์ชนิดเดียว การขึ้นรูปเส้นใยที่กล่าวนี้คือ การขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Bicomponent Fiber) หรือบางพื้นที่เรียกเส้นใยกลุ่มนี้ว่า Conjugate Fiber (Franz Fourne', 1999; Raghavendra R. Hegde, Atul Dahiya and M.G. Kamath, 2004; Jeffries R., 1971)

อย่างไรก็ตาม การผลิตหรือขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบนี้ ต้องใช้เครื่องจักรในการผลิตที่มีความแตกต่างจากเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสังเคราะห์แบบเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ชุดประกอบแผ่นอัดรีดเส้นใย หรือที่เรียกว่า สปินแพ็ค (Spin Pack) ต้องมีการออกแบบพิเศษเพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ได้รับการอัดรีดจากสกรูสองชุด ให้ไหลเข้ามาประกอบเป็นรูปร่างหรือภาคตัดขวางของเส้นใยที่แตกต่างกันไปตามความต้องการ บทความนี้ได้ให้ข้อมูลพื้นฐานในการขึ้นรูป เส้นใย การผลิตเป็นเส้นใยสององค์ประกอบ และการใช้งานต่าง ๆ เพื่อให้เข้าใจและทราบถึงการนำเส้นใยชนิดนี้ไปใช้งานต่อไป

2. ผลการศึกษา

2.1 คำจำกัดความของเส้นใยสององค์ ประกอบ

จากคำจำกัดความของเส้นใย ที่กล่าวว่าเป็นวัสดุที่มีความยาว มีอัตราส่วนระหว่างความยาวมากกว่าความหนาที่สูง มากกว่า 100 เท่า แต่หากแสดงถึงความเป็นเส้นใยแล้ว จะต้องมีความละเอียดและมีความสามารถในการอ่อนตัว โค้งงอได้ดีด้วย จึงจะสามารถนำเส้นใยนั้น ๆ มาใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้ ทั้งผลิตภัณฑ์สิ่งทอและวัสดุที่เกี่ยวเนื่องได้ (Gupta V.B. and Kothari V.K. 1997) ส่วนคำจำกัดความของเส้นใยสององค์-ประกอบ คือ เส้นใยสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีสมบัติทางเคมี และ/หรือ ทางกายภาพที่แตกต่างกันสองชนิด ที่อัดรีดจากแผ่นอัดรีด

เส้นใย (Spinneret) เดียวกัน โดยพอลิเมอร์ ทั้งสองตัวอยู่ในเส้นใยเดียวกัน (Fiber Economics Bureau, 2015)

2.2 หน่วยการวัดขนาดของเส้นใย

ดีเนียร์ (Denier หรือ Tden) เป็นหน่วยวัดขนาดของเส้นใยที่นิยมใช้ โดยเส้นใยที่มีความยาว 9,000 เมตร หนัก 1 กรัม จะมีขนาดเท่ากับ 1 ดีเนียร์ ซึ่งเป็นระบบตรง (Direct System) ระบบในการวัดขนาดของเส้นใย ที่นิยมกันอีกระบบคือ เดซิเท็กซ์ (Decitex หรือ dTex) เป็นหน่วยย่อยลงจาก เท็กซ์ (Tex หรือ Tt) โดยที่ 1 Tex เท่ากับ 10 dTex การคำนวนสามารถหาได้จากสมการที่ 1 และ 2 (Eberle H., Hermeling H., Hornberger M., Kilgus R., Menzer D. and Ring W. 2002)

$$T_{den} = 9\,\frac{\text{mass (g)}}{\text{length (km)}} \quad \text{..... สมการที่ 1}$$

$$T_t(\text{tex}) = \frac{\text{mass (g)}}{\text{length (km)}} \quad \text{..... สมการที่ 2}$$

โดยที่ T_{den} คือ ขนาดของเส้นใย มีหน่วยเป็น ดีเนียร์ mass คือ น้ำหนักของเส้นใย มีหน่วยเป็น กรัม length คือ ความยาวของเส้นใย มีหน่วยเป็น กิโลเมตร T_t คือ ขนาดของเส้นใย มีหน่วยเป็น เท็กซ์

แต่ในหน่วยของการวัดของวัสดุอื่นมักวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือพื้นที่หน้าตัด ซึ่งแตกต่างจากหน่วยวัดเส้นใย ที่มีหน่วยวัดที่เทียบเคียงกัน โดยที่ขนาดของเส้นใยจะโตหรือใหญ่ขึ้นตาม ตัวเลขที่เพิ่มสูงขึ้น เพราะเป็นระบบตรง ทำให้บางครั้งต้องมีการแปลงหน่วยให้เป็น ความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$d = 11.3\sqrt{\frac{T_{dtex}}{\tilde{n}}} = 11.9\sqrt{\frac{T_{den}}{\tilde{n}}} \quad \text{.... สมการที่ 3}$$

โดยที่ d คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร (mm), T_{dtex} คือ ขนาดของเส้นใย มีหน่วยเป็น เดซิเท็กซ์, T_{den} คือ ขนาดของเส้นใย มีหน่วยเป็น ดีเนียร์, r คือ ความหนาแน่น (density) ของเส้นใย มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร (g/cm^3)

2.3 ลักษณะของเส้นใยสององค์ประกอบ

เส้นใยสององค์ประกอบมีหลายลักษณะ ดังแสดงใน รูปที่ 1 ที่มี ชนิดมีแกนกลาง ชนิดติดกัน ชนิดเสี้ยว และชนิดกระจายตัวในเส้นใย

รูปที่ 1 ภาคตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบชนิด ก.มีแกนกลางกึ่งกลาง, ข.มีแกนกลางเยื้องศูนย์, ค.ชิดติดกัน, ง.เสี้ยว, จ.เสี้ยวมีรู และ ฉ.กระจายตัวในเส้นใย

ซึ่งรายละเอียดแต่ละลักษณะ มีดังนี้

2.3.1 ลักษณะของเส้นใยสององค์ประกอบ

เส้นใยสององค์ประกอบชนิดมีแกนกลาง (Sheath-Core Bicomponent Fiber) เป็นเส้นใยสององค์ประกอบที่มีแกนกลางกับขอบนอก โดยแกนกลางอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางจะเรียกว่า เส้นใยสององค์ประกอบชนิดมีแกนกลางกึ่งกลาง (Concentric Sheath-Core Bicomponent Fiber) และที่เยื้องตำแหน่งออกไปด้านขอบเส้นใยจะเรียกว่า เส้นใยสององค์ประกอบชนิดมีแกนกลางเยื้องศูนย์ (Eccentric Sheath-Core Bicomponent Fiber) โดยมักใช้ในการเพิ่มสมบัติของเส้นใยด้วยผิวของเส้นใยที่ใช้พอลิเมอร์ที่แตกต่างกับแกนกลาง

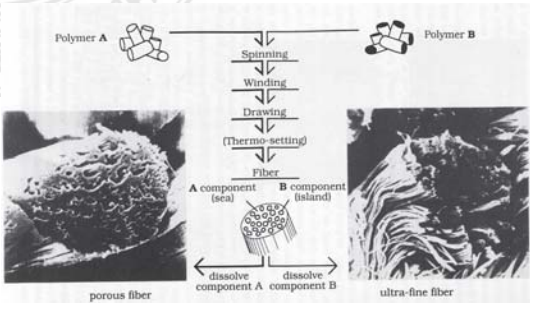
และหากแกนกลางมีการเยื้องไปด้านข้าง เส้นใยที่ได้จะมีสมบัติที่หยิกงอได้ด้วยตัวเอง หากพอลิเมอร์นั้นมีสมบัติการหดและยืดตัวที่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับเส้นใยสององค์ประกอบชนิดติดกัน แต่ลักษณะการหยิกงอจะต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม เส้นใยชนิดนี้มักใช้เป็นเส้นใยประสานด้วยความร้อน (Bicomponent Thermal Binder Fiber)

เส้นใยสององค์ประกอบชนิดติดกัน (Side-by-Side Bicomponent Fiber) เป็นเส้นใยสององค์ประกอบที่มีพอลิเมอร์ชิดติดกัน โดยมีการแบ่งเป็นสองข้าง การใช้งานมักใช้เพื่อเพิ่มสมบัติการหยิกงอและพองตัวของเส้นใย ด้วยสมบัติการหดตัวและยืดตัวที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์ทั้งสอง

เส้นใยสององค์ประกอบชนิดเสี้ยว (Segment-Pie Bicomponent Fiber) เป็นเส้นใยที่มีลักษณะภาคตัดขวางที่คล้ายกับการตัดชิ้นของพาย หรือ พิซซ่า มีลักษณะเป็นลิ่ม จึงอาจถูกเรียกว่าเป็น เส้นใยสององค์ประกอบชนิดเสี้ยวหรือลิ่ม (Pie Wedge Bicomponent Fiber) เส้นใยสององค์ประกอบชนิดเสี้ยวนี้ มักใช้ในการผลิตเป็นเส้นใยขนาดเล็ก หลังจากที่ได้รับการทำให้ชิ้นส่วนเล็ก ๆ แยกออกจากกัน (Splitting) ทำให้ได้เส้นใยมีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวมาก และผิวสัมผัสที่แตกต่างไป โดยมักใช้ผลิตเป็นผ้าไมโครไฟเบอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของชิ้นของการผลิต โดยสามารถทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงประมาณ 0.1-0.2 ดีเนียร์ต่อเส้นใยได้ หากต้องการให้เส้นใยแยกออกจากกันได้ง่ายขึ้น มักจะถูกขึ้นรูปเป็นเส้นใยสององค์ประกอบชนิดเสี้ยวมีรู (Hollow Segment-Pie Bicomponent Fiber) โดยเรียกเส้นใยลักษณะนี้ว่าเป็นเส้นใยที่สามารถแยกเป็นส่วนได้ (Splittable Fiber)

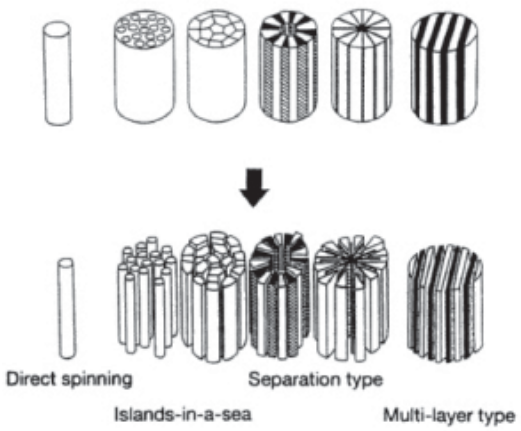
เส้นใยสององค์ประกอบชนิดกระจายตัวในเส้นใย (Island–in–the-Sea Bicomponent Fiber) เป็นเส้นใยที่ได้รับชื่อที่พิเศษจากเส้นใยอื่นด้วยเหตุจากที่พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งกระจายตัวเป็นเส้นใยยาวอยู่ในพอลิเมอร์อีกชนิดตามความยาวของเส้นใย ซึ่งหากแยกหรือทำการละลายพอลิเมอร์อีกชนิด จะได้เส้นใยที่มีรูตามความยาว หรือเส้นใยที่มีขนาดเล็กมาก ตามจำนวนเส้น ตามความยาวของเส้นใย ดังรูปที่ 2 ซึ่งขึ้นอยู่กับชุดประกอบแผ่นอัดรีดเส้นใยในการขึ้นรูปเส้นใย ปัจจุบันสามารถทำให้มีจำนวนเส้นใย เป็น 600 เส้นได้ ทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กลงได้ถึง 0.04 ดีเนียร์ หรือมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ไมโครเมตรได้ (Hills, Inc. 2015) ดังรูปที่ 3 หากได้รับการละลายส่วนที่เป็นตัวกลาง (Matrix) ออก

จากเส้นใยสององค์ประกอบชนิดกระจายตัวในเส้นใย มี 2 แนวทางที่จะได้เส้นใย คือ เส้นใยที่มีรูพรุน และเส้นใยที่มีขนาดเล็ก โดยการนำส่วนที่เป็นส่วนเติม (Island) หรือส่วนตัวกลาง (Sea หรือ Matrix) ออกด้วยการละลาย (Nakajima T., 1994) อย่างไรก็ตามแนวทางการผลิตเส้นใยขนาดเล็กจากเส้นใยสององค์ประกอบนั้นก็ยังสามารถทำได้หลายแบบดังภาพ ภาคตัดขวางของเส้นใย รูปที่ 4



รูปที่ 2 เส้นใยที่ได้จากเส้นใยสององค์ประกอบชนิดกระจายตัวในเส้นใย (Nakajima T., 1994)

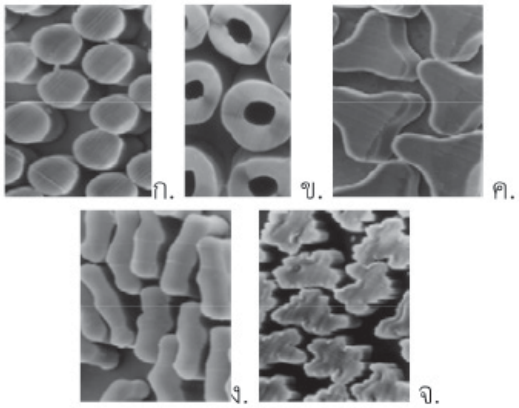
รูปที่ 3 เส้นใยสององค์ประกอบชนิดกระจายตัวในเส้นใยที่มีเส้นใยจำนวน 600 เส้นใย ในเส้นใยเดี่ยว (Hills, Inc., 2015)



รูปที่ 4 การผลิตเส้นใยขนาดเล็กด้วยเส้นใยสององค์ประกอบ (Nakajima T., 1994)

2.3.2 ลักษณะภาคตัดขวางของเส้นใย (Cross Section)

เส้นใยสังเคราะห์ที่ขึ้นรูปได้ ทั้งที่เป็นองค์ประกอบเดียวและสององค์ประกอบ สามารถขึ้นรูปให้มีลักษณะภาคตัดขวางในลักษณะต่าง ๆ ได้ เพื่อสมบัติที่แตกต่างเพิ่มเติม โดยลักษณะของภาคตัดขวางของเส้นใยเกิดได้จากการลอกแบบจากลักษณะรูของแผ่นอัดรีดเส้นใย ดังรูปที่ 5 โดยลักษณะและสมบัติของภาคตัดขวางของเส้นใยต่าง ๆ มีดังนี้



รูปที่ 5 ลักษณะภาคตัดขวาง ก.เส้นใยตัน ข.กลวง ค.สามแฉก ง.แบน และ จ.หลายเหลี่ยม (BISFA, 2009)

เส้นใยตัน (Solid) เป็นเส้นใยที่มีลักษณะตัน ไร้รูในเส้นใย เป็นเส้นใยที่ผลิตและใช้กันเป็นพื้นฐาน โดยผลิตทั้งที่เป็นเส้นใยเดี่ยว (Monofilament) และเส้นใยรวม (Multifilament)

เส้นใยกลม (Round) เป็นเส้นใยมีลักษณะของภาคตัดขวางกลม เป็นเส้นใยพื้นฐานที่ใช้งานปกติในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ด้วยเหตุผลที่ขึ้นรูปง่ายและราคาถูกที่สุด และยังเป็นเส้นใยที่มีอัตราส่วนระหว่างผิวเส้นใยต่อปริมาตรต่ำที่สุด (surface to volume ratio)

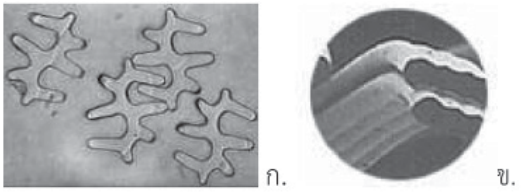
เส้นใยกลวง (Hollow) เป็นเส้นใยที่มีรูตรงกลางเส้นใย โดยมักมีลักษณะรอบเส้นใยกลม โดยการผลิตอาจมีรูมากกว่า 1 รู แต่การผลิตยากขึ้น ด้วยลักษณะที่มีรู มีอากาศขังตัวอยู่ ทำให้เส้นใยมีสมบัติรักษาอุณหภูมิได้ดี ผลิตภัณฑ์มักใช้ในงานฉนวนรักษาอุณหภูมิต่าง ๆ และลักษณะที่มีรูทำให้เส้นใยมีน้ำหนักเบา (Low Density) เมื่อเทียบกับเส้นใยที่มีขนาดเท่ากันและยังทำให้เส้นใยมีความมันเงาลดลง

เส้นใยสามแฉก (Trilobal) เป็นเส้นใยที่มีผิวของเส้นใยสูง จึงถูกนำไปใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติของผิวที่มากในจำนวนเส้นใยที่เท่ากัน โดยเส้นใยสามแฉกเป็นเส้นใยที่ถือได้ว่าเป็นเส้นใยที่ผลิตได้ไม่ยากนัก มักผลิตเป็นพรม เพราะเหลี่ยมมุน ของเส้นใยเป็นที่กับเก็บกักสิ่งสกปรกได้ดี จากการมองเห็นจะพบว่าเส้นใยมีความเงาสูงกว่าเส้นใยกลม

เส้นใยแบน (Ribbon) เป็นเส้นใยลักษณะภาคตัดขวางแบบคล้ายริบบิ้น เส้นใยมีความเงาสูงและโค้งงอได้ดี ทำให้ยากแก่การสาง (Carding)

เส้นใยโบว์ไทน์ (Bowtie) เป็นเส้นใยที่มีภาคตัดขวางคล้ายโบว์ไทน์ มักใช้ในการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยชนิดติดกัน (side-by-side) ทำให้เส้นใยมีสมบัติในการคืนรูป สปริงตัวดีขึ้น

อย่างไรก็ตาม มีผู้ผลิตหลายแห่งได้พัฒนาเส้นใยที่มีภาคตัดขวางที่แตกต่างขึ้นมา เส้นใย 4-DG™ ในรูป 6 ก. เป็นเส้นใยที่มีลักษณะของภาคตัดขวางหลายเหลี่ยม ผลิตโดย บริษัท Fiber Innovation Technology, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา ร่วมมือกับองค์การนาซา (NASA) เส้นใยมีสมบัติที่โดดเด่นในด้านการนำพาความชื้น และการรักษาความร้อน หากนำเส้นใยนี้ไปใช้ในการผลิตเป็นผืนผ้า ปกติมักใช้ในงานแผ่นกรอง และชั้นกันความร้อน โดยการนำส่งของเหลวและความชื้นเกิดในร่องเส้นใยที่เล็ก (Fiber Innovation Technology, Inc., 2014) ส่วนรูปที่ 6 ข. เส้นใยแบนแต่มีปม (Four Flat Peaks) ผลิตโดย บริษัท เทยิน ในชื่อการค้า Waveron® ซึ่งผลิตเส้นใยที่ภาคตัดขวางของเส้นใยแบบคล้ายริบบิ้น มีปมอยู่ 4 ปม ด้วยการเพิ่มสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นผ้าม่าน ซึ่งพื้นฐานเส้นใยที่อ่อนตัวได้ดี นุ่ม และแห้งได้เร็ว (Teijin Frontier Co., Ltd., 2015)



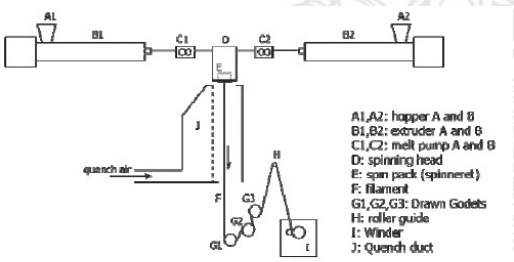
รูปที่ 6 ลักษณะภาคตัดขวางของเส้นใย ก. 4-DG™ (Fiber Innovation Technology, Inc. 2014) และ ข. Waveron® (Teijin Frontier Co., Ltd., 2015)

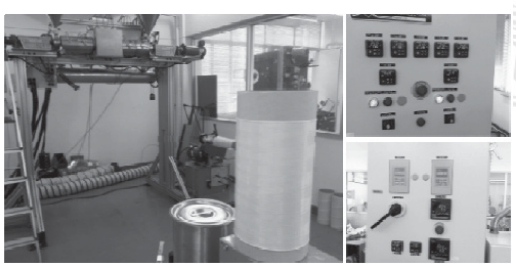
2.4 เครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Bicomponent Fiber Spinning Machine)

เส้นใยสององค์ประกอบประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่ประกอบกันได้ภาคตัดขวางตามต้องการ ดังรูปที่ 7 โดยพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ถูกป้อนสู่กรวย (Hopper) (A1 และ A2) พอลิเมอร์จะถูกทำให้หลอมตัวและอัดรีดด้วยสกรูเดี่ยว (Single Screw Extruder) (B1 และ B2) โดยแยกเป็นพอลิเมอร์แต่ละส่วน หลังจากที่พอลิเมอร์หลอมตัวและถูดอัดส่งไปด้านปลายสกรู พอลิเมอร์หลอมเหลวจะถูกกำหนดปริมาตรด้วยปั๊มพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt Pump, Metering Pump, Spin Pump หรือ Gear Pump) (C1 และ C2) แล้วส่งไปยัง Spin Head (D) ที่เป็นที่อยู่ของชุดประกอบแผ่นอัดรีดเส้นใย (E) อันเป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งในการแยกพอลิเมอร์หลอมเหลวทั้งสองให้กระจายไปในทิศทางที่ต้องการ โดยหน้าที่ของแผ่นกระจายพอลิเมอร์ (Distribution Plate) พอลิเมอร์หลอมเหลวจะถูกประกอบให้เป็นเส้นใยได้ตามต้องการที่ทางเข้า และออกมาเป็นเส้นใยจากแผ่น

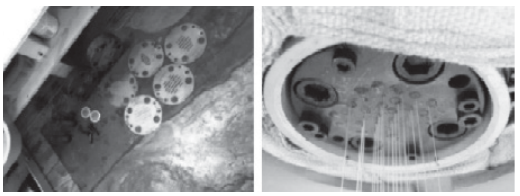
อัดรีดเส้นใย จากนั้นเส้นใยจะถูกลดขนาดจากลูกกลิ้งที่มีความเร็วที่สูงขึ้น (G1, G2 และ G3) เส้นใยผ่านลูกกลิ้งนำเส้นด้าย (H) แล้วม้วนเส้นใยเข้ากระสวย (Bobbin) ด้วยเครื่องม้วนเก็บเส้นใย (I)

การอัดส่งพอลิเมอร์หลอมเหลว จาก Melt Pump ไปในตำแหน่งที่ต้องการ ด้วยแผ่นกระจายพอลิเมอร์ ซึ่งผู้ผลิตแต่และเจ้าได้ผลิตจากวัสดุที่แตกต่างกัน ที่เป็นแผ่นโลหะทั้งบางและหนา ดังรูปที่ 8 และ 9 เป็นส่วนประกอบของชุดประกอบแผ่นอัดรีดเส้นใยของเครื่อง Hills Bicompoment Fiber Extruder Fed Spinning Machine และ ที่ผลิตจากบริษัท Kasen (Kasen Nozzle Mfg. Co. Ltd., 2015) แต่ส่วนที่ทำให้ขนาดชุดประกอบแผ่นอัดรีดเส้นใยมีขนาดเล็กนิยมเป็นแบบแผ่น แต่พื้นฐานการไหลตัวของพอลิเมอร์จะเกิดได้ดังรูปที่ 10

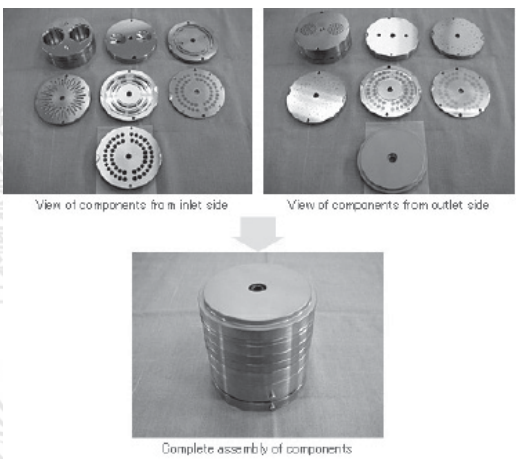




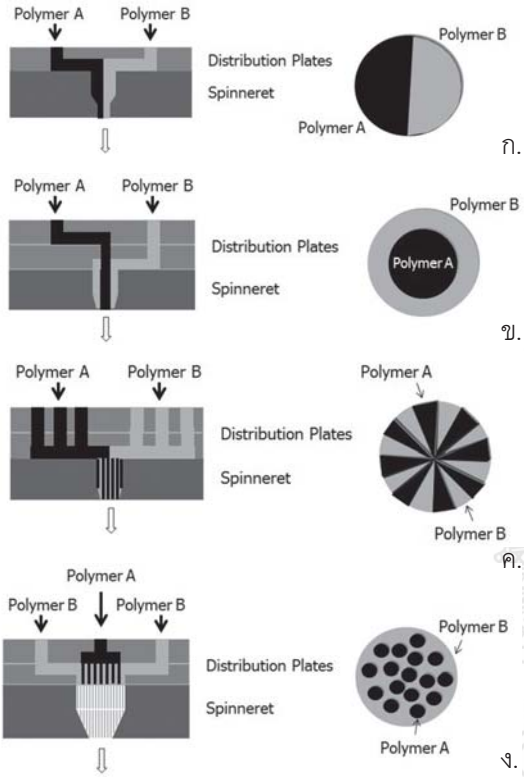
รูปที่ 7 โครงสร้างเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ ประกอบและเครื่องขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ (Hills Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100)



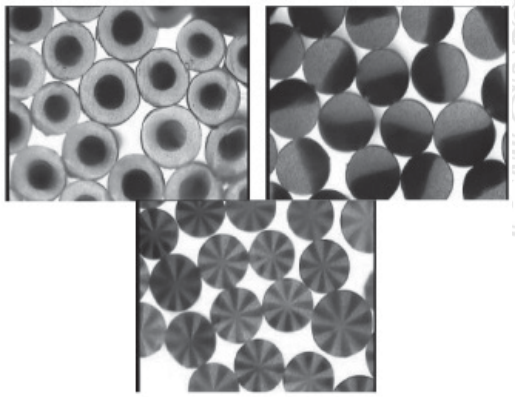
รูปที่ 8 ชุดประกอบแผ่นอัดรีดเส้นใยของเครื่อง Hills Lab Scale Bicomponent Extruder Fed Spinning Machine Model LBS-100



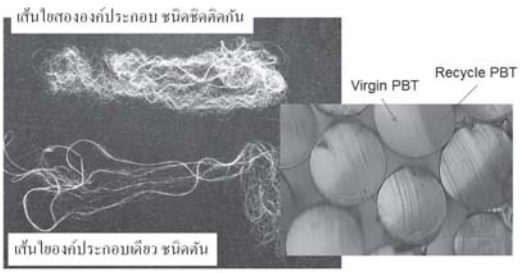
รูปที่ 9 ชุดประกอบแผ่นอัดรีดเส้นใย ที่ผลิตจากบริษัท Kasen ประเทศญี่ปุ่น (Kasen Nozzle Mfg. Co. Ltd., 2015)



รูปที่ 10 ลักษณะอย่างง่ายของชุดประกอบแผ่นอัดรีดเส้นใย และเส้นใยสององค์ประกอบที่ผลิตได้ ก.ชิดติดกัน, ข.มีแกนกลาง, ค.เสี้ยว, ง.กระจายตัวในเส้นใย

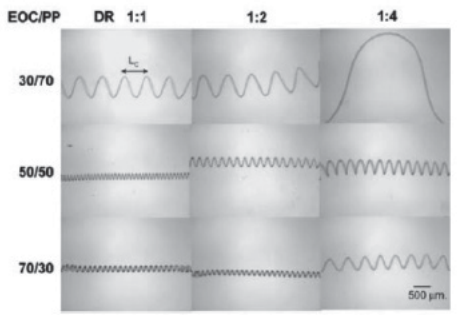


รูปที่ 11 ภาคตัดขวางของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้จากเครื่อง Hills Bicomponent Fiber Extruder Fed Spinning Machine (นที ศรีสวัสดิ์ และคณะ, 2557)



รูปที่ 12 เส้นใยสององค์ประกอบพอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต ชนิดรีไซเคิล (Valox IQ315) (สีเข้ม) กับ ชนิดบริสุทธิ์ (Valox 315) (สีอ่อน) ชนิดชิดติดกัน (นที ศรีสวัสดิ์, 2556)

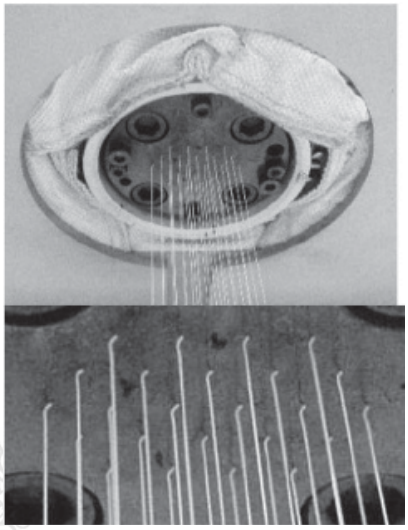
จากรูปที่ 11 เป็นภาคตัดขวางของเส้นใยที่ขึ้นรูปได้จากเครื่อง Hills Bicomponent Fiber Extruder Fed Spinning Machine ซึ่งเป็นการศึกษาและพัฒนาเส้นใยสององค์ประกอบพอลิเอไมด์ต้านทานแบคทีเรีย และเส้นใยมีสีด้วยการให้สีแบบหลอมเหลว (นที ศรีสวัสดิ์ และคณะ. 2557) และรูปที่ 12 เป็นเส้นใยที่หยิกงอได้ตัวเอง (Self Crimping) ของเส้นใยสององค์ประกอบพอลิบิว-ทิลีนเทเรฟทา-เลต (Polybuthyleneterephthalate, PBT) ชนิดรีไซเคิล (Valox IQ315) กับ ชนิดบริสุทธิ์ (Valox 315) โดยขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบแบบชิดติดกัน (Side-by-Side) (นที ศรีสวัสดิ์. 2556)



รูปที่ 13 เส้นใยที่เกิดการหยิกงอด้วยตัวเอง จากเส้นใยสององค์ประกอบระหว่าง EOC กับ PP (Chureerat Phahsarn, Wattana Klinsukhon, Nanjaporn Roungpaisan and Natee Srisawat, 2013)

จากรูปที่ 13 เป็นการศึกษาการขึ้นรูปและพฤติกรรมของเส้นใยสององค์ประกอบ ระหว่างเอทิลีนออกทีนโคพอลิเมอร์ (Ethylene Octene Copolymer, EOC) ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (Thermoplastic Elastomer) กับ พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) จากการขึ้นรูปให้เป็นเส้นใยสององค์ประกอบชนิดติดกัน ในสัดส่วนต่าง ๆ และอัตราส่วนการลดขนาดต่าง ๆ (Draw Ratio, DR) การเกิดการหยิกงอของเส้นใยมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสัดส่วน 50:50 เส้นใยจะหยิกงอได้ในความถี่ที่สูงสุด (Chureerat Phahsarn, Wattana Klinsukhon, Nanjaporn Roungpaisan and Natee Srisawat, 2013)

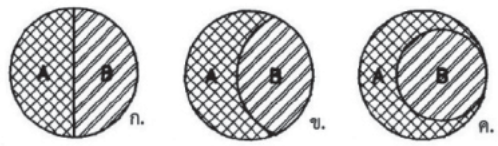
ปัญหาบางประการที่พบได้ขณะขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบ คือ ความหนืดของพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลว (Melt Viscosity) ที่แตกต่างกัน ปัญหานี้พบมากในการผลิตเส้นใยสององค์ประกอบชนิดติดกัน และเกิดขึ้นบ้างในชนิดมีแกนกลางเยื้องศูนย์ ปัญหานี้เรียกว่า การงอของเส้นใยขณะออกรู หรือ Kneeing (Franz Fourne', 1999) ทำให้พอลิเมอร์ที่อัดรีดออกมานั้นมีการโค้งงอ โดยอาจโค้งงอมากจนติดผิวของแผ่นอัดรีดเส้นใย ไม่สามารถขึ้นรูปได้ โดยเกิดจากความแตกต่างของความหนืดที่สูงมาก อย่างไรก็ตาม ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถทำให้ลดลงได้ด้วยสภาวะในการขึ้นรูป เช่น การเพิ่มอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลว เป็นต้น และการเลือกพอลิเมอร์ที่เหมาะสม ชนิดเดียวกัน แต่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลง ก็ทำให้ความหนืดลดลงได้ (ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และ ชาคริต สิริสิงห, 2544) ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติการไหลตัวของพอลิเมอร์เป็นสำคัญ จากรูปที่ 14 แสดงถึงการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบชนิดชิดติดกันระหว่างพอลิพรอพิลีนกับพอลิออลิฟินอิลาสโตเมอร์ที่เกิด Kneeing



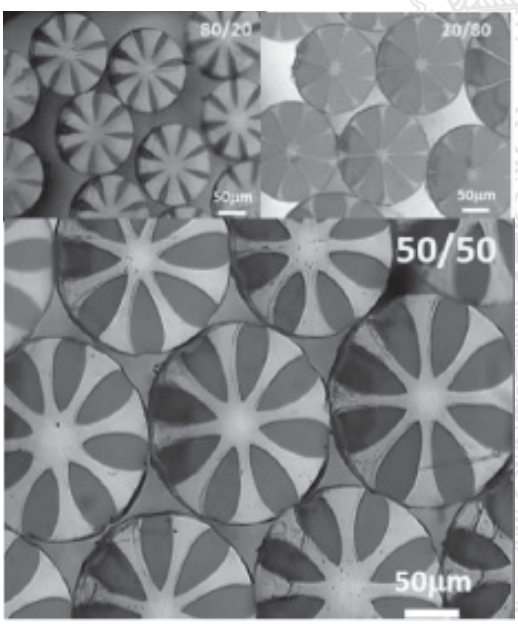
รูปที่ 14 การงอของเส้นใยพอลิพรอพิลีนกับพอลิออลิฟินอิลาสโตเมอร์ขณะออกรู (Kneeing)

ปัญหาของการที่มีความหนืดที่แตกต่างกันยังส่งผลให้เส้นใยมีภาคตัดขวางไม่ตรงตามต้องการ โดยพอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูงกว่าในขณะอุณหภูมิและสภาวะในการขึ้นรูปนั้น จะมีลักษณะกลมมน แต่พอลิเมอร์ที่มีความหนืดต่ำกว่าจะพยายามโอบส่วนที่หนืดกว่า (Zbigniew K. Walczak, 2002) ดังรูปที่ 15 และในการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบชนิดเสี้ยว ปัญหาที่เกิดจากความแตกต่างของความหนืดทำให้รูปร่างของ 2 ส่วนไม่เป็นไปตามต้องการ ดังรูปที่ 16 เป็นการขึ้นรูปเส้นใยสององค์ประกอบชนิดเสี้ยวระหว่าง พอลิแลคติกแอซิด (PLA) กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) โดยส่วนสีเข้มคือส่วนของ PBS ที่มีความหนืดสูงกว่า ส่วนสีอ่อน คือ ส่วนของ PLA เส้นใยที่ขึ้นรูปได้จะไม่ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ โดยความหนืดของ PBS สูงกว่าจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มค่อนข้างกลมมน เมื่ออยู่ในสัดส่วนที่ต่ำกว่า

แต่หากมีสัดส่วนที่สูงกว่าส่วนของ PLA จะโอบส่วนที่เป็น PBS โดย PBS ยังคงกลมมนเช่นเดิม (นที ศรีสวัสดิ์ และนรรจพร เรืองไพศาล, 2558)



รูปที่ 15 ภาคตัดขวางของเส้นใยเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวมีความหนืดที่ต่างกัน ก.มีความหนืดที่เท่ากัน, ข.ความหนืดของ B สูงกว่า A และ ค.ความหนืดของ B สูงกว่า A มาก (Zbigniew K. Walczak, 2002)

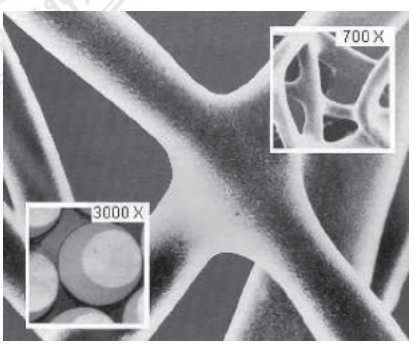


รูปที่ 16 ภาคตัดขวางของเส้นใยสององค์ประกอบระหว่าง PLA กับ PBS ในสัดส่วน 80:20, 20:80 และ 50:50 (นที ศรีสวัสดิ์ และนรรจพร เรืองไพศาล, 2558)

2.5 การใช้งานของเส้นใยสององค์ประกอบ

การใช้งานเส้นใยสององค์ประกอบนั้น มีหลายจุดประสงค์ โดยการใช้งานหลักมีด้วยกัน 3 ประเภท (Minifibers, 2015; ES Fibervisions. 2015; Hills, Inc., 2015) คือ

2.5.1 การใช้เป็นเส้นใยประสาน (Bicomponent Thermal Binder Fibers) กับเส้นใย ในการผลิตผ้าไม่ทอ (Nonwoven) โดยใช้ในการผลิตในลักษณะภาคตัดขวางชนิดมีแกนกลาง ที่มีพอลิเอททิลีนเป็นผิวด้านนอก และมีพอลิพรอพิลีนหรือพอลิเอสเทอร์เป็นแกนกลาง เมื่อเส้นใยได้รับความร้อนเพียงพอในการหลอมตัวของผิวด้านนอก จะเกิดการหลอมผนึกติดกันกับเส้นใยที่ผสม เพื่อให้ได้ความแข็งแรงสูงขึ้น ไร้กลิ่นเหมือนเกิดจากการใช้กาว และมีสมบัติทนทานต่อความร้อนที่ดีขึ้น ดังเช่น พอลิเอสเทอร์เป็นแกนกลาง และโคพอลิเมอร์พอลิเอสเทอร์เป็นขอบนอก ซึ่งมีจุดหลอมเหลวต่างกันที่ 250 องศาเซลเซียส และ 210-220 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พอลิเอสเทอร์เป็นแกนกลางและพอลิเอทิลีนเป็นขอบนอก โดยมีจุดหลอมเหลวต่างกันที่ 250 องศาเซลเซียส และ 113 องศาเซลเซียส การใช้งานก็เช่น การใช้เส้นใยสององค์ประกอบชนิดมีแกนกลางผลิตเป็นผ้าไม่ทอ เพื่อนำไปใช้งานเป็นชั้นกรอง ดังรูปที่ 17



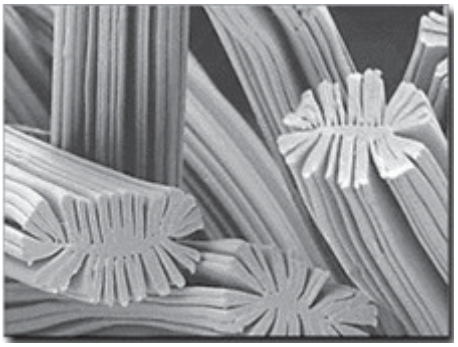
รูปที่ 17 การยึดติดระหว่างเส้นใยสององค์ประกอบชนิดมีแกนกลางในผ้าไม่ทอ โดยผลิตเป็นชั้นกรอง (Filter) (FUHR GmbH, 2015)

2.5.2 การใช้เป็นเส้นใยที่หยิกงอหรือมีเนื้อฟูด้วยตัวเอง (Self Crimping/Bulking) ด้วยการผลิตเส้นใยสององค์ประกอบที่เป็นชนิดติดกันหรือชนิดมีแกนกลางเยื้องศูนย์

2.5.3 การผลิตเส้นใยขนาดเล็ก (Microfiber) ด้วยการผลิตที่มีภาคตัดขวางชนิดเสี้ยวหรือชนิดกระจายตัวในเส้นใย จากการใช้พอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด โดยการผลิตมักทำการผลิตเป็นผืนก่อน จากนั้นจึงมีกระบวนการแยกเส้นใย ทั้งการใช้ทางกลและสารเคมี

การใช้งานเส้นใยสององค์ประกอบมีมากมาย เช่น การเลือกลดต้นทุนการผลิตโดยการใช้พอลิเอสเทอร์ใหม่เป็นแกนกลาง และการใช้พอลิเอสเทอร์รีไซเคิลเป็นผิวนอก หรือตกแต่งสมบัติของเส้นใยโดยใช้พอลิเมอร์สมบัติปกติเป็นแกนกลาง และการใช้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติพิเศษเป็นผิวนอก หรือการลดปริมาณการใช้พอลิเมอร์ เช่น การศึกษาและพัฒนาเส้นใยสององค์ประกอบพอลิเอไมด์ต้านทานแบคทีเรีย และเส้นใยมีสีด้วยการให้สีแบบหลอมเหลว (นที ศรีสวัสดิ์ และคณะ, 2557) ซึ่งผลการศึกษา พบว่า ปริมาณของพอลิเอไมด์ที่ได้รับการผสมสารต้านทานแบคทีเรียชนิดซิงค์ออกไซด์ (ZnO) สามารถลดปริมาณลงได้ โดยการใช้ส่วนขอบนอก (Sheath) ลดลง ในอัตราส่วนขอบนอกร้อยละ 25 50 และ 75 ของเส้นใยทั้งหมด เส้นใยยังคงมีประสิทธิภาพในการต้านทานแบคทีเรียเท่ากับเส้นใยเดิมที่ใช้พอลิเอไมด์ผสมซิงค์ออกไซด์แบบเส้นใยตัน โดยมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ (Antibacterial Activity) ใกล้เคียงกันคือ การลดลงปริมาณร้อยละ 90 (% Reduction) ทดสอบด้วยเชื้อ *E.coli* ตามมาตรฐาน ASTM E2149-10 นอกจากนี้ ยังมีการใช้งานเส้นใยสององค์ประกอบในรูปแบบอื่นอีกคือ ใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์แบบใช้แล้วทิ้ง เช่น ผ้าเย็น ผ้าเช็ด หรือผ้าอนามัย เป็นต้น การใช้ผลิตเป็นผ้าอ้อมสำเร็จรูป ใช้เป็นผ้าปิดแผลหรือผ้ากอช หรือผ้าที่ใช้ในการแพทย์ (Medical Textile) ใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบ (Fiber/Textile Polymer Composite หรือ FRP: Fiber Reinforce Plastic) ใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในฝ้าหรือซีเมนต์ ใช้ผลิตเป็นประเก็นและเทปผ้าผนึก ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน ใช้เป็นวัสดุกรอง (Filter Media) ทั้งกรองอากาศและของเหลว ใช้เป็นชั้นผ้าประกอบเพื่อผลิตเป็นผ้าเพื่อป้องกัน (Protective Clothing) ที่มีการผลิตเป็นเส้นใยแบบมีแกนกลาง โดยควบคุมรูปร่างแกนกลางแล้วทำการละลายส่วนที่เป็นพอลิเมอร์ด้านนอกออก ดังรูปที่ 18 เป็นการผลิตผ้าที่นุ่มพิเศษหรือผิวลักษณะพิเศษ เช่น หนังเทียม ผ้าสำหรับเช็ดทำความสะอาด เป็นต้น

ผู้ผลิตเส้นใยสององค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ Eastman Chemical Co., ES Fibervisions, Nyltec, Geogia, USA และ Kuraray. Japan อย่างไรก็ตาม เส้นใยสององค์ประกอบชนิดมีแกนกลาง (Sheath-Core) มีใช้มากในการผลิตผ้าไม่ทอ โดยมีผู้ผลิตจากประเทศจีนที่ถือได้ว่าเป็นผู้ผลิตเส้นใยสององค์ประกอบหลักในปัจจุบัน



รูปที่ 18 เส้นใยสององค์ประกอบที่ควบคุมรูปร่างของแกนกลางให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านการกรองและการดูดซับ (Janet Bealer Rodie, 2012)

3. สรุป

บทความนี้ได้กล่าวถึง การพัฒนาการผลิตเส้นใยสังเคราะห์ ชนิดเส้นใยสององค์ประกอบ ซึ่งทำให้เส้นใยมีสมบัติที่โดดเด่นขึ้น ทำให้การนำไปใช้ได้หลายหลายจุดประสงค์ ไม่เพียงเสื้อผ้าเพื่อการสวมใส่ แต่ครอบคลุมไปถึงการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม เช่น การผลิตผ้าไม่ทอ เส้นใยหรือผ้าใช้เป็นวัสดุเสริมแรง ใช้ในวัสดุก่อสร้าง ทั้ง ฝ้าเพดาน และถนน ซึ่งต้องการการศึกษาอีกมากในการนำเส้นใยประเภทนี้ไปใช้ประโยชน์ นอกจากนี้ยังมีผู้คิดค้นการผลิตเส้นใยที่มากกว่าสององค์-ประกอบ คือ สามองค์ประกอบ แต่การผลิตและการพัฒนายังไม่กว้างขวางมากนัก

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โครงการการศึกษาและพัฒนาเส้นใยสององค์ประกอบพอลิเอไมด์ ต้านทานแบคทีเรีย และเส้นใยมีสีด้วยการให้สีแบบหลอมเหลว รหัสโครงการ P-11-00541 และสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ (THTI) โครงการการพัฒนาเส้นใยและผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์จากพอลิบิวทิลีนเทเรฟแทเลต (PBT) ที่ได้จากกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ ในการสนับสนุนการศึกษา ค้นคว้า และรวบรวมบทความวิชาการนี้

5. เอกสารอ้างอิง

นที ศรีสวัสดิ์. 2556. **การพัฒนาเส้นใยและผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ จากพอลิบิวทิลีนเทเรฟแทเลต (PBT) ที่ได้จากกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่**. กรุงเทพฯ. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ.

นที ศรีสวัสดิ์ และคณะ. 2557. **การศึกษาและพัฒนาเส้นใยสององค์ประกอบพอลิเอไมด์ต้านทานแบคทีเรีย และเส้นใยมีสีด้วยการให้สีแบบหลอมเหลว**. ปทุมธานี. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

นที ศรีสวัสดิ์ และนรรจพร เรืองไพศาล. 2558. **ลักษณะและสมบัติของเส้นใยสององค์ประกอบชนิดเสี้ยวจากพอลิแลกติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต**. กรุงเทพฯ. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2558.

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และ ชาคริต สิริสิงห. 2544. **พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้งาน**. กรุงเทพฯ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

BISFA (The International Bureau for The Standardization of Man-Made Fibres). 2009. **Terminology of man-made fibres 2009 Edition**. Brussels. Belgium.

Chureerat Phahsarn, Wattana Klinsukhon, Nanjaporn Roungpaisan and Natee

Srisawat. 2013. **Self-Crimped Bicomponent Fiber Containing Polypropylene/Ethylene Octene Copolymer**. Materials Letters. 91. 232-234.

Eberle H., Hermeling H., Hornberger M., Kilgus R., Menzer D. and Ring W. 2002. **Clothing Technology**. 3rd Edition. Verlag Europa-Lehr mittel.

ES Fibervisions. 2015. **Fiber Engineering**. สืบค้นเมื่อ 2 กุมภาพันธ์ 2558 จาก http://www.es-fibervisions.com

Fiber Economics Bureau. 2015. สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2558 จาก http://www.fibersource.com/f-tutor/bicomponent.htm

Fiber Innovation Technology, Inc. 2014. **4-DG™.** สืบค้นเมื่อ 19 มิถุนายน 2556 จาก http://www.fitfibers.com

Franz Fourne'. 1999. **Synthetic Fibers: Machines and Equipment, Manufacture, Properties**, Munich. Hanser Publishes.

FUHR GmbH. 2015. **Filtercartridge "Betapure"**. สืบค้นเมื่อ 11 กุมภาพันธ์ 2558 จาก http://www.fuhr-gmbh.com/englisch/e_betapure%20polyolefin.htm

Gupta V.B. and Kothari V.K. 1997. **Manufactured Fibre Technology**. First Edition. Cornwall. Great Britain. Chapman & Hall.

Hatch, K.L. 1993. **Textile Science**. St. Paul. USA. West Publishing Company.

Hills, Inc. 2015. **Splitting Bicomponent Fibers in Spunbond Fabrics**. สืบค้นเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2558 จากhttp://www.hillsinc.net/assets/pdfs/splitting-biocomponent-fibers-spunbond-fabrics.pdf

Hills, Inc. 2015. **Polymeric Nanofibers**. สืบค้นเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2558 จาก http://www.hillsinc.net/assets/pdfs/polymeric-nanofibers.pdf

Janet Bealer Rodie. 2012. **Featherweight Filtration**. สืบค้นเมื่อ 22 กุมภาพันธ์ 2558 จาก http://www.textileworld.com/Issues/2012/SeptemberOctober/Quality_Fabric_Of_The_Month/Featherweight_Filtration

Jeffries. R. 1971. **Bicomponent Fibres**. Bath. Great Britain. Merrow Publishing.

Kasen Nozzle Mfg. Co. Ltd. 2015. **Conjugate Spinnerette Assembly**. สืบค้นเมื่อ 9 พฤษภาคม 2553 จากhttp://www.kasen.co.jp/english/product/nozzle/nozzle03_5.html

Minifibers. 2015. **Bi-Component Fibers**. สืบค้นเมื่อ 8 พฤษภาคม 2553 จาก http://www.minifibers.com/precision-cut-fibers/precision-cut-bi-component-fibers/

Nakajima. T. 1994. **Advanced Fiber Spinning Technology**. Charpter 9. Spinning of Ultra-Fine Fibers by Miyoshi Okamoto. page 184-204. United Kingdom. Woodhead Publishing

Limited.

Raghavendra R. Hegde, Atul Dahiya and M.G. Kamath. 2004. **Bicomponent fibers**. สืบค้นเมื่อ 11 เมษายน 2556 จาก http://www.engr.utk.edu/mse/Textiles/Bicomponent%20fibers.htm

Teijin Frontier Co.,Ltd. 2015. **Waveron**. สืบค้นเมื่อ 12 กุมภาพันธ์ 2558 จาก http://www2.teijin-frontier.com/english/sozai/specifics/waveron.html

Zbigniew K. Walczak. 2002. **Processes of Fiber Formation**. First Edition. Netherlands. Elsevier.