# บทที่ 4

## ผลการทดลองและวิจารณ์

### 4.1 การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินเอ

วิธีวิเคราะห์ปริมาณวิตามินเอเริ่มต้นและที่เหลือเมื่อตัวอย่างผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กันจำเป็นต้องมีความแม่นยำสูงและเหมาะสมกับตัวอย่างที่ศึกษา ทั้งนี้เพราะปริมาณวิตามินเอที่วิเคราะห์ได้จะมีผลต่อความถูกต้องของตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การสลายตัวที่ได้ (44) ขั้นต้นใช้ Carr-Price Method ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากและเครื่องมือหาง่าย จากการทดลองในการวิเคราะห์ตัวอย่างวิตามินเอปาล์มิเตต พบว่าวิธีนี้ไม่สามารถหาปริมาณวิตามินเอได้ สารละลายสีน้ำเงินที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างวิตามินเอกับแอนติโมนีไตรคลอไรด์ชุ่น เนื่องจากแอนติโมนีไตรคลอไรด์มีความไวต่อความชื้นมาก เมื่อตัวอย่างมีน้ำปนอยู่แม้จะปริมาณเล็กน้อยก็ทำให้สารละลายสีน้ำเงินชุ่นได้ นอกจากนี้สารละลายสีน้ำเงินมีเสถียรภาพต่ำโดยเปลี่ยนเป็นสารละลายที่ไม่มีสีในเวลา 5 วินาที ทำให้ไม่สะดวกและเกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าการดูดกลืนแสง แม้ว่าจะสามารถใช้อะซิติกแอนไฮไดรด์ช่วยดูดน้ำปริมาณเล็กน้อยที่อยู่ในน้ำยาเคมีได้(23, 24) แต่อะซิติกแอนไฮไดรด์เป็นสารเคมีควบคุมพิเศษไม่สะดวกในการซื้อมาใช้ เนื่องจากเป็นสารเคมีที่ใช้สังเคราะห์ยาเสพติดบางชนิด นอกจากนั้นการทดลองโดย Carr-Price Method มีขั้นตอนยุ่งยาก ใช้เวลานานและต้องฉายแสงอัลตราไวโอเลต ซึ่งอาจเป็นผลให้วิตามินเอสลายตัวระหว่างการวิเคราะห์ได้ สำหรับ lewis acid ตัวอื่น ๆ เช่น trifluoroacetic acid และ trichloroacetic acid แม้ว่าจะไม่ไวต่อความชื้น แต่ก็มีข้อเสียอื่น ๆ เหมือนกับ Carr-Price Method ดังนั้นจึงเลือกศึกษาวิธีวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคของ High Performance Liquid Chromatography ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถแยกไอโซเมอร์ของวิตามินเอได้ การวิเคราะห์มีความแม่นยำ ความจำเพาะสูง ช่วงเวลาในการวิเคราะห์สั้น โดยสามารถแยกและหาปริมาณไปได้พร้อม ๆ กัน(30)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography นั้นการเตรียมตัวอย่างสำหรับฉีดเข้าเครื่อง HPLC มีความสำคัญมาก วิธีการเตรียมตัวอย่างที่ศึกษาได้แก่

วิธีตกตะกอนแยกกรดไขมันออกจากตัวอย่างวิตามินเอ และวิธีสกัดวิตามินเอด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม โครมาโทแกรมของวิตามินเอที่ได้จากการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีทั้งสองแสดงในภาคผนวก ข (รูปที่ 1) เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์วิตามินเอที่เตรียมจากวิธีทั้งสอง (ตารางที่ 4.1) จะเห็นได้ว่า สารละลายสุดท้ายของวิตามินเอก่อนฉีดเข้าเครื่อง HPLC เมื่อเตรียมด้วยวิธีสกัดมีความเข้มข้นสูงกว่าเมื่อเตรียมด้วยวิธีตกตะกอนซึ่งเครื่อง HPLC สามารถตรวจวัดปริมาณได้แม่นยำกว่า เนื่องจากตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ต่อไปเป็นตัวอย่างตับหมูสดและตับหมูที่ผ่านการให้ความร้อนซึ่งจะมีวิตามินเอเหลืออยู่น้อย และวิธีตกตะกอนมีการเติมกรดปริมาตรคงที่เพื่อสะเทินกับด่างที่เหลือจากการย่อยตัวอย่างซึ่งมีปริมาณไม่คงที่ ดังนั้นกรดที่มากเกินพอจึงมีปริมาณต่างกันในแต่ละตัวอย่างที่วิเคราะห์ และอาจมีผลต่อการสลายตัวของวิตามินเอ (11) นอกจากนั้นวิธีตกตะกอนไม่มีขั้นตอนการกำจัด impurity ออกจากสารละลายที่จะฉีดเข้าเครื่อง HPLC ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการอุดตันของคอลัมน์ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ในการทดลองนี้จึงเลือกวิธีสกัดในการเตรียมตัวอย่างสำหรับเครื่อง HPLC

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์วิตามินเอเมื่อเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีต่างกัน

| วิธี | ความเข้มข้นของวิตามินเอ (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) |
|---|---|
| ตกตะกอน | 5.822 ± 0.001 |
| สกัด | 31.480 ± 0.827 |

จากการศึกษาภาวะการสกัดที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างตับหมูพบว่า ปริมาตรของไดเอทิลอีเทอร์ที่ใช้ในการสกัดวิตามินเอ ความเข้มข้นของสารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ล้างชั้นไดเอทิลอีเทอร์ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์วิตามินเอที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.2) ดังนั้นจึงเลือกใช้ภาวะการสกัดที่ระ-

ตับต่ำสุดคือ ไดเอทิลอีเทอร์ 50 มิลลิลิตร สารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1% ยกเว้น สารละลายโซเดียมคลอไรด์ซึ่งใช้ความเข้มข้น 1 % ทั้งนี้เนื่องจากการใช้น้ำกลั่นในการล้างชั้นอีเทอร์จะเกิดอิมัลชัน (emulsion) ทำให้เสียเวลาในการสกัดมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 ปริมาณวิตามินเอเมื่อใช้ภาวะการสกัดต่าง ๆ กัน

| ตัวอย่าง | ตัวแปร | ระดับ | ความเข้มข้นของวิตามินเอ (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) |
|---|---|---|---|
| วิตามินเอ | ไดเอทิลอีเทอร์ | 100 | 6.581 ± 0.439 |
| ปาล์มิเตต | (มิลลิลิตร) | 85 | 6.645 ± 0.515 |
| | | 70 | 7.135 ± 0.692 |
| | | 50 | 6.674 ± 0.498 |
| ตับหมูสด | ไดเอทิลอีเทอร์ | 100 | 25.018 ± 1.841 |
| | (มิลลิลิตร) | 50 | 23.608 ± 1.443 |
| วิตามินเอ | โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ | 1 | 6.268 ± 0.285 |
| ปาล์มิเตต | (ร้อยละ) | 3 | 5.618 ± 0.514 |
| | | 5 | 6.643 ± 0.487 |
| วิตามินเอ | โซเดียมคลอไรด์ | 0 | 6.855 ± 0.283 |
| ปาล์มิเตต | (ร้อยละ) | 1 | 7.154 ± 0.410 |
| | | 5 | 6.677 ± 0.402 |
| | | 10 | 7.093 ± 0.185 |

ในส่วนของการใช้เครื่อง HPLC นั้นเลือกใช้ประเภท reversed phase เนื่องจากส่วนประกอบของเครื่อง HPLC ที่มีอยู่คือ คอลัมน์และปั๊มเหมาะกับประเภท reversed phase มากกว่า normal phase ระบบที่เลือกใช้คือ เมทิลแอลกอฮอล์กับน้ำเพราะค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ถูกกว่าระบบอื่น เช่น ระบบอะซิโตไนไตรล์มีราคาแพงกว่าถึงสามเท่า สำหรับอัตราส่วนเมทิลแอลกอฮอล์กับน้ำที่เหมาะสมในการวิเคราะห์วิตามินเอนั้น ค่า resolution และ retention time (ตารางที่ 4.3) จากโครมาโทแกรม (ภาคผนวก ข รูปที่ 2) แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนของเมทิลแอลกอฮอล์สูงขึ้น retention time จะลดลง resolution ก็ต่ำลงด้วย โดยอัตราส่วนเมทิลแอลกอฮอล์ : น้ำ เท่ากับ 87 : 13 และ 88 : 12 มี resolution ใกล้เคียงกัน แต่อัตราส่วน 88 : 12 มี retention time ต่ำกว่าอัตราส่วน 87 : 13 มาก และระบบที่มีอัตราส่วนของน้ำสูงจะทำให้ความดันของระบบสูง ซึ่งเป็นผลให้อายุการใช้งานของคอลัมน์สั้นลง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้อัตราส่วนเมทิลแอลกอฮอล์ : น้ำ เท่ากับ 88 : 12 ในการแยกและหาปริมาณวิตามินเอ

ขั้นตอนการวิเคราะห์วิตามินเอโดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4

ตารางที่ 4.3 Retention time และ resolution ของการแยกวิตามินเอด้วยเมทิลแอลกอฮอล์กับน้ำอัตราส่วนต่าง ๆ กัน

| เมทิลแอลกอฮอล์:น้ำ | retention time (วินาที) | resolution |
|---|---|---|
| 87 : 13 | 825.5 | 1.41 |
| 88 : 12 | 760.2 | 1.40 |
| 90 : 10 | 593.7 | 1.18 |
| 98 : 2 | 351.5 | 0.71 |

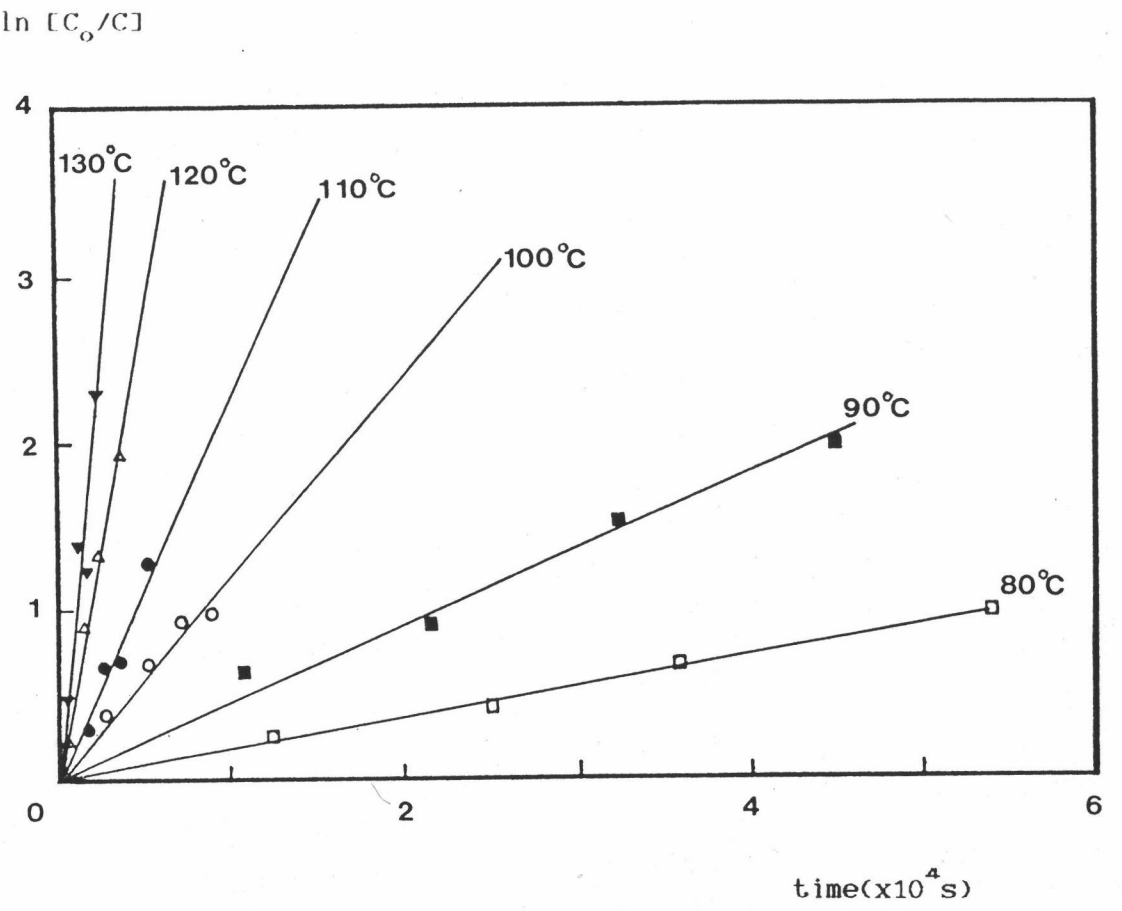
4.2 ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสด

จากการทดลองให้ความร้อนแก่ตับหมูสดในหลอดแก้วปลายปิดขนาดเล็กที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ พบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ตับหมูสดนานขึ้น ความสูงของ peak วิตามินเอจะลดลงในขณะที่ peak A สูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม (ภาคผนวก รูปที่ 4 และ 5) แสดงว่าในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน วิตามินเอในตับหมูสดจะสลายตัวเป็นสารอื่น (peak A) ซึ่งคาดว่าเป็นไอโซเมอร์อื่นของวิตามินเอ(30) การให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส baseline แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 120 องศาเซลเซียส baseline เปลี่ยนไปบ้าง โดยมี peak บาง peak เกิดขึ้นและ peak จะสูงขึ้นเมื่อช่วงเวลาการให้ความร้อนนานขึ้น แสดงว่าเมื่อภาวะการให้ความร้อนรุนแรง สารประกอบในตัวอย่างตับหมูเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นสารอื่นและมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเวลาในการให้ความร้อนนานขึ้น สารใหม่เหล่านี้อาจจะเป็นผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของวิตามินเอหรือสารประกอบอื่นในตัวอย่างตับหมู ดังนั้นอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนมีผลต่อปริมาณวิตามินเอในตัวอย่างตับหมู

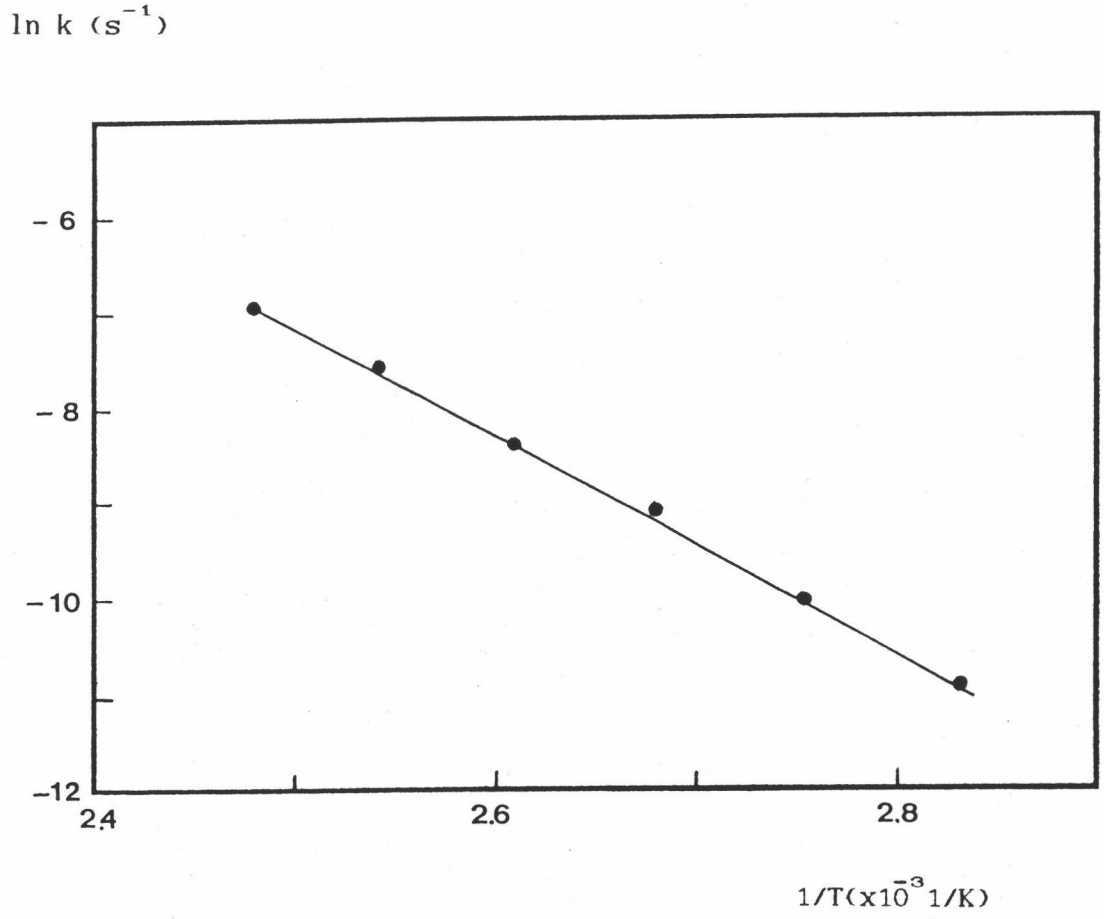
ในการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสด ได้เลือกศึกษาเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิพาสเจอไรส์ (70-90 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิน้ำเดือด (100 องศาเซลเซียส) และช่วงอุณหภูมิสเตอริไรส์ (110-130 องศาเซลเซียส) เพื่อหาค่า Ea ของการสลายตัวของวิตามินเอได้ทั้งช่วงพาสเจอไรส์และสเตอริไรส์ จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณวิตามินเอและช่วงเวลาที่ให้ความร้อน (ภาคผนวก ค ตารางที่ 2) ตามสมการของปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและปฏิกิริยาอันดับสอง พบว่าค่า $r^2$ (ภาคผนวก ค ตารางที่ 11) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสมีค่าต่ำและแตกต่างจากค่า $r^2$ ช่วง 80 ถึง 130 องศาเซลเซียสมาก จึงไม่นำการสลายตัวของวิตามินเอที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสมาพิจารณาสรุปด้วย นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยของปริมาณวิตามินเอที่เหลือเมื่อผ่านการให้ความร้อนนาน 210, 420 และ 600 นาที ที่ 70 องศาเซลเซียส ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งแสดงว่าเวลาในการให้ความร้อนอาจไม่เพียงพอที่จะทำให้วิตามินเอสลายตัว ดังนั้นความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินเออาจมากกว่าปริมาณวิตามินเอที่ลดลงเนื่องจาก

การให้ความร้อน เป็นผลให้การหาตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ผิดพลาดได้ จากการพิจารณาค่า $r^2$ ในช่วง 80-130 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่งมีค่า $r^2$ เฉลี่ยสูงสุด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด และเมื่อทดสอบความแตกต่างของ $r^2$ โดยใช้ t-test พบว่ามีความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และปฏิกิริยาอันดับสอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดระหว่างอุณหภูมิ 80-130 องศาเซลเซียสสามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (รูปที่ 4.1) ซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวของวิตามินเอใน ghee และในตับวัว โดยมีค่า k ของการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.4 และค่า k นี้มีค่าต่ำกว่าค่า k ของการสลายตัวของวิตามินเอใน ghee(42) และในตับวัว(4) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะองค์ประกอบในตัวอย่างแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งไขมันใน ghee มีคุณภาพต่ำจึงเกิดออกซิไดส์ได้ง่าย ซึ่งเป็นผลต่อเนื่องถึงปฏิกิริยาออกซิเดชันของวิตามินเอด้วย(10) นอกจากนี้ค่า k จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 80 - 130 องศาเซลเซียส ซึ่งผลของอุณหภูมิต่อค่า k เมื่ออธิบายโดยสมการของอาร์รีเนียส (รูปที่ 4.2) มีค่า Ea เท่ากับ 95.60 $\pm$ 4.11 กิโลจูลต่อโมล หรือ 22.85 $\pm$ 0.98 กิโลแคลอรีต่อโมล ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับค่า Ea ในตับวัว (112 $\pm$ 9 กิโลจูลต่อโมล)(4) และมีค่าใกล้เคียงกับค่า Ea ใน liquid multivitamin preparation และ multivitamin tablet ซึ่งมีค่าเท่ากับ 95.86 และ 117.62 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ(37,41)

นอกจากนี้ยังพบว่าค่า $r^2$ ของการพลอตตามสมการอาร์รีเนียสมีค่าใกล้ 1 มากแสดงว่าค่า k ของการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดในช่วงอุณหภูมิพาสเจอไรส์และสเตอริไรส์มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ดังนั้นในช่วงต่อไปจะศึกษาอุณหภูมิในการให้ความร้อนรวมเป็นช่วงเดียวกันคือ 80,100 และ 120 องศาเซลเซียส




รูปที่ 4.1 การสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน




รูปที่ 4.2 อาร์รีเนียสพลอตสำหรับการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสด ช่วง 80-130 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสด เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

| อุณหภูมิ ($^{\circ}C$) | $k \times 10^{5}$ ($s^{-1}$) | $r^2$ |
|---|---|---|
| 80 | 1.81 ± 0.06 | 0.9888 |
| 90 | 4.52 ± 0.17 | 0.9850 |
| 100 | 12.02 ± 0.75 | 0.9510 |
| 110 | 22.61 ± 1.57 | 0.9521 |
| 120 | 54.68 ± 1.47 | 0.9929 |
| 130 | 99.43 ± 4.66 | 0.9791 |
| Ea ($kJ\ mole^{-1}$) | 95.60 ± 4.11 | 0.9973 |

4.3 ผลของปริมาณไขมันต่อการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสด

การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดที่ปรับไขมันด้วยน้ำมันหมูและน้ำกลั่นให้มีปริมาณไขมันร้อยละ 10.14 และ 14.48 ปริมาณความชื้นเท่ากับในตับหมูสด (ภาคผนวก ค ตารางที่ 1) เทียบกับตับหมูสดซึ่งมีไขมันร้อยละ 3.79 พบว่า โครมาโทแกรมจาก HPLC มีลักษณะเหมือนกับในตับหมูสด เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างสูงขึ้นปริมาณวิตามินเอจะลดลง (ภาคผนวก ค ตารางที่ 3 และ 4) หาอันดับของปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยวิธีเดียวกับตับหมูสดพบว่า ตัวอย่างที่มีไขมันร้อยละ 10.14 และ 14.48

1174989958

ค่า $r^2$ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด (ภาคผนวก ค ตารางที่ 12 และ 13) ดังนั้นการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูที่ปรับไขมันร้อยละ 10.14 และ 14.48 ในช่วงอุณหภูมิ 80-120 องศาเซลเซียสสามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือนกับในตับหมูสด และสอดคล้องกับการศึกษาผลไขมันต่อการสลายตัวของวิตามินเอในตัวอย่างตับวัว(43)

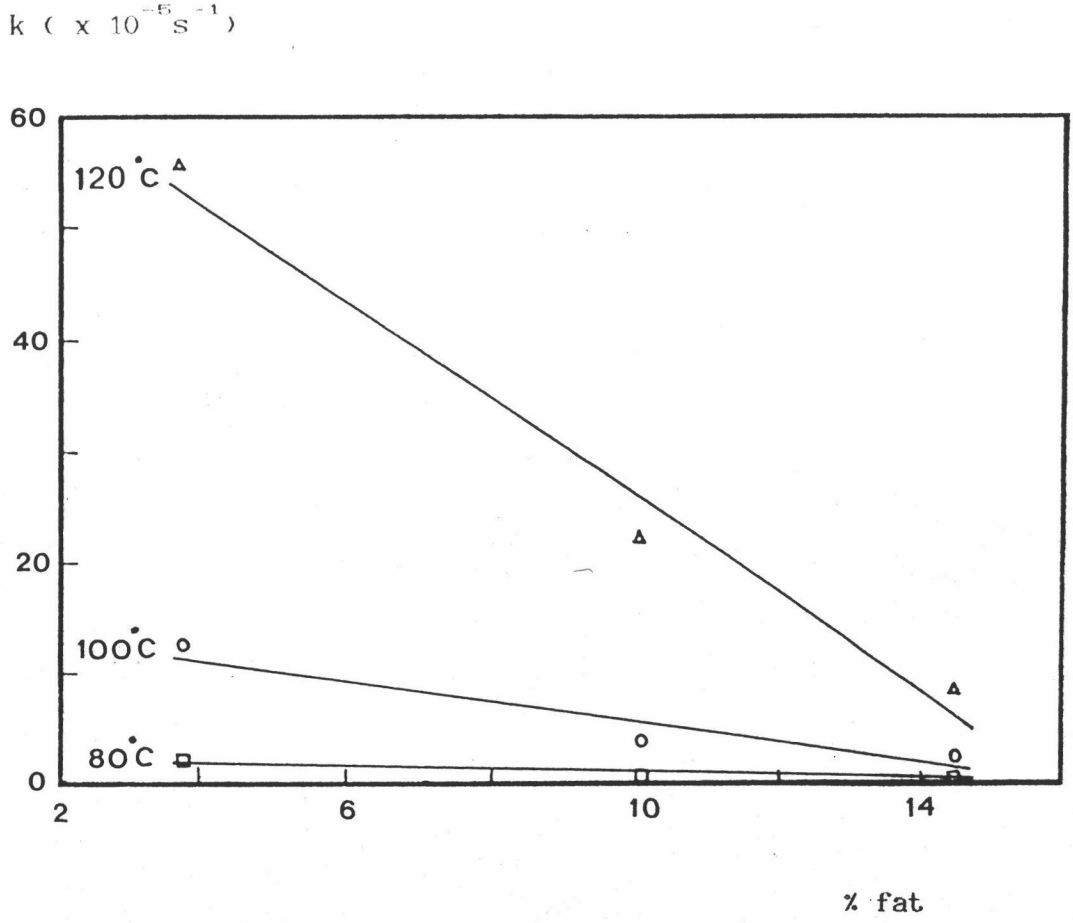
ค่า k ของการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูที่ปรับไขมันมีค่าลดลงเมื่อปริมาณไขมันเพิ่มจากร้อยละ 3.79 เป็น 14.48 (ตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.3) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในตัวอย่างตับวัว(43) การที่อัตราการสลายตัวของวิตามินเอลดลงเมื่อปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น เนื่องจากวิตามินเอเป็นวิตามินที่ละลายในไขมัน การเพิ่มปริมาณไขมันจึงเป็นการเพิ่มเสถียรภาพแก่วิตามินเอ(10) แต่เมื่อพิจารณาค่า k ของตัวอย่างตับวัวที่ปรับไขมันร้อยละ 10.0 ความชื้นร้อยละ 72.2 มีค่า k ที่ 102.1, 112.0 และ 122.0 องศาเซลเซียส เท่ากับ $2.54 \times 10^{-5}$, $6.16 \times 10^{-5}$ และ $12.84 \times 10^{-5}$ต่อวินาที ตามลำดับ จะเห็นว่ามีค่าต่ำกว่าในตัวอย่างตับหมูสด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแบบจำลองอาหาร (food model) และส่วนผสมที่นำมาปรับองค์ประกอบต่างกัน(43)

อุณหภูมิมีผลต่อค่า k ของการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูที่ปรับไขมันตามสมการของอาร์รีเนียส (รูปที่ 4.4) ได้ค่า Ea ของตัวอย่างที่มีไขมันร้อยละ 3.79, 10.14 และ 14.48 เท่ากับ $95.60 \pm 4.11$ กิโลจูลต่อโมล, $103.72 \pm 6.30$ กิโลจูลต่อโมล ($24.79 \pm 1.51$ กิโลแคลอรีต่อโมล) และ $86.41 \pm 2.08$ กิโลจูลต่อโมล ($20.65 \pm 0.50$ กิโลแคลอรีต่อโมล) ตามลำดับ (ตารางที่ 4.5) เมื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติพบว่า ค่า Ea ของตัวอย่างที่มีไขมันร้อยละ 3.79 และ 10.14 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่เมื่อปริมาณไขมันเพิ่มเป็น 14.48 ผลของอุณหภูมิต่อค่า k จะลดลง เมื่อทดสอบทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณไขมันที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มเสถียรภาพแก่วิตามินเอ เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (T) และร้อยละของไขมัน (F) ที่มีต่อค่า k จะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.1 มีค่า $r^2$ เท่ากับ 0.9870

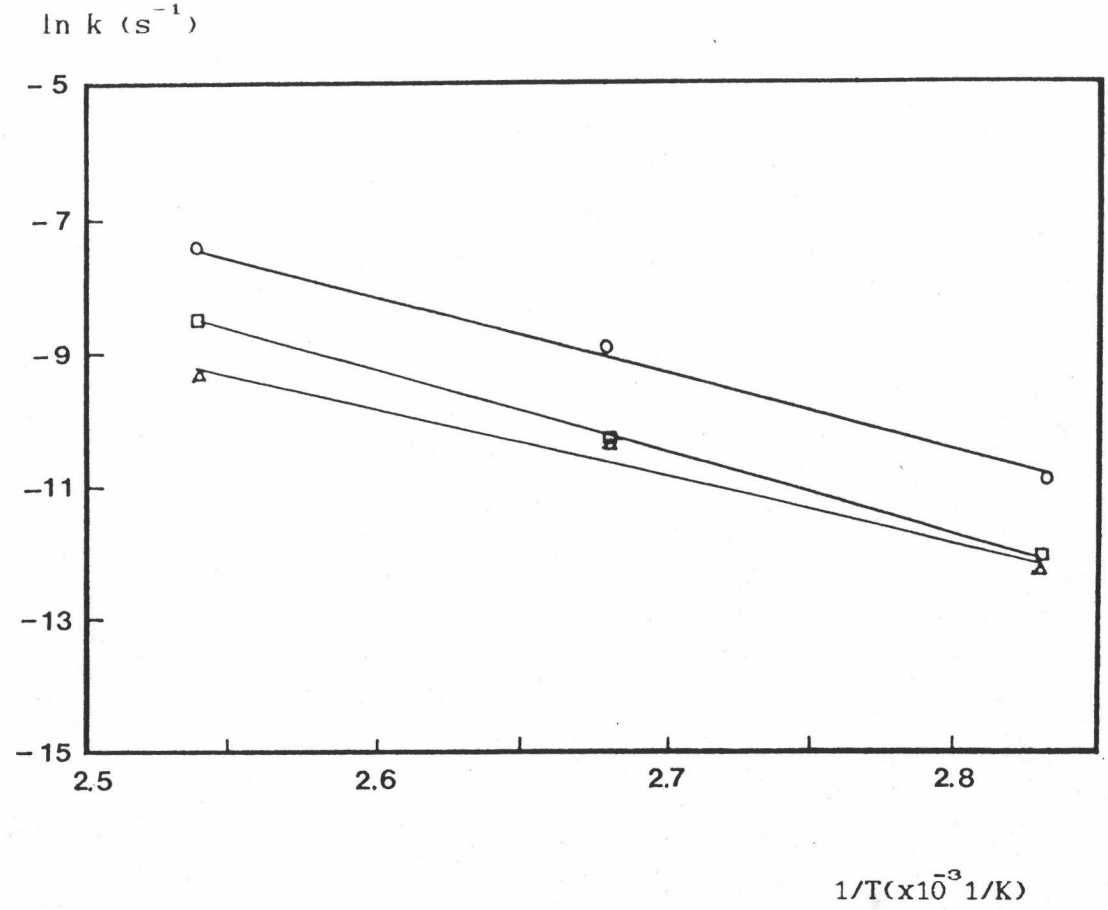
$$\ln k = 22.4 - 0.147\,(F) - 1.16 \times 10^{4}(1/T) \qquad (4.1)$$

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดที่ปรับปริมาณไขมัน เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

| อุณหภูมิ ( °C) | $k \times 10^{5}$ ($s^{-1}$) เมื่อร้อยละของไขมัน | | |
|---|---|---|---|
| | 3.79 | 10.14 | 14.48 |
| 80 | 1.81 ± 0.06 | 0.56 ± 0.04 | 0.45 ± 0.03 |
| 100 | 12.02 ± 0.75 | 3.38 ± 0.18 | 2.94 ± 0.19 |
| 120 | 54.68 ± 1.47 | 20.65 ± 0.55 | 8.86 ± 0.43 |
| Ea (kJ $mole^{-1}$) | 95.60 ± 4.11 | 103.72 ± 6.30 | 86.41 ± 2.08 |
| $r^2$ | 0.9973 | 0.9988 | 0.9883 |
| ln A ($s^{-1}$) | 22.68 | 23.21 | 17.22 |




รูปที่ 4.3 ผลของปริมาณไขมันต่อการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสด




รูปที่ 4.4 อาร์รีเนียสพลอตสำหรับการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดที่ปรับปริมาณไขมัน ช่วง 80-120 องศาเซลเซียส

o——o ปริมาณไขมันร้อยละ 3.79

□——□ ปริมาณไขมันร้อยละ 10.14

△——△ ปริมาณไขมันร้อยละ 14.48

4.4 ผลของปริมาณความชื้นต่อการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสด

จากการวิเคราะห์ปริมาณวิตามินเอในตัวอย่างตับหมูสดที่ปรับความชื้นด้วยน้ำกลั่น น้ำมันหมู และเคซีนให้มีปริมาณความชื้นร้อยละ 48.21, 61.38 และ 70.29 ปริมาณไขมันเท่ากับตับหมูสด พบว่าลักษณะของโครมาโทแกรมจาก HPLC เหมือนกับในตับหมูสด ปริมาณวิตามินเอในตัวอย่างที่ได้รับความร้อนจะลดลงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และความชื้น (ภาคผนวก ค ตารางที่ 5,6 และ 7 ตามลำดับ) โดยปริมาณความชื้นไม่มีผลต่ออันดับของปฏิกิริยา กล่าวคือในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษานี้ การสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดที่ปรับความชื้นยังคงสามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เนื่องจากมีค่า $r^2$ เฉลี่ยสูงสุด (ภาคผนวก ค ตารางที่ 14,15 และ 16 ตามลำดับ) เช่นเดียวกับตัวอย่างตับหมูสดและตับหมูสดที่ปรับปริมาณไขมัน และสอดคล้องกับการศึกษาผลของความชื้นในตัวอย่างตับวัว(43) แต่ความชื้นจะมีผลต่ออัตราการสลายตัวของวิตามินเอในตัวอย่างโดยค่า k จะลดลงเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 48.21 เป็น 70.29 (ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.5) ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับการศึกษาผลของความชื้นต่อการสลายตัวของวิตามินเอในตับวัว(43) ความแตกต่างนี้อาจเป็นเพราะแผนการทดลองและแบบจำลองอาหารที่ศึกษาแตกต่างกัน โดยในตับวัววางแผนการทดลองแบบ mixture design ปรับองค์ประกอบของตัวอย่างโดยใช้น้ำมันหมูและโปรตีนเข้มข้นจากตับวัว (beef liver protein concentrate) สำหรับงานวิจัยนี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด กำหนดให้ปริมาณไขมันคงที่และมีค่าใกล้เคียงตับหมูสด โดยใช้เคซีน น้ำมันหมู และน้ำกลั่นปรับองค์ประกอบของตัวอย่างให้มีความชื้นตามต้องการ เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่ปรับความชื้นร้อยละ 70.29 ไขมันร้อยละ 3.48 ด้วยเคซีนซึ่ง มีค่า k ที่ 120 องศาเซลเซียส เท่ากับ $39.99 \times 10^{-5}$ ต่อวินาที (ตารางที่ 4.6) กับตับหมูสดที่มีความชื้นร้อยละ 72.07 ไขมันร้อยละ 3.79 มีค่า k เท่ากับ $54.68 \times 10^{-5}$ ต่อวินาที (ตารางที่ 4.5) จะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่มีเคซีนอัตราการสลายตัวของวิตามินเอจะช้ากว่าตัวอย่างตับหมูสด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเคซีนเป็นโปรตีนที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนพวกเซอรีน (serine) และทรีโอนีน (threonine) ที่มีพันธะเอสเทอร์กับกรดฟอสฟอริค (phosphoric acid)(46) เมื่อเคซีนถูกไฮโดรไลส์จะเกิดเป็นฟอสเฟต (phosphate) ซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน(47)

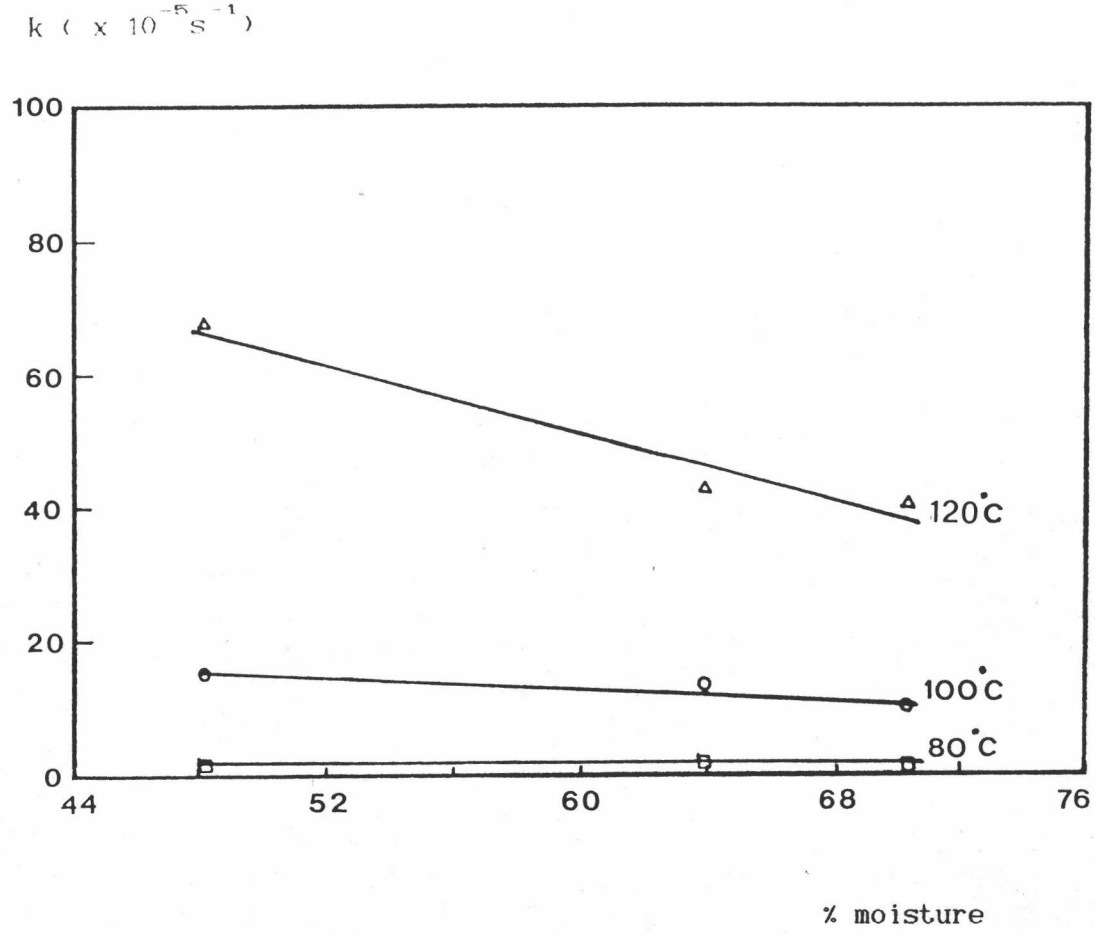
จึงสามารถลดอัตราการสลายตัวของวิตามินเอได้ ดังนั้นในตัวอย่างที่ปรับความชื้นด้วยเคซีนจนมีร้อยละของความชื้นแตกต่างกันเป็น 48.21, 61.38 และ 70.29 นั้นทำให้ในตัวอย่างมีปริมาณน้ำที่จะไฮโดรไลส์เคซีนได้แตกต่างกัน ตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำจะไฮโดรไลส์เคซีนได้น้อยเป็นผลให้การสลายตัวของวิตามินเอสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า k ของการสลายตัวของวิตามินเอในตับวัวที่ปรับปริมาณความชื้นร้อยละ 61.0 ไขมันร้อยละ 18.6 ที่ 102.1, 112.0 และ 122.0 อาศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1.12 \times 10^{-5}$, $3.44 \times 10^{-5}$ และ $9.22 \times 10^{-5}$ ต่อวินาที ตามลำดับ(43) จะมีค่าต่ำกว่าการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูที่ปรับความชื้นร้อยละ 61.38 ไขมันร้อยละ 3.33 มาก (ตารางที่ 4.6) ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณไขมันต่างกันมาก และปริมาณไขมันที่เพิ่มขึ้นมีผลให้การสลายตัวของวิตามินเอลดลง ดังที่พบในการทดลองซึ่งกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.3

อุณหภูมิยังคงมีผลต่อค่า k ของการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูที่ปรับความชื้นตามสมการของอาร์รีเนียส ได้ค่า Ea ของตัวอย่างที่มีความชื้นร้อยละ 48.21, 61.38 และ 70.29 เท่ากับ 100.95 $\pm$ 8.56 กิโลจูลต่อโมล (24.13 $\pm$ 2.05 กิโลแคลอรีต่อโมล) 90.02 $\pm$ 1.99 กิโลจูลต่อโมล (21.52 $\pm$ 0.48 กิโลแคลอรีต่อโมล) และ 93.09 $\pm$ 5.10 กิโลจูลต่อโมล (22.25 $\pm$ 1.22 กิโลแคลอรีต่อโมล) ตามลำดับ (ตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.6) จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าการปรับความชื้นไม่ทำให้ผลของอุณหภูมิต่อการสลายตัวของวิตามินเอเปลี่ยนแปลง และยังคงอยู่ในช่วงเดียวกับค่า Ea ของตับหมูสดและตับหมูที่ปรับไขมัน เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (T) และร้อยละของความชื้น (M) ที่มีต่อค่า k จะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.2 มีค่า $r^2$ เท่ากับ 0.9931

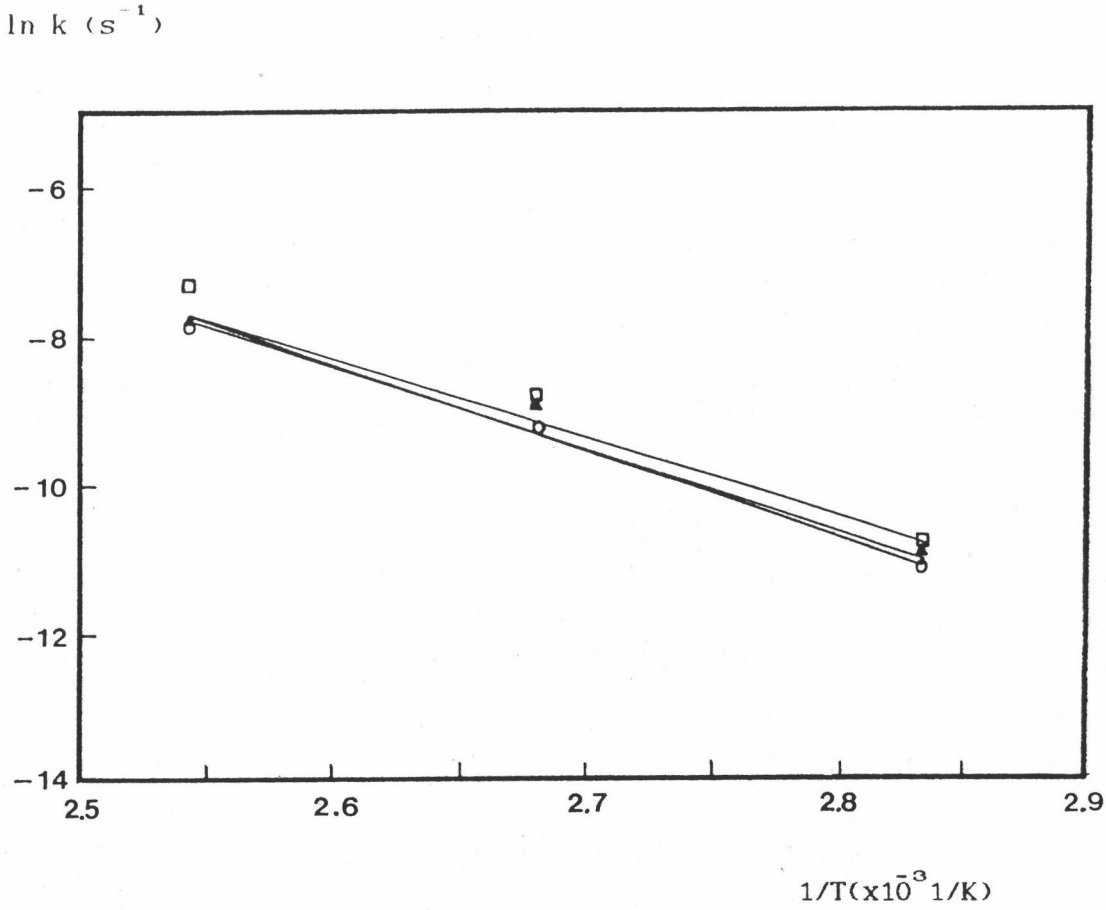
$$\ln k = 22.5 - 1.85 \times 10^{-2}(M) - 1.14 \times 10^{4}(1/T) \qquad (4.2)$$

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดที่ปรับปริมาณความชื้นเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

| อุณหภูมิ ( °C) | $k \times 10^5$ ($s^{-1}$) เมื่อร้อยละของความชื้น | | |
|---|---|---|---|
| | 48.21 | 61.38 | 70.29 |
| 80 | 2.05 ± 0.12 | 1.88 ± 0.11 | 1.59 ± 0.08 |
| 100 | 14.95 ± 0.97 | 12.94 ± 0.71 | 9.50 ± 0.71 |
| 120 | 67.55 ± 3.54 | 42.20 ± 1.85 | 39.99 ± 1.83 |
| Ea ($kJ\ mole^{-1}$) | 100.95 ± 8.56 | 90.02 ± 1.99 | 93.09 ± 5.10 |
| $r^2$ | 0.9976 | 0.9895 | 0.9992 |
| ln A ($s^{-1}$) | 23.65 | 19.88 | 20.69 |




รูปที่ 4.5 ผลของปริมาณความชื้นต่อการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสด




รูปที่ 4.6 อาร์รีเนียสพลอตสำหรับการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดที่ปรับปริมาณความชื้น ช่วง 80-120 องศาเซลเซียส

□——□ ปริมาณความชื้นร้อยละ 48.21

▲——▲ ปริมาณความชื้นร้อยละ 61.38

○——○ ปริมาณความชื้นร้อยละ 70.29

## 4.5 ผลของเกลือไนเตรตต่อการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสด

ในการศึกษาการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดที่เติมเกลือไนเตรต 250 และ 500 ppm เทียบกับตับหมูสด พบว่าลักษณะโครมาโทแกรมจาก HPLC เหมือนกับตับหมูสด ปริมาณวิตามินเอในตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และปริมาณเกลือไนเตรต (ภาคผนวก ค ตารางที่ 8 และ 9) อันดับของปฏิกิริยาการสลายตัวของวิตามินเอในช่วงอุณหภูมิ 80-120 องศาเซลเซียสยังคงสามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเช่นเดียวกับในตับหมูสด ตับหมูที่ปรับปริมาณไขมัน และตับหมูที่ปรับปริมาณความชื้นเพราะมีค่า $r^2$ เฉลี่ยสูงสุด (ภาคผนวก ค ตารางที่ 17 และ 18) แต่เกลือไนเตรตมีผลต่อการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสด ค่า k ของการสลายตัวของวิตามินเอจะลดลงเมื่อปริมาณเกลือไนเตรตเพิ่มขึ้นจากศูนย์เป็น 500 ppm (ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.7) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ 120 องศาเซลเซียส ค่า k จะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณเกลือไนเตรตเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิต่ำ ( 80 องศาเซลเซียส ) เกลือไนเตรตก็ยังคงมีผลทำให้ค่า k ลดลงแต่เมื่อระดับของเกลือไนเตรตเพิ่มจาก 250 ppm เป็น 500 ppm ค่า k จะมีค่าใกล้เคียงกันและไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้อาจเนื่องจากไนเตรตเปลี่ยนเป็นไนไตรต์(48) และไนไตรต์เข้าทำปฏิกิริยากับอิออนของเหล็ก ที่เกิดเมื่อโปรตีนในฮีโมโกลบินสลายตัว(denature) เนื่องจากความร้อน เป็นผลให้อิออนของเหล็กทำปฏิกิริยากับกรดไขมันไม่อิ่มตัวได้น้อยลงหรือเป็นการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน(49) ซึ่งสามารถลดอัตราการสลายตัวของวิตามินเอได้(10) ที่อุณหภูมิสูง(120 องศาเซลเซียส)โปรตีนสลายตัวมากเกิดอิออนของเหล็กที่จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันมาก จึงต้องการไนไตรต์ปริมาณมากในการยับยั้งปฏิกิริยา ซึ่งไนไตรต์ปริมาณต่างกันจะมีผลยับยั้งปฏิกิริยาต่างกัน แต่ที่อุณหภูมิต่ำ(80 องศาเซลเซียส)เกิดอิออนของเหล็กที่จะทำปฏิกิริยาน้อย ไนไตรต์ปริมาณต่ำก็สามารถยับยั้งปฏิกิริยาได้ ดังนั้นไนไตรต์ที่มากเกินพอจะไม่มีผลในการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน นั่นคือปริมาณไนไตรต์ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อค่า k

อุณหภูมิมีผลต่อค่า k ของการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูที่เติมเกลือไนเตรตตามสมการของอาร์รีเนียสได้ค่า Ea ในตัวอย่างที่เติมเกลือไนเตรต 250 และ 500 ppm เท่ากับ 99.26 $\pm$ 9.10 กิโลจูลต่อโมล(23.72 $\pm$ 2.17 กิโลแคลอรีต่อโมล) และ 93.27 $\pm$ 8.48 กิโลจูลต่อโมล(22.29 $\pm$ 2.03 กิโลแคลอรีต่อโมล) ตามลำดับ(ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.8) จะเห็นได้ว่ายังคงมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับตับหมูสด ตับหมูที่ปรับไขมันและความชื้น เมื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีทางสถิติพบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าปริมาณเกลือไนเตรตที่เพิ่มขึ้นไม่ทำให้ผลของอุณหภูมิต่อค่า k เปลี่ยนไป เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (T) และปริมาณเกลือไนเตรต (N) ที่มีต่อค่า k จะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4.3 มีค่า $r^2$ เท่ากับ 0.8701

$$\ln k = 22.2 - 6.28 \times 10^{-4}(N) - 1.17 \times 10^{4}(1/T) \qquad (4.3)$$

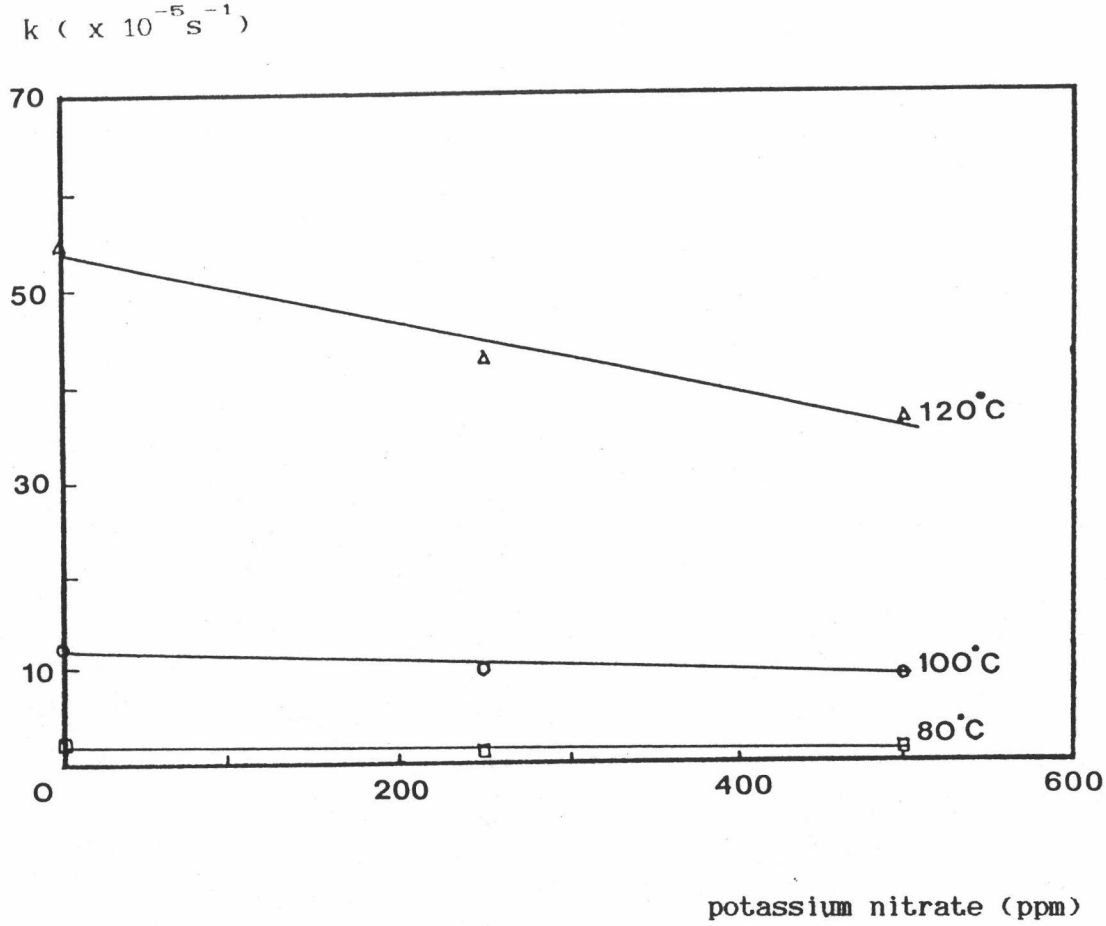
เมื่อนำค่า k จากการหาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสด ตับหมูที่ปรับปริมาณไขมัน ปริมาณความชื้น และปริมาณเกลือไนเตรต และอุณหภูมิสัมบูรณ์มาหาความสัมพันธ์ตามสมการอาร์รีเนียสเพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่า k และ Ea ของการสลายตัวของวิตามินเอในผลิตภัณฑ์ตับบด (ตารางที่ 4.9) ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.4 มีค่า $r^2$ เท่ากับ 0.8701

$$\ln k = 21.74 - 1.16 \times 10^{4}(1/T) \qquad (4.4)$$

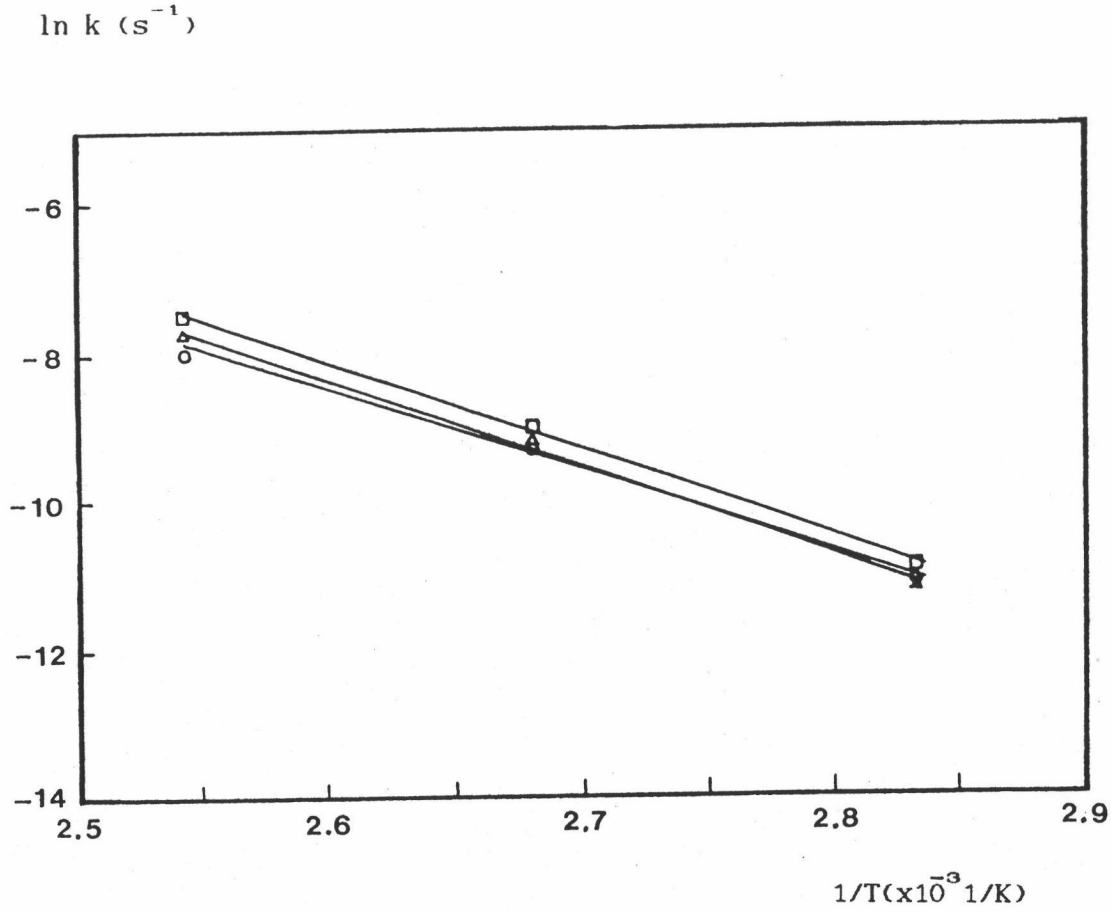
จากสมการอาร์รีเนียส ได้ค่า Ea เท่ากับ 96.44 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า Ea ของวิตามินเอในตับหมูสด ตับหมูที่ปรับปริมาณไขมัน ปริมาณความชื้น และปริมาณเกลือไนเตรต

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดที่เติมเกลือไนเตรต เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

| อุณหภูมิ ( °C) | $k \times 10^{5}$ ($s^{-1}$) เมื่อปริมาณเกลือไนเตรตที่เติม(ppm) | | |
|---|---|---|---|
| | 0 | 250 | 500 |
| 80 | 1.81 ± 0.06 | 1.38 ± 0.06 | 1.42 ± 0.05 |
| 100 | 12.02 ± 0.75 | 9.88 ± 0.50 | 9.04 ± 0.36 |
| 120 | 54.68 ± 1.47 | 42.94 ± 2.06 | 35.98 ± 1.75 |
| Ea (kJ $mole^{-1}$) | 95.60 ± 4.11 | 99.26 ± 9.10 | 93.27 ± 8.48 |
| $r^2$ | 0.9973 | 0.9972 | 0.9972 |
| ln A ($s^{-1}$) | 22.68 | 22.69 | 20.67 |




รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณเกลือไนเตรตต่อการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสด




รูปที่ 4.8 อาร์รีเนียสพลอตสำหรับการสลายตัวของวิตามินเอในตับหมูสดที่เติมเกลือไนเตรต ช่วง 80-120 องศาเซลเซียส องศาเซลเซียส

□——□ โปตัสเซียมไนเตรต 0 ppm

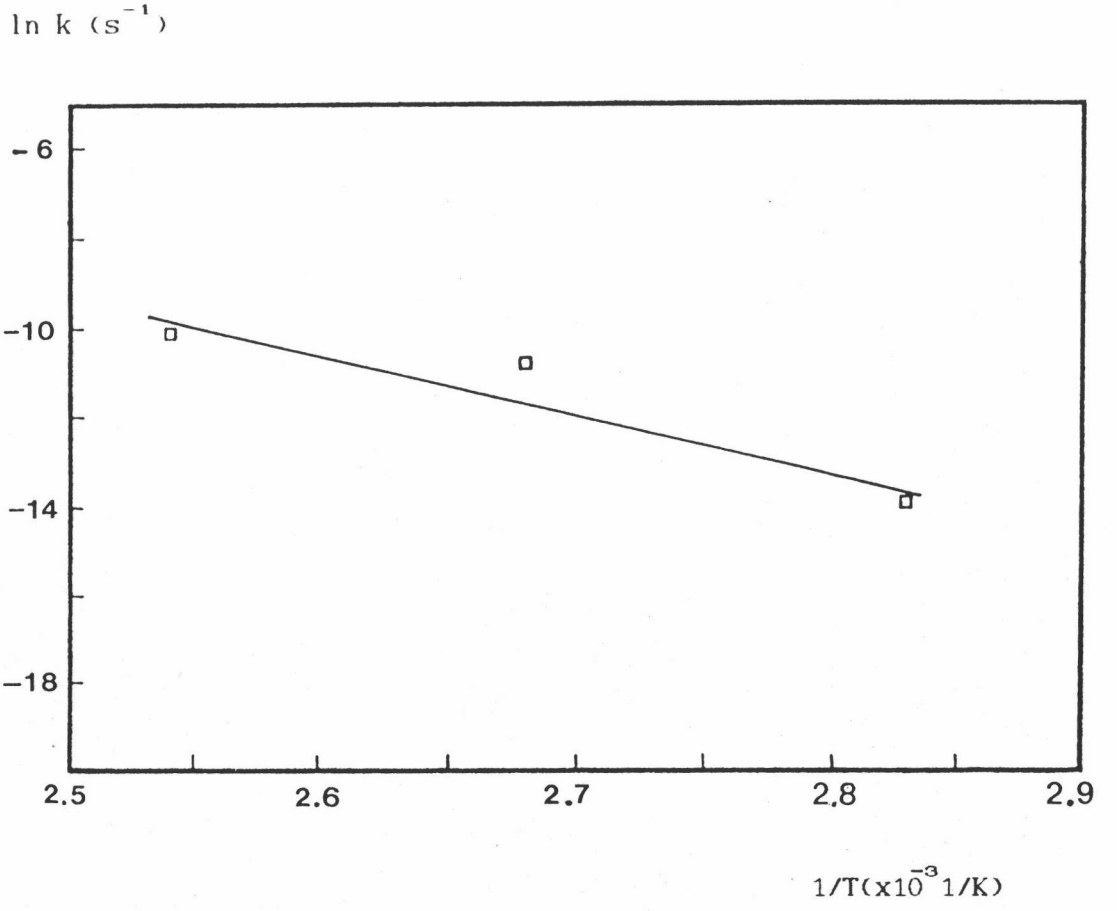
△——△ โปตัสเซียมไนเตรต 250 ppm

○——○ โปตัสเซียมไนเตรต 500 ppm

4.6 ตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอในผลิตภัณฑ์ตับบด

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการสลายตัวของวิตามินเอในผลิตภัณฑ์ตับบด (ความชื้นร้อยละ 58.12 ไขมันร้อยละ 21.30) พบว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างสูงขึ้นปริมาณวิตามินเอจะลดลง (ภาคผนวก ค ตารางที่ 10) และลักษณะโครมาโทแกรมจาก HPLC ต่างไปจากตัวอย่างตับหมูสด (ภาคผนวก ข รูปที่ 6) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีส่วนผสมอื่นเช่นเนื้อหมูและเครื่องเทศอยู่ด้วย แต่ peak เหล่านี้ก็แยกจาก peak ของวิตามินเออย่างเด่นชัด เมื่อนำปริมาณวิตามินเอและช่วงเวลาที่ให้ความร้อนมาหาอันดับของปฏิกิริยาด้วยวิธีเดียวกับในตับหมูสด และทดสอบความแตกต่างของ $r^2$ พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ภาคผนวก ค ตารางที่ 19) แต่เนื่องจากปฏิกิริยาอันดับหนึ่งมีค่า $r^2$ เฉลี่ยสูงสุด ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า การสลายตัวของวิตามินเอในผลิตภัณฑ์ตับบดช่วงอุณหภูมิ 80-120 องศาเซลเซียสสามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับในตัวอย่างตับหมูสดและตับหมูที่ปรับองค์ประกอบที่ได้ศึกษามาแล้ว

ค่า k ของการสลายตัวของวิตามินเอในผลิตภัณฑ์ตับบดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 80 - 120 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.8) ซึ่งผลของอุณหภูมิต่อค่า k เมื่ออธิบายโดยสมการของอาร์รีเนียส (รูปที่ 4.9) มีค่า Ea เท่ากับ 111.97 $\pm$ 8.02 กิโลจูลต่อโมล หรือ 26.76 $\pm$ 1.92 กิโลแคลอรีต่อโมล ln A มีค่า 24.55 ต่อวินาที ซึ่งยังคงมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับตัวอย่างตับหมูสด และตับหมูที่ปรับองค์ประกอบ แต่ค่า k ของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ตับบดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ จะมีค่าต่ำที่สุด (ตารางที่ 4.4-4.8) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ตับบดมีปริมาณไขมันสูง (ร้อยละ 21.30) ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้แก่วิตามินเอ มีปริมาณความชื้นต่ำ (ร้อยละ 58.12) ทำให้การละลายและการเคลื่อนที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยลง ทำให้การสลายตัวของวิตามินเอต่ำลงด้วย(50) และยังมีส่วนผสมอื่น เช่น ไนไตรต์และเครื่องเทศซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวรีดิวส์(47) ในขิงยังมีสารจำพวก phenolic เช่น shogoal และ zingerone ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น antioxidant อีกด้วย(51)




รูปที่ 4.9 อาร์รีเนียสพลอตสำหรับการสลายตัวของวิตามินเอในผลิตภัณฑ์ตับบด ช่วง 80-120 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอในผลิตภัณฑ์ตับบด เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กัน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

| อุณหภูมิ (°C) | $k \times 10^5$ ($s^{-1}$) | $r^2$ |
|---|---|---|
| 80 | 0.09 ± 0.02 | 0.7673 |
| 100 | 2.08 ± 0.18 | 0.9471 |
| 120 | 4.02 ± 0.21 | 0.9772 |
| Ea (kJ $mole^{-1}$) | 111.97 ± 8.02 | 0.8960 |

4.7 <u>การประมาณค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอในผลิตภัณฑ์ตับบด</u>

จากสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า k ส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์และองค์ประกอบ (ปริมาณไขมัน ความชื้น และเกลือไนเตรต) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณขององค์ประกอบที่ศึกษาเพิ่มขึ้น ค่า k ของการสลายตัวของวิตามินเอจะลดลง และเมื่อองค์ประกอบที่ศึกษาเปลี่ยนไปก็ไม่ทำให้ผลของอุณหภูมิต่อการสลายตัวของวิตามินเอเปลี่ยนไป ซึ่งสังเกตได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ของสมการดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกัน

การประมาณค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอในผลิตภัณฑ์ตับบด โดยสมการที่ 4.1 และ 4.2 และ 4.4 (ตารางที่ 4.9) พบว่าค่า Ea มีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ในช่วงเดียวกับค่า Ea จากการทดลอง แต่สำหรับค่า k นั้นพบว่า ความสัมพันธ์ที่มีไขมันเป็น

ตัวแปร (สมการที่ 4.1) สามารถประมาณค่า k ของวิตามินเอในผลิตภัณฑ์ตับบดได้ใกล้เคียงกว่าที่มีความชื้นเป็นตัวแปร (สมการ 4.2) และสมการอาร์รีเนียส (สมการ 4.4) ทั้งนี้อาจเนื่องจากแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่า k และปริมาณความชื้นที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้ผลตรงข้ามกับที่มีผู้ศึกษามาแล้ว(43) ซึ่งอาจมีสาเหตุจากการเลือกส่วนผสมที่ใช้ปรับปริมาณความชื้น แต่อย่างไรก็ตามสมการที่ 4.1 ก็ยังไม่สามารถประมาณค่า k ได้ดีนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในผลิตภัณฑ์ตับบดมีส่วนผสมอื่นซึ่งอาจมีส่วนในการเร่งหรือลดอัตราเร็วของการสลายตัว จึงทำให้การประมาณค่า k ของวิตามินเอในผลิตภัณฑ์ตับบดด้วยปริมาณไขมันเพียงอย่างเดียวไม่แม่นยำเท่าที่ควร คาดว่าการประมาณค่า k จะให้ผลดีขึ้นเมื่อใช้ตัวแปรหลายตัวร่วมกัน ซึ่งในการนี้อาจทำได้โดยอาศัยผลจากงานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองอาหารและออกแบบการทดลองให้มีความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่จะศึกษาต่อไป

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบตัวแปรทางจลนพลศาสตร์การสลายตัวของวิตามินเอ

| อุณหภูมิ (°C) | k x $10^5$ ($s^{-1}$) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | การทดลอง | สมการ 4.1 | สมการ 4.2 | สมการ 4.4 |
| 80 | 0.09 | 0.13 | 1.90 | 1.48 |
| 100 | 2.08 | 0.73 | 10.72 | 8.62 |
| 120 | 4.02 | 3.54 | 50.97 | 41.95 |
| Ea ($kJ\ mole^{-1}$) | 111.97 | 96.08 | 94.63 | 96.44 |