

บทที่ 3

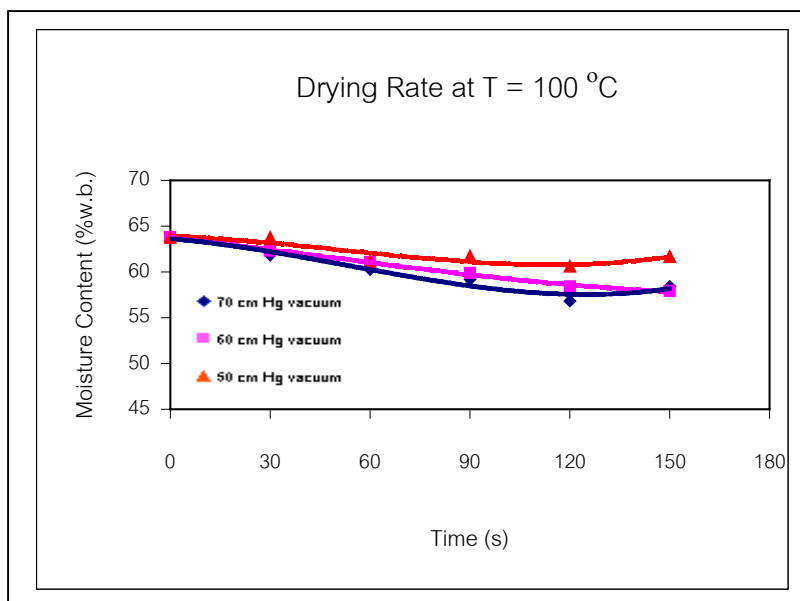
ผลการทดลอง

การศึกษากาลผลกระทบของอุณหภูมิน้ำมัน (100, 120, 140 องศาเซลเซียส) และความดัน (50, 60, 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ) ต่ออัตราการระเหยของน้ำ การดูดซึมน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา และคุณภาพของน้ำมัน เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาและน้ำมันที่ผ่านการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ) กับสภาวะบรรยากาศ (165 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ)

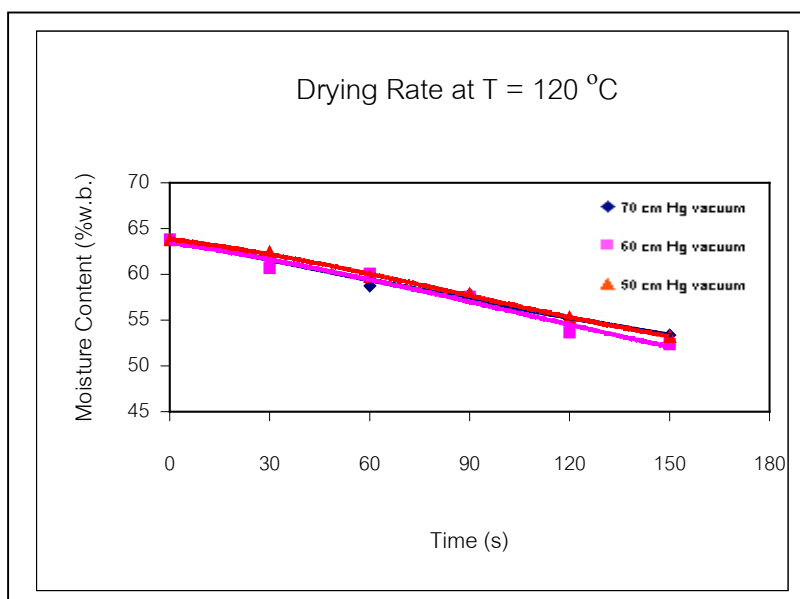
1. ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ซึ่งทอดภายใต้ระยะเวลาที่กำหนด 150 วินาที สำหรับการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้น ช่วงเวลาดังกล่าวถือได้ว่าเป็นช่วงเวลาที่สูงมาก และถือได้ว่าการดำเนินอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการให้ความร้อน น้ำหรือความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาจำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนที่ถ่ายโอนจากน้ำมันที่ใช้ในการทอดผ่านเนื้อผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาเพื่อเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเปลี่ยนแปลงสถานะของตัวมันเอง จากอุณหภูมิห้องที่ 26-28 องศาเซลเซียส สถานะของเหลวสู่จุดเดือดของน้ำในสถานะไอในแต่ละความดันสุญญากาศ

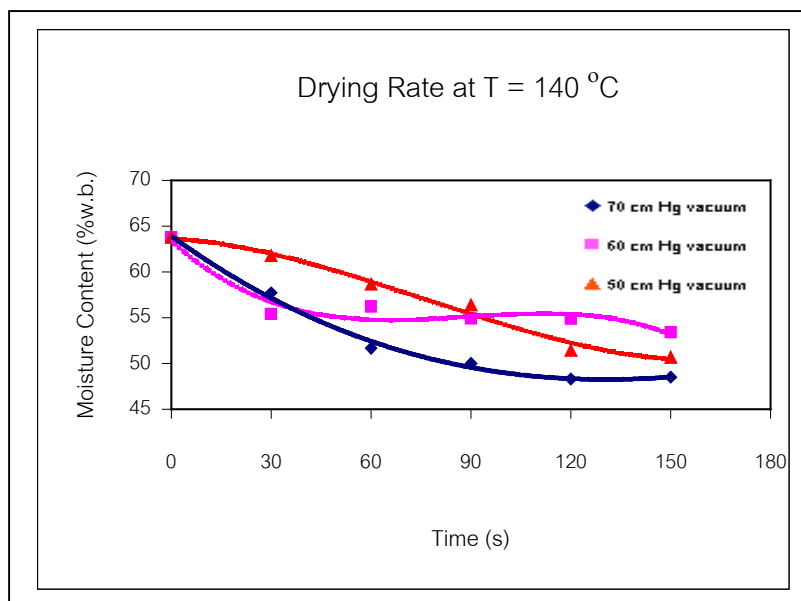
จากภาพประกอบที่ 3-1 ถึงภาพประกอบที่ 3-3 เป็นกราฟแสดงปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ทอด 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-4 ถึงภาพประกอบที่ 3-6 เป็นกราฟแสดงปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดันสุญญากาศที่ใช้ทอด 50, 60 และ 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ ภาพประกอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอัตราการระเหยของความชื้นหรือน้ำออกจากผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลายังอยู่ในช่วงแรกของการระเหย ได้แก่ ช่วง initial heating (the initial heating period) โดยสังเกตได้จากกราฟซึ่งยังไม่เข้าสู่สถานะคงตัว ปริมาณความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาจึงยังคงสูงอยู่ โดยปริมาณความชื้นสุดท้ายหลังจากผ่านการทอดไปแล้ว 150 วินาที จะมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 50-62 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นกับอุณหภูมิ น้ำมันและความดันที่ใช้ในการทอด โดยที่ความชื้นสะสมเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ก่อนทอดอยู่ในช่วง 60-65 เปอร์เซ็นต์



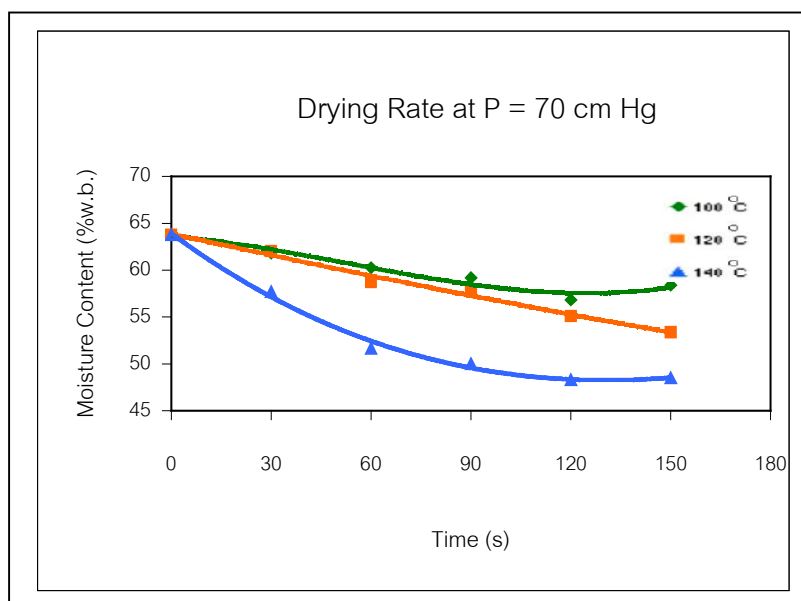
ภาพประกอบที่ 3-1 กราฟแสดงปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด 100 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 50, 60, 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ



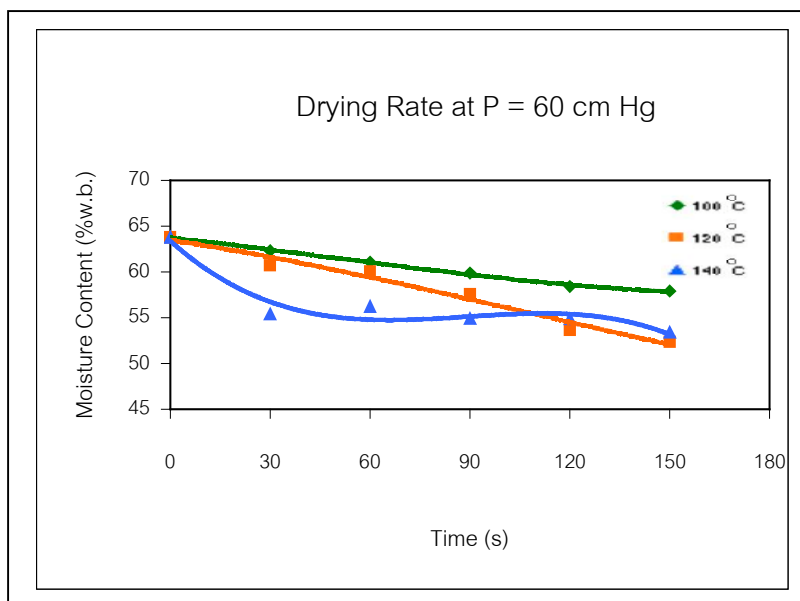
ภาพประกอบที่ 3-2 กราฟแสดงปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด 120 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 50, 60, 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ



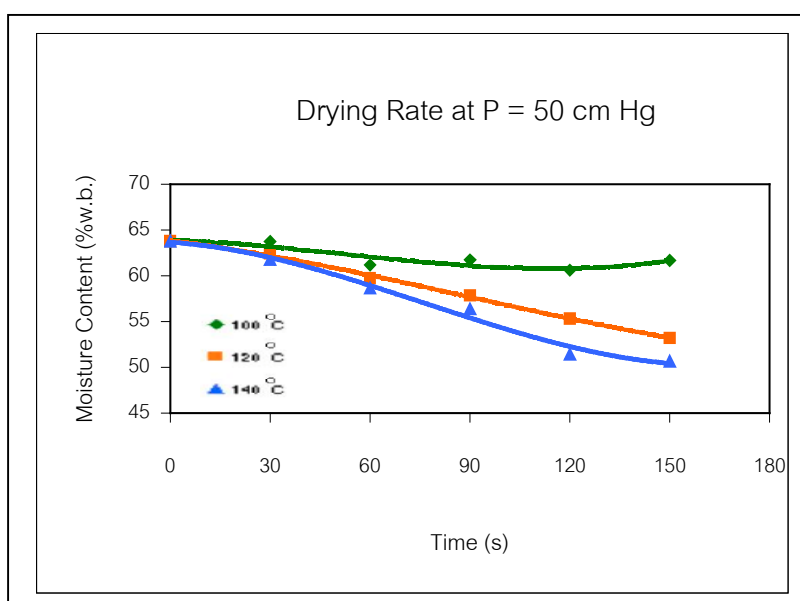
ภาพประกอบที่ 3-3 กราฟแสดงปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด 140 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 50, 60, 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ



ภาพประกอบที่ 3-4 กราฟแสดงปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ความดันที่ใช้ในการทอด 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ อุณหภูมิที่ใช้ในการทอด 100, 120, 140 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 3-5 กราฟแสดงปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ความดันที่ใช้ในการทอด 60 เซนติเมตรปรอทสูญญากาศ อุณหภูมิที่ใช้ในการทอด 100, 120, 140 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 3-6 กราฟแสดงปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ความดันที่ใช้ในการทอด 50 เซนติเมตรปรอทสูญญากาศ อุณหภูมิที่ใช้ในการทอด 100, 120, 140 องศาเซลเซียส

ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ใช้ในการทดลองนั้น โดยปกติแล้วจะมีความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์อยู่แล้ว โดยมีความแตกต่างของปริมาณความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วงค่าที่ไม่กว้างนัก ในการทำการทดลองไม่สามารถควบคุมปริมาณความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ได้ ในการทดลองเพื่อหาปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์จึงมีผลกระทบให้การปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่หาได้ในบางครั้งสูงหรือต่ำจนเกินไป แต่หากมองในภาพรวมจะสังเกตได้ว่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลายังคงลดลงเมื่อเวลาในการทอดเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการทอดที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอดเดียวกัน พบว่าปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศต่ำ (50 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ) จะมีปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบการทอดที่ความดันที่ใช้ในการทอดเดียวกัน พบว่าภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดัน 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาน้อยที่สุดที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ทอด 140 องศาเซลเซียส

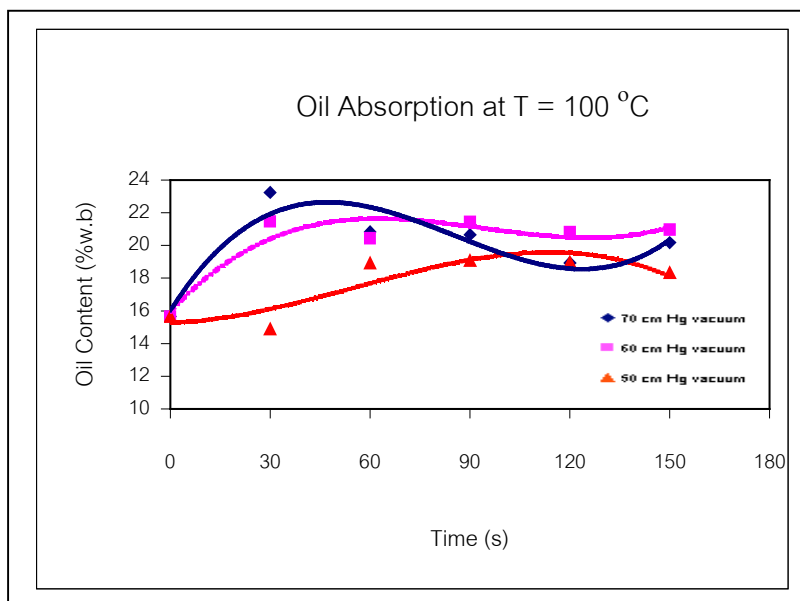
2. ปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

ปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ซึ่งทอดภายใต้ระยะเวลาที่กำหนด 150 วินาที สำหรับการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้น การเพิ่มขึ้นของน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาจะมีปริมาณสูงในช่วงประมาณ 60 วินาทีแรกของการทอด

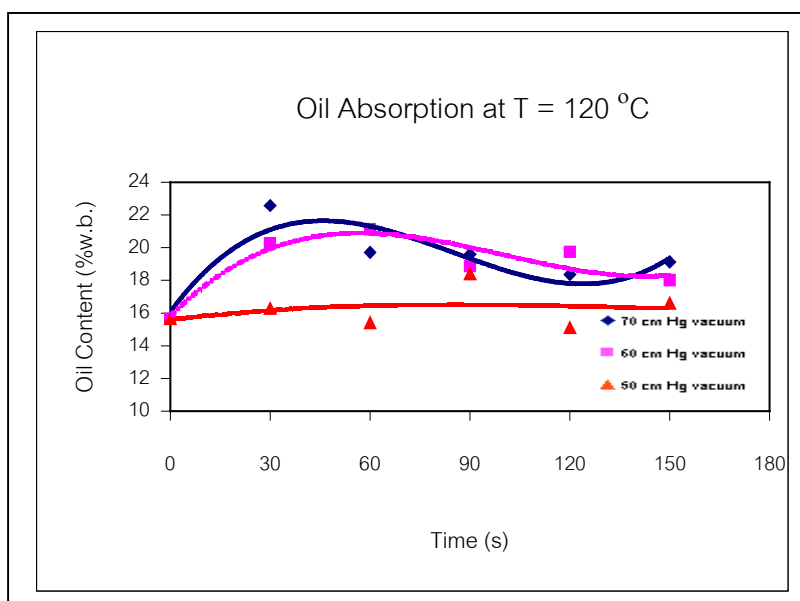
จากภาพประกอบที่ 3-7 ถึงภาพประกอบที่ 3-9 เป็นกราฟแสดงปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ทอด 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ภาพประกอบที่ 3-10 ถึงภาพประกอบที่ 3-12 เป็นกราฟแสดงปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดันสุญญากาศที่ใช้ทอด 50, 60 และ 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ ภาพประกอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า น้ำมันที่ใช้ในการทอดผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาจะมีการถ่ายโอนเข้าสู่ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาดังกล่าวอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาประมาณ 60 วินาทีแรกของการทอด หลังจากนั้นการถ่ายโอนจะลดลง โดยปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์สุดท้ายหลังจากผ่านการทอดไปแล้ว 150 วินาที จะมีปริมาณน้ำมันที่ค่าเฉลี่ย 18.94 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นกับอุณหภูมิน้ำมันและความดันที่ใช้ในการทอด โดยที่ปริมาณน้ำมันเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ก่อนทอดอยู่ที่ค่าเฉลี่ย 15.65 เปอร์เซ็นต์

ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ใช้ในการทดลองนั้น โดยปกติแล้วจะมีไขมันเริ่มต้นอยู่แล้วเช่นเดียวกับความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์และมีปริมาณไขมันของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวอยู่ในช่วงค่าที่ไม่กว้าง ในการทำการทดลองไม่สามารถควบคุมปริมาณไขมันเริ่มต้นได้ ในการสกัดเพื่อหาปริมาณ

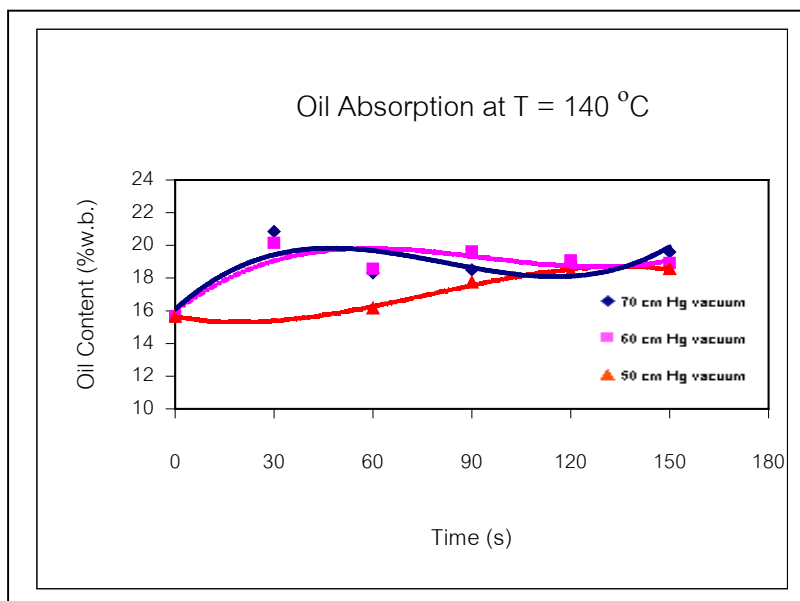
น้ำมันจึงอาจมีไขมันบางส่วนที่ไม่ใช่ไขมันที่ใช้ในการทอดที่ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาดูดซึมเข้าไปออกมาด้วย สาเหตุดังกล่าวจึงมีผลกระทบต่อให้การปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่สกัดได้ในบางครั้งสูงจนเกินไป โดยภาพรวมของปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่ทำการสกัดได้จากผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ผ่านการทอดที่เวลาต่าง ๆ นั้น จะสังเกตได้ว่ายังคงเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทอดเพิ่มขึ้น



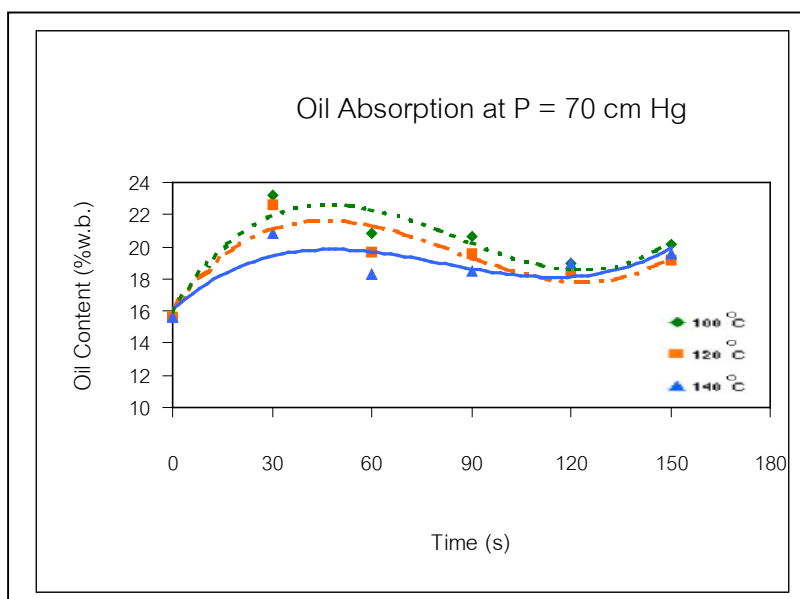
ภาพประกอบที่ 3-7 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด 100 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 50, 60, 70 เซนติเมตรปรอทสูญญากาศ



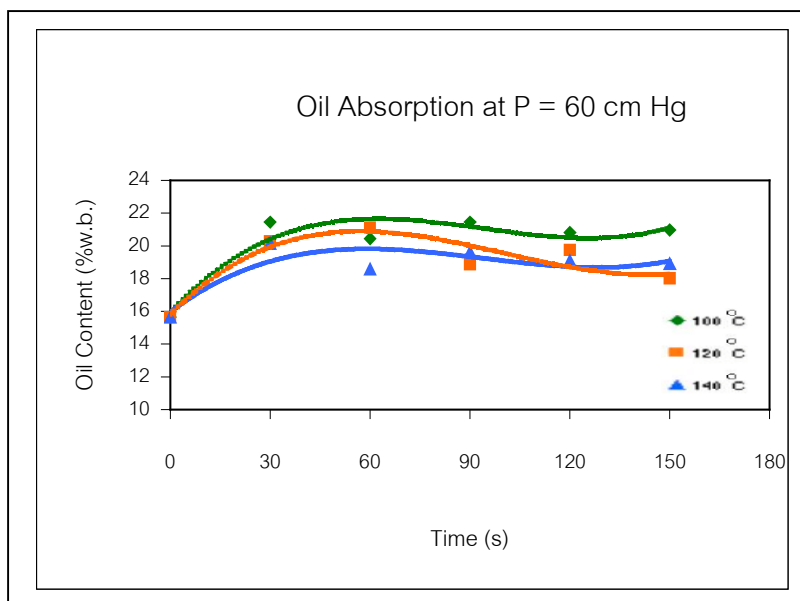
ภาพประกอบที่ 3-8 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด 120 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 50, 60, 70 เซนติเมตรปรอทสูญญากาศ



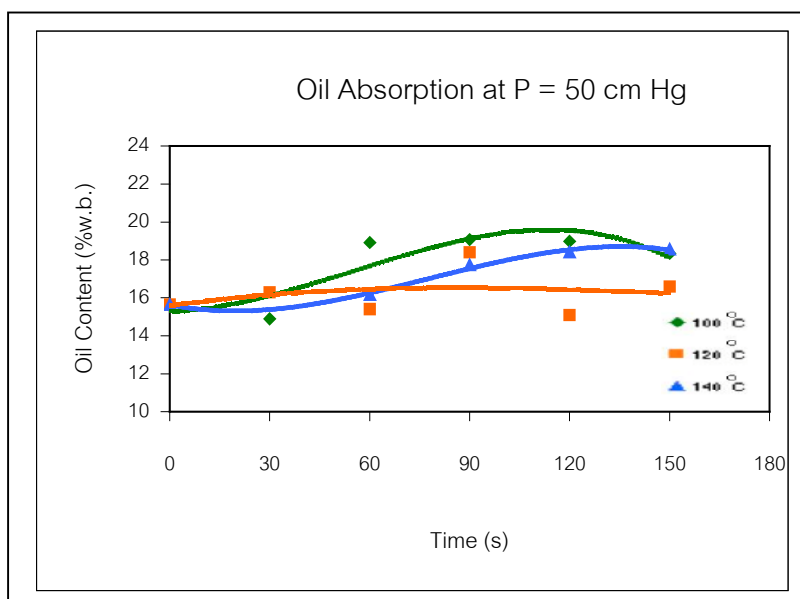
ภาพประกอบที่ 3-9 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด 140 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 50, 60, 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ



ภาพประกอบที่ 3-10 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่ความดันที่ใช้ในการทอด 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ อุณหภูมิที่ใช้ในการทอด 100, 120, 140 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 3-11 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่ความดันที่ใช้ในการทอด 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ อุณหภูมิที่ใช้ในการทอด 100, 120, 140 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบที่ 3-12 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่ความดันที่ใช้ในการทอด 50 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ อุณหภูมิที่ใช้ในการทอด 100, 120, 140 องศาเซลเซียส

เมื่อเปรียบเทียบการทอดที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอดเดียวกัน พบว่าปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะสุญญากาศสูงจะมีปริมาณ

น้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่สูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบการทอดที่ความดันที่ใช้ในการทอดเดียวกัน พบว่าผลกระทบของอุณหภูมิของน้ำมันที่ความดัน 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ ต่อปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ไม่มีความต่างกันมากนัก สาเหตุดังกล่าวเนื่องมาจากการเกิดผิวหนังแข็ง ซึ่งก็คือผิวของชั้นอาหารที่เกิดการแข็งตัวหรือเกิดการเกรียมขึ้นที่เรียกว่า crust และความดันภายในของผลิตภัณฑ์ โดยจะมีปริมาณน้ำมันสูงในช่วงแรกของกระบวนการทอดซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นมีอัตราการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ต่ำหุ้ปลาในอัตราสูง

3. ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

3.1 สีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

เปรียบเทียบสีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทำการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ ด้วยเวลาที่ใช้การทอด 150 วินาที เมื่อเปรียบเทียบที่ความดันสุญญากาศที่ใช้ในการทอดเดียวกัน 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ พบว่า สีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่อุณหภูมิในการทอดสูงที่สุด 140 องศาเซลเซียส มีสีเข้มที่สุด และสีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่อุณหภูมิของน้ำมันในการทอดต่ำที่สุด 100 องศาเซลเซียส มีสีอ่อนที่สุด เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทอดเท่ากัน 120 องศาเซลเซียส พบว่า สีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ความดันสุญญากาศที่ใช้ในการทอดที่ต่ำที่สุด 50 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ มีสีเข้มที่สุด และสีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ความดันสุญญากาศที่ใช้ในการทอดสูงที่สุด 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ มีสีอ่อนที่สุด และเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดและความดันสุญญากาศที่ใช้ในการทอดเท่ากัน 120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ พบว่า สีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาซึ่งใช้เวลาในการทอดมากขึ้น ที่ 3.5 นาที จะมีสีเข้มกว่าสีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ใช้เวลาในการทอดน้อยกว่า 150 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 3-1

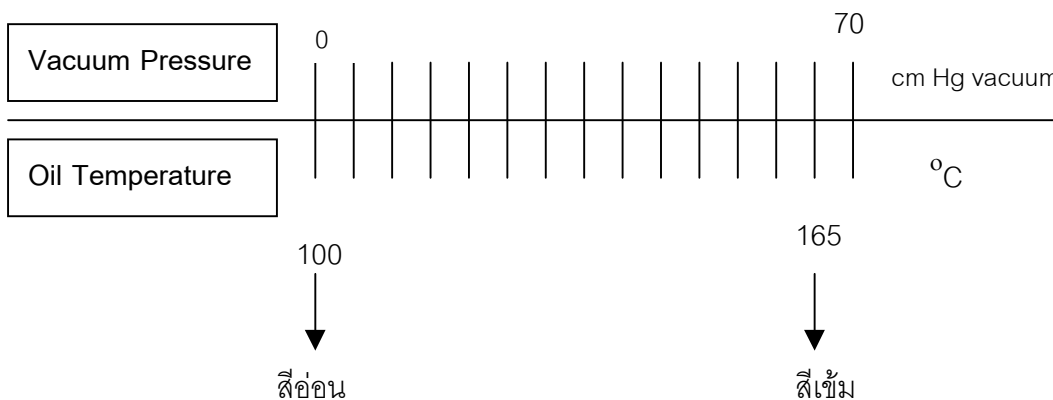
ตารางที่ 3-1 ตารางแสดงค่าสีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

Condition			Color index		
Oil Temperature (°C)	Vacuum Pressure (cm Hg vacuum)	Frying Time (s)	L (unit)	a (unit)	b (unit)
100	70	150	83.39	-1.60	8.72
120	50	150	81.39	-1.90	16.20
120	60	150	78.40	-1.94	17.57
120	60	180	76.62	-1.47	20.20
120	70	150	79.08	-2.17	16.79
140	70	150	66.09	3.43	26.58
165 (exp)	0	150	69.09	7.32	26.31
165 (PFP)	0	150	59.81	13.49	27.81

ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศซึ่งผ่านกระบวนการทอดจากโรงงาน (PFP) มีสีเข้มกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศที่ได้จากการทดลอง ผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ มีสีเข้มกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยที่ผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความดัน 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ มีสีใกล้เคียงกับที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศที่ได้จากการทดลองมากที่สุด รองลงมาคือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิน้ำมันในการทอด 120 องศาเซลเซียส และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยที่สีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มสีมากน้อยต่างกันเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอดและความดันสุญญากาศที่ใช้ในการทอด

นอกจากนี้ปัจจัยด้านสีของน้ำมันที่ใช้ในการทอดก็มีผลต่อความเข้มสีของผลิตภัณฑ์ สีของน้ำมันที่ใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานจะใสและอ่อนกว่าสีของน้ำมันที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ดังนั้นการทอดผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาซึ่งเดิมนั้นตัววัตถุดิบจะมีสีขาวล้วนน่าจะได้รับผลกระทบจากสีของน้ำมันด้วยอีกประการหนึ่ง ดังจะสังเกตเห็นได้ว่าที่จำนวนครั้งในการทอดเพิ่มขึ้น สีของผลิตภัณฑ์มีความเข้มมากขึ้นโดยในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศซึ่งใช้อุณหภูมิน้ำมันในการทอดต่ำจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนกว่าการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศซึ่งใช้อุณหภูมิน้ำมันในการทอดสูงกว่า

มาก เนื่องจากการทอดภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิหน้าจะมีผลกระทบต่อกลิ่นเกรียมและความเข้มสีของผลิตภัณฑ์ได้น้อยกว่า แต่เนื่องด้วยในการทดลองที่ผ่านมานี้ใช้เวลาในการทอดผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาเพียงช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ต่อครั้งของการทอด และตลอดการทดลอง การเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำมันจึงเกิดขึ้นน้อย ผลกระทบที่เกิดจากสีของน้ำมันจึงน่าจะเกิดขึ้นน้อยมาก



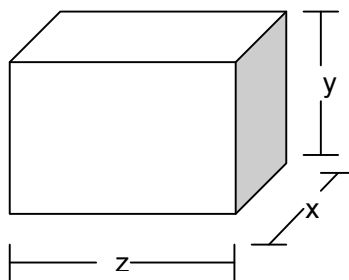
ภาพประกอบที่ 3-13 ภาพแสดงการเปรียบเทียบสีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่สภาวะต่าง ๆ

3.2 การขยายตัวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

ภายหลังจากทำการวัดขนาดผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาก่อนการทอดและหลังการทอดที่สภาวะต่าง ๆ โดยทำการวัดภายหลังจากทำการเหวี่ยงแยกน้ำมันทันทีด้วยเครื่องมือเวอร์เนียร์ มิเตอร์ พบว่าผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาก่อนการทอด มีขนาดโดยเฉลี่ย $2.67 \times 2.75 \times 3.11$ เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 3-2 หลังจากผ่านกระบวนการทอด โดยใช้ความดันสุญญากาศในการทอดเดียวกัน 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ พบว่า ที่อุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ในการทอดสูงที่สุด 140 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาสูงที่สุด ที่อุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ในการทอดต่ำที่สุด 100 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาต่ำที่สุด โดยหากใช้อุณหภูมิของน้ำมันในการทอดเดียวกัน พบว่า ที่ความดันสุญญากาศที่ใช้ในการทอดต่ำที่สุด 50 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาต่ำที่สุด ที่ความดันสุญญากาศสูงที่สุด 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ มีเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาสูงที่สุด ในขณะที่เมื่อทำการทอดผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทอดและความดันสุญญากาศที่ใช้ในการทอดเดียวกัน 120 องศาเซลเซียส 60 ปรอทสุญญากาศ พบว่า ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ใช้ในการทอดมากกว่า 210 วินาที มีการขยายตัวมากกว่าผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ใช้เวลาในการทอดน้อยกว่า 150 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-2 ตารางแสดงขนาดของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาก่อนทอด

Product	x average (cm)	y average (cm)	z average (cm)	Volume (cm ³)
raw	2.67	2.75	3.11	22.78



ภาพประกอบที่ 3-14 ภาพแสดงทิศทางการวัดขนาดผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

ตารางที่ 3-3 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

Condition		% Expansion			
Oil Temperature (°C)	Vacuum Pressure (cm Hg vacuum)	ΔV_x (%)	ΔV_y (%)	ΔV_z (%)	Volume (%)
100	70	3.37	6.61	1.45	12.06
120	50	1.75	9.09	0.75	12.10
120	60	6.68	13.09	2.95	20.71
120	70	11.05	13.64	9.16	38.09
140	70	11.24	24.12	13.45	57.02
165	0	3.25	10.30	5.31	20.22

$$\Delta V_x = \frac{(V_x - V_{x0})}{V_{x0}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\Delta V_y = \frac{(V_y - V_{y0})}{V_{y0}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\Delta V_z = \frac{(V_z - V_{z0})}{V_{z0}} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\%Volume = \frac{(V_x V_y V_z - V_{x0} V_{y0} V_{z0})}{V_{x0} V_{y0} V_{z0}} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่	V_{x0}	คือ	ความยาวในแนวแกน x ของผลิตภัณฑ์ก่อนทอด
	V_{y0}	คือ	ความยาวในแนวแกน y ของผลิตภัณฑ์ก่อนทอด
	V_{z0}	คือ	ความยาวในแนวแกน z ของผลิตภัณฑ์ก่อนทอด
	V_x	คือ	ความยาวในแนวแกน x ของผลิตภัณฑ์หลังทอด
	V_y	คือ	ความยาวในแนวแกน y ของผลิตภัณฑ์หลังทอด
	V_z	คือ	ความยาวในแนวแกน z ของผลิตภัณฑ์หลังทอด
	ΔV_x	คือ	การเปลี่ยนแปลงความยาวในแนวแกน x
	ΔV_y	คือ	การเปลี่ยนแปลงความยาวในแนวแกน y
	ΔV_z	คือ	การเปลี่ยนแปลงความยาวในแนวแกน z

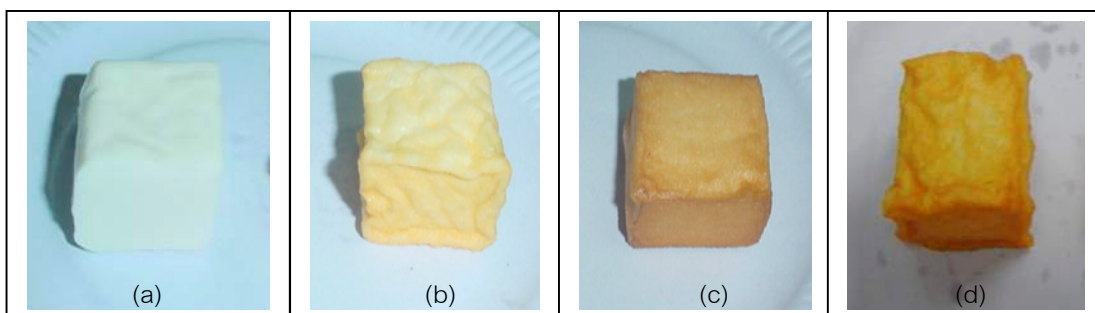
การขยายตัวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ มีการขยายตัวสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ การขยายตัวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลามากน้อยเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทอดและความดันสุญญากาศที่ใช้ในการทอด

3.3 เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา จากผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ โดยการทอดแบบกระทะ ที่อุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ในการทอด 165 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ เวลาที่ใช้ในการทอด 150 วินาที จากบริษัทแปซิฟิกแปรรูปสัตว์น้ำ จำกัด และจากการทอดโดยใช้สภาวะดังกล่าวด้วยเครื่องทอดสุญญากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิของน้ำมันในการทอด 120 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศที่ใช้ในการทอด 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ จากการทดสอบเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศจากโรงงาน และจากการทดลอง โดยใช้สภาวะเดียวกัน ที่อุณหภูมิน้ำมันในการทอด 165 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศนั้นมีเนื้อสัมผัสต่างกัน ผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 120 องศาเซลเซียส ที่ความดันต่างกัน มีเนื้อสัมผัสต่างกัน และพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 60 และ 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ มีค่าเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3-4

4. เปรียบเทียบการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและภายใต้สภาวะบรรยากาศ

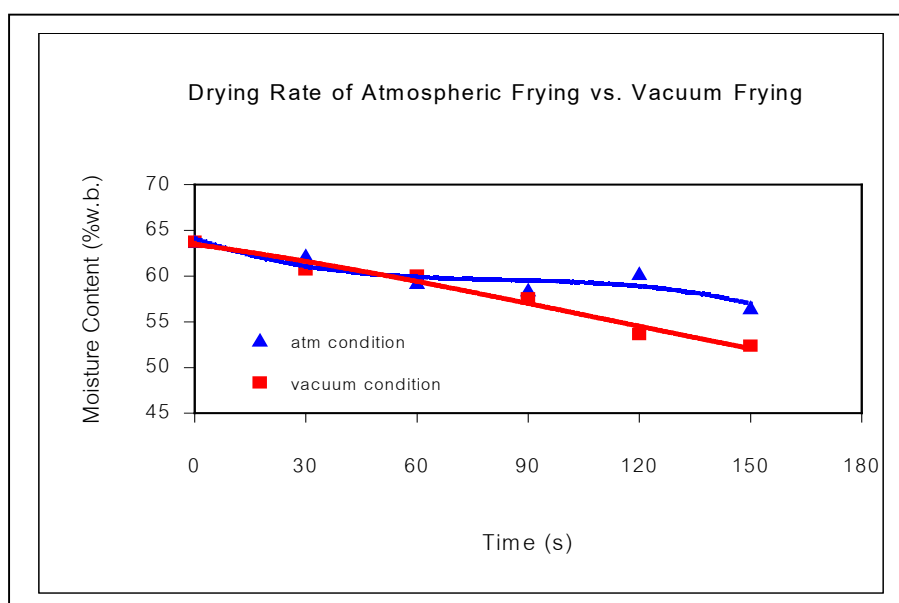
เปรียบเทียบการสูญเสียความชื้นระหว่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ) และการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ (165 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ) โดยสาเหตุที่เลือกสภาวะสุญญากาศที่ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ เนื่องจากจากผลการทดลองใน 3.1, 3.2 และ 3.3 พบว่าไม่สามารถใช้เปอร์เซ็นต์ความชื้นและปริมาณน้ำมันน้อยที่สุดในผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เวลาในการทอดเท่ากันเป็นตัวตัดสินเลือกสภาวะได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่สภาวะในการทอดต่างกันมีลักษณะต่างกั้กันดังแสดงผ่านมาแล้วใน 3.3 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยลักษณะเรื่อง สี การขยายตัวของผลิตภัณฑ์ และลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาประกอบด้วย ดังนั้นการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ จึงน่าจะเหมาะสมที่สุดจากสภาวะสุญญากาศทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากมีลักษณะของสีไม่อ่อนเกินไปเหมือนในสภาวะที่อุณหภูมิในการทอดต่ำ 100 องศาเซลเซียส มีการขยายตัวในระดับไม่มากจนเกินไปและไม่มีชั้นผิวหนังแข็งหนาเหมือนในสภาวะที่อุณหภูมิน้ำมันในการทอดสูง 140 องศาเซลเซียส เนื้อสัมผัสมีค่าโดยภาพรวมใกล้เคียงกับที่ความดันสุญญากาศสูง 70 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ และสภาวะบรรยากาศ หากแต่มีการขยายตัวน้อยกว่าที่ความดันสุญญากาศสูง ถึงแม้ค่าความชื้นและปริมาณน้ำมันที่ผลิตภัณฑ์ภายหลังการทอดที่ 150 วินาทีจะมีค่าอยู่ในระดับกลางเมื่อเทียบกับสภาวะสุญญากาศอื่นในการทดลอง



ภาพประกอบที่ 3-15 (a) ภาพแสดงผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาก่อนทอด (สีขาว), (b) หลังทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (สีเหลือง), (c) หลังทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศจากโรงงาน (สีน้ำตาล) และ (d) หลังทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศจากการทดลอง (สีเหลืองเข้ม)

ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบการสูญเสียความชื้นระหว่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ) และการทอดภายใต้

สภาวะบรรยากาศ (165 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-16 พบว่า อัตราการระเหยของน้ำจากผลิตภัณฑ์ได้จากการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศมีอัตราเร็วในการระเหยใกล้เคียงกับอัตราการระเหยของความชื้นจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศในช่วง 60 วินาทีแรก ของการทอด หลังจากนั้นอัตราการระเหยของความชื้นจากผลิตภัณฑ์ได้จากการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีอัตราเร็วในการระเหยเร็วกว่าอัตราการระเหยของความชื้นจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ ที่เวลาในการทอดผ่านไป 150 วินาที ปริมาณของความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีค่าน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ



ภาพประกอบที่ 3-16 กราฟแสดงปริมาณความชื้นในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ) เปรียบเทียบกับการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ (165 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ)

ผลของความดันและผิวของชิ้นอาหารที่เกิดการแข็งตัวหรือเกิดการเกรียมขึ้นที่เรียกว่า crust ซึ่งเกิดขึ้นในขณะทำการทอดนั้น เป็นผลให้ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศแตกต่างกัน จากกราฟปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและบรรยากาศนั้นเมื่อทำการทอดผ่านไป 30 วินาที จะมีอัตราการระเหยรวดเร็วหรือมีปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ได้หุบลาดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเมื่อภายหลังวินาทีที่ 30 ผ่านไปนั้น ผลิตภัณฑ์จะเริ่มเกิด crust ขึ้น การเกิด crust

ในผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศนั้นทำให้รูปทรงของผลิตภัณฑ์เต่าหุ้ปลาซึ่งมีน้ำอยู่มีขนาดเล็กลง น้ำที่อยู่ภายในอาหารจึงระเหยออกมาได้น้อยลง ประกอบกับความดันภายนอกของผลิตภัณฑ์เต่าหุ้ปลาหรือความดันภายในเครื่องทอดนั้นมีค่าสูงกว่าความดันภายในเนื้อผลิตภัณฑ์แรงกดดันที่เกิดจากความดันภายนอกที่สูงกว่าส่งผลให้การถ่ายโอนของความชื้นออกจากเนื้อผลิตภัณฑ์ได้น้อยลง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้น ในเวลาในการทอดเท่ากันกับผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศแต่อุณหภูมิที่ใช้ในการทอดต่ำกว่าผิวของชิ้นอาหารที่เกิดการแข็งตัวหรือเกิดการเกรียมขึ้น จึงอาจเกิดได้ช้ากว่า หรืออาจมีชั้นของผิวแข็งดังกล่าวบางกว่า รวมถึงความต่างของผลต่างของความดันภายในเนื้อผลิตภัณฑ์และความดันภายนอกผลิตภัณฑ์มีค่าน้อย จึงมีแรงกดดันที่มีผลต่อการถ่ายโอนความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์น้อยกว่า การระเหยของความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจึงมีมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจึงมีน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ

ในการศึกษาการถ่ายโอนมวลสารในการแปรรูปอาหาร (Mass Transfer in Food Processing) พบว่า การเคลื่อนย้ายของน้ำในอาหารนั้น เมื่ออาหารได้รับความร้อนน้ำที่อยู่ในอาหารก็จะเคลื่อนตัวออกจากอาหาร ลักษณะการเคลื่อนที่ออกจากอาหาร อาจเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือของไอ กล่าวคือ น้ำหรือไอน้ำที่อยู่ในอาหารจะเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าของวัตถุ จากนั้นน้ำที่ผิวจะกลายเป็นไอระเหยออกสู่บรรยากาศ กลไกภายในของการไหลของของเหลวและผลของสภาพภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วของลม มีส่วนเกี่ยวข้องกับ การเคลื่อนตัวของน้ำ กลไกภายในของการไหลของของเหลวเหล่านั้นได้พบว่ามีอยู่หลายแบบ ทั้งนี้ขึ้นกับโครงสร้างของอาหาร ชนิดของการเคลื่อนที่ของน้ำอาจเกิดขึ้นจากแรงแคปิลลารี (capillary force) การเคลื่อนตัวแบบนี้ พบว่ามีลักษณะที่ซับซ้อนมาก นั่นคือยากต่อการแยกแยะว่าจะเป็นการเคลื่อนที่แบบที่เกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้น หรือแรงแคปิลลารี เมื่อปริมาณน้ำในอาหารลดลงการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านแคปิลลารีและรูเล็ก ๆ จะเกิดขึ้นจากไอเป็นส่วนใหญ่ ลักษณะการเคลื่อนที่แบบนี้ยังขึ้นกับความดันย่อยของน้ำในอาหารและค่าการยอมให้ผ่านของอาหารอีกด้วย (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาลิก, 2529 อ้างโดย ชาญชัย รัชชี, 2547)

การถ่ายโอนมวลเกี่ยวข้องกับการแพร่ของมวลที่เกิดขึ้นระดับโมเลกุลหรือการถ่ายโอนมวลเชิงปริมาตร (bulk transport) เนื่องจากการไหลแบบการพา (convection) กระบวนการแพร่สามารถอธิบายได้โดยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้กฎของฟิค (Fick's law) กล่าวไว้ว่า แมสฟลักซ์

(mass flux) ต่อหน่วยพื้นที่องค์ประกอบหนึ่งเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของความเข้มข้น ดังสมการสำหรับองค์ประกอบใด ๆ

$$\frac{\dot{m}_i}{A} = -D \left(\frac{dc}{dx} \right) \quad (3.5)$$

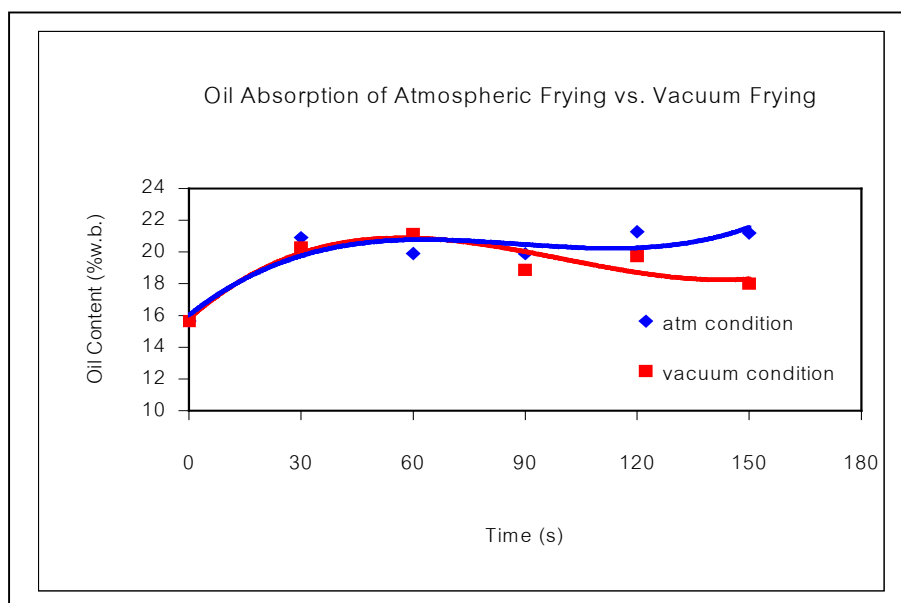
เมื่อ \dot{m}_i = อัตราการไหลของมวล (kg/s)
 A = พื้นที่ (m^2)
 D = สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)
 dc = การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของมวล (kg/m^3)
 dx = การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างความเข้มข้น 2 จุด ที่กำลังพิจารณา (m)

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำในอาหารเป็นการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือของไอ ถ้าเป็นการแพร่ของของเหลว (liquid diffusion) นั้น การเคลื่อนที่ของน้ำจะเกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นเมื่อระเหยน้ำออกไปจากผิวหน้า นั่นคือความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มมากขึ้นและปริมาณน้ำลดลง ส่วนการแพร่ของไอน้ำ (water vapor diffusion) เกิดจากความแตกต่างของความดันย่อยในอากาศที่อยู่ในรูเปิดเล็ก ๆ มีลักษณะคองที่ และเมื่อไอน้ำที่เกิดจากการระเหยของน้ำแพร่ซึมผ่านเข้าไปในรูเปิดเล็ก ๆ นี้ จะไปไล่อากาศจากบริเวณที่มีความดันไอสูงไปสู่ความดันไอต่ำ อัตราการเคลื่อนที่นี้ขึ้นกับแฟคเตอร์การต้านทานต่อการการแพร่ซึ่งมีลักษณะคล้ายค่าสภาพการนำของวัตถุ ดังนั้นการแพร่ของไอ จึงเกิดจากความแตกต่างของความดันไอ ความชื้นอาจจะเคลื่อนที่โดยการแพร่ของไอน้ำผ่านอาหารที่เป็นของแข็งได้ ตราบเท่าที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ การระเหยและการแพร่ของไอน้ำจะเกิดขึ้นในอาหารที่เป็นของแข็ง โดยอาหารนั้นได้รับความร้อนข้างหนึ่งและเกิดการระเหยอีกข้างหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีการแพร่ของของเหลวที่ดูดซับอยู่ที่ผิวอาหาร ซึ่งการแพร่แบบนี้เรียกว่าการแพร่โดยการกระตุ้น จะเกิดขึ้นเมื่ออาหารมีความชื้นค่อนข้างต่ำ (ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, 2529 อ้างโดย ชาญชัย รัชชี, 2547)

จากการศึกษาข้างต้นกล่าวได้ว่าความดันมีความสำคัญต่อการแพร่ของของเหลวหรือความชื้นภายในอาหารในลักษณะไอ และการแพร่ของความชื้นมากน้อยมีผลต่อการแพร่ของของเหลวที่ดูดซับที่ผิวอาหาร ดังนั้นในการทอดอาหารภายใต้สภาวะสุญญากาศซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของความดันไอและการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการทอดจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ออกมานั้น

ความดันจึงน่าจะมีผลต่อการถ่ายโอนมวลสาร อันได้แก่ การถ่ายโอนมวลของน้ำออกจากอาหาร และการถ่ายโอนมวลของน้ำมันที่ผิวของอาหารเข้าสู่อาหาร

ภาพประกอบที่ 3-17 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันระหว่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้นั้นได้จากการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศมีปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากในช่วงเวลา 30 วินาทีแรกของการทอด และมีปริมาณน้ำมันลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทอด ในขณะที่ผลลัพธ์ที่ได้นั้นได้จากการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศมีลักษณะการเปลี่ยนไปของปริมาณน้ำมันในผลลัพธ์แตกต่างกันไปโดยมีการเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทอดยังคงค่อย ๆ เพิ่มไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทอด ผลลัพธ์ที่ได้นั้นได้จากการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจึงมีปริมาณน้ำมันหลังจากผ่านการทอดไป 150 วินาที น้อยกว่าปริมาณน้ำมันของผลลัพธ์ที่ได้นั้นได้จากการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ



ภาพประกอบที่ 3-17 กราฟแสดงปริมาณน้ำมันในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (120 องศาเซลเซียส 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ) เปรียบเทียบกับการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ (165 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ)

ผลของความดันและ crust ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่ทำการทอดนั้น เป็นผลให้ปริมาณน้ำมันในผลลัพธ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและผลลัพธ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศแตกต่างกัน

ต่างกัน จากกราฟปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศเมื่อทำการทอดผ่านไป 30 วินาที ผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณน้ำมันในเวลาในการทอดต่อมาจะเริ่มลดลง แสดงให้เห็นว่าหลังทำการทอดผ่านไป 30 วินาทีนั้น ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาเริ่มจะเกิด crust ขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้รูพรุนของชิ้นอาหารมีขนาดเล็กลง ประกอบกับการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นการทอดภายใต้ความดันต่ำ ซึ่งผลต่างของความดันระหว่างความดันภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาและความดันภายนอกผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาหรือความดันภายในเครื่องทอดนั้นมีความต่างกันน้อย ส่งผลให้แรงขับเคลื่อนที่จะขับดันน้ำมันเข้าสู่ผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำ ทำให้ปริมาณน้ำมันที่ได้จากผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศมีค่าต่ำ ในขณะที่การทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศนั้นก็มีการเกิด crust ได้เช่นกัน หากแต่แรงขับเคลื่อนอันเนื่องมาจากผลต่างของความดันระหว่างความดันภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาและความดันภายนอกผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาหรือความดันภายในเครื่องทอดนั้นมีค่ามากกว่า ปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์หลังจากทำการทอดผ่านไป 150 วินาที จึงมีค่าสูงกว่าการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

เป็นเรื่องยากและมีความซับซ้อนอย่างมากที่จะอธิบายว่าการดูดซึมน้ำมันที่ผิวของผลิตภัณฑ์เข้าสู่ภายในผลิตภัณฑ์นั้น เกิดจากการควบคุมของการแพร่ (diffusion control) โดยตรงและแรงขับเคลื่อนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความดันมีผลต่อการดูดซึมน้ำมัน เนื่องจากยังไม่มีสมการสนับสนุนทฤษฎีดังกล่าวข้างต้นโดยตรง หากแต่เราทราบว่าปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusivity, D) ตามกฎของฟิคที่กล่าวไป เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วของลม เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลของผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์กัน (Simultaneous Heat and Mass Transfer) ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการนำความร้อน เช่น อุณหภูมิ ความดัน และลักษณะทางธรรมชาติของอาหาร อันได้แก่ โครงสร้างเซลล์ ปริมาณอากาศระหว่างเซลล์ และปริมาณความชื้น จึงมีอิทธิพลต่อการแพร่เช่นกัน ดังนั้นความดันซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและน้ำมัน และมีผลถึงคุณสมบัติอื่น ๆ ของน้ำและน้ำมัน จึงมีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่และการแพร่ของน้ำและน้ำมัน

5. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมัน

การศึกษาคุณภาพของน้ำมันนั้น สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำมัน ที่ผ่านกระบวนการทอดได้หลายแบบทั้งทางกายภาพและทางเคมี วิธีการตรวจสอบทางกายภาพที่ใช้กันทั่วไปคือ การตรวจสอบสี และจุดควัน (Stevenson, et al., 1984 อ้างโดย ชุติมา และดารารัตน์, 2544) ส่วนในการทดสอบทางเคมีนิยมตรวจสอบ กรดไขมันอิสระ (Free fatty acids, FFA), ค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide value, PV) และค่า Thiobarbaturic Acid (Thiobarbaturic acid, TBA) (ชุติมา และดารารัตน์, 2544) ในการทำการศึกษาวิจัยนี้ได้ยึดถือการตรวจสอบคุณภาพน้ำมันโดยอ้างอิงจากตัวแปรหลักเฉพาะที่ทางโรงงานผู้ให้การสนับสนุนสนใจเป็นหลัก ได้แก่ สี และค่าเปอร์ออกไซด์ โดยมีการตรวจสอบกรดไขมันอิสระ และค่า Thiobarbaturic Acid เป็นตัวแปรเสริมเพื่อประกอบและยืนยันความเป็นไปได้ของผลการทดลอง

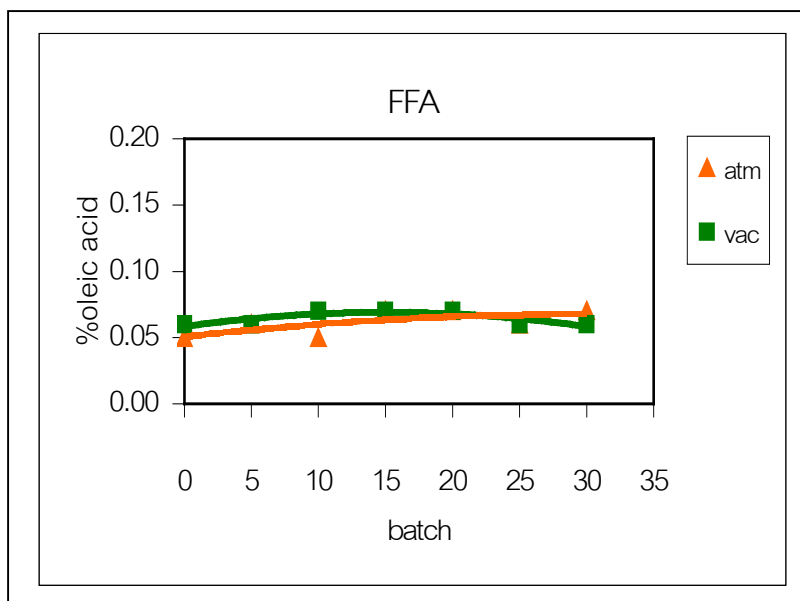
การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นการวัดการย่อยสลายด้วยน้ำของไขมันและน้ำมันโดยเป็นปริมาณร้อยละของกรดไขมันอิสระที่อาจคำนวณในรูปของกรดโอเลอิกหรือกรดรูปอื่น ๆ (เสาวลักษณ์, 2534) โดยความชื้น เวลาและอุณหภูมิเป็นตัวทำให้น้ำมันเกิดกรดไขมันอิสระดังกล่าวจากปฏิกิริยา catalyzing triglyceride hydrolysis (Hamilton, 2002) เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าสารที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตัวแรกคือ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (ชุติมา และดารารัตน์, 2544; Kim and Shin, 2001) ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์นั้น จึงเป็นการวัดเฉพาะค่าเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Hamilton, 2002; Kim and Shin, 2001) หลังจากเกิดการออกซิเดชันโดยที่ค่าที่ได้จะมีอัตราเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดสมดุล (equilibrium) จากนั้น เปอร์ออกไซด์จะเปลี่ยนไปเป็น อัลดีไฮด์ (aldehydes) และคีโตน (ketones) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์อันดับสอง (secondary products) ต่อไป (ชุติมา และดารารัตน์, 2544; Hamilton, 2002) การวัดค่าผลิตภัณฑ์อันดับสอง ได้แก่ อัลดีไฮด์และคีโตนนั้น คือ การวิเคราะห์ค่า Thiobarbaturic Acid (Hamilton, 2002)



ภาพประกอบที่ 3-18 ภาพแสดงตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (น้ำมันที่ยังไม่ผ่านการทอด, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว 5 ครั้ง, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว 10 ครั้ง, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว 15 ครั้ง, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว 20 ครั้ง, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว 25 ครั้ง, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว 30 ครั้ง เรียงลำดับจากซ้ายไปขวา)



ภาพประกอบที่ 3-19 ภาพแสดงตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ (น้ำมันที่ยังไม่ผ่านการทอด, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว 5 ครั้ง, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว 10 ครั้ง, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว 15 ครั้ง, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว 20 ครั้ง, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว 25 ครั้ง, น้ำมันที่ผ่านการทอดแล้ว 30 ครั้ง เรียงลำดับจากซ้ายไปขวา)



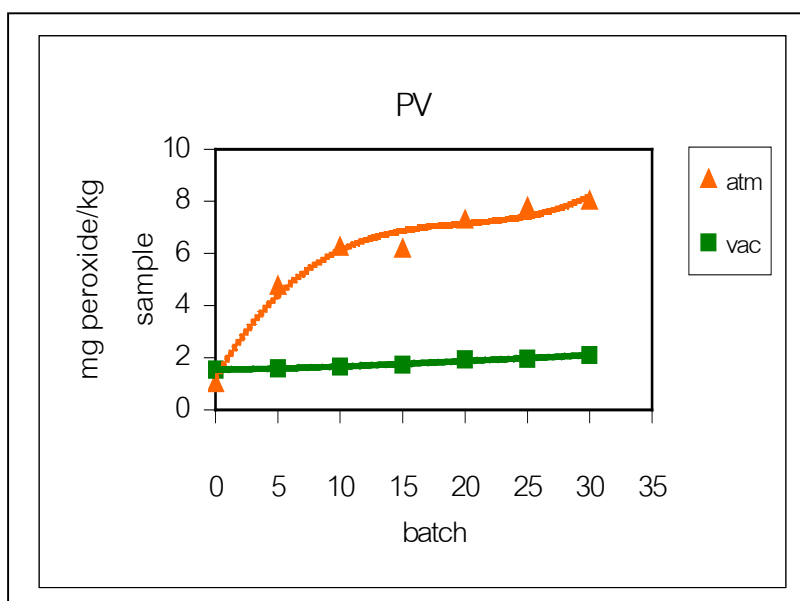
ภาพประกอบที่ 3-20 กราฟแสดงค่ากรดไขมันอิสระในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ) เปรียบเทียบกับการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ

เปรียบเทียบการเสื่อมสภาพน้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้ในการทอด โดยการวัดปริมาณของกรดไขมันอิสระ, ค่าเปอร์ออกไซด์, ค่ากรดไทโอบาบิทอริก และสี ภายหลังจากผ่านการใช้งานในการทอดผลิตภัณฑ์เตาหุ้ปลา ครั้งละ 8 ชิ้น คิดเป็นน้ำหนักประมาณ 160-200 กรัม จำนวน 30 ครั้ง ในการทอดในแต่ละสภาวะ รวมน้ำหนักผลิตภัณฑ์เตาหุ้ปลาที่ใช้ทั้งสิ้นต่อสภาวะการทอดประมาณ 10 กิโลกรัม และใช้เวลาในการทอดผลิตภัณฑ์เตาหุ้ปลาต่อครั้งเท่ากัน คือ 150 วินาที ทั้งการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและสภาวะบรรยากาศ รวมเวลาการทอดทั้งหมด 30 ครั้ง ประมาณ 3 ชั่วโมงต่อการทดลองทอดแต่ละสภาวะ

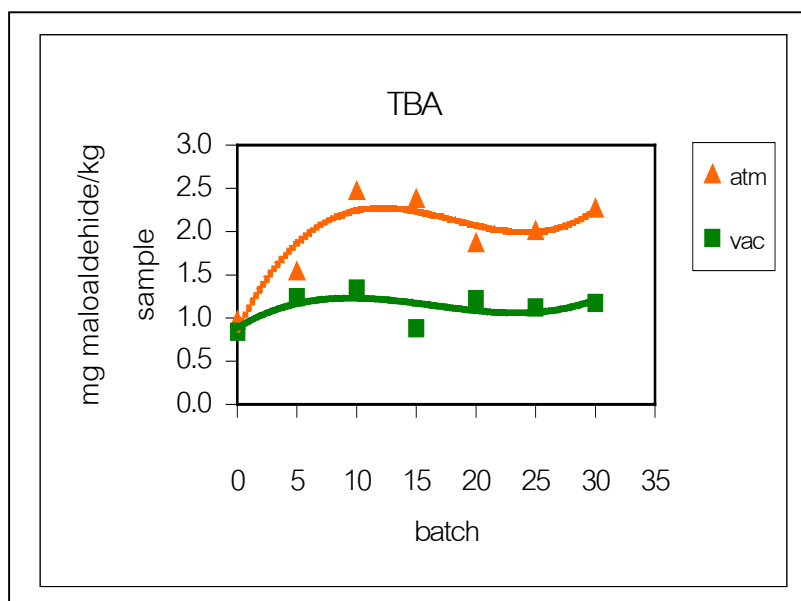
จากภาพประกอบที่ 3-20 ผลการทดลองทั้งการทอดภายใต้สภาวะการทอดสุญญากาศและการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ พบว่า น้ำมันที่ใช้ในการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศและการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณของกรดไขมันอิสระอย่างมีนัยสำคัญ หลังจากการทอด 30 ครั้ง เนื่องมาจากการทอด จำนวน 30 ครั้ง ซึ่งใช้เวลาในการทอดไปเพียง 3 ชั่วโมงนั้นสั้นเกินไป จากการทดลองทอด Tortilla Dough โดยใช้น้ำมันถั่วเหลือง (Moreira, R.G., Castell-Perez, M.E., 1999) พบว่า ที่ Degradation Time ผ่านไป 10 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ของ FFA ของน้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้ในการทอด Tortilla Dough เปลี่ยนจาก 0.03

เปอร์เซ็นต์กรดโอเลอิก ที่ค่าเริ่มต้นที่ Degradation Time เริ่มต้น ไปเป็น 0.05 เปอร์เซ็นต์กรดโอเลอิก เท่านั้น

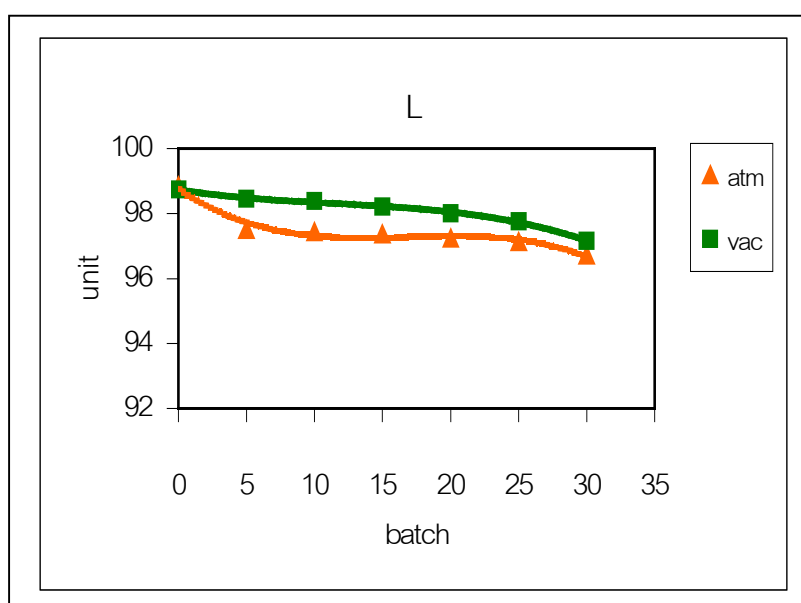
เปรียบเทียบกับ การทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ จากภาพประกอบที่ 3-21 และภาพประกอบที่ 3-22 น้ำมันที่ใช้ในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศมีค่าเปอร์ออกไซด์และค่ากรดไทโอบาพิทอริกต่ำกว่าน้ำมันที่ใช้ในการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ หลังจากทำการทอด 30 ครั้ง ค่าเปอร์ออกไซด์และค่ากรดไทโอบาพิทอริกที่ต่ำกว่าเป็นอีกปัจจัยที่บ่งบอกว่าน้ำมันที่ผ่านการใช้งานในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศยังมีคุณภาพดีกว่าน้ำมันที่ผ่านการใช้งานในการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ เมื่อผ่านการใช้งานในการทอดผลิตภัณฑ์ได้จำนวนไป 30 ครั้งเท่ากัน แต่ค่าเปอร์ออกไซด์ที่วัดได้นั้น ทั้งจากน้ำมันที่ผ่านการทอดผลิตภัณฑ์ได้จำนวนไป 30 ครั้งเท่ากัน แต่ค่าเปอร์ออกไซด์และการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศนั้น ยังมีค่าไม่เกิน 10 มิลลิกรัมสมมูลเปอร์ออกไซด์ออกซิเจนต่อน้ำมันหนึ่งกิโลกรัม (ดัดแปลงจาก มอก.176, 2519) ซึ่งยังถือว่าน้ำมันดังกล่าวนี้ยังสามารถใช้งานในการทอดต่อไปได้อีกระยะหนึ่ง



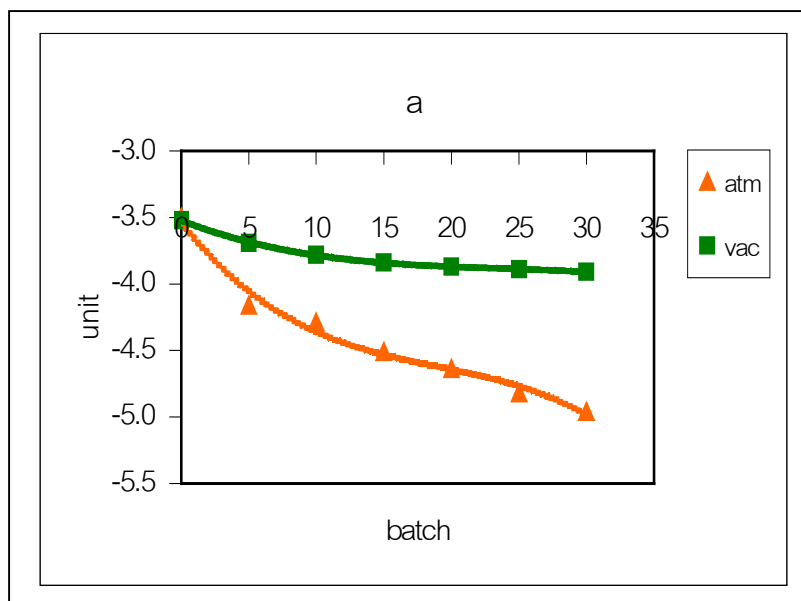
ภาพประกอบที่ 3-21 กราฟแสดงค่าเปอร์ออกไซด์ในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ) เปรียบเทียบกับการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ



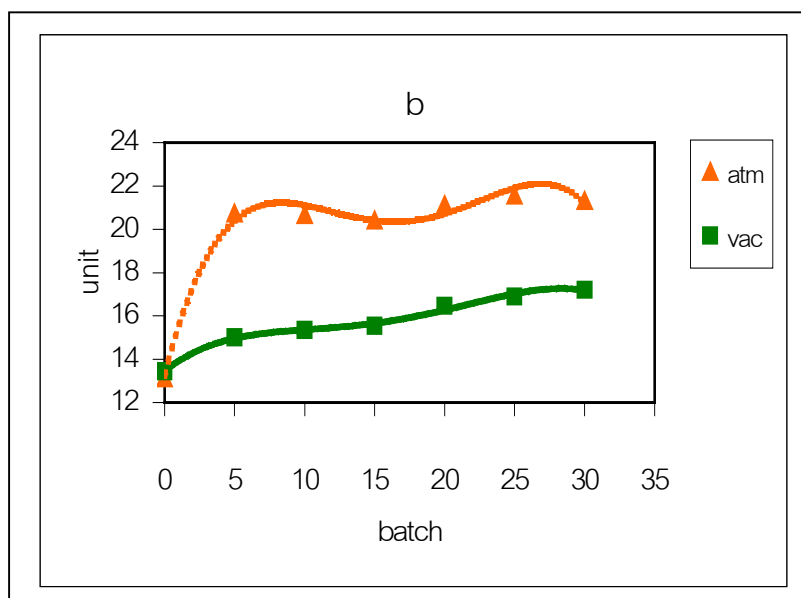
ภาพประกอบที่ 3-22 กราฟแสดงค่า Thiobarbaturic Acid ในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ)



ภาพประกอบที่ 3-23 กราฟแสดงค่า Color Index L (Lightness) ในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ) เปรียบเทียบกับการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ

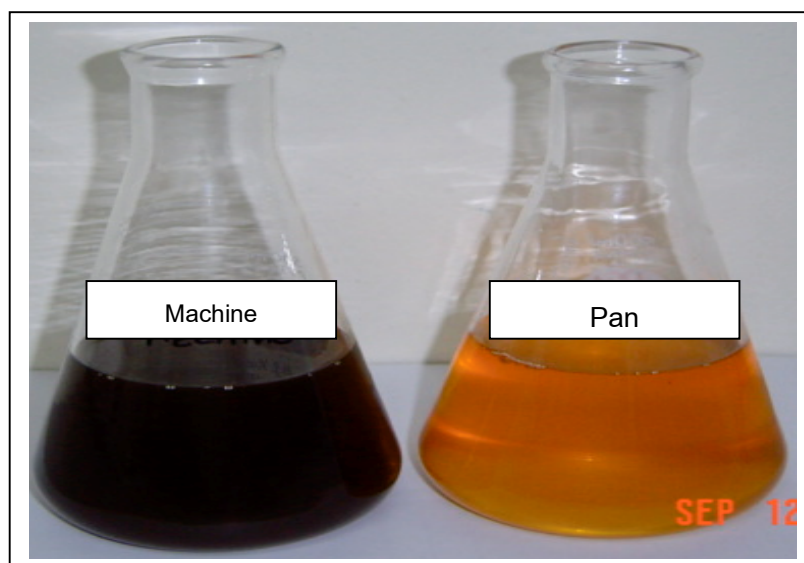


ภาพประกอบที่ 3-24 กราฟแสดงค่า Color Index a (Green-red Chromaticity) ในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ) เปรียบเทียบกับการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ



ภาพประกอบที่ 3-25 กราฟแสดงค่า Color Index b (Blue-yellow Chromaticity) ในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (120 องศาเซลเซียส ความดัน 60 เซนติเมตรปรอทสุญญากาศ) เปรียบเทียบกับการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ

น้ำมันที่ใช้ในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศมีค่า L (Lightness) และค่า a (Green-red Chromaticity) สูงกว่าและมีค่า b (Blue-yellow Chromaticity) ต่ำกว่าน้ำมันที่ใช้ในการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ หลังจากทำการทอด 30 ครั้ง แสดงว่าสีของน้ำมันที่ใช้ในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศใสมากกว่าน้ำมันที่ใช้ในการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ เมื่อใช้ทอดผลิตภัณฑ์ปริมาณเท่ากันในจำนวนครั้งที่เท่ากัน การสังเกตค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก การวัดคุณภาพค่าสีของน้ำมันที่ใช้ในการทอดดังกล่าวนี้เป็นวิธีการหลักที่ทางโรงงานใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพน้ำมันที่เปลี่ยนไป นอกเหนือจากการวัดค่าเปอร์ออกไซด์ซึ่งต้องมีค่าไม่เกินและเป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรมกำหนดไว้ เนื่องจากสีของน้ำมันที่เปลี่ยนไปจะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทอดเป็นอย่างมากทั้งในด้านสีสันของผลิตภัณฑ์ รวมถึงกลิ่นและรสชาติของผลิตภัณฑ์ด้วย ดังนั้นสีของน้ำมันที่ใช้ในการทอดจะเป็นตัวกำหนดความเข้มสีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ใช้ในการทอดลงได้ด้วย จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้การทอดทั้งการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศมีสีสันอ่อนกว่าผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดจากโรงงาน ดังนั้นการทอดในสภาวะการทอดสุญญากาศสามารถที่จะลดค่าใช้จ่ายโดยการยืดอายุการใช้งานของน้ำมันที่ใช้ในการทอดได้ อันเนื่องมาจากการน้ำมันที่ใช้ในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้นให้ค่าเปอร์ออกไซด์และค่ากรดไทโอบาพิทอริกที่ต่ำกว่าและมีค่าสีใสมากกว่าน้ำมันที่ใช้ในการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศเมื่อใช้ทอดผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ผ่านไปจำนวน 30 ครั้ง ในปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ใช้ต่อครั้งเท่ากัน



ภาพประกอบที่ 3-26 ภาพแสดงตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ จากการทอดด้วยเครื่องทอดแบบต่อเนื่อง และการทอดแบบกระทะจากโรงงาน เรียงลำดับจากซ้ายไปขวา

ตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการทอดด้วยเครื่องทอดแบบต่อเนื่อง เป็นตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการทอดผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาแล้วเป็นเวลา 3 วัน โดยผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 8 ชั่วโมงต่อวัน และมีการเติมน้ำมันใหม่ผสมก่อนการทอดในวันต่อไป ตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการทอดด้วยกระทะ เป็นตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการทอดผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาแล้ว 1 วัน หรือ ประมาณ 8 ชั่วโมง โดยผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส อย่างต่อเนื่องตลอดวัน และพร้อมที่จะผสมน้ำมันใหม่เพื่อใช้ในการทอดวันต่อไป

ตารางที่ 3-5 ตารางแสดงคุณภาพน้ำมันเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันก่อนการใช้งาน, น้ำมันที่ผ่านการทอดด้วยเครื่องทอดแบบต่อเนื่อง และน้ำมันที่ผ่านการทอดด้วยกระทะ

Composition	Fresh Oil	Machine	Pan
FFA (%oleic acid)	0.047	0.054	0.392
PV (mg peroxide / kg sample)	1.97	14.53	7.84
TBA (mg malonaldehyde / kg sample)	0.11	0.78	1.02
Color Index L (unit)	97.06	85.13	43.72
Color Index a (unit)	-5.14	-0.46	22.70
Color Index b (unit)	20.27	42.01	28.47

ในภาพประกอบที่ 3-26 แสดงตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการใช้งานจากโรงงาน พบว่า ค่าสีที่ได้จากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานจากโรงงานทั้งการทอดแบบเครื่องทอดแบบต่อเนื่องและการทอดแบบกระทะนั้นมีสีเข้มมาก และมากกว่าค่าสีที่ได้จากน้ำมันที่ได้จากการทดลองมาก เนื่องจากระยะเวลาในการใช้งานนานกว่าและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทอดทั้งหมดมากกว่าการทอดภายใต้การทดลองหลายเท่าตัว แต่จากตารางที่ 3-5 พบว่าค่ากรดไขมันอิสระ และค่ากรดโทโอบาพิทอริกที่ได้จากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานด้วยเครื่องทอดแบบต่อเนื่องนั้นมีค่าต่ำมาก เพียง 0.054 เปอร์เซ็นต์กรดโอเลอิก และ 0.78 มิลลิกรัม malonaldehyde ต่อ กิโลกรัมตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าการเติมน้ำมันลงไปผสมสามารถช่วยลดปริมาณกรดไขมันอิสระและค่ากรดโทโอบาพิทอริกที่เปลี่ยนไปได้ ในขณะที่ค่าสี และค่าเปอร์ออกไซด์นั้นอยู่ในเกณฑ์ที่สูง โดยเฉพาะค่าเปอร์ออกไซด์นั้นเกินที่มาตรฐานอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้ด้วย ในขณะที่น้ำมันที่ผ่านการทอดจากโรงงานในแบบกระทะนั้นมีค่าของกรดไขมันอิสระสูงถึง 0.392 เปอร์เซ็นต์กรดโอเลอิก ค่าเปอร์ออกไซด์และค่ากรดโทโอบาพิทอริกก็อยู่ในระดับสูงถึง 7.84 มิลลิกรัมเปอร์ออกไซด์ต่อ กิโลกรัมตัวอย่าง และ

1.02 มิลลิกรัม malonaldehyde ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง หากแต่ค่าเปอร์ออกไซด์และค่ากรดไทโอบาบิทอริกน่าจะมีค่าสูงกว่านี้ เนื่องจากค่าเปอร์ออกไซด์และค่ากรดไทโอบาบิทอริกที่ได้จากการทดสอบภายใต้สภาวะบรรยากาศในการทดลองซึ่งมีปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทดสอบน้อยกว่า จำนวนครั้งในการทดสอบน้อยกว่าและเวลารวมตลอดการใช้งานน้อยกว่าการทดสอบจากโรงงานนั้นให้ค่า 8.03 มิลลิกรัมเปอร์ออกไซด์ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง และ 2.27 มิลลิกรัม malonaldehyde ต่อกิโลกรัมตัวอย่าง ซึ่งที่เป็นเช่นนี้น่าจะเกิดจากการระเหยได้ของสารตั้งต้นในการหาค่าเปอร์ออกไซด์และค่ากรดไทโอบาบิทอริกในระหว่างการทดสอบตลอดทั้งวันก่อนการเก็บตัวอย่างภายหลังเสร็จสิ้นการทดสอบเนื่องจากระบบที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบกระทะซึ่งอยู่ในลักษณะของระบบเปิดมีการแลกเปลี่ยนมวลและพลังงานกับสิ่งแวดล้อมได้ โดยค่าเปอร์ออกไซด์และค่ากรดไทโอบาบิทอริกที่ได้จากเครื่องทดสอบต่อเนื่องที่ได้จากโรงงานก็อาจเป็นเช่นเดียวกัน

6. การประหยัดพลังงาน

เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้และเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานของการทดสอบผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาภายใต้สภาวะบรรยากาศกับการทดสอบผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยการคำนวณพลังงานที่ใช้ของระบบ ได้แก่

Heat Oil Initial คือ พลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทดสอบจากอุณหภูมิห้องสู่อุณหภูมิที่กำหนด

Heat Oil Again คือ พลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทดสอบสู่อุณหภูมิที่กำหนดอีกครั้งหลังจากใส่ผลิตภัณฑ์ลงไป

Heat of Vaporization คือ พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำในผลิตภัณฑ์จากสถานะของเหลวเป็นสถานะไอ

Energy of Vacuum Pump คือ พลังงานที่ปั๊มสุญญากาศใช้ในการดูดอากาศเพื่อรักษาความดันของระบบ

โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณพลังงาน Heat Oil Initial, และ Heat Oil Again คือ สมการ

$$Q = mC_p\Delta T \quad (3.6)$$

โดยที่	Q	คือ	พลังงานความร้อน (J)
	m	คือ	มวล (kg)
	C _p	คือ	ค่าความจุความร้อน (J/kg °C)

ΔT คือ ค่าความต่างของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
การคำนวณค่าความจุความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ใช้สมการ

$$C_p = 1.675 + 0.025w_c \quad (3.7)$$

โดยที่ w_c = water content (%)

Heat of Vaporization คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ
สมการที่ใช้ในการคำนวณ คือ สมการ

$$Q_{\text{vap}} = m\lambda \quad (3.8)$$

โดยที่ Q_{vap} คือ พลังงานความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (J)

m คือ มวลของน้ำ (kg)

λ คือ ค่าความร้อนแฝงของน้ำ (J/kg)

สมการที่ใช้ในการคำนวณพลังงาน Energy of Vacuum Pump คือ สมการ

$$W = Pt \quad (3.9)$$

โดยที่ W_{work} คือ งาน (J)

P คือ กำลัง (W)

t คือ เวลา (s)

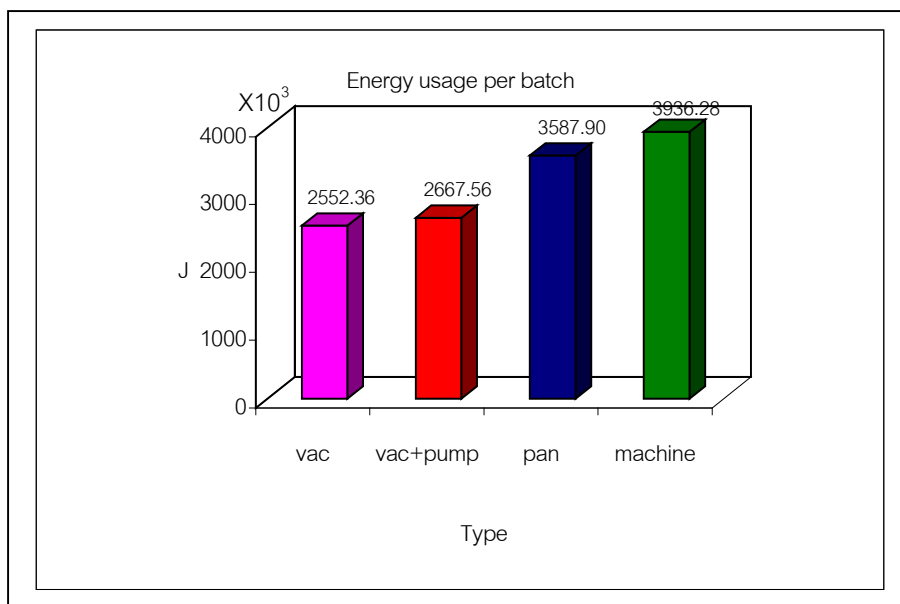
ตารางที่ 3-6 ตารางแสดงค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณพลังงาน

ค่าคงที่	สัญลักษณ์	ค่า	ที่มา
มวลของน้ำมัน	m-oil	11.03 kg	คำนวณใช้ในการทดลอง
มวลของผลิตภัณฑ์	m-product	0.16 kg	คำนวณใช้ในการทดลอง
มวลของน้ำในผลิตภัณฑ์	m-water	0.10 kg	ได้จากโรงงาน PFP
ค่าความจุความร้อนของน้ำมัน	Cp-oil	2.11×10^3 J/kg °C	Moreira et al.,1999.
ค่าความจุความร้อนของผลิตภัณฑ์	Cp-product	3.30×10^3 J/kg °C	$Cp=1.675+0.025w_c$
ค่าความจุความร้อนของน้ำ	Cp-water	4.18×10^3 J/kg °C	Thermodynamics, 2002
ค่าความร้อนแฝงของน้ำที่บรรยากาศ	hfg-water atm (λ_{atm})	2257×10^3 J/kg	Thermodynamics, 2545
ค่าความร้อนแฝงของน้ำที่สุญญากาศ	hfg-water vac (λ_{vac})	2355.18×10^3 J/kg	Thermodynamics, 2545
ความชื้นสะสมของผลิตภัณฑ์	w_c	65%	ค่าที่ได้จากการทดลอง
ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการทอด	oil	12 L	กำหนดใช้ในการทดลอง
ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทอดต่อครั้ง	product	160 g	กำหนดใช้ในการทดลอง
ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดแบบกระทะต่อวัน	kg/day/pan	500 kg	ได้จากโรงงาน PFP
ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องทอดแบบต่อเนื่องต่อวัน	kg/day/machine	2000 kg	ได้จากโรงงาน PFP

ตารางที่ 3-7 ตารางแสดงพลังงานที่ใช้ในแต่ละระบบ เปรียบเทียบระหว่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ และสภาวะบรรยากาศ

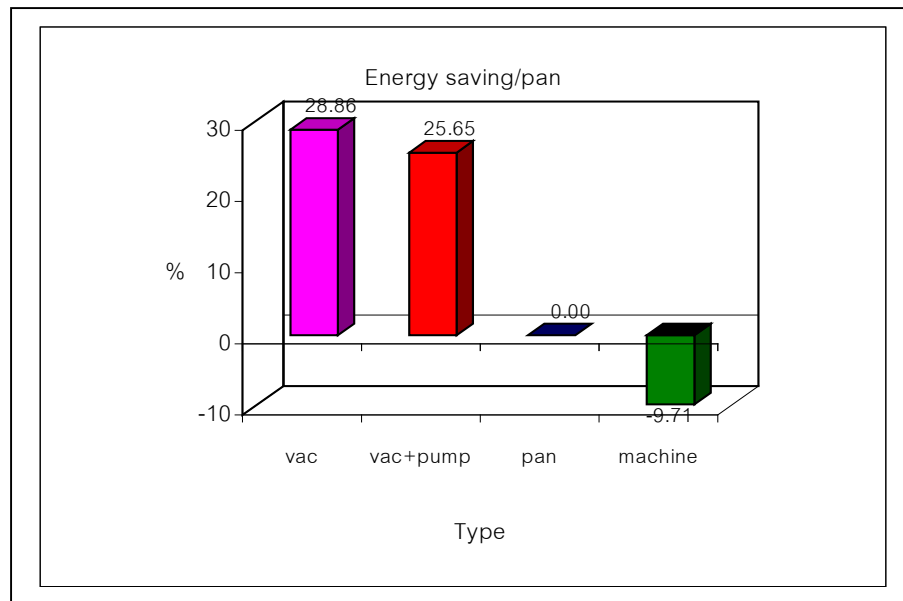
Typical	Vacuum		Atmospheric	
	No Pump	Pump	Pan	Machine
Oil Temperature (°C)	120	120	165	180
Frying Time (s)	240	240	150	40
Heat Oil Initial ($\times 10^3$ J)	2090.25	2090.25	3135.37	3483.75
Heat Oil Again ($\times 10^3$ J)	232.25	232.25	232.25	232.25
Heat of Vaporization ($\times 10^3$ J)	229.87	229.87	220.28	220.28
Energy of Vacuum pump ($\times 10^3$ J)	0.00	115.20	0.00	0.00
Energy Usage per batch ($\times 10^3$ J)	2552.36	2667.56	3587.90	3936.28
Energy Saving/Pan (%)	28.86	25.56	0.00	-9.71
Energy Saving/Machine(%)	35.16	32.23	8.85	0.00

ภายใต้การคำนวณตามสมการดังกล่าวและค่าคงที่ที่ใช้ดังตารางที่ 3-6 พบว่าดังตารางที่ 3-7 ซึ่งแสดงผลการคำนวณดังกล่าวด้วยโปรแกรม Microsoft Excel 97 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานของการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศในระบบที่มีการใช้ปั๊มสุญญากาศและระบบที่มีปั๊มสุญญากาศ การทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศในการทอดด้วยกระทะ และการทอดด้วยเครื่องทอดแบบต่อเนื่อง สามารถแสดงค่าพลังงานที่ใช้ในการทอดต่อครั้งได้ดังตาราง และสามารถแสดงค่าการประหยัดพลังงานของการทอดแต่ละแบบเทียบกับการทอดโดยใช้กระทะ และการทอดโดยใช้เครื่องทอดแบบต่อเนื่องได้ ในการคำนวณนี้จะใช้เวลาการทอดในการคำนวณระหว่างการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศทั้งแบบกระทะและเครื่องทอดแบบต่อเนื่องต่างกัน คือ 240, 150 และ 40 วินาที ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจำเป็นต้องมีการพักเพื่อสะเด็ดน้ำมันก่อนการปรับความดันสุญญากาศปกติ จึงต้องรวมเวลาการทำงานในช่วงเวลาดังกล่าวเข้าไปด้วย และจากการคำนวณพบว่ายังสามารถประหยัดพลังงานที่ใช้ได้มากกว่าการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศถึง 25.65 เปอร์เซ็นต์

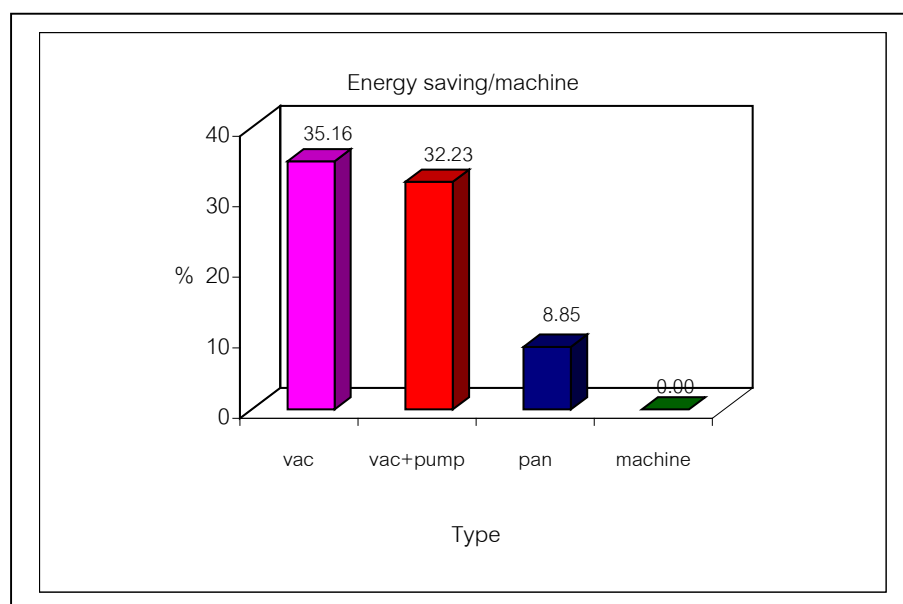


ภาพประกอบที่ 3-27 กราฟแสดงพลังงานที่ใช้ต่อครั้งการทอดแต่ละแบบ

ภาพประกอบที่ 3-27 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในการทอดต่อครั้งของการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศในระบบที่ไม่มีการใช้ปั๊มสุญญากาศ การทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศในระบบที่มีปั๊มสุญญากาศ การทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศด้วยกระทะ และการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศด้วยเครื่องทอดแบบต่อเนื่อง พบว่าการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศด้วยเครื่องทอดแบบต่อเนื่องมีการใช้พลังงานในการทอดผลิตภัณฑ์ต่อครั้งสูงสุด 3936.28 กิโลจูล ขณะที่การทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศในระบบที่ไม่มีการใช้ปั๊มสุญญากาศ การทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศในระบบที่มีปั๊มสุญญากาศ และการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศด้วยกระทะ ใช้พลังงานไป 2552.36, 2667.56 และ 3587.90 กิโลจูล ตามลำดับ ดังนั้นการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศทั้งสองแบบดังกล่าวจึงมีการใช้พลังงานในการทอดต่อครั้งน้อยกว่าการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศทั้งแบบทอดด้วยกระทะและทอดด้วยเครื่องทอดแบบต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 3-28 กราฟแสดงการประหยัดพลังงานในการทอดแต่ละแบบต่อการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศโดยใช้กระทะ



ภาพประกอบที่ 3-29 กราฟแสดงการประหยัดพลังงานในการทอดแต่ละแบบต่อการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศโดยใช้เครื่องทอดแบบต่อเนื่อง

ภาพประกอบที่ 3-28 แสดงการเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานในการทอดต่อครั้งของการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศในระบบที่ไม่มีการใช้บี้มสุญญากาศ การทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศในระบบที่มีบี้มสุญญากาศ และการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศด้วยเครื่องทอดแบบต่อเนื่อง เปรียบเทียบกับการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศด้วยกระทะ และจากภาพประกอบที่ 3-29 เปรียบเทียบการประหยัดพลังงานในการทอดต่อครั้งของการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศในระบบที่ไม่มีการใช้บี้มสุญญากาศ การทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศในระบบที่มีบี้มสุญญากาศ และการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศด้วยกระทะเปรียบเทียบกับทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศด้วยเครื่องทอดแบบต่อเนื่อง พบว่าการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 32.23 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศด้วยกระทะ และสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 25.65 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศด้วยเครื่องทอดแบบต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศสามารถประหยัดพลังงานที่ใช้ในการทอดต่อครั้งได้มากกว่าการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ

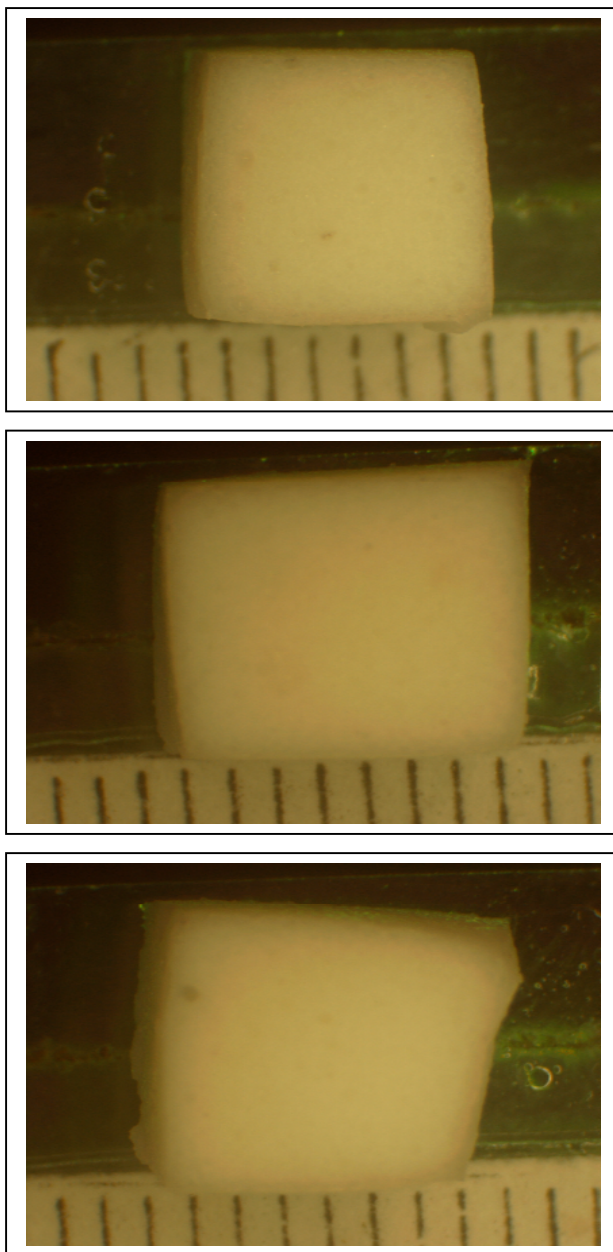
7. โครงสร้างของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

ทำการถ่ายภาพของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาก่อนทอด ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาหลังทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ และผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาหลังทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศด้วยกล้องสเตอริโอ (Stereo Microscope) กำลังขยาย 7 เท่า และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) กำลังขยาย 75 เท่า จากภาพถ่ายด้วยกล้องสเตอริโอของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา พบว่าผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาก่อนทอดมีสีขาวและรูพรุนลักษณะกลมตลอดทั่วทั้งชิ้น ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาหลังการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศจะมีชั้นผิวหนังก (Crust) สีเหลืองเกิดขึ้นที่บริเวณขอบด้านบนและด้านล่างและมีรูพรุนทั่วทั้งชิ้น โดยรูพรุนทั่วไปมีลักษณะเป็นวงรี ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาหลังการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีชั้นผิวหนังกสีเหลืองอ่อนกว่าผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ และมีรูพรุนลักษณะกลมทั่วทั้งชิ้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-30, ภาพประกอบที่ 3-31 และภาพประกอบที่ 3-32

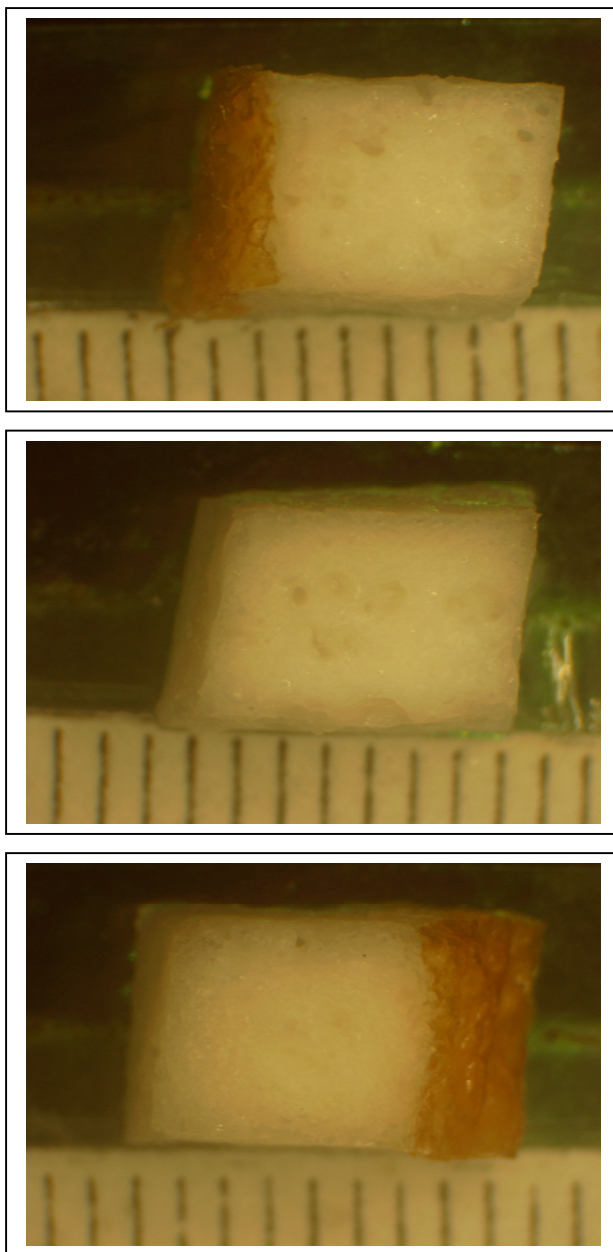
รูพรุนที่เปลี่ยนแปลงไปของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศน่าจะเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอดสูงซึ่งน่าจะมีผลต่อการทำลายโครงสร้างโปรตีนของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา และความดันบรรยากาศเนื่องจากเมื่อขณะทำการทอดการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำมันที่ใช้ทอดสู่ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาและสู่ความชื้นภายในอาหารนั้น จะทำให้ความชื้นภายในอาหารเปลี่ยนแปลงสถานะจากสถานะของเหลวกลายเป็นไอ และขยายตัวอยู่ภายในช่องว่าง

หรือรูปพุนภายในอาหาร แรงดันภายในที่เกิดจากแรงดันไอที่เพิ่มขึ้นนั้นจะพยายามขับดันผนังรูปพุนของอาหารให้ขยายตัว หากแต่แรงดันภายนอกที่สูงกว่าแรงดันภายในของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาในขณะที่ทำการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ จะสร้างความต้านทานให้เกิดแก๊ซในผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาในขณะที่ทำการทอด จึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ในขณะที่ทำการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้นอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด แรงดันไอของความชื้นที่เปลี่ยนสถานะ และแรงดันภายนอกต่ำกว่าในการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ นอกจากนี้ความแตกต่างกันของแรงดันภายนอกและแรงดันภายในในระหว่างการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศก็มีค่าน้อยกว่าความแตกต่างของแรงดันภายนอกและแรงดันภายในในระหว่างการทอดภายในสภาวะบรรยากาศด้วย ซึ่งปัจจัยดังกล่าวน่าจะเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศคงลักษณะทางโครงสร้างของรูปพุนภายในได้ดีกว่าการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ

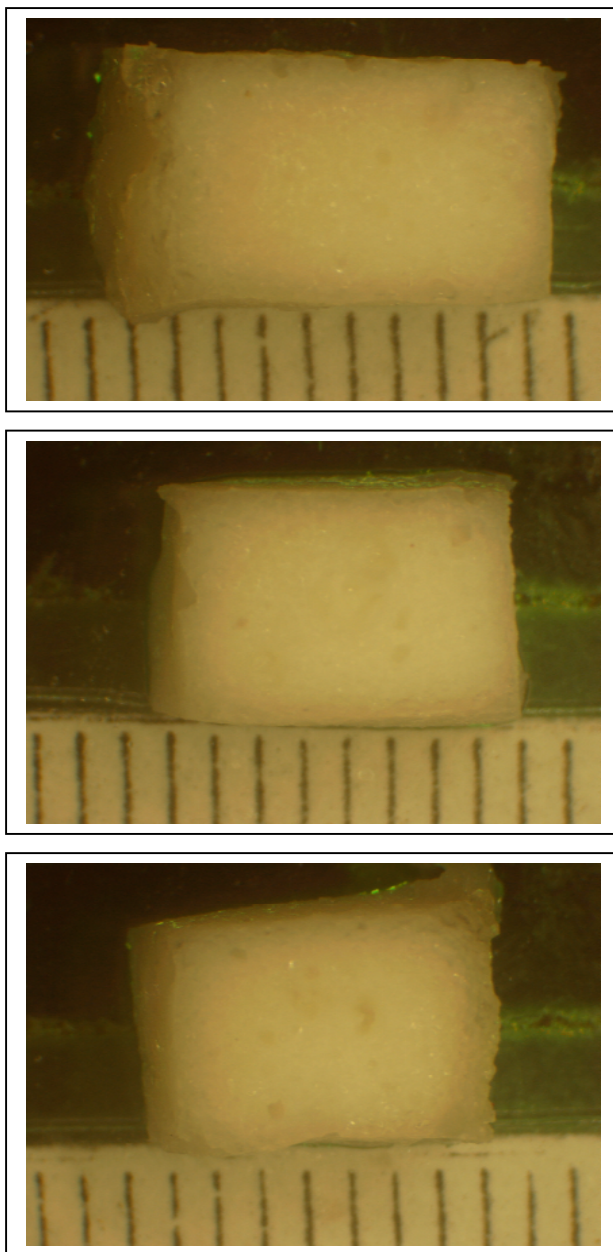
จากการสังเกตพบว่ารูปพุนที่กระจายตัวอยู่ทั่วไปบนชิ้นผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาภายหลังการทอดทั้งภายใต้สภาวะบรรยากาศ และภายใต้สภาวะสุญญากาศ สามารถสังเกตเห็นได้ง่ายมากขึ้นกว่าในชิ้นผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาก่อนการทอด เนื่องด้วยขนาดรูปพุนที่ขยายกว้างขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการขยายตัวของผนังรูปพุนของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาเพราะแรงดันไอน้ำภายในรูปพุน



ภาพประกอบที่ 3-30 ภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ถ่ายด้วยกล้องสเตอริโอ (Stereo Microscope) ก่อนการทอด กำลังขยาย 7 เท่า ส่วนบน, ส่วนกลาง และส่วนล่าง เรียงลำดับจากบนลงล่างตามลำดับ

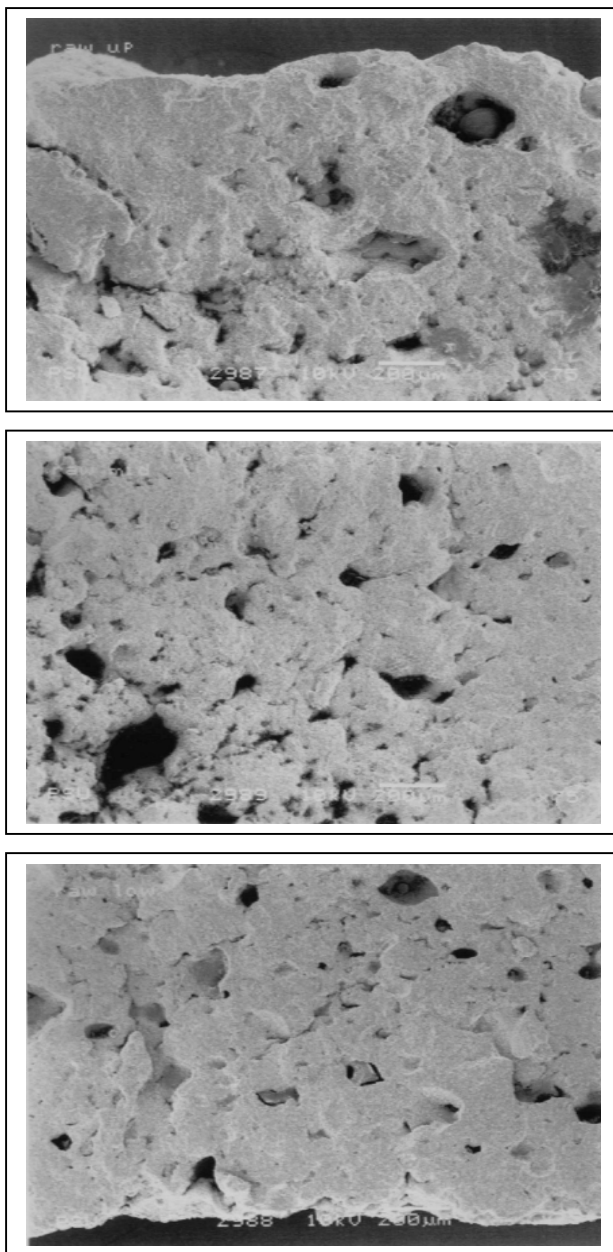


ภาพประกอบที่ 3-31 ภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ถ่ายด้วยกล้องสเตอริโอ (Stereo Microscope) หลังทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ (ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด 165 องศาเซลเซียส) กำลังขยาย 75 เท่า ส่วนบน, ส่วนกลาง และส่วนล่าง เรียงลำดับจากบนลงล่างตามลำดับ

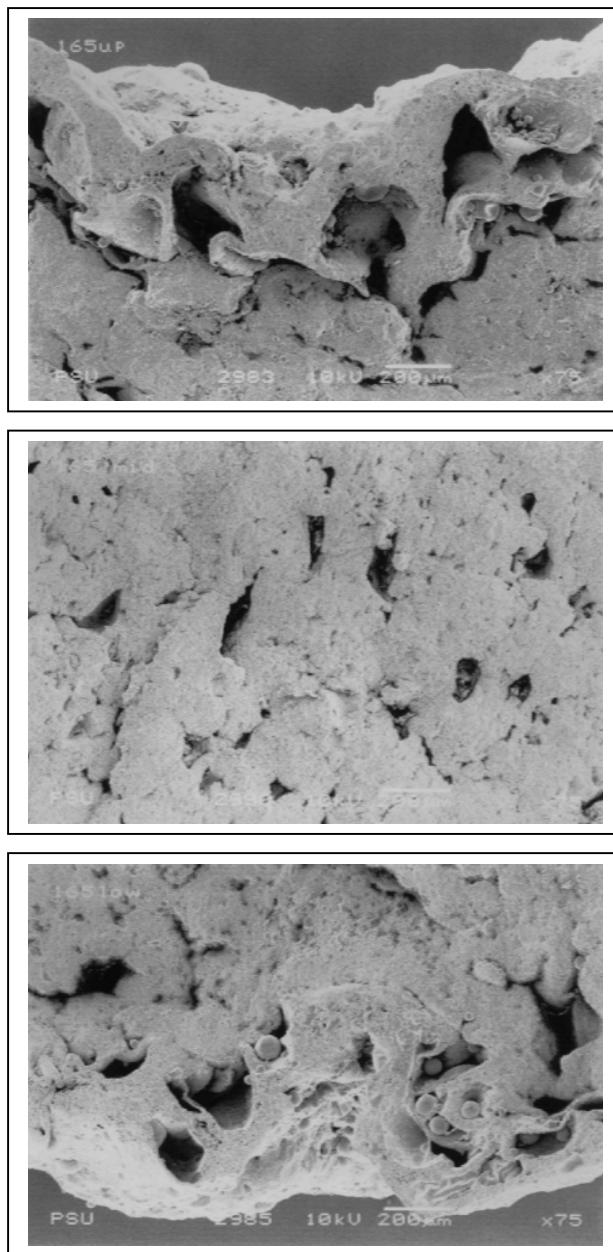


ภาพประกอบที่ 3-32 ภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ถ่ายด้วยกล้องสเตอริโอ (Stereo Microscope) หลังทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (ความดันสุญญากาศ 60 เซนติเมตรปรอท อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด 120 องศาเซลเซียส) กำลังขยาย 75 เท่า ส่วนบน, ส่วนกลาง และ ส่วนล่าง เรียงลำดับจากบนลงล่างตามลำดับ

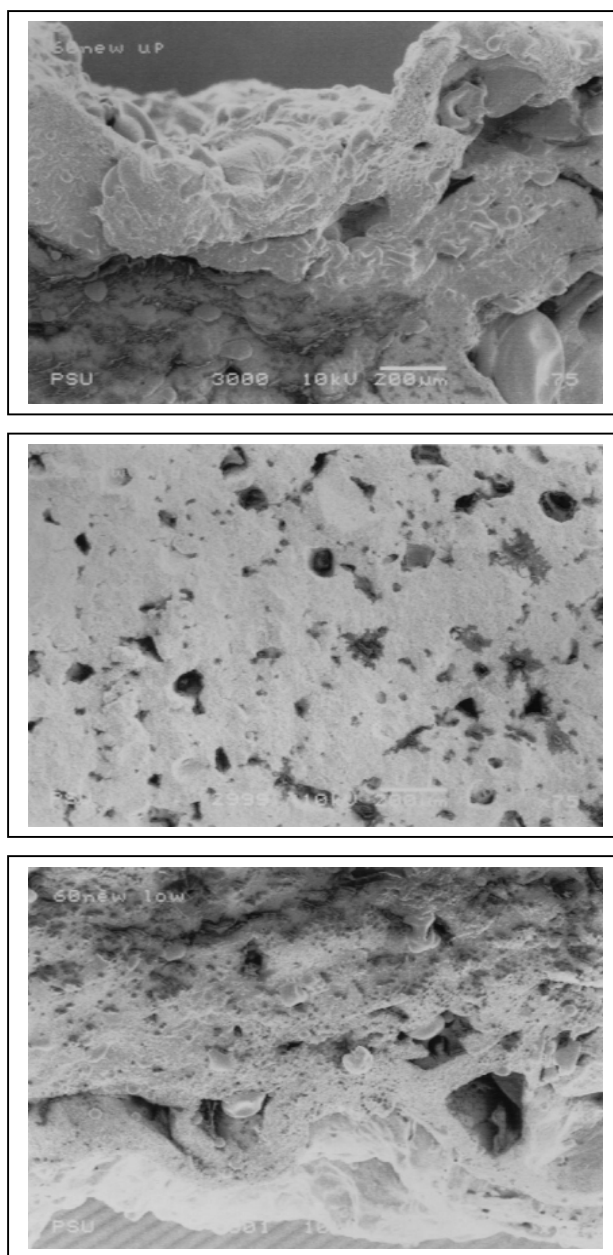
จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) กำลังขยาย 75 เท่า ของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ก่อนทอด ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาหลังทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ และผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาหลังทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-33, ภาพประกอบที่ 3-34 และภาพประกอบที่ 3-35 พบว่า ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ก่อนทอดนั้น มีรูพรุนขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้น ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา หลังการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศจะมีชั้นผิวหนัง (Crust) เกิดขึ้นที่บริเวณขอบด้านบนและด้านล่างแยกชั้นออกจากเนื้อของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาอย่างชัดเจน มีรูพรุนลักษณะวงรีและรูตีบแคบกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้น ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา หลังการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีชั้นผิวหนังทั้งขอบด้านบนและด้านล่าง ซึ่งผิวหนังดังกล่าวมีความชัดเจนของการแยกชั้นออกจากเนื้อผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาน้อยกว่าผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ และมีรูพรุนลักษณะกลมคล้ายกับผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ก่อนทอดมากกว่ากระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้น เป็นเพราะเมื่อขณะทำการทอดและหลังการทอดเสร็จสิ้นประมาณ 6 วินาที จะเกิดการบวมตัวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาทั่วทั้งชิ้น อันเนื่องมาจากการกลายเป็นไอของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ซึ่งไม่สามารถแพร่ผ่านชั้นผิวหนังที่เกิดขึ้นเมื่อบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาได้รับความร้อนได้ ใอน้ำดังกล่าวจึงถูกกักอยู่ระหว่างผิวหนังและเนื้อของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา แรงดันที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้รูพรุนที่กระจายอยู่ทั่วไปทั้งชิ้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาถูกบีบให้ตีบแคบลง และทำให้เกิดการแยกชั้นของผิวหนังกับเนื้อของผลิตภัณฑ์อย่างชัดเจนของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ อันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงกว่าของน้ำมันที่ใช้ในการทอดซึ่งมีผลต่อแรงดันของไอน้ำดังกล่าว



ภาพประกอบที่ 3-33 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) ตัดขวางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาก่อนการทอด กำลังขยาย 75 เท่า ส่วนบน, ส่วนกลาง และส่วนล่าง เรียงลำดับจากบนลงล่างตามลำดับ



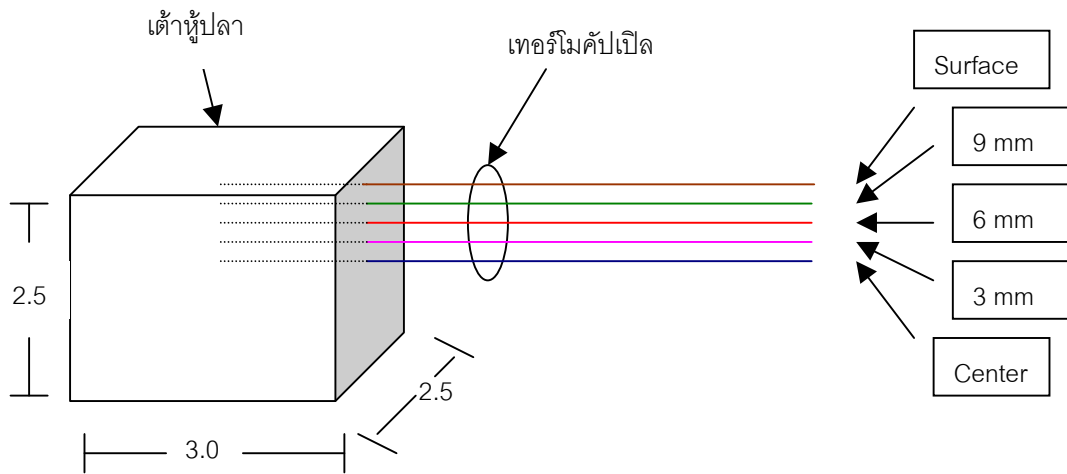
ภาพประกอบที่ 3-34 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) ตัดขวางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาหลังทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ (ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด 165 องศาเซลเซียส) กำลังขยาย 75 เท่า ส่วนบน, ส่วนกลาง และส่วนล่าง เรียงลำดับจากบนลงล่างตามลำดับ



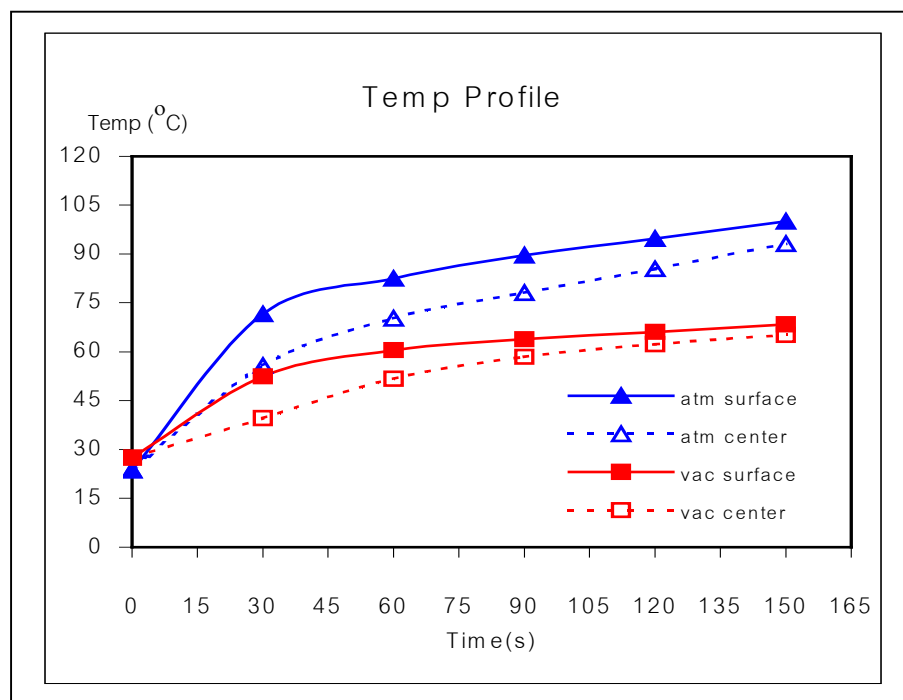
ภาพประกอบที่ 3-35 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) ตัดขวางของผลิตภัณฑ์ได้น้ำปลาหลังทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ (ความดันสุญญากาศ 60 เซนติเมตรปรอทอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด 120 องศาเซลเซียส) กำลังขยาย 75 เท่า ส่วนบน, ส่วนกลาง และส่วนล่าง เรียงลำดับจากบนลงล่างตามลำดับ

8. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในและอุณหภูมิที่บริเวณใต้ผิวหนังลึกลงไปจากผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา 1 มิลลิเมตร ของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในและอุณหภูมิที่บริเวณใต้ผิวหนังลึกลงไปจากผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา 1 มิลลิเมตรของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา จากภาพประกอบที่ 3-37 พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่แกนกลางและบริเวณใต้ผิวหนังลึกลงไปจากผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา 1 มิลลิเมตร ทั้งที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศอย่างรวดเร็ว ในช่วง 30 วินาทีแรกของการทอด และอัตราการเพิ่มขึ้นจะช้าลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งสิ้นสุดการทอด การเปลี่ยนแปลงของกราฟอุณหภูมิที่ได้นั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นทั้งกราฟที่ได้จากอุณหภูมิแกนกลางและอุณหภูมิที่บริเวณใต้ผิวหนังลึกลงไปจากผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา 1 มิลลิเมตรรวมไปถึงทั้งสภาวะการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและภายใต้สภาวะบรรยากาศ โดยสำหรับการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศนั้น อุณหภูมิภายในและอุณหภูมิที่บริเวณใต้ผิวหนังลึกลงไปจากผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา 1 มิลลิเมตรของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิภายในและอุณหภูมิที่บริเวณใต้ผิวหนังลึกลงไปจากผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา 1 มิลลิเมตรของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ อุณหภูมิเริ่มต้นที่บริเวณใต้ผิวหนังลึกลงไปจากผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา 1 มิลลิเมตรและอุณหภูมิเริ่มต้นที่แกนกลางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาก่อนทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศอยู่ที่ 27 องศาเซลเซียสอุณหภูมิเริ่มต้นที่บริเวณใต้ผิวหนังลึกลงไปจากผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา 1 มิลลิเมตรและอุณหภูมิเริ่มต้นที่แกนกลางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาก่อนทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศอยู่ที่ 24 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณใต้ผิวหนังลึกลงไปจากผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา 1 มิลลิเมตรและที่แกนกลางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศอยู่ที่ 68 และ 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณใต้ผิวหนังลึกลงไปจากผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา 1 มิลลิเมตรและที่แกนกลางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศอยู่ที่ 100 และ 93 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

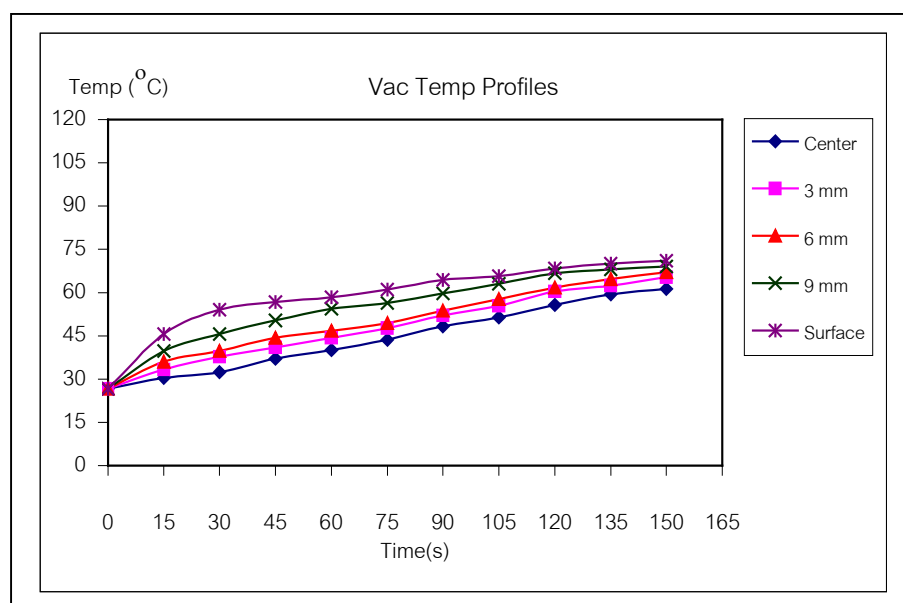


ภาพประกอบที่ 3-36 ภาพแสดงการวัดอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ตำแหน่งต่าง ๆ

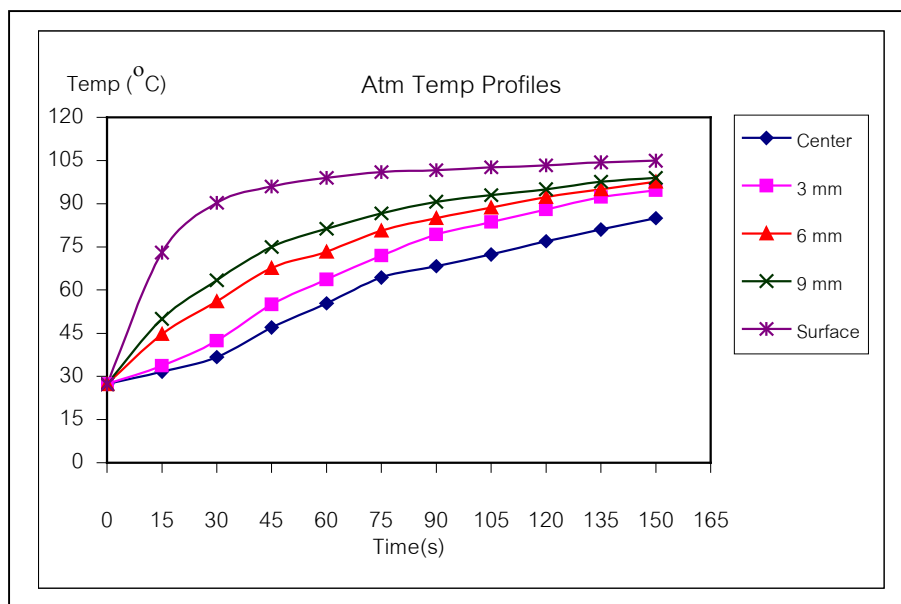


ภาพประกอบที่ 3-37 กราฟแสดงอุณหภูมิที่ผิวและแกนกลางผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศและสภาวะสุญญากาศ

เมื่อทำการวัดค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา โดยการแบ่งกำหนดจุดดังกล่าว 5 จุด ซึ่งแบ่งระยะจากผิวหนังของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาถึงจุดศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา ได้แก่ จุดที่หนึ่งคือจุดที่ห่างจากชั้นผิวหนังเข้าสู่ศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร จุดที่สองคือจุดที่ห่างจากจุดแรกเข้าสู่ศูนย์กลาง 2.3 มิลลิเมตร จุดที่สามและจุดที่สี่คือจุดที่ห่างจากจุดที่สองและจุดที่สามเข้าสู่ศูนย์กลางตามลำดับ 2.3 มิลลิเมตร และจุดที่ห้าจุดสุดท้ายคือจุดที่ศูนย์กลางชั้นผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาหรือห่างจากผิวผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาเข้าสู่ศูนย์กลาง 12.5 มิลลิเมตร โดยทุกจุดอยู่ตามแนวศูนย์กลางผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา พบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ นั้นมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 วินาทีแรกของการทอดและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนสิ้นสุดการทอดเช่นเดียวกันทุกจุดทั้งผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศและผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศเช่นเดียวกันในการทดลองหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในและอุณหภูมิที่บริเวณใต้ผิวหนังลึกลงไปจากผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา 1 มิลลิเมตรของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา จากภาพประกอบที่ 3-37 ที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ระดับของอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้น จะมีค่าน้อยกว่าของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศเมื่อเปรียบเทียบที่จุดเดียวกัน และมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทอดทั้งสองสภาวะ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3-38 และภาพประกอบที่ 3-39



ภาพประกอบที่ 3-38 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ



ภาพประกอบที่ 3-39 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ

จากภาพประกอบที่ 3-38 และภาพประกอบที่ 3-39 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน หากแต่ระดับของอุณหภูมินั้นต่างกัน ดังนั้นแสดงว่าการถ่ายโอนความร้อนของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศนั้นน่าจะมีรูปแบบเดียวกัน คงแตกต่างกันเพียงสภาวะขอบเขต (Boundary Condition) ของอุณหภูมิที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป โดยที่สภาวะขอบเขตในการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีค่าต่ำกว่าสภาวะขอบเขตที่ใช้ในการทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ สภาวะขอบเขตดังกล่าวได้แก่ อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอด และอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา โดยอุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอดผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้นอยู่ที่ 120 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิน้ำมันที่ใช้ในการทอดผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศนั้นอยู่ที่ 165 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความแตกต่างกันมาก หากแต่มีอุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาเริ่มต้นก่อนทอดใกล้เคียงกัน คือ 26 องศาเซลเซียส สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ และ 27 องศาเซลเซียส สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลการทดลองในส่วนนี้นั้น สามารถคาดการณ์ได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ควรจะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิ

ที่เกิดจากการถ่ายโอนความร้อนเป็นระดับชั้นของอุณหภูมิจากสูงสุดที่ผิวของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา สู่อุณหภูมิต่ำสุดที่แกนกลางของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลา และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำมาจะ แสดงให้เห็นการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นระดับชั้นได้ดีกว่ากราฟในภาพประกอบที่ 3-39 และ ภาพประกอบที่ 3-40 ซึ่งจะทำให้การศึกษาต่อไปมีความสะดวกรวดเร็ว และเข้าใจง่ายขึ้น

9. การทดสอบการยอมรับผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศของผู้ บริโภค

9.1 ลักษณะทางประชากรศาสตร์ของผู้บริโภค

ลักษณะทางประชากรศาสตร์ของผู้บริโภคที่ใช้ในการทดสอบผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นบุคคล ภายในภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ จำนวนในการทดสอบครั้งที่ 1 คือ 41 คน และจำนวนในการทดสอบครั้งที่ 2 คือ 28 คน ผู้ บริโภคจำนวนดังกล่าว ส่วนใหญ่เป็นนักศึกษาซึ่งกำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรี บุคลากรภายในภาควิชา รวมไปถึงคณาจารย์ด้วย มีอายุประมาณอยู่ในช่วง 20-57 ปี

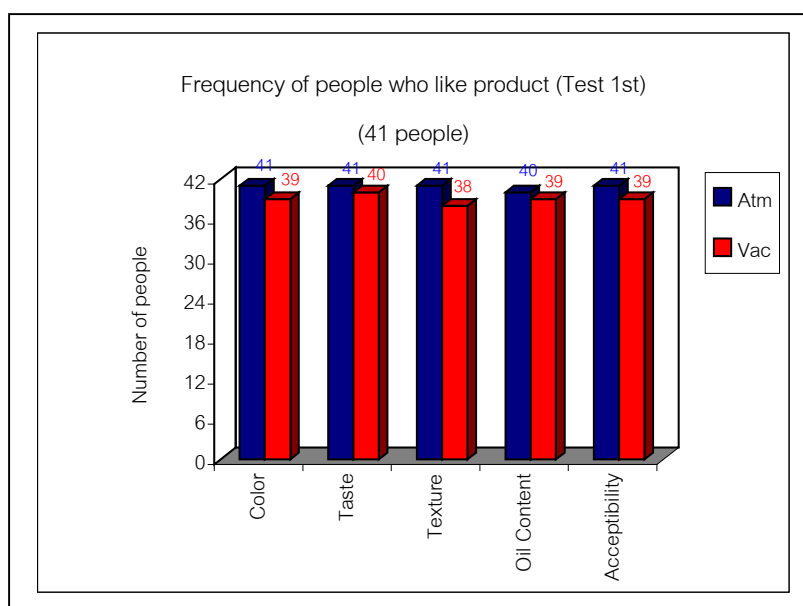
ตารางที่ 3-8 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบลักษณะทางประชากรในการทดสอบชิม ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

ลักษณะประชากร	เปอร์เซ็นต์	
	การทดสอบครั้งที่ 1	การทดสอบครั้งที่ 2
เพศชาย	63.41	46.23
เพศหญิง	36.59	53.57
นักศึกษา	87.80	100
บุคลากรและอาจารย์	12.20	0
ช่วงอายุ 20-25 ปี	90.24	100
ช่วงอายุมากกว่า 25-57 ปี	9.76	0

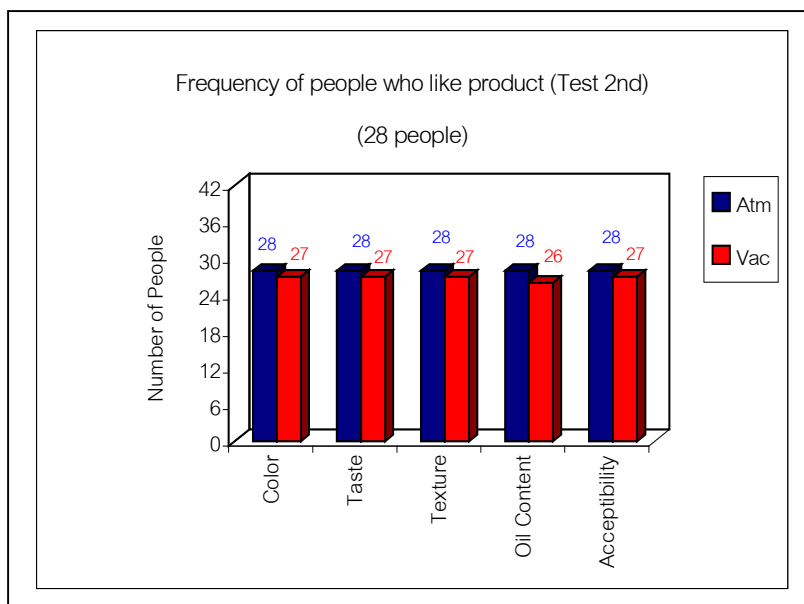
จากการสังเกตพฤติกรรมการรับประทาน พบว่าผู้บริโภคให้ความสำคัญกับลักษณะ ปรากฏ อันได้แก่ สีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลามากที่สุด โดยผู้บริโภคส่วนใหญ่ จะมีเล็กรับประทาน ผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาสีเข้มกว่าก่อน 68.29, 53.57 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการทดสอบครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ตามลำดับ

9.2 การยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

ผลการทดสอบความชอบผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศเปรียบเทียบกับทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศ โดยวิธี Face Scale Test จำนวน 2 ครั้ง ดังแสดงในภาพประกอบ 3-40 และภาพประกอบ 3-41 พบว่า สี (Color) รสชาติ (Taste) เนื้อสัมผัส (Texture) ปริมาณน้ำมัน (Oil Content) และความชอบรวม (Acceptability) ของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศมีค่าความชอบสูงกว่าของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ หากแต่ค่าเฉลี่ยต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ อันได้แก่ ค่าสี รสชาติ เนื้อสัมผัส ปริมาณน้ำมัน และความชอบรวมในการทดสอบครั้งที่ 2 นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจากการทดสอบในครั้งแรก ในการทดสอบครั้งที่ 2 ค่าความชอบรวมของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศและสุญญากาศมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าค่าความชอบรวมของผลิตภัณฑ์ทั้งสองในการทดสอบครั้งแรก โดยมีค่าเฉลี่ยของ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส ปริมาณน้ำมัน และความชอบรวม ในการทดสอบครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 3-9



ภาพประกอบ 3-40 กราฟแสดงผลการทดสอบชิม ครั้งที่ 1



ภาพประกอบ 3-41 กราฟแสดงผลการทดสอบชิม ครั้งที่ 2

ตารางที่ 3-9 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยเปรียบเทียบการทดสอบชิม ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2

Average	Color		Taste		Texture		Oil Content		Acceptability	
	atm	vac	atm	vac	atm	vac	atm	vac	atm	vac
Test 1st	6.02	4.22	5.90	4.66	5.80	4.34	4.93	4.44	5.78	4.54
Test 2 nd	6.04	4.79	5.36	5.04	5.64	5.29	5.11	4.46	5.64	5.04

เมื่อพิจารณาความถี่ของแต่ละปัจจัย พบว่า สีของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศมีค่าต่ำกว่าสีของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศมากจากการทดสอบทั้ง 2 ครั้ง แม้ว่าในการทดสอบครั้งที่ 2 ค่าเฉลี่ยสีของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีการปรับตัวสูงขึ้นก็ตาม โดยความถี่ส่วนใหญ่ของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศอยู่ในระดับชอบน้อยถึงชอบปานกลาง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศอยู่ในระดับชอบมากถึงชอบมากที่สุด ส่วนปัจจัยด้านความชอบรวมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศและผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศนั้น อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมากสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศทั้ง 2 ครั้ง อยู่ในระดับชอบน้อยถึงชอบปานกลาง และชอบปานกลางถึงชอบมากสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้

สภาวะสุญญากาศ ในขณะที่ค่าปัจจัยปริมาณน้ำมันของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศทั้งสองครั้งยังคงอยู่ในระดับชอบน้อยถึงชอบปานกลางทั้งสองครั้งการทดสอบ ต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศที่มีการปรับตัวสูงขึ้นจากระดับชอบน้อยถึงชอบปานกลางในการทดสอบครั้งที่ 1 เป็นชอบปานกลางถึงชอบมากในครั้งที่ 2 สำหรับค่าปัจจัยรสชาติและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศมีการปรับตัวสูงขึ้นจากระดับชอบน้อยถึงชอบปานกลางในการทดสอบครั้งที่ 1 เป็นชอบปานกลางถึงชอบมากในการทดสอบครั้งที่ 2 เช่นเดียวกัน ในขณะที่ค่าปัจจัยรสชาติ และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะบรรยากาศนั้นอยู่ในระดับความชอบปานกลางถึงชอบมากทั้ง 2 ครั้ง ของการทดสอบ

จากการทดลองพบว่าปัจจัยสีน่าจะมีผลต่อปัจจัยด้านอื่น ได้แก่ รสชาติ เนื้อสัมผัส ปริมาณน้ำมันและความชอบรวม ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์ที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศน่าจะมีผลทำให้ค่าความชอบรวมและค่าปัจจัยอื่นเพิ่มขึ้นไปด้วย การอบหรือการนึ่งซ้ำภายหลังจากทอดอาจเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งทำให้สีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาเข้มขึ้น เนื่องด้วยในกระบวนการของโรงงานมีการนึ่งผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาซ้ำอีกครั้งภายหลังจากทอดแล้ว วิธีการดังกล่าวจึงอาจนำมาใช้เพิ่มความเข้มสีของผลิตภัณฑ์เต้าหู้ปลาที่ทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศได้ และเป็นการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีค่าความชอบเพิ่มสูงขึ้นได้อีกด้วย