

บทที่ 4

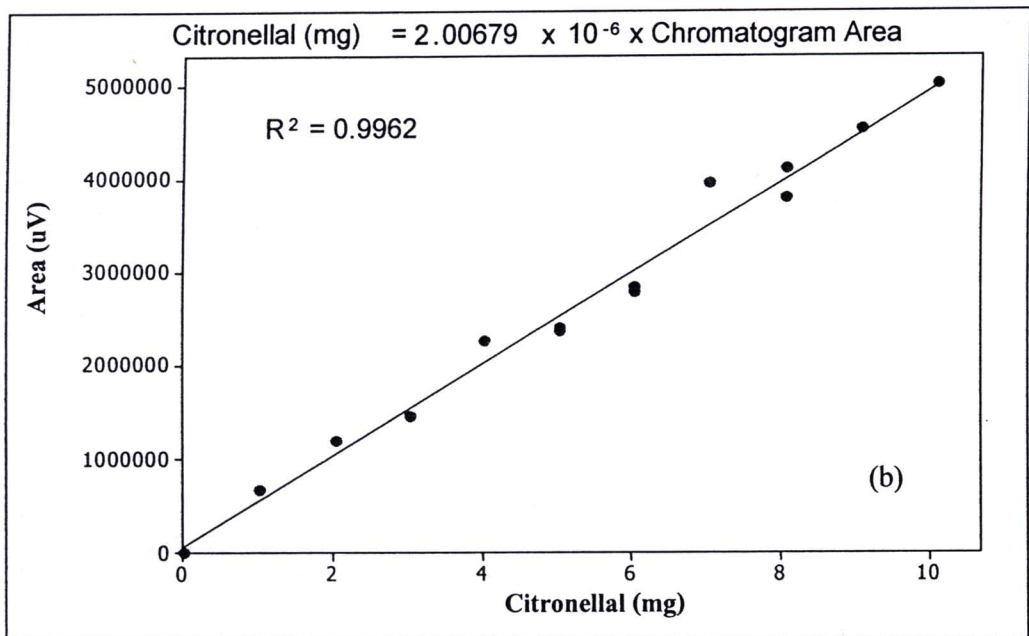
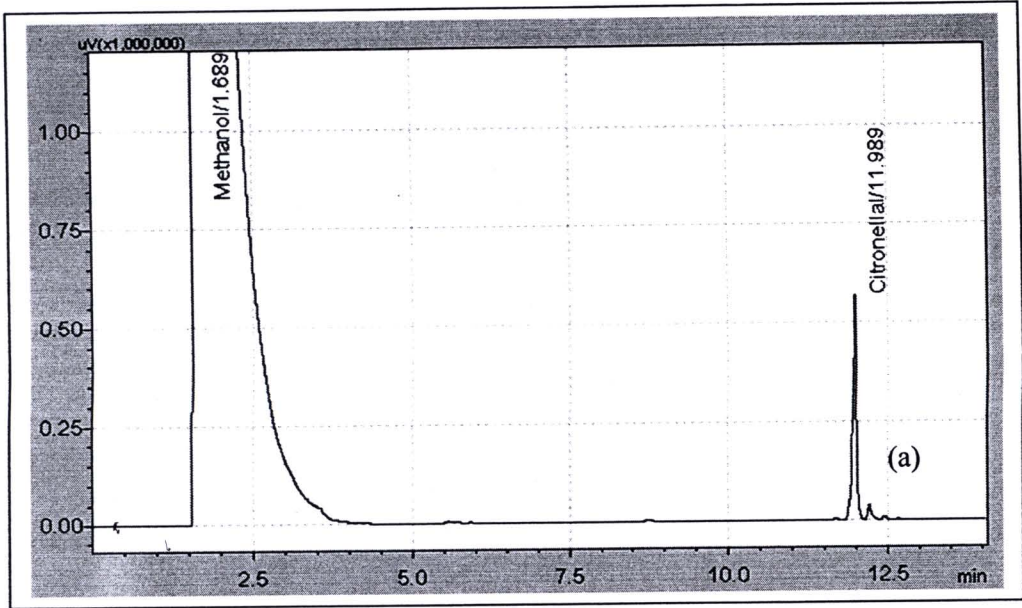
ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การวิเคราะห์ปริมาณ Citronellal โดยวิธี Headspace Solid Phase Micro Extraction Gas Chromatography

ในการวิเคราะห์พื้นที่โครมาโตแกรม (chromatogram area) ของสารละลาย citronellal ในเมธานอล 200 ไมโครลิตรที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง gas chromatography ได้ข้อมูลแสดงดังตาราง 4.1 ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ ได้สมการความสัมพันธ์ดังภาพ 4.1 คือ ปริมาณ citronellal (mg) = 2.00679×10^{-6} x chromatogram area ความสัมพันธ์นี้มีค่า $R^2 = 0.9962$, $p < 0.0001$ จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์นี้มีค่าสูงมาก สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณ citronellal ในตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งต่อไป

ตาราง 4.1 พื้นที่ของ citronellal ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย gas chromatography

Citronellal (mg)	Area (uV)
0.0000	0.0
1.0092	663,248.1
2.0184	1,187,361.1
3.0276	1,453,622.9
4.0368	2,256,778.6
5.0460	2,395,510.1
5.0460	2,375,269.2
6.0552	2,847,418.7
6.0552	2,785,237.5
7.0644	3,972,790.6
8.0736	3,816,093.7
8.0736	4,127,601.5
9.0828	4,541,322.6
10.0920	5,016,908.3

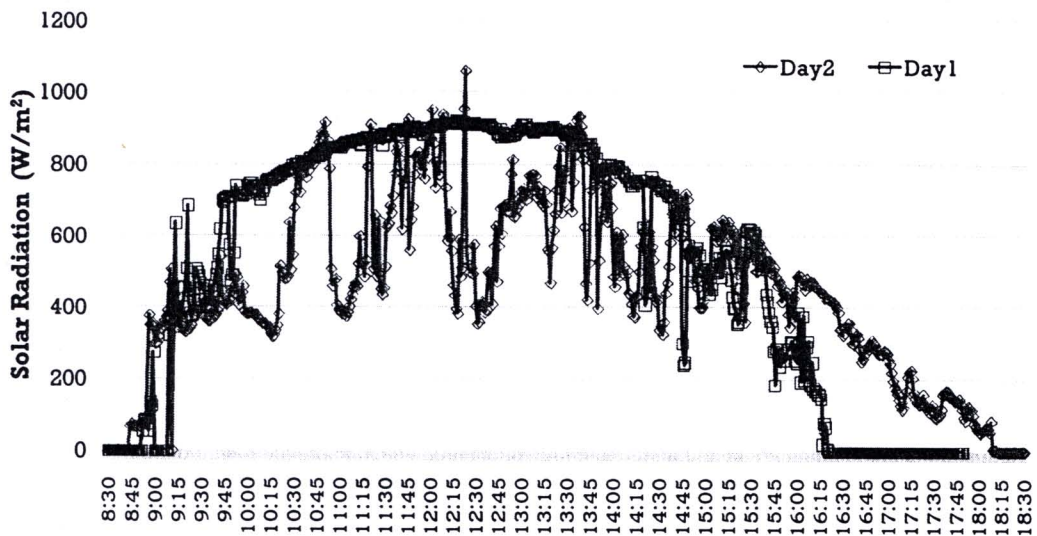


ภาพ 4.1 โครมาโตแกรมของ citronellal (a) และ
กราฟมาตรฐานของ citronellal ต่อพื้นที่โครมาโตแกรม (μV) (b)

4.2 วิธีการอบแห้งต่อคุณภาพใบมะกรูด

4.2.1 การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ (solar radiation) ระหว่างอบโดยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์

ในระหว่างการอบแห้งโดยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ ค่าการแผ่รังสีแสดงดังภาพ 4.2 พบว่าวันแรกของการอบแห้ง ช่วงเวลา 12.15-12.30 นาฬิกา เป็นช่วงเวลาที่รังสีดวงอาทิตย์เข้มข้นที่สุด คือ 923.1 w/m^2 โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดการอบอยู่ที่ 542.8 w/m^2 ส่วนวันที่สองของการอบแห้ง พบว่าความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด 1061.9 w/m^2 ช่วง 12.00-12.15 นาฬิกา โดยมีค่าเฉลี่ยระหว่างการอบ 453.9 w/m^2 ส่วนการอบแห้งวันที่ 3 นั้น ข้อมูลสูญหายเนื่องจากแบตเตอรี่ในเครื่องบันทึกเกิดชำรุด



ภาพ 4.2 การแผ่รังสีดวงอาทิตย์ระหว่างการอบแห้งโดยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์

4.2.2 อัตราการลดความชื้นของใบมะกรูดโดยตู้อบลมร้อนแบบภาค

ในการศึกษาการลดลงของความชื้นในใบมะกรูดที่ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C นั้น ได้ข้อมูลดังตาราง 4.2 โดยค่าอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) คำนวณได้จาก [ความชื้น (dry basis) ณ เวลา นั้น - ความชื้น (dry basis) ณ จุดสมดุล]หารด้วย [ความชื้น (dry basis) ณ จุดเริ่มต้น - ความชื้น (dry basis) ณ จุดสมดุล] หรือแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Moisture Ratio (MR)} = \frac{\text{Moisture}_{t, db} - \text{Moisture}_{equilibrium, db}}{\text{Moisture}_{initial, db} - \text{Moisture}_{equilibrium, db}}$$

โดยที่ t หมายถึง ระยะเวลา ณ นาทีใด ๆ
db หมายถึง dry basis

เมื่อนำข้อมูลอัตราส่วนความชื้นไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยใช้ model ต่าง ๆ ได้แก่ Page, Henderson and Pabis, Lewis model ได้ข้อสรุปดังตาราง 4.3 กล่าวคือ พบว่า Page model มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนความชื้นสูงที่สุด โดยมีค่า adjusted R² สูงที่สุด คือ 0.9975 สูงกว่า Henderson and Pabis และ Lewis model ที่มีค่า adjusted R² 0.9880 และ 0.9877 ตามลำดับ ค่า Root Mmean Square Error (RMSE) และค่า reduced chi-square ของ Page model มีค่าต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่า Page model สามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในใบมะกรูดขณะอบแห้งได้ดีกว่า Henderson and Pabis และ Lewis model model เมื่อนำข้อมูลไปวาดกราฟโดยใช้ model ต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 4.3

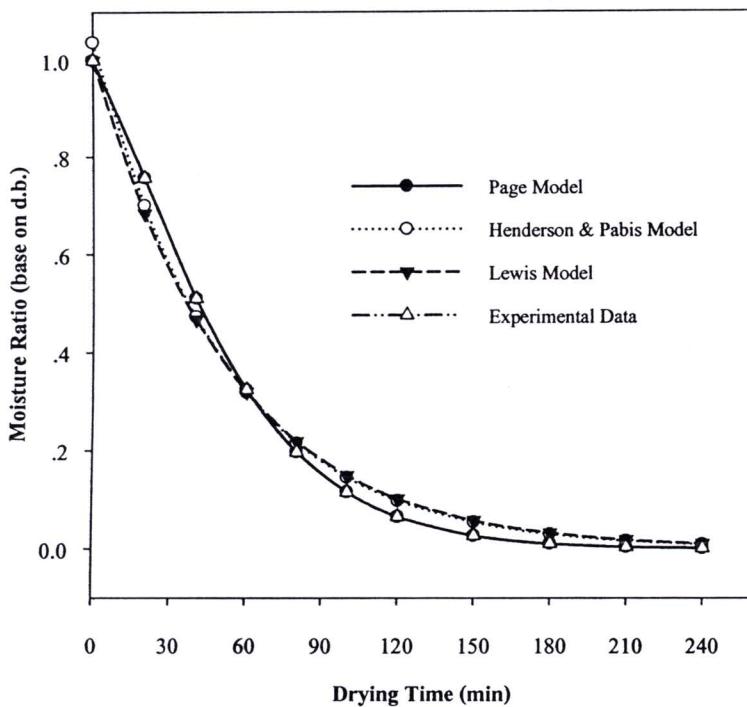
ตาราง 4.2 อัตราการลดลงของความชื้นของใบมะกรูดที่อบโดยตู้อบลมร้อนแบบถาด

ระยะเวลาอบ (นาที)	ความชื้น (%, wet basis)	ความชื้น (%, dry basis)	Moisture Ratio
0	67.79	210.46	1.0000
20	60.84	155.39	0.7323
40	53.77	116.29	0.5422
60	40.80	68.93	0.3119
80	30.64	44.18	0.1916
100	24.53	32.51	0.1349
120	12.53	14.33	0.0465
150	7.95	8.63	0.0188
180	6.29	6.71	0.0094
210	5.14	5.42	0.0031
240	4.55	4.77	0.0000

ตาราง 4.3 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของแต่ละ model ในการวิเคราะห์แบบ regression จากการอบด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาด

Model name	Equation	RMSE	Adjusted R ²	Reduced chi-square
Page	$MR = \exp(-0.0062 t^{1.2719})$	0.0170	0.9975	0.000291
Henderson and Pabis	$MR = 1.0373 \exp(-0.0197 t)$	0.0374	0.9880	0.001402
Lewis	$MR = \exp(-0.0190 t)$	0.0380	0.9877	0.001443

หมายเหตุ : t = drying time (minute), MR = Moisture ratio , RMSE = root mean square error



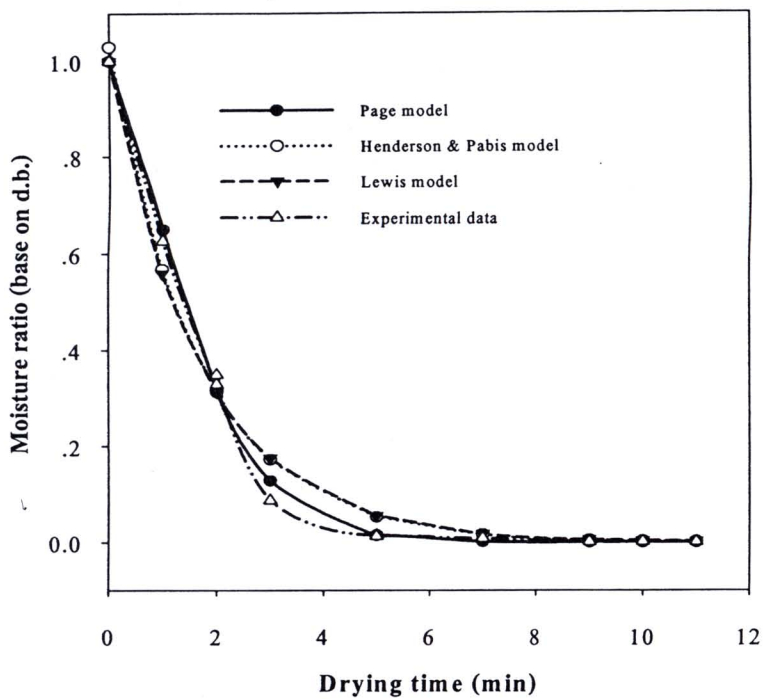
ภาพ 4.3 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากข้อมูลจริงและทำนายจาก model ต่าง ๆ ของใบมะกรูดที่อบแห้งโดยตู้อบลมร้อนแบบถาด

4.2.3 อัตราการลดลงของความชื้นของใบมะกรูดโดยตูบไมโครเวฟสุญญากาศ

ในการศึกษาการลดลงของความชื้นในใบมะกรูดที่อบแห้ง โดยตูบไมโครเวฟสุญญากาศ นั้น ได้ข้อมูลดังตาราง 4.4 เมื่อนำข้อมูลอัตราส่วนความชื้นไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยใช้ Model ต่าง ๆ ได้แก่ Page, Henderson and Pabis, Lewis model ได้ข้อสรุปดังตาราง 4.5 กล่าวคือ พบว่า Page model มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนความชื้นสูงที่สุด โดยมีค่า adjusted R^2 สูงที่สุด คือ 0.9965 สูงกว่า Henderson and Pabis และ Lewis model ที่มีค่า adjusted R^2 0.9844 และ 0.9834 ตามลำดับ ค่า root mean square error และค่า reduced chi-square ของ Page model มีค่าต่ำที่สุด คือ 0.0213 และ 0.00045 ตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลไปวาดกราฟโดยใช้ model ต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า Page model สามารถใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในใบมะกรูดขณะอบแห้งได้ดีกว่า Henderson and Pabis และ Lewis model ซึ่งให้ผลการทดลองในทำนองเดียวกันกับการอบแห้งโดยตูบลมร้อนแบบถาด

ตาราง 4.4 อัตราการลดลงของความชื้นของใบมะกรูดที่อบโดยตูบไมโครเวฟสุญญากาศ

ระยะเวลาอบ (นาที)	ความชื้น (%, wet basis)	ความชื้น (%, dry basis)	Moisture Ratio
0	65.76	192.21	1.00000
1	54.85	121.46	0.62567
2	39.47	65.22	0.32809
2	40.83	69.10	0.34860
3	16.39	19.61	0.08672
5	5.60	5.93	0.01433
5	5.21	5.50	0.01206
7	4.40	4.61	0.00734
9	3.14	3.24	0.00011
10	3.22	3.33	0.00060
11	3.21	3.22	0.00000



ภาพ 4.4 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากข้อมูลจริงและทำนายจาก model ต่าง ๆ ของใบมะกรูดที่อบแห้งโดยตู้อบไมโครเวฟสุญญากาศ

ตาราง 4.5 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ของแต่ละ Model ในการวิเคราะห์แบบ regression จากการอบด้วยตู้อบไมโครเวฟสุญญากาศ

Model name	Equation	RMSE	Adjusted R ²	Reduced chi-square
Page	$MR = \exp(-0.4329 t^{1.4183})$	0.0201	0.9967	0.000453
Henderson and Pabis	$MR = 1.0296 \exp(-0.5963 t)$	0.0451	0.9844	0.002706
Lewis	$MR = \exp(-0.5918 t)$	0.0438	0.9834	0.002250

หมายเหตุ : t = drying time (minute), MR = Moisture ratio , RMSE = root mean square error

4.2.4 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของใบมะกรูดที่อบแห้งโดยวิธีต่าง ๆ

ในการอบแห้งใบมะกรูดโดยวิธีการต่าง ๆ นั้น พบว่า ค่าสี L* a* b* C* และ Hue angle มีค่าไม่แตกต่างกัน ($P \geq 0.05$) รวมทั้งค่า a_w และปริมาณ citronellal ส่วนปริมาณความชื้น

ที่ได้จากกระบวนการอบแห้งทั้ง 3 วิธีนั้น การอบด้วยไมโครเวฟสุญญากาศ จะมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าวิธีการอบอื่นเล็กน้อย (ดังตาราง 4.6)

ตาราง 4.6 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ของใบมะกรูดอบแห้งจากการอบแห้งวิธีต่าง ๆ

คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ	ตู้อบ		
	พลังงานแสงอาทิตย์	ลมร้อนแบบถาด	ไมโครเวฟสุญญากาศ
L*	53.790a ± 1.115	53.527a ± 2.147	53.073a ± 0.918
a*	-11.495a ± 0.338	-10.998a ± 0.102	-11.242a ± 0.502
b*	27.317a ± 0.633	27.783a ± 1.119	28.765a ± 0.513
C*	29.642a ± 0.472	29.882a ± 1.056	30.888a ± 0.461
Hue angle	112.84a ± 1.045	111.62a ± 0.728	111.35a ± 1.021
Moisture content (% d.b.)	6.69a ± 0.38	6.64a ± 0.80	5.82b ± 0.22
a_w	0.424a ± 0.025	0.413a ± 0.044	0.424a ± 0.023
Citronellal (% d.b.)	1.81a ± 0.06	2.14a ± 0.52	1.81a ± 0.38

หมายเหตุ ค่าของข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันซึ่งกำกับค่าเฉลี่ยในแต่ละแถว แสดงว่าค่าเฉลี่ยเหล่านั้นๆ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าของตู้อบทั้ง 3 แบบพบว่า ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาอากาศร้อนเข้าสู่ห้องอบมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 1.667 kwh/กิโลกรัมวัตถุดิบสด ส่วนตู้อบลมร้อนแบบถาดใช้พลังงานไฟฟ้า 4.167 kwh/กิโลกรัมวัตถุดิบสด และตู้อบไมโครเวฟสุญญากาศใช้พลังงานไฟฟ้า 8.801 kwh / กิโลกรัมวัตถุดิบสด อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแบบตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เวลาอบนานที่สุดคือ 8-10 ชั่วโมง ขณะที่ตู้อบลมร้อนแบบถาดใช้เวลาอบนาน 4 ชั่วโมง ส่วนตู้อบไมโครเวฟสุญญากาศใช้เวลา 10.5 นาที

อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์เกิดจาก ระบบไหลเวียนของอากาศที่ได้ติดตั้งพัดลมระบายอากาศ ซึ่งยังคงทำให้มีต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าอยู่บ้าง แต่อย่างน้อยกว่าตู้อบลมร้อนแบบถาดอยู่ประมาณ 3 เท่า ส่วนตู้อบไมโครเวฟสุญญากาศใช้พลังงานสูงที่สุดเนื่องจากมีระบบสุญญากาศ และระบบทำความเย็นสำหรับดักจับไอน้ำที่ระเหยออกมา จึงทำให้

สิ้นเปลืองพลังงานมากที่สุด โดยสูงกว่าคู่อุปพลังงานแสงอาทิตย์ประมาณ 6 เท่า อย่างไรก็ตาม การออกแบบไมโครเวฟสุญญากาศ ใช้ระยะเวลาสั้นกว่า

4.3 อายุการเก็บรักษาของใบมะกรูดอบแห้งป่น

4.3.1 ปริมาณ citronellal ต่อการยอมรับของผู้บริโภค

จากการผสมใบมะกรูดอบแห้งป่นเก่าและใหม่ ทำให้ทราบปริมาณ citronellal ในตัวอย่างดังตาราง 4.7 จากการวิเคราะห์หรีเกรสชัน พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของใบมะกรูดอบแห้งป่น และปริมาณ citronellal อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.001$) ดังภาพ 4.5 และดังสมการ โดยมี $\text{adjusted } R^2 = 0.9918$

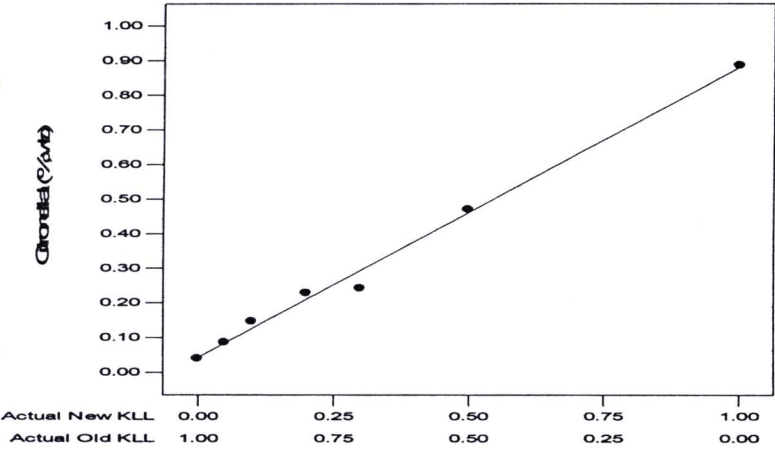
$$\text{citronellal (\%)} = 0.88118 * \text{New GKLL} + 0.042435 * \text{Old GKLL}$$

โดยที่ GKLL = Grounded Kaffir Lime Leaves

เมื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างการยอมรับของผู้บริโภคต่อปริมาณ citronellal ในตัวอย่างใบมะกรูดดังกล่าว พบว่า มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญดังตาราง 4.8 โดยพบว่า ทั้งคะแนนความชอบด้านสี กลิ่นและการยอมรับโดยรวมจะเพิ่มขึ้นหากปริมาณ citronellal ในตัวอย่างเพิ่มขึ้น Grosso and Resurreccion (2002) ได้ใช้เกณฑ์ค่าเฉลี่ยของคะแนนความชอบของผู้ทดสอบน้อยกว่า 5 ถือว่าผลิตภัณฑ์นั้นไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค หรือเป็นจุดที่สิ้นสุดอายุการเก็บในการประเมินอายุการเก็บรักษาของถั่วลิสงเคลือบและถั่วลิสงคั่ว ส่วน Lee and Resurreccion (2006) ได้ใช้คะแนนความชอบที่ต่ำกว่า 5 เช่นกันในการศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อถั่วลิสงคั่วในการเก็บที่อุณหภูมิและสภาวะต่างๆ นอกจากนี้ยังมีอีกหลายงานวิจัยที่ใช้คะแนนความชอบน้อยกว่า 5 เป็นจุดสิ้นสุดอายุการเก็บรักษา Labuza and Schmidl, 1985; Labuza and Schmidl, 1988) เมื่อใช้คะแนนความชอบเท่ากับ 5 แทนในสมการดังตาราง 4.8 พบว่า ปริมาณ citronellal ในตัวอย่างเท่ากับ 0.097, 0.040 และ 0.064 % สำหรับความชอบด้านสี กลิ่นใบมะกรูดและความชอบโดยรวมตามลำดับ เห็นได้ว่า ความเข้มข้นของ citronellal ของสำหรับความชอบด้านสีมีค่าสูงที่สุด จึงใช้ปริมาณ citronellal 0.097 % นี้เป็นจุดที่แสดงการสิ้นสุดของการยอมรับในใบมะกรูดอบแห้งป่นต่อไป

ตาราง 4.7 ปริมาณ citronellal ในตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งป่น

อัตราส่วนของใบมะกรูดอบแห้งป่น		Citronellal (%, wet basis)	การทดสอบความชอบ		
ใบมะกรูดอบแห้ง (ใหม่)	ใบมะกรูดอบแห้ง (เก่า)		สี	กลิ่น	โดยรวม
1.00	0.00	0.887	-	-	-
0.50	0.50	0.471	6.7±1.5	6.3±1.4	6.3±1.4
0.30	0.70	0.242	6.7±1.1	6.5±1.3	6.6±1.0
0.20	0.80	0.228	6.3±0.9	6.1±1.3	6.2±1.0
0.10	0.90	0.146	5.7±1.0	5.7±1.1	5.7±1.0
0.05	0.95	0.086	4.8±1.3	5.4±1.4	5.1±1.3
0.00	1.00	0.040	4.1±1.5	5.2±1.5	4.8±1.3



ภาพ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนใบมะกรูดอบแห้งป่นใหม่และเก่า
ต่อปริมาณ citroneallal (%)

ตาราง 4.8 การยอมรับของผู้บริโภคต่อปริมาณ citronellal ในตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งป่นผสม

สมการรีเกรสชัน	Adjusted R ²
สี = 3.32 + 19.89*Citronellal – 28.93*Citronellal ²	0.9890
กลิ่นใบมะกรูด = 4.77 + 9.14*Citronellal – 12.39*Citronellal ²	0.8188
การยอมรับโดยรวม = 4.19 + 14.04*Citronellal – 20.30*Citronellal ²	0.9448

* การทดสอบผู้บริโภครูปแบบ 9-points hedonic scale

ตาราง 4.9 ปริมาณ citronellal ในใบมะกรูดอบแห้งปนผสม หากคะแนนความชอบเท่ากับ 5

คุณลักษณะ	ปริมาณ Citronellal (%) หากมีคะแนนความชอบเท่ากับ 5
สี	0.097
กลิ่นใบมะกรูด	0.040
การยอมรับโดยรวม	0.064

จากการสอบถามผู้บริโภคเกี่ยวกับการยอมรับในผลิตภัณฑ์ พบว่า ที่อัตราส่วนใบมะกรูดอบแห้งปนใหม่และเก่า ที่ผู้บริโภคยอมรับ คือ 50 : 50, 30 : 70 และ 20 : 80 ตามลำดับ ($p < 0.05$) ขณะที่อัตราส่วน 10 : 90, 5 : 95 และ 0 : 100 นั้น ผู้บริโภคให้การยอมรับในสัดส่วนเท่ากับการไม่ยอมรับในผลิตภัณฑ์ ($P > 0.05$) หรืออาจกล่าวได้ว่า ที่อัตราส่วน 10 : 90 เป็นอัตราส่วนที่ผู้บริโภคเริ่มไม่ยอมรับในผลิตภัณฑ์แล้วนั่นเอง และที่อัตราส่วนดังกล่าวนี้ มีปริมาณ citronellal เท่ากับ 0.146 % ในขณะที่อัตราส่วนของใบมะกรูดอบแห้งปนใหม่ที่น้อยที่สุดที่ผู้บริโภคยอมรับคืออัตราส่วน 20 : 80 ซึ่งมีปริมาณ citronellal เท่ากับ 0.228 % ซึ่งสูงกว่าระดับในการทดสอบการยอมรับแบบ 9-point hedonic scale (จุดสิ้นสุดการยอมรับมีปริมาณ citronellal เท่ากับ 0.097 %) จึงใช้ปริมาณ citronellal 0.228 % เป็นจุดสิ้นสุดการยอมรับของผลิตภัณฑ์

ตาราง 4.10 การยอมรับของผู้บริโภคต่ออัตราส่วนใบมะกรูดอบแห้งปนในอัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนของใบมะกรูดอบแห้งปน		การยอมรับของผู้บริโภค		Chi-Square	P
ใบมะกรูดอบแห้ง (ใหม่)	ใบมะกรูดอบแห้ง (เก่า)	ยอมรับ	ไม่ยอมรับ		
0.50	0.50	43	7	25.92	< 0.01
0.30	0.70	44	6	28.88	< 0.01
0.20	0.80	41	9	20.48	< 0.01
0.10	0.90	31	19	2.88	> 0.05
0.05	0.95	23	27	0.32	> 0.05
0.00	1.00	20	30	2.00	> 0.05

4.3.2 อายุการเก็บรักษาของใบมะกรูดอบแห้งป่น

ใบมะกรูดอบแห้งป่นที่ใช้ในการศึกษาอายุการเก็บรักษาแสดงดังตาราง 4.11 พบว่า ค่าสี L^* a^* b^* C^* a_w ความชื้น และปริมาณ citronellal มีค่าไม่ต่างกัน ยกเว้นเฉพาะค่า Hue angle เท่านั้น ที่การอบแห้งแบบพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าสูงที่สุด รองลงมาเป็นการอบแห้งลมร้อนแบบถาด และมีค่าต่ำที่สุดได้แก่ใบมะกรูดที่อบแห้งโดยวิธีไมโครเวฟสุญญากาศ

ตาราง 4.11 คุณภาพทางเคมีและกายภาพเริ่มต้นสำหรับใบมะกรูดที่ใช้ศึกษาอายุการเก็บรักษา

ค่าสังเกต	วิธีการอบแห้ง		
	SD [#]	TD	VMD
L^*	53.650a $\pm$ 0.750	54.430a $\pm$ 0.679	53.705a $\pm$ 0.516
a^*	-11.540a $\pm$ 0.325	-11.215a $\pm$ 0.191	-11.030a $\pm$ 0.113
b^*	27.410a $\pm$ 0.679	28.230a $\pm$ 0.537	28.820a $\pm$ 0.354
C^*	29.740a $\pm$ 0.750	30.375a $\pm$ 0.573	30.860a $\pm$ 0.368
Hue angle	112.830a $\pm$ 0.071	111.660b $\pm$ 0.035	110.950c $\pm$ 0.035
a_w	0.415a $\pm$ 0.013	0.434a $\pm$ 0.016	0.444a $\pm$ 0.022
Moisture (%)	6.20a $\pm$ 0.16	6.18a $\pm$ 0.20	5.60a $\pm$ 0.18
Citronellal(%)	1.10a $\pm$ 0.38	1.22a $\pm$ 0.26	1.36a $\pm$ 0.33

หมายเหตุ ค่าของข้อมูลแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันซึ่งกำกับค่าเฉลี่ยในแต่ละแถว แสดงว่าค่าเฉลี่ยคู่นั้นๆ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

SD = solar dryer, TD = tray dryer, VMD = vacuum microwave dryer

เมื่อนำข้อมูลปริมาณ citronellal ในแต่ละสภาวะไปทำการวิเคราะห์รีเกรสชัน จะได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ citronellal กับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในสภาวะเร่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยค่าความความชันของกราฟที่ได้สำหรับสมการลำดับศูนย์ (zero order) มีค่าเท่ากับ $-k$ (รุ่งนภา, 2540) สำหรับใบมะกรูดอบแห้งป่นที่บรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ (ตาราง 4.12) และในถุงโพลีโพรพิลีน (ตาราง 4.13) ตามลำดับ

เมื่อได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ แล้ว นำไปหาความสัมพันธ์ของค่า k ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (activated energy, E_a) โดยใช้สมการของ Arrhenius (Singh, 1994) ดังนี้

$$\ln k = \ln k_0 - E_a / RT$$

โดยที่

k = ค่าคงที่ของอัตราปฏิกิริยา (reaction rate constant)

k_0 = pre-exponential factor

E_a = ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (activated energy)

R = gas constant = 8.314 J/mole.K

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

จากสมการของ Arrhenius สามารถหาค่า E_a ได้โดยการสร้างสมการ regression ระหว่างค่า $\ln k$ กับ $1/T$ (K) แสดงดังภาพ 4.6 - 4.11 และนำค่าความชันของสมการ มาคำนวณหาค่า E_a ดังสมการ (Singh, 1994)

$$E_a \text{ (KJ/mole.K)} = \text{ความชันของสมการ} \times R$$

โดยที่ $R = \text{gas constant} = 8.314 \times 10^{-3} \text{ KJ/mole.K}$

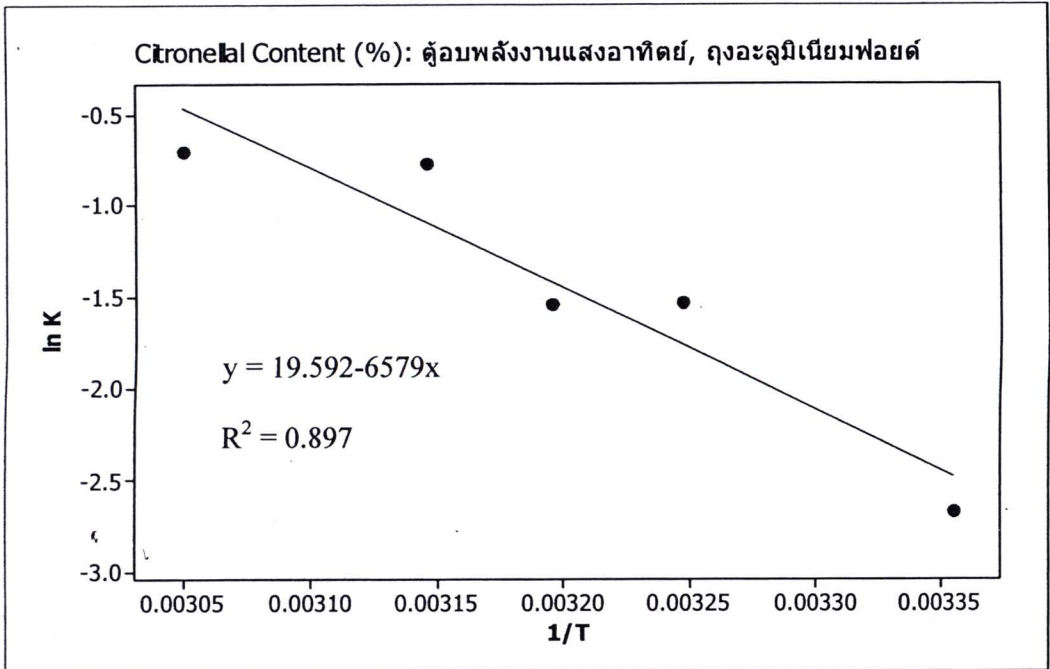
จาก Arrhenius plot สามารถทราบค่า E_a ในการเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณ citronellal แสดงดังตาราง 4.14 โดยพบว่า ไบมะกรูดอบแห้งป่นที่อบแห้งโดยใช้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่า E_a สูงกว่าการอบแห้งโดยตู้อบลมร้อนแบบถาดและตู้อบไมโครเวฟสุญญากาศ ไม่ว่าจะบรรจุถุงด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์หรือถุงโพลีโพรพิลีน อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบทางสถิติพบว่า ค่า E_a ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ citronellal นั้น ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ระหว่างบรรจุภัณฑ์ทั้งสองชนิด รวมถึงวิธีการอบแห้งด้วย

ตาราง 4.12 ค่าตัวแปรจากสมการความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ citronellal กับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในสภาวะเร่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับใบมะกรูดอบแห้งป่นที่บรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์

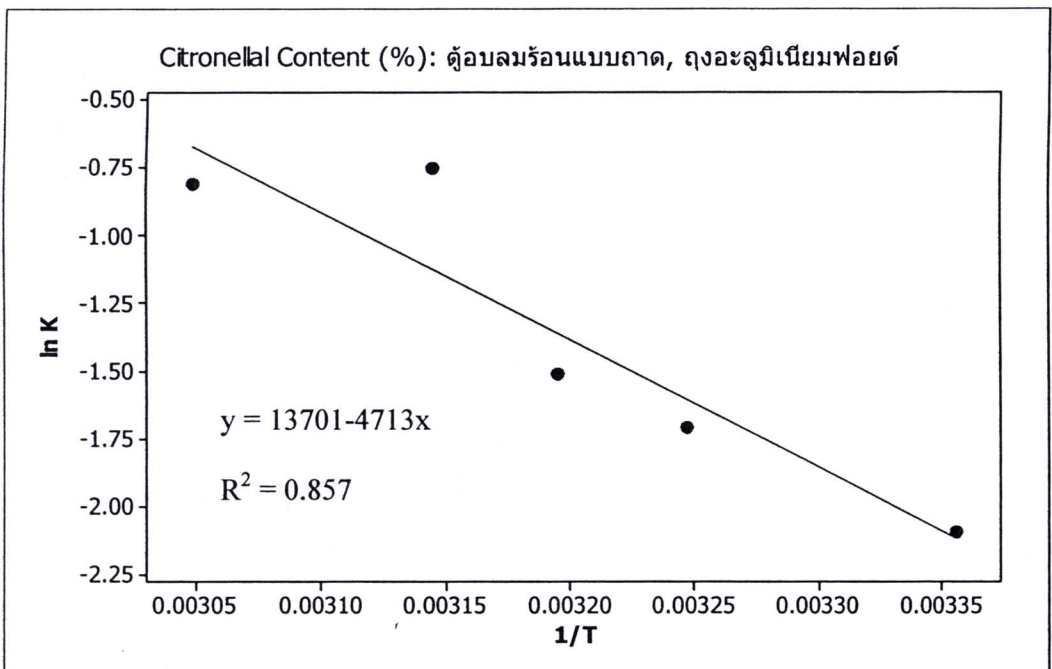
คุณภาพ	ตู้อบ	อุณหภูมิ (°C)	constant rate, k (หน่วย / สัปดาห์)	k ₀ (หน่วย / สัปดาห์)	R ²
ทางเคมี					
Citronellal % (wet basis)	Solar	25	0.0947	1.2189	0.692
	Solar	35	0.2146	1.0896	0.646
	Solar	40	0.2131	1.1230	0.529
	Solar	45	0.4601	1.0891	0.657
	Solar	55	0.4954	1.0044	0.581
	Tray	25	0.1236	1.1484	0.640
	Tray	35	0.1814	1.2158	0.616
	Tray	40	0.2203	1.1467	0.557
	Tray	45	0.4739	1.2333	0.652
	Tray	55	0.4460	1.0989	0.467
	Microwave	25	0.1209	1.2884	0.493
	Microwave	35	0.2141	1.3222	0.448
	Microwave	40	0.2459	1.3162	0.534
	Microwave	45	0.5449	1.2477	0.499
	Microwave	55	0.5449	1.2461	0.493

ตาราง 4.13 ค่าตัวแปรจากสมการความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ citronellal กับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในสภาวะเร่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับใบมะกรูดอบแห้งป่นที่บรรจุในถุงโพลีโพรพิลีน

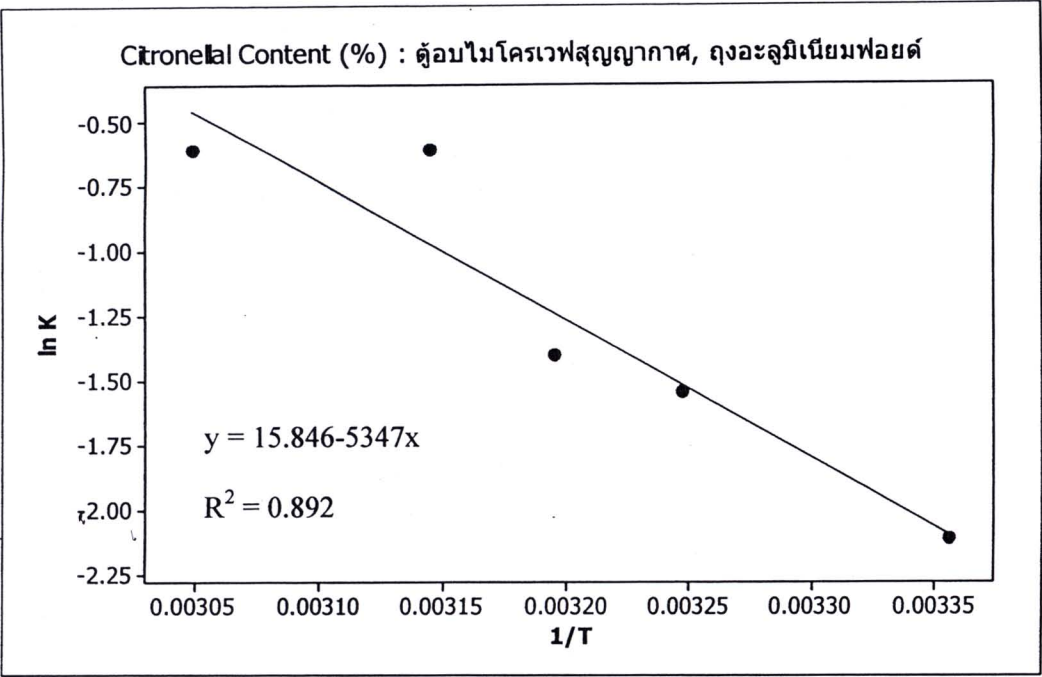
คุณภาพ	ตู้อบ	อุณหภูมิ (°C)	constant rate, k (หน่วย / สัปดาห์)	k ₀ (หน่วย / สัปดาห์)	R ²
ทางเคมี					
Citronellal % (wet basis)	Solar	25	0.1016	1.0567	0.517
	Solar	35	0.2851	1.0834	0.765
	Solar	40	0.2935	1.0009	0.655
	Solar	45	0.5847	1.0031	0.657
	Solar	55	0.5801	0.9976	0.643
	Tray	25	0.1458	1.1543	0.719
	Tray	35	0.3180	1.1972	0.799
	Tray	40	0.3215	1.1319	0.719
	Tray	45	0.5919	1.1018	0.618
	Tray	55	0.6411	1.1115	0.682
	Microwave	25	0.1626	1.2805	0.634
	Microwave	35	0.3635	1.3351	0.738
	Microwave	40	0.3608	1.2427	0.631
	Microwave	45	0.7303	1.2437	0.638
	Microwave	55	0.7275	1.2382	0.628



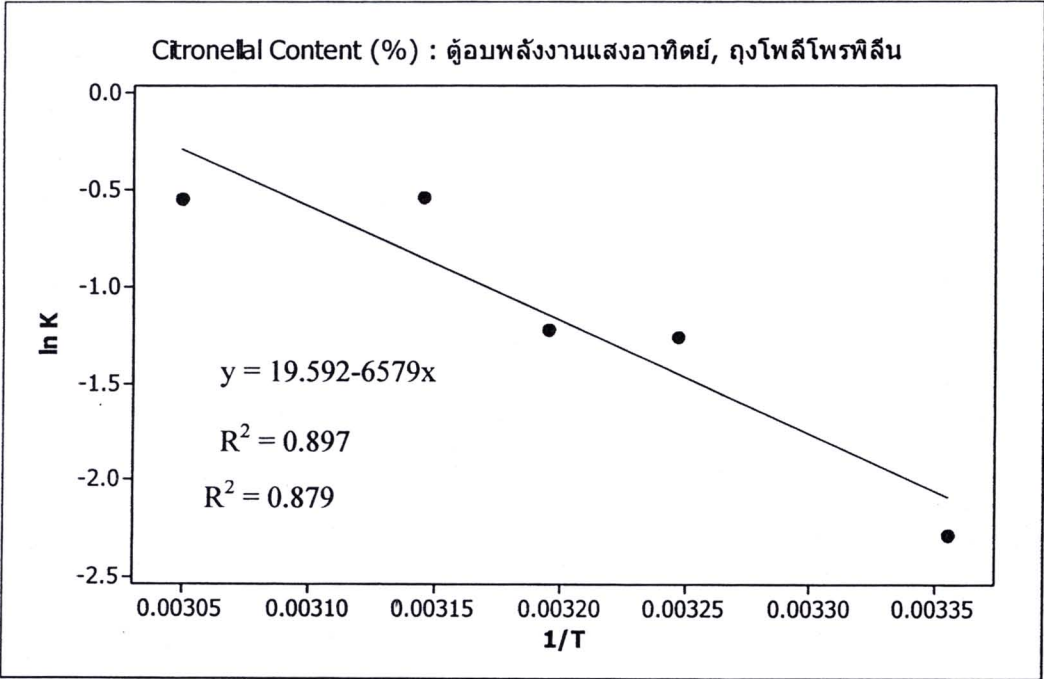
ภาพ 4.6 Arrhenius plot ของปริมาณ Citronellal (%) ของใบมะกรูดอบแห้งป่นที่อบด้วย
ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์และบรรจุในถังอะลูมิเนียมฟอยด์



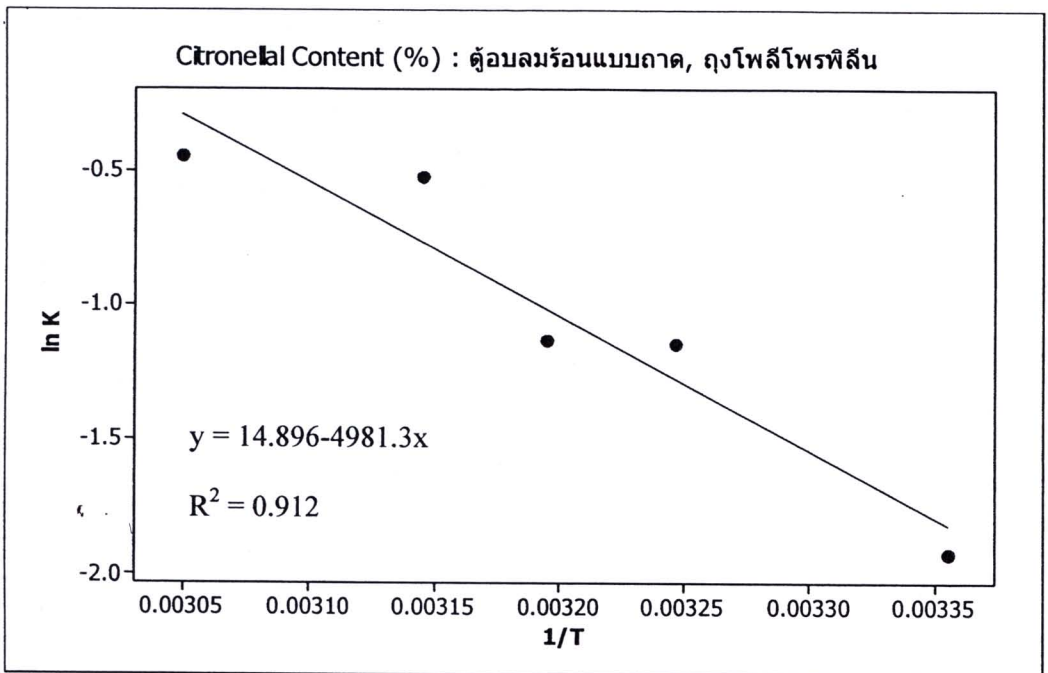
ภาพ 4.7 Arrhenius plot ของปริมาณ citronellal (%) ของใบมะกรูดอบแห้งป่นที่อบด้วย
ตู้อบลมร้อนแบบถาดและบรรจุในถังอะลูมิเนียมฟอยด์



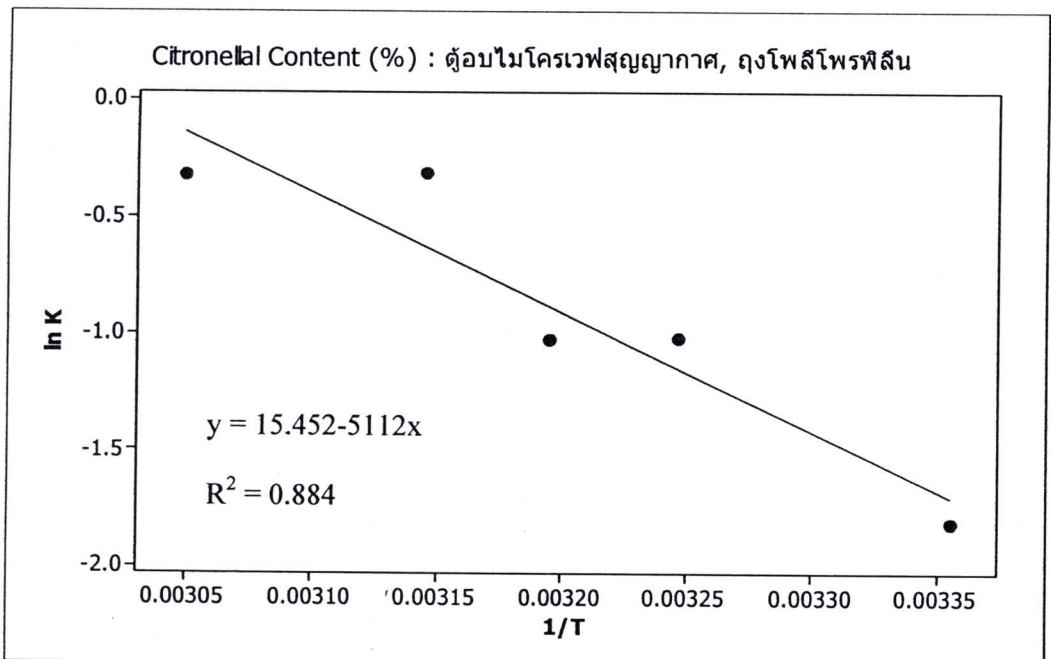
ภาพ 4.8 Arrhenius plot ของปริมาณ citronellal (%) ของใบมะกรูดอบแห้งป่นที่อบด้วย
ตู้อบไมโครเวฟสุญญากาศและบรรจุในถังอะลูมิเนียมฟอยล์



ภาพ 4.9 Arrhenius plot ของปริมาณ citronellal (%) ของใบมะกรูดอบแห้งป่นที่อบด้วย
ตู้พลังงานแสงอาทิตย์และบรรจุในถังโพลีโพรพิลีน



ภาพ 4.10 Arrhenius plot ของปริมาณ citronellal (%) ของใบมะกรูดอบแห้งป่นที่อบด้วย
ตู้อบลมร้อนแบบถาดและบรรจุในถุงโพลีโพรพิลีน



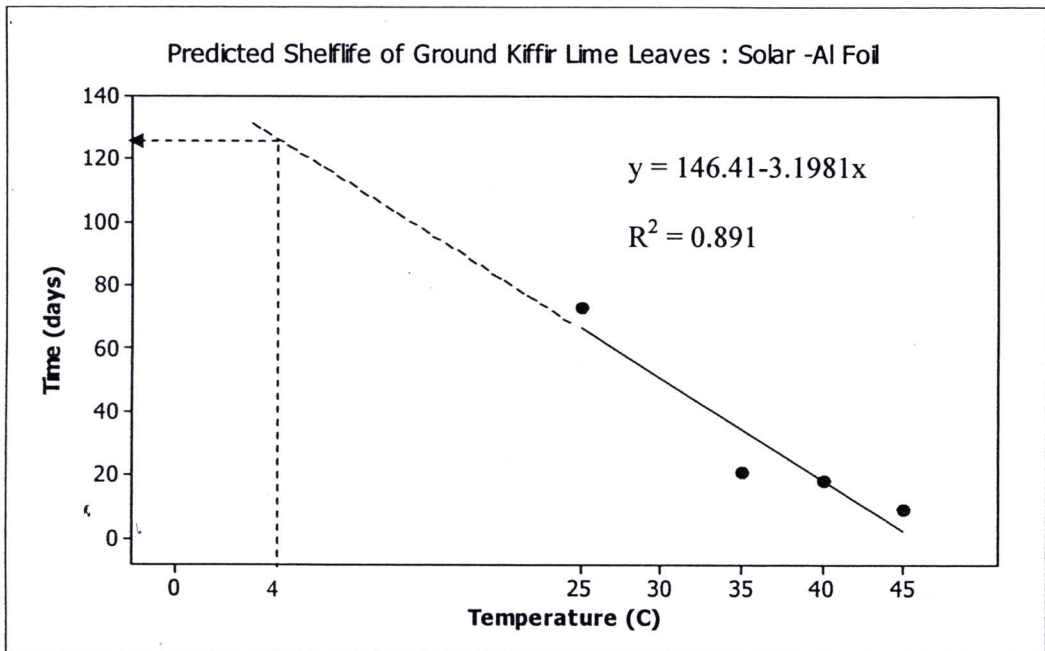
ภาพ 4.11 Arrhenius plot ของปริมาณ citronellal (%) ของใบมะกรูดอบแห้งป่นที่อบด้วย
ตู้อบไมโครเวฟสูญญากาศและบรรจุในถุงโพลีโพรพิลีน

ตาราง 4.14 ค่า Ea ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณ citronellal ของใบมะกรูดอบแห้งป่น

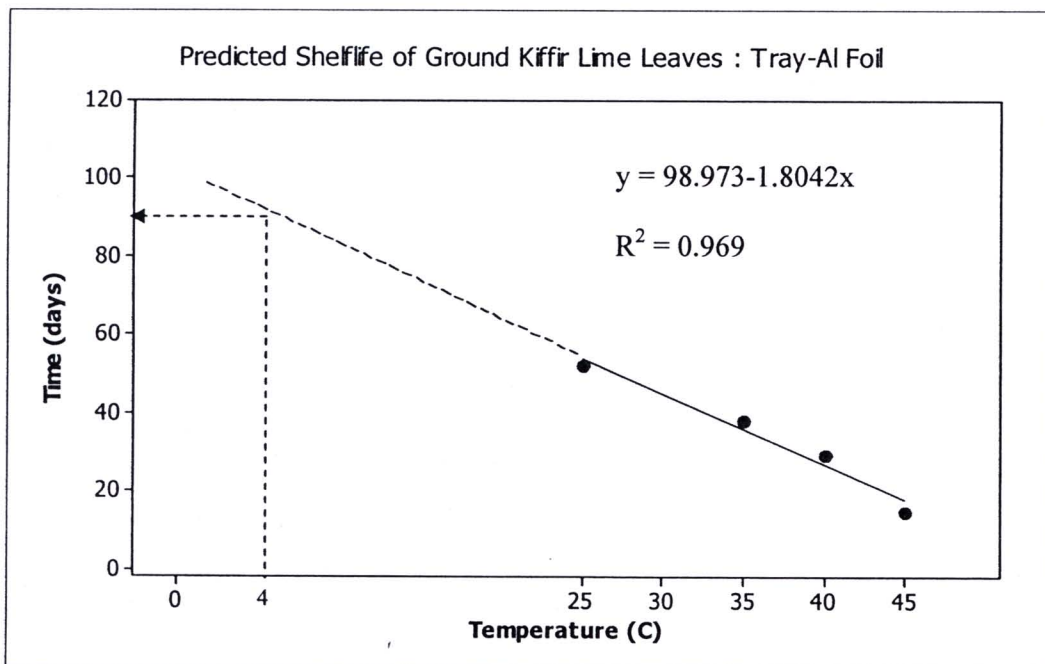
คุณภาพ	ตู้อบ	Ea (kJ/mol K)	R ²
ทางเคมี	ถุงอะลูมิเนียมฟอยล์		
Citronellal (% , w.b.)	Solar	46.78	0.905
	Tray	38.18	0.857
	Microwave	44.45	0.892
	ถุงโพลีโพรพิลีน		
Citronellal (% , w.b.)	Solar	48.77	0.879
	Tray	41.41	0.912
	Microwave	42.50	0.884

4.3.3 การทำนายอายุการเก็บรักษาของใบมะกรูดอบแห้งป่น

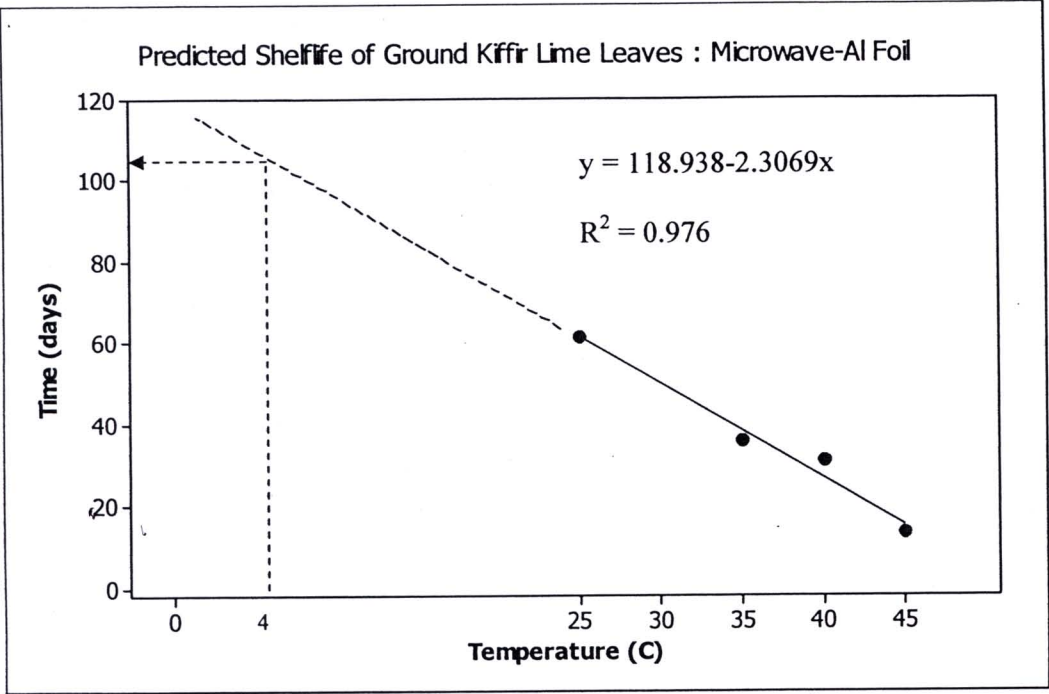
จากการทำนายอายุการเก็บรักษาของใบมะกรูดอบแห้ง โดยใช้สมการที่ได้จากภาพ 4.12-4.14 โดยใช้อุณหภูมิ 4 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิในการเก็บรักษาในตู้เย็น หากบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์และถุงโพลีโพรพิลีน ตามลำดับ พบว่า หากอบด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์จะเก็บรักษาไว้ได้ 133.6 วัน และ 102.9 วัน ส่วนการอบโดยใช้ตู้อบลมร้อนแบบถาด พบว่า จะมีอายุการเก็บ 91.8 วัน และ 77.4 วัน ขณะที่หากอบแบบไมโครเวฟสุญญากาศ จะมีอายุการเก็บได้ 109.7 วันและ 79.6 วัน จะเห็นได้ว่า การบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้นานกว่าการบรรจุในถุงโพลีโพรพิลีนประมาณ 3-4 สัปดาห์ ทั้งอาจเป็นเพราะคุณสมบัติในการด้านการซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำของถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ดีกว่าถุงโพลีโพรพิลีน



ภาพ 4.12 การทำนายอายุการเก็บรักษาใบมะกรูดอบแห้งป่นที่อบด้วย
ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์และบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์



ภาพ 4.13 การทำนายอายุการเก็บรักษาใบมะกรูดอบแห้งป่นที่อบด้วย
ตู้อบลมร้อนแบบถาดและบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์



ภาพ 4.14 การทำนายอายุการเก็บรักษาใบมะกรูดอบแห้งป่นที่อบด้วย
ตู้อบไมโครเวฟสุญญากาศและบรรจุในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์

ตาราง 4.15 การทำนายอายุการเก็บรักษาใบมะกรูดอบแห้งป่นที่อบแห้งโดยวิธีการต่าง ๆ และ
ลักษณะการบรรจุต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเก็บรักษา 4 °C

วิธีการอบแห้งใบมะกรูด และลักษณะการบรรจุ	อายุการเก็บ (วัน)
Solar -Aluminum Foil	133.6
Tray-Aluminum Foil	91.8
Microwave-Aluminum Foil	109.7
Solar-Polypropylene	102.9
Tray- Polypropylene	77.4
Microwave- Polypropylene	79.6