การสกัดสารประกอบฟีโนลิคจากใบสบู่ดำโดยใช้
คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตกับตัวทำละลายร่วม

นายธนพัทย์ สุขจรมากุล วท.บ. (วิทยาศาสตร์เคมี)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(รศ.ดร.อุบลรัตน์ สิริภัทราวรรณ)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รศ.ดร.สุวัสสา พงษ์อำไพ)

..... กรรมการ
(รศ.ดร.วิทยา เทพไพฑูรย์)

..... กรรมการ
(รศ.ดร.นพดล เจียมสวัสดิ์)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสกัดสารประกอบฟีโนลิคจากใบสบู่ดำโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตกับตัวทำละลายร่วม
หน่วยกิต 12
ผู้เขียน นายธนพัทย์ สุขจรมากุล
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุวัสสา พงษ์อำไพ
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ. 2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสกัดสารประกอบฟีโนลิค ได้แก่ กรดแกลลิก (gallic acid) กรดแอลลาจิก (ellagic acid) และคลอริลาจิน (corilagin) จากใบสบู่ดำ (*Jatropha curcas* Linn.) ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต และใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม ออกแบบการทดลองด้วย วิธีบ๊อกซ์-เบ็นเกน (Box-Behnken design, BBD) เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของความดัน (8 ถึง 42 เมกกะปาสคาล) อุณหภูมิ (35 ถึง 85 องศาเซลเซียส) และความเข้มข้นของเมทานอล (1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) พบว่าผลได้ (yield) การสกัดของกรดแกลลิกสูงสุดเท่ากับ 2,178.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมใบสบู่ดำแห้ง สกัดโดยใช้เมทานอล 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเป็นตัวทำละลายร่วม ที่ความดัน 25 เมกกะปาสคาล และอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในขณะที่การสกัดที่ความดัน 42 เมกกะปาสคาล อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้เมทานอล 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรเป็นตัวทำละลายร่วม พบว่าผลได้การสกัดกรดแอลลาจิกและคลอริลาจินสูงสุดเท่ากับ 4,810.61 และ 12,156.35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมใบสบู่ดำแห้งตามลำดับ จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) พบว่าการสกัดที่ความดัน 25 เมกกะปาสคาล อุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนตัวทำละลายร่วมที่ 6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สามารถสกัดกรดแกลลิกได้สูงสุดเท่ากับ 2,622.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมใบสบู่ดำแห้ง ส่วนกรดแอลลาจิกพบว่าสามารถสกัดได้ปริมาณสูงสุดเท่ากับ 4,700.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมใบสบู่ดำแห้ง ที่ความดัน 37.5 เมกกะปาสคาล อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนตัวทำละลายร่วมที่ 6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และการสกัดที่ความดัน 42 เมกกะปาสคาล อุณหภูมิ 78.5 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนตัวทำละลายร่วม 6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรสามารถสกัดคลอริลาจินได้สูงสุดเท่ากับ 18,245.46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมใบสบู่ดำแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพี (p-value) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากวิธีพื้นผิวตอบสนองแสดงให้เห็นว่า

เทอมของความสัมพันธ์กำลังสองของค่าความดันมีผลต่อการสกัดกรดแกลลิกมากที่สุด ส่วนเทอมที่มีอิทธิพลต่อการสกัดกรดแอลลาจิก และคลอริลาจินมากที่สุดคือ เทอมของอุณหภูมิ และสัดส่วนของตัวทำละลายร่วมที่ใช้ ตามลำดับ

การศึกษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากใบสบู่ดำด้วยวิธีโมดิฟายออลิจินอล ดีพีพีเอช (modified original DPPH) พบว่าสารสกัดใบสบู่ดำมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงสุดเท่ากับ 62.8 เปอร์เซ็นต์เทียบกับสารมารตฐาน DPPH เมื่อสกัดที่ความดัน 25 เมกกะปาสคาล 35 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนตัวทำละลายร่วม 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และจากผลการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่าเทอมของ ความสัมพันธ์กำลังสองของอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดมากที่สุด โดยพบว่าการสกัดที่ความดัน 8 เมกกะปาสคาล อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส และใช้สัดส่วนตัวทำละลายร่วม 6 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สารสกัดจากใบสบู่ดำที่ได้จะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงสุดเท่ากับ 82.88 เปอร์เซ็นต์เทียบกับสารมาตรฐาน DPPH

คำสำคัญ : คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต / สารประกอบฟีโนลิค / สบู่ดำ / วิธีพื้นผิวตอบสนอง / ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

Thesis Title	Extraction of phenolic compounds from physic nut *(Jatropha curcas Linn.)* leaves using supercritical carbon dioxide with a co-solvent
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Tanapat Sukachonmarkul
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suwassa Pongamphai
Program	Master of Engineering
Field of Study	Chemical Engineering
Department	Chemical Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2554

Abstract

In this research, we investigated the extraction of phenolic compounds such as gallic acid (GA), ellagic acid (EA), and corilagin (CG) from physic nut (*Jatropha curcas* Linn.) leaves using supercritical carbon dioxide ($SCCO_2$) and methanol as a co-solvent. The experiments were designed by using Box - Behnken Design (BBD) to determine the effects of pressure (8 - 42 MPa), temperature (35 – 85 ^oC) and concentration of methanol (1 - 5 % (v/v)). The maximum extraction yield (2,178.2 mg/kg dried leaves) of GA was obtained at the temperature of 85 ^oC, pressure of 25 MPa and using methanol concentration of 5% (v/v), while the maximum yields of EA (4,810.61 mg/kg dried leaves) and CG (12,156.35 mg/kg dried leaves) were obtained at 42 MPa, 60 ^oC and 5 % (v/v) methanol. In addition, the response surface methodology (RSM) was used to optimize the extraction yield. The predicted results showed that the maximum extraction yield of GA, EA, and CG were 2,622.12 (at 25 MPa, 97 ^oC and 6 % (v/v) methanol), 4,700.94 (at 37.5 MPa, 60 ^oC and 6 % (v/v) methanol), and 18,245.46 mg/kg dried leaves (at 42 MPa, 78.5 ^oC and 6 % (v/v) methanol), respectively. Moreover, the *P*-value indicates that the quadratic term of the pressure is the most importance factor that affects the GA extraction, while the significant effects on EA and CG extraction are the temperature and the methanol concentration, respectively.

The antioxidant activity of the crude extract was evaluated by using the 1, 1 - diphenyl - 2 picrylhydrazy (DPPH) method. The maximum inhibition percentage (62.8 % compared with the standard DPPH) of the extract was achieved at 25 MPa, 35 ^oC and 5 % (v/v) methanol. The RSM results indicates that the quadratic term of the extraction temperature is the most significant effect on the antioxidant activity of the extract. The highest DPPH radical scavenging activity (82.88 %) of the extract could obtained using 6 % (v/v) methanol as a co-solvent at 8 MPa and 22 ^oC.

Keywords: Supercritical carbon dioxide / Phenolic compounds / Physic nut / Response surface methodology / Antioxidant activity

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ รศ.ดร.สุวัสสา พงษ์อำไพ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งขอขอบพระคุณ รศ .ดร.นพดล เจียมสวัสดิ์ รศ.ดร.วิทยา เทพไพฑูรย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี รศ.ดร.อุบลรัตน์ สิริภัทราวรรณ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ละเอียด เพ็งโสภา และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆในการดำเนินงานวิจัย รวมถึงสถาบันอาหารที่ให้ความช่วยเหลือในด้านเครื่องมือ และขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องที่มิได้เอ่ยนามไว้ในที่นี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ง
กิตติกรรมประกาศ จ
สารบัญ ฉ
รายการตาราง ซ
รายการรูปประกอบ ฌ
รายการสัญลักษณ์ ฎ
ประมวลศัพท์และคำย่อ ฑ

บทที่

1. บทนำ **1**
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ 3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง **4**
2.1 สบู่ดำ 4
2.2 สารประกอบฟีโนลิค 8
2.3 อนุมูลอิสระ 13
2.4 การสกัด 15
2.5 ตัวทำละลายร่วม 27
2.6 พารามิเตอร์การละลาย 29
2.7 โครมาโทกราฟีแบบของเหลวสมรรถนะสูง 30
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 33

3. วิธีการทดลอง **39**

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ 39

3.2 วัสดุและสารเคมี 39

3.3 วิธีการทดลอง 40

3.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 44

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง **47**

4.1 การเตรียมใบสบู่ดำอบแห้ง 47

4.2 การสกัดสารประกอบฟีโนลิคจากใบสบู่ดำด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต 47

4.3 การศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ 64
ของสารสกัดจากใบสบู่ดำ

4.4 สหสัมพันธ์สำหรับทำนายผลได้การสกัดสารประกอบฟีโนลิคและความ 68
สามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ของสารสกัดใบสบู่ดำ

4.5 การวิเคราะห์ความคงตัวของสารประกอบฟีโนลิคในสารสกัดจากใบสบู่ดำ 80

5. สรุปผลการทดลอง **86**

5.1 สรุปผลการทดลอง 86

เอกสารอ้างอิง **89**

ภาคผนวก **94**

ก ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีสมรรถนะสูง 94

ข การคำนวน 98

ค ตารางผลการทดลอง 101

ประวัติผู้วิจัย **110**

รายการตาราง

ตาราง **หน้า**

2.1 คุณสมบัติของกรดแกลลิก กรดแอลลาจิก และคลอริลาจิน 12

2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของของไหลเหนือวิกฤต 20

2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตและตัว ทำละลายของเหลวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 25

2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดัน และความหนาแน่นของ คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต 26

2.5 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของเมทานอล 27

3.1 สัญลักษณ์และระดับตัวแปรต่าง ๆ ในการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken 41

3.2 ผลการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken แบบ 3 ตัวแปร 3 ระดับ 42

4.1 เปรียบเทียบปริมาณสารประกอบฟีโนลิครวมที่สกัดได้จากวิธีสกัดที่ต่างกัน 64

ก.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารมาตรฐานกรดแกลลิก สำหรับการสร้างกราฟมาตรฐาน 95

ก.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารมาตรฐานกรดแอลลาจิก สำหรับการสร้างกราฟมาตรฐาน 95

ก.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารมาตรฐานคลอริลาจิน สำหรับการสร้างกราฟมาตรฐาน 96

ค.1 การเปรียบเทียบปริมาณกรดแกลลิกที่ได้จากการทดลอง และการทำนายผล 102

ค.2 การเปรียบเทียบปริมาณกรดแอลลาจิกที่ได้จากการทดลอง และการทำนายผล 103

ค.3 การเปรียบเทียบปริมาณคลอริลาจินที่ได้จากการทดลอง และการทำนายผล 104

ค.4 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบสบู่ดำ ที่ได้จากการทดลอง และการทำนายผล 105

ค.5 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของสมการอันดับสองของผลได้ของกรดแกลลิก 106

ค.6 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของสมการอันดับสองของผลได้ของกรดแอลลาจิก 106

ค.7 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของสมการอันดับสองของผลได้ของคลอริลาจิน 107

ค.8 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ของสมการอันดับสองของความสามารถในการต้าน อนุมูลอิสระของสารสกัดจากใบสบู่ดำ 107

ค.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลได้ของกรดแกลลิก 108

ค.10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลได้ของกรดแอลลาจิก 108

ค.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลได้ของคลอริลาจิน 109

ค.12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของความสามารถในการต้านอนุมูล อิสระของสารสกัดใบสบู่ดำ 109

รายการรูปประกอบ

รูป **หน้า**

2.1 ส่วนต่างๆของต้นสบู่ดำ 6
2.2 โครงสร้างของคอนเดนเซดแทนนิน 9
2.3 โครงสร้างของแกลโลแทนนิน 10
2.4 โครงสร้างของกรดแกลลิก 10
2.5 โครงสร้างของแอลลาจิกแทนนิน 11
2.6 โครงสร้างของกรดแอลลาจิก 11
2.7 โครงสร้างของคลอริลาจิน 12
2.8 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของสาร DPPH 14
2.9 เฟสไดอะแกรมของคาร์บอนไดออกไซด์ไหลเหนือวิกฤต 19
2.10 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นรีดิวส์ของสารบริสุทธิ์ 21
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน อุณหภูมิ และความสามารถในการแพร่ 22
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน อุณหภูมิ และค่าความหนืด 23
2.13 หน้าที่ของตัวทำละลายร่วมแบบอิออนเอกซ์เชนจ์ 28
2.14 หน้าที่ของตัวทำละลายร่วมแบบอิออนซัพเพรสชั่น 28
2.15 หน้าที่ของตัวทำละลายร่วมแบบอิออนแพริ่ง 29
2.16 องค์ประกอบของเครื่อง HPLC 31
3.1 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken 3 ตัวแปร 40
3.2 โครงสร้างเครื่องสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต 43
4.1 การเปลี่ยนแปลงของผลได้กรดแกลลิกระหว่างการสกัดใบสบู่ดำ 49
4.2 การเปลี่ยนแปลงของผลได้กรดแอลลาจิกระหว่างการสกัดใบสบู่ดำ 49
4.3 การเปลี่ยนแปลงของผลได้คลอริลาจินระหว่างการสกัดใบสบู่ดำ 50
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของความดันกับอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณ กรดแกลลิกที่สกัดได้จากใบสบู่ดำ 51
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน อุณหภูมิ และความหนาแน่นของของไหลเหนือวิกฤต 52
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน อุณหภูมิ และค่าความหนืดของของไหลเหนือวิกฤต 52
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของความดันกับสัดส่วนตัวทำละลายร่วม ที่มีผลต่อปริมาณกรดแกลลิกที่สกัดได้จากใบสบู่ดำ 54

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการละลายของกรดแกลลิกในคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต กับสัดส่วนตัวทำละลายร่วม 54
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิกับสัดส่วนตัวทำละลายร่วมที่มีผลต่อปริมาณกรดแกลลิกที่สกัดได้จากใบสบู่ดำ 55
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของความดันกับอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณกรดแอลลาจิกที่สกัดได้จากใบสบู่ดำ 57
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของความดันกับสัดส่วนตัวทำละลายร่วมที่มีผลต่อปริมาณกรดแอลลาจิกที่สกัดได้จากใบสบู่ดำ 58
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิกับสัดส่วนตัวทำละลายร่วมที่มีผลต่อปริมาณกรดแอลลาจิกที่สกัดได้จากใบสบู่ดำ 59
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของความดันกับอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณคลอริลาจินที่สกัดได้จากใบสบู่ดำ 60
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของความดันกับสัดส่วนตัวทำละลายร่วมที่มีผลต่อปริมาณคลอริลาจินที่สกัดได้จากใบสบู่ดำ 61
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิกับสัดส่วนตัวทำละลายร่วมที่มีผลต่อปริมาณคลอริลาจินที่สกัดได้จากใบสบู่ดำ 62
4.16 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบสบู่ดำ 65
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอุณหภูมิที่มีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ของสารสกัดจากใบสบู่ดำ 66
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและสัดส่วนตัวทำละลายร่วมที่มีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากใบสบู่ดำ 67
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและสัดส่วนตัวทำละลายร่วมที่มีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ของสารสกัดจากใบสบู่ดำ 68
4.20 *t*-value ของสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สำหรับสหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายผลได้การสกัดกรดแกลลิก 71
4.21 *t*-value ของสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สำหรับสหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายผลได้การสกัดกรดแอลลาจิก 71
4.22 *t*-value ของสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สำหรับสหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายผลได้การสกัดคลอริลาจิน 72
4.23 เปรียบเทียบผลได้การสกัดของกรดแกลลิกที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลอง 73
4.24 เปรียบเทียบผลได้การสกัดของกรดแอลลาจิกที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลอง 73
4.25 เปรียบเทียบผลได้การสกัดของคลอริลาจินที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลอง 74

4.26 *t*-value ของสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์สำหรับสหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนาย ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบสบู่ดำ 75
4.27 เปรียบเทียบ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบสบู่ดำที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลอง 76
4.28 ผลการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดกรดแกลลิกจากใบสบู่ดำ 77
4.29 ผลการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดกรดแอลลาจิกจากใบสบู่ดำ 77
4.30 ผลการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดคลอริลาจินจากใบสบู่ดำ 78
4.31 ผลการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดสารสกัดจากใบสบู่ดำที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ สูงที่สุด 79
4.32 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดแกลลิกในสารสกัดใบสบู่ดำระหว่างการเก็บรักษา 81
4.33 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดแอลลาจิกในสารสกัดใบสบู่ดำระหว่างการเก็บรักษา 81
4.34 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอริลาจินในสารสกัดใบสบู่ดำระหว่างการเก็บรักษา 82
4.35 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของแอลลาจิกแทนนิน 83
4.36 การเปลี่ยนโครงสร้างของสารประกอบฟีโนลิคเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส 84
4.37 โครงสร้างของแคสทาลาจิน 84
4.38 การเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบสบู่ดำในระหว่างการเก็บรักษา 85
ก.1 แสดงกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก 96
ก.2 แสดงกราฟมาตรฐานของกรดแอลลาจิก 97
ก.3 แสดงกราฟมาตรฐานของคลอริลาจิน 97

รายการสัญลักษณ์

A = พื้นผิวของอนุภาคของแข็ง

A_c = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวควบคุม

A_s = ค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัด

b_i = ค่าสัมประสิทธิ์

C = สัดส่วนตัวทำละลายร่วม

C_A = ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ณ เวลาใดๆ

C_{AS} = ค่าความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกละลายในสารละลาย

C_{ref} = ปริมาณสารเริ่มต้น (t=0)

C_t = ปริมาณสารที่เวลาต่างๆ

C_x = ปริมาณสารที่ลดลงไปเมื่อเทียบกับปริมาณสารเริ่มต้น

^0C = องศาเซลเซียส

D_A = ค่าสัมประสิทธ์การแพร่

dC_A/dr = อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ระยะทาง (r) ใดๆ

E_{hi} = อันตรกิริยาของพันธะไฮโดรเจนของหมู่องค์ประกอบ i

F_{di} = อันตรกิริยาของส่วนที่ไม่มีขั้วของหมู่องค์ประกอบ i

F_{pi} = อันตรกิริยาของส่วนที่มีขั้วของหมู่องค์ประกอบ i

J_A = ปริมาณการถ่ายโอนตัวถูกละลายในสารละลาย

K_L = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

K_r = ค่าคงที่ของปฏิกิริยา

M = มวลโมเลกุล

N_A = อัตราการถ่ายโอนตัวถูกละลายในสารละลาย

P = ความดัน

P_c = ความดันวิกฤต

T = อุณหภูมิ

T_c = อุณหภูมิวิกฤต

V = ปริมาตร เชิงโมล

v/v = สัดส่วนโดยปริมาตร

R = ค่าคงที่ของ ก๊าซ

R^2 = ค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น

R_x = ปริมาณการลดลงระหว่างการเก็บรักษา

x	=	ค่าพื้นที่ใต้กราฟ
Y	=	ผลได้จากการทดลอง
Y_A	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย
Y_{max}	=	ความเข้มข้นสูงสุดของตัวถูกละลายในสารละลาย
y	=	ค่าความเข้มข้น
Z	=	แฟกเตอร์สภาพอัด
ρ	=	ความหนาแน่น
ρ_c	=	ความหนาแน่น วิกฤต
ω	=	แฟกเตอร์อะเซนทริก
δ	=	ค่าพารามิเตอร์การละลาย
δ_p	=	ค่าพารามิเตอร์การละลายของส่วนที่มีขั้ว
δ_d	=	ค่าพารามิเตอร์การละลายของส่วนที่ไม่มีขั้ว
δ_h	=	ค่าพารามิเตอร์การละลายของพันธะไฮโดรเจน

ประมวลศัพท์และคำย่อ

AARD	=	Average Absolute Relative Deviation
ANOVA	=	Analysis of variance
BBD	=	Box-Behnken Design
DPPH	=	1, 1- diphenyl-2-picrylhydrazyl
EtOH	=	Ethyl Alcohol
HHDP	=	Hexahydroxydiphenic Acid
HIV	=	Human immunodeficiency Virus
HPLC	=	High Performance Liquid Chromatography
MPa	=	Megapascal
$SCCO_2$	=	Super Critical Carbon Dioxide
SS	=	Sum of squares
UV-VIS	=	UV-Vis Spectrophotometer