



การหาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิตสำหรับ
เครื่องพันเส้นใยอัตโนมัติ

**Determination of the Filament Winding Path for Composite Elbow Pipe
Winding Machine**

ธฤต ชูอ่อนสกุล

Tharit Choo-ongsakul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University**

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การหาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิตสำหรับ
เครื่องพันเส้นใยอัตโนมัติ

**Determination of the Filament Winding Path for Composite Elbow Pipe
Winding Machine**

ธฤต ชูอ่อนสกุล

Tharit Choo-ongsakul

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University**

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณ
บุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ทริกร สมิตไมตรี)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(นาย ธฤต ชูอ่อนสกุล)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นาย ธฤต ชูอ่อนสกุล)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การหาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิตสำหรับเครื่องพันเส้นใยอัตโนมัติ
ผู้เขียน	นายรฤต ชู่อองสกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

ท่อคอมโพสิตมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมก่อสร้าง เพราะท่อคอมโพสิตมีข้อดีในเรื่องความแข็งแรงทนต่อการกัดกร่อน น้ำหนักเบา และไม่เป็นสนิม การผลิตท่อคอมโพสิตใช้เส้นใยแก้วจุ่มเรซินแล้วนำมาพันตามรูปทรงของท่อ งานวิจัยนี้เป็นการหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเพื่อให้ได้เส้นทางการพันเส้นใยตามการออกแบบบนท่อโค้งตันแบบด้วยสมการ helix การพันเส้นใยต้องพันให้เต็มพื้นที่ของท่อตันแบบ ซึ่งการกำหนดจำนวนรอบของการพันและไขว้ของเส้นใยต้องเป็นไปตามลักษณะที่ออกแบบไว้ เส้นทางการพันถูกจำลองด้วยโปรแกรม CAD/CAM จากนั้นทำการแปลงทางเดินของเส้นใยบนท่อโค้งให้เป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสำหรับการทำงานอัตโนมัติ จากการทดลองพบว่าเครื่องพันเส้นใยสามารถเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงกับการจำลองในโปรแกรม การตรวจความถูกต้องทำโดยการเปรียบเทียบลักษณะการพันที่ออกแบบไว้กับผลของการพันเส้นใยด้วยเครื่องจักร พบว่าได้ลักษณะเส้นใยที่พันตามการออกแบบ ผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องพันเส้นใยแก้วสำหรับท่อโค้งที่มีขนาดต่างกันได้

คำสำคัญ: เครื่องจักรอัตโนมัติ, ท่อคอมโพสิต, ท่อโค้ง, พันเส้นใยแก้ว

Thesis Title	Determination of the Filament Winding Path for Composite Elbow Pipe Winding Machine
Author	Mr.Tharit Choo-ongsakul
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2019

ABSTRACT

Composite pipes have an important role in the construction industry because their advantages in terms of strength, corrosion resistance, lightweight and non-rust. In manufacturing of composite pipes, glass fibers are dipped into resin solution and wended on 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 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 close 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 knowledge on determination of the filament winding path on elbow pipes for the automatic winding machine, and can also be applied on various elbow pipe sizes.

Keywords: Automatic machine, Composite pipe, Elbow pipe, Filament winding.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปด้วยความกรุณาเป็นอย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร. พฤทธิกร สมิตไมตรีเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษาข้อชี้แนะและความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่างจนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คุณประสงค์ เพิ่มอารยวงศ์ ประธานบริษัทและคุณภาคภูมิ เบ็ญจศักดิ์ วิศวกรบริษัทไทยคอมโพลิต จำกัด สำหรับข้อมูลการผลิตท่อคอมโพลิตและการสนับสนุนทุก ๆ ด้านในการทำวิจัย ขอขอบคุณบริษัท เอส.อี.ดี จำกัด ที่ให้คำปรึกษาสำหรับการออกแบบและสร้างเครื่องจักรสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.) ที่สนับสนุนงบประมาณการวิจัย

ขอขอบพระคุณเป็นพิเศษสำหรับความห่วงใยและกำลังใจจากครอบครัวซึ่งเป็นที่รักยิ่งที่คอยห่วงใยสนับสนุนการศึกษาเพื่อรอความสำเร็จของผู้วิจัยและเป็นแรงใจสำคัญจนทำให้งานวิจัยครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ธฤต ชูอ่อนสกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
Abstract	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(10)
สัญลักษณ์และคำย่อ	(13)
รายการผลงานที่ตีพิมพ์และการประชุมวิชาการ	(14)
บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	11
ระเบียบวิธีวิจัย	12
ผลการทดลอง	29
สรุปผลการศึกษา	40
เอกสารอ้างอิง	41
วารสารวิชาการ: การหาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิตสำหรับเครื่องพันเส้นใย อัตโนมัติ	41
ประวัติผู้เขียน	53

รายการตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ผลการคำนวณจากสมการการพัน ($R=150$ mm, $r=50$ mm และ $L=210$ mm)	19
ตารางที่ 2 ตำแหน่งที่คำนวณได้จากสมการการพันทอคอมโพสิตแบบโค้ง ($R=300$, $r=150$ mm และ $L=370$ mm)	20
ตารางที่ 3 ตัวอย่างการเคลื่อนที่ของตำแหน่งระหว่าง master axis และ slave axis	26
ตารางที่ 4 ระยะเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเมื่อระยะห่างการปล่อยเส้นใย L เปลี่ยนแปลง ที่ $\beta = 78^\circ$	31
ตารางที่ 5 ระยะเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเมื่อมุมการพันเปลี่ยนแปลง ที่ $L=210$ mm	32
ตารางที่ 6 ผลทดสอบการพันเส้นใยของเครื่องจักรสำหรับทอโค้งขนาดต่างๆ	34
ตารางที่ 7 เปรียบเทียบจุดตัดบนเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของการจำลอง และการพันทอโค้งคอมโพสิต ($R=300$ mm $D=300$ mm)	36
ตารางที่ 8 เปรียบเทียบจุดตัดเส้นใยบนแนวเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของทอโค้ง $R=200$ mm, $D=200$ mm และระยะปล่อยเส้นใย $L=350$ mm	38
ตารางที่ 9 เปรียบเทียบจุดตัดเส้นใยบนแนวเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของทอโค้ง $R=200$ mm, $D=200$ mm และระยะปล่อยเส้นใย $L=370$ mm	39
ตารางที่ 10 ผลการทดสอบแรงดันกับจำนวนรอบของการพันทอโค้งคอมโพสิต	40
วารสารวิชาการ: การหาเส้นทางการพันเส้นใยบนทอโค้งคอมโพสิตสำหรับเครื่องพันเส้นใยอัตโนมัติ	
ตารางที่ 1 ระยะเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเมื่อระยะห่างการปล่อยเส้นใย L เปลี่ยนแปลง ที่ $\beta = 78^\circ$	50
ตารางที่ 2 ระยะเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเมื่อมุมการพันเปลี่ยนแปลง ที่ $L=210$ mm	50

รายการภาพประกอบ

	หน้า
บทนำ	
รูปที่ 1 Global Fiberglass Market	1
รูปที่ 2 เส้นใยแก้ว	2
รูปที่ 3 รูปแบบท่อโค้งตันแบบ (mandrel pipe)	3
รูปที่ 4 การกำหนดพิกัดและตัวแปรของท่อโค้ง	4
รูปที่ 5 แกนเคลื่อนที่เครื่องจักรแบบ 4 แกน	5
รูปที่ 6 หัวพันเส้นใย (fiber placement ring)	6
รูปที่ 7 ท่อคอมโพสิตพันด้วยเส้นใย	6
รูปที่ 8 ผังการทำงานของการพันท่อโค้งด้วยระบบ CAM	7
รูปที่ 9 พารามิเตอร์ของการพันท่อด้วยเครื่องจักร 4 แกนระบบ CAM	7
รูปที่ 10 เวกเตอร์ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของเครื่องจักร 4 แกน	7
รูปที่ 11 พารามิเตอร์ท่อโค้งคอมโพสิต	8
รูปที่ 12 เส้นทางสมการ spiral หรือ helix บนผิวทรงทอรัส	9
รูปที่ 13 เส้นทางสมการ spiral หรือ helix บนผิวท่อตรง	10
รูปที่ 14 PLC รุ่น NX1P2 ของ Omron	10
รูปที่ 15 ลักษณะการผลิตท่อโค้งคอมโพสิตด้วยแรงงานคน	12
รูปที่ 16 ท่อโค้งตันแบบ (ชาย) และแม่พิมพ์ของท่อโค้ง (ขวา)	13
รูปที่ 17 จำนวนชั้นส่วนย่อยขยายของแม่พิมพ์ท่อโค้ง	14
รูปที่ 18 ความกว้างของส่วนแม่พิมพ์ย่อยและระยะความกว้างของการถอด	14
รูปที่ 19 พารามิเตอร์ของท่อโค้งคอมโพสิต	15
รูปที่ 20 เส้นทางพันเส้นใยบนส่วนของท่อโค้ง	16
รูปที่ 21 เส้นทางพันเส้นใยบนส่วนของท่อตรง	16
รูปที่ 22 สมการเส้นทางพันบนท่อโค้ง	17
รูปที่ 23 เส้นทางพันเมื่อรวมสมการท่อตรงและท่อโค้ง	17
รูปที่ 24 การตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องจักรพันเส้นใยและตัวแปรของเครื่องจักร	18
รูปที่ 25 แบบเครื่องจักรพันเส้นใยท่อโค้ง	20
รูปที่ 26 พารามิเตอร์การหาค่าแรงบิดโหลด (T_L)	22
รูปที่ 27 พารามิเตอร์การหาค่าแรงต้านการบิด (T_w) ติดตั้งแบบ ball screw	23
รูปที่ 28 พารามิเตอร์การหาค่าแรงต้านการบิด (T_w) ติดตั้งแบบ rack and pinion	23

รูปที่ 29 พารามิเตอร์การหาค่าแรงต้านการบิด (T_w)	23
รูปที่ 30 เครื่องจักรสำหรับการพันท่อคอมโพสิตแบบโค้ง	24
รูปที่ 31 Cyclic Synchronous position mode diagram	24
รูปที่ 32 ขั้นตอนการสั่งการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสำหรับการพันท่อคอมโพสิตแบบโค้ง	26
รูปที่ 33 คำสั่งการเคลื่อนที่แบบประสานในคอลโทรลเลอร์ ePLC	27
รูปที่ 34 ตัวอย่างการพันเส้นใยที่ได้จากเครื่องจักรแบบสี่แกน	27
รูปที่ 35 ลักษณะการพันเส้นใยหลังบ่อนค่าตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ	28
รูปที่ 36 ท่อคอมโพสิตหลังจากการแข็งตัวของเรซิน	28
รูปที่ 37 เส้นทางการพันเส้นใยตลอดผิวท่อโค้ง	29
รูปที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการพันและมุมการพันเส้นใยบนท่อโค้ง	29
รูปที่ 39 การเคลื่อนที่ของหัวปล่อยเส้นใยของเครื่องจักร	30
รูปที่ 40 (ก) ตำแหน่งการหมุนแกน ω	33
รูปที่ 40 (ข) ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน X_3	33
รูปที่ 40 (ค) ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน Y_3	33
รูปที่ 40 (ง) ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน Z_3	33
รูปที่ 41 ช่องว่างระหว่างเส้นใยตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อโค้ง	34
รูปที่ 42 พิกัดอ้างอิงสำหรับการเทียบจุดตัดเส้นใยตามแนวความโค้งนอกของท่อ	35
รูปที่ 43 ตำแหน่งจุดตัดเส้นใยตามแนวความโค้งนอกของท่อจากแบบจำลอง (R=300 mm D=300 mm)	35
รูปที่ 44 ผลทดสอบการพันและจุดตัดเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิต (R=300 mm D=300 mm)	35
รูปที่ 45 ตำแหน่งจุดตัดเส้นใยตามแนวความโค้งนอกของท่อจากแบบจำลอง (R=200 mm D=200 mm)	37
รูปที่ 46 ทดสอบท่อโค้งคอมโพสิตด้วยการอัดแรงดันน้ำ	40
วารสารวิชาการ: การหาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิตสำหรับเครื่องพันเส้นใยอัตโนมัติ	
รูปที่ 1 พารามิเตอร์ของท่อโค้งคอมโพสิต	44
รูปที่ 2 เส้นทางจากสมการ helix บนผิวทรงทอรัส	45
รูปที่ 3 เส้นทางจากสมการ helix บนผิวท่อตรง	45

รูปที่ 4	เส้นทางการพันเส้นใยบนส่วนของท่อโค้ง	47
รูปที่ 5	เส้นทางการพันเส้นใยบนส่วนของท่อตรง	47
รูปที่ 6	การตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องจักรพันเส้นใยและตัวแปรของเครื่องจักร	48
รูปที่ 7	เส้นทางการพันเส้นใยตลอดผิวท่อโค้ง	49
รูปที่ 8	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการพันและมุมการพันเส้นใยบนท่อโค้ง	49
รูปที่ 9	การเคลื่อนที่ของหัวปล่อยเส้นใยของเครื่องจักร	49
รูปที่ 10 (ก)	ตำแหน่งการหมุนแกน ω	51
รูปที่ 10 (ข)	ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน X_3	51
รูปที่ 10 (ค)	ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน Y_3	51
รูปที่ 10 (ง)	ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน Z_3	51
รูปที่ 11	ตัวอย่างการพันเส้นใยที่ได้จากเครื่องจักรแบบสี่แกน	51

สัญลักษณ์และคำย่อ

<i>CAD/CAM</i>	Computer aided design/computer-aided manufacturing
d_x, d_y, d_z	ระยะเลื่อนตามแนวแกน x, y, z
$H_{elbow}, H_{cylinder}$	สมการที่ใช้กำกับเส้นทางเดินบนผิวท่อในช่วงนั้น
\dot{H}_i	เวกเตอร์เส้นสัมผัสเส้นทางการพัน ณ จุดใดๆ
$ \dot{H}_i $	ขนาดของเวกเตอร์เส้นสัมผัส
L	ความยาวของเส้นใยจากจุดสัมผัสบนผิวท่อถึงหัว
ปล่อยเส้นใย	
n_i	จำนวนรอบการพัน
P_i	ช่วงห่างการพันเส้นใย
r	รัศมีของขนาดท่อ
R	รัศมีความโค้งของท่อ
\vec{t}	เวกเตอร์บอกทิศเส้นสัมผัสของเส้นทางการพัน
T_j^i	สมการการเลื่อนกรอบเวกเตอร์
u	มุมตามความยาวส่วนท่อโค้ง
\vec{v}_c	เวกเตอร์บอกตำแหน่งของหัวปล่อยเส้นใย
\vec{v}_p	เวกเตอร์บอกตำแหน่งเส้นทางการพันบนผิวท่อ
X_i, Y_i, Z_i	กรอบอ้างอิงแกน X, Y, Z
x_i, y_i, z_i	สมการย่อยของแกน x, y, z
β	มุมการพัน
ω	มุมการหมุนท่อโค้งต้นแบบ
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	มุมการหมุนรอบแกน X, Y, Z

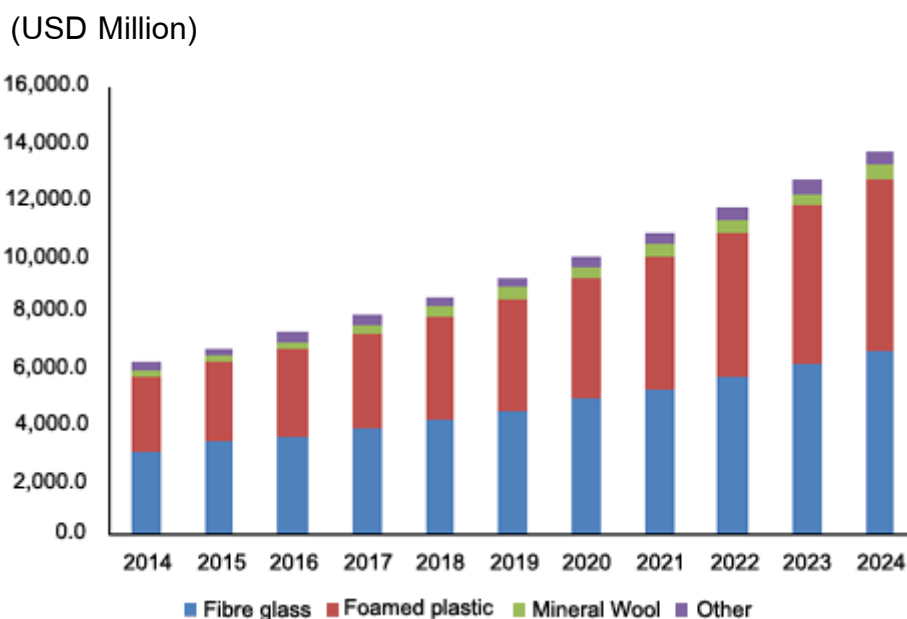
รายการผลงานที่ตีพิมพ์และการประชุมวิชาการ

1. วารสารวิชาการ

ธฤต ชูอ่องสกุล และ พงุทธิกร สมิตไมตรี, “การหาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพลิตสำหรับเครื่องพันเส้นใยอัตโนมัติ,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 29, ฉบับที่ 3, ก.ค.–ก.ย. 2562.

บทนำ

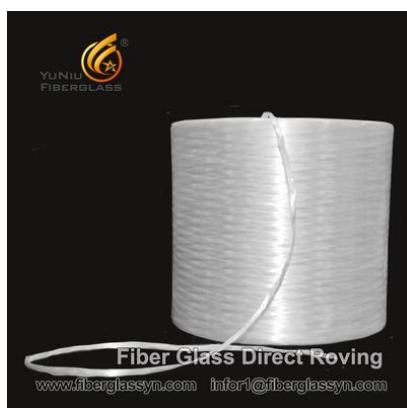
ในปัจจุบันระบบท่อในงานอุตสาหกรรมและการก่อสร้างเป็นเรื่องสำคัญมาก เนื่องจากระบบท่อเป็นเส้นทางในการลำเลียงขนส่งของไหลไปสู่ส่วนต่างๆ ในกระบวนการผลิตของโรงงาน การออกแบบและวางระบบท่อในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีประสิทธิภาพและการบำรุงรักษาระบบท่อที่สม่ำเสมอ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและทำให้กระบวนการผลิตในโรงงานเกิดความปลอดภัย ดังนั้นท่อที่จะนำมาใช้ต้องมีคุณภาพและได้มาตรฐาน ท่อในระบบโรงงานอุตสาหกรรมทำจากวัสดุหลายประเภททั้ง เหล็ก อลูมิเนียม พลาสติก และคอมโพสิต วัสดุแต่ละชนิดมีความเหมาะสมกับงานต่างประเภทกัน ปัจจุบันท่อคอมโพสิตผสมเส้นใยคอมโพสิตหรือที่เรียกทั่วไปว่าท่อคอมโพสิต มีแนวโน้มการใช้งานมากขึ้นภายในประเทศและภูมิภาคอาเซียนดังรูปที่ 1 ซึ่งแสดงแนวโน้มของมูลค่าการตลาดของอุตสาหกรรมคอมโพสิต จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการผลิตของท่อคอมโพสิตในประเทศไทยให้ได้มาตรฐาน



รูปที่ 1 Global Fiberglass Market [ที่มา:

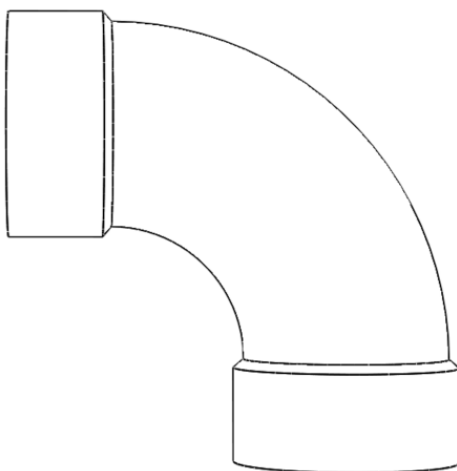
<http://cmfemarketresearchindustryreports.blogspot.com>]

ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วหรือ fiberglass reinforced composite ทำมาจากวัสดุประเภทพลาสติกที่มีวัสดุเสริมแรงเป็นใยแก้วตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 เส้นใยแก้ว [ที่มา : <http://www.fiberglassyn.com>]

ใยแก้วมีลักษณะอ่อนตัวแต่เหนียวทนความร้อนสูงส่วนพลาสติกที่นำมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานนั้นเป็นชนิดที่มีความแข็งมากซึ่งถ้าไม่มีการเสริมแรงแล้วจะเปราะ ดังนั้นพลาสติกที่เลือกใช้จึงเป็นประเภทโพลีเอสเตอร์เรซิน ไวนิลเอสเตอร์เรซิน หรืออีพอกซีเรซิน พลาสติกจำพวกนี้เป็นพลาสติกเหลวซึ่งภายหลังจากการผสมกับสารเร่งปฏิกิริยาหรือสารเร่งการแข็งตัวแล้วจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีคายความร้อนสูงกว่า 100°C แล้วจะเปลี่ยนเป็นพลาสติกแข็งแบบไม่คืนรูปกระบวนการนี้เรียกว่าเทอร์โมเซตติง (thermosetting) ผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตวิธีการดังกล่าวเรียกว่าผลิตรภัณฑ์พลาสติกเสริมแรงด้วยใยแก้วหรือคำย่อภาษาอังกฤษ FRP ซึ่งเรียกง่ายๆ ว่าผลิตรภัณฑ์คอมโพสิตหรือผลิตรภัณฑ์เอฟอาร์พี โดยคุณสมบัติเด่นคือไม่เป็นสนิมและทนต่อการกัดกร่อน (corrosion resistance) ผลิตรภัณฑ์คอมโพสิตทนความร้อนได้ดีมาก สามารถทนอุณหภูมิตั้งแต่ -30 ถึง $+120$ ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินที่เลือกใช้มีน้ำหนักเบาทำให้ประหยัดค่าก่อสร้าง ด้วยน้ำหนักที่เบากว่าเหล็กถึง 4 เท่า จึงสะดวกต่อการยกประกอบและติดตั้ง ประหยัดค่าก่อสร้าง ท่อเบอร์กลาสแข็งแรงให้ตัวได้ ป้องกันการรั่วซึมหรือร้าว ไม่ผุกร่อนทนทุกสภาวะสิ่งแวดล้อม คงรูปเดิมได้ดี ไม่มีการหด ผิวยเรียบเนียนมีแรงเสียดทานต่ำ (low coefficient of friction) เป็นฉนวนไฟฟ้า และไม่นำความร้อน ทนต่อแสงแดดและแสงยูวี



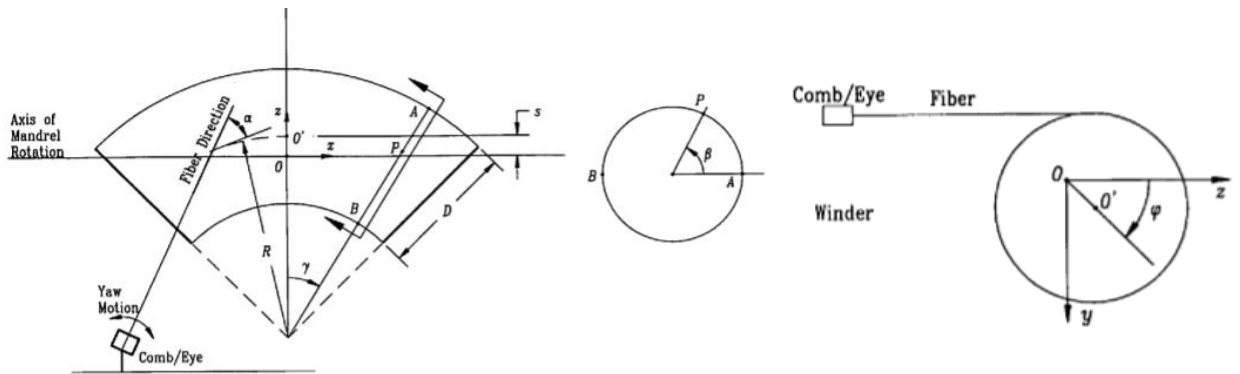
รูปที่ 3 รูปแบบท่อโค้งต้นแบบ (mandrel pipe)

ปัจจัยสำคัญของการผลิตท่อคอมโพสิตอยู่ที่วิธีการพันเส้นใยแก้วโดยการนำเส้นใยแก้วแต่ละเส้นมาสานหรือไขว้กันเพื่อให้เกิดความแข็งแรงในแนวรับแรงที่ต่างกัน วิธีการหาเส้นทางการพันเส้นใยที่สม่ำเสมอจำเป็นต้องมีสมการความสัมพันธ์ของเส้นทางการเดินของเส้นใยบนผิวท่อโค้งที่มีรูปแบบซึ่งสามารถกำหนดตามความต้องการ การพันท่อคอมโพสิตแบบท่อตรงมีวิธีการพันที่ไม่ซับซ้อน แต่ท่อคอมโพสิตที่มีลักษณะข้อต่อเช่น ท่อโค้ง 90 องศา หรือ 45 องศา, ข้อต่อ 3-4 ทาง และข้อต่อตลอด จำเป็นต้องมีสมการความสัมพันธ์ของทางเดินเส้นใยที่ซับซ้อนกว่าและแตกต่างกันขึ้นกับลักษณะของท่อ สำหรับการพันท่อโค้งคอมโพสิตในประเทศไทยนั้น เป็นการผลิตแบบใช้แรงงานคน ทำให้ท่อโค้งที่ผลิตออกมามีคุณภาพไม่แน่นอน ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดปัญหาเมื่อทำการติดตั้งระบบท่อ เช่น ท่อโค้งที่ผลิตออกมามีองศาความโค้งน้อยกว่าหรือมากกว่าองศาที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานการผลิตท่อโค้ง ท่อโค้งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ใหญ่กว่าหรือเล็กกว่ามาตรฐานของท่อโค้งที่ต้องการผลิต ท่อโค้งที่ผลิตออกมามีผิวไม่เรียบและไม่สม่ำเสมออาจจะทำให้เกิดรอยร้าวได้ อาจมีปัญหายื้องศูนย์กลางหลังการติดตั้งเนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกลมไม่ได้มาตรฐานที่เท่ากันทุกชั้น ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อพัฒนากระบวนการผลิตให้ได้มาตรฐานด้วยเครื่องจักรโดยนำเสนอลำดับวิธีการหาเส้นทางการพันเส้นใยคอมโพสิตสำหรับท่อโค้ง 90 และ 45 องศาตามรูปที่ 3 และการหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแบบ 4 แกนเพื่อการผลิตท่อโค้งคอมโพสิตขนาดต่าง ๆ

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า Chihdar Yang และ Richard H. Lea [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของเครื่องจักรสำหรับการพันท่อโค้งคอมโพสิตโดยใช้เครื่องจักรแบบ 5 แกน การเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสามารถพันเส้นใยแก้วได้เสนอสมการเส้นทางการพันที่

ซับซ้อน ซึ่งสมการสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร 5 แกน ทิศทางการเคลื่อนที่และตัวแปรของเครื่องจักรดังแสดงตามรูปที่ 4 โดยแต่ละแกนการเคลื่อนที่เป็นดังนี้

- 1) แกนเคลื่อนที่ซ้าย/ขวาของปลายปล่อยเส้นใย (comb/eye) (x)
- 2) แกนเคลื่อนที่ขึ้น/ลงของปลายปล่อยเส้นใย (y)
- 3) แกนเคลื่อนที่ตามแนวแกน z ของปลายปล่อยเส้นใย (z)
- 4) แกนหมุนที่ต้นแบบ (β)
- 5) แกนหมุนที่ปลายของปลายปล่อยเส้นใย (θ)



รูปที่ 4 การกำหนดพิกัดและตัวแปรของทอโค้ง [1]

จากรูปที่ 4 สมการความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของเครื่องจักร 5 แกนเป็นไปตาม ตามสมการที่ (1) ถึงสมการที่ (5)

$$x = \frac{3D}{2} \cdot \sin \gamma + \frac{D}{2} \cos \beta \cdot \sin \gamma \quad (1)$$

$$y = -\frac{D}{2} \cdot \sin \beta \cdot \cos \phi + \frac{3D}{2} \cdot \cos \gamma \cdot \sin \phi - \frac{3D}{2} \cdot \sin \phi + s \cdot \sin \phi + \frac{D}{2} \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma \cdot \sin \phi \quad (2)$$

$$z = \frac{D}{2} \cdot \sin \beta \cdot \cos \phi + \frac{3D}{2} \cdot \cos \gamma \cdot \cos \phi - \frac{3D}{2} \cdot \cos \phi + s \cdot \cos \phi + \frac{D}{2} \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \phi \quad (3)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{-1}{\tan \phi \cdot \cos \gamma} \right) \quad (4)$$

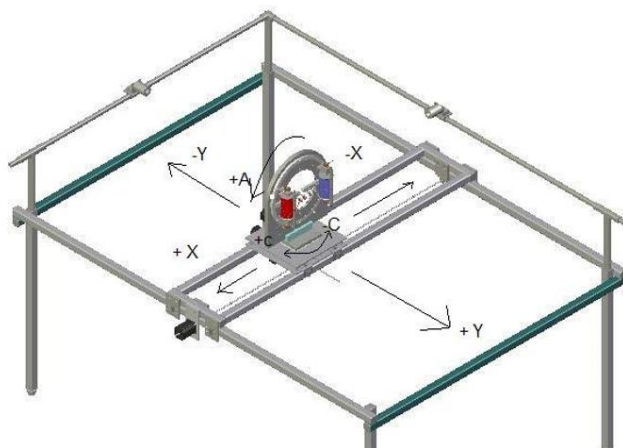
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \gamma}{\sin \gamma \cdot \sin \phi} \right) \quad (5)$$

เมื่อแก้สมการที่ (1) ถึงสมการที่ (5) แล้วจะได้ค่าตัวแปรการเคลื่อนที่ x, y, z, β และ θ และได้ความสัมพันธ์ของเส้นทางเดินเส้นใยแก้วบนท่อโค้งตามสมการ

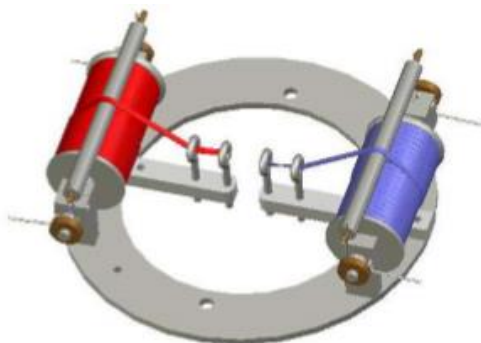
$$\frac{d\beta}{dy} = \frac{\left(\frac{2D}{3} + \left(\frac{D}{2} \cdot \cos \beta\right)\right)}{\frac{D}{2}} = (3 + \cos \beta) \cdot \tan \alpha \quad (6)$$

จากงานวิจัยดังกล่าวของ Chihdar Yang และ Richard H. Lea ทำให้เครื่องจักรสามารถพันเส้นใยได้แม่นยำตามสมการเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้คำนวณไว้ แต่เนื่องจากท่อนั้นแบบในการผลิตจริงมีส่วนของท่อตรงรวมอยู่ด้วยที่ปลายทั้งสองข้างเพื่อการสวมต่อท่อ จึงทำให้สมการที่นำเสนอใช้นั้นใช้ได้เฉพาะกับส่วนโค้งเท่านั้นไม่สามารถพันท่อโค้งที่มีส่วนท่อตรงที่ต่อออกมาได้

ต่อมา Jeffrey V. Anderson (2006) [2] ได้นำเสนองานวิจัยศึกษาการพันท่อในลักษณะต่างๆ โดยมีแกนที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งหมด 4 แกน ตามรูปที่ 5 ลักษณะการเคลื่อนที่ทั้ง 4 แกน ได้แก่ 1) เคลื่อนที่ตามแนวแกน X, 2) เคลื่อนที่ตามแนวแกน Y, 3) เคลื่อนที่หมุนในรอบแกน C และ 4) เคลื่อนที่หมุนรอบแกน A ซึ่งมีลักษณะของหัวพันเส้นใยดังรูปที่ 6

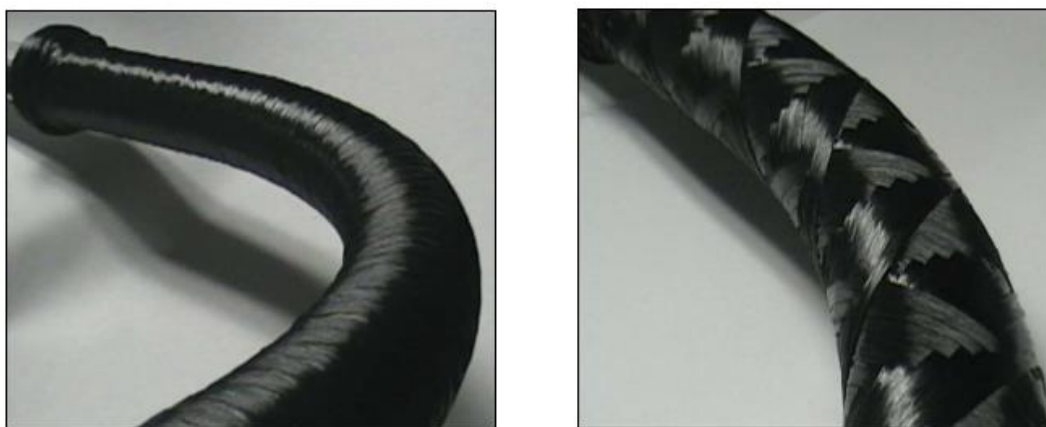


รูปที่ 5 แกนเคลื่อนที่เครื่องจักรแบบ 4 แกน [2]



รูปที่ 6 หัวพันเส้นใย (fiber placement ring) [2]

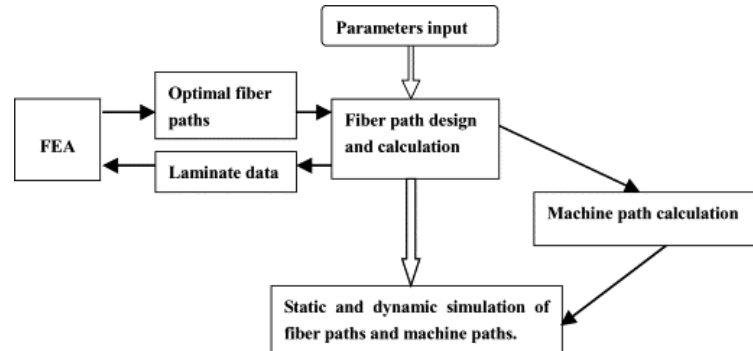
เครื่องจักรนี้ทำงานโดยการนำท่อมาวางบนระนาบแกน X-Y ในรูปที่ 5 แล้ววางท่อต้นแบบที่ต้องการพันให้อยู่ในหัวพันเส้นใยวงกลมแกนหมุน A เส้นใยที่ติดอยู่ทั้งสองข้างของหัวพันเส้นใยตามรูปที่ 6 เมื่อเครื่องจักรเคลื่อนที่แล้วแกนหมุน C จะสามารถปรับตัวตามแนวความโค้งของท่อได้ทำให้หัวปล่อยเส้นใยสามารถพันเส้นใยได้ตามแกนท่อที่โค้ง โดยรูปแบบการพันเส้นใยบนท่อที่ได้จากเครื่องจักรดังกล่าวแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ท่อคอมโพสิตพันด้วยเส้นใย [2]

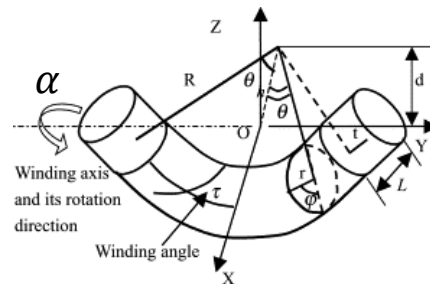
อย่างไรก็ตามท่อต้นแบบที่ต้องการนำมาพันเส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกันทำให้เครื่องจักรตามการออกแบบนี้จะต้องเปลี่ยนวงแหวนทุกขนาดตามเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่เปลี่ยนไป จึงเป็นข้อจำกัดของการออกแบบเครื่องจักรลักษณะนี้

H. Li และคณะ (2005) [3] ศึกษาการพันท่อโค้งคอมโพสิต โดยใช้ระบบการควบคุมแบบ CAM มีระบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรดังแสดงในรูปที่ 8

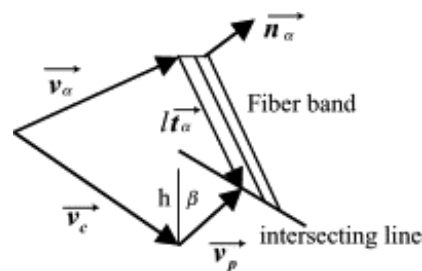


รูปที่ 8 ผังการทำงานของการทำงานการพันท่อโค้งด้วยระบบ CAM [3]

งานวิจัยนี้ออกแบบเครื่องจักรที่มีแนวการเคลื่อนที่ทั้งหมด 4 แกน ได้แก่ 1) แกนหมุนของปลายปล่อยเส้นใย (β) 2) แกนเคลื่อนที่ซ้าย/ขวาของของปลายปล่อยเส้นใย (y_c คือแกนเคลื่อนที่แนวแกน y ของ \bar{v}_c) 3) แกนเคลื่อนที่เข้า-ออกของปลายปล่อยเส้นใย (x_c คือแกนเคลื่อนที่แนวแกน x ของ \bar{v}_c) 4) แกนหมุนของท่อต้นแบบ (α) ตามพารามิเตอร์แสดงในรูปที่ 9 และ 10



รูปที่ 9 พารามิเตอร์ของการพันท่อด้วยเครื่องจักร 4 แกนระบบ CAM [3]



รูปที่ 10 เวกเตอร์ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของเครื่องจักร 4 แกน [3]

จากรูปที่ 10 แสดงถึงความสัมพันธ์ของเครื่องจักรในแต่ละแกน โดยมุม α บอกถึงทิศการหมุนของท่อต้นแบบเวกเตอร์, \bar{v}_c บอกตำแหน่งของเครื่องจักรที่ปล่อยเส้นใย ($\bar{v}_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}$), β เป็นมุมในการหมุนของหัวปล่อยเส้นใย และ l คือความยาวของเส้นใยจากหัวปล่อยเส้นใยถึงจุดที่

สัมพันธ์บนผิวท่อนแบบ ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของเครื่องจักรได้เป็นตามสมการที่ (7) ถึงสมการที่ (10)

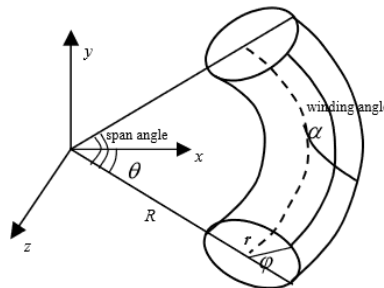
$$x_\alpha + lt_{\alpha x} = x_c \quad (7)$$

$$y_\alpha + lt_{\alpha y} = y_c + h \sin \beta \quad (8)$$

$$z_\alpha + lt_{\alpha z} = z_c + h \cos \beta \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta &= \frac{n_{\alpha y}}{\sqrt{n_{\alpha y}^2 + n_{\alpha z}^2}} \\ \cos \beta &= \frac{n_{\alpha z}}{\sqrt{n_{\alpha y}^2 + n_{\alpha z}^2}} \end{aligned} \right\} , \text{ where } n_\alpha = \begin{bmatrix} n_{\alpha x} \\ n_{\alpha y} \\ n_{\alpha z} \end{bmatrix} \quad (10)$$

โดยค่า $x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha$ หาได้จากเส้นทางการพันบนผิวท่อนโค้ง ณ จุดใดๆ ขณะพัน และเมื่อแก้สมการความสัมพันธ์ของเครื่องจักรจะได้ค่าแนวการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแต่ละแกนคือ x_c, y_c, β และ α การหาสมการความสัมพันธ์ของเครื่องจักรที่ขึ้นกับตัวแปรของท่อนลักษณะนี้ ทำให้สามารถพันท่อนแบบขนาดใดก็ได้ เพราะฉะนั้นการออกแบบเครื่องจักรสำหรับพันท่อนโค้งคอมโพสิตควรมีความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของเครื่องจักรและเส้นทางการพันบนผิวท่อนก่อนเสมอ และงานวิจัยของ H. Li และคณะ [4] ได้หาเส้นทางการพันบนท่อนโค้งด้วยสมการที่ (11) ตามรูปที่ 11 โดยใช้วิธี Geodesic curvature เป็นวิธีการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดบนผิวโค้งโดยอาศัยสมการของ Liouville มาช่วยในการแก้สมการและกำหนดค่าเริ่มต้นตามสมการที่ (12) ซึ่งได้ผลลัพธ์เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ตามสมการที่ (13) และ (14) เพื่อหาค่ามุมของการพัน (α) กับตำแหน่งเชิงมุม (θ)



รูปที่ 11 พารามิเตอร์ท่อนโค้งคอมโพสิต

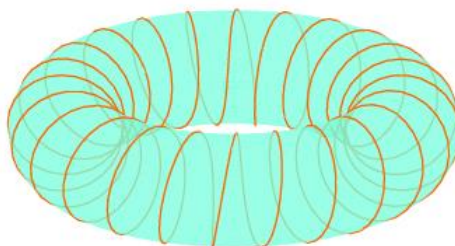
$$T(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} (R + r \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \theta \\ r \cdot \sin \theta \\ (R + r \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\sqrt{E} = R + r \cdot \cos \varphi, F = 0, \sqrt{G} = r \quad (12)$$

$$\frac{d\alpha}{d\varphi} = -\frac{r \cdot \sin \varphi}{R+r \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (13)$$

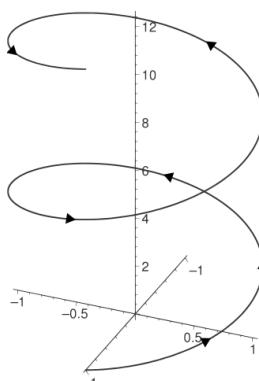
$$\frac{d\theta}{d\varphi} = -\frac{r}{R+r \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (14)$$

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวไปข้างต้นทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีแนวคิดที่จะสร้างสมการเส้นทางการพันที่ง่ายต่อการจำลองโดยใช้สมการพื้นฐานสำหรับเส้นทางการพันบนท่อโค้งคอมโพสิต เป็นสมการที่สามารถพันได้ 3 หรือ 4 แกน (งานวิจัยของ Chihdar Yang เป็นเครื่องจักรพันท่อโค้งคอมโพสิต 5 แกน และ H. Li เป็นเครื่องจักร 4 แกน) และศึกษาวิธีการควบคุมมอเตอร์ให้ทำงานแบบซิงโครไนซ์ทุกแกนเพื่อให้เครื่องจักรเคลื่อนที่ได้ตามตำแหน่งสอดคล้องกัน ซึ่งการผลิตท่อโค้งคอมโพสิตมีส่วนสำคัญที่ต้องพิจารณา 2 ส่วนคือ สมการความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรและสมการเส้นทางการพันของเส้นใยแก้วบนผิวโค้ง ซึ่งระเบียบวิธีของงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความสัมพันธ์ของเครื่องจักรตามวิธีของงานวิจัยของ H. Li เนื่องจากเป็นวิธีหาแบบเวกเตอร์ทำให้คำนวณสมการความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของเครื่องจักรได้ง่าย ในส่วนของการหาเส้นทางการพันบนท่อตันแบบบนผิวโค้งนั้นเส้นทางการพันของท่อโค้งคอมโพสิตจะมีการพันไขว้กัน ซึ่งเส้นทางการพันจะคล้ายกับสมการของสปริงซึ่งมีชื่อเรียกสมการว่า spiral หรือ helix โดยมีเส้นทางตามรูปที่ 12



รูปที่ 12 เส้นทางสมการ spiral หรือ helix บนผิวทรงทอรัส [ที่มา :

<https://forum.processing.org/two/discussion/23313/how-do-i-make-a-torus-knot>]



รูปที่ 13 เส้นทางสมการ spiral หรือ helix บนผิวทอตรง [ที่มา :

<https://en.wikipedia.org/wiki/Helix>]

โดยปกติแล้วท่อโค้งคอมโพสิตที่ผลิตนั้นจะมีส่วนของท่อตรงอยู่ที่ปลายทั้ง 2 ข้างเพื่อสวมต่อกับท่ออื่นดังแสดงรูปที่ 3 และรูปที่ 19 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีสมการ helix บนผิวทอตรงตามรูปที่ 13 เพื่อนำมาต่อกับเส้นทางการพันบนผิวทอโค้ง จึงทำให้ได้แนวเส้นทางการพันสำหรับท่อโค้งคอมโพสิตที่สมบูรณ์โดยจะกล่าวถึงวิธีการหาสมการเส้นทางการพันบนท่อโค้งต้นแบบในบทความวิจัยถัดไป

ในระบบควบคุมการทำงานของเครื่องจักรอัตโนมัติต้องใช้ตัวควบคุมที่สามารถสั่งการเคลื่อนที่มอเตอร์ได้หลายแกนพร้อมกัน โดยแต่ละแกนต้องเคลื่อนที่เชิงเส้น (linear motion) และทำงานสอดคล้องกัน จึงต้องใช้ตัวควบคุมมอเตอร์โดยเฉพาะ งานวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุม ePLC ของ Omron รุ่น NX1P2 ตามรูปที่ 14 ซึ่งสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรได้สูงสุด 4 แกนพร้อมกัน



รูปที่ 14 PLC รุ่น NX1P2 ของ Omron [ที่มา :

<http://www.ia.omron.com/products/family/3650/specification.html>]

เมื่อนำองค์ความรู้เรื่องความสัมพันธ์ของเส้นทางการเดินของเส้นใยและการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรที่กล่าวไปมารวมกันจะสามารถออกแบบเครื่องจักรที่ควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ 4 แกนได้ สำหรับสมการความสัมพันธ์การพันท่อโค้งคอมโพสิต ณ จุดใดๆ โดยนำ ePLC ของ Omron มาควบคุมการเคลื่อนที่ และยังสามารถกำหนดมุมมองขาของการไขว้เส้นใยเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับท่อโค้งคอมโพสิตได้อีกด้วย องค์ความรู้ที่กล่าวมาจึงเป็นพื้นฐานที่ทำให้เกิดงานวิจัยระบบควบคุมการพันคอมโพสิตสำหรับท่อคอมโพสิตแบบโค้งนี้ขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบเครื่องจักรพันเส้นใยสำหรับท่อโค้งคอมโพสิตโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อหาสมการเส้นทางการพันเส้นใยของบนผิวบนท่อโค้งที่มีส่วนของท่อตรงอยู่ที่ปลายทั้งสองข้าง
- 2) เพื่อพัฒนาโปรแกรมคำนวณหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสำหรับการพันเส้นใยแกวบนท่อโค้ง

ขอบเขตงานวิจัย

- 1) เครื่องจักรมีแกนการเคลื่อนที่ไม่เกิน 5 แกน เครื่องจักรมีช่วงการเคลื่อนที่ในแนวขนานกับท่อเป็นระยะ 1 เมตร สามารถพันท่ออ (elbow) 90 องศา nominal pipe size 300 มม. และ ท่ออ 45 องศา nominal pipe size 350 มม.
- 2) โปรแกรมคำนวณหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรทำงานตามพารามิเตอร์ที่ผู้ควบคุมกำหนด ได้แก่ ชนิดของท่อ ความยาว ความหนา จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาเส้นทางการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กับทางเดินของเส้นใยบนผิวท่อโค้งและควบคุมการทำงานของเครื่องจักรอัตโนมัติ

โดยรายละเอียดของผลงานวิจัยถูกนำเสนอในบทความถัดไป

ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ต้องมีส่วนที่เกี่ยวข้องกับการขนถ่ายหรือลำเลียงของเหลว ซึ่งจำเป็นต้องมีท่อส่งอย่างเลี่ยงไม่ได้ ท่อประเภทคอมโพสิตทนต่อการกัดกร่อน ไม่ขึ้นสนิม และทนต่อความดันสูงได้ดี โดยกระบวนการผลิตท่อคอมโพสิตในปัจจุบันของประเทศไทยมีการใช้เครื่องจักรผลิตท่อคอมโพสิต โดยใช้เส้นใยแก้วมาสานไปมาบนท่อตันแบบซึ่ง

เครื่องจักรผลิตได้เฉพาะท่อตรง สำหรับการพันท่อโค้งคอมโพลีเมอร์ในประเทศไทยนั้นเป็นการผลิตด้วยแรงงานคนโดยอาศัยคนสานเส้นใยแก้วลงบนตัวท่อโค้งตามรูปที่ 15 ทำให้ท่อโค้งที่ผลิตออกมามีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดปัญหาเมื่อทำการติดตั้งใช้งานท่อ เช่น ท่อโค้งที่ผลิตออกมามีองศาความโค้งน้อยกว่าหรือมากกว่าองศาที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานการผลิตท่อโค้ง ท่อโค้งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ใหญ่กว่าหรือเล็กกว่ามาตรฐานของท่อโค้งที่ต้องการผลิต ท่อโค้งที่ผลิตออกมามีผิวไม่เรียบและไม่สม่ำเสมออาจจะทำให้เกิดรอยร้าวได้ อาจมีปัญหายื้องศูนย์หลังการติดตั้งเนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกลมไม่ได้มาตรฐานที่เท่ากันทุกชั้น สาเหตุของการบิดเบี้ยวของท่อคอมโพลีเมอร์แบบโค้งเกิดจากท่อต้นแบบที่นำมาพันมีรูปทรงที่ไม่เท่ากันทุกชั้นและในช่วงของการพันมีช่องว่างที่ไม่สม่ำเสมอตามรูปที่ 15 ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงนำเสนอกระบวนการการหาเส้นทางการพันเส้นใยคอมโพลีเมอร์สำหรับท่อโค้ง 90 และ 45 องศา เพื่อให้ตัวแปรคุณภาพการผลิตสามารถถูกควบคุมให้เป็นไปตามกำหนดได้



รูปที่ 15 ลักษณะการผลิตท่อโค้งคอมโพลีเมอร์ด้วยแรงงานคนในปัจจุบัน

ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นตอนการพัฒนาเครื่องจักรสำหรับการพันเส้นใยแก้วท่อคอมโพลีเมอร์มีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ผลิตท่อต้นแบบคอมโพลีเมอร์แบบโค้งให้เป็นรูปทรงมาตรฐาน
2. หาสมการเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อคอมโพลีเมอร์แบบโค้ง
3. กำหนดค่าพารามิเตอร์ในสมการเพื่อคำนวณหาค่าการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร
4. กำหนดค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร ใน ePLC และควบคุมการเคลื่อนที่มอเตอร์แต่ละแกนตามค่าตำแหน่งที่คำนวณ

โดยรายละเอียดแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

1. ผลิตท่อตันแบบคอมโพสิตแบบโค้งให้เป็นรูปทรงมาตรฐาน

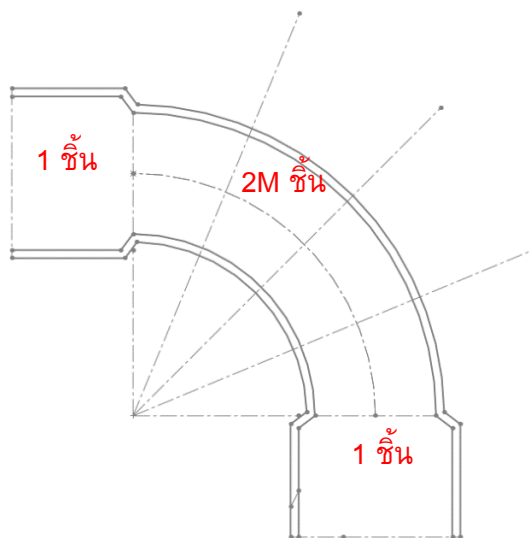
เนื่องจากปัจจุบันท่อตันแบบที่ผลิตด้วยแรงงานคนมีการผลิตแบบใช้แม่พิมพ์ท่อโค้งแล้วเคลือบด้วยน้ำยาเรซินผสมเส้นใยแก้วเพื่อให้มีความหนาเล็กน้อย หลังจากน้ำยาเรซินแข็งตัวแล้วทำการผ่าท่อโค้งตามแนวความโค้งภายในเพื่อถอดตัวแม่พิมพ์ออก แล้วนำส่วนท่อที่ผ่าออกมาเชื่อมกันอีกครั้งด้วยเรซิน จึงทำให้ท่อตันแบบที่ผลิตออกมามีเส้นผ่านศูนย์กลางและองศาความโค้งของท่อไม่สม่ำเสมอ งานวิจัยนี้ได้แก้ปัญหาด้วยการออกแบบแม่พิมพ์ที่สามารถถอดออกได้จากภายในสำหรับการสร้างท่อตันแบบทำโดยการแม่พิมพ์ที่เป็นชิ้นเล็กๆ ของส่วนท่อโค้งมาประกอบเป็นท่อโค้งตามรูปที่ 16 (ขวา) ด้วยเทคนิคจากการสร้างแม่พิมพ์แบบนี้ทำให้สามารถถอดแม่พิมพ์ออกจากท่อตันแบบที่ผลิตได้และทำให้สามารถผลิตท่อโค้งตันแบบตามมาตรฐานโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและองศาความโค้งที่เท่ากันทุกชิ้นตามรูปที่ 16 (ซ้าย)



รูปที่ 16 ท่อโค้งตันแบบ (ซ้าย) และแม่พิมพ์ของท่อโค้ง (ขวา)

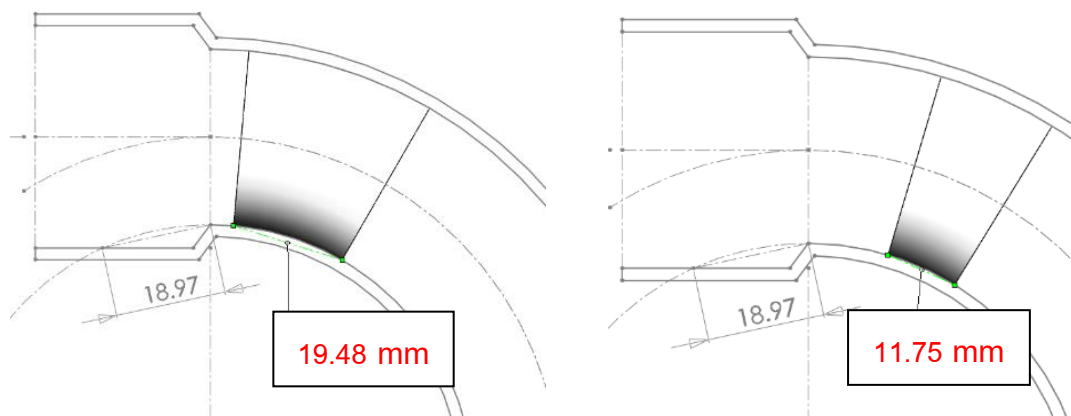
วิธีการออกแบบแม่พิมพ์ท่อโค้งตันแบบ

เนื่องจากแม่พิมพ์ท่อโค้งตันแบบเดิมไม่สามารถถอดท่อโค้งตันแบบออกจากแม่พิมพ์ได้ จึงต้องมีการออกแบบแม่พิมพ์ใหม่เป็นชิ้นส่วนย่อยดังแสดงตามรูปที่ 17 การออกแบบรองรับการผลิตท่อโค้งที่มีองศาความโค้ง 2 ขนาดคือ 90 และ 45 องศา โดยวิธีการออกแบบในช่วงส่วนย่อยของท่อโค้งจะต้องมีชิ้นส่วนของความโค้งเป็นจำนวนชิ้นคู่ (2M) และมีสวนของท่อตรงอีก 2 ชิ้น



รูปที่ 17 จำนวนชั้นส่วนย่อยขยายของแม่พิมพ์ท่อโค้ง

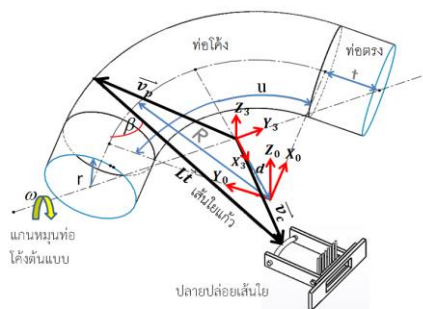
จากรูปที่ 17 จำนวนส่วนประกอบของแม่พิมพ์จะขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นส่วนย่อยของส่วนโค้ง โดยมีวิธีออกแบบตามรูปที่ 18 (ซ้าย) จะเห็นได้ว่าถ้าออกแบบให้ชั้นส่วนแม่พิมพ์โค้งกว้าง 19.48 mm ซึ่งใหญ่กว่าระยะความกว้างของการถอดแม่พิมพ์ 18.97 mm จะทำให้ไม่สามารถดึงแม่พิมพ์ย่อยออกมาได้ ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบระยะความกว้างของรัศมีความโค้งด้านในก่อนเพื่อหาระยะเผื่อในการถอดแม่พิมพ์ ยกตัวอย่างเช่นการออกแบบตามรูปที่ 18 (ขวา) เมื่อแม่พิมพ์โค้งย่อยมีความกว้าง 11.75 mm ซึ่งขนาดเล็กกว่าระยะความกว้างของการถอดส่วนท่อโค้งด้านใน 18.97 mm จึงทำให้สามารถถอดแม่พิมพ์ออกมาได้ ส่วนการกำหนดให้จำนวนแม่พิมพ์โค้งมีจำนวนคี่นั้นจะทำให้สามารถประยุกต์แม่พิมพ์ย่อยที่มีเป็นแม่พิมพ์ของท่อโค้ง 45 องศาได้โดยใช้จำนวนแม่พิมพ์ย่อยเพียงครึ่งหนึ่งของที่มีอยู่



รูปที่ 18 ความกว้างของส่วนแม่พิมพ์ย่อยและระยะความกว้างของการถอด

2. การหาสมการเส้นทางการพินเส้นใยบนท่อนโค้ง

เนื่องจากการพินเส้นใยบนของท่อคอมโพสิตเป็นลักษณะการสานกันของเส้นใยแก้วและท่อโค้งต้นแบบที่นำมาพินประกอบด้วยรูปทรงย่อย 2 แบบ คือ ส่วนของท่อโค้งและท่อทรงกระบอกตรงที่ปลายดังรูปที่ 19 ซึ่งในรูปจะแสดงเวกเตอร์ความสัมพันธ์ของเครื่องจักรในการพินท่อโค้ง ณ จุดใดๆ โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามสมการที่ (15) – (17)



รูปที่ 19 พารามิเตอร์ของท่อโค้งคอมโพสิต

$$\vec{v}_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \vec{v}_p + L\vec{t} \quad (15)$$

$$\vec{v}_p = \text{Rot}(Y_3, \omega) \cdot H_3 \quad (16)$$

$$\vec{t} = \text{Rot}(Y_3, \omega) \cdot \frac{H'_3}{|H'_3|} \quad (17)$$

ด้วยเหตุที่ท่อโค้งคอมโพสิตจะมีรูปทรง 2 ส่วนคือส่วนของท่อตรงและส่วนของท่อโค้งจึงทำให้ต้องหาความสัมพันธ์ของ 2 ส่วนนี้เพื่อคำนวณหาเส้นทางการพินของเส้นใยโดยมีสมการดังนี้

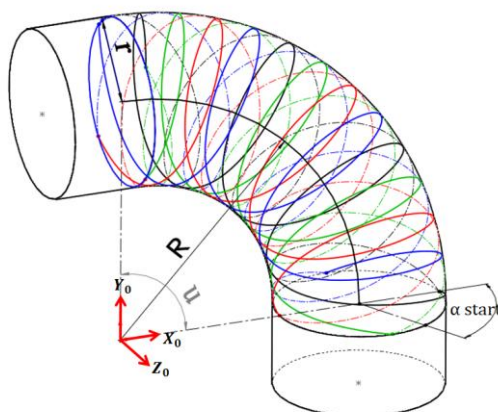
2.1 สมการเส้นทางการพินบนท่อนโค้งโดยมีลักษณะตามรูปที่ 20

$$H_{Elbow}(u) = \begin{bmatrix} x_0(u) \\ y_0(u) \\ z_0(u) \end{bmatrix} \quad (18)$$

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

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

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



รูปที่ 20 เส้นทางการพันเส้นใยบนส่วนของท่อโค้ง

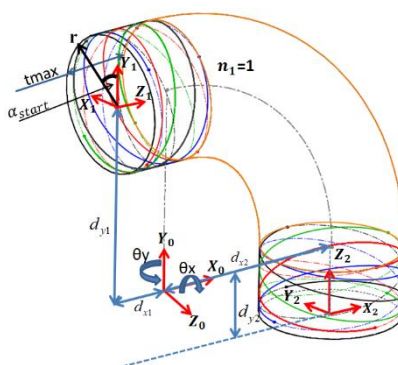
2.2 สมการเส้นทางการพันบนท่อตรงโดยมีลักษณะตามรูปที่ 21

$$H_{Cylinder}(t) = \begin{bmatrix} x_0(t) \\ y_0(t) \\ z_0(t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

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

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

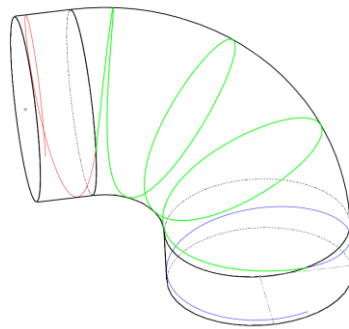
$z_0(t) = n_1 P_1 t + n_1 P_2 t^2$



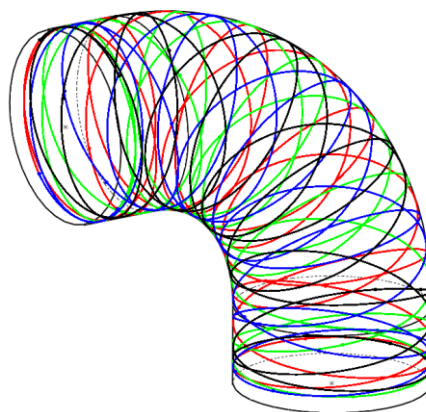
รูปที่ 21 เส้นทางการพันเส้นใยบนส่วนของท่อตรง

วิธีเชื่อมต่อสมการเส้นทางการพันบนท่อตรงและผิวบนท่อสามารถทำได้ดังเช่นตัวอย่างต่อไปนี้ จากรูปที่ 22 เริ่มจากสมการบนท่อตรงซ้ายบน (เส้นสีแดง) มี α_{start} เท่ากับ 0 องศา ส่วนสมการบนท่อโค้งก็จะมี α_{start} เท่ากับ 0 องศาเช่นกัน และจำเป็นต้องกำหนดจำนวนเส้นทางการพันบนส่วนของท่อโค้ง เพราะส่งผลกับช่องว่างระหว่างเส้นใยดังตัวอย่างในรูปที่ 22 นี้กำหนดไว้ที่ 16

เส้นทาง จำนวนเส้นทางบนท่อโค้งแปรผันตรงกับ n โดยที่ n มีค่าเท่าจำนวนรอบที่ต้องการพัน
 บวกกับ $\frac{1}{\text{จำนวนเส้นทางบนท่อโค้ง}}$ เช่นจำนวนรอบของการพันในส่วนของท่อโค้ง 3 รอบและจำนวน
 เส้นทางบนท่อโค้ง 16 เส้นทาง ทำให้มีค่า $n = 3 + \frac{1}{16} = 3.0625$ และเมื่อถึงจุดต่อเชื่อมของท่อ
 ตรงส่วนปลาย (เส้นสีน้ำเงิน) จะบรรจบที่ $\alpha = \frac{2 \times 360^\circ}{\text{จำนวนเส้นทางบนท่อโค้ง}}$ นั่นคือการเริ่มต้นของ
 $\alpha_{start} = \frac{2 \times 360^\circ}{16} = 22.5$ องศา บนท่อตรงส่วนปลายเมื่อสิ้นสุดการพันขาไปแล้วการวกกลับ
 จะเริ่มที่ขอบปลายด้วย α_{start} เท่ากับ 22.5 องศาเพื่อให้เส้นใยเดินทางต่อจากเดิมเมื่อพัน
 กลับมาจากขอบปลายท่อ



รูปที่ 22 สมการเส้นทางการพันบนท่อโค้ง



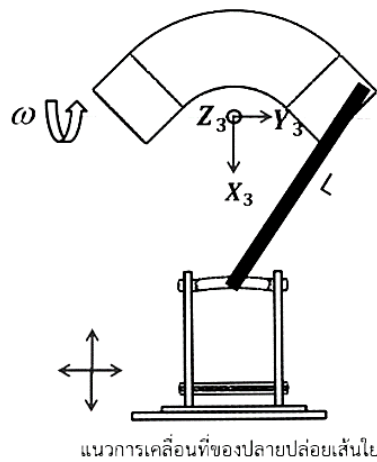
รูปที่ 23 เส้นทางการพันเมื่อรวมสมการท่อตรงและท่อโค้ง

ซึ่งเมื่อได้เส้นทางการพันของเส้นใยแก้วทั้งส่วนของท่อตรงและท่อโค้งซึ่งถ้านำเส้นทางทั้ง 2 มา
 รวมกันหลายๆเส้นจะได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 23 จากนั้นนำ 2 เส้นทางเดินมารวมกับสมการ
 เวกเตอร์ความสัมพันธ์การพันของเครื่องจักรก็จะสามารถคำนวณค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ

เครื่องจักร โดยกระบวนการหาสมการนี้ได้กล่าวไว้ในบทความวารสารวิชาการ: การหาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิตสำหรับเครื่องพันเส้นใยอัตโนมัติตั้งที่แนบมาในบทถัดไป

3. การกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อคำนวณการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร

เริ่มต้นจากกำหนดขนาดของท่อคอมโพสิต ในกรณีนี้กำหนดให้ $R = 150 \text{ mm}$, $r = 50 \text{ mm}$, $n_2 = 3.125$, $u_{max} = 90^\circ$, $n_1 = 1$, $t_{max} = 70 \text{ mm}$ และ $L = 150\text{-}300 \text{ mm}$ กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นการพันตามรูปที่ 24 แทนค่าพารามิเตอร์ลงในสมการที่ (11)-(13) จะสามารถแก้สมการหาค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหัวปล่อยเส้นใยได้เป็น x_c , y_c และ z_c



รูปที่ 24 การตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องจักรพันเส้นใยและตัวแปรของเครื่องจักร

ซึ่งตัวอย่างผลการคำนวณของสมการจะเป็นไปตามตารางที่ 1 โดยแสดงถึงค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนจากที่ได้จากสมการการพันท่อโค้งคอมโพสิต

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณจากสมการการพัน ($R=150$ mm, $r=50$ mm และ $L=210$ mm)

ตำแหน่งการพันทอโค้ง $R=150$ $r=50$				ระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแต่ละแกน (mm)		
$\omega(\theta)$	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	ระยะเลื่อนแกน X	ระยะเลื่อนแกน Y	ระยะเลื่อนแกน Z
7.2	182.29	-278.18	73.57	233.15	601.58	186.45
14.4	190.11	-270.64	75.22			
21.6	200.55	-259.53	75.76			
28.8	213.45	-243.82	75.29			
36	227.78	-221.97	74.06			
43.2	241.75	-192.43	72.46			
50.4	252.10	-154.48	71.02			
57.6	254.77	-110.36	70.27			
64.8	247.97	-66.35	70.54			
72	234.13	-29.57	71.79			
79.2	218.72	-3.47	73.56			
86.4	206.09	12.73	75.28			
93.6	198.02	21.46	76.44			
100.8	194.69	24.93	76.64			
108	195.36	24.51	75.67			

เมื่อนำค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้จากสมการนำไปออกแบบเครื่องจักรแต่ละแกนโดยคำนวณระยะการเคลื่อนที่จากทอคอมโพสิตแบบโค้งขนาดใหญ่ที่สุด ($R=300$ mm, $r=150$ mm, $n_2=3.125$, $u_{max}=90^\circ$, $n_1=1$, $t_{max}=95$ mm และ $L=370$ mm) จะได้ตามตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสมการจะสังเกตได้ว่าแกน X มีระยะเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 253.07 mm แกน Y มีระยะเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 942.35 mm และ Z มีระยะเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 166.34 mm จากค่าระยะการเคลื่อนที่สูงสุดแต่ละแกนทำให้สามารถออกแบบเครื่องจักรโดยกำหนดช่วงการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนได้โดยสรุปดังนี้

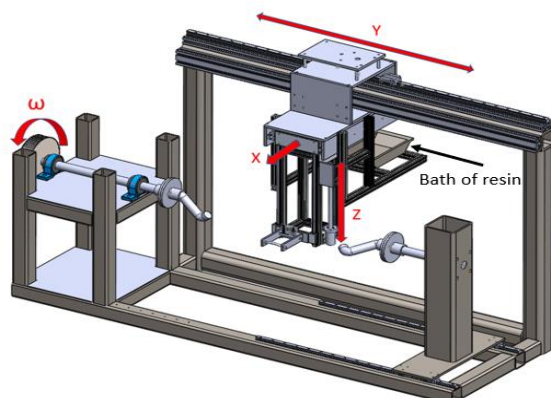
- แกน X มีระยะความยาวในการเคลื่อนที่เท่ากับ 300 mm
- แกน Y มีระยะความยาวในการเคลื่อนที่เท่ากับ 1500 mm
- แกน Z มีระยะความยาวในการเคลื่อนที่เท่ากับ 300 mm
- แกน ω มีช่วงการเคลื่อนที่เชิงมุม 0 - 360 องศา

ตารางที่ 2 ตำแหน่งที่คำนวณได้จากสมการการพันท่อคอมโพสิตแบบโค้ง ($R=300$ mm, $r=150$ mm และ $L=370$ mm)

ตำแหน่งการพันท่อโค้ง $R=300$ $r=150$			
$\omega(\theta)$	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
7.2	231.76	-9.37	162.46
14.4	247.27	3.22	172.92
21.6	262.17	14.12	181.73
28.8	276.2	23.33	188.72
36	288.75	31.18	193.8
43.2	299.51	37.43	196.94
50.4	307.91	42.05	198.16
57.6	313.42	44.85	197.54
64.8	315.66	45.31	195.24
72	314.11	43.2	191.48
79.2	308.71	37.82	186.54
86.4	299.6	28.64	180.79
93.6	286.28	14.05	174.61
100.8	256.69	-22.94	168.96

ระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแต่ละแกน (mm)		
ระยะเลื่อนแกน X	ระยะเลื่อนแกน Y	ระยะเลื่อนแกน Z
253.07	942.35	166.34

การออกแบบเครื่องจักรพันท่อโค้งเป็นไปตามรูปที่ 25 โดยมีแกนการพันตามที่ได้อธิบายไปข้างต้นการออกแบบแกน ω จะเป็นแกนหมุนท่อโค้งต้องรองรับการติดตั้งท่อจากการอัดท่อโค้งที่ปลายทั้งด้านซ้ายและขวา โดยคำนึงถึงการหมุนต่อเนื่องและโครงสร้างไม่เกิดการแกว่งขณะหมุน ต่อมาโครงสร้างรองรับการเคลื่อนที่ของแกน Y จะต้องรับน้ำหนักของชุดขับเคลื่อนทั้งของแกน X และแกน Z และรับน้ำหนักของอ่างที่มีน้ำยาเรซินอยู่ด้วยดังนั้นการเลือกใช้มอเตอร์ต้องออกแบบให้มอเตอร์ขับเคลื่อนแกน Y มีขนาดใหญ่กว่ามอเตอร์ขับเคลื่อนแกน X และแกน Z ส่วนมอเตอร์ขับเคลื่อนแกน ω จะต้องมีความใหญ่เพียงพอสำหรับการหมุนท่อโค้งขนาดใหญ่สุด



รูปที่ 25 แบบเครื่องจักรพันเส้นใยท่อโค้ง

วิธีการคำนวณภาระของมอเตอร์หาได้จากโมเมนต์ความเฉื่อยของโหลด (j_L) ที่ต้องการตามรูปที่ 26 และสมการที่ (16) โดยที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นงานหรือท้อคังคอมโพสิต (j_W) จะหาได้จากการจำลองแบบในโปรแกรมออกแบบสามมิติ เนื่องจากชิ้นงานมีรูปแบบเฉพาะและเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ จากนั้นคำนวณค่าแรงบิดของโหลด (T_L) ตามรูปที่ 26 จากสมการที่ (17) ค่าแรงต้านการบิด (T_W) ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของการติดตั้งมอเตอร์ โดยในแกน X และแกน Z จะติดตั้งชุดขับเคลื่อนแบบ ball screw ซึ่งสามารถคำนวณตามภาระขับได้จากสมการที่ (18) อ้างอิงตามรูปที่ 27 ต่อมาชุดขับเคลื่อนแกน Y เป็นแบบ rack and pinion สามารถคำนวณภาระขับได้จากสมการที่ (19) อ้างอิงรูปที่ 28 ส่วนแรงบิดและภาระในแกน ω หาได้จากสมการที่ (20) อ้างอิงตามรูปที่ 29 เมื่อคำนวณค่าแรงบิดของโหลดและโมเมนต์ความเฉื่อยของโหลดทุกแกนการเคลื่อนที่แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปเทียบกับข้อมูลมอเตอร์เพื่อเลือกใช้งาน อย่างไรก็ตามจะต้องเผื่อค่าสำหรับภาระส่วนเกินและแรงเสียดทานตามสมการที่ (21) และ (22) จึงจะใช้ได้

$$j_L = j_1 + \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 (j_2 + j_W) \quad (kg \cdot m^2) \quad (16)$$

$$T_L = T_W \cdot \frac{z_1}{z_2 \cdot \eta} \quad (N \cdot m) \quad (17)$$

$$T_{W-1} = \mu Mg \cdot \frac{P}{2\pi} \cdot 10^{-3} \quad (N \cdot m) \quad (18)$$

$$T_{W-2} = Mg \cdot \frac{D_2}{2} \cdot 10^{-3} \quad (N \cdot m) \quad (19)$$

$$T_{W-3} = Mg \cdot \cos \theta \cdot \frac{D_2}{2} \cdot 10^{-3} \quad (N \cdot m) \quad (20)$$

$$j_M \geq \frac{j_L}{30} \quad (21)$$

$$T_M \cdot 0.8 > T_L \quad (22)$$

เมื่อ

j_L คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของโหลด

j_1 คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเกียร์ที่ 1

j_2 คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเกียร์ที่ 2

j_W คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของชิ้นงาน

j_M คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์

Z_1 คือ จำนวนฟันเฟืองของเกียร์ที่ 1

Z_2 คือ จำนวนฟันเฟืองของเกียร์ที่ 2

T_{W-1} คือ แรงบิดของการติดตั้งแบบ ball screw

T_{W-2} คือ แรงบิดของการติดตั้งแบบการหมุนรอบแกน

T_L คือ แรงบิดของโหลด

T_M คือ แรงบิดของมอเตอร์

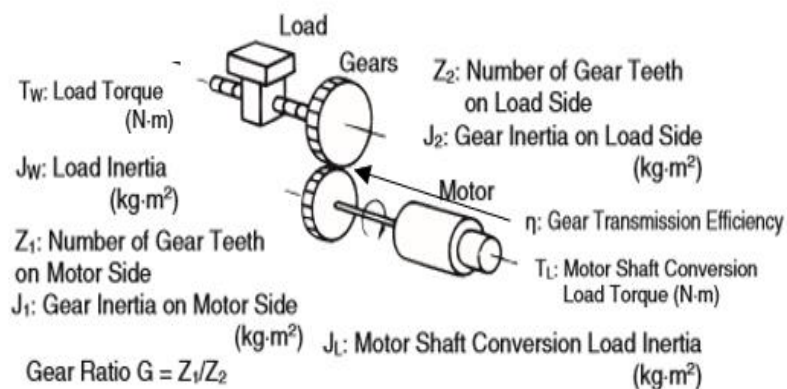
μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

M คือ มวลของชิ้นงาน

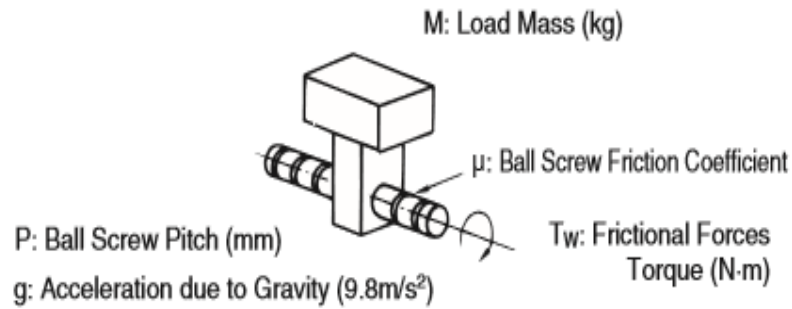
g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก

D_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของเกียร์ตัวที่ 2

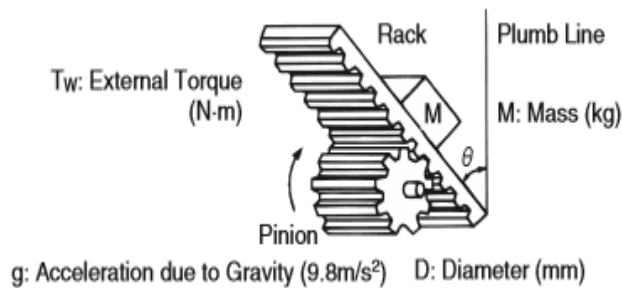
P คือ ค่า pitch ของ ball screw



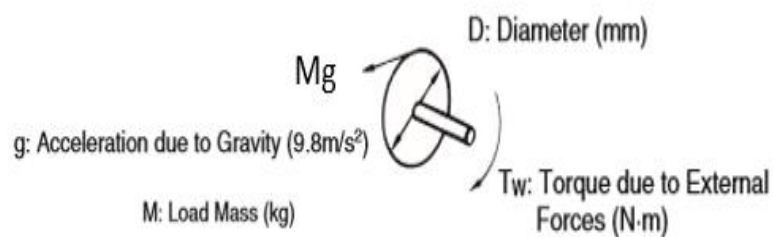
รูปที่ 26 พารามิเตอร์การหาค่าแรงบิดโหลด (T_L) [ที่มา: http://www.omron-ap.com/service_support/technical_guide/servo_motor_drive]



รูปที่ 27 พารามิเตอร์การหาค่าแรงต้านการบิด (T_w) ติดตั้งแบบ ball screw [ที่มา: http://www.omron-ap.com/service_support/technical_guide/servo_motor_drive]



รูปที่ 28 พารามิเตอร์การหาค่าแรงต้านการบิด (T_w) ติดตั้งแบบ rack and pinion [ที่มา: http://www.omron-ap.com/service_support/technical_guide/servo_motor_drive]



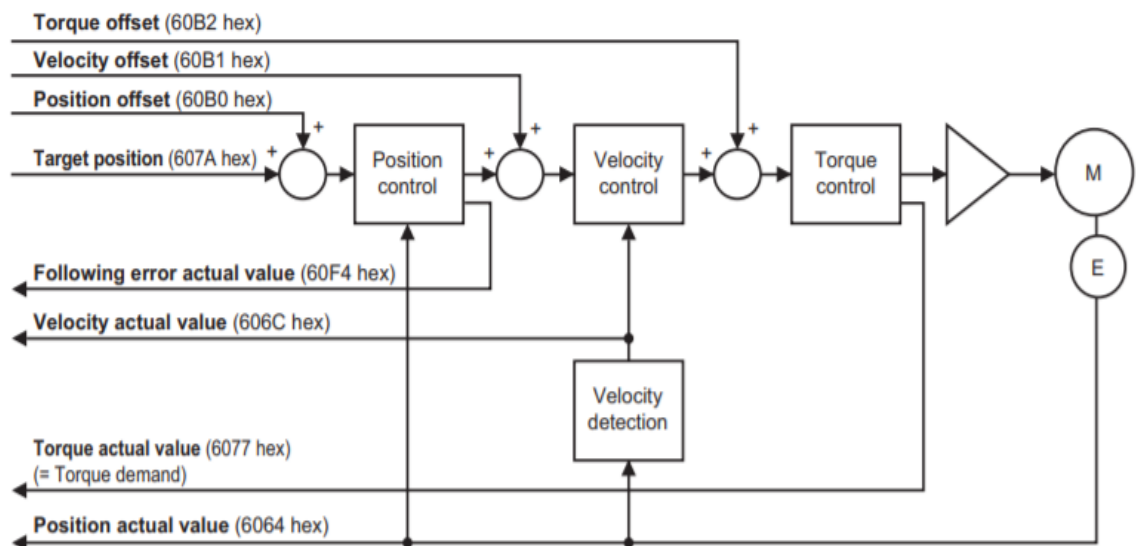
รูปที่ 29 พารามิเตอร์การหาค่าแรงต้านการบิด (T_w) [ที่มา: http://www.omron-ap.com/service_support/technical_guide/servo_motor_drive]

จากการออกแบบด้วยข้อมูลที่ได้ออกไปทั้งหมดทำให้สามารถสร้างเครื่องจักรสำหรับการพันท่อคอมโพสิตลักษณะโค้งแบบ 4 แกนได้ตามรูปที่ 30 ซึ่งมีปรับเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างบางส่วนเพื่อให้เข้าชิ้นงานแล้วความเหมาะสมกับการติดตั้งหน้างาน



รูปที่ 30 เครื่องจักรสำหรับการพันท่อคอมโพสิตแบบโค้ง

4. การกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร ใน ePLC และควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์



รูปที่ 31 Cyclic synchronous position mode diagram [ที่มา :

<https://industrial.omron.eu/en/products/1s-servo-drive#downloads>]

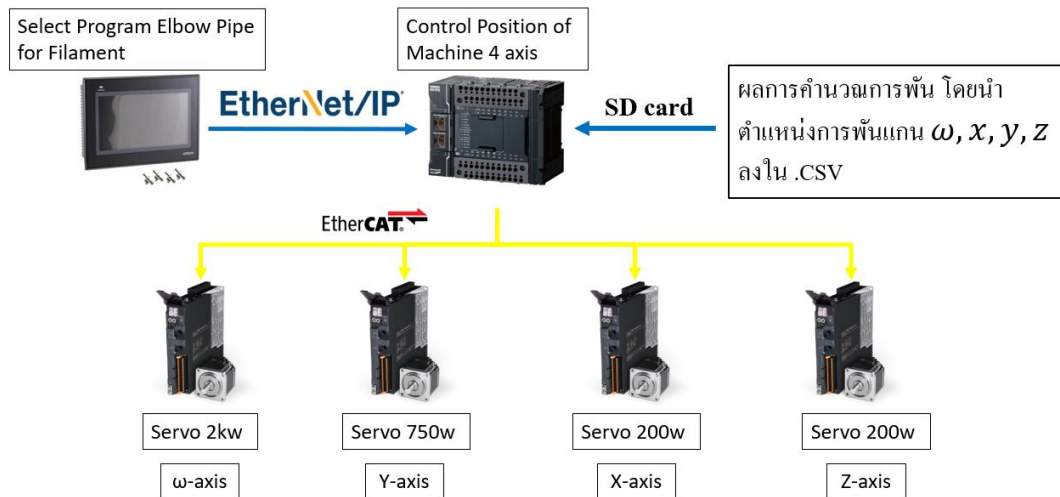
ขั้นตอนการทำงานของคอนโทรลเลอร์ของมอเตอร์เซอร์โวมีฟังก์ชันสำหรับการควบคุม (ฟังก์ชันคำนวณการทำงาน) และกำหนดให้ตำแหน่งเป้าหมายไปยังอุปกรณ์เซอร์โวไดรฟ์แบบ

ซึ่งโครโนซ์แบบ closed loop ตามรูปที่ 31 การควบคุมการทำงานของมอเตอร์เซอร์โวลักษณะนี้จะเป็นแบบควบคุมตำแหน่ง (position control) มีค่าความละเอียดของการควบคุมตำแหน่งอยู่ที่ 23 bit นั้นหมายความว่า encoder มีค่าความละเอียดอยู่ที่ 8,388,608 pulse/rev และเมื่อนำข้อมูลนี้แปลงเป็นค่าผิดพลาด (error) ของตำแหน่งการเคลื่อนที่แต่ละแกนที่ต่างกันออกไปตามการกลไกขับเคลื่อนจะได้แกน X และแกน Z มีค่า error 1.19×10^{-6} mm โดยมอเตอร์เซอร์โวจะขับเคลื่อนด้วยกลไก ball screw ที่ความเร็ว 10 mm/rev และส่วนแกน Y มีค่า error ที่ 1.05×10^{-5} mm โดยมอเตอร์เซอร์โวจะขับเคลื่อนด้วยกลไก rack and pinion ที่ความเร็ว 88 mm/rev ส่วนแกน ω มีค่า error 4.29×10^{-5} deg โดยมอเตอร์เซอร์โวขับเคลื่อนแบบการหมุนอยู่ที่ 360 deg/rev

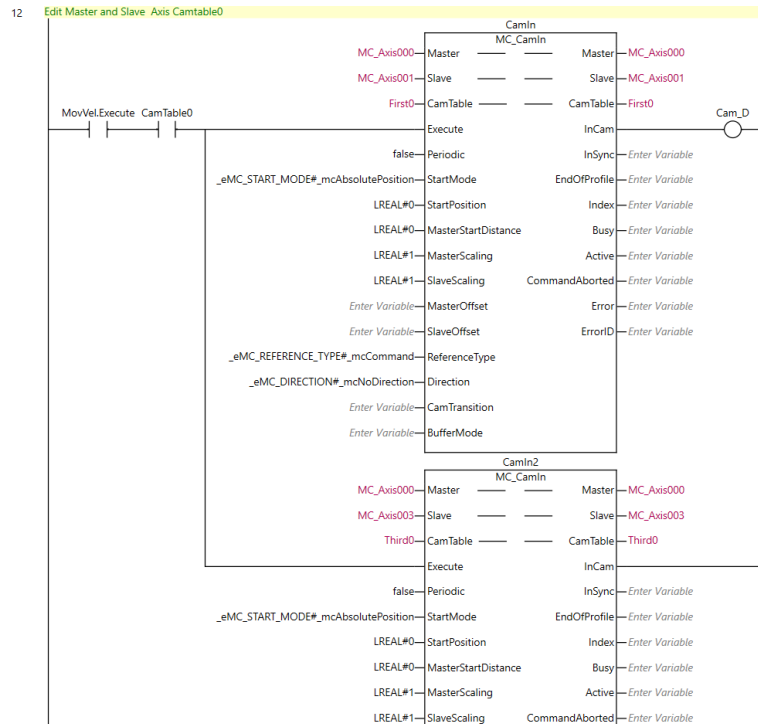
การควบคุมเครื่องจักรเป็นไปตามขั้นตอนดังรูปที่ 32 หลังจากได้ค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรตามเส้นทางของเส้นใยตามที่กำหนดไว้แล้ว ถัดไปจำเป็นต้องมีโปรแกรมสำหรับการควบคุมมอเตอร์แต่ละแกนให้เคลื่อนที่ตรงตามตำแหน่งที่ได้คำนวณไว้และสอดคล้องกันทุกแกน คอลโทรลเลอร์ ePLC ถูกนำมาใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เซอร์โว คอลโทรลเลอร์นี้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่แบบซึ่งโครโนซ์จากมอเตอร์แกนหลัก (master axis) หลักการทำงานแบบซึ่งโครโนซ์จะอ้างอิงจากแกนหลัก ซึ่งกำหนดไว้แบบความเร็วคงที่ ตารางที่ 3 แสดงการเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งที่ 2 เป็นแบบเส้นตรง และมอเตอร์แกนรอง (slave axis) จะปรับให้ความเร็วตามแบบอัตโนมัติเพื่อให้ได้ตำแหน่งตามตารางที่ 3 โดยเครื่องจักรตามการออกแบบในงานวิจัยนี้กำหนดให้แกนหลักคือแกน ω และแกน X,Y,Z เป็นแกนรอง ค่าตำแหน่งตามการคำนวณจากสมการและถูกบันทึกไว้ใน SD card ซึ่งไฟล์ที่ใช้มีนามสกุลเป็น .csv สกูลไฟล์นี้มีการค้นข้อมูลด้วยเครื่องหมายจุลภาค (,) คอลโทรลเลอร์จะทำการอ่านข้อมูลแล้วแยกตำแหน่งของแต่ละแกนเพื่อนำไปควบคุมมอเตอร์แต่ละตัวได้อย่างถูกต้อง ค่าข้อมูลตำแหน่งถูกนำไปใช้ด้วยคำสั่ง camIn ตามรูปที่ 33

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการเคลื่อนที่ของตำแหน่งระหว่าง master axis และ slave axis

Position	Master position (Deg)	Slave position (mm)
1	0	0
2	10	100
3	20	200
4	30	300
5	40	400



รูปที่ 32 ขั้นตอนการสั่งการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสำหรับการพันเส้นใยท่อโคงคอมโพสิต



รูปที่ 33 คำสั่งการเคลื่อนที่แบบประสานในคอลโทรลเลอร์ ePLC

สมการเส้นทางเดินบนผิวท่อโค้งและการคำนวณการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้จริงในการพัฒนาเครื่องจักรพันเส้นใยอัตโนมัติแบบ 4 แกน โดยท่อต้นแบบที่นำมาทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่ากรณีตัวอย่างที่นำเสนอไว้ข้างต้น ขนาด R, r และพารามิเตอร์อื่นจึงถูกปรับตามค่าเงื่อนไขการทดสอบ ผลการทดสอบพันเส้นใยดังรูปที่ 34



รูปที่ 34 ตัวอย่างการพันเส้นใยที่ได้จากเครื่องจักรแบบสี่แกน

เป็นตัวอย่างการพันเส้นใยด้วยเครื่องจักรแบบสี่แกนที่ได้นำสมการจากงานวิจัยนี้ไปใช้คำนวณ และยังคงแสดงให้เห็นลวดลายการพันที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการเส้นทางเดินของเส้นใยอย่างที่ต้องการ เมื่อนำไปพันด้วยเส้นใยแก้วที่ผสมน้ำยาเรซินจะทำให้ผลการพันเป็นไปตามรูปที่ 35 และเมื่อน้ำยาเรซินแข็งตัวก็จะกลายเป็นท่อคอมโพสิตแบบโค้งตามรูปที่ 36



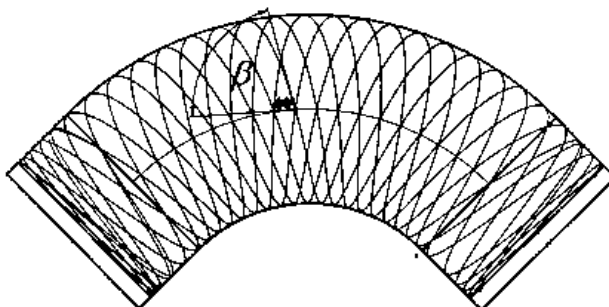
รูปที่ 35 ลักษณะการพันเส้นใยหลังป้อนค่าตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 36 ท่อคอมโพสิตหลังจากการแข็งตัวของเรซิน

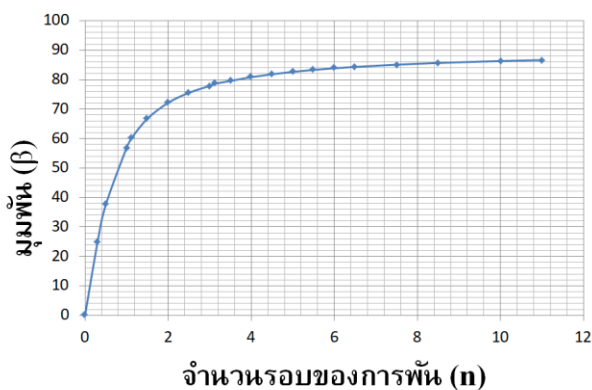
ผลการทดลอง

จากการจำลองสมการเส้นทางการพันเส้นใยตลอดผิวท่อโค้งที่ได้ นำสมการส่วนของท่อโค้งและส่วนของท่อตรงมารวมกันเป็นเส้นทางตามรูปที่ 37



รูปที่ 37 เส้นทางการพันเส้นใยตลอดผิวท่อโค้ง

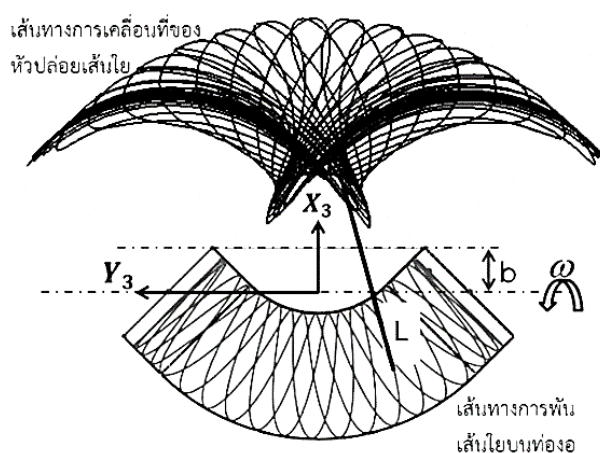
จากรูปที่ 37 จะเห็นได้ว่าเส้นทางที่ได้มีความต่อเนื่องตลอดแนวท่อโค้งทั้งการพันไปและกลับ อีกทั้งยังมีจำนวนเส้นใยที่กระจายในแนวเส้นรอบวงอย่างสม่ำเสมอ การไขว้กันของเส้นใยจะถูกกำหนดด้วยมุม β ที่ขึ้นกับจำนวนรอบการพัน (n) โดยความสัมพันธ์ของสองตัวแปรนี้เป็นไปตามรูปที่ 38



รูปที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการพันและมุมการพันเส้นใยบนท่อโค้ง

ข้อดีของความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้กล่าวคือสามารถเลือกมุมการพันได้จากจำนวนรอบการพัน มุมการพันนี้ส่งผลต่อความแข็งแรงของท่อคอมโพสิต โดยปกติแล้วมุม β ถูกกำหนดอยู่ในช่วง $60-85^{\circ}$ สำหรับการผลิตท่อโค้งระดับอุตสาหกรรม มุม β ไม่ควรน้อยกว่า 60° เพราะจะมีโอกาสเกิดการไถลระหว่างผิวท่อต้นแบบและเส้นใยแก้วผสมเรซินขณะพันได้ ซึ่งควรทำการทดสอบหาค่า β ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตจริงต่อไป

ผลการคำนวณการเคลื่อนที่ของหัวปลอยเส้นใยจากเครื่องจักรแสดงดังรูปที่ 39(บน) เป็นค่าตำแหน่งที่คำนวณได้จากตัวแปร x_c , y_c และ z_c แสดงให้เห็นว่า การเคลื่อนที่ของหัวปลอยเส้นใยมีความต่อเนื่อง มีช่วงการเคลื่อนที่กว้างกว่าขนาดของท่อโค้ง อีกทั้งเครื่องจักรยังรักษาระยะของหัวปลอยให้ห่างจากผิวท่อเป็นระยะ L คงที่เสมอ รูปที่ 39(ล่าง) แสดงทางเดินของเส้นใยบนผิวท่อโค้งที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร



รูปที่ 39 การเคลื่อนที่ของหัวปลอยเส้นใยของเครื่องจักร

เครื่องจักรมีการเคลื่อนที่ 4 แกน ได้แก่ หัวปลอยเส้นใยสามารถเลื่อนตามแกนพิกัดฉาก 3 แกน (X_3, Y_3, Z_3) และท่อโค้งต้นแบบมีแกนหมุน 1 แกน (ω) ระยะการเคลื่อนที่แต่ละแกนคำนวณจากตำแหน่งที่สัมพันธ์กับเส้นทางการพันแบบจุดต่อจุด โดยกำหนดให้ L เป็นค่าคงที่เริ่มต้น พบว่าระยะเส้นใย L มีผลต่อมุมสัมผัสผิวท่อโค้งตามเส้นทางการพัน ผลของการเปลี่ยนแปลงระยะเส้นใย L ต่อระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเป็นไปตามตารางที่ 4 เมื่อกำหนดขนาด $R = 150 \text{ mm}$, $r = 50 \text{ mm}$, $n_2 = 3.125$, $u_{max} = 90^\circ$, $n_1 = 1$, $t_{max} = 70 \text{ mm}$ และ $L = 150\text{-}300 \text{ mm}$

อนึ่ง ระยะวิกฤต b ดังแสดงในรูปที่ 39 คือ ขอบต่ำสุดที่เครื่องจักรสามารถเลื่อนเข้าตามแนวแกน X_3 โดยที่หัวปลอยเส้นใยจะไม่ชนกับท่อต้นแบบขณะทำงาน สำหรับท่อขนาดที่กำหนดไว้ ค่า b มีเท่ากับ 35.36 mm นอกจากนี้ โอกาสที่จะชนยังขึ้นอยู่กับความกว้างของหัวปลอยเส้นใยด้วยเช่นกัน ดังนั้นควรเผื่อระยะ X_3 ต่ำสุด ให้มากกว่า b พอสมควร เพื่อลดโอกาสชนระหว่างหัวปลอยเส้นใยและท่อโค้งที่จะเกิดขึ้น

ผลการจำลองระยะเลื่อนทั้งสี่แกนของเครื่องจักร ด้วยโปรแกรม CAD/CAM เป็นตามตารางที่ 4 พบว่า ค่า L ที่เหมาะสมกับท่อขนาดนี้ที่ไม่ทำให้เครื่องจักรชนกับท่อขณะพัน (ตาม

เงื่อนไข X_3 ต่ำสุด $> b$) คือ L มากกว่าหรือเท่ากับ 170 mm แต่ถ้าเลือกระยะ L ที่มากเกินไปก็จะทำให้เครื่องจักรมีขนาดใหญ่ขึ้นตามระยะเลื่อนของแต่ละแกน

ตารางที่ 4 ระยะเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเมื่อระยะทางการปล่อยเส้นใย L เปลี่ยนแปลงที่ $\beta = 78^\circ$

ระยะ L (mm)	X_3 ต่ำสุด (mm)	ระยะเลื่อนแกน X_3 (mm)	ระยะเลื่อนแกน Y_3 (mm)	ระยะเลื่อนแกน Z_3 (mm)
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

อีกทั้งระยะ L ที่มากขึ้นจะทำให้แนวการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรตามแกน X_3 และ Y_3 มีช่วงกว้างมากขึ้น เพื่อรักษามุมการไขว้เส้นใยไว้ตามกำหนดสำหรับแต่ละรอบของการหมุน ω ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรในแกน X_3 และ Y_3 จึงเพิ่มขึ้นตาม เมื่อสังเกตจากการพันทดสอบกับเครื่องจักรต้นแบบที่สร้างขึ้นโดยตั้งค่าความตึงของเส้นใยไว้ที่ค่าหนึ่ง พบว่าการไถลระหว่างเส้นใยกับผิวแกนท่อมักเกิดขึ้นที่สุดขอบของการเคลื่อนที่ในแกน X_3 หรือ Y_3 เพราะแรงเสียดระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองไม่คงที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งการหมุนของท่อต้นแบบและช่วงการเคลื่อนที่ของจักร

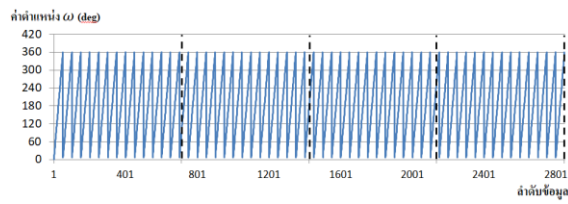
สมการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถปรับใช้ได้กับท่อทุกขนาด เพราะสมการ helix ที่สร้างบนพื้นผิวท่อต้องเป็นตามการกำหนดขนาด R และ r ด้วยเช่นกัน ระยะ L ที่เหมาะสมกับท่อขนาดอื่นก็สามารถคำนวณด้วยวิธีเดียวกันกับที่นำเสนอไป

ผลจากการจำลองหาระยะเลื่อนของเครื่องจักรเมื่อมุมผันเปลี่ยนเป็นไปตามตารางที่ 5 (กำหนดให้ $L = 210$ mm) พบว่ามุมการผันมีผลต่อระยะความยาวของเครื่องจักรในแนวแกน X_3 เพียงแกนเดียวเท่านั้น โดยมุมการผันแปรผกผันกับระยะเลื่อนตามแกน X_3

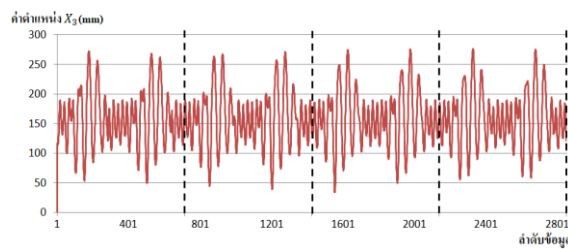
ตารางที่ 5 ระยะเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเมื่อมุมการผันเปลี่ยนแปลง ที่ $L=210$ mm

มุมผัน (องศา)	ระยะเลื่อนแกน X_3 (mm)	ระยะเลื่อนแกน Y_3 (mm)	ระยะเลื่อนแกน Z_3 (mm)
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

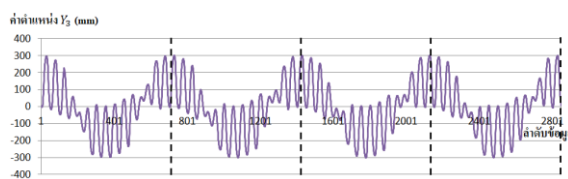
หากพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรเครื่องจักรสี่แกน (X_3, Y_3, Z_3, ω) ตามแกนอ้างอิงในรูปที่ 19 เมื่อตัวแปรต้น (ω) ซึ่งเป็นแกนทอตันแบบหมุน จะทำให้ตัวแปรตามอื่นๆ เปลี่ยนแปลงตาม ดังรูปที่ 40 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ตำแหน่งแกน ω, X_3, Y_3 และ Z_3 ที่เปลี่ยนไปตามลำดับข้อมูล ผลการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวปล่อยเส้นใย (รูปที่ 40) แสดงให้เห็นว่าการหมุนแต่ละรอบของ ω ทำให้ทุกแกนเลื่อนย้ายกลับไปกลับมาตามความถี่ของตัวเอง โดยมีการเปลี่ยนช่วงการเคลื่อนที่แต่ละคาบไปที่ละน้อยและไม่ซ้ำเดิม โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสำหรับการผันเส้นใย 4 ครั้ง มีดังนี้ ครั้งที่ 1 อยู่ในลำดับข้อมูลที่ 0-713, ครั้งที่ 2 อยู่ในลำดับข้อมูลที่ 714-1426, ครั้งที่ 3 อยู่ในลำดับข้อมูลที่ 1427-2139 และครั้งที่ 4 อยู่ในลำดับข้อมูลที่ 2140-2852 ซึ่งสามารถแบ่งช่วงการผันแต่ละรอบด้วยเส้นประ (รูปที่ 40) จะสังเกตเห็นว่าการผันแต่ละรอบแกนหมุนทอจะเริ่มต้นการผันที่ตำแหน่งมุมเฟสต่างกันในรูปแบบที่ 40(ก) เนื่องจากเส้นทางการผันที่กำหนดไว้บนผิวทอ มีการเหลื่อมกันเล็กน้อยตามจำนวนรอบการผันนั่นเอง



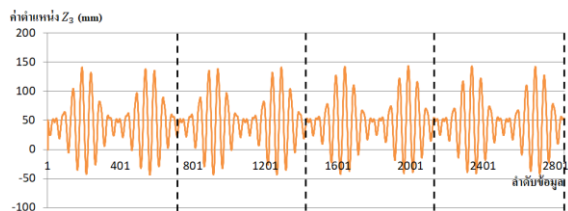
รูปที่ 40(ก) ตำแหน่งการหมุนแกน ω



รูปที่ 40(ข) ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน X_3



รูปที่ 40(ค) ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน Y_3



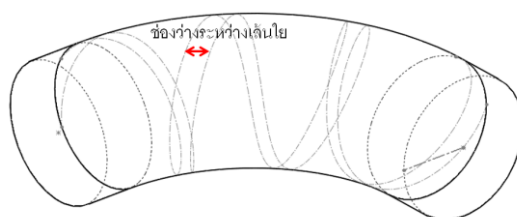
รูปที่ 40(ง) ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน Z_3

และจากผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์การผันสั่นโยของเครื่องจักรสำหรับท่อโค้ง ได้ผลการทำงานตามตารางที่ 6 โดยความเร็วเชิงมุมของแกนท่อนต้นแบบคงที่อยู่ที 30 องศาต่อวินาที

ตารางที่ 6 ผลทดสอบการพันเส้นใยของเครื่องจักรสำหรับท่อโค้งขนาดต่าง ๆ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโค้ง (mm)	รัศมีความโค้งท่อ R (mm)	จำนวนรอบการพัน (n)	ช่องว่างระหว่างเส้นใย (mm)	จำนวนเส้นใยแก้ว (เส้น)	เวลาในการพัน (s)
300	300	3.06	29.2	14	1010
250	375	3.06	33.1	16	1010
200	300	3.08	33.6	17	750
150	225	3.08	26.8	13	750
127	190.5	3.08	25.3	12	750
100	150	3.12	25.8	12	510
75	112.5	3.12	18.5	9	510

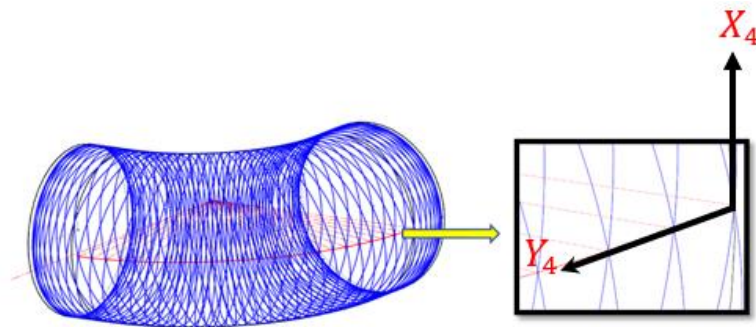
จากตารางที่ 6 จำนวนรอบของการพันแปรผันตรงกับเวลาในการพันท่อโค้งและจำนวนเส้นใยแก้วที่ใช้ในการพันรวมกันเป็นแพเส้นใยเป็นตัวกำหนดความห่างทางเดินการพันเส้นใยในแต่ละรอบ และส่งผลถึงจำนวนรอบการพันตลอดความยาวท่อทั้งหมด (n) ซึ่งวัดจากการทดสอบการพันด้วยเส้นใย 1 เส้นก่อนเพื่อตรวจสอบระยะห่างระหว่างเส้นใยตามรูปที่ 41 ทำให้สามารถกำหนดความกว้างของแพเส้นใยและจำนวนเส้นใยได้ จากการวัดพบว่า 1 เส้นใยกว้างเฉลี่ยประมาณ 2.32 mm จึงใช้คำนวณเป็นจำนวนเส้นใยแก้วที่ใช้ใน 1 แพได้ตามตารางที่ 6



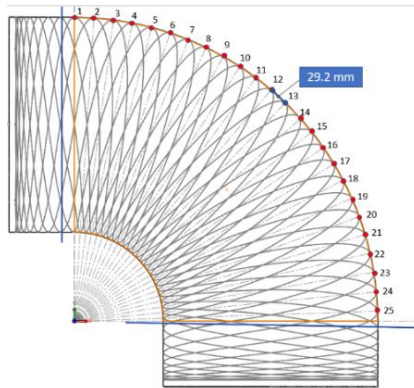
รูปที่ 41 ช่องว่างระหว่างเส้นใยตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อโค้ง

หลังจากทดสอบเส้นทางการพันท่อโค้งแต่ละขนาดแล้ว ทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากเส้นทางเดินเส้นใยจากจำลองกับเส้นใยบนท่อโค้งที่ออกมาโดยสังเกตจากจุดตัดของเส้นใยตามเส้นขอบนอกของท่อโค้ง อ้างอิงตามตารางที่ 7 และรูปที่ 42 เส้นสีน้ำเงินคือเส้นทางการพันที่ตัดกันและเส้นสีแดงจะเป็นแนวเส้นผ่านศูนย์กลางความโค้งนอกของท่อโค้ง จากรูปจะเห็นได้ว่าการพันที่ตัดกันจะอยู่บนแนวเส้นผ่านศูนย์กลางความโค้งนอกทุกจุด เพราะฉะนั้นการ

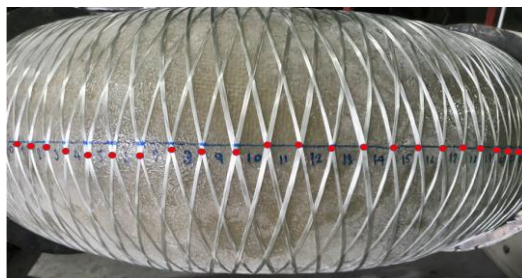
เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของการพันเส้นใยอ้างอิงตามพิกัดของแกน X_4 และแกน Y_4 ตามรูปที่ 42 โดยที่ตำแหน่งจุดตัดควรอยู่บนแกน Y_4 (นั่นคือ $X_4 = 0$) และมีค่าตำแหน่งตามแกน Y_4 เริ่มต้นจาก 0 mm และเพิ่มขึ้นระยะห่างระหว่างจุดตัดสองจุดดังแสดงใน รูปที่ 43 ซึ่งช่องว่างระหว่างจุดตัดเส้นใยจะมีค่าเท่ากันตามแบบการจำลอง และช่องว่างระหว่างจุดตัดที่ได้จากการวัดเส้นใยท่อโคงที่ผลิตขึ้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบความถูกต้องด้วยเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 44 ผลการวัดค่าตำแหน่งจุดตัดเส้นใยของท่อโคงที่ผลิตขึ้นแสดงในตารางที่ 7



รูปที่ 42 พิกัดอ้างอิงสำหรับการเทียบจุดตัดเส้นใยตามแนวความโค้งนอกของท่อ



รูปที่ 43 ตำแหน่งจุดตัดเส้นใยตามแนวความโค้งนอกของท่อจากแบบจำลอง ($R=300$ mm $D=300$ mm)



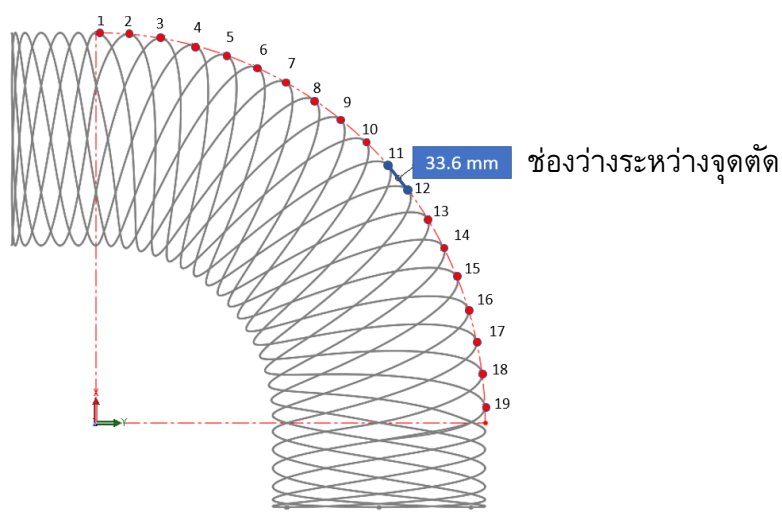
รูปที่ 44 ผลทดสอบการพันและจุดตัดเส้นใยบนท่อโคงคอมโพสิต ($R=300$ mm $D=300$ mm)

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบจุดตัดเส้นใยบนแนวเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของท่อโค้ง ($R=300$ mm
 $D=300$ mm)

ตำแหน่ง ที่	ระยะตามแนวแกน X_4 (mm)	ระยะตามแนวแกน Y_4 (mm)	ช่องว่างระหว่างเส้นใย (mm)
1	3	0	-
2	5	30	30
3	5	57	27
4	7	87	30
5	8	115	28
6	5	145	30
7	8	174	29
8	8	204	30
9	8	233	29
10	3	260	27
11	3	289	29
12	5	313	24
13	2	343	30
14	0	377	34
15	0	402	25
16	0	435	33
17	0	464	29
18	0	492	28
19	0	522	30
20	3	550	28
21	5	582	32
22	3	610	28
23	1	640	30
24	0	670	30
25	0	700	30

จากตารางที่ 7 แสดงให้เห็นว่าผลการพันเส้นใยที่ได้จากเครื่องจักรตามการออกแบบนี้ มีความใกล้เคียงกับเส้นทางเดินที่ออกแบบไว้ โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดตามแกน X_4 เท่ากับ 8 mm และมีความคลาดเคลื่อนของช่องว่างระหว่างจุดตัดต่างจากที่ออกแบบไว้เพียง $34-29.2 = 4.8$ mm

ต่อมาทำการเปลี่ยนระยะปล่อยเส้นใย L ตามตารางที่ 8 และตารางที่ 9 โดยมีอ้างอิงเปรียบเทียบดังแสดงตามรูปที่ 45 จุดวัดเปรียบเทียบทั้งหมด 19 ตำแหน่ง



รูปที่ 45 ตำแหน่งจุดตัดเส้นใยตามแนวความโค้งนอกของท่อจากแบบจำลอง ($R=200$ mm
 $D=200$ mm)

จากตารางที่ 8 และตารางที่ 9 เมื่อพิจารณาผลการพันเส้นบนท่อโค้งที่มีระยะปล่อยเส้นใย (L) ต่างกันพบว่า L ที่ยาวกว่ามีการคลาดเคลื่อนมากกว่า เนื่องจากความยาวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดโอกาสที่เส้นใยไถลบนผิวท่อโค้งคอมโพสิตขณะพันได้มากกว่า เพราะเมื่อหัวปล่อยเส้นใยรักษาระยะ L ไว้ให้มีความห่างมากและเข้าใกล้ท่อโค้งขณะพัน จึงทำให้แนวของเส้นใยเกือบจะขนานไปกับผิวท่อ แรงเสียดทานระหว่างเส้นใยกับผิวท่อลดลงทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการไถลขึ้น

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบจุดตัดเส้นใยบนแนวเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของท่อโค้ง $R=200$ mm, $D=200$ mm และระยะปล่อยเส้นใย $L=350$ mm

ตำแหน่ง ที่	ระยะตามแนวแกน X_4 (mm)	ระยะตามแนวแกน Y_4 (mm)	ช่องว่างระหว่างเส้นใย (mm)
1	5	10	-
2	0	42	32
3	0	75	33
4	3	107	32
5	3	138	31
6	2	172	34
7	3	205	33
8	3	238	33
9	0	270	32
10	1	302	32
11	2	335	33
12	0	368	33
13	-1	402	34
14	-2	435	33
15	0	469	34
16	-3	501	32
17	-3	532	31
18	-5	562	30
19	0	593	31

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบจุดตัดเส้นใยบนแนวเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของท่อโค้ง $R=200$ mm, $D=200$ mm และระยะปล่อยเส้นใย $L=370$ mm

ตำแหน่ง ที่	ระยะตามแนวแกน X_4 (mm)	ระยะตามแนวแกน Y_4 (mm)	ช่องว่างระหว่างเส้น ใย
1	7	15	-
2	3	50	35
3	-3	83	33
4	3	113	30
5	5	145	32
6	5	180	35
7	7	210	30
8	3	243	33
9	5	275	32
10	7	305	30
11	2	337	32
12	3	370	33
13	0	403	33
14	0	435	32
15	0	470	35
16	-3	500	30
17	-7	530	30
18	-3	565	35
19	0	595	30

เมื่อพันท่อโค้งคอมโพสิตด้วยเครื่องจักรแล้วทางโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดค่ามาตรฐานความทนทานแรงดัน โดยวิธีทดสอบแรงดันจะใช้วิธีปิดปากของท่อทั้ง 2 ด้านแล้วอัดน้ำแรงดันเข้าไปในท่อโค้งคอมโพสิตตามรูปที่ 46 โดยการทดสอบนี้จะทดสอบการพันท่อโค้งคอมโพสิต 4 รอบ (1 รอบ = 2 ชั้น) ซึ่งทำให้ท่อโค้งคอมโพสิตทนแรงดันได้ที่ 20-30 bar โดยเกิดรอยรั่วของท่อโค้งคอมโพสิตที่ 30 bar (มาตรฐานกำหนดไว้ไม่ต่ำกว่า 25 bar โดยอ้างอิงจากบริษัทไทยคอมโพสิต ASTM D2996 [5]) โดยค่าที่ความดันที่ทำให้เกิดรอยรั่วแปรผันตามจำนวนรอบของการพันท่อโค้งคอมโพสิตตามตารางที่ 10



รูปที่ 46 ทดสอบท่อโค้งคอมโพสิตด้วยการอัดแรงดันน้ำ

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบแรงดันกับจำนวนรอบของการพันท่อโค้งคอมโพสิต

จำนวนรอบของการพัน (รอบ)	ท่อคอมโพสิตขาดรั่วที่แรงดัน (bar)
2	12
3	20
4	30

สรุปผลการศึกษา

วิทยานิพนธ์และบทความวิจัยตามแนบนี้ได้กล่าวถึงกระบวนการหาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิตสำหรับเครื่องพันเส้นใยอัตโนมัติด้วยการนำสมการเส้นทางการพันเส้นใยที่เป็นสมการพื้นฐานเพื่อให้ง่ายต่อการจำลองเส้นทางบนพื้นผิวท่อในโปรแกรม CAD/CAM ที่รองรับ อีกทั้งยังนำเสนอความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร 4 แกน กับเส้นทางเดินของเส้นใยได้สร้างเครื่องจักรสำหรับผลิตท่อโค้งคอมโพสิตที่รองรับการผลิตท่อโค้งขนาดความยาวสูงสุดไม่เกิน 1 เมตร พบว่าเครื่องจักรสามารถพันท่อคอมโพสิตแบบโค้งขนาดใหญ่สุดอยู่ที่ $R=300\text{mm}$, $r=150\text{ mm}$ และ $L=370\text{ mm}$ องค์ความรู้และระเบียบวิธีวิจัยนี้สามารถประยุกต์กับการออกแบบและสร้างเครื่องจักรสำหรับการผลิตท่อโค้งขนาดใหญ่ได้เช่นกัน ซึ่งจากการผลิตท่อโค้งคอมโพสิตด้วยเครื่องจักรตามกระบวนการนี้สามารถทดแทนการผลิตด้วยแรงงานคนผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นไปตามกำหนดตามมาตรฐานจากผลการทดสอบการอัดความดันภายในท่อ ระเบียบวิธีการศึกษาเครื่องจักรพันท่อโค้งคอมโพสิตสามารถนำไปดัดแปลงต่อยอดพันท่อคอมโพสิตลักษณะอื่นได้ เช่น ท่อทรงกรวย ทรงตัวที่ โดยขึ้นอยู่กับการหาสมการเส้นทางของเส้นใยที่นำมาพันให้รองรับกับเครื่องจักรที่ออกแบบไว้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chihdar Yang and Richard H.Lea “Filament Winding Composite Elbows”, filament winding technique and the associated industries. session17 (1998)
- [2] J. V. Anderson, “Automated manipulation for the LOTUS filament winding process,” M.S. Thesis, Brigham Young University, 2006.
- [3] Haisheng Lia, Youdong Liangb, Hujun Baob “CAM system for filament winding on elbows”, Journal of Materials Processing Technology 161, 491–496 (2005)
- [4] Haisheng Lia, Youdong Liangb, Hujun Baob “Computer Aided Filament Winding for Elbows”, Journal of software Vol.13, No.4 (2002)
- [5] ATSM International, ASTM D2996: Standard Specification for Filament-Wound “Fiberglass” (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe, <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D2996> [Accessed June 2020].

วารสารวิชาการ:

ชอุต ชู่อองสกุล และ พฤทธิกร สมิตไมตรี, “การหาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิตสำหรับเครื่องพันเส้นใยอัตโนมัติ,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 29, ฉบับที่ 2, หน้า 259-269, เม.ย.-มิ.ย. 2562



บทความวิจัย

การหาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิตสำหรับเครื่องพันเส้นใยอัตโนมัติ

ชฤต ชูอ่องสกุล และ พฤทธิกร 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 การตรวจความถูกต้องทำโดยการเปรียบเทียบลักษณะการพันที่ออกแบบไว้กับผลของการพันเส้นใยด้วยเครื่องจักร พบว่าได้ลักษณะเส้นใยที่พันตามการออกแบบ ผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องพันเส้นใยแก้วสำหรับท่อโค้งที่มีขนาดต่างกันต่อไป

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

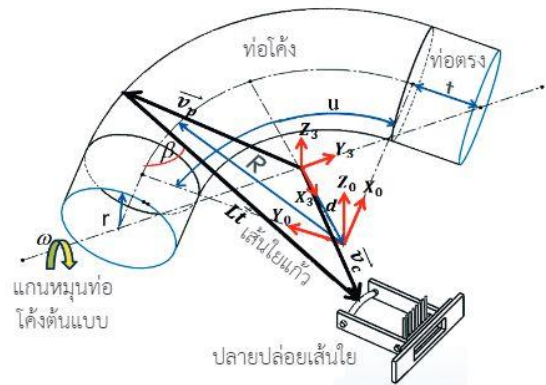


1. บทนำ

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

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

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองหาเส้นทางการพันเส้นใยบนผิวท่อโค้งจากสมการ Helix เพื่อให้ง่ายต่อการจำลองเส้นทางและการจำลองในโปรแกรม CAD/CAM โดยใช้ความ



รูปที่ 1 พารามิเตอร์ของท่อโค้งคอมโพสิต

สัมพันธ์จากจำนวนรอบของการพัน และเพื่อวิเคราะห์หาเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสี่แกนจากการพันเส้นใยที่กำหนดไว้

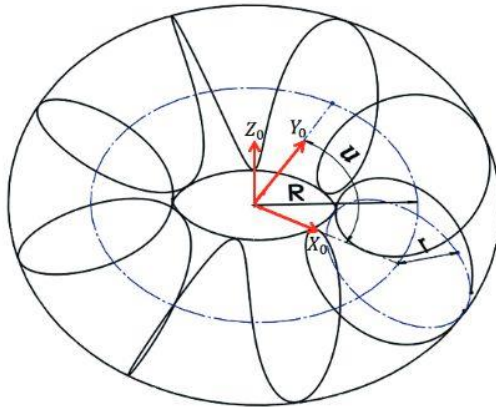
ความสัมพันธ์ของเส้นทางการพันเส้นใยบนผิวท่อโค้งเกี่ยวข้องกับสมการของท่อโค้งและท่อตรง เพราะท่อโค้งคอมโพสิตหนึ่งท่อประกอบด้วยส่วนของท่อตรงที่ปลายท่อทั้งสองและส่วนของท่อโค้งที่อยู่ตรงกลาง ตามรูปที่ 1

สมการที่นำมาใช้สร้างเส้นทางการเดินทางบนผิวของท่อโค้งคือสมการ Helix ของรูปทรงทอรัส (Torus) ตามสมการ

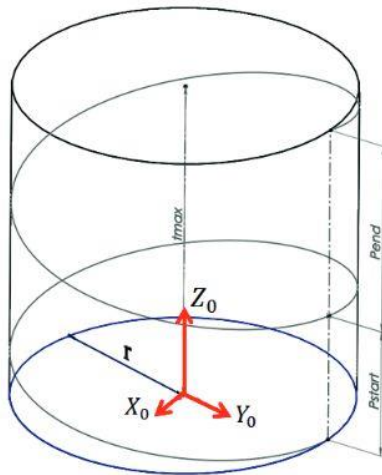
$$\begin{bmatrix} x_0(u) \\ y_0(u) \\ z_0(u) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R+r \cdot \cos(n \cdot u)) \cdot \cos(u) \\ (R+r \cdot \cos(n \cdot u)) \cdot \sin(u) \\ r \cdot \sin(n \cdot u) \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

เส้นทางการพันเส้นใยบนผิวส่วนท่อตรงที่ปลายทั้งสองบนผิวทรงกระบอก ซึ่งมีการกำหนดพารามิเตอร์ตามรูปที่ 3 สามารถใช้สมการ Helix บนผิวทรงกระบอกได้ตามสมการที่ (3) โดยกำหนดพารามิเตอร์ P_1 และ P_2 บอกช่วงทางการพันเส้นใย (Pitch) ในแต่ละรอบ P_1 และ P_2 มีความสัมพันธ์ขึ้นกับจำนวนรอบของการพันเส้นใย (n_1) และความยาวของส่วน



รูปที่ 2 เส้นทางจากสมการ Helix บนผิวทรงทอรัส



รูปที่ 3 เส้นทางจากสมการ Helix บนผิวทอตรง

ทอตรง (t_{max}) ช่วงห่างของ Pitch ถูกกำหนดโดย Pitch เริ่มต้น (P_{start}) และ Pitch สุดท้าย (P_{end}) ตามสมการที่ (3)–(5) พารามิเตอร์ P_1 และ P_2 บ่งชี้ถึงการทยอยเพิ่มขึ้นของระยะห่าง Pitch ตามแนวแกน Z_0 จากเริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดการพันในช่วงทอตรงที่มีความยาวรวมเป็น t_{max}

ในกรณีที่ $n_1 = 1$ เส้นทางพันเส้นใยเป็นไปตามสมการที่ (6) โดยกำหนดค่า t_{max} เป็นความยาวทอตรงและส่วนค่า P_1 ถูกกำหนดโดยเส้นสัมผัส ณ จุดต่อเชื่อมระหว่างเส้นทางการพันทอโค้งและเส้นทางการพันของทอตรงจะต้องมีความชันเท่ากัน

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 บนส่วนของทอโค้งและทอตรงมีจุดอ้างอิงที่ต่างกัน จึงต้องอาศัยเมทริกซ์การแปลง (Transformation Matrix) สำหรับเลื่อนตำแหน่งกรอบอ้างอิงตามสมการที่ (7) และหมุนกรอบอ้างอิงตามสมการที่ (8)–(10) ให้จุดอ้างอิงของสมการ Helix ของทอโค้งและทอตรงมาซ้อนกันทับกัน [6]

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

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

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



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

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

การออกแบบเส้นทางการพันเส้นใยที่ต่อเนื่องระหว่างจุดต่อของส่วนท่อตรงกับส่วนท่อโค้งและมีเส้นใยพันทับกลับไปมาเป็นหลายไขว้ สามารถทำได้โดยนำสมการที่ (1) และสมการที่ (2) หรือ (6) มาปรับความต่อเนื่องของเส้นทางการพันเฟสเริ่มต้น (α_{start}) จะได้เส้นทางการพันบนผิวท่อโค้งเป็น

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

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

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

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

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

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

เมื่อได้สมการเส้นทางการเดินบนผิวท่อที่ต่อเนื่องแล้ว ลำดับถัดไปเป็นการสร้างรูปแบบของเส้นทางการเดินบนพื้นผิวให้เป็นไปตามแบบการพันเส้นใยบนท่อโค้งในงานอุตสาหกรรม การกำหนดพารามิเตอร์เพื่อการออกแบบหลายไขว้ของเส้นใยถูกแยกเป็น 2 กรณี ดังนี้

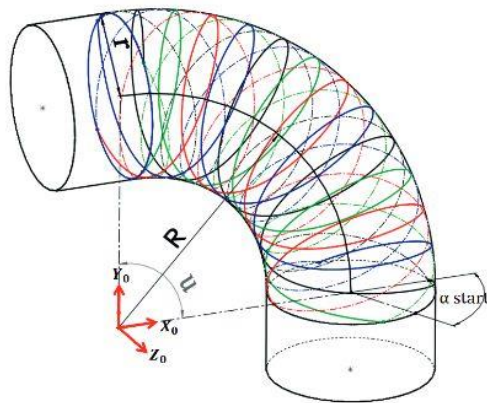
กรณีที่ 1 ส่วนของท่อโค้ง

การออกแบบเส้นทางการเริ่มต้นจากการกำหนดมุมเปิดของความยาวส่วนท่อโค้งตามลักษณะท่อที่ต้องการผลิต 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

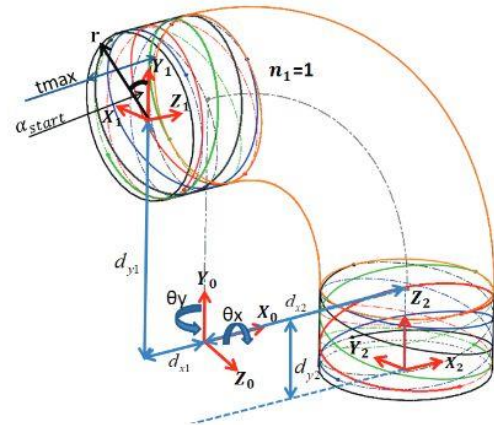
การกำหนดมุมเฟสเริ่มต้น α_{start} ของเส้นทางการพันของเส้นรอบวงดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อต้องการเส้นทางการเดินของเส้นใยพันหลายทบกระจายตามแนวเส้นรอบวงสามารถทำได้ด้วยการกำหนดมุมเฟสเริ่มต้นหลายค่า ยกตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยนี้ต้องการให้มีการพันเส้นใย 4 ครั้ง กระจายตามแนวเส้นรอบวง จึงกำหนดให้ $\alpha_{start} = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ ส่วนเส้นทางการเดินวกกลับสามารถหาได้จากสมการสมการที่ (11) เฉพาะองค์ประกอบในแนว Z_0 ด้วย -1 และกำหนดค่า α_{start} เพื่อให้เส้นทางการวกกลับต่อกับเส้นทางการขมายกตัวอย่างเช่น เส้นที่บสีดำเมื่อคุณองค์ประกอบในแนวแกน Z_0 ด้วย -1 แล้วจะได้เส้นทางการวกกลับเป็นเส้นประสีดำ

กรณีที่ 2 ส่วนของท่อตรง

ขั้นตอนการคำนวณเริ่มต้นจาก กำหนดระยะเวลาความยาวของท่อตรงส่วนที่ต้องการพันเส้นใย เช่น ส่วนของท่อตรงยาว 70 มม. อาจกำหนด $t_{max} = 60$ 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

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

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

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

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

เมื่อได้สมการเส้นทางเดินบนผิวท่อที่ต่อเนื่องโดยตลอดแล้ว ลำดับถัดไปเป็นการหาความสัมพันธ์ของเส้นใยที่ปล่อยจากเครื่องจักรมาพันรอบท่อโค้งให้อยู่บนเส้นทางตามสมการที่ได้มาข้างต้น

2.2 การเคลื่อนที่ของเครื่องจักร

การคำนวณระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสี่แกนที่ทำให้เกิดการพันเส้นใยบนผิวท่อโค้งตามการออกแบบ เริ่มต้น



จากการย้ายกรอบอ้างอิงจาก $[X_0, Y_0, Z_0]$ ไปที่กรอบอ้างอิง $[X_3, Y_3, Z_3]$ ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงของหัวปลอยเส้นใย (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

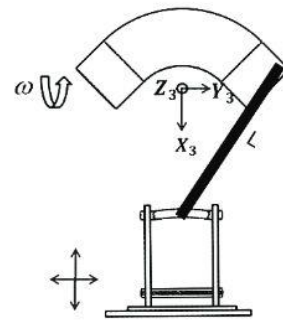
$$\vec{v}_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \vec{v}_p + L\vec{i} \quad (19)$$

เมื่อ \vec{v}_c คือ เวกเตอร์บอกตำแหน่งของหัวปลอยเส้นใย \vec{v}_p คือ เวกเตอร์บอกตำแหน่งเส้นทางการพันบนผิวท่อ L คือ ความยาวของเส้นใยจากจุดสัมผัสบนผิวท่อถึงหัวปลอยเส้นใย \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



แนวทางการเคลื่อนที่ของปลายปลอยเส้นใย

รูปที่ 6 การตั้งค่าเริ่มต้นของเครื่องจักรพันเส้นใยและตัวแปรของเครื่องจักร

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

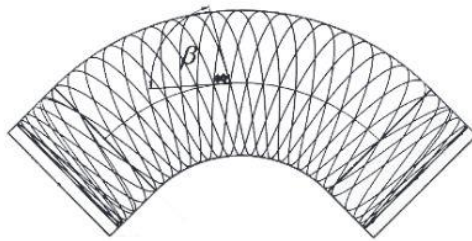
จากนั้นกำหนดขนาดของท่อคอมโพสิตในกรณีนี้กำหนด $R = 150$ มม., $r = 50$ มม., $n_2 = 3.125$, $u_{max} = 90^\circ$, $n_1 = 1$, $t_{max} = 70$ มม. และ $L = 150-300$ มม. กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นการพันตามรูปที่ 6 แทนค่าพารามิเตอร์ลงในสมการที่ (19)-(21) สามารถแก้สมการหาค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหัวปลอยเส้นใยได้เป็น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

3. ผลการทดลอง

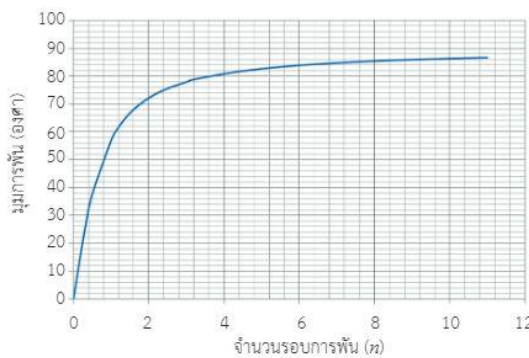
จากการจำลองสมการเส้นทางการพันเส้นใยตลอดผิวท่อโค้งที่ได้มาสมการส่วนของท่อโค้งและส่วนของท่อตรงมารวมกันได้เส้นทางตามรูปที่ 7

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

ข้อดีของความสัมพันธ์นี้สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้ กล่าวคือ สามารถเลือกมุมการพันได้จากจำนวนรอบการพัน มุมการพันนี้ส่งผลต่อความแข็งแรงของท่อคอมโพสิต โดยปกติแล้ว มุม β ถูกกำหนดอยู่ในช่วง



รูปที่ 7 เส้นทางการพันเส้นใยตลอดผิวทอโค้ง



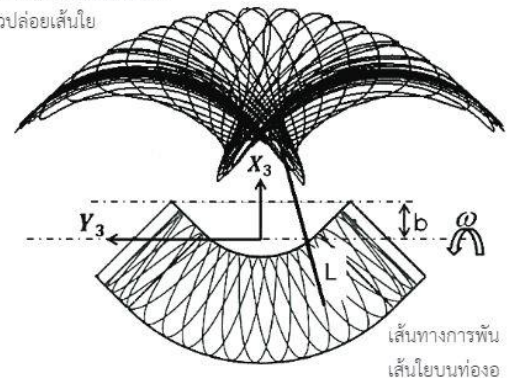
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการพันและมุมการพันเส้นใยบนทอโค้ง

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

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

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

เส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวปล่อยเส้นใย



รูปที่ 9 การเคลื่อนที่ของหัวปล่อยเส้นใยของเครื่องจักร

แกนคำนวณจากตำแหน่งที่สัมพันธ์กับเส้นทางการพันแบบจุดต่อจุด โดยกำหนดให้ L เป็นค่าคงที่เริ่มต้น พบว่าระยะเส้นใย L มีผลต่อมุมสัมผัสผิวทอโค้งตามเส้นทางการพัน 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 โดยที่หัวปล่อยเส้นใยจะไม่ชนกับทอต้นแบบขณะทำงาน สำหรับทอขนาดที่กำหนดไว้ ค่า b มีเท่ากับ 35.36 มม. นอกจากนี้ โอกาสที่จะชนยังขึ้นอยู่กับความกว้างของหัวปล่อยเส้นใยด้วยเช่นกัน ดังนั้น ควรเมื่อระยะ X_3 ต่ำสุด ให้มากกว่า b พอสมควร เพื่อลดโอกาสชนระหว่างหัวปล่อยเส้นใยและทอโค้งที่จะเกิดขึ้น

ผลการจำลองระยะเลื่อนทั้งสี่แกนของเครื่องจักรด้วยโปรแกรม CAD/CAM เป็นตามตารางที่ 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 เพื่อรักษามุมการไขว้เส้นใยได้ตามกำหนด สำหรับแต่ละรอบของการหมุน



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

ระยะ L (มม.)	X_3 ต่ำสุด (มม.)	ระยะเลื่อน แกน X_3 (มม.)	ระยะเลื่อน แกน Y_3 (มม.)	ระยะเลื่อน แกน 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 การไหลระหว่างเส้นใยกับผิวแกนท่อมักเกิดขึ้นที่สุดขอบของการเคลื่อนที่ในแกน X_3 หรือ Y_3 เพราะแรงเสียดระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองไม่คงที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งการหมุนของท่อนั้นแบบและช่วงการเคลื่อนที่ของจักร

สมการที่นำเสนอในบทความนี้ สามารถปรับใช้ได้กับท่อนทุกขนาด เพราะสมการ Helix ที่สร้างบนพื้นผิวท่อนต้องเป็นตามการกำหนดขนาด R และ r ด้วยเช่นกัน ระยะ L ที่เหมาะสมกับท่อนขนาดอื่นก็สามารถคำนวณด้วยวิธีเดียวกันกับที่นำเสนอไป

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) ซึ่งเป็นแกนท่อนต้นแบบหมุน จะทำให้ตัวแปรตามอื่นๆ เปลี่ยนแปลงตาม ดังรูปที่ 10 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ตำแหน่งแกน ω, X_3, Y_3 และ Z_3 ที่เปลี่ยนไปตามลำดับข้อมูล ผลการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของ

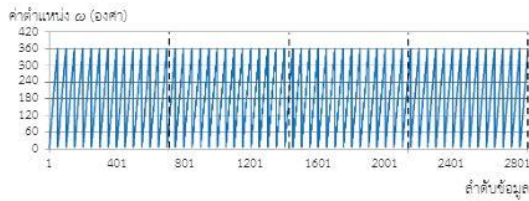
ตารางที่ 2 ระยะเคลื่อนที่ของเครื่องจักรเมื่อมุมการพันเปลี่ยนแปลง ที่ $L = 210$ มม.

มุมพัน (องศา)	ระยะเลื่อน แกน X_3 (มม.)	ระยะเลื่อน แกน Y_3 (มม.)	ระยะเลื่อน แกน 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

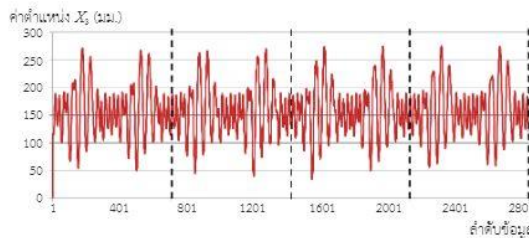
หัวปล่อยเส้นใย (รูปที่ 10) แสดงให้เห็นว่าการหมุนแต่ละรอบของ ω ทำให้ทุกแกนเลื่อนย้ายกลับไปกลับมาตามความถี่ของตัวเอง โดยมีการเปลี่ยนช่วงการเคลื่อนที่แต่ละคาบไปที่ละน้อยและไม่ซ้ำเดิม โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรสำหรับการพันเส้นใย 4 ครั้ง มีดังนี้ ครั้งที่ 1 อยู่ในลำดับข้อมูลที่ 0–713 ครั้งที่ 2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

สมการเส้นทางเดินบนผิวท่อนโค้งและการคำนวณการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้จริงในการพัฒนาเครื่องจักรพันเส้นใยอัตโนมัติแบบ 4 แกน โดยท่อนต้นแบบที่นำมาทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่ากรณีตัวอย่างที่นำเสนอไว้ข้างต้น ขนาด R, r และพารามิเตอร์อื่นจึงถูกปรับตามค่าเงื่อนไขการทดสอบ ผลการทดสอบพันเส้นใย ดังรูปที่ 11 เป็นตัวอย่างการพันเส้นใยด้วยเครื่องจักรแบบสี่แกนที่ได้นำมาสมการจากงานวิจัยนี้ไปคำนวณ และยังคงแสดงให้เห็นลวดลายการพันที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการเส้นทางเดินของเส้นใยอย่างที่ต้องการ

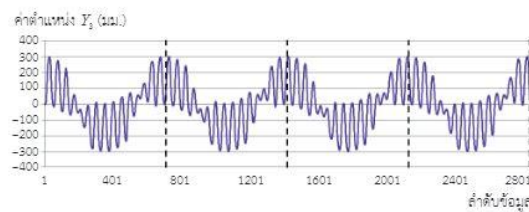
บทความนี้ได้เสนอที่มาของสมการและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในการออกแบบเครื่องจักรพันเส้นใยแบบ



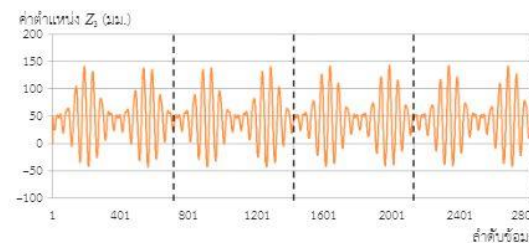
รูปที่ 10 (ก) ตำแหน่งการหมุนแกน ω



รูปที่ 10 (ข) ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน X₃



รูปที่ 10 (ค) ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน Y₃



รูปที่ 10 (ง) ตำแหน่งการเคลื่อนที่แนวแกน Z₃

สี่แกน ความถูกต้องและความคลาดเคลื่อนในการพันเส้นใยบนท่อโค้งของเครื่องจักรต้นแบบจะถูกศึกษาในลำดับต่อไป เพราะต้องมีการทดลองและทดสอบกับท่อหลายขนาด ซึ่งขนาดของเครื่องจักรที่สร้างขึ้นจะตัวเป็นกำหนดขอบเขตของขนาดท่อที่ทดสอบและตัวแปรควบคุมที่จะทำการทดลอง



รูปที่ 11 ตัวอย่างการพันเส้นใยที่ได้จากเครื่องจักรแบบสี่แกน

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพสิตจากสมการ Helix ที่เป็นการรวมกันของเส้นทางเดินบนผิวท่อทรงทอรัสและท่อทรงกระบอก พบว่าสมการที่นำเสนอสามารถใช้เป็นเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งได้และสามารถนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นเพื่อคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรพันเส้นใยแบบ 4 แกนได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างเส้นเดินทางของเส้นใยบนผิวท่อกับตัวแปรของเครื่องจักร ผลการจำลองพบว่าระยะเลื่อนของแกนเครื่องจักรตามแกน X₃, Y₃ และ Z₃ ขึ้นกับระยะ L จากหัวปล่อยเส้นใยถึงผิวท่อโค้งและมีเงื่อนไขว่า L ที่สามารถนำมาออกแบบเครื่องจักรได้ ต้องมีค่าระยะเลื่อนตามแกน X₃ น้อยที่สุด ต้องมากกว่าระยะขอบท่อ b และค่ามุมการพัน β แปรผกผันกับระยะเลื่อนของเครื่องจักรตามแกน X₃ ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบเครื่องพันเส้นใยแก้วสำหรับท่อโค้งที่มีขนาดต่างกันได้ดังแสดงในผลการทดสอบกับเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้น

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).

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายชฤต ชูอ่อนสกุล

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5810120024

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2014

ทุนการศึกษา

1. ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ปี 2559
2. สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) และสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.)

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

วิศวกร บริษัท ออมรอนอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ชฤต ชูอ่อนสกุล และ พุทธิกร สมิตไมตรี, “การหาเส้นทางการพันเส้นใยบนท่อโค้งคอมโพลิตสำหรับเครื่องพันเส้นใยอัตโนมัติ,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 29, ฉบับที่ 2, หน้า 259-269, เม.ย.-มิ.ย. 2562