บทที่ 3

กระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิก (Electric resistance heating of foods : Ohmic heating)

บทนำ

ในปัจจุบันมีการผลิตอาหารพร้อมบริโภคชนิดต่างๆ มากมาย โดยอาหารชนิดที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ได้แก่อาหารที่ทำให้สุกและแช่เย็น (cooked – chilled) ซึ่งให้ความสะดวกสบายแก่ผู้บริโภค รวมทั้งอาหารที่ผลิตขึ้นนี้มีคุณภาพสูงกว่าอาหารแช่เยือกแข็งและอาหารบรรจุกระป๋องที่ผ่านกระบวนการแปรรูปโดยใช้ความร้อนแบบดั้งเดิม (traditional/conventional heat processing) อย่างไรก็ตามอาหารที่ทำให้สุกและแช่เย็นนี้มีอายุการเก็บรักษาที่จำกัด เนื่องจากยังคงมีจุลินทรีย์ปนเปื้อน ซึ่งจะต้องยับยั้งการเจริญโดยการนำไปแช่เย็น (Skudder, 1993) ถึงแม้ว่าการสเตอริไลส์อาหารบรรจุกระป๋อง จะทำให้สามารถเก็บรักษาอาหารได้ที่อุณหภูมิปกติ (ambient temperature) หรืออุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลานาน แต่พบว่าคุณภาพของอาหารจะต่ำลง เนื่องจากมีการใช้ความร้อนสูงภายนอกเพื่อที่จะทำให้อาหารที่อยู่ภายในภาชนะบรรจุตรงจุดที่ร้อนช้าที่สุด (cold spot) ได้รับความร้อนในระดับที่กำหนด

การใช้กระบวนการปลอดเชื้อ (aseptic processing) โดยการให้ความร้อนแก่อาหารด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (plate) แบบท่อ (tubular) แบบกวาดพื้นผิว (scraped surface heat exchanger) หรือการฉีดพ่นไอน้ำโดยตรง (steam injection) ตามด้วยการบรรจุอาหารลงในภาชนะบรรจุกระดาษหรือพลาสติกภายใต้สภาพปลอดเชื้อ เป็นวิธีการหนึ่งที่เป็นทางเลือกเพื่อหลีกเลี่ยงการทำให้สุกมากเกินไป (over cooking) และนิยมใช้ในอุตสาหกรรมในปัจจุบันเช่น อุตสาหกรรมการผลิตน้ำนมหรือน้ำผลไม้ อย่างไรก็ตาม Parrott (1992) รายงานว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมที่อาจมีทั้งการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ทั้งการนำ (conduction)

และการพา (convection) นั้น ถ้าผลิตภัณฑ์อาหารประกอบด้วยชิ้นของแข็งที่มีความยาวมากกว่า 25 มิลลิเมตร พบว่าจะทำให้อาหารในส่วนที่เป็นของเหลวได้รับความร้อนสูงเกินไป (over processing) ก่อนที่ชิ้นอาหารที่เป็นของแข็งจะได้รับอุณหภูมิในระดับที่กำหนดไว้ เป็นสาเหตุให้คุณภาพอาหารด้านต่างๆ เกิดการสูญเสีย เช่น รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการ รวมทั้งผลจากการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (plate heat exchanger) จะทำให้สูญเสียรูปทรงของอาหารจากการกระทบกันระหว่างชิ้นอาหารและผนังหรือใบมีดด้านในของเครื่องในระหว่างการให้ความร้อน

การแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนนี้สามารถกระทำได้โดยการใช้กระบวนการให้ความร้อนที่เกิดจากความต้านทานไฟฟ้าหรือแบบโอมมิก ซึ่งเป็นการผ่านกระแสไฟฟ้า (electric current) ไปยังอาหารที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง (continuous flow) ทำให้อนุภาคหรือชิ้นส่วนของแข็งและของเหลวในอาหารเกิดความร้อนด้วยอัตราเดียวกันและใช้เวลาสั้นกว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะในอาหารที่เป็นของเหลวที่มีปริมาณของแข็งหรือชิ้นอาหารอยู่มาก (high solid fractions) (Fryer, 1995) เทคนิคที่ใช้ในกระบวนการให้ความร้อนแบบนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในเชิงอุตสาหกรรมและการค้าในการสเตอริไลส์อาหารผสมที่มีลักษณะดังกล่าว รวมทั้งการให้ความร้อนแก่อาหารอื่นๆ กระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกแก่อาหารมีความแตกต่างอย่างสิ้นเชิงจากกระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม เช่นการใช้ความร้อนในการฆ่าเชื้ออาหารบรรจุกระป๋อง ซึ่งวิธีการนี้จะใช้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงสุดระดับหนึ่งในระบบ ในขณะที่กระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่มีขีดจำกัด และมีความแตกต่างจากการให้ความร้อนโดยใช้การทำให้เกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟซึ่งวิธีการนี้ มีข้อเสียตรงที่การทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟนั้นมีข้อจำกัดแต่การให้ความร้อนแบบโอมมิกพบว่าความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่มีขีดจำกัดและจากการที่ชิ้นส่วนของอาหารถูกทำให้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว กระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกจึงมีข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการให้ความร้อนวิธีอื่นๆ และมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างสูตรอาหารเฉพาะเนื่องจากมีผลต่อกระบวนการให้ความร้อน รวมทั้งคุณภาพของอาหาร ในปัจจุบันระบบการให้ความร้อนแบบโอมมิกนี้มีใช้ในอุตสาหกรรมผลิตอาหารในประเทศต่างๆ ได้แก่ สหราชอาณาจักร รวมทั้งญี่ปุ่น ฝรั่งเศสและสหรัฐอเมริกา โดยนำมาใช้ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลายชนิด

การใช้ความร้อนในการสเตอริไลส์อาหาร

กระบวนการสเตอริไลส์ในเชิงการค้า (commercial sterilization) เป็นการใช้ความร้อนเพื่อลดจำนวนของจุลินทรีย์ให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียตลอดอายุการเก็บรักษา ผลที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ความร้อนในการแปรรูปหรือถนอมอาหารได้แก่การลดปริมาณจุลินทรีย์และผลจากการที่อาหารมีคุณภาพด้อยลงทั้งทางด้านคุณค่าทางโภชนาการ รสชาติและเนื้อสัมผัส กระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมได้แก่ การผลิตอาหารบรรจุกระป๋อง ซึ่งอาหารจะถูกบรรจุในภาชนะปิดสนิทและนำไปสเตอริไลส์ในหม้อนึ่งภายใต้ความดัน (retorts) โดยส่วนใหญ่ใช้ความร้อนจากไอน้ำ ในกรณีที่อาหารนั้นมีความหนืดต่ำ ความร้อนดังกล่าวจะถูกถ่ายทอดเข้าไปภายในกระป๋องโดยการพา (convective) หรือถ้าอาหารมีลักษณะเป็นของแข็งหรือมีความหนืดสูงความร้อนจะถูกถ่ายทอดเข้าไปภายในกระป๋องโดยการนำ (conduction) ซึ่งการให้ความร้อนวิธีนี้จะต้องสเตอริไลส์ทุกส่วนของอาหาร ซึ่งสามารถทำให้อาหารบางส่วนได้รับความร้อนมากเกินไป (overcooking) ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนที่ค่อนข้างช้า ในทางปฏิบัติอาหารบรรจุกระป๋องจะมีคุณสมบัติด้านรสชาติและเนื้อสัมผัสแตกต่างไปจากอาหารที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน (ยกเว้นอาหารบางประเภทที่ผ่านการให้ความร้อนแล้วผู้บริโภคยอมรับสูงกว่า เช่น ถั่วบรรจุกระป๋อง (tinned bean) และซุปมะเขือเทศ เป็นต้น)

Holdsworth (1993) รายงานว่าในการปรับปรุงคุณภาพของอาหารบรรจุกระป๋องนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธี ได้แก่

1. ทำให้เกิดการหมุนเวียนของอาหารบรรจุกระป๋องภายในหม้อนึ่งความดัน เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการพาความร้อนให้สูงขึ้น
2. ลดขนาดของภาชนะบรรจุลงเพื่อลดระยะทางในการที่ความร้อนจะเข้าไปสู่จุดที่ร้อนช้าที่สุด (cold spot)
3. เปลี่ยนแปลงระบบในการให้ความร้อน เพื่อลดการทำให้สุกมากเกินไป (overcooking) ในชั้นอาหารโดยเฉพาะอาหารที่ติดอยู่กับภาชนะบรรจุด้านใน
4. เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการสเตอริไลส์อาหาร มีการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาที่ลดปริมาณสปอร์ของแบคทีเรียลงนั้นมีพลังงานกระตุ้น (activation energy) สูงกว่าปฏิกิริยาที่ทำให้อาหารมีคุณภาพด้อยลง เช่น ในการทำลายสปอร์ของ *Clostridium botulinum* จะมีค่าพลังงานกระตุ้นประมาณ 300 kJ/mol ในขณะที่พลังงานกระตุ้นเพื่อทำให้เอนไซม์สูญเสียกิจกรรมมีค่าประมาณ 120 kJ/mol ซึ่งหมายความว่าในการผลิตอาหารบรรจุกระป๋องที่มีคุณภาพสูงสุดจะต้องใช้อุณหภูมิสูงสุดเท่าที่จะทำได้

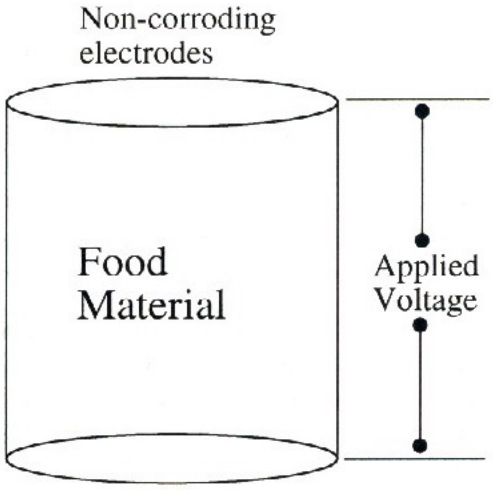
การใช้ระบบการให้ความร้อนแบบต่อเนื่องโดยการใช้อุณหภูมิสูงและเวลาสั้น (high temperature short time, HTST) หรือ ultra high temperature (UHT) เป็นตัวอย่างของวิธีการฆ่าเชื้อซึ่งทำให้อาหารบรรจุกระป๋องมีคุณภาพที่ดีขึ้นกว่าวิธีการดั้งเดิม ในกระบวนการนี้อาหารจะถูกทำให้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วถึง 140 องศาเซลเซียส และคงระยะเวลาไว้เล็กน้อย ก่อนที่จะนำไปบรรจุแบบปลอดเชื้อ (aseptic packaging) ในส่วนของกระบวนการ UHT นั้นต้องใช้อัตราการทำความร้อนที่รวดเร็ว เพื่อลดเวลาในการใช้อุณหภูมิสูงและทำให้คุณภาพอาหารสูญเสียน้อยที่สุด วิธีการนี้จะทำให้ดีที่สุดเมื่อดำเนินการในระบบต่อเนื่อง (continuous) กระบวนการนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่

1. ส่วนที่ให้ความร้อน (heating system) ซึ่งผลิตภัณฑ์ถูกทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
2. ส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิ (holdling system) มักจะเป็นท่อที่วางในแนวนอนหรือเอียงเล็กน้อย เพื่อที่จะใช้รักษาหรือคงอุณหภูมิให้นานพอในการสเตอริไลส์ผลิตภัณฑ์อาหาร
3. ส่วนที่ทำให้เย็น (cooling system) เพื่อลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก่อนการบรรจุ

กระบวนการ UHT สามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ โดยใช้การถ่ายเทความร้อนแบบการพา (convective heat transfer) ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นหรือท่อ ซึ่งตัวอาหารจะไม่สัมผัสกับสารที่ทำความร้อน อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนและความเย็นประมาณ 1 องศาเซลเซียสต่อวินาทีและเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสเตอริไลส์อาหาร เช่น น้ำนม น้ำผลไม้ ซุปและซอสต่างๆ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีความหนืดสูง เช่น ครีมหรือซอสที่มีความข้นหนืด อาจทำให้เกิดการติดค้างในท่อได้ ซึ่งอาจแก้ไขปัญหาโดยการใช้ไอน้ำฉีดพ่นโดยตรงและเป็นทำให้เกิดความร้อนได้อย่างรวดเร็ว (Fryer, 1995) กระบวนการ UHT นั้นไม่เหมาะกับอาหารที่มีชิ้นอาหารของแข็งอยู่ด้วย เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนโดยการนำสู่ของแข็งเกิดขึ้นช้า ในอาหารที่มีชิ้นอาหารขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ถ้าปล่อยเวลาให้ชิ้นอาหารถูกสเตอริไลส์จนหมด ความร้อนที่เกิดในอาหารส่วนที่เป็นของเหลวจะสูงมากเกินไป ทำให้เกิดการสุกมากเกินไปขึ้นได้ วิธีนี้อาจแก้ปัญหาโดยการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดที่มีใบมีดกวาด (scrapped surface heat exchanger) ซึ่งสามารถใช้ได้กับอาหารที่มีปริมาณของแข็งอยู่สูงถึงประมาณ 40% (Parrott, 1992) โดยต้องใช้อัตราการทำความร้อนต่ำและต้องคงอุณหภูมิไว้นานเพื่อที่จะสเตอริไรส์อาหารที่เป็นชิ้นของแข็งและทำให้คุณภาพอาหารลดลงไป เช่น ชิ้นอาหารอาจเกิดการแตกหักเนื่องการแรงกวาดของใบมีดและการกระทบกันของชิ้นอาหารเอง

การให้ความร้อนจากความต้านทานไฟฟ้าของอาหาร (Electrical resistance heating) **หรือแบบโอมมิก** (Ohmic heating)

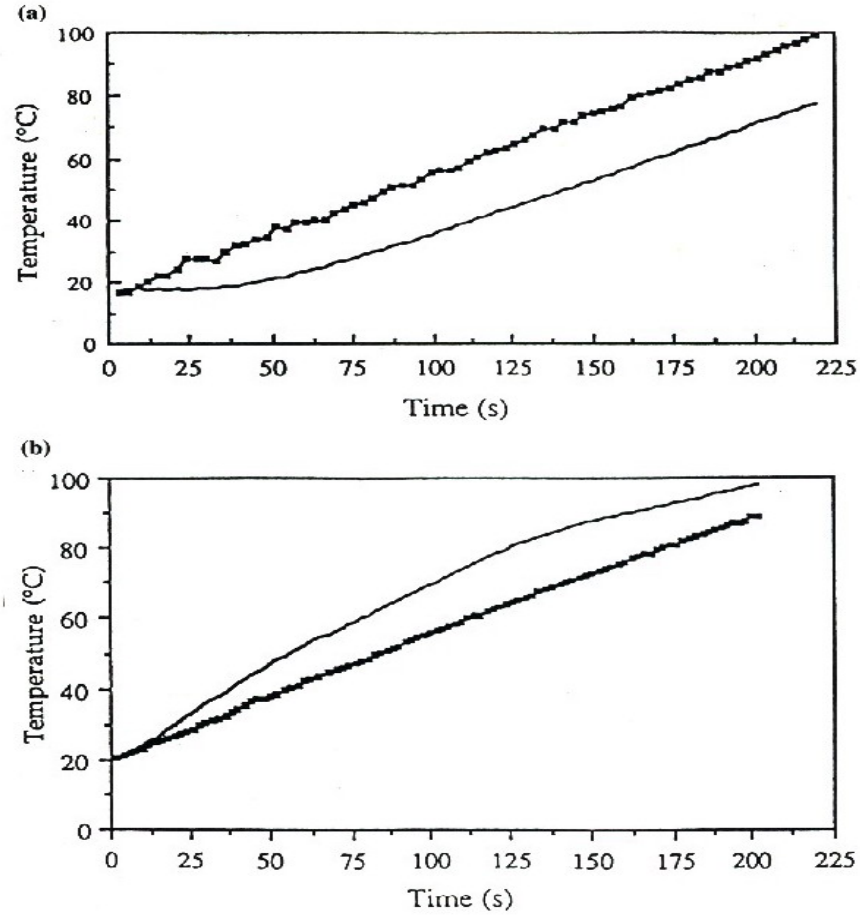
ในการสเตอริไลส์อาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารที่เป็นของแข็งอยู่ด้วย มีข้อจำกัดในการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ วิธีการทำให้เกิดความร้อนที่ถูกสร้างขึ้นจากภายในตัวอาหาร (volumetric techniques) สามารถช่วยแก้ปัญหาได้ในระดับหนึ่ง เช่น การใช้ไมโครเวฟในการทำให้เกิดความร้อน ซึ่งสนามไฟฟ้าที่มีคลื่นความถี่สูงจะทำให้น้ำภายในอาหารถูกกระตุ้น หรือการทำให้เกิดความร้อนที่เกิดจากความต้านทานของกระแสไฟฟ้าของอาหารหรือโอมมิก วิธีนี้จะผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในอาหาร ทำให้เกิดความร้อนขึ้นทั่วทุกส่วน เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของตัวอาหาร อย่างไรก็ตามการใช้ไมโครเวฟนั้นตัวอาหารจะไม่สัมผัสกับอุปกรณ์ ในขณะที่การเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนจากความต้านทานไฟฟ้าของอาหารจะต้องใช้อิเลคโตรด (electrode) สัมผัสกับอาหาร หลักการของการทำให้เกิดความร้อนแบบโอมมิกแสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 หลักการของการทำให้เกิดความร้อนแบบโอมมิก
ที่มา : Fryer (1995)

จากภาพเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังอาหาร จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น โดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าที่ใช้เป็นกระแสไฟฟ้าสลับความถี่ต่ำ (low frequency alternating current) ประมาณ 50 – 60 เฮิร์ตซ์ (Hz) โดยผ่านจากอิเลคโตรดที่ถูกออกแบบและผลิตขึ้นเฉพาะในการให้กระแสไฟฟ้าแก่อาหารและไม่มีการปนเปื้อนจากสารที่ใช้ทำ รวมทั้งลดปฏิกิริยาทางเคมีและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น เมื่ออาหารที่ประกอบด้วยชิ้นอาหารของแข็งและส่วนที่เป็นของเหลวสัมผัสกับกระแสไฟฟ้า จะทำให้อาหารนั้นร้อนขึ้นเนื่องจากความต้านทานของอาหาร (electrical resistance) และถ้าอาหารทั้งสองเฟส (ของแข็งและของเหลว) มีความต้านทานไฟฟ้าเท่ากันจะทำให้อัตราการเกิดความร้อนเท่ากัน จาก

การทดลองเปรียบเทียบอัตราการเกิดความร้อนในชิ้นอาหารที่เป็นของแข็งและส่วนที่เป็นของเหลว ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (conventional) และแบบโอมมิก แสดงดังภาพที่ 3.2 จะเห็นว่าอุณหภูมิของชิ้นอาหารที่เป็นของแข็งที่ได้รับการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม จะเพิ่มขึ้นช้ากว่าอุณหภูมิของส่วนที่เป็นของเหลว ในขณะที่กระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกนั้นพบว่าอุณหภูมิของส่วนที่เป็นของชิ้นอาหารที่เป็นของแข็งจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าในส่วนที่เป็นของเหลว ดังนั้นจึงสามารถนำหลักการนี้ไปใช้ในการฆ่าเชื้ออาหารที่เป็นของเหลวที่มีชิ้นอาหารอยู่ด้วย โดยจัดเป็นกระบวนการ HTST กระบวนการหนึ่ง



ภาพที่ 3.2 การเกิดความร้อนในชิ้นอาหารของแข็ง (เส้นเรียบ) และในของเหลว (เส้นจุด) ในกระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม (a) และแบบโอมมิก (b)

ที่มา : Fryer (1995)

วิธีการทำให้เกิดความร้อนโดยการใช้กระแสไฟฟ้า ไม่ได้เป็นวิธีการใหม่ (de Alwis and Fryer, 1990) แต่ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อใช้ในการพาสเจอไรส์อาหารตั้งแต่ประมาณ ค.ศ. 1930 โดยมีการประยุกต์ใช้ในการละลายอาหารแช่เยือกแข็ง (thawing) และการอบ (baking) แต่ก่อนที่

กระบวนการนี้จะเป็นที่ยอมรับและนำมาใช้ระดับอุตสาหกรรมอาหารในปัจจุบันนั้น ได้มีการตรวจสอบและพิจารณาในเรื่องต่างๆ ทั้งตัวกระบวนการเองและความปลอดภัย เช่น

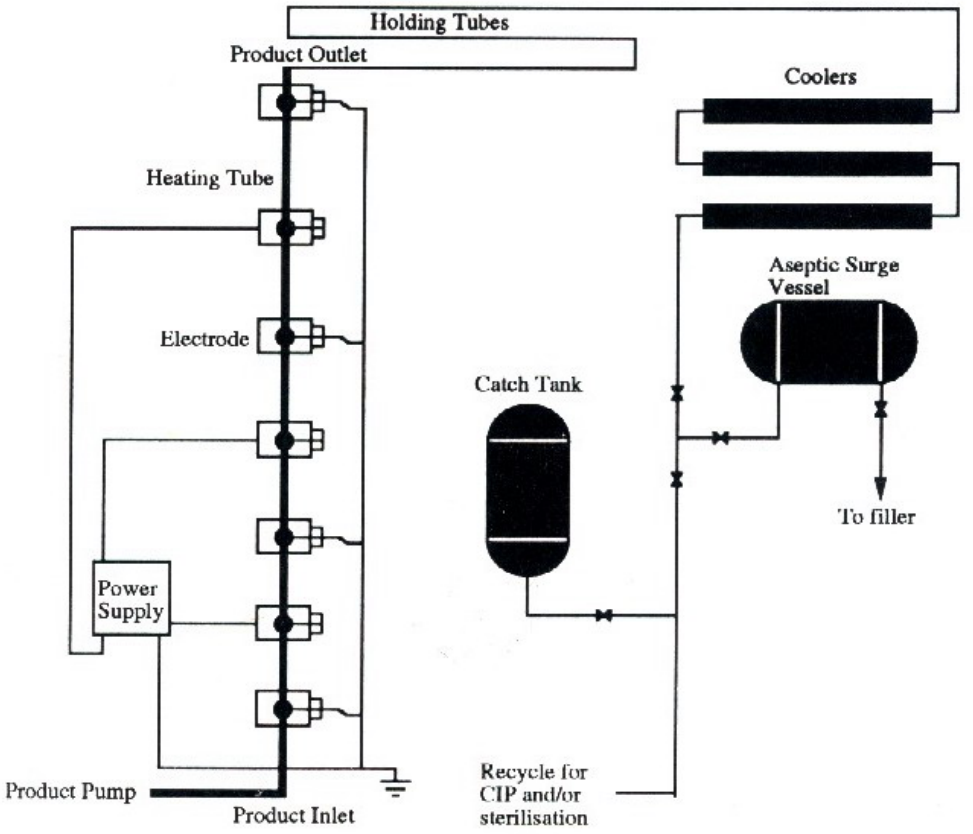
1. การออกแบบเกี่ยวกับระบบการใช้ไฟฟ้าเพื่อหลีกเลี่ยงการแก้ปัญหาการเกิดการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า (electrolysis) และการปนเปื้อนของผลิตภัณฑ์เนื่องมาจากสารที่สลายตัวจากการกัดกร่อนของอิเลคโตรด หรือจากอาหารที่เกิดการไหม้ในบริเวณบางจุดภายในเครื่องที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ
2. ประสิทธิภาพในการควบคุมการทำให้เกิดความร้อนและอัตราการไหลของอาหาร
3. การใช้เทคนิคการบรรจุอาหารแบบปลอดเชื้อ ซึ่งใช้ในการบรรจุอาหารสองส่วนคือของเหลวและของแข็งที่ผ่านการฆ่าเชื้อ โดยบรรจุในสภาวะที่ปลอดเชื้อ
4. ประสิทธิภาพในการประหยัดต้นทุนของกระบวนการฆ่าเชื้อแบบโอมมิกในภาพรวม

ในการใช้กระแสไฟฟ้าในการฆ่าเชื้อในอาหารในช่วงเวลาก่อนหน้านี้พบว่าไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากแต่เดิมใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (direct current) จากแหล่งไฟฟ้า (D.C. supply) ทำให้เกิดปฏิกิริยาอิเลคโตรไลซิส (electrolysis) บนอิเลคโตรด ซึ่งต้องใช้อิเลคโตรดชนิดที่มีราคาแพงเกินไป แต่ในปัจจุบันข้อเสียดังกล่าวได้รับการแก้ไขโดยบริษัท APV Baker โดยได้ปรับปรุงและพัฒนาระบบการฆ่าเชื้อด้วยเครื่องให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าหรือแบบโอมมิก (ohmic heater) ทางการค้าขึ้น (Parrott, 1992)

เครื่องให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าของ APV (APV Baker Ohmic Heater)

เครื่องมือการสเตอริไลส์อาหารโดยใช้ความร้อนจากความต้านทานกระแสไฟฟ้าหรือแบบโอมมิกได้รับการพัฒนาขึ้นแต่เดิมโดย EA Technology เมือง Capenhurst ประเทศอังกฤษ ต่อมาในปี คศ. 1984 บริษัท APV Baker ได้นำมาพัฒนาต่อและจดลิขสิทธิ์ระบบการฆ่าเชื้อในอาหารโดยใช้กระแสไฟฟ้าในระดับอุตสาหกรรม โดยกำลังของเครื่อง (power outputs) มีขนาด 75 และ 300 กิโลวัตต์ (kW) ซึ่งสามารถฆ่าเชื้ออาหารได้ในอัตรา 750 และ 3,000 กิโลกรัมต่อชั่วโมงตามลำดับ (Fryer, 1995) Parrott (1992) รายงานว่าการทำให้เกิดความร้อนแก่อาหารด้วยกระแสไฟฟ้านั้นขึ้นกับความสามารถในการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) ของอาหาร ซึ่งอาหารส่วนใหญ่ที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการมีปริมาณของน้ำอิสระ (free water) ซึ่งมีอิออนของเกลือละลาย (dissolved ionic salts) ในระดับปานกลาง ซึ่งเพียงพอต่อการทำให้เกิดความร้อนเนื่องมาจากการผ่านของกระแสไฟฟ้า

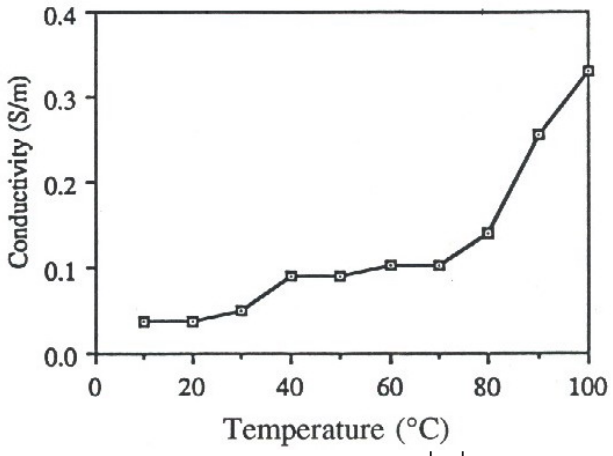
ลักษณะการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิกแสดงดังภาพที่ 3.3 เริ่มต้นจากอาหารเหลวถูกปั๊มผ่านท่อที่เกิดความร้อน (heating tubes) โดยท่อนี้อยู่ในแนวตั้งหรือเอียงเล็กน้อย ซึ่งภายในท่อจะมีจุดที่เชื่อมต่อกับชุดของอิเลคโตรด การปั๊มอาหารเหลวผ่านท่อดังกล่าวจำเป็นต้องใช้แรงดันที่คงที่และเหมาะสมเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเดือด โดยใช้ได้ถึงระดับ 4 บาร์สำหรับการสเตอริไลส์อาหารที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสจากภาพจะเห็นว่ามีอิเลคโตรด 7 อันแต่ละอันจะมีอิเลคโตรดข้างเคียงสองอันที่ต่อกับสายดิน (earth)



ภาพที่ 3.3 ลักษณะการทำงานของเครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิก (APV Baker ohmic heater)
ที่มา : Fryer (1995)

ชุดของอิเลคโตรดแต่ละอันจะมีอิเลคโตรดที่อยู่ภายในท่อและอยู่ในตำแหน่งที่วางยื่นออกมาในแนวขวางกับการไหลของอาหาร โดยกล่องหรือชุดของอิเลคโตรดนี้ทำด้วยพลาสติกโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (polytetrafluoroethylene, PTFE) และหุ้มด้วยโลหะแสตนเลสอีกชั้นหนึ่งและชุดอิเลคโตรดแต่ละอันจะเชื่อมต่อกันด้วยท่อแสตนเลสที่หุ้มด้วยฉนวนไฟฟ้า (ฉนวนที่เหมาะสมในการใช้ได้แก่โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride, PVDF) และโพลีอีเทอร์คีโตน (polyether ether ketone, PEEK) หรือแก้ว)

ท่อที่ให้ความร้อนนั้นอาจตั้งตรงหรือเอียงเล็กน้อยและมีวาล์ว (vent valve) ตรงด้านบนสุดเพื่อทำให้อาหารที่เข้ามาในท่อเต็มอยู่ตลอดเวลา โดยความยาวของท่อในแต่ละช่วงจะมีความแตกต่างกันในแต่ละคู่ของอิเลคโตรดเพื่อทำให้แต่ละช่วงมีค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า (electrical impedance) ที่ใกล้เคียงกัน โดยท่อแต่ละช่วงจะมีความยาวเพิ่มขึ้นจากทางเข้าของอาหารจนถึงทางออกจากท่อของการให้ความร้อนเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า (electrical conductivity) มีค่าเพิ่มขึ้น ตัวอย่างการศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิต่อความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าของมันฝรั่งแสดงดังภาพที่ 3.4 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าของมันฝรั่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในส่วนของสารละลายที่มีอิออนของเกลือที่แตกตัวนั้นพบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างอุณหภูมิและความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้การเคลื่อนที่ของอิออนเพิ่มขึ้น ยกเว้นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืด (viscosity) เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิสูงขึ้น เช่นในผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยสตาร์ช (Skudder, 1993)



ภาพที่ 3.4 ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าของมันฝรั่งที่อุณหภูมิต่างๆ

ที่มา : Fryer (1995)

จากส่วนที่ให้ความร้อน อาหารจะผ่านมายังท่อที่รักษาหรือคงอุณหภูมิไว้ระยะหนึ่ง (holding tubes) ซึ่งจะทำให้การสเตอริไลส์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ แล้วจึงผ่านมายังท่อที่ทำให้อาหารมีอุณหภูมิลดลงทันที (cooling tubes) และเข้าสู่กระบวนการบรรจุแบบปลอดเชื้อต่อไป

ในส่วนของการควบคุมอุณหภูมิของเครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิกนั้น สามารถออกแบบระบบการควบคุมให้เป็นแบบอัตโนมัติได้ การเปลี่ยนแปลงที่มีผลต่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สุดท้าย (outlet temperature) ที่ออกมาได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอาหารก่อนเข้าเครื่อง

(inlet temperature) อัตราการไหลของอาหาร (mass flow rate) ภายในเครื่อง และค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity) ของผลิตภัณฑ์ ในการควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องนั้นปัจจุบันใช้คอมพิวเตอร์โดยไมโครโพรเซสเซอร์ (microprocessor) จะทำหน้าที่สแกนตัวแปรดังกล่าวและมีการคำนวณอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มหรือลดพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการทำความร้อนให้ถึงอุณหภูมิที่กำหนด

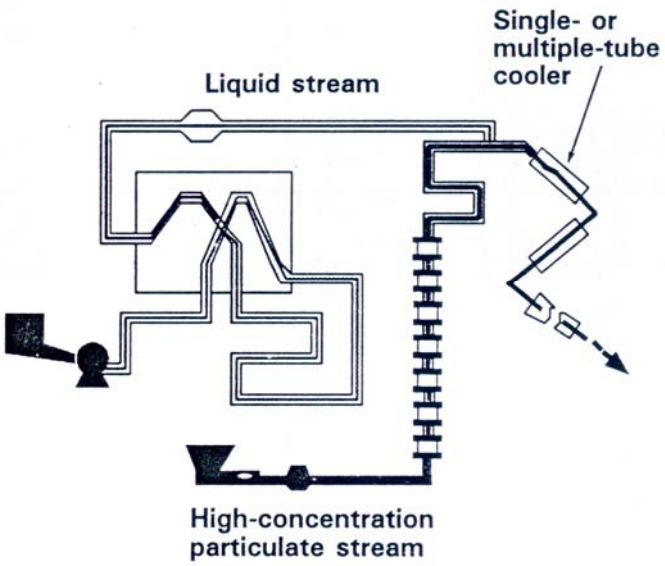
กระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกนี้ สามารถสเตอริไลส์อาหารเหลวที่มีปริมาณชิ้นอาหารของแข็งอยู่มากถึง 60% ได้ โดยมีอัตราการทำความร้อน (heating rates) ประมาณ 1 องศาเซลเซียสต่อวินาที โดยสามารถใช้กระบวนการนี้ในการฆ่าเชื้ออาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารของแข็งที่มีขนาดใหญ่มากได้ (เช่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25 มิลลิเมตร) นอกจากนั้นกระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการฆ่าเชื้ออาหารได้หลายรูปแบบ ได้แก่

1. ใช้ร่วมกับกระบวนการบรรจุแบบปลอดเชื้อ (aseptic processing) สำหรับอาหารที่มีคุณค่าสูงและอาหารพร้อมรับประทานโดยสามารถเก็บรักษาและขนส่งที่อุณหภูมิห้อง
2. ใช้พาสเจอไรส์อาหารเหลวที่มีชิ้นอาหารสำหรับการบรรจุร้อน (hot filling)
3. ใช้เพิ่มระดับอุณหภูมิของอาหารก่อนนำอาหารนั้นไปฆ่าเชื้อต่อโดยวิธีดั้งเดิม (อาหารบรรจุกระป๋อง)
4. ใช้ในการผลิตอาหารพาสเจอไรส์อาหารพร้อมรับประทานที่มีความสะอาดและมีคุณค่าสูง โดยสามารถเก็บรักษาและขนส่งโดยการแช่เย็น

การใช้เครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิกร่วมกับกระบวนการบรรจุแบบปลอดเชื้อ

เครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิกสามารถนำมาต่อเข้ากับระบบการบรรจุแบบปลอดเชื้อโดยใช้ในการสเตอริไลส์หรือทำความร้อนให้แก่อาหารได้เป็นอย่างดีแสดงดังภาพที่ 3.3 เมื่ออาหารผ่านการให้ความร้อนแล้วจะต้องทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกันกับระบบที่ให้ความร้อนทั่วไป ซึ่งมักนิยมใช้วิธีการแลกเปลี่ยนความร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกวาด (scraped surface) หรือแบบท่อ (tubular heat exchanger) แต่นิยมใช้แบบท่อมากกว่าเนื่องจากการทำลายลักษณะของชิ้นอาหารของแข็งเกิดขึ้นน้อยกว่า

ในการสเตอริไลส์อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ให้ความร้อนและใช้ในกระบวนการบรรจุแบบปลอดเชื้อนั้นก่อนที่จะนำอาหารมาให้ความร้อนด้วยเครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิก จำเป็นจะต้องมีการล้าง



ภาพที่ 3.5 การใช้กระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกร่วมกับการถ่ายเทความร้อนแบบการพา
ที่มา : Parrott (1993)

เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำความสะอาด ในส่วนเครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิก ท่อที่ใช้ในส่วนที่คงอุณหภูมิและท่อในส่วนของการให้ความเย็นทันที โดยการใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (sodium sulfate) หรือสารละลายเกลือ (mineral salt solution) ที่ใช้สำหรับอาหาร ที่ความเข้มข้นซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้า (electrical conductivity) ของอาหารที่ต้องการสเตอริไลส์โดยการเปิดเครื่องเพื่อหมุนเวียนสารละลายดังกล่าว ทั้งนี้เนื่องจากเป็นการลดขั้นตอนในการปรับระดับของกระแสไฟฟ้า เมื่อเปลี่ยนจากสารที่ใช้ทำความสะอาดไปเป็นอาหารที่ต้องการฆ่าเชื้อ ซึ่งจะทำให้ระบบมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอยิ่งขึ้น ในส่วนถังเก็บพักอาหารที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วและท่อเชื่อมต่อหรือวาล์วต่างๆ นั้นจะใช้ไอน้ำความดันสูง (pressurized steam) ในการฆ่าเชื้อเพื่อทำความสะอาด

กระบวนการฆ่าเชื้ออาหาร เริ่มต้นหลังจากการทำความสะอาดเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ แล้วและนำสารเคมีที่ใช้ทำความสะอาดจะถูกเก็บไว้เพื่อนำมาใช้ใหม่ โดยทำให้สารเคมีเย็นลงด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและถ่ายเทออก ความดันย้อนกลับระหว่างช่วงของการเปลี่ยนควบคุมได้โดยการควบคุมความดันส่วนบนของถังพักที่ใช้อากาศอัดหรือไนโตรเจนอัดที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว จากนั้นทำการปั๊มอาหารผ่านวาล์วที่กั้นไม่ให้ไหลย้อนกลับ กรณีที่ฆ่าเชื้ออาหารที่มีความเป็นกรดสูงจะทำที่อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 2 บาร์ และถ้าเป็นอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ จะใช้อุณหภูมิ 120-140 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 4 บาร์ (Parrott, 1992) ที่ความดันสูงนี้จะ

ช่วยป้องกันการเดือดของอาหารในเครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิก เมื่ออาหารผ่านการให้ความร้อนถึงระดับอุณหภูมิที่กำหนดแล้วจะผ่านเข้าไปยังท่อที่รักษาระดับของอุณหภูมิ ก่อนที่จะผ่านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ (tubular heat exchanger) เพื่อลดอุณหภูมิลง จากนั้นจึงถ่ายอาหารเข้าสู่ถังพักก่อนนำไปบรรจุแบบปลอดเชื้อต่อไป

ในการทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการให้ความร้อนแบบโอมมิกมีอุณหภูมิต่ำลงหลังจากผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อนั้น สามารถกระทำได้อย่างรวดเร็วมากโดยเฉพาะถ้าอาหารนั้นมีชิ้นอาหารของแข็งน้อยกว่า 40% (Parrott, 1992) ซึ่งระบบนี้จะใช้วิธีการร่วมกันระหว่างการใช้เครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิกและวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมทั่วๆไปและจากประสิทธิภาพของเครื่องให้ความ ร้อนแบบโอมมิกนั้น ทำให้สามารถนำมาใช้ฆ่าเชื้ออาหารที่มีชิ้นอาหารของแข็งที่มีปริมาณสูงถึง 80% ได้ วิธีการนี้แสดงดังภาพที่ 3.5 โดยการแยกเตรียมอาหารสองส่วนคือส่วนที่เป็นของเหลวและส่วนที่มีชิ้นอาหารของแข็งปริมาณสูง อาหารในส่วนที่เป็นของเหลวจะนำไปฆ่าเชื้อด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมและทำให้เย็นลงโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นหรือแบบท่อ ก่อนที่จะถูกส่งเข้าไปผสมกับอาหารส่วนที่เป็นชิ้นของแข็งที่ออกมาจากท่อที่รักษาระดับอุณหภูมิของเครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิก ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยลดต้นทุนและค่าดำเนินการสำหรับการผลิตอาหารต่อเนื่องที่ระดับหนึ่งได้

หลังจากการฆ่าเชื้อเสร็จสิ้นสมบูรณ์ ขั้นตอนต่อมาคือการทำความสะอาดเครื่อง โดยทำการล้างเครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิกโดยใช้น้ำ จากนั้นใช้สารละลาย caustic soda ความเข้มข้น 2% (น้ำหนัก/ปริมาตร) โดยให้สารละลายหมุนเวียนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แต่เนื่องจากสารละลายนี้มีความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าที่สูง ดังนั้นจึงต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นเพื่อทำให้อุณหภูมิของสารละลายนี้สูงขึ้นโดยไม่ใช้เครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิกในการให้ความร้อนกับสารละลาย

ในด้านของกำลังการผลิต (production capacity) ของเครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิกในปัจจุบันมีเครื่องที่มีหลายขนาดกำลังการผลิต โดยจะมีชุดอิเลคโตรดและท่อที่มีขนาดแตกต่างกัน ทำให้สามารถผลิตอาหารได้มากถึง 3 ตันต่อชั่วโมง ขึ้นอยู่กับระดับอุณหภูมิสูงที่ต้องการและในส่วนเครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิกที่ใช้ในระดับปฏิบัติการจะมีกำลังการผลิตได้ประมาณ 50 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

คุณภาพของผลิตภัณฑ์

Skudder (1993) รายงานข้อได้เปรียบของกระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกซึ่งเป็นการแปรรูปแบบปลอดเชื้อที่ต่อเนื่อง (continuous aseptic processing) ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อได้เปรียบของกระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิก

ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีชิ้นอาหาร มีรสชาติสดกว่าและมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่า
สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เพิ่มมูลค่าสูงขึ้นได้ (high added value)
สามารถให้ความร้อนในระบบการไหลต่อเนื่องโดยไม่ต้องใช้พื้นผิวในการถ่ายเทความร้อน
เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อแรงเฉือน (shear sensitive)
ความร้อนในชิ้นอาหารเกิดขึ้นได้โดยไม่ขึ้นกับความสามารถในการนำความร้อนผ่านของเหลว
ระบบเดินเงียบ
ต้นทุนในการบำรุงรักษาต่ำ
ระบบควบคุมง่ายและสามารถเปิดปิดได้ทันที
ประหยัดต้นทุนในการแปรรูปและการบรรจุ
ประยุกต์ใช้กับภาชนะบรรจุได้หลากหลาย

ที่มา : Skudder (1993)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการให้ความร้อนแบบโอมมิกนั้น จะเห็นว่ามีคุณภาพดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ที่ให้ความร้อนแบบดั้งเดิม มาตรฐานของคุณภาพในที่นี้ได้แก่ ความปลอดภัยทางจุลินทรีย์ (เช่น ค่า lethality ของกระบวนการ) ผลของการทำให้สุก (cooking effects) และการคงคุณค่าทางโภชนาการและวิตามินของผลิตภัณฑ์

กระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกนั้นแตกต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นๆ ตรงที่ไม่มีการแผ่กระจายของความร้อน (heat penetration) ไม่ว่าจะเป็นการแผ่กระจายความร้อนจากด้านนอกไปยังจุดศูนย์กลางของอาหาร (ในการฆ่าเชื้ออาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท) หรือจากด้านนอกของชิ้นอาหารไปยังจุดศูนย์กลางด้านใน (โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อหรือแบบกวาด) ซึ่งกระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอและรวดเร็ว ทำให้มีความปลอดภัยจากจุลินทรีย์ในระดับสูง จากการทดสอบพบว่ากระบวนการนี้มีช่วงของค่า lethaility ที่แคบมากจากผิวหน้าไปยังจุดศูนย์กลางของชิ้นอาหาร (Parrott, 1992)

การทดสอบยืนยันความปลอดภัยจากจุลินทรีย์ของกระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิก

Brown et al. (1984) จาก Campden Food and Drink Research Association ทำการศึกษาเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการสเตอริไลส์อาหารโดยใช้เครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิกและใช้เทคนิคที่คิดค้นขึ้น วิธีการทดสอบกระทำโดยเติมสปอร์แบคทีเรียที่ทนความร้อนสูงลงในก้อนอัลจีเนต (alginates) ที่เตรียมขึ้นเพื่อเป็นตัวแทนของชิ้นอาหาร จากนั้นจึงนำไปใส่ลงในอาหารที่จะใช้ทดสอบ แล้วนำไปให้ความร้อนแบบโอมมิก จากนั้นนำอาหารที่ผ่านการให้ความร้อนมาตรวจวิเคราะห์ปริมาณของสปอร์ที่รอดชีวิตเปรียบเทียบกับกระบวนการฆ่าเชื้อโดยวิธีดั้งเดิม

ตัวอย่างในการศึกษาค่า F_0 ทั้งหมดของชิ้นเนื้อและแครอท โดยนำอาหารที่มีส่วนประกอบของชิ้นเนื้อและแครอทในน้ำเกรวี่มาศึกษาค่า F_0 ของแต่ละองค์ประกอบ การเตรียมชิ้นเนื้อผสมอัลจีเนตและแครอทผสมอัลจีเนต ทำโดยบดเนื้อและนำโซเดียมอัลจีเนต (sodium alginates) มาเติม (ในส่วนของแครอททำเช่นเดียวกัน) จากนั้นเติมสปอร์ที่ทราบจำนวนของ *Bacillus stearothermophilus* Th24 ลงไปในสารละลายอัลจีเนตและนำไปทำให้แข็งตัวและตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์โดยนำไปจุ่มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride) นำลูกบาศก์ดังกล่าวไปใส่ในอาหารและผ่านเข้าเครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิกที่มีกำลัง 45 กิโลวัตต์ ทำการฆ่าเชื้อโดยใช้สภาวะตามทฤษฎีโดยให้ค่า F_0 ของการฆ่าเชื้อในส่วนของอาหารที่เป็นของเหลว (liquid phase) เท่ากับ 32 นาที หลังจากผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ นำลูกบาศก์แต่ละชนิดมาวิเคราะห์หาปริมาณของสปอร์ที่รอดชีวิต ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยพบว่าค่า F_0 ที่ได้จากลูกบาศก์แครอทมีค่าอยู่ระหว่าง 28.1 – 38.5 นาทีในขณะที่ลูกบาศก์เนื้อมีค่าอยู่ในช่วง 23.5 – 30.5 นาที

ผลจากการทดลองวิธีนี้ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าชิ้นอาหารถูกทำให้ร้อนโดยตรงเนื่องจากความต้านทานกระแสไฟฟ้าและเกิดความร้อนขึ้นทันทีในระดับเดียวกับอาหารในส่วนที่เป็นของเหลว ซึ่งแตกต่างจากวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมที่ชิ้นอาหารได้รับความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนมาจากส่วนที่เป็นของเหลว ตัวอย่างเช่นที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นหรือแบบท่อ ซึ่งค่า F_0 ทางทฤษฎีจากกระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกจะมีค่าเพียง 0.2 นาทีที่จุดศูนย์กลางของชิ้นอาหาร จากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า ชิ้นอาหารที่เติมสปอร์ของเชื้อ มีค่า F_0 ที่อยู่ในช่วงที่แคบ แสดงว่าการกระจายของเวลาฆ่าเชื้อ (residence time distribution) ของชิ้นอาหารอยู่ในเครื่องมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 3.2 ผลของ Lethality challenge test ของชิ้นเนื้อและแครอทในน้ำเกรวี่ที่มีสปอร์ของ *Bacillus stearothermophilus* Th2 ผสมหรืออยู่ตรงจุดกึ่งกลางของชิ้นอาหาร

การทดลอง	ชนิดอาหาร	บริเวณของสปอร์	ค่า F_0	
			ช่วง	ค่าเฉลี่ย
1	เนื้อ	กระจายในชิ้น	23.5 – 30.5	27.0
	แครอท	กระจายในชิ้น	28.1 – 38.5	33.7
2	เนื้อ	กระจายในชิ้น	28.0 – 38.5	32.5
	เนื้อ	ตรงกลางของชิ้น	34.0 – 37.5	37.0
	แครอท	กระจายในชิ้น	23.1 – 44.0	35.6
	แครอท	ตรงกลางของชิ้น	30.8 – 40.2	37.1

ที่มา : Parrott (1992)

ตัวอย่างการศึกษาอีกการทดลองหนึ่ง โดยศึกษาการกระจายของค่า F_0 ของชิ้นเนื้อและแครอท ซึ่งเปรียบเทียบกับค่า F_0 ของการฆ่าสปอร์ที่กระจายอยู่ภายในชิ้นของอาหารและค่า F_0 ที่ได้จากการฆ่าสปอร์ที่อยู่ใจกลางของชิ้นอาหาร วิธีการทำโดยนำชิ้นเนื้อผสมอัลจีเนตและแครอทผสมอัลจีเนต โดยเตรียมเป็นรูปลูกบาศก์เพียงครึ่งหนึ่งก่อน แล้วนำสปอร์ที่ทราบปริมาณและเตรียมให้อยู่ในเม็ดอัลจีเนตขนาดเล็ก จากนั้นนำเม็ดนี้ไปใส่ในชิ้นอาหารตรงกลางของชิ้นอาหารครึ่งแรก นำเนื้อผสมอัลจีเนตอีกครึ่งหนึ่งมาใส่ทับให้เป็นลูกบาศก์เต็มลูก (ของแครอททำเช่นเดียวกัน) และนำไปผ่านเครื่องให้ความร้อนแบบโอมมิก เช่นเดียวกับวิธีแรก

ผลการทดลอง (ตารางที่ 3.2) พบว่าค่า F_0 ของทั้งชิ้นแครอทจะมีค่าระหว่าง 23.1 – 44.0 นาที เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากใจกลางชิ้นแครอท ซึ่งอยู่ระหว่าง 30.8 – 40.2 นาที และในส่วนของชิ้นเนื้อนั้นพบว่ามีค่า F_0 ของทั้งชิ้นและที่ได้จากใจกลางชิ้นเนื้ออยู่ระหว่าง 28.0 – 38.5 และ 34.0 – 37.5 นาที ตามลำดับ จากการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าความร้อนที่ได้รับในใจกลางของอาหารและที่ได้ในส่วนผิวนอกของชิ้นอาหารมีค่าใกล้เคียงกัน

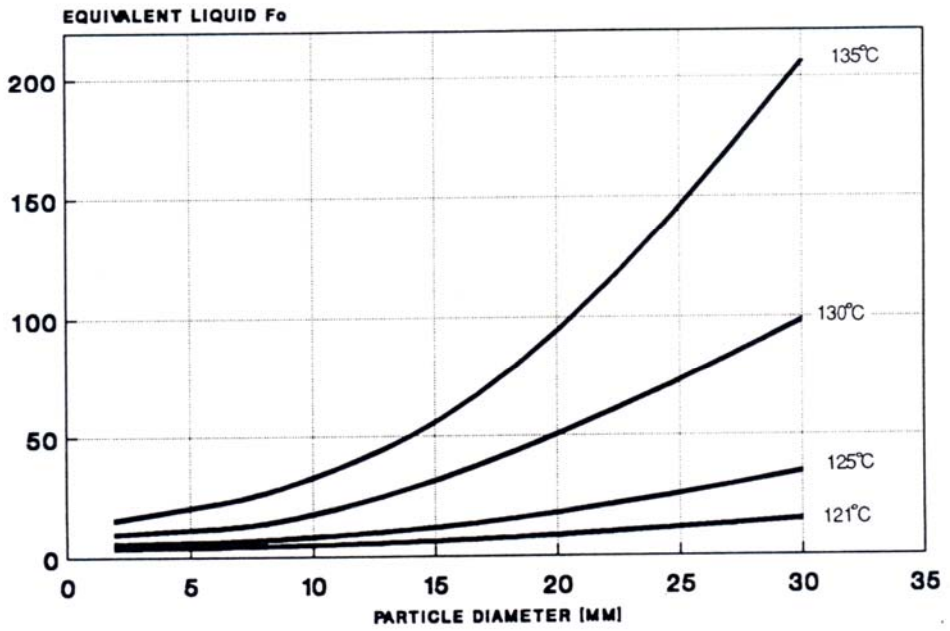
อย่างไรก็ตามเวลาในการฆ่าเชื้อที่มีในอาหารแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันออกไป จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาเฉพาะอาหารแต่ละชนิด เพื่อที่จะให้มั่นใจได้ว่าสภาวะในการฆ่าเชื้อที่นำมาใช้ ทำให้เกิดความปลอดภัยและสามารถเก็บรักษาอาหารได้เป็นเวลานาน

ค่า Cook value (C_0)

ค่า cook value ของกระบวนการหมายถึงค่าที่แสดงระดับของการทำให้สุกและการทำลายของวิตามินในอาหารเนื่องมาจากความร้อน โดยเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณในลักษณะเดียวกับค่า F_0 แต่ข้อแตกต่างก็คือใช้อุณหภูมิอ้างอิงที่ 100 องศาเซลเซียส แทนที่จะเป็น 121.1 องศาเซลเซียส และจะมีค่า Z ที่สูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการทำลายจุลินทรีย์โดยความร้อนซึ่งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ มีค่าสูงกว่าอัตราของการเพิ่มของปฏิกิริยาการทำให้สุก (cooking reactions) และปฏิกิริยาที่ทำลายวิตามิน ตัวอย่างเช่นค่า Z ในการทำลายไธอามิน (thiamine) คือ 33 องศาเซลเซียส แทนที่จะเป็น 10 องศาเซลเซียสสำหรับจุลินทรีย์ต่างๆ ดังนั้นในการที่จะลดระดับของการทำให้สุกและค่า cook value จะต้องทำให้อาหารมีอุณหภูมิสูงถึงระดับที่ต้องการโดยใช้อัตราการให้ความร้อนที่เร็วที่สุดที่สามารถกระทำได้

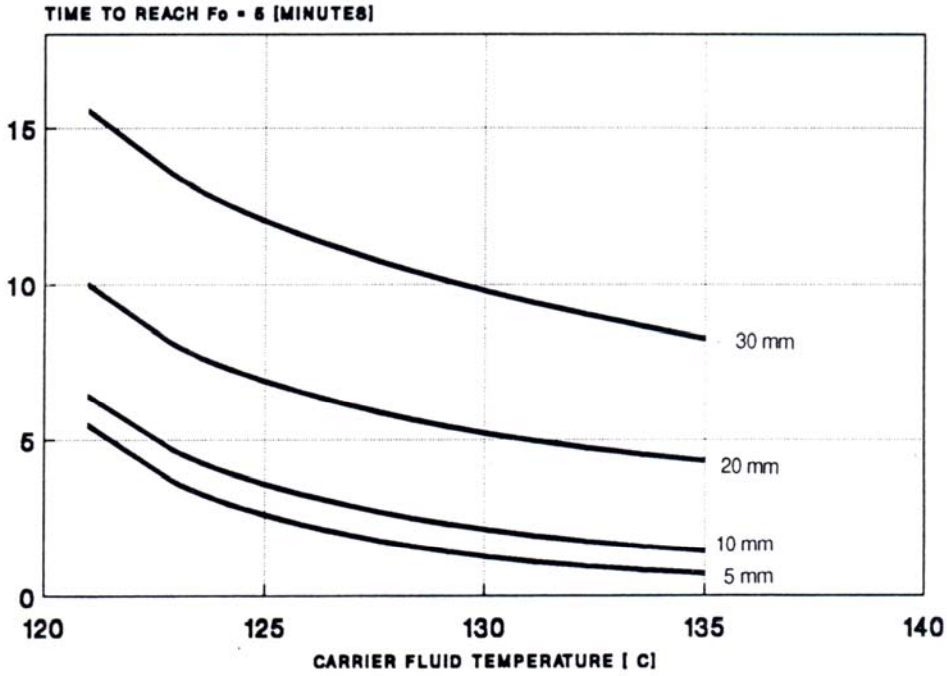
ในการให้ความร้อนโดยใช้กระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมนั้นไม่สามารถสเตอริไลส์อาหารที่มีชิ้นอาหารขนาดใหญ่ โดยใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 130 องศาเซลเซียสได้ ซึ่งอุณหภูมิสูงดังกล่าวทำให้อาหารส่วนที่เป็นของเหลวได้รับความร้อนที่สูงเกินไป จากการทดลองในการให้ความร้อนแก่ส่วนที่เป็นของเหลว (liquid phase) ของอาหาร ซึ่งจะทำให้ตรงกลางชิ้นของอาหารมี F_0 เท่ากับ 5 นาที แสดงดังภาพที่ 3.6 ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสเตอริไลส์และขนาดของชิ้นอาหาร ในการฆ่าเชื้ออาหารที่มีชิ้นอาหารความยาว 25 มิลลิเมตร และกระทำที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส จะพบว่าค่า F_0 ในส่วนของอาหารที่เป็นของเหลว มีค่าสูงประมาณ 150 นาที ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเกิน แต่ถ้าลดขนาดชิ้นอาหารลงเหลือความยาว 15 มิลลิเมตร และกระทำที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส พบว่าส่วนที่เป็นของเหลวจะมีค่า F_0 สูงกว่า 25 นาทีเล็กน้อย ซึ่งเป็นสภาวะทั่วไปที่ใช้ในการฆ่าเชื้ออาหารชนิดที่เป็นกรดต่ำโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกวาด นอกจากนั้นในภาพที่ 3.6 ยังแสดงให้เห็นว่าการใช้อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ในการฆ่าเชื้ออาหารบรรจุกระป๋องที่มีขนาดของชิ้นอาหารค่อนข้างใหญ่จะมีผลทำให้เกิดการสุกเกินไปเนื่องจากค่า F_0 มีค่าสูงเกินไป

ข้อเสียของกระบวนการให้ความร้อนวิธีดั้งเดิม คือต้องใช้ระยะเวลานานในการทำให้ความร้อนที่ใจกลางชิ้นอาหารถึงระดับอุณหภูมิที่ต้องการ จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้เพื่อที่จะทำให้ใจกลางชิ้นอาหารมีค่า F_0 เท่ากับ 5 โดยการถ่ายเทความร้อนจากส่วนของอาหารที่เป็นของเหลวและขนาดชิ้นของอาหารแสดงดังภาพที่ 3.7 พบว่าการใช้ความร้อนอย่างต่อเนื่องโดย



ภาพที่ 3.6 ค่า F_0 ของอาหารในส่วนที่เป็นของเหลว ในการฆ่าเชื้ออาหารที่มีขนาดชิ้นแตกต่างกันที่อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อต่างๆ

ที่มา : Skudder (1992)



ภาพที่ 3.7 เวลาที่ใช้ในการทำให้จุดกึ่งกลางของชิ้นอาหารขนาดต่างๆ มีค่า F_0 เท่ากับ 5 เมื่อใช้อุณหภูมิระดับต่างๆ ในการฆ่าเชื้อ

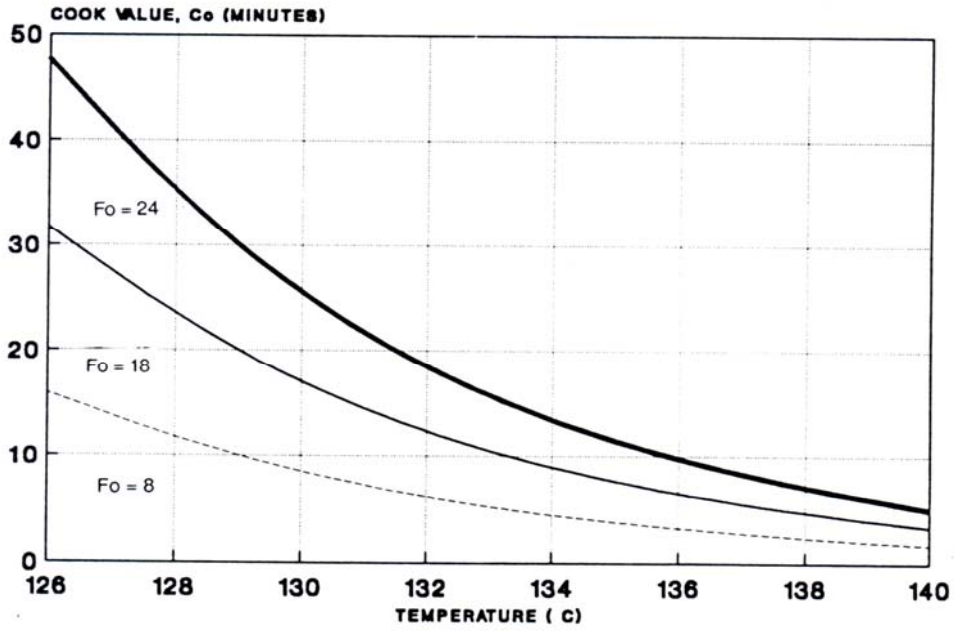
ที่มา : Skudder (1992)

วิธีการดั้งเดิมกับอาหารที่มีชิ้นอาหารที่มีความยาวเกินกว่า 15 มิลลิเมตร จะต้องใช้ท่อที่รักษาหรือคงอุณหภูมิ ในการคงอุณหภูมิไว้เกินกว่า 5 นาที ทำให้จะต้องใช้ท่อที่มีขนาดยาวที่มากเกินไป

นอกจากนั้นในกระบวนการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องแบบดั้งเดิม สามารถกระทำได้เฉพาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีชิ้นของแข็งประมาณ 30 – 40 % เท่านั้นเพื่อทำให้อาหารในส่วนของเหลวมีความร้อนสูงเพียงพอที่จะฆ่าเชื้ออาหารที่เป็นชิ้นของแข็ง นอกจากนั้นข้อจำกัดอีกประการหนึ่ง ได้แก่ ความหนืด (viscosity) ของอาหารในส่วนที่เป็นของเหลว เนื่องจากของเหลวที่มีความหนืดสูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนจากอาหารในส่วนที่เป็นของเหลวไปยังชิ้นของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งทำให้ความแตกต่างของเวลาในการกระจายความร้อนระหว่างเฟสของแข็งและของเหลวมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น

ในกระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกนั้น ชิ้นของอาหารจะได้รับความร้อนโดยตรงและอุณหภูมิที่ใช้ในการสเตอริไลส์สามารถทำให้สูงได้ถึง 140 องศาเซลเซียส (เป็นอุณหภูมิที่จำกัดในการใช้เนื่องจากจะทำลายพลาสติกที่ใช้หุ้มอิเลคโตรด) โดยไม่ทำให้ของเหลวได้รับอุณหภูมิที่สูงเกินไป นอกจากนั้นยังสามารถใช้ในการฆ่าเชื้ออาหารที่มีปริมาณชิ้นอาหารอยู่สูงและแขวนลอยในส่วนที่เป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงได้

กระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกจึงสามารถใช้ในการสเตอริไลส์อาหารที่มีส่วนผสมของชิ้นอาหารขนาดใหญ่โดยใช้ระดับอุณหภูมิที่สูงกว่าได้ ในขณะที่ทำให้ระดับของการทำให้สุกเกินไปของอาหารและการทำลายวิตามินมีค่าลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างค่า F_0 และ ค่า C_0 (เปรียบเทียบจากการทำลายไทอามีน) เมื่อใช้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ แสดงดังภาพที่ 3.8 จากภาพที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และค่า F_0 เท่ากับ 24 นั้น จะเห็นว่าค่า C_0 มีค่าประมาณ 4 นาที ในขณะที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส และค่า F_0 เท่ากับ 8 นั้น พบว่าค่า C_0 มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า (8 นาที)



ภาพที่ 3.8 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ฆ่าเชื้อต่อค่า C_0 ที่ค่า F_0 ระดับต่างๆ
ที่มา : Skudder (1992)

ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีมูลค่าเพิ่มและมีคุณภาพสูงที่ได้จากการใช้กระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิก ในส่วนของอาหารที่เป็นกรดสูง (high acid products) ได้แก่ ซอสพาสต้าผสมผัก ผลไม้ผสม สตรอเบอร์รี่ทั้งผล ซอสแอปเปิ้ล และกีวีฟรุ๊ตหั่นชิ้น และอาหารที่เป็นกรดต่ำ (low acid products) ได้แก่ พาสต้า เช่นทอเทลลินี (tortellini) ในซอสมะเขือเทศ ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ เช่น สตูว์เนื้อผสมผัก และแกงผักรวมทั้งซุปไมน์สโตรนเข้มข้น

สรุป

กระบวนการให้ความร้อนแบบโอมมิกทำให้ผู้ประกอบการด้านอุตสาหกรรมอาหารสามารถผลิตผลิตภัณฑ์อาหารชนิดใหม่ที่มีคุณภาพสูงและมีความปลอดภัย รวมทั้งสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้เป็นเวลานานที่อุณหภูมิปกติ เนื่องจากกระบวนการนี้สามารถทำให้เกิดความร้อนแก่อาหารได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ โดยไม่ทำให้ลักษณะของอาหารถูกทำลายและคงคุณค่าทางโภชนาการและมีการสูญเสียวิตามินที่ต่ำกว่ากระบวนการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อน โดยเฉพาะการฆ่าเชื้ออาหารที่มีชิ้นของแข็งอยู่ในปริมาณที่สูงและใช้ร่วมกับกระบวนการบรรจุแบบปลอดเชื้อ ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องและนำมาใช้ในเชิงการค้าในหลายประเทศทั่วโลก

เอกสารอ้างอิง

Allen, K., V. Eidman and J. Kinsey. 1996. An economic engineering study of ohmic heating of food processing . Food Technol. 50 : 269 – 273.

Brown, K. L., C. A. Ayres, J. E. Gaze and M. E. Newman. 1984. Thermal destruction of bacterial spores immobilized in food/alginate particles. Food Microbiol. 1 : 187-198.

Castro, I., J. A. Teixeira, S. Salengke, S.K. Sastry and A. A. Vicente. 2004. Ohmic heating of strawberry products : electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. Innovative Food Sci. Emerging Technol. 5 : 27 – 36.

de Alwis, A. A. P. and P. J. Fryer. 1990. The use of direct resistance heating in the food industry. J. Food Eng. 11 : 3-27.

FDA. 2001. Kinetics of microbial inactivation of alternative food processing technologies : ohmic heat and inductive heating. จาก http://vm.cfscan.fda.gov~comm/ift-ohm.html สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2548

Fryer, P. 1995. Electrical resistant heating of foods. pp. 205 – 235. *In* "New methods of food preservation". G.W. Gould (ed.). Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Halden, A. A., A. A. P. de Alwis and P. J. Fryer. 1990. Changes in the electrical conductivity of foods during ohmic heating. J. Food Sci. Technol. 25 : 9-25.

Holdsworth, S. D. 1993. Aseptic processing and packaging of food products. Elsevier, London.

Lakkakula, N. R., M. Lima and T. Walker. 2004. Rice bran stabilization and rice bran oil extraction using ohmic heating. Bioresource Technology 92 : 157 – 161.

Ohlsson, T. 1999. Minimal processing of foods with electric heating methods. pp. 97-105. *In* "Processing foods". A. R. Fernanda, Oliviera and J.C. Oliviera (eds.). CRC press LLC, Florida.

Parrot, D. L. 1992. Use of ohmic heating for aseptic processing of food particulates. Food Tech. 46 : 68-72.

Sastry, K. S. 1994. Ohmic heating. pp. 17 – 34. *In* "Minimal processing of foods and process optimization : an interface. R. P. Singh and F. A. R. Oliveira. CRC Press, Inc. Florida.

Sastry, S. and S. Palaniappan, 1992. Ohmic heating of liquid particle mixtures. Food Technol. 46 (12) : 64 -67.

Sastry, S. and J. Barach. 2000. Ohmic and inductive heating. J. Food Sci. 65 (4) : 42-46.

Shirsat, N., J. G. Lyng, N. P. Brutonand B. McKenna. 2004. Ohmic heating : Electrical conductivities of pork cuts. Meat Sci. 67 : 507 – 514.

Skudder, P. J. 1993. Ohmic Heating. pp. 74 – 89. *In* " Aseptic processing and packaging of particulate foods. E. M. A. Willhoft (ed.). Blackie Academic & Professional, Glasgow.

Sreenarayanan, V. V., and P. K. Chattopadhyay. 1986. Rice bran stabilization by dielectric heating. J. Food Proc. Preserv. 10 : 89 – 98.

Zoltai, P. and P. Swearinggen. 1996. Product development considerations for ohmic processing. Food Technol. 50 (5) : 263 – 266.