บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

กระบวนการทอดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารด้วยความร้อนที่ใช้กันมานานแล้วกระบวนการหนึ่ง ในปัจจุบันอาหารทอดยังคงได้รับความนิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย เนื่องมาจากความมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวของอาหารทอดที่ถูกปากผู้บริโภค อาหารทอดมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่กรอบนอก นุ่มใน หรือกรอบทั้งชิ้น มีกลิ่นรสและลักษณะปรากฏที่ชวนให้น่ารับประทาน ถึงแม้ว่าการบริโภคอาหารทอดในปริมาณมากจะมีผลเสียต่อสุขภาพ เนื่องจากบริโภคน้ำมันในปริมาณที่มากเกินความต้องการของร่างกาย อาจก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ ได้เช่น โรคอ้วน โรคหัวใจ และโรคความดันโลหิตสูง เป็นต้น อาหารทอดยังคงได้รับความนิยมบริโภค เนื่องจากเป็นกรรมวิธีการแปรรูปที่สะดวกและรวดเร็ว และให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความน่ารับประทาน

ปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารขบเคี้ยวทั้งในต่างประเทศและประเทศไทย กำลังให้ความสนใจผลิตภัณฑ์ผักและผลไม้ทอดกรอบกันเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ให้คุณค่าทางอาหารสูงกว่าอาหารขบเคี้ยวประเภทแป้งทอดกรอบ แต่การทอดที่ความดันบรรยากาศต้องใช้อุณหภูมิน้ำมันสูงและทอดเป็นเวลานานจนทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้มไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค สารอาหารและวิตามินบางชนิดเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ทำให้สูญเสียคุณค่าทางอาหารไป นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์มีการดูดซึมน้ำมันในปริมาณสูงอีกด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นหืน ดังนั้นการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งเป็นการลดจุดเดือดของของเหลวภายในอาหาร ทำให้น้ำระเหยออกจากอาหารได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการทอดที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการดูดซึมน้ำมันลดลง มีสีและกลิ่นรสดี การทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นระบบการทอดที่มีแก๊สออกซิเจนน้อยมากทำให้เกิดออกซิเดชันต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น ช่วยยืดอายุการใช้งานของน้ำมัน อีกทั้งยังลดอันตรายต่อสุขภาพที่เป็นผลมาจากคุณภาพน้ำมันที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังใช้อุณหภูมิในการทอดต่ำกว่าที่สภาวะบรรยากาศทำให้ใช้พลังงานต่ำกว่า

ในระหว่างการทอด อาหารจะมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติของอาหาร อย่างเช่น การหดตัว การขยายตัว ความแข็ง ความเป็นรูพรุน ความชื้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะส่งผลโดยตรงถึงคุณภาพของอาหารที่ได้หลังการทอด จึงได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและคุณสมบัติของอาหารระหว่างการทอดและหลังการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อใช้ในการทำนายและปรับปรุงคุณภาพของอาหารหลังการทอดให้ดีและเป็นที่ยอมรับมากยิ่งขึ้น

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎี

การทอดเป็นการปฏิบัติการแปรรูปอาหารด้วยความร้อน โดยการส่งผ่านความร้อนจากตัวกลางคือน้ำมัน ไปยังอาหารอย่างรวดเร็ว เป็นการถนอมอาหารโดยใช้ความร้อนทำลายเชื้อจุลินทรีย์และเอนไซม์ในอาหาร และทำให้ค่า water activity ที่ผิวหน้าหรือทั้งชิ้นของอาหารลดลง อายุการเก็บรักษาของอาหารทอดโดยส่วนใหญ่ขึ้นกับปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในขณะที่เก็บรักษา ในระหว่างการทอดจะมีการระเหยของน้ำออกจากชิ้นอาหารและมีการฟอร์มตัวของเม็ดแป้งเกิด gelatinization ภายในอาหาร ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัส และรสชาติเฉพาะ ทั้งนี้เวลาในการทอดจนได้ผลิตภัณฑ์จะใช้เวลาสั้นมาก ซึ่งพบว่าอาหารจะสุกในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิของอาหารยังมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของน้ำมันอยู่มาก

การทอดเป็นกรรมวิธีการแปรรูปอาหารที่แตกต่างจากวิธีอื่นโดยทั่วไป ดังนี้

1. การทอดใช้เวลาสั้นมาก ส่วนใหญ่จะเสร็จภายใน 5-10 นาที เนื่องจาก

1.1 การทอดมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน (น้ำมัน) และอุณหภูมิของอาหารมาก การทอดที่บรรยากาศจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิมากกว่าการทอดที่สภาวะสุญญากาศ (Joslyn และHeid, 1964 อ้างโดย จริญญา, 2541)

1.2 ขนาดของชิ้นอาหารที่ใช้ในการทอดส่วยใหญ่มีขนาดเล็ก และมีน้ำหนักน้อย

2. ผลิตภัณฑ์อาหารทอดโดยทั่วไป จะมีน้ำมันอยู่ในผลิตภัณฑ์ประมาณ 10-40% โดยน้ำหนัก เช่น potato chips

3. ผลิตภัณฑ์อาหารทอดจะมีคุณลักษณะความกรอบมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปโดยส่วนใหญ่

4. ตัวกลางส่งผ่านความร้อนที่ใช้คือ น้ำมัน ซึ่งมีผลทำให้องค์ประกอบและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์มีลักษณะเฉพาะแตกต่างจากวิธีการแปรรูปอาหารอื่น ๆ

1.1 วิธีการทอด

โดยทั่วไป วิธีการทอดในอุตสาหกรรมอาหารมีด้วยกัน 2 วิธี ซึ่งจำแนกโดยวิธีการถ่ายเทความร้อน ได้แก่ การทอดแบบน้ำมันตื้น (shallow frying) และการทอดแบบน้ำมันท่วม (deep-fat frying) (วิไล รังสาดทอง, 2543; นิธิยา และไพโรจน์, 2547)

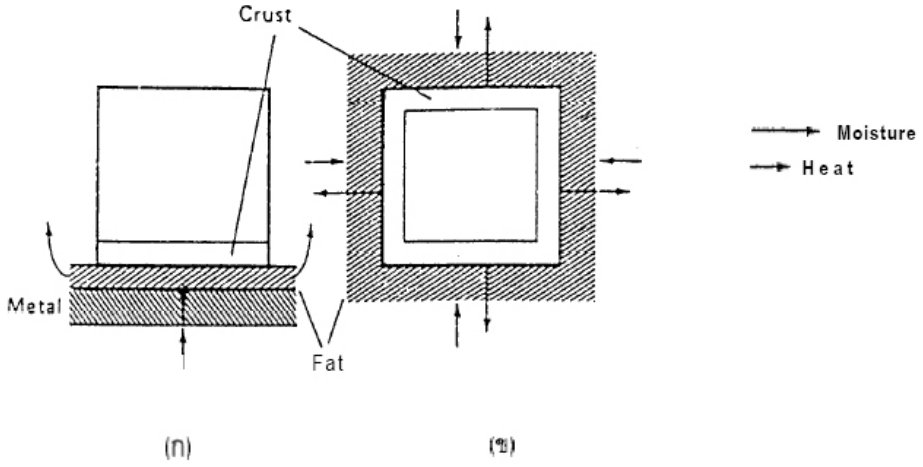
1.1.1 การทอดแบบน้ำมันตื้น

การทอดแบบน้ำมันตื้นเป็นการทอดชิ้นอาหารในกระทะที่มีปริมาณน้ำมันเพียงเล็กน้อย โดยมีระดับน้ำมันในกระทะประมาณ ½-1 นิ้ว น้ำมันจะไม่ท่วมชิ้นอาหารทั้งชิ้น วิธีนี้เหมาะสำหรับ

อาหารที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงเช่น เบคอน ไข่ เบอร์เกอร์ และพายชนิดต่าง ๆ ความร้อนจากผิวของกระทะร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านชั้นน้ำมันบาง ๆ ไปยังอาหาร (ภาพประกอบ 1.1 ก) ความหนาของชั้นน้ำมันแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของผิวหน้าของอาหาร ถ้าชั้นน้ำมันบางฟองไอน้ำเดือดจะทำให้อาหารเคลื่อนที่ขึ้นลงบนผิวร้อนของกระทะ การกระจายความร้อนจึงไปสม่ำเสมอ ทำให้ผิวหน้าของอาหารที่ทอดแบบน้ำมันตื้นมีสีน้ำตาลไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามวิธีทอดแบบนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวสูง (200-450 W/m^2K) (นิธิยา และไพโรจน์, 2547)

1.1.2 การทอดแบบน้ำมันท่วม

การทอดแบบน้ำมันท่วมเป็นการทอดอาหารในน้ำมันที่มีปริมาณมากเพียงพอที่จะท่วมอาหารทั้งชิ้น การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีนี้เป็นทั้งการพาความร้อนในน้ำมันร้อนและการนำความร้อนจากภายในอาหาร ผิวของอาหารทั้งหมดจะได้รับความร้อนใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดสีและลักษณะภายนอกที่สม่ำเสมอ (ภาพประกอบ 1.1 ข) การทอดแบบน้ำมันท่วมเหมาะสำหรับอาหารทุกรูปร่าง แต่อาหารที่มีรูปร่างไม่แน่นอนจะอมน้ำมันมากกว่าอาหารที่มีรูปร่างแน่นอน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก่อนเกิดการระเหยเท่ากับ 250-300 W/m^2K และเพิ่มขึ้นเป็น 800-1000 W/m^2K เนื่องจากเกิดเทอบุเลนซ์ของไอที่หนีออกจากอาหาร อย่างไรก็ตามถ้าอัตราการระเหยสูงเกินไปจะเกิดฟิล์มบาง ๆ ของไอน้ำอยู่บนผิวอาหารทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง (นิธิยา และไพโรจน์, 2547)



ภาพประกอบ 1.1 การถ่ายเทมวลและความร้อน (ก) การทอดแบบน้ำมันตื้น (ข) การทอดแบบน้ำมันท่วม

ที่มา : นิธิยา และไพโรจน์, 2547.

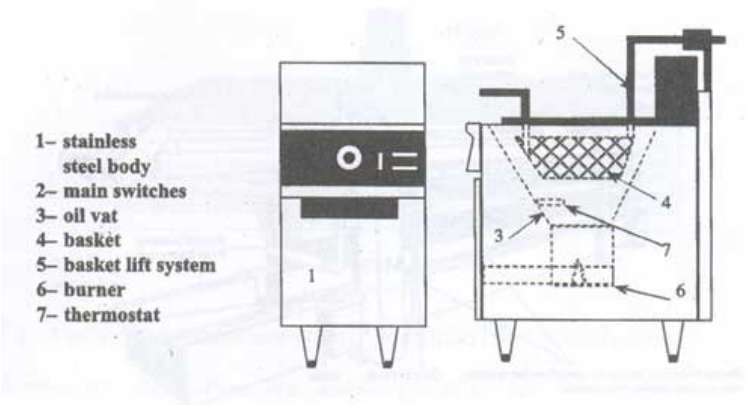
การทอดแบบน้ำมันท่วมเป็นกระบวนการที่ทำให้อาหารสุกและมีความชื้นลดลง โดยการให้ชิ้นอาหารสัมผัสกับน้ำมันที่มีอุณหภูมิประมาณ 160°C ถึง 200°C จนกระทั่งจุดกึ่งกลางของชิ้นอาหาร หรือจุดร้อนช้าที่สุดมีอุณหภูมิสูงเพียงพอที่จะทำลายจุลินทรีย์ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการบริโภค หรือนานเพียงพอที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะตามที่ต้องการ การทอดเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวลสารรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของอาหารเกิดขึ้นพร้อม ๆกัน นอกจากนี้การทอดยังมีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้ผิวนอกของอาหารเกิดเป็นเปลือกแข็ง (crust) หุ้มอาหาร เพื่อรักษากลิ่นรสและความฉ่ำของอาหารไว้ อาหารบางชนิดสามารถทอดได้เลย เช่น มันฝรั่ง เนื้อไก่ ปลา อาหารบางชนิดนิยมเคลือบด้วยแป้งชุบทอดหรือ/และเกล็ดขนมปังก่อนทอด เช่น หัวหอมใหญ่หั่นเป็นวง ๆ เนื้อปลาหั่นเป็นแผ่นบาง ๆ และเนื้อไก่ เป็นต้น เพื่อลดการซึมผ่านของน้ำมันไปยังชิ้นอาหารและลดการเสื่อมของน้ำมันจากน้ำที่ออกจากอาหาร ทำให้สามารถใช้น้ำมันทอดอาหารได้นานขึ้น

1.2 รูปแบบการทอด

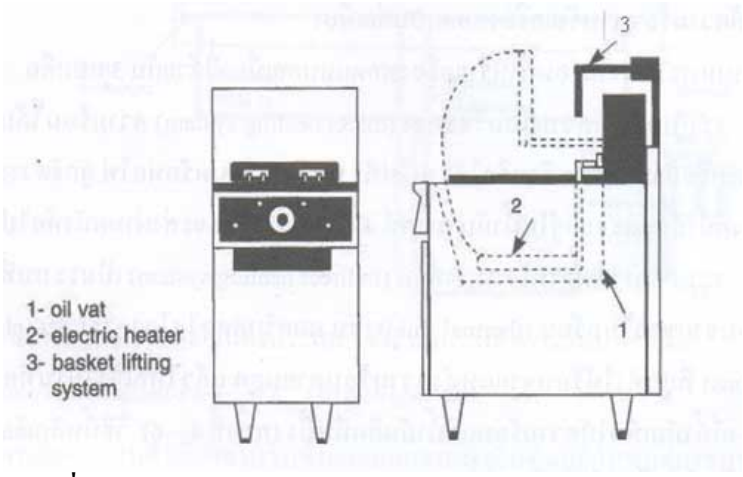
การทอดแบบน้ำมันท่วมสามารถทำได้ 2 แบบ คือ การทอดแบบแบทช์ และการทอดแบบต่อเนื่อง

1.2.1 ระบบทอดแบบแบทช์ (batch frying system)

ระบบทอดแบบแบทช์ใช้กับการทอดอาหารปริมาณน้อย เช่น เครื่องทอดแบบที่ใช้ในครัวเรือน หรือเครื่องทอดที่ใช้ในร้านอาหารฟาสต์ฟูดส์ ดังแสดงในภาพประกอบ 1.2 และภาพประกอบ 1.3 แหล่งความร้อนเป็นได้ทั้งแบบแก๊สและแบบไฟฟ้า โดยทั่วไปอุณหภูมิของน้ำมันขณะทอดจะอยู่ในช่วง 160°C – 200°C นอกจากนี้การทอดอาจกระทำภายใต้บรรยากาศปกติ หรือทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ หรือทอดภายใต้ความดัน การทอดภายใต้ความดันพัฒนาขึ้นครั้งแรกเพื่อใช้ในการทอดไก่เพื่อลดเวลาทอด อาหารที่ได้จะมีความฉ่ำ สีและลักษณะปรากฏสม่ำเสมอกว่าการทอดในระบบเปิด วัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนของอุปกรณ์ที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันควรหลีกเลี่ยงวัสดุประเภททองแดงหรือทองเหลือง เพื่อลดการแตกตัวของน้ำมันเนื่องจากไอออนของโลหะดังกล่าว และควรปิดฝาหม้อทอดเมื่อไม่มีการทอด เพื่อลดการสัมผัสกับแก๊สออกซิเจน ควรตักเศษชิ้นอาหารในหม้อทอดออกทิ้งเป็นระยะ ๆ และเติมน้ำมันใหม่เข้าไปเป็นระยะ ๆ เพื่อรักษาระดับน้ำมันในหม้อทอด และกรองน้ำมันเพื่อแยกเศษชิ้นอาหารในน้ำมันออกทุกวันหากน้ำมันนั้นยังมีคุณภาพดี การพิจารณาคุณภาพของน้ำมันด้วยสายตาอาจสังเกตจากการเกิดควันมากเกินไปในขณะทอด ซึ่งเกิดขึ้นได้เนื่องจากจุดเกิดควัน (smoke point) ของน้ำมันลดต่ำลง การเกิดฟองจำนวนมากขณะทอด และสังเกตจากสีของน้ำมันที่เข้มขึ้น เมื่อต้องเปลี่ยนน้ำมันใหม่ทั้งหมด ควรล้างทำความสะอาดเครื่องทอดก่อนเติมน้ำมันใหม่ทุกครั้ง



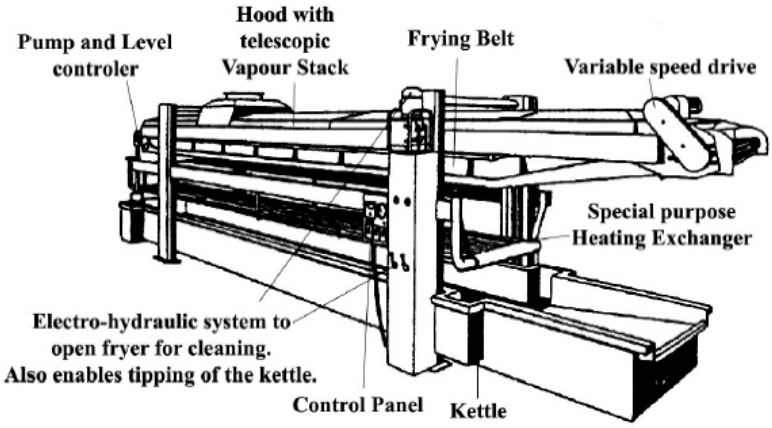
ภาพประกอบ 1.2 เครื่องทอดแบบใช้แก๊ส
ที่มา : นิธิยา และไพโรจน์, 2547.



ภาพประกอบ 1.3 เครื่องทอดแบบใช้ไฟฟ้า
ที่มา : นิธิยา และไพโรจน์, 2547.

1.2.2 ระบบทอดแบบต่อเนื่อง (continuous frying system)

ระบบการทอดแบบต่อเนื่องแสดงดังภาพประกอบ 1.4 ระบบนี้มักใช้กับการทอดอาหารปริมาณมาก เช่น การทอดอาหารในระดับอุตสาหกรรม โดยทั่วไประบบทอดแบบต่อเนื่องจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน ได้แก่ 1) อ่างน้ำมันหรือแทงค์น้ำมัน 2) ส่วนให้ความร้อนพร้อมระบบควบคุม 3) ระบบลำเลียงอาหารเข้าและออกจากแทงค์น้ำมัน 4) ระบบน้ำมันสำหรับทอด และ 5) ระบบระบายไอน้ำและควันที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์



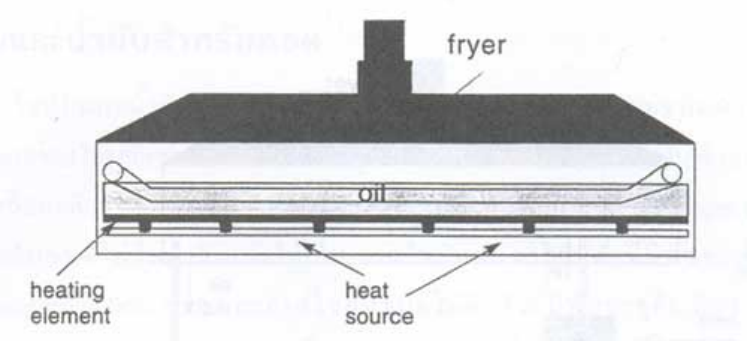
ภาพประกอบ 1.4 ระบบทอดในน้ำมันท่วมแบบต่อเนื่อง
ที่มา : นิธิยา และไพโรจน์, 2547.

ระบบการให้ความร้อนสำหรับเครื่องทอดแบบต่อเนื่องมีด้วยกัน 3 แบบคือ

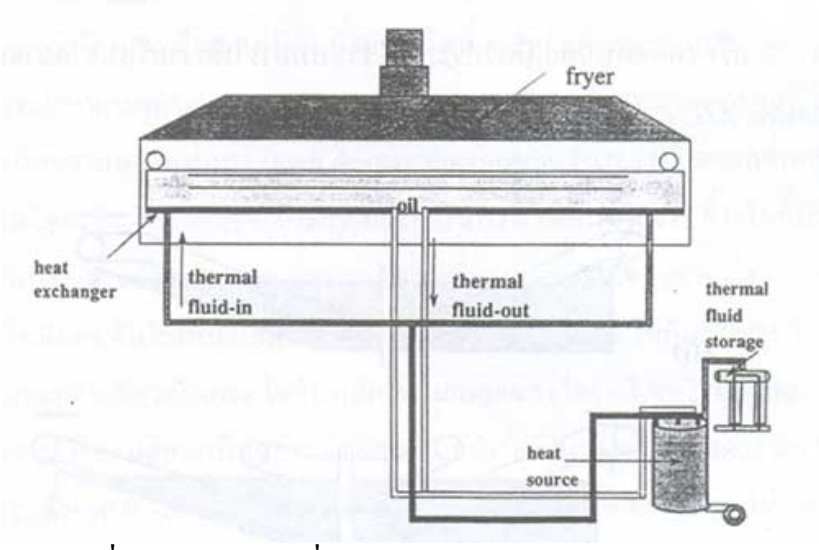
1. ระบบการให้ความร้อนโดยตรง (direct heating system) ความร้อนได้มาจากการเผาไหม้แก๊สหรือน้ำมันเชื้อเพลิงหรือได้จากไฟฟ้า ท่อความร้อนหรือท่อไฟ ถูกจัดวางไว้ที่ส่วนล่างของแทงค์น้ำมันและจมอยู่ในน้ำมัน (ภาพประกอบ 1.5) ความร้อนจะส่งผ่านผนังท่อไปยังน้ำมัน

2. ระบบการให้ความร้อนทางอ้อม (indirect heating system) เป็นระบบที่น้ำมันได้รับความร้อนจากของไหลร้อน (thermal fluid) เช่น คลอริเนเตดไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbons) ที่ถูกทำให้ร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอก แล้วไหลเข้าไปในท่อที่อยู่ส่วนล่างของแทงค์น้ำมันเพื่อให้ความร้อนแก่น้ำมันอีกทีหนึ่ง (ภาพประกอบ 1.6) วิธีนี้หลีกเลี่ยงการต้องมีอุปกรณ์ที่ต้องใช้แก๊สหรือไฟในบริเวณทอด

3. ระบบการให้ความร้อนจากภายนอก (external heating system) น้ำมันจะถูกทำให้ร้อนด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ภายนอกเครื่องทอดแล้วไหลเข้าสู่แทงค์น้ำมัน (ภาพประกอบ 1.7) ไม่มีท่อให้ความร้อนในแทงค์น้ำมัน ทำให้ไม่มีปัญหาการเกาะติดของเศษอาหารบนท่อความร้อน ทำความสะอาดได้ง่าย แต่มีข้อเสียในเรื่องของราคา และต้องใช้พื้นที่มากสำหรับจัดวางระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและท่อ

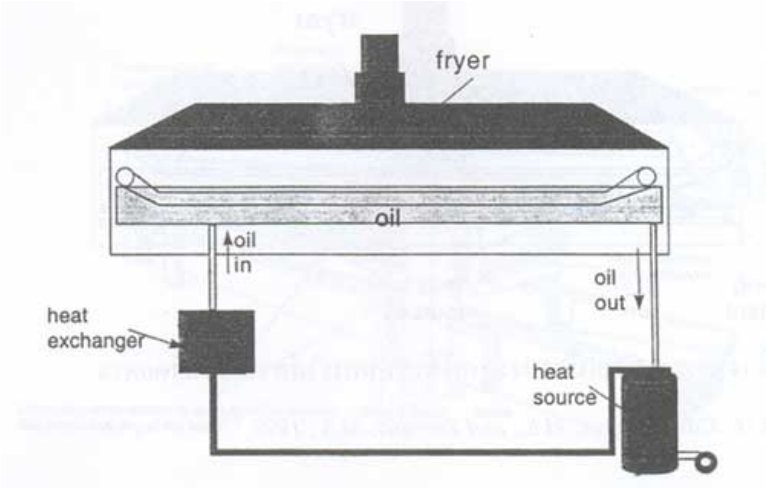


ภาพประกอบ 1.5 เครื่องทอดแบบต่อเนื่องประเภทใช้ระบบการให้ความร้อนโดยตรง
ที่มา : นิธิยา และไพโรจน์, 2547.

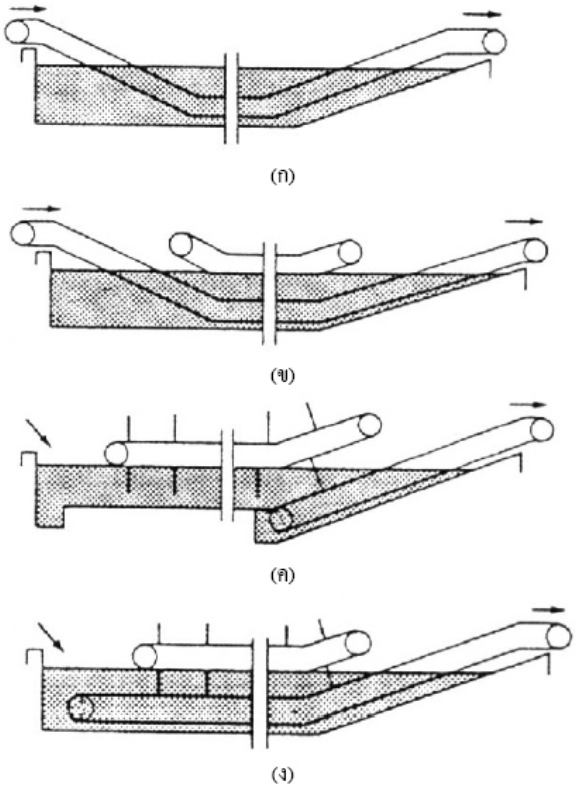


ภาพประกอบ 1.6 เครื่องทอดแบบต่อเนื่องประเภทใช้ระบบการให้ความร้อนทางอ้อม
ที่มา : นิธิยา และไพโรจน์, 2547.

การเลือกระบบลำเลียงอาหารเข้าและออกจากน้ำมันขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของอาหาร อาหารกึ่งแข็งหรือเป็นของแข็ง เช่น แผ่นมันฝรั่ง มันฝรั่งแท่ง เนื้อปลาแท่ง และอาหารชุบทอดต่าง ๆ ต้องอาศัยสายพานลำเลียงพาอาหารเหล่านั้นเข้าไปในเครื่องทอด (ภาพประกอบ 1.8 ก) และถ้าอาหารลอยขึ้นมาที่ผิวน้ำมันขณะทอดอาจต้องมีสายพานอีกชุดหนึ่งสำหรับกดให้อาหารจมอยู่ในน้ำมัน (ภาพประกอบ 1.8 ข) สำหรับอาหารบางชนิดที่บีบออกจากเครื่อง เช่น โดนัท หรือผลิตภัณฑ์จากเครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์ จะถูกอัดผ่านรูเปิดและหล่นลงไปในน้ำมันโดยไม่ต้องมีสายพานลำเลียง และหากอาหารลอยอยู่บนผิวน้ำมันทันทีที่สัมผัสกับน้ำมัน เช่น โดนัท และขนมขบเคี้ยวบางชนิด ระบบลำเลียงจะออกแบบให้มีใบพายหรือใบพัดสำหรับพาให้ผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ไปข้างหน้า (ภาพประกอบ 1.8 ค) สำหรับอาหารที่เมื่อทอดไประยะหนึ่งแล้วจึงจะลอยขึ้นมาจะใช้ระบบลำเลียงดังภาพประกอบ 1.8 ง



ภาพประกอบ 1.7 เครื่องทอดแบบต่อเนื่องประเภทใช้ระบบการให้ความร้อนจากภายนอก
ที่มา : นิธิยา และไพโรจน์, 2547.



ภาพประกอบ 1.8 ระบบลำเลียงในเครื่องทอดแบบต่อเนื่อง
ที่มา : นิธิยา และไพโรจน์, 2547.

1.3 ขั้นตอนของกระบวนการทอดอาหาร

ขั้นตอนของกระบวนการทอดอาหารแบ่งได้เป็น 4 ช่วง ดังนี้ (นิธิยาและไพโรจน์, 2547)

1. ช่วงแรกของการให้ความร้อน (initial heating) เป็นช่วงที่ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิเท่ากับจุดเดือดของน้ำ การถ่ายเทความร้อนเป็นการพาแบบธรรมชาติที่ยังไม่มีการระเหยของน้ำ

2. ช่วงการเดือดของน้ำที่ผิวอาหาร (surface boiling) น้ำที่ผิวของอาหารจะระเหยกลายเป็นไอ ผิวหน้าเริ่มแห้งเกิดเป็นเปลือกแข็ง การถ่ายเทความร้อนเป็นการพาแบบบังคับ

3. ช่วงอัตราการระเหยลดลง (falling rate) เป็นช่วงที่อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของอาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการสูญเสียน้ำจากภายในชิ้นอาหาร และอัตราการระเหยน้ำเริ่มช้าลง อาหารเริ่มสุกและเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพ เช่น เกิดการเจลาติไนซ์ของแป้ง

4. จุดยุติของการเกิดฟอง (bubble end point) จะเกิดขึ้นเมื่ออาหารถูกทอดเป็นเวลานาน น้ำระเหยได้ช้าทำให้ปริมาณฟองของไอน้ำที่ออกจากผิวอาหารลดลง

1.4 ระบบการทอด

ระบบการทอดประกอบด้วย 5 ระบบย่อย คือ

1.4.1 ระบบเครื่องมือและอุปกรณ์ (Mechanical system) เป็นระบบการส่งอาหารเข้าและออกจากน้ำมัน โดยส่วนใหญ่จะเป็นสายพานเหล็กปลอดสนิมที่มีการหมุนเวียนการทำงานด้วยแรงขับจากมอเตอร์ โดยที่ตำแหน่งและลักษณะการทำงานของสายพานแตกต่างกันไปขึ้นกับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด

1.4.2 ระบบน้ำมัน (Fat system) จะเป็นภาชนะที่บรรจุน้ำมันสำรองและน้ำมันที่ใช้หมุนเวียนภายในเครื่องทอด โดยน้ำมันที่หมุนเวียนภายในเครื่องทอดจะช่วยควบคุมให้อุณหภูมิของน้ำมันสม่ำเสมอ

1.4.3 ระบบการให้ความร้อน (Thermal system) เป็นระบบที่ให้ความร้อนกับน้ำมัน แบ่งเป็นรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

1.4.3.1 ขดลวดต้านทานไฟฟ้า (electric immersion heating coils) เป็นวิธีที่ให้ความร้อนสัมผัสกับน้ำมันโดยตรง ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพสูง แต่ไม่เป็นที่แพร่หลายเพราะต้นทุนค่าไฟฟ้ามีราคาสูง

1.4.3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) เป็นวิธีให้ความร้อนโดยการถ่ายเทความร้อนจากท่อไอน้ำ (steam pipe) ไปยังน้ำมัน นิยมใช้กันมากเนื่องจากแก๊สหรือน้ำมันเตาที่เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำมีราคาถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ แต่ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะต่ำกว่าการใช้ขดลวดต้านทานไฟฟ้า

1.4.4 ระบบระบายอากาศ (Hooding and ventilation system) เป็นระบบการดูดอากาศไอน้ำ และควัน ที่ลอยขึ้นมาจากผิวหน้าเครื่องทอด ช่วยป้องกันการกลั่นตัวของไอน้ำ และป้องกัน

อันตรายที่อาจเกิดจากน้ำมันที่กระเด็นออกจากเครื่องทอดและช่วยในด้านความสะอาดของผลิตภัณฑ์และบริเวณที่ติดตั้งเครื่องทอดได้เป็นอย่างดี

1.4.5 ระบบควบคุมการทำงาน (Control system) เป็นระบบการทำงานที่ทำให้สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการและสามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์หลายชนิด แบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่

1.4.5.1 Modulating system จะสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยมีความละเอียดอยู่ในช่วง $\pm 2^{\circ}F$

1.4.5.2 On-off system สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง $\pm 10^{\circ}F$ ซึ่งจะมีความละเอียดน้อยกว่าแต่ราคาถูกกว่าแบบ Modulating system

1.5 องค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตในผักและผลไม้ (นิธิยา, 2545)

ผักและผลไม้มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก 70-95% นอกจากนี้ยังประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตในปริมาณที่รองลงมา คาร์โบไฮเดรตอาจอยู่ในรูปของน้ำตาลหรือแป้ง ซึ่งร่างกายสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ แต่ผลไม้และผักส่วนใหญ่ไม่ใช่แหล่งพลังงานที่สำคัญ ตาราง 1.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของกล้วยหอมสด

ตาราง 1.1 องค์ประกอบทางเคมีของกล้วยหอม

Nutrient	Units	Value per 100 g of edible portion
Water	g	74.91
Energy	kcal	89.00
Protein	g	1.09
Fat	g	0.33
Carbohydrate	g	22.84
Fiber	g	2.60
Ash	g	0.82

ที่มา : http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/search/

1.5.1 คาร์โบไฮเดรตในผักและผลไม้ (นิธิยา, 2545)

คาร์โบไฮเดรต เป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่โมเลกุลประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน คาร์โบไฮเดรตเป็นสารอาหารที่มีปริมาณมากที่สุดในโลก มีหน้าที่สำคัญ คือ เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างผนังเซลล์ของพืชและเป็นสารที่ให้พลังงานแก่เซลล์ของ

สิ่งมีชีวิต ในธรรมชาติพอคาร์โบไฮเดรตได้ทั้งในพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ พืชสีเขียวเป็นผู้สังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตในรูปของน้ำตาลกลูโคส โดยอาศัยกระบวนการสังเคราะห์แสง

น้ำตาลกลูโคสที่พืชผลิตได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง จะถูกนำไปใช้สังเคราะห์เป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนชนิดต่าง ๆ เช่น ไดแซ็กคาไรด์ (disaccharide) โอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) และพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) โดยเฉพาะพอลิแซ็กคาไรด์ที่ทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างเนื้อเยื่อพืช หรือผนังเซลล์พืช เช่น เซลลูโลส พอลิแซ็กคาไรด์บางส่วนจะถูกนำไปสะสมไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของพืชในรูปของสตาร์ช (starch) โดยสะสมไว้ที่หัว ราก ลำต้น ผล และเมล็ด และสังเคราะห์เป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) อินูลิน (inulin) กัม (gums) มิวซิเลจ (mucilage) และไกลโคไซด์ต่าง ๆ ดังนั้นในพืชจะมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบทั้งหมดประมาณ 90% ของน้ำหนักแห้ง ชนิดและปริมาณของคาร์โบไฮเดรตที่พบในอาหารบางชนิด ดังแสดงในตาราง 1.2

ตาราง 1.2 ชนิดและปริมาณของคาร์โบไฮเดรตที่พบในอาหารบางชนิด (%)

อาหาร	ปริมาณน้ำตาล	กลูโคส	ฟรุคโตส	มอลโทส	ซูโครส	สตาร์ช
แอปเปิล	14.50	1.17	6.04	น้อยมาก	3.78	1.50
แครอท	9.70	0.85	0.85	-	4.25	7.80
มันฝรั่ง	7.10	-	-	-	-	14.00
มันเทศ	26.30	0.87	-	-	2-3	14.65
กล้วย*	12.23	4.98	4.85	0.01	2.39	5.38

ที่มา : นิธิยา, 2545., *http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp/cgi-bin/list_nut_edit.pl

1.5.2 สตาร์ช (นิธิยา, 2545)

สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสและเป็นโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืช ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชเก็บสะสมสตาร์ชไว้ตามส่วนต่าง ๆ เช่น หัว ราก เมล็ด ลำต้น และผล โดยรวมตัวกันอยู่เป็นเม็ดสตาร์ช (starch granule) ที่อาจมีหรือไม่มีเมมเบรนหุ้มก็ได้ สตาร์ชที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ คือ มีโครงสร้างทางเคมีในโมเลกุลแตกต่างกัน และเม็ดสตาร์ชจ่ะมีขนาดรูปร่าง และสมบัติทางกายภาพเตกต่างกันด้วย

โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช ภายในเม็ดสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ อะไมโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์สายยาว และ อะไมโลเพกติน (amylopectin) เป็นสายแขนงที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง อะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่เป็นองค์ประกอบในเม็ดสตาร์ชแต่ละชนิดจะแตกต่างกันที่น้ำหนักโมเลกุล ตำแหน่งที่อยู่ในเม็ดสตาร์ช และสัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน ดังนั้นสมบัติของสตาร์ชที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจึงแตกต่างกัน การ

ที่สตาร์ชแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน จึงมีความสามารถในการทำหน้าที่ได้แตกต่างกัน เม็ดสตาร์ชส่วนใหญ่จะมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบอยู่ในประมาณ 20-39% และมีอะไมโลเพกตินประมาณ 70-80%

สมบัติของสตาร์ช

1. เป็นแหล่งสะสมพลังงานของพืช และเป็นแหล่งสารอาหารที่ให้พลังงานแก่สัตว์

2. ไม่มีรสหวาน

3. ไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะพองตัวได้เป็นสารละลายข้นหนืดในน้ำร้อนและกลายเป็นเจล

4. ในธรรมชาติสตาร์ชจะอยู่ในรูปเม็ดสตาร์ชที่มีเมมเบรนหุ้ม เมื่อเม็ดสตาร์ชกระจายตัวอยู่ในน้ำ และนำไปทำให้ร้อน เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำทำให้พองตัวออกมีขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดเจลาติไนเซชันได้เป็นสารละลายที่มีความข้นหนืดเมื่อปล่อยสารละลายให้เย็นลงจะเกิดเป็นเจลจึงใช้เป็นสารเพิ่มความข้นหนืดให้แก่ผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิด แต่ถ้ามีอุณหภูมิต่ำมาก เช่นในตู้เย็น หรือนำไปแช่แข็ง จะเกิดการตกตะกอน เรียกว่า รีโทรเกรเดชัน ทำให้ลักษณะเนื้อของผลิตภัณฑ์อาหารเปลี่ยนไปได้

5. สตาร์ชถูกไฮโดรไลซ์เพียงบางส่วนจะได้เป็นเดกซ์ทริน แต่ถ้าเกิดการไฮโดรไลซิสอย่างสมบูรณ์จะได้น้ำตาลมอลโทสและกลูโคส

ขั้นตอนในการสุกของกล้วย ดังภาพประกอบ 1.9 แบ่งได้เป็น 8 ระยะ คือ (เบญจมาศ, 2545)

ระยะที่ 1 เปลือกเขียว ผลแข็ง ไม่มีการสุก

ระยะที่ 2 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองนิดๆ

ระยะที่ 3 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองมากขึ้นแต่ยังมีสีเขียวมากกว่าสีเหลือง

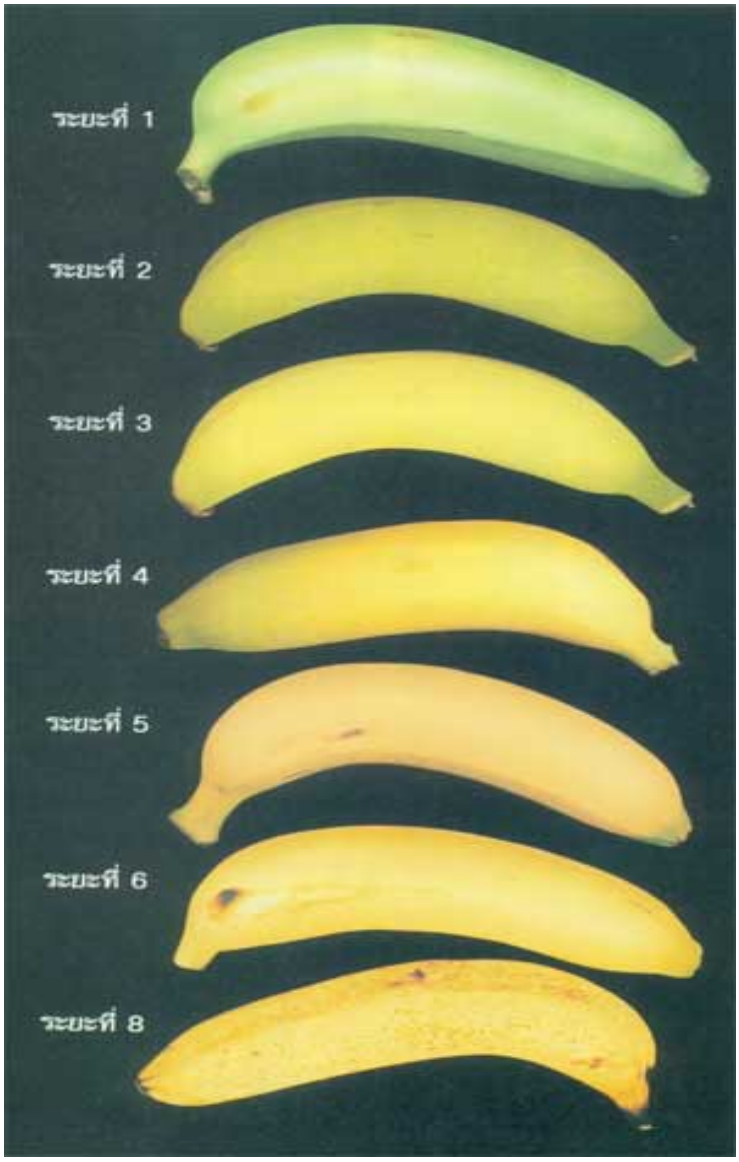
ระยะที่ 4 เริ่มเปลี่ยนสีจากเขียวออกเหลืองและมีสีเหลืองมากกว่าสีเขียว

ระยะที่ 5 เปลือกสีเหลือง แต่ปลายยังเป็นสีเขียว

ระยะที่ 6 ทั้งผลมีสีเหลือง (ผลสุก)

ระยะที่ 7 ผิวสีเหลืองและเริ่มมีจุดสีน้ำตาล (สุกเต็มที่ มีกลิ่มหอม)

ระยะที่ 8 ผิวสีเหลืองและเริ่มมีจุดสีน้ำตาลมากขึ้น (สุกมากเกินไป, เนื้อเริ่มอ่อนตัวและมีกลิ่นแรง)



ภาพประกอบ 1.9 ระยะการสุกของกล้วย
ที่มา : เบญจมาศ, 2545.

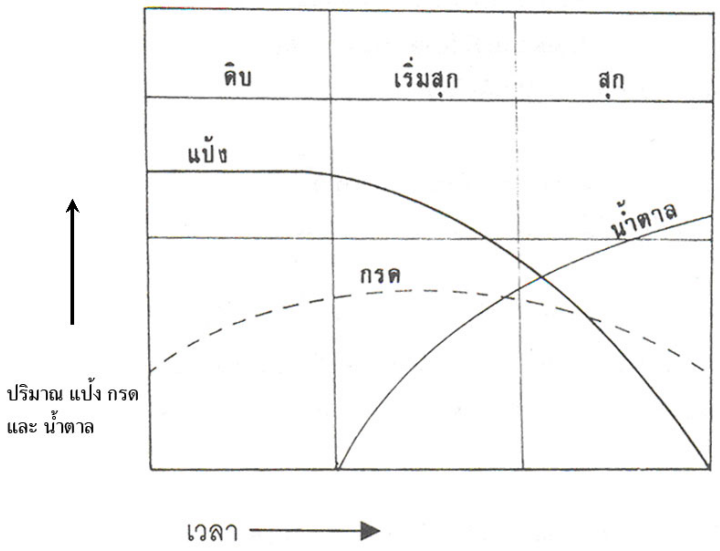
ในช่วงการสุกของกล้วยนี้ทำให้คุณค่าอาหารเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะแป้งซึ่งมักจะมีมากตอนผลกล้วยดิบจะเริ่มลดลงและเปลี่ยนเป็นน้ำตาล ดังตาราง 1.3

ตาราง 1.3 ค่าร้อยละของปริมาณแป้งและน้ำตาลของผลกล้วยที่มีการสุกในระยะต่าง ๆ

ระยะการสุก	น้ำตาล(%)	แป้ง(%)
1	0.8	21.1
2	2.7	18.4
3	4.8	16.1
4	8.2	12.5
5	13.2	6.8
6	17.6	3.3
7	18.5	2.4
8	19.9	1.3

ที่มา : Silayoi, B. 1986. อ้างโดย เบญจมาศ, 2545.

ในช่วงการสุกจะเห็นได้ว่าปริมาณแป้งลดลงแต่ปริมาณน้ำตาลมากขึ้นนั่นคือกล้วยมีรสหวานมากขึ้น ปริมาณแป้งจะลดลงอย่างมากเมื่อกล้วยสุก โดยจะเริ่มลดเมื่อกล้วยเริ่มมีการเปลี่ยนสี สำหรับปริมาณของกรดตั้งแต่ดิบจนสุกจะค่อนข้างต่ำ ดังภาพประกอบ 1.10



ภาพประกอบ 1.10 เปรียบเทียบปริมาณแป้ง กรด และน้ำตาลในการสุกของกล้วย
ที่มา : Simmonds, N.W. 1987. อ้างโดย เบญจมาศ, 2545.

1.6 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของอาหารทอด

ในระหว่างการทอด มีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในอาหารดังนี้

1.6.1 เกิดการระเหยของน้ำในอาหาร

1.6.2 ผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้น จนถึงระดับที่ต้องการ และมีการฟอร์มตัวของเม็ดแป้ง เกิด gelatinization ภายในชิ้นอาหาร จนกระทั่งอาหารสุกและมีความกรอบ

1.6.3 การที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีน้ำตาล

1.6.4 มีการดูดซึมน้ำมันเข้าไปในผลิตภัณฑ์

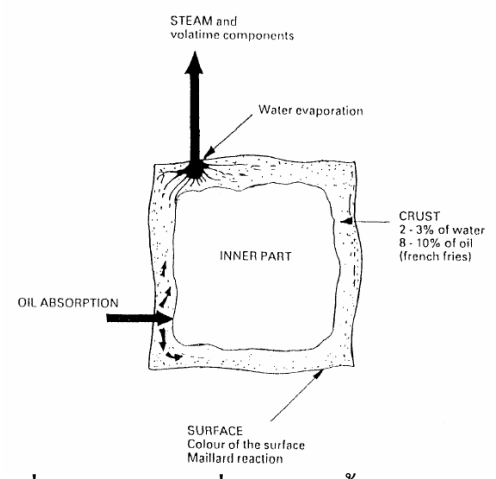
1.6.5 เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอาหารขณะกำลังทอด ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการลอยหรือจมของชิ้นอาหารในการทอด

Guillaumin, 1988. อ้างโดย จริญญา, 2541. อธิบายลักษณะโครงสร้างของอาหารทอดโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 ส่วน (ภาพประกอบ 1.11) คือ

1. surface เป็นส่วนที่มีความกรอบ มีสีเหลืองทอง เนื่องจากมีการสูญเสียน้ำระหว่างการทอด เมื่ออุณหภูมิของอาหารเท่ากับจุดเดือดของของเหลวที่เป็นองค์ประกอบในอาหาร และเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Maillard reaction) ความเข้มของสีจะมากหรือน้อยขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการทอดและองค์ประกอบที่ผิว ในส่วนนี้มีปริมาณความชื้นประมาณ 3%

2. crust ระหว่างการทอดมีการระเหยของน้ำกลายเป็นไอ ทำให้เกิดการฟอร์มตัวของ crust เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดสูงกว่า 155°C crust ประกอบด้วยช่องว่างและรูพรุนต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก และมีน้ำมันเข้าไปอยู่ในช่องว่างเหล่านี้แทนน้ำที่ระเหยออกไป อาหารทอดแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตัวและมีปริมาณน้ำมันระดับหนึ่ง ขึ้นกับสัดส่วนของ crust/core เช่น potato chips 40%, potato sticks 35%, French fried 8-10%, fried shrimps 12-15% และ doughnuts 20-25%

3. core เป็นส่วนที่อยู่ตรงกลาง มีความชื้นสูงและอาหารสุกเนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนจากน้ำมันเข้าไปภายใน ในการทอดแบบน้ำมันท่วม มีส่วน core ปรากฏอยู่ตลอดเวลาการทอด ยกเว้นอาหารที่เป็นแผ่นบาง ๆ เช่น potato chips จะมีเฉพาะส่วน crust



ภาพประกอบ 1.11 ลักษณะทั่วไปของอาหารที่ทอดแบบน้ำมันท่วม
ที่มา : Guillaumin, 1988.

1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหารในกระบวนการทอด

การทอดเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนมาก มีตัวแปรมากมายที่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของอาหารทอด โดยแบ่งพิจารณาเป็น 3 ส่วนดังนี้

1.7.1 กระบวนการทอด ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำมันร้อน เวลาที่ใช้ทอด วิธีการทอดเป็นแบบน้ำมันท่วมหรือการทอดแบบน้ำมันตื้น และรูปแบบการทอด เช่น การทอดแบบแบทช์ หรือแบบต่อเนื่อง ทำการทอดภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ (atmospheric) หรือความดันเหนือบรรยากาศ (pressure fryer) หรือภายใต้สภาวะสุญญากาศ (vacuum fryer) โดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการทอดมีค่าประมาณ 163-193°C ขึ้นกับชนิดของอาหารที่ทอด การเลือกอุณหภูมิที่ใช้สำหรับทอดอาจพิจารณาจากข้อกำหนดลักษณะและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ตามความต้องการของผู้บริโภค การทอดที่ใช้อุณหภูมิสูงจะลดเวลาการทอดให้สั้นลงและทำให้อัตราการทอดเร็วขึ้น (Varela, 1988 อ้างโดย จริญญา, 2541)

1.7.2 น้ำมันที่ใช้ทอด ได้แก่ คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมัน สารปนเปื้อนและองค์ประกอบในน้ำมัน การทอดที่อุณหภูมิน้ำมันสูงจะเป็นตัวเร่งให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพเร็ว เนื่องจากเกิดกรดไขมันอิสระมากขึ้น และยังทำให้สีกลิ่น และความหนืดของน้ำมันเปลี่ยนไป

1.7.3 อาหาร ได้แก่ องค์ประกอบของอาหาร สมบัติทางกายภาพและเคมีของอาหาร การเตรียมชิ้นอาหารก่อนการทอด เช่น รูปทรงของอาหาร ความหนาของชิ้นอาหาร การลวกชิ้นอาหาร การลดความชื้นของชิ้นอาหารก่อนทอด การชุบในแป้งชุบทอด สัดส่วนของน้ำหนักอาหารต่อปริมาตรของน้ำมัน และสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอาหาร ซึ่งมีผลต่อปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับเข้าไปในอาหาร

1.8 ผลกระทบของความร้อนในการทอด

1.8.1 ผลกระทบของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำมัน

การให้ความร้อนแก่น้ำมันที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ในขณะที่มีความชื้นและออกซิเจนออกมาจากอาหารระหว่างนั้นทำให้น้ำมันเกิดการออกซิเดชัน และเกิดสารระเหยประเภทคาร์บอนิล กรดไฮดรอซี กรดคีโต และกรดอีพอกซี ทำให้น้ำมันมีสีคล้ำและมีกลิ่นเหม็น โมเลกุลของน้ำมันจะเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันในสภาพไม่มีออกซิเจนและให้โพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลสูงหรือให้สารประกอบไซคลิกทำให้น้ำมันมีความหนืดสูง ซึ่งมีผลไปลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวระหว่างการทอดและทำให้อาหารดูดซับน้ำมันมากขึ้น

การออกซิไดซ์วิตามินที่ละลายได้ในไขมันในน้ำมันทำให้เกิดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เรตินอล คาโรทินอยด์ และโทโคเฟอรอลจะถูกทำลายไปและทำให้และกลิ่นของน้ำมันเปลี่ยนไป อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาออกซิเดชันของโทโคเฟอรอลกลับมีผลดีต่อน้ำมันเนื่องจากสามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชันได้ เรื่องนี้มีความสำคัญมากเพราะน้ำมันที่ใช้ในการทอดส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมันพืชซึ่งประกอบด้วยไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งเกิดออกซิเดชันได้ง่าย กรดลิโนเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นจะสูญเสียไปมีผลทำให้สมดุลของกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวเปลี่ยนไป

1.8.2 ผลกระทบของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของอาหาร

วัตถุประสงค์หลักของการทอดคือ เพื่อปรับปรุงสี กลิ่น และรสในเปลือกนอกของอาหารโดยอาศัยปฏิกิริยาเมลลาร์ดและการดูดซับสารระเหยจากน้ำมัน ปัจจัยหลักที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงมีและกลิ่นของอาหารได้แก่

1. ชนิดของน้ำมันที่ใช้ในการทอด
2. อายุและประวัติด้านความร้อนของน้ำมัน
3. อุณหภูมิและเวลาในการทอด
4. ขนาดและลักษณะผิวหน้าของอาหาร
5. การจัดการหลังการทอด

ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้มีผลต่อการดูดซับน้ำมันของอาหาร ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสารประกอบโพลิเมอร์ซึ่งคล้ายคลึงกับในกรณีการอบ

1.8.3 ผลกระทบของความร้อนต่อคาร์โบไฮเดรต (กล้าณรงค์, 2542.)

แป้ง (flour) ประกอบด้วย starch และสารอาหารอื่น ๆ ในส่วนของ starch จะประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน 2 ชนิดคือ อะไมโลส (amylose) 20-39% และอะไมโลเพกติน (amylopectin) 70-80% อะไมโลสเป็นสารที่ละลายน้ำได้ ประกอบด้วยกลูโคส 70-300 หน่วย สำหรับอะไมโลเพกติน มักอยู่ในส่วนที่หุ้มเม็ดแป้ง ไม่ละลายน้ำ ปกติแป้งจะไม่ละลายในน้ำเย็นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50°C เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในผนังเซลล์ซึ่งเป็นเซลลูโลส เมื่อนำน้ำแป้งไปต้ม น้ำจะซึมเข้าไปในผนังเซลล์ ความสามารถในการดูดน้ำของเม็ดสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการพองตัวและการพองตัวนี้สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ เพราะเม็ด

สตาร์ชสามารถหดตัวลงได้เมื่อนำไปอบไล่น้ำออกหรือทำให้แห้ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ เม็ดสตาร์ชจะพองตัวออกมากขึ้นจนมีขนาดใหญ่ แต่ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด (ระยะที่ 1) หลังจากนั้น ร่างแหระหว่างไมเซลล์ ภายในเม็ดสตาร์ชจะอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ ได้เป็นสารละลายข้นหนืด เรียกกระบวนการนี้ว่า เจลาติไนเซชัน (gelatinization) สารละลายข้นหนืดที่ได้จะเป็นสารผสมของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน กระบวนการนี้ทำให้คืนกลับไม่ได้ ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 60°C ที่อุณหภูมิประมาณ 85°C ปริมาตรของแป้งจะเพิ่มขึ้นเป็น 5 เท่า น้ำแป้งจะมีลักษณะข้นเหนียว เรียกว่าเกิดเป็นเจล (ระยะที่ 2) เมื่อเม็ดสตาร์ชแตกตัวพบว่า ส่วนที่เป็นอะไมโลสจะละลายน้ำและดูดน้ำได้มากขึ้น ทำให้เกิดการพองตัวได้มากขึ้น โมเลกุลจะเข้ามาใกล้ชิดกันและยึดเข้าด้วยกัน มีบางส่วนของอะไมโลสจะแตกออกมาอยู่ในน้ำ จะสังเกตเห็นเม็ดแป้งกระจายอยู่ในน้ำแป้ง ทำให้ได้สารละลายที่มีความข้นหนืดเป็นเจล (ระยะที่ 3) ดังภาพประกอบ 1.12 การสุกในอาหารคือการเกิดเจลอย่างสมบูรณ์ (complete gelatinization) อุณหภูมิที่แป้งพองตัวอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งน้ำแป้งข้น เรียกว่า อุณหภูมิของการเกิดเจล (gelatinization temperature) แสดงในตาราง 1.4

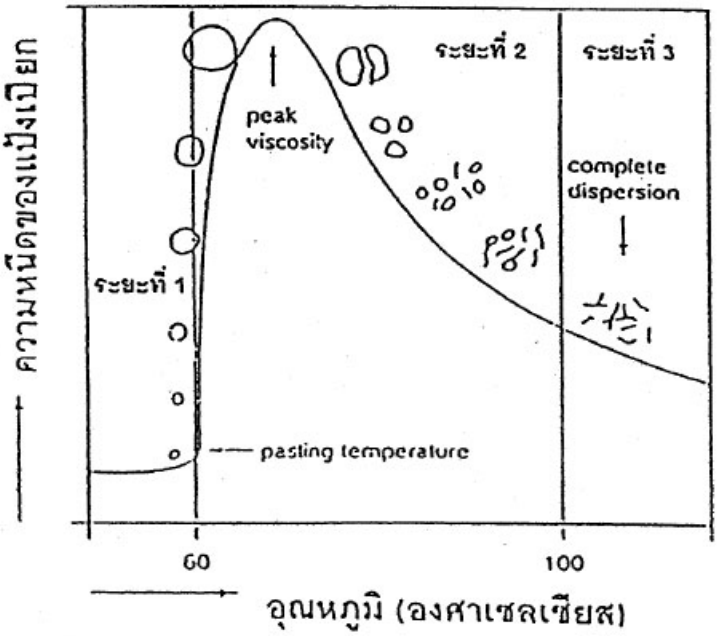
ตาราง 1.4 ปริมาณอะไมโลส และอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชัน ของสตาร์ชชนิดต่าง ๆ

แหล่งของสตาร์ช	อะไมโลส (%)	อุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชัน (°C)
ข้าวสาลี	26	53-65
ข้าวบาร์เลย์	22	56-62
ข้าวโพด	22	62-70
ข้าวโอ๊ต	27	56-62
ข้าวเจ้า	18	61-78
มันฝรั่ง	23	58-66
มันสำปะหลัง	16	52-64
ถั่ว (beans)	24	64-67
ถั่ว (peas)	35	57-70

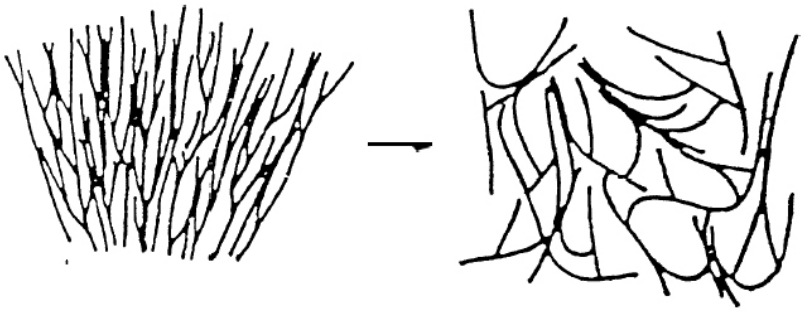
ที่มา : นิธิยา, 2545.

จากการศึกษาค้นคว้าของนักวิทยาศาสตร์สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของการเกิดเจลได้ดังนี้คือ เมื่อมีการให้ความร้อนแก่เม็ดแป้งซึ่งอยู่ในรูปของสารแขวนลอยในน้ำ ความร้อนซึ่งเป็นพลังงานรูปหนึ่งจะไปสลายพันธะไฮโดรเจนในองค์ประกอบของกลูโคสโพลิเมอร์ใน

เม็ดแป้ง โดยจะเริ่มสลายพันธะไฮโดรเจนในจุดที่อ่อนที่สุดของอะไมโลเพคตินทำให้เกิดการแทรกตัวของน้ำเข้าไปในเส้นใยของกลูโคสโพลิเมอร์ และเริ่มการจัดเรียงเส้นใยของกลูโคสโพลิเมอร์ ในรูป helices หรือ coils ซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ว่างภายในเม็ดแป้ง ทำให้เกิดการดูดซึมของน้ำเข้าเม็ดแป้งได้มากขึ้น จึงทำให้เม็ดแป้งขยายตัวขึ้นจากเดิมหลายเท่า ขณะที่เกิดการพองตัว อะไมโลสจะแทรกตัวออกจากเม็ดแป้งและอะไมโลเพคตินก็ดูดซึมน้ำได้มากขึ้น สารแขวนลอยแป้งจะเริ่มใส ความหนืดของแป้งจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่เม็ดแป้งดูดซึมน้ำได้สูงสุดแล้ว ถ้ามีการให้ความร้อนต่อไปเรื่อย ๆ เม็ดแป้งจะเริ่มแตกและกลูโคสโพลิเมอร์ จะเริ่มกระจายตัวในน้ำ ความหนืดของสารแขวนลอยจะลดลง โดยทั่ว ๆ ไปแล้วแป้งที่ได้จากพืชที่สะสมแป้งในรากและลำต้น จะให้ค่าอยู่ในช่วงค่อนข้างแคบกว่าที่ได้จากธัญญพืช และวิธีการวัดค่าอุณหภูมิของการเกิดเจลของแป้งแต่ละชนิดนั้นมีหลายวิธี แต่วิธีที่ให้ความแม่นยำสูงวิธีหนึ่งคือ การใช้ polarized light กับกล้องจุลทรรศน์ ประกอบกับ Kofler hot stage การพองตัวของเม็ดแป้งมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลดังภาพประกอบ 1.13



ภาพประกอบ 1.12 ระยะในการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดสตาร์ช
ที่มา : กล้าณรงค์, 2542.

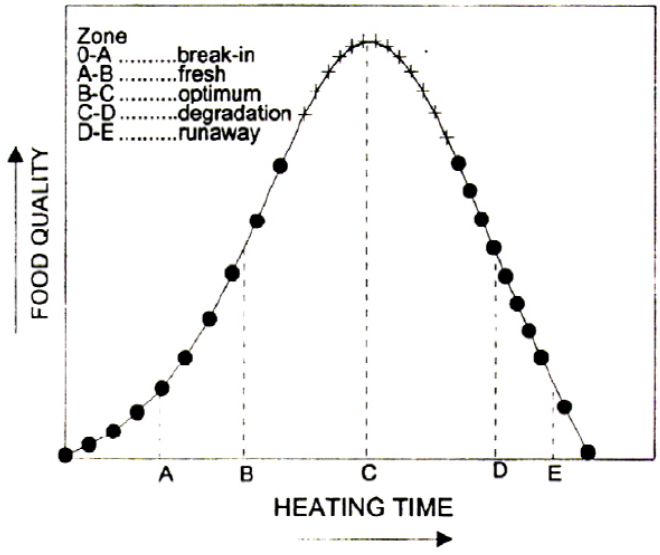


แป้งธรรมดา แป้งที่พองตัว

ภาพประกอบ 1.13 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลในแป้งก่อนและหลังการพองตัว
ที่มา : วิจิตร, 2537.

1.8.4 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารในน้ำมันทอด (Blumental, 1991. อ้างโดย ณัฐพร และธีรภาพ, 2545.)

ภาพประกอบ 1.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของน้ำมันและคุณภาพของอาหารที่ผ่านการทอด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอาหารในน้ำมันระหว่างการทอดแบ่งเป็น 5 ระยะ คือ



ภาพประกอบ 1.14 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงของการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำมันกับคุณภาพของอาหาร
ที่มา : Bluental, 1991. อ้างโดย ธิวาริ, 2547.

1. Break-In oil เป็นระยะที่อาหารมีสีขาว ไม่มีกลิ่นอาหารสุก ผิวไม่กรอบ การดูดซับน้ำมันมีมาก (อาหารยังดิบ ไม่เกิดการย่อยเจลในแป้ง)

2. Fresh oil เป็นระยะที่บริเวณขอบของอาหารมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลเล็กน้อย ส่วนกลางของอาหารเริ่มสุก ผิวเริ่มกรอบ การดูดซับน้ำมันมีมากขึ้น

3. Optimum oil เป็นระยะที่อาหารมีสีน้ำตาลทอง (golden brown) กรอบ ผิวนอกแข็ง รสชาติอร่อย และมีกลิ่นหอมของน้ำมัน ใจกลางอาหารสุกเต็มที่ มีการดูดซับของน้ำมันอย่างเหมาะสม

4. Degrading oil เป็นระยะที่อาหารมีผิวดำ มีการดูดซับน้ำมันมากเกินไป ผิวแข็ง

5. Runaway oil เป็นระยะที่อาหารมีสีดำแข็ง อาหารมีน้ำหนักมากเกินไป ผิวบุ๋มเข้าข้างใน มีกลิ่นและรสชาติไหม้

1.8.5 ผลของการทอดต่อคุณค่าทางโภชนาการ

การทอดเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่ใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาสั้น อุณหภูมิภายในชิ้นอาหารที่ถัดจากชั้นของผิวนอก (crust) จะมีอุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และไม่เกิดการละลายของวิตามินที่ละลายได้ในน้ำ ดังนั้นจึงมีการเสื่อมสลายของวิตามินที่ไม่ทนความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับการอบหรือการต้ม ส่วนวิตามินที่ละลายได้ในน้ำมันจะสูญเสียในระหว่างการทอดมากกว่าการต้มหรือการผัด นอกจากนี้ในน้ำมันพืชมักมีวิตามินอีอยู่ด้วย วิตามินนี้จะติดไปกับอาหารที่ผ่านการทอดแล้ว ดังตัวอย่างผลิตภัณฑ์ใน ตาราง 1.5 นอกจากนั้น อาหารทอดยังสูญเสียเกลือแร่น้อยกว่าอาหารที่ผ่านการต้มหรือการอบดังนั้นหากน้ำมันที่ใช้ทอดอาหารมีคุณภาพดีแล้ว อาหารทอดจัดเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการและให้พลังงานสูง ซึ่งอาจเหมาะกับประเทศกำลังพัฒนาที่มีปัญหาการขาดสารอาหารที่ให้พลังงาน

ตาราง 1.5 ปริมาณวิตามินอีในผลิตภัณฑ์มันฝรั่ง 100 g

ผลิตภัณฑ์มันฝรั่ง	ปริมาณวิตามินอี (%RDA)
มันฝรั่งดิบ	0.6
มันฝรั่งแท่งทอดด้วยน้ำมันพืชในร้านขายปลีก	3.9
มันฝรั่งแท่งทอดและแช่แข็ง (ทอดด้วยน้ำมันข้าวโพด)	32.7
มันฝรั่งแท่งทอดในน้ำมันข้าวโพดบริโภคในครัวเรือน	49.0

ที่มา : Holland et al., 1991 อ้างโดย นิธิยา และไพโรจน์, 2547.

ผลกระทบของการทอดต่อคุณค่าทางโภชนาการของอาหารขึ้นอยู่กับชนิดของกรรมวิธีที่ใช้ การใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดเปลือกนอกเร็วและปิดกั้นผิวหน้าของอาหารไว้ ทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยลงและยังคงรักษาคุณค่าทางโภชนาการส่วนใหญ่ไว้ได้ นอกจากนั้นยังเกิดการสูญเสียระหว่างการเก็บรักษาน้อยเนื่องจากผู้บริโภคมักจะบริโภคอาหารนี้หลังการทอดไม่นาน เช่น มีรายงานการสูญเสียไลซีน 17% ในปลาทอดและเพิ่มเป็น 25% เมื่อใช้น้ำมันที่ถูกทำลายด้วยความร้อน ตับทอดในน้ำมันตื้นจะสูญเสียไทอามีน 15% และไม่มีโฟลทเหลืออยู่ การสูญเสียวิตามินซีในอาหารทอดน้อยกว่าการต้ม วิตามินจะสะสมกันในรูปกรดดีไฮโดรแอสคอร์บิก เนื่องจากมีความชื้นต่ำ ในขณะที่ถ้าใช้วิธีต้ม วิตามินซีจะถูกไฮโดรไลซ์และกลายไปเป็นกรด 2,3-ไดคีโตกลูโคนิก

การทอดให้อาหารแห้งเพื่อถนอมรักษาอาหารจะทำให้เกิดการสูญเสียสารอาหารมากขึ้น โดยเฉพาะวิตามินที่ละลายได้ในไขมัน เช่น วิตามินอี ซึ่งถูกดูดซับโดยน้ำมันระหว่างการทอดจะถูกออกซิไดซ์ในระหว่างการเก็บรักษา วิตามินที่ละลายน้ำซึ่งไวต่อความร้อนหรือออกซิเจนก็ถูกทำลายโดยการทอด คุณภาพของโปรตีนเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดของกรดอะมิโนในเปลือกนอก มีรายงานการสูญเสียคาร์โบไฮเดรตและเกลือแร่จำนวนน้อยมาก แต่ยากที่จะชี้ถึงคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากความแตกต่างของชนิดและประวัติการใช้น้ำมันและปริมาณการดูดซับน้ำมันในอาหาร

1.9 การดูดซึมน้ำมันของอาหารทอด

กลไกการดูดซึมน้ำมันของอาหาร ซึ่งสามารถอธิบายได้ 2 กลไกด้วยกันคือ

1. การดูดซึมน้ำมันอย่างต่อเนื่องที่เกิดจากการแทนที่น้ำที่ระเหยออกจากอาหารขณะทอด เมื่อน้ำระเหยกลายเป็นไอและระเหยออกจากชิ้นอาหาร จะเหลือโครงสร้างที่เป็นรูพรุนซึ่งน้ำมันสามารถเคลื่อนเข้าไปแทนที่ได้

2. การดูดซึมน้ำมันที่เกิดขึ้นเมื่อการทอดเสร็จสิ้นและอาหารทอดเย็นลง เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำภายในอาหารกลายเป็นไอระหว่างทอด ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอ ไอน้ำเคลื่อนที่ออกผ่านท่อคาปิลารีในโครงสร้างของเซลล์ ตราบใดที่ยังคงมีการระเหยเป็นไอของน้ำ น้ำมันจะเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในช่องว่างได้ยาก แต่เมื่อนำอาหารทอดขึ้นจากน้ำมันและปล่อยให้เย็น ความดันไอภายในรูพรุนจะลดลง ไอน้ำจะควบแน่นและเกิดภาวะสุญญากาศซึ่งจะดูดเอาน้ำมันที่ผิวอาหารเข้ามาไว้ในผลิตภัณฑ์

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำมันของอาหารทอด

1. คุณภาพและองค์ประกอบของน้ำมัน

คุณภาพและองค์ประกอบของน้ำมันจะเปลี่ยนไปตามระยะเวลาของการทอด เนื่องจากการเสื่อมของน้ำมันจากปฏิกิริยาต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้น และได้สารประกอบที่ทำให้แรงตึงผิวของน้ำมันลดลง น้ำมันจะสัมผัสกับอาหารมากขึ้น การดูดซึมน้ำมันและอัตราการถ่ายเท

ความร้อนไปยังผิวของอาหารจะเพิ่มขึ้น ทำให้ผิวของอาหารมีสีเข้มและแห้งก่อนที่อาหารจะสุก และเกิดฟองปริมาณมากขณะทอด โดยปริมาณฟองจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารดังกล่าว นอกจากนี้ยังทำให้ผิวของอาหารทอดฉ่ำไปด้วยน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันมีความหนืดสูงขึ้น จึงเกาะติดกับผิวของอาหารมากขึ้น

2. อุณหภูมิของการทอดและระยะเวลาที่ใช้ทอด

โดยทั่วไปอุณหภูมิของการทอดมักอยู่ในช่วง 160°C-200°C การทอดที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีอ่อนและกลิ่นรสที่เกิดจากการทอดน้อย และจะมีการดูดซึมน้ำมันมากกว่าการทอดที่อุณหภูมิสูง (Indira, 1996 อ้างโดย นิธิยา และไพโรจน์ 2547) รายงานว่าการทอดโดของ Urd Vada ซึ่งเป็นอาหารอินเดียชนิดหนึ่งในช่วงอุณหภูมิสูง (172°C-192°C) อาหารทอดที่ได้มีปริมาณน้ำมันที่ดูดซึมเข้าไปในอาหารต่ำกว่าการทอดในช่วงอุณหภูมิต่ำ (155°C-165°C) แต่มีงานวิจัยบางงานที่พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิไม่ได้ลดการดูดซึมน้ำมันให้น้อยลง (Moreira และคณะ, 1997 อ้างโดย นิธิยา และไพโรจน์, 2547) การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซึมน้ำมันในระหว่างการทอด Tortilla chip พบว่าอุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดในช่วง 130°C-190°C ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับการดูดซึมน้ำมันของ Tortilla chip ส่วนงานวิจัยของ Krokida และคณะ (2000) (อ้างโดย นิธิยา และไพโรจน์, 2547) รายงานว่าอุณหภูมิของน้ำมันในช่วง 150°C-190 °C มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณน้ำมันในมันฝรั่งแท่งทอด (French fries) ส่วนผลของระยะเวลาทอดต่อการดูดซึมน้ำมัน พบว่าอัตราการดูดซึมน้ำมันจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรกของการทอดแล้วลดลงจนกระทั่งถึงเวลาหนึ่งปริมาณน้ำมันในอาหารทอดจะค่อนข้างคงที่

3. รูปทรงเรขาคณิตและความพรุนของอาหาร

รูปทรงทางเรขาคณิตในที่นี้หมายถึงอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของอาหาร อาหารที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมีแนวโน้มที่จะดูดซึมน้ำมันได้มากกว่าอาหารที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ นอกจากนี้ความหนาของชิ้นอาหารก็มีผลต่อปริมาณน้ำมันในอาหารทอด Krokida และคณะ (2000) (อ้างโดย นิธิยา และไพโรจน์, 2547) รายงานว่าเมื่อความหนาของชิ้นมันฝรั่งแท่งเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมันในชิ้นมันฝรั่งแท่งทอดจะลดลง ผลของความพรุนต่อการดูดซึมน้ำมันของมันฝรั่งขึ้นรูป (restructured potato) ซึ่งศึกษาโดย Pinthus และคณะ (1995) (อ้างโดย นิธิยา และไพโรจน์, 2547) พบว่าความพรุนของอาหารก่อนทอดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับสัดส่วนของปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซึมโดยอาหารต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากอาหาร (oil uptake/water removed ratio) นอกจากนี้ความพรุนของอาหารที่ทอดแล้วและปริมาณน้ำมันในอาหารทอดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาทอด

4. ความชื้น

ปริมาณความชื้นเริ่มต้นในอาหารมีผลต่อการดูดซึมน้ำมันของอาหารระหว่างการทอด อาหารที่มีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูงจะดูดซึมน้ำมันมากกว่าอาหารที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำ เนื่องจากมีปริมาณน้ำระเหยออกจากอาหาร และเหลือช่องว่างที่จะให้น้ำมันเข้าไปแทนที่ได้มากกว่าอาหารที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำ นอกจากนี้การเติมไฮโดรคอลลอยด์หรือกัมบางชนิดในส่วนผสมของอาหาร เช่น อัลจิเนต (alginate) เมทิลเซลลูโลส (methylcellulose, MC) และไฮดรอกซีโพรพิล เมทิลเซลลูโลส (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) จะช่วยทำให้อาหารอุ้มน้ำไว้ได้มากขึ้น น้ำระเหยออกจากอาหารน้อยลง ซึ่งส่งผลให้การดูดซึมน้ำมันลดลงด้วย

5. ชนิดและองค์ประกอบของอาหาร

การเคลื่อนที่ของน้ำมันเข้าไปในอาหารจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสมบัติของอาหาร เช่น ปริมาณความชื้น ลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร ความพรุน ขนาดของรูพรุน และการจัดเรียงตัวจของท่อคาปิลารีในโครงสร้างของอาหาร ในกรณีของอาหารชุบแป้งทอด (batter-coated products) พบว่าชนิดของแป้ง โดยเฉพาะสัดส่วนของปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและการดูดซึมน้ำมันของแป้งชุบทอด ปริมาณอะไมโลสในแป้งให้ความสัมพันธ์เชิงบวกกับความกรอบของแป้งทอด แต่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซึม แป้งชุบทอดที่มีแป้งข้าวจ้าวเป็นส่วนประกอบหลักจะมีการดูดซึมน้ำมันได้น้อยกว่าแป้งชุบทอดที่มีแป้งสาลีเป็นส่วนประกอบหลัก แป้งที่มีสัดส่วนของอะไมโลเพคตินต่ออะไมโลสต่ำกว่าจะดูดซึมน้ำมันได้น้อยกว่า โปรตีนในแป้งชุบทอดมีแนวโน้มที่จะเพิ่มการดูดซึมน้ำมัน เนื่องจากโปรตีนมีสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟอิงเอเจนต์ (emulsifying agent) นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ไฮโดรคอลลอยด์บางชนิด สามารถลดการดูดซึมน้ำมันของอาหารทอดได้ เช่น การเคลือบผิวอาหารด้วย MC หรือ HPMC สามารถเกิด reversible thermal gel และฟิล์มที่มีสมบัติไม่ละลายในน้ำมัน ซึ่งจะช่วยรักษาความฉ่ำและป้องกันการดูดซึมน้ำมันของอาหารทอดได้

6. ความแข็งแรงของเจล

ความแข็งแรงของเจลมีความสำคัญต่อการดูดซึมน้ำมันของผลิตภัณฑ์ขึ้นรูป เช่น อาหารขบเคี้ยว และผลิตภัณฑ์จากมันฝรั่งขึ้นรูป Pinthus และคณะ (1992) (อ้างโดย นิธิยา และไพโรจน์, 2547) รายงานว่าเมื่อเพิ่มความแข็งแรงของเจลมันฝรั่งขึ้นรูป จะส่งผลให้การดูดซึมน้ำมันของผลิตภัณฑ์ทอดลดลง

7. การเตรียมตัวอย่างอาหารก่อนทอด

การลวก การลดความชื้นของอาหารก่อนทอด และการแช่เยือกแข็งจะช่วยลดการดูดซึมน้ำมัน ส่วนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะทำให้การดูดซึมน้ำมันเพิ่มขึ้น เพราะลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารมีรูพรุนมากขึ้น

1.10 การทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

การทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการดูดซึมน้ำมันลดลง มีสีและกลิ่นรสดี การทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นระบบการทอดที่มีแก๊สออกซิเจนน้อย ทำให้เกิดออกซิเดชันต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีอายุการเก็บรักษานานขึ้น ช่วยยืดอายุการใช้งานของน้ำมัน อีกทั้งยังลดอันตรายต่อสุขภาพที่เป็นผลมาจากคุณภาพน้ำมันที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้ยังใช้อุณหภูมิในการทอดต่ำกว่าที่สภาวะบรรยากาศทำให้ใช้พลังงานต่ำกว่า

ผักและผลไม้ที่สามารถนำมาทอดกรอบในระบบสุญญากาศได้ ได้แก่ กล้วย แอปเปิล ขนุน ลูกแพร์ แครอท มะม่วง มะละกอ ฟักทอง สับปะรด ฝรั่ง เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้กับการทอดผลิตภัณฑ์อื่นได้ เช่น เต้าหู้ปลา ปลากะตัก หอย เป็นต้น

ในการทอดที่สภาวะสุญญากาศ มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

<u>ข้อดี</u>

1. อาหารที่ทอดที่สภาวะสุญญากาศจะมีน้ำมันในผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่ต่ำกว่าการทอดโดยวิธีปกติ

2. เปรียบเทียบกับการทอดโดวิธีการทั่วไป พบว่าเมื่อทอดอาหารด้วยสภาวะสุญญากาศสามารถใช้อุณหภูมิของน้ำมันต่ำกว่าการทอดปกติ

3. การทอดใช้ระยะเวลาสั้นกว่า

4. วิตามินสูญเสียน้อยกว่าการทอดปกติ เพราะใช้น้ำมันอุณหภูมิต่ำและใช้ระยะเวลาสั้น

5. เกิดออกซิเดชันของน้ำมันได้ช้า ทำให้สามารถใช้น้ำมันได้นานขึ้นโดยคุณภาพไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

<u>ข้อเสีย</u>

1. มีการลงทุนของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่สูงกว่าการทอดปกติ และสิ้นเปลืองเนื้อที่ในการติดตั้งด้วย

2. ขั้นตอนการทอดจะยุ่งยากและซับซ้อนกว่าการทอดปกติ

3. การทำความสะอาดเครื่องมือและอุปกรณ์จะยุ่งยากกว่าการทอดปกติ

4. ผลของปัจจัยการผลิตต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาในการทอด ที่มีต่อผลิตภัณฑ์มีข้อมูลน้อยมากและไม่ชัดเจน

5. ความเข้าใจในกลไกและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการทอดที่สภาวะสุญญากาศมีน้อยมาก

1.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิจิตร ครูปัญญามาตย์ (2537) ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องทอดสุญญากาศขนาดเล็กชนิด batch-type vacuum fryer และศึกษาทดลองเครื่องทอดสุญญากาศกับตัวอย่างอาหาร คือ ฟักทองสไลด์ หนา 1 mm เพื่อทดสอบปัจจัยหลักที่สำคัญ 3 ประการ ที่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ คือ ความดันที่ใช้ทอด อุณหภูมิน้ำมันขณะทอดและเวลาที่ใช้ทอด นำผลิตภัณฑ์หลังการทอดมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ได้แก่ ลักษณะเนื้อสัมผัสโดยการวัดค่าแรงเฉือนขณะเกิดการแตกหักของผลิตภัณฑ์ สีของผลิตภัณฑ์ ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ จากผลการทดลองจะได้ว่าปัจจัยความดันนั้นไม่มีผลโดยตรงต่อการเกิด gelatinization เนื่องจากเม็ดแป้งเกิด gelatinization ได้ต้องรวมตัวกับน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 60°C-70°C แต่ก็พบว่าในการทอดที่ความดันต่ำนั้นมักได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าแรงเฉือนแตกหักต่ำกว่าการทอดที่ความดันบรรยากาศเล็กน้อย เมื่อทอดที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงเฉือนขณะเกิดการแตกหักได้ชัดเจนกว่าการทอดที่อุณหภูมิสูง

สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดที่เมื่อใช้อุณหภูมิน้ำมันสูง จะมีการเปลี่ยนแปลงสีเร็วกว่าการทอดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนความดันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ การดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์จากการทอดที่อุณหภูมิสูงซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีค่าต่ำ สำหรับการทอดที่ความดันต่ำกว่าปกตินั้นทำให้ปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์น้อยกว่าการทอดที่ความดันปกติเล็กน้อย เนื่องมาจากการลดความดันหลังการทอด โดยการเหวี่ยงผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศประมาณ 3 นาที จึงทำให้ปริมาณน้ำมันในผลิตภัณฑ์ลดน้อยลงกว่าการทอดที่ความดันบรรยากาศ ส่วนปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดภายใต้ความดันต่ำน้อยกว่าการทอดที่ความดันปกติ เนื่องจากการลดความดันทำให้น้ำในอาหารระเหยได้เร็วขึ้น และการทอดที่อุณหภูมิต่ำทำให้ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงกว่าการทอดที่อุณหภูมิสูง

จากงานวิจัยนี้ได้ข้อสรุปที่สำคัญคือปัจจัยที่มีผลกระทบโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์คือ อุณหภูมิของน้ำมัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดที่อุณหภูมิสูงจะมีสีเข้มกว่าการทอดที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนปัจจัยความดันในขณะทอดมีผลต่อการสุกของชิ้นอาหาร เมื่อทอดที่ความดันต่ำจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์สุกเร็วขึ้นเนื่องจากเม็ดแป้งมีการฟอร์มตัวผ่านจุด complete gelatinization ได้รวดเร็วกว่าการทอดที่ความดันปกติ ปริมาณความชื้นและน้ำมันในผลิตภัณฑ์น้อยลง แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีในผลิตภัณฑ์ และการทอดฟักทองสไลด์ที่ความดัน 150 mm Hg อุณหภูมิ 140°C เป็นเวลา 2.5 นาที ให้คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เป็นที่ยอมรับได้มากที่สุด

ณัฐพร และ ธีรภาพ (2545) ศึกษาการทอดผักและผลไม้ด้วยระบบสุญญากาศเพื่อศึกษาปริมาณความชื้น ปริมาณน้ำมัน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่บริเวณกึ่งกลางและผิวของอาหาร โดยใช้มันฝรั่งเป็นตัวอย่างในการทอด อุณหภูมิที่ใช้ในการทอด 120°C 140°C และ

160°C และใช้ความดันที่ 260 และ 360 mm Hg จากการศึกษาพบว่าปริมาณความชื้นภายในเนื้ออาหารมีค่าลดลงตามเวลา ที่เวลาและอุณหภูมิทอดเดียวกัน (120 °C) การทอดที่ความดันต่ำกว่า (260 mm Hg) จะมีปริมาณความชื้นในอาหารต่ำกว่าการทอดที่ความดันสูง (360 mm Hg) และที่ความดันเดียวกัน (360 mm Hg) พบว่าที่อุณหภูมิทอดสูงกว่า (160°C) ปริมาณความชื้นในอาหารจะมีค่าต่ำกว่าการทอดที่อุณหภูมิต่ำ (120°C และ 140°C) การศึกษาปริมาณน้ำมันที่สะสมในเนื้อมันฝรั่งสำหรับการทอดที่เวลาใด พบว่าที่ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ (260 และ 360 mm Hg) น้ำมันจะเข้าไปในเนื้อมันฝรั่งได้มากในช่วงแรกจากนั้นก็จะปรับตัวลดลงจนกระทั่งคงที่ที่ค่าในค่าหนึ่งขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ในการทอด และสำหรับการทอดที่ความดันบรรยากาศปริมาณน้ำมันที่สะสมในเนื้อมันฝรั่งจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทอด

Shyu และ Hwang (2001) ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากการรักษาสภาพและสภาวะของกระบวนการต่อคุณภาพของแอปเปิลที่ผ่านการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ชิ้นแอปเปิลจะถูกจุ่มในสารละลายน้ำตาลฟรุกโทสและแช่แข็งก่อนการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ และศึกษาความพรุนของผิวหน้าตัวอย่างโดยวิธี Scanning electron microscope (SEM) ในระหว่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ความชื้นและแรงแตกหักของชิ้นแอปเปิลจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการทอดเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณน้ำมันจะเพิ่มมากขึ้น จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่า ค่าความชื้น สี และแรงแตกหัก ของชิ้นแอปเปิลมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลฟรุกโทส อุณหภูมิ และเวลาในการทอดอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) สภาวะที่เหมาะสมในการทอดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง คือ การทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 100°C-110°C เวลาในการทอด 20-25 นาที โดยจุ่มในสารละลายน้ำตาลฟรุกโทสเข้มข้น 30-40%

Krokida และ คณะ (2000) ศึกษาผลกระทบจากสภาวะในการทอดต่อการหดตัวและความพรุนของมันฝรั่ง โดยศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลสาร (การสูญเสียน้ำและการดูดซับน้ำมัน) ที่เกิดขึ้นขณะทอดมันฝรั่งแผ่น ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้แบบจำลอง empirical first order kinetic โดยที่ตัวแปรสำคัญคือ อุณหภูมิของน้ำมันและความหนาของชิ้นตัวอย่างซึ่งมีนัยสำคัญกับระยะ constant rate และค่าที่จุดสมดุลของการสูญเสียความชื้นและการดูดซับน้ำมันขณะทอด สำหรับการสูญเสียน้ำและปริมาณน้ำมันที่ดูดซับหลังการทอดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทอดสูงและชิ้นตัวอย่างมีความหนาไม่มากพอ

Garayo และ Moreira (2002) ศึกษาการผลิตมันฝรั่งทอดที่มีปริมาณของน้ำมันภายในต่ำโดยกระบวนการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ อุณหภูมิน้ำมัน 118°C 132°C และ 144°C ความดันสุญญากาศ 16.661 9.888 และ 3.115 kPa พบว่า อุณหภูมิน้ำมันและความดันสุญญากาศมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการสูญเสียความชื้นและอัตราการดูดซับน้ำมันของชิ้นมันฝรั่งทอด และยังพบว่ามันฝรั่งที่ผ่านการทอดที่ความดันสุญญากาศต่ำและอุณหภูมิ

น้ำมันสูงจะมีการหดที่น้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบอีกว่าอุณหภูมิน้ำมันและความดันสุญญากาศไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสีของมันฝรั่งหลังการทอด ส่วนค่าความแข็ง (Hardness) ของมันฝรั่งหลังการทอดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและลดความดันสุญญากาศในการทอด เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์มันฝรั่งที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (3.115 kPa และ 144°C) และที่บรรยากาศ (165°C) พบว่า มันฝรั่งที่ผ่านการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีการหดตัวมากกว่าและมีสีที่ค่อนข้างอ่อนกว่ามันฝรั่งที่ผ่านการทอดที่บรรยากาศ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นกระบวนการที่เป็นไปได้ในการผลิตมันฝรั่งทอดที่มีปริมาณน้ำมันต่ำและยังให้สีและลักษณะเนื้อสัมผัสที่เป็นที่ต้องการ

Payawong และ Devahastin (2005) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่สภาวะแตกต่างกันโดยอาศัยค่า shape factor ซึ่งพบว่า รูปแบบของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะแตกต่างกันมีความแตกต่างกันถึงแม้การหดตัวจะมีค่าใกล้เคียงกันแต่รูปแบบในการหดตัวนั้นแตกต่างกัน งานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้ Heywood shape factor ในการอธิบายถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นแครอทที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะแตกต่างกัน ซึ่งผลที่ได้เป็นที่ยอมรับและสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี

Baik และ Mittal (2005) ได้ศึกษาแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน ความชื้น และการหดตัวของเต้าหู้ในระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วม โดยทอดที่อุณหภูมิ 147°C 160°C และ 172°C แบบจำลองการแพร่ของความร้อนและความชื้น ได้ดำเนินการที่สภาวะการถ่ายโอนแบบ convective แบบจำลองที่ได้ให้ค่า อุณหภูมิ ความชื้น และความหนาของเต้าหู้ในระหว่างการทอดเป็นที่น่าพอใจ และได้เสนอสมการ 1.1

$$\frac{L}{L_o} = 0.9321M_w^2 + 0.5235 \qquad (1.1)$$

โดยที่ L คือความหนาเต้าหู้ (mm) L_o คือความหนาเต้าหู้เริ่มต้น (mm) และ M_w คือความชื้นมาตรฐานเปียก

Mayor และ Sereno (2004) ศึกษาแบบจำลองการหดตัวของอาหารในระหว่างการอบแห้งแบบ convective การหดตัวของอาหารเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งแบบต่าง ๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของอาหารที่ได้หลังการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถนำมาใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิภายในอาหารระหว่างการอบได้ จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการอธิบายทางกายภาพของกลไกการหดตัวและแสดงการจำแนกประเภทของแบบจำลองต่าง ๆที่อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นกับอาหารที่ผ่านการอบ แบบจำลองต่าง ๆถูกจำแนกออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆคือ empirical model

และ fundamental model โดยที่ empirical model ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการหดตัวของตัวอย่าง ดังแสดงในตาราง 1.6 ส่วน fundamental model ได้จากการอธิบายลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างอาหารและทำนายการเปลี่ยนแปลงขนาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของอาหารระหว่างกระบวนการอบแห้ง แบบจำลองต่าง ๆที่ถูกอ้างอิงในงานวิจัยนี้ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองอบแห้ง แอปเปิ้ล แครอท มันฝรั่ง และปลาหมึก ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าการหดตัวที่ได้จากผลการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายแตกต่างกันน้อยกว่า 10%

ตาราง 1.6 Non-linear empirical models

Type of model	Geometry	Reduced dimension	Material	Reference
$a_v / a_{vo} = k_{21} + k_{22}X + k_{23}X^2 + k_{24}X^3$	Cylinder	Surface area to volume ratio	Apple, carrot, potato	Ratti (1994)
$D_R = k_{25} + k_{26}X + k_{27}X^2 + k_{28}X^3$	Cylinder	Bed volume	Apple, carrot, potato	Ratti (1994)
$D_R = k_{35} + k_{36}X + k_{37}X^{3/2} + k_{38}\exp(k_{39}X)$	Slab	Thickness	Garlic	Vázquez, Chenlo, Moreira, and Costoyas (1999)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Mayor และ Sereno, 2004.

โดยที่ a_v คือ surface area to volume ratio (m^{-1}), D_R คือ shrinkage dimension (volume, area, thickness), X คือ moisture content, dry basis (kg water/kg dry solid)

Kawas และ Moreira (2001) ศึกษาคุณสมบัติของคุณภาพของผลิตภัณฑ์ tortilla chip ในระหว่างกระบวนการทอด ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญมากสามารถนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองพื้นฐาน (fundamental model) เพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ระหว่างการทอด การทดลองใช้ tortilla chip ทอดในน้ำมันพืชเป็นเวลา 60 วินาที ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าการหดตัวของตัวอย่างในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางเกิดขึ้นในช่วง 5 วินาทีแรกของการทอด ส่วนความหนาจะเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดเปลือกแข็ง (crust) และฟองอากาศที่ผิวหน้าตัวอย่างเนื่องจากการขยายตัวของแก๊ส ความพรุนของตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นทั้งในด้านขนาดและจำนวน การกระจายตัวของรูพรุนจะสม่ำเสมอมากขึ้นตามเวลาทอดที่เพิ่มขึ้น ความกรอบของชิ้นตัวอย่างจะเพิ่มมากขึ้นตามการลดลงของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ระหว่างการทอด เมื่อนำ

คุณสมบัติเหล่านี้มารวมกันก็จะทำให้การผลิตได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ดีที่สุด แบบจำลองของ Crapiste และ Rotstein ให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของทุกค่าความชื้นและอุณหภูมิ

Yamsaengsung และ Moreira (2002a) ได้ศึกษาการถ่ายโอนและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เกิดขึ้นกับ Tortilla chip ระหว่างการทอดแบบน้ำมันท่วมรวมไปถึงการเย็นตัวของ tortilla chip ด้วย โดยศึกษาการหดตัวและการขยายตัวซึ่งเป็นผลมาจากน้ำภายในของชิ้น tortilla chip พบว่า ของเหลวภายในชิ้นตัวอย่างสามารถไหลได้ ซึ่งการไหลที่เป็นแบบ convective flow เป็นผลมาจากเกรเดียนของความดันรวมภายใน และการไหลที่เป็นแบบ capillary flow เป็นผลมาจากเกรเดียนของ capillary force สำหรับการเคลื่อนที่ของแก๊ส ที่เป็นแบบ convective flow เป็นผลมาจากเกรเดียนของความดันรวมและการแพร่ของ Knudsen เป็นผลมาจากเกรเดียนของความเข้มข้น สำหรับการดูดซับน้ำมันระหว่างการเย็นตัวอาจเป็นฟังก์ชั่นกับ capillary pressure

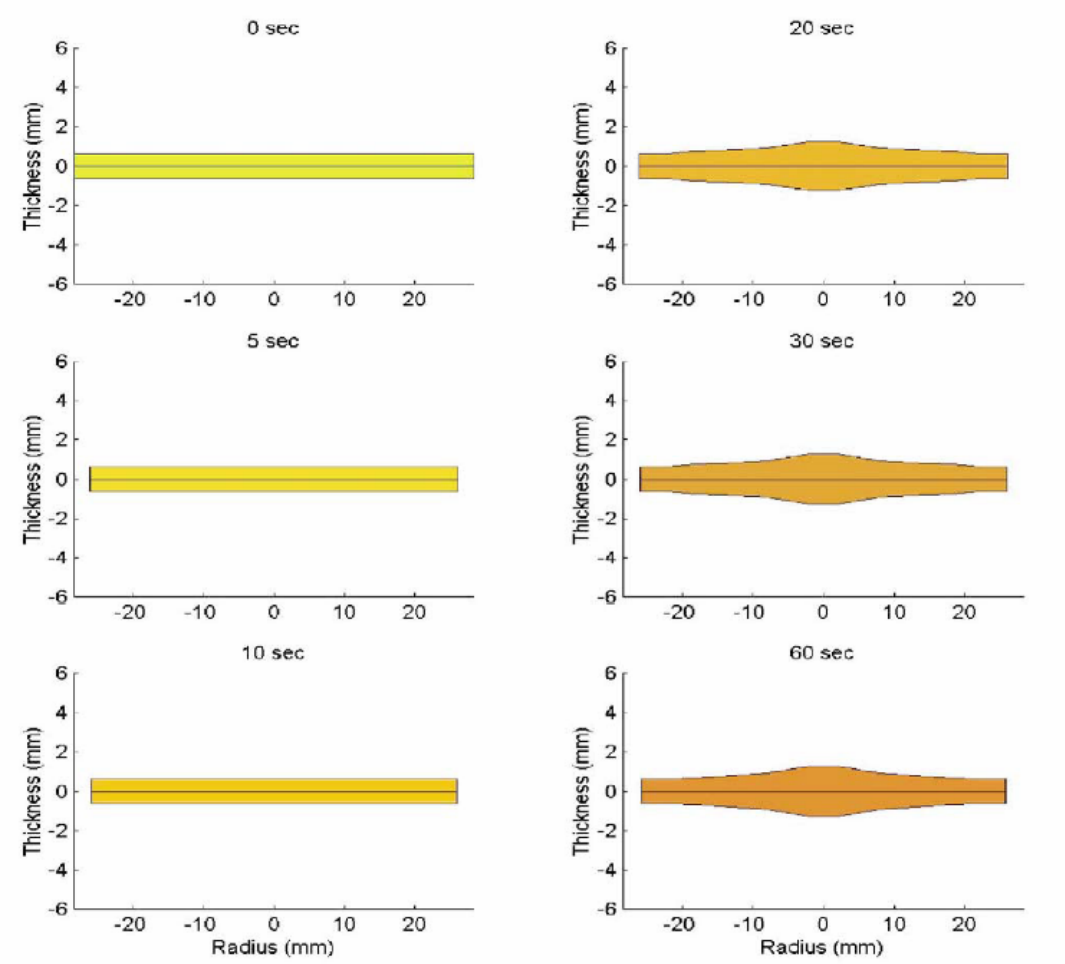
อาหารโดยทั่วไปจะมีความชื้นอยู่ภายใน จากการศึกษาเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไม่ว่าจะเป็นการหดตัวหรือขยายตัวจะเป็นผลอันเนื่องมาจากการพองตัวของชิ้น tortilla chip ซึ่งน้ำภายในของชิ้น tortilla chip จะมีพันธะที่แข็งแรงเป็นผลให้มีการหดตัวเมื่อมีการสูญเสียน้ำ การเกิดเปลือกแข็งจะเกิดที่ผิวด้านนอกของชิ้น tortilla chip ซึ่งมีหน้าที่ในการจำกัดการแพร่ผ่านของไอน้ำจากภายในชิ้น tortilla chip เมื่อการหดตัวเริ่มหยุดการพองตัวก็เริ่มขึ้นซึ่งการพองตัวจะเริ่มเมื่อความชื้นมาตรฐานเปียกของชิ้น tortilla chip มีค่าประมาณ 10% และจะดำเนินต่อไปจนความชื้นลดเหลือ 2% ซึ่งถือว่าเป็นจุดสมดุล การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระหว่างการทอดนั้นมีความสำคัญมากเนื่องจากสามารถนำไปใช้ในการทำนาย อัตราการสูญเสียความชื้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และปริมาณน้ำมันที่ดูดซับในชิ้น tortilla chip

Yamsaengsung และ Moreira (2002b) ระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกใช้ในการแก้ปัญหาระบบสมการ PDE (Partial Differential Equation) เพื่ออธิบายกระบวนการทอด tortilla chip ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวอยู่ในรูปแบบของ non-linear PDF ที่ซับซ้อน ซึ่งอธิบายถึงการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนในระหว่างการทอด โดยตัวอย่าง tortilla chip ที่ใช้มีขนาด 27.6 mm x 1.27 mm ซึ่งแทนด้วย 9 x 7 เอลิเมนต์ (80 node) และมีการปรับความหนาและความกว้างของตัวอย่างให้สอดคล้องกับผลการทดลองเพื่อสื่อถึงการหดตัวและพองตัวของชิ้นอาหาร ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 1.15

การทอดที่อุณหภูมิสูงจะทำให้การสูญเสียความชื้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าทอดที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับมีมากกว่าโดยเฉพาะที่บริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ สำหรับชิ้น tortilla chip ที่มีความชื้นเริ่มต้นที่สูงกว่าจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการดูดซับน้ำมันมากกว่าด้วย และสำหรับ tortilla chip ที่หนากว่าจะใช้เวลาในการทอดนานกว่าแต่ปริมาณการดูดซับน้ำมันน้อยกว่า

ในขณะที่ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงน้ำมันส่วนใหญ่จะอยู่ที่ผิวของตัวอย่าง ซึ่งอุณหภูมิในการเย็นตัวจะมีผลต่อการดูดซับน้ำมันโดยที่อุณหภูมิในการเย็นตัวสูงกว่าจะทำให้การดูดซับน้ำมันน้อยกว่าเนื่องจากมีความแตกต่างของแรงดันแคปปิลารี่น้อยกว่า

การหดตัวจะเกิดขึ้นหลังการทอดผ่านไป 5 วินาที และการขยายตัวจะเกิดขึ้นหลังการทอดผ่านไป 20 วินาที หรือเมื่อปริมาณน้ำอิ่มตัวน้อยลงมาก การขยายตัวจะเกิดขึ้นพร้อมกับการเกิดเปลือกแข็ง ซึ่งเปลือกแข็งที่เกิดขึ้นจะลดอัตราการส่งผ่านน้ำลงและยังเพิ่มแรงดันภายในชิ้นตัวอย่างด้วย ซึ่งความดันที่เพิ่มมากขึ้นนี้บางครั้งทำให้การแก้ปัญหามีความคลาดเคลื่อนไป



ภาพประกอบ 1.15 การหดตัวและพองตัวของ Tortilla chip ขนาด 1.27 mm ที่ผ่านการทอดที่อุณหภูมิ 190°C ที่เวลาต่างๆ

ที่มา : Yamsaengsung และ Moreira, 2002.

1.12 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.ศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผักและผลไม้ที่ผ่านการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

2.นำผลที่ได้มาเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เขียนขึ้นมาทำนายผลที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

4.พัฒนาแบบจำลองไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม

1.13 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบถึงกระบวนการทอดผักและผลไม้ภายใต้สภาวะสุญญากาศและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลิตภัณฑ์

2. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทอดที่สภาวะสุญญากาศ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของผลิตภัณฑ์