

การศึกษาภาชนะบรรจุสารหน่วงไฟทดแทน จากกระดาษกราฟสำหรับเครื่องดับเพลิง

สุวิชา จันทน์กะพ้อ^{1*} และ วีระชาติ กุลศิริเกษม¹

วันที่รับ 13 สิงหาคม 2566 วันที่แก้ไข 12 กันยายน 2566 วันตอบรับ 9 ตุลาคม 2566

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันหน่วยงานภาครัฐและเอกชนได้ให้การสนับสนุนเจ้าหน้าที่และเครื่องมือในการดับไฟป่าด้วยแนวทางการระงับเหตุเพลิงไหม้จากระยะไกล ซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงจากความร้อนและไฟต่อทรัพย์สินและบุคคลได้ดีที่สุด ด้วยเทคโนโลยีเครื่องดับเพลิงในปัจจุบันสามารถนำสารหน่วงไฟด้วยอากาศยานไร้คนขับและจรวดได้ ซึ่งเครื่องดับเพลิงที่นำมาติดตั้งใช้ภาชนะวัสดุโพลีโพรพิลีนบรรจุสารหน่วงไฟ เมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดสารสไตรีนที่เป็นมลพิษและชิ้นส่วนที่เหลืตกค้างย่อยสลายช้ามากส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีวัตถุประสงค์ใช้ภาชนะบรรจุสารหน่วงไฟจากวัสดุกระดาษกราฟที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถขึ้นรูปให้มีความแข็งแรงตามที่ต้องการด้วยการออกแบบ จำลองภาวะตามหลักการทำงานของเครื่องดับเพลิงเพื่อนำไปสร้างและทดสอบภาคสนาม โดยได้ผลการทดสอบการกระจายตัวของสารหน่วงไฟครอบคลุมพื้นที่ไม่น้อยกว่า 7 ตารางเมตร ซึ่งเป็นไปตามที่กำหนดไว้ ทำให้ได้องค์ความรู้ ทักษะการผลิต และผลการทดสอบคุณสมบัติ ที่สามารถนำไปออกแบบและสร้างภาชนะบรรจุสารหน่วงไฟด้วยกระดาษกราฟ ซึ่งสามารถทดแทนภาชนะบรรจุเดิม ทำให้สามารถติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับและจรวดที่มีใช้ปฏิบัติการกิจในปัจจุบัน

คำสำคัญ : กระดาษกราฟ, ภาชนะ, เครื่องดับเพลิง, สิ่งแวดล้อม

¹ ส่วนงานวิศวกรรมวัสดุระเบิดและนิวเคลียร์ ชิวะ เคมี, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

* ผู้แต่ง, อีเมล: suwicha.c@dti.or.th

Study of Alternative Fire Retardant Containers made from Kraft Paper for Fire Extinguisher

Suwicha Chankapoe ^{1*} Weerachart Kulsirikasem ¹

Received 13 August 2023, Revised 12 September 2023, Accepted 9 October 2023

Abstract

At present, government and private agencies provide support to officials and equipment for extinguishing forest fires. The greatest way to reduce the risk of heat and fire to people and property is to use a distant fire extinguishing technique. Current fire extinguisher technology allows for the deployment of fire retardants using rockets and unmanned aerial vehicles. The fire extinguisher has a fire retardant container and is made of polystyrene foam. The ecologically harmful styrene is produced during combustion, and the gradual disintegration of the leftover parts has an impact on the environment. An excellent environmentally friendly option is kraft paper. As a result, the action load for kraft paper containers was designed, modeled, and field tested using the same approach as fire extinguishers. As required, the fire retardant covers a surface area of at least 7 square meters. Knowledge of manufacturing process skills and qualification test results that can be utilized to design and build fire retardant containers made of kraft paper that can be used to replace the original containers and be mounted on unmanned aerial vehicles and rockets that are currently used for missions.

Keywords : Kraft paper, Container, Fire extinguishers, Environment

¹ NBC and Explosive Engineering Division, Defence Technology Institute

* Corresponding author, E-mail: suwicha.c@dti.or.th

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาไฟฟ้าทุกปี โดยมีสาเหตุเกิดขึ้นจากธรรมชาติและจากมนุษย์ ซึ่งหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนให้การสนับสนุนภารกิจป้องกันไฟฟ้า รวมถึงสนับสนุนเจ้าหน้าที่และเครื่องมือในการดับไฟฟ้าด้วย ซึ่งมีแนวทางการดับไฟทางตรงโดยให้เจ้าหน้าที่เข้าควบคุมไฟฟ้าในระยะใกล้ประมาณ 5 - 8 เมตร จากขอบของไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก มีความร้อนและควันไม่มากนัก ใช้เครื่องมือเป็นถังฉีดน้ำ พลุ และที่ดับไฟ ซึ่งยังไม่ได้ผลเท่าที่ควร เนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่เป็นภูเขาสูง เจ้าหน้าที่เดินเท้าเข้าปฏิบัติงานยากลำบาก บรรทุกน้ำได้น้อย เสี่ยงอันตรายต่อชีวิต [1] หากไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ จะใช้วิธีดับไฟทางอ้อมด้วยการโปรยน้ำและสารหน่วงไฟจากอากาศยานเครื่องบินปีกหรือเฮลิคอปเตอร์ทิ้งน้ำในระยะสูงกลายเป็นละอองเล็กเกินกว่าที่จะสามารถดับไฟฟ้าได้ จึงต้องเพิ่มรอบในการทิ้งน้ำมากขึ้น ใช้เวลานานไม่ทันต่อเหตุลุกลามไฟ และมีค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงสูงมากขึ้นตามไปด้วย [2]

ดังนั้น เพื่อให้สามารถสนับสนุนภารกิจป้องกันไฟฟ้าของกรมป่าไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการนำส่งเครื่องดับเพลิงจากระยะไกลด้วยอากาศยานไร้คนขับหรือจรวดของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ [3] ดับไฟผิวดินที่กำลังลุกลาม แต่ด้วยเครื่องดับเพลิงที่ใช้ในปัจจุบันบรรจุสารหน่วงไฟในภาชนะที่ผลิตจากวัสดุโพลีเอทิลีนที่ย่อยสลายยาก เเผาไหม้แล้วเกิดมลพิษทำลายสิ่งแวดล้อม [4] จึงจำเป็นต้องมีการศึกษา ออกแบบ วิจัยพัฒนา และสร้างเครื่องดับเพลิงที่ใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เเผาไหม้แล้วไม่เกิดสารพิษ ให้สามารถขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุสารหน่วงไฟและสร้างแรงดันสูงกระจายสารหน่วงไฟได้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวจะทำให้เจ้าหน้าที่ดับไฟฟ้ามีเครื่องดับเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดความเสี่ยงต่อชีวิต และเพิ่มประสิทธิภาพในการดับไฟฟ้าได้

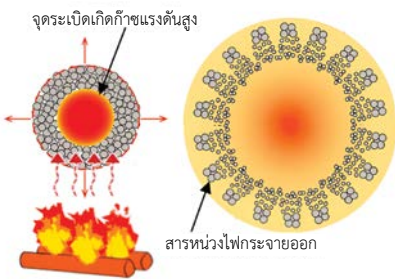
2. ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ไฟที่ไหม้ลุกลามเกิดจากความเร็วในการเผาไหม้เชื้อเพลิงบนพื้น ซึ่งมีความสูงเปลวไฟตั้งแต่ 0.5 ถึง 5 เมตร ดังนั้น เครื่องมือและอุปกรณ์ในการควบคุมไฟที่ใช้หลักการแยกออกซิเจนออกจากองค์ประกอบของสามเหลี่ยมไฟได้จึงมีความจำเป็นอย่างมาก การใช้สารหน่วงไฟ (Fire Retardant) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้สารเคมีในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการติดไฟของเชื้อเพลิง หรือเข้าไปรบกวนขั้นตอนในขบวนการสันดาปทำให้อัตราการเผาไหม้ช้าลง [5] สำหรับการดับเพลิงที่ไฟเกิดจากเชื้อเพลิงวัสดุของแข็งและวัสดุของเหลว นิยมใช้สารโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP) ที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการเกษตร สามารถจัดหาได้ง่าย มีราคาถูก และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย [6]

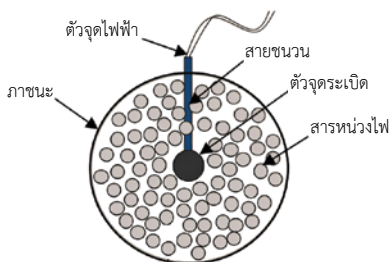
การนำส่งสารหน่วงไฟให้สามารถกระจายครอบคลุมพื้นที่ที่ไฟลุกลามใช้การบรรจุสารหน่วงไฟและก๊าซแรงดันสูงไว้ภายในถังวัสดุเหล็กมีน้ำหนักมาก ทำให้เคลื่อนย้ายไม่สะดวก หรือบรรจุสารหน่วงไฟในภาชนะวัสดุน้ำหนักเบาและใช้วัสดุระเบิดสร้างก๊าซแรงดันสูงให้กระจายสารหน่วงไฟออกไปครอบคลุมพื้นที่ไฟไหม้ โดยมีการนำไปใช้ในการดับไฟจากระยะไกลด้วยการติดตั้งในอากาศยานไร้คนขับหรือจรวด [7] ซึ่งภาชนะของสารหน่วงไฟใช้วัสดุโพลีเอทิลีน เมื่อเผาไหม้เกิดสารสไตรีนและเบนซินที่เป็นมลพิษตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อม และเศษชิ้นส่วนที่เหลืออยู่ใช้ระยะเวลาในการย่อยสลาย ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม [8] เพื่อให้เกิดความยั่งยืนในสังคมและสิ่งแวดล้อม จึงพิจารณานำกระดาษคราฟต์ (Kraft Paper) ซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติ เเผาไหม้แล้วเกิดสารพิษน้อย สามารถย่อยสลายได้ง่าย [9] นำมาขึ้นรูปทรงภาชนะให้มีความแข็งแรงสามารถบรรจุสารหน่วงไฟได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กระดาษคราฟต์เป็นวัสดุทดแทนสำหรับภาชนะบรรจุสารหน่วงไฟของเครื่องดับเพลิง

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

กำหนดให้เครื่องดับเพลิงทำงานเมื่อได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ขนาดที่อยู่ภายนอกภาชนะแล้วเกิดระเบิดอย่างรวดเร็วจากภายใน สร้างก๊าซแรงดันสูงมากพอทำลายเปลือกภาชนะและกระจายสารหน่วงไฟออกไปได้ เป็นไปตามที่ Frost [10] แสดงลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 1 โดยใช้ภาชนะทรงกลมบรรจุสารหน่วงไฟและมีตัวจุดระเบิดอยู่กึ่งกลางภาชนะเชื่อมต่อกับเส้นสายขนวนให้ออกมาภายนอกภาชนะ โดยมีส่วนปลายสายขนวนต่อกับตัวจุดไฟฟ้าไว้สำหรับการทดสอบภาคสนาม แสดงในรูปที่ 2 หลังจากนั้นทำการเลือกวัสดุสำหรับภาชนะของเครื่องดับเพลิงที่มีคุณสมบัติเชิงกลใกล้เคียงวัสดุโพลีโพลีไตรีนและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า พบว่า วัสดุกระดาษคราฟต์เผาไหม้ แล้วเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเศษที่เหลืออยู่จากการเผาไหม้สามารถย่อยสลายได้ง่าย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าวัสดุโพลีโพลีไตรีนที่เผาไหม้เกิดก๊าซมลพิษจากสารสไตรีนและย่อยสลายได้ยากมาก แสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุ



รูปที่ ๑ การทำงานของเครื่องดับเพลิง



รูปที่ ๒ แสดงส่วนประกอบของเครื่องดับเพลิง

โพลีโพลีไตรีนและวัสดุกระดาษคราฟต์ในตารางที่ 1 [11] นอกจากนี้ วัสดุกระดาษคราฟต์ผลิตด้วยกระบวนการเยื่อเคมีสกัดลิกนินออกทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงสูง สามารถรับแรงได้ทุกทิศทาง [12] นำมาผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยแรงดันและความร้อนให้ได้ขนาดความหนา รูปร่าง และค่าคุณสมบัติเชิงกลตามที่ต้องการนำไปใช้เป็นภาชนะบรรจุสารหน่วงไฟได้ แสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุ

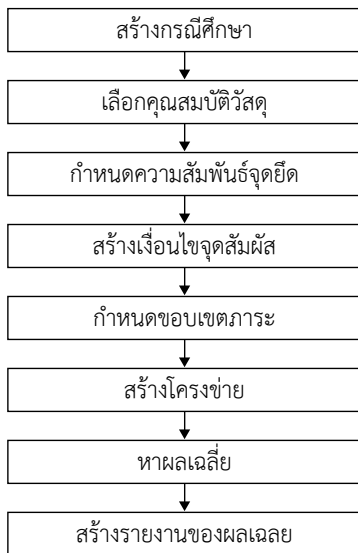
คุณสมบัติ	วัสดุโพลีโพลีไตรีน	วัสดุกระดาษคราฟต์
ความเค้นดึง (เมกะปาสคาล)	0.4 - 1.2	0.58 - 0.72
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	28 - 70	630 - 870
วิธีการขึ้นรูป	อัดขึ้นรูปด้วยไอน้ำ	รีดขึ้นรูปด้วยความร้อน
ผลกระทบ	เผาไหม้เกิดสารสไตรีน	เผาไหม้เกิดก๊าซ
สิ่งแวดล้อม	มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	คาร์บอนไดออกไซด์
	ย่อยสลายยาก	เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
		ย่อยสลายได้ง่าย



รูปที่ ๓ ภาชนะวัสดุกระดาษคราฟต์

เมื่อได้วัสดุที่จะนำมาทดแทนแล้วดำเนินการสร้างแบบจำลองและกำหนดขนาดภาชนะวัสดุกระดาษคราฟต์ที่บรรจุสารหน่วงไฟด้วยโปรแกรม SolidWorks ที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์ปัญหาในสถานะสถิต เพื่อให้ทราบความเค้น (Stress) และระยะขจัด (Displacement) สามารถวิเคราะห์ความแข็งแรงของภาชนะว่ามี การเสียรูป (Deformation Scale) [13] ขณะที่รับภาระแรงดันก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ของตัวจุดระเบิด โดยดำเนินการจำลองด้วยการสร้างกรณีศึกษา กำหนดภาระที่

กระทำกับชิ้นงานที่เลือกคุณสมบัติวัสดุไว้ สร้างเงื่อนไขของแรงปฏิกิริยาที่กระทำกับภาชนะเป็นแรงดันสม่ำเสมอ ทิศทางที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิว กำหนดค่าแรงดัน กำหนดจุดยึดบริเวณพื้นที่กึ่งกลางภาชนะที่ถูกบังคับไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ สร้างโครงข่ายของสมการลงบนชิ้นงาน แบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย จากนั้นทำการหาผลเฉลยของปัญหานั้น โดยเป็นไปตามผังงานสำหรับการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4 [14] ที่ต้องการทราบคุณสมบัติของส่วนประกอบของเครื่องดับเพลิงที่ใช้ตัวจุดวัตถุระเบิดดินดำ (Black Powder) แสดงคุณสมบัติในตารางที่ 2 [15] เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วจากของแข็งไปเป็นก๊าซแรงดันสูงด้วยการจุดชนวนด้วยไฟฟ้าสำหรับการทดสอบภาคสนามแทนการใช้เปลวเพลิงจริง นำคุณสมบัติของสารหน่วงไฟโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟตในตารางที่ 3 [16] และผลการทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของภาชนะวัสดุกระดาษคราฟต์ที่อัดขึ้นรูปด้วยความร้อนแล้วมา กำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุส่วนประกอบในโปรแกรมคำนวณจำลองหาผลลัพธ์ต่อไป



รูปที่ ๔ ผังงานสำหรับการวิเคราะห์แบบคังทีของโปรแกรม SolidWorks

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของตัวจุดระเบิดดินดำ

คุณสมบัติ (หน่วย)	ค่า
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	200
แรงดันระเบิด (จิกะปาสกาล)	0.13
ปริมาณปล่อยก๊าซ (ลิตร/กิโลกรัม)	280 - 290
ความเร็วในการจุดระเบิด (เมตร/วินาที)	1,223

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของสารหน่วงไฟโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต

คุณสมบัติ (หน่วย)	ค่า
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1,000 - 1,300
ความหนาแน่นไอ (อากาศ = 1)	0.97
ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	100 - 212

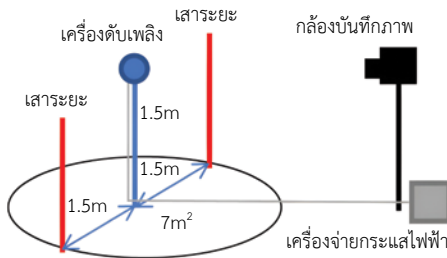
การกำหนดขอบเขตให้เป็นเครื่องดับเพลิงมีน้ำหนักรวมไม่มากกว่า 1.5 กิโลกรัม บรรจุสารหน่วงไฟในภาชนะวัสดุกระดาษคราฟต์อัดขึ้นรูปด้วยความร้อนรูปร่างครึ่งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 130 มิลลิเมตร ความหนา 4 มิลลิเมตร มีตัวจุดระเบิดดินดำที่มีอัตราส่วนประกอบโพแทสเซียมไนเตรต 75% ซัลเฟอร์ 10% และผงถ่าน 15% บรรจุในถังก้นน้ำหนัก 6 กรัม คำนวณหาแรงดันก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ดินดำที่จุดศูนย์กลางภาชนะแล้วกระจายในทิศทางตามรัศมีทรงกลมตามที่ Nakka [17] สร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวจุดระเบิดและปริมาตรของภาชนะไว้

ใช้กระบวนการประกอบเครื่องดับเพลิงตามที่แสดงในรูปที่ 5 เตรียมภาชนะตรวจสอบขนาดรูปทรงและรอยแตก ร้าว เตรียมสารหน่วงไฟคัดกรองนำสิ่งปนเปื้อนออก พร้อมทำให้เป็นผงละเอียดบรรจุอัดแน่นเต็มภาชนะทั้ง 2 ส่วน ประกอบตัวจุดระเบิดกับสายชนวนที่เตรียมไว้แล้ว โดยให้หลักจุดระเบิดอยู่กึ่งกลางของภาชนะส่วนแรก แล้วจึงนำภาชนะที่บรรจุสารหน่วงไฟอีกส่วนหนึ่งประกบเข้าด้วยกันเป็นทรงกลม ยึดติดภาชนะทั้ง 2 ส่วน ด้วยกระดาษตามแนวที่ประกบกันให้แน่น พันสายชนวนให้อยู่ในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะ พร้อมติดตัวจุดไฟฟ้าไว้ที่ปลายสายชนวน หุ้มฟิล์มหูด ชั่งน้ำหนักและบันทึกผล พร้อมติดฉลากที่ระบุลำดับและข้อมูลส่วนประกอบที่ใช้ในการผลิต



รูปที่ ๕ กระบวนการประกอบเครื่องดับเพลิง

กำหนดการทดสอบต้นแบบเครื่องดับเพลิงด้วยชุดอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 6 ให้มีขาตั้งเครื่องดับเพลิงสูง 1.5 เมตรเสาแสดงระยะที่รัศมี 1.5 เมตรจำนวน 2 เสา ในบริเวณที่ไม่มีเชื้อเพลิงหรือวัสดุติดไฟ เชื่อมต่อสายไฟจากเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า 1 แอมป์เข้ากับตัวจุดไฟฟ้าให้มีระยะห่างระหว่างกันไม่น้อยกว่า 50 เมตร และติดตั้งกล้องบันทึกภาพเคลื่อนไหว



รูปที่ ๖ ชุดอุปกรณ์ทดสอบเครื่องดับเพลิง

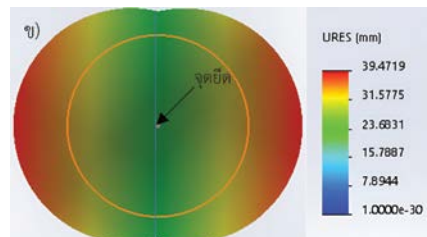
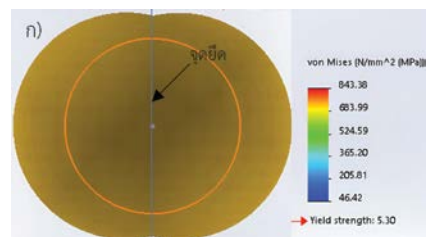
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์

ภาชนะบรรจุสารหน่วงไฟทำจากวัสดุกระดาษกราฟที่อัดด้วยแรงดันและความร้อนเป็นรูปร่างครึ่งทรงกลม วัดความหนาได้ 4 ± 0.2 มิลลิเมตร นำมาเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D828-97 ทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง TEST BANDS 112.100 กำหนดระยะทดสอบ 165 มิลลิเมตร ความเร็ว 5 มิลลิเมตรต่ออนาที ได้ผลการทดสอบแรง

ดึงชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 4 [18] และผลวัดความหนาแน่นรวมของภาชนะวัสดุกระดาษกราฟด้วยเครื่อง Alfa Mirage SD-200L มีความหนาแน่น 1050 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลความเค้นดึงและความหนาแน่นของภาชนะวัสดุกระดาษกราฟที่สร้างมีค่ามากกว่าภาชนะวัสดุโฟมโพลีสไตรีนความหนา 10 มิลลิเมตร จึงใช้ผลทดสอบค่าคุณสมบัติเชิงกลความเค้นดึงของภาชนะวัสดุกระดาษกราฟ 5.3 เมกะปาสคาล และผลคำนวณแรงดันก๊าซสูงสุดที่เกิดจากการเผาไหม้ตัวจุดระเบิด 106 เมกะปาสคาล เป็นค่าคุณสมบัติวัสดุและค่าการะตามหลักการทํางานของเครื่องดับเพลิงสร้างเป็นกรณีศึกษาแบบงานจำลองภาชนะได้ผลลัพธ์แสดงอยู่ในรูปของข้อมูลที่เป็นเฉดสีและตัวเลขปรากฏชุดข้อมูลความเค้น (Stress, von Mises) และระยะขจัด (Displacement, URES) ของภาชนะวัสดุกระดาษกราฟที่อัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 7

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคุณสมบัติของกระดาษกราฟ

ตัวอย่างที่	แรงดึงสูงสุด (นิวตัน)	พื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	ความเค้นดึง (เมกะปาสคาล)	ระยะยืด (%)
1	596.60	101.51	5.88	<2%
2	491.72	101.48	4.85	<2%



รูปที่ ๗ ผลจำลอง ก) ความเค้น และ ข) ระยะขจัด ของภาชนะบรรจุสารหน่วงไฟที่เกิดแรงดันก๊าซภายใน

ด้วยข้อจำกัดให้ใช้จุดยึดบริเวณแนวประกบของภาชนะที่ถูกบังคับไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ จึงแสดงผลค่าความเค้นและค่าระยะขจัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างจากจุดยึด ในทิศทางเดียวกับแรงดันของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ของตัวจุดระเบิดที่อยู่กึ่งกลางภาชนะ โดยค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่ภาชนะวัสดุกระดาษคราฟต์ที่สร้างขึ้นมีค่าสูงสุด 843 เมกะปาสคาล มากกว่าค่าความเค้นสูงสุดที่ภาชนะรับได้ซึ่งสอดคล้องกับค่าระยะขจัดสูงสุด 39 มิลลิเมตรหรือระยะยืด 30% จึงทำให้ภาชนะเสียรูปจนเกิดการแตกหักเสียหาย

ผลการทดสอบภาคสนามของเครื่องดับเพลิงที่ใช้ภาชนะวัสดุกระดาษคราฟต์ ดังแสดงในรูปที่ 8 เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ตัวจุดไฟฟ้าเกิดการเผาไหม้ของสายขบวนจนตัวจุดระเบิดภายในภาชนะเผาไหม้สร้างก๊าซแรงดันสูงมากพอที่จะทำให้ภาชนะวัสดุกระดาษคราฟต์มีการฉีกขาดเป็นชิ้นขนาดเล็กตกกระจายตามแนวรัศมีการระเบิดและแรงดันก๊าซสามารถกระจายสารหน่วงไฟตามแบบจำลองออกไปรอบทิศทางตามแนวรัศมีระยะทางมากกว่า 1.5 เมตร ได้พื้นที่วงกลม 7 ตารางเมตร ซึ่งมีการฟุ้งกระจายสารหน่วงไฟลักษณะเดียวกับเครื่องดับเพลิงที่ใช้ภาชนะวัสดุโพลีโพลีสไตรีน [19] ในแนวรัศมีทรงกลมจากแนวจุดยึดภาชนะทั้ง 2 ส่วน ที่พันติดกันด้วยกระดาษขาว และสอดคล้องกับการศึกษากระจายตัวของผงเคมีด้วยตัวจุดระเบิดสร้างก๊าซแรงดันสูงที่บรรจุในภาชนะทรงกลมขึ้นเดียวที่ใช้วัสดุไนลอน [20] และวัสดุแก้ว [21] ที่มีลักษณะการฟุ้งกระจายในแนวรัศมีเป็นทรงกลมเหมือนกัน

5. สรุปและอภิปรายผล

เครื่องดับเพลิงที่สร้างขึ้นด้วยภาชนะวัสดุกระดาษคราฟต์ทดแทนวัสดุโพลีโพลีสไตรีนสามารถกระจายสารหน่วงไฟได้ครอบคลุมพื้นที่ 7 ตารางเมตรได้เทียบเท่ากัน จึงสามารถนำไปใช้ในการดับเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งการเผาไหม้ภาชนะวัสดุกระดาษคราฟต์เกิดก๊าซมลพิษน้อยและเศษชิ้นส่วนของภาชนะที่เหลืออยู่ย่อยสลายได้ง่าย จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าภาชนะวัสดุโพลีโพลีสไตรีน นักวิจัยสามารถนำองค์ความรู้ในการออกแบบ ทักษะการสร้างและทดสอบเครื่องดับเพลิงที่ใช้ภาชนะวัสดุ



รูปที่ ๘ ผลการทดสอบภาคสนามของเครื่องดับเพลิงภาชนะวัสดุกระดาษคราฟต์

กระดาษคราฟต์มาปรับขนาดและรูปร่างให้สามารถติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กและจรวดนำไปใช้ในการดับเพลิงได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยการสนับสนุนทุนการวิจัย อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย และพื้นที่ในการทำวิจัย รวมไปถึงการอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ จากโครงการวิจัยพื้นฐาน วิจัยและพัฒนาเครื่องดับเพลิงแบบส่งระยะไกลของส่วนงานวิศวกรรมวัสดุระเบิดและนิวเคลียร์ ชีวะ เคมี สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ การสนับสนุนเจ้าหน้าที่และเครื่องมือทดสอบคุณสมบัติของวัสดุของส่วนงานวิศวกรรมโลหะการและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัย และแก้ไขปัญหาข้อบกพร่องจนทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ส่วนควบคุมไฟฟ้า, “รายงานประจำปี 2564,” สำนักป้องกันปราบปราม และควบคุมไฟฟ้า, กรุงเทพฯ, ไทย, 2564.
- [2] ส่วนควบคุมไฟฟ้า, “การใช้อากาศยานสนับสนุนงานดับไฟฟ้า,” สำนักป้องกันปราบปราม และควบคุมไฟฟ้า, กรุงเทพฯ, ไทย, 2566.
- [3] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, “โครงการวิจัยและพัฒนาจรวดดับเพลิง,” กรุงเทพฯ, ไทย, 2565.
- [4] ญัฐวิญญ์ ชวลิตพรศิยา และคณะ, “ประเด็น

- สิ่งแวดล้อมจาก ‘สไตรีนโมโนเมอร์’ ในเหตุโรงงาน โฟมระเบิดที่กิ่งแก้ว 21,” ใน *Chula Engineering Innovation toward Sustainability*, 2564, [Online]. Available: <https://www.eng.chula.ac.th/wp-content/uploads/2021/07/ประเด็นสิ่งแวดล้อมจาก-สไตรีนโมโนเมอร์-ในเหตุโรงงานโฟมระเบิดที่กิ่งแก้ว-21.pdf>
- [5] คู่มือการปฏิบัติงานสำหรับเครือข่ายความร่วมมือ ในการควบคุมไฟฟ้า, สำนักป้องกันรักษาป่าและควบคุมไฟฟ้า กรมป่าไม้, 2565.
- [6] อนุชา สินธุสาร และอาภาพร สินธุสาร, “โมโนเอมโมเนียมพอสเฟตผงเคมีแห้งดับเพลิง,” *จดหมายข่าว วศ. กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, ปีที่ 3, ฉบับที่ 6, น. 5, ก.พ. 2553.
- [7] พิศิษฐ์ มิตรเกื้อกูล. “โดรนดับเพลิง.” DXC. THAIPBS.or.th. [https://dxc.thaipbs.or.th/expert-pool/firefighting-drones/#:~:text=โดรนถือเป็นเครื่องมือ,เกิดเหตุเพลิงไหม้ได้\(วันที่เข้าถึง ส.ค. 13, 2566\)](https://dxc.thaipbs.or.th/expert-pool/firefighting-drones/#:~:text=โดรนถือเป็นเครื่องมือ,เกิดเหตุเพลิงไหม้ได้(วันที่เข้าถึง ส.ค. 13, 2566)).
- [8] สมศักดิ์ อรรถศิลป์, “การปฏิบัติตนเบื้องต้นเพื่อความปลอดภัย,” *กรมการแพทย์*, 2564.
- [9] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, “รายงานการศึกษาภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมกระดาษคราฟท์,” *กระทรวงอุตสาหกรรม*, 2559.
- [10] D. L. Frost, “Heterogeneous/Particle-laden Blast Waves,” *Shock Waves*, vol. 28, pp. 439 - 449, 2018.
- [11] สวัสดิ์ ภูมิสวัสดิ์ และชัยยกร จันทร์สุวรรณ, “คุณสมบัติของโฟมโพลีสไตรีนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,” ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18*, ขอนแก่น, ประเทศไทย, ต.ค. 18 - 20, 2547.
- [12] นุชชรา นงนุช, “ความเป็นไปได้ในการใช้เชื้อจากกระดาษคราฟท์และกระดาษกลองมาผลิตกระดาษเซ็ดมือ,” *วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, การจัดการสิ่งแวดล้อม, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์, กรุงเทพฯ, ไทย*, 2553.
- [13] อรรถพล ชัยมนัสกุล, “การศึกษาความเค้นในถังแรงดันแนวนอนและแท่นรองรับด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,” *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 13, น. 26-34, 2556.
- [14] D. C. Planchard, *Engineering Design with SOLIDWORKS 2019*. Mission, MS, USA:SDC publication, 2019.
- [15] B. S. Ermolaev, A. A. Belyaev, S. B. Viktorov, K. A. Sleptsov, and S. Y. Zharikova, “Nonideal Regimes of Deflagration and Detonation of Black Powder,” *Russ. J. Phys. Chem. B*, vol. 4, no. 3, pp. 428 - 439, 2010.
- [16] *Material Safety Data Sheet for ABC 40*, Jewel Saffire Product Ltd., Aug. 2023. [Online]. Available: http://www.safelincs.co.uk/templates_safelincs/file/datasheet/1143_POWDER%20MSDS.pdf
- [17] R. Nakka. “Chamber Pressure due to Igniter Combustion.” NAKKA-ROCKETRY.net. <https://www.nakka-rocketry.net/igniter.html#Pressure> (accessed Aug. 13, 2023).
- [18] ส่วนงานวิศวกรรมโลหการและวัสดุ, “รายงานผลการทดสอบ Tensile Strength Bulk Density,” สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, นนทบุรี, ไทย, DTI-RE-RMM-2022-003, 2566.
- [19] ส่วนงานวิศวกรรมวัสดุระเบิดและนิวเคลียร์ ชิวะ เคมี, “วิจัยและพัฒนาเครื่องดับเพลิงแบบส่งระยะไกล,” *โครงการวิจัยพื้นฐาน, สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ, นนทบุรี, ไทย*, 2565.
- [20] A. M. Milne, E. Floyd, A. W. Longbottom, and P. Taylor, “Dynamic Fragmentation of Powders in Spherical Geometry,” *Shock Waves*, vol. 24, pp. 501 - 513, 2014.
- [21] Q. Pontalier, J. Loiseau, S. Goroshin, and D. L. Frost, “Experimental Investigation of Blast Mitigation and Particle-blast Interaction during the Explosive Dispersal of Particles and Liquids,” *Shock Waves*, vol. 28, pp. 489 - 511, 2018.