

การออกแบบและการสร้างมาตรฐานวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร



นายสมชาย ศรีทนต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา มาตรฐานวิทยา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND CONSTRUCTION OF FOOD OIL QUALITY METER



Mr.Somchai Sritanu

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Metrological Science

Faculty of Science
Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

511613

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและการสร้างมาตรฐานวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร

โดย

นายสมชาย ศรีทนู

สาขาวิชา

มาตรวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร.สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินฉวงค์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

รองคณบดีฝ่ายบริหารรักษาการแทน

.....
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจรยศ อยู่ดี)

.....
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร.สธน วิจารณ์วรรณลักษณ์)

.....
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินฉวงค์)

.....
กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงลา)

.....
กรรมการ

(ดร.มนต์เทียน เทียนประทีป)

สมชาย ศรีทनु : การออกแบบและการสร้างมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร. (DESIGN AND CONSTRUCTION OF FOOD OIL QUALITY METER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ดร.สรณ วิจารย์วรรณลักษณ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ศศ.ดร.บัณฑิต อินฉวงค์, 84 หน้า

งานวิจัยนี้ เป็นการออกแบบและสร้างมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารต้นแบบ โดยอาศัยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมันปาล์มตัวอย่าง ซึ่งได้มาจากโรงงานผลิตบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป และนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาเทียบกับวิธีคอลัมน์โครมาโทกราฟีซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานสากล มาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารต้นแบบใช้ตัวรับรู้ชนิดความจุไฟฟ้าที่ประกอบจากแผ่นสแตนเลส 3 แผ่นวางขนานกัน และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในภาคประมวลผล และสร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาณสารโพลาร์กับค่าความจุไฟฟ้า ผลการวัดปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันปาล์มตัวอย่างในช่วงร้อยละ 10 - 20 ด้วยมาตรวัดฯ มีความคลาดเคลื่อนไปจากวิธีมาตรฐานประมาณร้อยละ 5

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สาขาวิชา.....มาครวิทยา.....

ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

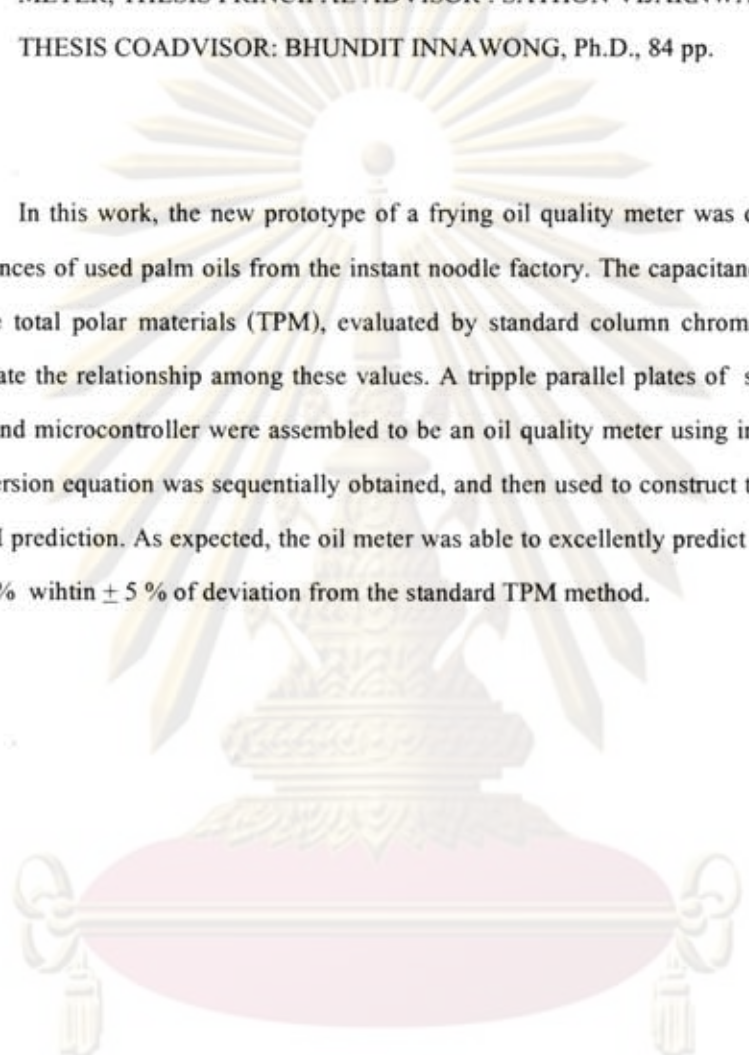
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4872490523: MAJOR METROLOGICAL SCIENCE

KEY WORD: TPM / FFA/ CAPACITANCE / FOOD OIL / DIELECTRIC

SOMCHAI SRITANU : DESIGN AND CONSTRUCTION OF FOOD OIL QUALITY
METER, THESIS PRINCIPAL ADVISOR : SATHON VIJARNWANNALAK, Ph.D.,
THESIS COADVISOR: BHUNDIT INNAWONG, Ph.D., 84 pp.

In this work, the new prototype of a frying oil quality meter was designed to measure the capacitances of used palm oils from the instant noodle factory. The capacitances were then compared with the total polar materials (TPM), evaluated by standard column chromatography technique, to investigate the relationship among these values. A tripple parallel plates of stainless steel capacitive sensor and microcontroller were assembled to be an oil quality meter using in the experimental field. A conversion equation was sequentially obtained, and then used to construct the mathematic equation for TPM prediction. As expected, the oil meter was able to excellently predict the TPM at the range of 10 - 20 % wihtin ± 5 % of deviation from the standard TPM method.



ศูนย์วิทยทรัพยากร

Field of study.....Metrological.....

Academic year: 2008

Student's signature:.....

Principal Advisor's signature:.....

Co-advisor's signature:.....

S. Sritanu
Sathon Vijarnwannal
Bhundit Inna Wong

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยที่ต้องอาศัยองค์ความรู้และทักษะความเชี่ยวชาญในหลายสาขา โดยลำพังผู้วิจัยคงไม่สามารถดำเนินการวิจัยและทำให้ผลงานนี้ประสบความสำเร็จออกมาเป็นรูปธรรมได้ หากขาดซึ่งคุณูปการจากบุคคลและหน่วยงานที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

ลำดับแรก ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.สรน วิจารย์วรรณลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินฉวงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้โอกาสแก่ผู้วิจัยให้ได้ทำงานวิจัยในหัวข้อนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษาและชี้แนะแก่ผู้วิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือสนับสนุน ส่งผลให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จลงได้ด้วยดี

ลำดับที่สอง ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจรยศ อยู่ดี อาจารย์ ดร.คันพงศ์ แก้วคงกา และอาจารย์ ดร.มนต์เทียน เทียนประทีป อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับที่สาม ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวพรทิพย์ เต็มวิจิตร นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและสนับสนุนงานวิจัย และภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ที่สนับสนุนเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

ลำดับสุดท้าย ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายอภิรักษ์ นามแดง ที่ได้คำแนะนำและช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรมการทำงานและจัดสร้างส่วนประกอบต่างๆ จนแล้วเสร็จลงได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำย่อ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 คุณสมบัติของวัสดุ.....	5
2.2 โพลีไธเรชั่นในไดอิเล็กทริก.....	6
2.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก.....	7
2.4 ตัวเก็บประจุ.....	7
2.5 การทำงานของตัวเก็บประจุ.....	9
2.6 ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุ.....	11
2.7 การวัดค่าความจุไฟฟ้า.....	12
2.8 วงจร โมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์.....	12

ศูนย์ผลิตและพัฒนาทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	14
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	14
3.2 ประชากร.....	14
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	15
3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านเคมี.....	15
3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างมาตรฐานวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร.....	18
3.3.3 การออกแบบมาตรฐานวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร.....	20
3.4 การทำงานของวงจรในมาตรฐานวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร.....	25
3.5 การทดลองทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยมาตรฐานวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร.....	27
3.6 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	28
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	29
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	30
4.1 ผลการวิเคราะห์.....	30
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน.....	30
4.1.2 การคัดเลือกน้ำมันตัวอย่างเพื่อทำการทดลองในส่วนการวัดค่าความจุไฟฟ้า.....	30
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความจุไฟฟ้า.....	33
4.1.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและปริมาตรสาร โพลาร์.....	34
4.1.5 ความคลาดเคลื่อนในการวัดของมาตรฐานวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร.....	38
4.1.6 ค่าความไม่แน่นอนในการวัด/วิเคราะห์.....	38
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	40
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	40
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	40
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	41
รายการอ้างอิง.....	42

ภาคผนวก.....	43
ภาคผนวก ก ผลการตรวจวิเคราะห์ FFA และ TPM ในน้ำมันทอดอาหารตัวอย่าง.....	44
ภาคผนวก ข วงจรการทำงานของมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร.....	46
ภาคผนวก ค วิธีการวิเคราะห์สารโพลาร์ด้วยคอลัมน์โครมาโทกราฟี (AOAC 982.27)....	49
ภาคผนวก ง วันและเวลาที่เก็บน้ำมันตัวอย่าง.....	54
ภาคผนวก จ โปรแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	55
ภาคผนวก ฉ คุณสมบัติของสายสัญญาณ.....	61
ภาคผนวก ช ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F876.....	62
ภาคผนวก ซ คุณสมบัติของสแตนเลส 304.....	65
ภาคผนวก ฅ ความสามารถในการวัด การใช้งาน และวิธีการสอบเทียบ.....	67
ภาคผนวก ญ ขั้นตอนการปฏิบัติงานมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร.....	68
ภาคผนวก ฎ ตัวอย่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในสสาร.....	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	71



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความนำจำเพาะ (σ) โดยประมาณของวัสดุบางชนิด.....	5
ตารางที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันอิสระและสาร โพลาร์เนื่องจากอายุการใช้งาน.....	28
ตารางที่ 4.1 น้ำมันตัวอย่างที่เลือกเพื่อทดลองกับมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร.....	32
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมันตัวอย่างที่ถูกคัดเลือก.....	34
ตารางที่ 4.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับปริมาณสาร โพลาร์.....	35
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนปริมาณสาร โพลาร์เมื่อใช้สมการทั้ง 2 สมการ.....	36
ตารางที่ 4.5 ค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละช่วงเมื่อใช้สมการทั้ง 2.....	36
ตารางที่ 4.6 รูปแบบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด.....	39



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 รูปจำลองโครงสร้างน้ำมันทอดอาหารใหม่ และที่ผ่านการใช้งานแล้ว.....	1
รูปที่ 1.2 ปริมาณสารโพลาาร์ของน้ำมันจำนวน 40 ตัวอย่างตลอด 5 วันของการสุ่มตัวอย่างน้ำมัน.....	3
รูปที่ 2.1 โคอิเล็กทริกในสภาวะปกติ.....	6
รูปที่ 2.2 โคอิเล็กทริกเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ.....	6
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนาน.....	8
รูปที่ 2.4 ตัวเก็บประจุแบบขนานมากกว่าหนึ่งตัว.....	9
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างวงจรการทำงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (ก) และกราฟแรงดันตกคร่อม.....	10
รูปที่ 2.6 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของประจุไฟฟ้า (Q) บนตัวเก็บประจุ และการลดลงของ.....	11
รูปที่ 2.7 การวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยการวัดความถี่.....	12
รูปที่ 2.8 วงจรโมโนสเตเบิลมันดิไวเบรเตอร์.....	12
รูปที่ 3.1 น้ำมันตัวอย่างที่เก็บมาเพื่อทำการวิจัยครั้งนี้ (ขวดละประมาณ 500 ซม. ³).....	15
รูปที่ 3.2 คอลัมน์โครมาโทกราฟี.....	16
รูปที่ 3.3 ตู้อบความร้อน.....	17
รูปที่ 3.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก แบบดิจิตอล 4 ตำแหน่ง.....	17
รูปที่ 3.5 เครื่องระเหยสารเคมีแบบหมุน (Rotary Evaporator).....	17
รูปที่ 3.6 FLUKE PM 6304 Programmable Automatic RCL Meter.....	18
รูปที่ 3.7 รูปร่างและขนาดของกระบอกดวง.....	19
รูปที่ 3.8 กระบอกดวงทำจากสแตนเลส.....	19
รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบของตัวรับรู้.....	20
รูปที่ 3.10 รูปร่างและขนาดของตัวรับรู้.....	20
รูปที่ 3.11 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้ขณะอยู่ในอากาศปกติ.....	22
รูปที่ 3.12 สายสัญญาณพร้อมขั้วต่อ BNC และขั้วต่อแบบหางปลา.....	23
รูปที่ 3.13 มาตรฐานคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร.....	24
รูปที่ 3.14 กระบวนการทำงานของมาตรฐานคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร.....	25
รูปที่ 3.15 แผนผังลำดับงานของมาตรฐาน.....	26
รูปที่ 3.16 ขณะทำการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมันทอดอาหาร.....	27
รูปที่ 3.17 ขณะทำการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมันทอดอาหาร.....	29

รูปที่ 4.1 ปริมาณสาร โพลาร์ (% TPM) ของน้ำมัน 40 ตัวอย่าง แบ่งตามวันที่เก็บ.....	31
รูปที่ 4.2 ปริมาณกรดไขมันอิสระ (% FFA) ของน้ำมัน 40 ตัวอย่าง แบ่งตามวันที่เก็บ.....	32
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (% FFA) กับสาร โพลาร์ (%TPM) ของ น้ำมัน 13 ตัวอย่าง ที่ถูกคัดเลือก.....	33
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับปริมาณสาร โพลาร์ในน้ำมัน 13 ตัวอย่าง.....	33
รูปที่ 4.5 การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับปริมาณสาร โพลาร์ในน้ำมันตัวอย่าง ด้วยโปรแกรม MATLAB.....	35
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง TPM ของทั้งสองแหล่ง เมื่อใช้สมการที่ 1 พร้อมค่าความคลาดเคลื่อน.....	37
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง TPM ของทั้งสองแหล่ง เมื่อใช้สมการที่ 2 พร้อมค่าความคลาดเคลื่อน.....	37



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

TPM	สารประกอบมีขั้ว หรือ สารโพลาร์ (Total Polar Material)
FFA	กรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid)
PV	ค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide value)
AOAC	Association Official of Analytical Chemist, USA.)
Q	ประจุไฟฟ้า (Charge)
I	กระแสไฟฟ้า (Current)
T	เวลา (Time)
E	สนามไฟฟ้า (Electric field)
D	ฟลักซ์ไฟฟ้า (Electric flux)
P	โพลาไรเซชัน (Polarization)
F	ฟารัด (Farad)
C	ค่าความจุไฟฟ้า, ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitance, Capacitor)
V	แรงดันไฟฟ้า (Voltage)
R	ความต้านทาน (Resistance)
F	ความถี่ (Frequency)
ϵ	ค่าความยอมสัมพัทธ์ ของไดอิเล็กทริก (Permittivity of dielectric)
ϵ_0	ค่าความยอมสัมพัทธ์ ของสุญญากาศ (Permittivity of free space)
ϵ_r	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในวัสดุ (Dielectric constant)
χ_e	ความไวต่อสนามไฟฟ้า (Electric susceptibility)
X_c	ความต้านทานในตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Reactance)
K	แฟกเตอร์ขอบเขตความเชื่อมั่น (Coverage factor)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

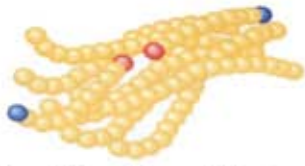
บทที่ 1

บทนำ

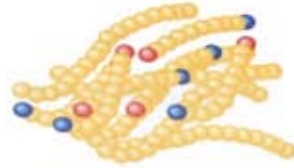
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คนไทยนิยมรับประทานอาหารประเภทของทอด ปัจจุบันมีการใช้น้ำมันทอดอาหารมากกว่า 8 แสนตันต่อปี ในการสุ่มตรวจพบว่ามีการใช้น้ำมันทอดซ้ำจำนวนมาก ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกาย เพราะน้ำมันทอดซ้ำมีสารในกลุ่มสารประกอบมีขี้ขี้ทั้งหมด (Total polar material; TPM หรือ สารโพลาร์) ที่เป็นสารก่อโรคมะเร็ง โลหิตสูง หลอดเลือด หัวใจ มะเร็ง อีกทั้งไอรยะเหยงจากน้ำมันทอดซ้ำ หากสูดดมเป็นเวลานาน พบมีความสัมพันธ์กับการเกิดมะเร็งปอด และเนื้องอกในตับ เพราะมีสารกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน คั้นนี้ชี้วัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารที่นิยมใช้ในระดับโรงงานอุตสาหกรรมอาหารของไทยส่วนใหญ่ ก็คือการวัดปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid; FFA) หรือ ปริมาณกรด (Acid value; AV) ทั้งนี้วิธีที่ดีและถูกต้องที่สุดคือ การวัดปริมาณสารประกอบมีขี้ขี้ (Polar component) หรือสารโพลาร์ เพราะเป็นการระบุถึงปริมาณผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันทอดอาหาร ซึ่งมีนัยถึงประวัติการใช้น้ำมัน [1] ในบางประเทศ อาทิ เบลเยียม ฝรั่งเศส อิตาลี และสเปน กำหนดให้มีสารโพลาร์ในน้ำมันที่ใช้ทอดอาหารไม่เกินร้อยละ 25 ของน้ำหนัก สำหรับประเทศออสเตรเลีย สวิตเซอร์แลนด์ กำหนดให้มีสารโพลาร์ไม่เกินร้อยละ 27 ของน้ำหนัก ส่วนประเทศไทย ได้กำหนดมาตรฐานน้ำมันทอดประกอบอาหารทั้งเพื่อจำหน่ายและบริโภคต้องมีสารโพลาร์ได้ไม่เกินร้อยละ 25 ของน้ำหนัก ตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 283 (พ.ศ.2547) เรื่อง “การกำหนดปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันที่ใช้ทอดหรือประกอบอาหารเพื่อจำหน่าย” [2] และมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 5 พฤศจิกายน พ.ศ. 2547 ซึ่งผู้ใดฝ่าฝืนจะมีโทษปรับไม่เกิน 5 หมื่นบาท เมื่อแรกเริ่มผลิตน้ำมันทอดอาหารใหม่ๆ โครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันทอดอาหารจะประกอบด้วยสารประกอบไม่มีขี้ขี้ (Non Polar Component) ถึงร้อยละ 99 [3] เมื่อนำไปประกอบอาหารจะเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นอย่างน้อย 3 ชนิดคือ 1. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction), 2. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) และ 3. ปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization reaction) เป็นผลให้โครงสร้างทางเคมีของน้ำมันทอดอาหารเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบมีขี้ขี้ (Polar Component) หรือสารโพลาร์ มากขึ้น ภาพจำลองโครงสร้างน้ำมันแสดงในรูปที่ 1.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



น้ำมันใหม่ (มีสาร โพลาร์น้อย)



น้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้ว (มีสาร โพลาร์เพิ่มมากขึ้น)

รูปที่ 1.1 รูปจำลองโครงสร้างน้ำมันทอดอาหารใหม่ และที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ที่มา : Testo Co., Ltd. (2004)

เนื่องจากวิธีการมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร ด้วยวิธีการตรวจวิเคราะห์ทางเคมีตามวิธีมาตรฐานเช่น IUPAC 2.507, AOAC 982.27 หรือ AOCS Cd 20-91 เป็นวิธีการที่ต้องกระทำในห้องปฏิบัติการทางเคมี ปัจจุบันมีเพียงหน่วยงานราชการเช่น องค์การอาหารและยา (อย.) กระทรวงสาธารณสุข และมหาวิทยาลัยบางแห่งเช่น มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม เป็นต้น ที่ให้บริการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันทอดอาหาร วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีต้องใช้บุคลากรที่มีความชำนาญ ใช้เครื่องมือหลายชนิด และใช้สารเคมีหลายชนิด โดยสารเคมีบางตัวเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย ระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์น้ำมัน 1 ตัวอย่าง ใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง ถ้ารวมถึงการออกไปรับรองผลการวิเคราะห์จะใช้เวลาไม่น้อยกว่า 2 วัน ค่าใช้จ่ายในการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างละหลายร้อยบาท เนื่องจากปริมาณสาร โพลาร์มีค่าความสัมพันธ์ไปในแนวทางเดียวกันกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในน้ำมันทอดอาหาร ด้วยเหตุผลนี้จึงวิจัยและพัฒนามาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร โดยใช้หลักการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก และเครื่องมือที่ใช้วัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ได้ตรงวัดคุณสมบัติที่สุดก็คือเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance meter)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสร้างมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารต้นแบบที่ให้ผลการวัดถูกต้อง รวดเร็ว ประหยัด และปลอดภัย มีความคล่องตัวสูง สามารถนำออกไปตรวจวัดแบบภาคสนามได้ มีความแข็งแรง ทั้งตัวเครื่องและตัวรับรู้ ซ่อมแซมและดูแลรักษาง่าย ไม่ต้องใช้สารเคมีอันตรายเป็นตัวช่วยในการตรวจวัด ใช้วัสดุและอุปกรณ์ภายในประเทศ ลดการนำเข้ามาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารจากต่างประเทศ

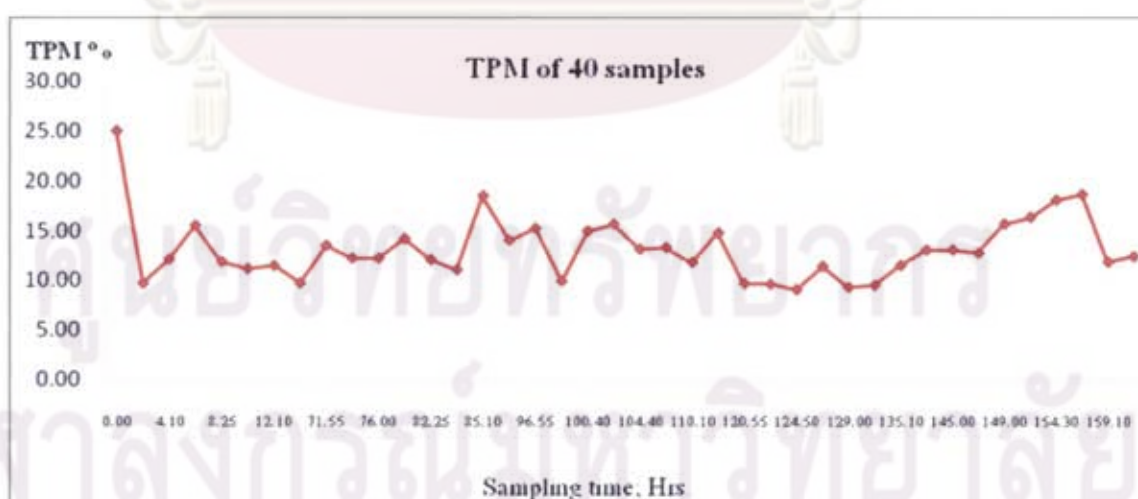
1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สร้างมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารต้นแบบ ที่สามารถใช้งานได้จริง โดยใช้ตัวอย่างน้ำมันทอดอาหารที่ผ่านการใช้งานจริง มาทำการทดลอง การวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่น้ำมันปาล์มซึ่งมีอัตราการใช้ต่อปีในปริมาณมาก เช่นในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทอาหารและของขบเคี้ยว

โรงงานผลิตบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป รวมไปถึงร้านอาหารประเภท อาหารจานด่วน (Fast food) โดยนำมาตรวจคุณภาพน้ำมันทอดอาหารที่ออกแบบและสร้างขึ้น ทำการวัดน้ำมันปาล์มที่ผ่านการใช้งานจริง โดยได้รับความอนุเคราะห์น้ำมันตัวอย่างจากโรงงานผลิตบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปแห่งหนึ่ง ซึ่งใช้น้ำมันปาล์มในการทอดบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปออกจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ ทำการวัดปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันปาล์มตัวอย่าง ด้วยวิธีคอลัมน์โครมาโทกราฟีตามวิธีการมาตรฐาน AOAC 982.27 เปรียบเทียบผลการวัดกับมาตรฐานคุณภาพน้ำมันทอดอาหารที่สร้างขึ้น

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

เนื่องจากแหล่งที่มาของน้ำมันตัวอย่าง มีวิธีการควบคุมคุณภาพน้ำมันด้วยการเผื่อระวังไม่ให้ ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) ในน้ำมันเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งปกติกำหนดไว้ต้องมีปริมาณกรดไขมันไม่เกิน 0.8 % ค่อน้ำหนัก โรงงานแห่งนี้รวมถึงอีกหลายๆ โรงงาน จะไม่เปลี่ยนน้ำมันแบบทิ้งทั้งหมดในคราวเดียวเมื่อครบอายุการใช้งาน แต่ใช้วิธีการถ่ายน้ำมันเก่าออกบางส่วนและใส่น้ำมันใหม่ในปริมาณที่เท่ากับน้ำมันเก่าที่ถ่ายออกไป หรือเติมน้ำมันใหม่ลงไปเมื่อน้ำมันในหม้อทอดลดระดับลงเนื่องจากถูกดูดซึมโดยอาหารที่ทอด ทำให้ปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันตัวอย่างที่ใช้ในการทำวิจัยจำนวน 40 ตัวอย่าง มีค่าสารโพลาร์เกาะกลุ่มกันอยู่ระหว่างร้อยละ 10 – 15 ค่อน้ำหนัก สังเกตได้จากรูปที่ 1.2 ความแตกต่างของสารโพลาร์ในน้ำมันตัวอย่างที่ไม่สม่ำเสมอนี้ ส่งผลกระทบต่อการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้ากับปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันตัวอย่าง



รูปที่ 1.2 ปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันจำนวน 40 ตัวอย่างตลอด 5 วันของการสุ่มตัวอย่างน้ำมัน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ต้นแบบมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารที่สะดวกต่อการใช้งาน ให้ผลการวัดรวดเร็ว มีราคาถูก ผลิตหรือทดแทนมาตรวัดที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ทำให้เจ้าหน้าที่กระทรวงสาธารณสุขหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและผู้สนใจ มีมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารไว้ใช้งานมากขึ้น สามารถนำมาตรวัดนี้ไปใช้งานแบบภาคสนามได้ ดูแลรักษาง่าย ผลิตง่าย ตัวรับรู้ใช้โลหะปลอดสนิม ทำความสะอาดง่าย ถอดและประกอบขึ้นด้วยตัวเองได้ง่าย ช่วยลดอันตรายจากการบริโภคอาหารประเภทของทอดที่จะนำน้ำมันทอดอาหารที่เสื่อมสภาพมาประกอบอาหาร

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

ออกแบบและสร้างมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารต้นแบบ โดยแบ่งขั้นตอนออกเป็น

1. ออกแบบและสร้างตัวรับรู้ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitive sensor) เพื่อวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในน้ำมันทอดอาหารที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความร้อนและอายุการใช้งาน
2. ออกแบบและสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้หลักการวัดค่าความจุไฟฟ้าแล้วแปลงผลกลับไปเป็นค่าสารประกอบมีซัลเฟอร์ทั้งหมดหรือสาร โพลาร์
3. ทำการวัดน้ำมันตัวอย่างเดียวกันโดยเปรียบเทียบผลการวัด และหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารต้นแบบ กับวิธีคอลัมน์โครมาโทกราฟี
4. ปรับปรุงรูปแบบ คุณลักษณะ การใช้งาน การตีความหมายของส่วนแสดงผลการวัด
5. กำหนดค่าความไม่แน่นอนในการวัด กำหนดขีดความสามารถในการวัด
6. เขียนคู่มือการใช้งาน และวิธีการสอบเทียบ

1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

รายงานความก้าวหน้าของวิทยานิพนธ์ต่ออาจารย์ที่ปรึกษา เมื่อมีความคืบหน้าของงานในสาระสำคัญ โดยจะรายงานเมื่อ

1. ออกแบบตัวรับรู้ (Sensor) เสร็จเรียบร้อยแล้ว
2. ทราบค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับปริมาณสาร โพลาร์ ในน้ำมันตัวอย่าง
3. เมื่อมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารเสร็จสมบูรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของวัสดุ (Properties of material)

วัสดุอาจแบ่งตามคุณสมบัติด้านความนำจำเพาะ (Conductivity; σ) ได้เป็นวัสดุชนิดตัวนำไฟฟ้าและวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า ความนำจำเพาะมีหน่วยเป็นโมห์ (mho) ต่อเมตร หรือซิเมนส์ (Siemens) ต่อเมตร วัสดุที่มีค่าความนำจำเพาะสูง ($\sigma \gg 1$) เรียกว่าโลหะหรือตัวนำไฟฟ้า (Conductors) วัสดุที่มีค่าความนำจำเพาะต่ำ ($\sigma \ll 1$) เรียกว่าฉนวน (Insulators) หรือ ไดอิเล็กทริก (Dielectric) และวัสดุที่มีค่าความนำจำเพาะอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้าและฉนวน เรียกว่า สารกึ่งตัวนำ (Semiconductors) [5] ตัวอย่างวัสดุแสดงในตารางที่ 2.1

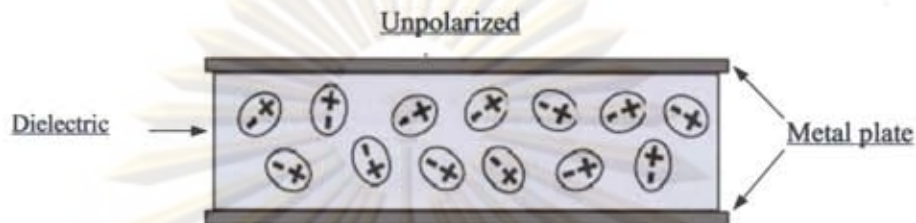
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความนำจำเพาะ (σ) โดยประมาณของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิ 20 °C [5]

วัสดุ	ค่าความนำจำเพาะ (โมห์ต่อเมตร)
ตัวนำไฟฟ้า	
เงิน	6.1×10^7
ทองแดง	5.8×10^7
ทองคำ	4.1×10^7
สารกึ่งตัวนำ	
เจอร์มาเนียม (บริสุทธิ์)	2.2
ซิลิคอน (บริสุทธิ์)	4.4×10^{-4}
ไดอิเล็กทริก	
แก้ว	10^{-12}
ยาง	10^{-15}

สารไดอิเล็กทริกมีคุณสมบัติไม่นำไฟฟ้า แต่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบนผิวหน้าได้เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า

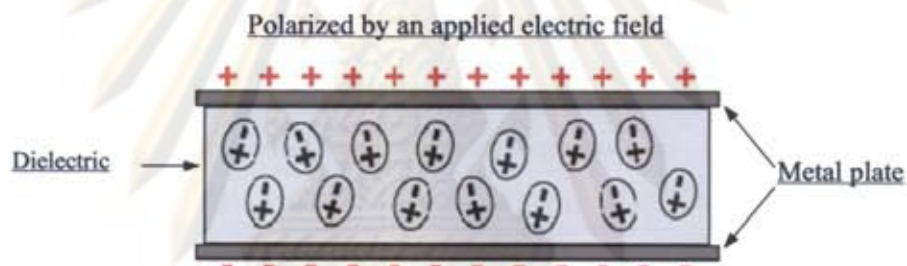
2.3 โพลาริเซชันในไดอิเล็กทริก (Polarization in dielectrics)

ประจุไฟฟ้าในไดอิเล็กทริกจะเคลื่อนที่ได้ไม่อิสระดังรูปที่ 2.1 แต่เมื่อมีความเข้มของสนามไฟฟ้า (E) จากภายนอกมากระทำ ประจุบวกและประจุลบของไดอิเล็กทริกจะแยกตัวออกจากกันได้เล็กน้อย ซึ่งเรียกว่าการเกิด โพลาริเซชัน ในไดอิเล็กทริก ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ไดอิเล็กทริกในสภาวะปกติ

ที่มา : <http://hyperphysics.phy-astr-gsu.edu> (2005)



รูปที่ 2.2 ไดอิเล็กทริกเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำ

ที่มา : <http://hyperphysics.phy-astr-gsu.edu> (2005)

โพลาริเซชันในไดอิเล็กทริกมีผลกระทบต่อสนามไฟฟ้าคือ ทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (D) มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับความเข้มของการเกิดโพลาริเซชัน (P) กล่าวคือเมื่อมีสนามไฟฟ้า (E) มากระทำต่อไดอิเล็กทริก ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า จะมีค่ามากกว่าขณะอยู่ในสุญญากาศเท่ากับ P ดังสมการที่ 2.1

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2-1)$$

ความเข้มของการเกิดโพลาริเซชัน (P) แปรผันตรงกับความเข้มของสนามไฟฟ้า (E) ดังสมการที่ 2-2

$$P = \chi_e \epsilon_0 E \quad (2-2)$$

เมื่อ χ_e คือ Electric susceptibility ของวัสดุ ซึ่งเป็นค่าบ่งบอกคุณสมบัติความไวต่อสนามไฟฟ้าของไดอิเล็กทริก

2.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant; ϵ_r)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) เป็นอัตราส่วนของเพอร์มิตติวิตีของไดอิเล็กทริก กับเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ เมื่อแทนสมการที่ 2-2 ในสมการที่ 2-1 จะได้

$$D = \epsilon_0 (1 + \chi_0) E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (2-3)$$

หรือ
$$D = \epsilon \cdot E \quad (2-4)$$

โดย
$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2-5)$$

และ
$$\epsilon_r = 1 + \chi_e = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2-6)$$

เมื่อ ϵ เป็นเพอร์มิตติวิตี (Permittivity) ของไดอิเล็กทริก

ϵ_0 เป็นเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ (Permittivity of free space) (8.854×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร)

ϵ_r เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกหรือเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative Permittivity)

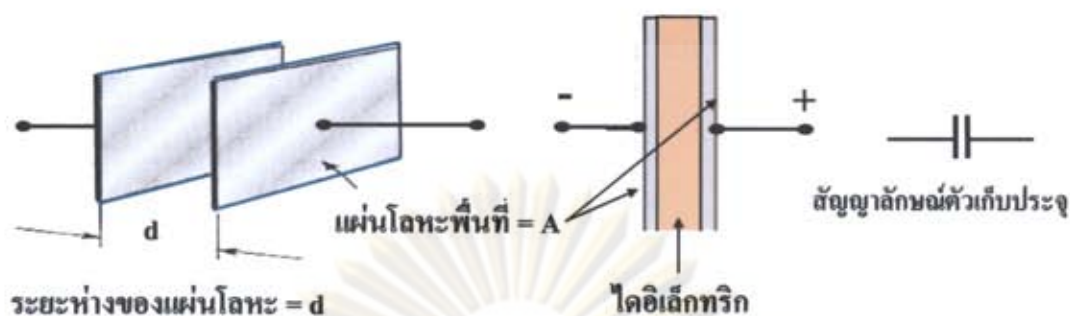
2.4 ค่าความจุไฟฟ้าและตัวเก็บประจุ [13]

ความจุไฟฟ้า (Capacitance) คือค่าที่บอกถึงจำนวนประจุไฟฟ้าที่สะสมเอาไว้บนแผ่นโลหะคู่ขนานของตัวเก็บประจุ ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างแผ่นโลหะนั้น ยิ่งตัวเก็บประจุมีค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้น ย่อมใช้จำนวนประจุไฟฟ้ามากขึ้นตามไปด้วย โดยที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่าเดิม ค่าความจุไฟฟ้ามีหน่วยที่เรียกว่า ฟารัด (Farad, F) ค่าความจุไฟฟ้า (C) 1 ฟารัด หมายถึงความจุไฟฟ้าของตัวนำที่มีประจุไฟฟ้า (Q) 1 คูลอมบ์ และ ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) 1 โวลต์ ดังสมการที่ 2-7

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2-7)$$

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถสะสมประจุไฟฟ้าเอาไว้ได้ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ปริมาณที่บ่งบอกความสามารถในการเก็บสะสมนี้เรียกว่า ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance, C) ตัวเก็บประจุถูกใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางในวงจรไฟฟ้าตัวเก็บประจุสร้างจากแผ่นตัวนำคู่ขนาน โดยใช้แผ่นตัวนำวางแบบขนาน 2 แผ่น (หรือมากกว่า) วางห่างกันเป็นระยะ d มีพื้นที่ตั้งฉากระหว่างแผ่นคู่ขนาน A ระหว่างแผ่นตัวนำคู่ขนานนี้ถูกคั่นกลางด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่เรียกว่า สาร ไดอิเล็กทริก แผ่นคู่ขนานแต่ละด้านต่อกับขั้วไฟฟ้างดรูปที่ 2.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะทั่วไปของตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนาน [13]

ค่าความจุไฟฟ้าขณะมีอากาศเป็น ไดอิเล็กทริก คำนวณได้จากสมการที่ 2-8

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2-8)$$

เมื่อใส่ตัวกลางที่ต้องการหาค่าไดอิเล็กทริกลงไประหว่างแผ่นคู่ขนานทั้งสอง สามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการที่ 2-9

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2-9)$$

จะเห็นว่า อัตราส่วน

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r$$

โดย ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (Relative permittivity) หรือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก ดังนั้น

$$C = \epsilon_r C_0 \quad (2-10)$$

หรือกล่าวได้ว่าค่าคงที่ไดอิเล็กทริกคืออัตราส่วนระหว่างค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนานเมื่อมีสาร ไดอิเล็กทริกคั่นอยู่ เทียบกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแผ่นคู่ขนานเมื่อมีอากาศเป็นสาร ไดอิเล็กทริก ดังแสดงในสมการ 2-6

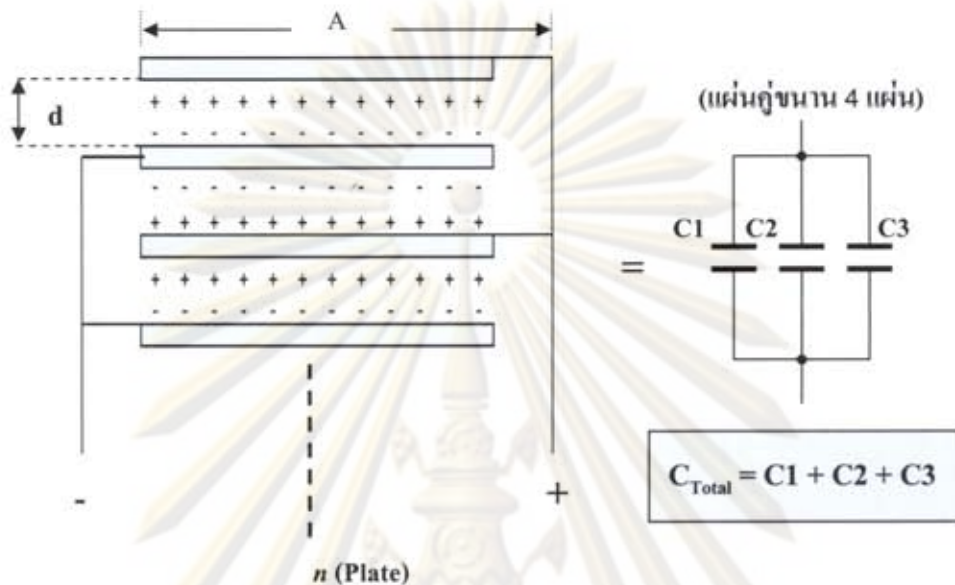
ในกรณีที่สาร ไดอิเล็กทริกบรรจุอยู่เต็มบริเวณ ระหว่างแผ่นคู่ขนานของตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนาน ค่าความต่างศักย์ (V) ระหว่างแผ่นคู่ขนานพื้นที่ (A) อยู่ห่างกัน (d) กับประจุทั้งหมด (Q) บนแผ่นคู่ขนาน มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 2-11

$$Q = \left(\frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \right) V \quad (2-11)$$

แทนสมการที่ 2-7 ในสมการที่ 2-11 จะได้

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2-12)$$

สมการที่ 2-12 เป็นการหาค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากตัวเก็บประจุเพียง 1 ตัว (แผ่นคู่ขนานเพียง 1 คู่) หากต้องการให้ตัวเก็บประจุสามารถเก็บประจุได้มากขึ้น สามารถทำได้โดยเพิ่มแผ่นโลหะเข้าไป ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวเก็บประจุแบบขนานมากกว่าหนึ่งตัว

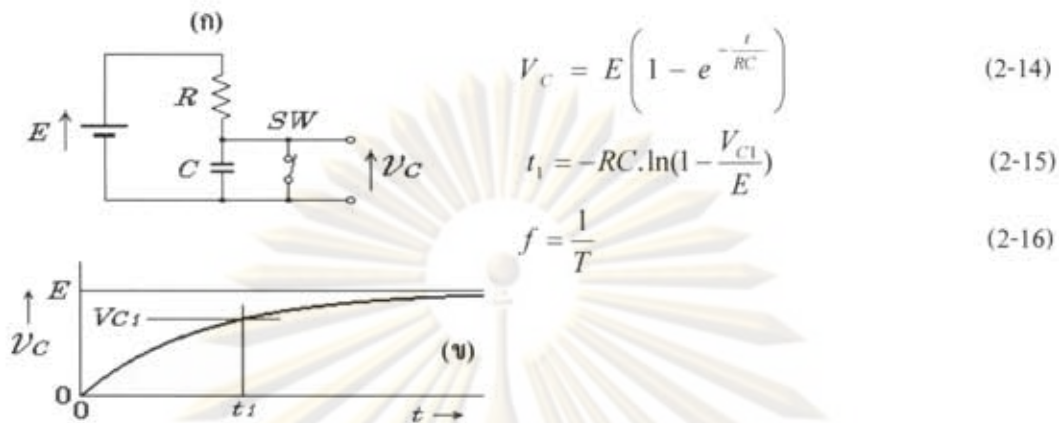
จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าแผ่นคู่ขนานวางเรียงกันอยู่จำนวน 4 แผ่น แต่มีช่องว่างสำหรับเป็นที่อยู่ของไดอิเล็กทริกได้เพียง 3 ช่อง นั่นคือมีตัวเก็บประจุเพียง 3 ตัวเท่านั้น หากมีแผ่นคู่ขนานจำนวน n แผ่นเราสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการที่ 2-13

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A (n-1)}{d} \quad (2-13)$$

2.5 การทำงานของตัวเก็บประจุ [6]

เมื่อตัวเก็บประจุต่อกับแหล่งกำเนิดที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าที่เป็นอิเล็กตรอนอิสระจะไหลจากแผ่นคู่ขนานด้านที่ต่อกับศักย์ไฟฟ้าบวก ผ่านแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปสะสมอยู่ที่แผ่นคู่ขนานอีกด้าน ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างแผ่นคู่ขนานทั้งสอง (ดูรูปที่ 2.3) เมื่ออิเล็กตรอนไหลไปสะสมอยู่ที่อีกด้านหนึ่งมากขึ้น จะทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแผ่นคู่ขนานทั้งสองมากขึ้นตามไปด้วย และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นนี้จะหยุดลงเมื่ออิเล็กตรอนหยุดไหล นั่นคือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแผ่นโลหะทั้งสอง มีค่าเท่ากับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการที่มีประจุไฟฟ้าไหลมาสะสมอยู่ที่แผ่นโลหะทั้งสองนี้เรียกว่า *การประจุ* (Charge) และเมื่อเรานำตัวเก็บประจุนี้ไปต่อกับภาระ (load) อิเล็กตรอนที่สะสมอยู่บนแผ่นโลหะจะไหลผ่าน

ภาวะสู่แผ่นโลหะอีกด้าน ทำให้ประจุไฟฟ้าในตัวเก็บประจุมีค่าลดลง กระบวนการนี้เรียกว่าการคายประจุ (Discharge)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างวงจรการทำงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (ก) และกราฟแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ขณะทำการประจุ (Charge) (ข)

โดย

V_C = แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

t = เวลาที่ใช้ในการประจุให้กับตัวเก็บประจุไฟฟ้าจนเต็ม (ประมาณ 99.3% ของแรงดันที่ป้อนให้กับวงจร) $t \approx 5RC$

t_1 = เวลาที่ใช้ในการประจุให้กับตัวเก็บประจุที่ 2 ใน 3 ของแรงดันที่ป้อนให้กับวงจร

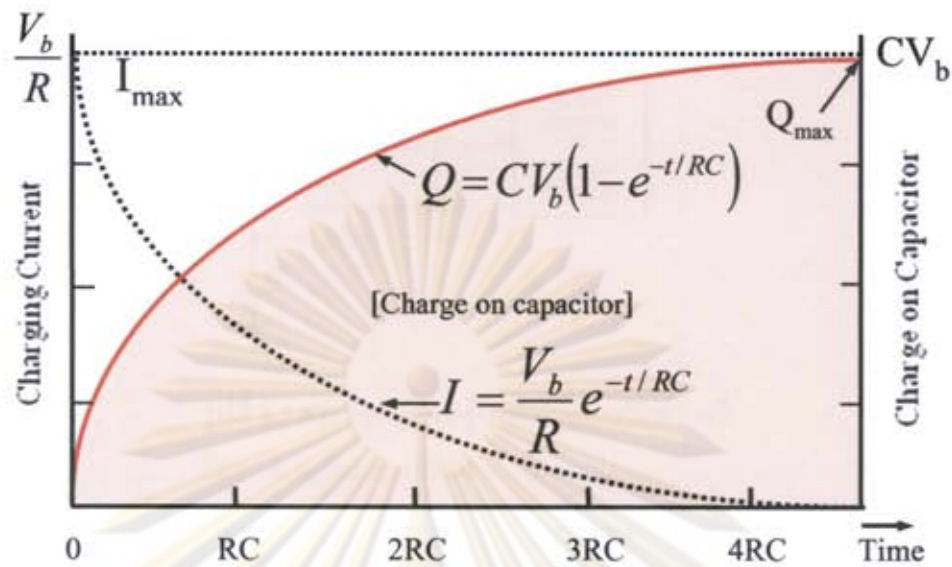
f = ความถี่ที่ใช้ในการประจุ (Charging Frequency)

E = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้วงจร

R = ตัวความต้านทาน

C = ตัวเก็บประจุ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของประจุไฟฟ้า (Q) บนตัวเก็บประจุ และการลดลงของกระแสไฟฟ้าในวงจร ขณะกำลังทำการประจุ (Charging) [13]

จากรูปที่ 2.5 (ก) เมื่อเริ่มต่อสะพานไฟ (Switch; SW) เปิดสวิช ($t = 0$) กระแสในวงจร (I) จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ $\frac{V_b}{R}$ และตัวเก็บประจุ (C) เริ่มทำการประจุ (Charging) เมื่อเวลาผ่านไป กระแสไฟฟ้าในวงจรจะลดลงดังสมการที่ 2-17 และ ตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นตามสมการที่ 2-18

$$I = \frac{V_b}{R} e^{-t/RC} \quad (2-17)$$

$$Q = CV_b (1 - e^{-t/RC}) \quad (2-18)$$

การเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสไฟฟ้า (I) ในวงจร และปริมาณประจุไฟฟ้า (Q) ในตัวเก็บประจุ (C) แสดงในรูปที่ 2.6

2.6 ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุ

ความต้านทานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเรียกว่า Reactance (X_c) คำนวณได้จากสมการที่ 2-19

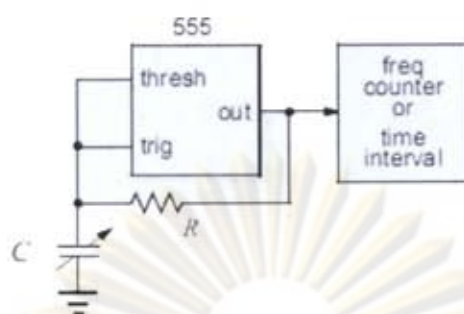
$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2-19)$$

เมื่อ X_c = ความต้านทานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Ω)

f = ความถี่ในวงจร (Hz)

C = ค่าความจุไฟฟ้า (Farad)

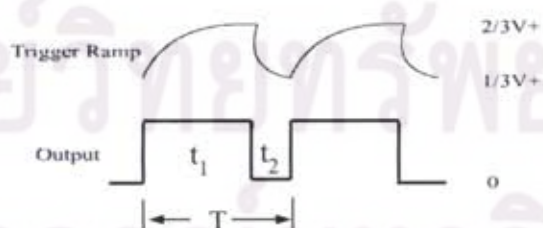
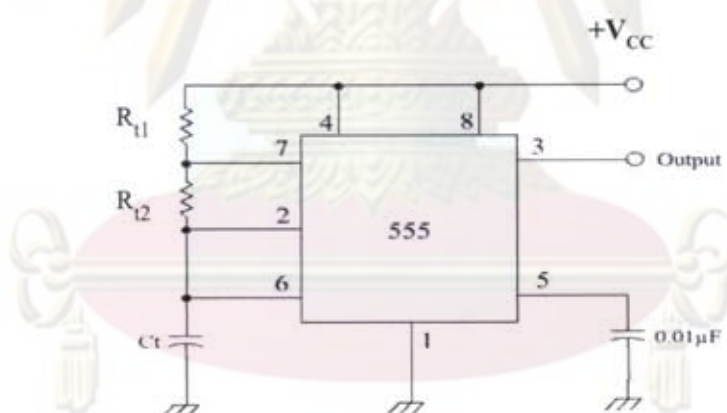
2.7 การวัดค่าความจุไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 การวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยการวัดความถี่
ที่มา : L.K. Baxter (2000)

การวัดค่าความจุไฟฟ้าสามารถทำได้หลายวิธี ตัวอย่างหนึ่งดังรูปที่ 2.7 แสดงการทำงานของ วงจร RC-Oscillator โดยใช้ ไอซี 555 ซึ่งเป็นไอซีสร้างคาบเวลา ความถี่ที่เกิดขึ้น เกิดจากการ เปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า แล้วนำความถี่ที่เกิดขึ้นมาผ่านวงจรมับความถี่ (Frequency counter) แล้ว คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับค่าความจุไฟฟ้า

2.8 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Monostable Multivibrator)



รูปที่ 2.8 วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์
ที่มา : Phillips Semiconductors, 1994

โดย $t_1 = 0.693 (R_{i1} + R_{i2})C_i$ (2-20)

$$t_2 = 0.693 R_{i2}C_i \quad (2-21)$$

$$T = 0.693 (R_{i1} + 2R_{i2})C_i \quad (2-22)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_{i1} + 2R_{i2})C_i} \quad (2-23)$$

การทำงานของวงจร

1. จากรูปที่ 2.8 เมื่อป้อนแหล่งจ่าย $+V_{CC}$ เข้าวงจรมีกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งไหลผ่าน R_{i1} และ R_{i2} มาประจุที่ C_i ทำให้แรงดันที่ตกคร่อม C_i มีค่าสูงขึ้นจนถึง $1/3$ ของแหล่งจ่าย $+V_{CC}$ ขา 2 ซึ่งมีความไวต่อแรงดันนี้จะจุดชนวน (Trigger) ทำให้เอาต์พุตเปลี่ยนจากระดับต่ำ (Low) เป็นระดับสูง (High) ทันที

2. แรงดันที่ตกคร่อม C_i จะสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีระดับแรงดัน $2/3$ ของแหล่งจ่าย $+V_{CC}$ ขา 6 ซึ่งมีความไวต่อแรงดัน จะตรวจจับทำให้เอาต์พุต (Output) เปลี่ยนจากระดับสูงเป็นระดับต่ำ และเป็นผลทำให้ขา 7 มีความต้านทานต่ำ C_i จะคายประจุผ่าน R_{i2} ที่ต่ออยู่กับขา 6 ซึ่งมีความไวต่อศักย์ไฟฟ้าในระดับนี้ จึงทำให้เอาต์พุต เปลี่ยนจากระดับต่ำเป็นระดับสูงอีกครั้ง

3. การที่เอาต์พุตเปลี่ยนจากระดับศักย์ไฟฟ้าต่ำเป็นระดับสูงทำให้ขา 7 มีความต้านทานสูง ตัวเก็บประจุ C_i ประจุผ่าน R_{i1} และ R_{i2} ใหม่อีกครั้ง ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นหนึ่งรอบของการทำงาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ การใช้น้ำมันปาล์มเพื่อทอดอาหารในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป ขั้นตอนการวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. วิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) และสารโพลาร์ (TPM) ในน้ำมันปาล์มจำนวน 40 ตัวอย่างที่เก็บจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปใน ขณะปฏิบัติงานจริง
2. ออกแบบและสร้างตัวรับรู้โดยอาศัยหลักการวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitive sensor) ออกแบบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า วงจรวัดอุณหภูมิ พร้อมส่วนแสดงผล
3. คัดเลือกน้ำมันตัวอย่างที่ดีและเหมาะสม จากน้ำมันปาล์มจำนวน 40 ตัวอย่าง (ขั้นตอนการคัดเลือกน้ำมันตัวอย่างโดยละเอียดแสดงในบทที่ 4)
4. ทำการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมันตัวอย่างที่ถูกเลือก ด้วยตัวรับรู้ที่สร้างขึ้น
5. คำนวณหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณสารโพลาร์กับค่าความจุไฟฟ้า
6. สร้างส่วนแสดงผลปริมาณสาร โพลาร์ โดยใช้สมการความสัมพันธ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5
7. ทดลองวัดน้ำมันตัวอย่างด้วยมาตรวัดฯ ที่เสร็จสมบูรณ์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

3.2 ประชากร

จากการศึกษาพบว่ามีการใช้งานน้ำมันทอดอาหารใน 2 ลักษณะ คือ การทอดอาหารแบบต่อเนื่องไปจนกว่าน้ำมันจะเสื่อมคุณภาพแล้วจึงเปลี่ยนน้ำมันใหม่ทั้งหมด และการทอดอาหารแบบมีการเติมน้ำมันใหม่ลงในหม้อทอดเป็นช่วงๆ โดยมีเกณฑ์การเติมน้ำมันใหม่ 2 ลักษณะคือ เติมน้ำมันในหม้อทอดมีระดับต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด หรือเติมเมื่อตัววัดทางเคมี [1] ใกล้ถึงเกณฑ์ที่กำหนด ตัววัดที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม คือ กรดไขมันอิสระ (FFA), ค่าเปอร์ออกไซด์ (PV) หรือค่าความเป็นกรด (AV) เป็นต้น เนื่องจากการทอดอาหารในแบบแรกไม่เป็นที่นิยมใช้กันในระบบอุตสาหกรรม และไม่ได้รับความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันจากโรงงานที่ใช้การทอดแบบแรก การจะได้มาซึ่งตัวอย่างน้ำมันในการทอดแบบแรกต้องทำการทดลองทอดด้วยตนเอง ซึ่งจะกระทบต่อความเชื่อมั่น ในผลการวิจัย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกน้ำมันปาล์มที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป เป็นตัวอย่างในการทำการวิจัย เนื่องจากเป็นน้ำมันที่มีการใช้งานในสภาวะการณ์ที่เป็นจริงและมีการใช้น้ำมันปริมาณมากในการผลิตแต่ละครั้ง น้ำมันตัวอย่างที่เก็บมาทำการวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปแห่งหนึ่ง โรงงาน

แห่งนี้ใช้น้ำมันปาล์มในการทอดบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปในครั้งหนึ่งๆประมาณ 3,000 ลิตร อุณหภูมิที่ใช้ในการทอดอยู่ในช่วง $170 - 180^{\circ}\text{C}$ บะหมี่กึ่งสำเร็จแต่ละก้อนถูกทอดในน้ำมันประมาณ 3 นาที น้ำมันตัวอย่างจะถูกสุ่มเก็บวันละ 8 ตัวอย่างๆ ละ 500 ลบ.ซม. ใช้เวลา 5 วันในการเก็บตัวอย่าง รวมตัวอย่างน้ำมันทั้งสิ้น 40 ตัวอย่าง น้ำมันตัวอย่างถูกบรรจุในขวดแก้วสีเขียวทึบแสงปิดสนิทขนาด 750 ลบ.ซม. และบรรจุในกล่องกระดาษอีกชั้นหนึ่ง ตัวอย่างน้ำมันแสดงในรูปที่ 3.1 รายละเอียดวันและเวลาในการเก็บน้ำมันตัวอย่างแสดงในภาคผนวก จ



รูปที่ 3.1 น้ำมันปาล์มตัวอย่างที่เก็บมาเพื่อทำการวิจัยครั้งนี้

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านเคมี

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านเคมี เพื่อหาปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันปาล์มตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 3.2 – 3.5 ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม มีดังต่อไปนี้

1. ภาชนะเครื่องแก้วปริมาตร (Volumetric) เช่น Beaker, Flask, Pipette, ขวดกั้นกลม ขนาดตั้งแต่ 10 – 250 มล. ฯลฯ ยี่ห้อ PYREX ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา
2. คอลัมน์แก้ว (Chromatographic Glass column) ความยาว 45 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 ซม. ยี่ห้อ PYREX ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา

3. ตู้อบ (Hot air oven) ขนาด 50 ลิตร ยี่ห้อ Binder รุ่น F- 50D ผลิตในประเทศเยอรมัน
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP 2215 ผลิตในประเทศเยอรมัน
5. เครื่องระเหยสารภายใต้สุญญากาศ (Rotary evaporator) ยี่ห้อ BUCHI รุ่น R-114 ผลิตในประเทศเยอรมัน
6. สารเคมี
 - Light petroleum (จุดเดือด 40 – 60 °C) ประมาณ 1 ลิตร
 - Solvent 1: Mixture of Light petroleum: Diethyl ether (90:10; v/v)
 - Solvent 2: Diethyl ether
 - Silica gel 125 กรัม
 - Cotton wool
 - Nitrogen (99.0 – 99.8 %)



รูปที่ 3.2 คอลัมน์ และภาชนะเครื่องแก้วปริมาตร ขณะทำการวิเคราะห์หาสารโพลาาร์



รูปที่ 3.3 ตู้อบความร้อน (Hot air oven)



รูปที่ 3.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก แบบดิจิตอล 4 ตำแหน่ง

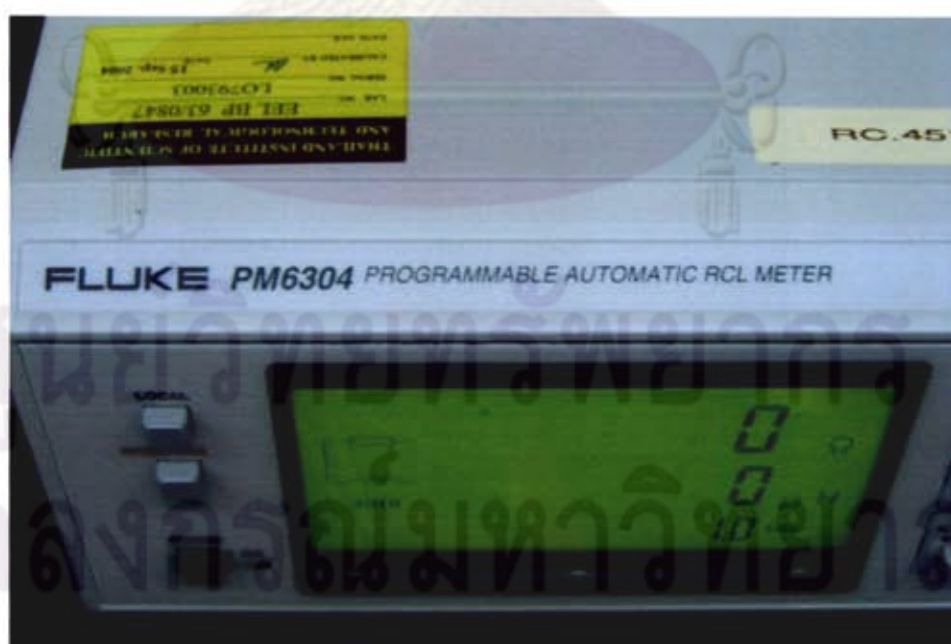


รูปที่ 3.5 เครื่องระเหยสารภายใต้สุญญากาศ (Rotary evaporator)

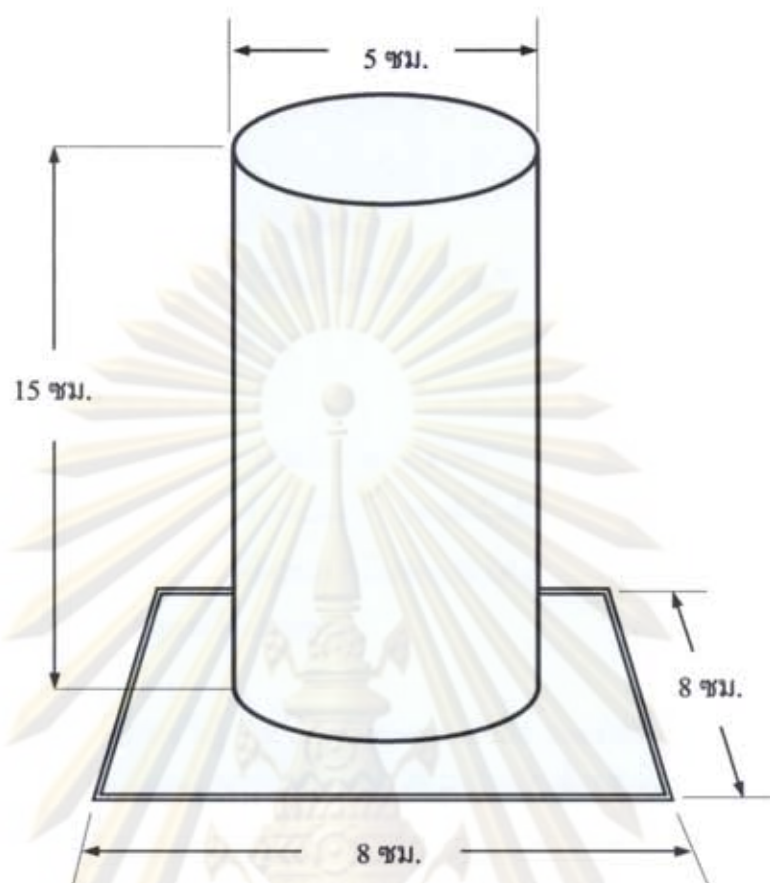
3.3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างมาตรฐานวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างมาตรฐานวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร แสดงในรูปที่ 3.6 – 3.8 โดยเฉพาะรายการที่ 1 (RCL Meter) ได้รับความอนุเคราะห์จาก ห้องปฏิบัติการทางไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เครื่องมือที่ใช้ทั้งหมด มีดังต่อไปนี้

1. เครื่องวัดค่าความต้านทาน ความจุไฟฟ้า และ ค่าเหนี่ยวนำ (Programmable Automatic RCL Meter) ย่านการวัด 1 – 999 pF ความคลาดเคลื่อน $< \pm 20$ ppm. ชี้อี่ห้อ FLUKE รุ่น PM 6304 ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ ย่านการวัด 0 – 250 °C ความแม่นยำ ± 0.5 °C
3. เครื่องวัดความหนา และความกว้างแบบดิจิตอล (Digital caliper) ความละเอียด 0.01 มม.
4. อุปกรณ์วัดความห่าง (Filler gauge) ขนาด 0.1 มม. – 1.0 มม.
5. กระบอกตวงสเตนเลส (ใช้แทนหม้อทอด) ความหนา 1 มม. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 15 ซม. ฐานกว้าง 8 x 8 ซม. (รูปที่ 3.7 – 3.8)
6. เต้าไฟฟ้า กำลังไฟขนาด 1,500 วัตต์
7. ขาตั้งพร้อมเสายึด (Stand)



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดค่าความต้านทาน ความจุไฟฟ้า และ ค่าเหนี่ยวนำ (RCL Meter)



รูปที่ 3.7 รูปร่างและขนาดของ กระบอกตวง



รูปที่ 3.8 กระบอกตวงทำจากสแตนเลส

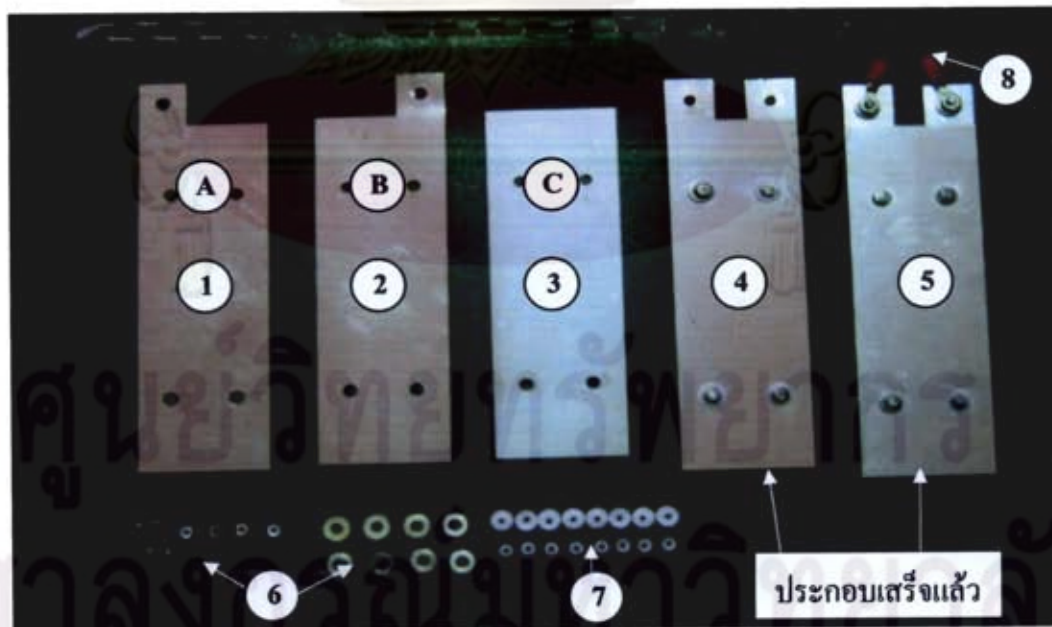
3.3.3 การออกแบบมาตรฐานวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร [10]

1. ตัวรับรู้ (Sensor)

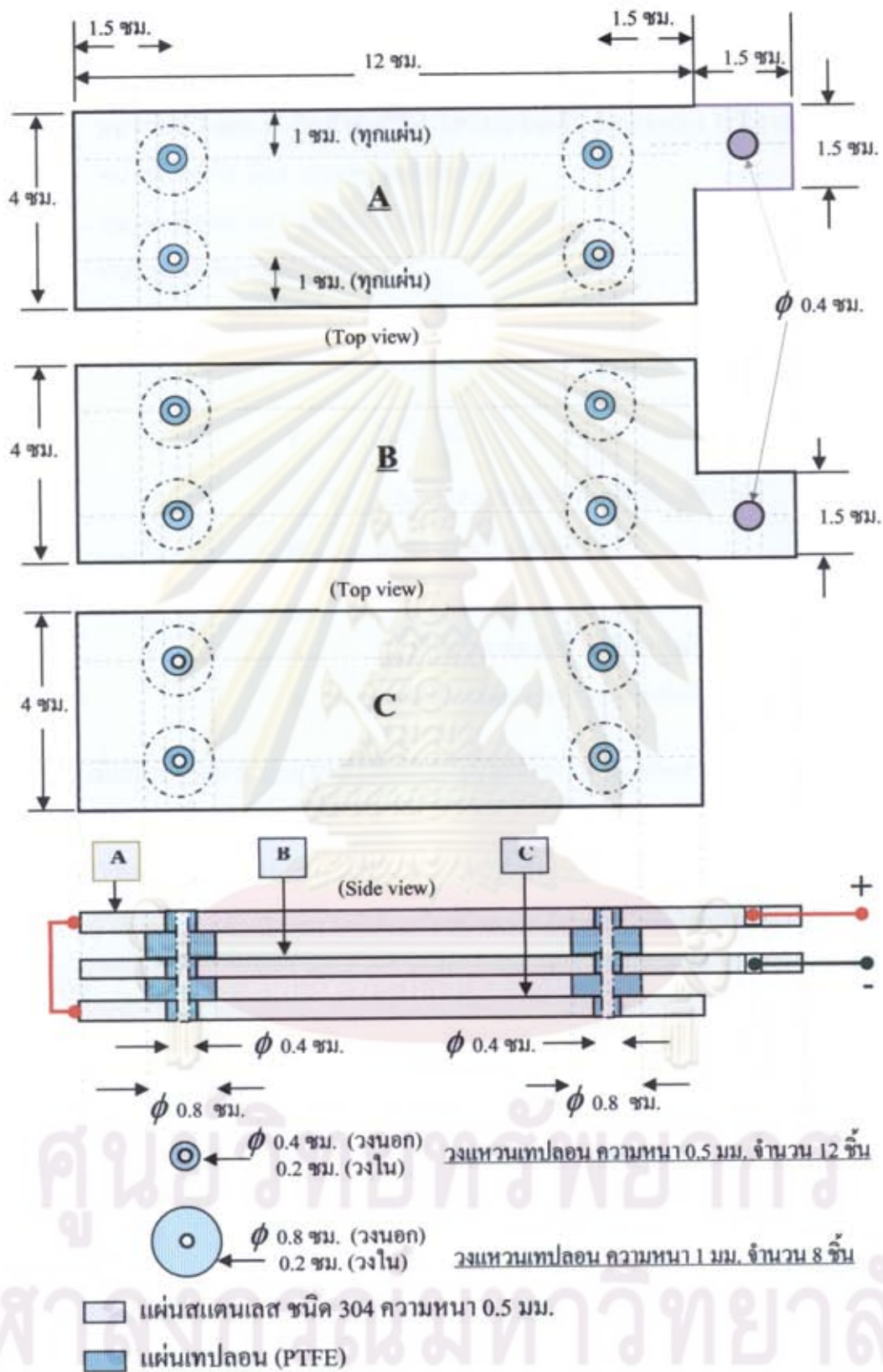
แนวทางในการออกแบบตัวรับรู้คือ :-

- มีขนาดเหมาะสมกับการใช้งาน ไม่ใหญ่จนเกินไป
- ใช้วัสดุที่เป็นไม้เป็นอันตราย
- ไม่ใช่สารเคมีที่อันตราย
- สามารถทำความสะอาด และนำกลับมาใช้ได้
- สายสัญญาณ ไม่ยาวหรือสั้นจนเกินไป โดยคำนึงถึงความปลอดภัยและสัญญาณรบกวน
- สามารถใช้ได้ทั้งแบตเตอรี่ขนาด 9 โวลต์ และไฟ AC 220 โวลต์
- มีราคาถูก ใช้วัสดุภายในประเทศ

แผ่นตัวนำที่นำมาทำตัวรับรู้ ทำจากแผ่นสแตนเลสชนิด 304 มีความหนา 0.5 มม. วางขนานกัน 3 แผ่น ขึ้นรูปด้วยเลเซอร์ (Laser Cutting) เพื่อความแม่นยำ ใช้แผ่นเทปลอน (PTFE) เป็นตัวฉนวนชั้นระหว่างแผ่นตัวนำ ใช้น็อตสแตนเลสเป็นตัวยึด รูปร่างและขนาดของตัวรับรู้แสดงในรูปที่ 3.9 – 3.10



รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบต่างๆของตัวรับรู้ และตัวรับรู้ที่ประกอบเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.10 รูปร่างและขนาดของตัวรับรู้

ส่วนประกอบของตัวรับรู้ในรูปที่ 3.9 มีดังนี้

- หมายเลข 1, 2 และ 3 คือ แผ่นตัวนำ A, B และ C ทำจากสแตนเลส 304
- หมายเลข 4 และ 5 คือ ตัวรับรู้ที่ประกอบเสร็จแล้ว (หมายเลข 4 ไม่มีสายสัญญาณ)
- หมายเลข 6 คือ นี้อด และแหวนสแตนเลส
- หมายเลข 7 คือ แหวนเทพลอน (PTFE)
- หมายเลข 8 คือ สายสัญญาณ

ค่าความจุไฟฟ้า (C) ของตัวรับรู้ที่ออกแบบ ขณะอยู่ในอากาศ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-13

โดย

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A(n-1)}{d} = 85 \text{ pF}$$

$$\epsilon_r = 1.0005 \text{ (ค่าความยอมสัมพัทธ์ของอากาศ)}$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ ฟารัด/ม.}$$

$$A = 0.0048 \text{ ม.}^2 \text{ (พื้นที่ของแผ่นตัวเก็บประจุหนึ่งแผ่น)}$$

$$n = 3 \text{ (จำนวนแผ่นตัวนำที่นำมาทำตัวเก็บประจุ)}$$

$$d = 0.001 \text{ ม. (ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ)}$$

เมื่อทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้ด้วยเครื่อง RCL Meter (รูปที่ 3.11) ขณะไม่รวมสายสัญญาณ ได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 90.5 pF ซึ่งห่างจากการคำนวณประมาณ 5.5 pF ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากแผ่นเทพลอนที่ทำเป็นฉนวนกั้นระหว่างแผ่นตัวนำ เพื่อกำหนดระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ (d) ซึ่งเทพลอนจัดเป็นสารไดอิเล็กทริกชนิดหนึ่ง มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r) ประมาณ 2 ซึ่งสูงกว่าค่า ϵ_r ของอากาศ ทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นในการสร้างตัวรับรู้ขึ้นใหม่ต้องระวังความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากขนาดของแผ่นเทพลอน ที่นำมาทำเป็นฉนวนกั้น



รูปที่ 3.11 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้ขณะอยู่ในอากาศปกติ (ไม่รวมสายสัญญาณ)

2. สายสัญญาณ และขั้วต่อ

จากรูปที่ 3.12 เป็นสายสัญญาณแบบ 2 สาย (Dual core) มีชีลด์ (Shield) แบบตาข่าย โลหะคลุมด้านนอกเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากสนามไฟฟ้าหรือคลื่นวิทยุโดยรอบ เป็นสายสัญญาณที่ใช้เป็นตัวต่อขยายความยาว สำหรับตัวรับรู้ทางด้านอุณหภูมิ แบบเทอร์มोकัปเปิลชนิด K (Thermocouple extension wires; Type K; Model : EXT-T-K-20-SB-T OMEGA Inc. USA.) มีความต้านทานในสายต่ำ (Low impedance) มีการรบกวนจากสัญญาณภายนอกน้อย (Low noise cables) สายสัญญาณที่มีความยาวมากๆ จะมีสเตรย์คาปาซิแตนซ์ (Stray capacitance) และความต้านทานของสายมากกว่าสายสัญญาณที่สั้นกว่า ซึ่งจะมีผลกระทบต่อผลการวัด แต่หากสายสัญญาณสั้นเกินไป จะทำให้ตัวมาตรวัดฯและผู้ใช้มาตรวัดฯอยู่ใกล้หม้อทอดหรือเตาไฟมากเกินไป อาจเป็นอันตรายได้ สายสัญญาณของมาตรวัดฯนี้ยาวเท่ากับ 78 เซนติเมตร พร้อมขั้วต่อแบบ BNC และขั้วต่อแบบหางปลา ค่าสเตรย์คาปาซิแตนซ์ของสายสัญญาณทั้งชุดเท่ากับ 56 pF ค่าความจุไฟฟ้ารวมของตัวรับรู้เมื่อประกอบสายสัญญาณแล้วเท่ากับ 151.5 pF (90.5 + 56 pF) คุณสมบัติของสายสัญญาณแสดงในภาคผนวก จ



รูปที่ 3.12 สายสัญญาณพร้อมขั้วต่อ BNC และขั้วต่อแบบหางปลา

3. มาตรฐานคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร

มาตรฐานมีลำดับขั้นตอนการออกแบบดังนี้

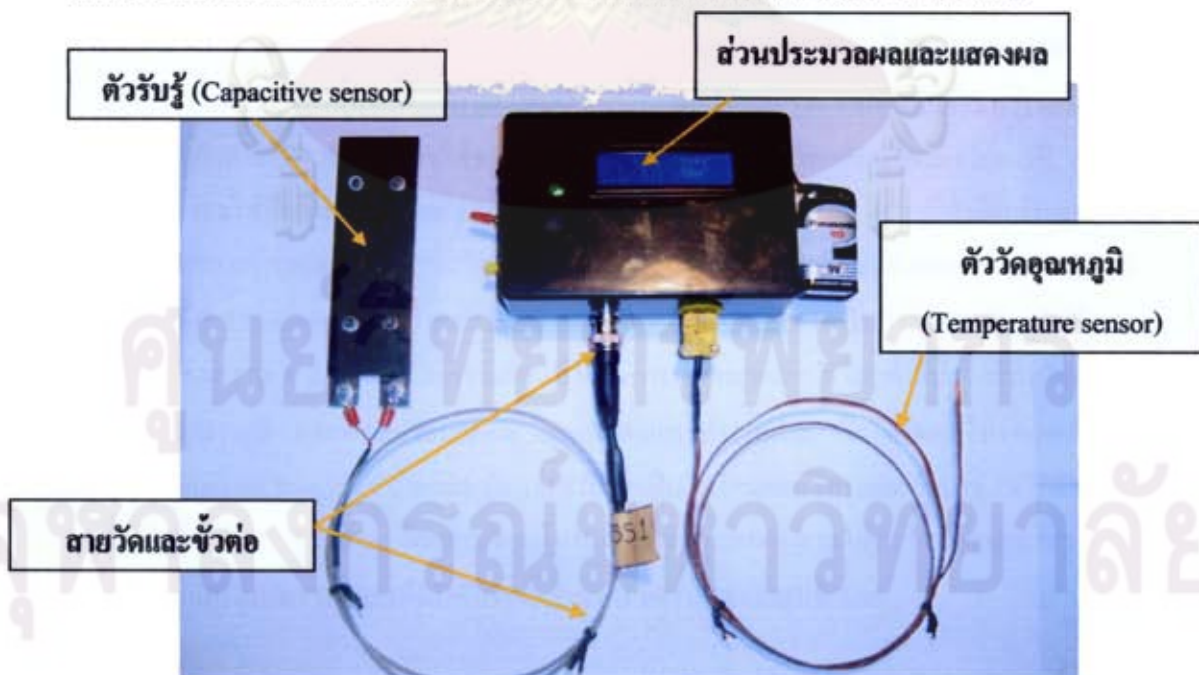
- ออกแบบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า และอุณหภูมิโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F876 เป็นตัวประมวลผล ให้สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าในช่วง 1 - 500 pF และวัดอุณหภูมิในช่วง 0 - 250 °C ได้ (จากการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยตัวรับรู้โดยใช้ RCL - Meter ในรูปที่ 3.6 เป็นตัวอ่าน กับน้ำมันตัวอย่างที่มีค่าสารโพลาไรท์เท่ากับ 24.9 % TPM ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ มีค่าไม่เกิน 400 pF ที่อุณหภูมิน้ำมันประมาณ 170 °C)

- ออกแบบส่วนแสดงผลให้สามารถเข้าใจได้ง่าย และชัดเจน

- ทดสอบความถูกต้องของผลการวัดค่าความจุไฟฟ้า ด้วยตัวเก็บประจุที่ทราบค่าแล้ว โดยใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่าที่จะหาได้เป็นตัวเก็บประจุอ้างอิง ทำการปรับค่าการแสดงผลของมาตรวัดฯ ให้ตรงกับตัวเก็บประจุอ้างอิง ผิดพลาดได้ไม่เกินค่าความคลาดเคลื่อนของตัวเก็บประจุอ้างอิง

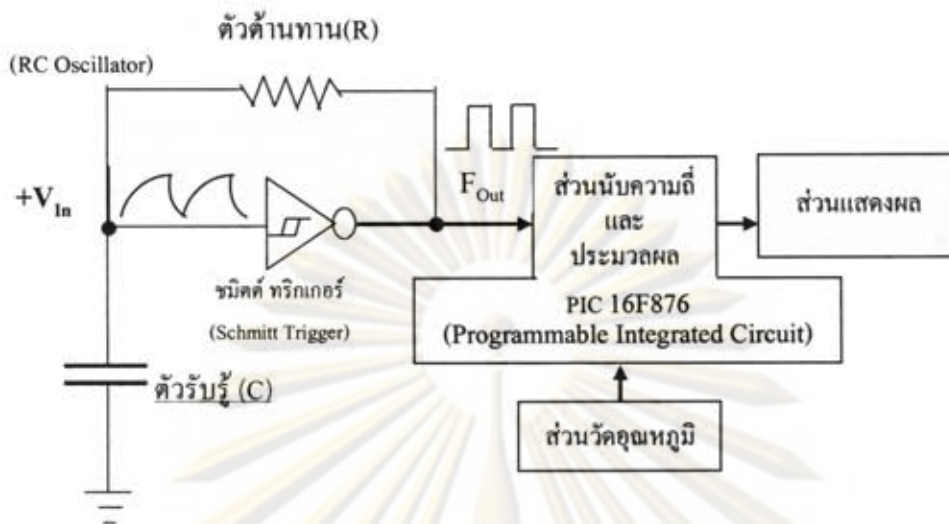
- ทำการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยตัวรับรู้และมาตรวัดฯจนครบทุกตัวอย่าง

- คำนวณหาสมการความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับปริมาณสารโพลาไรท์ แล้วนำสมการที่ได้ ไปเป็นสมการตัวแปรในการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นปริมาณสารโพลาไรท์ โดยการเขียนโปรแกรมการทำงานให้กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F876 ทำการประมวลผล รูปของมาตรวัดฯ แสดงในรูปที่ 3.13 ภาพลายวงจรพิมพ์พร้อมลายละเอียดอุปกรณ์ และ โปรแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยภาษา C แสดงในภาคผนวก ข และ จ ตามลำดับ



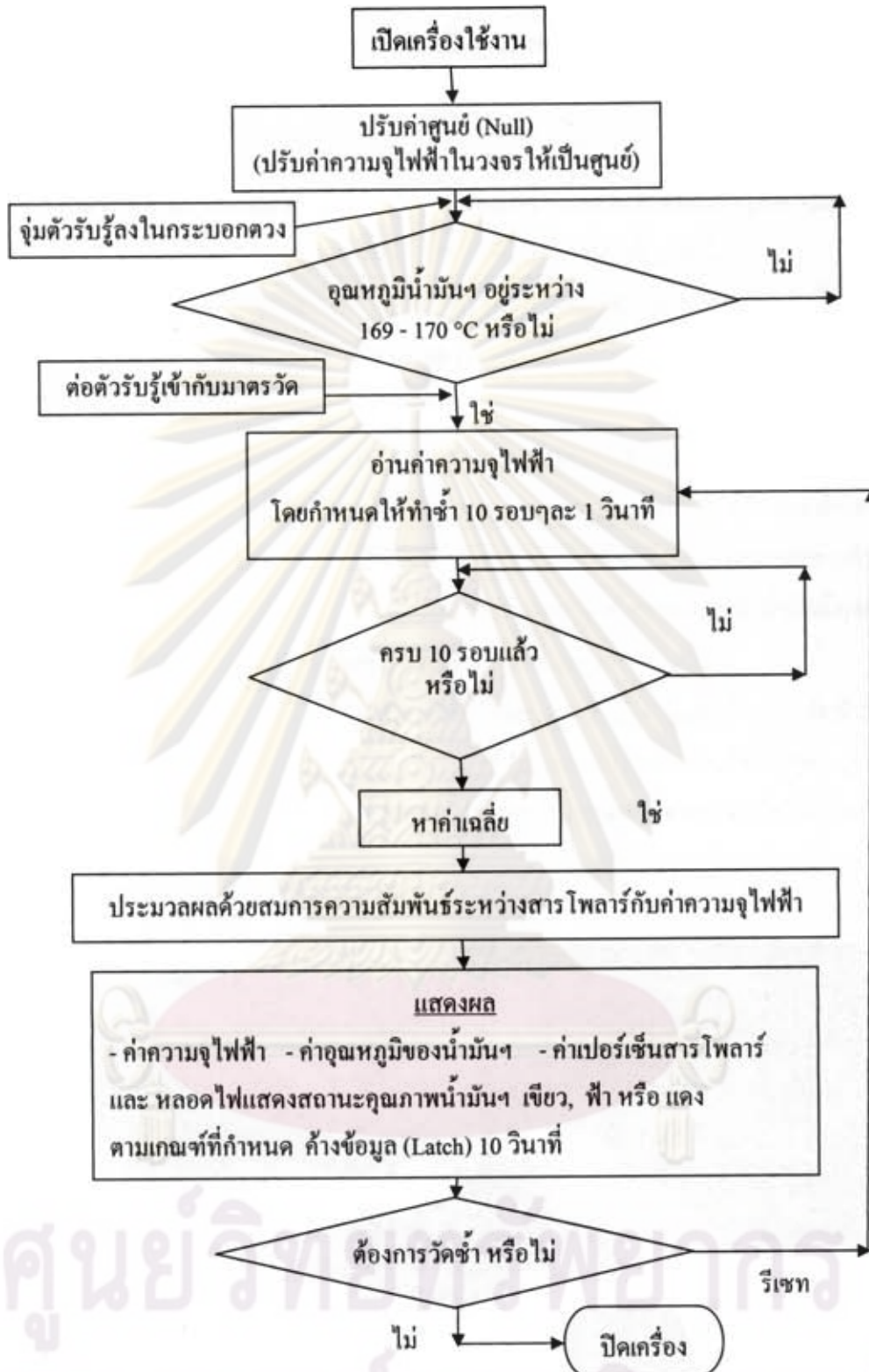
รูปที่ 3.13 มาตรฐานคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร

3.4 การทำงานของวงจรในมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร



รูปที่ 3.14 กระบวนการทำงานของมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร

จากรูปที่ 3.14 เมื่อนำตัวรับรู้จุ่มลงในน้ำมันทอดอาหาร น้ำมันฯซึ่งเป็นไดอิเล็กทริกชนิดหนึ่งจะเข้าแทนที่อากาศในตัวรับรู้ทำให้ตัวรับรู้มีค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำมันมีค่ามากกว่าอากาศ (น้ำมันใหม่ $K \sim 2$) ตัวรับรู้ถูกประกอบเป็นส่วนหนึ่งของวงจรกำเนิดความถี่แบบ RC Oscillator ความถี่ที่เกิดขึ้น เกิดจากการประจุ (Charge) และคายประจุ (Discharge) ของตัวรับรู้ และถูกส่งผ่านไปยังวงจรชmitt์ทริกเกอร์ (Schmitt Trigger) เพื่อแปลงรูปสัญญาณความถี่แบบฟันเลื่อยให้เป็นความถี่แบบดิจิตอล ส่วนนับความถี่จะนำความถี่ที่นับได้ไปแปลงเป็นค่าความจุไฟฟ้า ด้วยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่กับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง จากนั้นทำการประมวลผลอีกครั้ง โดยใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าสารโพลาไรท์คำนวณได้จากการวัดน้ำมันตัวอย่างด้วยวิธีคอลัมน์โครมาโทกราฟี กับการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance meter) ส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งที่มีผลกระทบต่อการทำงานคือส่วนวัดอุณหภูมิ เนื่องจากความร้อนมีผลกระทบโดยตรงกับค่าความหนืด (Viscosity) และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในน้ำมันทอดอาหาร ในการทดลองครั้งนี้ใช้ความร้อนในช่วง 170 ± 2 °C ซึ่งเป็นความร้อนที่ใช้ในการประกอบอาหารโดยทั่วไป ส่วนนับความถี่ ส่วนวัดอุณหภูมิ และส่วนประมวลผล ถูกควบคุมการทำงานด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC (Programmable Integrated Circuit) รุ่น 16F876 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 16 บิต ทำงานที่ความถี่นาฬิกา 5 MHz โดยการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยโปรแกรมภาษา C แผนผังลำดับงานของมาตรวัดฯ แสดงในรูปที่ 3.15

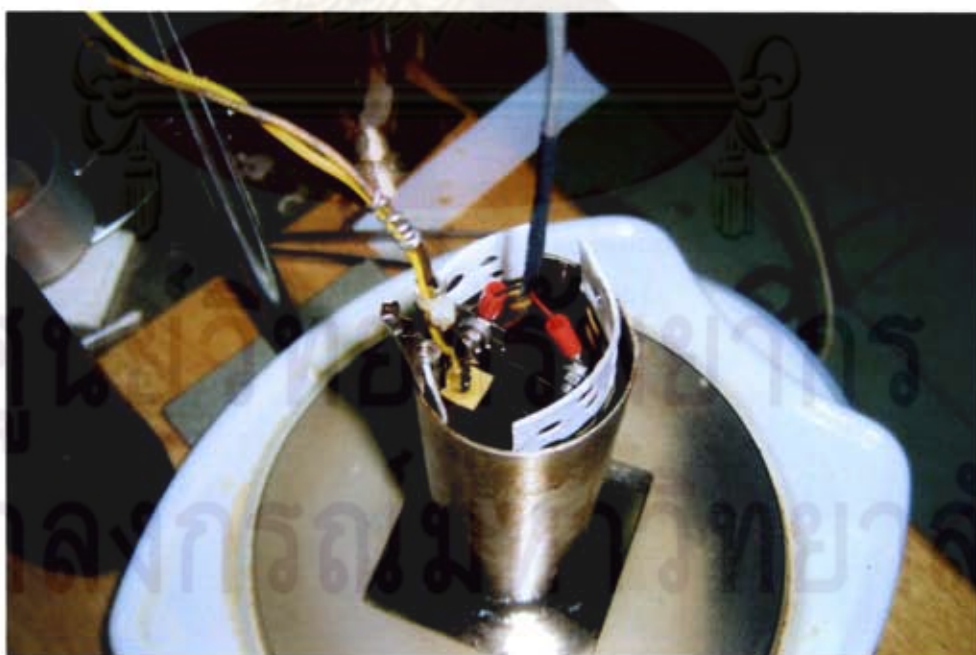


รูปที่ 3.15 แผนผังลำดับงานของมาตรวัดฯ

3.5 การทดลองทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร

ลำดับขั้นการทดลองมีดังนี้

1. เทน้ำมันตัวอย่างประมาณ 250 ลบ.ซม. ลงในกระบอกตวงสแตนเลส (รูปที่ 3.8)
2. นำกระบอกตวงไปตั้งบนเตาไฟฟ้า และทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 170°C
3. จุ่มตัวรับรู้พร้อมตัววัดอุณหภูมิ ลงในกระบอกตวงด้วยความระมัดระวัง พร้อมกับใส่แผ่นเทปลอนป้องกันตัวรับรู้สัมผัสกับผิวกระบอกตวง แสดงในรูปที่ 3.16
4. รอจนกระทั่งน้ำมันมีอุณหภูมิ 170°C อีกครั้ง จากนั้นต่อสายสัญญาณของตัวรับรู้เข้ากับตัวมาตรวัดฯ และเปิดสวิทซ์ให้มาตรวัดฯทำงาน เพื่อทำการอ่านค่าความจุไฟฟ้า
5. ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมันตัวอย่างหนึ่งๆ จะทำการวัดซ้ำ 4 ครั้ง กระทำโดยเมื่อการวัดครั้งแรกเรียบร้อยแล้ว ให้ยกตัวรับรู้ให้สูงพ้นกระบอกตวง เพื่อให้ น้ำมันไหลออกจากตัวรับรู้คอยประมาณ 2 – 3 นาที แล้วจุ่มตัวรับรู้ลงไป ในกระบอกตวงซ้ำอีก รอจนกระทั่งน้ำมันมีอุณหภูมิ 170°C อีกครั้ง จึงทำการวัดครั้งที่ 2 ทำอย่างนี้จนครบ 4 รอบการวัด
6. นำค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากน้ำมันแต่ละตัวอย่าง ไปคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB V. 2006a เพื่อให้ได้สมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด
7. นำสมการที่ได้จากข้อ 6. ไปเขียนโปรแกรมแปลงค่าจากค่าความจุไฟฟ้าเป็นค่าสารโพลาไร ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F876



รูปที่ 3.16 ขณะทำการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมันตัวอย่าง

3.6 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันจำนวน 40 ตัวอย่าง ที่วิเคราะห์ได้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ทางด้านเคมี จะถูกคัดเลือกเพื่อให้ได้ตัวอย่างน้ำมันที่ดีที่สุด ในการนำไปวัดค่าความจุไฟฟ้า เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารโพลาร์กับค่าความจุไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงอย่างสอดคล้องกันระหว่างค่า FFA และ TPM [11] ดังแสดงในตารางที่ 3.1 (ขั้นตอนการคัดเลือกน้ำมันแสดงใน บทที่ 4) ผลการคัดเลือกได้น้ำมันจำนวน 13 ตัวอย่าง ที่ถือว่าเป็นตัวแทนที่ดี ที่จะถูกวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร

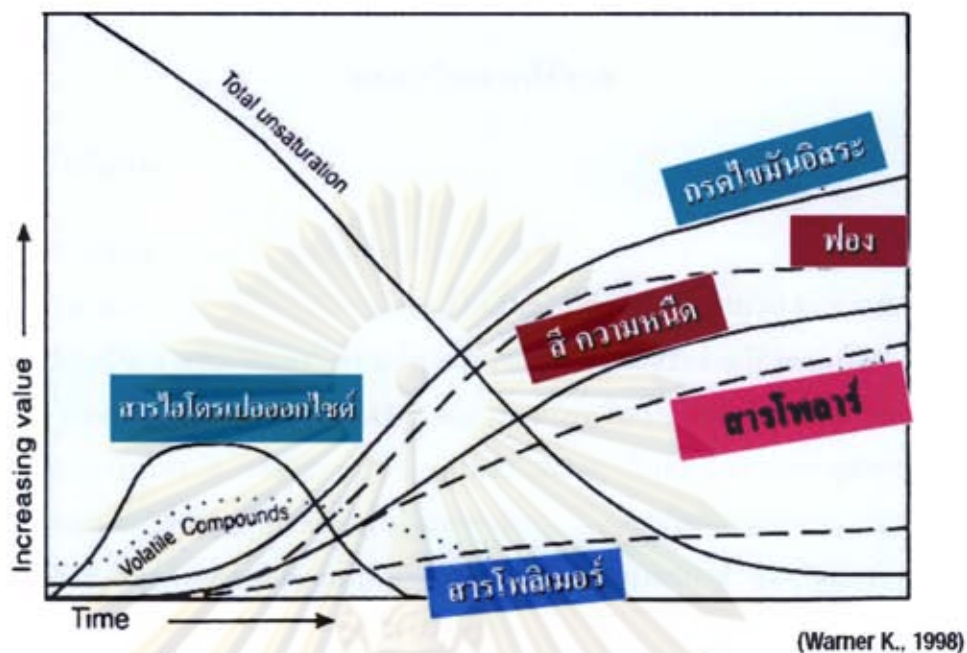
ตารางที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันอิสระและสารโพลาร์ เนื่องจากอายุการใช้งาน

ระยะเวลาการเสื่อมของน้ำมัน (ชม.)	% FFA	% TPM
0	0.03	3.35
10	0.05	1.88
20	0.15	24.21
30	0.34	33.94
40	0.43	41.81
50	0.51	51.21
60	0.61	61.54

จากตารางที่ 3.1 Rosana G. Moreira และเพื่อน [11] ทำการทดลองทอดโดนัทในน้ำมันทอดอาหาร ที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลาติดต่อกัน 60 ชั่วโมง ผลการวัดปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณสารโพลาร์ โดยสุ่มตัวอย่างน้ำมันเพื่อทำการวัดฯ ทุกๆ 10 ชั่วโมง ผลการวัดพบว่า เมื่อเวลาในการทอดยาวนานขึ้น ปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณสารโพลาร์จะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กันในเชิงบวก รูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์สอดคล้องกันระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระกับปริมาณสารโพลาร์ ในน้ำมันทอดอาหาร เมื่อมีการใช้งานนานขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.17 ขณะทำการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมันตัวอย่าง
ที่มา : ทิพยเนตร อริยปิติพันธ์ (2549)

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้โปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์และวิศวกรรมชื่อ โปรแกรม MATLAB (V. 2006a) ในการคำนวณหาสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาณสารโพลาร์กับ ค่าความจุไฟฟ้า ที่ได้จากการวัดด้วยมาตรวัดฯ แล้วนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้ในการแปลงค่าจากค่าความจุไฟฟ้าเป็นค่าสาร โพลาร์ ในส่วนประมวลผลและส่วนแสดงผลของมาตรวัดฯ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการวิเคราะห์

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

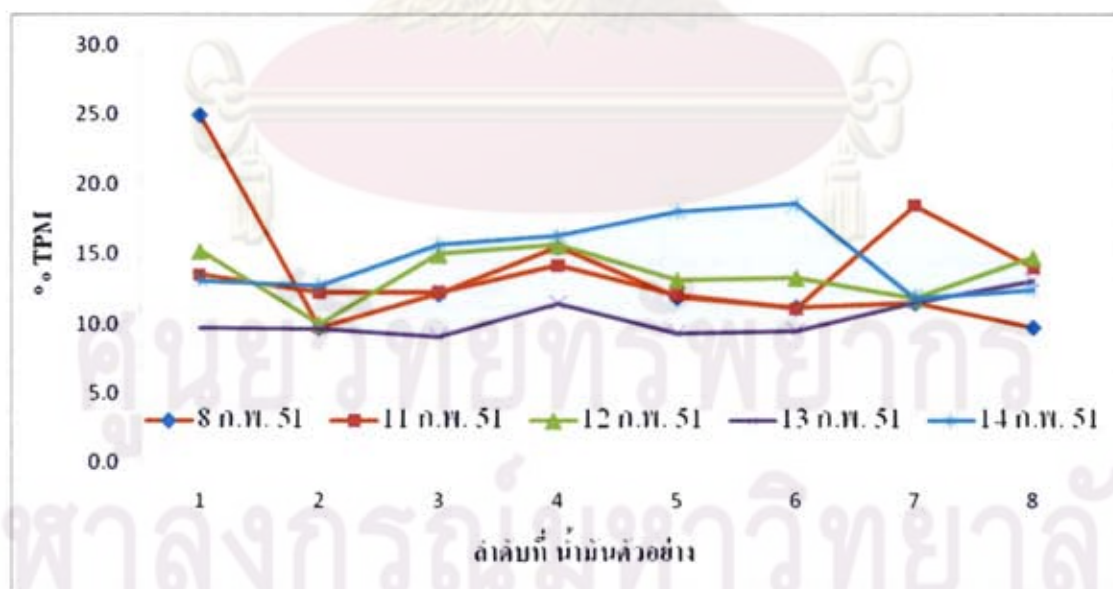
ก. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านเคมีในน้ำมันปาล์มตัวอย่าง จำนวน 40 ตัวอย่าง โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 ส่วน คือการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยวิธีแอลคาไลน์ ไทเทรชัน Alkaline Titration ตามวิธีมาตรฐาน AOAC 940.28 และการวิเคราะห์หาปริมาณสารโพลาร์ ด้วยวิธีคอลัมน์โครมาโทกราฟี ตามวิธีมาตรฐาน AOAC 982.27 ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านเคมีนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม เป็นผู้วิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณสารโพลาร์ ในน้ำมันปาล์มตัวอย่างที่เก็บมาจากโรงงานผลิตบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปแห่งหนึ่ง ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณสารโพลาร์ แสดงในภาคผนวก ก.

ข. ผลการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมันทอดอาหารตัวอย่าง โดยใช้มาตรฐานวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารที่สร้างขึ้น

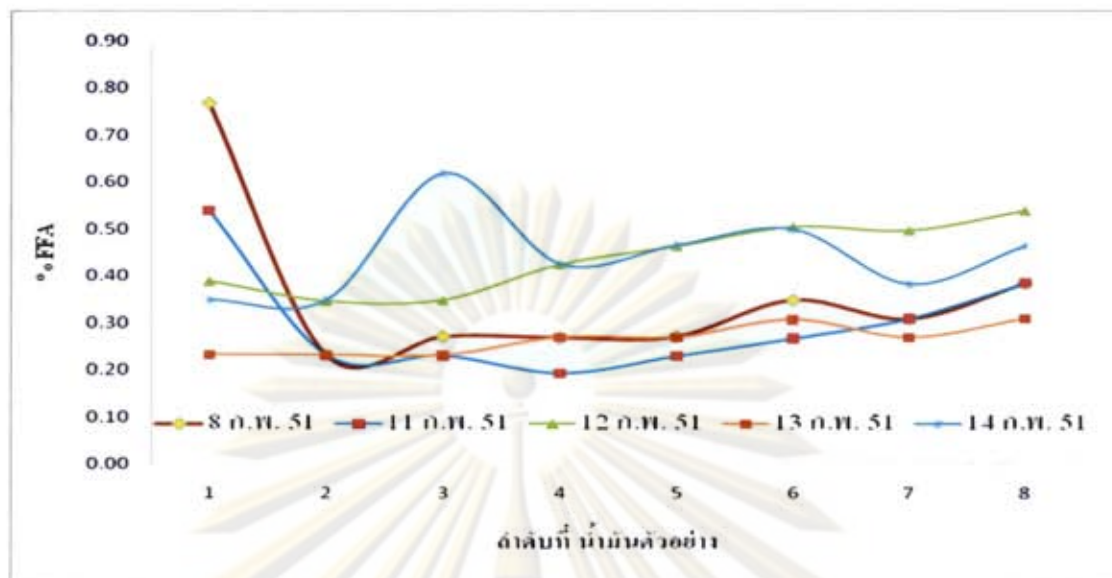
4.1.2 การคัดเลือกน้ำมันตัวอย่างเพื่อทำการทดลองในส่วนการวัดค่าความจุไฟฟ้า

ในส่วนนี้จะทำการคัดเลือกน้ำมันตัวอย่าง ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลอง หลักการคัดเลือกจะใช้ค่ากรดไขมันอิสระ (FFA) เป็นองค์ประกอบร่วมในการพิจารณา เนื่องจากกรดไขมันอิสระเป็นดัชนีชี้วัดความเสื่อมของน้ำมันที่เกิดขึ้นเป็นลำดับแรกในระบบการทอด จากปฏิกิริยากระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) โดยมี น้ำ น้ำมัน และความร้อน เป็นองค์ประกอบ โดยหากทำการทอดต่อเนื่องกันไป กรดไขมันอิสระจะพัฒนาไปเป็น ค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide value) ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) และค่าเปอร์ออกไซด์นี้ก็จะพัฒนาเป็น สารประกอบมีขี้ในช่วงท้ายสุดของอายุการใช้งานน้ำมัน จากปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization reaction) เพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดในการผลิต โรงงานผลิตบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป จึงใช้การควบคุมคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร (น้ำมันปาล์ม) ด้วยการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยวิธีแอลคาไลน์ ไทเทรชัน (Alkaline Titration) ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยาก ซับซ้อนเหมือนกับวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณสาร โพลาร์ ดังนั้นในการคัดเลือกน้ำมันตัวอย่างที่ดี และมีค่าที่ถูกต้อง จากน้ำมัน 40 ตัวอย่าง จะต้องพิจารณาปริมาณสารโพลาร์ควบคู่ไปกับปริมาณ

กรดไขมันอิสระด้วย โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารโพลาร์ กับกรดไขมันอิสระ จะต้องเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน กล่าวคือปริมาณสารโพลาร์เพิ่มขึ้นหรือลดลง กรดไขมันอิสระก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างสอดคล้องกัน โดยปกติในการทอดแบบต่อเนื่อง และไม่มีการเติมน้ำมันใหม่เข้าไปในหม้อทอด ปริมาณกรดไขมันอิสระและสารโพลาร์จะเพิ่มขึ้นสอดคล้องกันอย่างเห็นได้ชัด [11] (แสดงในตารางที่ 3.1 บทที่ 3) เนื่องจากโรงงานที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันนี้ ใช้วิธีควบคุมคุณภาพน้ำมันด้วยการกรองเศษอาหารที่ล่องหล่นในหม้อทอดในขณะที่ทำการทอด ร่วมกับการตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (< 0.8 ค่อน้ำหนัก) หากกรดไขมันอิสระสูงใกล้ถึงเกณฑ์ที่กำหนด ทางโรงงานจะทำการเติมน้ำมันใหม่ลงไป เพื่อเจือจางกรดไขมันอิสระให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด โดยน้ำมันใหม่ที่เติมลงไปจะต้องมีค่ากรดไขมันอิสระไม่เกิน 0.5% ค่อน้ำหนัก เป็นผลให้ปริมาณสารโพลาร์ค่อน้ำหนักลดลงตามไปด้วย เมื่อทำการเติมน้ำมันใหม่ลงไปในหม้อทอด การปรับระดับปริมาณสารโพลาร์และกรดไขมันอิสระนั้น ใช้เวลาแตกต่างกัน การเปลี่ยนแปลงจึงไม่พร้อมกัน ด้วยเหตุนี้ปริมาณสารโพลาร์และกรดไขมันอิสระจึงมีการเปลี่ยนแปลงไม่สอดคล้องกัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $10 - 15\%$ และ $0.2 - 0.5\%$ ตามลำดับ สังเกตได้จากรูปที่ 4.1 - 4.2 จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้คงเหลือน้ำมันที่เป็นตัวแทนที่ดี เพื่อนำไปทำการทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยมาตรวัดฯ จำนวน 13 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ผลการคัดเลือกน้ำมันแสดงในตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระกับสารโพลาร์แสดงในรูปที่ 4.3



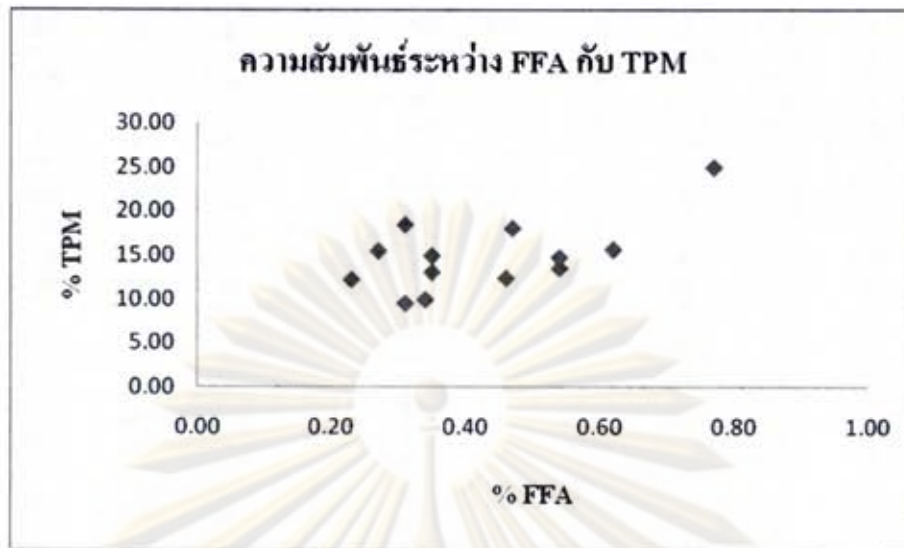
รูปที่ 4.1 ปริมาณสารโพลาร์ (% TPM) ของน้ำมัน 40 ตัวอย่าง แบ่งตามวันที่เก็บ



รูปที่ 4.2 ปริมาณกรดไขมันอิสระ (% FFA) ของน้ำมัน 40 ตัวอย่าง แบ่งตามวันที่เก็บ

ตารางที่ 4.1 น้ำมันตัวอย่างที่ถูกคัดเลือกเพื่อทำการทดลองกับมาตรฐานคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร

น้ำมันจำนวน 13 ตัวอย่างที่ถูกคัดเลือก		
ตัวอย่างที่	ปริมาณกรดไขมันอิสระ (% FFA)	ปริมาณสารโพลาร์ (%TPM)
1	0.31	9.52
2	0.34	9.95
3	0.23	12.24
4	0.46	12.41
5	0.35	13.08
6	0.54	13.52
7	0.54	14.75
8	0.35	14.96
9	0.27	15.49
10	0.62	15.65
11	0.47	18.05
12	0.31	18.46
13	0.77	24.94



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) กับสารโพลาร์ (TPM) ของน้ำมัน 13 ตัวอย่างที่ถูกคัดเลือก

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความจุไฟฟ้า

ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมัน 13 ตัวอย่าง แสดงในตารางที่ 4.2 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับปริมาณสารโพลาร์ แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมัน 13 ตัวอย่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมันตัวอย่างที่ถูกคัดเลือก

ตัวอย่างที่	วิธีคอลัมน์โครมาโทกราฟี		มาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร	
	ปริมาณสาร โพลาร์*	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)*	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1.	9.52	2.2819	292.35	0.2380
2.	9.95	1.7832	292.43	0.2500
3.	12.24	2.3920	292.83	0.2217
4.	12.41	1.5037	292.88	0.2754
5.	13.08	1.8836	292.98	0.2500
6.	13.52	0.9129	293.13	0.1893
7.	14.75	2.4714	293.33	0.2630
8.	14.96	1.1708	293.43	0.2986
9.	15.49	0.4491	293.48	0.2986
10.	15.65	2.8812	293.53	0.3096
11.	18.05	1.6940	294.03	0.2217
12.	18.46	1.6188	294.13	0.2062
13.	24.94	0.4855	295.73	0.3594

* คือ ผลการวัดเฉลี่ย, \bar{x}

4.1.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและปริมาณสารโพลาร์

ในส่วนการประมวลผลส่วนสุดท้ายของมาตรวัดฯ คือการแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ไปเป็นปริมาณสาร โพลาร์นั้น ต้องอาศัยสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับปริมาณสารโพลาร์ และเพื่อให้ได้สมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด จึงใช้โปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์และวิศวกรรม หรือโปรแกรม MATLAB (V. 2006a) ในการคำนวณหาสมการที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ทำการสุ่มชุดข้อมูลปริมาณสารโพลาร์และค่าความจุไฟฟ้าในตารางที่ 4.2 การสุ่มข้อมูล 1 ครั้ง จะแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนๆแรกจำนวน 10 ตัวอย่าง และส่วนที่เหลืออีก 3 ตัวอย่าง โดยส่วนแรกนำไปคำนวณหาสมการความสัมพันธ์ และส่วนที่เหลืออีก 3 ชุด ถูกนำไปแทนค่ากลับในสมการที่คำนวณได้จากการสุ่มในครั้งหนึ่งๆ เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของสมการนั้นๆอีกครั้งหนึ่ง จากชุดข้อมูล 13 ชุด และข้อกำหนดการสุ่มตัวอย่างที่กำหนดข้างต้น ทำให้ได้สมการหลักทั้งสิ้น 286 สมการ และสมการที่เกิดจากการแทนค่าชุดข้อมูล 3 ค่าที่เหลือจากการสุ่มอีก 286 สมการเช่นกัน หลังจากนั้นทำการคำนวณหาสมการที่มีค่าความคลาดเคลื่อน (Mean square error) ที่น้อยที่สุด ซึ่งคือสมการที่ดีที่สุด (Optimize function) จากนั้นนำสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใส่ในโปรแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ (PIC16F876) ที่อยู่ภายในมาตรวัดฯ เพื่อใช้ในการแปลงค่า

ความจุไฟฟ้าเป็นปริมาณสารโพลาไรต์ต่อไป สมการดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปตัวอย่างการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงในรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับปริมาณสารโพลาไรต์

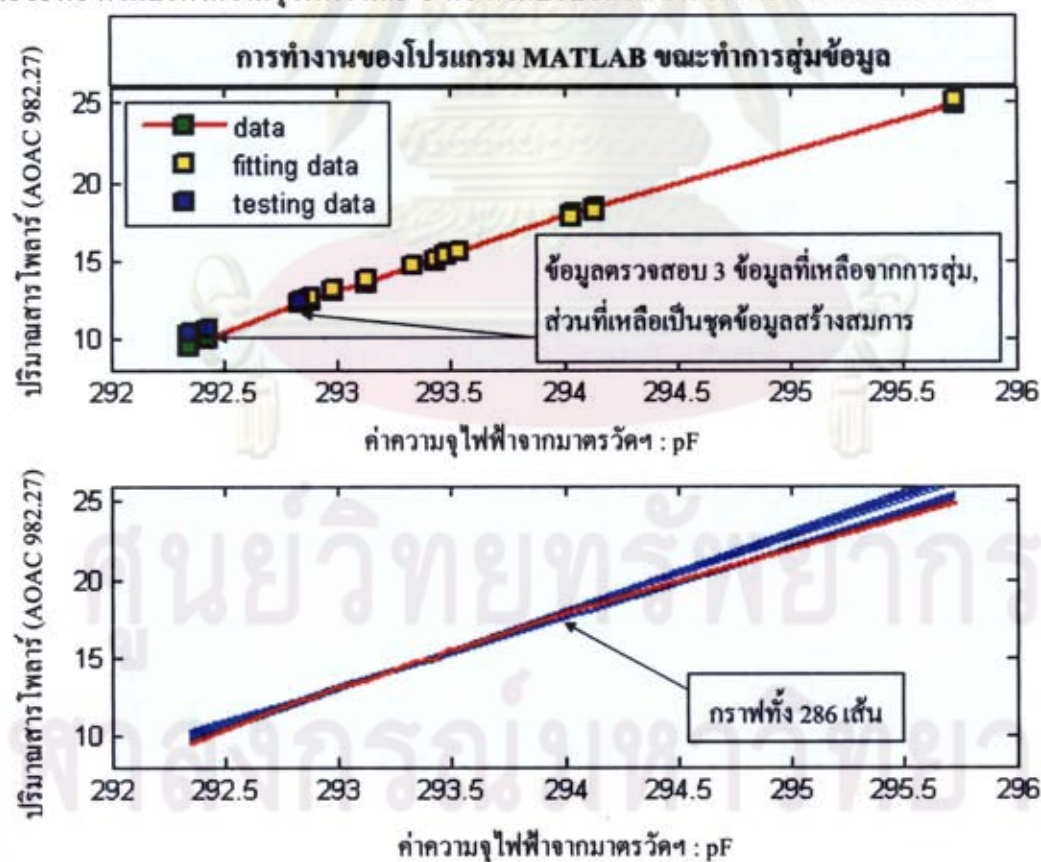
	สมการความสัมพันธ์	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง *
สมการที่ 1	$Y = 1417.1283 \ln(X) - 8036.4836$	0.143
สมการที่ 2	$Y = 1348.3129 \ln(X) - 7645.6566$	0.088

(* = Mean square error)

สมการที่ 1 เป็น Optimize function แบบแทนค่ากลับด้วยข้อมูลความจุไฟฟ้า 10 ข้อมูล ที่นำไปคำนวณหาสมการฯ แล้วพิจารณาเลือกสมการที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

สมการที่ 2 เป็น Optimize function แบบแทนค่ากลับด้วยข้อมูล 3 ข้อมูล ที่เหลือจากการสุ่มในสมการนั้นๆ แล้วพิจารณาเลือกสมการที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

โดย X คือ ตัวแปรค่าความจุไฟฟ้า และ Y คือ ตัวแปรปริมาณสาร โพลาไรต์ จากการแทนค่า X



รูปที่ 4.5 การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับปริมาณสารโพลาไรต์ในน้ำมันตัวอย่าง ด้วยโปรแกรม MATLAB

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนปริมาณสารโพลาร์เมื่อใช้สมการทั้ง 2 สมการ

มาตรฐาน ๑ C : pF	% TPM (AOAC 982.27)	%TPM คำนวณด้วยสมการที่ 1		%TPM คำนวณด้วยสมการที่ 2	
		Y = 1417.1283 ln (X) - 8036.4836		Y = 1348.3129 ln (X) - 7645.6566	
		% TPM	ความคลาดเคลื่อน	% TPM	ความคลาดเคลื่อน
292.35	9.52	9.90	0.38	10.00	0.48
292.43	9.95	10.27	0.32	10.35	0.40
292.83	12.24	12.20	-0.04	12.19	-0.05
292.88	12.41	12.45	0.04	12.42	0.01
292.98	13.08	12.93	-0.15	12.88	-0.20
293.13	13.52	13.65	0.13	13.57	0.05
293.33	14.75	14.62	-0.13	14.49	-0.26
293.43	14.96	15.10	0.14	14.95	-0.01
293.48	15.49	15.35	-0.14	15.18	-0.31
293.53	15.65	15.59	-0.06	15.41	-0.24
294.03	18.05	18.00	-0.05	17.70	-0.35
294.13	18.46	18.48	0.02	18.16	-0.30
295.73	24.94	26.17	1.23	25.48	0.54

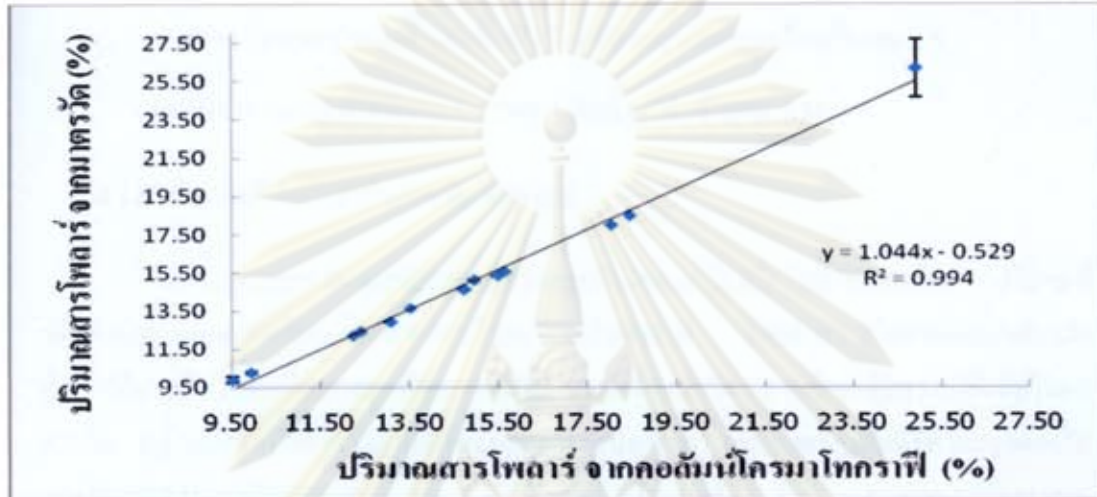
ตารางที่ 4.5 ค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละช่วง ของทั้ง 2 สมการ

% TPM	สมการที่ 1	สมการที่ 2
		Y = 1417.1283 ln (X) - 8036.4836
	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง	ความคลาดเคลื่อนกำลังสอง
<10	0.12	0.19
10 - 15	0.01	0.02
15 - 20	0.01	0.07
>20	1.51	0.29

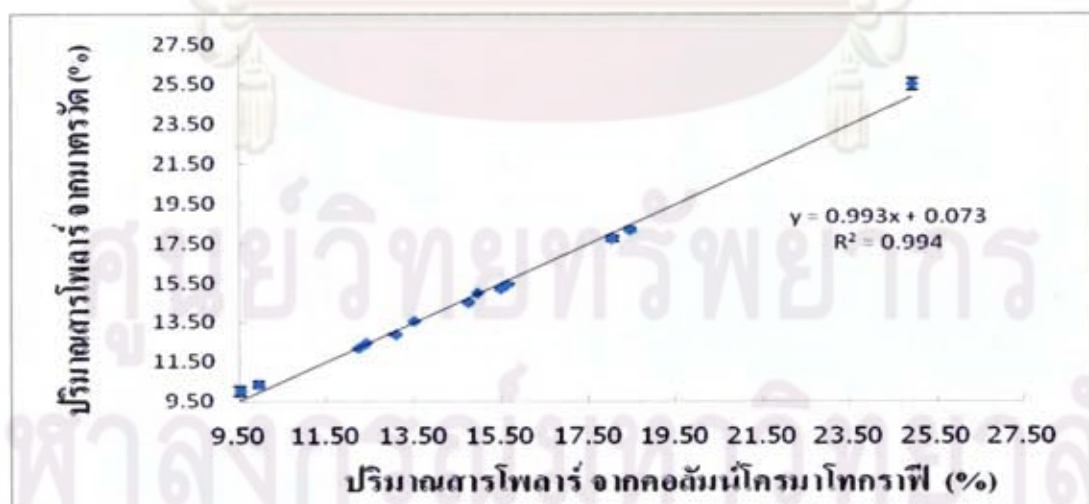
จากตารางที่ 4.5 เพื่อให้ได้ผลการวัดที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจึงเลือกใช้สมการ 4-1

$$Y = 1348.3129 \ln(X) - 7645.6566 \quad (4-1)$$

เป็นสมการความสัมพันธ์ ในการแปลงค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมันฯเป็นปริมาณสารโพลาไร ในตัว
มาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง TPM ของทั้งสองแหล่ง เมื่อใช้สมการที่ 1 พร้อมค่าคลาดเคลื่อน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง TPM ของทั้งสองแหล่ง เมื่อใช้สมการที่ 2 พร้อมค่าคลาดเคลื่อน

4.1.5 ความคลาดเคลื่อนในการวัดของมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร

สรุปแหล่งที่มาของความคลาดเคลื่อนในการทดลองทั้งหมดของงานวิจัยนี้มีดังนี้

1. ความคลาดเคลื่อนจากสมการความสัมพันธ์ จากตารางที่ 4.4 ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเมื่อใช้สมการที่ 4-1 คือ 0.54 (Mean square error = 0.29) คิดเป็นร้อยละ 2.16
2. ในขั้นตอนการสร้างภาคประมวลผล ส่วนวัดค่าความจุไฟฟ้าเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่ทราบค่าความจุไฟฟ้าเป็นค่าอ้างอิง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 2.5

ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนรวม ในงานวิจัยนี้ เท่ากับร้อยละ 3.30

4.1.6 ค่าความไม่แน่นอนในการวัด/วิเคราะห์

ในกระบวนการวัด องค์ประกอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดประกอบด้วย ปริมาณที่วัดได้ ค่าความคลาดเคลื่อน และค่าความไม่แน่นอนในการวัด โดยค่าความไม่แน่นอนในการวัดคือ ปริมาณที่บ่งบอกถึงความถูกต้องและแม่นยำของเครื่องมือวัด รวมถึงระดับความเชื่อมั่นในผลการวัด เครื่องมือวัดที่มีค่าความไม่แน่นอนในการวัดน้อยกว่า จะเป็นเครื่องมือที่มีความถูกต้องในการวัดมากกว่า ระดับความเชื่อมั่นสากล ของผลการวัดโดยปกติคือ 95% และ แฟคเตอร์ขอบเขตความเชื่อมั่น (Coverage factor, K) = 2 [7] ตัวอย่างรูปแบบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัดแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งจากตารางที่ 4.6 สรุปว่า ค่าความไม่แน่นอนในการวัดในส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเป็น ± 4.11 % TPM

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างรูปแบบการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด (M 3003)						
แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน (Source of uncertainty)	ปริมาณ ±% TPM ¹⁾	ลักษณะการ กระจายของ ข้อมูล ²⁾	ตัวหาร (Divisor)	Ci ³⁾	U _i (T) ⁴⁾ ±%TPM	Vi ⁵⁾
ความสามารถในการทำซ้ำ ⁶⁾ AOAC 982.27 (Column.)	2.04	ปกติ	1	1.0	2.04	1
ความสามารถในการทำซ้ำ ⁶⁾ ของมาตรฐาน	0.25	ปกติ	1	1.0	0.25	3
ผลรวมค่าความไม่แน่นอนในการวัด (Combined uncertainty, U _c (T))		ปกติ			2.05	V _{eff} ⁷⁾
ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty, U)		ปกติ	K = 2		4.11	> 100

¹⁾ Value of ± %TPM²⁾ Probability distribution³⁾ Sensitivity coefficients⁴⁾ Standard uncertainties⁵⁾ Degree of freedom⁶⁾ Repeatability⁷⁾ Effective degrees of freedom


คุรุวิทยาลัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัย การออกแบบและสร้างมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร พบว่าสามารถวัดปริมาณสารโพลาร์ ในน้ำมันปาล์มตัวอย่างที่ได้จากโรงงานผลิตกะหรี่กิ่งสำเร็จรูปอย่างได้ผล จากตารางที่ 4.4 ผลการวัดสารโพลาร์ในช่วงร้อยละ 10 - 20 จะให้ผลการวัดที่ดีที่สุด โดยมีความคลาดเคลื่อนไปจากวิธีมาตรฐานเท่ากับ 0.48 % TPM คิดเป็นร้อยละ 5 โดยประมาณ

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยอาจมีความคลาดเคลื่อนสูง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดปริมาณสารโพลาร์ที่ผลิตและนำเข้าจากต่างประเทศ โดยมาตรวัดชนิดแบบนี้ มีความคลาดเคลื่อนไปจากวิธีมาตรฐานประมาณ ร้อยละ 5 ขณะที่เครื่องวัดจากต่างประเทศมีความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 3 แต่การวิจัยมาตรวัดชนิดนี้ สามารถเป็นมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหารต้นแบบได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำมันปาล์ม เพียงปรับปรุงช่วงการวัดหรือย่านการทำงานให้สามารถวัดปริมาณสารโพลาร์ได้กว้างขึ้น ลดขนาดตัวรับรู้ลง และปรับปรุงรูปลักษณะ อีกเล็กน้อย มาตรวัดชนิดนี้ราคาถูกกว่าของต่างประเทศหลายเท่าและถ้าผลิตในจำนวนมากก็จะมีราคาถูกลงไปอีก มาตรวัดชนิดนี้ใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ภายในประเทศทั้งสิ้น เมื่อประกอบกับอุปกรณ์เสริมเช่น ตัวรับรู้สำรอง กระบอกตวงน้ำมัน (รูปที่ 3.10) และเตาแก๊สแบบภาคสนาม ก็สามารถทำงานแบบภาคสนามได้โดยใช้เพียงแบตเตอรี่ขนาด 9 โวลต์ เป็นแหล่งพลังงาน เมื่ออยู่ในที่ตั้งหน่วยงานหรือแหล่งที่มีไฟฟ้าใช้ก็สามารถใช้งานได้เพราะมีชุดหม้อแปลงไฟ ตัวรับรู้สามารถถอดประกอบและทำความสะอาดได้ง่าย การประกอบชิ้นใหม่ก็ง่ายเช่นกัน วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (แสดงในภาคผนวก ข) เป็นวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนเป็นที่รู้จักกันดี เพียงเพิ่มโปรแกรมและสมการความสัมพันธ์ ในการคำนวณผลและแสดงผลอีกเล็กน้อยเท่านั้น งานวิจัยนี้มีจุดเด่นอยู่ที่ตัวรับรู้ ที่ประกอบขึ้นจากแผ่นสแตนเลสปลอดสนิม (รูปที่ 3.12) ใช้เทปลอน (PTFE) เป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างแผ่นคู่ขนาน (d) ทำให้การประกอบตัวรับรู้ง่ายขึ้น แผ่นเทปลอนจะถูกเปลี่ยนทิ้งทุกครั้งที่มีการถอดประกอบเพื่อทำความสะอาด ในการประกอบตัวรับรู้เพียงวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวรับรู้ขณะมีอากาศเป็นไดอิเล็กทริก ได้ประมาณ 151 pF ผิดพลาดไม่เกิน ± 1 pF (แสดงใน หัวข้อ 3.3.3) ก็สามารถนำไปใช้งานได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. น้ำมันตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ปริมาณสารโพลาร์ในงานวิจัยนี้ เป็นน้ำมันที่มีลักษณะการใช้งานแบบเติมน้ำมันใหม่ลงไปเมื่อปริมาณน้ำมันในหม้อทอดลดลงตลอดเวลา หรือเติมน้ำมันใหม่ลงไปบางส่วนเมื่อค่าความเป็นกรด (Acid value) เพิ่มขึ้นเข้าใกล้เกณฑ์ที่กำหนด (<2.5 - <4.5) [4] น้ำมันที่พร่องหรือหายไปขณะทำการทอดนั้นถูกอาหารที่ลงไปทอด (เส้นขนมี่) ดูดซึมเอาเอาไว้ส่วนหนึ่ง ทำให้ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารโพลาร์มีการเกาะกลุ่มอยู่ในช่วง 10 - 15 % TPM เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ดี ควรหาตัวอย่างน้ำมันที่มีการใช้งานแบบต่อเนื่องกันไปตลอด แล้วทำการสุ่มตัวอย่างน้ำมันออกมาวิเคราะห์เป็นระยะตลอดช่วงเวลากการทอด ซึ่งจะให้เห็นการเปลี่ยนแปลง ของตัวชี้วัดความเสื่อมในน้ำมันทอดอาหารได้เด่นชัดกว่า

2. ตัวรับรู้ในงานวิจัยนี้มีขนาดใหญ่ ทำให้ใช้กระแสไฟในปริมาณมาก เมื่อใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟทำให้แบตเตอรี่หมดเร็ว และต้องใช้น้ำมันตัวอย่างในปริมาณมาก แต่เมื่อลดขนาดของตัวรับรู้ จะมีผลกระทบต่อการใช้พลังงานการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กทริกในน้ำมันทอดอาหาร ข้อมูลที่ได้จะมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมากขึ้น

3. ขณะทำการทดลอง เตาสำหรับเป็นแหล่งให้ความร้อนแก่น้ำมันในระดับอุณหภูมิ 170°C ควรมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่ดีมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไม่เกิน $\pm 1^{\circ}\text{C}$ เพราะอุณหภูมิมีผลกระทบต่อค่าไดอิเล็กทริกในน้ำมันฯ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนไป 4°C จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนไปประมาณ 1 pF (เฉพาะงานวิจัยนี้)

4. สายสัญญาณที่ใช้ในการประกอบตัวรับรู้ ไม่ควรยาวมากจนเกินไปเพราะจะเกิดผลกระทบกับสนามไฟฟ้าโดยรอบ ไม่ว่าจะเป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากเตาไฟฟ้าที่ให้ความร้อน หรือแม้แต่สนามไฟฟ้าที่เกิดจากเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆ เช่น เตาไมโครเวฟ เครื่องคอมพิวเตอร์ หรือแม้แต่โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น

5. เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริก 2.5, 4.0 และ 5.9 เทียบกับปริมาณสารโพลาร์ที่ ร้อยละ 15, 27 และ 39 [4] จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพียง 0.13 - 0.16 ต่อ 1 %TPM ซึ่งเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นส่วนของการวัดค่าความจุไฟฟ้าต้องมีความละเอียดสูง (High resolution) พอที่จะสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในน้ำมันทอดอาหาร ที่มีการเปลี่ยนแปลงในปริมาณเล็กน้อยได้

หมายเหตุ - ความสามารถในการวัดของมาตรวัดฯ และวิธีการสอบเทียบ แสดงใน ภาคผนวก ฉ
- ขั้นตอนการปฏิบัติงานมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร แสดงใน ภาคผนวก จ

รายการอ้างอิง

- [1] บัณฑิต อินฉวงค์, ปัจฉิมาภรณ์ อุดมคุณ, ปิยะฉัตร ใจเอื้อ. ดัชนีชี้วัดคุณภาพน้ำมันที่
เหมาะสมสำหรับการประเมินคุณภาพน้ำมันทอด. กรุงเทพฯ :
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549.
- [2] ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 283/47. การกำหนดปริมาณสาร โพลาร์ในน้ำมันที่ใช้
ทอดหรือประกอบอาหารเพื่อจำหน่าย. กรุงเทพฯ : องค์การอาหารและยา.
กระทรวงสาธารณสุข, 2547.
- [3] จิตรา เศรษฐอุดม, ดร. ทิพยเนตร อริยปิณฑ์. การวิเคราะห์ความเสี่ยงน้ำมันทอดซ้ำ.
กรุงเทพฯ : องค์การอาหารและยา กระทรวงสาธารณสุข, 2549.
- [4] ทิพยเนตร อริยปิณฑ์, ประเสริฐศรี ดังเลิศสัมพันธ์, นูรีซัน สามาลูกา. การศึกษาประสิทธิภาพ
ของเครื่องมือวัดสาร โพลาร์ในน้ำมันปรุงอาหารแบบรวดเร็วเปรียบเทียบกับวิธี
มาตรฐาน. กรุงเทพฯ : 2549.
- [5] Hayt, JR. William H. Engineering Electromagnetic. 7th ed. USA. McGraw Hill, 2005.
- [6] Bell, David A. Solid state pulse circuit. 3th ed. Reston: Prentice, 1988.
- [7] United Kingdom Accreditation Service. The Expression of Uncertainty and Confidence in
Measurement. 2nd ed. London: UKAS, 2007.
- [8] Yunsheng Li . Quality changes in nuggets fried in oils with different degrees of
Hydrogenation . Master's Thesis, Department of Bioresource Engineering, McGill
University, 2005.
- [9] มณฑล หอมกลิ่นเทียน. การสร้างและศึกษาตัวเก็บประจุขนาด 10 pF ชนิดพีวส์ซิลิกาเป็นสาร
ไดอิเล็กทริกเพื่อใช้เป็นมาตรฐานหัตถิยภูมิ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชา
ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2547.
- [10] C. Inoue, Y. Hagura, M. Ishikawa ,and K. Suzuki. 2002. The Dielectric Property of Soybean
Oil in Deep-Fat Frying and the Effect of Frequency. Journal Food Science;
67(3):1126-1129.
- [11] Rosana G. Moreira, M. Elena Castell-Perez, Maria A. Barrufet. Deep Fat Frying:
Fundamentals and Applications. New York: Springer, 1999.
- [12] C. W. Fritsch, D. C. Egberg and J. S. Magnuson. 1979. Changes in dielectric constant as a
measure of frying oil deterioration. Journal of the American Oil Chemists' Society;
56: 746-750.
- [13] Thomas L. Floyd. Electronics Fundamentals. 4th ed. Reston: Prentice, 1998.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก



ภาควิชา เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จังหวัดธนบุรี 10600

วันที่ 10 มีนาคม 2551

เรื่อง ผลการตรวจสอบปริมาณไขมันในเนื้อสัตว์และปริมาณสารพิษที่ตกค้างในเนื้อสัตว์

ตัวอย่าง เนื้อสัตว์ ๒๐ ตัวอย่าง วิศวกรรมปริมาณไขมันในเนื้อสัตว์ (FFA, AOCS, 1990) และ ปริมาณสารพิษที่ตกค้าง (TPM, AOAC, 1990)

ตารางที่ ๑ ปริมาณไขมันในเนื้อสัตว์*

ตัวอย่าง	ปริมาณไขมันในเนื้อสัตว์	ตัวอย่าง	ปริมาณไขมันในเนื้อสัตว์
1	0.35-0.06	21	0.46-0.00
2	0.35-0.05	22	0.50-0.06
3	0.62-0.00	23	0.50-0.05
4	0.42-0.05	24	0.54-0.00
5	0.47-0.00	25	0.54-0.00
6	0.50-0.06	26	0.23-0.00
7	0.38-0.00	27	0.23-0.00
8	0.46-0.00	28	0.19-0.05
9	0.25-0.00	29	0.23-0.00
10	0.23-0.00	30	0.27-0.05
11	0.25-0.00	31	0.31-0.00
12	0.27-0.06	32	0.38-0.00
13	0.27-0.05	33	0.77-0.00
14	0.31-0.00	34	0.23-0.00
15	0.27-0.06	35	0.27-0.06
16	0.31-0.00	36	0.27-0.06
17	0.39-0.00	37	0.27-0.06
18	0.34-0.00	38	0.35-0.00
19	0.35-0.00	39	0.31-0.00
20	0.42-0.05	40	0.38-0.00

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ 2 ปริมาณสารมีโซโทรมล*

ตัวอย่าง	สารมีโซโทรมล	ตัวอย่าง	สารมีโซโทรมล
1	13.08±1.04	21	13.14±1.88
2	12.76±1.32	22	13.31±3.44
3	16.65±3.88	23	11.82±0.63
4	16.32±2.15	24	14.75±2.47
5	18.05±1.09	25	13.52±0.91
6	18.59±0.44	26	12.24±2.39
7	11.86±0.39	27	12.71±1.11
8	12.41±1.50	28	14.18±2.92
9	9.70±3.35	29	12.09±0.79
10	9.62±1.64	30	11.08±0.27
11	9.08±0.56	31	18.46±1.62
12	11.42±2.77	32	14.01±1.42
13	9.31±0.95	33	14.94±0.49
14	9.52±2.23	34	9.73±0.07
15	11.52±2.23	35	12.14±2.88
16	13.06±1.73	36	15.49±0.45
17	15.21±0.54	37	11.90±0.87
18	9.95±1.73	38	11.17±1.22
19	14.96±1.17	39	11.50±0.34
20	15.63±2.43	40	9.74±2.07

* หน่วยผลคูณแสดงผลเป็นค่าเฉลี่ย- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

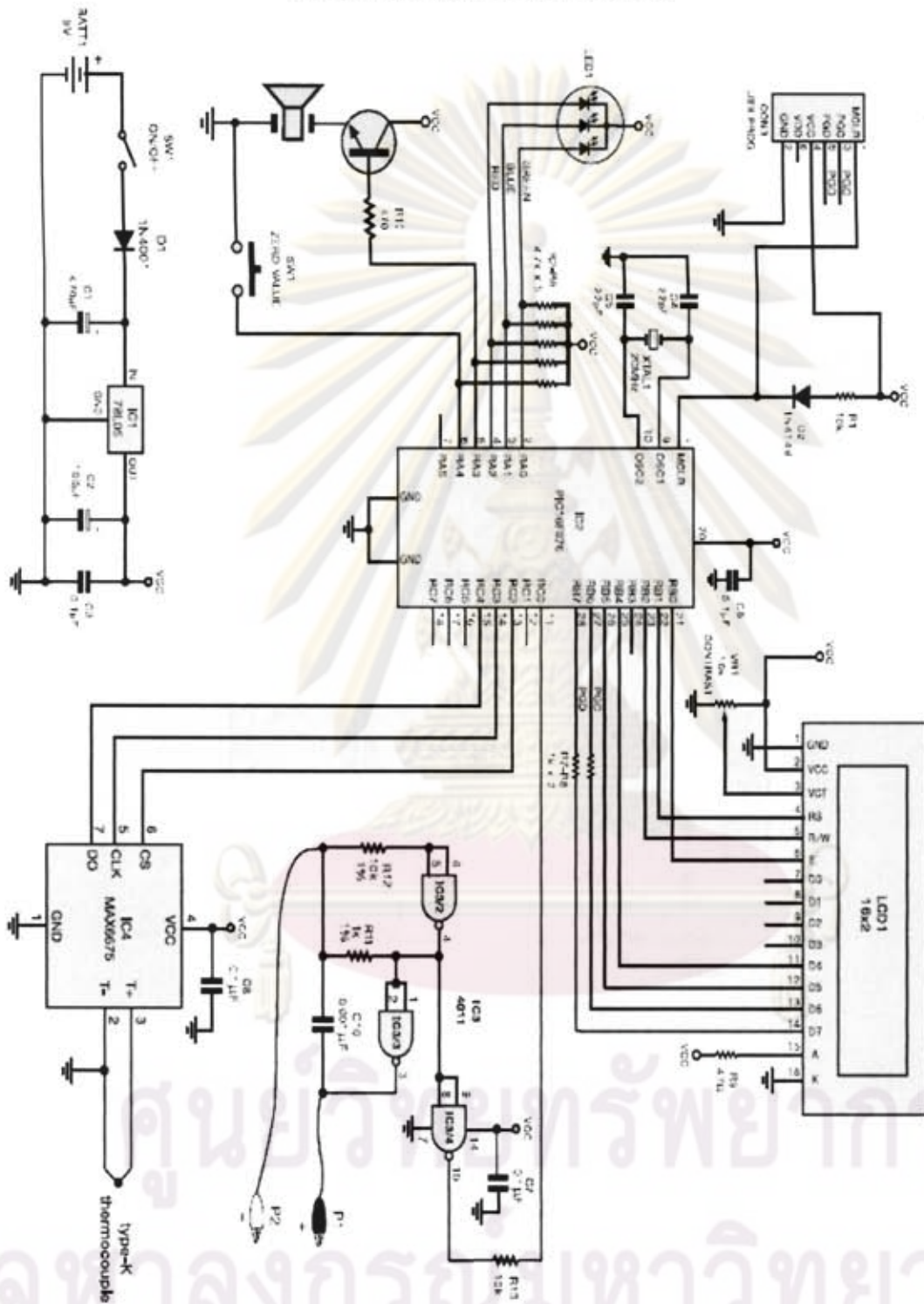
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สงวนลิขสิทธิ์
(ไม่สงวนลิขสิทธิ์ในวิธีคิด)
Sx0
ผู้สำรวจ

สงวนลิขสิทธิ์
ศาสตราจารย์ ดร. อรรถสิทธิ์
ผู้ตรวจการ

ภาคผนวก ข

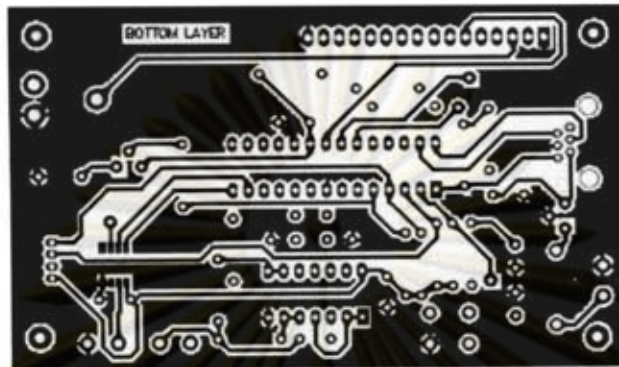
วงจรเครื่องวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร



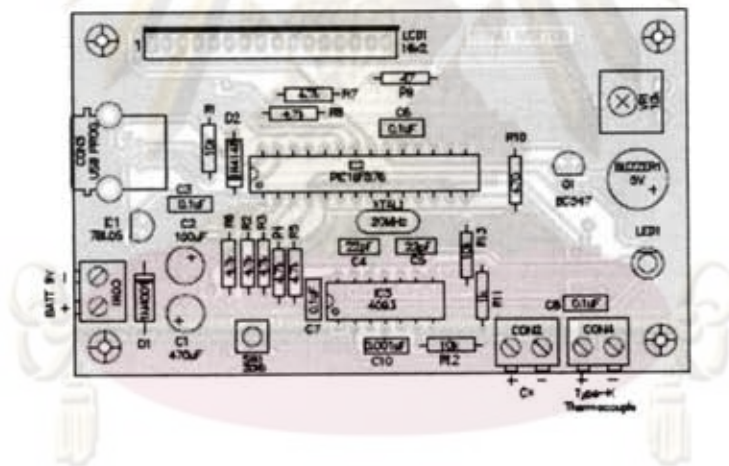
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข (ต่อ)

ภาพลายวงจร



ภาพลงอุปกรณ์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข (ต่อ)

รายการอุปกรณ์

ตัวต้านทาน $\pm 1\%$		
R1, R12, R13	10k	3 ตัว
R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8	4.7k	7 ตัว
R9	47	1 ตัว
R10	470	1 ตัว
R11	1k	1 ตัว
VR1 เกือกม้าตัวเล็ก-นอน	10k	1 ตัว
ตัวเก็บประจุ $\pm 2.5\%$		
C1 อีเล็กโทรไลต์	470uF 16V	1 ตัว
C2 อีเล็กโทรไลต์	100uF 16V	1 ตัว
C3, C6, C7, C8 โพลีเอสเตอร์	0.1uF 50V	4 ตัว
C4, C5 เซรามิก	22pF 50V	2 ตัว
C10 โพลีเอสเตอร์	0.001uF 50V	1 ตัว
อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ		
D1	1N4001	1 ตัว
D2	1N4148	1 ตัว
IC1	78L05	1 ตัว
IC2	PIC16F876-20/SP	1 ตัว
IC3	CD4093	1 ตัว
IC4	MAX6675	1 ตัว
Q1	BC547	1 ตัว
LED1	แอลอีดี 3 สี	1 ตัว
อื่นๆ		
BUZZER1	บัสเซอร์ 5 โวลต์	1 ตัว
CON1, CON2, CON4	เทอร์มินอลบล็อก 2 ขา	3 ตัว
CON3	แจ็ก RJ-11 ขนาด 6 ขา	1 ตัว
LCD1	แอลซีดี 16x2	1 ตัว
SW1	สวิตช์กดติดปล่อยดับ	1 ตัว
XTAL1	คริสตัล 20MHz	1 ตัว
Thermocouple	เทอร์โมคัปเปิ้ล Type-K	1 ตัว

สายสัญญาณสำหรับตัวรับรู้

Thermocouple extension wires Type Type-K, (Gauge 24)	1 เมตร
Connector แบบหางปลา	2 ตัว

ภาคผนวก ก

ตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดในน้ำมันบริโภค ด้วยวิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟี

(IUPC: Doarganes, M.C. *et al.*, 2000. Pure Appl. Chem., 72:8, 1563-75)

หลักการ

ปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันบริโภค ซึ่งรวมถึงน้ำมันปรุงอาหารใหม่และน้ำมันที่ผ่านการทอดอาหาร สามารถทำการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารโพลาร์และสารนอนโพลาร์ได้ โดยใช้หลักการแยกสารประกอบสองประเภทนี้ ด้วยเทคนิคคอลัมน์โครมาโตกราฟีตามวิธีมาตรฐานของ AOAC Method 982.27 หรือ IUPAC 2.507 หรือ AOCS Cd 20-91 ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ถูกต้อง ใช้เครื่องมือน้อย และราคาถูก อย่างไรก็ตามวิธีค่อนข้างช้า เปลืองเวลา และแรงงานในการตรวจวิเคราะห์ เนื่องจากต้องใช้คอลัมน์ขนาดใหญ่ซึ่งเปลืองสารซิลิกาเจลในการเตรียมคอลัมน์และใช้เวลานานในการตรวจวิเคราะห์ จึงนำวิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันทอดอาหารที่ใช้คอลัมน์ขนาดเล็ก (minicolumn) ลดปริมาณสารซิลิกาเจลและสารเคมี ใช้เวลาในการตรวจวิเคราะห์ต่อตัวอย่างลดลง จึงทำให้สามารถตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างได้มากและเร็วขึ้น มีค่าใช้จ่ายและสารเคมีที่ต้องกำจัดทิ้งลดลง (IUPC: Dobarganes, M.C. *et al.*, 2000)

การแยกสารโพลาร์และสารนอนโพลาร์ในน้ำมันทอดอาหาร ทำโดยละลายตัวอย่างน้ำมันใน light petroleum: diethyl ether (90:10) และผ่านในคอลัมน์ที่อัดแน่นด้วยซิลิกาเจล ซึ่งมีความชื้นร้อยละ 5 สารประกอบมีขั้วที่เกิดจากการเสื่อมสลายของน้ำมันทั้งหมดถูกดูดซับไว้บนซิลิกาเจล เมื่อชะล้างคอลัมน์ด้วยสารละลายผสมของ light petroleum/diethyl ether (90:10) สารประกอบไม่มีขั้วซึ่งเป็นไตรเอทิลกลีเซอรอลของน้ำมันที่ไม่มีการแตกตัว และสารโพลีเมอร์ชนิดไม่มีขั้วที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทอดอาหารจะถูกชะล้างออกมาพร้อมกับสารละลายผสม สารละลายที่เก็บได้ถูกนำไประเหยแห้ง ซึ่งน้ำหนัก และคำนวณกลับเป็นปริมาณสารนอนโพลาร์ทั้งหมดในตัวอย่งน้ำมัน 100 กรัม (%TNPC) ส่วนสารโพลาร์ที่ค้างในคอลัมน์ถูกชะออกมาด้วย diethyl ether สารละลายที่เก็บได้ถูกนำไประเหยแห้ง ซึ่งน้ำหนัก และคำนวณกลับเป็นปริมาณสารโพลาร์ทั้งหมดในตัวอย่งน้ำมัน 100 กรัม (%TPC) ดังนี้

$$\text{สารนอนโพลาร์ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของสารนอนโพลาร์ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)}}$$

$$\text{สารโพลาร์ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของสารโพลาร์ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)}}$$

สารโพลาร์และสารนอนโพลาร์ที่แยกได้ นำไปตรวจสอบประสิทธิภาพของการแยกโดยใช้

เทคนิค Thin-layer Chromatography (TLC)

การตรวจวิเคราะห์

1. ตัวอย่าง : น้ำมันปรุงอาหารใหม่และน้ำมันที่ผ่านการทอดอาหาร

ภาคผนวก ก (ต่อ)

2. การแยกสารโพลาร์ : โดยวิธี Column Chromatography

อุปกรณ์

1. ขวดก้นกลม (Round-bottomed glass column) พร้อม ground-glass stoppers ขนาด 100 มล. และ 500 มล.
2. บีกเกอร์ (Beakers) ขนาด 100 มล.
3. คอลัมน์แก้ว (Chromatographic glass column) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มม. x ความยาว 150 มม.
4. Volumetric flask ขนาด 10 มล. และ 100 มล.
5. Volumetric pipette ขนาด 5 มล.
6. Dropping funnel ขนาด 100 มล. ขนาดพอดีกับคอลัมน์ในข้อ 3
7. กรวยแก้ว (Glass funnel) เส้นผ่านศูนย์กลาง 8 ซม.
8. แท่งแก้ว (Glass rod) ความยาว 30 ซม.
9. เสายึด (Stand)
10. ช้อนตักสารเคมี (Spoon)
11. จานกระเบื้อง (Porcelain dish) เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร
12. โถดูดความชื้นพร้อมสารดูดความชื้น (Desiccator)
13. เตาอบ (อุณหภูมิ 120-160 องศาเซลเซียส)
14. เครื่องระเหยสารภายใต้สุญญากาศ (Rotary evaporator)
15. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical balance)
16. เครื่องเขย่าสาร (Shaking machine)

สารเคมี

1. Light petroleum (boiling point 40-60°C), chromatographic quality, redistilled
2. Solvent 1 : Mixture of light petroleum : diethyl ether (90:10; v/v)
3. Solvent 2 : Diethyl ether (free from peroxide and residue)
4. Silica gel : particle size 0.063-0.200 mm. (70-230 mesh), MERCL N^o7734 or Equivalent ปรับให้มีความชื้นร้อยละ 5 โดยอบ Silica gel ใน porcelain dish ที่อุณหภูมิ 160°C นานอย่างน้อย 4 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นลงในโถดูดความชื้น หลังจากนั้นชั่งน้ำหนัก silica gel 125 กรัม ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 250 mL ผสมน้ำ 8 กรัม ผสมให้เข้ากันโดยใช้เครื่องระเหยสารภายใต้สุญญากาศ หรือเครื่องเขย่าสาร
5. Sea sand (purified by acid calcined)
6. Cotton wool (surgical quality)
7. Nitrogen (99.0-99.8%)

การเตรียมตัวอย่าง

หากตัวอย่างน้ำมันที่ต้องการวิเคราะห์เป็นไขให้อุ่นด้วยน้ำร้อน ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย (ประมาณ 60°C) ผสมตัวอย่างน้ำมันให้เป็นเนื้อเดียวกันและกรองแยกกากอาหาร หากมีน้ำปนในน้ำมันให้กรองด้วยกระดาษกรองแบบ hydrophobic filter paper

ภาคผนวก ก (ต่อ)

การเตรียมคอลัมน์

1. เติมน้ำมันระเหยของ light petroleum : diethyl ether (90:10) (Solvent 1) ปริมาตร 5 mL ในคอลัมน์แก้ว ใส่ Cotton wool ลงไปที่ส่วนล่างของคอลัมน์และใช้แท่งแก้วกดไล่อากาศ
2. ชั่ง Silica gel น้ำหนัก 5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ ละลายด้วย Solvent 1 ปริมาตร 10 mL เติมน้ำมันระเหยทั้งหมดลงในคอลัมน์โดยใช้กรวยแก้วหรือปิเปต ล้าง Silica gel ที่ค้างในบีกเกอร์ด้วย Solvent 1 และเทใส่ลงในคอลัมน์
3. เปิดก๊อกคอลัมน์ใส่น้ำมันระเหยเหนือระดับ Silica gel เคาะคอลัมน์เบาๆ เพื่อปรับระดับ Silica gel ส่วนบนให้เรียบและอยู่ในแนวเดียวกัน
4. เติมน้ำมัน Sea sand น้ำหนัก 1 กรัม ในคอลัมน์โดยผ่านกรวยแก้ว เปิดก๊อกคอลัมน์ใส่น้ำมันระเหยจนอยู่ในระดับเดียวกับ Sea sand

การแยกสารโพลาร์โดยวิธี Column chromatography

การเตรียมตัวอย่างน้ำมันเพื่อตรวจวิเคราะห์

ชั่งตัวอย่างน้ำมัน 1+0.1 กรัม ใน volumetric flask ขนาด 10 mL ละลายด้วย Solvent 1 ช้อนๆ ปริมาตร 8 mL วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเย็นลงเติมด้วย Solvent 1 จนถึงขีดปริมาตร 10 mL และผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน

การแยกสารนอนโพลาร์ (สารประกอบไม่มีขั้ว)

1. ขอบขวดก้นกลมขนาด 100 mL จำนวน 2 ใบ (A และ B) ในตู้อบที่อุณหภูมิ $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ชั่งและบันทึกน้ำหนักขวดหลังอบแห้ง A สำหรับสารนอนโพลาร์ (W_{nb}) และน้ำหนักขวดหลังอบแห้ง B สำหรับสารโพลาร์ (W_p)
2. วางขวดก้นกลม A ใต้คอลัมน์สำหรับรองรับสารนอนโพลาร์
3. ปิเปตสารละลายตัวอย่างในข้อ 3.1 ปริมาตร 58 mL ใส่ในคอลัมน์ ระวังอย่าให้ผิวบนของทรายที่กระจาย เปิดก๊อกคอลัมน์ใส่น้ำมันระเหยจนอยู่ในระดับเดียวกับทราย
4. เติมน้ำมัน Solvent 1 ปริมาตร 60 mL และเปิดก๊อกคอลัมน์ระเหยสารละลายด้วยอัตราไหล 1.5 mL/นาาที จนกระทั่งสารละลายหยุดไหล
5. ปิเปตสารละลายนอนโพลาร์ที่ตกค้างบริเวณปลายคอลัมน์ด้วย Solvent 1
6. ระเหยสารละลายในขวดก้นกลม A ด้วยเครื่องระเหยสารภายใต้สูญญากาศ ที่อุณหภูมิ 60°C นาน 20 นาที และเป่าไล่ด้วยไนโตรเจน
7. ชั่งน้ำหนักขวดก้นกลม A หลังระเหยสารแห้ง และบันทึกน้ำหนัก (W_{nb})
8. คำนวณน้ำหนักของสารนอนโพลาร์ (Total non polar compounds ; % TNPC) ดังนี้

$$\% \text{ TNPC} = \frac{(\text{น้ำหนักของขวดก้นกลม A หลังระเหยสาร}) - (\text{น้ำหนักของขวดก้นกลม A อบแห้ง})}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างที่ใส่ลงในคอลัมน์}} \times 100$$

$$\% \text{ TNPC} = \frac{(W_{nb}) - (W_{nb})}{W_{\text{sample}}} \times 100$$

ภาคผนวก ก (ต่อ)

การแยกสารโพลาร์ (สารประกอบมีขั้ว)

1. หลังจากขั้นตอนที่ 3.2.5 วางขวดก้นกลม B ได้คอลัมน์สำหรับรองรับสารโพลาร์
2. เติม Diethyl ether (Solvent 2) ปริมาตร 50 mL และเปิดก๊อกคอลัมน์ระเหยสารละลายด้วย

อัตราไหล 1.5 mL/นาที จนกระทั่งสารละลายหยุดไหล

3. ปิดเปิดล้างสารโพลาร์ที่ตกค้างบริเวณปลายคอลัมน์ด้วย Solvent 2
4. ระเหยสารละลายในขวดก้นกลม B ด้วยเครื่องระเหยสารภายใต้สูญญากาศที่อุณหภูมิ

60°C นาน 20 นาที และเป่าไล่ด้วยไนโตรเจน

5. ชั่งน้ำหนักขวดก้นกลม B หลังระเหยแห้ง และบันทึกน้ำหนัก (W_{ps})
6. คำนวณน้ำหนักของสารโพลาร์ทั้งหมด (Total Polar Compounds; %TPC) ดังนี้

$$\%TPC = \frac{(\text{น้ำหนักของขวดก้นกลม B หลังระเหยสาร}) - (\text{น้ำหนักของขวดก้นกลม B อับแห้ง}) \times 100}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างที่ใส่ในคอลัมน์}}$$

$$\%TPC = \frac{(W_{ps}) - (W_{ob}) \times 100}{W_{\text{sample}}}$$

3. การตรวจสอบประสิทธิภาพการแยกสารโพลาร์และสารนอนโพลาร์โดยเทคนิค

Thin-layer Chromatography (TLC)

อุปกรณ์

1. Capillary pipette ขนาด 2 ไมโครลิตร
2. Glass plate (20x20 เซนติเมตร) เคลือบด้วยซิลิกาเจล (ไม่มี Fluorescence indicator)

หนา 0.25 มิลลิเมตร

3. Developing tank with ground glass lid
4. Spray

สารเคมี

1. 100% Acetic acid (analytical reagent quality)
2. Pure chloroform
3. 95% Ethanol (v/v)
4. Developing solvent : Mixture of Light petroleum : Diethyl ether : Acetic acid

(70:40:1, v/v)

5. Phosphomolybdic acid (analytical reagent quality), 100 g/L solution in Ethanol

ภาคผนวก ก (ต่อ)

วิธีการวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายของสารโพลาร์และสารนอนโพลาร์ที่แยกได้ให้มีความเข้มข้น 10% ในคลอโรฟอร์ม
2. เตรียม Glass plate เคลือบด้วยซิลิกาเจล โดยทำเครื่องหมายแสดงจุดเริ่มต้นและตำแหน่งตัวอย่าง ใช้ Capillary pipette หยดสารละลายตัวอย่างในข้อ 4.1 ที่เตรียมไว้ลงบนตำแหน่งต่างๆ ณ จุดเริ่มต้นบน Glass plate
3. เติม Developing solvent ลงใน Developing tank และวาง Glass plate ลงไปในด้านที่หยดสารตัวอย่างแร่อยู่นในสารละลาย ปิดฝาให้สนิท ตั้งทิ้งไว้ 35 นาที สารละลายจะเดินทางได้ประมาณ 17 เซนติเมตร นำ Glass plate มาระเหยสารละลายให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง
4. พ่นสารละลาย Phosphomolybdic acid in ethanol (100 g/L) ลงบน Glass plate ทิ้งไว้ให้ ethanol ระเหยแห้ง แล้วนำไปอบที่ 120-130 °C

การรายงานและแปลผล

รายงานผลปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันทอดอาหารที่คำนวณได้เป็นเปอร์เซ็นต์สารโพลาร์ทั้งหมด (%TPC) หรือปริมาณสารโพลาร์ (กรัม) ต่อน้ำหนักตัวอย่างน้ำมัน 100 กรัม ค่าสารโพลาร์และสารนอนโพลาร์ของตัวอย่างเดียวกันรวมกันควรได้ใกล้เคียง 100 หากค่าสารโพลาร์เกินร้อยละ 25 น้ำมันชนิดนั้นไม่ควรนำมาใช้ทอดอาหารอีกต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. AOAC. 1996. Official Methods of Analysis, 16th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC.
2. Billek, G., Guhr, G., Waibel, J. 1978. Quality assessment of used frying fats : A comparison of four methods. JAOCS. 55(10); 728-33

ภาคผนวก ง

วันและเวลาที่เก็บน้ำมันตัวอย่าง

วัน/เวลา ทำการเก็บน้ำมันตัวอย่าง จำนวน 40 ตัวอย่างๆละ 500 ลบ.ซม.				
8 ก.พ. 2551	11 ก.พ. 2551	12 ก.พ. 2551	13 ก.พ. 2551	14 ก.พ. 2551
5:50 น.	5:45 น.	5:45 น.	5:45 น.	5:50 น.
8:00 น.	8:30 น.	8:00 น.	7:55 น.	7:40 น.
10:00 น.	9:50 น.	9:30 น.	9:40 น.	9:50 น.
12:00 น.	11:20 น.	11:40 น.	11:35 น.	11:35 น.
14:00 น.	16:15 น.	13:30 น.	13:50 น.	15:20 น.
16:00 น.	17:30 น.	17:30 น.	17:30 น.	17:30 น.
18:00 น.	19:00 น.	19:00 น.	20:00 น.	20:00 น.
20:00 น.	21:30 น.	21:30 น.	22:00 น.	22:00 น.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

โปรแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์**(Food oil quality meter (Main Program))**

```

#include <16F876.h> int16 thermo;
#fuses
HS,NOWDT,NOLVP,NOPROTECT,NOPU void temp();
T,NOBROWNOUT void read_freq ();
#use delay(clock=2000000) void cal_tpm ();
#use rs232(baud=9600, xmit=PIN_c6, void test_temp();
rcv=PIN_c7) void reset_value ();
#bit t1_overflow=0x0C.0

void read_freq ()
{
#define led_green PIN_A0
#define led_blue PIN_A1 cycles8=0;
#define led_red PIN_A2 cycles=0;
#define buzzer PIN_A3 freqc_high=0;
#define reset PIN_A4

t1_overflow=0;

#include <max6675_k.c> set_timer1(0);
#include <LCD.C>
#include <math.h> setup_timer_1(T1_EXTERNAL,T1_DIV_B
Y_1);

int i, man_reset=1,red_buz=0; /* __ wait one second __ */
int8 cycles8, cycles; while (cycles!=0xFF)
int32 freq; { //true=3, false=4
long freqc_high; cycles8=0; //1 cycle
long freqc_low; //start inner loop

float32 while (cycles8!=0xFF) { //true=3,
C,val_cap,C_save=0,tpm,C_save_new; false=4
int16 R;

```

ภาคผนวก จ (ต่อ)

```

//--
    {t1_overflow=0;freqc_high++;} //6
cycles // |
    else // |-- 8 delay_cycles(211); //z
cycles /* __ end waiting 1 second __ */
    {delay_cycles(5);} //-- setup_timer_1(T1_DISABLED); //turn
--| of counter to
    delay_cycles(62); //x
    cycles8++; //1
//2 cycles to jump to top prevent corruption while grabbing value
//math: end inner loop if (t1_overflow) //check one last
//math: total inner loop=((3+8+x+1+2)*255 time for overflow
+ 4)*255 freqc_high++;
//math: if x=62.87781 then inner loops freqc_low=get_timer1(); //get timer1
takes 5mil instructions value as the least sign. 16bits of freq counter
freq=make32(freqc_high,freqc_low);
//use new make32 function to join lsb and
//math: if x=62 then inner loop takes msb
4942920, have to fill 57080 cycles
} val_cap=1/(PI*R*freq);
delay_cycles(216); //y C=val_cap;
cycles++; //1 cycle
//2 cycles to jump to top C*=1000000;
//math: outer=(3+1+y+1+2)*255+4=57080 C*=1000000;
//math: y=(57080-4)/255)-(3+1+0+0+1+2) }
void temp()
//math: if {
y=216.827450980392156862745098039216 thermo = read_temp();
then outer loop cycles is 57080 thermo = thermo>>3;

```

ภาคผนวก จ (ต่อ)

```

}
red_buz=0;
}
void cal_tpm ()
if ((tpm>25)||C>300)
{
output_high (led_green);
// tpm=((-0.346)*(C*C))+208.11*C-
output_high (led_blue);
31259.45;
output_low (led_red);
tpm=1348.3129*(log(C))-7645.6566;
output_high (buzzer);
if ((tpm<=7.3)&&(C<=292))
red_buz=1;
{
}
output_low (led_green);
}
output_high (led_blue);
}
output_high (led_red);
void reset_value ()
output_low (buzzer);
{
tpm=0;
delay_ms(500);
red_buz=0;
if (!input(reset)||man_reset==1)
}
}
if ((tpm>=7.3)&&(tpm<=14))
lcd_gotoxy(1,2);
{
LCD_PUTC (" zero value ");
output_low (led_green);
i=11;
output_high (led_blue);
read_freq ();
output_high (led_red);
C_save_new=C;
output_low (buzzer);
C_save=0;
red_buz=0;
delay_ms(1000);
}
}
if ((tpm>14.1)&&(tpm<=24.9))
}
{
output_high(led_green);
}
output_low (led_blue);
}
output_high (led_red);
}
}
}
void main()
int first_read=0,buz;

```

ภาคผนวก จ (ต่อ)

```

lcd_init();
init_temp();

SET_TRIS_A(0x10);

output_a(0xFF);
output_low (buzzer);

R=1106;

lcd_gotoxy(1,1);
LCD_PUTC (" Food oil \r\n");
lcd_gotoxy(1,2);
LCD_PUTC (" Quality meter ");

////////////////////////////////////

loop1: read_freq ();

if(freq<=150000)
{
  delay_ms(700);
  goto loop1;
}

delay_ms(1500);
C_save_new=C;
temp();

while (TRUE)
{
  if ((thermo>=169)&&(thermo<=171))
  //check range temp. for 169~171
  {
    if (first_read==0)
    {
      reset_value ();
      temp();
      lcd_gotoxy(1,1);
      printf(LCD_PUTC, "Oil Temp.
      %LD%CC \r\n",thermo, 0xDF);
      C=0;
      cal_tpm ();
      lcd_gotoxy(1,2);
      printf(LCD_PUTC, "%.1fp %.1f
      %%TPM \r\n",C,tpm);
      first_read=1;
    }
    ////////////////////////////////////get capacitance 10
    value and lacth////////////////////////////////////
    for (i=1;i<=10;i++)
    {
      read_freq ();
      C=C_save_new; //get capacitance
      value behind wire
      C_save+=C;
    }
  }
}

```


ภาคผนวก จ (ต่อ)

```
tpm=0;
lcd_gotoxy(1,1);
printf(LCD_PUTC, "Oil Temp.
%LD%CC \r\n",thermo,0xDF);
lcd_gotoxy(1,2);
printf(LCD_PUTC, "%.1fp %.1f
%%TPM \r\n",C,tpm);
first_read=0;
}

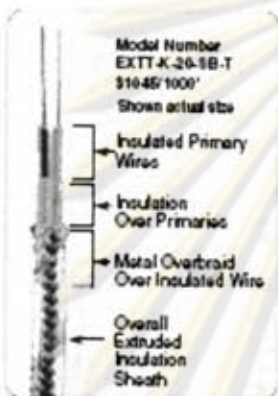
if (!input(reset))
{
reset_value ();
}
}
}
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของสายสัญญาณ

Heavy-Duty Industrial Grade Thermocouple Wire Shielded Extension Cables



OMEGA® extension cables are designed for use in connecting a thermocouple probe to a readout or indicator. Made from extension grade thermocouple wire, J, K, and E wire types are rated from 0 to 105°C (32 to 221°F) for the insulation. The range type T extension wire is rated from -60° to 100°C (-76 to 212°F). Used for a wide variety of applications, these cables are our standard construction PVC or PFA wire with a metal overbraid of tinned copper or stainless steel, and an overall outer jacket of PVC or PFA.

This construction add durability and assures long term abrasion resistance.

Use with OMEGA's Patented Low Noise Connectors

The thermocouple connector with a ground strap to work with shielded wire.



See page G-4.
Note: Published prices are based on nominal value of 1000' of wire and are subject to change due to metal price fluctuations, Chromium and precious metal market fluctuations.

Polyvinyl Coated Wire with Tinned Copper Overbraid

MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!

Model Number	Price/1000'	Calibration	Nominal Size mm (inches)	AWG No.*
EXPP-J-14-TCB-P	\$1950	J Iron-Constantan	5.1 x 7.4 (0.20 x 0.29)	14 Solid
EXPP-J-16-TCB-P	1150		4.8 x 6.7 (0.19 x 0.26)	16 Solid
EXPP-J-16S-TCB-P	1410		4.8 x 6.9 (0.19 x 0.27)	16 Stranded
EXPP-J-20-TCB-P	600		4.1 x 5.5 (0.16 x 0.22)	20 Solid
EXPP-J-20S-TCB-P	770		4.1 x 5.6 (0.16 x 0.22)	20 Stranded
EXPP-J-24S-TCB-P	670		4.0 x 5.1 (0.16 x 0.20)	24 Stranded
EXPP-T-14-TCB-P	1305	T Copper-Constantan	5.1 x 7.4 (0.20 x 0.29)	14 Solid
EXPP-T-16-TCB-P	1005		4.8 x 6.7 (0.19 x 0.26)	16 Solid
EXPP-T-20-TCB-P	610		4.1 x 5.5 (0.16 x 0.22)	20 Solid
EXPP-T-20S-TCB-P	790		4.1 x 5.6 (0.16 x 0.22)	20 Stranded
EXPP-T-24S-TCB-P	660		4.0 x 5.1 (0.16 x 0.20)	24 Stranded
EXPP-K-14-TCB-P	2090	K CHROMEGA® ALOMEGA®	5.1 x 7.4 (0.20 x 0.29)	14 Solid
EXPP-K-16-TCB-P	1440		4.8 x 6.7 (0.19 x 0.26)	16 Solid
EXPP-K-16S-TCB-P	1830		4.8 x 6.9 (0.19 x 0.27)	16 Stranded
EXPP-K-20-TCB-P	715		4.1 x 5.5 (0.16 x 0.22)	20 Solid
EXPP-K-20S-TCB-P	960		4.1 x 5.6 (0.16 x 0.22)	20 Stranded
EXPP-K-24S-TCB-P	770		4.0 x 5.1 (0.16 x 0.20)	24 Stranded
EXPP-E-16-TCB-P	1750	E CHROMEGA® Constantan	4.8 x 6.7 (0.19 x 0.26)	16 Solid
EXPP-E-20-TCB-P	755		4.1 x 5.5 (0.16 x 0.22)	20 Solid
EXPP-E-24S-TCB-P	805		4.0 x 5.1 (0.16 x 0.20)	24 Stranded

* See page H-7 for complete AWG dimensions. Ordering Example: EXPP-J-20S-TCB-P-1000' 1000' (200 m) of Type J (Iron-Constantan) polyvinyl coated extension grade wire. See page 8770.

PFA Coated Wire with 304SS Overbraid

Model Number	Price/1000'	Calibration	Nominal Size mm (Inches)	AWG No.*
EXTT-J-16-SB-T	\$1940	J Iron-Constantan	3.3 x 5.1 (0.13 x 0.20)	16 Solid
EXTT-J-20-SB-T	1120		2.9 x 4.3 (0.12 x 0.17)	20 Solid
EXTT-J-24-SB-T	900		2.5 x 3.3 (0.10 x 0.13)	24 Solid
EXTT-T-16-SB-T	1920	T Copper-Constantan	3.3 x 5.1 (0.13 x 0.20)	16 Solid
EXTT-T-20-SB-T	1110		2.9 x 4.3 (0.12 x 0.17)	20 Solid
EXTT-T-24-SB-T	900		2.5 x 3.3 (0.10 x 0.13)	24 Solid
EXTT-K-16-SB-T	2590	K CHROMEGA® ALOMEGA®	3.3 x 5.1 (0.13 x 0.20)	16 Solid
EXTT-K-20-SB-T	1360		2.9 x 4.3 (0.12 x 0.17)	20 Solid
EXTT-K-24-SB-T	960		2.5 x 3.3 (0.10 x 0.13)	24 Solid
EXTT-E-16-SB-T	2590	E CHROMEGA® Constantan	3.3 x 5.1 (0.13 x 0.20)	16 Solid
EXTT-E-20-SB-T	1360		2.9 x 4.3 (0.12 x 0.17)	20 Solid
EXTT-E-24-SB-T	1085		2.5 x 3.3 (0.10 x 0.13)	24 Solid

* See page H-7 for complete AWG dimensions. Ordering Example: EXTT-K-20-SB-T-1000' 1000' (200 m) of Type K (CHROMEGA® ALOMEGA®) PFA coated extension grade wire. See page 8770.

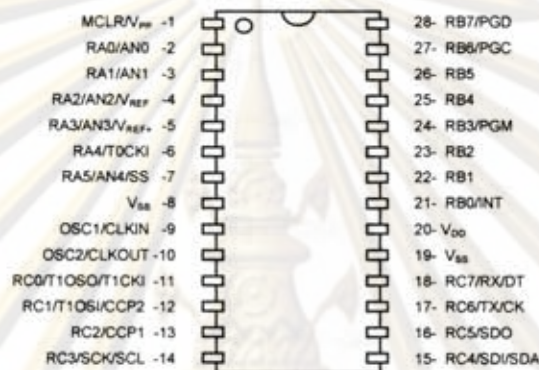
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F876

(Microchip PIC16F876)

The microcontroller you will be working with is the PIC16F876. This is produced by Microchip and is one of a very large family of microcontrollers made by this organisation. The 16F876 offers a good mix between features, ease of use and cost. The knowledge gained in working with the 16F876 can be readily adapted to other microcontrollers if required.



Processor :

5 MHz clock RISC (Reduced Instruction Set Computer) microprocessor

Memory :

- ◆ 7.5kB for the user program in its assembled form. This is stored in FLASH format and so the program is retained after switch off. It can also be reprogrammed several thousand times.
- ◆ 256 Bytes of user EEPROM memory – can be used to store data out with the program which is retained after switch-off.
- ◆ 368 Bytes of data memory – used to hold data during the running of a program. Data is lost after switch off or reset.

Timers & Interrupts :

- ◆ 3 timers (0, 1 & 2) – can be used in timing and sequencing operations. Timers generate interrupts which can be used to temporarily divert the program to perform special actions before returning to the main program.
- ◆ Other interrupts can be generated by changing or resetting the signals on certain pins.

ภาคผนวก ข (ต่อ)

Input / Output (I/O) :

- ◆ Up to 22 digital input / output channels – these can be used to read in simple on-off type signals from switches or can be used to switch external devices on and off, often via relays or transistors.
- ◆ Up to 5 10-bit analogue to digital channels. These can read in analogue voltages which are converted to a number between 0 and 2^{10} (1024) depending on how the recorded voltage compares to the reference. This line can be used to read in signals from a temperature sensors or a control such as a volume dial.

The full manual for the Microchip 16F876 can be found on the Microchip website at :

<http://www.microchip.com/1010/pline/picmicro/category/embctrl/14kbytes/devices/16f876/index>.

This is a big file : ~200 pages in adobe pdf format.

Pin out details for the PIC16F876 & POND μ F876B.

Note that many of the pins have several functions. For example pin 2 can be either a digital input, a digital output or an analogue input. The exact role of a pin can be configured from within the software.

Some of the more advanced functions of certain pins have also been omitted as you are unlikely to need these at this stage.

Name	PIC16F876 Pin number	POND μ F876B pin number	Description
V_{PP}	1		+ve supply for chip
RA0/AN0	2	B10	Digital input/output A0 / Analogue input A0
RA1/AN1	3	A10	Digital input/output A1 / Analogue input A1
RA2/AN2/ V_{REF-}	4	B9	Digital input/output A2 / Analogue input A2 / A/D -ve reference
RA3/AN3/ V_{REF+}	5	A9	Digital input/output A3 / Analogue input A3 / A/D +ve reference
RA4	6		Digital input/output A4

ภาคผนวก ข (ต่อ)

RA5/AN4	7		Digital input/output A5 / Analogue input A4
V _{SS}	8		0 volt reference for chip supply and I/O pins
OSC1/CLKIN	9		External oscillator/clock input
OSC2/CLKOUT	10		Internal oscillator/clock output
RC0/T1OSO	11	B12	Digital input/output C0 / Timer 1 oscillator output
RC1	12	A12	Digital input/output C1
RC2	13	B11	Digital input/output C2
RC3	14	A11	Digital input/output C3
RC4	15		Digital input/output C4
RC5	16		Digital input/output C5
RC6	17		Digital input/output C6
RC7	18		Digital input/output C7
V _{SS}	19		0 volt reference for chip supply and I/O pins
V _{DD}	20		+ve supply for logic and I/O pins
RB0/INT	21	B7	Digital input/output B0 / External interrupt
RB1	22	A7	Digital input/output B1
RB2	23	B6	Digital input/output B2
RB3	24	A6	Digital input/output B3
RB4	25	B5	Digital input/output B4
RB5	26	A5	Digital input/output B5
RB6	27	B4	Digital input/output B6
RB7	28	A4	Digital input/output B7
		A1, B1	+12 volts on Pond μ F876B
		A2, B2	+5 volts on Pond μ F876B
		A3,8, B3,8	0 volts on Pond μ F876B

ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของสแตนเลส 304



AK Steel Type 304 is a variation of the basic 18-8 grade, Type 302, with a higher chromium and lower carbon content. Lower carbon minimizes chromium carbide precipitation due to welding and its susceptibility to intergranular corrosion. In many instances, it can be used in the "as-welded" condition, while Type 302 must be annealed in order to retain adequate corrosion resistance.

Type 304L is an extra low-carbon variation of Type 304 with a 0.02% maximum carbon content that eliminates carbide precipitation due to welding. As a result, this alloy can be used in the "as-welded" condition, even in severe corrosive conditions. It often eliminates the necessity of annealing weldments except for applications specifying stress relief. It has slightly lower mechanical properties than Type 304.

Typical uses include architectural moldings and trim, kitchen equipment, welded components of chemical, textile, paper, pharmaceutical and chemical industry processing equipment.

AVAILABLE FORMS

AK Steel produces Type 304 Stainless Steel in thicknesses from 0.01" to 0.25" (0.025 to 6.35 mm) max. and widths up to 48" (1219 mm). For other thicknesses and widths, inquire.

COMPOSITION

	Type 304 %	Type 304L %
Carbon	0.08 max.	0.03 max.
Manganese	2.00 max.	2.00 max.
Phosphorus	0.045 max.	0.045 max.
Sulfur	0.005 max.	0.003 max.
Silicon	0.75 max.	1.75 max.
Chromium	18.00-20.00	18.0-20.0
Nickel	8.00-12.00	8.0-12.0
Nitrogen	0.10 max.	0.10 max.
Hot	Balance	Balance

SPECIFICATIONS

AK Steel Types 304 and 304L Stainless Steels are covered by the following specifications:

Type 304	Type 304L
AMS 5513	AMS 5511
ASTM A 240	ASTM A 240
ASTM A 666	ASTM A 666

MECHANICAL PROPERTIES

Typical Room Temperature Mechanical Properties

	UTS ksi (MPa)	0.2% YS ksi (MPa)	Elongation % (1/2" 12.7 mm)	Hardness Rockwell C
Type 304L	85 (586)	35 (241)	55	B90
Type 304	90 (621)	42 (290)	55	B92

304/304L-S-2-20-01

ภาคผนวก ข (ต่อ)

AK STEEL

304/304L STAINLESS STEEL DATA SHEET

PHYSICAL PROPERTIES

Density, 0.29 lbs/in³
8.03 g/cm³

Electrical Resistivity, microhm-in
(microhm-cm)
66°F (20°C) - 29.4 (72)
1200°F (650°C) - 45.8 (116)

Specific Heat, BTU/lb°F (kJ/kg•K)
32 - 212°F (0 - 100°C) - 0.12 (0.50)

Thermal Conductivity, BTU/hr-ft²/in²•°F
(W/m•K)
at 212°F (100°C) - 9.4 (16.2)
at 902°F (500°C) - 12.4 (21.4)

Mean Coefficient of Thermal Expansion,
in/in°F (µm/m•K)
32 - 212°F (0 - 100°C) - 9.4 x 10⁻⁶ (16.9)
32 - 600°F (0 - 315°C) - 9.6 x 10⁻⁶ (17.3)
32 - 1000°F (0 - 538°C) - 10.2 x 10⁻⁶ (18.4)
32 - 1200°F (0 - 649°C) - 10.4 x 10⁻⁶ (18.7)

Magnetic Permeability, μ - 200
Overstuds, Annealed - 1.02 max.

Modulus of Elasticity, ksi (MPa)
29.0 x 10³ (193 x 10³) in tension
11.2 x 10³ (78 x 10³) in torsion

Making Range, °F (°C) - 2550 - 2650
(1399 - 1454)

CORROSION RESISTANCE

These steels exhibit excellent resistance to a wide range of atmospheric, chemical, textile, petroleum and food industry exposures.

OXIDATION RESISTANCE

The maximum temperature to which Types 304 and 304L can be exposed continuously without appreciable scaling is about 1650°F (899°C). For intermittent exposure, the maximum exposure temperature is about 1500°F (816°C).

HEAT TREATMENTS

Type 304 is non-hardenable by heat treatment. Annealing: Heat to 1900 - 2050°F (1038 - 1121°C), then cool rapidly. Thin strip sections may be air cooled, but heavy sections should be water quenched to minimize exposure in the carbide precipitation region.

Stress Relief Annealing: Cold worked parts should be stress relieved at 750°F (399°C) for 1/2 to 2 hours.

FORMABILITY

Types 304 and 304L have very good drawability. Their combination of low yield strength and high elongation permits successful forming of complex shapes. However, these grades work harden rapidly. To relieve stresses produced in severe forming or spinning, parts should be full annealed or stress-relief annealed as soon as possible after forming.

WELDABILITY

The austenitic class of stainless steels is generally considered to be weldable by the common fusion and resistance

techniques. Special consideration is required to avoid weld "hot cracking" by assuring formation of ferrite in the weld deposit. Types 304 and 304L are generally considered to be the most common alloys of this stainless class. When a weld filler is needed, AWS E/ER 308, 309L or 347 are most often specified. Types 304 and 304L Stainless Steels are well known in reference literature and more information can be obtained in this way.

METRIC CONVERSION

Data in this publication are presented in U.S. customary units. Approximate metric equivalents may be obtained by performing the following calculations:

Length (inches to millimeters) -
Multiply by 25.4

Strength (ksi to megapascals or
meganeutons per square meter) -
Multiply by 6.8948

Temperature (Fahrenheit to Celsius) -
(Fahrenheit - 32) Multiply by 0.5556

Density (pounds per cubic inch to
kilograms per cubic meter) -
Multiply by 27.670

The information and data in this product data sheet are accurate to the best of our knowledge and belief, but we intend to grant information only. Additional requests for the materials are decided on a case-by-case basis. We make no warranty, express or implied, and we make no guarantee for the use of the material in any application.

Calculating mechanical properties and chemical analysis are the result of test performed on specific direction and grade sections with specified tempering conditions. Approximate values are limited to the data obtained in such tests and may vary in practice. There is no warranty with respect to data of the reverse or other sections.

AK Steel and the AK Steel logo are registered trademarks of AK Steel Corporation.

OFFICES AND SALES OFFICES THROUGHOUT THE WORLD

AK Steel Corporation
783 Centre Street
Middletown, OH 45043-0001
Customer Service 180-311-5830
Butler Works
PO Box 1000
Butler, PA 16003-1000
Customer Service 180-311-5831
Columbus Works
17400 State Route 16
Columbus, OH 43212
Customer Service 180-423-4433

AK Steel Sales Offices
Atlanta, GA Southeast Region 770-614-0823
Baltimore, MD 410-613-1331
Charlotte, NC 704-661-0796
Chicago, IL West Central Region 630-303-0801
Cincinnati, OH Midwest Region 513-631-0300
Detroit, MI North Central Region 248-641-7821
Grand Rapids, MI 616-949-5276
Nashville, TN Southeast Region 615-771-3134
New England 481-456-3400
Pittsburgh, PA 412-636-0825
Tulsa, OK 918-266-2270
International (Dallas-Houston), TX 281-470-5741
Specialty Stainless and Electrical
Conventional Sales, TX 180-311-5831



ภาคผนวก ฉ

ความสามารถในการวัดของมาตรวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร

- ช่วงการวัดปริมาณสารโพลาร์ 9 % ถึง 25 % TPM
- การวัดอุณหภูมิ 0°C ถึง 250 °C
- ช่วงอุณหภูมิทำการ (อุณหภูมิของน้ำมัน) 169°C ถึง 171°C
- ช่วงการวัดค่าความจุไฟฟ้า 1.0 ถึง 999.9 PF
- แหล่งจ่ายไฟ แบตเตอรี่ 9 V, 1 ก้อน หรือ 220 VAC เมื่อใช้หม้อแปลงไฟ

วิธีการสอบเทียบ

- ทำการสอบเทียบอย่างน้อย 6 เดือนครั้ง (ปีละสองครั้ง) เมื่อมีการใช้งานเป็นประจำ หากไม่ได้ใช้งานเกิน 1 เดือน ควรทำการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องด้วยการใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นตัวยืนยันความถูกต้องของเครื่องมือ (ดูหัวข้อการใช้งาน)
- การสอบเทียบกระทำโดยใช้น้ำมันตัวอย่าง 3 ช่วง คือ น้ำมันใหม่ (อายุการใช้งาน 0 ชม.) น้ำมันใช้ปานกลาง (อายุการใช้งานประมาณ 15 ชม.) และน้ำมันเก่า (อายุการใช้งานประมาณ 30 ชม.) โดยนำน้ำมันทั้ง 3 ตัวอย่าง ไปวิเคราะห์หาปริมาณสารโพลาร์ด้วยวิธีคอลัมน์โครมาโทกราฟี แล้วใช้น้ำมัน 3 ตัวอย่างนี้เป็นน้ำมันอ้างอิง เพื่อทำการวัดเปรียบเทียบ กับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดด้วยมาตรวัดฯ
- หากผลการวัดเปรียบเทียบมีความคลาดเคลื่อนเกิน $\pm 5\%$ TPM ควรทำการปรับแก้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับปริมาณสารโพลาร์ในโปรแกรมในเครื่องเสียใหม่ โดยการโปรแกรมเข้าไปในไมโครคอนโทรลเลอร์ใหม่

หมายเหตุ น้ำมันชนิดเดียวกันหากนำไปใช้ทอดอาหารต่างชนิดกัน จะมีระยะเวลาการเสื่อมในน้ำมันต่างกัน

ภาคผนวก ญ

ขั้นตอนการปฏิบัติงานมาตรฐานวัดคุณภาพน้ำมันทอดอาหาร

ลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงาน ดังนี้

1. เตรียมน้ำมันทอดอาหารที่ต้องการวัด ประมาณ 250 ลบ.ซม. นำมากรองเศษอาหารออก แล้วเทลงในกระบอบอกดวงสแตนเลส (รูปที่ 3.8, บทที่ 3)
2. นำกระบอบอกดวงตั้งบนเตาไฟฟ้าหรือเตาแก๊สที่สามารถตั้งอุณหภูมิได้ โดยตั้งอุณหภูมิเตาที่ 170°C
3. นำตัวรับรู้ ใส่ลงในกระบอบอกดวงในระดับความลึกประมาณ 12 ซม. ใส่แผ่นเทปลอน ป้องกันตัวรับรู้สัมผัสกับผิวกระบอบอกดวง (รูปที่ 3.16) ใส่ตัววัดอุณหภูมิที่ระดับความลึกประมาณ 6 ซม. จากระดับผิวน้ำมันฯ
4. รอจนกระทั่งน้ำมันมีอุณหภูมิ 170°C ต่อสายสัญญาณของตัวรับรู้เข้ากับตัวมาตรวัดฯ และเปิดสวิทช์ให้มาตรวัดฯ ทำงาน เพื่อทำการอ่านค่าความจุไฟฟ้า
5. ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าในน้ำมันตัวอย่างหนึ่งๆ จะทำการวัดซ้ำ 4 ครั้ง โดยเมื่อการวัดครั้งแรกเรียบร้อยแล้ว ให้ยกตัวรับรู้สูงพ้นกระบอบอกดวง เพื่อให้ให้น้ำมันไหลออกจากตัวรับรู้ รอประมาณ 2 – 3 นาที แล้วจึงนำตัวรับรู้ลงไปในกระบอบอกดวงซ้ำอีกครั้ง รอจนกระทั่งน้ำมันมีอุณหภูมิ 170°C อีกครั้ง จึงทำการวัดครั้งที่ 2 ทำอย่างนี้จนครบ 4 รอบการวัด โดยในแต่ละรอบการวัด จะทำการจดบันทึกข้อมูลดิบประมาณ 5-10 ข้อมูลต่อ 1 รอบการวัด เพื่อหาค่าเฉลี่ย (ขึ้นอยู่กับผู้ใช้)
6. เมื่อทำการวัดครบ 4 รอบการวัดแล้ว นำตัวรับรู้และตัววัดอุณหภูมิ ขึ้นจากกระบอบอกดวง รอจนกระทั่งตัวรับรู้เย็นลง จึงนำไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาขจัดคราบไขมัน
7. เมื่อต้องการวัดน้ำมันฯ ตัวอย่างอื่น ต้องแน่ใจว่าตัวรับรู้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน โดยตรวจสอบค่าความจุไฟฟ้าขณะตัวรับรู้อยู่ในอากาศ ที่อุณหภูมิปกติ (ประมาณ 151 pF)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในสาร

ที่มา: http://www.flowmeterdirectory.com/dielectric_constant_02.html

MATERIALS	DEG. F	DIELECTRIC CONSTANT
AIR		1
AIR (DRY)	68	1.000536
OCTANONE		10.3
OCTANONE	68	10.3
OCTENE		2
OCTENE	76	2.1
OCTYL ALCOHOL	18	3.4
OCTYL ALCOHOL		3.4
OCTYL ALCOHOL	64	3.4
OCTYL IODIDE	20	4.9
OCTYL IODIDE		4.9
OCTYL IODIDE	68	4.9
OCTYLENE	18	3.4
OCTYLENE		4.1
OCTYLENE	65	4.1
OIL ALMOND	20	2.8
OIL COTTONSEED	14	3.1
OIL COTTONSEED		3.1
OIL GRAPESEED	16	2.9
OIL LEMON	21	2.3
OIL LENSEED	13	3.4
OIL OLIVE	20	3.1
OIL PARAFFIN	20	2.2-4.7
OIL PEANUT	11	3
OIL PETROLEUM		2.1
OIL PETROLEUM		2.1
OIL PYRANOL	20	5.3
OIL SESAME	13	3
OIL SPERM	10	3.2
OIL TERPENTINE	20	3.2
OIL TRANSFORMER	20	2.2
OIL, ALMOND		2.8
OIL, ALMOND	68	2.8
OIL, COTTON SEED	57	3.1
OIL, FOR TRANSFORMER		2.2-2.4
OIL, GRAPESEED		2.9
OIL, GRAPESEED	61	2.9
OIL, LEMON		2.3
OIL, LEMON	70	2.3
OIL, LINSEED		3.4
OIL, LINSEED	55	3.4
OIL, OLIVE		3.1
OIL, OLIVE	68	3.1
OIL, PARAFFIN		2.2-4.7
OIL, PARAFFIN	68	2.2 - 4.7
OIL, PEANUT		3

ภาคผนวก ฎ (ต่อ)
ตัวอย่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกในสาร

MATERIALS	DEG. F	DIELECTRIC CONSTANT
OIL, PEANUT	52	3
OIL, PETROLEUM	68	2.1
OIL, PRYANOL		5.3
OIL, PYRANOL	68	5.3
OIL, SESAME		3
OIL, SESAME	55	3
OIL, SPERM		3.2
OIL, SPERM	68	3.2
OIL, TERPENTINE	68	2.2
OIL, TRANSFORMER		2.2
OIL, TRANSFORMER	68	2.2
OIL, TURPENTINE		2.2
OLEIC ACID	20	2.46
OLEIC ACID	20	2.5
OLEIC ACID	68	2.5
OLEIC ACID	68	2.5
OLERIC ACID		2.4-2.5
OXYGEN	-315	1.51
OXYGEN	68	1.000494
P-BROMOTOLUENE	137	5.5
P-CHLOROPHENOL	130	9.5
P-CHLOROTOLUENE	68	6.1
P-CREOSOL		5.6
P-CRESOL	24	5.6
P-CRESOL	137	9.9
P-CYMENE	17	2.3
P-CYMENE		2.3
P-CYMENE	63	2.3
P-DIBROMOBENZENE	88	4.5
P-DIBROMOBENZENE		4.5
P-DIBROMOBENZENE	190	4.5
P-DICHLOROBENZENE		2.86
P-DICHLOROBENZINE	120	2.4
P-NITRO ANALINE	320	56.3
P-NITROTOLUENE	137	22.2
P-TOLUDINE		3
P-TOLUIDINE		3
PAINT PALMITIC ACID		2.3
PALMITIC ACID	160	2.3
PAPER		2
TEFLON		2
TEFLON (4F)		2
TEFLON, FEP		2.1
TEFLON, PCTFE		2.3-2.8
TEFLON, PTFE		2
TEPINEOL		2.8

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล	นายสมชาย ศรีทนู
วัน เดือน ปี และสถานที่เกิด	1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2506 กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	
ระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร พ.ศ. 2539
ระดับปริญญาโท	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชามাত্রวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2551
ประสบการณ์การทำงาน	นักวิชาการ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ศาสตร์และเทคโนโลยีพ.ศ.2537 ถึง ปัจจุบัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย