



วิทยานิพนธ์

การสกัดวิตามินอีจากเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่
สถานะเหนือจุดวิกฤต และการตกผลึกวิตามินอีโดยใช้
คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต

**EXTRACTION OF VITAMIN E FROM SUNFLOWER SEEDS
USING SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE AND
PRECIPITATION OF VITAMIN E USING
DENSE CARBON DIOXIDE**

นางสาวเกศินี ศรีสุระ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2549



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การสกัดวิตามินอีจากเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต และการตกผลึกวิตามินอีโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต

Extraction of Vitamin E from Sunflower Seeds Using Supercritical Carbon Dioxide and
Precipitation of Vitamin E Using Dense Carbon Dioxide

นามผู้วิจัย นางสาวเกศินี ศรีสุระ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มานพ เจริญไชยตระกูล, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กานติส สุดสาคร, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิไล เจริญไชยศรี, D.Tech.Sc.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรารัตน์ มุ่งเจริญ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อัจฉกหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การสกัดวิตามินอีจากเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต
และการตกผลึกวิตามินอีโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต

Extraction of Vitamin E from Sunflower Seeds Using Supercritical Carbon Dioxide and
Precipitation of Vitamin E Using Dense Carbon Dioxide

โดย

นางสาวเกศินี ศรีสุระ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-2847-1

เกศินี ศรีสุระ 2549: การสกัดวิตามินอีจากเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตและการตกผลึกวิตามินอีโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต วิทยานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ประธาน
กรรมการที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์มานพ เจริญไชยตระกูล, Ph.D. 115 หน้า
ISBN 974-16-2847-1

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสกัดวิตามินอี (แอลฟาโทโคฟีรอล) ออกจากเมล็ดดอกทานตะวันบดที่มีขนาด 425-600 ไมโครเมตร โดยเปรียบเทียบการสกัด 2 วิธีคือ การสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์และการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งในการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อการสกัดคือความดันและอุณหภูมิ โดยทำการทดลองในช่วงความดัน 130-170 บาร์ ช่วงอุณหภูมิ 35-45 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ที่ 0.5 มิลลิตรต่อนาที จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มความดันส่งผลให้ความสามารถในการละลายของน้ำมันดีขึ้น จึงทำให้การสกัดดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดได้มีค่าน้อยลงเมื่อทำการเพิ่มดัน นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการสกัด ไม่ส่งผลต่อการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอล โดยในงานวิจัยนี้ ปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่สามารถสกัดได้สูงสุดคือ 2.52 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัมเมล็ดดอกทานตะวันบด ที่สภาวะความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 500 มิลลิตร และเมื่อใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 1.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลโดยใช้เครื่องปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 400-500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เวลา 7 ชั่วโมง ซึ่งสามารถสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลได้สูงถึง 25.13 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัมเมล็ดดอกทานตะวันบด จะเห็นว่าปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดได้ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะในช่วงสภาวะที่ใช้ทดลองในงานวิจัยนี้ แอลฟาโทโคฟีรอลมีความสามารถในการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ต่ำ นอกจากนี้ยังศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการตกผลึกวิตามินอีออกจากตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดในการตกผลึกคือที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิตรต่อนาที และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถตกผลึกได้สูงสุด 17.56 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัมเมล็ดดอกทานตะวันบด เมื่อใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย

Kesinee Srisura 2006: Extraction of Vitamin E from Sunflower Seeds Using Supercritical Carbon Dioxide and Precipitation of Vitamin E Using Dense Carbon Dioxide. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Manop Charoenchaitrakool, Ph.D. 115 pages. ISBN 974-16-2847-1

The aim of this study was to extract vitamin E (α -tocopherol) from sunflower seeds using conventional extraction and supercritical carbon dioxide. The sample was ground and was in the size range of 425-600 μm . In the study of supercritical carbon dioxide extraction, the effects of extraction pressure and temperature on the yield were investigated. The experiments were conducted at the pressure range of 130-170 bar and the temperature ranging from 35 to 45 $^{\circ}\text{C}$, carbon dioxide flow rate of 0.5 mL/min. It was found that an increase in the extraction pressure resulted in a higher amount of oil extracted. However, the amount of alpha-tocopherol extracted was decreased as the pressure increased. In addition, an increase in the extraction temperature did not improve the extraction yield significantly. In this study, the highest amount of alpha-tocopherol extracted was 2.52 mg per 100 g of sunflower seed when using the extraction pressure of 130 bar, temperature of 40 $^{\circ}\text{C}$ and 500 mL of carbon dioxide. When adding ethanol as a co-solvent, the extraction was improved by 1.3 times. In the conventional extraction using a hot plate with the speed of 400-500 rpm, temperature of 50 $^{\circ}\text{C}$, extraction time of 7 hours and ethanol as a solvent, the highest amount of alpha-tocopherol extracted was obtained to be 25.13 mg per 100 g of sunflower seed. The low amount of alpha-tocopherol extracted in this study could be due to the low solubility of alpha-tocopherol in the supercritical carbon dioxide within the range of operating conditions studied. In the precipitation of alpha-tocopherol from ethanol using the GAS technique, the highest amount of alpha-tocopherol precipitated was found to be 17.56 mg per 100 g of sunflower seed when using carbon dioxide as an anti-solvent with the flow rate of 5 ml/min at 25 $^{\circ}\text{C}$.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.มานพ เจริญไชยตระกูล ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัย ตลอดจนการให้คำปรึกษาแนะนำในการวิทยานิพนธ์ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.กานติส สุธาสคร กรรมการที่ปรึกษา วิชาเอก ผศ.ดร.วิไล เจียมไชยศรี กรรมการปรึกษาวิชาการ และ ผศ.ดร.วิรัตน์ วาณิชศรีรัตน อาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่สละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และกรุณาให้คำปรึกษาแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อ.ดร.นฤมล วงศ์นาสุนทร อาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในช่วงต้นของงานวิจัย และขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย และ โครงการพัฒนานักคิดและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกในด้านการติดต่อประสานงานต่างๆจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจ และสนับสนุนในทุกๆด้านจนประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี

เกศินี ศรีสุระ

กันยายน 2549

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(16)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์และขอบเขตวิจัย	3
วัตถุประสงค์	3
ขอบเขตการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	4
ดอกทานตะวัน	4
วิตามินอี (Tocopherol)	9
ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต	14
การสกัดด้วยของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต	27
ของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต (Dense Gas)	33
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์และสารเคมี	37
เครื่องมือวิเคราะห์	37
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	42
สรุปและข้อเสนอแนะ	61
สรุป	61
ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง	70
ภาคผนวก ข การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับงานวิเคราะห์วิตามินอี	76
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ	80
ภาคผนวก ง ภาพโครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอล	82
ภาคผนวก จ คุณสมบัติในการละลายของน้ำมันทานตะวัน	110
ภาคผนวก ฉ ความสามารถในการละลาย (Solubility) และความเป็นขั้ว (Polarity) ของตัวทำละลายอินทรีย์	112
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	115

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงปริมาณกรดไขมันในน้ำมันพืชที่สำคัญ	8
2	แสดงปริมาณสารอาหารในเมล็ดดอกทานตะวันกะเทาะเปลือก	8
3	ปริมาณวิตามินอีในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ	14
4	แสดงข้อมูลคุณสมบัติที่จุดวิกฤตของสารชนิดต่างๆ	16
5	แสดงคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเปรียบเทียบกับก๊าซ และของเหลว	18
6	แสดงรายละเอียดจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่กำหนดสำหรับงานสกัด	25
7	แสดงความดันที่ใช้ในการตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายเอทานอล ที่อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ	53
8	แสดงความดันที่ใช้ในการตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายเอทานอล ที่อุณหภูมิต่างๆ	56
9	แสดงความดันที่ใช้ในการตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายชนิดต่างๆ	58
ตารางผนวกที่		
ก1	แสดงผลการสกัดสารแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยตัวทำละลายอินทรีย์	71
ก2	แสดงผลการสกัดน้ำมันจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก3 แสดงผลการสกัดสารแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่อัตราการไหล คาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที	73
ก4 แสดงผลการสกัดสารแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตร่วมกับสารละลายเอทานอล ที่ ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหล คาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ ถูกใช้ไป 50 มิลลิลิตร	74
ก5 แสดงผลการตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายอินทรีย์	75
ฉ1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า Dielectric constant (ϵ) ของตัวทำ ละลาย	114
ฉ2 ความเป็นขั้ว (Polarity) ของตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ	114

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ดอกทานตะวัน	6
2 เมล็ดดอกทานตะวัน	6
3 โครงสร้างสารอนุพันธ์ของวิตามินอี	12
4 แผนภาพแสดงความดันและอุณหภูมิของสารบริสุทธิ์ใดๆ	15
5 ประสิทธิภาพของการสกัดน้ำมันถั่วเหลืองด้วยของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต เมื่อใช้ผงเมล็ดถั่วเหลืองที่มีขนาดต่างๆกัน	20
6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการละลายเนฟทาซีนในคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความหนาแน่นต่างๆ	21
7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนาแน่น และความดัน ในรูปของตัวแปรลด	22
8 ก๊าซโครมาโตแกรมของสารจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ ซึ่งสามารถสกัดได้ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตที่สถานะต่างๆ	23
9 แผนภาพแสดงกระบวนการที่ใช้ของไหลที่สถานะใกล้จุดวิกฤต	34
10 แสดงภาพเครื่อง High Performance Liquid Chromatography	38
11 แสดงแผนภาพเครื่องมือการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต	40
12 แสดงแผนภาพเครื่องมือการตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต	41
13 แสดงผลของเวลาที่มีต่อการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอล จากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยเอทานอล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	41
14 แสดงผลของชนิดตัวทำละลายที่มีต่อการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันบด ที่เวลา 5 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	45
15 แสดงผลของความดันที่มีต่อการสกัดน้ำมันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
16	แสดงผลของความดันที่มีต่อการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที	47
17	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสกัดน้ำมันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที	48
18	แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที	49
19	เปรียบเทียบชนิดตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที	50
20	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลกับอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยตัวทำละลายเอทานอล ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	52
21	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลกับอัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยตัวทำละลายเอทานอล ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	53
22	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลกับอุณหภูมิ ด้วยตัวทำละลายเอทานอล ที่อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที	55
23	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลกับอุณหภูมิ ด้วยตัวทำละลายเอทานอล ที่อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที	56
24	เปรียบเทียบชนิดตัวทำละลายที่ใช้ในการตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอล ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	เปรียบเทียบโครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอล	
	(ก)แอลฟาโทโคฟีรอลบริสุทธิ์เข้มข้น 0.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	59
	(ข)แอลฟาโทโคฟีรอลจากการสกัดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง	60
	(ค)แอลฟาโทโคฟีรอลจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหล คาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 100 มิลลิลิตร	60
	(ง)แอลฟาโทโคฟีรอลจากการตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหล คาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที	60
ภาพผนวกที่		
ข1	กราฟมาตรฐานของแอลฟาโทโคฟีรอลในตัวทำละลายเอทานอล	78
ข2	กราฟมาตรฐานของแอลฟาโทโคฟีรอลในตัวทำละลายเมทานอล	79
ข3	กราฟมาตรฐานของแอลฟาโทโคฟีรอลในตัวทำละลายอะซีโตน	79
ง1	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเอทานอลที่ความ เข้มข้น 0.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	83
ง2	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเอทานอลที่ความ เข้มข้น 0.04 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	83
ง3	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเอทานอลที่ความ เข้มข้น 0.06 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	83
ง4	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเอทานอลที่ความ เข้มข้น 0.08 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง5	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้น 0.10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	84
ง6	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเมทานอลที่ความเข้มข้น 0.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	84
ง7	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเมทานอลที่ความเข้มข้น 0.04 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	85
ง8	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเมทานอลที่ความเข้มข้น 0.06 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	85
ง9	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเมทานอลที่ความเข้มข้น 0.08 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	85
ง10	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเมทานอลที่ความเข้มข้น 0.10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	86
ง11	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายอะซีโตนที่ความเข้มข้น 0.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	86
ง12	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายอะซีโตนที่ความเข้มข้น 0.04 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	86
ง13	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายอะซีโตนที่ความเข้มข้น 0.06 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	86
ง14	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายอะซีโตนที่ความเข้มข้น 0.08 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	87
ง15	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายอะซีโตนที่ความเข้มข้น 0.10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง16	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 100 มิลลิลิตร	88
ง17	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 200 มิลลิลิตร	88
ง18	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 300 มิลลิลิตร	89
ง19	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 400 มิลลิลิตร	89
ง20	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 500 มิลลิลิตร	90
ง21	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 100 มิลลิลิตร	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
22	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 200 มิลลิลิตร	91
ง23	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 300 มิลลิลิตร	91
ง24	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 400 มิลลิลิตร	92
ง25	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 500 มิลลิลิตร	92
ง26	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 170 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 100 มิลลิลิตร	93
ง27	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 170 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 200 มิลลิลิตร	93

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง28	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 170 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 300 มิลลิลิตร	94
ง29	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 170 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 400 มิลลิลิตร	94
ง30	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 170 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 500 มิลลิลิตร	95
ง31	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 50 มิลลิลิตร	95
ง32	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 50 มิลลิลิตร	96
ง33	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อัตรา การไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 50 มิลลิลิตร	96

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง34	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตร่วมกับเอทานอล ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 50 มิลลิลิตร	97
ง35	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที	97
ง36	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตรต่อนาที	98
ง37	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 15 มิลลิลิตรต่อนาที	98
ง38	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที	99
ง39	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที	99
ง40	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที	100
ง41	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเมทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง42	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเมทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที	101
ง43	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากอะซีโตนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที	101
ง44	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากอะซีโตนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที	102
ง45	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ในชั่วโมงที่ 1	102
ง46	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ในชั่วโมงที่ 2	102
ง47	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ในชั่วโมงที่ 3	103
ง48	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ในชั่วโมงที่ 4	103
ง49	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ในชั่วโมงที่ 5	103
ง50	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ในชั่วโมงที่ 6	104
ง51	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ในชั่วโมงที่ 7	104
ง52	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ในชั่วโมงที่ 1	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง53	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 2	105
ง54	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 3	105
ง55	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 4	105
ง56	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 5	106
ง57	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 6	106
ง58	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 7	106
ง59	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 1	107
ง60	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 2	107
ง61	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 3	107
ง62	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 4	108
ง63	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 5	108
ง64	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 6	108

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ง65	โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 7	109
จ1	ความสามารถในการละลายของน้ำมันทานตะวัน	111

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

°C	=	Degree Celsius
CP	=	Critical point
CO ₂	=	Carbon dioxide
EtOH	=	Ethanol
GAS	=	Gas anti-solvent
HPLC	=	High Performance liquid chromatography
MeOH	=	Methanol
NCL	=	Near-critical liquid
P	=	Pressure
Pa	=	Pascal
P _c	=	Critical pressure
ppm	=	Part per million
Pr	=	Reduced pressure
p.s.i.	=	Pound per square inch
SC-CO ₂	=	Supercritical carbon dioxide
SCF	=	Supercritical fluid
SFC	=	Supercritical fluid chromatography
SFE	=	Supercritical fluid extraction
T	=	Temperature
T _c	=	Critical temperature
TP	=	Triple point
Tr	=	Reduced temperature
α	=	Alpha
β	=	Beta
γ	=	Gamma
δ	=	Delta

การสกัดวิตามินอีจากเมล็ดดอกทานตะวันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต และการตกผลึกวิตามินอีโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต

Extraction of Vitamin E from Sunflower Seeds Using Supercritical Carbon Dioxide and Precipitation of Vitamin E Using Dense Carbon Dioxide

คำนำ

ปัจจุบัน โลกตื่นตัวเรื่องสุขภาพโดยเฉพาะสารต้านอนุมูลอิสระในอาหาร เพราะอนุมูลอิสระเป็นสาเหตุของโรคต่างๆมากมาย เช่น โรคมะเร็ง โรคหลอดเลือด รวมถึงการเสื่อมของเซลล์ผิวหนัง นอกจากนี้พืชจากธรรมชาติยังเป็นที่นิยมในกลุ่มผู้ใส่ใจในสุขภาพเพราะอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระคือ วิตามินอี (tocopherol) ซึ่งเป็นสารที่มีคุณค่าต่อร่างกาย เช่น ช่วยเพิ่มภูมิคุ้มกัน ส่งผลให้ผู้บริโภควิตามินอีทุกวันมีอายุยืนยาวขึ้น และไม่เจ็บป่วยด้วยโรคชราอย่างคนทั่วไป จึงมีความพยายามที่จะสกัดวิตามินอีจากธรรมชาติ ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการสกัดนั้นจะได้จากพืชเป็นส่วนใหญ่ เช่น ชา และพืชตระกูลถั่ว เป็นต้น

ดอกทานตะวันเป็นพรรณไม้ล้มลุกที่ให้ดอกขนาดใหญ่ ในดอกอันใหญ่โตนั้นจะประกอบด้วยดอกย่อยๆ หลายดอกเรียงกันอยู่บนฐานรองดอกหรือจานดอกเดียวกัน และดอกย่อยเหล่านี้ต่อไปก็จะเจริญเติบโตเป็นเมล็ด สำหรับเมล็ดของดอกทานตะวันนั้นจะมีวิตามินอีอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถใช้เติมในอาหารและเป็นส่วนผสมในยา หรือเครื่องสำอางได้ และเนื่องจากในประเทศไทย เริ่มมีการปลูกดอกทานตะวันมากขึ้นเพื่อการท่องเที่ยว จึงควรมีการนำเมล็ดดอกทานตะวันซึ่งมีวิตามินอีอยู่เป็นจำนวนมากมาใช้ประโยชน์ให้มากขึ้น จึงทำให้เกิดงานวิจัยนี้ขึ้นมา

สำหรับเทคนิคการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายที่สถานะเหนือจุดวิกฤต (supercritical fluid extraction) เป็นวิธีการสกัดที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคมากกว่าการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่สามารถแยกตัวทำละลายออกมาได้หมดสมบูรณ์ ทำให้มีตัวทำละลายตกค้างอยู่ ส่วนตัวทำละลายที่สถานะเหนือจุดวิกฤตที่ได้รับความนิยมมาก คือ คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต (supercritical carbon dioxide) เพราะมีจุดวิกฤตที่ต่ำ คือที่สถานะความดัน 72.8 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 31.1 องศาเซลเซียส ซึ่งในสถานะที่เหนือจุดวิกฤตนี้ คาร์บอนไดออกไซด์จะมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดี สามารถแยกออกจาก

ผลิตภัณฑ์ได้ง่ายหลังจากสิ้นสุดการสกัดแล้ว ทำให้ไม่ตกค้างในผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังไม่เป็นพิษ และไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ด้วยข้อดีเหล่านี้ส่งผลให้ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสกัดวิตามินอีออกจากเมล็ดดอกทานตะวัน โดยทำศึกษาวิธีการสกัด 2 วิธี เพื่อเปรียบเทียบเทียบกันคือการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ และการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดวิตามินอีออกจากเมล็ดดอกทานตะวันในแต่ละเทคนิคที่ใช้ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการตกผลึกของวิตามินอีออกจากตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตอีกด้วย

วัตถุประสงค์และขอบเขตวิจัย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของความดัน อุณหภูมิ และการใช้ตัวทำละลายร่วมที่มีต่อการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลเวลา และชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีต่อการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และชนิดตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีต่อการตกผลึกของวิตามินอีออกจากตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต
4. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดทั้ง 2 วิธี รวมถึงหาสภาวะที่เหมาะสมของการตกผลึกวิตามินอีออกจากตัวทำละลายอินทรีย์

ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการสกัดวิตามินอีจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิ 35 ถึง 45 องศาเซลเซียส ช่วงความดัน 130 ถึง 170 บาร์ และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง
2. ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการสกัดวิตามินอีจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการสกัด (0-7 ชั่วโมง) และชนิดตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ เอทานอล เมทานอล และอะซีโตน
3. ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการตกผลึกวิตามินอีจากตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต ได้แก่ ช่วงอัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 ถึง 15 มิลลิลิตรต่อนาที ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 40 องศาเซลเซียส และชนิดตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ เอทานอล เมทานอล และอะซีโตน โดยทำการล้างตัวทำละลายอินทรีย์ที่ความดัน 65 บาร์
4. หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทั้ง 2 วิธี รวมถึงหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกวิตามินอีออกจากตัวทำละลายอินทรีย์

การตรวจเอกสาร

ดอกทานตะวัน

ทานตะวันเป็นดอกไม้สีเหลือง มีดอกขนาดใหญ่กว่าดอกกรักร่ำ เป็นที่สะดุดตา บางทีดอกจะใหญ่กว่าลำต้นไม่สมดุลกัน นิยมปลูกเป็นแปลง เป็นไม้ที่ปลูกง่ายและโตเร็ว เมื่อออกดอกแล้วดอกจะหันไปทางทิศตะวันออก เป็นการทานตะวัน ไม่หันไปทางทิศอื่น จึงได้ชื่อว่า ดอกทานตะวัน ผลผลิตส่วนใหญ่อยู่ในเขตอบอุ่น เช่น สหภาพโซเวียต อาร์เจนตินา และประเทศในแถบยุโรป ตะวันออก สำหรับประเทศไทย ได้มีการส่งเสริมให้มีการปลูกทานตะวันเป็นอาชีพเสริมมากขึ้น เพื่อเพิ่มผลผลิตให้เพียงพอกับอุตสาหกรรมพืชน้ำมัน และความต้องการของผู้บริโภค ทั้งนี้ เพราะทานตะวันเป็นพืชที่มีอายุสั้นระบบรากลึก มีความทนทานต่อสภาพแห้งแล้งได้ดีกว่าพืชอื่น ๆ แหล่งปลูกที่สำคัญได้แก่ จังหวัดลพบุรี เพชรบูรณ์ และสระบุรี

1. ข้อมูลทั่วไป

1.1 ชื่อวิทยาศาสตร์	Helianthus annuus
1.2 ชื่อวงศ์	COMPOSITAE
1.3 ชื่อสามัญ	Common Sunflower
1.4 ชื่ออื่นๆ	ทานตะวัน ชอบตะวัน
1.5 ถิ่นกำเนิด	อเมริกาตะวันตก
1.6 การขยายพันธุ์	เพาะเมล็ด

2. สภาพแวดล้อม

ทานตะวันเป็นพืชที่มีการปรับตัวเข้ากับสภาพของเขตร้อนได้ดีพอสมควรไม่ไวต่อแสง สามารถออกดอกให้ผลได้ทุกสภาพช่วงแสง มีความทนทานต่อสภาพแห้งและร้อนได้พอสมควร และจะเริ่มเติบโตทันทีเมื่อมีฝน นอกจากนี้ทานตะวันยังมีความทนทานต่อสภาพอากาศเย็นจัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระยะต้นกล้า ทานตะวันขึ้นได้ดีกับดินในสภาพดินที่มีผิวดินหนาและอุ้มความชื้นไว้ได้ดี สามารถทนต่อสภาพความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ตลอดจนสภาพดินเกลือและเป็นด่างจัดได้พอสมควร ซึ่งดินเหล่านี้จะมีอยู่เป็นจำนวนมากในเขตแห้งแล้งทั่วไป

3. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ทานตะวันเป็นพืชในตระกูลเดียวกันกับเบญจมาศ คำฝอย ดาวเรือง เป็นพืชล้มลุกที่มีปลูกกันมากในเขตอบอุ่น การที่มีชื่อเรียกว่า “ทานตะวัน” เพราะลักษณะการหันของช่อดอกและใบจะหันไปทางทิศของดวงอาทิตย์ คือ หันไปทางทิศตะวันออกในตอนเช้า และทิศตะวันตกในตอนเย็น แต่การหันจะลดน้อยลงเรื่อย ๆ หลังจากมีการผสมเกสรแล้วไปจนกระทั่งถึงช่วงดอกแก่ ซึ่งช่อดอกจะหันไปทิศตะวันออกเสมอ

3.1 ราก เป็นระบบรากแก้วยังลึกลงไปประมาณ 150-270 เซนติเมตร มีรากแขนงค่อนข้างแข็งแรงแผ่ขยายไปด้านข้างได้ยาวถึง 60-150 เซนติเมตร เพื่อช่วยลำจุนลำต้นได้ดี และสามารถใช้ความชื้นระดับผิวดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 ลำต้น ส่วนใหญ่ไม่มีแขนง แต่บางพันธุ์มีการแตกแขนง ขนาดของลำต้น ความสูง การแตกแขนงขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อม การโค้งงอของลำต้นตรงส่วนที่เป็นก้านช่อดอกมีหลายแบบ แบบที่ต้องการคือแบบที่ ส่วนโค้งตรงก้านช่อดอกคิดเป็นร้อยละ 15 ของความสูงของลำต้น พันธุ์ที่มีการแตกแขนง อาจมีความยาวของแขนงสูงกว่าลำต้นหลัก แขนงอาจแตกมาจากส่วนโคนหรือยอด หรือตลอดลำต้นก็ได้

3.3 ใบ เป็นใบเดี่ยวเกิดตรงกันข้าม หลังจากที่มีใบเกิดแบบตรงกันข้ามอยู่ 5 คู่แล้ว ใบที่เกิดหลังจากนั้นจะมีลักษณะวน จำนวนใบบนต้นอาจมีตั้งแต่ 8-70 ใบ รูปร่างของใบแตกต่างกันตามพันธุ์ สีของใบอาจมีตั้งแต่เขียวอ่อน เขียว และเขียวเข้ม ใบที่เกิดออกมาจากตาขอดใหม่ ๆ ก้านใบจะอยู่ในแนวตั้งจนกระทั่งใบมีความยาว 1 เซนติเมตร ปลายยอดจะค่อย ๆ โค้งลงจนเมื่อใบแก่แล้วก็จะโค้งลงมาเป็นรูปตัวยู (U) การสร้างใบจะมีมากจนกระทั่งดอกบาน หลังจากนั้นการสร้างใบจะลดน้อยลง

3.4 ดอก เป็นรูปจาน เกิดอยู่บนตาขอดของลำต้นหลัก หรือแขนงลำต้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกอยู่ระหว่าง 6-37 เซนติเมตร ซึ่งขึ้นกับพันธุ์และสภาพแวดล้อม ดอกมีลักษณะเป็นแบบช่อดอก ประกอบด้วยดอกย่อยเป็นจำนวนมาก แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ดอกทานตะวัน

3.5 เมล็ด (หรือผล) แสดงดังภาพที่ 2 ประกอบด้วยเนื้อใน ซึ่งถูกห่อหุ้มไว้ด้วยเปลือกที่แข็งแรง เมื่อผลสุก ส่วนของดอกที่อยู่เหนือรังไข่จะร่วง ผลที่มีขนาดใหญ่จะอยู่รอบนอก ส่วนผลที่อยู่ข้างในใกล้ๆ กึ่งกลางจะมีผลเล็กลง



ภาพที่ 2 เมล็ดดอกทานตะวัน

4. ประโยชน์ของดอกทานตะวัน

แต่เดิมทานตะวันเป็นเพียงไม้ดอกไม้ประดับเท่านั้น ต่อมาได้นำมาเมล็ดมาเป็นของขบเคี้ยว และสกัดเป็นน้ำมัน จึงทำให้กลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญพืชหนึ่ง การใช้ประโยชน์จากทานตะวัน มีหลายลักษณะดังนี้

4.1 เมล็ด ใช้บริโภคโดยตรง เพื่อเป็นแหล่งโปรตีนแทนเนื้อสัตว์ได้ ในเมล็ดมีธาตุเหล็กสูง ไม่แพ้ธาตุเหล็กจากไข่แดงและตับสัตว์ เมื่ออบคั่วแห้งจะได้แป้งสีขาว มีไขมันสูง มีโปรตีนมากกว่า ร้อยละ 50 ของปริมาณแป้ง

4.2 เปลือกของลำต้น มีลักษณะเหมือนเยื่อไม้ นำมาทำกระดาษสีขาวได้คุณภาพดี ลำต้นใช้ทำเชื้อเพลิงได้ เมื่อไถกลบจะเป็นปุ๋ยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ดินได้ดี

4.3 ราก ใช้ทำแป้งเค้ก สปาเก็ตตี้ ในรากมีวิตามินบี 1 และธาตุอีกหลายชนิด แพทย์แนะนำให้ใช้รากทานตะวันประกอบอาหารสำหรับผู้ป่วยเป็นโรคเบาหวาน

4.4 น้ำมัน ทานตะวันจัดว่าเป็นพืชที่มีความสำคัญอันดับสองรองจากถั่วเหลืองที่ปลูกขึ้นเพื่อการสกัดน้ำมัน น้ำมันทานตะวันมีคุณภาพสูงเมื่อเทียบกับน้ำมันอื่นที่โลกผลิต น้ำมันที่สกัดจากเมล็ดจะให้ปริมาณน้ำมันสูงถึงร้อยละ 35 และได้น้ำมันที่มีคุณภาพสูง ประกอบด้วยกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวเช่น กรดไลโนเลอิก หรือกรดไลโนเลนิก สูงถึงร้อยละ 60-70 ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ต่อร่างกายในการช่วยลดโคเลสเตอรอลที่เป็นสาเหตุของโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือดได้ และยังประกอบด้วยวิตามิน เอ ดี อี และเค ซึ่งคุณภาพของวิตามินอีจะสูงกว่าในน้ำมันพืชอื่นๆ เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานานจะไม่เกิดกลิ่นหืน ทั้งยังทำให้สีกลิ่น และรสชาติไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาณสารอาหารในเมล็ดดอกทานตะวันแสดงดังตารางที่ 2 นอกจากใช้เป็นน้ำมันพืชแล้วยังนิยมใช้ในอุตสาหกรรม ทำเนยเทียม สี น้ำมันชักเงา สบู่ และน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์

4.5 กาก กากที่ได้จากการสกัดน้ำมันออกแล้ว จะนำไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์ได้ในกากเมล็ดทานตะวันที่จะเพาะเปลือกและบีบน้ำมันออกแล้ว จะมีโปรตีนร้อยละ 42 และใช้เป็นแหล่งแคลเซียมสำหรับปศุสัตว์ได้ดีแต่จะมีปริมาณกรดอะมิโนอยู่เล็กน้อย และขาดไลซีน จึงต้องใช้ อย่างรอบคอบ เมื่อจะเอาไปผสมเป็นอาหารสัตว์ที่มีใช้สัตว์เคี้ยวเอื้อง

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณกรดไขมันในน้ำมันพืชที่สำคัญ

รายการ	น้ำมันใน เมล็ด	กรดไขมัน อิ่มตัว	กรดไขมัน ไม่อิ่มตัว	กรดไลโนเลอิก
น้ำมันดอกคำฝอย ¹	48	8	87	72
น้ำมันข้าวโพด ¹	8	10	84	53
น้ำมันทานตะวัน ¹	40	12	83	63
น้ำมันงา ¹	45	14	80	42
น้ำมันถั่วเหลือง ¹	22	15	80	52
น้ำมันปาล์ม ¹	18	49	45	8
น้ำมันรำข้าว ²	-	16	80	37
น้ำมันเมล็ดฝ้าย (นุ่น) ²	-	25	71	50
น้ำมันถั่วลิสง ²	-	18	76	29

หน่วย: ร้อยละ

ที่มา: ¹กรมส่งเสริมการเกษตร (2545)

²เสาวนีย์ (2526)

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณสารอาหารในเมล็ดดอกทานตะวันกะเทาะเปลือก

สารอาหาร	หน่วย	ปริมาณต่อ 100 กรัม
โดยประมาณ		
Water	g	5.36
Energy	kcal	570
Energy	kJ	2385
Protein	g	22.78
Total lipid (fat)	g	49.57
Ash	g	3.53
Carbohydrate, by difference	g	18.76
Fiber, total dietary	g	10.5
Sugars, total	g	2.62

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณสารอาหารในเมล็ดดอกทานตะวันกะเทาะเปลือก (ต่อ)

สารอาหาร	หน่วย	ปริมาณต่อ 100 กรัม
วิตามิน		
Vitamin C, total ascorbic acid	mg	1.4
Thiamin	mg	2.290
Riboflavin	mg	0.250
Niacin	mg	4.500
Pantothenic acid	mg	6.745
Vitamin B-6	mg	0.770
Folate, total	mcg	227
Folate, food	mcg	227
Folate, DFE	mcg_DFE	227
Vitamin A, IU	IU	50
Vitamin A, RAE	mcg_RAE	3
Vitamin E (alpha-tocopherol)	mg	34.50
Tocopherol, beta	mg	1.30
Vitamin K (phylloquinone)	mcg	2.7

ที่มา: The Big Carrot Natural Food Market (1999)

วิตามินอี

วิตามิน (vitamin) เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งมีความจำเป็นต่อกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) และการเจริญเติบโต ผลผลิตจากพืชเป็นแหล่งของวิตามินหลายอย่างที่สำคัญต่อมนุษย์ ยกเว้นวิตามิน B₁₂ (cobalamin) ซึ่งจะสังเคราะห์ขึ้นโดยจุลินทรีย์ (micro-organisms) เท่านั้น และวิตามิน D ซึ่งได้จากการที่ผิวหนังได้รับแสงแดด วิตามินหลายชนิดในพืชจะทำหน้าที่ทางชีวเคมีเช่นเดียวกับในเซลล์ของสัตว์ ซึ่งก็คือทำหน้าที่เกี่ยวข้องในเมแทบอลิซึมของพืชและยังเป็นแหล่งวิตามินสำหรับสัตว์ด้วย แม้ว่าความต้องการวิตามินจะเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่การขาด

วิตามินจะเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับมนุษย์ การขาดวิตามินทำให้เกิดโรคทางโภชนาการได้ เช่น การขาดวิตามิน A อย่างต่อเนื่องในอาหาร โดยเฉพาะของเด็กเล็ก มีผลทำให้ตาบอดได้

วิตามินแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่ละลายในน้ำ (water-soluble vitamins) ได้แก่ วิตามิน B₁ (thiamine), B₂ (riboflavin, G), B₃ (nicotinic acid, PP), B₅ (pantothenic acid), B₆ (pyridoxine), B₇ (biotin, H), folic acid และ ascorbic acid (C)

2. กลุ่มที่ละลายในไขมัน (lipid-soluble vitamins) ได้แก่ วิตามิน A, D, E, และ K

วิตามินพวกที่ละลายในไขมันจะถูกสะสมในร่างกายได้จำนวนหนึ่ง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องกินเข้าไปทุกวัน แต่วิตามินที่ละลายในน้ำจะไม่ค่อยสะสมในร่างกาย จึงจำเป็นต้องกินอย่างสม่ำเสมอทุกๆ วัน วิตามินซึ่งต้องการในปริมาณเพียงเล็กน้อยนั้น มีความสำคัญ คือมีหน้าที่เป็น coenzymes ซึ่งทำหน้าที่ร่วมกับเอนไซม์ โดยเฉพาะกลุ่มวิตามินที่ละลายในน้ำ

สำหรับงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาการสกัดวิตามินอีออกจากเมล็ดดอกทานตะวัน ซึ่งจะขอกว่าแต่หัวข้อวิตามินอีเป็นหลัก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ประวัติและความเป็นมาของวิตามินอี

วิตามินอี เป็นสารอาหารที่มีประวัติการค้นพบมานานกว่าศตวรรษ โดยถูกค้นพบในปี 1922 โดย Evans และ Bishop ซึ่งทำการทดลองกับหนูตัวเมีย พบว่าสารสำคัญชนิดหนึ่งซึ่งยังไม่ทราบแน่ชัดว่าเป็นสารอะไร มีผลควบคุมการตั้งครรภ์ในหนูให้เป็นที่ไปตามปกติ ถ้าหนูไม่ได้รับสารนี้เพียงพอ หนูนั่นจะตั้งครรภ์ได้แต่จะแท้งลูก หลังจากการค้นพบจึงตั้งชื่อสารดังกล่าวว่า วิตามินที่ป้องกันการเป็นหมัน (antisterility vitamin) ต่อจากนั้น ในปี ค.ศ. 1936 Evan และคณะ สามารถสกัดและแยกวิตามินอีได้จากน้ำมันจมูกข้าวสาลี (Wheat germ oil) และตั้งชื่อว่า โทโคฟีรอล (Tocopherol) มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกคือคำว่า Tokos แปลว่า เด็ก (children) และ Phero แปลว่า ทำให้เกิด (to bear)

หลังจากนั้นจนถึงปัจจุบันสามารถพบอนุพันธ์ของวิตามินอีได้ทั้งหมด 8 ชนิด โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 4 ชนิด

กลุ่มแรกเป็นโทโคฟีรอล (Tocopherol) โดยมีอนุพันธ์แบ่งเป็น แอลฟาโทโคฟีรอล (α -Tocopherol) เบต้าโทโคฟีรอล (β -Tocopherol) แกมมาโทโคฟีรอล (γ -Tocopherol) และเดลต้าโทโคฟีรอล (δ -Tocopherol)

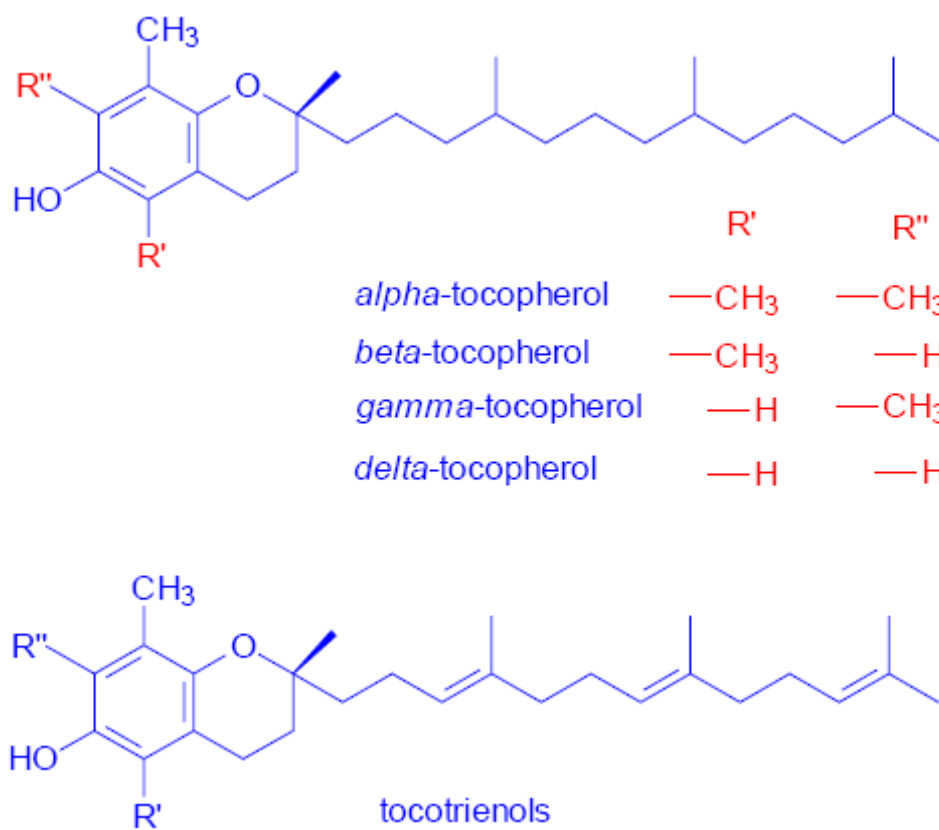
ส่วนอีกกลุ่มเป็นโทโคไตรีนอล (Tocotrienol) ซึ่งแตกต่างจากโทโคฟีรอลตรงหมู่แทนที่ด้านข้าง ซึ่งเป็นหมู่ไฟทอล (phytol group) จะมีพันธะคู่เพิ่มขึ้นมาอีก 3 แห่ง คือที่ตำแหน่ง 3', 7' และ 11' โดยมีอนุพันธ์แบ่งเป็น แอลฟาโทโคไตรีนอล (α -Tocotrienol) เบต้าโทโคไตรีนอล (β -Tocotrienol) แกมมาโทโคไตรีนอล (γ -Tocotrienol) และเดลต้าโทโคไตรีนอล (δ -Tocotrienol) รายละเอียดโครงสร้างสารอนุพันธ์ของวิตามินอี แสดงในภาพที่ 3

2. ลักษณะทางกายภาพของวิตามินอี

วิตามินอีจัดอยู่ในกลุ่มวิตามินชนิดละลายในไขมัน โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นน้ำมันใสหนืด และมีกลิ่นเล็กน้อย มีสีเหลืองอ่อนถึงน้ำตาลแดง แต่ถ้าอยู่ในรูปบริสุทธิ์จะไม่มีสี และไม่มีกลิ่นเลย ไม่ละลายในน้ำ ละลายได้ในสารละลายอินทรีย์ เช่น แอลกอฮอล์ และอีเทอร์

3. โครงสร้างของวิตามินอี

วิตามินอีประกอบด้วยส่วนหัวซึ่งเป็นส่วนที่เป็นขั้ว เรียกว่าวงแหวนโครแมน (Chroman ring) และหมู่แทนที่ด้านข้าง ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วได้มาจากหมู่ไฟทอล อนุพันธ์ของวิตามินอีชนิดแอลฟา เบต้า แกมมา และเดลต้า ทั้งของกลุ่มโทโคฟีรอล และโทโคไตรีนอลมีความแตกต่างกันที่จำนวนและตำแหน่งของหมู่เมทิล (methyl group) บนวงแหวนโครแมน เช่น แอลฟาโทโคฟีรอลจะมีหมู่เมทิลที่ตำแหน่ง R1 และ R2 ความแตกต่างระหว่างกลุ่มโทโคฟีรอลและโทโคไตรีนอลอยู่ที่หมู่แทนที่ด้านข้าง ซึ่งโทโคไตรีนอลจะมีพันธะคู่เพิ่มขึ้นมาอีก 3 แห่ง คือตำแหน่งที่ 3', 7' และ 11' ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างสารอนุพันธ์ของวิตามินอี

ที่มา: The Lipid Library (2006)

วิตามินอีส่วนใหญ่จะปรากฏอยู่ในรูปแอลฟา เบต้า แกมมา และเดลต้าโทโคฟีรอล แต่ถ้าตรวจสอบกันทางปฏิกิริยาเคมีแล้ว แบ่งความสามารถในการทำงานได้ดังนี้คือ แอลฟาโทโคฟีรอล 100% ขณะที่ตัวอื่นได้แค่ 40% 8% และ 1% ตามลำดับ นอกจากนี้จากการศึกษาทั้งในมนุษย์และสัตว์ พบว่าแอลฟาโทโคฟีรอลสามารถทำงานให้ผลดีมากที่สุด อย่างไรก็ตามถ้าต้องการผลในการป้องกันการเหม็นหืนของไขมัน วิตามินอีที่อยู่ในรูปเดลต้าโทโคฟีรอลจะให้ผลดีมากที่สุด

4. หน้าที่ทางชีวภาพของวิตามินอี

วิตามินอีจะช่วยปกป้องเซลล์ในร่างกายจากสารอนุมูลอิสระ โดยไปขัดขวางปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารในร่างกาย โดยอาศัยคุณสมบัติของมันเองที่เป็นตัวที่ไวต่อการถูกออกซิไดส์มาก จึงเป็นตัวที่ถูกออกซิไดส์เองแทนสารอื่นๆในร่างกายที่มีความไวต่อการถูกออกซิไดส์ได้น้อยกว่า ป้องกันไขมันไม่อิ่มตัวที่กินเข้าไปรวมกับออกซิเจนซึ่งจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ เป็นสารต้านไม่ให้

หลอดเลือดแข็งตัว และยังขยายหลอดเลือดฝอยเล็กๆ ได้อีกด้วย ทำให้การไหลเวียนดีขึ้น ป้องกันการเกาะตัวของเกร็ดเลือดที่ผนังหลอดเลือด จึงช่วยลดการอุดตันของโคเลสเตอรอล ทั้งตัวมันเองยังมีฤทธิ์ลดโคเลสเตอรอล ทำให้ร่างกายมีการนำพาออกซิเจนได้อย่างสะดวก ส่งผลให้ร่างกายใช้ออกซิเจนได้ดีขึ้น ทำให้กล้ามเนื้อมีกำลังมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้มีการผลิตผิวหนังขึ้นมาใหม่ ช่วยเพิ่มการทำงานของอินซูลิน ทำให้ระบบประสาทดีขึ้นสามารถทำงานได้ตามปกติ ช่วยทำให้ระบบสืบพันธุ์เป็นปกติ รักษาอาการเป็นหมันได้ ช่วยป้องกันการเกิดต่อกระจกได้ และยังเชื่อว่าทำลายฤทธิ์ของสารก่อมะเร็งได้ด้วย

5. แหล่งที่พบวิตามินอี

วิตามินอีพบมากในน้ำมันพืช เช่นจากถั่วเหลือง ข้าวโพด และดอกคำฝอย น้ำมันจมูกข้าวสาลี น้ำมันตับปลา น้ำมันมะกอก น้ำมันเมล็ดทานตะวัน แสดงดังตารางที่ 3 นอกจากนั้นยังพบในผักใบเขียว และพบน้อยลงใน เนื้อ ปลา ผลไม้ เป็นต้น โดยที่มนุษย์และสัตว์ไม่สามารถที่จะสังเคราะห์วิตามินอีได้เอง จึงจำเป็นต้องรับวิตามินอีจากอาหารที่รับประทานเข้าไป แต่มนุษย์และสัตว์สามารถสะสมวิตามินอีได้ เช่น สะสมในไข ชั้นไขมันใต้ผิวหนัง เนื้อเยื่อไขมัน (adipose tissue) และน้ำนม จากการศึกษาทั้งในมนุษย์และสัตว์ พบว่าแอลฟาโทโคฟีรอลสามารถทำงานให้ผลดีมากที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ร่างกายต้องการแอลฟาโทโคฟีรอลมากที่สุด สำหรับปริมาณวิตามินอีในพืชนั้นจะแปรผันค่อนข้างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช สายพันธุ์ อายุ นอกจากนี้อิทธิพลจากสภาวะแวดล้อมภายนอก สามารถส่งผลกระทบต่อปริมาณวิตามินอีเช่น แหล่งดิน ฤดูกาล สภาพอากาศ รวมทั้งการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวเช่น อุณหภูมิ ความชื้น และระยะเวลาในระหว่างการเก็บรักษาที่มากขึ้นทำให้ปริมาณวิตามินอีลดลง นอกจากนี้ ขั้นตอนการผลิตและการแปรรูปผลิตภัณฑ์สามารถทำลายวิตามินอีได้เช่นกัน

ตารางที่ 3 ปริมาณวิตามินอีในน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

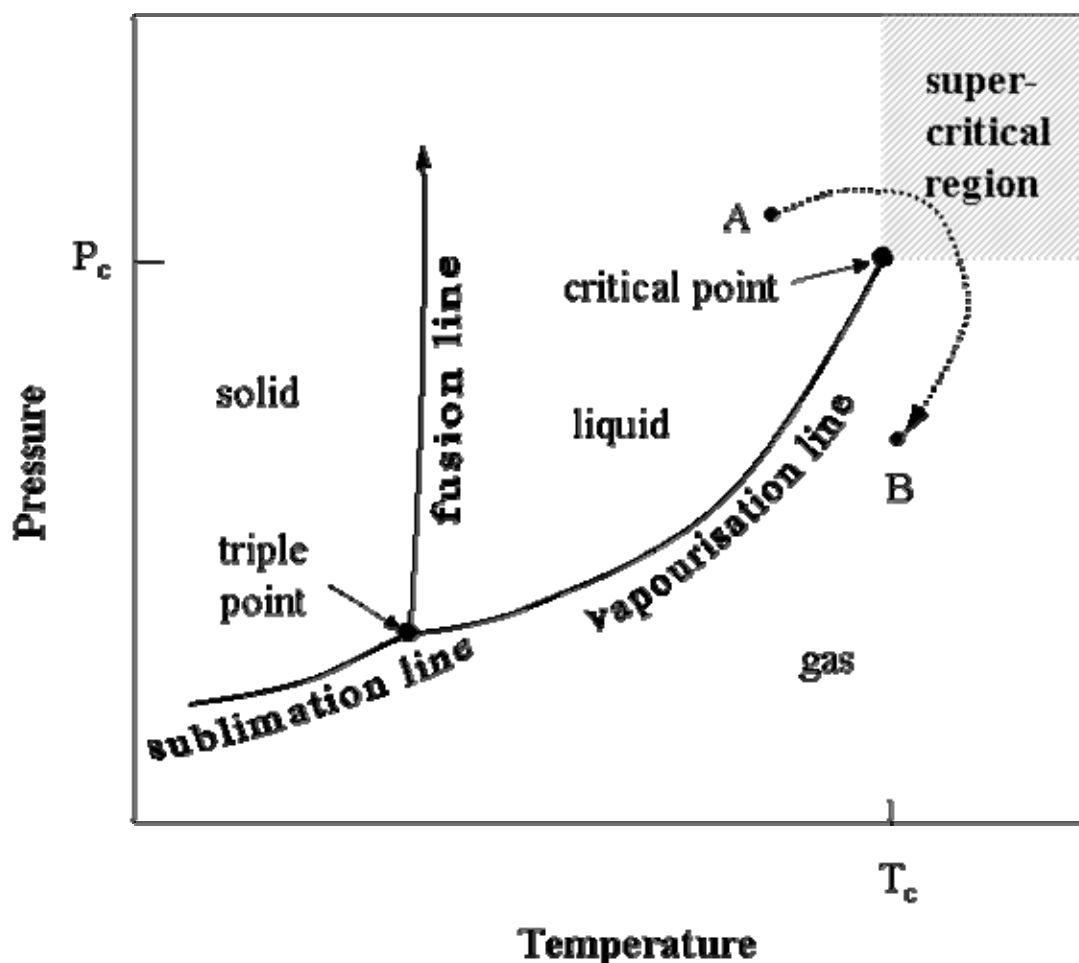
น้ำมันพืช	วิตามินอี	
	กลุ่มโทโคฟีรอล (ppm.)	กลุ่มโทโคไตรอีนอล (ppm.)
น้ำมันรำข้าว	287	558
น้ำมันมะกอก	51	-
น้ำมันข้าวโพด	888	47
น้ำมันคาโนลา	650	-
น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน	565	-
น้ำมันดอกคำฝอย	645	-
น้ำมันถั่วเหลือง	1,055	-
น้ำมันถั่วลิสง	370	-
น้ำมันปาล์ม	371	659

หมายเหตุ: ppm. = part per million หรือ มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัม

ที่มา: บริษัท น้ำมันบริโภคไทย จำกัด (2545)

ของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

ของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical Fluids, SCF) หมายถึง สารใดๆ ในสถานะซึ่งจำแนกไม่ได้ว่าเป็นก๊าซหรือของเหลว สถานะเช่นนี้สามารถอธิบายได้จากแผนภาพความดันและอุณหภูมิ (pressure-temperature phase diagram) ของสารบริสุทธิ์ใดๆ ดังภาพที่ 4 จะแสดงบริเวณที่สารอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยมีเส้นต่างๆ เป็นเส้นสมดุลระหว่าง 2 เฟส คือ เส้นที่อยู่ระหว่างบริเวณที่สารอยู่ในสถานะของแข็งกับก๊าซ เรียกว่า sublimation line เส้นที่อยู่ระหว่างของแข็งกับของเหลว เรียกว่า fusion line และเส้นที่อยู่ระหว่างก๊าซกับของเหลว เรียกว่า vapourisation line (boiling line) โดยจุดที่อยู่ระหว่างทั้ง 3 สถานะเรียกว่า triple point (TP)



ภาพที่ 4 แผนภาพแสดงความดันและอุณหภูมิของสารบริสุทธิ์ใดๆ

การเปลี่ยนเฟสจากของเหลวไปเป็นก๊าซสิ้นสุดที่จุดวิกฤต และที่เหนือจากจุดนี้เป็นของไหลที่มีเฟสเดียว เรียกว่า ของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต (แสดงในบริเวณที่แรเงา) ถ้าพิจารณาเฟสของของเหลว สามารถกลายเป็นไอโดยการลดความดันที่อุณหภูมิคงที่ และถ้าพิจารณาเฟสของก๊าซสามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้โดยการลดอุณหภูมิที่ความดันคงที่ ในบริเวณของของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตจะไม่มี การเปลี่ยนเฟสใดๆ ดังนั้นของไหลที่สถานะนี้จึงต่างจากไอหรือของเหลว จากภาพที่ 4 ถ้าเดินทางตามเส้นทางจากจุด A ไป B จะพบว่าของเหลวสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซได้โดยไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของเฟสเกิดขึ้น

ก๊าซสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวได้ 2 วิธี โดยการเพิ่มความดัน หรือลดอุณหภูมิ เพื่อลดพลังงานจลน์ (kinetic energy) ทำให้ระยะทางระหว่างโมเลกุลลดลงเกิดแรงดึงดูดระหว่างกันและควบแน่นเป็นของเหลว แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดๆหนึ่ง โมเลกุลของก๊าซจะมีพลังงานจลน์

มาก แม้จะใช้ความดันเท่าใด ก็ไม่สามารถทำให้ก๊าซเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวได้ เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต (critical temperature, T_c) และที่ความดันที่จุดนี้จะเรียกว่าความดันวิกฤต (critical pressure, P_c) จุดที่มีอุณหภูมิเท่ากับ T_c และความดันเท่ากับ P_c เรียกว่าจุดวิกฤต (critical point, CP)

ที่อุณหภูมิมากกว่า T_c และความดันมากกว่า P_c สารจะอยู่ในสภาวะที่มีคุณสมบัติจำแนกไม่ได้ว่าเป็นก๊าซหรือของเหลว เรียกสารที่อยู่ในสภาวะนี้ว่า supercritical fluid โดยค่า T_c และ P_c ของสารต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลคุณสมบัติที่จุดวิกฤตของสารชนิดต่างๆ

สาร	อุณหภูมิวิกฤต (K)	ความดันวิกฤต (MPa)	ความหนาแน่นวิกฤต (g/cm ³)
มีเทน	190.6	4.60	0.162
เอทิลีน	282.4	5.03	0.218
คลอโรไตรฟลูออโรมีเทน	302.0	3.92	0.579
คาร์บอนไดออกไซด์	304.2	7.38	0.468
อีเทน	305.4	4.88	0.203
โพรไพลีน	365.0	4.62	0.233
โพรเพน	369.8	4.24	0.217
แอมโมเนีย	405.6	11.30	0.235
ไดเอทิล อีเทอร์	467.7	3.64	0.265
นอร์มัล-เพนเทน	469.6	3.37	0.237
อะซีโตน	508.1	4.70	0.278
เมทานอล	512.6	8.09	0.272
เบนซีน	562.1	4.89	0.302
โทลูอิน	591.7	4.11	0.292
ไพรีดีน	620.0	5.63	0.312
น้ำ	647.3	22.00	0.322
ซีลอน	289.7	5.84	1.113

ที่มา: Rizvi *et al.* (1986)

ถ้ากล่าวกันตามทฤษฎีแล้ว ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตคือ ของไหลที่ทั้งอุณหภูมิและความดันอยู่สูงกว่าจุดวิกฤต แต่ในทางปฏิบัติ ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตคือ สารที่มีอุณหภูมิ $(T_r = \frac{T}{T_c})$ และความดันลด $(P_r = \frac{P}{P_c})$ อยู่ในช่วง 1.01-1.1 และ 1.01-1.5 ตามลำดับ (Brennecke and Eckert, 1989) ส่วนคำว่า dense gas หรือของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต หมายถึง สารที่อยู่ในบริเวณใกล้จุดวิกฤตหรือที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตก็ได้

ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจะมีคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ (physiochemical) อยู่ระหว่างก๊าซกับของเหลว ดังแสดงในตารางที่ 5 ความหนาแน่นของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต มีค่าใกล้เคียงกับของเหลว เมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย โมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต เกิดอันตรกิริยา (interaction) กัน ลดพลังงานเอนทาลปี (enthalpy) เกิดการละลายได้ดี และขณะเดียวกันของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตก็มีความหนืด (viscosity) ใกล้เคียงกับก๊าซ และการแพร่กระจาย (diffusivity) ดีกว่าของเหลว ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างของตัวถูกละลาย (solute matrix) ได้ดี ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ จึงนำของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต มาใช้เป็นตัวทำละลายซึ่งมีข้อดีเหนือตัวทำละลายที่เป็นของเหลวคือ มีอัตราการถ่ายเทมวล (mass transfer) เร็วกว่า และมีความสามารถในการทำละลาย (solvating power) ที่ดีกว่า เช่นมีการทดลองเปรียบเทียบการสกัดระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์เหลว (liquid CO₂) และคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (supercritical CO₂) พบว่า คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตให้อัตราการสกัดที่ดีกว่าอย่างน้อย 2-5 เท่า จึงมีบางครั้ง ที่เรียกของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตว่า super solvent

ตารางที่ 5 แสดงคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเปรียบเทียบกับก๊าซ และของเหลว

สถานะ	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การแพร่กระจาย (cm ² /sec)	ความหนืด (g/cm·sec)
ก๊าซ			
P = 1 atm, T = 15-30 °C	(0.6-2)×10 ⁻³	0.1-0.4	(1-3)×10 ⁻⁴
ของเหลว			
P = 1 atm, T = 15-30 °C	0.6-1.6	(0.2-2)×10 ⁻⁵	(0.2-3)×10 ⁻²
ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต			
P = P _c , T = T _c	0.2-0.5	0.7×10 ⁻³	(1-3)×10 ⁻⁴
P = 4P _c , T = T _c	0.4-0.9	0.2×10 ⁻³	(3-9)×10 ⁻⁴

ที่มา: Rizvi *et al.* (1986)

การศึกษาการละลายของสารในของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตครั้งแรกเกิดขึ้นในปี 1879 โดย J.B.Hannay และ J.Hogarth แสดงการละลายของเมทิลฮาไลด์ (Methyl halides) ในของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเอทานอล และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Wilke, 1978) แต่ไม่ได้รับความสนใจมากนัก มีการศึกษาถึงประโยชน์ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตอย่างจริงจังเมื่อไม่นานมานี้เอง ตัวอย่างการศึกษาเกี่ยวกับของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตซึ่งลงตีพิมพ์ใน Journal Analytical Chemistry ก่อนปี 1986 มีเพียง 2 เรื่องเท่านั้น แต่ตั้งแต่ปี 1986 จนถึงกลางปี 1989 มีมากถึง 26 เรื่อง (Hawthorne, 1990) เหตุผลสำคัญที่ทำให้ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตได้รับความสนใจได้แก่ การค้นพบว่าตัวทำละลายที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นอันตรายต่อสุขภาพ ทำลายสิ่งแวดล้อม และแหล่งของตัวทำละลายมีจำกัดลง เป็นต้น (Brown *et al.*, 1984)

การใช้ประโยชน์จากของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเริ่มต้นในทศวรรษ 1930 ซึ่งในระยะแรกจะมุ่งเน้นที่การนำมาใช้เป็นตัวทำละลายในงานสกัด (Supercritical Fluid Extraction, SFE) โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และอุตสาหกรรมอาหาร และถูกนำมาใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ในงานวิเคราะห์ (Supercritical Fluid Chromatography, SFC) ครั้งแรกในปี 1962 (Brown *et al.*, 1984)

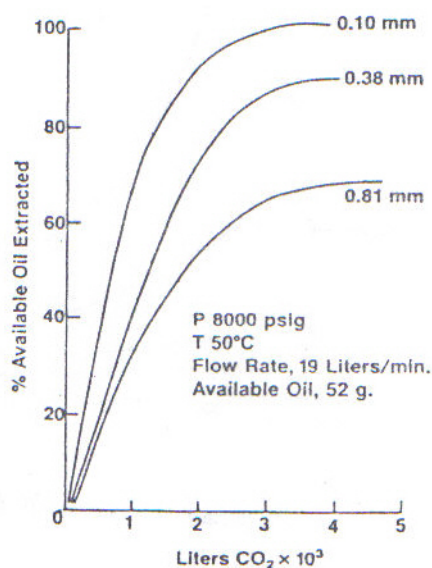
1. คุณสมบัติของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

1.1 คุณสมบัติการถ่ายเท (transportation property)

จากการที่ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีความหนืดต่ำ และสัมประสิทธิ์การแพร่สูง ทำให้สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง สามารถแทรกซึม (penetrate) เข้าโครงสร้างของตัวถูกละลายได้ดี และทำให้ตัวถูกละลายที่ละลายเข้าไปในของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตกระจายออกจากบริเวณการสกัด (extraction zone) ไปบริเวณอื่นได้ง่าย อัตราการถ่ายเทมวล (mass transfer rate) ดี ส่งผลให้ ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลายที่ดี

ค่าความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความดัน และชนิดของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต จึงต้องมีการปรับสภาวะให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถสกัดสารที่ต้องการได้ดีที่สุด

อัตราการถ่ายเทมวล (mass transfer rate) นอกจากเป็นผลโดยตรงจากค่าความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตแล้ว ยังขึ้นกับระยะทางการแพร่ (diffusion distance) และอุปสรรคต่างๆในการแพร่ (diffusion barriers) ซึ่งเป็นปัจจัยจากโครงสร้างของตัวถูกละลายด้วย จากภาพที่ 5 แสดงผลของขนาดอนุภาคของตัวถูกละลายต่อผลผลิต (yield) ของน้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดถั่วเหลือง พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคลดลง จะได้ผลผลิตมากขึ้น การลดขนาดอนุภาคของตัวถูกละลายจะลดระยะทางในการแพร่เข้าไปในโครงสร้างของผนังเซลล์ (cell wall) ซึ่งเป็นสิ่งกีดขวางในการแพร่ (Marentis, 1988)



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพของการสกัดน้ำมันถั่วเหลืองด้วยของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต เมื่อใช้ผงเมล็ดถั่วเหลืองที่มีขนาดต่างๆกัน

ที่มา: Marentis (1988)

1.2 ความสามารถในการทำละลาย (solvating power)

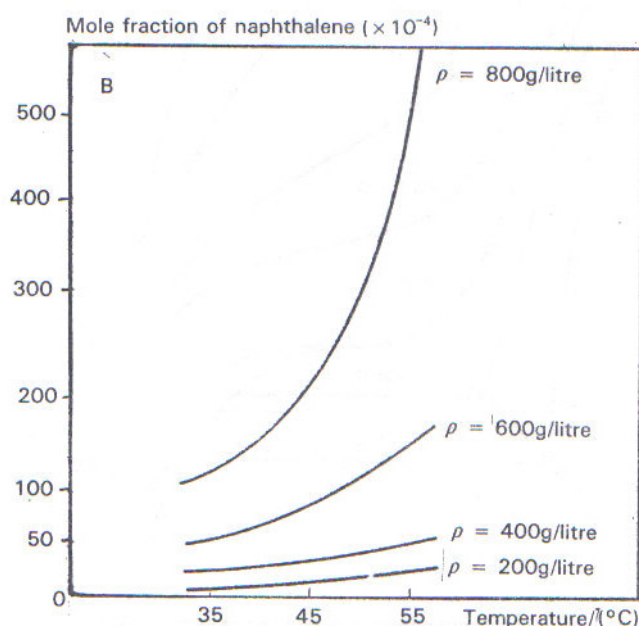
ความสามารถในการทำละลาย เป็นคุณสมบัติเด่นประการหนึ่งของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ดีกว่าตัวทำละลายที่เป็นของเหลวทั่วไป เนื่องจากสามารถปรับให้มีค่ามากหรือน้อยได้ง่ายกว่า โดยการปรับสภาวะของตัวทำละลาย ซึ่งตัวแปรที่มีผลสำคัญคือ อุณหภูมิ โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวทำละลายที่เป็นของเหลว จะทำให้มีการละลายเพิ่มขึ้น แต่ในของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตการเพิ่มอุณหภูมิจะก่อให้เกิดผล 2 ประการที่ขัดแย้งกัน คือ

1.2.1 เพิ่มความดันไอของตัวถูกละลาย (solute) ดังนั้นการละลายของตัวถูกละลายจะเพิ่มขึ้น

1.2.2 ลดความหนาแน่นของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ทำให้โมเลกุลของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตกับตัวถูกละลายอยู่ห่างกัน การละลายของตัวถูกละลายจึงลดลง

จากสาเหตุทั้ง 2 ประการนี้ จะทำให้ความสามารถในการทำละลายของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตไม่ส่งผลที่ชัดเจนนักเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งข้อขัดแย้งในประการที่ 2

สามารถแก้ไขได้โดยการให้ความดันกับของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตก่อนเพื่อคงสภาพความหนาแน่นให้ใกล้เคียงกับสถานะเดิม จากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิ กล่าวโดยสรุปคือ ตัวแปรที่มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการทำละลายคือ อุณหภูมิและความหนาแน่น ดังแสดงตามภาพที่ 6 (Brogle, 1982) ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการละลายของแนฟทาลินในคาร์บอนไดออกไซด์

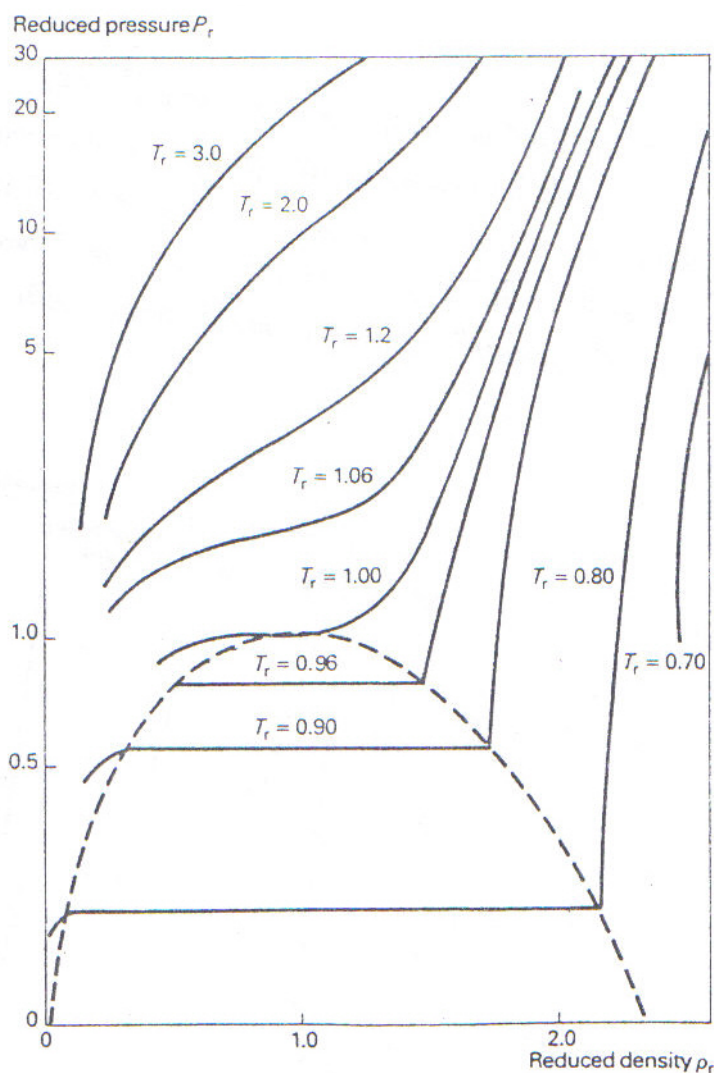


ภาพที่ 6 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการละลายแนฟทาลินในคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความหนาแน่นต่างๆ

ที่มา: Brogle (1982)

ในปี 1981 D.F.Williams ได้อธิบายคุณสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนาแน่น และความดัน นำเสนอในรูปแบบของตัวแปรลด (reduced variable, $T_r = \frac{T}{T_c}$, $P_r = \frac{P}{P_c}$) ดังภาพที่ 7 ในช่วงที่เป็นเส้นโค้งคือบริเวณที่ของเหลวและก๊าซเกิดการสมดุลกัน (ช่วงที่ก๊าซเกิดการควบแน่นเป็นของเหลว) ของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตคือบริเวณ T_r และ P_r มีค่ามากกว่า 1 ส่วนในช่วง T_r 0.95-1.0 เรียกว่า ของเหลวใกล้จุดวิกฤต (near-critical liquid, NCL) ที่บริเวณจุดวิกฤต การเปลี่ยนแปลงความดันเพียงเล็กน้อยจะทำให้มีความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปมาก แต่ที่อุณหภูมิสูงๆ (T_r มีค่ามาก) กราฟจะมีลักษณะลาดชัน การเพิ่มความหนาแน่น จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างมาก ก่อให้เกิดปัญหาด้านเครื่องมือ และที่อุณหภูมิสูงๆ ความหนาแน่นจะมีค่าค่อนข้างต่ำจนสภาพไม่เหมาะสมที่จะใช้

งาน ดังนั้นจึงนิยมใช้ของไหลที่สถานะเหนือบริเวณจุดวิกฤตเพียงเล็กน้อย เนื่องจากสามารถเปลี่ยนความสามารถในการทำละลายโดยการปรับความดันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

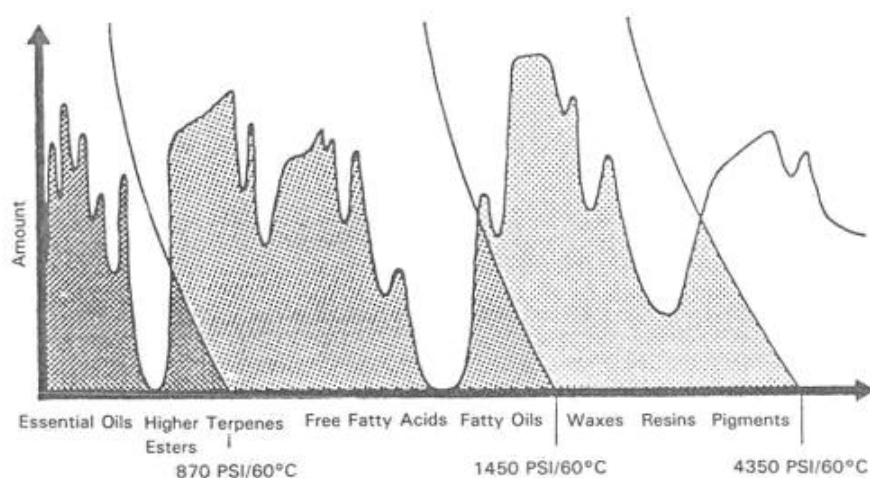


ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนาแน่น และความดัน ในรูปของตัวแปรลด
ที่มา: Williams (1981)

1.3 คุณสมบัติในการเลือกสกัด (selectivity property)

การเลือกสกัดเป็นคุณสมบัติของของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตที่สามารถปรับอุณหภูมิและความดัน เพื่อให้มีความสามารถในการทำละลายที่เหมาะสมเฉพาะกับสารที่ต้องการสกัด โดยมีสารที่ไม่ต้องการปนมาน้อยที่สุด ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนคือ การสกัดสารจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ (Natural products) หากต้องการให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตมี

คุณสมบัติคล้าย steam distillation คือ ต้องการสภาวะที่ระเหยง่าย ก็ใช้ low solvent power คือ ปรับให้สภาวะอยู่ในบริเวณของจุดวิกฤต (CP) เช่นตามภาพที่ 8 คือ 870 p.s.i. / 60 °C ซึ่งในสภาวะเช่นนี้ยังสามารถนำมาใช้ขจัดกลิ่นจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติอีกด้วย หากต้องการสกัดสารทุกชนิด ให้ใช้อุณหภูมิและความดันสูงๆ คือ 4,350 p.s.i. / 60 °C แต่มักจะได้ ผลิตภัณฑ์ที่มีสีจางลง ตัวอย่างเช่น การสกัด hop หากใช้ความดัน 300 บาร์ จะได้สารสีเขียว แต่ที่ 140 บาร์ จะได้สีเหลือง (Brogle, 1982)



ภาพที่ 8 แก๊สโครมาโตแกรมของสารจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ ซึ่งสามารถสกัดได้ด้วย

คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่สภาวะต่างๆ

ที่มา: Brogle (1982)

2. สารปรับแต่ง (Modifiers)

สารปรับแต่ง (Modifiers หรือ Entrainers หรือ Entrained solvent) คือ ตัวทำละลายตัวที่สอง (secondary solvent) ได้แก่ ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด (conventional solvents) ชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถละลายผสม (miscible) ได้ กับของเหลวหลัก (primary fluid) ได้อย่างสมบูรณ์ มีผลให้ความสามารถในการทำละลายของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม การเติมสารปรับแต่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสไดอะแกรม การทำนายพฤติกรรมของตัวทำละลาย (solvent behavior) เป็นไปได้ยาก เนื่องจากความรู้ทางด้านนี้ยังมีจำกัด ผลของสารปรับแต่งจึงต้องใช้การทดลองเป็นเครื่องตัดสิน

ตัวอย่างการใช้สารปรับแต่ง เช่น

2.1 การเติมโพรเพน (propane) ลงในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต เพื่อช่วยการสกัดไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) และกรดไขมัน (fatty acids)

2.2 การเติมอะซีโตน (acetone) ลงในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต เพื่อสกัดไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) พบว่าสามารถลดความดันที่ใช้จาก 13.5 MPa (1,960 p.s.i.) เหลือเพียง 8 MPa (1,160 p.s.i.) ซึ่งลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 30% (Peter and Brunner, 1978)

2.3 การเติมน้ำ 0.1% ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการขจัด 1-butanol และ n-butyl acetate ที่ติดมาในการสกัดแยก penicillin G (Verrall, 1992)

3. การเลือกชนิดของของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

จากการศึกษาของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตชนิดต่างๆ สารที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีปริมาณมาก ไม่เป็นพิษ ไม่ไวไฟ ไม่ก่อให้เกิดเครื่องมือเกิดสนิม ราคาถูก หาได้ง่าย ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม เป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับสารที่ไม่มีขั้ว สามารถใช้ร่วมกับตัวทำละลายร่วม (Co-solvents) ชนิดอื่นได้ เช่น แอลกอฮอล์ อีเทอร์ แอลดีไฮด์ และคีโตน เป็นต้น และการที่มี T_c ต่ำ ($T_c = 31\text{ }^{\circ}\text{C}$) ทำให้สามารถจัดออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย เพียงทิ้งไว้ที่อุณหภูมิและความดันห้อง ทำให้ใช้กับสารที่ไม่ทนความร้อนได้ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะนำไปใช้ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้ตามตารางที่ 6

อย่างไรก็ตาม คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต มีคุณสมบัติค่อนข้างไม่มีขั้ว (non-polar) จึงเหมาะสมกับสารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และเป็นตัวทำละลายที่แย่ (poor solvent) สำหรับสารที่มีขั้ว (polar group) เช่น น้ำตาล แป้ง เกลือแร่ กรดไขมัน กรดอะมิโน กลีโคไซด์ (glycosides) สารอัลคาลอยด์ ส่วนมาก ฤทธิ์ของน้ำตาลและกรดอะมิโน แม้จะใช้อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันมากถึง 2,000 บาร์ ก็มีการละลายเพียง 1:200,000

ส่วนกรณีของสารอัลคาลอยด์ เช่น การสกัด cannabinol, colchicines, codeine จากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติจะใช้ไนตรัสออกไซด์ ซึ่งดีกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากไนตรัสออกไซด์มีความเป็นขั้ว (dipole moment) และมีความหนาแน่นมากกว่า

ตารางที่ 6 แสดงรายละเอียดจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่กำหนดสำหรับงานสกัด

รายละเอียดจำเพาะ	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
กลิ่น	ไม่เหม็นไหม้และฉุน
สี	ปราศจากสี
ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	น้อยที่สุด 99.9 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร วัดในสถานะของเหลวหรือก๊าซ
PH ₃ , H ₂ S และสารอินทรีย์ที่หลงเหลืออยู่	ไม่สามารถตรวจจับได้ใน 100 l (STP) ของก๊าซ
สารพิษอื่นๆ เช่น SO ₂ , HCl	ไม่สามารถตรวจจับได้ใน 100 l (STP) ของก๊าซ
คาร์บอนมอนอกไซด์	น้อยกว่า 2 ส่วนในล้านโดยปริมาตร
ส่วนประกอบที่สามารถเกิดการออกซิไดซ์	ไม่เกิน 1 ส่วนในล้านโดยปริมาตร
ปริมาณสารที่เหลือจากการระเหย	ไม่เกิน 1 ส่วนในล้านโดยปริมาตร

ที่มา: Hubert and Vitzthum (1966)

4. ประโยชน์ของของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

แม้ว่าของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตจะเป็นที่รู้จักกันมานานแล้ว แต่การนำมาใช้ประโยชน์เพิ่งเริ่มแพร่หลายเมื่อไม่นานมานี้เอง สามารถสรุปประโยชน์ของของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตได้ดังนี้

4.1 ใช้เป็นตัวทำละลายในงานสกัด (Supercritical fluid extraction) ทั้งงานสกัดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมากๆและที่ได้รับการพัฒนาค่อนข้างมากคือ งานสกัดในปริมาณน้อยๆจุดประสงค์เพื่อนำสารสกัดไปวิเคราะห์ต่อไป

4.2 ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ในงานวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟี (Supercritical fluid chromatography)

4.3 พบว่าผลึกของสารบางชนิดที่ได้จากการสกัดด้วยของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตจะอยู่ในรูปผลึกที่มีขนาดเล็ก (microfine crystals) (10-50 μm) เมื่อนำมาศึกษาโดย X-ray diffraction แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของผลึกที่ได้นี้จะมีลักษณะเหมือนสารนั้นในสภาพเริ่มต้น จึงมีการเสนอว่า วิธีนี้สามารถใช้สำหรับลดขนาดอนุภาคแทนการบด (milling) ได้ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้อุณหภูมิที่สูง

4.4 มีรายงานว่าวิธีสกัดสารด้วยของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตสามารถฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ จึงมีการเสนอว่า วิธีนี้สามารถใช้ในการ sterilization สารที่ไม่ทนความร้อน หรือใช้เป็น preliminary ในการสกัดผลึกจากเชื้อจุลินทรีย์ที่เพาะเลี้ยงไว้

5. ข้อเสียของการสกัดด้วยของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

การสกัดด้วยของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตมีข้อเสียอยู่บ้าง เช่น ต้นทุนของเครื่องมือมีราคาแพง และไม่สามารถใช้สกัดวัตถุดิบในปริมาณมาก อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในการสกัดสารที่มีขี้ผึ้ง เนื่องจากของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตส่วนใหญ่ที่นำมาใช้สกัดสารมักจะเป็นของไหลที่ไม่มีขี้ผึ้ง และมีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ระหว่าง 0 -100 $^{\circ}\text{C}$ ทำให้การสกัดสารที่มีขี้ผึ้งมีข้อจำกัด ดังตัวอย่างเช่น การนำคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้เป็นของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์นี้เป็นสารที่ไม่มีขี้ผึ้ง ทำให้การสกัดสารที่มีขี้ผึ้งมีประสิทธิภาพที่ต่ำ เนื่องจากความสามารถในการละลาย (solubility) ของตัวถูกละลายในตัวทำละลายต่ำ ถึงแม้ว่าจะมีการเติมตัวทำละลายร่วม (co-solvent) ลงไปเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารแล้วก็ตาม

แต่บางครั้งการใช้ตัวทำละลายร่วมก็มีข้อเสีย คือ เป็นการลดความจำเพาะเจาะจงของสารที่ต้องการสกัด ทำให้ได้สารหลายชนิดมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเลือกตัวทำละลายร่วมให้มีความเหมาะสมกับสารที่ต้องการสกัด เช่น ไม่สามารถใช้น้ำร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เพราะคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำได้น้อย นอกจากนี้การใช้เมทานอลยังมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นพิษต่อมนุษย์ กล่าวคือถ้าความเข้มข้นของตัวทำละลายร่วมไม่เหมาะสม ก็อาจส่งผลกระทบต่อปริมาณสารที่ต้องการสกัดได้เช่นเดียวกัน ซึ่งอาจจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณตัวทำละลายร่วมให้สูงขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัด ซึ่งอาจทำให้เกิดการตกค้างของตัวทำละลายร่วมในสารที่สกัดได้ ถ้าเลือกใช้ตัวทำละลายร่วมที่มีความดันหรืออุณหภูมิวิกฤตสูงก็จะส่งผลให้ต้องใช้ความดันหรืออุณหภูมิของระบบที่สูงขึ้นตาม ซึ่งอาจส่งผลเสียได้ในกรณีที่สารที่ต้องการสกัดไม่ทนต่อสถานะที่

ใช้ในการสกัดสารเหล่านี้ นอกจากนั้นการใช้ตัวทำละลายร่วมอาจส่งผลให้ต้นทุนการผลิตมีราคาที่สูงขึ้นได้ ตัวอย่างของตัวทำละลายร่วมที่นิยมใช้ร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต เช่น เอทานอล เป็นต้น

การสกัดด้วยของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

หลักการของของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตถูกนำมาใช้ในงานสกัด (เรียกว่า Supercritical Fluid Extraction, SFE) โดยมีจุดประสงค์เพื่อสกัดสารที่มีคุณค่าออกมาจากวัตถุดิบ หรือขจัดสารที่ไม่พึงปรารถนาออกจากวัตถุดิบ (เช่น คาเฟอีน) และที่สำคัญคือเพื่อทดแทนการใช้สารละลายอินทรีย์ในการสกัดแบบวิธีดั้งเดิม อันเป็นที่ทราบกันดีถึงผลเสียต่างๆ เช่น การมีสารตกค้างในผลิตภัณฑ์

การสกัดด้วยของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือการสมดุลของเฟส (phase equilibria) ระหว่างของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตและสารที่ต้องการสกัด เพื่อปรับให้ได้ความสามารถในการละลายที่เหมาะสม แต่ข้อมูลเหล่านี้ยังมีไม่เพียงพอ และในบางคราวก็ไม่เป็นไปตามทฤษฎี เช่น นิโคตินในยาสูบ หรือคาเฟอีนในเมล็ดกาแฟ อาจจะมีการจับเป็นเกลือ (complex salt) กับกรดคลอโรจีนิก (chlorogenic acid), กรดซิตริก (citric acid) ฯลฯ ทำให้การสกัดเป็นไปได้ยากขึ้น จึงต้องใช้น้ำเป็นสารปรับแต่ง

วิธีและหลักการสกัดด้วยของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการสกัด และลักษณะของวัตถุดิบ แต่โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนเสมอ คือ

1. ขั้นตอนการสกัด (extraction) เป็นส่วนที่มีการสกัดเกิดขึ้น โดยควบคุมอุณหภูมิและความดันของของไหลให้สูงกว่าจุดวิกฤต
2. ขั้นตอนการแยก (separation) เป็นขั้นตอนที่ปรับสภาวะให้ของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตกลายเป็นก๊าซ หรือมีความสามารถในการละลายลดลง ปลดปล่อยสารที่สกัดได้ออกมา หากเลือกคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลาย ในขั้นตอนนี้สามารถกระทำ

ง่าย ๆ เพียงทิ้งสารสกัดไว้ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศปกติ คาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในสถานะก๊าซและแยกออกจากสารสกัดโดยไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานเลย

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดด้วยของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตนั้น มีผู้ทำการศึกษาอยู่มากมาย ในที่นี้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือการศึกษาการสกัดวิตามินอี หรือ โทโคฟีรอล และการสกัดสารอื่นๆ

ในส่วนของการศึกษาการสกัดวิตามินอี มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

ภทิรา และคณะ (2546) ทำการศึกษาการสกัดวิตามินอีจากใบปาล์มน้ำมันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต โดยใช้ใบปาล์มน้ำมันอบแห้งบด ขนาดอนุภาค 850 ไมโครเมตร จำนวน 0.50 กรัม ทำการศึกษาการสกัดที่สถานะอุณหภูมิคงที่ที่ 40 องศาเซลเซียส ความดันในช่วง 15 ถึง 35 เมกกะปาสคาล (150 ถึง 350 บาร์) และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตในช่วง 0.26 ถึง 1.00 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการสกัดคือ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 15 เมกกะปาสคาล (150 บาร์) และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต 1.00 มิลลิลิตรต่อนาที ได้ปริมาณสารแอลฟาโทโคฟีรอลเท่ากับ 122.18 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง

Hadolin *et al.* (2001) ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการสกัดวิตามินอีด้วยความดันสูงจากเมล็ด *Silybum marianum* ตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลองคือคาร์บอนไดออกไซด์และโพรเพนที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ทำการทดลองที่สถานะต่างๆคือ สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเลือกใช้ความดัน 100 200 300 บาร์ และอุณหภูมิ 25 40 60 และ 80 องศาเซลเซียส สำหรับโพรเพนที่สถานะเหนือจุดวิกฤต เลือกใช้ความดัน 60 150 200 บาร์ และอุณหภูมิ 40 60 และ 80 องศาเซลเซียส ผลการวิจัย พบว่าเมื่อใช้โพรเพนเป็นตัวทำละลาย อัตราการสกัดจะไม่ขึ้นกับความดัน และอุณหภูมิ ในทางกลับกันเมื่อใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลาย อัตราการสกัดจะขึ้นกับความดันและอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่อความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการสกัดก็จะมากขึ้นด้วย สำหรับผลการทดลองที่ดีที่สุดคือการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตที่สถานะความดัน 200 บาร์ และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถสกัดวิตามินอีได้เข้มข้นสูงสุด 0.08 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักโดยน้ำหนัก

Lucas *et al.* (2002) ทำการศึกษาการสกัดโทโคฟีรอลจากใบมะกอกด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ทำการศึกษาที่สภาวะความดันในช่วง 25 ถึง 45 เมกะปาสกาล (250 ถึง 450 บาร์) ขนาดของอนุภาคในช่วง 0.25 ถึง 1.5 มิลลิเมตร อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในช่วง 0.5 ถึง 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิในช่วง 313 ถึง 333 เคลวิน (40 ถึง 60 องศาเซลเซียส) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดอยู่ที่ความดัน 25 เมกะปาสกาล (250 บาร์) ขนาดของอนุภาค 1.5 มิลลิเมตร อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต 1 มิลลิลิตรต่อนาที และอุณหภูมิ 313 เคลวิน (40 องศาเซลเซียส) ซึ่งสภาวะดังกล่าวนี้สามารถสกัดโทโคฟีรอลได้ความเข้มข้นสูงสุด 74 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักโดยน้ำหนัก

Yiqiang *et al.* (2002) ทำการศึกษาการสกัดวิตามินอีจากจมูกข้าวสาลีด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งก่อนการสกัดทำการเตรียมจมูกข้าวสาลีให้มีขนาด 30 mesh และมีปริมาณความชื้น 5.1 เปอร์เซ็นต์ ทำการศึกษาที่สภาวะความดันในช่วง 2,000 ถึง 6,000 psi (140 ถึง 415 บาร์) อุณหภูมิในช่วง 35 ถึง 50 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในช่วง 1.0 ถึง 3.0 มิลลิลิตรต่อนาที ในช่วงเวลาระหว่าง 0 ถึง 120 นาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดอยู่ที่สภาวะความดันระหว่าง 4,000 ถึง 5,000 psi (275 ถึง 345 บาร์) อุณหภูมิระหว่าง 40 ถึง 45 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ 2.0 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที

ในส่วนของการสกัดสารอื่นๆ มีผู้ทำการศึกษา ดังนี้

อกินันท์ และคณะ (2541) ทำการศึกษาการสกัดคาเฟอีนออกจากเมล็ดกาแฟเขียวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่สภาวะความดัน 100 200 และ 300 บรรยากาศ (101.325 202.65 และ 303.975 บาร์) อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความชื้นเมล็ดกาแฟเขียวที่ใช้คือ 0 20 และ 45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ พบว่าความสามารถในการสกัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันและความชื้นของเมล็ดกาแฟเพิ่มขึ้น เมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากวิธีการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่สภาวะความดัน 200 และ 300 บรรยากาศ (202.65 และ 303.975 บาร์) ความชื้นเมล็ดกาแฟ 45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ค่าอยู่ในช่วง $1.73 \times 10^{-6} - 8.6 \times 10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งสูงกว่า

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สกัดด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทนที่มีค่าอยู่ในช่วง $7 \times 10^{-7} - 1.1 \times 10^{-6}$ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

Tonthubthimthong *et al.* (2001) ทำการศึกษาการสกัดสารที่มีประโยชน์ทางการแพทย์ที่มีชื่อว่านิมบิน (nimbin) จากเมล็ดสะเดาด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยทำการศึกษาที่สภาวะความดันในช่วง 10 ถึง 26 เมกะปาสกาล (100 ถึง 260 บาร์) อุณหภูมิในช่วง 300 ถึง 333 เคลวิน (27 ถึง 60 องศาเซลเซียส) และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในช่วง 0.24 ถึง 1.24 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดอยู่ที่ความดัน 23 เมกะปาสกาล (230 บาร์) อุณหภูมิ 308 เคลวิน (35 องศาเซลเซียส) และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต 1.24 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับสารตัวอย่างสะเดา 2 กรัม อัตราการสกัดที่วัดได้คือ 0.18 มิลลิกรัมของสารนิมบินต่อกรัมของเมล็ดสะเดาต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.35 กิโลกรัมของสารนิมบินที่สกัดได้ต่อกิโลกรัมของสารนิมบินที่มีอยู่ในเมล็ดสะเดา

Ozkal *et al.* (2005) ทำการศึกษาการสกัดน้ำมันจากถั่วชนิดหนึ่ง (hazelnut) ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ทำการศึกษาถั่วที่ใช้สกัดขนาด 1 ถึง 2 มิลลิเมตร ความดันระหว่าง 15 ถึง 60 เมกะปาสกาล (150 ถึง 600 บาร์) อุณหภูมิระหว่าง 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในช่วง 2 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าจุดตัดความดัน (crossover pressure) ของน้ำมันจาก hazelnut อยู่ระหว่าง 15 ถึง 30 เมกะปาสกาล (150 ถึง 300 บาร์) และความสามารถในการละลายจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน แต่สำหรับผลของอุณหภูมิความสามารถในการละลายจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในบริเวณเหนือจุดตัดความดันและการสกัดเกิดขึ้น 2 ช่วง คือช่วงการสกัดเร็วกับช่วงการสกัดช้า ช่วงการสกัดเร็วคือน้ำมันที่สามารถสกัดได้จากบริเวณผิวของอนุภาค ซึ่งในตอนเริ่มต้นของแต่ละสภาวะการทดลองสามารถสกัดน้ำมันได้ 39 เปอร์เซ็นต์ ช่วงการสกัดช้าคือน้ำมันที่อยู่ภายในเซลล์ของอนุภาค ผลการสกัดที่ได้สูงสุดคือ 59 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 60 เมกะปาสกาล (600 บาร์) และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สกัดเป็นเวลา 180 นาที ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารของเฟสของเหลวและเฟสของแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดด้วยของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

1. อุณหภูมิ

อภินันท์ และคณะ (2541) ทำการศึกษาการสกัดคาเฟอีนออกจากเมล็ดกาแฟเขียวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 40 ถึง 70 องศาเซลเซียส พบว่าที่ความดัน 100 บรรยากาศ (101.325 บาร์) ความสามารถในการสกัดคาเฟอีนอยู่ในระดับที่ต่ำ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการสกัดลดลงตามไปด้วย แต่ที่ความดัน 200 และ 300 บรรยากาศ (202.65 และ 303.975 บาร์) ความสามารถในการสกัดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากที่สถานะนี้ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการไปเพิ่มความดันไอของคาเฟอีน ทำให้คาเฟอีนสามารถละลายเข้าไปในตัวทำละลายได้ดี จึงทำให้ผลการสกัดสูงขึ้น

Tonthubthimthong *et al.* (2001) ทำการศึกษากัดนิมบินจากเมล็ดสะเดา โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 20 เมกะปาสกาล (200 บาร์) น้ำหนักเมล็ดสะเดา 2 กรัม อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ที่ 0.62 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 308 ถึง 333 เคลวิน (30 ถึง 60 องศาเซลเซียส) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้ปริมาณการสกัดสารมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการทำละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

2. ความดัน

อภินันท์ และคณะ (2541) ทำการศึกษาการสกัดคาเฟอีนออกจากเมล็ดกาแฟเขียวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต เมื่อทำการเพิ่มความดันจาก 100 ถึง 300 บรรยากาศ (101.325 ถึง 303.975 บาร์) ที่อุณหภูมิคงที่ พบว่าความสามารถในการสกัดคาเฟอีนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความดันจะส่งผลให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายสูงขึ้น เป็นผลให้คาเฟอีนสามารถละลายในตัวทำละลายได้มากยิ่งขึ้น

Tonthubthimthong *et al.* (2001) ทำการศึกษากัดนิมบินจากเมล็ดสะเดา โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 328 เคลวิน (55 องศาเซลเซียส) น้ำหนัก

เมล็ดสะเดา 2 กรัม อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ที่ 0.62 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความดันในช่วง 10 ถึง 26 เมกกะปาสกาล (100 ถึง 260 บาร์) พบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นในช่วง 10 ถึง 23 เมกกะปาสกาล (100 ถึง 230 บาร์) อัตราการสกัดสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อความดันสูงขึ้น ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต จะมีค่าใกล้เคียงกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะของเหลวยิ่งขึ้น ทำให้ความสามารถในการทำละลายของคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นด้วย แต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นจาก 20 เมกกะปาสกาล (200 บาร์) เป็น 26 เมกกะปาสกาล (260 บาร์) พบว่าอัตราการสกัดจะลดลง แสดงให้เห็นว่าการสกัดด้วยของไหลที่สถานะใกล้จุดวิกฤตจะมีความดันที่เหมาะสมอยู่ค่าหนึ่ง ถ้าเพิ่มความดันเกินจุดนี้แล้วจะทำให้อัตราการสกัดที่ได้ลดน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากความดันที่สูงเกินไปจะทำให้ความสามารถในการแพร่ของของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤตลดลง และยังส่งผลให้เกิดการอัดแน่นของวัสดุที่นำมาสกัด ทำให้ช่องว่าง (void fraction) ลดลง

3. อัตราการไหลของของไหลที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

Louli *et al.* (2004) ทำการศึกษาการสกัดน้ำมันจากเมล็ดผักชีฝรั่ง (Parsley seed) โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 10 เมกกะปาสกาล (100 บาร์) ขนาดอนุภาค 293 ไมโครเมตร และอุณหภูมิ 318 เคลวิน (45 องศาเซลเซียส) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็น 0.7 1.1 และ 2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลให้อัตราการสกัดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการสกัดถูกควบคุมโดยการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion)

Doker *et al.* (2004) ทำการศึกษาการสกัดเบตาแคโรทีน (β -carotene) จาก apricot bagasse ที่ได้จากโรงงานผลิตน้ำผลไม้ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ในเครื่องสกัดแบบแพคเบด (packed bed extractor) ที่มีปริมาตรของหอสกัด 10×10^{-3} ลูกบาศก์เมตร มีน้ำหนักสารในหอสกัด 2×10^{-3} กิโลกรัม จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 1.16×10^{-8} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เป็น 3.33×10^{-8} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที จะทำให้การสกัดได้ปริมาณสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มที่อยู่รอบๆ อนุภาคของแข็งบางลง ส่งผลให้ความต้านทานการแพร่ของสารที่อยู่รอบๆ อนุภาคของแข็งลดลง ปริมาณสารที่สกัดได้จึงสูงขึ้น

4. ขนาดอนุภาค

Louli *et al.* (2004) ทำการศึกษาการสกัดน้ำมันจากเมล็ดผักชีฝรั่ง (Parsley seed) โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 10 เมกะปาสกาล (100 บาร์) อุณหภูมิ 318 เคลวิน (45 องศาเซลเซียส) และอัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ที่ 1.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เมื่อทำการปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคของเมล็ดผักชีฝรั่งบดที่นำมาสกัดจาก 293 ไมโครเมตร เป็น 495 ไมโครเมตร พบว่าอัตราการสกัดสารจะลดลงเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคของเมล็ดผักชีฝรั่งบด ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์ของเมล็ด (seed cells) จะถูกทำลายจากการบดเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดอนุภาคยิ่งเล็กลง ทำให้การสกัดสารทำได้ง่ายขึ้น อัตราการสกัดสารจึงสูงขึ้น

Doker *et al.* (2004) ทำการศึกษาการสกัดเบตาแคโรทีน (β -carotene) จาก apricot bagasse ที่ได้จากโรงงานผลิตน้ำผลไม้ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต พบว่าการลดรัศมีของอนุภาคลงจาก 300×10^{-6} เมตร เป็น 106×10^{-6} เมตร จะทำให้สามารถสกัดสารเบตาแคโรทีนได้เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการลดขนาดอนุภาคจะทำให้ความต้านทานของการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion resistance) ลดลง เนื่องจากเส้นทางการแพร่จะลดลง

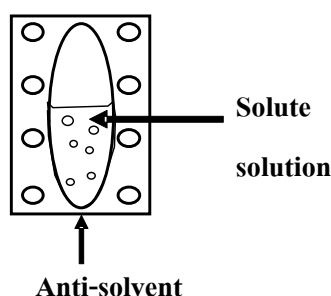
ของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต

Dense gas process คือ กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการใช้ของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต หรือ Dense gas ในระหว่างขั้นตอนของกระบวนการ

โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคที่เรียกว่า Gas Anti-Solvent (GAS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับสารที่ไม่ละลายในของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ซึ่งสามารถผลิตอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ดังจะมีรายละเอียดดังนี้

Gas Anti-Solvent (GAS) เป็นกระบวนการที่ใช้ของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตเป็น anti-solvent และทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบงวด (batch) หรือแบบกึ่งงวด (semi-batch) ซึ่งวิธี GAS จะเติมของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตลงในสารละลาย ซึ่งจะทำให้ตัวถูกละลายตกตะกอนออกมาเป็นผลึก ที่ความดันหนึ่ง ที่เรียกว่า threshold pressure โดยของแข็งที่สนใจจะต้องมีความสามารถในการ

ละลายที่ต่ำในของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต แต่สามารถที่จะละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ ความสามารถในการทำละลายของตัวทำละลายอินทรีย์จะลดลงเมื่อบางส่วนหรือทั้งหมดของของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตผสมกับตัวทำละลาย เมื่อปริมาตรของของผสมระหว่างสารละลายและของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตขยายตัวถึงค่าวิกฤตแล้วของผสมนั้นจะอิ่มตัว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตมากขึ้น จะทำให้ของเหลวกลายเป็นสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturated) ดังนั้นตัวถูกละลายก็จะตกตะกอนออกจากสารละลายและได้อนุภาคที่มีขนาดเท่ากัน จากนั้นทำการแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการออกจากตัวทำละลายโดยการล้างด้วย anti-solvent บริสุทธิ์ ซึ่งลักษณะของกระบวนการ แสดงได้ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แผนภาพแสดงกระบวนการที่ใช้ของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต

ที่มา: Charoenchaitrakool (2000)

เนื่องจากเทคนิค GAS เป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับสารที่ไม่ละลายในของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ซึ่งสามารถผลิตอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกัน จึงได้มีงานวิจัยที่เลือกใช้เทคนิค GAS ดังนี้

Cai Jian-Guo *et al.* (1997) ศึกษาการฟอร์มตัวของอนุภาคและการตกผลึกของ 1, 3, 5, 7 – tetranitro – 1, 3, 5, 7 – tetraazacyclooctane (HMX or Octogen) ในสารละลายอะซีโตน โดยใช้เทคนิค Gas Anti-Solvent ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็น anti-solvent จากผลการทดลองพบว่าได้อนุภาค HMX ที่มีขนาดประมาณ 2-5 ไมโครเมตร และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่แคบ และเมื่อเปรียบเทียบผลการตกผลึกที่ได้จากการทดลองดังกล่าวกับการตกผลึกด้วยกระบวนการทั่วไป พบว่าเทคนิคนี้มีความปลอดภัยและน่าเชื่อถือมากกว่า เพราะทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง และใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็น anti-solvent ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่ติดไฟ

นอกจากงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้ว เนื่องจากเทคนิค GAS มีข้อดีหลายอย่าง จึงได้มีงานวิจัยที่เลือกเทคนิค GAS มาใช้เพื่อศึกษาสารที่สนใจ ดังงานวิจัยต่อไปนี้

Foster *et al.* (1997) ศึกษากระบวนการ Gas Anti-Solvent โดยใช้ ortho- และ para-hydroxybenzoic acids (*o*-HBA, *p*-HBA) เป็นตัวถูกละลาย ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย และใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็น anti-solvent โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และใช้สารผสม 50 : 50 ของ *o*-HBA และ *p*-HBA ในสารละลายเมทานอล พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อผ่านกระบวนการ GAS จะมี *p*-HBA สูงถึง 99 wt%

Warwick *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษาการลดขนาดยา Copper Indomethacin ด้วยกระบวนการ Gas Anti-Solvent โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต และใช้ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ (DMF) เป็นตัวทำละลาย พบว่ากระบวนการ Gas Anti-Solvent สามารถทำการลดขนาดยา Copper Indomethacin ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังทำให้อัตราการละลายของยา Copper Indomethacin ที่ผ่านกระบวนการแล้วนั้นมีอัตราการละลายเพิ่มขึ้นเป็นแปดเท่าเมื่อเทียบกับยา Copper Indomethacin ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ และนอกจากนี้พบว่า ความเข้มข้นของสารละลาย และชนิดตัวทำละลาย เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อขนาดและลักษณะอนุภาคของอนุภาคยา Copper Indomethacin ที่ได้

จณา (2548) ได้ทำการศึกษาการผลิตอนุภาคคอมพอสิตระหว่าง *para*-hydroxybenzoic acid (*p*-HBA) กับ poly(methyl methacrylate) (PMMA) และ poly(L-lactic acid) (L-PLA) ด้วยกระบวนการที่ใช้ของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ (เมทานอล เอทานอล และอะซิโตน) มีผลต่อขนาดของ *p*-HBA โดยเมื่อใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลายจะทำให้ขนาดอนุภาคของ *p*-HBA เล็กที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่มีความแข็งแรง (solvent strength) มากกว่าเอทานอล และอะซิโตน ทำให้มีแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลายสูง จึงไปรบกวนการเจริญเติบโตของอนุภาค ทำให้ได้อนุภาคที่เล็ก นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของ *p*-HBA ที่ได้มีขนาดลดลง

วุฒิชัย (2549) ได้ทำการศึกษาการสกัดสารออกฤทธิ์จากฟ้าทะลายโจรโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตเป็น anti-solvent โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ (35-45

องศาเซลเซียส) อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ (5-15 มิลลิลิตรต่อนาที) และชนิดของตัวทำละลาย ซึ่งได้แก่ เมทานอล เอทานอล อะซีโตน และไดเมทิลฟอร์มาไมด์ พบว่าสามารถสกัดสาร Andrographolide ได้สูงสุด 1.24 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมฟ้าทะลายโจร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้อะซีโตนเป็นตัวทำละลาย อินทรีย์ นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดและรูปร่างของสาร Andrographolide ที่ตกตะกอนได้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสกัด อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ และชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์และสารเคมี

1. ปัมเพิ่มความดัน ISCO รุ่น 260 D
2. เครื่อง Ultrasonic bath รุ่น ME-11 ยี่ห้อ METTLER ELECTRONICS
3. ตู้อบสุญญากาศ รุ่น DZF-6021 (บริษัท เพนีฟูล (ไทยแลนด์) จำกัด)
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 3 ตำแหน่ง รุ่น AR3130 (จากบริษัท Ohaus Corporation)
5. เครื่องบด (Blender machine จากบริษัทเนชั่นแนล)
6. เครื่องกวนให้ความร้อน (SCHOTT instrument GmbH D-55122 Main Z)
7. ตะแกรงร่อน (Sieve; Retsch GmbH&Co.KG 5657 HAAN 1 WEST-GERMANY)
8. เมทานอล (ความบริสุทธิ์ 99.8% จากบริษัท ITALMAR)
9. เอทานอล (ความบริสุทธิ์ 99.8% จากบริษัท ITALMAR)
10. อะซีโตน (ความบริสุทธิ์ 99.8% จากบริษัท ITALMAR)
11. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (High purity grade จากบริษัทอินดัสเทรียลแก๊ส, TIG)
12. เมล็ดดอกทานตะวัน พันธุ์ทานตะวันป้อม (จากตลาดนัดสวนจตุจักร)
13. สารแอลฟาโทโคฟีรอล มาตรฐาน (ความบริสุทธิ์ 99.6% จากบริษัท Sigma)
14. เส้นใยแก้ว (glass wool; จากบริษัท Alltech Associates Inc.)

เครื่องมือวิเคราะห์

ปริมาณวิตามินอี หรือสารแอลฟาโทโคฟีรอลที่สามารถสกัดได้จากการทดลอง จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC; Spectra System Isocratic Pump) ดังภาพที่ 10 ซึ่งประกอบด้วย

คอลัมน์	:	Inerstil ODS-3 (5 μ m, 4.6 mm ID. x 15 cm)
ตัวกรอง	:	Cellulose acetate membrane filter 0.45 μ m
เฟสเคลื่อนที่	:	เมทานอล / น้ำ (98.5:1.5, v/v)

อัตราการไหล : 1.3 มิลลิลิตรต่อนาที
 ความยาวคลื่น : 295 นาโนเมตร
 ปริมาณการฉีด : 20 ไมโครลิตร



ภาพที่ 10 แสดงภาพเครื่อง High Performance Liquid Chromatography

วิธีการ

1. การเตรียมเมล็ดดอกทานตะวัน

นำเมล็ดดอกทานตะวันกะเทาะเปลือกมาบดด้วยเครื่องบด จากนั้นคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อน โดยเลือกใช้เมล็ดดอกทานตะวันบดในช่วงขนาด 425-600 ไมโครเมตร และไม่มีการควบคุมความชื้นของเมล็ดทานตะวันที่บดแล้ว

2. การสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์

2.1 ชั่งเมล็ดดอกทานตะวันบด 50 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่

2.2 เติมน้ำทำละลายเอทานอลปริมาณ 100 มิลลิลิตร

2.3 สกัดโดยใช้เครื่องกวนที่ความเร็ว 400-500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 ชั่วโมง โดยทำการเปลี่ยนตัวทำละลายใหม่ทุกๆ 1 ชั่วโมง

2.4 นำสารละลายที่ผ่านการกรองออกไปวิเคราะห์หาปริมาณสารแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยเครื่อง HPLC

2.5 ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นเมทานอลและอะซีโตน ตามลำดับ

3. การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

3.1 ชั่งเมล็ดดอกทานตะวันบดหนัก 25 กรัม บรรจุลงในหน่วยสกัดสแตนด์เลส (equilibrium cell) ทรงกระบอกกลวงสลักกับเส้นใยแก้วเพื่อหลีกเลี่ยงการหลุดพื้นของอนุภาคนาขนาดเล็กและเพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์สัมผัสกับเมล็ดทานตะวันได้ดีขึ้น

3.2 ชั่งวาล์ว 3 (metering valve, V-03) และชั้นกรอง (solute trap) ก่อนการทดลอง

3.3 ทำการประกอบเครื่องมือ ดังภาพที่ 11

3.4 เริ่มทำการทดลองโดยปรับอุณหภูมิภายในอ่างน้ำ (water bath) ให้ได้ตามต้องการ (35 และ 45 องศาเซลเซียส)

3.5 ปรับความดัน (130 150 และ 170 บาร์) ทั้งให้ระบบเข้าสู่สมดุลประมาณ 30 นาที จึงค่อยๆ เปิดวาล์ว 2 (V-02) และวาล์ว 3 (V-03)

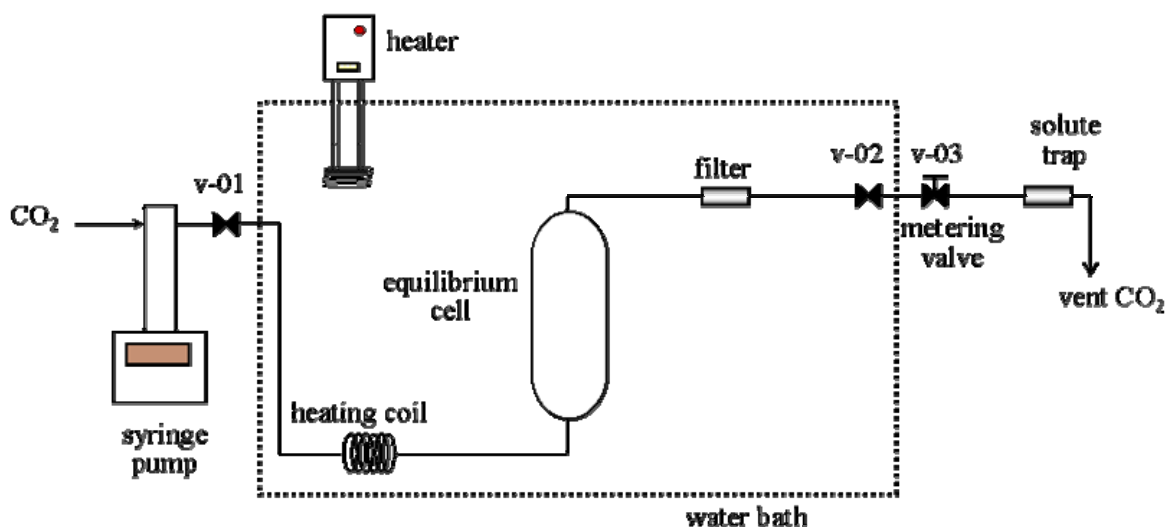
3.6 ปรับอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ (0.5 มิลลิลิตรต่อนาที)

3.7 ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 100 มิลลิลิตรของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกใช้ไป โดยการถอดวาล์ว 3 และชั้นกรองมาชั่งเพื่อหาปริมาณสารที่สกัดได้

3.8 ล้างวาล์ว 3 และชั้นกรองด้วยเอทานอลปริมาตร 15 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์ด้วย HPLC เพื่อหาปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอล โดยค่าที่ได้นำไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) แสดงวิธีการคำนวณดังภาคผนวก ก

4. การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตร่วมกับสารละลายเอทานอล

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต เพียงแต่บรรจุเมล็ดดอกทานตะวันบดร่วมกับเอทานอล 20 มิลลิลิตร



ภาพที่ 11 แสดงแผนภาพเครื่องมือการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

5. การตกผลึกของวิตามินอีด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต

5.1 ทำการประกอบเครื่องมือสำหรับเทคนิค GAS ดังภาพที่ 12

5.2 นำสารละลายที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์ ในข้อ 2 ฉีดลงใน Precipitator chamber ในปริมาตร 4 มิลลิลิตร

5.3 ตรวจสอบทิศทางการไหลของ dense CO_2 โดยเปิดวาล์ว 2 (V-02) ให้ทิศทางการไหลไหลลงด้านล่าง และเปิดวาล์ว 3 (V-03) ให้ทิศทางการไหล ไหลเข้าด้านล่างของ Precipitator chamber ดังภาพที่ 12

5.4 ทำการปรับอุณหภูมิภายในอ่างน้ำ (water bath) ให้ได้ตามต้องการ (25 30 35 และ 40 องศาเซลเซียส)

5.5 เริ่มการทดลองโดยเปิดวาล์ว 1 (V-01) แล้วทำการเดินปั๊มให้ dense CO_2 ไหลออกจากปั๊มและไหลเข้ากระบวนการโดยจะเลือกปั๊มให้อยู่ใน mode ของอัตราการไหลคงที่ที่ต้องการ (5 10 และ 15 มิลลิลิตรต่อนาที)

5.6 Dense CO_2 ที่ไหลเข้า Precipitator chamber จะเกิดการสัมผัสกับสารละลาย

5.7 สังเกตการเกิดตะกอนของอนุภาค และบันทึกความดันดังกล่าว หลังจากนั้นเพิ่มความดันต่อไปจนความดันคงที่ที่ 65 บาร์ ซึ่งเป็นความดันที่ใช้ในการล้างตัวทำละลายออกจากผลึกของอนุภาค

5.8 เปลี่ยนทิศทางการไหลของวาล์ว 2 (V-02) เพื่อให้ dense CO₂ ไหลเข้าด้านบนของ Precipitator chamber เป็นการล้างตัวทำละลายออกจาก Precipitator chamber (ป้องกันอนุภาคไม่ให้ละลายกลับในตัวทำละลายอีก) โดยล้างด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 100 มิลลิลิตร

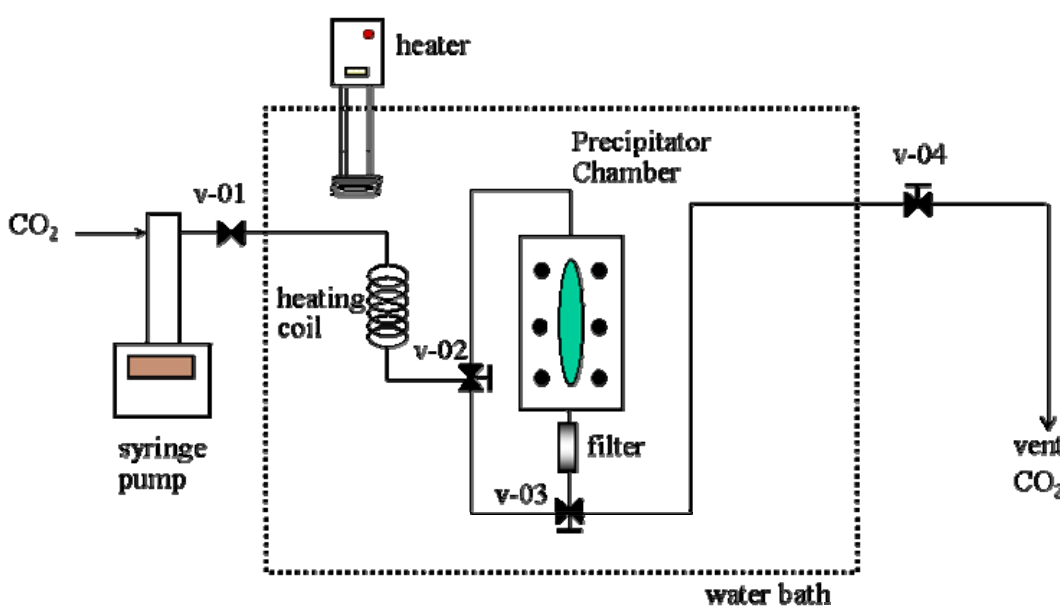
5.9 เปลี่ยนทิศทางการไหลของวาล์ว 3 (V-03) และเปิดวาล์ว 4 (V-04) เพื่อให้ dense CO₂ และตัวทำละลายที่เป็นสารอินทรีย์ไหลออกจากระบบ

5.10 เก็บตัวอย่างที่ได้จาก Precipitator chamber จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วย HPLC เพื่อหาปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอล ดังตัวอย่างการคำนวณที่ภาคผนวก ค

5.11 คำนวณเปอร์เซ็นต์การตกผลึกได้ดังนี้

% การตกผลึก

$$= \frac{\text{น้ำหนักแอลฟาโทโคฟีรอลจากเทคนิค GAS} \times 100}{\text{น้ำหนักแอลฟาโทโคฟีรอลจากการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์}}$$



ภาพที่ 12 แสดงแผนภาพเครื่องมือการตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต

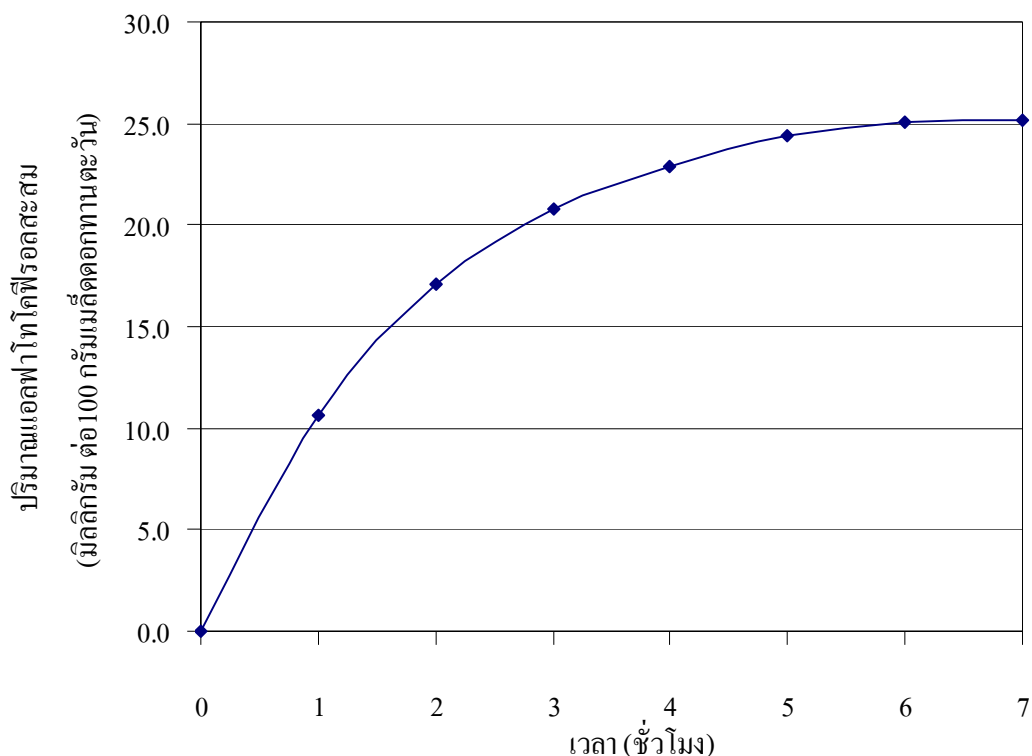
ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสกัดวิตามินอี หรือสารแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากเมล็ดดอกทานตะวัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นการศึกษาการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาก่อประกอบด้วยเวลาที่ใช้ในการสกัด และชนิดของตัวทำละลาย ส่วนที่สองเป็นการศึกษาการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสกัดคือ ความดัน อุณหภูมิ และการใช้ตัวทำละลายร่วม ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในส่วนนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ การสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ต่อไป และส่วนที่สามเป็นการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการตกผลึกของวิตามินอีออกจากตัวทำละลายด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อัตราการไหล คาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และชนิดตัวทำละลาย

1. การสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์

1.1 ศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการสกัด

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาโดยนำเมล็ดดอกทานตะวันบด 50 กรัม มาละลายในตัวทำละลายเอทานอลปริมาณ 100 มิลลิลิตร แล้วนำมาปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก ความเร็วรอบ 400-500 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกรองสารละลายที่ได้ออก แล้วนำกากที่เหลือมาทำการทดลองต่อโดยเปลี่ยนตัวทำละลายเอทานอลใหม่ในทุกๆ ช่วงเวลา 1 ชั่วโมง รวมเป็นเวลา 7 ชั่วโมง นำสารละลายที่ถูกกรองออกในแต่ละชั่วโมงไปวิเคราะห์หาปริมาณสารแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยเครื่อง HPLC ซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แสดงผลของเวลาที่มีต่อการสกัดแอลฟาไพโรล จากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยเอทานอล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

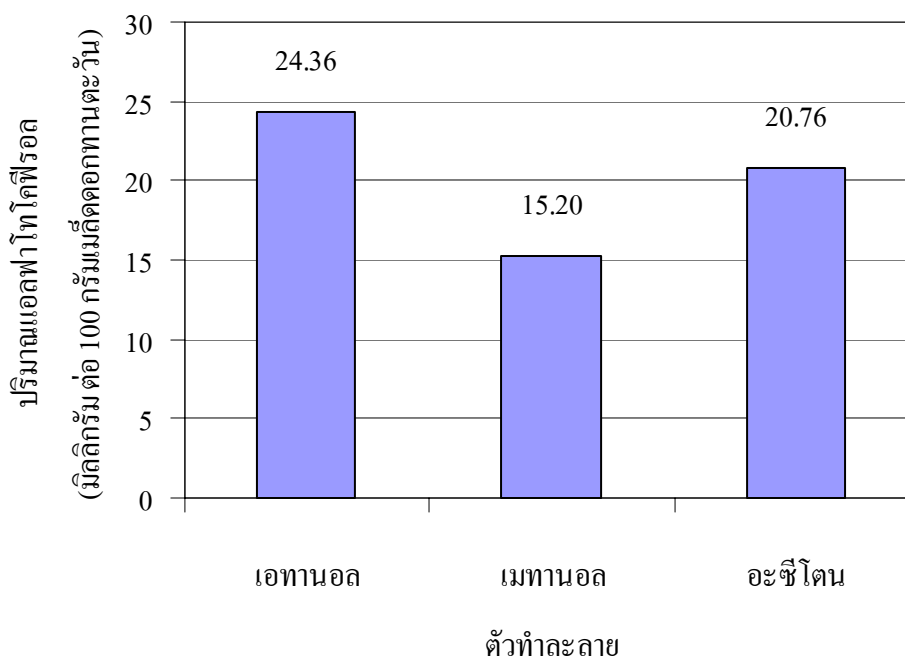
จากภาพที่ 13 พบว่า เมื่อใช้เวลาในการสกัดมากขึ้น ปริมาณแอลฟาไพโรลที่สกัดได้จะสูงขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการสกัดที่มากขึ้น จะเป็นการเพิ่มโอกาสให้ตัวทำละลายเอทานอลได้มีเวลาสัมผัสตัวถูกละลายหรือแอลฟาไพโรลได้มากขึ้น จะเห็นว่าหลังช่วงเวลา 5 ชั่วโมงแรก อัตราการสกัดแอลฟาไพโรลที่ได้ไม่เพิ่มสูงขึ้นมากนัก ซึ่งปริมาณแอลฟาไพโรลที่สกัดออกมาได้ที่เวลา 5 ชั่วโมงคือ 24.36 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวันบด ซึ่งคิดเป็น 96.93 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณแอลฟาไพโรลทั้งหมด ดังนั้นจึงเลือกเวลาที่ใช้ในการสกัดที่ 5 ชั่วโมง สำหรับการทดลองในช่วงต่อไป

1.2 ศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายที่มีต่อการสกัด

การทดลองในส่วนนี้ นำเมล็ดดอกทานตะวันบด 50 กรัมมาละลายในตัวทำละลายปริมาณ 100 มิลลิตร เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วในการกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก 400-500 รอบต่อนาที โดยทำการปรับเปลี่ยนตัวทำละลายคือ เอทานอล เมทานอล

และอะซีโตน ตามลำดับ พบว่าปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดได้มีค่าเท่ากับ 24.36 15.20 และ 20.76 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวัน ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 14 จะเห็นว่าตัวทำละลายที่สามารถสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลได้สูงสุดคือเอทานอล รองลงมาคืออะซีโตน และเมทานอล เนื่องจากความสามารถในการละลายของสารจะขึ้นอยู่กับความมีขั้วของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย โดยพิจารณาได้จากค่า dipole moment ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า dielectric constant จากภาคผนวก ข จะเห็นว่าเอทานอลมีค่า dielectric constant มากกว่าค่าของอะซีโตน จึงทำให้สามารถสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลได้ดีกว่าอะซีโตน อย่างไรก็ตาม แม้ว่าค่า dielectric constant ของเมทานอลจะมากกว่าเอทานอลและค่า dipole moment ใกล้เคียงกับเอทานอล ในการทดลองนี้พบว่าเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่สามารถสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลได้น้อยที่สุด

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในเมล็ดดอกทานตะวัน 100 กรัม จะมีสารแอลฟาโทโคฟีรอล 34.50 มิลลิกรัม จากการทดลองนี้ในเมล็ดดอกทานตะวัน 100 กรัม เช่นเดียวกัน สามารถสกัดสารแอลฟาโทโคฟีรอลได้สูงสุด 25.13 มิลลิกรัม ที่เวลา 7 ชั่วโมง ด้วยตัวทำละลายเอทานอล ซึ่งได้ค่าที่น้อยกว่า นั้นเป็นเพราะปริมาณสารแอลฟาโทโคฟีรอลที่มีอยู่ในเมล็ดดอกทานตะวันขึ้นอยู่กับชนิดของสายพันธุ์ อายุ นอกจากนั้นยังมีอิทธิพลจากสภาวะแวดล้อมภายนอก เช่น แหล่งดิน ฤดูกาล สภาพอากาศ รวมทั้งการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวเช่น อุณหภูมิ ความชื้น และระยะเวลาในการเก็บรักษาอีกด้วย จึงทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองแตกต่างจากค่าที่ได้ในตารางที่ 2 และเนื่องจากเมทานอลและอะซีโตนมีความเป็นพิษสูงเมื่อเทียบกับเอทานอล และสามารถสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลได้น้อยกว่าเอทานอล ตัวทำละลายทั้งสองตัวนี้จึงไม่เหมาะที่จะใช้ในการสกัด ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายสำหรับการทดลองต่อไป



ภาพที่ 14 แสดงผลของชนิดตัวทำละลายที่มีต่อการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันบด ที่เวลา 5 ชั่วโมง อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

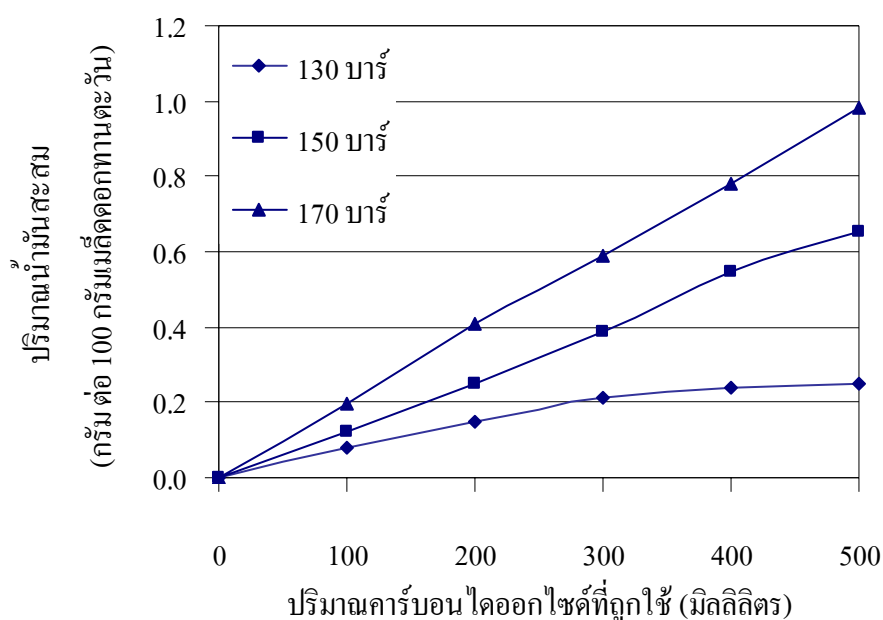
2. การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

2.1 ศึกษาผลของความดันที่มีต่อการสกัด

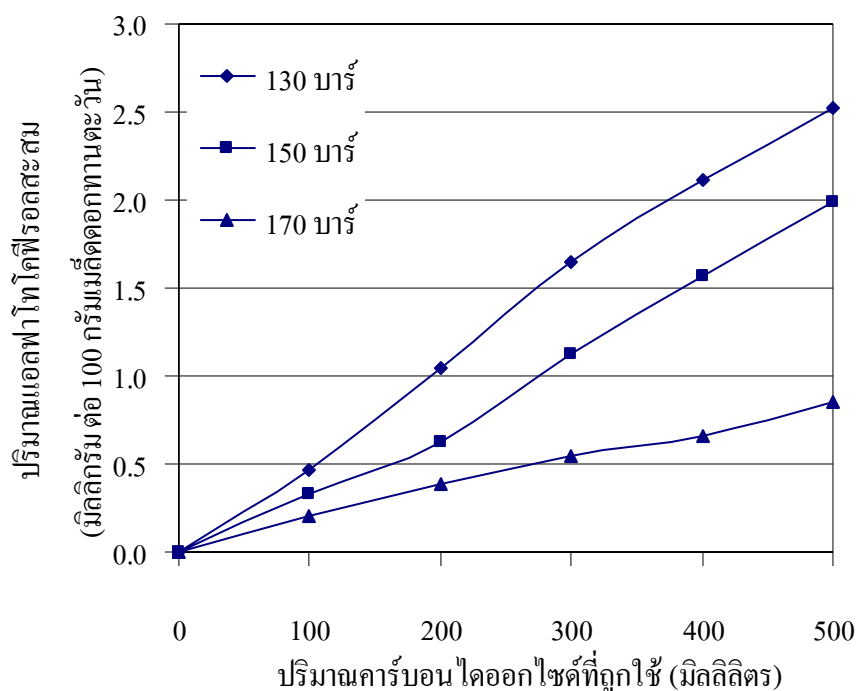
การทดลองในส่วนนี้ นำเมล็ดดอกทานตะวันบด 25 กรัม ที่มีขนาดอนุภาค 425-600 ไมโครเมตร มาผ่านการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิตรต่อนาที ทำการปรับเปลี่ยนความดันจาก 130 เป็น 150 และ 170 บาร์ ตามลำดับ และเก็บตัวอย่างเมื่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไปทุกๆ 100 มิลลิตร รวม 500 มิลลิตร จากการทดลองพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความสามารถในการสกัดสารที่มีอยู่ในเมล็ดดอกทานตะวันหรือน้ำมันมีมากขึ้น แสดงดังภาพที่ 15 ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อเพิ่มความดันของการสกัดให้สูงขึ้น มีผลให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้ความสามารถในการทำละลายดีขึ้น (McHugh *et al.*, 1986) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของคนอื่นๆดังที่กล่าวไว้แล้ว อย่างไรก็ตามปริมาณสารแอลฟาโทโคฟีรอลในสารที่สกัดได้กลับมีปริมาณลดลงเมื่อทำการเพิ่มความดัน ดังภาพที่ 16 นั่นอาจเป็นเพราะในการ

สัปดาห์เกิดการแข่งขันกันระหว่างแอลฟาโทโคฟีรอล และสารประกอบอื่นๆ ในเมล็ดดอกทานตะวัน เช่นเดียวกับการทดลองของ Lucas *et al.* (2002)

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับผลการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยเอทานอลซึ่งได้ค่าสูงสุด 25.13 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวัน ในเวลา 7 ชั่วโมง พบว่าปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่สามารถสกัดได้สูงสุดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิตรต่อ นาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ 500 มิลลิตร ได้ค่าการสกัดสูงสุด 2.52 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวัน ซึ่งค่าการสกัดที่ได้น้อยกว่าค่าการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์เกือบ 10 เท่า แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการละลายของแอลฟาโทโคฟีรอลในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีค่าต่ำ และจากงานวิจัยของ Bravi *et al.* (2002) และ Ugur *et al.* (2005) พบว่า ที่ความดันต่ำกว่า 20 เมกะปาสกาล หรือ 200 บาร์ น้ำมันดอกทานตะวันสามารถละลายได้ในคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม ผลการสกัดที่ได้ก็สามารถนำมาศึกษาถึงแนวโน้มการสกัดได้ นอกจากนี้การทดลองในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทดลองที่ความดันสูงกว่า 200 บาร์ได้ เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถทนความดันสูงได้เพียง 200 บาร์เท่านั้น



ภาพที่ 15 แสดงผลของความดันที่มีต่อการสกัดน้ำมันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิตรต่อ นาที

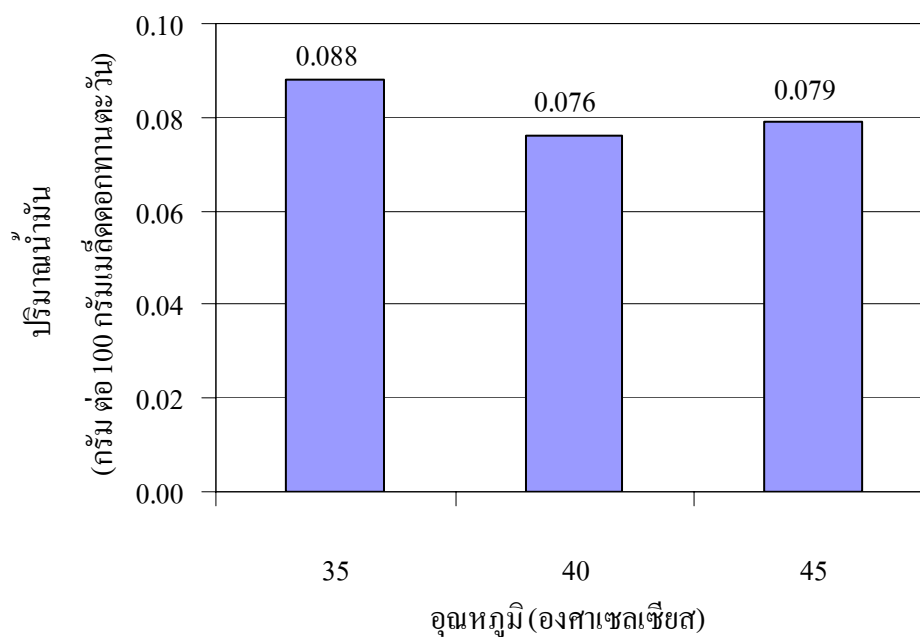


ภาพที่ 16 แสดงผลของความดันที่มีต่อการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิตรต่อนาที

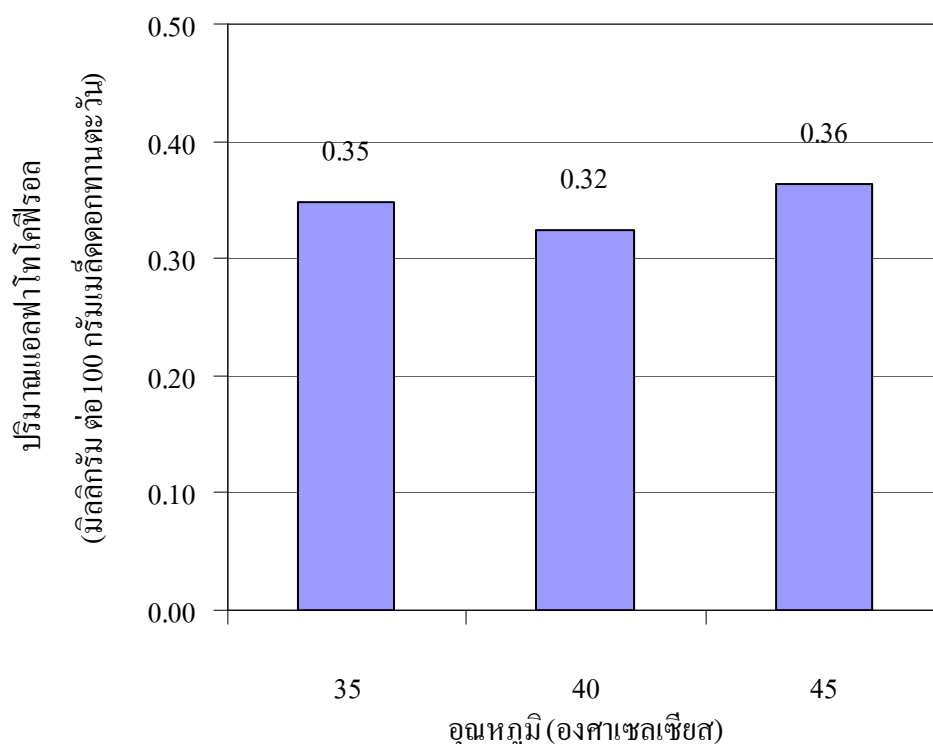
2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสกัด

จากการศึกษาในส่วนของความดัน พบว่าสามารถสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลได้ปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการศึกษาผลของอุณหภูมินี้จึงทำการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการสกัดลงจาก 500 มิลลิตร เป็น 50 มิลลิตร เพื่อเป็นการไม่สิ้นเปลืองในการสกัดโดยไม่จำเป็น ซึ่งทำการทดลองที่สถานะความดัน 150 บาร์ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิตรต่อนาที และขนาดอนุภาคเมล็ดดอกทานตะวันบด 425-600 ไมโครเมตร ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 35 เป็น 40 และ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเก็บตัวอย่างเพียงครั้งเดียวเมื่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 50 มิลลิตร จากภาพที่ 17 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิไม่ส่งผลที่ชัดเจนต่อการสกัดน้ำมัน นั่นเป็นเพราะการเพิ่มของอุณหภูมิทำให้เกิดการแข่งขันกันสองประการคือการเพิ่มความดันไอของน้ำมัน ทำให้น้ำมันสามารถละลายได้ดีในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ในขณะที่ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตจะลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการทำละลายของ

คาร์บอนไดออกไซด์ลดลงด้วย อย่างไรก็ตาม ในส่วนของการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอล พบว่า อุณหภูมิในช่วงที่ทำการศึกษามีผลต่อปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดได้ แสดงดังภาพที่ 18 จะ เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัด ค่าการสกัดแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ



ภาพที่ 17 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสกัดน้ำมันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิตรต่อนาที

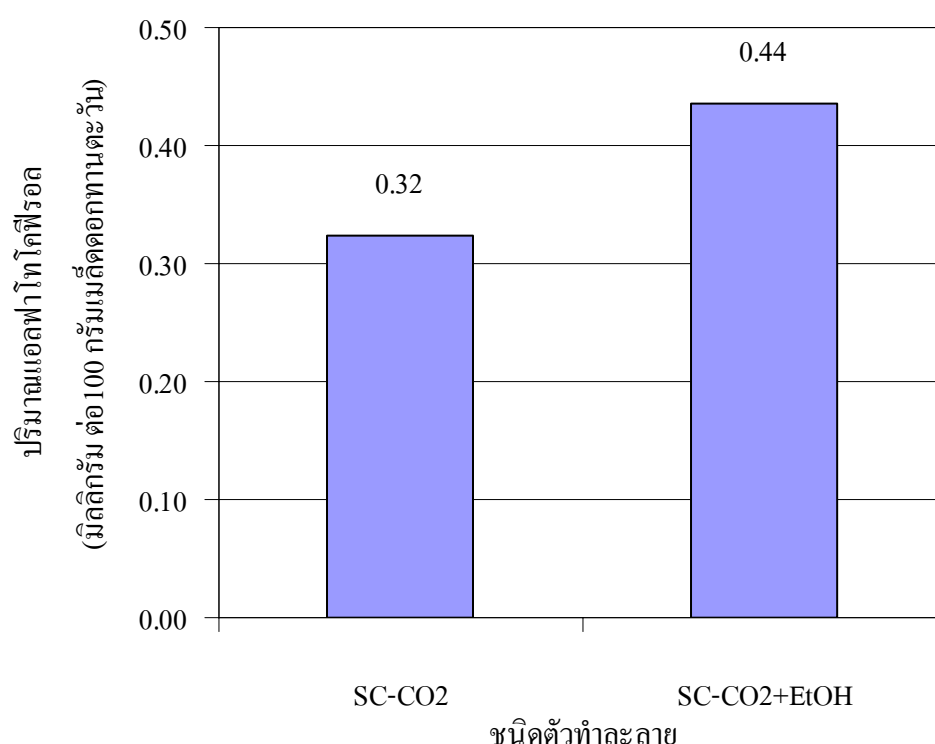


ภาพที่ 18 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิตรต่อนาที

2.3 ศึกษาการใช้ตัวทำละลายร่วม

เนื่องจากการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตนั้นยังมีข้อจำกัดคือ คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว จึงนำมาใช้สกัดแอลฟาโทโคฟีรอลซึ่งเป็นสารที่มีขั้วได้ไม่ดี ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอล จึงมีการศึกษาถึงผลของการใช้ตัวทำละลายร่วม โดยตัวทำละลายร่วมที่เลือกใช้นั้นต้องมีคุณสมบัติที่สามารถละลายแอลฟาโทโคฟีรอลได้ดีคือ มีขั้วเล็กน้อย และจากการทดลองก่อนหน้านี้ พบว่าเอทานอลเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่สกัดแอลฟาโทโคฟีรอลได้ดี ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกเอทานอลเป็นตัวทำละลายร่วมเพื่อเพิ่มความมีขั้วให้กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต โดยทำการทดลองที่สถานะความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิตรต่อนาที และขนาดอนุภาคเมล็ดคอกทานตะวันบด 425-600 ไมโครเมตร และเก็บตัวอย่างเพียงครั้งเดียวเมื่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 50 มิลลิตร เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการสกัดที่ได้กับการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตเพียงอย่างเดียวที่สถานะเดียวกัน พบว่า

การใช้สารละลายเอทานอลเข้าร่วมสามารถช่วยให้การสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลได้ดีขึ้นจาก 0.32 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวัน เป็น 0.44 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวัน ดังแสดงในภาพที่ 19 ทั้งนี้เป็นเพราะการเติมเอทานอลลงในระบบ เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของตัวทำละลาย จึงสามารถทำให้ละลายแอลฟาโทโคฟีรอลได้ดีขึ้น นอกจากนี้เอทานอลยังช่วยทำลายพันธะระหว่างโครงข่ายของแข็งและอนุภาคของแอลฟาโทโคฟีรอลอีกด้วย (เอกวัฒน์ และคณะ, 2548) แต่ค่าที่ได้ไม่ต่างกันมากนัก นั่นเป็นเพราะถึงแม้ว่าจะมีเอทานอลอยู่ในระบบ แต่ก็มีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไปเพียง 50 มิลลิลิตร



ภาพที่ 19 เปรียบเทียบชนิดตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที

จากผลการทดลอง พบว่า การสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตนั้นมีประสิทธิภาพต่ำ แม้ว่าจะมีการเติมตัวทำละลายร่วมเข้าช่วย แต่ผลการสกัดที่ได้กลับไม่เพิ่มสูงขึ้นมากนัก ดังนั้นการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตจึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสม จากภาพที่ 15 และ 16 จะเห็นว่าค่าการสกัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม จากการทดลองที่สถานะดังกล่าวนี้ จะต้องใช้เวลาในการสกัดถึง 17 ชั่วโมง ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ เช่นงานวิจัยของ Ugur *et al.* (2005) ซึ่งทำการทดลองการสกัดน้ำมันทานตะวัน ที่สถานะความดันสูงกว่า 200 บาร์ และใช้เวลาในการสกัด

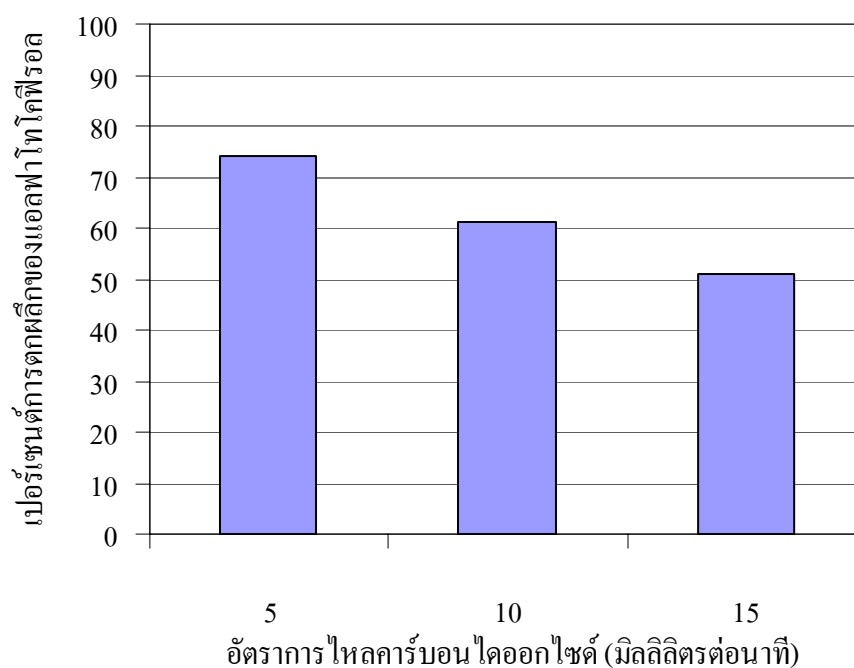
เพียง 50 ถึง 200 นาที ดังนั้นจึงเป็นการไม่คุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการทำการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ความดันต่ำกว่า 200 บาร์ เนื่องจากเป็นการสิ้นเปลืองเวลา และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นสำหรับการทดลองการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจึงไม่ได้ดำเนินการต่อ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3. การตกผลึกของวิตามินอีด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต

สำหรับการศึกษาในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตดังจะกล่าวต่อไป

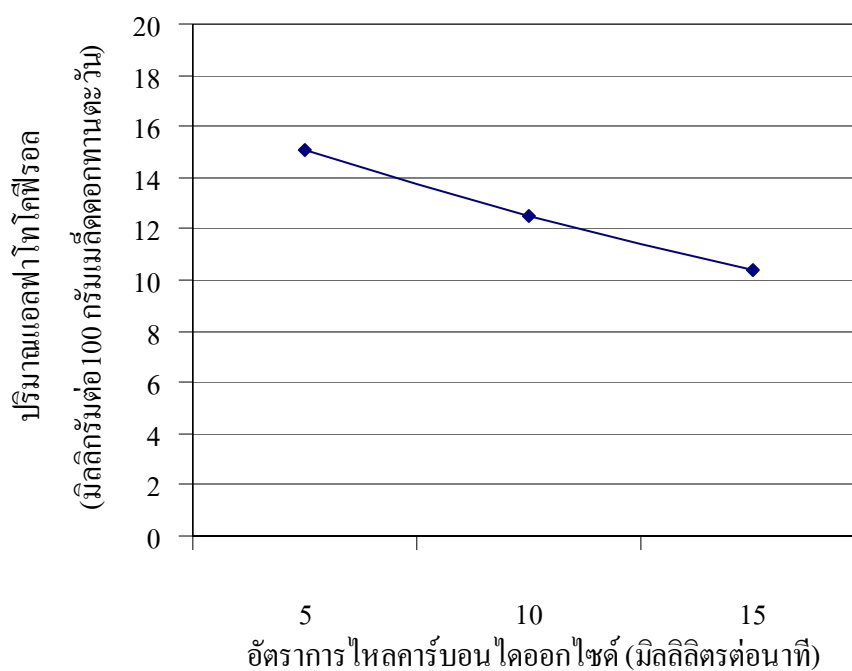
3.1 ผลของอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อการตกผลึก

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการตกผลึกสารแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยเทคนิค GAS โดยนำสารละลายเอทานอลที่ผ่านการกวนพร้อมเมล็ดดอกทานตะวันเป็นเวลา 5 ชั่วโมงมาทำการตกผลึกปริมาณ 4 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์จาก 5 เป็น 10 และ 15 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ โดยทำการล้างสารละลายด้วยความดัน 65 บาร์ จากภาพที่ 20 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การตกผลึกสารแอลฟาโทโคฟีรอล มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการตกผลึกต่ำๆ จะส่งผลให้ระบบมีเวลาในการเข้าสู่สมดุลได้มากขึ้น (Thiering, 1998) ทำให้แอลฟาโทโคฟีรอลตกผลึกได้มากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที สารแอลฟาโทโคฟีรอลจะสามารถตกผลึกได้ดีที่สุด



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลกับอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยตัวทำละลายเอทานอล ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เมื่อนำเปอร์เซ็นต์การตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยเทคนิค GAS มาคำนวณหาปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอล ต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวัน พบว่าปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกสูงสุดมีค่า 15.07 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวัน ที่อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อ 100 กรัม ดังแสดงได้ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลกับอัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยตัวทำละลายเอทานอล ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้จากการทดลองพบว่าที่อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆกันมีผลกระทบต่อความดันที่ใช้ในการตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายเอทานอลอีกด้วย ดังตารางที่ 7

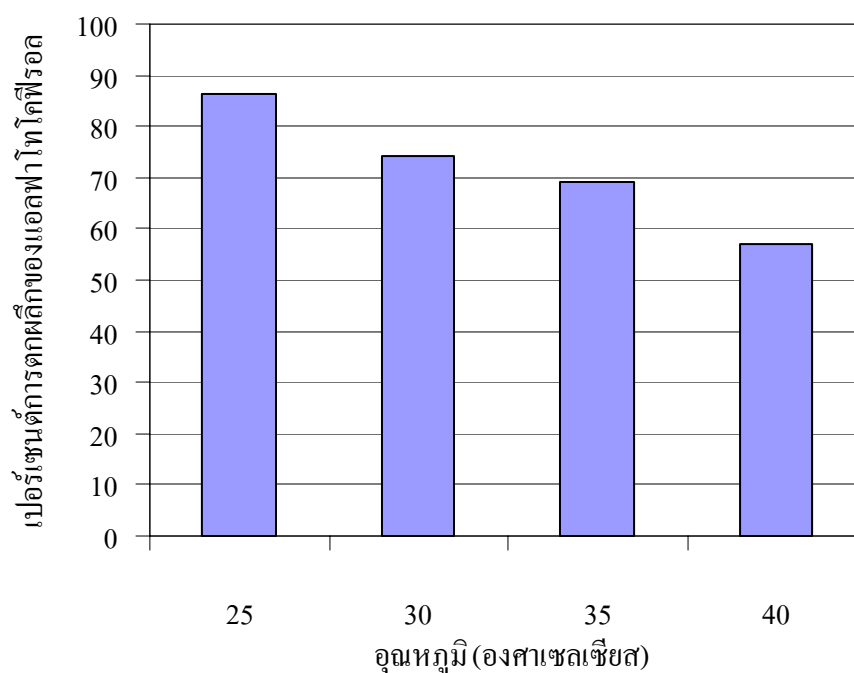
ตารางที่ 7 แสดงความดันที่เริ่มตกผลึก (Threshold pressure) ของแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายเอทานอล ที่อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ต่างๆ

อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิตรต่อนาที)	ความดัน (บาร์)
5	52.8
10	53.4
15	54.2

จากตารางที่ 7 จะเห็นว่าที่อัตราการใช้ไคโตรเจนต่ำๆนั้น สารละลายจะเกิดการอิมตัวได้เร็วกว่าที่อัตราการใช้ไคโตรเจนสูง จึงสามารถตกผลึกแอลฟาโคเฟอรอลได้เร็ว ทำให้ความดันที่เริ่มตกผลึกของแอลฟาโคเฟอรอลมีค่าที่ต่ำกว่าการใช้อัตราการใช้ไคโตรเจนที่สูง

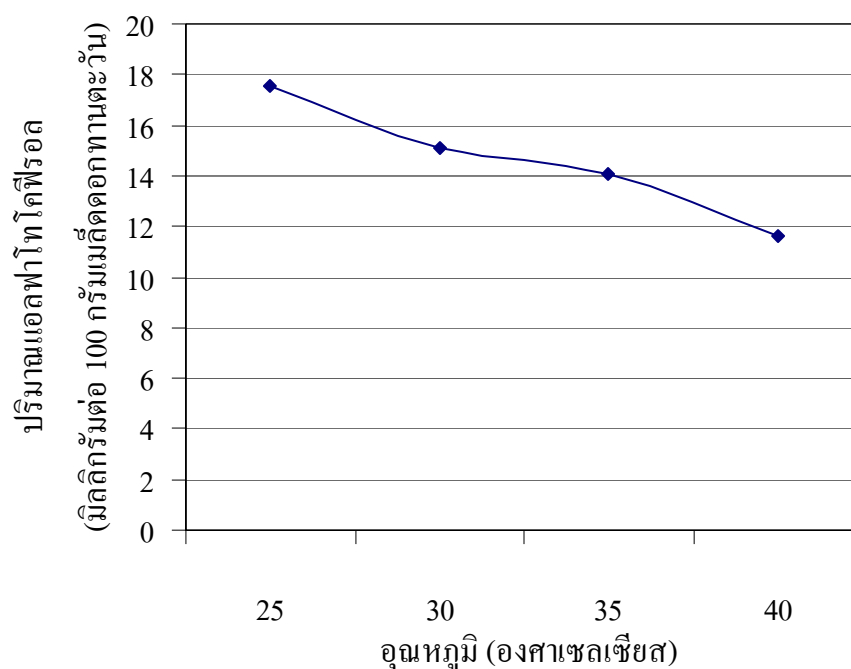
3.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการตกผลึก

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการตกผลึกแอลฟาโคเฟอรอลออกจากตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายด้วยเทคนิค GAS โดยใช้ปริมาณสารละลาย 4 มิลลิลิตร อัตราการใช้ไคโตรเจนของคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ที่ 5 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกจาก 25 เป็น 30 35 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และทำการล้างสารละลายที่ความดัน 65 บาร์ จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกของแอลฟาโคเฟอรอล จาก 25 องศาเซลเซียส เป็น 40 องศาเซลเซียส ทำให้เปอร์เซ็นต์ในการตกผลึกมีแนวโน้มลดลงดังภาพที่ 22 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้ความสามารถในการละลายของแอลฟาโคเฟอรอลในตัวทำละลายเอทานอล และคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤตเพิ่มขึ้น (Thiering, 1998) และนอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิยังส่งผลให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงด้วย ทำให้การอิมตัวของสารละลายจากการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤตช้ากว่าการใช้อุณหภูมิที่ต่ำลง จึงทำให้ปริมาณการตกผลึกแอลฟาโคเฟอรอลที่ได้ต่ำลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้อุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ในการตกผลึกสารแอลฟาโคเฟอรอล จะได้ประสิทธิภาพที่สูงสุด



ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลกับอุณหภูมิ ด้วยตัวทำละลายเอทานอล ที่อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิตรต่อนาที

เมื่อนำเปอร์เซ็นต์การตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยเทคนิค GAS มาคำนวณหาปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอล ต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวัน พบว่าปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกสูงสุดมีค่า 17.56 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังแสดงได้ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลกับอุณหภูมิ ด้วยตัวทำละลายเอทานอล ที่อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิตรต่อนาที

ในการศึกษาผลของอุณหภูมียังพบอีกว่า ความดันที่เริ่มตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายเอทานอล มีค่าแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงความดันที่เริ่มตกผลึก (Threshold pressure) ของแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายเอทานอล ที่อุณหภูมิต่างๆ

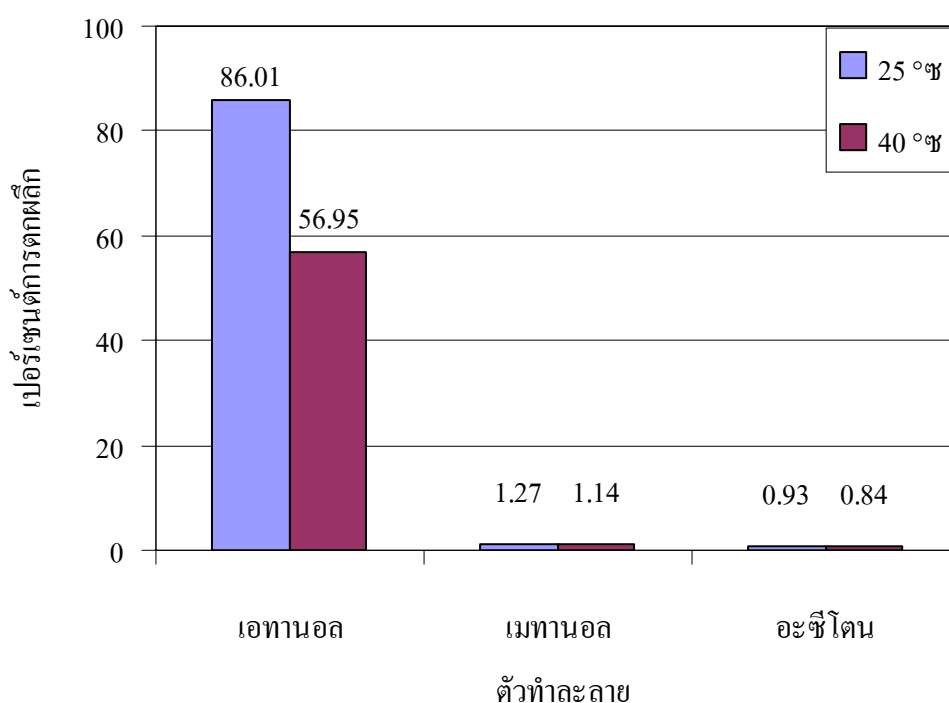
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน (บาร์)
25	51.6
30	52.3
35	53.5
40	55.2

จากตารางที่ 8 จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้ค่าความดันที่ใช้ในการตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายเอทานอลมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิให้กับ

ระบบ จะส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตนั้นละลายในตัวทำละลายเอทานอลได้น้อยลง สารละลายจึงเกิดการอิ่มตัวได้ช้าลง จึงเป็นผลให้ความดันที่เริ่มตกผลึกมีค่าสูงขึ้น

3.3 ผลของชนิดตัวทำละลายที่มีต่อการตกผลึก

การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของชนิดตัวทำละลายที่มีต่อการตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายอินทรีย์โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆกัน ได้แก่ เอทานอล เมทานอล และอะซีโตน ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการล้างสารละลายที่ความดัน 65 บาร์ จากการทดลองพบว่า ที่สภาวะการตกผลึก การใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายจะให้เปอร์เซ็นต์การตกผลึกสูงกว่าการใช้อะซีโตน และเมทานอล ดังภาพที่ 23 ทั้งนี้เนื่องมาจากคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายในวัฏภาคของเหลวที่มีการใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายได้ดีกว่าการใช้อะซีโตน และเมทานอล จึงส่งผลให้เกิดการอิ่มตัวในวัฏภาคของเหลวได้ดีกว่า เป็นผลให้การตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ใช้เอทานอล เป็นตัวทำละลายจึงสูงกว่าการใช้อะซีโตน และเมทานอล



ภาพที่ 24 เปรียบเทียบชนิดตัวทำละลายที่ใช้ในการตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอล ที่อุณหภูมิ 25 และ 40 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที

ในการศึกษาผลชนิดตัวทำละลายยังพบอีกว่า การเปลี่ยนชนิดตัวทำละลายมีผลกระทบต่อความดันที่ใช้ในการตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลาย จากตารางที่ 9 จะเห็นว่าเมื่อใช้เมทานอลเป็นเป็นตัวทำละลาย ความดันที่ใช้ในการตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลจะมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากเมทานอลเป็นตัวทำละลายที่มีความแข็งแรงมากกว่าเอทานอล และอะซีโตน ซึ่งเมทานอลจะมีแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลายมาก เมื่อมีแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายและตัวถูกละลายมาก ทำให้การอิมตัวยิ่งยวดเกิดได้ช้า จึงต้องการความดันที่ใช้ในการตกผลึกที่สูงกว่าตัวทำละลายที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าเช่น เอทานอล และอะซีโตน

ตารางที่ 9 แสดงความดันที่เริ่มตกผลึก (Threshold pressure) ของแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายชนิดต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ชนิดของตัวทำละลาย	ความดัน (บาร์)
25	เอทานอล	51.6
	เมทานอล	59.8
	อะซีโตน	57.4
40	เอทานอล	55.2
	เมทานอล	60.1
	อะซีโตน	57.7

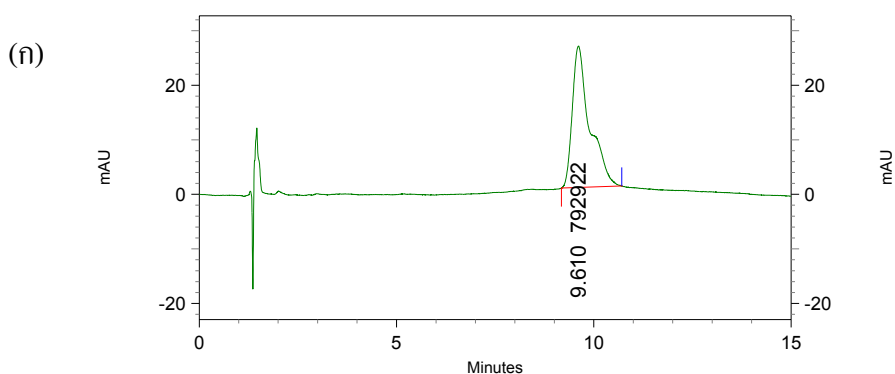
จากตารางที่ 9 จะเห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้ค่าความดันที่ใช้ในการตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายอินทรีย์มีค่ามากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบจะส่งผลให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤตนั้นละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้น้อยลง สารละลายจึงเกิดการอิมตัวได้ช้าลง จึงเป็นผลให้ความดันที่ใช้ในการตกผลึกมีค่าสูงขึ้น

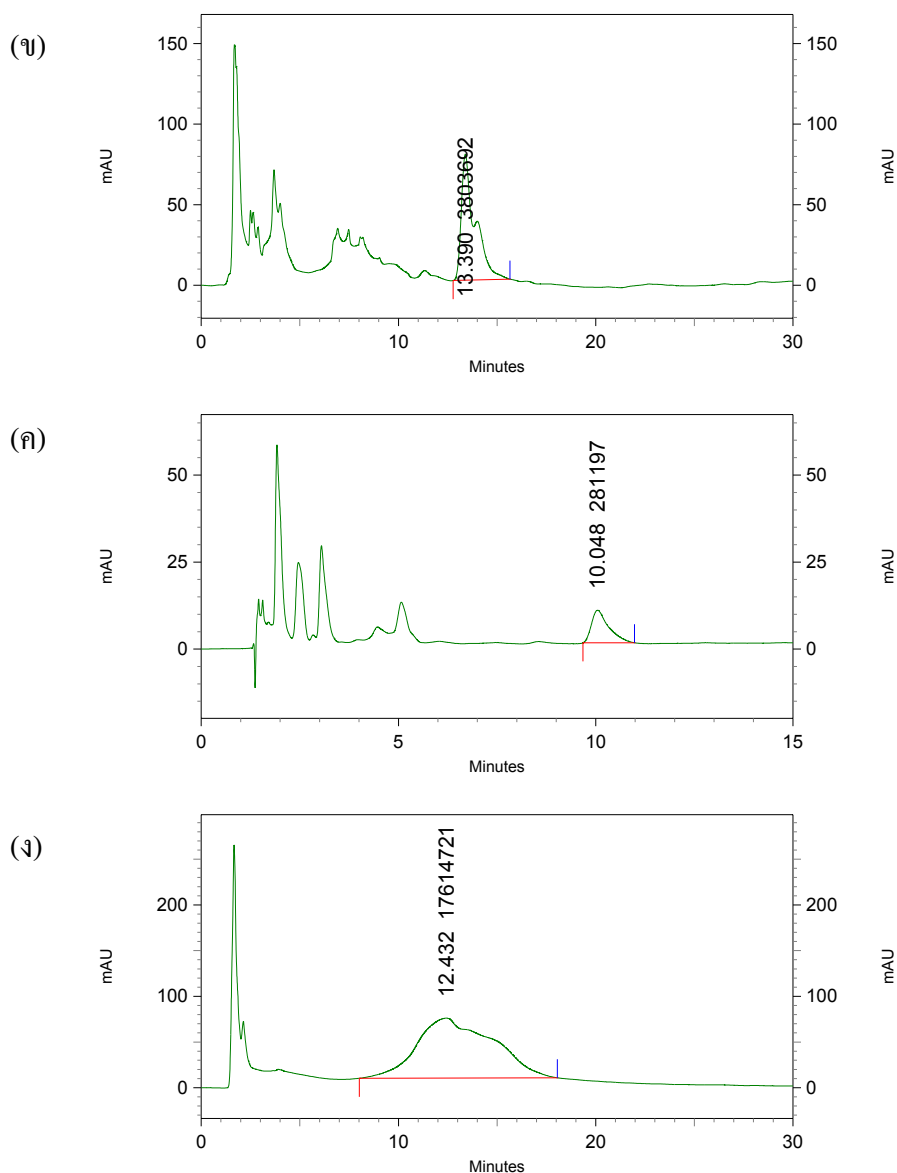
4. เปรียบเทียบความจำเพาะในการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลในแต่ละวิธี

ผลการทดลองส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบความจำเพาะในการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลในแต่ละวิธีที่ทำการศึกษา จากภาพที่ 25 แสดงภาพเปรียบเทียบโครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอล ภาพที่ 25 (ก) แสดงแอลฟาโทโคฟีรอลบริสุทธิ์เข้มข้น 0.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จะเห็นว่าพีคในช่วงนาที่ที่ 1-2 เป็นพีคของเฟสเคลื่อนที่ และพีคของแอลฟาโทโคฟีรอลขึ้นที่ช่วงเวลา 9.6 นาที เมื่อนำ

โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลบริสุทธิ์ไปเปรียบเทียบกับโครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ผ่านการทดลองดังภาพที่ 25 (ข) (ค) และ (ง) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการสกัดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ดังภาพที่ 25(ข) พีคของแอลฟาโทโคฟีรอลขึ้นในช่วงนาที่ที่ 13 และนอกเหนือจากช่วงนี้ ในนาที่ที่ 3-10 ยังพบพีคของสารเจือปนอื่นๆขึ้นอีกด้วย ซึ่งอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของสารแอลฟาโทโคฟีรอลต่อพื้นที่ใต้กราฟของสารเจือปนอื่นๆที่สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์นั้นมีค่าเท่ากับ 0.67 เมื่อเปรียบเทียบกับ การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตดังภาพที่ 25(ค) พบว่าอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของสารแอลฟาโทโคฟีรอลต่อพื้นที่ใต้กราฟของสารเจือปนอื่นๆนั้นเท่ากับ 0.23 ซึ่งต่ำกว่าค่าของการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ 3 เท่า นั้นหมายความว่า การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีความสามารถในการเลือกสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลน้อยกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์

เมื่อนำสารละลายที่ผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์นี้ไปทำการตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายอินทรีย์ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต จากนั้นนำสารที่ตกผลึกได้ไปวิเคราะห์ด้วย HPLC ผลการทดลองดังภาพที่ 25(ง) จะเห็นว่าพีคของสารเจือปนอื่นๆที่ได้จากการสกัดด้วยเอทานอลมีปริมาณน้อยมาก ซึ่งอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของสารแอลฟาโทโคฟีรอลต่อพื้นที่ใต้กราฟของสารเจือปนอื่นๆนั้นเป็น 3.45 นั้นหมายความว่าเทคนิค GAS มีความสามารถในการเลือกตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอล ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์ของวิตามินอีที่สูงกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์





ภาพที่ 25 เปรียบเทียบโครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอล

(ก)แอลฟาโทโคฟีรอลบริสุทธิ์เข้มข้น 0.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

(ข)แอลฟาโทโคฟีรอลจากการสกัดด้วยเอทานอลเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

(ค)แอลฟาโทโคฟีรอลจากการสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 100 มิลลิลิตร

(ง)แอลฟาโทโคฟีรอลจากการตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยตัวทำละลายอินทรีย์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต รวมทั้งยังทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการตกผลึกของแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะใกล้จุดวิกฤต จากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยเอทานอล โดยการปั่นกวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก พบว่าเวลา 5 ชั่วโมงเพียงพอต่อการสกัด เนื่องจากปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดได้สูงสุด 96.93 เปอร์เซ็นต์ ของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดได้ทั้งหมด ตัวทำละลายที่สามารถสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลได้ดีรองลงมาคือ อะซีโตน และเมทานอล

2. จากการศึกษาการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต พบว่าเมื่อใช้คาร์บอนไดออกไซด์ 500 มิลลิลิตร สถานะที่สามารถสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลที่ดีที่สุด คือที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดได้คือ 2.52 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัมเมล็ดดอกทานตะวันบด

3. จากการศึกษาการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตโดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม ที่สถานะความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อใช้คาร์บอนไดออกไซด์ 50 มิลลิลิตร สามารถช่วยให้การสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลได้ดีขึ้นจาก 0.32 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวัน เป็น 0.44 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวันบด

4. จากการศึกษาพบว่า การสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตนั้นมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ แม้จะเพิ่มตัวทำละลายร่วม ทั้งนี้เป็นเพราะที่ความดันต่ำกว่า 170 บาร์ แอลฟาโทโคฟีรอลมีความสามารถในการละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตที่ต่ำ

5. จากการศึกษาการตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต พบว่าสภาวะที่สามารถตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลที่ดีที่สุดคือ ที่อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิเมตรต่อนาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ โดยปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกได้สูงสุด คือ 17.56 กรัมต่อ 100 กรัมของเมล็ดดอกทานตะวันบด หรือคิดเป็น 86.01 เปอร์เซ็นต์ของแอลฟาโทโคฟีรอลทั้งหมดที่สกัดได้ด้วยเอทานอล

ข้อเสนอแนะ

1. การสกัดแอลฟาโทโคฟีรอล ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ในงานวิจัยนี้ ใช้การปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก ซึ่งเป็นอุปกรณ์อย่างง่าย จึงอาจทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดสารมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงควรมีการทดลองด้วยอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการสกัดสูงยิ่งขึ้น เช่นการใช้ถังกวนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิ อัตราการปั่นกวน รวมถึงประสิทธิภาพในการปั่นกวนสารให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้

2. เนื่องจากปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดได้ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงเครื่องมือที่ใช้ให้ทนต่อความดันสูงได้มากกว่า 170 บาร์ หรืออาจใช้ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตชนิดอื่น เช่น โพรเพน

3. ก่อนทำการทดลองการสกัดและการตกผลึกด้วยความดันสูง ต้องตรวจสอบรอยรั่วของข้อต่อต่างๆ เนื่องจากการทดลองนี้ต้องใช้แรงดันที่สูง อาจทำให้เกิดอันตรายได้ และหลังเสร็จสิ้นการทดลอง ควรทำการล้างท่อและข้อต่อต่างๆ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารเจือปน

4. การทดลองต้องทำการประกอบเครื่องมือต่างๆ ซึ่งต้องการความละเอียดและค่อนข้างยุ่งยาก อาจทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหาย จึงทำให้การทดลองเกิดความล่าช้า

5. ในการสั่งซื้อแอลฟาโทโคฟีรอลบริสุทธิ์เพื่อใช้เป็นสารมาตรฐาน ควรสั่งซื้อล่วงหน้าก่อนทำการทดลอง เพราะต้องเสียเวลาในการจัดส่งจากต่างประเทศ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2545. **สถานการณ์ตลาดทานตะวัน**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

จณา ทัพพลี. 2548. **การผลิตอนุภาคคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์-ยาด้วยกระบวนการที่ใช้ของไหลที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภัทธรา ภัทธโรภาชัย, กฤษดา คำแสน และ กิตติพงษ์ รักช่วย. 2546. **การสกัดวิตามินอีจากใบปาล์ม น้ำมันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต**. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

บริษัท น้ำมันบริโภคไทย จำกัด. **วิตามินอี**. <http://www.thaiedibleoil.com>-Thai Edible Oil Co.,Ltd.. แหล่งที่มา: http://www.thaiedibleoil.com/thai/oil_01.php

วุฒิชัย ตรีศิลานันท์. 2549. **การสกัดสารออกฤทธิ์จากฟ้าทะลายโจรโดยใช้กระบวนการ GAS ANTI-SOLVENT**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เสาวนีย์ จักรพิทักษ์. 2526. **หลักโภชนาการปัจจุบัน**, น. 63. ไทยวัฒนาพานิช, ประเทศไทย

อุรษา รังสาทอง. 2546. **การเพิ่มการละลาย (Solubility Enhancement)**. (เอกสารประกอบการเรียน). คณะเภสัชศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อภินันท์ วัลภา, วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา, สุภาภรณ์ เชื้อประเสริฐ และ ละเอียด เพ็งโสภา. 2541. **การศึกษาการสกัดคาเฟอีนออกจากเมล็ดชาเขียวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์วิกฤตยิ่งยวด**. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 6 (1): 15-26.

อุทัย โสธนะพันธุ์ และ รพีพล ภโรวาท. 2536. **SUPERCRITICAL FLUIDS**. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 1 (3): 37-63.

เอกวัฒน์ นิธิไชโย, สุวิธสา พงษ์อำไพ และ สุภาภรณ์ คี๊กลาส. 2548. การสกัดสารนิมบินจาก
เมล็ดสะเดาไทยโดยใช้โมดิฟายด์คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต, น. 68. ใน การประชุม
วิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15. สมาคมวิศวกรรมเคมี
และเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ร่วมกับ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา

Bravi, M., R. Bubbico, F. Manna and N. Verdone. 2002. Process optimisation in sunflower oil
extraction by supercritical CO₂. **Chemical Engineering Science**. 57: 2753-2764.

Brennecke, J.F. and C.A. Eckert. 1989. Phase Equilibria for Supercritical Fluid Process Design.
AIChE J. 35: 1409-1427.

Brogle, H. 1982. CO₂ as a Solvent: Its Properties and Applications. **Chemistry and Industry**.
12: 385-390.

Brown, J. *et.al.* 1984. pp. 872-893. **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**.
John Wiley & Sons.

Charoenchaitrakool, M., F. Dehghani, N.R. Foster and H.K. Chan. 2000. Micronization by
Rapid Expansion of Supercritical Solution to Enhance the Dissolution Rates of Poorly
Water Soluble. **Industrial & engineering chemistry research**. 39: 4794-4802.

Guo, C.J., X.C. Liao and Z.Y. Zhou. 1997. Microparticle Formation and
Crystallization rate of HMX Using Supercritical Carbon Dioxide Antisolvent
Recrystallization. *In The 4th International Symposium on Supercritical Fluids*.

Doker, O., U. Salgin, I. Sanal, U. Mehmetoglu and A. Calimli. 2004. Modeling of extraction of
β-carotene from apricot bagasse using supercritical CO₂ in packed bed extractor.
Journal of Supercritical Fluids. 28 (1): 11-19.

- Stahl, E., E. Schutz and K.H. Mangold. 1980. Extraction of Seed Oils with Liquid and Supercritical Carbon Dioxide. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 28: 1153-1157.
- Foster, N.R., S.L.J. Yun, A.K. Dillow, P. Wells and F.P. Lucien. 1997. A Fundamental Study of the Gas Anti-Solvent Process, pp. 27-29. *In* International Society for the Advancement of Supercritical Fluids (ISASF), ed. **International Symposium on Supercritical Fluids 4. ed.** Sendai, Japan.
- Hadolin, M., M. Skerget, Z. Knez and D. Bauman. 2001. High pressure extraction of vitamin E-rich oil from *Silybum marianum*. **Food Chemistry**. 74 (10): 355-364.
- Hawthorne, S.B. 1990. Analytical Scale Supercritical Fluid Extraction. **Anal. Chem.** 62: 633A-642A.
- Hubert, P. and O.G. Vitzthum. 1978. Fluid Extraction of Hops, Spices, and Tobacco with Supercritical Gases. **Angewandte Chemie International Edition in English** 17 (10): 710-715.
- Louli, V., G. Folas, E. Voutsas and K. Magoulas. 2004. Extraction of parsley seed oil by supercritical CO₂. **Journal of Supercritical Fluids**. 30 (2): 163-174.
- Lucas, de A., E. Martinez de la Ossa,, J. Rincon, M.A. Blanco and I. Gracia. 2002. Supercritical fluid extraction of tocopherol concentrates from olive tree leaves. **Journal of Supercritical Fluids**. 22 (8): 221-228.
- King, J.W. 2002. Supercritical Fluid Technology for Lipid Extraction, Fractional, and Reactions, pp. 663-684. *In* Tsung Min Kuo and Harold W. Gardner, comps. **Lipid Biotechnology**. Marcel Dekker, Inc., New York.

- Kiriamiti, H.K, E. Rascol, A. Marty and J.S. Condoret. 2001. Extraction rates of oil from high oleic sunflower seeds with supercritical carbon dioxide. **Chemical Engineering and Processing**. 41: 711-718.
- Hadolin, M., M. Skerget, Z. Knez and D. Bauman. 2001. High Pressure extraction of vitamin E-rich oil from *Silybum marianum*. **Food Chemistry**. 74: 355-364.
- Marentis, R.T. 1988. Supercritical Fluid Extraction and Chromatograph: Techniques and Applications, pp. 109-126. **ACS Symposium series 366**. USA.
- McHugh, M.A. and V.J. Krukons. 1994. **Supercritical Fluid Extraction: Principles and Practice**. Butterworth-Heinemann, Boston, MA.
- Ozkal, S.G., U. Salgin and M.E. Yener. 2005. Supercritical carbon dioxide extraction of hazelnut oil. **Journal of Food Engineering**. 29 (2): 217-223.
- Peter, S. and G. Brunner. 1978. The Separation of Nonvolatile Substances by Means of Compressed Gases in Countercurrent Processes. **Angew Chem., Int. Ed. Engl.** 17: 746-750.
- Rizvi, S.S.H., A.L. Benado, J.A. Zollweg and J.A. Daniels. 1986. Supercritical fluid extraction: Fundamental principles and modeling methods. **Food Technol.** 40 (6): 55-65.
- The Big Carrot Natural Food Market. 1999. **USDA Nutrient Database for Standard Reference**. Seed, sunflower seed kernels, dried. แหล่งที่มา: http://www.thebigcarrot.ca/nuts%20and%20seeds/seeds_sunflower_seed_kernels.htm
- The Lipid Library. 2006. **Tocopherols and other isoprenoid lipids – structure, composition, biology and analysis**. แหล่งที่มา: <http://www.lipidlibrary.co.uk/Lipids/tocol/index.htm>

The University of Southern Maine. 2006. **Solvents**. แหล่งที่มา:

http://www.usm.maine.edu/~newton/Chy251_253/Lectures/Solvents/Solvents.html

Thiering, R., M. Charoenchaitrakool, L. Sze Tu, F. Dehghani, A.K. Dillow and N.R. Foster.

1998. Crystallization of para-hydroxybenzoic acid by solvent expansion with dense carbon dioxide, pp. 291-296. *In Meeting on Supercrit. Fluids 5. ed.* International Society for the Advancement of Supercritical Fluids (ISASF), Nice, France.

Tonthubthimthong, P., C. Supaporn, P. Douglas and W. Luewisutthichat. 2001. Supercritical

CO₂ extraction of nimbin from neem seeds - an experimental study. **Journal of Food Engineering**. 47: 289-293.

Salgin, U., O. Doker and A. Calimli. 2005. Extraction of sunflower oil with supercritical CO₂:

Experiments and modeling. **Journal of Supercritical Fluids**. In pressed.

Salgin, U., O. Doker and A. Calimli. 2005. Extraction of sunflower oil with supercritical CO₂:

Experiments and modeling. **Journal of Supercritical Fluids**. In pressed. *Cited*

Andrich, G., S. Balzini, V.Z. de Vitis, S. Silvestri, F. Venturi and R. Fiorentini. 2004.

Supercritical Fluid extraction in sunflower seed technology. **Journal of Lipid Science Technology**. 103 : 151-157.

Verrall, M.S. 1992. Liquid-liquid partition in the pharmaceutical industry, pp. 194-308. *In*

U.D. Thornton, comp. **Science and Practice of Liquid-Liquid Extraction**. Oxford University Press, New York.

Warwick, B., F. Dehghani, N.R. Foster, J.R. Biffin and H.L. Regtop. 2002. Micronization of

copper indomethacin using gas antisolvent processes. **Industrial & engineering chemistry research**. 41 (8): 1993-2004.

Wilke, G. 1978. Extraction with Supercritical Gases - A Foreword. **Angewandte Chemie International Edition in English.** 17 (10): 701-702.

Williams, D.F. 1981. Extraction with supercritical gases. **Chemical engineering science** 36 (11): 1769-1788.

Ge, Y., H. Yan, B. Hui, Y. Ni, S. Wang and T. Cai. 2002. Extraction of Natural Vitamin E from Wheat Germ by Supercritical Carbon Dioxide. **Journal of Agricultural and Food Chemistry.** 50: 685-689.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดลอง

1. ผลการสกัดสารแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยตัวทำละลายอินทรีย์

ตารางผนวกที่ ก1 แสดงผลการสกัดสารแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยตัวทำละลายอินทรีย์

ตัวทำละลาย	ชั่วโมงที่	น้ำหนักสารแอลฟาโทโคฟีรอล (มิลลิกรัม/100 กรัมทานตะวัน)	น้ำหนักสารแอลฟาโทโคฟีรอลสะสม (มิลลิกรัม/100 กรัมทานตะวัน)
เอทานอล	1	10.60	10.60
	2	6.44	17.04
	3	3.72	20.77
	4	2.10	22.86
	5	1.50	24.36
	6	0.74	25.11
	7	0.03	25.13
เมทานอล	1	5.22	5.22
	2	4.06	9.29
	3	3.27	12.55
	4	1.44	14.00
	5	1.20	15.20
	6	0.48	15.67
	7	0.86	16.53
อะซีโตน	1	10.57	10.57
	2	6.23	16.80
	3	2.25	19.05
	4	1.45	20.50
	5	0.26	20.76
	6	0.48	21.24
	7	0.18	21.41

2. ผลการสกัดสารแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

ตารางผนวกที่ ก2 แสดงผลการสกัดน้ำมันจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต ที่อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที

ความดัน (บาร์)	อุณหภูมิ (°ซ)	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ ถูกใช้ไป (มล.)	น้ำหนักน้ำมัน (มก./100 กรัมทานตะวัน)	น้ำหนักน้ำมันสะสม (มก./100 กรัมทานตะวัน)
130	40	100	0.078	0.078
		200	0.071	0.149
		300	0.063	0.212
		400	0.025	0.237
		500	0.011	0.248
150	40	100	0.121	0.121
		200	0.128	0.249
		300	0.140	0.389
		400	0.158	0.547
		500	0.104	0.651
170	40	100	0.199	0.199
		200	0.211	0.410
		300	0.178	0.588
		400	0.194	0.782
		500	0.202	0.984
150	35	50	0.088	-
	40	50	0.076	-
	45	50	0.079	-

ตารางผนวกที่ ก3 แสดงผลการสกัดสารแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยคาร์บอน-ไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที

ความดัน (บาร์)	อุณหภูมิ (°ซ)	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ถูกใช้ไป (มล.)	น้ำหนักแอลฟาโทโคฟีรอล (มก./100 กรัมทานตะวัน)	น้ำหนักแอลฟาโทโคฟีรอลสะสม (มก./100 กรัมทานตะวัน)
130	40	100	0.4606	0.4606
		200	0.5852	1.0458
		300	0.5990	1.6448
		400	0.4713	2.1161
		500	0.4038	2.5199
150	40	100	0.3277	0.3277
		200	0.2980	0.6257
		300	0.4958	1.1215
		400	0.4470	1.5685
		500	0.4243	1.9928
170	40	100	0.2063	0.2063
		200	0.1830	0.3893
		300	0.1542	0.5435
		400	0.1113	0.6548
		500	0.2013	0.8561
150	35	50	0.3484	-
	40	50	0.3236	-
	45	50	0.3632	-

3. ผลการสกัดสารแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตร่วมกับสารละลายเอทานอล

ตารางผนวกที่ ก4 แสดงผลการสกัดสารแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตร่วมกับสารละลายเอทานอล ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตร ต่อนาที และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกใช้ไป 50 มิลลิลิตร

ตัวทำละลาย	น้ำหนักแอลฟาโทโคฟีรอล (มก./100 กรัมทานตะวัน)
คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต	0.3236
คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต + สารละลายเอทานอล	0.4364

4. ผลการตกผลึกสารแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต

ตารางผนวกที่ ก5 แสดงผลการตกผลึกแอลฟาโทโคฟีรอลออกจากตัวทำละลายอินทรีย์

ชนิด ตัวทำ ละลาย	สภาวะการสกัด		ปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอล (มก./100 กรัมทานตะวัน)		% Yield
	อุณหภูมิ (°ซ)	อัตราการ ไหล CO ₂ (มล./นาที)	GAS	Conventional Extraction	
เอทานอล	30	5	15.07	20.25	74.43
	30	10	12.48	20.25	61.62
	30	15	10.40	20.25	51.34
	25	5	17.56	20.42	86.01
	30	5	15.07	20.42	73.81
	35	5	14.04	20.42	68.76
	40	5	11.63	20.42	56.95
เมทานอล	25	5	0.09	10.21	0.93
	40	5	0.08	10.21	0.84
อะซีโตน	25	5	0.20	15.12	1.27
	40	5	0.18	15.12	1.14

ภาคผนวก ข

การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับงานวิเคราะห์วิตามินอี

1. การสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับงานวิเคราะห์วิตามินอี

1.1 นำแอลฟาโทโคฟีรอลบริสุทธิ์ปริมาณ 100 มิลลิกรัม มาละลายลงในเอทานอลปริมาตร 100 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จะได้สารละลายแอลฟาโทโคฟีรอลความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เรียกว่า สารละลายแม่ (Master Solution)

1.2 ปิเปตสารละลายแม่ 0.2 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นจึงเติมเอทานอลลงไป ปรับปริมาตรให้ได้ 10 มิลลิลิตร

1.3 ทำซ้ำ โดยเปลี่ยนปริมาณสารละลายแม่เป็น 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ

1.4 นำสารละลายแอลฟาโทโคฟีรอลที่มีความเข้มข้นต่างกันทั้ง 5 ขวด มาวิเคราะห์ด้วย HPLC เพื่อนำข้อมูลมาสร้างกราฟมาตรฐานของสารแอลฟาโทโคฟีรอล

1.5 ทำซ้ำจากข้อ 1.1 ถึง 1.4 โดยเปลี่ยนตัวทำละลายเป็นเมทานอลและอะซีโตนตามลำดับ

2. การคำนวณความเข้มข้นของสารแอลฟาโทโคฟีรอล

ขวดที่ 1 สารละลายแม่ 0.2 มิลลิลิตร ในเอทานอล 10 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} MV &= M_1 V_1 \\ 1.0 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \times 0.2 \text{ mL} &= M_1 \times 10 \text{ mL} \\ M_1 &= 0.02 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \end{aligned}$$

ขวดที่ 2 สารละลายแม่ 0.4 มิลลิลิตร ในเอทานอล 10 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} MV &= M_2 V_2 \\ 1.0 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \times 0.4 \text{ mL} &= M_2 \times 10 \text{ mL} \\ M_2 &= 0.04 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \end{aligned}$$

ขวดที่ 3 สารละลายแม่ 0.6 มิลลิลิตร ในเอทานอล 10 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} MV &= M_3 V_3 \\ 1.0 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \times 0.6 \text{ mL} &= M_3 \times 10 \text{ mL} \\ M_3 &= 0.06 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \end{aligned}$$

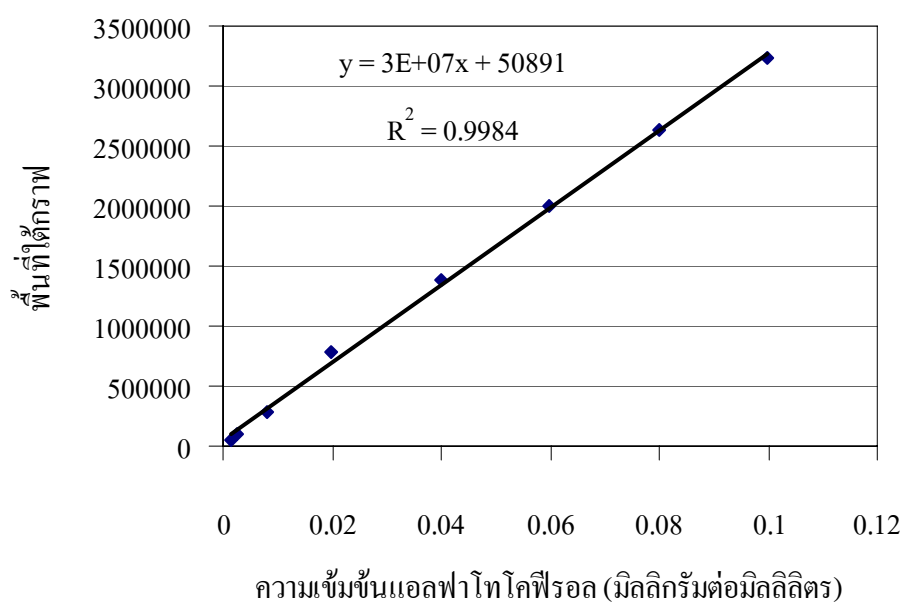
ขวดที่ 4 สารละลายแม่ 0.8 มิลลิลิตร ในเอทานอล 10 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned}
 MV &= M_4 V_4 \\
 1.0 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \times 0.8 \text{ mL} &= M_4 \times 10 \text{ mL} \\
 M_4 &= 0.08 \frac{\text{mg}}{\text{mL}}
 \end{aligned}$$

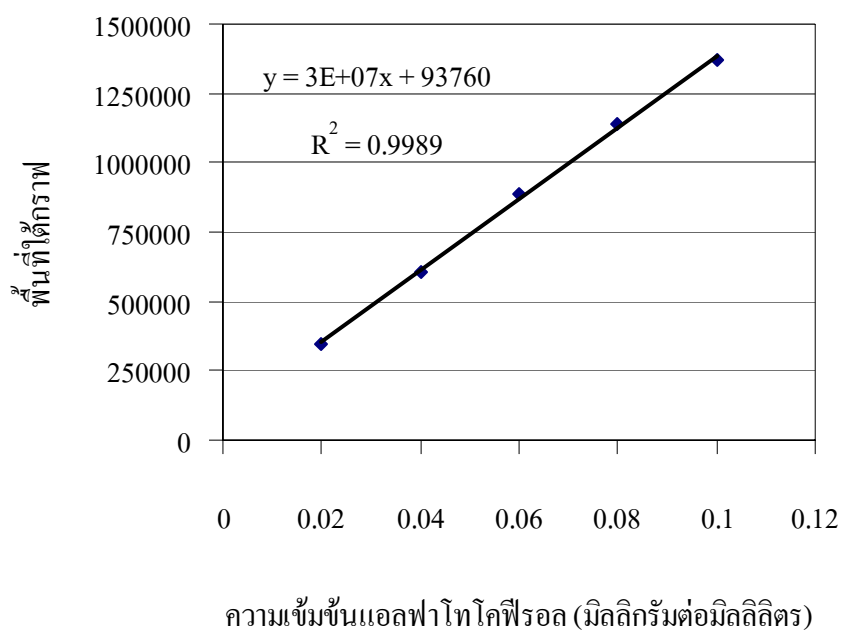
ขวดที่ 5 สารละลายแม่ 1.0 มิลลิลิตร ในเอทานอล 10 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned}
 MV &= M_5 V_5 \\
 1.0 \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \times 1.0 \text{ mL} &= M_5 \times 10 \text{ mL} \\
 M_5 &= 0.10 \frac{\text{mg}}{\text{mL}}
 \end{aligned}$$

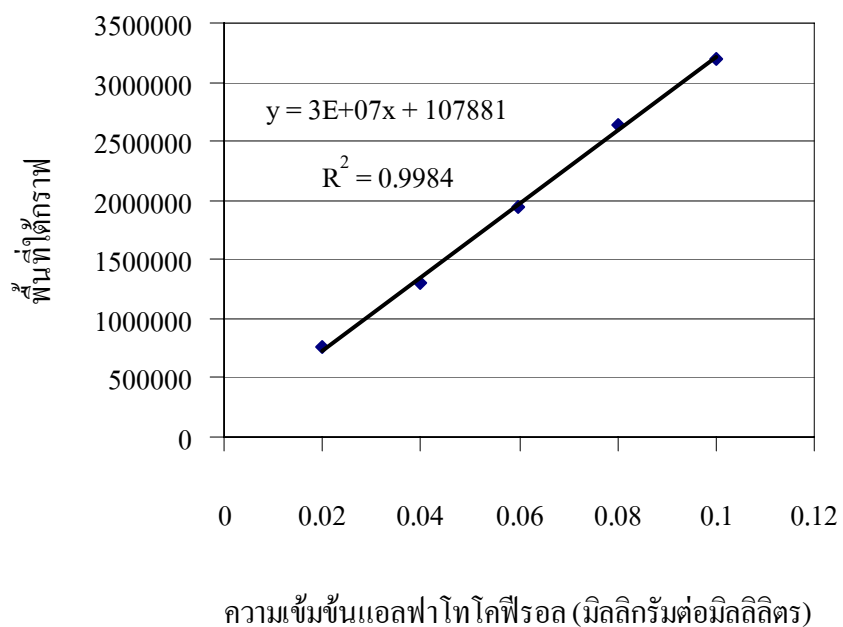
3. กราฟมาตรฐานของแอลฟาโทโคฟีรอล



ภาพผนวกที่ ข1 กราฟมาตรฐานของแอลฟาโทโคฟีรอลในตัวทำละลายเอทานอล



ภาพผนวกที่ ข2 กราฟมาตรฐานของแอลฟาโทโคฟีรอลในตัวทำละลายเมทานอล



ภาพผนวกที่ ข3 กราฟมาตรฐานของแอลฟาโทโคฟีรอลในตัวทำละลายอะซีโตน

ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณปริมาณแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดได้ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

จากข้อมูลการสกัดแอลฟาโทโคฟีรอลจากเมล็ดดอกทานตะวันด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต เมื่อใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดัน 130 บาร์ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้เมล็ดดอกทานตะวันบดหนัก 25 กรัม สารที่สกัดได้ในเวลา 3 และ 5 ชั่วโมงถูกกลั่นด้วยเอทานอลปริมาณ 15 มิลลิลิตร

จากสมการแอลฟาโทโคฟีรอลมาตรฐาน $y = (3 \times 10^7)x + 50891$

โดยที่ $y =$ พื้นที่ใต้กราฟ

$x =$ ความเข้มข้นของสารแอลฟาโทโคฟีรอล

พื้นที่ใต้กราฟของสารแอลฟาโทโคฟีรอลที่ได้จาก HPLC มีค่าเท่ากับ 281197

คิดเป็นความเข้มข้นของสารแอลฟาโทโคฟีรอล $x = \frac{281197 - 50891}{3 \times 10^7} = 0.0077 \frac{mg}{mL}$

สารสกัด 1 มิลลิลิตร มีสารแอลฟาโทโคฟีรอล 0.0077 มิลลิกรัม

สารสกัด 15 มิลลิลิตร มีสารแอลฟาโทโคฟีรอล $\frac{0.0077 \times 15}{1} = 0.1151$ มิลลิกรัม

เมล็ดทานตะวันหนัก 25 กรัม มีสารแอลฟาโทโคฟีรอล 0.1151 มิลลิกรัม

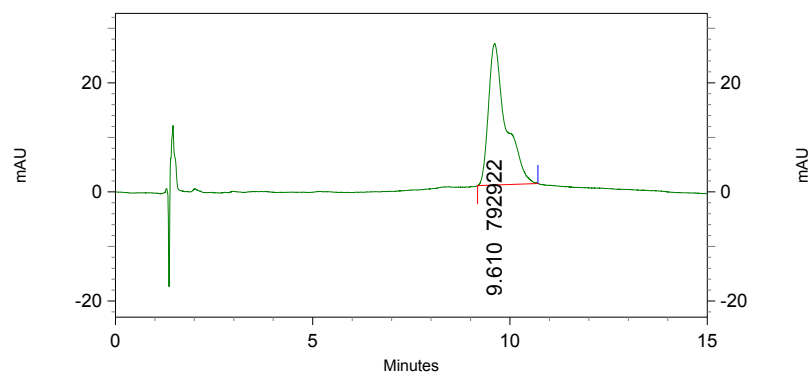
เมล็ดทานตะวันหนัก 1 กรัม มีสารแอลฟาโทโคฟีรอล $\frac{0.1151 \times 1}{25} = 0.0046$ มิลลิกรัม

เมล็ดทานตะวันหนัก 100 กรัม มีสารแอลฟาโทโคฟีรอล $0.0046 \times 100 = 0.4606$ มิลลิกรัม

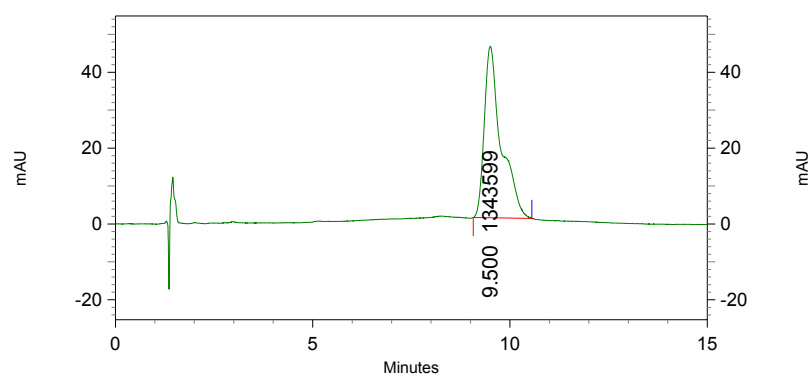
ภาคผนวก ง

ภาพโครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอล

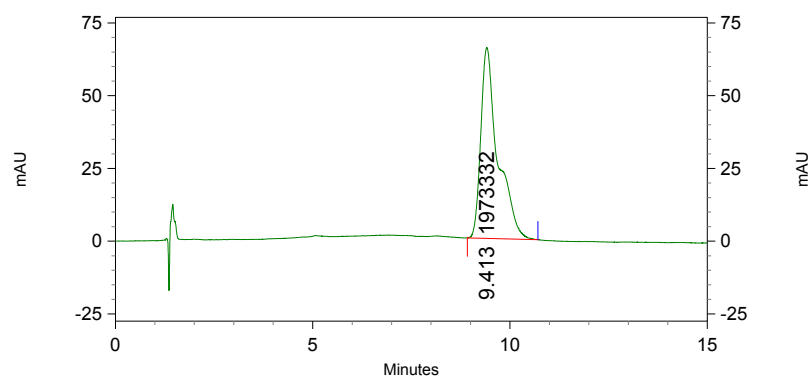
1. ภาพโครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลมาตรฐานในตัวทำละลายต่างๆ



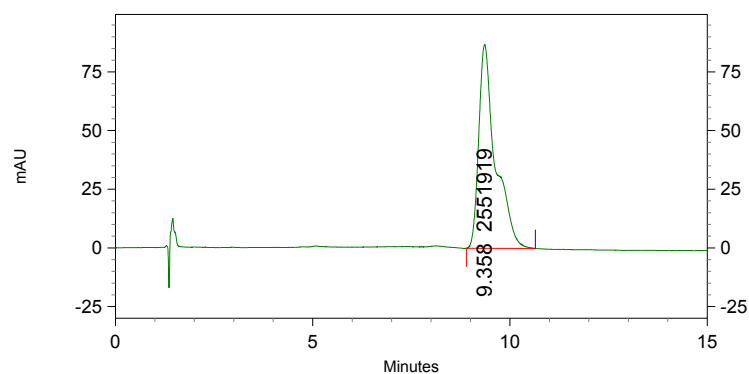
ภาพผนวกที่ ๑1 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้น 0.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



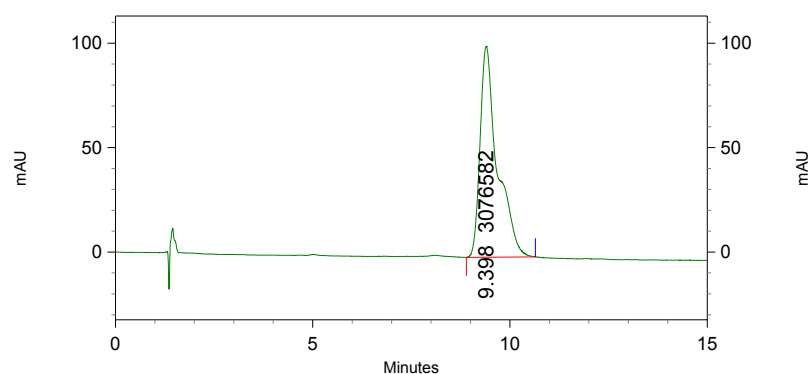
ภาพผนวกที่ ๑2 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้น 0.04 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



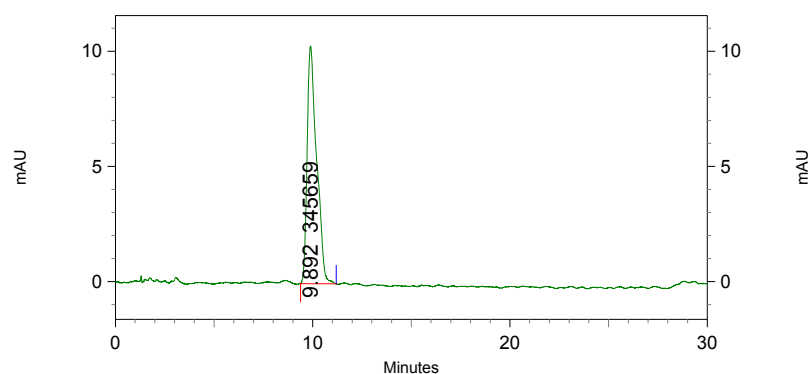
ภาพผนวกที่ ๑3 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้น 0.06 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



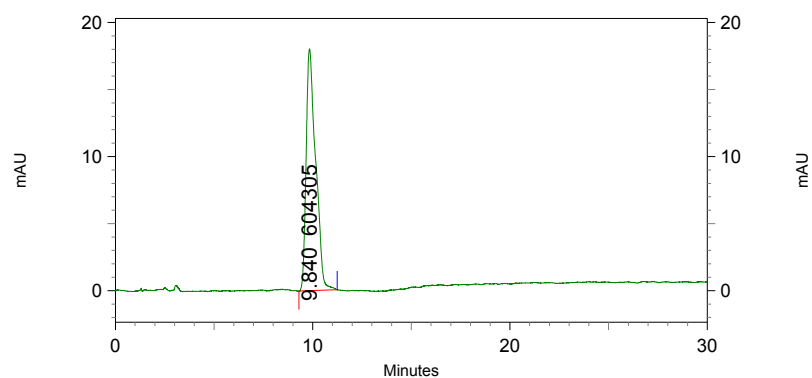
ภาพผนวกที่ ๔4 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้น 0.08 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



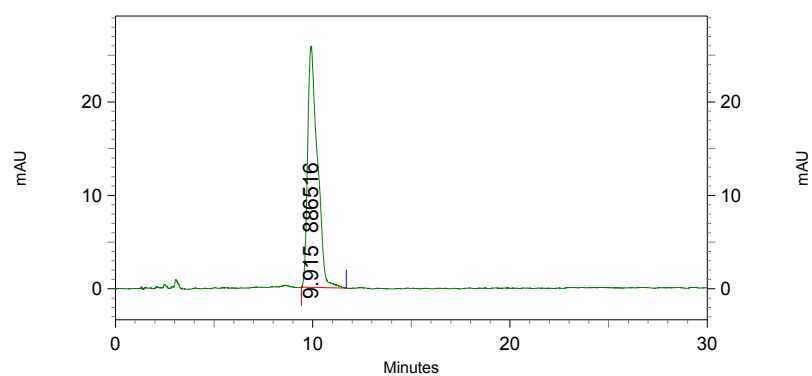
ภาพผนวกที่ ๔5 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเอทานอลที่ความเข้มข้น 0.10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



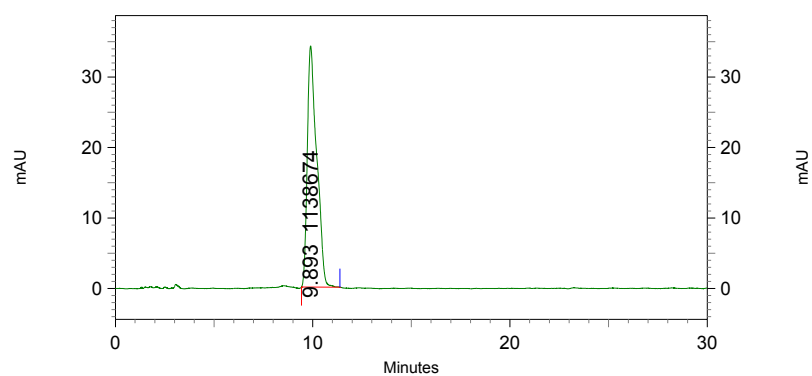
ภาพผนวกที่ ๔6 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเมทานอลที่ความเข้มข้น 0.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



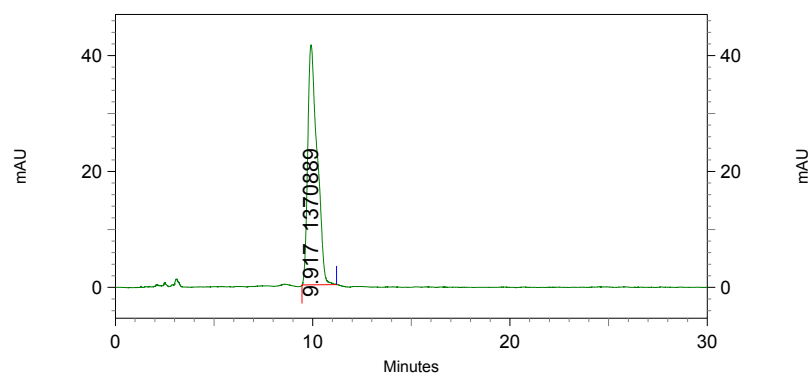
ภาพผนวกที่ ๗7 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเมทานอลที่ความเข้มข้น 0.04 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



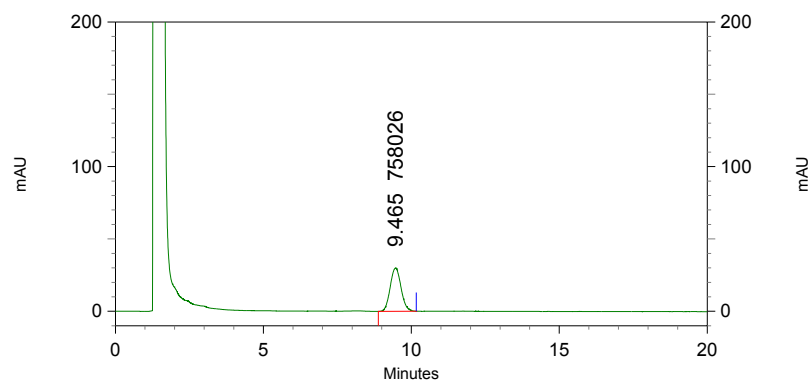
ภาพผนวกที่ ๗8 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเมทานอลที่ความเข้มข้น 0.06 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



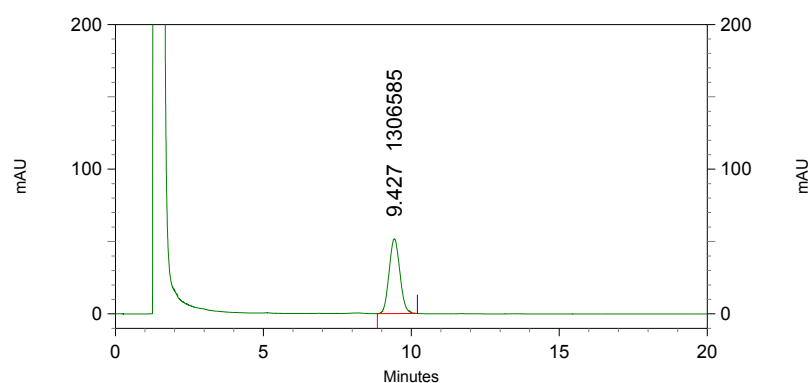
ภาพผนวกที่ ๗9 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเมทานอลที่ความเข้มข้น 0.08 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



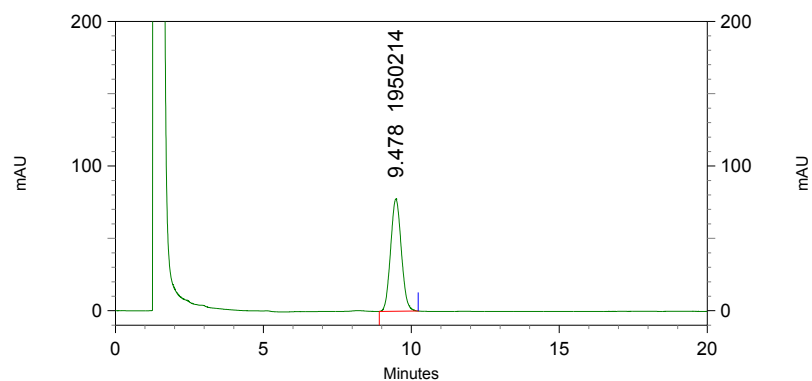
ภาพผนวกที่ ๑10 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายเมทานอลที่ความเข้มข้น 0.10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



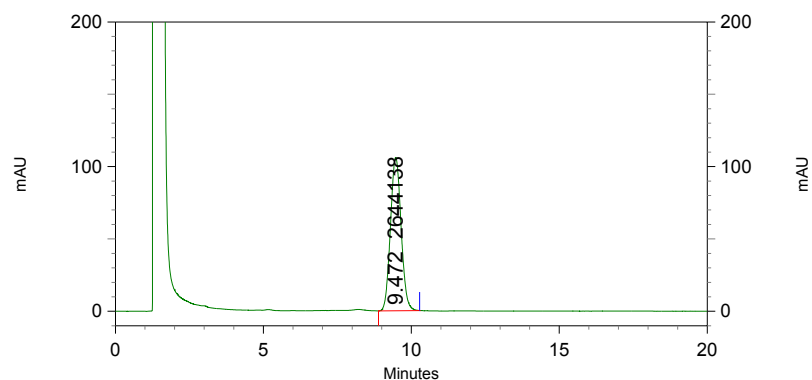
ภาพผนวกที่ ๑11 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายอะซีโตนที่ความเข้มข้น 0.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



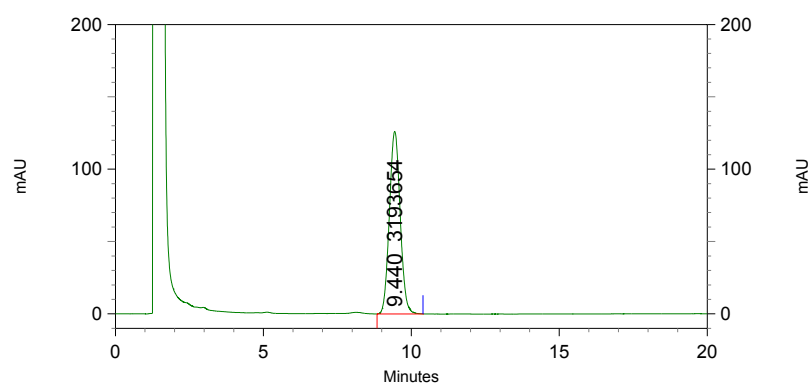
ภาพผนวกที่ ๑12 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายอะซีโตนที่ความเข้มข้น 0.04 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร



ภาพผนวกที่ 13 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายอะซีโตนที่ความเข้มข้น 0.06 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

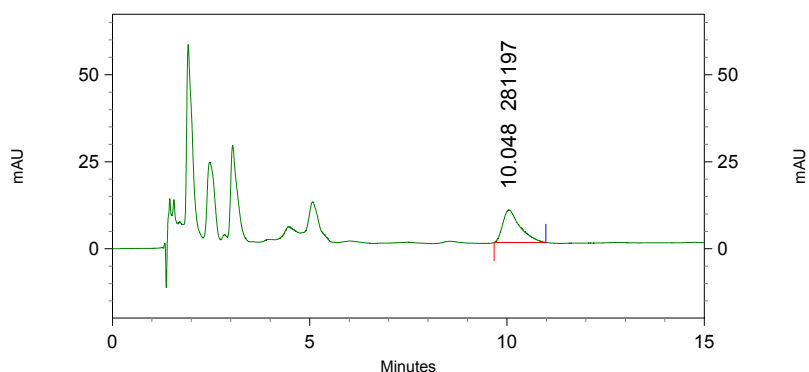


ภาพผนวกที่ 14 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายอะซีโตนที่ความเข้มข้น 0.08 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

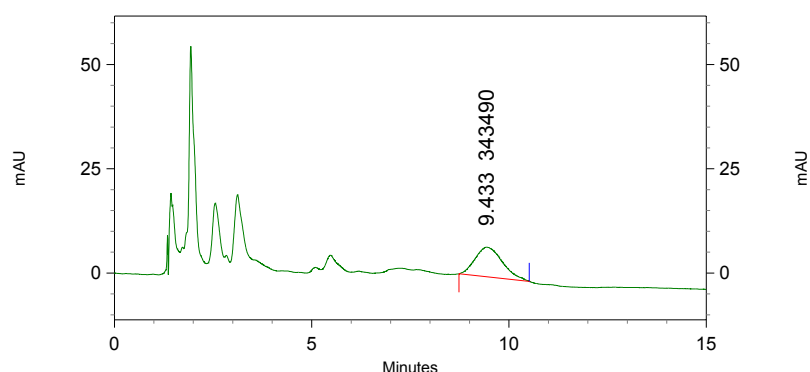


ภาพผนวกที่ 15 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลในสารละลายอะซีโตนที่ความเข้มข้น 0.10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

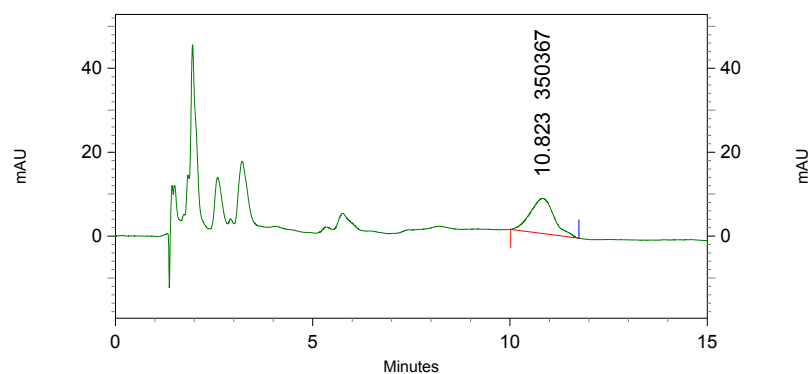
2. ภาพโครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต



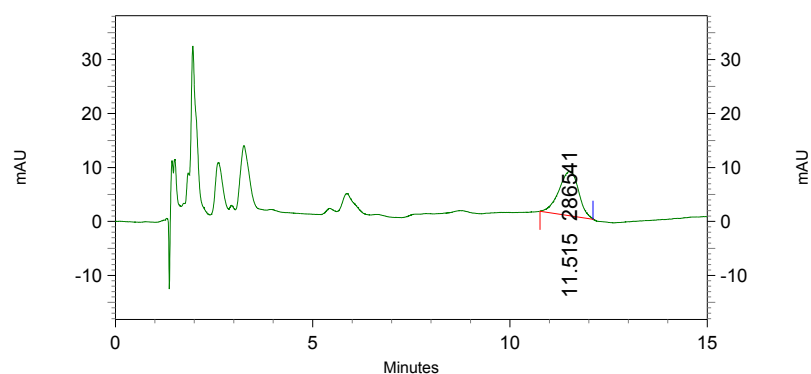
ภาพผนวกที่ 16 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 100 มิลลิลิตร



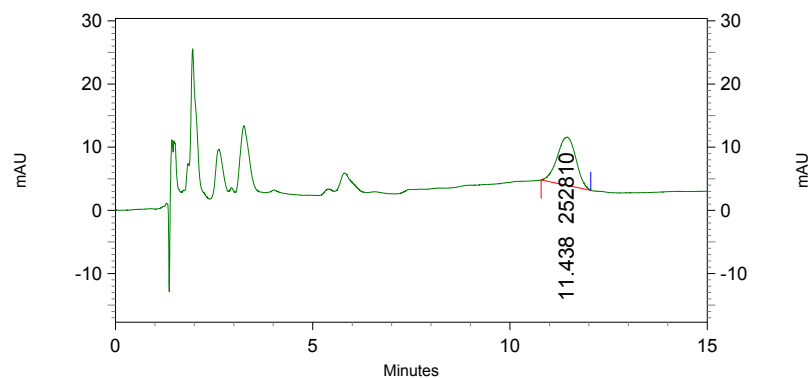
ภาพผนวกที่ 17 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 200 มิลลิลิตร



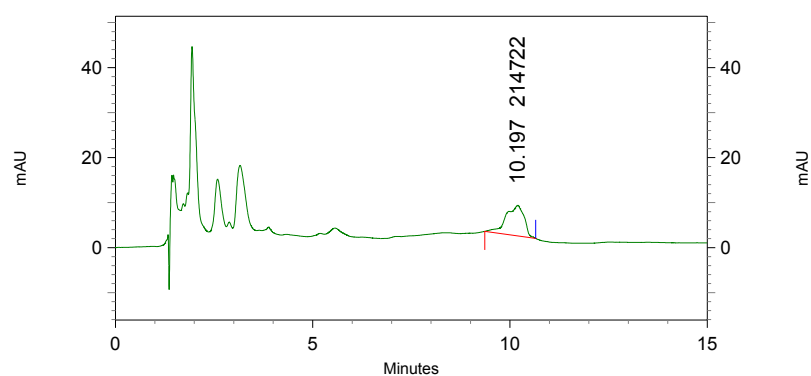
ภาพผนวกที่ 18 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 300 มิลลิลิตร



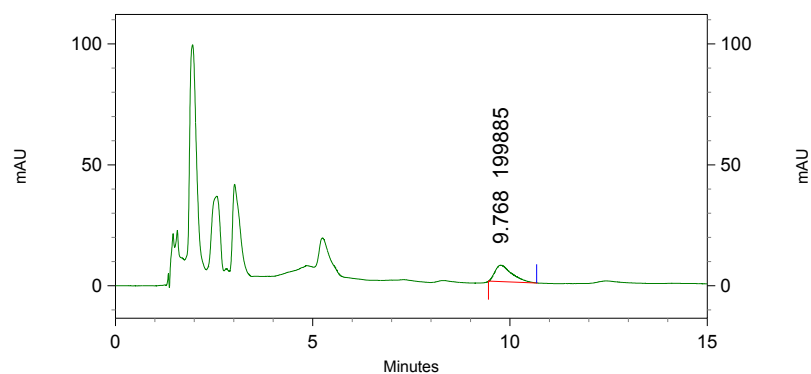
ภาพผนวกที่ 19 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 400 มิลลิลิตร



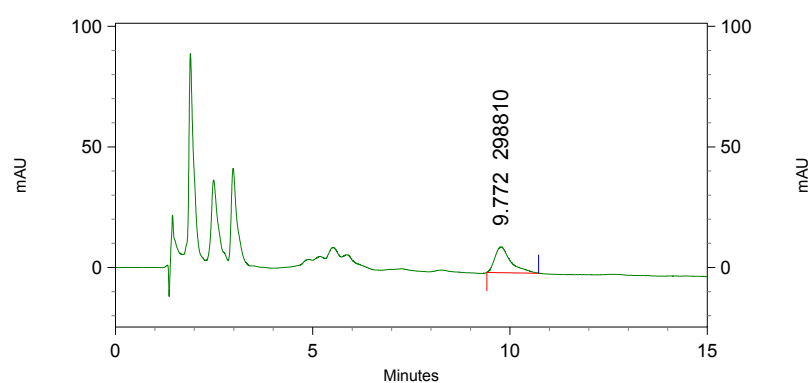
ภาพผนวกที่ ง20 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 130 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 500 มิลลิลิตร



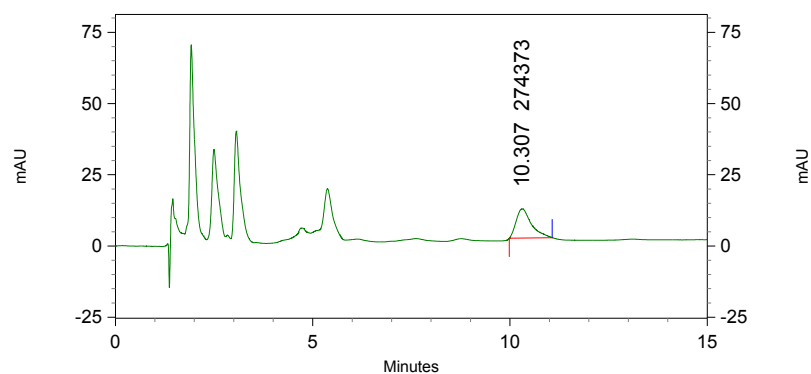
ภาพผนวกที่ ง21 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 100 มิลลิลิตร



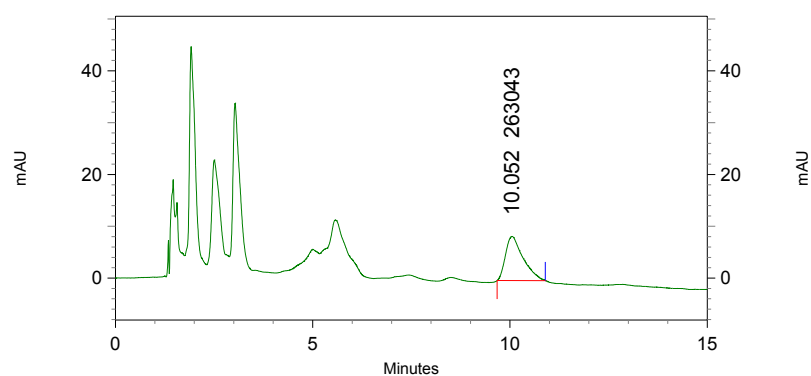
ภาพผนวกที่ ง22 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 200 มิลลิลิตร



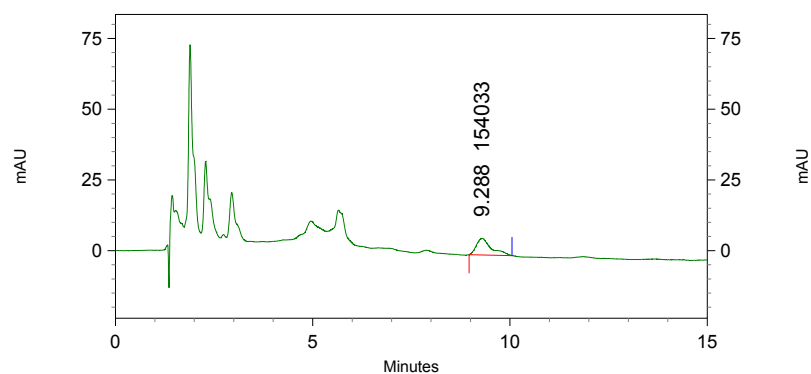
ภาพผนวกที่ ง23 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 300 มิลลิลิตร



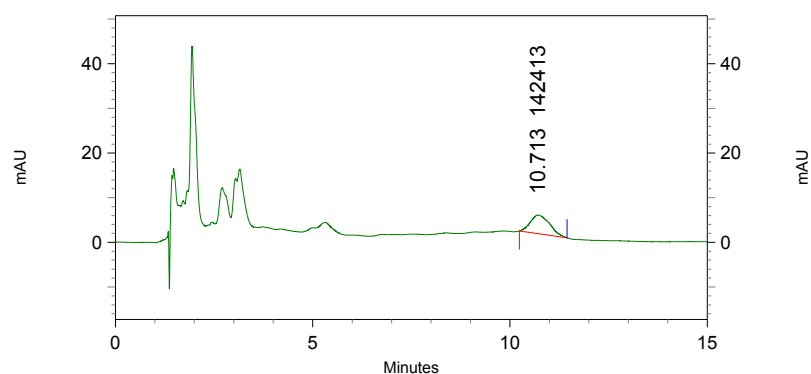
ภาพผนวกที่ ง24 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 400 มิลลิลิตร



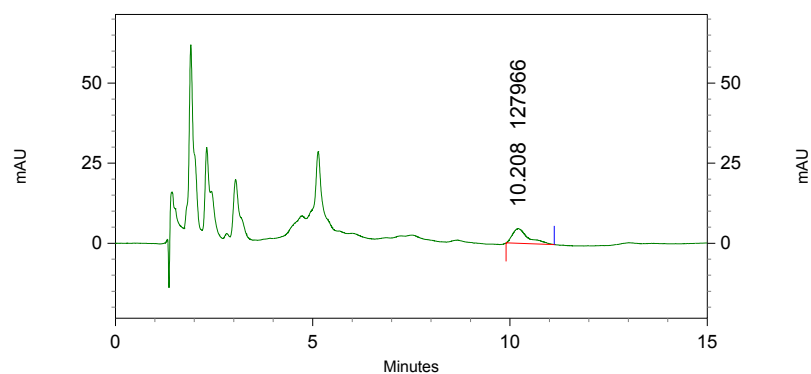
ภาพผนวกที่ ง25 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 500 มิลลิลิตร



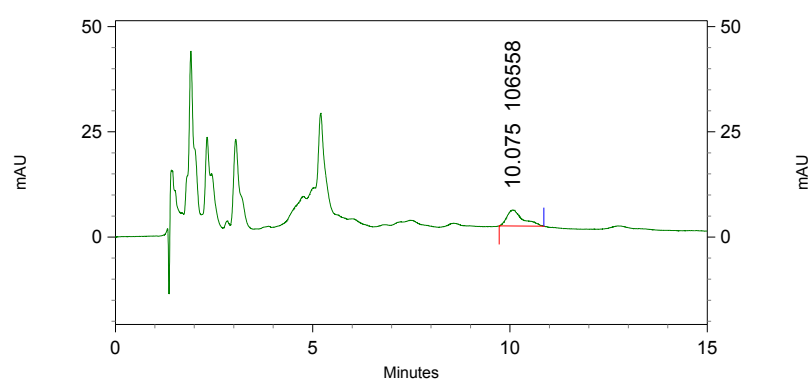
ภาพผนวกที่ ง26 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 170 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 100 มิลลิลิตร



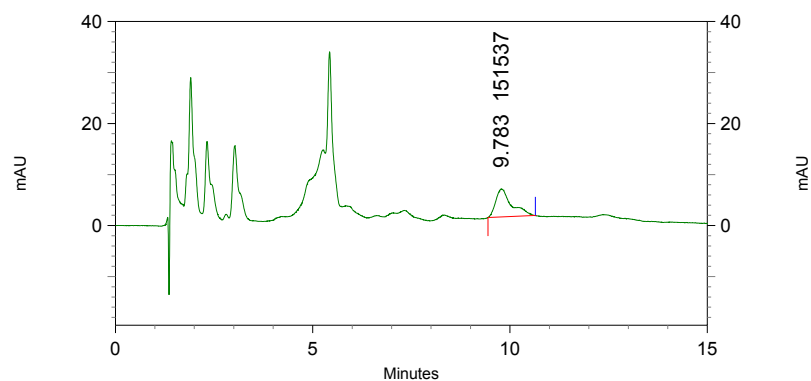
ภาพผนวกที่ ง27 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 170 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 200 มิลลิลิตร



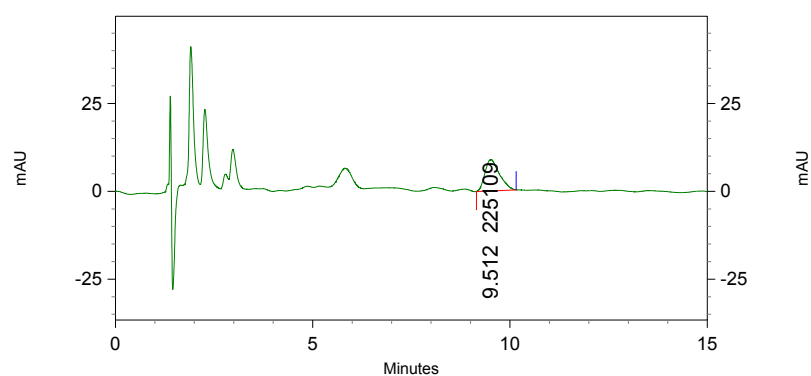
ภาพผนวกที่ ง28 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 170 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 300 มิลลิลิตร



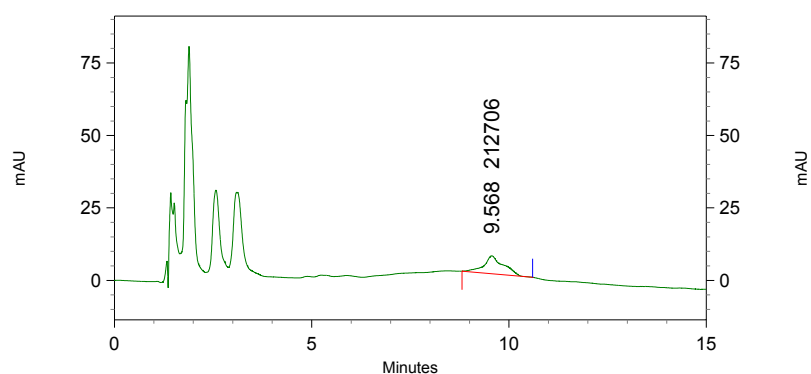
ภาพผนวกที่ ง29 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 170 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 400 มิลลิลิตร



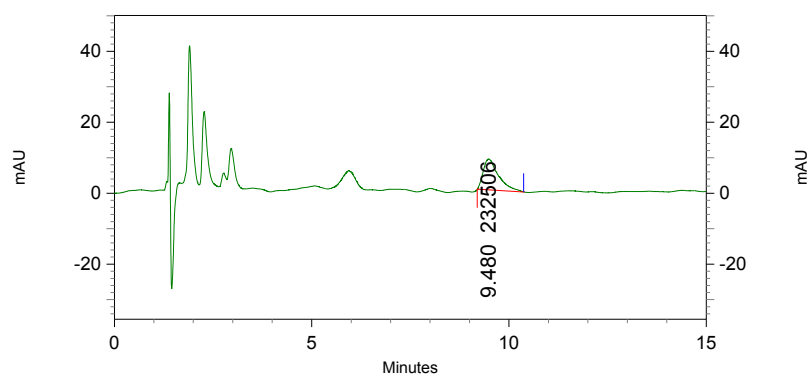
ภาพผนวกที่ ง30 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 170 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 500 มิลลิลิตร



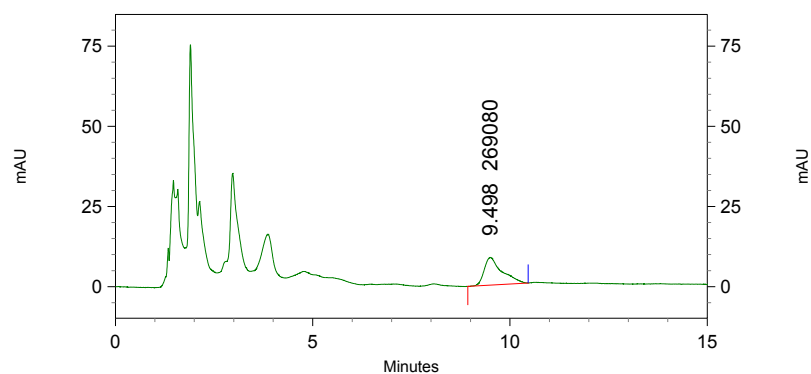
ภาพผนวกที่ ง31 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 50 มิลลิลิตร



ภาพผนวกที่ ง32 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 50 มิลลิลิตร

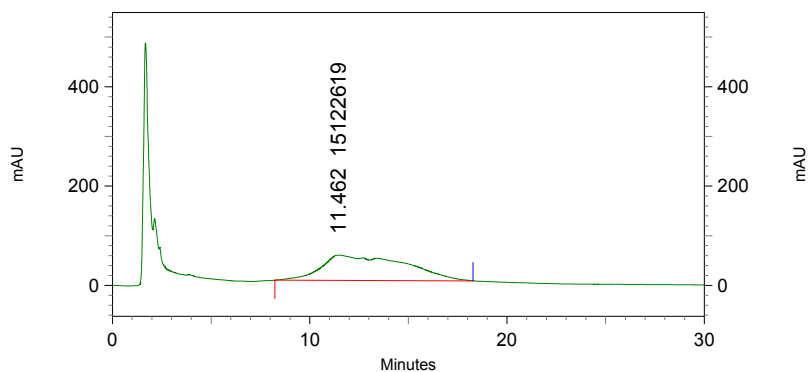


ภาพผนวกที่ ง33 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 50 มิลลิลิตร

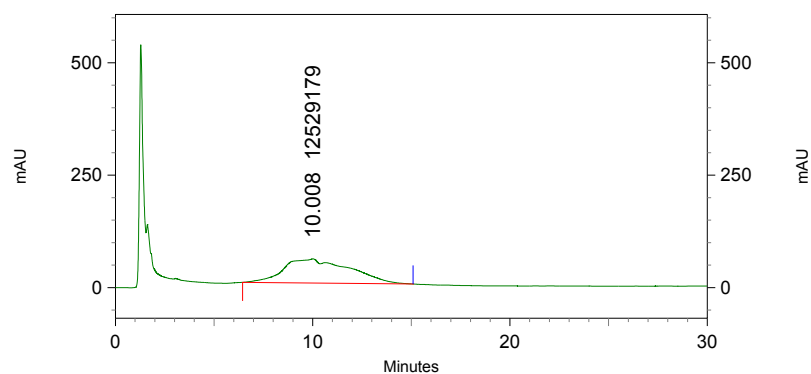


ภาพผนวกที่ 34 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตร่วมกับเอทานอล ที่ความดัน 150 บาร์ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกใช้ไป 50 มิลลิลิตร

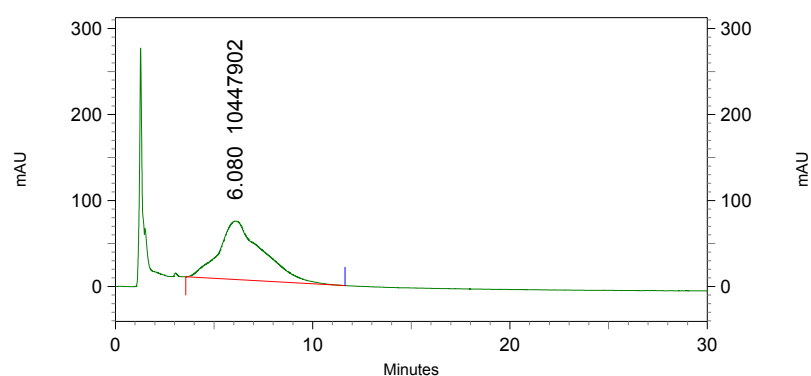
3. ภาพโครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต



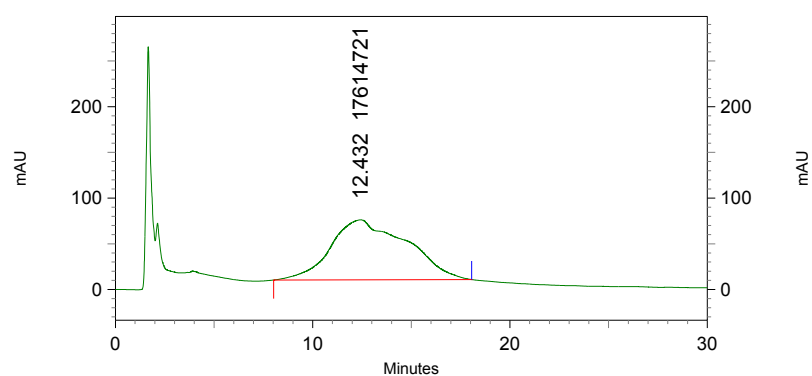
ภาพผนวกที่ 35 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที



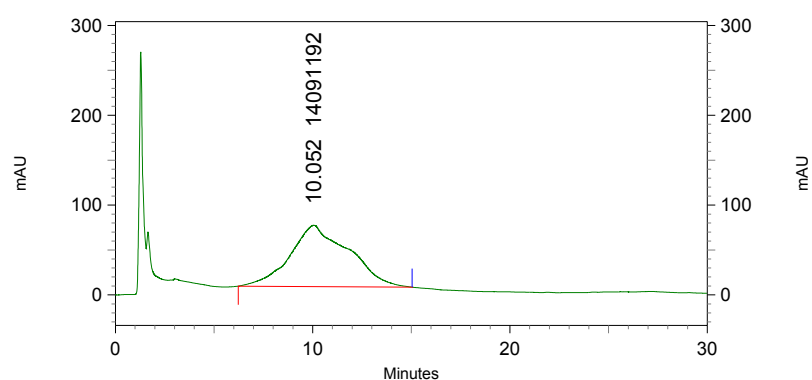
ภาพผนวกที่ 36 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตรต่อนาที



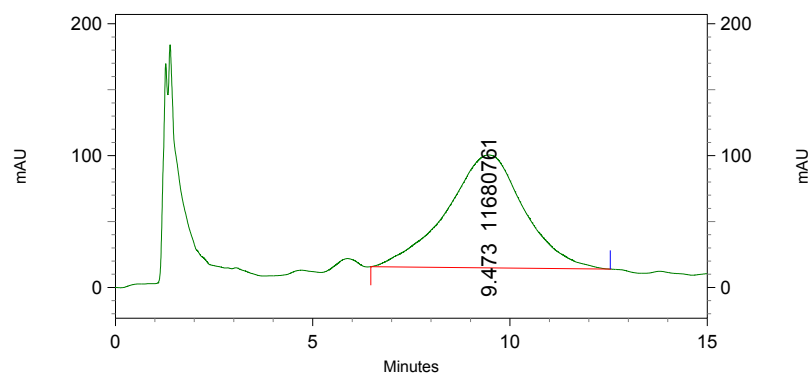
ภาพผนวกที่ 37 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 15 มิลลิลิตรต่อนาที



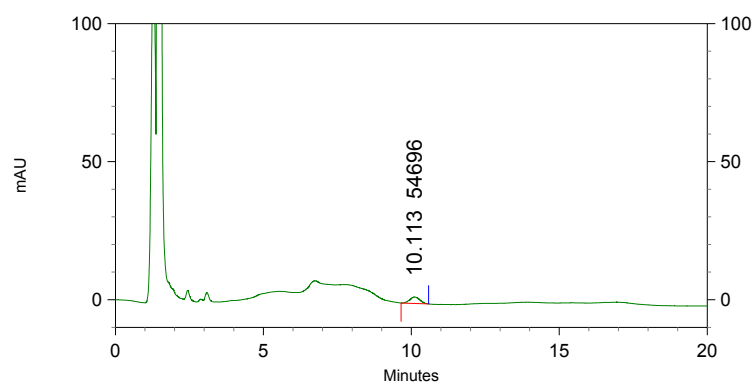
ภาพผนวกที่ 38 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที



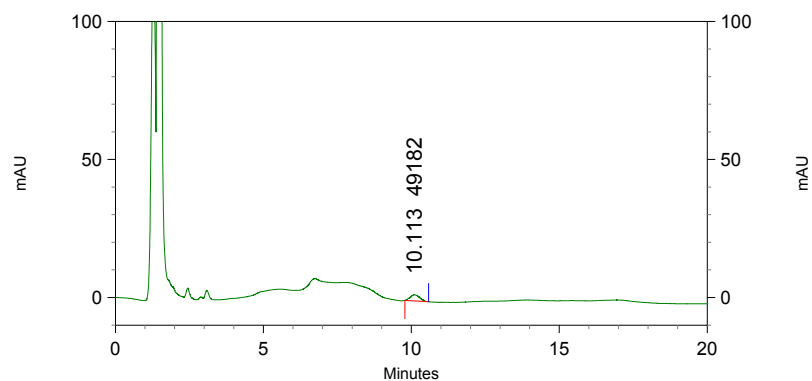
ภาพผนวกที่ 39 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที



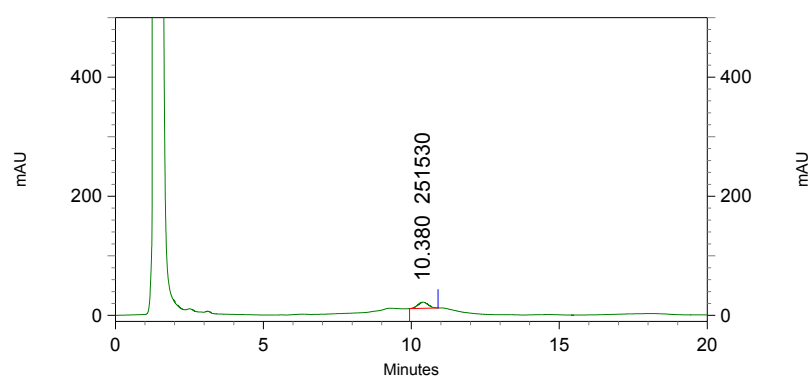
ภาพผนวกที่ ๔๐ โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที



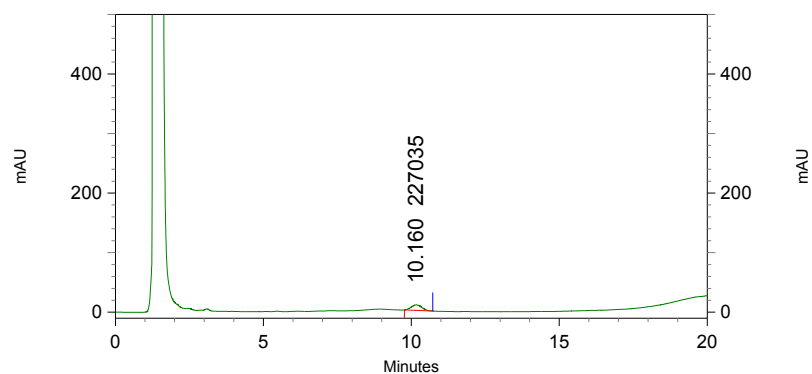
ภาพผนวกที่ ๔๑ โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากเมทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพผนวกที่ ๔๒ โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่แตกสลายออกจากเมทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้เคียงวิกฤต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที

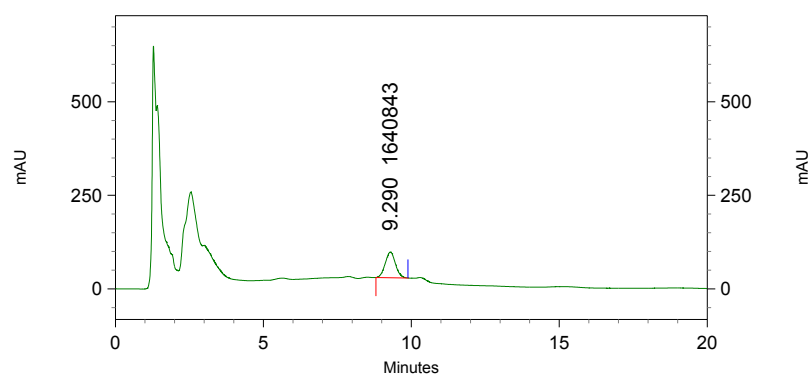


ภาพผนวกที่ ๔๓ โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่แตกสลายออกจากอะซีโตนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้เคียงวิกฤต ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที

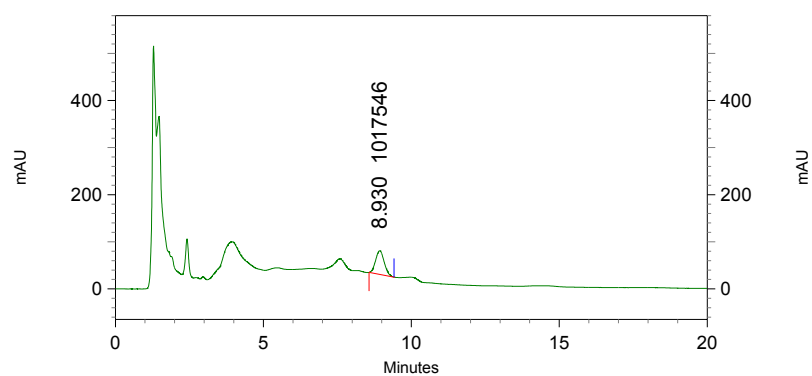


ภาพผนวกที่ ง44 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่ตกผลึกออกจากอะซีโตนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตรต่อนาที

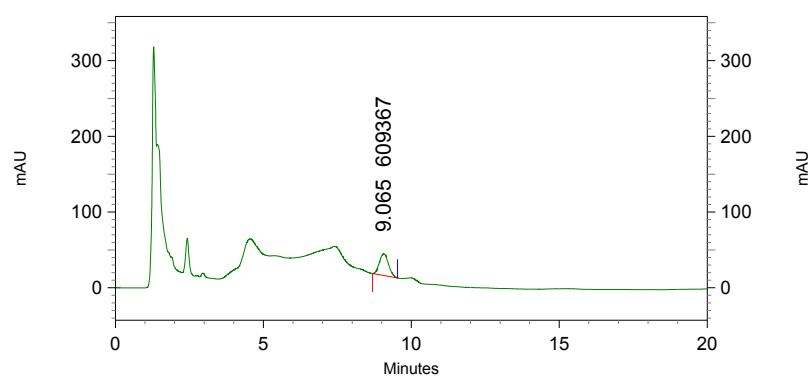
4. โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์



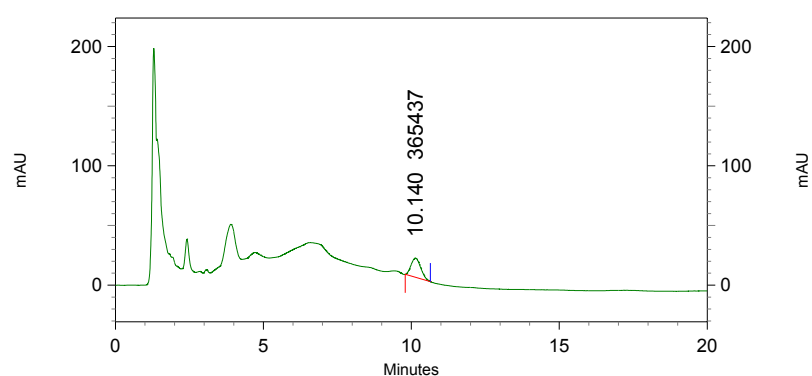
ภาพผนวกที่ ง45 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ในชั่วโมงที่ 1



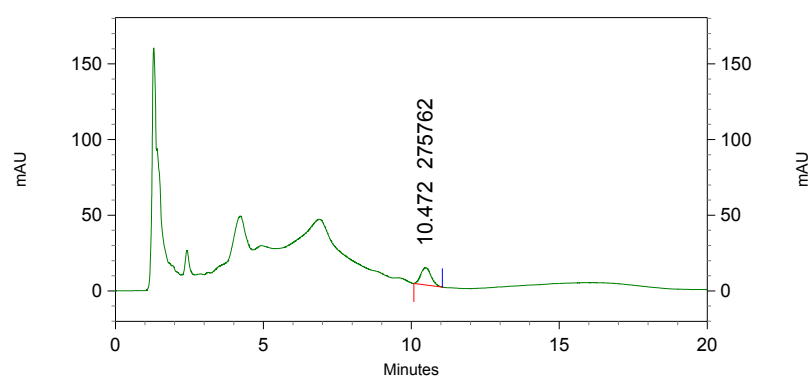
ภาพผนวกที่ ง46 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ในชั่วโมงที่ 2



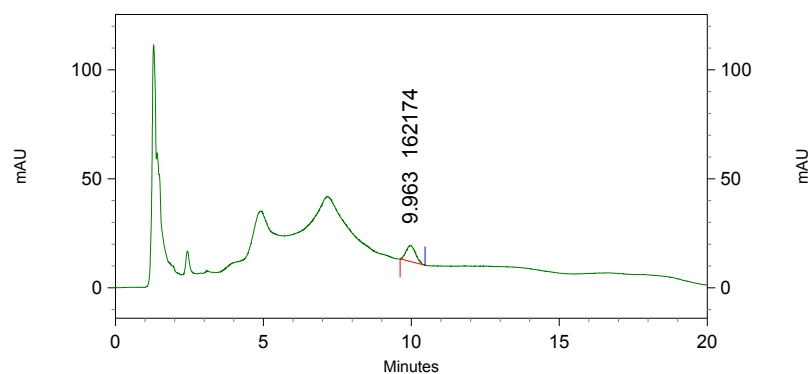
ภาพผนวกที่ 47 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ใน ชั่วโมงที่ 3



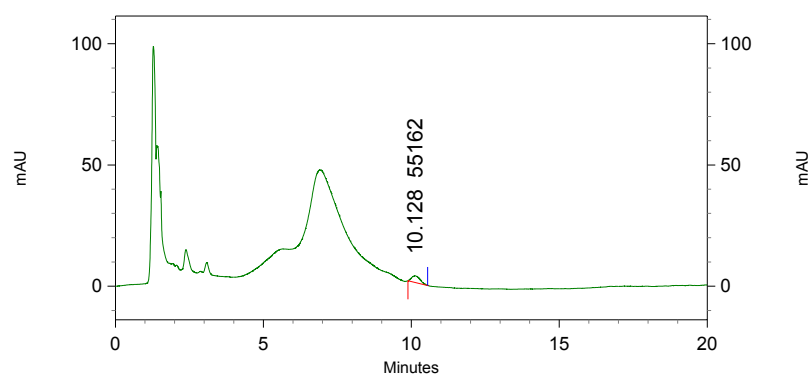
ภาพผนวกที่ 48 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ใน ชั่วโมงที่ 4



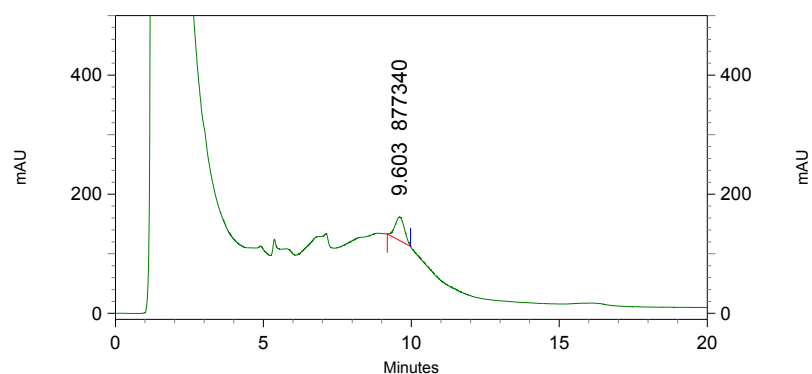
ภาพผนวกที่ 49 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ใน ชั่วโมงที่ 5



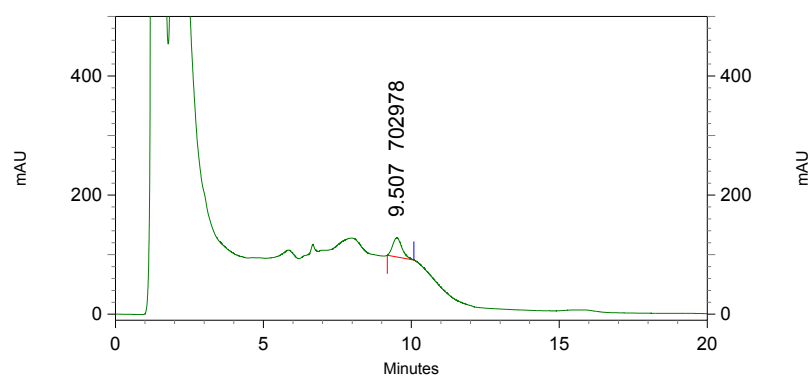
ภาพผนวกที่ ๕๐ โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ใน ชั่วโมงที่ 6



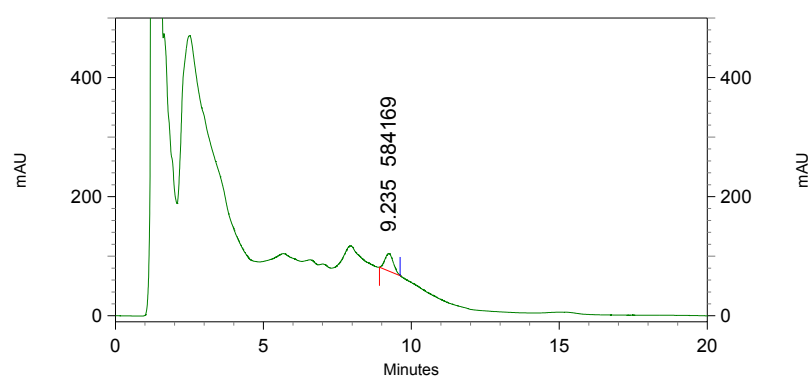
ภาพผนวกที่ ๕๑ โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล ใน ชั่วโมงที่ 7



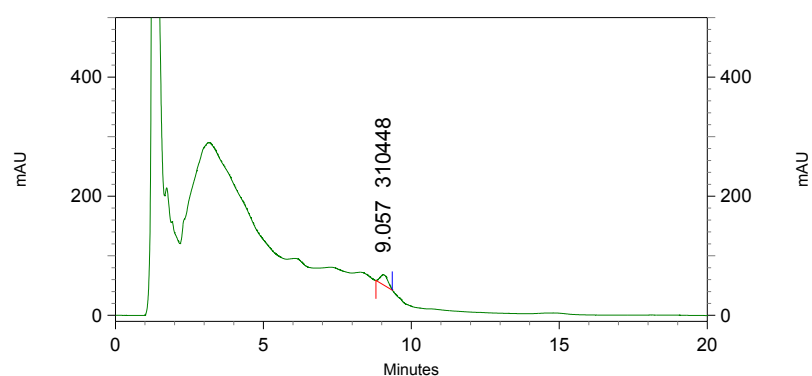
ภาพผนวกที่ ๕๒ โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 1



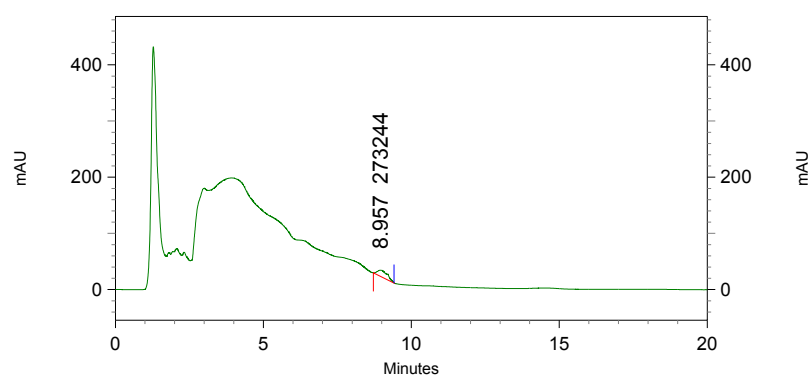
ภาพผนวกที่ 53 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 2



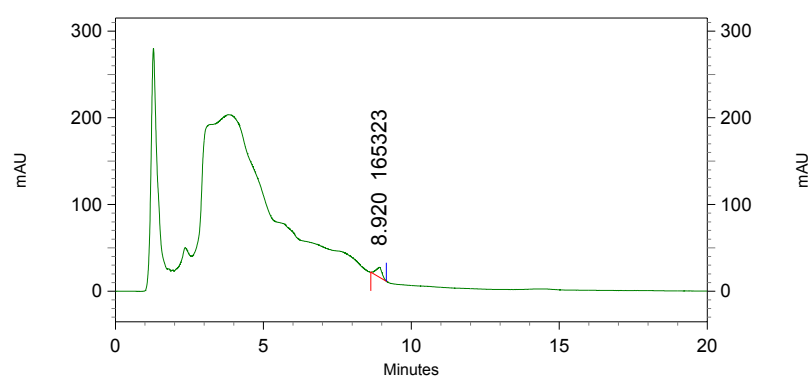
ภาพผนวกที่ 54 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 3



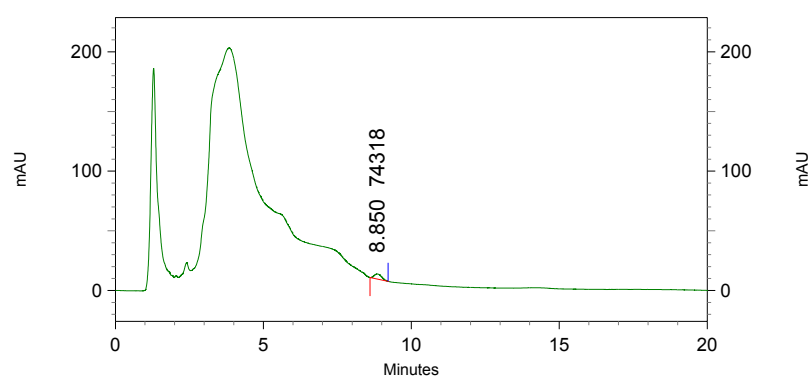
ภาพผนวกที่ 55 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 4



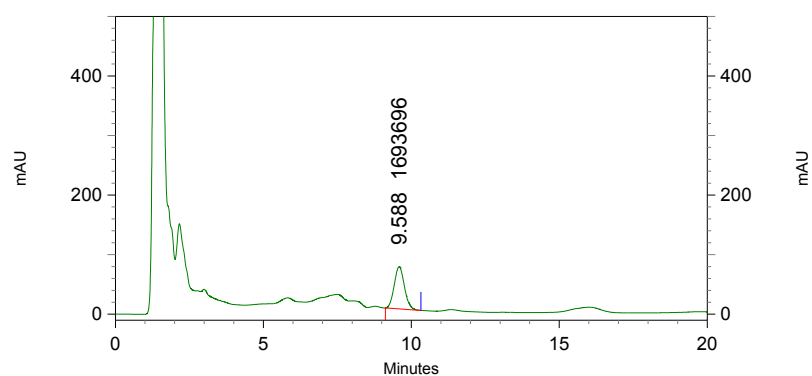
ภาพผนวกที่ 56 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 5



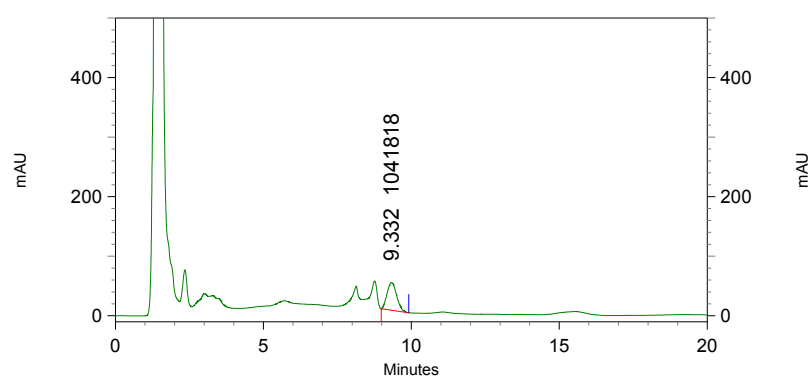
ภาพผนวกที่ 57 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 6



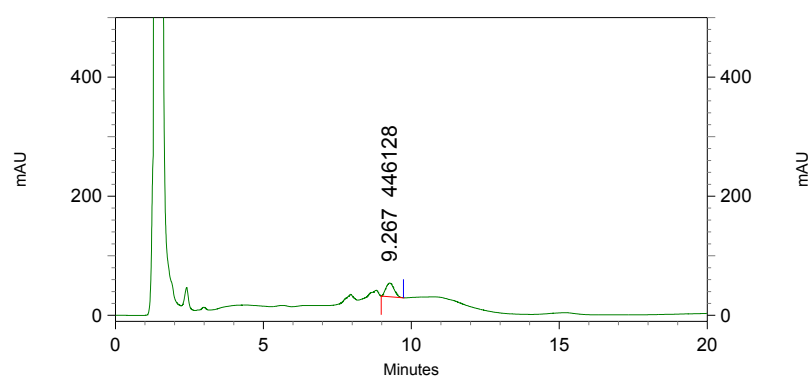
ภาพผนวกที่ 58 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล ใน ชั่วโมงที่ 7



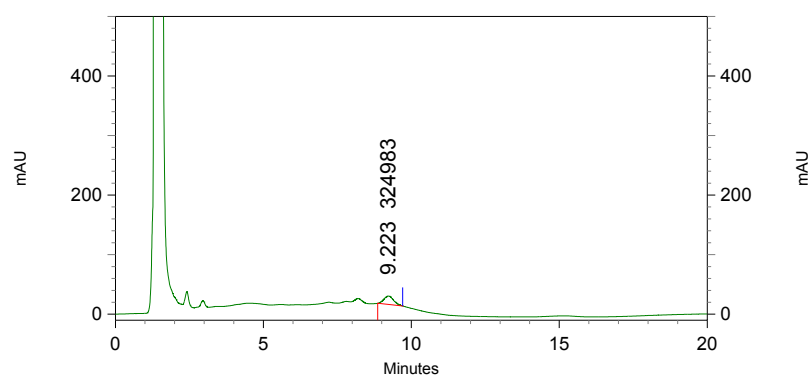
ภาพผนวกที่ 59 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 1



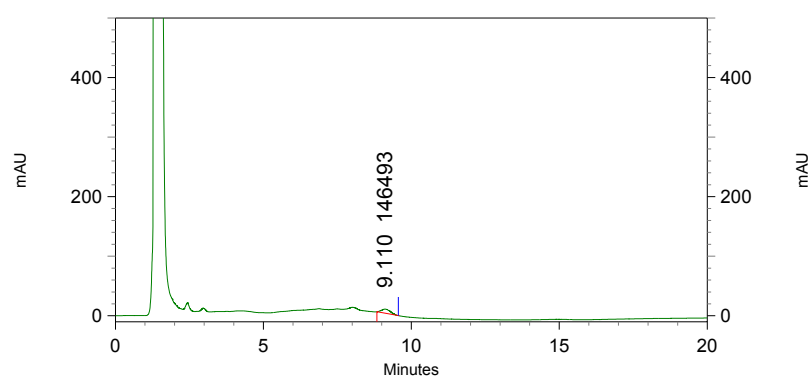
ภาพผนวกที่ 60 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 2



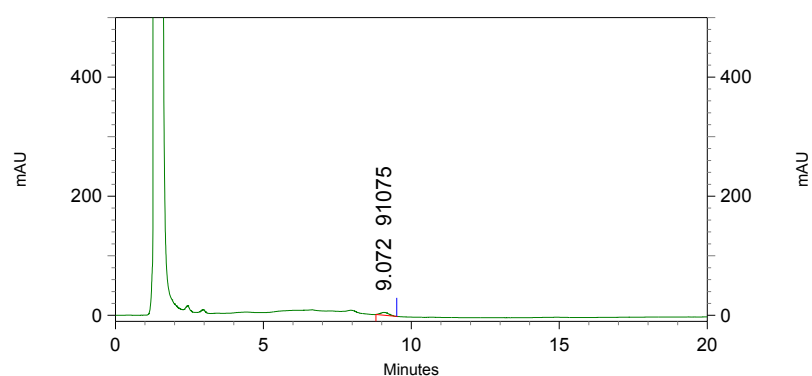
ภาพผนวกที่ 61 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 3



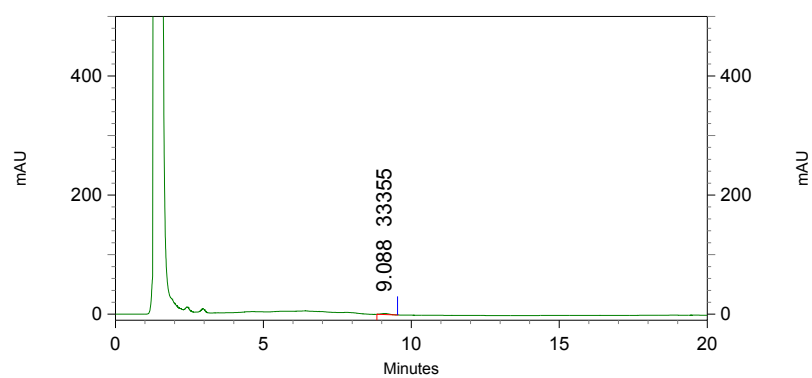
ภาพผนวกที่ ๖๒ โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 4



ภาพผนวกที่ ๖๓ โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 5



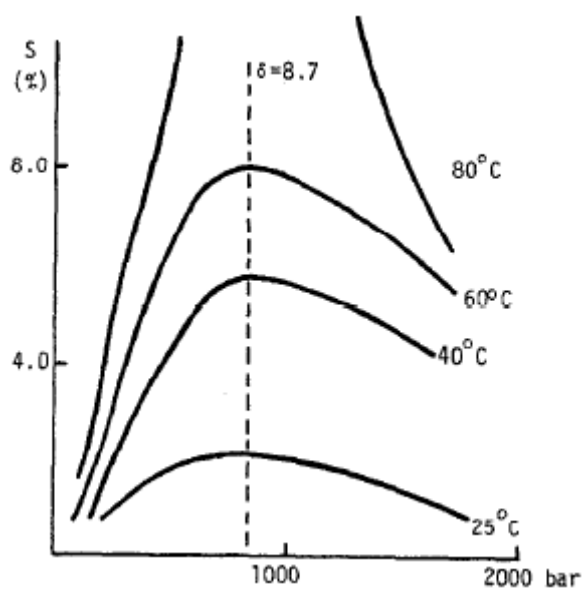
ภาพผนวกที่ ๖๔ โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 6



ภาพผนวกที่ 65 โครมาโตแกรมของแอลฟาโทโคฟีรอลที่สกัดด้วยตัวทำละลายอะซีโตน ใน ชั่วโมงที่ 7

ภาคผนวก จ

คุณสมบัติในการละลายของน้ำมันทานตะวัน



ภาพผนวกที่ จ1 ความสามารถในการละลายของน้ำมันทานตะวันในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะ
เหนือจุดวิกฤต

ที่มา: King (2002)

ภาคผนวก จ

ความสามารถในการละลาย (Solubility) และความเป็นขั้ว (Polarity) ของตัวทำละลายอินทรีย์

ความสามารถในการละลาย (Solubility)

ความสามารถในการละลายของสารนั้นขึ้นอยู่กับความมีขั้วของตัวทำละลาย โดยอยู่ในรูปของ dipole moment ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า dielectric constant ตัวทำละลายที่มีค่า dielectric constant สูง จะละลายสารประกอบไอออน หรือสารที่มีขั้ว โดยอาศัยปฏิกิริยา ion-dipole ส่วนตัวทำละลายที่มีค่า dielectric constant ต่ำ จะละลายสารที่ไม่ชอบน้ำหรือสารที่ไม่มีขั้ว โดยอาศัยปฏิกิริยา dipole หรือ induced-dipole (Van der Waals, แรง London หรือ Debye) ตัวทำละลายกลุ่มแรกเรียกว่าตัวทำละลายแบบมีขั้ว เช่น น้ำ กลีเซอริน และเมทานอล ส่วนตัวทำละลายกลุ่มหลังเรียกว่าตัวทำละลายแบบไม่มีขั้ว เช่น คลอโรฟอร์ม เบนซีน และ น้ำมัน สำหรับตัวทำละลายที่มีค่า dielectric constants ปานกลาง เรียกว่าตัวทำละลายแบบกึ่งมีขั้ว เช่น อะซีโตน และ บิวทานอล

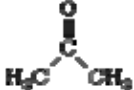
Dielectric constant (ϵ) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความมีขั้ว (polarity) ของโมเลกุลของตัวทำละลายที่อุณหภูมิใดๆ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่า dielectric constant และความมีขั้วได้แสดงในตารางผนวกที่ ๑ จะเห็นได้ว่าสารที่มีความเป็นขั้วสูงจะมีค่า dielectric constant ที่สูง ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายที่เป็น electrolyte จะขึ้นกับการแตกตัวของตัวถูกละลายซึ่งเป็นผลมาจากค่า dielectric constant ของตัวทำละลาย ดังนั้นของเหลวที่มีค่า dielectric constant ที่สูง เช่น น้ำ จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการแตกตัวของ electrolyte ในน้ำได้ง่าย แต่ในกรณีที่ตัวถูกละลายเป็น weak electrolyte หรือ non-electrolytes การแตกตัวในน้ำจะเกิดขึ้นน้อยหรือแทบจะไม่มีเลย ทำให้การผสมตัวทำละลายหลายชนิดเข้าด้วยกันเป็นการเปลี่ยนแปลงความมีขั้วของระบบตัวทำละลายได้ และสามารถเลือกใช้เทคนิคนี้ในการเพิ่มการละลายของตัวถูกละลายที่ละลายได้ยาก โดยสามารถใช้ค่า dielectric constant ของตัวทำละลาย (ตารางผนวกที่ ๑) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการละลายของตัวถูกละลายในการทำนายความสามารถในการละลายได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารที่มีค่า ϵ ใกล้เคียงกันมักจะละลายซึ่งกันและกันได้ดี อย่างไรก็ตามค่า dielectric constant ไม่สามารถทำนายความสามารถในการละลายของสารได้ทั้งหมด เนื่องจากการละลายของสารยังขึ้นกับปัจจัยอื่นอีก เช่น สูตรโครงสร้างทางเคมี, น้ำหนักโมเลกุล เป็นต้น

ตารางผนวกที่ ๑1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความมีขั้วกับค่า Dielectric constant (ϵ) ของตัวทำละลาย

Polarity	Dielectric constant (ϵ)
Non polar	1-20
Semipolar	20-50
Polar	>50

ที่มา: อรุษา (2546)

ตารางผนวกที่ ๑2 ความเป็นขั้ว (Polarity) ของตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆ

Name	Structure	bp (°C)	dipole moment	dielectric constant
methanol	CH ₃ -OH	68	1.70	33
ethanol	CH ₃ CH ₂ -OH	78	1.69	24.3
acetone		56	2.88	20.7

ที่มา: The University of Southern Maine (2006)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวเกศินี ศรีสุระ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 31 กรกฎาคม 2524
สถานที่เกิด	ชลบุรี
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนชลกันยานุกูล จังหวัดชลบุรี ระดับอุดมศึกษา วศ.บ. (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี (พ.ศ. 2547)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	Asian Development Bank-Kasetsart (ADB-KU)

