

แนวทางการควบคุมอัคคีภัยและความเสียหายขั้นสูงในเรือรบ

Approaches to Advanced Fire and Damage Control on Battleship

วีระ บุญผุด¹

Weera Boonphud¹

Received : November 2, 2020

Revised : January 26, 2021

Accepted : March 18, 2021

บทคัดย่อ

เรือรบเป็นอาวุธยุทธโประณ์ที่มีความเป็นเอกลักษณ์พิเศษเฉพาะตัว ทุกส่วนของเรือรบถูกออกแบบให้ปฏิบัติการทางทหารเพื่อรักษาความมั่นคงและรักษาผลประโยชน์ของชาติทางทะเลสูงสุด ดังนั้น กระบวนการสร้างและออกแบบตัวเรือจึงเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีทางวิศวกรรมหลายสาขา เรือรบถูกออกแบบให้มีความซับซ้อนเชิงโครงสร้าง ออกแบบเป็นบล็อกหลาย ๆ บล็อกมาประกอบกัน โดยมีห้องต่าง ๆ ในเรือจำนวนมาก ตามภารกิจทางทหารและหลักการทรงตัวของเรือในทะเล จำนวนห้องต่าง ๆ มีผลต่อระบบการป้องกันความเสียหายทางเรือ (Damage Control) ซึ่งแต่ละห้องนั้นถูกออกแบบเป็นพิเศษ เช่น ห้องเครื่องจักรใหญ่ ห้องไฟฟ้า ห้องเก็บคลังกระสุน ห้องควบคุมการยิง ห้องครัว และห้องพักทหาร ลักษณะความซับซ้อนและไม่เหมือนกันในแต่ละห้องนี้สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือความปลอดภัยจากเพลิงไหม้และชนิดสารดับเพลิง

เทคโนโลยีด้านการป้องกันและดับเพลิง ประกอบด้วยอุปกรณ์สัญญาณแจ้งเตือนอัคคีภัยต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์ตรวจจับควันไฟ (Smoke Detector) อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน (Heat Detector) และอุปกรณ์ดับเพลิงขนาดใหญ่ เช่น อุปกรณ์หัวกระจายน้ำดับเพลิงอัดโน้มติ (Water Mist High Pressure) อุปกรณ์ดับเพลิงชนิดก๊าซ (Gas Suppression System) และระบบโฟมอัดน้ำแรงดันสูง (Foam Suppression System) เทคโนโลยีต่าง ๆ เหล่านี้จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถด้านการดับเพลิง ซึ่งที่กล่าวมานี้อยู่ในขั้นตอนทดลองและพัฒนาไปสู่เรือต้นแบบในอนาคตเท่านั้น ปัจจุบันเรือเดินสมุทรได้เริ่มนำเทคโนโลยีป้องกันความเสียหายและดับเพลิงลักษณะแบบนี้มาใช้งานบ้างแล้ว โดยรวมทุกอุปกรณ์ตรวจจับและดับเพลิงเข้าด้วยกันที่เรียกว่า อุปกรณ์ตรวจจับแบบองค์รวม (Volume Sensors and Volume Sensing Systems) แต่สำหรับกรณีเรือรบแล้วปัญหามีจำนวนห้องกับอาวุธยุทธโประณ์จำนวนมาก รวมทั้งระเบียบข้อกำหนดต่าง ๆ ของกองทัพเรือล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยสิ่งท้าทายที่รอการทดสอบ

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กองวิชาฟิสิกส์และเคมี ฝายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

Assistant Professor, Department of Physics and Chemistry, Academic Branch, Royal Thai Naval Academy

E-mail: baankhawhom@hotmail.com

นอกจากการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับและดับเพลิงแล้ว แนวทางการลดเชื้อเพลิงของวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ (Polymeric) ก็มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่ออัตราการเกิดไฟไหม้ หากเลือกใช้วัสดุพอลิเมอร์ (Polymer) ที่มีคุณสมบัติทนไฟ และเลือกใช้สารเคลือบผิวโลหะทนไฟระดับนาโน (Nano - Coating) บนอาวุธยุทโธปกรณ์แล้ว จะเป็นอีกทางเลือกสำคัญหนึ่งในการป้องกันความเสียหายทางเรือ

คำสำคัญ: ป้องกันความเสียหายทางเรือ อุปกรณ์ตรวจจับควันไฟ อุปกรณ์ตรวจจับความร้อน อุปกรณ์ดับเพลิงชนิดก๊าซ ระบบโหมอัดน้ำแรงดันสูง วัสดุที่ไม่ใช่โลหะ วัสดุพอลิเมอร์ และสารเคลือบผิวโลหะทนไฟระดับนาโน

Abstract

Warships are unique type of military armaments. Almost every part of a warship is designed to maintain maximum maritime capabilities to ensure the maritime national Interests and security. The design of the hull structure is therefore complex. The number of rooms in the ship is large according to the mission and stability of the ship during battle. The complexity of the hull has a huge effect on the ship's damage control system. Special designs of each room such as the engine room, generator room, ammunition chamber, fire control room and kitchen require a different fire prevention and extinguishing method. Therefore, the hull is built into several blocks put together.

The technology of fire prevention and extinguishing systems consists of smoke detectors, heat detectors as well as some advanced fire-fighting equipment like automatic fire sprinkler, gas suppression system and high-pressure compressed-foam suppression system. These technologies could improve the ability to prevent damage on the warships. However, they are still only in their experimental and prototype stage before the actual installation on the warships, although, in some ocean liners, damage control technologies as a combination of the two systems have been adopted. As for the case of warships, the problems are more delicate, completely different and more challenging due to the large number of rooms, maritime equipment, the naval requirements and etc.

In addition to detecting and suppressing damages, reduction of the flammability rate of polymeric materials also plays a very important role as a mean of reducing fuel to the fire.

Selections of a polymer material with flame resistance properties and a Nano-level fire-resistant coating metal on the ship's munitions is one of the main ways of reducing the amount of fuel to the fire and therefore could prevent /eliminate damage to the inside of the warships.

Keywords: Damage prevention in ship, smoke detection, heat detection, gas suppression system, high-pressure compressed foam system, Polymeric, Polymer and Nano-level fire-resistance coating materials.

1. บทนำ

ความสามารถในการลอลำขณะปฏิบัติการทางทะเลอย่างต่อเนื่องเป็นหัวใจหลักของยุทธนาวี ความสามารถของเรือกับภารกิจเหล่านี้จำเป็นต้องใช้ "การรบภายใน" [1] การรบภายใน หมายถึงทุกกิจกรรมบนเรือรบที่จะต้องตรวจสอบและปฏิบัติจนมั่นใจว่าเรือรบจะไม่จมทะเลในระหว่างภารกิจ การบำรุงรักษาเครื่องจักรกลและรักษาระบบควบคุมการยิงต่อเนื่องให้เรือกลับมาในภารกิจได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งความได้เปรียบทางยุทธวิธีในห้วงที่เรือได้รับความเสียหายอย่างหนักกลับมาได้ [2-5]

เพลิงไหม้เป็นภัยคุกคามที่สำคัญต่อเรือรบในระหว่างภารกิจ ลูกเรือต้องใช้ทักษะความสามารถดับเพลิง การประสานงานที่ชัดเจนในการปฏิบัติในทันที [6] เพื่อลดความเสียหายภายในเรือลงให้น้อยและในเวลาที่สุด ในทางกลับกันหากลูกเรือไม่สามารถควบคุมเพลิงได้ เรืออาจตกอยู่ในสถานการณ์เลวร้าย มีความเสี่ยงสูงที่จะระเบิดและถอนตัวจากภารกิจ ด้วยเหตุสำคัญนี้ความต้องการเทคโนโลยีด้านการป้องกันความเสียหายทางเรือจึงเข้ามามีบทบาททันทีในขณะที่เรือกำลังปฏิบัติการทางทะเล ส่วนแรกคือเทคโนโลยีด้านเครื่องตรวจจับควัน ตรวจจับเปลวไฟและอุปกรณ์ดับเพลิงรวมถึงเทคนิคการดับเพลิงขั้นสูง สิ่งเหล่านี้จะช่วยลูกเรือควบคุมความเสียหายบนเรือได้ นอกจากนี้ยังมีอีกหลายเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการดับเพลิงบนเรือ เช่น เทคโนโลยีควบคุมระบบระบายอากาศเพื่อแยกพื้นที่เพลิงไหม้และลดการกระจายของควันพิษไปยังพื้นที่อื่นของเรือ อีกทั้งเทคโนโลยีระบบกำจัดควันและการมองเห็นจะช่วยให้นักดับเพลิงสามารถค้นหาตำแหน่งต้นเพลิงและดับเพลิงไหม้ ส่วนที่สองคือ เทคโนโลยีวัสดุไม่ใช้โลหะทนไฟ วัสดุเหล่านี้จะช่วยลดอัตราการติดไฟ เชื้อเพลิง ปริมาณความร้อนและควันพิษในเรือ

2. เทคโนโลยี

2.1 เครื่องตรวจจับไฟไหม้ (Fire Detector System)

ระบบเครื่องตรวจจับความเสียหายและเปลวไฟที่ดีที่สุดบนเรือคือลูกเรือ อย่างไรก็ตามบนเรือมิได้มีลูกเรือเฝ้าระวังอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นความจำเป็นที่ต้องมีระบบตรวจจับเพลิงไหม้ที่มีประสิทธิภาพที่ตอบสนองในเวลาอันสั้นและรวดเร็วเพื่อยุติเหตุก่อนที่จะเกิดอัคคีภัยหรือการลุกลาม (Fire Development Stages) “ระยะเวลาในการค้นหาที่ลดลง นั้นหมายถึงโอกาสรอดชีวิตที่เพิ่มมากขึ้น” ดังนั้นเรือจึงจำเป็นต้องมีสิ่งเหล่านี้ในระหว่างภารกิจ

ปัจจุบันอุปกรณ์ตรวจจับไฟไหม้ที่นิยมใช้ในเรือสินค้าและเรือรบนั้นเป็นชนิดตรวจจับเฉพาะจุด (Point) หรือระบุตำแหน่ง (Addressable) อุปกรณ์ตรวจจับเฉพาะจุดจะใช้เทคนิคทางกลตรวจจับความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นช่วงการลุกไหม้แล้วส่งสัญญาณเตือนแจ้งภัยในลำเรือ สัญญาณเตือนนี้จะนำเข้าสู่ขั้นตอนการปฏิบัติของเรือ พื้นที่รับผิดชอบ ขั้นตอนการสั่งการและขั้นตอนการดับไฟอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อควบคุมสถานการณ์ก่อนจะเกิดไฟไหม้และลุกลาม จุดประสงค์หลักของอุปกรณ์ตรวจจับอัคคีภัยคือการกระตุ้นให้มีการตอบสนองของสัญญาณเตือนต่อปัจจัยสิ่งเร้าที่มาจากไฟ ตัวอย่างเช่น ควัน อุณหภูมิสูงหรือความหนาแน่นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ตำแหน่งเกิดเหตุในเรือรอบพื้นที่ตรวจจับ ข้อจำกัดนี้ในกรณี

พื้นที่ขนาดใหญ่อาจต้องใช้เวลานานในการตอบสนองต่อสิ่งเร้าของอุปกรณ์ตรวจจับไฟไหม้ ในข้อจำกัดเวลานี้ ไฟสามารถลุกลามอย่างรวดเร็วไปยังพื้นที่ใกล้เคียง ทำให้การดับไฟเป็นงานที่ยากและท้าทาย

แนวทางแก้ปัญหาที่ชัดเจนที่สุดคือการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ตรวจจับในบริเวณพื้นที่อับและมีความเสี่ยง หากเกิดเพลิงไหม้โอกาสที่อุปกรณ์ตรวจจับอยู่ใกล้พื้นที่ไฟไหม้ก็จะมากขึ้นและเวลาก่อนที่อุปกรณ์ตรวจจับจะตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสิ่งบ่งชี้ว่าเกิดไฟไหม้ก็จะลดลง ข้อจำกัดของอุปกรณ์ตรวจจับเฉพาะจุดใดๆ คือไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันมาจากเพลิงไหม้และอุณหภูมิที่เพิ่มอันมาจากการทำงานปกติได้ เช่น การเชื่อมหรือตัดโลหะที่ลูกเรือทำงานอยู่ใกล้ๆ กับอุปกรณ์ตรวจจับ ในทำนองเดียวกัน อุปกรณ์ตรวจจับควันไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างควันที่เกิดจากการทำอาหารประจำวันกับควันที่เกิดจากไฟไหม้ได้ การเตือนที่ผิดพลาดบ่อยๆ นี้จะนำมาซึ่งการถูกยกเลิกอุปกรณ์ตรวจจับเหล่านี้ หรือไม่ก็ลูกเรืออาจเพิกเฉยต่อสัญญาณแจ้งเตือน ซึ่งสิ่งเหล่านี้ไม่ควรเกิดขึ้นภายในเรืออย่างเด็ดขาด

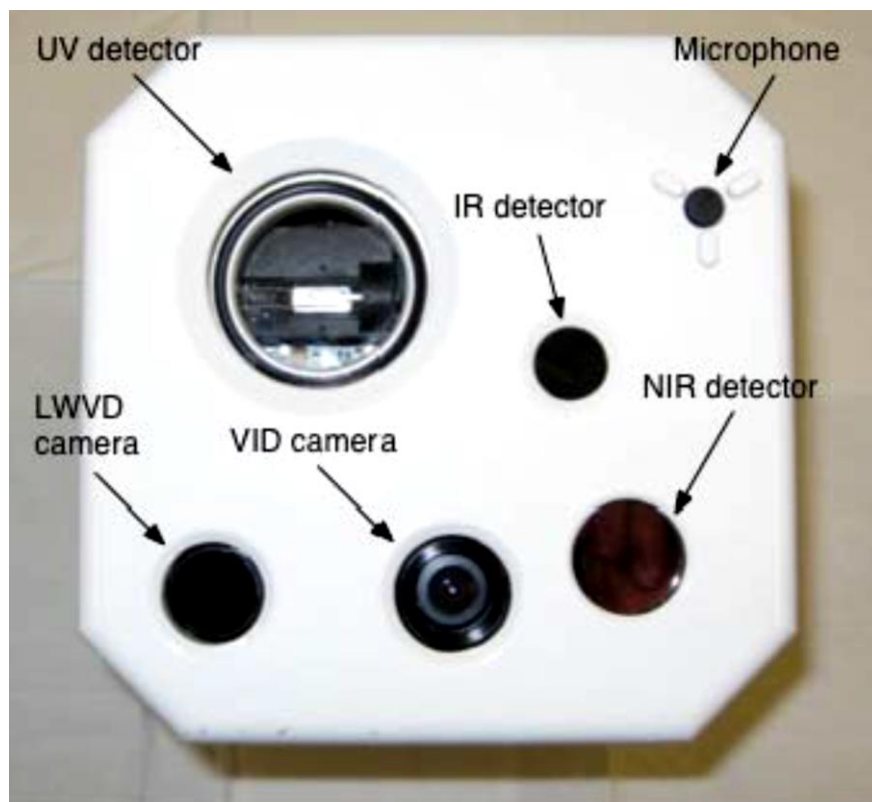
แนวคิดใหม่

รวมทุกอุปกรณ์ตรวจจับไว้ในเครื่องเดียวกัน ควบคุมและประมวลผลโดยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ และโปรแกรมควบคุม เรียกว่า **อุปกรณ์ตรวจจับแบบองค์รวมและระบบตรวจจับ** เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับและแก้ไขจุดบกพร่องของอุปกรณ์ตรวจจับเฉพาะจุดที่ไม่สามารถแยกเหตุการณ์ปกติกับไฟไหม้ได้

อุปกรณ์ตรวจจับองค์รวมแตกต่างจากอุปกรณ์ตรวจจับเฉพาะจุด ตรงที่มีความสามารถในการตรวจจับเพลิงไหม้ได้จากหลายปัจจัยสิ่งเร้า ครอบคลุมพื้นที่กว้างกว่าแม้ว่าต้นเพลิงจะอยู่ห่างจากอุปกรณ์ตรวจจับ ลักษณะเด่นที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยให้ลูกเรือตัดสินใจได้อย่างถูกต้องบนข้อมูลที่แม่นยำเพื่อระงับเหตุในทันที

จุดประสงค์การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับแบบองค์รวมนี้เพื่อลดการแจ้งเตือนที่ผิดพลาดอันมาจากการทำงานปกติในเรือ เช่น การประกอบอาหาร การเชื่อมเหล็ก ตัดเหล็ก การทำงานของยานพาหนะบางชนิดที่ใช้น้ำมันดีเซลบนเรือ แสงแฟลชจากกล้องถ่ายรูป และละอองน้ำทะเลที่ใกล้กับเครื่องตรวจจับ โดยประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถของการพัฒนาชุดอุปกรณ์ซอฟต์แวร์ควบคุมทุกอุปกรณ์ตรวจจับเพื่อประมวลผล ตัดสินใจ แยกความแตกต่างระหว่างเหตุไฟไหม้และการทำงานปกติออกจากกัน แจ้งเตือนเหตุไฟไหม้ได้ถูกต้อง เพื่อลดข้อบกพร่องของอุปกรณ์ตรวจจับเฉพาะจุดแบบเดิม

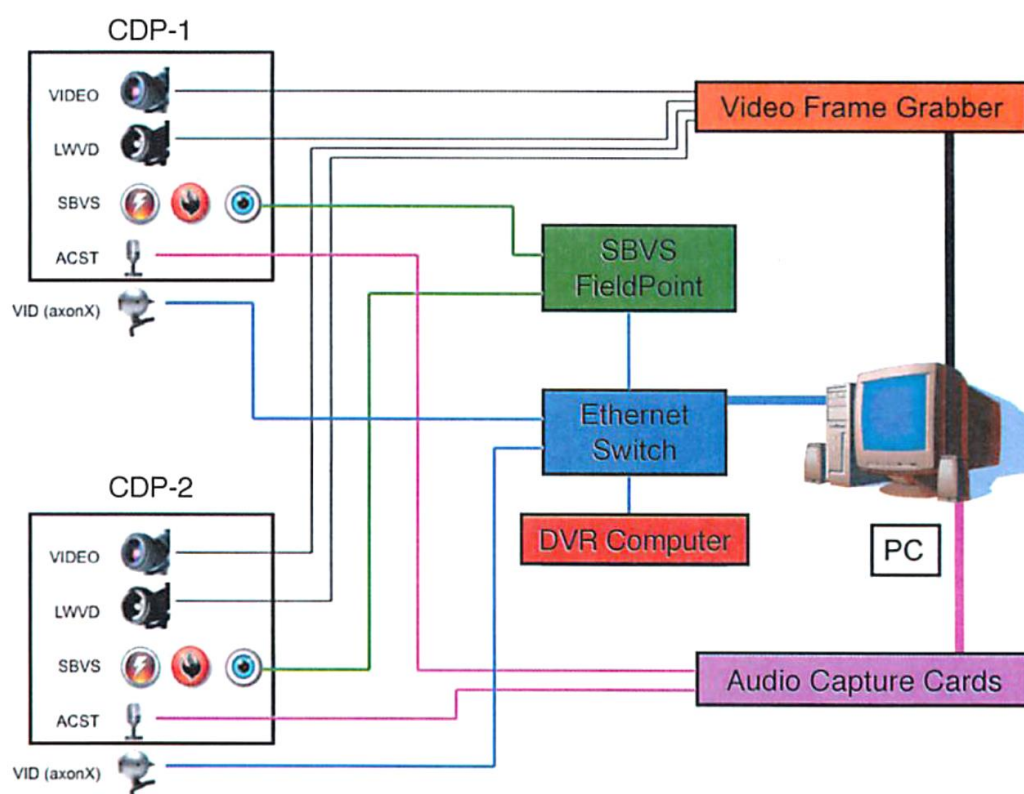
ห้องปฏิบัติการวิจัยกองทัพเรือ (The Naval Research Laboratory, NRL) กรุงวอชิงตันดีซีได้พัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับแบบองค์รวม (Volume Sensor System, VSS) [7-13] เพื่อบูรณาการทุกอุปกรณ์ตรวจจับมาไว้ที่เดียวกันและทำงานร่วมกัน เช่น อุปกรณ์ตรวจจับเพลิงแบบอินฟราเรด (Infrared Spectral Sensors) อุปกรณ์ตรวจจับเพลิงแบบอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Spectral Sensors) อุปกรณ์ตรวจจับแสงภาพวิดีโอแบบอินฟราเรด (Infrared Video and Video Recorders) อุปกรณ์ตรวจจับเสียง (Acoustic Detector) และอุปกรณ์ตรวจจับควันแสดงภาพวิดีโอ (Video Image Smoke Detection, VISD) ซอฟต์แวร์กลางจะทำหน้าที่รับข้อมูล รวบรวมข้อมูลและประมวลผลข้อมูลจากทุกอุปกรณ์ตรวจจับแล้วตัดสินใจแยกชนิดของเหตุการณ์ว่าเหตุการณ์ใดเป็นเพลิงไหม้หรือเหตุการณ์ใดเป็นการทำงานปกติในเรือ



รูปที่ 1 มุมมองด้านหน้าของอุปกรณ์ตรวจจับใหม่แบบองค์รวม [7]



รูปที่ 2 อุปกรณ์ตรวจจับควันแสดงภาพวิดีโอ (Video Image Smoke Detection, VISD) [3]



รูปที่ 3 ผังแสดงระบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ในเรือ USS SHADWELL [10]

ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับแบบองค์รวมบนเรือหลวง USS SHADWELL ในเดือนกันยายน 2010 [14] เพื่อตรวจจับเพลิงไหม้จริงกับกิจกรรมอื่นๆ ในเรือ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบระบบแบบองค์รวมบนเรือหลวง USS SHADWELL ต่อเพลิงไหม้ [10]

สถานที่	ประเภท	จำนวนครั้งการทดสอบ/จำนวนครั้งที่ ตอบสนองต่อเหตุเพลิงไหม้จริง	เวลาที่ตอบสนอง แจ้งเตือน(วินาที)
พื้นที่เฉพาะตำแหน่ง	ควัน	4/4	50
	เปลวไฟ	6/6	34
พื้นที่รอบด้าน	เปลวไฟ	6/6	109

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบระบบแบบองค์รวมบนเรือหลวง USS SHADWELL ต่อเหตุจากงานปกติ[10]

สถานที่	ประเภท	จำนวนครั้งการทดสอบ/จำนวนครั้งที่ ตอบสนองต่อกิจกรรมอื่นๆในเรือ	เวลาที่ตอบสนอง แจ้งเตือน(วินาที)
พื้นที่เฉพาะตำแหน่ง	ควัน	4/0	ไม่แจ้งเตือน
	เปลวไฟ	6/1	137
พื้นที่รอบด้าน	เปลวไฟ	6/0	ไม่แจ้งเตือน

ผลการทดสอบอุปกรณ์เครื่องตรวจจับแบบองค์รวมต่อเหตุจำลองเหตุเพลิงไหม้และงานปกติในเรือ แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจจับแบบองค์รวมทำงาน 100% ต่อเหตุเพลิงไหม้จริง ส่วนเหตุจากงานปกติอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวกับเพลิงไหม้ อุปกรณ์ตรวจจับไม่แจ้งเตือนจึงสรุปได้ว่ามีประสิทธิภาพ 100%

2.2 Smoke Control

ควันไฟจากเพลิงไหม้ถือเป็นปัญหาใหญ่อันหนึ่งในเรื่องการมองเห็นของลูกเรือ บนเรือรบถูกออกแบบให้มีห้องจำนวนมากในเรื่องหลักการทำงานเรือ ระยะระหว่างช่องทางเดินแคบ และพื้นที่ปิดทึบ ปัญหาที่เกิดจากควันนี้จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของลูกเรือที่พยายามจะเข้าระงับเหตุในทันที ทั้งการอพยพคนและสิ่งอุปกรณ์ออกจากพื้นที่เกิดเหตุ การค้นหาลูกเรือที่ติดค้างในพื้นที่เสี่ยง การดับไฟและปัญหาสุดคมควันพิษทั้งหมดนี้ทำให้เรือและลูกเรือตกอยู่ในสถานการณ์เสี่ยง

Klote [15] ให้คำจำกัดความของการจัดการควันว่า “การประยุกต์ใช้วิธีการทั้งหมดในการปรับเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของควันเพื่อประโยชน์ของผู้อยู่อาศัยและนักดับเพลิงตลอดจนการลดความเสียหายต่อทรัพย์สิน” การจัดการหรือควบคุมควันบนเรือทำได้โดยสร้างแรงดันสูง (High Pressure Air, HPA) หรือการไหลของอากาศที่สูงขึ้น

ระบบควบคุมควันในเรือมี 2 ระบบ คือ ระบบเฉพาะกับไม่เฉพาะ ระบบเฉพาะประกอบด้วยระบบย้ายมวลอากาศและระบบกระจายอากาศที่แยกจากกันและใช้เฉพาะในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ ระบบที่ไม่เฉพาะเจาะจงใช้ส่วนประกอบของระบบระบายความร้อนและระบบปรับอากาศ (HVAC) ระบบเฉพาะต้องใช้พื้นที่มากขึ้นและมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าระบบที่ไม่เฉพาะ อย่างไรก็ตามการควบคุมของระบบที่ไม่เฉพาะเจาะจงนั้นซับซ้อนกว่าระบบเฉพาะ

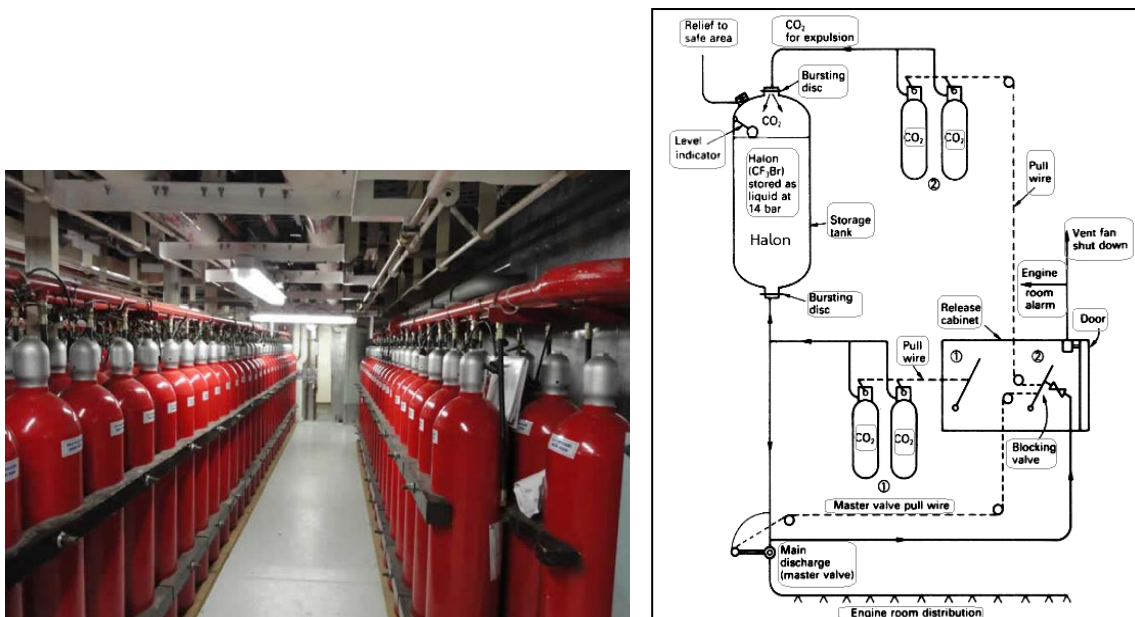
แนวคิดใหม่

1. สร้างแรงดันบวก (Positive Pressure Ventilation, PPV) เพื่อควบคุมควันไม่ให้ไหลย้อนกลับเข้าไปในตัวเรือหรือพื้นที่ควบคุม โดยวิธีการอัดอากาศเพิ่มแรงดันบวกในตัวเรือ จุดประสงค์หลักคือควบคุมควันให้ควันไหลไปในทิศทางที่กำหนด โดยใช้ระบบ HVAC ของเรือหรือพัลลม แรงดันบวกสามารถใช้เพื่อบังคับให้ควันและก๊าซพิษออกจากเรือ สิ่งนี้กำหนดให้สามารถกำหนดเส้นทางจากพื้นที่ที่ไฟกำลังลุกไหม้ไปยังด้านนอกของเรือได้ เทคนิคนี้ยังสามารถใช้เพื่อสร้างแรงดันเชิงบวกในช่องทางเดินในเรือ เช่น ป้องกันหรือหน่วงการไหลเข้าของควันพิษเข้าไปในตัวเรือ

2. เพิ่มระบบระบายควัน (Smoke Ejection System, SES) เพื่อเร่งระบายควันออกจากตัวเรือให้ในปริมาณมากๆ ในเวลาอันสั้น มีงานวิจัยที่ทดสอบกับเรือ USS SHADWELL ซึ่งตั้งอยู่ใน Mobile Bay เป็นเรือทดสอบควบคุมไฟและความเสียหายที่ดำเนินการโดย US NRL วอชิงตันดีซีใช้ระบบการควบคุมอากาศที่เรียกว่า The Collective Protection System (CPS) โดยเรือถูกออกแบบให้มีโครงสร้างรองรับระบบระบายควันสำหรับระบายควัน (A Smoke Ejection System, SES) จะมีพัลลมดูดอากาศจำนวนมากสำหรับผลักดันและควบคุมการไหลมวลอากาศจำนวน 31 ตัว เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของมวลอากาศ ระบบดูดอากาศมีสองประเภทคือระบบควบคุมควัน (Smoke Control Dampers, SCD) และระบบดูดกำจัดควัน (SPD) ภายใต้สภาวะปกติระบบจะถูกกำหนดค่าในโหมด CPS ซึ่ง SCD จำนวน 17 ตัว กำลังทำงานและ SPD 14 ตัว ถูกปิด เมื่อตรวจพบเพลิงไหม้ระบบจะกำหนดค่าใหม่เพื่อควบคุมควัน ในเรือทำได้โดยการเลือกโหมดสวิตช์ปิด SCD และเปิด SPD ทั้งสองระบบนี้จะมีประสิทธิภาพแค่ไหนก็ขึ้นอยู่กับความแม่นยำของชุดอุปกรณ์ตรวจจับแบบองค์รวมนั่นเอง

2.3 สารดับเพลิง (Fire Agent)

ปัจจุบันระบบดับเพลิงขนาดใหญ่ในเรือประจำการมี 2 ระบบที่มีใช้งานในเรือคือระบบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide Agent System) และระบบของเหลวระเหยเฮลอน (Halon Agent System) มีใช้ทั้งบนเรือเดินสมุทรและเรือรบ เรือแต่ละลำจะเลือกติดตั้งแต่ละระบบอย่างใดอย่างหนึ่งตามประเภทเชื้อเพลิงและงบประมาณ ทั้งสองระบบมีประสิทธิภาพในการดับไฟโดยเฉพาะไฟประเภท ข (Class B) จำพวกของเหลวติดไฟและไฟประเภท ค (Class D) จำพวกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ข้อดี คือ ลดความร้อนของเปลวไฟ และไม่ทิ้งเศษขยะหลังการดับเพลิง ตัวสารทั้งสองจะระเหยไปในอากาศในเวลาอันรวดเร็วจึงนิยมที่จะนำมาติดตั้งในเรือทุกชนิด โดยเฉพาะในเรือรบที่มีระบบสื่อสาร ระบบเดินเรือ และระบบควบคุมการยิง ทุกระบบต้องเสียหายน้อยสุดหลังเพลิงสงบลง สารดับเพลิงชนิด คาร์บอนไดออกไซด์ และเฮลอน จึงตอบโจทย์และถูกนำมาใช้ แต่ ณ ปัจจุบันความเป็นพิษของสารทั้งสองมีอันตรายถึงชีวิตหากเกิดการรั่วไหลในตัวเรือ ด้วยคุณสมบัติไร้กลิ่นของตัวสารเอง อีกทั้งเฮลอนมีสารส่วนประกอบทำลายชั้นบรรยากาศ CFC-113, CFC-114 และ CFC-115 เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมด้วยเหตุที่สารสามารถอยู่ (ตกค้าง) ในบรรยากาศโลกเป็นเวลานาน และบางส่วนจะเข้าไปในชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) แล้วสร้างความเสียหายต่อชั้นโอโซนส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อนจึงเป็นแรงกระตุ้น ให้มีการเลิกใช้สารกลุ่มฮาโลเจน

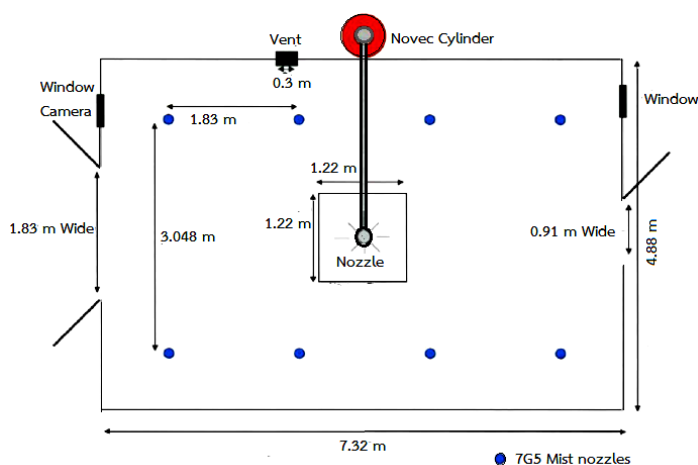


รูปที่ 4 แสดงการติดตั้งระบบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารเฮลอนในเรือ [3]

แนวคิดใหม่

ระบบลูกผสม (Dual system or hybrid system)

1. Dual Systems – Water Mist/Novec 1230 เป็นการผสมระหว่างน้ำและสารสะอาดกลุ่มสารฮาโลคาร์บอน (Halocarbon Agent) คือ ฟลูโอรีน คลอรีน โบรมีน หรือ ไอโอดีน เช่น FM-200, FE25, Novec 1230 มีการทดสอบในห้องเครื่องจักรบนเรือดำน้ำ HMC [16] ของระบบลูกผสมระหว่างน้ำและสารดับเพลิง Novec 1230 ที่อัตราการปล่อยน้ำแบบละอองฝอยที่อัตรา 288 ลิตร/นาที (1.92 L/min/m^3) ร่วมกับสารดับเพลิง Novec 1230 อัตรา 1.56 นาที/ลิตร ผ่านหัวกระจายน้ำดับเพลิงอัตโนมัติ (Automatic Sprinkler System) บนเพดานห้องเครื่องเรือจำนวน 3.7 จุด ห้องขนาด $82 \text{ m} \times 4.88 \text{ m}$ ตามรูปที่ 5 ใช้เวลาดับไฟ 105 วินาที ค่า pH ความเป็นกรดต่างของน้ำบนพื้น เท่ากับ 7 และไม่พบคราบสกปรกในเรือ



รูปที่ 5 ผังแสดงการใช้ระบบดับเพลิงคู่ ระหว่างน้ำและสารดับเพลิงสังเคราะห์รุ่น Novec 1230 [12]

2. Dual Systems – Water Mist/Nitrogen เป็นการผสมระหว่างน้ำและสารสะอาดกลุ่ม ก๊าซเฉื่อย (Inert Gas Agent) เป็นสารสะอาดดับเพลิงที่มีองค์ประกอบหลักของก๊าซเหล่านี้อย่างน้อยหนึ่งสารหรือมากกว่า คือ ฮีเลียม นีออน อาร์กอน ไนโตรเจน โดยสามารถใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซผสม เพื่อเป็นสารองค์ประกอบรองได้ เช่น Inergen, Argonite และ N100

ระบบนี้สามารถฉีดสารดับเพลิงลูกผสมเข้าไปในพื้นที่ที่ต้องการปกป้องซึ่งสามารถดับไฟได้ ลักษณะเป็นฝอยละเอียดเหมือนกลุ่มเมฆ เป็นเทคโนโลยีสีเขียวผสมผสานกันระหว่างไนโตรเจนกับเมื่อน้ำขนาดเล็กมาก (ขนาด 1 ใน 100 ส่วนของเมื่อน้ำในระบบหมอกน้ำ (Water Mist)) กลไกการดับเพลิงด้วยสารสองชนิดนี้เกิดขึ้นพร้อมกันทำความเย็นและเจือจางออกซิเจน ทำให้บรรยากาศบริเวณนั้นไม่เอื้อให้เกิดการสันดาป เมื่อน้ำขนาดเล็กกระดบะตอมไม่เพียงปกคลุมผิวหน้าเพลิงไหม้อย่างทั่วถึงเท่านั้นแต่ยังสามารถดูดซับความร้อนได้อีกด้วย อนุภาคของทั้งน้ำและไนโตรเจนเข้าไปยังเพลิงไหม้พร้อมกับอากาศที่ใช้ในการลุกไหม้ ดังนั้นสารดับเพลิงทั้งสองชนิดนี้จึงดับไฟได้ลึกจนถึงแก่นกลางเชื้อเพลิง



รูปที่ 6 แสดงการทำงานใช้ระบบดับเพลิงคู่ ระหว่างน้ำและไนโตรเจน[3]

2.4 ระบบฟองทางกล (Foam System)

โฟม (Foam) หมายถึง โฟมใช้ดับเพลิงเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก มีความคงทน ไม่สลายตัวง่าย ความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันเชื้อเพลิงหรือน้ำ โฟมเกิดจากส่วนผสมของน้ำยาโฟม (อัตราส่วนผสมโฟม) น้ำ และอากาศ โดยน้ำยาโฟมกับน้ำผสมกันแล้วจะได้ส่วนผสมโฟมหรือโฟมละลายน้ำเป็นของเหลวและเมื่อเติมอากาศเข้าไป ส่วนผสมโฟมจะเป็นฟองเหมือนลูกโป่งเล็กๆ อัดแน่นรวมตัวกัน ใช้คลุมพื้นที่เพลิงไหม้ต่อเนื่องเป็นบริเวณกว้างลักษณะเป็นผ้าห่มคลุมไฟเพื่อไม่ให้ลุกลามและดับลงไปในที่สุด เหมาะสำหรับดับไฟประเภท ก (Class A) จำพวกอินทรีย์วัตถุและไฟประเภท ข (Class B) โฟมมีหลายชนิดแบ่งตามการขยายตัวของโฟม 3 ประเภทคือ โฟมขยายตัวต่ำมีการขยายตัวมากถึง 20 เท่า โฟมขยายตัวปานกลางมีการขยายตัวจาก 20 ถึง 200 เท่าและโฟมขยายตัวสูงมีการขยายตัวจาก 200 ถึง 1000 เท่า เช่น โฟมสร้างฟิล์มน้ำ (Aqueous Film Forming Concentrate, AFFF) และ โฟมสร้างฟิล์มน้ำต้านทานแอลกอฮอล์ (Alcohol Resistant-Aqueous Film Forming Foam, AR-AFFF) เป็นต้น ในเรือเดินสมุทรและเรือรบมีบางลำที่ใช้ระบบนี้ โดยเฉพาะเรือขนส่งเชื้อเพลิง ก๊าซและน้ำมัน ข้อจำกัดคือ แรงดันน้ำจากปั๊มมอเตอร์ต่ำส่งผลต่ออัตราการขยายตัวของโฟมต่ำ (Low Expansion Rate) การดับไฟจึงไม่มีประสิทธิภาพ

แนวคิดใหม่

โฟมดับเพลิงแบบบีบอัดอากาศ (Compressed Air Foam Systems, CAFS) เป็นการผสมระหว่างน้ำและโฟมดับเพลิง (Foam Agent) หลักการ CAFS ประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ชนิดคือ ปั๊มน้ำ (Water Pump) เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) และ โฟมเข้มข้น (Foam Concentrate) โดยปล่อยโฟมด้วยแรงดันอากาศที่เชื่อมต่อกับห้องผสมโฟมโดยตรงเพื่อฉีดหรือปล่อยโฟมลงบนพื้นเป้าหมาย บังคับการทำงานด้วยระบบตรวจจับอัตโนมัติหรือบังคับด้วยมือ โฟมจะถูกฉีดออกมาด้วยแรงดันอากาศทำให้คลุมผิวหน้าเชื้อเพลิงได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึง ใช้ดับไฟเกิดจากของเหลวติดไฟได้และของเหลวไวไฟ

CAFS มีประสิทธิภาพมากสุดกับไฟประเภทประเภท ก (Class A) และไฟประเภท ข (Class B) แต่ไม่สามารถใช้ดับไฟประเภท ค (Class C) ไฟประเภท ง (Class D) และไฟที่เกิดภายในถังบรรจุความดัน (Pressure Tank) ได้ผลการทดสอบ CAFS กับโฟมเข้มข้น 2 ชนิดคือ โฟมแบบฟิล์มน้ำ (Aqueous Film-Forming Foam, AFFF) กับโฟมชนิดทนแอลกอฮอล์แบบฟิล์มน้ำ (Alcohol-Resistant Aqueous Film-Forming Foam, AR-AFFF) อย่างหลังนี้จะมีอัตราการดับไฟที่เชื้อเพลิงผสมกับน้ำได้และเชื้อเพลิงประเภทไฮโดรคาร์บอนได้ดีที่สุด [17]



รูปที่ 7 แสดงการใช้ CAFS กับโฟมชนิดขยายตัวสูง AR-AFFF ดับไฟประเภท ข (Class B) ในเรือฝึกจำลองที่แผนกอุปกรณ์ดับเพลิง กองการฝึกกองเรือยุทธการ อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี (ภาพถ่ายปี พ.ศ.2562)

3. วัสดุทนไฟ (Materials)

วัสดุทนไฟ หมายถึง วัสดุที่มีอัตราค่าความต้านทานไฟ (Fire-Resistance Rating) หรือค่าการป้องกันไฟ (Fire Protection Rating) สำหรับหน่วงการลุกลามไหม้ของไฟ เช่น ประตูทางเดินในเรือ ระบบท่อต่าง ๆ ในเรือ ส่วนกัน (ผนังห้อง) เอกสารสิ่งพิมพ์ เป็นต้น โดยเป็นหนึ่งในองค์ประกอบของระบบป้องกันอัคคีภัยภายในเรือ (Passive Fire Protection) เพื่อลดการลุกลามของเปลวไฟหรือต้านทานความร้อนไม่ให้เข้าไปในพื้นที่ปิดหรือเส้นทางเดินมากเกินไปพร้อมกับป้องกันการแพร่กระจายของควันและควันพิษเพื่อไม่ให้ชีวิตและยุทธโประกรณ์ที่อยู่ข้างในพื้นทีปิดได้รับอันตรายหรือเกิดความสูญเสีย นักวัสดุวิศวกรรมได้เข้ามามีบทบาทอย่างยิ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุทนไฟ โดยปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีวัสดุด้วยกระบวนการใส่สารเติมแต่งบางตัวลงไปในวัสดุ เช่น สารหน่วงไฟเพื่อช่วยลดอัตราการลุกลามไหม้ กล่าวคือไม่ไวต่อการเกิดไฟ

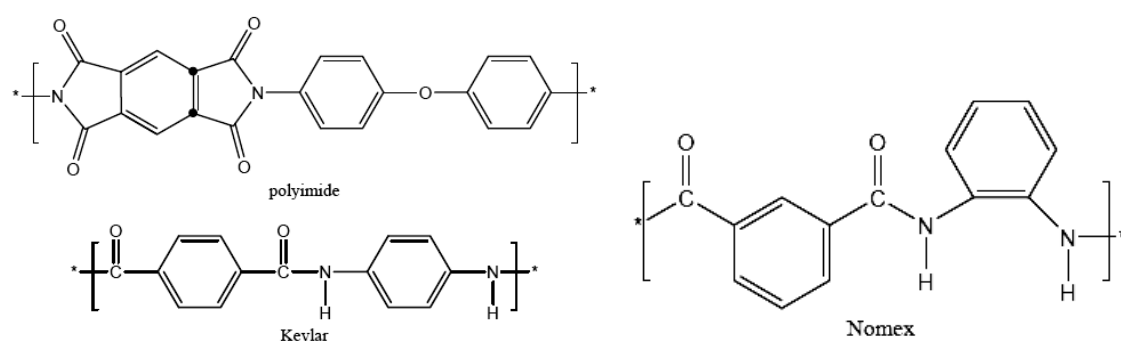
สถาบันวิจัยการก่อสร้างประเทศแคนาดา (Research in Construction) ซึ่งเป็นสาขาหนึ่งของสภาวิจัยแห่งชาติและผู้จัดทำมาตรฐานอาคารแห่งแคนาดา (NBC) กำหนดให้มีการทดสอบวัสดุป้องกันการลามไฟ (Fire Stop) ของประตูทนไฟ (Fire Doors) ในการทดสอบจะต้องทำในเตาเผาแรงดันบวก 50 ปาสกาล (Pascal) อัตราการทนไฟที่ได้จากการทดสอบ (Fire Resistance Test Rating) ตามมาตรฐาน UL 72 Standard for Tests for Fire Resistance of Record Protection Equipment สำหรับประตูทนไฟและ

วัสดุทนไฟอื่นๆ ทุกชนิด สามารถแยกประเภทการทนไฟของประตูออกเป็น ระดับคือ 3 อัตราการทนไฟ Class 100 (125) เวลาหน่วงไฟ 2 ชั่วโมง ทดสอบที่อุณหภูมิภายนอกห้องสูงถึง 2,000° F (1,090° C) อุณหภูมิในห้องเมื่อวัดที่ผิววนอกสุดของประตูทนไฟด้านที่อยู่ข้างในต้องต่ำกว่า 125° F (52° C) อัตราการทนไฟ Class 150 เวลาหน่วงไฟ 2 ชั่วโมง ทดสอบที่อุณหภูมิภายนอกห้องสูงถึง 2,000° F (1,090° C) อุณหภูมิในห้องเมื่อวัดที่ผิววนอกสุดของประตูทนไฟด้านที่อยู่ข้างในต้องต่ำกว่า 150° F (65.5° C) อัตราการทนไฟ Class 350 เวลาหน่วงไฟ 4 ชั่วโมง ทดสอบที่อุณหภูมิภายนอกห้องสูงถึง 2,000° F (1,090° C) อุณหภูมิในห้องเมื่อวัดที่ผิววนอกสุดของประตูทนไฟด้านที่อยู่ข้างในต้องต่ำกว่า 350° F (7.176° C) [18]

แนวคิดใหม่

1. วัสดุอินทรีย์ทนไฟ (Inherently Fire Retardant Organic Materials) “อะรามิด (Aramid)” ได้ถูกกำหนดขึ้น โดย The Federal Trade Commission ของประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ.2517 เนื่องจากเป็นเส้นใยที่ได้มาจากอะโรเมติกพอลิเอไมด์ Polyimides (อย่างน้อย 85% ต่อด้วยเบนซีนริง ทั้งสองด้าน (แทนที่จะเป็นโมเลกุลโซ่ตรงๆ – คล้ายเบนซีนริงในพอลิเอสเทอร์) แทนที่จะเป็นเส้นใยที่ได้มาจาก โซโมเลกุลตรงๆ แบบไนลอน บริษัทดูปองท์ (DuPont) เริ่มออกวางตลาดในปี พ.ศ.2508 โดยมีชื่อว่า “นอเม็กซ์ (Nomex)” ในตลาดปัจจุบัน พบว่ามีเส้นใยอะรามิดอยู่ 2 ชนิด ซึ่งทั้ง 2 ชนิดถือว่าเป็นเส้นใยสมรรถนะสูง โดยที่ชนิดแรก มีสมบัติในการทนทานความร้อน ซึ่งมีหมู่เมต้า - อะรามิดอยู่ Poly (*m*-phenylenediamine isophthalamide) แต่มีสมบัติความเหนียวปานกลาง และมีค่าโมดูลัสต่ำ อย่างไรก็ตามทนทานต่อความร้อน ดีเลิศ (ทนได้ 600 - 800°C) ใช้สำหรับเป็นเสื้อผ้าทนความร้อน และสมบัติเป็นฉนวนกันกระแสไฟฟ้า ตัวอย่าง เช่น เส้นใยนอเม็กซ์ (บริษัท ดูปองท์) และเส้นใยโคเน็กซ์ (บริษัท เทยีน)

ในช่วง 2513-2523 บริษัทดูปองท์ได้ออกเส้นใยชนิดที่สองในตระกูลนี้ โดยมีชื่อว่า “เคฟลาร์ (Kevlar)” Poly (*p* - phenylene terephthalamide) เส้นใยใหม่นี้มีหมู่พารา - อะรามิด ทำให้เกิดสมบัติที่ดีขึ้นหลายประการ เช่น ความแข็งแรงสูง ค่าโมดูลัสสูง มีความคงทนต่อความร้อนสูงในเรือใช้กับชุดดับเพลิง (Gear Suit) โดยโพลีเมอร์เหล่านี้แสดงตามรูปข้างล่าง [19-20]



รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างโพลิเมอร์ทางเคมีต่าง ๆ ของวัสดุทนไฟ [21]

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติต่างของเส้นใย Aramid [21]

สมบัติ	Kevlar (Dupont)	Twaron (AKZO)	Technora (Teijin)
ความแข็งแรง (gpd/GPa)	21-25/5.65-3.2	21-23/2.6-2.85	24-28/3.0-3.4
โมดูลัส (gpd/GPa)	450-1000/57-127	440-800/54-99	450-850/55-104
ความยาวเมื่อดัดยัด (%)	2-4	3.2-3.8	4.4-4.6
Tg(°C)	360	โ-	-
Tm(°C) เริ่มสลายตัว	560	-	>500
ความถ่วงจำเพาะ	1.44	1.4	1.39
ความเป็นผลึก (%)	72	71	73
การจัดเรียงตัว (%)	91	91	92
ขนาดของผลึก (nm)	91	-	23



รูปที่ 9 แสดงนักดับเพลิงในเรือ (Fire Fighter) สวมชุดดับเพลิงที่ทำจากวัสดุอินทรีย์ทนไฟ Kevlar [21]

2. เส้นใยสังเคราะห์ทนไฟ (Chemically Modified Polymers) เซรามิกไฟเบอร์ (Ceramic Fiber) เซรามิกไฟเบอร์หมายถึงเส้นใยที่ทำมาจากวัสดุเซรามิกทนความร้อนสูง บางชนิดก็อาจเป็นวัสดุสารประกอบเดี่ยวหรือผสมกัน เช่น $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 > 97\%$ (Al_2O_3 47%) หรือ $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 1\%$ ทำการหลอมแล้วพ่นกระจายในบรรยากาศที่มีความเย็น กลายเป็นเส้นใย นำไปรวมอัดเป็นก้อน แท่ง หรือทำรูปแบบต่างๆ เซรามิกไฟเบอร์ วัสดุชนิดนี้ทำได้หลายรูปแบบเป็นแผ่นคล้ายผ้าห่ม ทำเป็นชิ้นใหญ่ๆ เป็นก้อนหรือท่อได้ ส่วนมากทำจากอะลูมิเนียมซิลิเกตบริสุทธิ์ซึ่งหลอมในที่อุณหภูมิสูง และผ่านด้วยไอน้ำที่มีแรงกดสูงไปที่ส่วนผสมเหลวของอลูมินา ซิลิกา และเกาหลิน ทำให้ส่วนประกอบนี้แยกกันเป็นลักษณะไฟเบอร์ที่มีเส้นยาวขนาดต่าง ๆ กัน (4"- 12") และมีค่าความทนไฟตั้งแต่ $1,200^\circ\text{C} - 1,400^\circ\text{C}$ ไฟเบอร์ที่คุณภาพดีมากสามารถทนไฟได้สูงถึง $1,800^\circ\text{C}$ ไฟเบอร์มีน้ำหนักเบาสามารถทนต่อความร้อนอย่างรวดเร็วได้ ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงในการเผา เพราะความร้อนจะขึ้นเร็ว ในเรือใช้ทำฉนวนกันความร้อน สายสูบลดับเพลิง และวัสดุฉนวนหุ้มท่อทางต่าง ๆ ในเรือ



รูปที่ 10 โครงสร้างทางเคมีและตัวอย่างวัสดุเซรามิกไฟเบอร์ เช่น สายสูบลดับเพลิงในเรือและฉนวนบุผนังเรือ [3]

4. บทสรุป

การรวมเทคโนโลยีของทุกอุปกรณ์ดับเพลิงที่เกี่ยวข้องกันเข้ามาไว้ในที่เดียวกันในงานป้องกันและดับเพลิงในเรือ่นั้นเป็นสิ่งที่ท้าทายและควรมีของเรือแต่ละลำ โดยอาศัยการเชื่อมต่อทุกอุปกรณ์ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ทั้งอุปกรณ์ตรวจจับเพลิงแบบอินฟราเรด อุปกรณ์ตรวจจับเพลิงแบบอัลตราไวโอเล็ต อุปกรณ์ตรวจจับแสดงภาพวิดีโอแบบอินฟราเรด อุปกรณ์ตรวจจับเสียง และอุปกรณ์ตรวจจับควันแสดงภาพวิดีโอ อย่างไรก็ตามการรวมส่วนประกอบเหล่านี้เข้ากับระบบเรือเดินสมุทรที่ช่วยเพิ่มการป้องกันความเสียหายและความสามารถในการควบคุมยังรอการทดสอบ การพิสูจน์ในเรือเดินสมุทรและเรือรบ ในบางกรณีนี้เป็นเพราะข้อกำหนดเฉพาะของเรือรบ ระบบละอองน้ำแรงดันสูงระบบพ่นละอองน้ำแรงดันสูงนี้ไม่สามารถใช้ได้ด้วยท่อในเรือตามข้อกำหนดของกองทัพเรือ [3]

วัสดุทนไฟชนิดวัสดุอินทรีย์และพอลิเมอร์โดยส่วนมากพบการใช้งานในเรือเดินสมุทรมานานแต่ในเรือรบมีไม่มาก ตัววัสดุทนไฟมีทดสอบและปรับปรุงคุณสมบัติตลอดเวลาจนถึงวันนี้จึงเป็นนวัตกรรมของเหล่าบรรดานักวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะงานก่อสร้างอาคารทั้งหลาย มีบางข้อสรุปที่น่าสนใจเช่น การใช้โพลีเมอร์ทนไฟได้ดีกว่าการรวมตัวกันของสารหน่วงไฟ เทคโนโลยีการเคลือบสารป้องกันไฟบนพื้นผิววัสดุทั้งหมดเหล่านี้เป็นแนวทางที่จะป้องกันการความเสียหายในเรือ บนความท้าทายที่รอการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กองทัพเรือ .ยุทธศาสตร์กองทัพเรือ 2558 – 2567 [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: กองทัพเรือ; .2558 [สืบค้นเมื่อวันที่ 28 ม .ค.2564]. จาก :<http://www.navy.mi.th> > upload > pdf > strategic
- [2] ไกรสุนทร เข้มสุข. การพัฒนาการต่อเรือรบไทยภายใต้ความร่วมมือระหว่างกรมอุทกทหารเรือกับภาคเอกชน. วารสารกรมอุทกทหารเรือ .2563:84-76.
- [3] ความรู้พื้นฐานงานดับเพลิง .นิตยสารเซฟตี้ไลฟ์2564 .ม.ค-2563 .ธ.ค .:.)152(.
- [4] ศูนย์ศึกษายุทธศาสตร์ทหารเรือ .ความรู้เบื้องต้นงาน ปคส [อินเทอร์เน็ต] .กรุงเทพฯ: ศูนย์ศึกษายุทธศาสตร์ทหารเรือ; 2550. [สืบค้นเมื่อวันที่ 28 ม.ค .2564]. จาก:
<http://110.49.60.146/thinktank/?p=2597>
- [5] ศูนย์ศึกษายุทธศาสตร์ทหารเรือ .หลักนิยมทางทะเลของกองทัพเรือ [อินเทอร์เน็ต] .กรุงเทพฯ: ศูนย์ศึกษายุทธศาสตร์ทหารเรือ; 2550. [สืบค้นเมื่อวันที่ 28 ม.ค .2564]. จาก:
<http://110.49.60.146/thinktank/?p=2597>
- [6] John FG Wade. Navy tactics doctrine and training requirements for littoral warfare [dissertation]. California: Naval Postgraduate School; 1996.

- [7] Pehrsson SL Rose, Minor CP, Steinhurst DA, Owrutsky J., Lynch JA, Gottuk DT, et al. Phase I: FY01 Investigative Study of the Advanced Volume Sensor. NRL Memorandum Report. 2003 Jun.
- [8] Owrutsky J, Nelson HH, Steinhurst DA, Williams FW. Spectral-Based Component of the Volume Sensor Program. NRL Memorandum Report. 2003 Jul.
- [9] Gottuk DT, Harrison M, Scheffey JL, Williams FW, Farley JP, Pehrsson SL Rose. An Initial Evaluation of Video-based Fire Detection Technologies. NRL Memorandum Report. 2004 Jan.
- [10] Lynch JA, Gottuk DT, Pehrsson SL Rose, Owrutsky J, Steinhurst DA, Minor CP, et al. Volume Sensor Development Test Series 2- Lighting Conditions, Camera Settings, and Spectral and Acoustic Signatures. NRL Memorandum Report. 2004 Nov.
- [11] Steinhurst DA, Lynch JA, Gottuk DT, Owrutsky J, Nelson HH. Spectral-Based Volume Sensor Testbed Algorithm Development, Test Series VS2. NRL Memorandum Report. 2005 Jan.
- [12] Lynch JA, Gottuk DT, Owrutsky J, Steinhurst DA, Minor CP, Wales SC, et al. Volume Sensor Development Test Series 5- Multi-Component System. NRL Memorandum Report. 2005 Dec.
- [13] Steinhurst DA, Owrutsky J, Steinhurst DA, Minor CP, Wales SC, et al. Spectral-Based Volume Sensor Prototype, Post-VS4 Test Series Algorithm Development. NRL Memorandum Report. 2009 Apr.
- [14] Steinhurst DA, Minor CP, Wales SC, Burchfield T, Pehrsson SL Rose. Volume Sensor - Canadian Demonstrator Prototype - User's Guide. NRL Memorandum Report. 2011 Mar.
- [15] Klote JH. Smoke Control in The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. National Fire Protection Association. 1988.
- [16] Kim A, Crampton G, Bijloos M. Fire Protection of Submarine's Machinery Space and Electronic Equipment Cabinets. National Research Council of Canada. 2011 Feb.