

เครื่องแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนแบบ โครโอจีนิกส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

ธนากร วงศ์วัฒนาเสถียร¹⁾ และ ธวัชชัย จาร่างพิทยาก²⁾

¹⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²⁾ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

การแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว เป็นวิธีการแช่แข็งโดยการฉีดคาร์บอนได-ออกไซด์เหลวลงบนผลิตภัณฑ์ให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว โดยอาศัยคุณสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่มี อุณหภูมิจุดเดือด -78°C การวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนแบบโครโอจีนิกส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว โดยห้องแช่แข็งมีลักษณะเป็นอุโมงค์หัวด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม กว้าง 0.5 เมตร สูง 0.45 เมตร และยาว 1.2 เมตร และพุ่มฉนวนด้วยโฟมหนา 0.1 เมตร ข้าวโพดฝักอ่อนถูกลำเลียงเข้าห้องแช่แข็งด้วยสายพานลำเลียงแบบตาข่ายอย่างต่อเนื่อง คาร์บอนไดออกไซด์เหลวจะถูกฉีดด้วยหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.001 เมตร จำนวน 4 หัว สูงจากข้าวโพดฝักอ่อน 0.12 เมตร จากการทดสอบ เครื่องแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนแบบโครโอจีนิกส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลวสามารถลดอุณหภูมิของข้าวโพดฝักอ่อนให้มีอุณหภูมิ -18°C หรือต่ำกว่าในเวลาที่รวดเร็วและที่อุณหภูมิดังกล่าวจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายไม่สามารถเจริญเติบโตได้ การแช่แข็งแบบนี้จัดว่าเป็นการแช่แข็งแบบเร็ว ซึ่งทำให้คุณลักษณะของข้าวโพดฝักอ่อนมีการเปลี่ยนแปลงน้อย เมื่อเทียบกับการแช่แข็งแบบช้าจากการทดลองพบว่า ข้าวโพดฝักอ่อนที่ผ่านการแช่แข็งแบบช้าเมื่อนำมาทำละลายจะมีสีเข้มกว่าการแช่แข็งแบบโครโอจีนิกส์ สำหรับเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งที่คำนวณได้จากสมการของ Plank มีดังนี้ ข้าวโพดฝักอ่อนเกรด $S = 173$ วินาที เกรด $M = 198$ วินาที และเกรด $L = 270$ วินาที และจากการทดลองมีดังนี้ เกรด $S = 203$ วินาที เกรด $M = 235$ วินาที และเกรด $L = 295$ วินาที จากการศึกษาพบว่า เวลาที่ใช้ในการแช่แข็งที่ได้จากการคำนวณและจากการทดลองมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าสมการสำหรับคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งของ Plank สามารถนำมาใช้ในการทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งข้าวโพดฝัก

อ่อนได้ อย่างไรก็ตามการศึกษานี้อยู่ในขั้นเริ่มต้นเพื่อออกแบบและสร้างเครื่อง ดันแบบ และต้องการการศึกษาและพัฒนากระบวนการฉีดรวมถึงหัวฉีดเพื่อควบคุมให้มีการฉีดพ่นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวในปริมาณที่เหมาะสมเท่าที่ผลิตภัณฑ์ต้องการใช้ในการลดอุณหภูมิให้ได้ -18°C เนื่องจากขณะทำการทดลอง พบว่ามีการสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้นทุนในการผลิตยังสูงอยู่

Cryogenics Baby Corn Freezer by Liquid Carbon-dioxide

Tanakorn wongwuttanasatian¹⁾ and Tawatchai Jaruwongwittaya²⁾

¹⁾ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
Khon Kaen University

²⁾ Master Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
Khon Kaen University

Abstract

Cryogenics freezing by liquid carbon-dioxide (CO_2) is a freezing method in which liquid CO_2 (Boiling point = $-78.5^\circ C$ at 1 atm) is sprayed on a product and is able to freeze the product in a short time. This research is to design and construct a freezer using cryogenic process. The tunnel was a $0.5\text{ m} \times 0.45\text{ m}$ rectangular duct, and 1.2 m in length and insulated by foam-like material of 0.1 m thickness. Baby corns used as a frozen product, were fed continuously by mesh conveyer and laid evenly on the floor in one slab without overlapping. Liquid CO_2 was sprayed over the baby corns from four nozzles above then at 0.12 m in height. The nozzle have 1 mm in diameter. In a short time, this cryogenic freezer could reduce the baby corn's temperature less or equal to $-18^\circ C$ at which microorganism could not grow under this condition. In general, a quick freezing method will change the characteristics of the product less than slow freezing method. For this research, after thawing process, the baby corn's color frozen by slow freezing method was darker than those frozen by cryogenic freezing. The freezing times of size S,M,L, calculated by Plank's equation were 173,198,270 seconds respectively and those measured from the experiments were 205,235,295 seconds respectively. Consequently the Plank's equation can be used to predict the freezing time of the baby corns. This study is, however, in an initial state of development. It only aims to design and construct the prototype machine. Further study is required for the study and development of spraying system and nozzle. During this experimental study, it was found that large amount of liquid CO_2 is lost to the surroundings due to liquid CO_2 oversupply which was uncontrollable by the current prototyping machine resulting this research uneconomic. As a result, the spraying control system is needed to be systematically designed in order to supply suitable amount of liquid CO_2 to the products.

บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีประชากรประกอบอาชีพทางด้านเกษตรกรรมเป็นส่วนใหญ่ ในแต่ละปีมีผลผลิตที่ได้จากการเกษตรเป็นจำนวนมาก ทั้งจากพืชและสัตว์ ซึ่งข้าวโพดฝักอ่อนก็เป็นผลผลิตที่สามารถทำรายได้ให้กับเกษตรกรและเป็นสินค้าส่งออกที่ทำรายได้ให้กับประเทศเป็นจำนวนมากในแต่ละปี และมีแนวโน้มในการส่งออกที่สูงขึ้นในอนาคต แต่ข้าวโพดฝักอ่อนได้จากการเกษตรนั้นมีจุดอ่อนคือหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้ว ถ้าจำหน่ายหรือบริโภคไม่หมดก็จะเกิดการเน่าเสีย อีกทั้งถ้ามีการเก็บรักษาข้าวโพดฝักอ่อนไว้ด้วยวิธีที่ไม่เหมาะสม จะทำให้รักษาสภาพความสดไว้ได้ในระยะเวลาอันสั้น และคุณภาพก็จะแตกต่างจากข้าวโพดฝักอ่อนที่สดและใหม่ หรือก่อให้เกิดการเน่าเสีย จึงไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภคและประเทศที่นำเข้า ส่งผลให้เกษตรกรและประเทศสูญเสียผลประโยชน์ที่ควรได้ไปเป็นจำนวนมากในแต่ละปี จึงต้องมีการเก็บรักษาที่ถูกต้องวิธี เพื่อที่จะใช้ประโยชน์จากข้าวโพดฝักอ่อนให้คุ้มค่าทั้งทางด้านการบริโภคและการส่งออกสินค้าเกษตรกรรมประเภทของสดและผลิตภัณฑ์แช่แข็ง การวิจัยนี้สนใจวิธีการแช่แข็งแบบโครโอจีนิกส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ซึ่งเป็นวิธีการเก็บรักษาผลผลิตที่มี ประสิทธิภาพสูง สามารถทำให้ข้าวโพดฝักอ่อนแช่แข็งได้ภายในเวลาที่รวดเร็ว เมื่อเทียบกับการแช่แข็งด้วยวิธีอื่น ซึ่งผลจากการแช่แข็งอย่างรวดเร็วนี้เป็นผลให้ข้าวโพดฝักอ่อนมีรูปร่าง สีสรรชาติ ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และทำให้อายุในการเก็บรักษาสภาพความสดของข้าวโพดฝักอ่อนยาวนาน เนื่องจากน้ำที่เป็นส่วนประกอบของข้าวโพดฝักอ่อนนั้นมีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง เป็นผลให้จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ภายในข้าวโพดฝักอ่อนหยุดการเจริญเติบโตทันทีทันใด เป็นเหตุให้ไม่สามารถทำหน้าที่ในการย่อยสลายได้ ข้าวโพดฝักอ่อนจึงไม่เกิดการเน่าเสีย วิธีการแช่แข็งดังกล่าวเป็นการช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะใกล้เคียงของสด และน่าจะเป็นส่วนช่วยให้มีการจำหน่ายที่มากขึ้น

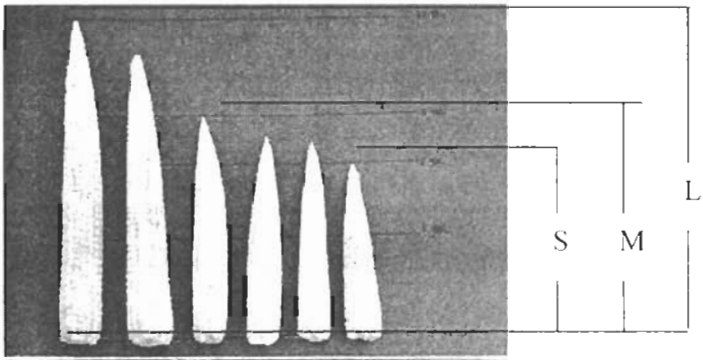
ทฤษฎีและหลักการ

ข้าวโพดฝักอ่อน เป็นผักอุตสาหกรรมและส่งออกที่สำคัญของประเทศ การส่งออกมีทั้งการแปรรูปบรรจุกระป๋อง การส่งออกฝักสด และการแช่แข็ง ซึ่งมีแนวโน้มการตลาดที่สดใส ในปี 2534 ประเทศไทยสามารถทำรายได้จากข้าวโพดฝักอ่อน เป็นมูลค่ามากกว่าพันล้านบาท สำหรับเกษตรกรแล้ว ข้าวโพดฝักอ่อน นับเป็นผักที่นิยมปลูก เนื่องจากมีเทคโนโลยีการผลิตที่

ไม่ยุ่งยาก มีระบบตลาดที่สะดวกและมั่นคงพอสมควร ไม่ต้องใช้สารเคมีอันตราย และเป็นพืชที่มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้น โดยมีอายุตั้งแต่วันปลูกถึงวันเก็บเกี่ยวประมาณ 45-50 วัน และมีช่วงระยะเวลาเก็บเกี่ยวเพียง 7-10 วัน เกษตรกรสามารถปลูกได้ปีละ 4-5 ครั้ง

เพื่อจะผลิตข้าวโพดฝักอ่อนที่มีคุณภาพดี เกษตรกรจะต้องรู้มาตรฐานและคุณภาพของข้าวโพดฝักอ่อนที่ผู้ซื้อต้องการ ขนาดของข้าวโพดฝักอ่อนเพื่อส่งโรงงานอุตสาหกรรมจำแนกเป็น 3 เกรด คือ

- 1) ขนาดความยาว 9-13 ซม. (L)
- 2) ขนาดความยาว 7-9 ซม. (M)
- 3) ขนาดความยาว 4-7 ซม. (S)



รูปที่ 1 แสดงขนาดมาตรฐานของข้าวโพดฝักอ่อน

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบของข้าวโพดฝักอ่อน (จากตัวอย่างข้าวโพดฝักอ่อน 100 กรัม)

ส่วนประกอบ	น้ำ	โปรตีน	คาร์โบไฮเดรต	ไขมัน	เถ้า
ปริมาณ (กรัม)	89.1	1.9	8.2	0.2	0.6

การแช่แข็ง

หลักการพื้นฐานของการแช่แข็งคือ การลดอุณหภูมิของอาหารหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้ต่ำลงจนถึงระดับที่สิ่งมีชีวิตไม่สามารถจะดำเนินปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่อไปได้ตามปกติจุลินทรีย์ที่มีปะปนอยู่ในอาหารนั้นจะหยุดการเจริญเติบโตและหยุดกระบวนการทางเมแทบอลิซึมลง แต่เนื้อเยื่อของอาหารจะยังคงลักษณะอยู่ได้ โดยทั่วไปมักจะเป็นที่อุณหภูมิ -18°C หรือต่ำกว่า ซึ่งหลักสำคัญคือ การเปลี่ยนสถานะของน้ำที่มีอยู่ในอาหารจากของเหลวให้เป็นของแข็ง เพื่อมิให้น้ำนั้นสามารถทำหน้าที่ต่างๆ ในปฏิกิริยาเคมี และไม่เป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ที่ปะปนมากับอาหารได้ แต่การทำให้อุณหภูมิต่ำลงมากเพียงใดก็ไม่สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ให้หมดไปได้

การแช่แข็งแบบไครโอเจนิค (Cryogenic Freezing)

คำว่า Cryogenic มาจากภาษากรีก 2 คำคือ kryos ซึ่งแปลว่าเย็นกับคำว่า genes ซึ่งแปลว่ามีชีวิต สำหรับความหมายของคำว่า Cryogenic นั้นได้มีผู้กำหนดไว้ 3 แนวทางด้วยกันคือ

1. หมายถึง งานทางวิทยาศาสตร์ที่ทำให้อุณหภูมิลดต่ำลงมาก ๆ ตั้งแต่ -193°C จนถึง -273°C หรือต่ำกว่า ซึ่งเป็นงานที่วิศวกรสนใจที่จะพยายามสร้างสภาวะดังกล่าวให้เกิดขึ้น
2. หมายถึง งานทางวิทยาศาสตร์ที่ทำให้อุณหภูมิลดต่ำลงมาก ๆ ตามข้อ 1 และรักษาระดับของอุณหภูมินั้นให้คงอยู่ได้ ตลอดจนถึงการศึกษาถึงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น ณ ช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ซึ่งงานนี้จะเป็นที่สนใจของนักวิทยาศาสตร์ทั้งหลาย
3. หมายถึง งานทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของสารต่างๆ ที่ระดับอุณหภูมิต่ำกว่า -75°C ซึ่งเป็นงานที่นักวิทยาศาสตร์การอาหารสนใจที่จะทราบและศึกษา

การแช่แข็งแบบไครโอเจนิคส์เป็นการแช่แข็งที่มีอัตราเร็วสูงสุดจัดอยู่ในขั้น Ultra rapid freezing rate ทำได้โดยการนำเอาสิ่งที่ต้องการแช่แข็งโดยไม่มีการห่อหุ้มหรืออาจจะห่อหุ้มด้วยวัสดุบางชนิด แล้วฉีดพ่นสารทำความเย็นที่เรียกว่า Cryogen เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ แล้วดึงความร้อนออกจากสิ่งที่ต้องการเพื่อให้มีการแข็งตัว ซึ่งวิธีนี้แตกต่างจากวิธีการแช่แข็งแบบจุ่มที่สารทำความเย็นไม่เปลี่ยนสถานะ สาร Cryogen ที่นิยมใช้กับอาหารคือ

ไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen – LN), คาร์บอนไดออกไซด์เหลว (Liquid carbon dioxide – LCD), คาร์บอนไดออกไซด์แข็ง (Solid carbon dioxide – SCD), ไนตรัสออกไซด์ (Nitrous oxide) และฟลูออโรคาร์บอนเหลว (Liquid fluorocarbon) ในระดับที่มีความบริสุทธิ์ตามมาตรฐานที่นำมาบริโภคได้เช่น ไดคลอโรไดฟลูออโรมีเทน (Dichlorodifluoro-methane) หรือเรียกกันทั่วไปว่า R-12 มีสูตรทางเคมีว่า CCl_2F_2

คาร์บอนไดออกไซด์เหลว (Liquid Carbon dioxide, CO_2)

คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) จัดเป็นโครโอเจนที่ใช้กับอาหารได้อย่างปลอดภัยที่สุด CO_2 ได้จากการเผาไหม้ก๊าซมีเทน น้ำมันเชื้อเพลิง หรือก๊าซจากโรงกลั่น หรือเป็นผลพลอยได้จากการผลิตแอมโมเนียและการผลิตแอลกอฮอล์จากการหมัก อาจได้จากแหล่งก๊าซธรรมชาติได้อีกได้ คาร์บอนไดออกไซด์เหลวนั้นจะเก็บรักษาและขนส่งในถังที่มีฉนวนป้องกันความร้อนภายใต้ความดัน 8-25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีอุณหภูมิ -12°C ถึง -45°C เมื่อคาร์บอนไดออกไซด์เหลวระเหยจะดูดความร้อนแฝงเพื่อการเปลี่ยนสถานะ ทำให้เกิดความเย็นขึ้น วิธีการแช่แข็งโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวทำได้โดยการฉีดของเหลวลงไปสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งตัว สำหรับเวลาในการแช่แข็งพบว่า ในการแช่แข็งแฮมเบอร์เกอร์ ใช้เวลา 7 นาที และการแช่แข็งสเต็กในถุงพลาสติกใช้เวลา 12 นาที การแช่แข็งโดยคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจะใช้เวลาในการแช่แข็งนานกว่าไนโตรเจน แต่คาร์บอนไดออกไซด์มีราคาถูกกว่าไนโตรเจนมาก

ตารางที่ 2 คุณสมบัติโดยทั่วไปของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

Properties		SI unit	Eng unit
Chemical Symbol		CO_2	CO_2
Liquid phase (at boiling point)	Specific gravity (Water = 1)	1.18 (at 1.013 bar)	1.18 (at 1 atm)
Boiling point	Temperature Latent heat of vaporization Specific gravity (Air = 1)	-78.5°C (at 1.013 bar) 571.3 kJ/kg 1.539	-109.3°F (at 1 atm) 245.5 BTU/lb 1.524
Gaseous phase	Specific heat capacity Density	0.85 kJ/kg $^\circ\text{C}$ 1.9769 kg/m 3	0.199 BTU/lb $^\circ\text{F}$ 0.12341 lb/ft 3
Triple point	Temperature Pressure	-56.6°C 517.3 kPa abs	-69.9°F 75.1 psia
Critical point	Temperature Pressure	31.1°C 7382 kPa abs	87.9°F 1070.6 psia
Molar mass		44.01	44.01

การคำนวณและการออกแบบ

ในการออกแบบและสร้างเครื่องแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนแบบโครโอจีนิกส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ในขั้นต้นจะต้องทราบถึงสมบัติต่างๆ ของข้าวโพดฝักอ่อนคือ ความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน เอนทาลปี อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง และ เวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

ความหนาแน่น (Density), ρ

จากการศึกษาของ Choi & Okos [Choi, Y. and M.R. Okos., 1986] ได้ทำการทดลองหาความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ โดยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง -40°C ถึง 150°C โดยมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\rho = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}} \quad (1)$$

ซึ่งค่า ρ_i คือ ความหนาแน่นของส่วนประกอบต่างๆ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Protein : } \rho_P = 1,329.9 - 0.5184T \quad (2)$$

$$\text{Carbohydrate : } \rho_C = 1,599.1 - 0.31046T \quad (3)$$

$$\text{Fat : } \rho_F = 925.59 - 0.41757T \quad (4)$$

$$\text{Fiber : } \rho_{Fi} = 1,311.5 - 0.36589T \quad (5)$$

$$\text{Ash : } \rho_{As} = 12,423.8 - 0.28063T \quad (6)$$

$$\text{Water : } \rho_W = 997.18 + 3.1439 \times 10^{-3}T - 3.7574 \times 10^{-3}T^2 \quad (7)$$

$$\text{Ice : } \rho_I = 916.89 - 0.13071T \quad (8)$$

เมื่อ T = อุณหภูมิของข้าวโพดฝักอ่อน ($^{\circ}\text{C}$)

ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity), k

ค่าการนำความร้อนของผลิตภัณฑ์อาหารนั้นจะต้องคำนึงถึงส่วนประกอบของอาหารด้วยคือ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เส้นใย เถ้า และน้ำ ว่ามีค่าการนำความร้อนในแต่ละ

ละชนิดเท่าไร แล้วจึงนำมาคิดเป็นค่าการนำความร้อนของผลิตภัณฑ์อาหารนั้นๆ จากการศึกษาของ Choi & Okos [Choi, Y. and M.R. Okos., 1986] ได้ทำการทดลองหาการนำความร้อนของผลิตภัณฑ์โดยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง -40°C ถึง 150°C สำหรับ การไหลของของไหลตั้งฉากกับผลิตภัณฑ์โดยมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$k = \frac{1}{\sum \frac{x_i^v}{k_i}} \quad (9)$$

ซึ่งค่า k_i คือ ค่าการนำความร้อนของส่วนประกอบต่าง ๆ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Protein : } k_p = 0.17881 + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2 \quad (10)$$

$$\text{Carbohydrate : } k_c = 0.20141 + 1.3874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2 \quad (11)$$

$$\text{Fat : } k_f = 0.18071 - 2.7604 \times 10^{-3}T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2 \quad (12)$$

$$\text{Fiber : } k_{fi} = 0.18331 + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2 \quad (13)$$

$$\text{Ash : } k_{As} = 0.32962 + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2 \quad (14)$$

$$\text{Water : } k_w = 0.57109 + 1.7625 \times 10^{-3}T - 6.7036 \times 10^{-6}T^2 \quad (15)$$

$$\text{Ice : } k_i = 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3}T - 1.0154 \times 10^{-4}T^2 \quad (16)$$

และ x_i^v สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$x_i^v = \frac{\frac{x_i}{\rho_i}}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}} \quad (17)$$

สำหรับ x_w และ x_i หาได้จากสมการ

$$x_i = (x_{wa} - 0.4x_p) \left[1 - \frac{T_f}{T} \right] \quad (18)$$

$$x_w = x_{wa} - x_i \quad (19)$$

เมื่อ

- x_i^v = สัดส่วนโดยปริมาตรของส่วนประกอบต่าง ๆ ของข้าวโพดฝักอ่อน
 x_{wa} = สัดส่วนโดยมวลของน้ำก่อนการแข็งตัว (%)
 x_p = สัดส่วนโดยมวลของโปรตีน (%)
 x_w = สัดส่วนโดยมวลของน้ำหลังการแข็งตัว (%)
 x_f = สัดส่วนโดยมวลของน้ำที่แข็งตัว (%)
 T = อุณหภูมิของข้าวโพดฝักอ่อน ($^{\circ}\text{C}$)
 T_f = อุณหภูมิจุดเยือกแข็งของข้าวโพดฝักอ่อน ($^{\circ}\text{C}$)

เอนทาลปี (Enthalpy), H

การเปลี่ยนแปลงค่าเอนทาลปีสำหรับการแช่แข็งผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ นั้น จากการศึกษาของ Chen [Chen, C.S., 1985] ได้หาความสัมพันธ์ของค่าเอนทาลปีและอุณหภูมิโดยกำหนดอุณหภูมิอ้างอิงที่ -40°C ซึ่งมีค่าเอนทาลปีเป็นศูนย์ และได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Delta H = (h_A - h_B) \quad (20)$$

- 1) เอนทาลปีก่อนอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง (Enthalpy of unfrozen food), h_A คือ ค่าเอนทาลปีของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง สามารถหาได้จาก

$$h_A = h_f + (T - T_f)(4.19 - 2.3x_s - 0.628x_s^3) \quad (21)$$

- 2) เอนทาลปีที่อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง (Enthalpy of freezing point), h_f คือ ค่าเอนทาลปีของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง สามารถหาได้จาก

$$h_f = (T_f - T_r) \left(1.55 + 1.26x_s + \frac{(x_w - 0.4x_p)L_o T_f}{T_r T_f} \right) \quad (22)$$

- 3) เอนทาลปีหลังอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง (Enthalpy of frozen food), h_B คือ ค่าเอนทาลปีของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง

สามารถหาได้จาก

$$h_B = (T - T_r) \left(1.55 + 1.26x_s + \frac{(x_w - 0.4x_p)L_oT_f}{T_rT} \right) \quad (23)$$

เมื่อ

ΔH = ค่าเอนทาลปีที่แตกต่างกันระหว่างก่อนและหลังอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง, kJ/kg

h_A = ค่าเอนทาลปีก่อนอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง kJ/kg

h_B = ค่าเอนทาลปีหลังอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง

ρ = ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์, kg/m³

h_f = ค่าเอนทาลปีก่อนอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง kJ/kg

T = อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อาหาร (°C)

T_f = อุณหภูมิจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์อาหาร (°C)

T_r = อุณหภูมิอ้างอิง (-40°C)

x_s = สัดส่วนโดยมวลของผลิตภัณฑ์อาหารที่ไม่ใช่ น้ำ (%)

L_o = ค่าความร้อนแฝงในการละลายของน้ำที่ 273.2 K = 333.6 kJ/kg

4) อุณหภูมิจุดเยือกแข็ง (Freezing point), T_f ,

Q.T.Pham. [Q.T.Pham., 1996] ได้ทำการศึกษาเรื่องการหาค่า

คุณสมบัติทางความร้อนและเวลาในการแช่แข็งของอาหารจากข้อมูลต่างๆ

โดยใช้ตัวอย่างอาหารจำนวน 43 ชนิด ทำการทดลองและคำนวณหาค่าต่าง

ๆ ให้อยู่ภายใต้ขอบเขตอุณหภูมิ -40°C ถึง 40°C ซึ่งสมการที่ใช้ในการ

คำนวณหาจุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์มีดังนี้

$$T_f = -4.66 \frac{x_o}{x_{wa}} - 46.4 \frac{x_{As}}{x_{wa}} \quad (24)$$

เมื่อ

x_{wa} = สัดส่วนโดยมวลของน้ำก่อนการแข็งตัว (%)

x_o = สัดส่วนโดยมวลของส่วนประกอบอื่นๆ

x_{As} = สัดส่วนโดยมวลของเถ้า (%)

- 5) เวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง จากการทดลองของ Plank ได้กำหนดให้ผลิตภัณฑ์มีรูปทรงทางคณิตศาสตร์ แล้วสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$t = \frac{\rho \Delta H}{(T - T_\infty)} \left(P \frac{D}{2h} + R \frac{D^2}{8k} \right) \quad (25)$$

เมื่อ

ΔH = ค่าเอนทาลปีที่แตกต่างกันระหว่างก่อนและหลังอุณหภูมิจุดเยือกแข็ง, kJ/kg

ρ = ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์, kg/m³

T = อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ก่อนการแช่แข็ง (°C)

T_∞ = อุณหภูมิหลังการแช่แข็ง (°C)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์ (m)

h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหล, (W/m².K)

k = ค่าการนำความร้อนผลิตภัณฑ์ (W/mK)

P และ R คือค่าคงที่ในกรณีที่มีผลิตภัณฑ์มีรูปทรงต่างๆ $P=1/2$ และ $R=1/8$ สำหรับรูปทรงสี่เหลี่ยม $P=1/4$ และ $R=1/16$ สำหรับรูปทรงกระบอก $P=1/6$ และ $R=1/24$ สำหรับรูปทรงกลม

จากการคำนวณหาค่าต่างดังรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วนั้น ปรากฏว่าเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตรคือ 4 นาที 30 วินาที ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนแบบโครโอจีนิกส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่เป็นต้นแบบ โดยมีส่วนประกอบหลัก ดังต่อไปนี้

ห้องสำหรับแช่แข็ง

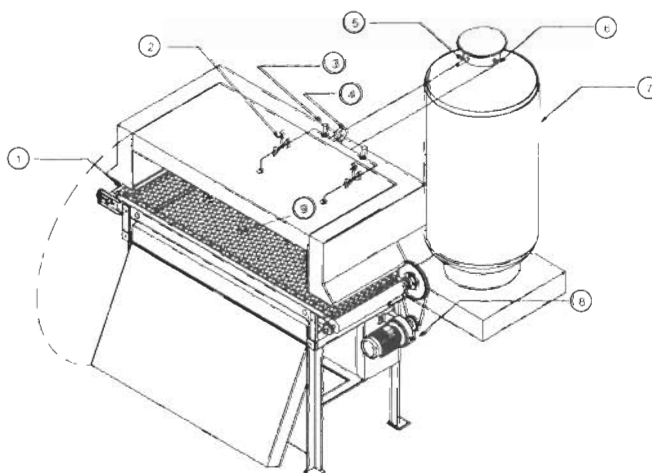
ห้องสำหรับแช่แข็งได้ทำการออกแบบให้มีลักษณะเป็นอุโมงค์ ขนาด 0.5×0.45 เมตร และยาว 1.2 เมตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel, AISI 304) หนา 0.0015 เมตร โดยมีอุณหภูมิใช้งานภายใน -78.5°C จึงต้องมีการบุฉนวนด้วยโฟมหนา 0.01 เมตร แล้วปิดทับด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งห้องแช่แข็งนั้นได้ทำการออกแบบให้มีประตูเปิดเพื่อทำความสะอาดและบริการที่ด้านหน้า

สายพานลำเลียง

จากขนาดของห้องสำหรับแช่แข็งจึงกำหนดให้สายพานลำเลียงเป็นแบบตาข่ายถัก มีความกว้าง 0.45 เมตร และยาวไป-กลับ 3 เมตร ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดที่สัมผัสกับอาหารได้ (stainless steel, AISI 316L) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.001 เมตร

เกียร์มอเตอร์

เนื่องจากความยาวของห้องสำหรับแช่แข็งเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ จึงเลือกมอเตอร์ที่สามารถทดรอบของมอเตอร์ได้ และได้ทำการเลือกจากท้องตลาดซึ่งมีขนาดเล็กที่สุดคือ ขนาด 0.09 kW ความเร็วรอบ 1,250 รอบต่อนาที แรงเคลื่อนไฟฟ้า 380 โวลต์ โดยมีอัตราทด 1: 160 รอบ ทำให้ความเร็วรอบลดลงเหลือ 8 รอบต่อนาที



รูปที่ 2 เครื่องแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนแบบไครโอจีนิกส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

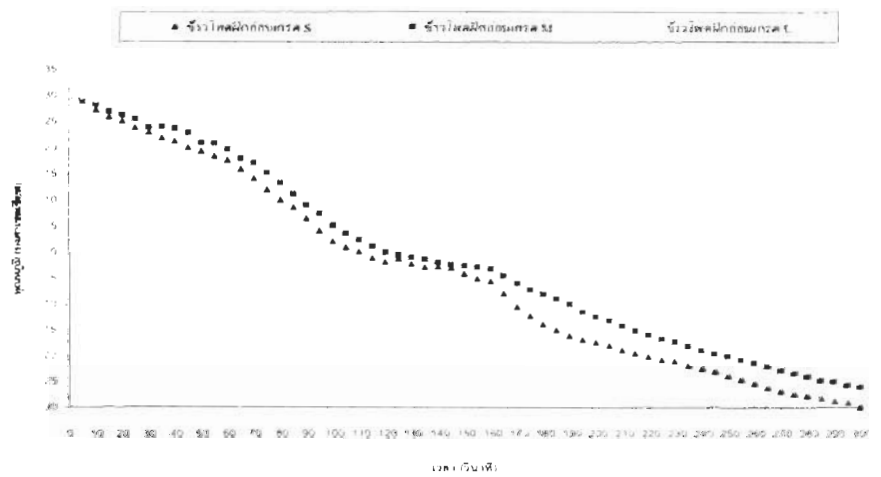
- | | |
|--------------------------|-----------------------------------|
| 1. สายพานลำเลียง | 6. วาล์วควบคุมตัวหน่วงเหลว |
| 2. โซลีนอยด์วาล์ว | 7. ถังบรรจุคาร์บอนไดออกไซด์เหลว |
| 3. วาล์วควบคุมความดันสูง | 8. มอเตอร์ขับเคลื่อนสายพานลำเลียง |
| 4. เกจวัดความดัน | 9. หัวฉีด |
| 5. วาล์วควบคุมด้านไอ | |

ผลการทดลอง

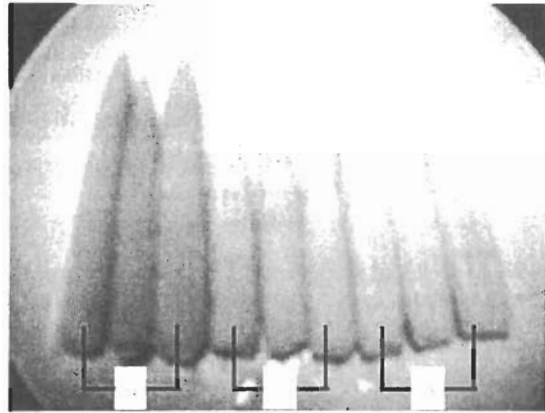
จากการทดลองสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนด้วยเครื่องแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนแบบโครโอจินิกส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ของข้าวโพดฝักอ่อนในแต่ละเกรด ซึ่งปรากฏว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 3 และเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของข้าวโพดฝักอ่อน คือถ้าข้าวโพดฝักอ่อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยก็ใช้เวลาสั้น และถ้าข้าวโพดฝักอ่อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากก็ใช้เวลาตามไปด้วย ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งจนกระทั่ง ข้าวโพดฝักอ่อนในแต่ละเกรดมีอุณหภูมิ -18°C ที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณด้วยสมการของ Plank แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งจากการคำนวณกับการทดลอง

เกรดของข้าวโพดฝักอ่อน	เวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง (วินาที)	
	จากการคำนวณ	จากการทดลอง
S	173	205
M	198	235
L	270	295



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อน



รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลการแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนด้วยวิธีการต่าง ๆ

1. ข้าวโพดฝักอ่อนที่ได้จากการละลายเพื่อคืนสภาพหลังการแช่แข็งแบบช้า
2. ข้าวโพดฝักอ่อนที่ได้จากการละลายเพื่อคืนสภาพหลังการแช่แข็งแบบเร็ว
3. ข้าวโพดฝักอ่อนก่อนการแช่แข็ง

จากตารางแสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าต่ำกว่าเวลาที่ได้จากการทดลองเนื่องจากสมการที่ใช้ได้ตั้งสมมุติฐานว่าการถ่ายเทความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์จากใจกลางสู่ผิวของผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอโดยรอบ ซึ่งในการทดลองด้วยเครื่องต้นแบบนั้นข้าวโพดฝักอ่อนจะสัมผัสกับคาร์บอนไดออกไซด์เหลวเพียงด้านเดียวทำให้ต้องใช้เวลาในการถ่ายเทความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ (เวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง) นานกว่าแต่ผลที่ได้นั้นจะเห็นว่ามีขนาดต่างกันเพียงเล็กน้อยจึงสามารถสรุปได้ว่าสมการสำหรับคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งของ Plank สามารถนำมาทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนได้ และทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะของข้าวโพดฝักอ่อนที่ได้จากการละลายเพื่อคืนสภาพ หลังผ่านการแช่แข็งด้วยเครื่องแช่แข็งทั้ง 2 แบบซึ่งแบบแรกเป็นการแช่แข็งชนิดเร็วคือ เครื่องแช่แข็งแบบโครโอจีนิกส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว โดยใช้เวลาในการแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนเกรด L คือ 4 นาที 30 วินาที ในการแช่แข็งให้ข้าวโพดฝักอ่อนมีอุณหภูมิ -18°C และแบบที่สอง เป็นการแช่แข็งแบบช้า โดยใช้เวลา 150 นาที ในการแช่แข็งให้ข้าวโพดฝักอ่อนมีอุณหภูมิ -18°C เช่นเดียวกัน แล้วนำมาทำการละลายเพื่อคืนสภาพซึ่งมี

ผลดังนี้คือข้าวโพดฝักอ่อนที่ผ่านการแช่แข็งแบบช้าจะมีสีที่เข้มกว่าข้าวโพดฝักอ่อนที่ได้จากการแช่แข็งแบบเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากเกิดรอยช้ำภายในเนื้อข้าวโพดฝักอ่อนมาก สาเหตุมาจากใช้เวลาในการแช่แข็งนานเกินไป เนื่องจากการเกิดผลึกของน้ำถ้าใช้เวลานานก็จะทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่ภายในเนื้อข้าวโพดฝักอ่อน จึงทำให้เกิดรอยช้ำดังกล่าว

สรุปผลการทดลอง

ในการแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนโดยเครื่องแช่แข็งแบบโครโอจีนิกส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้รับการออกแบบและสร้างขึ้น และการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. จากการทดลองพบว่า เครื่องแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนแบบโครโอจีนิกส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการออกแบบและสร้างนั้นมีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากมีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นต้นกำลังคือมอเตอร์ขับเคลื่อนสายพานลำเลียงเพียงตัวเดียว ดังนั้นค่าใช้จ่ายหลักของกระบวนการนี้คือปริมาณการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลว เมื่อเทียบกับเครื่องแช่แข็งที่ใช้วัฏจักรอัดไอในการทำความเย็นซึ่งมีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นต้นกำลังคือ มอเตอร์คอมเพรสเซอร์ มอเตอร์พัดลมระบายความร้อน และมอเตอร์พัดลมกระจายลมเย็นภายในห้องแช่แข็งอีกทั้งยังเป็นเครื่องแช่แข็งแบบช้า ซึ่งใช้เวลาในการแช่แข็งมากทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงมาก สำหรับปริมาณการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวในการแช่แข็งนั้นขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง กล่าวคือ ถ้าใช้เวลาในการแช่แข็งมาก ปริมาณการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวก็สูงขึ้นตาม และปัจจัยสำคัญที่ทำให้ใช้เวลาในการแช่แข็งมากคือ

1.1 อุณหภูมิของข้าวโพดฝักอ่อนก่อนแช่แข็ง

1.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของข้าวโพดฝักอ่อน

ปัจจัยสำคัญทั้งสองนั้นมีผลกับเวลาในการแช่แข็งโดยตรง ซึ่งในปัจจัยแรกเราสามารถแก้ไขได้โดยทำให้ข้าวโพดฝักอ่อนก่อนแช่แข็งมีอุณหภูมิต่ำลง จะทำให้เวลาที่ใช้ในการแช่แข็งลดลง ซึ่งจะต้องมีกระบวนการในการลดอุณหภูมิดังกล่าวด้วย สำหรับปัจจัยที่สองนั้นถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของข้าวโพดฝักอ่อนมากก็จะใช้เวลาในการแช่แข็งมากเช่นกัน แต่

ปัจจัยนี้ไม่สามารถแก้ไขได้เพราะข้าวโพดฝักอ่อนได้มีการกำหนดขนาดมาตรฐานที่เป็นที่ต้องการของโรงงานอุตสาหกรรมในการส่งออกข้าวโพดฝักอ่อนแช่แข็งตามความยาวของฝักข้าวโพด และโดยทั่วไปข้าวโพดฝักอ่อนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10-15 มิลลิเมตร จึงทำให้การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนั้นทำไม่ได้

2. เครื่องต้นแบบในการแช่แข็งแบบโครโอจีนิกส์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ได้จากการวิจัยนี้ มุ่งเน้นไปที่ผลผลิตที่ได้จากการเกษตรชนิดเดียวคือ ข้าวโพดฝักอ่อน และเมื่อได้ทำการทดลองปรากฏว่าสามารถลดอุณหภูมิของข้าวโพดฝักอ่อนได้ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยคือ -18°C โดยเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับเวลาที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะสูงกว่าประมาณ 18% ในทุกขนาด จึงสรุปได้ว่าสมการที่ใช้ในการคำนวณเวลาที่ใช้ในการแช่แข็ง (Plank's equation) สามารถนำมาทำนายเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งข้าวโพดฝักอ่อนด้วยเครื่องต้นแบบ และสามารถนำมาใช้กับผลผลิตที่ได้จากการเกษตรชนิดอื่น เพื่อทำการแช่แข็งให้มีอุณหภูมิ -18°C ได้เช่นกัน ซึ่งไม่ว่าจะเป็นผลผลิตใดก็ตามจะต้องมีการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการแช่แข็งก่อน เนื่องจากข้อจำกัดการเคลื่อนที่ของสายพานลำเลียงเริ่มจากผลผลิตเข้าจนกระทั่งออกจากเครื่องไม่เกิน 10 นาที

เอกสารอ้างอิง

- Choi, Y. and M.R. Okos, 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of food. In **Food Engineering and Process Applications**. 1986, 1: 93-101.
- Chen, C.S., 1985. Thermodynamic analysis of the freezing and thawing of food. **Journal of Food Science**. 1985, 50: 1158.
- Q.T.Pham, 1996. Prediction of Calorimetric Properties and Freezing Time of Food from Composition Data. **Journal of Food Engineering**. 1996, 30: 95 – 107.