

การดูตลับน้ำของแผ่นหนัง และความสัมพันธ์ระหว่าง
ความชื้นในหนังกับคุณสมบัติการพอง



นาย ณิชพล เจียรสำราญ

ศูนย์วิทยพัทยาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

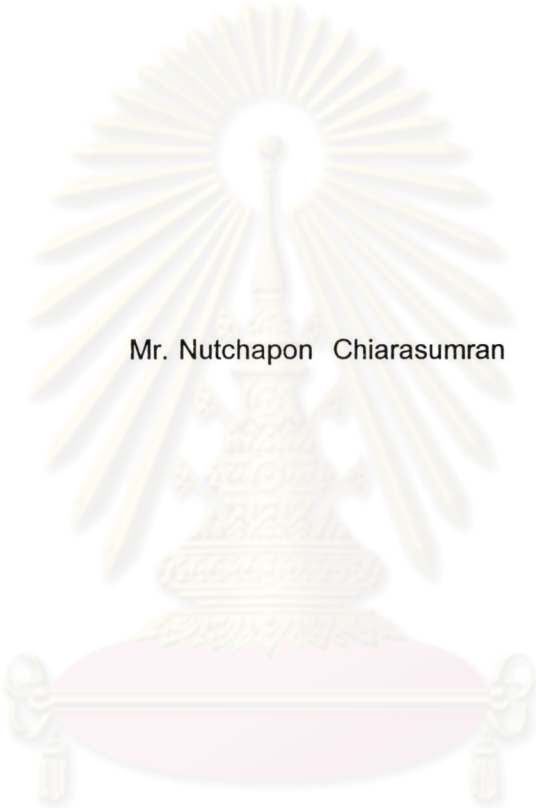
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-1755-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WATER ADSORPTION AND RELATIONSHIP BETWEEN MOISTURE CONTENT
AND BENDING CHARACTERISTICS OF RAW HIDE



Mr. Nutchapon Chiarasumran

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-14-1755-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับน้ำของแผ่นหนัง และความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในหนัง
กับคุณสมบัติการพองอ

โดย

นาย ณัชพล เจียรสำราญ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

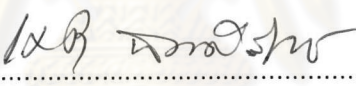
อาจารย์ที่ปรึกษา

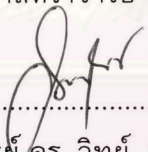
อาจารย์ ดร.วิทย์ สุนทรนันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการสอบ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา จันทรศิริเวช)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล)

ณัชพล เจียรสำราญ : การดูดซับน้ำของแผ่นหนัง และความสัมพันธ์ระหว่าง
ความชื้นในหนังกับคุณสมบัติการพองอ (WATER ADSORPTION AND
RELATIONSHIP BETWEEN MOISTURE CONTENT AND BENDING
CHARACTERISTICS OF RAW HIDE)

อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร. วิทย์ สุนทรนันท์, 116 หน้า. ISBN : 974-14-1755-1

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการดูดซับน้ำเข้าสู่หนัง และผลของความชื้นที่มีต่อค่าความแข็งของหนัง ซึ่งใช้สำหรับการบ่งชี้คุณสมบัติการพองอ โดยพัฒนาออกมาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าอัตราการดูดซับน้ำเข้าสู่หนังจะแปรผันตามเวลาและอุณหภูมิตามกฎข้อที่สองของฟิกส์ โดยหนังฟอกจะมีอัตราการดูดซับที่มากที่สุด รองลงมาเป็นหนังโคและกระบือตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากโครงสร้างภายในหนังที่แตกต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอันเป็นผลจากการไฮเดรชัน สำหรับค่าความแข็งของหนังจะขึ้นกับปริมาณความชื้นที่มีในหนัง ณ เวลานั้นๆ เป็นผลให้หนังกระบือจะมีค่าความแข็งลดลงช้าที่สุด รองลงมาเป็นหนังโคและหนังฟอกตามลำดับ เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการดูดซับน้ำผนวกเข้ากับผลการทดลองเรื่องความแข็งกับเวลาในการแช่หนัง ของหนังแต่ละชนิดสามารถใช้ประโยชน์ในการกำหนดระยะเวลาในการแช่หนังที่เหมาะสมได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2548.....

4570303221 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ADSORPTION/MOISTURE/BENDING/HIDE

NUTCHAPON CHIARASUMRAN : WATER ADSORPTION AND
RELATIONSHIP BETWEEN MOISTURE CONTENT AND BENDING
CHARACTERISTICS OF RAW HIDE. THESIS ADVISOR : WIT
SOONTARANUN, Ph.D., 116 pp. ISBN : 974-14-1755-1

Water adsorption and effect of moisture content on hardness of raw hide which was used for indicating bending characteristic in this research were studied. It was found that the rate of water adsorption into raw hide was dependent on temperature and time in accordance with Fick's second law. Mathematical model could thus be developed for each type of raw hide. Bleached hide exhibited the highest water adsorption rate while cow hide and buffalo hide absorbed water with lower rate consecutively. This was due to the difference in the nature structure of hide and the change of hide's structure when subjected to hydration. The hardness was found to be dependent on the moisture content in hide. As a result, the hardness of bleached hide decreased at the fastest rate while those of cow hide and buffalo hide decreased slower. By combining water adsorption rate model with strength test data, a suitable time for soaking hide in actual process could be predicted.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical Engineering.....Student's signature.....
Field of study...Chemical Engineering.....Advisor's signature.....
Academic year.....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วิทย์ สุนทรนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางการทำวิจัยและข้อคิดเห็นในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนช่วยแก้ไขและปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คุณ วิกิจ ดำรงค์ศักดิ์กุล และบริษัทเว็ลด์เพ็ท อิเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ที่กรุณาเอื้อเฟื้อวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง รวมไปถึงข้อมูลที่เป็นประโยชน์จากทางโรงงาน จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิจิตรา จงวิศาล และ รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริพร ดำรงค์ศักดิ์กุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย และศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล

ขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ห้องปฏิบัติการวิจัยวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย ห้องปฏิบัติการวิจัยชีวเคมีที่ให้คำแนะนำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจตลอดมาจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ศูนย์วิทยาศาสตร์พยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ(ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ฅ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	2
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 หนังสือและโครงสร้างของหนังสือ.....	3
2.2 การผลิตอาหารขบเคี้ยวสำหรับสุนัข.....	6
2.2.1 การเก็บรักษาหนังสือ.....	6
2.2.2 การแช่หนังสือ.....	6
2.2.3 การแช่ในต่างและการกำจัดขน.....	6
2.2.4 การแล่และแบ่งแยกชั้น.....	6
2.2.5 การตัดแยกหนังสือ.....	7
2.2.6 การแช่หนังสือ.....	7
2.2.7 การม้วนพับ.....	7
2.2.8 การอบไล่ความชื้น.....	7
2.2.9 การขึ้นรูป.....	7
2.2.10 การอบแห้ง.....	7
2.2.11 การบรรจุถุงและจำหน่าย.....	7
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer).....	8
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	10

	หน้า
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับน้ำของหนัง.....	13
2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์.....	13
2.5.3 งานวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลของหนัง.....	13
3. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	14
3.1 วัตถุประสงค์.....	14
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	14
3.3 วิธีทดลอง.....	15
3.3.1 การทดลองเพื่อหาปริมาณความชื้นในหนัง.....	15
3.3.2 การทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานแรงกดของหนัง.....	16
3.4 วิธีวิเคราะห์.....	16
3.4.1 การวิเคราะห์ความชื้นในหนังโดยวิธีการอบ.....	16
3.4.2 การวัดคุณสมบัติเชิงกลด้วย Durometer Type D.....	17
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	18
4.1 การดูดซับน้ำของหนังชนิดต่างๆ.....	18
4.1.1 หนังโค.....	18
4.1.2 หนังกระบือ.....	21
4.1.3 หนังฟอก.....	23
4.2 สมบัติเชิงกลกับสภาวะการแช่หนัง.....	28
4.2.1 หนังโค.....	28
4.2.2 หนังกระบือ.....	30
4.2.3 หนังฟอก.....	33
4.3 การพัฒนาแบบจำลองการดูดซับน้ำของหนัง.....	37
4.3.1 แบบจำลองปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของหนังโค.....	40
4.3.2 แบบจำลองปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของหนังกระบือ.....	44
4.3.3 แบบจำลองปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของหนังฟอก.....	48
4.4 การพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์สมบัติเชิงกลกับสภาวะการแช่หนัง.....	53
4.4.1 แบบจำลองค่าความแข็งของหนังโค.....	53
4.4.2 แบบจำลองค่าความแข็งหนังกระบือ.....	57
4.4.3 แบบจำลองค่าความแข็งหนังฟอก.....	61
5. การประยุกต์ใช้ผลการศึกษา.....	66

	หน้า
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	68
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	68
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	69
รายการอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก. การหาปริมาณความชื้นในหนังตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 3790-79.....	73
ภาคผนวก ข. วิธีวิเคราะห์ค่าความแข็งของวัสดุตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 2240-81.....	75
ภาคผนวก ค. ตารางผลการทดลองในส่วนของการแช่หนัง.....	78
ภาคผนวก ง. ตารางผลการทดลองในส่วนของการทดสอบค่าความแข็ง.....	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	116



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงค่า M_t และ %water uptake ที่เวลาต่างๆ ของหนังโคที่แช่ที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 K.....	40
4.2 แสดงค่า M_∞ และ W_0 สำหรับหนังโคที่อุณหภูมิต่างๆ.....	41
4.3 แสดงค่า Least Square และ % Different Error ที่แต่ละอุณหภูมิ สำหรับหนังโค.....	43
4.4 แสดงค่า M_t และ %water uptake ที่เวลาต่างๆ ของหนังกระบือที่แช่ที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 K.....	45
4.5 แสดงค่า M_∞ และ W_0 สำหรับหนังกระบือที่อุณหภูมิต่างๆ.....	46
4.6 แสดงค่า Least Square และ % Different Error ที่แต่ละอุณหภูมิ สำหรับหนังกระบือ.....	47
4.7 แสดงค่า M_t และ %water uptake ที่เวลาต่างๆ ของหนังฟอกที่แช่ที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 K.....	49
4.8 แสดงค่า M_∞ และ W_0 สำหรับหนังฟอกที่อุณหภูมิต่างๆ.....	50
4.9 Least Square และ % Different Error ที่แต่ละอุณหภูมิ สำหรับหนังฟอก.....	51
4.10 แสดงค่า Least Square และ % Different Error ที่แต่ละอุณหภูมิ สำหรับหนังโค.....	54
4.11 แสดงค่า%water uptake, F จากการทดลองและจากการคำนวณ เมื่อใช้ค่า $A = 0.46$, $B = 38.56$ ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ในการแช่หนังโค.....	55
4.12 แสดงค่า Least Square และ % Different Error ที่แต่ละอุณหภูมิสำหรับหนังกระบือ.....	58
4.13 แสดงค่า%water uptake, F จากการทดลองและจากการคำนวณ เมื่อใช้ค่า $A = 0.56$, $B = 48.10$ ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ในการแช่หนังกระบือ.....	59
4.14 แสดงค่า Least Square และ % Different Error ที่แต่ละอุณหภูมิสำหรับหนังฟอก.....	62
4.15 แสดงค่า%water uptake, F จากการทดลองและจากการคำนวณ เมื่อใช้ค่า $A = 0.32$, $B = 35.47$ ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ในการแช่หนังฟอก.....	63
5.1 แสดงค่าเวลาที่ใช้แช่หนังที่อุณหภูมิต่างๆ แบ่งตามประเภทของหนังในหน่วยนาที.....	67

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะโครงแสดงลักษณะโครงสร้างของหนัง.....	3
2.2 ภาพถ่ายทางยาวของกลุ่มเส้นใยคอลลาเจน แสดงให้เห็นถึงการบิดตัวของเส้นใยพื้นฐาน.....	4
2.3 การเปลี่ยนแปลงค่า tensile strength และ easticity ที่แต่ละตำแหน่งของหนังลูกวัว.....	5
2.4 การแบ่งประเภทหนังวัว.....	5
3.1 อุปกรณ์ทดสอบค่าความแข็ง SHORE Durometer Type D ตามมาตรฐาน ASTM D2240.....	17
4.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโคที่อุณหภูมิ 303 K.....	19
4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโคที่อุณหภูมิ 313 K.....	19
4.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโคที่อุณหภูมิ 323 K.....	20
4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนังโคเทียบกันทั้ง 3 อุณหภูมิ.....	20
4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลาของการทดลองแช่หนังกระบือที่อุณหภูมิ 303 K.....	21
4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลาของการทดลองแช่หนังกระบือที่อุณหภูมิ 313 K.....	22

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะโครงแสดงลักษณะโครงสร้างของหนัง	3
2.2 ภาพถ่ายทางยาวของกลุ่มเส้นใยคอลลาเจน แสดงให้เห็นถึงการบิดตัวของ เส้นใยพื้นฐาน	4
2.3 การเปลี่ยนแปลงค่า tensile strength และ elasticity ที่แต่ละตำแหน่ง ของหนังลูกวัว	5
2.4 การแบ่งประเภทหนังวัว	5
3.1 อุปกรณ์ทดสอบค่าความแข็ง SHORE Durometer Type D ตามมาตรฐาน ASTM D2240	17
4.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโคที่ อุณหภูมิ 303 K	19
4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโคที่ อุณหภูมิ 313 K	19
4.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโคที่ อุณหภูมิ 323 K	20
4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนังโคเทียบกันทั้ง 3 อุณหภูมิ	20
4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลาของการทดลองแช่หนังกระบือที่อุณหภูมิ 303 K	21
4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลาของการทดลองแช่หนังกระบือที่อุณหภูมิ 313 K	22

รูปที่	หน้า
4.7 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลาของการทดลองแช่หนังกระบือที่อุณหภูมิ 323 K	22
4.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนังกระบือเทียบกันทั้ง 3 อุณหภูมิ	23
4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลาของการทดลองแช่หนังฟอก ที่อุณหภูมิ 303 K	24
4.10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลาของการทดลองแช่หนังฟอก ที่อุณหภูมิ 313 K	24
4.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ยเทียบกับเวลาของการทดลองแช่หนังฟอก ที่อุณหภูมิ 323 K	25
4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนังฟอกเทียบกัน ทั้ง 3 อุณหภูมิ	25
4.13 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนัง 3 ชนิด ที่ 303 K	26
4.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนัง 3 ชนิด ที่ 313 K	27
4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนัง 3 ชนิด ที่ 323 K	27
4.16 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค ที่อุณหภูมิ 303 K	28
4.17 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค ที่อุณหภูมิ 313 K	29
4.18 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค ที่อุณหภูมิ 313 K	29

รูปที่	หน้า
4.19	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค ที่อุณหภูมิต่างๆ 30
4.20	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังกระบือ ที่อุณหภูมิ 303 K 31
4.21	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังกระบือ ที่อุณหภูมิ 313 K 31
4.22	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังกระบือ ที่อุณหภูมิ 323 K 32
4.23	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังกระบือ ที่อุณหภูมิต่างๆ 32
4.24	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังฟอก ที่อุณหภูมิ 303 K 33
4.25	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังฟอก ที่อุณหภูมิ 313 K 34
4.26	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังฟอก ที่อุณหภูมิ 323 K 34
4.27	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังฟอก ที่อุณหภูมิต่างๆ 35
4.28	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค, กระบือ และหนังฟอกที่อุณหภูมิ 303 K 36
4.29	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค, กระบือ และหนังฟอกที่อุณหภูมิ 313 K 36
4.30	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค, กระบือ และหนังฟอกที่อุณหภูมิ 323 K 37
4.31	แสดงค่า P_s และเส้นแนวโน้มของค่า P_s เทียบกับอุณหภูมิของหนังโค 42
4.32	แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่าง %water uptake ของหนังโค ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ (4.13) เทียบกับค่าจากการทดลองจริง ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ 44
4.33	ค่า P_s และเส้นแนวโน้มของค่า P_s เทียบกับอุณหภูมิของหนังกระบือ 46
4.34	แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่าง %water uptake ของหนังกระบือ ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ (4.16) เทียบกับค่าจากการทดลองจริง ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ 48
4.35	ค่า P_s และเส้นแนวโน้มของค่า P_s เทียบกับอุณหภูมิของหนังฟอก 50

รูปที่	หน้า	
4.36	ค่าเปรียบเทียบระหว่าง %water uptake ของหนังฟอก ที่ได้จากการคำนวณ ด้วยสมการ (4.19) เทียบกับค่าจากการทดลองจริง ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ.....	52
4.37	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %water uptake ที่ได้จากการทดลองเทียบกับ ค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองของหนังโค ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	53
4.38	แสดงผลของค่าความแข็งเทียบกับค่า %water uptake ที่ได้จากการตารางที่ 4.11.....	56
4.39	แสดงผลของค่าความแข็งเทียบกับเวลา ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับที่ได้จากการ คำนวณด้วยสมการ (4.22).....	57
4.40	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %water uptake ที่ได้จากการทดลองเทียบกับ ค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองของหนังกระบือ ที่อุณหภูมิต่างๆ	57
4.41	แสดงผลของค่าความแข็งเทียบกับค่า %water uptake ที่ได้จากการตารางที่ 4.13.....	60
4.42	แสดงค่าความแข็งเทียบกับเวลา ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับที่ได้จากการคำนวณ ด้วยสมการ (4.24).....	61
4.43	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %water uptake ที่ได้จากการทดลองเทียบกับ ค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองของหนังฟอก ที่อุณหภูมิต่างๆ	61
4.44	แสดงผลของค่าความแข็งเทียบกับค่า %water uptake ที่ได้จากการตารางที่ 4.15.....	64
4.45	ค่าความแข็งเทียบกับเวลา ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับที่ได้จากการคำนวณ ด้วยสมการ (4.26).....	65
5.1	กระบวนการผลิตอาหารขบเคี้ยวสำหรับสุนัข ในส่วนของกระดุกผูก.....	66

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	=	สาร A , พื้นที่ผิวหน้าของวัสดุ, ค่าคงที่
B	=	ค่าความแข็งเริ่มต้นของหนัง
C	=	ความเข้มข้นของสารที่ซึมผ่านเข้าไปที่ตำแหน่ง x ณ เวลา t
C_A	=	ความเข้มข้นของสาร A
C_∞	=	ความเข้มข้นของสาร ณ เวลาอึดัมตัว
d	=	ความหนาของวัสดุ
D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสาร (Mass Diffusivity Coefficient)
D_0	=	ค่า Pre-exponential Factor
E_a	=	ค่า Activation Energy of Diffusion
F	=	ค่าความแข็ง
j_{Ax}	=	อัตราการถ่ายเทสาร A ในทิศ x ต่อพื้นที่
k	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสาร (Mass Diffusivity Coefficient)
M_t	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ ณ เวลา t
M_∞	=	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ ณ เวลาอึดัมตัว
n_A	=	ผลรวมของอัตราของมวลสาร A ที่วิ่งผ่านพื้นที่หนึ่ง
$P.S.$	=	Percent Saturation
R	=	Gas Constant
t	=	เวลา, เวลาที่สารซึมผ่านเข้าไป
T	=	อุณหภูมิ
v	=	ความเร็วมวลเฉลี่ย
W_0	=	น้ำหนักแห้งของวัสดุ
x	=	ทิศทางตามแนวแกน x , ระยะทางที่สารซึมผ่านเข้าไป, ค่า %water uptake
ρ	=	ความหนาแน่นของระบบถ่ายเทมวลสาร
ρ_A	=	ความหนาแน่นของสาร A
ω_A	=	สัดส่วนของมวล A ในระบบ (Mass fraction of A)
ψ	=	Adsorption Rate