บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการศึกษาหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการกำจัดกลิ่น ส่วนที่สองเป็นการทดสอบความเสถียรของน้ำมันถั่วเหลืองที่ได้จากการศึกษาในส่วนแรกโดยการทอดอาหาร (frying stability test)

4.1 การศึกษาหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการกำจัดกลิ่น

4.1.1 การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันถั่วเหลือง (BSO) เริ่มต้นที่ออกจากกระบวนการฟอกสี ก่อนเข้ากระบวนการกำจัดกลิ่น

ผลการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันถั่วเหลือง (BSO) แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณภาพของน้ำมันถั่วเหลืองเริ่มต้น (BSO) ก่อนเข้ากระบวนการกำจัดกลิ่น

รายการวิเคราะห์	ผลการวิเคราะห์*
กรดไขมันชนิดทรานส์ (%)	0.14 $\pm$ 0.01
โทโคฟรอลทั้งหมด (ppm)	1,167.42 $\pm$ 30.95
กรดไขมันอิสระ (คิดเป็น % ของกรดโอเลอิก)	0.14 $\pm$ 0.02
สีเหลือง (cell 5 ¼") (Yellow; Y)	52 $\pm$ 3.38
สีแดง (cell 5 ¼") (Red; R)	2.3 $\pm$ 0.29

* ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากการวิเคราะห์คุณภาพ พบว่า BSO มีปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์อยู่น้อยเท่ากับ 0.14 % เนื่องจากในกระบวนการฟอกสีมีการให้ความร้อนแก่น้ำมันไม่สูงมากนักใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 95-110 °C (Taylor, 2005) ซึ่งกรดไขมันชนิดทรานส์จะเกิดขึ้นน้อยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 220 °C จะเกิดขึ้นมากที่อุณหภูมิระหว่าง 220-240 °C และจะเกิดขึ้นมากที่สุดที่อุณหภูมิสูงกว่า 240 °C (Kellens และ De Greyt, 2000) BSO มีปริมาณโทโคฟีรอลทั้งหมดเท่ากับ 1,167.42 ppm ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับปริมาณโทโคฟีรอลที่มีอยู่ในน้ำมันถั่วเหลืองดิบซึ่งมีอยู่เท่ากับ 1,200 ppm (Medina-Juarez และคณะ, 2000) BSO มีปริมาณ

กรดไขมันอิสระเท่ากับ 0.14 % ปริมาณกรดไขมันอิสระส่วนหนึ่งมาจากปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำมันจากขั้นตอนทำน้ำมันให้เป็นกลาง และอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากความเป็นกรดที่เหลืออยู่ในผงฟอกสีและภาวะของกระบวนการฟอกสีเป็นสาเหตุให้น้ำมัน BSO มีปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยา acid-catalyzed hydrolysis ของพันธะเอสเทอร์ (Taylor, 2005) BSO มีค่าสี Y เท่ากับ 52 และค่าสี R เท่ากับ 2.3 การฟอกสีเป็นกระบวนการลดรงควัตถุที่ให้สีในน้ำมันซึ่งส่วนใหญ่ คือ ฟีโอไฟติน (pheophytins) และแคโรทีนอยด์ต่างๆ โดยการใช้ผงฟอกสี เป็นผลให้ น้ำมันใสขึ้น มีสีลดลง และมีความเสถียรมากขึ้น และในการฟอกสีน้ำมันถั่วเหลืองจะช่วยให้รสชาติของน้ำมันดีขึ้นด้วย การตรวจวัดสีของแคโรทีนอยด์ในน้ำมันพืชสามารถวัดได้โดยใช้เครื่อง Lovibond รายงานเป็นค่าสีเหลือง (Y) และค่าสีแดง (R) การที่น้ำมัน BSO มีค่าสีแดงต่ำ ทำให้มั่นใจได้ว่าน้ำมันที่ออกจากหอกำจัดกลิ่นจะมีค่าสีแดงต่ำด้วย (Taylor, 2005)

4.1.2 การทดลองปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการกำจัดกลิ่น และผลการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันถั่วเหลืองที่ออกจากกระบวนการกำจัดกลิ่น (DSO)

เมื่อปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและเวลาใน deodorizing tray โดยกำหนดอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่น (deodorizing temperature) ที่อุณหภูมิ 235 °C 240 °C และ 245 °C และในแต่ละอุณหภูมิปรับเปลี่ยนเวลาในการกำจัดกลิ่น (deodorizing time) นาน 103 นาที 124 นาที และ 155 นาที จากการทดลองพบว่าน้ำมัน DSO ที่ออกจากกระบวนการกำจัดกลิ่นทุกภาวะจะมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐาน CODEX Stan 210 (1999) โดยน้ำมันทุกภาวะจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระเท่ากับ 0.03 % ค่าเพอร์ออกไซด์เท่ากับ 0 meq./kg.oil ความชื้นและสารที่ระเหยได้เท่ากับ 0.01 % ค่าสีเหลือง (Y) อยู่ในช่วง 3-4 ค่าสีแดง (R) เท่ากับ 0.3 สำหรับกลิ่นและรสชาติของน้ำมันถั่วเหลืองอยู่ที่ระดับ 5 คือ ไม่มีกลิ่นหืนและไม่มีรสชาติ (ตารางที่ 4.2) ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับที่ Gupta (2004) รายงานว่ากรดไขมันอิสระจะถูกกำจัดในกระบวนการกำจัดกลิ่น น้ำมันที่ถูกทำให้บริสุทธิ์อย่างเพียงพอต้องมีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำๆ (0.02-0.04%) ถ้าน้ำมันที่ออกจากหอกำจัดกลิ่นใหม่ๆ มีปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่า 0.05 % แสดงว่ากระบวนการกำจัดกลิ่นไม่สมบูรณ์ และน้ำมันที่ออกจากหอกำจัดกลิ่นใหม่ๆ จะต้องมีค่าเพอร์ออกไซด์เป็น 0 meq./kg ถ้าค่าเพอร์ออกไซด์สูงกว่า 0 meq./kg แสดงว่าการสร้างสุญญากาศในหอกำจัดกลิ่นไม่สมบูรณ์ ถ้าสร้างสุญญากาศในหอกำจัดกลิ่นได้ดีจะช่วยกำจัดออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำมันออกไปจากน้ำมันในขั้นตอนการไล่อากาศด้วย สำหรับสีของน้ำมัน

จะต้องเป็นลักษณะเฉพาะของน้ำมันแต่ละชนิด และน้ำมันจะต้องไม่มีรสชาติและไม่มีกลิ่นผิดปกติ ซึ่งสอดคล้องกับที่ De Greyt และ Kellens (2005) รายงานว่าน้ำมันทุกชนิดที่ออกจากกระบวนการกำจัดกลิ่นจะตั้งเป้าหมายให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระเหลืออยู่ในน้ำมันระหว่าง 0.03-0.05 % เนื่องจากกรดไขมันอิสระมีค่า volatility ต่ำ ถ้ากำจัดกรดไขมันอิสระออกจากน้ำมันได้ดีในระหว่างกระบวนการกำจัดกลิ่น แสดงว่าสารอื่นๆ ที่ระเหยได้ง่ายกว่ากรดไขมันอิสระจะถูกกำจัดออกไปจากน้ำมันได้ดีด้วย การกำจัดกลิ่นและรสชาติที่ไม่ดีออกจากน้ำมันจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณกรดไขมันอิสระที่ลดลงด้วย โดยถ้าปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำมันมีค่าอยู่ระหว่าง 0.03-0.05 % จะทำให้ได้น้ำมันถั่วเหลืองที่ไม่มีกลิ่นหืนและไม่มีรสชาติ สำหรับสีเหลืองและสีแดงที่เหลืออยู่ในน้ำมันถั่วเหลืองที่ออกจากกระบวนการฟอกสีจะถูกกำจัดออกจากน้ำมันในระหว่างกระบวนการกำจัดกลิ่น โดยเกิดการเสื่อมสลายของรงควัตถุเนื่องจากความร้อน (thermal degradation) หรือเรียกว่า heat bleaching ทำให้น้ำมันถั่วเหลืองที่ออกจากกระบวนการกำจัดกลิ่นมีสีเหลืองอ่อน และน้ำมันที่ออกจากกระบวนการกำจัดกลิ่นจะต้องมีปริมาณความชื้นและสารที่ระเหยได้ไม่เกิน 0.05 %

ตารางที่ 4.2 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดกลิ่นต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ ค่าเพอร์ออกไซด์ ความชื้นและสารที่ระเหยได้ สีเหลือง (Y) สีแดง (R) และกลิ่นและรสชาติของ DSO

เวลา (min)	อุณหภูมิ (^{o}C)	กรดไขมัน-อิสระ (%)	ค่าเพอร์-ออกไซด์ (meq./kg)	ความชื้นและสารที่ระเหย-ได้ (%)	สีเหลือง (Y)	สีแดง (R)	กลิ่นและรสชาติ
103	235	0.03±0.01	0±0.00	0.01± 0.01	3±1	0.3±0.0	5
	240	0.03±0.00	0±0.00	0.01± 0.01	3±0	0.3±0.1	5
	245	0.03±0.01	0±0.00	0.01± 0.01	3±0	0.3±0.1	5
124	235	0.03±0.01	0±0.00	0.01± 0.01	3±1	0.3±0.0	5
	240	0.03±0.01	0±0.00	0.01± 0.01	3±1	0.3±0.0	5
	245	0.03±0.00	0±0.00	0.01± 0.01	3±0	0.3±0.0	5
155	235	0.03±0.01	0±0.00	0.01± 0.01	4±1	0.3±0.0	5
	240	0.03±0.00	0±0.00	0.01± 0.01	4±1	0.3±0.1	5
	245	0.03±0.00	0±0.00	0.01± 0.01	4±1	0.3±0.1	5

ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 4.3 น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาและอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นต่างๆ จะมีปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์อยู่ในช่วง 1.11-2.53 % ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Medina-Juarez และคณะ (2000) ที่ศึกษาปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์และปริมาณโทโคฟีรอลของน้ำมันถั่วเหลืองในประเทศเม็กซิโก ซึ่งใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นระหว่าง 240-260 °C โดยเก็บตัวอย่างน้ำมันจากกระบวนการผลิตน้ำมันพืชแบบ physical refining จำนวน 1 โรงงาน และเก็บตัวอย่างน้ำมันจากกระบวนการผลิตแบบ chemical refining จำนวน 17 โรงงาน พบว่าน้ำมันถั่วเหลืองจะมีกรดไขมันชนิดทรานส์ระหว่าง 0.90-2.93 % ใกล้เคียงกับผลที่รายงานในประเทศฝรั่งเศสพบ 0.16-2.99 % และในประเทศเบลเยี่ยมพบ 0.90-3.50 % โดยตัวอย่างน้ำมันจำนวน 72 % จะมีกรดไขมันชนิดทรานส์สูงกว่า 1% สำหรับปริมาณโทโคฟีรอลอยู่ในช่วง 704.54-984.44 ppm ปริมาณของโทโคฟีรอลในน้ำมันถั่วเหลืองจะต้องมีไม่เกิน 1,200 ppm และจะต้องไม่น้อยกว่า 700 ppm ถ้าน้ำมันถั่วเหลืองมีปริมาณโทโคฟีรอลสูงมากกว่า 1,200 ppm จะทำให้น้ำมันถั่วเหลืองเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็วในระหว่างการทอดอาหารเพราะผลิตภัณฑ์บางส่วนที่เกิดจากการสลายตัวของโทโคฟีรอลจะมีสมบัติเป็น prooxidants (Gupta, 2004) และน้ำมันถั่วเหลืองที่ได้จากการทดลองจะมีค่า OSI อยู่ในช่วง 3.82-4.17 ชั่วโมง น้ำมันถั่วเหลืองที่ออกจากกระบวนการกำจัดกลิ่นใหม่ๆ จะต้องมีค่า OSI อยู่ระหว่าง 4.0-4.5 ชั่วโมง ที่ 120 °C (Gupta, 2004) ภาวะที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่น 103 นาที และใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่ 235 °C จะได้น้ำมันถั่วเหลืองที่มีปริมาณโทโคฟีรอลสูงที่สุด คือ 984.44 ppm และมีปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์ต่ำที่สุด คือ 1.11 % และภาวะที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่น 124 นาที และใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่ 235 °C จะได้น้ำมันถั่วเหลืองที่มีปริมาณโทโคฟีรอลสูงเป็นอันดับที่ 2 คือ 947.21 ppm และมีปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์ต่ำเป็นอันดับที่ 2 คือ 1.32 %

เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย โดยพิจารณาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดกลิ่น พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยทั้งสองนี้ส่งผลให้ปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์ในน้ำมันถั่วเหลืองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ไม่พบอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดกลิ่นต่อปริมาณโทโคฟีรอล และค่า OSI ($p > 0.05$) (ตารางที่ 4.3) จึงแยกวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในแต่ละปัจจัยต่อไป

ตารางที่ 4.3 ผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดกลิ่นต่อปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์ โทโคฟีรอลทั้งหมด และ ดัชนีความเสถียรของน้ำมัน DSO

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)	กรดไขมันชนิด-ทรานส์ (%)	โทโคฟีรอลทั้งหมด^{ns} (ppm)	ดัชนีความเสถียรของน้ำมัน (OSI)^{ns} (hrs)
103	235	1.11 ± 0.01 ^{i}	984.44 ± 20.25	4.17 ± 0.11
	240	1.45 ± 0.01 ^{g}	890.25 ± 5.61	4.14 ± 0.01
	245	1.88 ± 0.01 ^{d}	815.43 ± 17.14	4.07 ± 0.03
124	235	1.32 ± 0.01 ^{h}	947.21 ± 3.49	4.17 ± 0.04
	240	1.65 ± 0.01 ^{e}	861.73 ± 13.74	4.07 ± 0.05
	245	2.24 ± 0.01 ^{b}	777.99 ± 1.23	3.97 ± 0.04
155	235	1.54 ± 0.02 ^{f}	862.16 ± 33.03	4.06 ± 0.04
	240	1.99 ± 0.03 ^{c}	817.71 ± 10.41	3.93 ± 0.11
	245	2.53 ± 0.01 ^{a}	704.54 ± 1.23	3.82 ± 0.01

ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a, b, c... ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns ค่าที่ได้แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่น พบว่าอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่ต่างกันส่งผลให้ปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์ โทโคฟีรอล และค่า OSI แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์จะเพิ่มขึ้น ปริมาณโทโคฟีรอล และค่า OSI จะลดลง (ตารางที่ 4.4) และเมื่อพิจารณาผลของเวลาในการกำจัดกลิ่น พบว่าเมื่อใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นที่ต่างกันส่งผลให้ค่าทั้งสามแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อเวลานานขึ้นปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์จะเพิ่มขึ้น ปริมาณโทโคฟีรอล และค่า OSI จะลดลง (ตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดกลิ่นต่อปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์ โทโคฟีรอลทั้งหมด และ ดัชนีความเสถียรของน้ำมัน DSO

อุณหภูมิ (°C)	กรดไขมันชนิดทรานส์ (%)	โทโคฟีรอลทั้งหมด (ppm)	ดัชนีความเสถียรของน้ำมัน (hrs)
235	1.32 ± 0.19 [c]	931.27 ± 57.66 [a]	4.13 ± 0.08 [a]
240	1.70 ± 0.24 [b]	856.56 ± 32.92 [b]	4.05 ± 0.11 [b]
245	2.22 ± 0.28 [a]	765.99 ± 50.84 [c]	3.96 ± 0.11 [c]

ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a, b, c ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.5 ผลของเวลาที่ใช้ในการกำจัดกลิ่นต่อปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์ โทโคฟีรอลทั้งหมด และ ดัชนีความเสถียรของน้ำมัน DSO

เวลา (min)	กรดไขมันชนิดทรานส์ (%)	โทโคฟีรอลทั้งหมด (ppm)	ดัชนีความเสถียรของน้ำมัน (hrs)
103	1.48 ± 0.34 [c]	896.71 ± 74.59 [a]	4.13 ± 0.07 [a]
124	1.74 ± 0.41 [b]	862.31 ± 74.45 [b]	4.07 ± 0.09 [a]
155	2.02 ± 0.43 [a]	794.80 ± 72.48 [c]	3.94 ± 0.12 [b]

ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

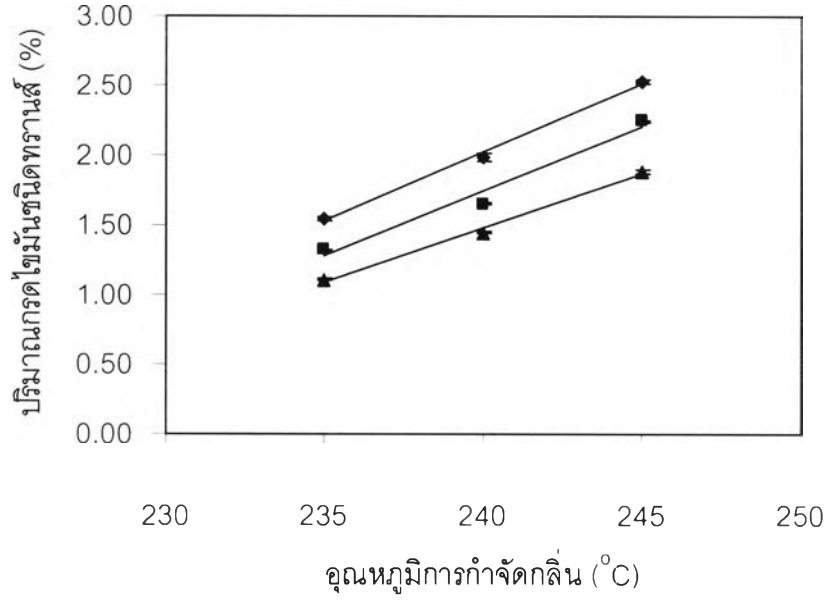
a, b, c ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

การที่น้ำมันถั่วเหลืองมีปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์เพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นสูงขึ้นและใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นนานขึ้น เนื่องจากกรดลิโนเลอิกและกรดลิโนเลนิกซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีอยู่มากในน้ำมันถั่วเหลืองเกิด geometrical isomerization เปลี่ยนจาก cis isomer ไปเป็น trans isomers มากขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด trans isomers คืออุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนในกระบวนการกำจัดกลิ่น (Ferrari และคณะ,1996; Pinkaew, 2002; Mossoba และคณะ, 2005) ซึ่งกรดลิโนเลอิกและกรดลิโนเลนิกมีค่า activation energy สำหรับการเกิด thermal cis-trans-isomeriztion เท่ากับ 178 kJ/mol และ 144-148 kJ/mol ตามลำดับซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ค่อนข้างต่ำ กรดไขมันทั้งสองจึงเปลี่ยนเป็นกรดไขมันชนิด

ทรานส์ได้ง่ายเมื่อใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่สูงขึ้น การเกิด cis-trans-isomeriztion ในระหว่างกระบวนการกำจัดกลิ่นจะเป็นปฏิกิริยาแบบ first order (De Greyt และ Kellens, 2005) การที่ปริมาณโทโคฟีรอลในน้ำมันถั่วเหลืองลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นสูงขึ้นและใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นนานขึ้น เนื่องจากผลของ distillation removal โดยโมเลกุลของโทโคฟีรอลเกิดการระเหยไปพร้อมๆ กับโมเลกุลของกรดไขมันอิสระที่ถูกกำจัดออกจากน้ำมันในกระบวนการกำจัดกลิ่น หรือเป็นผลจากการที่โทโคฟีรอลเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อน (thermal degradation) โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อ distillation losses คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดกลิ่น ความดัน และปริมาณ stripping steam (Medina-Juarez และคณะ, 2000) การระเหยเป็นไอของโทโคฟีรอลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันไอ (vapor pressure) ของโทโคฟีรอลเพิ่มขึ้น โดยความดันไอของโทโคฟีรอลจะเพิ่มขึ้นถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดกลิ่นเพิ่มขึ้นตามสมการความสัมพันธ์ของ vapor pressure-temperature ของ Antoine ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดกลิ่นต่ำลงค่าความดันไอของโทโคฟีรอลจะต่ำลง การระเหยกลายเป็นไอของโทโคฟีรอลจะลดลงโทโคฟีรอลจะเหลืออยู่ในน้ำมันมากขึ้น (De Greyt และ Kellens, 2005) ส่วนการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของโทโคฟีรอลขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการกำจัดกลิ่น และการใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่สูงกว่า 240 °C ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 240 °C จะสูญเสียโทโคฟีรอลโดยการระเหยเป็นไอระหว่างกระบวนการ distillation (Medina-Juarez และคณะ, 2000) การที่น้ำมันถั่วเหลืองมีค่า OSI ลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นสูงขึ้นและใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นนานขึ้น เนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่สูงและใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเป็นเวลานานจะทำให้ปริมาณโทโคฟีรอลในน้ำมันถั่วเหลืองเหลืออยู่น้อยลงจึงทำให้ความเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันถั่วเหลืองลดลงตามไปด้วย (Pokorny และ Parkanyiova, 2005)

4.1.3 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่มีต่อปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์ที่เกิดขึ้นในน้ำมันถั่วเหลือง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์กับอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่น ที่เวลาในการกำจัดกลิ่นต่างๆ จากการใช้ Regression Analysis จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์กับอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่น ที่เวลาในการกำจัดกลิ่นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.1



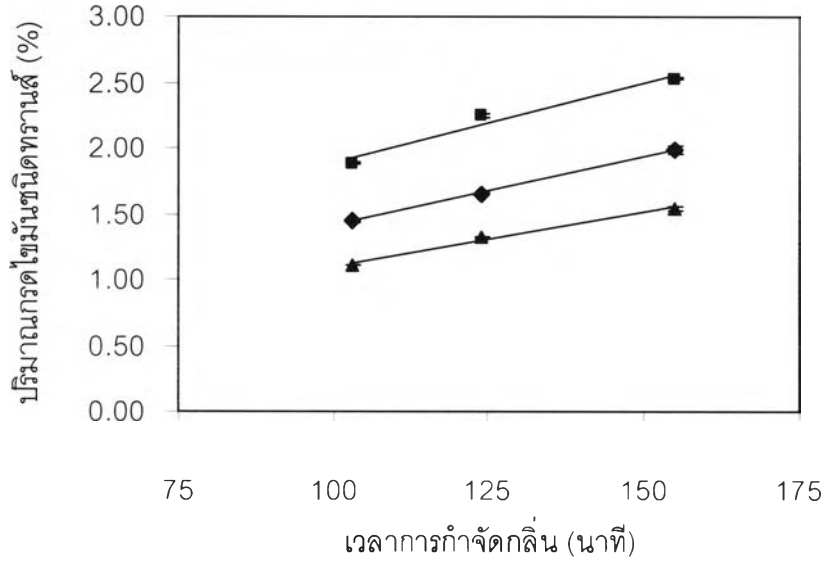
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์กับอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่เวลาในการกำจัดกลิ่นต่างๆ

น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 103 นาที
สมการเส้นตรง $y = 0.0777x - 17.161$
$r^2 = 0.9949$

น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 124 นาที
สมการเส้นตรง $y = 0.0927x - 20.502$
$r^2 = 0.9757$

น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 155 นาที
สมการเส้นตรง $y = 0.0987x - 21.660$
$r^2 = 0.9966$

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์กับเวลาในการกำจัดกลิ่น ที่อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นต่างๆ จากการใช้ Regression Analysis จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์กับเวลาในการกำจัดกลิ่น ที่อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์กับเวลาในการกำจัดกลิ่นที่อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นต่างๆ

น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 235 °C
สมการเส้นตรง y = 0.0083x + 0.2634
r^2 = 0.9922

น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 240 °C
สมการเส้นตรง y = 0.0104x + 0.3697
r^2 = 0.9994

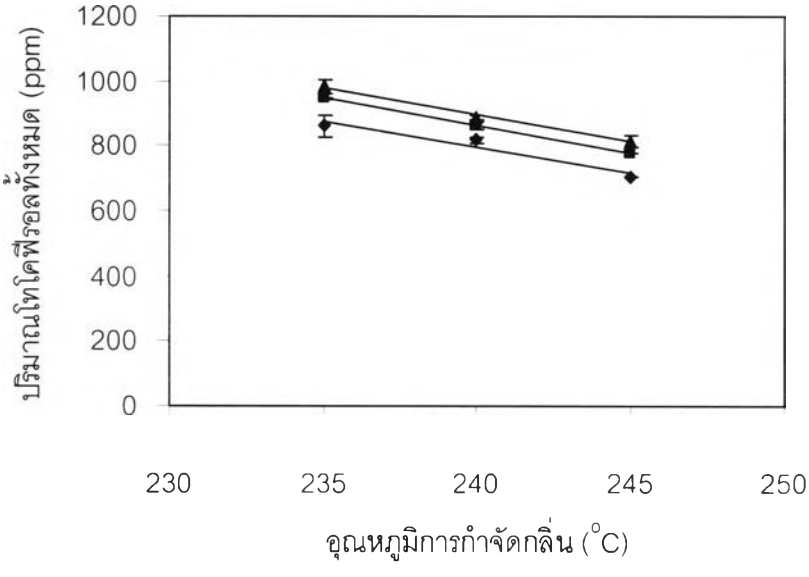
น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 245 °C
สมการเส้นตรง y = 0.0122x + 0.666
r^2 = 0.9694

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์กับอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่น และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์กับเวลาในการกำจัดกลิ่น เป็นสมการเส้นตรง ซึ่งมีค่า slope เป็นบวก เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นและเวลาในการกำจัดกลิ่นนานขึ้นปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์จะเพิ่มขึ้น และค่า r^2 ที่ได้มีค่าสูงมาก (มีค่าเข้าใกล้ 1) (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2542) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์กับอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่น และ เวลาในการกำจัดกลิ่น ว่ามีความสัมพันธ์กันมาก

สามารถนำสมการที่ได้ไปใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์ในน้ำมันถั่วเหลือง เมื่ออุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นหรือเวลาในการกำจัดกลิ่นเปลี่ยนแปลงไป

4.1.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่มีต่อปริมาณโทโคฟีรอลที่เหลืออยู่ในน้ำมันถั่วเหลือง

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโทโคฟีรอลกับอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่น ที่เวลาในการกำจัดกลิ่นต่างๆ จากการใช้ Regression Analysis จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโทโคฟีรอลกับอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่น ที่เวลาในการกำจัดกลิ่นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโทโคฟีรอลทั้งหมดกับอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่เวลาในการกำจัดกลิ่นต่างๆ

—▲— น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 103 นาที

สมการเส้นตรง $y = -16.901x + 4952.9$

$r^2 = 0.9956$

—■— น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 124 นาที

สมการเส้นตรง $y = -16.921x + 4923.4$

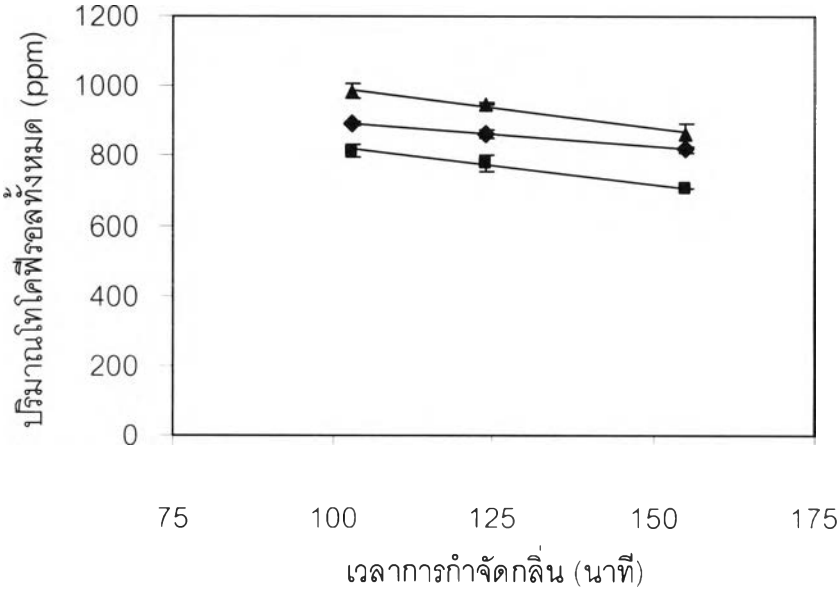
$r^2 = 1.0000$

—◆— น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 155 นาที

สมการเส้นตรง $y = -15.762x + 4577.6$

$r^2 = 0.9404$

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโทโคฟีรอลทั้งหมดกับเวลาในการกำจัดกลิ่น ที่อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นต่างๆ จากการใช้ Regression Analysis จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโทโคฟีรอลทั้งหมดกับเวลาในการกำจัดกลิ่นที่อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโทโคฟีรอลทั้งหมดกับเวลาในการกำจัดกลิ่นที่อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นต่างๆ

น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 235 °C
สมการเส้นตรง $y = -2.3813x + 1234.5$
$r^2 = 0.9876$

น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 240 °C
สมการเส้นตรง $y = -1.3968x + 1034.4$
$r^2 = 0.9999$

น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 245 °C
สมการเส้นตรง $y = -2.1504x + 1039.8$
$r^2 = 0.9944$

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโทโคฟีรอลทั้งหมดกับอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่น และความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโทโคฟีรอลทั้งหมดกับเวลาในการ

กำจัดกลิ่น เป็นสมการเส้นตรง ซึ่งมีค่า slope เป็นลบ เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นและเวลาในการกำจัดกลิ่นนานขึ้นปริมาณโทโคฟีรอลทั้งหมดจะลดลง และค่า r^2 ที่ได้มีค่าสูงมาก (มีค่าเข้าใกล้ 1) (กัลยา วานิชย์บัญชา, 2542) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโทโคฟีรอลทั้งหมดกับอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่น และเวลาในการกำจัดกลิ่นว่ามีความสัมพันธ์กันมาก สามารถนำสมการที่ได้ไปใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโทโคฟีรอลทั้งหมดในน้ำมันถั่วเหลืองเมื่ออุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นหรือ เวลาในการกำจัดกลิ่นเปลี่ยนแปลงไป

4.2 การทดสอบความเสถียรของน้ำมันถั่วเหลืองโดยการทอดอาหาร (frying stability test)

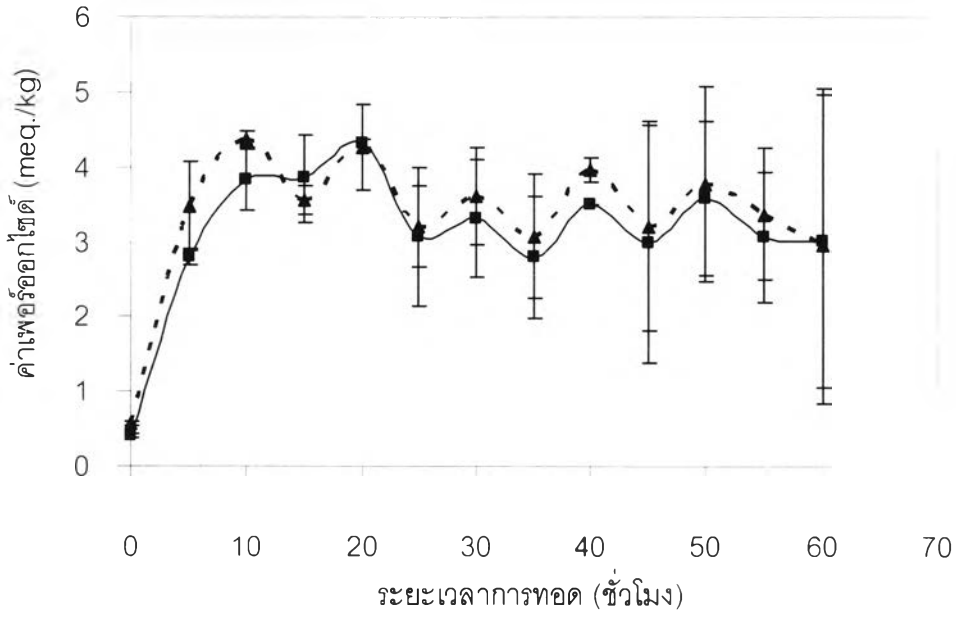
นำน้ำมันถั่วเหลืองที่ได้จากภาวะที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่น 103 นาที และใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่ 235 °C ซึ่งมีปริมาณโทโคฟีรอลสูงที่สุด คือ 984.44 ppm และมีปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์ต่ำที่สุด คือ 1.11 % และภาวะที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่น 124 นาที และใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่ 235 °C ซึ่งมีปริมาณโทโคฟีรอลสูงเป็นอันดับที่ 2 คือ 947.21 ppm และมีปริมาณกรดไขมันชนิดทรานส์ต่ำเป็นอันดับที่ 2 คือ 1.32 % มาทดสอบความเสถียรของน้ำมันโดยการทอดอาหารที่อุณหภูมิ 190 °C แบบน้ำมันท่วม (deep-fat frying) ตามวิธีในข้อ 3.4.2 และเก็บตัวอย่างน้ำมันเริ่มต้นก่อนทอดในวันแรกและหลังจากการทอดในแต่ละวันมาตรวจสอบค่าเพอร์ออกไซด์ กรดไขมันอิสระ และสี ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5-4.6 และ 4.9

จากรูปที่ 4.5 พบว่าในช่วงแรกค่าเพอร์ออกไซด์จะสูงขึ้นเนื่องมาจากในน้ำมันถั่วเหลืองมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิดกรดลิโนเลอิกและกรดลิโนเลนิกอยู่สูง จึงถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็วและเกิดเป็น hydroperoxides ช่วงต่อมาค่าเพอร์ออกไซด์ลดลงเพราะ hydroperoxides ซึ่งไม่เสถียรจะสลายตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นที่สอง (secondary products) (Tyagi และ Vasishtha, 1996; Goburdhun และคณะ, 2000) นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลโดยไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic browning) มีสมบัติเป็นสารต้านออกซิเดชันได้ด้วย ปริมาณของ hydroperoxides ในน้ำมันจึงลดลงทำให้ค่าเพอร์ออกไซด์ลดลง ทั้งนี้ไม่สามารถใช้ค่าเพอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียวในการประเมินคุณภาพน้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้ทอดว่ายังสามารถใช้ทอดอาหารได้อีกหรือไม่จะต้องพิจารณาคุณภาพอื่นๆ ประกอบด้วย เช่น ปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นต้น (Goburdhun และคณะ, 2000)

ตารางที่ 4.6 ค่าเพอร์ออกไซด์ กรดไขมันอิสระ และ สีแดง (cell 5 ¼") ของน้ำมันที่เวลาการทอดต่างๆ

ระยะเวลาการทอด (ชั่วโมง)	ค่าเพอร์ออกไซด์ (meq./kg)		กรดไขมันอิสระ (%)		สีแดง (cell 5 ¼")	
	103 นาที	124 นาที	103 นาที	124 นาที	103 นาที	124 นาที
0	0.57±0.01	0.41±0.02	0.03±0.00	0.03±0.00	0.50±0.00	0.38±0.02
5	3.48±0.60	2.80±0.10	0.07±0.01	0.08±0.00	3.29±0.02	3.87±0.23
10	4.37±0.10	3.83±0.42	0.12±0.00	0.13±0.00	7.63±0.85	9.17±0.42
15	3.55±0.18	3.85±0.58	0.18±0.00	0.21±0.00	12.17±0.19	13.24±1.08
20	4.27±0.57	4.32±0.06	0.27±0.01	0.30±0.01	20.07±1.28	22.49±0.69
25	3.21±0.54	3.08±0.93	0.35±0.00	0.40±0.03	31.52±2.14	36.02±5.68
30	3.62±0.64	3.32±0.78	0.45±0.00	0.57±0.12	40.83±1.65	45.35±5.21
35	3.08±0.82	2.80±0.81	0.58±0.01	0.66±0.09	-	-
40	3.97±0.16	3.51±0.01	0.71±0.01	0.83±0.14	-	-
45	3.22±1.39	2.98±1.58	0.89±0.04	1.02±0.17	-	-
50	3.78±1.31	3.59±1.03	1.07±0.11	1.19±0.26	-	-
55	3.38±0.88	3.08±0.87	1.23±0.13	1.50±0.35	-	-
60	2.95±2.11	3.01±1.96	1.33±0.18	1.61±0.37	-	-

ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

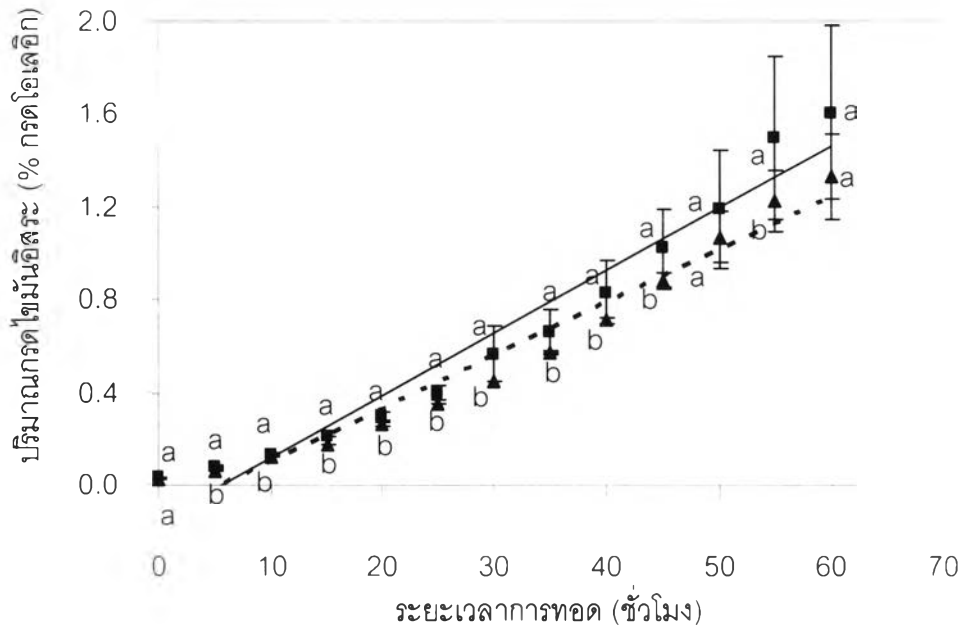


รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอร์ออกไซด์กับระยะเวลาการทอด

-▲- น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 103 นาทีและอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 235 °C

-■- น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 124 นาทีและอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 235 °C

น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่น 103 นาที และใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่ 235°C ซึ่งมีปริมาณโทโคฟีรอลสูงกว่าจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นน้อยกว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่น 124 นาที และใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่ 235 °C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาการทอดเดียวกันจนครบ 45 ชั่วโมง (รูปที่ 4.6) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Normand และคณะ (2001) ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเสถียรของน้ำมันคาโนลาในระหว่างการทอดกับปริมาณโทโคฟีรอล ในระหว่างการทอดมันฝรั่งเส้น ที่อุณหภูมิ 175 $\pm$ 2 °C จากการทดลองพบว่าน้ำมันคาโนลาที่มีปริมาณโทโคฟีรอลเริ่มต้นก่อนทอดต่ำกว่ามีแนวโน้มที่น้ำมันจะเกิดกรดไขมันอิสระเร็วกว่า



a,b ตัวอักษรที่ต่างกันที่เวลาการทอดเดียวกัน แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระกับระยะเวลาการทอด

-▲- น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 103 นาที และอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 235 °C

สมการเส้นตรง $y = 0.0227x - 0.122$

$r^2 = 0.9621$

-■- น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 124 นาที และอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 235 °C

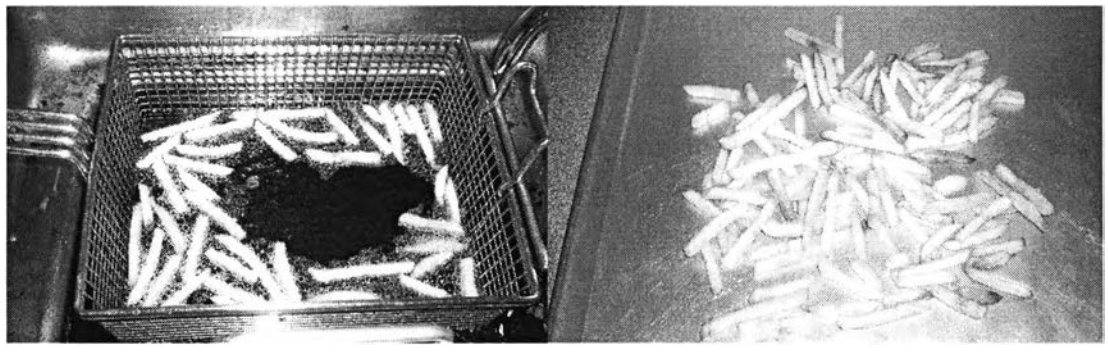
สมการเส้นตรง $y = 0.0269x - 0.1512$

$r^2 = 0.9560$

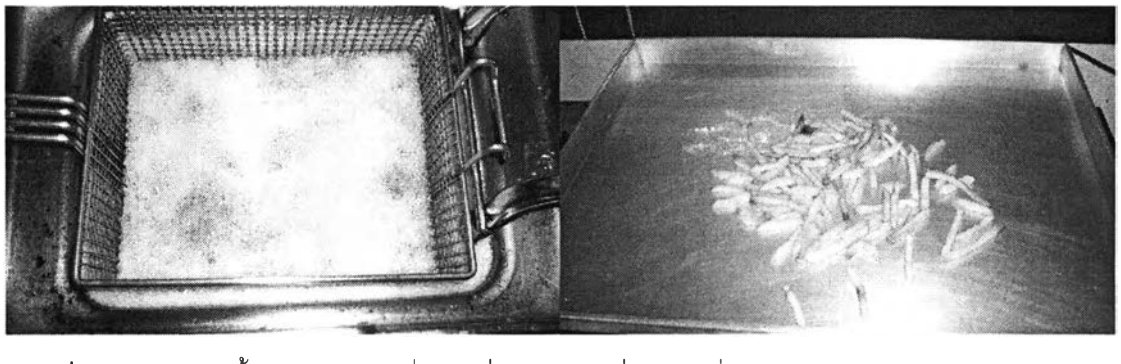
น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่น 103 นาที และใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่ 235 °C ซึ่งมีปริมาณโทโคฟีรอลสูงกว่าจะใช้ทอดมันฝรั่งเส้นได้นานถึง 30 ชั่วโมงจึงจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระเท่ากับ 0.45 % ซึ่งยังสามารถใช้ทอดมันฝรั่งเส้นต่อไปได้อีก โดยน้ำมันที่ยังใช้ทอดมันฝรั่งได้ต้องมีปริมาณกรดไขมันอิสระไม่เกิน 0.5 % (Moreira และคณะ,1999; Goburdhun และคณะ, 2000) ในขณะที่น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่น 124 นาที และใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่ 235 °C เมื่อทอดครบ 30 ชั่วโมงจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงเกิน 0.5 % อยู่ที่

0.57% ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการใช้ทอดมันฝรั่งเส้นแล้ว การทอดอาหารที่มีน้ำมากและให้ความร้อนเป็นเวลานาน เช่น การทอดมันฝรั่ง (มีปริมาณน้ำ 80 %) ที่ 190 °C น้ำมันจะเกิดการเสื่อมสลายเนื่องจากปฏิกิริยา hydrolytic rancidity (หรือกระบวนการ hydrolysis) ได้เป็นกลีเซอรอลและกรดไขมันอิสระซึ่งจะใช้ปริมาณกรดไขมันอิสระเป็นตัวตัดสินความเสถียรของน้ำมันถั่วเหลืองในการทอดมันฝรั่งเส้น (Tyagi และ Vasishtha, 1996; Goburdhun และคณะ, 2000; Mcsavage และ Trevisan, 2001) ปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา hydrolysis และ oxidation ของน้ำมันในระหว่างการทอด และเกิดจากการสะสมของ non-volatile decomposition products (NVDPs) ในน้ำมัน (Moreira และคณะ, 1999; Goburdhun และคณะ, 2000)

นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าเมื่อนำน้ำมันถั่วเหลืองทั้ง 2 ตัวอย่าง มาทอดมันฝรั่งเส้นเป็นเวลา 5 ชั่วโมงจะมีฟองเกิดขึ้นในน้ำมันปริมาณเล็กน้อยในทั้ง 2 เตา (รูปที่ 4.7) และจะมีฟองเกิดขึ้นในน้ำมันปริมาณมากเมื่อทอดมันฝรั่งเส้นเป็นเวลา 30 ชั่วโมง (รูปที่ 4.8) ฟองในน้ำมันเกิดขึ้นจากพอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันเนื่องจากความร้อน ฟองในน้ำมันจะยึดไอน้ำเอาไว้ให้อยู่ในน้ำมันนานขึ้นซึ่งจะเร่งปฏิกิริยา hydrolysis ในน้ำมันไปพร้อมๆ กันด้วย (Moreira และคณะ,1999)



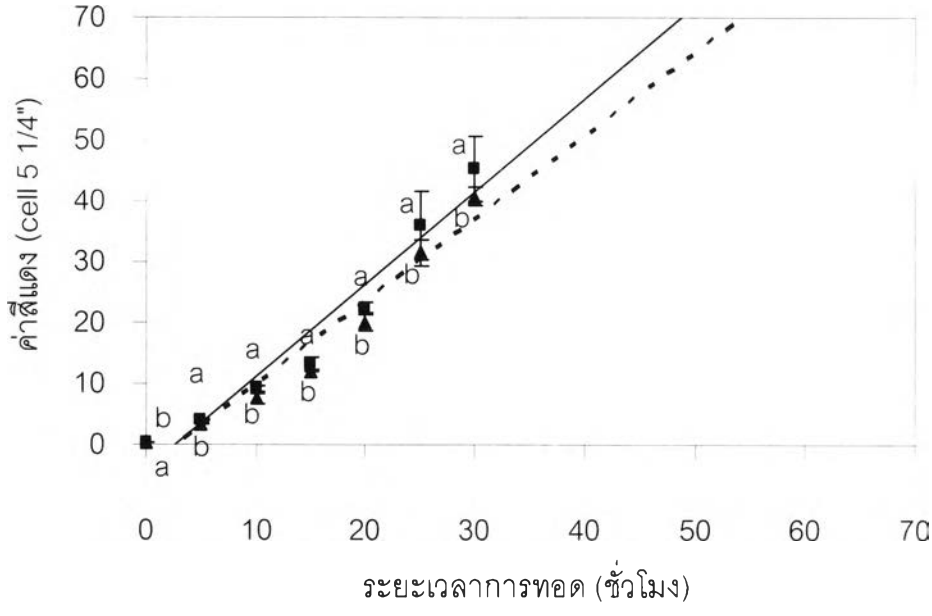
รูปที่ 4.7 ลักษณะน้ำมันและมันฝรั่งเส้นที่ทอดในวันที่ 1 (5 ชั่วโมง)



รูปที่ 4.8 ลักษณะน้ำมันและมันฝรั่งเส้นที่ทอดในวันที่ 6 (30 ชั่วโมง)

น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่น 103 นาที และใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่ 235 °C ซึ่งมีปริมาณโทโคฟีรอลสูงกว่าจะมีค่าสีแดง (Red) เพิ่มขึ้นน้อยกว่าน้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่น 124 นาที และใช้อุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นที่ 235 °C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาการทอดเดียวกันจนครบ 30 ชั่วโมง (รูปที่ 4.9) สำหรับน้ำมันทั้ง 2 ตัวอย่างที่ทอดนานมากกว่า 30 ชั่วโมงจะไม่สามารถวัดค่าสีได้เนื่องจากน้ำมันมีสีเข้มมาก

น้ำมันที่ใช้ทอดมีสีเข้มเพิ่มขึ้นอาจเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยา hydrolysis, cyclization polymerization, isomerization และ oxidation หรือจากการที่มีรงควัตถุจากอาหารออกมาอยู่ในน้ำมัน หรือผลของ Maillard reaction ทำให้เกิด brown pigment melanoidin ขึ้นในน้ำมัน และเกิดจากการสะสมของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Goburdhun และคณะ, 2000)



a,b ตัวอักษรที่ต่างกันที่เวลาการทอดเดียวกัน แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีแดง (cell 5 ¼") กับระยะเวลาการทอด

-▲- น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 103 นาที และอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 235 ^{O}C

สมการเส้นตรง y = 1.3564x - 3.7749

r^2 = 0.9481

-■- น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้เวลาในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 124 นาที และอุณหภูมิในการกำจัดกลิ่นเท่ากับ 235 ^{O}C

สมการเส้นตรง y = 1.5179x - 4.1263

r^2 = 0.9485