

คุณสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพของโฟมโปรตีนดับเพลิง
ประเภทน้ำมันจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา**

Physical Properties and Efficacy of Firefighting Protein Foam for Fuel Oil Derived
from the Rubber Seed Kernel**

ณัฐบดี วิริยวัฒน์* และสุรชาติ สินวรรณ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

Nuttabodee Viriyawattana* and Surachat Sinworn

Faculty of Science and Technology, Suan Dusit Rajabhat University

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เพื่อศึกษาคุณสมบัติและเปรียบเทียบสูตรของโฟมโปรตีน รวมทั้งประสิทธิภาพในการดับเพลิงประเภทน้ำมันของโฟมโปรตีน ซึ่งใช้วิธีการสกัดโปรตีนจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา แล้วนำไปเข้ากระบวนการผลิตเป็นโฟมโปรตีนดับเพลิง 3 สูตร แต่ละสูตรประกอบด้วย สารละลายโปรตีนต่อสารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างต่อน้ำต่อสารละลาย ไมโครซิงค์ออกไซด์ อัตราส่วน 80 : 5 : 10 : 5 ในสูตรที่ 1 อัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ในสูตรที่ 2 อัตราส่วน 80 : 5 : 0 : 15 ในสูตรที่ 3 ตามลำดับ ส่วนสูตรควบคุมเป็นสูตรที่ 4 ประกอบด้วยสารละลายโปรตีนต่อสารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่าง อัตราส่วน 85 : 15 : 0 : 0 โดยศึกษาพารามิเตอร์ดังนี้ 1) ความคงตัวของโฟม 2) ความหนาแน่นของโฟม 3) ค่าโอเวอร์รัน 4) ค่าความหนืด 5) ค่าแรงตึงผิว และ 6) ประสิทธิภาพในการดับเพลิง โดยแต่ละพารามิเตอร์ ทำการทดลองจำนวน 7 ซ้ำ แล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ด้วยเทคนิค Duncan's Multiple - range test

ผลการศึกษาพบว่า โฟมโปรตีนทั้ง 3 สูตร (1-3) มีคุณสมบัติในการรวมตัวกับสารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างได้ดี ทำให้มีลักษณะทางกายภาพของโฟมที่มีความเหนียวแน่น เกาะกันเป็นแพ คลุมพื้นที่ลุกไหม้ของไฟได้ดี นอกจากนี้ การเติมไมโครซิงค์ออกไซด์ ทำให้โฟมโปรตีนมีความละเอียด การคงสภาพโฟมได้ดีและยาวนาน ส่วนผลการศึกษพารามิเตอร์ทางด้านความหนาแน่นของทั้ง 3 สูตร และสูตรควบคุม (สูตรที่ 4) เมื่อเปรียบเทียบกับพบว่า สูตรที่ 1 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าต่ำกว่าสูตรที่ 2, 3 และ 4 โดยสูตรที่ 4 มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุดเท่ากับ 0.67 ส่วนผลการวิเคราะห์

* ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)
e-mail: nutta_v@hotmail.com

Physical Properties and Efficacy of Firefighting Protein Foam for Fuel Oil Derived
from the Rubber Seed Kernel

**งานวิจัยเรื่องนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

โอเวอร์รันของทั้ง 4 สูตร พบว่า สูตรที่ 1 มีค่าโอเวอร์รันสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 51.05 ส่วนผลการวิเคราะห์ความคงตัวพบว่า สูตรที่ 1 มีค่าความคงตัวสูงที่สุดที่ร้อยละ 24.14 ส่วนสูตรที่ 3 มีความหนืดต่ำสุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ ที่ร้อยละ 23.73 และสูตรที่ 2 ให้ค่าแรงตึงผิวสูงสุด เท่ากับ 0.00605 n/m ส่วนประสิทธิภาพในการดับเพลิง พบว่าสูตรที่ 1 มีประสิทธิภาพในการดับเพลิงสูงสุด

คำสำคัญ : กากเนื้อในเมล็ดยางพารา, โปมโปรตีน, สารดับเพลิง, น้ำมัน

Abstract

This research aimed to study the properties and compare the formula of protein foam, including its firefighting capability against fuel oil. The protein was extracted from rubber seed kernel and then used to produce three formulas of extinguishing agents. Each formula consisted of the protein solution to alkaline catalysts to water solutions to micro - zinc oxide ratio : 80 : 5 : 10 : 5 in the 1st formula, 80 : 5 : 5 : 10 in the 2nd formula, and 80 : 5 : 0 : 15 in the 3rd formula while the ratio of the 4th formula was the control formula had a ratio of 85 : 15 : 0 : 0. The following parameters were studied: 1) stability of foam 2) density of foam 3) overrun 4) viscosity 5) surface tension and 6) the effectiveness of firefighting foam. Each parameter was tested for seven replicates and the aggregate data was analyzed by analysis of variance via SPSS using Duncan's multiple - range test.

Results of this experiment demonstrate that all experimental formulations (the 1st- 3rd formula) were capable of mixing with alkaline catalysts. The foam was strong, dense and effectively converged the flames of the fire. The addition of micro - zinc oxide made a fine protein foam and maintained long - lasting foam stability. In regards to density, the 1st formula was the least dense at 0.24 g/cm³ and 4th formula and the 4th formula was the most dense at 0.67 g/cm³. Foam overrun was highest for the 1st formula at 51.05%. The stability analysis found that the 1st formula had the highest stability value (24.14%). The viscosity value of the 3rd formula had the lowest viscosity value (23.73%). Additionally, it was noted that the 2nd formula also had the highest surface tension, 0.00605 n/m. Moreover, the 1st formula had the highest efficacy for firefighting.

Keywords : Rubber seed kernel, protein foam, extinguishing agents, fuel oil

บทนำ

การดับเพลิงไหม้ที่เกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิงหรือก๊าซไวไฟชนิดต่างๆ (Class B) ไม่สามารถใช้น้ำในการดับเพลิงเชื้อเพลิงดังกล่าวได้ แต่สามารถดับได้โดยใช้สารดับเพลิงประเภทเคมีและสารเคมีดับเพลิงประเภทโปรตีน (Davis, 1991) โดยเฉพาะสารดับเพลิงประเภทโฟมโปรตีนสังเคราะห์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการตัดออกซิเจนไม่ให้สัมผัสกับเปลวไฟ ช่วยลดอุณหภูมิบริเวณผิวสัมผัสของน้ำมัน ทำให้เกิดไอร่อน้ำมันลดลง (Magrabi, et al., 2002; Perri, 1956) แต่ข้อเสียของ โฟมโปรตีนสังเคราะห์ คือ มีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง เฉลี่ย 1 ลิตร ต่อ 10.30 เหรียญดอลลาร์สหรัฐ (Nippon, 2007) ทางเลือกหนึ่งในการผลิตโฟมโปรตีนในการดับเพลิงคือ การสกัดโปรตีนจากพืช โดยเฉพาะเมล็ดยางพาราที่มีอยู่มากมายในประเทศไทย ซึ่งเนื้อในเมล็ดยางพารานั้น มีโปรตีนอยู่ถึงร้อยละ 27 (Babatunde & Pond, 1987) คุณสมบัติของโฟมโปรตีนที่เหมาะสมในการดับเพลิง จะต้องมีความแข็งแรงดีและสามารถเกิดฟองเล็กน้อยเมื่อสัมผัสอากาศ ซึ่งจะเกิดกลไกการดูดซับออกซิเจนได้อย่างรวดเร็วที่ผิวหน้าระหว่างน้ำกับอากาศ อีกทั้งสามารถเคลื่อนที่ไปแทรกตัวระหว่างชั้นของน้ำและอากาศ ทำให้อากาศไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปเติมการสันดาปให้กับไฟที่กำลังลุกไหม้ (Cherry & Mcwater, 1981) การรวมตัวของฟองมีความมั่นคงและเหนียวแน่นในแนวราบสามารถต้านทานความร้อนจากไฟได้ดี (Colletti, 1992) ในการศึกษาเป็นการผลิตโฟมโปรตีนจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของโฟมโปรตีนและประสิทธิภาพในการดับเพลิง จากเชื้อเพลิงประเภทน้ำมันขนาด 475 x 475 X 200 มิลลิเมตร ซึ่งนำไปสู่การหาสูตรที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเปรียบเทียบโฟมโปรตีนที่สกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา
2. ศึกษาประสิทธิภาพของโฟมโปรตีนที่สกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพาราในการดับเพลิงประเภท

น้ำมัน

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การศึกษานี้ ได้ศึกษาคุณสมบัติของโฟมโปรตีนที่ผลิตขึ้นทั้ง 4 สูตร โดย 3 สูตรแรกเป็นสูตรที่พัฒนาขึ้น ขณะที่สูตรที่ 4 เป็นสูตรควบคุม ดังรายละเอียดดังนี้

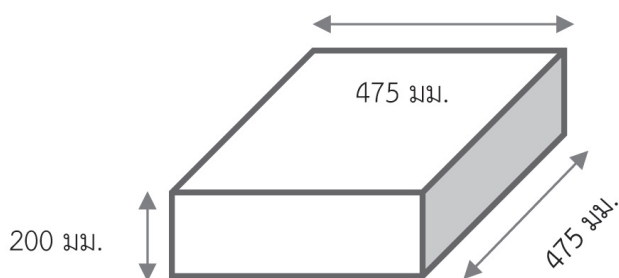
1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

โฟมโปรตีนจากเมล็ดยางพารามีองค์ประกอบ ดังนี้ คือ โปรตีน : สารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่าง : น้ำ : ไมโครซิงค์ออกไซด์ โดยการศึกษาครั้งนี้จะพัฒนาโฟมโปรตีนขึ้นมา 3 สูตร คือ สูตรที่ 1 อัตราส่วน 80 : 5 : 10 : 15 (v/v) สูตรที่ 2 อัตราส่วน 80 : 5 : 10 : 5 (v/v) สูตรที่ 3 อัตราส่วน 80 : 5 : 0 : 15 (v/v) แล้วอัดก๊าซด้วยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (Fortes, 1994) ซึ่งเมื่อฉีดออกไปสัมผัสอากาศก็จะเกิดฟองโฟมขึ้นซึ่ง

เป็นการใช้โปรตีนและสารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างอัตราคงที่ ส่วนอัตราส่วนในน้ำและไมโครซิงค์ออกไซด์จะผันแปรไปในแต่ละสูตร สูตรที่ 4 อัตราส่วน 85 : 15 : 0 : 0 (สูตรควบคุม) ซึ่งจะไม่มีการเติมน้ำและไมโครซิงค์ออกไซด์ ทำการทดสอบตัวอย่างละ 7 ข้าง ในแต่ละพารามิเตอร์

2. ภาวะเชื้อเพลิง

การจำลองไฟได้จากถาดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ออกแบบจากเหล็กเหนียวขนาด หน้า 6 มิลลิเมตร ปริมาตรความจุ 475 x 475 x 200 มิลลิเมตร ใส่น้ำมันเบนซินลงในถาด ความสูงจากพื้นถาดขนาดปริมาตร 12 ลูกบาศก์เดซิเมตร หรือระดับความสามารถในการดับเพลิง ซึ่งเทียบเท่ากับขนาด 1 B (ANSI/UL 711, 2007) (ภาพที่ 1) โดยการทดสอบจะทำการทดสอบในพื้นที่โล่ง



ภาพที่ 1 ถาดสี่เหลี่ยมที่ใช้บรรจุน้ำมันในการทดสอบปริมาตรความจุ 475 x 475 x 200 มิลลิเมตร

3. การสกัดโปรตีนจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา

ยางพาราที่นำมาใช้ในการสกัดโปรตีน คือสายพันธุ์ RRIM 600 ขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร นำมาแกะเปลือกนอกออกแล้วนำไปหีบน้ำมันออก โดยใช้เครื่องหีบน้ำมันไฮดรอลิก ซึ่งจะคงเหลือเฉพาะกากเนื้อในเมล็ดยางพาราแล้วนำเนื้อมาบดให้ละเอียดเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเนื้อเมล็ดยางพารา 1 : 20 (NaOH 0.02 โมลาร์) แล้วนำไปกวนด้วยเครื่องกวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำมาปั่นแยกสารโปรตีนด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที แล้วแยกตะกอนออกจากโปรตีน (Nuttabodee & Surachat, 2014) นำสารละลายโปรตีนที่ได้มาวัดค่าความเข้มข้นของโปรตีนด้วย วิธี Bradford Assay โดยใช้ Bovine Serum Albumin (BSA) เป็นสารมาตรฐาน วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร (Bollay, et al., 1994) แล้วนำโปรตีนที่ได้มาผลิตโฟมโปรตีน โดยการนำโปรตีนที่ได้มาเติมสารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่าง :

น้ำ : ไมโครซิงค์ออกไซด์ โดยสารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างที่ใช้เดิมในแต่ละสูตรได้แก่ โซเดียมไบคาร์บอเนต ส่วนไมโครซิงค์ออกไซด์ จะใช้นุภาคเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 ไมโครเมตร ในอัตราส่วนที่ระบุในแต่ละสูตรทั้ง 4 สูตร

4. ค่าคงตัวของโปรตีน

บรรจุโฟมโปรตีนตัวอย่างลงในกรวยแก้วที่ทราบปริมาตร แล้วรองรับของเหลวที่แยกตัวออกมาจากฟองโฟมโปรตีนด้วยกระบอกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร ในเวลา 60 นาที บันทึกผลปริมาตรของของเหลวที่แยกออกมาทุก 15 นาที (Sauter & Montoure, 1972)

$$\text{ค่าความคงตัวของโฟมโปรตีน (\%)} = \frac{X - Y}{X} \times 100$$

โดย X คือ ปริมาตรของโฟมโปรตีนเริ่มต้น (มิลลิลิตร)

Y คือ ปริมาตรของเหลวที่แยกตัวออกจากโฟมโปรตีนในช่วง 60 นาที (มิลลิลิตร)

5. ความหนาแน่นของโฟม

นำโฟมโปรตีนที่ต้องการวัดความหนาแน่น บรรจุลงในถ้วยตวงพลาสติก ขนาด 200 มิลลิลิตร บรรจุให้เต็มไม่ให้มีโพรงอากาศภายในถ้วยเกลี่ยโฟมที่ล้นบริเวณปากถ้วยด้วยพายไม้ขีดบริเวณรอบนอกถ้วยไม่ให้เศษโฟมเหลืออยู่ แล้วชั่งน้ำหนักลบก้นกับน้ำหนักถ้วยตวงเปล่า นำมาคำนวณหาความหนาแน่นของโฟม (Akintoye & Oguntunde, 1999; Graham & Phillips, 1979) ดังสูตร

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของโฟม (กรัมต่อมิลลิลิตร)} &= \frac{\text{น้ำหนักโฟม}}{\text{ปริมาตรของถ้วย}} \\ &= \frac{\text{น้ำหนักของถ้วยเมื่อบรรจุโฟม} - \text{น้ำหนักถ้วย}}{\text{ปริมาตรของถ้วย}} \end{aligned}$$

6. ค่าโอเวอร์รัน

ชั่งน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของส่วนผสมก่อนตีโฟม และน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของโฟม (Kirk & Sawyer, 1991) ดังสูตร

$$\text{โอเวอร์รัน} = \frac{A - B}{B} \times 100$$

โดย A คือ น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของส่วนผสม (มิลลิกรัม)

B คือ น้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของโฟม (มิลลิกรัม)

7. ค่าความหนืด

ใช้เครื่องวัดความหนืด วัดปริมาณความหนืดของโฟมโปรตีนที่บรรจุอยู่ในปิกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร โดยการจุ่มเข็มลงในโฟมโปรตีนด้วยหัวเบอร์ 2 และความเร็วรอบ 100 รอบ ต่อนาที อ่านหน่วยเป็น ร้อยละ (Davis & Foegeding, 2004)

8. ค่าแรงตึงผิว

การวัดค่าแรงตึงผิว เพื่อหาปริมาณแรงตึงผิว โดยการประยุกต์เทคนิคการวัดแรงตึงผิว โดยใช้เครื่อง Du Nouy Tensiometer โดยมีวงแหวนติดกับคานที่ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างสมดุลของแรง โดยวงแหวนจะถูกวางบนผิวของโฟมโปรตีนและดึงขึ้นพร้อมกับการวัดความตึงผิวของโฟมโปรตีน และนำไปคำนวณหาค่าแรงตึงผิว (Foegeding, Davis & Luck, 2006)

$$\text{ค่าแรงตึงผิว } (\gamma) = \frac{F}{2L}$$

จากสูตร
โดย

γ หมายถึง ค่าแรงตึงผิว (นิวตันต่อเมตร)
F หมายถึง แรงตึงผิวของผิววัดตวงแหวน (แรงต่อความยาว)
L หมายถึง ความยาวเส้นรอบวง (ผิวนอกและผิวในของวงแหวน) (เซนติเมตร)

9. ประสิทธิภาพในการดับเพลิง

การวัดระยะเวลาในการดับเพลิงของแต่ละสูตร จากแบบจำลองไฟที่ทำจากเหล็กเหนียว หนา 6 มิลลิเมตรทุกด้าน 475 x 475 x 200 มิลลิเมตร หรือน้ำมันขนาด 12 ลิตร (ระดับความสามารถของเครื่องดับเพลิงมาตรฐานขนาด 1-B) ตามมาตรฐาน TIS 332 (1994), ANSI/UL 711 (1979) โดยใช้ถังบรรจุแรงดันบรรจุโฟมโปรตีนแต่ละสูตรลงในถังขนาด 10 ปอนด์ มีระยะเวลาในการฉีดครั้งละ 10 วินาที โดยผู้ฉีดจะอยู่ห่างจากไฟ 2-4 เมตร ด้านเหนือลม พร้อมฉีดไปยังฐานไฟ (Nippon, 2007)

10. การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือ

การตรวจสอบเครื่องมือในการทดลองในแต่ละพารามิเตอร์ โดยใช้เครื่องมือตามวิธีการมาตรฐาน ANSI/UL 711 (2007) ในการทดสอบฐานไฟและประสิทธิภาพการดับเพลิงชนิดน้ำมัน ส่วนวิธี Bradford Assay (1976) เป็นวิธีการมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนที่สกัดได้ในแต่ละสูตร และ NIOSH 1501 (1984) เป็นวิธีการวิเคราะห์เบนซีนและโทลูอินที่เป็นไอระเหยจากการดับเพลิงในกะบะทดลอง

11. การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลการทดลองปริมาณโปรตีนที่สกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพาราและการเปรียบเทียบการทดลอง ทั้ง 6 พารามิเตอร์ได้แก่ 1) การวิเคราะห์ความคงตัว 2) ความหนาแน่น 3) ค่าไอ

เวอร์รัน 4) ค่าความหนืด 5) ค่าแรงตึงผิว และ 6) ประสิทธิภาพในการดับเพลิง โดยทุกพารามิเตอร์ทำการทดลอง จำนวน 7 ซ้ำ โดยการวิเคราะห์จากวิธีมาตรฐานและบันทึกข้อมูล เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนจากการทดลอง

12. วิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนที่สกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา และการทดสอบทั้ง 6 พารามิเตอร์ พารามิเตอร์ละ 7 ซ้ำ โดยใช้เทคนิควิเคราะห์ทางสถิติ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ด้วยเทคนิค Duncan's Multiple - Range Test

ผลการทดลอง

การทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของโฟมโปรตีนทั้ง 3 สูตรที่ผลิตขึ้น เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม 1 สูตร ประกอบด้วย ปริมาณความเข้มข้นโปรตีน การวัดค่าความคงตัวของโฟมโปรตีน การวัดค่าความหนาแน่นของโฟม การวัดค่าโอเวอร์รันของโฟม การวัดความหนืดของโฟม การวัดค่าแรงตึงผิว และ ประสิทธิภาพในการดับเพลิงของโฟมโปรตีนแต่ละสูตร

1. ปริมาณความเข้มข้นของโปรตีน

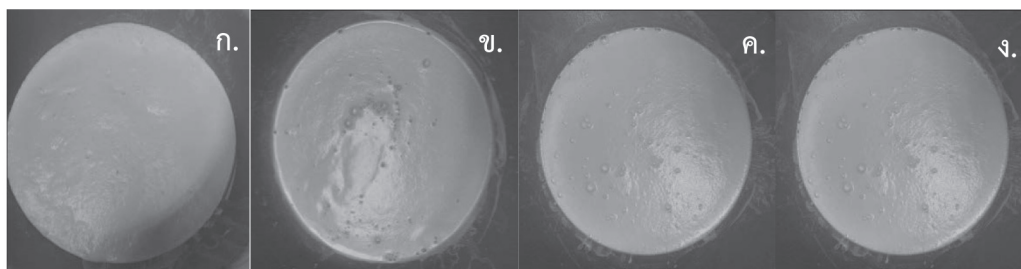
โดยการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อเตรียมวัดความเข้มข้นของโปรตีนที่ทำการสกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา โดยการสร้างกราฟมาตรฐานโปรตีน ได้ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (R^2) เท่ากับ 0.96 ซึ่งค่อนข้างมีความเที่ยงตรง จากนั้นทำการวัดปริมาณโปรตีนจากตัวอย่าง จำนวน 5 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ซึ่งจากตารางที่ 1 พบว่า ตัวอย่างโปรตีนที่สกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารามีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโปรตีน เท่ากับ 4.26 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีปริมาณมากพอสำหรับการนำไปพัฒนาเป็นโฟมโปรตีนดับเพลิงต่อไป

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของโปรตีนที่สกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา

โปรตีนสกัดจากกากเนื้อใน เมล็ดยางพารา (ตัวอย่างที่)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
1	4.66
2	4.03
3	4.21
4	4.11
5	4.29
เฉลี่ย	4.26±0.24

2. ค่าความคงตัวของโฟมโปรตีน (Foam-Protein of Stability)

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารดับเพลิงโฟมโปรตีนสกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา ซึ่งแต่ละสูตรมีอัตราส่วนของปริมาณโปรตีน สารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่าง น้ำและไมโครซิงค์ออกไซด์แตกต่างกัน จำนวน 3 สูตร ประกอบด้วย สูตรที่ 1 อัตราส่วน 80 : 5 : 10 : 15 สูตรที่ 2 อัตราส่วน 80 : 5 : 10 : 5 สูตรที่ 3 อัตราส่วน 80 : 5 : 0 : 15 สูตรที่ 4 อัตราส่วน 85 : 15 : 0 : 0 (สูตรควบคุม) ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลอง พบว่า สูตรที่ 1 มีค่าความคงตัวของโฟมโปรตีนสูงสุด เท่ากับร้อยละ 24.14 ± 0.26 เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมโปรตีน 3 สูตรที่เหลือ (สูตร 2 3 และ 4) โดยที่ลักษณะโฟมโปรตีนสูตรที่ 1 มีลักษณะฟองโฟมที่ละเอียด มีความเสถียรของการจับตัวของโฟมดี สูตรที่ 2 มีค่าความคงตัวของโฟมโปรตีนเท่ากับ ร้อยละ 22.91 ± 0.76 โดยมีลักษณะฟองโฟมละเอียด แต่ฟองโฟมไม่เสถียรมากนัก สูตรที่ 3 มีลักษณะฟองโฟมยุบตัวง่ายและไม่มีความเสถียรในการจับตัวกันของโฟมโปรตีน ส่วนสูตรที่ 4 มีลักษณะฟองโฟมหยาบ ขนาดของฟองโฟมใหญ่และมีการยุบตัวของโฟมง่าย (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ลักษณะโฟมดับเพลิงจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา (ก) สูตรที่ 1 (ข) สูตรที่ 2 (ค) สูตรที่ 3 และ (ง) สูตรที่ 4 (ควบคุม)

โดยลักษณะทางกายภาพของฟองโฟมที่มีความละเอียดจะสามารถผสมกับออกซิเจนได้ดีทำให้สามารถเกิดฟองในตัวโฟมได้ดี มีการยึดติดกันระหว่างผิวสัมผัสของน้ำและโปรตีนได้ดีในลักษณะฟิล์มเหนียว (Cohesive Viscoelastic Film) โดยปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลภายในฟองโฟมโปรตีน (Inter Molecular Interactions) (Mine, 1995) ซึ่งโมเลกุลของโปรตีนจะเป็นส่วน Hydrophobic ไปสัมผัสกับอากาศในขณะที่มีการอัดอากาศหรือฉีดพ่นออกมา ซึ่งอากาศจะเข้าไปแทรกอยู่ในเนื้อของโปรตีนเกิดเป็นฟองโปรตีน (Graham & Phillips, 1979) ทำให้แรงดึงดูดผิวระหว่างโฟมกับผิวของของเหลวลดลงหรือเป็นสารลดแรงตึงผิวมากขึ้น (Surfactant) ทำให้โฟมโปรตีนแผ่ไปคลุมพื้นผิวหน้าของของเหลว (น้ำมัน) ได้ดี (Lomakina & Mikova, 2006) ซึ่งทำให้โอกาสของออกซิเจนในอากาศที่จะเข้าไปเติมปฏิกิริยาของไฟลดลงรวมถึงลดอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวของน้ำมันลงด้วย (Diekinson, 1986)

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของสารดับเพลิงสกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา

อัตราส่วนร้อยละ ของแต่ละสูตร	คุณสมบัติทางกายภาพของสารดับเพลิงสกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา				
	ค่าความคงตัว (ร้อยละ)	ความหนาแน่น (กรัม/มก.)	แรงตึงผิว (นิวตัน/ เมตร)	ความหนืด (ร้อยละ)	โอเวอร์รัน (ร้อยละ)
1 (80 : 5 : 10 : 5)	24.14 ^a ±0.26	0.24 ^a ±0.06	0.00536 ^a ±0.00306	31.76 ^a ±5.82	51.05 ^a ±12.04
2 (80 : 5 : 10 : 5)	22.91 ^c ±0.76	0.26 ^b ±0.08	0.00605 ^d ±0.00114	24.91 ^c ±4.92	47.35 ^b ±13.06
3 (80 : 5 : 0 : 15)	21.81 ^d ±1.23	0.35 ^c ±0.17	0.00601 ^c ±0.00116	23.73 ^d ±2.60	27.27 ^c ±17.65
4 (85 : 15 : 0 : 0)	23.62 ^b ±0.68	0.67 ^d ±0.25	0.00561 ^b ±0.00138	30.51 ^b ±2.60	16.85 ^d ±11.85

หมายเหตุ : a, b, c และ d คือ ค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ในแนวนอน

3. ค่าความหนาแน่นของโฟมโปรตีน

การศึกษาค่าความหนาแน่นของโฟมโปรตีนดับเพลิงที่สกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพาราทั้ง 3 สูตร และ 1 สูตรควบคุม (ตารางที่ 2) พบว่า โฟมโปรตีนของสูตรที่ 1 มีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นต่ำสุด 0.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำและน้ำมัน ส่วนใหญ่การเกิดเป็นฟองโฟมจะขึ้นอยู่กับลักษณะฟอง โดยเฉพาะขนาดฟองที่มีขนาดเล็ก ก็จะทำให้โฟมโปรตีนมีความคงตัวสูง ซึ่งฟองเล็กๆ นี้เกิดจากอากาศเข้าแทรกตัวอยู่ในเนื้อโฟม จึงสามารถลอยตัวเหนือผิวของน้ำมันได้ดี และสามารถคลุมพื้นผิวของน้ำมันที่จะสัมผัสกับออกซิเจนได้ดี (Diekinson, 1986) ขณะที่สูตรที่ 2 3 และ 4 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.26 0.35 และ 0.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งแม้ว่าจะมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำและน้ำมันเช่นกันกับสูตรที่ 1 แต่การยึดเกาะตัวของโฟมโปรตีนและการคลุมพื้นที่ผิวของน้ำมันที่ลุกติดไฟยังไม่มีประสิทธิภาพเท่ากับสูตรที่ 1 ได้เท่าที่ควร

4. ค่าแรงตึงผิวของโฟมโปรตีน

จากตารางที่ 2 พบว่า โฟมโปรตีนสกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพาราทั้ง 4 สูตรมีค่าเฉลี่ยของแรงตึงผิวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยสูตรที่ 2 และ 3 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดใกล้เคียงกัน คือ 0.00605 และ 0.00601 นิวตันต่อเมตร ตามลำดับ ส่วนสูตรที่ 4 มีค่าแรงตึงผิวเฉลี่ยสูงรองลงมา คือ 0.00561 นิวตันต่อเมตร ส่วนสูตรที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของแรงตึงผิวของโฟมโปรตีนต่ำที่สุด คือ 0.00536 นิวตันต่อเมตร ซึ่งแรงตึงผิวนี้นจะมีอิทธิพลโดยตรงต่อการแผ่ขยายของโฟมบนผิวของเหลว ซึ่งจะทำให้โฟมโปรตีน

ไหลไปบนผิวหน้าน้ำมันได้ดีและทั่วถึงมากขึ้น (Engelsen, et al, 2002) โดยเฉพาะบนผิวของน้ำมันเวลาไฟไหม้บนผิวของน้ำมัน (Lattimer & Trelles, 2007) โดยที่แรงตึงผิวหากมีค่าสูงจะไปทำให้เกิดการเพิ่มแรง Capillary สูงขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของของเหลวและเพิ่มแรงต้านแรงโน้มถ่วงของโลก เนื่องจากแรงตึงผิวของผิวสัมผัส (Tafreshi & Di Marzo, 1991) ทำให้การแผ่ไปคลุมไฟทำได้ยากมากกว่าการมีค่าแรงตึงผิวลดกว่า

5. ค่าความหนืดของโฟมโปรตีน

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของโฟมโปรตีนสกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพาราทั้ง 4 สูตร (ตารางที่ 2) พบว่า ค่าความหนืดของโปรตีนทั้ง 4 สูตร มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 เช่นกันกับค่าแรงตึงผิวของโฟมโปรตีน โดยที่สูตรที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของความหนืดของโฟมโปรตีนสูงสุด ร้อยละ 31.76 รองลงมาคือ สูตรที่ 4 มีค่าเฉลี่ย ร้อยละ 30.51 และสูตรที่ 2 มีค่าเฉลี่ย ร้อยละ 24.91 และสุดท้าย คือสูตรที่ 3 มีค่าเฉลี่ย ร้อยละ 23.73 ซึ่งค่าความหนืดที่มีมาก แสดงถึงความสัมพันธ์กับการแผ่ขยายของโฟมโปรตีนบนของเหลว เมื่อเกิดไฟไหม้ ทำให้ลดการสร้างฟิล์มของโฟม และยังทำให้อัตราการแผ่ขยายลดลง (Magrabi, Dlugogorski, & Jame, 2002) ซึ่งเป็นปัจจัยทำให้ประสิทธิภาพในการดับเพลิงของโฟมโปรตีนลดลง

6. ค่าโอเวอร์รันของโฟมโปรตีน

ผลการทดลองในตารางที่ 2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของโฟมโปรตีนสกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพาราที่มีอัตราส่วนของสารละลายโปรตีนต่อสารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างต่อน้ำต่อไมโครซิงค์ออกไซด์ ดังนี้ สูตรที่ 1 - 3 และสูตรที่ 4 พบว่าทั้ง 4 สูตร มีค่าโอเวอร์รันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยสูตรที่ 1 มีค่าโอเวอร์รันสูงที่สุดร้อยละ 51.05 และสูตรที่ 4 มีค่าโอเวอร์รันต่ำที่สุดร้อยละ 16.85 โดยค่าโอเวอร์รันนี้ เป็นค่าที่มีผลต่อการฟู (ขึ้นของโฟม) ของ โฟมโปรตีน ซึ่งจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดออกซิเจนในอากาศ ซึ่งเป็นกลไกการดับเพลิงอันหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ

7. การทดสอบประสิทธิภาพของโฟมโปรตีน

การทดสอบประสิทธิภาพของโฟมโปรตีน ทั้ง 3 สูตร (สูตรที่ 1 2 และ 3) ในการดับเพลิงในภาคนาม เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (สูตรที่ 4) (ภาพที่ 2) ผลการทดลองจากตารางที่ 3 พบว่า โฟมโปรตีนทั้ง 3 สูตร (สูตรที่ 1-3) และสูตรควบคุม (สูตรที่ 4) มีระยะเวลาในการดับเพลิงประเภทน้ำมันในภาคนามทดลอง ปริมาตรความจุ $475 \times 475 \times 200$ มิลลิเมตร ซึ่งใส่น้ำมันเบนซินลงในภาคนามความสูงจากพื้นภาคนาม ขนาด ปริมาตร 12 ลูกบาศก์เดซิเมตร เพื่อเป็นเชื้อเพลิง มีระยะเวลาในการดับเพลิงไม่แตกต่างกันทางสถิติทั้ง 4 สูตร โดยสูตรที่ 1 มีระยะเวลาในการดับเพลิงน้อยกว่า เพียง 11.00 ± 2.83 วินาที รองลงมาคือสูตรที่ 2 ใช้ระยะเวลาในการดับเพลิง 13.86 ± 3.29 วินาที ถัดมาคือ สูตรที่ 4 ใช้ระยะเวลาในการดับเพลิง 16.29 ± 1.80 วินาที และสูตรที่ 3 มีระยะเวลาในการดับเพลิงมากที่สุด เท่ากับ 16.43 ± 2.82 วินาที ซึ่งเหตุผลที่สูตรที่ 3 ใช้เวลาในการดับเพลิงมากที่สุดอาจเนื่องมาจากอัตราส่วนของไมโครซิงค์ออกไซด์ที่มากเกินไปในการทำปฏิกิริยาเพิ่มประสิทธิภาพของโฟม (Additive) ทำให้เหลือไมโครซิงค์ออกไซด์ตกค้าง ทำให้เกิดการลดแรง

ตั้งผิวมากเกินไป จึงทำให้โฟมโปรตีนเกาะกันไม่ดี เป็นสาเหตุให้ออกซิเจนในอากาศรอบๆ กองเพลิงสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไฟที่กำลังลุกไหม้บนผิวหน้าน้ำมันได้ (Ramimoghdam, Hussein & Taufiq-Yap, 2012) ได้เพิ่มมากขึ้น การดับเพลิงจึงใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพโฟมโปรตีนสกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพาราในภาคสนาม

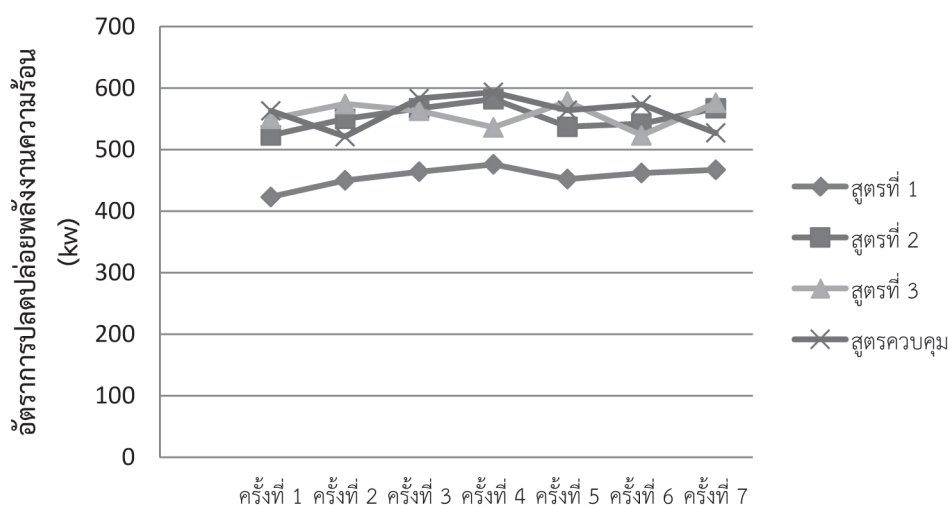
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบระยะเวลาในการดับเพลิงของโฟมโปรตีนแต่ละสูตร

สูตรและอัตราส่วน ร้อยละของแต่ละสูตร (โปรตีน : สารเร่ง ปฏิกิริยาประเภทต่าง : น้ำ : ไมโครซิงค์ ออกไซด์	ระยะเวลาในการดับเพลิง (วินาที)							ระยะเวลาในการ ดับเพลิงเฉลี่ย (วินาที)
	ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ซ้ำที่ 4	ซ้ำที่ 5	ซ้ำที่ 6	ซ้ำที่ 7	
1 (80 : 5 : 10 : 15)	8	12	11	10	15	9	8	11.00±2.83
2 (80 : 5 : 10 : 5)	12	11	10	15	13	17	19	13.86±3.29
3 (80 : 5 : 0 : 15)	15	13	14	21	19	17	16	16.43±2.82
4 (85 : 0 : 0 : 15)	16	17	15	18	14	19	15	16.29±1.80
F-Value	NS							
C.V.(%)	24.4							

หมายเหตุ : NS มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

8. ค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อน (Heat Release Rate)

การทดสอบค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนหลังจากการใช้โฟมโปรตีนแต่ละสูตรในการดับเพลิง พบว่า โฟมโปรตีนสูตรที่ 1 เมื่อฉีดโฟมคลุมพื้นผิวน้ำมันแล้ว ค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำสุด (ภาพที่ 3) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ 2 3 และสูตรควบคุม (สูตรที่ 4) ซึ่งจะได้จากเส้นกราฟอยู่ในตำแหน่งต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟของโฟมโปรตีนสูตรอื่นๆ โดยมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 500 กิโลวัตต์ (kw) ซึ่งค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่ต่ำกว่าสูตรอื่นๆ นี้ แสดงให้เห็นถึงการลดความร้อนของพื้นผิวน้ำมันซึ่งเป็นสาเหตุของการลุกติดไฟขึ้นมาซ้ำได้เมื่อถึงจุดติดไฟ (Ignition Point) ขณะที่สูตรที่ 2 3 และสูตรควบคุม มีค่าอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนเฉลี่ยสูงกว่า 500 กิโลวัตต์ ซึ่งอาจทำให้เกิดความร้อนสะสมจนถึงจุดลุกไหม้เอง (Auto Ignition Point) และทำให้เกิดการลุกไหม้ขึ้นอีกครั้งได้อีก



ภาพที่ 3 อัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนของโฟมโปรตีนแต่ละสูตร

วิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาคณสมบัติทางกายภาพของสารดับเพลิงโฟมโปรตีนสกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา ทั้ง 3 สูตร และสูตรควบคุม (สูตรที่ 4) พบว่า สูตรที่ 1 มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าสูตรที่ 2, 3 และ 4 คือ 0.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และสูตรที่ 4 มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุดเท่ากับ 0.67 ส่วนผลการวิเคราะห์โอเวอร์รันของสารดับเพลิงโฟมโปรตีนสกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพาราทั้ง 4 สูตร โดยสูตรที่ 1 มีค่าโอเวอร์รันสูงกว่าสูตรที่ 2 และ 3 เท่ากับร้อยละ 51.05 ส่วนการวิเคราะห์ความคงตัว พบว่า สูตรที่ 1 มีค่าความคงตัว

สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ 2, 3 และ 4 เท่ากับร้อยละ 24.14 และสูตรที่ 2 มีค่าความคงตัวต่ำที่สุด ร้อยละ 21.81 ผลการศึกษาข้างต้นอาจสรุปได้ว่า ปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น ความคงตัวและค่าโอเวอร์รัน โดยสัมพันธ์กับการศึกษาของ Karim & Wai ในปี ค.ศ. 1999 ซึ่งพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Methocel (สารเร่งปฏิกิริยา) ซึ่งเป็นสารก่อให้เกิดฟองโฟม ทำให้โฟมในน้ำมันเพื่องมีความคงตัวและค่าโอเวอร์รันเพิ่มขึ้น (Karim & Wai, 1999) และสอดคล้องกับการศึกษาของ Thawatchai Supavititpatana ในปี ค.ศ. 2012 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้น Methocel จากร้อยละ 0.5 เป็นร้อยละ 1 ร่วมกับกลีเซอรอลโมโนสเตียเรทจะช่วยให้ฟิล์มที่ห่อหุ้มฟองอากาศมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มีฟองอากาศที่ละเอียด สม่ำเสมอและช่วยพยุงโครงสร้างของโฟมไว้ไม่ให้ยุบตัวลง แต่เมื่อใช้ Methocel ร้อยละ 1.5 methocel ร่วมกับ GMS ร้อยละ 1.5 รวมถึงการเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอลโมโนสเตียเรท จากร้อยละ 0.5 เป็น 1.0 และ 1.5 ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นของโฟมกลับเพิ่มขึ้นและค่าโอเวอร์รันลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการละลายของ Methocel, GMS เริ่มเกิดสภาวะอิมิตัวทำให้ไม่สามารถละลายเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดเป็นฟิล์ม เพื่อกักเก็บอากาศไว้ภายในได้จึงทำให้ไม่สามารถขยายปริมาตรของโฟมได้ (Thawatchai, 2012) ส่วนผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของสารดับเพลิงโฟมโปรตีนสกัดจากกากเนื้อในเมล็ดยางพาราทั้ง 4 สูตร มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Kumgao ในปี ค.ศ. 2009 ซึ่งระบุว่า ความหนืดมีความสัมพันธ์กับความคงตัว ทำให้อัตราการแยกตัวของของเหลวลดลง ส่วนโฟมที่ระดับความหนืดต่ำ ขั้นตอนของการสัมผัสกันจะบางมากและสามารถยุบตัวได้ง่าย ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะสอดคล้องกับสูตรที่ 1 จากการทดลองในครั้งนี้ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้สูตรที่ 1 มีความหนืดมากที่สุด จากเหตุผลดังกล่าวนี้เอง (Kumgao, 2009) ขณะที่ค่าการปลดปล่อยพลังงานความร้อนของสูตรที่ 1 มีค่าต่ำกว่าสูตรที่ 2 3 และสูตรควบคุม (สูตรที่ 4) นอกจากนี้สูตรที่ 1 มีค่าโอเวอร์รันและค่าคงตัวสูงที่สุด จึงเป็นเหตุผลที่อธิบายได้ว่าความหนาแน่นที่ต่ำ มีค่าโอเวอร์รันและความคงตัวสูงทำให้โฟมโปรตีนสูตรที่ 1 สามารถแพร่และคลุมพื้นผิวน้ำมันได้ทั่วถึงและคงตัวอยู่นานทำให้พื้นผิวของน้ำมันที่เป็นเชื้อเพลิงลดความร้อนลง ทำให้ติดไฟไหม้ได้ยาก ซึ่งสอดคล้องกับ Xin ในปี 2014 ที่อธิบายค่าการปลดปล่อยพลังงานความร้อนจะขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนแฝงและพื้นที่ต่อหน่วยปริมาณไฟ ซึ่งหากมีน้อยอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนก็จะน้อยตามไปด้วย (Xin, 2014; Rashbash, 1956; De Ris, 2000)

สรุปผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโปรตีนจากกากเนื้อในเมล็ดยางพารา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.26 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ซึ่งเป็นปริมาณที่มากพอที่จะพัฒนาโฟมโปรตีนต่อไป ซึ่งเมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพของโฟมโปรตีนทั้ง 4 สูตร จะมีลักษณะฟองโฟม ที่ใกล้เคียงกันมา แต่อย่างไรก็ตาม โฟมโปรตีนในสูตรที่ จะมีลักษณะฟองที่ละเอียดและเกาะตัวกันดีกว่าสูตรที่ 2, 3 และ 4 โดยในภาพรวมสูตรที่ 1-3 สามารถรวมตัวกับสารเร่งปฏิกิริยาประเภทต่างได้ดี ให้ลักษณะฟองโฟมที่มีความเหนียวแน่น และไมโครซิงค์ออกไซด์ทำให้เกิดฟองโฟมมีลักษณะละเอียดและคงสภาพได้ดี ส่วนสูตรที่ 4 ซึ่งไม่มีอัตราส่วนของไมโครซิงค์ออกไซด์

ฟองโฟมมีลักษณะหยาบและยุบตัวได้ง่าย มีฟองอากาศขนาดใหญ่ ส่วนผลความหนืดสูตรที่ 1-4 อยู่ระหว่างร้อยละ 23.73 ถึง 31.76 โดยสูตรที่ 1 มีค่าความหนืดสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 31.76 ความหนาแน่นของสูตรที่ 1-4 อยู่ระหว่าง 0.24 ถึง 0.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสูตรที่ 1 มีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุดเท่ากับ 0.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การวิเคราะห์ค่าโอเวอร์รันของทั้ง 4 สูตรอยู่ระหว่างร้อยละ 16.85 ถึง 51.05 โดยสูตรที่ 1 มีค่าโอเวอร์รันสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 51.05 ส่วนค่าความคงตัวอยู่ระหว่างร้อยละ 21.81 ถึง 24.14 ซึ่งสูตรที่ 1 มีค่าความคงตัวสูงที่สุดเท่ากับ 24.14 และค่าแรงตึงผิวอยู่ระหว่าง 0.00536 ถึง 0.00605 พบว่า สูตรที่ 1 มีค่าแรงตึงผิวต่ำที่เท่ากับ 0.00536 ส่วนอัตราการปลดปล่อยพลังงานความร้อนพบว่าสูตรที่ 1 มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 455.86 กิโลวัตต์ ส่วนสูตรที่ 2 3 และสูตรควบคุม (สูตรที่ 4) มีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 500 กิโลวัตต์ทั้งสิ้น นอกจากนี้ ประสิทธิภาพการดับเพลิงของโฟมโปรตีนในสูตร 1-4 ไม่มีความแตกต่างกันของระยะเวลาในการดับเพลิงทางสถิติ โดยสูตรที่ 1 สามารถดับได้เร็วที่สุด โดยใช้เวลาเพียง 11 วินาที ขณะที่สูตรที่ 3 ใช้เวลาในการดับเพลิงมากที่สุด เท่ากับ 16.43 วินาที

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาขนาดของฐานโฟมขนาดต่างๆ ต่อประสิทธิภาพของการดับเพลิง
2. ศึกษาถึงประสิทธิภาพการดับเพลิงต่ออายุการเก็บรักษาและการใช้งานของโฟมโปรตีน
3. ควรศึกษาอัตราแรงอัดฉีดที่เหมาะสมของโฟมโปรตีนต่อการเกิดฟองที่เหมาะสมในการดับเพลิง

References

- Akintoye, O. A., & Oguntunde, A. O. (1999). Preliminary investigation on the effect of foam stabilizers on the physical characteristics and reconstitution properties of foam-mat dried soymilk. *Drying Technology*, 9 (1), 245 – 262.
- American National Standard Institute / Underwriters Laboratories. (1979). *ANSI/UL 711, Rating and fire testing of fire extinguishers*. New York: Author.
- _____. (2007). *ANSI/UL 711, Rating and fire testing of fire extinguishers*. New York: Author.
- Babatunde, G. M., & Pond, W. G. (1987). Nutritive value of rubber seed (*Hevea brasiliensis*) meal and oil II. Rubber seed oil versus can oil in semi-purified diets for rats. *Nutrition Reproduction International*, 36, 857.

- Bollay, R. J., Siegfried, Z., Cebra-Thomas, J. A., Garvey, N., Davison, E. M., & Silver, L. M. (1994). An accient family of embryomically expressed mouse gens sharing a conserved protein motif with the T locus. *Nat. Genet.*, 7, 385-389.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.*, 72, 248-54.
- Cherry, J. P., & Mcwater, K. H. (1981). Whippability and Aeration. *American Chemical Society Symposium Series*, 147, 217.
- Colletti, D. J. (1992). Class a foam for structure firefighting. *Fire Engineering*, 1, 47 – 57.
- Davis, J. P., & Foegeding, E. A. (2004). Foaming and interfacial properties of polymerized why protein isolate. *Journal of Food Science*, 69, C 404-C410.
- Davis, L. (1991). Class A Foams. *Firehouse*, 49, 1-9.
- De Ris, J. L. (2000). *Proc. Combust. Inst.*, 28, 2751-2759.
- Diekinson, E. (1986). Competitive protein adsorption. *Food hydrocolloids*, 1, 3-23.
- Engelsen, C. W., Isarin, J. C., Gooijer, H., Warmoeskerkom, M. M. C. G., & Wassinh, J. G. (2002). Buble size distribution of foam. *Autex Research Journal*, 2 (1), 14-27.
- Foegeding, E. A. Davis, P. J., & Luck, P. J. (2006). Factors determining the physical properties of protein foams. *Food Hydrocolloids*, 20, 284–292.
- Fortes, M. A., & Coughlan, S. (1994). Simple model of foam drainage. *J Appl Phys.*, 76 (1), 4028.
- Graham, D. E. and Phillips, M. C. (1979). Proteins at liquid interfaces I. kinetics of adsorption and surface denaturation. *J. colloid interface sci.*, 70 (3), 403-414.
- Karim, A. A., & Wai, C. C. (1999). Foam-mat drying of starfruit (Averrhoa carambola L.) puree. Stability and air drying characteristics. *Food Chemistry*, 64, 337-343.
- Kirk, R. S., & Sawyer, R. (1991). *Pearson's composition and analysis of foods*. Harllow, United Kingdom: Longman Scientific and Technical.
- Kumgao, T. (2009). Production of pickled garlic powder by Foam-mat Drying. *Agricultural Science Journal*, 39 (3), 515-518.

- Lattimer, B. Y., & Trellers, J. (2007). Foam spread over a liquid pool. *Fire Safety Journal*, 42, 249-264.
- Lomakina, K., & Mikova, K. (2006). A study of the factors affecting the foaming properties of egg while a review. *Czech J. Food Sci.*, 24, 110-118.
- Magrabi, S. A., Dlugogorski, B. Z., & Jameson, G. J. (2002). A comparative study of drainage characteristics in AFFF and FFFP compressed-air fire-fighting foams. *Fire Safety Journal*, 37, 21-52.
- Mine, Y. (1995). Recent advances in the understanding of egg white priotein functionality. *Trends in Food Science & Technology*, 6, 225 - 253.
- National Institute for Occupational Safety and Health. (1984). *NIOSH Method 1501: Hydrocarbons, Aromatic*. Gorgia: Author.
- Nippon. (2007). *Today putting out fire is only half the battle*. Bangkok: Author.
- Nuttabodee, V., & Surachat, S. (2014). *Development of Effective Fire Extinguishing agent from the Rubber Seed Kernel Protein Extracted by adding Micronized Zinc Oxide for Oil and Gases (Class B) Fires Fighting*. Bangkok: Suan Dusit Rajabhat University.
- Perri, J. M., & Conway, C. (1956). Foam as a fire exposure protection medium evaluatiny effectiveness of wetting and protein agents. *Ind Eng Chem.*, 48 (11), 2021.
- Ramimoghadam, D., Hussein, M. Z. B., & Taufiq-Yap, Y. H. (2012). The effect of sodium dodecyl sulfate (SDS) and cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) on the properties of ZnO systhesized by hydrothermal method. *Int. J. Mol. Sci.*, 13, 13275-13293.
- Rashbash, D. J. (1956). Properties of fires of liquids. *Fuel*, 35, 94-106.
- Sauter, E. H., & Montoure, J. E. (1972). The relationship of lysozyme content of egg white to volume and stability of foam. *Journal of Food Science*, 37 (6), 918-920.
- Tafreshi, A. M., & Di Marzo, M. (1991). Foams and gels as fire protection agents. *Fire Safety Journal*, 33, 295-305.

Thai Industrial Standard. (1994). *TIS 332: Dry chemical portable fire extinguishers*. Bangkok: Author.

Thawatchai, S. (2012). Effects of types and concentrations of foaming agents on qualities and sensory properties of instant germinated brown rice porridge. *Proceeding the 4th Science Research Conference*. 12-13 March 2012. Phitsanulok: Naresuan University.

Xin, Y. (2014). Estimation of chemical heat release rate in rack storage fires based on flame volume. *Fire Safety Journal*, 63, 29-36.

คณะผู้เขียน

ดร.ณัฐบดี วิริยาวัฒน์

หลักสูตรอาชีวอนามัยและความปลอดภัย

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

e-mail: nutta_v@hotmail.com

ผศ.ดร.สุรชาติ สินวรรณ

หลักสูตรอาชีวอนามัยและความปลอดภัย

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต

e-mail: sinworn@hotmail.com

