วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 30:3 (22-30)

การพัฒนากระบวนการแช่แข็งแบบ Impingement Jet สำหรับกุ้งแช่แข็งที่มีคุณภาพสูง

Impingement Jet Freezing Process Development for High Quality Frozen Shrimp

พิสิฐ วงศ์สง่าศรี[1] วราภรณ์ บุญทรัพย์ทิพย์[2]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้เพื่อพัฒนากระบวนการแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นเป่าพ่นปะทะ (Impingement Jet freezing) สำหรับกุ้งแช่เยือกแข็งที่มีคุณภาพสูง โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการแช่เยือกแข็งกุ้งขาวดิบทั้งตัวมีเปลือก (Head-On-Shell-On shrimp) 3 กระบวนการ คือ (1) การแช่เยือกแข็งแบบลมเย็นเป่าพ่นปะทะ ที่อุณหภูมิ -40 °C โดยใช้ความเร็วลม 3 ระดับคือ 10 15 และ 25 m/s (2) การแช่เยือกแข็งแบบเป่าลมเย็น (Air Blast freezing) ที่อุณหภูมิเดียวกัน (ความเร็วลม 2.8 m/s) และ (3) การแช่เยือกแข็งแบบไครโอเจน (Cryogenic freezing) ที่อุณหภูมิ -90 °C โดยศึกษาผลของกระบวนการแช่เยือกแข็งทั้งสามต่อค่าอัตราการแช่เยือกแข็ง (Freezing rate) ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการแช่เยือกแข็ง (Freezing loss) ค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการละลาย (Drip loss) และค่าคุณภาพเนื้อสัมผัส (g, แรงที่ตัดกุ้งขาดออกจากกัน) พบว่า ค่า Freezing rate ของการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast และแบบ Cryogenic มีค่าเท่ากับ 0.039 และ 0.104 °C/s ตามลำดับ ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ให้ค่า Freezing rate สูงสุดเท่ากับ 0.102 °C/s ที่ความเร็วลม 25 m/s ค่า Freezing loss ของการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast มีค่ามากกว่าการแช่เยือกแข็งวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 7.62 % ($p \leq 0.05$) การแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic มีค่า Freezing loss เท่ากับ 0.68 % ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ให้ค่าเท่ากับ 1.73 2.17 และ 2.91 %ที่ความเร็วลม 10 15 และ 25 m/s ตามลำดับ สำหรับค่า Drip loss การแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast มีค่ามากที่สุดคือ 14.44 % ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic มีค่าเท่ากับ 3.36 % และแบบ Impingement Jet มีค่าเท่ากับ 3.74 5.48 และ 6.27 %ที่ความเร็วลม 10 15 และ 25 m/s ตามลำดับ การวัดค่าคุณภาพเนื้อสัมผัส การแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic และ Impingement Jet (15 และ 25 m/s) ให้ค่าคุณภาพเนื้อสัมผัสที่ดีใกล้เคียงกัน (1600 กรัม) ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast ให้คุณภาพเนื้อสัมผัสต่ำกว่าการแช่เยือกแข็งทั้งสองวิธี (1200 กรัม)นอกจากนี้ พบว่าการแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ที่ความเร็วลม 10 m/s เป็นความเร็วที่เหมาะสมกับการศึกษาครั้งนี้ในการแช่เยือกแข็งกุ้งขาวดิบทั้งตัวมีเปลือก เพราะมีค่า Freezing loss, Drip loss และคุณภาพเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับการแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic แต่มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการแช่เยือกแข็งสูงกว่าการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast

คำสำคัญ : ลมเป่าพ่นปะทะ, แช่เยือกแข็ง, กุ้งขาวทั้งตัวมีเปลือก, กุ้งแช่เยือกแข็ง

Abstract

Objective of this study is to develop impingement jet freezing process for high quality frozen shrimp by comparing the effectiveness of three freezing processes for frozen head-on-shell-on shrimp (*Litopenaeus vannamei*). The freezing processes were (1) Impingement jet freezing at -40°C by varying air velocity into 3 levels (10, 15 and 25 m/s), (2) Air blast freezing at the same temperature (-40 °C, the air velocity is approximately 2.8 m/s), and (3) Cryogenic freezing at -90°C. Freezing rate, freezing loss, drip

[1]กลุ่มนวัตกรรมผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำเชิงพาณิชย์ กองพัฒนาอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ กรมประมง
[2]ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

loss, and texture quality (g, cutting force) were studied at each freezing process. The result showed that the freezing rate of air blast and cryogenic freezing were 0.039 and 0.104 °C/s, respectively, whereas the maximum freezing rate of impingement jet freezing was 0.102 °C/s at 25 m/s air velocity. Freezing loss of air blast were significantly the highest at 7.26 % ($p \leq 0.05$) whereas that of the cryogenic freezing was 0.68 % and those of impingement jet freezing ranged from 1.73, 2.17 and 2.91 % at 10, 15 and 20 m/s air velocity, respectively. Air blast freezing provided the significant higher drip loss than any other process at 14.44 % ($p \leq 0.05$) which that of cryogenic freezing was 3.36 % and those of impingement jet freezing were 3.74, 5.48 and 6.27 % at 10, 15 and 20 m/s air velocity, respectively. For texture evaluation, frozen shrimp processed by cryogenic and impingement jet freezing had approximately the same good texture (1600 g) which was better than those processed by air blast freezing (1200 g). Moreover, the impingement jet freezing at 10 m/s was the recommended freezing process for frozen head-on-shell-on shrimp on this study due to the fact that its freezing loss, drip loss and texture quality were similar to those of cryogenic freezing and better than air blast freezing.

Key words: impingement Jet, Freezing, Head-On-Shell-On White Shrimp, Frozen Shrimp

คำนำ

กุ้งเป็นสินค้าส่งออกสำคัญอันดับต้นๆ ที่มีศักยภาพของประเทศ จากข้อมูลของกลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง ศูนย์สารสนเทศ กรมประมงและข้อมูลจากยุทธศาสตร์กุ้ง กรมประมง พบว่าในปี พ.ศ. 2551 ประเทศไทยยังคงความสามารถในการส่งออกกุ้งได้เป็นอันดับ 1 ของโลกอยู่ คิดเป็นส่วนแบ่งทางการตลาดประมาณ 15 % และสามารถผลิตกุ้งได้เป็นอันดับที่ 1 ของโลกเช่นกัน คิดเป็นประมาณ 22% ของผลผลิตกุ้งทั้งหมดทั่วโลก (อินโฟเควสท์, 2552)

กระบวนการแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet เป็นกระบวนการแช่เยือกแข็งประเภท Mechanical freezing แบบหนึ่ง โดยมีการพัฒนาให้เกิดความเร็วลมที่สูงขึ้นด้วยการไหลของอากาศเย็นผ่านหัวพ่นเป่า เพื่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนอย่างรุนแรง (High turbulence characteristics) ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่รวดเร็ว (Ovadia and Walker, 1998; Sarkar and Singh, 2004) นอกจากนี้ ความเร็วลมที่มีค่าสูงจะป้องกันไม่ให้ชิ้นอาหารเกิดการเกาะกันในระหว่างการแช่เยือกแข็ง ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวหน้าของอาหารมากขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนจึงสูงขึ้นด้วย (Soto and Borquez, 2001)

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อพัฒนากระบวนการแช่แข็งแบบ Impingement Jet และเปรียบเทียบค่า Freezing rate, Freezing loss, Drip loss และเนื้อสัมผัสของกุ้งแช่แข็งที่ผ่านกระบวนการแช่เยือกแข็งระหว่างแบบ Impingement Jet กับ Cryogenic และ Air Blast

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เครื่องแช่เยือกแข็ง

1.1 Cryogenic freezer ระบบที่ใช้เป็นแบบฉีดพ่นสารให้ความเย็นผ่านหัวฉีด (nozzle) ซึ่งติดตั้งที่ช่องด้านบนของตัวเครื่อง โดยสารให้ความเย็น (cryogen) ที่ใช้คือ ไนโตรเจนเหลว ซึ่งจะฉีดพ่นลงมาบนกุ้งที่วางอยู่ที่ถาดอุณหภูมิของอากาศที่หมุนเวียนอยู่ภายในเครื่องประมาณ -90 °C ก่อนนำตัวอย่างเข้าเครื่อง จะใช้เวลา 15 นาที ในการทำให้อุณหภูมิของเครื่องถึง -90 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 Air Blast freezer และ Impingement Jet freezer มีการออกแบบและสร้างเครื่องแช่เยือกแข็งชนิดเป่าลมเย็น (Air Blast Freezer) และเครื่องแช่เยือกแข็งชนิดลมเย็นเป่าพ่นปะทะ (Impingement Jet Freezer) ระดับการทดลอง (lab scale) ภายในเครื่องเดียวกัน โดยสร้างและติดตั้งร่วมกับ บริษัท พัฒนกล (มหาชน) จำกัด หลังจากนั้นจึงทำการทดลองและทดสอบเครื่องที่สร้างขึ้นเพื่อควบคุมความเร็วลมภายในเครื่อง สารทำความเย็น (Refrigerant) ที่ใช้คือ R-134a ซึ่งอุณหภูมิของอากาศหมุนเวียนภายในเครื่องมีค่าประมาณ -40°C ส่วนของ Impingement Jet Freezer จะมีการบังคับลมเย็นที่ผลิตได้ผ่านหัวพ่นเป่าที่มีรูปร่างหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อเพิ่มความเร็วลมที่ปลายหัวพ่นเป่าก่อนที่ลมเย็นจะกระทบกับตัวกุ้งเพื่อให้ได้ความเร็วลมตามที่ออกแบบในการทดลอง โดยปรับความเร็วลมซึ่งวัด ณ ปลายหัวพ่นเป่าเป็น 3 ระดับ คือ 10 15 และ 25 m/s ในขณะที่ส่วนของ Air Blast Freezer จะเป็นส่วนที่ใช้ลมเย็นที่ไม่ได้ผ่านหัวพ่นเป่า

2. การเตรียมวัตถุดิบ

กุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*) ที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 50-60 ตัวต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นขนาดที่มีการผลิตค่อนข้างมากขนาดหนึ่งในอุตสาหกรรมกุ้งแช่เยือกแข็ง โดยนำกุ้งมาแช่ในภาชนะบรรจุน้ำแข็งระหว่างขนส่งก่อนการทดลอง หลังจากนั้น นำกุ้งมาตัดหนวดจะได้กุ้งมีเปลือกทั้งตัว (head-on-shell-on shrimp) นำไปทำความสะอาดโดยล้างกุ้งด้วยน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 5°C นำกุ้งไปพักไว้บนตะแกรงเพื่อให้สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำกุ้งมาบรรจุในถุงพลาสติกป้องกันน้ำและนำไปแช่ในภาชนะซึ่งบรรจุน้ำแข็งเพื่อนำไปทำการแช่เยือกแข็งต่อไป

3. วิธีการทดลอง

การทดลองการแช่เยือกแข็งกุ้งทั้ง 3 วิธี (Cryogenic freezing, Air blast freezing และ Impingement jet freezing) มีรายละเอียดดังแสดงใน Table 1 แต่ละการทดลองจะใช้กุ้งจำนวน 7 ตัว (เป็นจำนวนตัวกุ้งที่สามารถวางเรียงบนถาดตะแกรงพอดี) เมื่อกุ้งผ่านการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีดังกล่าวแล้ว นำกุ้งไปคำนวณหาค่า freezing rate และ freezing loss หลังจากนั้น นำกุ้งไปละลายน้ำแข็งและคำนวณค่าปริมาณการสูญเสียน้ำ (drip loss) ด้วย 2 วิธี คือ (1) วัดโดยใช้วิธีการเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) โดยใช้กุ้งจำนวน 2 ตัว และ (2) วัดโดยวิธีการกดทับด้วยน้ำหนัก โดยใช้กุ้งจำนวน 2 ตัว และนำกุ้งที่เหลือจำนวน 3 ตัวไปวัดเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสต่อไป

Table 1 values of various factors of the freezing treatments

Freezing process	Medium Temperature (°C)	Air Velocity (m/s)	Initial Sample Temperature (°C)
Cryogenic	-90	-	25.5
Air blast	-40	2.8	25.5
Impingement Jet	-40	10	25.5
Impingement Jet	-40	15	25.5
Impingement Jet	-40	25	25.5

4. การหาค่า Freezing rate, Freezing loss และ Drip loss

4.1 ก่อนการแช่เยือกแข็ง นำกุ้งไปชั่งน้ำหนักและบันทึกเป็นน้ำหนักก่อนการแช่เยือกแข็ง วางกุ้งบนตะแกรงแล้วเสียบสาย microthermocouple เข้าที่ตัวกุ้งตรงบริเวณปล้องที่สองนับจากหัวกุ้งซึ่งเป็นจุดที่เย็นช้าที่สุด ต่อสาย microthermocouple เข้ากับเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (Data logger) ที่ต่ออยู่กับเครื่องพิมพ์ เพื่อบันทึกข้อมูลอุณภูมิของกุ้งและเวลาในระหว่างกระบวนการแช่เยือกแข็ง จากนั้นนำกุ้งไปผ่านกระบวนการแช่แข็งของแต่ละวิธี รอจนกวาอุณหภูมิตรงบริเวณจุดที่เย็นช้าที่สุดของกุ้งมีอุณหภูมิถึง –18°C แล้ว จึงนำกุ้งออกจากเครื่องแช่เยือกแข็ง นำกุ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดไปชั่งน้ำหนักและบันทึกเป็นน้ำหนักหลังการแช่เยือกแข็ง หลังจากนั้น นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่า freezing rate และ freezing loss ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\text{Freezing rate } (^{\circ}C/s) = \frac{\text{อุณหภูมิที่ (-0.4 }^{\circ}\text{C) - อุณหภูมิที่ (-8.0 }^{\circ}\text{C)}}{\text{เวลาที่อุณหภูมิ(-0.4 }^{\circ}\text{C) - เวลาที่อุณหภูมิ (-8.0 }^{\circ}\text{C)}} \quad (1)$$

$$\text{Freezing loss (\%)} = \frac{(\text{นน.กุ้งก่อนการแช่เยือกแข็ง - นน.กุ้งหลังการแช่เยือกแข็ง}) \times 100}{\text{นน. กุ้งก่อนการแช่เยือกแข็ง}} \quad (2)$$

4.2 หลังการแช่เยือกแข็งกุ้ง นำกุ้งมาวางไว้บนตะแกรงที่อยู่ในถาดเพื่อละลายน้ำแข็ง ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำกุ้งไปชั่งน้ำหนัก และบันทึกเป็นน้ำหนักกุ้งที่ผ่านการละลายน้ำแข็งหลังการแช่แข็ง นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าปริมาณการสูญเสียน้ำของกุ้ง (drip loss) ดังสมการที่ 3 ซึ่งการวัดค่าปริมาณการสูญเสียน้ำของกุ้งทดสอบด้วย 2 วิธี คือ

- วัดโดยใช้วิธีการเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) น้ำหนักกุ้งที่ผ่านการละลายน้ำแข็งหลังการแช่แข็งนั้น บันทึกเป็น ค่าน้ำหนักกุ้งกอนการหมุนเหวี่ยง (น้ำหนักกุ้งหลังทำการละลายน้ำแข็ง) นำกุ้งหลังการทำละลายน้ำแข็งใส่ในหลอด centrifuge แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลานาน 15 นาที แล้วนำกุ้งมาชั่งน้ำหนักบันทึกเป็นน้ำหนักกุ้งหลังผ่านการหมุนเหวี่ยง (น้ำหนักกุ้งหลังกำจัดน้ำ) (Boonsomrej *et al*., 2007)

- วัดโดยวิธีการกดทับด้วยน้ำหนัก นำกุ้งที่ผ่านการละลายน้ำแข็งมาแล้ว 2 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักและบันทึกเป็นน้ำหนักก่อนการกดทับ (น้ำหนักกุ้งหลังทำการละลายน้ำแข็ง) นำกุ้งมาวางกดทับด้วยน้ำหนักขนาด 2 กิโลกรัม เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำกุ้งไปชั่งน้ำหนักและบันทึกเป็นน้ำหนักกุ้งหลังผ่านการกดทับ (น้ำหนักกุ้งหลังกำจัดน้ำ) (Boonsomrej *et al*., 2007)

$$\text{Drip loss (\%)} = \frac{(\text{นน.กุ้งหลังทำการละลายน้ำแข็ง - นน.กุ้งหลังกำจัดน้ำ}) \times 100}{\text{นน.กุ้งหลังทำละลายน้ำแข็ง}} \quad (3)$$

ค่า drip loss เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบของทั้งสองวิธีและทำการทดลองสองซ้ำ

5. การวัดคุณภาพเนื้อสัมผัส

นำกุ้งที่ผ่านการทำละลายน้ำแข็งหลังการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีทั้งสาม ไปวัดเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, รุ่น XT-II) โดยวัดแรง (g) ที่เกิดขึ้นจากการตัดอาหารให้ขาดออกจากกัน สภาวะของเครื่องที่ใช้ ได้แก่ ใบมีดชนิดที่ใช้ตัดแบบ Wanner Blade, ความเร็วก่อนตัด (pre-test speed) 10 mm/s, ความเร็วขณะตัด (test speed) 10 mm/s, ความเร็วหลังตัด (post-test speed) 10 mm/s, ระยะทางที่มีดตัดลงบนอาหาร (distance 30 mm) ทุกการทดลองทำซ้ำ 2 ครั้ง

ผลการทดลองและวิจารณ์

เครื่องแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการพัฒนากระบวนการที่เหมาะสม (optimal condition) กับการแช่เยือกแข็งของกุ้งมีเปลือกและเปรียบเทียบค่า Freezing rate, Freezing loss และ Drip loss กับกระบวนการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast ซึ่งสร้างขึ้นในเครื่องเดียวกันแต่แบ่งสัดส่วนเป็น 2 ข้าง ข้างซ้ายเป็นส่วนของการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast และข้างขวาเป็นส่วนของการแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet แต่ละส่วนมีประตูเปิดปิดแยกจากกันอย่างอิสระ โดยลมเย็นที่ผลิตขึ้นภายในเครื่องจะมาจากแหล่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตเดียวกัน เครื่องถูกออกแบบให้มีความสามารถในการปรับระดับความเร็วของลมเย็นได้ด้วยการปรับความถี่ในการหมุนของมอเตอร์ที่ใช้เป็นตัวให้กำลังของใบพัดลม ซึ่งมี 2 ช่วงระดับความถี่ คือช่วงความถี่สูงและต่ำ ซึ่งจะแปลงเป็นค่าความเร็วลม ผลที่ได้จากการทดลองปรับค่าความถี่ของมอร์เตอร์ทั้งสองช่วงสามารถแสดงได้ด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของมอเตอร์ (X, มีหน่วยเป็น Hz) กับความเร็วลม (Y, มีหน่วยเป็น m/s) โดยความเร็วของลมเย็นภายในห้อง Impingement Jet Freezer และ Air Blast Freezer สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$Y\ (m/s) = 0.68X(Hz) + 0.58\ ;\ R^2 = 0.9665 \quad (4)$$

$$Y\ (m/s) = 0.44X(Hz) - 0.13\ ;\ R^2 = 0.9295 \quad (5)$$

การแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet มีการออกแบบและทดลองกับหัวพ่นเป่าที่มีรูปร่างหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 2 ซม ยาว 12 ซม ซึ่งมีการทดสอบในขั้นต้นกับการใช้หัวพ่นเป่า 2 หัวที่อยู่ตำแหน่งข้างบนและข้างล่างตัวกุ้งซึ่งวางอยู่บนถาดที่อยู่ระหว่างหัวพ่นเป่า ผลการทดลองข้างต้นปรากฏว่า ลมเย็นที่เข้ามาปะทะทั้งทางด้านบนและด้านล่างมีการปะทะกัน ทำให้กุ้งขยับเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ต้องการ และเพื่อเป็นการลดปัจจัยต่าง ๆ อันเกิดจากการไหลของลมแบบสองทิศทางที่อาจมีผลต่อการทดลอง ดังนั้นจึงเลือกทดลองใช้หัวพ่นเป่าเพียงหัวเดียวในตำแหน่งข้างบน นอกจากนี้การทดสอบกับหัวพ่นเป่าหนึ่งหัวยังเป็นการง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรมแช่เยือกแข็งกุ้งที่มีการใช้การแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast อยู่ก่อน

1. ผลของสภาวะการแช่เยือกแข็งวิธีต่าง ๆ ต่อค่าอัตราการแช่เยือกแข็ง (Freezing rate)

จาก Figure 1 แสดงให้เห็นว่า การแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic ให้อัตราการแช่เยือกแข็งสูงสุด เท่ากับ 0.104 °C/s และการแช่เยือกแข็งแบบ Air blast ให้อัตราการแช่เยือกแข็งต่ำสุด เท่ากับ 0.039 °C/s ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ที่ความเร็วลม 10 15 และ 25 m/s ให้อัตราการแช่เยือกแข็ง 0.066 0.072 และ 0.102 °C/s ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast แม้ว่าลมเย็นที่ใช้ในการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast และ Impingement Jet จะมาจากแหล่งเดียวกันโดยมีอุณหภูมิ -40°C เท่ากัน

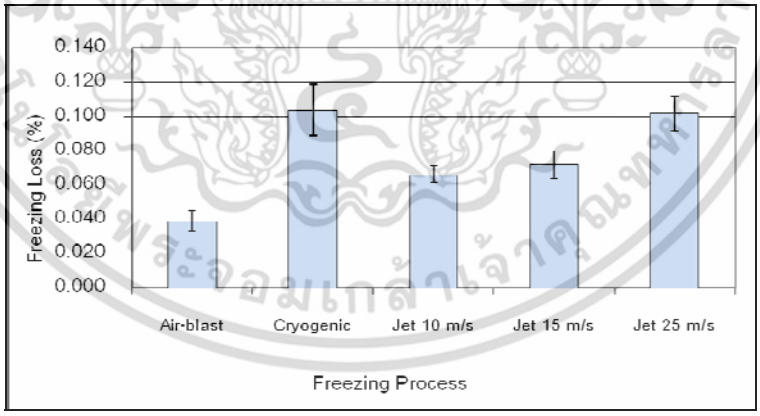

Figure 1 Freezing rate of head-on-shell-on white shrimp by various freezing processes

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เมื่อเปรียบเทียบความเร็วลมจะพบว่า การแช่แข็งแบบ Air blast มีความเร็วลมที่ต่ำประมาณ 2.8 m/s ทำให้อัตราการแช่เยือกแข็งต่ำกว่าแบบ Impingement Jet ณ ทุกความเร็วลม เนื่องจากการแช่เยือกแข็งทั้งสองแบบ เป็นการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนที่มีการใช้แรงบังคับ (Forced convective heat transfer) ซึ่งเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิการพาความร้อนก็จะสูงขึ้นตาม ทำให้การถ่ายเทพลังงานความร้อนจากตัวกุ้งสู่ลมเย็นมีความรวดเร็วมากขึ้นตามกฎการทำความเย็นของนิวตัน (Singh and Heldman, 1993; Geankoplis, 1993) ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความเร็วลมที่ไหลผ่านอาหาร รูปร่างของชิ้นอาหาร ทิศทางของลม ความหยาบของพื้นผิวของอาหาร เป็นต้น แต่ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนคือ ความเร็วลมที่ไหลผ่านอาหาร (Becker and Fricke, 2004) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบอัตราการแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ที่ความเร็วลม 25 m/s จะพบว่ามีค่าอัตราการแช่เยือกแข็งสูงสุดและมีค่าใกล้เคียงกับการแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic โดยมีค่า 0.102 $^{\circ}$C/s ซึ่งเป็นไปตามการรายงานของ Salvadori และ Mascheroni (2002)

2. ผลของสภาวะการแช่เยือกแข็งแบบต่าง ๆ ต่อค่า Freezing loss และ Drip loss

จาก Figure 2(a) แสดงให้เห็นว่าการแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ณ ความเร็วลมที่ 10, 15 และ 20 m/s ให้ค่า Freezing loss 1.73, 2.71 และ 2.91 % ตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic ซึ่งมีค่า Freezing loss น้อยที่สุด (0.86 %) การแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ที่ความเร็วลม 10 และ 15 m/s มีค่า Freezing loss ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แต่ที่ความเร็วลม 25 m/s มีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) ทั้งนี้เนื่องมาจาก อัตราการแช่เยือกแข็งของการแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic มีค่ามากที่สุด น้ำอิสระภายในตัวกุ้งกลายเป็นผลึกน้ำแข็งอย่างรวดเร็ว ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวหน้าของกุ้งกับอุณหภูมิของลมเย็นลดลงอย่างรวดเร็ว มีผลให้ความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำที่ผิวหน้าชิ้นกุ้งและของลมเย็นลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน เกิดการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการแช่เยือกแข็งน้อยลง (Campanone et al., 2001) ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ที่ความเร็วสูงสุด (25 m/s) ให้ค่า Freezing loss มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ความเร็วลมที่ต่ำกว่า ทั้งนี้ โดยหลักการแล้ว การแช่แข็งแบบ Impingement Jet ที่ความเร็วมากกว่าจะทำให้เกิดเป็นเปลือกชั้นน้ำแข็งรอบชิ้นอาหารอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการแช่เยือกแข็ง ทำให้สามารถกักเก็บความชื้นที่อยู่ภายในชิ้นอาหารได้มากกว่า ค่า freezing loss น่าจะต่ำกว่าการแช่แข็งที่ความเร็วลมต่ำกว่า (Linde group, 2009; Johnston *et al.*, 1994) แต่ด้วยความแรงของลมเย็นในช่วงปะทะกับตัวกุ้งมีความเร็วที่มากกว่า ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำที่ผิวที่ยังไม่แข็งตัวบางส่วนในช่วงที่ลมเย็นปะทะกับตัวกุ้ง การถ่ายเทมวลของน้ำสู่อากาศจึงเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้อาจเกิดการแตกหักของชิ้นอาหารที่แข็งตัวแล้วบางส่วน เนื่องจากแรงลมพ่นปะทะที่รุนแรง ทำให้ค่า Freezing loss มีมากกว่า ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast ให้ค่า Freezing loss มากที่สุด คือ 7.62 % ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับการแช่เยือกแข็งวิธีอื่น ($p\leq0.05$) เนื่องจากมีอัตราการแช่เยือกแข็งต่ำที่สุด (เพราะความเร็วลมต่ำที่สุด) เมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งต่ำลง อัตราการระเหิดของน้ำแข็งที่ผิวหน้าของอาหารจะเพิ่มมากขึ้น การสูญเสียน้ำอันเกิดจากกระบวนการแช่เยือกแข็งก็จะมากขึ้นตามและเมื่ออัตราการแช่เยือกแข็งต่ำ ยังผลให้ระยะเวลาในการแช่เยือกแข็งนานขึ้น ยิ่งทำให้การสูญเสียน้ำในกระบวนการแช่เยือกแข็งมากขึ้นอีกทางหนึ่งด้วย (Campanone *et al.*, 2001) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ Boonsomrej *et al.* (2007) ที่ว่าการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast ให้ค่า Freezing loss มากกว่าการแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic

สำหรับผลการทดลองเรื่องค่า drip loss พบว่าค่า drip loss ของการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast มีค่ามากที่สุดคือ 14.44 % และแตกต่างกับวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic ให้ค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 3.36 % และการแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ให้ค่าอยู่ในช่วง 3.74 ถึง 6.27 % ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราความเร็วของลมที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงใน Figure 2(b) จะเห็นได้ว่าการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast มีอัตราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แช่เยือกแข็งต่ำสุด ซึ่งทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic และ Impingement Jet ทำให้การฉีกขาดของเนื้อเยื่อของอาหารอันเนื่องมาจากผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีโอกาสเกิดมากกว่า ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำมากกว่าเมื่อมีการละลายกุ้ง ค่า drip loss ของการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast จึงมีค่าสูง ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ที่ความเร็ว 10 m/s ให้ค่า drip loss ต่ำที่สุดซึ่งใกล้เคียงกับการแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic ($p>0.05$) และแตกต่างกับการแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ที่ความเร็ว 25 m/s อย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ที่ความเร็วลม 25 m/s ถึงแม้จะมีอัตราการแช่เยือกแข็งที่สูงกว่าขนาดผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กกว่า แต่ในระหว่างกระบวนการเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งของน้ำ น้ำและโปรตีนไม่มีโอกาสในการจัดเรียงตัวกันมากนักเพราะอัตราการแช่เยือกแข็งที่เร็วมาก ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบค่า drip loss ที่ความเร็วลม 10 m/s ซึ่งจะมีอัตราการแช่เยือกแข็งที่ต่ำกว่า ทำให้ในระหว่างกระบวนการที่น้ำกลายเป็นน้ำแข็งนั้นโปรตีนที่อยู่ภายในชิ้นอาหารสามารถเกิดการแยกตัวออกจากน้ำได้และจัดเรียงตัวกันใหม่ซึ่งทำให้อาหารมีความสามารถในการอุ้มน้ำมากขึ้น (Ngapo *et al*., 1999; Anon and Calvelo, 1980) จึงทำให้ค่า drip loss ต่ำกว่า โดยอิทธิพลของขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ไปทำลายเนื้อเยื่อในกรณีนี้ มีผลต่อค่า drip loss น้อยกว่า

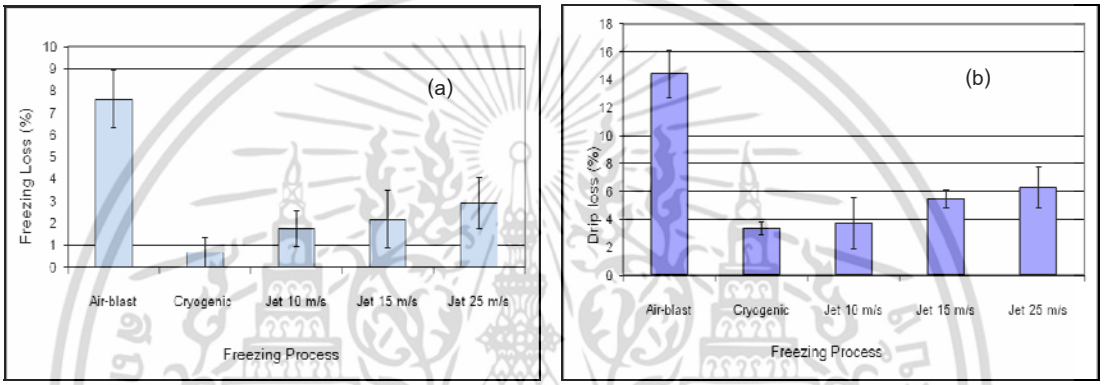

Figure 2 (a) Freezing loss and (b) Drip loss of head-on-shell-on white shrimp by various freezing processes

3. ผลของสภาวะการแช่เยือกแข็งแบบต่างๆ ต่อ เนื้อสัมผัส

การวัดคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสโดยพิจารณาจากแรงที่ใช้ในการตัดกุ้งให้ขาด ณ ตำแหน่งปล้องที่ 2 จากหัวกุ้ง หากแรงที่ใช้ในการตัดมากกว่า แสดงว่าเนื้อสัมผัสของกุ้งมีความแน่น (firmness) สูงกว่าซึ่งสะท้อนถึงว่ากระบวนการแช่เยือกแข็งมีผลทำให้เนื้อเยื่อของกุ้งเสียหายน้อยกว่า ความสามารถในการเก็บน้ำของเนื้อเยื่อของกุ้งเปลี่ยนแปลงลดลงไปน้อยกว่า (Boonsomrej *et al*., 2007) ดังนั้นจาก Figure 3 พบว่า การแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic และ Impingement Jet ที่ความเร็วลม 15 และ 25 m/s ใช้แรงในการตัดใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1600 กรัม แสดงว่าคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสมีความใกล้เคียงกัน ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ที่ความเร็ว 10 m/s ใช้แรงในการตัดมากกว่า (1900 กรัม) ส่วนการแช่เยือกแข็งแบบ Air blast ให้คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสต่ำที่สุด (1200 กรัม) เนื่องจากความสามารถในการอุ้มน้ำของเนื้อเยื่อต่ำกว่าเพราะการฉีกขาดของเนื้อเยื่อในระหว่างการแช่เยือกแข็งมีมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในเรื่องค่า drip loss ข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

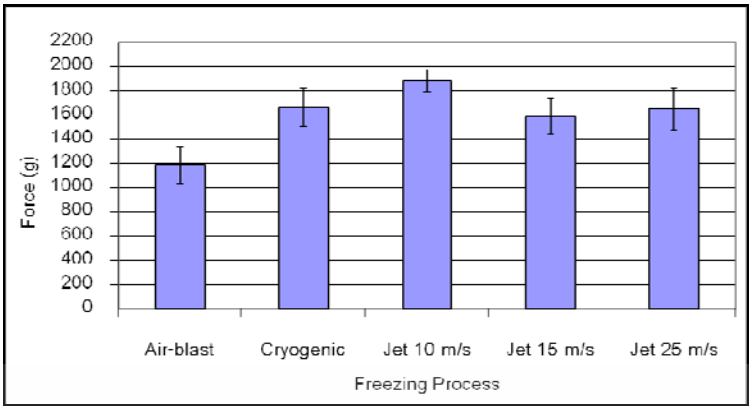

Figure 3 Texture analysis of head-on-shell-on white shrimp frozen by various freezing processes

สรุปผลการทดลอง

กระบวนการแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet สำหรับกุ้งขาวมีเปลือกสามารถพัฒนานำไปใช้ได้ดี การแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet มีค่า Freezing rate ใกล้เคียงกับการแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic และสูงมากกว่าการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast การแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ที่ความเร็วลมระหว่าง 10 ถึง 25 m/s ให้ค่า freezing rate ในช่วง 0.085 ถึง 0.102 °C/s ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic และ Air Blast มีค่าเท่ากับ 0.104 และ 0.039 °C/s ตามลำดับ การแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ที่ใช้ความเร็วลมที่ 10 m/s ให้ค่า freezing loss และค่า drip loss สูงกว่าการแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic ไม่มากนัก ($p>0.05$) โดยมีค่า freezing loss และค่า drip loss อยู่ที่ 1.73 และ 3.74 % ในขณะที่การแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic มีค่า 0.86 และ 3.36 % ตามลำดับ และค่าทั้งสองมีค่าต่ำกว่าการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast อย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq0.05$) (7.62 % และ 14.44 %, ตามลำดับ) นอกจากนี้ ค่าที่ได้จากการวัดเนื้อสัมผัสโดยการตัดของการแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ที่ 10 m/s (1900 กรัม) มีค่าใกล้เคียงกับการแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic (1700 กรัม) โดยที่การแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast มีค่าเท่ากับ 1200 กรัม เท่านั้น จึงเห็นได้ว่า กระบวนการแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet ที่ความเร็วลมเย็นเป่าพ่นปะทะที่ 10 m/s เป็นความเร็วลมที่เหมาะสมของการศึกษาครั้งนี้และวิธีการแช่เยือกแข็งแบบ Impingement Jet นี้น่าจะให้คุณภาพใกล้เคียงกับการแช่เยือกแข็งแบบ Cryogenic และดีกว่าการแช่เยือกแข็งแบบ Air Blast

เอกสารอ้างอิง

อินโฟเควสท์. 2552. พาณิชย์คาดยอดส่งออกกุ้งแช่แข็งไปสหรัฐเพิ่มหลังคำนวณอัตราภาษีเอดีใหม่. http://www.ryt9.com/s/ iq03/526258/. 20 กุมภาพันธ์ 2552

Anon, M. and A. Calvelo. 1980. Freezing rate effects on the drip loss of frozen beef. Meat Science, 4:1-14

Becker, B.R. and B.A. Fricke. 2004. Heat transfer coefficients for forced-air cooling and freezing of selected foods, International Journal of Refrigeration, 27: 540-551

Boonsomrej, S., S. Chaiwanichsiri, S. Tantratian, T. Suzuki, and R. Takai. 2007. Effects of freezing and thawing on the quality change of tiger shrimp (Penaeus monodon) frozen by air-blast and cryogenic freezing. Journal of Food Engineering. 80:292-299.

Campanone, L.A., V.O. Salvadori, and R.H. Masheroni. 2001. Weight loss during freezing and storage of unpacked foods. J. of Food Engineering, 47: 69-79

Geankoplis, C. J. 1993. Transport Processes and Unit Operations, 3rd Ed. Prentice-Hall, Inc. 921 pp.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Johnston, W.A., F.J. N. A. Roger, and G.D. Stroud. 1994. FAO fisheries technical paper-340: Freezing and refrigerated storage in fisheries. CSL Food Science Laboratory, Scotland, UK

Linde group. 2009. Cryoassist refrigeration systems. http://www.lindeus.com. 6 June 2010

Ngapo, T.M., I.H. Babare, J. Reynolds, and R.F. Mawson. 1999. Freezing and thawing rate effects on drip loss from samples of pork. Meat science, 53: 149-158

Ovadia, D.Z. and C.E. Walker. 1998. Impingement in food processing. Food Technology, 52(4): 46

Salvadori, O.V. and R.H. Mascherori. 2002. Analysis of impingement freezers performance. Journal of Food Engineering. 54:133-140.

Sarkar, A. and R.P. Singh. 2004. Air impingement technology for food processing: visualization studies. Lebensm-Wiss. u-Technol. 37: 873-879

Singh, R. P. and D.R. Heldman. 1993. Introduction to Food Engineering. Academic press, Inc. CA. 659 pp.

Soto, V. and R. Borquez. 2001. Impingement jet freezing of biomaterials. Food Control, 12: 515-522.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้