



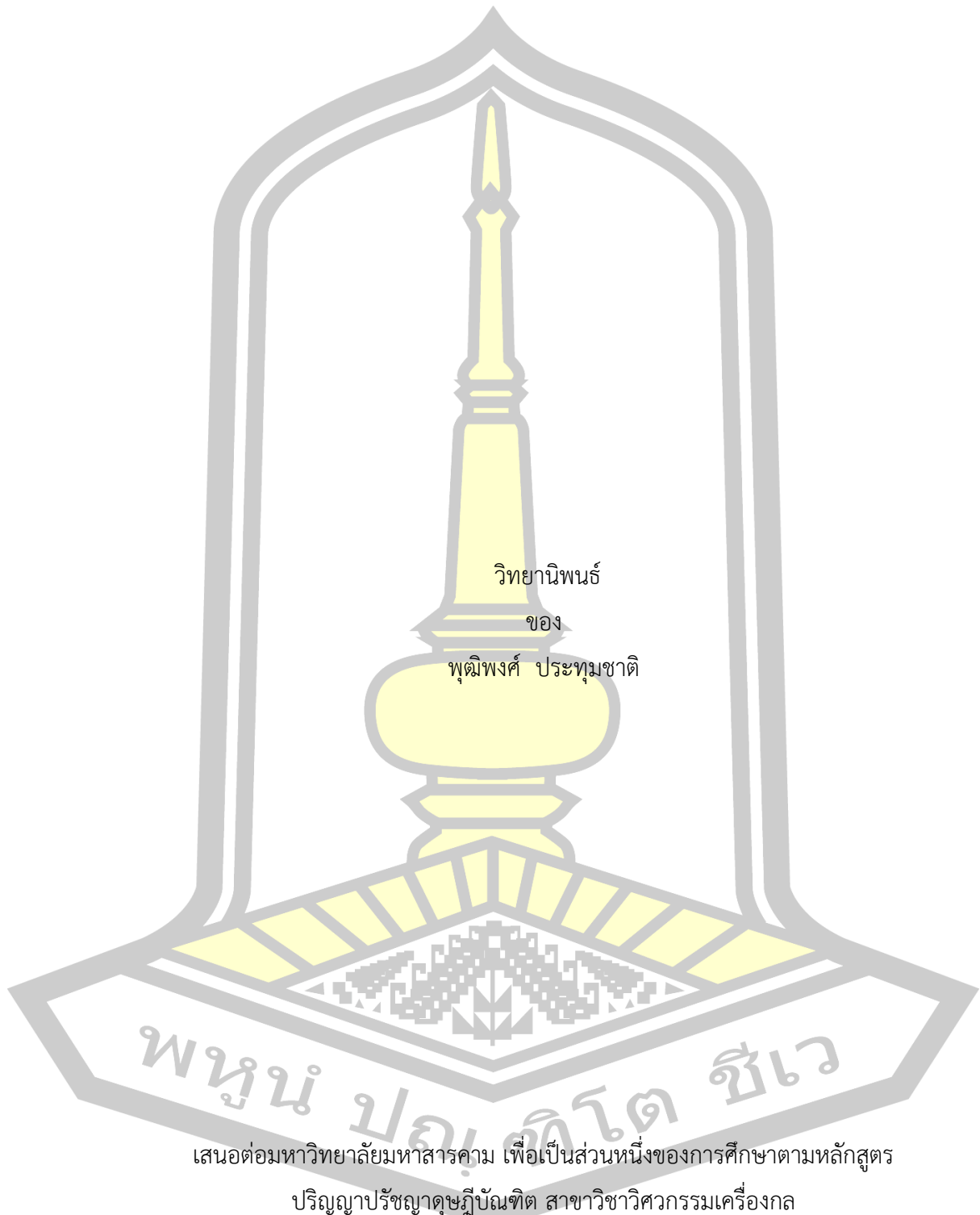
วิธีการใหม่สำหรับคอมพิวเตอร์ช่วยในการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างผ้าทอ

วิทยานิพนธ์
ของ
พุดมพงศ์ ประทุมชาติ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สิงหาคม 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

วิธีการใหม่สำหรับคอมพิวเตอร์ช่วยในการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างผ้าทอ



วิทยานิพนธ์
ของ
พุดิพงษ์ ประทุมชาติ

พุดิพงษ์ ประทุมชาติ ชีวะ

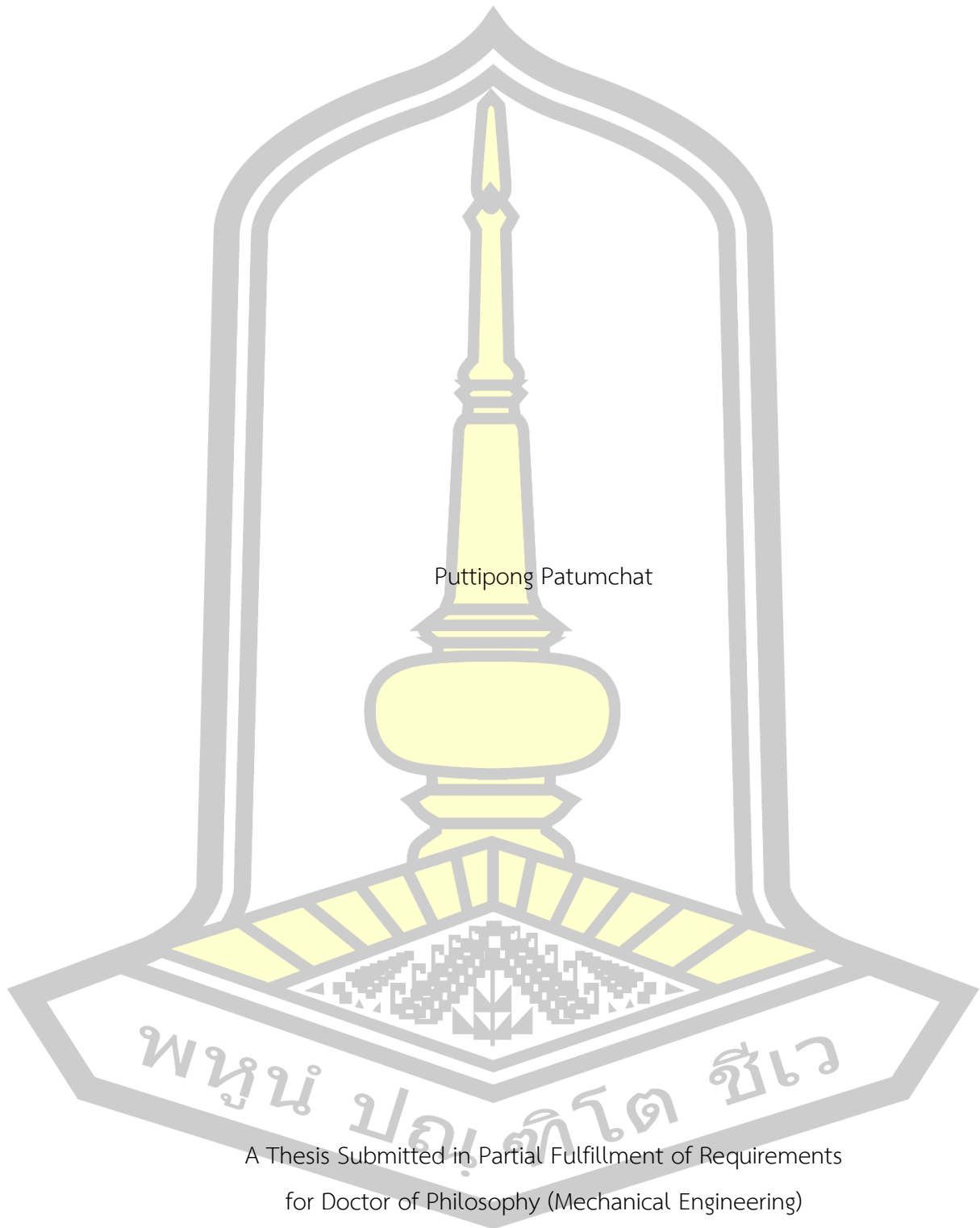
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สิงหาคม 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

New Computer Aided Modeling Approach of Woven Fabrics Structures



Puttipong Patumchat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

August 2019

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายพุดผิงค์ ประทุมชาติ
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. คณิศร ภูนิคม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รศ. ดร. สุตสาคร อินริเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. ยศฐา ศรีเทพ)

กรรมการ

(รศ. ดร. บพิศ บุปผโขติ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. อรุมา ลาสุนนท์)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	วิธีการใหม่สำหรับคอมพิวเตอร์ช่วยในการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างผ้าทอ		
ผู้วิจัย	พุดพิงศ์ ประทุมชาติ		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป รองศาสตราจารย์ ดร. สุตสาคร อินธิเดช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยศฐา ศรีเทพ		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการใหม่สำหรับการสร้างแบบจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ บนพื้นฐานแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของโครงสร้างผ้าทอของ เพียร์ซ ร่วมกับแบบจำลองแนวเส้นด้าย อาร์ค แอบซิสซา (เพียร์ซ) โมเดล เริ่มจากการสร้างเส้นด้ายเดี่ยวที่สมบูรณ์มีเส้นใยหลาย ๆ เส้นบิดตัวกันเป็นเกลียวในเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งที่มีลักษณะโค้งลดขึ้นลงตามลายทอผ้าชนิดต่าง ๆ ภาพหน้าตัดของเส้นด้ายจะถูกสร้างขึ้นตามทฤษฎี เวอซเวลโลเคชั่น เพื่อกำหนดตำแหน่งของเส้นใยที่อยู่บนหน้าตัดของเส้นด้าย ภาพหน้าตัดเส้นใยในเส้นด้ายจะหมุนบิดเป็นเกลียวไปตามความยาวของเส้นด้ายตามค่ามุมเกลียวที่กำหนด แนวเส้นโค้งของเส้นใยถูกสร้างขึ้นจากการคำนวณหาความโค้งและเชื่อมต่อกันระหว่างหน้าตัดของเส้นใยด้วยวิธีการเนิร์ป เส้นใยแต่ละเส้นจะถูกลากกวาดไปในลักษณะปลายปิดไปตามแนวเส้นด้ายเพื่อสร้างเป็นเส้นด้ายแล้วนำมาประกอบกันเป็นผืนผ้าในรูปแบบแค็ตโมเดล ภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอที่ถูกสร้างขึ้นจะแสดงรายละเอียดของผ้าได้ชัดเจนสมจริงและยังสามารถสร้างโครงสร้างผ้าทอที่มีความซับซ้อนได้หลากหลายชนิด ในงานวิจัยนี้ ยังได้นำเสนอภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอชนิดสองและสามชั้น ผ้าทอหลายทแยงชนิด 2×2 2×1 และ 3×1 ในสภาวะของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งที่มีลักษณะเบ้เอียงไม่ตั้งฉากกัน ด้วยระเบียบวิธีการดังกล่าวเหล่านี้เป็นการเอื้อให้เกิดการพัฒนาต่อยอดสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงกลของผ้าทอในขั้นสูงต่อไปเช่น ผ้าที่ใช้วัสดุคอมโพสิต เป็นต้น

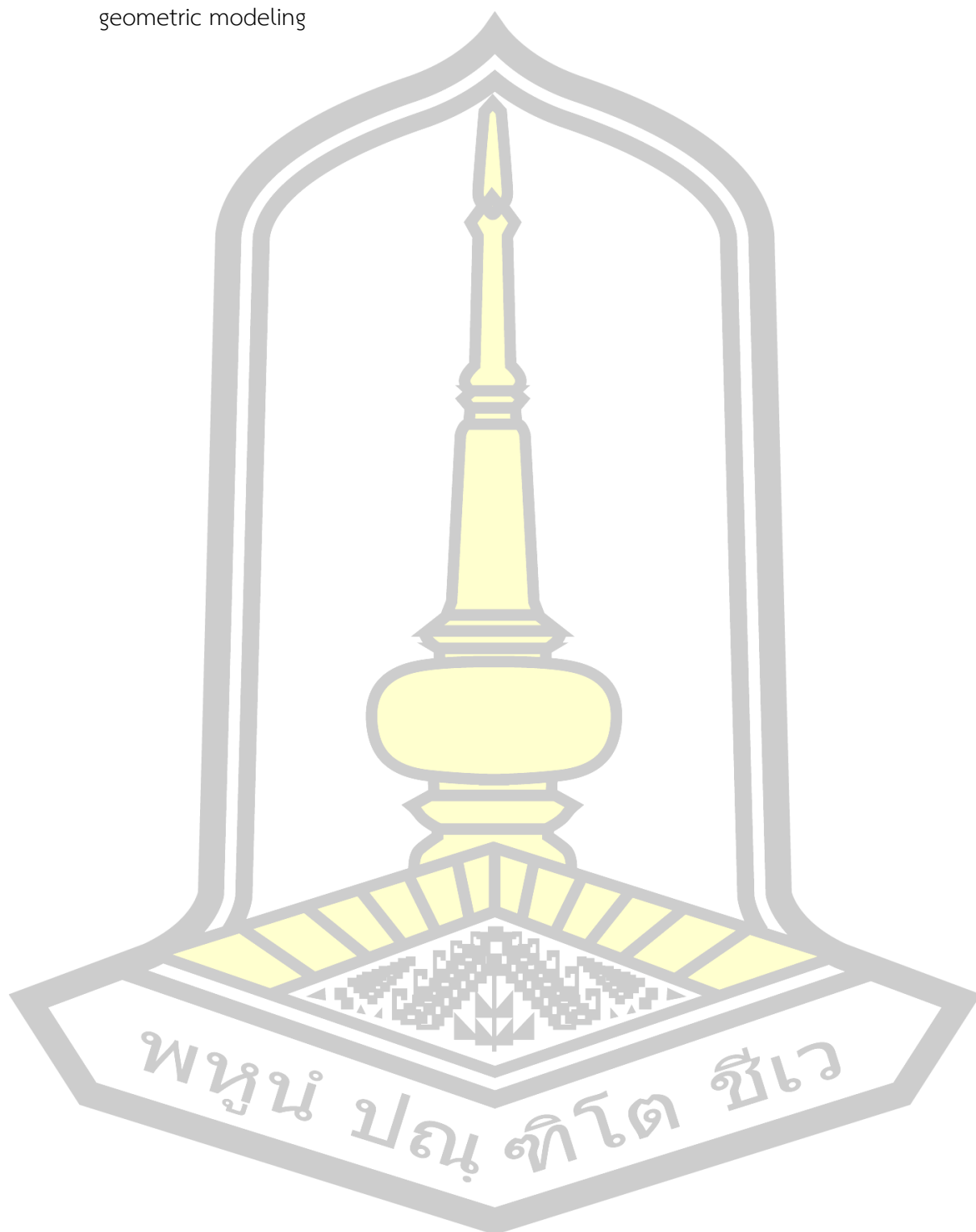
คำสำคัญ : โครงสร้างผ้าทอ, คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ, รูปแบบการประกอบเส้นใย, รูปแบบเชิงเรขาคณิต

TITLE	New Computer Aided Modeling Approach of Woven Fabrics Structures		
AUTHOR	Puttipong Patumchat		
ADVISORS	Associate Professor Keartisak Sriprateep , Ph.D. Associate Professor Sudsakorn Inthidech , Ph.D. Assistant Professor Yottha Srithep , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2019

ABSTRACT

This paper presents a new computer geometric modeling approach for three-dimensional woven fabric structures. Peirce's geometry of the weave fabric of yarn from an arc abscissa (Peirce's) model is presented. Then, new algorithms with a filament assembly model for a single yarn composed of many filaments by twisting along the crimp shape in the warp/weft is developed. The concept of a virtual location is used to simulate the fiber distributions in the yarn cross-section. Each cross-section is rotated along the yarn length by a pre-determined amount to allow for the yarn twist. The curve of each filament in each two successive cross-sections is approximated by NURBS and then each curve is created by sweeping a closed curve along the centerline of the yarn path. In this study, The approach described is demonstrated in 3D CAD for of 2 - 3 Layers for woven fabric structure and 2x1, 2x2 and 3x1 twill woven fabrics structures by using the geometric parameters considering their inherent skewness. The simulated woven fabrics using this approach can demonstrate a wider variety and improved visual simulations of real woven fabric and can then be further generalized for different and more complicated fabrics. The method is necessary as an input to many computational models, such as the composite parts.

Keyword : woven fabric structures, computer-aided design, filament assembly model, geometric modeling



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ซึ่งกรุณาให้ความรู้คำแนะนำเอาใจทุก ๆ ขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์ ทั้งในการดำเนินงาน การเขียนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการให้วิชาความรู้และแก้ไขปัญหาต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงสำเร็จไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร ภูนิคม ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกที่ได้เสียสละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.สุตสาคร อินธิเดช รองศาสตราจารย์ ดร.บพิช บุปผโชติ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยศฐา ศรีเทพ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาโท โท ตรี ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้าน ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเอกสารและทางด้านเครื่องมืออุปกรณ์ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนเป็นกำลังใจในการศึกษาตลอดมา รวมถึงผู้ที่ไม่สามารถกล่าวชื่อนามได้ทั้งหมดที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือด้วยความเต็มใจอย่างยิ่ง ประโยชน์และคุณความดีจากงานวิจัยทั้งหมดนี้ ผู้ทำวิทยานิพนธ์ขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ ที่มีส่วนให้ชีวิตและปัญญาแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์จนประสบผลสำเร็จ

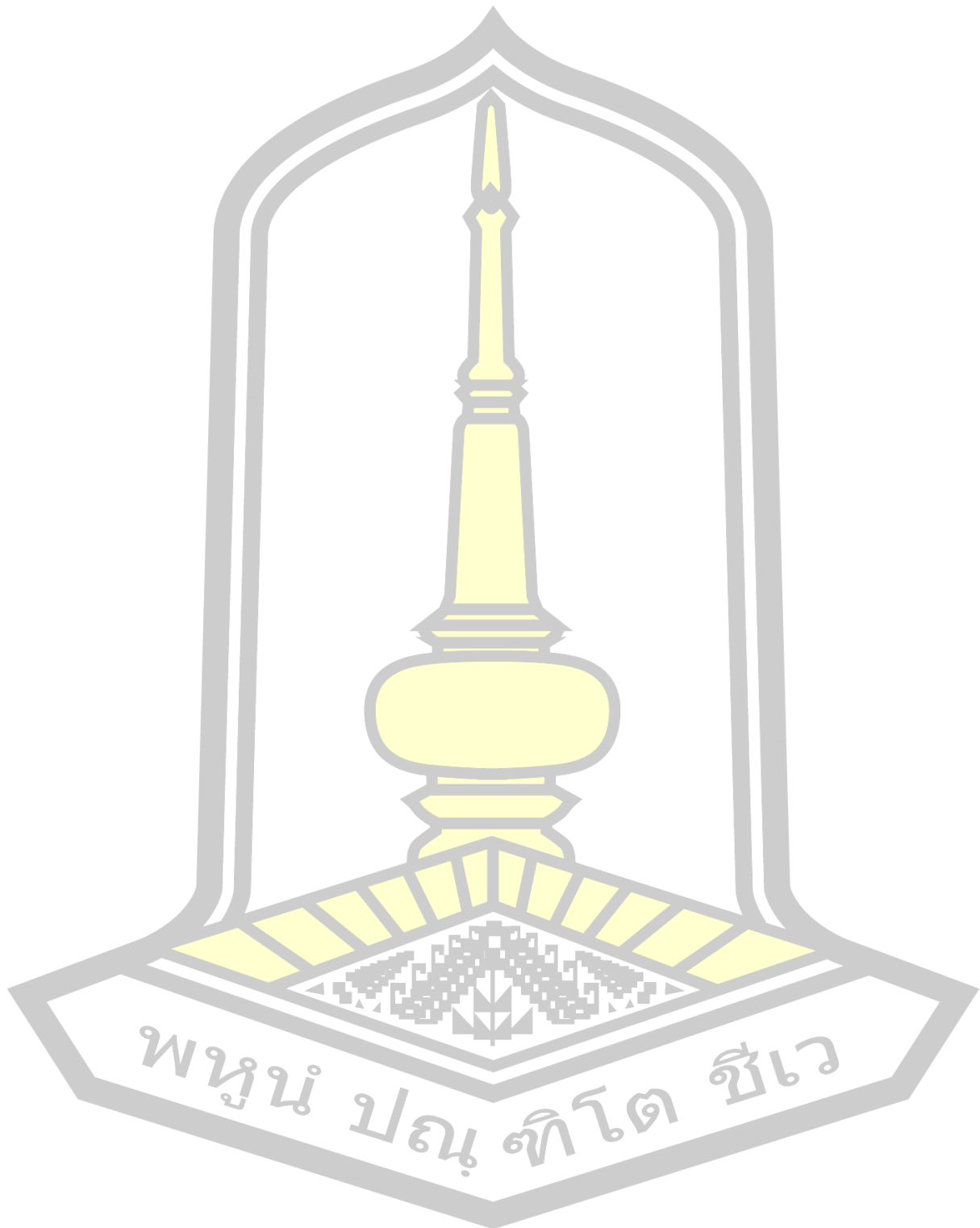
พุดพิงศ์ ประทุมชาติ

พูนัน ปณฺ ทิโต ชีเว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ความสำคัญของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ	6
บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	9
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโครงสร้างผ้า.....	9
2.2 พารามิเตอร์ของผ้าทอ.....	19
2.3 แบบจำลองโครงสร้างผ้าเชิงเรขาคณิตของเพียช (Peirce's model).....	21
2.4 พื้นที่เสมือนจริงของเส้นใย (Virtual location of fibers).....	24
2.5 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตของความหยิกงอเส้นด้าย	26
2.6 รูปแบบโครงสร้างผ้าทอแบบหลายชั้น (Multi-layered woven fabric: MLWF)	31
2.7 รูปแบบโครงสร้างผ้าทอลายทแยงในแบบ skewness	33

2.8 รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 มิติ ของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่ง.....	36
2.9 คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ CAD สำหรับโครงสร้างผ้าทอ.....	38
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	45
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงสร้างผ้าทอ.....	46
3.2 แบบจำลองสำหรับโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 1 x 1 (plain weave).....	47
3.4 แบบจำลองสำหรับโครงสร้างผ้าทอลายทแยง (twill weaves).....	51
3.5 แบบจำลองสำหรับโครงสร้างผ้าทอแบบหลายชั้น (Multi-layered woven fabric).....	53
3.6 แบบจำลองสำหรับโครงสร้างผ้าทอแบบ skewness.....	54
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	58
4.1 ผลการสร้างรูปแบบภาพจำลองสามมิติของเส้นด้าย.....	58
4.2 ผลการสร้างรูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอ.....	61
4.3 ผลการสร้างรูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง.....	66
4.4 ผลการสร้างรูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอลายแบบหลายชั้น.....	73
4.5 ผลการสร้างรูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงในแบบ skewness....	77
4.6 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลของการสร้างภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้า.....	83
บทที่ 5 บทสรุป.....	92
5.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	92
5.2 สรุปผล.....	92
5.3 อภิปรายผล.....	93
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	96
บรรณานุกรม.....	98
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก การสร้างแบบจำลองโครงสร้างผ้าทอโดยใช้ CAD.....	101



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 การคำนวณ Open packing ของเส้นใยในเส้นด้าย	12
ตาราง 2.2 การคำนวณ Close packing ของเส้นใยในเส้นด้ายที่เป็นหกเหลี่ยม	13
ตาราง 3.1 พิกัดของแนวเส้นด้ายยืนที่ตำแหน่ง A – K บนระนาบ XYZ ของโครงสร้างผ้าทอหลายแยง ชนิด 2 × 2 แบบ skewness	55
ตาราง 3.2 พิกัดของแนวเส้นด้ายยืนที่ตำแหน่ง A – I บนระนาบ XYZ ของโครงสร้าง ผ้าทอหลายแยง ชนิด 3 × 1 แบบ skewness	56
ตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างรูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอ	61
ตาราง 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของเส้นด้ายบนพื้นฐานของ virtual location	62
ตาราง 4.3 รูปแบบของสมการและตำแหน่งแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอหลายขัดชนิด 1 × 1.....	64
ตาราง 4.4 รูปแบบของสมการและตำแหน่งแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอหลายขัดชนิด 2 × 2.....	66
ตาราง 4.5 รูปแบบของสมการและตำแหน่งแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอหลายแยงชนิด 2 × 1 ..	68
ตาราง 4.6 รูปแบบของสมการและตำแหน่งแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอหลายแยงชนิด 2 × 2 ..	70
ตาราง 4.7 รูปแบบของสมการและตำแหน่งแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอหลายแยงชนิด 3 × 1 ..	72
ตาราง 4.8 กำหนดข้อมูลเบื้องต้นในการสร้างภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอในลักษณะ skewness....	78
3 รูปแบบของสมการและตำแหน่งแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอหลายขัดชนิด 1 × 1.....	104

พหุ ประถมศึกษา

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 เส้นใยผ้าจากกล้องกำลังขยายสูง.....	9
ภาพประกอบ 2.2 ภาพหน้าตัด open packing ของเส้นด้ายที่มีเส้นใยวงกลมบรรจุอยู่ในชั้นเลเยอร์ที่ 2 และ 3 และลักษณะวงกลม 4 ชั้นของเลเยอร์ที่ใช้จุดศูนย์กลางร่วมกัน.....	10
ภาพประกอบ 2.3 (a) หน้าตัดหกเหลี่ยม close-packing ของเส้นด้ายที่มีสามเลเยอร์ (b) หน้าตัดหกเหลี่ยม close-packing ที่บรรจุเส้นใยจำนวน 169 เส้น และส่วนของเส้นใยในชั้นเลเยอร์ขอบนอกที่ 8 และ 9.....	13
ภาพประกอบ 2.4 (a) เรขาคณิตของเกลียวเส้นด้ายที่สมบูรณ์แบบ (b) ภาพแผ่นคลี่ทรงกระบอก แสดงรัศมีของเกลียว (c) ภาพแผ่นคลี่แสดงรัศมีของเกลียวที่พื้นผิวชั้นนอกสุด.....	14
ภาพประกอบ 2.5 ลักษณะการขัดสานกันของด้ายพุ่ง (Weft yarn) และด้ายยืน (Warp yarn).....	15
ภาพประกอบ 2.6 (a) การทอลายขัด (b) ผ้าทอลายขัด.....	16
ภาพประกอบ 2.7 (a) การทอลายทแยง (b) ผ้าทอลายทแยงขวา (c) ผ้าทอลายทแยงซ้าย.....	17
ภาพประกอบ 2.8 (a) การทอลายตัวน (b) ผ้าทอลายตัวน.....	18
ภาพประกอบ 2.9 ความยาวของด้ายก่อนทอ (L), ความยาวของผ้าผืน (S).....	20
ภาพประกอบ 2.10 แบบจำลองของ Peirce แสดงผ้าทอลายขัด.....	22
ภาพประกอบ 2.11 (a) ภาพหน้าตัดของเส้นใยใน virtual location ที่เป็นวงรี (b) ตำแหน่งของเส้นใยใน virtual location ที่เป็นวงรี.....	24
ภาพประกอบ 2.12 แบบจำลอง arc abscissa model (a) square, (b) unbalanced fabrics....	27
ภาพประกอบ 2.13 เส้นโค้งรูปคลื่นไซน์ (a) แนวเส้นด้ายยืน (b) แนวเส้นด้ายพุ่ง.....	29
ภาพประกอบ 2.14 (a) รูปแบบภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอแบบสามชั้น (b) รูปแบบภาพตัดขวางของโครงสร้างผ้าทอแบบสามชั้น.....	32
ภาพประกอบ 2.15 แสดงแรงที่กระทำต่อเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2x1.....	34
ภาพประกอบ 2.16 ภาพ Projection ของแนวเส้นด้ายบนระนาบ XZ.....	36
ภาพประกอบ 3.1 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย.....	45

ภาพประกอบ 3.2 ภาพหน้าตัดของเส้นด้ายและเส้นใยในแต่ละเลเยอร์	46
ภาพประกอบ 3.3 แบบจำลองโครงสร้างผ้าทอลายขัด.....	47
ภาพประกอบ 3.4 แบบจำลองโครงสร้างผ้าทอลายขัด 2 × 2.....	49
ภาพประกอบ 3.5 แบบจำลองโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×1 twill weaves.....	51
ภาพประกอบ 3.6 แบบจำลองโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×2 twill weaves.....	51
ภาพประกอบ 3.7 แบบจำลองโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3×1 twill weaves.....	52
ภาพประกอบ 3.8 รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบสองชั้น	53
ภาพประกอบ 3.9 รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบสามชั้น.....	54
ภาพประกอบ 3.10 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง ชนิด 2 × 2 แบบ skewness.....	55
ภาพประกอบ 3.11 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง ชนิด 3 × 1 แบบ skewness.....	56
ภาพประกอบ 3.12 การดำเนินการสร้างภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอลายโครงสร้าง ผ้าทอลายทแยงแบบ skewness	57
ภาพประกอบ 4.1 แสดงภาพตัดขวางของเส้นด้ายในรูปแบบของ CAD model.....	59
ภาพประกอบ 4.2 รูปแบบ CAD model ของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าแบบ unbalanced fabrics (a) โครงสร้างพื้นผ้าแบบ unbalanced fabrics ในมุมมอง isometric (b) โครงสร้างพื้นผ้าแบบ unbalanced fabrics ในมุมมอง top view (c) โครงสร้างพื้นผ้าแบบ unbalanced fabrics ในมุมมอง front view (d) และ (e) ภาพตัดแสดงแนวแกนเส้นด้ายพุ่งและเส้นด้ายยืน	60
ภาพประกอบ 4.3 รูปแบบ CAD model ของโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 1 × 1 (isometric).....	62
ภาพประกอบ 4.4 รูปแบบ CAD model ของโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 1 × 1 (top view).....	63
ภาพประกอบ 4.5 รูปแบบ CAD model ของโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 1 × 1 (front view).....	63
ภาพประกอบ 4.6 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของแนวเส้นด้ายยืนในลายขัดชนิด 1 × 1	63
ภาพประกอบ 4.7 รูปแบบ CAD model ของโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 2 × 2 (isometric).....	64
ภาพประกอบ 4.8 รูปแบบ CAD model ของโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 2 × 2 (top view)	65

ภาพประกอบ 4.9	รูปแบบ CAD model ของโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 2 x 2 (front view).....	65
ภาพประกอบ 4.10	ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของแนวเส้นด้ายยืนในลายขัดชนิด 2 x 2.....	65
ภาพประกอบ 4.11	รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 1 (isometric).....	67
ภาพประกอบ 4.12	รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 1 (top view)	67
ภาพประกอบ 4.13	รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 1 (front view).....	68
ภาพประกอบ 4.14	ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของแนวเส้นด้ายยืนในลายทแยงชนิด 2 x 1.....	68
ภาพประกอบ 4.15	รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 2 (isometric).....	69
ภาพประกอบ 4.16	รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 2 (top view)	69
ภาพประกอบ 4.17	รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 2 (front view).....	70
ภาพประกอบ 4.18	ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของแนวเส้นด้ายยืนในลายทแยงชนิด 2 x 2.....	70
ภาพประกอบ 4.19	รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3 x 1 (isometric).....	71
ภาพประกอบ 4.20	รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3 x 1 (top view)	71
ภาพประกอบ 4.21	รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3 x 1 (front view).....	72
ภาพประกอบ 4.22	ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของแนวเส้นด้ายยืนในลายทแยงชนิด 3 x 1.....	72
ภาพประกอบ 4.23	รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบ 2 ชั้น (isometric)	73
ภาพประกอบ 4.24	รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบ 2 ชั้น (Top view)	74
ภาพประกอบ 4.25	รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบ 2 ชั้น (front view).....	74
ภาพประกอบ 4.26	แสดงลักษณะแนวเส้นของด้ายยืนในโครงสร้างผ้าทอ 2 ชั้น.....	75
ภาพประกอบ 4.27	รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบ 3 ชั้น (isometric)	75
ภาพประกอบ 4.28	รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบ 3 ชั้น (Top view).....	76
ภาพประกอบ 4.29	รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบ 3 ชั้น (front view).....	76
ภาพประกอบ 4.30	แสดงลักษณะแนวเส้นของด้ายยืนในโครงสร้างผ้าทอ 3 ชั้น.....	77
ภาพประกอบ 4.31	ภาพจำลอง 3D โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 1 แบบ skewness ในมุมมอง isometric view.....	79

ภาพประกอบ 4.32 ภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 × 1 แบบ skewness ในมุมมอง top view และภาพตัดขวางแสดงแนวเส้นด้ายยืนและพุ่ง.....	79
ภาพประกอบ 4.33 ภาพจำลอง 3D โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 × 2 แบบ skewness ในมุมมอง isometric view.....	80
ภาพประกอบ 4.34 ภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 × 2 แบบ skewness ในมุมมอง top view และภาพตัดขวางแสดงแนวเส้นด้ายยืนและพุ่ง.....	81
ภาพประกอบ 4.35 ภาพจำลอง 3D โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3 × 1 แบบ skewness ในมุมมอง isometric view.....	82
ภาพประกอบ 4.36 ภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง 3 × 1 แบบ skewness ในมุมมอง top view และภาพตัดขวางแสดงแนวเส้นด้ายยืนและพุ่ง.....	82
ภาพประกอบ 4.37 เปรียบเทียบรูปแบบภาพจำลองของเส้นด้าย.....	83
ภาพประกอบ 4.38 เปรียบเทียบรูปแบบภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าจากงานวิจัยที่ผ่านมา (a) จากงานวิจัยของ Adanur and Liao. (1998) (b) จากงานวิจัยของ Jiang and Chen. (2005) (c) จากงานวิจัยในครั้งนี้.....	84
ภาพประกอบ 4.39 เปรียบเทียบ 3D CAD ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง skewness ชนิด 2 × 1 ในมุมมอง isometric view (a) จากงานวิจัยของ Turan and Okur (2013) (b) จากงานวิจัยในครั้งนี้.....	86
ภาพประกอบ 4.40 เปรียบเทียบ 3D CAD ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง skewness ชนิด 2 × 1 ในมุมมอง top view (a) จากงานวิจัยของ Turan and Okur (2013) (b) จากงานวิจัยในครั้งนี้.....	87
ภาพประกอบ 4.41 เปรียบเทียบ 3D CAD ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง skewness ชนิด 2 × 1 ในมุมมอง top view, และภาพตัดขวางแสดงแนวเส้นด้ายยืนและพุ่ง (a) จากงานวิจัยของ Turan and Okur (2013) (b) จากงานวิจัยในครั้งนี้.....	88
ภาพประกอบ 4.42 เปรียบเทียบ 3D CAD ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง skewness ชนิด 3 × 1 ในมุมมอง isometric view (a) จากงานวิจัยของ Turan and Okur (2013) (b) จากงานวิจัยในครั้งนี้.....	89
ภาพประกอบ 4.43 เปรียบเทียบ 3D CAD ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง skewness ชนิด 3 × 1 ในมุมมอง top view, และภาพตัดขวางแสดงแนวเส้นด้ายยืนและพุ่ง (a) จากงานวิจัยของ Turan and Okur (2013) (b) จากงานวิจัยในครั้งนี้.....	90

ภาพประกอบ 4.44 เปรียบเทียบ 3D CAD ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง skewness ชนิด 2 × 2 ในมุมมอง isometric view (a) จากงานวิจัยของ Turan และ Baser (2010) (b) จากงานวิจัยในครั้งนี้ 91

ภาพประกอบ ก.1 รูปแบบ 3D CAT model หน้าตัดเส้นด้ายบนพื้นฐานของ virtual location... 102

ภาพประกอบ ก.2 การกำหนดตำแหน่งของเส้นด้ายตามโครงสร้างลายทอ 103

ภาพประกอบ ก.3 แบบจำลอง 2D โครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 1 × 1 (plain weave) 103

ภาพประกอบ ก.4 กำหนดตำแหน่งของเส้นด้ายตามโครงสร้างลายขัด..... 104

ภาพประกอบ ก.5 กำหนดตำแหน่งพิกัดของเส้นโค้งสไปลน์ 105

ภาพประกอบ ก.6 แนวเส้นโค้งสไปลน์ ตามรูปแบบ arc abscissa ชนิด square fabric..... 105

ภาพประกอบ ก.7 แนวเส้นโค้งสไปลน์ตามรูปแบบ arc abscissa ชนิด unbalanced fabrics..... 106

ภาพประกอบ ก.8 การสร้างระนาบตั้งฉากที่ปลายแนวเส้นโค้งสไปลน์..... 106

ภาพประกอบ ก.9 เส้นใยที่ถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการ sweep ไปตามแนวเส้นด้าย..... 107

ภาพประกอบ ก.10 อาศัยคำสั่ง Circular Pattern เพื่อสร้างชั้น Layer ในเส้นด้าย..... 107

ภาพประกอบ ก.11 เส้นด้ายแต่ละเส้นจะถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกัน 108

ภาพประกอบ ก.12 แบบจำลอง 3D CAD ของผ้าทอลายขัด 1 × 1 108



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

การพัฒนาความรู้และเทคโนโลยีสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอของประเทศไทยมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหลักที่สร้างรายได้ให้กับประเทศในอันดับต้น ๆ และเป็นอุตสาหกรรมที่มีความเชื่อมโยงกันตามขั้นตอนการผลิตแบบครบวงจรเริ่มตั้งแต่อุตสาหกรรมการผลิตเส้นใยและปั่นด้าย อุตสาหกรรมการถักทอและฟอกย้อม ไปจนถึงอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มและตัดเย็บเสื้อผ้าสำเร็จรูป (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2554)

จากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงชั่วอำนาจทางเศรษฐกิจที่ภูมิภาคเอเชียกำลังจะกลายเป็นตัวจักรสำคัญทางเศรษฐกิจของโลก ถือเป็นโอกาสและความท้าทายต่ออุตสาหกรรมสิ่งทอไทยที่ต้องเผชิญกับการแข่งขันที่สูงขึ้น จึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญต่อการทำวิจัยและพัฒนา (R&D) เพื่อสร้างนวัตกรรมใหม่หรือการต่อยอดการพัฒนาด้านสิ่งทอให้มากขึ้น โดยเฉพาะการทำวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต การพัฒนาคุณภาพและรูปแบบสินค้าที่เป็นแบรนด์เนมของตนเองให้เป็นที่ยอมรับของตลาด ตลอดจนการวิจัยและพัฒนาแบบของผลิตภัณฑ์ให้มีความหลากหลาย เกิดการขยายผลไปสู่ผลิตภัณฑ์สิ่งทอเฉพาะทาง (Technical textiles) ซึ่งได้แก่ เช็มขัดนิรภัย สายพานลำเลียง ผ้าทนไฟ หรือเส้นหลอดเลือดเทียม เป็นต้น ผลิตภัณฑ์สิ่งทอเฉพาะทางเป็นอุตสาหกรรมการผลิตสิ่งทอสมัยใหม่ที่กำลังเติบโตอย่างรวดเร็วมีส่วนแบ่งทางการตลาดที่กำลังขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น อุตสาหกรรมสิ่งทอของประเทศไทยจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญต่อการวิจัยและพัฒนาให้เกิดขึ้นในประเทศ ควบคู่ไปพร้อมกับการปฏิบัติตามเงื่อนไขกฎระเบียบสากล เช่น มาตรฐานการผลิต (ISO 9000) มาตรฐานสิ่งแวดล้อม (ISO 14000) และมาตรฐานการจ้างงาน (SA 8000) เป็นต้น จึงจะทำให้อุตสาหกรรมสิ่งทอของไทยสามารถปรับตัวให้รอดอย่างยั่งยืนท่ามกลางภาวะการแข่งขันทางเศรษฐกิจของโลกที่เปลี่ยนไป

ในบรรดาผลิตภัณฑ์สิ่งทอที่ประเทศไทยผลิตได้ ผ้าทอนับว่าเป็นสินค้าที่มีส่วนแบ่งในตลาดสูง การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผ้าทอให้มีคุณภาพและเป็นที่ยอมรับ จำเป็นต้องทราบหรือทำนายสมบัติของผ้าทอที่แม่นยำเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่มีความหลากหลายและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

สมบัติของผลิตภัณฑ์สิ่งทอจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้างหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างทางเคมีหรือทางกายภาพของเส้นใย หรือลักษณะการเรียงตัวกันของเส้นใยที่ประกอบกัน

เป็นเส้นด้าย ตลอดจนรูปร่างลักษณะของเส้นด้ายที่ขัดสานกันตามกระบวนการทอเพื่อสร้างเป็นผืนผ้า ซึ่งลักษณะเหล่านี้สามารถนำมาอธิบายหรือทำนายสมบัติในการใช้งานของผลิตภัณฑ์สิ่งทอได้ (Hearle et al., 1969) การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของเส้นใยและเส้นด้ายได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางมาเป็นเวลานานจนถึงปัจจุบัน เช่นงานวิจัยของ Schwarz, (1933); Gong et al., (2009); Kemp, (1958); Sriprateep and Bohez, (2009); Tao, (1994) Harwood et al., (1995); Li et al., (2012) และ Alamdar and Heppler, (2013) ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ได้นำเสนอเกี่ยวกับรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยและเส้นด้ายที่เปลี่ยนไปเป็นรูปร่างต่าง ๆ เมื่อมีแรงมากระทำหรือมีการย้ายตำแหน่งของเส้นใยในเส้นด้ายที่เกิดจากกระบวนการผลิตเส้นด้าย ขณะที่การวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างของผ้าผืนก็ได้มีการวิจัยและพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง เช่นงานวิจัยของ Hearle et al., (1969); Jeon, (2003); Kovar, (2011); Peirce, (1937); Fujita, (1962) และ Balakrishna et al., (1964) งานวิจัยดังกล่าวได้อธิบายถึงโครงสร้างผ้าและสมบัติของผ้าโดยการทดสอบคุณสมบัติเฉพาะอย่าง เช่น ลักษณะการเรียงตัวของเส้นด้ายผ้า หรือการหาช่องว่างระหว่างเส้นด้ายสองเส้นที่อยู่ชิดกัน ซึ่งจะเป็นการอธิบายคุณสมบัติทางแสงและสมบัติการทะลุผ่านของผ้า ตลอดจนการทดสอบการเสีรูปร่างของเส้นด้ายที่เกิดจากกระบวนการถักทอส่งผลให้ด้ายแต่ละเส้นเกิดความหยิกงอซึ่งจะเป็นการอธิบายสมบัติด้านความยาวของผืนผ้า แล้วจึงทำการสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาโดยวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีการทางด้านเรขาคณิตหรือวิธีทางฟิสิกส์

งานวิจัยที่เกี่ยวกับโครงสร้างผ้าทอที่เป็นที่ยอมรับและเป็นที่รู้จักกันมาเป็นเวลานาน และถูกนำมาใช้อ้างอิงในงานวิจัยด้านโครงสร้างผ้าทอมาจนถึงปัจจุบัน ได้แก่งานวิจัยของ Peirce (1937) ซึ่งตีพิมพ์ในวารสาร Journal of textile Institute เมื่อปี ค.ศ. 1937 งานวิจัยนี้ได้นำเสนอรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของผ้าทอหลายชนิด ที่ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยวิธีการทางเรขาคณิตเรียกว่า “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเพียร์ซ” (Peirce’s model) แบบจำลองนี้มีการนำไปใช้ในการคำนวณหาสมบัติเชิงโครงสร้างต่าง ๆ ของผ้าทออย่างแพร่หลายโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยให้สามารถผลิตผ้าทอให้มีคุณสมบัติตามความต้องการ ลดการสูญเสียเวลาและวัตถุดิบจากการทดลองทอให้น้อยลง แม้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Peirce จะเป็นที่ยอมรับและถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง แต่ก็ยังมีความยุ่งยากต่อการอธิบายสมบัติเชิงโครงสร้างของผ้าทอ เนื่องจากความยุ่งยากในการแก้ระบบสมการที่เป็นแบบสมการไม่เชิงเส้น (non-linear) อีกทั้งแบบจำลองดังกล่าวถูกสร้างขึ้นมาจากลักษณะโครงสร้างแบบสองมิติ ทำให้มีปัญหาต่อการใช้แบบจำลองเพื่ออธิบายสมบัติต่าง ๆ ของผ้าที่เกิดขึ้นจริงในภาวะต่าง ๆ

ในเวลาต่อมาจึงได้มีนักวิจัยหลายท่านได้นำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในงานวิจัยทางด้านสิ่งทอเพิ่มมากขึ้น โดยมีการนำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสิ่งทอด้วยรูปแบบของภาพจำลองสามมิติ

ที่ถูกสร้างขึ้นตามแบบจำลองเชิงเรขาคณิตหรือแบบจำลองทางฟิสิกส์ ดังเช่นงานวิจัยของ Adanur and Liao, (1998); Dash et al., (2013); Keefe et al., (1992); Lin and Newton, (1999) และ Whitney and Chou, (1989) เป็นการนำคอมพิวเตอร์มาใช้วิเคราะห์โครงสร้างของสิ่งทอด้วยภาพจำลองสามมิติซึ่งจะช่วยให้การอธิบายหรือทำนายสมบัติของสิ่งทอทำได้ง่ายขึ้น และยังสามารถสร้างภาพจำลองในเชิงรายละเอียดโดยเน้นไปที่โครงสร้างผ้าแบบต่าง ๆ ตามกระบวนการทอเป็นพื้นผ้า เช่นงานวิจัยของ Zhang et al., (2013); Rajesh et al. (2012); Turan & Okur, (2013) และ Jamshidi et al. (2014) ที่สร้างภาพจำลองของเส้นด้ายแต่ละเส้นจะถูกสร้างขึ้นด้วยหลักการทางเรขาคณิตโดยด้ายแต่ละเส้นจะมีแนวเส้นด้ายแตกต่างกันไปตามลายทอ เมื่อนำมาประกอบเข้าด้วยกัน จะได้โครงสร้างของผ้าที่ต้องการศึกษา

ดังนั้นการวิเคราะห์สมบัติของผ้าผ่านโครงสร้างผ้าจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้างผ้าที่หลากหลายประการ ดังที่กล่าวมาแล้ว และเมื่อนำลักษณะการบิดตัวกันเป็นเกลียวของเส้นใยจำนวนมากที่เกิดจากการปั่นให้เป็นเส้นด้ายและลักษณะของเส้นด้ายที่เกิดจากการขัดสานกันตามลายทอแบบต่าง ๆ มาร่วมพิจารณาด้วยแล้วก็จะเป็นการเพิ่มความเที่ยงตรงและแน่นอนต่อการวิเคราะห์สมบัติของผ้าได้ดียิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและสร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอในลักษณะสามมิติในเชิงรายละเอียด (micro-scale modeling) โดยเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองฯ ตั้งแต่ระดับเส้นใยในเส้นด้ายที่ประกอบเข้าเป็นโครงสร้างผ้าทอ การสร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าในลักษณะสามมิติจะเริ่มจากการนำทฤษฎีทางสิ่งทอและทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ร่วมกันในการสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างผ้าทอ แล้วนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาสร้างเป็นภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอ โดยประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) ภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอจะประกอบไปด้วยเกลียวของเส้นใยแต่ละเส้นที่บิดตัวเข้าด้วยกันเป็นเส้นด้ายโดยมีหน้าตัดในลักษณะวงกลม (Circular cross section) โดยการกำหนดแนวเส้นด้าย (Yarn path) ขึ้นลงตามจุดขัดสานของลายทอผ้า (Weave pattern) แต่ละชนิด และนำมาประกอบเข้าด้วยกันจะได้ภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอ เพื่อเพิ่มความเข้าใจถึงลักษณะโครงสร้างผ้าทอในเชิงรายละเอียด มีลักษณะเสมือนจริง และช่วยให้การทำนายหรือวิเคราะห์สมบัติของผ้าทอเป็นไปด้วยความเที่ยงตรงและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎีของโครงสร้างผ้าในรายละเอียดของเส้นใยและเส้นด้ายที่ประกอบกันเป็นผืนผ้า

1.2.2 เพื่อพัฒนารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาใหม่และนำไปสร้างเป็นภาพจำลองของโครงสร้างผ้าโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) โดยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works V. 2011 เพื่อนำเสนอภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอในลักษณะ 3 มิติที่มีลักษณะเสมือนจริง ที่ถูกสร้างขึ้นจากรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าที่สร้างขึ้นตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่กับแบบจำลองและภาพจำลองในงานวิจัยก่อนหน้า

1.2.4 เพื่อใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงกลของผ้าทอในขั้นสูงต่อไป

1.3 ความสำคัญของการวิจัย

โดยทั่วไปการวิเคราะห์โครงสร้างผ้าจะกระทำโดยอาศัยเครื่องมือทดสอบและการมองด้วยตาเปล่า ทำให้ต้องใช้เวลาและเกิดความผิดพลาดได้ง่าย ในงานวิจัยนี้จะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่โดยอาศัยแบบจำลองทางเรขาคณิตตามทฤษฎีโครงสร้างผ้าทอของ Peirce เป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลอง ทำให้สามารถสร้างภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอในเชิงรายละเอียดถึงระดับของเส้นใย เส้นด้าย และโครงสร้างของผ้าที่มีความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังได้ผลงานวิจัยที่สามารถนำไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ และใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษาปัจจัยในการผลิตผ้า สามารถทราบถึงแนวโน้มสมบัติของผ้าทอเพื่อให้ตรงกับความต้องการมากที่สุดก่อนที่จะทำการผลิต เป็นพื้นฐานสำหรับวิเคราะห์แบบจำลองเชิงกลของผ้าทอในขั้นสูง เพื่อให้เกิดการพัฒนาต่อยอดผลิตภัณฑ์สิ่งทอเฉพาะทางหรือ technical textiles ต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ทราบถึงแนวคิดและทฤษฎีต่าง ๆ ของแบบจำลองโครงสร้างผ้า

1.4.2 ได้วิธีการและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างผ้าในรูปแบบใหม่ เพื่อนำไปใช้สร้างเป็นภาพจำลอง 3 มิติ

1.4.3 ได้ภาพจำลอง 3 มิติที่แสดงถึงรายละเอียดของเส้นใย เส้นด้าย ที่ประกอบกันเป็นโครงสร้างผ้าทอตามลักษณะของลายทอแบบต่าง ๆ ที่มีลักษณะเสมือนจริง

1.4.4 ทราบถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่นำมาเป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างผ้า และปัจจัยที่ส่งผลต่อลักษณะของภาพจำลองโครงสร้างผ้า สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์หรือการคำนวณเพื่อทำนายสมบัติของผ้าผ่านโครงสร้างผ้าได้

1.4.5 ช่วยให้สามารถผลิตผ้าทอที่มีคุณสมบัติตามความต้องการ ลดการสูญเสียเวลาและวัสดุจากการทดลองทอให้น้อยลง เป็นการเอื้อให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้านสิ่งทอต่อไป

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 สร้างภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ตามแบบจำลองของโครงสร้างผ้าทอในแบบ 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น

1.5.2 สร้างภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ เพื่อสร้างเป็นภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอที่เป็นแบบ skewness

1.5.3 ลักษณะของเส้นด้ายจะประกอบไปด้วยจำนวนเส้นใยหลาย ๆ เส้นถูกบรรจุอยู่ในภาพหน้าตัดของเส้นด้าย โดยหมุนรอบไปตามความยาวของแนวเส้นแกนกลางของเส้นด้าย (Yarn path) เส้นด้ายแต่ละเส้นจะถูกนำมาประกอบกัน (Assembly) เพื่อสร้างเป็นโครงสร้างผ้าทอตามลายทอต่าง ๆ ที่จะศึกษา

1.5.4 ลายทอที่จะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นลายทอแบบพื้นฐานแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลัก ๆ ได้แก่ ลายขัด (Plain weaves) และลายทแยง (Twill weaves) ซึ่งลายทอเหล่านี้ เป็นลายทอพื้นฐานที่สามารถดัดแปลงให้เป็นลายทอในลักษณะอื่น ๆ ที่แตกต่างกันออกไปได้หลาย ๆ แบบ ดังนั้นจึงทำการศึกษาผ้าทอลายขัดชนิด 1×1 และ 2×2 ผ้าทอลายทแยง ชนิด 2×1 , 2×2 และ 3×1

1.5.5 เส้นใยเป็นชนิดเส้นใยยาวลักษณะของโครงสร้างเส้นด้ายเป็นลักษณะโครงสร้างที่สมบูรณ์แบบ

1.5.6 ลักษณะรูปร่างของภาพหน้าตัดเส้นใยและเส้นด้ายที่ทำการศึกษามีลักษณะรูปร่างเป็นวงกลม (circular cross section)

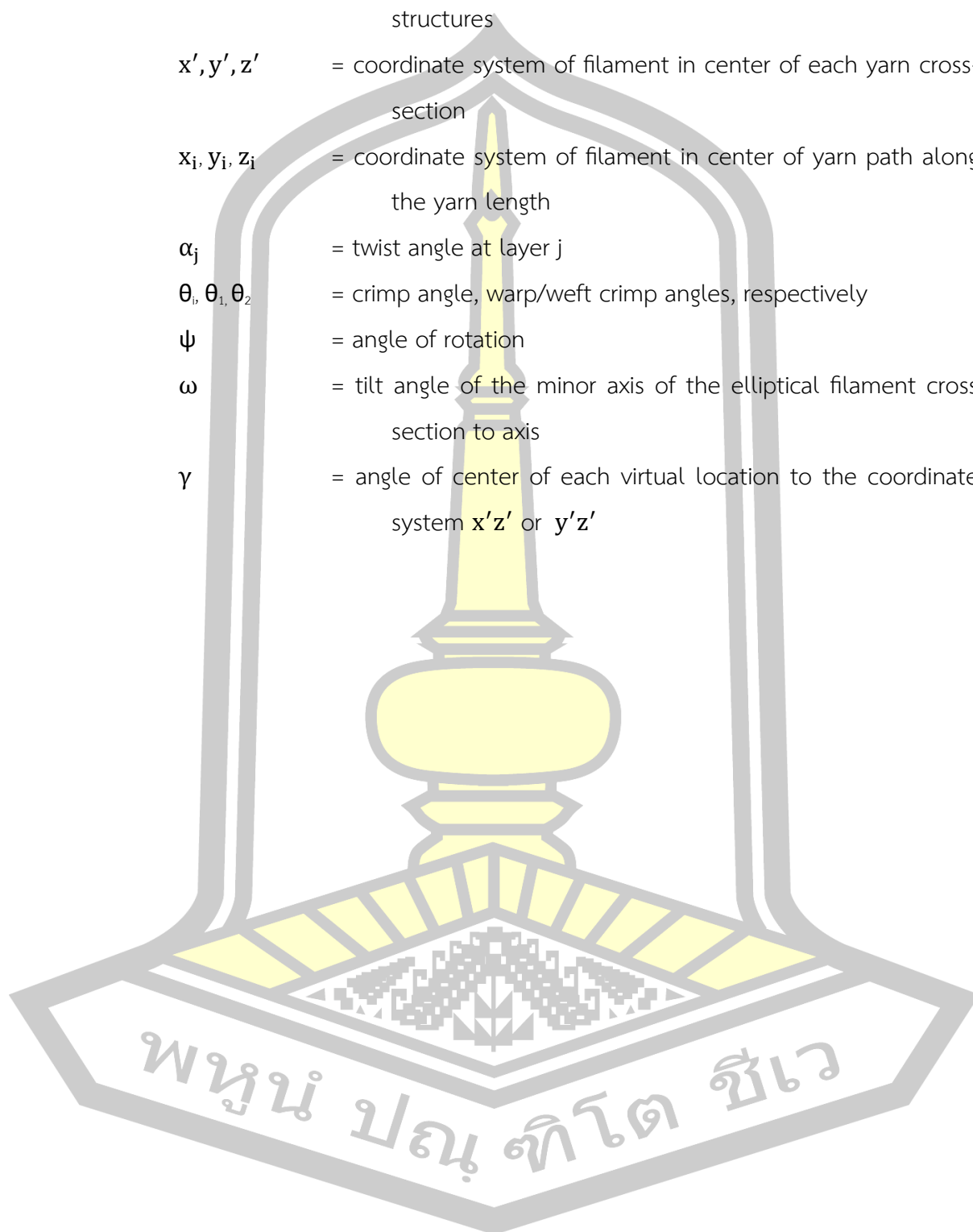
1.5.7 ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและสร้างแบบจำลอง ได้แก่ Solid Works 2011 ร่วมกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล Asus, Intel Core i5, CPU 1.8 GHz, 4 GB of RAM, 64-bit Operating System

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

a	= connected points the piecewise of arc abscissa models for a^{th} warp yarn
b	= connected points the piecewise of arc abscissa models for b^{th} weft yarn
C_1, C_2	= warp/weft crimp ratio
D	= fabric thickness
$d_f, d_f^{\min}, d_f^{\max}$	= filament diameter, minimum and maximum of filament diameter, respectively
$d_i, d_{1,i}, d_{2,i}$	= yarn diameter, warp/weft yarn diameters, respectively
d_i^x, d_i^y, d_i^z	= Coordinate system of yarn of i_{di} in X,Y and Z axis
$d_{i=2i}^x$	= coordinate system of yarn in X axis of number of yarn i_{di} of the values re even number
$d_{i=2i+1}^x$	= coordinate system of yarn in X axis of number of yarn i_{di} of the values are odd number
$f_{Nj}^{x'}, f_{Nj}^{y'}, f_{Nj}^{z'}$	= coordinates system of N^{th} filament in center of j^{th} layers on x', y', z' axis, respectively
$f_{Nj}^x, f_{Nj}^y, f_{Nj}^z$	= coordinates of N^{th} filament of j^{th} layers for i_{di} on X,Y,Z axis of woven fabric, respectively
g_i, s_i, k_i	= complementary parameters
h_j	= width of j^{th} layer
h_i, h_1, h_2	= crimp wave height, warp/weft crimp wave heights, respectively
i_{di}, i_{d1}, i_{d2}	= number of yarn, number of warp/weft yarn, respectively
j	= current ring layer
k	= degree of non-uniform rational B-spline (NURBS)
l_a	= arc length is the distance along the curve line
l_b	= length of the linear part of yarn segment
l_i, l_1, l_2	= length of arc abscissa model ($2l_a+l_b$), warp/weft length of $2l_a+l_b$, respectively

M_j	= number of virtual locations at layer j
N_1, N_2	= number of warp/weft yarn in weave repeat
N_f	= number of filaments in yarn cross section
N_z	= number of the ring layers in the yarn cross section
$p_i, p_{1,i}, p_{2,i}$	= yarn spacing, warp/weft yarn spacing, respectively
p_{1pi}, p_{2pi}	= spacing of the sinking or floating warp/weft yarns in weave fabric structure, respectively
R	= yarn radius
$\vec{r}(t)$	= point on the NURBS curve for given parameter t
$\vec{r}(\psi)$	= point on the parametric equation for given parameter ψ
$R_{ave}, R(\psi)$	= average relative radius (R_{jc}/R) and radius at ψ of migrating helix
r_f, ϕ_f	= polar coordinates of the center of the filament with respect to the center of the virtual location on axis uv
r_i	= element of the array of control points
R_j	= radius of j^{th} layer
R_{jc}	= radius of centre of j^{th} layers
R_w, R_f	= number of the connected points of piecewise for arc abscissa models in warp and weft yarns, respectively
Rd_i	= arc radius of arc abscissa model
\vec{T}	= element of the vector matrix H_0
T^x, T^y, T^z	= projection of \vec{h} on the plane
$\vec{T}_{a,b}$	= vector of distance between the yarn centerline and center plane of fabric at the crossover yarn point relative to a^{th} warp yarn and b^{th} weft yarn
t_i	= element of the knot vector
t_v, n_v	= tangent (t) and principal axis normal (n) to the yarn radius, respectively
u, v	= coordinate system of virtual location in yarn cross-section
w_i	= scaling of weights

- X, Y, Z = coordinates system of warp/weft yarn in woven fabric structures
- x', y', z' = coordinate system of filament in center of each yarn cross-section
- x_i, y_i, z_i = coordinate system of filament in center of yarn path along the yarn length
- α_j = twist angle at layer j
- $\theta, \theta_1, \theta_2$ = crimp angle, warp/weft crimp angles, respectively
- ψ = angle of rotation
- ω = tilt angle of the minor axis of the elliptical filament cross section to axis
- γ = angle of center of each virtual location to the coordinate system $x'z'$ or $y'z'$



บทที่ 2

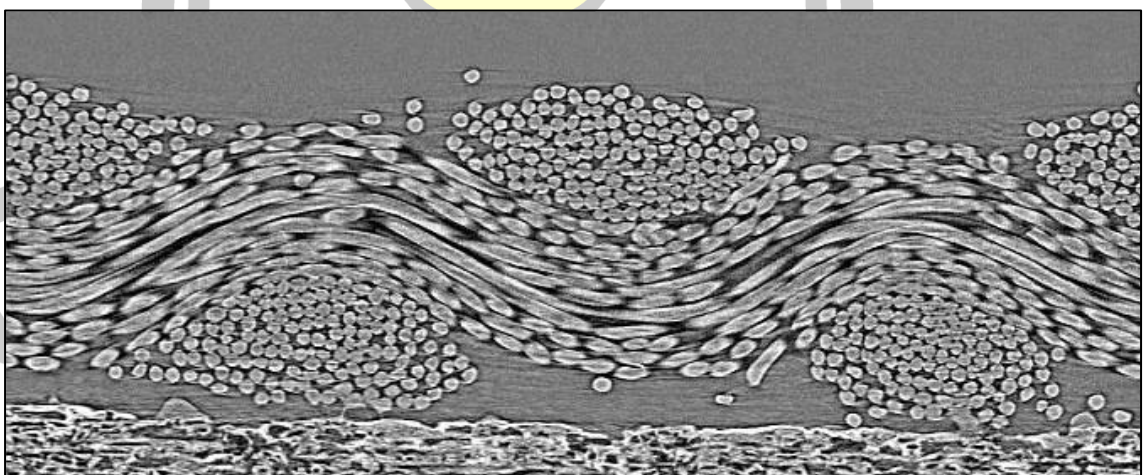
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโครงสร้างผ้า

โครงสร้างของผ้าจะประกอบไปด้วย โครงสร้างของเส้นใย โครงสร้างของเส้นด้าย โครงสร้างลายทอผ้า ประกอบเข้าด้วยกันเพื่อผลิตเป็นผืนผ้า โดยตามนิยามเดิม สิ่งทอ (Textile) จะหมายถึงเฉพาะแค่ผ้าทอเท่านั้น แต่ในปัจจุบันมีการขยายความหมายครอบคลุมถึง เส้นใย เส้นด้าย และผืนผ้า หรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจาก เส้นใย เส้นด้าย หรือจากผืนผ้าด้วย

2.1.1 โครงสร้างเส้นใย

เส้นใยสิ่งทอสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือใยจากธรรมชาติ (Natural fibers) และใยจากกระบวนการผลิตโดยมนุษย์ (Manufactured fibers) โครงสร้างทางกายภาพ หรือโครงสร้างภายนอกของเส้นใยสิ่งทอ เป็นลักษณะรูปร่างภายนอกของเส้นใยที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 100 เท่าขึ้นไป ซึ่งโครงสร้างทางกายภาพนี้ ได้แก่ ลักษณะของความยาว ความกว้าง ลักษณะผิวนอก ความมัน ความหดตัว สมบัติทางความร้อน ความฟู ความรู้สึกอันเกิดจากการสัมผัส เป็นต้น โครงสร้างทางกายภาพเหล่านี้จะมีผลต่อความสามารถในการปั่นเป็นเส้นด้าย ตลอดจนความสวยงามเมื่อผลิตเป็นผ้าผืน



ภาพประกอบ 2.1 เส้นใยผ้าจากกล้องกำลังขยายสูง

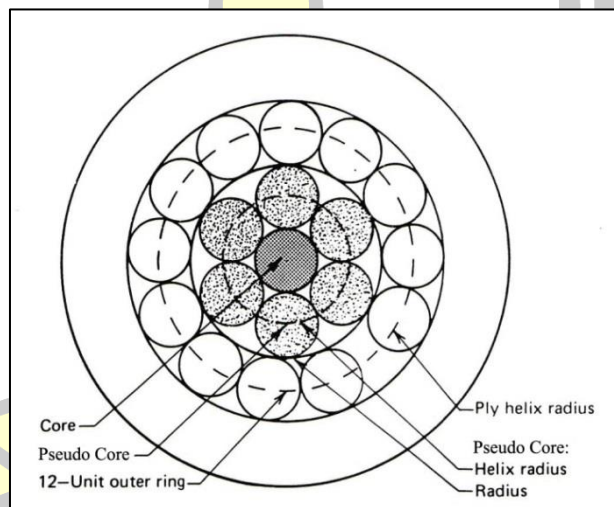
(Gong et al., 2009)

2.1.2 โครงสร้างและลักษณะภาพหน้าตัดของเส้นด้าย

ความหมายของเส้นด้าย อัจฉราพร, (2539) กล่าวว่า เส้นด้าย หมายถึงวัสดุที่เกิดจากการที่แถบเส้นใยถูกจัดวางให้เรียงตัวขนานกันอย่างเป็นระเบียบเพื่อให้เส้นใย (Fiber) รวมตัวและยึดเกาะกันเป็นเส้นยาวต่อเนื่องกันไปตลอด มีความยาวเพียงพอและมีพื้นที่หน้าตัดค่อนข้างเล็ก การอธิบายลักษณะของภาพหน้าตัดเส้นด้ายที่ประกอบไปด้วยเส้นใยที่เป็นวงกลมบรรจุอยู่ในเส้นด้าย แบ่งได้ตามรูปแบบ ดังนี้

2.1.2.1 Open packing เป็นลักษณะของเส้นใยหลาย ๆ เส้นที่ถูกบรรจุอยู่ในภาพหน้าตัดของเส้นด้ายที่มีรูปร่างเป็นวงกลม แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.2 เส้นด้ายจะประกอบไปด้วยจำนวนเส้นใยหลาย ๆ เส้นมีรูปร่างเป็นวงกลมเรียงตัวกันเป็นวงแหวนหลาย ๆ ชั้นมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ซึ่งแต่ละชั้นวงแหวนที่มีเส้นใยบรรจุอยู่เรียกว่าเลเยอร์ (Layer) โดยเส้นใยแต่ละเส้นในแต่ละชั้นเลเยอร์จะถูกบิดเป็นเกลียว (Twist) เพื่อให้ยึดติดกันเป็นเส้นด้าย ซึ่งเลเยอร์ชั้นข้างในสุดที่จุดศูนย์กลาง คือเส้นใยเส้นแรกและมีเส้นเดียวถือเป็นแนวแกนกลางของเส้นด้ายจะนับเป็นเลเยอร์ชั้นที่

1



ภาพประกอบ 2.2 ภาพหน้าตัด open packing ของเส้นด้ายที่มีเส้นใยวงกลมบรรจุอยู่ในชั้นเลเยอร์ที่ 2 และ 3 และลักษณะวงกลม 4 ชั้นของเลเยอร์ที่ใช้จุดศูนย์กลางร่วมกัน (Hearle et al., 1969)

จากการตั้งสมมุติฐานของเส้นด้ายที่สมบูรณ์แบบ โดยกำหนดให้เส้นใยเส้นแรกจุดศูนย์กลางของเส้นด้ายซึ่งนับเป็นเลเยอร์ชั้นที่ 1 มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกยาวต่อเนื่องกันไปตามแนวแกนเส้นด้าย ถัดมาจะเป็นเลเยอร์ชั้นที่ 2 ซึ่งจะมีเส้นใยบรรจุอยู่ในชั้นเลเยอร์นี้

จำนวน 6 เส้นเรียงตัวกันเป็นวงกลมล้อมรอบเส้นใยแกนกลางหรือเลเยอร์ชั้นที่ 1 ต่อมาในชั้นเลเยอร์ที่ 3 มีเส้นใยถูกบรรจุอยู่จำนวน 12 เส้นเรียงตัวเป็นวงกลมล้อมรอบเลเยอร์ชั้นที่ 2 โดยที่มุมเกลียวของเส้นใยที่พันอยู่รอบ ๆ เลเยอร์แต่ละชั้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามลำดับชั้นของเลเยอร์ไปจนถึงเลเยอร์ชั้นนอกสุดหรือเลเยอร์ชั้นสุดท้าย ดังนั้นเส้นใยในเลเยอร์ชั้นนอกสุดจะมีมุมเกลียวที่มากที่สุด ซึ่งถือว่าเป็นมุมเกลียวของเส้นด้ายเส้นนั้น ๆ ชั้นของเลเยอร์ใด ๆ ในเส้นด้ายที่เราสนใจศึกษาเขียนแทนด้วย N_j ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 ถึง N_z โดยที่ N_z คือจำนวนของชั้นเลเยอร์ทั้งหมดในเส้นด้าย และเมื่อ N_j มีค่าเท่ากับ N_z ทำให้รัศมีเส้นรอบของวงเลเยอร์ N_j จะเท่ากับรัศมีของเลเยอร์ N_z ซึ่งเป็นเลเยอร์ชั้นนอกสุดและยังมีค่าเท่ากับรัศมีของเส้นด้าย จึงสรุปได้ว่าเมื่อรัศมี $N_j =$ รัศมี $N_z =$ รัศมีของเส้นด้าย สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$N_j = N_z = \text{radius of yarn} = R = (2N_z - 1)r_F \quad (2.1)$$

$$R_j = 2(N_j - 1)r_F \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$R = \text{รัศมีของเส้นด้าย}$$

$$R_j = \text{รัศมีของชั้นเลเยอร์; } j = 1, 2, \dots, N_z$$

$$r_F = \text{รัศมีของเส้นใย}$$

เมื่อกำหนดให้ m_j คือจำนวนเส้นใยที่เรียงตัวกันเป็นวงกลมรอบ ๆ ชั้นของเลเยอร์ โดยมีมุมที่เกิดขึ้นระหว่างจุดศูนย์กลางเส้นด้ายกับจุดศูนย์กลางเส้นใยแต่ละเส้น (γ) ที่อยู่ติดกัน การหาจำนวนเส้นใยที่มากที่สุดที่จะสามารถบรรจุได้พอดีกับพื้นที่วงแหวนในแต่ละเลเยอร์ตามขนาดของเส้นด้าย สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\gamma = (360/m_j)^\circ \quad (2.3)$$

ดังนั้น รัศมีตรงกึ่งกลางในชั้นเลเยอร์ j หรือระยะของรัศมีจากจุดศูนย์กลางเส้นด้ายถึงจุดศูนย์กลางของเส้นใย (R_{jc}) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$R_{jc} = r_F \operatorname{cosec} (180/m_j)^\circ \quad (2.4)$$

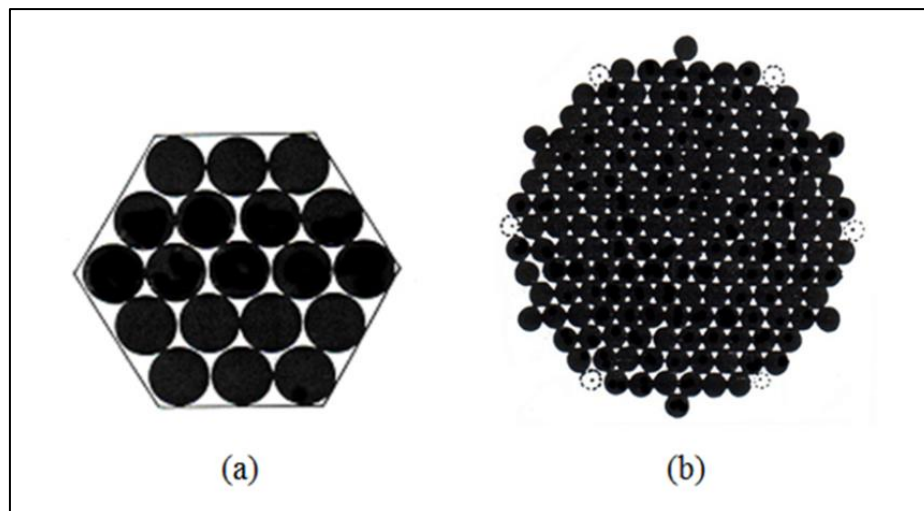
ตาราง 2.1 การคำนวณ Open packing ของเส้นใยในเส้นด้าย

Layer	Layer radius	$r_F \operatorname{cosec} (180/m_j)^\circ$	Max. no. in layer	Gap in layer	Yarn radius	Total no. of fibers
1	0	-	1	-	r_F	1
2	$2r_F$	$2r_F$ for $m_j = 6$	6	0	$3r_F$	7
3	$4r_F$	$3.86r_F$ for $m_j = 12$ $4.18r_F$ for $m_j = 13$	12	$1.12r_F$	$5r_F$	19
4	$6r_F$	$5.76r_F$ for $m_j = 18$ $6.08r_F$ for $m_j = 19$	18	$1.68r_F$	$7r_F$	37
5	$8r_F$	$7.98r_F$ for $m_j = 25$	25	$0.12r_F$	$9r_F$	62
6	$10r_F$	$9.89r_F$ for $m_j = 31$	31	$0.84r_F$	$11r_F$	93

2.1.2.2 Hexagonal close packing เป็นการบรรจุเส้นใยที่มีลักษณะรูปร่างหน้าตัดที่เป็นวงกลมจะถูกบรรจุอยู่รอบ ๆ เส้นใยเส้นเดี่ยวที่เป็นแกนกลางของเส้นด้ายโดยมีพื้นที่หน้าตัดของเส้นด้ายมีลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงเรียกว่าเป็นการบรรจุแบบปิด (close packing) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.3 ภาพหน้าตัดของเส้นใยแต่ละเส้นจะเรียงตัวชิดติดกันเป็นชั้น ๆ รอบ ๆ เส้นใยเส้นแรกที่เป็นแกนกลางของเส้นด้ายกำหนดเป็นเลเยอร์ชั้นที่ 1 ในเลเยอร์ชั้นถัด ๆ ไปจะมีจำนวนของเส้นใยที่บรรจุอยู่ในแต่ละชั้นเลเยอร์เท่ากับ $6(Nz-1)$ ซึ่งก็หมายความว่าจำนวนของเส้นใยในชั้นเลเยอร์จะเพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 6 เส้นใยในทุก ๆ ชั้นของเลเยอร์ที่เพิ่มขึ้น

ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเส้นด้ายกับจุดศูนย์กลางของเส้นใยที่มุมทั้งสองข้างบนภาพหน้าตัดเส้นด้ายแบบหกเหลี่ยมด้านเท่าสามารถคำนวณได้จาก $2(Nz-1)r_F$ และเส้นใยที่อยู่ติดกับด้านของเส้นรอบรูปหกเหลี่ยมแต่ละด้านสามารถคำนวณได้จาก $\sqrt{3}(Nz-1)r_F$ หรือมีค่าเท่ากับ $1.732(Nz-1)r_F$ ในส่วนการคำนวณหาจำนวนเส้นใยที่บรรจุอยู่ในเลเยอร์แต่ละชั้น, ความกว้างของแต่ละชั้นเลเยอร์ที่เป็นแบบหกเหลี่ยม, และจำนวนของเส้นใยทั้งหมดที่อยู่ในหน้าตัดเส้นด้ายที่เป็นหกเหลี่ยมถูกแสดงไว้ในตาราง 2.2

เมื่อจำนวนของเส้นใยในหน้าตัดเส้นด้ายที่มีรูปร่างหกเหลี่ยมด้านเท่า มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นตามชั้นของเลเยอร์ที่เพิ่มขึ้น จำนวนของเส้นใยในเลเยอร์ชั้นนอกสุดจะมีการย้ายตำแหน่งเนื่องจากกระบวนการปั่นด้ายทำให้เส้นด้ายเสียรูปทรงไปจากรูปทรงที่เป็นหกเหลี่ยม ดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 2.3 (b)

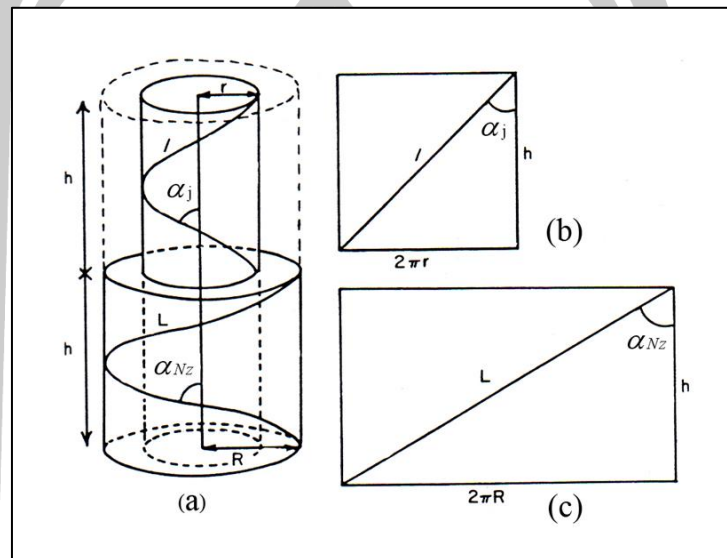


ภาพประกอบ 2.3 (a) หน้าตัดหกเหลี่ยม close-packing ของเส้นด้ายที่มีสามเลเยอร์ (b) หน้าตัดหกเหลี่ยม close-packing ที่บรรจุเส้นใยจำนวน 169 เส้น และส่วนของเส้นใยในชั้นเลเยอร์ขอบนอกที่ 8 และ 9 (Hearle et al., 1969)

ตาราง 2.2 การคำนวณ Close packing ของเส้นใยในเส้นด้ายที่เป็นหกเหลี่ยม

Layer	Distance between yarn center and fiber center		Number in layer	Total no. of fibers
	At corner	At middle of side		
1	0	0	1	1
2	$2r_F$	$1.73r_F$	5	7
3	$4r_F$	$3.46r_F$	12	19
4	$6r_F$	$5.20r_F$	18	37
5	$8r_F$	$6.93r_F$	24	61
6	$10r_F$	$8.66r_F$	30	91
7	$12r_F$	$10.4r_F$	36	127
8	$14r_F$	$12.1r_F$	42	169
9	$16r_F$	$13.9r_F$	48	217

2.1.2.3 เรขาคณิตของเกลียวเส้นด้ายที่สมบูรณ์แบบ เส้นด้ายเกิดจากกระบวนการปั่นด้ายเพื่อผลิตเป็นเส้นด้าย โดยการทำให้เส้นใยเรียงตัว และรวมตัวเข้าด้วยกันเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง เกลียวของเส้นด้าย เกิดขึ้นจากการหมุนของความยาวเวกเตอร์ต่อเนื่องกันไปตามความยาวแกนกลาง ดังนั้นเกลียวเส้นด้ายจะถูกกำหนดขึ้นจากขนาดของความยาวเวกเตอร์ที่หมุนรอบไปตามความยาวแนวเส้นด้ายอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.4



ภาพประกอบ 2.4 (a) เรขาคณิตของเกลียวเส้นด้ายที่สมบูรณ์แบบ (b) ภาพแผ่นคลี่ทรงกระบอก แสดงรัศมีของเกลียว (c) ภาพแผ่นคลี่แสดงรัศมีของเกลียวที่พื้นผิวชั้นนอกสุด (Hearle et al., 1969)

จากพื้นฐานของโครงสร้างเส้นด้ายเส้นเดี่ยว ที่มีรูปแบบทางกายภาพที่ใช้จุดศูนย์กลางและแนวแกนเส้นด้ายร่วมกันกับเกลียวเส้นด้ายดังภาพประกอบที่ 2.4 จากการตั้งสมมติฐานของเกลียวที่สมบูรณ์แบบของเส้นด้ายสามารถคำนวณหามุมของเกลียวเส้นด้ายจากสมการ ดังนี้

$$\tan \alpha = 2\pi Rjc \cdot n \quad (2.5)$$

และ

$$h = \sec \alpha = (1 + 4\pi^2 \cdot Rjc^2 \cdot n^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

เมื่อ Rjc = รัศมีจากจุดศูนย์กลางเส้นด้ายถึงจุดศูนย์กลางของเส้นใยในเลเยอร์ j

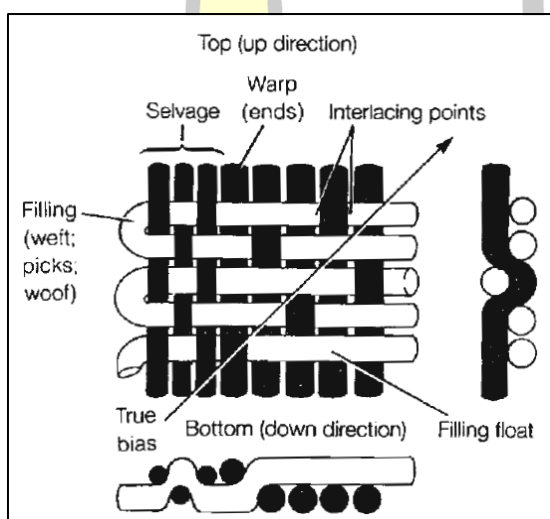
n = จำนวนของขดเกลียวต่อหน่วยความยาวแนวแกนเส้นด้าย

h = ระยะของเกลียวต่อความยาวแนวแกนเส้นด้าย

2.1.3 โครงสร้างลายทอผ้า

การทอเป็นการผลิตผ้าโดยใช้เครื่องทอผ้าเพื่อให้ด้ายสองชุดขัดสานกันในลักษณะตั้งฉาก ซึ่งการทอผ้ามีแบบและวิธีการต่าง ๆ แต่ไม่ว่าจะเป็นวิธีใดก็ตามต้องอาศัยศิลปะในการออกแบบ เทคนิคหรือเทคโนโลยีและผู้ที่มีความชำนาญเฉพาะในการทำงานจึงได้ผ้าทอที่สวยงามและมีคุณภาพ

โครงสร้างของผ้าทอประกอบด้วยเส้นด้ายตามแนวยาวของผ้าซึ่งเรียกว่า เส้นด้ายยืน (warp หรือ yarn) เส้นด้ายตามแนวขวางของผ้าซึ่งเรียกว่า “เส้นด้ายพุ่ง” (filling หรือ weft) ตามชนิดของโครงสร้างและลายทอที่ต้องการทอ อย่างไรก็ตามในทางเทคนิคมักเรียกเส้นด้ายยืนว่า “end” และเรียกเส้นด้ายพุ่งว่า “pick” เส้นด้ายยืนหรือด้ายพุ่งนี้อาจขัดกันเส้นต่อเส้นหรือรวมกลุ่มกันสองถึงสามเส้นจะขัดกันเป็นแบบธรรมดาหรือสร้างเป็นลวดลายก็ได้ (ยุพินศรี สายสีทอง, 2528)

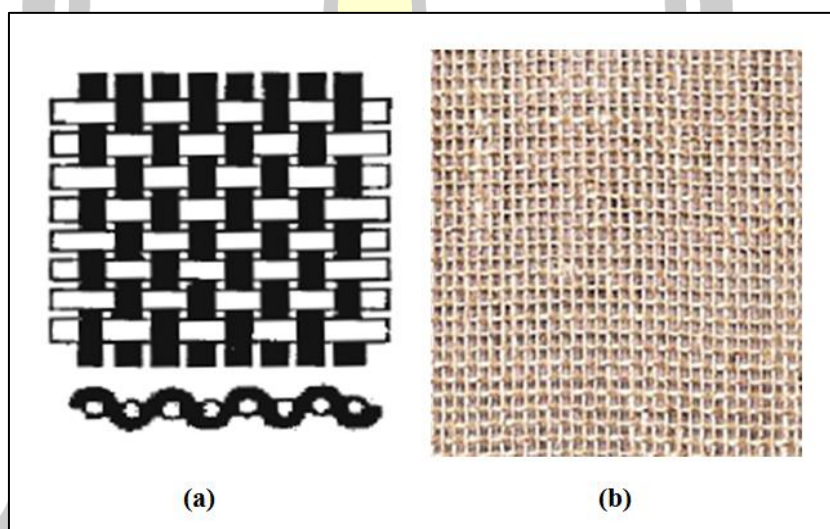


ภาพประกอบ 2.5 ลักษณะการขัดสานกันของด้ายพุ่ง (Weft yarn) และด้ายยืน (Warp yarn)
(ประณัฐ โปธิยะราช, 2549)

การทอเป็นกระบวนการผลิตผ้าที่เก่าแก่ที่สุด และยังคงเป็นวิธีที่สำคัญในการผลิตผ้าฝ้าย ในกระบวนการทอด้วยยืน และด้ายพุ่งจะขัดสานกันที่ จุดขัดสาน (Interlacing point) และที่จุดขัดสาน ด้ายยืนและด้ายพุ่งจะเกิดลักษณะของการวางตัวได้ 2 ลักษณะก็คือ ด้ายยืนอยู่เหนือด้ายพุ่ง และด้ายพุ่งอยู่เหนือด้ายยืน การสลับสับเปลี่ยนกันนี้อาจเกิดขึ้นได้ซ้ำ ๆ กันเพื่อสร้างให้เกิดเป็นผ้าฝ้ายใหญ่ขึ้นมาตามลายทอต่าง ๆ

ในงานวิจัยนี้จะขอก้าวในรายละเอียดของโครงสร้างผ้าทอแบบง่ายหรือแบบพื้นฐาน ได้แก่ ลายขัดธรรมดา และลายทแยง ซึ่งลายทอเหล่านี้สามารถดัดแปลงให้มีลักษณะแตกต่างกันออกไปให้เป็นผ้าในลักษณะลายทออื่น ๆ ได้อีกด้วย

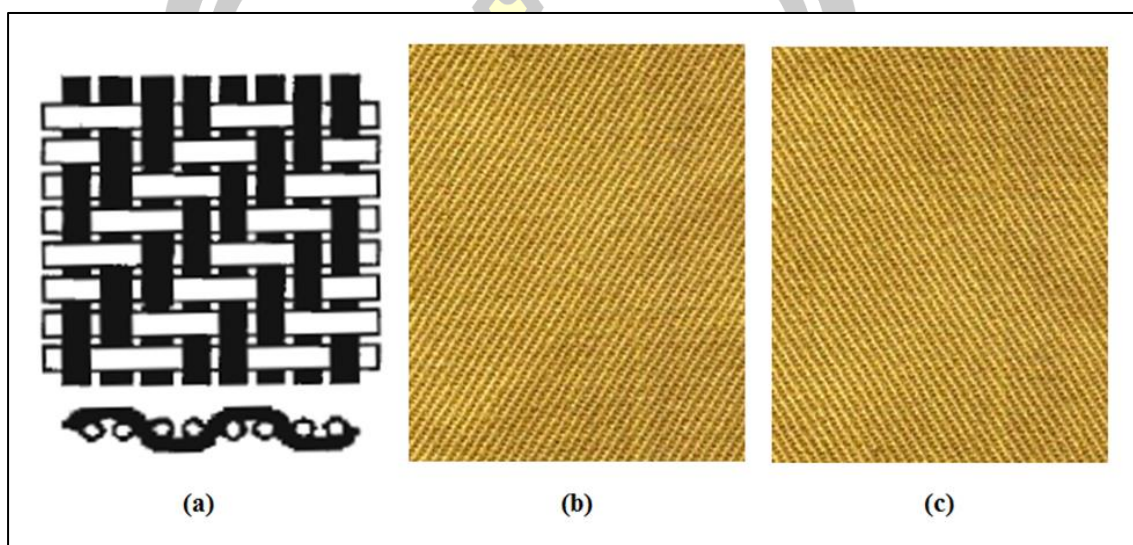
2.1.3.1 ลายขัดธรรมดา (Plain weaves) ผ้าทอลายขัดธรรมดาหรือบางที่เรียกว่า “taffeta” หรือ “tabby” มีลวดลายเหมือนกันทั้งด้านหน้าและด้านหลังของผ้า ผ้าทอลายขัดธรรมดามีใช้ประมาณ 80% ของผ้าทอทั้งหมด ผ้าลายขัดธรรมดามีความแข็งแรงที่สุด แต่ค่อนข้างยับและสกปรกได้ง่ายแม้ว่าสามารถจะทำความสะอาดได้ง่ายก็ตาม จะเห็นว่าในหนึ่งลายซ้ำ (Weave repeat) จะประกอบไปด้วยเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งอย่างละ 2 เส้นซึ่งมีลักษณะการข้ามและการลอดตรงข้ามกัน ผ้าทอลายขัดธรรมดาที่เป็นแบบสมดุลง เป็นผ้าทอที่มีจำนวนเส้นด้ายยืนต่อเซนติเมตรเท่ากับ เส้นด้ายพุ่งและมีเบอร์เส้นด้ายเท่ากันทั้งสองเส้น ดังนั้นทั้งด้ายยืนและด้ายพุ่งจะมีการงอตัว (crimp) ที่เท่ากัน (Joseph, 1972)



ภาพประกอบ 2.6 (a) การทอลายขัด (b) ผ้าทอลายขัด

2.1.3.2 ผ้าทอลายทแยง (Twill weaves) ผ้าทอลายทแยงหรือเรียกว่า “ลายสอง” เป็นลายทอที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับผ้าทอที่เป็นโครงสร้างแบบง่าย มีความแข็งแรงรองจากผ้าทอลายขัด สามารถนำไปใช้ได้ในงานหลาย ๆ ประเภท เช่น เสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม และผ้าสำหรับเฟอร์นิเจอร์หรือใช้ในเครื่องเรือน ผ้าลายทแยงแบบสมดุลงเป็นลายทอที่บอกลักษณะโดยแนวทแยงของเส้นด้ายยืนที่ข้ามเส้นด้ายพุ่ง พร้อมกับแนวทแยงของเส้นด้ายพุ่งที่ข้ามเส้นด้ายยืนซึ่งปรากฏอยู่ที่ด้านหน้าและด้านหลังของผ้า กล่าวคือถ้าด้านหน้าเป็นลายเอียงขวาด้านหลังจะเป็นลายเอียงซ้าย

หรือถ้าด้านหน้าเป็นลายเอียงซ้ายด้านหลังจะเป็นลายเอียงขวา ทิศทางแนวทแยงบนด้านหน้าของผ้า จะตรงข้ามกับแนวทแยงด้านหลังของผ้า ในหนึ่งหน่วยซ้ำของลายทแยงจะมีจำนวนเส้นด้ายยืนเท่ากับ เส้นด้ายพุ่ง ลายทแยงที่เล็กที่สุดอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วยเส้นด้ายยืน 3 เส้นและเส้นด้ายพุ่ง 3 เส้น เช่น ผ้าลายสองแบบ 2×1 ผ้าลายสองพื้นฐาน สามารถถอดดัดแปลงเป็นลายสองแบบต่าง ๆ ได้ อีกมากมายดังภาพประกอบ 2.7 (a)

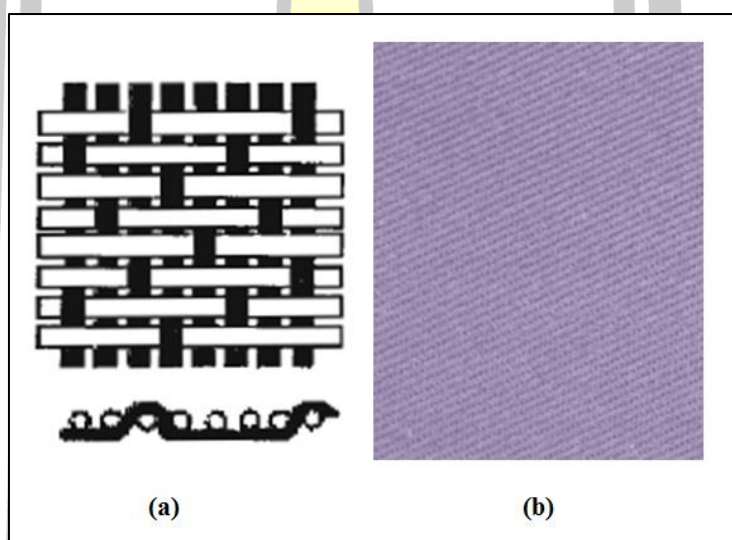


ภาพประกอบ 2.7 (a) การทอลายทแยง (b) ผ้าทอลายทแยงขวา (c) ผ้าทอลายทแยงซ้าย

โดยทั่วไปแนวทแยงของลายผ้าสามารถแบ่งเป็น 2 แนวคือ แนวทแยงขวา (Right twill) และ แนวทแยงซ้าย (Left twill) ผ้าทอแนวทแยงขวา จะมีทิศทางของแนวทแยงขึ้นไปทางขวาหรือเรียกว่า “z-twill” มีทิศทางของแนวทแยงจะขนานกับส่วนตรงกลางของทิศทางตัวอักษร Z ดังภาพประกอบ 2.7 (b) โดยปกติแล้วแล้วจะทอเป็นแนวทแยงขวา แต่ถ้าหากไม่มีการระบุหรือกำกับสัญลักษณ์ใด ๆ ไว้จะถือว่าลายทแยงนั้นเป็นลายทแยงขวา ในส่วนของผ้าทอแนวทแยงซ้าย จะมีทิศทางของแนวทแยงขึ้นไปทางซ้ายหรือเรียกว่า “s-twill” ซึ่งทิศทางของแนวทแยงจะขนานกับส่วนตรงกลางของทิศทางตัวอักษร S ดังภาพประกอบ 2.7 (c)

2.1.3.3 ผ้าทอลายต่วน (Satin weaves) ลายต่วน หรือ ลายซาติน คือผ้าทอลายทแยงที่ไม่สมดุล กล่าวคือตั้งใจผลิตเพื่อให้ผิวของผ้าไม่มีลวดลายเส้นด้ายจะข้ามหรือลอยอย่างน้อย 4 เส้น ในการทอลายต่วนต้องให้ได้พุ่งและด้ายยืนขัดกันน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ตำแหน่งที่ขัดกันจะกระจัดกระจายไปทั่วบนผืนผ้าจึงทำให้พื้นผิวผ้าด้านหน้ามีแต่เส้นด้ายพุ่งหรือเส้นด้ายยืน เส้นใดเส้นหนึ่งเป็นเส้นลอย ลายต่วนแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ ลายต่วนที่มีด้ายพุ่งเป็นเส้นลอยเรียกว่า ลาย

ต่วนด้ายพุ่ง (Sateen or weft sateen) และที่มีด้ายยืนเป็นเส้นลอยเรียกว่า ลายต่วนด้ายยืน (Satin or warp satin) ความแตกต่างระหว่างลายทั้งสองชนิดนี้อาจจะเนื่องมาจากจำนวนเส้นด้ายต่อหน่วยความยาว (จำนวนเส้นด้ายต่อนิ้ว หรือ ต่อเซนติเมตร) เช่น ลายต่วนด้ายพุ่ง เป็นผ้าที่ทอโดยใช้จำนวนเส้นด้ายพุ่งต่อเซนติเมตร มากกว่า เส้นด้ายยืนต่อเซนติเมตร จึงทำให้เส้นด้ายพุ่งโผล่พ้นอยู่ด้านบนผิวผืนผ้า เส้นด้ายพุ่งจะปิดบังเส้นด้ายยืนจึงทำให้พื้นผิวของผ้ามีผิวเรียบ ในทางกลับกัน ลายต่วนด้ายยืน เป็นผ้าที่ทอโดยใช้จำนวนเส้นด้ายยืนต่อเซนติเมตร มากกว่า เส้นด้ายพุ่งต่อเซนติเมตร และเส้นด้ายยืนจะปิดบังเส้นด้ายพุ่งจึงทำให้ผ้ามีผิวเรียบ ผ้าลายต่วนมีลักษณะเฉพาะ คือ มีความราบเรียบ (Smooth) มีความเงางาม (Luster) ด้านผิวสัมผัสมีความนุ่มนวล (Gentle) ทนต่อการยับได้ดี มีการทึงตัวได้ดี ผ้าลายต่วนนี้นิยมใช้ทำเสื้อผ้าซับใน เพราะมีผิวที่เรียบ ใช้ทำชุดกลางคืน หรือชุดแต่งงาน เป็นต้น (อัจฉราพร ไสละสูตร, 2524)



ภาพประกอบ 2.8 (a) การทอลายต่วน (b) ผ้าทอลายต่วน

ในการทอผ้าหรือการผลิตผ้าสามารถดัดแปลงลายทอทั้ง 3 ลายทอดังกล่าว โดยสามารถรวมวิธีการทอผ้าลายขัด ลายทแยง และลายต่วนเข้าด้วยกัน เกิดเป็นผ้าชนิดใหม่ขึ้นได้อีก วิธีการทอผ้าตามลายทอทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวนี้เรียกว่า วิธีการทอผ้าตามลายทอเบื้องต้น ผ้าทอนอกจากจะแบ่งออกตามวิธีการทอแบบต่าง ๆ ตามกระบวนการทอแล้ว ยังสามารถแบ่งออกตามชนิดของเส้นใยได้อีกด้วย เช่น ผ้าฝ้าย ผ้าลินิน ผ้าขนสัตว์ ผ้าไหม ผ้าใยเรยอน ผ้าใยผสม และผ้าใยสังเคราะห์ เป็นต้น

2.2 พารามิเตอร์ของผ้าทอ

พารามิเตอร์ของผ้าทอที่จำเป็นจะต้องทราบ เพื่อให้การอธิบายโครงสร้างของผ้าทอสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญของผ้าทอ ได้แก่ ลายผ้า, ความหนาแน่นของเส้นด้าย, ความละเอียดของด้ายยืนและด้ายพุ่ง และความหยิกงอของด้ายยืนและด้ายพุ่ง (ประณัฐ โพธิยะราช, 2549)

2.2.1 ลายผ้า

ลายทอพื้นฐาน ได้แก่ ลายขัด (Plain weave) ลายทแยง (Twill weave) และลายต่วน (Satin weave) จากลายทอพื้นฐานของผ้า เหล่านี้เราสามารถนำไปดัดแปลงเป็นลายใหม่ ๆ ได้ โดยการกำหนดวิธีการร้อยตะกอกที่แตกต่างกันออกไป หรือการผสมผสานลายทอเข้าด้วยกัน เช่น ผ้าทอลายขัด สามารถดัดแปลงเป็นลายอ็อกฟอร์ดได้ หรือดัดแปลงเป็นลายตะกร้าก็ได้ เป็นต้น

2.2.2 ความหนาแน่นของเส้นด้าย

ในทางเทคนิค เส้นด้ายยืนแต่ละเส้นจะเรียกว่า end และระบุความหนาแน่นของด้ายยืนในหน่วย เส้นด้ายยืนต่อเซนติเมตร (Ends per centimeter, epc) ด้ายพุ่งแต่ละเส้นจะเรียกว่า picks และระบุความหนาแน่นของด้ายพุ่งในหน่วย เส้นด้ายพุ่งต่อเซนติเมตร (Picks per centimeter, ppc)

2.2.3 ความละเอียดของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่ง

ในแง่ของโครงสร้างผ้า ความละเอียดของเส้นด้ายเป็นสมบัติเชิงเรขาคณิต รูปร่างของภาคตัดขวางของด้ายมักถูกสมมุติให้มีรูปร่างเป็นวงกลม ทำให้ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกยาว โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ d ในทางปฏิบัติ เป็นการยากที่จะวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของด้ายโดยตรง แต่จะนิยามวัดในหน่วยของน้ำหนักต่อความยาว หรือที่เรียกว่าหน่วย เท็กซ์ (Tex, t) ซึ่งนิยามไว้ว่าเป็นน้ำหนักของเส้นด้ายความยาว 1,000 เมตร ความสัมพันธ์ระหว่างความละเอียดของเส้นด้ายในหน่วยเท็กซ์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของด้าย จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นโดยรวมเฉลี่ย (mean bulk density, D_n) ของเส้นด้าย ในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการ ดังนี้

$$d = 2 \sqrt{\frac{t}{100\pi D_n}} \cdot \text{mm} \quad (2.7)$$

จะต้องย้ำว่าสมการ (2.7) นี้เป็นสมการในการประมาณค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง d เท่านั้น เนื่องจากการสมมุติให้ภาคหน้าตัดเส้นด้ายมีรูปร่างเป็นวงกลม (Flattening coefficient, e)

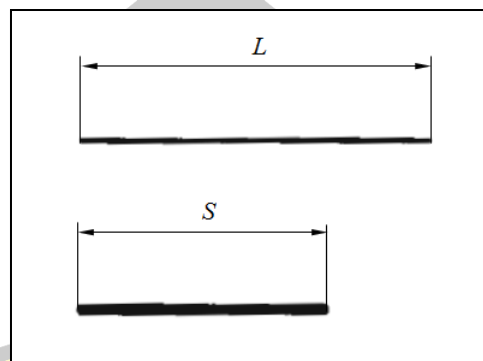
ซึ่งคำนวณได้จากค่า d_v / d_h และจะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ ดังนั้น จึงสามารถประมาณค่าของ d_h และ d_v ได้จากสมการต่อไปนี้

$$d_h = \frac{d}{\sqrt{e}} \quad (2.8)$$

$$d_v = d\sqrt{e} \quad (2.9)$$

2.2.4 ความหยิกงอของเส้นด้าย

ก่อนที่จะมีกระบวนการทอเพื่อผลิตเป็นผ้าฝ้าย ทั้งเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง แต่เมื่อเกิดเป็นผ้าฝ้ายแล้ว ด้ายทั้งสองชุดจะไม่สามารถคงตัวในลักษณะความเป็นเส้นตรงได้ เนื่องจากจะต้องมีการขัดสานซึ่งกันและกัน ทำให้ด้ายแต่ละเส้นเกิดการโค้งงอ และทำให้ความยาวของผ้าฝ้ายหนึ่ง ๆ จะมีความยาวของด้ายที่ใช้มากกว่า ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าความหยิกงอ (crimp) ซึ่งเป็นการอธิบายความโค้งงอของด้ายในผ้าฝ้าย ดังแสดงในภาพประกอบ 2.9



ภาพประกอบ 2.9 ความยาวของด้ายก่อนทอ (L), ความยาวของผ้าฝ้าย (S)
(ประณัฐ โพธิยะราช, 2549)

ความหยิกงอของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่ง นิยมวัดเป็นปริมาณความหยิกงอ เขียนแทนด้วย c ซึ่งคำนวณได้จาก

$$c = \frac{L-S}{S} = \frac{L}{S} - 1 \quad (2.10)$$

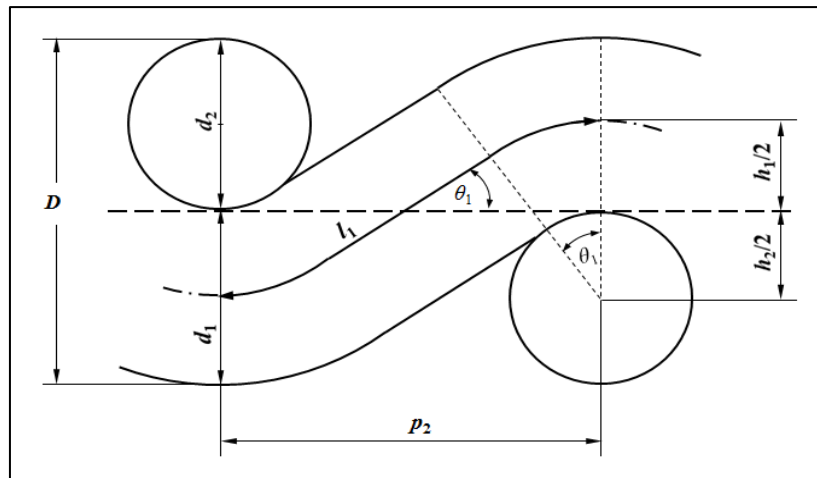
สมการข้างต้นนี้จะให้ค่าความหยิกงอในรูปทศนิยม ถ้านำค่านี้มาคูณด้วย 100 จะทำให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ของความหยิกงอ (Crimp percentage) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในงานที่เกี่ยวข้องกับสิ่งทอ จากพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น โดยรวมแล้วจะมีความเกี่ยวเนื่องกัน ตัวอย่างเช่น หากความละเอียดของด้ายยืนและด้ายพุ่งคงที่ จะไม่มีความหนาแน่นของด้ายยืนและด้ายพุ่งที่น้อยที่สุด แต่จะมีความหนาแน่นของเส้นด้ายต่อเซนติเมตรที่มากที่สุด ซึ่งถูกกำหนดโดยความละเอียดของด้ายนั่นเอง ค่าขีดจำกัดดังกล่าวนี้ก็จะมีความเกี่ยวข้องต่อเนื่องต่อไปอีกเช่นกัน ความหนาแน่นด้ายพุ่งอาจเพิ่มขึ้นหากความหนาแน่นด้ายยืนลดลง หรือความหนาแน่นของด้ายพุ่งอาจลดลงเมื่อความหนาแน่นด้ายยืนเพิ่มขึ้น

ส่วนความหยิกงอนั้น จะไม่มีค่าที่น้อยที่สุดสำหรับระบบเส้นด้ายหนึ่ง ๆ เนื่องจากด้ายบางเส้นอาจอยู่ในแนวเส้นตรงทำให้มีความหยิกงอเป็นศูนย์ สำหรับผ้าทอแล้วไม่มีทางเป็นไปได้ในการผลิตผ้าให้ความหยิกงอของด้ายทุกเส้นเป็นศูนย์ เนื่องจากความหยิกงอจะต้องเกิดขึ้นจากการขัดสาน การแลกเปลี่ยนความหยิกงอ (Crimp interchange) ระหว่างด้ายทั้งสองชุดมีความเป็นไปได้ ค่าความหยิกงอสำหรับด้ายกลุ่มใดกลุ่มหนึ่งจะมีค่ามากที่สุดเมื่อการแลกเปลี่ยนความหยิกงอเกิดขึ้นจนถึงจุดที่ด้ายอีกชุดหนึ่งมีความหยิกงอเป็นศูนย์ สำหรับโครงสร้างผ้าการแลกเปลี่ยนความหยิกงอจนถึงจุดดังกล่าวจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ดังนั้นค่าความหยิกงอที่มากที่สุดสำหรับกลุ่มเส้นด้ายในเนื้อผ้าจะน้อยกว่าความหยิกงอที่สามารถเกิดขึ้นได้จริง

2.3 แบบจำลองโครงสร้างผ้าเชิงเรขาคณิตของเพียซ (Peirce's model)

จากแบบจำลองของ Peirce's model เป็นแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของผ้าทอลายขัด ดังแสดงในภาพประกอบ 2.10 เป็นข้อสมมุติฐานที่พิจารณาพื้นที่หน้าตัดของเส้นด้ายมีรูปร่างเป็นวงกลม และอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าเส้นด้ายไม่มีความต้านทานต่อการโค้งงอ ดังสมการ (2.11) ถึง (2.17)

พหุคูณ ปณฺ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 2.10 แบบจำลองของ Peirce แสดงผ้าทอลายขัด
(Hearle et al., 1969)

$$\text{เมื่อ } p_1 = (l_2 - D \theta_2) \cos \theta_2 + D \sin \theta_2 \quad (2.11)$$

$$p_2 = (l_1 - D \theta_1) \cos \theta_1 + D \sin \theta_1 \quad (2.12)$$

$$h_1 = (l_1 - D \theta_1) \sin \theta_1 + D (1 - \cos \theta_1) \quad (2.13)$$

$$h_2 = (l_2 - D \theta_2) \sin \theta_2 + D (1 - \cos \theta_2) \quad (2.14)$$

$$D = h_1 + h_2 = d_1 + d_2 \quad (2.15)$$

$$c_1 = l_1/p_2 - 1 \quad (2.16)$$

$$c_2 = l_2/p_2 - 1 \quad (2.17)$$

จากภาพประกอบ 2.10 สามารถกำหนดสมการขึ้นมาโดยอาศัยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในภาพที่เป็นโครงสร้างผ้าทอลายขัดในหนึ่งหน่วยซ้ำ ตัวแปรที่กำกับไว้ด้วยเลข 1 หรือ 2 ตัวเลข 1 หมายถึง ตัวแปรนั้นแทนค่าของด้ายยืน ส่วนตัวแปรที่กำกับไว้ด้วยเลข 2 หมายถึงตัวแปรนั้นแทนค่าของด้ายพุ่ง ในทางตรงกันข้ามอาจวาดภาพเพื่อแสดงภาพตัดขวางตามแนวแกนของด้ายพุ่งตั้งฉากกับ

ระนาบผ้าได้ด้วย ทั้งนี้ตัวเลขที่กำกับไว้ในภาพดังกล่าวก็จะเปลี่ยนเป็นตัวเลขอีกเลขหนึ่ง และจากการวิเคราะห์ตัวแปรอื่น ๆ ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ ดังนี้

- เมื่อ
- d_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของภาพหน้าตัดของเส้นด้ายยืน
 - d_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของภาพหน้าตัดเส้นด้ายพุ่ง
 - p_1 = ระยะห่างระหว่างแกนกลางของด้ายยืน
 - p_2 = ระยะห่างระหว่างแกนกลางของด้ายพุ่ง
 - θ_1 = มุมที่แนวแกนของด้ายยืนทำกับระนาบของผ้า
 - θ_2 = มุมที่แนวแกนของด้ายพุ่งทำกับระนาบของผ้า
 - l_1 = ความยาวแนวแกนของเส้นด้ายยืนระหว่างด้ายพุ่ง
 - l_2 = ความยาวแนวแกนของเส้นด้ายพุ่งระหว่างด้ายยืน
 - $h_1/2$ = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของเส้นด้ายยืนกับระนาบผ้า
 - $h_2/2$ = ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของเส้นด้ายพุ่งกับระนาบผ้า
 - D = ความหนาของผ้า เมื่อ $D = d_1 + d_2 = h_1 + h_2$
 - c_1 = สัดส่วนความหยิกงอของด้ายยืน เมื่อ $c_1 = (l_{1i} / p_2) - 1$
 - c_2 = สัดส่วนความหยิกงอของด้ายพุ่ง เมื่อ $c_2 = (l_{2i} / p_1) - 1$

จากสมการเบื้องต้นของ Peirce ร่วมกับนิยามของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามสมการโครงสร้างผ้าทอ ดังกล่าวซึ่งมีทั้งส่วนที่สามารถหาค่าได้ง่าย เช่น ความหนาของผ้า และความหยิกงอของเส้นด้าย (จากนิยามของพารามิเตอร์) จำนวนด้ายต่อนิ้ว (คำนวณจากระยะห่างระหว่างด้ายที่อยู่ติดกัน คือ p_2) เบอร์ของเส้นด้าย (คำนวณได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางด้าย) ในขณะที่ต้องกำจัดค่าที่ไม่สามารถวัดค่าได้หรือหาค่าได้ยากออกไป เช่น l_1 และ θ_1 ดังนั้น เมื่อมุม θ_1 มีค่าน้อยมาก เราอาจ

ประมาณได้ว่า $h_1 = l_1 \theta_1$; $p_2 = l_1$ และ $c_1 = \frac{\theta_1^2}{2}$ จะได้

$$h_1 = p_2 \sqrt{2c_1} \quad (2.18)$$

จากการนำสมการ (2.18) ที่ได้ขึ้นไปแทนค่าและเปรียบเทียบกับค่าจริงที่สังเกตได้จากพื้นผ้า พบว่า สมการนี้จะถูกต้องเมื่อ c_1 มีค่าน้อย และ p_2 มีค่ามาก พบว่าการประมาณค่าที่ให้ค่าใกล้เคียงกับผ้าโดยส่วนใหญ่จะต้องมีการดัดแปลงสมการกล่าว คือ

$$\frac{h_1}{p_2} = \frac{4}{3} \sqrt{c_1} \quad (2.19)$$

จากสมการ (2.19) สามารถคำนวณหาค่าสัดส่วนความหยิกงอของด้ายยืน c_1 ได้ ดังนี้

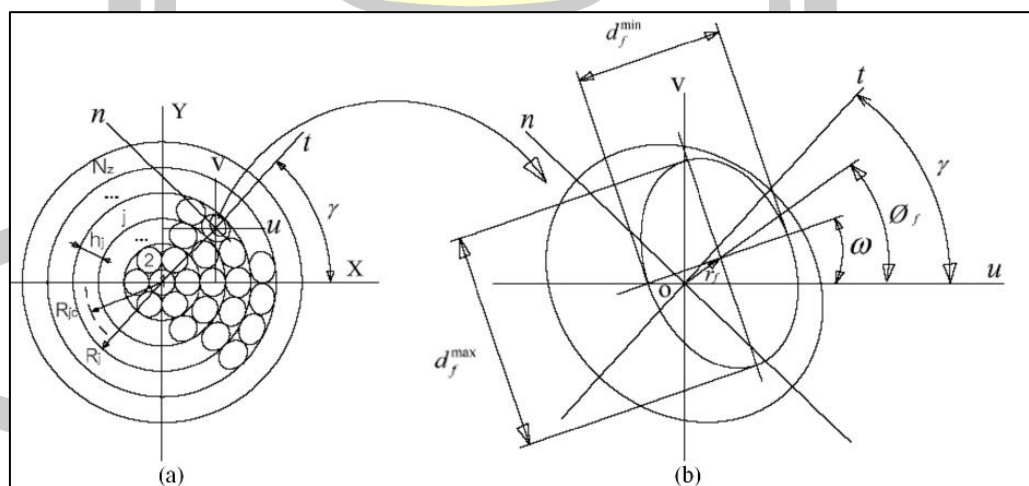
$$c_1 = \sqrt{\frac{1}{4/3} \times \frac{h_1}{p_2}} \quad (2.20)$$

และจากนิยามของค่าสัดส่วนความหยิกงอของด้ายยืน c_1 สามารถคำนวณหาความยาวแนวแกนของเส้นด้ายยืน l_1 ได้ ดังนี้

$$l_1 = p_2(1+c_1) \quad (2.21)$$

2.4 พื้นที่เสมือนจริงของเส้นใย (Virtual location of fibers)

พื้นที่เสมือนจริง หรือ “virtual location” ใช้เพื่อระบุตำแหน่งของเส้นใยบนภาพหน้าตัดของเส้นด้าย ตำแหน่งของพื้นที่เสมือนจริงสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันที่สร้างขึ้นจากข้อมูลการทดลอง พื้นที่เสมือนจริงสามารถสร้างเป็นรูปแบบในการระบุตำแหน่งของเส้นใยในเส้นด้ายได้ถึงสามรูปแบบตั้งแต่การระบุแบบหนึ่งเส้นใยต่อหนึ่งพื้นที่เสมือนจริงหรือหลาย ๆ เส้นใยต่อหนึ่งพื้นที่เสมือนจริง และยังสามารถสร้างในรูปแบบของ ring configuration model เพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งของเส้นใยที่เกิดจากกระบวนการปั่นด้ายด้วยระบบวงแหวนได้อีกด้วย (Grishanov et al., 2011)



ภาพประกอบ 2.11 (a) ภาพหน้าตัดของเส้นใยใน virtual location ที่เป็นวงรี (b) ตำแหน่งของเส้นใยใน virtual location ที่เป็นวงรี

(Sriprateep and Bohez, 2009)

จากรูปแบบวิธีการ “ring configuration model” ได้มีการนำมาพัฒนาต่อยอดโดย Sriprateep และ Bohez, (2009) ดังในภาพประกอบที่ 2.11 ที่ได้แสดงถึง virtual location ของภาพหน้าตัดของเส้นด้าย ซึ่งรัศมีของแต่ละเลเยอร์จะไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่ในทิศที่ตั้งฉากกับแนวรัศมีนั้น รัศมีของไฟเบอร์ในแต่ละเลเยอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับมุมของเกลียวของเส้นด้าย โดยตำแหน่งของเส้นใยแต่ละเส้นจะมีพิกัด $[Rjc, \gamma]$ เมื่อกำหนดให้จุดศูนย์กลางของเส้นด้ายเป็นจุดอ้างอิง จากพิกัด $[0, 2\pi]$ ของพื้นที่หน้าตัดของเส้นด้าย และเมื่อกำหนดให้จุดศูนย์กลางของเส้นด้ายเป็นจุดอ้างอิง ดังนั้น ในการระบุตำแหน่งของเส้นใยใด ๆ บนภาพหน้าตัดเส้นด้าย สามารถที่จะอธิบายตำแหน่งพิกัดของเส้นใยโดยระนาบคาร์ทีเซียนในระบบพิกัดฉาก X, Y จากสมการต่อไปนี้

$$X = Rjc \cos \gamma \quad (2.18)$$

$$Y = Rjc \sin \gamma \quad (2.19)$$

ในด้ายเส้นเดี่ยว virtual location ถูกบรรจุอยู่ในวงแหวนในแต่ละชั้นเลเยอร์ และใช้จุดศูนย์กลางร่วมกัน โดยมีจำนวนทั้งหมด N_z ภาพหน้าตัดของเส้นด้ายที่มีลักษณะเป็นวงกลม ตำแหน่งของเส้นใยเส้นแรกจะเริ่มจากจุดศูนย์กลางของเส้นด้ายบนพิกัด 0, 0 ถือว่าเป็นเลเยอร์ที่หนึ่ง รัศมีของแต่ละชั้นของเลเยอร์ j สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$R_j = h_j j - h_j / 2 ; j = 1, 2, 3, \dots, N_z \quad (2.20)$$

ดังนั้น รัศมีตรงกึ่งกลางของชั้นเลเยอร์ j สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$R_{jc} = N \cdot h_j ; N = 0, 1, 2, \dots, N_z \quad (2.21)$$

จำนวนของ virtual location ที่จะสามารถบรรจุอยู่ในชั้นเลเยอร์ได้ ตามสมการดังนี้

$$M_1 = 1; M_j = \frac{2\pi R_{jc}}{\sec \alpha_j} ; j = 2, 3, 4, \dots, N_z \quad (2.22)$$

จำนวนของ virtual location ทั้งหมดในภาพหน้าตัดเส้นด้าย

$$M_1 + \sum_{j=2}^{N_z} M_j = 1 + \sum_{j=2}^{N_z} M_j \quad (2.23)$$

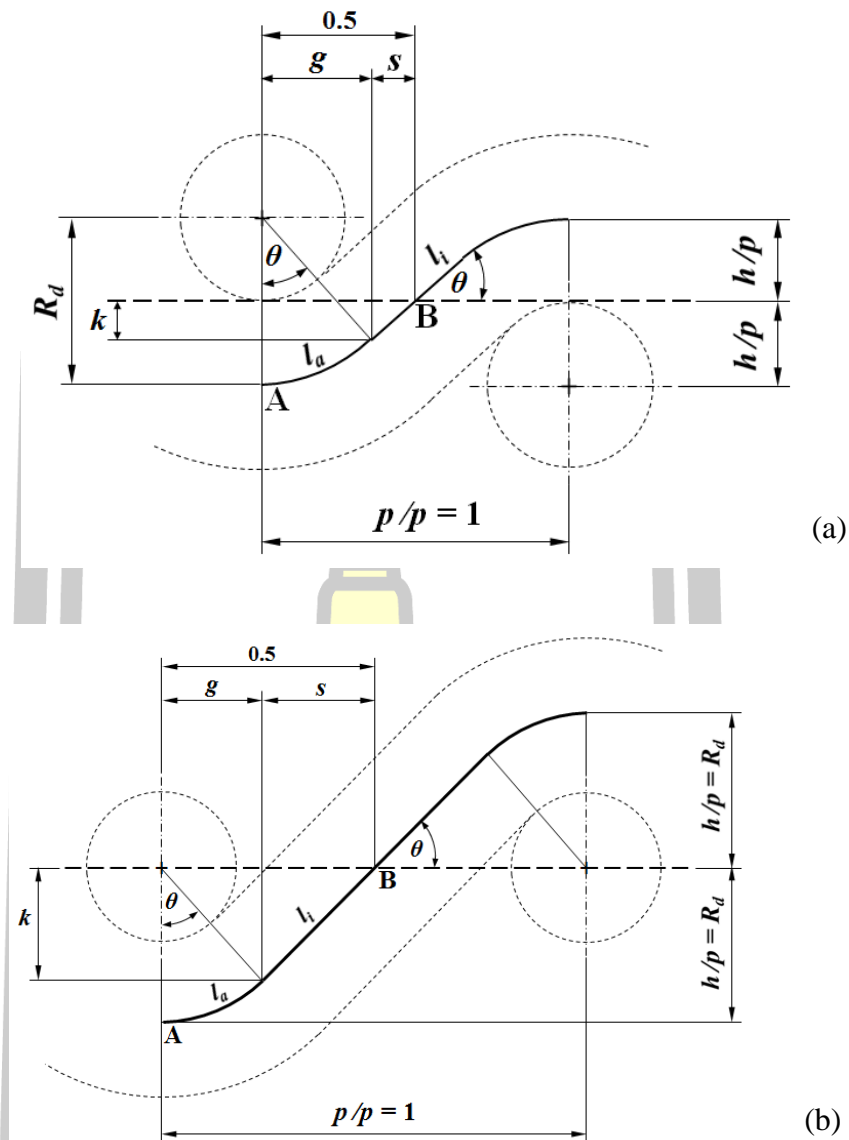
- เมื่อ
- R_j = รัศมีจากของชั้นเลเยอร์ j
 - R_{jc} = รัศมีกึ่งกลางของชั้นเลเยอร์ j
 - h_j = ความกว้างของชั้นเลเยอร์ j
 - N = ลำดับของชั้นเลเยอร์ที่นับจากเส้นใยแกนกลางเส้นด้ายเป็น 0
 - N_z = ลำดับของชั้นเลเยอร์ที่นับจากเส้นใยแกนกลางเส้นด้ายเป็น 1
 - j = ลำดับชั้นของเลเยอร์

2.5 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตของความหยิกงอเส้นด้าย

ในงานวิจัยนี้ได้อาศัยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของ (Hu, 2004) ที่ได้นำเสนอรูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่เกี่ยวข้องกับความหยิกงอของเส้นด้ายในโครงสร้างลายทอผ้า ซึ่งได้อธิบายถึงลักษณะความโค้งงอของแนวเส้นแกนกลางของเส้นด้ายในพื้นผ้า คือ แบบจำลองของแนวเส้นด้ายในรูปแบบ arc abscissa (Peirce's) model และแบบจำลองของแนวเส้นด้ายในรูปแบบ sinusoidal model

2.5.1 แบบจำลองของแนวเส้นด้ายในรูปแบบ arc abscissa (Peirce's) model

รูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของความหยิกงอของเส้นด้ายในโครงสร้างลายทอผ้า อาศัยทฤษฎีของ Hu, (2004); Kovar, (2011) และ Peirce, (1937) ใช้เพื่ออธิบายลักษณะทางเรขาคณิตของเส้นโค้งและเส้นตรงเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างผ้า ซึ่งสังเกตได้จากภาพตัดขวางตามแนวแกนเส้นด้าย สามารถกำหนดรูปแบบของสมการขึ้นโดยอาศัยพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ ระยะห่างกันระหว่างแนวเส้นด้าย (p) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรสามตัวแปรคือ ความหยิกงอของด้าย ความสูงของความโค้งงอ และความยาวของความโค้งงอ และอีกหนึ่งพารามิเตอร์ได้แก่ ค่ารัศมีของส่วนโค้ง (r) ซึ่งพารามิเตอร์และตัวแปรดังกล่าว สามารถใช้รูปแบบสมการของ Peirce's models เพื่อช่วยในการหาค่าต่าง ๆ เหล่านี้ได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.12 (a) และ (b)



ภาพประกอบ 2.12 แบบจำลอง arc abscissa model (a) square, (b) unbalanced fabrics

2.5.1.1 แบบจำลองสำหรับโครงสร้างผ้ากรณี square fabric จากภาพประกอบ 2.12 (a) สามารถกำหนดสมการขึ้นมาโดยอาศัยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผ้าทอ ได้แก่ h/p และ p/p เมื่อ l_d คือความยาวของส่วนโค้ง และ l_s คือระยะความยาวของเส้นด้ายที่เป็นเส้นตรงที่สัมผัสกับส่วนโค้งและระนาบผ้า มีความยาวเท่ากับ AB ในกรณีของโครงสร้างผ้าที่เป็นแบบ square fabric ซึ่งเป็นโครงสร้างผ้าที่มีความหนาแน่นของด้ายยืนและด้ายพุ่งเท่ากัน รัศมีของส่วนโค้งจะหาได้จาก $R_d = 2h/p$ ในส่วนประกอบของตัวแปรในพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้แก่ g , s และ k สามารถคำนวณหาค่าได้ ดังนี้

$$g = R_d \sin \theta = \frac{2h}{p} \sin \theta, \quad s = 0.5 - g = 0.5 - \frac{2h}{p} \sin \theta \quad (2.24)$$

และ

$$k = \frac{h}{p} (2 \cos \theta - 1) \quad (2.25)$$

จากตัวอย่างการคำนวณ เมื่อทราบค่ามุมของความหยิกงอ θ ของเส้นด้าย สามารถนำมาคำนวณหาตัวแปรในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\frac{h}{p} = \frac{0.5 \sin \theta}{2 - \cos \theta} \quad (2.26)$$

สัดส่วนความหยิกงอของโครงสร้างผ้าทอกรณี square fabric สามารถคำนวณได้จาก $c = 2(l_2 + l_1) - 1$ และจากนิยามของสัดส่วนของความหยิกงอตามสมการ (2.12) และ (2.13) จึงสามารถที่จะคำนวณหาค่าความยาวของส่วนโค้งได้ ดังนี้

$$l_a = \frac{2h}{p} = \theta \quad (2.27)$$

2.5.1.2 แบบจำลองสำหรับโครงสร้างผ้ากรณี unbalanced fabrics จากภาพประกอบ 2.12 (b) แสดงตัวอย่างของเส้นด้ายพุ่งที่วางตัวในแนวเส้นตรงส่วนด้ายยืนจะวางตัวสอดสลับขึ้นลงตามแนวของด้ายพุ่ง ทำให้เส้นด้ายยืนมีความหยิกงอเกิดขึ้นอย่างเต็มที่ ซึ่งโครงสร้างผ้าในลักษณะนี้ในทางปฏิบัติจะเกิดขึ้นได้ยาก เพราะการกระจายความหยิกงอของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งมักจะมีค่าอยู่ระหว่างปานกลางซึ่งกันและกัน ในส่วนรัศมีของส่วนโค้งที่เกิดจากโครงสร้างในลักษณะนี้ จะมีค่าเท่ากับ $R_d = h/p$ ส่วนตัวประกอบของตัวแปรในพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้แก่ g , s และ k สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$g = R_d \sin \theta = \frac{h}{p} \sin \theta, \quad s = 0.5 - g = 0.5 - \frac{h}{p} \sin \theta \quad (2.28)$$

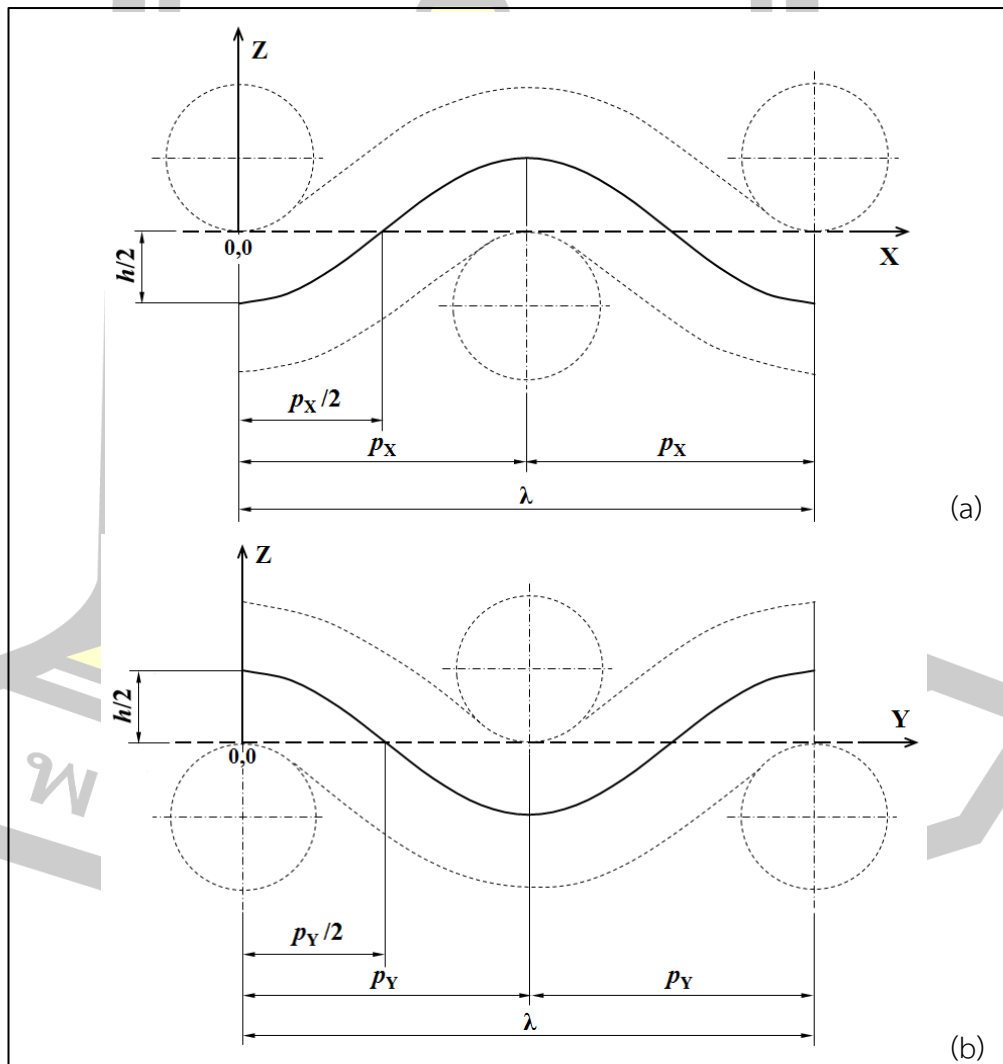
และ

$$k = \frac{h}{p} \cos \theta \quad (2.29)$$

จะได้
$$\frac{h}{p} = 0.5 \sin \theta \quad (2.30)$$

2.5.2 แบบจำลองของแนวเส้นด้ายในรูปแบบ sinusoidal model

รูปแบบจำลองของแนวเส้นด้ายในลักษณะเส้นโค้งรูปคลื่นแบบไซน์ sinusoidal model ถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นแนวเส้นแกนกลางของเส้นด้ายตามลายทอ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.13 จะบรรยายถึงเส้นคลื่นที่เคลื่อนที่ไปตามแกน X ในทางทศบวก โดยมีจุดตัดแกน X ที่ระยะ $p/2$ ดังนั้นความยาวคลื่น (λ) จึงมีค่าเท่ากับระยะของ $2p$ ส่วนค่าแอมพลิจูดทั้งทางบวกและลบของคลื่นเทียบได้กับค่าความสูงของความหยัก (h) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของความหยักกับระยะห่างระหว่างแกนกลางเส้นด้าย h/p



ภาพประกอบ 2.13 เส้นโค้งรูปคลื่นไซน์ (a) แนวเส้นด้ายยืน (b) แนวเส้นด้ายพุ่ง

แบบจำลองของแนวเส้นด้ายในรูปแบบ sinusoidal model โดยเส้นโค้งรูปคลื่นแบบไซน์จะถูกสร้างขึ้นบนแกนของระนาบผ้าที่ลากผ่านกึ่งกลางของเส้นสัมผัสของด้ายในโครงสร้างผ้าทอมีจุดตัดแกน Y ที่ระยะทางเท่ากับ $p_1/2$ ไปในทิศทางบวกของแนวแกน X หรือ Y ในส่วนระยะความสูงของยอดคลื่นและท้องคลื่นที่เคลื่อนที่ไปจะมีแอมพลิจูดเท่ากันโดยวัดจากแนวแกน Z เมื่อพิจารณาจากการหมุนของมุม ϱ ณ จุดศูนย์กลางเส้นด้าย ซึ่งจะได้กราฟของฟังก์ชันไซน์ มีคาบเท่ากับ 2π โดยมีเรนจ์ของฟังก์ชันอยู่ในช่วง $0 \leq \varrho \leq 2\pi$ เมื่อจุดพิกัดเคลื่อนที่ไปบนเส้นรอบวงซึ่งเทียบได้กับตำแหน่งของจุดพิกัดต่าง ๆ บนระนาบคาร์ทีเซียนตามแกน X, Y, Z ดังนั้น ความสูงของแนวเส้นแกนกลางเส้นด้ายในแกน Z สามารถหาได้โดยสมการ

$$\text{สำหรับด้ายยืน } Z(\varrho) = h_i/2 \sin(\varrho p_{ix} Q / 2\pi + \beta) \quad (2.31)$$

$$\text{สำหรับด้ายพุ่ง } Z(\varrho) = h_i/2 \sin(\varrho p_{iy} Q / 2\pi + \beta) \quad (2.32)$$

- เมื่อ
- $h_i/2$ = ครึ่งหนึ่งของระยะความสูงของความหยิกงอของเส้นด้ายยืน/เส้นด้ายพุ่ง
 - ϱ = มุมที่เกิดจากการหมุนในเรนจ์ของฟังก์ชันที่อยู่ในช่วง $0 \leq \varrho \leq 2\pi$
 - β = จุดเริ่มต้นของเส้นโค้งคลื่นแบบไซน์
 - λ = ความยาวของเส้นโค้งคลื่น
 - Q = จำนวนช่วงของเส้นโค้งคลื่นต่อคาบบนเส้นโค้งรูปคลื่นแบบไซน์

ระยะความสูงของแอมพลิจูดที่วัดในแนวตั้งฉากกับระนาบของผ้าทอสามารถคำนวณได้โดยสมการสัดส่วนความหยิกงอของด้ายยืนและด้ายพุ่ง ดังสมการ (2.12) และ (2.13) เมื่อ $c_1 = l_1/p_2 - 1$ และ $c_2 = l_2/p_2 - 1$ ในทางเรขาคณิตสมการดังกล่าวนี้สามารถนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ของความหยิกงอ $p_1/2$ ได้ ในส่วนของค่าระยะห่างระหว่างแกนเส้นด้ายในแนวแกน X หรือ Y ควบคู่กับระยะความยาวของช่วงที่แบ่งจากความยาวคาบ 2π ออกเป็นส่วน ๆ (Q) ในเทอมของ $p_{ix} Q$ และ $p_{iy} Q$ สามารถเขียนใหม่ได้เป็น p_{ix} หรือ $p_{iy} = \lambda/Q$ การประมาณค่าความหยิกงอของเส้นด้ายจากเดิมจะใช้วิธีการนำค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการสังเกตหรือการทดลอง แล้วนำมาวาดเป็นกราฟไปตามโครงสร้างผ้าแล้วจึงหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ไม่ทราบค่าจากกราฟนั้น ตลอดจนประมาณค่าจากการสมมาตรกันระหว่างจุดตัดกันของเส้นโค้งตามแนวเส้นด้ายกับระนาบของโครงสร้างผ้าทอ เส้นโค้งรูปคลื่นแบบไซน์ เกิดขึ้นจากการเขียนกราฟของฟังก์ชันไซน์ $\sin \theta$ ที่พลอตเทียบกับ θ โดยมีรัศมีที่กำหนดตามเส้นโค้งคลื่น ซึ่งเทียบได้กับลักษณะความยาวของเส้นโค้งคลื่น (λ) ที่มีลักษณะเดียวกันกับแนวเส้นแกนกลางของเส้นด้าย

2.5.3 การประกอบเส้นด้ายตามลายทอผ้า

เส้นแนวแกนกลางของเส้นใยหลาย ๆ เส้น ที่ถูกสร้างขึ้นแล้วนำมาประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อสร้างเป็นเส้นด้ายตามโครงสร้างลายทอ ขนาดของเส้นด้ายจะขึ้นอยู่กับจำนวนของชั้นเลเยอร์ที่มีเส้นใยบรรจุอยู่ โดยปกติแล้วเส้นใยเส้นแรกที่ใช้เป็นแกนกลางของเส้นด้ายที่สร้างขึ้นตามแบบจำลอง arc abscissa models และ sinusoidal model จะมีค่ามุมเรเดียสเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ($R_{ave} = 0$) ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นเลเยอร์แรก ถัดมาจะนำเส้นแนวแกนกลางของเส้นใยมาประกอบกันที่ละชั้นเลเยอร์โดยมีจุดศูนย์กลางเดียวกันกับเส้นใยในเลเยอร์แรก โดยมุมเฉลี่ยของเส้นใยที่พันอยู่รอบ ๆ เลเยอร์แต่ละชั้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามลำดับชั้นของเลเยอร์ไปจนถึงเลเยอร์ชั้นสุดท้าย รัศมีของแต่ละชั้นเลเยอร์สามารถหาได้จากสมการ (2.1) ค่าสัดส่วนความหยิกงอของด้ายยืนและด้ายพุ่ง หาได้จากสมการ (2.12) และ (2.13) ระยะห่างของจุดศูนย์กลางเส้นใยกับจุดศูนย์กลางเส้นด้ายหรือรัศมี R_{jc} หาได้จากสมการ (2.4) การระบุตำแหน่งพิกัดของเส้นใยในพื้นที่เสมือนจริง virtual locations ตามแนวแกน z x และ z y สามารถระบุได้โดยสมการ (2.1) และ (2.2) โดยที่ตำแหน่งของเส้นใยในเส้นด้ายยืนจะมีพิกัดบนระนาบ Y_i, Z_i ส่วนความยาวของเส้นด้ายยืนจะมีความยาวไปตามแกน X_i ในทางกลับกันตำแหน่งของเส้นใยในเส้นด้ายพุ่งจะมีพิกัดบนระนาบ X_i, Z_i ส่วนความยาวของเส้นด้ายพุ่งจะมีความยาวไปตามแนวแกน Y_i ซึ่งสามารถคำนวณได้โดย

$$\text{สำหรับเส้นด้ายยืน} : \begin{cases} x = x_i \\ y = R(\psi) \cos(\psi Q) + y_i \\ z = R(\psi) \sin(\psi Q) + z_i \end{cases} \quad (2.33)$$

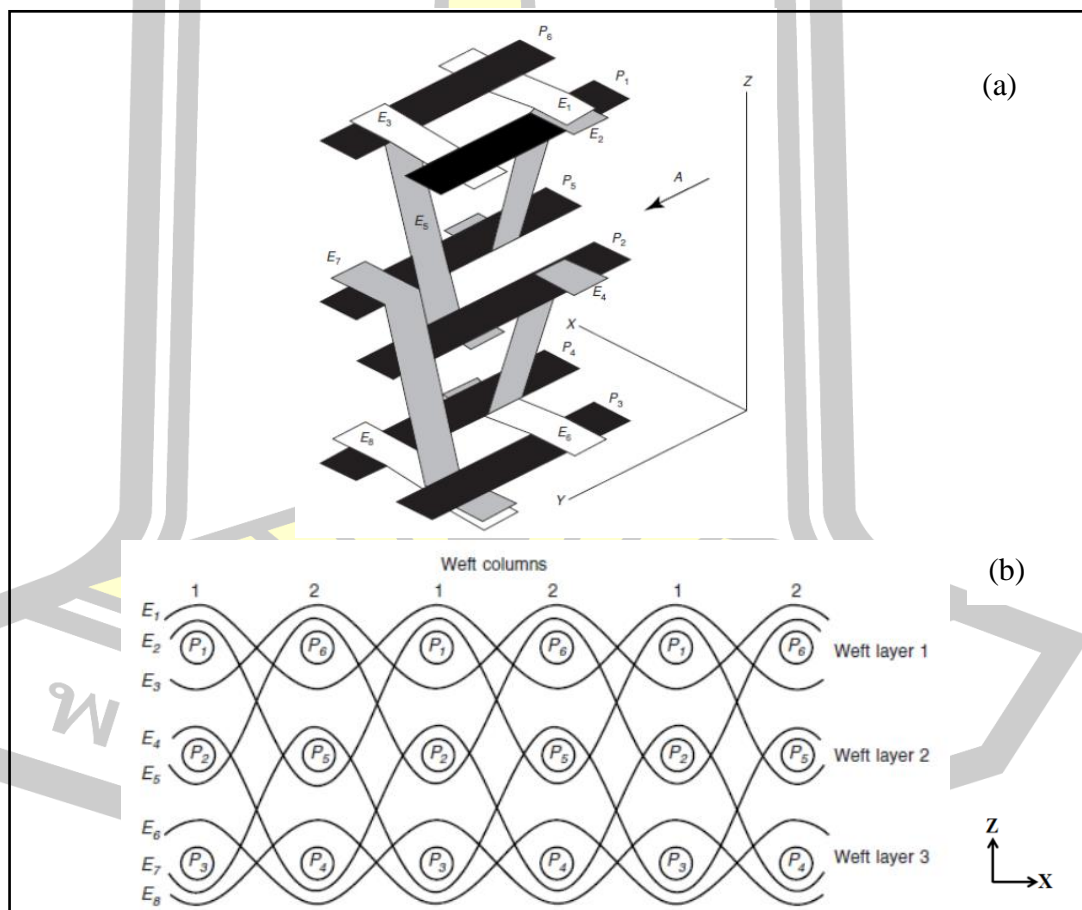
$$\text{สำหรับเส้นด้ายพุ่ง} : \begin{cases} x = R(\psi) \cos(\psi Q) + x_i \\ y = y_i \\ z = R(\psi) \sin(\psi Q) + z_i \end{cases} \quad (2.34)$$

2.6 รูปแบบโครงสร้างผ้าทอแบบหลายชั้น (Multi-layered woven fabric: MLWF)

โครงสร้างผ้าทอแบบผ้าทอที่มีหลายชั้น (MLWF) มีโครงสร้าง 3 มิติที่ซับซ้อนในงานวิจัยนี้จะเน้นการพัฒนาารูปแบบของโครงสร้างผ้าจะใช้สมมติฐานและแนวทางที่เรียบง่ายเพื่อเพิ่มความเข้าใจให้มากยิ่งขึ้น จากงานวิจัยของ Grunbaum และ Shephard. (1980) ได้นำเสนอแบบจำลองสำหรับโครงสร้างผ้า ที่แสดงให้เห็นถึงการเรียงตัวของเส้นด้ายที่ขัดสานกันมีความหนาและความกว้างของผ้าคงที่ ความยาวผืนผ้าจะยาวต่อเนื่องไปตามแนวแกน Y เส้นด้ายทั้งหมดจะมีการกำหนดลำดับและสัญลักษณ์ไว้เพื่อแสดงตำแหน่งของเส้นด้ายที่ด้านบนหรือด้านล่างในโครงสร้างผ้าที่ประกอบเข้าด้วยกัน

ตำแหน่งของเส้นด้ายหลายเส้นที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างผ้าแบบหลายชั้น จะอยู่ในระนาบเดียวกันตามจำนวนชั้นของผ้าซึ่งเรียกว่า “strand” กลุ่มสัญลักษณ์และตัวเลขของเส้นด้ายในระนาบ strand จะเริ่มจากด้านชั้นบนสุดของผ้าโดยเรียงลำดับตัวเลขจาก น้อย - มาก (Pedersen. 1983) อย่างไรก็ตามภาพจำลองของโครงสร้างผ้านี้ยังไม่ได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างผ้าที่ถูกต้องใด ๆ เป็นเพียงการสร้างภาพให้เกิดความเข้าใจเท่านั้น

การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างผ้าแบบสามชั้นที่นำเสนอโดย Kutepov.(1953) ถูกนำมาพัฒนาต่อยอดโดย Gusakov et al. (1999) โดยแสดงรูปแบบของโครงสร้างผ้าในมุมมอง 3 มิติ ในหนึ่งหน่วยซ้ำของลายทอ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างผ้าที่มีทิศทางของแนวโค้งเส้นด้ายบนระนาบ X และ Y ของระบบพิกัดคาร์ทีเซียน 3 มิติ โดยมีแนวแกน Z จะตั้งฉากกับระนาบของพื้นผิวผ้า และมีเส้นด้ายยืนจำนวน 8 เส้น คือ E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7 และ E8 โค้งขึ้นลงขัดสานกันกับเส้นด้ายพุ่งที่เรียงตัวกันเป็นระนาบจำนวน 6 เส้น คือ P1, P2, P3, P4, P5 และ P6



ภาพประกอบ 2.14 (a) รูปแบบภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอแบบสามชั้น (b) รูปแบบภาพตัดขวางของโครงสร้างผ้าทอแบบสามชั้น (kutepov, 1953)

2.6.1 การกำหนดของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอแบบหลายชั้นสามารถอธิบาย ได้ดังนี้

1 การกำหนดตำแหน่งของเส้นด้ายพุ่งบนระนาบ XY ในโครงสร้างผ้าทอแบบหลายชั้น จะเริ่มนับจากตำแหน่งซ้ายมือสุดบนระนาบที่ 1 คือชั้นด้านบนสุดของโครงสร้างผ้า กำหนดให้เป็น เส้นด้ายพุ่ง P1 และเรียงตัวถัดลงมาในแนวตั้งของระนาบที่ 2 กำหนดให้เป็นเส้นด้ายพุ่ง P2 จะ กำหนดตำแหน่งเช่นนี้เรียงตัวกันขึ้นลงนับจากซ้าย ไปขวา จนครบจำนวนหนึ่งลายทอของโครงสร้าง ผ้ายังภาพประกอบที่ 2.14 นั่นคือมีเส้นด้ายพุ่งทั้งหมด 6 เส้น

2 ในภาพประกอบ 2.14 วิธีการกำหนดตำแหน่งของเส้นด้ายพุ่งบนระนาบ XY ใน โครงสร้างผ้าทอแบบหลายชั้นในลักษณะเช่นนี้สามารถแบ่งออกเป็นคอลัมน์ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าในหนึ่ง ลายทอซ้ำของผ้าทอแบบหลายชั้นชนิดนี้ มีอยู่ 2 คอลัมน์ คือ คอลัมน์ที่ 1 ประกอบด้วยเส้นด้ายพุ่ง P2 – P3 และคอลัมน์ที่ 2 ประกอบด้วยเส้นด้ายพุ่ง P4 – P6

3 โครงสร้างผ้าแบบหลายชั้นยังสามารถกำหนดตำแหน่งบนระนาบ XZ ของเส้นด้ายยืน ที่มีจำนวน 8 เส้น คือ E1 – E8 และยังสามารถแบ่งออกตามลักษณะการโค้งงอขึ้นลงของเส้นด้ายยืน ได้อีกด้วย เช่น เส้นด้ายพุ่งในคอลัมน์ที่ 1 มีลักษณะของเส้นด้ายยืนที่อยู่เหนือด้ายพุ่ง คือ เส้นด้ายยืน ที่ E1, E2, E4 และ E6 ส่วนกลุ่มของเส้นด้ายยืนที่อยู่ด้านล่างเส้นด้ายพุ่ง คือ E3, E5, E7 และ E8

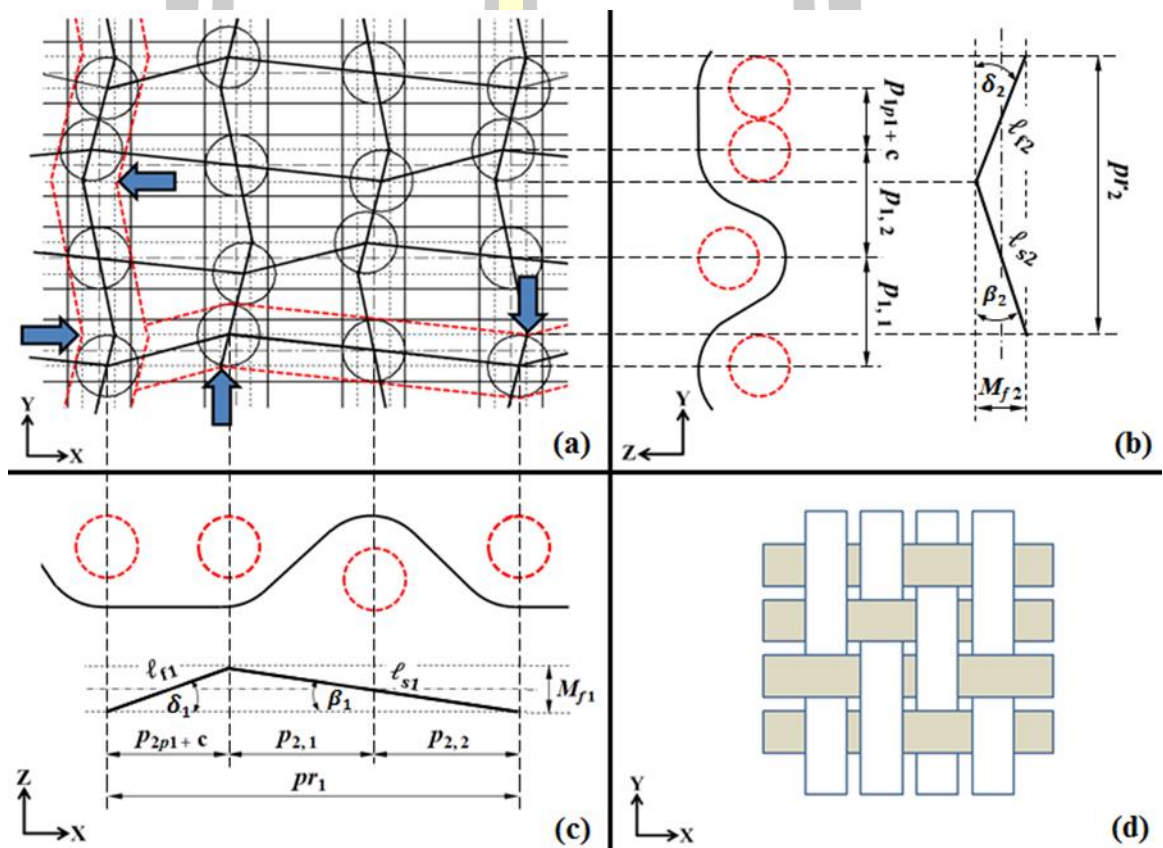
4. จุดตัดสานของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งบนระนาบ XZ ก็คือจุดตัดสานเดียวกันกับ ระนาบ YZ แต่จะตรงกันข้ามกันกับตำแหน่งขึ้น-ลง ของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่ง ตัวอย่างเช่น จุดตัด ของระนาบ XZ เส้นด้ายพุ่ง P1 เมื่อมองระนาบ XZ จะมีเส้นด้ายยืน E1 E2 และ E3 ขัดสานกัน อยู่ จะถูกกำหนดให้เป็น E1P1 E2P1 เนื่องจากที่เส้นด้ายพุ่ง P1 มีเส้นด้ายยืน E1 และ E2 อยู่เหนือ เส้นด้ายพุ่ง P1 และจะได้ว่า P1E3 เนื่องจากเส้นด้ายยืน E3 อยู่ด้านล่างเส้นด้ายพุ่ง P1 ในทาง กลับกัน เมื่อพิจารณาในระนาบ YZ สัญลักษณ์และตัวเลขจะสลับและตรงข้ามกัน

2.7 รูปแบบโครงสร้างผ้าทอลายทแยงในแบบ skewness

ผ้าทอลายทแยงเป็นลายที่บอกถึงลักษณะแนวทแยงของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งที่ขัดข้ามกัน และเหลื่อมกัน ขึ้นไปที่ละเส้นอย่างต่อเนื่อง การศึกษาโครงสร้างผ้าทอในหนึ่งลายซ้ำของลายทแยง อย่างน้อยต้องประกอบไปด้วยด้ายยืน 3 เส้น และด้ายพุ่งอีก 3 เส้นสอดขัดกันในลักษณะที่ทำให้เกิด ด้ายลอยบนพื้นผ้า เส้นด้ายที่ข้ามไปบนเส้นด้ายอีกเส้นเรียกว่า เส้นด้ายลอย (Float yarns) ในสภาวะ ที่เส้นด้ายพุ่งไม่ตั้งฉากกับเส้นด้ายยืนเรียกว่า “Skewness”

ในกระบวนการทอผ้า การชิงเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งมักจะตั้งไม่เท่ากันเส้นด้ายยืนมักจะ ถูกดึงตึงกว่าเส้นด้ายพุ่ง ซึ่งจะส่งผลให้สมบัติของผ้าเกิดความเหนียว ความคงตัว และการจับจีบได้ดี ซึ่งในกระบวนการทอผ้าเป็นการนำเส้นด้ายอย่างน้อย 2 กลุ่ม (กลุ่มด้ายยืนกับกลุ่มด้ายพุ่ง) ขัดกันไป

มาโดยด้ายทั้ง 2 กลุ่มนั้นทำมุมฉากกัน จากภาพประกอบ 2.15 (a) จะเห็นได้ว่า เส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งเกิดการเคลื่อนที่ออกจากแนวเส้นด้ายเดิมและไม่ตั้งฉากกัน มีลักษณะเฉียงเหมือนฟันเลื่อย เป็นผลกระทบจากความตึงเครียด (Tension) ในผืนผ้าเนื่องจากกระบวนการทอ ก่อให้เกิดแรงปฏิกิริยา (Reaction) ในเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งกระทำต่อส่วนที่เป็นเส้นด้ายลอย (Float segment) และในส่วนของเส้นด้ายที่บริเวณจุดขัดสาน (Intersection segment) ทำให้เส้นด้ายแต่ละเส้นเกิดการเบี่ยงตัวไม่ตั้งฉากกัน



ภาพประกอบ 2.15 แสดงแรงที่กระทำต่อเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2x1

- (a) มุมมอง top view ของเส้นด้ายที่ถูกแรงกระทำ
- (b) the projection linear ของแนวเส้นด้ายบนระนาบ YZ
- (c) the projection linear ของแนวเส้นด้ายบนระนาบ XZ
- (d) มุมมอง top view ของผ้าทอลายทแยงชนิด 2x1

2.7.1 รูปแบบทางเรขาคณิต 2D model ของโครงสร้างผ้าทอแบบ skewness

รูปแบบทางเรขาคณิต 2D model ของแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอแบบ skewness จะทำการแบ่งการวิเคราะห์เป็นแต่ละช่วงตามลักษณะของเส้นด้ายที่ถูกแรงกระทำ เพื่อที่จะพัฒนารูปแบบทางคณิตศาสตร์ให้เกิดความเข้าใจและเห็นภาพได้ดียิ่งขึ้น ในภาพประกอบ 2.15 (b) - (c) เป็นการแสดงให้เห็นถึงลักษณะของแนวเส้นด้าย yarn path ที่เกิดการเบี่ยงตัวไม่ตั้งฉากกันโดยพิจารณาบนระนาบ X Y ในหนึ่งหน่วยของลายทอซ้ำของเส้นด้าย จะเห็นว่าแนวของเส้นด้ายเคลื่อนที่ไม่เป็นเส้นตรง เคลื่อนที่ไปตามแนวยาวมีลักษณะเฉียงเหมือนฟันเลื่อยขึ้นลงสลับกันไปมา ซึ่งจะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองช่วง คือช่วงความยาวแนวของเส้นด้ายลอย (floating region, l_f) คือเส้นด้ายที่ข้ามอยู่ด้านบนเส้นด้ายอีกเส้นเมื่อมีแรงมากระทำจึงทำให้เกิดการเบี่ยงออกไปทำมุมกับแนวตั้งฉากเท่ากับ δ ช่วงที่สองคือช่วงความยาวของเส้นด้ายที่จุดขัดสาน (intersecting region, l_s) และทำมุม β โดยช่วงความยาวของเส้นด้ายทั้งสองช่วงรวมกันจะเท่ากับหนึ่งหน่วยความยาวของเส้นด้ายในลักษณะ skewness (unit length of the skewness, p_r) ในส่วนของช่วงความยาวในการเคลื่อนที่ไปกลับ (return movement length, M_f) ซึ่งเป็นช่วงความสูงของแนวเส้นด้ายที่เอียงไปมาในลักษณะของฟันเลื่อย การพิจารณาเรขาคณิตของเส้นด้ายในลักษณะ skewness ตัวเลขที่กำกับไว้ในภาพประกอบที่ 2.15 เลข 1 และ 2 คือเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของแนวเส้นด้าย ในหนึ่งหน่วยของ unit skewness length (p_r) จะประกอบด้วยความยาวของแนวเส้นด้ายที่สำคัญสองส่วน คือความยาวของส่วนเส้นด้ายลอย (Floating length, l_f) ที่ข้ามไปบนเส้นด้ายอีกเส้นและเฉียงออกไปจากแนวเดิม กับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในมุมมอง top view ในแบบ 2D ในภาพประกอบ 2.1 (b) - (c) ค่าของมุม skewness angle (δ_2) จะขึ้นอยู่กับความยาวของส่วนเส้นด้ายลอย (Floating length, l_f) โดยการกำหนดระยะห่างแนวแกนของเส้นด้ายที่อยู่ติดกัน spacing of the sinking ($p_{1p1} + c$) ค่า c คือค่าคงที่ของช่องว่างระหว่างเส้นด้าย ซึ่งจะถูกกำหนดโดยผู้ออกแบบในการสร้างภาพจำลองตามลายทอนั้น ๆ ในส่วนของค่ามุม return angle (β_2) ซึ่งเป็นมุมของความยาวของเส้นด้ายในส่วนที่เป็นจุดขัดสาน (intersection length, l_{s2}) กระทำกับแนวแกน Y โดยมีความยาวในแนวแกน Y เท่ากับ $p_{1,1}$ ความยาวในแกน X จะถูกควบคุมโดยระยะขอบเขตการเคลื่อนที่ของเส้นด้าย yarn movement (M_{f2}) ที่มีลักษณะเหมือนฟันเลื่อยตลอดความยาวของ unit skewness length (p_r) สามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

ช่วงความยาวของเส้นด้ายลอยที่เป็นด้ายยืนสามารถคำนวณได้จาก

$$l_{f2} = \frac{p_{1p1} + c}{\cos \delta_2} \quad (2.35)$$

ช่วงความยาวของเส้นด้ายที่จุดตัดสานและเป็นด้ายยืนสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$l_{s2} = \frac{P_{1,1}}{\cos \beta_2} \quad (2.36)$$

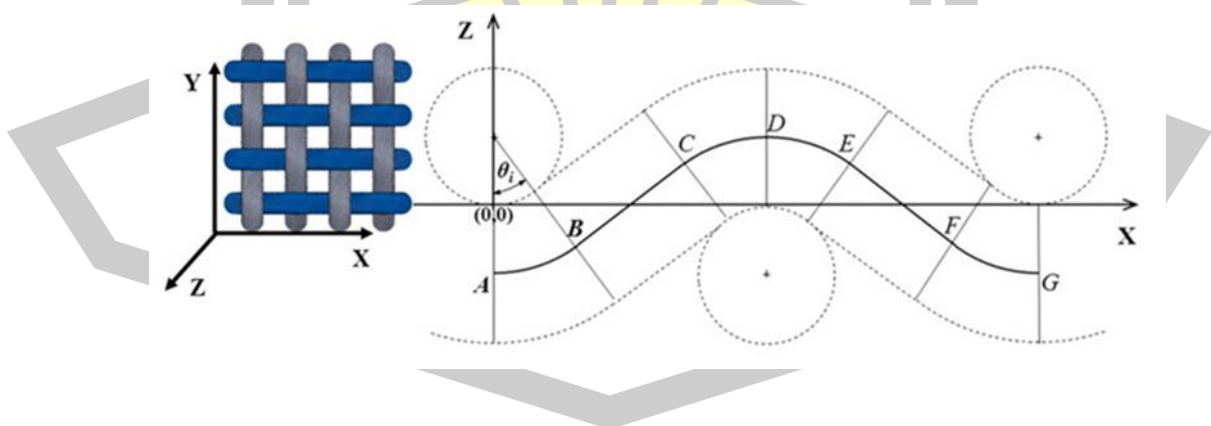
ในการนำเสนองานในครั้งนี้, ขั้นตอนแรกของการสร้างภาพจำลองของผ้าทอ 2/2, 2/1 และ 3/1 twill weaves ในแบบ skewness ผู้ออกแบบจะกำหนดระยะขอบเขตการเคลื่อนที่ของเส้นด้าย (yarn movement, M_{fi}) ดังนี้

$$\text{For } 2 \times 2 \text{ twill fabric; } M_{f1} = M_{f2} = d_i / 4 \quad (2.37)$$

$$\text{For } 2 \times 1 \text{ and } 3 \times 1 \text{ twill fabric; } M_{f1} = M_{f2} = d_i / 2 \quad (2.38)$$

2.8 รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 มิติ ของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่ง

ในปี ค.ศ. 2005 Jiang และ Chen ได้นำเสนอรูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับแนวเส้นด้ายใช้ในการสร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอลายขัดแบบ 2D และ 3D โดยกำหนดจุดหน้าตัดความโค้งของเส้นด้ายในพื้นผ้าเป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์ที่เรากำลังศึกษาออกเป็นส่วนย่อยหลาย ๆ ส่วน และเขียนแทนด้วยระบบเมทริกซ์เวกเตอร์ ซึ่งมีสมาชิกเป็นตัวเลขฐานสอง แสดงตำแหน่งของแนวเส้นด้ายบนหน้าตัดเส้นด้าย



ภาพประกอบ 2.16 ภาพ Projection ของแนวเส้นด้ายบนระนาบ XZ

ในภาพประกอบที่ 2.16 แสดงถึงจุดหน้าตัดความโค้งของเส้นด้ายที่เป็นองค์ประกอบของเวกเตอร์แบ่งออกเป็น A ถึง G ไปตามความยาวของแนวเส้นด้ายโค้งขึ้นลงของลายผ้าทอ หรือลักษณะเฉพาะที่เราต้องการออกแบบ เพื่อให้ได้โครงสร้างของเมทริกซ์เวกเตอร์ H_0 ของความโค้งเส้นด้าย ดังนี้

$$H_0 = \begin{pmatrix} \vec{T}_{R_f,1} & \vec{T}_{R_f,2} & \dots & \vec{T}_{R_f,b} & \vec{T}_{R_f,b+1} & \dots & \vec{T}_{R_f,R_w-1} & \vec{T}_{R_f,R_w} \\ & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \vec{T}_{a,1} & \vec{T}_{a,2} & \dots & \vec{T}_{a,b} & \vec{T}_{a,b+1} & \dots & \vec{T}_{a,R_w-1} & \vec{T}_{a,R_w} \\ & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \vec{T}_{2,1} & \vec{T}_{2,2} & \dots & \vec{T}_{2,b} & \vec{T}_{2,b+1} & \dots & \vec{T}_{2,R_w-1} & \vec{T}_{2,R_w} \\ & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \vec{T}_{1,1} & \vec{T}_{1,2} & \dots & \vec{T}_{1,b} & \vec{T}_{1,b+1} & \dots & \vec{T}_{1,R_w-1} & \vec{T}_{1,R_w} \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

จุด a และ b เป็นจุดเชื่อมต่อกันของส่วนโค้งของแนวเส้นด้าย ด้วยรูปแบบจำลอง arc abscissa model ส่วนโค้งของด้ายยืนเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ath และเส้นด้ายพุ่ง bth ในส่วนของ $\vec{T}_{a,b}$ คือระยะห่างของเวกเตอร์ระหว่างของแนวเส้นด้าย ath ด้ายยืนและ bth ด้ายพุ่ง กับจุดกำเนิดบนระนาบผืนผ้า ($X = 0, Y = 0, Z = 0$) ในส่วนของ R_w, R_f คือจำนวนของจุดที่เชื่อมต่อกันระหว่างเส้นโค้งความยาวตามรูปแบบจำลอง arc abscissa model ไปตามทิศทางของแนวเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่ง สมาชิกในเมทริกซ์เป็นการแสดงออกถึงตำแหน่งของจุดที่เชื่อมต่อแต่ละช่วง ของแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าซึ่งมีองค์ประกอบเป็นเวกเตอร์ ในเมทริกซ์เวกเตอร์ H_0 เป็นข้อมูลของจุดพิกัดที่กำหนดโดยการระบุตำแหน่งเส้นด้ายตามความโค้งของลายทอแนวแกน x_i, y_i และ z_i ในแต่ละหน้าตัดที่ตั้งฉากกับแนวแกนเส้นด้ายไปตามความยาวของเส้นด้ายในผืนผ้า สำหรับพิกัดของแนวเส้นด้ายพุ่งได้แก่เวกเตอร์ $\vec{T} = (T^y, T^z)^T$ ซึ่งเป็นสมาชิกในเมทริกซ์เวกเตอร์ H_0 ที่ประกอบด้วยเวกเตอร์ของระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อของความยาวแนวเส้นด้ายกับระนาบของผ้า เมื่อ T^y คือตำแหน่งของเวกเตอร์ \vec{T} บนระนาบ O_{xy} ในส่วนของ T^z คือระยะห่างของเวกเตอร์ \vec{T} บนระนาบ O_{xz} สำหรับเส้นด้ายยืน เวกเตอร์ $\vec{T} = (T^x, T^z)^T$ เมื่อ T^x คือระยะห่างของเวกเตอร์ \vec{T} บนระนาบ O_{xy} และเมื่อ T^z คือระยะห่างของเวกเตอร์ \vec{T} บนระนาบ O_{yz}

2.8.1 รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเส้นใยตามแนวเส้นด้าย

สำหรับการกำหนดตำแหน่งของเส้นใยจะกำหนดพิกัดบนระนาบย่อย $x' y'$ ของพื้นที่หน้าตัดเส้นด้ายแต่ละเส้น ในภาพตัดขวางของโครงสร้างผ้าทอตามระนาบ Y Z หน้าตัดของเส้นด้ายแต่ละเส้นจะประกอบไปด้วยเส้นใยจำนวนมากบรรจุอยู่ภายในเส้นด้าย เส้นใยเหล่านั้นจะบิดตัวเป็นเกลียวทำมุมตามที่กำหนดไว้ในแต่ละชั้นเลเยอร์ โดยเคลื่อนที่หมุนไปรอบ ๆ ความยาวของแนวเส้นด้ายยืน (x_i) ที่พิกัด (y_i, z_i) ในส่วนของเส้นใยในเส้นด้ายพุ่ง (y_i) จะมีพิกัดไปตามความยาวเส้นด้าย

ที่พิกัด (x_i, z_i) ดังนั้น ระยะความยาวของเส้นใยในชั้นนอกของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{For warp: } \begin{cases} x' = x_i - R_{jc} \sin(\gamma) \sin \theta_i \\ y' = y_i + R_{jc} \cos(\gamma + \psi) \cos \theta_i \\ z' = z_i + R_{jc} \sin(\gamma + \psi) \cos \theta_i \end{cases} \quad (2.40a)$$

$$\text{For waft: } \begin{cases} x' = x_i - R_{jc} \cos(\gamma + \psi) \sin \theta_i \\ y' = y_i - R_{jc} \sin(\gamma) \sin \theta_i \\ z' = z_i + R_{jc} \sin(\gamma + \psi) \cos \theta_i \end{cases} \quad (2.40b)$$

สำหรับเส้นด้ายที่มีโครงสร้างแบบ ผ້าทอแบบ skewness

$$\text{For warp: } \begin{cases} x' = x_i - R_{jc} \sin(\gamma) \sin \theta_i \\ y' = y_i + [R_{jc} \cos(\gamma + \psi) \cos \theta_i] / \cos(\delta_i) \cos(\beta_i) \\ z' = z_i + R_{jc} \sin(\gamma + \psi) \cos \theta_i \end{cases} \quad (19a)$$

$$\text{For waft: } \begin{cases} x' = x_i + [R_{jc} \cos(\gamma + \psi) \cos \theta_i] / \cos(\delta_i) \cos(\beta_i) \\ y' = y_i - R_{jc} \sin(\gamma) \sin \theta_i \\ z' = z_i + R_{jc} \sin(\gamma + \psi) \cos \theta_i \end{cases} \quad (19b)$$

2.9 คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ CAD สำหรับโครงสร้างผ້าทอ

ในโครงสร้างผ້าทอกรณี unbalanced fabrics เส้นใยในเส้นด้ายยืนหรือในเส้นด้ายพุ่ง จะมีทิศทางไปตามแนวเดียวกันกับโครงสร้างของเส้นด้ายที่ได้ออกแบบไว้ พารามิเตอร์ของสมการเกลียวเส้นด้ายจะมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับคาร์คมีเฉลี่ย ดังแสดงไว้ในสมการต่อไปนี้

สำหรับเส้นด้ายยืน

$$\vec{r}(t) = [ct, R_{jc} \cos(t + \psi), R_{jc} \sin(t + \psi)]^T \quad (2.41a)$$

สำหรับเส้นด้ายพุ่ง

$$\vec{r}(t) = [R_{jc} \cos(t + \psi), ct, R_{jc} \sin(t + \psi)]^T \quad (2.41b)$$

$$\text{เมื่อ } c = R_{jc} \tan \alpha_j$$

เส้นโค้งรูปคลื่นที่สร้างจากแบบจำลอง sinusoidal model หรือแบบจำลอง arc abscissa model เส้นโค้งของเส้นใยแต่ละเส้นถูกสร้างขึ้นจากการคำนวณหาความโค้ง เชื่อมต่อกันระหว่างภาพ

หน้าตัดของเส้นใยทั้งสองด้านด้วยเส้นโค้งบี-สไปไลน์ (B-Spline) โดยวิธีการเนิร์บ (NURBS) เป็นวิธีการสร้างเส้นโค้งและผิวโค้งจากเส้น 2 มิติ หรือ 3 มิติ เรขาคณิตของเส้นโค้งเนิร์บ ตั้งอยู่บนพื้นฐานของเส้นโค้งบี-สไปไลน์ และเส้นโค้งเบซิเอร์ (Bezier) โดยอาศัยหลักการแบบสัดส่วน ซึ่งใช้ตัวแปรถ่วงในการปรับเปลี่ยนรูปโค้งในเส้นโค้งย่อย ๆ นั้น การเปลี่ยนรูปทรงวัตถุสามารถทำได้โดยการย้ายที่จุดควบคุม หรือการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่การถ่วงน้ำหนัก หรือการเปลี่ยนแปลงเซตของเวกเตอร์น็ท โดยผลจากการปรับเปลี่ยนรูปโค้งจะไม่มีอิทธิพลต่อเส้นโค้งย่อยที่ใกล้เคียง สำหรับฟังก์ชันมูลฐานของเนิร์บจะนิยามตามอัลกอริทึมของ ค็อกซ์ เดอร์บัวร์ (Cox-de boor) ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้ (Piegl and Tiller, 1997)

$$B_{i,1}(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } t_i \leq t < t_{i+1}, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2.40)$$

$$B_{i,k}(t) = \frac{(t-t_i)B_{i,k-1}(t)}{t_{i+k-1}-t_i} + \frac{(t_{i+k}-t)B_{i+1,k-1}(t)}{t_{i+k}-t_{i+1}} \quad (2.41)$$

เมื่อ n_p คือจำนวนของจุดควบคุม และเมื่อตัวแปรถ่วงมีจำนวนเท่ากับ n_p ดังนั้นค่าของน็ทเวกเตอร์จะมีค่าเท่ากับ $n_p + k + 1$ ค่าของน็ทเวกเตอร์ คือ $[0,0,0,0, \dots, 1,1,1,1]$ จะต้องมีค่าอยู่ในช่วงของเรนจ์ของทุกค่าในพารามิเตอร์ของโดเมน ฟังก์ชันพื้นฐานจากนิยามของเนิร์บจะอยู่ในรูปแบบของสมการเส้นโค้งเนิร์บอันดับหนึ่ง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่การถ่วงน้ำหนักเขียนแทนด้วย w_i อีกทั้งเส้นโค้งเนิร์บยังคำนวณพื้นผิวจากจุดควบคุมและเปรียบเทียบน้ำหนักที่จุดศูนย์กลางวัตถุที่มีอิทธิพลต่อพื้นที่ผิวแต่ละส่วน เมื่อกำหนดให้พารามิเตอร์ของจุดควบคุมบนเส้นโค้งเนิร์บเขียนแทนด้วย t จะได้สมการต่อไปนี้

$$\vec{r}(t) = \frac{\sum_{i=0}^{n_p-1} w_i B_i(t) \cdot \vec{r}_i}{\sum_{l=0}^{n_p-1} w_l B_l(t)} = \sum_{i=0}^{n_p-1} B_i(t) \cdot \vec{r}_i, \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (2.42)$$

การให้ค่าน้ำหนักแก่ตัวแปรถ่วงในแต่ละจุดควบคุมควรมีค่าน้อย ๆ หรือไม่เกิน 1 เป็นการเหมาะสมสำหรับสร้างเส้นโค้งที่ได้จากภาคตัดกรวย เช่น วงกลม วงรี พาราโบลา และไฮเพอร์โบลา ในกรณีที่มีการปรับค่าน้ำหนักของตัวแปรถ่วงเพื่อลดการบิดพลาดโดยให้ค่าเท่ากับ 1 เส้นโค้งเนิร์บจะมีอันดับเท่ากับเส้นโค้งของบี-สไปไลน์ เมื่อกำหนดให้จุดของข้อมูลคือ $\{d_i\}$ ที่เป็นจุดเปลี่ยนโค้งใน

ระนาบ x, y, z ของการย้ายตำแหน่งของเส้นใยในแต่ละหน้าตัด และความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ $\{\vec{r}(t)\}, i = 0, 1, \dots, m$ การประมาณค่าเส้นโค้งเนิร์ป $\vec{r}(t)$ ในอันดับของสมการที่น้อยที่สุดอยู่ที่อันดับสอง สามารถคำนวณได้จากสมการในงานวิจัยของ (Piegl & Tiller, 1997) ดังนี้

$$\text{Minimize } \sum_{i=0}^m \|d_i - \vec{r}(t)\|^2 \quad (2.43)$$

อาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ CAD ร่วมกับเส้นโค้งที่ได้สร้างขึ้นจากการกำหนดจุดต่าง ๆ เพื่อใช้ควบคุมเส้นโค้ง โดยเมื่อมีการกำหนดจุดควบคุมมาก ๆ ก็จะทำให้เส้นโค้งมีความต่อเนื่องกันและมีความละเอียดราบเรียบมากยิ่งขึ้น ในช่วงระยะห่างระหว่างภาพหน้าตัดของเส้นใยแต่ละเส้นบนระนาบสองระนาบที่ตั้งอยู่เรียงกันเป็นแถวต่อเนื่องกันไปตามแนวเส้นโค้งแกนกลางของเส้นด้าย โดยเส้นแกนกลางของเส้นใยแต่ละเส้นจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยเส้นโค้งเนิร์ป เส้นใยแต่ละเส้นจะถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการ sweep ปลายปิด ไปตามความยาวตามแนวเส้นแกนกลางของเส้นใยนั้น ๆ เพื่อประกอบกันเป็นเส้นด้าย ภาพจำลองของโครงสร้างของเส้นด้ายจะนำเสนอในรูปแบบ solid model

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2547 นิพนธ์ พนมเขต ได้ทำวิจัยในหัวข้อเรื่อง การทำนายสมบัติเชิงโครงสร้างของผ้าทอบนพื้นฐานแบบจำลองของพืช โดยได้ศึกษาจากเส้นใยสามชนิด ได้แก่ ฝ้าย ฝ้ายผสมพอลิเอสเตอร์ และเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ในโครงสร้างผ้าทอลายขัด 2×1 และผ้าทอลายต่วน ซึ่งโครงสร้างลายทอผ้าเหล่านี้จะถูกนำไปทดสอบหาสมบัติเชิงโครงสร้างผ้าแล้วนำผลลัพธ์ที่วัดได้จริง ไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากทฤษฎีของพืช พบว่า โครงสร้างของลายทอผ้า และความหนาแน่นในเส้นด้าย มีผลต่อความหนาและความหยิกงอของเส้นด้าย โดยที่ภาวะปั่นแห้ง ผ้าทอจะมีความหนาเพิ่มขึ้นมากกว่าภาวะแห้งและเปียก และเมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองของพืช พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้มีความแตกต่างกันมาก จึงจำเป็นต้องปรับแก้ระบบสมการในแบบจำลองโดยการหาค่าปรับแก้ที่เหมาะสม แต่การแก้ระบบสมการจะต้องใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนมาก จึงอาจต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างแต่ละโครงสร้างผ้าทอ เพื่อเพิ่มเติมตัวแปรที่ทราบค่าให้แก้ระบบสมการเชิงเรขาคณิตตามแบบจำลองของพืช

ในปี พ.ศ. 2549 ประณัฐ โพธิยะราช ได้ทำการศึกษาวิจัย เรื่องการจำลองภาพ 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอด้วยภาษาเวอร์ชวลเรียลิตีโมเดลลิง ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างภาพจำลองสามมิติ

ของโครงสร้างผ้าทอด้วยโปรแกรมที่ทำหน้าที่สร้างภาพจำลองดังกล่าว ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ภาษาวิชวลเบสิก โดยเริ่มจากผู้ใช้ป้อนลายทอที่ต้องการพร้อมปรับค่าการทอที่เกี่ยวข้อง เช่น ขนาดของเส้นด้าย ความหนาแน่นของด้ายยืนและด้ายพุ่ง สีของเส้นด้าย เป็นต้น จากนั้นภาพสามมิติของโครงสร้างผ้าทอที่กำหนดจะถูกสร้างขึ้นโดยอัตโนมัติ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถจำลองภาพสามมิติของโครงสร้างผ้าทอหลายพื้นฐาน ได้แก่ ลายขัด ลายทแยง และลายตัวน อย่างไรก็ตามภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ยังไม่มีการแสดงถึงรายละเอียดของเส้นใยที่ประกอบอยู่ในเส้นด้าย อีกทั้งภาพจำลองเหล่านี้ยังไม่ได้อาศัยแบบจำลองที่ครบถ้วนซึ่งแบบจำลองทางเรขาคณิตเหล่านี้มักจะสร้างขึ้นในลักษณะสองมิติ ทำให้การพิจารณาเป็นไปได้ยาก จึงเป็นเพียงการสร้างภาพของโครงสร้างผ้าทอเพื่อให้เกิดความเข้าใจในลวดลายของผ้าทอชนิดต่าง ๆ เท่านั้น

ในปี ค.ศ. 1937 Pierce ได้นำเสนอแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของผ้าทอลายขัด (Peirce's model) บนข้อสมมุติฐานที่ว่า เส้นด้ายพิจารณามีความยืดหยุ่นไม่ต้านทานต่อการโค้งงอ มีหน้าตัดเป็นวงกลม และไม่สามารถถูกบีบอัดหรือดึงยืดออกได้ แบบจำลองของ Peirce นี้ถูกนำมาใช้อ้างอิงในงานวิจัยด้านโครงสร้างผ้าทออย่างแพร่หลายจนกระทั่งปัจจุบัน

ในปี ค.ศ. 1958 Kemp ได้พิจารณาเกี่ยวกับแบบจำลองของ Peirce's model พบว่ารูปแบบจำลองของ Peirce มีความยากในการแก้ระบบสมการซึ่งเป็นแบบสมการไม่เชิงเส้น (non-linear equations) จึงได้ปรับปรุงข้อสังเกตของ Peirce ที่สมมุติให้หน้าตัดของด้ายมีรูปร่างเป็นวงกลม โดยกำหนดให้หน้าตัดของเส้นด้ายมีรูปร่างต่าง ๆ เนื่องจากในกระบวนการทอเส้นด้ายที่มีหน้าตัดเป็นวงกลมจะถูกกดทับจากการขัดสานกันทำให้หน้าตัดเส้นด้ายเกิดการเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบต่าง ๆ เช่น วงรี สีเหลี่ยมปลายมน และรูเลนส์นูน เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 1998 Adanur และ Liao ได้นำคอมพิวเตอร์ถูกนำมาใช้ประมวลผลเพื่อแสดงภาพจำลอง 3 มิติ ของโครงสร้างลายทอชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้พัฒนาโปรแกรม computer aided geometric based design (CAGD) ที่มีศักยภาพใช้สร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของโครงสร้างผ้าทอแบบ 3 มิติ โดยจะทำการจำลองรูปแบบของสิ่งทอภายใต้พื้นฐานวิชาการและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ง่ายต่อการใช้งานนำเข้ามาช่วยในการออกแบบโครงสร้างผ้า 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อใช้ทำนายสมบัติเชิงกลและคุณลักษณะการใช้งานรูปร่าง 3 มิติ โดยการออกแบบโปรแกรมจะทำการจำลองแยกผืนผ้าออกเป็นชั้น ๆ (layer) ซึ่งสามารถสร้างเป็นผ้าผืนได้ถึงสามชั้น ทำให้ผู้ใช้โปรแกรมสามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น และมีความยืดหยุ่นในการเปลี่ยนแปลงการออกแบบที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น

ในปี ค.ศ. 1999 Lin และ Newton ได้นำเสนองานวิจัยที่น่าสนใจ ด้วยการอธิบายวิธีการสร้างและแสดงลักษณะของโครงสร้างผ้าทอในแบบ 3 มิติ โดยคอมพิวเตอร์กราฟิก ภาพจำลองของแนวเส้นด้ายจะถูกสร้างขึ้นด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการสร้างเส้นโค้งแบบ B-splines เป็นวิธีการต่อเส้นโค้งเข้าด้วยกันด้วยการคำนวณควบคุมแบบพื้นที่เฉพาะที่ (Local control) ที่ถูกควบคุมโดยอิทธิพล

ของจุดควบคุม (Control point) ที่ใกล้ที่สุด ซึ่งจะมีฟังก์ชันประสาน (Blending function) เป็นตัวกำหนดรูปร่างของเส้นโค้ง ทำให้สามารถสร้างเป็นภาพจำลองของผ้าฝืนที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะเส้นโค้งคลื่นของด้ายในผืนผ้าที่เกิดขึ้นตามลายทอแบบทแยง

ในปี ค.ศ. 2003 Jeon และคณะ ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองของ Peirce ให้เข้าใจถึงโครงสร้างเส้นด้ายและสมบัติเชิงกลต่าง ๆ โดยได้อ้างอิงงานวิจัยของ Peirce ในปี ค.ศ. 1937 นำมาพัฒนาเพื่อเป็นส่วนประกอบของแบบจำลองเส้นด้ายที่เปลี่ยนแปลงไปตามตามลายทอในภาคตัดขวางของด้ายที่เป็นวงกลม ในแบบจำลองนี้ได้อธิบายถึงจุดศูนย์กลางของเส้นด้าย จะเป็นตำแหน่งของรูปแบบการเชื่อมต่อกันระหว่างเส้นโค้งกับเส้นตรง และยังได้อ้างถึงข้อเสนอนะต่าง ๆ จากหลาย ๆ แบบจำลอง ซึ่งกำหนดตำแหน่งของเส้นด้ายในรูปแบบเส้นโค้งและเส้นตรงเท่านั้น หรือ race-track กับการแบนแผ่ออกของเส้นด้าย ในแบบจำลองนี้ยังสามารถอธิบายถึงลักษณะเฉพาะของโครงสร้างเส้นด้ายด้วยเช่นกัน และใช้ในการศึกษาแรงดึง (tensile force) การผ่อนคลายของผ้าฝืน (fabric relaxation) และยังได้ศึกษาถึงการเปลี่ยนรูปร่างของโครงสร้างเส้นด้าย ตลอดจนพฤติกรรมความตึงของเส้นด้ายซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการผ่อนคลายของผ้า

ในปี ค.ศ. 2005 Jiang and Chen ได้อาศัยวิธีการทางด้านเรขาคณิตและขั้นตอนที่ เกี่ยวข้องกับพีชคณิตนามาสสร้างเป็นแบบจำลองของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอในลักษณะ 3 มิติด้วยการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย เพื่อประโยชน์ในการเพิ่มประสิทธิภาพและความเข้าใจให้แก่ผู้ปฏิบัติที่เกี่ยวกับงานด้านการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการใหม่ ทำให้ได้แบบจำลองที่สมบูรณ์ มีความสมจริง รูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของเส้นด้ายที่ถูกสร้างขึ้นมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนแก้ไขได้ง่ายต่อการใช้งาน โดยแนวคิดของงานวิจัยนี้จะพิจารณาความแตกต่างของโครงสร้างเส้นด้ายหลาย ๆ รูปแบบ ซึ่งเรียกว่าโครงสร้างแบบทอพอลยีของเส้นด้าย (topological structure of yarns) เส้นด้ายแต่ละเส้นจะมีอิทธิพลซึ่งกันและกันเมื่อเส้นด้ายเส้นหนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างก็จะมีผลต่อรูปร่างของเส้นด้ายอีกเส้น ภาพจำลองของเส้นโค้งแนวเส้นด้ายตามโครงสร้างลายขัด จะถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการสร้างเส้นโค้งแบบ B-splines เป็นวิธีการเชื่อมต่อเส้นโค้งเข้าด้วยกันจากการคำนวณหาตำแหน่งของจุดควบคุม (control point) การสร้างภาพพื้นที่หน้าตัดตามขนาดของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าลายขัดก็อาศัยวิธีการแบบ B-splines เช่นเดียวกัน งานวิจัยนี้มีจุดเด่นในการนำเสนอรูปแบบวิธีการทางเรขาคณิตที่แตกต่างไปจากเดิม เพื่อให้เกิดความสมจริงของเส้นด้ายที่ประกอบกันเป็นผ้าทอในรูปแบบ 3 มิติ โดยการกำหนดเวกเตอร์ให้กับแบบจำลองของเส้นด้ายทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างพื้นที่หน้าตัดของเส้นด้าย โดยเฉพาะที่ตำแหน่งของจุดขัดสานที่สัมผัสกันระหว่างเส้นด้ายสองเส้น รูปร่างพื้นที่หน้าตัดของเส้นด้ายจะเกิดการกดทับกันทำให้แบนลงมีลักษณะเป็นรูปวงรี

ในปี ค.ศ. 2009 Sriprateep และ Bohez ได้นำเสนอวิธีการใหม่สำหรับคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ CAD เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสร้างเป็นโครงสร้างเส้นด้าย เส้นด้ายที่สร้างขึ้นจะประกอบไปด้วยเส้นใยหลาย ๆ เส้นนำมาประกอบเข้าด้วยกัน (fiber assembly) เกิดเป็นแบบจำลองของเส้นด้ายที่มีรูปร่างลักษณะตามทฤษฎีของเส้นด้ายที่สมบูรณ์แบบ ในกรณีที่เกิดการย้ายตำแหน่งของเส้นใยในเส้นด้าย (fiber migration) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการปั่นด้ายด้วยวิธีริงสปันยาร์น (ring spun yarn) การหาตำแหน่งของเส้นใยที่ย้ายตำแหน่งไปในทิศทางต่าง ๆ ในบนหน้าตัดเส้นด้าย ซึ่งได้อาศัยแนวคิดวิธีการของ virtual locations นำมาใช้ โดยได้นำเสนอโมเดลใหม่สำหรับคำนวณตัวแปรที่เกิดจากกระบวนการริงสปันยาร์น โดยการกำหนดให้พื้นที่ของ virtual locations มีรูปร่างเป็นวงรี เพื่อให้มีพื้นที่ครอบคลุมสอดคล้องกับลักษณะของเส้นใยแต่ละเส้นมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเส้นใยจะมีรูปร่างเป็นวงรีที่เกิดจากการบิดตัวกันเป็นเกลียวเพื่อยึดกันเป็นเส้นด้าย ซึ่งความรีของเส้นใยจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับมุมเกลียวของเส้นด้าย หลังจากนั้นนำคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบมาใช้สร้างภาพจำลองของเส้นด้ายในแบบ 3 มิติ เพื่อแสดงรูปร่างของเส้นด้ายในลักษณะต่าง ๆ ตามแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่ได้ประยุกต์ขึ้น

ในปี ค.ศ. 2009 Turan และ Baser ได้สร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×2 เพื่อแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยทำการทดลองจากการใช้ผ้าจริง ๆ เป็นผ้าชนิดบางลายทแยงแบบ 2×2 ถูกจับมาซึ่งไว้ให้ตั้งในแนวระนาบ เพื่อที่จะสังเกตลักษณะของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งได้อย่างชัดเจน และเห็นได้ว่าเส้นด้ายจะเกิดการเอียงตัวไปในทิศทางตามขวาง เนื่องจากผ้าถูกซึ่งอยู่ทำให้เกิดแรงภายในโครงสร้างผ้าทำให้เส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งเกิดการเอียงตัวไม่ตั้งฉากกัน วิธีการทดลองนี้เนื่องจากโครงสร้างผ้าทอในรูปแบบสองมิติไม่สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ หรือกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงในแบบสามมิติได้ เพื่อให้การวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นไปด้วยความแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากมีความจำเป็นในการกำหนดค่ามุม skewness ของเส้นด้ายที่เอียงเบี่ยงออกไปโดยการวัดเบื้องต้น เพื่อที่จะนำไปใช้ในการสร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าในแบบสามมิติที่มีลักษณะของเส้นด้ายในแบบ skewness ที่เสมือนจริง ดูเป็นธรรมชาติ ในการสร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าเบื้องต้นทิศทางของแนวแกนเส้นด้ายจะถูกแบ่งออกเป็นเซ็กเมนต์ เชิงเรขาคณิตขนาดเล็กเป็นช่วง ๆ ไป การกำหนดมิติและมุมทิศทางของแนวเส้นด้ายใช้วิธีเส้นโค้ง "B spline" เพื่อแปลงแนวเส้นด้ายให้เกิดเป็นเส้นโค้งเรียบ การตรวจสอบความถูกต้องและสมบูรณ์ของรูปแบบภาพจำลอง โดยการเปรียบเทียบจากค่าความหยักงอของเส้นด้ายที่คำนวณได้ และผ้าคำนวณต่อพื้นที่ จากทฤษฎี เปรียบเทียบกับกับผ้าตัวอย่างจริงที่ใช้งานการทดลอง พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี และจากภาพจำลองมีความแตกต่างจากค่าที่วัดได้จริง เนื่องจากแรงภายในของโครงสร้างผ้าตัวอย่างจริง มีความเคลื่อนไหวไม่เท่ากันเพราะแรงในการการซึ่งยึดผ้าในแต่ละด้านต่างกัน การพิจารณาควรแบ่งบริเวณผ้าที่ชัดเจนและแรงที่ใช้ในการซึ่งยึดผ้าควรเท่ากันสม่ำเสมอในทุกบริเวณ

ในปี ค.ศ. 2012 Turan และ Okur ได้สร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×1 และ 3×1 โดยจำลองเส้นด้ายในสภาวะที่เส้นด้ายพุ่งไม่ตั้งฉากกับเส้นด้ายยืนเรียกว่า “skewness” เส้นด้ายจะมีลักษณะเอียงเฉียงเหมือนฟันเลื่อย เป็นผลกระทบจากความตึงเครียด (tension) ในพื้นผ้าเนื่องจากกระบวนการทอ ทำให้เส้นด้ายแต่ละเส้นเกิดการบิดเอียงตัวไม่ตั้งฉากกัน ในส่วนของผ้าทอลายทแยงชนิด 2×1 , 3×1 เป็นลายทแยงแบบไม่สมดุลง (uneven sided twill) กล่าวคือลายทอของผ้าทั้งด้านหน้าและด้านหลังจะต่างกัน ในการสร้างภาพจำลองจะเริ่มจากการใช้ผ้าตัวอย่างจริงมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของโครงสร้าง เช่น ระยะห่างระหว่างแกนกลางของด้ายยืน ความหนาแน่นของเส้นด้ายยืนและพุ่ง และ ค่ามุม skewness angle จะพิจารณาวัตจากเส้นด้ายลอยของลายทแยงเพื่อใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างผ้า การกำหนดทิศทางทางของแนวเส้นด้ายที่เอียงเอียงในเชิงเรขาคณิตที่จุดตัดสานของรูปแบบสามมิติ จะถูกพิจารณาให้อยู่ภายในรูปปริซึมสี่เหลี่ยม แล้วใช้วิธีเส้นโค้ง B-spline ในการกำหนดทิศทางของเส้นด้ายที่มีเส้นโค้งเรียบ ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของความหยิกงอ และค่ามวลต่อหน่วยพื้นที่ ของผ้าทอลายทแยง $2/1$ และ $3/1$ ได้จากเรขาคณิตของการกำหนดจุดควบคุมเส้นโค้ง B-spline แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้จากภาพจำลองสามมิตินี้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ทดลองวัดจริง และยังสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผ้าตัวอย่างจริง ผลการตรวจสอบพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากภาพจำลองมีความใกล้เคียงกับผ้าทอจริงที่ใช้เป็นตัวอย่าง ในส่วนของภาพจำลองก็มีความคล้ายคลึงใกล้เคียงกับผ้าทอจริงได้ดี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของโครงสร้างผ้าและธรรมชาติคุณสมบัติความเอียงของเส้นด้ายเป็นตัวแปรที่สำคัญ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการสร้างและวิเคราะห์ภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอ โดยใช้คอมพิวเตอร์ CAD เข้ามาช่วยในการสร้างเป็นภาพจำลอง ตามโครงสร้างลายทอที่จะศึกษา โดยได้แบ่งวิธีการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของการกำหนดข้อมูล และส่วนของขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

กำหนดข้อมูล

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้ายยืนและด้ายพุ่ง (d_1, d_2)
- ระยะห่างระหว่างแกนกลางของด้ายยืนและด้ายพุ่ง (p_1, p_2)
- ความสูงของความหยิกงอของด้ายยืนและด้ายพุ่ง (h_1, h_2)
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (df)
- จำนวนเลเยอร์ในเส้นด้าย (N_2)
- จำนวนเส้นใยในเส้นด้าย (Nf)

ขั้นตอนการดำเนินงาน

แบบจำลอง 2 มิติ สำหรับหน้าตัดเส้นด้ายและโครงสร้างผ้าทอ

1. จัดวางตำแหน่งของเส้นใยแต่ละเส้น บนภาพหน้าตัดของเส้นด้าย โดยหลักการของ virtual location
2. ระบุพิกัดตำแหน่งของเส้นใยและเส้นด้าย ตามโครงสร้างลายทอที่จะศึกษา

แบบจำลอง 3 มิติ สำหรับเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่ง

3. สร้างเส้นแนวแกนกลางของเส้นด้ายแต่ละเส้นตามลายทอที่จะศึกษา
4. ภาพหน้าตัดของเส้นใยแต่ละเส้นจะถูกสร้างขึ้น ตามลำดับชั้นในตำแหน่งใน virtual location แล้วบิดเป็นเกลียวทำมุมตามที่กำหนดไว้ในแต่ละชั้นเลเยอร์โดยหมุนรอบเส้น yarn path.
5. แนวเส้นแกนกลางของเส้นใยหลาย ๆ เส้น ที่ถูกสร้างขึ้นจะนำมาประกอบเข้าด้วยกัน

คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ CAD สำหรับโครงสร้างผ้าทอ

5. เส้นด้ายจะถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการ sweep ภาพหน้าตัดของเส้นใย ไปตามแนวเส้นแกนกลางของเส้นใยที่ม้วนตัวเป็นชั้น ๆ พันอยู่รอบ ๆ แนวเส้นแกนกลางของเส้นด้าย
6. ทำการประกอบเส้นด้ายแต่ละเส้นเพื่อสร้างเป็นโครงสร้างผ้าตามลายทอ

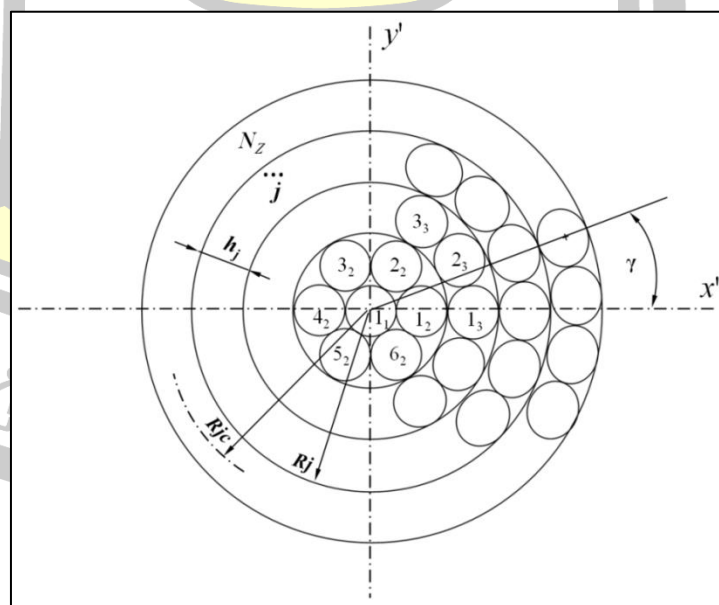
ภาพประกอบ 3.1 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโครงสร้างผ้าทอ

จากแบบจำลองทางเรขาคณิตตามทฤษฎีของ Peirce (บทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3) ได้นำมาเป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลองทางเรขาคณิตของโครงสร้างผ้าทอในแบบ 2D ขึ้นมาใหม่ ทำให้สามารถสร้างสมการขึ้นโดยอาศัยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของผ้าทอในหนึ่งหน่วยซ้ำ เพื่อการสร้างและกำหนดรูปร่างของแนวเส้นด้ายตามลายทอต่าง ๆ การสร้างภาพเส้นด้ายแต่ละเส้นจะถูกสร้างขึ้นโดยวิธีการ sweep ภาพหน้าตัดของเส้นด้ายไปตามแนวเส้นด้าย (yarn path) ภาพของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งจะถูกนำมาประกอบกันเป็นโครงสร้างผ้า

3.1.1 การกำหนดพิกัดของเส้นใยบนหน้าตัดเส้นด้าย

ในแต่ละค่าพิกัดของจุดศูนย์กลางเส้นใยในตำแหน่งต่าง ๆ บนพื้นที่เสมือนจริง หรือ virtual location ของภาพหน้าตัดของเส้นด้าย จะถูกกำหนดให้เป็นไปตามระบบพิกัดเชิงขั้ว โดยตำแหน่งของเส้นใยแต่ละเส้นจะมีพิกัด (R_{jc}, γ) เมื่อกำหนดให้จุดศูนย์กลางของเส้นด้ายเป็นจุดอ้างอิง เส้นใยที่พิกัด $[0, 2\pi]$ พารามิเตอร์ในการกำหนดหาตำแหน่งของเส้นใยจะอยู่ในรูปของตัวแปรของ r_f, ϕ_f และ ϖ โดยที่พารามิเตอร์ r_f และ ϕ_f เป็นพิกัดเชิงขั้วระหว่างจุดศูนย์กลางของเส้นใย กับจุดศูนย์กลางของ virtual location บนแกน u, v ที่เอียงไปตามเส้นโค้งวงกลมมีระยะทางอยู่ในช่วง $[0, r_{f \max}]$ และ $[0, 2\pi]$ ตามลำดับ ดังนั้นค่าของ $r_{f \max}$ จะมีค่าสอดคล้องกับตำแหน่งของเส้นใยที่มากที่สุด ใน virtual location ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย ϕ_f ที่กำหนดขึ้น



ภาพประกอบ 3.2 ภาพหน้าตัดของเส้นด้ายและเส้นใยในแต่ละเลเยอร์

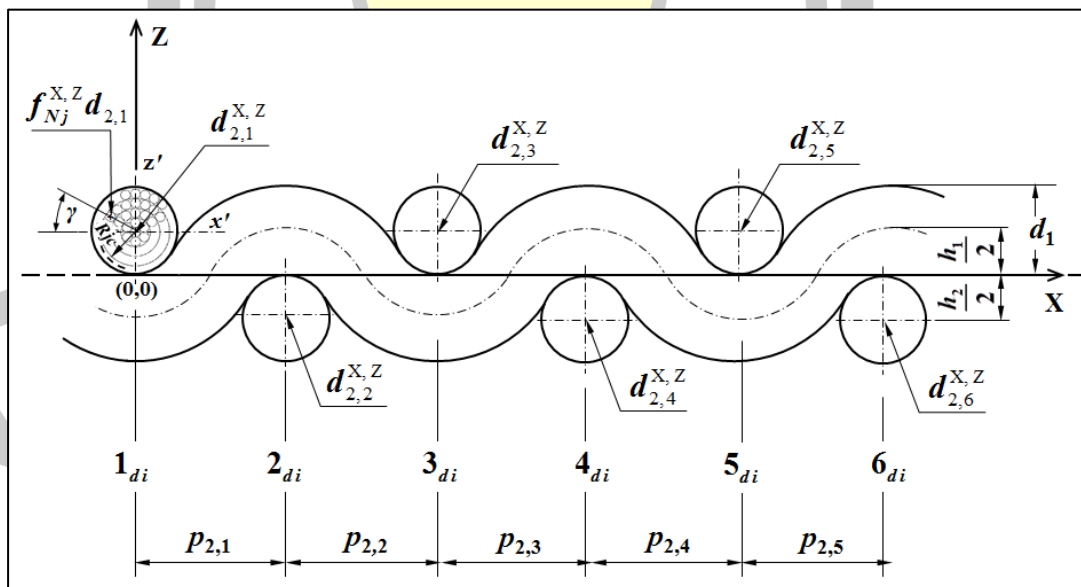
ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้พื้นที่เสมือนจริงหรือ virtual location มีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ดังนั้น จากระนาบคาร์ทีเซียนสำหรับระบบพิกัดเชิงขั้วโดยมีจุดศูนย์กลางของเส้นด้ายเป็นจุดกำเนิดอ้างอิง จึงสามารถใช้เพื่อกำหนดพิกัดตำแหน่งต่าง ๆ ของเส้นใยบนหน้าตัดเส้นด้ายตามระบบพิกัดฉาก x, z ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$f_{Nj}^{x'} = Rjc \cos \gamma \tag{3.1}$$

$$f_{Nj}^{z'} = Rjc \sin \gamma \tag{3.2}$$

- เมื่อ $f_{Nj}^{x'}$ = พิกัดของเส้นใยเส้นที่ N เลเยอร์ที่ j บนระนาบย่อยแกน x'
 $f_{Nj}^{z'}$ = พิกัดของเส้นใยเส้นที่ N เลเยอร์ที่ j บนระนาบย่อยแกน z'
 Rjc = รัศมีจากจุดศูนย์กลางเส้นด้ายถึงเส้นกึ่งกลางของชั้นเลเยอร์ j
 γ = มุมระหว่างจุดศูนย์กลางของ virtual location กับแนวแกนตามระบบพิกัดฉาก $x' z$

3.2 แบบจำลองสำหรับโครงสร้างผ้าทอลายชนิด 1 x 1 (plain weave)



ภาพประกอบ 3.3 แบบจำลองโครงสร้างผ้าทอลายชนิด

จากการกำหนดพิกัดตำแหน่งของเส้นใยบนภาพหน้าตัดเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอ ตำแหน่งของเส้นด้ายในระนาบ X, Z จากภาพประกอบ 3.3 กำหนดให้เส้นด้ายพุ่งในโครงสร้างลายทอที่จะศึกษาเขียนแทนด้วย i_{d2} ซึ่งมีค่าระหว่าง 1 ถึง N_p โดยที่ N_p คือจำนวนด้ายพุ่งในหนึ่งหน่วยซ้ำ (number weft in weave repeat) และ N_e คือจำนวนด้ายยืนในหนึ่งหน่วยซ้ำ (number warp in weave repeat) ดังนั้นการระบุพิกัดของเส้นด้ายตามแนวแกน X สามารถทำได้โดยสมการ

$$d_i^X = p_i (i_{di} - 1) \quad (3.3)$$

เมื่อ d_i^X = พิกัดของเส้นด้ายยืน/ด้ายพุ่ง เส้นที่ i_{di} ตามแนวแกน x
 p_i = ระยะห่างระหว่างเส้นด้ายยืน/ด้ายพุ่ง (pitch)
 i_{di} = ลำดับของเส้นด้ายยืน/ด้ายพุ่งในแนวแกน x

ในส่วนของการกำหนดตำแหน่งให้กับเส้นด้ายในแนวแกน Z ซึ่งก็คือระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่ต่ำที่สุดและสูงที่สุดของจุดศูนย์กลางของหน้าตัดเส้นด้าย โดยวัดตามแนวตั้งฉากกับระนาบผ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความสูงของความหยิกงอของเส้นด้ายหรือ $h/2$ นั้นเอง

จากภาพประกอบ 3.2 จะกำหนดให้ค่า $h/2$ มีค่าเป็นบวก (+) เพื่อแทนตำแหน่งของเส้นด้ายที่อยู่ด้านบนระนาบผ้า และจะมีค่าเป็นลบ (-) เมื่อเส้นด้ายอยู่ในตำแหน่งด้านล่างระนาบผ้า เพื่อระบุพิกัดตำแหน่งของเส้นด้ายบนโครงสร้างผ้าทอในแนวแกน Z ได้ดังนี้

$$d_i^Z = \pm h_2/2 ; \begin{cases} h_2/2 & \text{เมื่อ ด้ายอยู่ด้านบนระนาบผ้า} \\ -h_2/2 & \text{เมื่อ ด้ายอยู่ด้านล่างระนาบผ้า} \end{cases} \quad (3.4)$$

เมื่อ d_i^Z = พิกัดของเส้นด้ายยืน/เส้นด้ายพุ่งในแนวแกน Z
 $h/2$ = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเส้นด้ายกับระนาบผ้า

ในระบบพิกัดฉากซึ่งสามารถใช้ในการบอกตำแหน่งของจุดใด ๆ บนระนาบ X, Z โดยอ้างอิงจากตำแหน่งของเส้นตรงสองเส้นที่ตัดกันเป็นมุมฉากที่พิกัด (0, 0) เมื่อพิจารณาส่วนหนึ่งของผ้าทอลายขัดดังภาพประกอบ 3.2 สามารถอาศัยระนาบผ้า (plane of the cloth) ที่เป็นเส้นตรงแนวนอนที่ลากผ่านกึ่งกลางของเส้นสัมพันธ์แนวเส้นด้าย จะถูกกำหนดให้เป็นแกน X และกำหนดให้เส้นตรงแนวตั้งแกน Z คือเส้นตรงที่ลากผ่านจุดศูนย์กลางของหน้าตัดเส้นด้ายที่อยู่ด้านบน ลงมาตัดตั้งฉากกันกับระนาบผ้าหรือเส้นแนวนอนแกน X ตัดกันเป็นมุมฉากที่พิกัด (0, 0) จะใช้เป็นจุดอ้างอิงเริ่มต้น เพื่อประโยชน์ในการระบุพิกัดตำแหน่งอื่น ๆ บนโครงสร้างผ้า

อาศัยแบบจำลองสำหรับการกำหนดพิกัดของเส้นใยบนหน้าตัดเส้นด้ายสมการที่ (3.1) และ (3.2) ร่วมกับแบบจำลองสำหรับการกำหนดพิกัดของแนวเส้นด้ายบนโครงสร้างผ้าทอสมการที่ (3.3) และ (3.4) นำมารวมเข้าด้วยกันในการกำหนดพิกัดของเส้นใยบนโครงสร้างผ้าทอ ได้ดังนี้

$$f_{Nj}^X d_i = Rjc \cos \gamma + p_i (i_{di} - 1)$$

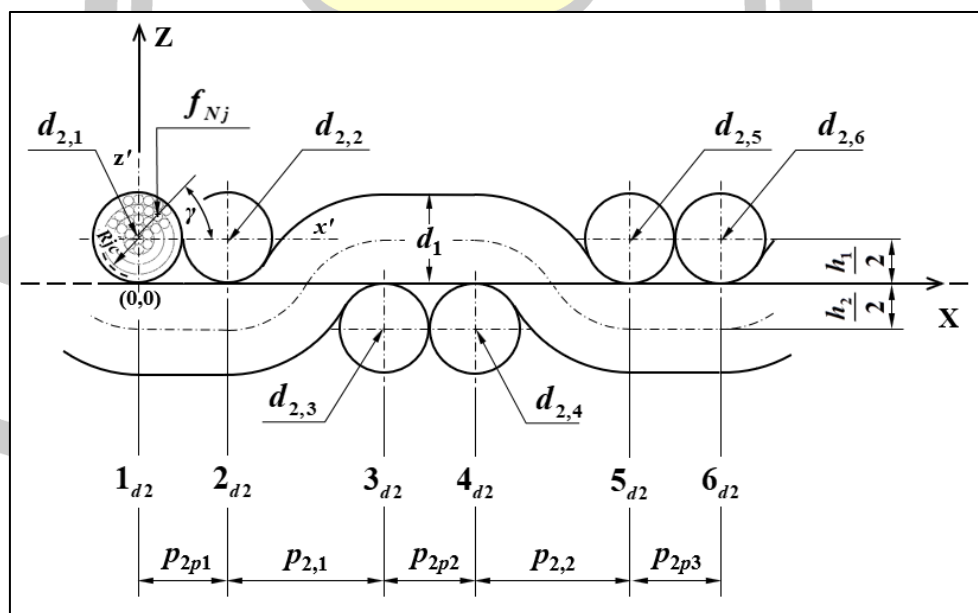
หรือ $f_{Nj}^X d_i = f_{Nj}^X + d_i^X$ (3.5)

$$f_{Nj}^Z d_i = Ric \sin \gamma \pm h_i/2$$

หรือ $f_{Nj}^Z d_i = f_{Nj}^Z + d_i^Z$ (3.6)

เมื่อ $f_{Nj}^X d_i$ = พิกัดของเส้นใยเส้นที่ N เลเยอร์ที่ j ในเส้นด้ายยืน/เส้นด้ายพุ่งเส้นที่ i_{di} ตามแนวแกน X บนโครงสร้างผ้าทอ
 $f_{Nj}^Z d_i$ = พิกัดของเส้นใยเส้นที่ N เลเยอร์ที่ j ในเส้นด้ายยืน/เส้นด้ายพุ่งเส้นที่ i_{di} ตามแนวแกน Z บนโครงสร้างผ้าทอ

3.3 แบบจำลองสำหรับโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 2 x 2 plain weave



ภาพประกอบ 3.4 แบบจำลองโครงสร้างผ้าทอลายขัด 2 x 2

จากภาพประกอบ 3.4 ในการพัฒนาสมการขึ้นมาใหม่สำหรับแบบจำลองเส้นด้าย เพื่อการ
สร้างและกำหนดรูปร่างของแนวแกนเส้นด้ายตามโครงสร้างลายทอแบบ 2×2 โดยอาศัยพารามิเตอร์
ต่าง ๆ ดังนี้

- เมื่อ d_i^X = พิกัดของเส้นด้ายยืน/ด้ายพุ่งตามแนวแกน X
 i_{di} = ลำดับของเส้นด้ายยืน/ด้ายพุ่งในแนวแกน X
 p_i = ระยะห่างระหว่างเส้นด้ายยืน/ด้ายพุ่ง (pitch)
 N_i = N_e or N_p . จำนวนด้ายพุ่ง/ด้ายยืนในหนึ่งหน่วยซ้ำ
 p_{ipi} = ระยะห่างระหว่างเส้นด้ายที่อยู่ชิดติดกัน

การกำหนดพิกัดตำแหน่งของเส้นด้ายบนโครงสร้างผ้าทอลายขัดแบบ 2×2 จะถูกกำหนด
โดยเลขลำดับของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้า โดยจะนับเส้นด้ายเส้นแรกในตำแหน่งพิกัด 0,0 ซึ่งจะ
นับเป็นเส้นด้ายลำดับที่ 1 ($i_{di} = 1$) ซึ่งเป็นจำนวนเลขคี่ 3, 5, 7 และเลขลำดับของเส้นด้ายใน
โครงสร้างผ้าที่เป็นเลขคู่ 2, 4, 6 เพื่อสร้างสมการในการกำหนดพิกัดของเส้นด้าย เมื่อค่าของระยะห่าง
ระหว่างเส้นด้ายที่อยู่ชิดติดกันมีค่า $p_{ipi} = (d_i + d_i) / 2$ สามารถกำหนดสมการได้ ดังนี้

เมื่อเลขลำดับของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าเป็นเลขคู่ $i_{di=2i} = \text{even number}$

$$d_{i=2i}^X = p_i \left[i_{di=2i} - \left(\frac{i_{di=2i} + 1}{2} \right) \right] + p_{ipi} \left(\frac{i_{di=2i}}{2} \right); 2i = 2, 4, 6 \dots N_i \quad (3.7)$$

เมื่อเลขลำดับของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าเป็นเลขคี่ $i_{di=2i+1} = \text{odd number}$

$$d_{i=2i+1}^X = p_i \left[i_{di=2i+1} - \left(\frac{i_{di=2i+1} + 0.5}{2} \right) \right] + p_{ipi} \left[i_{di=2i+1} - \left(\frac{i_{di=2i+1} + 0.5}{2} \right) \right]; 2i+1 = 1, 3, 5 \dots N_i \quad (3.8)$$

การกำหนดพิกัดตำแหน่งของเส้นด้ายบนโครงสร้างผ้าทอในแนวแกน Z จะใช้สมการ
เดียวกันกับสมการที่ (3.4) ดังนี้

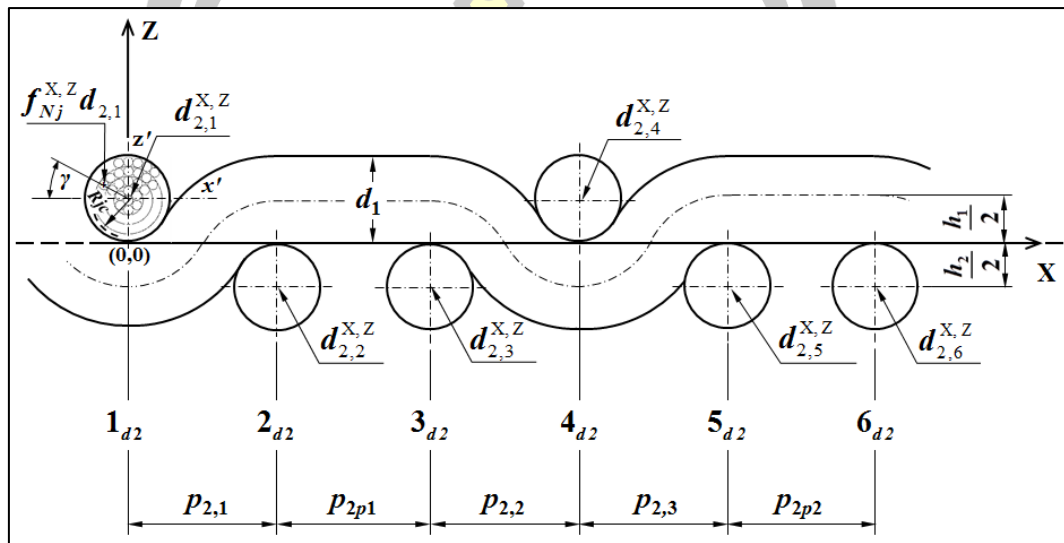
$$d_i^Z = \pm h_2/2; \begin{cases} h_2/2 & \text{เมื่อ ด้ายอยู่ด้านบนระนาบผ้า} \\ -h_2/2 & \text{เมื่อ ด้ายอยู่ด้านล่างระนาบผ้า} \end{cases}$$

เมื่อ d_i^Z = พิกัดของเส้นด้ายยืน/เส้นด้ายพุ่งในแนวแกน Z

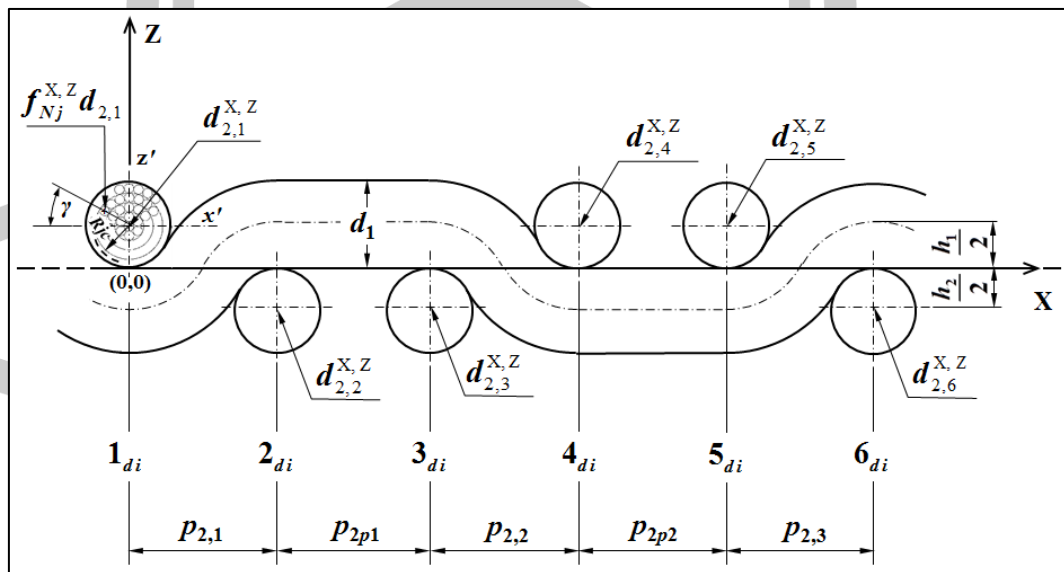
$h_2/2$ = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเส้นด้ายกับระนาบผ้า

3.4 แบบจำลองสำหรับโครงสร้างผ้าทอลายทแยง (twill weaves)

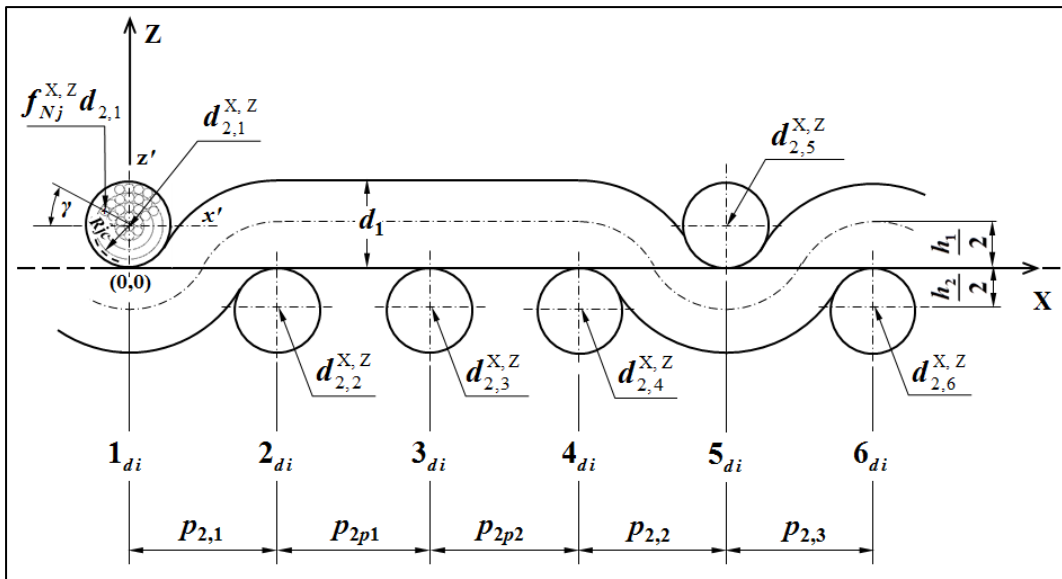
ในหนึ่งหน่วยซ้ำของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงจะมีจำนวนเส้นด้ายยืนเท่ากับเส้นด้ายพุ่ง ลายทแยงที่เล็กที่สุดอย่างน้อยต้องประกอบไปด้วยเส้นด้ายยืน 3 เส้นและเส้นด้ายพุ่ง 3 เส้น รูป แบบจำลองโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×1 , 2×1 และ 3×1 มีดังนี้



ภาพประกอบ 3.5 แบบจำลองโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×1 twill weaves



ภาพประกอบ 3.6 แบบจำลองโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×2 twill weaves



ภาพประกอบ 3.7 แบบจำลองโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3x1 twill weaves

จากภาพประกอบ 3.5 – 3.7 มีการระบุพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไว้เพื่อการพัฒนาสมการขึ้นมาใหม่สำหรับแบบจำลองเส้นด้าย เพื่อการสร้างและกำหนดรูปร่างของแนวแกนเส้นด้ายตามโครงสร้างลายทแยงเพื่อศึกษารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎีของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงที่ประกอบกันเป็นผืนผ้าอธิบายได้ ดังนี้

- เมื่อ
- d_i^X = พิกัดของเส้นด้ายยืน/ด้ายพุ่งตามแนวแกน X
 - i_{di} = ลำดับของเส้นด้ายยืน/ด้ายพุ่งในแนวแกน X
 - p_i = ระยะห่างระหว่างเส้นด้ายยืน/ด้ายพุ่ง (pitch)
 - N_i = N_e or N_p . จำนวนด้ายพุ่ง/ด้ายยืนในหนึ่งหน่วยซ้ำ
 - p_{ipi} = ระยะห่างระหว่างเส้นด้ายที่อยู่ติดกัน

และเมื่อค่าระยะห่างระหว่างเส้นด้ายที่อยู่ติดกันมีค่า เท่ากับ ระยะห่างระหว่างเส้นด้ายยืน/ด้ายพุ่ง $p_{ipi} = p_i$ จึงทำให้สามารถใช้สมการเพื่อกำหนดตำแหน่งของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าลายทแยงในแนวแกน X ได้โดยใช้สมการที่ (3.3) คือ $d_i^X = p_i (i_{di} - 1)$

ดังนั้น การกำหนดพิกัดตำแหน่งของเส้นด้ายบนโครงสร้างผ้าในแนวแกน Z ก็จะใช้สมการเดียวกันกับสมการที่ (3.4)

$$d_i^Z = \pm h_2/2 ; \begin{cases} h_2/2 & \text{เมื่อ ด้ายอยู่ด้านบนระนาบผ้า} \\ -h_2/2 & \text{เมื่อ ด้ายอยู่ด้านล่างระนาบผ้า} \end{cases}$$

3.5 แบบจำลองสำหรับโครงสร้างผ้าทอแบบหลายชั้น (Multi-layered woven fabric)

การสร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอแบบหลายชั้น จะใช้รูปแบบจำลองในงานวิจัยของ kutepov, (1953) นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการสร้างภาพจำลองสามมิติที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เพื่อสร้างภาพของโครงสร้างผ้าทอแบบ 2 ชั้น และ 3 ชั้น โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

3.1.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ก่อนการจำลอง

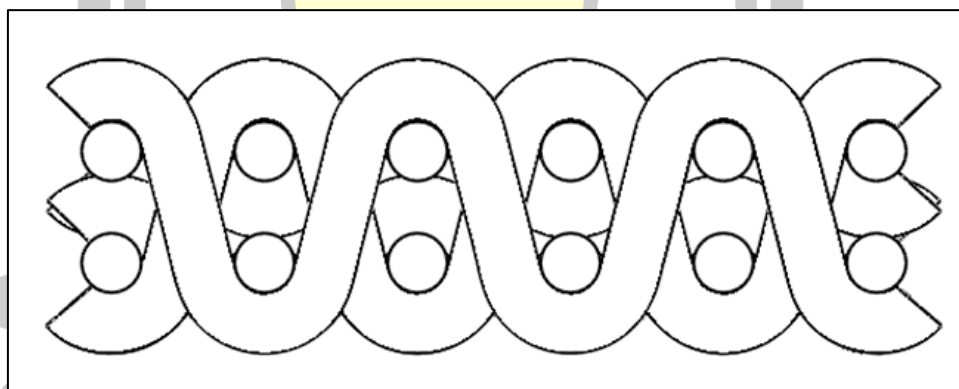
- ขนาดและจำนวนของเส้นใยในเส้นด้ายแต่ละค่า
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นด้ายแต่ละเส้น

3.1.2 ขั้นตอนการสร้างรูปแบบภาพจำลองโดย CAD

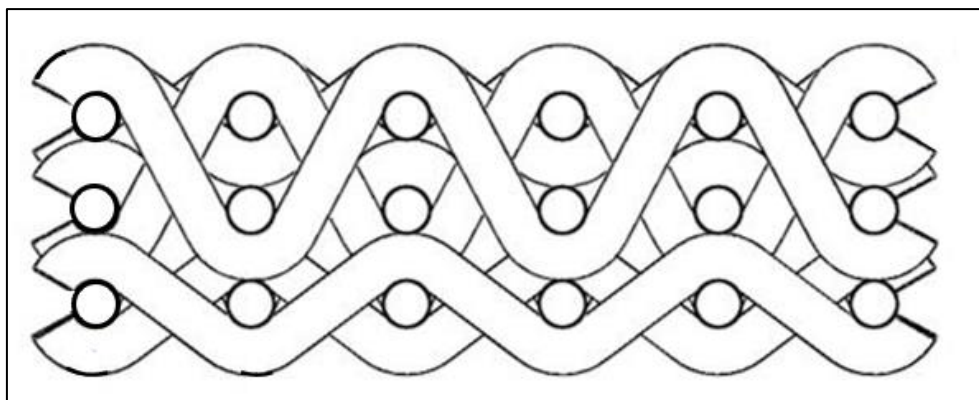
- คำนวณพิกัด (x,y) ของเส้นใยแต่ละจุดบนเส้นด้าย
- คำนวณพิกัด (x,y,z) ของเส้นใยแต่ละจุดบนเส้นด้าย
- สร้างเส้นโค้ง Nurbs โดยประเมินตำแหน่งเส้นใยในเส้นด้ายทุกค่าโดยใช้โปรแกรม

Solid Work จำลองรูปทรงทางเรขาคณิตของเส้นใย เส้นด้าย และโครงสร้างผ้า

- สร้างภาพกราฟิกของหน้าตัดเส้นด้ายในรูปแบบ Solid model แล้วทำการ Sweep ไปตามเส้นโค้ง Nubs ที่ใช้เป็นแนวเส้นด้ายจะได้รูปร่างของเส้นด้ายแต่ละเส้นตามลายทอที่กำหนด
- ทำการประกอบเส้นด้ายแต่ละเส้นเพื่อสร้างเป็นโครงสร้างผ้าตามลายทอ



ภาพประกอบ 3.8 รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบสองชั้น

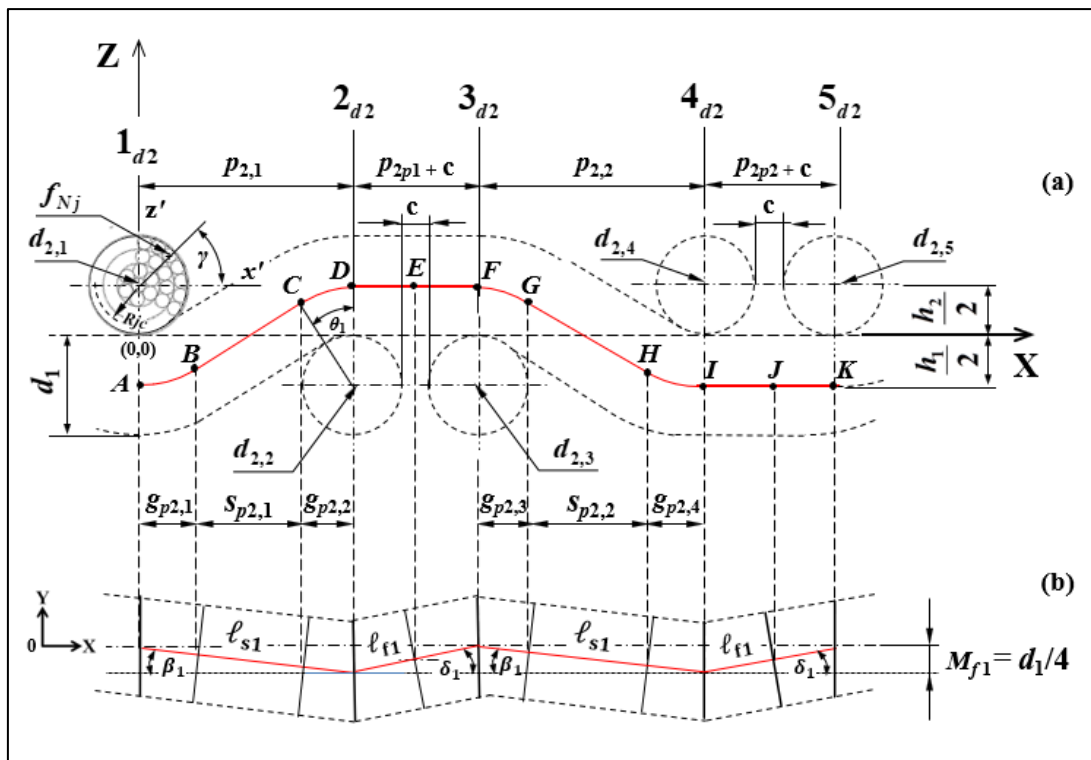


ภาพประกอบ 3.9 รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบสามชั้น

3.6 แบบจำลองสำหรับโครงสร้างผ้าทอแบบ skewness

ในหนึ่งหน่วยลายทอของผ้าทอลายทแยง 2×2 จะใช้จำนวนเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่ง ทั้งด้านหน้าและด้านหลังผ้าเท่ากัน เรียกว่าลายทแยงแบบสมดุ (even sided twill) ลายทแยงแบบสมดุจะมีลายทอทั้งสองด้านเหมือนกันทั้งหน้าและหลังผ้า เพียงแต่แนวของเส้นทแยงจะกลับกัน ดังนั้นจาก ภาพประกอบ 3.10 (a) และ 3.10 (b) แนวเส้นแกนกลางของเส้นด้าย (center line of yarn path) จะมีลักษณะเบ้เฉียงแบบ skewness เมื่อมองในมุม top view มีลักษณะคล้ายกับพื้นเลื่อย โดยจุดยอดแหลมของพื้นเลื่อยคือเส้นสัมผัส (tangent) ที่ส่วนปลายของเส้นความยาวด้ายลอย (floating length, l_{f1}) กับที่ส่วนปลายเส้นความยาวของส่วนจุดขัดสาน (intersection length, l_{s1}) ที่วนกลับสลับกันขึ้นลงทำมุม β_1 ตำแหน่งจุดกลับของเส้นด้ายที่จุดขัดสานนี้ในผ้าทอลายทแยงชนิด 2×2 ในมุมมอง top view (3b) จะกำหนดให้ตรงกับจุดศูนย์กลาง cross-section ของเส้นด้าย d_{2i} ในการ coordinate จะกำหนดให้เหมือนกันทั้งด้ายยืนและด้าย

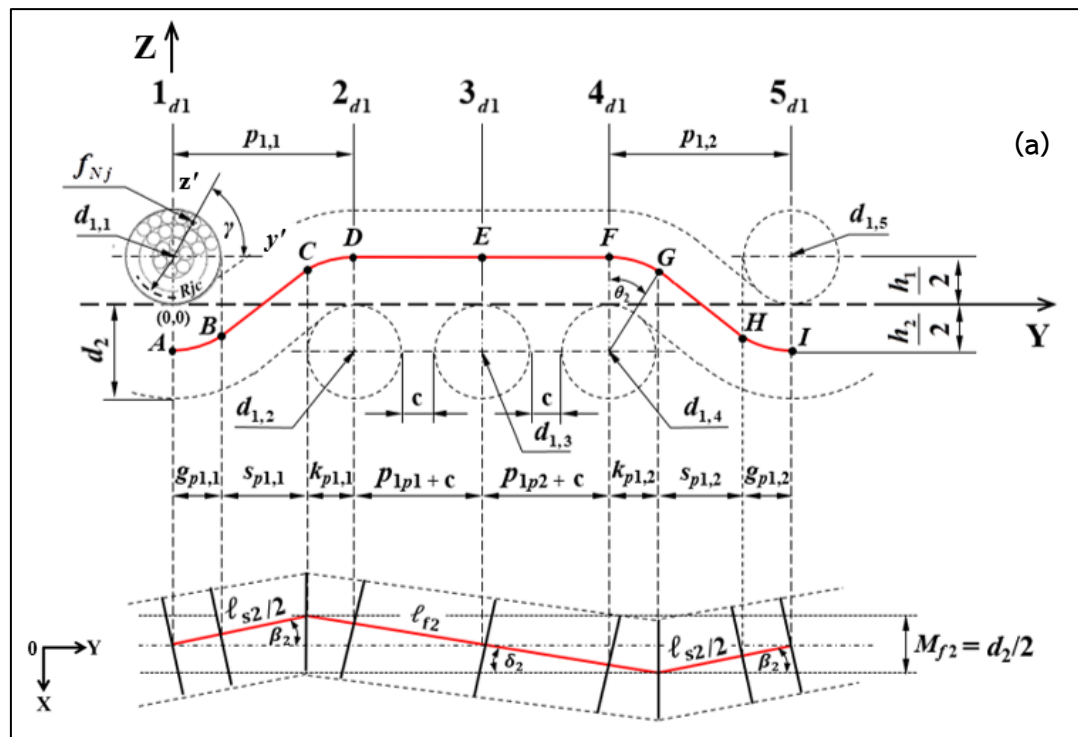
ในส่วนของผ้าทอลายทแยงชนิด 2×1 , 3×1 เป็นลายทแยงแบบไม่สมดุ (uneven sided twill) กล่าวคือลายทอของผ้าทั้งด้านหน้าและด้านหลังจะต่างกัน ดังนั้นการ coordinate แนวเส้นแกนกลางของเส้นด้าย (center line of yarn pat) ของหน้าตัดเส้นด้ายที่มีรูปร่างเป็นวงกลมและเส้นด้ายแบบ skewness จะกำหนดตำแหน่งจุดกลับของเส้นด้ายยืน (จุดยอดแหลมของพื้นเลื่อย) ของเส้นด้ายยืน d_1 เหมือนกับลายทแยง 2×2 ดังภาพประกอบ 3.11 (a) และ 3.11 (b) แต่ในส่วน of เส้นด้ายยืน d_1 ของลายทแยงชนิด 2×1 , 3×1 จะกำหนดตำแหน่งจุดกลับของเส้นด้ายพุ่ง ให้ตรงกับเส้นสัมผัสด้านข้างของภาพหน้าตัด cross-section ของเส้นด้าย d_{2i}



ภาพประกอบ 3.10 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง
ชนิด 2 × 2 แบบ skewness

ตาราง 3.1 พิกัดของแนวเส้นด้ายยืนที่ตำแหน่ง A – K บนระนาบ XYZ ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง
ชนิด 2 × 2 แบบ skewness

Axis Point	X	Y	Z
A	0	0	$-h_1/2$
B	$g_{p2,1} = d_2/2 = B_X$	$-(g_{p2,1}) \sin \beta_1$	$-[d_1 \sin(90^\circ - \theta_1) - (h_1/2)]$
C	$(B_X + s_{p2,1}) = C_X$	$(g_{p2,2}) \sin \beta_1 - M_{f1}$	$d_1 \sin(90^\circ - \theta_1) - (h_1/2)$
D	$(C_X + g_{p2,2}) = D_X$	$-M_{f1}$	$h_1/2$
E	$D_X + (p_{2p1+c}/2) = E_X$	$-(p_{2p1+c}/2) \sin \delta_1$	$h_1/2$
F	$E_X + (p_{2p1+c}/2) = F_X$	0	$h_1/2$
G	$(F_X + g_{p2,3}) = G_X$	$(g_{p2,3}) \sin \beta_1 - M_{f1}$	$d_1 \sin(90^\circ - \theta_1) - (h_1/2)$
H	$(G_X + s_{p2,2}) = H_X$	$-(g_{p2,4}) \sin \beta_1$	$-[d_1 \sin(90^\circ - \theta_1) - (h_1/2)]$
I	$(H_X + g_{p2,4}) = I_X$	$-M_{f1}$	$-h_1/2$
J	$I_X + (p_{2p2+c}/2) = J_X$	$-(p_{2p2+c}/2) \sin \delta_1$	$-h_1/2$
K	$J_X + (p_{2p2+c}/2) = K_X$	0	$-h_1/2$



ภาพประกอบ 3.11 แบบจำลองเชิงเรขาคณิตของโครงสร้างผ้าทอหลายทแยง
ชนิด 3 × 1 แบบ skewness

ตาราง 3.2 พิกัดของแนวเส้นด้ายยืนที่ตำแหน่ง A - I บนระนาบ XYZ ของโครงสร้าง
ผ้าทอหลายทแยงชนิด 3 × 1 แบบ skewness

Axis	X	Y	Z
Point			
A	0	0	$-h_2/2$
B	$-(g_{p1,1}) \sin \beta_2$	$g_{p1,1} = d_1/2 = B_Y$	$-[d_1 \sin(90^\circ - \theta_1) - (h_1/2)]$
C	$-(M_{f2}/2)$	$(B_Y + s_{p1,1}) = C_Y$	$d_1 \sin(90^\circ - \theta_1) - (h_1/2)$
D	$(k_{p1,1}) \sin \delta_2 - (M_{f2}/2)$	$(C_Y + k_{p1,1}) = D_Y$	$h_2/2$
E	0	$(D_Y + p_{1p1} + c) = E_Y$	$h_2/2$
F	$(M_{f2}/2) - (k_{p1,2}) \sin \delta_2$	$(E_Y + p_{1p2} + c) = F_Y$	$h_2/2$
G	$(M_{f2}/2)$	$(F_Y + k_{p1,2}) = G_Y$	$d_1 \sin(90^\circ - \theta_1) - (h_1/2)$
H	$(g_{p1,2}) \sin \beta_2$	$G_Y + s_{p1,2} = H_Y$	$-[d_1 \sin(90^\circ - \theta_1) - (h_1/2)]$
I	0	$H_Y + g_{p1,2} = J_Y$	$-h_2/2$

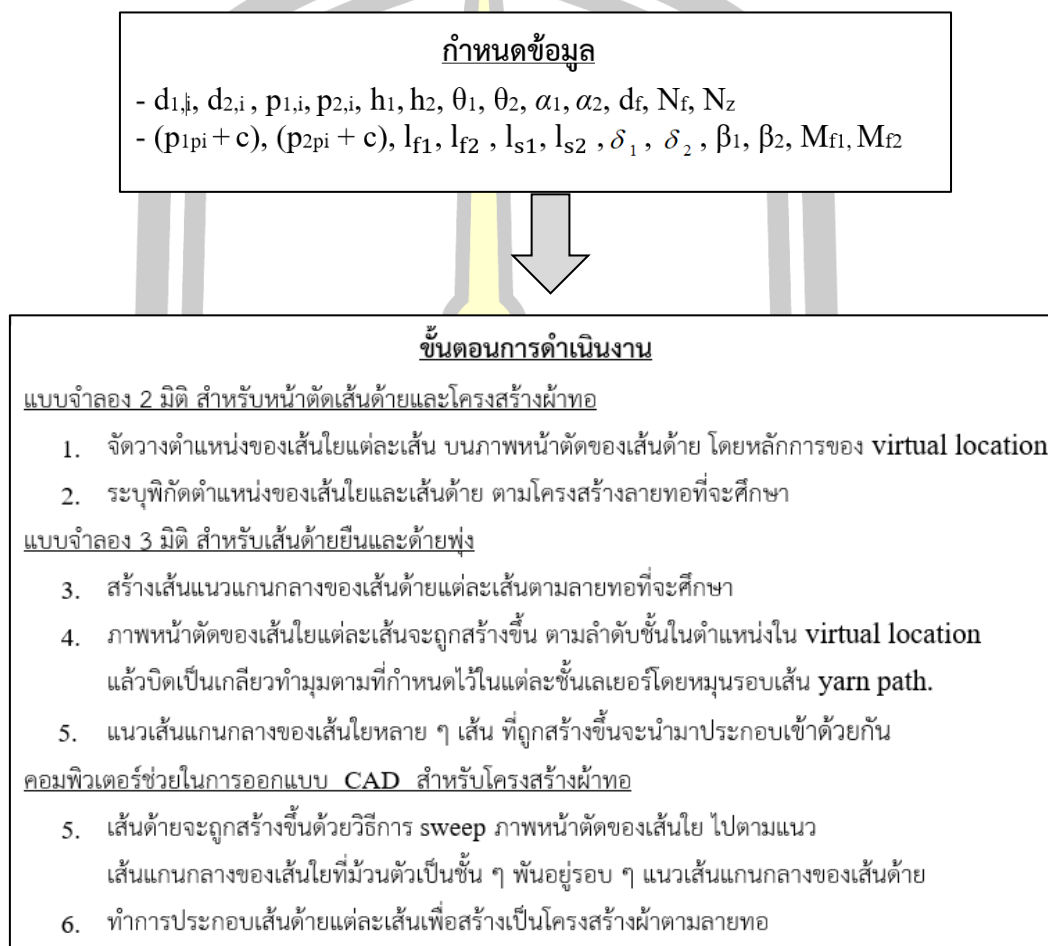
เมื่อ $g_{pi,i}$ = ความยาวส่วนโค้งของเส้นด้ายที่ทอดอยู่ด้านล่างเส้นด้ายอีกเส้นหนึ่ง

$s_{pi,i}$ = ความยาวของเส้นด้ายในส่วนที่เป็นเส้นตรงที่จุดขัดสานในระนาบ

$k_{pi,i}$ = ความยาวส่วนโค้งของเส้นด้ายที่ข้ามอยู่บนเส้นด้ายอีกเส้นหนึ่ง ในระนาบ

i_x = ระยะความยาวของตำแหน่งจุดพิกัดต่าง ๆ เมื่อ $i = A, B, \dots, I$

วิธีดำเนินงานในการสร้างและวิเคราะห์ภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×1 , 2×2 และ 3×1 ในลักษณะของเส้นด้ายแบบ skewness โดยได้แบ่งวิธีการดำเนินการวิจัย ในครั้งนี้ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของการกำหนดข้อมูล และส่วนของขั้นตอนการดำเนินงาน



ภาพประกอบ 3.12 การดำเนินการสร้างภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงโครงสร้างผ้าทอลายทแยงแบบ skewness

พหุ ประถมศึกษา

ผลการวิจัยและการอภิปราย

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและสร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอในลักษณะสามมิติในเชิงรายละเอียดแสดงให้เห็นถึงในระดับเส้นใยในเส้นด้ายของโครงสร้างผ้าทอ โดยเริ่มจากการนำทฤษฎีทางสิ่งทอและทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ร่วมกันในการสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างผ้าทอ แล้วนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาสร้างเป็นภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอ โดยประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) ภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอจะประกอบไปด้วยเกลียวของเส้นใยแต่ละเส้นที่บิดตัวเข้าด้วยกันเป็นเส้นด้าย และเส้นด้ายแต่ละเส้นจะมีแนวเส้นด้าย (yarn path) ที่แตกต่างกันตามลายทอ (weave pattern) เมื่อนำมาประกอบเข้าด้วยกันจะได้ภาพจำลองแบบสามมิติของโครงสร้างผ้าทอที่ต้องการศึกษา

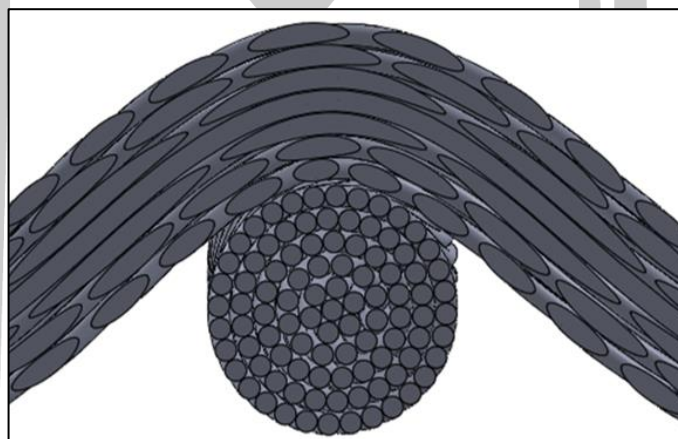
4.1 ผลการสร้างรูปแบบภาพจำลองสามมิติของเส้นด้าย

จากการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) นำมาสร้างเป็นเส้นด้ายที่มีเส้นใยหลาย ๆ เส้นถูกบรรจุอยู่ในภาพหน้าตัดของเส้นด้ายที่มีรูปร่างเป็นวงกลม ลักษณะตามของทฤษฎี Open packing (ดังภาพประกอบ 2.2) เส้นด้ายจะประกอบไปด้วยจำนวนเส้นใยหลาย ๆ เส้นมีรูปร่างเป็นวงกลมเรียงตัวกันเป็นวงแหวนหลาย ๆ ชั้นมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ซึ่งแต่ละชั้นวงแหวนที่มีเส้นใยบรรจุอยู่เรียกว่าเลเยอร์ (layer) โดยเส้นใยแต่ละเส้นในแต่ละชั้นเลเยอร์จะถูกบิดเป็นเกลียว (twist) เพื่อให้ยึดติดกันเป็นเส้นด้าย ซึ่งเลเยอร์ชั้นข้างในสุดที่จุดศูนย์กลาง คือเส้นใยเส้นแรกและมีเส้นเดียวถือเป็นแนวแกนกลางของเส้นด้ายจะนับเป็นเลเยอร์ชั้นที่ 1

ขั้นตอนแรกในการทดลองสร้างรูปแบบภาพจำลองสามมิติของเส้นด้ายจะเริ่มจากการกำหนดข้อมูลของเส้นด้าย ดังนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นด้ายยืน (d_1) เท่ากับ 0.139 มม. มีจำนวนเส้นใยในเส้นด้ายทั้งหมด 35 เส้น, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย (df_1) เท่ากับ 0.019 มม., จำนวนชั้นของเลเยอร์เท่ากับ 4 เลเยอร์, และมุมเกลียวของเส้นด้ายเท่ากับ 12.5° ในส่วนของเส้นด้ายพุ่ง (d_2) กำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.219 มม. มีจำนวนชั้นเลเยอร์อยู่ที่ 6 เลเยอร์, เส้นใยในเส้นด้ายทั้งหมดมี 96 เส้น, และมุมเกลียวของเส้นด้ายพุ่งมีค่าเท่ากับ 38.6°

ผลการสร้างรูปแบบภาพจำลองของเส้นด้าย โดยประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) เป็นเครื่องมือในการสร้างภาพจำลองของเส้นด้ายที่ประกอบไปด้วยเส้นใยหลาย ๆ เส้น ซึ่งสามารถแสดงภาพหน้าตัดของเส้นด้ายและตำแหน่งการเรียงตัวของเส้นใยในแต่ละชั้นเลเยอร์

ได้อย่างถูกต้องเหมาะสม เป็นไปตามการกำหนดข้อมูลเส้นด้ายและตามสมการของเส้นด้าย (สมการที่ 2.1 – 2.4) ในส่วนการแสดงผลภาพตัดขวางด้านข้างของเส้นด้ายยีน จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเส้นใยในแต่ละชั้นเลเยอร์ที่บิดตัวเป็นเกลียวรอบเส้นใยเลเยอร์ 1 ซึ่งถือว่าเป็นเส้นใยแกนกลางตามแนวเส้นด้าย ภาพของเส้นใยตัดขวางของเส้นใยแต่ละชั้นเลเยอร์บริเวณที่ถูกตัดจะมีลักษณะรูปร่างเป็นวงรี ยาวปลายแหลม โดยความยาวของรูปวงรีจะขึ้นอยู่กับมุมเกลียวของเส้นใยในแต่ละชั้นเลเยอร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งค่ามุมจะเพิ่มขึ้นตามชั้นเลเยอร์ที่เพิ่มขึ้น ค่ามุมเกลียวของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ได้ภาพตัดเส้นใยรูปร่างวงรีมีความยาวสั้นลง และบริเวณที่เป็นส่วนโค้งด้านในหรือเลเยอร์ชั้นนอกสุดที่สัมผัสกับเส้นด้ายพุ่ง ความยาวของวงรีจะมีความยาวที่สั้นที่สุด เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความโค้งและมีมุมเกลียวมากที่สุด



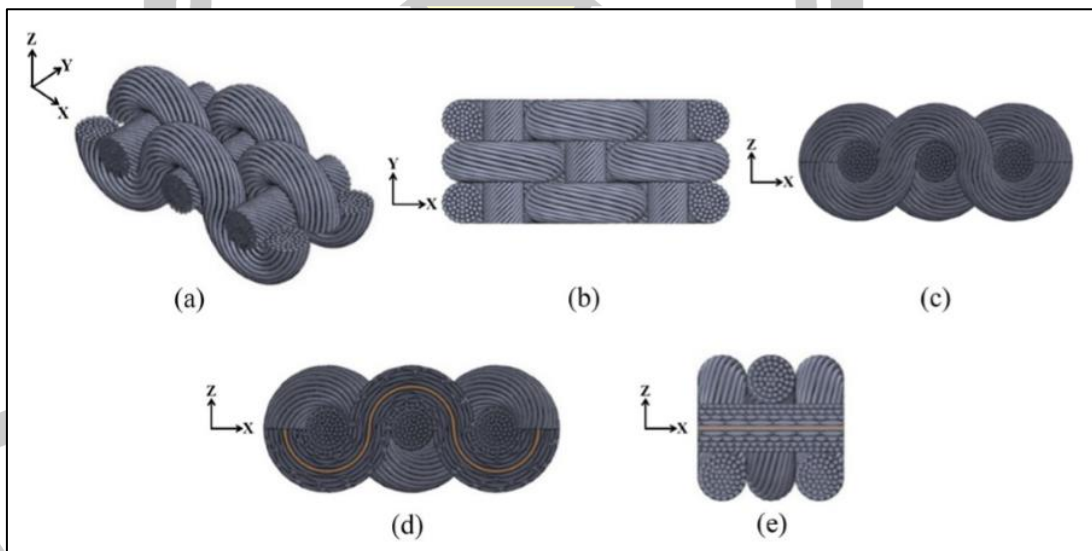
ภาพประกอบ 4.1 แสดงภาพตัดขวางของเส้นด้ายในรูปแบบของ CAD model

การสร้างแบบจำลองของโครงสร้างผ้าด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) โดยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works ในการสร้างรูปแบบภาพจำลองบนคอมพิวเตอร์ขนาดและรูปร่างของภาพจำลองจะเป็นไปตามเงื่อนไขในรูปแบบทางเรขาคณิตของเส้นด้ายและโครงสร้างผ้าที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ และยังสามารถแสดงค่าต่าง ๆ เช่น density, material, mass, และ weight เป็นต้น และยังสามารถมองเห็น 3D Model ได้ทุกมุมมอง เส้นด้ายแต่ละเส้นจะถูกสร้างขึ้นในโหมด part mode ซึ่งเป็นโหมดการทำงานเริ่มต้นก่อนที่จะก้าวสู่การทำงานในโหมด assembly เพื่อประกอบกันเป็นโครงสร้างผ้าต่อไป

ในเส้นด้ายยีนและด้ายพุ่งแต่ละเส้น เมื่อนำมาประกอบกันเป็นผืนผ้าตามลายทอต่าง ๆ แล้วเส้นด้ายทั้งสองจะไม่สามารถคงลักษณะที่เป็นเส้นตรงได้ เนื่องจากต้องมีการขัดสานซึ่งกันและกัน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าความหยิกงอ (crimp) ซึ่งเป็นการอธิบายความโค้งของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้า

ในงานวิจัยนี้ได้อาศัยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของ (Hu, 2004) ที่ได้นำเสนอรูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่เกี่ยวข้องกับความหยิกงอของเส้นด้ายในโครงสร้างลายทอผ้า ซึ่งได้อธิบายถึงลักษณะความโค้งงอของแนวเส้นแกนกลางของเส้นด้ายในผืนผ้า โดยแบบจำลองที่นำมาประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดตำแหน่งพิกัดของแนวแกนเส้นด้าย คือ แบบจำลองของแนวเส้นด้ายในรูปแบบ arc abscissa (Peirce's) model และแบบจำลองของแนวเส้นด้ายในรูปแบบ sinusoidal model

เพื่อทดสอบความสามารถของคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) โดยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works V. 2011 ในการสร้างภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้า โดยอาศัยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตกรณีโครงสร้างผ้าแบบ unbalanced fabrics และนิยามของความหยิกงอในผ้าผืนในสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.28) - (2.30) และกำหนดพารามิเตอร์ของโครงสร้างผ้า ดังนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของด้ายยืนและด้ายพุ่งเท่ากับ $d_1 = d_2 = 0.108$ มม. มีจำนวนชั้นเลเยอร์ 5 ชั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยทั้งหมด $df_1 = df_2 = 0.012$ มม. และมีจำนวนเส้นใยในเส้นด้ายทั้งหมด $N_f = 56$ เส้น ระยะห่างระหว่างแกนกลางของด้ายยืน $p_1 = p_2 = 0.216$ มม. มุมเกลียวของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่ง 35.75° โดยกำหนดให้ค่าความสูงของความหยิกงอเส้นด้ายพุ่ง (h_2) เท่ากับศูนย์ เพื่อให้เส้นด้ายยืนมีค่าความหยิกงอ (h_1) ที่มากที่สุด



ภาพประกอบ 4.2 รูปแบบ CAD model ของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าแบบ unbalanced fabrics

- (a) โครงสร้างผืนผ้าแบบ unbalanced fabrics ในมุมมอง isometric
- (b) โครงสร้างผืนผ้าแบบ unbalanced fabrics ในมุมมอง top view
- (c) โครงสร้างผืนผ้าแบบ unbalanced fabrics ในมุมมอง front view
- (d) และ (e) ภาพตัดแสดงแนวแกนเส้นด้ายพุ่งและเส้นด้ายยืน

จากภาพประกอบ 4.2 เป็นการทดสอบความสามารถในการขึ้นรูปโครงสร้างผ้า โดยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works สามารถสร้างรูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าได้จริง และแสดงถึงรายละเอียดของเส้นใยในเส้นด้ายบนโครงสร้างผ้าได้อย่างครบถ้วน โดยมีลักษณะของด้ายพุ่งวางตัวในแนวเส้นตรง แต่เส้นด้ายยืนมีลักษณะโค้งสอดรับสลับกันและมีความสูงของความหยักงอสูงสุด แต่ในทางปฏิบัติสำหรับผ้าทอไม่มีทางที่จะผลิตผ้าให้มีความหยักงอของเส้นด้ายเส้นใดเส้นหนึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์และอีกเส้นมีค่าที่มากที่สุด การกระจายความหยักงอของด้ายยืนและด้ายพุ่งมักมีค่าอยู่ปานกลางซึ่งกันและกัน ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) โดยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works สามารถสร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าในสถานการณ์ที่มีค่าขีดจำกัดเกิดขึ้นได้อย่างเต็มที่

4.2 ผลการสร้างรูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอ

การสร้างภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอโดยใช้คอมพิวเตอร์ CAD เข้ามาช่วยในการสร้างเป็นภาพจำลองตามโครงสร้างลายทอ ได้แก่ ผ้าทอลายขัดชนิด 1×1 , 2×2 ผ้าทอลายทแยงชนิด 2×1 , 2×2 และลายทแยงชนิด 3×1 โดยในขั้นตอนแรกจะทำการกำหนดข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของเส้นด้ายและโครงสร้างผ้าทอทั้งหมด ดังตาราง 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตาราง 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างรูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอ

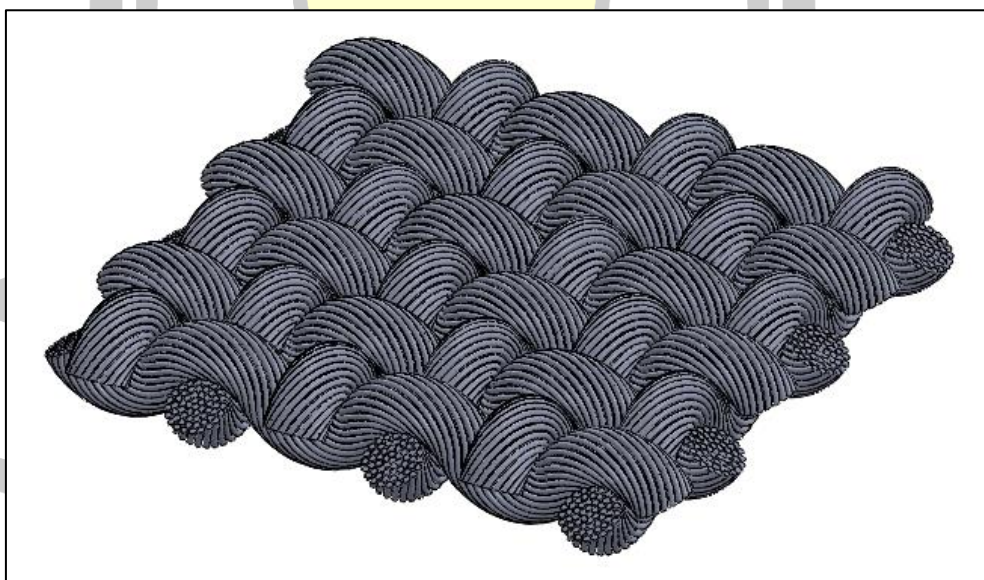
Input data										
d_1	d_2	df_1	df_2	p_1	p_2	h_1	h_2	N_z	N_f	α
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(layer)	(filament)	(deg.)
0.108	0.108	0.012	0.012	0.187	0.187	0.108	0.108	5	56	35.75

พหุ ประถมศึกษา

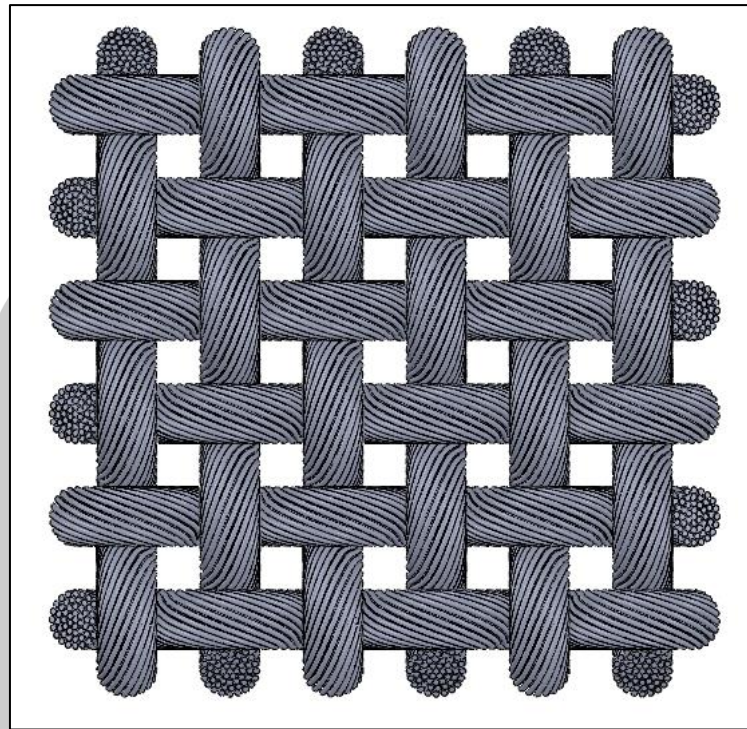
ตาราง 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของเส้นด้ายบนพื้นฐานของ virtual location

Define fiber in yarn cross section						
Yarn (mm)	No. layer	h_j (mm)	R_j (mm)	R_{jc} (mm)	α_j (deg.)	f_j (filament)
$d_1 = 0.108$	1	-	0.006	-	-	1
	2	0.012	0.018	0.012	8.94	6
	3	0.012	0.030	0.024	17.88	12
	4	0.012	0.042	0.036	26.81	17
	5	0.012	0.054	0.048	35.75	20
$d_2 = 0.108$	1	-	0.006	-	-	1
	2	0.012	0.018	0.012	8.94	6
	3	0.012	0.030	0.024	17.88	12
	4	0.012	0.042	0.036	26.81	17
	5	0.012	0.054	0.048	35.75	20

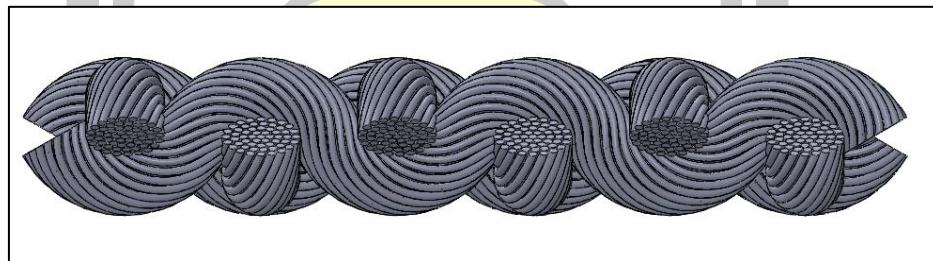
4.2.1 รูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 1 × 1



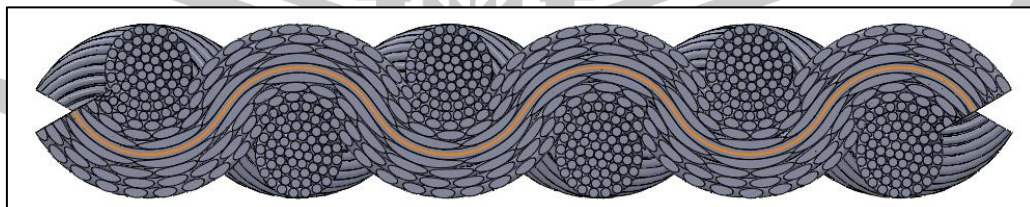
ภาพประกอบ 4.3 รูปแบบ CAD model ของโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 1 × 1 (isometric)



ภาพประกอบ 4.4 รูปแบบ CAD model ของโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 1 x 1 (top view)



ภาพประกอบ 4.5 รูปแบบ CAD model ของโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 1 x 1 (front view)

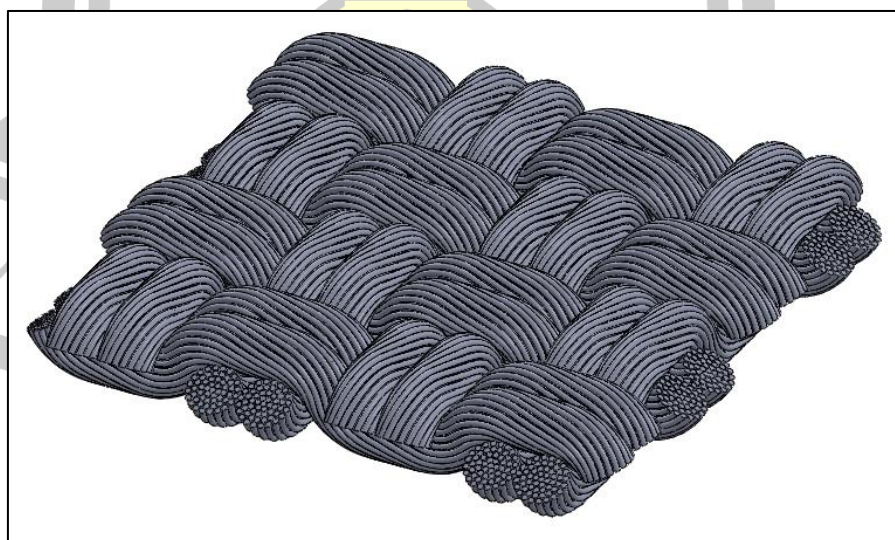


ภาพประกอบ 4.6 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของแนวเส้นด้ายยืนในลายขัดชนิด 1 x 1

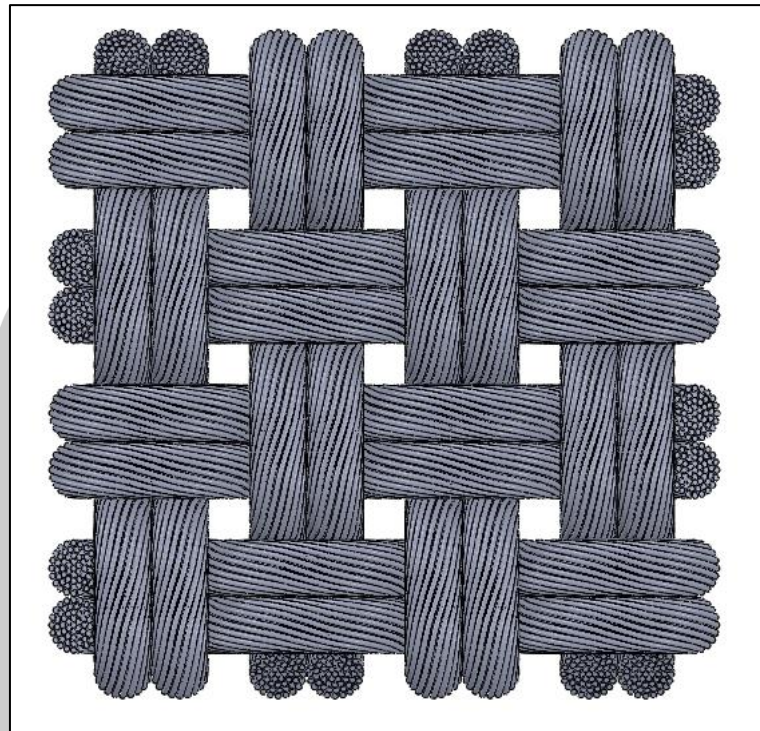
ตาราง 4.3 รูปแบบของสมการและตำแหน่งแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอหลายขีดชนิด 1 × 1

Coordinate of weft yarn in woven fabric for 1x1 plain weave												
New geometric model of 1x1 plain weave												
$d_i^X = p_i (i_{di} - 1)$ $d_i^Z = \pm h_i/2 \begin{cases} \frac{h_i}{2}; \text{ where the coordinate of yarn in the upper quadrant regions} \\ -\frac{h_i}{2}; \text{ where the coordinate of yarn in the lower quadrant regions} \end{cases}$												
The positions of center weft yarn in woven fabric for 1x1 plain weave												
i_{d2}	$d_{2,1}^X$	$d_{2,1}^Z$	$d_{2,2}^X$	$d_{2,2}^Z$	$d_{2,3}^X$	$d_{2,3}^Z$	$d_{2,4}^X$	$d_{2,4}^Z$	$d_{2,5}^X$	$d_{2,5}^Z$	$d_{2,6}^X$	$d_{2,6}^Z$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	0	0.054										
2			0.187	-0.054								
3					0.374	0.054						
4							0.561	-0.054				
5									0.748	0.054		
6											0.935	-0.054
the warp and weft densities being 53.48 ends/ cm and 53.48 picks/cm, respectively.												

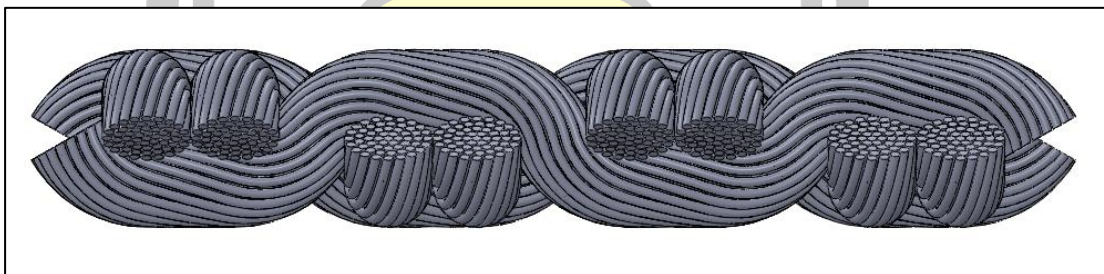
4.2.2 รูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอหลายขีดชนิด 2 × 2



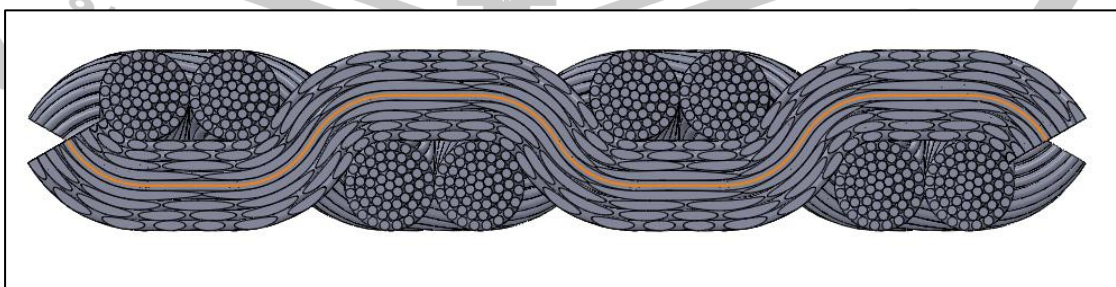
ภาพประกอบ 4.7 รูปแบบ CAD model ของโครงสร้างผ้าทอหลายขีดชนิด 2 × 2 (isometric)



ภาพประกอบ 4.8 รูปแบบ CAD model ของโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 2 x 2 (top view)



ภาพประกอบ 4.9 รูปแบบ CAD model ของโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 2 x 2 (front view)



ภาพประกอบ 4.10 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของแนวเส้นด้ายยืนในลายขัดชนิด 2 x 2

ตาราง 4.4 รูปแบบของสมการและตำแหน่งแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 2 x 2

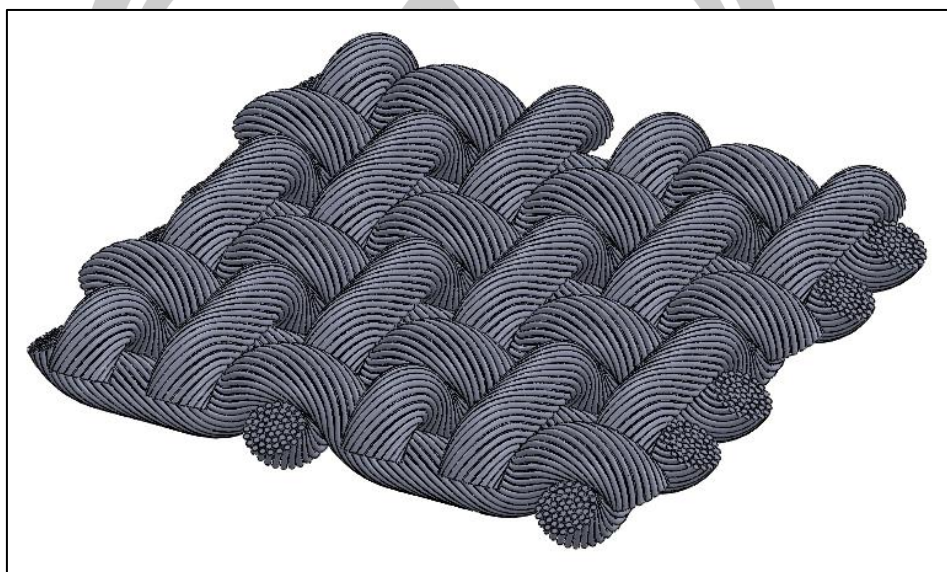
Coordinate of weft yarn in woven fabric for 2x2 plain weave												
New geometric model of 2x2 plain weave												
When $i_{di=2i}$ = even number												
$d_{i=2i}^X = p_i \left[i_{di=2i} - \left(\frac{i_{di=2i}}{2} + 1 \right) \right] + p_{ipi} \left(\frac{i_{di=2i}}{2} \right)$												
When $i_{di=2i+1}$ = odd number												
$d_{i=2i+1}^X = p_i \left[i_{di=2i+1} - \left(\frac{i_{di=2i+1}}{2} + 0.5 \right) \right] + p_{ipi} \left[i_{di=2i+1} - \left(\frac{i_{di=2i+1}}{2} + 0.5 \right) \right]$												
$d_i^Z = \pm h/2 \begin{cases} \frac{h_i}{2} ; \text{ where the coordinate of yarn in the upper quadrant regions} \\ -\frac{h_i}{2} ; \text{ where the coordinate of yarn in the lower quadrant regions} \end{cases}$												
The positions of center weft yarn in woven fabric for 2x2 plain weave												
i_{d2}	$d_{2,1}^X$	$d_{2,1}^Z$	$d_{2,2}^X$	$d_{2,2}^Z$	$d_{2,3}^X$	$d_{2,3}^Z$	$d_{2,4}^X$	$d_{2,4}^Z$	$d_{2,5}^X$	$d_{2,5}^Z$	$d_{2,6}^X$	$d_{2,6}^Z$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	0	0.054										
2			0.108	0.054								
The positions of center weft yarn in woven fabric for 2x2 plain weave												
i_{d2}	$d_{2,1}^X$	$d_{2,1}^Z$	$d_{2,2}^X$	$d_{2,2}^Z$	$d_{2,3}^X$	$d_{2,3}^Z$	$d_{2,4}^X$	$d_{2,4}^Z$	$d_{2,5}^X$	$d_{2,5}^Z$	$d_{2,6}^X$	$d_{2,6}^Z$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
3					0.295	-0.054						
4							0.403	-0.054				
5									0.59	0.054		
6											0.698	0.054
the warp and weft densities being 67.8 ends/ cm and 67.8 picks/cm, respectively.												

4.3 ผลการสร้างรูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง

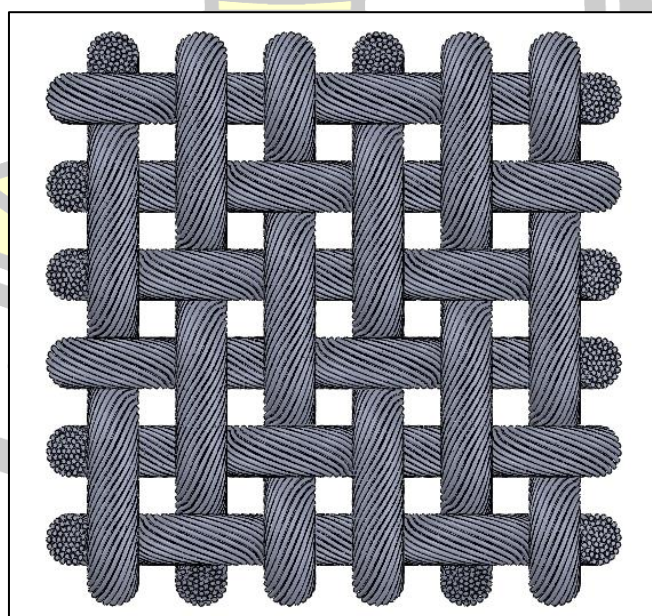
รูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 1, 2 x 1 และ 3 x 1 เมื่อค่าระยะห่างระหว่างเส้นด้ายที่อยู่ติดกันมีค่า เท่ากับ ระยะห่างระหว่างเส้นด้ายยืน/ด้ายพุ่ง ($p_{pi} = p$) ทำให้สามารถใช้สมการในการกำหนดตำแหน่งของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าตามแนวแกน X โดยสมการ

(3.3) คือ $d_i^X = p_i (i_{di} - 1)$ ดังนั้น การกำหนดพิกัดตำแหน่งของเส้นด้ายบนโครงสร้างผ้าในแนวแกน Z ก็จะใช้สมการเดียวกันกับสมการที่ (3.4) ในส่วนค่าพารามิเตอร์ของเส้นด้ายและโครงสร้างผ้าที่จะใช้ข้อมูลในตาราง 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

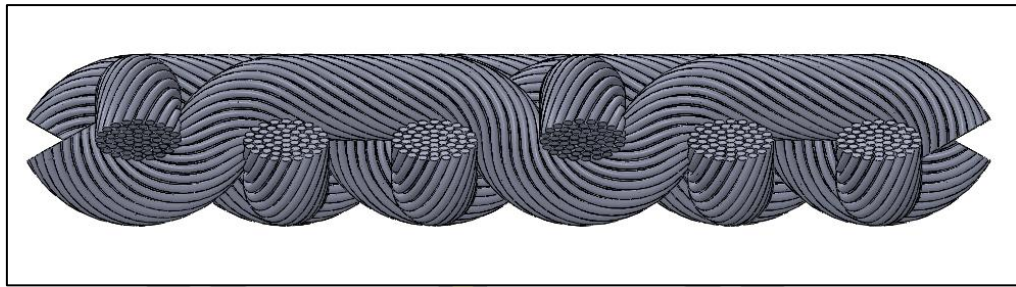
4.3.1 รูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 × 1



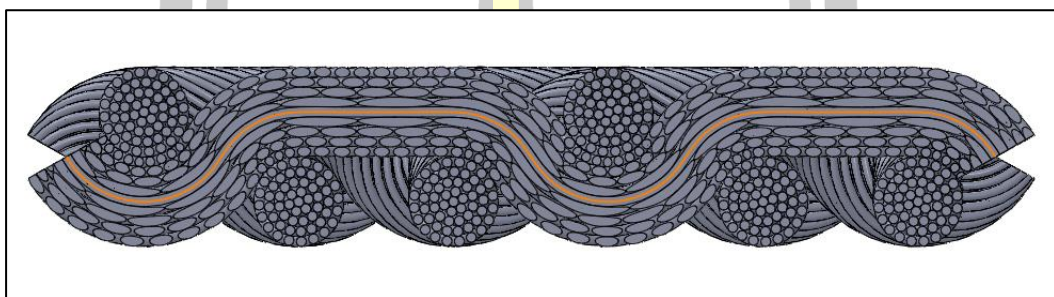
ภาพประกอบ 4.11 รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 × 1 (isometric)



ภาพประกอบ 4.12 รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 × 1 (top view)



ภาพประกอบ 4.13 รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 1 (front view)



ภาพประกอบ 4.14 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของแนวเส้นด้ายยืนในลายทแยงชนิด 2 x 1

ตาราง 4.5 รูปแบบของสมการและตำแหน่งแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 1

Coordinate of weft yarn in woven fabric for 2x1 twill weave

New geometric model of twill weave

where $p_{ipi} = p_i$ so that $d_i^X = p_i (i_{di} - 1)$

$$d_i^Z = \pm h_i/2 \begin{cases} \frac{h_i}{2}; \text{ where the coordinate of yarn in the upper quadrant regions} \\ -\frac{h_i}{2}; \text{ where the coordinate of yarn in the lower quadrant regions} \end{cases}$$

The positions of center weft yarn in woven fabric for 2x1 twill

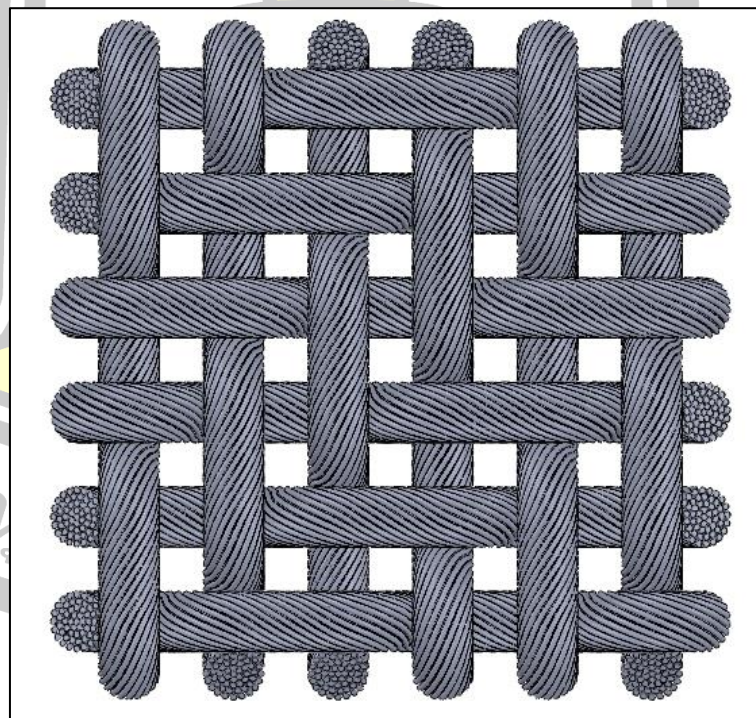
i_{d2}	$d_{2,1}^X$	$d_{2,1}^Z$	$d_{2,2}^X$	$d_{2,2}^Z$	$d_{2,3}^X$	$d_{2,3}^Z$	$d_{2,4}^X$	$d_{2,4}^Z$	$d_{2,5}^X$	$d_{2,5}^Z$	$d_{2,6}^X$	$d_{2,6}^Z$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	0	0.054										
2			0.187	-0.054								
3					0.374	-0.054						
4							0.561	0.054				
5									0.748	-0.054		
6											0.935	-0.054

the warp and weft densities being 53.48 ends/ cm and 53.48 picks/cm, respectively.

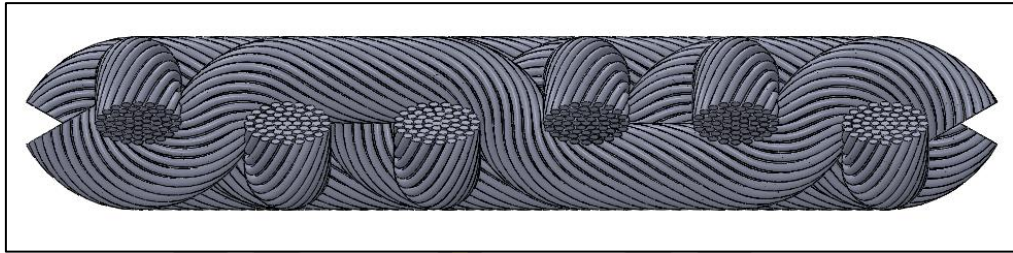
4.3.2 รูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 2



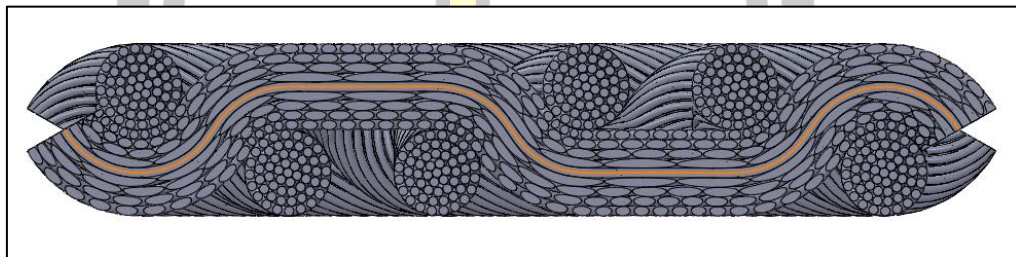
ภาพประกอบ 4.15 รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 2 (isometric)



ภาพประกอบ 4.16 รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 2 (top view)



ภาพประกอบ 4.17 รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 2 (front view)



ภาพประกอบ 4.18 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของแนวเส้นด้ายยืนในลายทแยงชนิด 2 x 2

ตาราง 4.6 รูปแบบของสมการและตำแหน่งแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2 x 2

Coordinate of weft yarn in woven fabric for 2x2 twill weave

New geometric model of twill weave

where $p_{ipi} = p_i$ so that $d_i^X = p_i (i_{di} - 1)$

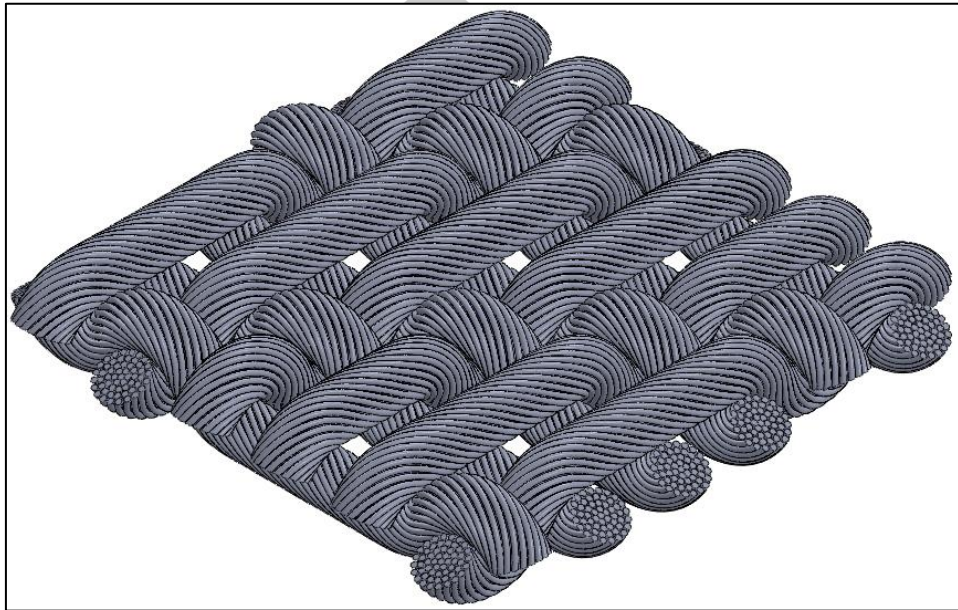
$$d_i^Z = \pm h_i/2 \begin{cases} \frac{h_i}{2}; \text{ where the coordinate of yarn in the upper quadrant regions} \\ -\frac{h_i}{2}; \text{ where the coordinate of yarn in the lower quadrant regions} \end{cases}$$

The positions of center weft yarn in woven fabric for 2x2 twill

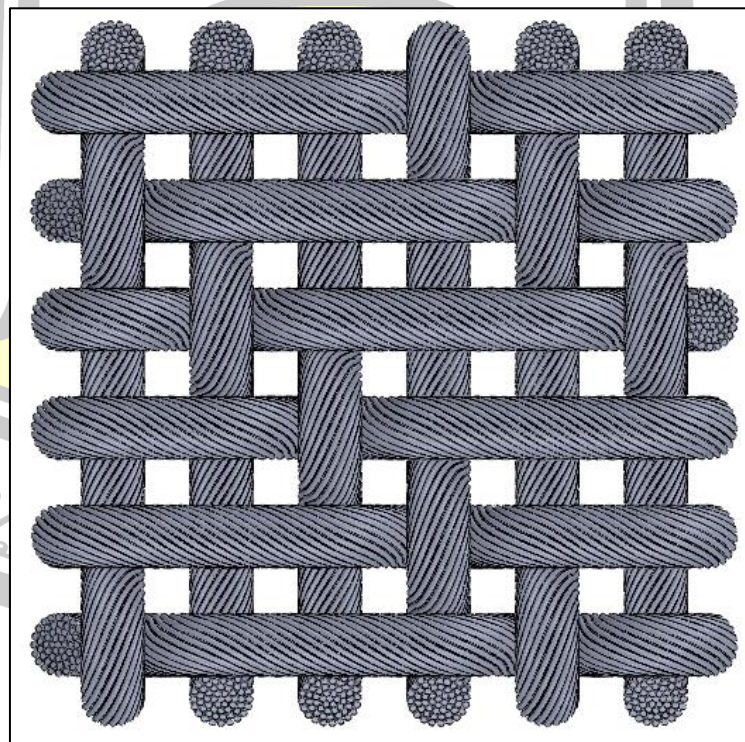
i_{d2}	$d_{2,1}^X$	$d_{2,1}^Z$	$d_{2,2}^X$	$d_{2,2}^Z$	$d_{2,3}^X$	$d_{2,3}^Z$	$d_{2,4}^X$	$d_{2,4}^Z$	$d_{2,5}^X$	$d_{2,5}^Z$	$d_{2,6}^X$	$d_{2,6}^Z$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	0	0.054										
2			0.187	-0.054								
3					0.374	-0.054						
4							0.561	0.054				
5									0.748	0.054		
6											0.935	-0.054

the warp and weft densities being 53.48 ends/ cm and 53.48 picks/cm, respectively.

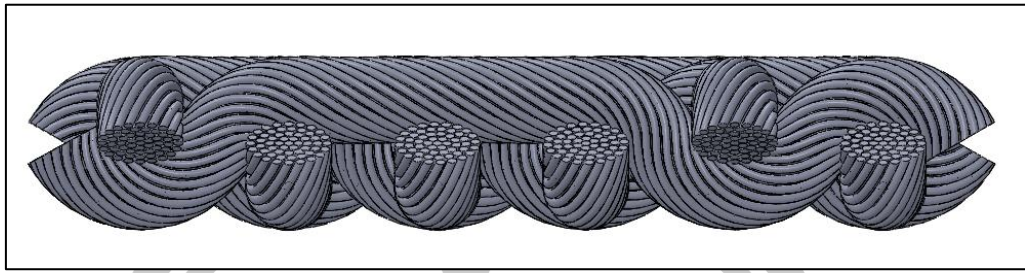
4.3.3 รูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3 × 1



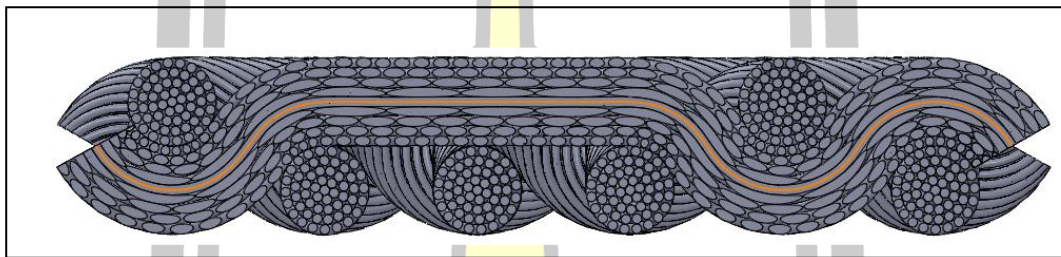
ภาพประกอบ 4.19 รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3 × 1 (isometric)



ภาพประกอบ 4.20 รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3 × 1 (top view)



ภาพประกอบ 4.21 รูปแบบ CAD model โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3 x 1 (front view)



ภาพประกอบ 4.22 ภาพตัดขวางแสดงลักษณะของแนวเส้นด้ายยืนในลายทแยงชนิด 3 x 1

ตาราง 4.7 รูปแบบของสมการและตำแหน่งแนวเส้นด้ายยืนในโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3 x 1

Coordinate of weft yarn in woven fabric for 3x1 twill weave

New geometric model of twill weave

where $p_{ipi} = p_i$ so that $d_i^X = p_i (i_{di} - 1)$

$$d_i^Z = \pm h_i/2 \begin{cases} \frac{h_i}{2}; \text{ where the coordinate of yarn in the upper quadrant regions} \\ -\frac{h_i}{2}; \text{ where the coordinate of yarn in the lower quadrant regions} \end{cases}$$

The positions of center weft yarn in woven fabric for 3x1 twill

i_{d2}	$d_{2,1}^X$ (mm)	$d_{2,1}^Z$ (mm)	$d_{2,2}^X$ (mm)	$d_{2,2}^Z$ (mm)	$d_{2,3}^X$ (mm)	$d_{2,3}^Z$ (mm)	$d_{2,4}^X$ (mm)	$d_{2,4}^Z$ (mm)	$d_{2,5}^X$ (mm)	$d_{2,5}^Z$ (mm)	$d_{2,6}^X$ (mm)	$d_{2,6}^Z$ (mm)
1	0	0.054										
2			0.187	-0.054								
3					0.374	-0.054						
4							0.561	-0.054				
5									0.748	0.054		
6											0.935	-0.054

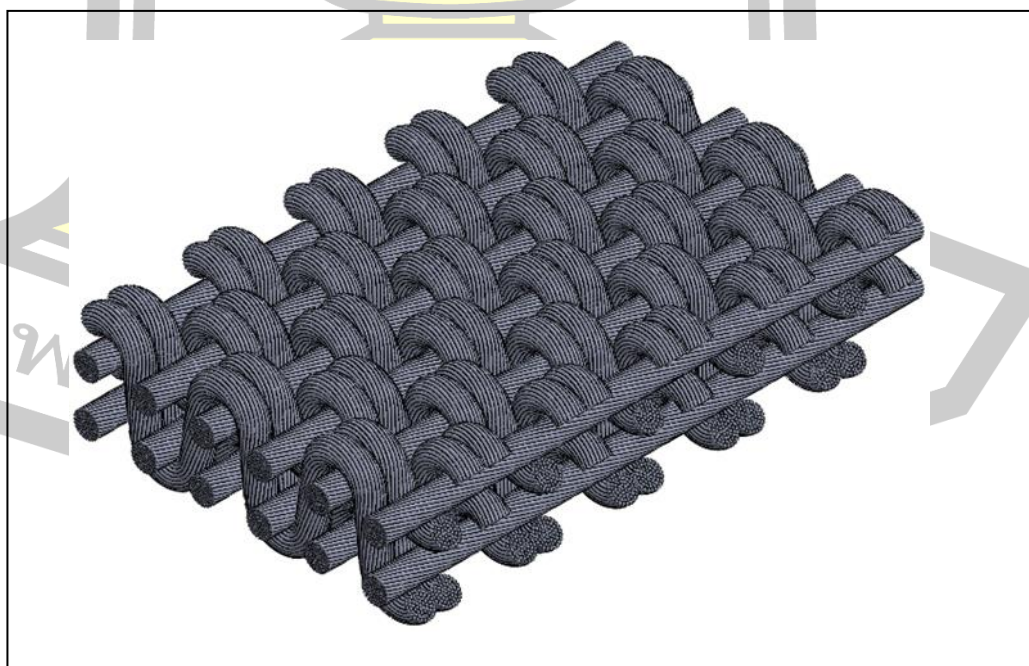
the warp and weft densities being 53.48 ends/ cm and 53.48 picks/cm, respectively.

4.4 ผลการสร้างรูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอแบบหลายชั้น

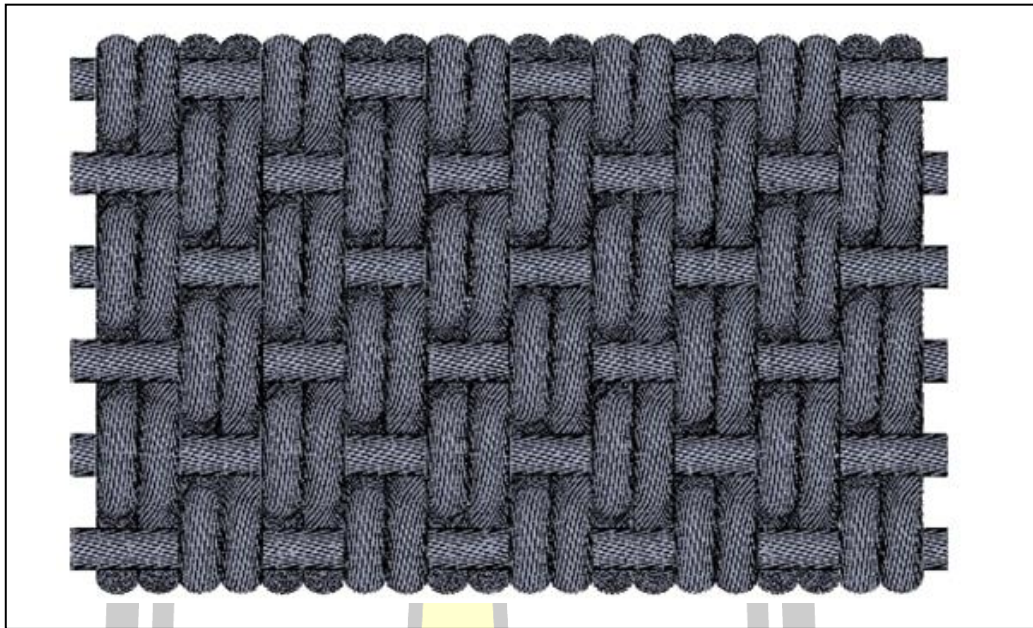
วิธีการสร้างภาพจำลองสามมิติที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จะนำเสนอรูปแบบภาพของโครงสร้างผ้าทอแบบ 2 และ 3 ชั้น จะใช้วิธีการกำหนดพิกัดสำหรับแนวเส้นด้ายที่นำเสนอไว้ในงานวิจัยนี้ เพื่อเป็นวิธีการกำหนดเส้นทางของแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้า รูปแบบการกำหนดพิกัดของเส้นด้ายจะกำหนดโดยภาพหน้าตัดของเส้นด้ายพุ่งที่วางตัวเป็นเส้นตรงในแนวเดียวกันของแต่ละชั้นในโครงสร้างผ้า เพื่อให้เห็นถึงเส้นทางของแนวเส้นด้ายยืน 2 เส้นโค้งขึ้น – ลง ในลักษณะลอดและการข้ามเส้นด้ายพุ่งสลับกันในแต่ละชั้นของโครงสร้างผ้า

4.4.1 รูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอแบบ 2 ชั้น

งานวิจัยนี้จะสร้างรูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอแบบ 2 ชั้น ที่มีลักษณะของเส้นด้ายพุ่งวางตัวในแนวเส้นตรงส่วนเส้นด้ายยืนจำนวน 2 เส้นจะลอดและข้ามเส้นด้ายพุ่งสลับกันในแต่ละชั้นเพื่อทำหน้าที่ขัดสานและประกบกันเป็นผืนผ้า โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ของด้ายพุ่งและด้ายยืนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน $d_1 = d_2 = 0.002$ มม. ระยะห่างระหว่างแกนกลางของด้ายยืนและด้ายพุ่ง $p_1 = p_2 = 0.041$ มม. ความยาวแนวแกนของเส้นด้ายยืนระหว่างด้ายพุ่ง $l_1 = 81$ ค่าความสูงของเส้นด้ายพุ่งในแนวระนาบระหว่างชั้นที่ 1 กับชั้นที่ 2 มีค่า 0.036 มม. ค่าความสูงความหยิกงอของเส้นด้ายยืนชุดที่สองมีค่า 0.018 มม. มุมเกลียวของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่ง 14.43° จำนวนเส้นใยในเส้นด้ายแต่ละเส้น 61 เส้นใย และมีจำนวนชั้นเลเยอร์ในเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่ง 5 เลเยอร์



ภาพประกอบ 4.23 รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบ 2 ชั้น (isometric)

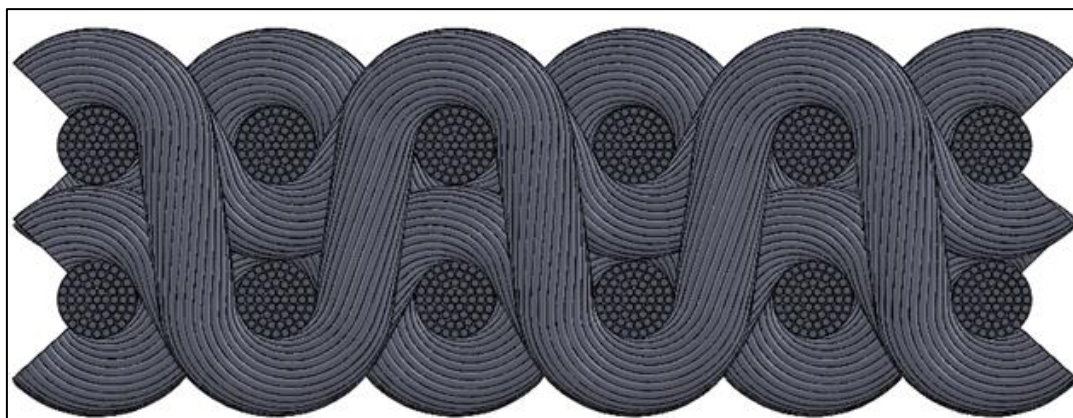


ภาพประกอบ 4.24 รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบ 2 ชั้น (Top view)



ภาพประกอบ 4.25 รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบ 2 ชั้น (front view)

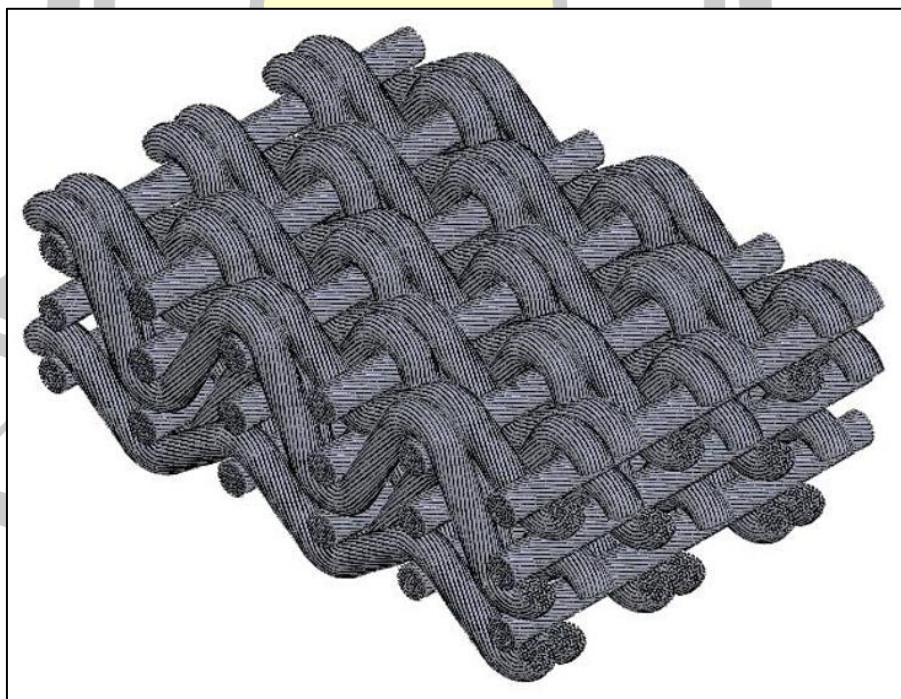




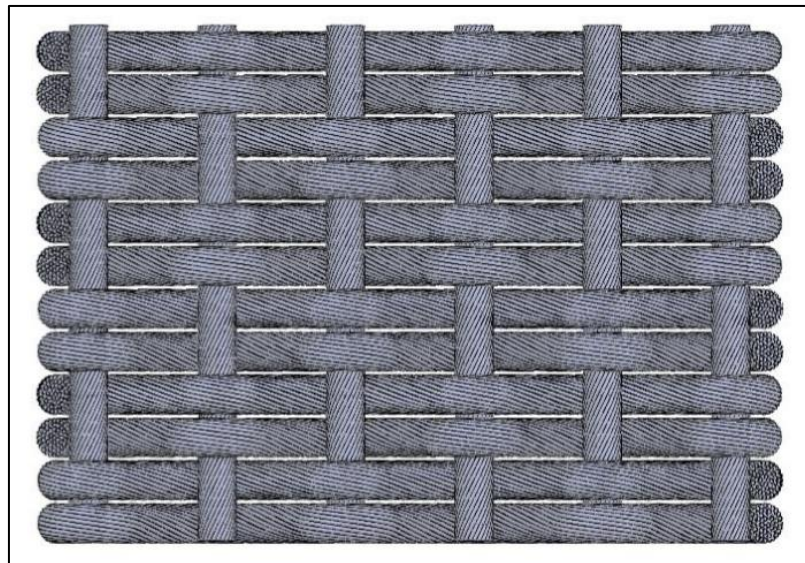
ภาพประกอบ 4.26 แสดงลักษณะแนวเส้นของด้ายยืนในโครงสร้างผ้าทอ 2 ชั้น

4.4.2 รูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอแบบ 3 ชั้น

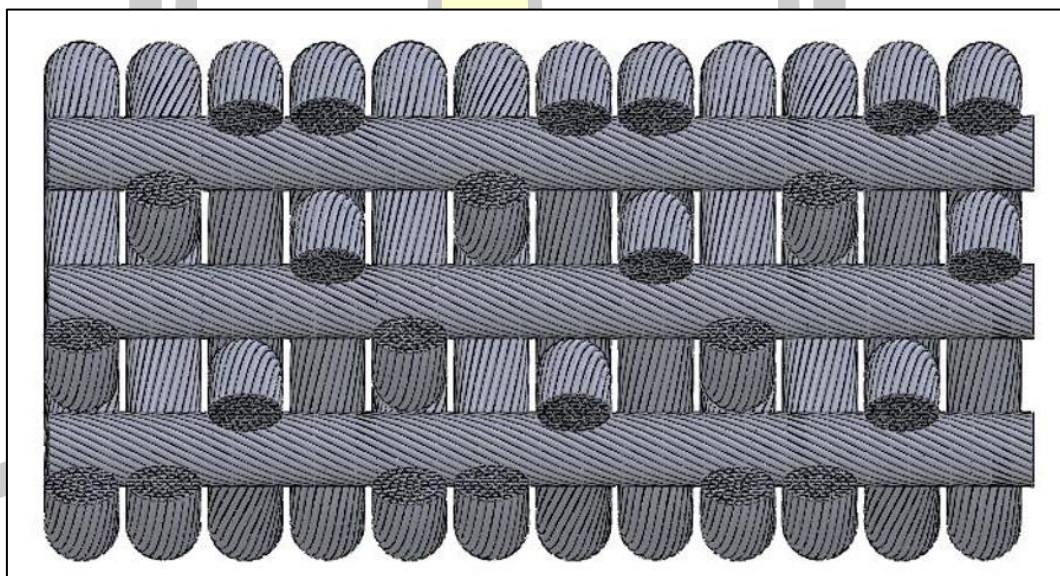
ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการสร้างรูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอแบบ 3 ชั้น ถูกกำหนดไว้ในเบื้องต้น ดังนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่ง $d_1 = d_2 = 0.002$ มม. ระยะห่างระหว่างแกนกลางของด้ายยืนและด้ายพุ่ง $p_1, p_2 = 0.060$ มม. และ 0.018 มม. ตามลำดับ ค่าความสูงของระหว่างชั้น 0.036 มม. มุมเกลียวของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่ง 14.43° จำนวนชั้นเลเยอร์ในเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่ง 5 เลเยอร์ และเส้นใยในด้ายยืนและด้ายพุ่ง 61 เส้นใย



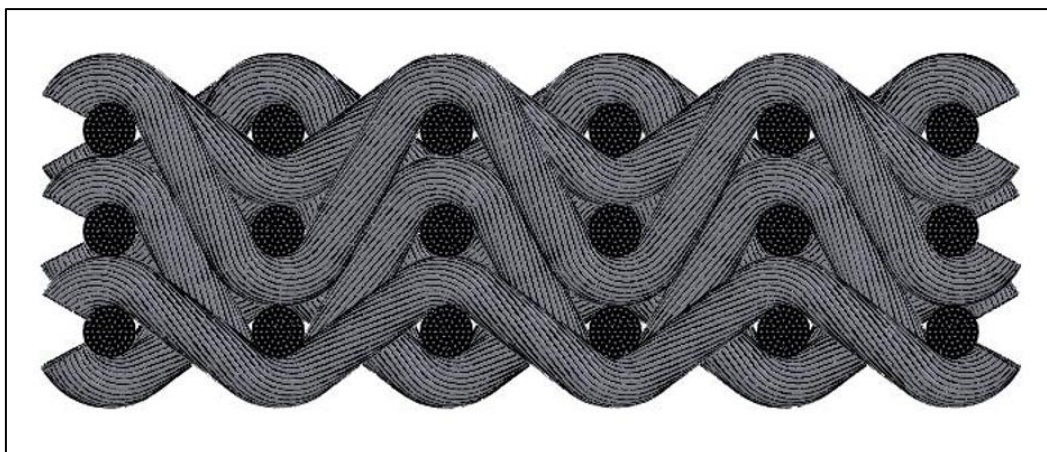
ภาพประกอบ 4.27 รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบ 3 ชั้น (isometric)



ภาพประกอบ 4.28 รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบ 3 ชั้น (Top view)



ภาพประกอบ 4.29 รูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอแบบ 3 ชั้น (front view)



ภาพประกอบ 4.30 แสดงลักษณะแนวเส้นของด้ายยืนในโครงสร้างผ้าทอ 3 ชั้น

จากการสร้างรูปแบบภาพจำลองโครงสร้างผ้าแบบ 2 ชั้น และ 3 ชั้น เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งที่แสดงให้เห็นได้ว่าการสร้างรูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) โดยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works สามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการสร้างรูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าได้หลากหลายชนิด สามารถสร้างและแสดงถึงรายละเอียดของโครงสร้างผ้าในระดับเส้นใยในเส้นด้าย การสร้างภาพจำลองในโครงสร้างนี้จะอาศัยการกำหนดข้อมูลพารามิเตอร์ของเส้นด้ายเพื่อสร้างเป็นเส้นด้ายแต่ละเส้น ในส่วนเส้นทางของแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าจะอาศัยข้อมูลเกี่ยวกับลายทอของผ้าและการวางตำแหน่งเส้นด้ายในระนาบ X Y โดยมีได้อาศัยรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องใด ๆ เป็นเพียงการสร้างภาพให้เกิดความเข้าใจเท่านั้น

4.5 ผลการสร้างรูปแบบภาพจำลองสามมิติของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงในแบบ skewness

รูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงในแบบ skewness เป็นลักษณะของเส้นด้ายในสภาวะไม่ตั้งฉากกัน ซึ่งแบบจำลองเชิงเรขาคณิตและขั้นตอนในการสร้างภาพจำลองได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.7 และ 3.7 ตามลำดับ การสร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าดังกล่าวนี้ ถือได้ว่ามีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากแนวเส้นด้ายแต่ละเส้นมีลักษณะเป็นเส้นโค้งของการสอด การลอด และต้องมีความเบ้เอียงไปพร้อม ๆ กัน การพิจารณาแนวเส้นด้ายจะทำการพิจารณาออกเป็นช่วง ๆ ได้แก่ ช่วงที่ด้ายยืนอยู่เหนือ/อยู่ล่างด้ายพุ่ง ช่วงที่ด้ายพุ่งอยู่เหนือ/อยู่ล่างด้ายยืน และช่วงที่เชื่อมกันระหว่างเส้นด้ายแต่ละส่วน ดังนั้น จึงต้องมีการพัฒนารูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิตสำหรับแนวเส้นด้ายขึ้นมาใหม่ร่วมกับข้อมูลเกี่ยวกับลายทอชนิดต่าง ๆ เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอรูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของแนวเส้นด้ายและภาพจำลองสามมิติของ

โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×1 , 2×2 และลายทแยงชนิด 3×1 ของโครงสร้างผ้าทอในลักษณะที่เป็นแบบ skewness

ขั้นตอนการสร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงในแบบ skewness จะเริ่มจากการกำหนดข้อมูลที่สำคัญของเส้นด้ายและโครงสร้างผ้า ดังตาราง 4.8

ตาราง 4.8 กำหนดข้อมูลเบื้องต้นในการสร้างภาพจำลองโครงสร้างผ้าทอในลักษณะ skewness

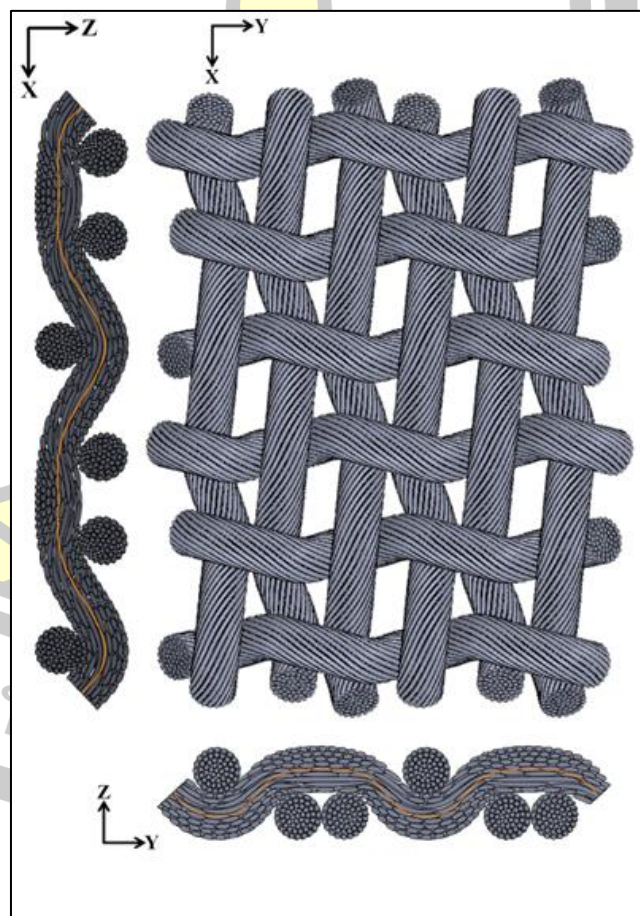
Fabric pattern	$d_{1,i}, d_{2,i}$ (mm)	d_f (mm)	N_z (layer)	N_f (filament)	α_1, α_2 (deg.)	θ_1, θ_2 (deg.)	h_1, h_2 (mm)	δ_1 (deg.)	δ_2 (deg.)	β_1 (deg.)
Twill (2x1)	0.108	0.012	5	56	35.75	30	0.108	14.48	14.04	6.17
Twill (2x2)	0.108	0.012	5	56	35.75	30	0.108	11.47	11.47	8.21
Twill (3x1)	0.108	0.012	5	56	35.75	30	0.108	6.55	8.13	5.63
Fabric pattern	$p_{1,i}$ (mm)	$p_{2,i}$ (mm)	p_{1pi+c} (mm)	p_{2pi+c} (mm)	M_{f1}, M_{f2} (mm)	l_{f1} (mm)	l_{s1} (mm)	l_{f2} (mm)	l_{s2} (mm)	β_2 (deg.)
Twill (2x1)	0.189	0.249	0.108	0.209	0.054	0.216	0.502	0.222	0.275	11.31
Twill (2x2)	0.187	0.187	0.133	0.133	0.027	0.135	0.189	0.135	0.189	8.21
Twill (3x1)	0.189	0.273	0.135	0.235	0.054	0.473	0.550	0.381	0.275	11.31

4.5.1 รูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง 2×1 แบบ skewness

การสร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง 2×1 แบบ skewness นอกจากการกำหนดข้อมูลเบื้องต้นดังตาราง 4.8 แล้วยังต้องทำการวิเคราะห์แนวเส้นด้ายโดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works เข้าช่วยในการร่างแบบเพื่อที่จะกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแนวเส้นด้ายแต่ละเส้นตามรูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ร่วมกับข้อมูลเกี่ยวกับลายทอ ซึ่งได้ผลดังนี้ ค่ามุมในส่วนความยาวเส้นด้ายลอยของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่ง (warp/weft skewness angle) มีค่าเท่ากับ $\delta_1 = 14.48^\circ$, $\delta_2 = 14.04^\circ$ ค่ามุมในส่วนความยาวในการเคลื่อนที่ไปกลับของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่ง (warp/weft return angle) มีค่า $\beta_1 = 6.17^\circ$, $\beta_2 = 11.31^\circ$ ค่าความยาวในการเคลื่อนที่ไปกลับของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่ง (warp/weft return of yarn movement) มีค่า $M_{f1} = M_{f2} = 0.054$ มม. ระยะห่างระหว่างแกนกลางของด้ายยืนและด้ายพุ่ง $p_{1i} = 0.189$ มม. และ $p_{2i} = 0.249$ มม. ระยะห่างระหว่างเส้นด้ายที่อยู่ชิดติดกัน + c มีค่าเท่ากับ $p_{1pi+c} = 0.108$ มม. และ $p_{2pi+c} = 0.209$ มม. ตามลำดับ ในส่วนจำนวนเส้นด้ายยืน 61 เส้น/ซม. และจำนวนเส้นด้ายพุ่งมี 42 เส้น/ซม. ดังภาพประกอบ 4.31 และ 4.32



ภาพประกอบ 4.31 ภาพจำลอง 3D โครงสร้างผ้าทอหลายทแยงชนิด 2 × 1 แบบ skewness
ในมุมมอง isometric view



ภาพประกอบ 4.32 ภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอหลายทแยงชนิด 2 × 1 แบบ skewness
ในมุมมอง top view และภาพตัดขวางแสดงแนวเส้นด้ายยืนและพุ่ง

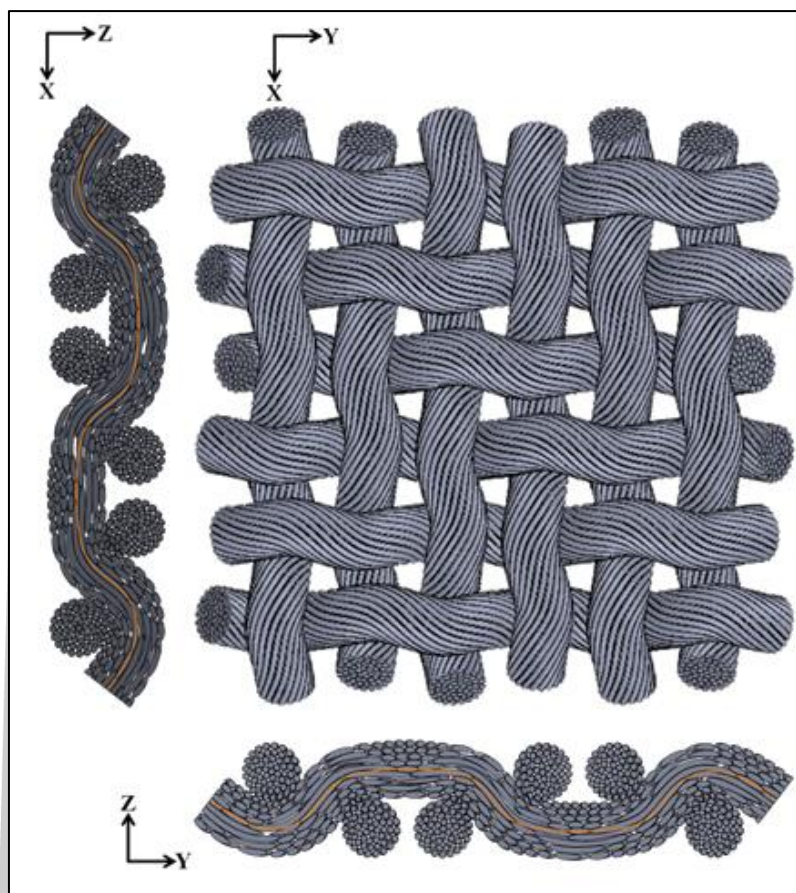
4.5.2 รูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง 2×2 แบบ skewness

จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับแนวเส้นด้ายของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×2 ตามรูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของโครงสร้างผ้าในลักษณะแบบ skewness โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อนำมาสร้างภาพจำลองสามมิติ ได้ดังนี้ ค่ามุมในส่วนของความยาวเส้นด้ายลอยของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งมีค่ามุมเท่ากันคือ $\delta_1 = \delta_2 = 11.47^\circ$ ค่ามุมในส่วนความยาวในการเคลื่อนที่ไปกลับของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งมีค่ามุมเท่ากันคือ $\beta_1 = \beta_2 = 8.21^\circ$ ค่าความยาวในการเคลื่อนที่ไปกลับของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งมีค่าเท่ากันคือ $M_{f1} = M_{f2} = 0.027$ มม. ระยะห่างระหว่างแกนกลางของด้ายยืนและด้ายพุ่งมีค่าเท่ากันคือ $p_{1i} = p_{2i} = 0.187$ มม. ระยะห่างระหว่างเส้นด้ายที่อยู่ชิดติดกันมีค่าเท่ากับ $p_{1pi} + c = p_{2pi} + c = 0.133$ มม. ตามลำดับ ในส่วนจำนวนเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งต่อเซนติเมตร มีค่าเท่ากันคือ 62 เส้น/ซม. แสดงดังภาพประกอบ 4.33 และ 4.34



ภาพประกอบ 4.33 ภาพจำลอง 3D โครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×2 แบบ skewness
ในมุมมอง isometric view

พหุ ประถมศึกษา



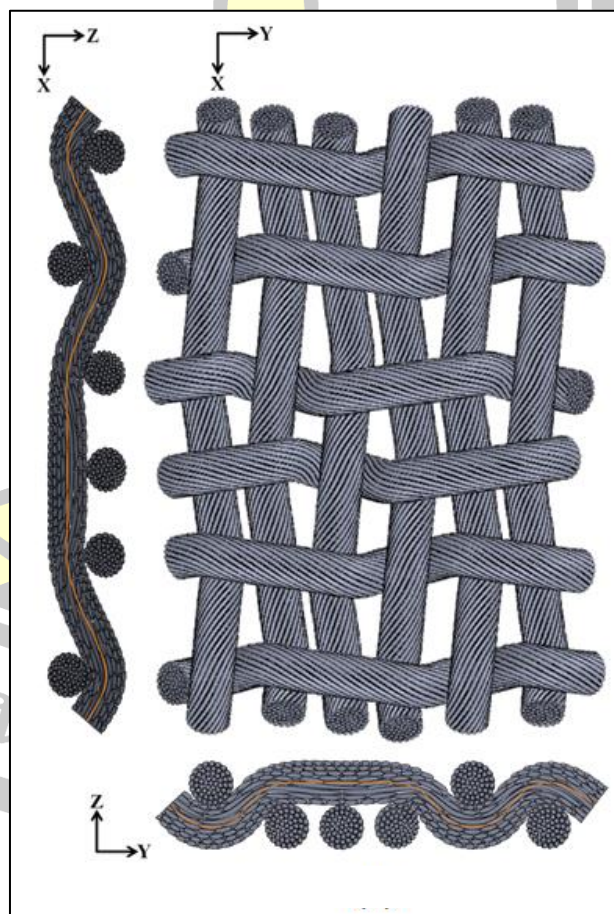
ภาพประกอบ 4.34 ภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×2 แบบ skewness ในมุมมอง top view และภาพตัดขวางแสดงแนวเส้นด้ายยืนและพุ่ง

4.5.3 รูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง 3×1 แบบ skewness

จากข้อมูลในตาราง 4.8 ร่วมกับค่าพารามิเตอร์สำหรับแนวเส้นด้ายของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3×1 ในลักษณะแบบ skewness มีค่าดังนี้ ค่ามุมในส่วนของความยาวเส้นด้ายลอยของเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งมีค่ามุมเท่ากันคือ $\delta_1 = \delta_2 = 11.47^\circ$ ค่ามุมในส่วนความยาวในการเคลื่อนที่ไปกลับของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งมีค่ามุมเท่ากันคือ $\beta_1 = \beta_2 = 8.21^\circ$ ค่าความยาวในการเคลื่อนที่ไปกลับของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งมีค่าเท่ากันคือ $M_{f1} = M_{f2} = 0.027$ มม. ระยะห่างระหว่างแกนกลางของด้ายยืนและด้ายพุ่งมีค่าเท่ากันคือ $p_{1i} = p_{2i} = 0.187$ มม. ระยะห่างระหว่างเส้นด้ายที่อยู่ชิดติดกันมีค่าเท่ากับ $p_{1pi} + c = p_{2pi} + c = 0.133$ มม. ตามลำดับ ในส่วนจำนวนเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งต่อเซนติเมตร มีค่าเท่ากันคือ 62 เส้น/ซม. จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปสร้างเป็นภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 3×1 ในแบบ skewness แสดงในภาพประกอบ 4.35 และ 4.36



ภาพประกอบ 4.35 ภาพจำลอง 3D โครงสร้างผ้าทอหลายทแยงชนิด 3×1 แบบ skewness
ในมุมมอง isometric view

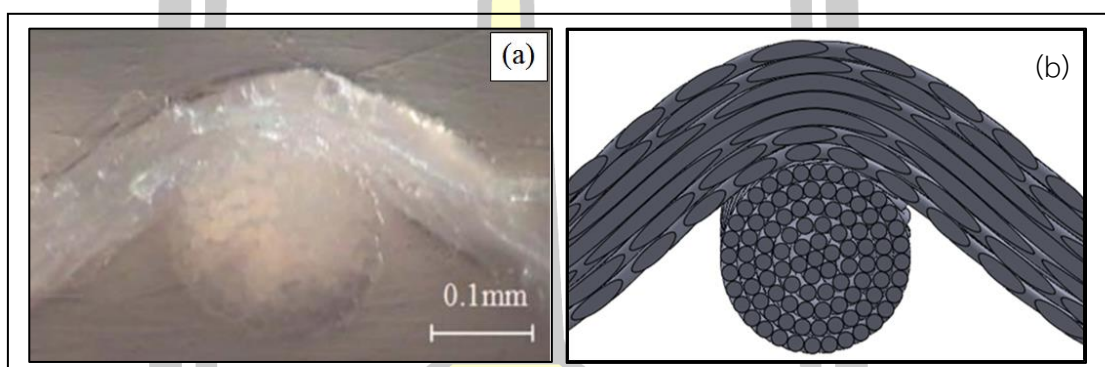


ภาพประกอบ 4.36 ภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าทอหลายทแยง 3×1 แบบ skewness
ในมุมมอง top view และภาพตัดขวางแสดงแนวเส้นด้ายยืนและพุ่ง

4.6 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลของการสร้างภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้า

จากการสร้างรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอชนิดต่าง ๆ ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) โดยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works ทำการสร้างตามเงื่อนไขในการกำหนดข้อมูลและรูปแบบเชิงเรขาคณิตสำหรับแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ รูปแบบภาพจำลอง 3 มิติที่ถูกสร้างขึ้นจะนำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบภาพจำลองที่ได้จากการวิจัยไว้ในก่อนหน้า เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างหรือความเหมือนจริงของรูปแบบภาพจำลอง

4.6.1 เปรียบเทียบรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างเส้นด้าย



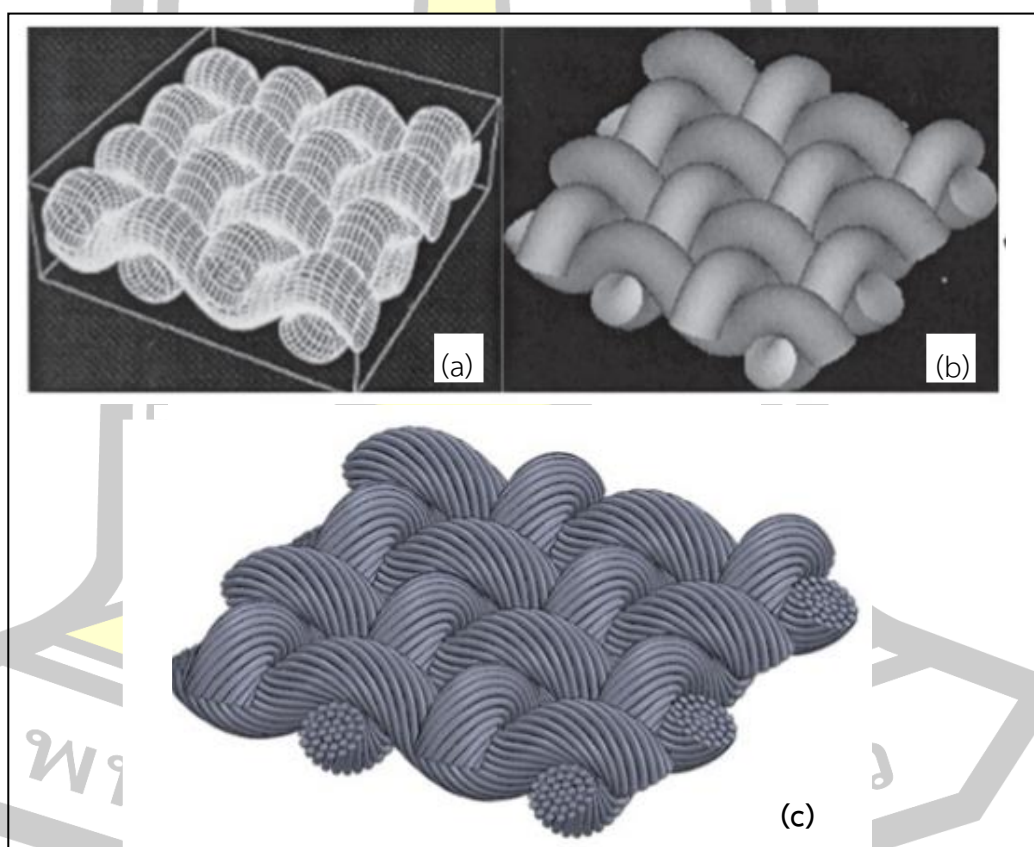
ภาพประกอบ 4.37 เปรียบเทียบรูปแบบภาพจำลองของเส้นด้าย

จากภาพประกอบ 4.34 (a) เป็นภาพของโครงสร้างเส้นด้ายด้วยกล้องขยายกำลังสูง (projectina microscopes) จากงานวิจัยของ Afrashteh et al, (2013) ซึ่งได้ทำการศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวกับ ผลกระทบของมุมเกลียวในเส้นด้ายที่มีค่ามุมเกลียวสูงส่งผลกระทบต่อรูปร่างลักษณะของเส้นด้ายอย่างไร โดยทำการทดลองเส้นด้ายที่มีขนาด 300 denier ประกอบไปด้วยเส้นใยที่ทำจากวัสดุโพลีเอสเตอร์จำนวน 96 เส้น แล้วทำการบิดเป็นเกลียวตามค่าที่กำหนดไว้ในกาทดลอง จากภาพประกอบ 4.37 (a) เป็นภาพเส้นด้ายยีนที่มีค่ามุมเกลียว $\alpha_{\text{tex}} = 1150$ และด้ายพุ่งมีค่ามุมเกลียว $\alpha_{\text{tex}} = 4600$ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบรูปแบบภาพจำลองในภาพประกอบ 4.36 (b) ซึ่งได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยนี้ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยระเบียบวิธีการที่ได้อภิปรายไว้แล้วในข้างต้นจะเห็นได้ว่า รูปแบบเชิงเรขาคณิตของเส้นด้ายและโปรแกรมสำเร็จรูปที่นำมาใช้สร้างภาพจำลอง 3 มิติในงานวิจัยนี้สามารถสร้างรูปภาพจำลองของโครงสร้างเส้นด้ายให้มีรูปร่างลักษณะใกล้เคียงคล้ายคลึงกับภาพโครงสร้างเส้นด้ายของจริง

4.6.2 เปรียบเทียบรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอ

ภาพประกอบ 4.35 (a) เป็นแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอหลายชนิด ระหว่างงานวิจัยที่ผ่านมาของ Adanur and Liao's และงานวิจัยของ Jiang and Chen's กับรูปแบบภาพจำลองที่ได้จากงานวิจัยนี้โดยการใช้รูปแบบเชิงเรขาคณิตของโครงสร้าง

ผ้าที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ร่วมกับวิธีสร้างเส้นโค้งสไปน์ (spline) และวิธีการประกอบ (assembly) รูปแบบ CAD model ของเส้นใยและเส้นด้ายให้เกิดเป็นโครงสร้างผ้าซึ่งวิธีการทั้งหมดได้อภิปรายไว้แล้วในข้างต้น ภาพประกอบ 4.38 (a) เป็นภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอลายซัดที่ได้จากงานวิจัยของ Adanur and Liao's. (1998) จะสังเกตได้ว่าลักษณะของภาพหน้าตัดเส้นด้ายคล้ายคลึงกับลักษณะของทอกลองไม่ประกอบไปด้วยเส้นใยในเส้นด้าย ภาพหน้าตัดของเส้นด้ายที่ขัดสานกันตามลายทอถูกสร้างขึ้นโดยไม่คำนึงถึงแนวเส้นแกนกลางของเส้นด้ายซึ่งโดยปกติแล้วรูปแบบภาพหน้าตัดของเส้นด้ายจะต้องเคลื่อนที่ไปตามความยาวของแนวเส้นแกนกลางของเส้นด้ายและตั้งฉากกัน ลักษณะที่ผิดปกตินี้สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนในบริเวณจุดขัดสานของเส้นด้ายที่มีลักษณะทับซ้อนกัน และภาพหน้าตัดที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนปลายของเส้นด้ายแต่ละเส้นจะมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 4.38 เปรียบเทียบรูปแบบภาพจำลอง 3D ของโครงสร้างผ้าจากงานวิจัยที่ผ่านมา

- (a) จากงานวิจัยของ Adanur and Liao. (1998)
- (b) จากงานวิจัยของ Jiang and Chen. (2005)
- (c) จากงานวิจัยในครั้งนี้

ภาพประกอบ 4.38 (b) เป็นการแสดงรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอลายซัตธรรมดาจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Jiang and Chen's โดยกำหนดให้ภาพหน้าตัดของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งมีรูปร่างเป็นวงกลม การสร้างรูปแบบภาพจำลองในงานวิจัยนี้จะคำนึงถึงภาพหน้าตัดและแนวเส้นแกนกลางของเส้นด้ายเป็นสำคัญ ภาพของหน้าตัดเส้นด้ายจะถูกสร้างขึ้นด้วยหลักเรขาคณิตและเคลื่อนที่ไปตามความยาวของแนวเส้นแกนกลางของเส้นด้ายในลักษณะที่ตั้งฉากกัน ทำให้ได้ภาพจำลองของเส้นด้ายที่ถูกต้องเหมาะสมตามรูปแบบเชิงเรขาคณิตของโครงสร้างผ้า โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของด้ายยืนและด้ายพุ่งเท่ากันคือ 0.6 มม. และความหนาแน่นของจำนวนด้ายยืนและด้ายพุ่งมีจำนวนที่เท่ากันคือ 10 เส้น/ซม.

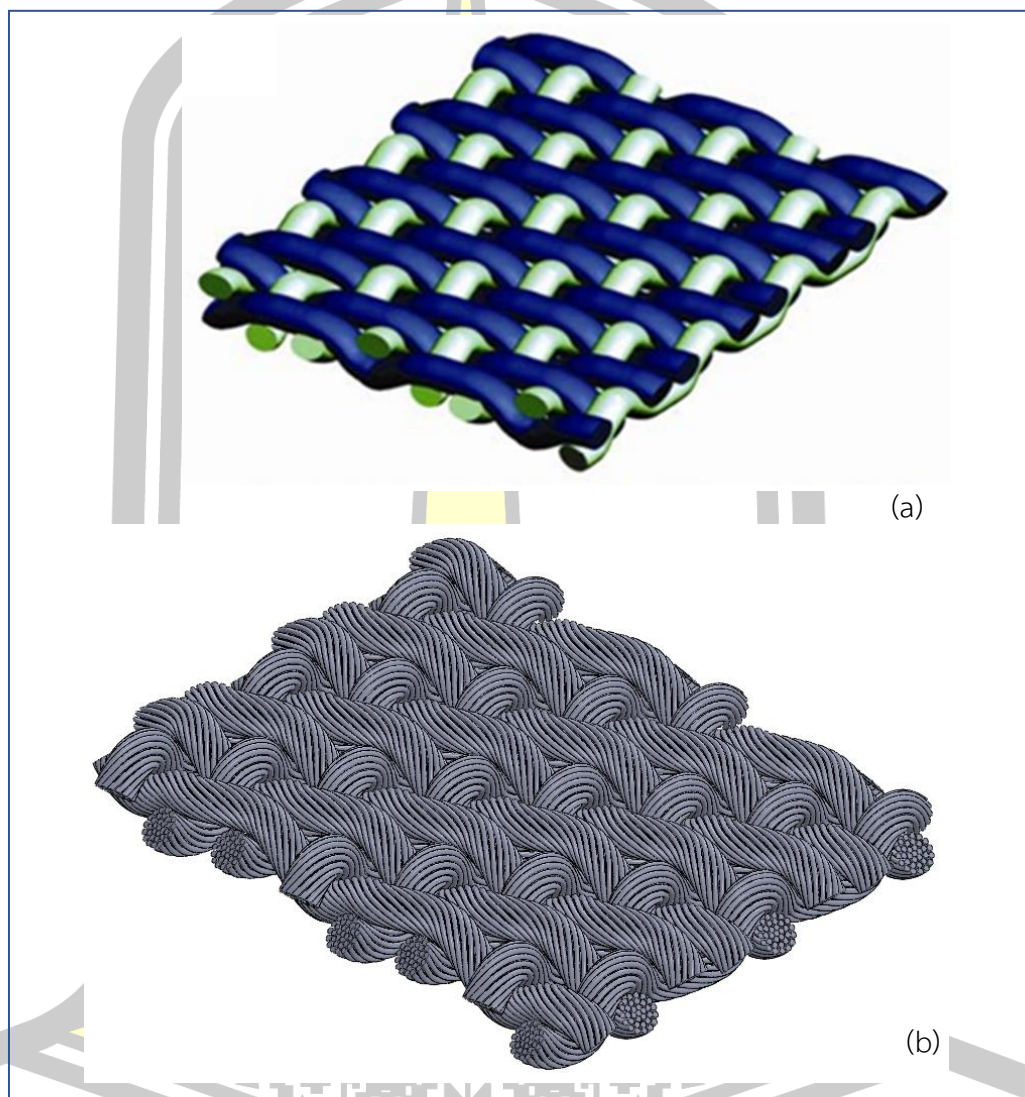
ภาพประกอบ 4.38 (c) แสดงรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอลายซัตที่ได้สร้างขึ้นและนำเสนอจากงานวิจัยนี้ ภาพของเส้นด้ายแต่ละเส้นจะถูกสร้างขึ้นด้วยหลักทางเรขาคณิต นั่นคือด้ายแต่ละเส้นจะมีแนวเส้นด้าย ที่ถูกสร้างขึ้นจากแบบจำลองของแนวเส้นด้ายในรูปแบบ arc-abscissa (Peirce's) model ภาพหน้าตัดของเส้นด้ายที่ประกอบไปด้วยเส้นใยหลายเส้น ถูกสร้างขึ้นจากแบบจำลอง virtual location แล้วบิดเป็นเกลียวทำมุมตามที่กำหนดไว้ในแต่ละชั้นเลเยอร์ โดยเคลื่อนที่หมุนรอบไปตามความยาวของแนวเส้นด้ายในลักษณะที่ตั้งฉากกัน โดยกำหนดข้อมูลที่สำคัญของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในโครงสร้างผ้า ดังนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของด้ายยืนและด้ายพุ่งเท่ากันคือ 0.6 มม. จำนวนเส้นใยในเส้นด้าย 35 เส้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยทั้งหมดมีขนาด $85.7 \mu\text{m}$. มุมเกลียวของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งมีค่า 37° ความหนาแน่นของจำนวนด้ายยืนและด้ายพุ่งมีจำนวนที่เท่ากันคือ 10 เส้น/ซม. จำนวนชั้นเลเยอร์ในเส้นด้ายแต่ละเส้นมี 4 เลเยอร์ ความสูงของความหยิกงอของด้ายยืนและด้ายพุ่ง $h_1 = h_2 = 0.6$ มม.

4.6.3 เปรียบเทียบรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอ skewness

ในปี ค.ศ. 2013 Turan และ Okur ได้สร้างรูปแบบภาพ 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง 2×1 และ 3×1 เพื่อแสดงสภาวะของเส้นด้ายในลักษณะ skewness เป็นการแสดงให้เห็นถึงลักษณะของแนวเส้นด้าย yarn path ของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งเกิดการเบี่ยงตัวไม่ตั้งฉากกัน ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างผ้า โดยอาศัยรูปแบบทางเรขาคณิตในการวิเคราะห์บริเวณเส้นด้ายลอยซึ่งเป็นบริเวณที่เส้นด้ายเกิดลักษณะของ skewness ร่วมกับการอาศัยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผ้า เพื่อคำนวณหาความโค้งที่เชื่อมต่อกันระหว่างแนวเส้นด้ายที่เบี่ยงด้วยเส้นโค้งบี-สไปไลน์ (B-Spline) เพื่อสร้างเป็นแนวเส้นด้ายตามลายทอ

จากการเปรียบเทียบรูปแบบภาพ 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×1 และ 3×1 ระหว่างงานวิจัยของ Turan และ Okur และภาพจำลองในงานวิจัยนี้ พบว่า รูปแบบภาพ 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอลายทแยงชนิด 2×1 และ 3×1 เพื่อแสดงสภาวะของเส้นด้ายในลักษณะ skewness ที่ได้สร้างขึ้นจากงานวิจัยนี้มีความเหมือนจริงและมีรายละเอียดของโครงสร้างผ้าที่

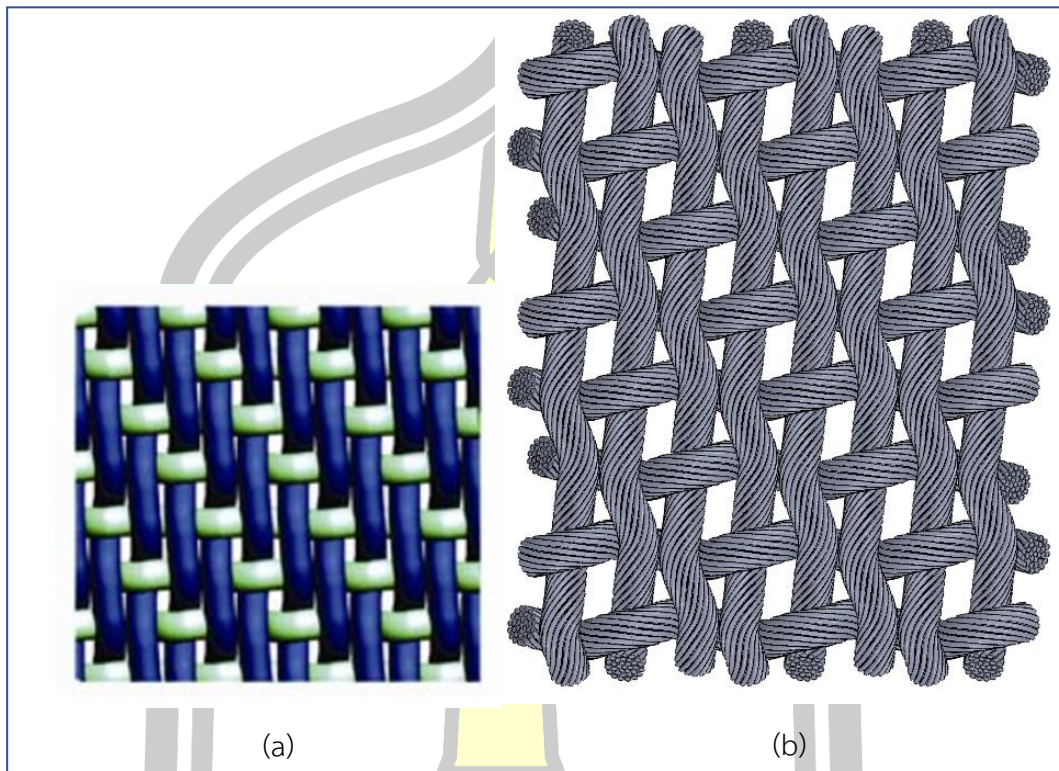
หลากหลายมากกว่า เช่น ลักษณะของสันใยในเส้นด้าย ภาพหน้าตัดของเส้นด้ายที่แสดงให้เห็นถึงเส้นใยที่บรรจุอยู่ในแต่ละชั้นของเส้นด้าย และยังสามารถมองเห็นถึงลักษณะของแนวเส้นด้ายแต่ละเส้น โดยการพิจารณาจากภาพตัดขวางด้านข้างได้อีกด้วย ดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 4.39 – 4.44



ภาพประกอบ 4.39 เปรียบเทียบ 3D CAD ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง skewness ชนิด 2×1 ในมุมมอง isometric view

(a) จากงานวิจัยของ Turan and Okur (2013)

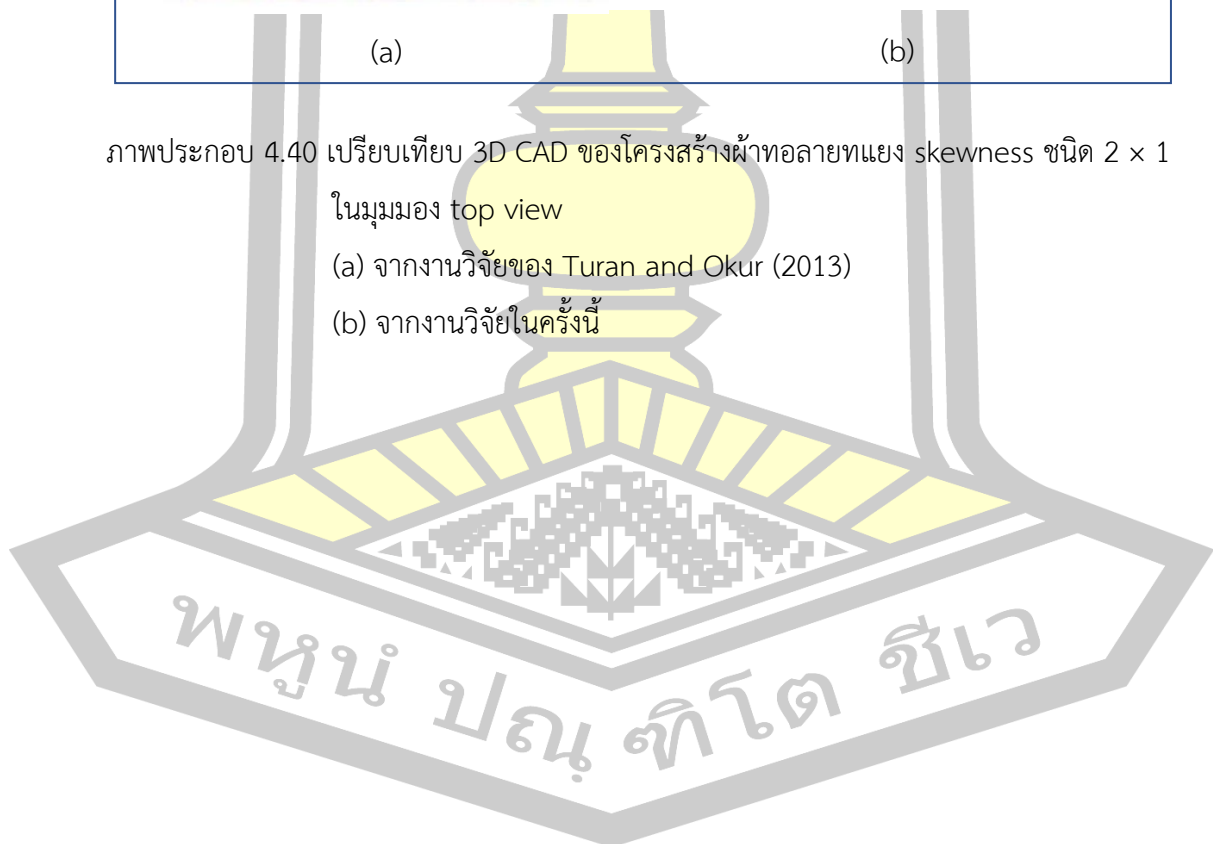
(b) จากงานวิจัยในครั้งนี้

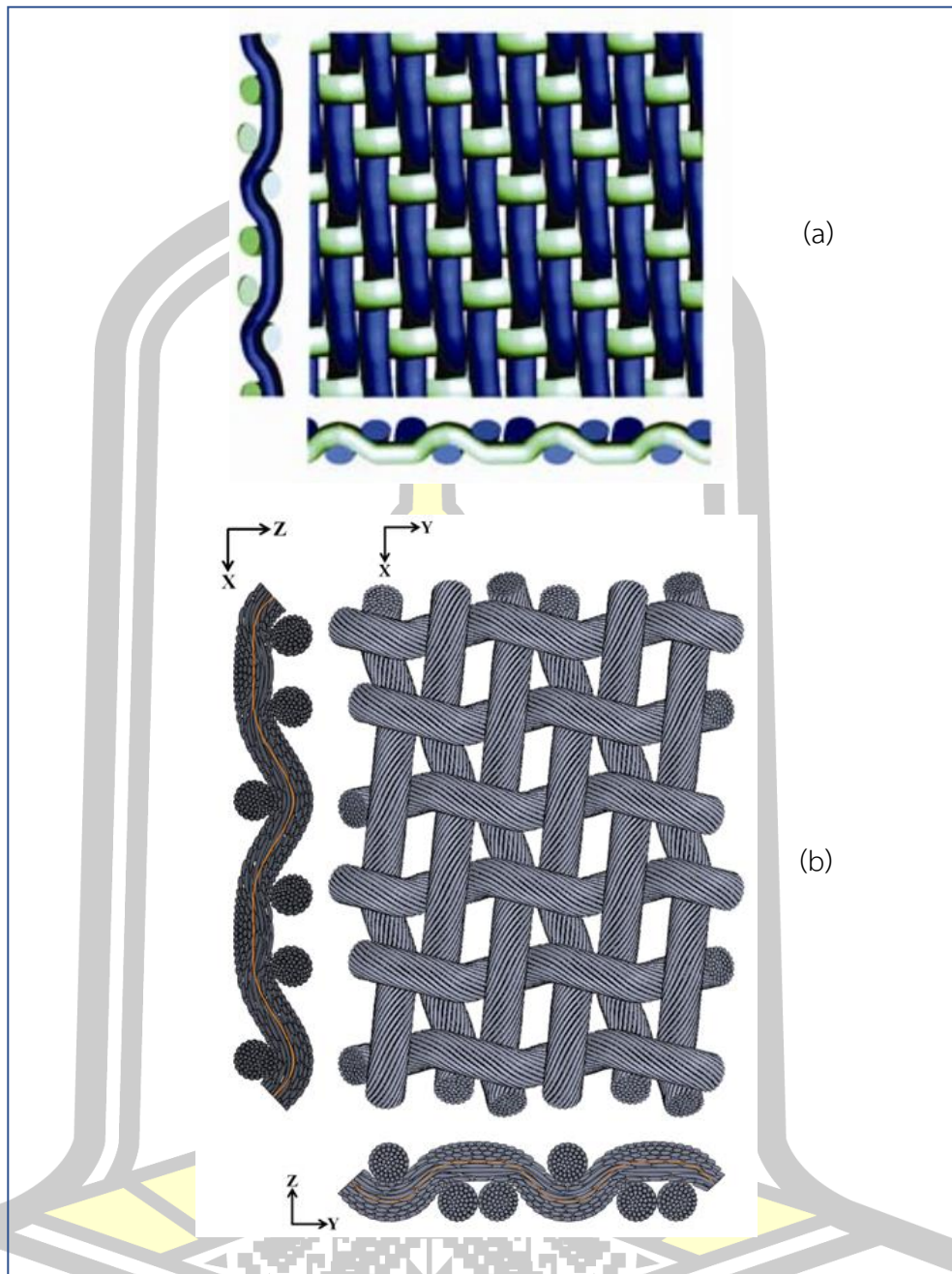


ภาพประกอบ 4.40 เปรียบเทียบ 3D CAD ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง skewness ชนิด 2 x 1
ในมุมมอง top view

(a) จากงานวิจัยของ Turan and Okur (2013)

(b) จากงานวิจัยในครั้งนี้

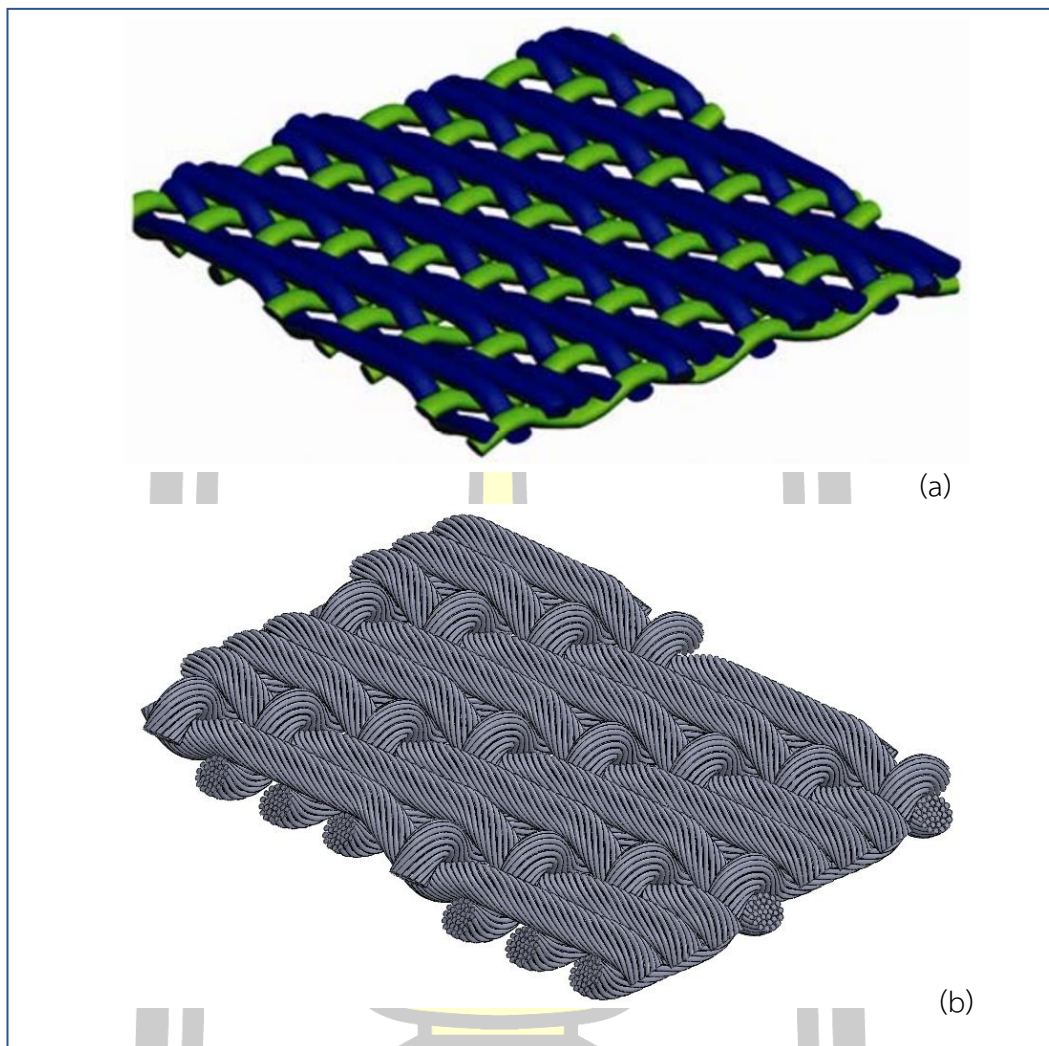




ภาพประกอบ 4.41 เปรียบเทียบ 3D CAD ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง skewness ชนิด 2×1 ในมุมมอง top view, และภาพตัดขวางแสดงแนวเส้นด้ายยืนและพุ่ง

(a) จากงานวิจัยของ Turan and Okur (2013)

(b) จากงานวิจัยในครั้งนี้

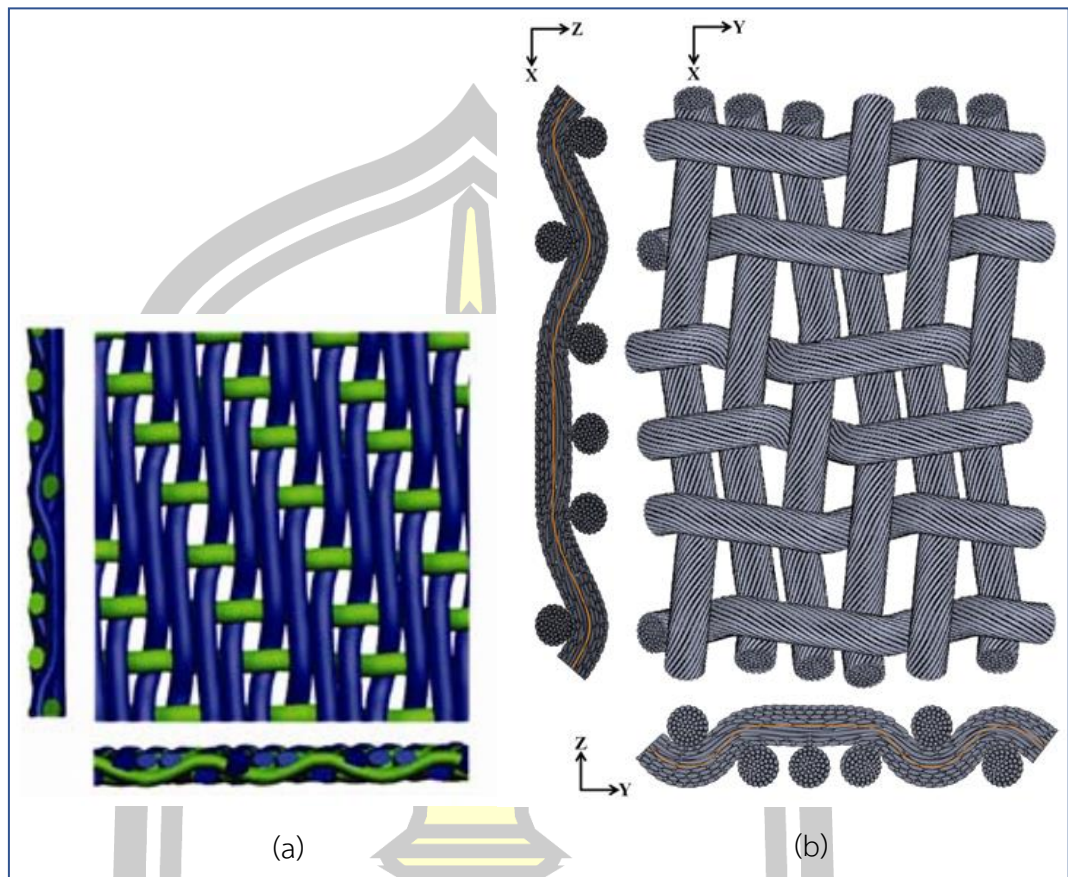


ภาพประกอบ 4.42 เปรียบเทียบ 3D CAD ของโครงสร้างผ้าทอหลายทแยง skewness ชนิด 3×1 ในมุมมอง isometric view

(a) จากงานวิจัยของ Turan and Okur (2013)

(b) จากงานวิจัยในครั้งนี้

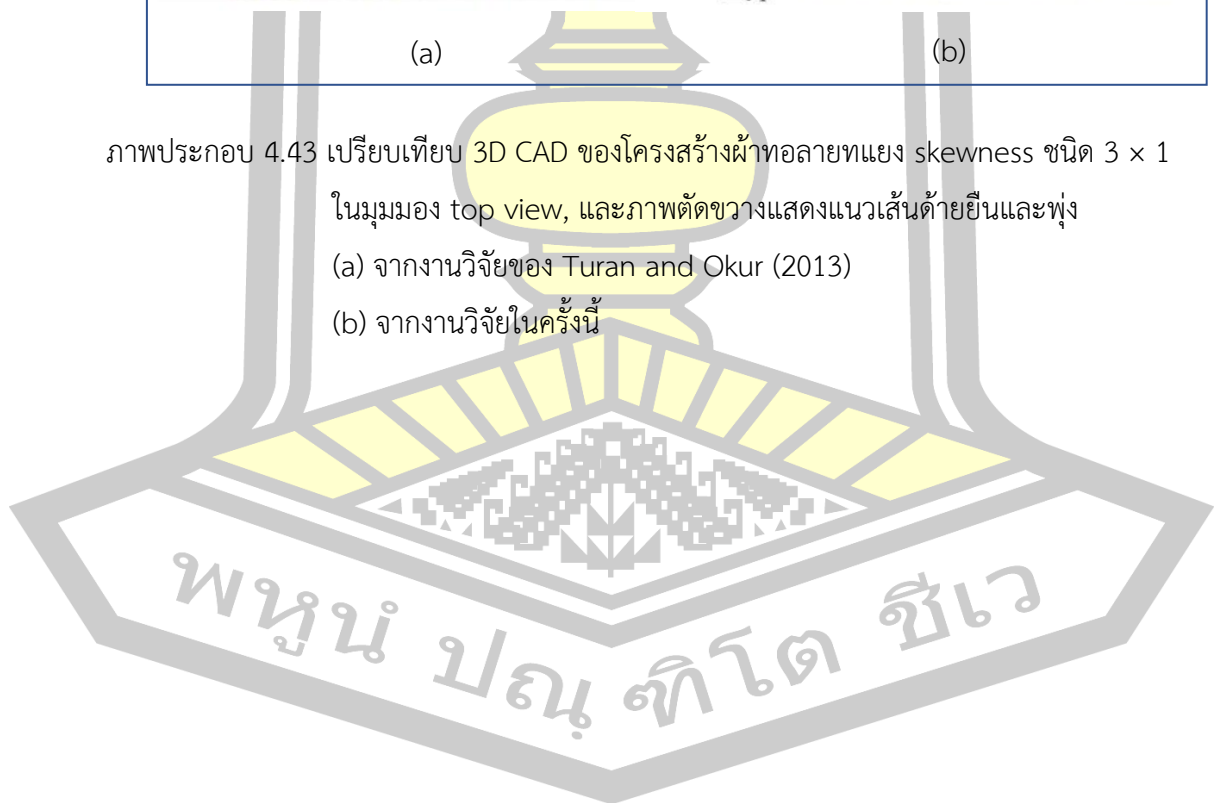
พหุ ประถม โท ชีวะ

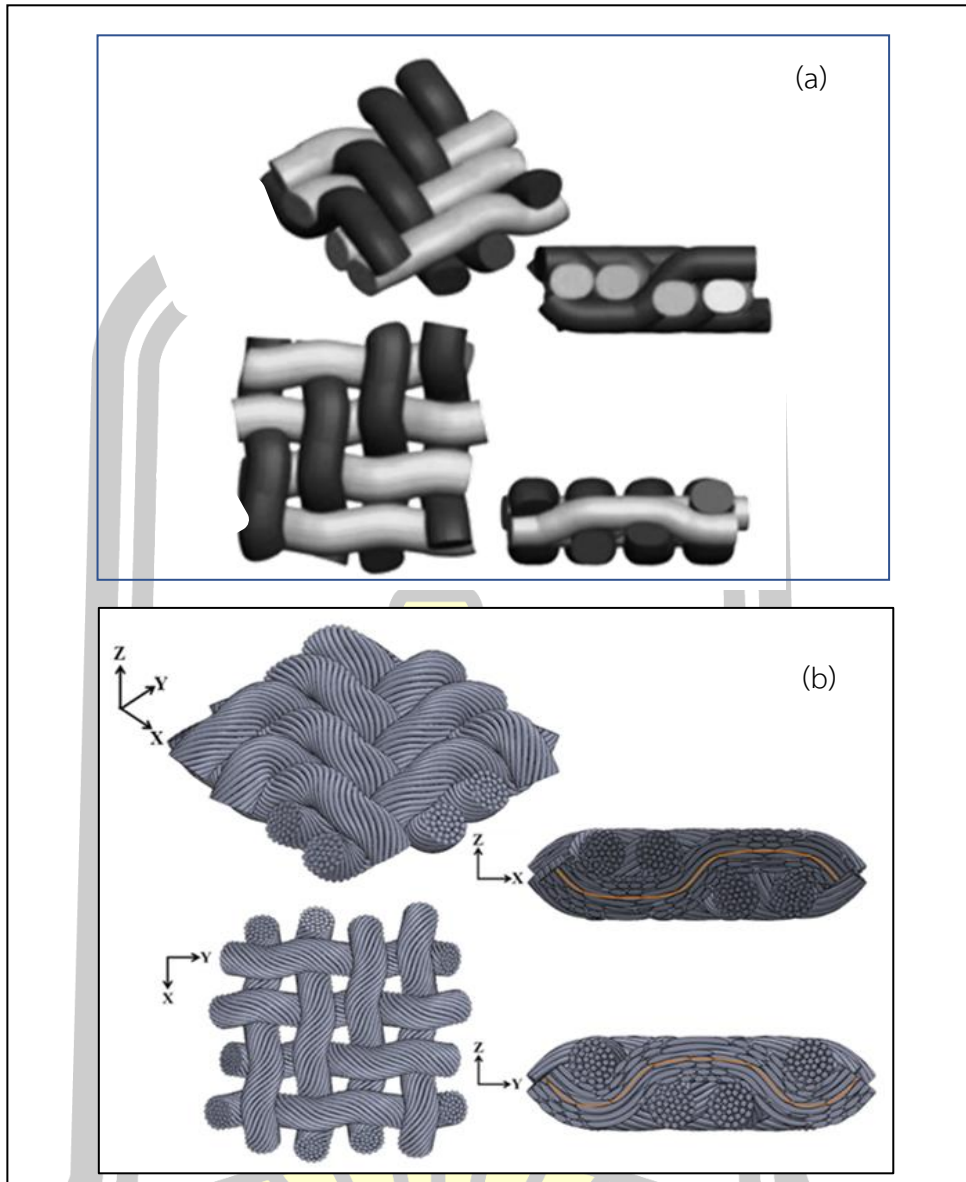


ภาพประกอบ 4.43 เปรียบเทียบ 3D CAD ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง skewness ชนิด 3×1 ในมุมมอง top view, และภาพตัดขวางแสดงแนวเส้นด้ายยืนและพุ่ง

(a) จากงานวิจัยของ Turan and Okur (2013)

(b) จากงานวิจัยในครั้งนี้





ภาพประกอบ 4.44 เปรียบเทียบ 3D CAD ของโครงสร้างผ้าทอลายทแยง skewness ชนิด 2×2 ในมุมมอง isometric view

(a) จากงานวิจัยของ Turan และ Baser (2010)

(b) จากงานวิจัยในครั้งนี้

จากการเปรียบเทียบรูปแบบภาพจำลองทั้ง 3 รูปแบบ จะเห็นได้ว่ารูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีความแตกต่างอย่างเด่นชัด เนื่องจากรูปแบบภาพจำลองสามารถแสดงให้เห็นถึงภาพของเส้นด้ายแต่ละเส้นที่ประกอบด้วยเกลียวของเส้นใยจำนวนมาก รวมเข้าด้วยกันในโครงสร้างผ้าทอ ทำให้รูปแบบภาพจำลอง 3 มิติในงานวิจัยนี้มีความเสมือนจริงมากกว่ารูปแบบภาพจำลอง 3 มิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังกล่าว

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

5.1.1 เพื่อศึกษารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามทฤษฎีของโครงสร้างผ้าในรายละเอียดของเส้นใยและเส้นด้ายที่ประกอบกันเป็นผืนผ้า

5.1.2 เพื่อพัฒนารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาใหม่และนำไปสร้างเป็นภาพจำลองของโครงสร้างผ้าโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) โดยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works V. 2011

5.1.3 เพื่อนำเสนอภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอในลักษณะ 3 มิติที่มีลักษณะเสมือนจริงที่ก่อสร้างขึ้นจากรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่

5.1.4 เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าที่สร้างขึ้นตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่กับแบบจำลองและภาพจำลองในงานวิจัยก่อนหน้า

5.1.5 เพื่อใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงกลของผ้าทอในขั้นสูงต่อไป

5.2 สรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการใหม่สำหรับการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) โดยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works V. 2011 เริ่มจากการกำหนดข้อมูล (input data) ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของโครงสร้างผ้าบนพื้นฐานแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของโครงสร้างผ้าทอของ Peirce จากนั้นอาศัยทฤษฎีของ open packing และรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ virtual location เพื่อกำหนดตำแหน่งของเส้นใยที่กระจายอยู่ในภาพหน้าตัดของเส้นด้าย การสร้างแนวเส้นด้ายตามลายทอจะอาศัยแบบจำลองของ Peirce เป็นพื้นฐานร่วมกับแบบจำลองของแนวเส้นด้าย arc abscissa model เส้นด้ายแต่ละเส้นจะถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการ sweep ภาพหน้าตัดเส้นใยในแต่ละชั้น layer ของเส้นด้ายจะหมุนบิดตัวกันเป็นเกลียวไปตามความยาวของเส้นด้ายตามค่ามุมเกลียวที่กำหนดในขั้นตอนแรก แนวเส้นโค้งของเส้นใยแต่ละเส้นถูกสร้างขึ้นจากการคำนวณหาค่าความโค้งและเชื่อมต่อกันระหว่างหน้าตัดของเส้นใยทั้งสองด้านด้วยวิธีการ NURBS เส้นใยแต่ละเส้นจะถูกลากกวาดไปในลักษณะปลายปิด ตามความยาวของแนวเส้นด้ายเพื่อสร้างเป็นเส้นด้ายยีนและด้ายพุ่ง รูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของเส้นด้ายแต่ละเส้นที่ถูก

สร้างขึ้นจะถูกทำการประกอบกันด้วยวิธีการ assembly ตามแบบจำลองการกำหนดพิกัดตำแหน่งของเส้นด้ายบนโครงสร้างผ้า เพื่อสร้างเป็นภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอตามลายทอผ้าชนิดต่าง ๆ ในรูปแบบ 3D CAD model

ด้วยระเบียบวิธีการที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ดังกล่าวเหล่านี้ ส่งผลให้ได้รูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอภายใต้ลายทอชนิดต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้องและเสมือนจริง สามารถแสดงรายละเอียดของโครงสร้างผ้าทอในระดับของเส้นด้ายที่ประกอบไปด้วยเส้นใยหลาย ๆ เส้นบิดตัวกันเป็นเกลียวในเส้นด้ายยืนและเส้นด้ายพุ่งที่มีลักษณะโค้งลดขึ้นลงตามลายทอผ้าที่มีความซับซ้อนได้หลากหลายชนิด ในงานวิจัยนี้ ยังได้นำเสนอรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอแบบ 2 ชั้น และ 3 สามชั้น รวมถึงการสร้างแบบจำลองของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอหลายทแยงชนิด 2×2 2×1 และ 3×1 ในสถานะของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งที่มีลักษณะเบ้เอียงไม่ตั้งฉากกัน

วัตถุประสงค์อีกประการของงานวิจัยนี้ก็เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตผ้าที่มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการของผู้บริโภคที่มีความหลากหลาย ลดการสูญเสียเวลาและวัตถุดิบจากการทดลองทอให้น้อยลง เป็นการเอื้อให้เกิดการพัฒนาต่อยอดสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในงานวิจัยครั้งถัดไปสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงกลของผ้าทอในขั้นสูง เช่น รูปแบบคุณสมบัติทางกล รูปแบบการถ่ายเทความร้อนของผ้า หรือรูปแบบโครงสร้างผ้าที่ใช้วัสดุผสมคอมโพสิต ต่อไป

5.3 อภิปรายผล

5.3.1 ผลจากการสร้างรูปแบบเส้นด้าย

จะเริ่มจากการสร้างหน้าตัดของเส้นด้ายได้โดยอาศัยทฤษฎีของ open packing และรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ virtual location นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับรูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของเกลียวเส้นด้ายที่สมบูรณ์แบบ แล้วนำไปสร้างเป็นรูปแบบจำลอง 3 มิติ คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ ส่งผลให้เกิดเส้นด้ายในรูปแบบ 3D CAD model ที่ประกอบไปด้วยเส้นใยหลายเส้นบิดตัวกันตามค่ามุมเกลียวที่ได้ออกแบบและกำหนดข้อมูลไว้ในแต่ละชั้น Layer ส่งผลให้ได้รูปแบบ 3 มิติเส้นด้ายที่มีองค์ประกอบคล้ายคลึงกับเส้นด้ายจริง

5.3.2 ผลจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแนวเส้นด้าย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแนวเส้นด้าย โดยอาศัยรูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของโครงสร้างผ้าทอของ Peirce เป็นพื้นฐานในการพัฒนา ร่วมกับแบบจำลองของแนวเส้นด้ายในรูปแบบ arc abscissa model และข้อมูลเกี่ยวกับลายทอในโครงสร้างผ้า รูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งแต่ละเส้นจะถูกสร้างขึ้นด้วยหลักทางเรขาคณิต เส้นโค้งที่ได้สร้างขึ้นจากการกำหนดจุดต่าง ๆ เพื่อใช้ควบคุมเส้นโค้ง โดยเมื่อมีการกำหนด

จุดควบคุมมาก ๆ ก็จะทำให้เส้นโค้งมีความต่อเนื่องกันและมีความละเอียดราบเรียบมากยิ่งขึ้น นั่นคือ ด้ายแต่ละเส้นจะมีแนวเส้นด้าย (yarn path) ที่แตกต่างกันในลักษณะแนวเส้นโค้งขึ้นลงสลับ สลับเปลี่ยนกันไปตามลายทอ

5.3.3 ผลจากการสร้างภาพจำลอง 3D CAD model ของโครงสร้าง

จากการทำการศึกษาและสืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับลายทอผ้าชนิดต่าง ๆ เพื่อใช้ใน สร้างภาพจำลอง 3D CAD model ของโครงสร้างผ้าตามลายทอที่ทำการศึกษา ได้แก่ ผ้าทอลายขัด ธรรมดา 1×1 , 2×2 ลายทแยง 2×1 , 2×2 และ 3×1 ในงานวิจัยนี้ ยังได้นำเสนอรูปแบบภาพ จำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอหลายชั้น (MLWF) ได้แก่ ผ้าทอชนิด 2 ชั้น 3 ชั้น และโครงสร้างผ้า ทอในสถานะของเส้นด้ายยืนและด้ายพุ่งที่มีลักษณะเบ้เอียงไม่ตั้งฉากกันของผ้าทอลายทแยงชนิด 2×2 , 2×1 และ 3×1 รูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้า จะถูกสร้างขึ้นจากการนำภาพ เส้นด้ายแต่ละเส้นในรูปแบบ 3D CAD model นำมาประกอบกันด้วยวิธีการ assembly ตาม แบบจำลองของการกำหนดพิกัดตำแหน่งของเส้นด้ายบนโครงสร้างผ้าที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ ทำให้ได้ภาพ จำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอที่มีความถูกต้องตรงตามแบบของลายทอที่ทำการศึกษา

ภาพจำลอง 3D CAD model ของโครงสร้างผ้าทอชนิดลายขัดธรรมดา 1×1 , 2×2 ลายทแยง 2×1 , 2×2 และ 3×1 เป็นโครงสร้างผ้าทอที่สร้างขึ้นจากแบบจำลองสำหรับโครงสร้าง ผ้ากรณี square fabric สามารถกำหนดสมการขึ้นมาโดยอาศัยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างผ้า ทอ ได้แก่ ความยาวของส่วนโค้งและความยาวของเส้นด้ายที่เป็นเส้นตรงที่สัมผัสกับส่วนโค้งและ ระนาบผ้า ในกรณีของโครงสร้างผ้าที่เป็นแบบ square fabric ค่าสัดส่วนความหยิกงอของโครงสร้าง ผ้าอาศัยแบบจำลองเชิงเรขาคณิตของ Peirce ในการออกแบบ โครงสร้างผ้าในลักษณะนี้จะมีความ หนาแน่นของด้ายยืนและด้ายพุ่งเท่ากัน เส้นด้ายแต่ละเส้นจะตั้งฉากกันเมื่อมองในมุมมอง top view

ภาพจำลอง 3D CAD model ของโครงสร้างผ้าทอชนิด 2 และ 3 ชั้น ในงานวิจัยนี้จะ ถูกสร้างจากรูปแบบจำลองของ Grunbaum และ Shephard. (1980) นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับ วิธีการสร้างภาพจำลองสามมิติของเส้นด้ายที่สมบูรณ์แบบเพื่อสร้างเกลียวของเส้นใยในเส้นด้ายที่ แสดงให้เห็นถึงการเรียงตัวของเส้นด้ายที่ขัดสานกัน มีความหนาและความกว้างของผ้าคงที่ เส้นด้าย ทั้งหมดในโครงสร้างผ้าที่ประกอบเข้าด้วยกัน ตำแหน่งของเส้นด้ายหลายเส้นที่ประกอบเข้าด้วยกัน เป็นโครงสร้างผ้าแบบหลายชั้น จะอยู่ในระนาบเดียวกันตามจำนวนชั้นของผ้าซึ่งเรียกว่า “strand” กลุ่มสัญลักษณ์และตัวเลขของเส้นด้ายในระนาบ strand จะเริ่มจากด้านชั้นบนสุดของผ้าโดย เรียงลำดับตัวเลขจาก น้อย - มาก อย่างไรก็ตามภาพจำลองของโครงสร้างผ้านี้ยังไม่ได้อาศัย แบบจำลองของโครงสร้างผ้าที่ถูกต้องใด ๆ หรือรูปแบบที่ได้พัฒนาต่อยอดใหม่ ๆ เป็นเพียงการสร้าง ภาพให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้นเท่านั้น และแสดงถึงความสามารถของรูปแบบวิธีการใหม่ที่น่าเสนอ

ในงานวิจัยนี้ที่มีสามารถสร้างภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอตามลายทอผ้าชนิดต่าง ๆ ที่หลากหลายได้

การสร้างแบบจำลองของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอหลายทแยงชนิด 2×2 2×1 และ 3×1 ในสภาวะของเส้นด้ายย่นและด้ายพุ่งที่มีลักษณะเบ้เอียงไม่ตั้งฉากกัน หรือ skewness ซึ่งมีลักษณะของแนวเส้นด้ายเกิดการเบ้เอียงตัวไม่ตั้งฉากกันเมื่อมองในมุมมอง top view จะเห็นว่าแนวของเส้นด้ายเคลื่อนที่ไม่เป็นเส้นตรง เส้นด้ายจะเคลื่อนที่ไปตามแนวยาวในลักษณะเฉียงเหมือนฟันเลื่อย ขึ้นลงสลับกันไปมา ค่าของมุม skewness angle จะเกิดขึ้นในส่วนความยาวของส่วนเส้นด้ายลอย คือ ความยาวของเส้นด้ายที่ข้ามอยู่ด้านบนเส้นด้ายอีกเส้นเมื่อมีแรงมากระทำจึงทำให้เกิดการเบ้เอียง และในส่วนในช่วงความยาวในการเคลื่อนที่ไปกลับในบริเวณที่จุดขัดสานของโครงสร้างผ้า ถูกกำหนดขึ้นตามความสูงของแนวเส้นด้ายที่เอียงไปมาในลักษณะของฟันเลื่อย การพิจารณาเรขาคณิตของเส้นด้ายในลักษณะ skewness การสร้างภาพจำลองของโครงสร้างผ้าดังกล่าวนี้ ถือได้ว่ามีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก เนื่องจากแนวเส้นด้ายแต่ละเส้นมีลักษณะเป็นเส้นโค้งของการสอด การลอด และต้องมีความเบ้เอียงไปพร้อม ๆ กัน ดังนั้น จึงต้องมีการพัฒนารูปแบบจำลองเชิงเรขาคณิตสำหรับแนวเส้นด้ายขึ้นมาใหม่เพื่อเพิ่มความเข้าใจและเพื่อความสะดวกต่อการนำไปใช้งานให้ง่ายขึ้น

โครงสร้างผ้าทอหลายทแยงชนิด 2×2 ในสภาวะของเส้นด้ายย่นและด้ายพุ่งที่มีลักษณะแบบ skewness จะเป็นโครงสร้างผ้าทอที่สมดุล กล่าวคือถ้าด้านหน้าเป็นลายเอียงขวาด้านหลังจะเป็นลายเอียงซ้าย หรือถ้าด้านหน้าเป็นลายเอียงซ้ายด้านหลังจะเป็นลายเอียงขวา ทิศทางแนวทแยงบนด้านหน้าของผ้าจะตรงข้ามกับแนวทแยงด้านหลังของผ้า มุมของเส้นด้าย skewness angle ที่พิจารณาจากเส้นด้ายลอยที่เป็นด้ายย่น (floating length) จะเท่ากับค่ามุมของเส้นด้ายลอยที่เป็นด้ายพุ่ง $\delta_1 = \delta_2$ และค่ามุมในช่วงความยาวเส้นด้ายจุดขัดสาน (intersection length) ของเส้นด้ายย่นก็จะเท่ากับ ค่ามุมที่จุดขัดสานของเส้นด้ายพุ่ง $\beta_1 = \beta_2$ ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ จะส่งผลให้ความหนาแน่นของด้ายย่นและด้ายพุ่งจะมีจำนวนเท่ากัน

ในส่วนของเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอหลายทแยงชนิด 2×1 และ 3×1 ภายใต้สภาวะของ skewness จะมีลักษณะที่ไม่สมมาตรกัน กล่าวคือค่าของมุมของเส้นด้าย skewness angle ที่พิจารณาจากเส้นด้ายย่นที่ลอยอยู่ด้านล่างของเส้นด้าย (floating length) จะมีค่าไม่เท่ากับค่ามุมของเส้นด้ายลอดที่เป็นด้ายพุ่ง $\delta_1 \neq \delta_2$ และค่ามุมในช่วงความยาวเส้นด้ายจุดขัดสาน (intersection length) ของเส้นด้ายย่นก็จะเท่ากับ ค่ามุมที่จุดขัดสานของเส้นด้ายพุ่ง $\beta_1 \neq \beta_2$ โดยที่เส้นด้ายย่นที่ลอยอยู่ด้านล่างของเส้นด้ายจะมีค่ามุม (δ_1) มากกว่า ค่ามุมของเส้นด้ายลอยที่เป็นเส้นด้ายพุ่ง (δ_2) ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ จะส่งผลให้ความหนาแน่นของด้ายย่นและด้ายพุ่งจะมีจำนวนไม่เท่ากัน โดยปกติแล้วจำนวนเส้นด้ายย่นต่อเซ็นติเมตร จะมีจำนวนมากกว่าเส้นด้ายพุ่ง

5.3.2 ผลจากการประยุกต์ใช้ CAD และการเปรียบเทียบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้า ที่สร้างขึ้นกับรูปแบบภาพจำลองในงานวิจัยก่อนหน้า

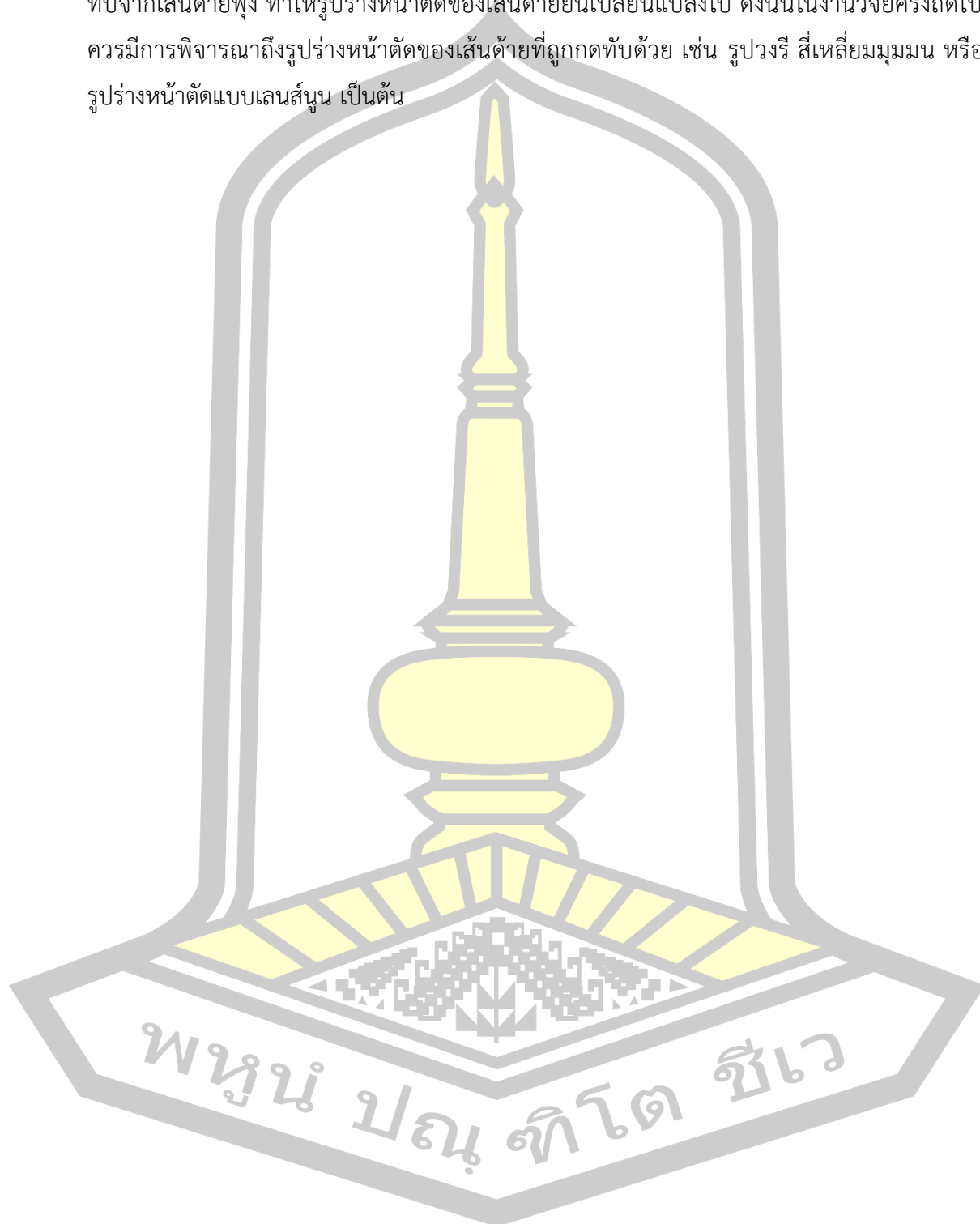
การสร้างรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการ ออกแบบ (CAD) โดยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works V. 2011 ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถจะทำงานได้อย่างสมบูรณ์แบบตรงกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ การสร้างภาพจำลอง 2 มิติตาม รูปแบบเชิงเรขาคณิตของโครงสร้างผ้าต่าง ๆ จะถูกสร้างในโหมดการทำงาน part mode :ซึ่งเป็น โหมดการทำงานเริ่มต้นก่อนที่จะก้าวสู่การทำงานในโหมด assembly รูปแบบจำลองการใช้ 2D sketch รูปแบบของภาพจำลองจะถูกสร้างตามเงื่อนไขทางคณิตศาสตร์ และสามารถแก้ไขขนาด รูปร่างทางเรขาคณิตของ Model ที่สร้างขึ้นมาได้โดยง่าย เพื่อนำไปสู่การสร้างเป็นโครงสร้างผ้าใน รูปแบบ 3D CAD mode คือแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ที่สามารถแสดงค่าต่าง ๆ เช่น density, material, mass, weight เป็นต้น และยังสามารถมองเห็น 3D Model ได้ทุกมุมมอง รวมทั้งยังสามารถแสดงภาพตัดขวาง 2 มิติ และ 3 มิติ ของโครงสร้างผ้าทอตามแนวของด้ายยืนและด้ายพุ่ง ได้ อีกด้วย

จากการเปรียบเทียบรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอ ได้แสดงการ เปรียบเทียบไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.6 โดยเปรียบเทียบภาพจากงานวิจัยนี้ คือ รูปแบบภาพจำลอง 3 มิติ ของโครงสร้างผ้าลายขัตรีธรรมดา 1×1 กับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Adanur and Liao. (1998) และ จากงานวิจัยของ Jiang and Chen. (2005) ในส่วนการเปรียบเทียบรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของ โครงสร้างผ้าทอ skewness ชนิด 2×1 และ 3×1 จะทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Turan and Okur (2013) และลายทแยงชนิด 2×2 จะทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Turan and Baser. (2010) จะเห็นได้ว่ารูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอที่ได้จาก งานวิจัยนี้ มีความแตกต่างอย่างเด่นชัด เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วในข้างต้น เนื่องจากรูปแบบภาพจำลองสามารถแสดงให้เห็นถึงภาพของเส้นด้ายแต่ละเส้นที่ประกอบด้วยเกลียว ของเส้นใยจำนวนมากรวมเข้าด้วยกันในโครงสร้างผ้าทอ ทำให้รูปแบบภาพจำลอง 3 มิติในงานวิจัยนี้มี ความเสมือนจริงมากกว่ารูปแบบภาพจำลอง 3 มิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังกล่าว

5.4 ข้อเสนอแนะ

การสร้างรูปแบบภาพจำลอง 3 มิติของโครงสร้างผ้าโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) โดยอาศัยทฤษฎี Peirce เป็นพื้นฐานในการคำนวณทางเรขาคณิตที่เกี่ยวกับโครงสร้างผ้าทอ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ Peirce จึงได้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานไว้ว่า ด้ายที่ทำการพิจารณามีความยืดหยุ่น ไม่ต้านการโค้งงอ มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม ไม่สามารถบีบอัดหรือดึงยืดออกได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้วใน

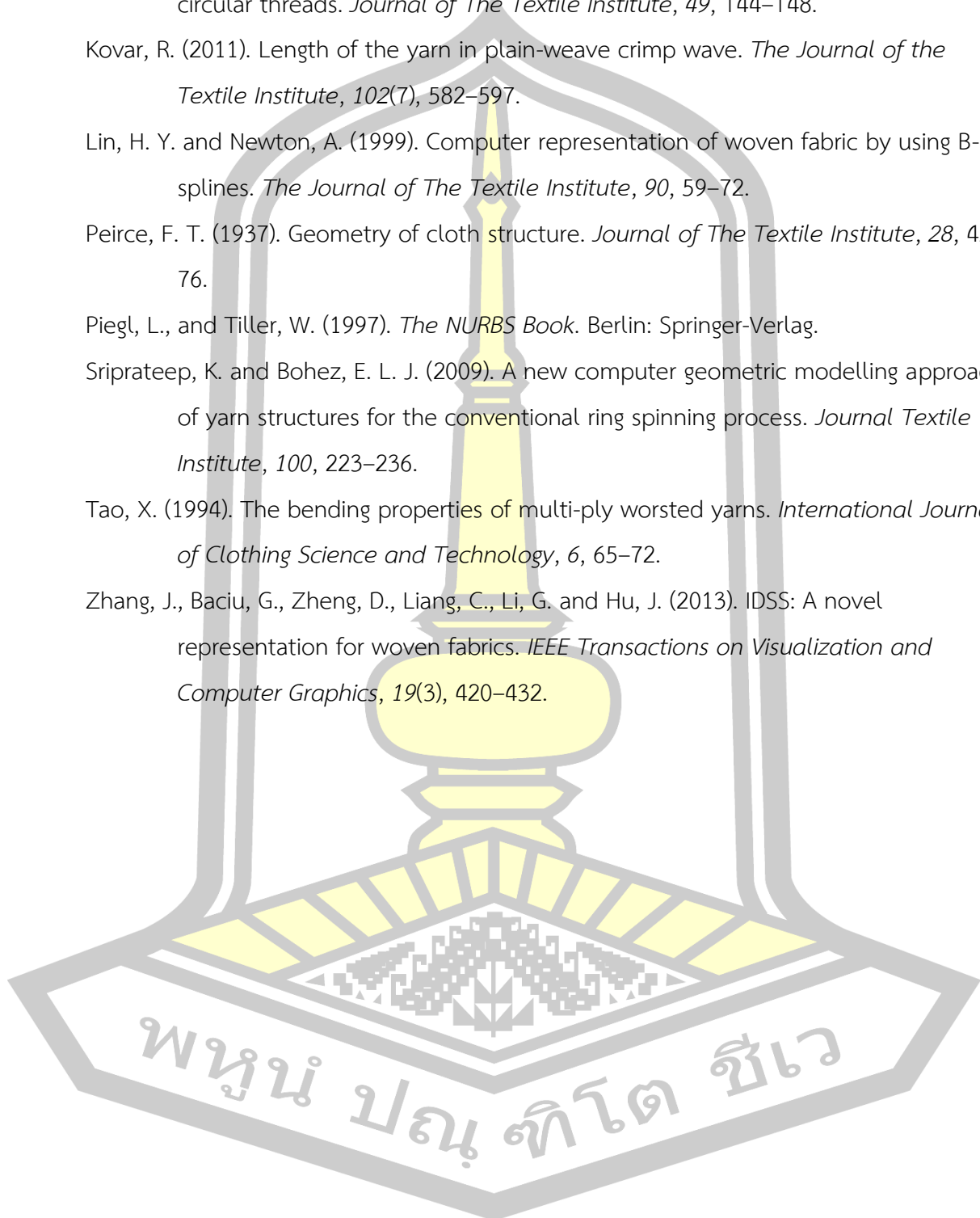
กระบวนการทอเช่นนี้เกิดขึ้นได้ยาก ตัวอย่างเช่นเส้นด้ายยืนที่มีรูปร่างหน้าตัดที่เป็นวงกลมจะถูกกดทับจากเส้นด้ายพุ่ง ทำให้รูปร่างหน้าตัดของเส้นด้ายยืนเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในงานวิจัยครั้งถัดไปควรมีการพิจารณาถึงรูปร่างหน้าตัดของเส้นด้ายที่ถูกกดทับด้วย เช่น รูปวงรี สีเหลี่ยมมุมมน หรือรูปร่างหน้าตัดแบบเลนส์นูน เป็นต้น

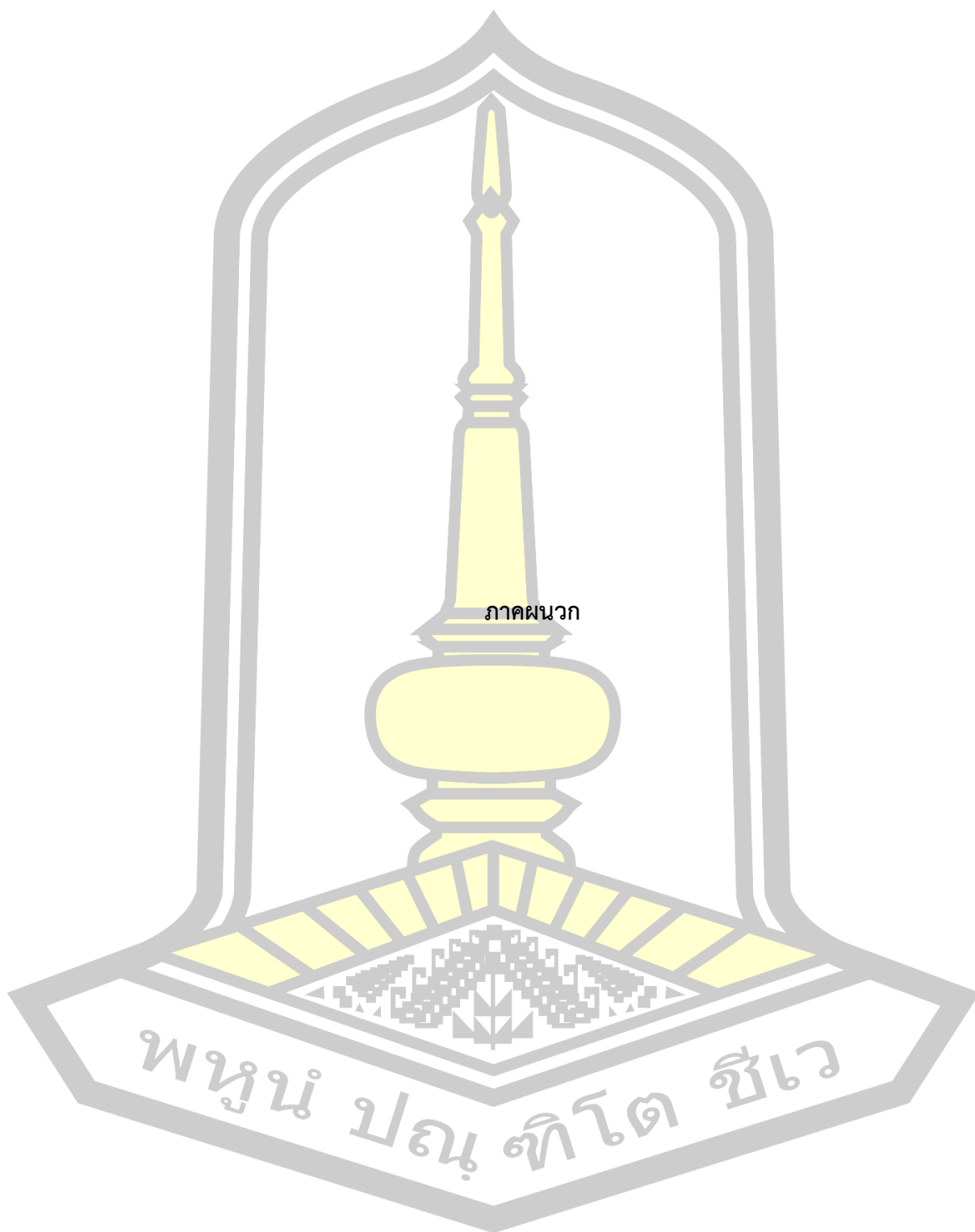


บรรณานุกรม

- ประณัฐ โพธิยะราช. (2549). *การจำลองภาพ 3 มิติของโครงสร้างผ้าทอด้วยภาษาเวอ์ซวลเรียลิตีโมเดล*. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- ยุพินศรี สายสีทอง. (2528). *งานทอ*. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. (2554). *อุตสาหกรรมสิ่งทอไทย*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัจฉราพร ไสละสูตร. (2524). *การออกแบบลายผ้าและเทคนิคการพิมพ์*. กรุงเทพฯ: สหประชาพานิชย์.
- Adanur, S. and Liao, T. (1998). 3D modeling of textile composite performs. *Composites Part B*, 29, 787–793.
- Dash, B.P., Behera, B. K., Mishra, R. and Militky, J. (2013). geometry of 3D woven fabrics by computation method. *Journal of The Textile Institute*, 104(3), 312–321.
- Gong, R. H., Ozgen, B. and Soleimani, M. (2009). Modeling of yarn cross-section in plain woven fabric. *Textile Research Journal*, 79, 10–14.
- Grishanov, S. A., Siewe, F. and Cassidy, T. (2011). Advances in the CAD simulation of textile yarns. *Research Journal Textile Apparel*, 15(1), 1–10.
- Harwood, R.J., Liu, Z., Grishanov, S.A., Lomov, S. V. and C. T. (1995). Modelling of Two-component Yarns Part II: Creation of the Visual Images of Yarns. *The Journal of The Textile Institute*, 88(4), 385–399.
- Hearle, J.W.S., Grosberg, P. and Backer, S. (1969). *Fabrics*. New York: John Wiley & Sons. New York: John Wiley & Sons.
- Hu, J. (2004). *Structure and mechanics of woven fabrics*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Jeon, B.S., Chun, S.Y. and Hong, C. L. (2003). Structural and mechanical properties of woven fabrics employing Peirce's Model. *Textile Research Journal*, 73(10), 929–933.
- Jiang, Y. and Chen, X. (2005). Geometric and algebraic algorithms for modelling yarn in woven fabrics. *The Journal of the Textile Institute*, 96, 237–245.
- Keefe, M., Edwards, D. and Yang, J. (1992). Solid modeling of yarn and fibre assemblies. *The Journal of the Textile Institute*, 83, 185–196.

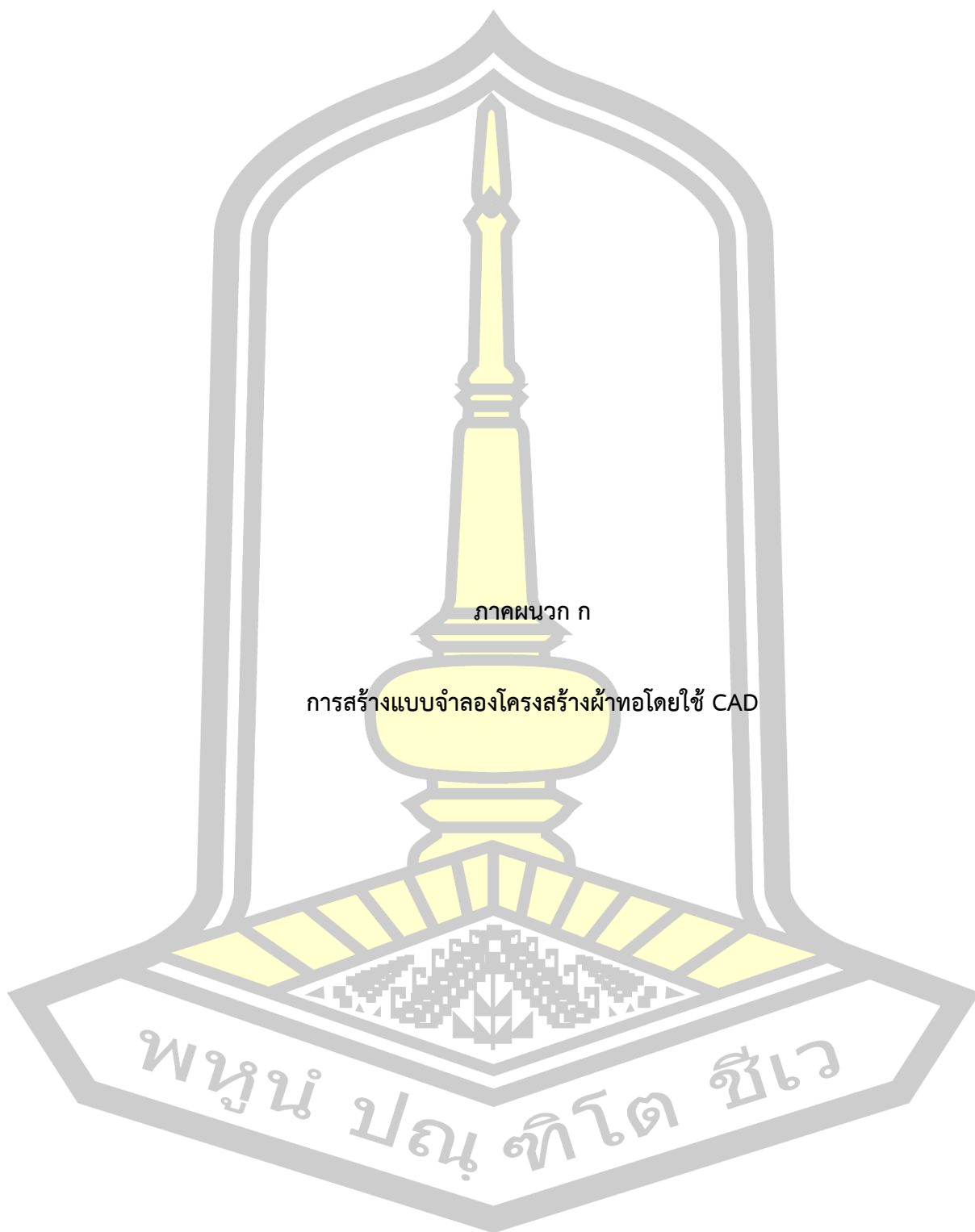
- Kemp, A. (1958). An extension of Pierce's cloth geometry to the treatment of non-circular threads. *Journal of The Textile Institute*, 49, T44–T48.
- Kovar, R. (2011). Length of the yarn in plain-weave crimp wave. *The Journal of the Textile Institute*, 102(7), 582–597.
- Lin, H. Y. and Newton, A. (1999). Computer representation of woven fabric by using B-splines. *The Journal of The Textile Institute*, 90, 59–72.
- Peirce, F. T. (1937). Geometry of cloth structure. *Journal of The Textile Institute*, 28, 45–76.
- Piegl, L., and Tiller, W. (1997). *The NURBS Book*. Berlin: Springer-Verlag.
- Sriprateep, K. and Bohez, E. L. J. (2009). A new computer geometric modelling approach of yarn structures for the conventional ring spinning process. *Journal Textile Institute*, 100, 223–236.
- Tao, X. (1994). The bending properties of multi-ply worsted yarns. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 6, 65–72.
- Zhang, J., Baci, G., Zheng, D., Liang, C., Li, G. and Hu, J. (2013). IDSS: A novel representation for woven fabrics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(3), 420–432.





ภาคผนวก

พูนํ ปณํ ทิโต ชีเว



ภาคผนวก ก

การสร้างแบบจำลองโครงสร้างฟ้าทอโดยใช้ CAD

พหุบัณฑิตวิทัย

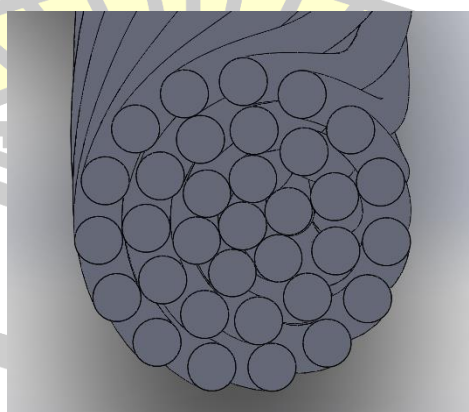
ขั้นตอนการสร้างรูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอโดยใช้ CAD

1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างรูปแบบภาพจำลองของโครงสร้างผ้าทอ

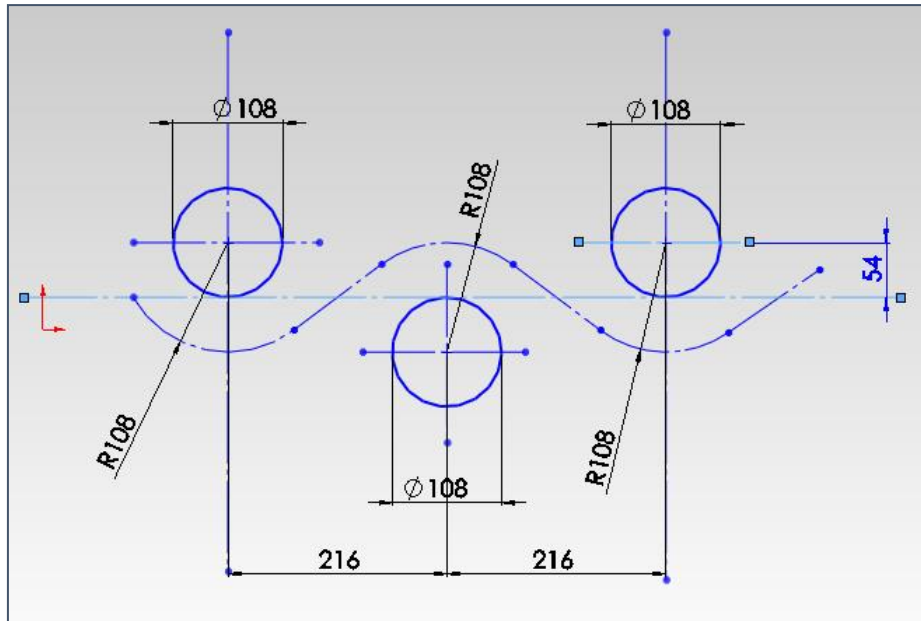
Input data										
d_1	d_2	df_1	df_2	p_1	p_2	h_1	h_2	N_z	Nf	α
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(layer)	(filament)	(deg.)
0.108	0.108	0.012	0.012	0.187	0.187	0.108	0.108	5	56	35.75

2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ของเส้นด้ายบนพื้นฐานของ virtual location

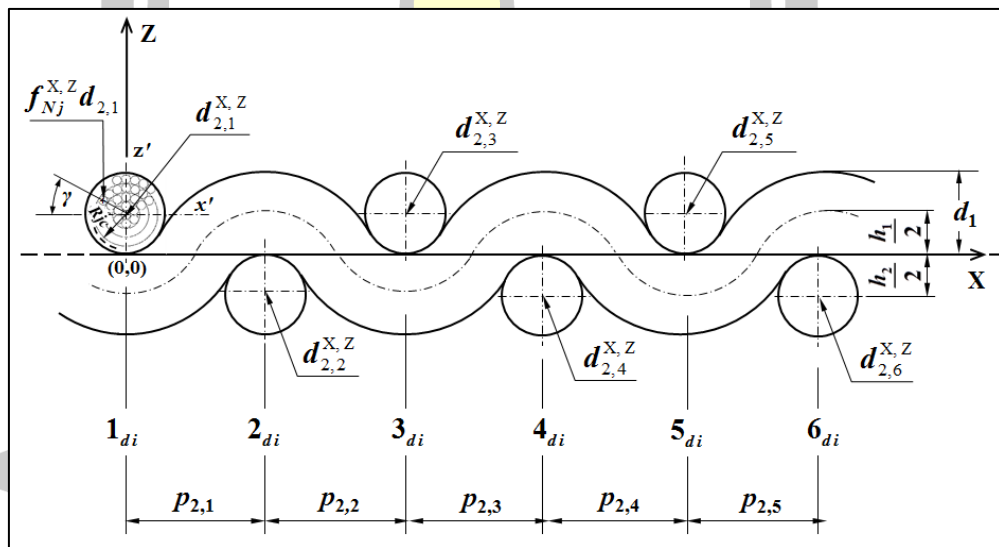
Define fiber in yarn cross section						
Yarn (mm)	No. layer	h_j (mm)	R_j (mm)	R_{jc} (mm)	α_j (deg.)	f_j (filament)
$d_1 = 0.108$	1	-	0.006	-	-	1
	2	0.012	0.018	0.012	8.94	6
	3	0.012	0.030	0.024	17.88	12
	4	0.012	0.042	0.036	26.81	17
	5	0.012	0.054	0.048	35.75	20
$d_2 = 0.108$	1	-	0.006	-	-	1
	2	0.012	0.018	0.012	8.94	6
	3	0.012	0.030	0.024	17.88	12
	4	0.012	0.042	0.036	26.81	17
	5	0.012	0.054	0.048	35.75	20



ภาพประกอบ ก.1 รูปแบบ 3D CAT model หน้าตัดเส้นด้ายบนพื้นฐานของ virtual location



ภาพประกอบ ก.2 การกำหนดตำแหน่งของเส้นด้ายตามโครงสร้างลายทอ



ภาพประกอบ ก.3 แบบจำลอง 2D โครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 1 × 1 (plain weave)

1 รูปแบบของสมการและตำแหน่งแนวเส้นด้ายในโครงสร้างผ้าทอลายขัดชนิด 1 × 1

Coordinate of weft yarn in woven fabric for 1x1 plain weave

New geometric model of 1x1 plain weave

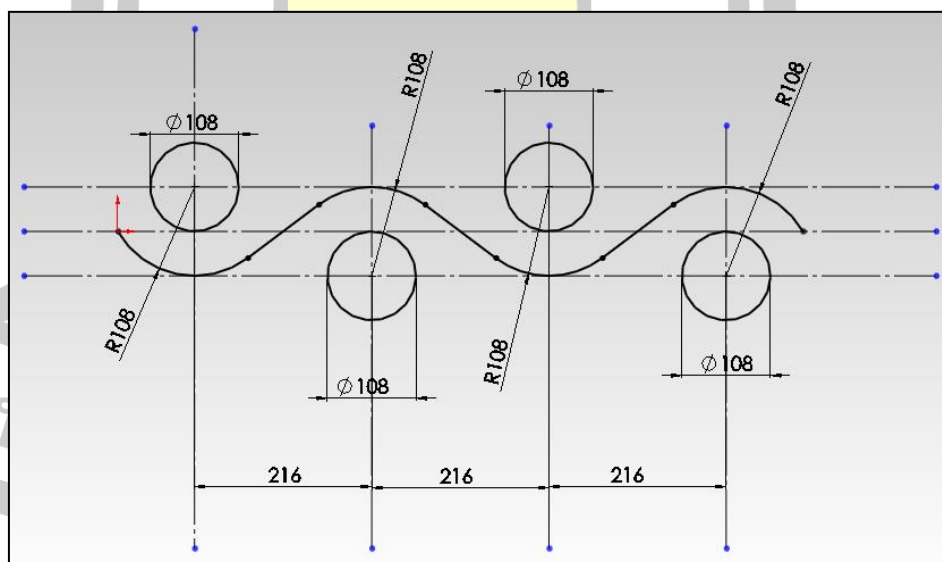
$$d_i^X = p_i (i_{di} - 1)$$

$$d_i^Z = \pm h/2 \begin{cases} \frac{h_i}{2}; \text{ where the coordinate of yarn in the upper quadrant regions} \\ -\frac{h_i}{2}; \text{ where the coordinate of yarn in the lower quadrant regions} \end{cases}$$

The positions of center weft yarn in woven fabric for 1x1 plain weave

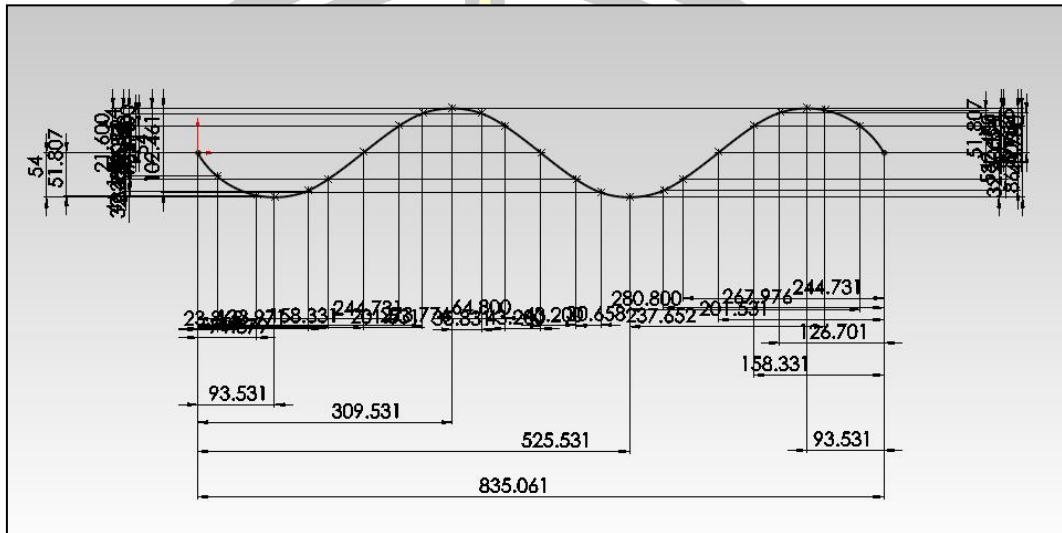
i_{d2}	$d_{2,1}^X$	$d_{2,1}^Z$	$d_{2,2}^X$	$d_{2,2}^Z$	$d_{2,3}^X$	$d_{2,3}^Z$	$d_{2,4}^X$	$d_{2,4}^Z$	$d_{2,5}^X$	$d_{2,5}^Z$	$d_{2,6}^X$	$d_{2,6}^Z$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	0	0.054										
2			0.187	-0.054								
3					0.374	0.054						
4							0.561	-0.054				
5									0.748	0.054		
6											0.935	-0.054

the warp and weft densities being 53.48 ends/ cm and 53.48 picks/cm, respectively.



ภาพประกอบ ก.4 กำหนดตำแหน่งของเส้นด้ายตามโครงสร้างลายขัด

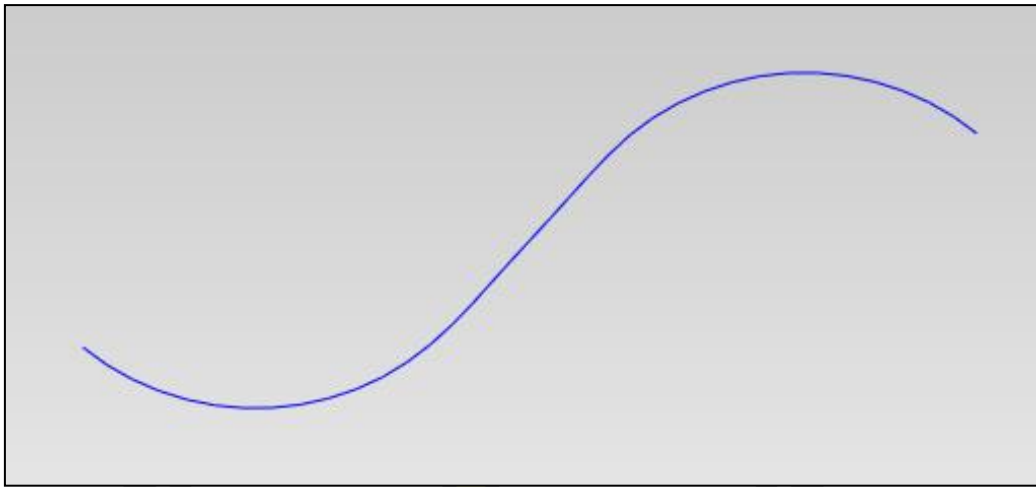
4. ในโปรแกรม Solid Works อาศัยแท็บของฟังก์ชัน สไปล์น (Spline) นำมาสร้างเส้นโค้งแนวแกนเส้นด้าย แล้วกำหนดจุดควบคุมต่าง ๆ ของเส้นโค้ง โดยถ้ามีการกำหนดจุดควบคุมมาก ก็จะทำให้เส้นโค้งมีความต่อเนื่องกัน และมีความละเอียดมากยิ่งขึ้น



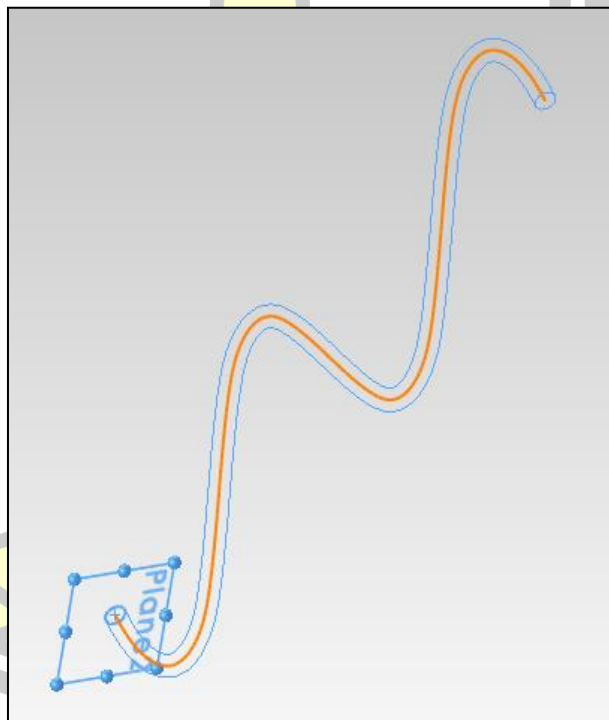
ภาพประกอบ ก.5 กำหนดตำแหน่งพิกัดของเส้นโค้งสไปล์น



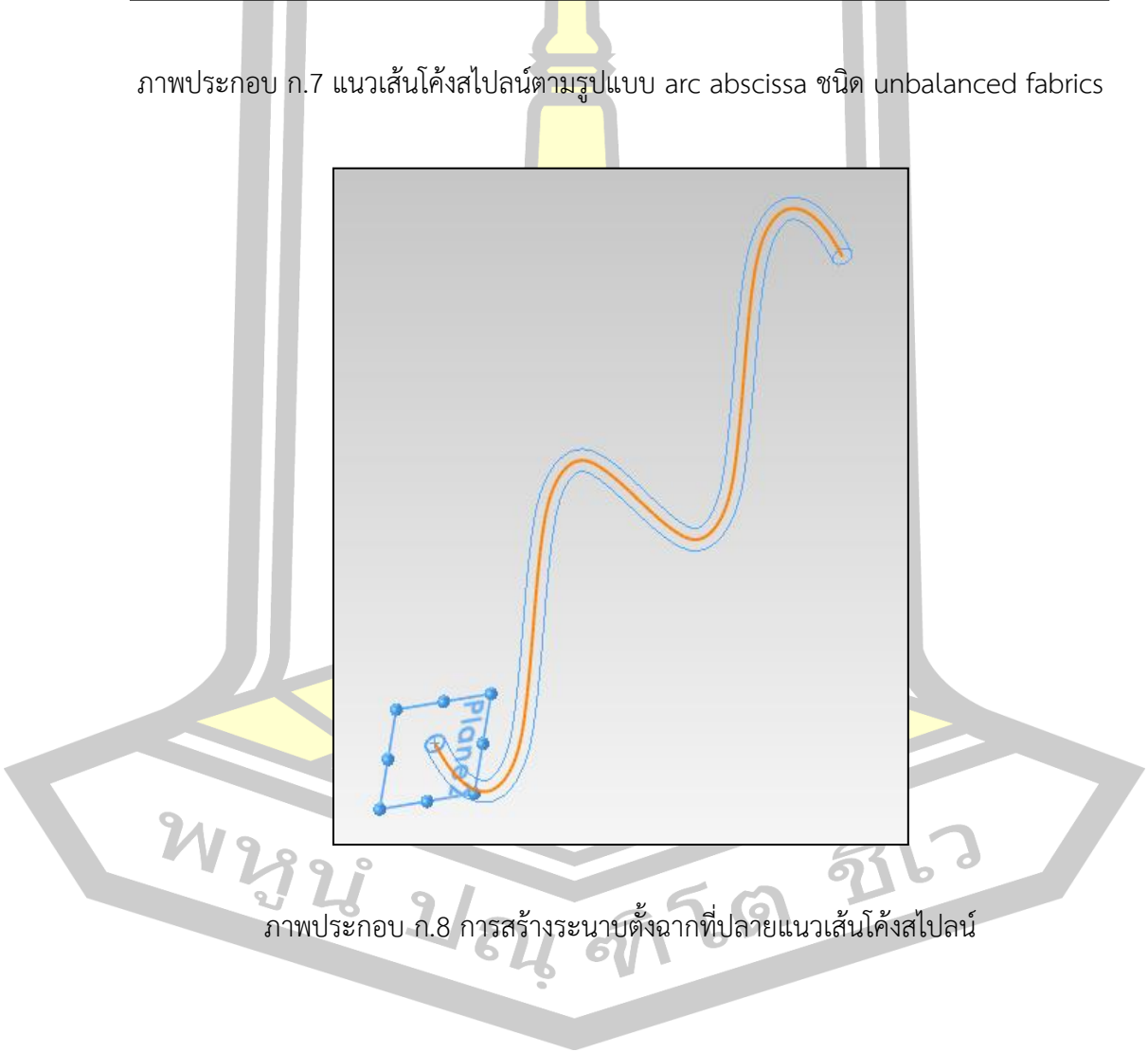
ภาพประกอบ ก.6 แนวเส้นโค้งสไปล์น ตามรูปแบบ arc abscissa ชนิด square fabric

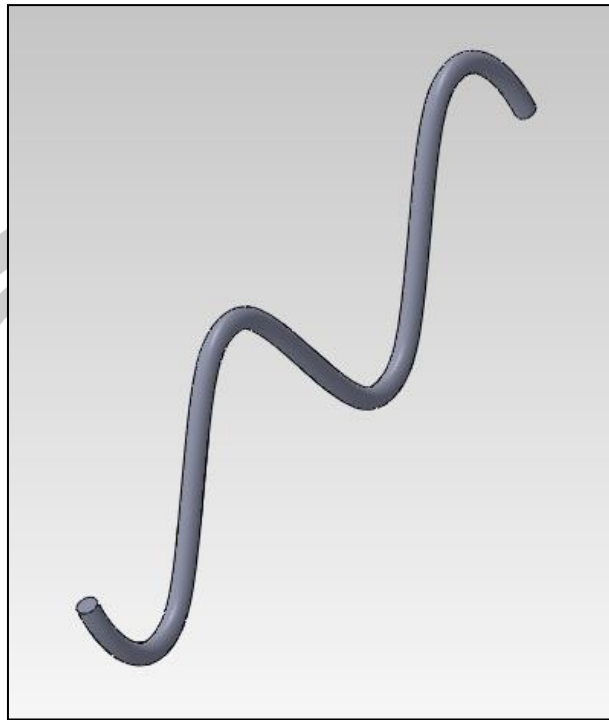


ภาพประกอบ ก.7 แนวเส้นโค้งสไปลน์ตามรูปแบบ arc abscissa ชนิด unbalanced fabrics

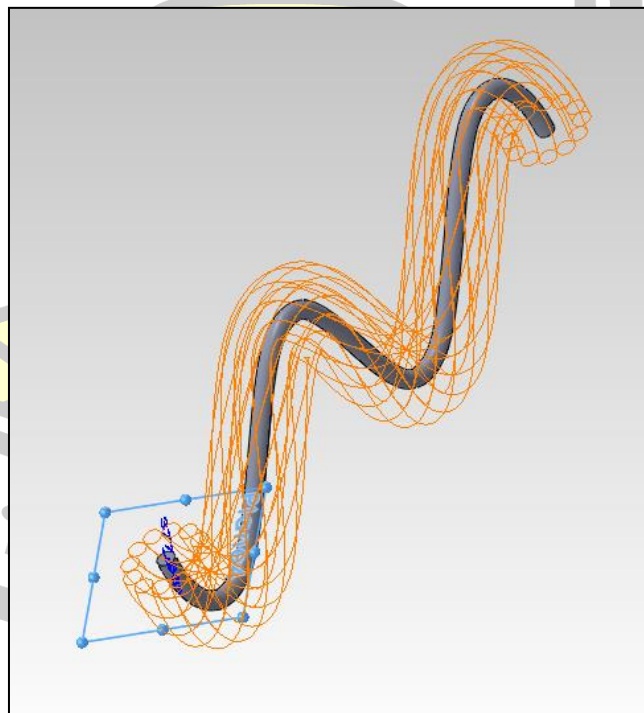


ภาพประกอบ ก.8 การสร้างระนาบตั้งฉากที่ปลายแนวเส้นโค้งสไปลน์

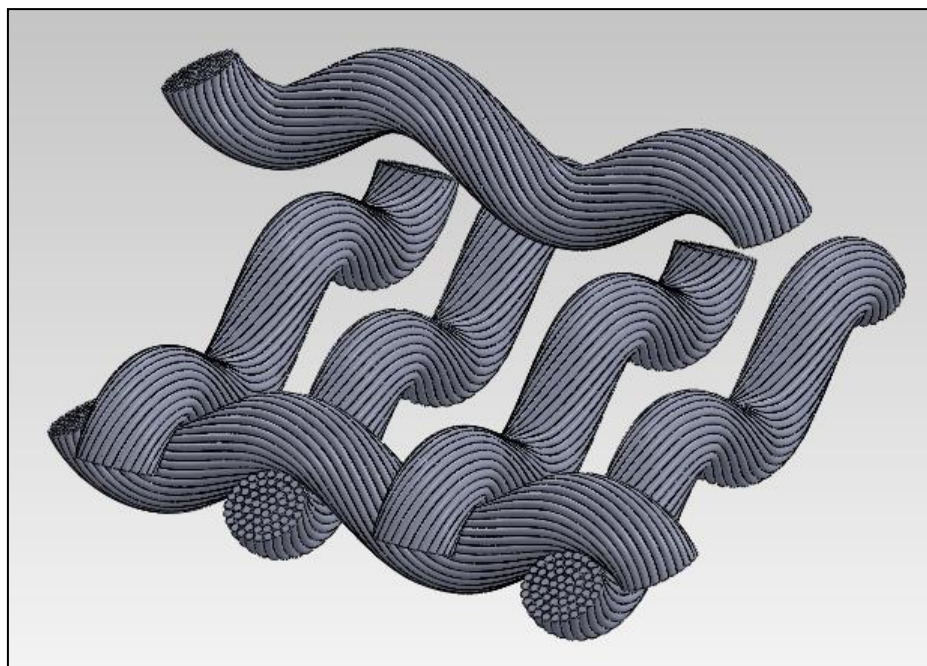




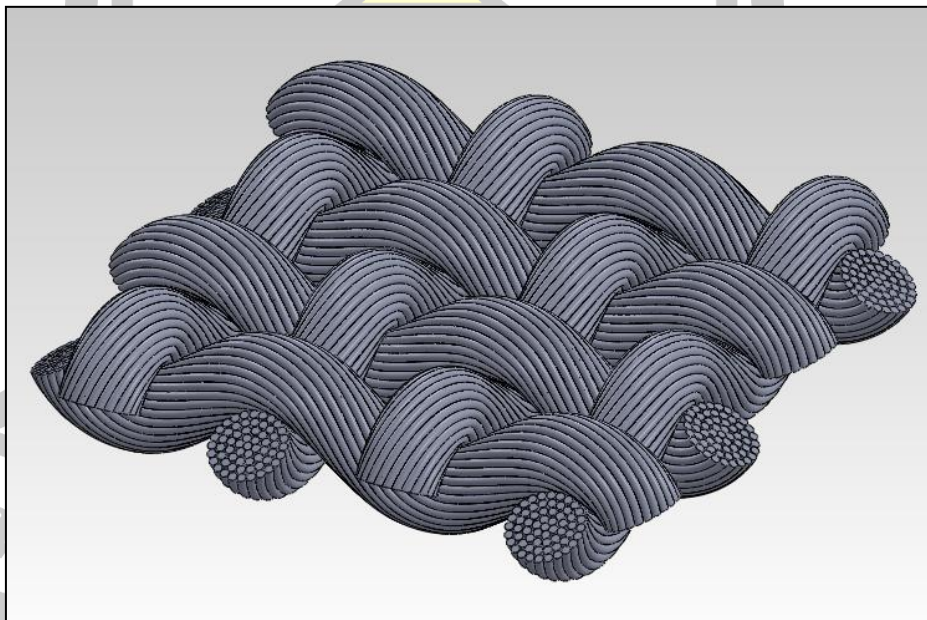
ภาพประกอบ ก.9 เส้นใยที่ถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการ sweep ไปตามแนวเส้นด้าย



ภาพประกอบ ก.10 อาศัยคำสั่ง Circular Pattern เพื่อสร้างชั้น Layer ในเส้นด้าย



ภาพประกอบ ก.11 เส้นด้ายแต่ละเส้นจะถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกัน



ภาพประกอบ ก.12 แบบจำลอง 3D CAD ของผ้าทอลายขัด 1 × 1

