การจำลองพลศาสตร์อัคคีภัยเพื่อการออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัย สำหรับเครื่องล้างชิ้นงานในโรงงานอุตสาหกรรม

FIRE DYNAMIC SIMULATION FOR THE DESIGN OF FIRE PROTECTION SYSTEM IN INDUSTRIAL WASHING MACHINE

ธวัชชัย สารพรรณ์ และ ชัยยากร จันทร์สุวรรณ์
สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันอัคคีภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
E-mail: t_saraphan@hotmail.com, fengckj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

เครื่องล้างชิ้นงานในอุตสาหกรรมเป็นเครื่องที่มีใช้ทั่วไปในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ โดยที่หนึ่งในสารที่ใช้ในกระบวนการเป็นสารไวไฟ ทำให้มีความเสี่ยงสูงในการเกิดการลุกไหม้ และก่อให้เกิดความเสียหาย บทความนี้นำเสนอการออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัยสำหรับเครื่องล้างชิ้นงานในโรงงานอุตสาหกรรม ตามมาตรฐาน NFPA 12 สำหรับเครื่องล้างชิ้นงานขนาดกว้าง 2.5 เมตร ยาว 8.8 เมตร สูง 2.1 เมตร และสารไวไฟที่ใช้มีค่าการปลดปล่อยความร้อน 841.7 kW/m^2 พบว่าระบบดับเพลิง ที่เหมาะสมคือระบบ Local Application ชนิด Rate by Area ดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ติดตั้งหัวฉีด 2 ตัว ที่ความสูง 1 เมตร อัตราการไหล 24 กิโลกรัมต่อนาที ต่อหัว ฉีดนาน 30 วินาที

การตรวจสอบผลการออกแบบทำโดยการจำลองพลศาสตร์อัคคีภัยด้วยโปรแกรม Fire Dynamics Simulator (FDS) โดยศึกษาจากสถานการณ์ที่เลวร้ายที่สุดที่อาจเกิดขึ้นภายในเครื่องล้างชิ้นงาน คือกรณีเกิดความร้อนบริเวณอ่างบรรจุสารไวไฟจนทำให้เกิดเพลิงไหม้ขึ้น จากการจำลองพบว่าระบบดับเพลิงตามที่ออกแบบสามารถดับเพลิงที่เกิดขึ้นภายในเครื่องล้างชิ้นงานใช้ระยะเวลา 11 วินาที อุณหภูมิลดลงสู่ภาวะปกติเป็นไปตามมาตรฐาน NFPA 12 ซึ่งกำหนดให้ต้องดับเพลิงได้ภายในระยะเวลาไม่เกิน 30 วินาทีหลังฉีดสาร และปริมาณออกซิเจนลดลงต่ำกว่า 5 % ใช้ระยะเวลา 20 วินาที ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่สามารถติดไฟได้อีกต่อไป

คำสำคัญ : การป้องกัน อัคคีภัย พลศาสตร์ เครื่องล้างชิ้นงาน ระบบดับเพลิง

Abstract

Industrial washing machines are commonly used in the industrial part washing process. Since one of the substances used in the process is flammable liquid, there is a high risk of fire that may lead to human injury and property damage. This article presents the design of a fire protection system for a 2.5 × 8.8 × 2.1 m industrial washing machine in accordance with the NFPA 12. The heat release rate of a flammable liquid is 841.7 kW/m^2. The appropriate fire protection system is a Rate-by-Area, Local Application, carbon dioxide system with 2 nozzles installed at a height of 1 meter over a dipping tank at a flow rate of 24 kg per minute per nozzle for 30 seconds.

The design validation was done by a fire dynamics simulation with the Fire Dynamics Simulator (FDS) program at worst case scenario when the fire occurred in the dipping tank that contained flammable liquid. From the simulation, it was found that the fire extinguishing system was able to extinguish the fire within 11 seconds where the temperature decreased to a normal level according to the NFPA 12, which required a maximum extinguished time of 30 seconds and the oxygen content decreased below 5% within 20seconds, which was a non-flammable state.

Keywords :

protection; fire; dynamics; washing machine; fire extinguishing system

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมประมาณ 80,000 แห่ง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นปีละกว่า 5,000 แห่ง ทั้งนี้จากสถิติข้อมูลการเกิดอัคคีภัยในโรงงานอุตสาหกรรม [1] ในปี 2556-2557 พบว่ามีเหตุเพลิงไหม้เกิดขึ้น 71 ครั้งเพิ่มขึ้นจากปี 2555 ที่มีเหตุเพลิงไหม้จำนวน 50 ครั้ง ขณะที่ในช่วงเดือนตุลาคม 2557 ถึงกุมภาพันธ์ 2558 เกิดเหตุเพลิงไหม้ถึง 43 ครั้งหรือเฉลี่ย 9 ครั้งต่อเดือนและพบว่าโรงงานที่เกิดเหตุไฟไหม้ส่วนใหญ่เป็นโรงงานที่ตั้งมานาน โดยในปี 2557 โรงงานที่เกิดเหตุมีอายุ 11 ปีขึ้นไป มีจำนวน 133 โรงงาน คิดเป็น 57% ของโรงงานที่เกิดอัคคีภัยทั้งหมด รองลงมาคือ ช่วงอายุ 6-10 ปี จำนวน 67 โรงงาน คิดเป็น 29% และช่วงอายุ 1-5 ปี จำนวน 35 โรงงาน คิดเป็น 14% ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการจัดการและออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัยตามมาตรฐานเพื่อป้องกันการเกิดเพลิงไหม้ หรือในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ขึ้นจะสามารถควบคุมเพลิงไม่ให้เกิดการลุกลามจนถึงขั้นร้ายแรง เพื่อป้องกันและลดความสูญเสียทั้งร่างกายและทรัพย์สินต่อไป

1.1 เครื่องล้างชิ้นงานอุตสาหกรรม ภาพที่ 1 แสดงเครื่องล้างชิ้นงานในอุตสาหกรรมทำหน้าที่ในการล้างคราบสกปรก คราบน้ำมันและเศษวัสดุที่ติดอยู่บนชิ้นงานในกระบวนการผลิต

ภาพที่ 1 แสดงเครื่องล้างชิ้นงาน

เครื่องล้างชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาศึกษามีขนาดกว้าง 2.5 เมตร ยาว 8.8 เมตร และสูง 2.1 เมตร ภายในเครื่องมีการจัดแบ่งเป็นห้องๆ ในแต่ละห้องมีอ่างบรรจุน้ำยาที่ต่างกันเพื่อล้างชิ้นงานให้สะอาด อ่างล้างชิ้นงานมีขนาดกว้าง 500 มิลลิเมตร และยาว 700 มิลลิเมตร เครื่องล้างชิ้นงานมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ โครงห่อหุ้ม (Enclosure) ทำมาจากแผ่นโลหะ (Steel Sheet) ซึ่งสามารถรับแรงทางกลจากภายนอกได้เพียงพอต่อสภาพการใช้งาน โดยภายในโครงเครื่องประกอบด้วย ห้องล้างชิ้นงานสำหรับกระบวนการล้างในขั้นตอนต่างๆ 11 ขั้นตอน ประกอบด้วยอ่างที่ 1 ใช้น้ำยา NB-20 โดยจุ่มชิ้นงานลงในน้ำยาแล้วเขย่าในแนวดิ่งเพื่อล้างคราบไขมันหรือเศษหยาบที่อยู่บนชิ้นงาน อ่างที่ 2-3 ใช้น้ำยาชนิดเดียวกับในขั้นตอนแรก ร่วมกับเครื่อง Ultrasonic เพื่อให้ชิ้นงานสะอาดมากขึ้น อ่างที่ 4-6 เป็นการล้างด้วยน้ำเปล่า อ่างที่ 7 จุ่มน้ำมัน Clean MNS เพื่อไล่น้ำที่ติดอยู่บนชิ้นงานออก อ่างที่ 8-9 จุ่มน้ำมันกันสนิม Rust fighter F-2360 ซึ่งเป็นสารไวไฟ และอ่างที่ 10-11 เป่าลมให้แห้งจึงเสร็จสิ้นกระบวนการ

1.2 การเกิดเพลิงไหม้ภายในเครื่อง เพลิงไหม้เกิดจากเชื้อเพลิงได้รับความร้อนสูงถึงจุดวาบไฟเมื่อมีออกซิเจนซึ่งเป็นตัวช่วยการเผาไหม้ในปริมาณที่เหมาะสม เชื้อเพลิงจะลุกติดไฟได้ [2] แหล่งความร้อนและประกายไฟสามารถเกิดได้จากสาเหตุเช่น ความร้อนที่จุดต่อสายไฟที่เดินภายในเครื่อง ความร้อนจากการทำงานผิดปกติของอุปกรณ์ทำความร้อน ซึ่งโดยปกติจะมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิต่อร่วมอยู่ด้วย หากอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิทำงานผิดปกติไม่สามารถปลดวงจรออกเมื่อความร้อนเกินค่าที่กำหนดไว้ เมื่อความร้อนเพิ่มสูงขึ้นถึงค่าหนึ่งจะเกิดการลุกไหม้ของสารไวไฟและวัตถุติดไฟที่มีอยู่ในบริเวณดังกล่าวได้ ภาพที่ 2 แสดงเครื่องที่เกิดเพลิงไหม้จากสาเหตุตัวควบคุมความร้อนขัดข้อง

ภาพที่ 2 เครื่องล้างชิ้นงานที่เกิดเพลิงไหม้

การเกิดเพลิงไหม้ในเครื่องล้างชิ้นงานเกิดได้จากการลุกติดไฟของสารไวไฟในกระบวนการผลิต คือน้ำมันกันสนิม Rust fighting F-2360 ซึ่งมีส่วนผสมประกอบด้วย Hydrodesulfurized heavy 60-80% 1,2,4- Trimethylbenzene 10-15% 1,3,4 Trimethylbenzene 1-5% Xylene 1.0-5.0% Propyl benzene 1.0-2.5% และ Cumene 1.0-2.5% สารนี้จะอยู่ในสถานะของเหลวที่อุณหภูมิห้อง มีสีเหลืองใส มีจุดเดือดมากกว่า 187 องศาเซลเซียส มีจุดวาบไฟที่ 46 องศาเซลเซียส มีความเข้มข้นสูงสุดที่สามารถลุกติดไฟได้เมื่อผสมกับอากาศเท่ากับ 6% ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถลุกติดไฟได้เมื่อผสมกับอากาศเท่ากับ 0.6% มีความดันไอน้อยกว่า 0.1 kPa ที่ 20 องศาเซลเซียส มีความเสถียร ไม่ละลายน้ำและมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ เมื่อผสมกันจะลอยอยู่บนผิวน้ำ

จากเหตุผลข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบระบบดับเพลิงที่เหมาะสมสำหรับเครื่องล้างชิ้นงานในโรงงานอุตสาหกรรม ที่มีส่วนประกอบของของเหลวไวไฟ ภายใต้มาตรฐานการป้องกันอัคคีภัย NFPA 12 และใช้การจำลองพลศาสตร์อัคคีภัย ด้วยโปรแกรม Fire Dynamic Simulator (FDS) เพื่อตรวจสอบและยืนยันประสิทธิภาพของระบบดับเพลิงที่ได้ เพื่อเป็นแนวทางในการยกระดับมาตรการการป้องกันและปรับปรุงระบบป้องกันอัคคีภัยให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

2. วิธีดำเนินการ

ในระบบดับเพลิงมีการใช้สารดับเพลิงหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของเชื้อเพลิงและพื้นที่ใช้งาน เช่น น้ำ เหมาะกับเชื้อเพลิงประเภท ไม้ กระดาษ พลาสติก หากฉีดเป็นสเปรย์หรือหมอกน้ำก็สามารถใช้กับของเหลวไวไฟได้ โฟม เหมาะกับของเหลวไวไฟโดยจะเข้าไปเคลือบผิวเพื่อตัดออกซิเจนของเชื้อเพลิงออก แต่ไม่เหมาะกับพื้นที่หรืออุปกรณ์ที่มีไฟฟ้า [3] ผงเคมีแห้ง สามารถดับเพลิงได้หลายชนิดแต่จะทิ้งคราบสกปรกทำให้ผลิตภัณฑ์เสียหายและเสียเวลาในการทำความสะอาดพื้นที่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เหมาะกับก๊าซหรือของเหลวไวไฟ หรือหากนำไปใช้กับเชื้อเพลิงประเภทไฟไหม้ลึกควรออกแบบเป็นระบบท่วมห้อง ไม่เหมาะกับพื้นที่เปิดโล่งมีลมแรง [4]

ในการออกแบบระบบดับเพลิงนี้เลือกใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องมาจากสามารถดับเพลิงเชื้อเพลิงประเภทของเหลวไวไฟได้เป็นอย่างดี ไม่เกิดพิษกับมนุษย์ ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม มีราคาถูก จัดหาได้ง่าย ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง ไม่นำไฟฟ้า ไม่เกิดความสกปรกหลังฉีดสาร ระบบดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามมาตรฐาน NFPA12 มี 2 วิธี [5] ดังนี้

1. ระบบ Total Flooding คือการฉีดสารดับเพลิงด้วยอัตราการไหลคงที่ผ่านท่อและหัวฉีดเข้าไปยังพื้นที่ปิดซึ่งสามารถกักเก็บความเข้มข้นสารไว้ได้เป็นระยะเวลาหนึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ไฟไหม้ผิว (Surface fires) ที่เกิดจากของเหลวไวไฟ ก๊าซและของแข็ง โดยการฉีดสารเข้าไปอย่างรวดเร็วด้วยปริมาณที่เพียงพอในการลดออกซิเจนให้ถึงจุดที่ไม่สามารถติดไฟต่อไปได้ และไฟไหม้ลึก (Deep-seated fires) สำหรับวัสดุ Class A และ C โดยการฉีดสารเข้าไปอย่างรวดเร็วด้วยปริมาณที่เพียงพอในการลดออกซิเจนให้ถึงจุดที่ไม่สามารถติดไฟต่อไปได้ และรักษาความเข้มข้นไว้ระยะเวลาหนึ่ง [6]

2. ระบบ Local Application เป็นการฉีดสารดับเพลิงตรงไปที่พื้นที่อันตรายโดยตรง เหมาะสำหรับพื้นที่เปิดโล่ง ไม่สามารถกักเก็บสารไว้ได้หรือภายในห้องที่มีช่องเปิดจำนวนมากและไม่สามารถปิดได้ ซึ่งจะทำให้ต้องสูญเสียสารดับเพลิงจำนวนมาก

เนื่องจากเครื่องล้างชิ้นงานมีช่องเปิดจำนวนมากจึงไม่เหมาะสมกับระบบ Total Flooding อีกทั้งเป็นการเผาไหม้แบบ Surface Fire ดังนั้นจึงออกแบบเป็นระบบ Local Application ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.1 Rate by Volume เหมาะสำหรับอุปกรณ์หรือวัตถุรูปทรง 3 มิติ ที่อยู่ในพื้นที่เปิด โดยจะติดตั้งหัวฉีดเหนือพื้นที่ป้องกัน เล็งไปยังพื้นที่อันตราย โดยพื้นที่อันตราย กว้าง 2.5 เมตร ยาว 8.8 เมตรและสูง 2.1 เมตร คิดเป็นปริมาตรเท่ากับ 46.2 ลูกบาศก์เมตร มี 2 ช่องเปิดขนาดยาว 0.5 เมตร สูง 0.85 เมตร (เนื่องจากเป็นช่องเปิดจึงชดเชยเพิ่ม 0.61 เมตร ตามมาตรฐาน NFPA12) ดังนั้นปริมาตรห้องสมมูลคือ (2.5×8.8×2.1) + 2(0.5×0.85×0.61) = 46.72 ลูกบาศก์เมตร พื้นที่ทั้งหมดคือ 2(8.8×2.1) + 2(2.5×2.1) = 47.46 ตารางเมตร พื้นที่ช่องเปิดคือ 2(0.5×0.85) = 0.85 ตารางเมตร ร้อยละของช่องเปิดคือ (0.85/47.46) = 0.018 ร้อยละของพื้นที่ปิดคือ 1-0.018 = 0.982

ตามมาตรฐาน NFPA12 กำหนดให้อัตราการไหลต่อหน่วยปริมาตร q เท่ากับ

$$q = 1 - (0.75 \times A_c) \quad (1)$$

เมื่อ A_c คือ Enclosed percentage ดังนั้นจะได้ $q = 1 - 0.75 \times 0.982 = 0.2635$ (kg/min/m^3)

ตามมาตรฐาน NFPA12 กำหนดให้ System Discharge Rate สำหรับในกรณีนี้คือ 16 (kg./min./m^3) ปรับอัตราการไหล (0.2635×16×46.72) เท่ากับ 196.97 (kg./min./m^3) หาจำนวนหัวฉีดจาก (อัตราการไหลของระบบ / อัตราการไหลขั้นต่ำของหัวฉีดที่ความสูงติดตั้ง) โดยจากตารางที่ 1 จะได้จำนวนหัวฉีดเท่ากับ 196.97/24 เท่ากับ 8.2 ปัดขึ้นเป็น 9 หัว ปรับอัตราการไหลเท่ากับ 9 x 24 = 216 (kg/min.) ดังนั้นปริมาณสารดับเพลิงที่สำหรับการฉีด 30 วินาทีคือ (216 x 1.4 (ชดเชย CO_2 เหลว) x 0.5) = 151.2 kg หากใช้ถัง 34 kg จะได้ (151.2 / 34) = 4.44 ปัดเป็น 5 ถัง

2.2 Rate by Area เหมาะกับพื้นที่ 2 มิติที่อยู่ในพื้นที่เปิด เช่น อ่างน้ำมัน Dip Tank และ Drain Board โดยติดตั้งหัวฉีดให้ครอบคลุมพื้นที่อันตรายทั้งหมด การออกแบบระบบ Local Application ดับเพลิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบ Rate by Area พื้นที่อันตรายเหนืออ่างน้ำมัน กว้าง 0.4 เมตร ยาว 1.16 เมตร จากตารางที่ 1 เมื่อติดตั้งหัวฉีดที่ความสูง 1 เมตรจะครอบคลุมพื้นที่อันตราย 0.88 x 0.88 ตารางเมตร ดังนั้นต้องใช้หัวฉีด 2 หัว อัตราการไหลที่ต้องการคือ 24 กิโลกรัมต่อนาทีต่อหัวฉีดนาน 30 วินาที ดังนั้นต้องใช้สารดับเพลิง 24 กิโลกรัม

ตารางที่ 1 Nozzle Coverage Chart [7]

Nozzle Height (m)	Flow Rate (kg/min.)	Liquid Surface Side of square (m)
0.91	20.5	0.82
0.99	22.2	0.85
1.07	24.0	0.88

จากการคำนวณ ระบบ Local Application แบบ Rate by Area จะใช้สารดับเพลิงน้อยกว่า และกรณีนี้ทราบตำแหน่งพื้นที่อันตรายอยู่แล้ว จึงเป็นระบบดับเพลิงที่เหมาะสมกับเครื่องล้างชิ้นงาน

โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองพลศาสตร์อัคคีภัยประกอบด้วย โปรแกรม Fire Dynamics Simulator Version 5.0 ของ National Institute of Standard and Technology ใช้สำหรับประมวลผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข [8] โปรแกรม PyroSim 2008 revision 2012.1.1101 ของหน่วยงาน Thunderhead Engineering Consultant, Inc. ใช้สำหรับสร้างแบบจำลอง และโปรแกรม Smoke view ของ National Institute of Standard and Technology (NIST) ใช้สำหรับแสดงผลการจำลอง

โปรแกรม FDS ใช้หลักการวิเคราะห์เชิงตัวเลขซึ่งต้องการทรัพยากรคอมพิวเตอร์จำนวนมาก ความละเอียดและความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับขนาดกริดที่ใช้ ดังนั้นการหาขนาดกริดที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็น ซึ่งทำโดยการสร้างแบบจำลองเพลิงไหม้จากข้อมูลที่รวบรวมไว้ อ้างอิงจากขนาดเท่าของจริง โดยใช้โปรแกรม Pyrosim 2008 กำหนดขนาดโครงข่ายของเพลิง (Fire Mesh) ขนาดกว้าง

2.5 เมตร ยาว 9.0 เมตร สูง 2.1 เมตร เกิดความร้อนบริเวณอ่างบรรจุสารไวไฟ ถังที่ 8 และ 9 กำหนดค่าการปลดปล่อยความร้อนของสารไวไฟที่ใช้เท่ากับ 841.7 kW/m^2 ในการทดลองนี้กำหนดขนาดกริดเพื่อการเปรียบเทียบ 3 ขนาดคือ กริดหยาบ ความยาวด้าน 0.08 เมตร กริดปานกลาง ความยาวด้าน 0.05 เมตร และกริดละเอียด ความยาวด้าน 0.03 เมตร โดยค่าความต่างอุณหภูมิระหว่างกริดหาได้จาก

$$[(T_C - T_M) / T_M] \times 100 \quad (2)$$

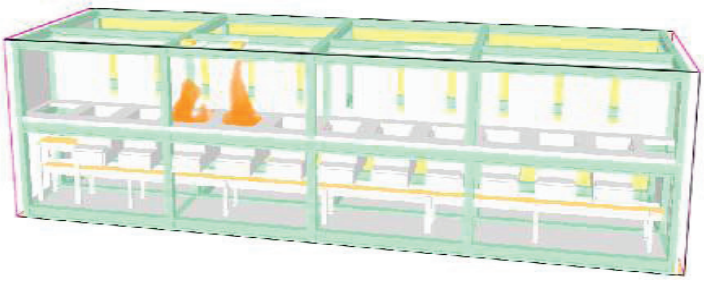
$$[(T_M - T_{UF}) / T_{UF}] \times 100 \quad (3)$$

T_C = อุณหภูมิเฉลี่ยของกริดหยาบ (องศาเซลเซียส)

T_M = อุณหภูมิเฉลี่ยของกริดปานกลาง (องศาเซลเซียส)

T_{UF} = อุณหภูมิเฉลี่ยของกริดละเอียด (องศาเซลเซียส)

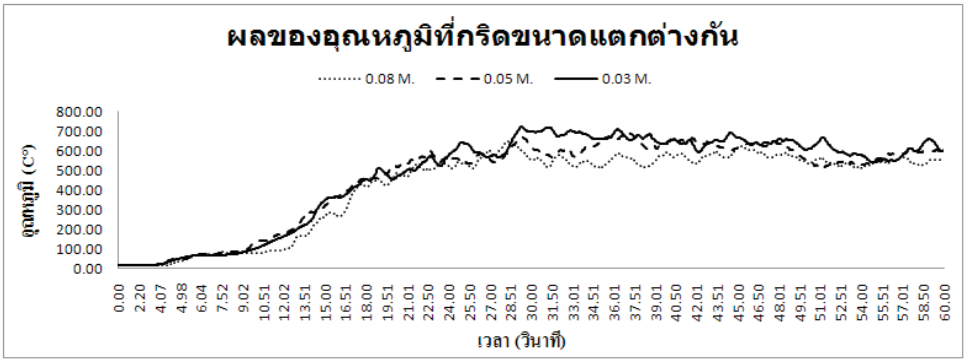
จากตารางที่ 2 และภาพที่ 4 พบว่ากริดหยาบขนาด 0.08 เมตร มีระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลน้อยที่สุดคือ18 นาที กริดปานกลางขนาด 0.05 เมตร มีระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผล 4 ชั่วโมงและกริดละเอียดขนาด 0.03 เมตรใช้เวลาในการประมวลผล 20.67 ชั่วโมง โดยค่าความต่างอุณหภูมิระหว่างกริดหยาบและกริดปานกลางอยู่ที่ -7.91% และค่าความต่างอุณหภูมิระหว่างกริดปานกลางและกริดละเอียดอยู่ที่ -5.4% ซึ่งพบว่ากริดปานกลางมีระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลและค่าความต่างอุณหภูมิอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ โดยภาพที่ 3 แสดงเปลวไฟที่เกิดขึ้นในแบบจำลองจากการใช้กริดปานกลางขนาด 0.05 เมตร



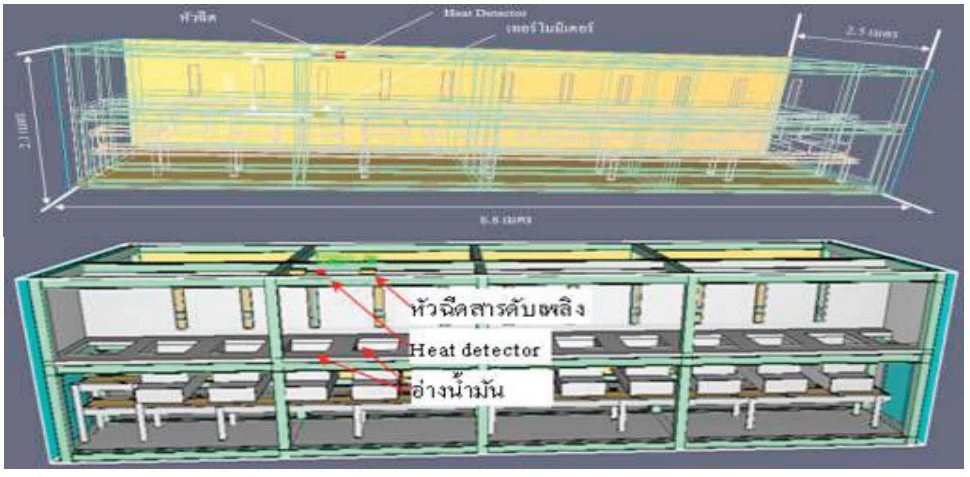
ภาพที่ 3 รูปแบบเปลวไฟที่เกิดขึ้นในการจำลอง

ตารางที่ 2 ผลของเวลาในการคำนวณขนาดกริดแต่ละขนาดโครงข่ายเพลิงไหม้

ความละเอียด	จำนวนกริด			ขนาดกริด (เมตร)			อุณหภูมิเฉลี่ย (C°)	CPU. Time
	NPX	NPY	NPZ	ΔX	ΔY	ΔZ		
C	120	30	25	0.08	0.08	0.08	558.11	18 min
M	170	50	40	0.05	0.05	0.05	606.06	4 hr
UF	320	90	80	0.03	0.03	0.03	640.68	20.67 hr



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ของปริมาตรกริดและเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์



ภาพที่ 5 แบบจำลองที่สร้างขึ้นมาตามแบบจริง

เครื่องล้างชิ้นงานในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยโครงสร้าง ดังภาพที่ 6 และมีพื้นที่เปิดตามขนาดและตำแหน่งจริง กำหนดให้จุดต้นเพลิงเกิดขึ้นที่อ่างน้ำมันที่ 9 เนื่องจากเป็นอ่างที่มีของเหลวไวไฟ ซึ่งค่า Heat Release Rate เท่ากับ 841.07 kW/m^2 ตำแหน่ง Heat Detector ติดตั้งที่ความสูง 1 เมตรเหนืออ่างที่ 9 ทำงานเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องเท่ากับ 74 องศาเซลเซียส มีผลให้ช่องลม (Vent) ซึ่งกำหนดให้ทำหน้าที่เสมือนหัวฉีด เปิดและฉีดสารคาร์บอนไดออกไซด์เข้ามาในเครื่องล้างชิ้นงาน โดยติดตั้งหัวฉีดสองตัวที่ความสูง 1 เมตรเหนืออ่างน้ำมันดังภาพที่ 5 กำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นในเครื่องล้างชิ้นงานเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส ใช้กริดละเอียดปานกลางในการจำลอง โดยวัดผลของอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนบนอ่างน้ำมันที่ 9 เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบดับเพลิง

ภาพที่ 6 แสดงเครื่องจักรที่ใช้ในการจำลอง

3. ผลการศึกษา

3.1 ผลของอุณหภูมิ การวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม FDS (Fire Dynamics Simulator) พิจารณาทั้งหมด 5 กรณีคือ

กรณีที่ 1 คือไม่มีระบบดับเพลิง เพื่อดูผลของอุณหภูมิและออกซิเจนในสถานการณ์ที่ไม่มีการติดตั้งระบบดับเพลิง

กรณีที่ 2 คืออัตราการไหล 17.6 กิโลกรัมต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราการไหลตามมาตรฐานของหัวฉีดเพื่อดูผลของอุณหภูมิและออกซิเจนเมื่อฉีดสารที่อัตราการไหลน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน NFPA 12 Local Application-Rate by Area (กรณีที่ 4)

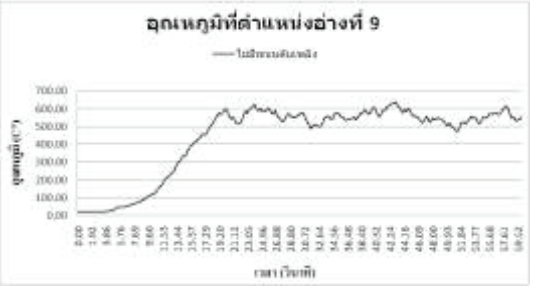
กรณีที่ 3 คืออัตราการไหล 24 กิโลกรัมต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราการไหลตามมาตรฐานของหัวฉีด เพื่อดูผลของอุณหภูมิและออกซิเจนเมื่อฉีดสารที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้นจากกรณีที่ 2 แต่น้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณตามมาตรฐาน NFPA 12 Local Application-Rate by Area (กรณีที่ 4)

กรณีที่ 4 คืออัตราการไหล 48 กิโลกรัมต่อนาที ซึ่งได้มาจากการคำนวณตามมาตรฐาน NFPA 12 Local Application-Rate by Area และ

กรณีที่ 5 คืออัตราการไหล 216 กิโลกรัมต่อนาที ซึ่งได้มาจากการคำนวณตามมาตรฐาน NFPA 12 Local Application-Rate by Volume

โดยในทุกกรณีติดตั้งตัววัดอุณหภูมิและตัววัดปริมาณออกซิเจนในอ่างที่ 9 เนื่องจากเป็นอ่างที่มีของเหลวไวไฟซึ่งเป็นจุดต้นเพลิง

กรณีที่ 1 กำหนดให้ไม่มีการฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเพื่อจำลองสถานการณ์ไม่มีการติดตั้งระบบดับเพลิง



ภาพที่ 7 แสดงอุณหภูมิที่ระยะเวลาต่างๆ กรณีไม่มีระบบดับเพลิง

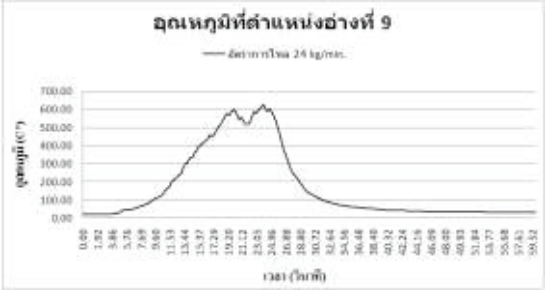
จากภาพที่ 7 ที่เวลาเริ่มต้นการจำลอง อุณหภูมิในเครื่องเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส จากนั้นเริ่มเกิดเพลิงไหม้ในเครื่องล้างชิ้นงาน โดยต้นเพลิงอยู่ที่อ่างน้ำมันที่ 9 ที่เวลา 15 วินาทีของจำลอง อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมาอยู่ที่ 366 องศาเซลเซียส ที่เวลา 25 วินาที อุณหภูมิเท่ากับ 582 องศาเซลเซียส ที่เวลา 35 วินาที อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยมาอยู่ที่ 575 องศาเซลเซียส ที่เวลา 45 วินาที อุณหภูมิอยู่ที่ 581 องศาเซลเซียส และที่เวลา 55 วินาที อุณหภูมิอยู่ที่ 547 องศาเซลเซียส

กรณีที่ 2 กำหนดอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 17.6 กิโลกรัมต่อนาที

ภาพที่ 8 แสดงอุณหภูมิที่ระยะต่างๆ ของอัตราการไหล 17.6 kg/min

จากภาพที่ 8 ที่เวลาเริ่มต้นการจำลองอุณหภูมิในเครื่องเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส จากนั้นเริ่มเกิดเพลิงไหม้ในเครื่องล้างชิ้นงาน โดยต้นเพลิงอยู่ที่อ่างน้ำมันที่ 9 ที่เวลา 15 วินาทีของจำลองอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมาอยู่ที่ 366 องศาเซลเซียส ที่เวลา 25 วินาที อุณหภูมิเท่ากับ 582 องศาเซลเซียส ที่เวลานี้ Heat detector มีอุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดที่ heat detector เริ่มทำงาน สั่งฉีดสารดับเพลิงเข้ามาในเครื่องล้างชิ้นงาน ที่เวลา 35 วินาที อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วมาอยู่ที่ 81 องศาเซลเซียส ที่เวลา 45 วินาที อุณหภูมิลดลงมาอยู่ที่ 50 องศาเซลเซียส ที่เวลา 55 วินาทีซึ่งเป็นเวลาหลังจากฉีดสารมาได้ 31 วินาที อุณหภูมิลดลงมาที่ 42 องศาเซลเซียส ซึ่งที่เวลานี้สารดับเพลิงได้ฉีดหมดแล้วแต่อุณหภูมิยังไม่เข้าสู่ภาวะปกติ ดังนั้นที่อัตราการไหลนี้ไม่สามารถดับเพลิงในเครื่องล้างชิ้นงานได้

กรณีที่ 3 กำหนดอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 24 กิโลกรัมต่อนาที



ภาพที่ 9 แสดงอุณหภูมิที่ระยะเวลาต่างๆ ของอัตราการไหล 24 kg/min

จากภาพที่ 9 ที่เวลาเริ่มต้นการจำลองอุณหภูมิในเครื่องเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส จากนั้นเริ่มเกิดเพลิงไหม้ในเครื่องล้างชิ้นงาน โดยต้นเพลิงอยู่ที่อ่างน้ำมันที่ 9 ที่เวลา 15 วินาทีของจำลองจะเห็นว่าอุณหภูมิ เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมาอยู่ที่ 366 องศาเซลเซียส ที่เวลา 25 วินาที อุณหภูมิเท่ากับ 584 องศาเซลเซียส ที่เวลานี้ Heat detector มีอุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดที่ heat detector เริ่มทำงาน สั่งฉีดสารดับเพลิงเข้ามาในเครื่องล้างชิ้นงาน ที่เวลา 35 วินาที อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วมาอยู่ที่ 64 องศาเซลเซียส ที่เวลา 45 วินาที อุณหภูมิลดลงมาอยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส ที่เวลา 55 วินาที ซึ่งเป็นเวลาหลังจากฉีดสารมาได้ 31 วินาที อุณหภูมิลดลงมาที่ 30 องศาเซลเซียสซึ่งที่เวลานี้สารดับเพลิงได้ฉีดหมดแล้วแต่อุณหภูมิยังไม่เข้าสู่ภาวะปกติ ดังนั้นที่อัตราการไหลนี้ไม่สามารถดับเพลิงในเครื่องล้างชิ้นงานได้

กรณีที่ 4 กำหนดอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 48 กิโลกรัมต่อนาที

ภาพที่ 10 แสดงอุณหภูมิที่ระยะเวลาต่างๆ ของอัตราการไหล 48 kg/min

จากภาพที่ 10 ที่เวลาเริ่มต้นการจำลอง อุณหภูมิในเครื่องเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส จากนั้นเริ่มเกิดเพลิงไหม้ในเครื่องล้างชิ้นงาน โดยต้นเพลิงอยู่ที่อ่างน้ำมันที่ 9 ที่เวลา 15 วินาทีของอุณหภูมิ เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมาอยู่ที่ 366 องศาเซลเซียส ที่เวลา 25 วินาที อุณหภูมิเท่ากับ 558 องศาเซลเซียส ที่เวลานี้ Heat detector มีอุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดที่ heat detector เริ่มทำงาน สั่งฉีดสารดับเพลิงเข้ามาในเครื่องล้างชิ้นงาน ที่เวลา 35 วินาที อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วมาอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส ที่เวลา 45 วินาทีซึ่ง อุณหภูมิลดลงมาอยู่ที่ 22 องศาเซลเซียส

ที่เวลา 55 วินาทีซึ่งเป็นเวลาหลังจากฉีดสารมาได้ 31 วินาที อุณหภูมิลดลงมาที่ 21 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิปกติ ดังนั้นที่อัตราการไหลนี้สามารถดับเพลิงในเครื่องล้างชิ้นงานได้

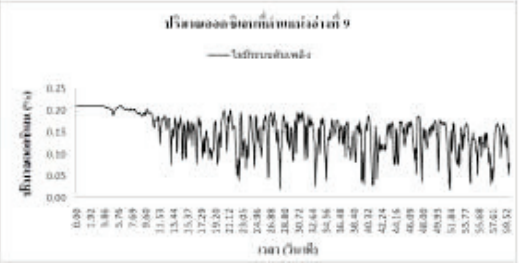
กรณีที่ 5 กำหนดอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 216 กิโลกรัมต่อนาที ตามการออกแบบ Rate-By-Volume

ภาพที่ 11 แสดงอุณหภูมิที่ระยะเวลาต่างๆ ของอัตราการไหล 216 kg/min

จากภาพที่ 11 ที่เวลาเริ่มต้นการจำลองอุณหภูมิในเครื่องเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส จากนั้นเริ่มเกิดเพลิงไหม้ในเครื่องล้างชิ้นงาน โดยต้นเพลิงอยู่ที่อ่างน้ำมันที่ 9 ที่เวลา 15 วินาทีของอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมาอยู่ที่ 366 องศาเซลเซียส ที่เวลา 25 วินาที อุณหภูมิเท่ากับ 434 องศาเซลเซียส ที่เวลานี้ Heat detector มีอุณหภูมิ 73 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดที่ heat detector เริ่มทำงาน สั่งฉีดสารดับเพลิงเข้ามาในเครื่องล้างชิ้นงาน ที่เวลา 35 วินาที อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วมาอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส ที่เวลา 45 วินาที อุณหภูมิลดลงมาอยู่ที่ 21 องศาเซลเซียส ที่เวลา 55 วินาทีซึ่งเป็นเวลาหลังจากฉีดสารมาได้ 31 วินาที อุณหภูมิลดลงมาที่ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิปกติ ดังนั้นที่อัตราการไหลนี้สามารถดับเพลิงในเครื่องล้างชิ้นงานได้

3.2 ปริมาณออกซิเจนในเครื่องล้างชิ้นงาน การวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม FDS (Fire Dynamics Simulator) พิจารณาทั้งหมด 5 กรณีคือ กรณีที่ 1 คือไม่มีระบบดับเพลิง กรณีที่ 2 คืออัตราการไหล 17.6 กิโลกรัมต่อนาที กรณีที่ 3 คืออัตราการไหล 24 กิโลกรัมต่อนาที กรณีที่ 4 คืออัตราการไหล 48 กิโลกรัมต่อนาที และกรณีที่ 5 คืออัตราการไหล 216 กิโลกรัมต่อนาที

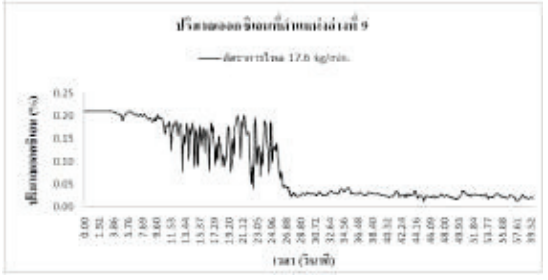
กรณีที่ 1 กำหนดให้ไม่มีการฉีดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเพื่อจำลองสถานการณ์ไม่มีการติดตั้งระบบดับเพลิง



ภาพที่ 12 แสดงปริมาณออกซิเจน (O_2) ที่เวลาต่างๆ กรณีไม่มีระบบดับเพลิง

จากภาพที่ 12 แสดงปริมาณออกซิเจนภายในเครื่องล้างชิ้นงานที่เวลา 0 วินาที สภาวะปกติ มีก๊าซออกซิเจนอยู่ 21% ที่เวลา 15 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 16% ที่เวลา 25 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 16% ที่เวลา 35 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 14% ที่เวลา 45 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 17% และที่เวลา 55 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 14%

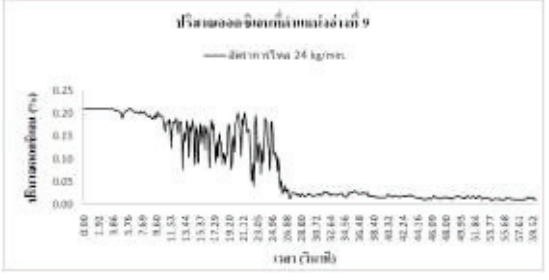
กรณีที่ 2 กำหนดอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 17.6 กิโลกรัมต่อนาที



ภาพที่ 13 แสดงปริมาณออกซิเจน (O_2) ที่เวลาต่างๆ ของอัตราการไหล 17.6 kg/min

จากภาพที่ 13 แสดงปริมาณออกซิเจนภายในเครื่องล้างชิ้นงานที่เวลา 0 วินาที สภาวะปกติมีก๊าซออกซิเจนอยู่ 21% ที่เวลา 15 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 16% ที่เวลา 25 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 16% ที่เวลา 35 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 4% ที่เวลา 45 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 3% และที่เวลา 55 วินาที ปริมาณออกซิเจนอยู่ที่ 3%

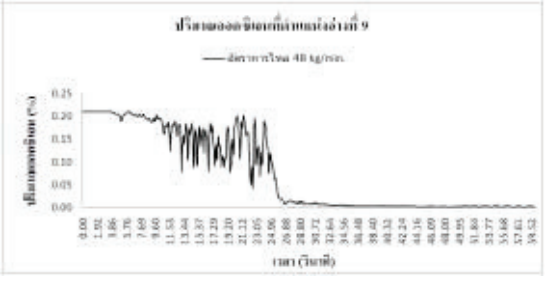
กรณีที่ 3 กำหนดอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 24 กิโลกรัมต่อนาที



ภาพที่ 14 แสดงปริมาณออกซิเจน (O_2) ที่เวลาต่างๆ ของอัตราการไหล 24 kg/min

จากภาพที่ 14 แสดงปริมาณออกซิเจนภายในเครื่องล้างชิ้นงานที่เวลา 0 วินาที สภาวะปกติมีก๊าซออกซิเจนอยู่ 21% ที่เวลา 15 วินาที

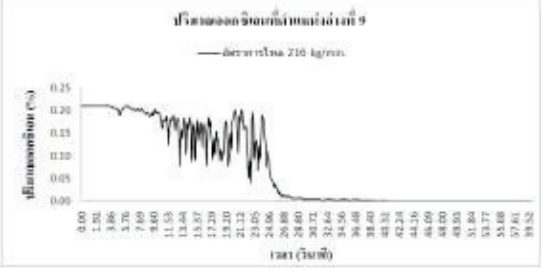
กรณีที่ 4 กำหนดอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 48 กิโลกรัมต่อนาที



ภาพที่ 15 แสดงปริมาณออกซิเจน (O_2) ที่เวลาต่างๆ ของอัตราการไหล 48 kg/min

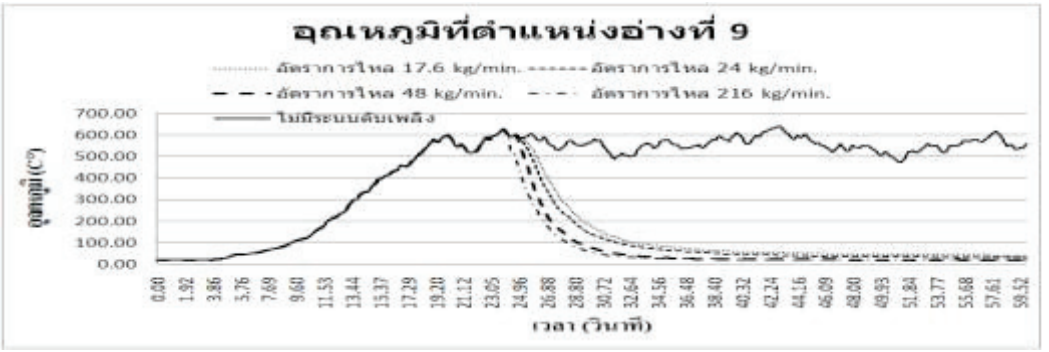
จากภาพที่ 15 แสดงปริมาณออกซิเจนภายในเครื่องล้างชิ้นงานที่เวลา 0 วินาที สภาวะปกติมีก๊าซออกซิเจนอยู่ 21% ที่เวลา 15 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 16% ที่เวลา 25 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 10% ที่เวลา 35 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 0% ที่เวลา 45 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 0% และที่เวลา 55 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 0% ซึ่งเป็นปริมาณที่ไม่สามารถเกิดการติดไฟได้อีกต่อไป

กรณีที่ 5 กำหนดอัตราการไหลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 216 กิโลกรัมต่อนาที ตามการออกแบบ Rate-By-Volume

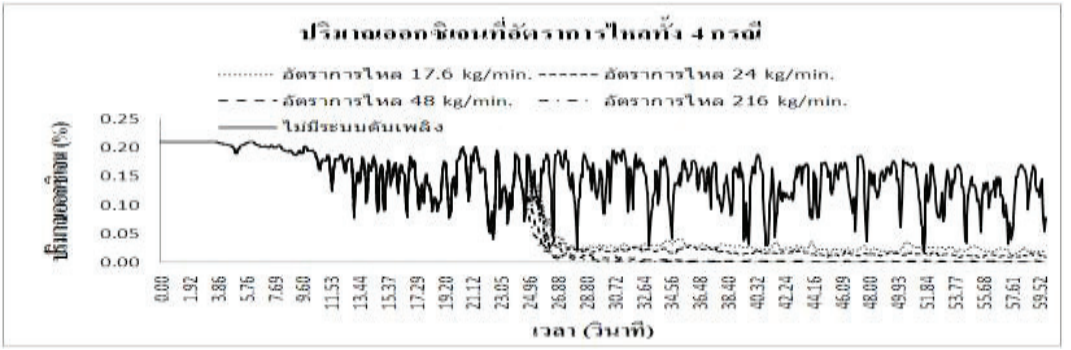


ภาพที่ 16 แสดงปริมาณออกซิเจน (O_2) ที่เวลาต่างๆ ของอัตราการไหล 216 kg/min

จากภาพที่ 16 แสดงปริมาณออกซิเจนภายในเครื่องล้างชิ้นงานที่เวลา 0 วินาที สภาวะปกติ มีก๊าซออกซิเจนอยู่ 21% ที่เวลา 15 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 16% ที่เวลา 25 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 7% ที่เวลา 35 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 0% ที่เวลา 45 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 0% และที่เวลา 55 วินาที ปริมาณออกซิเจนอยู่ที่ 0%



ภาพที่ 17 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่เวลาต่างๆของอัตราการไหลทั้ง 5 กรณี



ภาพที่ 18 กราฟปริมาณออกซิเจนที่เวลาต่างๆ ของอัตราการไหลทั้ง 5 กรณี

ภาพที่ 17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเกิดเพลิงไหม้ในอ่างที่ 9 ที่เวลาต่างๆ พบว่าที่เวลา 0 วินาที อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส หลังเกิดการลุกไหม้ของสารไวไฟ อุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วไปจนถึงจุดที่ระบบดับเพลิงทำงานที่เวลา 24 วินาทีหลังเกิดเพลิงไหม้ พบว่าที่อัตราการไหล 17.6 และ 24 kg/min อุณหภูมิลดลงได้ช้า ที่เวลา 55 วินาที อุณหภูมิอยู่ที่ 42 และ 31 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่อัตราการไหล 48 และ 216 kg/min อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว ที่เวลา 55 วินาที อุณหภูมิอยู่ที่ 21 และ 20 องศาเซลเซียสตามลำดับ ดังนั้นที่อัตราการไหล 17.6 และ 24 kg/min จึงไม่สามารถดับเพลิงที่เกิดขึ้นในเครื่องล้างชิ้นงานได้ ส่วนอัตราการไหล 48 และ 216 kg/min สามารถดับเพลิงในเครื่องล้างชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นไปตามมาตรฐาน NFPA 12 ที่กำหนดให้ดับเพลิง

ได้ระยะเวลาไม่เกิน 30 วินาทีหลังฉีดสาร เนื่องจากออกแบบให้ปริมาณสารสามารถฉีดได้เพียง 30 วินาที ในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งระบบดับเพลิงจะเห็นว่าอุณหภูมิจะสูงขึ้นและแพร่กระจายความร้อนไปภายในเครื่องซึ่งในสถานการณ์จริงจะเริ่มมีการลุกลามไปยังวัสดุใกล้เคียงและทำลายความแข็งแรงของโครงสร้างเครื่องล้างชิ้นงาน

ในภาพที่ 18 พบว่าที่เวลา 0 วินาที ออกซิเจนในสภาวะปกติอยู่ที่ 21% หลังเกิดเพลิงไหม้ปริมาณออกซิเจนมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเนื่องจากถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้และดึงเอาออกซิเจนรอบข้างเข้ามา ที่เวลา 25 วินาที เริ่มต้นฉีดสารดับเพลิงคาร์บอนไดออกไซด์เข้ามาในเครื่องล้างชิ้นงานได้ 1 วินาที ที่อัตราการไหล 17.6 และ 24 kg/min ออกซิเจนอยู่ที่ 16% ที่เวลา 55 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 3% และ 1% ตามลำดับ ที่อัตราการไหล 48 และ 216 kg/min ออกซิเจนลดลงอย่างรวดเร็ว ที่เวลา 25 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 10% และ 7% ตามลำดับและที่เวลา 55 วินาที ออกซิเจนอยู่ที่ 0% ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่สามารถติดไฟได้อีกต่อไป

4. สรุป

1. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจนในภาพที่ 17 และ 18 แสดงให้เห็นว่าการใช้สารดับเพลิงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่าอัตราการไหล 48 กิโลกรัมต่อนาที สามารถดับเพลิงที่เกิดภายในเครื่องล้างชิ้นงาน ทำให้อุณหภูมิลดลงสู่ภาวะปกติและปริมาณออกซิเจนลดลงสู่ภาวะที่ไม่สามารถติดไฟได้ ภายในระยะเวลา 30 วินาที เป็นไปตามมาตรฐาน NFPA ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้อัตราการไหลที่สูงกว่านี้ ทำให้ประหยัดสารดับเพลิงประหยัดค่าใช้จ่ายและคุ้มค่ากว่า

2. ระบบดับเพลิง local application แบบ Rate by Area เหมาะสมกับเครื่องล้างชิ้นงาน สามารถดับเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากการจัดวางหัวฉีดอยู่ในตำแหน่งที่สามารถฉีดเข้าตรงสู่เปลวไฟทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องล้างชิ้นงานลดลงได้เร็ว

3. การออกแบบระบบดับเพลิงด้วยคาร์บอน-ไดออกไซด์แบบ Rate by Area สามารถดับเพลิงในเครื่องล้างชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับพื้นที่ใช้งานประหยัดค่าใช้จ่ายและพื้นที่ติดตั้งเนื่องจากใช้ถังคาร์บอนไดออกไซด์เพียงถังเดียว ไม่ก่อให้เกิดอันตรายจากไฟฟ้า ไม่ทิ้งคราบสกปรกและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

4. ในแบบจำลองกำหนดจำนวนหัวฉีดสารดับเพลิงเพียง 2 หัว สำหรับการออกแบบ Rate by Area เนื่องมาจากทราบว่าเพลิงจะเกิดที่ตำแหน่งใด ซึ่งในความเป็นจริงหากอ่างสารไวไฟมีการย้ายตำแหน่งควรพิจารณาตำแหน่งการติดตั้งให้เหมาะสม

5. เอกสารอ้างอิง

[1] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2560. สถิติการเกิดอุบัติเหตุปี 2556 และปี 2557. http://php.diw.go.th/safety/?page_id=83. สืบค้นเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน 2559.

[2] Nation Fire Protection Association. 2008, Flammable and Combustible Liquids. NFPA 30.

[3] Nation Fire Protection Association. 2007, Standard for Portable Fire Extinguishers. NFPA10.

[4] Nation Fire Protection Association. 2007, Standard for Portable Fire Extinguishers. NFPA10

[5] Nation Fire Protection Association. 2008, Standard on Carbon Dioxide Extinguishing Systems. NFPA 12.

[6] Nation Fire Protection Association. 2008, Standard on Clean Agent Fire Extinguishing System. NFPA 2001.

[7] Fike Corporation. (2008). Industrial Carbon Dioxide Extinguishing Systems Design Installation and Maintenance Manual. Revision 2. Fike World Headquarters. Missouri.

[8] McGrattan, K. and Forney, G., Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide. 2007, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

[9] Thunderhead_Engineering, PyroSim User Manual. 2008. Thunderhead_Engineering, PyroSim User Manual. Available Source: http://thunderheadeng.com/pyrosim/, December 25, 2009.