

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1. ผลของชนิดและปริมาณพลาสติกไซเซอรต่อสมบัติของฟิล์มจากเคิร์ดแลน

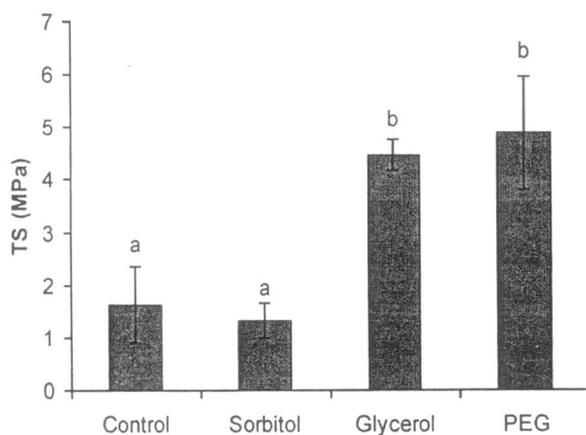
##### 4.1.1. ผลของชนิดพลาสติกไซเซอร

##### 4.1.1.1. สมบัติเชิงกล

จากการศึกษาผลของการใช้พลาสติกไซเซอรชนิดต่างๆ ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ซอร์บิทอล และกลีเซอรอล ที่ระดับความเข้มข้น 40% (w/w) ของปริมาณเคิร์ดแลน ต่อสมบัติของฟิล์มจากเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายฟิล์มเคิร์ดแลนในสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.3 M พบว่าการใช้พลาสติกไซเซอรแต่ละชนิดที่ระดับความเข้มข้นที่เท่ากัน ให้ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength: TS) และค่าระยะยืดเมื่อขาด (Elongation at break: EAB) ที่มีความแตกต่างกัน ( $P < 0.05$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4 ฟิล์มเคิร์ดแลนที่เติม PEG มีค่า TS สูงกว่าฟิล์มชุดควบคุม (ที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร) ประมาณ 3 เท่า การใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรให้ฟิล์มเคิร์ดแลนที่มีค่า TS ที่ไม่แตกต่างกับการใช้ PEG เป็นพลาสติกไซเซอร ( $P > 0.05$ ) ส่วนการใช้ซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอรให้ฟิล์มเคิร์ดแลนที่มีค่า TS ไม่แตกต่างจากฟิล์มควบคุม ( $P > 0.05$ ) เมื่อพิจารณาผลของการใช้พลาสติกไซเซอรต่อค่า EAB พบว่าการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรให้ฟิล์มเคิร์ดแลนที่มีค่า EAB สูงที่สุดโดย มีค่าเพิ่มขึ้นจากชุดควบคุมประมาณ 2.6 เท่า ซึ่งให้ค่าไม่แตกต่างจากการใช้ซอร์บิทอลเป็นพลาสติกไซเซอร ( $P > 0.05$ ) ส่วนการใช้ PEG เป็นพลาสติกไซเซอรให้ฟิล์มที่มีค่า EAB ต่ำสุดและไม่แตกต่างจากฟิล์มควบคุม ( $P > 0.05$ )

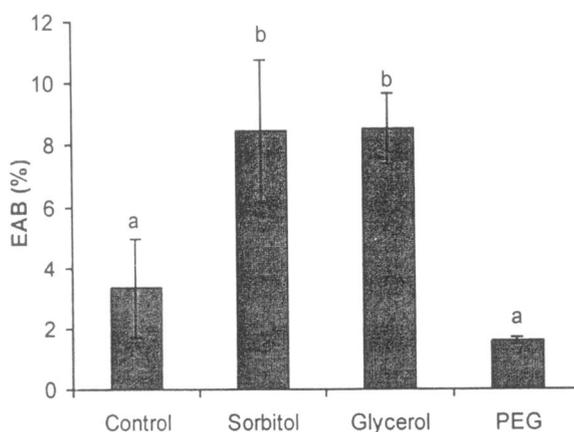
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเคิร์ดแลนสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ โดยฟิล์มจากเคิร์ดแลนที่ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอรมีลักษณะเปราะและทนต่อแรงดึงได้น้อย ทั้งนี้เกิดจากเคิร์ดแลนมีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโดยเฉพาะพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นมาก การเติมพลาสติกไซเซอรช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของเคิร์ดแลนทำให้ฟิล์มที่ได้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น จากการทดลองพบว่าการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรให้ฟิล์มเคิร์ดแลนที่มีความยืดหยุ่นและแข็งแรงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ซอร์บิทอล และ PEG ทั้งนี้อาจเป็นเพราะกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่า สามารถแยกตัวและรวมตัวกับโมเลกุลเคิร์ดแลนได้ดีกว่าจึงสามารถปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเคิร์ดแลนให้มีประสิทธิภาพสูงกว่า Sothornvit และคณะ (2001) รายงานว่า PEG เป็นพลาสติกไซเซอรที่ส่งผลให้ฟิล์มเบต้าแลคโตโกลบูลิน ( $\beta$ -lactoglobulin) มีความเปราะมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอล ส่วนกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรที่ส่งผลให้ฟิล์มมีค่า EM (elastic modulus) TS (tensile strength) และ %E (elongation) สูงกว่าการใช้ซอร์บิทอล และ PEG เป็นพลาสติกไซเซอร

เนื่องจาก กลีเซอรอล มีมวลโมเลกุลที่ต่ำทำให้ สามารถกระจายตัวได้ดี ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ใน โครงสร้างฟิล์ม และกลีเซอรอลยังมีสมบัติในการดูดซับความชื้นในอากาศได้สูง



ชนิดของพลาสติกไซเซอร์

( a )



ชนิดของพลาสติกไซเซอร์

( b )

รูปที่ 4 ค่าการต้านทานแรงดึง ( TS ) ( a ) และค่าระยะยืดเมื่อขาด ( EAB ) ( b ) ของฟิล์มเคิร์ดแลน ที่ ใช้พลาสติกไซเซอร์ชนิดต่างๆ ( ที่ระดับความเข้มข้น 40% ( w/w ) ของปริมาณเคิร์ดแลน )

\* ตัวอักษร ( a, b ) ที่แตกต่างกัน ที่แสดงบนแท่งกราฟ แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (  $P < 0.05$  )

#### 4.1.1.2. การซึมผ่านไอน้ำ

ตารางที่ 4 แสดงค่าการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เติมและไม่เติมพลาสติกไซเซอร် พบว่าผลของการใช้พลาสติกไซเซอร်ในการผลิตฟิล์มจากเคิร์ดแลน ให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมซึ่งไม่มีการใช้พลาสติกไซเซอร် เป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลเคิร์ดแลนที่ลดลง ทำให้โมเลกุลน้ำสามารถแพร่ผ่านโครงสร้างของฟิล์มได้ง่ายขึ้น รวมทั้งพลาสติกไซเซอร်ที่ใช้มีสมบัติที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้ฟิล์มมีสมบัติที่สามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการใช้พลาสติกไซเซอร်ชนิดต่างๆ พบว่า ฟิล์มเคิร์ดแลนที่เติมซอร์บิทอล กลีเซอรอล และ PEG ในปริมาณ 40 % ของเคิร์ดแลน มีค่า WVP ที่ไม่แตกต่างกัน ( $p > 0.05$ )

ตารางที่ 4 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มจากเคิร์ดแลนที่ไม่ เติมและที่เติม พลาสติกไซเซอร် ชนิดต่างๆ (ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 40 ของปริมาณเคิร์ดแลน)

Sample	WVP ( $\times 10^{-7} \text{ g cm}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mmHg}^{-1}$ )
Control	$0.76 \pm 0.01^a$
Sorbitol	$1.54 \pm 0.22^b$
Glycerol	$1.60 \pm 0.38^b$
PEG	$1.43 \pm 0.08^b$

\* ตัวอักษรที่แตกต่างกันในสมมติเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

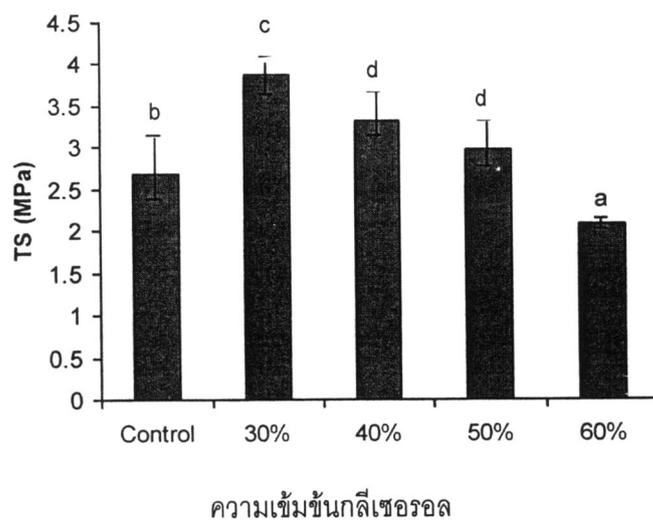
จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร်ให้ฟิล์มเคิร์ดแลนที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด จึงเลือกใช้กลีเซอรอลในการศึกษาต่อไป

#### 4.1.2. ผลของความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร်

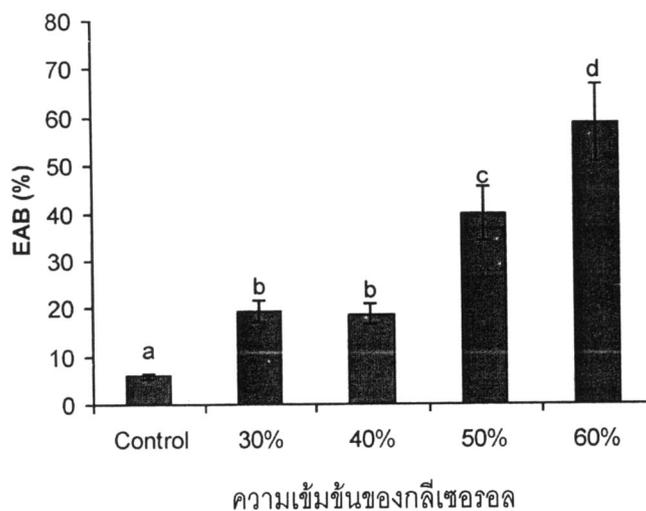
##### 4.1.2.1. สมบัติเชิงกล

จากการศึกษาผลของการใช้กลีเซอรอลที่ระดับความเข้มข้น 30 40 50 และ 60% ของปริมาณเคิร์ดแลน ต่อสมบัติของฟิล์มจากเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลนในสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.3 M พบว่า การใช้กลีเซอรอลที่ระดับความเข้มข้น 40% ให้ฟิล์มที่มีค่า TS สูงที่สุด ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 60 % ให้ฟิล์มที่มีค่า TS ต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 5(a) โดยเมื่อระดับความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นค่า TS มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นผลจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลเคิร์ดแลนที่ลดลง ส่วนค่า TS ของฟิล์มชุดควบคุมที่ไม่เติมกลีเซอรอลมีค่าต่ำกว่าฟิล์มที่เติมกลีเซอรอล 30-50 % เป็นเพราะฟิล์มชุดควบคุมมีความเปราะจึงแตกหักได้ง่ายเมื่อได้รับแรงดึง สำหรับค่า EAB พบว่าการใช้

กลีเซอรอลที่ระดับต่างกันให้ค่า EAB ที่มีความแตกต่างกัน ( $P < 0.05$ ) ดังแสดงในรูปที่ 5(b) โดยที่ระดับความเข้มข้น 60% ให้ฟิล์มที่มีค่า EAB สูงที่สุด ส่วนที่ระดับความเข้มข้น 30 และ 40% ให้ฟิล์มที่มีค่า EAB ที่ไม่แตกต่างกัน ( $P > 0.05$ ) เมื่อระดับความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นค่า EAB เพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่าการใช้กลีเซอรอลที่ระดับความเข้มข้น 60 % ฟิล์มที่ได้มีผิวหน้าที่มีลักษณะค่อนข้างชื้น เหนอะหนะ และทนต่อแรงดึงได้ต่ำ แสดงถึงกลีเซอรอลที่เติมในปริมาณที่มากเกินไป



(a)



(b)

รูปที่ 5 ค่าการต้านทานแรงดึง (TS) (a) และค่าระยะยืดเมื่อขาด (EAB) (b) ของฟิล์มเคอร์ดีแลนที่เติมกลีเซอรอลที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

\* ตัวอักษร (a, b, c, d) ที่แตกต่างกันที่แสดงบนแท่งกราฟ แสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

#### 4.1.2.2. การซึมผ่านไอน้ำ

เมื่อพิจารณาค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเคิร์ดแลนด ที่เติมกลีเซอรอลในปริมาณต่างๆ พบว่า การใช้กลีเซอรอลในระดับความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ฟิล์มเคิร์ดแลนดที่เตรียมได้มีค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้น ( $p < 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 5 ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติความชอบน้ำของกลีเซอรอล ทำให้ฟิล์มที่ได้สามารถดูดซับไอน้ำได้เพิ่มขึ้น การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเคิร์ดแลนดจึงสูงขึ้น

ตารางที่ 5 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ ( WVP) ของฟิล์มจากเคิร์ดแลนดที่ใช้และไม่ใช้กลีเซอรอลที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

Sample	WVP ( $\times 10^{-7} \text{ g cm}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mmHg}^{-1}$ )
Control	$0.825 \pm 0.025^a$
30%	$2.346 \pm 0.270^b$
40%	$2.462 \pm 0.259^b$
50%	$3.096 \pm 0.086^c$
60%	$3.663 \pm 0.264^d$

\* ตัวอักษรที่แตกต่างกันในสมมติเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

จากการทดลองพบว่าการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรที่ระดับความเข้มข้น 50 % ของปริมาณเคิร์ดแลนด ให้ฟิล์มเคิร์ดแลนดที่มีสมบัติเชิงกล เหมาะสมที่สุด คือให้ฟิล์มที่มีความยืดหยุ่นดีและไม่เหนียวเหนอะ ในขณะที่การใช้กลีเซอรอลในระดับที่ต่ำกว่า 50 % ให้ฟิล์มที่มีการยึดตัวต่ำกว่า จึงเลือกใช้ชนิดและความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอรดังกล่าวในการศึกษาต่อไป

#### 4.2. ผลของสภาวะในการเตรียมสารละลายฟิล์มต่อสมบัติของฟิล์มเคิร์ดแลนด

##### 4.2.1. สมบัติของฟิล์มเคิร์ดแลนดที่เตรียมโดยใช้สารละลายต่างที่ความเข้มข้นต่างๆ

##### 4.2.1.1. สมบัติเชิงกลและลักษณะปรากฏทั่วไปของฟิล์ม

จากการศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และความเข้มข้นของเคิร์ดแลนดที่ใช้ในการเตรียม สารละลายฟิล์มต่อสมบัติของฟิล์มจากเคิร์ดแลนด พบว่าระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และความเข้มข้นของเคิร์ดแลนดที่ต่างกัน ทำให้ฟิล์มที่ได้มีค่า TS และค่า EAB ที่มีความแตกต่างกัน ( $P < 0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย 0.3M NaOH และความเข้มข้นของเคิร์ดแลนด 0.5% มีค่า TS สูงที่สุด ส่วนฟิล์มที่เตรียมจาก

สารละลาย 0.05 M NaOH และความเข้มข้นของเคิร์ดแลน 0.5 % ให้ค่า TS ต่ำที่สุด ส่วนค่า EAB ของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย 0.2 M NaOH และความเข้มข้นของเคิร์ดแลน 2.0% มีค่า EAB สูงที่สุด ส่วนฟิล์มที่เตรียมจากสารละลาย 0.3 M NaOH และความเข้มข้นของเคิร์ดแลน 0.5% ให้ค่า EAB ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม จากการทดลองยังไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลายต่างและความเข้มข้นของเคิร์ดแลนกับสมบัติเชิงกลของฟิล์มเคิร์ดแลนได้ชัดเจน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความสม่ำเสมอของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้ไม่ดี (รูปที่ 6) จึงมีผลต่อความคลาดเคลื่อนของค่าที่ทดสอบ

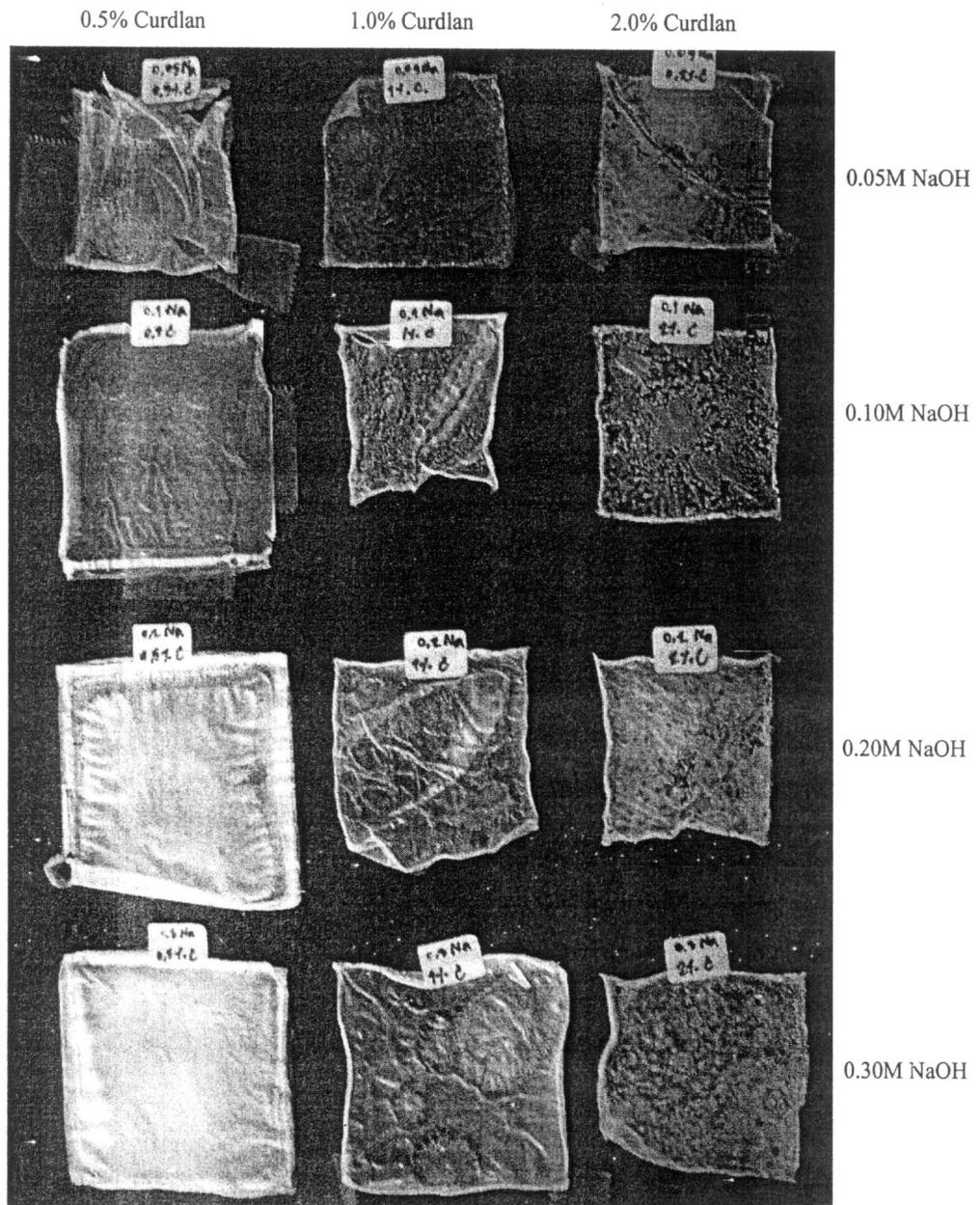
แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายต่างที่ความเข้มข้นสูงขึ้น (0.2 M และ 0.3 M) ให้ความแข็งแรงสูงกว่าการใช้สารละลายต่างความเข้มข้นต่ำ (0.05 M และ 0.1M) ทั้งนี้อาจเนื่องจากเคิร์ดแลนมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบ triple helix แต่เมื่ออยู่ในสารละลายต่างที่ความเข้มข้นสูง (>0.25 M NaOH) โครงสร้างที่เป็น triple helix จะถูกทำลายได้เป็น single stranded random coils (Yanaki and Norisuye, 1983; Bluhm et al., 1982; Bo et al., 1987) ดังนั้นเคิร์ดแลนในสารละลายต่างความเข้มข้น 0.2 M และ 0.3 M สามารถทำให้โมเลกุลเคิร์ดแลนเกิดการแยกตัวเป็นอิสระและคลายตัวออกได้มากในสารละลาย ซึ่งเมื่อนำสารละลายเคิร์ดแลนดังกล่าวมาระเหยในขั้นตอนการเกิดฟิล์ม โมเลกุลเคิร์ดแลนสามารถเกิดการเชื่อมประสานโดยอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล (โดยเฉพาะพันธะไฮโดรเจน) ได้ดีขึ้น จึงทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของฟิล์มเคิร์ดแลนที่ได้กับฟิล์มสังเคราะห์ (ตารางที่ 3) พบว่า ฟิล์มเคิร์ดแลนที่ได้ยังมีความต้านทานแรงดึงและระยะยืดเมื่อขาดต่ำกว่าฟิล์มสังเคราะห์มาก ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างทางโครงสร้างเคมีและอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่เกี่ยวข้อง โดยทั่วไปฟิล์มจากพอลิเมอร์ชีวภาพมีความต้านทานแรงดึงและความยืดหยุ่นต่ำกว่าฟิล์มสังเคราะห์ (ตารางที่ 3) เนื่องจากมีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลสูงทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการยึดตัวต่ำในระหว่างได้รับแรงดึง มีผลให้การจัดเรียงตัวภายใต้แรงดึงเกิดขึ้นได้น้อยก่อนที่ฟิล์มจะขาด จึงทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ชีวภาพมีความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ต่ำ

ตารางที่ 6 ค่าความต้านทานแรงดึง ( TS) และค่าระยะยืดเมื่อขาด ( EAB) ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายต่างที่ระดับความเข้มข้นของ NaOH และ ความเข้มข้นของเคิร์ดแลนต่างๆ

Sample	Thickness (mm)	TS (MPa)	EAB (%)
0.05M/0.5%*	0.040 ± 0.001 <sup>e</sup>	1.497 ± 0.337 <sup>a</sup>	44.149 ± 0.124 <sup>c</sup>
0.05M/1.0%	0.044 ± 0.002 <sup>b</sup>	1.675 ± 0.405 <sup>ab</sup>	34.352 ± 0.012 <sup>b</sup>
0.05M/2.0%	0.063 ± 0.004 <sup>a</sup>	2.239 ± 0.166 <sup>b</sup>	34.262 ± 0.102 <sup>b</sup>
0.1M/0.5%	0.052 ± 0.001 <sup>d</sup>	1.777 ± 0.228 <sup>ab</sup>	35.232 ± 3.020 <sup>b</sup>
0.1M/1.0%	0.050 ± 0.001 <sup>cd</sup>	1.590 ± 0.050 <sup>ab</sup>	34.351 ± 1.744 <sup>d</sup>
0.1M/2.0%	0.040 ± 0.001 <sup>a</sup>	1.843 ± 0.108 <sup>c</sup>	34.262 ± 4.711 <sup>d</sup>
0.2M/0.5%	0.044 ± 0.003 <sup>b</sup>	2.552 ± 0.180 <sup>d</sup>	30.670 ± 4.061 <sup>b</sup>
0.2M/1.0%	0.047 ± 0.001 <sup>bc</sup>	2.442 ± 0.156 <sup>cd</sup>	44.149 ± 0.236 <sup>cd</sup>
0.2M/2.0%	0.052 ± 0.001 <sup>d</sup>	3.139 ± 0.261 <sup>e</sup>	85.433 ± 1.838 <sup>e</sup>
0.3M/0.5%	0.050 ± 0.001 <sup>cd</sup>	3.717 ± 0.044 <sup>f</sup>	13.720 ± 1.004 <sup>a</sup>
0.3M/1.0%	0.052 ± 0.001 <sup>d</sup>	2.366 ± 0.186 <sup>cd</sup>	29.739 ± 2.838 <sup>b</sup>
0.3M/2.0%	0.050 ± 0.001 <sup>cd</sup>	2.278 ± 0.104 <sup>cd</sup>	33.507 ± 4.389 <sup>b</sup>

\* ----/---- คือ ความเข้มข้นสารละลาย NaOH/ความเข้มข้นเคิร์ดแลน

\*\* ตัวอักษรที่แตกต่างกันในสตมภ์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (P<0.05)



รูปที่ 6 ภาพถ่ายของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายต่างที่ระดับความเข้มข้นของ NaOH และความเข้มข้นของเคิร์ดแลนต่างๆ

#### 4.2.1.2 การซึมผ่านไอน้ำ

สำหรับค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายที่มีความเข้มข้น NaOH และเคิร์ดแลนต่างๆ ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของเคิร์ดแลนเพิ่มขึ้น ค่าการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความชอบน้ำของโมเลกุลเคิร์ดแลนเอง รวมทั้งการเกิดโครงสร้างร่างแหของฟิล์มที่อาจไม่เป็นระเบียบทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุลในเมตริกซ์ของฟิล์มมากขึ้น การซึมผ่านไอน้ำจึงสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นเคิร์ดแลนที่เท่ากัน ค่าการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มเคิร์ดแลนลดลงตามความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ อาจเนื่องจากการใช้สารละลายต่างที่ความเข้มข้นสูงกว่า (0.2 และ 0.3 M) มีผลให้โมเลกุลเคิร์ดแลนเกิดการคลายตัวมากขึ้น จึง สามารถเกิดอันตรกิริยา (โดยเฉพาะพันธะไฮโดรเจน) ระหว่างโมเลกุลเคิร์ดแลนได้ มากขึ้น (Funami et al., 2000) ทำให้ส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้ลดลง เป็นผลให้การดูดซับน้ำและแพร่ผ่านของโมเลกุลน้ำในแผ่นฟิล์มได้ลดลง

ตารางที่ 7 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายต่างที่ระดับความเข้มข้นของ NaOH และ ความเข้มข้นของเคิร์ดแลนต่างๆ

Samples	WVP ( $\times 10^{-7} \text{ g cm}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mmHg}^{-1}$ )
0.05M/0.5%*	$1.421 \pm 0.112^{de**}$
0.05M/1.0%	$1.673 \pm 0.012^f$
0.05M/2.0%	$2.062 \pm 0.163^g$
0.1M/0.5%	$0.977 \pm 0.145^c$
0.1M/1.0%	$2.582 \pm 0.162^h$
0.1M/2.0%	$2.934 \pm 0.217^i$
0.2M/0.5%	$0.708 \pm 0.170^b$
0.2M/1.0%	$1.319 \pm 0.017^d$
0.2M/2.0%	$3.234 \pm 0.073^j$
0.3M/0.5%	$0.336 \pm 0.016^a$
0.3M/1.0%	$0.974 \pm 0.082^c$
0.3M/2.0%	$1.571 \pm 0.138^{ef}$

\* ----/---- คือ ความเข้มข้นสารละลาย NaOH/ความเข้มข้นเคิร์ดแลน

\*\* ตัวอักษรที่แตกต่างกันในสดมภ์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลทั้ง TS และ EAB (ตารางที่ 6) จะเห็นได้ว่าการใช้สารละลาย 0.2 M NaOH และความเข้มข้นของเคิร์ดแลน 2.0% ให้ฟิล์มที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด (TS และ EAB) จึงเลือกจะวัดความเข้มข้น 0.2 M NaOH และความเข้มข้นของเคิร์ดแลน 2.0% เพื่อศึกษาต่อไป

#### 4.2.2. สมบัติของฟิล์มเคิร์ดแลนจากสารละลายเคิร์ดแลนในน้ำและ ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้เตรียมสารละลายฟิล์มต่อสมบัติของฟิล์มจากเคิร์ดแลนที่เตรียมโดยการกวนผสมเคิร์ดแลนในน้ำกลั่น หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 M ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 30 45 65 และ 85 °C เป็นเวลา 30 min พบว่าที่สภาวะการเตรียมต่างๆ มีผลต่อสมบัติเชิงกลและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเคิร์ดแลน ดังนี้

##### 4.2.2.1. สมบัติเชิงกล

ตารางที่ 8 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมในสภาวะต่างๆ พบว่า ฟิล์มจากเคิร์ดแลนที่เตรียมโดยใช้สารละลาย 0.2 M NaOH ให้ค่า TS และ EAB สูงกว่าฟิล์มจากเคิร์ดแลนที่เตรียมโดยใช้น้ำกลั่นที่อุณหภูมิการให้ความร้อนเดียวกัน ซึ่งอาจเป็นเพราะเคิร์ดแลนสามารถละลายและคลายตัวได้ดีในสภาวะสารละลายต่าง ทำให้การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลในโครงสร้างฟิล์มได้ดีกว่า และพบว่าสภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 60 °C ฟิล์มจากเคิร์ดแลนที่เตรียมโดยใช้สารละลาย NaOH เป็นตัวทำละลายให้ค่า TS สูงที่สุด ส่วนที่สภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 30 °C โดยใช้สารละลาย NaOH เป็นตัวทำละลายให้ค่า TS ต่ำที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการผสมที่เพิ่มขึ้นค่า TS ของฟิล์มเพิ่มขึ้น ( $P < 0.05$ ) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่ออุณหภูมิที่ใช้เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเกิดโครงสร้างร่างแหที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกมากขึ้น Harada และคณะ (1987 อ้างโดย Funami et al., 1999a; 2000) พบว่าการให้ความร้อนแก่สารแขวนลอยเคิร์ดแลนในน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C มีผลให้โมเลกุลเคิร์ดแลนเกิดจากการเชื่อมประสานกันระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในรูป multiple-chain helix หรือ triple-stranded helix โดยการเชื่อมประสานกันระหว่างโมเลกุลเกิดโดยอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก ( hydrophobic interaction) (Tako and Hanashiro, 1997) (รูปที่ 2)

สำหรับค่า EAB ของฟิล์มจากเคิร์ดแลนที่เตรียมโดยใช้สารละลาย NaOH พบว่าที่ทุกอุณหภูมิการผสม ฟิล์มจากเคิร์ดแลนให้ค่า EAB ที่ไม่มีความแตกต่างกัน ( $P > 0.05$ ) จากตารางที่ 8 พบว่าในตัวอย่างของฟิล์มจากเคิร์ดแลนที่เตรียมโดยใช้สารละลาย NaOH หรือน้ำกลั่น เมื่อสภาวะการผสมที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่า TS และค่า EAB เพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลายฟิล์มจากเคิร์ดแลนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเจลที่สภาวะการผสมที่อุณหภูมิในช่วง 40-80 องศาเซลเซียส ที่เกิดจากการเชื่อมประสานกันระหว่าง

โมเลกุลเป็นโครงสร้างร่างแหจากพันธะไฮโดรเจน และ อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกมากขึ้น ทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลดงกล้าวสูงขึ้น Funami และคณะ (2000) ศึกษาการเกิดเจล เคร็ดแลนที่เตรียมโดยใช้น้ำและสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ พบว่าโมเลกุลเคร็ดแลนสามารถกระจายตัวในสารละลายต่างได้มากกว่าในน้ำ และเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหที่สม่ำเสมอ (homogeneous network structure) ได้มากกว่า ส่งผลให้เจลมีสมบัติที่ยืดหยุ่นและแข็งแรง

ตารางที่ 8 ค่าความต้านทานแรงดึง (TS) และค่าระยะยืดเมื่อขาด (EAB) ของฟิล์มเคร็ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคร็ดแลน (2.0% w/v) ในน้ำกลั่นและในสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ 0.2 M ที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

Sample	TS (MPa)	EAB (%)
NaOH/30°C	1.637 ± 0.186 <sup>b</sup>	35.428 ± 8.411 <sup>bc**</sup>
NaOH/45°C	1.806 ± 0.102 <sup>b</sup>	48.156 ± 10.623 <sup>c</sup>
NaOH/60°C	2.500 ± 0.255 <sup>d</sup>	42.482 ± 8.002 <sup>bc</sup>
NaOH/85°C	2.296 ± 0.436 <sup>c</sup>	35.784 ± 4.734 <sup>bc</sup>
H <sub>2</sub> O/30°C	1.887 ± 0.465 <sup>bc</sup>	14.009 ± 5.348 <sup>a</sup>
H <sub>2</sub> O/45°C	0.611 ± 0.052 <sup>a</sup>	31.966 ± 7.110 <sup>b</sup>
H <sub>2</sub> O/65°C	2.085 ± 0.158 <sup>bcd</sup>	29.422 ± 5.246 <sup>b</sup>
H <sub>2</sub> O/85°C	*	*

\*ไม่สามารถลอกออกจากแผ่นซิลิโคนได้

\*\* ตัวอักษรที่แตกต่างกันในสมมุติเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p < 0.05)

#### 4.2.2.2. การซึมผ่านไอน้ำ

ตารางที่ 9 แสดงค่าการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มเคร็ดแลนที่เตรียมในสภาวะต่างๆ พบว่า ฟิล์มเคร็ดแลนที่เตรียมจากสารละลายที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปมีค่า WVP ต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายต่างมีค่า WVP ไม่แตกต่างจากฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายในน้ำกลั่นที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน การให้ความร้อนกับสารละลายเคร็ดแลนอาจมีผลให้โมเลกุลเคร็ดแลนเกิดการคลายตัวและแยกตัวออกจากกันได้มาก ทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาใหม่ระหว่างโมเลกุลได้มากในช่วงของการทำแห้ง โดยที่การเกิดโครงสร้างร่างแหของฟิล์มอาจเกี่ยวข้องกับการเกิด

อันตรกิริยาชนิดต่างๆ ทั้งพันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก จึงช่วยลดการดูดซับและการแพร่ผ่านของไอน้ำในแผ่นฟิล์มได้ดีขึ้น (Tako and Hanashiro, 1997)

ตารางที่ 9 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ (WVP) ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลน (2.0% w/v) ในน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 M ที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

Sample	WVP ( $\times 10^{-7} \text{ g cm}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ mmHg}^{-1}$ )
NaOH/30°C	$12.950 \pm 1.030^{**}$
NaOH/45°C	$10.600 \pm 1.810^b$
NaOH/60°C	$7.400 \pm 0.980^a$
NaOH/85°C	$8.520 \pm 0.470^{ab}$
H <sub>2</sub> O/30°C	$10.110 \pm 0.300^b$
H <sub>2</sub> O/45°C	$11.880 \pm 1.400^{bc}$
H <sub>2</sub> O/60°C	$8.780 \pm 0.510^{ab}$
H <sub>2</sub> O/85°C	*

\*ไม่สามารถลอกออกจากแผ่นซีลโคนได้

\*\* ตัวอักษรที่แตกต่างกันในสดมภ์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

#### 4.3. เปรียบเทียบสมบัติบางประการและการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายต่างและให้ความร้อน

จากผลการทดลองได้คัดเลือกแผ่นฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลน (2.0 % w/v) ในสารละลาย 0.2 M NaOH และในน้ำกลั่นที่ 65 °C มาทำการวิเคราะห์สมบัติบางประการ ได้แก่ สีและความโปร่งแสง การดูดซับน้ำและน้ำมัน สมบัติทางความร้อน โครงสร้างจุลภาค และโครงสร้างผลึก ให้ผลดังต่อไปนี้

##### 4.3.1 ลักษณะปรากฏ สี และความใส

รูปที่ 7 แสดงภาพถ่ายฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลนในสารละลาย 0.2 M NaOH และในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60 °C จะเห็นว่าฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลนในน้ำกลั่นให้ลักษณะปรากฏที่แตกต่างจากฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลนใน 0.2 M NaOH โดยที่ฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมโดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย จะให้แผ่นฟิล์มที่มีลักษณะเรียบและมีความ

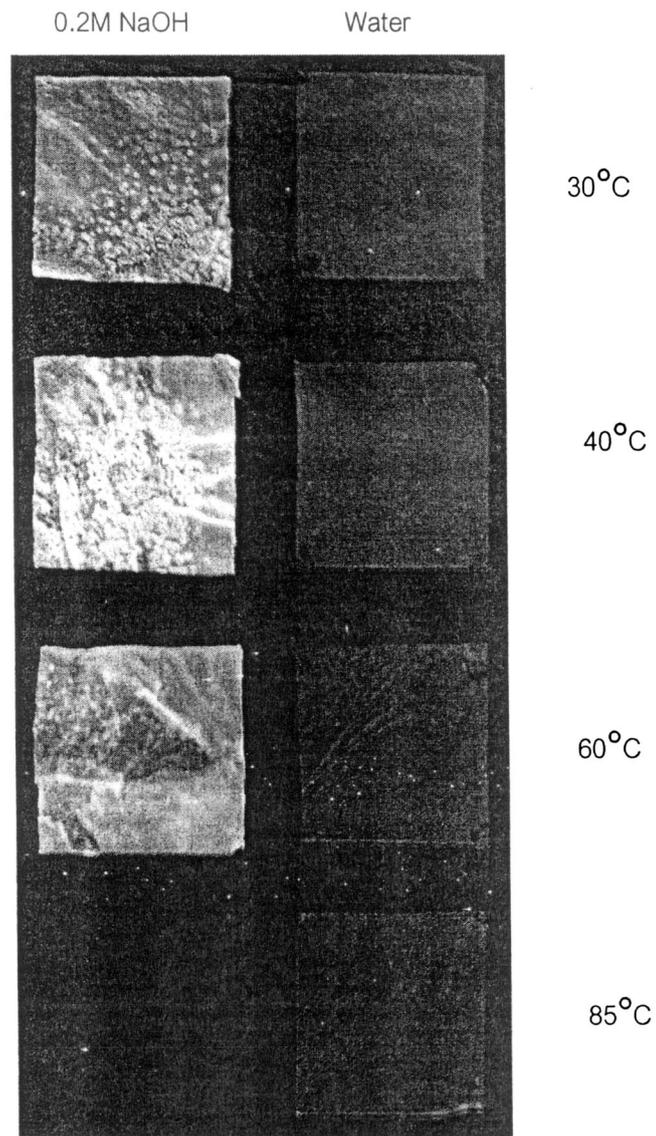
โปร่งแสงมากกว่าฟิล์มเคิร์ตแลนที่เตรียมโดยใช้สารละลายต่าง (ตารางที่ 10) ในขณะที่ฟิล์มเคิร์ตแลนที่เตรียมโดยใช้สารละลายต่างจะมีลักษณะผิวที่ไม่เรียบ ทึบแสงและมีสีขาว โดยมีค่าความขาวหรือความสว่าง (ค่า  $L^*$ ) และค่าสีเหลือง (ค่า  $b^*$ ) (ตารางที่ 11) ที่สูงกว่าฟิล์มเคิร์ตแลนที่เตรียมโดยใช้น้ำกลั่น ลักษณะปรากฏที่แตกต่างกันนี้น่าจะเป็นผลมาจากโครงสร้างผลึกและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเคิร์ตแลนในแผ่นฟิล์ม ในสภาวะการใช้สารละลายต่างโมเลกุลเคิร์ตแลน อาจจะสามารถละลายและคลายตัวได้มากกว่า จึงทำให้สามารถเกิดการเคลื่อนไหวของโมเลกุลได้ง่าย เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบและเกิดโครงสร้างของผลึกขึ้นได้มากกว่าในสภาวะการใช้น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย อย่างไรก็ตามเมื่อความเป็นผลึกในโครงสร้างฟิล์มเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ฟิล์มเกิดการหดตัวได้มากขึ้นและฟิล์มที่ได้มีลักษณะผิวหน้าที่ไม่เรียบสม่ำเสมอ Toshi และคณะ (1999) รายงานว่าเจลเคิร์ตแลนที่ผ่านการให้ความร้อนสูงกว่า  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  มีสมบัติการส่องผ่านแสงมากขึ้น เนื่องจากเจลมีโครงสร้างร่างแหที่สม่ำเสมอ (homogeneous network structure)

ตารางที่ 10 การส่องผ่านแสง (%) และความโปร่งใสของฟิล์มเคิร์ตแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ตแลน (2.0% w/v) ในน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.2 M

Sample	Thickness (mm)	Wavelength (nm)								Transparency
		200	280	350	400	500	600	700	800	
NaOH film	$0.061 \pm 0.017$	0.42	5.00	7.75	8.25	8.97	9.31	9.48	9.42	$11.47 \pm 0.23$
H <sub>2</sub> O film	$0.054 \pm 0.027$	0.81	6.42	12.33	14.02	17.82	20.59	22.77	24.21	$13.20 \pm 0.35$

ตารางที่ 11 ค่าสี ( $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$ ) ของฟิล์มเคิร์ตแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ตแลน (ร้อยละ 2.0) ในน้ำกลั่นและสารละลาย 0.2M โซเดียมไฮดรอกไซด์

Sample	Thickness (mm)	$L^*$	$a^*$	$b^*$
NaOH film	$0.061 \pm 0.017$	90.34	-1.418	3.036
H <sub>2</sub> O film	$0.054 \pm 0.027$	85.318	-0.998	1.262



รูปที่ 7 ภาพถ่ายของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลน (2.0% w/v) ในน้ำกลั่น และในสารละลาย 0.2 M NaOH ที่ให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

#### 4.3.2 การดูดซับน้ำและน้ำมัน

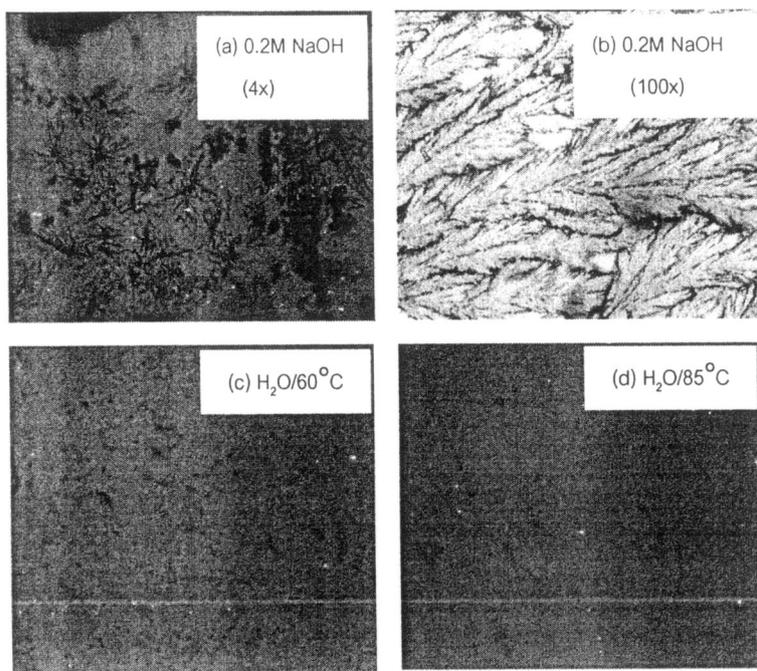
จากการศึกษาการดูดซับน้ำและน้ำมัน พืช (palm oil) ที่เวลาต่างๆ ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลนใน 0.2 M NaOH และในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60 °C ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 12 พบว่าการดูดซับน้ำและน้ำมันของฟิล์มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการแช่ที่เพิ่มขึ้น โดยฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลาย ต่างมีความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมัน พืชที่เวลาการแช่ 24 h ได้ 174.1 % และ 68.10% ตามลำดับ ในขณะที่ ฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลาย ในน้ำกลั่นมีความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำมัน พืชที่เวลาการแช่ 24 h ได้ 194.36% และ 57.71% ตามลำดับ ฟิล์มเคิร์ดแลนมีสมบัติชอบน้ำจึงทำให้ฟิล์มที่ได้มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีกว่าน้ำมัน แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองเห็นได้ว่าค่าการดูดซับน้ำมันของฟิล์มเคิร์ดแลนยังมีค่าค่อนข้างสูง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะพื้นผิวของฟิล์มเคิร์ดแลนที่ได้มีลักษณะขรุขระไม่เรียบ ทำให้น้ำมันสามารถยึดเกาะบนผิวของแผ่นฟิล์มได้ด้วยการยึดเกาะทางกล

ตารางที่ 12 ค่าการดูดซับน้ำและน้ำมันพืช ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลน (2.0% w/v) ในน้ำกลั่นและสารละลาย 0.2 M โซเดียมไฮดรอกไซด์

Samples	Time (h)	Water absorption (%)	Palm oil absorption (%)
NaOH film	0	0	0
	6	162.27	49.42
	12	165.86	61.29
	24	174.10	68.10
H <sub>2</sub> O film	0	0	0
	6	171.85	47.62
	12	187.11	55.04
	24	194.36	57.71

### 4.3.3 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม

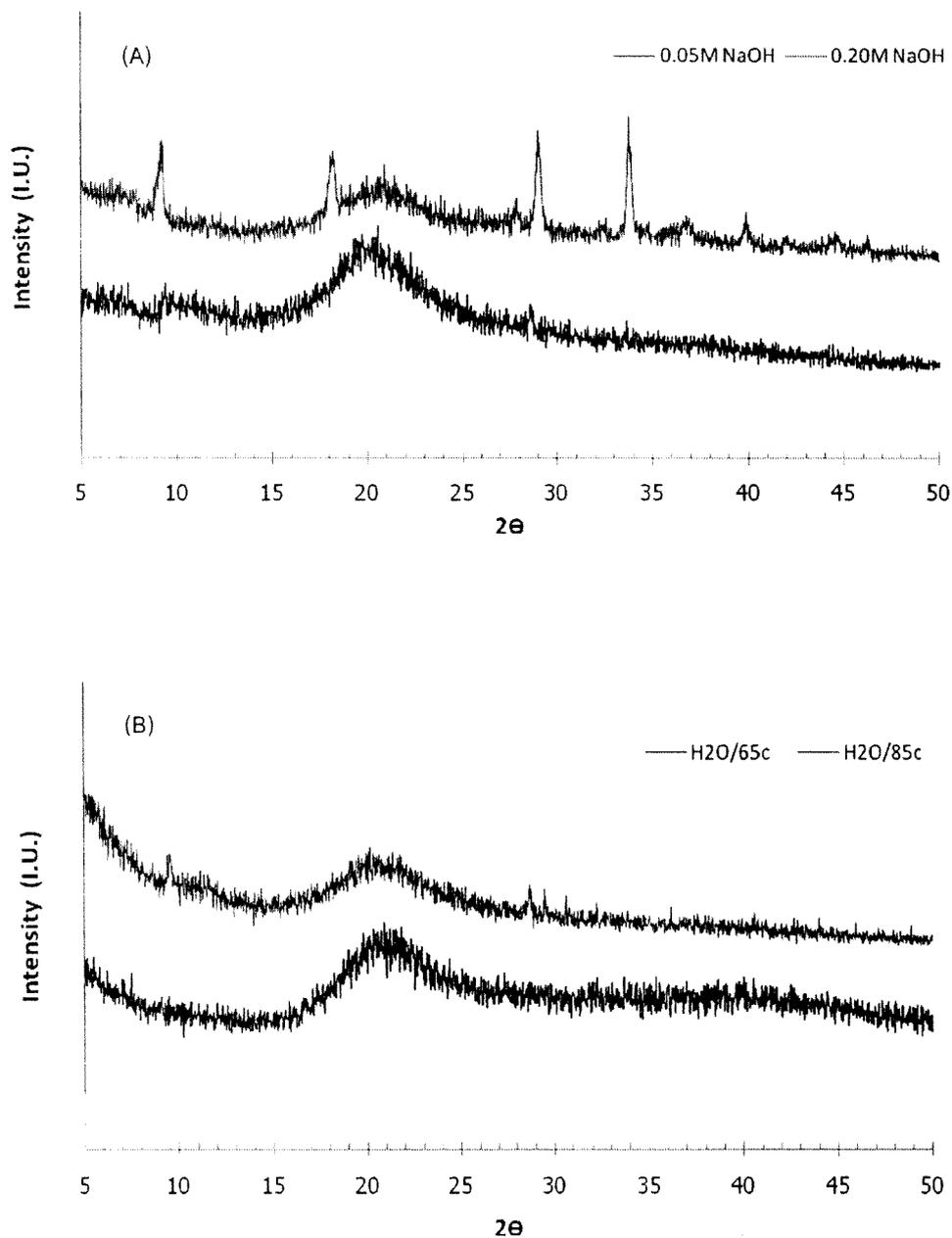
รูปที่ 8 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ (optical microscope) ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลนใน 0.2 M NaOH และในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60 และ 85 °C พบว่า ฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายต่างจะปรากฏรูปทรงของผลึกให้เห็นในตัวฟิล์ม โดยมีลักษณะเป็นชั้นของลามัลลา (lamellae) ที่มีการแตกกิ่งคล้ายรวงข้าว (sheaf-like structure) รวมตัวกันเป็นกลุ่มคล้าย (รูปที่ 8(a) และ 8(b)) ในขณะที่ฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60 และ 85 °C ไม่ปรากฏรูปทรงของผลึกที่ชัดเจนให้เห็น (รูปที่ 8 (c) และ 8(d)) จากลักษณะโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายต่างที่ปรากฏลักษณะคล้ายผลึกอยู่น่าจะเป็นผลให้ฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมในสภาวะดังกล่าวมีลักษณะที่บดแสงและมีการหดตัวสูงเนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้น



รูปที่ 8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลน (2.0% w/v) ใน 0.20 M NaOH (a และ b) และในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 65°C (c) และ 85 °C (d)

#### 4.3.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD (X-ray diffraction analysis)

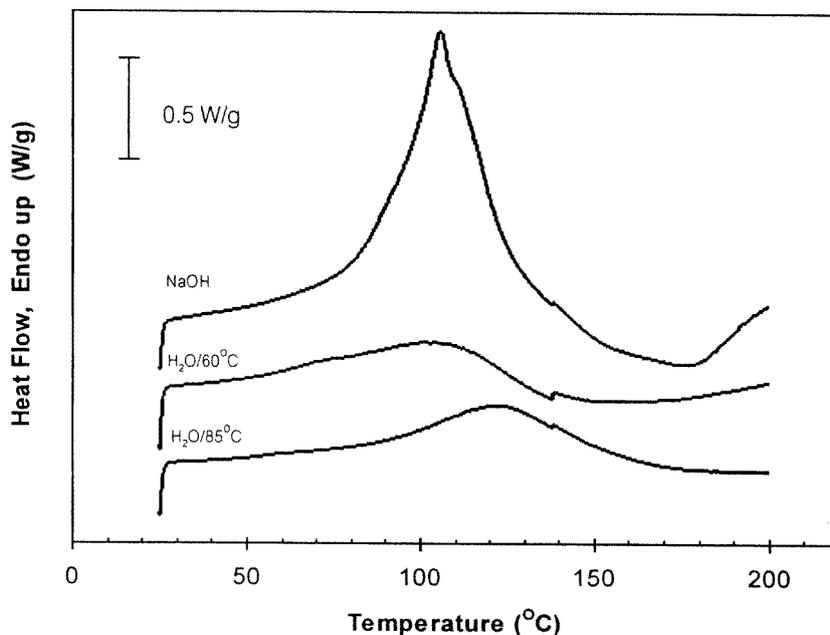
จากการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มเคิร์ดแลนด้วยเทคนิค XRD เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกที่อาจเกิดขึ้นในโครงสร้างของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมด้วยวิธีการที่ต่างๆ กัน คือ ฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลนใน 0.05 M และ 0.2 M NaOH และในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60 และ 85 °C ดังแสดงในรูปที่ 9(A) และ 9(B) ตามลำดับ ฟิล์ม เคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลาย ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60 และ 80 °C ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะกว้าง ( broad or halo peak) ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 20.89 และ 20.07 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปแบบการเลี้ยวเบนดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายในน้ำกลั่นจะปรากฏโครงสร้างผลึกอยู่น้อย จึงไม่เห็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ชัดเจน ในขณะที่ฟิล์ม เคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลาย 0.2 M NaOH ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ชัดเจนที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 9.27, 48.21, 20.91, 29.01, 33.77, 36.77 และ 39.91 ซึ่งเกี่ยวข้องกับโครงสร้างผลึกที่ปรากฏในฟิล์มดังกล่าว อย่างไรก็ตามฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นต่ำ 0.05 M มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้ไม่แตกต่างจากฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายในน้ำกลั่น



รูปที่ 9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction pattern) ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลน (2.0% w/v) ใน 0.05 M และ 0.20 M NaOH (A) และในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60 และ 85 °C (B)

#### 4.3.5 สมบัติทางความร้อน

รูปที่ 10 แสดงเทอร์โมแกรม (Thermogram) ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 200 °C ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC (Differential scanning calorimetry) ของแผ่นฟิล์มเคิร์ตแลนที่เตรียมในสภาวะต่าง ๆ พบว่า ฟิล์มเคิร์ตแลนปรากฏพีคการดูดพลังงานความร้อน ( endothermic peak) เพียงพีคเดียว ที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะทางโครงสร้าง ซึ่งคาดว่าอาจเกิดจากการทำลายโครงสร้างผลึกหรือส่วนที่เป็นระเบียบที่เกิดขึ้นในตัวอย่างฟิล์ม ฟิล์มเคิร์ตแลนที่เตรียมโดยใช้น้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60 °C มีพีคดังกล่าวที่ค่อนข้างกว้างโดยที่อุณหภูมิประมาณ 110 °C พีคดังกล่าวขยับมาปรากฏที่อุณหภูมิสูงขึ้นอยู่ที่ประมาณ 122 °C เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มจากสารละลายเคิร์ตแลนในน้ำกลั่นที่ 85 °C ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิ 85 °C โมเลกุลของเคิร์ตแลนจะมีเกิดการเชื่อมประสานกันระหว่างโมเลกุลของเคิร์ตแลนอยู่ในรูปของ multiple-chain helix โดยที่การเชื่อมประสานกันระหว่างโมเลกุลเกิดโดยพันธะไฮโดรเจนและอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก ( Tako and Hanashiro, 1997) สำหรับตัวอย่างฟิล์มเคิร์ตแลนที่เตรียมโดยใช้สารละลาย 0.2 M NaOH มีพีคปรากฏที่อุณหภูมิประมาณ 105 °C โดยพีคดังกล่าวมีลักษณะที่แคบกว่าพีคของตัวอย่างฟิล์มเคิร์ตแลนที่เตรียมโดยใช้น้ำกลั่น ซึ่งอาจแสดงถึงความสม่ำเสมอของโครงสร้างผลึกหรือส่วนที่เป็นระเบียบที่มีมากกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะที่แตกต่างกันที่พบในตัวอย่างฟิล์มเคิร์ตแลนที่เตรียมโดยใช้น้ำกลั่นและใช้สารละลายต่างนี้ อาจเป็นผลมาจากรูปแบบโครงสร้างผลึกหรือโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่มีความแตกต่างกันในตัวอย่างฟิล์มทั้งสองชนิด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค XRD และ microscopy นอกจากนี้ยังพบว่าพลังงานเอนทัลปีของการหลอมเหลว ( $\Delta H$ ) ดังกล่าวของตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมโดยใช้สารละลาย 0.2 M NaOH มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมโดยใช้น้ำกลั่น ซึ่งบ่งบอกว่าฟิล์มเคิร์ตแลนที่เตรียมจากสารละลายต่างมีปริมาณความเป็นผลึกหรือส่วนที่เป็นระเบียบอยู่มากกว่าฟิล์มที่เตรียมโดยใช้น้ำกลั่น จากข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าในสารละลายต่างโมเลกุลเคิร์ตแลนสามารถเกิดโครงสร้างผลึกหรือเกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบขึ้นได้มากกว่าการเตรียมโดยใช้น้ำกลั่น

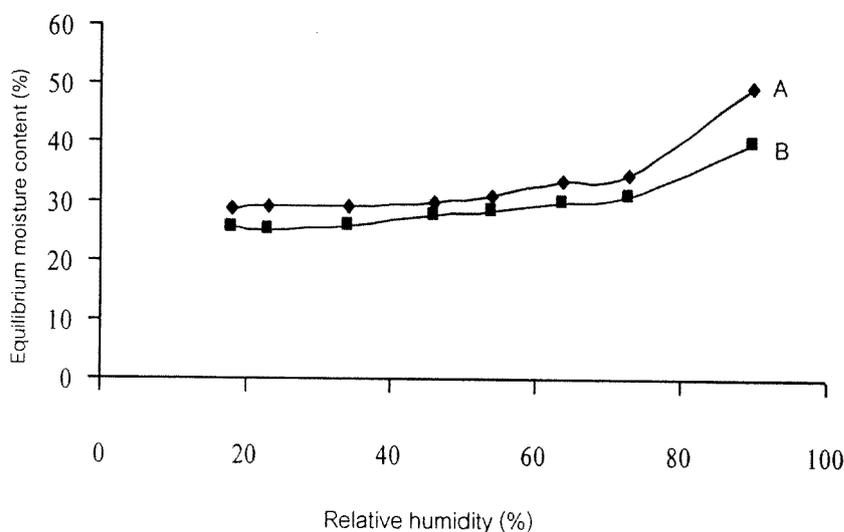


รูปที่ 10 DSC thermograms ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลน (2.0% w/v) ใน 0.20 M NaOH และในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60 และ 85 °C (B)

#### 4.4 Moisture sorption isotherm และความคงตัว ทางความร้อน ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมใน สภาวะต่างๆ

##### 4.4.1. Moisture sorption isotherm

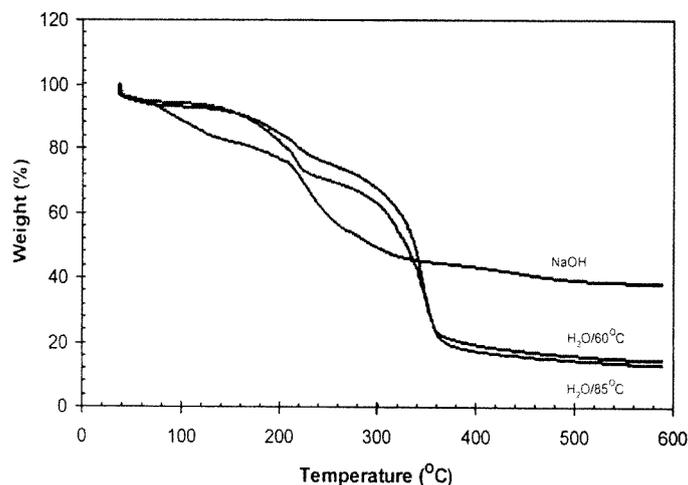
รูปที่ 11 แสดง moisture sorption isotherm ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมในสภาวะต่างๆ พบว่า เมื่อเก็บฟิล์มเคิร์ดแลนที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ (15-90 %) ฟิล์มมีความชื้นค่อนข้างคงที่ความชื้นสัมพัทธ์ช่วง 15-35 % และมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 40-75 % แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเคิร์ดแลนค่อนข้างมีความคงตัวต่อความชื้น อาจเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่สูง อย่างไรก็ตามฟิล์มมีความชื้นสูงชันมากเมื่อเก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90 % อันเป็นผลมาจากสมบัติชอบน้ำของเคิร์ดแลน เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้างจำนวนมาก โดยที่ลักษณะการเพิ่มขึ้นของความชื้นของ moisture sorption isotherm ที่ได้มีรูปร่างเป็น sigmodal ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้ทั่วไปสำหรับพอลิเมอร์ชีวภาพและในอาหาร ( Al-Muhtaseb et al., 2002) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมในสภาวะต่างกัน พบว่า ฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายต่างมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้มากกว่าฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมโดยใช้ความร้อน



รูปที่ 11 Moisture Sorption Isotherms ของฟิล์มไครตแลนที่เตรียมจากสารละลายไครตแลน (2.0% w/v) ใน 0.20 M NaOH (A) และในน้ำกลั่นที่ 60 °C (B)

#### 4.4.2. ความคงตัวทางความร้อนของฟิล์มไครตแลน —TGA analysis

จากวิเคราะห์ความคงตัวทางความร้อนของฟิล์มไครตแลนโดยใช้เทคนิค TGA (Thermogravimetric analyzer) ให้ผลดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่า ฟิล์มไครตแลนเริ่มเกิดการสลายตัวช่วงแรกที่อุณหภูมิประมาณ 180 °C ซึ่งอาจเกิดจากการสลายตัวของสารโมเลกุลเล็ก ซึ่งอาจเป็นโมเลกุลกลีเซอรอล หลังจากนั้นเกิดการสลายตัวอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิในช่วงประมาณ 250 °C ซึ่งน่าจะเกี่ยวข้องกับการสลายตัวของโมเลกุลไครตแลนที่เป็นโครงสร้างหลักของฟิล์ม อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิระหว่าง 400 – 600 °C ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่าง รวมทั้งตัวอย่างไม่สลายตัวหมดที่อุณหภูมิดังกล่าว ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณหรือส่วนของโมเลกุลที่เกิดการเชื่อมประสานระหว่างโมเลกุลมีความคงตัวเพียงพอในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว และสามารถสังเกตได้ว่าฟิล์มไครตแลนที่เตรียมจากสารละลายต่างเกิดการสลายตัวไปน้อยกว่าฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายในน้ำกลั่น แสดงถึงโครงสร้างร่างแหที่มีความแข็งแรงและหนาแน่นมากกว่าในฟิล์มไครตแลนที่เตรียมโดยใช้ความร้อน



รูปที่ 12 TGA thermograms ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลน (2.0% w/v) ใน 0.20 M NaOH และในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 60 และ 85 °C

#### 4.4.3. ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของฟิล์มเคิร์ดแลน

เมื่อนำฟิล์มเคิร์ดแลน ที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ดแลนใน 0.20 M NaOH และในน้ำกลั่นมาทำการอบบ่มที่อุณหภูมิ 45, 65 และ 85 °C เป็นเวลา 1, 6 และ 12 h แล้วทำการตรวจสอบสมบัติเชิงกล การซึมผ่านไอน้ำ และสมบัติทางกายภาพ ให้ผลดังแสดงในตารางที่ 13 – 15 โดยทั่วไปพบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อให้ความร้อนแก่ฟิล์มในช่วง 1-12 h ฟิล์มที่ได้มีค่าการต้านทานแรงดึง และการซึมผ่านไอน้ำ และค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาการให้ความร้อนเดียวกัน การให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความยืดหยุ่นและ WVP ของฟิล์มมีแนวโน้มลดลง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างที่โมเลกุลอาจมีการจัดเรียงตัวมากขึ้น ความยืดหยุ่นและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มจึงลดลง

ตารางที่ 13 สมบัติเชิงกล ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ด แลนใน 0.2 M NaOH และในน้ำกลั่นที่เก็บปมที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

Samples	Temperature (°C)	Time (h)	TS (MPa)	EAB (%)
NaOH	45	0	7.37±1.60 <sup>ab</sup>	62.40±15.94 <sup>b*</sup>
		1	7.47±0.89 <sup>ab</sup>	67.39±16.51 <sup>b</sup>
		6	6.87±0.90 <sup>abc</sup>	52.73±20.50 <sup>bc</sup>
		12	6.95±0.54 <sup>abc</sup>	35.21±8.26 <sup>c</sup>
	65	0	3.82±0.78 <sup>c</sup>	110.67±7.29 <sup>a</sup>
		1	3.92±0.93 <sup>c</sup>	104.20±4.44 <sup>a</sup>
		6	3.57±0.54 <sup>c</sup>	69.02±6.61 <sup>b</sup>
		12	3.70±0.70 <sup>c</sup>	62.68±6.51 <sup>b</sup>
	85	0	3.26±0.77 <sup>e</sup>	80.40±17.80 <sup>b</sup>
		1	3.16±0.73 <sup>e</sup>	33.50±21.07 <sup>bc</sup>
		6	4.57±0.75 <sup>e</sup>	37.47±15.08 <sup>cd</sup>
		12	5.26±0.69 <sup>e</sup>	27.80±14.80 <sup>cd</sup>
H <sub>2</sub> O	45	0	8.11±3.24 <sup>a</sup>	110.69±10.76 <sup>a</sup>
		1	4.77±1.25 <sup>d</sup>	92.50±13.60 <sup>a</sup>
		6	5.00±1.55 <sup>d</sup>	69.54±29.36 <sup>b</sup>
		12	5.61±0.80 <sup>cd</sup>	65.64±13.37 <sup>b</sup>
	65	0	8.11±3.24 <sup>b</sup>	110.69±10.76 <sup>a</sup>
		1	5.86±0.99 <sup>bc</sup>	72.29±4.59 <sup>b</sup>
		6	10.07±3.29 <sup>a</sup>	62.81±11.10 <sup>b</sup>
		12	8.71±2.09 <sup>a</sup>	35.51±9.35 <sup>c</sup>
	85	0	7.87±1.36 <sup>c</sup>	110.69±10.76 <sup>a</sup>
		1	7.54±2.19 <sup>b</sup>	38.48±6.06 <sup>d</sup>
		6	11.64±3.55 <sup>b</sup>	14.58±4.31 <sup>e</sup>
		12	16.97±1.49 <sup>a</sup>	12.24±1.31 <sup>e</sup>

\* ตัวอักษรที่แตกต่างกันในสตรมภ์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ (p< 0.05)

ตารางที่ 14 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ ของฟิล์มเคิร์ดแลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ด แลนใน 0.2 M NaOH และในน้ำกลั่นที่เก็บบ่มที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

Samples	Temperature (°C)	Time (h)	WVP
NaOH	45	0	5.07±0.17 <sup>a*</sup>
		1	5.09±0.15 <sup>a</sup>
		6	4.74±0.23 <sup>ab</sup>
		12	4.58±0.24 <sup>b</sup>
	65	0	2.86±0.15 <sup>ab</sup>
		1	2.87±0.51 <sup>ab</sup>
		6	2.93±0.08 <sup>a</sup>
		12	2.22±0.46 <sup>cd</sup>
	85	0	2.86±0.15 <sup>c</sup>
		1	3.38±0.22 <sup>ab</sup>
		6	3.03±0.45 <sup>bc</sup>
		12	3.71±0.41 <sup>a</sup>
H <sub>2</sub> O	45	0	2.44±0.18 <sup>c</sup>
		1	2.22±0.36 <sup>c</sup>
		6	2.15±0.54 <sup>c</sup>
		12	2.22±0.23 <sup>c</sup>
	65	0	2.46±0.04 <sup>bc</sup>
		1	1.92±0.16 <sup>d</sup>
		6	2.64±0.40 <sup>abc</sup>
		12	2.22±0.09 <sup>cd</sup>
	85	0	2.42±0.05 <sup>d</sup>
		1	2.20±0.21 <sup>de</sup>
		6	1.79±0.35 <sup>e</sup>
		12	2.05±0.25 <sup>de</sup>

\* ตัวอักษรที่แตกต่างกันในสมมุติเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ตารางที่ 15 ค่าสีของฟิล์มเคิร์ดเลนที่เตรียมจากสารละลายเคิร์ด เลนใน 0.2 M NaOH และในน้ำกลั่นที่เก็บบ่มที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

Samples	Temperature (°C)	Time (h)	L*	a*	b*
NaOH	45	0	95.11±0.14 <sup>a</sup>	-2.81±0.04 <sup>a</sup>	14.25±0.38 <sup>c*</sup>
		1	94.98±0.22 <sup>ab</sup>	-2.85±0.05 <sup>ab</sup>	14.31±0.19 <sup>c</sup>
		6	94.97±0.15 <sup>ab</sup>	-2.91±0.01 <sup>bc</sup>	14.54±0.10 <sup>abc</sup>
		12	94.88±0.18 <sup>ab</sup>	-2.87±0.03 <sup>ab</sup>	14.44±0.19 <sup>bc</sup>
	65	0	95.01±0.38 <sup>ab</sup>	-2.69±0.12 <sup>c</sup>	13.78±0.38 <sup>c</sup>
		1	95.32±0.27 <sup>a</sup>	-2.44±0.21 <sup>b</sup>	13.35±0.66 <sup>c</sup>
		6	94.89±0.22 <sup>ab</sup>	-2.10±0.05 <sup>a</sup>	13.37±0.41 <sup>c</sup>
		12	94.91±0.18 <sup>ab</sup>	-2.17±0.30 <sup>a</sup>	13.55±0.67 <sup>c</sup>
	85	0	95.01±0.38 <sup>a</sup>	-2.69±0.12 <sup>b</sup>	13.78±0.38 <sup>b</sup>
		1	92.56±0.42 <sup>b</sup>	-1.62±0.20 <sup>b</sup>	15.24±1.11 <sup>b</sup>
		6	83.91±2.21 <sup>c</sup>	2.11±0.75 <sup>a</sup>	15.51±0.68 <sup>b</sup>
		12	80.70±2.48 <sup>d</sup>	2.61±0.31 <sup>a</sup>	20.27±3.22 <sup>a</sup>
H <sub>2</sub> O	45	0	94.02±0.56 <sup>c</sup>	-2.97±0.04 <sup>c</sup>	14.82±0.37 <sup>a</sup>
		1	93.73±0.12 <sup>c</sup>	-2.93±0.04 <sup>bc</sup>	14.70±0.36 <sup>ab</sup>
		6	94.10±0.25 <sup>c</sup>	-2.87±0.08 <sup>ab</sup>	14.51±0.21 <sup>abc</sup>
		12	94.65±0.62 <sup>b</sup>	-2.86±0.07 <sup>ab</sup>	14.21±0.37 <sup>c</sup>
	65	0	93.71±0.20 <sup>c</sup>	-3.04±0.02 <sup>d</sup>	15.35±0.20 <sup>a</sup>
		1	94.75±0.10 <sup>b</sup>	-3.00±0.06 <sup>d</sup>	14.91±0.03 <sup>ab</sup>
		6	94.63±0.88 <sup>b</sup>	-2.89±0.04 <sup>cd</sup>	15.01±0.46 <sup>ab</sup>
		12	93.87±0.12 <sup>c</sup>	-2.87±0.05 <sup>cd</sup>	14.63±0.21 <sup>b</sup>
	85	0	93.71±0.16 <sup>ab</sup>	-3.04±0.01 <sup>b</sup>	15.35±0.17 <sup>b</sup>
		1	93.83±0.79 <sup>ab</sup>	-2.83±0.07 <sup>b</sup>	14.51±0.31 <sup>b</sup>
		6	94.42±0.32 <sup>ab</sup>	-2.43±0.09 <sup>b</sup>	13.98±0.10 <sup>b</sup>
		12	94.74±0.29 <sup>a</sup>	-2.83±0.05 <sup>b</sup>	13.92±0.27 <sup>b</sup>

\* ตัวอักษรที่ต่างกันในระดับมีเดียวกั้นแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $p < 0.05$ )