การพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสูตรน้ำยาฟื้นฟูสภาพเนื้อเยื่อจากร่างอาจารย์ใหญ่โดยใช้กรดแลคติกในระดับความเข้มข้นและเวลาที่แตกต่างกัน

Development and comparative efficacy of tissue restoration formulations for embalmed cadavers using lactic acid at varying concentrations and durations

ดิน ตังคโณบล[1] ฑิพพาภรณ์ ช่างกล[1] กนกวรรณ สีหามาตย์[1] ณัฐนนท์ สมเสนาะ[1] อัครเดช อธิปราชญ์[1] ไพเราะ แสนหวัง[2] นงนุช กัณหารัตน์[1] สุธารกมล ครองยุติ[2] ปิยนันท์ มีเวที[1] ธนภพ การุญ[1] รัตนา เล็กสมบูรณ์[2*]

Din Tongkanobol[1] Tippapron Changkon[1] Kanokwan Seehamart[1] Natthanon Somsanoa[1] Akkharadet Athiprat[1] Pairo Saenwang[2] Nongnuch Kanharat[1] Suthankamon Khrongyut[2] Piyanan Mevatee[1] Thanaphop Karoon[1] Ratana Leksomboon[2*]

(Received: July 6, 2026; Revised: August 15, 2026; Accepted: August 28, 2026)

[*]Corresponding author: ratana.l@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

การดองร่างอาจารย์ใหญ่ด้วยฟอร์มาลินความเข้มข้นสูงทำให้โปรตีนเกิด cross-linking ส่งผลให้กล้ามเนื้อแข็งกระด้างขึ้นตามเวลา จึงไม่เหมาะต่อการใช้ซ้ำในการเรียนกายวิภาคศาสตร์และการฝึกทักษะศัลยกรรม การศึกษานี้จึงพัฒนาและประเมินน้ำยาฟื้นฟูสภาพเนื้อเยื่อจากกรดแลคติกร่วมกับฟีนอล 6 สูตร (กรดแลคติก 0.25, 0.50, 1.00 % ร่วมกับระยะเวลาแช่ 12 และ 24 ชั่วโมง) โดยใช้กล้ามเนื้อ Sartorius จากร่างอาจารย์ใหญ่ รวม 30 ตัวอย่าง (5 ตัวอย่าง/กลุ่ม) ประเมินผลด้วย Texture Analyzer เครื่องวัดสี (CIE L *a^** b*) การวัดลักษณะทางกายภาพ และการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ วิเคราะห์ทางสถิติด้วย Two-way repeated ANOVA และ Šídák's test ($p < 0.05$) ผลการศึกษาพบว่าทุกสูตรทำให้ค่า springiness และ cohesiveness เพิ่มขึ้น ขณะที่ resilience ลดลง มีแนวโน้มสะท้อนคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับเนื้อเยื่อดองฟอร์มาลินเดิม โดยไม่พบความแตกต่างของค่า hardness และสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ด้านลักษณะทางกายภาพ ความยาวและความหนาของชิ้นเนื้อเพิ่มขึ้น ขณะที่เส้นรอบวงลดลงในทุกกลุ่ม และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงพื้นผิวกล้ามเนื้อที่มันวาวขึ้นช่องว่างระหว่างมัดเส้นใยกล้ามเนื้อลดลงภายหลังการฟื้นฟู น้ำยาฟื้นฟูสูตรนี้สามารถคืนความอ่อนนุ่ม ชุ่มชื้นและความยืดหยุ่นแก่กล้ามเนื้อดองฟอร์มาลินที่ผ่านการใช้เรียนมาแล้ว และอาจเป็นแนวทางนำเนื้อเยื่อชีวภาพที่ใช้แล้วกลับมาฟื้นฟูและนำกลับมาใช้ซ้ำในการเรียนกายวิภาคศาสตร์และการฝึกทักษะศัลยกรรมเป็นการลดต้นทุนด้านทรัพยากรและเวลาในการเตรียมเนื้อเยื่อและการเรียนรู้ได้เร็วขึ้น

คำสำคัญ: อาจารย์ใหญ่ กรดแลคติก น้ำยาฟื้นฟูสภาพเนื้อเยื่อ ฟอร์มาลิน การฝึกทักษะศัลยกรรม

[1]วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

[1]College of Medicine and Public Health, Ubon Ratchathani University

[2]กลุ่มวิจัยและพัฒนานวัตกรรมด้านชีวเวชศาสตร์ วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

[2]Research Group for Biomedical Research and Innovative Development (RG-BRID), College of Medicine and Public Health, Ubon Ratchathani University

Abstract

Cadaveric fixation with high-concentration formalin causes extensive protein cross-linking, leading to progressive muscle stiffness and limiting repeated use for anatomy and surgical training. This study therefore aimed to develop and evaluate the efficacy of a tissue-softening solution composed of lactic acid combined with phenol, in 6 formulations (lactic acid concentrations of 0.25, 0.50, and 1.00 percent, combined with immersion durations of 12 and 24 hours), using Sartorius muscle specimens from the cadavers, totaling 30 samples (5 samples per group). Outcomes were evaluated using a Texture Analyzer, a colorimeter (CIE L *a* b*), physical measurements, and examination under a microscope. Statistical analysis was performed using Two-way repeated ANOVA and Šídák's test, with a significance level of $p < 0.05$. Springiness and cohesiveness increased while resilience decreased in all groups, suggesting improved elastic behavior of the treated muscle. Hardness showed inconsistent changes among formulations without statistically significant differences, and color remained unchanged. Specimen length and thickness increased while circumference decreased in all groups; weight varied by formulation. Microscopic images showed a glossier muscle surface and decreased interfiber spaces after treatment. This restoration solution restored softness, moisture, and elasticity to previously used formalin-fixed muscle tissues and may provide a practical approach for restoring and reusing biological specimens in anatomy education and surgical skills training, thereby reducing preparation costs and improving resource efficiency.

Keywords: Cadaver, Formalin, Lactic acid, Tissue restoration solution, Surgical skills training

1. บทนำ

การศึกษากายวิภาคศาสตร์จากร่างอาจารย์ใหญ่ (Cadaveric dissection) เป็นมาตรฐานสำคัญ (Gold standard) ในการฝึกทักษะศัลยกรรม[1] โดยเฉพาะหัตถการขั้นสูง เช่น Flap elevation หรือศัลยกรรมความงาม ซึ่งต้องอาศัยโครงสร้าง 3 มิติและความรู้สึกตอบสนองจากการสัมผัสที่สมจริง[2] แม้ร่างอาจารย์ใหญ่แบบสด (Fresh frozen cadaver) จะให้คุณสมบัติใกล้เคียงผู้ป่วยจริงที่สุด แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนสูง ระยะเวลาการใช้งานสั้น[3] และกระบวนการรับบริจาคที่ใช้เวลานาน ทำให้สัดส่วนนักศึกษาต่อร่างสูงเกินเหมาะสมในหลายสถาบัน[4] ส่วนสื่อทดแทนอย่างหุ่นจำลองหรือ Virtual Reality ก็ไม่สามารถทดแทนสัมผัสความยืดหยุ่นแท้จริงของเนื้อเยื่อได้[5]

การดองด้วยฟอร์มาลิน (Formaldehyde-based embalming) แม้มีประสิทธิภาพสูงในการยับยั้งจุลชีพและรักษาเนื้อเยื่อได้ยาวนาน แต่ทำให้เกิดการเชื่อมข้ามของโปรตีน (Protein cross-linking) อย่างรุนแรง ส่งผลให้เนื้อเยื่อหดตัว แข็งกระด้าง และสูญเสียความยืดหยุ่นถาวร[6,7] ทำให้การแยกชั้นเนื้อเยื่อในการผ่าตัดทำได้ยาก เนื้อเยื่อดองแบบดั้งเดิมสามารถนำมาชำแหละสอนได้ 1 ครั้งและจะเสียสภาพแข็งมากและเปลี่ยนเป็นสีคล้ำดำ ไม่สามารถนำกลับมาใช้อีก นอกจากนี้ไอระเหยฟอร์มาลินยังเป็นพิษและก่อมะเร็ง เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพของบุคลากร[8] จึงมีการพัฒนาน้ำยารักษาสภาพศพแบบนุ่ม (Soft-embalming) ขึ้นมาหลากหลายเทคนิค เช่น เทคนิค Thiel หรือ Saturated Salt Solution ซึ่งคงความยืดหยุ่นได้ดีกว่า[9,10] แต่ยังมีข้อจำกัดด้านขั้นตอนที่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายสูง ทำให้หลายสถาบันการศึกษาไม่สามารถเข้าถึงได้ และอาจทำให้เนื้อเยื่อเปื่อยยุ่ยเมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน[11]

งานวิจัยด้าน Soft-embalming ที่ผ่านมาส่วนใหญ่มุ่งพัฒนาสูตรน้ำยาสำหรับดองร่างใหม่ตั้งแต่ต้น แต่ยังไม่มีการศึกษาที่นำเสนอวิธีฟื้นฟูเนื้อเยื่อของร่างที่ผ่านการดองฟอร์มาลินไปแล้วให้กลับมามีความยืดหยุ่นใกล้เคียงเนื้อเยื่อจริง ซึ่งเป็นช่องว่างสำคัญ เนื่องจากสถาบันการศึกษาจำนวนมากมีร่างอาจารย์ใหญ่ที่ดองแบบดั้งเดิมอยู่แล้วเป็นทุนเดิม การพัฒนาวิธีฟื้นฟูจึงคุ้มค่าและต่อยอดทรัพยากรที่มีอยู่ได้มากกว่าการเริ่มดองใหม่ ผู้วิจัยจึงพัฒนาน้ำยาฟื้นฟูสภาพเนื้อเยื่อ (Cadaveric tissue restoration fluid) สูตรใหม่โดยเฉพาะ สำหรับประยุกต์ใช้กับร่างที่ผ่านการดองฟอร์มาลินและผ่านการชำแหละเพื่อการเรียนการสอนมาแล้ว เพื่อสามารถนำมาใช้ซ้ำได้อีก ลดต้นทุนในการเตรียม ประหยัดเวลาในการชำแหละซ้ำ และทำให้การเตรียมเนื้อเยื่อประกอบการเรียน และการเรียนรู้รวดเร็วขึ้น โดยใช้ฟีนอลเป็นสารคงสภาพที่จับโปรตีนโดยไม่เกิด cross-linking หนาแน่นเกินไป ช่วยคงโครงสร้างเซลล์พร้อมต้านจุลชีพ[12] ร่วมกับกรดแลคติกซึ่งช่วยลด pH และรบกวนแรงยึดเหนี่ยวในโครงสร้างโปรตีนที่เชื่อมขวางจากฟอร์มาลดีไฮด์[13] ทำให้โปรตีนคลายตัว เนื้อเยื่อนุ่มและยืดหยุ่นขึ้น อีกทั้งช่วยเพิ่มการดูดซับน้ำเข้าสู่เนื้อเยื่อและ ECM ฟื้นฟูปริมาตรและความชุ่มชื้น ลดปัญหาเนื้อเยื่อแห้งแตกและหักล้างการหดตัวจากฟอร์มาลินได้

นอกจากนี้ งานวิจัยด้าน Soft-embalming ในอดีตมักประเมินผลด้วยความรู้สึกเชิงอัตวิสัย การศึกษานี้จึงเน้นการประเมินเชิงปริมาณระดับมหภาค (ขนาดและเส้นรอบวง) ร่วมกับการประเมินเชิงคุณภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เพื่อลดความลำเอียงของผู้สังเกต โดยเลือกใช้กล้ามเนื้อ Sartorius เป็นตัวแทนในการทดสอบ เนื่องจากเป็นกล้ามเนื้อรูปแถบที่ยาวที่สุดในร่างกาย มีทิศทางของเส้นใยค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดความยาว สะดวกต่อการตัดเป็นชิ้นตัวอย่างที่มีคุณสมบัติตั้งต้นที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด สะดวกต่อการวัดและเปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่างกลุ่มทดลอง อีกทั้งมีความสำคัญทางคลินิกในฐานะแหล่งเนื้อเยื่อสำหรับ Sartorius flap ในศัลยกรรมสร้างเสริม เนื่องจากอยู่ในตำแหน่งตื้นใต้ผิวหนัง เข้าถึงและเก็บตัวอย่างได้ง่าย

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการกายศาสตร์ วิทยาลัยแพทยศาสตร์และการสาธารณสุข

2.1 กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้ได้มาจากกล้ามเนื้อ Sartorius ของร่างอาจารย์ใหญ่ที่ผ่านการดองฟอร์มาลินมาเป็นเวลานาน จำนวน 15 ร่าง แบ่งเป็นร่างเพศชาย 8 ร่าง

และร่างเพศหญิง 7 ร่าง โดยเก็บกล้ามเนื้อ Sartorius ข้างซ้ายและข้างขวาจากแต่ละร่าง รวมได้ตัวอย่างทั้งสิ้น 30 ตัวอย่าง จากนั้นสุ่มตัวอย่างเพื่อแบ่งเข้ากลุ่มทดลองโดยแบ่งเป็น 6 กลุ่ม กลุ่มละ 5 ตัวอย่าง ทั้งนี้ ร่างอาจารย์ใหญ่ทุกร่างผ่านการดองฟอร์มาลินด้วยวิธีและระยะเวลาใกล้เคียงกัน แบบดั้งเดิม ตามมาตรฐานเดียวกันของสถานที่เตรียมร่างเพื่อการศึกษากายวิภาคศาสตร์ และการฝึกผ่าตัดของแพทย์ชั้นคลินิก และมีการสุ่มแยกกล้ามเนื้อ Sartorius ข้างซ้ายและข้างขวาจากร่างเดียวกันให้กระจายเข้าคนละกลุ่มทดลอง เพื่อกระจายความแปรปรวนทางชีวภาพระหว่างร่างและข้างให้เท่าเทียมกันในทุกกลุ่มทดลอง

2.2 การเตรียมสารละลาย

การเตรียมสารละลายทั้งหมดกำหนดปริมาตรสุดท้าย 500 มิลลิลิตร โดยคำนวณปริมาตรสารตั้งต้นจากสมการ $C_1V_1 = C_2V_2$ และการคำนวณจากมวลต่อปริมาตรในการหาน้ำหนักฟีนอล ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดการเตรียมสารละลายและสารละลายรักษาสภาพ

สารละลายที่เตรียม	สารตั้งต้น	ปริมาตร/น้ำหนักสารตั้งต้น	วิธีเตรียม
1X PBS	10X PBS	50 มล.	ตวง 10X PBS 50 มล. แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรครบ 500 มล.
กรดแลคติก 0.25%	กรดแลคติก 70%	1.79 มล.	ปิเปตกรดแลคติก 70% ปริมาตร 1.79 มล. แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 500 มล.
กรดแลคติก 0.50%	กรดแลคติก 70%	3.57 มล.	ปิเปตกรดแลคติก 70% ปริมาตร 3.57 มล. แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 500 มล.
กรดแลคติก 1.00%	กรดแลคติก 70%	7.14 มล.	ปิเปตกรดแลคติก 70% ปริมาตร 7.14 มล. แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 500 มล.
กลีเซอรอล 10%	กลีเซอรอล 99.5%	50.25 มล.	ตวงกลีเซอรอล 99.5% ปริมาตร 50.25 มล. แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 500 มล.
Tween 20 0.1%	Tween 20	0.50 มล.	ปิเปต Tween 20 ปริมาตร 0.50 มล. แล้วเติมน้ำกลั่นจนครบ 500 มล.
สารละลายรักษาสภาพ			
	สารตั้งต้น	**ปริมาตร/น้ำหนักสารตั้งต้น**	**วิธีเตรียม**
เอทานอล 70%	เอทานอล 99.9%	350.35 มล.	ตวงเอทานอล 99.9 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 350.35 มิลลิลิตร
กลีเซอรอล 10%	กลีเซอรอล 99.5%	50.25 มล.	กลีเซอรอล 99.5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 50.25 มิลลิลิตร
ฟีนอล 2%	ฟีนอลบริสุทธิ์	10.00 กรัม	และชั่งฟีนอลบริสุทธิ์ 10.00 กรัม จากนั้นผสมรวมกันและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 500 มิลลิลิตร

2.3 การล้างสารฟอร์มาลินออกจากเนื้อเยื่อ

ก่อนเข้าสู่กระบวนการฟื้นฟู ชิ้นเนื้อทุกตัวอย่างต้องผ่านการล้างสารฟอร์มาลดีไฮด์ที่ตกค้างอยู่ในเนื้อเยื่อออกให้มากที่สุด โดยการนำตัวอย่างทั้งหมดแช่ในสารละลาย Phosphate Buffered Saline (PBS) เป็นระยะเวลา 12 ถึง 24 ชั่วโมง ซึ่งการใช้ PBS ในขั้นตอนนี้มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจาก PBS มีค่า pH และความเข้มข้นของไอออนใกล้เคียงกับของเหลวในร่างกาย ส่งผลให้ช่วยรักษาสภาพเนื้อเยื่อขณะที่ชะล้างสารฟอร์มาลดีไฮด์ออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยรักษาสมดุลความเข้มข้นของสารละลายภายในเซลล์และภายนอกเซลล์ และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างเนื้อเยื่อ

2.4 การฟื้นฟูสภาพเนื้อเยื่อด้วยกรดแลคติก

หลังจากการล้างสารฟอร์มาลดีไฮด์ที่ตกค้างอยู่ด้วย PBS แล้ว จากนั้นนำชิ้นเนื้อมาทดสอบโดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 6 กลุ่ม โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรของกรดแลคติกที่ใช้ในการฟื้นฟูเนื้อเยื่อ

สูตร	ความเข้มข้นของกรดแลคติก (%)	ระยะเวลาในการแช่ (ชั่วโมง)
สูตรที่ 1	0.25	12
สูตรที่ 2	0.25	24
สูตรที่ 3	0.50	12
สูตรที่ 4	0.50	24
สูตรที่ 5	1.00	12
สูตรที่ 6	1.00	24

กลไกหลักที่คาดว่ากรดแลคติกจะส่งผลต่อเนื้อเยื่อคือการลดค่า pH ของสภาพแวดล้อมโดยรอบ ซึ่งจะรบกวนแรงยึดเหนี่ยวภายในโครงสร้างโปรตีนที่เชื่อมขวางกันอยู่จากฟอร์มาลดีไฮด์ ทำให้โปรตีนเกิดการคลายตัวและเนื้อเยื่อมีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น นอกจากนี้กรดแลคติกยังมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มการดูดซับน้ำเข้าสู่เนื้อเยื่อและสารพื้นระหว่างเซลล์ ทำให้เนื้อเยื่อที่หดตัวจากการเก็บรักษาระยะยาวสามารถฟื้นตัวกลับมาได้ในระดับหนึ่ง

2.5 การเพิ่มความชุ่มชื้นด้วยกลีเซอรอล

ภายหลังการแช่กรดแลคติก ชิ้นเนื้อทุกกลุ่มจะถูกนำไปแช่ในสารละลายกลีเซอรอลความเข้มข้น 10% เป็นเวลา 1 ถึง 5 ชั่วโมง เนื่องด้วยกลีเซอรอลเป็นสารที่มีคุณสมบัติดูดความชื้น (humectant) ช่วยรักษาความชุ่มชื้นของเนื้อเยื่อและเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่ชิ้นเนื้อ การแช่ในขั้นตอนนี้จึงมีความสำคัญในการช่วยให้เนื้อเยื่อที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยกรดแลคติกมีความชุ่มชื้นเพียงพอก่อนเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป

2.6 การแช่ใน Tween 20

หลังจากการเพิ่มความชุ่มชื้นให้ชิ้นเนื้อแล้วขั้นตอนต่อไปจะนำชิ้นเนื้อมาแช่ในสารละลาย Tween 20 ความเข้มข้น 0.1 % เป็นเวลา 1 ถึง 5 ชั่วโมง Tween 20 เป็นสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ที่ช่วยให้สารในขั้นตอนต่อๆ ไปสามารถแทรกซึมเข้าสู่เนื้อเยื่อได้อย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยชำระล้างสิ่งสกปรกหรือคราบไขมันที่อาจเกาะอยู่บนพื้นผิวเนื้อเยื่อออกได้อีกด้วย

2.7 การรักษาสภาพเนื้อเยื่อ

เมื่อผ่านขั้นตอนข้างต้นครบแล้ว ชิ้นเนื้อจะถูกนำไปแช่ในสารละลายรักษาสภาพ ซึ่งประกอบด้วย เอทานอล 70% กลีเซอรอล 10% และ ฟีนอล 2% เป็นเวลา 12 ถึง 18 ชั่วโมง สารละลายผสมนี้ทำหน้าที่หลายอย่างพร้อมกัน กล่าวคือ เอทานอล 70% ช่วยรักษาสภาพเนื้อเยื่อและป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ กลีเซอรอล 10% ช่วยรักษาความชุ่มชื้นและป้องกันเนื้อเยื่อแห้งแข็ง ส่วน ฟีนอล 2% ทำหน้าที่เป็นสารฆ่าเชื้อและช่วยรักษาสีของเนื้อเยื่อ การแช่ในสารละลายผสมนี้จึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการรักษาคุณภาพของชิ้นเนื้อให้คงสภาพได้นานพอสำหรับการวัดและประเมินผล

2.8 การทำให้แห้งก่อนการวัดผล

ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำชิ้นเนื้อวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ถึง 3 ชั่วโมง เพื่อให้พื้นผิวของชิ้นเนื้อแห้งในระดับที่เหมาะสมก่อนเข้าสู่กระบวนการวัดและประเมินผลในขั้นตอนต่อไป การทำให้แห้งในขั้นตอนนี้มีความสำคัญเนื่องจากความชื้นบนพื้นผิวที่มากเกินไปอาจส่งผลต่อความแม่นยำของการวัดค่าสี และลักษณะทางกายภาพของชิ้นเนื้อได้

2.9 การวัดและประเมินผล

การวัดและประเมินผลดำเนินการทั้งก่อนและหลังการฟื้นฟูสภาพเนื้อเยื่อ เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละกลุ่มทดลอง โดยแบ่งการวัดออกเป็น 3 ด้าน ดังนี้

2.9.1 การวัดความยืดหยุ่นของเนื้อเยื่อ

วัดความยืดหยุ่นของชิ้นเนื้อด้วยเครื่อง Texture Analyzer โดยวัดค่าพารามิเตอร์ทางเนื้อสัมผัส 4 ค่า ได้แก่ Hardness คือ ความแข็งหรือแรงสูงสุดที่ใช้ในการกดชิ้นเนื้อ Springiness คือ ความสามารถในการคืนตัวกลับสู่รูปร่างเดิมหลังถูกกด Cohesiveness คือความสามารถในการรักษาโครงสร้างภายในของเนื้อเยื่อเมื่อถูกแรงกด และ Resilience คือความสามารถในการดูดซับและคืนพลังงานของเนื้อเยื่อ ทำการวัดทั้งก่อนและหลังการ

ฟื้นฟูสภาพเนื้อเยื่อเพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง โดยทำการวัดในโหมดการทดสอบแบบกด (Compression test) โดยใช้หัวกดทรงกระบอกสเตนเลส (probe P/50; เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm.) การทดสอบดำเนินการที่ความเร็วทดสอบ 1 มม./วินาที โดยกำหนดแรงเริ่มต้น (Trigger force) เท่ากับ 5.0 กรัม การกดดำเนินการจนถึงระยะการยุบตัวร้อยละ 50 ของความหนาเริ่มต้น ภายใต้สภาวะที่ควบคุม

2.9.2 การวัดสีของชิ้นเนื้อ

วัดสีของชิ้นเนื้อด้วยเครื่องวัดสี (Color Meter) Hunter-Lab โดยวัดค่าสีในระบบ CIE L* a* b* ซึ่ง L* แทนความสว่าง a* แทนสีในแกนแดง-เขียว และ b* แทนสีในแกนเหลือง-น้ำเงิน ทำการวัดทั้งก่อนและหลังการฟื้นฟูสภาพเนื้อเยื่อ เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นในแต่ละกลุ่มทดลอง

2.9.3 การวัดลักษณะทางกายภาพของชิ้นเนื้อ

วัดลักษณะทางกายภาพของชิ้นเนื้อ 4 ค่า ดังนี้ น้ำหนักวัดด้วยเครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง ความยาว และความหนาวัดด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ และเส้นรอบวงวัดด้วยสายวัด โดยทำการวัดทั้งก่อนและหลังการฟื้นฟูสภาพเนื้อเยื่อเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงขนาดและมวลของชิ้นเนื้อในแต่ละกลุ่มทดลอง

2.9.4 การศึกษาลักษณะของเนื้อเยื่อภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 100 เท่า

ตัดกล้ามเนื้อ Sartorius ตามแนวขวาง หลังจากนั้นนำมาส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 100 เท่า เพื่อประเมินลักษณะจุลกายวิภาคของตัวอย่างเป็นเชิงคุณภาพก่อนและหลังการฟื้นฟู และมีการบันทึกภาพตัวอย่างเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผล

2.10 การวิเคราะห์ทางสถิติ

สำหรับแต่ละพารามิเตอร์คำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงก่อน-หลังการฟื้นฟูของตัวอย่างแต่ละชิ้นก่อน จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม GraphPad Prism โดยใช้การวิเคราะห์ Repeated measures และความแปรปรวนสองทาง (Two-way repeated ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยระหว่างกลุ่มทดลองทั้งหมด 6 กลุ่มและเมื่อพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจะทำการเปรียบเทียบรายคู่ด้วยวิธี Šídák's multiple comparisons test เพื่อระบุว่ากลุ่มทดลองใดมีความแตกต่างกัน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

งานวิจัยนี้ได้ผ่านการพิจารณาและรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เลขที่ใบรับรองจริยธรรม UBU-REC-23/2568

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการวัดความยืดหยุ่นของเนื้อเยื่อ

ผลการวัดคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของกล้ามเนื้อ Sartorius ได้แก่ Hardness, Springiness, Cohesiveness และ Resilience แสดงในตารางที่ 3 พบว่า ค่า Hardness หลังการฟื้นฟูลดลงในสูตรที่ 1, 5 และ 6 ขณะที่สูตรที่ 2–4 มีค่าเพิ่มขึ้น โดยสูตรที่ 2–4 มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง เนื่องจากค่าเริ่มต้นของบางตัวอย่างใกล้ศูนย์ สำหรับค่า Springiness และ Cohesiveness พบว่าทุกสูตรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่า Resilience ลดลงในทุกสูตร อย่างไรก็ตาม ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มทดลอง ($p \geq 0.05$)

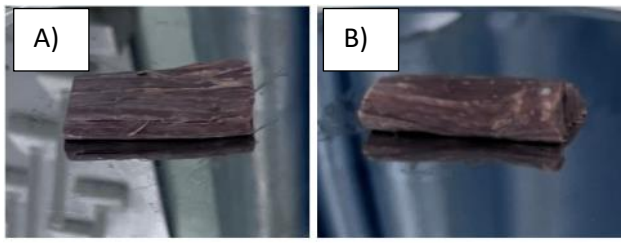
ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่า Hardness, Springiness, Cohesiveness และ Resilience ของกล้ามเนื้อ Sartorius

กลุ่มทดลอง	Hardness (%)	Springiness (%)	Cohesiveness (%)	Resilience (%)
สูตรที่ 1	-30.60 ± 30.44[a]	2.40 ± 26.21[a]	5.41 ± 7.57[a]	-13.86 ± 13.34[a]
สูตรที่ 2	7,578.23 ± 16,953.11[a]	14.37 ± 16.22[a]	3.26 ± 5.67[a]	-6.10 ± 10.24[a]
สูตรที่ 3	5,189.21 ± 10,442.94[a]	15.27 ± 16.34[a]	6.28 ± 9.42[a]	-13.71 ± 17.70[a]
สูตรที่ 4	3,049.43 ± 6,849.93[a]	14.75 ± 41.04[a]	0.39 ± 18.16[a]	-6.98 ± 29.00[a]
สูตรที่ 5	-8.17 ± 67.65[a]	26.02 ± 24.87[a]	13.47 ± 12.46[a]	-0.87 ± 23.13[a]
สูตรที่ 6	-4.57 ± 29.70[a]	20.26 ± 20.22[a]	5.01 ± 10.36[a]	-5.84 ± 17.04[a]

หมายเหตุ: ค่าแสดงเป็น mean ± SD, n = 5 ต่อกลุ่ม ตัวอักษรเหมือนกัน (a) หมายถึงไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่ม ($p \geq 0.05$) วิเคราะห์ด้วย Two-way ANOVA และ Šídák's test สำหรับ Hardness และ Two-way repeated-measures ANOVA และ Šídák's test สำหรับ Springiness, Cohesiveness และ Resilience

3.2 ผลการวัดสี

ค่าสี (CIE L*a*b*) ของกล้ามเนื้อ Sartorius ก่อนและหลังการฟื้นฟู แสดงดังภาพที่ 1 โดยค่า L* ก่อนและหลังการฟื้นฟูเท่ากับ 48.97 ± 3.35 และ 48.90 ± 3.40, ค่า a* เท่ากับ 4.46 ± 0.66 และ 4.42 ± 0.66, และค่า b* เท่ากับ 7.64 ± 1.66 และ 7.53 ± 1.71 ตามลำดับ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)



ภาพที่ 1 A) กล้ามเนื้อ Sartorius ก่อนฟื้นฟู B) กล้ามเนื้อ Sartorius หลังฟื้นฟู

3.4 ผลการวัดลักษณะทางกายภาพของชิ้นเนื้อ

ผลการวัดลักษณะทางกายภาพของกล้ามเนื้อ Sartorius ได้แก่ น้ำหนัก ความยาว ความหนา และขนาดเส้นรอบวง แสดงในตารางที่ 4 พบว่า หลังการฟื้นฟู สูตรที่ 1 และ 5 มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น ขณะที่สูตรที่ 2, 3, 4 และ 6 มีน้ำหนักลดลง โดยสูตรที่ 2 และ 5 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนความยาวและความหนาของชิ้นเนื้อเพิ่มขึ้นในทุกสูตร ขณะที่ขนาดเส้นรอบวงลดลงในทุกสูตร ทั้งนี้ ความยาวของชิ้นเนื้อแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างสูตร ($p < 0.05$) ส่วนความหนาและขนาดเส้นรอบวงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

ตารางที่ 4 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของกล้ามเนื้อ Sartorius

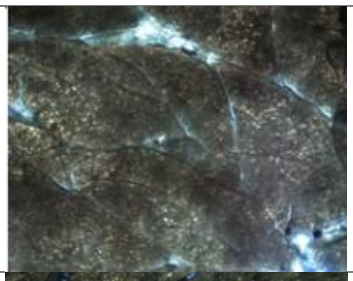
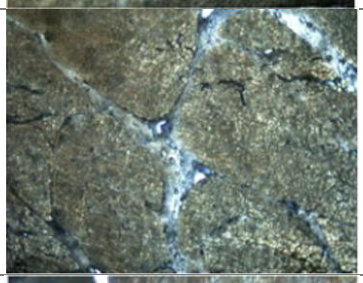
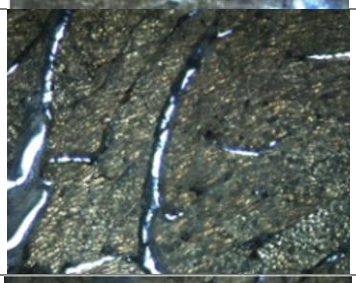
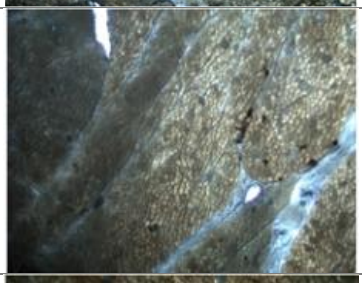
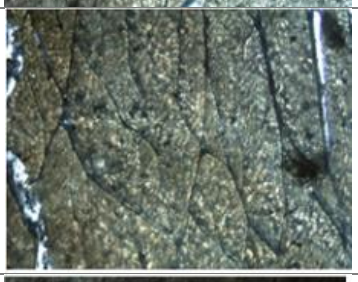
กลุ่มทดลอง	(% การปลี่ยนแปลง)			
	น้ำหนัก	ความยาว	ความหนา	ขนาดเส้นรอบวง
สูตรที่ 1	2.38 ± 5.94^{ab}	2.14 ± 5.63^{a}	29.58 ± 5.84^{a}	-3.67 ± 1.79^{a}
สูตรที่ 2	-4.60 ± 2.54^{b}	15.12 ± 4.50^{b}	25.52 ± 7.94^{a}	-3.93 ± 5.39^{a}
สูตรที่ 3	-0.75 ± 6.58^{ab}	2.56 ± 2.33^{b}	27.85 ± 6.05^{a}	-5.04 ± 6.13^{a}
สูตรที่ 4	-1.70 ± 2.38^{ab}	1.44 ± 2.62^{b}	22.58 ± 15.42^{a}	-5.42 ± 6.14^{a}
สูตรที่ 5	6.54 ± 6.42^{a}	0.10 ± 2.21^{b}	27.87 ± 12.27^{a}	-0.25 ± 2.34^{a}
สูตรที่ 6	-0.94 ± 3.41^{ab}	1.41 ± 1.50^{b}	24.40 ± 7.84^{a}	-1.75 ± 2.47^{a}

หมายเหตุ: ค่าแสดงเป็น mean ± SD, n = 5 ต่อกลุ่ม ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกัน (a,b) ในคอลัมน์เดียวกัน หมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) วิเคราะห์ด้วย Two-way repeated-measures ANOVA และ Šídák's test

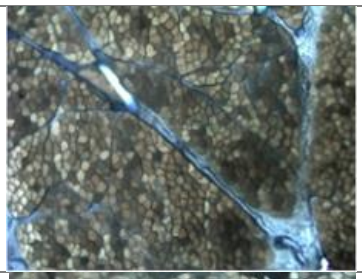
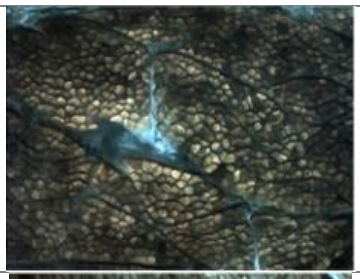
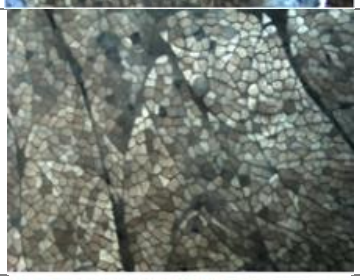
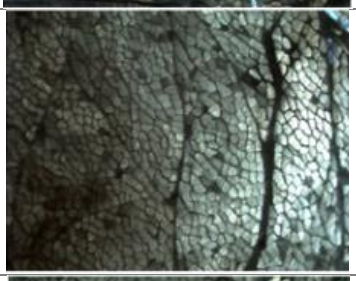
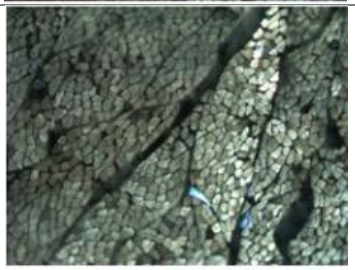
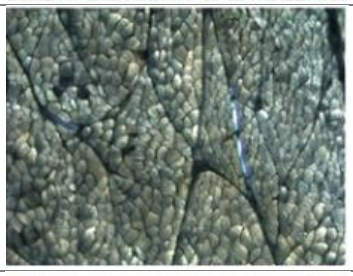
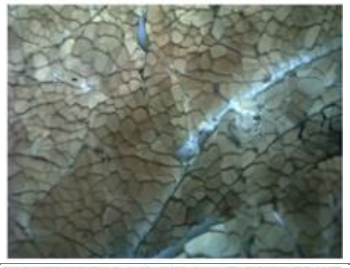
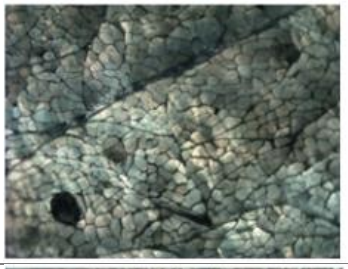
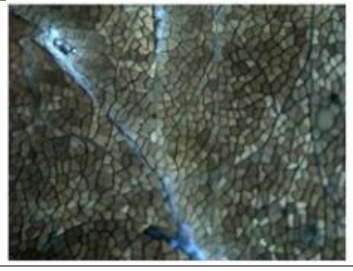
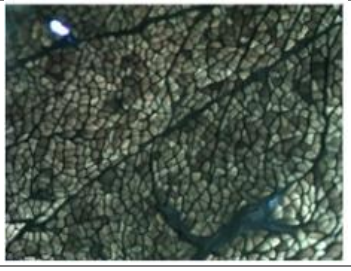
3.5 ผลการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า และ 100 เท่า

ภาพตัดขวางกล้ามเนื้อ Sartorius ภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า และ 100 เท่า แสดงลักษณะพื้นผิวเป็นลายตามขวางชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 5 และตารางที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบภาพก่อนและหลังการฟื้นฟูในแต่ละกลุ่มทดลอง พบว่ากล้ามเนื้อที่ผ่านการฟื้นฟูมีความมันวาวมากขึ้นและช่องว่างระหว่างมัดกล้ามเนื้อลดลง ทั้งนี้การสังเกตด้วยกำลังขยายระดับนี้เป็นเพียงการประเมินเชิงคุณภาพของลักษณะโดยรวมเท่านั้น ไม่สามารถระบุการเปลี่ยนแปลงในระดับเซลล์ได้

ตารางที่ 5 แสดงภาพจุลกายวิภาคของกล้ามเนื้อ Sartorius ก่อนและหลังการฟื้นฟูด้วยสูตรที่ 1–6 ที่กำลังขยาย 4×

สูตร	ก่อนฟื้นฟู	หลังฟื้นฟู
1		
2		
3		
4		
5		
6		

ตารางที่ 6 แสดงภาพจุลกายวิภาคของกล้ามเนื้อ Sartorius ก่อนและหลังการฟื้นฟูด้วยสูตรที่ 1–6 ที่กำลังขยาย 10×

สูตร	ก่อนฟื้นฟู	หลังฟื้นฟู
1		
2		
3		
4		
5		
6		

4. อภิปรายผล

การศึกษากายวิภาคศาสตร์จากร่างอาจารย์ใหญ่ยังคงเป็นมาตรฐานสำคัญของการเรียนการสอนด้านกายวิภาคศาสตร์ และฝึกทักษะทางศัลยกรรม แต่การดองด้วยฟอร์มาลินความเข้มข้นสูงทำให้เนื้อเยื่อเกิดการเชื่อมข้ามของโปรตีนอย่างรุนแรง ส่งผลให้กล้ามเนื้อแข็งกระด้างและสูญเสียความยืดหยุ่นตามธรรมชาติ โดยเฉพาะหลังการใช้เรียนเนื้อเยื่อจะเสียสภาพอย่างมาก ไม่สามารถนำมาสอนซ้ำได้อีก ต้องชำแหละเตรียมเนื้อเยื่อใหม่ทุกปี การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสูตรน้ำยาฟื้นฟูสภาพเนื้อเยื่อ โดยใช้กรดแลคติกร่วมกับฟีนอลที่ระดับความเข้มข้นและระยะเวลาแช่ที่แตกต่างกัน 6 สูตร (ความเข้มข้นกรดแลคติก 0.25, 0.50 และ 1.00 % ร่วมกับระยะเวลาแช่ 12 และ 24 ชั่วโมง) เพื่อประยุกต์ใช้กับร่างที่ผ่านการดองฟอร์มาลินแบบดั้งเดิมและผ่านการชำแหละเพื่อการศึกษามาแล้วประมาณ 1 ปี เพื่อประหยัดต้นทุนและเวลาในการเตรียมเนื้อเนื้อเยื่อใหม่ทุกปี สะดวกต่อผู้เตรียมเนื้อเยื่อ และการเรียนรู้ที่รวดเร็วขึ้น จากการผลการศึกษานี้สามารถอภิปรายผลได้ดังต่อไปนี้

การเพิ่มขึ้นของค่า springiness และ cohesiveness ในทุกกลุ่มทดลองสอดคล้องกับกลไกที่คาดการณ์ไว้ กล่าวคือ กรดแลคติกช่วยลดค่า pH ของสภาพแวดล้อมโดยรอบเนื้อเยื่อ ซึ่งไปรบกวนแรงยึดเหนี่ยวบางส่วนภายในโครงสร้างโปรตีนที่เชื่อมขวางกันจากฟอร์มาลดีไฮด์[10] ทำให้โปรตีนคลายตัวและเนื้อเยื่อมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ประกอบกับคุณสมบัติ humectant ของกรดแลคติกและกลีเซอรอลที่ช่วยดึงน้ำกลับเข้าสู่สารพื้นระหว่างเซลล์ ทำให้เนื้อเยื่อที่หดตัวจากฟอร์มาลินฟื้นตัวกลับมาได้บางส่วน[6-7,11-12] ผลลัพธ์นี้ใกล้เคียงกับแนวคิดของ soft-embalming ทางเลือกอื่น เช่น เทคนิค Thiel และสารละลายเกลืออิ่มตัวที่มุ่งคงความยืดหยุ่นของเนื้อเยื่อไว้มากกว่าการดองแบบฟอร์มาลินเข้มข้น[9-10]

ในทางตรงกันข้าม ค่า resilience กลับลดลงในทุกกลุ่มทดลอง แม้ความสามารถในการคืนรูปโดยรวม (springiness) จะเพิ่มขึ้นก็ตาม ข้อค้นพบนี้อาจอธิบายได้ว่าเมื่อโครงสร้างโปรตีนที่เชื่อมขวางแน่นถูกคลายตัวลง เนื้อเยื่อจะมีลักษณะเป็น viscoelastic มากขึ้นคล้ายเนื้อเยื่อสด ซึ่งมีการดูดซับพลังงานขณะถูกกด (energy dissipation) มากกว่าเนื้อเยื่อที่แข็งกระด้างจากฟอร์มาลิน จึงคืนพลังงานทันทีได้น้อยลง แม้จะคืนรูปทรงได้ดีขึ้นในภาพรวม ลักษณะเช่นนี้ใกล้เคียงพฤติกรรมเชิงกลของเนื้อเยื่อนี้ดีกว่าเนื้อเยื่อที่ผ่านการดองฟอร์มาลินเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่พึงประสงค์สำหรับการฝึกสัมผัสและลงมีด (tactile feedback) ในการฝึกหัตถการศัลยกรรม[2]

สำหรับค่า hardness พบแนวโน้มที่ไม่สอดคล้องกันระหว่างสูตร โดยสูตรที่ 1, 5 และ 6 มีค่าลดลงหลังการฟื้นฟู ขณะที่สูตรที่ 2, 3 และ 4 กลับมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก พร้อมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงมาก ทำให้เห็นบทบาทสองด้านของกรดแลคติก กล่าวคือ ในความเข้มข้นและระยะเวลาที่เหมาะสมกรดแลคติกช่วยคลายพันธะเชื่อมขวางของโปรตีน แต่หากได้รับความเข้มข้นของกรดในระยะเวลาที่ไม่สมดุลกัน อาจเกิดกระบวนการ protein denaturation ซ้ำเติมจนทำให้โปรตีนตกตะกอนแข็งตัวขึ้นใหม่แทน ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าเหตุใดสูตรที่ใช้ความเข้มข้น 1.00 % (สูตรที่ 5 และ 6) จึงให้ผลด้านความนุ่มที่สม่ำเสมอกว่าสูตรที่ใช้ความเข้มข้นต่ำกว่าในบางช่วงเวลาการแช่ อย่างไรก็ตาม ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงมากในบางสูตร (เช่น สูตรที่ 2 ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยสูงถึงหลักพัน%) ความแปรปรวนดังกล่าวน่าจะมาจากความแตกต่างทางชีวภาพระหว่างร่างอาจารย์ใหญ่แต่ละร่าง (อายุ ปริมาณไขมันแทรก ระยะเวลาการดองก่อนหน้า) รวมถึงตำแหน่งการวัดที่อาจมีพังผืดหรือเนื้อเยื่อเกี่ยวพันปะปนอยู่มากกว่าจะเป็นผลจากสูตรน้ำยาโดยตรง จึงยังไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสูตร ($p \geq 0.05$)

การที่สีของกล้ามเนื้อ (CIE L*a*b*) ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญก่อนและหลังการฟื้นฟู สนับสนุนบทบาทของฟีนอลในสารละลายรักษาสภาพซึ่งทำหน้าที่เป็นสารคงสภาพที่จับกับโปรตีนโดยไม่ก่อให้เกิดการเชื่อมข้ามที่หนาแน่นเกินไป และช่วยรักษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของเซลล์ควบคู่กับฤทธิ์ต้านจุลชีพ[13] ผลลัพธ์นี้มีความสำคัญเชิงปฏิบัติ เนื่องจากลักษณะสีของเนื้อเยื่อที่ใกล้เคียงของเดิมช่วยคงความสมจริงในการฝึกผ่าตัด โดยไม่

ทำให้เกิดความสับสนในการแยกโครงสร้างทางกายวิภาคจากการเปลี่ยนสีที่ผิดธรรมชาติ

ความยาวและความหนาของชิ้นเนื้อที่เพิ่มขึ้นในทุกกลุ่มทดลองเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ที่สนับสนุนกลไกการคืนน้ำเข้าสู่เนื้อเยื่อ (tissue hydration) ของกรดแลคติกและกลีเซอรอลตามที่ตั้งสมมติฐานไว้ กล่าวคือ เนื้อเยื่อที่หดตัวและแห้งจากการดองฟอร์มาลินเป็นเวลานานสามารถดูดซับน้ำกลับคืนได้เมื่อผ่านกระบวนการฟื้นฟู ซึ่งช่วยลดปัญหาเนื้อเยื่อแห้งแตกและหักล้างการหดตัวจากฟอร์มาลินได้บางส่วน[6-7,11-12] อย่างไรก็ตาม เส้นรอบวงของชิ้นเนื้อกลับลดลงในทุกกลุ่มทดลอง ซึ่งดูขัดแย้งกับการเพิ่มขึ้นของความหนา ความไม่สอดคล้องกันนี้อาจอธิบายได้จากสองแนวทาง แนวทางแรกคือด้านกลศาสตร์ของเนื้อเยื่อ เมื่อกล้ามเนื้อคลายตัวและมีความยืดหยุ่นมากขึ้นจากฤทธิ์ของกรดแลคติก มัดกล้ามเนื้ออาจปรับรูปทรงในแนวยาวมากกว่าแนวรอบวง ทำให้หน้าตัดเปลี่ยนสัดส่วนโดยไม่ได้ขยายตัวเท่ากันทุกทิศทาง ซึ่งผลการศึกษานี้ที่พบว่าทุกกลุ่มมีความยาวเพิ่มขึ้น แนวทางที่สองคือด้านวิธีการวัด เนื้อเยื่อที่แข็งกระด้างจากฟอร์มาลินอาจคงรูปทรงกลมนูนเมื่อวัดด้วยสายวัด ในขณะที่เนื้อเยื่อที่นุ่มขึ้นภายหลังการฟื้นฟูอาจถูกสายวัดกดจนแบนราบลงเล็กน้อยขณะวัด ส่งผลให้ค่าเส้นรอบวงที่วัดได้ลดลงโดยไม่ได้สะท้อนการสูญเสียปริมาตรจริง ข้อสังเกตนี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการใช้วิธีวัดปริมาตรที่แม่นยำกว่าการวัดเส้นรอบวงด้วยสายวัดในการศึกษาต่อไป

สำหรับน้ำหนักของชิ้นเนื้อที่มีทั้งเพิ่มขึ้น (สูตรที่ 1 และ 5) และลดลง (สูตรที่ 2, 3, 4 และ 6) โดยพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสูตรที่ 2 และสูตรที่ 5 สะท้อนถึงความสมดุลระหว่างสองกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมกัน คือการดูดน้ำกลับเข้าสู่เนื้อเยื่อซึ่งเพิ่มน้ำหนัก กับการชะล้างโปรตีนหรือสารที่ละลายน้ำได้บางส่วนออกจากเนื้อเยื่อระหว่างขั้นตอนการแช่หลายขั้นตอน (PBS กรดแลคติก กลีเซอรอล Tween 20 และสารละลายรักษาสภาพ) ซึ่งลดน้ำหนัก ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าความเข้มข้นของกรดแลคติกและระยะเวลาแช่ที่แตกต่างกันอาจปรับสมดุลของสองกระบวนการนี้ไม่เท่ากัน โดยสูตรที่ 5 (กรดแลคติก 1.00 % นาน 12 ชั่วโมง) ให้ผลด้านการเพิ่มน้ำหนักที่ชัดเจนที่สุด

การประเมินลักษณะทางจุลกายวิภาคของกล้ามเนื้อภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 และ 100 เท่า พบว่าเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อมีความมันวาวเพิ่มขึ้นและช่องว่างระหว่างมัดเส้นใยกล้ามเนื้อลดลงภายหลังการฟื้นฟู ซึ่งเป็นหลักฐานเชิงคุณภาพเพิ่มเติมที่สอดคล้องกับการคืนความชุ่มชื้นให้เนื้อเยื่อ อย่างไรก็ตาม การประเมินในระดับกำลังขยายนี้ยังไม่ผ่านกระบวนการย้อมสีทางมิญชวิทยาและไม่สามารถระบุการเปลี่ยนแปลงในระดับเซลล์ได้อย่างชัดเจน ทำให้ยังไม่สามารถยืนยันผลของกรดแลคติกต่อพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยกล้ามเนื้อ (muscle fiber cross-sectional area) เนื่องจากไม่พบนิวเคลียสของเซลล์กล้ามเนื้อเลย ซึ่งโดยทั่วไปใช้นิวเคลียสเป็นจุดสังเกตในการวัดเส้นรอบวงของเส้นใยกล้ามเนื้อ ด้วยโปรแกรม ImageJ การวิเคราะห์ภาพอัตโนมัติ[14-15]ได้ตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ในเบื้องต้น การที่ไม่พบนิวเคลียสอาจเกิดจากความเก่าของเนื้อเยื่อทำให้นิวเคลียสถูกย่อยสลายไปแล้ว ผู้วิจัยจึงสังเกตช่องว่างระหว่างมัดเส้นใยกล้ามเนื้อก่อนและหลังฟื้นฟูแทนการวัดเส้นรอบวงเส้นใยกล้ามเนื้อ สอดคล้องกับผลการทดสอบเนื้อสัมผัสและลักษณะทางกายภาพที่พบในระดับมหภาค

5. สรุปผลการศึกษา

ผลการทดลองพบว่าแต่ละสูตรให้ผลแตกต่างกันในแต่ละพารามิเตอร์เชิงกลและลักษณะทางกายภาพของกล้ามเนื้อ Sartorius โดยสูตรที่ 2 ซึ่งใช้กรดแลคติกความเข้มข้น 0.25% และระยะเวลาแช่ 24 ชั่วโมง มีความเหมาะสมในเชิงปฏิบัติมากที่สุด เนื่องจากทำให้ความยาวของกล้ามเนื้อเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ยังคงคุณสมบัติของเนื้อเยื่อได้เหมาะสม น้ำยาฟื้นฟูสภาพสามารถช่วยปรับเนื้อเยื่อของร่างอาจารย์ใหญ่ที่ดองฟอร์มาลินให้มีความยืดหยุ่นและสัมผัสใกล้เคียงกับร่างที่เพิ่งชำแหละใหม่ ซึ่งเหมาะสำหรับการฝึก tactile feedback และหัตถการทางศัลยกรรม เช่น Blunt and Sharp dissection, flap dissection, suturing and knot tying รวมถึง Microsurgery Training เช่น การเย็บต่อเส้นเลือดและเส้นประสาท (anastomosis) นอกจากนี้ยัง

สามารถนำไปใช้ฟื้นฟูเฉพาะส่วนของร่างอาจารย์ใหญ่ที่มีอยู่ ช่วยเพิ่มประโยชน์จากทรัพยากรเดิม ลดการพึ่งพาร่างสด และลดค่าใช้จ่ายในการเตรียมเนื้อเยื่อสำหรับการฝึกปฏิบัติ

การศึกษานี้มีข้อจำกัดจากขนาดตัวอย่างเพียง 5 ตัวอย่างต่อกลุ่ม และความแปรปรวนของร่างอาจารย์ใหญ่ด้านอายุ เพศ ดัชนีมวลกาย และระยะเวลาการดองฟอร์มาลิน ซึ่งอาจทำให้หลายพารามิเตอร์ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การศึกษาต่อไปควรเพิ่มขนาดตัวอย่างเป็นอย่างน้อย 15 ตัวอย่างต่อกลุ่ม ควบคุมปัจจัยพื้นฐานและระยะเวลาการดองให้ใกล้เคียงกัน และเพิ่มกลุ่ม untreated control, PBS control และ vehicle control เพื่อแยกผลขององค์ประกอบในสูตรฟื้นฟู รวมถึงการประเมินการเปลี่ยนแปลงระดับจุลภาคและการประเมินความเสมือนจริงของเนื้อเยื่อโดยศัลยแพทย์ นอกจากนี้ควรทดสอบสูตรที่เหมาะสมกับร่างอาจารย์ใหญ่แบบเต็มร่างและประเมินการใช้งานจริงในการฝึก surgical procedures เพื่อยืนยันความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ใน medical training ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประเภทงบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund: FF) ประจำปีงบประมาณพ.ศ. 2568 และขอขอบคุณวิทยาลัยการแพทย์และการสาธารณสุข คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและสถานที่สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Chouari TAM, Lindsay K, Bradshaw E, Parson S, Watson L, Ahmed J, et al. An enhanced fresh cadaveric model for reconstructive microsurgery training. Eur J Plast Surg. 2018;41(4):439-46.
2. Manikumari B, Jaggavarapu SR, Subha K, Kalpana T, Muni RKN, Kishve P, et al. Simulation of reconstructive microsurgery in soft embalmed cadavers: a teaching module for plastic surgery residents. Indian J Plast Surg. 2022;55(3):262-7.
3. Turner AJ, Mellington A, Ali F. Fresh cadaver dissection for training in plastic surgery. Br J Plast Surg. 2005;58(5):742-3.
4. Ghazanfar H, Rashid S, Hussain A, Ghazanfar M, Ghazanfar A, Javaid A. Cadaveric dissection a thing of the past? The insight of consultants, fellows, and residents. Cureus. 2018;10(4):e2418.
5. Sheckter CC, Kane JT, Minneti M, Garner W, Sullivan M, Talving P, et al. Incorporation of fresh tissue surgical simulation into plastic surgery education: maximizing extraclinical surgical experience. J Surg Educ. 2013;70(4):466-74.
6. Bhat AH, Hussein S. Fixation and different types of fixatives: their role and functions: a review. Int J Clin Diagn Pathol. 2021;4(4):113-9.
7. Amrit G, Ray S, Mohapatra S. Preparation of soft embalmed cadavers by the modified Thiel embalming technique for surgical skill training and development of a universal quantitative scoring system to assess the suitability of soft embalmed cadavers for such training purposes. Cureus. 2023;15(8):e43991.
8. Vucevic DD, Seidman MA, Mesaki K, Guan Z, Juvet S, Liu M, et al. A novel tissue preservation and transport solution as a substitute for formalin. Lab Invest. 2023;103(9):100198.
9. Ottone NE, Vargas CA, Fuentes R, del Sol M. Walter Thiel's embalming method. Review of solutions and applications in different fields of biomedical research. Int J Morphol. 2016;34(4):1442-54.
10. Venuto MT, Soldat-Böttcher Z, Kleine J, Warnke P, Kipp M, Keiler J. Evaluation of lactic acid as a novel fixative for histological and

neuroanatomical applications. Sci Rep. 2026;16:15746.

11. Lombardero M, Yllera MM, Costa-e-Silva A, Oliveira MJ, Ferreira PG. Saturated salt solution: a further step to a formaldehyde-free embalming method for veterinary gross anatomy. J Anat. 2017;231(2):309-17.
12. Akosman MS, Kara R, Fidan AF. Preservation of muscle tissue with a formaldehyde-free borax solution for gross anatomy lessons. World J Adv Res Rev. 2022;16(3):390-5.
13. Crosado B, Löffler S, Ondruschka B, Zhang M, Zwirner J, Hammer N. Phenoxyethanol-based embalming for anatomy teaching: an 18 years' experience with Crosado embalming at the University of Otago in New Zealand. Anat Sci Educ. 2020;13(6):778-93.
14. Mula J, Lee JD, Liu F, Yang L, Peterson CA. Automated image analysis of skeletal muscle fiber cross-sectional area. J Appl Physiol (1985). 2013;114(1):148-55.
15. Encarnacion-Rivera L, Foltz S, Hartzell HC, Choo H. Myosoft: an automated muscle histology analysis tool using machine learning algorithm utilizing FIJI/ImageJ software. PLoS One. 2020;15(3):e0229041.