

การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อน ในกล้ามเนื้อภายหลังการตายของปลาไน (*Oreochromis niloticus*)

Postmortem Changes in Thermal Property of
Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Muscle

ตุลาคუნ นนทพุท¹ การุณ ทองประจุแก้ว^{2*}

สมรักษ์ รอดเจริญ³ และวราภรณ์ ห่าหอ¹

Tulakhun Nonthaput¹, Karun Thongprajukaew^{2*},
Somrak Rodjaroen³ and Waraporn Hahor¹

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขานิติวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90112
²ผศ.ดร., ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90112
³อ.ดร., สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ตรีัง 92150

บทคัดย่อ

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนในกล้ามเนื้อแดงของปลานิลแปลงเพศ (*Oreochromis niloticus*) ภายหลังการตายที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง โดยใช้ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ผลการศึกษาพบโปรตีนไมโอซินและแอกทินในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังการตาย แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนทั้ง 2 ชนิด ในเวลา 48 ชั่วโมง คุณลักษณะเชิงความร้อนของไมโอซินและแอกทิน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิพีคอุณหภูมิสุดท้าย และเอนทัลปี รวมทั้งการแสดงออกของโปรตีน สามารถจำแนก ระยะเวลาหลังการตายได้ 3 ช่วง คือระยะก่อนเกร็งตัว (ภายใน 1 ชั่วโมง) ระยะเกร็งตัว (1 ถึง 24 ชั่วโมง) และระยะหลังเกร็งตัว (หลัง 24 ชั่วโมง) ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนของกล้ามเนื้อสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการ ประเมินระยะเวลาหลังการตายของสัตว์น้ำได้

คำสำคัญ : ไมโอซิน แอกทิน การเปลี่ยนแปลงหลังการตาย

Abstract

Postmortem changes (0, 1, 2, 4, 8, 12, 24 and 48 h) in muscle thermal transition property were investigated in sex reversed Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) using a differential scanning calorimeter. Myosin and actin were observed in the first 24 h postmortem times but not at 48 h. Thermal transition property of myosin and actin (onset, peak and conclusion temperatures, and enthalpy) as well as expression of other proteins can divide these postmortem changes into 3 intervals, including pre-rigor mortis (within 1 h after death), rigor mortis (1 to 24 h after death) and post-rigor mortis (exceeding 24 h after death). The findings suggest that the thermal changes of muscle can serve as primary data for the estimation of time of death of an aquatic animal.

Keywords : Myosin, Actin, Postmortem Change

บทนำ

ภายหลังการตายของสิ่งมีชีวิต โกลโคเจนที่ร่างกายสะสมไว้ที่ตับและกล้ามเนื้อจะถูกขับออกมา ผ่านกระบวนการสลายในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน เกิดเป็นกรดแลคติกสะสมในกล้ามเนื้อ ทำให้ค่าพีเอชของกล้ามเนื้อลดต่ำลง [1] ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกล้ามเนื้อ 3 ระยะ คือ ระยะก่อนเกร็งตัว (Pre-rigor mortis) โดยกล้ามเนื้อจะอ่อนตัว มีรอยเขียวช้ำและยืดหยุ่น [2] ระยะเกร็งตัว (Rigor mortis) กล้ามเนื้อจะเกิดการเกร็ง แข็งทื่อ และขาดความยืดหยุ่น และระยะหลังเกร็งตัว (Post-rigor mortis) ซึ่งเนื้อจะนิ่ม ไม่ยืดหยุ่น และเสื่อมคุณภาพ [3-4] การเปลี่ยนแปลงหลังการตายเหล่านี้ขึ้นอยู่กับโปรตีนไมโอซิน (Myosin) และแอกทิน (Actin) ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของกล้ามเนื้อสัตว์ที่ทำหน้าที่โดยตรงเกี่ยวกับการหดและคลายตัว [5-6] เมื่อสัตว์ตาย เซลล์กล้ามเนื้อขาดพลังงานจากการหายใจ แอกทินกับไมโอซินจะจับกันแน่น รวมตัวกันเป็นแอกโทไมโอซิน กล้ามเนื้อจึงหดตัว แต่ไม่คลายตัวเนื่องจากขาด ATP ทำให้ซากสัตว์แข็งทื่ออยู่ระยะหนึ่งหลังจากตาย [6] ซึ่งโปรตีนทั้งสองจะสลายตัวหลังการตายโดยเอนไซม์ คาเทปซิน (Cathepsin) [7-8] และสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนที่แสดงถึงการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนได้ [9-12]

การศึกษาการสลายตัวของโปรตีนในกล้ามเนื้อภายหลังการตายส่วนใหญ่เน้นในสัตว์บก เช่น ไก่ สุกร และวัว รวมทั้งในมนุษย์ [13-16] สำหรับในสัตว์น้ำมีเฉพาะการศึกษาในตัวอย่างที่เก็บในอุณหภูมิต่ำเพื่อประยุกต์ใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษา หรือคงสภาพผลิตภัณฑ์เป็นหลัก [17] การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสลายตัวของโปรตีนไมโอซินและแอกทินในกล้ามเนื้อภายหลังการตายในสภาพใกล้เคียงธรรมชาติโดยใช้ปลานิลแปลงเพศ (*Oreochromis niloticus*) เป็นต้นแบบ เนื่องจากปลานิลนี้มีข้อมูลพื้นฐานทางด้านชีววิทยาค่อนข้างมาก [18-20] อีกทั้งเป็นปลาที่สามารถปรับตัวให้เข้ากับธรรมชาติได้ง่าย กินอาหารได้หลายชนิด เจริญเติบโตเร็ว และเป็นปลาน้ำจืดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจระดับโลก [21-22] ข้อมูลที่ได้สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการจำแนกระยะเวลาหลังการตาย (Postmortem interval) ของสัตว์น้ำ รวมทั้งอาจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการงานนิติวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (Environmental forensics) เพื่อระบุช่วงเวลาของการปล่อยสารที่ทำให้เกิดพิษ (มลสาร) ลงในแหล่งน้ำ หรืออาจใช้สำหรับสืบสวนและสอบสวนคดีความที่เกี่ยวข้องกับการตายของสัตว์น้ำในฟาร์มเลี้ยง (Fisheries forensics)

ระเบียบวิธีการศึกษา

1. การเตรียมตัวอย่างปลาไนล์

นำตัวอย่างปลาไนล์แปลงเพศอายุ 4 เดือน มาเลี้ยงเพื่อปรับสภาพในบ่อเป็นเวลา 15 วัน โดยให้อาหารที่มีโปรตีน 30 เปอร์เซ็นต์ 2 ครั้งต่อวัน และให้แสงเป็นเวลา 12 ชั่วโมงต่อวัน คุณภาพน้ำทางเคมีของบ่อปรับสภาพ คือ อุณหภูมิ 29.60 ± 0.15 องศาเซลเซียส พีเอช 6.95 ± 0.02 ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ 5.05 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณแอมโมเนีย 0.94 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. การเก็บตัวอย่างปลาไนล์

อดอาหารปลาไนล์แปลงเพศก่อนเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นสุ่มปลาที่มีความยาวและน้ำหนักใกล้เคียงกัน (น้ำหนัก 105.83 ± 1.66 กรัม และความยาวเหยียด 18.55 ± 0.14 เซนติเมตร) มาสลบโดยใช้น้ำแข็งและนำมาวางในภาชนะทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ($32 \times 43 \times 11$ เซนติเมตร) ที่มีระดับน้ำสูง 7 เซนติเมตร จากนั้นเก็บตัวอย่างกล้ามเนื้อแดง (Red muscle) บริเวณใต้ครีบหลังก้านครีบที่ 3 ถึง 10 ภายหลังการตายที่ระยะเวลา 0, 1, 2, 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง เพื่อใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อน

3. การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนของกล้ามเนื้อแดง

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนของกล้ามเนื้อแดงโดยใช้ดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (DSC7, Perkin Elmer, Waltham, Massachusetts, USA) ในช่วง 25 ถึง 120 องศาเซลเซียส และกำหนดอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที การพิสูจน์เอกลักษณ์ของโปรตีนไมโอซินและแอคติน พิจารณาตามอุณหภูมิที่โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติที่ 47–50 องศาเซลเซียส และ 73–75 องศาเซลเซียสตามลำดับตามรายงานวิจัยของ Matos et al. [12]

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ (8 ช่วงเวลา $\times$ 2 ซ้ำ) รายงานผลข้อมูลในรูปค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error of mean: SEM) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลแบบทางเดียวและเปรียบเทียบข้อมูลโดยใช้ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

1. การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนของโปรตีนไมโอซิน

ระยะเวลาหลังการตายมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนของโปรตีนไมโอซิน ในกล้ามเนื้อ คุณลักษณะพีคของไมโอซินได้ ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น (Onset temperature: T_o) อุณหภูมิพีค (Peak temperature: T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (Conclusion temperature: T_c) และเอนทัลปี (Enthalpy: ΔH) ของการเสียสภาพของโปรตีน พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) ในช่วงเวลา 0–12 ชั่วโมง แต่มีแนวโน้มลดลงในช่วงเวลาที่ 24 ($P < 0.05$) จนไม่สามารถตรวจวัดได้ในช่วงเวลาสุดท้าย (ตารางที่ 1) ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างบางส่วนของไมโอซินมีการเปลี่ยนแปลง (Transformation) ซึ่งอาจเกิดจากการลดลงของค่าพีเอชในกล้ามเนื้อ [1] ทำให้โปรตีนไมโอซินสูญเสียสภาพธรรมชาติ [6] หรือเกิดจากการทำงานของเอนไซม์คาเทปซินแอล (Cathepsin L) ซึ่งเป็นซิสเตอีนโปรติเอสที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายไมโอซินในกล้ามเนื้อ [7] และสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิห้อง [23] ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ (24–30 องศาเซลเซียส) หรืออาจเกิดจากกิจกรรมของอัลคาไลน์โปรติเอสบางชนิด

หลังการตาย 48 ชั่วโมง ไม่พบโปรตีนไมโอซินที่อยู่ในสภาพเดิม (Native protein) ในกล้ามเนื้อแดงของปลานิล (ตารางที่ 1) แสดงให้เห็นว่าโปรตีนชนิดนี้สลายตัวหมด [5] หรืออยู่ในรูปที่เสียสภาพธรรมชาติ (Denatured protein) ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับระยะเกร็งตัวของปลาแซลมอน (*Salmo salar*) ซึ่งอยู่ระหว่าง 2–24 ชั่วโมง [24] และปลากระพงขาว (*Lates calcarifer*) อยู่ระหว่าง 3–24 ชั่วโมง [25] โดยกล้ามเนื้อของปลาจะเกร็ง แข็งทื่อ แต่ยังไม่สูญเสียโปรตีน แต่หลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้ว จะเข้าสู่ระยะสิ้นสุดการเกร็งตัว ทำให้กล้ามเนื้อนิ่ม เหลว และไม่ยืดหยุ่น เนื่องจากโปรตีนไมโอซินซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของกล้ามเนื้อได้สลายตัวหมดไปแล้ว [5] ผลการศึกษาก็ได้ต่างจากการทดลองในหนู ซึ่งพบว่ามีระยะเกร็งตัวที่ 5–24 ชั่วโมง [26] สำหรับในมนุษย์พบการเปลี่ยนแปลงหลังการตายช้ากว่าในปลาเช่นเดียวกัน โดยการตายในฤดูร้อน (ช่วงอุณหภูมิ 12.0–46.5 องศาเซลเซียส) ระยะเกร็งตัวจะอยู่ที่ 8–30 ชั่วโมง แต่ถ้าตายในฤดูฝน (ช่วงอุณหภูมิ –2.6–35.4 องศาเซลเซียส) ระยะเกร็งตัวจะอยู่ที่ 7–36 ชั่วโมง [27] เนื่องจากกล้ามเนื้อหนูและมนุษย์มีความซับซ้อน และมีหลอดเลือดมาเลี้ยงกล้ามเนื้อ [28] อีกทั้งการศึกษาระยะเวลาหลังการตายของปลาในครั้งนี้กระทำในตัวกลางที่เป็นน้ำ ซึ่งอาจทำให้อัตราการสลายตัวของโปรตีนเกิดขึ้นได้เร็วกว่า เนื่องจากองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่ในเซลล์สามารถละลายได้ดีในน้ำ [29]

2. การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนของโปรตีนแอกทิน

สมบัติเชิงความร้อนของโปรตีนแอกทินมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กักระยะเวลาภายหลังการตายเช่นเดียวกับไมโอซิน (ตารางที่ 2) โปรตีนชนิดนี้จะทำหน้าที่ร่วมกับไมโอซินช่วยให้กล้ามเนื้อหดและคลายตัว ทำให้อวัยวะสามารถเคลื่อนตัว และช่วยให้ร่างกายสามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้น เมื่อไมโอซินสลายตัวจะส่งผลให้แอกทินสูญเสียสภาพและสลายตัวตามไปด้วย [6] นอกจากนี้ การสลายตัวของโปรตีนแอกทินยังเกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์คาเทปซินบี (Cathepsin B) และคาเทปซินดี (Cathepsin D) ที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายกล้ามเนื้อหลังการตายส่งผลให้กล้ามเนื้ออ่อนตัวลง และเสื่อมประสิทธิภาพ [8]

นอกจากการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนไมโอซินและแอกทินแล้ว ยังตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนบางชนิด (ภาพที่ 1a และ 1h) ซึ่งคาดว่าเป็นซาร์โคพลาสมิคโปรตีน (Sarcoplasmic protein) ที่แขวนลอยอยู่ในส่วนของซาร์โคพลาสซึม [12] หรืออาจเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของโปรตีนไมโอซินหรือแอกทิน โปรตีนดังกล่าวมีการตอบสนองต่อระยะเวลาภายหลังการตายเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลรวมของเอนทัลปีซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของโปรตีนที่อยู่ในสภาพเดิม พบว่าค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วหลังจาก 24 ชั่วโมง (ภาพที่ 2) แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลาดังกล่าวโปรตีนมีอัตราของการสลายตัวหรือเสียดสภาพธรรมชาติในอัตราที่สูงกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ

สรุปผลการศึกษา

ระยะเวลาหลังการตายมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนของโปรตีนไมโอซินและแอกทิน เมื่อพิจารณาผลรวมของเอนทัลปี รูปแบบของเทอร์โมแกรม และการแสดงออกของโปรตีนสามารถจำแนกระยะเวลาหลังการตายได้ 3 ช่วงคือ ระยะก่อนเกร็งตัว (ภายใน 1 ชั่วโมง) ระยะเกร็งตัว (1 ถึง 24 ชั่วโมง) และระยะหลังเกร็งตัว (หลัง 24 ชั่วโมง) ข้อมูลจากการศึกษาเบื้องต้นนี้สามารถนำมาใช้ในการจำแนกระยะเวลาหลังการตายของสัตว์น้ำ รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับมลพิษทางน้ำ หรือในกรณีที่สัตว์น้ำตายในฟาร์มหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานด้านนิติวิทยาศาสตร์การประมง

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากบัณฑิตวิทยาลัย ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภททั่วไป (เลขที่สัญญาSCI570522S) และทุนวิจัยจากภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bayliss, P. (1996). “Chemistry in the kitchen: fish and fish products”, **Nutrition and Food Science**. 96(1), 41–43.
- [2] Shahidi, F. and Botta, J.R. (1994). **Seafoods chemistry, processing technology and quality**. London: Chapman and Hall.
- [3] Fraser, O.P. and Sumar, S. (1998). “Composition changes and spoilage fish (part II) microbiological induced deterioration”, **Nutrition and Food Science**. 98(6), 325–329.
- [4] Chytiri, S., Chouliara, I., Savvaidis, I.N. and Kontominas, M.G. (2004). “Microbiological, chemical and sensory assessment of iced whole and filleted aquacultured rainbow trout”, **Food Microbiology**. 21(2), 157–165.
- [5] McMahon, T.A. (1984). **Muscles, reflexes and locomotion**. New Jersey : Princeton University Press.
- [6] Tyska, M.J. and Warshaw, D.M. (2002). “The myosin power stroke”. **Cell Motility and the Cytoskeleton**. 51(1), 1–15.
- [7] Ho, M.L., Chen, G.H. and Jiang, S.T. (2000). “Effect of mackerel cathepsins L and L like, and calpain on the degradation of mackerel surimi”, **Fisheries Science**. 66(3), 558–568.
- [8] Ladrat, C., Verrez-Bagnis, V., Noël, J. and Fleurence, J. (2003). “In vitro proteolysis of myofibrillar and sarcoplasmic proteins of white muscle of sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) : effects of cathepsins B, D and L.”, **Food Chemistry**. 81(4), 517–525.

- [9] Schubring, R. (1999). "DSC studies on deep frozen fishery products", **Thermochimica Acta**. 337(1–2), 89–95.
- [10] Kuo, H.L., Chen, M.T., Liu, D.C. and Lin, L.C. (2005). "Relationship between thermal properties of muscle proteins and pork quality", **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**. 18(3), 427–432.
- [11] Beyrer, M. and Klaas, M.R. (2007). "Influence of freezing and of frozen storage on the specific heat capacity of trout and herring fillet", **European Food Research and Technology**. 224(3), 349–353.
- [12] Matos, E., Silva, T.S., Tiago, T., Aureliano, M., Dinis, M.T. and Dias, J. (2011). "Effect of harvesting stress and storage conditions on protein degradation in fillets of farmed gilthead seabream (*Sparus aurata*) : A differential scanning calorimetry study", **Food Chemistry**. 126(1), 270–276.
- [13] Bircan, C. and Barringerd, S.A. (2002). "Determination of protein denaturation of muscle foods using the dielectric properties", **Journal of Food Science**. 67(1), 202–205.
- [14] Deng, Y., Rosenvold, K., Karlsson, A.H., Horn, P., Hedegaard, J., Steffensen, C.L. and Andersen, H.J. (2002). Relationship between thermal denaturation of porcine muscle proteins and water-holding capacity. **Journal of Food Science**. 67(5), 1642–1647.
- [15] Gazsó, I., Kráncz, J., Bellyei, A. and Lörinczy, D. (2003). "DSC analysis of the abnormalities of human leg skeletal muscles: A preliminary study", **Thermochimica Acta**. 402(1–2), 117–122.
- [16] McDonnell, C.K., Allen, P., Morin, C. and Lyng, J.G. (2014). "The effect of ultrasonic salting on protein and water–protein interactions in meat", **Food Chemistry**. 147(1), 245–251.

- [17] Herrera, J.J., Pastoriza, L. and Sampedro, G. (2001). "A DSC study on the effects of various maltodextrins and sucrose on protein changes in frozen-stored minced blue whiting muscle", **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 81(4), 377–384.
- [18] Morrison, C.M. and Wright Jr, J.R. (1999). "A study of the histology of the digestive tract of the Nile tilapia", **Journal of Fish Biology**. 54, 597–606.
- [19] Nielsen, L.B. and Nielsen, H.H. (2001). "Purification and characterization of cathepsin D from herring muscle (*Clupea harengus*)", **Comparative Biochemistry and Physiology**. 128, 351–363.
- [20] Wang, Q., Gao, Z., Zhang, N., Shi, Y., Xie, X. and Chen, Q. (2010). "Purification and characterization of trypsin from the intestine of hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*)", **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 58, 655–659.
- [21] อุดม เรืองนพคุณ. (2549). **การเพาะพันธุ์และเลี้ยงปลาไนล์**. กรุงเทพฯ : เกษตรสยามบุ๊คส์
- [22] De Silva, S.S., Subasinghe, R.P., Bartley, D.M. and Lowther, A. (2004). **Tilapias as alien aquatics in Asia and the Pacific: a review**. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [23] Astier, C., Labbe, J.P., Roustan, C. and Benyamin, Y. (1991). "Sarcomeric disorganization in post-mortem fish muscles", **Comparative Biochemistry and Physiology**. 100(3), 459–465.
- [24] Roth, B., Slinde, E. and Arildsen, J. (2006). "Pre or post mortem muscle activity in Atlantic salmon (*Salmo salar*). The effect on rigor mortis and the physical properties of flesh", **Aquaculture**. 257(1–4), 504–510.
- [25] Wilkinson, R.J., Paton, N. and Porter, M.J.R. (2008). "The effects of pre-harvest stress and harvest method on the stress response, rigor onset, muscle pH and drip loss in barramundi (*Lates calcarifer*)", **Aquaculture**. 282(1–4), 26–32.

- [26] Krompecher, T. (1994). "Experimental evaluation of rigor mortis. VIII. Estimation of time since death by repeated measurements of the intensity of rigor mortis on rats", **Forensic Science International**. 68(3), 149–159.
- [27] Dalal, J.S., Tejpal, H.R., Chanana, A. and Kaur, N. (2006). "Medicolegal study of rigor mortis to estimate postmortem interval", **Journal of Indian Academy of Forensic Medicine**. 28(2), 971–973.
- [28] Gillis, G.B. and Biewener, A.A. (2001). "Hindlimb muscle function in relation to speed and gait: in vivo patterns of strain and activation in a hip and knee extensor of the rat (*Rattus norvegicus*)", **Journal of Experimental Biology**. 204(Pt 15), 2717–2731.
- [29] Baroni, L., Cenci, L., Tettamanti, M. and Berati, M. (2007). "Evaluating the environmental impact of various dietary patterns combined with different food production systems", **European Journal of Clinical Nutrition**. 61(2), 279–286.

ตารางที่ 1 คุณลักษณะเชิงความร้อนของไมโอซินในกล้ามเนื้อแดงของปลานิลแปลงเพศ ภายหลังการตายในช่วง 48 ชั่วโมง

ระยะเวลาหลังการตาย (ชั่วโมง)	$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_p(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H (\text{J g}^{-1})$
0	41.92 ± 0.33^{ab}	46.25 ± 0.35^a	48.72 ± 0.42^a	0.37 ± 0.01^a
1	43.50 ± 0.26^{ab}	47.33 ± 0.01^a	49.92 ± 0.27^a	0.47 ± 0.02^a
2	43.17 ± 0.36^{ab}	47.59 ± 0.12^a	52.12 ± 0.75^a	0.53 ± 0.01^a
4	44.91 ± 0.75^a	47.84 ± 0.47^a	49.93 ± 0.79^a	0.52 ± 0.19^a
8	43.18 ± 0.90^{ab}	46.34 ± 1.18^a	48.80 ± 0.95^a	0.58 ± 0.16^a
12	44.65 ± 0.83^a	48.34 ± 0.47^a	50.54 ± 0.50^a	0.51 ± 0.02^a
24	39.60 ± 1.54^b	42.25 ± 1.29^b	44.35 ± 1.10^b	0.24 ± 0.06^b
48	nd	nd	nd	nd

nd, ตรวจไม่พบ; T_o , อุณหภูมิเริ่มต้น; T_p , อุณหภูมิพีค; T_c , อุณหภูมิสุดท้าย; ΔH , เอนทาลปี

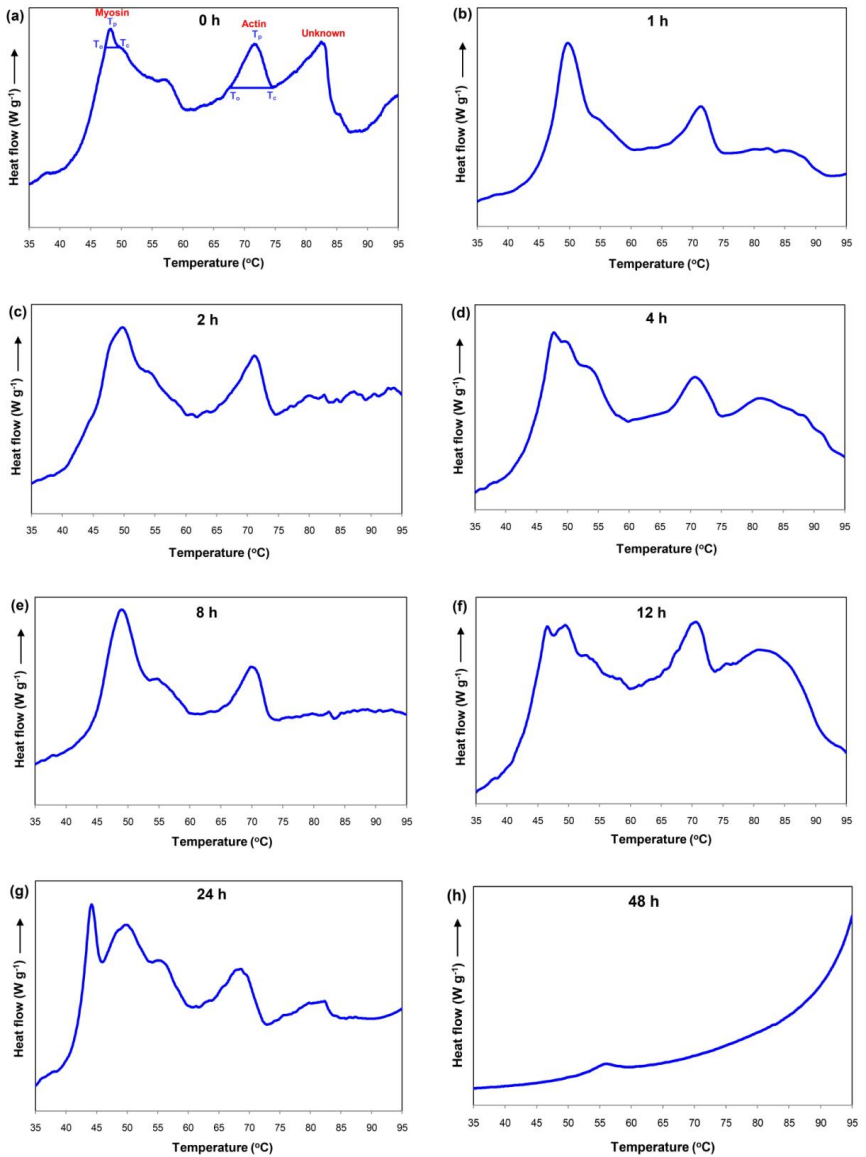
อักษร a และ b ที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 2 คุณลักษณะเชิงความร้อนของแอกทินในกล้ามเนื้อแดงของปลานิลแปลงเพศ ภายหลังการตายในช่วง 48 ชั่วโมง

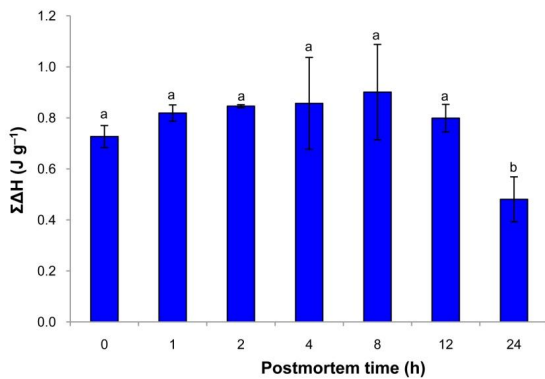
ระยะเวลาหลังการตาย (ชั่วโมง)	$T_o(^{\circ}\text{C})$	$T_p(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	$\Delta H (\text{J g}^{-1})$
0	66.33 ± 0.24^a	70.84 ± 0.06^a	73.47 ± 0.05^a	0.35 ± 0.03^a
1	68.01 ± 0.01^a	71.92 ± 0.24^a	74.57 ± 0.42^a	0.35 ± 0.01^a
2	68.50 ± 0.88^a	71.59 ± 0.12^a	73.71 ± 0.29^a	0.32 ± 0.02^a
4	67.48 ± 0.07^a	70.92 ± 0.01^a	73.43 ± 0.02^a	0.34 ± 0.01^a
8	67.68 ± 0.55^a	70.92 ± 0.01^a	73.50 ± 0.19^a	0.37 ± 0.03^a
12	68.13 ± 0.35^a	71.58 ± 0.01^a	74.16 ± 0.01^a	0.29 ± 0.04^a
24	62.89 ± 1.20^b	67.00 ± 1.18^b	69.95 ± 1.02^b	0.25 ± 0.03^a
48	nd	nd	nd	nd

nd, ตรวจไม่พบ; T_o , อุณหภูมิเริ่มต้น; T_p , อุณหภูมิพีค; T_c , อุณหภูมิสุดท้าย; ΔH , เอนทาลปี

อักษร a และ b ที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนในกล้ามเนื้อแดงของปลานิล
ภายหลังการตาย (A = 0 ชั่วโมง, B = 1 ชั่วโมง, C = 2 ชั่วโมง, D = 4 ชั่วโมง,
E = 8 ชั่วโมง, F = 12 ชั่วโมง, G = 24 ชั่วโมง และ H = 48 ชั่วโมง)



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีรวมในกล้ามเนื้อแดงของปลานิล
ภายหลังการตายในช่วง 48 ชั่วโมง อักษร a และ b ที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกัน
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

