



การหาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิตสำหรับเครื่องพันเส้นใยอัตโนมัติ

ธฤต ชู่อ่องสกุล และ พงุทธิกร สมิตไมตรี*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7428 7214 อีเมล: pruittikorn.s@psu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.01.003

รับเมื่อ 28 พฤษภาคม 2561 แก้ไขเมื่อ 11 กันยายน 2561 ตอรับเมื่อ 18 ธันวาคม 2561 เผยแพร่ออนไลน์ 9 มกราคม 2562

© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ท่อคอมโพสิตมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เพราะท่อคอมโพสิตมีข้อดีในเรื่องความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อน น้ำหนักเบา และไม่เป็นสนิม การผลิตท่อคอมโพสิตใช้เส้นใยแก้วจุ่มเรซินแล้วนำมาพันตามรูปทรงของท่อ งานวิจัยนี้เป็นการหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเพื่อให้ได้เส้นทางการพันเส้นใยตามการออกแบบบนท่อโค้งต้นแบบด้วยสมการ Helix การพันเส้นใยต้องพันให้เต็มพื้นที่ของท่อต้นแบบ ซึ่งการกำหนดจำนวนรอบของการพันและไขว้ของเส้นใยต้องเป็นไปตามลักษณะที่ออกแบบไว้ เส้นทางการพันสามารถจำลองด้วยโปรแกรม CAD/CAM จากนั้นทำการแปลงทางเดินของเส้นใยบนท่อโค้งให้เป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสำหรับการทำงานอัตโนมัติ จากการทดลองพบว่าเครื่องพันเส้นใยสามารถเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงกับการจำลองในโปรแกรม การตรวจความถูกต้องทำได้โดยการเปรียบเทียบลักษณะการพันที่ออกแบบไว้กับผลของการพันเส้นใยด้วยเครื่องจักร พบว่าได้ลักษณะเส้นใยที่พันตามการออกแบบ ผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องพันเส้นใยแก้วสำหรับท่อโค้งที่มีขนาดต่างกันได้อีก

คำสำคัญ: เครื่องจักรอัตโนมัติ, ท่อคอมโพสิต, ท่อโค้ง, พันเส้นใยแก้ว



Determination of Filament Winding Path on a Composite Elbow Pipe for the Automatic Winding Machine

Tharit Choo-ongsakul and Pruittikorn Smithmaitrie*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 7428 7214, E-mail: pruittikorn.s@psu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2019.01.003

Received 28 May 2018; Revised 11 September 2018; Accepted 18 December 2561; Published online: 9 January 2019

© 2019 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Composite pipes have an important role in construction industry in terms of strength, corrosion resistance, lightweight and non-rust. To manufacture composite pipes, glass fiber is dipped into resin solution and wound around a mandrel pipe. This research determines the elbow pipe filament winding path on an elbow mandrel by using helix curve equations. A CAD/CAM software determines the number of winding rounds to obtain the desired filament angle, and simulates the filament winding pattern. After that, the filament path is transformed to the winding machine path. The experiments show that the filament winding machine is able to automatically wind the filament similar to the design pattern. The validation is done by comparing the machine winding path with the simulation winding path on an elbow pipe. The result shows that the machine works according to the design. This study provides the knowledge on determination of the filament winding path on elbow pipes for the automatic winding machine. The results can be applied to various sizes of elbow pipes.

Keywords: Automatic Machine, Composite Pipe, Elbow Pipe, Filament Winding

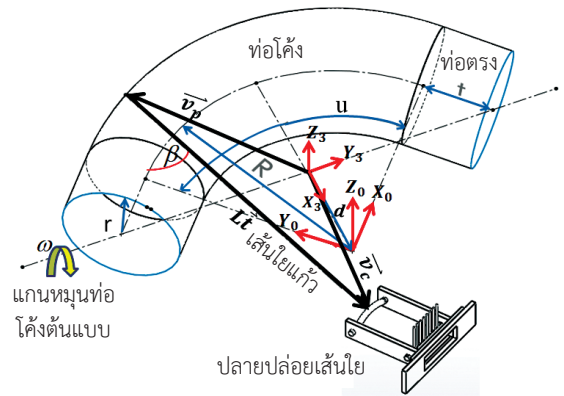
Please cite this article as: T. Choo-ongsakul and P. Smithmaitrie, "Determination of filament winding path on a composite elbow pipe for the automatic winding machine," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 2, pp. 259–269, Apr.–Jun. 2019 (in Thai).

1. บทนำ

ท่อคอมโพสิตมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ซึ่งลักษณะของท่อคอมโพสิตที่ผลิตในอุตสาหกรรมมีทั้งแบบท่อตรง ข้อต่อ ท่อโค้ง ถึง และแคปซูล กระบวนการผลิตของท่อคอมโพสิตใช้วิธีการพันด้วยเส้นใยแก้วจุ่มเรซิน แล้วพันเส้นใยแก้วลงบนตัวท่อโค้งต้นแบบ (Mandrel) การผลิตท่อในอุตสาหกรรมไทยมีทั้งแบบใช้เครื่องพันแบบอัตโนมัติและแบบใช้แรงงานคน การผลิตท่อคอมโพสิตที่ใช้แรงงานคนจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐาน การพันเส้นใยบนท่อโค้งด้วยคนทำได้ลักษณะเดียว คือแบบการพันให้เส้นใยแก้วเกลยทับกันทีละนิดจนเต็มพื้นที่ผิวท่อโค้งต้นแบบ แต่การพันในระดับมาตรฐานอุตสาหกรรมต้องการให้มีมุมมองการไขว้ของเส้นใยหรือมุมการพัน (β) เทียบกับเส้นแกนของท่อ การพันเส้นใยเป็นลายไขว้ทำให้ท่อสวยงามและเพิ่มความแข็งแรงด้วยความหนาของท่อเท่าเดิม

Karpuz [1] ได้ทดสอบความแข็งแรงของท่อตรงคอมโพสิต พบว่ามุมการพันเส้นใยมีผลต่อความแข็งแรงของท่อ [1] จึงเป็นที่มาของการวิจัยประดิษฐ์เครื่องพันท่อโค้งคอมโพสิตแบบอัตโนมัติที่สามารถกำหนดมุมการพันเส้นใยได้ เพื่อให้ท่อโค้งมีความแข็งแรงได้มาตรฐานและมีความหนาของท่อที่เหมาะสม Li and Liang [2] ได้นำเสนอเส้นทางการพันบนผิวท่อโค้งด้วยสมการ Geodesic เป็นสมการเฉพาะทางที่ซับซ้อน ซึ่งต่อมา Li et al. [3] ได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของเครื่องจักรพันเส้นใยแบบสี่แกนกับตัวแปรเส้นทางการพันบนผิวท่อโค้ง นอกจากนี้ยังมีกลุ่มนักวิจัยที่พัฒนาเครื่องจักรพันเส้นใยท่อโค้งอัตโนมัติด้วยวิธีต่างๆ เช่น วิธีการสอนให้เครื่องจักรจดจำการเคลื่อนที่ในรอบแรก แล้วให้เครื่องจักรทำซ้ำตามที่สอน [4] และเครื่องจักรแบบมีวงแหวนพันเส้นใยหมุนรอบท่อและเคลื่อนที่ตามแนวโค้งของท่อโค้งซึ่งสามารถพันท่อได้ทุกความโค้ง และหากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโค้งใหญ่ขึ้นก็สามารถเปลี่ยนขนาดวงแหวนพันเส้นใยให้ใหญ่ตามได้ [5]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองหาเส้นทางการพันเส้นใยบนผิวท่อโค้งจากสมการ Helix เพื่อให้ง่ายต่อการจำลองเส้นทางและการจำลองในโปรแกรม CAD/CAM โดยใช้ความ



รูปที่ 1 พารามิเตอร์ของท่อโค้งคอมโพสิต

สัมพันธ์จากจำนวนรอบของการพัน และเพื่อวิเคราะห์หาเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสี่แกนจากการพันเส้นใยที่กำหนดไว้

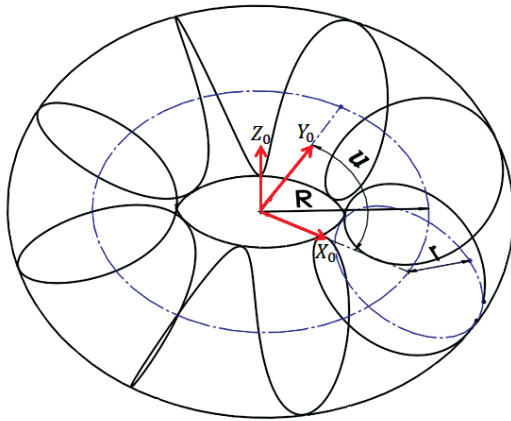
ความสัมพันธ์ของเส้นทางการพันเส้นใยบนผิวท่อโค้งเกี่ยวข้องกับสมการของท่อโค้งและท่อตรง เพราะท่อโค้งคอมโพสิตหนึ่งท่อประกอบด้วยส่วนของท่อตรงที่ปลายท่อทั้งสองและส่วนของท่อโค้งที่อยู่ตรงกลาง ตามรูปที่ 1

สมการที่นำมาใช้สร้างเส้นทางการเดินบนส่วนของท่อโค้งคือสมการ Helix ของรูปทรงทอรัส (Torus) ตามสมการ

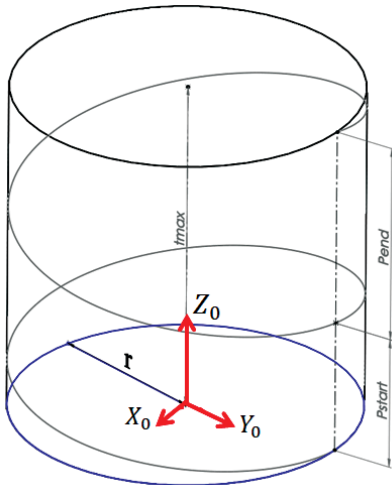
$$\begin{bmatrix} x_0(u) \\ y_0(u) \\ z_0(u) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R+r \cdot \cos(n \cdot u)) \cdot \cos(u) \\ (R+r \cdot \cos(n \cdot u)) \cdot \sin(u) \\ r \cdot \sin(n \cdot u) \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ $0 < u \leq u_{max}$ โดยที่ R คือรัศมีความโค้งของท่อ r คือรัศมีของขนาดท่อ n คือจำนวนรอบการพันสำหรับ $u_{max} = 2\pi$ u คือมุมตามความยาวส่วนท่อโค้ง u_{max} คือมุมเปิดของความยาวส่วนท่อโค้ง เส้นทางการพันบนผิวท่อโค้งที่ได้จากสมการที่ (1) เป็นตามรูปที่ 2

เส้นทางการพันเส้นใยบนส่วนท่อตรงที่ปลายทั้งสองบนผิวทรงกระบอก ซึ่งมีการกำหนดพารามิเตอร์ตามรูปที่ 3 สามารถใช้สมการ Helix บนผิวทรงกระบอกได้ตามสมการที่ (3) โดยกำหนดพารามิเตอร์ P_1 และ P_2 บอกช่วงทางการพันเส้นใย (Pitch) ในแต่ละรอบ P_1 และ P_2 มีความสัมพันธ์ขึ้นกับจำนวนรอบของการพันเส้นใย (n) และความยาวของส่วน



รูปที่ 2 เส้นทางจากสมการ Helix บนผิวทรงทอรัส



รูปที่ 3 เส้นทางจากสมการ Helix บนผิวท่อตรง

ท่อตรง (t_{max}) ช่วงห่างของ Pitch ถูกกำหนดโดย Pitch เริ่มต้น (P_{start}) และ Pitch สิ้นสุดท้าย (P_{end}) ตามสมการที่ (3)–(5) พารามิเตอร์ P_1 และ P_2 บ่งชี้ถึงการทยอยเพิ่มขึ้นของระยะห่าง Pitch ตามแนวแกน Z_0 จากเริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดการพัน ในช่วงท่อตรงที่มีความยาวรวมเป็น t_{max}

ในกรณีที่ $n_1 = 1$ เส้นทางการพันเส้นใยเป็นไปตามสมการที่ (6) โดยกำหนดค่า t_{max} เป็นความยาวท่อตรงและส่วนค่า P_1 ถูกกำหนดโดยเส้นสัมผัส ณ จุดต่อเชื่อมระหว่างเส้นทางการพันท่อโค้งและเส้นทางการพันของท่อตรงจะต้องมีความชันเท่ากัน

เมื่อ $0 < t \leq 1$

ในกรณีที่ $n_1 \geq 2$

$$\begin{bmatrix} x_0(t) \\ y_0(t) \\ z_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot \sin(2\pi n_1 t) \\ r \cdot \cos(2\pi n_1 t) \\ n_1 P_1 t + n_1 P_2 t^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$t_{max} = \frac{n_1(P_{start} + P_{end})}{2} \quad (3)$$

$$P_1 = \frac{2n_1 - 1}{n_1(n_1 - 1)} t_{max} - \frac{n_1}{n_1 - 1} P_{end} \quad (4)$$

$$P_2 = -\frac{1}{n_1 - 1} t_{max} + \frac{n_1}{n_1 - 1} P_{end} \quad (5)$$

ในกรณีที่ $n_1 = 1$

$$\begin{bmatrix} x_0(t) \\ y_0(t) \\ z_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot \sin(2\pi n_1 t) \\ r \cdot \cos(2\pi n_1 t) \\ n_1 P_1 t + n_1 (t_{max} - P_1) t^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

เนื่องจากสมการ Helix บนส่วนของท่อโค้งและท่อตรงมีจุดอ้างอิงที่ต่างกัน จึงต้องอาศัยเมทริกซ์การแปลง (Transformation Matrix) สำหรับเลื่อนตำแหน่งกรอบอ้างอิงตามสมการที่ (7) และหมุนกรอบอ้างอิงตามสมการที่ (8)–(10) ให้จุดอ้างอิงของสมการ Helix ของท่อโค้งและท่อตรงมาซ้อนกันทับกัน [6]

$$Trans(d_x, d_y, d_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$Rot(X, \theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x & 0 \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$Rot(Y, \theta_y) = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Rot(Z, \theta_z) = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

เมื่อ d_x คือระยะเลื่อนตามแนวแกน X , d_y คือระยะเลื่อนตามแนวแกน Y , d_z คือระยะเลื่อนตามแนวแกน Z , θ_x คือมุมการหมุนรอบแกน X , θ_y คือมุมการหมุนรอบแกน Y และ θ_z คือมุมการหมุนรอบแกน Z

2. วิธีการวิจัย

2.1 การออกแบบเส้นทางการพันเส้นใย

การออกแบบเส้นทางการพันเส้นใยที่ต่อเนื่องระหว่างจุดต่อของส่วนท่อตรงกับส่วนท่อโค้งและมีเส้นใยพันทับกลับไปมาเป็นลายไขว้สามารถทำได้โดยนำสมการที่ (1) และสมการที่ (2) หรือ (6) มาปรับความต่อเนื่องของเส้นทางด้วยมุมเฟสเริ่มต้น (α_{start}) จะได้เส้นทางการพันบนผิวท่อโค้งเป็น

$$H_{Elbow}(u) = \begin{bmatrix} x_0(u) \\ y_0(u) \\ z_0(u) \end{bmatrix} \quad (11)$$

โดยที่

$$x_0(u) = \left(R + r \cos\left(\frac{2\pi n_2 u}{u_{max}} + \alpha_{start}\right) \right) \cos(u)$$

$$y_0(u) = \left(R + r \cos\left(\frac{2\pi n_2 u}{u_{max}} + \alpha_{start}\right) \right) \sin(u)$$

$$z_0(u) = r \sin\left(\frac{2\pi n_2 u}{u_{max}} + \alpha_{start}\right)$$

เมื่อ n_2 คือจำนวนรอบการพันสำหรับส่วนโค้ง u_{max} ใดๆ ส่วนเส้นทางการพันบนผิวท่อตรงเมื่อมีมุมเฟสเป็นไปตามสมการ

$$H_{Cylinder}(t) = \begin{bmatrix} x_0(t) \\ y_0(t) \\ z_0(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{โดยที่ } x_0(t) = r \sin(2\pi n_1 t + \alpha_{start})$$

$$y_0(t) = r \cos(2\pi n_1 t + \alpha_{start})$$

$$z_0(t) = n_1 P_1 t + n_1 P_2 t^2$$

เมื่อได้สมการเส้นทางเดินบนผิวท่อที่ต่อเนื่องแล้ว ลำดับถัดไปเป็นการสร้างรูปแบบของเส้นทางเดินบนพื้นผิวให้เป็นไปตามแบบการพันเส้นใยบนท่อโค้งในงานอุตสาหกรรม การกำหนดพารามิเตอร์เพื่อการออกแบบลายไขว้ของเส้นใยถูกแยกเป็น 2 กรณี ดังนี้

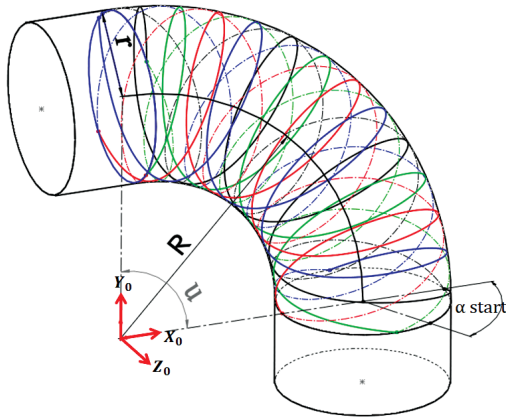
กรณีที่ 1 ส่วนของท่อโค้ง

การออกแบบเส้นทางเริ่มต้นจากการกำหนดมุมเปิดของความยาวส่วนท่อโค้งตามลักษณะท่อที่ต้องการผลิต ยกตัวอย่างเช่น กำหนด $u = 0-45^\circ$ สำหรับท่อโค้ง 45° หรือ กำหนด $u = 0-90^\circ$ สำหรับท่อโค้ง 90° โดยที่ตัวแปร R และ r ขึ้นอยู่กับขนาดของท่อต้นแบบ ต่อมากำหนดจำนวนรอบ $n_2 = 3.125$ ซึ่งทำให้มีการเหลื่อมกันของเส้นทางการพัน (กรณีนี้มีการพัน 4 เส้นในแนวรอบวง) และจำนวนรอบในการพันจะส่งผลต่อมุมการพัน β โดยมีค่าปกติที่มักใช้กันในการผลิตอยู่แล้ว

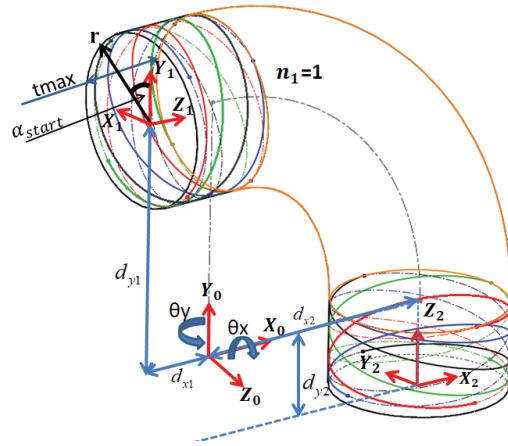
การกำหนดมุมเฟสเริ่มต้น α_{start} ของเส้นทางบนส่วนของเส้นรอบวงดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อต้องการเส้นทางเดินของเส้นใยพันหลายทบกระจายตามแนวเส้นรอบวงสามารถทำได้ด้วยการกำหนดมุมเฟสเริ่มต้นหลายค่า ยกตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยนี้ต้องการให้มีการพันเส้นใย 4 ครั้ง กระจายตามแนวเส้นรอบวง จึงกำหนดให้ $\alpha_{start} = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ ส่วนเส้นทางเดินวกกลับสามารถหาได้จากการคูณสมการที่ (11) เฉพาะองค์ประกอบในแนว Z_0 ด้วย -1 และกำหนดค่า α_{start} เพื่อให้เส้นทางวกกลับต่อกับเส้นทางขามายกตัวอย่างเช่น เส้นที่บีสีด้าเมื่อคุณองค์ประกอบในแนวแกน Z_0 ด้วย -1 แล้วจะได้เส้นทางวกกลับเป็นเส้นประสีด้า

กรณีที่ 2 ส่วนของท่อตรง

ขั้นตอนการคำนวณเริ่มต้นจาก กำหนดระยะความยาวของท่อตรงส่วนที่ต้องการพันเส้นใย เช่น ส่วนของท่อตรงยาว 70 มม. อาจจะทำหนด $t_{max} = 60$ มม. หรือ 65 มม. ขึ้นอยู่กับ



รูปที่ 4 เส้นทางการพันเส้นใยบนส่วนของท่อโค้ง



รูปที่ 5 เส้นทางการพันเส้นใยบนส่วนของท่อตรง

หน้ากว้างของแพเส้นใยแก้ว

การออกแบบเส้นทางบนผิวท่อตรงนั้นแตกต่างกับเส้นทางบนผิวท่อโค้งตรงที่ไม่ต้องกำหนดมุมพันเพราะเส้นทางเดินเป็นเส้นสัมผัสที่เชื่อมต่อมาจากส่วนของผิวท่อโค้งที่คำนวณไว้ก่อนหน้าและต่อเนื่องไปบนผิวของท่อตรง จากนั้นเส้นทางจะไปสิ้นสุดที่ปลายท่อแล้ววกกลับเข้าหาส่วนของท่อโค้งอีกครั้งด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการแปลงกรอบอ้างอิงของปลายท่อด้านซ้ายบนตามรูปที่ 5 ด้วยการเลื่อน $d_x = -d_{x1}$, $d_y = d_{y1}$ และการหมุน $\theta_y = 90^\circ$ จะได้เส้นทางเดินของจุดบนผิวท่อตรงอ้างอิงเทียบกรอบ $[X_0, Y_0, Z_0]$ เป็น

$$H_{Cylinder1}(t) = Trans(-d_{x1}, d_{y1}, 0) \cdot Rot(Y_0, 90^\circ) \cdot H_{Cylinder}(t) \tag{13}$$

จากนั้นกำหนด r ตามขนาดท่อต้นแบบ กำหนดจำนวนรอบของการพัน ซึ่งควรมีจำนวนรอบการพันไม่มาก เพื่อไม่ให้เกิดการพันที่ทับซ้อนของเส้นใยมากเกินไป เช่น $0 < n_1 \leq 5$ ต่อมากำหนดมุมเฟสเริ่มต้น α_{start} ตามจำนวนเส้นทางการพันตามแนวเส้นรอบวง รูปที่ 5 ปลายท่อตรงซ้ายบนแสดง $\alpha_{start} = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ และ 315° อ้างอิงเทียบแกน Y_0 โดย α_{start} จะถูกเลือกให้สอดคล้องกับเส้นทางของเส้นใยที่มาจากส่วนของท่อโค้ง เริ่มจากเส้นสีดำ สีเขียว สีแดง และสีน้ำเงินตามลำดับ

ส่วนปลายท่อตรงขวากลางตามรูปที่ 5 การแปลงกรอบอ้างอิง สามารถทำได้โดยการเลื่อน $d_x = d_{x2}$, $d_y = -d_{y2}$ และการหมุน $d_x = -90^\circ$ จะได้เส้นทางตามสมการที่ (14) โดยมีมุมพันเริ่มต้น $\alpha_{start} = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ และ 270° อ้างอิงเทียบแกน Z_0 โดยเริ่มจากเส้นสีดำ สีเขียว สีแดง และสีน้ำเงินตามลำดับ

$$H_{Cylinder2}(t) = Trans(d_{x2}, -d_{y2}, 0) \cdot Rot(X_0, -90^\circ) \cdot H_{Cylinder}(t) \tag{14}$$

การทำเส้นทางการพันวกกลับของส่วนท่อตรงสามารถทำได้ด้วยการคูณ -1 ในองค์ประกอบในแนวแกน Z_0 ในสมการที่ (13) และ (14) เพื่อให้ได้เส้นทางในฝั่งตรงข้าม (Mirror) และปรับ α_{start} ของเส้นทางวกกลับให้ตรงกับเส้นทางเดินเส้นใยมา

เมื่อได้สมการเส้นทางเดินบนผิวท่อที่ต่อเนื่องโดยตลอดแล้ว ลำดับถัดไปเป็นการหาความสัมพันธ์ของเส้นใยที่ปล่อยจากเครื่องจักรมาพันรอบท่อโค้งให้อยู่บนเส้นทางตามสมการที่ได้มาข้างต้น

2.2 การเคลื่อนที่ของเครื่องจักร

การคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสี่แกนที่ทำให้เกิดการพันเส้นใยบนผิวท่อโค้งตามการออกแบบ เริ่มต้น

จากการย้ายกรอบอ้างอิงจาก $[X_0, Y_0, Z_0]$ ไปที่กรอบอ้างอิง $[X_3, Y_3, Z_3]$ ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงของหัวปล้อยเส้นใย (กรอบอ้างอิงของเครื่องจักร) ด้วยเมทริกซ์การแปลงสมการที่ (15) โดยกำหนดค่าการหมุนรอบแกน Z_3 เป็นมุม -135° และการเลื่อนตามแกน X_3 เป็นระยะ -56.57 มม. ทำให้ได้สมการเส้นทางเดินของเส้นใยในแต่ละส่วนของท่อเป็น H_{Elbow} , $H_{Cylinder1}$ และ $H_{Cylinder2}$ เป็นตามสมการที่ (16), (17) และ (18) ตามลำดับ

$$T_3^0 = Trans(-56.57, 0, 0) \cdot Rot(Z_3, -135^\circ) \quad (15)$$

$$H_{3Elbow}(u) = T_3^0 \cdot H_{Elbow}(u) \quad (16)$$

$$H_{3Cylinder1}(t) = T_3^0 \cdot H_{Cylinder1}(t) \quad (17)$$

$$H_{3Cylinder2}(t) = T_3^0 \cdot H_{Cylinder2}(t) \quad (18)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องจักรกับแนวเส้นใยหาได้จากเวกเตอร์ ในรูปที่ 1 (เวกเตอร์เส้นสีดำ) ตามสมการ

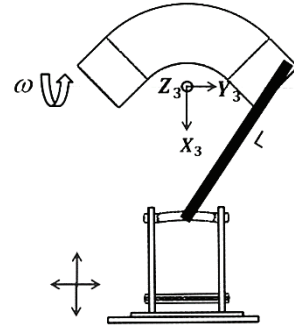
$$\vec{v}_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \vec{v}_p + L\vec{i} \quad (19)$$

เมื่อ \vec{v}_c คือ เวกเตอร์บอกตำแหน่งของหัวปล้อยเส้นใย \vec{v}_p คือ เวกเตอร์บอกตำแหน่งเส้นทางการพันบนผิวท่อ L คือ ความยาวของเส้นใยจากจุดสัมผัสบนผิวท่อถึงหัวปล้อยเส้นใย \vec{i} คือ เวกเตอร์บอกทิศเส้นสัมผัสของเส้นทางการพัน ในขณะที่ท่อต้นแบบหมุนเป็นมุม ω รอบแกน Y_3 ตำแหน่งของจุดบนผิวท่อและทิศเส้นสัมผัสก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้น

$$\vec{v}_p = Rot(Y_3, \omega) \cdot H_3 \quad (20)$$

$$\vec{i} = Rot(Y_3, \omega) \cdot \frac{H'_3}{|H'_3|} \quad (21)$$

โดย H_3 มาจากสมการที่ใช้กำกับเส้นทางเดินบนผิวท่อในช่วงนั้นเลือกจากสมการที่ (16), (17) หรือ (18) H'_3 คือ เวกเตอร์เส้นสัมผัสเส้นทางการพัน ณ จุดใดๆ และ $|H'_3|$ คือ ขนาด



แนวทางเคลื่อนที่ของปลายปล้อยเส้นใย

รูปที่ 6 การตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องจักรพันเส้นใยและตัวแปรของเครื่องจักร

ของเวกเตอร์เส้นสัมผัส H'_3 นอกจากนี้ ในการออกแบบทางเดินของเครื่องจักรยังกำหนดให้ $z_c = z_p$ จึงทำให้ \vec{i} อยู่ในแนวระดับเสมอ (องค์ประกอบ \vec{i} ในแนว Z เป็นศูนย์)

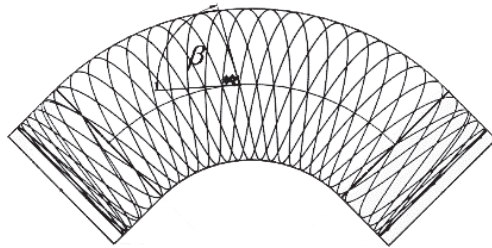
จากนั้นกำหนดขนาดของท่อคอมโพสิตในกรณีนี้ กำหนด $R = 150$ มม., $r = 50$ มม., $n_2 = 3.125$, $u_{max} = 90^\circ$, $n_1 = 1$, $t_{max} = 70$ มม. และ $L = 150-300$ มม. กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นการพันตามรูปที่ 6 แทนค่าพารามิเตอร์ลงในสมการที่ (19)–(21) สามารถแก้สมการหาค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหัวปล้อยเส้นใยได้เป็น x_c , y_c และ z_c

3. ผลการทดลอง

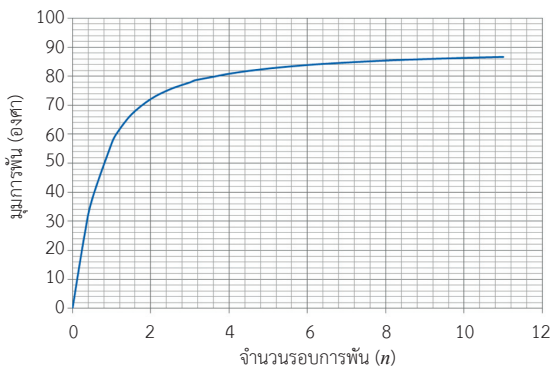
จากการจำลองสมการเส้นทางการพันเส้นใยตลอดผิวท่อโค้งที่ได้ นำสมการส่วนของท่อโค้งและส่วนของท่อตรงมารวมกันได้เส้นทางตามรูปที่ 7

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าเส้นทางที่ได้มีความต่อเนื่องตลอดแนวท่อโค้งทั้งการพันไปและกลับ อีกทั้งยังมีจำนวนเส้นใยที่กระจายในแนวเส้นรอบวงอย่างสม่ำเสมอ การไขว้กันของเส้นใยจะถูกกำหนดด้วยมุม β ที่ขึ้นกับจำนวนรอบการพัน (n) โดยความสัมพันธ์ของสองตัวแปรนี้เป็นไปตามรูปที่ 8

ข้อดีของความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้ กล่าวคือ สามารถเลือกมุมการพันได้จากจำนวนรอบการพัน มุมการพันนี้ส่งผลต่อความแข็งแรงของท่อคอมโพสิต โดยปกติแล้ว มุม β ถูกกำหนดอยู่ในช่วง



รูปที่ 7 เส้นทางการพันเส้นใยตลอดผิวทอโค้ง



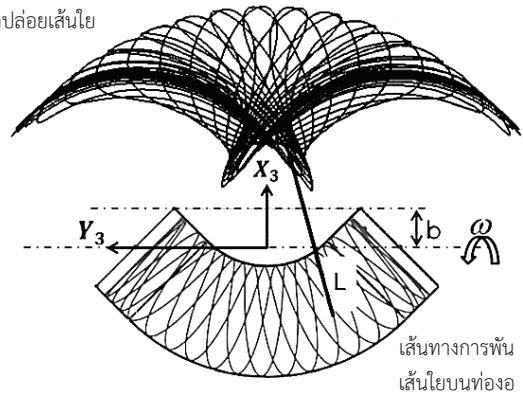
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการพันและมุมการพันเส้นใยบนทอโค้ง

60–85° สำหรับการผลิตทอโค้งระดับอุตสาหกรรม มุม β ไม่ควรน้อยกว่า 60° เพราะจะมีโอกาสเกิดการไถลระหว่างผิวทอตันแบบและเส้นใยแก้วผสมเรซินขณะพันได้ ซึ่งควรทำการทดสอบหาค่า β ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตจริงต่อไป

ผลการคำนวณการเคลื่อนที่ของหัวปล่อยเส้นใยจากเครื่องจักรแสดงดังรูปที่ 9 (บน) เป็นค่าตำแหน่งที่คำนวณได้จากตัวแปร x_c, y_c และ z_c แสดงให้เห็นว่า การเคลื่อนที่ของหัวปล่อยเส้นใยมีความต่อเนื่อง มีช่วงการเคลื่อนที่กว้างกว่าขนาดของทอโค้ง อีกทั้งเครื่องจักรยังรักษาระยะของหัวปล่อยให้ห่างจากผิวทอเป็นระยะ L คงที่เสมอ รูปที่ 9 (ล่าง) แสดงทางเดินของเส้นใยบนผิวทอโค้งที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร

เครื่องจักรมีการเคลื่อนที่ 4 แกน ได้แก่ หัวปล่อยเส้นใยสามารถเลื่อนตามแกนพิกัดฉาก 3 แกน (X_3, Y_3, Z_3) และทอโค้งตันแบบมีแกนหมุน 1 แกน (ω) ระยะการเคลื่อนที่แต่ละ

เส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวปล่อยเส้นใย



รูปที่ 9 การเคลื่อนที่ของหัวปล่อยเส้นใยของเครื่องจักร

แกนคำนวณจากตำแหน่งที่สัมพันธ์กับเส้นทางการพันแบบจุดต่อจุด โดยกำหนดให้ L เป็นค่าคงที่เริ่มต้น พบว่าระยะเส้นใย L มีผลต่อมุมสัมพันธ์ผิวทอโค้งตามเส้นทางการพัน ผลของการเปลี่ยนแปลงระยะเส้นใย L ต่อระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเป็นไปตามตารางที่ 1 เมื่อกำหนดขนาด $R = 150$ มม. $r = 50$ มม. $n_2 = 3.125$ $u_{max} = 90^\circ$ $n_1 = 1$ $t_{max} = 70$ มม. และ $L = 150-300$ มม.

อนึ่ง ระยะวิกฤต b ดังแสดงในรูปที่ 9 คือ ขอบต่ำสุดที่เครื่องจักรสามารถเลื่อนเข้าตามแนวแกน X_3 โดยที่หัวปล่อยเส้นใยจะไม่ชนกับทอตันแบบขณะทำงาน สำหรับทอขนาดที่กำหนดไว้ ค่า b มีเท่ากับ 35.36 มม. นอกจากนี้โอกาสที่จะชนยังขึ้นอยู่กับความกว้างของหัวปล่อยเส้นใยด้วยเช่นกัน ดังนั้น ควรเผื่อระยะ X_3 ต่ำสุด ให้มากกว่า b พอสมควร เพื่อลดโอกาสชนระหว่างหัวปล่อยเส้นใยและทอโค้งที่จะเกิดขึ้น

ผลการจำลองระยะเลื่อนทั้งสี่แกนของเครื่องจักรด้วยโปรแกรม CAD/CAM เป็นไปตามตารางที่ 1 พบว่า ค่า L ที่เหมาะสมกับทอขนาดนี้ที่ไม่ทำให้เครื่องจักรชนกับทอขณะพัน (ตามเงื่อนไข X_3 ต่ำสุด $> b$) คือ L มากกว่าหรือเท่ากับ 170 มม. แต่ถ้าเลือกระยะ L ที่มากเกินไปก็จะทำให้เครื่องจักรมีขนาดใหญ่ขึ้นตามระยะเลื่อนของแต่ละแกน

อีกทั้งระยะ L ที่มากขึ้นจะทำให้แนวการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรตามแกน X_3 และ Y_3 มีช่วงกว้างมากขึ้น เพื่อรักษามุมการไขว้เส้นใยไว้ตามกำหนด สำหรับแต่ละรอบของการหมุน

ตารางที่ 1 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเมื่อระยะทางการปล่อยเส้นใย L เปลี่ยนแปลงที่ $\beta = 78^\circ$

ระยะ L (มม.)	X_3 ต่ำสุด (มม.)	ระยะเลื่อนแกน X_3 (มม.)	ระยะเลื่อนแกน Y_3 (มม.)	ระยะเลื่อนแกน Z_3 (มม.)
150	25.6	214.7	516.2	186.5
165	33.9	221.3	537.0	186.5
170	37.2	224.0	545.6	186.5
180	42.1	228.0	558.5	186.5
200	52.9	234.1	587.2	186.5
210	58.2	241.8	601.6	186.5
300	106.2	283.6	734.3	186.5

ω ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรในแกน X_3 และ Y_3 จึงเพิ่มขึ้นตาม เมื่อสังเกตจากการพันทดสอบกับเครื่องจักรต้นแบบที่สร้างขึ้นโดยตั้งค่าความตึงของเส้นใยไว้ที่ค่าหนึ่ง พบว่า การไถลระหว่างเส้นใยกับผิวแกนที่มักเกิดขึ้นที่สุดขอบของการเคลื่อนที่ในแกน X_3 หรือ Y_3 เพราะแรงเสียดระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองไม่คงที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งการหมุนของท่อต้นแบบและช่วงการเคลื่อนที่ของจักร

สมการที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถปรับใช้ได้กับท่อทุกขนาด เพราะสมการ Helix ที่สร้างบนพื้นผิวท่อต้องเป็นตามการกำหนดขนาด R และ r ด้วยเช่นกัน ระยะ L ที่เหมาะสมกับท่อขนาดอื่นก็สามารถคำนวณด้วยวิธีเดียวกันกับที่นำเสนอไป

ผลจากการจำลองหาระยะเลื่อนของเครื่องจักรเมื่อมุมพันเปลี่ยนเป็นไปตามตารางที่ 2 (กำหนดให้ $L = 210$ มม.) พบว่ามุมการพันมีผลต่อระยะความยาวของเครื่องจักรในแนวแกน X_3 เพียงแกนเดียวเท่านั้น โดยมุมการพันแปรผกผันกับระยะเลื่อนตามแกน X_3

หากพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรเครื่องจักรสี่แกน (X_3, Y_3, Z_3, ω) ตามแกนอ้างอิงในรูปที่ 9 เมื่อตัวแปรต้น (ω) ซึ่งเป็นแกนท่อต้นแบบหมุน จะทำให้ตัวแปรตามอื่นๆ เปลี่ยนแปลงตาม ดังรูปที่ 10 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ตำแหน่งแกน ω, X_3, Y_3 และ Z_3 ที่เปลี่ยนไปตามลำดับข้อมูล ผลการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของ

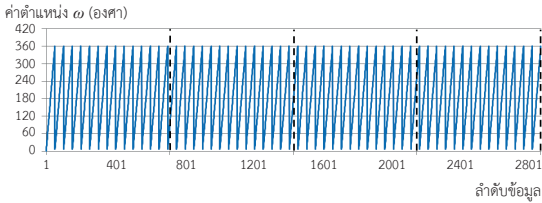
ตารางที่ 2 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเมื่อมุมการพันเปลี่ยนแปลง ที่ $L = 210$ มม.

มุมพัน (องศา)	ระยะเลื่อนแกน X_3 (มม.)	ระยะเลื่อนแกน Y_3 (มม.)	ระยะเลื่อนแกน Z_3 (มม.)
72	258.0	601.6	186.5
78	241.8	601.6	186.5
80	233.1	601.6	186.5
83	230.2	601.6	186.5
86	214.7	601.6	186.5

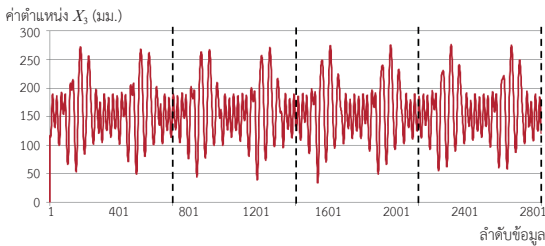
หัวปล่อยเส้นใย (รูปที่ 10) แสดงให้เห็นว่าการหมุนแต่ละรอบของ ω ทำให้ทุกแกนเลื่อนย้ายกลับไปกลับมาตามความถี่ของตัวเอง โดยมีการเปลี่ยนช่วงการเคลื่อนที่แต่ละคาบไปที่ละน้อยและไม่ซ้ำเดิม โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสำหรับการพันเส้นใย 4 ครั้ง มีดังนี้ ครั้งที่ 1 อยู่ในลำดับข้อมูลที่ 0-713 ครั้งที่ 2 อยู่ในลำดับข้อมูลที่ 714-1426 ครั้งที่ 3 อยู่ในลำดับข้อมูลที่ 1427-2139 และครั้งที่ 4 อยู่ในลำดับข้อมูลที่ 2140-2852 ซึ่งสามารถแบ่งช่วงการพันแต่ละรอบด้วยเส้นประ (รูปที่ 10) จะสังเกตได้ว่าการพันแต่ละรอบแกนหมุนท่อจะเริ่มต้นการพันที่ตำแหน่งมุมเฟสต่างกัน ในรูปที่ 10 (ก) เนื่องจากเส้นทางการพันที่กำหนดไว้บนผิวท่อ มีการเหลื่อมกันเล็กน้อยตามจำนวนรอบการพันนั่นเอง

สมการเส้นทางเดินบนผิวท่อโค้งและการคำนวณการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้จริงในการพัฒนาเครื่องจักรพันเส้นใยอัตโนมัติแบบ 4 แกน โดยท่อต้นแบบที่นำมาทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่ากรณีตัวอย่างที่นำเสนอไว้ข้างต้น ขนาด R, r และพารามิเตอร์อื่นจึงถูกปรับตามค่าเงื่อนไขการทดสอบ ผลการทดสอบพันเส้นใย ดังรูปที่ 11 เป็นตัวอย่างการพันเส้นใยด้วยเครื่องจักรแบบสี่แกนที่ได้นำเสนอจากงานวิจัยนี้ไปคำนวณ และยังคงแสดงให้เห็นลวดลายการพันที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการเส้นทางเดินของเส้นใยอย่างที่ต้องการ

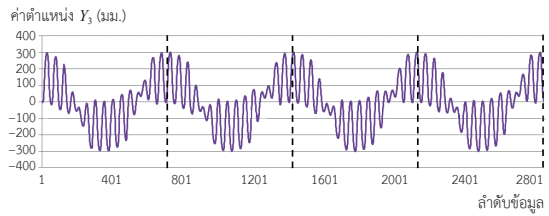
บทความนี้ได้เสนอที่มาของสมการและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในการออกแบบเครื่องจักรพันเส้นใยแบบ



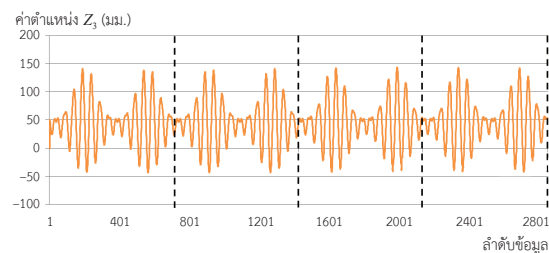
รูปที่ 10 (ก) ตำแหน่งการหมุนแกน ω



รูปที่ 10 (ข) ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน X_3

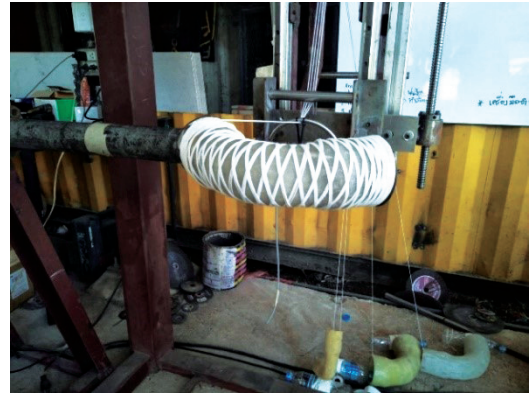


รูปที่ 10 (ค) ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน Y_3



รูปที่ 10 (ง) ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน Z_3

สี่แกน ความถูกต้องและความคลาดเคลื่อนในการพันเส้นใยบนท่อโค้งของเครื่องจักรต้นแบบจะถูกศึกษาในลำดับต่อไป เพราะต้องมีการทดลองและทดสอบกับท่อหลายขนาด ซึ่งขนาดของเครื่องจักรที่สร้างขึ้นจะตัวเป็นกำหนดขอบเขตของขนาดท่อที่ทดสอบและตัวแปรควบคุมที่จะทำการทดลอง



รูปที่ 11 ตัวอย่างการพันเส้นใยที่ได้จากเครื่องจักรแบบสี่แกน

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิตจากสมการ Helix ที่เป็นการรวมกันของเส้นทางเดินบนผิวท่อทรงทอรัสและท่อทรงกระบอกพบว่าสมการที่นำเสนอสามารถใช้เป็นเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งได้และสามารถนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นเพื่อคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรพันเส้นใยแบบ 4 แกนได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างเส้นเดินทางของเส้นใยบนผิวท่อกับตัวแปรของเครื่องจักร ผลการจำลองพบว่าระยะเลื่อนของแกนเครื่องจักรตามแกน X_3 , Y_3 และ Z_3 ขึ้นกับระยะ L จากหัวปล่อยเส้นใยถึงผิวท่อโค้งและมีเงื่อนไขว่า L ที่สามารถนำมาออกแบบเครื่องจักรได้ ต้องมีค่าระยะเลื่อนตามแกน X_3 น้อยที่สุด ต้องมากกว่าระยะขอบท่อ b และค่ามุมการพัน β แปรผกผันกับระยะเลื่อนของเครื่องจักรตามแกน X_3 ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบเครื่องพันเส้นใยแก้วสำหรับท่อโค้งที่มีขนาดต่างกันได้ตั้งแสดงในผลการทดสอบกับเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท ไทยคอมโพสิต จำกัด สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.) ที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัย และขอขอบคุณ บริษัท SED จำกัด ที่ให้คำปรึกษาในการสร้างเครื่องจักร



เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Karpuz, "Mechanical characterization of filament wound composite tube by internal pressure testing," M.S. thesis, Middle East Technical University, 2005.
- [2] H. Li and Y. Liang, "Computer aided filament winding for elbows," *Journal of Software*, vol. 13, no. 4, pp. 518–525, 2002.
- [3] H. Li, Y. Liang, and H. Bao, "CAM system for filament winding on elbows," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 161, no. 3, pp. 491–496, 2005.
- [4] J. Z. Xu, M. Qiao, L. Y. Zhang, and D. Liu, "Composite elbow winding machine applied teaching and playback method," in *Proceedings Advanced Materials Research*, 2011, vol. 183, pp. 2249–2253.
- [5] J. V. Anderson, "Automated manipulation for the LOTUS filament winding process," M.S. thesis, School of Technology, Brigham Young University, 2006.
- [6] P. Smithmaitrie, *Robotics and Technology*. Songkla: Prince of Songkla University, 2008 (in Thai).