

การทำนายสมบัติการดึงสำหรับเกลียวเส้นด้ายแบบเส้นใยยาวของโพลีเอสเตอร์

A Tensile Property Prediction for Multifilament Twisted Yarns of Polyester

สุทธาทิพย์ ศิริบุรณ์,¹ เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป,^{2*} บพิช บุปผโชติ,³ สุตสาคร อินธิเดช,⁴
Sutthatip Siriboon,^{1*} Keartisak Sriprateep,² Bopit Bubphachot,³ Sudsakorn Inthidech,⁴

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการจำลองและทำนายสมบัติการดึงของเส้นด้ายชนิดเส้นใยยาวของโพลีเอสเตอร์ ด้วยการจำลองรูปทรงเรขาคณิตเส้นด้ายที่ประกอบด้วยเส้นใยจำนวนมากและวิธีการของ CAD/CAE สำหรับวิเคราะห์สมบัติการดึงจำลองโครงสร้างเส้นด้ายที่สมบูรณแบบโครงสร้างละ 5 ชั้นและมีมุมเกลียวต่างๆกัน และใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ (CAE) จำลองโดยการดึงให้มีการเปลี่ยนรูปมากเพื่อวิเคราะห์หาความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นกับเส้นใยในแต่ละเลเยอร์แล้วจึงนำค่าที่ได้คำนวณหาสมบัติการดึงของเส้นด้าย จากการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดของเส้นด้ายพบว่า ความเค้นสูงสุดจะอยู่ที่เส้นใยที่จุดศูนย์กลางของเส้นด้ายและลดลงมาจนถึงผิวด้านนอก เมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายความเค้นและความเครียดของแบบจำลองและผลที่ได้จากการทดสอบเส้นด้ายโพลีเอสเตอร์พบว่า ที่ค่ามุมเกลียวต่ำคือ 14.38 และ 19.86 องศา ผลการทำนายมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบจากการทดสอบดึงจริง แต่สำหรับที่ค่ามุมเกลียวที่เพิ่มขึ้นผลการทำนายต่ำกว่าผลการทดสอบดึงจริงเล็กน้อย

คำสำคัญ: สมบัติของความเค้น-ความเครียด, เกลียวเส้นด้ายแบบเส้นใยยาว, แคด/ซีเออี

Abstract

This paper presents a method for modeling and prediction the tensile behavior of multifilament twisted yarns of polyester. The fiber assemble model and CAD/CAE approach were proposed for the tensile analysis. The ideal yarn structures of five-layers with different twist angle were simulated to predict tensile behavior each fiber and each layer. CAE and large deformation effects were applied for computation the stress-extension curves. The stress acting on the fibers after yarn extension can be directly analyzed in each fiber and each layer and then converted to yarn tensile behavior. The stress distribution in fiber shown that the highest stress region were located at the fiber in center of the yarn and decreases slightly to the yarn surface. The results of this prediction model were compared with the stress-strain curves of polyester yarn that show good agreement with experimental results at low twisted yarn (14.38 and 19.86 degree), but at high twisted yarn the prediction model slightly than the experimental results.

Keyword: Stress-strain properties, Multifilament twisted yarns, CAD/CAE

¹ นิสิตปริญญาโท, ^{2,3,4} ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ Graduate student, ^{2,3,4} Assistant Professor, Manufacturing Engineering Department, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Khantharawichai District, Mahasarakham Province, 44150, Thailand.

* Corresponding author: Email : keartisaks@hotmail.com

บทนำ

สมบัติพื้นฐานทางด้านเรขาคณิต (Geometry) ของผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เช่น เส้นใย (fiber) เส้นด้าย (yarn) และ ผ้า (fabric) คือ ความซับซ้อนของโครงสร้างทางเรขาคณิตของการจัดเรียงของเส้นใยในโครงสร้างของเส้นด้าย และการถักทอของเส้นด้ายเพื่อประกอบเป็นผืนผ้า สมบัติทางกลของเส้นใย เส้นด้าย และผ้า ก็ไม่เป็นเส้นตรง (non-linear) และแต่ละทิศทางจะมีคุณสมบัติทางกลไม่เท่ากัน¹ (Anisotropic) ซึ่งสมบัติทางกลของเส้นใย เส้นด้าย และผ้า ไม่เท่ากัน เป็นผลมาจากการประกอบเข้าด้วยกันของเส้นใยขนาดเล็กจำนวนมากเพื่อผลิตเป็นเส้นด้าย ฝักระหว่างเส้นใยเมื่อได้รับแรงกระทำ นอกจากนี้ยังมีความยุ่งยากในการระบุลักษณะทางกายภาพของเส้นใยที่มีรูปร่างไม่แน่นอน

การดึง¹ (Tension) คือ การประยุกต์แรงทำให้เกิดความเครียดกับเส้นใยในเส้นด้าย ซึ่งเป็นการประยุกต์แรงดึงกับเกลียวของเส้นใยในโครงสร้างของเส้นด้าย เส้นด้ายจะมีแรงดัน (compression) เข้าไปแนวรัศมี และตั้งฉากกับแรงในแนวแกนของเส้นด้าย การเพิ่มขึ้นของแรงในการดึงจะมีข้อจำกัดโดยความแข็งแรงสูงสุดของเส้นใย (tensile strength) เมื่อประยุกต์แรงดึงเกินกว่าความแข็งแรงสูงสุดของเส้นใย หลังจากนั้น เส้นด้ายจะเกิดความเสียหายเพราะว่าความเสียหายเกิดกับเส้นใย ด้วยสาเหตุนี้จะเป็นการเชื่อมโยงระหว่างสมบัติของแรงดึงของเส้นใยและเส้นด้าย การเกิดความเสียหายของเส้นด้ายที่ทำจากเส้นใยสั้น สัมประสิทธิ์ความเสียหายของเส้นใยต่ำ และแรงดึงจะเท่ากับแรงจากความเสียหาย ที่จุดนี้เส้นใยจะลื่น (slip) ผ่านแต่ละจุดและเส้นด้ายจะเกิดความเสียหายโดยที่เส้นใยไม่เกิดการขาดจากกัน ในกรณีของเส้นด้ายที่ทำจากเส้นใยยาวแรงที่เกิดขึ้นจะไม่เกินแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใย ดังนั้น เส้นใยจึงเกิดการขาดจากกัน การดึงบนเส้นด้ายมีค่าเท่ากับแรงดึงทั้งหมดของเส้นใยที่อยู่ในส่วนของเส้นด้าย ในกรณีนี้ คำนวณหาแรงดึงของเส้นด้ายจากสมการได้ มีงานวิจัยได้ทำการพัฒนารูปแบบการจำลองโครงสร้างเส้นใย เส้นด้ายและผ้าโดยใช้ CAD²⁻⁴

(Computer Aided Design) และการทำนายสมบัติทางกลของโครงสร้างสิ่งทอโดย Finite Element Method⁵⁻⁶ (FEM) รวมทั้งเทคนิคของวิธีพลังงาน⁷ (Energy Method) ในการทำนายสมบัติทางกลของวัสดุสิ่งทอ

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ นำเสนอแบบจำลองเรขาคณิตของเส้นด้ายที่ประกอบด้วยเส้นใยจำนวนมากโดยใช้ CAD^{2,3} และทำนายสมบัติการดึงของเส้นด้ายด้วย CAE โดยกำหนดโครงสร้างของเส้นด้ายที่สมบูร์นแบบและเปลี่ยนค่าของมุมเกลียวเป็นค่าต่างๆ สมบัติวัสดุที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองคือ โพลีเอสเตอร์

วิธีการดำเนินงาน

สมมุติฐาน

ในการทำนายสมบัติการดึงของเส้นด้ายกำหนดสมมุติฐาน ดังนี้

- เส้นด้ายมีโครงสร้างที่สมบูร์นแบบ โดยจำลองโครงสร้างเส้นด้าย 1 รอบเกลียวของแต่ละค้ำมุม และกำหนดจำนวนเลเยอร์ เท่ากับ 5 เลเยอร์
- ค่าความเค้นของแบบจำลองที่บริเวณจับยึดสำหรับดึงและบริเวณยึดอยู่กับจะไม่นำมาพิจารณา
- ความเสียหายของเส้นใยในเส้นด้ายสูงมาก ดังนั้น เมื่อเส้นใยสัมผัสจะยึดติดกัน

เตรียมแบบจำลองโดยใช้ CAD

จากตารางที่ 1 แสดงค่าของตัวแปรในการจำลองโครงสร้างของเส้นด้าย โดยรูปแบบโครงสร้างเส้นด้ายถูกสร้างขึ้นโดยการประกอบกันของเส้นใยหลายๆเส้นใย ในการสร้างแบบจำลองของเส้นด้ายเราจำเป็นต้องทราบขนาดของเส้นใย รัศมีของเส้นใย และรัศมีของเส้นด้ายและจำนวนเส้นใยในพื้นที่หน้าตัดของเส้นด้าย สำหรับเส้นใยและเส้นด้ายที่จะทดสอบ การจำลองโครงสร้างของเส้นด้ายที่มีโครงสร้างสมบูร์นแบบใช้โปรแกรมสำเร็จรูปคือ SolidWorks⁸ รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างแบบจำลองโครงสร้างเส้นด้ายตามมุมเกลียวที่มีองศาต่างๆ กำหนดไว้ คือ 0, 14.38, 19.86, 31.12 และ 35.75 องศา ตามลำดับ

Table 1 Geometrical parameters of yarns structures.

Twist angle (degree)	Fiber diameter (micron)	No. of layers	No. of fibers	Yarn diameter (micron)	Pitch length (mm)
0	12	5	61	108	1.000
14.38	12	5	61	108	1.323
19.86	12	5	61	108	0.940
31.12	12	5	53	108	0.562
37.75	12	5	56	108	0.471

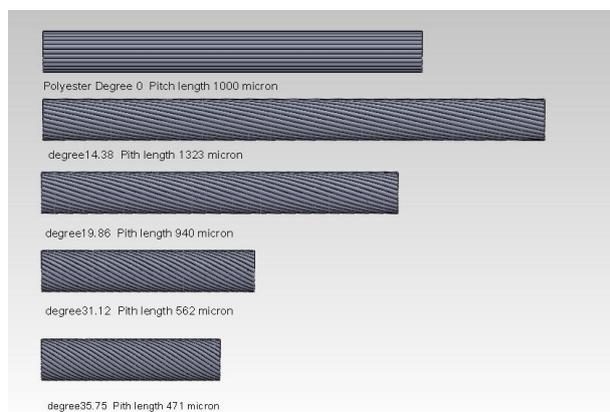


Figure 1 The fiber assemble model of 5 layers with different twist angle.

เตรียมแบบจำลองโดย CAE

หลังจากที่ได้แบบจำลองโครงสร้างเส้นด้ายตามมุมเกลียวที่มีองศาต่างๆที่กำหนดไว้ข้างต้น หลังจากนั้น นำแบบจำลองมาทำการจำลองการดึงโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปคือ COSMOS Works^o เพื่อหาความเค้นที่เกิดขึ้นจากการดึง โดยทำการดึงเส้นด้ายในทิศทางเดียวส่วนอีกด้านหนึ่งทำการยึดเอาไว้ โดยที่ระยะของการดึงที่ใช้กำหนดไว้ที่ 10-15 % ของความยาวของเส้นด้ายในแต่ละค่ามุมเกลียวซึ่งแสดงในตารางที่ 2 ชนิดของเมชที่ใช้คือ Parabolic tetrahedral

mesh ซึ่งมีโนด 4 มุมในแต่ละมุม และโนดที่บริเวณตรงกลางของแต่ละด้าน และมี 6 ขอบ ซึ่ง ขนาดของเมช และค่าเผื่อ สามารถกำหนดโดยอัตโนมัติ โดย COSMOS Works ซึ่งจะเลือกความหนาแน่นของเมชของเส้นใยได้เมื่อทำการจำลองการดึงในแต่ละค่ามุมของเส้นด้าย ตัวอย่างของการเมชเส้นใยในเส้นด้ายสำหรับค่ามุม 37.75 องศา แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยจำนวนเมชเท่ากับ 30,644 ต่อความยาว 0.471 มิลลิเมตร

Table 2 Percentages and length of yarn extension.

Twist angle (degree)	Percentage of yarn extension	length of yarn extension (micron)
14.38	15	198
19.86	12	112
31.12	10	56
35.75	10	47

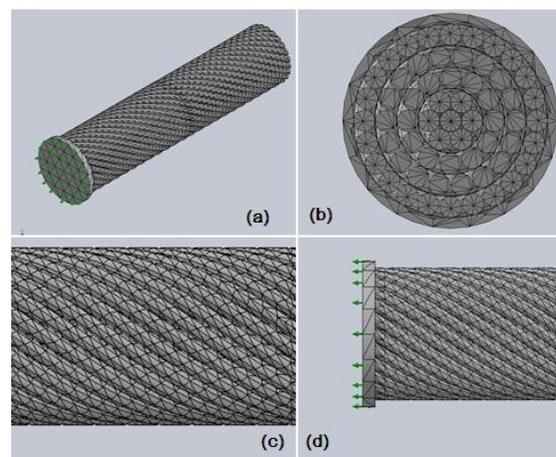


Figure 2 Example of finite element method of fiber assemblies with 37.75 degree twist angle, (a) 3D model, (b) front view, (c, d) mesh generated at fixed and clamped point, respectively.

สมบัติของแรงดึงระหว่างเส้นใยและเส้นด้าย

เมื่อทำการดึงเส้นด้าย ค่าของแรงดึงต่อพื้นที่หน้าตัดเท่ากับผลรวมของการดึงเส้นใยทั้งหมดรวมกัน สามารถคำนวณแรงดึง (F_y) ของเส้นด้ายจากผลรวมของแรงดึงแต่ละเส้นใย (F_{fj}) คูณด้วย $\cos\alpha_j$ เมื่อกำหนดให้ α_j คือค่าของมุมเกลียวของเส้นใย⁹⁻¹⁰ ดังนี้

$$F_y = \sum_{j=1}^n F_{fj} \cos \alpha_j = \sum_{j=1}^n \sigma_{fj} A_{fj} \cos \alpha_j \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้ σ_{fj} คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นของเส้นใยที่เลเยอร์ j และ A_{fj} คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยตามแนวแกนของเส้นใยที่เลเยอร์ j ซึ่ง j คือ ลำดับที่ของเลเยอร์ เมื่อเกิดความเค้นขึ้นกับเส้นใยหลังจากเกิดการดึงที่เส้นด้าย สามารถวิเคราะห์ค่าได้โดย FEM ดังนั้นความเค้นที่ได้ของแต่ละเส้นใยสามารถนำไปคำนวณค่าความเค้นของเส้นด้าย จาก

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_y} = \frac{\sum_{j=1}^n \sigma_{fj} A_{fj} \cos \alpha_j}{A_y} \quad (2)$$

ซึ่ง σ_y คือ ความเค้นที่เกิดขึ้นบนเส้นด้าย และ A_y คือพื้นที่หน้าตัดของเส้นด้าย สมการที่ (2) นี้ใช้ในการคำนวณความเค้นของเส้นด้าย ดังนั้น ถ้าต้องการคำนวณค่าของความเค้นโดยใช้ค่าสูงสุด หรือใช้ค่าเฉลี่ยของความเค้นสามารถแทนค่าความเค้นของเส้นใยใน σ_{fj} ก็จะสามารถหาค่าของความเค้นที่เป็นค่าสูงสุดหรือต่ำสุดได้

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

ความเค้นของเส้นใยแต่ละเลเยอร์

จากการประยุกต์ใช้หลักการของ CAD/CAE ก่อนหน้านี้ และได้เปรียบเทียบตัวแปรที่ใช้ในการจำลองเช่น จำนวนของเมช ขนาด จำนวนครั้งในการคำนวณแบบเส้นตรง และเวลาการจำลองแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งทำการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลด้วย Intel® Core™ i5 , CPU 2.30 GHz, 4.00 GB of RAM จากผลของความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละเลเยอร์พบว่า ความเค้นจะมีค่ามากที่สุดที่เลเยอร์ 1 ซึ่งอยู่แกนกลางของเส้นด้าย และความเค้นจะลดลงมาเรื่อยๆ จนถึงผิวด้าน

นอกของเส้นด้าย การเกิดลักษณะเช่นนี้ เนื่องจากการดึงในแนวแกนของเส้นด้ายที่เป็นเกลียว และมีเรขาคณิตที่สมบูรณ์แบบซึ่ง เส้นใยที่อยู่แกนกลางเส้นด้ายจะถูกดึงก่อนแล้วเลเยอร์ถัดมาจึงจะได้รับผลกระทบจากการดึง รูปที่ 3 แสดงค่าความเค้นสูงสุดของแต่ละเลเยอร์กับเปอร์เซ็นต์การยืดของเส้นด้ายที่ค่ามุมเกลียวต่างๆ กราฟระหว่างความเค้นและเปอร์เซ็นต์การยืดของเส้นใยของเลเยอร์แรกจะมีลักษณะที่เป็นเส้นโค้ง และที่ เลเยอร์ถัดจากนั้นจะมีเส้นกราฟของความเค้นและเปอร์เซ็นต์การยืดที่ลดลงมาเป็นลำดับ ลักษณะของ เลเยอร์ 3 ถึง 5 ขึ้นอยู่กับมุมของเกลียวเส้นด้ายของแต่ละค่ามุม ซึ่งที่มุมเกลียวที่มากกว่า เลเยอร์ด้านนอกจะมีความชันของกราฟที่ต่ำลงมากกว่าเส้นด้ายที่มีมุมเกลียวที่น้อยกว่า

Table 3 Comparisons of parameter of CAE model with different twist angle.

Twist angle (degree)	No. of element	No. of node	Total time step	CPU time (Hour: Minute)
14.38	21722	45268	14	1hr : 24min
19.86	34756	83207	15	53.28min
31.12	26565	64281	17	1hr : 03min
35.75	30644	73553	18	13.48min

ความเค้น-เปอร์เซ็นต์การยืดเส้นด้ายและเปรียบเทียบกับการทดลอง

ในการศึกษานี้ จำลองที่ค่ามุมเกลียวทั้ง 4 ค่าโดยใช้หลักการของ FEM กราฟของความเค้นและการยืดของเส้นใยของแต่ละเลเยอร์แสดงในรูปที่ 3 และสมการที่ 2 ใช้คำนวณความเค้นของเส้นด้าย ดังนั้น สามารถคำนวณกราฟระหว่างความเค้นและเปอร์เซ็นต์การยืดของเส้นด้ายโดยแสดงในรูปของค่าเฉลี่ยและค่าที่มากที่สุดของความเค้นที่เกิดขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 4 ผลการทำนายของโพลิเอสเทอร์นี้ได้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบการดึงจริง¹ ที่ค่ามุมต่างๆ จากผลการเปรียบเทียบพบว่า ที่ค่ามุมเกลียวต่ำคือ 14.38 และ 19.86 องศา ผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบการดึงจริง แต่สำหรับที่ค่ามุมเกลียวที่เพิ่มขึ้นคือ 31.12 และ 37.75 องศา ผลการจำลองมีค่าต่ำกว่า

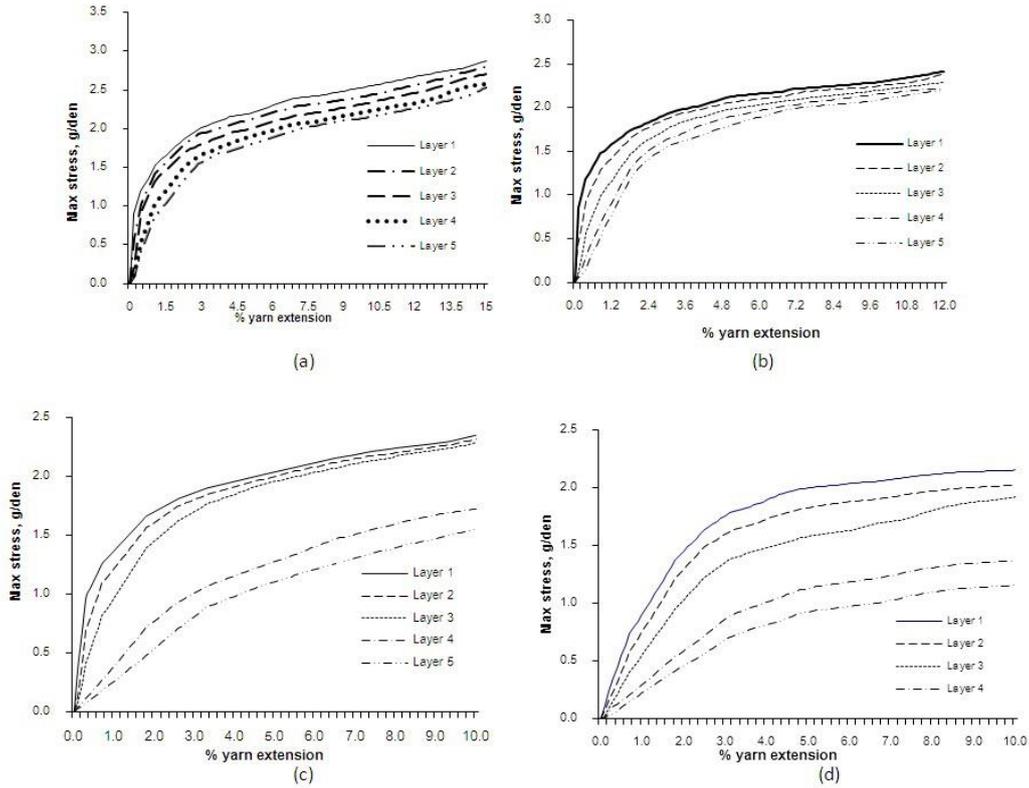


Figure 3 maximum stresses – layer extension, (a-d) layer extension with 14.38, 19.86, 31.12 and 35.75 degree twist angle.

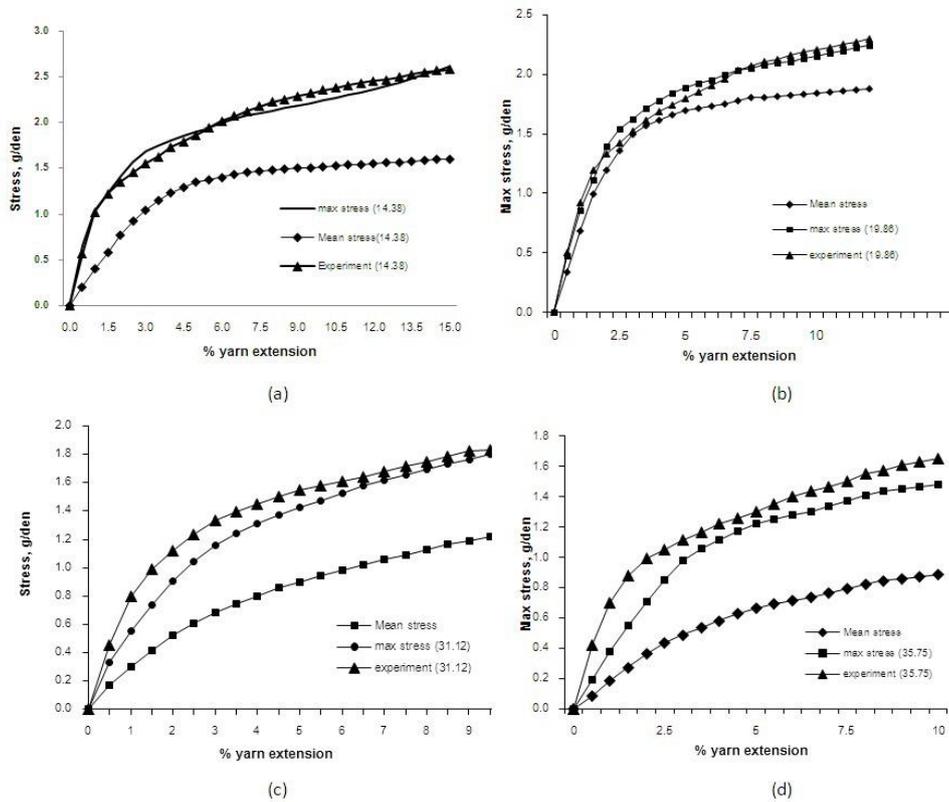


Figure 4 (a-d) Comparisons of stress-strain curves of CAD/CAE model with Experimental data.

ผลการทดสอบจริง โดยที่การเลือกค่าความเค้นที่มากที่สุดจะได้ค่าการทำนายที่ใกล้เคียงกับการทดสอบการดึงจริงมากกว่าการใช้ค่าความเค้นเฉลี่ย ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดระหว่างการจำลองและการทดสอบการดึงจริงอาจเกิดจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความแตกต่างกันของโครงสร้างเส้นด้ายและความหนาแน่นในการบรรจุของเส้นใยในด้ายจริง การย้ายตำแหน่งของเส้นใย แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใย ความยาวของแบบจำลองเส้นด้ายที่ใช้เพียงหนึ่งรอบเกลียวสำหรับการทดสอบ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ สามารถนำมาพัฒนาแบบจำลองให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้นในอนาคต

บทสรุป

จากการทำนายการดึงของเส้นด้ายแบบเส้นใยยาวสำหรับโพลีเอสเตอร์ด้วยวิธี CAD/CAE โดยสังเกตผลที่ได้จากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เป็นเส้นตรงมาวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นกับเส้นด้าย พบว่า ค่าความเค้นสูงสุดอยู่ที่เส้นใยที่จุดศูนย์กลางของเส้นด้าย และจะลดลงมาเป็นลำดับจนถึงขอบของเส้นด้าย เมื่อค่าของมุมเกลียวของเส้นด้ายเพิ่มขึ้น ความชันของกราฟระหว่างความเค้นและเปอร์เซ็นต์การยืดมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองโดยใช้ค่าของความเค้นสูงสุดและผลการทดสอบดึงจริงพบว่าที่ค่ามุมเกลียวต่ำคือ 14.38 และ 19.86 องศา ผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบดึงจริง แต่สำหรับที่ค่ามุมเกลียวที่เพิ่มขึ้นคือ 31.12 และ 37.75 องศา ผลการจำลองมีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบจริง สาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนอาจเนื่องจากปัจจัยที่แตกต่างกันของโครงสร้างเส้นด้าย ความหนาแน่นในการบรรจุของเส้นใยในด้ายจริง การย้ายตำแหน่งของเส้นใย แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใย เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้สามารถเพิ่มเข้าไปในแบบจำลองได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยมหาสารคามสำหรับอุปกรณ์ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. John W.S. Hearle ,Percy Grosberg , Stanley Backer. Structural Mechanics of Fibers, Yarns, and Fabrics. John Wiley & Sons; 1969.
2. Sriprateep K, Bohez ELJ. A New Computer Geometric Modeling Approach of Yarn Structures for Conventional ring Spinning Process. Journal of the Textile Institute. 2009;100:223-236.
3. Sreprateep K, Bohez, ELJ. Computer Aided Modeling of Fiber Assemblies. Computer-Aided Design and Applications. 2006;3:367-376.
4. Jiahua Zhang, Baciu G, Dejun Zheng, Cheng Liang, Guiqing Li, Jinlian Hu. IDSS : A Novel Representation for Woven Fabrics, Visualization and Computer Graphics. IEEE Trans on. 2013;19:420 - 432.
5. He, Weiyu ,Zhang, Shaorui,Wang. Mechanical Behavior of Irregular Fibers Part I: Modeling the tensile behavior of linear elastic fibers. Textile Research Journal. 2001;71:556-560.
6. S Vassiliadis, A Kallivretaki, Ch Provatidis. Mechanical Modelling of Multifilament Twisted Yarns. Fibers and Polymers. 2010;11(1):89-96.
7. LRG Treloar, G Riding. A theory of the stress-strain properties of continuous filament yarns. Journal of the textile Institute. 1963;54:156-170.
8. Solid works/COSMOS Works User's manual, Version2011.
9. Ning Pan, Tao Hua, Yiping Qiu. Relationship between fiber and yarn strength. *Textile Research Journal*. 2001;71:960-964.
10. Mary Lynn Realff, Ning Pan, Moon Seo, Mary C. Boyce, Stanley Backer. A Stochastic Simulation of the Failure Process and Ultimate Strength of Blended Continuous Yarns. *Textile Research Journal*. 2000;70:415-430.