

# การปรับปรุง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกุ้ง

## Improvement of Air Chamber of Shrimp Freezer

ชญญา อุไรจรี จารุพล สุริยวานกุล เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ นำเสนอถึงการจำลองการไหลของอากาศ (Airflow) ภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกุ้ง ที่ใช้แช่แข็งกุ้งในอุตสาหกรรมการผลิตกุ้งแช่แข็ง เนื่องจากกระบวนการแช่แข็งอาหารเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างมาก เพราะการไหลของอากาศภายใน Air Chamber ส่งผลกระทบถึงอัตราการแช่แข็ง อุณหภูมิ และความเร็วลม ทั้งหมดล้วนส่งผลถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์กุ้งแช่แข็ง วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือการปรับปรุงการไหลของอากาศ โดยการติดตั้งแผงกระจายลมด้านบนทางเข้าอากาศในเครื่องแช่แข็งกุ้งแบบเดิม โดยการวิเคราะห์ผลแบบจำลองการไหลของอากาศภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกุ้งด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) แบบจำลองการไหลของอากาศถูกคำนวณด้วยโปรแกรม SC/Tetra เวอร์ชันที่ 13 ผลการคำนวณแบบจำลองการไหลของอากาศภายใน Air Chamber แบบเดิมและแบบปรับปรุงแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการไหลของอากาศแบบปรับปรุงมีความสม่ำเสมอของอัตราการไหลของอากาศทางออกที่ดีขึ้น 13.57% เมื่อเทียบกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลรวมอัตราการไหลของอากาศที่ทางออกอากาศ

**คำสำคัญ :** พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, การไหลของอากาศ, เครื่องแช่แข็ง, การปรับปรุงเครื่องแช่แข็ง

### Abstract

This research presents the simulation of air flow in the air chamber of shrimp freezer. The frozen process is important because discharging airflow from air chamber influences the quality of the product, dependent on the duration of freezing time, temperature, and air velocity. The objective of this study is to improve the air flow by modifying the direction of the air inlet and to analyze by using program SC/Tetra V.13. The results from the simulation show that the improved model improved air-flow rate-uniformity at the outlet increasing by 13.57% from the SD compared to the original model

**Keywords :** Computational fluid dynamics, Airflow, Freezer, Improvement of freezer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**1. บทนำ**

ในปัจจุบัน มีหลากหลายวิธีที่สามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารให้คงคุณภาพที่ดีไว้ได้ หนึ่งในวิธีที่ดีที่สุดสำหรับเก็บรักษาอาหารก็คือการแช่แข็ง[1] เครื่องแช่แข็ง (Freezer) มีหลายชนิดที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง เช่น เครื่องแช่แข็งแบบใช้ลมเป่า (Air blast freezers) เครื่องแช่แข็งแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed freezers) เครื่องแช่แข็งแบบใช้อากาศเย็นปะทะ (Impingement freezers) และเครื่องแช่แข็งแบบไครโอจินิก (Cryogenics freezer) โดยเครื่องแช่แข็งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งคือ เครื่องแช่แข็งแบบใช้ลมเป่า [2] ซึ่งกระบวนการของเครื่องแช่แข็งชนิดนี้จะใช้อากาศเย็นเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ผลิตภัณฑ์จะถูกเป่าด้วยอากาศเย็น ทำให้ผลิตภัณฑ์ถูกแช่ให้แข็งตัวอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิใจกลาง (Core temperature) ตามที่ต้องการ โดยผลิตภัณฑ์กึ่งแช่แข็งควรมีอุณหภูมิใจกลางที่ -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า

การแช่แข็งเป็นการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อาหารลงจนกระทั่งผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (Freezing point) 1-2 องศาเซลเซียส[3] อุณหภูมินี้จะทำให้แบคทีเรียหยุดเจริญเติบโต ทำให้สามารถยืดระยะเวลาการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์ การแช่แข็งอาหารจึงเป็นวิธีการถนอมอาหารเพื่อยืดระยะเวลาของผลิตภัณฑ์อาหารที่ถูกถนอมไว้ให้คงอยู่ได้นานขึ้น กระบวนการแช่แข็งอาหารจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างมากของอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง

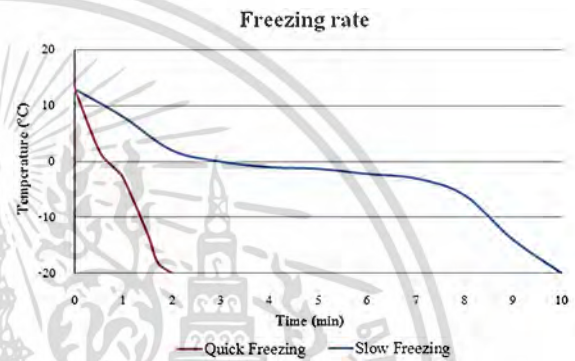
กระบวนการแช่แข็ง เป็นกระบวนการที่ของเหลวภายในอาหารจะแปรสภาพเป็นของแข็ง เรียกว่าการเกิดผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal formation) [3],[4] สามารถแบ่งการเกิดผลึกน้ำแข็งออกเป็น 2 ช่วง คือ

- 1) การเกิดนิวเคลียสน้ำแข็ง (Nucleation)
- 2) การเพิ่มขนาดของผลึกน้ำแข็ง (Crystal growth)

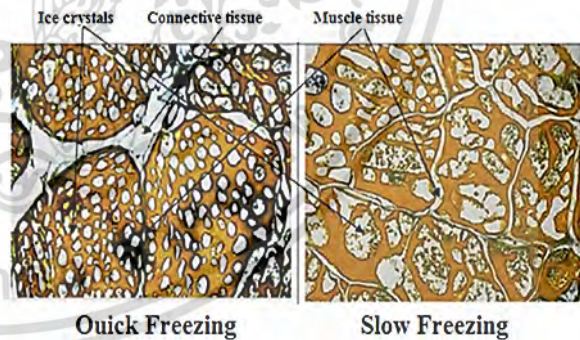
การเกิดผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งจะขึ้นอยู่กับอัตราการแช่แข็ง (Freezing Rate) [1],[4] อุณหภูมิ (Temperature) และความเร็วลม (Air velocity) ทั้งอัตราการแช่แข็ง อุณหภูมิ และความเร็วลม ขึ้นอยู่กับการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ของอากาศ (Airflow) ทั้งหมดเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร ทั้งนี้หากความเร็วในการแช่แข็งเร็ว (Quick freezing) จะทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก แต่ถ้าวความเร็วในการแช่แข็งช้า (Slow freezing) จะทำให้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ [5],[6] ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่จะสร้างความเสียหายให้กับเซลล์ของอาหาร ทั้งนี้คุณภาพของอาหารแช่แข็งสามารถวัดได้ด้วย สี (Color) [7] และเนื้อสัมผัส (Texture) [5] เป็นต้น



รูปที่ 1 กราฟแสดงอัตราการแช่แข็งระหว่างการแช่แข็งเร็วและการแช่แข็งช้า



รูปที่ 2 ขนาดผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้น เมื่อใช้ความเร็วในการแช่แข็งเร็วและช้า [5]

การที่ผู้บริโภคมีความต้องการซื้อผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้อุตสาหกรรมอาหารแช่แข็งเจริญเติบโตมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมต้องออกแบบพัฒนาระบบการทำงานของเครื่องแช่แข็ง เพื่อให้ได้เครื่องแช่แข็งที่มีประสิทธิภาพในการแช่แข็งที่สูงขึ้น โดยที่ผลิตภัณฑ์อาหารแช่แข็งยังคงคุณภาพที่ดีเหมือนเดิม

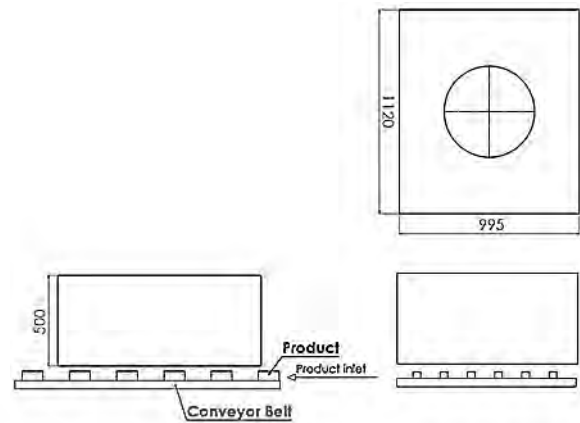
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

เป้าหมายของโครงการวิจัยนี้คือการปรับปรุง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่ง เนื่องจากเครื่องแช่แข็งกึ่งในปัจจุบันอากาศเย็นที่ไหลออก ทางออกอากาศของ Air Chamber ไปยังบริเวณพื้นที่แช่แข็ง (Freezing area) มีการไหลออกของอากาศเย็นที่ไม่สม่ำเสมอจนตลอดหน้าตัดของสายพาน ทำให้ผลิตภัณฑ์กึ่งแช่แข็งที่ผ่านกระบวนการแช่แข็งตลอดพื้นที่หน้าตัดระนาบเดียวกัน ได้รับอากาศเย็นไม่เท่ากัน ทำให้ผลิตภัณฑ์กึ่งแช่แข็งมีการแข็งตัวที่ไม่สม่ำเสมอ จึงเป็นที่มาในการติดตั้งแผงกระจายลมด้านบนทางเข้าอากาศ เพื่อกำจัดหรือลดการไหลของอากาศแบบหมุนวน (Swirling airflow) ภายใน Air Chamber และเพื่อให้ได้ผลลัพธ์การไหลออกของอากาศเย็นที่สม่ำเสมอจนตลอดหน้าตัดของสายพานมากที่สุด โดยการใช่วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) มาวิเคราะห์ผลด้วยการสร้างแบบจำลอง จำลองการไหลของอากาศภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่ง โดยใช้โปรแกรม SC/Tetra เวอร์ชันที่ 13

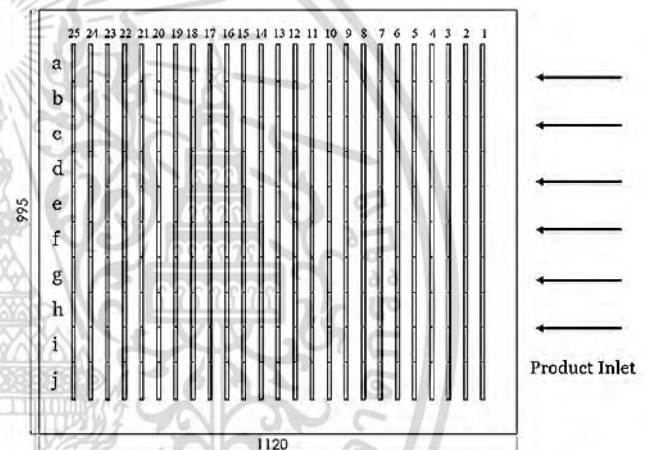
## 2. ระเบียบวิธีการแก้ปัญหา

### 2.1 แบบจำลอง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่ง

สร้างแบบจำลอง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่ง มีขนาดห้อง 995x1120x500 mm<sup>3</sup> ทางเข้าอากาศเย็น มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 mm โดยที่อากาศเย็นไหลเข้าด้านบนของ Air Chamber และไหลออกด้านล่างของ Air Chamber ทั้ง 25 ช่องทางออกอากาศ มีขนาดพื้นที่ 5x830 mm<sup>2</sup> ไปยังบริเวณพื้นที่แช่แข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3 ทำการบันทึกผลลัพธ์ค่าอัตราการไหลของอากาศ ที่ทางออกอากาศด้านล่างของ Air Chamber ทั้ง 25 ช่องทางออกอากาศ โดยแต่ละช่องแบ่งการเก็บบันทึกข้อมูลออกเป็น 10 พื้นที่ (พื้นที่แถว a ถึงพื้นที่แถว j) ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยทุกพื้นที่การเก็บบันทึกข้อมูลมีขนาดพื้นที่เท่ากัน 5x83 mm<sup>2</sup> จากนั้นใช้โปรแกรม SC/Tetra สร้างแบบจำลองเมช (Mesh) ขึ้นมา เพื่อทำการคำนวณและวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 3 แบบจำลอง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่งแบบเดิม



รูปที่ 4 พื้นที่บันทึกผลลัพธ์ค่าอัตราการไหลของอากาศ ทั้ง 25 พื้นที่

การวิเคราะห์ความเป็นอิสระของเมช (Mesh Independent Analysis) เพื่อหาแบบจำลองเมชที่มีความเหมาะสม ได้สร้างแบบจำลองเมช 4 ขนาด ที่มีความละเอียดของทางออกอากาศที่แตกต่างกัน พบว่าแบบจำลองเมชขนาด 0.3125 mm จำนวน 10.5 ล้านเอลิเมนต์ มีความเหมาะสมทั้งในแง่ของเวลาที่ใช้คำนวณและผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ

### 2.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในงานวิจัยนำเสนอการคำนวณแบบจำลอง turbulence model โดยกำหนดให้การไหลของอากาศเป็นแบบบิบัลไม่ได้ ที่มีความหนาแน่นคงที่ ประกอบไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (1) สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

และสมการที่ (2) สมการโมเมนตัม (Momentum conservation equation)

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho g_i \beta (T - T_o) \quad (2)$$

เมื่อ	$x_i$	Coordination (m)
	$u_i$	Velocity of flow in $x_i$ -direction (m/s)
	$t$	Time (s)
	$\rho$	Density of fluid (kg/m <sup>3</sup> )
	$p$	Pressure of a fluid (Pa)
	$\mu$	Viscosity (Pa-s)
	$g_i$	Gravity (m/s <sup>2</sup> )
	$\beta$	Coefficient of volume expansion (1/K)
	$T$	Temperature of a fluid (K)
	$T_o$	Reference temperature of a fluid (K)

### 2.3 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

การกำหนดค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณผลลัพธ์ความเร็วลมของอากาศ โดยโปรแกรม SC/Tetra เลือกใช้การคำนวณแบบสภาวะคงที่ (Steady-State) กำหนดค่าคุณสมบัติของอากาศ (Air properties) ได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature) ความหนาแน่น (Density) และความหนืด (Viscosity) ดังแสดงในตารางที่ 1 และกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของพื้นที่ทางเข้าอากาศและทางออกอากาศ (Inlet and outlet air boundary conditions) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอากาศ

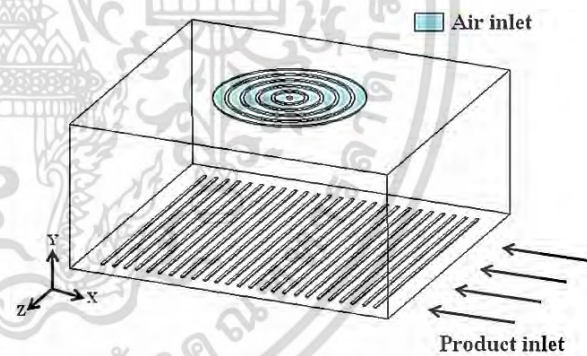
Air properties	
Temperature	-15 °C
Density	1.30410 kg/m <sup>3</sup>
Viscosity	1.64720 × 10 <sup>-5</sup> kg/m-s

ตารางที่ 2 ค่าเงื่อนไขขอบเขตของพื้นที่ทางเข้าอากาศและทางออกอากาศ

Inlet air boundary condition	
Flow rate	2.85885 m <sup>3</sup> /s
Outlet air boundary condition	
Pressure	0 Pa

### 3. การปรับปรุง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่ง

สร้างแบบจำลองการปรับปรุง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่ง ด้วยการติดตั้งแผงกระจายลมเข้าไปด้านบนของทางเข้าอากาศ ในแบบจำลอง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่งแบบเดิม ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ และค่าเงื่อนไขขอบเขตของพื้นที่ทางเข้าอากาศและทางออกอากาศซึ่งที่ทุกการทดลองจำลองพฤติกรรมกรไหลของอากาศ และนำผลการบันทึกอัตราการไหลของอากาศทางออกมาเปรียบเทียบกับระหว่างแบบจำลองเดิมและแบบปรับปรุง



รูปที่ 5 แบบจำลอง Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่งแบบปรับปรุง

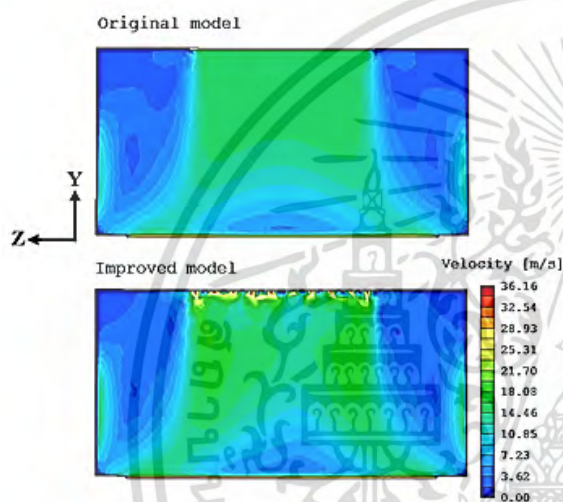
### 4. ผลการคำนวณและการอภิปราย

#### 4.1 ผลการจำลองคอนทัวร์ของความเร็วลม

จากการคำนวณแบบจำลองการไหลของอากาศภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งกึ่งแบบเดิมและแบบปรับปรุง นำผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณแบบจำลองมาแสดงในรูปแบบของคอนทัวร์ของความเร็วลม (Contour velocity) ดังแสดงในรูปที่ 6 แสดงคอนทัวร์ของความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลม ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความยาว Air Chamber ใน ระบาย y-z ที่ตำแหน่ง  $x = 560$  mm พบว่าการไหลของ อากาศเย็นภายใน Air Chamber เกิดการไหลของอากาศ แบบหมุนวนทั้งแบบจำลองแบบเดิมและแบบปรับปรุง แต่ จะเห็นได้ว่าในคอนทัวร์ของความเร็วมของแบบจำลอง แบบปรับปรุง เกิดการไหลของอากาศแบบหมุนวนเล็กน้อย ส่งผลทำให้อัตราการไหลของอากาศทางออกอากาศไปยัง บริเวณพื้นที่แช่แข็ง มีอัตราการไหลออกของอากาศเย็นที่มี ความสม่ำเสมอกันตลอดหน้าตัดของสายพานมากขึ้น



รูปที่ 6 คอนทัวร์ของความเร็วมของแบบจำลองการไหล อากาศแบบเดิมและแบบปรับปรุง

#### 4.2 อัตราการไหลของอากาศที่ทางออกอากาศของ Air Chamber

การบันทึกผลลัพธ์ค่าอัตราการไหลของอากาศทั้ง 250 พื้นที่ทางออกอากาศของ Air Chamber ที่แต่ละพื้นที่มี พื้นที่ทางออกเท่ากัน ผลลัพธ์การคำนวณที่ได้จาก แบบจำลองการไหลของอากาศเย็นภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งแบบเดิมและแบบปรับปรุง ถูก นำเสนอด้วยค่าของผลรวมของอัตราการไหลของอากาศ (Total air-flow rate at the outlet) ที่ทางออกอากาศในทุก พื้นที่แถว a ตั้งแต่ทางออกหลักที่ 1 ถึงหลักที่ 25 เรื่อยมา จนกระทั่งพื้นที่แถว j ตั้งแต่ทางออกหลักที่ 1 ถึงหลักที่ 25 พบว่าผลรวมอัตราการไหลของอากาศที่ทางออกอากาศ ภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่แข็งแบบปรับปรุง

ดีกว่าแบบเดิม จากการเปรียบเทียบค่าของส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (Standard Deviation, SD) ทั้งนี้ทำให้แบบจำลอง แบบปรับปรุงมีการไหลออกของอากาศเย็นที่มีความ สม่ำเสมอกันตลอดหน้าตัดของสายพานมากกว่า แบบจำลองแบบเดิม ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลรวมอัตราการไหลของอากาศที่ทางออก อากาศในทุกพื้นที่แถว a ถึงพื้นที่แถว j

Total air-flow rate at the outlet ( $\text{m}^3/\text{s}$ )		
Surface	Original model	Improved model
a	0.26219	0.26448
b	0.27386	0.27666
c	0.28919	0.28921
d	0.29938	0.29691
e	0.30445	0.30139
f	0.30452	0.30176
g	0.29964	0.29779
h	0.28944	0.28957
i	0.27414	0.27656
j	0.26204	0.26452
<b>SD</b>	<b>0.01666</b>	<b>0.01440</b>

#### 5. สรุป

ผลกระทบเชิงลบจากการไหลของอากาศแบบหมุนวน ไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงให้เกิดขึ้นได้ ทั้งในแบบจำลอง การไหลของอากาศเย็นภายใน Air Chamber ของเครื่องแช่ แข็งแบบเดิมและแบบปรับปรุง อย่างไรก็ตามใน แบบจำลองการไหลแบบปรับปรุง ด้วยการติดตั้งแผง กระจายลมเข้าไปด้านบนทางเข้าอากาศ ให้ผลการไหลออก ของอากาศเย็นที่มีความสม่ำเสมอกันตลอดหน้าตัดของ สายพานเพิ่มขึ้น 13.57% เมื่อเทียบจากส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานของผลรวมอัตราการไหลของอากาศที่ทางออก อากาศจากแบบจำลองเดิม 0.01666 เป็น 0.01440

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม (NSTDA University Industry Research Collaboration) โดยฝ่ายพัฒนาบัณฑิตและนักวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้การสนับสนุนในผลงานวิจัย และขอขอบคุณบริษัท มายคาวา (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมถึงให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอด

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Luis A., et al, "Cryogenic and air blast freezing techniques and their effect on the quality of catfish fillets," *LWT-Food Science and Technology*, Vol. 54, pp.377-382, 2013.
- [2] Patrick Dempsey, Pradeep Bansal, "The art of air blast freezing: Design and efficiency considerations," *Applied Thermal Engineering*, Vol.41, pp.71-83, 2012.
- [3] Lilian Daniel Kaale, Trygve Magne Eikevik, Turid Rustad, Kjell Kolsaker, "Superchilling of food: A review," *Journal of Food Engineering*, Vol.107, pp. 141-146, 2011.
- [4] Lilian D., Trygve M., Tora B., Elin K., Tom S., "The effect of cooling rates on the ice crystal growth in air-packed salmon fillets during superchilling and superchilled storage," *International journal of refrigeration*, Vol.36, pp.110-119, 2013.
- [5] Lilian Daniel Kaale, et al, "Ice crystal development in pre-rigor Atlantic salmon fillets during superchilling process and following storage," *Food Control*, Vol. 31, pp.491-498, 2013.
- [6] R.M. Khadatkar, S. Kumar, S.C. Pattanayak, "Cryofreezing and cryofreezer," *Cryogenics*, Vol.44, pp.661-678, 2004.
- [7] Abdullah A., et al, "Freezing of fresh Barhi dates for quality preservation during frozen storage," *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้