

การพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

DEVELOPMENT OF TEXTURE TESTING MACHINE
FOR INDUSTRIAL PRODUCT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-060-117

การพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

DEVELOPMENT OF TEXTURE TESTING MACHINE
FOR INDUSTRIAL PRODUCT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-060-117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF TEXTURE TESTING MACHINE
FOR INDUSTRIAL PRODUCT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

KMITL-2013-EN-M-060-117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

นักศึกษา

รหัสนักศึกษา

ปริญญา

สาขาวิชา

พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

การพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

นาย ณรงค์เดช เพ็ชรโต

53611219

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

วิศวกรรมการวัดคุม

2556

รศ. ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม โดยทั่วไปการทดสอบเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์สามารถทำได้ 2 วิธี คือการทดสอบด้วยแรงกดและการทดสอบด้วยแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส(Texture analyzer)ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐาน เครื่องมือทดสอบนี้ได้ถูกออกแบบให้มียานการทดสอบที่กว้าง มีความละเอียดสูงและมีราคาแพง งานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาและพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส เพื่อใช้กับผลิตภัณฑ์ตามต้องการ เช่นการทดสอบเนื้อสัมผัสของแมงกะพรุนด้วยแรงกด การทดสอบแผงวงจรแบบยืดหยุ่น(Flexible printed circuit)ด้วยแรงดึง ผลการทดสอบที่ได้พบว่า เครื่องทดสอบที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น สามารถใช้งานได้จริง สอดคล้องกับผลที่ได้จากเครื่องมือมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Development of texture testing machine For industrial product
Student	Mr. Narongdesh Phetto
Student ID.	53611219
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Taweepol Suesut

ABSTRACT

This thesis presents the development of texture analyzer for products. Generally, the texture property of product can be analyzed by testing compression force and tensile force using industrial texture analyzer. This equipment is designed for wide range of use with high accuracy and quite expensive. Therefore, this research aims to design the low cost texture analyzer for the specific application. Our equipment was applied to test the texture of jelly fish and FPC (Flexible printed circuit). The obtained experimental results were in agreement with the results from texture analyzer using in the laboratory.

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีพล ซื่อสัตย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม และ ผศ.ดร.นวกัทธา หนูนาค อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหารที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมที่ได้ให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ แม่ ญาติพี่น้อง ภรรยา รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนช่วยเหลือในทุกๆด้านจนทำให้ผู้เขียนทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปด้วยดี
สุดท้ายนี้คุณค่าและคุณประโยชน์อันที่พึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณรงค์เดช เพ็ชรโต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญตาราง	vi
สารบัญรูป	vii
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 สมมติฐานของการวิจัย	1
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 กล่าวนำ	3
2.2 วิธีการวัดเนื้อสัมผัส	3
2.2.1 วิธีการวัดทางประสาทสัมผัส	3
2.2.2 วิธีการวัดทางกายภาพหรือการใช้เครื่องมือตรวจวิเคราะห์	4
2.3 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสและการทำงาน	5
2.3.1 หลักการทำงาน	5
2.3.2 ข้อดีและข้อด้อย	6
2.3.3 การทดสอบเนื้อสัมผัสวิธีต่างๆโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส	7
2.4 สเตรนเกจ(Strain gauge) และโหลดเซลล์(Loadcell)	21
2.5 วงจรขยายสัญญาณแบบเครื่องมือวัด(Instrument Amplifier)	23
2.6 ชุดควบคุมการเคลื่อนที่	24
2.6.1 มอเตอร์	24
2.6.2 Ball screw	25
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	26
3.1 กล่าวนำ	26
3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส	26
3.2.1 เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.2 โปรแกรมควบคุม	33
3.2.3 หัววัด	38
3.2.4 หลักการทำงาน	39
3.3 การทดสอบ	40
3.3.1 การสอบเทียบกับตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน	40
3.3.2 การหาค่าความถูกต้องแม่นยำของเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น	41
3.3.3 การทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงกดด้วยวิธีการเจาะทะลุ	41
3.3.4 การทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงดึง	44
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	47
4.1 การสอบเทียบกับตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน	47
4.2 การหาค่าความถูกต้องแม่นยำของเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น	49
4.3 การทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงกดด้วยวิธีการเจาะทะลุ	50
4.3.1 การทดสอบเนื้อสัมผัสของแมงกะพรุน	50
4.3.2 การทดสอบเนื้อสัมผัสกับเฮลลีแต่งงาน้ำเค็ม	54
4.3.3 การทดสอบเนื้อสัมผัสกับเนื้อกุ้งขาว	56
4.4 การทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงดึง	58
4.4.1 การทดสอบเนื้อสัมผัสของแผงวงจรแบบยืดหยุ่น	58
4.4.2 การเปรียบเทียบเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐาน	60
4.4.3 การทดสอบเนื้อสัมผัสของช่องบรรจุยา	63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลการวิจัย	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก	70
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่	71
ประวัติผู้เขียน	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น	27
3.2 ค่าที่ใช้ในการกำหนดความละเอียดในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์	30
4.1 ผลการสอบเทียบ	47
4.2 ผลการหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation)	48
4.3 ค่าความถูกต้องแม่นยำของเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น	50
4.4 ค่าที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสกับเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสและที่สร้างขึ้น	53
4.5 ค่าแรงสูงสุดจากตัวอย่างเยลลี่ 5 ชั้น	56
4.6 ค่าแรงสูงสุดจากตัวอย่างเนื้อกุ้งขาว 5 ชั้น	58
4.7 ค่าแรงสูงสุดจากตัวอย่างแผงวงจรแบบยืดหยุ่น 5 ชั้น (ชั้นที่ 1-5)	60
4.8 ค่าแรงสูงสุดจากตัวอย่างแผงวงจรแบบยืดหยุ่น 5 ชั้น (ชั้นที่ 6-10)	63
4.9 ผลการหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation)	63
4.10 ค่าแรงสูงสุดจากตัวอย่างซองบรรจุยา 5 ชั้น	66

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการวัดค่าพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์	4
2.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องตรวจวัดเนื้อสัมผัส	5
2.3 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส	6
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบ TPA	7
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบกดของ Rohu fish	9
2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบเจาะของลูกแพร์	10
2.7 ลักษณะการจัดวางวัสดุภายใต้การกดแบบเจาะ (ก) หัวตัด (ข) หัวเข็ม (ค) หัวมน	11
2.8 การทดสอบการเจาะหลายหัว	11
2.9 การทดสอบวัสดุแผ่นบางแบบเจาะ	13
2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบตัดของข้าวโพดหวาน	13
2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบ Back ward extrusion ของ low fat yoghurt	14
2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบ Forward extrusion ของเนยเทียม	15
2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบการตัดของ Biscuit และ Chewy cereal bar	16
2.14 แสดงการดึงในแนวตั้งฉากกับแนวการยึดติด	17
2.15 แสดงการดึงในแนวระนาบกับแนวการยึดติด	17
2.16 แสดงการใช้แรงแยกบริเวณขอบของการยึดติด	17
2.17 แสดงการใช้แรงดึงลอกวัสดุ	18
2.18 รูปแสดงการทดสอบด้วยวิธีดึงในมุมที่ต่างกัน	18
2.19 รูปแสดงผลการทดสอบด้วยวิธีดึง	19
2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบการดึงของพิซซ่า	19
2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบ Relaxation	20
2.22 ลักษณะรูปร่างของสเตรนเกจในแบบต่าง ๆ กัน	21
2.23 ลักษณะโพลดเซลแบบสเตรนเกจ	22
2.24 วงจรวีทสโตนบริด	23
2.25 วงจรขยายแบบเครื่องมือวัด	24
2.26 Ball screw	25
3.1 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น	26
3.2 โพลดเซลล์ที่นำมาใช้งาน	27
3.3 วงจรขยายสัญญาณแบบเครื่องมือวัดโดยใช้ IC เบอร์ AD624	28
3.4 วงจรภายในของ Instrument amplifier AD624	28

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ส่วนประกอบของ Servo motor Reliance Cool Muscle	28
3.6 รูปแสดงตำแหน่งของการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์	29
3.7 การเสียบ Jumper เพื่อเลือกการติดต่อสื่อสารแบบ RS-232	29
3.8 แสดงการเตรียม Servo motor ให้พร้อมใช้งาน	29
3.9 แสดงการเตรียม Servo motor ให้พร้อมใช้งาน	30
3.10 วงจรจ่ายไฟฟ้า	31
3.11 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า	31
3.12 ผังการต่อของ USB-6009 OEM	32
3.13 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างร่องของ Ball screw	32
3.14 ผังการทำงานของโปรแกรมควบคุม	34
3.15 Front panel ของโปรแกรม Labview ที่ใช้ในการควบคุม	35
3.16 Block diagram ที่กำหนดในการเชื่อมต่อผ่านทาง RS-232	36
3.17 Block diagram ที่รับค่าและส่งต่อไปยังชุดควบคุม Servo motor	36
3.18 Block diagram ที่รับข้อมูลและส่งค่าไปที่ชุดขับ Servo motor	37
3.19 Block diagram ในการรับค่าจากวงจรขยายสัญญาณและการแสดงผลกราฟ	37
3.20 Block diagram ในการเก็บผลกราฟ	38
3.21 การทดสอบแบบเจาะด้วยหัววัด P/2	38
3.22 หัววัดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร	39
3.23 หัววัดเพื่อทดสอบแบบดึง	39
3.24 ตุ่มน้ำหนัมาตรฐาน	40
3.25 แสดงการสอบเทียบโดยใช้ตุ้มน้ำหนัมาตรฐาน	40
3.26 การเตรียมส่วนร่วมของแมงกะพรุน	41
3.27 การกำหนดตำแหน่งเพื่อทดสอบเนื้อสัมผัส	42
3.28 ตัวอย่างเยลลี่ที่นำมาทดสอบ	42
3.29 การวางเยลลี่เพื่อรอทดสอบ	42
3.30 ตัวอย่างเนื้อกุ้งขาวที่นำมาทดสอบ	43
3.31 การวางเนื้อกุ้งขาวเพื่อรอทดสอบ	43
3.32 การกำหนดความกว้างของแผงวงจรแบบยืดหยุ่นเพื่อทำการทดสอบ	44
3.33 แสดงการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับหัวจับและหัววัด	44
3.34 ตัวอย่างแสดงแผงวงจรที่ผ่านการทดสอบ	45
3.35 ตัวอย่างของบรรจุยาที่ตัดมาเพื่อทำการทดลอง	45
3.36 การยึดติดตัวอย่างของบรรจุยาเพื่อรอทดสอบ	46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer)	49
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Max Force ที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสกับเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น	49
4.3 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 27.40 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง	51
4.4 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 22.13 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง	51
4.5 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 21.63 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง	51
4.6 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 18.73 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง	52
4.7 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 3.53 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง	52
4.8 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 2.20 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง	52
4.9 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 0.8 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง	53
4.10 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 0.73 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง	53
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบเนื้อแมงกะพรุนที่ปริมาณเกลือต่างกัน	54
4.12 ผลการทดสอบของเยลลี่ชั้นที่ 1	54
4.13 ผลการทดสอบของเยลลี่ชั้นที่ 2	55
4.14 ผลการทดสอบของเยลลี่ชั้นที่ 3	55
4.15 ผลการทดสอบของเยลลี่ชั้นที่ 4	55
4.16 ผลการทดสอบของเยลลี่ชั้นที่ 5	56
4.17 ผลการทดสอบของเนื้อกุ้งขาวชั้นที่ 1	56
4.18 ผลการทดสอบของเนื้อกุ้งขาวชั้นที่ 2	57
4.19 ผลการทดสอบของเนื้อกุ้งขาวชั้นที่ 3	57
4.20 ผลการทดสอบของเนื้อกุ้งขาวชั้นที่ 4	57
4.21 ผลการทดสอบของเนื้อกุ้งขาวชั้นที่ 5	58
4.22 ผลการทดสอบของตัวอย่างแฉงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 1	59
4.23 ผลการทดสอบของตัวอย่างแฉงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 2	59
4.24 ผลการทดสอบของตัวอย่างแฉงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 3	59
4.25 ผลการทดสอบของตัวอย่างแฉงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 4	60
4.26 ผลการทดสอบของตัวอย่างแฉงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 5	60
4.27 เครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัส(Damper testing machine)	61
4.28 ผลการทดสอบของตัวอย่างแฉงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 6	61
4.29 ผลการทดสอบของตัวอย่างแฉงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 7	62
4.30 ผลการทดสอบของตัวอย่างแฉงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 8	62
4.31 ผลการทดสอบของตัวอย่างแฉงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 9	62
4.32 ผลการทดสอบของตัวอย่างแฉงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 10	63
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องที่สร้างขึ้นกับเครื่องในห้องปฏิบัติการ	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 ผลการทดสอบของตัวอย่างซองบรรจุยาชั้นที่ 164
4.35 ผลการทดสอบของตัวอย่างซองบรรจุยาชั้นที่ 265
4.36 ผลการทดสอบของตัวอย่างซองบรรจุยาชั้นที่ 365
4.37 ผลการทดสอบของตัวอย่างซองบรรจุยาชั้นที่ 465
4.38 ผลการทดสอบของตัวอย่างซองบรรจุยาชั้นที่ 566



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ เช่น ความกรอบ และความเหนียว โดยการใช้ปากกัด ไปยังอาหารโดยตรง จัดเป็นวิธีการที่ไม่ถูกต้องลักษณะและไม่ได้มาตรฐาน หรือโดยการใช้มือดึง หรือวิธีการอื่นๆ คุณภาพที่ได้เป็นเพียงการทดสอบโดยอาศัยประสบการณ์เฉพาะบุคคลเท่านั้น ขาดข้อมูลคุณภาพในเชิงปริมาณที่เป็นมาตรฐานที่แน่นอน ซึ่งจัดเป็นปัญหาสำคัญและควรได้รับการแก้ไข จึงได้มีการพัฒนาการตรวจสอบคุณภาพด้วยการใช้เครื่องมือวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) แม้ว่าปัจจุบันเครื่องมือตรวจวัดเนื้อสัมผัสจะมีใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เครื่องมือดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง และต้องการความรู้ความเข้าใจค่อนข้างมากสำหรับการวิเคราะห์ผลที่ได้ นอกจากนี้เครื่องมือดังกล่าว ยังเหมาะสำหรับการใช้งานเฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสกับอาหารหรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ โดยอาศัยหลักการวัดผลตอบสนองจากแรงกด (Compression force) หรือแรงดึง (Tensile force) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐานในเชิงปริมาณ เช่นเดียวกับเครื่องมือวัดแบบมาตรฐานที่ใช้วัดเนื้อสัมผัสที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ สามารถสร้างความแข็งแรงให้กับอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อมได้ เพราะเครื่องมือที่สร้างขึ้นจะมีราคาที่ถูกลงกว่า และใช้งานได้จริง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการกำหนดวัตถุประสงค์ดังนี้

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

1.2.2 เพื่อนำไปใช้ทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ทางด้านเนื้อสัมผัส

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันออกไป ทั้งความกรอบความเหนียว ถ้านำคุณสมบัติของเนื้อสัมผัสดังกล่าวมาเพื่อใช้ตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์และบันทึกค่าเก็บไว้วิเคราะห์ หลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบ ซึ่งไม่จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์หรือความชำนาญเฉพาะบุคคล ก็สามารถแยกแยะคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้โดยใช้เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น สามารถให้ผลที่ถูกต้องใกล้เคียงกับเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ซึ่งถือว่าเป็นอุปกรณ์มาตรฐาน และเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นต้องมีการสอบเทียบเพื่อให้ได้ผลที่มีค่าความน่าเชื่อถือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอหลักการทดสอบเนื้อสัมผัส เพื่อประเมินคุณภาพของเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เช่น การทดสอบเนื้อสัมผัสของแมงกระพรุนดองเค็ม เยลลี่แตงหน้าเค็มและเนื้อกุ้งขาว ด้วยแรงกด การทดสอบลอกของบรรจุยาและแผงวงจรยืดหยุ่น(Flexible printed circuit) ด้วยแรงดึง การทดสอบโดยวัดค่าการเปลี่ยนแปลงจากแรงกดหรือแรงดึงที่เป็นเชิงกล มาเปลี่ยนเป็นเชิงไฟฟ้า เพื่อนำค่าดังกล่าวไปประมวลผล ซึ่งสามารถนำหลักการดังกล่าวมาออกแบบเป็นเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นได้นำเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นมาสอบเทียบกับตุ้มน้ำหนักที่เป็นมาตรฐานเพื่อสอบเทียบแรงว่าสามารถอ่านค่าได้ถูกต้องแม่นยำเพียงใด ตลอดจนการทดสอบซ้ำเพื่อตรวจสอบค่าความแม่นยำ หลังจากนั้นเครื่องมือที่ถูกสร้างขึ้นจะมีการนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดเนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐาน เพื่อประเมินผลว่ามีค่าที่วัดได้ถูกต้องแม่นยำ หรือใกล้เคียงกับอุปกรณ์มาตรฐานจนเป็นที่ยอมรับ และสามารถนำไปใช้งานจริงได้

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.5.1 ศึกษาวิธีการประเมินผลเนื้อสัมผัสของอาหารเพื่อแยกแยะคุณภาพผลิตภัณฑ์
- 1.5.2 ศึกษาหลักการในการออกแบบและสร้างชุดเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยอาศัยหลักการของการวัดแรงกดหรือแรงดึงจากตัวตรวจวัดความเครียด จากนั้นนำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ไปประมวลผล
- 1.5.3 พัฒนาชุดเครื่องมือวัดและทดสอบ เพื่อใช้วัดคุณภาพอาหารได้หลากหลาย รวมทั้งนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมด้านอื่นๆที่อาศัยหลักการจากแรงกดหรือแรงดึง

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

เนื้อสัมผัส หมายถึง การตอบสนองของวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ต่อการสัมผัส แสดงถึงการต้านแรงของวัสดุ ในกรณีของผลผลิตทางการเกษตรและอาหาร เนื้อสัมผัสจะเป็นสมบัติเชิงกลที่เกิดจากการตอบสนองต่อแรงที่กระทำ ตัวอย่างแรงที่กระทำได้แก่ แรงกดทับซ้อนกันของผลไม้ แรงจากการกระแทก แรงที่กระทำเนื่องจากการบดเคี้ยวของอาหาร เป็นต้น ตัวอย่างสมบัติเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้แก่ ความแน่นเนื้อ (Firmness) ความแข็ง(Hardness) ความยืดหยุ่น(Elasticity) เป็นต้น ส่วนตัวอย่างสมบัติเนื้อสัมผัสอาหารได้แก่ ความแน่นเนื้อ(Firmness) ความเหนียว(Toughness) เป็นต้น (ปานมนัส ศิริสมบุญ. 2555 : 1)

การทดสอบกับผลิตภัณฑ์อื่นก็สามารถนำหลักการของการวัดการตอบสนองของแรงที่กระทำเพื่อวิเคราะห์ผลได้เช่นเดียวกัน

การทดสอบเนื้อสัมผัสแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ การทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation method) และการทดสอบทางกายภาพหรือการใช้เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ (Physical method or instrument method) การทดสอบทั้งสองแบบมีลักษณะ และความแตกต่างกันออกไป ซึ่งการทดสอบทางกายภาพจะใช้เครื่องมือวัด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเปลี่ยนรูป หรือเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) ซึ่งจะแสดงผลออกมาเป็นรูปกราฟเรียกว่า Force-Deformation curve และ Force-Time curve และ Stress-Strain curve ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัสจะใช้คนเป็นผู้ชิม ซึ่งอาศัยความรู้สึกทางประสาทสัมผัสทางรูป รส หรือการสัมผัส แต่จะขาดความแม่นยำ เนื่องจากมือคืดและความแปรปรวนจากผู้ชิมเกิดขึ้น ต่างจากการใช้เครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำมากกว่า

2.2 วิธีการวัดเนื้อสัมผัส

จากความสำคัญการประเมินเนื้อสัมผัสดังกล่าวจึงนำไปสู่การคิดค้นวิธีการประเมินเนื้อสัมผัส โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธีดังนี้

2.2.1 วิธีการวัดทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation methods)

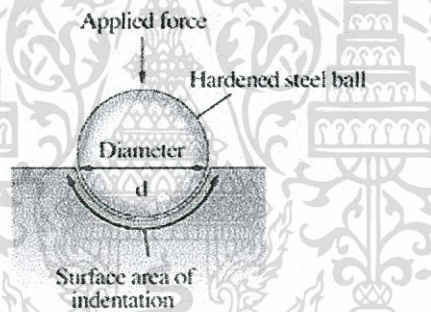
เป็นวิธีการหาค่าคุณภาพอาหารโดยใช้ประสาทสัมผัสของมนุษย์ ส่วนใหญ่ได้จากความรู้สึกทางปากหรือการกินซึ่งจะต้องมีการฝึกฝนผู้ทดสอบชิมเพื่อให้ได้ผลที่น่าเชื่อถือ ในการทดสอบโดยการชิมต้องมีการกำหนดมาตรฐานของลักษณะเนื้อสัมผัสแต่ละค่าให้เข้าใจตรงกัน(ัญญาภรณ์ ศิริเลิศ. 2550)

2.2.2 วิธีการวัดทางกายภาพหรือการใช้เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ (Physical methods or instrumental methods)

เป็นการพยายามที่จะออกแบบเครื่องมือเพื่อวัดค่าทางกายภาพของอาหารให้ใกล้เคียงกับความรู้สึกของมนุษย์มากที่สุด ทั้งความรู้สึกที่เกิดจากมือและความรู้สึกที่เกิดจากจากปาก เช่น การเคี้ยวอาหาร การกัดชิ้นอาหาร โดยส่วนใหญ่แล้วเครื่องมือจะวัดค่าแรงดันที่เกิดจากการสัมผัส ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด(กิตติชัย บรรจง. 2535) เครื่องมือที่ใช้ประเมินหรือวัดลักษณะเนื้อสัมผัสมีลักษณะเฉพาะซึ่งขึ้นกับวิธีการวัดคุณสมบัติทางกายภาพในสารหรือวัสดุนั้นๆ Bourne Malcolm แบ่งวิธีการประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสโดยการใช้เครื่องมือออกเป็น 3 วิธี ดังนี้

2.2.2.1 วิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์ (Fundamental measurement)

เป็นการวัดแรงที่หัววัดกระทำต่อตัวอย่างที่ทดสอบในแนวตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด ตัวอย่างที่ทดสอบจะเกิดแรงต้านต่อแรงที่มากระทำเพื่อพยายามรักษาสสมดุลของรูปร่างให้คงเดิม ข้อดีของวิธีการนี้ คือ สามารถอธิบายค่าที่วัดได้ในเชิงวัสดุศาสตร์ ส่วนข้อเสีย คือ ค่าที่วัดได้ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าทางประสาทสัมผัส เครื่องมือมีราคาแพงและใช้เวลาในการวัดค่านาน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะการวัดค่าพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์

2.2.2.2 วิธีการวัดค่าแบบประยุกต์ (Empirical measurement)

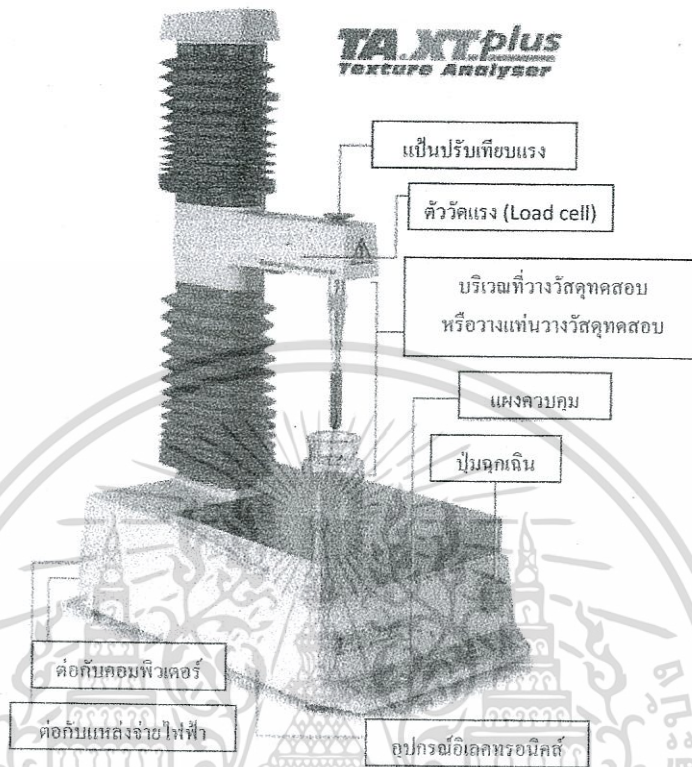
เป็นวิธีการวัดค่าเนื้อสัมผัสเพื่อใช้ในการควบคุมและแบ่งระดับชั้นคุณภาพผลิตภัณฑ์ในโรงงานอุตสาหกรรม ข้อดีของวิธีการนี้ คือ เครื่องมือใช้งานง่าย มีความรวดเร็วในการวัด และค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กับการวัดค่าทางประสาทสัมผัส ส่วนข้อเสีย คือ ไม่สามารถอธิบายหลักการของค่าที่วัดได้บนพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์ นอกจากนี้ยังเป็นวิธีการวัดค่าได้เพียงคุณลักษณะใด คุณลักษณะหนึ่ง โดยทั่วไปจะวัดค่าที่จุดใดจุดหนึ่งจึงไม่สามารถให้ข้อมูลที่ต่อเนื่องได้

2.2.2.3 วิธีการเลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ (Imitative measurement)

วิธีการนี้จะออกแบบเครื่องมือให้มีหลักการการทำงานคล้ายกับการเคี้ยวของมนุษย์ โดยเป็นเครื่องมือแบบเดียวกันกับวิธีการวัดค่าพื้นฐานทางวัสดุศาสตร์ที่สามารถหาค่าแรงกับระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือความเค้นกับความเครียดได้ ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้วัดค่าด้วยวิธีการนี้ได้แก่ Texture Analysis ดังรูปที่ 2.2 เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องตรวจวัดเนื้อสัมผัส

2.3 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสและการใช้งาน

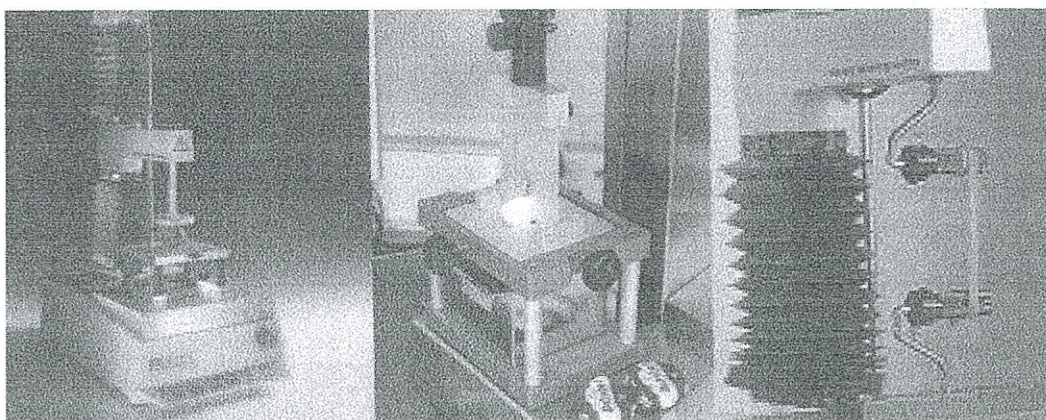
2.3.1 หลักการทำงาน

หลักการทำงานของเครื่อง Texture Analyzer คือ หัววัด หรือ probe เชื่อมต่ออยู่กับโหลดเซลล์ เมื่อ probe ให้แรงกระทำกับอาหารและอาหารก็จะมีแรงปฏิกิริยามากกระทำต่อ probe ทำให้โหลดเซลล์ได้รับแรงจึงเปลี่ยนค่าแรงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแปลค่าออกมาเป็นกราฟระหว่างแรงกับเวลา (Force-Time) หรือกราฟระหว่างแรงกับระยะทาง (Force-Distance) สามารถอ่านค่าและนำมาวิเคราะห์เป็นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้

เครื่องตรวจวัดเนื้อสัมผัสที่นิยมใช้สามารถให้แรงกด แรงเฉือนหรือแรงดึง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.3 การให้แรงชนิดใดขึ้นอยู่กับลักษณะหัววัดและทิศทางการเคลื่อนที่ของหัววัด

เครื่องตรวจวัดเนื้อสัมผัส ประกอบด้วยส่วนสำคัญแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งได้แก่แท่นวางวัสดุ ที่ติดตั้งหัววัด หัววัด โหลดเซลล์ที่ใช้เป็นตัวตรวจรับแรง ตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของหัววัด ซึ่งจะควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นลงของหัววัดด้วยคอมพิวเตอร์ และข้อมูลแรง ระยะทางและเวลา ยังถูกบันทึกลงในคอมพิวเตอร์เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 2.3 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส
(ก)ให้แรงกด (ข)ให้แรงเหวี่ยง (ค)ให้แรงดึง

แท่นที่วางวัสดุ ใช้สำหรับวางหรือใส่วัสดุให้พร้อมที่จะรับแรงจากหัววัด บางครั้งไม่จำเป็นต้องใช้ เช่นการวัดแบบแรงดึง หัววัดจะจับยึดปลายทั้งสองของวัสดุ โดยหัววัดจะสัมผัสกับตัวอย่างและติดกับตัวตรวจรับแรง หัววัดมีหลายชนิดขึ้นกับลักษณะการวัดที่ต้องการ เช่น หัววัดแบบแผ่นแบน หัววัดแบบทรงกระบอก เป็นต้น

เมื่อกำหนดตัวอย่างในตำแหน่งที่พร้อมจะทำการวัด และกำหนดแบบการเคลื่อนที่ของชุดที่ติดตั้งหัววัดเช่น ความเร็วหัววัด(ที่ติดตั้งหัววัด)ก่อนถึงตัวอย่าง(Pre-test speed) ความเร็วหัววัดขณะสัมผัสกับตัวอย่างหรือความเร็วขณะทดสอบ (Test speed) ความเร็วหัววัดหลังจากการทดสอบครบขั้นตอนหรือความเร็วถอยขึ้น (Post-test speed) ขนาดแรงเมื่อต้องการหยุดการเคลื่อนที่ทดสอบ หรือระยะทางเมื่อต้องการหยุดการเคลื่อนที่ทดสอบ หรือค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด (% Strain) เมื่อต้องการหยุดการเคลื่อนที่ทดสอบ เป็นต้น การกำหนดชนิดของหัววัด การกำหนดความละเอียดของการบันทึกข้อมูล

2.3.2 ข้อดีและข้อด้อย

ข้อดี

- เครื่องสามารถวัดและประมวลผลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เนื่องจากก่อนการวัดเนื้อสัมผัสมีการสอบเทียบ(Calibrate) ก่อนทุกครั้ง
- เครื่องสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ภายใต้สภาวะเงื่อนไขควบคุม
- เครื่องคอมพิวเตอร์มีโปรแกรมที่ประมวลผลเป็นค่าเนื้อสัมผัสออกมาเป็นตัวเลขได้ จึงง่ายต่อการนำไปใช้งาน
- ให้ค่าเนื้อสัมผัสออกมาเป็นตัวเลขในหน่วยมาตรฐาน
- ผู้ใช้เครื่องสามารถศึกษาจากข้อมูลต่างๆ จากคู่มือการใช้และทำการวัดตามคู่มือได้ง่าย
- นำไปประยุกต์ใช้กับอาหารได้หลายชนิด
- ใช้คนจำนวนน้อยในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อด้อย

- เครื่องมีราคาแพง
- ผู้ใช้เครื่องต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการใช้เครื่องเครื่องมือวัดเนื้อสัมผัส(Texture Analyzer) และการเลือกใช้หัววัดให้เหมาะสมกับชนิดของอาหาร และนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง
- ผู้ใช้เครื่องต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเนื้อสัมผัสเพื่อใช้ในการแปลผลค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดเนื้อสัมผัส
- ผู้ใช้เครื่องต้องทราบความหมายของค่าเนื้อสัมผัสต่างๆ จึงจะสามารถนำค่าที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์และนำไปใช้ได้ถูกต้อง
- เครื่องมือวัดเนื้อสัมผัส ทำการเคลื่อนย้ายยาก ต้องใช้ความระมัดระวังและความชำนาญในการเคลื่อนย้าย จึงต้องทำการวัดเฉพาะในห้องทดลองเท่านั้น

2.3.3 การทดสอบเนื้อสัมผัสวิธีต่าง ๆ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

การทดสอบเนื้อสัมผัสมีวิธีการทดสอบหลายวิธีด้วยกันได้แก่

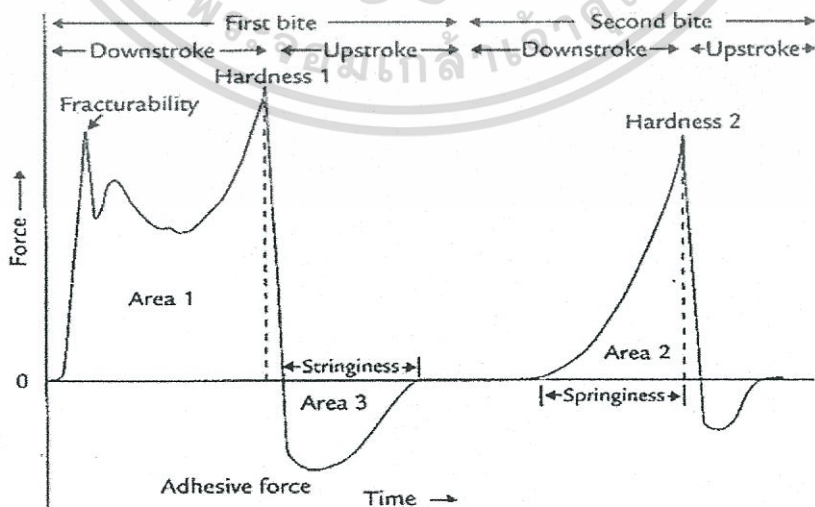
2.3.3.1 การทดสอบแบบ TPA (Texture Profile Analysis)

การทดสอบแบบ TPA เป็นการทดสอบเนื้อสัมผัสอาหารโดยการจำลองการเคี้ยวอาหารของมนุษย์ การทดสอบทำได้โดยใช้หัววัดซึ่งเป็นตัวแทนของฟันส่วนต่างๆกดลงบนอาหาร 2 ครั้ง ซึ่งลักษณะของ Texture Profile ที่ได้จากการใช้เครื่องวัดค่าเนื้อสัมผัสจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับตัวอย่างต่อเวลา ผ่านการกดของหัววัด 2 ครั้ง

ตัวอย่างอาหารที่ทดสอบด้วยวิธีนี้ เช่น หมูยอ เจลลี่ เต้าหู้ มันฝรั่ง เนื้อผลไม้ และเนื้อสัตว์ เป็นต้น

หัววัดที่นิยมใช้ ได้แก่ Flat plate ชนิด plunger และ Cylinder probe

ลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแบบ TPA แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบ TPA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ได้จากการทดสอบ มีดังนี้

- Hardness แสดงค่าความแข็งของอาหาร หาได้จากแรงสูงสุดของการกดแต่ละครั้ง
- Fracturability แสดงถึงแรงกดที่กระทำครั้งแรกซึ่งทำให้เกิดการแตกหักหรือเสียรูปของอาหาร (เดิมเรียกว่าBrittleness)
- Cohesiveness ขอบเขตของวัสดุที่สามารถเสียรูปได้ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก หาได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟ ของการกดครั้งสองกับพื้นที่ใต้กราฟของการกดครั้งที่แรก (Area 2 / Area 1)
- Springiness ความยืดหยุ่นหรืออัตราการคืนรูปของวัสดุหลังจากถูกกด หรือความสูงของอาหารที่กลับคืนระหว่างการสิ้นสุดการกดครั้งแรกกับครั้งที่สอง หาได้จากอัตราส่วนของเวลาที่ใช้ในการกดให้ถึงแรงสูงสุดครั้งที่สองกับเวลาที่ใช้ในการกดให้ถึงแรงสูงสุดครั้งแรก (Length 2/Length 1)
- Gumminess พลังงานหรือแรงที่ต้องใช้ในการทำให้อาหารกึ่งของแข็งแตกออกจนสามารถกลืนได้ หาได้จาก Hardness* Cohesiveness
- Chewiness พลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหาร หรือแรงที่ใช้ในการบดตัวอย่างจนกระทั่งเสียรูป หาได้จาก Gumminess*springiness หรือเท่ากับ Hardness* Cohesiveness* Springiness
- Adhesiveness งานที่จำเป็นในการดึงหัววัด หรือหัวกด หรือพื้นออกจากอาหาร หาได้จากArea 3 บางที เรียกว่า Stickiness หรือลักษณะเนื้ออาหารที่ติดอยู่ เช่น ผลไม้ กวน หรือ ทอฟฟี่ เมื่อเคี้ยวจะรู้สึกเหนอะติดฟัน

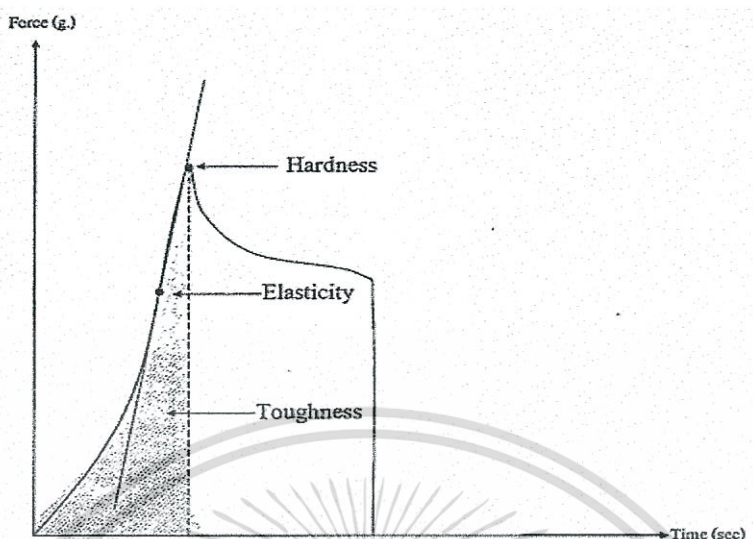
2.3.3.2 การทดสอบแบบการกด (Compression Test)

การทดสอบวัดแรงกดเป็นการทดสอบเนื้อสัมผัสที่ง่ายที่สุด โดยวัดการเปลี่ยนรูปของตัวอย่างที่ทดสอบ มีค่าความต้านทานที่เกิดจากการกดเป็นตัวชี้วัดลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร ซึ่งหัววัดจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าชิ้นอาหารที่นำมาทดสอบ

ตัวอย่างอาหารที่ทดสอบด้วยวิธีนี้ เช่น ขนมปัง, อาหารเข้าซีเรียล, เค้ก, แครอท, แผ่นมันฝรั่ง (Malcolm C. Bourne. 2002)

หัววัดที่นิยมใช้ ได้แก่ Cylinder probe (ปกติใช้ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 10 mm.), Compression platens, Spherical probe และ Ottawa cell เป็นต้น

ลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแบบกดแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบกดของ Rohu fish

ค่าที่ได้จากการทดสอบ มีดังนี้

- Hardness แรงสูงสุดที่ใช้ในการตัดลงไปเนื้ออาหาร หาได้จาก Peak force
- Elasticity /Springiness ค่าความยืดหยุ่นของเนื้ออาหาร หาได้จากค่าความชันก่อนถึงจุด Peak force ที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากที่สุด
- Toughness งานที่ใช้กดทับลงบนชิ้นอาหาร หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟจากจุดเริ่มต้นถึงจุด Peak force

2.3.3.3 การทดสอบแบบการเจาะ (Puncture and Penetration Test)

การทดสอบแบบเจาะเป็นการวัดแรงที่หัววัดใช้ในการแทรกเข้าไปในเนื้ออาหาร ซึ่งวัดทั้งแรงที่เกิดจากการกดและแรงเฉือน แรงทั้งสองนี้จะทำให้เกิดค่าความแตกต่างในชั้นการกดและหัววัดจะต้องมีขนาดเล็กกว่าชิ้นทดสอบ (David Kilcast. 2003) โดยการทดสอบแบบเจาะเป็นเครื่องมือที่วัดค่า maximum force ซึ่งแบ่งออกเป็น

- Single-probe ได้แก่ Magness-Taylor, EFFI-GI, Ghatillon, Bloom Gelometer

- Multiple-probe ได้แก่ Armour Tenderometer , the Christel Texture Meter, Maturo meter ต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้ค่าคงที่ ที่เกี่ยวกับแรงซึ่งมีเครื่องมือการทดสอบที่เป็นสากล ได้แก่ Instron และ TA-XT รุ่นต่างๆ

ตัวแปรที่มีผลต่อการทดสอบแบบเจาะ ได้แก่

1. ธรรมชาติทั่วไปของอาหาร เช่น อาหารที่นุ่มจะใช้แรงที่ใช้ในการเจาะน้อยกว่าอาหารที่มีความแข็ง
2. ขนาดและรูปร่างของอาหารที่นำมาทดสอบ
3. จำนวนหัววัดที่ใช้ระยะความลึกของการเจาะที่ลงไปเนื้ออาหารหรือตัวทดสอบ

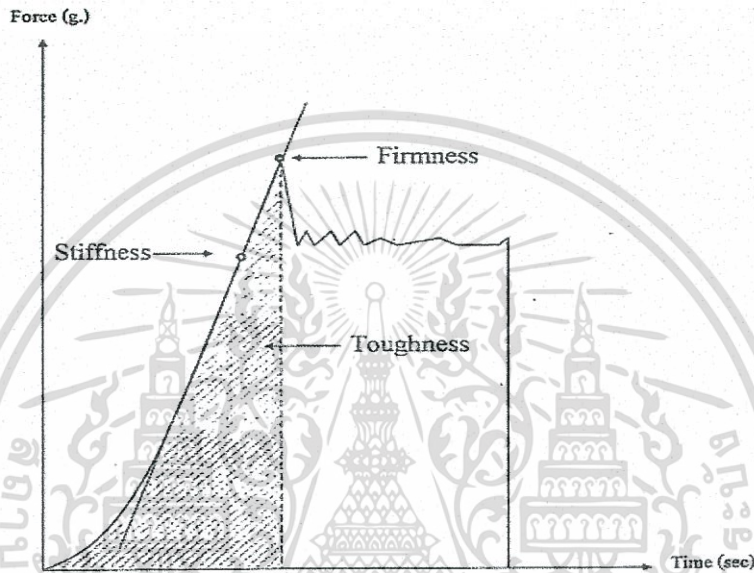
เอกสารแต่ก็ไม่ใช้กับอาหารทุกชนิด รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ของหัววัด เมื่อเป็นการทดสอบวัดค่าความหนืดของอาหารเพราะค่าอัตราความเครียด (strain) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย

ตัวอย่างอาหารที่ทดสอบด้วยวิธีนี้ เช่น ผักและผลไม้สด, Cheese, Confectionery และการแผ่กระจายของมาร์การีน

หัววัดที่นิยมใช้ ได้แก่ Cylinder probe, Multiple Chip Rig, Needle probe, Multiple Pea Test Rig, Conical probe, Spherical probe (David Kilcast. 2003)

ลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแบบเจาะแสดงดังรูปที่ 2.6



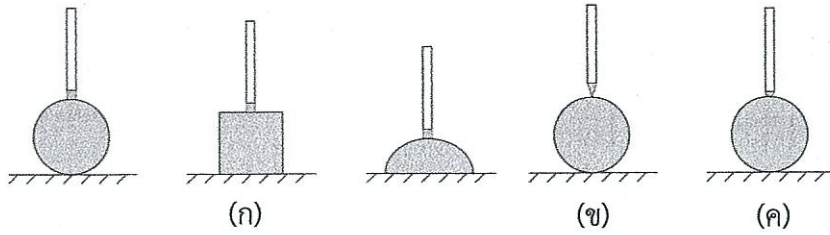
รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบเจาะของลูกแพร์

ค่าที่ได้จากการทดสอบ มีดังนี้

- Hardness/Firmness แรงสูงสุดที่ใช้ในการเจาะทะลุลงไปเนื้ออาหาร หาได้จากจุด Peak Force
- Stiffness แสดงความเหนียวหรือความเป็น viscoelastic body หาได้จากความชันจากจุดเริ่มต้น ถึงจุด Peak Force (Dilip Jain และคณะ. 2007)
- Toughness งานที่ใช้ในการเจาะทะลุลงไปเนื้ออาหาร หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟจากจุดเริ่มต้น ถึงจุด Peak Force

การทดสอบแบบนี้ใช้หัววัดเป็นแท่งรูปทรงกระบอกหน้าตัดเรียบหรือมนหรือแบบเข็ม กดเจาะตัดชิ้นตัวอย่าง โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัดมีค่าน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดตัวอย่างมากๆ เป็นการวัดการตอบสนองต่อแรงที่จุดที่เจาะนั้นถึงระดับความลึกต่างๆ ในกรณีที่วัสดุตัวอย่างมีเปลือก เช่น ผักผลไม้ การทดสอบแบบนี้ จะทำให้ทราบความแข็งแรงหรือเนื้อสัมผัสของเปลือก และของเนื้อที่จุดเจาะ มีการวางหัววัด และวัสดุตัวอย่างดังรูปที่ 2.7(ก) หัวตัด (ข) หัวเข็ม (ค) หัวมน (ปานมนัส ศิริสมบุญ. 2555)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ลักษณะการจัดวางวัสดุภายใต้การกดแบบเจาะ
(ก) หัวตัด (ข) หัวเข็ม (ค) หัวมน

วัสดุตัวอย่างได้แก่ ผักผลไม้ทั้งผลหรือครึ่งผล ลูกชิ้น ก้อนขนมปัง ชิ้นตัวอย่างอาหารรูปแบบต่างๆ สำหรับอาหารบางชนิดมีการใช้หัววัดแบบทรงกระบอกหลายหัวเจาะลงไปพร้อมๆกัน เพื่อให้ได้ค่าแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยเฉลี่ยตลอดทั้งก้อน และได้ค่าแรงที่มีขนาดหลายเท่ากว่าการทดสอบแบบหัวเดียว



รูปที่ 2.8 การทดสอบการเจาะหลายหัว

Mohsenin (1986) ได้อธิบายการกระจายความดันภายในหัวกดแบบแท่งทรงกระบอกหัวตัด โดยใช้หลักการปัญหาของ Boussinesq โดยสมมุติว่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้หน้าตัดของหัววัดมีค่าสม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งหน้าตัด จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าการกระจายความดันภายใต้หัววัด (P) ไม่สม่ำเสมอเท่ากัน แต่มีการเปลี่ยนแปลงดังสมการของ Boussinesq ดังนี้

$$P = \frac{F}{2\pi a \sqrt{a^2 - r^2}} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ F คือแรงทั้งหมดที่หัวเจาะกระทำต่อวัสดุ

a คือรัศมีของหัวกด

r คือระยะทางจากจุดกึ่งกลางของพื้นที่ที่หัวกดกระทำถึงตำแหน่งต่างๆที่พิจารณา

สมการแสดงให้เห็นว่าค่าความดันสูงสุดเกิดขึ้นที่ $r = a$ และค่าความดันต่ำสุดเกิดขึ้นที่ $r = 0$ ซึ่งสมการนี้ใช้ได้กับกรณีก่อนถึงจุดชั่วคราวเท่านั้น และความดันต่ำสุดนี้เท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าเฉลี่ยของความดันบนพื้นที่หน้าตัดของหัวกด

$$P_{\min} = \frac{1}{2} \left(\frac{F}{\pi a^2} \right) \quad (2.2)$$

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง D ใต้หัวกดกับแรงกระทำ F เป็นดังสมการต่อไปนี้ (Tomashenko and Goodier, 1951)

$$D = F \left(\frac{1 - \mu^2}{2aE} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ μ คืออัตราส่วนปัวซอง และ E คือโมดูลัสยืดหยุ่น

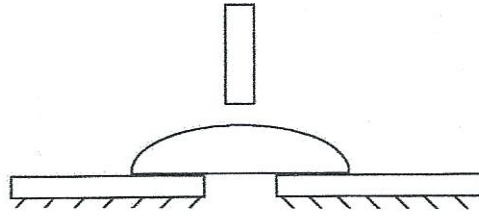
จากสมการดังกล่าวทำให้สามารถคำนวณโมดูลัสยืดหยุ่นได้จากความชันของกราฟแรงกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังนี้

$$E = F \left(\frac{1 - \mu^2}{2aD} \right) \quad (2.4)$$

เนื่องจากค่าอัตราส่วนปัวซองอยู่ระหว่าง 0-0.5 ดังนั้นโมดูลัสยืดหยุ่นจะอยู่ระหว่าง $\frac{F}{2aD}$ ถึง $0.75 \frac{F}{2aD}$

หัวกดแบบเจาะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดของวัสดุตัวอย่างมากจนกระทั่งทำให้ไม่มีความแตกต่างของแรงกระทำถึงแม้ว่าวัสดุจะมีขนาดใหญ่กว่าก็ตาม ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าลักษณะกึ่งอนันต์ (Semi-infinite geometry) ซึ่งการกดแบบเจาะควรจะมีผลกระทบบนขอบมุมหรือความหนาของตัวอย่างต่อแรงกด ดังนั้นตัวอย่างควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของหัวกดอย่างน้อยสามเท่า สำหรับอาหารที่กรอบหรือแตกง่ายควรใช้ค่าที่มากกว่าสาม สำหรับตัวอย่างที่บาง เช่น คุกกี้ ควรใช้ฐานรองที่มีรูอยู่ตรงกลาง เพื่อให้หัวกดเจาะทะลุผ่านไป ดังรูป 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 การทดสอบวัสดุแผ่นบางแบบเจาะ

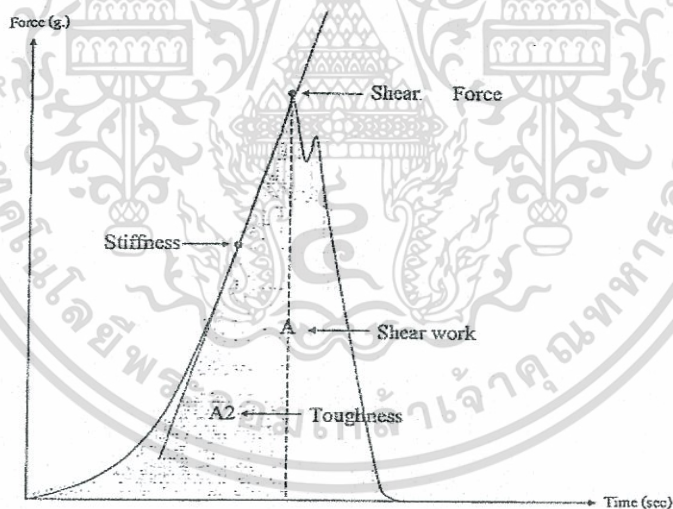
2.3.3.4 การทดสอบแบบตัด (Cutting and Shearing Test)

การทดสอบแบบการตัดเป็นการวัดเนื้อสัมผัสโดยใช้หัววัดที่มีลักษณะคล้ายใบมีดหรือโลหะที่เป็นเส้นลวด (wire) ตัดผ่านเนื้ออาหารลงไปตามระยะทางที่กำหนด ในระหว่างที่หัววัดสัมผัสผ่านเนื้ออาหารจะเกิดทั้งแรงเฉือนและแรงกด (Malcolm C. Bourne. 2002) การทดสอบแบบตัดจึงเป็นการวัดค่าแรงทั้งสองชนิดนี้ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่จำลองการกัดด้วยฟันของมนุษย์ได้ดีที่สุด

ตัวอย่างอาหารที่ทดสอบด้วยวิธีนี้ เช่น เนย, หมากฝรั่ง, พาย, ชีส, ลูกกวาด, เนื้อสัตว์ ผักและผลไม้ที่มีเส้นใย

หัววัดที่นิยมใช้ได้แก่ Warner-Bratzler Shear, Knife/Guillotine Blade, Volodkeviv Bit Jaws, Kramer Shear Cell, Wire Cutter (Malcolm C. Bourne. 2002)

ลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแบบตัดแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบตัดของข้าวโพดหวาน

ค่าที่ได้จากการทดสอบ มีดังนี้

- Shear force แรงเฉือนสูงสุดที่ใช้ในการตัดลงไปเนื้ออาหาร หาได้จาก Peak Force
- Shear work งานทั้งหมดที่ใช้ในการตัดเนื้ออาหาร หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

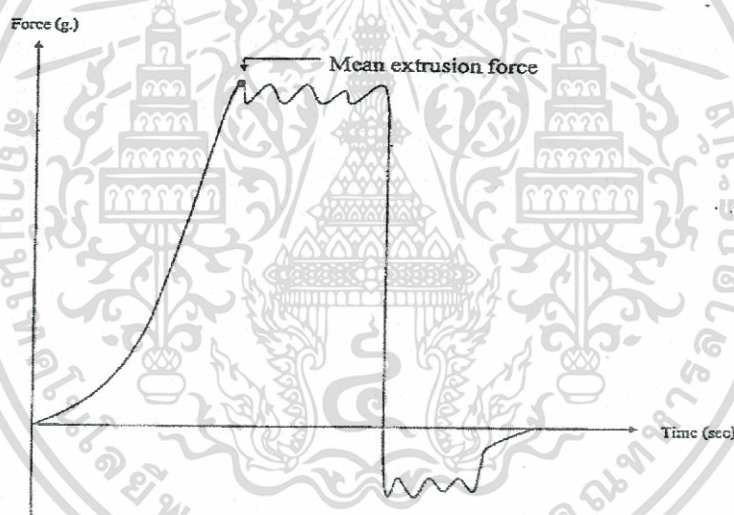
- Stiffness ความแข็งของเนื้ออาหาร ความแข็งที่ไต่ไม่ยืดหยุ่น หาได้จากความชันก่อนถึงจุด Peak Force ที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงมากที่สุด
- Toughness งานที่ใช้เจาะทะลุลงไปเนื้ออาหาร หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟจากจุดเริ่มต้น ถึงจุด Peak Force (A2)

2.3.3.5 การทดสอบแบบ Compression-Extrusion (Backward Extrusion)

เป็นการทดสอบวัดแรงที่ใช้ในการกดอาหารให้ไหลย้อนทิศออกมา โดยอาหารจะถูกกดจนโครงสร้างแตกกระจายแล้วไหลผ่านออกมาทางช่องว่างหรือรูระบาย ปกติแล้วแรงสูงสุดที่ใช้ในการดันหรือผลักอาหารให้ไหลออกนั้นจะเป็นตัวบอกคุณภาพเนื้อสัมผัสของอาหาร การทดสอบแบบนี้ นิยมใช้กับของเหลวที่มีความหนืด พวกละอองหรือไขมันต่าง ๆ

ตัวอย่างอาหารที่ทดสอบด้วยวิธีนี้ เช่น ของเหลวที่มีความข้นหนืดจำพวกซอส, มายองเนส, โยเกิร์ต, Gel, Fat, Pastes, Fresh and process fruit and vegetable เป็นต้น (Malcolm C. Bourne. 2002)

ลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแบบ Backward Extrusion แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบ Backward extrusion ของ Low fat yoghurt

ค่าที่ได้จากการทดสอบ มีดังนี้

- Mean Extrusion Force เป็นค่าแรงสูงสุดที่ทำให้อาหารไหลย้อนทิศขึ้นด้านบน หาได้จาก Peak Force ซึ่งใช้บอกค่า Firmness ของอาหาร (ธงชัย กาญจนชุมพล และคณะ. 2550)
- งานที่ใช้ในการทดสอบ หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ

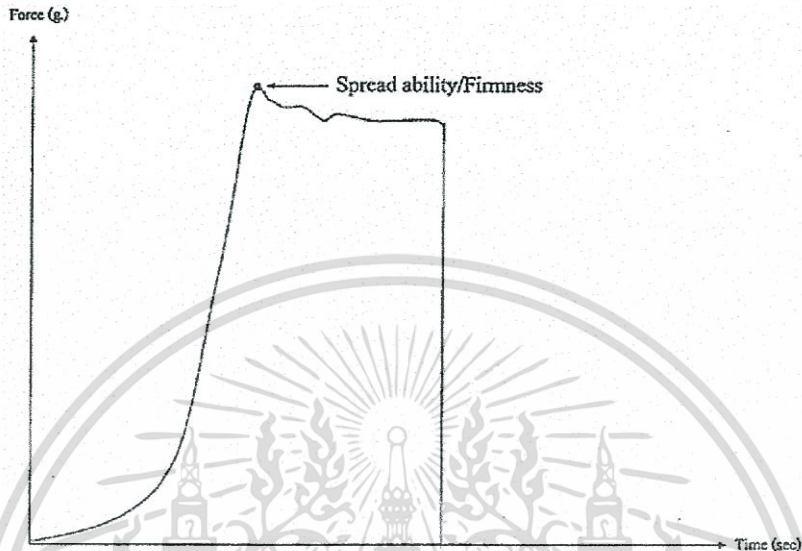
2.3.3.6 การทดสอบแบบ Extrusion Test (Forward Extrusion)

เป็นการทดสอบโดยหัววัดใช้แรงดันอาหารให้ไหลผ่านรูเปิดด้านล่างของจาน ซึ่งส่วนใหญ่อุปกรณ์จะอยู่ตรงกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างอาหารที่ทดสอบด้วยวิธีนี้ เช่น ของเหลวที่มีความข้นหนืดจำพวกซอส, มายองเนส, โยเกิร์ต, Gel, Fat, Pastes, Fresh and process fruit and vegetable เป็นต้น (Malcolm C. Bourne. 2002)

ลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแบบ Forward Extrusion แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบ Forward extrusion ของเนยเทียม

ค่าที่ได้จากการทดสอบ มีดังนี้

- Mean Extrusion Force เป็นค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการดันอาหารจนกระทั่งอาหารไหลย้อนผ่านรูเปิดด้านล่างออกไป หาได้จาก Peak Force ใช้บอกค่า Spread ability และ

2.3.3.7 การทดสอบแบบการตัด (Fracture and Bending/Snapping Test)

การทดสอบแบบการตัดเป็นการทดสอบวัดแรงที่ทำให้เกิดการหัก วัดความโค้งงอของอาหารโดยวางอาหารหรือตัวอย่างทดสอบบนฐานรอง แล้วให้หัววัดเคลื่อนที่ลงระหว่างฐานรอง จนกว่าอาหารจะเกิดการหักหรือโค้งงอเสียรูป

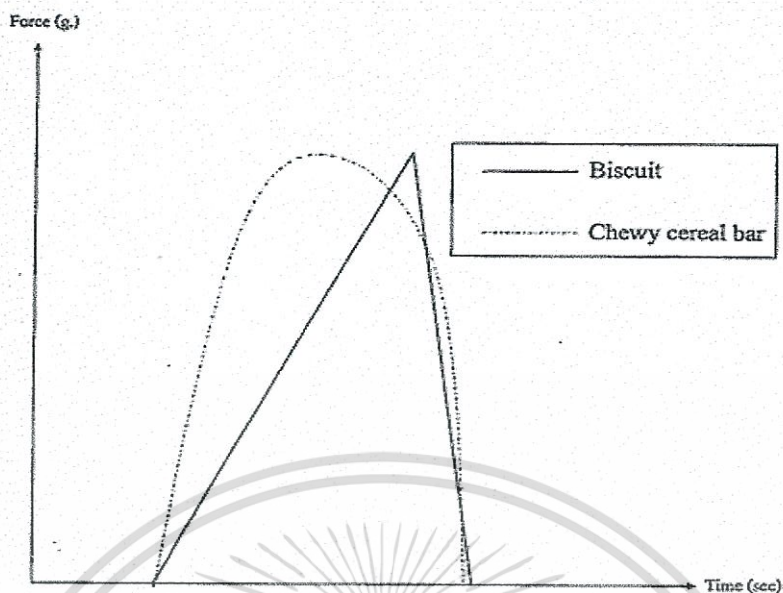
- Fracture บอกคุณสมบัติในการแตกหักซึ่งเป็นสิ่งที่บอกถึงความเปราะของอาหาร
- Bending ในการทดสอบความโค้งงอของอาหารจะเกิดจากการกด การดึงและการเฉือน
- Snapping เป็นการทดสอบที่เกิดจากการแตกหักอย่างรวดเร็ว ซึ่งใช้บอกค่าความกรอบของอาหารกรอบ

ตัวอย่างอาหารที่ทดสอบด้วยวิธีนี้ เช่น คูกี้, ขนมปังกรอบ, ผักสด และอาหารที่มีลักษณะเป็นแผ่นหรือแท่ง เป็นต้น

หัววัดที่นิยมใช้ ได้แก่ Three-Point Bending Rig, Crisp Fracture Rig และ Fracture Wedges

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแบบตัดแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบการตัดของ Biscuit และ Chewy cereal bar

ค่าที่ได้จากการทดสอบ มีดังนี้

สำหรับ Fracture

- Fracture ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหัก หาได้จากจุด Peak Force

- Work of fracture งานทั้งหมดที่ทำให้เกิดการแตกหักอย่างสมบูรณ์ หาได้จาก

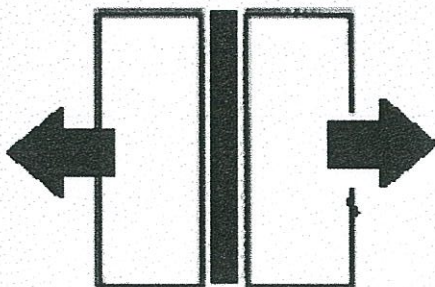
พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด

2.3.3.8 การทดสอบแบบการดึง (Tensile Test)

การทดสอบแบบการดึงเป็นการทดสอบเพื่อวัดแรงยืดเคาะ วัดค่าความเหนียวว่ามี การยืดเคาะได้ดีมากน้อยเพียงใด ด้วยการออกแรงไปในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้เกิดการแบ่งแยกออกจากกันจนกระทั่งเกิดการแตกหัก(Break) ของอาหาร โดยมีรอยแยกที่ไม่เป็นระเบียบ สิ่งที่ต้านแรงแยกคือความเหนียว เช่น ความเหนียวของเส้นใย

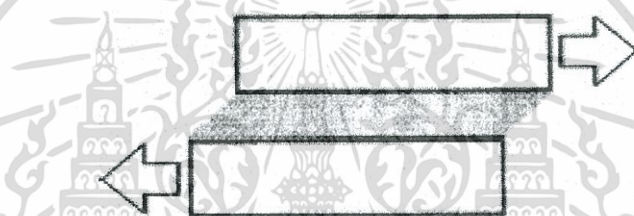
การทดสอบแบบการดึงมีอยู่ดังต่อไปนี้

2.3.3.8.1 การดึงในแนวตั้งฉากกับการยืดติด(Tensile) โดยใช้แรงดึง กระจายไปทั่วพื้นที่ที่เกิดการยืดติด ดังแสดงตามรูปที่ 2.14



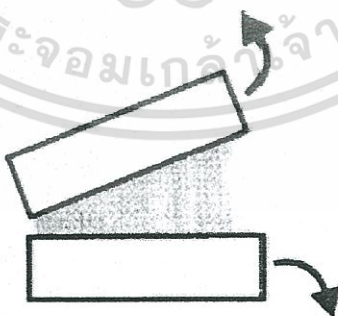
รูปที่ 2.14 แสดงการดึงในแนวตั้งฉากกับแนวการยึดติด

2.3.3.8.2 การดึงในแนวระนาบขนานกับแนวการยึดติด(Shear) โดยใช้แรงดึงกระจายไปทั่วพื้นที่ที่เกิดการยึดติด ดังแสดงตามรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงการดึงในแนวระนาบกับแนวการยึดติด

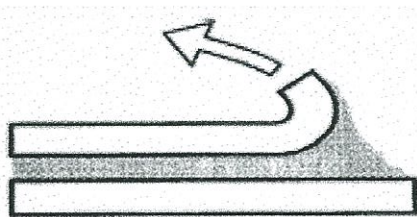
2.3.3.8.3 แรงแยก(Cleavage) โดยใช้แรงดึงกระทำในการแยกเฉพาะบริเวณขอบของการยึดติดเท่านั้น ดังแสดงตามรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงการใช้แรงแยกบริเวณขอบของการยึดติด

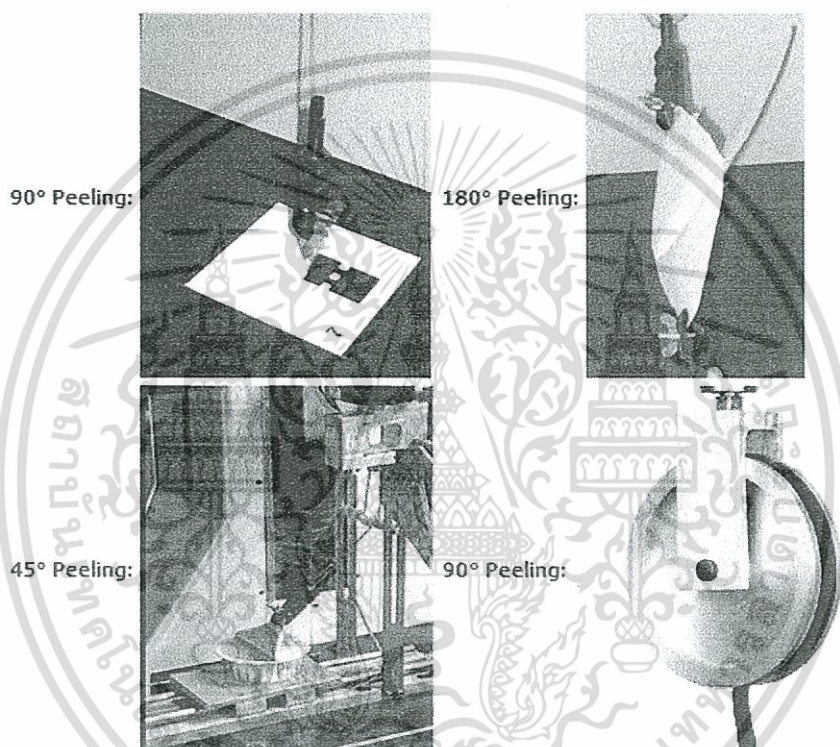
2.3.3.8.4 การดึงลอก(Peeling) โดยใช้แรงดึงกระทำกับวัสดุซึ่งอย่างน้อยด้านหนึ่งมีความยืดหยุ่น ดังแสดงตามรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



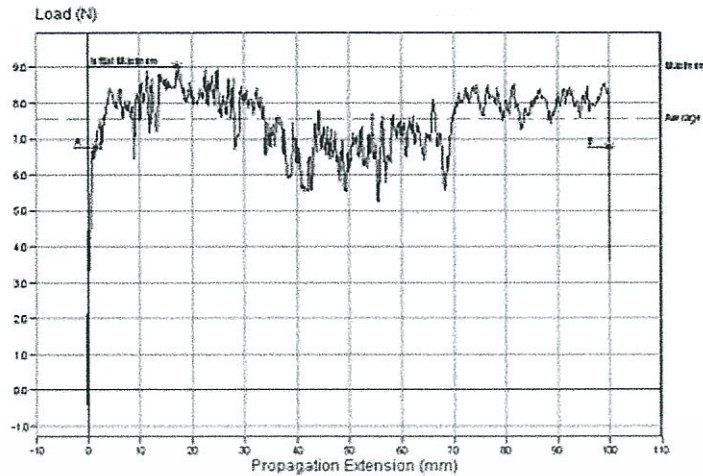
รูปที่ 2.17 แสดงการใช้แรงดึงลอกวัสดุ

ตัวอย่างการทดสอบโดยการดึงแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 รูปแสดงการทดสอบด้วยวิธีดึงในมุมที่ต่างกัน

การทดสอบโดยการลอกที่มีองศาที่แตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุที่ต้องการทำการทดสอบ ลักษณะของกราฟที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นจุดสูงสุดของแรงและหลังจากนั้นจะกลายเป็นลักษณะพื้นเลื่อย จนกราฟตกมาที่จุดต่ำสุดเนื่องจากการลอกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ ดังตัวอย่างรูปที่ 2.19

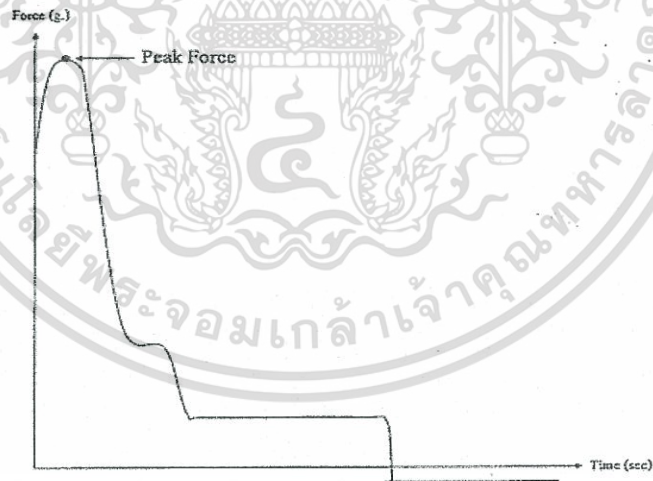


รูปที่ 2.19 รูปแสดงผลการทดสอบด้วยวิธีดึง

ส่วนตัวอย่างอาหารที่ทดสอบด้วยวิธีนี้ที่ผลิตภัณฑ์เป็นอาหาร เช่น พืชซ่า และเส้นบะหมี่ เป็นต้น

หัววัดที่นิยมใช้ ได้แก่ SMS/Kieffer Dough & Gluten Extensibility Rig, Spaghetti/Noodle Test Rig, Tensile Grips, Self-Tightening Roller Grips และ Peel Strength Rig

ลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแบบดึงแสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบการดึงของพืชซ่า

ค่าที่ได้จากการทดสอบ มีดังนี้

- Peak force ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้อาหารเกิดการ Break

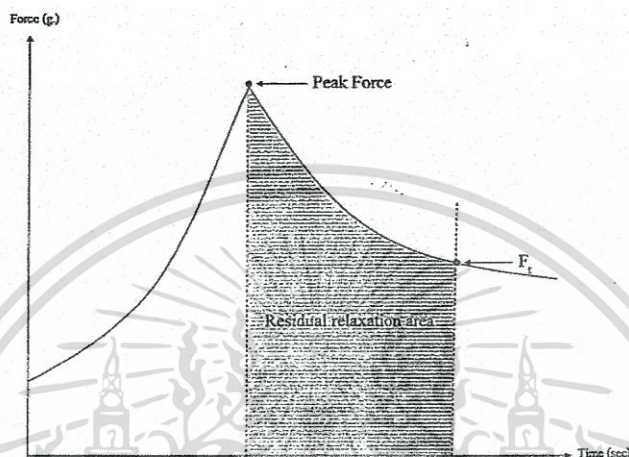
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.9 การทดสอบแบบ Relaxation (Relaxation Test)

เครื่องทดสอบจะกดหัววัดลงบนตัวอย่าง เมื่อหัววัดอยู่ครบเวลาที่กำหนดแล้ว หัววัดจะเคลื่อนที่ไปยังจุดที่อ่านแรงได้ใกล้ศูนย์ที่สุดคือจุดที่ผิวของตัวอย่าง หลังกดจนครบเวลาที่กำหนด หากตัวอย่างเป็นผลิตภัณฑ์ที่คืนตัวได้ดี ระยะทางที่หัววัดย้อนกลับที่แรงใกล้ศูนย์นี้จะเป็นศูนย์

ตัวอย่างอาหารที่ทดสอบด้วยวิธีนี้ เช่น เนื้อสัตว์

ลักษณะกราฟที่ได้จากการทดสอบแบบ Relaxation แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาที่ได้จากการทดสอบแบบ Relaxation

ค่าที่ได้จากการทดสอบ มีดังนี้

ขึ้น

ได้กราฟจาก F_{max} ถึง F_t

- Peak force แรงสูงสุดที่ใช้ในการกด F_t แรงต้านสุดท้ายก่อนที่หัววัดจะเคลื่อนที่ขึ้น
- Residual relaxation area ค่าความสามารถต้านแรงที่มากกระทำ หาได้จากพื้นที่
- Modulus of elasticity ค่าความยืดหยุ่นของอาหาร แสดงความสามารถในการคืนตัวเมื่อได้รับแรงกระทำ หาได้จาก F_t / F_{max}

หมายเหตุ นิยามคำศัพท์ที่ควรรู้

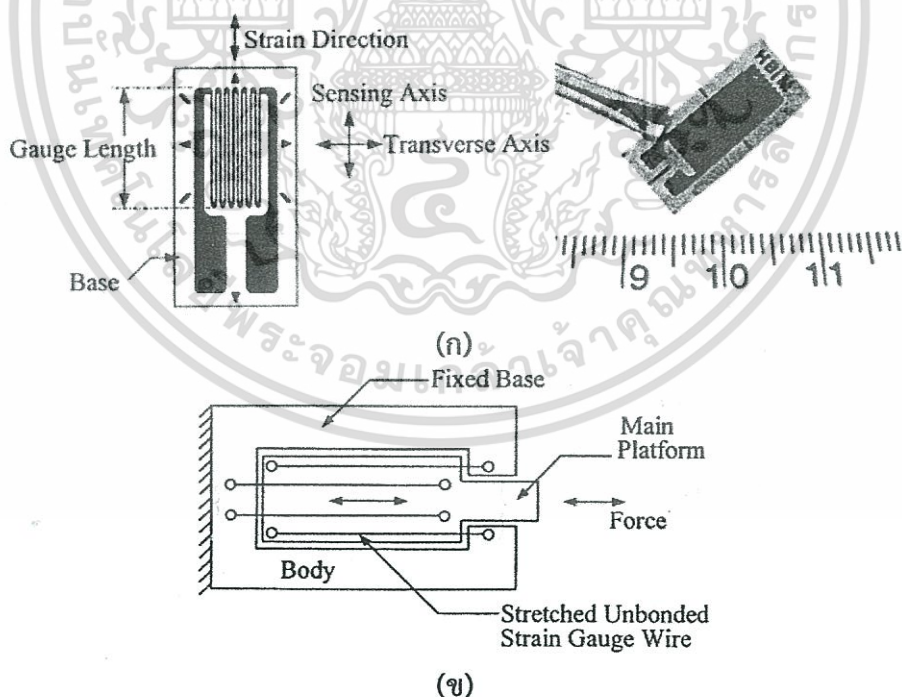
- Pre-test speed คือ ความเร็วของหัววัดก่อนถึงตัวอย่างอาหาร
- Test speed คือ ความเร็วของหัววัดขณะทดลอง
- Post test speed คือ ความเร็วของหัววัดหลังทดลอง
- Distance คือ ระยะทางที่หัววัดเคลื่อนที่หัวเริ่มรับรู้แรง
- Trigger force คือ แรงที่เริ่มรับรู้

2.4 สเตรนเกจ(Strain gauge) และโหลดเซลล์(Load cell)

สเตรนเกจ (Strain gauge) เป็นอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์แบบพาสซีฟ(Passive transducer) โดยใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าภายในเส้นลวดเพื่อตรวจวัดความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่มากระทำบนเส้นลวด สเตรนเกจสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือแบบยึดติด(Bonded Strain Gauge) และแบบไม่ยึดติด(Unbonded Strain Gauge) แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.22 ซึ่งสเตรนเกจทั้งสองชนิดจะมีลักษณะโครงสร้างและการทำงานที่คล้ายกันคือ ทำด้วยเส้นเล็กๆ ขดไปขดมาและนำไปติดกับวัสดุที่ต้องการวัดความเครียดเมื่อสเตรนเกจถูกดึงให้ยืดออก ความยาวของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่พื้นที่หน้าตัดจะลดลง ผลก็คือความต้านทานของเส้นลวดจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความต้านทานโลหะตัวนำจะแปรค่าโดยตรงตามความยาวและแปรค่าผกผันกับพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นจึงเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ได้ว่า

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.5)$$

โดยที่ R เป็นค่าความต้านทานของขดลวดตัวนำมีหน่วยเป็นโอห์ม
 ρ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของลวดตัวนำ มีหน่วยเป็นโอห์ม-เมตร
 L เป็นความยาวของขดลวดตัวนำมีหน่วยเป็นเมตร
 A เป็นพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำมีหน่วยเป็นตารางเมตร



รูปที่ 2.22 ลักษณะรูปร่างของสเตรนเกจในแบบต่าง ๆ กัน

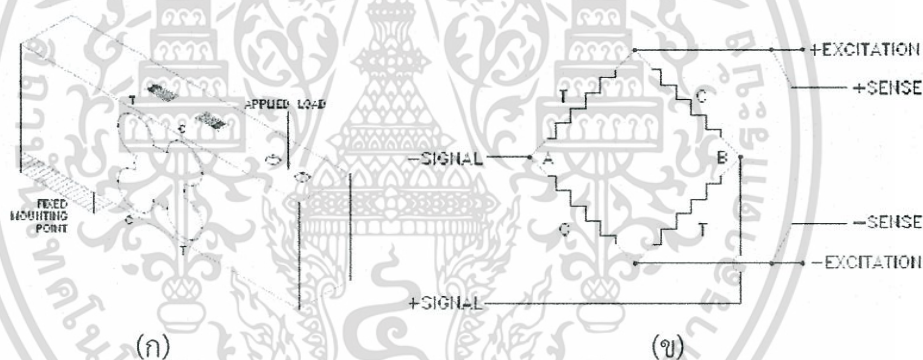
(ก) สเตรนเกจแบบพอยล์หรือแบบยึดติด (ข) สเตรนเกจแบบไม่ยึดติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเตรนเกจไม่เพียงจะนำมาใช้วัดค่าความเครียดเพียงอย่างเดียว แต่ยังมาใช้เป็นตัวแปลงสัญญาณ(Transducer) เช่น โหลดเซลล์ สำหรับวัดแรงเป็นต้น

โหลดเซลล์(Load cell) คือ เซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าแรงกดหรือแรงดึง เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เหมาะสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Properties of Parts) โหลดเซลล์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ได้แก่ การชั่งน้ำหนัก การทดสอบแรงกดของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงาน (Press fit) ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุ โลหะ ทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ วิศวกรรมโยธา ทดสอบคอนกรีต ทดสอบไม้ ฯลฯ

โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ(Strain gauge load cell) หลักการของโหลดเซลล์ ประเภทนี้ก็คือ เมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียดจะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ ซึ่งเป็นหลักการเช่นเดียวกับสเตรนเกจ ปกติแล้วมักจะใช้สเตรนเกจวัดความเครียด 4 ตัว โหลดเซลล์แบบคานจะประกอบด้วยสองส่วน คือ คานยื่นและสเตรนเกจ จากรูปที่ 2.23(ก) คานยื่นจะมีสเตรนเกจสองตัวอยู่ที่พื้นผิวด้านบน และอีกสองตัวอยู่บนพื้นผิวด้านล่าง โดยทั้งหมดจะต่อกันเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ดังรูปที่ 2.23(ข)

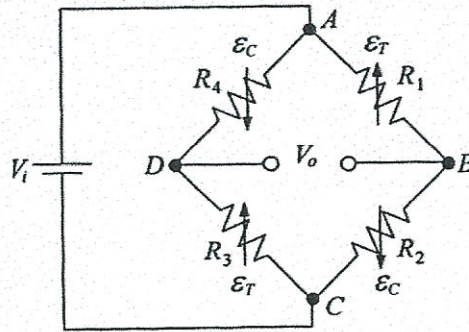


รูปที่ 2.23 ลักษณะโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ

(ก) คานยื่นสำหรับยึดสเตรนเกจ (ข) สเตรนเกจที่ต่อเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์

การต่อวงจรสำหรับตรวจวัดความเครียด โดยปกติแล้วจะใช้วงจรวีทสโตนบริดจ์ แบบสี่แขน ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งระหว่างจุด B และ D ซึ่งเป็นแรงดันเข้าพุท (Voltage output, V_O) จะมีความต่างศักย์เท่ากับ

$$V_O = V_{AB} - V_{AD} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.24 วงจรวิทสโตนบริดจ์

ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าพุท (V_o) จะเป็นศูนย์ก็ต่อเมื่อ $R_1 R_3 = R_2 R_4$ ซึ่งในสภาวะนี้จะถือว่าบริดจ์มีความสมดุล ดังนั้นจึงสามารถปรับค่าความต้านทานที่แขนของบริดจ์ได้ตามต้องการเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าพุท (V_o) เท่ากับศูนย์เมื่อไม่มีความเครียดเกิดขึ้น

ในการวัดแรงโดยสเตรนเกจ ตัวต้านทานทั้งสองจะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อใช้แปลงแรงที่กระทำกับตัวของมันไม่ว่าจะเป็นแรงกดหรือแรงดึง จากนั้นจะส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะเทียบเป็น mV/V หมายความว่า ถ้าจ่ายแรงดัน 10 V ให้กับโพลดเซลล์ที่มีข้อกำหนด(Specification) เป็น 2 mV/V ที่ภาระสูงสุด(Full load) สมมุติว่าน้ำหนักเป็น 2,000 กิโลกรัม ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำต่อโพลดเซลล์ที่ภาระสูงสุด สัญญาณที่จะได้ก็จะได้เท่ากับ 20 mV ซึ่งจะแสดงแรงดันเข้าพุทเป็นสัดส่วน คือ

0 Kg จะได้ $V_o = 0$ mV

1000 Kg จะได้ $V_o = 10$ mV

2000 Kg จะได้ $V_o = 20$ mV

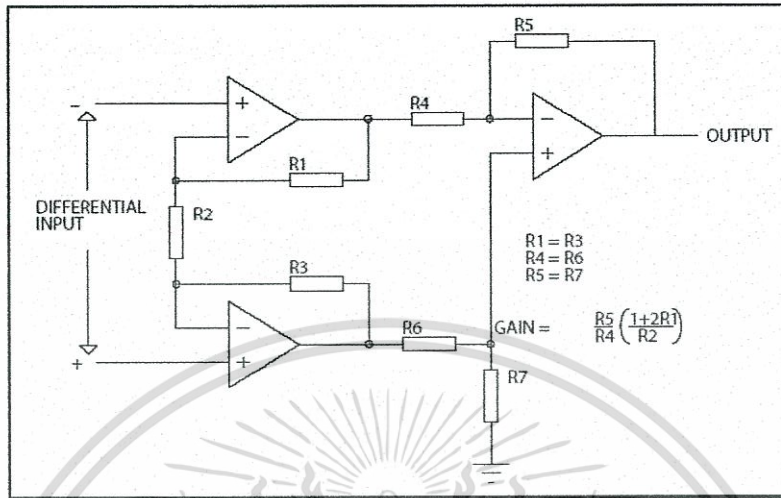
2.5 วงจรขยายสัญญาณแบบเครื่องมือวัด(Instrument Amplifier)

วงจรขยายแบบเครื่องมือวัดได้ถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อใช้ขยายสัญญาณจากโพลดเซลล์แบบสเตรนเกจ เมื่อได้รับแรงกระทำจากโพลด ค่าความต้านทานของสเตรนเกจที่ตัวโพลดเซลล์จะเปลี่ยนแปลง ทำให้วงจรบริดจ์ไม่สมดุล ทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าออกมาจากวงจรวิทสโตนบริดจ์ เหตุผลที่ไม่ใช้วงจรขยายความแตกต่าง (Differential amplifier) เนื่องจากอาจจะมี Common Mode Rejection Ratio (CMRR) สูง แต่ Input impedance ถูกจำกัดโดยค่าความต้านทานที่ขา Input ทำให้บางครั้งอาจจะมี Input Impedance ต่ำ จะเป็นเหตุให้มีการดึงกระแสจาก Signal source โพลดเข้าสู่่วงจรขยายความแตกต่าง ซึ่งโดยปกติแล้วจะไม่มี Signal source ใดถูกออกแบบให้จ่ายพลังงานได้สูง ซึ่งเป็นสาเหตุให้การออกแบบวงจรขยายไม่ต้องเป็นโพลดของตัวตรวจจับสัญญาณ(Sensor) อีก และนอกจากนั้นการที่มีกระแสไหลจาก Signal Source ไปสู่ วงจรขยาย อาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนแทรกเข้ามาในวงจรได้ง่าย

ส่วนวงจรขยายแบบเครื่องมือวัดจะไม่มีกรดึงกระแสจาก Signal Source เนื่องจาก Input impedance ของวงจรเท่ากับ Input impedance ของ Op-Amp ซึ่งปกติมีค่าสูง ข้อดีอีกอย่างคือมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CMRR สูง จึงเหมาะกับการนำไปใช้กับตัวตรวจจับสัญญาณซึ่งส่วนใหญ่จะให้สัญญาณ Amplitude ต่ำในสถานะที่มีสัญญาณรบกวนสูง ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปขยายสัญญาณจากโพลดิเซลล์



รูปที่ 2.25 วงจรขยายแบบเครื่องมือวัด

2.6 ชุดควบคุมการเคลื่อนที่

ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังต่อไปนี้

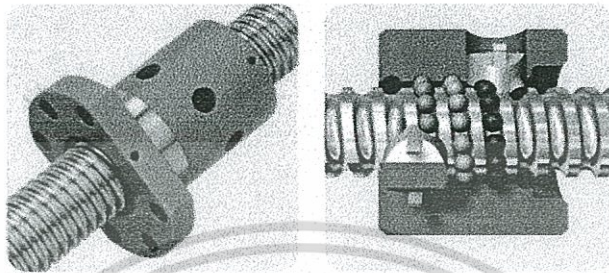
2.6.1 มอเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ประกอบด้วยขดลวดที่พันรอบแกนโลหะที่วางอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก โดยเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปยังขดลวดอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็ก จะทำให้ขดลวดหมุนไปรอบแกน และเมื่อสลับขั้วไฟฟ้า การหมุนของขดลวดจะหมุนกลับทาง

เซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) เป็นมอเตอร์ที่ทำงานโดยใช้สัญญาณพัลส์ โดยภายในเซอร์โวมอเตอร์จะประกอบไปด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชุดเกียร์และส่วนควบคุม โดยจะประกอบอยู่ในชุดเดียวกัน ในการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์นั้นจะทำให้หมุนไปทางซ้ายได้ 90 องศา และไปทางขวาได้ 90 องศา (รวมเป็น 180 องศา) และสามารถสั่งให้หมุนตามองศาที่กำหนดได้ (ในการที่จะทำให้หมุนได้ 360 องศา สามารถทำได้โดยการตัดแปลงแก้ไขวงจรภายใน) การใช้งานเซอร์โวมอเตอร์นั้นจะนำไปใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำ ในเรื่องขององศาหรือการหมุนไปในทิศทางที่ต้องการ ความเร็วหรือระยะเวลาตามที่กำหนด โดยมีวงจรในการป้อนกลับเพื่อควบคุมความเร็วหรือระยะเวลาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.6.2 Ball screw เป็นระบบการขับเคลื่อนแบบหนึ่งในระบบขับเคลื่อนประเภทเครื่องกล (Mechanic) โดยมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือ เฟลาเกลียว (Screw shaft) และ Nut มีเม็ดลูกปืนกลม (Ball) เป็นตัวรับน้ำหนักและแรงเสียดทาน Ball screw มีส่วนดีกว่าระบบขับเคลื่อนอื่นๆ มีส่วนประกอบที่น้อย ไม่ซับซ้อน และมีความแข็งแรงกว่าระบบอื่นๆ หลักๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ball screw แบบเจีย(Grounded or precision ball screw) ผลิตโดยการนำเพลลาที่ชุบแข็งแล้ว (Case hardening) มาเจียทางวง โดยสามารถควบคุมการเจียให้ได้ความละเอียดตามความต้องการ ซึ่งความผิดเพี้ยนจะเกิดขึ้นในช่วงหนึ่ง แต่จะไม่สะสมตามความยาวเหมือนแบบบริด ทำให้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง



รูปที่ 2.26 Ball screw



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

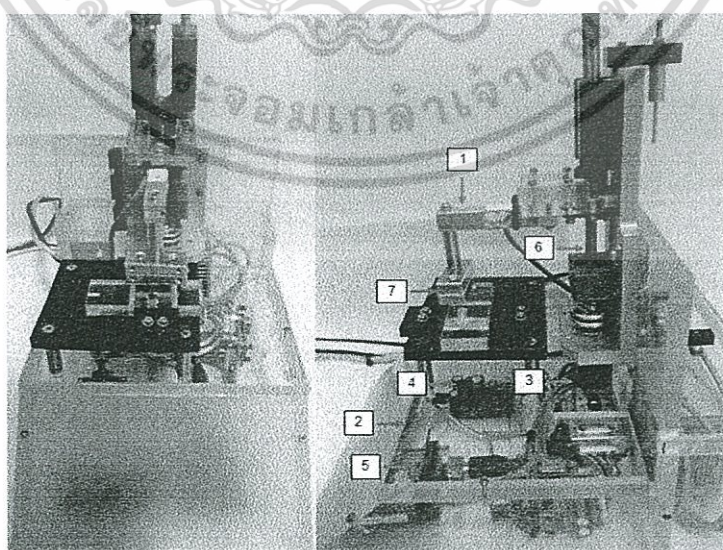
การทดสอบเนื้อสัมผัสแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ การทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation method) และการทดสอบทางกายภาพหรือการใช้เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ (Physical method or instrument method) การทดสอบทั้งสองแบบมีลักษณะ และความแตกต่างกันออกไป ซึ่งการทดสอบทางกายภาพจะใช้เครื่องมือวัด เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการเปลี่ยนรูป หรือเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) ซึ่งจะแสดงผลออกมาเป็นรูปกราฟเรียกว่า Force-Deformation curve และ Force-Time curve และ Stress-Strain curve งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส จึงนำวิธีการทดสอบทางกายภาพมาเพื่อสร้างเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส

3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส

เมื่อเราทราบหลักการการทำงานและส่วนประกอบเบื้องต้นของเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส จึงทำการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสขึ้น โดยประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส โปรแกรมควบคุม และหัววัด

3.2.1 เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส

เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น อ้างอิงจากเครื่องมือทดสอบเนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐาน โดยมีลักษณะตามรูปที่ 3.1 และมีส่วนประกอบของเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสแสดงตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น

หมายเลข	โครงสร้าง	วัสดุ/ชนิด	วัตถุประสงค์
1	โหลดเซลล์	สแตนเลส	ใช้วัดแรงที่ตัวอย่างกระทำกับหัววัด
2	วงจรรขยายสัญญาณ	AD624	ใช้เป็นวงจรรขยายสัญญาณแบบเครื่องมือวัด
3	เซอร์โวมอเตอร์	Cool muscle	ใช้บังคับการเคลื่อนของหัววัดเนื้อสัมผัส
4	วงจรรจ่ายไฟฟ้า	LM2575	ใช้จ่ายไฟให้กับวงจรวัดและควบคุม
5	วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า	USB6009	สำหรับวัดค่าแรงดันเอาพุทจากโหลดเซลล์
6	Ball screw	Grounded	ขับเคลื่อนหัววัด
7	หัววัด	สแตนเลส	เพื่อใช้ทดสอบในการดึงหรือกด

ส่วนประกอบที่สำคัญต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1.1 โหลดเซลล์(Load cell)

โหลดเซลล์ที่นำมาใช้งานต้องมีความเหมาะสม โดยต้องคำนึงถึงสภาวะการรับแรง ทั้งแรงกด แรงดึง แรงบิด โดยโหลดเซลล์แต่ละแบบจะมีรายละเอียดที่กำหนดที่แตกต่างกันไป ทั้งนี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความละเอียดของการเป็นแปลงของความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับโหลดเซลล์ และเอาพุทที่ได้จากสเตรนเกจที่ต่อเป็นวงจรวัด

พารามิเตอร์ดังกล่าวประกอบด้วยค่าแรงสูงสุดที่โหลดเซลล์รับได้ (Rate capacity) มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) ค่าแรงดันเอาพุทสูงสุด (Rate voltage) มีหน่วยเป็น mV/V และแรงดันกระตุ้นที่แนะนำ มีหน่วยเป็นโวลต์ (V) ซึ่งโหลดเซลล์ที่เลือกมาใช้งานสามารถรับแรงสูงสุดได้ที่ 2 กิโลกรัม

ลักษณะของโหลดเซลล์ที่นำมาใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.2

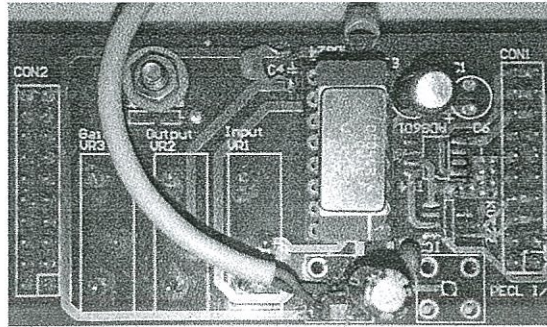


รูปที่ 3.2 โหลดเซลล์ที่นำมาใช้งาน

3.2.1.2 วงจรรขยายสัญญาณแบบเครื่องมือวัด(Instrument amplifier)

เนื่องจากโหลดเซลล์มีการเปลี่ยนของค่าความต้านทานค่อนข้างน้อย การวัดความต่างศักย์ที่เป็นแรงดันเอาพุทของวงจรวัดจึงจำเป็นต้องใช้วงจรรขยายสัญญาณ ซึ่งจากทฤษฎีที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงเลือกใช้วงจรขยายสัญญาณแบบเครื่องมือวัด(Instrument amplifier) โดยใช้ IC ของ Analog device เบอร์ AD624 มาใช้ในการขยายสัญญาณ แสดงวงจรดังรูปที่ 3.3

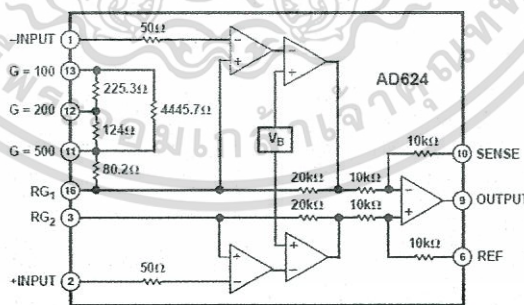


รูปที่ 3.3 วงจรขยายสัญญาณแบบเครื่องมือวัดโดยใช้ IC เบอร์ AD624

โดยอัตราการขยายสัญญาณ (Gain) จะเกิดจากการกำหนด R_G ตามสมการที่ 3.1

$$Gain = \frac{40k}{R_G} + 1 \tag{3.1}$$

อัตราการขยายของวงจรขยายสัญญาณในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่าอัตราขยาย 500 เท่าโดยนำขา 11(G=500) เชื่อมต่อเข้ากับขา 3(RG2) เพื่อให้ได้อัตราขยายดังกล่าว ตามลักษณะวงจรภายในของ IC ตามรูปที่ 3.4 และสามารถปรับค่าชดเชยให้วงจรบริดจ์มีความสมดุลย์ โดยให้ค่าแรงดันเอาท์พุทมีค่าเป็นศูนย์

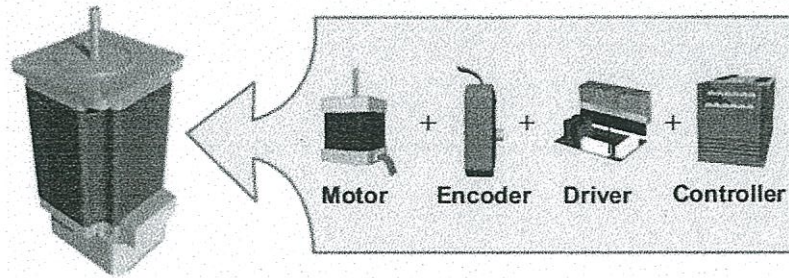


รูปที่ 3.4 วงจรภายในของ Instrument amplifier AD624

3.2.1.3 เซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor)

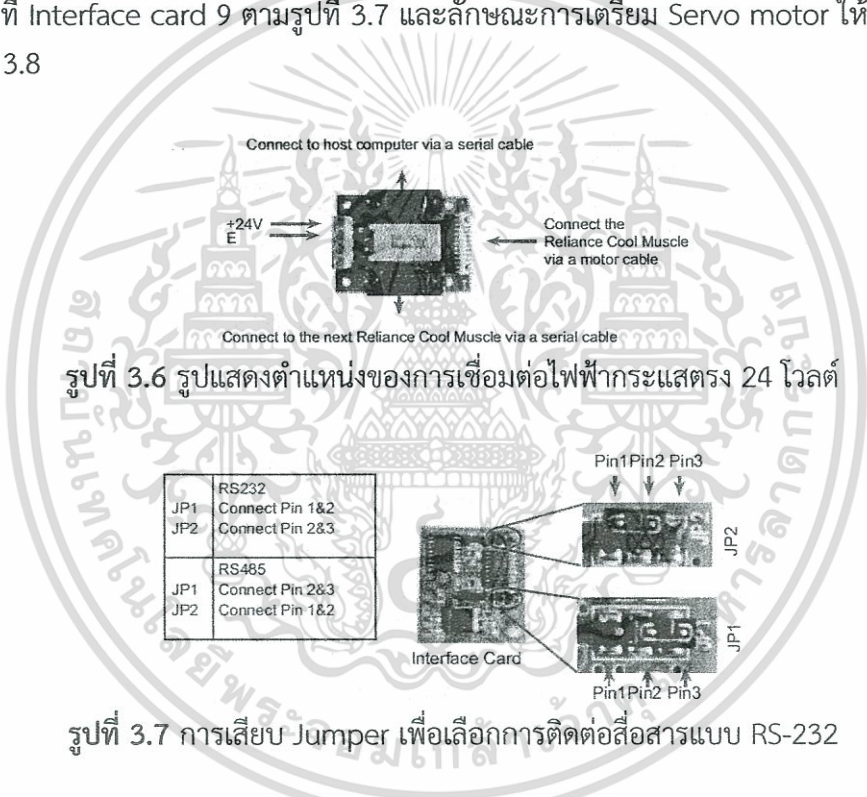
งานวิจัยนี้ได้เลือก Servo motor Reliance Cool Muscle ดังรูปที่ 3.5 มาใช้ ซึ่งมีความละเอียดค่อนข้างสูง และสามารถติดต่อสื่อสารผ่านทาง RS-232 โดยการควบคุมด้วยโปรแกรม Labview ซึ่งในตัวของ Servo motor จะมีวงจรขับมอเตอร์(Driver) และตัวนับรอบ (Encoder) อยู่ภายใน ซึ่งง่ายต่อการนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



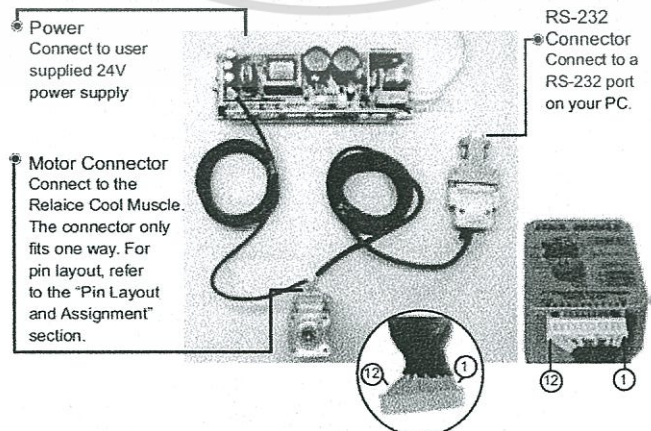
รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบของ Servo motor Reliance Cool Muscle

การต่อใช้งาน Servo motor โดยทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์เข้าที่ Interface card ตามรูปที่ 3.6 ทำการเลือกการติดต่อสื่อสารผ่านทาง RS-232 โดยทำการเสียบ Jumper ที่ Interface card 9 ตามรูปที่ 3.7 และลักษณะการเตรียม Servo motor ให้พร้อมใช้งานตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.6 รูปแสดงตำแหน่งของการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์

รูปที่ 3.7 การเสียบ Jumper เพื่อเลือกการติดต่อสื่อสารแบบ RS-232



รูปที่ 3.8 แสดงการเตรียม Servo motor ให้พร้อมใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

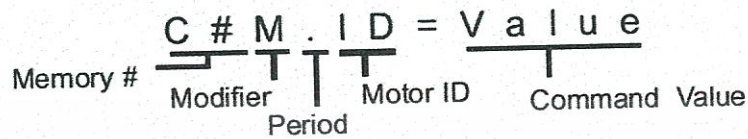
สำหรับคำสั่งในการควบคุม Servo motor ชนิดนี้มีสองประเภทคือ

1.Program command โดยใช้คำสั่งจากโปรแกรมสำเร็จรูป

2.Dynamic command โดยส่งคำสั่งโดยตรงไปยัง Servo motor จากโปรแกรมที่

สร้างขึ้น

โดยรูปแบบของคำสั่งตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงการเตรียม Servo motor ให้พร้อมใช้งาน

โดยที่

Memory# คือ ตำแหน่งของหน่วยความจำ

Modifier คือ การเพิ่มค่าเข้าไปในหน่วยความจำ

Motor ID คือ หมายเลขที่ใช้อ้างอิง motor

Command Value คือ ค่าของคำสั่ง

การตั้งค่าพารามิเตอร์ ซึ่งจะถูกกำหนดที่ส่วนเริ่มต้นของโปรแกรม โดยแต่ละพารามิเตอร์จะถูกระบุถึงตำแหน่งของหน่วยความจำ ทำตามรูปแบบด้านล่าง

K#=Value

เช่น K50=15 เป็นการกำหนดระยะทางที่ 15 pulse

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ การกำหนดความละเอียดในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ (Motor resolution) โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับ K37 โดยมีค่าอ้างอิงตามตารางที่ 3.2 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนด K37 = 6 ซึ่งต้องใช้ 5000 pulse ในการทำให้ Servo motor หมุนหนึ่งรอบ

ตารางที่ 3.2 ค่าที่ใช้ในการกำหนดความละเอียดในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

Speed unit 100pps				Speed unit 10pps			
#	Resolution	#	Resolution	#	Resolution	#	Resolution
0	200	6	5000	20	200	26	5000
1	400	7	10000	21	400	27	10000
2	500	8	25000	22	500	28	25000
3	1000(Default)	9		23	1000	29	
4	2000	10	50000	24	2000	30	50000
5	2500			25	2500		

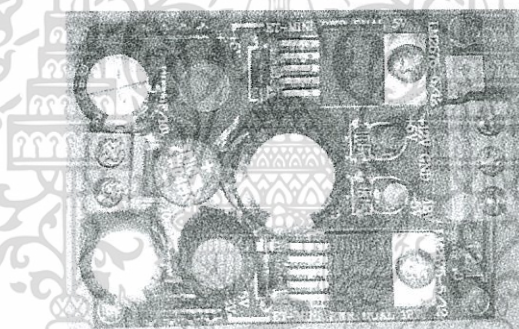
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสั่งที่สำคัญในการควบคุมมอเตอร์มีดังนี้

- P ใช้ในการกำหนดตำแหน่งปลายทาง (Position definition)
- S ใช้ในการกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ (Speed definition)
- A ใช้ในการกำหนดความเร่ง (Acceleration definition)
- | ใช้ในการกำหนดให้มอเตอร์กลับไปยังจุดเริ่มต้น (Origin)
-] ใช้ในการกำหนดให้มอเตอร์หยุดชั่วคราว (Pause)
- } ใช้ในการสั่งให้มอเตอร์หยุด (Stop after completing motion)
- (ใช้ในการกำหนดให้มอเตอร์พร้อมทำงาน (Enable)
-) ใช้ในการกำหนดให้มอเตอร์อิสระไม่รับคำสั่งใดๆ (Motor free)

3.2.1.4 วงจรจ่ายไฟฟ้า

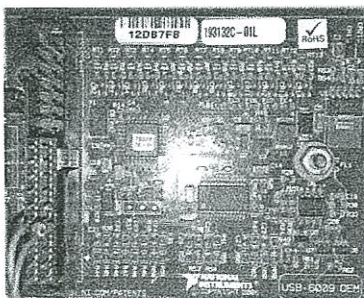
งานวิจัยนี้ได้เลือกวงจรจ่ายไฟฟ้าที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง +12 โวลต์ และ -12 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 3.10 เพื่อจ่ายให้กับวงจรขยายสัญญาณแบบเครื่องมือวัด เซอร์โวมอเตอร์และวงจรวีทสโตนบริดจ์



รูปที่ 3.10 วงจรจ่ายไฟฟ้า

3.2.1.5 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ได้เลือกวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ USB-6009 OEM ดังรูปที่ 3.11 มาใช้งาน โดยเลือกโหมดที่ใช้วัดเป็นแบบวัดความแตกต่างโดยเลือกให้แรงดันเอาพุทเข้าที่ขา 9(AI 1-) และขา 10(AI 1+) โดยอ้างอิงจากผังการต่อตามรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

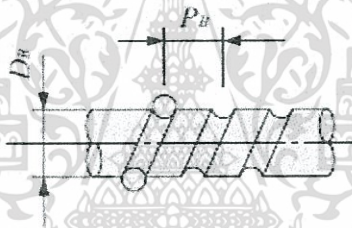
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะทางเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

+5 V	34	33	PF1.0
D GND	32	31	P1.3
P1.2	30	29	P1.1
P1.0	28	27	P0.7
P0.6	26	25	P0.5
P0.4	24	23	P0.3
P0.2	22	21	P0.1
P0.0	20	19	D GND
LED	18	17	D+
VBUS	16	15	D-
AI GND	14	13	AI GND
AI 4 (AI 0-)	12	11	AI 0 (AI 0+)
AI 5 (AI 1-)	10	9	AI 1 (AI 1+)
AI 6 (AI 2-)	8	7	AI 2 (AI 2+)
AI 7 (AI 3-)	6	5	AI 3 (AI 3+)
AI GND	4	3	AI GND
AO 1	2	1	AO 0

รูปที่ 3.12 ผังการต่อของ USB-6009 OEM

3.2.1.6 Ball screw

งานวิจัยนี้ได้เลือก Ball screw แบบเจีย (Grounded or precision ball screw) มาใช้งานในการขับเคลื่อนหัววัดตามคำสั่งให้ขึ้นเพื่อทำการดึงหรือกดลงเพื่อทดสอบเนื้อสัมผัส



รูปที่ 3.13 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและระยะห่างระหว่างร่องของ Ball screw

โดย Ball screw ที่เลือกมาใช้งานจะมีระยะห่างระหว่างร่อง (P_B) ตามรูปที่ 3.13 เท่ากับ 2 mm. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_B) เท่ากับ 8 mm. และจะกำหนดค่าไนโปรแกรมในการควบคุม Servo motor มีความละเอียดเป็น 5,000 pulse/rotation หรือกล่าวได้ว่าค่าความละเอียด (Desired resolution, Δ_l) ถูกกำหนดไว้ที่ 0.0002 mm/step กรณีต้องการทราบว่าหนึ่งระยะการหมุนของแกน (Step) เป็นกี่องศาสามารถคำนวณได้ตามสมการ 3.2

$$\theta_s = \frac{360^\circ \times \Delta_l}{P_B} \quad (3.2)$$

โดยที่ θ_s คือ องศาในการเคลื่อนที่หนึ่งระยะ

Δ_l คือ ความละเอียดในการเคลื่อนที่ต่อหนึ่งระยะ(mm./step)

P_B คือ ระยะห่างระหว่างร่อง (Pitch)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเมื่อนำค่าแทนเข้าไปในสมการแล้ว จะได้ θ_s เท่ากับ 0.072 องศาต่อหนึ่งระยะการหมุนของแกน

กรณีถ้าเราต้องการทราบว่าต้องจ่ายจำนวน Pulse เท่าใด ให้มีการเคลื่อนที่ไปในระยะทางที่ต้องการในแนวขนานกับแกน จะคำนวณได้ดังสมการ 3.3

$$A = \frac{l}{P_B} \times \frac{360^\circ}{\theta_s} \quad (3.3)$$

โดยที่ A คือ จำนวน Pulse

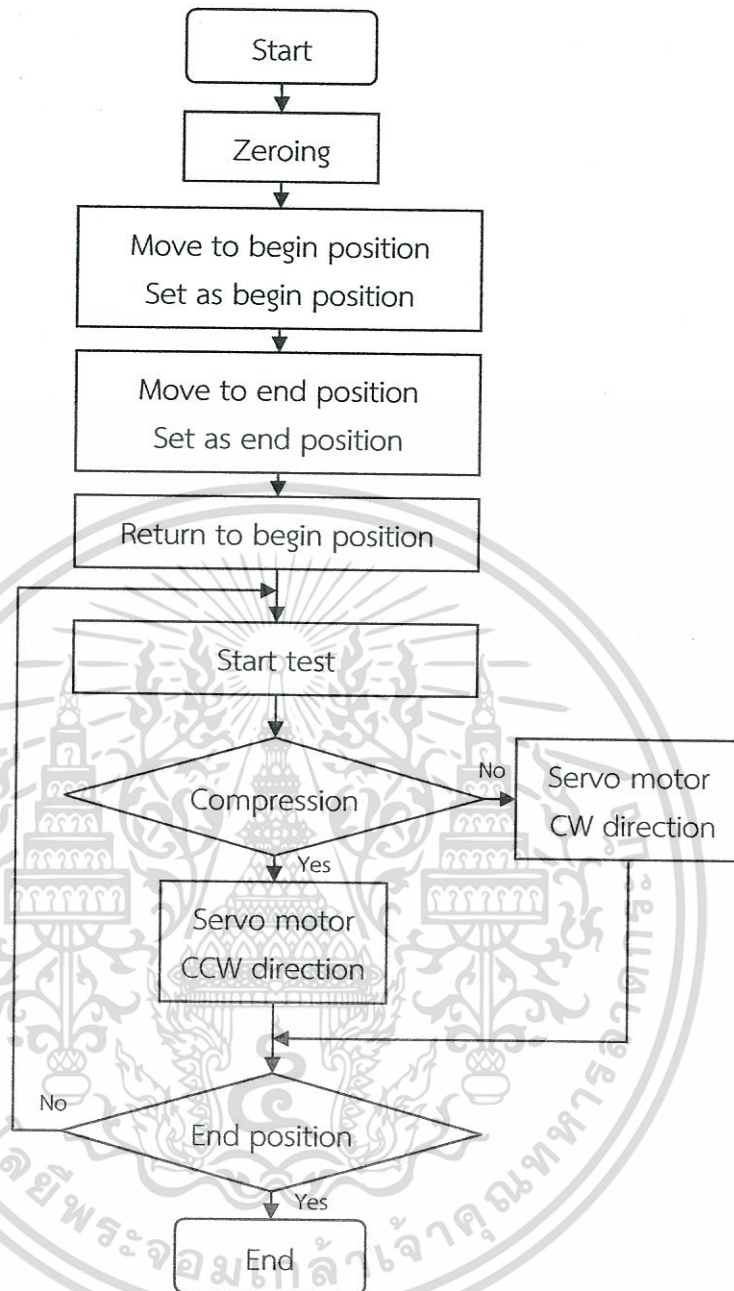
l คือ ระยะทาง(mm.) การเคลื่อนที่ในแนวขนานกับแกน

เมื่อนำค่าระยะทาง (l) เท่ากับ 2 mm. P_B เท่ากับ 2 mm. และ θ_s เท่ากับ 0.072 องศา ใส่กลับเข้าไปในสมการที่ 3.3 จะทำให้ได้จำนวน pulse (A) เท่ากับ 5,000 ซึ่งเป็นจำนวน pulse ที่กำหนดเป็นความละเอียดต่อการหมุนหนึ่งรอบ

การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาหรือแรงกับระยะทางนั้น สามารถหาความสอดคล้องกันได้ เนื่องจากการกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัด เช่น ถ้ากำหนดความเร็วเป็น 0.4 มิลลิเมตรต่อวินาทีในการเจาะผลิตภัณฑ์ การเคลื่อนที่ในแต่ละวินาทีจะเท่ากับการเจาะทะลุลงไปผลิตภัณฑ์เท่ากับ 0.4 มิลลิเมตร เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับกรณีที่ต้องการทราบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทาง

3.2.2 โปรแกรมควบคุม

งานวิจัยนี้ได้ทำการวางผังการทำงานของเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสดังรูปที่ 3.16 โดยนำโปรแกรม Labview มาใช้ในการควบคุมการทำงาน ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างเพื่อนำมาใช้ด้านการวัดและเครื่องมือวัดสำหรับงานทางวิศวกรรม Labview ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench ซึ่งหมายความว่า โปรแกรมที่สร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม ดังนั้นจุดประสงค์หลักของการทำงานของโปรแกรมนี้คือการจัดการด้านการวัดและเครื่องมือวัดอย่างมีประสิทธิภาพ และในตัวของโปรแกรมจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันที่ช่วยในการวัดมากมาย และจะมีประโยชน์สูงสุดเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดแบบต่างๆ



รูปที่ 3.14 ฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรมควบคุม

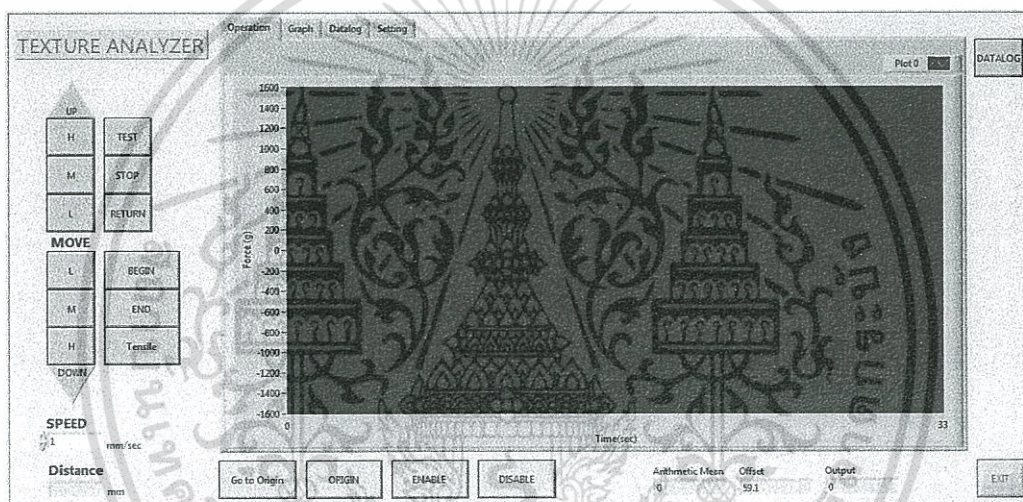
Labview เป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) โดยสมบูรณ์ ไม่จำเป็นต้องเขียน code หรือคำสั่งใดๆ และลักษณะภาษาของโปรแกรมนี้อาจเรียกว่า ภาษารูปภาพ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าภาษา G (Graphic language) ซึ่งแทนการเขียนโปรแกรมเป็นบรรทัด เช่น C ,Basic สามารถลดความยุ่งยากในการจัดการเกี่ยวกับตำแหน่งการส่งผ่านข้อมูลตามอุปกรณ์เชื่อมต่อ เช่น port หรือ card ต่างๆ โดย Labview จะประกอบด้วยฟังก์ชัน 3 ส่วนคือ Front panel ,Block diagram และ Icon and Connector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้ง 3 ส่วนนี้จะประกอบกันขึ้นมาเป็นอุปกรณ์เสมือนจริง ตามลักษณะและหน้าที่ของ ส่วนประกอบทั้ง 3 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.2.1 Front panel จะเป็นส่วนในการสื่อสารกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม หรือที่เรียกกันว่า User interface โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าปัดของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัดต่างๆไป เช่นมีสวิตช์ปิดเปิด ปุ่มกด จอแสดงผล ดังนั้น Front panel นี้จึงเปรียบเสมือน GUI ของโปรแกรม ลักษณะของ Front panel แสดงดังรูปที่ 3.15

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบ Front panel ที่จะมีลักษณะที่สำคัญ 2 แบบ คือ ตัวควบคุม(Controls) เพื่อให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของหัววัดเนื้อสัมผัส ในลักษณะเป็นปุ่มกด ส่วนที่สองเป็นตัวแสดงผล (Indicator) ซึ่งแสดงผลออกมาเป็นรูปภาพหรือดึงผลการทดลองมาแสดงที่กราฟได้เช่นเดียวกัน



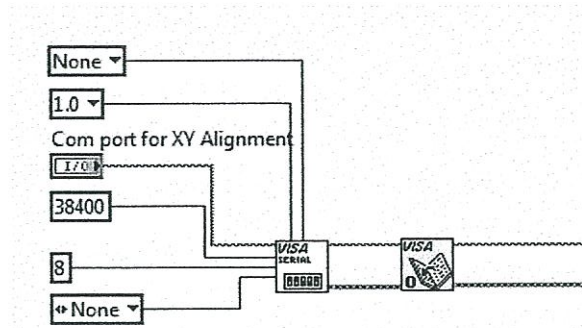
รูปที่ 3.15 Front panel ของโปรแกรม Labview ที่ใช้ในการควบคุม

3.2.2.2 Block diagram เปรียบเสมือน Source code ของโปรแกรมที่พัฒนาด้วย Labview ซึ่งเป็นภาษารูปภาพ โดย Block diagram จะสามารถทำงานได้ทันที (Executable program) และจะมีข้อดีคือโปรแกรม Labview สามารถตรวจสอบข้อผิดพลาดของโปรแกรมได้ตลอดเวลา ทำให้โปรแกรมจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อไม่มีข้อผิดพลาดในโปรแกรมเท่านั้น ซึ่งผู้เขียนจะสามารถดูรายละเอียดของข้อผิดพลาดที่จะแสดงให้เห็นได้ตลอดเวลา ทำให้การเขียนโปรแกรมง่ายขึ้น

ส่วนประกอบภายใน Block diagram จะประกอบด้วย ฟังก์ชัน ค่าคงที่ โปรแกรมควบคุมการทำงานหรือโครงสร้าง จากนั้นแต่ละส่วนจะปรากฏอยู่ในรูปของ Block เราจะได้รับการต่อสาย(wire) สำหรับ Block ที่เหมาะสมเข้าด้วยกัน เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง Block เหล่านั้น ทำให้ข้อมูลได้รับการประมวลผลตามที่ต้องการ

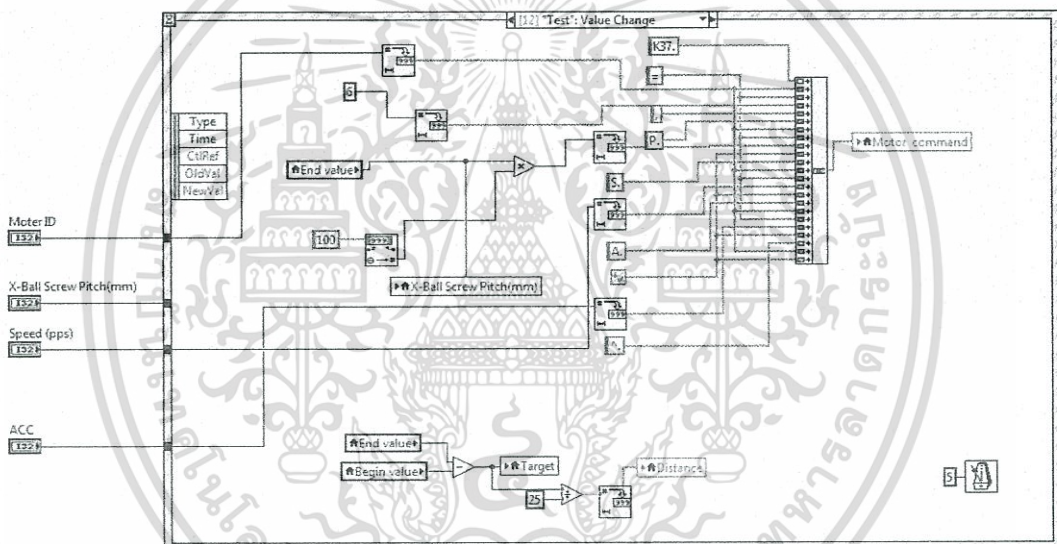
สำหรับงานวิจัยนี้ได้เขียน Block diagram ที่เป็นส่วนสำคัญ คือ ส่วนของการเชื่อมต่อผ่านทาง RS-232 ดังแสดงตามรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 Block diagram ที่กำหนดในการเชื่อมต่อผ่านทาง RS-232

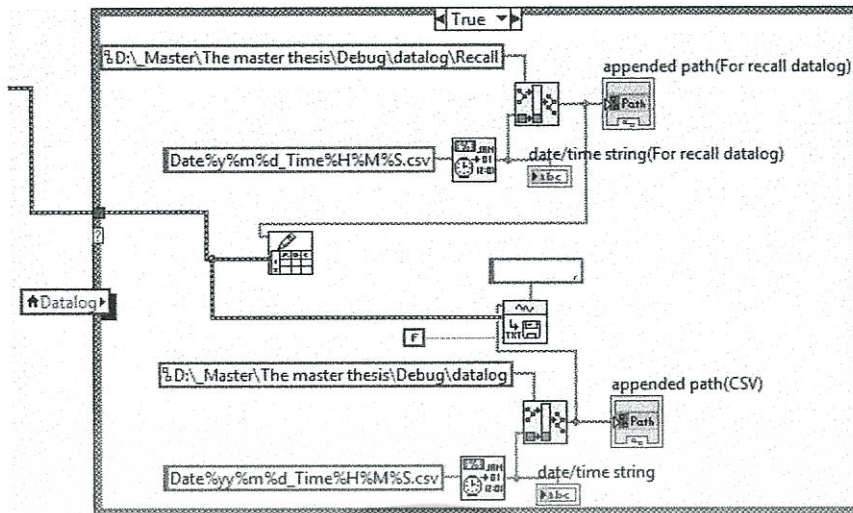
Block diagram ส่วนที่ใช้รับคำสั่ง และส่งข้อมูลให้กับชุดควบคุม Servo motor ดังแสดงตามรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 Block diagram ที่รับค่าและส่งต่อไปยังชุดควบคุม Servo motor

Block diagram ส่วนที่ใช้รับข้อมูล และเป็นชุดควบคุม Servo motor ซึ่งจะเชื่อมต่อกับชุดขับ Servo motor (Driver) ผ่านทาง RS-232 ดังแสดงตามรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

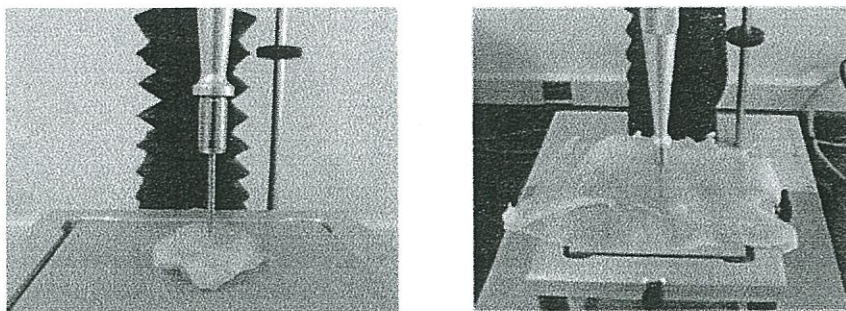


รูปที่ 3.20 Block diagram ในการเก็บผลกราฟ

3.2.2.3 Icon และ Connector เปรียบเสมือนโปรแกรมย่อย (Subroutine) ในโปรแกรมปกติทั่วไป Icon หมายถึง Block diagram ตัวหนึ่งที่มีการส่งข้อมูลเข้าและออกผ่านทาง Connector ซึ่งใน Labview จะเรียกโปรแกรมย่อยนี้ว่า Sub VI ข้อดีของการเขียนโปรแกรมภาษารูปภาพนี้ก็คือ สามารถสร้าง VI ทีละส่วนขึ้นมาให้ทำงานด้วยตัวเองได้อย่างอิสระ จากนั้นสามารถเขียนโปรแกรมหลักที่เรียกเพื่อเรียกโปรแกรมย่อยมาใช้งาน แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้นำโปรแกรมย่อยมาใช้งาน

3.2.3 หัววัด

ชนิดของหัววัดขึ้นอยู่กับวิธีการทดสอบ ในเบื้องต้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยการทดสอบเนื้อสัมผัสของแมงกะพรุน เพื่อเลือกหัววัดที่เหมาะสม โดยนำไปทดสอบกับเครื่องมือทดสอบเนื้อสัมผัส (Stable Micro System Texture Analyzer รุ่น TA.XT plus) จากการศึกษาวิธีทดสอบเนื้อสัมผัสเบื้องต้นพบว่า มีวิธีทดสอบเนื้อสัมผัสที่เหมาะสมสำหรับแมงกะพรุน คือ วิธีทดสอบแบบเจาะโดยใช้หัววัดทรงกระบอก (Cylinder probe) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร (P/2) โดยในส่วนของแมงกะพรุนถูกกำหนดค่าเป็น % strain มีค่าเท่ากับ 50% ในขณะที่ส่วนร่วมซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบางจะกำหนดเป็นค่า Distance มีค่าเท่ากับ 15 มิลลิเมตร ลักษณะการทดสอบแบบเจาะส่วนขาและร่วมของแมงกะพรุนแสดงดังรูปที่ 3.21

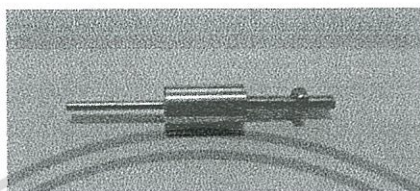


รูปที่ 3.21 การทดสอบแบบเจาะด้วยหัววัด P/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน (ก) ขาแมงกะพรุน เพื่อการศึกษาเท่านั้น (ข) เนื้อร่วมแมงกะพรุน ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำกราฟที่ได้จากการทดสอบเนื้อสัมผัส มาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์เพื่อประเมินเนื้อสัมผัสของแมงกะพรุน โดยมีพารามิเตอร์ที่พิจารณาดังนี้ Force (N) และ Distance (mm) ที่จุดYield point, Toughness (N.mm), Stiffness (N/mm), Elasticity (N/mm) และ Max Force (N)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำวิธีการทดสอบแบบเจาะจึงเลือกใช้หัววัดแบบทรงกระบอก (Cylinder probe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.22 มาทดสอบเนื้อสัมผัสในลักษณะของการรับแรงกดโดยวิธีการเจาะ และใช้หัววัดดังรูปที่ 3.23 เพื่อยึดผลิตภัณฑ์มาทดสอบเนื้อสัมผัสในลักษณะของการรับแรงดึง



รูปที่ 3.22 หัววัดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.23 หัววัดเพื่อทดสอบแบบดึง

3.3 การทดสอบ

การทดสอบเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น แบ่งออกเป็น การสอบเทียบด้วยตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน การหาค่าความถูกต้องแม่นยำ การทดสอบแรงกดด้วยวิธีการเจาะทะลุกับแมงกะพรุน การทดสอบแรงดึง กับแผงวงจรแบบยืดหยุ่น(Flexible printed circuit) และการทดสอบสอกับผลิตภัณฑ์อื่นๆเช่น เยลลี่แต่งหน้าเค้ก เนื้อกุ้งขาว ซองบรรจุยา ด้วยแรงกดและแรงดึง

3.3.1 การสอบเทียบกับตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน

เนื่องจากเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นเป็นลักษณะเครื่องมือวัด จึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบเพื่อให้ค่าที่อ่านได้มีความน่าเชื่อถือ วิธีการสอบเทียบอาจจะใช้ตุ้มน้ำหนักซึ่งมีขนาดแตกต่างกันออกไปตามรูปที่ 3.24 แขนงลงบนโพลดเซลล์ตามตัวอย่างรูปที่ 3.25 เนื่องจากสเตรนเกจที่ต่ออยู่ในโพลดเซลล์มีลักษณะเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์ ซึ่งเป็นบริดจ์สมดุล การกดลงของหัววัดกับการรับน้ำหนักจากตุ้มน้ำหนักจะมีค่าเท่ากันแต่เป็นทางตรงกันข้ามเท่านั้น หลักการดังกล่าวสามารถลดทำการสอบเทียบได้เช่นเดียวกัน

เมื่อนำตุ้มน้ำหนักมาสอบเทียบกับเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น หาย่านการวัดที่เหมาะสม โดยมีลักษณะเป็นเชิงเส้น เพื่อให้ค่าที่วัดได้มีความถูกต้อง



รูปที่ 3.24 ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน



รูปที่ 3.25 แสดงการสอบเทียบโดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การหาค่าความถูกต้องแม่นยำของเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าความถูกต้องแม่นยำของเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสโดยเตรียมอาหาร 8 ชนิด ได้แก่ มะละกอ แอปเปิ้ล มะเขือยาว ฝรั่ง มันฝรั่ง พักเขียว หัวไชเท้า หั่นเป็นแผ่นเรียบหนา 4 มิลลิเมตรโดยประมาณ ทดสอบเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA.XT plus) และทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้แก่ ค่า แรงสูงสุด(Max Force) จากการวัดอาหารชนิดละ 10 ตัวอย่าง โดยนำค่าเฉลี่ยไปเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน เพื่อหาค่าความถูกต้อง(%Accuracy) ความแม่นยำ(%Precision) และการกระทำซ้ำ(%Repeatability)

3.3.3 การทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงกดด้วยวิธีการเจาะทะลุ(Puncture test)

งานวิจัยนี้ได้ทำแบ่งการทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงกดด้วยวิธีการเจาะทะลุเป็น 2 ส่วนคือการทดสอบกับแมงกะพรุนและการทดสอบแบบอื่นๆ ได้แก่ เยลลี่แตงหน้าเค้ก และ เนื้อกุ้งขาว

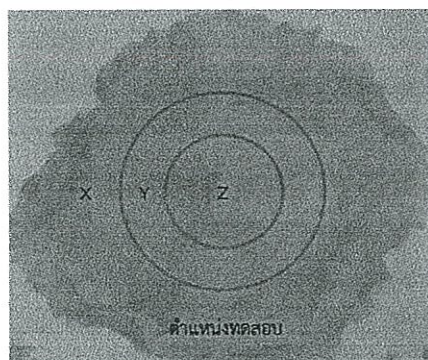
3.3.3.1 การทดสอบเนื้อสัมผัสแมงกะพรุน

เตรียมส่วนร่วมของแมงกะพรุนโดยการล้างลดระดับปริมาณเกลือต่างกัน 8 ระดับตามรูปที่ 3.26 โดยปริมาณเกลือวัดโดยใช้ Salt refractometer ของ ATAGO รุ่น S-28E โดยนำแมงกะพรุนมาบด ให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น แล้วบีบน้ำออกโดยใช้ผ้าขาวบาง นำน้ำแมงกะพรุนที่ได้ใส่ลงในเครื่องแล้วไปส่องกับแสงเพื่ออ่านค่าปริมาณเกลือ(g/100gNaCl) ทำการวัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ



รูปที่ 3.26 การเตรียมส่วนร่วมของแมงกะพรุน

โดยในส่วนร่วมของแมงกะพรุนจะพิจารณาผลของตำแหน่งในการทดสอบที่มีต่อค่าเนื้อสัมผัส เนื่องจากส่วนร่วมของแมงกะพรุนในแต่ละตำแหน่งมีความหนาบางไม่เท่ากัน ดังนั้น ร่วมของแมงกะพรุน 1 ตัว จะกำหนดตำแหน่งที่ทดสอบ 3 ตำแหน่ง กำหนดให้รอบนอกสุดเป็นตำแหน่ง X ถัดมาเป็นตำแหน่ง Y และด้านในสุดเป็นตำแหน่ง Z ลักษณะการแบ่งตำแหน่งทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.27 ทำการทดสอบตำแหน่งละ 10 ซ้ำ โดยทดสอบกับเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นและเครื่องมือมาตรฐาน



รูปที่ 3.27 การกำหนดตำแหน่งเพื่อทดสอบเนื้อสัมผัส

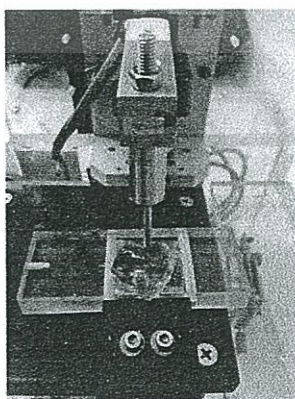
3.3.3.2 การทดสอบเนื้อสัมผัสเยลลี่แต่งหน้าเค้ก

งานวิจัยนี้ได้นำเยลลี่แต่งหน้าเค้กเป็นตัวตัวอย่างเพิ่มเติมในการทดสอบเนื้อสัมผัส ซึ่งมีลักษณะที่เหนียวนุ่ม เพื่อหาค่าแรงสูงสุด(Maximum force) นำมาวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยวิธีการเจาะ โดยการเตรียมตัวอย่างเยลลี่ 5 ชิ้นตามรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ตัวอย่างเยลลี่ที่นำมาทดสอบ

หลังจากนั้นนำเยลลี่ทั้ง 5 ชิ้นมาวางไว้ที่พื้นที่รอทดสอบตามรูปที่ 3.29



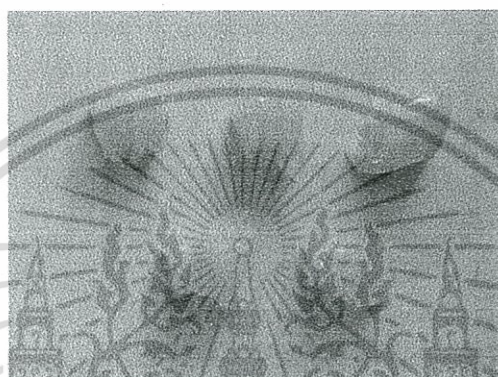
รูปที่ 3.29 การวางเยลลี่เพื่อรอทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า...
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ของหัววัดโดยกำหนดที่ความเร็วที่ 0.4 มิลลิเมตรต่อวินาที และให้มีระยะทางในการเคลื่อนที่ทั้งหมดจากจุดเริ่มต้นจนสุดท้าย หรือทะลุผ่านเนื้อเยลลี่เป็น 20 มิลลิเมตร แล้วทำการบันทึกผล

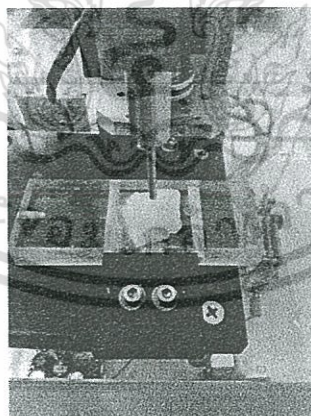
3.3.3.3 การทดสอบเนื้อสัมผัสเนื้อกุ้งขาว

งานวิจัยนี้ได้นำเนื้อกุ้งขาวมาเป็นตัวอย่างเพิ่มเติมในการทดสอบเนื้อสัมผัสเพื่อหาค่าแรงสูงสุด(Maximum force) นำมาวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยวิธีการเจาะ โดยทำการเตรียมตัวอย่างเนื้อกุ้งขาว 5 ชิ้นตามรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 ตัวอย่างเนื้อกุ้งขาวที่นำมาทดสอบ

หลังจากนั้นนำตัวอย่างเนื้อกุ้งขาว 5 ชิ้นมาวางไว้ที่พื้นที่รอทดสอบตามรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 การวางเนื้อกุ้งขาวเพื่อรอทดสอบ

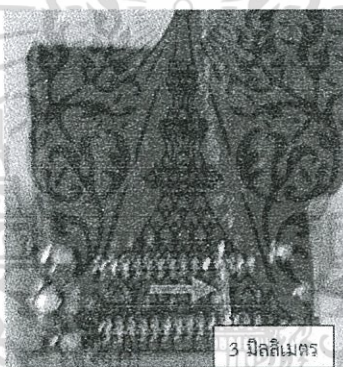
จากนั้นทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ของหัววัดโดยกำหนดที่ความเร็วที่ 0.4 มิลลิเมตรต่อวินาที และให้มีระยะทางในการเคลื่อนที่ทั้งหมดจากจุดเริ่มต้นจนสุดท้าย หรือทะลุผ่านเนื้อกุ้งขาวเป็น 19 มิลลิเมตร แล้วทำการบันทึกผล

3.3.4 การทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงดึง(Tensile test)

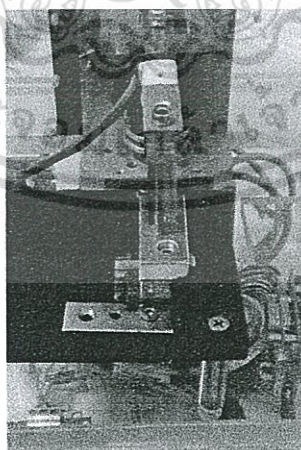
การทดสอบโดยการดึง(Tensile test) จะเป็นการนำผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรม มาเป็นตัวอย่างในการทำการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงที่กระทำกับตัวอย่าง ซึ่งค่าที่ต้องการจะเป็นค่าแรงสูงสุด(Maximum force) โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในลักษณะความแข็งแรงของกาวต่อการลอกออก(Peeling test) โดยใช้หัววัดที่สามารถยึดติดกับตัวอย่างเพื่อลอกออก

3.3.4.1 การทดสอบเนื้อสัมผัสของแผงวงจรแบบยืดหยุ่น(Flexible printed circuit)

ทำการเตรียมผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผงวงจรแบบยืดหยุ่นมาทดสอบความแข็งแรงต่อการลอกจากแรงดึง ซึ่งเป็นการทดสอบเนื้อสัมผัสเพื่อหาค่าแรงสูงสุดที่ทำให้แผงวงจรแบบยืดหยุ่นหลุดออกจาก สแตนเลส โดยเตรียมตัวอย่าง 5 ชิ้นโดยมีการกำหนดความกว้างของส่วนที่ลอกออกเป็น 3 มิลลิเมตรดังรูป 3.32 และนำไปติดตั้งกับหัวจับและหัววัดดังรูปที่ 3.33



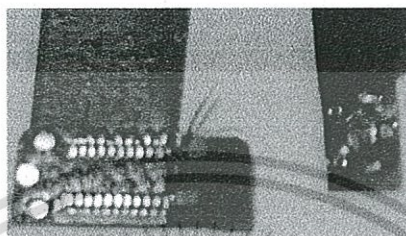
รูปที่ 3.32 การกำหนดความกว้างของแผงวงจรแบบยืดหยุ่นเพื่อทำการทดสอบ



รูปที่ 3.33 แสดงการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับหัวจับและหัววัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ของหัววัดโดยกำหนดที่ความเร็วที่ 0.84 มิลลิเมตรต่อวินาที และให้มีระยะทางในการเคลื่อนที่ทั้งหมดจากจุดเริ่มต้นจนสุดท้าย หรือทำให้แผงวงจรแบบยืดหยุ่นหลุดออกจากแผ่นสแตนเลสขาดออกจากกันเป็นระยะ 8 มิลลิเมตร หลังจากมีการลอกออกจะเป็นดังรูปที่ 3.34 ทำการทดสอบลักษณะเดียวกันกับเครื่องวัดมาตรฐานกับตัวอย่างงาน 5 ชิ้น เพื่อหาค่าสหสัมพันธ์(Correlation)ระหว่างเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นกับเครื่องมือมาตรฐานแล้วทำการบันทึกผล



รูปที่ 3.34 ตัวอย่างแสดงแผงวงจรที่ผ่านการทดสอบ

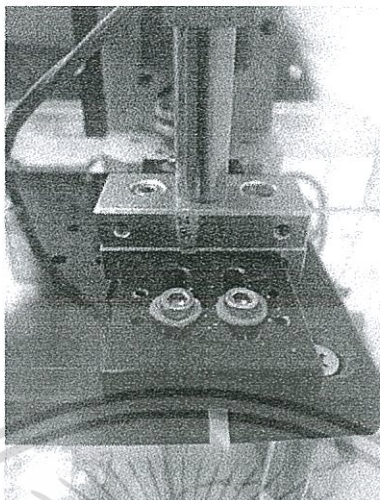
3.3.4.2 การทดสอบเนื้อสัมผัสของช่องบรรจุยา

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงดึงเพิ่มเติมโดยใช้ช่องบรรจุยามาเป็นตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงสูงสุดที่จะทำให้ช่องบรรจุยาลอกออกจากกัน ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแรงของกาวที่ใช้ยึดติดช่องบรรจุยาจากแรงดึง โดยทำการเตรียมตัวอย่าง 5 ชิ้น ดังรูปที่ 3.35 โดยความกว้างของตัวอย่างเท่ากับ 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.35 ตัวอย่างช่องบรรจุยาที่ตัดมาเพื่อทำการทดลอง

หลังจากนั้นนำตัวอย่างของบรรจุายืดติดเข้ากับหัววัดตามรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 การยืดติดตัวอย่างของบรรจุยาเพื่อรอทดสอบ

จากนั้นทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ของหัววัดโดยกำหนดที่ความเร็วที่ 0.4 มิลลิเมตรต่อวินาที และให้มีระยะทางในการเคลื่อนที่ทั้งหมดจากจุดเริ่มต้นจนสุดท้าย หรือทำให้ของบรรจุยาขาดออกจากกันเป็นระยะ 22 มิลลิเมตร แล้วทำการบันทึกผล

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 การสอบเทียบกับตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน

การสอบเทียบโดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานมาห้อยไว้ที่ตัวโพลดเซลล์ เพื่อทดสอบความถูกต้องในการวัด โดยตุ้มน้ำหนักเปรียบเสมือนแรงที่กระทำกับตัวโพลดเซลล์ที่เกิดจากแรงดึง โดยใช้ตุ้มน้ำหนักเพื่อทำการสอบเทียบตั้งแต่ 0 gram(g) จนถึง 1,300 gram(g) ผลการทดลองดังแสดงตามตารางที่ 4.1 ซึ่งค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐานอยู่ที่ ไม่เกิน +/- 1%

ตารางที่ 4.1 ผลการสอบเทียบ

ตุ้มน้ำหนัก (g)	วัดครั้งที่ 1 (g)	วัดครั้งที่ 2 (g)	วัดครั้งที่ 3 (g)	ค่าเฉลี่ย (g)	ค่าความผิดพลาด (%)
0	0.85	1.15	1.50	1.17	100.00
100	100.23	100.83	101.01	101.02	0.69
200	199.20	200.33	199.98	199.84	-0.08
300	301.17	300.90	300.93	301.00	0.33
400	399.00	402.31	401.40	400.90	0.23
500	498.63	501.14	500.34	500.04	0.01
600	602.82	600.29	600.17	601.09	0.18
700	700.61	701.05	699.17	700.28	0.04
800	801.23	802.08	800.87	801.39	0.17
900	902.11	900.49	901.10	901.23	0.14
1000	1001.13	1000.94	1001.06	1001.04	0.10
1100	1102.61	1103.30	1102.32	1102.74	0.25
1200	1200.42	1201.51	1203.65	1201.86	0.15
1300	1301.13	1301.60	1299.51	1300.75	0.06

การหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป หรือข้อมูล 2 ชุดขึ้นไป ซึ่งการทดสอบนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าของตุ้มน้ำหนักมาตรฐานกับค่าเฉลี่ยที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใดนั้น จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) เป็นค่าที่ใช้วัดความสัมพันธ์

การบอกระดับหรือขนาดของความสัมพันธ์ จะใช้ตัวเลขของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับสูง แต่หากมีค่าเข้า

ใกล้ 0 แสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับน้อยมาก หรือไม่มีเลย สำหรับการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยทั่วไปอาจใช้เกณฑ์ดังนี้

- 0.90 - 1.00 มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
 - 0.70 - 0.90 มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง
 - 0.50 - 0.70 มีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลาง
 - 0.30 - 0.50 มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ
 - 0.00 - 0.30 มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมาก
- ผลการหาค่าสหสัมพันธ์แสดงในตารางที่ 4.2

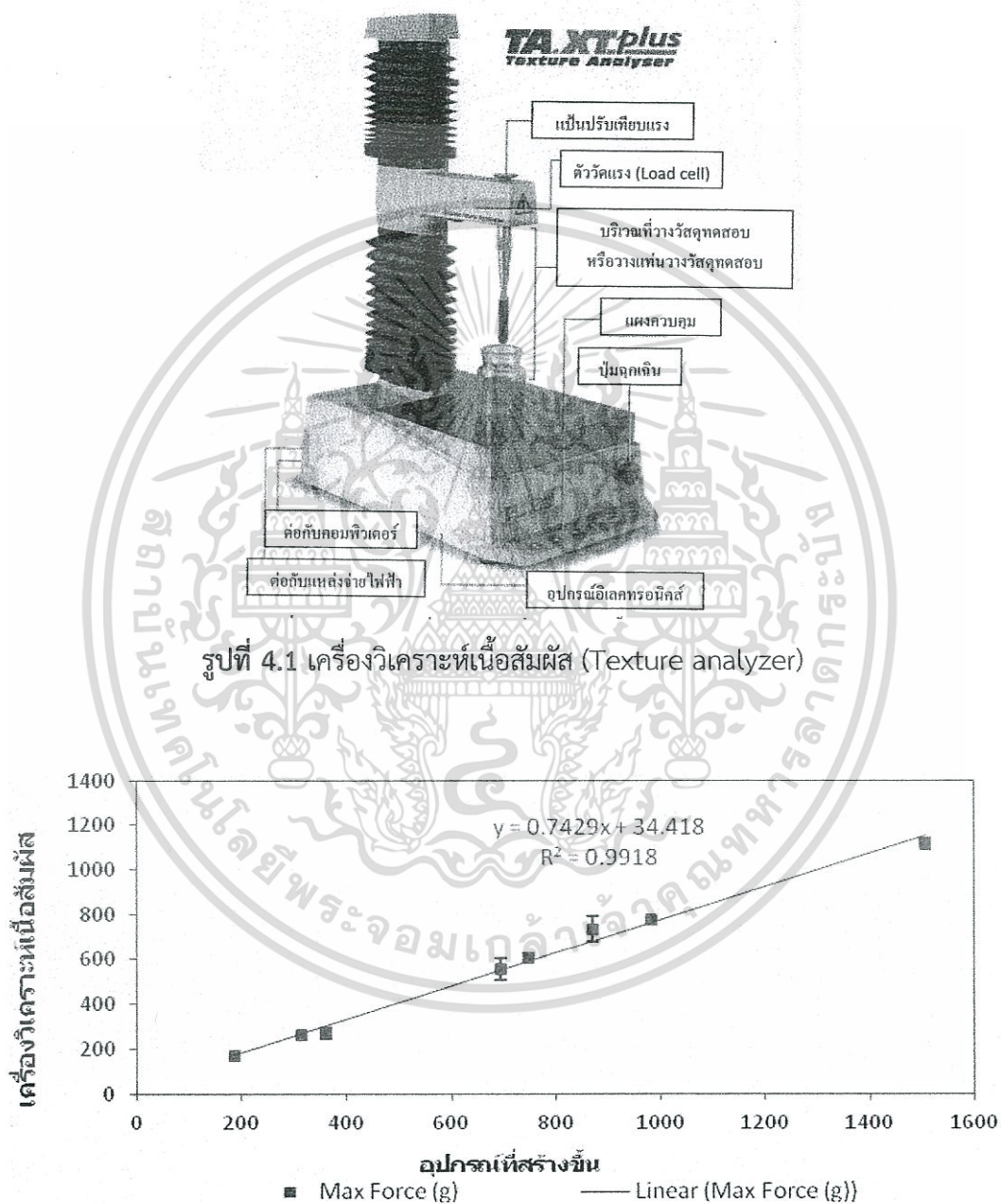
ตารางที่ 4.2 ผลการหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation)

ตม้หน้าหนัก (g)	ค่าเฉลี่ย (g)
0	1.17
100	101.02
200	199.84
300	301.00
400	400.90
500	500.04
600	601.09
700	700.28
800	801.39
900	901.23
1000	1001.04
1100	1102.74
1200	1201.86
1300	1300.75
ค่าสหสัมพันธ์	0.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การหาค่าความถูกต้องแม่นยำของเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น

นำอาหาร 8 ชนิดที่จัดเตรียมไว้มาทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐานตามรูปที่ 4.1 กับเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าวัดที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.2 ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Max Force ที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสกับเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าความถูกต้องแม่นยำของเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้น

ลำดับ ที่	ตัวอย่าง	Max Force (g)		% Accuracy	% Precision	% Repeatability
		เครื่อง วิเคราะห์ เนื้อสัมผัส	เครื่อง ทดสอบที่ สร้างขึ้น			
1	มะละกอ	168.26	186.15	89.37	92.99	87.50
2	แอปเปิ้ล	260.61	315.45	78.96	94.85	87.50
3	มะเขือ ยาว	269.32	360.74	66.05	94.61	66.67
4	ฝรั่ง	552.60	694.77	74.27	92.99	77.77
5	มันฝรั่ง	603.31	747.27	76.14	96.45	88.88
6	พริกเขียว	735.00	870.77	81.53	91.48	77.14
7	หัวไช เท้า	777.85	982.34	73.71	97.78	88.88
8	แครอท	1116.13	1506.71	65.01	97.41	71.43

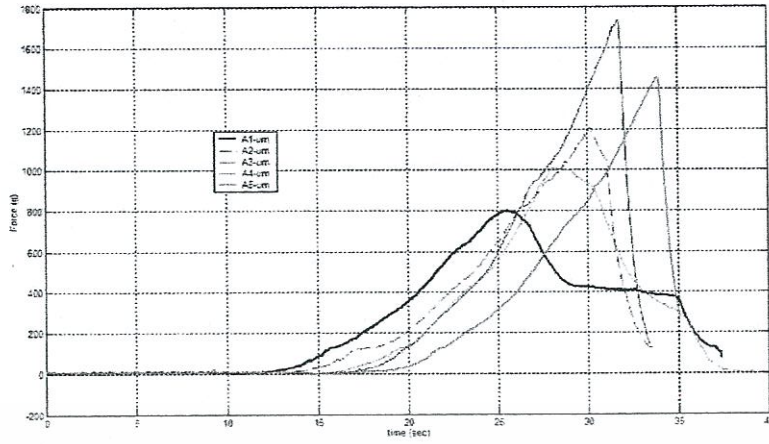
ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าแรงสูงสุดที่ได้จากเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นจะมีค่ามากกว่าเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐาน เช่นเดียวกัน ค่าความถูกต้อง(%Accuracy) มีค่าค่อนข้างต่ำ เป็นตัวบ่งบอกได้เช่นเดียวกันว่าต้องทำการพัฒนาให้เครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

4.3 การทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงกดด้วยวิธีการเจาะทะลุ(Puncture test)

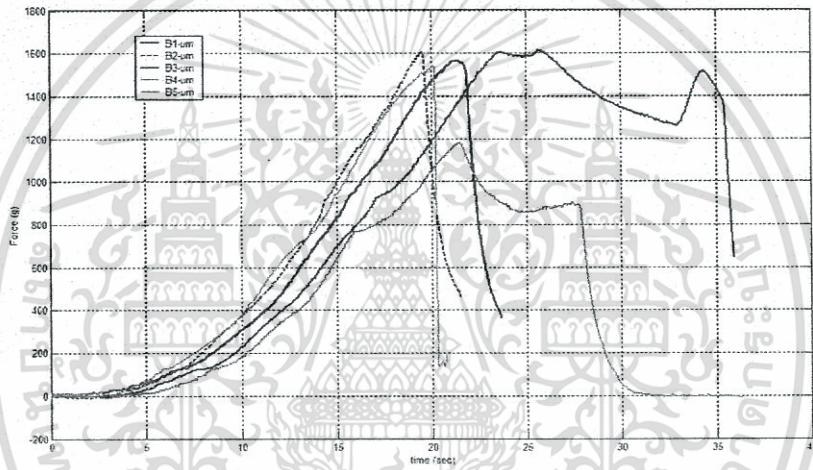
งานวิจัยนี้ได้ทำแบ่งการทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงกดด้วยวิธีการเจาะทะลุเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบกับแมงกะพรุนเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐาน และการทดสอบเพิ่มเติมจากผลิตภัณฑ์แบบอื่นๆ ได้แก่ เยลลี่แตงหน้าเค็ม และ เนื้อกุ้งขาว

4.3.1 การทดสอบเนื้อสัมผัสของแมงกะพรุน

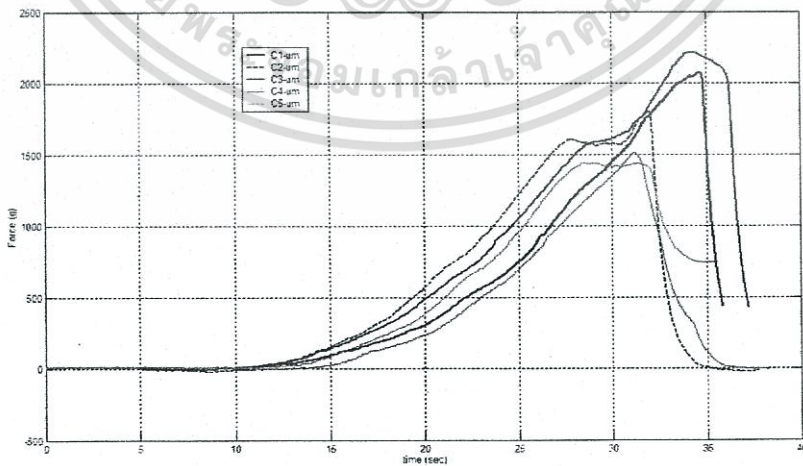
กราฟแสดงค่า Max force ที่ทดสอบแมงกะพรุนที่มีปริมาณเกลือแตกต่างกัน 8 ระดับแสดงดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.10 ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 27.40 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง

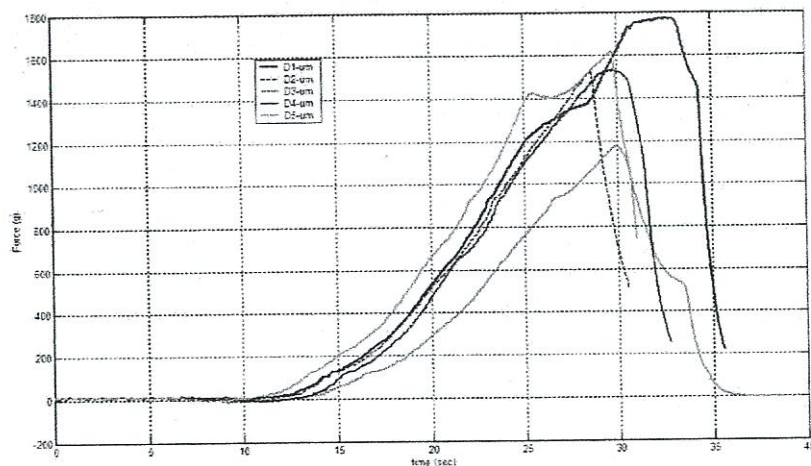


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 22.13 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง

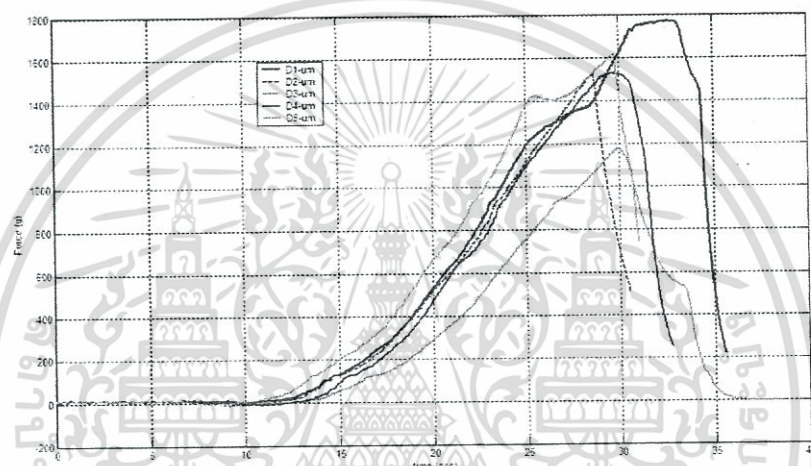


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 21.63 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง

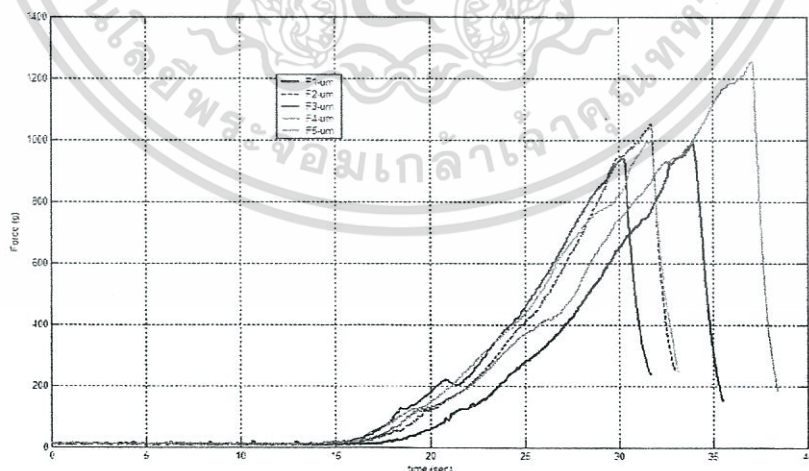
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 18.73 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง

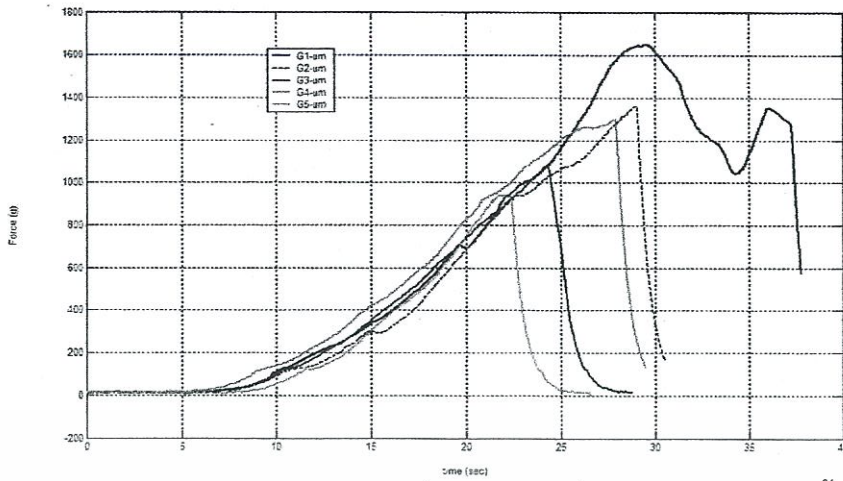


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 3.53 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง

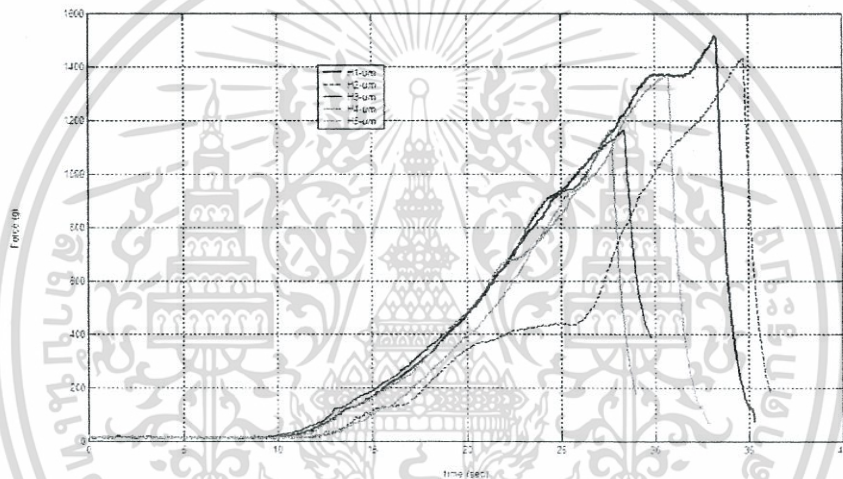


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 2.20 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 0.8 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง



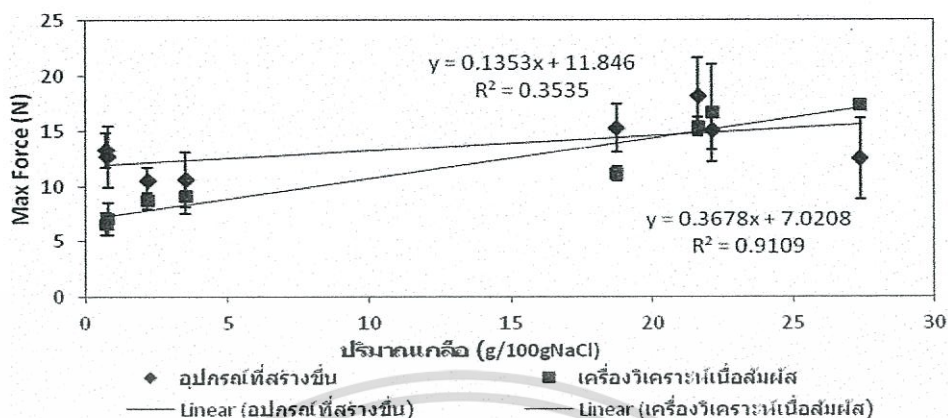
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเจาะแมงกะพรุนที่ระดับความเค็ม 0.73 / 100g NaCl ซ้ำ 5 ครั้ง

ตารางที่ 4.4 ค่าที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสกับเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสและที่สร้างขึ้น

ปริมาณเกลือ (g/100gNaCl)	Max Force	
	เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (N)	เครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น(g)
27.40	17.36 ± 0.51 ^c	1244.06 ± 365.97 ^{ab}
22.13	16.59 ± 4.45 ^c	1503.20 ± 180.43 ^{bc}
21.63	15.40 ± 0.82 ^c	1812.60 ± 341.51 ^c
18.73	11.14 ± 0.65 ^b	1527.80 ± 219.51 ^{bc}
3.53	9.10 ± 1.55 ^{ab}	1058.06 ± 249.58 ^a
2.20	8.91 ± 0.73 ^{ab}	1045.88 ± 123.96 ^a
0.80	7.05 ± 1.48 ^a	1268.80 ± 276.44 ^{ab}
0.73	6.58 ± 1.03 ^a	1331.20 ± 158.88 ^{ab}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังต่างกันในแนวตั้ง (a b c และ d) แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$), $n=5$

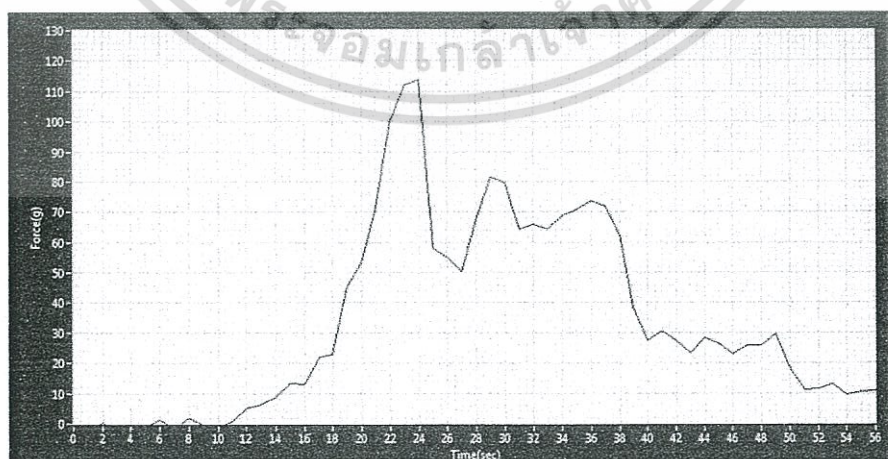


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบเนื้อแมงกะพรุนที่มีปริมาณเกลือต่างกัน

พิจารณา รูปที่ 4.3 ถึง 4.11 และตารางที่ 4.4 พบว่าค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้นและเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสมีค่าต่างกัน และเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้นไม่สามารถใช้ค่า Max Force แยกความแตกต่างเนื้อสัมผัสส่วนรุ่มของแมงกะพรุนที่มีปริมาณเกลือต่างกันได้ เนื่องจากความแปรปรวนภายในตัวของแมงกะพรุน

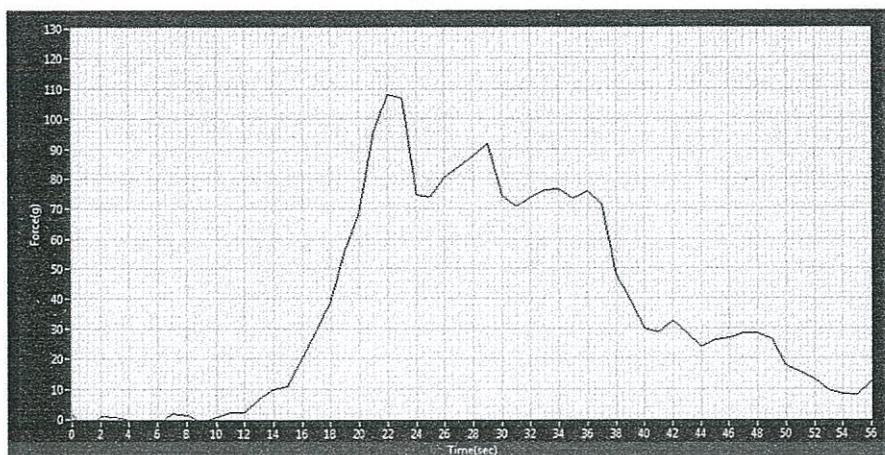
4.3.2 การทดสอบเนื้อสัมผัสกับเยลลี่แต่งหน้าเค้ก

โดยงานวิจัยนี้ได้นำเยลลี่แต่งหน้าเค้ก ซึ่งมีลักษณะที่เหนียวนุ่ม มาเป็นตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ผลการทดสอบที่ได้ตามรูปที่ 4.12 ถึง 4.16 และค่าแรงสูงสุด (Max force) ที่ได้จากการอ่านกราฟตามตารางที่ 4.5

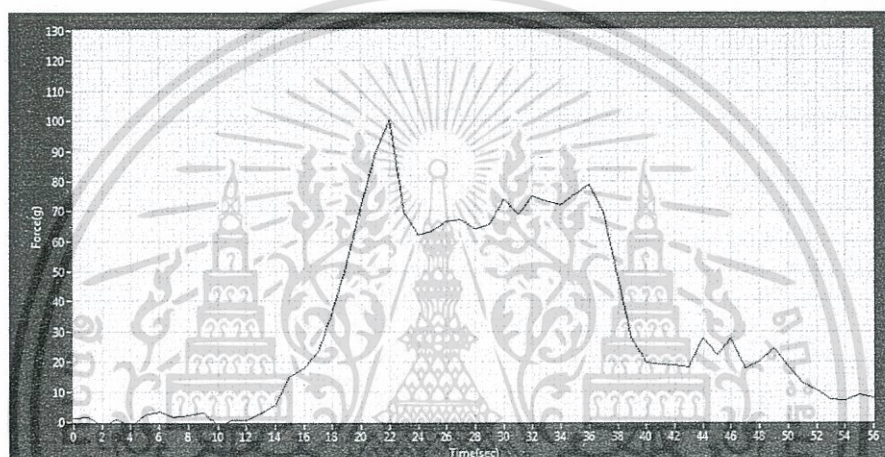


รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบของเยลลี่ชิ้นที่ 1

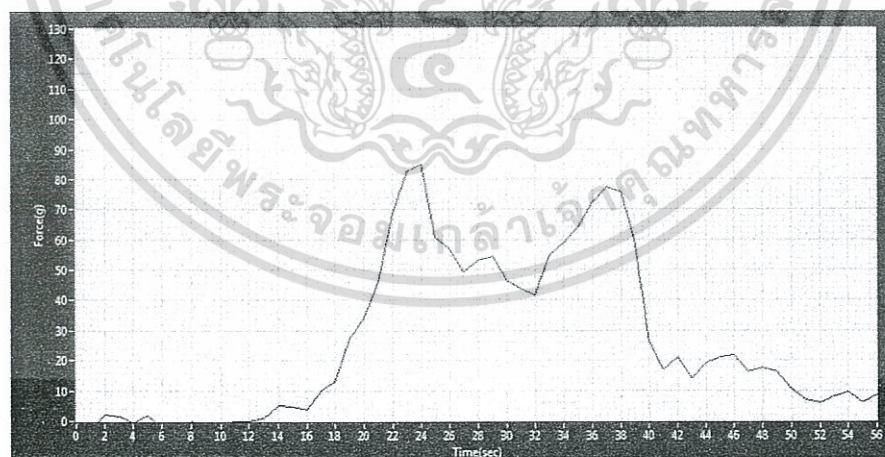
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบของเยลลี่ชั้นที่ 2

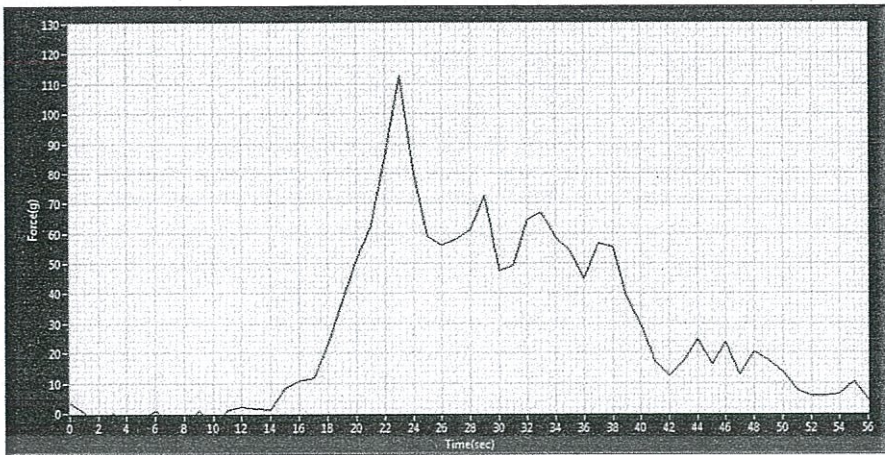


รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบของเยลลี่ชั้นที่ 3



รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบของเยลลี่ชั้นที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



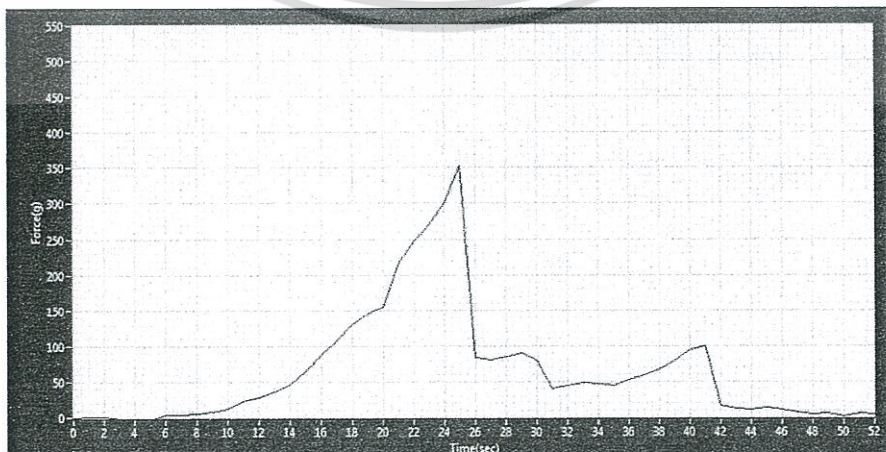
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบของเยลลี่ชั้นที่ 5

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงสูงสุดจากตัวอย่างเยลลี่ 5 ชั้น

ตัวอย่างลำดับที่	แรงสูงสุด (g)
1	114
2	108
3	100
4	86
5	112

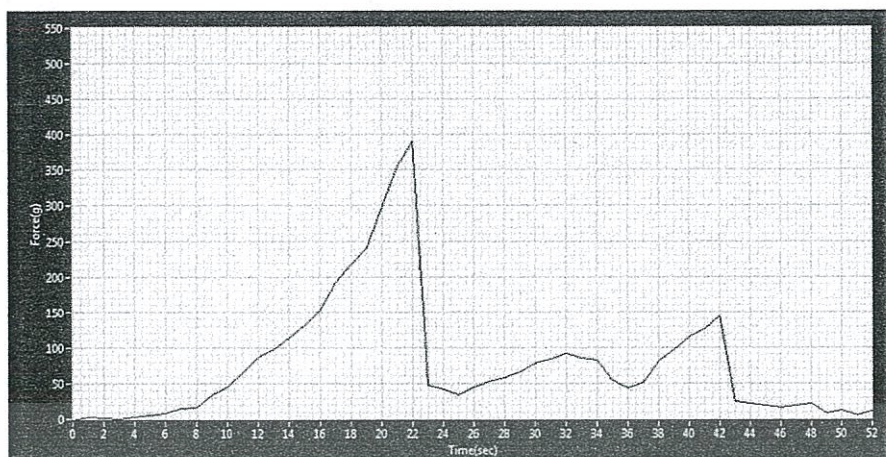
4.3.3 การทดสอบเนื้อสัมผัสกับเนื้อกุ้งขาว

งานวิจัยนี้ได้นำเนื้อกุ้งขาวมาเป็นอีกหนึ่งตัวอย่างในการทดสอบเพื่อนำมาวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ผลการทดสอบที่ได้ตามรูปที่ 4.17 ถึง 4.21 และค่าแรงสูงสุด (Max force) ที่ได้จากการอ่านกราฟตามตารางที่ 4.6

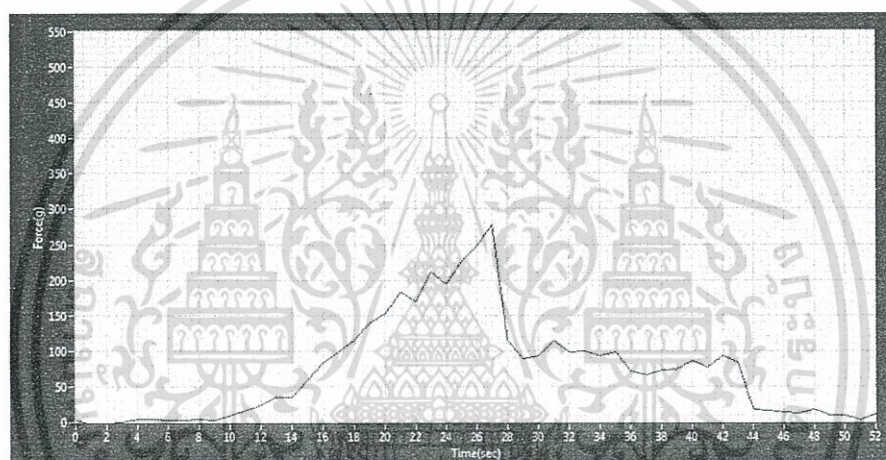


รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบของเนื้อกุ้งขาวชั้นที่ 1

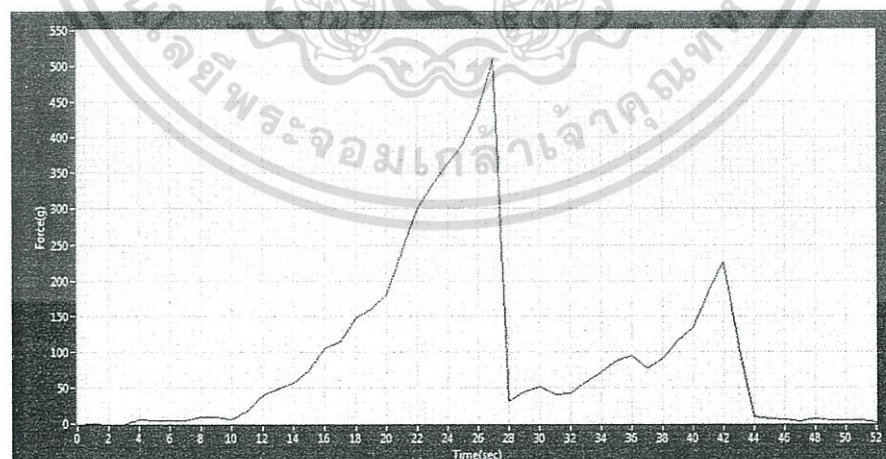
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบของเนื้อกุ้งขาชั้นที่ 2

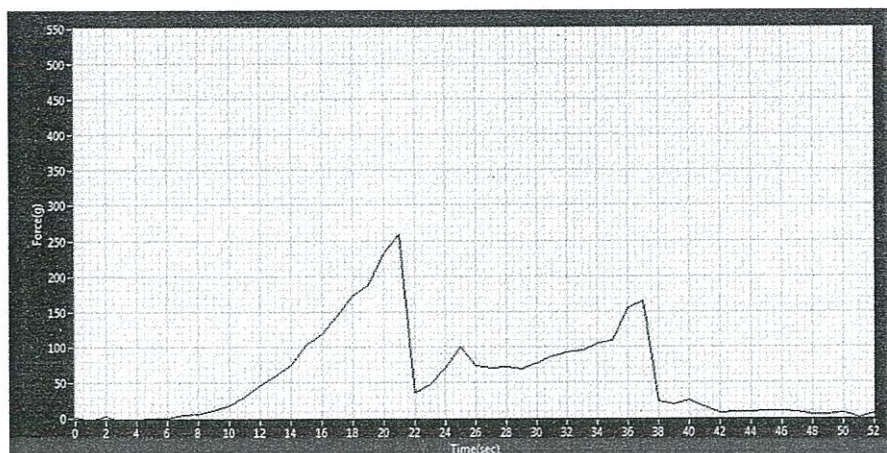


รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบของเนื้อกุ้งขาชั้นที่ 3



รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบของเนื้อกุ้งขาชั้นที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบของเนื้อกึ่งขาวชั้นที่ 5

ตารางที่ 4.6 ค่าแรงสูงสุดจากตัวอย่างเนื้อกึ่งขาว 5 ชั้น

ตัวอย่างลำดับที่	แรงสูงสุด (g)
1	350
2	390
3	280
4	510
5	260

จากการทดสอบเนื้อสัมผัสของเยลลี่แต่งหน้าเค้กและเนื้อกึ่งขาวด้วยวิธีการเจาะทะลุ พบว่า เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้นสามารถวัดแรงสูงสุดที่ใช้ในการเจาะทะลุผลิตภัณฑ์ได้โดยแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุเยลลี่แต่งหน้าเค้กมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 104 ± 11.4 g และแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุเนื้อกึ่งขาวมีค่า 358 ± 99.8 g จะเห็นได้ว่าเนื้อเยลลี่แต่งหน้าเค้กมีค่าแรงสูงสุดในการเจาะทะลุที่ต่ำกว่าเนื้อกึ่งขาว ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริง

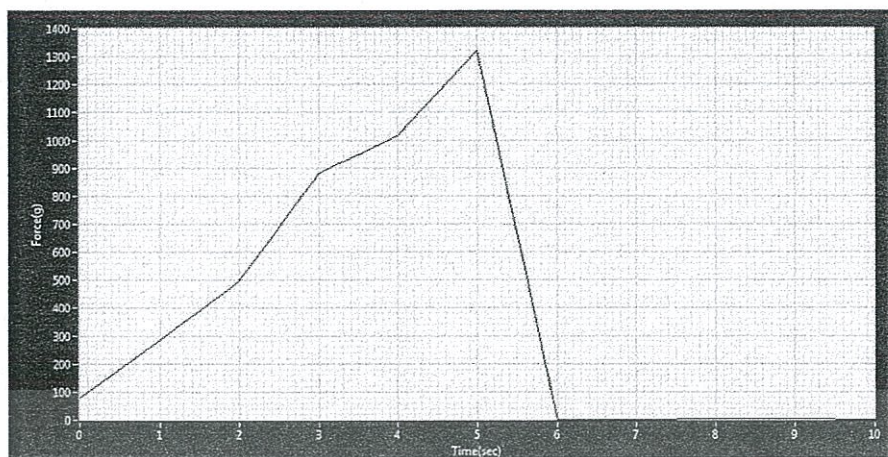
4.4 การทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงดึง(Tensile test)

งานวิจัยนี้ได้ทำแบ่งการทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงดึงเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบกับแผงวงจรแบบยืดหยุ่น(Flexible printed circuit) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐานและการทดสอบเพิ่มเติมจากผลิตภัณฑ์ที่เป็นของบรรจุยา

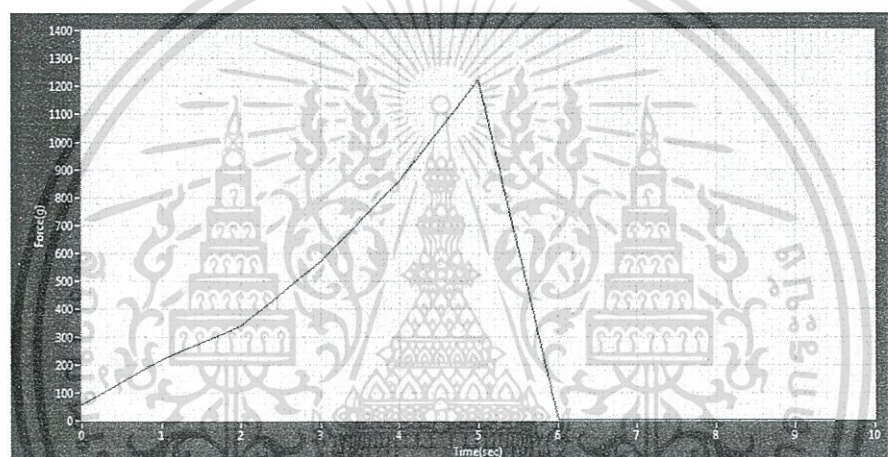
4.4.1 การทดสอบเนื้อสัมผัสของแผงวงจรแบบยืดหยุ่น(Flexible printed circuit)

การทดสอบเนื้อสัมผัสของแผงวงจรแบบยืดหยุ่น เป็นการทดสอบโดยใช้แรงดึงแยกแผงวงจรแบบยืดหยุ่นออกจากสแตนเลสที่ยึดติด ผลการทดสอบที่ได้ตามรูปที่ 4.22 ถึง 4.26 และค่าแรงสูงสุด(Max force) ที่ได้จากการอ่านกราฟตามตารางที่ 4.7

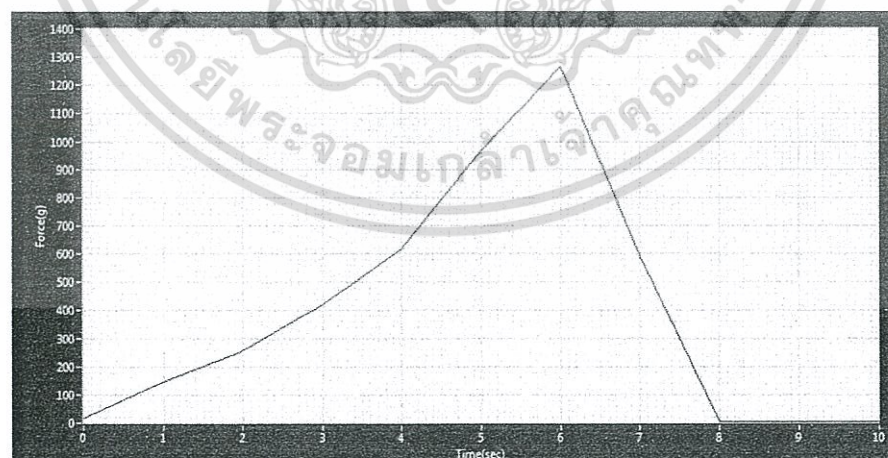
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบของตัวอย่างแผงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 1

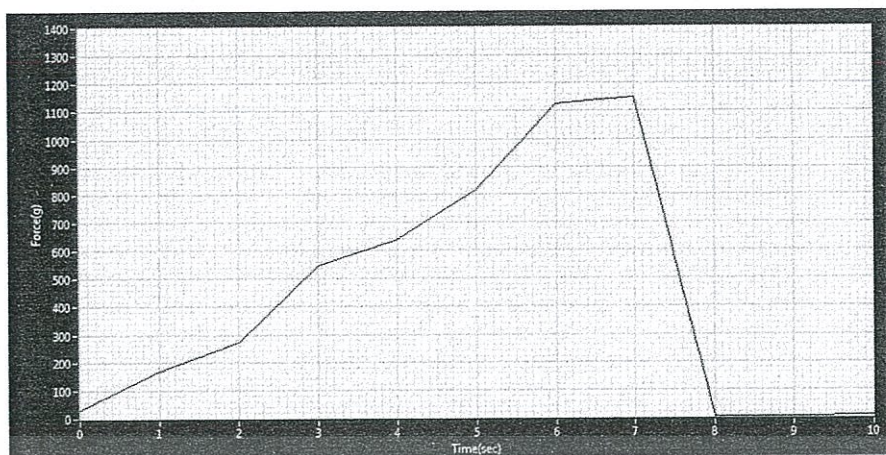


รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบของตัวอย่างแผงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 2

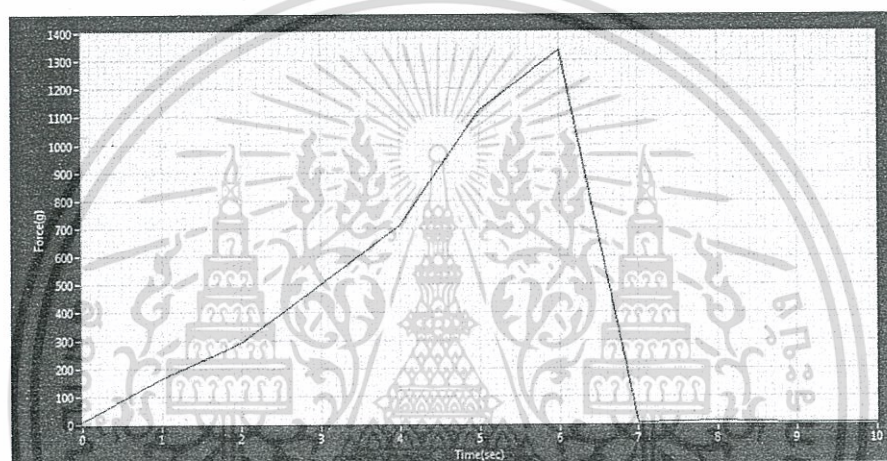


รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบของตัวอย่างแผงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบของตัวอย่างแผงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 4



รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบของตัวอย่างแผงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 5

ตารางที่ 4.7 ค่าแรงสูงสุดจากตัวอย่างแผงวงจรแบบยืดหยุ่น 5 ชั้น (ชั้นที่ 1-5)

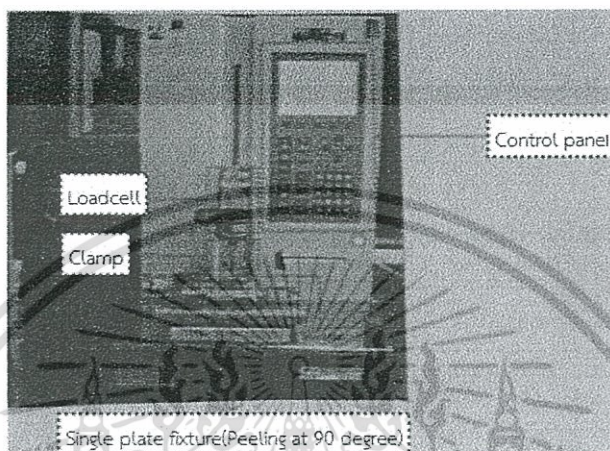
ตัวอย่างลำดับที่	แรงสูงสุด (g)
1	1320
2	1220
3	1260
4	1160
5	1340

จากการใช้เครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงดึง(Tensile test) พบว่าเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นสามารถทดสอบเนื้อสัมผัสได้จริง ซึ่งค่าแรงสูงสุด (Max force) มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกราฟที่มีลักษณะที่แตกต่างกันเล็กน้อย เกิดจากการยึดติดของวัสดุแต่ละพื้นที่ไม่เท่ากันหรือไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกับเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐานในขั้นตอนถัดไป

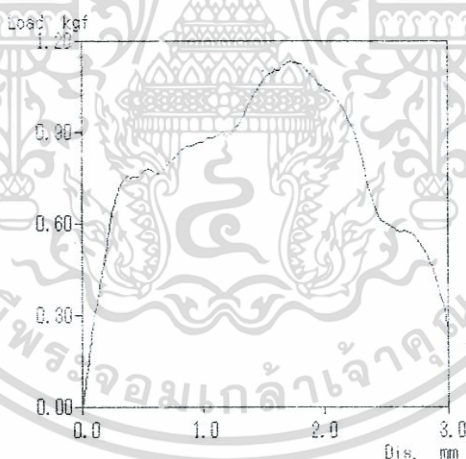
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การเปรียบเทียบกับเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐาน

เครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสจากแรงดึงที่นำมาใช้เปรียบเทียบคือ Damper testing machine ดังแสดงตามรูปที่ 4.27 ซึ่งนำตัวอย่างแผ่นวงจรรแบบยึดหยุ่น 5 ชิ้น(ชั้นที่ 6-10)ไปทำการทดสอบ ผลการทดสอบที่ได้ตามรูปที่ 4.28 ถึง 4.32 และค่าแรงสูงสุด (Max force) ที่ได้จากการอ่านกราฟตามตารางที่ 4.8

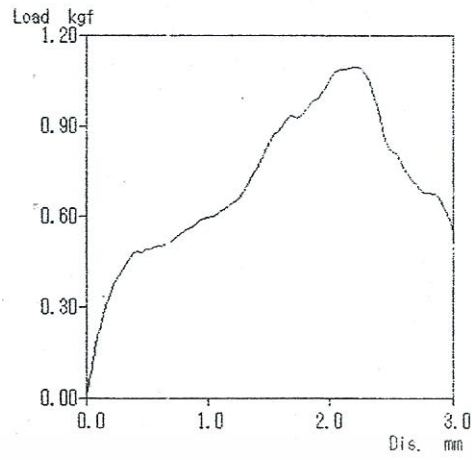


รูปที่ 4.27 เครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัส(Damper testing machine)

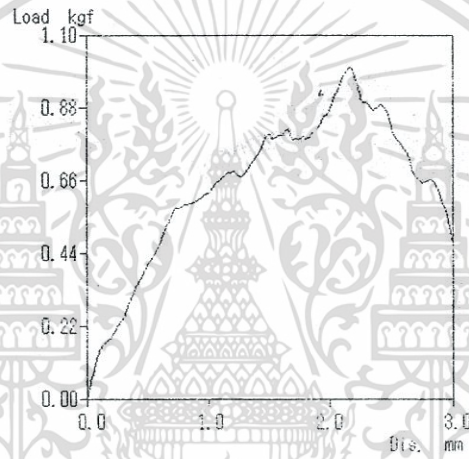


รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบของตัวอย่างแผ่นวงจรรแบบยึดหยุ่นชั้นที่ 6

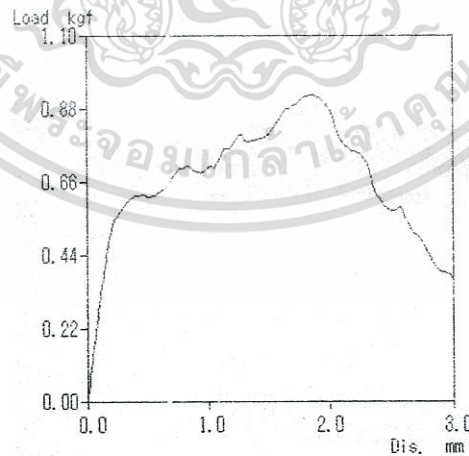
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบของตัวอย่างแผงวงจรแบบยึดหุ่นชั้นที่ 7

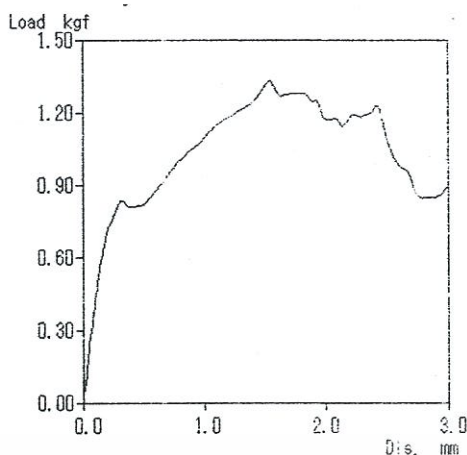


รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบของตัวอย่างแผงวงจรแบบยึดหุ่นชั้นที่ 8



รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบของตัวอย่างแผงวงจรแบบยึดหุ่นชั้นที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบของตัวอย่างแผงวงจรแบบยืดหยุ่นชั้นที่ 10

ตารางที่ 4.8 ค่าแรงสูงสุดจากตัวอย่างแผงวงจรแบบยืดหยุ่น 5 ชั้น (ชั้นที่ 6-10)

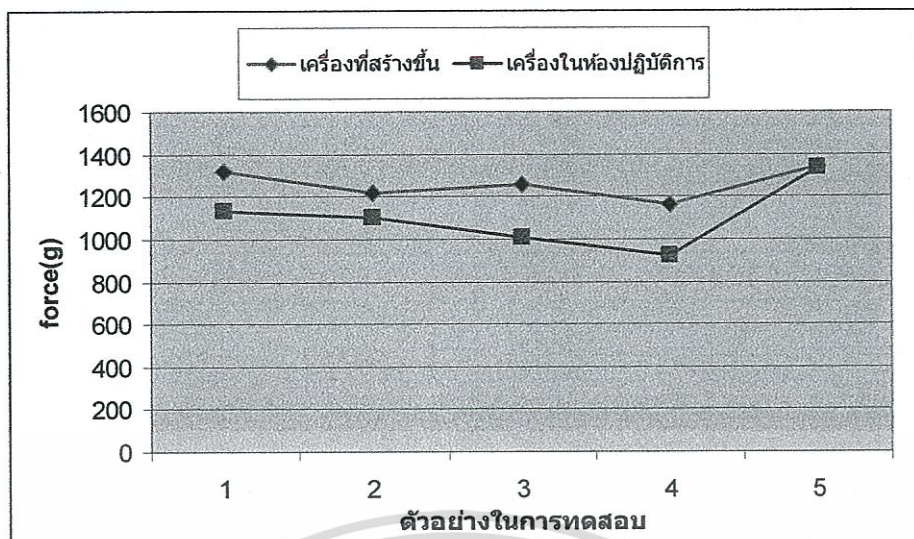
ตัวอย่างลำดับที่	แรงสูงสุด (g)
6	1133
7	1097
8	1004
9	922
10	1332

ตารางที่ 4.9 ผลการหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation)

ลำดับตัวอย่าง	ค่าแรงสูงสุดจากเครื่องที่สร้างขึ้น (g)	ลำดับตัวอย่าง	ค่าแรงสูงสุดจากอุปกรณ์มาตรฐาน (g)
1	1320	6	1133
2	1220	7	1097
3	1260	8	1004
4	1160	9	922
5	1340	10	1332
ค่าสหสัมพันธ์			0.846

เมื่อนำค่าแรงสูงสุดระหว่างเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น กับเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐาน มาหาค่าสหสัมพันธ์เพื่อทำการเปรียบเทียบ จะได้ค่าสหสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.9 เป็น 0.846 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

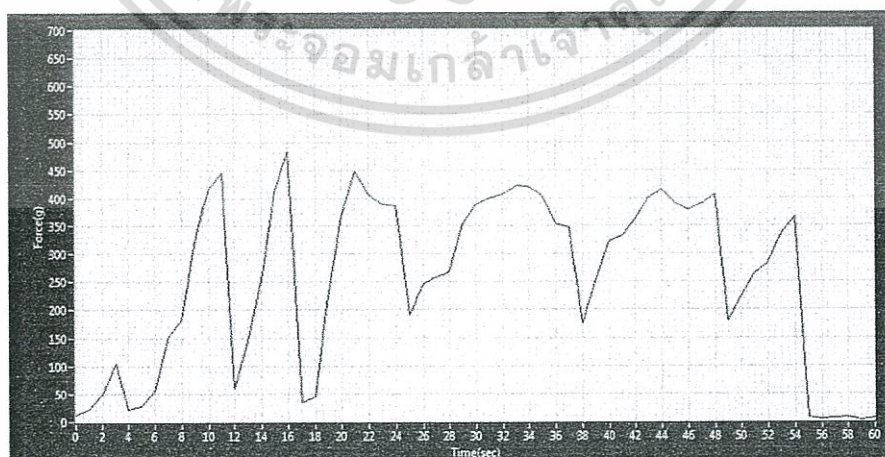


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องที่สร้างขึ้นกับเครื่องในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 4.33 เป็นการนำผลการทดสอบแฉวงจรที่ยึดหยุ่นที่ได้จากเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น และเครื่องในห้องปฏิบัติการ อย่างละ 5 ตัวอย่าง มาเปรียบเทียบกัน เห็นได้ชัดว่าเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น ให้ผลที่ใกล้เคียงกับเครื่องในห้องปฏิบัติการจริง

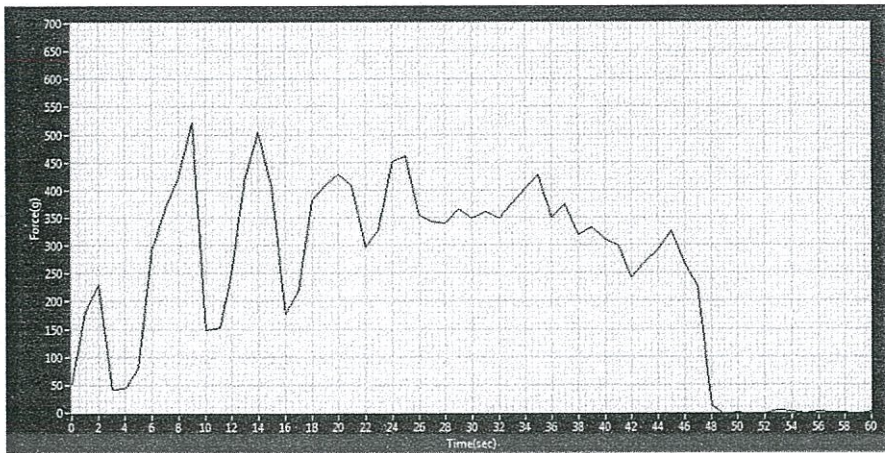
4.4.3 การทดสอบเนื้อสัมผัสของซองบรรจุยา

ซองบรรจุยาได้ถูกนำมาเป็นตัวอย่างเพิ่มเติมในการทดสอบในงานวิจัยนี้ เพื่อวิเคราะห์เนื้อสัมผัสหาค่าแรงสูงสุด (Max force) จากแรงดึงที่จะทำให้ซองบรรจุยาลอกออกจากกัน ซึ่งเป็นการทดสอบความแข็งแรงในการยึดติดของซองบรรจุยา ผลการทดสอบที่ได้ตามรูปที่ 4.34 ถึง 4.38 และค่าแรงสูงสุด (Max force) ที่ได้จากการอ่านกราฟตามตารางที่ 4.10

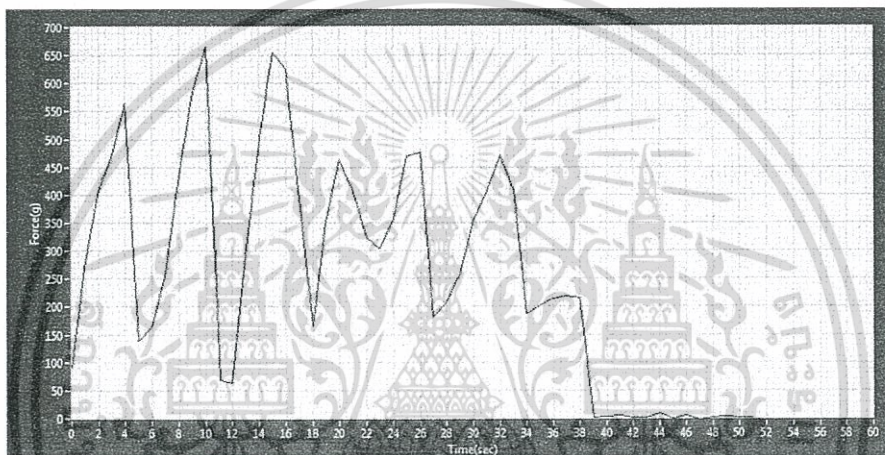


รูปที่ 4.34 ผลการทดสอบของตัวอย่างซองบรรจุยาชิ้นที่ 1

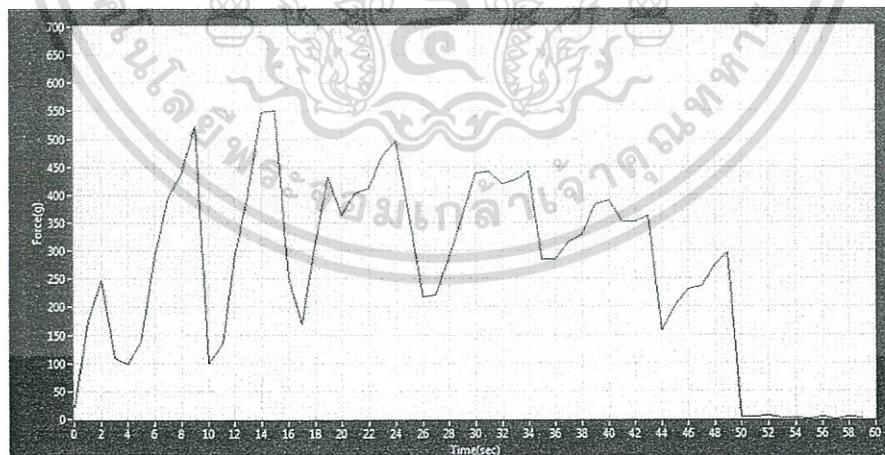
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 ผลการทดสอบของตัวอย่างของบรรจุยาชั้นที่ 2

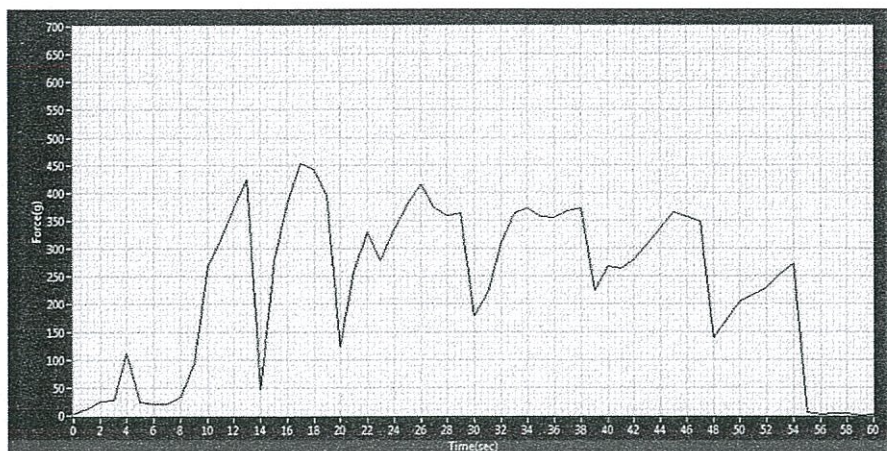


รูปที่ 4.36 ผลการทดสอบของตัวอย่างของบรรจุยาชั้นที่ 3



รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบของตัวอย่างของบรรจุยาชั้นที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบของตัวอย่างของบรรจุยาชั้นที่ 5

ตารางที่ 4.10 ค่าแรงสูงสุดจากตัวอย่างของบรรจุยา 5 ชั้น

ตัวอย่างลำดับที่	แรงสูงสุด (g)
1	480
2	520
3	670
4	550
5	450

จากผลการทดสอบเนื้อสัมผัสของของบรรจุยาพบว่า เครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น สามารถวัดเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของบรรจุยาได้จริง ซึ่งลักษณะกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย เป็นไปตามลักษณะของการยึดติดของของบรรจุยา ทั้งนี้สามารถนำไปสร้างเป็นค่ามาตรฐาน เพื่อระบุถึงคุณภาพในการยึดติดของของบรรจุยาได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนแรกเป็นเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส ซึ่งมีส่วนสำคัญคือโพลดเซลล์ วงจรขยายสัญญาณ เซอร์โวมอเตอร์ วงจรจ่ายแรงดันไฟฟ้า วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า Ball screw เป็นต้น ส่วนที่สองเป็นโปรแกรมควบคุม และส่วนที่สามคือหัววัด โดยเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นใช้หลักการวัดผลตอบสนองจากแรงที่กระทำกับผลิตภัณฑ์ โดยวางผลิตภัณฑ์ที่จะทำการทดสอบลงบนฐาน จากนั้นใช้โปรแกรมในการควบคุมหัววัดให้เคลื่อนที่มายังผลิตภัณฑ์ที่ทำการวัด และตั้งค่าที่โปรแกรมให้ตำแหน่งดังกล่าวเป็นค่าเริ่มต้น ถัดไปจะทำการควบคุมให้หัววัดค่อยๆกดหรือดึงผลิตภัณฑ์ โดยมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะถูกควบคุมจากโปรแกรม โดยส่งคำสั่งไปยังชุดควบคุมของเซอร์โวมอเตอร์ เมื่อหัววัดกดหรือดึงจะเกิดแรงต้านกลับกระทำต่อหัววัด ทำให้ค่าความต้านทานของสเตรนเกจในโพลดเซลล์เปลี่ยนไป จึงทำให้วงจรบริดจ์ไม่สมดุล เกิดเป็นค่าความต่างศักย์ซึ่งแปรผันตรงกับแรงที่ทำให้วัสดุเสียรูป จากนั้นโปรแกรมจะประมวลค่าแรงในหน่วยกรัมน้ำหนัก ส่งค่าเป็นกราฟแสดงผลออกมา และยังสามารถบันทึกค่าเก็บไว้ไปข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

5.1.2 การสอบเทียบเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้นกับตุ้มน้ำหนักมาตรฐานพบว่ามีความเป็นเชิงเส้นตั้งแต่ 0 ถึง 1300 g และนำไปทดสอบค่าความถูกต้องแม่นยำกับอาหาร 8 ชนิด ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าแรงสูงสุดที่ได้จากเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นจะมีค่ามากกว่าเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐาน เช่นเดียวกัน ค่าความถูกต้อง(%Accuracy) มีค่าค่อนข้างต่ำ เป็นตัวบ่งบอกได้เช่นเดียวกันว่าต้องทำการพัฒนาให้เครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

5.1.3 การทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ทางด้านเนื้อสัมผัส โดยใช้แรงกดด้วยวิธีการเจาะทะลุ(Puncture test) ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่เป็นแมงกะพรุน เพื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐาน และการทดสอบกับผลิตภัณฑ์อื่นๆที่เป็นเยลลี่แต่งหน้าเค้กและเนื้อกุ้งขาว พบว่าค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้นและเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสมีค่าต่างกัน และเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้นไม่สามารถใช้ค่าแรงสูงสุดแยกความแตกต่างเนื้อสัมผัสส่วนรุ่มของแมงกะพรุนที่มีปริมาณเกลือต่างกันได้อ เนื่องจากความแปรปรวนภายในตัวของแมงกะพรุน แต่สามารถวัดแรงสูงสุดในการเจาะทะลุผลิตภัณฑ์อื่นๆได้ โดยแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุเยลลี่แต่งหน้าเค้กมีค่า 104 ± 11.4 g และแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุเนื้อกุ้งขาวมีค่า 358 ± 99.8 g จะเห็นได้ว่าเนื้อเยลลี่แต่งหน้าเค้กมีค่าแรงสูงสุดในการเจาะทะลุที่ต่ำกว่า เนื้อกุ้งขาว ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นจริง

5.1.4 การทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ทางด้านเนื้อสัมผัส โดยใช้แรงดึง(Tensile test) กับแผงวงจรแบบยืดหยุ่น(Flexible printed circuit) เพื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐาน และการทดสอบเนื้อสัมผัสกับผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่นซองบรรจุยา พบว่าจากการใช้เครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นทดสอบเนื้อสัมผัสจากแรงดึง(Tensile test) สามารถทดสอบเนื้อสัมผัสได้จริง ซึ่งค่าแรงสูงสุด(Max force) มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อนำค่าแรงสูงสุดระหว่างเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น กับเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่เป็นมาตรฐาน มาหาค่าสหสัมพันธ์เพื่อทำการเปรียบเทียบ จะได้ค่าสหสัมพันธ์ เป็น 0.846 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับสูง และจากผลการทดสอบเนื้อสัมผัสของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของบรรจุกษาพบว่า เครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น สามารถวัดเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของบรรจุกษาได้จริง ซึ่งลักษณะกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย เป็นไปตามลักษณะของการยึดติดของของบรรจุกษา ทั้งนี้สามารถนำไปสร้างเป็นค่ามาตรฐาน เพื่อระบุถึงคุณภาพในการยึดติดของของบรรจุกษาได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสที่สร้างขึ้นมีขนาดเล็ก มีระยะเวลาเคลื่อนที่ของหัววัดค่อนข้างน้อย จึงมีขีดจำกัดบางประการในเรื่องของผลิตภัณฑ์ที่นำมาทดสอบ ถ้าต้องการนำผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่มีความหลากหลายมาทดสอบ ควรเพิ่มระยะเวลาเคลื่อนที่ของหัววัด จากการเพิ่มระยะเวลาเคลื่อนที่ของ Ball screw

เช่นเดียวกันกับหัวจับผลิตภัณฑ์ ควรจะมีหลายแบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ



บรรณานุกรม

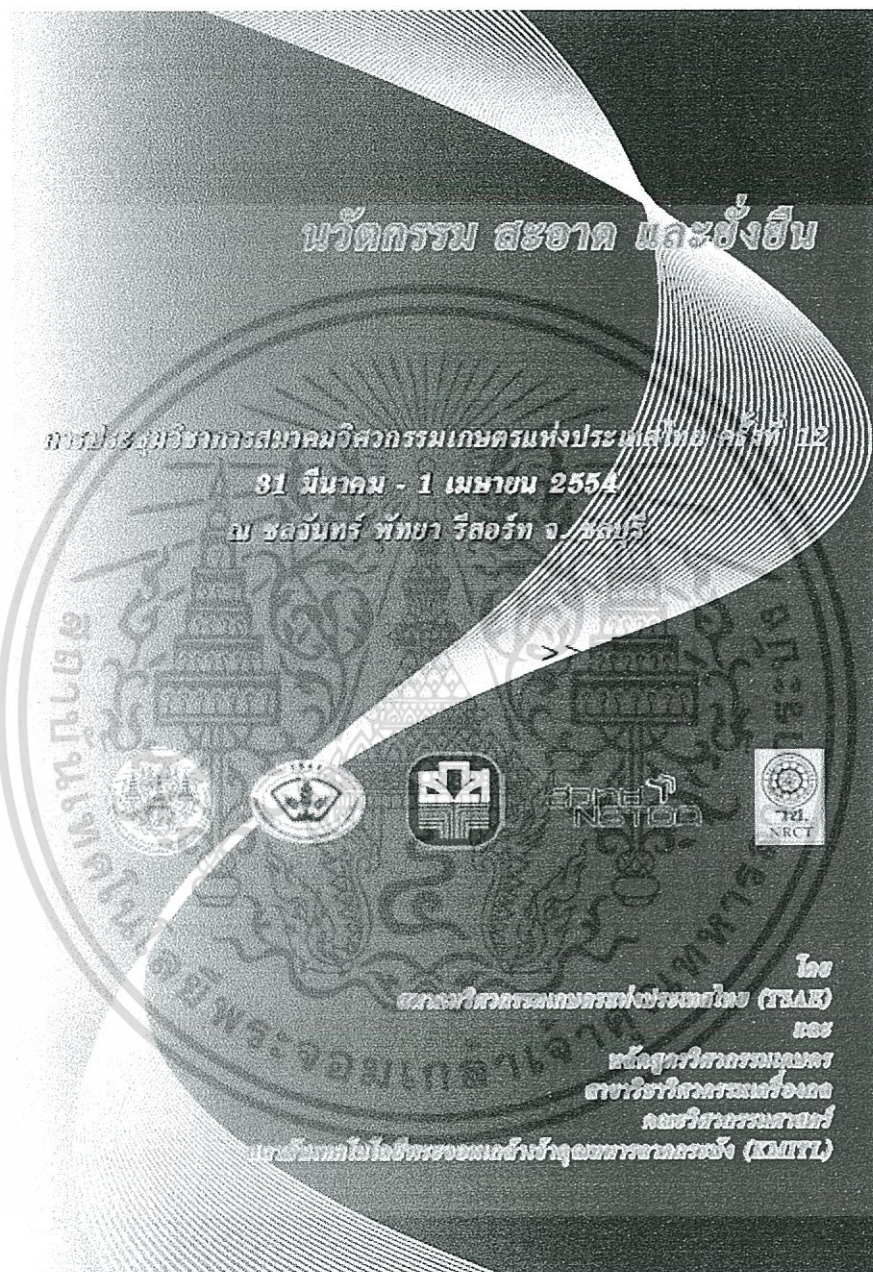
- นงลักษณ์ จันทวโร.2552.การศึกษาและพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสและความเค็มของ
แมงกะพรุนดองเค็ม [ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต].กรุงเทพฯ : สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วรัญพร ถินถา,เสกสรรค์ จิระศรีรังสรรค์.2552.การศึกษาและพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสและ
ความเค็มของแมงกะพรุนแห้งที่เหมาะสมในการบริโภค [ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร
บัณฑิต].กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปานมนัส ศิริสมบุญ.2555.เทคโนโลยีเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์และอาหาร พิมพ์ครั้งที่ 2.
กรุงเทพฯ : มิน เซอร์วิส ซัพพลาย.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสและความเค็มของแมงกะพรุนดองเค็ม

Development of an Instrument for Testing a Texture and Saltiness of Salted Jellyfish

นวภัทรา หนูนาค¹ ณรงค์เดช เพ็ชรโต² ทวีพล ซื่อสัตย์²
Navaphattra Nunak¹, Narongdech Phetto, Taweepol Suesut²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสและความเค็มของแมงกะพรุนดองเค็ม โดยเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสใช้หลักการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าของสเตรนเกจและการวัดความเค็มใช้หลักการวัดค่าความนำไฟฟ้า จากการทดสอบเบื้องต้นเพื่อวัดเนื้อสัมผัสส่วนขาและส่วนร่มของแมงกะพรุนที่มีปริมาณเกลือต่างกันด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA.XT plus) เปรียบเทียบระหว่างวิธีทดสอบแบบเจาะด้วยหัววัด P/2 และวิธีทดสอบแบบตัดด้วยหัววัด craft knife blade พบว่า วิธีทดสอบแบบเจาะโดยใช้ค่าพารามิเตอร์คือ stiffness และ max force สามารถแยกความแตกต่างเนื้อสัมผัสของแมงกะพรุนที่มีปริมาณเกลือต่างกันได้ดี และเมื่อทดสอบด้วยอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นพบว่า ค่า Stiffness สามารถแยกเนื้อสัมผัสแมงกะพรุนได้เช่นกันโดยแบ่งได้ 2 กลุ่มคือแมงกะพรุนที่มีความเค็มมากกับความเค็มน้อย ส่วนการทดสอบความเค็มของแมงกะพรุนโดยการวัดค่าความนำทางไฟฟ้าสามารถแยกได้ 2 กลุ่มคือกลุ่มที่มีปริมาณเกลือที่สูงกว่าและต่ำกว่า 0.8 g/100gNaCl

คำสำคัญ: แมงกะพรุนดองเค็ม, เนื้อสัมผัส, ความเค็ม

ABSTRACT

The objective of this project was to study and development of an instrument for testing texture and saltiness of salted jellyfish. The concept of force measuring by using strain gauge and electrical conductivity was brought to design the equipment for testing the texture and saltiness of salted jellyfish Texture of salted jellyfish (both medusa and tentacle) at various salinity levels was investigated by texture analyzer (TA.XT plus) by penetration with cylindrical probe (P/2) and cutting shear with craft knife blade testing. It was found that stiffness and max force obtained from penetration test can be used to distinguish the texture difference along the salinity level. The constructed equipment could be classified salted jellyfish into two main groups namely high salinity level (higher than 0.8 g/100gNaCl) and low salinity level (lower than 0.8 g/100gNaCl).

Keyword: Salted Jellyfish, Texture, Saltiness

บทนำ

แมงกะพรุนแห่งสามารถนำมาบริโภคเป็นอาหารได้ โดยกระบวนการแปรรูปเริ่มจากนำแมงกะพรุนแยกส่วนขาและร่มออกจากกัน ล้างน้ำและหมักในน้ำเกลือและสารส้ม 2-3 วัน จากนั้นล้างน้ำและหมักน้ำเกลือต่ออีก 6-7 วัน กดทับด้วยของหนักและผึ่งไว้ในที่ร่ม แมงกะพรุนที่แปรรูปแล้วเมื่อนำไปแช่น้ำมีลักษณะกรอบเหนียวนุ่มคล้ายเห็ดหูหนูขาว มีแคลอรีและคอเลสเตอรอลต่ำ จึงเป็นอาหารธรรมชาติที่น่าสนใจสำหรับนักบริโภคทั้งในแลต่างประเทศ (พิสิฐ วงศ์สง่าศรี, 2551)

ปัจจุบันขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพแมงกะพรุนแห่งหลังกระบวนการล้าง ผู้ประกอบการผู้แปรรูปแมงกะพรุนเพื่อตรวจสอบความเค็ม ความกรอบและความเหนียวโดยใช้ปากกัดไปยังตัวแมงกะพรุนโดยตรงจัดเป็นวิธีการที่ไม่ถูกสุขลักษณะและไม่ได้มาตรฐาน คุณภาพที่ได้เป็นเพียงการทดสอบโดยอาศัยประสบการณ์เฉพาะบุคคลเท่านั้น ขาดคุณภาพที่แน่นอน จัดเป็นปัญหาสำคัญและควรได้รับการแก้ไข แม้ว่าปัจจุบันเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสและวัดความเค็มมีใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เครื่องมือดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูงและต้องการความรู้ความเข้าใจค่อนข้างมากสำหรับการวิเคราะห์ผลที่ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส นอกจากนี้เครื่องมือดังกล่าวยังเหมาะสำหรับการใช้งานเฉพาะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น

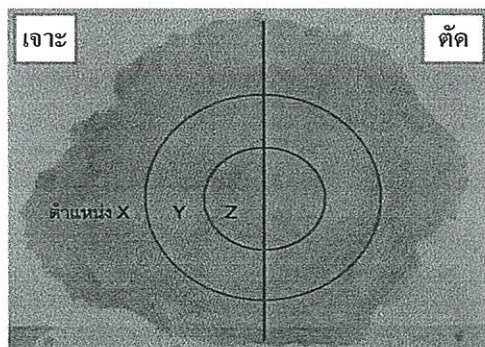
การทดสอบเนื้อสัมผัสอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของสเตรนเกจซึ่งติดตั้งไว้กับวงจรมอเตอร์ เมื่อหัววัดกดลงบนอาหาร อาหารจะเกิดแรงต้านกลับทำให้ค่าความต้านทานของสเตรนเกจเปลี่ยนไปทำให้บริดจ์ไม่สมดุล เกิดเป็นค่าความต่างศักย์ซึ่งแปรผันตรงกับแรงที่ทำให้อาหารเสียรูป (เพ็ญศิริ ทองผดุงโรจน์, 2547) ส่วนการวัดความเค็มอาศัยหลักการวัดค่าความนำทางไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วในสารละลาย เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากก็จะนำไฟฟ้าได้ดีซึ่งแปรผันตรงกับความเค็ม (ศทวภู เกียรติกำจร, 2546)

ดังนั้นโครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสและความเค็มของแมงกะพรุนแห่งหลังกระบวนการล้าง

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองเบื้องต้นเพื่อการออกแบบเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส

เตรียมส่วนขาและส่วนร่มของแมงกะพรุนแห่ง ล้างน้ำลดระดับปริมาณเกลือให้มีหลายระดับ โดยในส่วนขาของแมงกะพรุนมี 3 ระดับ และส่วนร่มมี 8 ระดับ โดยส่วนร่มของแมงกะพรุนซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นกลมบาง กำหนดให้มีตำแหน่งในการทดสอบ 3 ตำแหน่ง รอบนอกสุดเป็นตำแหน่ง X ถัดมาเป็นตำแหน่ง Y และด้านในสุดเป็นตำแหน่ง Z ดังแสดงในรูปที่ 1 ทดสอบเนื้อสัมผัสโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Stable Micro System รุ่น TA.XT plus) กำหนดค่าการทดสอบดังนี้ Pre-test speed 1 mm/s, Test speed 1 mm/s, Post-test speed 1 mm/s, Trigger force 5g. โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 วิธี คือ การทดสอบแบบเจาะด้วยหัววัดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm.(P/2) และการทดสอบแบบตัดด้วยหัววัด Craft Knife Blade ทำการทดลองตัวอย่างละ 10 ซ้ำ พิจารณาพารามิเตอร์ดังนี้ Force (N) และ Distance (mm) ที่จุด Yield point Toughness (N.mm) Stiffness (N/mm) และ Max Force (N)



รูปที่ 1 การแบ่งตำแหน่งเพื่อทดสอบเนื้อสัมผัส

การทดลองเบื้องต้นเพื่อการออกแบบเครื่องทดสอบความเค็ม

เตรียมแมงกะพรุนปั่นให้ละเอียด คั้นน้ำออกโดยใช้ผ้าขาวบาง วัดปริมาณเกลือโดยใช้ Salt Refractometer (ATAGO รุ่น S-28E) อ่านค่าปริมาณเกลือในหน่วย g/100gNaCl ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

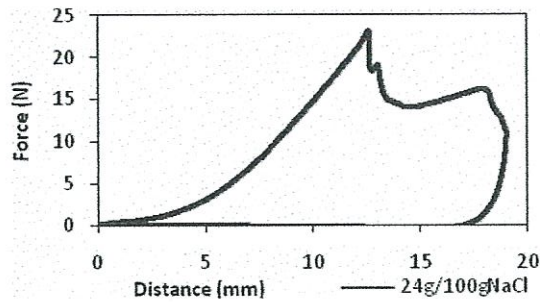
การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสและความเค็มของแมงกะพรุนด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างด้วย Duncan's Multiple rang Test ($P \leq 0.05$)

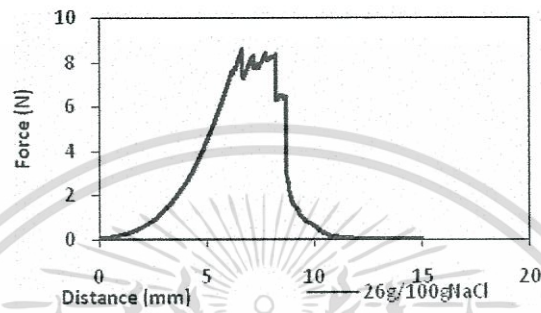
การเลือกพารามิเตอร์และวิธีทดสอบเนื้อสัมผัสส่วนของแมงกะพรุน

พิจารณารูปที่ 2 (ก และ ข) แรงในช่วงแรกเป็นแรงที่ใช้กดเพื่อให้หัววัดเจาะทะลุหรือตัดผ่านเนื้อแมงกะพรุน โดยระยะการกดมากขึ้นแรงต้านของแมงกะพรุนที่เกิดจากการกดมีค่ามากขึ้นด้วย จนถึงจุดยอดแรกของกราฟซึ่งบอกว่าหัววัดเจาะทะลุผ่านเนื้อแมงกะพรุน เรียกจุดนี้ว่า "Yield point" หรือ Max Force ลักษณะกราฟจากจุดเริ่มต้นถึงจุดนี้บอกลักษณะเนื้อสัมผัสแมงกะพรุนที่มีความแข็งเหนียวซึ่งดูได้จากความลาดชันที่เพิ่มขึ้น จากการทดสอบแบบเจาะด้วยหัววัด P/2 พบว่าค่า Max Force และค่า Stiffness สามารถแยกความแตกต่างเนื้อสัมผัสของแมงกะพรุนที่มีปริมาณเกลือต่าง ๆ ทั้งส่วนขาและส่วนร่วมที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยไม่ต้องคำนึงตำแหน่งที่ทดสอบ ส่วนการทดสอบแบบด้วยหัววัด Craft knife blade มีค่า Toughness แยกเนื้อสัมผัสได้ อย่างไรก็ตามไม่สามารถทดสอบเนื้อสัมผัสส่วนร่วมของแมงกะพรุนด้วยวิธีทดสอบแบบตัดได้ เนื่องจากส่วนร่วมของแมงกะพรุนมีลักษณะบางกว่าส่วนขา ซึ่งในการทดสอบแบบตัดมีข้อจำกัดเรื่องความหนา โดยถ้าชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบบางเกินไป หัววัดไม่สามารถประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสได้ ดังนั้น ในการออกแบบอุปกรณ์ที่ทดสอบเนื้อสัมผัสของแมงกะพรุนจึงควรใช้วิธีการทดสอบแบบเจาะด้วยหัววัด P/2 มาเป็นต้นแบบในการนำไปออกแบบหัววัด โดยใช้ค่า Stiffness และ Max Force เป็นพารามิเตอร์ประเมินเนื้อสัมผัสของแมงกะพรุนแห่งหลังล่าง

ค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้มีค่ามากสุดในกลุ่มแมงกะพรุนที่มีปริมาณเกลือสูงสุดและมีค่าลดลงตามระดับปริมาณเกลือที่ลดลง (รูปที่ 3 และ 4) เนื่องจากการล้างน้ำทำให้ชั้นเนื้อของแมงกะพรุนดูดซับน้ำเข้าไป ซึ่งเนื้อที่เคยซ้อน ทับกันอยู่จึงขยายตัวออกจากกัน งานที่ใช้เจาะหรือตัดผ่านเนื้อจึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

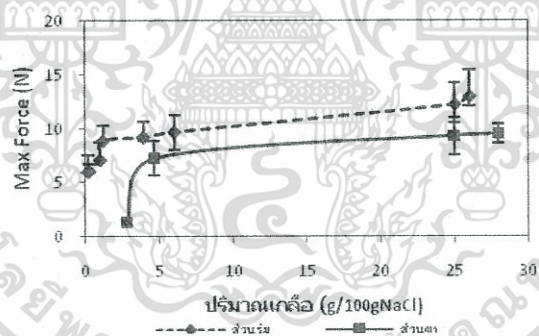


(ก)

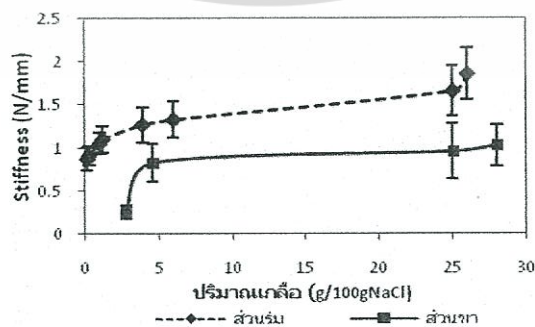


(ข)

รูปที่ 2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางจาก (ก) วิธีทดสอบเนื้อสัมผัสแมงกะพรุนแบบเจาะด้วยหัววัด P/2 และ (ข) วิธีทดสอบแบบตัดด้วยหัววัด Craft knife blade



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Max Force กับปริมาณเกลือจากการทดสอบแบบเจาะด้วยหัววัด P/2

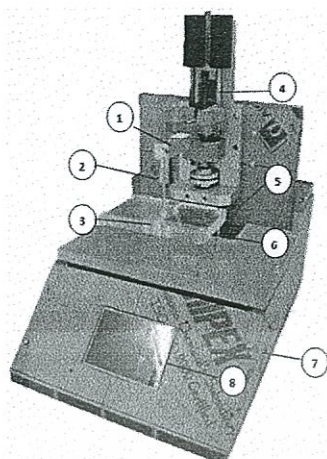


รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stiffness กับปริมาณเกลือจากการทดสอบแบบเจาะด้วยหัววัด P/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสและความเค็มของแมงกะพรุน

เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสและความเค็มแสดงดังรูปที่ 5



1. โหลดเซลล์
2. หัวทดสอบ เนื้อสัมผัส
3. อิเล็กโทรด
4. สไลด์เดอร์
5. สเตปมอเตอร์
6. ฐานรองเจาะ
7. ตัวฐาน
8. จอแสดงผล

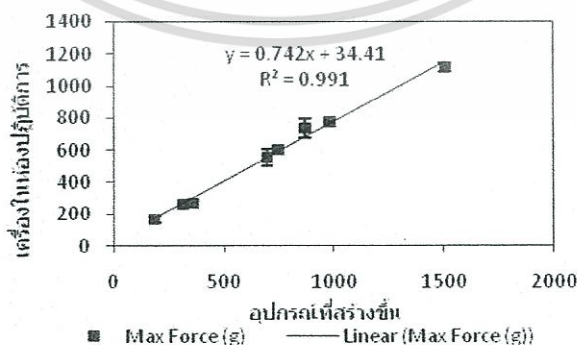
รูปที่ 5 เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสและความเค็ม

หลักการทำงาน

อุปกรณ์นี้ทดสอบเนื้อสัมผัสโดยหัววัดเคลื่อนที่ลงมากดอาหาร โดยใช้สเตปมอเตอร์เป็นตัวบังคับ เมื่อหัววัดกดอาหารจะเกิดแรงต้านกลับกระทำต่อหัววัดทำให้โหลดเซลล์ได้รับแรงต้านแปลค่าเป็นแรงที่ใช้กด จากนั้นโปรแกรม Visual Basic ทำการประมวลค่าแรงในหน่วยกรัมน้ำหนัก ส่งค่าเป็น M-file เก็บใน Mat lab ยังคอมพิวเตอร์ ส่วนการทดสอบความเค็มเริ่มจากการวางตัวอย่างให้แนบสนิทกับแผ่นอิเล็กโทรดซึ่งใช้วัดความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นการวัดค่าความนำไฟฟ้าโดยสัมผัสกับเนื้อแมงกะพรุนโดยตรงเมื่อตัวอย่างมีความเค็มมากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าน้อย โดยความต่างศักย์ที่วัดได้แปร ผกผันกับความเค็ม

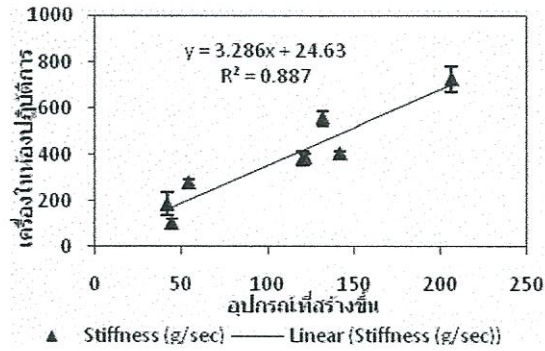
การทดสอบค่าความถูกต้องแม่นยำ

การทดสอบค่าความถูกต้องแม่นยำโดยทดสอบกับอาหารชนิดอื่นที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสแตกต่างกันเช่น มะละกอ แอปเปิล มันฝรั่ง หัวไชเท้า แครอท เป็นต้น พบว่าค่า Max Force ที่ได้จากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเครื่องในห้องปฏิบัติการ ส่วนค่า Stiffness ที่ได้มีค่าต่างกัน ค่าที่อ่านได้มีค่าแตกต่างกันเนื่องจากขนาดและความเร็วของการเคลื่อนที่ของหัววัดที่ต่างกัน ดังรูปที่ 6-7 และตารางที่ 1



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Max Force ที่ได้จากเครื่องในห้องปฏิบัติการกับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นของการทดสอบค่าความถูกต้องแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



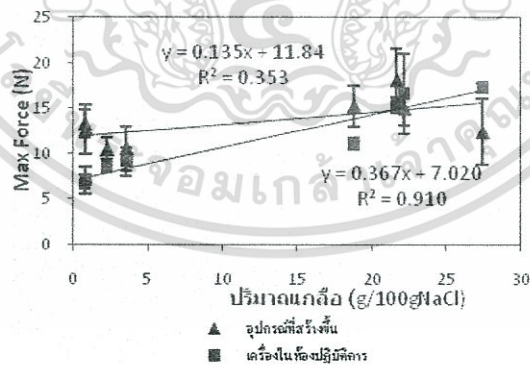
รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stiffness ที่ได้จากเครื่องในห้องปฏิบัติการกับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นของการทดสอบค่าความถูกต้องแม่นยำ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าความถูกต้องแม่นยำ

Parameter	%Accuracy	%Precision	%Repeatability
Max Force (g)	75.63	94.82	80.72
Stiffness (g/sec)	29.43	90.93	79.87

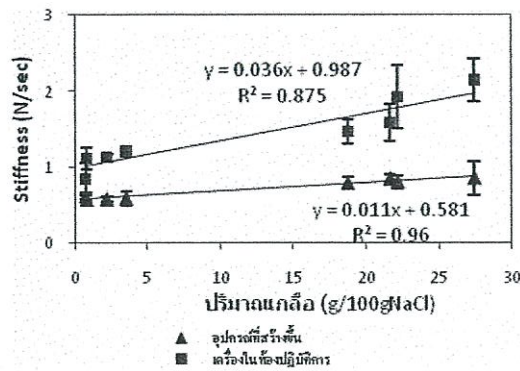
การทดสอบทดสอบเนื้อสัมผัสแมงกะพรุน

จากการทดสอบพบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นไม่สามารถใช้ค่า Max Force แยกความแตกต่างเนื้อสัมผัสส่วนร่วมของแมงกะพรุนที่มีระดับปริมาณเกลือต่างกันได้ในขณะที่ค่า Stiffness แยกได้เป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีปริมาณเกลือช่วง 18.73-27.40 g/100gNaCl และกลุ่มที่มีปริมาณเกลือช่วง 0.73-3.53 g/100gNaCl โดยมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ดังรูปที่ 8-9



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Max Force กับปริมาณเกลือของแมงกะพรุน

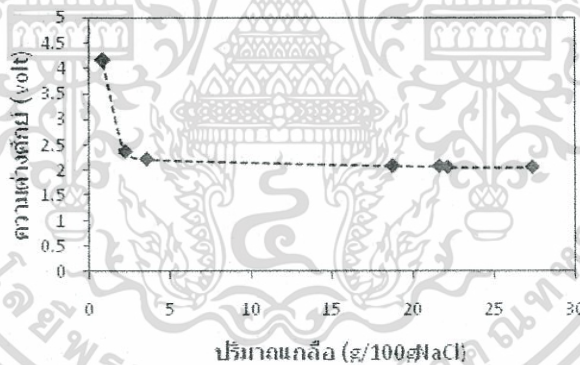
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Stiffness กับปริมาณเกลือของแมงกะพรุน

การทดสอบความเค็ม

จากการทดสอบพบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสามารถแยกระดับปริมาณเกลือได้ 2 ค่า คือค่าปริมาณเกลือที่มากกว่า 0.8g/100gNaCl กับค่าปริมาณเกลือที่ต่ำกว่า 0.8g/100gNaCl ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้คือ อุปกรณ์สามารถบอกได้ว่าแมงกะพรุนต้องเค็มหลังกระบวนการล้างมีความเค็มมากหรือความเค็มน้อย ดังรูปที่ 10 ซึ่งที่ระดับช่วงปริมาณเกลือที่ต่ำกว่า 0.8g/100gNaCl สอดคล้องกับคุณสมบัติที่ผู้ประกอบการธุรกิจผลิตแมงกะพรุนต้องเค็มต้องการเนื่องจากแมงกะพรุนต้องเค็มต้องมีปริมาณเกลืออยู่ในระดับหนึ่งเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาและรสชาติหลังผ่านกระบวนการล้าง



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับปริมาณเกลือที่ทดสอบได้จากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสและความเค็มที่สร้างขึ้นใช้วิธีทดสอบแบบเจาะด้วยหัววัด P/2 โดยใช้ค่า Stiffness เป็นพารามิเตอร์แยกความแตกต่างเนื้อสัมผัสของแมงกะพรุนที่มีปริมาณเกลือต่างกันได้เป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีปริมาณเกลือช่วง 18.73-27.40 g/100gNaCl และกลุ่มที่มีปริมาณเกลือช่วง 0.73-3.53 g/100gNaCl และให้ค่าความเค็มของแมงกะพรุนว่าเค็มน้อยผ่าน และเค็มมากไม่ผ่าน

เอกสารอ้างอิง

คหาวุธ เกียรติกำจร, รัชวิทย์ ลีเพ็ญ. ศึกษาการวัดความนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือ [ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยขอนแก่น: 2546.

พิสิฐ วงศ์สง่าศรี, พูลทรัพย์ วิรุฬห์กุล, เบญจวรรณ ธรรมธนาภิรักษ์. การศึกษากระบวนการผลิตแมงกะพรุนของ เค็มเชิงพาณิชย์. การประชุมวิชาการประมง ประจำปี 2551. [online]. Available from : URL : <http://elib.fisheries.go.th/LIBCAB/DRAWERS/ARTICLE/DATA0007/00007823.PDF>

เพ็ญศิริ ทองผดุงโรจน์, 2547. "Load Cell", Industrial Technology Review, 10(124), 105-109.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายณรงค์เดช เพ็ชรโต
วัน เดือน ปีเกิด	20 สิงหาคม 2523 ที่จังหวัดชัยนาท
ที่อยู่	390 หมู่ 4 หมู่บ้านโรจนะการ์เด็นโฮม ซอย 19 แยก 1 ตำบลคานหาม อำเภอกอซ้อ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13210
ประวัติการศึกษา	2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2546-2549	ตำแหน่งวิศวกรฝ่ายทดสอบ บริษัทโรห์มอินทริเกรชั่น เซมิคอนดักเตอร์(ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ.2549-2556	ตำแหน่งวิศวกรฝ่ายทดสอบ บริษัทเม็คเท็ค แมนูแฟ็คเจอร์ริง คอร์ปอเรชั่น(ประเทศไทย) จำกัด
ปัจจุบัน	วิศวกรอาวุโส บริษัทเม็คเท็ค แมนูแฟ็คเจอร์ริง คอร์ปอเรชั่น(ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้