

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการศึกษางานวิจัยชิ้นนี้ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การหาอัตราการดูดซับน้ำของหนังชนิดต่างๆ จำนวน 3 ชนิด การทดสอบค่าความความแข็ง ซึ่งสัมพันธ์กับสมบัติการตัดโค้งงอของหนังที่ค่าความชื้นต่างๆ และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น

4.1 การดูดซับน้ำของหนังชนิดต่าง ๆ

ผลการดูดซับน้ำของหนังทั้ง 3 ชนิด อันได้แก่ หนังโค หนังกระบือ และหนังฟอก ที่อุณหภูมิการแช่ที่ 303, 313 และ 323 เคลวิน มีความแตกต่างกันออกไปตามชนิดของหนังดังนี้

4.1.1 หนังโค

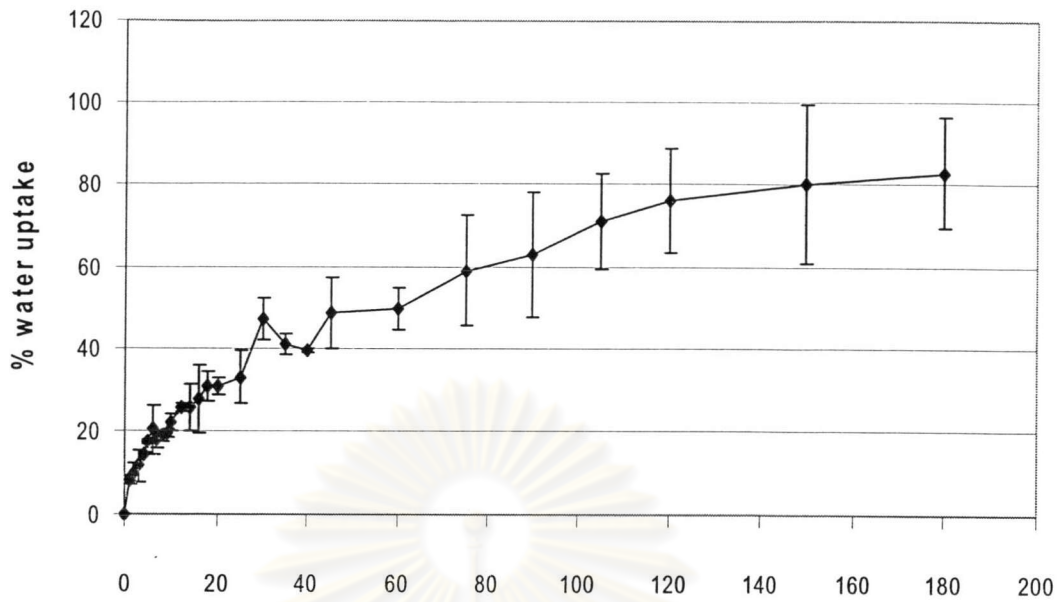
จากการวัดปริมาณน้ำที่ซึมผ่านเข้าไปในหนัง โดยวัดออกมาในรูปของปริมาณความชื้นที่หนังดูดซับเข้าไป ณ เวลาใด ๆ เทียบกับน้ำหนักแห้ง เป็นเปอร์เซ็นต์ (%water uptake) ซึ่งได้มาจากการคำนวณค่าความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D 3790-79 ที่เวลาต่างๆ แล้วนำไปแทนค่าลงในสมการที่ (4.1)

$$\% \text{water uptake} = \% \text{ความชื้นหลังแช่} - \% \text{ความชื้นก่อนแช่} = \frac{M_t}{W_0} \times 100 \quad (4.1)$$

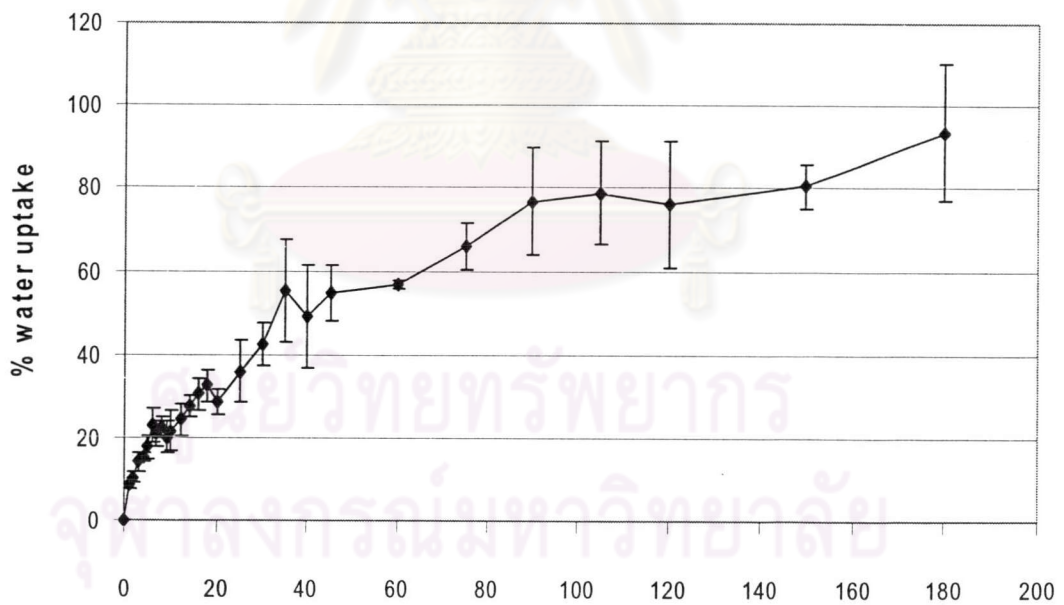
โดย M_t คือ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ มาจากน้ำหนักหลังแช่-ก่อนแช่

W_0 คือ น้ำหนักแห้ง หรือน้ำหนักหลังอบ

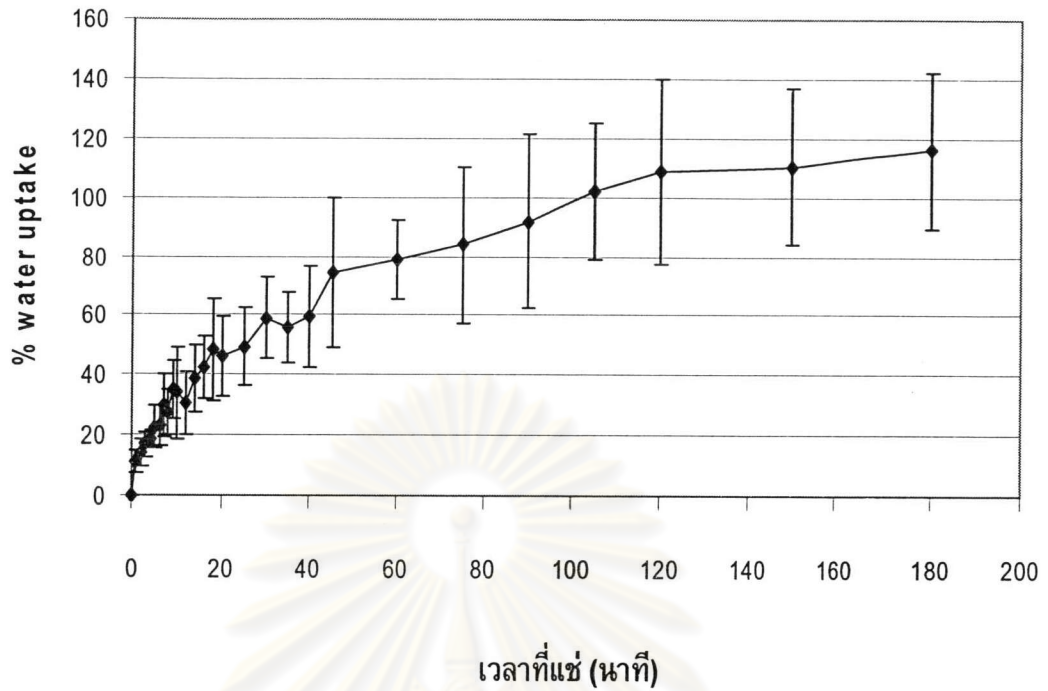
สำหรับการทดลองการดูดซับน้ำที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวิน ตามลำดับ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ (ผลการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก ค)



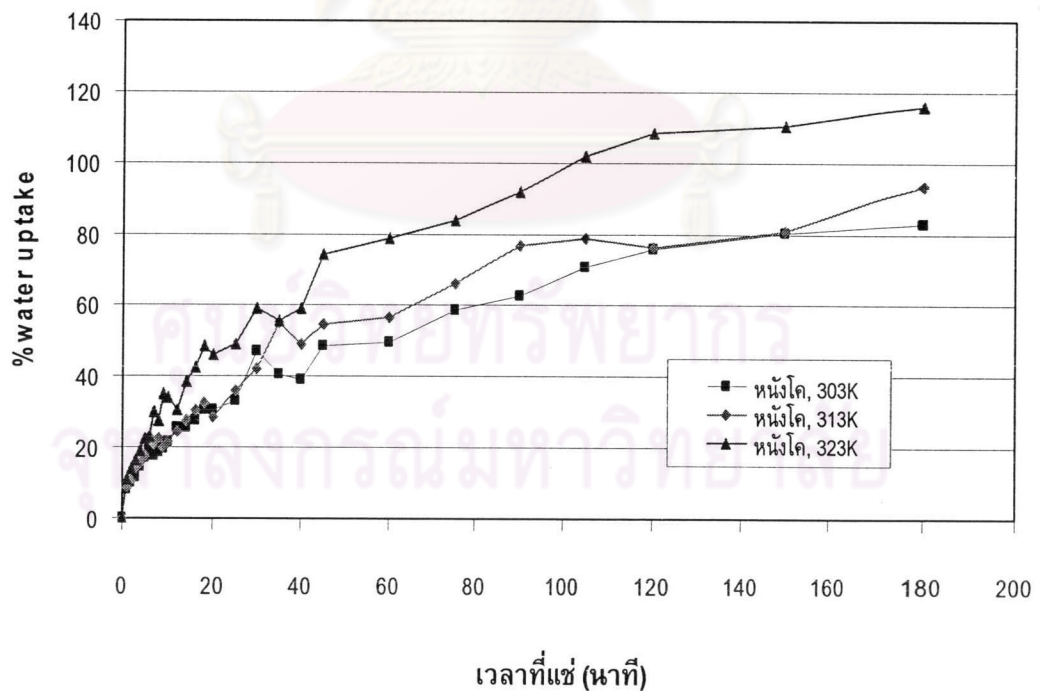
เวลาที่แช่ (นาที)
รูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโคที่อุณหภูมิ 303 K



เวลาที่แช่ (นาที)
รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโคที่อุณหภูมิ 313 K



รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโคที่อุณหภูมิ 323 K

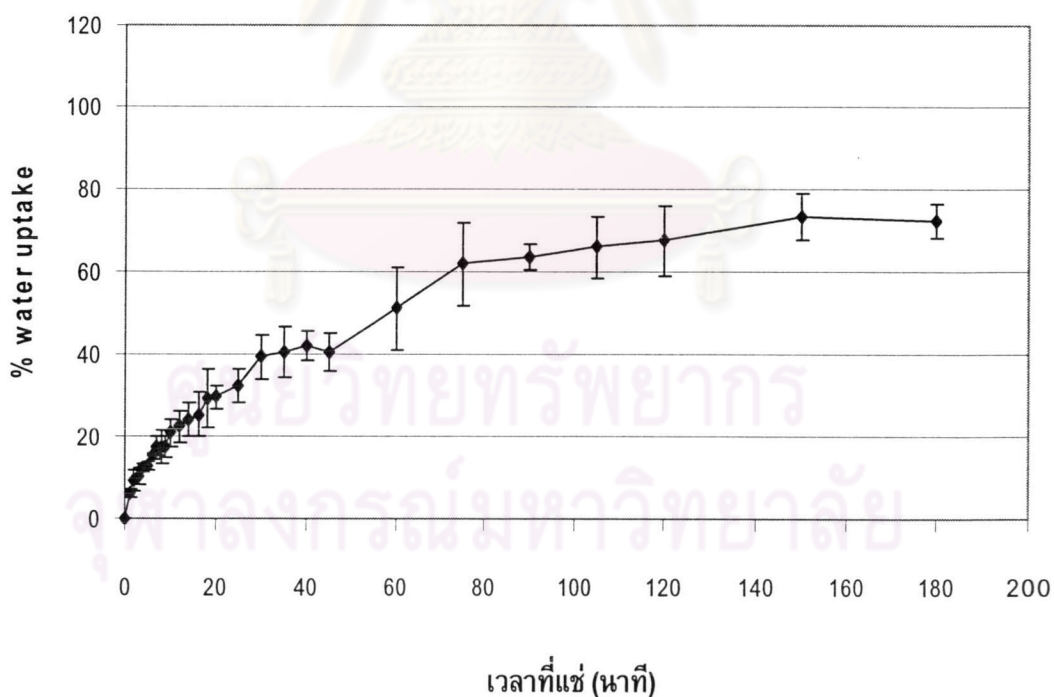


รูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนังโคเทียบกันทั้ง 3 อุณหภูมิ

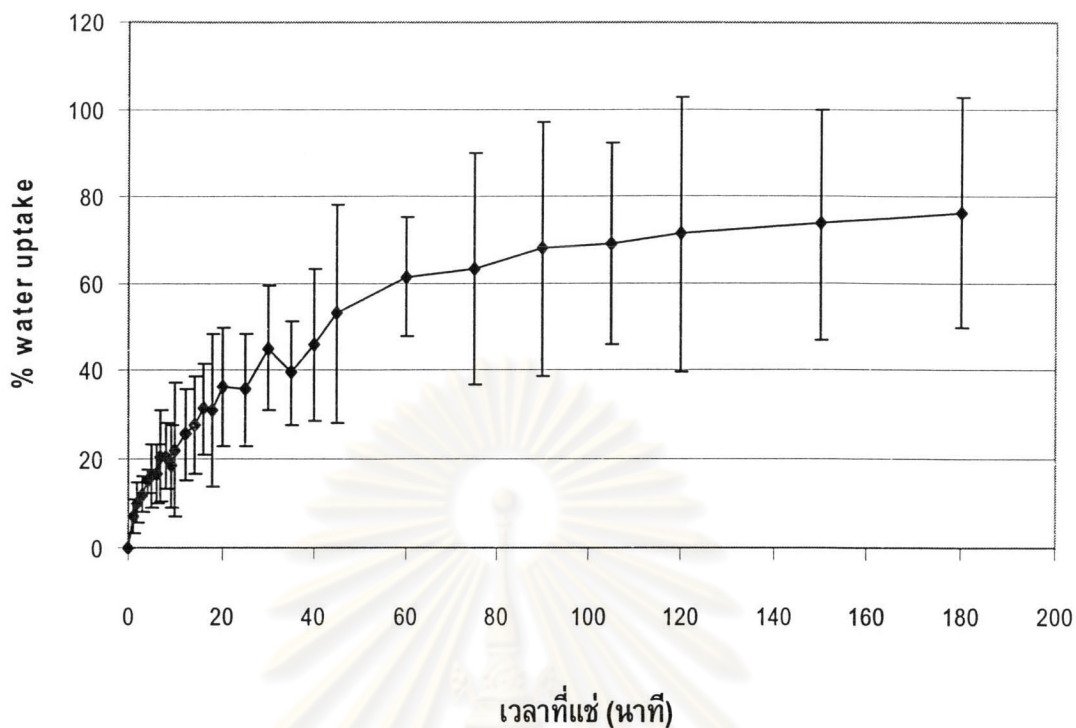
จากรูปที่ 4.4 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับเฉลี่ย ของการแช่หนังโคที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน เมื่อเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นเฉลี่ยการแช่หนังโคที่อุณหภูมิ 303 และ 313 เคลวินแล้วนั้น จะมีค่าที่สูงกว่าค่อนข้างมาก โดยจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อแช่ไปเกิน 10 นาทีแรก แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของหนัง ที่เกิดจากการคลายตัวของเส้นใยคอลลาเจน อันเป็นผลมาจากการไฮเดรชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่น้ำเข้าทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยคอลลาเจน ขณะเดียวกันกับการแช่หนังโคที่อุณหภูมิ 313 เคลวิน จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับเฉลี่ยที่สูงกว่าของที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน อยู่เล็กน้อย ทั้งนี้ ซึ่งก็เป็นไปตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius Relationship) ที่ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารใด ๆ มักจะขึ้นกับอุณหภูมิ โดยสัมพันธ์กันแบบฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียล โดยยิ่งอุณหภูมิขึ้นสูงเท่าไร ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ก็จะมีค่ามากขึ้น (Teresa et al., 1997) ส่งผลให้เกิดการดูดซับน้ำเข้าไปในหนังมากขึ้นด้วย

4.1.2 หนังกระบือ

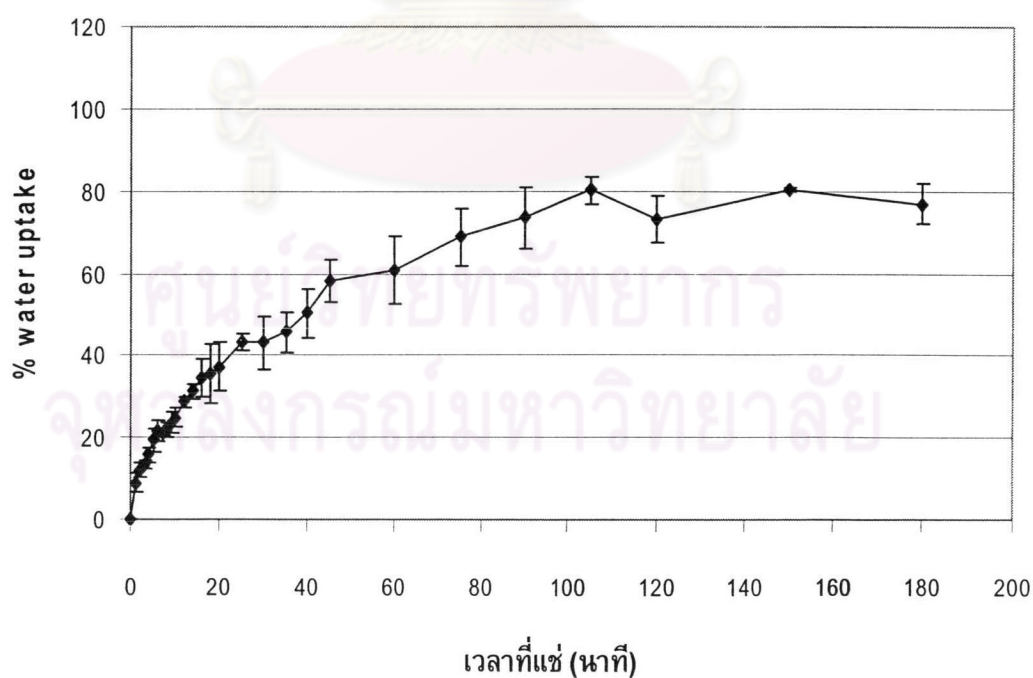
ผลการทดลองการแช่หนังกระบือที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวิน แสดงในรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ขณะที่รูปที่ 4.8 นำเสนอการเปรียบเทียบผลการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ



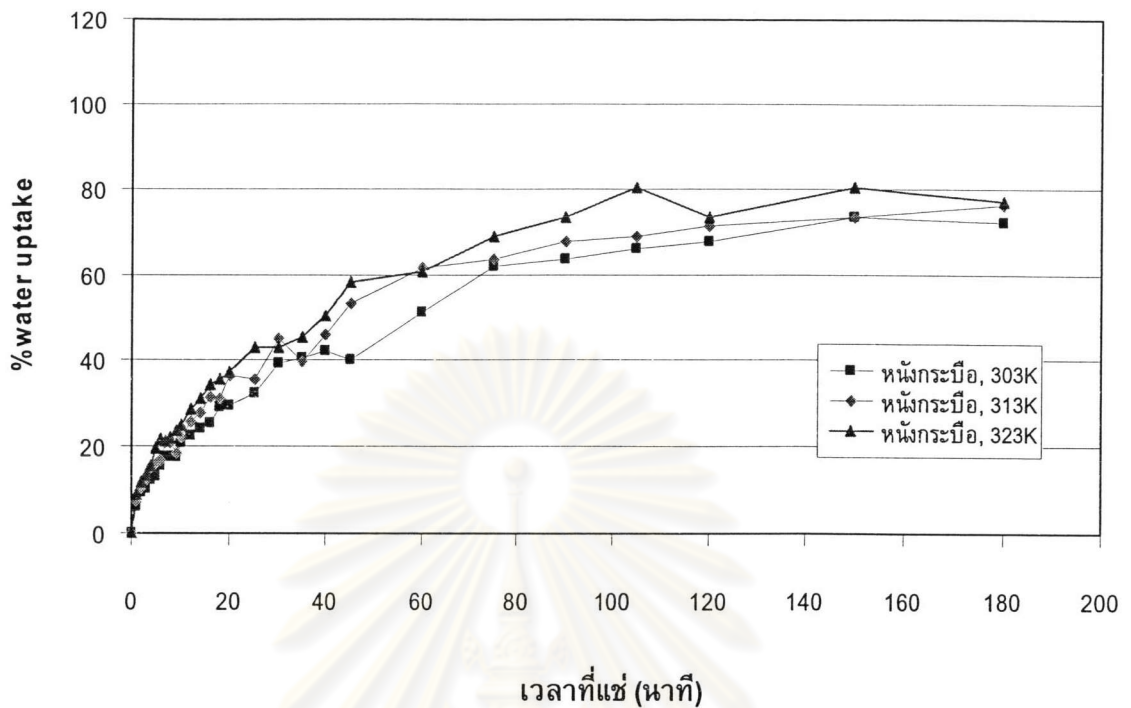
รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เทียบกับเวลาของการทดลองแช่หนังกระบือที่อุณหภูมิ 303 K



รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เทียบกับเวลาของการทดลองแช่หนังกระป๋องที่อุณหภูมิ 313 K



รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เทียบกับเวลาของการทดลองแช่หนังกระป๋องที่อุณหภูมิ 323 K

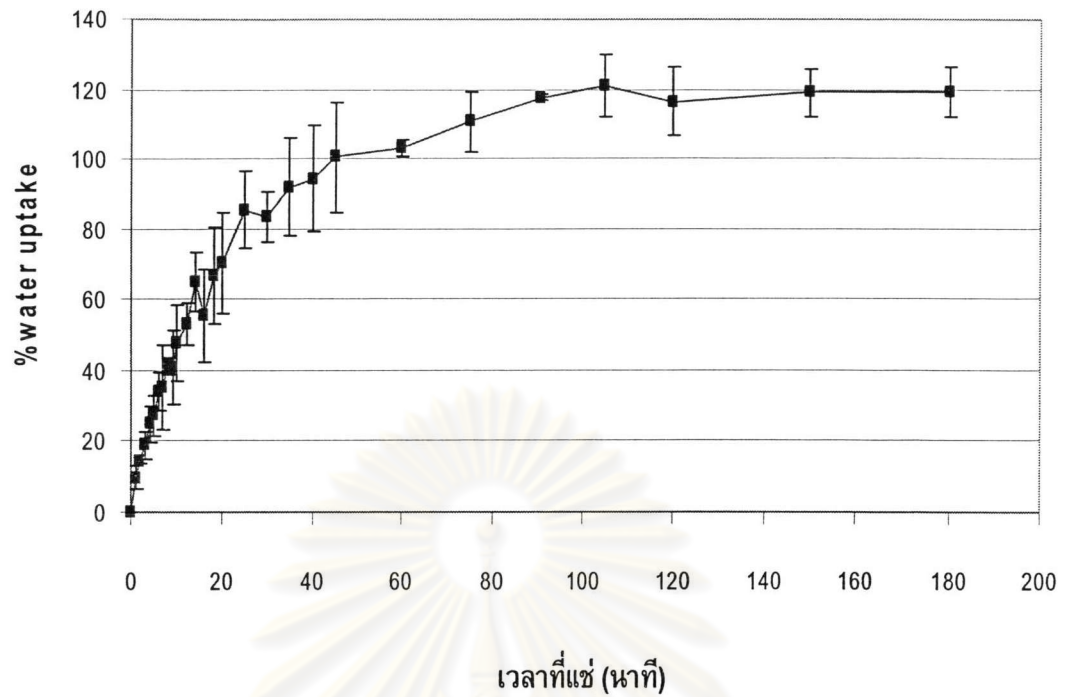


รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนังกระป๋องเทียบกับทั้ง 3 อุณหภูมิ

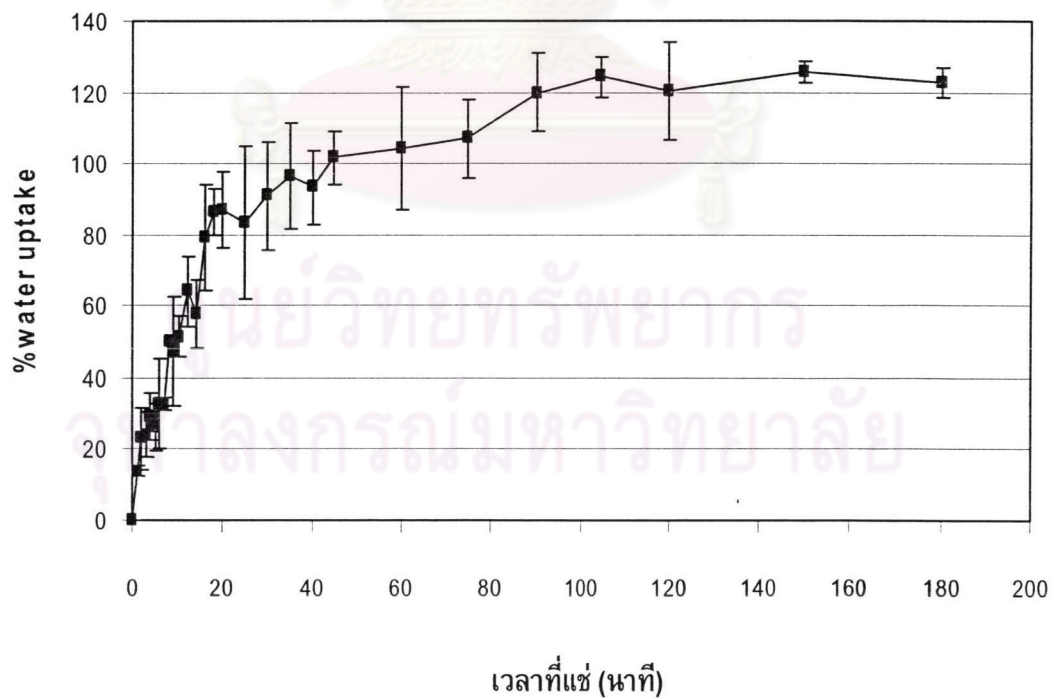
จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับเฉลี่ย มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับหนังโค อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกลับไม่ได้ส่งผลมากนักต่ออัตราการดูดซับน้ำ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความแตกต่างทางโครงสร้างระหว่างหนังกระป๋องและหนังโค โดยหนังโคจะเกิดการไฮเดรชันได้ง่ายกว่าหนังกระป๋อง

4.1.3 หนังฟอก

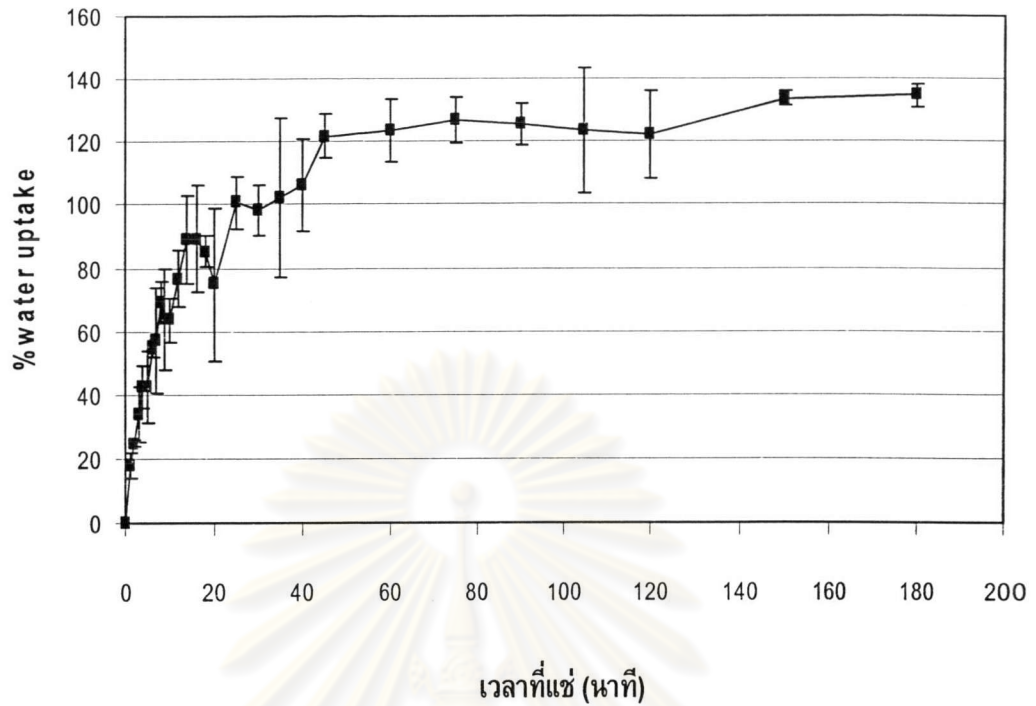
ผลการทดลองการแช่หนังฟอกที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวิน แสดงในรูปที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 ขณะที่รูปที่ 4.12 นำเสนอการเปรียบเทียบผลการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ



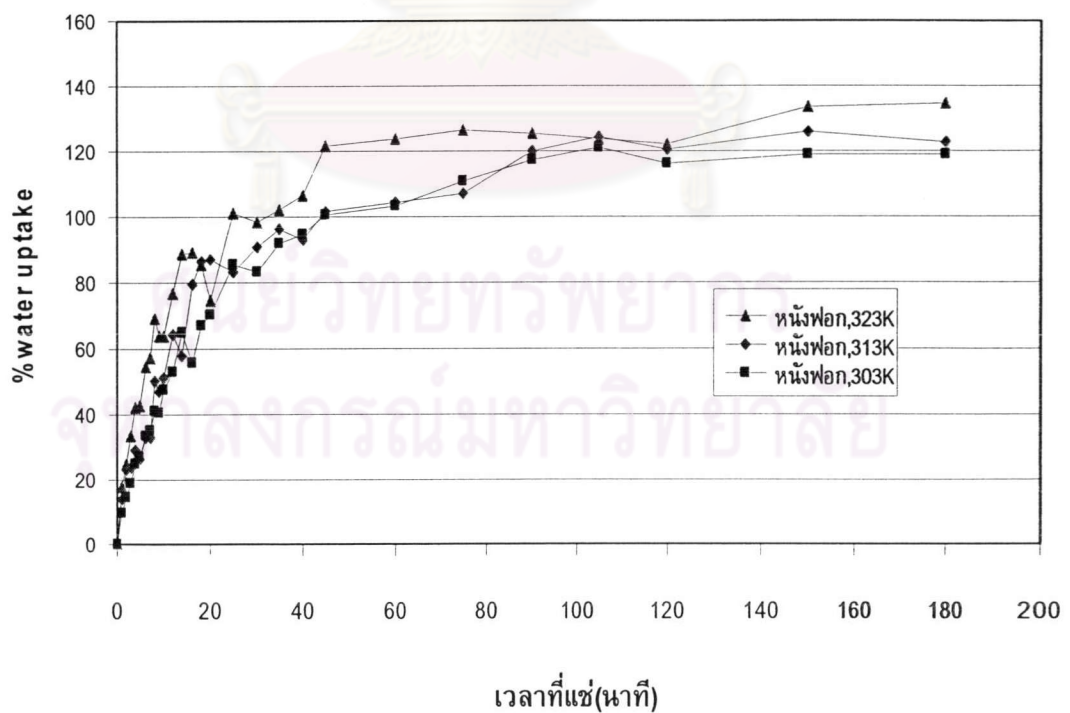
รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เทียบกับเวลาของการทดลองแช่แห้งฟอก ที่อุณหภูมิ 303 K



รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เทียบกับเวลาของการทดลองแช่แห้งฟอก ที่อุณหภูมิ 313 K



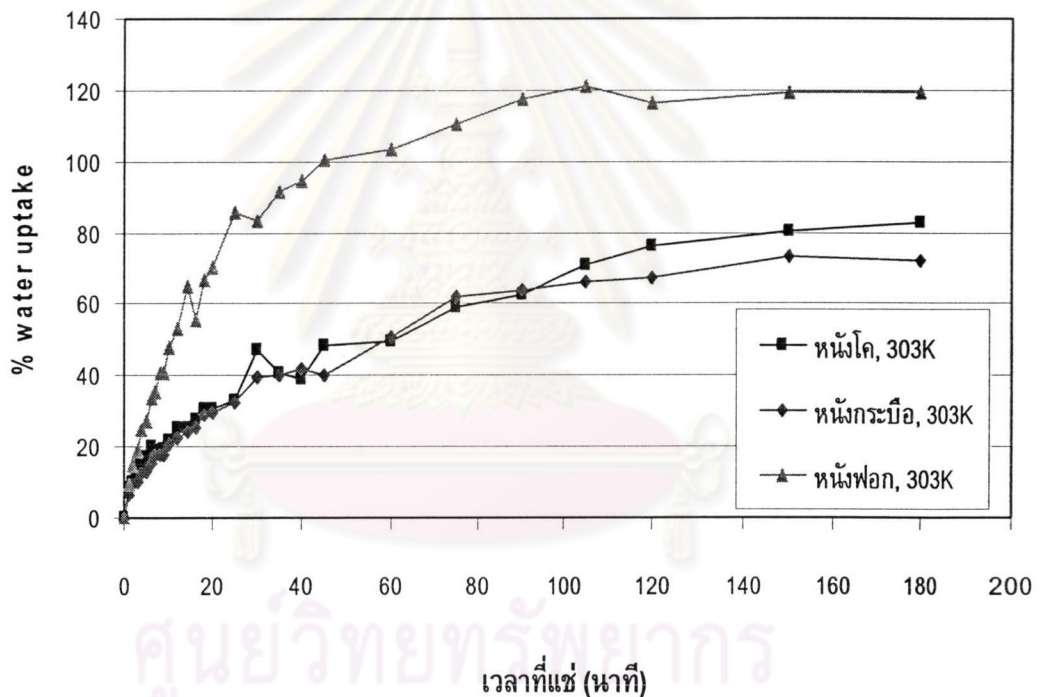
รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เทียบกับเวลาของการทดลองแช่หนังฟอก ที่อุณหภูมิ 323 K



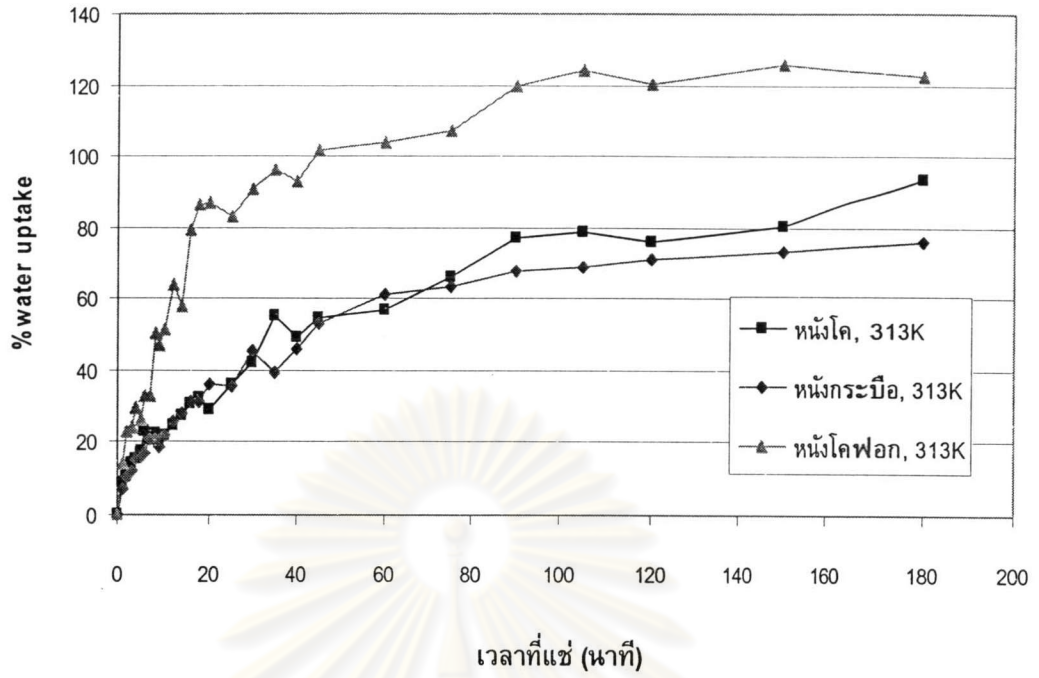
รูปที่ 4.12 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนังฟอกเทียบกันทั้ง 3 อุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับเฉลี่ย ของการแช่หนังฟอกที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน จะมีค่าสูงกว่าค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นเฉลี่ยการแช่หนังฟอกที่อุณหภูมิ 303 และ 313 เคลวิน ขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับเฉลี่ย การแช่หนังฟอกที่อุณหภูมิ 313 เคลวิน กับที่ 303 เคลวินจะมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยการแช่ที่ 313 เคลวิน จะให้ค่า %water uptake สูงกว่าอยู่เล็กน้อย ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะเหมือนกับกรณีการแช่หนังโค และกระบือ

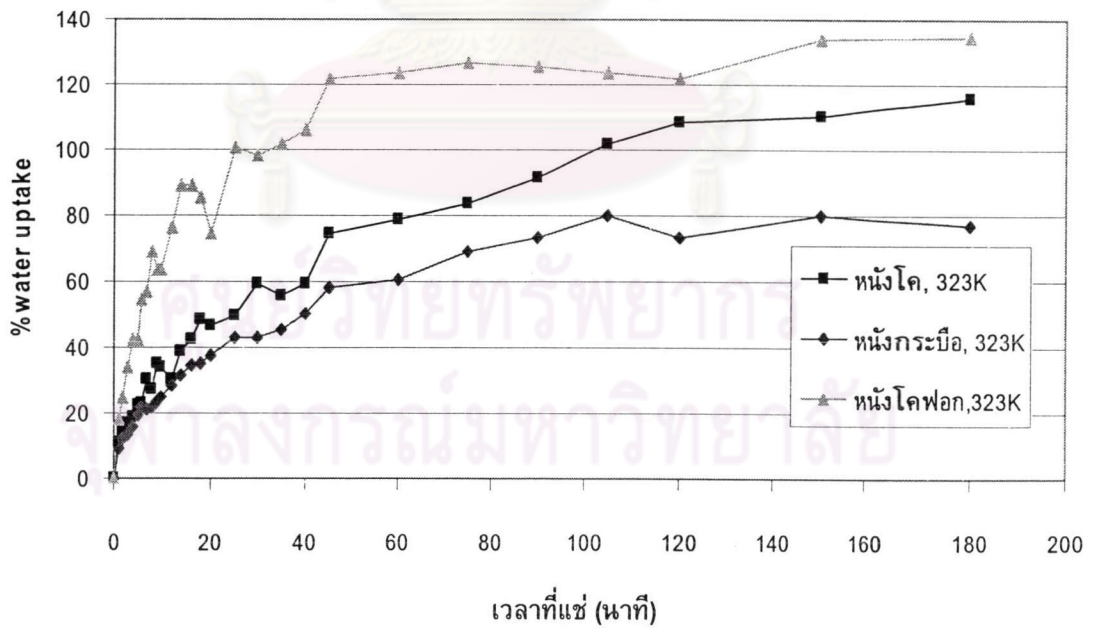
อย่างไรก็ตามค่า %water uptake ที่หนังฟอกดูดซับเข้าไปนั้นจะมีค่ามากกว่าหนังอีก 2 ชนิด เมื่อเทียบกับที่แต่ละอุณหภูมิเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากหนังฟอกเป็นหนังที่ผ่านกระบวนการฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาแล้วขั้นตอนหนึ่ง ทำให้โครงสร้างภายในของหนังเปลี่ยนไป ทำให้สามารถดูดซับน้ำเข้าไปข้างในได้มากกว่าหนังอีกสองชนิด เมื่อเทียบกับที่เวลาและอุณหภูมิเดียวกันทุกๆ อุณหภูมิ



รูปที่ 4.13 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนัง 3 ชนิด ที่ 303 K



รูปที่ 4.14 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนัง 3 ชนิด ที่ 313 K



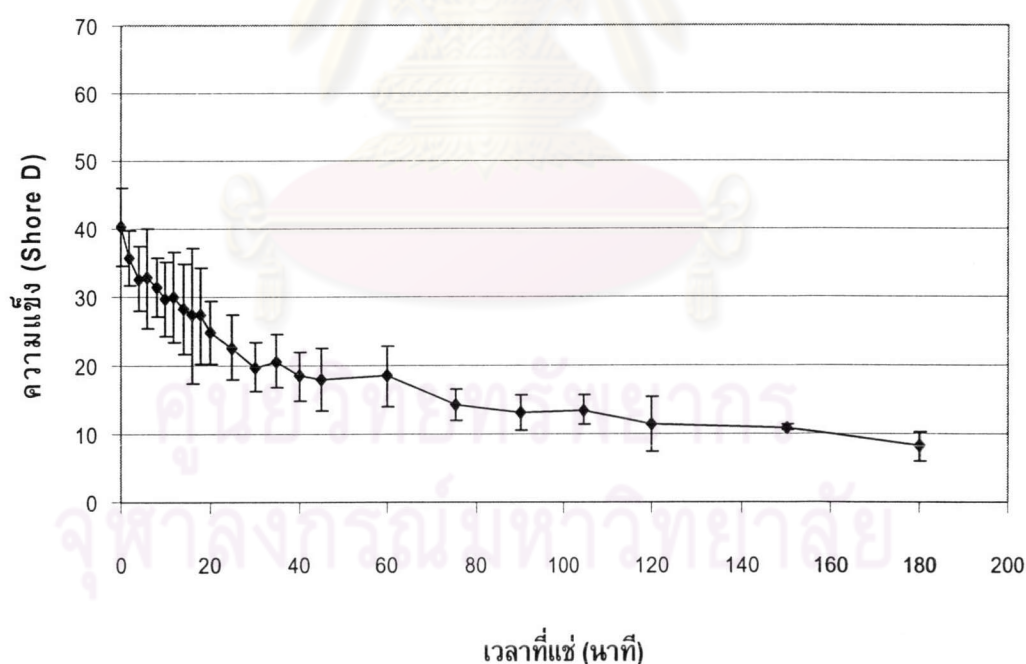
รูปที่ 4.15 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ (%water uptake) เฉลี่ย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองแช่หนัง 3 ชนิด ที่ 323 K

4.2 สมบัติเชิงกลกับสภาวะการแช่หนึ่ง

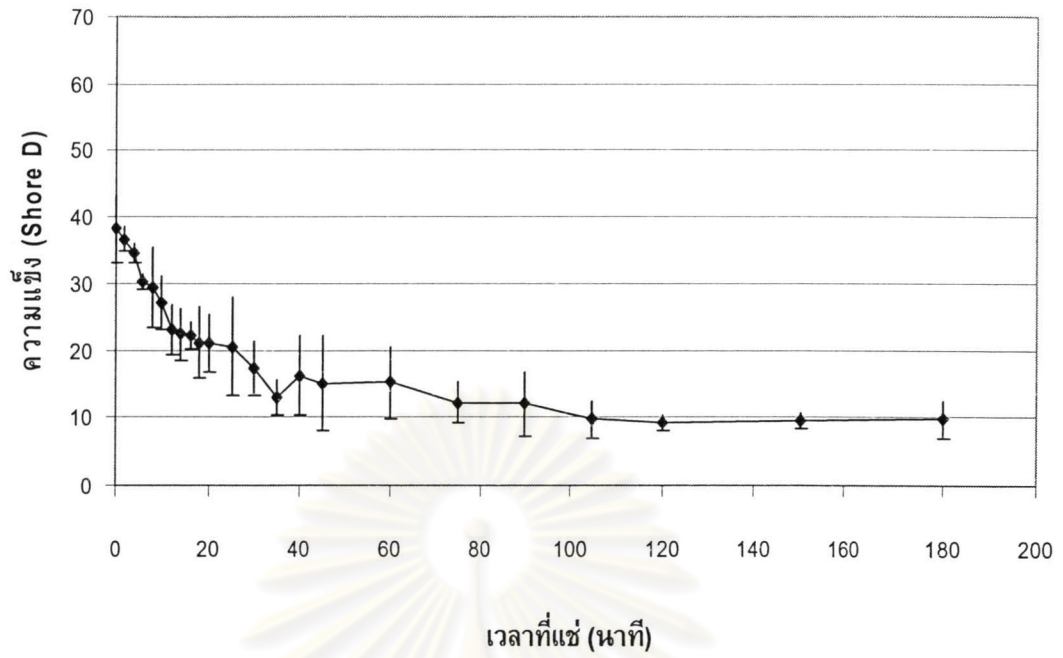
การทดสอบสมบัติเชิงกลของหนังทั้ง 3 ชนิด ได้ดำเนินการสำหรับเวลาการแช่น้ำต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวินตามลำดับ โดยใช้ SHORE Durometer Type D ตรวจวัดตามมาตรฐาน ASTM D2240 ซึ่งผลที่ได้ออกมาจะเป็นค่าความแข็งที่มีลักษณะเป็นค่าเฉพาะที่จะสะท้อนถึงความต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุนั้นๆ โดยถ้าค่าความแข็งยิ่งมากก็หมายความว่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูป รวมไปถึงสมบัติการพียงอของวัสดุนั้นๆ มีค่ามากด้วยเช่นกัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะแบ่งตามชนิดของหนังดังนี้

4.2.1 หนังโค

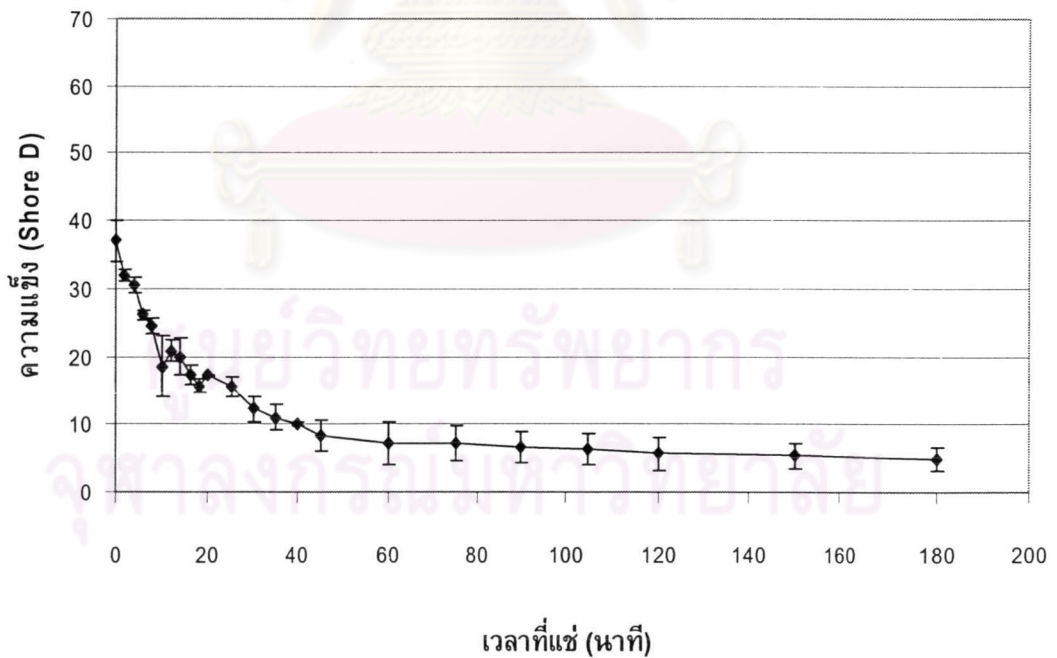
การทดสอบค่าความแข็งของหนังโคที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวิน จะทำการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของหนัง ก่อนและหลังการแช่ที่เวลาต่างๆ ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 สำหรับหนังที่ผ่านการแช่ที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวิน ตามลำดับ และนำมาแสดงในรูปที่ 4.19 เพื่อการเปรียบเทียบ (สำหรับผลการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก ง)



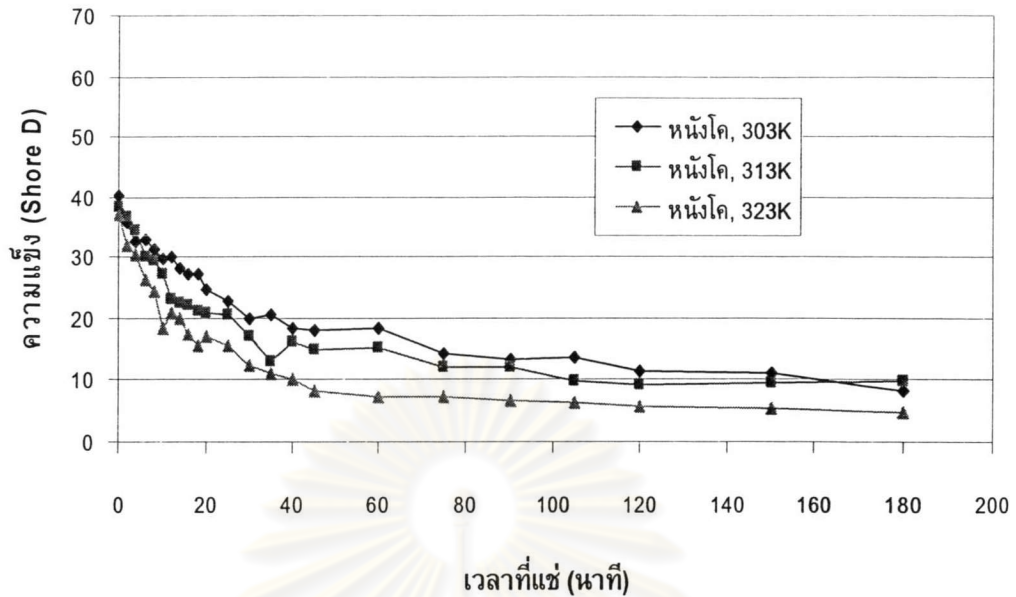
รูปที่ 4.16 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค ที่อุณหภูมิ 303 K



รูปที่ 4.17 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค ที่อุณหภูมิ 313 K



รูปที่ 4.18 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค ที่อุณหภูมิ 323 K

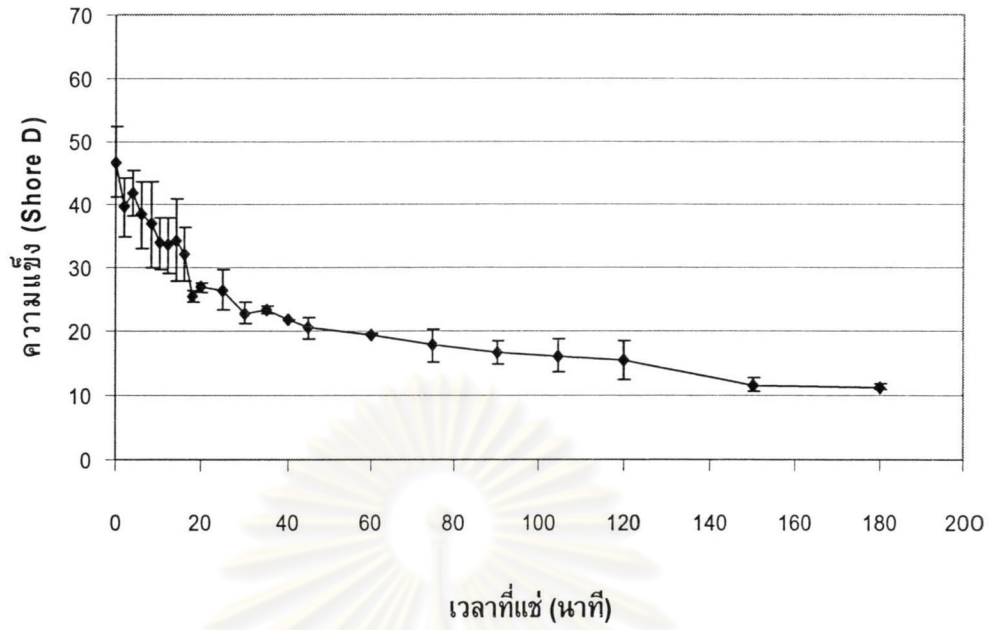


รูปที่ 4.19 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค ที่อุณหภูมิต่างๆ

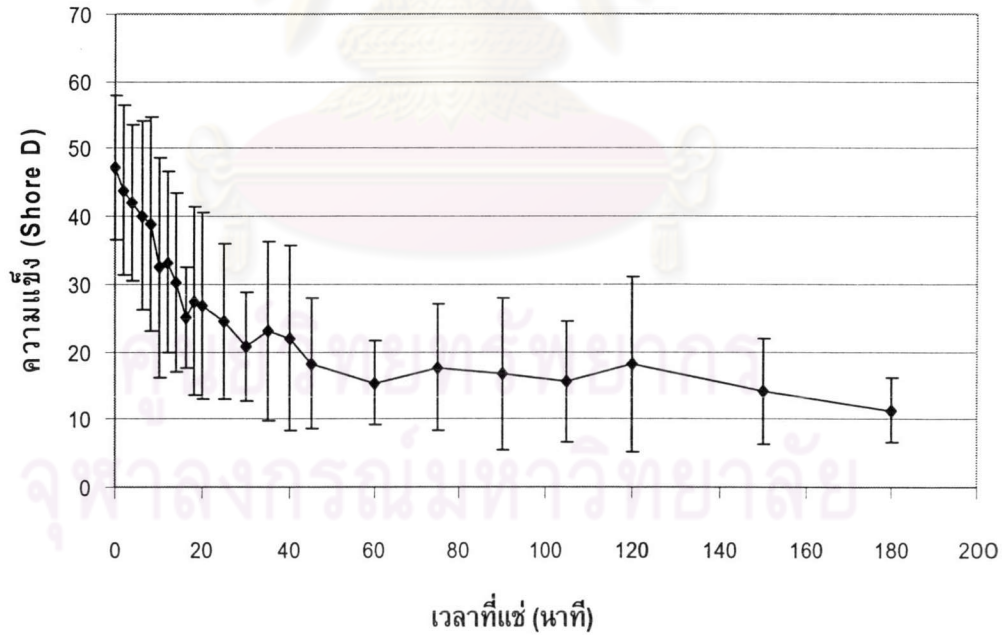
จากรูปที่ 4.19 จะพบว่าค่าความแข็งจากการแช่หนังโคจะขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้แช่หนัง คือ เมื่อเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งจะมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน และถ้าเปรียบเทียบที่อุณหภูมิต่างกันแล้ว พบว่าหนังโคที่แช่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีค่าความแข็งที่น้อยกว่าหนังโคที่แช่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อเทียบกัน ณ เวลาเดียวกัน ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะกลับกันกับค่าปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไป หรือ %water uptake โดยถ้าเป็นค่า %water uptake นั้นเมื่อเวลาและอุณหภูมิมียิ่งมาก ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับก็จะมากขึ้น จนกระทั่งอิมัตว์ ดังนั้นจึงพอสรุปได้ว่า ค่าความแข็งที่ลดลงตามปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ เป็นผลมาจากการที่น้ำเข้าไปทำลายร่างแหของเส้นใยคอลลาเจน ที่เชื่อมต่อกันโดยพันธะไฮโดรเจน ทำให้ความแข็งซึ่งเกิดการความต้านทานการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างหนังลดน้อยลง ค่าความแข็งจะค่อยๆ ลดลงเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประยะหนึ่ง เป็นผลมาจากปริมาณที่ถูกดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะอิมัตว์แล้วนั่นเอง หรือพูดอีกนัยก็คือ ค่าความแข็งของวัสดุจะแปรผันแบบผกผันกับปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับเข้าไป

4.2.2 หนังกระบือ

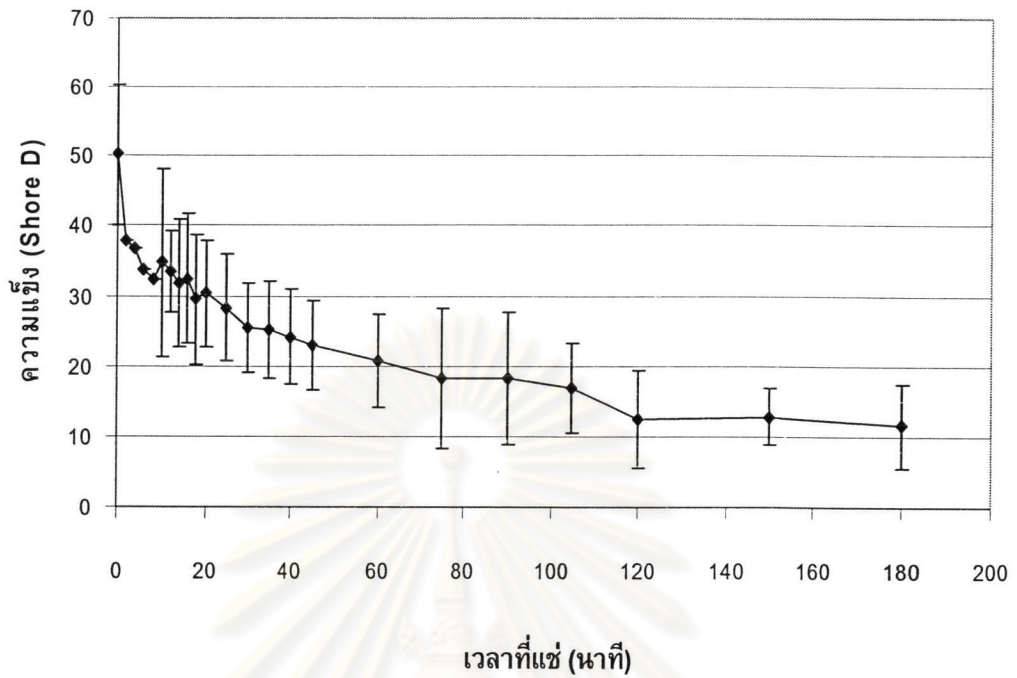
การทดสอบสมบัติการกดของหนังกระบือที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวิน จะทำการกดเพื่อหาค่าความแข็งของหนัง ก่อนและหลังการแช่ที่เวลาต่างๆ ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.20, 4.21 และ 4.22 สำหรับหนังที่ผ่านการแช่ที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวินตามลำดับ และนำมาแสดงในรูปที่ 4.23 เพื่อการเปรียบเทียบ



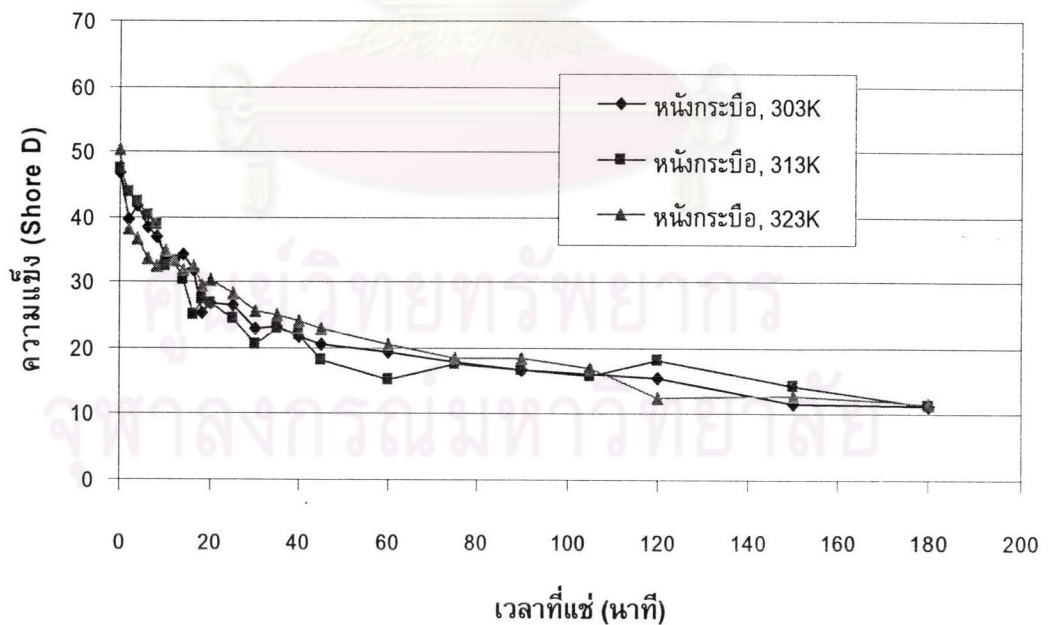
รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่ หนึ่งกระป๋อง ที่อุณหภูมิ 303 K



รูปที่ 4.21 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่ หนึ่งกระป๋อง ที่อุณหภูมิ 313 K



รูปที่ 4.22 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังกระบือ ที่อุณหภูมิ 323 K

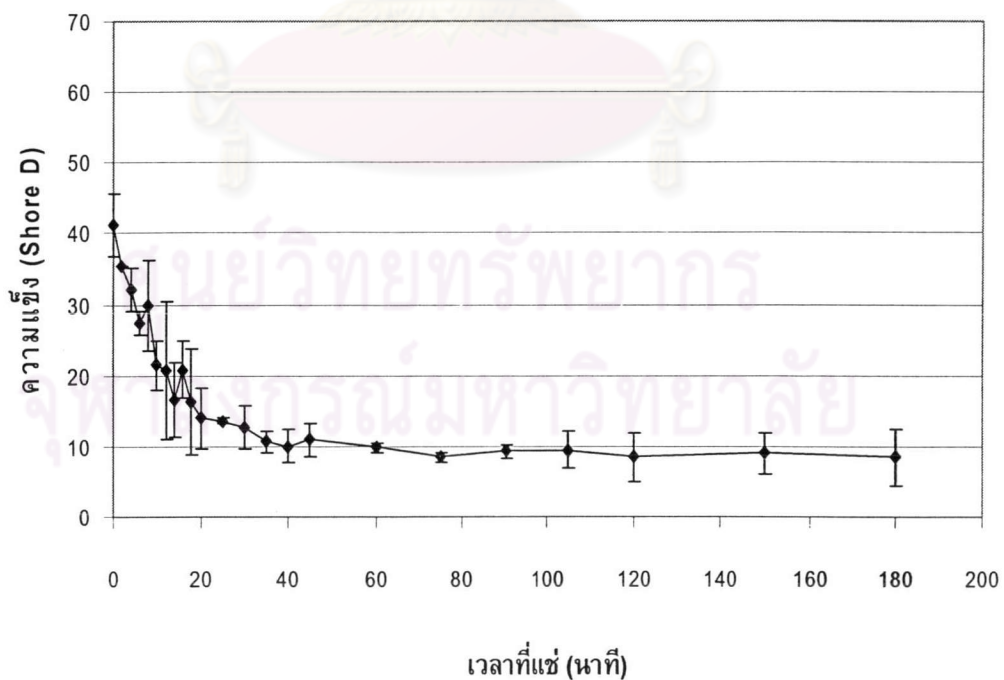


รูปที่ 4.23 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังกระบือ ที่อุณหภูมิต่างๆ

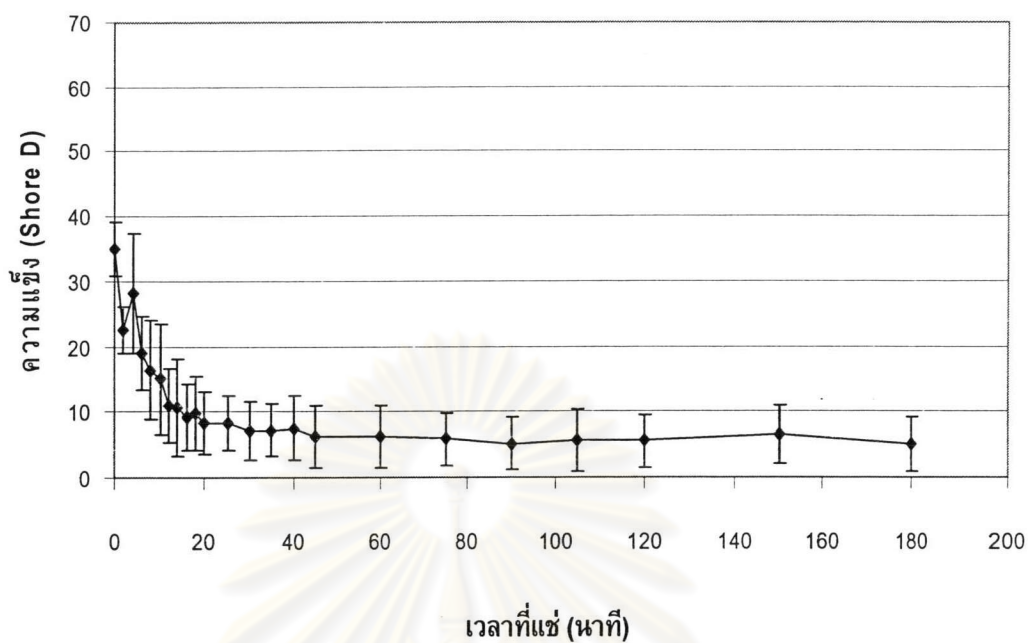
จากรูปที่ 4.23 จะพบว่าค่าความแข็งจากการแช่หนังกระบือจะมีลักษณะที่ต่างไปจากการแช่หนังโค โดยค่าความแข็งจากการแช่หนังกระบือทั้ง 3 อุณหภูมิจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับไปของหนังกระบือที่อุณหภูมิต่างๆ ที่มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก เมื่อเทียบกับการแช่หนังโค ดังนั้นจึงอาจพอสรุปได้ว่า ปัจจัยเรื่องของอุณหภูมิสำหรับการแช่หนังกระบือนั้นจะส่งผลถึงค่าความแข็งได้น้อยกว่ากรณีของหนังโค ซึ่งอาจเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างของหนังเอง อย่างไรก็ตาม ปัจจัยในเรื่องของเวลายังคงส่งผลถึงการวัดค่าความแข็งสำหรับหนังกระบืออยู่ โดยความสัมพันธ์นี้สอดคล้องกับปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับเข้ามาของหนังกระบือ โดยยิ่งเวลาเพิ่มมากขึ้น ค่าความชื้นที่ถูกดูดซับก็จะยิ่งมีค่ามากขึ้น ค่าความแข็งจึงมีค่าลดลงตามเวลา อันเป็นผลเนื่องมาจากการไฮเดรชัน ซึ่งก็หมายถึงว่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปและการพังของวัสดุก็จะมีลดลง นั่นคือปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับแปรผันแบบผกผันกับความแข็งของหนังเช่นเดียวกับกรณีหนังโค

4.2.3 หนังฟอก

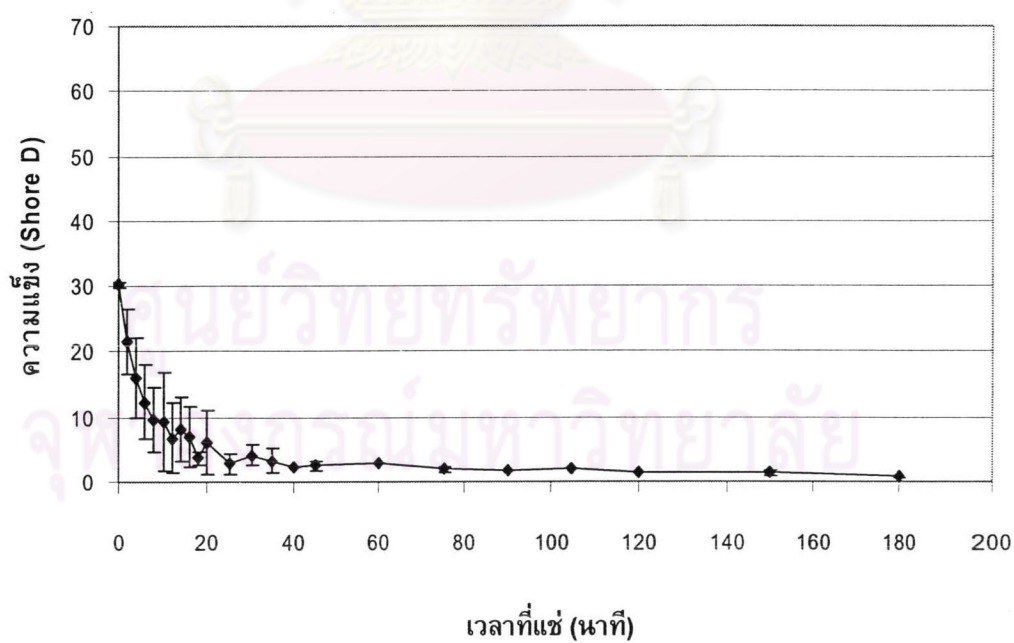
การทดสอบสมบัติการกดของหนังฟอกที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวิน จะทำการกดเพื่อหาค่าความแข็งของหนัง ก่อนและหลังการแช่ที่เวลาต่างๆ ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.24, 4.25 และ 4.26 สำหรับหนังที่ผ่านการแช่ที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวินตามลำดับ และนำมาแสดงในรูปที่ 4.27 เพื่อการเปรียบเทียบ



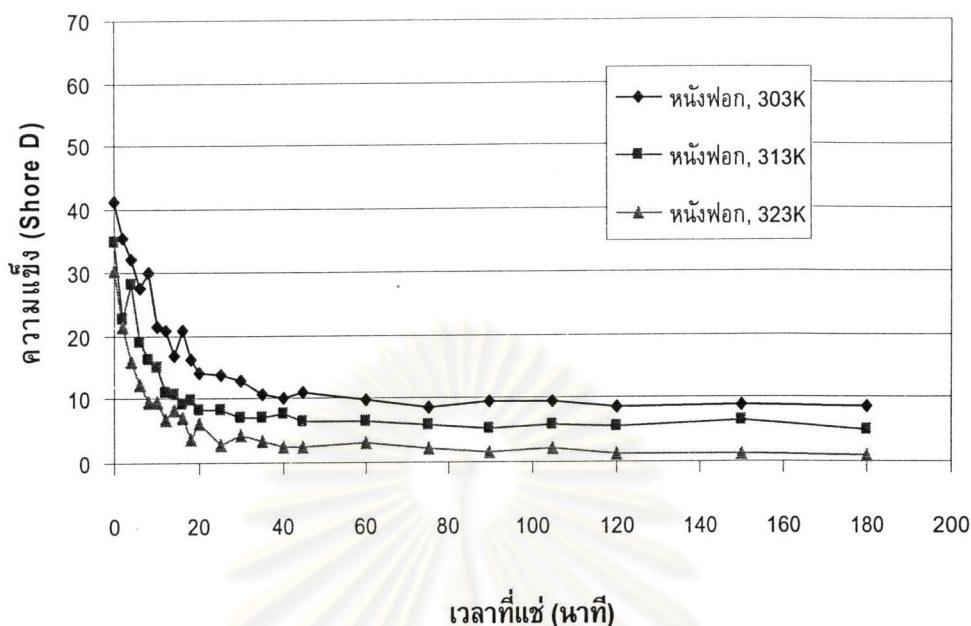
รูปที่ 4.24 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังฟอก ที่อุณหภูมิ 303 K



รูปที่ 4.25 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังฟอก ที่อุณหภูมิ 313 K

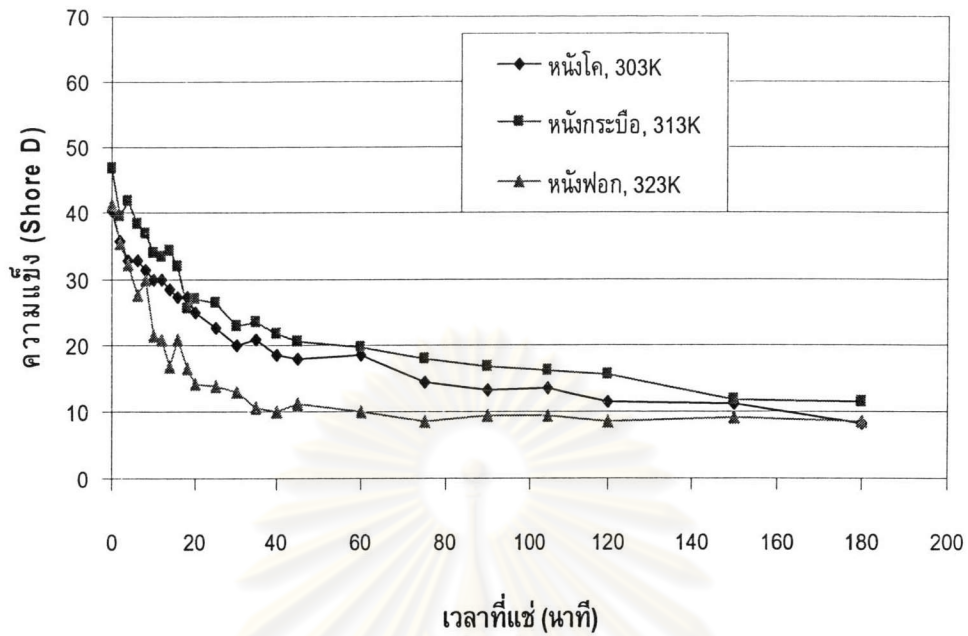


รูปที่ 4.26 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังฟอก ที่อุณหภูมิ 323 K

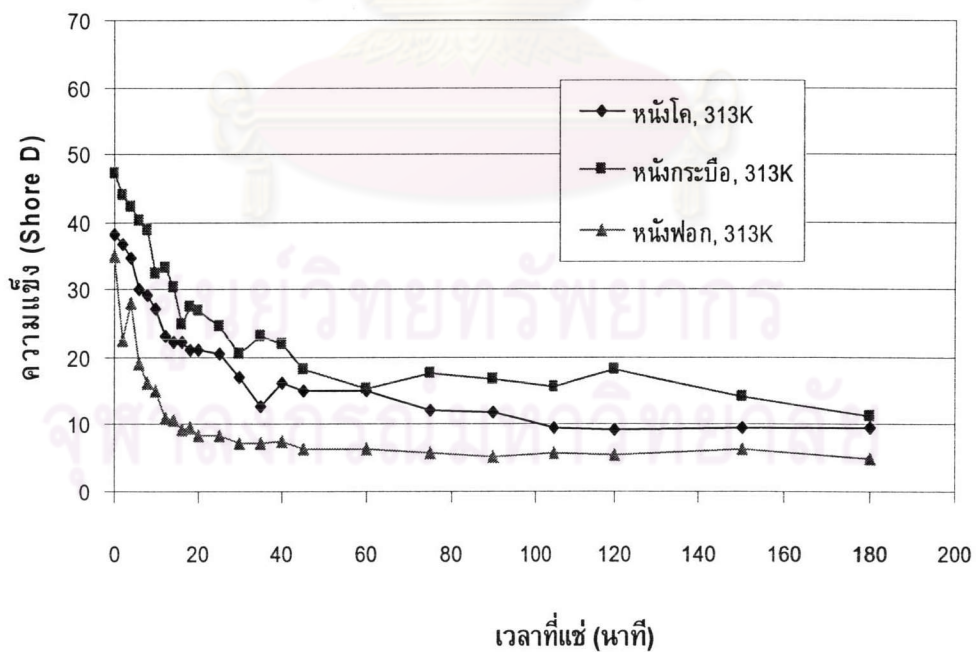


รูปที่ 4.27 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังฟอก ที่อุณหภูมิต่างๆ

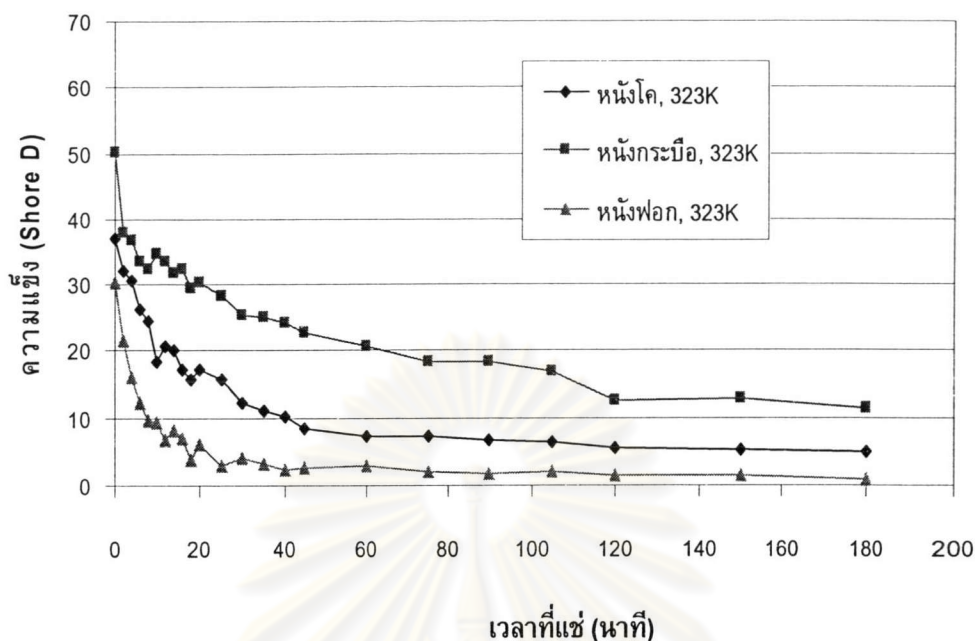
จากรูปที่ 4.27 จะพบว่าค่าความแข็งจากการแช่หนังฟอกจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับค่าความแข็งจากกรณีของหนังโค คือ ที่อุณหภูมิการแช่สูง ค่าความแข็งเทียบกับเวลาก็ยังมีค่าลดลงมากขึ้นซึ่งกรณีนี้จะต่างไปจากของหนังกระบือที่อุณหภูมิมิมีผลกับค่าความแข็งน้อยกว่า นอกจากนี้แล้วยังพบว่า ค่าความแข็งของกรณีหนังฟอกนี้จะเข้าใกล้ค่าคงที่ได้เร็วกว่ากรณีของหนังโคอีกด้วย ดังแสดงในรูปเปรียบเทียบระหว่างหนังทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 4.28, 4.29 และ 4.30 ซึ่งถ้าดูจากปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับของหนังฟอกแล้วนั้น จะพบว่าค่า %water uptake จะมีการเพิ่มขึ้นที่รวดเร็วกว่าของสองกรณีคือ หนังโคกับหนังกระบือ เมื่อเทียบเวลาและอุณหภูมิเดียวกัน จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมค่าความแข็งของหนังฟอกจึงมีค่าที่ลดลงอย่างรวดเร็วในระยะเวลานั้นเนื่องเพราะปริมาณน้ำที่ถูกดูดเข้ามามีค่ามากกว่าของทั้งหนังโคและหนังกระบือ ที่เวลาและอุณหภูมิเดียวกันนั่นเอง และความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นกับความแข็งของหนัง ที่บ่งบอกถึงความต้านทานการเปลี่ยนรูปและตัดโค้งงอ จะมีลักษณะแปรผกผันกันเช่นเดิม โดยทั้งสองค่าต่างก็ขึ้นกับปัจจัยด้านเวลาและอุณหภูมิ



รูปที่ 4.28 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค กระบือ และหนังฟอกที่อุณหภูมิ 303 K



รูปที่ 4.29 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หนังโค กระบือ และหนังฟอกที่อุณหภูมิ 313 K



รูปที่ 4.30 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความแข็งเฉลี่ยเทียบกับเวลา ของการทดลองแช่หน้าโค กระป๋อง และหน้าฟอกที่อุณหภูมิ 323 K

อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.28 ถึง 4.30 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งของหนังแต่ละชนิดจะมีค่าเริ่มต้นที่ไม่เท่ากัน โดยหน้ากระป๋องจะมีค่าความแข็งเริ่มต้นมากที่สุด รองลงมาเป็นหน้าโค และหน้าฟอกตามลำดับ โดยหน้าโคกับหน้าฟอกจะมีค่าความแข็งเริ่มต้นที่ใกล้เคียง ในขณะที่หน้ากระป๋องนั้นจะมีค่าความแข็งเริ่มต้นที่สูงกว่า อันเป็นผลมาจากลักษณะที่แตกต่างกันทางโครงสร้างของหนังทั้ง 3 ชนิด

4.3 การพัฒนาแบบจำลองการดูดซับน้ำของหนัง

เมื่อทำการทดลองจนได้ความสัมพันธ์ระหว่าง %water uptake กับเวลาของหนังชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวินแล้ว เพื่อให้สามารถเข้าใจได้ถึงพฤติกรรมการดูดซับน้ำเข้าสู่หนังได้มากขึ้น และเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคต จึงได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้น เพื่ออธิบายพฤติกรรมการดูดซับน้ำเข้าไปในหนัง โดยมีปัจจัยสำคัญ ได้แก่ เวลาที่อุณหภูมิ แยกตามประเภทของหนังแต่ละชนิด

จากสมการอัตราการดูดซับซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Liu (2002) บนพื้นฐานของกฎข้อที่สองของฟิกส์ (Fick's second law) ได้ว่า

$$\psi = 4M_{\infty} \left(D_0 \frac{e^{-E_a/RT}}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{t} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{d} \right) \left(\frac{100}{W_0} \right) \quad (2.15)$$

โดย	ψ	อัตราการดูดซับ (%/min)
	M_{∞}	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ ณ เวลาอิ่มตัว (g)
	W_0	น้ำหนักแห้งของวัสดุ (g)
	t	เวลาที่สารซึมผ่านเข้าไป (min)
	d	ความหนาของวัสดุ (mm)
	D_0	ค่า Pre-exponential factor
	E_a	ค่า Activation energy of diffusion (kJ/mol)
	R	Gas constant มีค่า 0.008314 kJ/mol K
	T	อุณหภูมิ (K)

เนื่องจากสมการ (2.15) เป็นการคำนวณหาอัตราการดูดซับ (Adsorption rate) ซึ่งได้จากการพิสูจน์โดยการใช้นิยามของค่า ψ ที่ Liu ให้ไว้คือ

$$\psi = \frac{100}{W_0} \times \frac{M_t}{t} \quad (2.12)$$

กำหนดนิยามใหม่ของ ψ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ ต่อเวลาที่เปลี่ยนแปลง เทียบกับน้ำหนักแห้ง เป็นเปอร์เซ็นต์ คือ

$$\psi = \frac{100}{W_0} \times \frac{\partial M_t}{\partial t} \quad (4.2)$$

จากสมการ (2.10) สำหรับคำนวณค่า M_t เมื่อ $0 < \frac{M_t}{M_{\infty}} < 0.6$

$$M_t = 4M_{\infty} \left(\frac{Dt}{\pi d^2} \right)^{1/2} \quad (2.10)$$

หาอนุพันธ์เทียบกับเวลาของ M_t ได้ว่า

$$\frac{\partial M_t}{\partial t} = 2M_{\infty} \left(\frac{D}{\pi d^2} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{t} \right)^{1/2} \quad (4.3)$$

นำค่า $\frac{\partial M_t}{\partial t}$ จาก (4.3) ไปแทนลงใน (4.2) แล้วจัดพจน์ใหม่ ได้เป็น

$$\psi = 2 \left(\frac{D}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{t} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{d} \right) \left(\frac{100M_\infty}{W_0} \right) \quad (4.4)$$

จากสมการหาค่า D ตามความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส

$$D = D_0 e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (2.14)$$

แทนลงในสมการ (4.4) จะได้สมการสำหรับใช้คำนวณหาอัตราการดูดซับ ตามนิยามใหม่เป็น

$$\psi = 2 \left(D_0 \frac{(e^{-E_a/RT})^{1/2}}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{t} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{d} \right) \left(\frac{100M_\infty}{W_0} \right) \quad (4.5)$$

จากสมการ (4.5) หากต้องการหาออกมาเป็นค่า %water uptake ก็สามารทำได้โดยจากนิยามของ %water uptake

$$\%wateruptake = \frac{M_t}{W_0} \times 100 \quad (4.1)$$

หาอนุพันธ์เทียบกับเวลาของ %water uptake ได้เป็นอัตราการดูดซับ

$$\frac{\partial(\%wateruptake)}{\partial t} = \frac{\partial M_t}{\partial t} \times \frac{100}{W_0} = \psi \quad (4.6)$$

ซึ่งจะมีค่าเท่ากับสมการ (4.5) ดังนั้น อินทิเกรตสมการ (4.5) และ (4.6) ในช่วง $0 \rightarrow t$ ได้สมการสำหรับคำนวณค่า %water uptake เป็น

$$\%wateruptake = 4 \left(D_0 t \frac{(e^{-E_a/RT})^{1/2}}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{d} \right) \left(\frac{100M_\infty}{W_0} \right) \quad (4.7)$$

สมการที่ (4.7) จะเป็นสมการที่ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่า %water uptake ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ซึ่งมีเงื่อนไขด้วยว่าระยะเวลาในการแพร่ของสารจะต้องไม่นานเกินไป โดยพิจารณาจากค่า M_t/M_∞ ซึ่งต้องอยู่ในช่วง $0 < \frac{M_t}{M_\infty} < 0.6$ จึงจะใช้งานได้

เมื่อได้สมการสำหรับการคำนวณแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือจะแยกพิจารณาตามชนิดของหนังแต่ละชนิด มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 แบบจำลองปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของหนังโค

จากผลการทดลองที่ได้ จะสามารถคำนวณออกมาเป็นค่า M_t และ %water uptake ที่เวลาต่างๆ ณ อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวินได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า M_t และ % water uptake ที่เวลาต่างๆ ของหนังโคที่แช่ที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 K

t (นาท)	303 K			313 K			323 K		
	M_t (g)	M_t/M_∞	%uptake	M_t (g)	M_t/M_∞	%uptake	M_t (g)	M_t/M_∞	%uptake
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
1	0.085	0.071	8.21	0.084	0.068	8.49	0.106	0.071	11.04
2	0.109	0.091	9.95	0.114	0.092	10.38	0.155	0.104	14.26
3	0.1303	0.109	11.53	0.125	0.101	14.07	0.184	0.123	16.80
4	0.151	0.126	14.323	0.160	0.1303	15.43	0.203	0.136	18.93
5	0.167	0.139	17.28	0.182	0.147	17.65	0.222	0.148	22.57
6	0.175	0.146	20.18	0.203	0.164	22.99	0.253	0.169	22.88
7	0.197	0.165	17.62	0.211	0.171	20.83	0.275	0.184	303.03
8	0.210	0.175	18.75	0.223	0.180	22.55	0.3036	0.205	27.39
9	0.226	0.189	19.49	0.258	0.209	20.16	0.315	0.211	34.96
10	0.264	0.221	21.77	0.276	0.223	21.65	0.339	0.227	33.98
12	0.257	0.215	25.41	0.293	0.237	24.39	0.376	0.252	303.323
14	0.289	0.242	25.42	0.3037	0.249	27.60	0.415	0.278	38.76
16	0.3032	0.253	27.58	0.332	0.269	303.58	0.423	0.283	42.67
18	0.337	0.282	303.73	0.334	0.271	32.44	0.479	0.321	48.63
20	0.327	0.274	303.80	0.369	0.299	28.76	0.488	0.327	46.41
25	0.3134	0.338	32.94	0.412	0.334	35.96	0.533	0.357	49.313
303	0.419	0.351	47	0.466	0.378	42.2	0.623	0.418	59.14
35	0.466	0.39	313.84	0.518	0.42	55.15	0.618	0.414	55.91
313	0.3233	0.421	39.22	0.546	0.443	49.05	0.676	0.453	59.42
45	0.541	0.453	48.72	0.564	0.457	54.53	0.668	0.448	74.44
60	0.616	0.516	49.47	0.647	0.524	56.63	0.8313	0.563	78.87
75	0.682	0.570	58.86	0.697	0.565	66.02	0.865	0.580	83.76
90	0.708	0.593	62.72	0.728	0.590	76.84	0.872	0.584	91.81

โดยค่า M_t คำนวณได้จากการนำค่าน้ำหนักหลังแช่ – น้ำหนักก่อนแช่ ส่วนค่า %water uptake ได้มาจากการนำค่า M_t ไปหารน้ำหนักหลังอบ แล้วคูณด้วย 100 โดยจะคำนวณที่แต่ละช่วงเวลา แล้วนำไปหาค่าเฉลี่ยออกมาได้

ในส่วนของค่า M_∞ เป็นค่าที่ได้มาจากการทดลองแช่หนึ่งที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวิน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งอัตราส่วน M_t/M_∞ มีความสำคัญตรงที่ในสมการที่ (4.3) ระบุไว้ว่าขอบเขตของสมการจะต้องมีค่า M_t/M_∞ อยู่ในช่วงไม่เกิน 0.6 จึงจะสามารถใช้งานสมการได้ จึงต้องมีการพิจารณาอัตราส่วนนี้ไว้ด้วยดังแสดงในตารางที่ 4.1

เมื่อได้ค่าจากการทดลองแล้ว สิ่งที่ทำต่อไปคือการหาค่าโดยการคำนวณโดยใช้สมการที่ (11) แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ได้จากตารางที่ 1 โดยเทียบกันทีละจุด จากสมการที่ (11) เราสามารถแทนค่าต่างๆ ลงไปโดยค่า d เป็นค่าความหนาของหนังเฉลี่ยได้เป็น 2 มิลลิเมตร ค่า R เป็น 0.008314 kJ/molK, ค่า T เป็น 303, 313 และ 323 K ตามลำดับ, ค่า t เป็น 0-10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60 และ 90 นาที ตามลำดับ ส่วนค่า W_0 ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักแห้งของหนังที่นำไปทดลองเพื่อหาค่า M_∞ และค่า M_∞ ที่แต่ละอุณหภูมิ สำหรับหนังโค ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า M_∞ และ W_0 สำหรับหนังโคที่อุณหภูมิต่างๆ

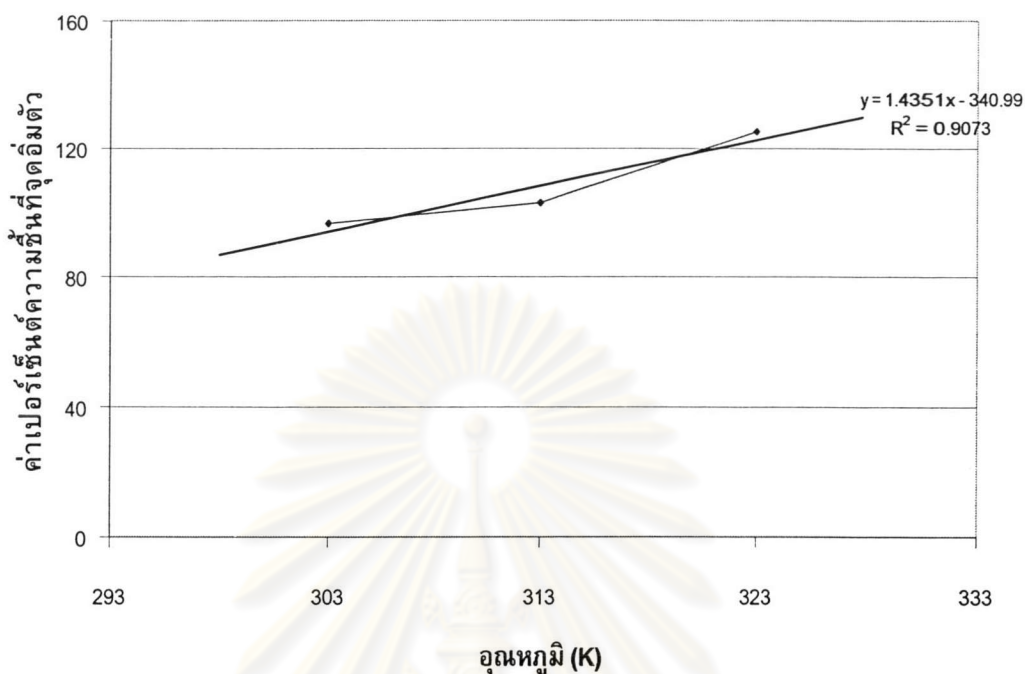
อุณหภูมิที่แช่	303 K	313 K	323 K
M_∞ (g)	1.195	1.234	1.492
W_0 (g)	1.238	1.199	1.192
P_s (%)	96.5	102.9	125.2

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่า M_∞ เป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ กล่าวคือ ยิ่งอุณหภูมิมากขึ้น ค่า M_∞ ก็จะมีมากขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงต้องมาการกำหนดค่าขึ้นมาใหม่ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับ ณ จุดอิ่มตัว (Percent Saturation ; P_s) คำนวณได้จาก

$$P_s = (M_\infty / W_0) \times 100 \quad (4.8)$$

ซึ่งค่า P_s นี้ก็คือพจน์ของ $\left(\frac{100M_\infty}{W_0}\right)$ ที่อยู่ในสมการที่ (4.3) นั่นเอง และเมื่อนำค่า P_s จากตารางที่ 4.2 ไปพล็อตเพื่อหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ในรูปแบบเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.31

$$P_s = 1.4351T - 340.99 \quad (4.9)$$



รูปที่ 4.31 แสดงค่า P_s และเส้นแนวโน้มของค่า P_s เทียบกับอุณหภูมิของหนังโค

ดังนั้น เมื่อแทนพจน์ $\left(\frac{100M_\infty}{W_0}\right)$ ของสมการที่ (4.7) ด้วยค่า P_s ที่แสดงในสมการที่ (4.9) แล้วจัดรูปใหม่ จะได้เป็น

$$\% \text{wateruptake} = 4 \left(D_0 t \frac{(e^{-E_a/RT})}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{1.4351T - 340.99}{d} \right) \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.10) จะเห็นว่ายังขาดค่า E_a และ D_0 ที่ยังไม่ทราบค่าอยู่ จึงต้องมีการหาค่า E_a และ D_0 ขึ้นมาก่อน แล้วคำนวณเป็นค่า % water uptake จากการคำนวณ จากนั้นนำค่า % water uptake จากการคำนวณนี้ไปเปรียบเทียบกับค่า % water uptake จากการทดลองที่อยู่ในตารางที่ 4.1 ตามแต่ละอุณหภูมิ ปรับแก้จนกว่าจะได้ค่า E_a และ D_0 ที่แท้จริง ซึ่งในการเปรียบเทียบจะใช้วิธีเปรียบเทียบ 2 วิธี วิธีแรกเป็นการคำนวณค่าผลต่างยกกำลังที่น้อยที่สุด (Least Square Method) กับอีกวิธีเป็นการหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (% Different Error) โดยเปรียบเทียบให้ได้ค่ารวมจากวิธี Least Square Method และค่ารวมจากการเฉลี่ยโดยวิธีหาเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่น้อยที่สุด ซึ่งวิธีการหาค่าเปรียบเทียบทั้งสองวิธีนี้ คำนวณได้จากสมการที่ (4.11) และ (4.12)

$$\text{ค่า Least Square} = (\% \text{ uptake จากการทดลอง} - \% \text{ uptake จากการคำนวณ})^2 \quad (4.11)$$

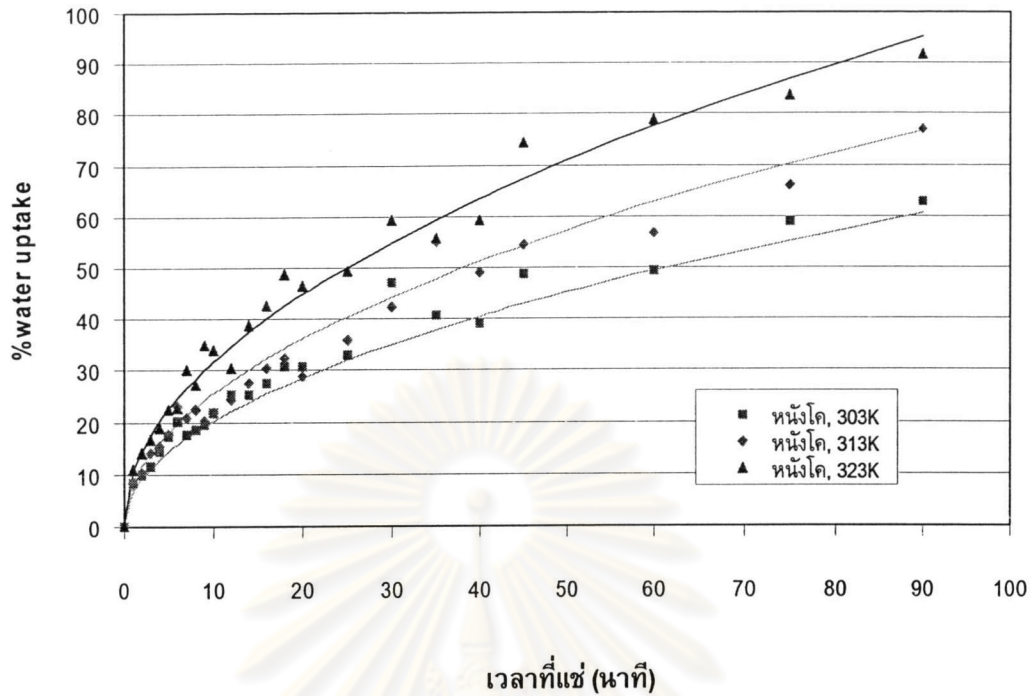
$$\% \text{ความแตกต่าง} = \frac{\% \text{ uptake จากการทดลอง} - \% \text{ uptake จากการคำนวณ}}{\% \text{ uptake จากการทดลอง}} \times 100 \quad (4.12)$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการแล้ว ก็เทียบหาค่าเปรียบเทียบจากทั้งสองวิธี ซึ่งผลที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Least Square และ % Different Error ที่แต่ละอุณหภูมิ สำหรับหนังโค

D_0	E_a	Least Square				Percent Error			
		303 K	313 K	323 K	SUM	303 K	313 K	323 K	SUM
420	30	981.16	207.86	391.02	1580.03	18.85	6.67	7.19	32.71
200	28	796.40	224.04	399.93	1420.37	16.83	7.19	7.24	31.25
63	25	680.76	222.13	300.89	1203.77	15.40	7.14	6.55	29.09
30	23	530.09	249.49	306.71	1086.29	13.29	7.82	6.60	27.71
14	21	449.03	257.97	274.68	981.69	11.96	7.99	6.30	26.25
9.6	20	403.33	268.06	267.25	938.64	11.13	8.19	6.25	25.57
6.5	19	387.91	259.79	246.44	894.13	10.86	8.03	6.08	24.97
4.4	18	373.44	251.79	234.35	859.58	10.60	7.87	5.94	24.40
3.0	17	344.91	253.48	231.36	829.75	10.06	7.90	5.88	23.84
2.1	16	273.25	296.88	236.89	807.02	8.51	8.83	5.97	23.31
1.4	15	287.03	262.32	233.11	782.46	8.82	8.07	5.91	22.81
1.0	14	205.38	352.30	238.62	796.29	6.75	9.90	5.99	22.64
0.7	13	173.21	424.39	252.33	849.93	5.96	11.02	6.14	23.12
0.5	12	161.15	586.24	310.65	1058.04	5.66	13.12	6.64	25.41

จากตารางที่ 4.3 เราจะได้อ่านค่า E_a และ D_0 ที่ทำให้เกิดค่า Least Square และค่า % Different Error ที่น้อยที่สุดเป็น $E_a = 15 \text{ kJ/mol}$ และ $D_0 = 1.4$ ซึ่งมีความหมายว่าการแพร่ของน้ำเข้าไปในหนังจำเป็นต้องได้รับพลังงานประมาณ 15 kJ/mol เพื่อทำให้เกิดการแพร่ขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ สำหรับการแพร่ของน้ำเข้าสู่หนังโคจะเป็น 1.4 เมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปแสดงเป็นแผนภูมิเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองจริงได้ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่าง %water uptake ของหนังโค ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ (4.13) เทียบกับค่าจากการทดลองจริง ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

ดังนั้น จากสมการที่ (4.10) จะได้สมการสำหรับการคำนวณค่า %water uptake สำหรับหนังโค ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เป็น

$$\%wateruptake = \left(te^{\frac{-1804.18}{T}} \right)^{0.5} (1.915T - 455.26) \quad (4.13)$$

โดย t เวลาที่แช่ หน่วย นาที มีค่า $t < 90$ นาที

T อุณหภูมิที่ใช้แช่ หน่วย เคลวิน (K) มีค่า $303 < T < 323$ K

และแบบจำลองนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 6-9 %

4.3.2 แบบจำลองปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของหนังกระบือ

จากผลการทดลองที่ได้ จะสามารถคำนวณออกมาเป็นค่า M_t และ %water uptake ที่เวลาต่างๆ ณ อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวินได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า M_t และ % water uptake ที่เวลาต่างๆ ของหนังกระป๋องที่แช่ที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 K

t (นาที)	303 K			313 K			323 K		
	M_t (g)	M_t / M_∞	%uptake	M_t (g)	M_t / M_∞	%uptake	M_t (g)	M_t / M_∞	%uptake
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
1	0.074	0.071	6.29	0.083	0.078	7.19	0.093	0.089	8.87
2	0.106	0.103	9.29	0.103	0.096	10.21	0.121	0.116	12.05
3	0.126	0.122	10.24	0.137	0.128	12.12	0.146	0.140	13.42
4	0.145	0.141	12.22	0.163	0.152	15.10	0.180	0.173	15.76
5	0.152	0.147	13.02	0.171	0.160	16.04	0.199	0.191	19.49
6	0.171	0.166	15.38	0.191	0.179	16.75	0.217	0.208	21.65
7	0.182	0.177	17.63	0.206	0.192	20.79	0.225	0.216	21.25
8	0.214	0.207	17.54	0.206	0.193	20.79	0.252	0.242	21.92
9	0.206	0.200	17.49	0.231	0.216	18.44	0.260	0.250	23.70
10	0.223	0.216	20.79	0.260	0.243	22.08	0.280	0.269	24.85
12	0.263	0.255	22.33	0.272	0.254	25.61	0.296	0.284	28.68
14	0.259	0.251	24.24	0.304	0.285	27.68	0.327	0.314	31.21
16	0.287	0.278	25.20	0.322	0.301	31.41	0.369	0.354	34.57
18	0.301	0.291	29.18	0.326	0.305	31.27	0.372	0.358	35.45
20	0.320	0.310	29.64	0.366	0.342	36.27	0.413	0.397	37.32
25	0.372	0.361	32.26	0.386	0.361	35.67	0.434	0.417	43.09
30	0.404	0.391	39.32	0.446	0.417	45.16	0.478	0.459	43.12
35	0.426	0.413	40.34	0.461	0.431	39.61	0.503	0.483	45.60
40	0.476	0.462	42.22	0.496	0.464	45.82	0.548	0.526	50.45
45	0.509	0.493	40.32	0.543	0.508	53.15	0.578	0.555	58.08
60	0.562	0.544	51.06	0.615	0.575	61.43	0.609	0.585	60.64
75	0.579	0.561	61.98	0.638	0.597	63.32			

โดยค่า M_t คำนวณได้จากการนำค่าน้ำหนักหลังแช่ - น้ำหนักก่อนแช่ ส่วนค่า % water uptake ได้มาจากการนำค่า M_t ไปหารน้ำหนักหลังอบ แล้วคูณด้วย 100 โดยจะคำนวณที่แต่ละช่วงเวลา แล้วนำไปหาค่าเฉลี่ยออกมาได้ เช่นเดียวกับหนังโค

ในส่วนของค่า M_∞ ที่ได้มาจากการทดลองแช่หนังกระป๋องที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวิน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณอัตราส่วน M_t / M_∞ ด้วย และเช่นเดียวกับหนังโคคือค่า M_t / M_∞ ต้องอยู่ในช่วงไม่เกิน 0.6 จึงจะสามารถใช้งานสมการได้ จึงได้แยกพิจารณาอัตราส่วนนี้ไว้ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

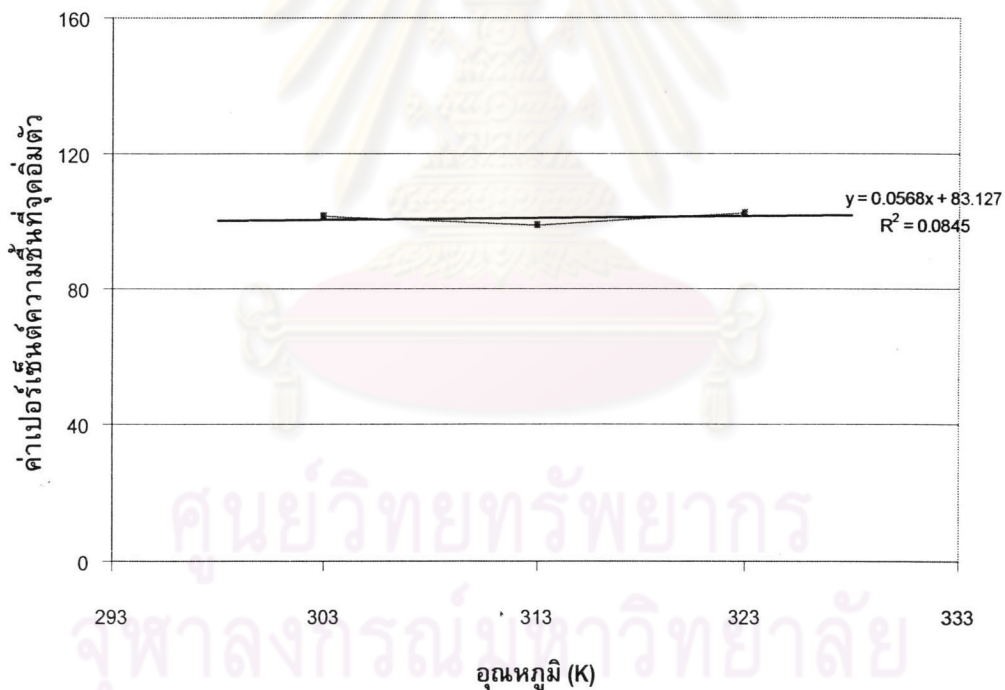
จากนั้นจะทำการหาค่าจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (4.7) แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.4 โดยเทียบกันที่ละจุด เช่นกันกับในกรณีของหนังโค โดยแทนค่าลงในสมการที่ (4.7) เป็นดังนี้ ค่า d เป็น 2 มิลลิเมตร ค่า R เป็น 0.008314 kJ/molK, ค่า T เป็น 303, 313 และ 323 K ตามลำดับค่า t เป็น 0-10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60 และ 75 นาที ตามลำดับ สำหรับค่า W_0 และค่า M_∞ ที่แต่ละอุณหภูมิ สำหรับหนังกระป๋อง ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า M_∞ และ W_0 สำหรับหนังกระป๋องที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิที่แช่	303 K	313 K	323 K
M_∞ (g)	1.032	1.069	1.041
W_0 (g)	1.018	1.083	1.015
P_s (%)	101.43	98.75	102.56

จากตารางที่ 4.5 จะสามารถคำนวณหาค่า P_s ได้โดยใช้สมการ (4.8) จากนั้นนำค่า P_s จากตารางที่ 4.5 ไปเพื่อหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในลักษณะเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.33 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า P_s สำหรับการแช่หนังกระป๋อง

$$P_s = 0.0568T + 83.127 \quad (4.14)$$



รูปที่ 4.33 แสดงค่า P_s และเส้นแนวโน้มของค่า P_s เทียบกับอุณหภูมิของหนังกระป๋อง

แทนพจน์ $\left(\frac{100M_\infty}{W_0}\right)$ ของสมการที่ (4.7) ด้วยค่า P_s จากสมการที่ (4.14)

แล้วจัดรูปใหม่ จะได้เป็น

$$\%wateruptake = 4 \left(D_0 t \frac{(e^{-E_a / RT})}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{0.0568T + 83.127}{d} \right) \quad (4.15)$$

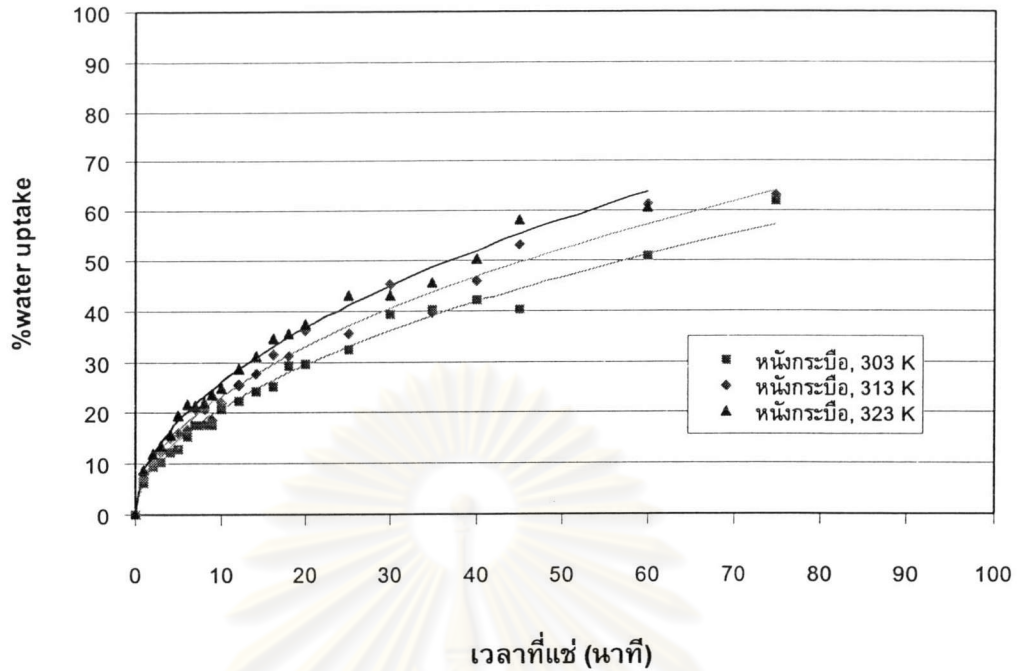
จากสมการที่ (4.15) ก็จะทำการหาค่า E_a และ D_0 เพื่อคำนวณออกมาให้ได้เป็นค่า % water uptake จากการคำนวณ แล้วจึงนำค่า % water uptake จากการคำนวณนี้ไปเปรียบเทียบกับค่า % water uptake จากการทดลองที่อยู่ในตารางที่ 4.4 ตามแต่ละอุณหภูมิเหมือนกับกรณีของหนังโค ปรับแก้จนกว่าจะได้ค่า E_a และ D_0 ที่แท้จริง โดยในการเปรียบเทียบค่าจากการคำนวณกับค่าจากการทดลอง ก็จะใช้การคำนวณค่าผลต่างยกกำลังที่น้อยที่สุด (Least Square Method) กับการหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (% Different Error) เพื่อให้ได้ค่ารวมจากวิธี Least Square Method และค่ารวมจากการเฉลี่ยโดยวิธีหาเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่น้อยที่สุด โดยการคำนวณเพื่อหาค่าจากทั้งสองวิธีนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.11) และ (4.12) ตามลำดับ

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการแล้ว ก็เทียบหาค่าเปรียบเทียบจากทั้งสองวิธี ซึ่งผลที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า Least Square และ %Different Error ที่แต่ละอุณหภูมิสำหรับหนังกระบือ

D_0	E_a	Least Square				Percent Error			
		303 K	313 K	323 K	SUM	303 K	313 K	323 K	SUM
410	30	278.68	130.40	157.02	566.10	7.56	4.84	6.01	18.41
190	28	235.60	130.88	118.92	485.39	6.80	4.84	5.27	16.91
61	25	156.48	118.67	95.13	370.28	5.41	4.79	4.85	15.05
28	23	138.57	125.69	65.12	329.38	5.10	4.81	4.23	14.14
13	21	111.79	124.73	53.68	290.20	4.71	4.81	4.08	13.60
9	20	89.35	114.09	55.51	258.94	4.52	4.79	4.10	13.41
6.2	19	76.42	108.53	55.39	240.34	4.49	4.83	4.09	13.42
4.3	18	67.80	103.01	58.35	229.17	4.75	5.11	4.12	13.98
2.9	17	67.44	105.41	50.53	223.38	4.81	4.92	4.09	13.82
2	16	68.00	102.49	50.72	221.21	5.44	5.17	4.09	14.69
1.3	15	68.64	122.51	57.88	249.02	4.67	4.80	4.14	13.62
0.9	14	67.43	112.46	55.81	235.70	5.29	4.79	4.12	14.21
0.6	13	66.92	125.88	75.88	268.69	5.08	4.81	4.41	14.30

จากตารางที่ 4.6 เราจะได้ค่า E_a และ D_0 ที่ทำให้เกิดค่า Least Square และค่า % Different Error ที่น้อยที่สุดเป็น $E_a = 17$ kJ/mol และ $D_0 = 2.9$ ซึ่งมีความหมายว่าการแพร่ของน้ำเข้าไปในหนังกระบือจำเป็นต้องได้รับพลังงานประมาณ 17 kJ/mol เพื่อให้เกิดการแพร่ขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ สำหรับการแพร่ของน้ำเข้าสู่หนังกระบือจะเป็น 2.9 เมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปแสดงเป็นแผนภูมิเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองจริงได้ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่าง %water uptake ของน้ำกระดาษบือ ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ (4.16) เทียบกับค่าจากการทดลองจริง ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

ดังนั้น จากสมการที่ (4.15) จะได้สมการสำหรับการคำนวณค่า %water uptake สำหรับน้ำกระดาษบือ ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เป็น

$$\%wateruptake = \left(te^{\frac{-2044.74}{T}} \right)^{0.5} (0.109T + 159.73) \quad (4.16)$$

โดย t เวลาที่แช่ หน่วย นาที มีค่า $t < 75$ นาที

T อุณหภูมิที่ใช้แช่ หน่วย เคลวิน (K) มีค่า $303 < T < 323$ K

และแบบจำลองนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ 4-5 %

4.3.3 แบบจำลองปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของหนังฟอก

จากผลการทดลองที่ได้ จะสามารถคำนวณออกมาเป็นค่า M_t และ %water uptake ที่เวลาต่างๆ ณ อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวินได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่า M_t และ % water uptake ที่เวลาต่างๆ ของหนังฟอกที่แช่ที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 K

t (นาที)	303 K			313 K			323 K		
	M_t (g)	M_t / M_∞	%uptake	M_t (g)	M_t / M_∞	%uptake	M_t (g)	M_t / M_∞	%uptake
0	0.000	-	0.00	0.000	-	0.00	0.000	-	0.00
1	0.090	0.062	9.72	0.127	0.084	13.96	0.169	0.143	18.08
2	0.140	0.096	14.47	0.206	0.137	23.11	0.273	0.230	24.77
3	0.171	0.117	18.77	0.262	0.174	24.04	0.311	0.262	33.71
4	0.220	0.140	24.86	0.284	0.189	29.43	0.394	0.332	42.34
5	0.249	0.170	27.25	0.342	0.227	26.32	0.436	0.367	42.52
6	0.312	0.213	33.76	0.347	0.231	32.85	0.590	0.497	54.65
7	0.328	0.224	35.16	0.335	0.223	32.89	0.550	0.463	57.26
8	0.361	0.246	313.89	0.489	0.325	50.25	0.604	0.510	69.09
9	0.382	0.261	313.78	0.497	0.331	47.21	0.676	0.570	63.89
10	0.442	0.302	47.60	0.550	0.366	51.35	0.697	0.588	63.58
12	0.457	0.312	52.94	0.638	0.425	64.15	0.660	0.556	76.61
14	0.588	0.402	64.94	0.670	0.446	57.72	0.790	0.666	88.90
16	0.600	0.410	55.42	0.783	0.522	79.25	0.854	0.720	89.24
18	0.668	0.456	66.89	0.680	0.452	86.38	1.035	0.873	85.17
20	0.731	0.499	70.38	0.677	0.451	86.81	1.016	0.856	74.80
25	0.725	0.495	85.38	0.831	0.553	83.34	1.132	0.954	100.84
30	0.785	0.536	83.23	0.952	0.634	90.90	1.036	0.873	98.29

โดยวิธีการคำนวณค่า M_t จะเหมือนกับของสองกรณีแรก ในส่วนของค่า M_∞ ที่ได้มาจากการทดลองแช่หนังฟอกที่อุณหภูมิ 303, 313 และ 323 เคลวิน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณอัตราส่วน M_t/M_∞ ด้วย และเช่นกันกับสองกรณีที่แล้วคือค่า M_t/M_∞ ต้องอยู่ในช่วงไม่เกิน 0.6 จึงจะสามารถใช้งานสมการได้ จึงได้แยกพิจารณาอัตราส่วนนี้ไว้ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

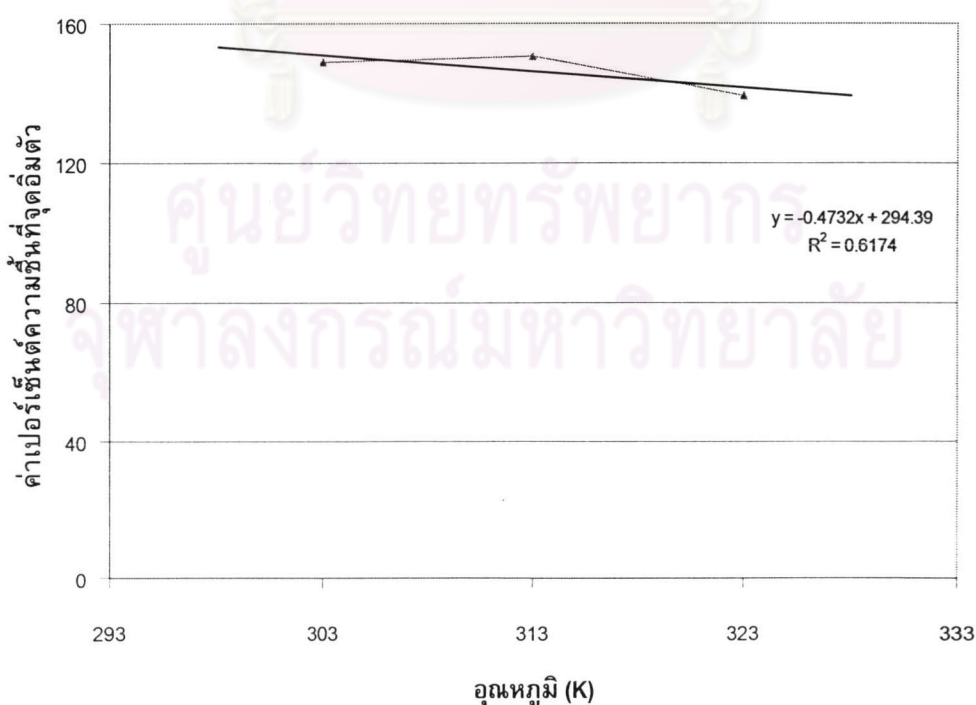
จากนั้นจะทำการหาค่าจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (4.7) แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.7 โดยเทียบกันทีละจุด เช่นกันกับในกรณีของหนังโคและกระบือ โดยแทนค่าลงในสมการที่ (4.7) เป็นดังนี้ ค่า d เป็นค่าความหนาของหนังเฉลี่ยได้เป็น 2 มิลลิเมตร ค่า R เป็น 0.008314 kJ/molK, ค่า T เป็น 303, 313 และ 323 K ตามลำดับ, ค่า t เป็น 0-10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, และ 30 นาที ตามลำดับ สำหรับค่า W_0 และค่า M_∞ ที่แต่ละอุณหภูมิ สำหรับหนังฟอก ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า M_∞ และ W_0 สำหรับหนังฟอกที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิที่แช่	303 K	313 K	323 K
M_∞ (g)	1.465	1.402	1.186
W_0 (g)	0.984	0.998	0.851
P_s (%)	148.86	150.58	139.39

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าค่า P_s ที่ได้มาจากการหาด้วยสมการ (4.8) ของหนังฟอกนั้นจะแตกต่างกันตรงที่ค่า M_∞ ที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน (323 K) มีค่าที่น้อยกว่าค่าอื่นๆ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะในการแช่หนังฟอกเพื่อหาค่า M_∞ เป็นเวลา 24 ชั่วโมงนั้นทำให้หนังฟอกเกิดการไฮโดรไลซิส ให้น้ำส่วนหนึ่งกลายเป็นเจลาตินไป ค่าที่ได้จึงมีความผิดพลาดซึ่งกรณีนี้ไม่เกิดกับการแช่หนังชนิดอื่นๆ ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะหนังฟอกนั้นผ่านกระบวนการฟอกขาวด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้โครงสร้างของหนังมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้เร็วกว่า ที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน ทั้งๆ ที่โดยปกติแล้วปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดที่อุณหภูมิ 333 เคลวินขึ้นไป จากนั้น ทำให้ลักษณะกราฟเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ และเส้นแนวโน้มออกมาเป็นดังรูปที่ 4.35 และจะทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า P_s กับอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K) เป็นสมการเชิงเส้นคือ

$$P_s = -0.4732T + 294.39 \quad (4.17)$$



รูปที่ 4.35 แสดงค่า $P.S.$ และเส้นแนวโน้มของค่า $P.S.$ เทียบกับอุณหภูมิของหนังฟอก

แทนพจน์ $\left(\frac{100M_\infty}{W_0}\right)$ ของสมการที่ (4.7) ด้วยค่า $P.S.$ จากสมการที่ (4.17)

แล้วจัดรูปใหม่ จะได้เป็น

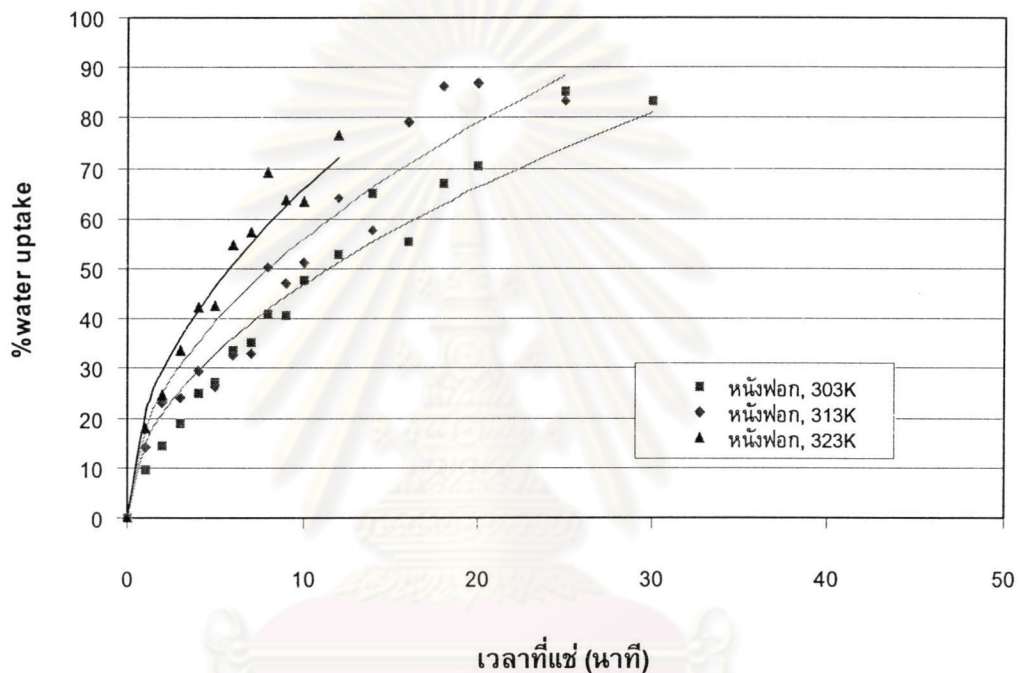
$$\%wateruptake = 4 \left(D_0 t \frac{(e^{-E_a/RT})}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{-0.4732T + 294.39}{d} \right) \quad (4.18)$$

จากสมการที่ (4.18) ก็จะทำการสุ่มค่า E_a และ D_0 เพื่อคำนวณออกมาให้ได้เป็นค่า % water uptake จากการคำนวณ แล้วจึงนำค่า %water uptake จากการคำนวณนี้ไปเปรียบเทียบกับค่า % water uptake จากการทดลองที่อยู่ในตารางที่ 4.7 ตามแต่ละอุณหภูมิ เหมือนกับกรณีของหนังโค ปรับแก้จนกว่าจะได้ค่า E_a และ D_0 ที่แท้จริง โดยในการเปรียบเทียบค่าจากการคำนวณกับค่าจากการทดลอง ก็จะใช้การคำนวณค่าผลต่างยกกำลังที่น้อยที่สุด และการหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง จากสมการที่ (4.11) และ (4.12) เพื่อให้ได้ผลรวมของค่าทั้งสองที่น้อยที่สุด ผลที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่า Least Square และ % Different Error ที่แต่ละอุณหภูมิ สำหรับหนังฟอก

D_0	E_a	Least Square				Percent Error			
		303 K	313 K	323 K	SUM	303 K	313 K	323 K	SUM
8000	35	505.28	1001.90	186.05	1693.23	14.05	16.97	7.41	38.43
5400	34	500.68	989.01	195.82	1685.51	14.11	16.74	7.42	38.27
3700	33	482.87	997.94	199.59	1680.40	14.40	16.91	7.42	38.73
2500	32	479.42	986.93	216.14	1682.50	14.48	16.70	7.43	38.61
1160	30	469.59	987.84	242.40	1699.83	14.89	16.72	7.44	39.05
540	28	475.99	993.32	270.62	1739.92	15.58	16.82	7.45	39.85
250	26	495.34	991.12	314.03	1800.49	16.36	16.78	7.59	40.73
170	25	509.10	989.21	339.97	1838.28	16.73	16.75	7.71	41.19
110	24	474.35	952.17	491.27	1917.79	15.49	15.44	8.47	39.39
78	23	531.76	976.27	416.84	1924.87	17.23	16.47	8.00	41.70
53	22	551.09	973.98	452.21	1977.28	17.59	16.42	8.22	42.23
36	21	572.36	971.46	490.77	2034.60	18.03	16.35	8.46	42.85
24	20	554.43	956.29	587.96	2098.67	17.66	15.81	9.12	42.59
16	19	538.28	951.99	696.51	2186.79	17.36	15.27	9.93	42.56
11.1	18	606.60	955.20	673.51	2235.32	18.68	15.74	9.77	44.19

จากตารางที่ 4.9 เราจะได้ค่า E_a และ D_0 ที่ทำให้เกิดค่า Least Square และค่า % Different Error ที่น้อยที่สุดเป็น $E_a = 33 \text{ kJ/mol}$ และ $D_0 = 3700$ ซึ่งมีความหมายว่าการแพร่ของน้ำเข้าไปในหนังกระเบื้องจำเป็นต้องได้รับพลังงานประมาณ 33 kJ/mol เพื่อทำให้เกิดการแพร่ขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ สำหรับการแพร่ของน้ำเข้าสู่หนังฟอกจะเป็น 3700 ซึ่งจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิที่สูงกว่าหนังชนิดอื่นๆ มาก ดังนั้นการแช่หนังฟอกจึงเกิดการดูดซับน้ำได้เร็วกว่าหนังชนิดอื่นๆ ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปแสดงเป็นแผนภูมิเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองจริงได้ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่าง %water uptake ของหนังฟอก ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ (4.19) เทียบกับค่าจากการทดลองจริง ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

ดังนั้น จากสมการที่ (4.18) จะได้สมการสำหรับการคำนวณค่า %water uptake สำหรับหนังฟอก ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ เป็น

$$\%wateruptake = \left(te^{\frac{-3969.21}{T}} \right)^{0.5} (-3.067T + 19082.32) \quad (4.19)$$

โดย t เวลาที่แช่ หน่วย นาที มีค่า $t < 30$ นาที

T อุณหภูมิที่ใช้แช่ หน่วย เคลวิน (K) มีค่า $303 < T < 323 \text{ K}$

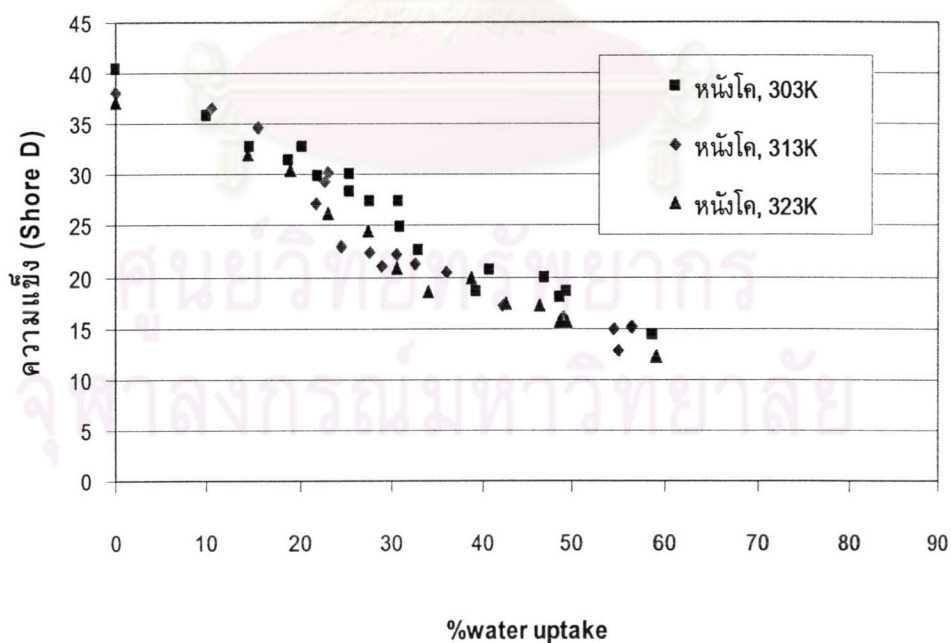
และแบบจำลองนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 7-18 %

4.4 การพัฒนาแบบจำลองความสัมพันธ์สมบัติเชิงกลกับสภาวะการแช่หนัง

จากผลการทดลองในส่วนของสมบัติเชิงกลกับสภาวะในการแช่หนัง ในหัวข้อ 4.2 นั้น จะทำให้ได้ข้อสรุปว่าค่าความต้านทานการเปลี่ยนรูปและการดัดงอของหนัง โดยวัดออกมาในรูปแบบของค่าความแข็งจะขึ้นกับปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับเข้าสู่หนัง หรือค่า %water uptake โดยยิ่งค่า %water uptake มีค่ามากขึ้นเท่าไร ค่าความแข็งก็จะมีค่าน้อยลง และจากส่วนของการพัฒนาแบบจำลองการดูดซับน้ำของหนัง ในหัวข้อที่ 4.3 จะทำให้ทราบค่า %water uptake ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ของหนังแต่ละชนิดได้ จากความสัมพันธ์ตรงนี้เอง ทำให้สามารถพัฒนาไปสู่การสร้างแบบจำลองค่าความแข็ง เมื่อรู้ค่าเวลาและอุณหภูมิของหนังชนิดต่างๆ ได้ โดยเริ่มจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของหนังกับค่าความแข็ง เมื่อได้ความสัมพันธ์แล้วก็นำแบบจำลองที่ได้จากหัวข้อ 4.3 มาช่วยในการคำนวณและจัดรูปแบบได้ วิธีการพัฒนาแบบจำลองค่าความแข็งที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิ แบ่งแยกตามชนิดของหนังได้เป็นดังนี้

4.4.1 แบบจำลองค่าความแข็งของหนังโค

จากผลการทดลองเรื่องค่าความแข็ง เมื่อนำมาสร้างเป็นแผนภูมิเพื่อหาความสัมพันธ์กับค่า %water uptake ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %water uptake ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองของหนังโค ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ หากพิจารณาเฉพาะช่วงที่มีค่า %water uptake ไม่เกิน 60% ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ค่าความแข็งของหนัง ภายหลังจากแช่ลดลงจนมีค่าอยู่ในช่วงที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง คือ 12-15 จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับ %water uptake มีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นเส้นตรงโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ มีลักษณะสมการเป็น

$$F = B - Ax \quad (4.20)$$

โดย F ค่าความแข็ง ณ ปริมาณความชื้นนั้นๆ
 x ค่า %water uptake
 B ค่าความแข็งเริ่มต้นเฉลี่ยของหนังโค
 A ค่าคงที่

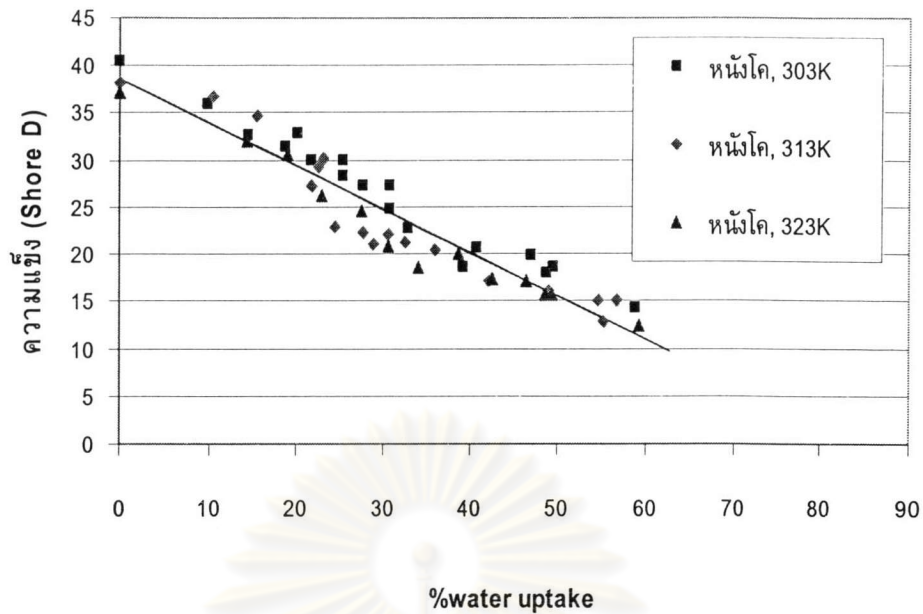
สำหรับค่า B จะทราบได้โดยการเฉลี่ยค่าความแข็งเริ่มต้นของหนังโค โดยจะได้ค่าเป็น 38.56 สำหรับค่า A สามารถหาได้โดยวิธีการสุ่มค่าขึ้นมาก่อนค่าหนึ่ง จากนั้นก็คำนวณได้เป็น F จากการคำนวณ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลองที่อยู่ในรูปที่ 4.37 แล้วหาออกมาเป็นค่าเปรียบเทียบด้วยวิธียกกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least square) และการหาค่าความคลาดเคลื่อน (%Error) เพื่อให้ได้ A ที่ทำให้ได้ค่าเปรียบเทียบทั้งสองที่น้อยที่สุด ผลการสุ่มค่าแสดงไว้ในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงค่า Least Square และ % Different Error ที่แต่ละอุณหภูมิ สำหรับหนังโค

A	B	Least Square				%Error			
		303K	313K	323K	SUM	303K	313K	323K	SUM
0.8	38.56	2609.61	4896.12	1927.23	9432.97	51.55	81.77	63.79	197.12
0.6	38.56	517.10	1200.83	267.46	1985.39	22.39	37.68	23.01	83.07
0.5	38.56	93.74	354.64	39.82	488.20	8.47	18.52	7.44	34.44
0.49	38.56	74.24	306.74	39.14	420.12	7.48	17.31	6.93	31.72
0.48	38.56	58.89	265.52	42.48	366.89	6.60	16.26	6.62	29.48
0.47	38.56	47.70	230.97	49.82	328.50	6.16	15.49	7.08	28.73
0.46	38.56	40.66	203.10	61.19	304.95	5.83	14.73	8.17	28.73
0.45	38.56	37.78	181.91	76.57	296.25	5.54	13.96	10.01	29.52
0.44	38.56	39.04	167.39	95.96	302.39	5.25	13.38	12.00	30.63
0.43	38.56	44.46	159.55	119.37	323.38	5.41	13.33	13.98	32.73
0.42	38.56	54.03	158.39	146.79	359.21	5.77	13.61	15.97	35.35
0.4	38.56	85.63	176.09	213.69	475.41	7.78	14.29	19.96	42.03

ตารางที่ 4.11 แสดงค่า%water uptake, F จากการทดลองและจากการคำนวณ เมื่อใช้ค่า $A = 0.46$, $B = 38.56$ ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ในการแช่
หนึ่งโศ

เวลาที่แช่ (นาที)	303 K				313 K				323 K			
	%uptake จริง	Fจริง	%uptake คำนวณ	Fคำนวณ	%uptake จริง	Fจริง	%uptake คำนวณ	Fคำนวณ	%uptake จริง	Fจริง	%uptake คำนวณ	Fคำนวณ
0	0.00	40.37	0.00	38.56	0.00	38.20	0.00	38.56	0.00	37.10	0.00	38.56
2	9.95	35.84	9.02	34.40	10.38	36.67	11.44	33.29	14.26	32.00	14.17	32.04
4	14.50	32.67	12.76	32.69	15.43	34.67	16.18	31.11	18.93	30.50	20.04	29.34
6	20.18	32.84	15.63	31.37	22.99	30.17	19.82	29.44	22.88	26.17	24.54	27.27
8	18.75	31.33	18.05	30.25	22.55	29.34	22.88	28.03	27.39	24.50	28.34	25.52
10	21.77	29.84	20.18	29.27	21.65	27.17	25.58	26.79	33.98	18.50	31.68	23.98
12	25.41	30.00	22.10	28.39	24.39	23.00	28.03	25.66	30.50	20.84	34.71	22.59
14	25.42	28.34	23.87	27.57	27.60	22.34	30.27	24.63	38.76	20.00	37.49	21.31
16	27.58	27.33	25.52	26.82	30.58	22.17	32.36	23.67	42.67	17.33	40.07	20.12
18	30.73	27.33	27.07	26.10	32.44	21.17	34.32	22.77	48.63	15.67	42.51	19.00
20	30.80	24.84	28.53	25.43	28.76	21.00	36.18	21.91	46.41	17.17	44.81	17.95
25	32.94	22.67	31.90	23.88	35.96	20.50	40.45	19.95	49.40	15.67	50.09	15.51
30	47.00	19.83	34.95	22.48	42.20	17.17	44.31	18.17	59.14	12.34	54.87	13.31
35	40.84	20.67	37.75	21.19	55.15	12.84	47.86	16.54				
40	39.22	18.50	40.35	19.99	49.05	16.17	51.17	15.02				
45	48.72	18.00	42.80	18.87	54.53	15.00	54.27	13.59				
60	49.47	18.50	49.42	15.82	56.63	15.17	62.67	9.73				
75	58.86	14.34	55.26	13.14								



รูปที่ 4.38 แสดงผลของค่าความแข็งเทียบกับค่า %water uptake ที่ได้จากตารางที่ 4.11

จากตารางที่ 4.10 จะได้ค่า $A = 0.46$ และค่า $B = 38.56$ แทนค่าทั้งสองลงในสมการ (4.20) จะได้ลักษณะสมการออกมาเป็น

$$F = 38.56 - 0.46x \quad (4.21)$$

จากสมการ (4.13) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %water uptake กับค่า t และ T ของหนังโค

$$\%wateruptake = \left(te^{\frac{-1804.18}{T}} \right)^{0.5} (1.915T - 455.26) \quad (4.13)$$

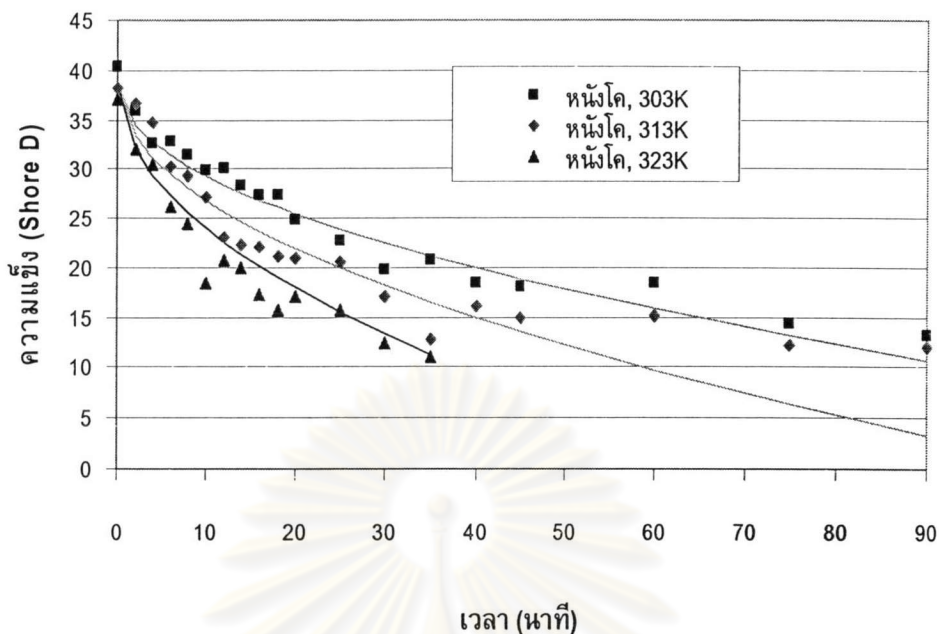
แทนค่าลงในสมการ (4.21) จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง F กับเวลาและอุณหภูมิ ของหนังโคเป็น

$$F = 38.56 - \left(te^{\frac{-1804.18}{T}} \right)^{0.5} (0.881T - 209.42) \quad (4.22)$$

โดย t เวลาที่แช่ หน่วย นาที มีค่า $t < 75$ นาที

T อุณหภูมิที่ใช้แช่ หน่วย เคลวิน (K) มีค่า $303 < T < 323$ K

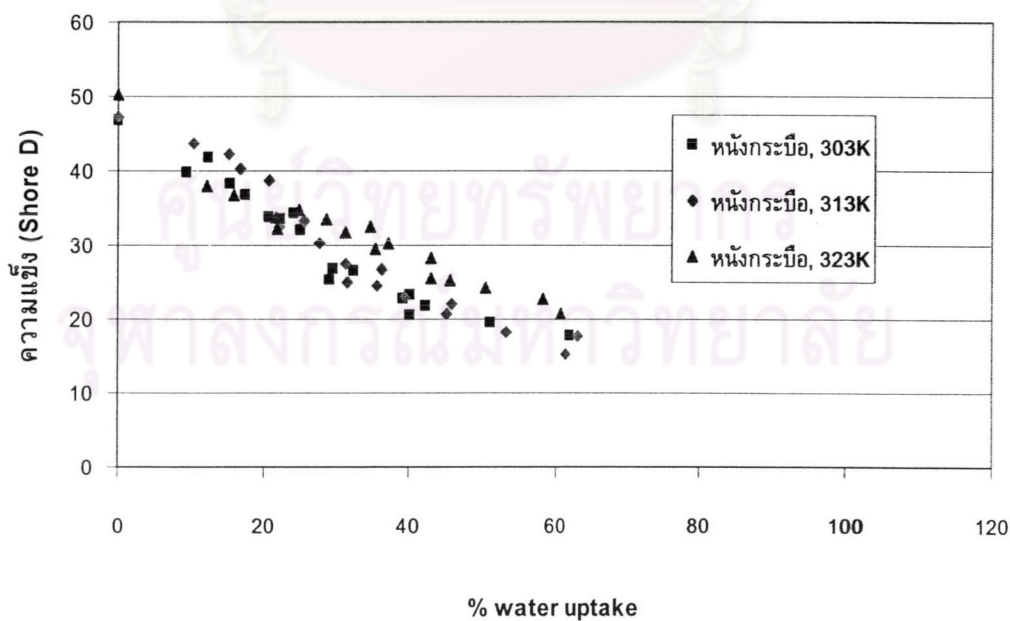
แบบจำลองนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 6-15 % และแบบจำลองทั้งสองชนิดนี้ใช้สำหรับการแช่หนังโคที่มีความหนาระดับกลาง คือ 1.5-2.0 มิลลิเมตร เท่านั้น



รูปที่ 4.39 แสดงค่าความแข็งเทียบกับเวลา ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับที่ได้จากการคำนวณ ด้วยสมการ (4.22)

4.4.2 แบบจำลองค่าความแข็งของหนังกระปือ

จากผลการทดลองเรื่องค่าความแข็งของหนังกระปือ เมื่อนำมาสร้างเป็นแผนภูมิเพื่อหาความสัมพันธ์กับค่า %water uptake ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %water uptake ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองของหนังกระปือ ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.40 หากพิจารณาเฉพาะช่วงที่มีค่า %water uptake ไม่เกิน 60% ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ค่าความแข็งอยู่ในช่วง 12-15 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้งานอยู่จริงในโรงงาน แม้ว่าค่าความแข็งจะมีมากกว่าหนึ่งโคอยู่ก็ตาม ทั้งนี้ เป็นเพราะหนึ่งกระป้อมีค่าความแข็งเริ่มต้นมากกว่าหนึ่งโคนั่นเอง และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับ %water uptake มีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นเส้นตรง โดยมีลักษณะสมการเหมือนกับหนึ่งโค คือ

$$F = B - Ax \quad (4.20)$$

โดย F ค่าความแข็ง ณ ปริมาณความชื้นนั้นๆ
 x ค่า %water uptake
 B ค่าความแข็งเริ่มต้นเฉลี่ยของหนึ่งกระป้อม
 A ค่าคงที่

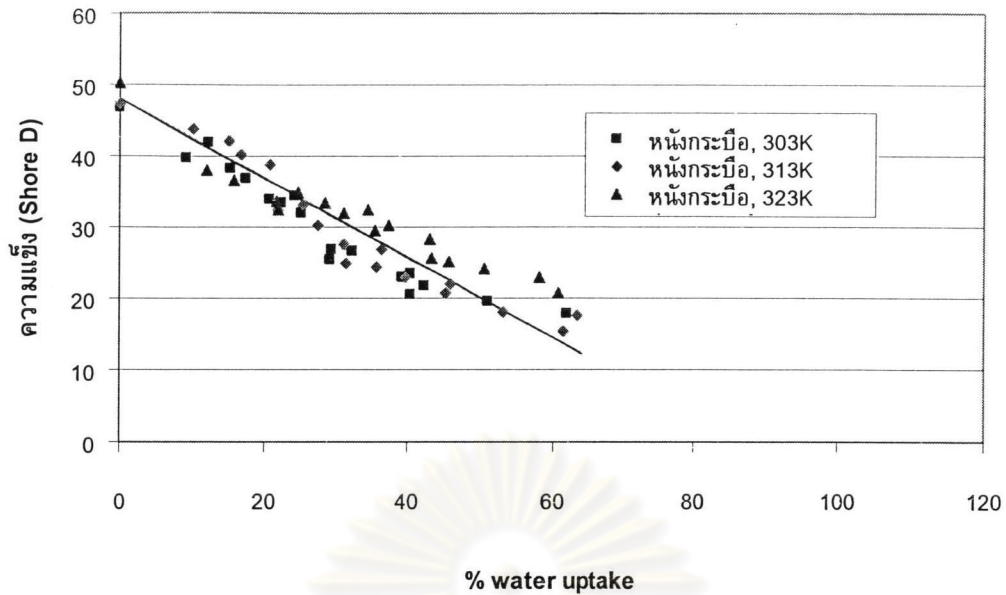
สำหรับค่า B จะทราบได้โดยการเฉลี่ยค่าความแข็งเริ่มต้นของหนึ่งกระป้อม โดยจะได้ค่าเป็น 48.10 สำหรับค่า A สามารถหาได้โดยวิธีการสุ่มค่าขึ้นมา แล้วหาด้วยวิธีการเดียวกับกรณีของหนึ่งโค เพื่อให้ได้ A ที่ทำให้ได้ค่าเบี่ยงเบนที่น้อยที่สุด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงค่า Least Square และ % Different Error ที่แต่ละอุณหภูมิสำหรับหนึ่งกระป้อม

A	B	Least Square				%Error			
		303K	313K	323K	SUM	303K	313K	323K	SUM
0.8	48.10	711.22	1243.80	2387.28	4342.30	20.99	29.95	37.25	88.19
0.6	48.10	106.88	154.06	398.41	659.35	7.52	9.09	15.41	32.02
0.59	48.10	115.10	147.80	348.01	610.91	7.92	8.96	14.42	31.31
0.58	48.10	126.98	146.13	302.28	575.40	8.32	8.85	13.44	30.62
0.57	48.10	142.53	149.06	261.23	552.81	8.72	8.97	12.46	30.15
0.56	48.10	161.73	156.58	224.84	543.15	9.12	9.55	11.48	30.15
0.55	48.10	184.59	168.69	193.12	546.41	9.85	10.32	10.49	30.66
0.54	48.10	211.12	185.40	166.08	562.60	10.62	11.14	9.51	31.27
0.53	48.10	241.31	206.70	143.70	591.71	11.40	11.95	8.56	31.91
0.52	48.10	275.15	232.59	126.00	633.75	12.50	12.77	7.82	33.09
0.51	48.10	312.66	263.08	112.97	688.71	13.63	13.59	7.11	34.32
0.5	48.10	353.83	298.16	104.60	756.59	14.76	14.41	6.59	35.76

ตารางที่ 4.13 แสดงค่า%water uptake, F จากการทดลองและการคำนวณเมื่อใช้ค่า $A = 0.56$, $B = 48.10$ ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ของหนังกะบือ

เวลาที่แช่ (นาที)	303 K				313 K				323 K			
	%uptake จริง	Fจริง	%uptake คำนวณ	Fคำนวณ	%uptake จริง	Fจริง	%uptake คำนวณ	Fคำนวณ	%uptake จริง	Fจริง	%uptake คำนวณ	Fคำนวณ
	0	0.00	46.76	0.00	48.10	0.00	47.28	0.00	48.10	0.00	50.25	0.00
2	9.29	39.67	9.34	42.87	10.21	43.84	10.46	42.24	12.05	38.00	11.64	41.58
4	12.22	41.83	13.20	40.70	15.10	42.17	14.79	39.81	15.76	36.67	16.46	38.88
6	15.38	38.34	16.17	39.04	16.75	40.17	18.11	37.95	21.65	33.67	20.15	36.81
8	17.54	36.84	18.67	37.64	20.79	38.84	20.92	36.38	21.92	32.33	23.27	35.06
10	20.79	33.84	20.88	36.40	22.08	32.50	23.38	35.00	24.85	34.83	26.02	33.53
12	22.33	33.50	22.87	35.29	25.61	33.17	25.62	33.75	28.68	33.50	28.50	32.13
14	24.24	34.34	24.70	34.26	27.68	30.34	27.67	32.60	31.21	31.83	30.78	30.86
16	25.20	32.00	26.41	33.31	31.41	25.00	29.58	31.53	34.57	32.50	32.91	29.67
18	29.18	25.34	28.01	32.41	31.27	27.50	31.37	30.53	35.45	29.50	34.91	28.55
20	29.64	26.83	29.52	31.56	36.27	26.84	33.07	29.58	37.32	30.34	36.79	27.49
25	32.26	26.50	33.01	29.61	35.67	24.50	36.97	27.39	43.09	28.34	41.14	25.06
30	39.32	22.84	36.16	27.85	45.16	20.67	40.50	25.41	43.12	25.50	45.06	22.86
35	40.34	23.34	39.06	26.22	39.61	23.00	43.75	23.60	45.60	25.17	48.68	20.84
40	42.22	21.67	41.75	24.71	45.82	22.00	46.77	21.91	50.45	24.17	52.04	18.96
45	40.32	20.50	44.28	23.30	53.15	18.17	49.60	20.32	58.08	22.83	55.19	17.19
60	51.06	19.50	51.14	19.46	61.43	15.34	57.28	16.02	60.64	20.67	63.73	12.41
75	61.98	17.84	57.17	16.08	63.32	17.67	64.04	12.23				



รูปที่ 4.41 แสดงผลของค่าความแข็งเทียบกับค่า %water uptake ที่ได้จาดตารางที่ 4.13

จาดตารางที่ 4.12 จะได้ค่า $A = 0.56$ และค่า $B = 48.10$ แทนค่าทั้งสองลงในสมการ (4.20) จะได้ลักษณะสมการออกมาเป็น

$$F = 48.10 - 0.56x \quad (4.23)$$

จาดสมการ (4.16) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %water uptake (x) กับค่า t และ T ของหน้ากระดาษ คือ

$$\%wateruptake = \left(te^{\frac{-2044.74}{T}} \right)^{0.5} (0.109T + 159.73) \quad (4.16)$$

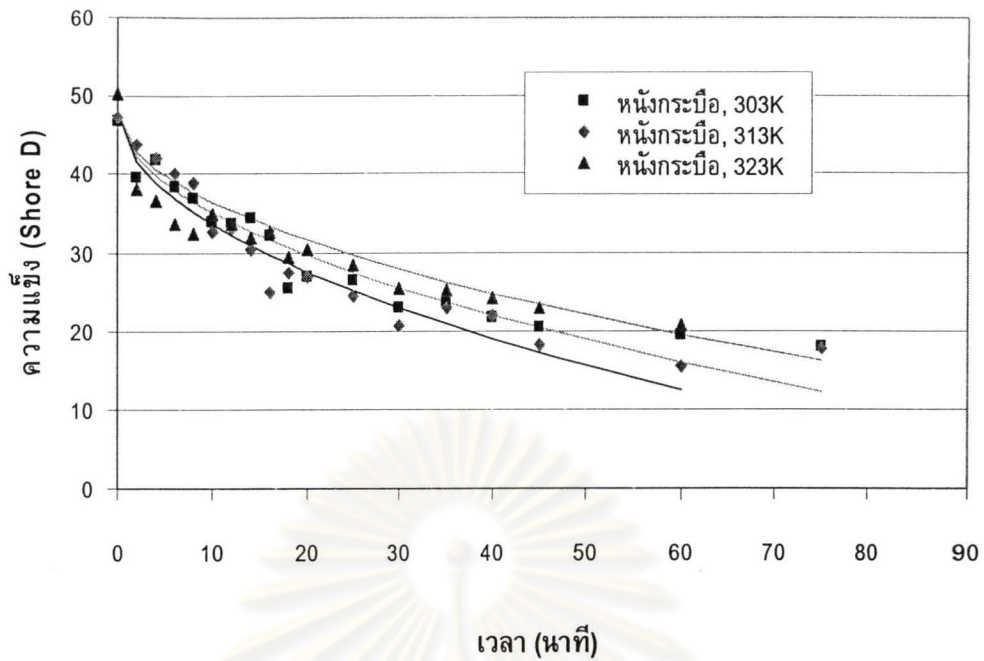
แทนค่าลงในสมการ (4.23) จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง F กับเวลาและอุณหภูมิของหน้ากระดาษออกมาเป็น

$$F = 48.10 - \left(te^{\frac{-1924.46}{T}} \right)^{0.5} (0.06T + 89.44) \quad (4.24)$$

โดย t เวลาที่แช่ หน่วย นาที มีค่า $t < 75$ นาที

T อุณหภูมิที่ใช้แช่ หน่วย เคลวิน (K) มีค่า $303 < T < 323$ K

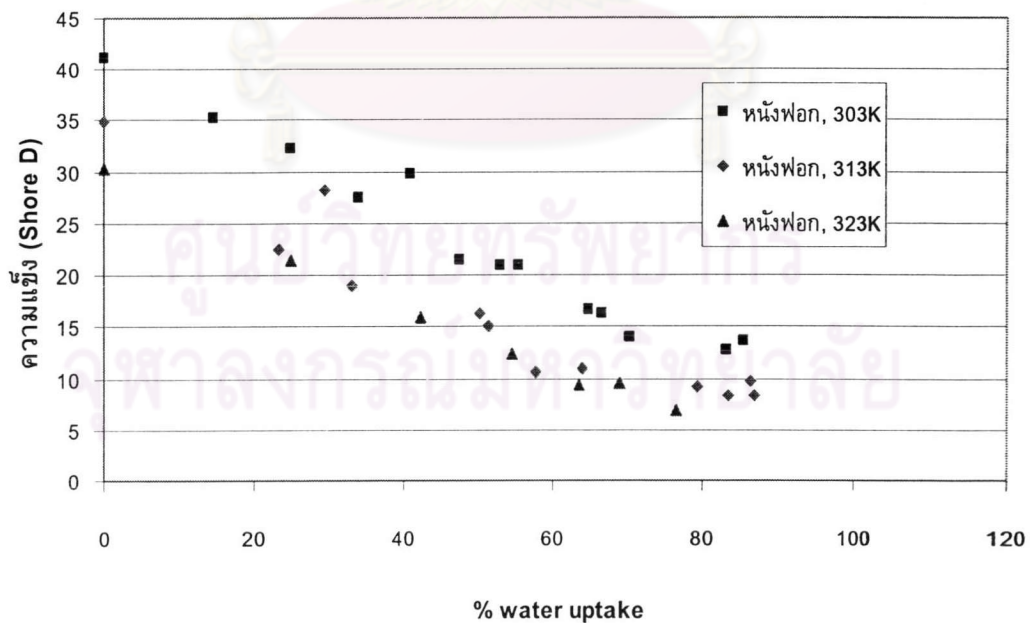
แบบจำลองนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 9-12 % และแบบจำลองทั้งสองแบบนี้ใช้สำหรับการแช่หน้ากระดาษที่มีความหนาระดับกลางคือ 1.5-2.0 มิลลิเมตร เท่านั้น



รูปที่ 4.42 แสดงค่าความแข็งเทียบกับเวลา ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับที่ได้จากการคำนวณ ด้วยสมการ (4.24)

4.4.3 แบบจำลองค่าความแข็งของหนังฟอก

จากผลการทดลองเรื่องค่าความแข็งของหนังฟอก เมื่อนำมาสร้างเป็นแผนภูมิเพื่อหาความสัมพันธ์กับค่า %water uptake ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %water uptake ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองของหนังฟอก ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 4.43 จะพบว่า เมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงที่มีค่า %water uptake ไม่เกิน 60% ซึ่งทำให้ค่าความแข็งอยู่ในช่วง 12-15 ที่เป็นช่วงใช้งานจริง จะได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับ %water uptake มีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นเส้นตรง ดังสมการที่ (4.20) โดยมีลักษณะสมการเหมือนกับของหนังโคและกระบือ คือ

$$F = B - Ax \quad (4.20)$$

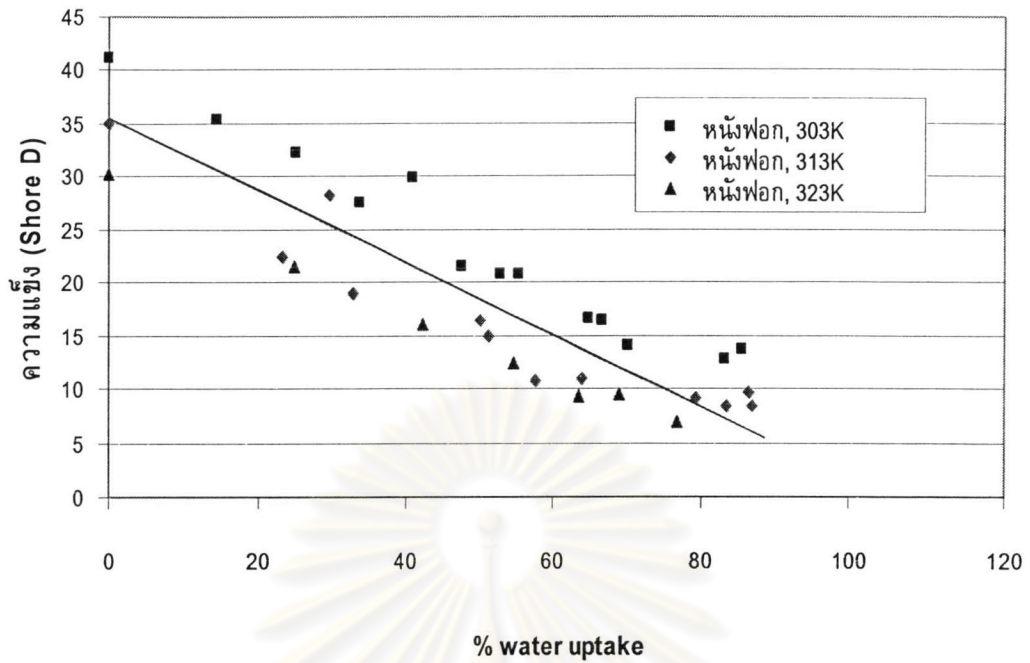
สำหรับค่า B คือค่าความแข็งเริ่มต้นเฉลี่ยของหนังฟอก มีค่าเป็น 35.47 ส่วนค่า A สามารถหาได้โดยวิธีการสุ่มค่า แล้วทำการคำนวณหาด้วยวิธีเดียวกับกรณีของหนังโคและกระบือ โดยการเปรียบเทียบด้วยวิธียกกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least square) และการหาค่าความคลาดเคลื่อน (%Error) เพื่อให้ได้ A ที่ทำให้ได้ค่าเปรียบเทียบทั้งสองที่น้อยที่สุด ผลการสุ่มค่าแสดงไว้ในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 แสดงค่า Least Square และ % Different Error ที่แต่ละอุณหภูมิสำหรับหนังฟอก

A	B	Least Square				%Error			
		303K	313K	323K	SUM	303K	313K	323K	SUM
0.6	35.47	3954.27	2677.70	611.51	7243.48	88.80	111.41	83.91	284.12
0.4	35.47	712.62	175.18	52.29	940.09	34.35	22.91	13.98	71.23
0.39	35.47	626.66	138.86	62.64	828.17	31.62	19.33	16.79	67.74
0.38	35.47	547.96	111.01	76.64	735.61	28.90	15.93	21.35	66.19
0.37	35.47	476.50	91.62	94.29	662.41	26.18	13.85	25.91	65.94
0.36	35.47	412.29	80.68	115.59	608.56	23.46	13.64	30.48	67.57
0.35	35.47	355.33	78.20	140.54	574.07	20.73	13.68	35.04	69.46
0.34	35.47	305.63	84.18	169.13	558.94	18.01	14.54	39.61	72.16
0.33	35.47	263.17	98.62	201.38	563.17	15.75	17.24	44.17	77.16
0.32	35.47	227.96	121.52	237.27	586.76	13.82	19.94	48.73	82.49
0.31	35.47	200.00	152.88	276.82	629.70	12.33	22.64	53.30	88.27
0.3	35.47	179.29	192.69	320.01	692.00	11.10	26.42	57.86	95.38
0.6	35.47	3954.27	2677.70	611.51	7243.48	88.80	111.41	83.91	284.12
0.4	35.47	712.62	175.18	52.29	940.09	34.35	22.91	13.98	71.23
0.39	35.47	626.66	138.86	62.64	828.17	31.62	19.33	16.79	67.74
0.38	35.47	547.96	111.01	76.64	735.61	28.90	15.93	21.35	66.19
0.37	35.47	476.50	91.62	94.29	662.41	26.18	13.85	25.91	65.94
0.36	35.47	412.29	80.68	115.59	608.56	23.46	13.64	30.48	67.57
0.35	35.47	355.33	78.20	140.54	574.07	20.73	13.68	35.04	69.46

ตารางที่ 4.15 แสดงค่า%water uptake, F จากการทดลองและจากการคำนวณ เมื่อใช้ค่า $A = 0.32$, $B = 35.47$ ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ ในการแช่
หนึ่งฟลอก

เวลาที่แช่ (นาที)	303 K				313 K				323 K			
	%uptake จริง	Fจริง	%uptake คำนวณ	Fคำนวณ	%uptake จริง	Fจริง	%uptake คำนวณ	Fคำนวณ	%uptake จริง	Fจริง	%uptake คำนวณ	Fคำนวณ
0	0.00	41.16	0.00	35.47	0.00	34.93	0.00	35.47	0.00	30.31	0.00	35.47
2	14.47	35.33	20.96	28.34	23.11	22.50	25.03	26.95	24.77	21.50	29.47	25.44
4	24.86	32.17	29.64	25.39	29.43	28.17	35.40	23.43	42.34	16.00	41.68	21.29
6	33.76	27.50	36.31	23.12	32.85	19.00	43.36	20.72	54.65	12.33	51.05	18.11
8	40.89	29.83	41.92	21.21	50.25	16.34	50.06	18.44	69.09	9.50	58.95	15.42
10	47.60	21.50	46.87	19.53	51.35	15.00	55.97	16.44	63.58	9.34	65.91	13.06
12	52.94	20.83	51.35	18.01	64.15	11.00	61.31	14.62	76.61	6.84	72.20	10.92
14	64.94	16.67	55.46	16.61	57.72	10.67	66.23	12.95				
16	55.42	20.83	59.29	15.31	79.25	9.17	70.80	11.39				
18	66.89	16.33	62.89	14.08	86.38	9.67	75.09	9.93				
20	70.38	14.00	66.29	12.93	86.81	8.34	79.16	8.55				
25	85.38	13.67	74.11	10.27	83.34	8.33	88.50	5.38				
30	83.23	12.84	81.18	7.86								



รูปที่ 4.44 แสดงผลของค่าความแข็งเทียบกับค่า %water uptake ที่ได้จากรายที่ 4.15

จากรายที่ 4.14 จะได้ค่า $A = 0.32$ และค่า $B = 35.47$ แทนค่าทั้งสองลงในสมการ (4.20) จะได้ลักษณะสมการออกมาเป็น

$$F = 35.47 - 0.32x \quad (4.25)$$

จากสมการ (4.19) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า %water uptake (x) กับค่า t และ T ของหนังฟอก คือ

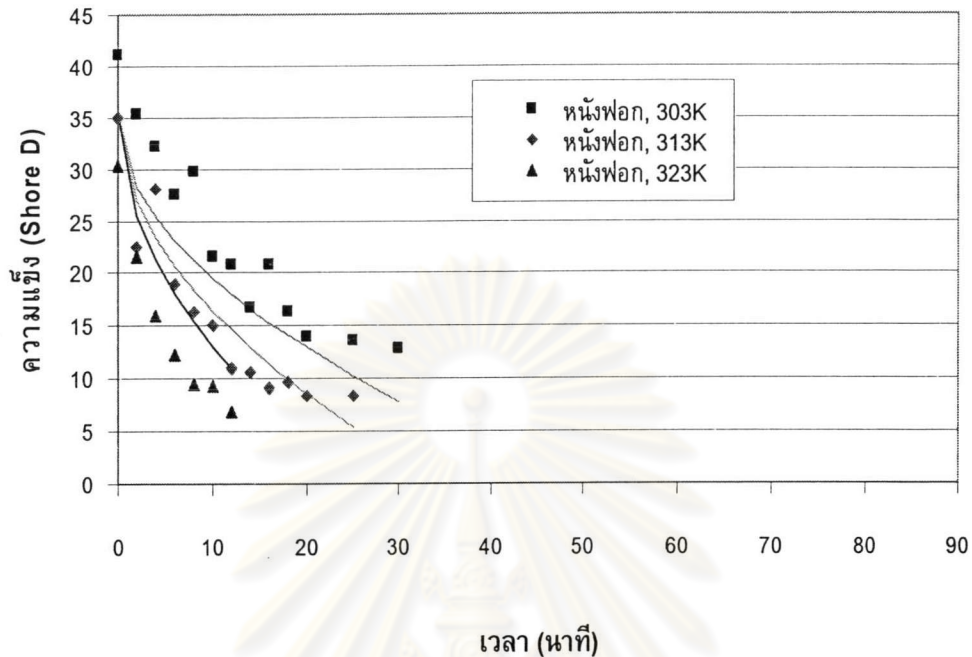
$$\%wateruptake = \left(te^{\frac{-3969.21}{T}} \right)^{0.5} (-3.067T + 19082.32) \quad (4.19)$$

แทนค่าลงในสมการ (4.25) จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็ง F กับเวลาและอุณหภูมิของหนังฟอกออกมาเป็น

$$F = 35.47 - \left(te^{\frac{-3969.21}{T}} \right)^{0.5} (-0.981T + 6106.34) \quad (4.26)$$

โดย t เวลาที่แช่ หน่วย นาที มีค่า $t < 30$ นาที
 T อุณหภูมิที่ใช้แช่ หน่วย เคลวิน (K) มีค่า $303 < T < 323$ K

แบบจำลองนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 14-49 % และแบบจำลองทั้งสองแบบนี้ใช้สำหรับการแช่หนังฟอกที่มีความหนาในระดับกลางคือ 1.8-2.3 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.45 แสดงค่าความแข็งเทียบกับเวลา ที่ได้จากการทดลอง เทียบกับที่ได้จากการคำนวณ ด้วยสมการ (4.26)

จากแบบจำลองของหนังฟอก จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าที่สูงเมื่อเทียบกับของหนังโคและกระบือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการคำนวณที่อุณหภูมิสูงๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างของหนังฟอกที่มีรูพรุนสูงกว่าอันเนื่องมาจากการถูกฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้โครงสร้างภายในของหนังเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม รวมไปถึงผลจากปรากฏการณ์ Capillary ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของน้ำจะสร้างแรงกระทำกับผนัง เมื่อเกิดการไหลผ่านท่อรูเล็ก โดยผลของปรากฏการณ์นี้ต่อหนังฟอกจะแตกต่างไปจากหนังอีกสองชนิด เนื่องจากลักษณะทางโครงสร้างของหนังฟอกเอง