บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

การทอดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่แพร่หลายและได้รับความนิยมมากทั้งในระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรม เนื่องจากขั้นตอนที่ค่อนข้างง่าย สะดวก และรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถเลือกใช้ได้กับอาหารหลากหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นอาหารประเภทเนื้อสัตว์ ผักหรือผลไม้ ซึ่งการทอดจะช่วยส่งเสริมลักษณะทางคุณภาพด้านประสาทสัมผัส (Sensory Quality) ของอาหาร แต่ในขั้นตอนการทอดมักจะมีการใช้ปริมาณของน้ำมันสูง ส่งผลให้อาหารที่ผ่านการทอดมีลักษณะอมน้ำมันทำให้ผู้บริโภคได้รับน้ำมันในปริมาณที่มากเกินความต้องการ จึงอาจก่อให้เกิดอัตราเสี่ยงต่อโรคบางชนิด เช่น โรคความดันโลหิตสูง โรคหัวใจ โรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด และโรคอ้วน จึงทำให้เป็นข้อจำกัดสำหรับผู้บริโภคที่มีปัญหาทางด้านสุขภาพ ดังนั้นจึงมีการพัฒนากระบวนการทอดขึ้นโดยอาศัยสภาวะสุญญากาศทำให้มีปริมาณของน้ำมันภายในอาหารน้อยลง

การทอดที่สภาวะสุญญากาศ (Vacuum Frying) เป็นกระบวนการให้ความร้อนต่ออาหาร และมีการลดความดันภายในซึ่งเป็นระบบปิด ดังนั้นสามารถลดอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำที่อยู่ภายในอาหารให้ระเหยออกมาได้อย่างรวดเร็ว การทอดภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำจะส่งผลให้สามารถรักษาคุณค่าทางอาหารและลักษณะปรากฏทางกายภาพ สีสัน กลิ่น อีกทั้งรสชาติของอาหารที่ได้ซึ่งยังเป็นที่ยอมรับมากกว่าการทอดที่สภาวะบรรยากาศ

การศึกษากระบวนการทอดผักและผลไม้ภายใต้สภาวะสุญญากาศจึงสำคัญอย่างยิ่งเพื่อนำมาอธิบายถึงกลไกการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนตลอดจนปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ เช่น การหดและขยายตัวของอาหาร อีกทั้งยังสามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวทำนายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง ปริมาณความชื้นและน้ำมันซึ่งมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการทอด

ตรวจเอกสาร

1.1 การแปรรูปอาหาร

การแปรรูปอาหาร เป็นกระบวนการเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปอย่างสมบูรณ์ โดยรวมเอาขั้นตอนการทำงานทั้งทางกลและทางฟิสิกส์เข้าไว้ด้วยกัน แต่ในบางครั้งการแปรรูปอาจหมายถึงการทำงานเพียงขั้นตอนเดียวก็ได้ ถ้าการทำงานนั้นทำให้องค์ประกอบหรือคุณสมบัติของวัตถุดิบเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เช่น การต้มมันฝรั่ง การอบขนมปัง การแช่แข็ง การพาสเจอไรส์ การสเตอริไรส์ การทำแห้งของผลิตภัณฑ์ การทำข้นน้ำผลไม้และการหมัก เป็นต้น ดังนั้นกระบวนการแปรรูปอาหารที่สมบูรณ์อาจประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานทางกลหรือทางฟิสิกส์ ขั้นตอนเดียวหรือหลายขั้นตอนก็ได้

- การทำงานทางกล (Mechanical operations) ได้แก่ การผสม (Mixing) การจัดการวัสดุ (Handling of materials) การลดและเพิ่มขนาด (Size reduction and enlargement) และการแยกสาร (Mechanical separation) ฯลฯ

- การทำงานทางฟิสิกส์ (Physical operations) สามารถจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ การให้ความร้อน (Heating) และการทำให้เย็น (Cooling) ซึ่งทั้ง 2 อย่างนี้มีความสำคัญมากในการถนอมรักษาอาหาร ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกริยาทางเคมีและเอนไซม์ในอาหารขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นการเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมก็สามารถยับยั้งปฏิกริยาเหล่านี้ได้ ทำให้สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้ นอกจากนี้การให้ความร้อนและการทำให้เย็นยังมีความสำคัญมากในกระบวนการแยกสาร (Physical separation) เช่น การทำแห้ง การทำให้ข้น การสกัดและการตกผลึก เป็นต้น

1.2 กระบวนการทอด (Frying)

การทอดเป็นกรรมวิธีที่มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณภาพการบริโภคของอาหาร วัตถุประสงค์รองคือ การถนอมรักษาอาหารโดยการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ ลดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ และเอนไซม์ ที่ผิวอาหารหรือตลอดชิ้นอาหาร ถ้าเป็นการทอดอาหารชิ้นบาง ๆ ความชื้นหลังอาหารของการทอดจะเป็นตัวกำหนดอายุของผลิตภัณฑ์อาหารซึ่งมีความชื้นอยู่ภายใน เช่น โดนัท ปลา อายุการเก็บรักษาเนื้อไก่ชุบแป้งทอดหรือชุบขนมปังป่นทอดจะสั้นเนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของน้ำและน้ำมันในระหว่างการเก็บรักษา จึงไม่นิยมผลิตอาหารเหล่านี้ในรูปแบบอุตสาหกรรมและกระจายไปยังร้านค้าย่อย แต่นิยมผลิตในร้านค้าย่อยมากกว่าอาหารเหล่านี้สามารถเก็บรักษาโดยการแช่เย็นได้หลายวัน อาหารที่ทอดให้แห้งอย่างทั่วถึง เช่น มันฝรั่งทอดกรอบ ขนมขบเคี้ยวประเภทข้าวโพดหรือมันฝรั่ง อาหารกึ่งสำเร็จรูปโดยผ่านการอัดเกรียวจะมีอายุการเก็บรักษานานถึง 12 เดือนที่อุณหภูมิห้อง และรักษาคุณภาพได้โดยการใช้บรรจุภัณฑ์และสภาวะการเก็บรักษาที่เหมาะสม

ทฤษฎี

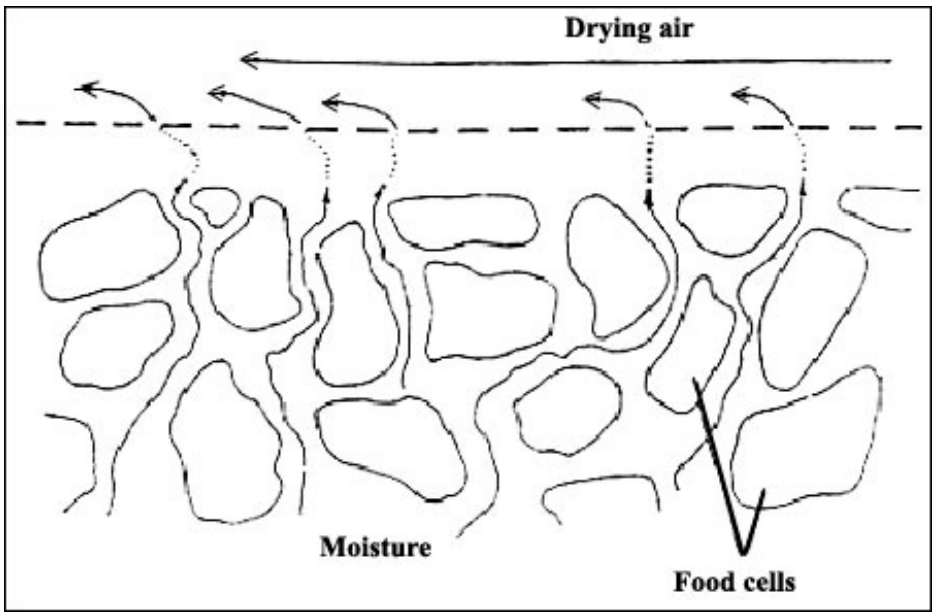
เมื่อวางอาหารลงในน้ำมันร้อน อุณหภูมิที่ผิวหน้าของอาหารจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดเดือดของน้ำและจะทำให้น้ำเกิดการระเหยกลายเป็นไอ ผิวหน้าจึงเริ่มแห้ง แนวระนาบการระเหยจะเคลื่อนที่เข้าไปในอาหารและเกิดเปลือกนอกขึ้น อุณหภูมิบริเวณผิวหน้าของอาหารจะเพิ่มขึ้นสู่อุณหภูมิของน้ำมันร้อน และอุณหภูมิภายในจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ถึงจุดเดือดของน้ำอีกครั้ง (จุดเดือดของน้ำที่ความดันบรรยากาศ คือ 100°C) ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันและอาหารและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวจะเป็นตัวควบคุมการถ่ายเทความร้อน ค่าการนำความร้อนของอาหารจะเป็นตัวควบคุมอัตราการส่งผ่านความร้อนเข้าไปในอาหาร

เปลือกนอก (crust) ของอาหารทอดมีลักษณะเป็นรูพรุนซึ่งประกอบด้วยท่อแคปปิลารี่ขนาดต่างๆ น้ำและไอน้ำจะเคลื่อนที่ออกจากแคปปิลารี่ช่องใหญ่ก่อนและถูกแทนที่ด้วยน้ำมันในระหว่างการทอดความชื้นจะเคลื่อนที่ผ่านผิวอาหารและฟิล์มบางๆ ของน้ำมัน ความหนืดและความเร็วของการเคลื่อนที่ของน้ำมันเป็นตัวกำหนดความหนาของฟิล์มซึ่งจะมีผลต่ออัตราการถ่ายโอนมวลและความร้อน ความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างความชื้นภายในอาหารและในน้ำมันจะเป็นตัวขับเคลื่อนความชื้นคล้ายกับกรณีการทำแห้งด้วยลมร้อน

เวลาที่ใช้ในการทอดโดยสมบูรณ์ขึ้นอยู่กับ

- ชนิดของอาหาร
- อุณหภูมิของน้ำมัน
- วิธีทอดว่าเป็นแบบน้ำมันตื้น (shallow frying) หรือน้ำมันท่วม (deep-fat frying)
- ความหนาของชิ้นอาหาร
- ความต้องการในการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการบริโภค

อาหารซึ่งมีความชื้นอยู่ภายในจะถูกทอดจนกว่าจุดร้อนช้าที่สุดของอาหารจะได้รับความร้อนเพียงพอที่สามารถจะทำลายจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนหรือเพียงพอที่จะเปลี่ยนคุณสมบัติด้านประสาทสัมผัสได้ตามที่ต้องการ ปัจจัยเหล่านี้สำคัญมากโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์เนื้อบดหรืออาหารอื่นที่อาจมีเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคอาศัยอยู่ได้



ภาพประกอบ 1.1 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการทำแห้ง
ที่มา : วิไล รังสาดทอง, 2543 : 229

การคำนึงถึงปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์และความต้องการของผลิตภัณฑ์จะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิในการทอด การทอดที่อุณหภูมิสูงจะช่วยลดเวลาและเพิ่มอัตราการผลิต อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสูงก็จะเร่งให้น้ำมันกลายเป็นกรดไขมันอิสระซึ่งจะเปลี่ยนแปลงความหนืด สี และกลิ่นของน้ำมัน ทำให้ต้องเปลี่ยนน้ำมันบ่อยขึ้น จึงเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายสำหรับน้ำมันในการทอด การสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์อีกประการหนึ่งเกิดจากการเดือดของอาหารอย่างรุนแรงที่อุณหภูมิสูงและเกิดการสูญเสียน้ำมันที่ติดขึ้นมากับไอน้ำ อีกทั้งระดับอุณหภูมิที่สูงยังจะส่งผลให้เกิดการแตกตัวกลายเป็นอะโครเลน (acrolein) ซึ่งเป็นควันสีน้ำเงินและทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศได้

ปัจจัยอีกข้อในการกำหนดอุณหภูมิในการทอดคือ ลักษณะความต้องการของผลิตภัณฑ์ มีการใช้อุณหภูมิสูงสำหรับการทอดอาหารที่ต้องการให้มีเปลือกนอกแข็งและมีความชื้นภายใน การเกิดเปลือกนอกอย่างรวดเร็วจะเป็นการปิดกั้นไม่ให้มีการเคลื่อนที่ของน้ำออกไปจากอาหาร และอัตราการถ่ายโอนความร้อนไปยังด้านในอาหาร ชิ้นอาหารจึงยังคงรักษาเนื้อสัมผัสที่ชุ่มชื้นและกลิ่นรสของสารประกอบในอาหารไว้ได้ การทำให้อาหารแห้งโดยการทอดจะใช้การทอดที่อุณหภูมิต่ำกว่าจึงทำให้ระนาบการระเหยเคลื่อนลึกลงไปในอาหารก่อนการเกิดเปลือกนอก อาหารจึงแห้งก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงด้านกลิ่น สี ที่รุนแรง (วิไล รังสาดทอง, 2543)

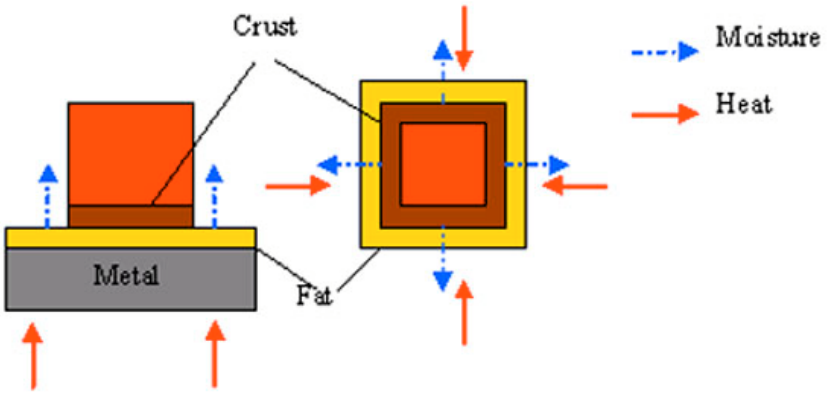
1.2.1 กระบวนการทอดทางอุตสาหกรรมที่สำคัญมีอยู่ 2 วิธี ซึ่งสามารถจำแนกโดยวิธีการถ่ายโอนความร้อน ได้แก่ วิธีการทอดแบบน้ำมันตื้น (shallow frying) และวิธีการทอดแบบน้ำมันท่วม (deep-fat frying)

1.2.1.1 การทอดแบบน้ำมันตื้น

วิธีนี้เหมาะสำหรับอาหารที่มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง เช่น เบคอน ไข่ เบอร์เกอร์ และพายชนิดต่างๆ ความร้อนจากผิวของกะทะร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำมันบางๆ ไปยังอาหาร ดังภาพประกอบ 1.2 ก ความหนาของชั้นน้ำมันแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของผิวหน้าอาหาร ถ้าชั้นน้ำมันบางฟองไอน้ำเดือดจะทำให้อาหารเคลื่อนที่ขึ้นลงบนผิวร้อนของกะทะ การกระจายความร้อนจึงไม่สม่ำเสมอ ทำให้ผิวหน้าของอาหารที่ทอดแบบน้ำมันตื้นมีสีน้ำตาลไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามวิธีการทอดแบบนี้จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่บริเวณผิวหน้าของอาหารสูง (200-400 $W/m^2\ ^oC$)

1.2.1.2 การทอดแบบน้ำมันท่วม

การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีนี้เป็นทั้งการพาความร้อนและการนำความร้อนเข้าสู่ภายในอาหาร ผิวอาหารทั้งหมดจะได้รับความร้อนใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดสีและลักษณะภายนอกที่สม่ำเสมอ ดังภาพประกอบ 1.2 ข การทอดแบบน้ำมันท่วมเหมาะสำหรับอาหารทุกรูปร่าง แต่อาหารที่มีรูปร่างไม่แน่นอนจะอมน้ำมันมากกว่าอาหารที่มีรูปร่างแน่นอน สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนก่อนเกิดการระเหยเท่ากับ 250-300 $W/m^2\ ^oC$ และเพิ่มขึ้นเป็น 800-1000 $W/m^2\ ^oC$ เนื่องจากการเกิดเทอบุเลนซ์ของไอที่หนีออกจากอาหาร อย่างไรก็ตามถ้าอัตราการระเหยสูงเกินไปจะเกิดฟิล์มบางๆ ของไอน้ำอยู่บนผิวอาหารทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนลดลง



(ก) (ข)

ภาพประกอบ 1.2 การถ่ายโอนความร้อนและมวลสารใน (ก) การทอดน้ำมันตื้น (ข) การทอด น้ำมันท่วม

1.2.2 กระบวนการทอด สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะ คือ

1.2.2.1 Initial Heating เป็นระยะเวลาที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนจากอุณหภูมิเริ่มต้นไปจนถึงจุดเดือดของน้ำมีการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำมันเข้าสู่อาหาร โดยการพาความร้อนที่บริเวณผิวหน้าและมีการนำความร้อนเข้าในตัวของอาหาร

1.2.2.2 Surface Boiling เกิดการสูญเสียความชื้นที่บริเวณผิวหน้าของอาหารทันทีเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนและเริ่มมีการก่อตัวของเปลือกนอกบริเวณผิวหน้าของอาหาร เป็นผลให้มีการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่บริเวณผิวหน้าอย่างรวดเร็ว โดยระยะดังกล่าวนี้เกิดการระเหยส่งผลให้เกิดฟองอากาศในการทอด

1.2.2.3 Falling Rate ใช้ระยะเวลานานเพื่อให้ความชื้นทั้งหมดหายไป และอุณหภูมิที่กึ่งกลางอาหารสูงถึงจุดเดือดของน้ำในการทอดอาหารจะเริ่มแห้งและเกิดการก่อตัวเป็นเปลือกนอกมากขึ้นและลดการถ่ายโอนความร้อนเนื่องจากค่าการนำความร้อนของบริเวณเปลือกนอกมีค่าต่ำ

1.2.2.4 Bubble End Point มีการหยุดการสูญเสียความร้อนจากอาหารชั่วคราว อาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยต่าง ๆ จากการสูญเสียน้ำในตัวของอาหาร (Moreira และคณะ, 1999)

ในระหว่างการทอด พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในชิ้นอาหาร ดังนี้

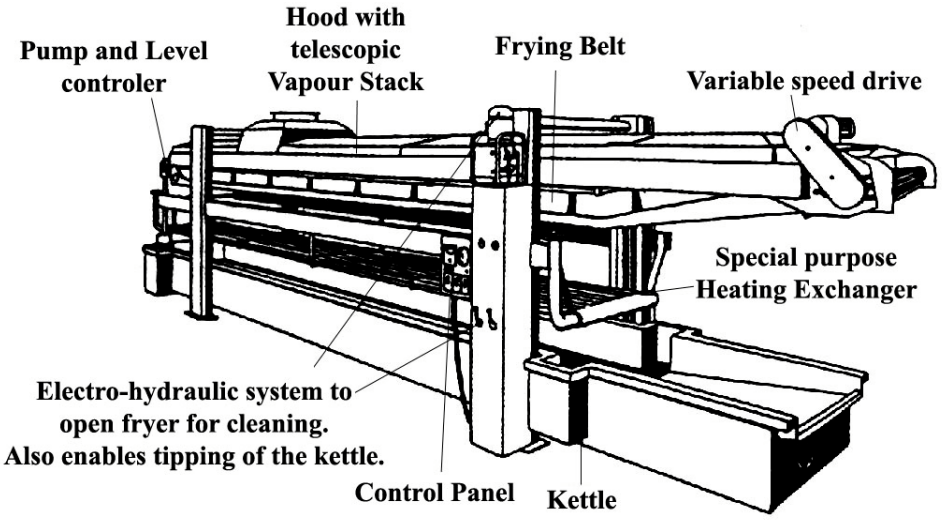
- เกิดการระเหยของน้ำในอาหาร
- มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้ระดับอุณหภูมิที่ต้องการ และมีการฟอร์มตัวของเม็ดแป้งจนกระทั่งอาหารสุกและมีความกรอบ
- การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดความกรอบและเกิดสีน้ำตาล
- ผลิตภัณฑ์มีการดูดซับน้ำมันเข้าไป

1.2.3 เครื่องมือ

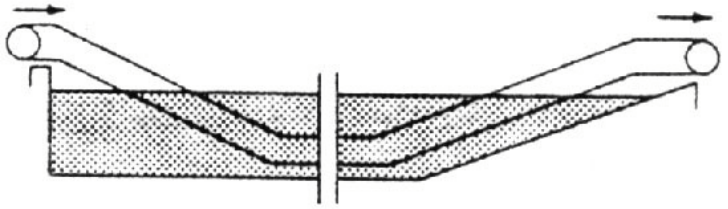
เครื่องมือสำหรับการทอดแบบน้ำมันตื้นประกอบด้วยผิวที่มีโลหะร้อนโดยใช้ชั้นน้ำมันตื้น ๆ ในอุตสาหกรรมนิยมใช้เครื่องทอดแบบน้ำมันท่วมซึ่งสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ การทอดแบบกะ (batch) ทำได้โดยการทอดอาหารในอ่างน้ำมันร้อนจนกว่าจะได้ระดับการทอดที่ต้องการซึ่งโดยทั่วไปจะดูได้จากสีผิวของอาหาร เครื่องทอดแบบน้ำมันท่วมซึ่งทำงานแบบต่อเนื่องประกอบด้วยสายพานสแตนเลสที่มีรูเล็ก ๆ และเคลื่อนที่ผ่านแท็งก์เก็บน้ำมัน ภาพประกอบ 1.3 ความร้อนที่ใช้อาจมาจากไฟฟ้า ก๊าซ น้ำมันเตา หรือ ไอน้ำ ในการวางอาหารลงในน้ำมันหรือวางลงในน้ำมันให้จมลงบนสายพานที่จุ่มอยู่ในน้ำมันจะใช้ใบพายเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ถ้าอาหารลอยขึ้นอาจใช้สายพานตัวที่สอง ทำให้อาหารจมลงใต้ผิวน้ำ ดังภาพประกอบ 1.4 ความเร็วของสายพานและอุณหภูมิของน้ำมันจะเป็นตัวควบคุมเวลาในการทอด สายพานที่เอียงอยู่จะเคลื่อนที่นำอาหาร

ออกไปพร้อมกับสลัดน้ำมันกลับลงในแท็งก์ เครื่องจะทำงานอัตโนมัติด้วยอัตราการผลิตสูงถึง 15 ตันผลิตภัณฑ์แห้งต่อชั่วโมง

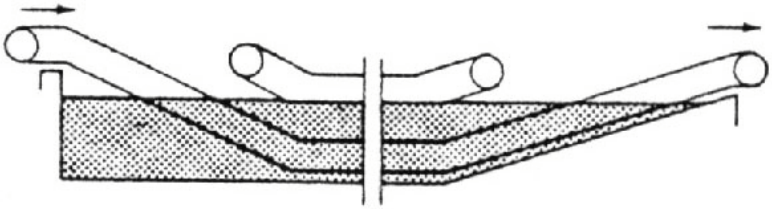
น้ำมันจะไหลหมุนเวียนอย่างต่อเนื่องอยู่ในเครื่องทำความร้อนภายนอกและมีการกรองเศษอาหารออกไปพร้อมกับมีการเติมน้ำมันใหม่ลงไปโดยอัตโนมัติเพื่อรักษาระดับของน้ำมันในแท็งก์ การกำจัดเศษอาหารออกไปจะช่วยยืดอายุน้ำมันได้ มิฉะนั้นอาหารจะไหม้และมีผลต่อกลิ่นรสและสีของผลิตภัณฑ์ ความหนืดของน้ำมันสำคัญมากต่อการถ่ายโอนความร้อนที่เหมาะสมรวมทั้งการทำให้อาหารดูดซับน้ำมันน้อยที่สุด ค่าความหนืดที่เหมาะสมเกิดขึ้นเมื่อให้ความร้อนน้ำมันจนได้ปริมาณกรดไขมันอิสระ 0.4% นอกจากนั้นยังมีการใช้เมทิลซิลิโคนเพื่อป้องกันการเกิดฟอง



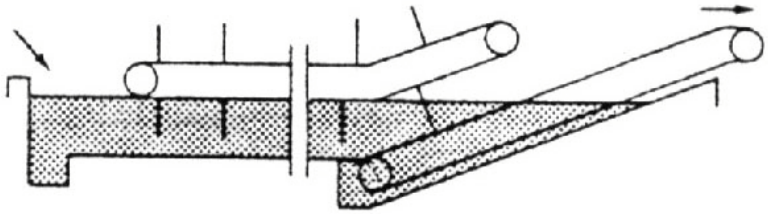
ภาพประกอบ 1.3 ระบบการทอดอย่างต่อเนื่องในน้ำมันท่วม
ที่มา : วิไล รังสาดทอง, 2543 : 265



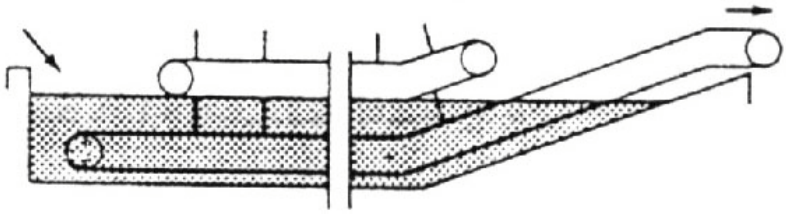
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพประกอบ 1.4 การเรียงตัวแบบต่าง ๆ ของสายพานในเครื่องทอด

(ก) อาหารที่ไม่ลอยตัว เช่น ชิ้นปลาบด

(ข) ผลิตภัณฑ์ชุบแป้งขนมปัง

(ค) อาหารแห้งที่มีความหนาแน่นต่ำ เช่น ขนมขบเคี้ยว

(ง) อาหารประเภทผสม เช่น ถั่ว และ ขนมขบเคี้ยว

ที่มา : วิไล รังสาดทอง, 2543 : 265

1.2.4 ผลกระทบต่ออาหาร

การทอดเป็นหน่วยปฏิบัติการที่มีลักษณะเฉพาะคือ การนำผลิตภัณฑ์จากหน่วยปฏิบัติการหนึ่งไปใช้ในอีกหน่วยปฏิบัติการหนึ่ง คือใช้น้ำมันที่ได้รับความร้อนในหน่วยหนึ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนให้กับอาหารในอีกหน่วยหนึ่ง ผลกระทบต่อการทอดอาหารในเรื่องคุณภาพอาหารจึงเกี่ยวข้องกับน้ำมันและความร้อนที่ใช้ในการทอดอาหาร

1.2.4.1 ผลกระทบของความร้อนต่อคุณภาพของน้ำมัน

การให้ความร้อนแก่น้ำมันที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานานทำให้น้ำมันเกิดออกซิเดชั่นได้เนื่องจากมีความชื้นและออกซิเจนเคลื่อนที่ออกมาจากอาหารระหว่างการทอด นอกจากนั้นยังเกิดการระเหยสารประเภทคาร์บอนิล กรดไฮดรอกซี กรดคีโตน และกรดอีพอกซี ทำให้น้ำมันมีสีคล้ำและมีกลิ่นเหม็น โมเลกุลของน้ำมันจะเกิดปฏิกริยาโพลิเมอไรเซชั่นในสภาพไม่มีออกซิเจนและให้โพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลสูงหรือให้สารประกอบไซคลิกทำให้น้ำมันมีความหนืดสูงขึ้น ซึ่งจะมีผลไปลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวระหว่างการทอดและทำให้อาหารดูดซับน้ำมันมากขึ้น

การออกซิไดซ์วิตามินที่ละลายได้ในไขมันทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เรตินอล แคโรทินอยด์ และโทโคเฟอรอลจะถูกทำลายไปทำให้สีและกลิ่นของน้ำมันเปลี่ยนไป อย่างไรก็ตามการที่โทโรเฟอรอลถูกออกซิไดซ์เองจะมีผลในการป้องกันกระบวนการเกิดการออกซิเดชั่นของน้ำมันได้เรื่องนี้มีความสำคัญมากเพราะน้ำมันที่ใช้ทอดส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมันพืชซึ่งมีส่วนประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งเกิดออกซิเดชั่นได้ง่าย กรดลิโนเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกายจะสูญเสียไปและมีผลทำให้ความสมดุลของกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวเปลี่ยนไป

1.2.4.2 ผลกระทบของความร้อนต่อการทอด

วัตถุประสงค์หลักของการทอด คือ การปรับปรุงสี กลิ่น และรสชาติในเปลือกนอกของอาหารโดยอาศัยปฏิกริยาเมลลาร์ดและการดูดซับสารระเหยจากน้ำมัน ปัจจัยหลักที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงสีและกลิ่นของอาหาร ได้แก่

1 ชนิดของน้ำมันที่ใช้ในการทอด

2 อายุและประวัติด้านความร้อนของน้ำมัน

3 อุณหภูมิและเวลาในการทอด

4 ขนาดและผิวด้านหน้าของอาหาร

5 การจัดการหลังการทอด

ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีผลต่อการดูดซับน้ำมันของอาหาร ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสารประกอบโพลิเมอร์ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในอาหารทอดจะคล้ายคลึงกับกรณีของการอบอาหาร

ผลกระทบของการทอดต่อคุณค่าทางโภชนาการของอาหารขึ้นอยู่กับชนิดของกรรมวิธีที่ใช้ การใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดเปลือกนอกเร็วและปิดกั้นผิวหน้าของอาหารไว้ ทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยลงและยังคงรักษาคุณค่าทางโภชนาการส่วนใหญ่ไว้ได้ นอกจากนั้นยังเกิดการสูญเสียระหว่างการเก็บรักษาน้อยเนื่องจากผู้บริโภคอาหารมักจะบริโภคอาหารหลังการทอดไม่นาน เช่น มีรายงานการสูญเสียไลซีน 17% ในปลาทอดและเพิ่มเป็น 25% เมื่อใช้น้ำมันที่ถูกทำลายด้วยความร้อน, ตับทอดในน้ำมันตื้นจะสูญเสียไทอามีน 15% และไม่มีโฟเลทเหลืออยู่ และการสูญเสียวิตามินซีในอาหารทอดน้อยกว่าอาหารต้ม วิตามินซีสามารถสะสมกันอยู่ในรูปของกรดไฮโดรเอสคอร์บิกเนื่องจากมีความชื้นต่ำ ในขณะที่วิตามินซีจะถูกไฮโดรไลซ์และจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรด 2,3-ไดคีโตกลูโคนิก ถ้าใช้วิธีต้ม

การทอดให้อาหารแห้งเพื่อถนอมรักษาอาหารจะทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าของอาหารมากขึ้นโดยเฉพาะวิตามินที่ละลายได้ในไขมัน เช่น วิตามินอี ซึ่งถูกดูดซับโดยน้ำมันระหว่างการทอดจะถูกออกซิไดซ์ในระหว่างการเก็บรักษา วิตามินที่ละลายในน้ำซึ่งไวต่อความร้อนหรือออกซิเจนก็ถูกทำลายโดยการทอด คุณภาพของโปรตีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกริยาเมลลาร์ดของกรดอะมิโนในเปลือกนอก มีรายงานการสูญเสียคาร์โบไฮเดรตและเกลือแร่ปริมาณน้อยมาก และคาดว่าคงเกิดการสูญเสียไม่มากนัก ปริมาณไขมันในอาหารเพิ่มขึ้นเนื่องจากการดูดซับน้ำมัน แต่ยากที่จะกล่าวถึงคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากความแตกต่างของชนิดและประวัติการใช้น้ำมันและปริมาณการดูดซับน้ำมันในอาหาร

กล่าวได้ว่า การเปลี่ยนแปลงบางอย่างที่อาจเกิดขึ้นในน้ำมันระหว่างการทดลองได้แก่ กรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น ค่าไอโอดีนลดลง มีค่าดัชนีหักเหเพิ่มขึ้น จุดมีควันต่ำลง ค่าเปอร์เซ็นต์ออกไซด์สูงขึ้น ค่าคาร์บอนิลสูงขึ้น จุดละลายต่ำลง สีคล้ำลง ความหนืดเพิ่มขึ้น การเป็นฟองเพิ่มขึ้น และ โมเลกุลของไขมันจะมาต่อกัน ได้มีการทดลองให้ความร้อนแก่ไขมันโดยมีหรือไม่มีออกซิเจนด้วยอุณหภูมิ 200 – 300°C ส่วนใหญ่เป็นเวลาหลายวันโดยไม่ใส่อาหารลงไปทอดด้วยเมื่อนำไขมันนี้ไปเลี้ยงสัตว์ทดลองปรากฏว่ามีผลเป็นพิษและขัดขวางการเจริญเติบโต โมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นที่เกิดจากการต่อกันของโมเลกุลไขมัน (polymerization) ที่อุณหภูมิสูง ๆ นี้จะไม่สามารถถูกดูดซึมได้ในทางเดินอาหาร

ได้มีผู้นำเอาน้ำมันที่ใช้ทอดในอุตสาหกรรมอาหารมาเลี้ยงหนูโดยใช้ปริมาณ 20% ซึ่งปรากฏว่าไม่ขัดขวางการเจริญเติบโต แสดงว่าไขมันที่ทดลองในห้องปฏิบัติการกับไขมันที่ใช้ทอดจริง ๆ นั้นแตกต่างกัน การทดลองในสภาพการปกติที่ใช้ไขมันนั้น ๆ จึงมีความสำคัญ มีการสำรวจไขมันที่ใช้ในการทอดในอุตสาหกรรม ปรากฏว่าบางแห่งสามารถทำให้น้ำมันที่ทอดนั้นคงสภาพอยู่ได้ แต่บางแห่งใช้อย่างไม่ถูกต้องทำให้น้ำมันเสียสภาพ

มีการศึกษาเปรียบเทียบการดูดซึมน้ำมันที่ใช้ทอดอาหาร พบว่าในน้ำมันที่ถูกดูดซึมเข้าไปในอาหารจะมีค่าไอโอดีนลดลงมาก มีกรดไขมันอิสระและสารถูกรีดิวส์เพิ่มขึ้นมากกว่าน้ำมันเดิมเมื่อทดลองในมันฝรั่งทอดก็ได้ผลเช่นเดียวกัน คือกรดไขมันอิสระในไขมันที่สกัดจากมันฝรั่งจะมีมากกว่าในน้ำมันเดิมที่ใช้ทอด ภายหลังการใช้ทอดมันฝรั่ง 10 ชั่วโมง ปรากฏว่า กรดลิโนเลอิกในไขมันสกัดจากมันฝรั่งนั้นต่ำกว่าในน้ำมันเดิม เนื่องจากส่วนของไขมันที่ถูกดูดซึมนั้นอาจเจือจางลงด้วยสารไขมันที่มีอยู่ในอาหารที่ทอดนั้น จึงวัดการเปลี่ยนแปลงในไขมันที่ถูกดูดซึมได้ยาก

มันฝรั่งทอดมีน้ำอยู่มากกว่าโดนัทและส่วนผสมแป้งเหลวประเภทใช้ทอด ความชื้นอาจสูญเสียจากฟองอากาศเข้าสู่น้ำมันในรูปของไอน้ำ เมื่อมีน้ำมันเพิ่มขึ้นกรดไขมันอิสระก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย จากการทอดโดนัทในอุตสาหกรรม เมื่อทดลองทอดไปเรื่อย ๆ โดยมีการเติมน้ำมันใหม่เป็นระยะ ๆ น้ำมันที่ใช้ทอดจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงถึง 0.74% ได้มีการเปรียบเทียบการทอดโดนัทและมันฝรั่งโดยใช้น้ำมันในแหล่งเดียวกัน ปรากฏว่าน้ำมันที่ใช้ทอดมันฝรั่งแล้วจะมีค่าไอโอดีนต่ำกว่า มีกรดไขมันอิสระมากกว่า และมีจุดควันสูงกว่าน้ำมันทอดโดนัท แต่น้ำมันที่ใช้ทอดโดนัทจะมีสีคล้ำกว่า เมื่อทดลองเปรียบเทียบการทอดมันฝรั่งกับแป้งผสมทอด ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามแป้งผสมทอดจะมีกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น และมีจุดควันต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจนกว่า สีน้ำมันจากการทอดแป้งผสมจะคล้ำลงอย่างชัดเจน ส่วนน้ำมันที่มาจากการทอดมันฝรั่งจะเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย การที่น้ำมันจากแป้งผสมทอดมีสีคล้ำอย่างเห็นได้ชัดและการที่กรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นมากเพราะในแป้งผสมนั้นมีส่วนของไข่แดงประกอบอยู่ด้วย ฟอสฟอไลปิดในไข่แดงอาจจะแพร่กระจายลงไปในน้ำมันแล้วเกิดการแตกตัวที่อุณหภูมิสูง

ในระหว่างการทอดที่อุณหภูมิสูง ๆ จะเกิดการต่อกันของโมเลกุลไขมัน ทำให้มีความข้นหนืดของไขมันที่ใช้ทอดเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ อย่างไรก็ตามถ้ามีการใช้น้ำมันทอดอย่างถูกต้อง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

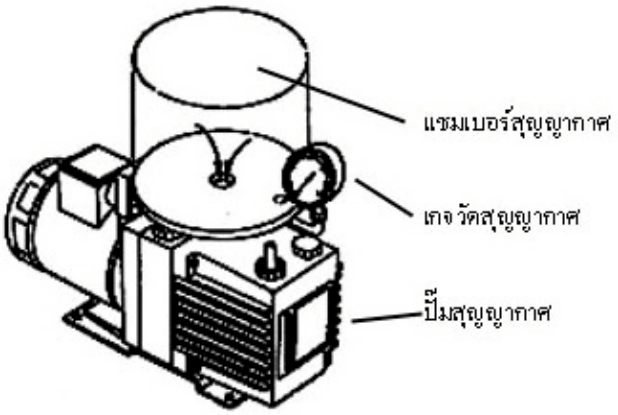
โดยทั่วไปแล้ว ถ้าทอดอาหารยิ่งนาน การดูดซับไขมันจะยิ่งมากขึ้น มีข้อยกเว้นอยู่บ้าง ตัวอย่างเช่น การใช้อุณหภูมิสูงทอดอาหารจะทำให้สารในส่วนผสมของแข็งหรือผิวนอกของอาหารแข็งซึ่งจะไปป้องกันการดูดซึมน้ำมันแม้จะทอดนานก็ตาม อาหารบางอย่างอาจสูญเสียน้ำมันไประหว่างการทอด เช่น เนื้อหมูคลุกขนมปังป่นทอด และไขมันจากไก่ สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ทอดนั้นจะมีผลต่อการดูดซึมของอาหารโดยทางอ้อม ถ้าใช้อุณหภูมิทอดต่ำต้องใช้เวลาทอดนานจึงจะเกิดสีน้ำตาลตามต้องการ ดังนั้นการดูดซึมจึงมากขึ้น เมื่อทอดโดนัทที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 170, 185 และ 200°C การดูดซับน้ำมันจะไม่มีการแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามสีของโดนัทที่ทดลองจะต่างกัน

ในการทอดโดนัทโดยควบคุมปัจจัยอย่างอื่นให้เหมือนกันหมด โดนัทที่มีผิวหน้ามากกว่าจะดูดซับน้ำมันมากกว่าด้วย ในการทำโดนัท ถ้าต้องการเพิ่มผิวหน้าอาจทำโดยยืดก้อนแป้งและทำให้มีรอยแยกร้าวบนพื้นผิวหน้าก้อนแป้ง โดนัทที่คลึงหนากว่านี้จะมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกันโดยน้ำหนักของโดนัท ในการทอดแป้งผสม การดูดซับน้ำมันจะลดลงอย่างมากถ้าไม่ใส่ผงฟูลงในแป้งผสมนั้น เพราะเมื่อไม่ใส่ผงฟูผิวหน้าของแป้งผสมทอดนั้นลดลงมาก

ชนิดและเครื่องปรุงในอาหารนั้น ๆ อาจจะมีผลต่อการดูดซับน้ำมันด้วย ถ้าเพิ่มไขมันหรือน้ำตาลในโดนัทจะมีผลการดูดซับน้ำมันมากขึ้น การเพิ่มไข่จะทำให้ก้อนแป้งนุ่มขึ้น ขนมดูดซึมน้ำมันได้มากขึ้น ในทางตรงกันข้าม การแข็งตัวในไข่จะลดการดูดซึมน้ำลง ดังนั้นผลรวมขั้นสุดท้ายจึงมาจากผลทั้งสองซึ่งเป็นไปในทางกลับกันนี้ รวมกับผลจากปัจจัยอื่น ๆ การเติมไข่ลงในแป้งผสมใช้ทอดที่ไม่มีสารช่วยให้นุ่มประกอบอยู่ด้วย จะทำให้การดูดซับน้ำมันลดลง

การดูดซับน้ำมันนั้นจะมีความสำคัญกันอย่างมีนัยสำคัญกับจุดมีควันของน้ำมัน โดนัทที่ทอดในน้ำมันที่มีจุดมีควันต่ำจะมีการดูดซึมน้ำมันได้มากกว่า

1.3 สภาวะสุญญากาศ



ภาพประกอบ 1.5 การดูดอากาศออกจากแชมเบอร์สุญญากาศ

ภาพประกอบ 1.5 แสดงให้เห็นถึงแชมเบอร์สุญญากาศที่มีลักษณะเป็นภาชนะที่ปิดสนิท เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรั่ว ซึ่งแชมเบอร์ได้ต่อเข้ากับปั๊มที่สามารถดูดเอาอากาศออกมาจากแชมเบอร์ได้ เมื่ออากาศที่อยู่ด้านในถูกกำจัดออกไปเรื่อย ๆ ก็จะทำให้ระดับสุญญากาศที่อยู่บริเวณด้านในของแชมเบอร์มีระดับที่เปลี่ยนไปตามปริมาณของอากาศที่ถูกกำจัดออก

ปริมาณของอากาศที่อยู่ภายในแชมเบอร์ ซึ่งอยู่ในสภาวะสุญญากาศจะเหลืออยู่น้อยกว่าปริมาณของอากาศที่อยู่ภายในแชมเบอร์ที่เปิดสู่อากาศ

อย่างไรก็ดีเราไม่สามารถที่จะนิยามคำว่า "สุญญากาศ" ว่าเป็น "ช่องว่างที่ไม่มีแก๊สใดๆ เหลืออยู่เลย" ได้ ทั้งนี้ในสภาวะสุญญากาศที่ดีที่สุดที่สามารถทำได้นั้น ก็ไม่สามารถที่จะกำจัดแก๊สออกไปได้อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด ซึ่งแก๊สที่กล่าวถึงโดยทั่วๆ ไปในงานทางด้านสุญญากาศมักเป็นการกล่าวถึงแก๊สถาวรจำพวกไฮโดรเจน รวมไปถึงแก๊สเฉื่อย จำพวก แก๊สนีออน และแก๊สอาร์กอนรวมทั้งพวกไอน้ำด้วยเช่นกัน

1.3.1 หน่วยสำหรับการวัดสุญญากาศ

หน่วยมาตรฐานเมตริกสำหรับการวัดความดันตามที่ System International d'Unites (SI) ได้บัญญัติให้ใช้ คือ หน่วย "นิวตันต่อตารางเมตร" ($N\ m^{-2}$) โดยสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าหน่วย "ปาสคาล" (pascal, Pa)

ค่าความดันบรรยากาศมาตรฐาน

= 101,325 Pa ($N\ m^{-2}$)

= 1.011325 bar

= 1,013.25 mbar

= 101.325 kPa

= 760 mm Hg

1.3.2 การแบ่งช่วงระดับสุญญากาศ

การแบ่งช่วงระดับสุญญากาศในที่นี้จะใช้ระดับสุญญากาศที่ต่ำสุดที่สามารถผลิตขึ้นมาได้โดยมนุษย์ นั่นคือ ประมาณ 10^{-14} mbar (ถึงแม้จะเป็นการยากที่จะวัดความดันที่ต่ำในระดับนี้) ไปจนถึงความดันบรรยากาศ หรือ 1,013 mbar

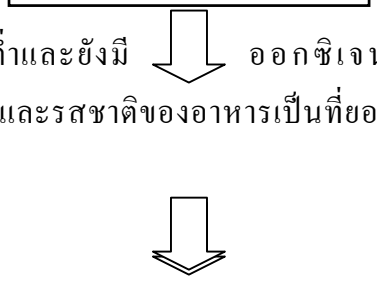
อย่างไรก็ตาม ค่าสุญญากาศในระดับต่ำสุดที่สามารถผลิตขึ้นมาได้ดังกล่าวก็ยังไม่ต่ำเท่ากับที่พบในธรรมชาติ นั่นคือ ความดัน 10^{-16} mbar จะสามารถพบได้ในอวกาศบริเวณที่อยู่ระหว่างดวงดาวแต่ละดวง และความดัน 10^{-22} mbar จะสามารถพบได้ในอวกาศบริเวณที่อยู่ระหว่างกาแลกซี่ โดยปกติแล้วการแบ่งช่วงระดับสุญญากาศสามารถแบ่งออกมาเป็น

- ช่วงสุญญากาศระดับต่ำหรือสุญญากาศระดับหยาบ : 1,013 mbar ถึง 2-3 mbar
- ช่วงสุญญากาศระดับกลาง : 2-3 mbar ถึง 10^{-3} mbar
- ช่วงสุญญากาศระดับสูง : 10^{-3} mbar ถึง 10^{-7} mbar
- ช่วงสุญญากาศระดับสูงมาก (UHV) ความดันต่ำกว่า : 10^{-7} mbar

ดังนั้นจากคำกล่าวที่ว่า "ปั๊มตัวนี้สามารถทำความดันต่ำ" หรือ "ปั๊มตัวนี้สามารถทำความดันสุญญากาศได้สูง" จึงมีความหมายเดียวกัน (นิติกร จามรดุสิต และ สุชาติ จันทริกานนท์, 2545)

1.4 การทอดในระบบ สุญญากาศ

การทอดที่สภาวะสุญญากาศเป็น กระบวนการให้ความร้อนต่ออาหารและมีการลดความดันภายในระบบปิด ซึ่งจะทำให้สามารถลดจุดเดือดของน้ำจาก 100°C เหลือเพียง 70 –85°C ที่ระดับความดันประมาณ 60 mm Hg ส่งผลให้น้ำสามารถ ระเหยออกมาได้อย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดสูง กว่าจุดเดือดของน้ำอาหารที่ทอดภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำและยังมี ออกซิเจนอยู่น้อยมากทำให้เกิดการออกซิเดชันต่ำส่งผลให้สีกลิ่นและรสชาติของอาหารเป็นที่ยอมรับมากกว่าการทอดที่สภาวะบรรยากาศ



ภาพประกอบ 1.6 กระบวนการทอดผักและผลไม้ในระบบสุญญากาศ

ตัวอย่างกระบวนการทอดผักและผลไม้ชนิดต่างๆ เช่น แอปเปิล ฝรั่ง มะม่วง สับปะรด มีการใช้วัตถุดิบอื่นๆ เช่น น้ำตาลซูโครส มอลโทส และกลูโคสเพื่อทำน้ำเชื่อมสารปรุงแต่งกลิ่นรส และใช้น้ำมันพืชในการทอด (วิไล รังสาดทอง, 2543)โดยมีกระบวนการแปรรูป ดังภาพประกอบ 1.6

ผักและผลไม้ที่สามารถนำมาทอดกรอบในระบบสุญญากาศได้ ได้แก่ แอปเปิล ขนุน ลูกแพร์ มะม่วง มะละกอ แครอท หัวหอม ฟักทอง สับปะรด มันฝรั่ง องุ่น กล้วย มะเฟือง ฝรั่ง ถั่วงอก เป็นต้น นอกจากผักและผลไม้แล้วยังสามารถประยุกต์ใช้กับการทอดผลผลิตที่ได้จากทางทะเลได้ด้วย

1.4.1 องค์ประกอบของอาหารทอดระบบสุญญากาศเปรียบเทียบกับอาหารทอดที่สภาวะบรรยากาศปกติ

ตารางที่ 1.1 แสดงองค์ประกอบของมันฝรั่งฝานบางที่ได้จากการทอดในบรรยากาศปกติกับมันฝรั่งที่ทอดในระบบสุญญากาศ จะเห็นได้ว่ามันฝรั่งที่ทอดในระบบสุญญากาศจะมีปริมาณน้ำมันและเกลือโดยเฉพาะเกลือโซเดียมน้อยกว่ามันฝรั่งที่ทอดในบรรยากาศปกติมาก

ตาราง 1.1 เปรียบเทียบองค์ประกอบของมันฝรั่งฝานบางที่ทอดในระบบสุญญากาศและบรรยากาศ

องค์ประกอบ	การทอดที่บรรยากาศ	การทอดในระบบสุญญากาศ
ความชื้น	2.5 %	2.0 %
โปรตีน	4.7 %	4.1 %
ไขมัน	35.0 %	14.8 %
เส้นใย	1.8 %	1.2 %
เถ้า	3.4 %	1.4 %
คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่เส้นใย	52.6 %	76.5 %
พลังงาน	555 kcal	461 kcal
ฟอสฟอรัส	100 mg	108 mg
เหล็ก	1.7 mg	2.14 mg
แคลเซียม	17 mg	11.7 mg
โซเดียม	400 mg	9.8 mg
โปแตสเซียม	1,200 mg	575 mg

หมายเหตุ: คิดคำนวณจากน้ำหนักอาหาร 100 กรัม

1.5 การถ่ายโอนความร้อนในการแปรรูปอาหาร (Heat transfer in food processing)

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต (2535) กล่าวถึงการให้ความร้อนหรือการให้ความเย็นต่ออาหารเป็นกระบวนการที่พบมากที่สุดในระดับโรงงานแปรรูปอาหาร เช่น การทำให้เย็น การแช่แข็ง การฆ่าเชื้อด้วยความร้อน การอบแห้ง และการระเหย ซึ่งการปฏิบัติการเหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์และสารให้ความเย็นหรือสารให้ความร้อน จุดประสงค์ของกระบวนการเหล่านี้ เพื่อป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์หรือเอนไซม์ แต่คุณภาพของอาหารหลังกระบวนการนี้จำเป็นต้องเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคด้วย

1.5.1 คุณสมบัติด้านความร้อน (Thermal Properties of Food)

1.5.1.1 ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat)

ความร้อนจำเพาะ เป็นปริมาณความร้อนที่ได้รับหรือสูญเสียไปต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักเพื่อให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตามต้องการ โดยไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (1.1)$$

เมื่อ C_p = ความจำเพาะ (kJ/kg ^{o}C)

Q = ความร้อนที่ได้รับหรือคายออก (kJ)

m = มวล (kg)

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (^{o}C)

ความร้อนของผลิตภัณฑ์หนึ่งจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในผลิตภัณฑ์ ปริมาณความชื้น อุณหภูมิ และความดัน

1.5.1.2 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity)

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเป็นค่าที่บอกถึง อัตราความร้อนที่นำผ่านความหนาของวัตถุ 1 หน่วย เมื่อมีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างความหนานั้น 1 หน่วย ดังนั้น ในระบบ SI หน่วยของสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) จะเป็น

J/s m ^{o}C = W/m ^{o}C

ค่าสมการการนำความร้อนของอาหารสามารถหาได้จากสมการรีเกรสชั่น ดังนี้

- ผักและผลไม้ที่มีปริมาณน้ำมากกว่า 60% โดยน้ำหนักเปียก

$$k = 0.148 + 0.00493w \quad (1.2)$$

- เนื้ออุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 60°C ปริมาณน้ำ 60 - 80% โดยน้ำหนักเปียก

$$k = 0.080 + 0.0052w \quad (1.3)$$

- เนื้ออุณหภูมิระหว่าง -40 ถึง -5°C ปริมาณน้ำ 65 - 85% โดยน้ำหนักเปียก

$$k = 0.28 + 0.019w - 0.092T \quad (1.4)$$

เมื่อ w = ปริมาณน้ำในอาหาร (wet basis)

T = อุณหภูมิของอาหาร (°C)

1.5.2 ลักษณะการถ่ายโอนความร้อน (Mode of Heat Transfer)

การถ่ายโอนความร้อนจะมีอยู่ 3 ลักษณะคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ลักษณะการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ มักจะเกิดขึ้นในหลายลักษณะร่วมกัน เช่น การถ่ายโอนความร้อนจากอากาศนอกห้องที่มีอุณหภูมิสูงกว่าผนังห้อง ไปยังอากาศภายในห้องที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นทั้งการนำความร้อน และการพาความร้อน ในที่นี้จะกล่าวสรุปดังนี้

1.5.2.1 การถ่ายโอนความร้อนแบบการนำ (Conductive Heat Transfer)

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานระดับโมเลกุล ซึ่งจะไม่มีกระบวนการเคลื่อนที่ทางกายภาพของวัตถุ (physical movement) โดยทั่วไปการนำความร้อนจะเกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นของแข็งทึบ

เมื่อมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเกิดขึ้นในวัตถุ จะมีการถ่ายโอนความร้อนจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปยังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ อัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อพื้นที่ 1 หน่วยในทิศทางหนึ่ง จะเป็นสัดส่วนความแตกต่างของอุณหภูมิ

$$\left(\frac{q_x}{A}\right) = k\left(\frac{dT}{dx}\right) \quad (1.5)$$

$$q_x = -kA\left(\frac{dT}{dx}\right) = -kA\frac{(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (1.6)$$

เมื่อ q_x = อัตราการถ่ายโอนความร้อนในทิศทาง x ด้วยการนำความร้อน (W)

k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m ^{o}C)

A = พื้นที่ (ตั้งฉากกับทิศทาง x) ที่ความร้อนผ่าน (m^2)

T = อุณหภูมิ (^{o}C)

x = ความยาวหรือความหนาที่ความร้อนผ่านในทิศทาง x (m)

สมการดังกล่าวอาจเรียกว่า กฎของฟอร์เรียร์ (Fourier's Law) สำหรับการนำความร้อน เครื่องหมายลบ หมายความว่าจะไหลจากที่ที่อุณหภูมิสูงกว่าไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

มีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อค่าการนำความร้อน เช่น ลักษณะธรรมชาติของอาหาร (ได้แก่โครงสร้างเซลล์ ปริมาณอากาศระหว่างเซลล์ และปริมาณความชื้น) อุณหภูมิและความดันรอบๆ ของอาหาร การลดปริมาณความชื้นจะมีผลต่อการนำความร้อนอย่างเห็นได้ชัด และสามารถประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น ในปฏิบัติการเฉพาะหน่วยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดน้ำออกจากอาหารโดยการนำความร้อนผ่านอาหาร เช่น การอบแห้ง การทอด และการอบแห้งแบบระเหิด ในการอบแห้งแบบระเหิดนั้น การลดความดันบรรยากาศก็มีผลต่อค่าการนำความร้อนของอาหาร น้ำแข็งจะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าน้ำ ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญมากในการหาอัตราการแช่เยือกแข็งและการละลายน้ำแข็ง

1.5.2.2 การถ่ายโอนความร้อนแบบการพา (Convective Heat Transfer)

เมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุผิวของแข็ง หรือไหลภายในท่อที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน การแลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างการไหล และวัตถุของแข็งหรือในท่อในลักษณะการพาความร้อน เช่น การทำให้ก๊าซหรือของไหลร้อนขึ้นหรือเย็นลงในท่อ เป็นต้น การถ่ายโอนความ

ร้อนแบบการพานี้มี 2 ชนิด คือ การพาความร้อนแบบบังคับ (force convection) ซึ่งจะใช้แรงภายนอกมากระทำเพื่อก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของของไหล เช่น การใช้พัดลมหรือปั๊ม และการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (free หรือ natural convection) จะเกิดขึ้นเมื่อความดันมีหนาแน่นแตกต่างกันอันเนื่องมาจากอุณหภูมิแตกต่างกันในระบบนั้น ๆ

ภาพประกอบ 1.7 การถ่ายโอนความร้อนแบบการนำและการพา จะเห็นว่าเมื่อห่างจากผนังของแข็งการถ่ายโอนจากหรือไปยังของไหลจะเป็นลักษณะการพา อัตราการถ่ายโอนความร้อนจะแสดงด้วยสมการ Newton's Law of Cooling ดังนี้

$$q_c = hA\left(T_p - T_f\right) \tag{1.7}$$

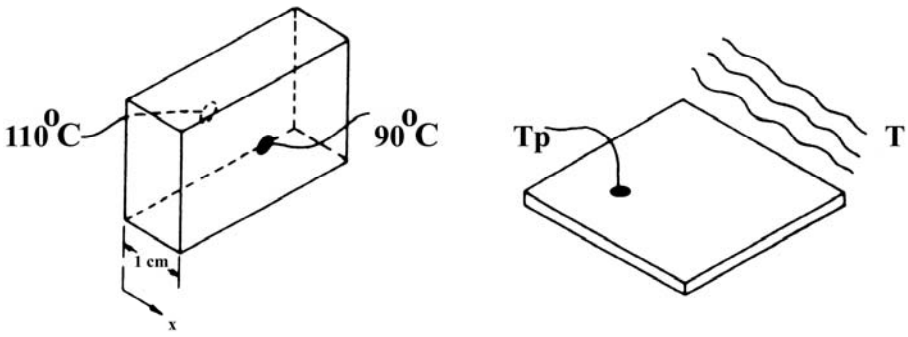
เมื่อ q_c = อัตราการถ่ายโอนความร้อนแบบการพา (J/s, W)

h = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนแบบการพา ($W/m^2\ ^oC$) (หรือเรียกว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิว)

A = พื้นที่ผิวที่ถ่ายโอนความร้อน (m^2)

T_p = อุณหภูมิผิวของวัตถุ (^oC)

T_f = อุณหภูมิของของไหล (fluid) (^oC)



(ก) (ข)

ภาพประกอบ 1.7 ลักษณะการถ่ายโอนความร้อน (ก) การนำความร้อน และ (ข) การพาความร้อน
ที่มา : รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2535 : 15

ตาราง 1.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนแบบการพาบางค่าโดยประมาณ ค่า h ที่สูงกว่า หมายถึงการถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นในอัตราที่สูงกว่า และการพาความร้อนแบบบังคับจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าแบบธรรมชาติ

ตาราง 1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนแบบการพาของของไหลบางชนิด

ชนิดของการไหล	h ($W/m^2\ ^oC$)
อากาศ	
- การพาแบบธรรมชาติ	5-25
- การพาแบบบังคับ	10-200
น้ำ	
- การพาแบบธรรมชาติ	20-200
- การพาแบบบังคับ	50-10,000
น้ำขณะเดือด	3,000-100,000
ไอน้ำขณะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ	5,000-100,000

ที่มา : ประภาศรี สิงห์รัตน์, 2533 : 98

1.5.2.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiative heat transfer)

การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสี จะเกิดขึ้นระหว่าง 2 พื้นผิวโดยการแผ่และการดูดซับในเวลาต่อมาของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการแพร่ความร้อนเหมือนในการนำหรือการพา ดังนั้นการถ่ายโอนความร้อนแบบนี้จึงเกิดขึ้นในสุญญากาศได้พลังงานที่แผ่ออกจากผิวจะเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์และลักษณะธรรมชาติของผิว ซึ่งแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$q_r = \sigma \varepsilon A T_A^4 \qquad (1.8)$$

เมื่อ q_r = ความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี (heat of radiation) (W)

σ = ค่าคงที่ของ Stefan-boltzmann = 5.669×10^{-8} $W/m^2 K^4$

ε = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (emissivity)

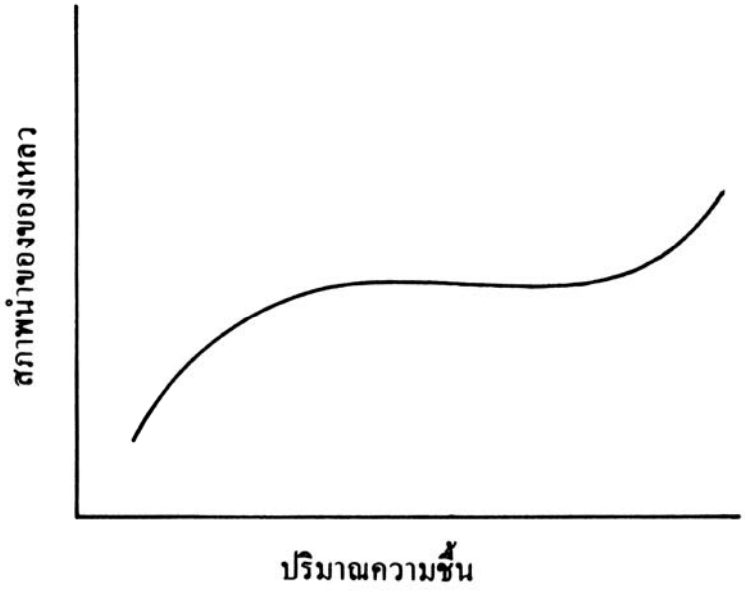
T_A = อุณหภูมิภายนอก (K)

ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี จะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 วัตถุดำ (blackbody) จะมีค่านี้เป็น 1

1.6 การถ่ายโอนมวลในการแปรรูปอาหาร (Mass Transfer in Food Processing)

ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก (2529) พบว่าการเคลื่อนย้ายของน้ำในอาหาร เมื่ออาหารได้รับความร้อนน้ำที่อยู่ในอาหารก็จะเคลื่อนตัวออกจากอาหาร ลักษณะการเคลื่อนที่ออกจากอาหาร อาจเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือของไอ กล่าวคือ น้ำหรือไอภายในอาหารจะเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าของวัตถุจากนั้นน้ำที่ผิวจะกลายเป็นไอระเหยออกไปสู่รอบบรรยากาศ จากการศึกษาพบว่า กลไกภายในของการไหลของของเหลวและผลของสภาพภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วของลม มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของน้ำ กลไกภายในของการไหลของของเหลวเหล่านั้นได้พบว่ามีอยู่หลายแบบ ทั้งนี้ขึ้นกับโครงสร้างของอาหาร ชนิดของการเคลื่อนที่ของน้ำอาจเกิดขึ้นจากแรงแคปปิลารี่ (capillary force) การเคลื่อนตัวแบบนี้ พบว่ามีลักษณะที่ซับซ้อนมาก นั่นคือยากต่อการแยกแยะว่าจะเป็นการเคลื่อนที่แบบที่เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้น หรือแรงแคปปิลารี่ ฉะนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกขึ้น จึงใช้ค่าสภาพนำของของเหลว (liquid conductivity) มาใช้อธิบาย ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันตามปริมาณน้ำ ดังภาพประกอบ 1.8

เมื่อปริมาณน้ำในอาหารลดลงการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านแคปปิลารี่และรูเปิดเล็ก ๆ เกิดขึ้นจากไอส่วนใหญ่ ลักษณะการเคลื่อนที่แบบนี้ยังขึ้นกับความดันย่อยของน้ำในอาหารและค่าการยอมให้ผ่านของอาหารอีกด้วย



ภาพประกอบ 1.8 ผลของปริมาณน้ำที่มีต่อค่าสภาพนำของของเหลว
ที่มา : ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2529 : 383

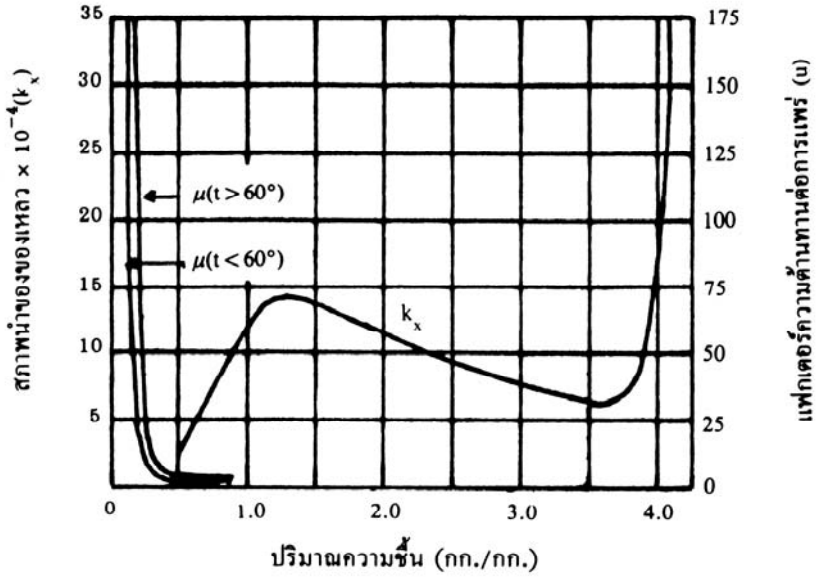
การถ่ายโอนมวลเกี่ยวข้องกับการแพร่ของมวลที่เกิดขึ้นระดับโมเลกุลหรือการถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร (bulk transport) เนื่องจากการไหลแบบการพา (convection) กระบวนการแพร่สามารถอธิบายได้โดยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้กฎของฟิค (Fick's Law) กล่าวว่า แมสฟลักซ์ (mass flux) ต่อหน่วยพื้นที่องค์ประกอบหนึ่งเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของความเข้มข้น ดังสมการสำหรับองค์ประกอบใด ๆ

$$\frac{\dot{m}_i}{A} = -D\left(\frac{dc}{dx}\right) \qquad (1.9)$$

เมื่อ $\dot{m}_i$ = อัตราการไหลของมวล (kg/hr)
A = พื้นที่ (m^2)
D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)
c = ความเข้มข้นของมวล (kg/m^3, $kg\ mole/m^3$)
x = ระยะห่างระหว่างความเข้มข้น 2 จุดที่กำลังพิจารณา (m)

6.1 การแพร่ของของเหลว (liquid diffusion) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารเป็นการเคลื่อนที่ของของเหลว หรือของไอถ้าเป็นสภาวะของของเหลว การเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำระเหยออกไปจากผิวหน้า นั่นคือความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มมากขึ้นและปริมาณน้ำลดลง

6.2 การแพร่ของไอน้ำ (water vapor diffusion) เกิดจากความแตกต่างของความดันย่อยในอากาศที่อยู่ในรูเปิดเล็กๆ มีลักษณะคงที่ แต่พอไอน้ำที่เกิดจากการระเหยของน้ำแพร่ซึมผ่านเข้าไปในรูเปิดเล็กๆ นี้ จะไปไล่อากาศจากบริเวณที่มีความดันไอสูงไปสู่ความดันไอต่ำ อัตราการเคลื่อนที่นี้ขึ้นกับแฟกเตอร์การต้านทานต่อการแพร่ซึ่งมีลักษณะคล้ายค่าสภาพการนำของวัตถุ จากการศึกษาได้แสดงให้เห็นว่าความต้านทานต่อการแพร่เพิ่มขึ้นอย่างสูงชัน เมื่อปริมาณความชื้นลดลงต่ำกว่า 0.2 กิโลกรัมต่อวัตถุแห้ง ดังภาพประกอบ 1.9 ค่านี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



ภาพประกอบ 1.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับการต้านทานต่อการแพร่
ที่มา : ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2529 : 384

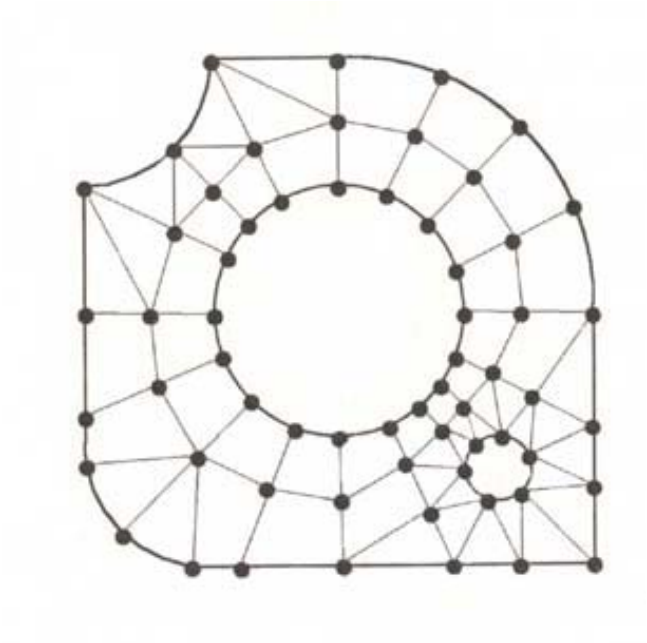
6.3 การแพร่ของไอ เกิดจากความแตกต่างของความดันไอ ความชื้นอาจจะเคลื่อนที่โดยการแพร่ของไอน้ำผ่านอาหารที่เป็นของแข็งได้ตราบเท่าที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ การระเหยและ

การแพร่ของไออาจเกิดขึ้นในอาหารที่เป็นของแข็งโดยอาหารนั้นได้รับความร้อนข้างหนึ่งและเกิดการระเหยอีกข้างหนึ่ง

6.4 การแพร่ของของเหลวที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของอาหาร นอกจากนี้การแพร่ของน้ำที่ดูดซับไว้ที่ผิวหน้าในอาหารที่มีความชื้นค่อนข้างต่ำ (10 – 15%) การแพร่แบบนี้เรียกว่า การแพร่โดยการกระตุ้น

1.7 ไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขที่กำหนดขอบเขตมาให้ ค่าเฉลยผลแม่นตรง (exact solution) ของปัญหาดังกล่าวด้วยค่าของตัวแปรต่าง ๆ บนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าผลเฉลยแม่นตรงจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาค่าแม่นตรงที่ประกอบด้วยจำนวนต่างๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัติจะทำไม่ได้ หลักการก็คือทำการเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่มีจำนวนค่าอนันต์นั้นมาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ (finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (elements) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน ดังเช่นแสดงในตัวอย่างของแผ่นอลูมิเนียมในภาพประกอบ 1.10



ภาพประกอบ 1.10 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอลูมิเนียมด้วยการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์
ที่มา : ปราโมทย์ เตชะอำไพ, 2542 : 4

วิธีการดังกล่าวชี้บ่งเป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้อง (satisfy) กับสมการอนุพันธ์และเงื่อนไขที่กำหนดมาในปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายถึงว่า วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นนั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่ทำอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมกันก่อให้เกิดรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงไปในสมการชุดใหญ่นี้แล้วจึงทำการสมการดังกล่าว ซึ่งจะก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น (ปราโมทย์ เตชะอำไพ, 2542)

สำหรับการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนความร้อนมีจุดเด่นหลายประการที่มีความน่าสนใจในตัวเองเมื่อเปรียบเทียบกับการแก้ปัญหาทางด้านอื่นๆ เช่น ทางด้านของแข็งหรือการไหล จุดเด่นประการแรกก็คือการแก้ปัญหาทางด้านการถ่ายโอนความร้อนนั้นค่อนข้างที่จะจำเพาะเจาะจง กล่าวคือ ตัวที่ไม่รู้ค่าที่ต้องการคำนวณนั้นคือ อุณหภูมิแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งถือเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สามารถนำไปใช้ออกแบบได้ จุดเด่นประการต่อมาก็คือการกระจายของอุณหภูมิที่ต้องการนั้นสามารถหาได้จากสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งอยู่ในรูปแบบง่ายๆ เพียงสมการเดียว และจุดเด่นประการ

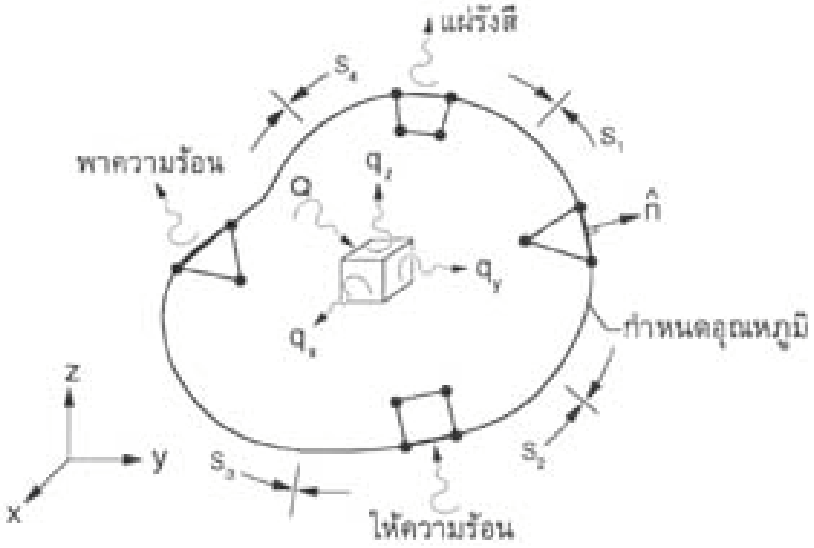
สุดท้ายที่สำคัญก็คือขั้นตอนในการคำนวณเพื่อหาค่าอุณหภูมินั้นสามารถทำความเข้าใจได้โดยง่าย รวมทั้งผลลัพธ์ลักษณะการกระจายของอุณหภูมิที่ได้นั้นสามารถตรวจสอบความถูกต้องหรือความเป็นไปได้โดยผู้ที่มีประสบการณ์ทางด้านนี้โดยไม่ยากนักเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาทางด้านอื่นๆ เหตุผลต่างๆ เหล่านี้เองมีส่วนเป็นอย่างมากที่ทำให้การพัฒนาวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ทางด้านการถ่ายโอนความร้อนนี้เป็นไปได้อย่างรวดเร็วถึงแม้ว่าจะเริ่มขึ้นหลังจากการพัฒนาทางด้านของแข็งก็ตาม และเหตุผลดังกล่าวยังมีส่วนเป็นอย่างมากที่ทำให้การเรียนการสอนวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มักจะใช้ปัญหาทางด้านความร้อนมาเป็นตัวอย่างประกอบ

ประโยชน์ของการใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาทางด้านการถ่ายโอนความร้อนนั้นมีมากมาย ซึ่งไม่เพียงแต่จะทำให้สามารถทำการคำนวณและวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนรูปร่างที่มีลักษณะซับซ้อนได้ ผลของอุณหภูมิที่ได้สามารถนำไปใช้ต่อในการคำนวณทางด้านอื่นต่อเนื่องไปได้อีก ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ การนำการกระจายของอุณหภูมิที่คำนวณได้ไปใช้ในการขยายตัวและความเค้นในของแข็งเป็นต้น เนื่องจากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นี้สามารถใช้ได้กับปัญหาทั้งสองด้านนี้โดยพร้อม ๆ กัน สำหรับสมการต่างๆ ที่เกิดขึ้นจึงอยู่ในรูปแบบของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สอดคล้องกันซึ่งทำให้ง่ายในการคำนวณและประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตัวอย่างปัญหาดังกล่าวครอบคลุมตั้งแต่การออกแบบและการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นในล้อแม็กซ์หรือเครื่องสุขภัณฑ์หลังจากการหล่อแล้วทิ้งให้เย็นตัวลง การคำนวณหาอุณหภูมิและความเค้นในเครื่องของรถยนต์ในขณะทำงาน รวมไปถึงการออกแบบโดยการคำนวณหาอุณหภูมิและความเค้นที่เกิดขึ้นบนสถานีอวกาศขณะโคจรรอบโลกภายใต้ความร้อนจากแสงอาทิตย์และความเย็นจัดขณะผ่านเงาโลก

สมการพื้นฐานโดยทั่วไปในสามมิติ

สมการเชิงอนุพันธ์

ภาพประกอบ 1.11 แสดงการถ่ายโอนความร้อนในของแข็งสามมิติที่ประกอบด้วยการนำความร้อนในโดเมน Ω โดยที่พื้นที่รอบนอก Γ อาจมีการกำหนดอุณหภูมิ การให้ปริมาณความร้อนที่บริเวณผิว การพาความร้อน รวมไปถึงการแผ่รังสี



ภาพประกอบ 1.11 การถ่ายโอนความร้อนทั่วไปในสามมิติ
ที่มา : ที่มา : ปราโมทย์ เตชะอำไพ, 2542 : 261

สมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนภายใต้สภาวะทั่ว ๆ ไปที่ไม่อยู่ตัว คือ

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}+\frac{\partial q_z}{\partial z}\right)+Q=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (1.10)$$

เมื่อ q_x, q_y และ q_z แทนอัตราการถ่ายโอนความร้อน (heat flow rate) ในการแกน x, y และ z ตามลำดับ

Q คือ ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เอง (internal heat source) (J)

ρ คือ ความหนาแน่นมวล (mass density) (kg / m^3)

c คือ ความร้อนจำเพาะ (specific heat) ของวัตถุนั้น (J/kg $^{\circ}$C)

T คือ อุณหภูมิ (temperature) ที่อาจเปลี่ยนแปลงตามเวลา t (time) t ซึ่งอุณหภูมินี้เป็นตัวไม่รู้ค่าที่เราต้องการจากการคำนวณจากกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) อัตราการถ่ายโอนความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและความชันของการกระจายของอุณหภูมิ ($^{\circ}$C)

ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบของเมตริกซ์โดยทั่วไปได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{Bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}}_{[k]} \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial T}{\partial x} \\ \dfrac{\partial T}{\partial y} \\ \dfrac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} \tag{1.11}$$

โดย $[k]$ เรียกว่าเมตริกซ์สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งในกรณีทั่วไปหากวัตถุนั้นมีคุณสมบัติที่เหมือนกันในทุก ๆ ทิศทาง (isotropic material) เมตริกซ์สัมประสิทธิ์การนำความร้อนนี้ลดรูปไปอยู่ในรูปแบบที่ง่าย ๆ คือ

$$[k] = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix} \tag{1.12}$$

จากภาพประกอบ 1.11 เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการถ่ายโอนความร้อนโดยทั่ว ๆ ไปอาจประกอบด้วย

(1) กำหนดอุณหภูมิที่ผิวตลอด S_1 :

$$T_s = T_1(x, y, z, t) \tag{1.13}$$

(2) กำหนดปริมาณความร้อนตลอดผิว S_2 :

$$q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = -q_s \tag{1.14}$$

(3) กำหนดการพาความร้อนตลอดผิว S_3 :

$$q_x n_x + q_x n_y + q_z n_z = h\left(T_s - T_\infty\right) \qquad (1.15)$$

(4) กำหนดการแผ่รังสีตลอดผิว S_4 :

$$q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = \varepsilon\sigma\left(T_s^4 - \overline{T_\infty^4}\right) - \alpha q_r \qquad (1.16)$$

เมื่อ q_s คือ ปริมาณความร้อนที่พุ่งเข้าสู่วัตถุ (กำหนดให้เป็นค่าบวก) ซึ่งอยู่ในทิศที่สวนทางกับปริมาณความร้อนในวัตถุที่อยู่ในทิศ $\hat{n}$ ซึ่งพุ่งตรงออกมาจากวัตถุในทิศตั้งฉากกับผิวของวัตถุนั้นอันประกอบด้วยทิศทางโคไซน์ n_x, n_y และ n_z ตามลำดับ

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m ^{o}C)

T_s คือ อุณหภูมิที่ผิว (^{o}C)

T_∞ คือ อุณหภูมิของตัวกลางสำหรับการพาความร้อน (^{o}C)

ε คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (emissivity)

σ คือ ค่าคงตัวของซเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann constant)

$\overline{T_\infty}$ คือ อุณหภูมิของตัวกลางสำหรับการแผ่รังสี (^{o}C)

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อน (absorptivity)

q_r คือ ปริมาณความร้อนที่ตกกระทบเนื่องจากการแผ่รังสี (J)

สมการเชิงอนุพันธ์ต้องการเงื่อนไขตอนเริ่มต้น (Initial condition) ซึ่งโดยทั่วไปสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบได้ดังนี้

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \qquad (1.17)$$

โดย T_0 แทนอุณหภูมิเริ่มแรกที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนวัตถุนั้น

1.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิจิตร และ ศักรินทร์ (2537) ศึกษาปัจจัยหลักของกระบวนการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยใช้ฟักทองสไลส์ หนาประมาณ 1 mm ซึ่งประกอบด้วย ความดัน อุณหภูมิน้ำมันและระยะเวลาที่ใช้ทอด พบว่าการใช้สภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ความดัน 150 mm Hg (abs) อุณหภูมิ 140^{o}C ระยะเวลาที่ใช้ทอด 2.5 นาที จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้กรอบ สีสันปกติ ความชื้นต่ำ มีปริมาณน้ำมันและเวลาน้อยกว่าการทอดที่สภาวะบรรยากาศ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถ สรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อ

ผลิตภัณฑ์ คือ ทอดที่ความดันต่ำอุณหภูมิสูงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สุกกรอบ มีปริมาณความชื้นและน้ำมันต่ำกว่าการทอดที่สภาวะบรรยากาศและการทอดที่ความดันต่ำอุณหภูมิต่ำ เป็นอีกแนวทางในการทอดเพื่อรักษาคุณค่าทางอาหารและวิตามิน อีกทั้ง สี กลิ่นและรสชาติให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

Plumb และคณะ (1985) สร้างแบบจำลองการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนขณะอบไม้ พบว่าในระหว่างการอบจะมีกลไกซึ่งประกอบด้วยการแพร่และแรงดันแคปปิลาริ่ แบบจำลองดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับลักษณะรูพรุนซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของไม้โดยมีตัวแปรที่สำคัญ คือ รูปแบบเรขาคณิตและการซึมผ่านของน้ำ ผลการทดลองจากแบบจำลองดังกล่าวนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าสามารถทำนายอัตราการสูญเสียและปริมาณความชื้นได้ดี ข้อมูลของการซึมของน้ำที่ได้ก็ถูกต้องและแม่นยำอีกด้วย

แบบจำลองดังกล่าวได้มาจากการสังเกตเพื่อทำนายการเคลื่อนที่ของของเหลวบริเวณผิวหน้าโดยเป็นฟังก์ชันกับปริมาณความชื้นที่บริเวณผิวหน้า แต่สำหรับวิธีการดังกล่าวยังมีข้อจำกัดเนื่องมาจากในทางทฤษฎียังไม่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสารของรูพรุนบริเวณผิวหน้าที่ค่อนข้างเปียกและมีความชื้น

Farkas และคณะ (1996a) ศึกษากระบวนการทอดใต้ผิวน้ำมันโดยรวบรวมข้อมูลจากการสังเกตและบันทึกผลจากการทดลอง (อุณหภูมิและปริมาณความชื้น) ซึ่งพบว่าในระหว่างการทอดสามารถแบ่งได้เป็น 4 ช่วงเวลา คือ Initial Heating, Surface Boiling, Falling Rate และ Bubble End Point พบว่าแต่ละช่วงเวลาจะมีลักษณะเฉพาะในการถ่ายโอนความร้อนบริเวณผิวหน้าและการถ่ายโอนมวลสาร (การเกิดฟองอากาศที่บริเวณผิวหน้า) โดยวัสดุที่นำมาทอดสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนได้อย่างชัดเจน คือ บริเวณขอบหรือเปลือกนอก (crust) และบริเวณแกนกลาง (core) โดยที่แต่ละส่วนจะมีขอบเขตระหว่างบริเวณที่ต่างกัน คือ รอยต่อระหว่างเปลือกนอกกับน้ำมัน เปลือกนอกกับแกนกลางและเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ

Farkas และคณะ (1996b) การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนที่ทอดใต้ผิวน้ำมันเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งพบว่าสามารถใช้แบบจำลองเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ , ปริมาณความชื้น และความหนาของเปลือก (crust thickness) ได้ใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวควรเลือกใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง และมีความหนา 2 - 5 cm ดังนั้น จึงไม่เหมาะกับตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่น (chip)

การถ่ายโอนความร้อนในเปลือกนอกและแกนกลางจะเป็นแบบการนำความร้อนในระยะแรก ส่วนการถ่ายโอนมวลในบริเวณแกนกลางจะเป็นไปตามทฤษฎีของการแพร่ การเกิดเปลือกนอกจะพบในบริเวณที่อยู่ในของเหลวซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายโอนความร้อนที่บริเวณผิวหน้า ในแบบ

จำลองดังกล่าวจะไม่สามารถคำนวณการดูดซับน้ำมัน เนื่องจากฟลักซ์ของพลังงานในการดูดซับน้ำมันจะมีค่าน้อยจากการวิเคราะห์และไม่มีปรากฏในสมการการถ่ายโอนความร้อน

ฟลักซ์ของไอน้ำจะปรากฏทั้งในกลไกการถ่ายโอนมวลสารและความร้อน ซึ่งอัตราการก่อตัวของเปลือกนอกในบริเวณที่มีของเหลวจะถูกควบคุมโดยอัตราการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อของของเหลวกับผิวหน้าของตัวอย่าง ในส่วนของการถ่ายโอนความร้อนที่ลดลงจะส่งผลให้การเกิดเปลือกนอกเปลี่ยนตำแหน่งไปทำให้มีผลต่ออัตราการระเหย ในขณะทอดฟลักซ์ของการแพร่บริเวณแกนกลางจะลดลงเนื่องมาจากบริเวณผิวหน้ามีความเข้มข้นลดลง เป็นผลให้การเกิดไอน้ำลดลงด้วย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เป็นสมการ PDE ที่มีความซับซ้อนซึ่งสามารถอธิบายถึงการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนขณะทอด ซึ่งผลที่ออกมานี้มีค่าสม่ำเสมอและครอบคลุมระยะเวลาในแต่ละขั้นตอน

Ngadi และคณะ (1997) ศึกษาการถ่ายโอนความชื้นในการทอดน่องไก่ที่ใต้ผิวน้ำมันโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วยเอลิเมนต์จำนวน 386 เอลิเมนต์ (432 node) ในการแก้ปัญหา สำหรับแบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายปริมาณความชื้นในระยะเวลาต่าง ๆ กันของน่องไก่ทอดที่อุณหภูมิ 120^0C และ 180^0C พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลอง แต่แบบจำลองดังกล่าวจะสามารถใช้ได้ผลดีในช่วงอุณหภูมิต่ำและระยะเวลาในการทอดสั้น ๆ ซึ่งอาจมีอิทธิพลมาจากการเกิดปฏิกริยาการแพร่ระหว่างของเหลวและไอของความชื้น

Krokida และคณะ (2000) พบว่าปรากฏการณ์ถ่ายโอนมวลสาร (การสูญเสียน้ำและการดูดซับน้ำมัน) ที่เกิดขึ้นขณะทอดมันฝรั่งแผ่น สามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลอง empirical first order kinetic ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญ คือ อุณหภูมิของน้ำมันและความหนาของชิ้นตัวอย่างมีนัยสำคัญกับระยะ constant rate และค่าที่จุดสมดุลของการสูญเสียความชื้นและการดูดซับน้ำมันขณะทอด สำหรับไฮโดรเจนที่ปะปนอยู่ในน้ำมันซึ่งเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนไม่มีผลต่อการถ่ายโอนมวลสารขณะทอด สำหรับการสูญเสียน้ำและปริมาณน้ำมันภายหลังการทอดจะมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิสูงและชิ้นตัวอย่างมีความหนาไม่มากนัก

Shyu และ Hwang (2001) ศึกษาการทอดแอปเปิลภายใต้สภาวะสุญญากาศ พบว่าปริมาณความชื้น, ค่าความสว่าง (Lightness) และ breaking force ของชิ้นแอปเปิลมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการทอดมากขึ้น แต่ค่าความแตกต่างของสี (E) และปริมาณน้ำมันมีค่าเพิ่มมากขึ้น ผลจากการทดลองดังกล่าวพบว่า ปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมัน สี และ ค่า breaking force มีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) กับอุณหภูมิ ระยะเวลาที่ใช้ในการทอดและความเข้มข้นของสารละลายฟรุกโทส ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการทอดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงซึ่งเลือกค่า breaking force

เป็นตัวบ่งบอกคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คือ การทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 100 - 110^{0}C เวลาที่ใช้ในการทอด 20 - 25 นาที โดยจุ่มในสารละลายฟรุกโทสที่มีความเข้มข้น 30 - 40%

Jagoba และ Rosana (2002) ศึกษาการผลิตมันฝรั่งทอดซึ่งมีปริมาณของน้ำมันภายในอาหารต่ำ โดยอาศัยกระบวนการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ พบว่า อัตราการดูดซับน้ำมันขณะทอดมันฝรั่งที่สภาวะสุญญากาศมีความสัมพันธ์กับอัตราการสูญเสียความชื้น ซึ่งอัตราการสูญเสียความชื้นสูง (อัตราการดูดซับน้ำมันสูง) จะเกิดขึ้นกับการทอดที่อุณหภูมิน้ำมันสูง (140^{c}C) และความดันสุญญากาศต่ำ (3.115 kPa) และร้อยละของน้ำอิสระในผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยก็มีส่วนทำให้การดูดซับปริมาณน้ำมันน้อยตามได้ด้วย ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือ การควบคุมความดันในระหว่างกระบวนการทอด

จากการศึกษา ไม่พบว่าการทอดที่สภาวะสุญญากาศ มีนัยสำคัญ ($P<0.05$) กับสีและเนื้อสัมผัสกับมันฝรั่งในระยะสุดท้าย ร้อยละของการหดตัว (shrinkage) ของมันฝรั่งจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันเพิ่มขึ้น และจะลดลงเมื่อความดันสุญญากาศลดลง

เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ทอด ณ. สภาวะบรรยากาศและสุญญากาศ พบว่าลักษณะการสูญเสียความชื้นจะคล้ายคลึงกันทั้ง 2 สภาวะ แต่การทอดที่สุญญากาศจะมีปริมาณน้ำมันที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้

Yamsaengsung และ Moreira (2002a) ศึกษาแบบจำลองของกระบวนการทอดและการเย็นตัวของ tortilla chip โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ปริมาณน้ำอิ่มตัว (S_w), ปริมาณน้ำมันอิ่มตัว (S_o), อุณหภูมิ (T) และความดัน (P) และพบว่าของเหลวสามารถไหลได้เป็นผลมาจาก convective flow เนื่องจากเกรเดียนในความดันรวม และ capillary flow เนื่องมาจากเกรเดียนของแรงแคปปิลารี่สำหรับการเคลื่อนที่ของแก๊สเป็นผลมาจาก capillary flow เนื่องจากเกรเดียนของความดันรวมและการแพร่ของ Knudsen เนื่องจากความเข้มข้น โดยการดูดซับน้ำมันเมื่อมีการเย็นตัวลงอาจเป็นฟังก์ชันกับแรงดันแคปปิลารี่

อาหารโดยทั่วไปจะมีความชื้นอยู่ภายใน จากการศึกษาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไม่ว่าจะเป็นการหดตัวหรือขยายตัวจะเป็นผลอันเนื่องมาจากพองตัวซึ่งใน tortilla chip น้ำจะมีพันธะที่แข็งแรงเป็นผลให้มีการหดตัวเมื่อมีการสูญเสียน้ำ สำหรับการเกิดเปลือกบริเวณผิวด้านนอกเป็นผลมาจากความดันที่ปล่อยออกมาจากแกนกลาง (ควบคุมการแพร่ของน้ำ) สำหรับการพองตัวจะเริ่มเกิดที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 10 ของน้ำหนักเปียกและจะดำเนินต่อไปจนเหลือปริมาณความชื้นร้อยละ 2 ของน้ำหนักเปียกซึ่งจะเป็นจุดสมดุล การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระหว่างการทอดนั้นมีส่วนสำคัญมากเนื่องจากสามารถทำนาย อัตราการสูญเสียความชื้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำมันสุดท้ายใน tortilla chip

Yamsaengsung และ Moreira (2002b) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกใช้แก้ปัญหาระบบสมการ PDE เพื่ออธิบายกระบวนการทอด tortilla chip ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวอยู่ในรูปแบบของ non-linear สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation : PDE) ที่ซับซ้อน อธิบายถึงการถ่ายโอนมวลสารและความร้อน โดยมีขนาดของตัวอย่างที่เหมาะสม ซึ่งประกอบด้วย 9 x 7 เอลิเมนต์ (80 node)

การทอดที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้มีการสูญเสียความชื้นจากผลิตภัณฑ์อย่างเร็วกว่า แต่ถ้าทอดที่อุณหภูมิต่ำจะส่งผลต่อปริมาณน้ำมันที่ดูดซับเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงจะมีผลต่อปริมาณการดูดซับน้ำมันสูงอีกทั้งพบว่าชิ้นตัวอย่างที่มีความหนามากจะใช้ระยะเวลาในการทอดที่นานกว่าแต่ปริมาณการดูดซึมน้ำมันก็จะน้อยด้วย

ในขณะที่ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงน้ำมันส่วนมากจะอยู่ที่ผิวหน้าของตัวอย่าง โดยอุณหภูมิ ขณะเกิดการเย็นตัวลงที่อุณหภูมิสูงกว่าจะส่งผลให้ปริมาณการดูดซับน้ำมันต่ำกว่าเนื่องจากมีความแตกต่างของความดันแคปปิลารี่น้อยกว่า

จากการทดลองเมื่อเริ่มทอดตัวอย่างไปประมาณ 5 วินาทีจะเริ่มมีการขยายตัว จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 20 วินาที (เมื่อมีปริมาณน้ำอิ่มตัวน้อยมาก) การขยายตัวจะเริ่มมีการก่อตัวของเปลือกนอก ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะลดอัตราการถ่ายโอนความชื้นและเป็นสาเหตุให้ความดันภายในของผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดปัจจัยทางด้านการขยายตัว ความดันที่เพิ่มมากขึ้นก็จะมีผลทำให้บางครั้งการแก้ปัญหามีความคลาดเคลื่อนออกไป

1.9 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาข้อมูลของการทอดผักและผลไม้ที่สภาวะสุญญากาศ ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันต่อระยะเวลาในการทอด
2. ศึกษาการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
3. ประยุกต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เขียนมาอธิบายผลที่ได้จากการทดลอง

1.10 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถทราบถึงกระบวนการทอดผักและผลไม้ภายใต้สภาวะสุญญากาศและปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทอด ตลอดจนถึงกลไกการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนในขณะทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและยังได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทอดที่สภาวะสุญญากาศ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ในการทอดที่สภาวะสุญญากาศให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้นในทุกด้าน