อิทธิพลของคาร์ราจีแนนที่สกัดจากสาหร่ายโพรงต่อสมบัติของเจลจากปลาน้ำจืด

Influence of Carrageenan Extracted from *Solieria robusta* on Gel Properties of Freshwater Fish Gel

จักรินทร์ ตรีอินทอง นงนุช รักสกุลไทย และ จิราพร รุ่งเลิศเกรียงไกร*

Jukkarin Treeinthong, Nongnuch Raksakulthai and Jiraporn Runglerdkriangkrai

ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

* *E-mail: ffisjpr@ku.ac.th โทร. 02-9428644*

บทคัดย่อ

สาหร่ายโพรง *(Solieria robusta)* เป็นสาหร่ายสีแดงชนิดเดียวในวงศ์ Solieriaceae (Gigartinales) ที่มีรายงานการพบในประเทศไทย งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของคาร์ราจีแนนซึ่งสกัดจากสาหร่ายโพรงที่ความเข้มข้นต่างๆ (ร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 (w/w)) ที่มีต่อสมบัติของเจลโปรตีนซึ่งเตรียมจากปลาน้ำจืด 4 ชนิด ได้แก่ ปลาหัวโต (*Aristichthys nobilis*; bighead carp) ปลาดุกบิ๊กอุย (*Clarias macrocephalus* x *Clarias gariepinus*; hybrid catfish) ปลายี่สกเทศ (*Labeo rohita*; Rohu) และปลานิล (*Oreochromis niloticus*; Nile tilapia) ผลการศึกษาพบว่าการเติมคาร์ราจีแนนที่ความเข้มข้นมากขึ้นทำให้เจลของปลาน้ำจืดทั้ง 4 ชนิดมีค่า breaking force, breaking distance และ gel strength ลดลงอย่างต่อเนื่อง ($p \leq 0.05$) ยกเว้นเจลปลาหัวโตที่เติมคาร์ราจีแนนร้อยละ 0.5 มีค่า breaking force และ gel strength เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ในทางตรงกันข้ามการเติมคาร์ราจีแนนที่ความเข้มข้นมากขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มค่า hardness และ springiness ของเจลปลาดุกบิ๊กอุย ปลายี่สกเทศ และปลานิลเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้การเติมคาร์จีแนนร้อยละ 1.5 ยังช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลปลาดุกบิ๊กอุย ($p \leq 0.05$) แต่ไม่มีผลต่อเจลปลาชนิดอื่น ดังนั้นคาร์ราจีแนนที่สกัดจาก *Solieria robusta* สามารถปรับปรุงสมบัติทางเนื้อสัมผัสของเจลปลาน้ำจืดที่มีคุณภาพต่ำได้เมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม

คำสำคัญ : คาร์ราจีแนน สาหร่ายโพรง การเกิดเจล สมบัติของเจล เจลปลาน้ำจืด

Abstract

Solieria robusta is the only one red seaweed species of family Solieriaceae (Gigartinales) found in Thailand and was used as a source of carrageenan for this study. The gel properties of protein gel are prepared from four species of freshwater fish, namely bighead carp (*Aristichthys nobilis*), hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* x *Clarias gariepinus*), rohu (*Labeo rohita*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). The effect of carrageenan at various concentrations (0, 0.5, 1.0 and 1.5% (w/w)) was investigated. The result showed that the addition of carrageenan at the higher concentrations rendered of gels with continually lower ($p \leq 0.05$) breaking force, breaking distance and gel strength except the bighead carp gel with 0.5% of carrageenan which has higher breaking force and gel strength ($p \leq 0.05$) when compared to the control. On the other hand, the addition of carrageenan at the higher concentration tended to slightly increase the hardness and springiness of hybrid catfish, rohu and Nile tilapia gels. Moreover, addition of 0.5% carrageenan also increased the water holding capacity of hybrid catfish gel ($p \leq 0.05$) but had no effect on other fish gels. Therefore, carrageenan

from *Solieria robusta* with optimal quantity could improve the textural properties of low quality freshwater fish gel.

Keywords : carrageenan, *Solieria robusta*, gelation, gel properties, freshwater fish gel

1. บทนำ

คาร์ราจีแนนเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภทเนื้อสัตว์และปลาหลายประเภทเพื่อเพิ่มคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของอาหารให้ดียิ่งขึ้น เนื้อสัมผัสเป็นสมบัติที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ประเภทยืดหยุ่นจากปลา (fish jelly product) เช่น ลูกชิ้นปลา คามาโบโกะ ไส้กรอกปลา เป็นต้น ซึ่งเนื้อสัมผัสที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนเมื่อได้รับความร้อนเกิดเป็นเจล โดยเริ่มจากการเติมเกลือร้อยละ 2-3 ลงไปในเนื้อปลาบดและบดผสม เกลือจะไปละลายโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ในเนื้อปลา ทำให้มีลักษณะความหนืดมากขึ้น เรียกว่า เพส (paste) (Suzuki, 1981) จากนั้นเมื่อนำเพสไปให้ความร้อน โมเลกุลโปรตีนจะเกิดการคลายตัว (unfolding) แล้วเกิดการรวมตัวกันหรือจับกันอย่างช้าๆ ด้วยพันธะชนิดต่างๆ เกิดเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติที่สามารถจับน้ำหรือสารอื่นๆ ที่มีโมเลกุลต่ำไว้ภายในได้ จะได้เจลที่มีความแข็งและยืดหยุ่น ปลาที่นิยมนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทยืดหยุ่นมักเป็นปลาทะเลมากกว่าปลาน้ำจืด เนื่องจากปลาทะเลมีเนื้อสีขาว ให้ลักษณะเนื้อสัมผัสและกลิ่นรสที่ดีกว่า โดยปลาทะเลที่นิยมใช้ เช่น ปลาทรายแดง ปลาหางเหลือง ปลาน้ำดอกไม้ ปลาดาบลาว ปลาตาโต ปลาตาหวาน ปลาจวด และปลาลิ้นหมา ขณะที่ปลาน้ำจืดมีสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนแตกต่างจากปลาทะเล กล่าวคือ มีความสามารถในการเกิดเจลอยู่ในระดับปานกลาง (Martín-Sánchez *et al.,* 2009) อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนที่ได้จากปลาน้ำจืดด้วยสารเติมแต่งชนิดต่างๆ เช่น การใช้โปรตีนถั่วเหลือง (Luo *et al.,* 2008) ไคโตแซน (Kungsuwan *et al.,* 2002) ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Jafarpour *et al.,* 2008) และการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ (Imeson, 2000) เป็นต้น ซึ่งการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของเจลโปรตีนปลา เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์มีความสามารถในการดูดน้ำแล้วให้ลักษณะข้นหนืดและเกิดเจลได้ สารไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมใช้ เช่น คาร์ราจีแนน กัวร์กัม แซนแทนกัม และเพกติน

คาร์ราจีแนนสกัดได้จากสาหร่ายสีแดง มีลักษณะเป็นสารคอลลอยด์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic colloids) ละลายน้ำได้ดี โครงสร้างเป็นสารกาแลคแทนที่มีหมู่ซัลเฟตเกาะอยู่ที่ตำแหน่งคาร์บอนต่างๆ (sulfated galactan) ทำให้คาร์ราจีแนนเป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุลบ (anionic polymer) (Stanley, 1987) คาร์ราจีแนนที่ใช้กันทั่วไปทางการค้ามี 3 รูปแบบ คือ แคปปา (kappa) ไอโอทา (iota) และ แลมบ์ดา (lambda) โดยชนิดแคปปาและไอโอทาสามารถเกิดเจลชนิดผันกลับได้ (thermally reversible gel) ส่วนชนิดแลมบ์ดาไม่สามารถเกิดเจล มีการใช้แคปปาคาร์ราจีแนนร่วมกับโลคัสท์บีนกัมในอาหารประเภทเนื้อสัตว์ที่ผ่านการปรุงให้สุก และใช้ในการเกิดเจลในอาหารสัตว์เลี้ยง การใช้แคปปาคาร์ราจีแนนในไส้กรอกเพื่อลดปริมาณการใช้ไขมันให้น้อยลงและมีการใช้เพื่อรักษาความชื้นและปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ในแฮม นอกจากนี้ยังมีการใช้แคปปาคาร์ราจีแนนร่วมกับไอโอทาคาร์ราจีแนนในผลิตภัณฑ์เนื้อบดแพ็ตตี้ (ground-beef patties) ไขมันต่ำ ขณะที่ในกระบวนการแช่แข็งมีการใช้แคปปาคาร์ราจีแนนร่วมกับโลคัสท์บีนกัมเพื่อป้องกันการเกิด freeze burn (Imeson, 2000) Candogan (2003) รายงานว่า การเติมคาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 0.3-0.7 ช่วยเพิ่มค่าความแข็งและความสามารถในการอุ้มน้ำให้กับผลิตภัณฑ์ไส้กรอกเนื้อแฟรงค์เฟอร์เทอร์ไขมันต่ำ (low-fat beef frankfurters) และ DeFreitas *et al.* (1997) รายงานว่า การเติมคาร์ราจีแนนช่วยเพิ่มความแข็งแรงเจล และการกักเก็บน้ำ (water retention) ของเจลโปรตีนเนื้อหมู

สาหร่ายโพรง (*Solieria robusta*) เป็นสาหร่ายสีแดงในวงศ์ Solieriaceae ซึ่งเป็นชนิดที่สามารถใช้ในการสกัดคาร์ราจีแนนได้ (Stanley, 1990) และยังเป็นสาหร่ายชนิดเดียวในวงศ์ Solieriaceae ที่มีรายงานการพบในประเทศไทย (Lewmanomont, 1998) การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายโพรงในประเทศไทยส่วนใหญ่นิยมนำมาบริโภคแบบสดหรือ

นำไปปรุงอาหารประเภทต่างๆ (สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง, 2550) การศึกษาก่อนหน้านี้มีการรายงานถึงวิธีการสกัด องค์ประกอบ และโครงสร้างของคาร์ราจีแนนที่สกัดจากสาหร่ายโพรง รวมถึงการนำสารสกัดคาร์ราจีแนนจากสาหร่ายโพรงไปประยุกต์ใช้ในเจลปลา จักรินทร์ และ จิราพร (2554) รายงานว่า สภาวะการให้ความร้อนระหว่างการสกัดคาร์ราจีแนนจากสาหร่ายโพรงที่ 80°C นาน 2 ชั่วโมง หรือ การสกัดด้วยหม้อนึ่งความดันที่ 121°C นาน 30 นาที ทำให้เจลคาร์ราจีแนนมีค่าความแข็งแรงเจลไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) Chiovitti *et al.* (1999) รายงานว่า สารกาแลคแทนซึ่งอยู่ที่ผนังเซลล์ของสาหร่ายโพรงมีโครงสร้างประกอบด้วยลักษณะเด่นของหน่วย carrabiose 2,4' –disulfate ซึ่งเป็นหน่วยซ้ำของไอโอทาคาร์ราจีแนน และยังพบสัดส่วนอย่างมีนัยสำคัญของหน่วย 4', 6'-pyruvated carrabiose 2-sulfate จักรินทร์ (2554) รายงานว่า การใช้คาร์ราจีแนนซึ่งสกัดจากสาหร่ายโพรงสามารถปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเจลซูริมิที่ผลิตจากปลาปากคม และปลาทรายแดง เกรด A ได้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ ภัทิรา และ วรางคณา (2557) ที่รายงานว่า การเติมสารสกัดจากสาหร่ายโพรง (เจลที่มีเส้นใยของสาหร่าย) ร้อยละ 5 ในซูริมิปลาฤาษี เกรด AA ทำให้ค่า expressible water ลดลง แต่ช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงเจล อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากคาร์ราจีแนนดังกล่าวในเจลโปรตีนจากปลาน้ำจืดยังมีข้อมูลไม่มากนัก จึงได้ศึกษาอิทธิพลของคาร์ราจีแนนที่สกัดจากสาหร่ายโพรงในประเทศไทยที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อสมบัติทางเนื้อสัมผัส สี และความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลโปรตีนจากปลาน้ำจืด 4 ชนิดที่มีความแข็งแรงเจลแตกต่างกัน โดยผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลในการใช้ประโยชน์คาร์ราจีแนนจากสาหร่ายโพรงในการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเจลปลาน้ำจืด และเป็นการเพิ่มทางเลือกในการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายโพรงในประเทศไทยให้มากขึ้น

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัตถุดิบ

ปลาน้ำจืด 4 ชนิด ได้แก่ ปลาหัวโต (*Aristichthys nobilis*; bighead carp) ขนาด 3-3.5 กิโลกรัม/ตัว ปลาดุกบิ๊กอุย (*Clarias macrocephalus* x *Clarias gariepinus*; hybrid catfish) ขนาด 300-400 กรัม/ตัว ปลายี่สกเทศ (*Labeo rohita*; Rohu) ขนาด 1-1.2 กิโลกรัม/ตัว และปลานิล (*Oreochromis niloticus*; Nile tilapia) ขนาด 600-700 กรัม/ตัว จากตลาดยิ่งเจริญ เขตสะพานใหม่ กรุงเทพฯ ซึ่งปลาหัวโตและปลายี่สกเทศนั้นผ่านการดองน้ำแข็งหลังการจับเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ขณะที่ปลาดุกบิ๊กอุยและปลานิลเป็นปลาที่มีชีวิตอยู่และถูกฆ่าทันทีก่อนการนำมาใช้ สาหร่ายโพรง (*Solieria robusta*) แบบสดจากศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง จังหวัดเพชรบุรี และเกลือป่นตราปรุงทิพย์

2.2 วิธีการ

1) การเตรียมสาหร่ายโพรงและการสกัดคาร์ราจีแนน

นำสาหร่ายโพรงมาล้างน้ำทำความสะอาดแล้วนำไปแช่ในอะซิโตน (acetone) ในสัดส่วน 1:2 (w/v) เปลี่ยนอะซิโตนจนไม่พบสีของสาหร่ายถูกชะออกมา นำสาหร่ายไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปสกัดคาร์ราจีแนน โดยนำสาหร่ายโพรงแห้งแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 3 (w/v) ที่สัดส่วน 1:40 (w/v) นาน 30 นาที จากนั้นนำไปให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 80°C นาน 2 ชั่วโมง และล้างด้วยน้ำประปาไหลผ่านนาน 5 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปสกัดคาร์ราจีแนนด้วยน้ำกลั่นที่สัดส่วนสาหร่ายต่อน้ำกลั่นเป็น 1:40 (w/v) โดยใช้หม้อนึ่งความดันที่อุณหภูมิ 121°C นาน 30 นาที กรองสารสกัดที่ได้แล้วนำไประเหยน้ำออกด้วยเครื่อง rotary evaporator ให้เหลือปริมาตรประมาณ 1 ใน 3 ของสารสกัดตั้งต้น จากนั้นเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ในสารสกัดให้มีความเข้มข้น 0.1 M นำไปให้ความร้อนที่ 60°C นาน 5 นาที เติมเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 ลงไปในสารสกัดที่อัตราส่วน 3:1 (v/v) เพื่อตกตะกอนคาร์ราจีแนน แยกตะกอนที่ได้แล้วล้างด้วยเอทานอลร้อยละ 95 จำนวน 2 ครั้ง

จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C นาน 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบดละเอียดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 80 mesh (ดัดแปลงจากวิธีของ Chiovitti *et al.,* 1995)

2) การเตรียมเนื้อปลาบดและเจลโปรตีนปลา

นำปลาน้ำจืดทั้งหมดมาตัดหัว ควักไส้ และล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นแล่เป็นชิ้นเลือกใช้เฉพาะกล้ามเนื้อขาว แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบด (grinder) ที่มีตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 ซม. โดยเนื้อปลาหัวโต ปลาดุกบิ๊กอุย และปลายี่สกเทศที่ใช้ในการทดลองจะเป็นเนื้อปลาบดไม่ล้างน้ำ ส่วนปลานิลจะใช้เนื้อปลาบดล้างน้ำซึ่งจะล้างด้วยน้ำเย็น (อุณหภูมิ 0-4°C) ที่สัดส่วนเนื้อปลาบดต่อน้ำเย็นเป็น 1:3 (w/w) นาน 10 นาที นำไปกรองและบีบน้ำออก จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำเกลือเข้มข้นร้อยละ 0.3 (w/v) นาน 10 นาที แล้วนำไปบีบน้ำออกและเหวี่ยงแยกน้ำ โดยสภาวะที่ใช้ในการเตรียมเนื้อปลาบดจากปลาน้ำจืดทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวนั้นเป็นสภาวะที่ให้สมบัติทางเนื้อสัมผัสดีที่สุด (จากการศึกษาขั้นต้น) นำเนื้อปลาบดที่เตรียมได้จากปลาทั้งหมดมาเตรียมเจลโดยสับผสมกับเกลือร้อยละ 3 (w/w) นาน 5 นาที แล้วเติมคาร์ราจีแนนที่สกัดได้จากสาหร่ายโพรง (ตามวิธีการในข้อ 3) สับผสมต่ออีก 5 นาที และปรับความชื้นสุดท้ายเป็นร้อยละ 80 ด้วยน้ำแข็งบด ควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 10°C จากนั้นบรรจุเนื้อปลาที่สับผสมแล้วในกระบอกสเตนเลสขนาด 25x25 มิลลิเมตร แล้วห่อด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติก มัดหัวท้ายให้แน่น นำไปให้ความร้อนตามสภาวะที่เหมาะสมของปลาแต่ละชนิด (จากการศึกษาขั้นต้น) กล่าวคือ ปลาหัวโต ปลาดุกบิ๊กอุย และปลายี่สกเทศ ให้ความร้อน 2 ระดับที่อุณหภูมิ 50°C นาน 20 นาที แล้วจึงนำไปให้ความร้อนที่ 90°C นาน 20 นาที ขณะที่ปลานิลให้ความร้อน 2 ระดับที่อุณหภูมิ 40°C นาน 20 นาที แล้วจึงนำไปให้ความร้อนที่ 90°C นาน 20 นาที (อุณหภูมิมีความแปรปรวน ±1°C) จากนั้นทำให้เย็นทันทีในน้ำเย็นผสมน้ำแข็งนาน 10 นาที วางให้สะเด็ดน้ำแล้วเก็บใส่กล่องพลาสติก และเก็บที่ 4°C นาน 1 คืน

3) ศึกษาอิทธิพลของคาร์ราจีแนนที่สกัดจากสาหร่ายโพรงต่อสมบัติของเจลโปรตีนจากปลาน้ำจืด

เตรียมเจลโปรตีนจากปลาน้ำจืดทั้ง 4 ชนิดตามวิธีในข้อ 2 โดยศึกษาปริมาณคาร์ราจีแนนที่เติมลงไปในระหว่างการเตรียมเจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ของน้ำหนักเนื้อปลาบด

4) การวัดค่าความแข็งแรงเจล (gel strength)

นำเจลปลาออกจากแท่งสเตนเลส แล้วนำไปวัดความแข็งแรงเจลด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Stable Micro System TA-HD) โดยใช้หัววัดแบบ spherical 5s ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร กดลงไปในตัวอย่างด้วยความเร็วคงที่ 1.1 มิลลิเมตร/วินาที เป็นระยะทาง 15 มิลลิเมตร วัดค่าของแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ (breaking force) (g) และระยะทางที่หัววัดกดก่อนทะลุ (breaking distance) (cm) แล้วคำนวณค่าความแข็งแรงเจล (g.cm) จากแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ คูณด้วย ระยะทางที่หัววัดกดก่อนทะลุ ทำ 5 ซ้ำ (ดัดแปลงจากวิธีของ MFRD, 1987)

5) การวัดโครงร่างทางเนื้อสัมผัส (texture profile analysis; TPA)

นำเจลออกจากแท่งสเตนเลส วัด TPA ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Stable Micro System TA-HD) ด้วยหัวกดทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร กดลงไปในตัวอย่างขนาด 25x25 มิลลิเมตร^2 เป็นระยะทางร้อยละ 60 ของความสูงในรูปแบบของการกดสองครั้ง (two bite) ด้วยความเร็วคงที่ 2 มิลลิเมตร/วินาที วัดค่าความแข็ง (hardness) ความยืดหยุ่น (springiness) และ ค่าการเกาะตัว (cohesiveness) ทำ 5 ซ้ำ

6) การวัดความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity; WHC)

ตัดตัวอย่างเจลให้มีขนาด 15x15x15 ลูกบาศก์มิลลิเมตร นำตัวอย่างเจลวางระหว่างกระดาษกรอง 2 แผ่น กดด้วยแรงคงที่ 10 กก./ซม.^{2} นาน 2 นาที ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนกด (W_1) และหลังกด (W_2) วัดร้อยละปริมาณความชื้นของตัวอย่าง (M) คำนวณร้อยละของน้ำที่คงอยู่ในตัวอย่างภายหลังการกดตามสูตร (ดัดแปลงจากวิธีของ Motohiro, 1981) ทำ 3 ซ้ำ

$$\text{WHC (\%)} = \frac{(W_1 \times M) - (W_1 - W_2) \times 100}{(W_1 \times M)}$$

7) การวัดความขาว (whiteness)

ตัดตัวอย่างเจลให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร นำไปวัดค่า CIE L* a* b* ด้วยเครื่องวัดสี (Minolta CM-3500d, Japan) แล้วนำไปคำนวณค่าความขาวตามสูตร (Lanier, 1992) ทำ 5 ซ้ำ

$$\text{Whiteness} = 100 - [(100\text{-}L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{0.5}$$

8) การวัดการพับ (folding test)

ตัดตัวอย่างเจลให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร แล้วนำไปทดสอบการพับ ให้คะแนนการพับโดยคะแนน AA เป็นคะแนนสูงสุดคือ ไม่มีรอยแตกเมื่อพับ 4 ส่วน และคะแนนต่ำสุดคือ D มีรอยแตกและแยกออกจากกันเมื่อพับเป็น 2 ส่วน (MFRD, 1987) ทำ 5 ซ้ำ

9) การวิเคราะห์สถิติ

วางแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA (analysis of variance) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ผลของคาร์ราจีแนนต่อสมบัติของเจลโปรตีนจากปลาหัวโต

ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเจลจากปลาหัวโต (Table 1) พบว่า การเติมคาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 0.5 ทำให้เจลโปรตีนของปลาหัวโตมีค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ (466.97 g) และ ความแข็งแรงเจล (452.16 g.cm) มากที่สุด ($p \leq 0.05$) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 0.12 และ 0.18 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เติมตามลำดับ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวอาจเป็นผลเนื่องมาจากคาร์ราจีแนนสามารถจับกับน้ำแล้วสร้างเจลของตัวเองแทรกอยู่ในโครงข่ายของโปรตีนปลาในปริมาณที่เหมาะสม หรือเกิดจากหมู่ซัลเฟตที่อยู่ในโครงสร้างของคาร์ราจีแนนซึ่งมีประจุลบเกิดอันตรกิริยากับกลุ่มประจุบวกบนไมโอไฟบริลลาร์โปรตีนส่งผลให้เจลเกิดความแข็งแรงมากขึ้น (Montero *et al.,* 2000) การเพิ่มขึ้นของสมบัติทางเนื้อสัมผัสเมื่อเติมคาร์ราจีแนนมีการรายงานในอาหารหลายชนิด เช่น DeFreitas *et al.* (1997) รายงานการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงเจลในเจลโปรตีนเนื้อหมูเมื่อเติมแคปปาคาร์ราจีแนน Hunt and Park (2013) รายงานการเพิ่มขึ้นของค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุของเจลซูริมิจากปลา Alaska pollack เมื่อมีการเติมคาร์ราจีแนนลงไป และจักรินทร์ (2554) รายงานว่า การเติมคาร์ราจีแนนที่สกัดจากสาหร่ายโพรงที่ร้อยละ 0.5-2.0 ช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงเจลของเจลซูริมิจากปลาปากคม และการเติมคาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 0.5 ช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงเจลของซูริมิจากปลาทรายแดง เกรด A เป็นต้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อเติมคาร์ราจีแนนที่ความเข้มข้นมากขึ้น (ร้อยละ 1.0 และ 1.5) กลับทำให้เจลปลาหัวโตมีค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ ระยะทางที่หัววัดกดก่อนทะลุ และความแข็งแรงเจลลดลงอย่างต่อเนื่องโดยลดลง 0.26-0.36, 0.23-0.33 และ 0.43-0.58 เท่าตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า การเติมคาร์ราจีแนนที่ปริมาณมากขึ้นทำให้เจลโปรตีนปลาหัวโตที่ได้มีลักษณะนิ่มและเปราะมากขึ้น การลดลงของค่าดังกล่าวอาจเกิดจากคาร์ราจีแนนที่เติมลงไปมีประจุลบเมื่อเติมลงไปในปริมาณที่มากขึ้นประจุลบของคาร์ราจีแนนอาจเกิดการผลักกันระหว่างประจุลบด้วยกันเองหรืออาจผลักกันระหว่างประจุลบของไมโอไฟบริลลาร์โปรตีนส่งผลให้การประสานตัวของโปรตีนปลาลดน้อยลง นอกจากนี้อาจเป็นไปได้ว่าเกิดจากการแทรกตัวของเจลคาร์ราจีแนนที่กระจายตัวในเมทริกซ์เจลของโปรตีนทำให้เกิดการขัดขวางการจับประสานตัวของโปรตีนได้น้อยลง ดังนั้นการเติมคาร์ราจีแนนเพื่อปรับปรุงเนื้อสัมสัมผัสของเจลจึงควรคำนึงถึงความเข้มข้นที่เหมาะสมและสมบัติภายในของโปรตีน การลดลงของสมบัติทางเนื้อสัมผัสเมื่อเติมคาร์ราจีแนนมีการรายงานในเจลปลา blue whiting ซึ่งมีค่าความแข็งแรงเจลลดลงเมื่อเติมไอโอทาคาร์ราจีแนน ร้อยละ 0.5-4 (Pérez-Mateos and Montero, 2000) เจลปลาซาร์ดีนซึ่งมีคุณภาพเชิงหน้าที่ (functional quality) สูงมีค่าความแข็งแรงเจลลดลงเมื่อเติมไอโอทาคาร์ราจีแนนร้อยละ 2 (Gómez-Guillén and Montero, 1995) เจลซูริมิ

จากปลา Alaskan pollock (*Theragra calcogramma*) ซึ่งมีค่า penetration force ลดลงเมื่อเติมไอโอทาคาร์ราจีแนน (Filipi and Lee, 1998) และเจลซูริมิจากปลาทรายแดงเกรด SA เมื่อมีการเติมคาร์ราจีแนนที่สกัดจากสาหร่ายโพรงร้อยละ 1.0-1.5 มีค่าความแข็งแรงเจลลดลง (จักรินทร์, 2554) นอกจากนี้ในสารไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นที่มีประจุลบเช่น แซนแทนกัมก็มีรายงานการลดลงของสมบัติเชิงกลของเจลซูริมิจากปลา silver carp เมื่อเติมแซนแทนกัมลงไปเช่นกัน (Ramirez *et al.,* 2002)

อย่างไรก็ตามสำหรับผลการวิเคราะห์ TPA พบว่า การเติมคาร์ราจีแนนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ไม่แสดงผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่า ความแข็ง ความยืดหยุ่น และค่าการเกาะตัวของเจลปลาหัวโต ($p>0.05$) โดยมีค่าดังกล่าวอยู่ในช่วง 71.92-74.26 N, 0.876-0.909 และ 0.615-0.650 ตามลำดับ การทดสอบด้วยวิธีการกด (compression test) แบบ TPA เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบการเกาะตัวของเจล ขณะที่วิธีการเจาะทะลุเป็นวิธีที่เหมาะสำหรับการวัดความหนาแน่นและความอัดแน่น (compactness) ของโครงข่ายเจลซึ่งเป็นผลมาจากการรวมกลุ่มของโปรตีน (Lee and Chung, 1989) โดยทั่วไปแล้วการทดสอบด้วยวิธี TPA จะมีความสัมพันธ์ที่สุดกับข้อมูลการทดสอบทางประสาทสัมผัสมากกว่าวิธีการเจาะทะลุ ดังนั้นค่าความแข็งและความยืดหยุ่นจึงมีความสัมพันธ์กับความรู้สึกภายในปาก (mouth feel) ของตัวอย่างมากกว่า การเติมคาร์ราจีแนนไม่มีผลต่อค่าความขาว ($p>0.05$) แต่ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลมีค่าลดลงเช่นเดียวกับการลดลงของค่าความแข็งแรงเจลเมื่อเติมคาร์ราจีแนนที่ปริมาณมากขึ้น (ร้อยละ 1-1.5) ทั้งนี้ความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลปลามีความสัมพันธ์อย่างสูงกับสมบัติทางเนื้อสัมผัสของเจลโดยสามารถใช้ค่าดังกล่าวเป็นดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการเกิดเจลของโปรตีนปลาได้ (Gao *et al.,* 1999) อย่างไรก็ตามการทดสอบการพับของทุกตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกันคือ AA ไม่มีรอยแตกเมื่อพับเป็น 4 ส่วน ทั้งนี้การที่ค่าทดสอบการพับไม่แตกต่างกันเนื่องจากการทดสอบการพับเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการแยกเจลโปรตีนคุณภาพสูงจากคุณภาพต่ำ แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างคุณภาพของโปรตีนที่ความสามารถในการเกิดเจลที่ดีได้ (Lanier, 1992) ดังนั้นจึงทำให้ไม่สามารถแยกความแตกต่างเจลโปรตีนของปลาหัวโตได้อย่างชัดเจน

Table 1 Textural properties, whiteness, and water holding capacity of bighead carp gel with the addition of carrageenan at various concentrations

Gel properties	Carrageenan concentration (%, w/w)			
	0	0.50	1.00	1.50
Breaking force (g)	$415.77^{b}\pm16.95$	$466.97^{a}\pm17.32$	$305.2^{c}\pm19.55$	$264.10^{d}\pm18.39$
Breaking distance (cm)	$0.92^{a}\pm0.04$	$0.97^{a}\pm0.03$	$0.72^{b}\pm0.02$	$0.61^{c}\pm0.04$
Gel strength (g.cm)	$383.42^{b}\pm32.21$	$452.16^{a}\pm31.63$	$219.91^{c}\pm20.79$	$162.71^{d}\pm20.51$
Hardness (N)^{ns}	73.81±4.99	73.97±1.42	71.92±0.53	74.26±1.55
Springiness^{ns}	0.876±0.004	0.876±0.009	0.897±0.008	0.909±0.056
Cohesiveness^{ns}	0.639±0.004	0.640±0.010	0.650±0.008	0.615±0.032
Whiteness^{ns}	67.91±0.42	68.08±0.25	67.86±0.36	68.78±0.42
Water holding capacity (%)	$80.40^{a}\pm2.34$	$78.71^{ab}\pm0.56$	$76.19^{bc}\pm0.39$	$75.14^{c}\pm1.22$
Folding test	AA	AA	AA	AA

Values are mean ± standard deviation (n=5); except n=3 (WHC)

$^{a-d}$ Different letters in the same row are significantly different ($p<0.05$)

^{ns} Means in the same row are not significantly different ($p>0.05$)

3.2 ผลของคาร์ราจีแนนต่อสมบัติของเจลโปรตีนจากปลาดุกบิ๊กอุย

ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเจลโปรตีนจากปลาดุกบิ๊กอุย (Table 2) พบว่า การเติมคาร์ราจีแนนที่ทุกความเข้มข้นทำให้เจลโปรตีนมีค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ ระยะทางที่หัววัดกดก่อนทะลุ และความแข็งแรงเจลลดลง ($p \leq 0.05$) ซึ่งมีค่าความแข็งแรงเจลลดลง 0.18-0.42 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ยกเว้นเจลที่มีการเติมคาร์ราจีแนนร้อยละ 0.5 ซึ่งมีค่าระยะทางที่หัววัดกดก่อนทะลุไม่แตกต่างกันกับตัวอย่างควบคุม ($p>0.05$) ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าเจลโปรตีนของปลาดุกบิ๊กอุยที่มีการเติมคาร์ราจีแนนมีลักษณะนิ่มและเปราะมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมซึ่งมีลักษณะแข็งปานกลางและยืดหยุ่นสูง ผลที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับผลของเจลปลาหัวโต สำหรับผล TPA พบว่า การเติมคาร์ราจีแนนที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.5 ทำให้เจลมีค่าความแข็ง ความยืดหยุ่น และค่าการเกาะตัวมากกว่าตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้น 0.23, 0.04 และ 0.06 เท่าตามลำดับ แสดงว่า การเติมคาร์ราจีแนนร้อยละ 1.5 ในเนื้อปลาดุกบิ๊กอุยช่วยเพิ่มสมบัติทางเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง ความยืดหยุ่น และแรงเกาะตัวได้ โดยความแข็งที่สูงขึ้นอาจเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดเจลของคาร์ราจีแนนที่เติมไปช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับเมทริกซ์เจลโปรตีนซึ่งเป็นโครงสร้างหลัก (Ayadi *et al.,* 2009) ส่งผลให้เจลโปรตีนมีความแข็งมากขึ้น การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคในไส้กรอกเนื้อไก่งวง (Ayadi *et al*., 2009) และเจลโปรตีนจากเนื้อไก่ (Verbeken *et al.,* 2005) ที่มีการเติมคาร์ราจีแนนแสดงว่า ถ้าเติมคาร์ราจีแนนความเข้มข้นต่ำลงไปในระบบเจลโปรตีนจะปรากฏเจลของคาร์ราจีแนนที่กระจายตัวแทรกระหว่างโครงข่ายของโปรตีน ทำให้ความอัดแน่นของโครงข่ายเจลโปรตีนลดลง แต่เมื่อเติมคาร์ราจีแนนความเข้มข้นสูง โครงข่ายเจลของคาร์ราจีแนนจะสร้างความเชื่อมโยงกับโครงข่ายโปรตีน และช่วยเพิ่มค่าความแข็งและความสามารถในการอุ้มน้ำของเจล (Ayadi *et al.,* 2009)

Table 2 Textural properties, whiteness and water holding capacity of hybrid catfish gel with the addition of carrageenan at various concentrations

Gel properties	Carrageenan concentration (%, w/w)			
	0	0.50	1.00	1.50
Breaking force (g)	300.30^{a}±19.73	259.03^{b}±13.06	218.70^{c}±7.16	239.73^{bc}±19.55
Breaking distance (cm)	1.38^{a}±0.07	1.31^{a}±0.04	1.10^{b}±0.01	1.09^{b}±0.07
Gel strength (g.cm)	414.65^{a}±46.59	339.08^{b}±26.41	240.31^{c}±5.23	263.08^{c}±38.58
Hardness (N)	31.65^{bc}±0.73	30.25^{c}±1.52	33.08^{b}±0.49	38.99^{a}±1.69
Springiness	0.893^{b}±0.003	0.906^{b}±0.010	0.905^{b}±0.007	0.927^{a}±0.009
Cohesiveness	0.636^{b}±0.006	0.662^{a}±0.021	0.622^{b}±0.012	0.676^{a}±0.006
Whiteness ns	63.39±0.25	63.23±0.18	63.24±0.74	62.95±0.15
Water holding capacity (%)	65.57^{b}±1.02	67.32^{b}±1.59	69.27^{b}±2.21	74.06^{a}±2.93
Folding test	AA	AA	AA	AA

Values are mean ± standard deviation (n=5) ; except n=3 (WHC)

$^{a-c}$ Different letters in the same row are significantly different ($p \leq 0.05$)

^{ns} Means in the same row are not significantly different ($p>0.05$)

ค่าความขาวของเจลปลาดุกบิ๊กอุยมีค่าอยู่ในช่วง 62.95-63.39 ซึ่งต่ำกว่าเจลปลาหัวโตเล็กน้อย ขณะที่ความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลปลาดุกบิ๊กอุยตัวอย่างควบคุมมีค่าต่ำที่สุด (ร้อยละ 65.57) เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในอุ้มน้ำของเจลปลาชนิดอื่น (ร้อยละ 67.47-69.89) แต่เมื่อเติมคาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 1.5 ทำให้เจลปลาดุกบิ๊กอุยมีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้น (ร้อยละ 74.06) ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 0.13 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง

ควบคุมทั้งนี้อาจเกิดจากผลของความสามารถในการจับกับน้ำที่ดีของคาร์ราจีแนนและการเกิดเจลของคาร์ราจีแนนในโครงข่ายของโปรตีน นอกจากนี้เนื้อปลาดุกบิ๊กอุยที่นำมาเตรียมได้จากการที่ปลาตายใหม่ๆ คุณภาพของโปรตีนจึงยังสูงอยู่ จึงมีการอุ้มน้ำได้ดี การเพิ่มขึ้นของความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลปลาดุกบิ๊กอุยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gómez-Guillén and Montero (1995) ที่รายงานว่า การเติมคาร์ราจีแนนในปลาซาร์ดีนที่มีคุณภาพเชิงหน้าที่ต่ำและสูง (แบ่งตามความสามารถในการละลายได้ของโปรตีน) ช่วยเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลปลาซาร์ดีน เจลที่มีการเติมคาร์ราจีแนนที่ทุกระดับความเข้มข้นมีค่าทดสอบการพับไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม คือ AA ไม่มีรอยแตกเมื่อพับเป็น 4 ส่วน

3.3 ผลของคาร์ราจีแนนต่อสมบัติของเจลโปรตีนจากปลายี่สกเทศ

ผลการทดสอบสมบัติของเจลจากปลายี่สกเทศ (Table 3) พบว่า การเติมคาร์ราจีแนนที่ปริมาณมากขึ้นทำให้เจลมีค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ ระยะทางที่หัววัดกดก่อนทะลุ และความแข็งแรงเจลลดลงอย่างต่อเนื่อง ($p \leq 0.05$) ซึ่งมีค่าลดลง 0.16-0.46, 0.09-0.41 และ 0.24-0.68 เท่าตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยการเติมคาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 1-1.5 ทำให้เจลมีค่าดังกล่าวไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) แต่น้อยกว่าการเติมที่ร้อยละ 0.5 ($p \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่า การเติมคาร์ราจีแนนทำให้เจลโปรตีนปลายี่สกเทศที่ได้มีลักษณะนิ่มและเปราะมากขึ้นเช่นเดียวกับปลาชนิดอื่น การเติมคาร์ราจีแนนจึงไม่ช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเจล ขณะที่ผลการทดสอบ TPA พบว่า การเติมคาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 1.5 ทำให้เจลมีค่าความแข็งสูงสุด ($p \leq 0.05$) และการเติมคาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 1-1.5 ช่วยเพิ่มค่าความยืดหยุ่นให้กับเจลโปรตีน ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามกลับไม่มีผลต่อค่าการเกาะตัว ($p>0.05$) ทั้งนี้ผลที่ได้จากการทดสอบ TPA มีผลตรงข้ามกับการทดสอบด้วยวิธีเจาะทะลุซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับผลของเจลปลาดุกบิ๊กอุย การเติมคาร์ราจีแนนทำให้เจลโปรตีนปลายี่สกเทศมีค่าความขาวไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) เช่นเดียวกับเจลปลาหัวโตและปลาดุกบิ๊กอุย ขณะที่การเติมคาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 1.0-1.5 ทำให้เจลโปรตีนมีความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมเช่นเดียวกับเจลปลาหัวโต เจลที่มีการเติมคาร์ราจีแนนร้อยละ 1.0 และ 1.5 มีค่าการการพับ (A) น้อยกว่าตัวอย่างควบคุมและเจลที่เติมคาร์ราจีแนนร้อยละ 0.5 (AA) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าระยะทางที่ใช้ในการเจาะทะลุ ระยะทางที่หัววัดกดก่อนทะลุ และความแข็งแรงเจลซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเติมคาร์ราจีแนน

Table 3 Textural properties, whiteness and water holding capacity of rohu gel with the addition of carrageenan at various concentrations

Gel properties	Carrageenan concentration (%, w/w)			
	0	0.50	1.00	1.50
Breaking force (g)	$409.47^{a}\pm22.01$	$345.30^{b}\pm28.15$	$221.27^{c}\pm15.18$	$252.77^{c}\pm27.75$
Breaking distance (cm)	$1.04^{a}\pm0.04$	$0.94^{b}\pm0.04$	$0.61^{c}\pm0.03$	$0.66^{c}\pm0.04$
Gel strength (g.cm)	$427.87^{a}\pm40.40$	$326.59^{b}\pm39.99$	$135.52^{c}\pm15.92$	$167.98^{c}\pm29.05$
Hardness (N)	$58.84^{b}\pm2.18$	$56.73^{bc}\pm0.33$	$55.14^{c}\pm1.67$	$64.29^{a}\pm1.42$
Springiness	$0.852^{c}\pm0.001$	$0.868^{bc}\pm0.006$	$0.870^{ab}\pm0.008$	$0.886^{a}\pm0.014$
Cohesiveness ^{ns}	0.618±0.004	0.636±0.005	0.627±0.023	0.645±0.016
Whiteness ^{ns}	67.47±0.07	67.64±0.20	67.79±0.59	67.62±0.45
Water holding capacity (%)	$72.91^{a}\pm2.47$	$72.48^{a}\pm0.99$	$66.90^{b}\pm2.52$	$68.47^{b}\pm1.25$
Folding test	AA	AA	A	A

Values are mean ± standard deviation (n=5) ; except n=3 (WHC)

$^{a-c}$ Different letters in the same row are significantly different ($p \leq 0.05$)

^{ns} Means in the same row are not significantly different ($p>0.05$)

3.4 ผลของคาร์ราจีแนนต่อสมบัติของเจลโปรตีนจากปลานิล

ผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเจลโปรตีนจากปลานิล (Table 4) พบว่า การเติมคาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 0.5-1.5 ทำให้เจลโปรตีนปลานิลมีค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ ระยะทางที่หัววัดกดก่อนทะลุ และความแข็งแรงเจลลดลงอย่างต่อเนื่องและน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) ซึ่งมีค่าลดลง 0.43-0.60, 0.32-0.46 และ 0.61-0.78 เท่าตามลำดับ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การเติมคาร์ราจีแนนทำให้เจลโปรตีนของปลานิลมีความนิ่มและเปราะมากขึ้นเมื่อเทียบกับเจลตัวอย่างควบคุมซึ่งมีลักษณะแข็งและยืดหยุ่น สำหรับผล TPA พบว่า การเติมคาร์ราจีแนนเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 1.0 ทำให้เจลโปรตีนมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ($p \leq 0.05$) ขณะที่การเติมคาร์ราจีแนนร้อยละ 1.0-1.5 ทำให้เจลโปรตีนมีค่าการเกาะตัวลดลง ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามกลับไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความยืดหยุ่นของเจลโปรตีน ($p \geq 0.05$) การเติมคาร์ราจีแนนมีผลต่อการเพิ่มความขาวเล็กน้อย แต่ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำและการทดสอบการพับของเจลโปรตีนลดลงเมื่อเติมคาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 1.0-1.5 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการลดลงของสมบัติทางเนื้อสัมผัสที่ทดสอบด้วยวิธีเจาะทะลุ

เมื่อประมวลผลการทดลองทั้งหมด การเติมคาร์ราจีแนนที่สกัดจากสาหร่ายโพรงในประเทศไทยมีผลต่อสมบัติของเจลโปรตีนจากปลาน้ำจืดทั้งสี่ชนิดแตกต่างกัน โดยการเติมคาร์ราจีแนนที่ปริมาณมากขึ้นทำให้เจลโปรตีนของปลาน้ำจืดทั้งสี่ชนิดมีค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ ระยะทางที่หัววัดกดก่อนทะลุ และความแข็งแรงเจลลดลงอย่างต่อเนื่อง ($p \leq 0.05$) ยกเว้นการเติมคาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 0.5 ในปลาหัวโตซึ่งมีลักษณะเจลที่แข็งเปราะทำให้เจลมีค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ และความแข็งแรงเจลมากกว่าตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) ในทางตรงกันข้ามการเติมคาร์ราจีแนนที่ความเข้มข้นมากขึ้นช่วยเพิ่มค่าความแข็งของเจลโปรตีนปลาดุกบิ๊กอุย ปลายี่สกเทศ และปลานิลเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกับค่าความยืดหยุ่นของเจลปลาดุกบิ๊กอุยและปลายี่สกเทศซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน นอกจากนี้การเติมคาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 1.5 ยังช่วยเพิ่มค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลโปรตีนปลาดุกบิ๊กอุยซึ่งเป็นปลาที่มีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำค่อนข้างต่ำ แต่กลับมีผลต่อการลดลงในเจลปลาชนิดอื่นๆ

Table 4 Textural properties, whiteness and water holding capacity of Nile tilapia gel with the addition of carrageenan at various concentrations

Gel properties	Carrageenan concentration (%, w/w)			
	0	0.50	1.00	1.50
Breaking force (g)	$587.27^{a}\pm28.65$	$332.07^{b}\pm36.67$	$246.67^{c}\pm18.86$	$234.13^{c}\pm19.06$
Breaking distance (cm)	$1.20^{a}\pm0.09$	$0.82^{b}\pm0.07$	$0.67^{c}\pm0.03$	$0.65^{c}\pm0.04$
Gel strength (g.cm)	$706.43^{a}\pm58.09$	$274.16^{b}\pm53.91$	$165.99^{c}\pm20.78$	$153.65^{c}\pm21.20$
Hardness (N)	$69.57^{b}\pm2.49$	$72.89^{ab}\pm3.87$	$75.96^{a}\pm0.89$	$68.76^{b}\pm1.57$
Springiness ^{ns}	0.912±0.009	0.911±0.002	0.914±0.006	0.914±0.006
Cohesiveness	$0.700^{a}\pm0.004$	$0.704^{a}\pm0.004$	$0.656^{b}\pm0.010$	$0.649^{b}\pm0.024$
Whiteness	$69.89^{b}\pm0.27$	$70.98^{a}\pm0.33$	$71.12^{a}\pm0.22$	$69.95^{b}\pm0.85$
Water holding capacity (%)	$83.77^{a}\pm0.13$	$77.70^{ab}\pm2.12$	$73.53^{b}\pm6.99$	$73.59^{b}\pm3.28$
Folding test	AA	AA	A	A

Values are mean ± standard deviation (n=5) ; except n=3 (WHC)

$^{a-c}$ Different letters in the same row are significantly different ($p<0.05$)

^{ns} Means in the same row are not significantly different ($p>0.05$)

4. สรุป

การใช้คาร์ราจีแนนซึ่งสกัดจากสาหร่ายโพรงที่ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมสามารถช่วยเพิ่มสมบัติทางเนื้อสัมผัสของเจลปลาหัวโตที่มีความแข็งแรงของเจลค่อนข้างต่ำได้ แต่มีผลเชิงลบในกลุ่มปลาที่มีความแข็งแรงเจลปานกลางถึงสูง รวมทั้งช่วยปรับปรุงความสามารถในการอุ้มน้ำของเจลปลาดุกบิ๊กอุยที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำให้เพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิทยาการขั้นสูงเพื่อเกษตรและอาหาร (CASAF) สถาบันวิทยาการขั้นสูงแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสต์ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

จักรินทร์ ตรีอินทอง. 2554. **การใช้สารสกัดจากสาหร่ายในการปรับปรุงคุณภาพลูกชิ้นปลา**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาผลิตภัณฑ์ประมง บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จักรินทร์ ตรีอินทอง และ จิราพร รุ่งเลิศเกรียงไกร. 2554. **ผลของการแช่อะซิโตนและสภาวะการให้ความร้อนต่อปริมาณผลผลิตและสมบัติของสารไฮโดรคอลลอยด์ที่สกัดจากสาหร่ายผมนาง (*Gracilaria sp.*) และสาหร่ายโพรง (*Solieria robusta*)**. ใน รายงานการประชุมวิชาการครั้งที่ 49 สาขาประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ ฯ : 228-235.

ภัทิรา สุดเลิศ และ วรางคณา สมพงษ์. 2557. **การใช้สารสกัดจากสาหร่ายโพรงในผลิตภัณฑ์เจลลูกชิ้นปลา**. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 22(1) : 67-78.

สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง. **ประมงน้อมเกล้าฯ เฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา “กินปลา ชมปลา พาสุขภาพดี”**. [Online]. เข้าถึงจาก http://www.coastalaqua.com/index .php?option=com_content &task=view&id=552&Itemid=5 : 2550. (4 มีนาคม 2553).

Ayadi, M.A., A. Kechaou, I. Makni and H. Attia. 2009. **Influence of carrageenan addition on Turkey meat sausages properties**. J Food Eng. 93 : 278-283.

Candogan, K. and N. Kolsarici. 2003. **The effects of carrageenan and pectin on some quality characteristics of low-fat frankfurters**. Meat Sci. 64 : 199-206.

Chiovitti, A., A. Bacic, G.T. Kraft, D.J. Craik and M.-L. Liao. 1999. **Pyruvated carrageenans from Solieria robusta and its adelphoparasite *Tikvahiella candida***. Hydrobiologia. 398/399 : 401-409.

Chiovitti, A., G.T. Kraft, G.W. Saunders, M.-L. Liao and A. Bacic. 1995. **A revision of the systematic of the Nizymeniaceae (Gigartinales, Rhodophyta) based on polysaccharides, anatomy and nucleotide sequences**. J. Phycol. 31 : 153-166.

DeFreitas, Z., J.G. Sebranek, D.G. Olson and J.M. Carr. 1997. **Carrageenan effects on salt-soluble meat proteins in model systems**. J Food Sci. 62 (3) : 539-543.

Filipi, I. and C.M. Lee. 1998. **Preactivated iota-carrageenan and its rheological effects in composite surimi gel**. Lebensm.-Wiss. u-Technol. 31 : 129-137.

Gao, J.C., G.M. Pigott and B. Reine. 1999. **Gel forming additive effects on properties of thermally induced minced fish gel**. J Food Sci. 64 (3) : 414-417.

Gómez-Guillén, M.C. and P. Montero. 1995. **Addition of hydrocolloids and non-muscle proteins to sardine (*Sadine pilchardus*) mince gels: Effect of salt concentration**. Food Chem. 56 : 421-427.

Hunt, A. and J.W. Park. 2013. **Alaska pollock fish protein gels as affected by refined carrageenan and various salts**. J Food Quality. 36 : 51-58.

Imeson, A.P. 2000. Carrageenan, pp. 87-102. *In* G.O. Phillips and P.A. Williams, eds. **Handbook of Hydrocolloids**. CRC Press, Baco Raton, Florida.

Jafarpour, A., F. Sherkat, B. Leonard and E.M. Gorczyca. 2008. **Colour improvement of common carp (*Cyprinus carpio*) fillets by hydrogen peroxide for surimi production**. Int. J. Food Sci. Technol. 43(9) : 1602-1611.

Kungsuwan, A., B. Ittipong, S. Jongrittiporn, O. Kongpan, S. Limsooksomboon and C. Limthongkun. 2002. Effect of chitosan on gelling properties of Thai catfish (*Pangasius sutchi*) surimi, pp. 311-320. *In* P.J. Bechtel, ed. **Alaska Sea Grant Coll Program**. Anchorage, Alaska.

Lanier, T.C. 1992. Measurement of surimi composition and functional properties, pp. 123 – 163. *In* T.C. Lanier and C.M. Lee, eds. **Surimi Technology**. Marcel Dekker, Inc., New York.

Lee, C. M. and K. H. Chung. 1989. **Analysis of surimi gel properties by compression and penetration test**. J. Texture Studies. 20 : 363-377.

Lewmanomont, K. 1998. The seaweed resources of Thailand, pp 79-87. *In* A.T. Critchley, & M. Ohno (Eds.), **Seaweed Resources of the World**. Japan: Kanagawa International Fisheries Training Center. Japan International Cooperation Agency.

Luo, Y.K., H.X. Shen, D.D. Pan and G.H. Bu. 2008. **Gel properties of surimi from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) as affected by heat treatment and soy protein isolate**. Food Hydrocol. 22(8) : 1513-1522.

Martín-Sánchez, A.M., C. Navarro, J.A. Pérez-Álvarez and V. Kuri. 2009. **Alternative for efficient and sustainable production of surimi: A review**. Compr. Rev. Food Sci. F. 8 : 359-374.

MFRD (Marine Fisheries Research Department). 1987. **Laboratory Manual on Analytical Methods and Procedures for Fish and Fish Products**. SEAFDEC, Singapore.

Montero, P., J.L. Hurtado and M. Pérez-Mateos. 2000. **Microstructural behavior and gelling characteristics of myosystem protein gels interacting with hydrocolloids**. Food Hydrocol. 14 : 455-461.

Motohiro, T. 1981. General aspect of processing marine food. *In* T. Motohiro., H. Kadota., K. Hashimoto., M. Kayama and T. Tokunaga, eds. **Science of Processing Marine Food Products vol. ll**. Kanagawa International Fisheries Training Center. Japan International Cooperation Agency, Japan.

Pérez-Mateos, M. and P. Montero. 2000. **Contribution of hydrocolloids to gelling properties of blue whiting muscle**. Eur. Food. Res. Technol. 210 : 383-390.

Ramirez, J.A., M. Barrera, O.G. Morales and M. Vazquez. 2002. **Effect of xanthan and locust bean gums on the gelling properties of myofibrillar protein**. Food Hydrocol. 16 : 11-16.

Stanley, N.F. 1987. Carrageenans, pp. 116-146. *In* D. J. McHugh, ed. **Production and Utilization of Products from Commercial Seaweeds**. FAO Fish. Tech. Pap., (288).

Suzuki, T. 1981. **Fish and Krill Protein Processing Technology**. Applied Science Publ, London.

Verbeken, D., N. Neirinck, P.V.D. Meeren and K. Dewettinck. 2005. **Influence of K-carrageenan on the thermal gelation of salt-soluble meat protein**. Meat Sci. 70 : 161-166.