

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และวิจารณ์

#### 4.1 คุณภาพทางกายภาพและเคมีของเนื้อลำไยสดพันธุ์ดอ

##### 4.1.1 คุณภาพทางกายภาพ

จากการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของเนื้อลำไยสดพันธุ์ดอ ได้แก่ ค่าสีของผลลำไยสด พบว่าค่าสี Lighness (L) เท่ากับ  $39.37 \pm 2.25$  ค่า Chroma (C) เท่ากับ  $6.55 \pm 0.21$  และ ค่า Hue (H) เท่ากับ  $85.50 \pm 2.40$  จากค่า H แสดงว่าผลลำไยสดอยู่ในเขตสีเหลืองแต่มีค่า C น้อยมากความสดใสของสีเหลืองจึงมีน้อย ทำให้ผลลำไยสดมีลักษณะสีขาวเหลือง

##### 4.1.2 คุณภาพทางเคมี

คุณภาพทางเคมีของลำไยสดพันธุ์ดอ แสดงดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 คุณภาพเคมีของเนื้อลำไยสดพันธุ์ดอ

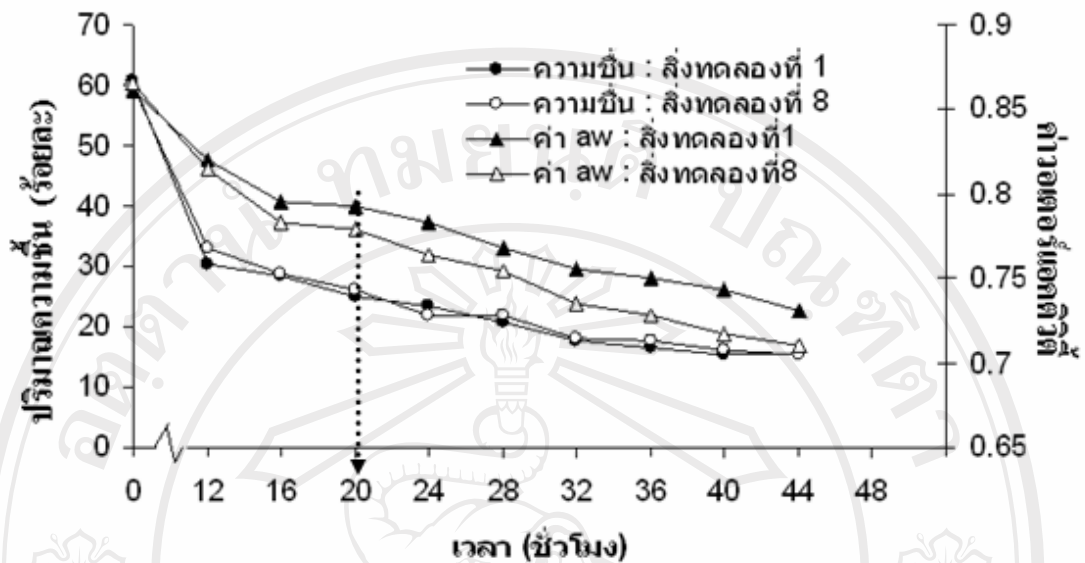
คุณภาพทางเคมี	ลำไยสด
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	$84.92 \pm 0.03$
ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี	$0.97 \pm 0.00$
ค่าความเป็นกรดค่า	$7.17 \pm 0.08$
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (องศาบริกซ์)	$17.5 \pm 0.3$
ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (ร้อยละ)	$8.65 \pm 0.16$
ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (ร้อยละ)	$9.67 \pm 0.63$
ปริมาณโปรตีน (ร้อยละ)	$0.95 \pm 0.03$
ปริมาณไขมัน (ร้อยละ)	$0.08 \pm 0.01$
ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)	$0.64 \pm 0.06$
ปริมาณเส้นใย (ร้อยละ)	$0.23 \pm 0.16$

จากตาราง 4.1 เมื่อพิจารณาเป็นร้อยละโดยน้ำหนักเปียกพบว่าเนื้อลำไยสดพันธุ์ดอมี ปริมาณความชื้น 84.92 โปรตีน 0.95 ไขมัน 0.08 เถ้า 0.64 เส้นใย 0.23 ซึ่ง USDA National Nutrient Database for Standard Reference (2003) ได้รายงานส่วนประกอบทางเคมีของผล ลำไยสด (ร้อยละ) เป็นดังนี้ ปริมาณความชื้น 82.75 โปรตีน 1.31 ไขมัน 0.10 เถ้า 0.70 เส้นใย 1.10 ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของผลลำไยสดที่รายงานไว้มีค่าใกล้เคียงกันกับที่ได้จากการทดลองแต่พบว่าส่วนประกอบทางเคมีบางค่ามีความแตกต่างกันอาจเนื่องมาจากแหล่งหรือ สถานที่ปลูก เมื่อพิจารณาปริมาณ โปรตีนและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเนื้อลำไยสดที่ได้จากการ ทดลองจะเห็นว่า มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) ในผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแปรรูปเนื้อลำไยสด โดย ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดจากการรวมตัวกันของน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโนทำให้เกิดสารเมลานอยดิน (melanoidin) ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลได้ในระหว่างการเก็บรักษา

#### 4.2 คุณภาพทางกายภาพและเคมีของเยลลี่ลำไย

ทำการผลิตเยลลี่ลำไยทั้ง 12 สิ่งทดลองที่แปรผันส่วนผสม เมื่อได้เยลลี่ลำไยที่เซตตัวจน แข็งแล้ว นำไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้เยลลี่ที่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 30 และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีอยู่ในช่วง 0.75-0.80 โดยขั้นตอนในการหาระยะเวลาในการอบ ใช้ เยลลี่ลำไยสิ่งทดลองที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย เนื้อลำไยร้อยละ 84.50 น้ำตาลผสมร้อยละ 15 คาร์ราจีแนนร้อยละ 0.25 โคลด์สตาร์บีนกัมร้อยละ 0.25 และ เยลลี่ลำไยสิ่งทดลองที่ 8 ซึ่งประกอบด้วย เนื้อลำไยร้อยละ 83.00 น้ำตาลผสมร้อยละ 15 คาร์ราจีแนนร้อยละ 1 โคลด์สตาร์บีนกัมร้อยละ 1 เป็น ตัวแทนเยลลี่ทั้งหมด ซึ่งได้จากการทดสอบเบื้องต้นว่าน่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งและอ่อน สด จากการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (ร้อยละ) และค่าวอเตอร์แอกติวิตี เทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบ (ชั่วโมง) (รูป 4.1) จะเห็นว่า หากต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณ ความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 20 -30 และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตีอยู่ในช่วง 0.75-0.80 ซึ่งแสดงลักษณะ อาหารกึ่งแห้ง (intermediate moisture food) (สุวรรณา, 2543) จะต้องใช้เวลารอบประมาณ 20 ชั่วโมง ดังนั้นในกระบวนการทำเยลลี่ลำไยจึงใช้เวลาในการอบเป็น 20 ชั่วโมง ในทุกสิ่งทดลอง

จากตัวอย่างเยลลี่ลำไยทั้ง 12 สิ่งทดลองที่แปรผันส่วนผสม ศึกษาคุณภาพทางกายภาพและ เคมี ได้ผลการทดลองเป็นดังต่อไปนี้



รูป 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (ร้อยละ) และค่าแอดอร์แอกติวิตี้ เทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบ (ชั่วโมง)

#### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพ

##### การวิเคราะห์ค่าสี

จากการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์เซลล์ลำไยทุกสิ่งทดลองมีค่าสี L, C, H ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) ดังตาราง 4.2 โดยมีค่าสี L อยู่ในช่วง 32.01-41.16 ค่าสี C อยู่ในช่วง 6.48-7.56 และค่าสี H อยู่ในช่วง 64.13-67.83 โดยค่าสี L แสดงถึงความสว่างของวัตถุ ยิ่งค่าสี L สูงหมายถึงผลิตภัณฑ์มีความสว่างมาก ซึ่งค่าสี L จะอยู่ในช่วง 0-100 จากการทดลองพบว่า เซลล์ลำไยทุกสิ่งทดลองมีสีค่อนข้างสว่าง ค่าสี C เป็นค่าที่แสดงถึงความสดใส ความเข้มสี หากค่าสี C มากแสดงว่าวัตถุนั้นมีความเข้มของสีมากซึ่งค่าสี C อยู่ในช่วง 0-60 จากการทดลองพบว่าเซลล์ลำไยทุกสิ่งทดลองมีค่า C น้อยมาก นั่นคือความสดใสของสีมีน้อย สำหรับค่าสี H บ่งบอกถึงสีที่แท้จริงที่ปรากฏให้เห็น โดยค่าสี H เท่ากับ 0 แสดงว่าเป็นสีแดง ค่าสี H เท่ากับ 90 แสดงว่าเป็นสีเหลือง ค่าสี H เท่ากับ 180 แสดงว่าเป็นสีเขียว ค่าสี H เท่ากับ 270 แสดงว่าเป็นสีน้ำเงิน จากการทดลองพบว่าเซลล์ลำไยทุกสิ่งทดลองมีสีเหลืองออกน้ำตาลเล็กน้อย

ตาราง 4.2 ค่าสีในระบบ L C H ของเยลลี่ลำไยทั้ง 12 สิ่งทดลอง

สิ่งทดลอง	ค่า L <sup>ns</sup>	ค่า C <sup>ns</sup>	ค่า H <sup>ns</sup>
1	34.28 ± 4.36	6.84 ± 0.17	66.20 ± 1.40
2	36.92 ± 3.30	6.76 ± 0.23	64.13 ± 1.42
3	41.16 ± 1.18	6.93 ± 0.23	66.95 ± 1.17
4	37.21 ± 4.60	7.40 ± 0.45	67.83 ± 2.25
5	36.49 ± 3.71	7.08 ± 0.31	67.05 ± 2.36
6	36.53 ± 2.63	6.77 ± 0.20	66.85 ± 1.63
7	34.11 ± 2.29	6.48 ± 0.37	66.68 ± 2.89
8	38.56 ± 2.29	6.65 ± 0.29	64.55 ± 2.07
9	36.68 ± 2.72	6.92 ± 0.09	65.00 ± 1.16
10	38.27 ± 2.95	7.54 ± 0.24	66.93 ± 1.61
11	34.67 ± 2.50	7.56 ± 0.22	67.38 ± 2.11
12	32.01 ± 2.44	7.23 ± 0.18	64.53 ± 1.08

หมายเหตุ : ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

#### การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเยลลี่ลำไยโดยวิธี Texture Profile Analysis แสดงดังตาราง 4.3 พบว่า hardness หรือความแข็ง มีค่าอยู่ในช่วง 20.56-157.95 นิวตัน โดยสิ่งทดลองที่ 12 ซึ่งมีเนื้อลำไยน้อย น้ำตาลผสมมาก แต่มีปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ผสมน้อย มีค่า hardness ต่ำสุด ในทางตรงข้ามสิ่งทดลองที่ 8 ซึ่งมีเนื้อลำไยมาก น้ำตาลผสมน้อย แต่มีปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ผสมมาก มีค่า hardness สูงสุด Adhesiveness หรือ แรงที่ทำให้วัสดุหลุดออกจากสิ่งเกาะติดมีค่าอยู่ในช่วง 0.66-1.65 นิวตัน.วินาที โดยสิ่งทดลองที่ 8 มีค่า Adhesiveness ต่ำสุด และสิ่งทดลองที่ 5 มีค่า Adhesiveness สูงสุด Springiness หรือความยืดหยุ่น มีค่าอยู่ในช่วง 0.61-0.82 โดยสิ่งทดลองที่ 2 มีค่า Springiness ต่ำสุด และสิ่งทดลองที่ 10 มีค่า Springiness สูงสุด Cohesiveness หรือแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0.25-0.71 โดยสิ่งทดลองที่ 12 มีค่า Cohesiveness ต่ำสุด และสิ่งทดลองที่ 8 มีค่า Cohesiveness สูงสุด Gumminess หรือแรงที่ใช้ในการทำให้อาหารกึ่งแข็งแตกกระจายจนอยู่ในสภาพพร้อมจะกลืน มีค่าอยู่ในช่วง 41.69-112.62 นิวตัน โดยสิ่งทดลองที่ 12 มีค่า Gumminess ต่ำสุด และสิ่งทดลองที่ 8 มีค่า Gumminess สูงสุด Chewiness แรงที่ใช้ในการทำให้อาหารแข็งแตกกระจายจนอยู่ในสภาพพร้อมจะกลืน มีค่าอยู่ในช่วง 32.85-72.08 นิวตัน โดยสิ่งทดลองที่ 12 มีค่า Chewiness ต่ำสุด และสิ่งทดลองที่ 8 มีค่า Chewiness สูงสุด ผลิตภัณฑ์ที่มีค่า Gumminess สูง เป็นผลิตภัณฑ์

ตาราง 4.3 ลักษณะทางเนื้อสัมผัส (TPA) ของเยลลี่ดำไผ่ 12 สิ่งทดลอง

สิ่งทดลอง	Hardness (N)	Adhesiveness (N.sec)	Springiness	Cohesiveness	Gumminess (N)	Chewiness (N)
1	65.53 <sup>b</sup> ± 6.80	1.25 <sup>cd</sup> ± 0.22	0.80 <sup>d</sup> ± 0.11	0.62 <sup>b</sup> ± 0.02	53.75 <sup>b</sup> ± 6.36	39.06 <sup>b</sup> ± 6.66
2	128.51 <sup>f</sup> ± 12.95	1.36 <sup>def</sup> ± 0.15	0.61 <sup>a</sup> ± 0.09	0.64 <sup>cd</sup> ± 0.01	81.91 <sup>cd</sup> ± 8.63	50.15 <sup>de</sup> ± 5.35
3	101.07 <sup>d</sup> ± 4.72	1.59 <sup>fg</sup> ± 0.26	0.82 <sup>d</sup> ± 0.10	0.61 <sup>b</sup> ± 0.04	58.49 <sup>b</sup> ± 1.89	44.61 <sup>c</sup> ± 4.93
4	129.03 <sup>f</sup> ± 23.91	1.21 <sup>cd</sup> ± 0.20	0.70 <sup>bc</sup> ± 0.06	0.65 <sup>de</sup> ± 0.01	100.60 <sup>f</sup> ± 1.72	64.66 <sup>f</sup> ± 2.46
5	110.71 <sup>de</sup> ± 9.00	1.65 <sup>g</sup> ± 0.29	0.65 <sup>ab</sup> ± 0.03	0.65 <sup>de</sup> ± 0.00	71.67 <sup>c</sup> ± 4.54	52.01 <sup>de</sup> ± 4.26
6	134.36 <sup>f</sup> ± 12.17	1.06 <sup>bc</sup> ± 0.15	0.73 <sup>c</sup> ± 0.03	0.64 <sup>bcd</sup> ± 0.02	94.66 <sup>ef</sup> ± 3.61	62.63 <sup>f</sup> ± 3.59
7	149.11 <sup>g</sup> ± 10.95	1.27 <sup>cde</sup> ± 0.35	0.69 <sup>bc</sup> ± 0.03	0.70 <sup>c</sup> ± 0.03	99.37 <sup>f</sup> ± 2.55	66.72 <sup>f</sup> ± 5.74
8	157.95 <sup>g</sup> ± 1.93	0.67 <sup>a</sup> ± 0.09	0.66 <sup>ab</sup> ± 0.02	0.71 <sup>f</sup> ± 0.01	112.62 <sup>g</sup> ± 9.08	72.08 <sup>g</sup> ± 6.94
9	127.69 <sup>f</sup> ± 14.35	0.82 <sup>ab</sup> ± 0.17	0.66 <sup>ab</sup> ± 0.05	0.65 <sup>de</sup> ± 0.02	82.13 <sup>cd</sup> ± 9.96	54.15 <sup>e</sup> ± 6.12
10	88.77 <sup>c</sup> ± 5.19	0.82 <sup>ab</sup> ± 0.17	0.82 <sup>d</sup> ± 0.06	0.62 <sup>bc</sup> ± 0.03	53.85 <sup>b</sup> ± 4.07	44.37 <sup>c</sup> ± 4.77
11	115.19 <sup>c</sup> ± 4.29	1.50 <sup>efg</sup> ± 0.37	0.68 <sup>abc</sup> ± 0.03	0.62 <sup>bc</sup> ± 0.04	71.05 <sup>c</sup> ± 4.53	47.91 <sup>cd</sup> ± 3.61
12	20.56 <sup>a</sup> ± 2.60	0.88 <sup>ab</sup> ± 0.12	0.73 <sup>c</sup> ± 0.04	0.25 <sup>a</sup> ± 0.03	41.69 <sup>a</sup> ± 0.91	32.85 <sup>a</sup> ± 4.95

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้ง อักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

ที่มีความแข็งและมีแรงยึดเหนี่ยวภายในมาก สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีค่า Chewiness สูงนั้น เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็ง มีแรงยึดเหนี่ยวภายใน และความยืดหยุ่นสูง (Szczeniak, 2002)

เมื่อนำข้อมูลของค่าเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละสิ่งทดลองไปหาความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระด้วยวิธี stepwise multiple regression จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังตาราง 4.4

ตาราง 4.4 สมการรีเกรสชันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของเยลลี่ลำไยต่อลักษณะทางเนื้อสัมผัส

สมการ	สมการรีเกรสชัน	$r^2$
4.1	Hardness = $109.260X_3 + 57.390X_4$	0.982
4.2	Adhesiveness = $0.011 X_1 + 0.028 X_2 - 0.560X_4$	0.961
4.3	Springiness = $0.008 X_1 + 0.009 X_2 - 0.140 X_3$	0.995
4.4	Cohesiveness = $0.006 X_1 + 0.200X_3$	0.983
4.5	Gumminess = $0.320 X_1 + 52.280 X_3 + 28.160 X_4$	0.993
4.6	Chewiness = $0.310 X_1 + 25.700X_3 + 20.580 X_4$	0.996

หมายเหตุ :  $X_1$  = ปริมาณเนื้อลำไย                       $X_2$  = ปริมาณน้ำตาลผสม  
 $X_3$  = ปริมาณคาร์ราจีแนน                       $X_4$  = ปริมาณ โคลด์สต์บีนกัม

จากสมการ (4.1) จะเห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า hardness คือปริมาณคาร์ราจีแนน และโคลด์สต์บีนกัม โดยพบว่ายิ่งเพิ่มปริมาณคาร์ราจีแนน และโคลด์สต์บีนกัม ค่า hardness ที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยปริมาณคาร์ราจีแนนจะมีอิทธิพลต่อค่า hardness มากกว่า โดยดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร  $X_3$  จะมากกว่า  $X_4$  จากการทดลองพบว่าสิ่งทดลองที่ 8 มีค่า hardness มากที่สุดและสิ่งทดลองที่ 12 มีค่า hardness น้อยที่สุด โดยมีค่า hardness เท่ากับ 157.95 นิวตันและ 20.56 นิวตัน ตามลำดับ โดยสิ่งทดลองที่ 8 ประกอบด้วย คาร์ราจีแนนร้อยละ 1 โคลด์สต์บีนกัมร้อยละ 1 ขณะที่สิ่งทดลองที่ 12 ประกอบด้วยคาร์ราจีแนนร้อยละ 0.25 โคลด์สต์บีนกัมร้อยละ 0.25 นั่นคือเมื่อความเข้มข้นของคาร์ราจีแนนและโคลด์สต์บีนกัมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า hardness มีค่ามากขึ้น



จากสมการ (4.2) จะเห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า adhesiveness คือปริมาณเนื้อลำไย ปริมาณน้ำตาลผสม และปริมาณ โคลค์สตีบีนกัม โดยพบว่า ปริมาณเนื้อลำไยและปริมาณน้ำตาลผสมที่มากขึ้น มีผลให้ค่า adhesiveness มีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณ โคลค์สตีบีนกัมที่มากขึ้นมีผลให้ค่า adhesiveness มีค่าลดลง โดยสังเกตจากสิ่งทดลองที่ 2 และสิ่งทดลองที่ 8 พบว่า เยลลี่ลำไยทั้งสองสิ่งทดลองประกอบด้วยเนื้อลำไย น้ำตาลผสม และคาร์ราจีแนนในปริมาณที่เท่ากัน คือร้อยละ 83, 15 และ 1 ตามลำดับ แต่แตกต่างกันที่ปริมาณ โคลค์สตีบีนกัม โดยสิ่งทดลองที่ 2 มีโคลค์สตีบีนกัมร้อยละ 0.25 สิ่งทดลองที่ 8 มีโคลค์สตีบีนกัมร้อยละ 1 ค่า adhesiveness ของเยลลี่ลำไยสิ่งทดลองที่ 2 และ 8 คือ  $1.36 \pm 0.15$  และ  $0.66 \pm 0.09$  ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ได้ นั่นคือ ปริมาณ โคลค์สตีบีนกัมที่มากมีผลทำให้ค่า adhesiveness มีค่าลดลง

จากสมการ (4.3) จะเห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า springiness คือปริมาณเนื้อลำไย ปริมาณน้ำตาลผสม และปริมาณคาร์ราจีแนน โดยพบว่า ปริมาณเนื้อลำไยและปริมาณน้ำตาลผสมที่มากขึ้น มีผลให้ค่า springiness มีค่ามากขึ้น แต่ปริมาณคาร์ราจีแนนที่มากขึ้น มีผลทำให้ค่า springiness มีค่าลดลง โดยสังเกตได้จากสิ่งทดลองที่ 1 และ 2 ที่ส่วนผสมทุกอย่างในเยลลี่เหมือนกันยกเว้น ปริมาณคาร์ราจีแนน โดยสิ่งทดลองที่ 1 มีคาร์ราจีแนนร้อยละ 0.25 สิ่งทดลองที่ 2 มีคาร์ราจีแนนร้อยละ 1 ค่า springiness ของเยลลี่ลำไยสิ่งทดลองที่ 1 และ 2 คือ  $0.80 \pm 0.11$  และ  $0.61 \pm 0.09$  ตามลำดับ นั่นคือปริมาณคาร์ราจีแนนที่มากขึ้น มีผลทำให้ค่า springiness มีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า เยลลี่ลำไยสิ่งทดลองที่ 10 มีค่า springiness มากสุดคือ 0.82 โดยอัตราส่วนระหว่างคาร์ราจีแนนและโคลค์สตีบีนกัม คือ 1 : 4 ซึ่งอัตราส่วนระหว่าง คาร์ราจีแนนและโคลค์สตีบีนกัมดังกล่าว ยังทำให้เกิดการแยกน้ำ (syneresis) น้อยที่สุด (อรอนงค์, 2545)

จากสมการ (4.4) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า cohesiveness หรือแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างคือปริมาณเนื้อลำไยและปริมาณคาร์ราจีแนน โดยปริมาณคาร์ราจีแนนมีผลต่อค่า cohesiveness มากกว่าปริมาณเนื้อลำไย สังเกตได้จากสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร โดยพบว่าปริมาณคาร์ราจีแนนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า cohesiveness เพิ่มขึ้น เห็นได้จากเยลลี่ลำไยสิ่งทดลองที่ 11 และ 12 ซึ่ง มีปริมาณคาร์ราจีแนนร้อยละ 1 และ 0.25 ตามลำดับ ค่า cohesiveness ที่ได้คือ  $0.62 \pm 0.04$  และ  $0.25 \pm 0.03$  ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเยลลี่ลำไยสิ่งทดลองที่ 8 มีค่า cohesiveness มากสุดคือ  $0.71 \pm 0.01$  อาจเนื่องมาจาก ปริมาณและอัตราส่วนของคาร์ราจีแนนต่อ โคลค์สตีบีนกัมที่เหมาะสมทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายที่แข็งแรงมีผลทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวภายในตัวอย่างมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับสิ่งทดลองอื่นๆ

จากสมการ (4.5) และ (4.6) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า gumminess และ chewiness คือ ปริมาณเนื้อลำใย ปริมาณคาร์ราจีแนน และปริมาณ โลคัสต์บีนกัม โดยปัจจัยหลักที่มีผลคือปริมาณ คาร์ราจีแนน และปริมาณ โลคัสต์บีนกัม สังกัดจากสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร โดยพบว่าสิ่งทดลองที่ 8 มีค่า gumminess และ chewiness สูงสุดคือ  $112.62 \pm 9.08$  และ  $72.08 \pm 6.94$  ตามลำดับ และสิ่งทดลองที่ 12 มีค่า gumminess และ chewiness ต่ำสุดคือ  $41.69 \pm 0.91$  และ  $32.85 \pm 4.59$  ตามลำดับ

จากสมการ (4.1- 4.6) จะสังเกตเห็นว่า ค่า  $r^2$  (coefficient of determination) มีค่าเข้า ใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่า สมการที่ได้มีความน่าเชื่อถือสูง นั่นคือสามารถใช้ในการทำนายค่าได้ สมการที่ได้จึงถือเป็น prediction equation เพื่อใช้ทำนายค่า hardness adhesiveness cohesiveness springiness gumminess และ chewiness โดยมีข้อจำกัดคือ ปัจจัยที่ศึกษาจะต้อง อยู่ในช่วงที่งานวิจัยนี้กำหนดเท่านั้น

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ทางเคมี

จากการทดลองพบว่าเยลลี่ลำใยทุกสิ่งทดลองมีคุณภาพทางเคมีในด้านต่างๆ แสดงดัง ตาราง 4.5 และ 4.6

ตาราง 4.5 คุณภาพทางเคมีของเยลลี่ลำใยทั้ง 12 สิ่งทดลอง

สิ่งทดลอง	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าวอเตอร์แอกติวิตี	ปริมาณของแข็งที่ ละลายได้ทั้งหมด <sup>ns</sup> (องศาบริกซ์)	ค่าความเป็น กรด - ค่า <sup>ns</sup>
1	$30.22^{ef} \pm 1.97$	$0.80^d \pm 0.01$	$54.9 \pm 3.1$	$6.98 \pm 0.07$
2	$27.52^{cd} \pm 2.80$	$0.79^c \pm 0.01$	$56.7 \pm 3.1$	$6.96 \pm 0.03$
3	$28.45^{cdef} \pm 0.57$	$0.80^d \pm 0.00$	$63.0 \pm 2.1$	$6.98 \pm 0.08$
4	$26.45^{bc} \pm 1.54$	$0.79^c \pm 0.01$	$63.9 \pm 1.0$	$6.98 \pm 0.07$
5	$27.59^{cd} \pm 1.47$	$0.80^d \pm 0.01$	$62.1 \pm 1.0$	$6.96 \pm 0.09$
6	$30.53^f \pm 1.92$	$0.81^e \pm 0.01$	$61.2 \pm 2.1$	$6.97 \pm 0.04$
7	$21.52^a \pm 1.31$	$0.76^a \pm 0.00$	$63.9 \pm 3.1$	$6.97 \pm 0.03$
8	$26.43^{bc} \pm 0.39$	$0.78^b \pm 0.01$	$61.2 \pm 2.1$	$6.98 \pm 0.04$
9	$29.42^{def} \pm 0.25$	$0.80^d \pm 0.01$	$59.4 \pm 0.0$	$6.97 \pm 0.03$
10	$27.89^{cde} \pm 0.90$	$0.80^d \pm 0.01$	$62.1 \pm 3.1$	$6.98 \pm 0.05$
11	$25.06^b \pm 1.22$	$0.79^c \pm 0.01$	$66.6 \pm 4.2$	$6.97 \pm 0.01$
12	$27.66^{cd} \pm 1.76$	$0.80^d \pm 0.02$	$59.4 \pm 0.0$	$6.95 \pm 0.05$

หมายเหตุ 1) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้ง อักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

2) ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ



ตาราง 4.6 ปริมาณน้ำตากรีควิวซ์และปริมาณน้ำตาท้งหมดของเฮลตี้ลำไยทั้ง 12 สิ่งทดลอง

สิ่งทดลอง	ปริมาณน้ำตากรีควิวซ์ (ร้อยละ)	ปริมาณน้ำตาท้งหมด (ร้อยละ)
1	19.81 <sup>bcd</sup> ± 1.09	32.31 <sup>a</sup> ± 0.22
2	19.28 <sup>bcd</sup> ± 0.48	32.67 <sup>a</sup> ± 0.24
3	17.40 <sup>ab</sup> ± 1.65	34.23 <sup>c</sup> ± 0.09
4	17.46 <sup>ab</sup> ± 0.00	34.16 <sup>c</sup> ± 0.20
5	17.65 <sup>bc</sup> ± 0.57	35.34 <sup>d</sup> ± 0.07
6	18.05 <sup>bc</sup> ± 0.40	33.49 <sup>b</sup> ± 0.02
7	17.00 <sup>ab</sup> ± 1.19	36.37 <sup>e</sup> ± 0.07
8	20.76 <sup>cd</sup> ± 0.00	32.69 <sup>a</sup> ± 0.36
9	21.49 <sup>d</sup> ± 0.67	32.47 <sup>a</sup> ± 0.52
10	17.74 <sup>bc</sup> ± 0.00	34.11 <sup>c</sup> ± 0.08
11	15.31 <sup>a</sup> ± 0.00	36.23 <sup>e</sup> ± 0.25
12	15.25 <sup>a</sup> ± 0.56	36.53 <sup>e</sup> ± 0.46

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้ง อักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

### ปริมาณความชื้น

จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์เฮลตี้ลำไยพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกสิ่งทดลอง ( $p \leq 0.05$ ) โดยความชื้นเฉลี่ยรวมของสิ่งทดลองทั้งหมดอยู่ที่ร้อยละ 27.39 ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงความชื้นของอาหารกึ่งแห้ง ซึ่งมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 15-30 สิ่งทดลองที่มีปริมาณความชื้นต่ำสุดคือ สิ่งทดลองที่ 7 ซึ่งประกอบด้วยเนื้อลำไยร้อยละ 68 น้ำตาลผสมร้อยละ 30 คาร์ราจีแนนร้อยละ 1 โคลคัสต์บินกัมร้อยละ 1 โดยมีปริมาณความชื้นร้อยละ 21.52 และสิ่งทดลองที่มีปริมาณความชื้นสูงสุดคือ สิ่งทดลองที่ 6 ซึ่งประกอบด้วย เนื้อลำไยร้อยละ 79.81 น้ำตาลผสมร้อยละ 18.75 คาร์ราจีแนนร้อยละ 0.81 โคลคัสต์บินกัมร้อยละ 0.63 โดยมีปริมาณความชื้นร้อยละ 30.53 เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและปัจจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษาก็ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (4.7) ในตาราง 4.7

ซึ่งจะเห็นว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์เฮลตี้ลำไย ได้แก่ ปริมาณเนื้อลำไย ปริมาณน้ำตาลผสม ปริมาณคาร์ราจีแนน และปริมาณโคลคัสต์บินกัม โดยปริมาณเนื้อลำไยและปริมาณน้ำตาลผสมที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณความชื้นมีค่ามากขึ้น ในทางตรงข้ามเมื่อปริมาณคาร์ราจีแนนและโคลคัสต์บินกัมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่วิเคราะห์ได้ลดลง จากสมการที่ได้ จะเห็นว่าค่า  $r^2$  ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 นั่นคือสามารถใช้เป็น prediction equation ได้

### ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ ( $a_w$ )

จากการวิเคราะห์ค่า  $a_w$  ในผลิตภัณฑ์เยลลี่ลำไยพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกสิ่งทดลอง ( $p \leq 0.05$ ) โดยค่า  $a_w$  อยู่ในช่วงค่า  $a_w$  ของอาหารกึ่งแห้ง คือ 0.65-0.85 อาหารกึ่งแห้งเป็นอาหารที่มีปริมาณน้ำที่เป็นประโยชน์ในระดับปานกลาง ซึ่งเป็นระดับที่จุลินทรีย์ประเภทแบคทีเรียส่วนใหญ่ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ แต่อาจมีปัญหาเรื่องเชื้อราและยีสต์ที่อาจจะเจริญเติบโตได้ นอกจากนี้ ค่า  $a_w$  ช่วงดังกล่าวยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) ในผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ในระหว่างการเก็บรักษา จากการทดลองพบว่า สิ่งทดลองที่ 7 มีค่า  $a_w$  ต่ำสุดขณะที่สิ่งทดลองที่ 3 และ 6 มีค่า  $a_w$  สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความชื้นข้างต้น เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $a_w$  และปัจจัยต่างๆที่ทำการศึกษา ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (4.8) ในตาราง 4.7

ซึ่งจะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่า  $a_w$  ในผลิตภัณฑ์เยลลี่ลำไย ได้แก่ ปริมาณเนื้อลำไย ปริมาณน้ำตาลผสม ปริมาณคาร์ราจีแนน และปริมาณโลคัสต์บินกัม โดยปริมาณเนื้อลำไยและปริมาณน้ำตาลผสมที่มากขึ้นส่งผลให้  $a_w$  มีค่ามากขึ้น ในทางตรงข้ามเมื่อปริมาณคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บินกัมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้  $a_w$  ที่วิเคราะห์ได้ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับความชื้นข้างต้น แต่อิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีต่อค่า  $a_w$  จะน้อยกว่าปริมาณความชื้นข้างต้น สังเกตได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรในสมการ (4.7) และสมการ (4.8) นอกจากนี้ เมื่อสังเกตที่ค่า  $r^2$  ในสมการ (4.8) พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.000 แสดงว่าสมการมีความน่าเชื่อถือสูงมาก สามารถใช้เป็น prediction equation ซึ่งจะสามารถทำนายค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ได้แม่นยำ แต่จำกัดอยู่ในช่วงที่ศึกษาเท่านั้น

ตาราง 4.7 สมการรีเกรสชันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของเยลลี่ลำไยต่อ

#### คุณภาพทางเคมี

สมการ	สมการรีเกรสชัน	$r^2$
4.7	ปริมาณความชื้น = $0.368X_1 + 0.118X_2 - 3.330X_3 - 2.080X_4$	0.998
4.8	ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ = $8.358 \times 10^{-3}X_1 + 7.516 \times 10^{-3}X_2 - 9.700 \times 10^{-3}X_3 - 1.240 \times 10^{-2}X_4$	1.000

หมายเหตุ :  $X_1$  = ปริมาณเนื้อลำไย

$X_2$  = ปริมาณน้ำตาลผสม

$X_3$  = ปริมาณคาร์ราจีแนน

$X_4$  = ปริมาณ โลคัสต์บินกัม

### ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความเป็นกรด-ด่าง

พบว่าเยลลี่ลำไยทุกสิ่งทดลอง มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 54.9- 66.6 องศาบริกซ์ ทั้งนี้ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้ ไม่ได้เป็นค่าที่ได้จากน้ำตาลผสมเพียงอย่างเดียว แต่ยังรวมถึงคาร์ราจีแนนและโกลด์สต์ปีนกันด้วย เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสองชนิดนี้ มีความสามารถในการละลายน้ำได้ จึงเป็นไปได้ที่จะสามารถอ่านค่าได้ด้วยเครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (hand refractometer) เช่นเดียวกับน้ำตาล สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ของเยลลี่ลำไย พบว่า ทุกสิ่งทดลองมีค่าความเป็นกรด-ด่าง ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 6.95-6.98 ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่าง ช่วงดังกล่าว เหมาะสมต่อการเกิดเจลของไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสองชนิด โดยคาร์ราจีแนนจะมีความสามารถในการเกิดเจลที่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5-10 และโกลด์สต์ปีนกันมีความสามารถในการเกิดเจลที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 3.5-11 (สุวรรณ, 2543)

จากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในเยลลี่ลำไยพบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ในทุกสิ่งทดลอง โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 15.25-21.49 ซึ่งปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่แตกต่างกันเนื่องจากปริมาณเนื้อลำไยที่แตกต่างกันในแต่ละสิ่งทดลอง โดยสิ่งทดลองที่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 9 สำหรับปริมาณน้ำตาลทั้งหมดพบว่ามีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) ในทุกสิ่งทดลองเช่นเดียวกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 32.31-36.53

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัส

การวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัส โดยใช้ผู้บริโภคทั่วไปเป็นผู้ทดสอบชิมจำนวน 50 คน ประเมินความชอบที่มีต่อคุณลักษณะต่างๆของผลิตภัณฑ์เยลลี่ลำไย ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี ความยืดหยุ่น กลิ่นลำไย รสหวาน ความเหนียว ลักษณะติดฟัน และความชอบรวม เมื่อผันแปรเนื้อลำไย น้ำตาลผสม คาร์ราจีแนน และโกลด์สต์ปีนกัน ได้คะแนนผลการทดสอบดังตาราง 4.8 พบว่า สิ่งทดลองที่ได้รับคะแนนการยอมรับรวมต่อผลิตภัณฑ์เยลลี่ลำไยน้อยที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 12 โดยมีคะแนนความชอบเท่ากับ 2.74 สำหรับสิ่งทดลองที่ได้รับคะแนนการยอมรับรวมมากที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 7 โดยมีคะแนนความชอบเท่ากับ 3.76

ในด้านลักษณะปรากฏและสี พบว่า เยลลี่ลำไยทุกสิ่งทดลองได้รับคะแนนความชอบใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วง 3.74-4.06 และ 3.42-4.06 ตามลำดับ โดยพบว่า สิ่งทดลองที่ 7 ได้รับคะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏและสีมากที่สุด และสิ่งทดลองที่ 8 ได้รับคะแนนความชอบ

ในด้านลักษณะปรากฏและสีน้อยสุด โดยสิ่งทดลองที่ 7 และ 8 ต่างกันที่ปริมาณน้ำตาลจึงเป็นไปได้ว่าน้ำตาลมีผลต่อลักษณะปรากฏและสี

ในด้านความยืดหยุ่นพบว่า สิ่งทดลองที่ 10 ได้รับคะแนนความชอบด้านความยืดหยุ่นมากที่สุดคือ 3.62 คะแนน โดยสิ่งทดลองที่ 10 ประกอบด้วย เนื้อลำไยร้อยละ 76.25 น้ำตาลผสมร้อยละ 22.5 คาร์ราจีแนนร้อยละ 0.25 โคลค์สตีบีนกัมร้อยละ 1 ซึ่งเป็นไปได้ว่าอัตราส่วนระหว่างคาร์ราจีแนนและโคลค์สตีบีนกัมดังกล่าว มีผลต่อความยืดหยุ่นของเจล ซึ่งตรงกับ ความชอบของผู้ทดสอบชิมคือมีลักษณะยืดหยุ่นที่เหมาะสม ไม่เปราะ แข็ง หรือ ละจนเกินไป สำหรับสิ่งทดลองที่ 1 และ 12 พบว่า ได้รับคะแนนความชอบด้านความยืดหยุ่นน้อย คือ 2.64 และ 2.24 คะแนน ตามลำดับ โดยสิ่งทดลองที่ 1 ประกอบด้วย เนื้อลำไยร้อยละ 84.50 น้ำตาลผสมร้อยละ 15 คาร์ราจีแนนร้อยละ 0.25 โคลค์สตีบีนกัมร้อยละ 0.25 สิ่งทดลองที่ 12 ประกอบด้วย เนื้อลำไยร้อยละ 69.5 น้ำตาลผสมร้อยละ 30 คาร์ราจีแนนร้อยละ 0.25 โคลค์สตีบีนกัมร้อยละ 0.25 ซึ่งเป็นไปได้ว่าปริมาณคาร์ราจีแนนและโคลค์สตีบีนกัมดังกล่าวน้อยเกินไปที่จะเกิด โครงสร้างตาข่ายของเจลที่มีความยืดหยุ่นตรงตามความชอบของผู้ทดสอบชิม

ในด้านกลิ่นลำไย พบว่า เกล็ดลำไยทุกสิ่งทดลองได้รับคะแนนความชอบใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 3.30-3.80 ในด้านรสหวานพบว่า เกล็ดลำไยทุกสิ่งทดลองได้รับคะแนนความชอบใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วง 3.24-3.68 โดยสิ่งทดลองที่ ได้รับคะแนนความชอบด้านรสหวานมากที่สุด คือ สิ่งทดลองที่ 7

ในด้านความชอบด้านความเหนียวพบว่า ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบด้านความเหนียวอยู่ในช่วง 2.22-3.68 โดยสิ่งทดลองที่ 7 ได้รับคะแนนความชอบด้านความเหนียวมากที่สุด และสิ่งทดลองที่ 12 ได้รับคะแนนความชอบด้านความเหนียวน้อยที่สุด นอกจากนี้ ความชอบในด้านลักษณะติดฟันให้ผลในการทำงานเดียวกัน คือเกล็ดสิ่งทดลองที่ 7 มีลักษณะติดฟันน้อยที่สุด ซึ่งตรงตามความชอบของผู้ทดสอบชิม

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทางด้านประสาทสัมผัส ได้แก่ ความยืดหยุ่น ความเหนียว และลักษณะติดฟัน กับลักษณะทางเนื้อสัมผัส (TPA) พบว่ามีความสัมพันธ์กันเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) น้อยกว่า 0.5 สาเหตุอาจเกิดจากผู้ทดสอบชิมเป็นผู้บริโภคทั่วไป ไม่ใช่ผู้ทดสอบชิมที่ผ่านการฝึกฝนจึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการแยกแยะลักษณะทางเนื้อสัมผัส และในการวัดลักษณะทางเนื้อสัมผัสโดยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ตัวอย่างที่ใช้วัดไม่ได้มีความสูงเท่ากันทุกชิ้น จึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดได้

ตาราง 4.8 การวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสของเยลลี่ลำไย 12 สิ่งทดลอง

สิ่งทดลอง	ลักษณะปรากฏ	สี	ความยืดหยุ่น	กลิ่นลำไย	รสหวาน	ความเหนียว	ลักษณะติดฟัน	ความชอบรวม
1	3.80 <sup>cd</sup> ± 0.67	3.66 <sup>cd</sup> ± 0.87	2.64 <sup>d</sup> ± 1.17	3.52 <sup>abc</sup> ± 0.93	3.46 <sup>ab</sup> ± 0.97	2.64 <sup>g</sup> ± 1.05	3.70 <sup>a</sup> ± 1.04	3.32 <sup>cd</sup> ± 0.74
2	3.84 <sup>abcd</sup> ± 0.79	3.60 <sup>cd</sup> ± 0.93	3.34 <sup>abc</sup> ± 1.02	3.64 <sup>abc</sup> ± 0.96	3.26 <sup>b</sup> ± 1.03	3.04 <sup>def</sup> ± 0.95	3.70 <sup>a</sup> ± 0.99	3.40 <sup>bcd</sup> ± 0.76
3	3.90 <sup>abcd</sup> ± 0.71	3.76 <sup>bc</sup> ± 0.92	2.94 <sup>cd</sup> ± 1.15	3.60 <sup>abc</sup> ± 0.95	3.34 <sup>ab</sup> ± 1.02	2.76 <sup>ab</sup> ± 0.89	3.52 <sup>ab</sup> ± 1.05	3.18 <sup>d</sup> ± 0.87
4	3.94 <sup>abcd</sup> ± 0.77	3.68 <sup>abc</sup> ± 0.86	3.26 <sup>abc</sup> ± 1.03	3.66 <sup>ab</sup> ± 1.04	3.42 <sup>ab</sup> ± 0.97	3.10 <sup>def</sup> ± 0.99	3.56 <sup>ab</sup> ± 0.91	3.44 <sup>abcd</sup> ± 0.73
5	4.04 <sup>ab</sup> ± 0.73	3.94 <sup>ab</sup> ± 0.96	3.28 <sup>abc</sup> ± 1.05	3.80 <sup>a</sup> ± 0.93	3.54 <sup>ab</sup> ± 0.97	3.18 <sup>cde</sup> ± 0.87	3.74 <sup>a</sup> ± 0.92	3.70 <sup>ab</sup> ± 0.74
6	3.96 <sup>abcd</sup> ± 0.67	3.80 <sup>abc</sup> ± 0.78	3.34 <sup>abc</sup> ± 0.98	3.40 <sup>abc</sup> ± 1.05	3.46 <sup>ab</sup> ± 0.97	3.40 <sup>abcd</sup> ± 0.44	3.70 <sup>a</sup> ± 0.91	3.54 <sup>abc</sup> ± 0.73
7	4.06 <sup>a</sup> ± 0.74	4.06 <sup>a</sup> ± 0.87	3.54 <sup>ab</sup> ± 1.01	3.60 <sup>abc</sup> ± 0.95	3.68 <sup>ab</sup> ± 1.01	3.68 <sup>abc</sup> ± 1.11	3.76 <sup>a</sup> ± 1.00	3.76 <sup>ab</sup> ± 0.79
8	3.74 <sup>d</sup> ± 0.90	3.42 <sup>d</sup> ± 1.05	3.20 <sup>bc</sup> ± 1.21	3.30 <sup>c</sup> ± 1.07	3.24 <sup>b</sup> ± 1.04	3.22 <sup>bcde</sup> ± 1.11	3.42 <sup>ab</sup> ± 0.93	3.22 <sup>d</sup> ± 0.84
9	3.82 <sup>bcd</sup> ± 0.77	3.60 <sup>cd</sup> ± 0.90	3.42 <sup>ab</sup> ± 0.93	3.46 <sup>abc</sup> ± 1.11	3.58 <sup>ab</sup> ± 0.95	3.56 <sup>ab</sup> ± 0.84	3.70 <sup>a</sup> ± 0.81	3.64 <sup>ab</sup> ± 0.75
10	4.02 <sup>abc</sup> ± 0.77	4.00 <sup>ab</sup> ± 0.88	3.62 <sup>a</sup> ± 0.97	3.48 <sup>abc</sup> ± 0.89	3.62 <sup>a</sup> ± 0.95	3.52 <sup>a</sup> ± 0.96	3.76 <sup>a</sup> ± 0.96	3.70 <sup>a</sup> ± 0.80
11	4.06 <sup>a</sup> ± 0.68	4.04 <sup>a</sup> ± 0.81	3.22 <sup>abc</sup> ± 1.04	3.48 <sup>abc</sup> ± 0.95	3.60 <sup>ab</sup> ± 0.99	2.94 <sup>efg</sup> ± 1.06	3.66 <sup>a</sup> ± 0.92	3.48 <sup>abcd</sup> ± 0.79
12	3.90 <sup>abcd</sup> ± 0.91	4.06 <sup>a</sup> ± 0.93	2.24 <sup>e</sup> ± 1.15	3.56 <sup>abc</sup> ± 1.07	3.36 <sup>ab</sup> ± 1.10	2.22 <sup>h</sup> ± 1.06	3.26 <sup>b</sup> ± 1.19	2.74 <sup>e</sup> ± 0.92

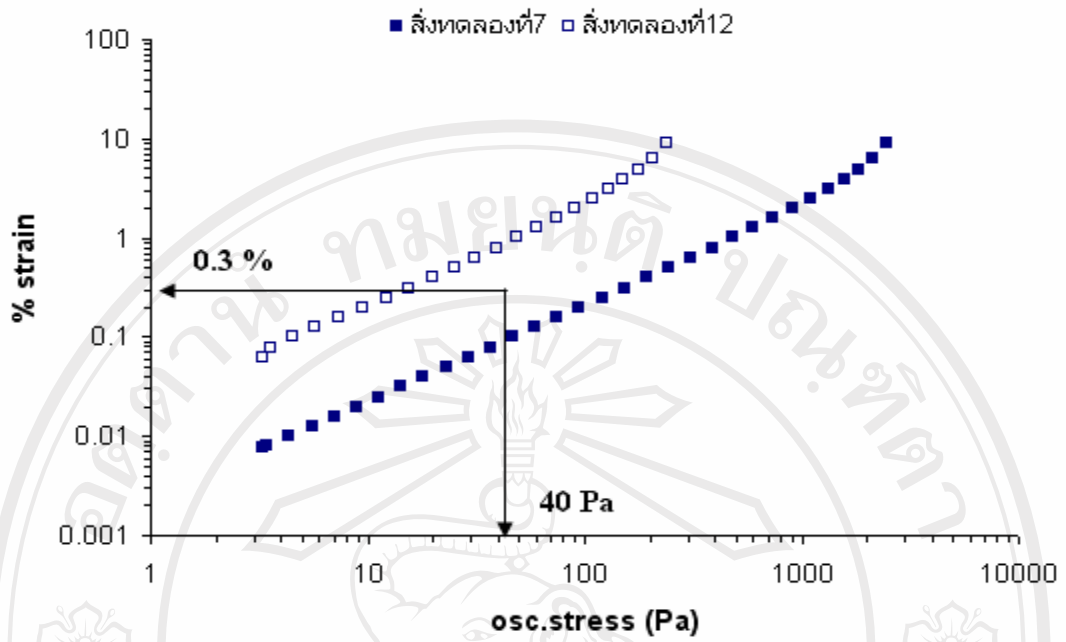
หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้ง อักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )



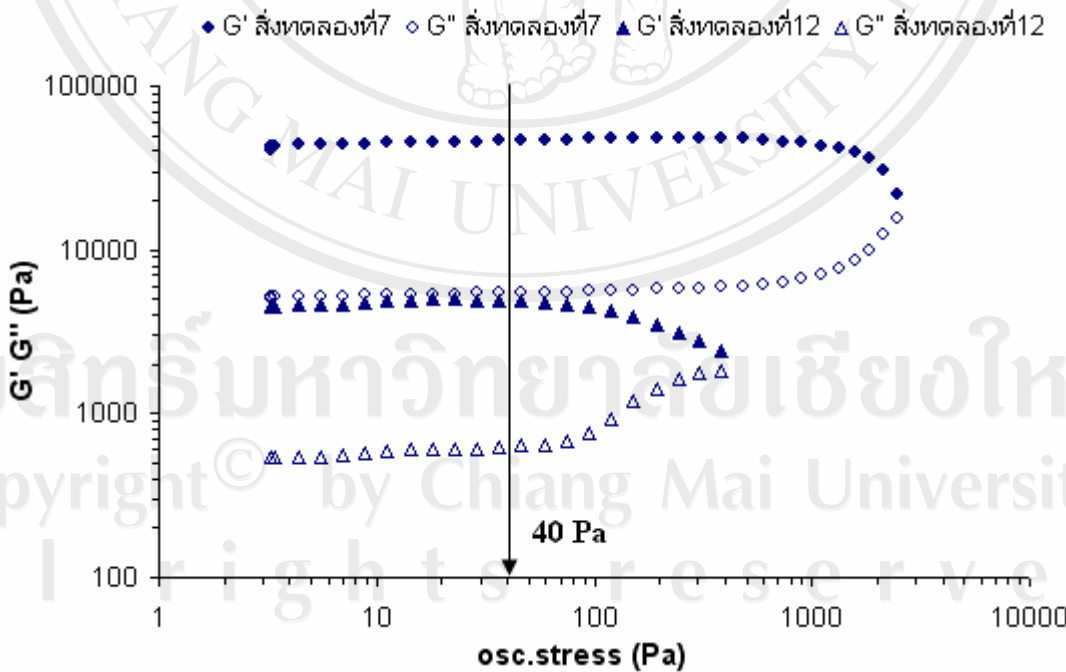
จากการ Optimization โปรแกรมได้ predict สูตรที่เหมาะสม โดยสูตรดังกล่าว ประกอบด้วย เนื้อลำไยสดร้อยละ 68 น้ำตาลผสมร้อยละ 30 คาร์ราจีแนนร้อยละ 1 โคลด์สตีปิ้งร้อยละ 1 ซึ่งจะให้คะแนนทางด้านคุณลักษณะต่างๆเป็นดังนี้ ลักษณะปรากฏ 4.06 คะแนน สี 4.02 คะแนน ความยืดหยุ่น 3.51 คะแนน กลิ่นลำไย 3.57 คะแนน รสหวาน 3.69 คะแนน ความเหนียว 3.50 คะแนน ลักษณะติดฟัน 3.78 คะแนน และความชอบรวม 3.79 คะแนน จะเห็นว่าสูตรที่โปรแกรม predict ดังกล่าว ตรงกับสิ่งทดลองที่ 7 ดังนั้น จึงเลือกเยลลี่ลำไยสูตรที่ 7 เพื่อศึกษาสภาวะการเก็บรักษาและบรรจุภัณฑ์ต่อคุณภาพในด้านต่างๆ ของเยลลี่ลำไย

#### 4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมและสมบัติทางวิโคอีลาสติกของเยลลี่ลำไย

**4.3.1** หาค่าความเครียด หรือความเค้นที่ไม่ทำให้โครงสร้างของตัวอย่างเสียหาย โดยวิธี stress sweep นำตัวอย่างเยลลี่ ที่มีลักษณะแข็งสุดและอ่อนสุดที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น ทำการทดสอบหาค่าความเครียด หรือความเค้นที่เหมาะสม ซึ่งจากการทดลองนำเยลลี่ลำไยสิ่งทดลองที่ 7 ซึ่งประกอบด้วย เนื้อลำไยสดร้อยละ 68 น้ำตาลผสมร้อยละ 30 คาร์ราจีแนนร้อยละ 1 โคลด์สตีปิ้งร้อยละ 1 และเยลลี่ลำไยสิ่งทดลองที่ 12 ซึ่งประกอบด้วยเนื้อลำไยสดร้อยละ 69.50 น้ำตาลผสมร้อยละ 30 คาร์ราจีแนนร้อยละ 0.25 โคลด์สตีปิ้งร้อยละ 0.25 หาค่าความเค้น หรือความเครียดที่เหมาะสม แสดงดังรูป 4.2 และ 4.3 จากรูป 4.2 แสดงช่วง LVR (linear viscoelastic region) สำหรับการทดสอบการคืบและการพักความเค้น พบว่า ค่าความเค้นที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดสอบการคืบ คือ 40 Pa และค่าความเครียดที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดสอบการพักความเค้น คือ 0.3 % จากรูป 4.3 แสดงช่วง LVR (linear viscoelastic region) สำหรับการทดสอบการแบบสั้น พบว่า ค่าความเค้นที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดสอบแบบสั้น คือ 40 Pa



รูป 4.2 ช่วง LVR (linear viscoelastic region) สำหรับการทดสอบการคืบและการพักความเค้น



รูป 4.3 ช่วง LVR (linear viscoelastic region) สำหรับการทดสอบแบบสั่น

### 4.3.2 การทดสอบการคืบ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบการคืบ

ทดสอบการคืบของเฮลลิลำไยทั้ง 12 สิ่งทดลอง โดยเครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer) ที่ควบคุมค่าความเค้น กำหนดให้ค่าความเค้นคงที่เท่ากับ 40 Pa ทำการทดสอบการคืบ 5 นาที และการถอนแรง 15 นาที จะได้กราฟที่มีลักษณะดังรูป 4.4 โดยพบว่าเฮลลิลำไยทุกสิ่งทดลองมีลักษณะกราฟคล้ายกัน ดังนั้นจึงยกตัวอย่างการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้กราฟการคืบของเฮลลิลำไยสิ่งทดลองที่ 12 ดังรูป 4.5 เป็นตัวอย่างในการหาแบบจำลองที่เหมาะสม

จากกราฟการคืบของเฮลลิลำไยสิ่งทดลองที่ 12 หาค่าตัวแปรของแบบจำลองจากกราฟซึ่งมีค่าตัวแปรเป็นดังนี้ คือ

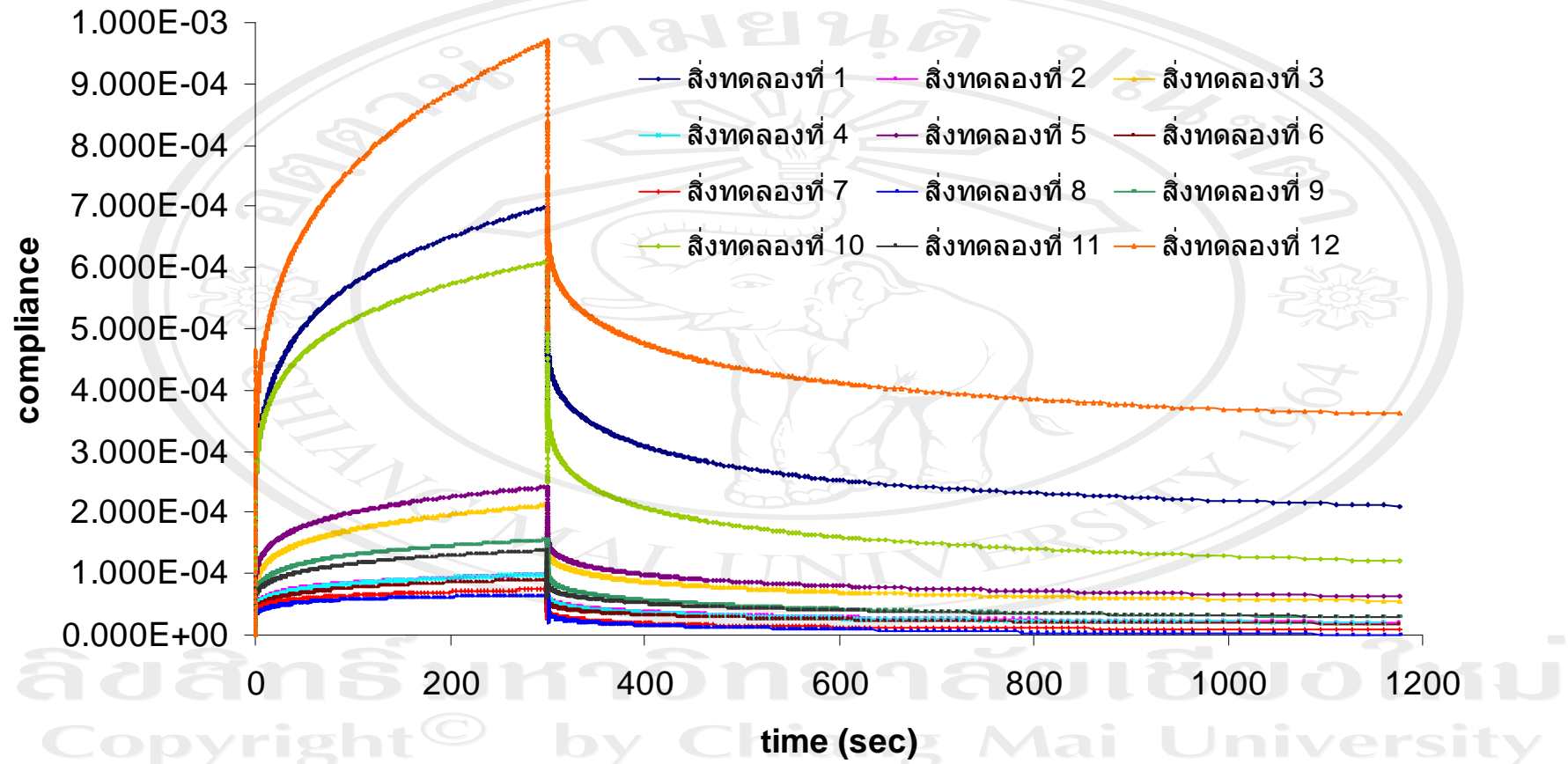
$$\begin{aligned} J_0 &= 4.08 \times 10^{-4} \text{ Pa}^{-1} \\ J_1 &= 3.16 \times 10^{-4} \text{ Pa}^{-1} \\ \mu &= 1.27 \times 10^6 \text{ Pa}\cdot\text{sec} \\ \lambda_{\text{ret}} &= 49.16 \text{ sec} \end{aligned}$$

แทนค่าตัวแปรในแบบจำลองของแมกซ์เวลล์ แบบจำลองไวค-เคลวิน และแบบจำลอง 4 องค์ประกอบ แล้ว plot กราฟ compliance (J) เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทั้ง 3 แบบ กับกราฟที่ได้จากการทดลองจริง ซึ่งพบว่าแบบจำลอง 4 องค์ประกอบมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากกราฟการคืบ ที่ได้จากการทดลองจริงและจากสมการแบบจำลองมีรูปแบบที่สอดคล้องกันพอดี ดังรูป 4.5 ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังสมการ (4.9) และพบว่าเฮลลิลำไยทั้ง 12 สิ่งทดลองมีแบบจำลองในรูปแบบเดียวกันคือเป็นแบบจำลอง 4 องค์ประกอบ

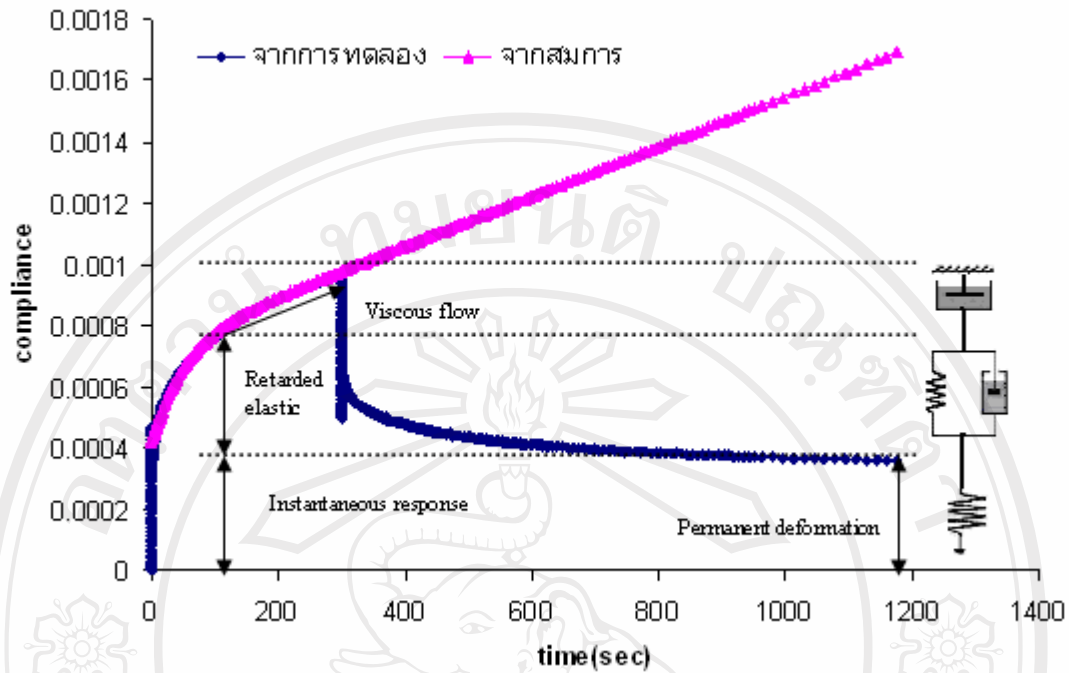
$$J(t) = 4.08 \times 10^{-4} + 3.16 \times 10^{-4} \left( 1 - \exp\left[-\frac{t}{49.16}\right] \right) + t / 1.27 \times 10^6 \quad (4.9)$$

การศึกษาสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของเฮลลิลำไย

จากแบบจำลอง 4 องค์ประกอบซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 1 หน่วย และแบบจำลองไวค-เคลวิน 1 หน่วย สามารถอธิบายคุณสมบัติวิสโคอีลาสติกของตัวอย่างเฮลลิลำไยทุกสิ่งทดลองได้จากแบบจำลองดังกล่าว ในที่นี้จึงยกตัวอย่างเฮลลิลำไย สิ่งทดลองที่ 12 ในการอธิบาย



รูป 4.4 กราฟการคืบของเซลล์สำเวย 12 สิ่งทดลอง



รูป 4.5 กราฟการคืบของเฮลลิ่งล้าโยลิ่งทดลองที่ 12 พร้อมแบบจำลองทางวิศ โคอีลาสติก

จากรูป 4.5 กราฟการคืบแบ่งได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ compliance  $J_0$  เกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด (instantaneous compliance) โดยที่เวลาไม่เปลี่ยน ซึ่งเกิดเนื่องจากเฮลลิ่งล้าโยมีสมบัติที่เป็นของแข็งซึ่งมีความยืดหยุ่น (elastic) เช่นเดียวกับสปริง (spring) เมื่อออกแรงดึง (โดยแรงนั้นไม่ทำให้สปริงเสียสภาพ) สปริงเกิดการยืดตัวออกทันทีทันใด แต่เมื่อปล่อยหรือไม่ออกแรงดึงสปริงจะหดกลับสู่สภาพเดิม ดังนั้นสปริงจึงเป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แทนแบบจำลองส่วนนี้ โดยค่า compliance  $J_0$  สามารถพิจารณาได้ในรูปของ อีลาสติกโมดูลัส (elastic modulus ;  $E_0$ ) ซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า  $J_0$  โดยเป็นพลังงานสะสมในวัสดุที่เป็นของแข็งและสามารถใช้พลังงานนั้นในการกลับคืนสู่สภาพเดิม (Ward and Hadley, 1995) ในช่วงนี้ถ้าถอนแรงออกเฮลลิ่งล้าโยจึงสามารถคืนสู่สภาพเดิมได้ เนื่องจากความเค้นที่ให้ไม่มากพอที่จะทำให้พันธะในเฮลลิ่งล้าโยเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยสันนิษฐานว่าพันธะที่เกิดขึ้นในเฮลลิ่งล้าโยเป็นพันธะที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์ (non-covalent bond) นั่นคืออาจเป็นพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดขึ้นระหว่างน้ำและน้ำตาล หรือแรงยึดเหนี่ยวซึ่งเกิดระหว่างคาร์ราจีแนนและ โคล์สตีบีนกัม โดยการก่อพันธะที่มากขึ้น ทำให้เจลมีความคงตัวและแข็งแรงมากขึ้น (Bayarri *et al.*, 2004)



ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่ compliance เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากกราฟที่ได้พบว่าช่วงนี้ประกอบด้วยแบบจำลองโวล-เคลวิน 1 หน่วย โดยแบบจำลองโวล-เคลวินมีสปริงต่อขนานกับลูกสูบ ซึ่งลูกสูบ (dashpot) เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แทนของเหลวที่ไม่ขึ้นกับเวลา หรือการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ดังนั้นในช่วงนี้จึงมีสมบัติที่เป็นทั้งของแข็งและของเหลว โดยการเปลี่ยนรูปจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และเกิดเวลาหน่วง (retardation time) เนื่องจากเมื่อให้ความเค้นคงที่ค่าหนึ่งกระทำกับตัวอย่าง สปริงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทันที แต่ลูกสูบค่อยๆเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้เกิดเวลาหน่วง ในส่วนของโครงสร้างเฮลลี่ลำไยในช่วงนี้จะเกิดการสลายของพันธะบางส่วน ดังนั้นสมบัติความยืดหยุ่นของเฮลลี่ลำไยจึงลดลง

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่ compliance ไม่สามารถคืนรูปได้ จึงแสดงสมบัติของของไหล โดยเมื่อมีความเค้นคงที่ค่าหนึ่งกระทำจะเกิดการไหลแบบไม่ไหลกลับ เนื่องจากสมบัติของของไหลไม่มีความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานเหมือนของแข็ง จึงทำให้พลังงานสูญหายไป ในช่วงที่ 3 นี้จะพิจารณาการไหลของวัสดุโดยพิจารณาจากค่าความหนืดซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าความชัน (slope) โดยถ้าวัสดุนี้มีความหนืดมาก นั่นคือความชันของเส้นกราฟจะน้อย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความเครียด (strain) จึงน้อย หมายถึงการมีสมบัติของแข็งที่มากขึ้นและส่งผลให้การไหลเกิดขึ้นน้อย

ในส่วนของการคืนรูป (recovery) พบว่าเมื่อถอนความเค้นแล้ว บางส่วนเกิดการคืนรูป ขณะที่บางส่วนเกิดการผิดรูปอย่างถาวร จากรูป 4.5 เฮลลี่ลำไยไม่สามารถคืนรูปได้หมดเนื่องจากลักษณะของวัสดุวิสโคอีลาสติก ซึ่งมีการยืดหยุ่นโดยมีการคืนรูปตามเวลาเหมือนสมบัติของแข็ง แต่จะไม่กลับไปสู่สภาพเริ่มต้นเนื่องจากมีลักษณะของของเหลวที่เกิดการไหลไปข้างหน้าโดยไม่มีการย้อนกลับสู่สภาพเดิม (มนัส, 2537) ในที่นี้พิจารณาการคืนรูปจากค่า compliance (J) ที่เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (permanent deformation ;  $J_{pd}$ ) ซึ่งพิจารณาจากค่า  $J_{pd}$  วินาทีที่ 1200 เนื่องจากเป็นจุดสุดท้ายของการทดสอบ ในส่วนโครงสร้างของเฮลลี่ลำไยจะเกิดการสลายของพันธะเป็นบางส่วน จากการที่มีสมบัติการไหลและไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้

จากการเปรียบเทียบผลการตอบสนองการคืบของเฮลลี่ลำไยที่ผันแปรส่วนผสม สามารถหาค่าตัวแปรของแบบจำลอง (viscoelastic parameter) ซึ่งสามารถบอกสมบัติทางวิสโคอีลาสติกได้ในด้านอาหารจะใช้ตัวแปร compliance  $J_0$  หรืออีลาสติกโมดูลัส (elastic modulus ;  $E_0$ ) แทนสมบัติอีลาสติกหรือความเป็นของแข็งของวัสดุ ในที่นี้จึงใช้ค่า  $E_0$  ในการอธิบายเพื่อให้เข้าใจได้ง่าย และใช้ค่าความหนืด (viscosity ;  $\mu$ ) ในการอธิบายสมบัติการไหล (flow) ซึ่งเป็นสมบัติของของเหลวของวัสดุ โดยค่าความหนืดพิจารณาได้จากส่วนกลับของค่าความชันของกราฟการคืบ และพิจารณาพฤติกรรมการผิดรูปของวัสดุจากค่า  $J_{pd}$  ดังตาราง 4.9

ตาราง 4.9 ค่าตัวแปรทางวิสโคอีลาสติกสำหรับการทดสอบการคืบ

สิ่งทดลอง	$E_0$ (kPa)	$J_{pd}$ ( $\mu\text{Pa}^{-1}$ )	$\mu$ (Pa.sec) $\times 10^6$	Slope (Pa.sec) <sup>-1</sup> $\times 10^{-7}$	$\lambda_{ret}$ (sec)
1	$3.07^h \pm 0.04$	$211.50^d \pm 9.10$	$1.95^h \pm 0.05$	$5.13^h \pm 0.08$	$48.22^g \pm 0.48$
2	$16.73^c \pm 0.45$	$22.20^a \pm 6.39$	$17.65^c \pm 0.37$	$0.57^c \pm 0.01$	$43.75^{de} \pm 0.88$
3	$9.62^g \pm 0.42$	$71.98^b \pm 9.41$	$6.17^f \pm 0.09$	$1.62^f \pm 0.02$	$44.33^e \pm 0.14$
4	$21.54^c \pm 0.76$	$19.52^a \pm 2.71$	$17.85^c \pm 0.39$	$0.57^c \pm 0.03$	$42.83^c \pm 0.52$
5	$8.52^g \pm 0.24$	$72.06^b \pm 7.73$	$6.03^f \pm 0.08$	$1.67^f \pm 0.05$	$44.33^e \pm 0.68$
6	$18.54^d \pm 0.76$	$21.60^a \pm 2.55$	$17.68^c \pm 0.17$	$0.57^c \pm 0.02$	$43.67^d \pm 0.68$
7	$24.98^b \pm 3.10$	$8.16^a \pm 2.58$	$26.33^b \pm 0.47$	$0.38^b \pm 0.01$	$41.92^b \pm 0.37$
8	$26.90^a \pm 1.03$	$0.75^a \pm 0.15$	$38.97^a \pm 0.48$	$0.26^a \pm 0.00$	$41.13^a \pm 0.23$
9	$13.44^f \pm 0.94$	$32.08^a \pm 9.34$	$10.63^e \pm 0.16$	$0.94^e \pm 0.03$	$44.25^{de} \pm 0.16$
10	$3.14^h \pm 0.12$	$125.82^c \pm 27.92$	$2.76^g \pm 0.07$	$3.62^g \pm 0.09$	$45.37^f \pm 0.38$
11	$13.71^f \pm 0.51$	$28.43^a \pm 1.12$	$11.24^d \pm 0.18$	$0.89^d \pm 0.03$	$43.86^{de} \pm 0.44$
12	$2.45^h \pm 0.06$	$359.16^e \pm 87.86$	$1.27^i \pm 0.04$	$7.87^i \pm 0.09$	$49.16^h \pm 0.23$

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้ง อักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

จากตาราง 4.9 แสดงค่าตัวแปรทางวิสโคอีลาสติกสำหรับการทดสอบการคืบ โดยค่า  $E_0$  หรือ elastic modulus หาได้จากส่วนกลับของ  $J_0$  จากการทดลองพบว่า สิ่งทดลองที่มีค่า  $E_0$  มากที่สุดจนถึงน้อยที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 8, 7, 4, 6, 2, 11, 9, 3, 5, 10, 1 และ 12 ตามลำดับ สิ่งทดลองที่ 8 มีค่า  $E_0$  เท่ากับ  $26.90 \pm 1.03$  kPa ขณะที่สิ่งทดลองที่ 12 มีค่า  $E_0$  เท่ากับ  $2.45 \pm 0.06$  kPa เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E_0$  และปัจจัยต่างๆที่ทำการศึกษา ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (4.10)

ตาราง 4.10 สมการรีเกรสชันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของเซลล์ลำใยต่อตัวแปรทางวิสโคอีลาสติกสำหรับการทดสอบการคืบ

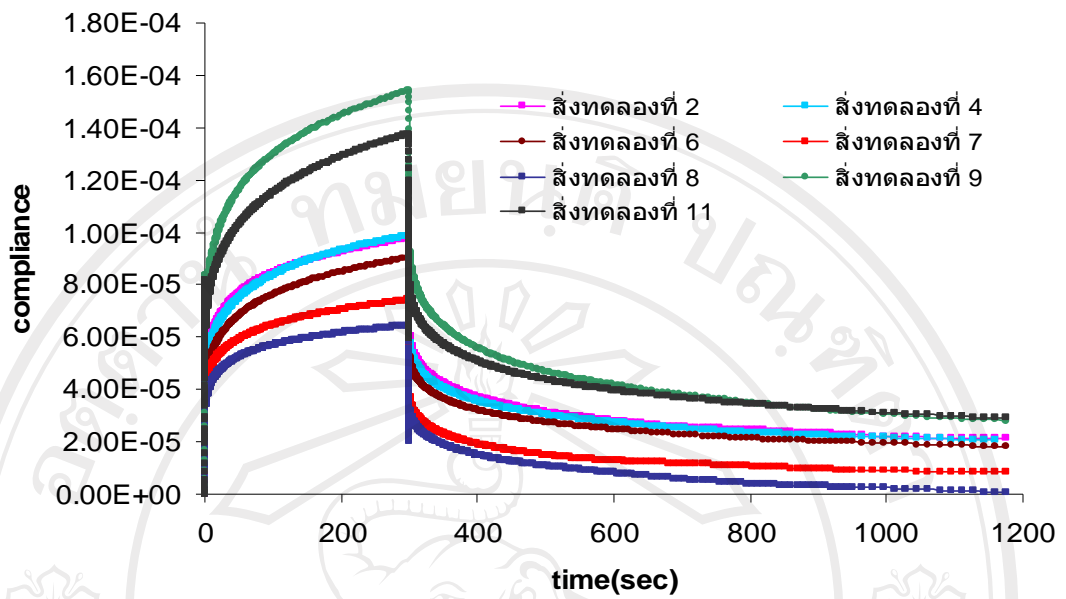
สมการ	สมการรีเกรสชัน	$r^2$
4.10	$E_0 = 0.101X_2 + 14.462X_3 - 1.422X_4 + 15.622X_3X_4$	0.997
4.11	$J_{pd} = 2.210X_1 + 6.048X_2 - 247.323X_3 - 90.409X_4$	0.786
4.12	$\mu = -0.5X_2 + 23.702X_3 + 14.057X_4$	0.936
4.13	$\lambda_{ret} = 0.495X_1 + 0.523X_2 - 5.285X_3 - 2.492X_4$	1.000

หมายเหตุ :  $X_1$  = ปริมาณเนื้อลำใย

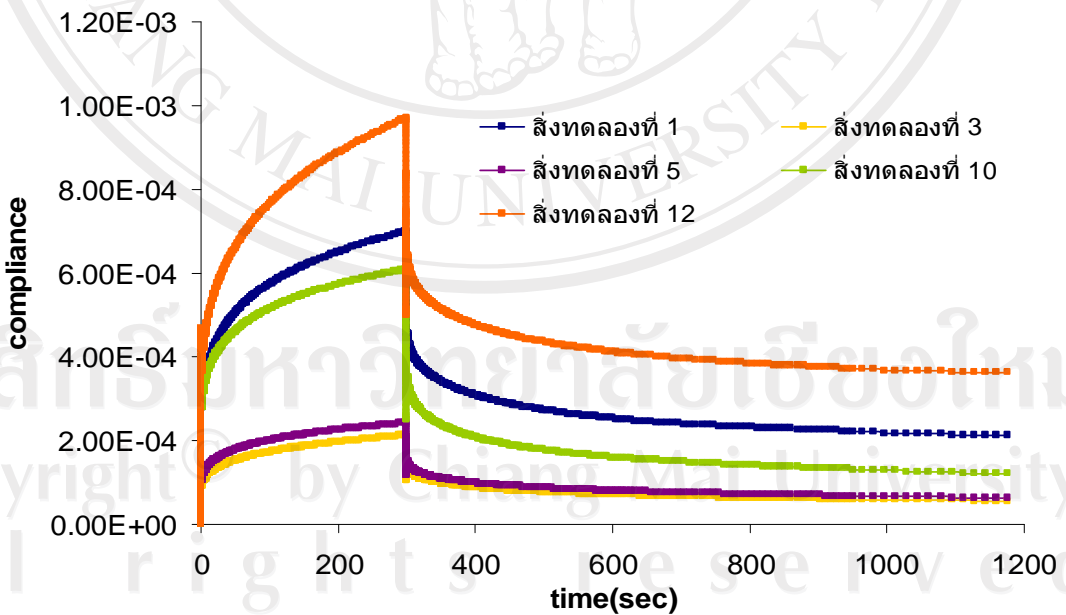
$X_2$  = ปริมาณน้ำตาลผสม

$X_3$  = ปริมาณคาร์ราจีแนน

$X_4$  = ปริมาณ โลคัสต์ปิ่นกัม



รูป 4.6 กราฟการคืบของเซลล์ไตโยสิ่งทดลองที่ 2, 4, 6, 7, 8, 9 และ 11



รูป 4.7 กราฟการคืบของเซลล์ไตโยสิ่งทดลองที่ 1, 3, 5, 10 และ 12

จากสมการ (4.10) พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่า  $E_0$  ได้แก่ น้ำตาลผสม คาร์ราจีแนน โคลด์สตี-บีนกัม และคาร์ราจีแนนร่วมกับโคลด์สตีบีนกัม โดยปริมาณคาร์ราจีแนนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $E_0$  มีค่ามากขึ้น ส่วน ปริมาณน้ำตาลผสมและ โคลด์สตีบีนกัมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $E_0$  มีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้คาร์ราจีแนนร่วมกับโคลด์สตีบีนกัมทำให้ค่า  $E_0$  มีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย จากค่า  $r^2$  ที่ได้พบว่า มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสมการรีเกรสชันที่ได้สามารถใช้เป็น prediction equation เพื่อทำนายค่า  $E_0$  ได้ และเพื่อให้เห็นความแตกต่างของกราฟในแต่ละสิ่งทดลองเพิ่มมากขึ้นจึงแยกกราฟการคืบเป็น 2 กราฟ โดยในรูป 4.6 แสดงกราฟการคืบ ของสิ่งทดลองที่ 8, 7, 4, 6, 2, 11 และ 9 รูป 4.7 แสดงกราฟการคืบของสิ่งทดลองที่ 12, 1, 10, 5 และ 3 จากรูป 4.6 เมื่อเปรียบเทียบสิ่งทดลองที่ 7 และ 8 ซึ่งมีเพียงปริมาณน้ำตาลผสมเท่านั้นที่แตกต่างกัน โดยสิ่งทดลองที่ 7 มีปริมาณน้ำตาลผสมร้อยละ 30 สิ่งทดลองที่ 8 มีปริมาณน้ำตาลผสมร้อยละ 15 พบว่าค่า  $E_0$  ของสิ่งทดลองที่ 8 มากกว่าค่า  $E_0$  ของสิ่งทดลองที่ 7 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำตาลที่มากขึ้นมีผลให้ค่า  $E_0$  มีค่าลดลง (Fiszman and Duran, 1992) ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (4.10) เป็นไปได้ว่าปริมาณน้ำตาลที่มากเกินไป การเกิดเจลจะน้อยลง เนื่องจากน้ำส่วนใหญ่ไปละลายน้ำตาลทำให้ไม่เพียงพอต่อการพองตัวของสารไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสองชนิด จึงส่งผลให้เกิดโครงสร้างตาข่ายของเจลด้อยลง (Whittaker *et al.*, 1997) เช่นเดียวกับสิ่งทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับสิ่งทดลองที่ 12 และสิ่งทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับสิ่งทดลองที่ 11 ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกล่าวคือ ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ความยืดหยุ่นของเจลด้อยลง และเมื่อพิจารณาถึงคาร์ราจีแนนจะพบว่า สิ่งทดลองที่ประกอบด้วยคาร์ราจีแนนในปริมาณมากมีผลให้ค่า  $E_0$  มีค่ามาก ซึ่งคาร์ราจีแนนจัดเป็นสารก่อก่อเจลที่จะให้เจลที่มีลักษณะแข็ง โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมที่นิยมใช้จะอยู่ในช่วง 0.50-2.00 (อรอนงค์, 2545) และการใช้คาร์ราจีแนนร่วมกับโคลด์สตีบีนกัมในปริมาณมากก็ส่งผลให้ค่า  $E_0$  มีค่ามาก และพบว่าอัตราส่วนระหว่างคาร์ราจีแนนและโคลด์สตีบีนกัมมีผลต่อค่า  $E_0$  ด้วย ทั้งนี้หากให้คาร์ราจีแนนมีอัตราส่วนมากกว่าโคลด์สตีบีนกัมจะทำให้ได้เจลที่มีลักษณะแข็ง และมีความยืดหยุ่นดังเช่นสิ่งทดลองที่ 2 และ 4 แต่หากให้โคลด์สตีบีนกัมมีอัตราส่วนมากกว่าคาร์ราจีแนนจะทำให้ได้เจลที่มีลักษณะอ่อนนุ่มแต่มีความยืดหยุ่นสูง ดังเช่นสิ่งทดลองที่ 10 และหากให้อัตราส่วนระหว่างคาร์ราจีแนนกับโคลด์สตีบีนกัมเป็น 2 : 1 จะทำให้เกิดความแข็งแรงของเจล (gel strength) สูงสุด และที่อัตราส่วนระหว่างคาร์ราจีแนนกับโคลด์สตีบีนกัมเป็น 1 : 4 จะทำให้เกิดการแยกน้ำ (syneresis) น้อยที่สุด (สุวรรณ, 2543)

สำหรับค่า  $J_{pd}$  ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงพฤติกรรมการผิดรูปของวัสดุ โดยวัสดุใดมีค่า  $J_{pd}$  มาก นั้นหมายถึงวัสดุนั้นจะเกิดการผิดรูปมากเมื่อมีแรงกระทำหรือมีการให้ความเค้น หากวัสดุใดมีค่า  $J_{pd}$  น้อย นั้นหมายถึงเกิดการผิดรูปน้อย ซึ่งแสดงว่ามีความคงตัวต่อความเค้นหรือแรงที่มากกระทำ

โดยดูได้จากส่วน recovery ของกราฟการคืบดังรูป 4.5 ซึ่งค่า  $J_{pd}$  จะเป็นค่าที่ผกผันกับค่า  $E_0$  โดยวัสดุใดมีค่า  $E_0$  มากจะมีค่า  $J_{pd}$  น้อย นั่นแสดงว่าวัสดุมีความยืดหยุ่นมากหรือมีการผิดรูปน้อย จากการทดลองพบว่า ทุกสิ่งทดลองมีค่า  $J_{pd}$  ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยสิ่งทดลองที่มีค่า  $J_{pd}$  มากสุดจนถึงน้อยที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 12, 1, 10, 5, 3, 9, 11, 2, 6, 4, 7 และ 8 โดยสิ่งทดลองที่ 12 มีค่า  $J_{pd}$  เท่ากับ  $359.16 \pm 87.86 \mu Pa^{-1}$  ขณะที่สิ่งทดลองที่ 8 มีค่า  $J_{pd}$  เท่ากับ  $0.75 \pm 0.15 \mu Pa^{-1}$  นั่นคือสิ่งทดลองที่ 12 เป็นเหล็กกล้าโยที่มีลักษณะเจลที่มีความคงตัวน้อย หรือมีความแข็งของเจลน้อยจึงมีค่าการผิดรูปถาวรมากเมื่อมีแรงกระทำ สาเหตุอาจเป็นเพราะปริมาณน้ำตาลผสมที่มากเกินไป หรือปริมาณคาร์ราจีแนนและ โคลคัสต์บีนกัมที่น้อยเกินไป จึงส่งผลให้เกิดเจลอย่างไม่สมบูรณ์ เจลที่ได้จึงไม่มีความแข็งแรง สำหรับสิ่งทดลองที่ 8 สาเหตุที่มีความคงตัวสูงสุดอาจเป็นเพราะอัตราส่วนและปริมาณของคาร์ราจีแนนและ โคลคัสต์บีนกัมที่มากเกินไป รวมถึงปริมาณน้ำตาลผสมที่มีความเหมาะสมที่จะเกิดโครงสร้างตาข่ายอย่างแข็งแรง และเมื่อนำค่า  $J_{pd}$  ในทุกสิ่งทดลองไปหาสมการเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $J_{pd}$  ที่ได้กับปัจจัยต่างๆที่ทำการศึกษา ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (4.11)

จากสมการ (4.11) พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่า  $J_{pd}$  ได้แก่ เนื้อลำใย น้ำตาลผสม คาร์ราจีแนน และ โคลคัสต์บีนกัม โดยปริมาณเนื้อลำใยและปริมาณน้ำตาลผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $J_{pd}$  มีค่ามากขึ้น ในทางตรงข้าม ปริมาณคาร์ราจีแนนและ โคลคัสต์บีนกัมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $J_{pd}$  มีค่าลดลง โดยคาร์ราจีแนนและ โคลคัสต์บีนกัมมีอิทธิพลต่อค่า  $J_{pd}$  มากกว่าลำใยสดและน้ำตาลผสม ดูได้จากสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร แต่เมื่อพิจารณาที่ ค่า  $r^2$  พบว่ามีค่า 0.786 ซึ่งถือเป็นค่าที่ไม่สูง นั่นคือสมการรีเกรสชันที่ได้ มีความน่าเชื่อถือไม่เพียงพอที่จะใช้เป็น prediction equation เพื่อทำนายค่า  $J_{pd}$

ค่า  $\mu$  หรือค่าความหนืด (viscosity) ใช้อธิบายสมบัติการไหล โดยถ้าวัสดุใดมีความหนืดมาก นั่นคือ มีความสามารถในการต้านการไหลได้มากเมื่อมีแรงกระทำ แสดงว่าวัสดุนั้นมีสมบัติความเป็นของแข็งมากขึ้น จึงส่งผลให้การไหลเกิดขึ้นได้น้อย (Jackman and Stanley, 1995) จากการทดลองพบว่า สิ่งทดลองที่มีค่า  $\mu$  มากที่สุดจนถึงน้อยที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 8, 7, 4, 6, 2, 11, 9, 3, 5, 10, 1 และ 12 ตามลำดับ สิ่งทดลองที่ 8 มีค่า  $\mu$  เท่ากับ  $38.97 \times 10^6 Pa \cdot sec$  สิ่งทดลองที่ 12 มีค่า  $\mu$  เท่ากับ  $1.27 \times 10^6 Pa \cdot sec$  เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\mu$  และปัจจัยต่างๆที่ทำการศึกษา ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (4.12)

จากสมการ (4.12) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า  $\mu$  ได้แก่ น้ำตาลผสม คาร์ราจีแนน และ โคลคัสต์บีนกัม โดยปริมาณคาร์ราจีแนนและ โคลคัสต์บีนกัมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $\mu$  มีค่ามากขึ้น ส่วนปริมาณน้ำตาลผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $\mu$  มีค่าลดลง เมื่อพิจารณาค่า  $r^2$  ที่ได้พบว่า มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสมการรีเกรสชันที่ได้สามารถใช้เป็น prediction equation เพื่อทำนายค่า  $\mu$  ได้



นอกจากนี้สามารถอธิบายสมบัติการไหลได้อีกรูปแบบหนึ่ง โดยดูจากค่าความชันของกราฟการคืบในช่วงของไหลนิวโตเนียน (อรุณี, 2547) จากตาราง 4.9 จะเห็นได้ว่า สิ่งทดลองที่ 12 มีค่าความชันมากที่สุดคือ  $7.87 \times 10^{-7} (\text{Pa}\cdot\text{sec})^{-1}$  แสดงให้เห็นว่า มีการผิดรูปเกิดขึ้นมากเมื่อเวลาเปลี่ยนไป โดยตัวอย่างจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างง่าย ซึ่งอาจเป็นเพราะมี crosslink ที่น้อยหรือเป็น crosslink แบบชั่วคราว ในทางตรงกันข้ามจะเห็นว่าสิ่งทดลองที่ 8 มีความชันต่ำที่สุดคือ  $0.26 \times 10^{-7} (\text{Pa}\cdot\text{sec})^{-1}$  แสดงให้เห็นว่ามีการผิดรูปน้อยเมื่อเวลาเปลี่ยนไป นั่นคือตัวอย่างมีความยืดหยุ่นสูง เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้ยาก ซึ่งอาจเป็นเพราะโครงสร้างมี crosslink ที่มากหรือเป็น crosslink ถาวร โดยค่าความชันเรียงตามลำดับจากมากไปน้อย คือ สิ่งทดลองที่ 12, 1, 10, 5, 3, 9, 11, 2, 6, 4, 7 และ 8

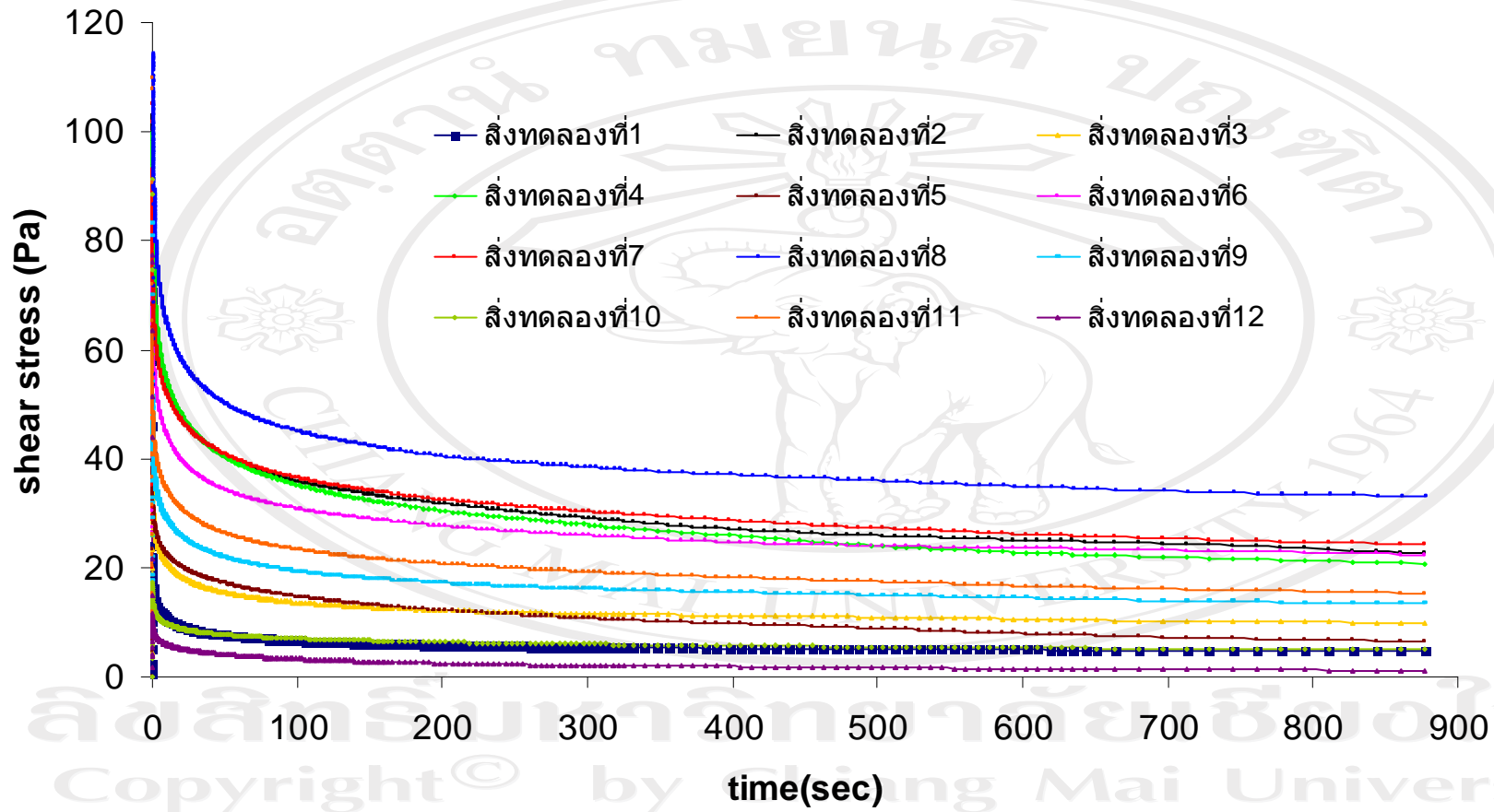
ค่า  $\lambda_{\text{ret}}$  หรือเวลาที่ใช้ในการหน่วง (retardation time) ซึ่ง  $\lambda_{\text{ret}} = \mu / E$  โดย  $\mu$  แทนสมบัติการเป็นของไหลหนืด ส่วน  $E$  แทนสมบัติการเป็นของแข็งยืดหยุ่น โดยจะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการหน่วง มีความสัมพันธ์ในเชิงผกผันกับความยืดหยุ่น (Ojijo *et al.*, 2004) จากการทดลองพบว่า ทุกสิ่งทดลองมีค่า  $\lambda_{\text{ret}}$  ใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 41.13- 49.16 โดยสิ่งทดลองที่มีค่า  $\lambda_{\text{ret}}$  มากที่สุด แสดงความเป็นของแข็งยืดหยุ่นน้อยที่สุด คือสิ่งทดลองที่ 12 และสิ่งทดลองที่มีค่า  $\lambda_{\text{ret}}$  น้อยที่สุด แสดงความเป็นของแข็งยืดหยุ่นมากที่สุด คือสิ่งทดลองที่ 8 เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\lambda_{\text{ret}}$  และปัจจัยต่างๆที่ทำการศึกษา ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (4.13)

จากสมการ (4.13) พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่า  $\lambda_{\text{ret}}$  ได้แก่ ปริมาณเนื้อลำใย น้ำตาลผสม คาร์ราจีแนนและ โลคัสต์บีนกัม โดยปริมาณเนื้อลำใยและน้ำตาลผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $\lambda_{\text{ret}}$  เพิ่มขึ้น ส่วนคาร์ราจีแนนและ โลคัสต์บีนกัมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $\lambda_{\text{ret}}$  มีค่าลดลง เมื่อสังเกตที่ค่า  $r^2$  ในสมการ (4.13) พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.000 แสดงว่าสมการมีความน่าเชื่อถือสูงมาก สามารถใช้เป็น prediction equation ซึ่งจะสามารถทำนายค่า  $\lambda_{\text{ret}}$  ได้แม่นยำ แต่จำกัดอยู่ในช่วงที่ศึกษาเท่านั้น

#### 4.3.3 การทดสอบการพักความเค้น

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบการพักความเค้น

การทดสอบการพักความเค้นของเยลลี่ลำใยทั้ง 12 สิ่งทดลองโดยเครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer) ที่ควบคุมค่าความเค้น กำหนดให้ค่าความเครียดคงที่เท่ากับ 0.3 % ทำการทดสอบการพักความเค้น 15 นาที จะได้กราฟทั้งหมดทุกสิ่งทดลองมีลักษณะดังรูป 4.8



รูป 4.8 กราฟการพักความเค้นของเยลลี่ดำไย 12 สิ่งทดลอง

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม โดยใช้กราฟการพักความเค้นของเหล็กกล้ายี่สิบสองที่ 8 เป็นตัวอย่างในการหาแบบจำลองที่เหมาะสม โดยทดลองแทนค่าลงในสมการแบบจำลองแมกซ์เวลล์ (Maxwell model) 1 หน่วยที่ต่อขนานกับสปริงอิสระ แล้ว plot ค่าเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการทดลองจริง พบว่าเส้นกราฟที่ plot ได้ มีรูปแบบที่ไม่สอดคล้องกับกราฟที่ได้จากการทดลองจริง นั่นหมายความว่าแบบจำลองนี้ยังไม่ใช่แบบจำลองที่เหมาะสม จึงทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 4 หน่วย ที่ต่อขนานกับสปริงอิสระ โดยต้องมีการปรับค่าตัวแปรเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังสมการ (4.14)

$$\begin{aligned} \sigma(t) = & 31.77 + (45.07) \exp\left[-\frac{t}{0.94}\right] + (17.75) \exp\left[-\frac{t}{19.80}\right] \\ & + (9.89) \exp\left[-\frac{t}{97.24}\right] + (8.31) \exp\left[-\frac{t}{479.20}\right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

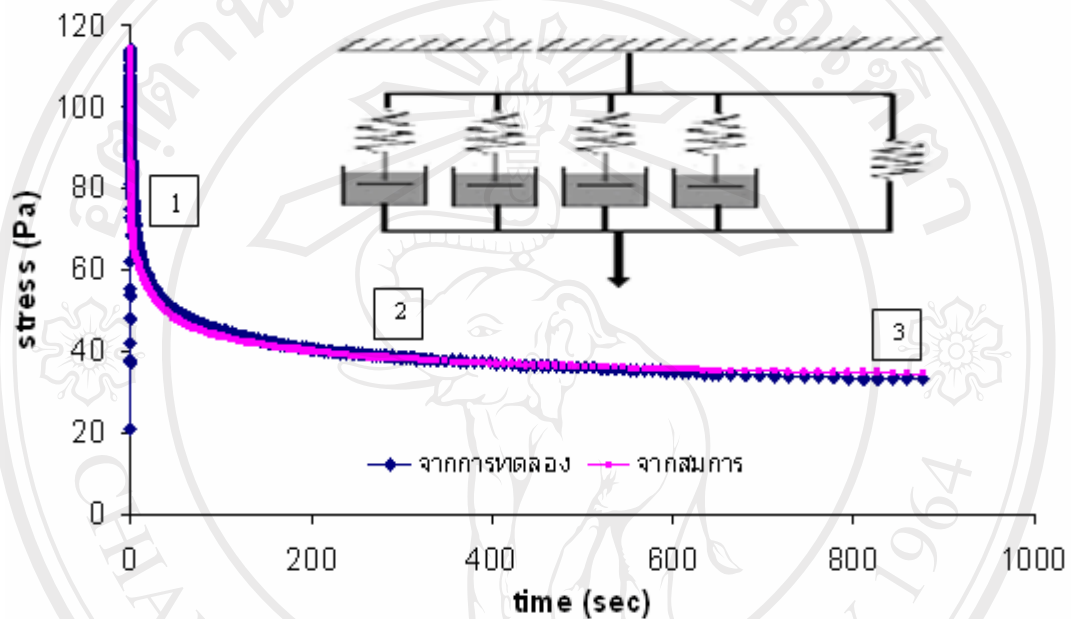
จากการเปรียบเทียบแบบจำลองข้างต้น พบว่าแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 4 หน่วยที่ต่อขนานกับสปริงอิสระ 1 หน่วย มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากรูปแบบกราฟการพักความเค้นที่ได้จากการทดลองและจากสมการแบบจำลองมีความสอดคล้องกัน ดังรูป 4.9 และพบว่าเหล็กกล้ายี่สิบสองที่ 12 ที่ทดลอง มีแบบจำลองในรูปแบบเดียวกัน คือเป็นแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 4 หน่วย ที่ต่อขนานกับสปริงอิสระ 1 หน่วย สำหรับเวลาการพักความเค้นในแต่ละองค์ประกอบ แสดงดังตาราง 4.11

ตาราง 4.11 เวลาการพักความเค้นในแต่ละองค์ประกอบของแบบจำลองทางวิศโคอีลาสติกในเหล็กกล้ายี่สิบสองที่ 12 สิ่งทดลอง

สิ่งทดลอง	$\lambda_{rel 1}$	$\lambda_{rel 2}$	$\lambda_{rel 3}$	$\lambda_{rel 4}$
1	0.01	19.15	106.18	496.05
2	1.57	34.01	105.40	438.20
3	0.01	25.82	115.70	561.10
4	1.54	44.49	109.50	471.00
5	0.01	20.06	79.32	462.80
6	0.99	19.29	74.20	364.50
7	0.46	16.73	68.06	413.70
8	0.94	19.80	97.24	479.20
9	0.01	25.30	107.50	503.80
10	0.01	12.12	80.34	520.20
11	0.01	10.33	54.74	397.30
12	0.01	6.55	62.94	446.40

### การศึกษาสมบัติทางวิสโคอิลาสติกของเยลลี่ลำไย

จากแบบจำลอง 9 องค์ประกอบซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 4 หน่วย และสปริงอิสระ 1 หน่วย สามารถอธิบายคุณสมบัติวิสโคอิลาสติกของตัวอย่างเยลลี่ลำไยทุกสิ่งทดลองได้จากแบบจำลองดังกล่าว ในที่นี้จึงยกตัวอย่างเยลลี่ลำไย สิ่งทดลองที่ 8 ในการอธิบาย



รูป 4.9 กราฟการพักความเค้นพร้อมแบบจำลองทางวิสโคอิลาสติกของเยลลี่ลำไยสิ่งทดลองที่ 8

จากรูป 4.9 กราฟการพักความเค้นประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 4 หน่วยต่อขนานกับสปริงอิสระ 1 หน่วย ซึ่งแบบจำลองแมกซ์เวลล์นั้นประกอบด้วยสปริง (spring) ใช้แทนสมบัติความยืดหยุ่น (elastic) และลูกสูบ (dashpot) ใช้แทนสมบัติความไหลหนืด (viscous) ต่อกันแบบอนุกรม เมื่อสปริงเคลื่อนที่จะทำให้ลูกสูบเคลื่อนลงอย่างรวดเร็ว จึงทำให้ลักษณะไหลหนืดของแบบจำลองแมกซ์เวลล์เด่นกว่าลักษณะยืดหยุ่น กราฟการพักความเค้นสามารถ แบ่งได้เป็น 3 ช่วง (Steffe, 1996)

ช่วงที่ 1 ความเค้นลดลงเป็นฟังก์ชันขึ้นกับเวลา จากกราฟพบว่า ช่วงนี้ประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 1 หน่วย เป็นช่วงที่ลูกสูบแสดงสมบัติเด่นกว่าสปริง ลูกสูบเกิดการไหลลงอย่างกะทันหัน สังเกตได้จากความชันของกราฟที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ตัวอย่างเยลลี่ลำไยจึงแสดงสมบัติการไหลหนืดมากกว่าความยืดหยุ่น ในช่วงนี้ตัวอย่างไม่มีความสามารถในการคืนรูปได้ เนื่องจากสมบัติความไหลหนืดที่ไม่มีความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานเหมือนของแข็ง จึงทำ

ให้พลังงานสูญหายไป ในส่วนโครงสร้างของตัวอย่างช่วงนี้เกิดการคลายตัวของโครงสร้าง  
สันนิษฐานว่าเกิดการคลายตัวของพันธะที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์

ช่วงที่ 2 ของกราฟประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 3 หน่วย ช่วงนี้ความเค้นลดลงอย่าง  
ช้าๆ จนเกือบเข้าสู่จุดความเค้นสมดุลย์ สังกัดได้จากความชันของกราฟลดน้อยลง ตัวอย่างเฮลลี่  
ถ้าโยจะแสดงสมบัติการไหลหนืดเด่นชัดกว่าสมบัติความยืดหยุ่น

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่ความเค้นมีค่าคงที่จนถึงจุดสมดุลย์ กราฟช่วงนี้ประกอบด้วยสปริง  
อิสระ 1 หน่วย เป็นช่วงที่ตัวอย่างแสดงสมบัติยืดหยุ่นได้อย่างเด่นชัด ถ้าความเค้นสมดุลย์มีค่ามาก  
แสดงว่าตัวอย่างเฮลลี่ถ้าโยแสดงสมบัติความยืดหยุ่นสูง แต่การคืนรูปนั้นไม่สามารถคืนสู่สภาพ  
เริ่มต้นได้ เนื่องจากลักษณะการไหลหนืดหน่วงเอาไว้

จากการเปรียบเทียบผลการตอบสนองการพักความเค้นของเฮลลี่ถ้าโยที่ผันแปร  
ส่วนผสม สามารถหาค่าตัวแปรของแบบจำลอง (viscoelastic parameter) ซึ่งสามารถบอกสมบัติ  
ทางวิสโคอิลาสติก ได้ ในด้านอาหารจะใช้ค่าความเค้นสมดุลย์ (equilibrium stress) และเวลาการ  
พักความเค้น (relaxation time ;  $\lambda_{rel}$ ) ในการอธิบายซึ่งแสดงดังตาราง 4.12

ตาราง 4.12 ค่าตัวแปรทางวิสโคอิลาสติกสำหรับการทดสอบการพักความเค้น

สิ่งทดลอง	equilibrium stress (Pa)	$\lambda_{rel}$ (sec)
1	4.68 <sup>b</sup> ± 0.29	0.01 <sup>a</sup> ± 0.00
2	20.43 <sup>c</sup> ± 1.86	67.37 <sup>b</sup> ± 19.01
3	9.53 <sup>c</sup> ± 0.68	0.07 <sup>a</sup> ± 0.01
4	22.93 <sup>f</sup> ± 3.51	89.08 <sup>c</sup> ± 3.51
5	6.44 <sup>b</sup> ± 2.28	0.01 <sup>a</sup> ± 0.00
6	22.38 <sup>f</sup> ± 1.99	73.49 <sup>b</sup> ± 14.41
7	24.20 <sup>f</sup> ± 0.23	91.73 <sup>c</sup> ± 9.29
8	31.77 <sup>g</sup> ± 1.56	236.30 <sup>d</sup> ± 33.77
9	13.52 <sup>d</sup> ± 1.15	0.26 <sup>a</sup> ± 0.08
10	4.95 <sup>b</sup> ± 1.70	0.01 <sup>a</sup> ± 0.00
11	14.34 <sup>d</sup> ± 1.59	4.39 <sup>a</sup> ± 1.22
12	1.08 <sup>a</sup> ± 0.08	0.01 <sup>a</sup> ± 0.00

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้ง อักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

จากตาราง 4.12 แสดงตัวแปรทางวิสโคอิลาสติกสำหรับการทดสอบการพักความเค้น  
พบว่า สิ่งทดลองที่มีค่า ความเค้นสมดุลย์ มากสุดจนถึงน้อยที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 8, 7, 4, 6, 2, 11,  
9, 3, 5, 10, 1 และ 12 ตามลำดับ สิ่งทดลองที่ 8 มีค่า ความเค้นสมดุลย์ เท่ากับ 31.77±1.56 Pa  
ขณะที่สิ่งทดลองที่ 12 มีค่าความเค้นสมดุลย์ เท่ากับ 1.08±0.08 Pa วัสดุใดที่มีค่าความเค้นสมดุลย์



มาก แสดงว่าวัสดุที่มีความเป็น elastic มาก (Shellhammer *et al.*, 1997) และเมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความเค้นสมดุลย์ และปัจจัยต่างๆที่ทำการศึกษา ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (4.15)

ตาราง 4.13 สมการรีเกรสชันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของเยลลีไต้ต่อตัวแปรทางวิสโคอีลาสติกสำหรับการทดสอบการพักความเค้น

สมการ	สมการรีเกรสชัน	$r^2$
4.15	equilibrium stress = $-0.382X_2+10.109X_3+24.839X_4$	0.982
4.16	$\lambda_{rel}$ = $-3.852X_2+113.604X_3+95.458X_4$	0.771

หมายเหตุ :  $X_1$  = ปริมาณเนื้อไต  $X_2$  = ปริมาณน้ำตาลผสม  
 $X_3$  = ปริมาณคาร์ราจีแนน  $X_4$  = ปริมาณ โลคัสต์บีนกัม

จากสมการ (4.15) พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่า ความเค้นสมดุลย์ ได้แก่ ปริมาณน้ำตาลผสม คาร์ราจีแนน และ โลคัสต์บีนกัม โดยปริมาณน้ำตาลผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า ความเค้นสมดุลย์ มีค่าลดลง ส่วน คาร์ราจีแนนและ โลคัสต์บีนกัมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า ความเค้นสมดุลย์ มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่า  $r^2$  ที่ได้พบว่า มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสมการรีเกรสชันที่ได้สามารถใช้เป็น prediction equation เพื่อทำนายค่า equilibrium stress ได้

จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่า equilibrium stress ที่ได้จากการทดสอบการพักความเค้น กับค่า permanent deformation ( $J_{pd}$ ) ที่ได้จากการทดสอบการคืบ พบว่า มีความสัมพันธ์กันในทิศทางตรงกันข้าม โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ  $-0.773$  สำหรับค่า equilibrium stress กับค่า elastic modulus ( $E_0$ ) พบว่ามีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ  $0.975$  แสดงว่าค่า equilibrium stress น่าจะมีความสัมพันธ์กับค่า elastic modulus ( $E_0$ ) มากกว่าค่า permanent deformation ( $J_{pd}$ )

ส่วนค่า  $\lambda_{rel}$  หรือเวลาการพักความเค้น (relaxation time) Shellhammer *et al.*, 1997 พบว่า หากค่า  $\lambda_{rel}$  มีค่าน้อยนั้นหมายถึงวัสดุนั้นมีความเป็น viscous มาก หรือมีความเป็น elastic น้อย จากการทดลองพบว่า ทุกสิ่งทดลองมีค่า  $\lambda_{rel}$  แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยสิ่งทดลองที่มีค่า  $\lambda_{rel}$  น้อยที่สุดคือสิ่งทดลองที่ 12 และสิ่งทดลองที่มีค่า  $\lambda_{rel}$  มากที่สุดคือสิ่งทดลองที่ 8 เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\lambda_{rel}$  และปัจจัยต่างๆที่ทำการศึกษา ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (4.16)

จากสมการ (4.16) พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่า  $\lambda_{rel}$  ได้แก่ ปริมาณน้ำตาลผสม คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บินกัน โดยปริมาณน้ำตาลผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $\lambda_{rel}$  มีค่าลดลง ส่วน คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บินกันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $\lambda_{rel}$  มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่ ค่า  $r^2$  พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.771 ซึ่งถือเป็นค่าที่ไม่สูง นั่นคือสมการรีเกรสชันที่ได้ มีความน่าเชื่อถือไม่เพียงพอที่จะใช้เป็น prediction equation เพื่อทำนายค่า  $\lambda_{rel}$

#### 4.3.3 การทดสอบ Frequency sweep

การทดสอบ Frequency sweep ให้ ความเค้นคงที่ 40 Pa ที่ช่วงความถี่ 0.01-10 Hz จะได้กราฟดังรูป 4.10 และรูป 4.11 จากกราฟจะเห็นว่าทุกสิ่งทดลอง  $G'$  (storage modulus) จะมากกว่า  $G''$  (loss modulus) แสดงว่าความเป็นของแข็งยืดหยุ่นเด่นกว่าของเหลวหนืด (Steffe, 1996) หากพิจารณาค่า  $G'$  และ  $G''$  ที่ความถี่ 1 Hz ดังตาราง 4.14 พบว่า ค่า  $G'$  และ  $G''$  มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกสิ่งทดลอง ( $p \leq 0.05$ ) โดยสิ่งทดลองที่ 8 มีค่า  $G'$  และ  $G''$  มากสุด คือ 35.73 kPa และ 3.87 kPa ตามลำดับ ขณะที่สิ่งทดลองที่ 12 มีค่า  $G'$  และ  $G''$  น้อยสุด คือ 3.84 kPa และ 0.39 kPa ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีอีกค่าที่สำคัญคือ ลอส-แทนเจนท์ (loss tangent) หรือ แทนเดลตา ( $\tan \delta$ ) โดยที่  $\tan \delta = G''/G'$  หากค่า  $\tan \delta$  มากกว่า 1 แสดงว่า มีลักษณะของไหลหนืดเด่นกว่าลักษณะของแข็งยืดหยุ่น หากค่า  $\tan \delta$  น้อยกว่า 1 แสดงว่าลักษณะของแข็งยืดหยุ่นเด่นกว่าลักษณะของไหลหนืด (Steffe, 1996) จากการทดลองพบว่าค่า  $\tan \delta$  ที่ความถี่ 1 Hz ในทุกสิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.08 - 0.13 ซึ่งหาก  $\tan \delta$  มีค่าประมาณ 0.1 จะแสดงลักษณะเจลที่แท้จริง (Apichartsrangkoon, 2002)

ตาราง 4.14 ค่า G' G'' ที่ความถี่ 1 Hz

สิ่งทดลอง	G' (kPa)	G'' (kPa)	tanδ <sup>(ns)</sup>
1	5.02 <sup>f</sup> ± 1.21	0.57 <sup>e</sup> ± 0.08	0.11 ± 0.00
2	27.48 <sup>c</sup> ± 2.29	3.11 <sup>b</sup> ± 0.05	0.10 ± 0.00
3	11.56 <sup>e</sup> ± 3.26	1.20 <sup>d</sup> ± 0.04	0.11 ± 0.00
4	30.29 <sup>bc</sup> ± 1.26	3.48 <sup>ab</sup> ± 0.27	0.11 ± 0.01
5	11.24 <sup>e</sup> ± 1.50	1.19 <sup>d</sup> ± 0.06	0.11 ± 0.00
6	29.20 <sup>bc</sup> ± 1.38	3.15 <sup>b</sup> ± 0.19	0.10 ± 0.00
7	33.10 <sup>ab</sup> ± 7.01	3.52 <sup>ab</sup> ± 0.80	0.10 ± 0.01
8	35.73 <sup>a</sup> ± 7.68	3.87 <sup>a</sup> ± 0.44	0.08 ± 0.01
9	19.03 <sup>d</sup> ± 3.34	2.03 <sup>c</sup> ± 0.18	0.11 ± 0.00
10	5.76 <sup>f</sup> ± 1.41	0.62 <sup>e</sup> ± 0.05	0.11 ± 0.00
11	20.49 <sup>d</sup> ± 1.05	2.42 <sup>c</sup> ± 0.33	0.11 ± 0.02
12	3.84 <sup>f</sup> ± 0.72	0.39 <sup>e</sup> ± 0.02	0.13 ± 0.04

หมายเหตุ : เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้ง อักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

เมื่อนำข้อมูลที่ได้ออกไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า G' และ G'' และปัจจัยต่างๆที่ทำการศึกษา ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (4.17) และสมการ (4.18)

ตาราง 4.15 สมการรีเกรสชันแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของเซลล์ลำไยต่อตัวแปร

ทางวิสโคอีลาสติกสำหรับการทดสอบแบบสั้น

สมการ	สมการรีเกรสชัน	r <sup>2</sup>
4.17	G' = -0.373X <sub>2</sub> +32.037X <sub>3</sub> +9.168X <sub>4</sub>	0.980
4.18	G'' = -0.041X <sub>2</sub> +3.640X <sub>3</sub> +0.847X <sub>4</sub>	0.982

หมายเหตุ : X<sub>1</sub> = ปริมาณเนื้อลำไย

X<sub>2</sub> = ปริมาณน้ำตาลผสม

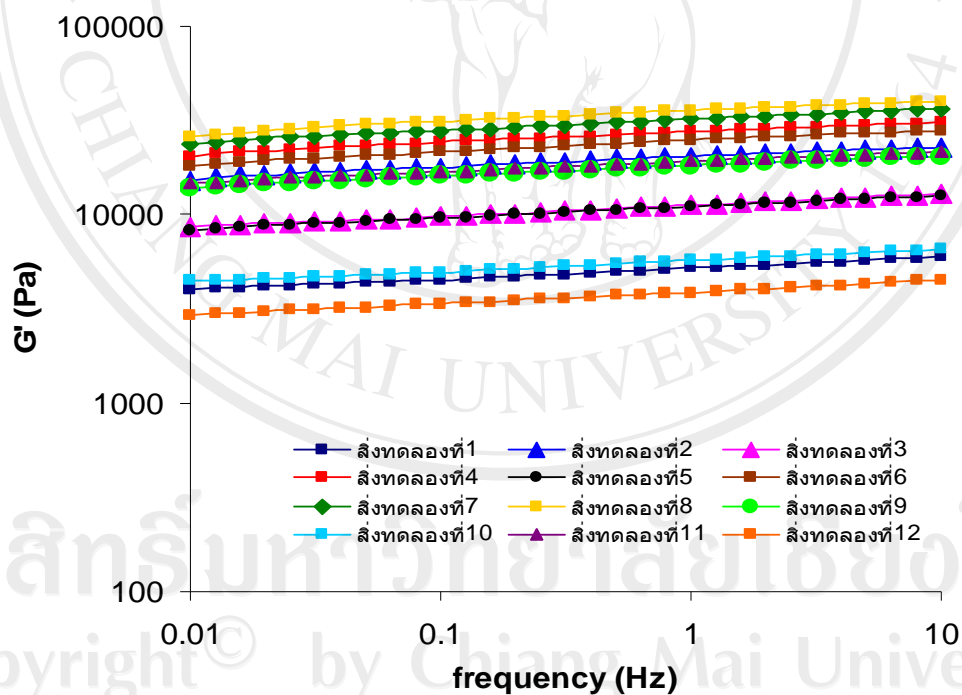
X<sub>3</sub> = ปริมาณคาร์ราจีแนน

X<sub>4</sub> = ปริมาณ โลคัสต์บี้นกัม

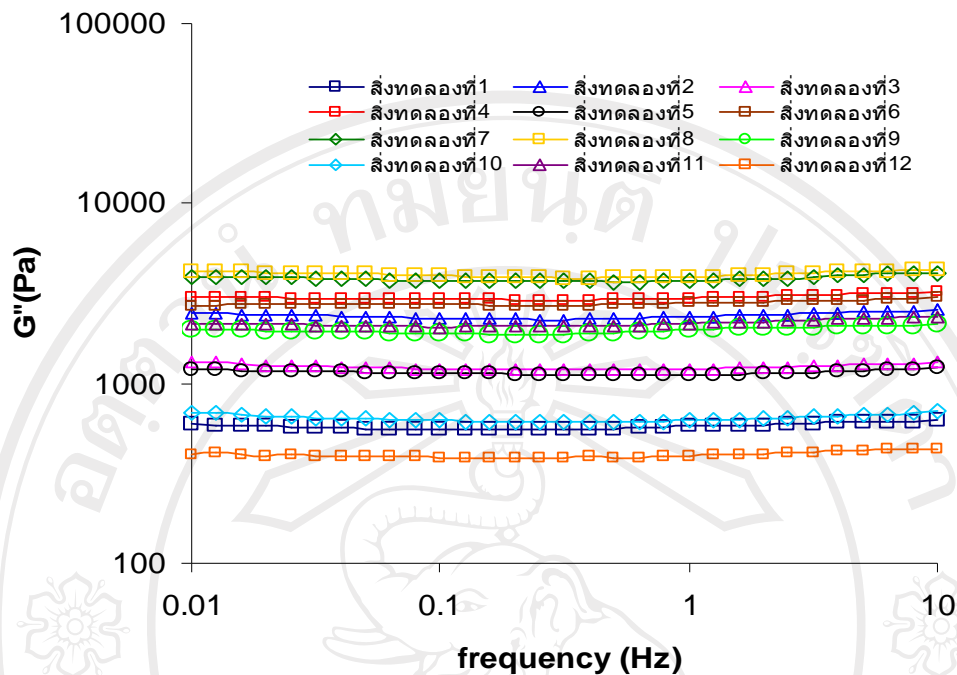
จากการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่า  $G'$  และ  $G''$  ได้แก่ ปริมาณน้ำตาลผสม คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บินกัม โดยปริมาณน้ำตาลผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $G'$  และ  $G''$  มีค่าลดลง ส่วนปริมาณคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บินกัมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า  $G'$  และ  $G''$  มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณา  $r^2$  จากสมการ (4.17) และ (4.18) พบว่ามีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสมการรีเกรสชันที่ได้สามารถใช้เป็น prediction equation เพื่อทำนายค่า  $G'$  และ  $G''$  ได้

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G'$  กับค่า elastic modulus ( $E_0$ ) ที่ได้จากการทดสอบการคืบ พบว่า มีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.974 สำหรับค่า  $G'$  กับค่า equilibrium stress ที่ได้จากการทดสอบการพักความเค้น พบว่า มีความสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.979

แสดงว่าการทดสอบทางรีโอโลยีเหล่านี้จะใช้วิธีใดก็ได้ ซึ่งจะได้ผลเหมือนกัน



รูป 4.10 ค่า  $G'$  ของเจลลี่ถั่วไทย 12 สิ่งทดลอง



รูป 4.11 ค่า  $G''$  ของเฮลตี้ลำไยทั้ง 12 สิ่งทดลอง

#### 4.4 สภาวะการเก็บรักษาและบรรจุภัณฑ์ต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และจุลชีววิทยาของเฮลตี้ลำไย

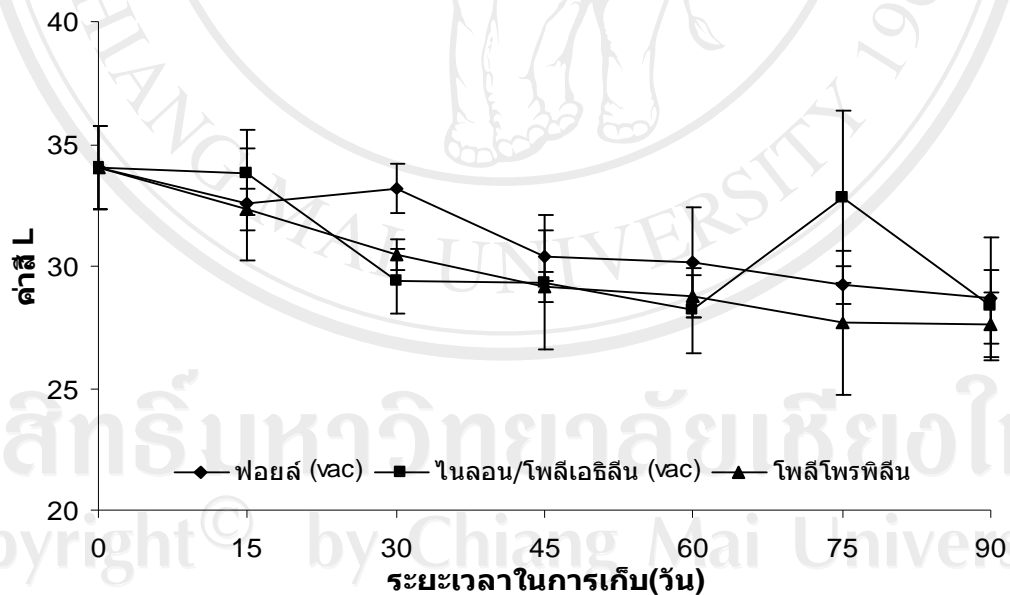
จากตอนที่ 4.2 พบว่าสูตรที่เหมาะสมคือ เฮลตี้ลำไยสิ่งทดลองที่ 7 ทำการศึกษาสภาวะการเก็บและบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการเก็บรักษา โดยบรรจุเฮลตี้ลำไยในบรรจุภัณฑ์ 3 ชนิดคือ ถุงฟอยล์บรรจุแบบสุญญากาศ ถุงไนลอน/โพลีเอธิลีน บรรจุแบบสุญญากาศ และ ถุงโพลีโพรพิลีน บรรจุแบบสภาวะบรรยากาศ จากนั้นนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส สุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ เคมี และทางจุลชีววิทยา โดยตัวอย่างเฮลตี้ลำไยที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสจะเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 90 วัน โดยสุ่มตรวจทุกๆ 15 วัน ส่วนตัวอย่างเฮลตี้ลำไยที่เก็บที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 30 วัน โดยสุ่มตรวจในวันที่ 3, 6, 9, 12, 15 และ 30

เฮลตี้ลำไยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณความชื้นและค่าออกซิเจนแอคทีวิตี อยู่ในช่วงที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ และเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เอนไซม์ (maillard reaction) การศึกษาสภาวะการเก็บและบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการเก็บรักษาพบว่า มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านกายภาพ เคมี และจุลชีววิทยา ดังนี้

#### 4.4.1 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านกายภาพของเยลลี่ลำไย

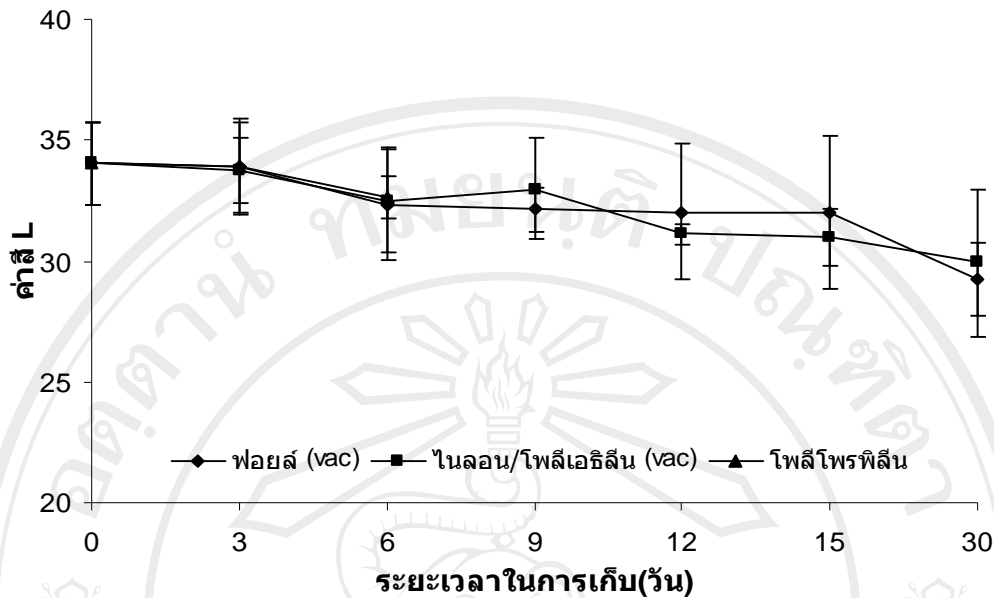
1. ค่าสี ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าสีในระบบ L, C, H ของเยลลี่ลำไยที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส แสดงดังตาราง ข.1 และตาราง ข.2 (ภาคผนวก ข)

ค่าสี L จากการทดลองพบว่าเยลลี่ลำไยที่เก็บในบรรจุภัณฑ์ 3 ชนิดให้ค่าสี L ลดลงตามระยะเวลาเก็บรักษาที่นานขึ้น ทั้งที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส ดังรูป 4.12 และรูป 4.13 โดยพบว่าบรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด ให้ค่าสี L ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) เมื่อเก็บเยลลี่ลำไยที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 วัน และที่ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 วัน สำหรับเยลลี่ลำไยที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีน และเก็บที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำการตรวจวัดค่าสี L ถึงวันที่ 6 เนื่องจากวันที่ 9 เป็นต้นไป ตัวอย่างเยลลี่ลำไยเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์คุณภาพทางด้านต่างๆ ได้ การที่เยลลี่ลำไยมีค่าสี L ลดลง นั้นแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์มีความสว่างลดลง หรือมีความขุ่นมากขึ้น โดยสาเหตุอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งได้แก่ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction)



รูป 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี L และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



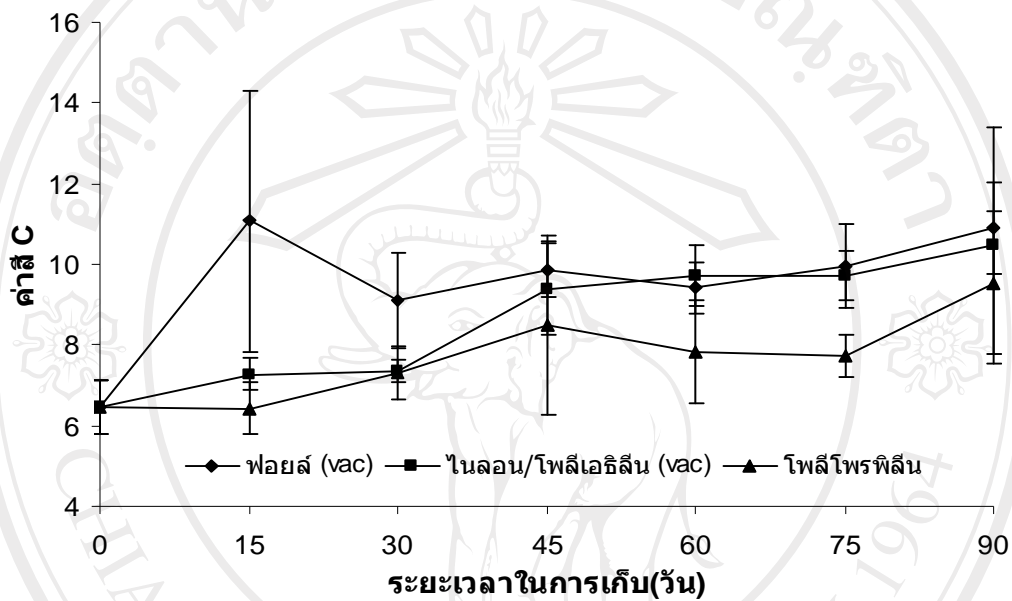


รูป 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี L และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

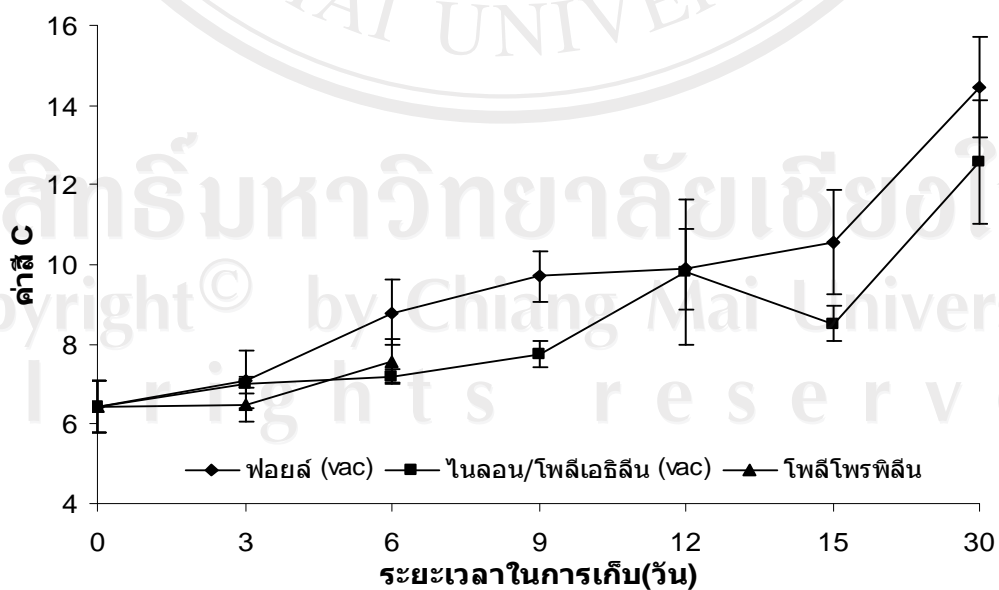
ค่าสี C จากการทดลองพบว่าเซลล์ด้าโยที่เก็บในบรรจุภัณฑ์ 3 ชนิดให้ค่าสี C เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บรักษาที่นานขึ้น ทั้งที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส ดังรูป 4.14 และรูป 4.15 โดยเซลล์ด้าโยที่เก็บในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 วันให้ค่าสี C ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) แต่เมื่อเก็บเซลล์ด้าโยไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 วัน พบว่า บรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันมีผลทำให้ค่าสี C ที่ได้แตกต่างกัน โดยเซลล์ด้าโยที่บรรจุในถุงฟอยล์ วิธีบรรจุแบบสุญญากาศ ให้ค่าสี C มากกว่าเซลล์ด้าโยที่บรรจุในถุงไนลอน/โพลีเอทิลีน วิธีบรรจุแบบสุญญากาศ ซึ่งมีค่าสี C เพิ่มขึ้นจาก 6.45 เป็น 14.46 และ 12.58 ตามลำดับ แสดงดังตาราง ข.2 (ภาคผนวก ข) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บ ณ วันที่ 30 พบว่า การเก็บที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะให้ค่าสี C มากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสทั้งที่บรรจุในถุงฟอยล์และถุงไนลอน/โพลีเอทิลีน การที่ค่าสี C มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีความเข้มของสีมากขึ้น

ค่าสี H จากการทดลองพบว่าเซลล์ด้าโยมีค่าสี H เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเก็บในบรรจุภัณฑ์และอุณหภูมิที่แตกต่างกันดังรูป 4.16 และรูป 4.17 ซึ่งในความเป็นจริงแล้วค่า สี H น่าจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการเก็บที่เพิ่มมากขึ้นและอุณหภูมิที่สูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยามอลลาร์ด (maillard reaction) ซึ่งเกิดจากน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโนทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็นสารสีน้ำตาลขึ้นเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีเข้มขึ้น แต่จากการทดลองพบว่า เซลล์ด้าโยที่ทำการศึกษายังคงมีสีเหลือง

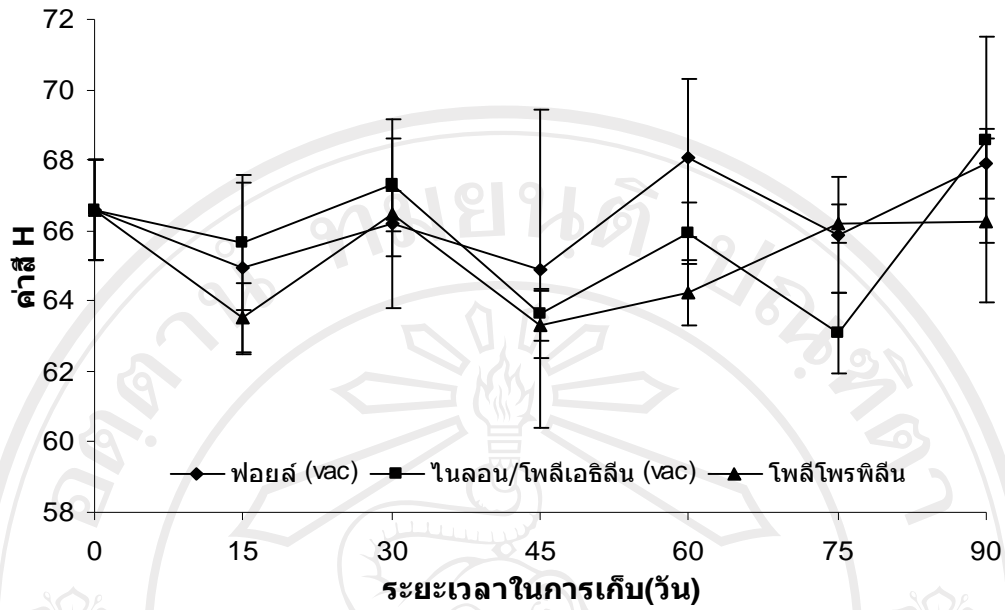
ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ใหม่ อาจเป็นเพราะระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาเป็นช่วงระยะเวลาที่สั้นเกินไปจึงไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าสี H ได้อย่างชัดเจน หากให้ระยะเวลาการเก็บรักษามากกว่านี้ อาจเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น แต่ด้วยข้อจำกัดทางด้านการศึกษาของผลิตภัณฑ์จากเชื้อจุลินทรีย์จึงทำให้ต้องศึกษาระยะเวลาการเก็บรักษาอยู่ในช่วงระยะเวลานั้นๆ ดังกล่าว



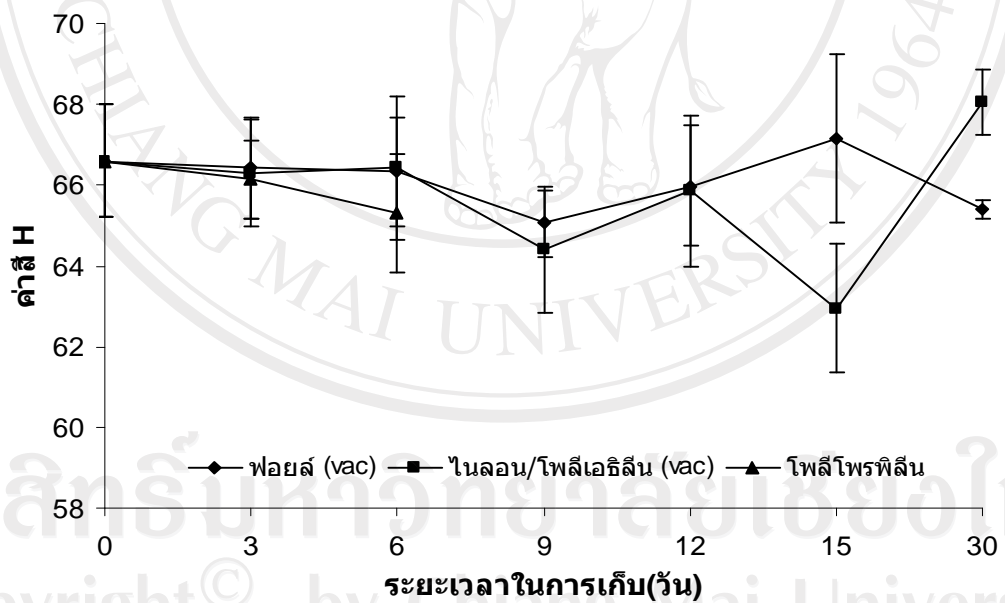
รูป 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี C และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



รูป 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี C และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูป 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี H และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



รูป 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสี H และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ดังนั้นสรุปได้ว่า เมื่อเก็บเซลล์ไตที่ไว้ที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส ค่าสี L มีแนวโน้มลดลง ค่าสี C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าสี H มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ตามระยะเวลาการเก็บที่นานขึ้น โดยบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันให้ค่าสีที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ นั่นคือจะเลือกเก็บในบรรจุภัณฑ์ชนิดใดก็ได้

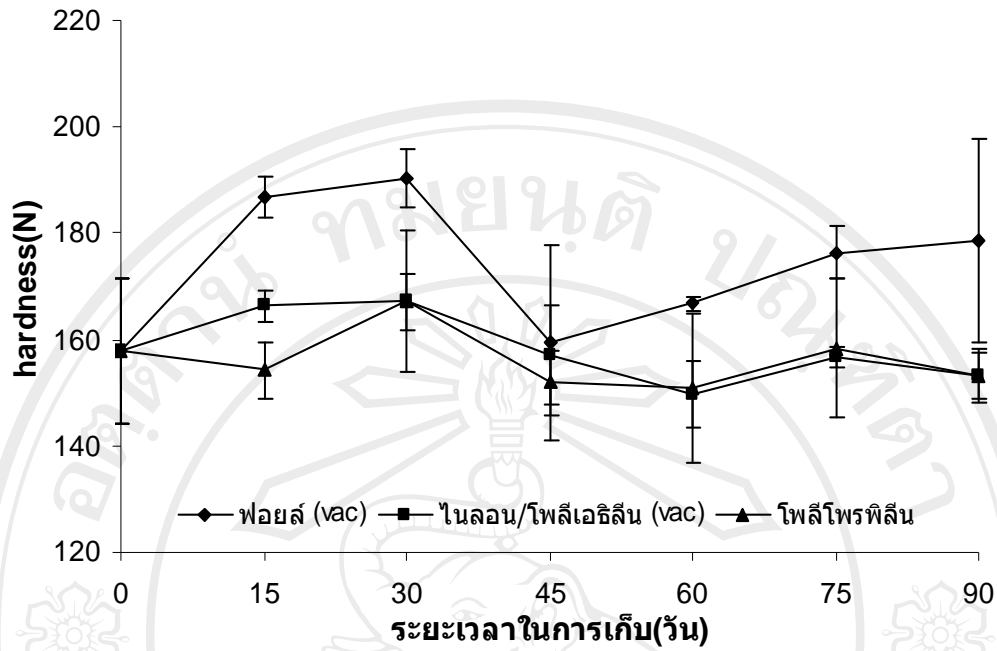
2. ลักษณะทางเนื้อสัมผัส (TPA) ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางด้านลักษณะทางเนื้อสัมผัสของเยลลี่ลำไยที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส แสดงดังตาราง ข.3 และตาราง ข.4 (ภาคผนวก ข)

ค่า hardness จากการทดลองพบว่าเยลลี่ลำไยที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ให้ค่า hardness ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าสภาวะการเก็บรักษาและชนิดของบรรจุภัณฑ์ รวมถึงระยะเวลาในการเก็บรักษาไม่มีผลต่อค่า hardness ของผลิตภัณฑ์ ดังรูป 4.18 สำหรับเยลลี่ลำไยที่เก็บที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าค่า hardness มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้เก็บนานขึ้น โดยบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันให้ค่า hardness ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ดังรูป 4.19

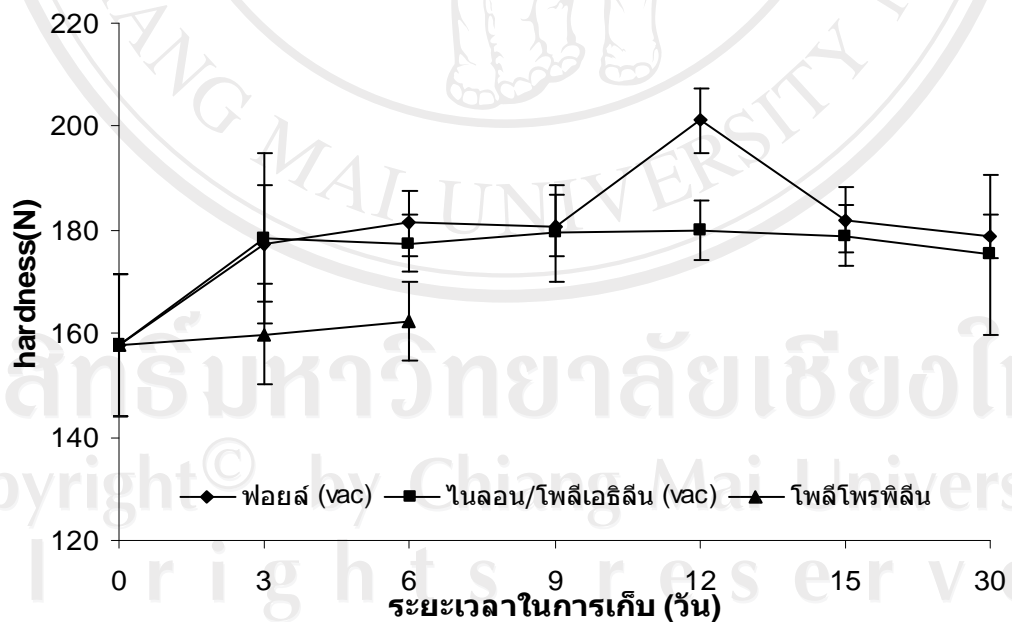
ค่า adhesiveness จากการทดลองพบว่าเยลลี่ลำไยมีค่า adhesiveness ไม่แตกต่างจากค่าเริ่มต้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บมากขึ้น ทั้งที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส โดยบรรจุภัณฑ์ที่ต่างกัน 3 ชนิด ให้ค่า adhesiveness ของเยลลี่ลำไยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ดังรูป 4.20 และรูป 4.21

ค่า cohesiveness สำหรับเยลลี่ลำไยที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่า cohesiveness เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บมากขึ้น แต่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) เมื่อเก็บในบรรจุภัณฑ์ที่ต่างกัน ดังรูป 4.22 สำหรับเก็บเยลลี่ลำไยไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่า cohesiveness เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บที่นานขึ้น ดังรูป 4.23 โดยเยลลี่ลำไยที่เก็บในถุงไนลอน/โพลีเอทิลีน ให้ค่า cohesiveness มากกว่าเยลลี่ลำไยที่เก็บในถุงพอยล์ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.60 เป็น 0.72 และ 0.67 ตามลำดับ เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 30 วัน ดังตาราง ข. 4 (ภาคผนวก ข)

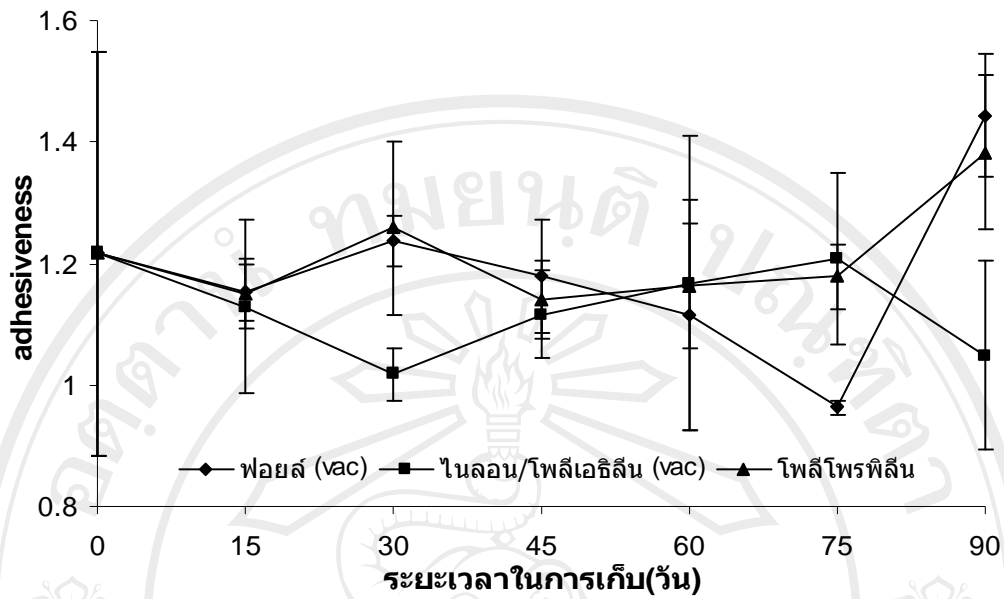
ค่า springiness, gumminess และ chewiness จากการทดลองพบว่าเยลลี่ลำไยที่เก็บในบรรจุภัณฑ์ 3 ชนิด ทั้งที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส ให้ค่า springiness, gumminess และ chewiness เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่จากการสังเกตพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้เก็บนานขึ้น ดังรูป 4.24 – รูป 4.29



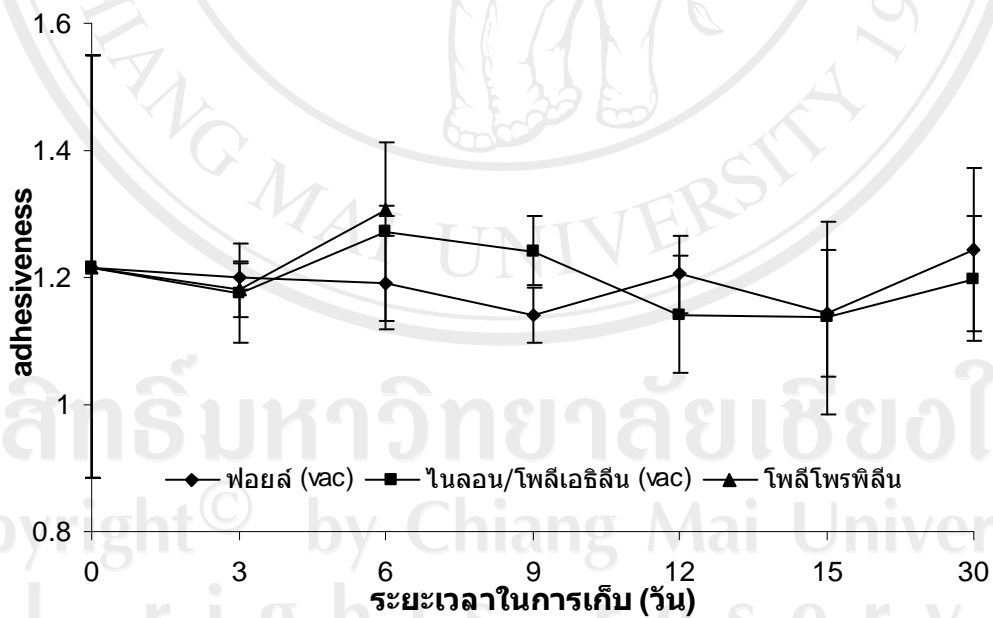
รูป 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า hardness และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



รูป 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า hardness และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

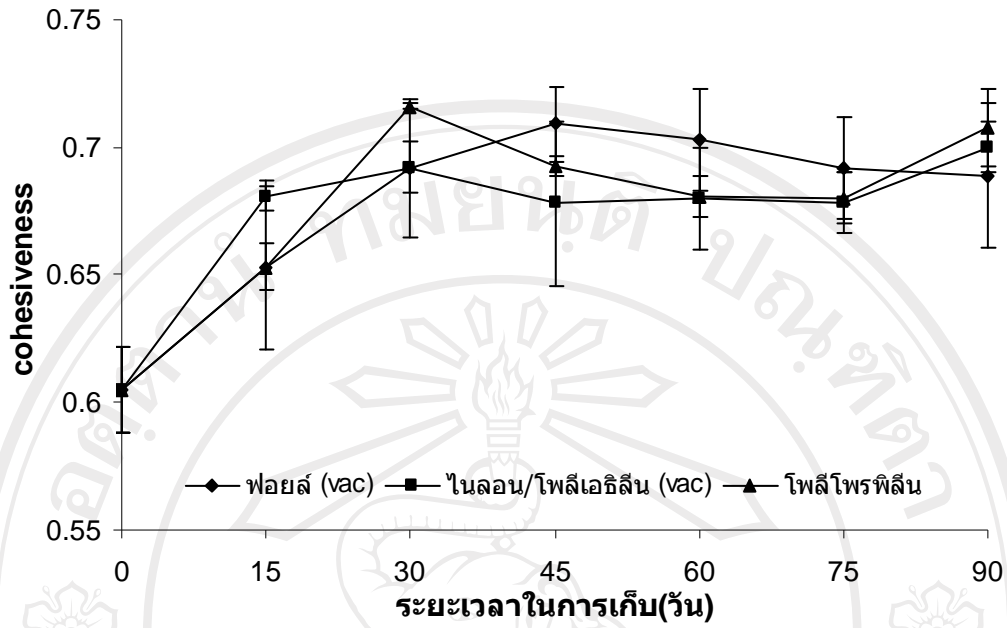


รูป 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า adhesiveness และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

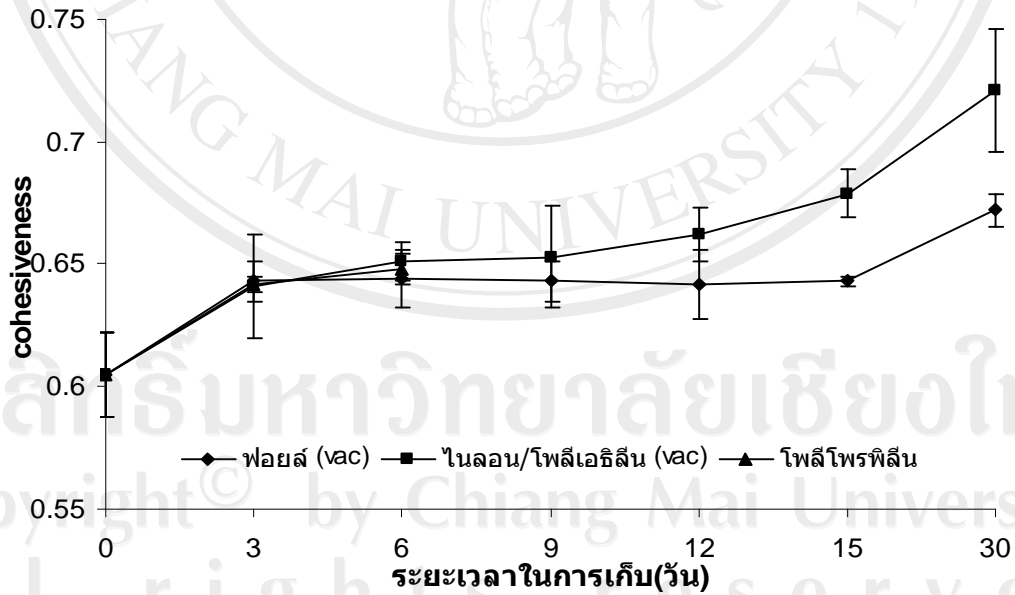


รูป 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า adhesiveness และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

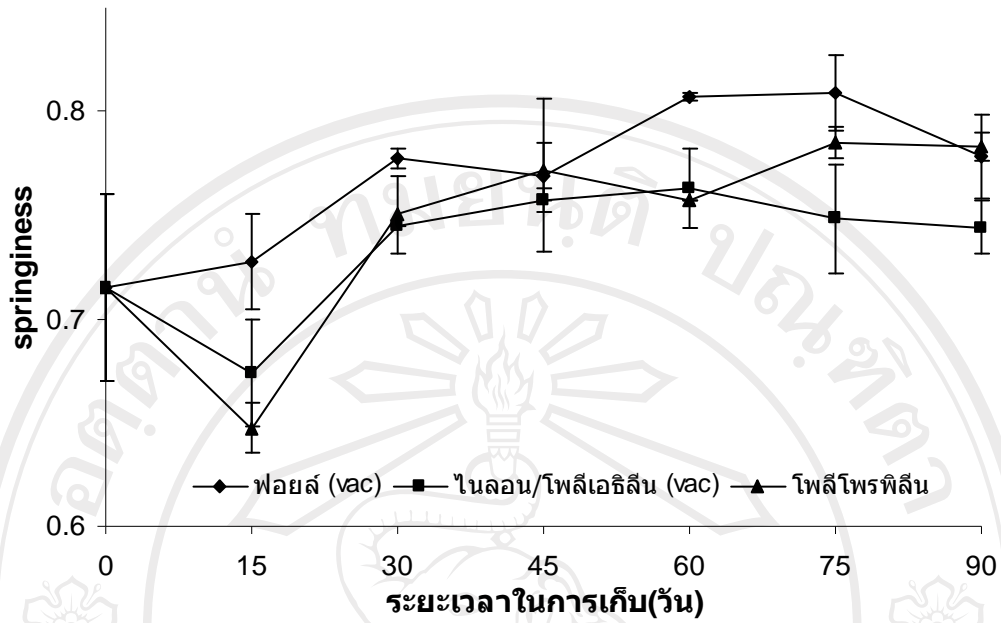




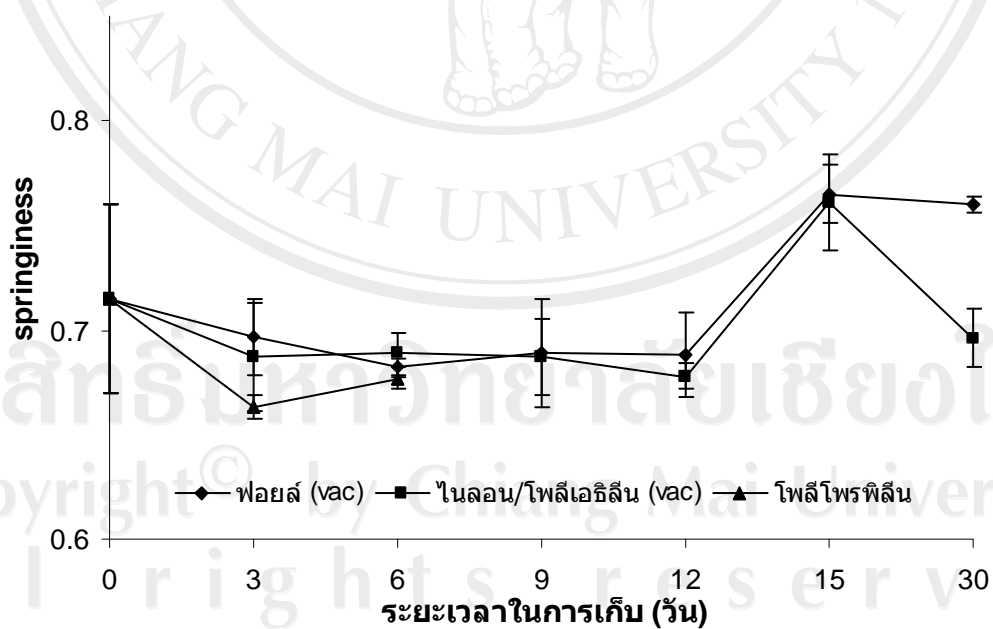
รูป 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cohesiveness และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



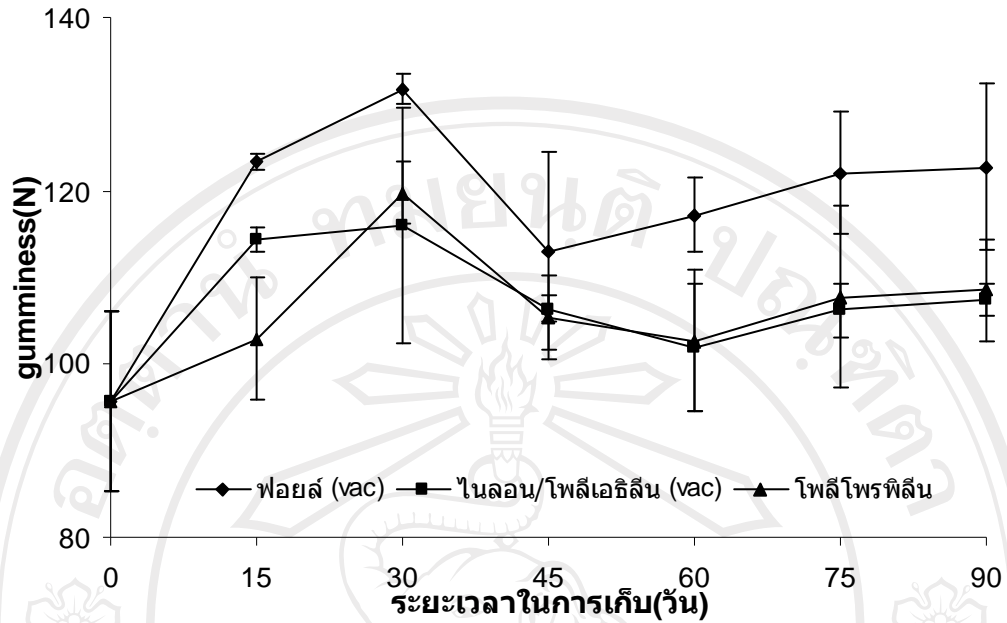
รูป 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า cohesiveness และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



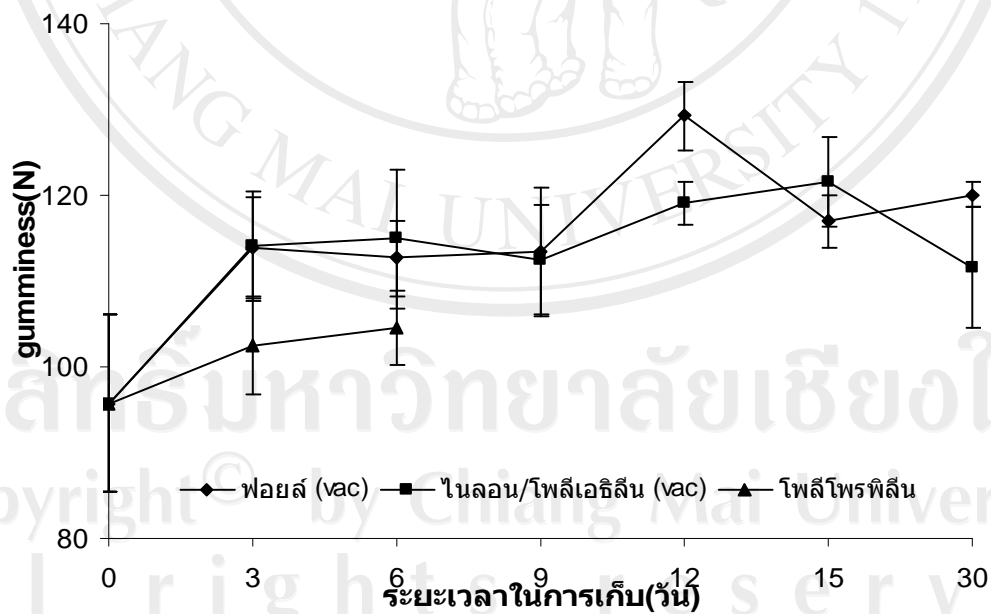
รูป 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า springiness และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



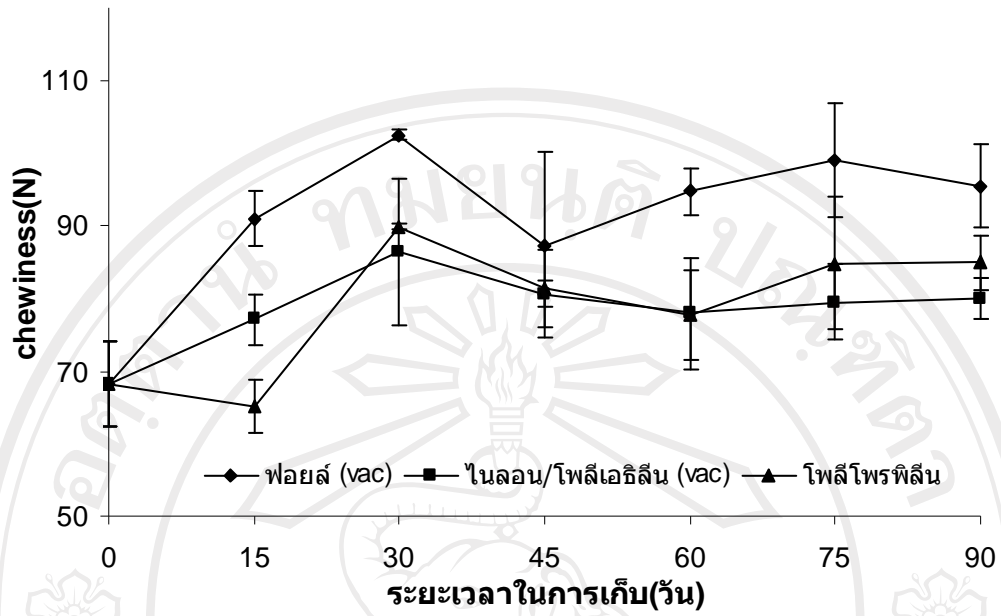
รูป 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า springiness และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



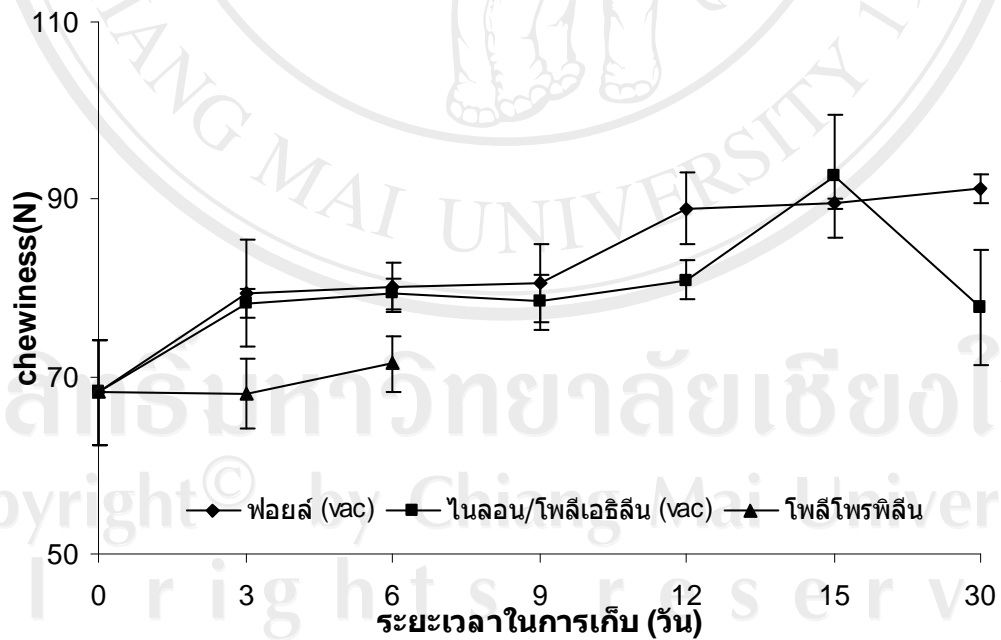
รูป 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า gumminess และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



รูป 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า gumminess และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูป 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า chewiness และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



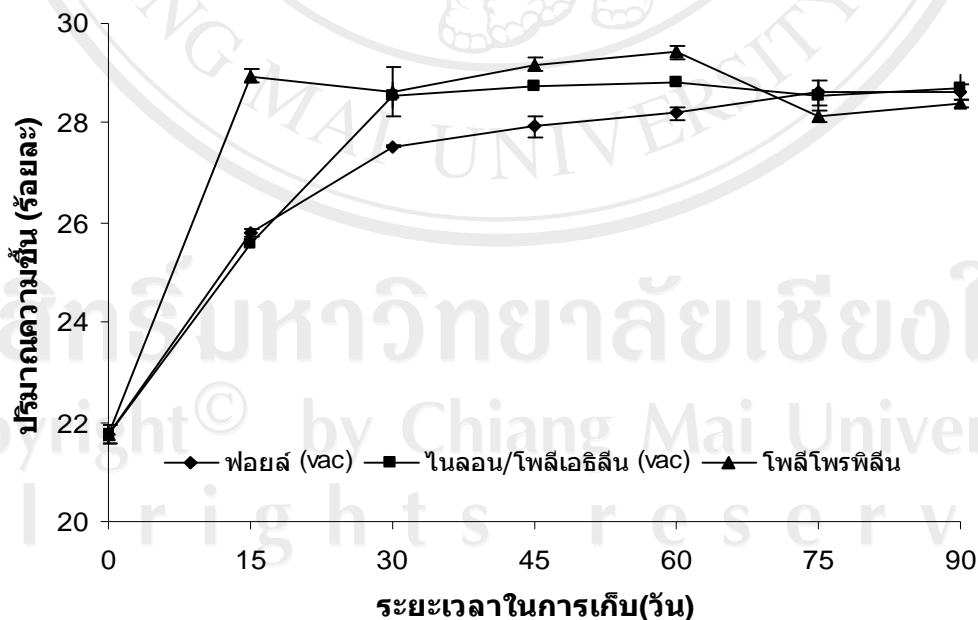
รูป 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า chewiness และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

#### 4.4.2 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีของเยลลี่ลำไย

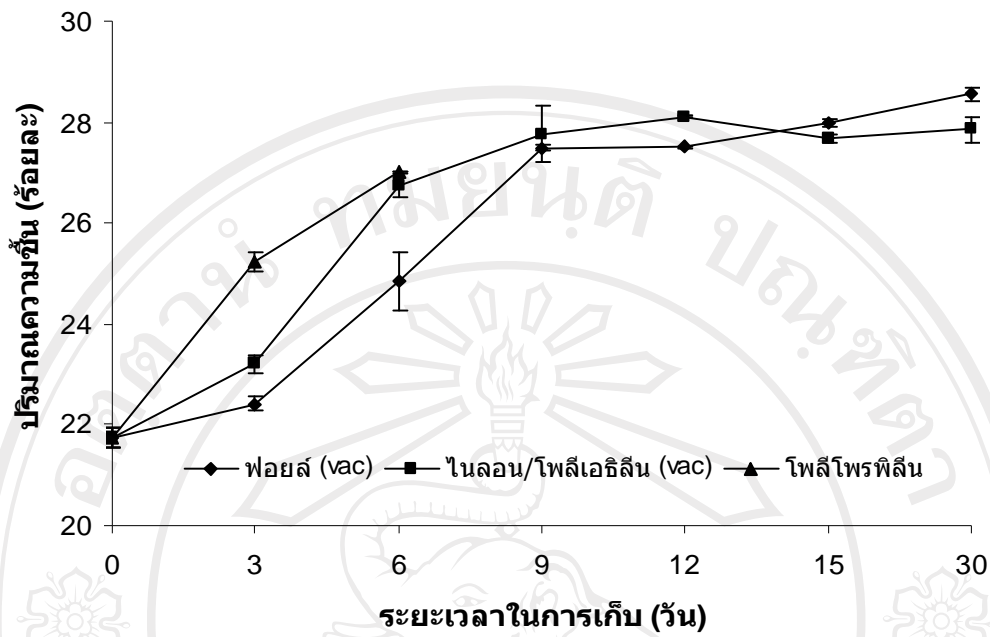
การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีของเยลลี่ลำไยที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียสแสดงดังตาราง ข.5- ตาราง ข.8 (ภาคผนวก ข)

1. ปริมาณความชื้น จากการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นของเยลลี่ลำไยมีค่ามากขึ้นตามระยะเวลาในการเก็บรักษาที่นานขึ้น ทั้งที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส ดังรูป 4.30 และรูป 4.31 และพบว่าเยลลี่ลำไยที่เก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ 3 ชนิดคือ ถุงฟอยล์ ถุงไนลอน/โพลีเอทิลีนบรรจุแบบสุญญากาศ และ ถุงโพลีโพรพิลีน บรรจุแบบสภาวะบรรยากาศ ให้ค่าความชื้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) ดังนั้นจากผลการทดลองในตอนนี้อาจสรุปได้ว่าจะเลือกใช้ชนิดของบรรจุภัณฑ์และวิธีการบรรจุแบบใดก็ได้ เนื่องจากทำให้ปริมาณความชื้นในเยลลี่ลำไยในระหว่างการเก็บรักษามีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แตกต่างกัน

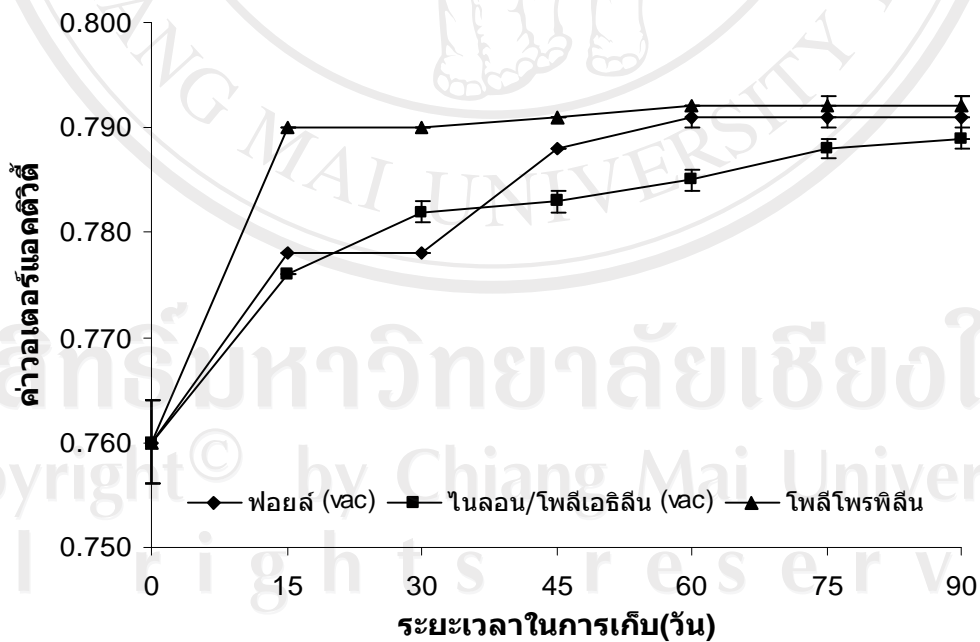
2. ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ ( $a_w$ ) จากการทดลองพบว่าเยลลี่ลำไยมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ มากขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้น ทั้งที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส ดังรูป 4.32 และรูป 4.33 โดยมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้เพิ่มจาก 0.76 เป็น 0.79 ดังตาราง ข. 5 และ ข. 6 (ภาคผนวก ข) และพบว่าเยลลี่ลำไยที่เก็บในถุงฟอยล์ ถุงไนลอน/โพลีเอทิลีน และถุงโพลีโพรพิลีน มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ )



รูป 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

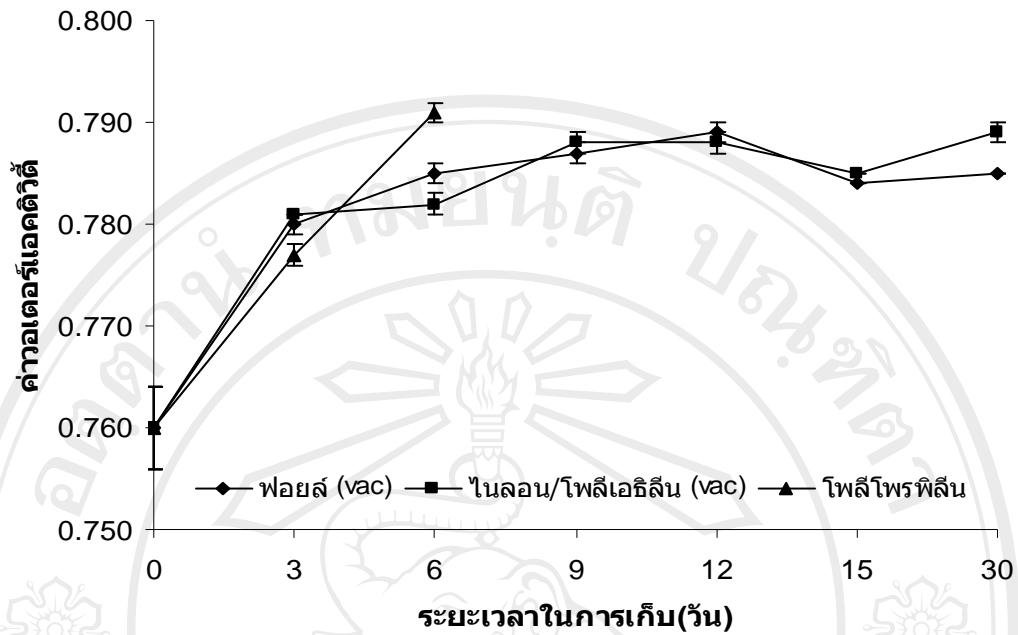


รูป 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



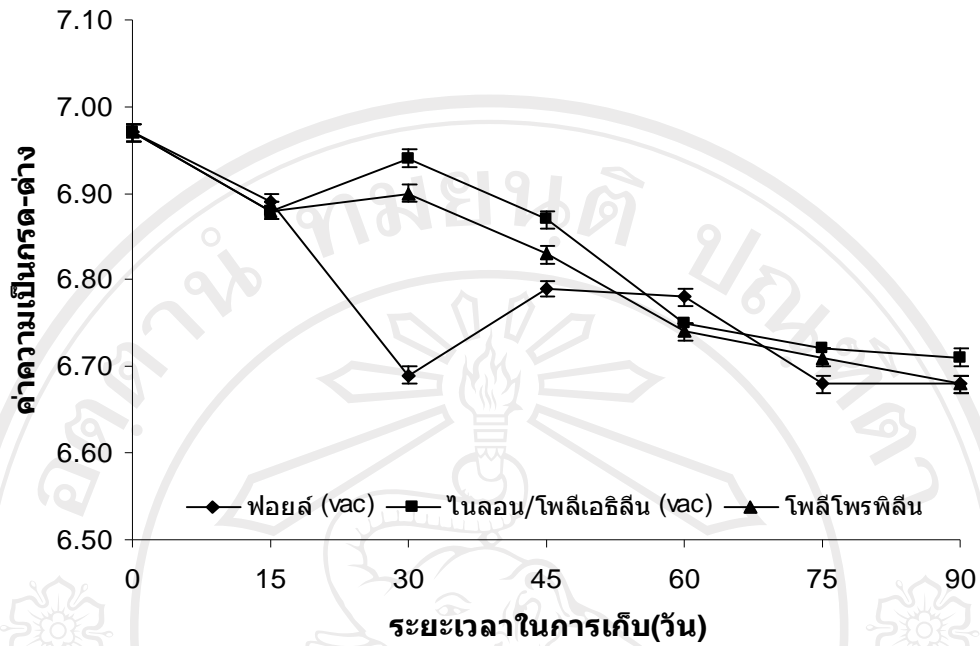
รูป 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าออคเตอร์แอคทีวิตี ( $a_w$ ) และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



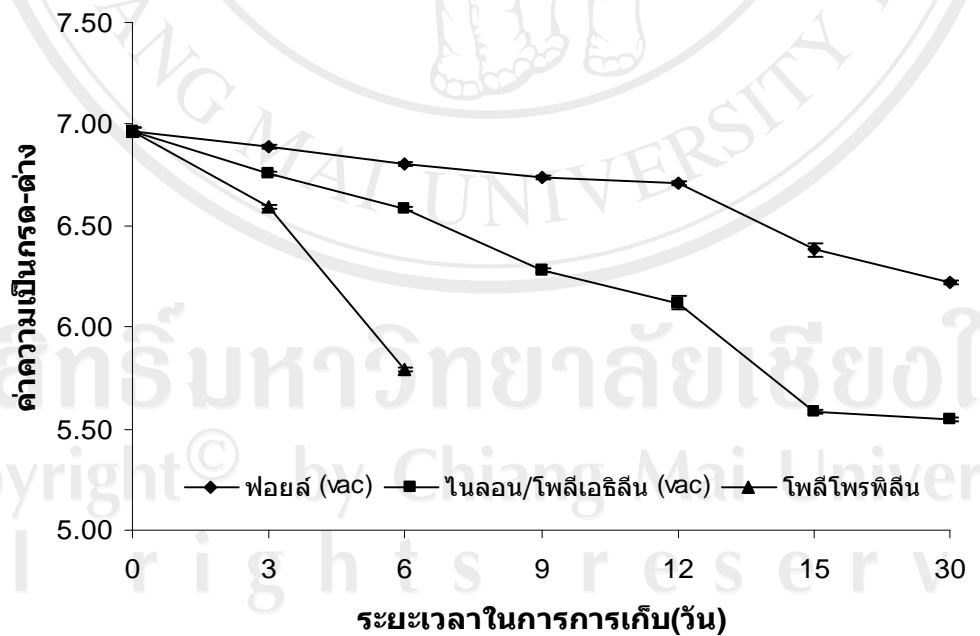


รูป 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอกติวิตี้ ( $a_w$ ) และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

3. ค่าความเป็นกรด- ต่างจากการทดลองพบว่าเซลล์ลำไยมีค่าความเป็นกรด-ต่างลดลงตามระยะเวลาเก็บที่นานขึ้น ทั้งที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส ดังรูป 4.34 และรูป 4.35 โดยเซลล์ลำไยที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด ให้ค่าความเป็นกรด-ต่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) สำหรับเซลล์ลำไยที่เก็บที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความเป็นกรด-ต่างมีแนวโน้มลดลงเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ซึ่งบรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด ให้ค่าความเป็นกรด- ต่าง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ ) โดยเซลล์ลำไยที่เก็บเป็นระยะเวลา 6 วันในถุงโพลีโพรพิลีน มีค่าความเป็นกรด- ต่างลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น โดยลดลงจาก 6.97 เป็น 5.79 ซึ่งเป็นไปได้ว่าเซลล์ลำไยเกิดการเน่าเสียเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ มีผลทำให้ค่าความเป็นกรด- ต่างลดลง เพราะการบรรจุในสภาวะบรรยากาศ อากาศยังคงมีเพียงพอต่อการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางด้านจุลชีววิทยา

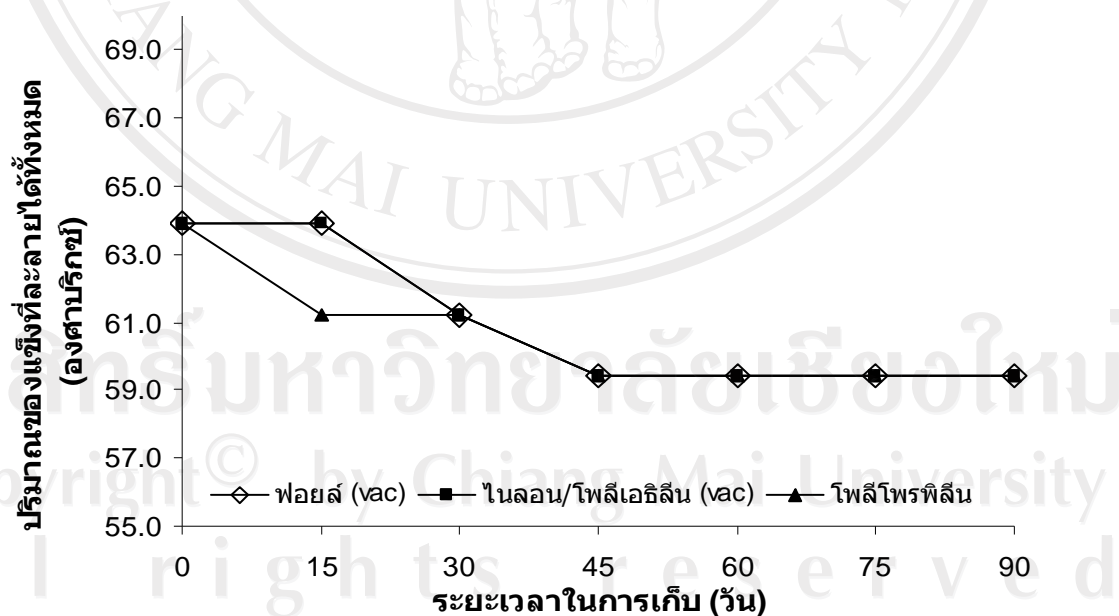


รูป 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างและระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

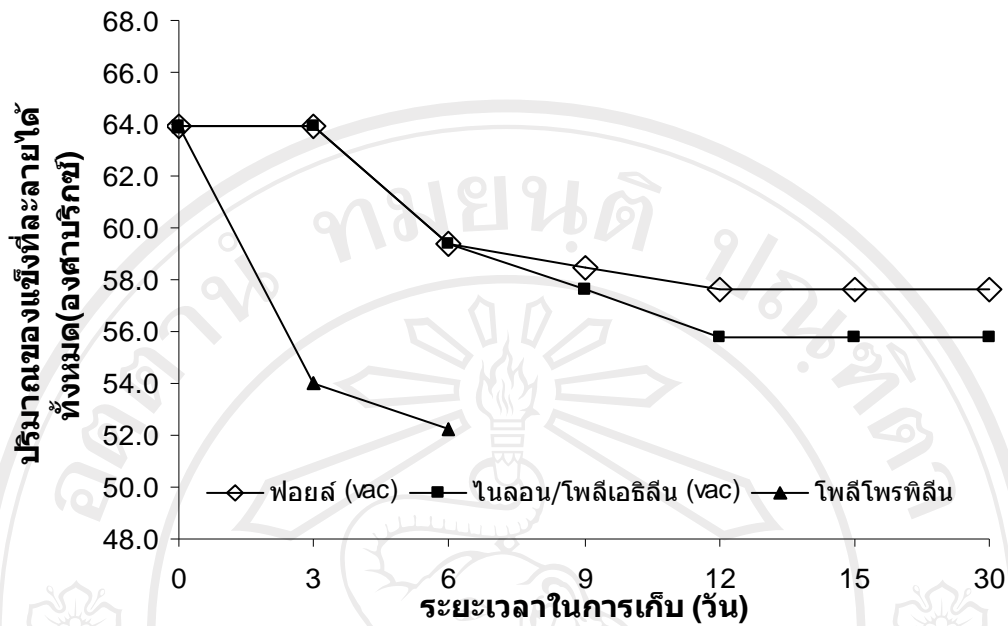


รูป 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างและระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

4. ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด จากการทดลองพบว่าเยลลี่ลำไยมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดลดลงเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น ดังรูป 4.36 และรูป 4.37 โดยเยลลี่ลำไยที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) แต่เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p\leq 0.05$ ) โดยที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในเยลลี่ลำไยมีค่าลดลงมากกว่าที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นไปได้ว่าการลดลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดดังกล่าวเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (nonenzymatic browning) เนื่องจากเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าสีที่เกิดขึ้น นอกจากนี้การลดลงของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดอาจมีสาเหตุจากเชื้อจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหารในการเจริญเติบโต ซึ่งสังเกตได้จากตัวอย่างเยลลี่ลำไยที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนในสภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 วัน พบว่ามีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดลดลงมากที่สุดคือจาก 66.9 เป็น 52.2 องศาบริกซ์ เนื่องจากตัวอย่างดังกล่าวเกิดการเน่าเสีย ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางจุลชีววิทยา

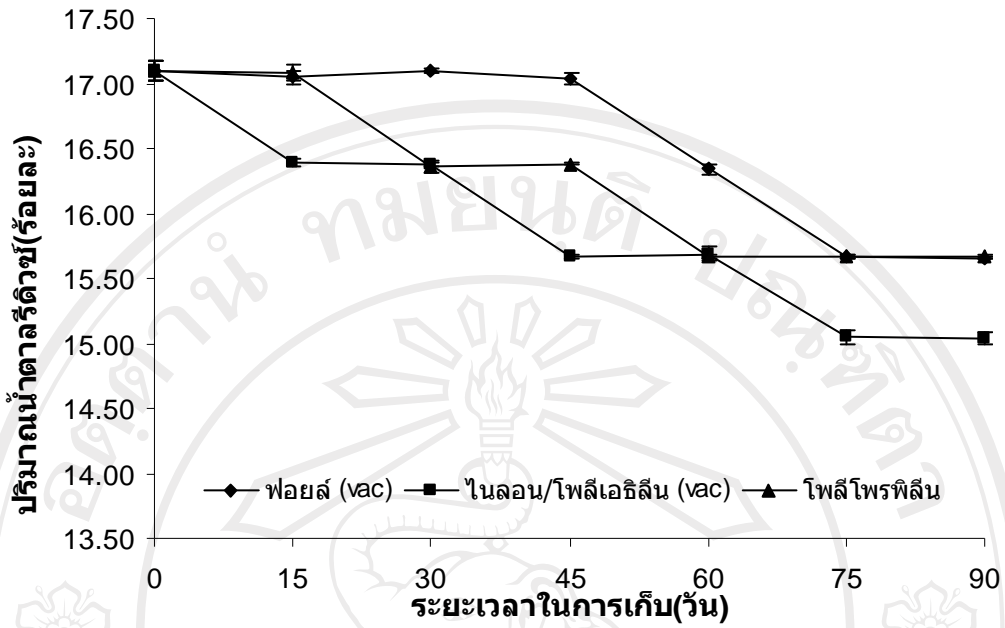


รูป 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

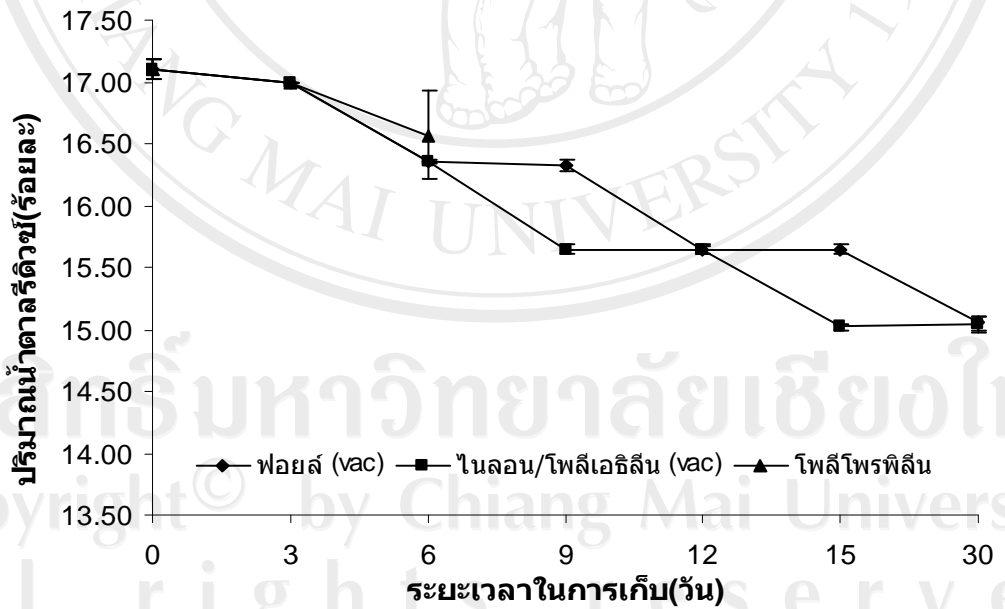


รูป 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและระยะเวลาในการเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

5. ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ จากการทดลองพบว่าเยลลี่ลำไยที่เก็บในบรรจุภัณฑ์แตกต่างกันทั้งที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพียงเล็กน้อย โดยสังเกตได้ว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าลดลงตามระยะเวลาเก็บที่นานขึ้น ดังรูป 4.38 และรูป 4.39 ซึ่งการลดลงของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ดังกล่าวอาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (nonenzymatic browning) โดยน้ำตาลรีดิวซ์ ถือว่าเป็นสารตั้งต้นตัวสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดสารสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ แต่จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าลดลงน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านค่าสี โดยพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย สาเหตุอาจเป็นเพราะระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาอยู่ในช่วงที่สั้นเกินไปจึงเห็นการเปลี่ยนแปลงทางด้านต่างๆไม่ชัดเจน นอกจากนี้การลดลงของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์อาจมีสาเหตุจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นอาหารในการเจริญเติบโต



รูป 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาดรีดิวซ์และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส



รูป 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาดรีดิวซ์และระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

#### 4.4.3 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลชีววิทยาของเยลลี่ลำไย

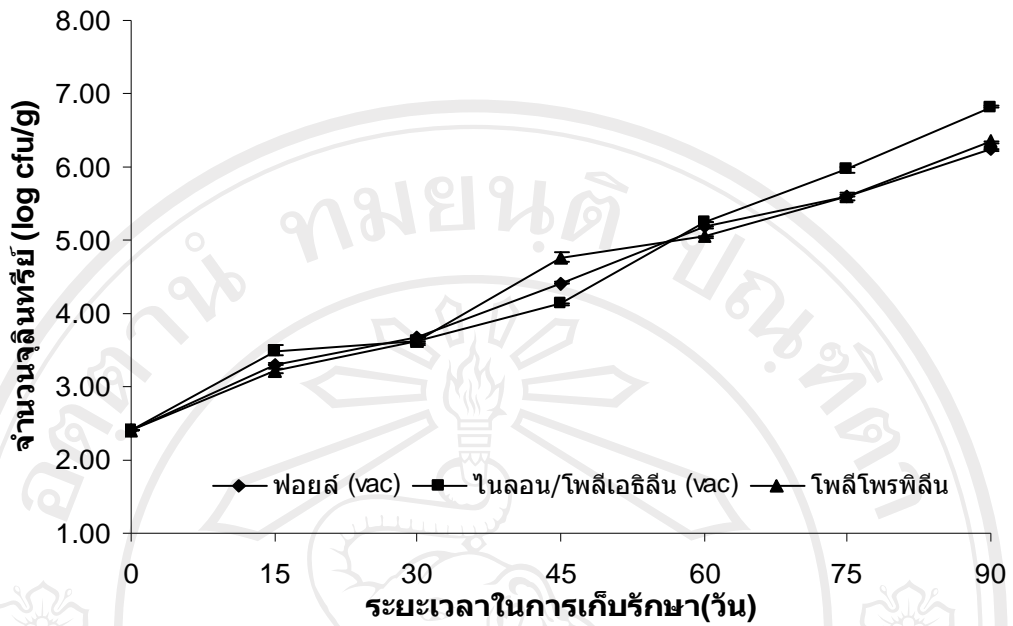
การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลชีววิทยาของเยลลี่ลำไยที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส แสดงดังตาราง ข.9 และตาราง ข.10 (ภาคผนวก ข)

ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด จากการทดลองพบว่า เยลลี่ลำไยที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 และ 30 องศาเซลเซียส ในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกัน มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการเก็บนานขึ้น ดังรูป 4.40 และรูป 4.41 จากการเก็บเยลลี่ลำไยที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่าการบรรจุเยลลี่ลำไยในถุงไนลอน/โพลีเอทิลีน ให้ค่าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดมากที่สุดคือ 6.82 log cfu/g ดังตาราง ข.9 (ภาคผนวก ข) ในขณะที่เยลลี่ลำไยที่เก็บในถุงฟอยล์ และถุงโพลีโพรพิลีน ให้ค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) โดยมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเป็น 6.23 และ 6.34 log cfu/g ตามลำดับ ดังตาราง ข.9 (ภาคผนวก ข) ซึ่งผลที่ได้ไปในทิศทางเดียวกับการเก็บเยลลี่ลำไยไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วัน โดยพบว่า เยลลี่ลำไยที่บรรจุในถุงไนลอน/โพลีเอทิลีน มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดมากกว่าการบรรจุในถุงฟอยล์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p\leq 0.05$ ) จากมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน กำหนดว่าผลิตภัณฑ์เยลลี่แห่งจะต้องมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 4 log cfu/g (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547) ซึ่งจากการทดลองพบว่าเยลลี่ลำไยที่บรรจุในถุงฟอยล์ ถุงไนลอน/โพลีเอทิลีน และ ถุงโพลีโพรพิลีน และเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 วัน มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 4 log cfu/g สำหรับตัวอย่างเยลลี่ลำไยที่เก็บที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เฉพาะบรรจุในถุงฟอยล์ และ ถุงไนลอน/โพลีเอทิลีน เท่านั้นที่มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนด โดยมีระยะเวลาในการเก็บรักษา 6 วัน ส่วนเยลลี่ลำไยที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนมีระยะเวลาในการเก็บรักษาเพียง 3 วัน

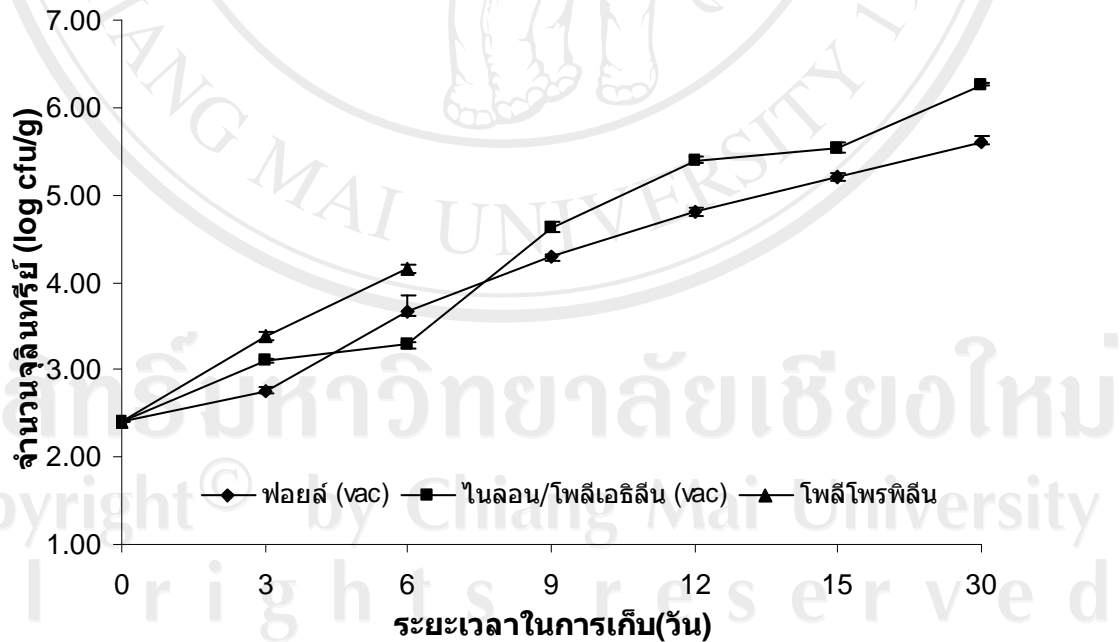
ปริมาณยีสต์และรา จากการทดลองพบว่า เยลลี่ลำไยที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วัน และที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 วัน ในบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันมีปริมาณยีสต์และราน้อยกว่า 100 โคโลนีต่อกรัม ดังตาราง ข.9 และตาราง ข.10 (ภาคผนวก ข) ซึ่งตรงตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนดไว้ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2547)

ดังนั้นสรุปได้ว่าเยลลี่ลำไยที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสในถุงโพลีโพรพิลีน บรรจุในสภาวะบรรยากาศ มีอายุการเก็บรักษาเพียง 3 วัน ถุงฟอยล์และถุงไนลอน/โพลีเอทิลีน บรรจุในสภาวะสุญญากาศ มีอายุการเก็บรักษา 6 วัน จะเห็นว่าการเก็บรักษาในสภาวะสุญญากาศสามารถเพิ่มอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้ในระดับหนึ่ง ขณะที่เยลลี่ลำไยที่เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีอายุการเก็บรักษา 30 วัน





รูป 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิตั้ง 4 องศาเซลเซียส



รูป 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและระยะเวลาในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิตั้ง 30 องศาเซลเซียส